

「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム  
開発プロジェクト」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・AI部
-----	---------------------------------------

—目次—

概要.....	i
プロジェクト用語集.....	x
I. 事業の位置付け・必要性について.....	1
1. 事業の背景、目的及び位置づけについて.....	1
2. NEDOの関与の必要性・制度への適合性.....	10
II. 研究開発マネジメントについて.....	12
1. 事業の目標.....	12
2. 事業の計画内容.....	13
3. 情勢変化への対応.....	28
III. 研究開発成果について.....	32
1. 事業全体の成果.....	32
2. 研究開発項目毎および個別テーマの成果.....	33
研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発.....	62
【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS技術研究機構.....	62
【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイクロマシンセンターコンソ.....	128
【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所.....	147
【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株).....	155
【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株)コンソ.....	171
研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発.....	180
【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ.....	180
【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ.....	187
研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発.....	201
【全体概要】.....	201
【③-(1)-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジーズ(株)コンソ.....	207
【③-(1)-2】小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ.....	213
【③-(1)-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フイルム(株)コンソ.....	218
【③-(1)-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発/ジビル調査設計(株)コンソ.....	223
【③-(1)-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ.....	230
【③-(1)-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発/(株)熊谷組コンソ.....	238
【③-(1)-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコンソ.....	242
【③-(1)-8】河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの研究開発/朝日航洋(株).....	250
【③-(1)-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発/国際航業(株)コンソ.....	255
【③-(1)-10】災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発の研究開発/(株)日立製作所コンソ.....	261
【③-(1)-11】遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組コンソ.....	271

【③-(1)-12】引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)コンソ.....	278
研究開発項目③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(ii)非破壊検査装置開発.....	284
【③-(2)-1】超小型 X 線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発/(国研)産業技術総合研究所コンソ.....	284
IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて.....	292
1. 事業全体の成果実用化・事業化の見通し.....	292
2. 個別テーマ毎の成果の実用化・事業化の見通し.....	293
研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発.....	293
【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS技術研究機構.....	293
【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイクロマシンセンターコンソ.....	304
【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所.....	307
【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株).....	310
【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株)コンソ.....	311
研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発.....	312
【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ.....	312
【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ.....	315
研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(i)ロボット技術開発.....	320
【③-(1)-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジーズ(株)コンソ.....	320
【③-(1)-2】小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ.....	322
【③-(1)-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フイルム(株)コンソ.....	323
【③-(1)-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発/ジビル調査設計(株)コンソ.....	324
【③-(1)-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ.....	326
【③-(1)-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発/(株)熊谷組コンソ.....	328
【③-(1)-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコンソ.....	330
【③-(1)-8】オートパイロット可能な水中点検ロボットの開発/朝日航洋(株).....	332
【③-(1)-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発/国際航業(株)コンソ.....	334
【③-(1)-10】災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発/(株)日立製作所コンソ.....	335
【③-(1)-11】遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組コンソ.....	336
【③-(1)-12】引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)コンソ.....	338
研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(ii)非破壊検査装置開発.....	340
【③-(2)-1】超小型 X 線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発/(国研)産業技術総合研究所コンソ.....	340

【添付資料】

- |          |               |
|----------|---------------|
| (添付資料 1) | プロジェクト基本計画    |
| (添付資料 2) | 事前評価関連資料      |
| (添付資料 3) | 特許・論文・外部発表リスト |

# 概要

		最終更新日	平成 28 年 11 月 2 日
プロジェクト名	インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト	プロジェクト番号	P14011
担当推進部/担当者	ロボット・機械システム部／菅原 淳(平成 26 年 4 月～平成 27 年 3 月) ロボット・機械システム部／安川裕介(平成 27 年 4 月～平成 28 年 3 月) ロボット・AI部／安川裕介(平成 28 年 4 月～平成 28 年 11 月現在)		
0. 事業の概要	本プロジェクトでは、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図るため、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステムの技術開発及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置の技術開発を行い、インフラの維持管理・更新等における財政問題及び人材・技術不足の解決に寄与する。		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>高度経済成長期以降に整備されたインフラのうち、社会インフラは、今後 20 年で建設後 50 年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。これは、石油精製プラント、化学プラント、鉄鋼所などの産業インフラも同様である。適切な維持管理が行われないことにより、インフラの崩壊や機能不全が発生し、人命や社会に影響を及ぼす危惧が高まっている。</p> <p>我が国のインフラの維持管理・更新に対する課題は以下に集約されると考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・維持管理・更新に対する財政問題                          今後、維持管理・更新に従来どおりの支出を行うと仮定すると、2037 年度には現在のレベルの投資総額を上回り、2011 年度から 2060 年度までの 50 年間に必要な更新費(約 190 兆円)のうち、約 30 兆円(全体約 16%)の更新ができなくなる。</li> <li>・維持管理の人材・技術不足                          維持管理の技術者の高齢化が著しく、一定レベルの知見を有する技術者が不足している。また、共用年数の長い施設に関する知見が不足し、維持管理に必要な技術が不十分である。</li> </ul> <p>また、我が国の主要なインフラでは、数年毎に定期点検を実施しているが、定期点検間の急激な劣化進行等の異常の把握は、人材の確保及び人件費の削減により困難である。加えて、定期点検時においても目視点検が困難な箇所も存在する。さらに、災害時においては、緊急点検に時間を要し、迅速な復旧が困難であるといった課題もある。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p><b>【研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発】</b></p> <p>本研究開発は、2016 年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。</p> <p>(1)センサ端末開発                      以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。</li> <li>■少なくとも 1 時間に 1 回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとする。</li> <li>■片手で取り付け可能なサイズ(概ね 7cm×10cm×5cm)以下とする。</li> <li>■無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で 30m以上とする。</li> <li>■実環境下で 10 年以上の信頼性を有するものとする。</li> </ul> <p>(2)センサネットワークシステムの構築と実証実験                      (1)で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。</p> <p><b>【研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発】</b></p> <p>本研究開発は、2016 年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。</p> <p>(1)イメージング技術開発</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>①完全自動により画像データから 0.2mm以上のひび割れ等を 8 割以上の確率で判別できる画像処理手法を開発し、実証する。</li> <li>②撮影時の位置ずれを補正でき、平面のみならず、奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法を開発し、実証する。なお、1 回の撮影で構造物の支点間の長さの 2 万分の 1 の変位を計測できること及び 15m以上の構造物を計測できることとする。</li> </ol>		

(2)イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験  
 (1)で開発したイメージング技術を用いて、インフラ状態をモニタリングするシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

**【研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発】**

(1)ロボット技術開発  
 本研究開発は、2015 年度末までに、概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実用化開発、実証実験を中心に実施する。  
 「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入における重点分野」が指定する維持管理業務について、従来の作業員による点検や重機を用いた作業と同程度のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発し、「ロボット現場検証委員会」の評価の下、実証実験を行う。

(2)非破壊検査装置開発  
 本研究開発は、2016 年度末までに、概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実証実験を中心に実施する。  
 上記のロボット技術開発で想定されるロボットへの搭載可能な非破壊検査装置を開発する。開発する装置は、X線や赤外線等を検査光源とし、正確な計測を可能にするために必要と考えられる光源数を搭載する。また、ロボットに搭載可能なサイズ、重量とし、検査対象の健全性を診断するための検査精度を備えたものとする。さらに、稼働寿命は2万時間以上とし、検査光源に対する安全性を十分に考慮したものとする。

**【研究開発項目④ ロボット性能評価手法等の研究開発】**  
 各種ロボットの運用に必要とされる性能や操縦技能等に関する評価基準やその検証方法を明らかにし、標準化の方策を含め検討する。

事業の計画内容	主な実施事項	H26fy	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy
	①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発	—————→				
	②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発	—————→				
	③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発 (1)ロボット技術開発 (2)非破壊検査装置開発	—————→				
	④ロボット性能評価手法等の研究開発			—————→		
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載)(単位:百万円) 契約種類:委託(H28 ③(1)のみ助成)	会計・勘定	H26fy	H27fy	H28fy	総額	
	一般会計	1,620	1,915	1,928	5,463	
	(委託)	1,571	2,187	1,375	5,133	
	(助成):負担率 1/3 または 2/3	—	—	363	363	

開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局研究開発課、製造産業局産業機械課
	プロジェクトリーダー	芝浦工業大学工学部教授(特任) 油田信一
委託先	<b>①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発</b> <b>【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発</b> 技術研究組合NMEMS技術研究機構 <b>【組合員】</b> (株)NTT データ、大日本印刷(株)、(株)東芝、日本ガイシ(株)、富士電機(株)、三菱電機(株)、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)、阪神高速道路(株)、(国研)産業技術総合研究所、(一財)マイクロマシンセンター、(株)リコー <b>【再委託】</b> 京都大学、東京大学、首都大学東京、東京工業大学 <b>【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発</b> (国研)産業技術総合研究所、(一財)マイクロマシンセンター、明星電気(株)、沖電気工業(株)、高砂熱学工業(株) <b>【再委託】</b> 東京大学 <b>【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発</b> (株)日立製作所 <b>【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発</b> 横河電機(株) <b>【再委託】</b> 大成建設(株)、長野日本無線(株)、東京大学 <b>【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発</b> 日本電気(株)、(一財)首都高速道路技術センター	

		<p>②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発</p> <p>【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発 首都高技術(株)、東北大学、(国研)産業技術総合研究所【再委託】(株)アダコテック</p> <p>【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)、4Dセンサー(株)、(株)共和電業、福井大学</p> <p>③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発</p> <p>(1)ロボット技術開発</p> <p>【③-1-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発 川田テクノロジーズ(株)、大日本コンサルタント(株)【委託】(国研)産業技術総合研究所</p> <p>【③-1-2】小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発(H28～) ルーチェサーチ(株)【委託】横浜国立大学、(株)建設技術研究所</p> <p>【③-1-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発 富士フィルム(株)、(株)イクシスリサーチ【委託】(一財)首都高速道路技術センター</p> <p>【③-1-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発(H28～) ジビル調査設計(株)【委託】福井大学</p> <p>【③-1-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発 (株)開発設計コンサルタント【委託】法政大学、岡山大学、ステラ技研(株)、開発電子技術(株)</p> <p>【③-1-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発(H28～) (株)熊谷組、(株)移動ロボット研究所【委託】名古屋大学、つくばソフトウェアエンジニアリング(株)</p> <p>【③-1-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発 (株)キュー・アイ、(株)日立製作所【委託】(国研)産業技術総合研究所</p> <p>【③-1-8】河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの研究開発(H28～) 朝日航洋(株)</p> <p>【③-1-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発 国際航業(株)、(株)エンルート【委託】(株)フィールドプロ、東北大学、工学院大学</p> <p>【③-1-10】災害調査用地上／空中複合型ロボットシステムの研究開発 (株)日立製作所、(株)エンルート、八千代エンジニアリング(株)【委託】(国研)産業技術総合研究所</p> <p>【③-1-11】遠隔搭乗操作によるマルチローラ型無人調査ロボットの研究開発 (株)大林組【委託】(株)移動ロボット研究所、慶應義塾大学</p> <p>【③-1-12】引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発 三菱重工業(株)【委託】千葉工業大学</p> <p>【H26～27年度】</p> <p>【③-1-13】水中構造物の近接目視等を位置計測しつつ安定に実施可能なテザー伸展操舵型ROVの研究開発 (株)ハイボット、(株)建設技術研究所</p> <p>【③-1-14】音カメラを活用した橋梁点検ロボットの研究開発 (株)応用技術試験所、(株)移動ロボット研究所、(株)熊谷組、東京エレクトロニクス(株)、名古屋大学</p> <p>【③-1-15】複合センサ搭載ワーム型多関節ロボットの研究開発 (株)タウ技研、【再委託】東京工科大学、神奈川県産業技術センター</p> <p>(2)非破壊検査装置開発</p> <p>【③-2】超小型X線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発 (国研)産業技術総合研究所、(株)日立パワーソリューションズ、静岡大学【再委託】三菱化学(株)</p>
--	--	---

		<p>④ロボット性能評価手法等の研究開発</p> <p>【④-1】無人航空機を活用した物流システムの性能評価手法等に関する研究開発 (株)自律制御システム研究所</p> <p>【④-2】無人航空機等を活用したインフラ点検ロボットシステムの性能評価手法等の研究開発 富士通(株)、日本電気(株)、(株)イクシスリサーチ、(株)エンルート、(株)プロドローン</p> <p>【④-3】インフラ維持管理等に資する水中ロボットの性能評価手法等の研究開発 パナソニックシステムネットワークス(株)、パナソニック(株)、朝日航洋(株)</p> <p>【④-4】調査用無人航空機の評価手法の研究開発 富士重工業(株) 【再委託】東京大学</p> <p>【④-5】陸上移動ロボットの防振性能評価手法等の研究開発 三菱重工業(株) 【再委託】千葉工業大学、三菱電機特機システム(株)</p> <p>【④-6】各種ロボットの性能評価基準の策定等の研究開発 (一財)製造科学技術センター</p>
<p>情勢変化への対応</p>	<p>平成 26 年 6 月「イノベーション・コースト構想研究会」にて「イノベーション・コースト構想」が取りまとめられ、平成 28 年 1 月経済産業省及び福島県との間で「福島イノベーション・コースト構想に係るロボットテストフィールド及び国際産学官共同利用施設(ロボット)の整備及び運営に関する協定」が締結された。さらに、平成 28 年 3 月、「ロボットテストフィールド・国際産学官共同利用施設(ロボット)活用検討委員会」の中間整理が纏められ、「ロボットテストフィールド(RTF)」の必要性とともに、3分野のロボットに対して「各種ロボットに求められる性能」及び「それを備えていることを確認するために必要な独自の施設」の重要性が示された。</p> <p>上記の情勢変化を受け、「④ロボット性能評価基準の研究開発」を平成 28 年度から早期に立ち上げ、公募及び採択に繋げた。</p>	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>25 年度実施 ロボット・機械システム部</p>
	<p>中間評価</p>	<p>28 年度 中間評価実施</p>
<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>【事業全体】</p> <p>本プロジェクトは、「研究開発項目①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」、「研究開発項目②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」、「研究開発項目③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」及び「研究開発項目④ロボット性能評価手法等の研究開発」にて構成しており、研究開発項目毎の成果は以下のとおり。</p> <p>【個別テーマ】</p> <p>①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発</p> <p>【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS技術研究機構</p> <p>■橋梁の劣化・損傷をモニタリングする1Hz～1MHzまでの振動を1つのセンサで検出できるスーパーアコースティックセンサ、橋梁のひずみを面状に検出できる面パターンセンサ、道路付帯物の劣化状態を振動、傾き、温度で検出する傾斜マルチセンサ、法面の3次元表面変位をミリメートルオーダーで検出する電波位相差方式変位センサのプロトタイプを試作し、その有効性を示すとともに、高速道路会社の実証場所において予備実証試験を実施し、課題を抽出して、来年度からの本格実証を実施できる目途を得た。将来技術の原子時計に関しては、フィージビリティスタディによって、小型、低消費電力、高性能化の目途を得た。</p> <p>【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイクロマシンセンターコンソ</p> <p>■(1)振動発電センサデバイスと鹿威し(蓄電キャパシタの電力が閾値を超えるとデータ送信する)回路の組み合わせることで、振動波形のピーク値だけのデータ収集・送信が可能となり、送信間隔の変化から回転機器の異常をモニタリングできる小型(直径 30mm、高さ 50mm)の端末を試作し、振動加速度(0.1m/s<sup>2</sup> ~ 0.8m/s<sup>2</sup>)の変化で無線送信周期が変化することを確認した。</p> <p>(2)クロック補正方式を盛り込んだ時刻同期型省電力通信方式を開発し、間欠受信期間を 100msec から 2msec まで短縮しても、1 時間以上の時刻同期が維持でき、1 時間あたりの平均消費電力 154μW(従来比 1/15 に削減)を確認した。</p> <p>(3)P 型端末機の疑似データを生成する「鹿威しエミュレータ」などを用いて実稼働ポンプの振動特性を把握し、データのフィルタリング、異常検知ロジックおよび余裕時間算出の仕様特定とコアモニタリングシステムの試作機を開発し、実証サイトにて検証した。</p> <p>【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所</p> <p>■仕様検討、評価した結果を踏まえ、1st プロトセンサ端末の開発・評価を実施し、当初実証計画で立てた中間目標に対して全ての項目において、今年度中に達成予定である。また、一部の項目においては、最終目標を達成しており、更なる機能・精度向上、製品の検討を実施している。</p> <p>【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株)</p>	

■シリコン振動式の加速度・傾斜センサ及びひびきセンサを開発し、目標とする性能を達成した。また、無線通信モジュールと自立電源とを組み合わせたセンサノードからの無線データ伝送試験を確認した。開発した加速度センサによる模擬建物での常時微動観測、また振動台による加振試験から、震度計算、逐次部分空間法により建物の損傷に伴う固有振動数減少と剛性の劣化を検出できることを確認した。

#### 【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株)コンソ

■①センサシステムの開発:実環境で使用可能なセンサ端末、ゲートウェイ装置、遠隔サーバを開発した。また変位センサ、自立発電装置の試作を行った。開発・試作した装置を実道路橋に簡易設置し、センサ端末からゲートウェイ装置まで 920MHz 特定小電力無線にてデータ通信が正しく行えることを確認した。また、ゲートウェイ装置からクラウド環境の遠隔サーバに対して広域無線(3G)通信により、データ送信が正しく行えることを確認した。②センサシステムのニーズ・運用・導入の検討:供用中の道路橋の損傷実態から、センサシステムの設置対象橋梁、想定する損傷と異常検知の手法及び必要な計測精度について整理した。

#### ②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

##### 【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ

■一般的な点検・調査作業に用いる撮影機材で取得した画像データからコンクリートのひび割れを 79.1%の精度で自動検出する技術を開発した。精度評価は見落としと過検出の両面から行っており、実用性の高い技術成果が得られている。また、ひび割れ自動抽出、パノラマ合成機能を実装したモニタリングシステムの試験運用を開始し、実用化に向けたシステム構築を行った。

##### 【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ

■これまでの成果として、三次元変位計測手法の開発、実用的な精度でのたわみ角(回転角)計測手法の開発、格子パターンがない位置での変位計測手法の提案と実証試験を行った。また、道路橋、トンネル、鉄道橋などの実際の構造物に適用する実験を行った。鉄道橋において、変位とたわみ角を組み合わせる新しい健全度評価指標を提案した。

#### ③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発

##### (1)ロボット技術開発

##### 【③-1-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジーズ(株)コンソ

■橋梁下面の画像を網羅的且つ迅速に取得する網羅的画像取得用マルチコプタと、橋梁に磁着し安定して細部の画像を取得する橋梁着脱型マルチコプタの開発を行い、国交省実証試験(H26,27 年度)を含む 6 度の実証試験を行い、評価、課題の抽出を行った。H27 の国交省実証試験では、課題解決を前提とした試行的導入を推奨するという評価を得た。

##### 【③-1-2】小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ

■①プロペラガード装着は、対象構造物に接近することができ、操縦者の不安軽減の効果が期待され、第三者への安全・安心を与える効果もある。②可変ピッチプロペラは、通常の固定ピッチと比較して、下降時の機体が不安定になることを回避できる可能性がある。機体構造や操縦が煩雑になる懸念もあるため、実用化には慎重に判断していく。③合成画像作成の半自動化・汎用ソフトは、技術面だけでなく、作業時間短縮にも寄与する。

##### 【③-1-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フイルム(株)コンソ

■鋼桁内の全ての箇所へアクセスでき(添架物等の点検困難箇所を除く)、二眼カメラ及びステレオ処理によって桁内にある損傷等の寸法を高精度に計測することができる、懸垂型ロボットを開発した。またステレオ処理による平面推定を応用した床版画像合成、ひび割れ自動検出・ひび幅測定及び現場での点検と事務所作業を画像処理により支援するソフトウェアを開発し、ほぼ目標の性能を達成した。

##### 【③-1-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発/ジビル調査設計(株)コンソ

■開発開始後 1.5 ヶ月での研究開発成果は、要素技術の設計を行うために必要となる設計条件を得るための各種室内実験及び実橋実験を実施した。実験結果は、精度よく計測されており、設計に十分使用可能なデータが得られている。

##### 【③-1-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ

■「ALP」は、中央部に測定装置を水平に移動させて測定するマニピュレーターを配置し、その上下に走行装置を配置した構造となっており、走行装置には壁面に吸着するための機構をユニット化した脚 2 本を配置している。そのため、搭載する測定装置や測定長さの変更にはマニピュレーターの改造で、また重量増加に対しては脚ユニットの個数や配置の変更で対応できる等、拡張性の高い構造となっている。走行は、3 本の脚を吸着させて全体をしっかりと保持した状態(3 点支持)で、脚を 1 本ずつ移動させてから、最後に全体を移動させ、移動が終了したらロボットを静止して、姿勢が安定した状態で測定装置を水平に移動させて測定を行っている。実際現場検証実験でも確認されたが、かなり安定した走行状態で、高精細の画像を撮影することが可能となり、画像を用いた精密写真測量解析により作成した 3 次元モデルは、幅 0.2mm 以上のひび割れが判定可能な精度を有していることが判明した。また、ソレノイド磁石により鉄心で



壁面を打撃し、発生した音から壁面の健全性を判定する打音装置を開発し、表面から5cm程度のやや深い位置にある内部空洞まで判定できることが判明した。更に、最新の小型電磁波レーダを用いて、鉄筋位置における塩化物イオン量を推定する手法を開発し、実構造物における検証試験で、従来法に対しても遜色のない精度で推定できることが判明している。

**【③-(1)-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発/(株)熊谷組コンソ**

■①様々な主桁添接板を乗り越える移動機構と操舵機構の改良により、展開図作成用の画像を取得、画像合成によりリアルタイムでの概査展開図を作成、目視点検の補助を実現する。②点検困難箇所での調査を可能とするロボットアームの開発ポール取付け型ロボットの開発により、狭隘箇所での点検を実現するものであり、最終的には床版ひび割れの高精細画像からの詳細展開図作成を実現する。

**【③-(1)-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコン**

■開発機として、水上機、水中機、操縦用ヒューマンインターフェースを開発した。本ロボットの機能として、水中壁面との相対距離・角度を保つ機能及び壁面に沿って自動的に航行し、点検を行う機能を開発し、実験プール及びダムにおいてその機能を確認した。国土交通省の実証試験においては、約76mの大深度まで潜航したほか、コンクリート継ぎ目に沿った十数mにわたる高精細な近接映像の取得などを行った。

**【③-(1)-8】河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの研究開発/朝日航洋(株)**

■平常時の河川(流速1.5m/s)の環境下で航行が可能でかつモビリティ性(可搬性)を考慮した設計、また操船者、計測担当者2名体制での点検を可能とするための各種支援システム機能を有する。

**【③-(1)-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発/国際航業(株)コンソ**

■本研究で開発する技術により、土石流予測シミュレーションの精度は、これまでと比較し、比較的向上することが期待できる。さらに、取得したデータを統合し、土石流シミュレーションを行うシステムについて、研究開発を進め、高精度土石流シミュレーションシステムを実現する。

**【③-(1)-10】災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発/(株)日立製作所コンソ**

■高い走破能力を持ち、長時間の運用と作業が出来る無人プラットフォーム車両、広範囲の災害調査を効率的に行う無人プラットフォームヘリ、情報共有に必要な災害調査情報の可視化及び災害情報DBを試作機レベルで開発が出来た。今後は、現場検証を通じ、実用化に必要な改良設計を進める。

**【③-(1)-11】遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組コンソ**

■平成27年度に試作機を完成させ、今まで災害発生直後の初動段階において、有人での調査に頼らざるを得なかった作業が、幾つかの課題は残るものの、遠隔操作にて崩落地盤を走破し原位置でスウェーデン式サウンディング試験を実施することで、現地の状況とともに地盤性状の物性調査をリアルタイムに取得することが可能となった。

**【③-(1)-12】引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)コンソ**

■引火性ガス雰囲気内での活動を可能とするために、国際整合防爆指針(Ex2015)に適合した防爆性能を持つ探査ロボット(Ex px d IIB + H2 T4 Gbの防爆性能を持つ)を開発し、陸上移動ロボットとしては、国内初となる防爆型式検定を取得した。また、開発したロボットは「櫻II号」の持つ高い踏破性と耐環境性(防塵・防水)を維持しつつ、取扱い性向上を目指した小型・軽量化により質量60kgを実現した。

(2)非破壊検査装置開発

**【③-(2)】超小型X線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発/(国研)産業技術総合研究所コンソ**

■自走ロボットに搭載できる中性子水分センサ、管電圧200kV以上の高エネルギーX線源、高エネルギーX線対応検出器、自動計測技術等の非破壊検査技術を開発した。開発した中性子水分センサを配管自走ロボットに搭載し、化学プラントの現場で実地試験を行って、目標とする検査能力があることを確認するとともに、ロボットを使った自動計測では計測の再現性を高めることができることを明らかにした。

投稿論文	「査読付き論文」16件
特許	「特許出願」36件(うち国際出願3件、登録1件)
その他の外部発表 (プレス発表等)	「学会発表・講演」148件、「新聞・雑誌への掲載」54件、「展示会の出展」73件

IV. 実用化・事業化の見通しについて	<p><b>【事業全体】</b>  本プロジェクトは、「研究開発項目①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」、「研究開発項目②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」、「研究開発項目③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」及び「研究開発項目④ロボット性能評価手法等の研究開発」にて構成しており、研究開発項目毎の実用化・事業化の見通しは以下のとおり。</p> <p><b>【個別テーマ】</b>  ①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発</p> <p><b>【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>  ■参画する高速道路会社(NEXCO3社及び阪神高速道路)との強い連携のもと、参画企業が橋梁、道路付帯物、法面のセンシングシステムに対して東芝、大日本印刷、富士電機、三菱電機が事業化のシナリオを明確にして研究開発を進めている。共通基盤技術である無線通信共通プラットフォーム技術、高耐久性パッケージング技術も他への展開が可能であり、NTT データ、日本ガイシ、大日本印刷が事業化を見据えて研究開発を進めている。高速道路から一般道への展開、さらに、エネルギー施設、鉄道、港湾施設等他の社会インフラへの展開も可能である波及効果の高い技術となっている。将来技術のセンサ端末同期用原子時計に関してはリコーが事業化を進める。</p> <p><b>【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイクロマシンセンターコンソ</b>  ■センサ端末・ネットワークシステム: PJ 終了後、2019 年度に商用設計を行い、2020 年度サンプル出荷、2021 年度より量産開始予定。国内の公共性の高い施設を中心に、エネルギー管理指定工場相当の大規模施設をターゲットに実用化・事業化を図る。  ■モニタリングシステム: PJ 終了以前から事業化検討を開始し、モニタリングシステムの汎用化やクラウド環境の提供先を選定、センサメーカ(明星電気)、クラウド型ネットワークを構築できる ASP(アプリケーションサービスプロバイダ)事業者とのコンソーシアムにより実用化を促進、研究開発完了後は 1 年間のトライアル販売の後、本格販売およびメンテナンス子会社による有償診断サービスを開始する予定。</p> <p><b>【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所</b>  ■今回の成果として、2 点挙げられる。1つは高速道路管理会社に向けた広範囲を管理するためのオンプレでのシステムの提供と、もう1つは自治体向けの低コストでのサービス提供である。既に日立製作所では、平成 25 年 10 月にインフラ分野をターゲットとした「施設モニタリングサービス」の事業化を発表しており、何社かのパートナー会社とも連携を取りながら本事業を推進している。本プロジェクトでの研究成果も施設モニタリングサービスの一部として適用を進めることで、早期実用化が見込まれると考えている。</p> <p><b>【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株)</b>  ■実用化に向けては、主に公共性の高い建物を中心にモニタリングシステムの実証試験を重ね、2020 年のエポックに向けた、安全・安心のインフラ構築を補完すべく、システムのレベルアップを図っていく。事業化に向けては、子会社の横河ソリューションサービスが既にインフラ関連事業を手掛けており、本プロジェクトの事業化に向けた取り組みを一体となって活動を行っている。</p> <p><b>【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株)コンソ</b>  ■①実用化・事業化に向けての見通し:センサシステムの設置対象となる 15m 以上の道路橋は約 17 万橋である。全国の点検結果から建設後 30 年以上を経過すると健全度「判定区分Ⅲ:早期措置段階」が増加し、損傷の進行モニタリングの必要性が高まり、クラウド方式のセンサシステムの事業化が課題解決に資する。  ②実用化・事業化に向けての取組:本研究開発終了後 2 年以内(平成 32 年度中まで)に事業化を考えている。各道路管理者がクラウド方式によりモニタリングシステムを導入し、橋梁の専門技術者が計測データを管理する方式での実用化・事業化を目指している。また、平成 28 年度下期の社外向け展示会で開発中のセンサ端末の展示を行うことでユーザへの情報発信とニーズの収集を予定している。</p> <p>②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発</p> <p><b>【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ</b>  ■開発するモニタリングシステムの汎用性を高めるために、事業者にはヒアリングを行い、得られた意見を満足するシステム構築を実施した。また、ヒアリングより事業者が求めるひび割れ検出精度やコンパクトデジタルカメラ画像からの自動抽出が可能となり、より実用的な機能を実装したモニタリングシステムとなった。</p> <p><b>【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ</b>  ■在来線と山陽新幹線、北陸新幹線の橋梁で計測実験を行うことで、従来手法との比較を行った。また、多くの一般土木関連の現場でデモ実験を行うことで、適用可能性の調査を行った。展示会などで出展することでニーズ調査を行った。それらの結果、実用化の可能性があることや事業化の可能性があることが確認できた。</p> <p>③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発  (1)ロボット技術開発</p>

**【③-(1)-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジーズ(株)コンソ**

■開発するシステムの実用化開発を助成期間中に実施し、助成期間終了後は、本研究開発に参画している点検事業者がユーザとなって、実際の点検業務の中で利用し、開発品を用いた事業を進める。業務での利用を通して製品化のための開発を行った後、システムを製品として販売し、事業化するとともに、システムを普及させることで橋梁の維持管理に貢献する。

**【③-(1)-2】小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ**

■構造物点検(橋梁、ダム、港湾岸壁、浮波提など)の実業務に従事し、国土交通省の橋梁点検を対象とした現場検証に平成25年(予備検証)、26年、27年に参画し、飛行技術・撮影技術・画像解析技術を確立させてきた。本事業の開発成果により更に技術のレベルアップと事業の浸透を図れると見通している。

**【③-(1)-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フィルム(株)コンソ**

■高速道路事業者、建設コンサルタント及び点検業者を販売先として提案・販売していくほか、点検支援ソフトウェアによる画像解析・調書作成を支援するシステムまたはクラウド上のサービスとして提供・課金することを検討している。コンソーシアム内にて「事業化検討ワーキンググループ」を設置し、H30年度の事業化に向けた具体的検討を行っている。

**【③-(1)-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発/ジビル調査設計(株)コンソ**

■開発開始 1.5 カ月であるが、本申請者は開発者であり、エンドユーザの立場でもあるため申請者の顧客である国土交通省並びに地方自治体の橋梁管理者ニーズには日々実施している点検業務を通して最新ニーズを体感できる業務環境下にある。よって、顧客ニーズへの的確な対応が可能な点検ロボットを目指す方針を基本として堅持したい。それが他のロボットとの差別化を促し、実用化、事業化に優位な方向性を生むことに期待している。

**【③-(1)-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ**

■「ALP」は、当面高さ約 20m・幅約 5m(面積約 100 m<sup>2</sup>)の鉄筋コンクリート製橋脚の壁面に適用することを指向しており、最終的な現場機能検証を、橋脚と構造的にはほぼ同じである J-POWER が保有するダムの洪水吐ゲートピア側壁で行うことを予定している。これを実現するために、移動速度としては高さ 20m 一往復(幅にして 2m)を一日で調査できること、また安定性・耐久性として一日 7 時間程度連続して稼働できることを目指している。また、調査中は一日中連続して電力を供給することが必要であることから、電力供給併用ケーブルを用いた安全装置の実現と、風雨等の天候急変に対するカバーリング等の最低限の耐水対策を施すことを目指している。

**【③-(1)-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発/(株)熊谷組コンソ**

■本研究開発がほかの画像診断技術に対する優位性として、①視覚的な診断が主体であり構造物の不可視部分等の診断には限界がある、②磁石走行ロボットの特性として、コンクリート片等の落下防止ネットの上からも走行が可能、③ほぼリアルタイムにRC床版の概査展開図が作成可能であり、要詳細検査箇所を継続して実施できる利点がある。以上から技術的、経済的に効率的調査が可能となり、研究開発の独自性、競争力が認められる。

**【③-(1)-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコンソ**

■平成 30 年度～平成 31 年度の 2 年間にダム構造物の点検を目的とした本開発システムの事業化を行う。これに先立つ平成 28 年度～平成 29 年度の 2 年間の助成開発事業において実用化試験機を開発し、実証試験を行いロボットの有効性を検証した上で、販売促進ツールとして使用する。事業化段階では、コストダウンを含めたロボットの製造方法の確立・販売ルートの確立・保守点検体制の確立を行う。

**【③-(1)-8】河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの研究開発/朝日航洋(株)**

■国土交通省の試行的導入に向けて、国土交通省と共に検討を行っている。また、各地方整備局に赴き、当該ロボットの説明と現場要望等の意見交換を実施し、普及に努めている。その他、学会発表、展示会への参加等を実施し、社会的認知度を高める。

**【③-(1)-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発/国際航業(株)コンソ**

■本研究では、火山噴火時の現場において、安全上の問題から人や航空機が進入できない区域の中で活動できる無人飛行機やロボットを開発し、火山噴火の状況を正確に把握することにより、その後の災害対応の精度を上げ、火山噴火後の各種災害から住民を守ることを目的とする。本研究により、開発した技術を基に、火山噴火を想定した各種災害の予測・調査をおこなうことや火山噴火に対応する防災計画の立案を支援することが可能となる。

**【③-(1)-10】災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発/(株)日立製作所コンソ**

■①国土交通省 TEC-FORCE が全国配備する事業、②製品あるいは構成サブシステムを消防庁、防衛省などの災害対応機関あるいは自治体、指定公共機関、インフラ会社などへの販売を想定する。③国土交

	<p>通省地方整備局や自治体等が発注する観測業務サービスあるいは得られた観測情報から災害現場の復旧工事計画作成に係るサービス事業も想定する。</p> <p><b>【③-(1)-11】遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組コンソ</b>  <b>■</b>本ロボットを国土交通省の各地方整備局等に配備し、土砂崩落災害時における初動調査を支援することで、土砂崩落災害の早期復旧に尽力することを目標としている。また、各要素技術は、移動手段を適宜変更することにより、鉄橋、PC 橋等で人間の立ち入りが困難な箇所での情報収集作業への展開も可能であり、他のインフラ維持管理用ロボット技術等との融合も期待される。</p> <p><b>【③-(1)-12】引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)コンソ</b>  <b>■</b>開発した探査ロボットのプレス発表、展示会出展により成果の普及活動を実施した。その結果、海外石油化学系の企業より問合せが複数あり、現在、問合せのあった企業に、本社よりニーズ調査及びロボット共同開発打診中である。また、国内の想定ユーザである消防に対し、防爆ロボットのニーズ調査を打診するとともに、開発したロボット操作性等の試験への協力を計画中である。</p> <p>(2)非破壊検査装置開発  <b>【③-(2)】超小型 X 線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発/(国研)産業技術総合研究所コンソ</b>  <b>■</b>本課題で開発した技術は、プラント配管検査の実用化・事業化に必要な能力があることを確認し、事業化を予定している日立パワー社が、国内外の想定ユーザー企業と実用化・事業化に向けた具体的検討を開始した。開発した X 線非破壊検査の基礎技術は、X 線新技術産業化コンソーシアム研究会等で興味のある企業に紹介し、広く横展開する予定である。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 26 年 3 月 作成
	変更履歴	平成 27 年 2 月:研究開発項目③(1)「ロボット技術開発」に関し、平成 28 年度からの助成事業へ移行及び期間変更(平成 29 年度まで)に伴う改訂。 平成 28 年 3 月:研究開発項目④「ロボット性能評価手法等の研究開発」追加に伴う改訂。

## プロジェクト用語集

(一般では分からない専門用語とその説明を記入。五十音順)

番号	用語名	説明
【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS技術研究機構		
1	CMOS	CMOS(Complementary MOS; 相補型 MOS)とは、P 型と N 型の MOSFET をデジタル回路(論理回路)の論理ゲート等で相補的に利用する回路方式(論理方式)及びそのような電子回路や IC のこと。
2	CPT 共鳴	Coherent Population Trapping の頭文字を取った略称で、原子とレーザー光のコヒーレントな相互作用の結果現れる現象。
3	Cs ディスペンサ	Cs を含む固体の化合物で、高温加熱することにより Cs を放出。
4	DARPA	アメリカ国防高等研究計画局(Defense Advanced Research Projects Agency)の略称。軍隊使用のための新技術開発および研究を行うアメリカ国防総省の機関。
5	FAN	Field Area Network の略。屋外の建物間でスマートメーターなどをつなぐネットワーク。
6	FPGA	Field-Programmable Gate Array の略で、製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路であり、広義には PLD(プログラマブルロジックデバイス)の一種。
7	ICT	Information and Communication Technology の略で、情報処理および情報通信、つまり、コンピュータやネットワークに関連する諸分野における技術・産業・設備・サービスなどの総称。
8	JIS A5557	外装タイル張り用有機系接着剤の JIS 規格。
9	JIS C60068-2-52	環境試験方法-電気・電子-塩水噴霧(サイクル)試験方法(塩化ナトリウム水溶液)の JIS 規格。
10	LAN	Local Area Network の略。ネットワークの種類のひとつで、建物内やフロア内といった狭い範囲にあるコンピュータで構成されたネットワークのこと。
11	LiPo バッテリ	リチウムイオンポリマー二次電池の通称。電解質にポリエチレンオキシドやポリフッ化ビニリデンからなるポリマーに電解液を含ませてゲル化したもの。
12	LTCC	「低温同時焼成セラミックス」を意味する Low Temperature Co-fired Ceramics の略称。産業界で用いられる高純度セラミックスは「ファイン・セラミックス」とも呼ばれるが、LTCC はそうしたファインセラミックスの内、電子材料として用いられる電子セラミックスのひとつ。
13	MEMS	MEMS(メムス、Micro Electro Mechanical Systems)は、機械要素部品、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料などの上に微細加工技術によって集積化したデバイス。
14	NIST	National Institute of Standards and Technology(アメリカ国立標準技術研究所)の略。アメリカ合衆国の国立の計量標準研究所。
15	NTP	NTP とは、TCP/IP ネットワークを通じて正しい現在時刻を取得するためのプロトコルの一つ。コンピュータの内部時計の時刻を正しく調整するために、ネットワーク上で時刻情報を配信しているサーバに問い合わせる手順を定義したもの。
16	PCT	Pressure Cooker Test の略。試験体に圧力を加圧しながら、温度を 110°C~130°C加熱することにより、耐湿度性を加速試験すること。
17	PDMS	polydimethylsiloxane(ポリジメチルシロキサン)の略。ジメチルシロキサンが沢山つながった構造をしているシリコーンゴムのベース材料。
18	PEN	Poly Ethylene Naphthalate(ポリエチレンナフタレート)の略。耐熱性やガスバリア性が高い高分子フィルム。
19	PET	Poly Ethylene Terephthalate(ポリエチレンテレフタレート)の略。化学的・物理的高機能性に加え、品質の安定性・均一性にもすぐれた高分子フィルム。
20	PLL	Phase Locked Loop の略。入力信号や基準周波数と、出力信号との周波数を一致させる電子回路。入力信号と出力信号との位相差を検出し、VCO(電圧によって周波数を変化させる発振器)や回路のループを制御することで、正確に同期した周波数の信号を発信することが可能。

番号	用語名	説明
21	PZT	チタン酸ジルコン酸鉛(lead zirconate titanate)のこと。代表的な圧電材料であり、高い圧電定数を有することが特徴。
22	Q 値	Q 値(Quality factor、品質係数 Q)は主に振動の状態を現す無次元数。弾性波の伝播においては、媒質の吸収によるエネルギーの減少に関係する値。振動においては、1 周期の間に系に蓄えられるエネルギーを、系から散逸するエネルギーで割ったもので、この値が大きいほど振動が安定であることを意味する。
23	Rb 時計	原子時計の一種。ルビジウム(Rb)の基底状態(5S 軌道)の超微細構造の遷移周波数を計測して、高精度に時間と周波数を求めるもの。測定時間 1 秒で 10-11、1000 秒で 10-13。
24	RF-IC	高周波(RF)の信号を処理する集積回路(IC)の総称。
25	RIE	Reactive Ion Etching (反応性イオンエッチング) の略で、ドライエッチングに分類される微細加工技術の一つ。原理としては、反応室内でエッチングガスに電磁波などを与えプラズマ化し、同時に試料を置く陰極に高周波電圧を印加する。すると試料とプラズマの間に自己バイアス電位が生じ、プラズマ中のイオン種やラジカル種が試料方向に加速されて衝突する。その際、イオンによるスパッタリングと、エッチングガスの化学反応が同時に起こり、微細加工に適した高い精度でのエッチングが行える。
26	SN 比	SN 比(Signal Noise Ratio)は、通信理論ないし情報理論あるいは電子工学などで扱われる値で、信号(signal)と雑音(noise)の比。
27	SOI	Silicon on Insulator の略。絶縁膜上に形成した単結晶シリコンを基板とした半導体、および半導体技術。
28	STN	Smart Things Network の略。ものをつなぐ末端のネットワーク。
29	SUS312L	NI 含量を増し、C 含量を抑えることで、耐食性と耐熱性に優れているステンレス鋼。
30	TELEC 認証	TELEC は一般財団法人テレコムエンジニアリングセンターで、「技術基準適合証明・工事設計認証」を行う日本で最も古い歴史と実績をもつ機関。技術基準適合証明とは、特定無線設備(小規模な無線局に使用するための無線設備)が電波法令の技術基準に適合していることを証明(電波法第 38 条の 2)すること。
31	VOC	Voltage-controlled oscillator(電圧制御発振器)の略。電圧(制御電圧)で発振周波数を制御する発振器。
32	VCSEL (面発光レーザー)	Vertical Cavity Surface Emitting Laser の頭文字を取った略称。基板に対して垂直方向へ出射する構造の半導体レーザー。
33	WAN	Wide Area Network の略。遠隔地の LAN(ラン)を連携させたコンピューターネットワーク。
34	Wi-Fi	Wi-Fi Alliance によって認定された無線 LAN の規格。
35	YAG レーザ	イットリウム・アルミニウム・ガーネットを用いた固体レーザーのこと。
36	アコースティック・エミッション(AE)	固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同等なエネルギー解放過程によって生ずる弾性波動現象。
37	圧電材料	圧電性(機械的ひずみを与えたとき電圧を発生する、あるいは、逆に電圧を加えると機械的ひずみを発生する性質)を示す結晶性物質の総称。
38	位置標定	AE の発生位置を定めること。
39	エッジ端末	通信ネットワークの境界におかれた端末。
40	オールインワンパッケージ	自立電源、無線モジュール、環境センサ、電子回路等すべての部品を1つのパッケージに内蔵させたもの。
41	カーボンナノチューブ	カーボンナノチューブ(carbon nanotube、略称 CNT)は、炭素によって作られる六員環ネットワーク(グラフェンシート)が単層あるいは多層の同軸管状になった物質。
42	ガスセル	ガスを閉じ込める容器。
43	環境発電素子	太陽光や照明光、機械の発する振動、熱などのエネルギーを採取(ハーベスティング)し、電力を得る素子。

番号	用語名	説明
44	協定世界時	国際原子時 (TAI) に由来する原子時系の時刻で、UT1 (天文台で恒星や銀河系外電波源の日周運動の観測、あるいは月や人工衛星の継続観測によって決められる世界時 UT0 から観測地の経度に表れる極運動の効果を補正して計算される値) 世界時に同調するべく調整された基準時刻。
45	グラファイト	炭素から成る元素鉱物。六方晶系 (結晶対称性は P63/mmc)、六角板状結晶。構造は亀の甲状の層状物質、層毎の面内は強い共有結合 (sp <sup>2</sup> 的) で炭素間が繋がっているが、層と層の間 (面間) は弱いファンデルワールス力で結合している。それゆえ、層状に剥離する (へき開完全)。電子状態は、半金属的である。
46	傾斜マルチセンサ	MEMS 加速度センサをベースとした高精度に傾斜、振動、温度が計測可能なセンサ。
47	結晶欠陥	結晶は原子が 3 次元的に規則的に並んでできているが、その結晶の中に存在する欠陥。
48	コアサンプル	コアボーリング (刃先にダイヤモンド粒子を埋め込んだコアビットを高速で回転させ、ダイヤモンドの切削力を利用して鉄筋コンクリートを穿孔する工法) により採取した円柱形の供試体。
49	構造ヘルスマモニタリング (SHM)	SHM (Structure Health Monitoring) ともいう。建築物等の構造物の振動を計測し、計測した振動の解析より、揺れの強度や変形量、振動周波数を解析し地震時の構造物安全性を診断や微小地震や常時微動の計測結果から構造躯体の状態変化をモニタリングする技術。
50	コヒーレント光	光束内の任意の 2 点における光波の位相関係が時間的に不変で一定に保たれていて、任意の方法で光束を分割した後、大きな光路差を与えて再び重ねあわせても完全な干渉性を示す光。
51	コレット	工作機械で使用する、工具やワークを固定する筒状 (コレット形状) の部位のこと、またはそのパーツ (治具) 単体のこと。
52	コンスタンタン	銅 55%、ニッケル 45% の組成からなる合金。電気抵抗の温度係数が小さいことから、ひずみゲージ・精密抵抗に使われる。熱起電力が低いことから、例えば熱電対に使われる。
53	コンセントレータ	データ通信の分野で使用する集信装置。本研究開発ではセンサを設置するフィールドに設置し、複数のセンサから送信されるデータをまとめ、インターネット経由でクラウドサーバに送信する機器を指す。
54	床版	床の機能をもつ構造部材。
55	シリコンカーバイド	SiC (シリコンカーバイド) はシリコン (Si) と炭素 (C) で構成される化合物半導体材料。絶縁破壊電界強度が Si の 10 倍、バンドギャップが Si の 3 倍と優れているだけでなく、デバイス作製に必要な p 型、n 型の制御が広い範囲で可能であることなどから、Si の限界を超えるパワーデバイス用材料として期待されている。
56	スーパーアコースティックセンサ	MMES 技術で製作したピエゾ抵抗型ビームの上に液体をパレレン薄膜で封止してその上にシリコーンゴム (PDMS) を有する多層構造の 1Hz~1MHz の広帯域が計測できる振動センサ。
57	スクリーン印刷	孔版印刷のひとつ。木または金属の枠に張った絹・ナイロンなどを版材とし、画線部は細かい織り目を通してインクを定着させる印刷法。
58	ストレイ容量	寄生容量、浮遊容量とも呼ばれ、電子部品の内部、あるいは電子回路の中で、それらの物理的な構造に起因する、設計者が意図しない容量成分のこと。
59	静電容量式センサ	導電膜の間での静電容量の変化を利用したセンサ。
60	対候性加速試験	キセノンランプ等の太陽光より、10 倍~100 倍の強い強度の光を試験体に照射することにより、紫外線等の屋外の太陽光の影響を加速する試験方法。
61	ダイバシティアンテナ	無線通信において、複数のアンテナで同じ電波を同時に利用することにより通信品質を向上させる技術。また、そのようにして一体的に運用される複数のアンテナ群。
62	タイムスタンプ	センサなどで取得したデータに対して、データを取得した時刻情報を記録して付与する仕組み。
63	卓越周波数	1.地震動の数ある波形の中で、建物に大きな影響を与える周期。 2.地震動の数ある波形の中で、発生する回数が最も多い周期。
64	弾性波	弾性体中を伝わる変形波で、弾性応力波、弾性ひずみ波とも呼ばれる。体積変化を伴う「体積波」と、形状変化は生じるが体積変化を伴わない「等体積波」とに大別される。

番号	用語名	説明
65	チップスケール 原子時計(CSAC)	原子時計(atomic clock)は、原子や分子のスペクトル線の高精度な周波数標準に基づき、正確な時間を刻む時計。チップスケール原子時計は、この原子時計をコンパクトにしたもの。
66	デュアルセル	ガスセルにCsとRbを封止したもの。
67	電子ビーム露光	感光剤を光で露光する代わりに、電子ビームの照射で露光する方法。
68	電波位相	電波の1波長(920MHz帯の場合、約0.3m)を360°として、1波長内における遅れあるいは進み具合を角度で表したもの。
69	導電性ペースト	試料を試料台に固定したり、導電性を持たせるために周辺に塗布するときに使うペースト。樹脂中に銀粒子やカーボンブラックをフィラーとして分散したものや、水にコロイド状のグラファイトを分散したもの。
70	特小無線	特定小電力無線の略で、電波法による無線局の免許を受けることなく利用可能。
71	ドングル	コンピュータに接続する小型装置。主にソフトウェアの不正使用防止のために利用されるほか、無線通信などの機能を提供する機器。本研究開発では無線通信機能を保有する小型装置。
72	粘接着シート	光硬化性エポキシ樹脂製のシート状接着剤。
73	法面	道路建設時に、山地を削ったり、盛土をすることにより造られる人工斜面、または自然斜面。
74	配線保護フィルム	有機・無機複合層からなる紫外線と水蒸気をカットするフィルム。
75	パリレン	パリレン(ポリパラキシレン、poly-para-xylene)は中性・非導電体の高分子で薄膜形成でき、耐薬品性、ガスバリア性に優れる、などの特徴をもつ。
76	ヒートサイクル試験	試験体を温度を-40℃と100℃前後の温度を、上昇及び下降させることによる温度影響の耐力をみる加速試験方法。
77	ピエゾ抵抗素子	電圧を力に変換したり、力を電圧に変換する素子。
78	光ナノ共振器	フォトニック結晶により実現した、数百ナノメートルの非常に小さな領域に光を閉じ込める共振器。
79	ひずみセンサ	対象物に貼り付けひずみを測定するセンサ。抵抗式、圧電式、容量式など検出原理が様々ある。
80	フェールセーフ	機器やシステム的设计などについての考え方の一つで、部品の故障や破損、操作ミス、誤作動などが発生した際に、なるべく安全な状態に移行するような仕組みにしておくこと。
81	フォトニック結晶	周期的屈折率分布によって作り出された光を伝播しない周波数帯域をもつ光学構造。微小領域に光を閉じ込める光共振器などを実現。
82	プライマ	最初に塗る塗料。
83	プラズマエッチング	プラズマ中に試料をさらすことにより、不必要な部分の原子を化学的または物理的に取り去る加工法。
84	フレキシブル面 パターンセンサ	フレキシブル基板上にひずみセンサを並べてひずみ分布を測定するセンサ。
85	フロントエンド回路	フロントエンドは、プロセスの最初の工程を指す一般的用語。フロントエンドは各種入力をユーザーから収集し、バックエンドが使える仕様に合うようにそれを加工。無線回路においては、アンテナ側の送受信端の回路部分をフロントエンドと呼ぶ。
86	分周	電波の周波数を1/nにすること。
87	ベースプレート	柱脚底部に取り付ける鋼板のこと。
88	ポリマー	有機化合物の分子が重合して生成する化合物(重合体)の総称。
89	マイグレーション	電気伝導体の中で移動する電子と金属原子の間で運動量の交換が行われるために、イオンが徐々に移動することで材質の形状に欠損が生じる現象。



番号	用語名	説明
90	マイクロマシニング技術	マイクロマシンを作ること。また、その技術の総称。半導体加工技術を応用した、微小部品の製造技術。
91	マルチホップ機能	1つの端末から他の複数の端末へデータを次々にホップ(飛び越え)させることで、通信距離を伸ばす機能。
92	メッシュネットワーク	通信機能を持った端末が、相互に通信を行うことで形成したネットワーク。
93	陽極接合	ウェハ接合法の一種で、ガラスと Si 基板の研磨面を重ねて加熱しながら電圧をかけることで、共有結合による強い接合が生じる接合法。
94	ラマンレーザ	光と原子振動の相互作用によって生じるラマン効果に起因する光学利得によって発振するレーザ。
95	ロガー	センサにより計測・収集した各種データを保存する装置のこと。
<b>【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイクロマシンセンターコンソ</b>		
1	920MHz	無線 LAN などの 2.4GHz 帯と比較して電波の到達距離が長く、また障害物を回り込んで届く特性が高いため、通信距離を必要とする場合や障害物が多い場所での利用が可能。
2	AlN 圧電プロセス	AlN はウルツ鉱構造の結晶構造で圧電性を有する材料であり、分極処理も不要。この圧電材料を用いた、センサに加工する工程を総称して N 圧電プロセスという。
3	Au-Au 低温活性化接合	通常、金と金の接合(接着)は、400℃程度の高温が必要とされ、圧電デバイスの特性に影響が出る。そこで、Ar プラズマ処理により、金表面の清浄化を行い、直ちにある程度の圧力で圧着することにより、低温化接合を行う接合法。
4	MCU	一つの集積回路にコンピュータシステムをまとめた、組み込み用のマイクロプロセッサのこと。MCU には、ROM や RAM などのメモリ、I/O 関連など多くの周辺機能を MCU 自体に搭載。
5	P 型センサ端末	回転機器に取り付け、低周波振動センサ情報、高周波振動センサ情報、表面温度情報を測定する大きさペッドボトル大の小型無線端末。
6	RFIC	無線通信を行うための処理を行う半導体チップ。
7	RFLSI	無線通信用 LSI。
8	ScAlN	AlN の圧電特性は、圧電定数が PZT に比べると 2 桁近く低いことから、より大きな出力を得るには圧電定数を向上させる必要がある。そこで、AlN を母材とし Sc を添加することで圧電定数が10倍に向上することが近年見いだされ、MEMS デバイスへの応用研究が盛んに行われている。
9	ウェハーレベルパッケージング工程	パッケージング工程をそれぞれの材料の基板を接合することにより行う、実装工程。一度に多量のセンサを実装することができるので、低コスト化を実現。
10	オールドライエッチングプロセス	AlN 圧電デバイスは AlN 圧電材料を Pt 電極で挟むことにより、形成される。Pt は難エッチング材料であるが、カンチレバーを構成する Si を含めて、これらの材料をすべて、ドライエッチング法により加工する方法。比較的短時間で高精度の加工が可能。
11	コンパレータ	参照電圧に対して入力されている電圧の高低によって出力が変化するデバイス。
12	参照電圧発生回路	一定以上の電源電圧が印可されている状態で、常に一定の電圧を出力する回路。
13	鹿威し	規定の電圧が蓄積した時点で動作する仕組み。
14	鹿威しエミュレータ	従来の振動加速度ピックアップで計測した振動加速度を積分し、鹿威し方式データを生成するための振動加速度の連続収集装置。
15	スタット	P 型センサ端末を回転機器に取り付けるための金属台座。

番号	用語名	説明
16	スパッタ	真空チャンバー内に堆積させたい材料をターゲットとして設置し、イオン化させた希ガス元素等を衝突させる。ターゲット表面の原子がイオン衝突によりはじき飛ばされ、対向して設置させている基板上にターゲット材からなる薄膜が成膜される。
17	整流回路	振動発電デバイスから得られる交流電力を直流電力に変換する回路。
18	センサデータ収集端末	P型センサ端末からの(P型センサ端末ID、振動センサ、表面温度)データを受信し、タイムスタンプ(受信時刻情報)を付加し、複数データをまとめ、(センサデータ収集端末の送信タイムスタンプおよびセンサデータ収集端末ID)を付加して上位装置であるM型中継端末に送信する無線中継装置。
19	多元スパッタ	スパッタ成膜において、複数のターゲットを持ち、それぞれを個別に制御しながら成膜する方法。
20	立型ラインポンプ	ポンプ効率と省スペース化を図ったインライン型の渦巻きポンプ。ポンプと上部にあるモーターが独立したユニットで構成。
21	パッケージング工程	AIN圧電デバイスを高温多湿の環境下で長期間動作させるため、Siやガラス材料を用いて、外部から4気密状態で遮断し、保護するための実装工程。
22	バンドパスフィルタ	周波数の高域成分を遮断するローパスフィルタと、低域成分を遮断するハイパスフィルタの組み合わせからなり、任意の周波数帯域の信号を取り出すのに用いる。
23	マルチホップ	他の無線通信装置を経由して、バケツリレーのようにデータを伝送する方法を無線マルチホップ通信と呼ぶ。基地局などの通信インフラがなくても通信できることから、センサーネットワークなどに広く使われる。
<b>【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所</b>		
1	RSSI値	受信強度(RSSI:Received Signal Strength Indicator)の略。受信した電波の強度を示す指標。
2	VMWare	物理的な一台のコンピュータ上にソフトウェアによって仮想的に複数のコンピュータを立ち上げ、別々のOSやソフトウェアなどを動作させる仮想化ソフトウェアの提供するシステム。
3	応答周波数	応答周波数は、近接センサの応答性を表し、標準検出物体を繰り返し接近させた時、追従可能(ON/OFF可能)な毎秒あたりの検出回数。
4	巡回型データ回収方式	監視対象施設に通信設備を構築し、定期的にデータを取得するのではなく、定期点検(巡回)時に点検車両が走行する際にデータを回収する方式。
5	ダイオードブリッジ回路	電流を正か負のどちらか一方にのみ流れるようにする整流回路の一種で4つの整流用のダイオードを用いて全波整流を行うことで交流電圧を直流電圧にすることが可能な回路。
6	ダイバーシティ方式	無線通信で生ずるフェージングの影響を軽減するため、信号の時間変動が相互に異なる二つ以上の受信信号を合成したり、切り替えたりする方式。
7	卓越周波数	それぞれの区間において最も振幅が大きい周波数。
8	ダンパー	振動エネルギーを消散させて衝撃または振動の振幅を軽減する装置。
9	ターンバックル	ロープやワイヤーやタイロッドなどの張力を調節する装置。
10	ビームフォーミング方式	電波を細く絞り、特定の方向に向けて集中的に発射する手法。
11	モバイルリーダー	無線通信機能、Bluetooth通信機能、電源監視機能等を有しており、設置したセンサ端末からデータを受信し、タブレット端末等へデータを送信する機器。
12	モバイルリーダー駆動方式	モバイルリーダーが継続的にビーコンパケットを送信しながら走行する方式で、センサ端末はモバイルリーダーからビーコンパケットを受信する際のみ起動するため、低消費電力化が実現可能な受信端末。
<b>【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株)</b>		
1	GPS-1PPS	GPS基準時計に同期した1秒間隔のパルス信号。
2	ゲージ率	一般的には、抵抗ゲージにおけるゲージ率は、ひずみに対するの抵抗の変化率を指すが、シリコン振動式センサでのゲージ率の定義は、ひずみに対するのシリコン振動式センサの周波数変化率に相当。

番号	用語名	説明
3	逐次部分空間法	検討対象とする動的システムの入出力データを用いて、固有振動数等の振動特性の時間変化を時々刻々評価することのできるシステム同定手法。
【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株)コンソ		
1	3G 通信	携帯電話の通信方式の一種。
2	AD コンバータ	アナログ信号をデジタル信号に変換する電子回路。
3	FEM モデル	複雑な形状・性質を持つ物体を小部分に分割することで近似し、全体の挙動を予測する手法。
4	I2C	フィリップス社が提唱した周辺デバイス とのシリアル通信の方式。
5	IP54	JIS の保護等級のレベルのひとつ。防塵性能と防水性能を規定したもの。
6	MCU	一つの集積回路にコンピュータシステムをまとめた、組み込み用のマイクロプロセッサ。
7	MEMS	機械要素部品、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板などの上に微細加工技術によって集積化したデバイス。
8	MTBF	機械システムや情報システムなどにおける信頼性 (Reliability) をあらわす指標となる数値。
9	PC 橋	あらかじめ応力を加えたコンクリート材、すなわち、プレストレスト・コンクリート (PC、Prestressed Concrete) を使用した橋。
10	SRAM	読み込み、書き込みが可能なメモリ (RAM) の一種で、一時的にデータを保持するための揮発性メモリ。
11	Web-API	コンピュータプログラムの提供する機能を外部の別のプログラムから呼び出して利用するための手順・規約 (API) の類型の一つで、HTTP など Web の技術を用いて構築されたもの。
12	圧電セラミック	結晶の分極を利用して、電気エネルギーと機械エネルギーの交換を行うもの。
13	インダクタンス	コイルなどにおいて電流の変化が誘導起電力となって現れる性質。
14	エネルギーハーベスティング	太陽光や照明光、機械の発する振動、熱などのエネルギー (エネルギー) を採取 (ハーベスティング) し、電力を得る技術。
15	キャリブレーション	計測器具の偏りを基準量によって正すこと。
16	ゲートウェイ	異なるネットワーク同士を接続するネットワーク機器。
17	鋼橋	主要部材に鋼を用いた橋。
18	サンプリング周波数	アナログ信号からデジタル信号への変換 (AD 変換) を 1 秒間に何回行うかを表す数値。
19	支承	橋梁において、上部構造 (主桁・主構) と下部構造 (橋台や橋脚) の間に設置する部材。
20	主桁	橋の荷重を支える桁。桁橋で、水平方向に渡した桁。
21	センシング	センサーを利用して物理量や音・光・圧力・温度などを計測・判別すること。
22	通信プロトコル	ネットワーク上での通信に関する規約を定めたもの。
23	デージーチェーン	複数の電気・電子機器を数珠つなぎにするような接続方法。
24	特定小電力無線	免許を要しない無線、その内のいわゆる小電力無線の一種。
25	汎用シリアルインタフェース	データ伝送の際、デジタルデータを 1 ビットずつ順次伝送、または、そのような方式を用いる接続インターフェース。

番号	用語名	説明
26	ファームウェア	電子機器に組み込まれたコンピュータシステムを制御するためのソフトウェアで、ROM 等の LSI など書き込んだ状態で、機器に組み込んだもの。
27	床版	橋の上を通る車両の重みを橋桁(はしげた)や橋脚(きょうきゃく)に伝えるための床板(ゆかいた)。
28	リチウムイオンキャパシタ	充放電サイクル寿命が長く、大電流の急速充放電が可能な蓄電デバイス。
<b>【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ</b>		
1	舗装	道路の路床、床版上面に敷設された、アスファルト等で車両の平坦性、走行性を向上させる構造。
2	床版	橋梁において、路面を構成して、舗装を介して、交通荷重を受けて、主桁に荷重を分配させる構造。
3	橋台	橋梁端部で橋桁を支える構造で橋桁に載荷された荷重を基礎に荷重を伝達させる。
4	橋脚	橋梁中間部で橋桁を支える柱構造で、橋桁に載荷された荷重を基礎に荷重を伝達させる。
5	定期点検	5年に1回等、期間を定めて定期的におこなう詳細点検を指す。
6	詳細点検	構造物に接近して、点検ハンマーを用いた打音調査や、触診等をおこなう点検。
7	野帳	現場において点検の詳細概要(位置、損傷ランク、寸法)を記録する手帳。
8	カルテ	記録のための規則に沿って点検結果を整理した資料で長期保存しているもの。
9	損傷図	構造物の図面に損傷位置、大きさ、種類等をマッピングした図面。
10	逐次の画像認識	二値化、エッジ検出などの個別の処理を順次適用して対象を識別し特定すること。
11	統計的パターン認識	検出対象の抽出に適した特徴パターンを見出して、画像に含まれる特徴量を多変量解析等の統計手法によって識別し特定すること。
12	局所特徴量	対象データ中に含まれる微視的な特徴の集合によってその対象が特定可能であるとして算出する量的な値で、多くの場合はベクトル量。
13	畳み込みニューラルネットワーク	深層学習を画像処理に適用するにあたって主に用いられるフィルタ処理層を有するニューラルネットワーク。
14	Mean Average Precision	個々の対象について設定値によって変動する精度の平均値を求め、全ての対象の平均値を平均した値。
15	再現率	全ての正解のうち検出に成功した検出結果の割合。
16	適合率	検出した結果の総数のうち正解の割合。
17	パノラマ合成	対象物を断片的に撮影した複数の画像から対象物全体の画像を合成する方法。
18	経年変化検出	点検時期の異なる同一対象について、劣化や損傷の進行状況を量的な差として算出すること。
<b>【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ</b>		
1	位相解析	格子パターンのような繰り返し模様を明るさの変化の波と捉え、その波の位相を求めること。
2	位相シフト法	位相解析の手法のひとつで、格子パターンを人為的に移動させることで、画素ごとの位相を変化させて複数の輝度値を取得し、その複数の輝度値から位相値を算出する方法。画素ごとに位相値が得られるため、空間分解能が高く、精度も良い手法として、格子画像解析にはよく用いられる。

番号	用語名	説明
3	サンプリングモアレ法	格子画像の位相解析方法のひとつで、格子画像を等間隔に抽出(サンプリング)することによりモアレ縞を発生する。サンプリング位置を移動させることでそのモアレ縞も移動することを利用し、位相シフト法を適用することで精度よく位相解析を行う手法。
4	サンプリングモアレカメラ	カメラの内部にサンプリングモアレ法のアルゴリズムを組み込んだカメラ。撮影と同時に位相解析を行い、その結果をリアルタイムに出力する。
<b>【③-(1)-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジーズ(株)コンソ</b>		
1	GPS	Global Positioning System。衛星を使い位置を計測する技術。
2	下部工	上部工(主桁、主構)からの荷重などを地盤へ伝達するための下部構造。橋台・橋脚およびそれらの基礎の総称。
3	鋼I桁橋	I形断面を有する鋼材によって桁が構成された鋼橋。
4	支承	上部工(主桁・主構)と下部工の間に設置する部材のこと。
5	床版	橋の上を通る車両の重みを橋桁や橋脚に伝えるための床板。
6	道路橋の定期点検	道路橋の定期点検は、5年に1回近接目視を基本として実施し、健全性の診断結果を4段階に区分して行うことが、国の法令により義務付けられている。国直轄の橋梁に対しては「橋梁定期点検要領」、地方公共団体の管理する橋梁に対しては「道路橋点検要領」が適用される。
7	マルコ TM	本プロジェクトで開発するマルチコプタを利用した橋梁点検システムの総称。商標登録済み。
8	マルチコプタ	3枚以上のプロペラを有した回転翼型の航空機。
9	メンテナンスサイクル	点検⇒診断⇒補修⇒記録という、インフラの長寿命化を目的とした一連の維持管理サイクル。
10	ロープアクセス	桁下にロープを張り、ロープを伝って自在に移動しながら、近接点検を行っていく点検手法。
<b>【③-(1)-2】小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ</b>		
1	可変ピッチプロペラ	現在市場に出回っているマルチコプターは、プロペラ角度が一定で、回転数で機体の動きを制御している固定ピッチが大半である。プロペラの変角機構を加えると、動きが柔軟になる。但し、機構が複雑になり、操作も煩雑になる懸念もある。
<b>【③-(1)-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フィルム(株)コンソ</b>		
1	懸垂型ロボット	橋げたにぶら下がる形で移動しながら、橋の裏側の鋼部材、コンクリート部材を撮影し点検するロボット。
2	床版	橋の道路面の裏側にあたる部分。
3	スクリプト	ロボットへの動作命令を箇条書きのように並べて記述したもので、簡単なプログラムのようなもの。
4	正対補正	斜めから撮影した画像を、あたかも真正面から撮影したかのように変形し補正する画像処理方法。
5	複眼式撮像装置	いわゆるステレオカメラ。カメラを2台並べて撮影することで、三角測量の要領で対象物への距離や対象物の大きさを測定することができ、付加的な測量手段が不要となる。
<b>【③-(1)-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ</b>		
1	ZigBee	センサーネットワークを主目的とする近距離無線通信規格の一つ。転送可能距離が短く転送速度も低速である代わりに、安価で消費電力が少ない。電氣的仕様は IEEE 802.15.4 として規格化。通信プロトコルについては「ZigBee アライアンス(ZigBee Alliance)」が策定。
2	脚・走行ユニット	吸着ユニットを X 方向、Y 方向に駆動制御し、ロボットを移動させる走行部であり、ユニット化された複数台を搭載可能。

番号	用語名	説明
3	塩化物イオン量	コンクリート中の鋼材腐食環境を判定するために用いられる。土木学会による指標では、鋼材付近の塩化物イオン量が 1.2~2.4kg/m <sup>3</sup> で腐食が開始するといわれている。
4	カウリング	本体部を覆うカバー。また風の影響を減らす働きをする。
5	コンクリートの塩害	コンクリート表面に付着した塩量は次第に内部に浸透して、鋼材付近の塩化物イオン量が一定値を超えると、鋼材は腐食環境下となる。腐食によって生じた錆は体積を増し、その膨張圧によってコンクリートにひび割れを生じ、鉄筋との付着力低下、かぶりコンクリートの浮き・はく離、鉄筋断面の減少を招き、構造物の耐力や安全性が低下する。
6	三次元モデル	3DCG ソフトウェアを使用し、3 次元において作成された立体データ。平成 28 年度策定予定の国交省の「CIM 導入ガイドライン」の CIM (Construction Information Modeling) により 3 次元モデルの作成・活用を促進。
7	写真撮影 (画像解析)	コンクリート構造物のひび割れ等のデジタル画像を撮影し、コンピュータによる画像解析によりひび割れ等を計測する方法。
8	真空吸着式パッド	ロボット ALP に備えられ、壁面に吸着する吸着ユニットのパッド。パッドは吸着部に真空室を設け凹凸不整面に吸着可能。
9	打音検査	コンクリート表面をハンマー等で打撃し、その反射音により、構造物のうきや内部状況を点検する方法。
10	電磁波レーダ	パルス電磁波をアンテナからコンクリート表面に向けて放射すると、その電磁波がコンクリートと電氣的性質の異なる物質 (鉄筋や空洞等) の境界面で反射され受信される。送信から受信までの時間から、反射物体までの距離を測定し、構造物の内部状況を点検する非破壊検査の一手法。
11	偏心モーメント	垂直面に吸着し走行するロボットの吸着支持点の変化、吸着姿勢の変化により発生する壁面からロボットを引き剥がそうとする力のモーメント。
12	マニピュレータ	写真撮影のためのカメラ、打音検査装置、電磁波レーダ等の検査機器を搭載し駆動するための装置。
<b>【③-1-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコンソ</b>		
1	ROV	遠隔操作型の無人潜水機 (ロボット)。
2	クリアサイト	カメラと撮影対象物の間に設置することで、濁った水の中でも良好な視界を得るためのもの。
<b>【③-1-8】河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの研究開発/朝日航洋(株)</b>		
1	GCP	Ground Control Point の略。人工衛星画像の正確な位置関係を調べるために測定する地上の点。
2	GIS	Geographic Information System、地理情報システムのこと。
3	GPS	Global Positioning System。上空にある数個の衛星からの信号を GPS 受信機で受け取り、受信者が自身の現在位置を知るシステム。
4	UAV	Unmanned Aerial Vehicle。無人航空機一般を総称して UAV と呼ぶ。
5	Structure form Motion (SfM)	撮影対象をカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、その対象の 3 次元形状と撮影したカメラの位置を同時に復元する手法。
6	オルソ画像	ラジコンヘリ、航空機、人工衛星等から撮影された空中写真に対し、正射投影によりその歪みを補正した画像をオルソ画像と呼ぶ。地形図と同様に利用でき、GIS の背景データとして使用可能。
7	火山噴火後の土石流災害	火山噴火に伴い生じる降灰は一般的に細粒分を多く含み地上に堆積した場合、降雨に対する浸透能を低下させることで土石流の発生確率を増加させる。
8	含水率	物質に含まれる水分の割合を示したもの。重量基準と体積基準の含水率があるが、単純に含水率と呼ぶ場合は、重量含水率を示す。
9	クアッドコプター	4 枚のプロペラ (ローター) により無人飛行する小型航空機。

番号	用語名	説明
10	スカイクレーン方式	UAV を減速させながら降下させ、ケーブルで吊り下げたデバイスを地上に接地させる方式。
11	鳥瞰図	地図の技法および図法の一つで、上空から斜めに見下ろしたような形式。
12	テザー	ケーブルのこと。ここでは、マルチロータ機とデバイスを繋ぐために利用。
13	テレメトリ	観測対象から離れた地点から様々な観測を行い、そのデータを取得する技術。ここでは、飛行ロボットの位置や姿勢等の情報をオペレータに送信する技術を指す。
14	透水性	土などの物質が水を通す性質のこと。通しやすさを示す値として透水係数が用いられる。
15	二次元汎濫計算	解析範囲を2次元格子(メッシュ)に分割し、メッシュ間で計算を行い汎濫範囲や流動深を推定する手法。
16	無人マルチロータ機	複数(マルチ)のプロペラ(ローター)により無人飛行する小型航空機。
17	リアルタイム	実時間。ここでは、日オーダーで更新するデータベースをリアルタイムデータベースと定義。
<b>【③-(1)-10】災害調査用地上/空中複合型ロボットシステムの研究開発/(株)日立製作所コンソ</b>		
1	係留型ヘリシステム	人の立ち入りが困難な災害現場に対し、空中に長時間ホバリングして災害現場を定点監視する、また無線中継等を行うために開発した、陸上の無人車両及び有線給電可能なマルチコプターから構成されるシステム。
2	災害情報データベース	各機器からの情報を集約し一元管理するシステム。災害情報を3次元的に可視化したり、定量的に確認したりするためのシステムで、GIS に重畳可能な標準フォーマットとして蓄積することにより、防災関連組織が保有するGISをベースとした防災システムで災害現場の情報共有が容易に行える機能を提供可能。
3	地すべり検知システム	無線中継機能、GPS、加速度センサ、気圧・温度センサ等を搭載した地すべり検知ノードをマルチコプターより複数災害現場に投下し、土石流発生等をリアルタイムに情報収集可能なシステム。既存の崩壊検知センサー、ワイヤーセンサー等の置き換えとして有効な手段。
4	吊り下げ式電磁探査システム	地下10m程度の比抵抗率(電気伝導度)を計測可能な電磁探査センサ及びセンサ吊り下げ用マルチコプターから構成され、災害現場をセンサ吊り下げにより走査することで、埋没した車両の検出、土壌の含水率等の推測が可能なシステム。
5	不整地踏破アーム付無人調査車両	災害現場における不整地移動、不整地踏破アームを活用した作業(現場での土壌サンプリング、移動路の造成等)を目的に、市販のミニショベルを遠隔操作化した車両。
6	無人調査プラットフォーム車両	人の立ち入りが困難な災害現場に対し、半自律的な制御を伴う遠隔操作により不整地や斜面等を移動して現場に接近し、現場の状況や地形、地質の情報を直接得ることが可能なロボット車両。無人調査プラットフォーム車両として、CRoSDI(Crawler Robot System for Disaster Investigation)を開発。
7	無人調査プラットフォームヘリシステム	人の立ち入りが困難な災害現場に対し、空中飛行で接近、または高い位置からの観測によって、現場の状況や地形、地質の情報を得ることが可能なマルチコプターを利用したプラットフォームヘリシステム。
<b>【③-(1)-11】遠隔搭乗操作によるマルチロータ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組コンソ</b>		
1	N値	重さ63.5kgのハンマーを75cmの高さから自由落下させて、サンプラーが30cm地面に貫入するのに必要な打撃回数。
2	TORSOロボット	人の上半身の動きとリンクする6自由度ロボットの頭部に、人間の目と同等にステレオカメラを配置し、ヘッドマウントディスプレイ上に映像を投影。
3	コーン指数	コーンペネトロメーターを土中に押し込む際の貫入抵抗力度。
4	スウェーデン式サウンディング試験	1KNのおもりの荷重と、回転によるロッドと土の貫入抵抗を測定し、その硬軟と地盤の締まりを判定する原位試験。

番号	用語名	説明
5	スループット	通信回線の単位時間あたりの実効通信速度。
6	レイグジスタンス	遠隔地にある物(あるいは人)が、あたかも近くにあるかのように感じながら、操作などをリアルタイムに行う環境を構築する技術およびその体系。
7	トラバース機構	クローラを走行装置本体に対しロールさせ、スキーの斜滑走のようにエッジを山側へ立てることによって、斜面横断走行を可能とする機構。
8	パッチアンテナ	平面アンテナのひとつで、指向性を高めたアンテナ。
9	マルチクローラ	メインクローラ(履帯)の前後に、サブクローラを備えた走行装置。
<b>【③-(1)-12】引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)</b>		
1	ATEX	爆発可能性のある雰囲気中で使用する機器に対する安全(防爆)に関する指令。EC(欧州共同体)指令 94/9/EG により、CE マーキング適合指令の一つとして、2003 年 7 月より「強制(compulsory)」となった。
2	BMS	Battery Management System の略で、リチウムイオン電池の各セルの電圧やモジュール温度を測定し、リチウムイオン電池を監視・制御(保護)する装置。充・放電時の過充電、過放電の検出のほか、各セル間の電圧バランスを維持する機能も有する。
3	Ex px d II B + H2 T4 Gb	Ex: 防爆構造の表示(国際整合防爆指針) Px: 内圧防爆構造 d: 耐圧防爆構造 II B + H2: 電気機器の分類されたグループ(分類 B の可燃性ガス、蒸気および H2 に適用) T4: 整合指針による温度等級(電気機器の最高表面温度 135℃以下) Gb: 機器保護レベル(Equipment protection level)。通常運転及び頻繁に発生する外乱ともに適する、又は、不具合(障害)発生を通常は考慮している機器。危険場所ゾーン 1 およびゾーン 2 において機能を維持。
4	オドメトリ	車輪型移動ロボットにおける車輪やステアリングの回転角度の計算からそれぞれの移動量を求め、その累積計算からロボットの位置を推定する手法。
5	クローラ	複数枚のリンクを鎖状につないで外周に履板を取り付けた構造、又は環状のベルト等をスプロケットホイールで支持して順次、送り出すことによって移動を可能とする機構。
6	国際整合防爆指針(Ex2015)	電気機械器具防爆構造規格第 5 条に基づく型式検定の基準。国際電気標準会議(IEC)の発行した国際規格(IEC60079 シリーズ)に整合。
7	産業安全技術協会	労働安全衛生法令で定める機械等の検定業務や JIS 基準による安全性能試験業務及び機械等の認定業務を行う。公益社団法人。
8	耐圧防爆構造	全閉構造の容器内部で可燃ガスの爆発が起こった場合に、容器がその圧力に耐えて、外部の爆発性ガスに引火するおそれのない構造。
9	内圧防爆構造	容器内の保護ガスを外部の気圧より高めて維持するものと、容器内のガスの濃度を爆発限界より低いレベルにすることによって防爆性能を確保する2通りの防爆構造方式。
10	防爆型式検定	検定申請品の規格への適合性並びに製造及び検査設備等を有するか否かを確認するために、労働安全衛生法第 44 条の 2(型式検定)の定めるところにより、機械等検定規則(昭和 47 年、労働省令第 45 号)に基づいて行われる検定。
<b>【③-(2)】超小型 X 線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発/(国研)産業技術総合研究所コンソ</b>		
1	CdTe検出器	テルル化カドミウム(CdTe)の半導体素子を用いたX線検出器。半導体検出器は、X線を直接信号に変換するので、質の高い画像が得られる。CdTeは他の半導体に比べて実効原子番号が大きく、高エネルギーX線を検出しやすい。
2	X線非破壊検査	一般的には、X線源から放出されるX線を被検体を透過させて、X線透過イメージを得る方法。
3	X線管の管電圧	管電圧が高いほど透過能力の高いX線を発生できる。医療用では数十～120kV 程度の管電圧が一般的だが、数 cm 厚の鉄構造物をイメージングするには 200kV 以上の管電圧が必要。



番号	用語名	説明
4	隔壁シンチレータX線検出器	X線が入ると光を出すシンチレータ式の検出器は、CdTeなどの半導体式の検出器に比べて大面積化が容易であるが、高エネルギーX線を検出するためシンチレータの厚さを厚くすると、光が拡がって得られる画像の質が低下するという問題があった。本課題では、この光の拡がりを抑えるた隔壁を設けたシンチレータ式の高エネルギーX線対応大面積検出器を開発。
5	カーボンナノ構造体冷陰極電子源	電子をターゲットに入射することによりX線を発生するが、これまで電子ビームは電子源(陰極)にフィラメントやヒーターを用いて発生するのが一般的。しかし、バッテリーで高出力のX線を発生しようとする、フィラメントやヒーターの電力が問題となることから、本課題ではこれらが不要な冷陰極の電子源を使ったX線管を開発。
6	シンチレータ式中性子検出器	中性子が入ると発光するシンチレータを用いた中性子検出器。
7	中性子水分センサ	中性子は水素などの軽元素に散乱されやすいという性質を利用して、散乱中性子の強度を計測することにより配管保温材等の水分の含水率を計測できる計測技術。
8	ヘリウム3中性子検出器	ヘリウム3が中性子との相互作用が強いことを利用して中性子を検出する方式。中性子の検出器として優れているが、ヘリウム3の資源の枯渇が心配されており、代替の検出器開発が望まれている。

## I. 事業の位置付け・必要性について

### 1. 事業の背景、目的及び位置づけについて

#### 1.1 事業の背景及び目的

高度経済成長期以降に整備されたインフラのうち、社会インフラは、今後 20 年で建設後 50 年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。これは、石油精製プラント、化学プラント、鉄鋼所などの産業インフラも同様である。適切な維持管理が行われないことにより、インフラの崩壊や機能不全が発生し、人命や社会に影響を及ぼす危惧が高まっている。また、我が国のインフラの維持管理・更新に対する課題は以下に集約されると考えられる。

##### (1) 維持管理・更新に対する財政問題

今後、維持管理・更新に従来どおりの支出を行うと仮定すると、2037年度には現在のレベルの投資総額を上回り、2011 年度から 2060 年度までの 50 年間に必要な更新費(約 190 兆円)のうち、約 30 兆円(全体約 16%)の更新ができなくなる。

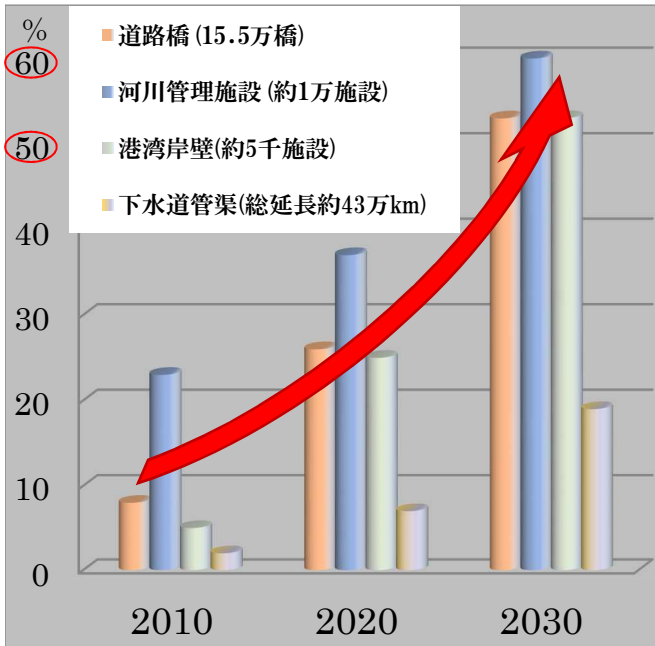
##### (2) 維持管理の人材・技術不足

維持管理の技術者の高齢化が著しく、一定レベルの知見を有する技術者が不足している。また、共用年数の長い施設に関する知見が不足し、維持管理に必要な技術が不十分である。

また、我が国の主要なインフラでは、数年毎に定期点検を実施しているが、定期点検間の急激な劣化進行等の異常の把握は、人材の確保及び人件費の削減により困難である。加えて、定期点検時においても目視点検が困難な箇所も存在する。さらに、災害時においては、緊急点検に時間を要し、迅速な復旧が困難であるといった課題もある。

世界の取組状況として、米国では、1960 年代後半から橋の事故が続発した。70 年代はじめに、全ての道路橋に2年に1度の点検を義務化しており、現在は、毎年約 30 万の橋の点検のために 1,000 億円を超える予算を連邦政府が支出しているが、費用面・検査時間・人材面などにおいて課題がある。また、欧州においても建設後 50 年を経過したインフラが多数存在するとみられており、同様な課題がある。中国では、新規のインフラを中心にモニタリングが進みつつある。

本事業では、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図るため、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステムの技術開発及び維持管理を行うロボット技術の開発を行い、インフラの維持管理・更新等における財政問題及び人材・技術不足の解決に寄与する。



	2013年 3月	2023年 3月	2033年 3月
道路橋 [約 40 万橋 <sup>注1</sup> (橋長 2 m 以上の橋約 70 万のうち)]	約 18%	約 43%	約 67%
トンネル [約 1 万本 <sup>注2</sup> ]	約 20%	約 34%	約 50%
河川管理施設 (水門等) [約 1 万施設 <sup>注3</sup> ]	約 25%	約 43%	約 64%
下水道管きよ [総延長: 約 45 万 km <sup>注4</sup> ]	約 2%	約 9%	約 24%
港湾岸壁 [約 5 千施設 <sup>注5</sup> (水深 - 4.5m 以深)]	約 8%	約 32%	約 58%

図表 I-1.1-1 建設後 50 年以上経過するインフラ施設の割合 (平成 24、25 年度国土交通白書)

- 注 1 : 建設年度不明橋梁の約 30 万橋については、割合の算出にあたり除いている。  
 注 2 : 建設年度不明トンネルの約 250 本については、割合の算出にあたり除いている。  
 注 3 : 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約 1,000 施設を含む。(50 年以内に整備された施設についてはおおむね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約 50 年以上経過した施設として整理している。)  
 注 4 : 建設年度が不明な約 1 万 5 千 km を含む。(30 年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約 30 年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。)  
 注 5 : 建設年度不明岸壁の約 100 施設については、割合の算出にあたり除いている。

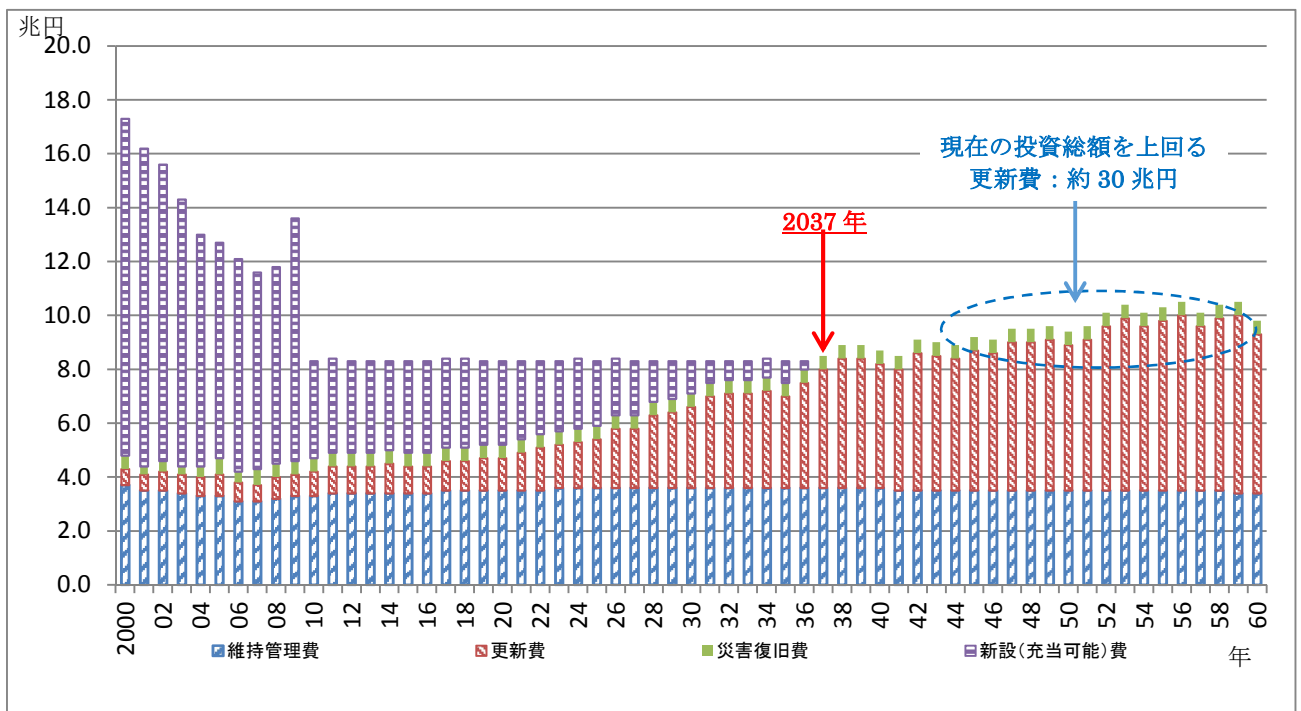


図 I-1.1-2 従来通りの維持管理・更新した場合の投資総額の推計 (平成 23 年度国土交通省白書)

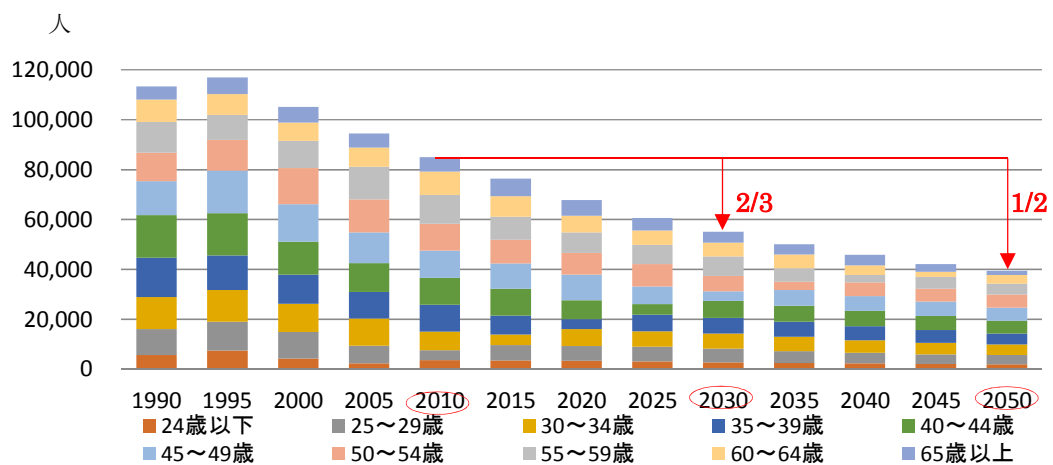


図 I -1.1-3 公務部門における維持管理技術者・作業員数の推計

(出典) 総務省「国勢調査報告」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口 (平成 18 年 12 月推計)」における出生中位(死亡中位)推計

## 1.2 事業の位置づけ

本プロジェクトの取組みであるインフラ維持・管理については、「日本再興戦略(平成 25 年 6 月 14 日閣議決定)」、「科学技術イノベーション総合戦略(平成 25 年 6 月 7 日閣議決定)」、「世界最先端 IT 国家創造宣言(平成 25 年 6 月 14 日閣議決定)」等の政策の中でその重要性及び必要性が位置づけられており、詳細は以下のとおり。

### ■日本再興戦略(抜粋)【平成25年6月14日 閣議決定】

#### テーマ3:安全・便利で経済的な次世代インフラの構築

##### (1) 2030 年の在るべき姿

インフラを、経済社会活動の礎となる機能を発揮する社会的な資産と捉え、最先端の技術と蓄積したデータを賢く利用することにより、財政規律に資するコスト縮減を図りつつ、その機能が恒常的に発揮され、時代の変化に対応して安全性・利便性が向上していく環境を実現する。

その中で、世界最先端の技術力を有するセンサーやロボットなどのデバイス・システム技術や宇宙インフラによる測位・観測技術、データ管理・活用技術などが駆使され、世界共通の課題であるインフラ老朽化問題対策のフロントランナーの地位を築く。

このため、次の2つの社会像の実現を目指す。

- ① 安全で強靱なインフラが低コストで実現されている社会
- ② ヒトやモノが安全・快適に移動することのできる社会

これにより、世界に先駆けて次世代のインフラを社会実装できる環境が整えられ、世界中から技術や投資が集まることにより、国内でのインフラ環境の改善及び日本のインフラビジネスの競争力強化の好循環を実現させる。

##### (2) 個別の社会像と実現に向けた取組

- ① 安全で強靱なインフラが低コストで実現されている社会

###### I) 社会像と現状の問題点

センサーやロボット、非破壊検査技術等の活用により、生活インフラ、公共インフラ、産業インフラといった様々なインフラの損傷度等をデータとして把握・蓄積・活用することにより、早期の異常検知により事故を未然に防ぎ、最適な時期に最小限のコストによる補修によってトータルライフサイクルコストが最小化されている社会を実現する。

###### II) 解決の方向性と戦略分野(市場・産業)及び当面の主要施策

###### ○IT 等を活用したインフラ点検・診断システムの構築

センサーやロボット、非破壊検査技術等による点検・補修の信頼性・経済性が実証できたところから、順次、これらの新技術を導入する。(中略)モニタリング技術の高度化、ロボットによる点検・補修技術の開発等により、効率的・効果的なインフラ維持管理・更新を実現する。

## 安全で強靱なインフラが低コストで実現されている社会

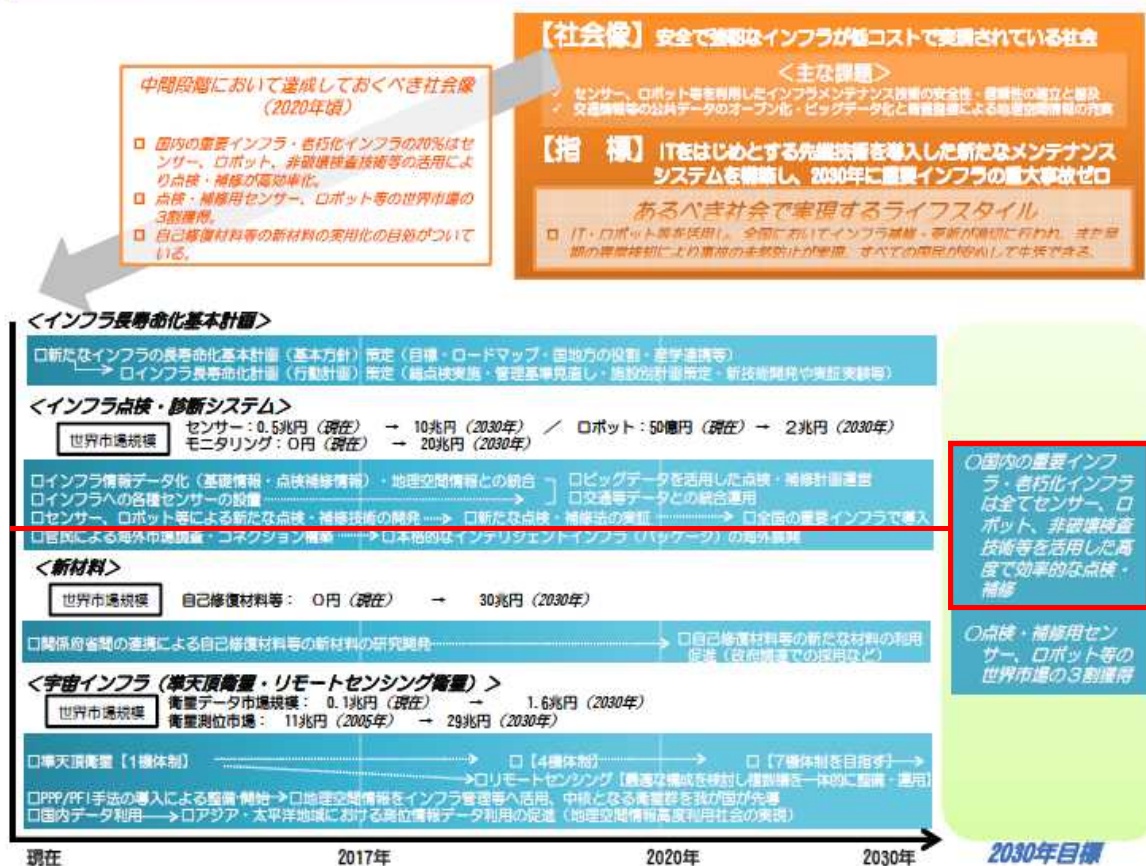


図 I -1.2-1 戦略市場創造プラン（日本再興戦略から抜粋）

■日本再興戦略2016(抜粋)【平成26年6月2日閣議決定】

### 8. ものづくり産業革命の実現

#### i) ロボットによる新たな産業革命の実現

■適切な性能や安全性を備えたロボット開発のため、ロボットテストフィールドにおいて、物流、インフラ点検、災害対策の分野を対象に、ロボットメーカー、ユーザー、学識経験者等から成る検討チームを組織し、本年度から、分野ごとに求められるロボットの性能や操作技術等に関する国際標準を見据えた評価基準やその検証方法の研究開発を開始する。

Ⅲ. 世界に先駆けた次世代インフラの整備

1. 基本的認識

人口減少や少子高齢化、産業構造の変容、大規模自然災害への備えなど、我が国を取り巻く社会環境は急速に変化しており、必要とされるインフラ需要も質的に大きく変化しつつある。また、高度経済成長期に整備されたインフラが一斉に更新期を迎え、今後、多額の維持補修・更新に係る投資需要が発生することが想定されるが、財政状況の悪化により、公的部門のインフラ供給余力が低下している。

2. 重点的に取り組むべき課題

近年の財政状況の中でインフラの老朽化対策を進めるには、維持管理・更新にかかる費用の低コスト化を図るとともに、確認困難な箇所等も的確に点検・診断し対処することでインフラの信頼度を高める必要がある。このため、「インフラの安全・安心の確保」を重点的課題として設定する。

3. 重点的取組

(1) 効果的かつ効率的なインフラ維持管理・更新の実現

① 取組の内容

この取組では、効果的、効率的に構造物の劣化・損傷等を点検・診断する技術やインフラを補修・更新する技術、インフラの構造材料の耐久性を向上させる技術等の開発を推進する。この取組により、災害時対応や確認困難な箇所等の対応が安全かつ適切に行えるようになるほか、近年進むインフラ老朽化にもコスト・安全性のバランスを鑑みて戦略的に対処することが可能となり、長期にわたり安心してインフラを利用できる社会を目指す。

「Ⅲ. 世界に先駆けた次世代インフラの整備」の課題と取組の例

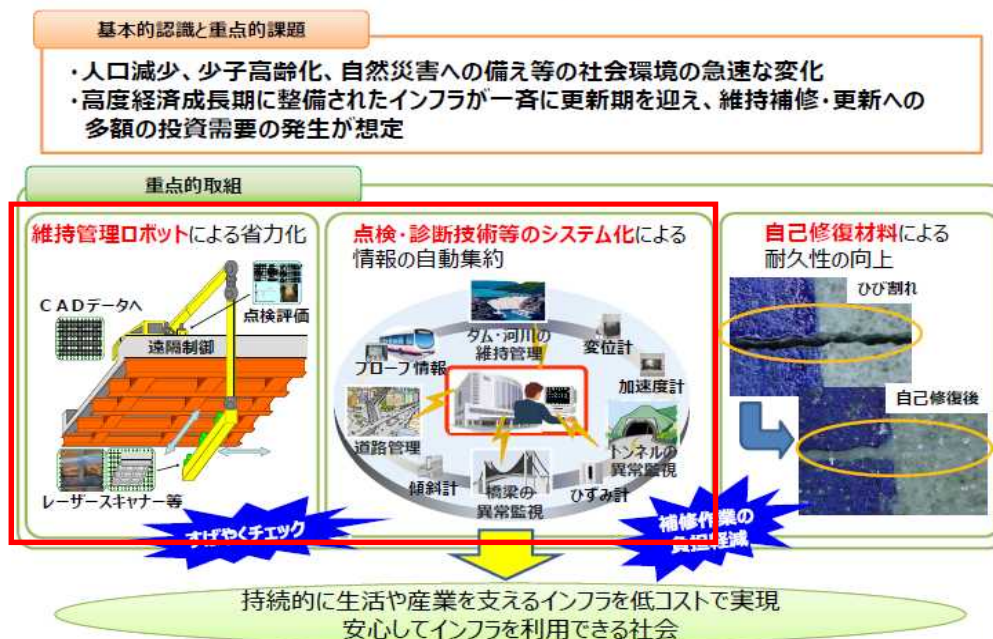


図 I -1.2-2 科学技術イノベーション総合戦略（概要）から抜粋

■世界最先端 IT 国家創造宣言(抜粋)【平成25年6月14日 閣議決定】

2. 健康で安心して快適に生活できる、世界一安全で災害に強い社会

(2) 世界一安全で災害に強い社会の実現

センサー、ロボット、非破壊検査等の技術も活用することにより、社会インフラの実態を正確に把握・蓄積し、それらを活用することにより、社会インフラを安全により長く利用できることにつなげ、世界で最も安全で経済的な社会インフラを実現する。

② IT 利活用による世界一安全で経済的な社会インフラの実現

劣化・損傷個所の早期発見、維持管理業務の効率化につながるセンサー、ロボット、非破壊検査等の技術の研究開発・導入を推進する。研究開発に当たっては、開発された技術が現場での導入につながるよう、ニーズや信頼性、経済性に十分配慮するなど、将来的な普及促進を見据えた研究開発を行う。

実施スケジュール (2. 健康で安心して快適に生活できる、世界一安全で災害に強い社会)

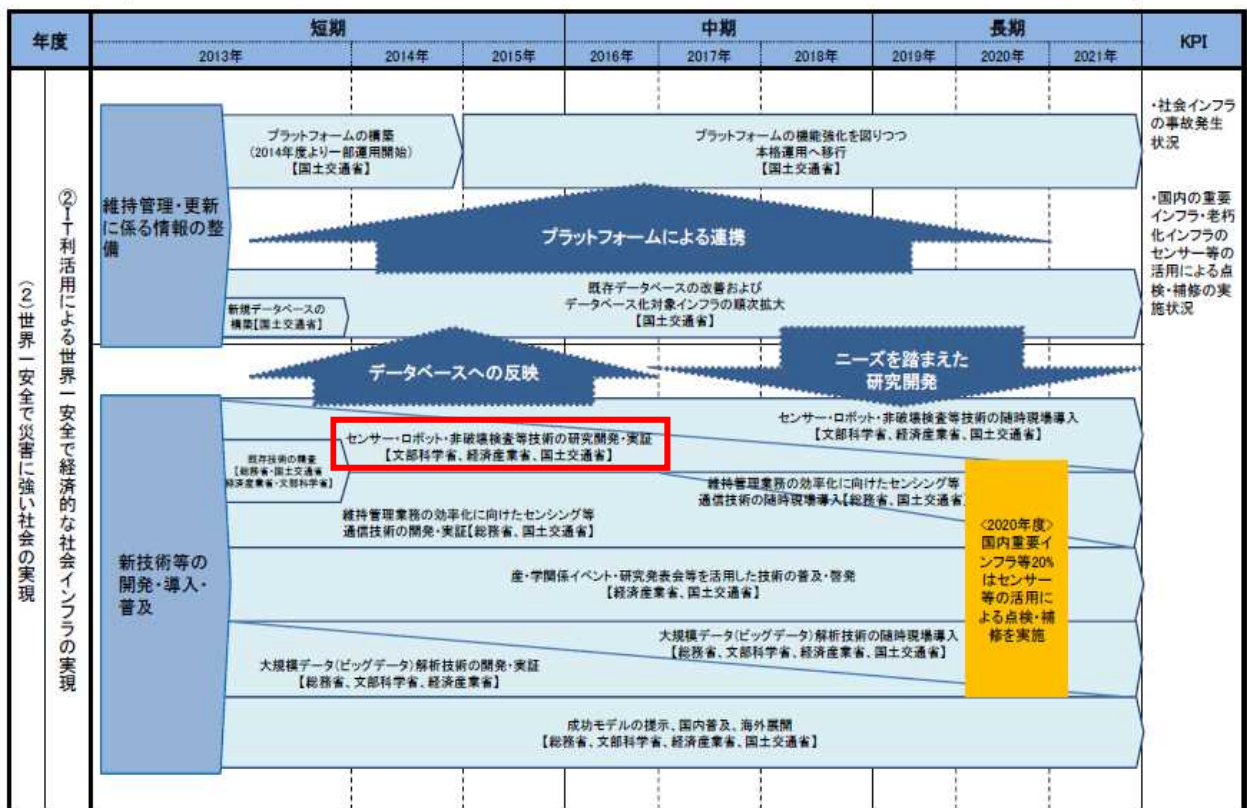


図 I-1.2-3 世界最先端 IT 国家創造宣言工程表から抜粋



#### 第4節 インフラ・災害対応・建設分野

##### ②インフラ(維持管理)

昭和 30 年代からの高度経済成長期に集中的に整備された社会資本が急速に老朽化してきており、今後、維持管理・更新の作業とこれにかかる費用の増加が予測されている。

また、産業インフラを含めて我が国のインフラ全体について、点検、診断、補修、更新等に必要な技術者不足が懸念されていることから、省力化が期待されている。

##### ③災害対応

日本の国土は世界的に見て非常に地震・火山噴火などの災害が発生しやすい地域にある。世界で発生するマグニチュード6以上の地震のうち2割が日本で発生している。活火山数は世界全体の約7%が日本に集中している。

また、気象的に見ても梅雨や台風が毎年襲来し、地形も急峻であるために、風水害や土砂災害が毎年発生している。

さらに、近年では、東日本大震災はもちろん、昨年1年間だけでも、御嶽山や阿蘇山の噴火や、台風、梅雨前線による浸水・土砂災害で死者が発生する被害が全国各地で多発している状況。

このような状況のもと、被災直後の調査や応急対策を迅速化することで、二次災害被害の軽減、早期の復旧・復興に資することが期待されている。

一方、災害発生後の、応急復旧等を行う際にも2次災害発生のリスクが非常に高く安全性を確保した中での作業が求められる。

#### (3) ロボット活用を推進すべき分野(重点分野)

##### ② インフラ(維持管理)

厳しい財政状況への対応及び今後懸念される点検、診断、補修等への技術者不足については、研修等による技術者の育成のほか、維持管理用ロボット技術の導入により、維持管理の効率化・高度化を支援することにより対応する。

##### ③ 災害対応

被災直後の調査や応急対策の迅速化に対しては、災害調査ロボットによる被災状況把握の迅速化及び無人化施工の施工効率向上や高い安全性の確保により対応する。

# ロボット新戦略(アクションプラン)(平成27年1月23日 ロボット革命実現会議)

## インフラ・災害対応・建設

就業者数の減少・高齢化により、深刻な労働力不足に直面する可能性

### 重点分野

- ✓建設現場の省力化、作業の自動化により、中長期的な担い手不足に対応
- ✓インフラの目視点検等にロボットを活用することで、技術者による維持管理を効率化・高度化
- ✓災害調査ロボットによる被災状況把握の迅速化、土砂災害現場等における無人化施工の施工効率向上

### 2020年に目指すべき姿

- ◆生産性向上や省力化に資する情報化施工技術の普及率3割
- ◆国内の重要・老朽化インフラの20%はセンサー、ロボット、非破壊検査技術等の活用により点検・補修を高効率化
- ◆土砂崩落や火山等の過酷な災害現場においても有人施工と比べて遜色ない施工効率を実現

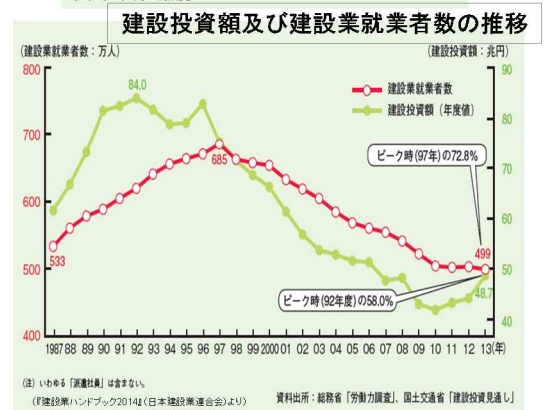
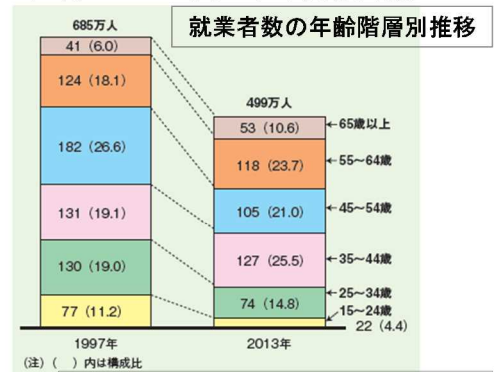


図 I-1.2-4 ロボット新戦略アクションプラン(ロボット新戦略のポイントから抜粋)

## 2. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

### 2.1 NEDOが関与することの意義

我が国では高度成長期以降に集中的に整備されたインフラが今後一斉に高齢化する。例えば、今後 20 年で、建設後 50 年以上経過する道路橋（橋長2m以上）の割合は現在の約 16%から約 65%となるなど、高齢化の割合は加速度的に増加する。

これらのインフラの中には、建設年度や構造形式等の施設諸元や、劣化や損傷等の老朽化の進展状況など、維持管理に必要な情報が不明な施設も多く存在している。また、維持管理に係る基準やマニュアル等は管理者間でばらつきが存在するほか、国や地方を通じ職員定数の削減が進む中、地方公共団体の中には維持管理を担当する技術職員が不在、若しくは不足している団体も存在するなど、制度や体制についても、我が国全体として十分とは言えないという指摘もある。このような現状に至った背景には、短期間で集中的にインフラ整備を進める必要があったことや、経年劣化や疲労等に伴う損傷はその進行速度が遅く、問題が顕在化するまでに長期間を要するため必要な措置が講じられてこなかったことなどが考えられ、一刻も早く取組を開始する必要がある。

上記の背景を踏まえ、センサーやロボット、非破壊検査技術等の活用により、生活インフラ、公共インフラ、産業インフラといった様々なインフラの損傷度等をデータとして把握・蓄積・活用することにより、早期の異常検知により事故を未然に防ぎ、最適な時期に最小限のコストによる補修によってトータルライフサイクルコストが最小化されている社会の実現が望まれる。

他方、現実にはデータを把握するためのセンサーの導入が試行的に始まったばかりであり、データの蓄積が進んでいない。また、新技術の安全性・信頼性・経済性も確立しておらず、点検・補修の大宗は人によって行われている状況にある。

このため、IT 等を活用したインフラ点検・診断システムの構築として、センサーやロボット、非破壊検査技術等による点検・補修の信頼性・経済性が実証できたところから、順次、これらの新技術を導入する必要がある。

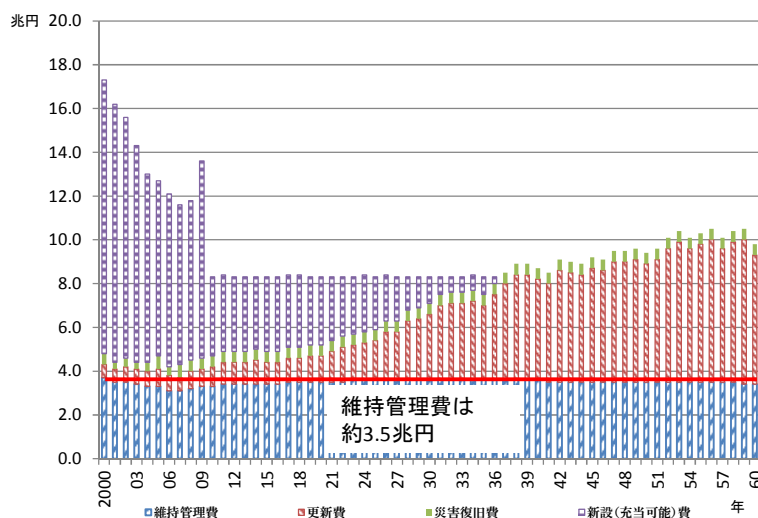
上記のようなインフラの維持・管理については、国や自治体等が抱える課題であり、急務であることから、民間企業の活動にまかせるのではなく、国等が主導して取り組んでいくべきであり、本プロジェクトを通じて、上記の課題解決に繋げていくことは NEDO として関与する意義は極めて高いと考えられる。

## 2.2 実施の効果(費用対効果)

「世界最先端IT国家創造宣言(平成25年6月14日 閣議決定)」では、劣化・損傷個所の早期発見、維持管理業務の効率化につながるセンサー、ロボット、非破壊検査等の技術の研究開発・導入を推進する。研究開発に当たっては、開発された技術が現場での導入につながるよう、ニーズや信頼性、経済性に十分配慮するなど、将来的な普及促進を見据えた研究開発を行う。さらに、センサー、ロボット、非破壊検査等の技術と大規模データ解析技術とを組み合わせることにより、世界最先端の高精度分析手法の確立に向け、2020年度までに、産官学が連携して、社会インフラの劣化状況等の把握に関する低廉かつ現場に即した技術の現場への導入を図る。これらの取組により、社会インフラの維持管理に関わる新産業の創出等につながるるとともに、2020年度までに国内の重要インフラ・老朽化インフラの20%についてセンサー等の活用による点検・補修を行うとともに、世界共通の課題となりうる社会インフラの老朽化対策について、我が国がフロントランナーとなれるよう、課題解決の成功モデルを構築し、国際展開を図る ことが示されている。

一方で、平成23年度の「国土交通省白書」では、国土交通省所管の社会資本(道路、港湾、空港、公共賃貸住宅、下水道、都市公園、治水、海岸)を対象に、過去の投資実績等を基に今後の維持管理・更新費(災害復旧費を含む。以下同じ。)を推計しており、今後の投資総額の伸びが2010年度以降対前年度比±0%で、維持管理・更新に従来どおりの費用の支出を継続すると仮定した場合、2037年度には維持管理・更新費が投資総額を上回る ことが示されている。

以上を踏まえ、今後、維持管理・更新に係る費用の推計は約3.5兆円程度で推移する予測であり、その内20%がセンサー等の活用による点検・補修を前提とした場合、約7,000億円の市場が見込まれる。あわせて、維持管理の技術者の高齢化が著しく、一定レベルの知見を有する技術者不足に対しても、センサー及びロボットの活用による課題への対応が期待される。



■2020年度までには、国内の重要インフラ・老朽化インフラの20%はセンサー等の活用による点検・補修を行うとともに、我が国が、世界共通の課題となりうる社会インフラの老朽化対策のフロントランナーとして、課題解決の成功モデルを構築し、国際展開を図る。

【世界最先端IT国家創造宣言(平成25年6月14日 閣議決定)】

図 I-2.2-1 従来どおりの維持管理・更新をした場合の推計 (平成23年度国土交通白書から抜粋)

## II. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

#### ①アウトプット目標

本研究開発は、2018年度末までに、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステム及び非破壊検査装置を開発する。なお、開発するモニタリングシステム及び非破壊検査装置は、事業終了後2年以内の実用化を目指した、妥当なコストを考慮したものとする。

(対象事業)

研究開発項目①「インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」

研究開発項目②「イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」

研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」(2)「非破壊検査装置開発」

本研究開発は、2017年度末までに、的確にインフラの維持管理を行うロボットを開発する。なお、開発するロボットは、事業終了後2年以内の実用化を目指した、妥当なコストを考慮したものとする。

(対象事業)

研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」(1)「ロボット技術開発」

研究開発項目④「ロボット性能評価手法等の研究開発」

#### ②アウトカム目標

開発するモニタリングシステム及びロボット等からのデータとインフラの損傷程度の関連付けやインフラ安全度の基準設定や導入技術の評価基準が出来ることにより、安全性を維持しつつ、低コストでインフラの維持管理を行うことが可能になる。また、こうしたインフラ維持管理・更新・マネジメント技術について2030年に約7,000億円超の市場創出が期待できる。

上記目標を達成するために、下記の「事業の計画内容」に示す①～④の研究開発項目について、基本計画(別紙)の研究開発計画に基づき研究開発を実施した。また、本研究開発の確実な成果が得られるよう、本事業とは別に実施する府省連携のインフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関する事業と連携していく。

#### 社会的背景

社会インフラの老朽化  
老朽化に対する十分な資金と高度な維持管理の専門知識を有する人材の不足  
対策は世界的課題



既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図る方法の必要性

#### 事業の目的

#### 技術による維持管理・更新の支援



- ・的確かつ迅速に状態を把握できる**モニタリング技術**の開発
- ・点検・調査を行う**ロボット技術・非破壊検査技術**等の開発

## 2. 事業の計画内容

### 2.1 研究開発の内容

#### 研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

##### (1) 研究開発の必要性

インフラの維持管理は、定期的な目視点検が基本であるが、地方自治体では財政面や人材面等の問題により十分行われていないのが実態である。また、過去に経験のない程インフラの老朽化が進んでいることから、定期点検間もインフラ構造物及びその構成部材の状態を常時・継続的・網羅的に把握する必要性が高まっている。さらに、災害時に構造物の変状を即時に把握することや目視点検で確認困難箇所の状態を把握することも必要である。

センサを活用したモニタリングシステムは、インフラの健全度を的確に把握できる技術として期待されているが、現状では試験的活用に留まっており、広く普及されていない。この理由としては、センサに対して以下の技術面での問題点が挙げられる。

- ・センシング性能が不十分なため、インフラ状態を完全に把握するには限界があり、健全度を診断することが出来ない。
- ・センサの大きさ、設置面積等による設置箇所や設置個数の制約が大きい。
- ・センサの電源や通信を有線で配線すると設置工事で大きな負担が生じる上に、設置にも最適な技術や方法がない。
- ・電池を内蔵して無線にする場合、現状のセンサや送信技術では電力消費が多く、電池交換等のメンテナンスが必要である。
- ・センサの耐久性や信頼性が不十分である。

したがって、センサを活用したモニタリングシステムの普及のカギとなるポイントは、①構造物の状態を適確に把握するために必要なセンシング性能、②センサ自身で自己動作するための、低消費電力、自立電源、無線通信機能、③センサを長期メンテナンスフリーとするための耐久性、信頼性、④センサ設置容易性(小型化等)の技術開発が必要である。

##### (2) 研究開発の具体的内容

###### (i) センサ端末開発

橋梁、トンネル、プラント等及びそれらの付帯物を対象とし、それら構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位等を計測でき、安定な接続性と信頼性がある無線通信機能を搭載したセンサ端末を開発する。これらのセンサ端末を駆動させるため、振動、熱、風、光等の環境エネルギーを利用して発電する長寿命で高効率な発電・蓄電一体型自立電源、長期耐久性や信頼性を確保するためのパッケージング技術等を開発する。

###### (ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験

(i)で開発したセンサ端末を活用した設置容易なセンサネットワークを構築し、実環境下でインフラ状態のモニタリングを行い、実用に求められるセンサ端末及びネットワークシステムの機能を検証する。

##### (3) 達成目標

本研究開発は、2016年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

###### (i) センサ端末開発

以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。

- ・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。

- ・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、地震等の突発事象を検出できるものとする。
- ・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下とする。
- ・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。
- ・実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする。

(ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験

(i) で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

なお、基本計画の目標設定にあつては、社会課題対応システム開発プロジェクト(研究開発成果等の他分野での先導研究)の結果やプロジェクト開始当時に国内外のセンサシステムの開発状況を調査し、ベンチマークを踏まえて設定している。

基本計画の目標値	根拠
振動または変位、温度計測機能	構造物の経時変化による劣化および地震や想定外の外力による突発事象を検出および、健全度診断には、振動、変位、傾斜、変形、温度等の計測が必要である。
・1回/時以上の無線通信 ・自立電源動作 ・地震等の突発事象検出	社会インフラの経時変化はそれ程急に発生するものではないので、1日数回の状態計測及び地震等の突発事象をイベントドリブンで検出できる必要がある。道路の場合、ラッシュ時の朝、夕および太陽光の影響が最も大きく、最も高温になると思われる昼と気温が最も下がる夜に計測することが必要である。
サイズ: 概ね 7cmx10cmx5cm 以下	取り付けが容易に行えるよう、作業者が片手で持ち運びおよび据え付けが可能な手のひらサイズ。
無線通信: 免許不要、通信距離 30 m 以上	広範な場所での使用が可能のように、電波法による無線局の免許が不要な周波数を使用する。また、無線の到達距離30mは、受信感度と通信距離の関係推定式をもとに、見通しが良くない屋内の品質係数にて、受信信頼性(-90dBm)が得られる距離である。
信頼性: 10 年以上	耐久性の達成目標は、現行屋外で使用されている太陽電池パネルと、厳しい信頼性が要求されている車載電子部品の信頼性に準拠するものとした。また、寿命に関しては、ユーザヒアリングで要求された 10 年以上を実環境下で達成するものとした。

表 II-2.1-1 基本計画の目標値の設定根拠 (①センサシステム)

**研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発**

(1) 研究開発の必要性

イメージング技術を用いたモニタリングシステムは、インフラ構造物をカメラで撮影し、取得した画像をデータ処理することにより、構成部材のひび割れや亀裂等を検知できることから、目視点検を補完できる技術として様々な取組が行われている。しかしながら、既存技術では、1つの構造物に対して大量に撮影しなければならないこと、取得した画像データの処理に手間がかかる、構成部材の変状しか検出できず構造物全体の状態を把握できない等の問題点がある。これらの課題を解決するようなイメージング技術の開発が必要である。

(2) 研究開発の具体的内容

(i) イメージング技術開発

橋梁、トンネル、道路、プラント等のインフラ構造物を対象として、①構造部材の画像データから完全自動で確実にひび割れや亀裂等を検出し、損傷予知を把握できるデータ処理技術及び、②構造物の全体もしくは広い範囲を遠方からカメラで撮影し、取得した画像をデータ処理することにより、それらインフラ構造物全体の変形挙動や応力集中箇所の局所的な変形分布を簡易に把握できるイメージング技術を開発する。

(ii) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験

(i) で開発した技術を用いたモニタリングシステムについて、実環境下でのインフラ状態モニタリングの実証実験を行い、実用に求められる機能を検証する。

(3) 達成目標

本研究開発は、2016年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

(i) イメージング技術開発

- ① 完全自動により画像データから0.2mm以上のひび割れ等を8割以上の確率で判別できる画像処理手法を開発し、実証する。
- ② 撮影時の位置ずれを補正でき、平面のみならず、奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法を開発し、実証する。なお、1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。

(ii) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験

(i) で開発したイメージング技術を用いて、インフラ状態をモニタリングするシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

なお、基本計画の目標設定にあっては、プロジェクト開始当時に国内外のイメージング技術の開発状況を調査し、ベンチマークを踏まえて設定している。

基本計画の目標値	根拠
画像データから0.2mm以上のひび割れ等を8割以上の確率で判別	国土交通省通達「土木コンクリート構造物の品質確保について」において、ひび割れ発生状況調査要領として0.2mm以上のひび割れ幅について展開図および対応する写真撮影を行うこととしている。幅0.2mmのひび割れは、人目でも判断に迷う事例が1/4ほど存在する。そのため、人目での判断をやや上回る8割以上を目標とすることとした。
平面／奥行きの変形を計測、支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測	国土交通省の橋、高架の道路等の技術基準より、橋のたわみの許容値は支間長(10m以下)の1/2000であり、その1/10の精度(1/20000)で変位を計測できる必要がある。道路橋は、2m以上のものが70万橋、15m以上は15万5千橋であり、大部分は15m以下である。よって、支間長の2万分の1の変位および、15m以上の構造物を計測できることを目標とした。

表Ⅱ-2.1-2 基本計画の目標値の設定根拠 (②イメージング技術)

**研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発**

(1) 研究開発の必要性

高度成長期を中心に大量に整備された社会インフラや産業インフラが老朽化して一斉に更新時期を迎えるのに対し、それらの長寿命化を図るためには適切な維持管理を行う必要があるが、維持管理に必要な財源や専門人材が不足している現状では、ロボットを活用した経済的な維持管理技術を研究開発する必要がある。

また、適切な維持管理には、従来人間が立ち入れない箇所での点検も必要となり、特に筐子トンネル天井板落下事故以降に国土交通省が実施している「総点検」の実施要領では、従前の点検箇所・点検方法からの内容強化が図られていることから、ロボットを活用した点検への期待が大きくなっている。

さらに、インフラの構造は総じて大規模であり、今後、目視や打音検査に加えて非破壊検査が必要となる機会が増大すると考えられることから、ロボットに搭載可能な非破壊検査装置を開発する必要がある。

(2) 研究開発の具体的内容



(i) ロボット技術開発

「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」(国土交通省、経済産業省、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(独)産業技術総合研究所、(独)土木研究所)が平成25年12月に公表した「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入における重点分野」が指定するロボット技術を開発する。

開発の検証評価は、国土交通省平成25年12月25日付け報道発表資料「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」を策定致しましたの「別紙3 現場検証及び開発評価に係る体制・スケジュールについて」に掲載される「ロボット現場検証委員会(仮称)」の下で行う。

なお、これらの重点分野や評価体制は、当該検討会での議論を経て改定等が行われた場合には、改訂後の内容に準じる。

(ii) 非破壊検査装置開発

上記のロボット技術開発で開発されるロボットへ搭載可能な非破壊検査装置を開発する。

(3) 達成目標

(i) ロボット技術開発

本研究開発は、2015年度末までに、概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実用化開発、実証実験を中心に実施する。

「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入における重点分野」が指定する維持管理業務について、従来の作業員による点検や重機を用いた作業と同程度のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発し、「ロボット現場検証委員会」の評価の下、実証実験を行う。

(ii) 非破壊検査装置開発

本研究開発は、2016年度末までに、概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実証実験を中心に実施する。

上記のロボット技術開発で想定されるロボットへの搭載可能な非破壊検査装置を開発する。開発する装置は、X線や赤外線等を検査光源とし、正確な計測を可能にするために必要と考えられる光源数を搭載する。また、ロボットに搭載可能なサイズ、重量とし、検査対象の健全性を診断するための検査精度を備えたものとする。さらに、稼働寿命は2万時間以上とし、検査光源に対する安全性を十分に考慮したものとする。

**研究開発項目④ ロボット性能評価手法等の研究開発**

(1) 研究開発の必要性

ロボット開発が進むことにより、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図り、インフラ維持管理・更新等における財政問題及び人材・技術不足の解決が期待される。

しかしながら、開発されるロボットは多様であるうえ、経済性が優先されるとともに、操縦者の目視内を想定したロボットが大半であり、より確実な実用化のためには、各種ユースケースに応じた適切な性能と安全性を備える必要がある。

そのため、性能及び安全性の評価軸、評価軸に沿った性能レベル(数値)、それを測定するための標準的試験方法を研究開発する。

(2) 研究開発の具体的内容

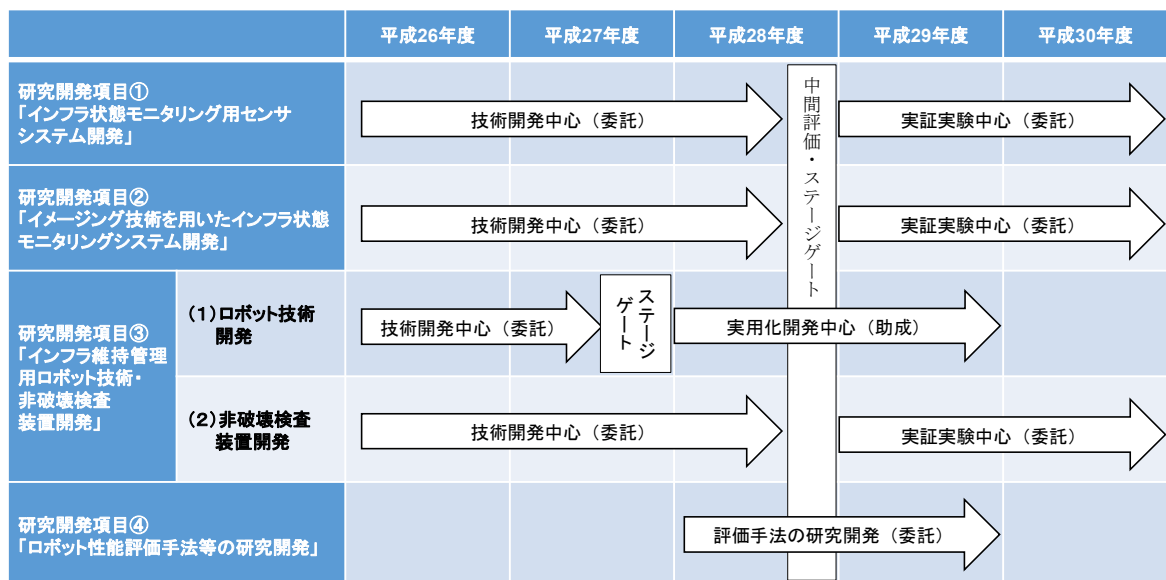
対象とするロボットの分野は、①無人航空機を活用した物流分野、②無人航空機及び水中ロボットを活用したインフラ点検分野、③無人航空機及び陸上ロボットを活用した災害対応分野とし、ユースケースごとに、既存のロボットによる各種試験を行った後、結果データを基に求められる性能レベルを設定し、それを踏まえて開発されたロボットによる各種試験を実施する。このサイクルを繰り返すことで、最適な性能評価手法等を研究開発する。

- (i) 各種ロボットの性能評価基準の策定等  
各種ロボットの性能評価基準・安全基準・整備基準・安全管理統制基準(オペレータの操縦資格基準等)及びその検証・検定手法の調査・研究開発を実施する。
- (ii) 各種ロボットの試験等  
既存のロボットによる各種試験(衝突実験等)の複数回の実施及び(1)の性能評価基準等を導入した各種ロボットの試験等を実施する。

(3) 達成目標

各種ロボットの運用に必要とされる性能や操縦技能等に関する評価基準やその検証方法を明らかにし、標準化の方策を含め検討する。

本プロジェクトの研究開発スケジュールを図Ⅱ-2.1-1に示し、各研究開発項目①～④の執行額(H28年度は契約または交付決定額)を表Ⅱ-2.1-3に示す。



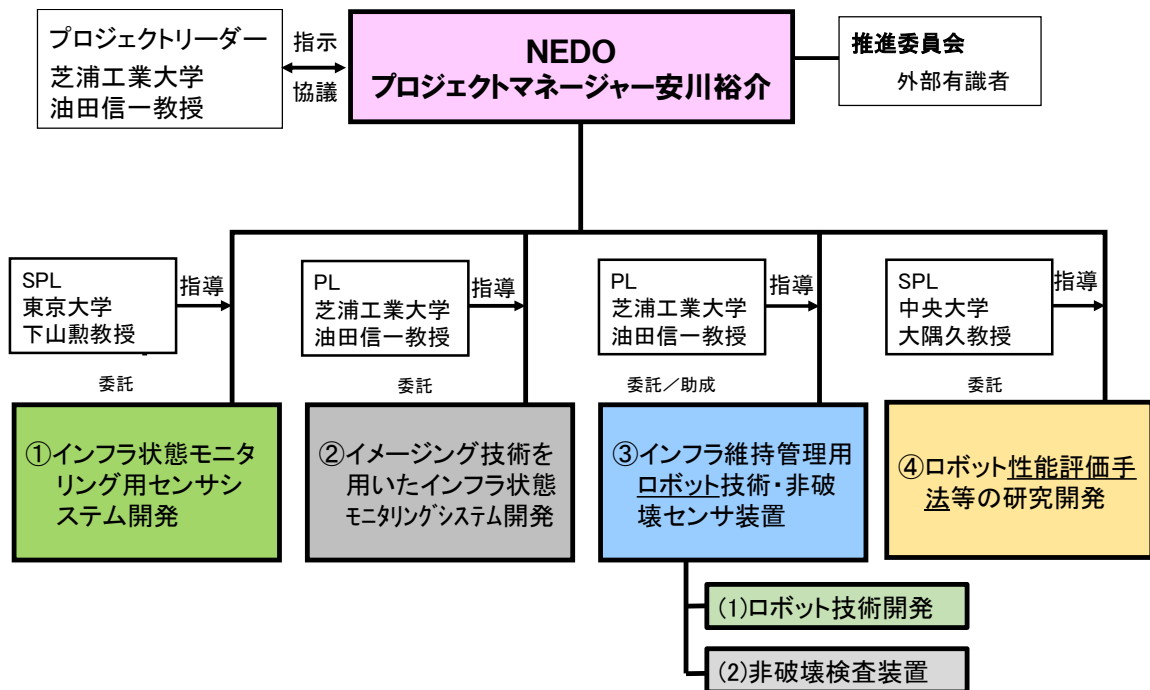
図Ⅱ-2.1-1 研究開発スケジュール

研究開発項目	／億円			
	H26	H27	H28	合計
①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発	7.2	12.7	10.1	30.0
②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発	0.6	0.6	0.6	1.8
③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発	7.8	8.6	4.8	21.3
(1)ロボット技術開発	7.0	7.6	3.6	18.2
(2)非破壊検査装置開発	0.8	1.0	1.2	3.0
④ロボット性能評価手法等の研究開発	0	0	1.9	1.9
合計	15.7	21.9	17.4	55.0

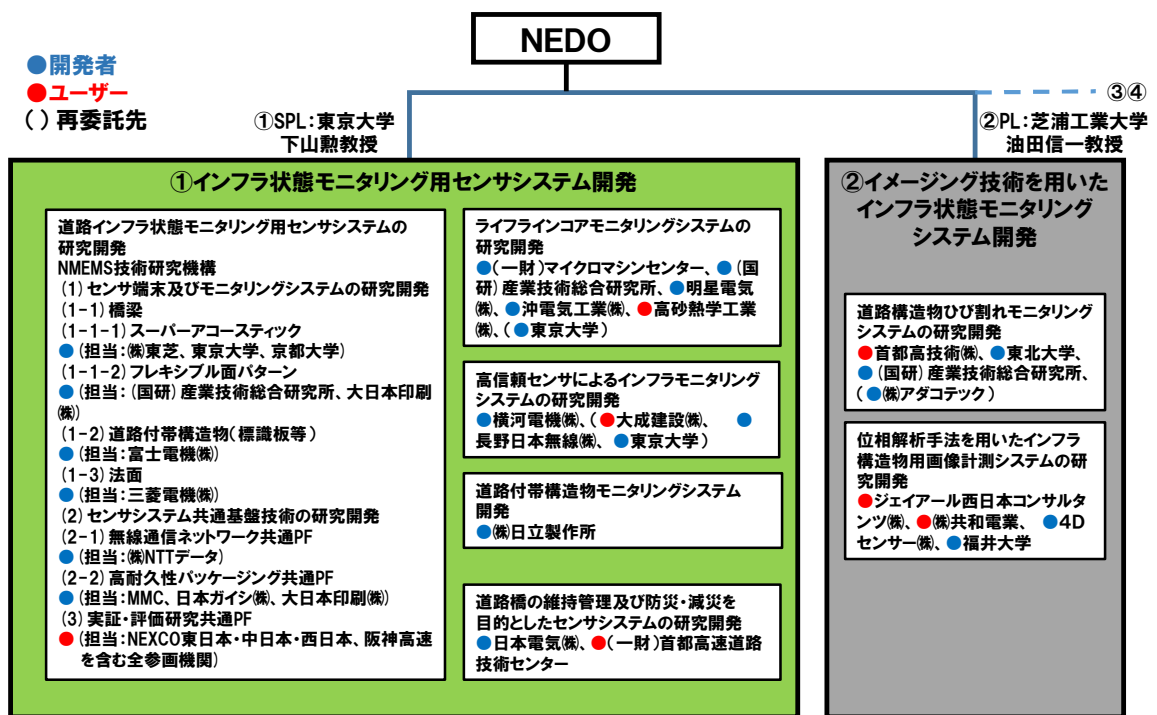
表Ⅱ-2.1-3 各研究開発項目の執行額 (H28年度は契約または交付決定額)

## 2.2 研究開発の実施体制

本プロジェクト全体の実施体制をを図Ⅱ-2.2-1 に示し、各研究開発項目①～④の実施体制を図Ⅱ-2.2-2、図Ⅱ-2.2-3、図Ⅱ-2.2-4に示す。



図Ⅱ-2.2-1 プロジェクト全体の実施体制



図Ⅱ-2.2-2 ①センサシステム及び②イメージング技術の実施体制

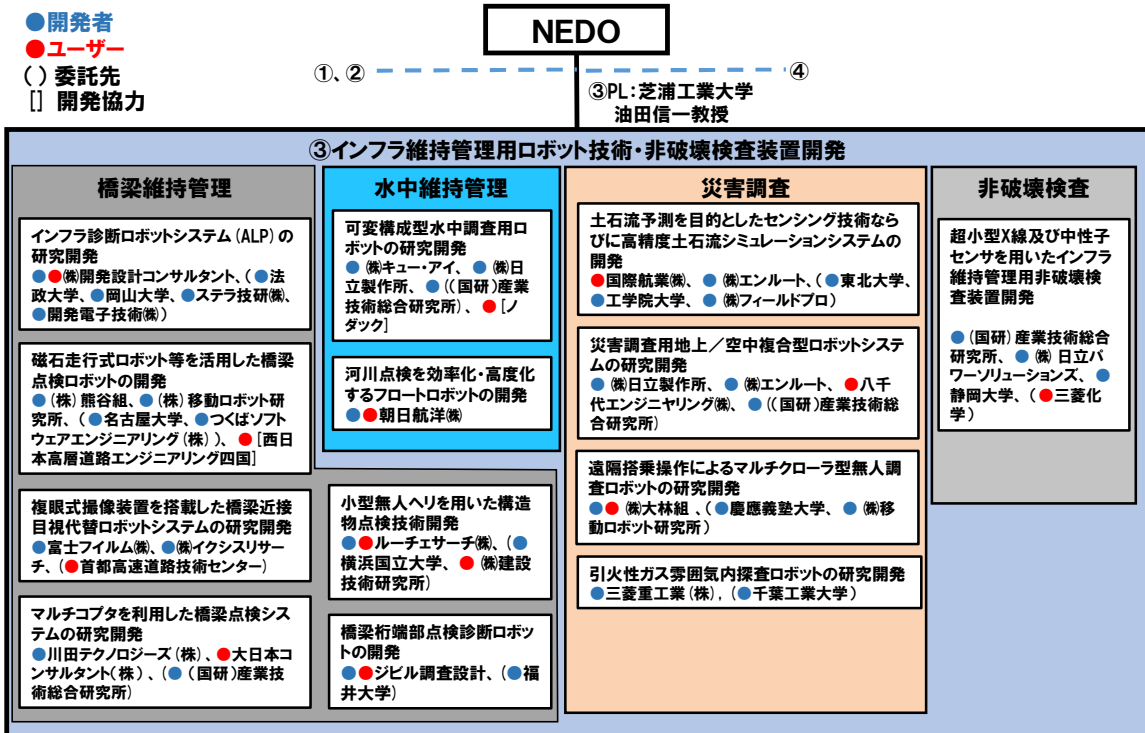


図 II -2.2-3 ③ロボット技術・非破壊検査装置の実施体制

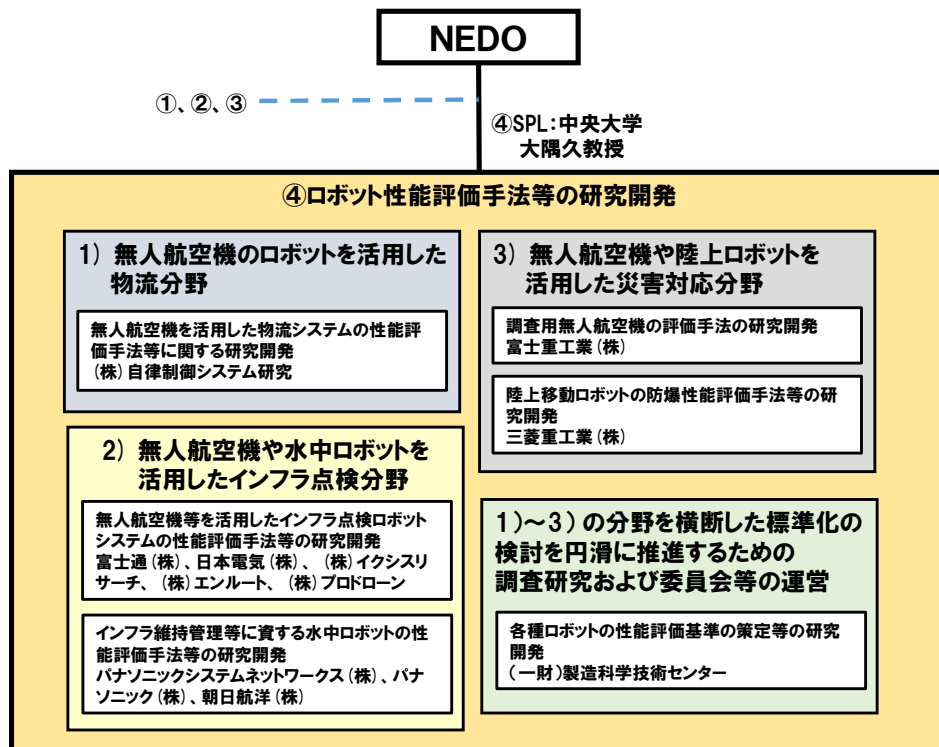


図 II -2.2-4 ④ロボット性能評価手法等の実施体制

## 2.3 研究開発の運営管理

研究開発項目毎の運営管理に関してそれぞれ以下に示す。

### ①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発、②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

#### 2.3. ①②-1 研究開発の進捗管理

		26年度	27年度	28年度
進捗報告会		▲第1回	▲第2回	▲第3回
個別 テーマ 定例 研究会	技術研究組合 NMEMS技術研究 機構	【月一回定例研究会】	▲契約延長 ▲加速	▲契約変更
	MMC	【月一回定例研究会】	▲契約延長 ▲加速	
	日立	【月一回定例研究会】	▲契約延長	
	横河	【月一回定例研究会】	▲契約延長 ▲加速	
	NEC	【月一回定例研究会】	▲契約延長	
	福井大	【四半期定例研究会】	▲契約延長	▲契約変更
	首都高	【四半期定例研究会】	▲契約延長	
	現地進捗確認委員会			▲▲▲ ▲▲▲▲
サイトビジット		▲▲▲▲ ▲▲		
ステージゲート審査会			▲11/1-2	
イベント等		▲4/22-24 NMB展	▲9/14-16 MSN展	

表Ⅱ-2.3-1 報告会及び委員会等の実施スケジュール(①センサシステム、②イメージング技術)

委員会・会議等	目的・内容
進捗報告会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 半期毎に開催するテーマ毎の開発評価会であり、全事業者が個別の開発進捗及び事業の見通しを報告する発表形式の進捗報告会。</li> <li>■ PL、SPLからの質疑とコメントを通じて開発の方向性を確認し、また効果的な開発となるようにアドバイスを受けることが目的。</li> </ul>
個別テーマ定例研究会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 個別テーマの実施者内において、定期的開催する研究検討会。より具体的な進捗をこまめにチェックするとともに、実施者間の円滑な連携を図る。</li> </ul>
現地進捗確認委員会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ おおむね研究開発を完了させるプロジェクト3年目(H28年度)に、事業者代表からPL、SPL、PM及び技術委員に対し、研究進捗を報告するとともに、実証実験現場を見学。</li> <li>■ 外部委員の視点加わることにより、実証実験及び実用化に向けての課題の早期抽出につなげる。</li> </ul>
サイトビジット	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 研究開発の実施場所や現場実証実験において、PL、PM等が、研究開発実施者等に対して研究進捗を確認。出口を見据えた事業戦略等について意見交換を実施し、課題の共有化等を図る。</li> </ul>

表Ⅱ-2.3-2 委員会、会議等の目的及び内容(①センサシステム、②イメージング技術)

### 2.3. ①②-2 ステージゲート審査

「①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」の5テーマ及び「②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」の2テーマに関する、平成26～28年度(10月末まで)における「開発の進捗状況」及び「今後の事業期間内の実現性」について、外部有識者による評価(ステージゲート審査)を実施し、各テーマの「継続」、「中止」または「一部中断」について審査を行った(実施日:平成28年11月1日～2日)。

### 2.3. ①-3 開発促進財源の投入

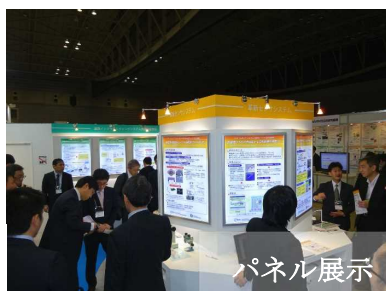
「①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」の5件(3テーマ)に対し、研究開発の加速及び実用化の促進を目的に開発促進財源(追加予算)を投入し、以下の成果を得ている。

件名	年度	目的	成果
1-1: NMEMS (Pilot-RIMS の開発)	H27	セキュリティ上実際に接続できない各高速道路会社システムとの接続可能性を事前に検証、課題の抽出を行い、プロジェクト終了後のシステム導入、実用化を加速。	高速道路会社のシステムを模擬する統合システムの試作が完了し、平成28年度以降の実証実験において、システム運用時の課題抽出と早期解決を期待。
1-2: NMEMS (インフラモニタリングセンサ同期用原子時計の適用可能性検証)	H27 H28	長大橋等のモニタリングにおいて課題となる時刻同期方法について、原子時計の適用可能性を検証するとともに、必要な技術要件を明らかにし、プロトタイプを試作。	インフラモニタリングセンサ用の原子時計として、必要な技術要件が明確となり、実現への技術ロードマップを策定。また、プロトタイプを試作し、技術的実現性を示した。
2-1: MMC (ScAlN 専用スパッタ装置導入)	H27	ポンプ振動を振動元とする振動発電において、AlN 圧電デバイスの10倍の発電量が期待できる ScAlN 圧電デバイスを開発。	装置導入により、ポンプ振動が小さいものに対しても、十分な発電量が期待できるとともに、量産に目処。
2-2: MMC (カスタム IC 回路設計の前倒し)	H27	ポンプ機実機の振動条件での予備実証を早い段階で行うため、研究開発を前倒し。	当該開発を前倒ししたことにより、平成28年度にポンプ機実機での実験が可能となり、実験が加速。
3: 横河電機 (加速度センサ評価用振動試験器の導入及びソフトウェア外注等)	H27	振動試験器の導入および、データ収集ソフトウェアの作成を行うことにより、研究開発を効率化。	当初、振動試験は外注にて行う計画であったが、当該試験機を導入することにより、各種手続きが省略され、また、データソフトウェア作成の外注等により、全体でおおよそ半年程度の研究前倒し効果が得られた。

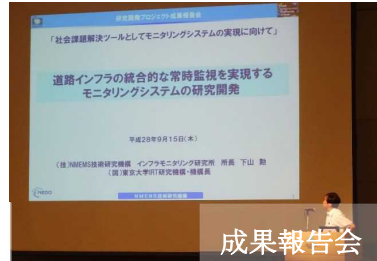
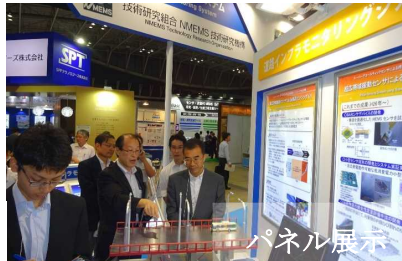
表 II-2.3-3 開発促進財源案件(①センサシステム)

### 2. 3. ①②-4 広報活動

平成 27 年度には「ナノマイクロビジネス展」、平成 28 年度には「MEMS センシング&ネットワークシステム展」に出展するなど、事業の取組み状況や成果を紹介した。また、併設する会場では、事業の成果報告会も開催し、プロジェクトの研究開発状況や成果、将来像を発表した。



ナノマイクロビジネス展（パシフィコ横浜 平成 27 年 4 月 22 日～24 日）



MEMS センシング&ネットワークシステム展（パシフィコ横浜 平成 28 年 9 月 14 日～16 日）

### 2. 3. ①-5 知的財産管理体制の構築

知的財産権委員会を設置し、知財ポリシーの策定、知的財産権の帰属、知的財産の管理・活用について、事業全体の目的を達成するための連携を生かした戦略、合理的なルール確立を行った。

研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発

2. 3. ③-1 研究開発の進捗管理

	26年度	27年度	28年度
ロボット開発評価委員会			▲
推進委員会			
全体連絡会			
進捗報告会			
現場実証実験	▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲	▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲	▲▲▲▲▲▲▲▲▲▲
サイトビジット	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲▲
ステージゲート, 追加公募関係		1/27-29ステージゲート委員会	追加 採択 公募 審査会
イベント等	▲ 10/15-17 Japan Robot Week	▲ 9/3-5 ロボット学会 ▲ 12/3-5 国際ロボット展	9/7-9 ロボット学会
契約関係	▲ 採択審査 ▲ 契約	SG審査 交付決定通知	▲ 追加採択審査 ▲ 交付決定通知

表Ⅱ-2.3-4 報告会及び委員会等の実施スケジュール (③ロボット)

委員会・会議等	目的・内容
ロボット開発評価委員会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 本事業は、経済産業省及び国土交通省との連携事業であり、上位委員会として「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」が存在。</li> <li>■ その下で、ロボットシステムの開発を討議する委員会として「ロボット開発評価委員会」を経済産業省及びNEDOが事務局として有識者を招へいし年度末に開催。</li> <li>■ 当該年度の開発内容を審議し、次年度の研究開発の方針を決定。</li> </ul>
推進委員会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ PJの年度運営計画を審議するための計画検討会であり年に1回開催。</li> <li>■ 有識者により組織する技術委員の前で、PM及びPLが年度報告および年度計画を報告。</li> <li>■ 技術委員が運営の妥当性を確認し助言を提示。現場実証実験やステージゲートの進め方、事業者の追加公募の妥当性等について検討。</li> </ul>
全体連絡会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 各年度当初等に実施者全社を集め、PJの年度方針や運営計画についてNEDOから発信。</li> <li>■ 質疑を通してPJ内容の理解を深め、新たに開始する実証実験計画及び自治体との連携についてNEDOから報告。</li> <li>■ H27年度は、助成事業に移行する際に変更となる経理処理やステージゲートの案内、提出物の注意事項等の事務処理を連絡し疑問点を事前に解消。</li> </ul>
進捗報告会	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 半期毎に開催するテーマ毎の開発評価会であり、全事業者が個別の開発進捗及び事業の見通しを報告する発表形式の進捗報告会。</li> <li>■ NEDO技術委員からの質疑とコメントを通じて開発の方向性を確認し、また効果的な開発となるようにアドバイスを受けることが目的。</li> </ul>

表Ⅱ-2.3-5 委員会、会議等の目的及び内容 1/2 (③ロボット)



委員会・会議等	目的・内容
現場実証実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>■開発するシステムは、最終使用場所として事業中のインフラ施設であるため、実務環境での機能・性能の発揮が求められる。このため、初期から実際の現場において動作試験を行い課題を抽出しつつ改良を進めることが有用なシステムを完成させることにつながる。</li> <li>■国土交通省が「現場実証」事業を進めていた期間は、国交省設定の現場で動作実験を実施。その後は、NEDOが実証現場を設定して、動作実験場所を提供する予定。なお、事業者が自主的に実験現場を設定し、実験を繰り返す場合も多数。</li> </ul>
サイトビジット	<ul style="list-style-type: none"> <li>■研究開発の実施場所や現場実証実験において、PL、PM等が、研究開発実施者等に対して研究進捗の確認、出口を見据えた事業戦略等について意見交換を実施し、課題の共有化等を図る。</li> </ul>
キックオフ ミーティング	<ul style="list-style-type: none"> <li>■新規事業の開始時及び追加公募による新規事業者の加入時に、PJ内容の理解を図り、また、年間の事業内容を案内及び事務処理について説明。</li> </ul>

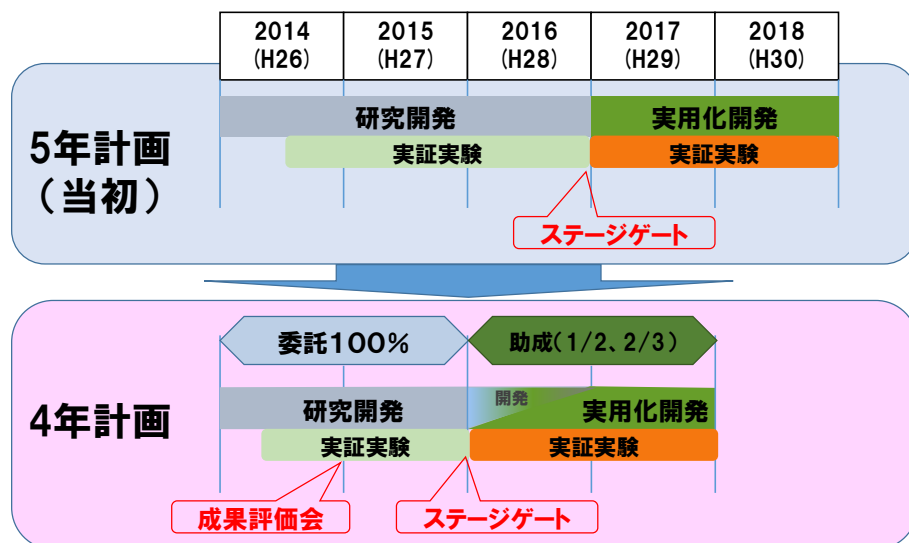
表Ⅱ-2.3-5 委員会、会議等の目的及び内容 2/2 (③ロボット)

### 2.3. ③-2 事業計画の見直し、追加採択及びステージゲート審査

「③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(1)ロボット技術開発」は、平成 26 年度のプロジェクト開始当初、5年間の委託事業であったが、実用化を加速すべく、平成 28 年度に事業期間を1年短縮して4年間とし、事業者が主体となる「助成事業」へ移行した。

また、全11テーマに関する平成 26～27年度における「開発の進捗状況」及び「今後の事業期間内の実現性」について、外部有識者による評価(ステージゲート審査)を実施し、各テーマの平成 28 年度(助成事業)への継続の可否について審査した結果、2テーマの中止を決定している。(実施日:平成 28 年 1 月 27 日～29 日)。さらに、平成 28 年度には、インフラを維持管理するロボットの実用化体制を強化するため追加公募を実施し、採択委員の厳正な審査の結果、4テーマのロボットを新たに採択している。

「(2)非破壊検査装置開発」については、平成 26 年度～28 年度(10 月末まで)における「開発の進捗状況」及び「今後の事業期間内の実現性」について、外部有識者による評価(ステージゲート審査)を実施し、各テーマの「継続」、「中止」または「一部中断」について審査を行った(実施日:平成 28 年 10 月 17 日)。



図Ⅱ-2.3-1 事業計画の見直し及びステージゲート審査(③ロボット)

### 2. 3. ③-3 開発促進財源の投入

「③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(1)ロボット技術開発」の4テーマに対し、研究開発の加速および実用化の促進を目的に開発促進財源(追加予算)を投入し、以下の成果を得ている。

件名	年度	目的	成果
東北大学 (土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発)	H27	空撮による3D地図作成技術に対し、地表設置マークを用いた地図の高機能化技術の開発を加速。	ユーザのニーズにより、撮影高度を設定して地図の詳細化と処理高速化のトレードオフを選択できる高機能化技術を開発。
ハイボット (水中構造物の近接目視等を位置計測しつつ安定に実施可能なテザー伸展操舵型ROVの研究開発)	H27	実証実験を早期に重ねて開発を加速。	複数の実証実験の繰返しの結果、除藻ブラシや設置高速化のための注水技術を確立。
三菱重工業 (引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発)	H27	機構の開発を加速し、平成27年度中に防爆機構を完成させ、平成28年度には防爆認定に注力。	機構の開発を早期に終了し、平成28年度には防爆認定を取得。
富士フイルム (複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発)	H27	懸垂型のアクセス性と安定性の向上を期待し、走行可能橋の対象を拡大。	懸垂走行部をモジュール化して、対象橋の構造やサイズに適合させて設置可能とし、点検可能な対象橋梁数を拡大。

表Ⅱ-2.3-6 開発促進財源案件(③ロボット)

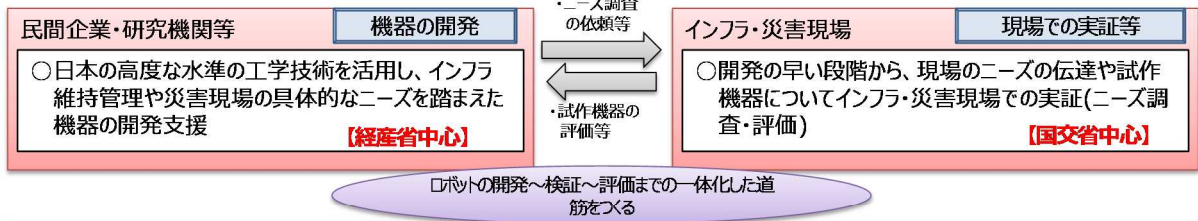
### 2. 3. ③-4 現場実証の実施(国土交通省との連携)

経済産業省及び国土交通省では、社会インフラの維持管理及び災害対応に関して、その効果及び効率の一層の向上のため、それらを支えるロボットの開発・導入を推進すべく、平成25年7月16日「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を設置した。

また、インフラ管理者及び災害対応経験者等への現場ニーズ調査や、国内外の異分野を含めた技術シーズ調査の結果を、平成25年12月25日に「社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」として策定している。

さらに、平成26、27年度において国土交通省では、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入に向けた現場実証」にて、維持管理(橋梁、トンネル、水中)及び災害対応(調査、応急復旧)に役立つ技術として現場検証及び評価を対象とする「ロボット技術・ロボットシステム」を募集し、実際の社会インフラを用いた現場実証を実施している。本事業の事業者においても、当該事業の実証の場を通じて実用性を確認し、その結果を改良することで、社会課題を解決するシステム開発に繋げるとともに、実用システムとして認定されるという戦略的な事業展開を行っている。

・経済産業省の機器開発と国土交通省の現場実証が連携し、ロボットの開発・検証・評価まで一体的な体制を構築。



『次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野』（平成25年12月25日 国土交通省・経済産業省公表）  
 国土交通省と経済産業省において、重点的に開発支援する分野を特定（平成26年度から開発支援）

(1) 維持管理 (2) 災害対応

<p>○橋梁</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・近接目視の代替ができる装置</li> <li>・打音検査の代替ができる装置</li> <li>・点検者を点検箇所に近づける作業台車</li> </ul> <p>○トンネル</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・近接目視の代替ができる装置</li> <li>・打音検査の代替ができる装置</li> <li>・点検者を点検箇所に近づける作業台車</li> </ul> <p>○河川及びダムの中筒所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・堆積物の状況を全体像として効率的に把握できる装置</li> <li>・近接目視の代替ができる装置</li> </ul>	<p>○災害状況調査（土砂崩落、火山噴火、トンネル崩落）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・土砂崩落及び火山災害現場において、高精細な画像・映像や地形データ等の取得ができる装置</li> <li>・土砂崩落及び火山災害現場において、含水比や透水性等の計測等ができる装置</li> <li>・トンネル崩落において、引火性ガス等に係る情報の取得ができる装置</li> <li>・トンネル崩落において、崩落状態や規模を把握するための高精細な画像・映像等の取得ができる装置</li> </ul> <p>○応急復旧（土砂崩落、火山噴火）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・応急復旧ができる技術</li> <li>・排水作業の応急対応ができる技術</li> <li>・遠隔・自律制御にかかわる情報伝達ができる技術</li> </ul>
--	---

図 II-2.3-2 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野

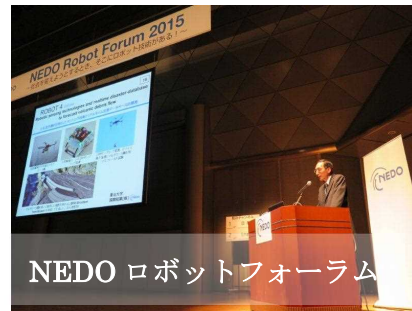
### 2.3. ③-5 広報活動

平成27年度には「国際ロボット展」への出展や併設する会場にて「NEDO ロボットフォーラム」を開催した。また、平成27、28年度には「日本ロボット学会学術講演会」のオーガナイズドセッションにおいて、各事業者から発表を行うなど、事業の取組み状況や成果を紹介した。



ブース全景

国際ロボット展（東京ビッグサイト 平成27年12月2日～5日）



NEDO ロボットフォーラム



日本ロボット学会学術講演会（山形大学 2016年9月7日～9日）



研究開発項目④ ロボット性能評価手法等の研究開発

2. 3. ④-1研究開発の進捗管理

委員会等		H28.7～9月	H28.10～12月	H29.1～3月
事業関係	ロボット性能評価委員会	▲第1回	▲第2回	▲第3回 ▲第4回
	テストフィールドに関するWG			▲第1回 ▲第2回
	無人航空機に関するWG		▲第1回 ▲第2回	▲第3回 ▲第4回
	標準化に関するWG		▲第1回 ▲第2回	▲第3回
	データベースに関するWG		▲第1回 ▲第2回	▲第3回 ▲第4回
委託先関係	プロジェクト全体会議	▲第1回		▲第2回 ▲第3回 ▲第4回
	定例会議		▲ ▲	▲ ▲ ▲ ▲
イベント等(福島テストフィールド関連)		福島テストフィールド仕様検討会(第1回)●		●現地視察会、中間報告会(福島)● ●第2回 ●第3回

表Ⅱ-2.3-7 報告会及び委員会等の実施スケジュール (④性能評価手法)

委員会・会議等		目的・内容
事業関係	ロボット性能評価委員会	■各WG及び各分野で設置された推進委員会の活動を踏まえ、「性能評価基準」及び「試験設備提案」を策定する委員会。
	テストフィールドに関するWG	■福島ロボットテストフィールド(RTF)の施設整備スケジュールに同期して、「性能評価基準」及び「試験設備提案」を図るため、福島県及び南相馬市との連携によるWG。
	無人航空機に関するWG	■無人航空機を活用する3分野(物流、インフラ点検及び災害対応)に共通する評価基準を策定するWG。
	標準化に関するWG	■策定した評価基準を国際標準化へ繋げるためのWGであり、中長期ロードマップの策定、具体的な標準化活動提案を担う。
	データベースに関するWG	■全分野に共通するデータ管理及び運用に関して、RTFに要する規模や活用要件を明確化し、データサーバの構築方針を策定するWG。
委託先関係	プロジェクト全体会議	■全分野の事業者が進捗報告を行い、全コンソにて情報共有を図る会議。
	定例会議	■NEDO及び各コンソが定期的に情報共有を図るための会議。
イベント等		<p>■11/6の福島県主催のイベント(ドローン大会)に参画するとともに、11/7にはRTF現地視察会及び地元企業等とのシンポジウムを実施予定。</p> <p>■H28年度末に策定予定の「性能評価基準」及び「試験設備提案」に関連したイベントをH29.3に開催予定。</p>

表Ⅱ-2.3-8 委員会、会議等の目的及び内容 (④性能評価手法)

## 2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

「①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」、「②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」及び「③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」においては、社会課題に対応するシステム開発に繋げるため、目標設定、体制構築、技術開発・検証評価・改良等の事業運営に関して、研究開発の実用化に向けた以下のマネジメントを実施している。

### (1) 実現場での実現性・実用性が見込まれる技術を開発

現場で役に立つシステムの開発に繋げるため、ユーザ要求に基づく実用的な運用方法とその目標値を達成目標として設定する。

### (2) コア技術の開発及びそれを用いたシステムを構築し現場で実証実験を実施

現場を支援するための技術を開発し、現場で動作させ評価を行うとともに、実用化開発と実証試験を行える体制を構築する。なお、コア技術とは、①センサシステムではセンサーデバイス、③(1)ロボット技術ではロボットを指す。

### (3) 技術を開発するメーカーとそれを受取るユーザを含む開発体制

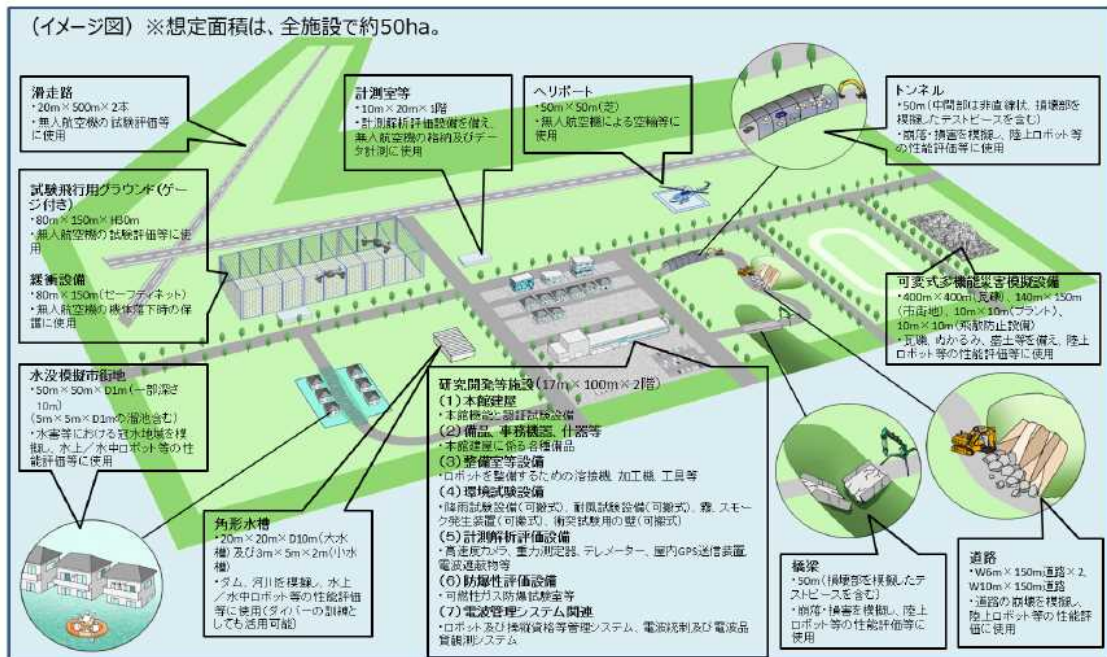
ユーザが実用性を評価し、抽出した課題を連携して研究開発するために、現場でシステムを使用するユーザを研究体制に含め、ニーズや現場の提供を行う。また、実証フィールドを用いた実証試験と検証評価を行いつつ技術の改良を進める。

## 3. 情勢変化への対応

平成 26 年 6 月、「イノベーション・コースト構想研究会」において、ロボット技術に関連する研究開発・実証等を苗床とした新たな産業集積を整備することで、新たな雇用の場を創出し、ひいては浜通り地域の復興を目指す「イノベーション・コースト構想」を取りまとめられた。また、平成 28 年 1 月には、経済産業省及び福島県との間で「福島イノベーション・コースト構想に係るロボットテストフィールド及び国際産学官共同利用施設(ロボット)の整備及び運営に関する協定」が締結され、今後の両拠点の整備・運営の方向性、役割分担などが確認された。

さらに、平成28年3月、「ロボットテストフィールド・国際産学官共同利用施設(ロボット)活用検討委員会」の中間整理が纏められ、ロボットに関して既存の試験施設にない機能を備えた実用的な「ロボットテストフィールド(RTF)」の必要性とともに、3分野のロボットに対して「各種ロボットに求められる性能」及び「それを備えていることを確認するために必要な独自の施設」の重要性が示された。

上記の情勢変化を受け、①無人航空機を活用した物流分野、②無人航空機及び水中ロボットを活用したインフラ点検分野、③無人航空機及び陸上ロボットを活用した災害対応分野の3分野に関して、ユースケースごとに既存のロボットによる各種試験を行った後、結果データを基に求められる性能レベルを設定し、それを踏まえて開発されたロボットによる各種試験を実施する「④ロボット性能評価基準の研究開発」を平成 28 年度から早期に立ち上げ、公募及び採択(平成 28 年 6 月 22 日)に繋げた。



図Ⅱ-3-1 ロボットテストフィールドの整備イメージ  
(ロボットテストフィールド・国際産学官共同利用施設(ロボット)活用検討委員会の中間整理から抜粋)

テーマ	求められる性能	独自の要素	
1. 無人航空機を活用した物流分野	物流のための無人航空機	積載重量や外乱(雨、風)があっても、安全に、確実に目的地まで移動可能。	
2. 無人航空機及び水中ロボットを活用したインフラ点検分野	橋梁点検のための無人航空機	外乱(風、雨)下でも、橋梁のひび割れの画像データ等を精度良く取得可能。	夜間も飛ばすことができ、周辺に家屋がない等、落下しても安全なフィールドがある。
	ダム・河川点検のための水中ロボット	外乱(水流やにごり等)下でも、水中構造物の画像データ等を精度良く取得可能。	雨や風を模擬した環境下で、橋梁のひび割れを模擬したテストピースの点検ができる。
3. 無人航空機及び陸上ロボットを活用した災害対応分野	火山・土砂崩落等の災害調査のための無人航空機	外乱(雨、風)下でも、火山・土砂崩落等の災害状況を短時間で広範囲にデータ取得可能。	水流やにごりを模擬した環境下で、ダム・水中構造物のひび割れを模擬したテストピースの点検ができる。
	土砂、トンネル崩落等の災害調査のための陸上ロボット	外乱(引火性ガス、不整地等)下でも、土砂崩落・トンネル崩落等の災害状況を短時間で広範囲にデータを取得することができる。	雨や風を模擬した環境下で、火山・土砂崩落等の災害を模擬したテストピースの調査ができる。
		霧や煙を模擬した環境下で、火山・トンネル崩落等の災害を模擬したモックアップの調査ができる。	

表Ⅱ-3-1 各種ロボットに求められる性能及び必要な独自の施設  
(ロボットテストフィールド・国際産学官共同利用施設(ロボット)活用検討委員会の中間整理から抜粋)

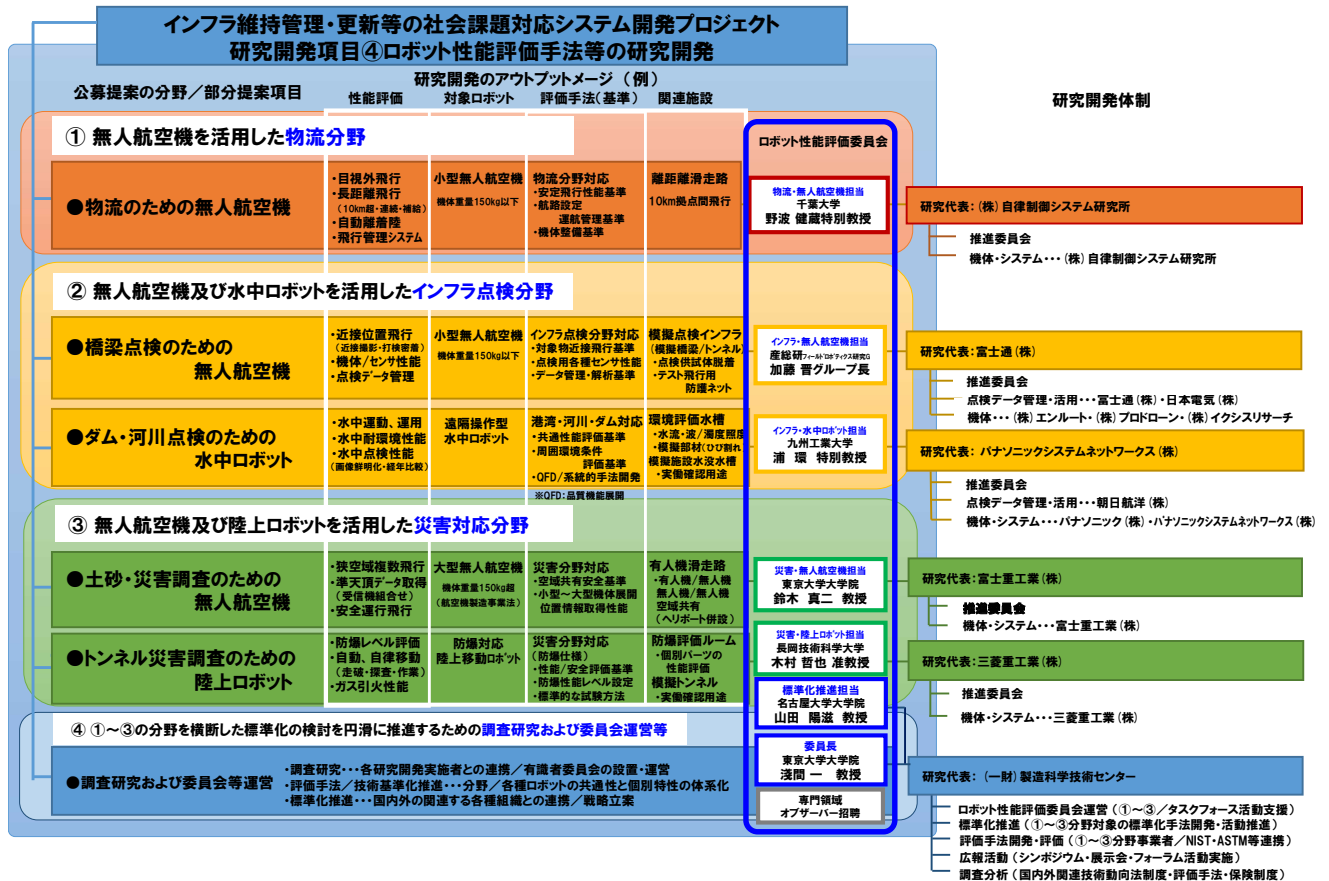


図 II -3-2 ④ロボット性能評価基準の研究開発の実施体制



図 II -3-3 ④ロボット性能評価基準の研究開発の研究内容 1 / 3

### (3) 水中ロボットを活用したインフラ点検分野

**インフラ点検分野における水中ロボットの活用**

インフラ点検を対象とし、特に水中ロボットを用いて行う港湾・河川・ダム等の点検を対象に、インフラ点検に実績を有する事業者が水中ロボットの運動性能・耐環境性能に関する評価手法を開発しつつ、ユーザー・管理者の性能要求を満たす性能評価手法を開発する。

**港湾/河川/ダム + 機体 → システム → データ管理の手法開発**

	港湾	河川	ダム
外部所有者			
測量コンサル 朝日航洋			
機体・センサ メーカー パナソニック			

区分	項目	観目
性能指標	運動性能	推進力、速度、回頭性、安定性
	運用性	連続稼働時間、測位条件、操縦性
	センシング	絶対精度、相対精度、解像度、姿勢記録
環境条件	気象条件	天候、気温、風速
	河川条件	水温、水流、濁度、波高
	点検条件	水深、水流、濁度、照度

**性能評価手法の体系化・標準化への取組み**

1 要求品質展開作成  
2 品質水準・評価方法  
3 品質項目  
4 点検項目の特定  
5 環境条件の特定  
6 必要最低限の選定

### (4) 無人航空機を活用した災害対応分野

**災害対応分野における無人航空機の活用**

災害調査を対象とし、無人機同士または有人機・無人機混在での運用安全性の確保を見据え、大型無人航空機(150kg超)の高精度位置測位を可能とする我が国独自の準天頂衛星を利用したシステム性能評価を開発し、将来の小型無人航空機(150kg以下)への展開も見据えた評価環境・評価項目・評価基準等を明らかにする。

**災害分野に適した高精度位置情報取得性能の評価**

航空機 (無人航空機 有人機)  
大型無人航空機 (RPH2)  
小型無人航空機

国際的な航空運用関連法規への対応により航空機も運用可能  
限定された空域を運航

人が乗れる大きさ  
人が乗れない大きさ (航空法)  
機体重量150kg超え (航空機製造事業法)  
機体重量150kg以下

大きな搭載能力・航空機水準の製品品質  
センチメートル級高精度測位端末

**ユースケース分析から国際標準化提案までの取組み**

1 災害調査用無人航空機 ユースケースの整理  
2 性能評価 環境の検討  
3 性能評価 項目・基準の検討  
4 基礎データ取得 (第1段階) 無人航空機と準天頂衛星受信機との組み合わせデータ取得  
5 災害調査用無人航空機システム構築  
6 基礎データ取得 (第2段階) 無人航空機のユースケースを想定したデータ取得  
7 国際標準化 調査・提案

ユースケース  
運用環境整理  
項目・基準案  
データ取得  
システム構築  
標準化提案

図 II-3-3 ④ロボット性能評価基準の研究開発の研究内容 2/3

### (5) 陸上ロボットを活用した災害対応分野

**災害対応分野における陸上ロボットの活用**

災害調査を対象に、陸上移動ロボット用の防壊性能評価基準を設定し、ロボットや使用される機器・技術に必要な防壊性能レベルを基準に沿って明確にした上で自動・自律移動性能を含めこれを検証し、実用的なロボット用の防壊性能評価手法を構築する。

**防壊性能レベルの評価**

出典:「防壊安全ガイドブック」日本電気自動車協会

対象とする場所の危険グレード

危険グレード	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
対象とする引火性ガスの種類	1.1.1 天然ガス	1.1.2 都市ガス	1.1.3 石油系ガス	1.1.4 有機溶剤	1.1.5 有機溶剤	1.1.6 有機溶剤

走破性能  
搬送性能  
作業性能 など

ロボットとして必要な機能

防壊性能レベル評価基準

**防壊性能レベル向上(自動移動・自律移動手法)に関する取組み**

遠隔操作・目視監視に特化した移動ロボット  
ユースケースで異なる、防壊性能レベルの充実

防壊性能レベルの向上

自動充電技術手法開発  
自動移動に必要な機器・技術  
例:自動充電、自動内圧バースに連した内圧前方式やステーションなど

レーザレンジファインダ技術開発  
自動移動に必要な機器・技術  
例:レーザレンジファインダなどのセンサ類

三菱電機特機システムを再委託  
消防庁と共同で消防用偵察ロボット FRIGO-Mを開発  
トンネル事故現場への出勤経路を有する

千葉工業大学(furo)を再委託  
Quinceなど実用的な移動ロボットを数多く開発  
東京電力福島第一原子力発電所事故対応での実績を有する

図 II-3-3 ④ロボット性能評価基準の研究開発の研究内容 3/3



### III. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

本プロジェクトは、「研究開発項目①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」の5コンソ、「研究開発項目②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」の2コンソ、「研究開発項目③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」の13コンソ、「研究開発項目④ロボット性能評価手法等の研究開発」の6コンソにより構成されており、研究開発項目①～④の研究内容を下図に示す。

「研究開発項目①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」、「研究開発項目②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」及び「研究開発項目③(2)インフラ維持管理用非破壊検査装置開発」にあつては、平成28年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、「研究開発項目③(1)インフラ維持管理用ロボット技術開発」にあつては、平成27年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標としており、すべての事業者(コンソ)において、概ね研究開発を終了しプロトタイプ等の完成等に繋げている。

また、ユーザを実施体制に含めることや関係官庁との連携等を通じて、センサ及びロボット等の実用性を評価し、抽出した課題を連携して研究開発するなど、中間目標以降において計画されている「実証実験を中心に実施する」ことに対しても、実施可能な研究体制を既に構築していることから、プロジェクト期間を通じてユーザの要求に基づく現場で役に立つシステムとして完成させることが可能と考えられる。



図III-1-1 研究開発項目毎の研究内容

## 2. 研究開発項目毎および個別テーマの成果

表Ⅲ-2-1 には、研究開発項目及び個別テーマ毎の基本計画または実施計画書に記載する目標に対する成果及び達成度を示す。

表Ⅲ-2-1 研究開発項目及び個別テーマ毎の目標に対する成果及び達成度

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
<b>①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発</b>			
【①-1】技術 研究組合 NMEMS 技術研究 機構	(1)道路インフラ状態モニタリング用 センサ端末及びモニタリングシ ステムの研究開発		
	(1-1)橋梁センシングシステムの開 発		
	(1-1-1)スーパーアコースティックセ ンサによる橋梁センシングシステ ムの開発		
	【実施計画】 ・感度 -95dB(re 1V/ubar)、帯域 10kHz～1MHz の仕様を満たす SA センサデバイスの開発を完了 する。	・SA センサの基本構造を確立した。 SA センサの理論計算モデルを確立した。 SA センサのプロトタイプ及びブリアンプを完成した。 SA センサのピーク感度(100kHz 付近)が-80dB(re 1V/ubar)を 超えることを確認した。	H28 年度末 達成見込み
	・SA センサデバイスを複数搭載可 能で、片手で持ち運び・取り付け 可能なサイズのセンサ端末の開 発を完了する。	・SA センサデバイスを 4ch 搭載可能で、高耐久パッケージを除 いた基板サイズが 7cm×10cm×5cm のセンサ端末を開発し た。	H28 年度末 達成見込み
	・自立発電デバイスを搭載し、1時 間に1回以上の送信頻度でデー タ送信を確認する。	・自立発電デバイスとして、太陽電池を搭載し、自然光下での自 立発電による1時間に1回の送信頻度での間欠駆動データ伝 送動作を確認した。	達成
	・小型センサ端末間のデータ相互 伝送を確認する。	・開発した小型センサ端末を、高速道路橋下に置かれた道路床 版供試体に設置し、端末間のデータ相互伝送を確認した。	達成
	・実橋梁環境における 30m 以上の 無線データ伝送を実証する。	・高速道路橋において、開発した小型センサ端末を設置し、30m 以上の無線データ伝送を確認した。	達成
	・調査対象の損傷規模に適応し た、SA センサのさらなる高性能化 指針抽出のため、損傷や劣化規 模と弾性波速度や周波数などの 弾性波パラメータの関係を明らか にする。	・交通荷重に伴うAEや雨滴により生じる弾性波の特性(AEの数 や大きさ、周波数等)を把握するとともに、これらの到達時間 を利用した位置標定及び弾性波速度構造評価を実施した。	達成
	・開発する SA センサから得られる 弾性波の種々の特徴抽出パラ メータを利用した損傷指標提案を 行う。	・センサから得られる弾性波パラメータと損傷規模の関係につ いて整理した。	達成
(1-1-2)フレキシブル面パターンセ ンサによる橋梁センシングシステ ムの開発			
【基本計画】 ・インフラ構造物及びその構成部 材の健全度を診断するための振 動、変位及びその他必要と考えら れるデータを計測できるものとし、 これらは温湿度も同時に計測でき るものとする。	・極薄 PZT(2μm)/Si(3μm)ひずみセンサ 25 枚をフレキシブル基 板上(厚さ 50μm)に集積化し、厚さ 100μm の紫外線、水蒸気層 保護層、厚さ 200μm の粘接着シートで挟んだフレキシブル面 パターンセンサを阪神高速の実橋に貼り付け、1x10 <sup>-5</sup> の精度で ひずみ分布を測定可能であることを示した。亀裂の発生によ ってひずみ値が 2,3 桁上昇することから、インフラ構造物の健全 度を診断することができる。温湿度は市販センサをフレキシ ブル基板上に実装することで達成可能である。	達成	

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<ul style="list-style-type: none"> <li>少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとする。同時に、地震等の突発事象を検出できるものとする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>無線通信モジュールの消費電力は 123mW であり、待機電力は 0.04mW と無視できるくらい小さい。高速道路において平均的な通行量が得られる時間が2分であるため、1時間に2分間の測定を行うと消費電力は4mW。7x4cm<sup>2</sup>の数百円の太陽電池(300mW)に、1000mAhのLiPoバッテリーを搭載した小型電源により、日差しのある場所であれば自立電源動作が可能である。日が差さない場所ではケーブルで配線する。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>片手で取り付け可能なサイズ(概ね 7cm×10cm×5cm)以下とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>試作したシートデバイスは12cm x 12cm x 0.2cm であり25個のひずみセンサが搭載されており、粘接着シートを用いているために湿布感覚で簡単に施工可能である。フレキシブル基板を7cm x 5cm 以下にすることは容易であるが、片手で施工できるよりも多数のひずみセンサを一括で貼り付けられることにメリットがある。</li> </ul>	H28年度未達成見込み
	<ul style="list-style-type: none"> <li>無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>通信モジュールは 920MHz 帯の特小無線を使用しており、送信電力 20mW で 30m 以上の距離が得られている。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>実環境下で 10 年以上の信頼性を有するものとする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-40～85℃の温度サイクル試験にて 1000cyc の接続信頼性を確認し 10 年を大幅に超える耐久性を達成した(120cyc=10 年相当)。UV 耐久性及び接着耐久性についても加速試験により 15 年相当の耐久性を有することを確認し、目標を達成した。</li> </ul>	達成
	<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高感度ひずみセンサアレイ(感度 <math>1 \times 10^{-7}</math>)を開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フレキシブル基板上に極薄 PZT/Si を転写、配線し、粘接着シートで鋼材等に貼りつけたフレキシブルひずみセンサの感度はチャージアンプ回路のみの状態で <math>1 \times 10^{-5}</math> 程度であり、高速道路を走る車両由来のひずみ分布を測定するには十分な値が得られている。フィルタ回路を加えることにより、<math>1 \times 10^{-6}</math> までは達成できる見込みである。<math>1 \times 10^{-7}</math> という目標は、ひずみセンサ単体での値を想定しており、現在その評価を行っているところである。</li> </ul>	H28年度未達成見込み
	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震検知センサ(0.1g、1～10Hzを検知)を開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震検知センサは市販の加速度センサで十分であり、通信モジュールに実装する予定である。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>大ひずみ用ポリマータイプを開発する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>グラファイト印刷ひずみセンサアレイを開発し、10000<math>\mu\epsilon</math> と亀裂発生レベルのひずみでも、破損することなく検出できることを示している。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>これらが制御回路IC、太陽電池と共に7cm×10cmサイズの配線付きのフレキシブルシート上に形成された、高耐候性(水蒸気透過率 2～3g/m<sup>2</sup>/day)センサシートの開発を完了する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TELEC 認証取得や施工のし易さを考慮し、制御回路 IC と地震検知センサは通信モジュールとして独立させることとした。極薄 PZT/Si が形成されたフレキシブル回路基板は試作したシートデバイスのサイズは 12cm x 12cm x 0.2cm であるが、フレキシブル回路基板のサイズを小さくすることで 7cm x 10cm サイズにすることはまったく問題なく行える。フレキシブル回路基板は有機・無機複合の保護層と一体化された状態で、水蒸気透過率 0.10g/m<sup>2</sup>/day を達成している。太陽電池は必要な発電量の面積のものを、シート上最表面に貼り付けることが十分可能である。</li> </ul>	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実橋で<math>1 \times 10^{-5}</math>の感度でひずみ分布を測定し、300mW程度の標準的な太陽電池を電源として1時間に1回無線データ通信できることを実証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・極薄 PZT(2<math>\mu</math>m)/Si(3<math>\mu</math>m)ひずみセンサ 25 枚をフレキシブル基板上(厚さ 50<math>\mu</math>m)に集積化し、厚さ 100<math>\mu</math>m の紫外線、水蒸気層保護層、厚さ 200<math>\mu</math>m の粘接着シートで挟んだフレキシブル面パターンセンサを阪神高速の実橋に貼り付け、<math>1 \times 10^{-5}</math>の精度でひずみ分布を測定可能であることを示した。無線通信モジュールの消費電力は 123mW であり、待機電力は 0.04mW と無視できるくらい小さい。高速道路において平均的な通行量が得られる時間が 2 分であるため、1 時間に 2 分間の測定を行うと消費電力は 4mW。7x4cm<sup>2</sup> の数百円の太陽電池 (300mW) に、1000mAh の LiPo バッテリーを搭載した小型電源により、日差しのある場所であれば自立電源動作が可能である。</li> </ul>	達成
	<b>(1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発</b>		
	<b>【実施計画】</b> (a)MEMS センサデバイスの開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・MEMS センサデバイスは必要な信号処理回路と合わせ、下記を開発目標とする。</li> </ul> 傾斜測定の出力安定性: 0.05deg 振動測定の分解能: 0.1gal	(a) MEMS センサデバイスの開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・原理試作品により、傾斜出力安定性<math>\pm 0.05</math>deg 以内を確認した。MEMS センサユニットの設計・試作を実施し、傾斜測定出力安定性、振動測定分解能の評価を実施中である。</li> <li>試作した MEMS センサユニットのフロントエンド回路ノイズ評価を実施した。目標 36.4 <math>\mu</math> V (=0.1Gal 相当)に対し、X 軸: 27.6 <math>\mu</math> V、Y 軸: 28.8 <math>\mu</math> V、Z 軸 17.1 <math>\mu</math> V を確認し、目標分解能達成の見通しを得た。</li> </ul>	H28 年度 達成見込み
	(b)傾斜マルチセンサ端末の開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・消費電力 3.5mW(平均)以下にする。</li> </ul>	(b)傾斜マルチセンサ端末の開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・回路設計を完了し消費電力を試算目標とした 3.5mW(平均)に対し 2.9mW(平均)の見通しを得た。太陽電池を用いた電源回路試作データと NEDO 日照データ(東京 平均年)によるシミュレーションから連続稼働を確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1時間に1回の間欠測定と突発事象測定対応の監視モードの動作無線通信(通信距離:30m以上、通信速度: 1Mbps) 環境発電素子(太陽電池)からの電源供給による自立電源化。センサ端末サイズ: 7cm<math>\times</math>10cm<math>\times</math>5cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造設計を完了し試作を実施し、目標サイズの 7cm<math>\times</math>10cm<math>\times</math>5cm のセラミックケース内収納を確認した。</li> <li>・試作品により、傾斜・振動・温度の同時測定、間欠測定動作を確認した。今後各部の詳細な動作を確認し、特性評価と必要により改良を実施する。突発事象と間欠測定を可能とするアルゴリズム開発を完了した。</li> <li>・無線通信は通信距離 30m 以上(実測 65m)、通信速度1Mbpsを確認した。実フィールドの情報板にて情報板内外で通信出来ることを確認した。</li> </ul>	達成
	(c)センサネットワークシステムの構築と実証実験 <ul style="list-style-type: none"> <li>・実証実験に向けシステムの構築</li> </ul> 集約器試作、傾斜マルチセンサ間の無線通信性能(通信距離: 30m 以上、通信速度: 1Mbps)を確認する。 集約器とコンセントレータ間の通信が正常動作することを確認する。	(c)センサネットワークシステムの構築と実証実験 <ul style="list-style-type: none"> <li>・集約器の設計・製作を完了した。傾斜マルチセンサ間の無線通信を確認した(通信距離: 65m、通信速度: 1Mbps)。集約器とコンセントレータ間通信を確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証実験実施場所を選定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証実験場所: 東名 吾妻山トンネル入口情報板を選定した。</li> </ul>	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・H27 年度に先行開始したモニタリングを継続し基礎データを引き続き取得する。取得したデータから目標とした傾斜測定 of 安定性 (0.05deg) 及び振動測定 of 分解能 (0.1gal) の妥当性を検証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・先行フィールド試験を 2015 年 12 月に開始した (240 日を超えるデータ取得し、継続中)。情報板の傾斜と卓越周波数の挙動が明らかになってきた。今後 1 年を超えるデータを取得し、データ処理方法等を考慮し傾斜の安定性と振動分解能の必要仕様を検討する。</li> </ul>	H28 年度末達成見込み
	<b>(1-3) 法面変位センシングシステムの開発</b>		
	<b>【実施計画】</b> (a)法面用多機能型センサ端末の開発 <ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための変位及び温度を同時に計測できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試作した端末を用いた基礎実験により、温度・変位・傾斜データを同時に計測できることを確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするともに突発事象を検出できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・太陽光発電を利用した自立電源により、温度・変位・傾斜データを無線通信により6分間に1回収集できることを確認した。変位・傾斜データにより突発事象を検出可能とした。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・片手で取り付け可能なサイズとする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・センサ端末サイズは概ね 5cm×7cm×10cm を達成した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数及び出力強度とし、その通信距離は 30m 以上である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・920MHz 帯の特小無線を用いることで、無線局の免許を受けることなく使用可能で、通信距離が 30m 以上あることを実証実験候補場所で確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・10 年以上の信頼性を有する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・加速試験で 10 年の耐久性の見通しを得たセラミックパッケージを使用することで耐久性を図るとともに、試作機にて雨天が連続しても継続動作することを確認した。</li> </ul>	達成
	(b)センサネットワークシステムの構築と実証実験 以下を満たすセンサネットワークシステムを試作し、基礎実験により検証する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・1 時間に 4mm 以上の変位を検出できることを基礎実験により検証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試作した端末を用いた基礎実験により、4 mm 以上の変位を検出できることを確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・(a)で試作したセンサ端末を用いてインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを試作し、平成 28 年度中に実証実験を開始する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ネットワークシステムを試作し、実証実験候補場所において動作確認試験を行い、実証実験を開始した。</li> </ul>	H28 年度末達成見込み
	<b>(2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発</b>		
	<b>(2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発</b>		

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	【実施計画】 (a)多種多様なセンサへの対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンセントレータ内の受信モジュールを変更することで、複数のセンサのデータ受信に対応する仕組みを構築した。</li> <li>・各インフラ構造物種別から各1種類、合計4種類のデータフォーマットに対応し、仮センサからのデータ通信が問題ないことを確認した。</li> <li>・上記の検証を実構造物に設置されたセンサのデータ収集によって実施する。データ収集は少なくとも1ヶ月連続で実施した。</li> </ul>	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>H28年度 達成見込み</p>
	(b)コンセントレータ間の連携通信対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンセントレータはセンサから通信可能な距離の屋外に設置し、コンセントレータの設置容易性、動作安定性について併せて検証した。</li> <li>・少なくともコンセントレータ3台を連携して、センサデータを伝送させて機能を検証した。</li> <li>・上記の検証を実構造物に設置されたセンサのデータ収集によって実施した。データ収集は少なくとも1ヶ月連続で実施した。</li> </ul>	<p>H28年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>H28年度 達成見込み</p>
	(c)セキュアな情報収集への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プログラムの不正な改ざんへの対応を実施した。具体的にはコンセントレータの動作中に不正なソフトウェアモジュールに変更する処理が失敗することを確認した。</li> <li>・上記の検証を実構造物に設置されたセンサのデータ収集によって実施した。データ収集は少なくとも1ヶ月連続で実施する。</li> </ul>	<p>H28年度 達成見込み</p> <p>H28年度 達成見込み</p>
	<b>(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発</b>		
	【実施計画】 (a)高効率アンテナ内蔵LTCC基板及び透光性セラミック基板の開発(NGK)		
	・100mm×70mm×50mm パッケージを供給する。	・センサ端末開発メーカーの要求仕様に応じて、外部端子やアンテナを形成した100mm×70mm×50mmパッケージの試作を完了し、実証試験に向けた予備試験用に三菱電機、富士電機へ供給を開始した。	H28年度 達成見込み
	・アンテナを内蔵した基板を試作し、920MHZでの通信距離30mと無指向性を達成する。	・低指向性のダイバーシティアンテナ内蔵パッケージを試作し、要求仕様をほぼ満足するアンテナ特性を得た。また、このパッケージを用いた富士電機における通信試験において、65mの距離で通信できることを確認した。	達成
	(b)高気密封止接合技術の開発(MMC)		
	・低融点接合材料によるパッケージ実装試作を行い、高気密封止特性を向上する。	・実装部品への熱影響を抑えるために、LTCC基板と透光性セラミック基板を低温(50~60℃)で接合できる無機有機複合接合材を開発し、パッケージ封止実装を完了した。封止部の10年耐久性に相当する信頼性加速試験として、PCT(Pressure Cooker Test、168Hr)、耐候性試験(UV照射、500Hr)、熱サイクル試験(-40⇔85℃、200回)を実施し、目標規格を達成した。	達成
	・オールインワン実装、目標リーク速度~10-9Pa・m3/sec以下を達成する。	・センサ端末のオールインワン実装プロセスを開発し、試作した封止部評価用センサ端末の信頼性加速試験での内部気圧耐久特性により、目標リーク特性達成の見込みを得た。	28年度達成 見込み
	(c)ベースプレート実装構造及びプロセスの開発(DNP)		

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	・各センサ端末に適したベースプレート構造の決定、及び実装プロセスを確立する。	・外部端子の取出し方法や実装のプロセスフローを策定し、橋梁向け、道路付帯物向け、法面向けのセンサ端末に対するベースプレート構造案を決定した。	28年度達成見込み
	・LTCC パッケージを実装した評価用ベースプレートを作製し、屋外10年暴露相当の耐久加速試験後の接着強度 0.4MPa 以上を達成する。	・LTCC パッケージサンプルを用いたベースプレート実装試作により、粘接着シートの貼付け条件及び外周部の保護材塗布条件を確立した。粘接着シートによる接合強度については、屋外10年暴露相当の耐久加速試験後の接着強度 0.4MPa 以上を達成した。	28年度達成見込み
	(d) 構造物への取付・接合開発 (DNP)		
	・構造物への最適実装・取付け方法を見出す。	・実橋梁について設置箇所候補となる様々な表面状態を確認、下地の整面方法を決定した。	28年度達成見込み
	・フェールセーフの屋外10年暴露相当の加速試験を行い、センサ端末とベースプレート重量以上の荷重負荷に耐えること。	・フェールセーフとしてネット方式に決定しネット材質、網目サイズの選定を完了した。	28年度達成見込み
	(e)パッケージング評価用モジュールと耐久性加速試験法の開発 (MMC、産総研)		
	・リモート耐久性評価試験評価をする。	・リモート耐久性システムを完成させた。加速試験法により、評価モジュールパッケージを試験し、3項目での耐久性試験規格を満足した。	達成
	・実地場所として、阪神高速、NEXCO 橋梁で自然暴露試験を実施する。	・阪神高速法円坂、NEXCO 西日本西安堵橋橋梁で自然暴露試験を実施した。	28年度達成見込み
	<b>(3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究</b>		
	<b>【実施計画】</b> ・センサ端末開発と連携して、各フィールドにおけるセンサシステムの基本仕様を決定する。	・センサシステムのプロトシステムの開発をほぼ完了した。	28年度達成見込み
	・フィールド毎に1ヶ所以上のモニタリングシステムの実証場所の選定を完了する。	・参画高速道路会社において各システムの1ヶ所以上の実証場所の選定を完了した。	達成
	・NEDO が別途委託している日立製作所及び横河電機と連携して、道路インフラへの実証方法を決定する。	・日立製作所の実証場所の選定を完了した。横河電機の傾斜センサを法面変位センサの地中に設置することを決定した。	達成
	<b>(4)センサ端末同期用原子時計の研究開発</b>		
	<b>(4-1)小型、低消費電力を支えるCSAC用ガスセルの開発</b>		

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<b>【実施計画】</b> (a)ガスセルの理論モデルを構築する。	・ガスセルの材質やパuffaガスの特性調査を行い、ガスセル起因の長期安定度を予測する理論モデルを構築するとともに、パuffaガスと共に高純度 Cs を封入するためのガラス加工方式ガスセル製造装置を開発し、φ5×9mm 3 の円筒型ガスセルを試作した(材質;石英、パイレックス。パuffaガス;Ne、N <sub>2</sub> 、Ar)。	達成
	・長期安定度 0.01 秒/半年以上のガスセルを試作する。	・特性調査の結果からガスセル材質としてパイレックス、パuffaガスとして N <sub>2</sub> を選択し、H27 年度ガスセル評価用プロトタイプに搭載し、50 日以上の評価を行い、理論モデルでの推定通り、周波数ドリフトレート 10-12 以下(大気 He 流入レベル)を実証した(長期安定度:0.01 秒/20 ヶ月相当)。	達成
	・拡散結合方式ガスセルでウェハ接合技術を検証する。	・拡散結合方式ガスセルに関し、ウェハ接合により全石英セルを試作し、Cs 原子を封入可能なことを実証した。	達成
	・2.1×2.1×2.1 mm以下のガスセルを試作し、ガスセルの小型化が長期安定度を制限しないことを検証する。	・ガラス加工方式の小型ガスセルとして、外形 2.1mm 角、内形 0.7mm 角のガスセルを試作し、約 4 日間に渡り周波数安定度を評価した。平均時間 8 万秒で、周波数安定度 $\sigma_y < 1 \times 10^{-11}$ となることを実験的に確認した。28 年度末にはより長期間の評価データにより長期安定度 0.01 秒/半年を検証する。	H28 年度 達成見込み
	(b) 長期安定度向上策であるデュアルセルにおいて、Cs 及び Rb が共に封入したガスセル、及び同時観測測定装置により、それぞれに関するパラメータを抽出する。	・デュアルセル(Cs、Rb 封入)を準備し、CSAC へ適応可能な同時観測測定装置を構築した。この観測装置を用いて、Cs、Rb2 つの CPT 原子が同時に観測できることを実証し、それぞれのパラメータを抽出した。同時計測を行いながら長期安定度を計測した 9 日間における周波数変動からは、それぞれの共鳴周波数は異なる変動をしている事を確認し、提案法が実現可能であることを実証した。	H28 年度 達成見込み
	・同時観測測定装置を用いて実際に長期安定度を計測し、得られた測定データから長期周波数補正をオフライン処理にて推定する。また、パuffaガス等のガスセル条件を変え良好な条件を探索する。	・周波数補正に関するオフライン処理を検証している状況である。また、パuffaガス等のガスセル条件に関しては、すでにサンプルのガスセルを入手済みである。本提案手法と測定データは、これまでどこにも報告されていないため新規性が非常に高いと考えられる。	H28 年度 達成見込み
	(c) 消費電力 10mW 以下の量子部を開発する。	・量子部の 3 次元熱解析モデルにより、10mW 以下を達成する量子部の構造設計を終えた。設計した構造を実現するための技術開発を進めている。	H28 年度 達成見込み
	(d) 消費電力 120mW 以下のプロトタイプを開発する。	・制御回路部の消費電力を 110mW に低減する回路を設計し、試作中である。H28 年度下期に消費電力 10mW の量子部を搭載し、トータルの消費電力 120mW を検証する。	H28 年度 達成見込み
	<b>(4-2) CSAC の制御回路開発</b>		
	<b>【実施計画】</b> ・CMOS 集積回路として 4.6GHz 電圧制御発振器を作製し、5mW 以下の低消費電力動作を達成する。	・電圧制御発振器 VCO の低消費電力化が可能な新たな回路方式を考案し、テールポンプ型 VCO を CMOS 集積回路として作製した。試作した 4.6GHz の VCO において、従来の 32mW が 0.52mW に低減でき、世界最小電力を達成した。現在、詳細性能評価中である。	H28 年度 達成見込み
	・水晶発振器を用いずに動作可能な制御方式の回路構成方法を考案する。	・量子部からの透過信号をそのまま用いて位相同期する回路と、分数分周の可能な周波数分周器の回路方式について考案した。また、回路シミュレーションに必要な量子部のモデルを構築するため、現状品の量子部の測定評価を行った。	H28 年度 達成見込み
	<b>(4-3) CSAC 用面発光半導体レーザ(VCSEL)技術の開発</b>		



テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<b>【実施計画】</b> ・波長調整 VCSEL のプロセスを確立する。	・波長調整層を挿入した VCSEL を試作し、発振波長を数 nm の範囲でシフトさせる事を実証した。この技術を適用し、ウェハ面内での波長ばらつき分布を打ち消す様に波長調整層を構成するプロセスを開発し、波長調整 VCSEL 方式の試作を進めている。	H28 年度 達成見込み
	<b>(4-4) 新技術導入の適用可能性検討、及び、CSAC の事業化に向けた技術ロードマップの策定</b>		
	<b>【実施計画】</b> ・損失の原因であるイオン注入による SiC の薄膜化を用いない方法で共振器を作製する。	・SiC 基板と Si 基板にそれぞれ SiO <sub>2</sub> を 1・μm 程度堆積し、両者を貼り合わせて SiC 基板を 10・μm 厚まで研磨した後に 300nm 程度までエッチングにより薄膜化し、薄膜 SiC/SiO <sub>2</sub> /Si 基板を作製した。この SiC 層に電子ビーム露光とプラズマエッチングによって光ナノ共振器を作製し、Q 値として約 9000 を得た。	H28 年度 達成見込み
	・周波数間隔 9.2GHz 程度の 2 つの共振器モードを設計する。	・共振器作製の目処が経ったので、2 つの SiC ナノ共振器を、導波路を介して結合させ、周波数間隔 9.2GHz 程度の 2 つの結合共振器モードを形成させる構造を設計中である。	H28 年度 達成見込み
	・事業化に向けた技術ロードマップを策定する。	・本研究開発や市場・技術調査資料、ヒアリングで得た知見などから開発過程の仕様でも Microsemi 社 CSAC の置き換え市場などがあることが判ってきた。これらを踏まえて、RIMS への適用仕様に至るまでの技術ロードマップの確度の向上を図っていく。	H28 年度 達成見込み
<b>【①-2】(一財)マイクロマシンセンサーコンソ</b>	<b>①-(1)コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発</b>		
	<b>【実施計画】</b> ・発電量 2V、0.5μW の MEMS 圧電振動センサデバイスの開発	・現在までに、最大で AlN の 5 倍の圧電定数を持つ新材料 ScAlN を導入し、2V、0.21μW の出力を達成した。H28 年度中に Sc の添加量を最適化し ScAlN の圧電定数を現行から 1.5 倍に増大させ発電量を 2 倍以上に増加させることによって目標を達成する見込みである。	H28 年度 達成見込み
	・低損失整流回路の開発	・整流回路の構成を工夫すると共に低い順方向電圧降下を持つ MOSFET を採用し、さらにこれらをワンチップ化した。これにより AlN 振動発電センサデバイスの出力電圧を従来品比 2.4 倍に増強させ、そのパッケージサイズを 2mm <sup>2</sup> 以下に小型化した。	達成
	・低消費電力鹿威し回路の開発	・コンパレータのバイアス電流を削減することによって、従来品の低消費電力コンパレータに比べて消費電流を 90%削減した。また参照電圧発生回路においては、弱反転領域を利用することによって 90%以上の消費電流を削減した。	達成
	・P 型端末の模擬的な動作実証	・AlN 振動発電センサデバイスと低消費電力鹿威し回路を組み合わせることによって、実際のポンプ振動と同等程度の振動加速度を発生させた加振器上において、鹿威し方式の動作実証を行った。	達成
	<b>①-(2)コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスのウェハレベルパッケージ技術の開発</b>		

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<p><b>【実施計画】</b></p> <p>a) AlN 圧電デバイス量産試作プロセス技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>前年度で開発した基本プロセス工程を用いて、P 型端末向けセンサ・発電デバイスを試作評価実施して、動作品を明星電気に収める。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>今年度、新たに設計された発電デバイスの試作評価を実施して、外観、AC 特性が良品のデバイスを得られた。産総研により、設計通りの出力、共振周波数を得ることを確認した後、明星電気に動作品を収めた。今年度中に、これも新たに設計される高出力の P 型端末用高周波センサを試作して、明星電気に収める予定。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>AlN プロセスは、量産対応できるようにプロセス確立する。ScAlN プロセスは、小容量ポンプに対して、デバイスが適用できる事を確認し、実用化を図る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>8 インチ基板を用いた AlN 圧電プロセスは、Pt/AlN/Pt 圧電電極構造のドライエッチング工程を確立することにより、カンチレバー構造を形成することが出来た。さらに、この多層構造のスパッタ成膜条件を検討して、DC/RF パワーを調整することにより 8 インチ基板の最外周を除く領域で、圧電積層膜の応力に起因するカンチレバーの反りを低減し、形状でも良品歩留りを向上することが出来た。このように、AlN プロセスは、形状歩留 70%を得ることが出来るプロセス条件を確定し、ウエハ内全領域で d31 が 1.00pm/V 以上の安定した圧電特性を得られたので、ほぼ量産プロセスは確立できたとと言える。</li> <li>ScAlN 圧電プロセスも 43% ScAlN ターゲットを用いて、8 インチ基板で d33 15pm/V と良好な圧電特性を得るスパッタ装置の成膜条件を見出した。今年度中に発電デバイスを試作して、カンチレバー加工プロセスを確立する。</li> </ul>	H28 年度 達成見込み
	<ul style="list-style-type: none"> <li>カンチレバーの共振 Q 値の広帯域化等によって、振動出力を確保し、ScAlN プロセスと AlN プロセスの発電効率、コスト、温度特性等の評価項目によるベンチマークテストを行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>今年度後半、産総研が設計検討している共振を広帯域化した新センサを試作し、出力の向上を図る。AlN と ScAlN デバイス・プロセスの比較は、これまで試作開発を行ってきたカンチレバー構造のデバイスの特性から、各性能指標を明確化する。</li> </ul>	H28 年度 達成見込み
	<p>b) ウエハレベルパッケージ技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>P 型端末向けセンサ・発電デバイスおよび高周波振動デバイスのウエハレベルパッケージ構造の試作を実施し、歩留まり向上の為にプロセス改良を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ウエハレベルパッケージ技術開発は、圧電デバイスの特性を劣化させないために、有望な接合方法として抽出された Au-Au 活性化低温接合技術をベースにした、P 型端末 0 次試作用 AlN 圧電デバイス向けの 4 層の基板を含むパッケージ構造の設計・試作を行い、明星電気に提供した。この作業は、チップとチップを接合して実施したが、開発した Au-Au 活性化低温接合技術はウエハレベルの接合が可能であり、今年度後半には、P 型端末用高周波センサのパッケージ構造として必要とされる、真空封止接合技術に取り組む。</li> </ul>	H28 年度 達成見込み
	<p>c) 振動センサ・発電デバイス技術動向調査(東大再委託)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>振動発電センサデバイス、センサネットワーク、MEMS 技術関連等の最新動向調査を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>振動センサ・発電デバイス技術動向の収集を、2015 Transducers、第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、IEEE SENSORS 2015、Power MEMS 2015、IEEE MEMS 2016 の文献あるいは会議出席により実施した。それらの収集から AlN 圧電デバイスに適用可能な周波数ブロードバンド化技術を抽出するとともに、それらの技術の本開発への適用可能性について調査を行った。</li> </ul>	達成
	<p><b>①-(3)コアモニタリング用センサ端末の開発</b></p>		
	<p><b>【基本計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するため振動または変位、温度も同時に計測可能なセンサ端末を開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>P 型端末(低周波振動センサ、高周波振動センサおよびサーミスタ搭載して発電素子からのトリガーで無線送信する端末)を開発。回転機器の健全性を診断するため 低周波振動センサと高周波振動センサと回転機器の表面温度上昇にて検出する端末を作成。高周波振動計測を改善して達成する見込み。</li> </ul>	H28 年度 達成見込み

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作でき、さらに地震等の突発事象を検出できるセンサ端末を開発	・P型端末を回転機器に装着して、1時間に1度以上の無線通信をできる端末を開発。自立電源自己動作は低周波振動の発電量の安定化を図り、地震等の突発事象はセンサデータ収集端末に機能を搭載して達成する見込み。	H28年度達成見込み
	・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下のセンサ端末を開発	・P型端末の外形寸法を(直径30mm、高さ50mm突起部除く)を開発。	H28年度達成
	・実環境下で10年以上の信頼性を有するセンサ端末を開発	・P型端末を10年以上性能保証できる端末の開発。センサ素子の耐久性をはかり加速度試験を実施して確認する。	H29年度達成見込み
	<b>【実施計画】</b> a)センサデータ収集端末の試作 受信モジュール(産総研)、M型中継端末(沖電気工業試作)、システム制御モジュール(地震情報の入力端子含む)	・P型端末からの電波を受信してM型端末に中継するセンサデータ収集端末を開発。センサデータ収集端末はP型端末からの電波を受信する受信モジュール、M型中継端末無線モジュールとシステム制御モジュールから構成される。M型中継端末無線モジュールはH29年度に入手して現行無線モジュールから変更設計 製作を実施する。地震情報のプログラムについてはH29年度に実装予定。	H29年度達成見込み
	b)P型端末(0次試作)開発 外径:約35φ 質量:50g以下 (1次電池除く)	・P型端末(0次試作)外径30mm、質量約40gを試作した。	H28年度達成見込み
	c)P型端末耐久試験(実環境1年以上)	・実環境動作1年以上のP型端末を開発。実証で確認中。	H28年度達成見込み
	<b>①-(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発</b>		
	<b>【基本計画】</b> ・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数を用い、その距離は実環境下で30m以上	・920MHz帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56mの距離(中継機1台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。	達成
	<b>【実施計画】</b> M型中継端末 ・省電力性能 稼働年数1年以上(実証実験環境下での見込) 端末消費電力:160μW以下	・本研究で開発したクロック補正方式を適用した時刻同期型省電力無線機(M型中継端末)の試作機を作成した。 次年度実環境にてモニタリングデータの中継サービスを行い1年以上の動作が可能であるかを確認する。 ・本研究で開発したクロック補正方式本方式を実装した評価機で消費電力を測定した結果、1時間の平均消費電力が154μWで、H28年度中間目標で設定した、端末消費電力160μW以下の目標値を達成していることを確認した。	H29年度達成見込み  達成
	・悪環境下での無線通信距離:30m以上 (920MHz 特定省電力・マルチホップの動作条件として)	・920MHz帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56mの距離(中継機1台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。 測定した無線経路は途中に障害物(コンクリート壁で覆われたエレベータホール)のある環境で実施した。 同じ経路でマルチホップなしの場合、通信エラーの発生頻度が高くなることを確認しており、マルチホップによる中継が必要となるケースが実環境であることも確認した。	達成
	<b>①-(5)コアモニタリングシステムの開発</b>		

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<b>【基本計画】</b> ・開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発	・P型0次試作機の発電素子から出力される鹿威し方式データ、ならびに振動素子から出力される振動データ、センサ部温度を収集する装置を開発。 ・実証サイトにて実稼働中のポンプに設置して動作を確認。	達成
	<b>【実施計画】</b> ・フィルタリング、異常検知、保全までの余裕時間予測の要素技術を開発	・従来の振動加速度ピックアップを用いて収集したポンプの振動加速度から、運転/停止時、軸回転数の違いによる振動加速度の特性を把握。 ・鹿威し方式データを用いた異常検知のロジックならびに余裕時間の予測手法を特定。以上の知見からモニタリングシステムの要件を完成。	達成
	・異常検知の精度確保:異常発生頻度に対し、検知率95%(2 $\sigma$ )を達成	・既存の軸受の劣化進行に伴う振動データと保全前後の振動データで異常検知の感度を確認。 引き続き、故障シミュレータから発生する異常振動、ならびに高砂熱学工業で実稼働しているポンプにて異常を故意に発生させ、その診断を予定している。これらから診断確度が95%であることを検証。	H29年度 達成見込み
	・安全な維持管理の持続:回転部位に起因する保全項目の70%をカバー	・実証サイトの運転管理者、メンテナンス業者と、保全作業と振動監視での代用についてのヒアリングを予定している。その結果から、ポンプの日常保全項目の70%について振動による検知の代用が可能であることを検証。	H29年度 達成見込み
	<b>②コアモニタリングシステムの構築と実証</b>		
	<b>【実施計画】</b> ・モニタリングシステムの連続稼働:実設備にて、データ収集、伝送から異常検知、保全までの余裕時間予測までを一連に処理	・鹿威し方式データの収集からフィルタリング、異常検知、結果表示、異常に対して保全までの余裕時間を予測するモニタリングシステムの試験機を完成。	達成
	・実証実験: 代表的な病院施設、地域熱供給施設の各1件で実証	・地域熱供給施設(所在地:東京都)にて、モニタリングシステムの試験機を稼働。引き続き、H28年度下期には病院施設(所在地:神奈川県所在)での稼働を予定	病院施設は H28年度 達成見込み
	・クラウド利用型ネットワークシステム: ネットワークを構築し、モニタリングシステムの連続稼働を実施	・地域熱供給施設の機械室にて、P型端末機からモニタリング装置までのローカルネットワークを構築し、モニタリングシステムを稼働。	達成
<b>【①-3】(株)日立製作所</b>	<b>【実施計画】</b> (i)センシングの検出・解析制度の測定誤差10%以下、数十バイトのデータ量伝送を実現するプロトタイプ完成を目指す。	解析区関数・応答周波数に対応したセンシングアルゴリズムの使用策定を実施し、誤差 $\pm 10\%$ のセンシング精度、数十バイトのデータ量伝送を実現した。	H28年度 達成見込み
	<b>【実施計画】</b> (ii)センサ部と無線モジュール部において下記内容を実現するプロトタイプの完成を目指す。 センサ部:(収録時)70mW以下、(待機時)170 $\mu$ W以下 無線モジュール部:10mW以下	センサ部、無線部それぞれ低消費電力化したソフトウェアを設計、実装した。センサ部については消費電力を計測し、目標値(明かり部平均3.0mW、トンネル内平均0.9mW)を満たした。無線部についても同様に、消費電力の評価を実施し、目標値(明かり部平均0.9mW以下、トンネル内平均0.3mW以下)を満たした。	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	【実施計画】 (iii)自立発電のプロトタイプ実装、蓄電部のサイクル寿命 2000 サイクル(充電回数 2 日に 1 回以上目指す)を実現するプロトタイプ完成を目指す。	電源部については、長期メンテナンスフリーを実現するための蓄電部の開発に向け、充放電レート・使用電圧範囲等の条件変更と最適な添加剤を投入することで、充放電 4000 サイクル性能を満たす蓄電池を開発した。	達成
	【実施計画】 (iv)本研究開発要素の中間目標として、安定した無線通信を確保するために、30m以上の遠距離通信を実現するプロトタイプ完成を目指す。	センサ端末無線部およびモバイルリーダの設計、実装を実施した。無線部・モバイルリーダ単体の通信距離確認試験では静止距離 30m、で問題なく通信可能なことを確認した。	達成
	【実施計画】 (v)各部それぞれ下記内容を実現するプロトタイプ完成を目指す。 サイズ:7cm×10cm×5mm 保護等級:(センサ端末本体)IP65相当(無線アンテナ IPX 相当)	センサ端末のサイズを、中間目標サイズ(16cm×16cm×10cm以下)を目標に、センサ部は内部機構の小型化の検討、電源部は電力構造の小型化を検討し、センサ部、無線部、電源部を一体化させたセンサ端末を開発、実装した。	H28 年度 達成見込み
	【実施計画】 (vi)道路附帯構造物ならびに道路分野においてニーズ調査、要件策定を実施する。	「センサ単体基礎実験の条件整理」として、対象とするジェットファンの損傷事例の再現、6 本吊りなど固定方法の再現、使用するセンサの選定、固有振動数計の精度に関する検討等を挙げ整理した。	達成
	【実施計画】 (vii)道路附帯構造物のインフラ維持管理に必要な機能を要するプロトタイプシステムの開発・構築を実施する。	要件定義書をもとに、スマートフォンアプリ機能(センサデータ受信機能、センサデータ送信機能、グラフ表示機能、作業履歴表示機能、時刻同期機能)を設計し、開発した。	達成
	【実施計画】 (viii)道路の実フィールドにセンサ端末のプロトタイプを設置し道路区間限定で短期間の検証を実施する。	1st プロト実証実験を新東名高速道路/三岳山トンネル(上り線)にて実施し、検証を行った。	達成
【①-4】横河電機(株)	【基本計画】 以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。 ・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測、温度も同時に計測。	・インフラ構造物として、建物を対象として振動(加速度)、変位(加速度を積分)、温度データを計測。	H28 年度 達成見込み
	・少なくとも1時間に1回の無線通信を自立電源で自己動作、地震等の突発事象を検出。	・定時(設定可)でのセンサデータを無線で収集、突発事象時も検出可。	達成
	・片手で取り付け可能なサイズ(概ね 7cm×10cm×5cm)以下。	・現状では現状では 9cm×16cm×5cm	H28 年度 達成見込み
	・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で 30m 以上。	・920MHz 帯特定小電力標準規格に準拠、実環境を想定した建物での通信距離として水平距離で 100m以上の見込み。	達成
	・実環境下で 10 年以上の信頼性を有する。	・未実施であるが、実証試験期間中に評価する。	未達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<p><b>【実施計画】</b></p> <p><u>①高信頼性・高感度振動式加速度センサデバイスの開発</u> 振動式加速度センサデバイスの完成。検出感度は 1/100gal、測定範囲は±2G。XYZ3 軸の加速度を個別に同時測定可能。動作温度範囲は、-10℃～50℃。振動出力を周波数へ変換する信号処理回路は1チップの CMOS 専用集積回路で構成し、測定時の消費電流が 1mA 以下を達成する。</p>	シリコン振動式加速度センサデバイスを開発し、検出感度として 1/1000gal (1μG) を達成。温度範囲は同型他センサの特性として -10℃～50℃ は達成可能。信号処理回路は、他センサで開発済の CMOS 専用 IC (ASIC) で構成した。消費電流は 1.5mA (5.5V 動作時)。電源電圧を下げる設計変更で 1mA は達成可能。	達成
	<p><u>②高信頼性歪みセンサデバイスの開発</u> 精度の高いシリコン振動式歪みセンサと破壊耐力の高いシリコンピエゾ抵抗式歪みセンサを完成させる。測定感度は±10με、測定範囲は±5000με。使用温度範囲は-10℃～50℃。鉄骨材料、コンクリートに接合できる構造とし、振動式センサからの信号処理は加速度センサの信号処理回路と同じもの、ピエゾ抵抗式センサからの信号出力は汎用集積回路で構成する。</p>	シリコン振動式歪みセンサとして、測定感度 0.1με 以下を達成。測定歪み範囲は評価中。環境の温度変化による歪み変化を補償する機能を付加し、測定範囲として ±1,000με を達成可能。±5,000με の測定範囲は、ピエゾ抵抗式センサで達成可能の見込み。振動式歪みセンサは加速度センサと同じ回路を使用。	H28 年度達成見込み 一部超過達成
	<p><u>③無線通信モジュールの開発</u> 無線モジュールによる測定信号の送受信検証を行い、30m 以内に設けるデータ受信モジュールによる信号受信を行う。測定モジュールの最大数は、1個の受信モジュールに対して 255 個、通信時間間隔は1時間置きとする。周波数帯は、2.45GHz、920MHz、400MHz 帯を候補として、消費電力・設置場所の状況に応じて適切なものを選定する。</p>	無線システムは、データ通信時間、伝搬距離を検討し、920MHz 帯と決定した。標準規格 ARIB STD-T108 に準拠し、最大送信電力 20mW、データ伝送速度 50kbps、チャネル数 29。建物を想定した屋内実験で 30m 以上の伝搬距離を得た。	達成
	<p><u>④センサ用自立電源モジュールの開発</u> センサ及び無線モジュールの消費電力量の最適化を図り、想定される設置環境で収集可能なエネルギーに適した発電素子と二次電池を各種検討し、エネルギーハーベスト電源の基本構成を完成させる。更に、外部からのワイヤレス充電を可能にする為にセンサ端末のサイズに納まる形で受電コイルと受電回路を構成する。送電装置は充電作業の利便性を上げるために、可搬型とする。送電装置と受電装置間の給電可能な距離は 50mm 以上、1年に1回 5 分間程度の給電で運用可能を目標とする。</p>	エネルギーハーベストおよびワイヤレス給電にて共通で使用する二次電池を選定し、-30/+25/+60℃の各温度で大電流および微小電流性能を確認した。エネルギーハーベスト回路は、屋内向けアモルファス太陽電池 (70×100mm 面積相当)、MPPT 機能付き降圧電力変換回路および二次電池で構成される。周囲照度 200lx にて充電電力は 365μW を得た。ワイヤレス給電は、本システムに最適化したプロトタイプ機を開発し、伝送距離 50～80mm にて受信電力 20W 以上が得られることを確認した。	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<p><b>⑤データ収集システムの開発</b>            センサからのデータ収集を既製のデータ収集計測システムで行う。センサとの通信確認を行うために、初期は有線でのデータ送受信方法で検証を行うことも合わせ、中間最終目標では、無線通信モジュールによるデータ収集を確立する。データ解析への受け渡しとして、各センサからのデータの時間同期の確保が課題となる。</p>	<p>データ収集システムは、既製システムでは冗長また不足の能力があることが判明し、新たにシステムの開発を行った。サイトビジットでデモ実験を行い、センサからのデータを無線で受信し表示することまで達成した。センサノードの時刻同期は、無線通信モジュール内に組み込んだ GPS-1PPS 信号で行った。有線での事前検証は省略し、最初から無線通信でのシステムの検証を行った。</p>	達成
	<p><b>⑥データ解析システムの開発</b>            各ノードで測定された加速度データから外乱(地震、風、環境振動など)前に実施した常時微動測定や人力加振などで把握した周波数特性と外乱後の周波数特性の差違をセンサシステムで評価する周波数解析プログラムを開発する。</p>	<p>加速度波形データから周波数特性のプログラムが完了した。さらに計画目標に掲げてなかった震度算出プログラムを追加し、建物の各階に設置したセンサの揺れの度合いをわかりやすく、客観的な指標で示すことを新たに組み込んだ。最終目標である時刻歴変位波形算出するプログラムの開発を前倒して実施し完了した。</p>	達成
	<p><b>⑦システム同定による建物の詳細な損傷評価手法の開発</b>            システム同定アルゴリズムを利用した建物損傷評価プログラムを作成し、損傷評価システムの妥当性および有効性を検証する。</p>	<p>木造軸組架構および小型模型を用いた振動台実験で得られた試験体の加速度データに逐次部分空間法を適用し、固有振動数および建物層剛性の同定精度について、従来のシステム同定法と比較した。その結果、逐次部分空間法を用いることで、従来法では評価できなかった試験体の各層の剛性の瞬間的な低下をも詳細に評価可能であることが分かった。</p>	達成
【①-5】日本電気(株)コンソ	<p><b>【実施計画】</b>            走行車両(特に積載荷重が大きい車両)の加振による道路橋の剛性低下の検知を目的とした振動応答を広帯域(1Hz~10kHz)で計測する。  <b>【基本計画】</b>            インフラ構造物及びその部材健全度を診断するため振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。</p>	<p>圧電セラミック方式の振動(加速度)センサを取り付け可能な低消費電力の無線センサ端末を開発。広帯域(1Hz~10kHz)な振動センサのデータと温湿度センサのデータの計測機能を実装。MCU のファームウェア処理で定期的なデータ収集機能を実装し、さらにサンプリング周波数/収集周期/収集時間/通信設定などの設定変更を可能とした。            通信時のデータ量削減方法を検討し、データ量削減(50%以下)機能を平成 28 年度未完了予定で実装中。分析手法の変更に対して柔軟な対応が可能となるようデータの収集・格納・提供を行う機能部分と分析を行う機能部分を分ける設計とした。データ提供機能については外部システムとの連携も視野に入れ、Web-API として実装済み。</p>	H28 年度未達成見込み
	<p><b>【実施計画】</b>            橋梁支承の変位検知を目的とした変位量(±50mm)を計測する。  <b>【基本計画】</b>            インフラ構造物及びその部材健全度を診断するため振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。</p>	<p>インダクタンス検知式の変位センサを試作した。検知可能変位量は最大±50mm。X 軸・Y 軸・Z 軸の 3 方向の変位データを同時に 1 つのチャンネルで受信可能。温度変化によるインダクタンス変動に課題があるが、温度変化で容量値が変化しないコンデンサに変更し温度依存性に対してキャリブレーションを行うことで対応予定。</p>	H28 年度未達成見込み

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<p><b>【実施計画】</b> 自立電源を有し、振動を計測するとともに少なくとも1時間に1回の無線通信で計測したデータを送信する。</p> <p><b>【基本計画】</b> 少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、地震等の突発事象を検出できるものとする。</p>	<p>自立発電装置の装置構成と主要構成部材を検討。太陽光パネルは温度や汚れに強い耐環境性に優れた製品を選定、蓄電媒体は寿命が非常に長い LIC(リチウムイオンキャパシタ)を用い試作した。</p> <p>無線センサ端末の待機時・計測時・送信時の電流量より1日動作に必要な蓄電媒体の容量を算出。</p> <p>筐体の収容設計、蓄電デバイスのチャージ回路の高効率化・安定化に課題があるが平成 28 年度未完了予定で対応中。実環境下での自立発電の稼働率検証を平成 28 年度末までに実施予定。</p>	H28 年度末 達成見込み
	<p><b>【実施計画】</b> 地震等の突発的な事象を検出し、検出後に自動的に計測周期を短く変更してデータを無線送信する。</p> <p><b>【基本計画】</b> 少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、地震等の突発事象を検出できるものとする。</p>	<p>地震時の無線センサ端末の動作及びデータ送信に関して検討し、地震時動作に対応した通信プロトコルを実装した。</p> <p>無線センサ端末に地震検知用センサを追加することで地震を自ら検知しデータ計測を開始する方式について検討、無線センサ端末のハードウェア設計を変更。平成 28 年度末までに実装機能検証を実施予定。</p>	H28 年度末 達成見込み
	<p><b>【実施計画】</b> 無線通信は電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる920MHz帯の近距離無線により、実環境下で送信距離30m以上の通信をする。</p> <p><b>【基本計画】</b> 無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。</p>	<p>無線ネットワークを実現するセンサ端末とゲートウェイ装置を開発。通信用に 920MHz 特定小電力無線モジュールを内蔵した。</p> <p>センサ端末からゲートウェイ装置までの距離を 30m とし、920MHz 特定小電力無線によるデータ通信、ゲートウェイ装置からクラウド環境の遠隔サーバに広域無線(3G)通信でデータ送信が正しく行えることを確認済み。</p>	達成
	<p><b>【実施計画】</b> 遠隔サーバとセンサ端末間の双方向無線通信により、各種設定変更等の制御を可能とする。</p>	<p>双方向にデータ送信するよう通信プロトコルを更新。更新したプロトコルに基づき無線センサ端末の動作パラメータ更新機能とファームウェアアップデートデータ配信機能を実装。ゲートウェイ1台に最大 25 台の無線センサ端末を接続可能な設計とし、センシング実行タイミングの同期のためにセンサ端末間の時刻同期機能を実装した。</p> <p>ゲートウェイから動作パラメータとファームウェアアップデートデータを取得し反映・更新する機能を実装した。</p> <p>実環境下で平成 28 年度末までに確認予定。</p>	H28 年度末 達成見込み
	<p><b>【実施計画】</b> 実環境下で作業者が設置・運用する作業性等の観点から、センサ端末(子機)の大きさは概ね350cm<sup>3</sup>(7cm×10cm×5cm相当の体積)以下とする。</p> <p><b>【基本計画】</b> 片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下とする。</p>	<p>無線センサ端末のサイズは目標達成の目途がしたが、実運用観点からセンサ及び自立発電部は子機と分離型とした。一次電池を廃止し自立発電装置から直接給電される構成に変更、基盤レイアウトの工夫、実装の高密度化等により高さ 2.6cm×幅 10cm×奥行 4.8cm の筐体サイズを実現した。平成 26 年度試作より体積で約 460cm<sup>3</sup> 小型化した。</p>	達成



テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	<b>【実施計画】</b> 実環境下での使用に耐える筐体として、耐環境性能(IP54)を有する。	筐体を耐食性アルミニウム合金ダイキャストとし塗装を施したほか、筐体内部へのパッキン設置や電源等のコネクタ類への防水対策によりIP54の防塵・防滴設計とした。	H28年度末達成見込み
	<b>【実施計画】</b> 10年以上、動作可能な装置とする。 <b>【基本計画】</b> 実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする。	10年以上の使用を考慮し、MTBFの長い部品を使用する設計とし、個々の部品、部材のマージン(電子部品では、電圧、電流など)を考慮し設計した。	H28年度末達成見込み
<b>②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発</b>			
【②-1】首都高技術(株)コンソ	<b>【実施計画】</b> ①ひび割れ自動検出技術の開発(目標:幅0.2mm以上のひび割れを床版、橋台で80%以上の確率で検出する。)	ひび割れ検出精度は79.1%となっている。	H28年度末達成見込み
	②ひび割れデータの採取と模擬試験(目標:1,000のひび割れ画像を取得しラベル付する。)	首都高速道路をはじめ、寒冷地、沿岸部等の道路構造物を調査し、約4,000枚の画像データを取得した。現在までに約600枚のラベル付けを完了した。	H28年度末達成見込み
	③パノラマ合成技術の開発(目標:140㎡程度の対象に対して取得した画像を2分以内に合成する。)	コンクリートに適した局所特徴量抽出方法を開発し、従来接続できなかった断片画像からパノラマ合成が可能になった。現在、約8分の処理速度を要する。	H28年度末達成見込み
	④経年変化モニタリング技術の開発(目標:対応部分を自動検出し位置合わせする技術を開発し性能を評価する。)	・点検時期が異なる同一の部位について劣化や損傷の進行を検出するため、ひび割れの詳細な形状を抽出し、記録する技術を開発した。	H28年度末達成見込み
	⑤モニタリングシステムの開発、性能評価および判別性能の高精度化(目標:プロトタイプを開発し、実データ数1000サンプルを適用し、処理速度等の性能を評価する。)	クラウドプラットフォーム上にひび割れ検出機能を実装したシステムにおいて、約4,000枚のサンプルを用いて評価を行ったところ、最も処理負荷の高いひび割れ自動検出機能において30秒/枚の処理性能であった。	H28年度末達成見込み
	⑥モニタリングシステムを用いた点検ワークフローの開発、実証評価(目標:モニタリングシステムの利用を想定した業務モデルを検討する。)	撮影マニュアル案の作成と、報告書として出力する際の基本様式を設計中。	H28年度末達成見込み
【②-2】福井大学コンソ	<b>【基本計画】</b> 1. 奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法の開発	・3次元の変位計測手法を開発した。原理の確認実験を行い、有効性を確認した。	達成
	2. 1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。	・20mの構造物の場合は、2万分の1は2mmとなる。十分な精度で計測できることを橋梁等の15m以上の実構造物で確認した。	達成
	<b>【実施計画】</b> 1-②。「サンプリングモアレ計測システム」として、変位0.3mm(x,y方向)3mm(z方向(奥行き方向)たわみ角1/5000ラジアンをめざす。	・3次元の変位計測手法を開発した。実験室内で原理の確認実験を行った。原理の確認実験、屋外での実証試験、実構造物での適用実験を行った。	達成 (現場での実証はH28達成予定)
	1-③。雨や雪などの外乱がある場合の計測できる限界値を得る。	・効率よく実験が行えるシステムを構築した。一部の気象条件で実施したが、十分なデータ取得と整理は未実施である。通常レベ	60%. H28達成予定。

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
		ルの降雨では計測に支障がないことを確認した。	
	2-①. 橋梁や構造物の変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))が計測できることおよび加速度センサーやレーザー変位計等の他の計測機と 50fps 以上で同期できる。	・3次元の変位計測手法を開発した。実験室内で原理の確認実験を行った。離れた位置に設置したカメラ間の同期については 50fps 以上で同期については、同期ができるトリガ信号出力装置を試作中である。	80%. 原理は達成 (現場での実証は H28 達成予定)
	2-②. 格子パターンを用いない変位計測として、橋りょうの変位 0.2mm(x,y 方向)が計測できること	・アルゴリズムの構築と、実際の新幹線橋りょうを計測した画像を用いたデータ解析を行い、サンプリングモアレカメラの結果と比較した。橋梁での実験により、50m の距離で変位計測精度 0.5m を達成(y 方向)。	70%.アルゴリズム完成. 精度評価と改良を引き続き行う。
	2-③. 「橋梁用診断アルゴリズムの開発」として、50fps 以上のデータが取得できること。精度および速度の評価を行うことができ、実験室内で評価実験を行うことができること	・実際の現場で適用できるサンプリングモアレカメラを用いた計測システムを構築した。評価実験は、室内、屋外とも実施した。	達成
	2-④. 10Hz 程度の固有振動数の計測ができるように撮影速度 50fps 以上のデータが取得できること。精度および速度の屋外評価実験を行い、距離 20m, 各環境条件(晴天, 曇天, 昼夜間)で精度 0.2mm で時系列データが取得できること。距離 20mにて、変位の時間安定度 0.2mm/H 以内。温度安定度 0.2mm/10℃以内(屋外, 晴天下, コンクリート地面カメラ三脚設置想定)	・実際の現場で適用できるサンプリングモアレカメラを用いた計測システムを構築した。 一般土木用計測システムにおいては、多くの対象物に適用することを試している。 屋外評価実験については、ほぼ達成している。	90%(H28 に屋外評価実験の目標の条件について不足するデータを取得する。)
	3-①. 横幅の画素数 5000 画素程度の横長のカメラを試作し、支点付近と中央部の両方を同時に計測できることをめざす。実際のフィールドで試験を行い橋梁の支点付近と中央部の両方の変位を 200mm 角程度の領域に対して同時に 0.2mm 程度の精度で計測できること。	・計測領域が飛び飛びではあるが、横長カメラの試作を行い、橋梁のような横長構造物に適用する実験を屋内で行った。	70% (現場での適用実験 H28 予定)
	3-②. 「三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))が計測できることをめざす。	・3次元の変位計測で用いる三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作を行った。	達成 (ただし、屋外での計測精度の検証は未実施である。H29 に実施予定)
	4-①. 10Hz 程度の固有振動数を計測でき、50fps 以上でデータを取得できるようにする。対照比較実験を通して、アルゴリズムの評価を行い、評価目標値を定める。	・ソフト版サンプリングモアレカメラによって試作済み。	70% (対照比較実験については H28 中に実施予定)
	4-②. 各機関との計測実験を通してアルゴリズムの評価を行い、②-4 で定めた精度を確認する。中	・実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価を行った。	50% (H28 に中間目標を達成)

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値		するようにする)
	4-③.「アルゴリズム評価試験用計測システムの改良」中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	•実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価結果を元に、アルゴリズム評価試験用計測システムの改良(ソフトウェアの改良)を行った。	30% (H29に中間目標を達成するようにする)
	5-①.「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす。	•奥行き方向以外の変位とたわみ角について、実橋梁での実証試験を行った。	達成。 奥行きは H28 実施予定。
	5-②. 稼働率 100%の安定して計測できるシステム構築をめざす。発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす。「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす。	•バッテリーで撮影実験ができる装置を試作している。また、50m 程度離れていても 1ms 以内のずれで撮影の同期ができるトリガ装置の試作を行っている。一次試作により評価を行い、改良版の本試作中である。 「橋梁用計測システム」としては、試作を行い、x,y 方向とたわみ角については、現場での検証実験により目標値を達成した。	70% (H29 達成 予定)
	6-①.「一般土木用計測システム」として、標点距離 80mにて、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40℃, 昼間晴天)を受けずに連続1分間の動的(20Hz)計測(相対変位), 連続 24H の静的(1FPS)計測(絶対変位)ができること。	•一般土木用計測システムにおいては、多くの対象物に適用することを試している。 タワー上部(標点距離 78m, 平均風速 8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続 2 分間)では、±10mm 前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した。バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した。 また、トンネル内での 24 時間連続計測(1FPS), 擁壁の約 1 か月間連続(昼間のみ)計測(1FPS)では X,Y 方向の 0.2mm 絶対変位が計測できた。(測量機器, ワイヤ式変位計との比較)	70%。 H29 達成 予定
	6-②. 稼働率 100%の安定して計測できるシステム構築をめざす。発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす。「一般土木用計測システム」として、標点距離 80 m にて、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40℃, 昼間晴天)を受けずに連続1分間の動的(20Hz)計測(相対変位), 連続 24H の静的(1FPS)計測(絶対変位)ができること。	•50m 程度離れていても 1ms 以内のずれで撮影の同期ができるトリガ装置の試作を行っている。一次試作により評価を行い、改良版の本試作中である。 タワー上部(標点距離 78m, 平均風速 8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続 2 分間)では、±10mm 前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した。バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した。 また、トンネル内での 24 時間連続計測(1FPS), 擁壁の約 1 か月間連続(昼間のみ)計測(1FPS)では X,Y 方向の 0.2mm 絶対変位が計測できた。(測量機器, ワイヤ式変位計との比較)	60%。 H29 達成 予定
	7-①. 2 機関以上の規格を調査する。規格の提案先を固定する。	•日本非破壊検査協会の規格化と、国土交通省のデータベース「NETIS」への登録について調査を行った。	達成
	7-②. 日本非破壊検査協会に提案を行う。規格化の活動を行う。	•規格化と登録の手続きについて調べた。	達成
	8-①. ターゲットについて調査して、目標仕様を設定する。	•実証試験を通して検討した。	70% (H28 達成 予定)
<b>③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(1)ロボット技術開発</b>			
【③-(1)-1】 川田テクノロジーズ(株)コンソ	【基本計画】 「ロボット現場検証委員会」の検証評価の下、従来の作業員による点検や重機を用いた作業と同程度	H26,H27 年度に実施された国交省実証試験に参加し、鋼橋、コンクリート橋の両方について、開発したシステムを用いて点検作業を行い、点検・調書作成の一連の作業を試行した。検証野結果、調査作成の支援・作成、アクセス性、効率、安全確保につい	H28 年度未達成見込み

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発する。	では、○の判定を得ることができた。一方で、ひび割れの認識率には課題を残した。総合的に、「課題の解決を前提に試行的導入に向けた検証を推奨する」という評価を得た。	
	<b>【実施計画】</b> 網羅的画像取得と細部点検をモジュールの交換で実現できるマルチコプタシステムを設計・製作し、評価する。	これまでに、網羅的画像取得用マルチコプタと橋梁着脱型マルチコプタを別々に開発し、それらの機能、性能を実証試験(H26,27 国交省実証試験、独自実証試験)にて評価し、課題を抽出した。これらの課題を解決するための技術開発を H28 年度中に実施し、網羅的画像取得と橋梁脱着機能による細部点検をモジュールの交換により 1 台で可能とする機体を製作、評価する。	H28 年度未達成見込み
	<b>【実施計画】</b> 機体の操縦を容易にするためのマルチコプタ制御技術を開発し評価する。	機体の操縦を容易にするための制御技術として、外乱抑制技術、衝突回避技術、機体の位置認識技術の開発を行った。外乱抑制技術については、H26,27 の国交省実証試験にてデモンストレーションを行い、有効性を示した。衝突回避技術、機体の位置認識技術については、独自サイトでの実証試験を行い、開発した技術の検証を行った。H28 年度中に実環境に耐えうる機体制御技術として改良を重ねる。	H28 年度未達成見込み
	<b>【実施計画】</b> 運用に必要な周辺機器を開発するとともに全システムを統合し、運用性の評価を行う。	橋上からの安全な運用を目標に、有線給電等の機体係留システム、機体位置計測センサ、装置の操作インタフェースを開発し、実証試験(H26,27 国交省実証試験、独自実証試験)にて評価した。運用性、安全性に関するユーザからのニーズを取り入れ、H28 度中に統合システムを完成させ、評価する。	H28 年度未達成見込み
	<b>【実施計画】</b> 画像データハンドリングシステムの仕様抽出	実証試験(H27 国交省実証試験、独自実証試験)で得られたデータをもとに、データをハンドリングする際の課題を抽出した。特に、大容量のデータの取り扱い、データの位置特定に課題があることが分かった。H28 年度中にこれらの課題に対応できるソフトウェアの仕様として取りまとめる。	H28 年度未達成見込み
<b>【③-(1)-2】</b> ルーチェサーチ(株)コンソ	<b>【実施計画】</b> <b>【目標機能・性能】</b> 0.2mm 幅のひび割れに対し、平成28年度は75%以上とする	平成27年度の検出率61%の算出根拠を、今後の参考のために具体的に入手し、分析を行った。高画質の画像撮影のために、①撮影機材の選択、②撮影手順の工夫、③安定した飛行、④撮影時間の余裕、などが要素として重要であり、①と②はほぼ技術が定着してきたが、③は改善の余地があり、「プロペラガード」と「可変ピッチプロペラ」を改善項目として選択した。また、確実な損傷箇所検出技術向上も検討していく。国土交通省の現場検証という同じ土俵で、改善後の評価を受けるべく参加を視野に入れている。	H28 年度未達成見込み
	<b>【運用目標】</b> コンクリート箱桁橋を対象とし、点検員を支援して損傷図作成までの作業時間合計を平成28年度10%削減させる。	技術面で目標に達成するとともに、効率的に一連の作業を進める必要を認識している。改善するための要素として、①現場での撮影、②合成画像の作成、③構造物点検調査の作成、④高画質ビューアーで確認、を考えている。それぞれの作業ステージで効率化を図る必要があるが、特に②のステージで、「半自動化」と「汎用ソフト活用」を具体的に検討していく方針を固めた。	H28 年度未達成見込み
<b>【③-(1)-3】</b> 富士フィルム(株)コンソ	<b>【実施計画】</b> ①計測精度 ・床版ひび割れ図作成支援、ひび幅検出率 0.2mm90%, 0.1mm50%	・約 0.1mm~0.2mm 幅のひび割れ損傷画像を対象に、検出率 85%、誤検出率 30%(当社評価基準)	H28 年度未達成見込み
	②業務量 ・半自動(スクリプト)操作で点検時間 15 分/格間	・床版撮影時間を約 4 分(手動)から 2.5 分に短縮。鋼部材撮影時間(手動)との合計時間、約 12.5 分。	達成
	・部材・要素番号の自動認識	・手動 8.5 分/格間を数秒/格間に短縮。	達成
	・点検調査作成支援ソフト、国交省・地方自治体対応	・国交省橋梁定期点検要領に加え、地方自治体の調査様式に対応済み。	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	③現場人員 ・3名で設置時間 20 分、撤去時間 15 分	・架台のユニット化及び重量の軽減、撮像装置周辺のケーブル整線により目標達成した。	達成
	④安全対策 ・実用化 に向けた安全性、回収性 検討	・命綱を用いた落下防止機能、および車輪の逸脱防止機能を追加し、性能評価中。	H28 年度未 達成見込み
	その他 ・自己サイト(首都高)に加え、積極 的な第三者評価実施	・川崎市、岩見沢市で実施済み。伊勢原市で実施予定。	達成
【③-(1)-4】 ジベル調査 設計(株)コ ンソ	【実施計画】 開発①: 噴出清掃メンテナンス要 素技術 室内実験で使用機材の基本性能 測定実験より設計条件を整理し試 作機を製作する。 基本性能測定のための試験は、 高圧噴射による発生反力・障害物 除去能力・必要水量等を測定す る。	基本性能試験を実施して設計条件の整理を実施。 □実施した試験項目 ○高圧散水時の発生反力の計測 ○高圧散水の水の衝撃力の計測 ○点検障害物除去性能試験 (土砂・鋼製の錆・コンクリート表面の付着物)	H28 年度未 達成見込み
	【実施計画】 開発②: 片持ち型水平アーム安定 要素技術 開発②-1: アームバランス安定・横 揺れ制御要素技術 室内試験により設計条件整理し、 基本設計を実施。試作機を製作 し、開発ベースロボットを用いて 実橋梁での動作・性能確認試験 を実施して要素技術の基礎構 造の確立を目標とする。 1) 設計条件整理(荷重条件(自 重・反力)) 2) 構造基本設計 3) 機構部の設計及び製作 4) 電気系統制御・操作盤他の設 計及び製作 5) 試作機における現場実証試験 の実施	基本性能試験を実施して設計条件の整理を実施。 □実施した試験項目 ○高圧散水時の発生反力の計測	H28 年度未 達成見込み
	【実施計画】 開発②-2: 複線水平アーム開発 開発②-3: アーム連結部高強度化 開発 仕様検討を行い複線式水平アームの プロトタイプを製作し、室内で 各アームの結合方式・結合強度・ バランス性能等の試験を実施して アームの基礎構造の確立を目標 とする。 1) 設計条件整理(荷重条件・自 重・反力・ねじりモーメント) 2) 強度試験用試作アーム(単線) 及び、アーム連結部の基本設計・ 試作機製作 3) 同上強度試験・評価 4) 複線式アーム・連結部の設計・	基本性能試験を実施して設計条件の整理を実施。 □実施した試験項目 ○高圧散水噴出時の反力により生じる鉛直ロッドねじりモーメント の測定	H28 年度未 達成見込み

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	製作		
	<b>【実施計画】</b> 開発③: 狭隘部点検カメラ要素技術 自由度を持たせたロボットアーム及び狭隘部点検カメラの基本動作、姿勢制御、カメラ解像度等の要素仕様を決定するため室内試験を実施する。室内試験は、模擬損傷を設けた狭隘空間試験体(隙間 100mm・奥行 1000mm)を作成し、カメラを挿入し模擬損傷の情報を 10 分以内に取得する事を目標とする。	○カメラ要素の仕様検討、選定作業を実施	H28 年度未達成見込み
【③-(1)-5】 (株)開発設計コンサルタントコンソ	<b>【実施計画】</b> ①走行機構の開発	・三点支持改良型ロボットの開発	達成
		・走行安定性・耐久性の向上	H29 年度達成見込み
	②計測機構の開発	・画像撮影用マニピュレーターの開発	達成
		・3 測定装置対応マニピュレーターの開発	H29 年度達成見込み
		・画像解析によるひび割れ判定の確立	達成
		・打音装置の開発	達成
		・電磁波レーダによる塩害判定の確立	達成
	③姿勢制御・通信機構の開発	・安定走行用の姿勢制御の実用化	H29 年度達成見込み
		・制御用 920MHz 帯通信の実用化	H29 年度達成見込み
	④安全装置他の開発	・燃料電池等独立電源による走行の実現	計画変更
・リフターを用いた安全装置の実用化		H28 年度達成見込み	
・電力通信併用ケーブルを用いた安全装置の実用化		H29 年度達成見込み	
【③-(1)-6】 (株)熊谷組コンソ	<b>【実施計画】</b> 支間 30m 程度の鋼橋の主桁をロボットが走行する。	添接部における各種のボルトパターンでの走行実験を実施中である。	H28 年度未達成見込み
	<b>【実施計画】</b> 高精細カメラを搭載して同時処理で概略展開図を作成する。	主桁 1 支間分の撮影データを PC に伝送し、リアルタイムに床版の概略展開図を作成する。(ソフトを開発中)	H28 年度未達成見込み
	<b>【実施計画】</b> カメラ搭載ロボットアームにより 0.2 mm のひび割れを撮影する。	点検員が近づけない環境下においても、0.2mm 幅のひびわれを検出できる画像を取得する。(実験環境下では取得可能)	H28 年度未達成見込み
【③-(1)-7】 (株)キュー・アイコンソ	<b>【基本計画】</b> 2015 年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実用化開発、実証実験を中心に実施する。	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機を用いた現場実証試験により得られた課題を踏まえた、実用機の開発を進めている。新規の要素技術を試作し、実験機(現行機)に適応し評価を行った。	達成
	<b>【基本計画】</b> 従来の作業員による点検や重機	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機を用いた現場実証試験の成果では、作業員による点検よりも低コストであり、ダム壁面	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	を用いた作業と同程度のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発する	に近接した精密な映像を取得することに成功している。	
	【実施計画】 D.1 調査プラットフォームおよび操作インターフェースの開発 平成 28 年度計画:設計・製作・仮組立を完了	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機での現場検証結果を踏まえ、設計改良を行った実用機開発を進めている。新規要素技術として水上ロボットの点検対象の壁面に対する移動距離を計測する距離計測機能付ガイドローラの評価モデルを試作、有効性を確認した。また、航行性能向上のため高効率スラスタ開発を進めている。	H28 年度末 達成見込み
	D.2 水中壁面自動調査技術の開発 平成 28 年度計画:設計・プログラムデバッグを完了	水中壁面に対して正対し、一定の離隔をとりながら矩形波状に水中機の自動的に航行させることで広範囲の水中壁面を効率的に点検する。これまでの成果として、実験プールにて自動調査を実施画像取得に成功している。実用機に向け、距離計測機能付ガイドローラを利用した、実用性を高めた機能として開発を進めている。	H28 年度末 達成見込み
	D.3 外部環境対応技術の開発 平成 28 年度計画:概要設計を完了	実環境における風の影響下においても運用可能とするため、 ①風力の影響を低減する運用方法 ②外部補助装置による人的補助による水上ロボットの位置保持手法を開発する。①について、スラスタを用いた壁面に対する位置保持機能の検証実験を実施し、位置保持力を計測し有効性を確認した。	H28 年度末 達成見込み
	D.4 報告書作成支援プログラムの開発 平成 28 年度計画:概要設計を完了	報告書作成支援プログラムとして、 ①異常箇所のリアルタイム記録機能、 ②水中マップ自動生成プログラム、 ③自動報告書作成プログラム の開発を行う。これまでの成果として②を開発しており、実験プール、弥栄ダムにおける点検映像について、画像をつなぎ合わせ一枚の画像を得る事に成功している。実用化に向け総合的な支援プログラムとするよう①、③の概要設計を進めている。	H28 年度末 達成見込み
	D.5 水中ロボット用アタッチメントの開発 平成 28 年度計画:概要設計を完了	調査内容・現場環境に柔軟に対応するため、状況に応じて装着可能なアタッチメントとして、クリアサイト搭載近接撮影用ガイドアームを開発する。これまでの成果として、ガイドアームを平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機に付加し、実証試験において安定な映像取得に有効であることを確認している。これにクリアサイトを付加することで、濁水中でも明瞭な視界の確保を可能とする。	H28 年度末 達成見込み
	S.1 水中音響イメージングソーナールの開発	平成 26 年度～平成 27 年度開発における独自サイト(日立所有水槽)での実証試験結果等を踏まえ、距離分解能の向上等の設計改良を進めている。新規要素技術を検討、評価モデルを製作し、平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機にて評価予定である。	H28 年度末 達成見込み
	S.2 環境地図作成技術の開発	平成 26 年度～平成 27 年度開発における独自サイト(日立所有水槽)での実証試験結果を踏まえ、設計改良を進めている。新規要素技術を検討、評価モデルを製作し、平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機にて評価予定である。	H28 年度末 達成見込み
【③-(1)-8】 朝日航洋 (株)	I. 【実施計画】運動性能の向上 ・流速 1.0 m/s 以下の環境下で計測可能とする。	・機体のベースとなるフロートと船外機の選定・走行実験、フレーム設計、遠隔操縦機による船外機の制御プログラム設計、が完了	H28 年度末 達成見込み
	II. 【実施計画】点検性能の向上 ・観測時の視野角の最適化を図る。 ・欠測を防ぐ操船支援機能を確立する。	・観測時の視野角については H28 下期で検討予定。操船支援機能は、各種搭載センサーの選定が完了。	H28 年度末 達成見込み

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	Ⅲ. 【実施計画】運用性能の向上 ・機体の全長を3m以内に作る。	・実施計画書に記載している左記目標に関しては再設定が必要。詳細は②を参照のこと。	未達成
	Ⅳ. 【実施計画】安全性能の向上 ・安全航行を実現する操船支援機能を検討する。	・安全航行を実現する操船支援機能として、遠隔から機体状況を確認する機能を検討中。H28 下期で具体化する予定。	H28 年度未達成見込み
【③-(1)-9】 国際航業 (株)コンソ	【実施計画】 (1)画像データ・三次元地形データの収集技術の開発	最大飛行時間 30～40 分の 4 枚プロペラ型のクアッドコプターを開発し、活動中の桜島火口の動画を撮影することに、世界で始めて成功した。また、本研究で開発したマルチローター機に搭載したカメラで撮影した連続静止画を用いて、三次元モデルやオルソ画像を作成し、解析ソフトやGCPの有無、撮影高度による違い等について検証した。	H27 までの目標は達成
	(2)デバイスの運搬・設置・通信技術の開発	災害時に適応可能な、テザーを用いたデバイス運搬・設置・通信技術を開発した。	H27 までの目標は達成
	(3)土砂サンプリング技術の開発	一ラ式の土砂サンプリングデバイスを開発し、このデバイスの基本性能試験や、フィールドにおける動作試験を実施した。また、実用機の製作を行った。	H27 までの目標は達成
	(4)含水率・透水性計測技術の開発	透水試験を簡易的に実施すると想定した場合でも、多くの課題が存在することが分かった。今後、雨量や加速度等の間接的な情報から、対象箇所の湿潤状況や土砂移動発生の可能性を推定する手法も検討する。	当初計画の見直し実施
	(5)火山災害地域のリアルタイムデータベースの構築	リアルタイムデータベースシステムのプロトタイプが完成した。なお、現時点では、計算プログラムの入力条件に利用できる観測データが少ない状況であるため、今後は、観測項目の追加状況に合わせてシステムの改修を行う予定である。また、観測データのデータベース登録方法についても、今後の検討課題である。	H27 までの目標は達成
【③-(1)-10】(株)日立製作所 コンソ	①無人調査プラットフォーム車両と 操作用インタフェースの開発		
	・無人調査プラットフォーム車両 (探査用)		
	【機体】 ・質量	・300kg 程度(全装備)	達成
	・寸法	・D1.5m×W1m×H1m 程度	達成
	【航行性能】 ・連続航行時間	・最大 3 時間(バッテリー駆動)⇒1.5 時間	未達成
	・航行速度	・8km/h 程度	達成
	・航行距離/範囲	・約 15km 程度⇒10km 程度	未達成
	・登坂能力	・最大斜度 35 度 程度⇒30 度程度	未達成
	・段差	・300mm 以下	達成
	・操作距離	・500m以内(オープンエア空間) 中継局により300m 程度の延長(2 台中継までのマルチホップ機能)	達成
	【環境性能】 ・照度	・暗闇でも調査が可能(照明装置あり、赤外線カメラも装着可能)	達成
	・防塵防水性	・IP65 程度	達成
	・冠水路走行	・深さ 25cm、距離 2m の航行が可能	達成
	【運用性】 ・運搬方法	・小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
・運用人数	・2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成	



テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	・準備／撤収	・各 40 分程度	達成
	・自動航行	・GPS 情報とセンサ情報を用いた自律航行が可能(オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	未達成
	・マニュアル航行	・GPS の届かないトンネル内では映像を確認しながら、半自律操作が可能	達成
	【調査機能】	・可視光カメラによるリアルタイム映像取得、記録が可能	達成
	・映像	・赤外線カメラによるリアルタイム熱画像取得、人の検知等が可能	達成
	・ガス検知	・ガスセンサのリアルタイム画像取得、記録により、ガス検知が可能(ガス種類はセンサに依存)	達成
	・測量	・レーザースキャナーの搭載による概査測量が可能(周辺 100m、360 度、誤差 5cm 程度)	達成
		・レーザー測量センサーの搭載による精密測量が可能(周辺 300m、360 度、誤差 1cm 程度)	達成
	・無線中継	・遠距離調査のための無線中継が可能(オープンエア空間で 300m 程度の延長、2台中継までのマルチホップ機能)	達成
	・狭隘部	・搭載可能な小型探索ロボットを用いて狭隘部の調査が可能(幅 20cm、高さ 15cm、段差 15cm の走行可能)	達成
	【安全性能】	・機体および遠隔操作コンソールに非常停止ボタンを装備し、誤操作や衝突した際に緊急停止が可能	未達成
	・緊急停止		
	・始動時自動点検	・始動時にセンサ、アクチュエータ等の作動状態のセルフチェック機能を有する	未達成
	・無人調査プラットフォーム車両(ヘリ搭載用)		
	【機体】	・100kg 程度	達成
	・質量		
	・寸法	・D1.2m×W0.8m×H1.0m 程度	達成
	【航行性能】	・最大 4 時間程度(バッテリー駆動)	達成
	・連続航行時間		
	・航行速度	・10km/h 程度	達成
	・航行距離/範囲	・約 20km 程度	達成
	・登坂能力	・25 度 程度	達成
	・段差	・100mm 以下	達成
	・操作距離	・500m以内(オープンエア空間)中継局により300m程度の延長(2台中継までのマルチホップ機能)	達成
	【環境性能】	・IP65 程度	達成
	・防塵防水性		
	・冠水路走行	・深さ 25cm、距離 2m の航行が可能	達成
	【運用性】	・小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	・運搬方法		
	・運用人数	・2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	・準備／撤収	・各 40 分程度	達成
	・自動航行	・GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能(オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
	・マニュアル航行	・GPS の届かないトンネル内では映像を確認しながら、半自律操作が可能	達成
	【調査性能】 ・無線中継	・遠距離調査のための無線中継が可能 (オープンエア空間で 300m 程度の延長、2台中継までのマルチホップ機能)	達成
	【安全性能】 ・緊急停止	・機体および遠隔操作コンソールに非常停止ボタンを装備し、誤操作や衝突した際に緊急停止が可能	未達成
	・始動時自動点検	・始動時にセンサ、アクチュエータ等の作動状態のセルフチェック機能を有する	未達成
	<b>②不整地踏破アーム付無人車両の開発</b>		
	【機体】 ・質量	・550kg 程度	達成
	・寸法	・D3.0m×W1.8m×H1.5m 程度	達成
	【航行性能】 ・連続航行時間	・最大8時間(内燃機関駆動)	達成
	・航行速度	・4km/h 程度	達成
	・航行距離/範囲	・約 20km 程度	達成
	・登坂能力	・30 度 程度	達成
	・段差	・400mm 以下	達成
	・操作距離	・500m以内(オープンエア空間) 中継局により300m 程度の延長(2台中継までのマルチホップ機能)	達成
	【環境性能】 ・防塵防水性	・IP65 程度	達成
	・冠水路走行	・深さ 25cm、距離 2m の航行が可能	達成
	【操作性】 ・運搬方法	・小型トラック(2t 程度)での運搬が可能	達成
	・運用人数	・2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	・準備/撤収	・各 40 分程度	達成
	・自律運用	・GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能(オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	未達成
	・半自律運用	・GPS の届かないトンネル内では映像を確認しながら、半自律操作が可能	達成
	【調査性能】 ・無線中継	・遠距離調査のための無線中継が可能 (オープンエア空間で 300m 程度の延長、2台中継までのマルチホップ機能)	達成
	【安全性能】 ・緊急停止	・誤操作や衝突した際に緊急停止が可能	未達成
	・始動時自動点検	・始動時にセンサ、アクチュエータ等の作動状態のセルフチェック機能を有する	未達成
	<b>③無人調査プラットフォームヘリと操作用インタフェースの開発</b>		
	・無人調査プラットフォームヘリ(長距離用)		
	【機体】	・8kg 程度	達成

テーマ名	目 標	研究開発成果	達成度
	・質量		
	・寸法	・D1.2m×W1.2m×H0.6m 程度	達成
	【航行性能】 ・連続航行時間	・最大 60 分(バッテリー駆動)	達成
	・航行速度	・20m/s 以上	達成
	・航行距離/範囲	・40km	達成
	・実用ペイロード	・1kg	達成
	・飛行高度	・4,000m	達成
	【環境性能】 ・耐風速	10m/s	達成
	・耐水性	100mm/h 程度の雨天での航行が可能	達成
	【操作性】 ・運搬方法	・小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	・運用人数	・2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	・準備/撤収	・各 30 分程度	達成
	・自動航行	・GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能 (オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	達成
	・マニュアル航行	・映像を確認しながらリアルタイム無線操縦航行が可能	達成
	【調査性能】 ・映像	・デジタルカメラによるリアルタイム動画調査が可能	達成
		・デジタルカメラによる高精細動画録画調査が可能	達成
		・デジタルカメラによる高精細静止画調査が可能	達成
		・赤外カメラによるリアルタイム動画調査が可能	達成
		・赤外カメラによる静止画調査が可能	達成
	・地滑り検知	・地滑り検知センサの設置が可能	達成
		・地滑りのリアルタイムモニタリングが可能	達成
	・無線中継	・遠距離調査のための無線中継が可能	達成
	【安全性能】 ・緊急対策	・緊急時に設定したポリシーに対応した運用が可能	達成
	・セルフチェック	・システムを構成するパーツ(モーター、モータードライバー、バッテリー)は、制御装置との通信セルフチェック機能を有する	達成
	・無人調査プラットフォームヘリ(電 磁探査用)		
	【機体】 ・質量	・10kg 程度	達成
	・寸法	・D1.5m×W1.5m×H0.7m 程度	達成
	【航行性能】 ・連続航行時間	・最大 20 分(バッテリー駆動)	達成
	・航行速度	・10m/s 以上	達成
	・航行距離/範囲	・5km	達成
	・実用ペイロード	・5kg	達成
	・飛行高度	・2m 程度を保持した探査航行が可能	達成
	【環境性能】	・10m/s	達成

テーマ名	目 標	研究開発成果	達成度
	・耐風速		
	・耐水性	・100mm/h 程度の雨天での航行が可能	達成
	【操作性能】 ・運搬方法	・小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	・運用人数	・2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	・準備／撤収	・各 40 分程度	達成
	・自動航行	・GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能(オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	達成
	・マニュアル航行	・リアルタイム無線操縦航行が可能	達成
	【調査性能】 ・電磁探査	・電磁探査システムによる地質調査が可能	達成
	・無線中継	・遠距離調査のための無線中継が可能	達成
	【安全性能】 ・緊急対策	・緊急時に設定したポリシーに対応した運用が可能	達成
	・セルフチェック	・システムを構成するパーツ(モーター、モータードライバー、バッテリー)は、制御装置との通信セルフチェック機能を有する	達成
	<b>④無係留型ヘリ用離発着装置の開発</b>		
	【航行性能】 ・連続航行時間	・有線給電で 12 時間以上ヘリ運用が可能	達成
	・飛行高度	・30m 以上	達成
	・離着陸	・10km/h 以上の走行状態での離着陸が可能	達成
	・上昇	・3m/秒程度の上昇	達成
	・下降	・3m/秒程度の巻取り	達成
	【環境性能】 ・耐風速	・10m/s	達成
	・耐水性	・100mm/h 程度の雨天での航行が可能	達成
	【操作性能】 ・運搬方法	・小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	・運用人数	・2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	・準備／撤収	・各 40 分程度	達成
	【調査性能】 ・無線中継	・遠距離調査のための無線中継が可能	達成
	【安全性能】 ・緊急対策	・緊急時に設定したポリシーに対応した運用が可能	達成
	・セルフチェック	・システムを構成するパーツ(モーター、モータードライバー、バッテリー)は、制御装置との通信セルフチェック機能を有する	達成
	<b>⑤地形情報の三次元可視化技術の開発</b>		達成
	【調査性能】 ・地形解析	・二次元リアルタイム解析が可能	達成
		・30 分程度でサンプリング三次元地形解析が可能	達成
		・3 時間程度でフル三次元地形解析が可能	達成
	・GIS 統合	・各解析結果の GIS(地図システム)上への重畳が可能	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
		・電磁探査システムのデータ処理・解析ソフトと連動し、GIS 上への重畳が可能	達成
	<b>⑥地質調査情報の解析技術の開発</b>		
	<b>【調査性能】</b> ・地質解析(電磁探査)	・吊下型電磁探査が可能	達成
		・災害現場での電磁探査結果のデータ処理・解析が可能	未達成
		・地下 10m 程度までの解析が可能	達成
	・地質解析(土壌物性計測)	・土壌物性計測プローブデータ取得が可能	達成
		・土壌物性計測プローブデータの表示が可能	達成
	<b>⑦災害情報データベースの開発</b> <b>【情報管理機能】</b> ・災害情報管理	・撮影時刻及び解析イベント発生毎に時系列で災害情報の管理が可能	達成
		・国や自治体の防災システムとの情報共有するフォーマットでの出力が可能	達成
<b>【③-(1)-11】(株)大林組コンソ</b>	<b>【実施計画】</b> ・走行装置 重量:1.2t 接地圧:16kPa 登坂角:30° 段差乗り越え:50cm	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。	達成
		平成 28 年度以降、駆動力を増強しつつ信頼性・耐久性を向上させた新規モデルを製作中。	H28 年度達成見込み
	・画像取得装置 俯瞰画像を必要としない 3D 画像を取得するロボットヘッドの製作	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。	達成
		平成 28 年度以降、より耐久性を高めたロボットとシステムの安定化を目指し改造中	H28 年度達成見込み
	・無線通信装置 帯域:10Mbps 以上 総遅延:300msec	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。	達成
		平成 28 年度以降、より安定的な通信をめざし、周波数帯・出力の再検討中	H28 年度達成見込み
	・貫入試験装置 遠隔にてスウェーデン式サウンディング試験を実施	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。	達成
		平成 28 年度以降、ロードが試験中に拘束された場合などのリスクに対処するための改造を実施中。	H28 年度達成見込み
・測位	平成 27 年度は簡易な測位装置にて基礎試験を実施 平成 28 年度以降、GNSS 受信機を搭載し、走行・試験軌跡表示や走行ナビゲーションの実施見込み	H28 年度達成見込み	
・運用 2t車への積載 2 時間での作業準備	平成 27 年度における実証試験にて確認済み	達成	
<b>【③-(1)-12】三菱重工業(株)</b>	<b>【実施計画】</b> ・国内における防爆型式検定の取得	・バッテリー式陸上移動ロボットとしては国内初となる防爆型式検定を取得。	達成
	・ATEX の取得に必要な課題抽出	・産業安全技術協会への問合せも含め調査中。	H28 年度未達成見込み
	・走行試験の実施、走破性能の検証、課題抽出	・社内に模擬コースを設定し、無線通信・目視操作でプレ試験を実施し、大きな問題なく完走。走破性を確認した。	H28 年度未達成見込み
	・ケーブルリールの検証、性能評価	・リールから送出されるケーブル長から自己位置を推定する機能の評価試験を実施し、誤差±2m に収まることを確認。トンネル内での自己位置推定に目処を得た。	達成

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度
<b>③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(2)非破壊検査装置開発</b>			
【③-(2)】(国研)産業技術総合研究所コンソ	<b>【基本計画】</b> ・X線源:管電圧200kV以上、管体厚7cm以下、重量3kg/組以下	・カーボンナノ構造体X線源を用いて、ロボットに搭載可能な管電圧200kV以上、管体厚7cm以下、重量3kg/組以下のX線源を開発した。	達成
	・外径測定精度0.3mm以下、外径測定間隔0.8秒以下	・測定間隔0.8秒以下で外径を0.3mm以下の精度で外径を測定できるシステムを開発した。	達成
	・センサピッチ0.1mmのCdTeイメージセンサ開発。	・センサピッチ0.1mm、素子厚1mmの高エネルギーX線に対応したCdTeイメージセンサを開発した。	達成
	・70mmの鉄を透過したX線のイメージングが可能であることを確認。	・開発したカーボンナノ構造体X線源を用いて、70mmの鉄の透過イメージングが可能であることを確認した。	達成
	・中性子水分センサ:重量2.0kg以下、検査スピード670箇所/日、自走ロボットに搭載した場合のスクリーニング検査能力:100m/日以上	・重量2.0kg、検査スピード30秒/箇所検査可能でロボットに搭載可能な中性子水分センサを開発した。この水分センサをロボットに搭載し、化学プラント現場での実地試験により、スクリーニング検査能力100m/30分以上であることを確認した。	達成
	・X線及び中性子水分センサの基本コンポーネントを完成させ、自走ロボットに搭載して6インチ保温材付き配管のスクリーニング検査を可能にする。	・中性子水分センサの基本コンポーネントを完成させ、自走ロボットに搭載して6インチ保温材付き配管のスクリーニング検査を可能にした。X線非破壊検査システムに関しては、検証用ロボットに搭載して外径測定精度0.3mmの検査能力を確認した。H28年中にX線システム用自走ロボットに搭載して外径検査を可能にする見込みである。	中性子:達成 X線:H28年度達成見込み
	<b>【実施計画】</b> ・X線源 管電圧200kV 2.5kg/個以下	・管電圧200kV、重量2.5kg/個、ロボット用バッテリーで駆動可能なX線源を開発した。	達成
	・CdTe検出器 センサピッチ0.1mm、センサ領域44mmx24mm	・センサピッチ0.1mm、センサ領域44mmx24mmで素子厚1mm、ロボット用バッテリーで駆動可能な高エネルギーX線対応の検出器を開発した。	達成
	・中性子水分センサ He3センサ完成、シンチレーション式開発	・ロボットに搭載できるHe3型の中性子水分センサを開発するとともに、シンチレーション式中性子センサを試作し、ロボット搭載水分センサとして使用できることを確認した。	達成
	・大面積検出器 素子厚600 $\mu$ m、有感面積10cm $\square$ の試作器のイメージセンサ	・素子厚600 $\mu$ m、有感面積10cm $\square$ の隔壁シンチレータと低リーク電流イメージセンサを組み合わせたX線検出器を試作し、高エネルギーX線を用いてその性能を確認した。	達成
・ロボットのフィールド検証:中性子水分センサ搭載ロボットの化学プラント現場でのフィールド検証	・中性子水分センサ搭載ロボットの化学プラント現場での保温材被覆配管のスクリーニング検査のフィールド検証を行い、基本計画の目標を達成できることを確認した。	達成	

## 研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

### 【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS技術研究機構

#### (1) 研究開発目標

##### 【全体概要】

##### <対象と解決すべき課題>

社会インフラの中で道路インフラは陸上貨物輸送量 2,655 億トンキロの 92.3% (2,451 億トンキロ) を占め、国民の豊かな生活を支えている。しかしながら、今後 20 年で建設後 50 年以上経過する道路インフラの割合が加速的に高くなる。さらに、過積載交通量の増大、異常気象の増加等の環境条件の変化も相まって、道路インフラの劣化・損傷は当初予想していたよりも大きなものとなっており、落橋、道路付帯物の倒壊、法面の崩落等の事故が散見され、大きな社会課題となっている。このため、国としても 5 年に1回の近接目視を法制化する等の対策を取ってはいるが、少子高齢化に伴う熟練点検員の減少による点検結果のバラツキ、容易に近接できなかつたり、構造物の内部等点検困難な箇所が存在したりするため、従来の点検、補修を中心とする事後保全だけでは対応できなくなっている。

そこで、本研究開発では、これら社会課題を有する道路インフラを対象とする。特に、高速道路は陸上貨物輸送量の 47.7% (1,266 億トンキロ) を占め、国民の生活に欠かせないライフラインになっているため、先ずは国民生活に与える影響度とその維持管理体制の状況を踏まえ、高速道路を対象とする。高速道路で技術を高め、将来的には一般道への展開を目指す。また、道路インフラの中でも、老朽化が進んでいる橋梁、環境条件等の変化で設計基準の見直しが必要となっている橋梁上の情報板等の道路付帯物及び異常気象により要注意箇所が 10 年前の 2 倍になっている法面を対象とする。

##### <解決する方策>

この課題を解決するために、従来の点検・補修を補完し、定量的で非破壊センシングにより内部損傷の検知も可能とし、定期点検間も道路インフラの状態を常時・継続的・網羅的に把握し、点検・補修の優先度を決定するとともに予防保全にも資する小型、安価、高性能、高耐久で自立電源を有する無線センサ端末を道路インフラに常時設置してモニタリングする道路インフラモニタリングシステム (Road Infrastructure Monitoring System : RIMS) を開発する。

##### <実現する方法>

RIMS を実現するために、各フィールドの常時モニタリングに適した以下に示す新規のモニタリングシステムを開発する。

- (1-1-1) 橋梁(振動) : MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術により、従来にない低周波(1Hz)から高周波(1MHz)まで測れるスーパーアコースティックセンサを開発し、橋梁全体の固有振動数が変化する大規模な劣化から、予防保全に関わる内部の微小劣化・進展状態までモニタリング可能な、低コストの橋梁劣化センシングシステムを開発する。
- (1-1-2) 橋梁(ひずみ) : 極薄構造ひずみセンサをフレキシブルシート上にアレイ化したフレキシブル面パターンセンサシートを開発し、シートを貼るだけで橋梁の床版や主桁などの構造物のひずみ分布を無線で測定可能なセンシングシステムを開発する。
- (1-2) 道路付帯物(傾き、振動) : 高精度・高分解能の MEMS センサデバイスとそれを搭載した傾斜マルチセンサ端末を開発し、傾斜と振動を同時に測定する。開発した傾斜マルチセンサ端末を用いて、道路標識板設備等の道路付帯物モニタリングシステムを開発する。
- (1-3) 法面(変位) : 電波の位相差を利用した変位計測技術により、高計測頻度・全天候・3次元で法面変位を高精度にセンシングするシステムを開発する。

また、共通基盤技術として、以下を開発する。これらの技術は共通基盤技術として開発することにより、対象フィールド毎に個別に開発するより効率的であるとともに、道路インフラを統合したモニタリングが可能となり、道路インフラのトータルな維持管理が可能となる。

- (2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォーム:多種多様なセンサの情報を共通のデータフォーマットに変換し、かつ、収集データの処理方式を遠隔で変更可能とすることで、統一的かつセキュアにセンサデータの伝送・蓄積・提供を実現する無線通信ネットワーク共通プラットフォームを開発する。
- (2-2) 高耐久性パッケージング技術:屋外の過酷な環境において10年以上の寿命を確保するオールインワンパッケージング技術及びフィルムシール技術を開発する。

これらを共同参加しているNEXCO3社と阪神高速道路の主要高速道路会社とセンサ企業(機関)及び通信システム企業が連携して、以下の実証・評価研究を実施する。これにより、道路インフラ全般のニーズに沿った開発を行う。

- (3) 実証・評価研究:開発したセンサ端末を活用した各フィールドのインフラ状態をモニタリングする無線センサネットワークシステムを構築するとともに、各フィールドで1年以上の実証実験を実施して、各フィールドの劣化・損傷診断に必要な基礎データを取得するとともに一般道へ展開するのに有用なパラメータを抽出する。

さらに、将来技術として、広域にばらまかれたセンサ端末の時刻同期のための以下の小型原子時計の開発を行う。

- (4)原子時計:チップスケール原子時計の高精度、小型、低消費電力化を実現するために、(4-1)ガスの構造最適化・高純度化、(4-2)制御回路の低消費電力化、(4-3)面発光レーザの波長歩留り向上、(4-4)低消費電力で安価な原子時計を実現するための新技術導入可能性の検討と技術ロードマップの策定を行う。

#### <現場での運用方法及び目標>

各フィールドのモニタリングシステムを効果的に実証できる実証場所を参画している高速道路会社管理の現場から1か所以上選定する。各フィールドのモニタリングシステムが実環境下で適用できることを実証するため、四季を越えた1年以上の実証実験を実施し、各フィールドの劣化・損傷診断に必要な基礎データを無線共通プラットフォームにより収集する。

基本計画に記載されている以下を達成目標とする。

2016年度末までに以下に記載のセンサ端末開発及びセンサネットワークシステムの構築の概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実証実験を中心に実施する。

##### ○センサ端末開発

以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。

- ・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。
- ・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとする。また、地震等の突発事象を検出できるものとする。
- ・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下とする。
- ・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。
- ・実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする。

##### ○センサネットワークシステムの構築

上記で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

上記目標に向け、研究開発を推進してきたが、すべてのテーマにおいて、今年度末には中間目標を達成見込みである。また、特許17件、論文、学会発表等の外部発表68件、HPやブログ、成果発表会の開催等広く成果の普及を図り、日経新聞や日経エレクトロニクスの特集等に取り上げられ、注目を得ている。



## (1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

### (1-1) 橋梁センシングシステムの開発

#### (1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

(担当: (株)東芝、再委託先: (国)東京大学、(国)京都大学)

#### <対象と解決すべき課題>

今後 20 年で半数が建設後 50 年以上となり劣化の進展が社会的問題となる危惧が高まっている橋梁を対象とする。橋梁の維持管理のライフサイクルコストを低減するため、事後保全から予防保全への移行が必要である。そのためには、初期破壊、メゾ破壊、マクロ破壊の全ての劣化状態を検出できるセンサシステムが必要であるがそのようなセンサシステムはない。

#### <解決する方策>

従来は振動計、加速度計、AE(アコースティックエミッション)センサの 3 つのデバイスでカバーしていた 1Hz~1MHz に渡る広帯域を、1 つのセンサデバイスで賄うことが可能な、新構造の MEMS 型スーパーアコースティックセンサ(SA センサ)デバイスを開発する。また、この SA センサデバイスを搭載した小型センサ端末を開発し、道路橋梁を対象とし、橋梁全体の固有振動数が変化する大規模な劣化(数 Hz オーダー)から、予防保全に関わる内部の微小劣化・進展状態(数百 kHz オーダー)までモニタリング可能な、低コストの橋梁劣化センシングシステムを実現する。さらに、橋梁構造の損傷や劣化とセンシングによる種々のパラメータの関係を明らかにし、健全性を定量的に評価可能な手法を開発する。

#### <実現する方法>

広帯域の振動を計測するため、気液の界面にカンチレバーを配置した新構造の MEMS 振動センサ(SA センサ)を開発する。また、自立電源で駆動可能なウェイクアップ・スリープ機能を有する低消費電力回路及び AE 発生源の位置標定等が可能な小型無線端末を開発する。さらに、弾性波パラメータを活用した新たな劣化・損傷指標を提案するとともに実構造物による実用化検証を行う。

#### <現場での運用方法及び目標>

橋梁一本につきおよそ 30m 間隔でセンサ端末を設置し、センサ端末間でマルチホップ機能により、データを通信して、集約器へとデータを送信し、集約器にデータを蓄積する。集約器は例えば橋のたもとなど有線配線が比較的容易な場所に設置するものとし、コンセントレータと有線接続して、計測データは RIMS ネットワークを介して収集サーバに伝送され、弾性波パラメータを活用した新たな劣化・損傷指標により、劣化状態を判定する。

最終目標として、感度 $-80\text{dB}(\text{re } 1\text{V}/\mu\text{bar})$ 、帯域 1Hz~1MHz の仕様を満たす MEMS SA センサデバイスの開発を完了する。また、SA センサを複数搭載し、自立電源で 1 時間に 1 回、920MHz で無線通信が可能な概ね  $7\text{cm}\times 10\text{cm}\times 5\text{cm}$  のサイズの小型センサ端末の開発を完了する。開発したセンサ端末・ネットワークシステムを用いて、高速道路会社管轄の実環境下にて実証実験を行い、弾性波パラメータを活用した橋梁構造の健全性評価手法の有効性を確認する。

## (1-1-2)フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

(担当: 国立研究開発法人産業技術総合研究所、大日本印刷(株)、再委託先: (国) 東京大学)

### <対象と解決すべき課題>

現在、高速道路鋼橋の点検は5年に1度行われている。亀裂発生が特に問題となる溶接部の点検において、亀裂が認められた場合のみならず、塗膜割れが確認された場合は渦流探傷試験、磁粉探傷試験によって溶接部表面の亀裂の有無を確認する。上記の点検で亀裂が確認された場合、ストップホールなどの応急処置を行った後、溶接や当て板などの補修・補強を行い、経過観察をする。現状では点検、経過観察共に5年に1度しか行えない状況である。

点検を行う高速道路会社側としては、簡便なセンサで亀裂の進展や発生を早期発見して、損傷が軽微なうちに補修・補強を行うことで、コストの低減や安全性の向上を図りたいというニーズがある。そこで本研究開発はまず鋼橋の亀裂を対象に、亀裂を観察、発見、さらには予測可能なひずみ分布を測定するひずみセンサアレイを開発することを目的とした。

### <解決する方策>

ひずみ分布を測定する方法としては、市販の金属箔ひずみゲージを並べたひずみセンサアレイによって、金属板試験体破壊時の静ひずみ分布から亀裂発生箇所を検出する方法がプリンストン大より報告されている。しかしながら、金属箔ひずみゲージは消費電力が大きく、並べての施工は容易でなく、数が増えるほど配線は複雑になるという問題がある。また、フレキシブル回路基板等樹脂材料の耐久性が低いため、屋外使用環境には耐えられないことが懸念される。さらに、実際の高速道路橋は温度が変化することに加え、通行車両由来の動ひずみが重畳するため、静ひずみを用いたひずみ分布測定は困難である。そこで、フレキシブルシート上にひずみセンサをアレイ上に配置し、耐候性フィルムでシールしたフレキシブル面パターンセンサを開発する。

### <実現する方法>

センサ自体の消費電力が0である圧電材料PZTの薄膜を形成した厚さ数 $\mu\text{m}$ の極薄シリコンをフレキシブル基板上にアレイ化した、極薄PZT/Siひずみセンサアレイシート、紫外線や水蒸気に耐える有機・無機複合材料を用いた配線保護フィルム、施工が容易な粘接着シートを一体化した、フレキシブル面パターンセンサを開発する。

### <現場での運用方法及び目標>

フレキシブル面パターンセンサを鋼橋の溶接部付近に貼り付け、アナログ回路、マイコン、RF-ICを一体化した太陽電池駆動の通信モジュールに接続して動ひずみのデータを無線送信し、受信機とパソコンを介してデータサーバに送る。サーバ側でデータ処理を行い、動ひずみピーク値の分布の面パターンからひずみの異常増大を検出して、亀裂の観察、発見、予測を行う一連のシステム化と実証試験を行う。

極薄PZT/Siひずみセンサアレイシートの開発目標として、極薄PZT/Si作製、転写、配線プロセスを完成させ、サイズ7cm x 10cmのフレキシブル回路基板上に極薄ひずみセンサアレイ、各種センサ・IC、電源を搭載し、耐候性保護層を貼り合わせた、プロトタイプを試作する。また、極薄PZT/Siひずみセンサ単体で $1 \times 10^{-7}$ の感度を実現する。またこれらとは別に地震などによる急激な亀裂発生を検知するための大ひずみ用のポリマータイプを開発する。また、配線保護フィルムと粘接着シートの開発目標として、屋外10年暴露相当の加速試験と屋外曝露試験により高耐候性(水蒸気透過率 $2 \sim 3 \text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ )を実証するとともに、粘接着シートを用いた実橋への施工法の開発を完了させる。さらに、フレキシブル面パターンセンサのシステム化と実証試験の目標として、実橋で $1 \times 10^{-5}$ の感度でひずみ分布を測定し、300mW程度の標準的な太陽電池を電源として1時間に1回無線データ通信できることを実証する。

## (1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

(担当:富士電機(株))

### <対象と解決すべき課題>

高速道路には、安全・円滑な道路交通の確保を目的に、道路情報板設備など、様々な道路付帯物が設置されており、このような道路付帯物を対象とする。仮にこれらの施設が構造的に劣化し、道路上に落下した場合、重大な事故の発生につながる可能性がある。そのため目視を主流とした構造点検が道路管理者により実施されている。しかし、目視点検は、経験等による個人差があり、評価を定量化できないため、早期に経年劣化を発見できる手法としては確立されていないという課題を有している。また、老朽化構造物の増加と少子高齢化の進展によるメンテナンス技術者の不足により、点検業務の効率化が求められている。

### <解決する方策>

このためセンサによる常時・継続的・網羅的なモニタリングを行うことで、点検実施判断基準の定量化が行え、劣化の予測、及び点検の優先順位付けや点検間隔の適正化などの具現化が期待できる。また、地震、台風、集中豪雨、豪雪など災害発生時における交通規制の一次判断や異常時点検の優先順位付等に資することが期待できる。

### <実現する方法>

重大な事故の発生につながる可能性のある道路付帯物の構造的な劣化としては、構造材の腐食による減肉や亀裂、ボルト締結部の緩み等による変形(傾き)や災害時の変形や地盤等基礎部の変動が想定される。これらの変形・地盤変動は傾斜の変化を測定することで定量化できる。また上記のリスクは、交通振動や風の影響等により加振力が作用する場合は、揺れ方(振幅、振動数)の変化として現れるため、振動センサにより定量的に確認できる。そこで、本研究開発では、道路付帯物の傾斜(構造材の変形や地盤変動)と振動(固有振動数や振幅の変化)を測定することで、構造的な変化や劣化を早期に発見し、重大な事故の発生回避に寄与することを目的とする。

### <現場での運用方法及び目標>

情報板の支柱基礎ベース部、支柱上端部、情報板端部付近の3か所に傾斜マルチセンサを配置し、各傾斜マルチセンサ端末の計測データを無線で集約器に収集し、集約器と有線接続されたコンセントレータ及びRIMSネットワークを介して計測データ収集サーバに伝送される。

目標として、高精度に傾斜(出力の安定性:0.05deg)と振動(分解能:0.1gal)を同時に測定できる静電容量式MEMS型センサデバイスを開発する。また、大容量のセンサデータを短時間で送信する高速無線モジュール(通信速度:1Mbps)を開発し、小型化、自立発電、設置環境下で10年以上の信頼性を有する道路インフラモニタリングのニーズに必要なかつ十分な前記のMEMS型センサデバイスを搭載した傾斜マルチセンサ端末を開発する。

### (1-3) 法面変位センシングシステムの開発

(担当:三菱電機(株))

#### <対象と解決すべき課題>

異常気象等により危険が増してきている道路法面や斜面を対象とする。それらの変位を高精度に計測することで、法面崩壊の予兆を早期に捉え、崩壊による災害のリスクを大幅に低減するセンシングシステムの開発を目標とする。従来は法面の変位を計測する方法として、デジタル写真測量、光波測量、伸縮計等の方法が用いられてきた。しかし、デジタル写真測量は計測周期が長く常時計測が困難、光波測量は悪天候時の継続的な計測が困難、伸縮計は 1 次元方向の変位しか検出できないので網羅的な計測が困難等の問題があり、これらの問題点を解決するセンシングシステムの開発が強く望まれている。

#### <解決する方策>

本研究開発では、電波位相差を用いることで、高計測頻度・全天候・3 次元で法面の変位を高精度にセンシングするシステムを開発し、上記従来方式の問題点を解決する。

#### <実現する方法>

本システム実現のために、ミリメートルオーダー以下の法面の変位を検出する高精度変位計測技術の開発、小型・高耐久型・多機能型センサ端末を実現する小型化、高耐久性・高信頼性、自立電源・複数センサ共有・無線メッシュネットワーク・省電力化の技術開発を行う。また、各センサ端末で観測された変位・温度等のデータを収集サーバに集約して管理する共通プラットフォームの開発を行う。

#### <現場での運用方法及び目標>

法面に複数のセンサ端末を設置し、複数のセンサ端末から放射された電波を道路沿い等に設置した複数の子受信機で受信し、受信した電波の位相差(各センサ端末から子受信機までの距離差に相当)を用いることで高精度にセンサ端末の位置を推定する。各センサ端末は変位計測用の電波を発信するタイミングが衝突しないように制御局である親受信機と双方向通信を行う。法面変位センシングシステムの親受信機から出力されたセンサデータは、共通プラットフォームのコンセントレータを介して、データベースに蓄積される。

目標としては、少なくとも 1 時間に 1 回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに突発事象を検出でき、片手で取り付け可能なサイズ(7cm×10cm×5cm)以下であるセンサ端末を開発し、実環境下で 1 時間に 4mm 以上の法面の変位を検出できるものとする。

## (2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

### (2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

(担当: (株)NTT データ)

#### <解決すべき課題>

道路インフラの維持管理の重要性に関しては、既に国家的な課題として認識されているが、長期的な維持管理費用の削減傾向により、人的・資金的なリソース不足が大きな問題となっている。その問題に対し、ICT 新技術の普及によって、センサネットワークによる遠隔監視に大きな期待が集まっている。

現状の遠隔監視システムでは、一種類のセンサに対応可能なコンセントレータの機種は固定となっていることが多く、センサ種別ごとに個別のシステムが構築・運用されることにより、回線や設備の負担増が発生している。結果として、新しい種別のセンサの追加や既存センサのデータフォーマット変更が困難となるため、遠隔監視システムの普及・発展を妨げる要因の一つとなっており、設備や通信コストの削減、及び、多種多様なデータの横断的な利用を可能とすることが求められている。

#### <解決する方策>

この課題を解決するため、データの収集・蓄積・提供の仕組みを共通的なプラットフォームとして構築することで、設備や通信コストの削減、及び、多種多様なデータの横断的な利用を可能とする。

#### <実現する方法>

これを実現するためには、多種多様なセンサから送信される様々なデータフォーマットを統一のフォーマットに揃え、共通のプラットフォーム上で伝送や蓄積を可能とするデータ収集装置「コンセントレータ」が必要となる。本研究開発ではコンセントレータに対し、(1)センサデータフォーマットの追加・変更の遠隔対応、(2)コンセントレータ間の連携通信対応、(3)不正なデータの受信を防止するセキュリティ対応、などを実現し、道路インフラに対するセンサネットワークシステムの発展拡大を実現する。

#### <現場での運用方法及び目標>

将来的に、コンセントレータがいたるところに設置され、センサを設置するだけで無線によるセンシングを容易に開始できる環境が実現することで、センサの設置が加速度的に促進され、モニタリングの拡大が期待できる。それにより、維持管理業務の効率化、及び、道路インフラの維持管理品質を向上させ、安全安心な社会の実現に貢献する。

目標として、多種多様なセンサからデータを受信、データを分解し、サーバへ送信できるとともに収集サーバからセンサデータ受信機能の受信モジュールを遠隔で変更できるコンセントレータを開発する。また、複数のコンセントレータが無線 LAN (Wi-Fi) で自立的にネットワークを構築し、相互に連携した通信を行うコンセントレータの連携通信技術を実現する。さらに、センサからサーバまでデータ送信する際に、不正なデータ受信を防止するためのセキュアな情報収集への対応技術を開発する。

## (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

(担当: (一財)マイクロマシンセンター、国立研究開発法人産業技術総合研究所、日本ガイシ(株)、大日本印刷(株))

### <対象と解決すべき課題>

対象とするインフラである道路橋梁、法面、道路付帯物の設置環境は、屋内と比べ厳しい。常時モニタリングシステムは、過酷な環境下でも安定的に動作しなければインフラ分野では適用困難である。NEXCO、阪神高速等の事業者にとって、常時モニタリングシステムの要である自立型無線センサ端末の寿命及び信頼性確保は重大関心事であり、インフラの寿命や点検サイクルに比してシステムの寿命が著しく短い場合は適用困難である。

### <解決する方策>

この課題を解決するために、センサ、無線回路、アンテナ、自立電源等のセンサ端末部品をオールインワンパッケージ化することにより、劣悪環境下での信頼性、構造体への敷設性、落雷に対する問題点の解決を図り、センサ端末の高耐久性化を狙う。

### <実現する方法>

具体的には、ガラスと比較して強靱性を備え、電気的絶縁性を持ち、光透過性を有し太陽電池のパッケージ内実装に最適な透光性セラミック材料と、使用する高周波数帯域の電波を遮らないで高効率でかつ無指向放射パターンを可能にするアンテナと低抵抗配線を内蔵でき、かつ振動センサ、発電素子、無線回路の実装用キャビティを形成できるLTCC(Low Temperature Co-fired Ceramics)基板を用いて、それらを高気密封止接合する。さらに、センサによってパッケージの外部端子が必要な場合を想定して、外部端子と外部配線の接続部からの湿気浸透を防ぐことができるベースプレート実装を開発する。また、パッケージや、センサ素子の構造物への簡易施工を目的とした、ベースプレート接合、及びセンサ端末の粘接着接合技術も併せて開発する。

### <現場での運用方法及び目標>

工場出荷時に裏面に塗布された粘着シートに、現場において太陽光等で露光したのちに、対象面に貼り付ける。安全のため防護ネットを取り付ける。

上記要素技術を組み合わせて、パッケージング評価システムを試作するとともに、耐久性加速試験法を開発し、耐久性加速試験を実施して10年以上の耐久性を有することを目標とする。

### (3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

(担当:全参画機関)

#### <対象と解決すべき課題>

老朽化が進んでいる橋梁、環境条件等の変化で設計基準の見直しが必要となっている橋梁上の情報板等の道路付帯物及び異常気象により要注意箇所が 10 年前の 2 倍になっている法面を対象とする。これまでは個別フィールドのモニタリングシステムはあるが、フィールドを跨った統合的なモニタリングシステムはない。また、有線の長期モニタリングはあるが、無線センサによるモニタリングは一般的には 1 年未満の短期モニタリングであり、無線センサによる長期モニタリングの実績は殆どない。

#### <解決する方策>

道路インフラの老朽化の進展を抑え、従来の点検技術者による目視や打音検査等五感に依存した点検を補完し、道路インフラの長寿命化を実現するため、容易にアクセスできない場所のモニタリングや災害等の突発事象へも対応できる常時・継続モニタリングが可能な無線センサネットワークシステムを活用した道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究を実施する。

#### <実現する方法>

常時・継続モニタリングが求められている橋梁、道路付帯物、法面を対象とした個別フィールドで 1 年以上の実証実験を実施し、各フィールドの劣化・損傷診断に必要な基礎データを取得するとともに、一般道へ展開するのに有用なパラメータを可能な限り抽出する。

#### <現場での運用方法及び目標>

各フィールドのモニタリングシステムを効果的に実証できる実証場所を参画している高速道路会社管理の現場から 1 か所以上選定する。各フィールドのモニタリングシステムが実環境下で適用できることを実証するため、四季を越えた 1 年以上の実証実験を実施し、各フィールドの劣化・損傷診断に必要な基礎データを無線共通プラットフォームにより収集する。

### (4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

#### <対象と解決すべき課題>

道路インフラ状態モニタリングシステム(RIMS)において、様々なフィールドから収集するデータには、そのデータ間の時刻の整合性を担保するタイムスタンプが付与される。このタイムスタンプは、センサ端末に搭載した水晶発振器を基準にした時計により与えられるが、一日に1秒程度の誤差を生じるため、時刻同期を適時に行うことで、その精度を維持している。有線や屋内無線などの通信が安定した環境では、NTP (Network Time Protocol) などにより 1ms の精度で協定世界時に同期できるが、屋外での無線では、その設置場所(山岳地帯、海岸沿い、都市部など)や天候により変化する電波状況に精度が依存し、10ms 程度の誤差を生じることもある。そのため、モニタリングシステムを設置する環境に応じたシステムの構築や運用が必要であり、ノウハウを持った人材の不足などがモニタリングシステム普及の阻害要因となる。

#### <解決する方策>

電波状況に依存せずにタイムスタンプの精度を維持できれば、システム構築や運用で必要となるノウハウの習得などの負荷が低減できる。これにより、モニタリングシステムの普及を強力に後押しできる。

#### <実現する方法>

センサ端末の時計の精度は、その基準となる水晶発振器の精度に依存しており、水晶発振器を原子時計に置き換えることができれば、時刻同期無しに 10ms の精度を年単位で維持できるようになる。本研究開発では、センサ端末に搭載可能なサイズや消費電力での原子時計の実現可能性を検討し、その基盤技術を確立する。

#### <現場での運用方法及び目標>

全てのセンサ端末に原子時計を搭載することで、センサ端末を設置するだけでモニタリングシステムを構築できる環境が整備されることになり、モニタリングシステムの急速な普及が期待できる。RIMS に適用可能な時刻精度 10ms/10 年以上、消費電力 1mW 以下、サイズ 15mm×15mm×5mm 以下の性能を持つ原子時計を実現することで、道路インフラの維持管理の確度を向上し、安全安心な社会を目指す。

#### (4-1) 小型、低消費電力を支える CSAC 用ガスセルの開発

(国立研究開発法人産業技術総合研究所、(株)リコー、再委託先: 首都大学東京)

##### <解決すべき課題>

原子時計の大きさや消費電力は、ガスセルのサイズに依存しており、小型化が必須である。しかし、ガスセルを小さくするとガスセル内環境(ガス分圧、温度)が変化しやすくなり、それに伴い正確な周波数の基になる Cs などアルカリ原子の固有周波数も変化(周波数ドリフト)する。そのため、米国の DARPA(国防高等研究計画局)が開発した技術を基に Microsemi 社が製品化した世界で唯一の低消費電力・小型原子時計 CSAC(Chip Scale Atomic Clock)でも 10ms を維持できるのは 5 ヶ月であり、これを 10 年にする必要がある。

##### <解決する方策>

原子時計の時間は、周波数精度と周波数ドリフトで決まるが、長期安定度は周波数ドリフトで決まるため、その低減により 10ms の維持期間の長期化を図る。

##### <実現する方法>

周波数ドリフトの主要原因は、ガスセル内環境の変化に伴う原子の固有周波数のシフトであり、ガスセル内環境の変動を理論的に推定するモデルを構築し、それに基づきガスセル内環境安定化技術を確立することで周波数ドリフトを低減する。また、ガスセル内環境の変動をゼロにすることは難しいため、その変動量を計測する技術を開発し、発振周波数を補正することで周波数ドリフトの影響を低減する。

##### <目標>

上記動作を実現する CSAC プロトタイプを設計するための理論モデルを構築し、H28 年度は、長期安定度 10ms/半年、消費電力 120mW、サイズ 40mm×40mm×18mm を目標としてプロトタイプを試作する。H30 年度には、産総研で開発するガスセル内環境安定化 Cs ガスセルにより時刻精度 0.01 秒/年、(4-2)で東工大が開発する極低消費電力制御回路により消費電力 60mW、制御回路の一部 CMOS 集積化によりサイズ 30mm×30mm×11mm の実現を目標として試作し、RIMS へ適用可能とするための基盤技術の検証を進める。

また、次世代技術として、ガスセル内のバッファガスのリークを検出・補正可能なデュアルセル(ガスセル内に Cs と Rb を封止)を開発し、H30 年度には Cs ガスセルの 10 倍以上の性能を目指す。

#### (4-2) CSAC の制御回路開発

(国立研究開発法人産業技術総合研究所、再委託先: (国) 東京工業大学)

##### <解決すべき課題>

原子時計の消費電力の約 9 割(Microsemi 社 CSAC:100mW/114mW)は、制御回路の消費電力であり、その削減が必須となる。また、原子時計のサイズ(平面)は、制御回路基板のサイズで決まるため、その小型化が必須となる。



#### <解決する方策>

新しい制御回路アーキテクチャーの開発と CMOS 集積回路化により、小型・低消費電力化を図る。

#### <実現する方法>

4.6GHz発振器を含めた PLL(Phase Lock Loop)回路を根本的に見直して、低消費電力化を図るとともに、最終的には Cs の固有周波数に直接同期する発振器と、分数比分周期を用いることで、PLL 回路を用いない極低消費電力制御回路を実現する。

#### <目標>

H28 年度は、CMOS 集積回路として 4.6GHz 発振器を作製し、5mW 以下の低消費電力動作を達成する。H30 年度は、4.6GHz 発振器を含め PLL(Phase Lock Loop)回路の全体で 10mW 以下の消費電力を目標とする。

PLL 構成を用いない極低消費電力制御回路では、H28 年度に回路シミュレーションにより実現性を明らかにし、H30 年度は、CMOS 集積回路を試作し、現状 7mW が必要な水晶発振器を用いずに、発振器及びその制御回路として 10mW 以下の消費電力を達成することを目標とする。

### (4-3) CSAC 用面発光半導体レーザー(VCSEL)技術の開発

((株)リコー、国立研究開発法人産業技術総合研究所)

#### <解決すべき課題>

原子時計でアルカリ原子を励起するレーザー(VCSEL)には、波長精度 $\pm 0.5\text{nm}$  が求められる。しかし、ウェハ面内の波長を $\pm 0.5\text{nm}$  にすることは難しく、安定供給を阻害する主要因となっている。

#### <解決する方策>

VCSEL を安定供給できる新規 VCSEL 構造と、その製造技術を確立する。

#### <実現する方法>

VCSEL 内に波長調整層を組込むことで、ウェハ内波長分布を抑制し、VCSEL の安定供給を実現する。

#### <目標>

H28 年度には、ばらつき補正前の波長を高精度に計測し、狙いの波長範囲となるように、1nm 単位で波長の調整を可能とするプロセスを確立する。H30 年度に向けては、CSAC プロトタイプに搭載し、時刻精度 10ms/年への改善に寄与する。

### (4-4) 新技術導入の適用可能性検討、及び、CSAC の事業化に向けた技術ロードマップの策定

((一財)マイクロマシンセンター、(株)リコー、再委託先: (国) 京都大学)

#### <解決すべき課題>

道路インフラ状態モニタリングシステムのセンサ端末で求められる消費電力 1mW を実現するには、VCSEL とは異なる方式の励起用レーザーの適用可能性を検討しておくことが重要となる。また、技術開発に 10 年以上の期間が必要となると想定されるため、そこに至る技術開発の道筋を明確にするとともに、その過程で実現する性能でのタイミングを捉えた市場への製品投入も重要となる。

#### <解決する方策>

超低損失な 2 次元フォトニック結晶微小共振器を用いたシリコンラマンレーザーは、 $\mu\text{W}$  レベルの発振閾値をもち、発振後には 2 波長のコヒーレント光を発生でき、かつ超小型であることから原子時計の励起用レー

ザとして適用できる可能性を持つ。これによりレーザの消費電力を大幅に削減し、原子時計の消費電力 1mW の実現に寄与する。また、本研究開発に加え、学会発表や論文などを調査して、技術ロードマップを策定し、技術開発項目の原子時計の性能向上への寄与度を明確にし、市場のニーズとのマッチングを図る。

#### <実現する方法>

シリコンラマンレーザは、発振波長が原子時計の仕様より長波長なため、材料をシリコンからシリコンカーバイドとして短波長化を図る。また、2 つのコヒーレント光の周波数間隔も 15THz と高いため、その間隔を 9.2GHz とする微小共振器を開発する。また、開発過程での原子時計の仕様と市場との関係をユーザヒアリングなどで明確にして、タイミングを捉えた市場への製品投入を実現する。

#### <目標>

シリコンカーバイドでのレーザ発振を実現するには、結晶欠陥の低減と寸法精度の改善による高 Q 値化が必要であり、平成 28 年度は、現状の Q 値 1 万を 20 万まで改善することを目標とし、平成 30 年度は、Q 値 100 万の達成を目標とする。

また、平成 28 年度は、(4-1)から(4-4)の研究開発で得られる知見から原子時計の到達可能な性能を推定し、RIMS への適用仕様である長期安定度 10ms/10 年、消費電力 1mW、サイズ 15mm×15mm×5mm、に至る技術ロードマップを策定するとともに、達成をより確実にするための追加研究項目の可能性を検討する。平成 30 年度は、これにより、RIMS への適用に至る過程で実現される原子時計の仕様を明確にし、RIMS のみならず、他分野への水平展開の可能性も含めた事業化の可能性を検討する。

(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

① 研究開発目標の達成度

(1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

(1-1) 橋梁センシングシステムの開発

(1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・感度-95dB(re 1V/ubar)、帯域 10kHz ~ 1MHz の仕様を満たす SA センサデバイスの開発を完了する。</li> <li>・SA センサデバイスを複数搭載可能で、片手で持ち運び・取り付け可能なサイズのセンサ端末の開発を完了する。</li> <li>・自立発電デバイスを搭載し、1時間に1回以上の送信頻度でデータ送信を確認する。</li> <li>・小型センサ端末間のデータ相互伝送を確認する。</li> <li>・実橋梁環境における 30m 以上の無線データ伝送を実証する。</li> <li>・調査対象の損傷規模に適応した、SA センサのさらなる高性能化指針抽出のため、損傷や劣化規模と弾性波速度や周波数などの弾性波パラメータの関係を明らかにする。</li> <li>・開発する SA センサから得られる弾性波の種々の特徴抽出パラメータを利用した損傷指標提案を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SA センサの基本構造を確立した。</li> <li>SA センサの理論計算モデルを確立した。</li> <li>SA センサのプロトタイプ及びプリアンプを完成した。</li> <li>SA センサのピーク感度(100kHz 付近)が-80dB(re 1V/ubar)を超えることを確認した。</li> </ul>	H28 年度末 達成見込み
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SA センサデバイスを 4ch 搭載可能で、高耐久パッケージを除いた基板サイズが 7cm×10cm×5cm のセンサ端末を開発した。</li> </ul>	H28 年度末 達成見込み
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自立発電デバイスとして、太陽電池を搭載し、自然光下での自立発電による1時間に1回の送信頻度での間欠駆動データ伝送動作を確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発した小型センサ端末を、高速道路橋下に置かれた道路床版供試体に設置し、端末間のデータ相互伝送を確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高速道路橋において、開発した小型センサ端末を設置し、30m 以上の無線データ伝送を確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・交通荷重に伴う AE や雨滴により生じる弾性波の特性(AE の数や大きさ、周波数等)を把握するとともに、これらの到達時間を利用した位置標定及び弾性波速度構造評価を実施した。</li> </ul>	達成
<ul style="list-style-type: none"> <li>・センサから得られる弾性波パラメータと損傷規模の関係について整理した。</li> </ul>	達成	

(1-1-2) フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【基本計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものと</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・極薄 PZT(2μm)/Si(3μm)ひずみセンサ 25 枚をフレキシブル基板上(厚さ 50μm)に集積化し、厚さ 100μm の紫外線、水蒸気層保護層、厚さ 200μm の粘接着シートで挟んだフレキシブル面パターンセンサを阪神高速の実橋に貼り付け、<math>1 \times 10^{-5}</math> の精度でひずみ分布を測定可能であることを示した。亀裂の発生によってひずみ値が 2,3 桁上昇することから、インフラ構造物の健全度を診断することができる。温</li> </ul>	達成

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>し、これらは温湿度も同時に計測できるものとする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、地震等の突発事象を検出できるものとする。</li> <li>片手で取り付け可能なサイズ(概ね 7cm×10cm×5cm)以下とする。</li> <li>無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。</li> <li>実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする。</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>高感度ひずみセンサアレイ(感度<math>1 \times 10^{-7}</math>)を開発する。</li> <li>地震検知センサ(0.1g、1～10Hzを検知)を開発する。</li> <li>大ひずみ用ポリマータイプを開発する</li> <li>これらが制御回路IC、太陽電池と共に7cm×10cmサイズの配線付きのフレキシブルシート上に形成された、高耐候性(水蒸気透過率2～3g/m<sup>2</sup>/day)センサシートの開発を完了する。</li> </ul>	<p>湿度は市販センサをフレキシブル基板上に実装することで達成可能である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>無線通信モジュールの消費電力は123mWであり、待機電力は0.04mWと無視できるくらい小さい。高速道路において平均的な通行量が得られる時間が2分であるため、1時間に2分間の測定を行うと消費電力は4mW。7x4cm<sup>2</sup>の数百円の太陽電池(300mW)に、1000mAhのLiPoバッテリーを搭載した小型電源により、日差しのある場所であれば自立電源動作が可能である。日が差さない場所ではケーブルで配線する。</li> <li>試作したシートデバイスは12cm x 12cm x 0.2cmであり25個のひずみセンサが搭載されており、粘接着シートを用いているために湿布感覚で簡単に施工可能である。フレキシブル基板を7cm x 5cm以下にすることは容易であるが、片手で施工できるよりも多数のひずみセンサを一括で貼り付けられることにメリットがある。</li> <li>通信モジュールは920MHz帯の特小無線を使用しており、送信電力20mWで30m以上の距離が得られている。</li> <li>-40～85°Cの温度サイクル試験にて1000cycの接続信頼性を確認し10年を大幅に超える耐久性を達成した(120cyc=10年相当)。UV耐久性及び接着耐久性についても加速試験により15年相当の耐久性を有することを確認し、目標を達成した。</li> <li>フレキシブル基板上に極薄PZT/Siを転写、配線し、粘接着シートで鋼材等に貼りつけたフレキシブルひずみセンサの感度はチャージアンプ回路のみの状態で<math>1 \times 10^{-5}</math>程度であり、高速道路を走る車両由来のひずみ分布を測定するには十分な値が得られている。フィルタ回路を加えることにより、<math>1 \times 10^{-6}</math>までは達成できる見込みである。<math>1 \times 10^{-7}</math>という目標は、ひずみセンサ単体での値を想定しており、現在その評価を行っているところである。</li> <li>地震検知センサは市販の加速度センサで十分であり、通信モジュールに実装する予定である。</li> <li>グラフィット印刷ひずみセンサアレイを開発し、10000μ<math>\epsilon</math>と亀裂発生レベルのひずみでも、破損することなく検出できることを示している。</li> <li>TELEC認証取得や施工のし易さを考慮し、制御回路ICと地震検知センサは通信モジュールとして独立させることとした。極薄PZT/Siが形成されたフレキシブル回路基板は試作したシートデバイスのサイズは12cm x 12cm x 0.2cmであるが、フレキシブル回路基板のサイズを小さくすることで7cm x 10cmサイズにすることはまったく問題なく行える。フレキシブル回路基板は有機・無機複合の保護層と一体化された状態で、水蒸気透過率0.10g/m<sup>2</sup>/dayを達成している。太陽電池は必要な発電量の面積のものを、シート上最表面に貼りつけることが十分可能である。</li> </ul>	<p>達成</p> <p>H28年度末達成見込み</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>H28年度末達成見込み</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>・実橋で<math>1 \times 10^{-5}</math>の感度でひずみ分布を測定し、300mW程度の標準的な太陽電池を電源として1時間に1回無線データ通信できることを実証する。</p>	<p>・極薄 PZT(2<math>\mu</math>m)/Si(3<math>\mu</math>m)ひずみセンサ 25 枚をフレキシブル基板上(厚さ 50<math>\mu</math>m)に集積化し、厚さ 100<math>\mu</math>m の紫外線、水蒸気層保護層、厚さ 200<math>\mu</math>m の粘接着シートで挟んだフレキシブル面パターンセンサを阪神高速の実橋に貼り付け、<math>1 \times 10^{-5}</math>の精度でひずみ分布を測定可能であることを示した。無線通信モジュールの消費電力は 123mW であり、待機電力は 0.04mW と無視できるくらい小さい。高速道路において平均的な通行量が得られる時間が 2 分であるため、1 時間に 2 分間の測定を行うと消費電力は 4mW。7x4cm<sup>2</sup> の数百円の太陽電池(300mW)に、1000mAh の LiPo バッテリーを搭載した小型電源により、日差しのある場所であれば自立電源動作が可能である。</p>	達成

### (1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>(a)MEMS センサデバイスの開発</p> <p>・MEMS センサデバイスは必要な信号処理回路と合わせ、下記を開発目標とする。</p> <p>傾斜測定の実出力安定性:0.05deg 振動測定の分解能:0.1gal</p>	<p>(a) MEMS センサデバイスの開発</p> <p>・原理試作品により、傾斜出力安定性<math>\pm 0.05</math>deg 以内を確認した。MEMS センサユニットの設計・試作を実施し、傾斜測定出力安定性、振動測定分解能の評価を実施中である。</p> <p>試作した MEMS センサユニットのフロントエンド回路ノイズ評価を実施した。目標 36.4 <math>\mu</math> V(=0.1Gal 相当)に対し、X 軸:27.6 <math>\mu</math> V、Y 軸:28.8 <math>\mu</math> V、Z 軸 17.1 <math>\mu</math> Vを確認し、目標分解能達成の見通しを得た。</p>	H28 年度 達成見込み
<p>(b)傾斜マルチセンサ端末の開発</p> <p>・消費電力 3.5mW(平均)以下にする。</p> <p>・1時間に1回の間欠測定と突発事象測定対応の監視モードの動作無線通信(通信距離:30m以上、通信速度:1Mbps)環境発電素子(太陽電池)からの電源供給による自立電源化。センサ端末サイズ:7cm <math>\times</math> 10cm <math>\times</math> 5cm</p>	<p>(b)傾斜マルチセンサ端末の開発</p> <p>・回路設計を完了し消費電力を試算目標とした 3.5mW(平均)に対し2.9mW(平均)の見通しを得た。太陽電池を用いた電源回路試作データと NEDO 日照データ(東京 平均年)によるシミュレーションから連続稼働を確認した。</p> <p>・構造設計を完了し試作を実施し、目標サイズの 7cm <math>\times</math> 10cm <math>\times</math> 5cm のセラミックケース内収納を確認した。</p> <p>・試作品により、傾斜・振動・温度の同時測定、間欠測定動作を確認した。今後各部の詳細な動作を確認し、特性評価と必要により改良を実施する。突発事象と間欠測定を可能とするアルゴリズム開発を完了した。</p> <p>・無線通信は通信距離 30m 以上(実測 65m)、通信速度1Mbpsを確認した。実フィールドの情報板にて情報板内外で通信出来ることを確認した。</p>	達成
<p>(c)センサネットワークシステムの構築と実証実験</p> <p>・実証実験に向けシステムの構築集約器試作、傾斜マルチセンサ間の無線通信性能(通信距離:30m以上、通信速度:1Mbps)を確認する。</p> <p>集約器とコンセントレータ間の通信が正常動作することを確認する。</p> <p>・実証実験実施場所を選定する。</p>	<p>(c)センサネットワークシステムの構築と実証実験</p> <p>・集約器の設計・製作を完了した。傾斜マルチセンサ間の無線通信を確認した(通信距離:65m、通信速度:1Mbps)。集約器とコンセントレータ間通信を確認した。</p> <p>・実証実験場所:東名)吾妻山トンネル入口情報板を選定した。</p>	達成
		達成

中間目標	研究開発成果	達成度
<ul style="list-style-type: none"> <li>・H27 年度に先行開始したモニタリングを継続し基礎データを引き続き取得する。取得したデータから目標とした傾斜測定 of 安定性 (0.05deg) 及び振動測定 of 分解能 (0.1gal) の妥当性を検証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・先行フィールド試験を 2015 年 12 月に開始した (240 日を超えるデータ取得し、継続中)。情報板の傾斜と卓越周波数の挙動が明らかになってきた。今後 1 年を超えるデータを取得し、データ処理方法等を考慮し傾斜の安定性と振動分解能の必要仕様を検討する。</li> </ul>	H28 年度未達成見込み

### (1-3) 法面変位センシングシステムの開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>(a)MEMS センサデバイスの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・MEMS センサデバイスは必要な信号処理回路と合わせ、下記を開発目標とする。</li> <li>傾斜測定 of 出力安定性:0.05deg 振動測定 of 分解能:0.1gal</li> </ul>	<p>(a) MEMS センサデバイスの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原理試作品により、傾斜出力安定性 <math>\pm 0.05\text{deg}</math> 以内を確認した。MEMS センサユニットの設計・試作を実施し、傾斜測定出力安定性、振動測定分解能の評価を実施中である。</li> <li>試作した MEMS センサユニットのフロントエンド回路ノイズ評価を実施した。目標 <math>36.4\mu\text{V}</math> (<math>=0.1\text{Gal}</math> 相当) に対し、X 軸: <math>27.6\mu\text{V}</math>, Y 軸: <math>28.8\mu\text{V}</math>, Z 軸 <math>17.1\mu\text{V}</math> を確認し、目標分解能達成の見通しを得た。</li> </ul>	H28 年度達成見込み
<p>(b)傾斜マルチセンサ端末の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・消費電力 3.5mW (平均) 以下にする。</li> </ul>	<p>(b)傾斜マルチセンサ端末の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・回路設計を完了し消費電力を試算目標とした 3.5mW (平均) に対し 2.9mW (平均) の見通しを得た。太陽電池を用いた電源回路試作データと NEDO 日照データ (東京 平均年) によるシミュレーションから連続稼働を確認した。</li> </ul>	達成
<ul style="list-style-type: none"> <li>・1時間に1回の間欠測定と突発事象測定対応の監視モードの動作 無線通信 (通信距離:30m 以上、通信速度:1Mbps) 環境発電素子 (太陽電池) からの電源供給による自立電源化。センサ端末サイズ:7cm×10cm×5cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造設計を完了し試作を実施し、目標サイズの 7cm×10cm×5cm のセラミックケース内収納を確認した。</li> <li>・試作品により、傾斜・振動・温度の同時測定、間欠測定動作を確認した。今後各部の詳細な動作を確認し、特性評価と必要により改良を実施する。突発事象と間欠測定を可能とするアルゴリズム開発を完了した。</li> <li>・無線通信は通信距離 30m 以上 (実測 65m)、通信速度 1Mbps を確認した。実フィールドの情報板にて情報板内外で通信出来ることを確認した。</li> </ul>	達成
<p>(c)センサネットワークシステムの構築と実証実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実証実験に向けシステムの構築</li> <li>集約器試作、傾斜マルチセンサ間の無線通信性能 (通信距離:30m 以上、通信速度:1Mbps) を確認する。</li> <li>集約器とコンセントレータ間の通信が正常動作することを確認する。</li> <li>・実証実験実施場所を選定する。</li> </ul>	<p>(c)センサネットワークシステムの構築と実証実験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・集約器の設計・製作を完了した。傾斜マルチセンサ間の無線通信を確認した (通信距離:65m、通信速度:1Mbps)。</li> <li>集約器とコンセントレータ間通信を確認した。</li> </ul>	達成
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実証実験場所: 東名 吾妻山トンネル入口情報板を選定した。</li> </ul>	達成

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>・H27 年度に先行開始したモニタリングを継続し基礎データを引き続き取得する。取得したデータから目標とした傾斜測定<span>の安定性(0.05deg)</span>及び振動測定<span>の分解能(0.1gal)</span>の妥当性を検証する。</p>	<p>・先行フィールド試験を2015年12月に開始した(240日を超えるデータ取得し、継続中)。情報板の傾斜と卓越周波数の挙動が明らかになってきた。今後1年を超えるデータを取得し、データ処理方法等を考慮し傾斜<span>の安定性と振動分解能</span>の必要仕様を検討する。</p>	<p>H28 年度末達成見込み</p>

## (2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

### (2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b> (a)多種多様なセンサへの対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンセントレータ内の受信モジュールを変更することで、複数のセンサのデータ受信に対応する仕組みを構築した。</li> <li>・各インフラ構造物種別から各1種類、合計 4 種類のデータフォーマットに対応し、仮センサからのデータ通信が問題ないことを確認した。</li> </ul>	達成  達成
(b)コンセントレータ間の連携通信対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・上記の検証を実構造物に設置されたセンサのデータ収集によって実施する。データ収集は少なくとも1ヶ月連続で実施した。</li> <li>・コンセントレータはセンサから通信可能な距離の屋外に設置し、コンセントレータの設置容易性、動作安定性について併せて検証した。</li> </ul>	H28年度 達成見込み H28年度 達成見込み
(c)セキュアな情報収集への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・少なくともコンセントレータ 3 台を連携して、センサデータを伝送させて機能を検証した。</li> <li>・上記の検証を実構造物に設置されたセンサのデータ収集によって実施した。データ収集は少なくとも1ヶ月連続で実施した。</li> <li>・プログラムの不正な改ざんへの対応を実施した。具体的にはコンセントレータの動作中に不正なソフトウェアモジュールに変更する処理が失敗することを確認した。</li> <li>・上記の検証を実構造物に設置されたセンサのデータ収集によって実施した。データ収集は少なくとも1ヶ月連続で実施する。</li> </ul>	達成  H28年度 達成見込み H28年度 達成見込み  H28年度 達成見込み

### (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b> (a) 高効率アンテナ内蔵 LTCC 基板及び透光性セラミック基板の開発 (NGK) ・100mm×70mm×50mm パッケージを供給する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・センサ端末開発メーカの要求仕様に応じて、外部端子やアンテナを形成した 100mm×70mm×50mm パッケージの試作を完了し、実証試験に向けた予備試験用に三菱電機、富士電機へ供給を開始した。</li> </ul>	H28年度 達成見込み
・アンテナを内蔵した基板を試作し、920MHZ での通信距離 30m と無指向性を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・低指向性のダイバーシティアンテナ内蔵パッケージを試作し、要求仕様をほぼ満足するアンテナ特性を得た。また、このパッケージを用いた富士電機における通信試験において、65m の距離で通信できることを確認した。</li> </ul>	達成
(b)高気密封止接合技術の開発 (MMC) ・低融点接合材料によるパッケージ実装試作を行い、高気密封止特性を向上する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実装部品への熱影響を抑えるために、LTCC 基板と透光性セラミック基板を低温 (50~60℃) で接合できる無機有機複合接合材を開発し、パッケージ封止実装を完了した。封止部の 10 年耐久性に相当する信頼性加速試験として、PCT (Pressure Cooker Test, 168Hr)、耐候性試験 (UV 照射, 500Hr)、熱サイクル試験 (-40⇔85℃, 200 回) を実施し、目標規格を達成した。</li> </ul>	達成



中間目標	研究開発成果	達成度
<ul style="list-style-type: none"> <li>・オールインワン実装、目標リーク速度～10－9 Pa・m<sup>3</sup>/sec 以下を達成する。</li> <li>(c)ベースプレート実装構造及びプロセスの開発(DNP)</li> <li>・各センサ端末に適したベースプレート構造の決定、及び実装プロセスを確立する。</li> <li>・LTCC パッケージを実装した評価用ベースプレートを作製し、屋外10年暴露相当の耐久加速試験後の接着強度0.4MPa以上を達成する。</li> <li>(d) 構造物への取付・接合開発(DNP)</li> <li>・構造物への最適実装・取付け方法を見出す。</li> <li>・フェールセーフの屋外10年暴露相当の加速試験を行い、センサ端末とベースプレート重量以上の荷重負荷に耐えること。</li> <li>(e)パッケージング評価用モジュールと耐久性加速試験法の開発(MMC、産総研)</li> <li>・リモート耐久性評価試験評価をする。</li> <li>・実地場所として、阪神高速、NEXCO 橋梁で自然暴露試験を実施する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・センサ端末のオールインワン実装プロセスを開発し、試作した封止部評価用センサ端末の信頼性加速試験での内部気圧耐久特性により、目標リーク特性達成の見込みを得た。</li> <li>・外部端子の取出し方法や実装のプロセスフローを策定し、橋梁向け、道路付帯物向け、法面向けのセンサ端末に対するベースプレート構造案を決定した。</li> <li>・LTCC パッケージサンプルを用いたベースプレート実装試作により、粘接着シートの貼付け条件及び外周部の保護材塗布条件を確立した。粘接着シートによる接合強度については、屋外10年暴露相当の耐久加速試験後の接着強度0.4MPa以上を達成した。</li> <li>・実橋梁について設置箇所候補となる様々な表面状態を確認、下地の整面方法を決定した。</li> <li>・フェールセーフとしてネット方式に決定しネット材質、網目サイズの選定を完了した。</li> <li>・リモート耐久性システムを完成させた。加速試験法により、評価モジュールパッケージを試験し、3項目での耐久性試験規格を満足した。</li> <li>・阪神高速法円坂、NEXCO 西日本西安堵橋橋梁で自然暴露試験を実施した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>28年度達成見込み</li> <li>28年度達成見込み</li> <li>28年度達成見込み</li> <li>28年度達成見込み</li> <li>28年度達成見込み</li> <li>28年度達成見込み</li> <li>達成</li> <li>28年度達成見込み</li> </ul>

(3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・センサ端末開発と連携して、各フィールドにおけるセンサシステムの基本仕様を決定する。</li> <li>・フィールド毎に1ヶ所以上のモニタリングシステムの実証場所の選定を完了する。</li> <li>・NEDO が別途委託している日立製作所及び横河電機と連携して、道路インフラへの実証方法を決定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・センサシステムのプロトシステムの開発をほぼ完了した。</li> <li>・参画高速道路会社において各システムの1カ所以上の実証場所の選定を完了した。</li> <li>・日立製作所の実証場所の選定を完了した。横河電機の傾斜センサを法面変位センサの地中に設置することを決定した。</li> </ul>	<p>28年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

(4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

(4-1) 小型、低消費電力を支える CSAC 用ガスセルの開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>(a) ガスセルの理論モデルを構築する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・長期安定度 0.01 秒/半年以上のガスセルを試作する。</li> <li>・拡散結合方式ガスセルでウェハ接合技術を検証する。</li> <li>・<math>2.1 \times 2.1 \times 2.1 \text{ mm}^3</math>以下のガスセルを試作し、ガスセルの小型化が長期安定度を制限しないことを検証する。</li> </ul> <p>(b) 長期安定度向上策であるデュアルセルにおいて、Cs 及び Rb が共に封入したガスセル、及び同時観測測定装置により、それぞれに関するパラメータを抽出する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・同時観測測定装置を用いて実際に長期安定度を計測し、得られた測定データから長期周波数補正をオフライン処理にて推定する。また、バッファガス等のガスセル条件を変え良好な条件を探索する。</li> </ul> <p>(c) 消費電力 10mW 以下の量子部を開発する。</p> <p>(d) 消費電力 120mW 以下のプロトタイプを開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ガスセルの材質やバッファガスの特性調査を行い、ガスセル起因の長期安定度を予測する理論モデルを構築するとともに、バッファガスと共に高純度 Cs を封入するためのガラス加工方式ガスセル製造装置を開発し、<math>\phi 5 \times 9 \text{ mm}</math> 3 の円筒型ガスセルを試作した(材質;石英、パイレックス。バッファガス;Ne、N<sub>2</sub>、Ar)。</li> <li>・特性調査の結果からガスセル材質としてパイレックス、バッファガスとしてN<sub>2</sub>を選択し、H27 年度ガスセル評価用プロトタイプに搭載し、50 日以上の評価を行い、理論モデルでの推定通り、周波数ドリフトレート 10-12 以下(大気 He 流入レベル)を実証した(長期安定度:0.01 秒/20 ヶ月相当)。</li> <li>・拡散結合方式ガスセルに関し、ウェハ接合により全石英セルを試作し、Cs 原子を封入可能なことを実証した。</li> <li>・ガラス加工方式の小型ガスセルとして、外形 2.1mm 角、内形 0.7mm 角のガスセルを試作し、約 4 日間に渡り周波数安定度を評価した。平均時間 8 万秒で、周波数安定度 <math>\sigma_y &lt; 1 \times 10^{-11}</math> となることを実験的に確認した。28 年度末にはより長期間の評価データにより長期安定度 0.01 秒/半年を検証する。</li> <li>・デュアルセル(Cs、Rb 封入)を準備し、CSAC へ適応可能な同時観測測定装置を構築した。この観測装置を用いて、Cs、Rb2つの CPT 原子が同時に観測できることを実証し、それぞれのパラメータを抽出した。同時計測を行いながら長期安定度を計測した 9 日間における周波数変動からは、それぞれの共鳴周波数は異なる変動をしている事を確認し、提案法が実現可能であることを実証した。</li> <li>・周波数補正に関するオフライン処理を検証している状況である。また、バッファガス等のガスセル条件に関しては、すでにサンプルのガスセルを入手済みである。本提案手法と測定データは、これまでどこにも報告されていないため新規性が非常に高いと考えられる。</li> <li>・量子部の 3 次元熱解析モデルにより、10mW 以下を達成する量子部の構造設計を終えた。設計した構造を実現するための技術開発を進めている。</li> <li>・制御回路部の消費電力を 110mW に低減する回路を設計し、試作中である。H28 年度下期に消費電力 10mW の量子部を搭載し、トータルの消費電力 120mW を検証する。</li> </ul>	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p>

#### (4-2) CSAC の制御回路開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・CMOS 集積回路として 4.6GHz 電圧制御発振器を作製し、5mW 以下の低消費電力動作を達成する。</li> <li>・水晶発振器を用いずに動作可能な制御方式の回路構成方法を考案する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電圧制御発振器 VCO の低消費電力化が可能な新たな回路方式を考案し、テールポンプ型 VCO を CMOS 集積回路として作製した。試作した 4.6GHz の VCO において、従来の 32mW が 0.52mW に低減でき、世界最小電力を達成した。現在、詳細性能評価中である。</li> <li>・量子部からの透過信号をそのまま用いて位相同期する回路と、分数分周の可能な周波数分周器の回路方式について考案した。また、回路シミュレーションに必要な量子部のモデルを構築するため、現状品の量子部の測定評価を行った。</li> </ul>	<p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p>

#### (4-3) CSAC 用面発光半導体レーザ (VCSEL) 技術の開発

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・波長調整 VCSEL のプロセスを確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長調整層を挿入した VCSEL を試作し、発振波長を数 nm の範囲でシフトさせる事を実証した。この技術を適用し、ウェハ面内での波長ばらつき分布を打ち消す様に波長調整層を構成するプロセスを開発し、波長調整 VCSEL 方式の試作を進めている。</li> </ul>	<p>H28 年度 達成見込み</p>

#### (4-4) 新技術導入の適用可能性検討、及び、CSAC の事業化に向けた技術ロードマップの策定

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・損失の原因であるイオン注入による SiC の薄膜化を用いない方法で共振器を作製する。</li> <li>・周波数間隔 9.2GHz 程度の 2 つの共振器モードを設計する。</li> <li>・事業化に向けた技術ロードマップを策定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SiC 基板と Si 基板にそれぞれ SiO<sub>2</sub> を 1・m 程度堆積し、両者を貼り合わせて SiC 基板を 10・m 厚まで研磨した後に 300nm 程度までエッチングにより薄膜化し、薄膜 SiC/SiO<sub>2</sub>/Si 基板を作製した。この SiC 層に電子ビーム露光とプラズマエッチングによって光ナノ共振器を作製し、Q 値として約 9000 を得た。</li> <li>・共振器作製の目処が経ったので、2 つの SiC ナノ共振器を、導波路を介して結合させ、周波数間隔 9.2GHz 程度の 2 つの結合共振器モードを形成させる構造を設計中である。</li> <li>・本研究開発や市場・技術調査資料、ヒアリングで得た知見などから開発過程の仕様でも Microsemi 社 CSAC の置き換え市場などがあることが判ってきた。これらを踏まえて、RIMS への適用仕様に至るまでの技術ロードマップの確度の向上を図っていく。</li> </ul>	<p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

### (1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

#### (1-1) 橋梁センシングシステムの開発

##### (1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

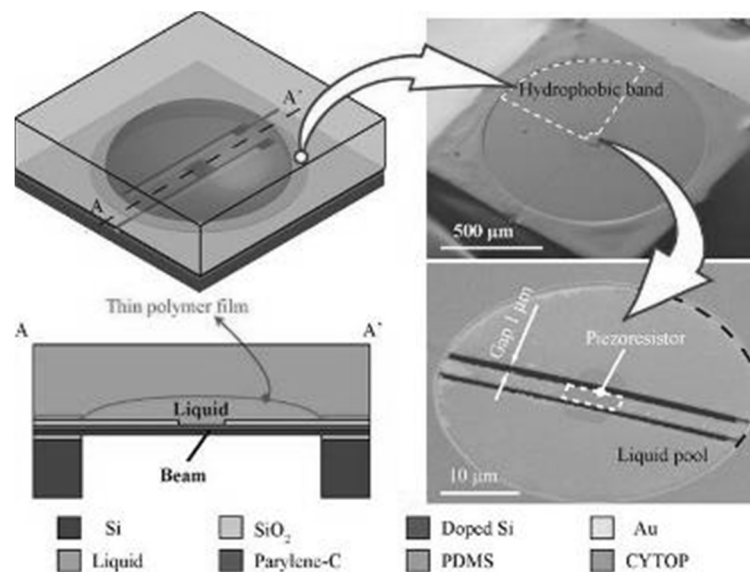
##### (a) スーパーアコースティックセンサデバイスの開発

##### <研究開発成果>

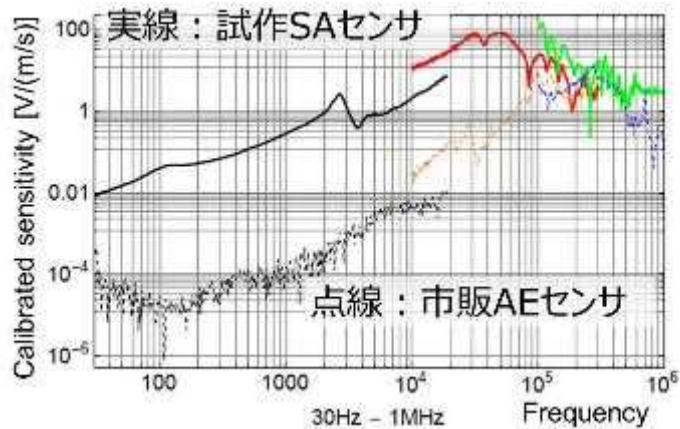
スーパーアコースティック(SA)センサの基本構造及び SA センサの理論計算モデルを確立した。図Ⅲ-【①-1】-1 に SA センサの構造を示す。SA センサの基本構造は、振動検出部(ピエゾ抵抗型ビーム)、振動伝達部(液体)、液体を封止するパリレン薄膜とその上に覆うシリコンゴム(PDMS)を有する多層構造である。液体部がないとピエゾ抵抗型ビームはビームの固有振動数だけに感度を有するが、液体部をビームの上に設けたことにより、外部からの広帯域の振動が弾性波振動として液体に伝わり、液体を介してピエゾ抵抗型ビームに振動が伝わることにより、広帯域で感度を有する振動センサが実現できている。図Ⅲ-【①-1】-2 に SA センサと市販の AE(アコースティックエミッション)センサの周波数応答を示す。市販 AE センサでは数百 kHz 付近のみ感度を有するが、SA センサでは 10Hz から 1MHz の広帯域で感度を有していることが分かる。図Ⅲ-【①-1】-3 にセンサをアルミ合金でシールドして、その内部を PDMS で埋めたプロトタイプを示す。

##### <意義>

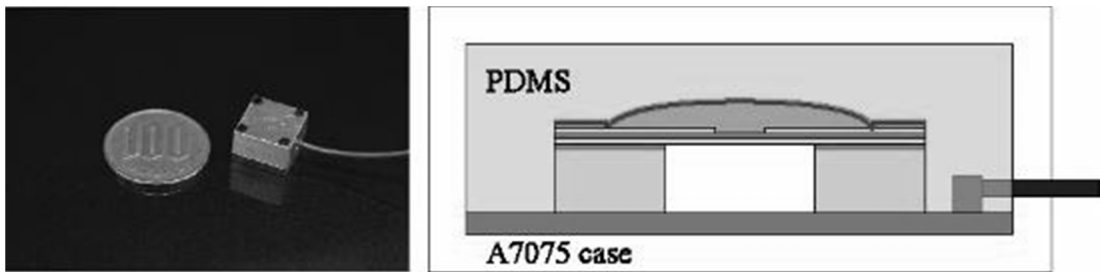
振動計、加速度計、AE センサの 3 つのデバイスでカバーしていた 1Hz~1MHz に渡る広帯域を、1 つのセンサで計測可能な、世界初で新構造の MEMS 型 SA センサデバイスを開発した。橋梁全体の固有振動数が変化する大規模な劣化(数 Hz オーダ)から、予防保全に関わる内部の微小劣化・進展状態(数百 kHz オーダ)までモニタリング可能な、低コストの橋梁劣化センシングシステムにつながるという点で、非常にインパクトがある。



図Ⅲ-【①-1】-1 スーパーアコースティックセンサの構造



図Ⅲ-【①-1】-2 SA センサと市販 AE センサの周波数応答



図Ⅲ-【①-1】-3 スーパーアコースティックセンサのプロトタイプ

### (b) 小型センサ端末の開発

#### <研究開発成果>

SA センサデバイスを 4ch 搭載可能な小型無線センサ端末を試作した。外觀図及び仕様を図Ⅲ-【①-1】-4 に示す。パッケージを含めた、さらなる小型端末を現在設計中であり、今年度中にパッケージを含めて、基本計画の 100mm×70mm×50mm サイズに収まる見通しである。この小型センサ端末を自立発電デバイスとして太陽電池を搭載し、自然光下(雨～曇りにおける屋内窓際)に設置し、自立発電による1時間に1回のセンサ信号計測、データ無線送信の動作検証試験を行なった。その結果、問題なく間欠動作し、エネルギー収支がプラスとなることを確認した。

#### <意義>

自立発電モジュールによって、無線伝送可能な小型 SA センサ端末を実現できたことは意義がある。



- ・ 小型(基板サイズ 100X70mm)
- ・ 4ch SA センサ入力
- ・ FPGA による特徴量抽出
- ・ 920MHz 帯無線モジュール
- ・ 自立発電モジュール接続 (太陽電池)

図Ⅲ-【①-1】-4 試作した無線 SA センサ端末

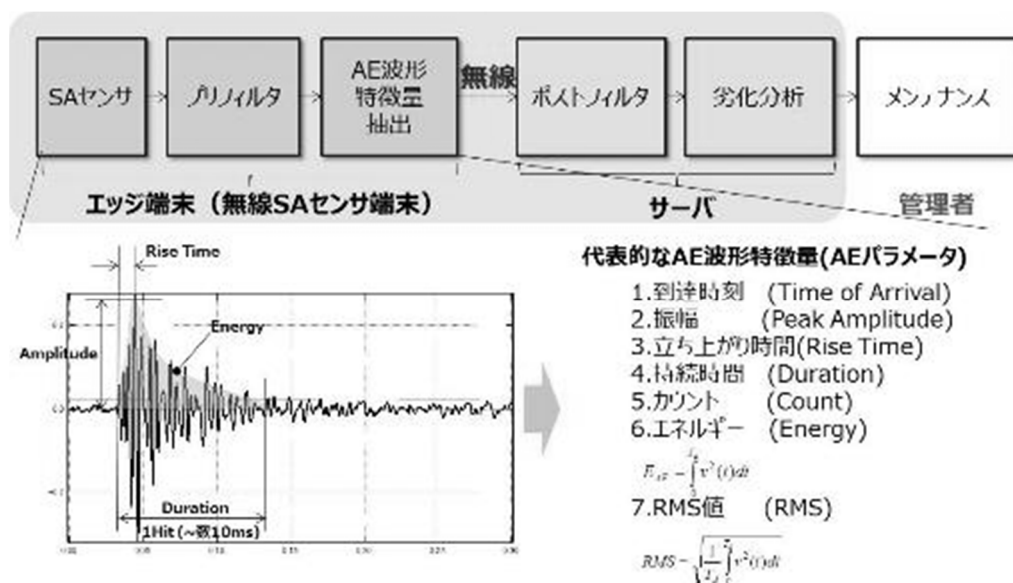
### (c) センサネットワークシステムの開発

#### <研究開発成果>

本検討で構築する SA センサ端末と無線ネットワークシステムによるブロック図Ⅲ-【①-1】-5 に示す。SA センサ端末に搭載したフィルタ、及び AE 波形特徴量抽出用の FPGA により、エッジ端末において、データの圧縮を図った。これにより無線伝送ビットレートを低減し、低消費電力で必要な情報を送信可能なネットワークシステムを構築した。開発した小型センサ端末を屋外橋梁近傍に設置した道路床版供試体に設置し、小型センサ端末間のデータ相互伝送試験を実施し、問題なく伝送可能なことを確認した。また、高速道路橋梁にて、開発した小型センサ端末を設置し、実環境での伝送可能距離を確認した。センサ端末を比較的不利な環境(鋼材隅角部)に設置したものの 30m 以上のデータ伝送が可能なことを確認した。

#### <意義>

自立発電と組み合わせた無線伝送可能な構造物健全性診断装置システムについては報告が確認されておらず、世界的にも先進的と言える。



図Ⅲ-【①-1】-5 SA センサ端末と無線ネットワークシステムの信号ブロック図

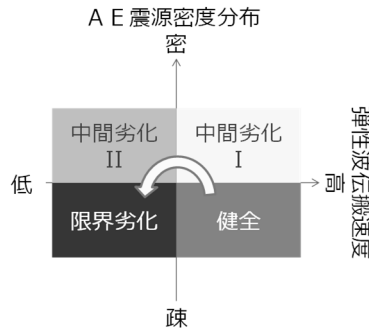
### (d) 橋梁構造の健全性定量評価手法の開発

#### <研究開発成果>

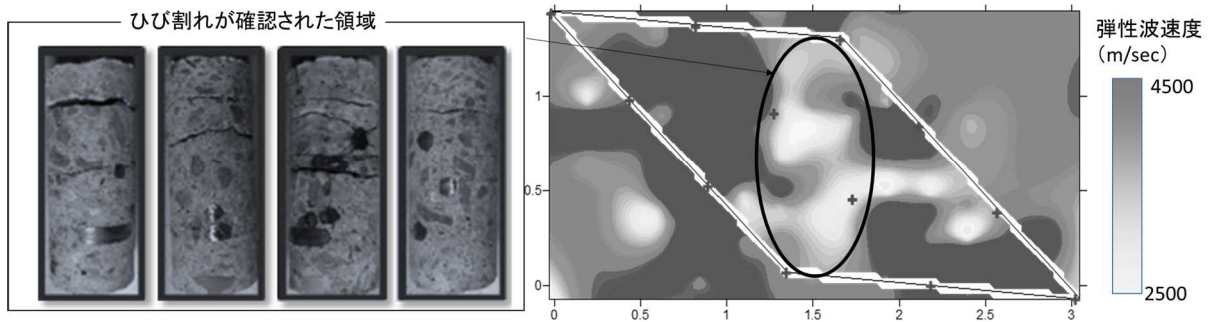
実高速道路床版(2 橋)及び大型損傷模擬供試体を対象とした内部損傷評価システムの構築・検証を実施した。特に、実高速道路床版においては、交通荷重に伴う AE や雨滴により生じる弾性波の特性(AE の数や大きさ、周波数等)を把握するとともに、これらの到達時間を利用した位置標定及び弾性波速度構造評価を実施した。この結果、AE 密度と弾性波速度の双方を評価することにより、図Ⅲ-【①-1】-6 に示すように床版の内部損傷の進行を詳細に追跡可能であること、また、図Ⅲ-【①-1】-7 に示すように、実構造物においてこれらの評価結果は内部の損傷を的確に把握できることを示した。

#### <意義>

以上の結果に基づき、使用者となる道路管理会社等と議論を行い、既往の検査手法では検知が難しい内部の欠陥を把握可能な、革新的な手法であるという評価を得ている。



図Ⅲ-【①-1】-6 床版の内部損傷進展に伴う AE 密度及び弾性波速度の変化



図Ⅲ-【①-1】-7 実高速道路床版の速度構造及び低速度領域でのコアサンプルの状況

### (1-1-2) フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

#### (a) 極薄半導体ひずみセンサアレイの開発

##### <研究開発成果>

成膜に 550°C の高温プロセスが必要なため従来はフレキシブル基板上に直接形成することはできない高感度かつ動作に電力を入力する必要のない PZT 圧電膜センサをフレキシブルシートにアレイ状に形成する新規なプロセスを開発した。新規なプロセスでは、先ず SOI(Silicon on Insulator)シリコンウエハ上(極薄シリコン厚さは 3 $\mu\text{m}$ )に厚さ 2 $\mu\text{m}$  の PZT 圧電膜を成膜し、フォトリソグラフィで長さ 5mm、幅 1mm の矩形状のセンサ構造にパターンニングした後、深掘り RIE(Reactive Ion Etching)等の MEMS プロセスによってフレーム状のハンドル層に微小な支持構造を介してわずかに支えられた構造として、容易に転写できる状態とした。次に、Cu 配線を形成した耐候性保護層付き PEN 基板のセンサを転写する箇所に UV 硬化性樹脂をスクリーン印刷し、真空吸引コレットを備えた実装機を用いて先の極薄半導体ひずみセンサを転写し、UV を照射して固定した。さらに、導電性ペーストをスクリーン印刷して PEN 基板の Cu 配線とセンサの上下電極を接続した。最後に、粘接着シートを貼り合わせ、コネクタを取り付けて完成させた。プロセスフローを図Ⅲ-【①-1】-8 (a)に、実際に作製した 5 $\times$ 5 アレイのセンサシートを図Ⅲ-【①-1】-8 (b)に、極薄半導体ひずみセンサと市販のひずみセンサの評価結果を図Ⅲ-【①-1】-8 (c)に示す。今回の試作では 20mm ピッチでセンサを転写したが、より高密とすることも容易である。作製した極薄半導体ひずみセンサを市販のひずみゲージと並べてステンレス板に貼り付けて感度を評価したところ 0.18mV/ $\mu\epsilon$  であった。ひずみに対するセンサの応答は市販のひずみゲージと同様であったため、1 $\mu\epsilon$  の分解能を有していることが示された。

ここまで述べてきた極薄半導体ひずみセンサアレイはシリコンを用いるため、1,000 $\mu\epsilon$  以上の大ひずみが印加されると破損してしまう懸念がある。地震発生時などに起こりうる、大きな亀裂発生においてはその 10 倍の 10,000 $\mu\epsilon$  以上の大ひずみが発生する。そこで極薄シリコン転写の代わりに、スクリーン印刷によって抵抗素子を印刷することで、10,000 $\mu\epsilon$  以上の大ひずみに耐えうるひずみセンサアレイの開発も行った。スクリーン印刷によって形成可能な抵抗素子材料として、銀ペースト、カーボンナノチューブ、グラファイトを比較した。その結果、図Ⅲ-【①-1】-9 (a)のようにゲージ率は順に 0.1、3.8、6.9 であり、カーボンナノチューブが最大値を示したが、インクの印刷性が良好でなくスクリーン印刷が行えなかったため、グラファイトを選定した。グラファイトは抵抗に温度依存性があるため、図Ⅲ-【①-1】-9 (b)左のような、通常のク

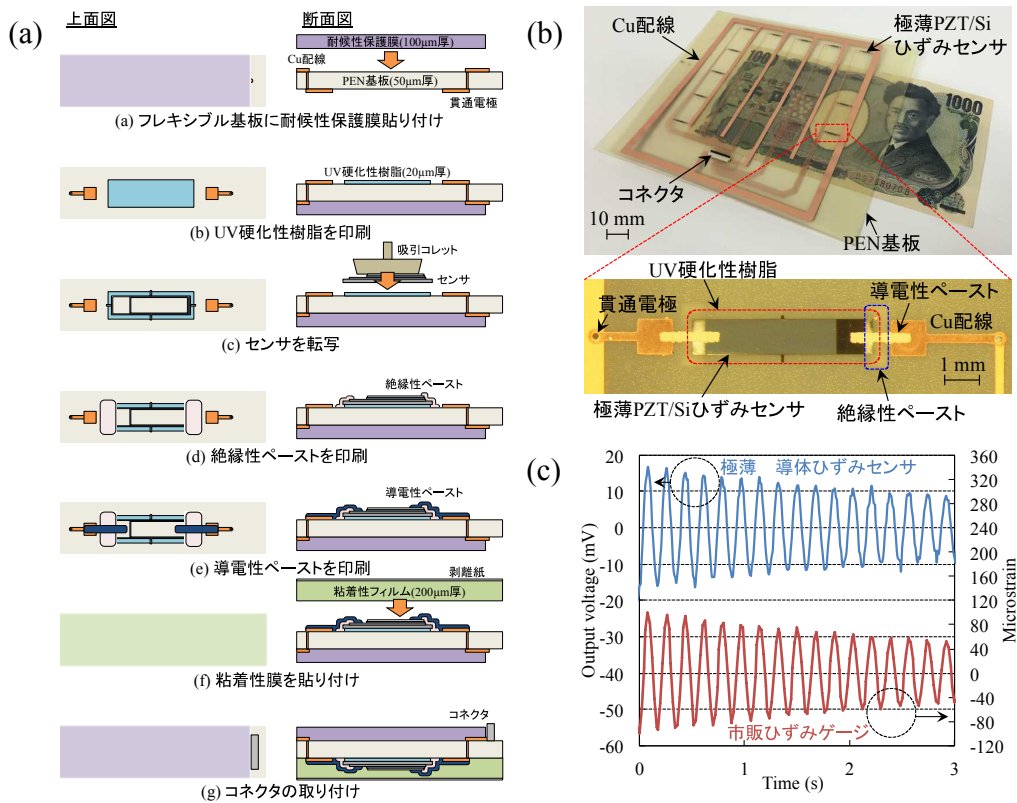


オーターブリッジでは温度の影響を受けてしまう。そこで図Ⅲ-【①-1】-9 (b)右のような、フルブリッジ構造を考案した。これによって、図Ⅲ-【①-1】-9 (c)に示したように、市販のコンスタンタン箔ひずみゲージと同等レベルの温度特性を達成することができた。試作したフルブリッジグラファイトひずみセンサアレイを、ステンレス製の試験体に貼りつけて、引っ張り試験を行った。結果を図Ⅲ-【①-1】-9 (d)に示す。あらかじめ入れておいた切り欠きを起点に亀裂が進展するに伴い、亀裂直下のグラファイトひずみセンサは破損することなく  $10,000\mu\epsilon$  以上の値を示し、亀裂の発生を明確に面パターンとして表示することができた。平成 28 年度残り期間で、PZT/Si、グラファイト、両者を様々な試験体で評価し、それぞれの適用範囲を明らかにしていくことを予定している。

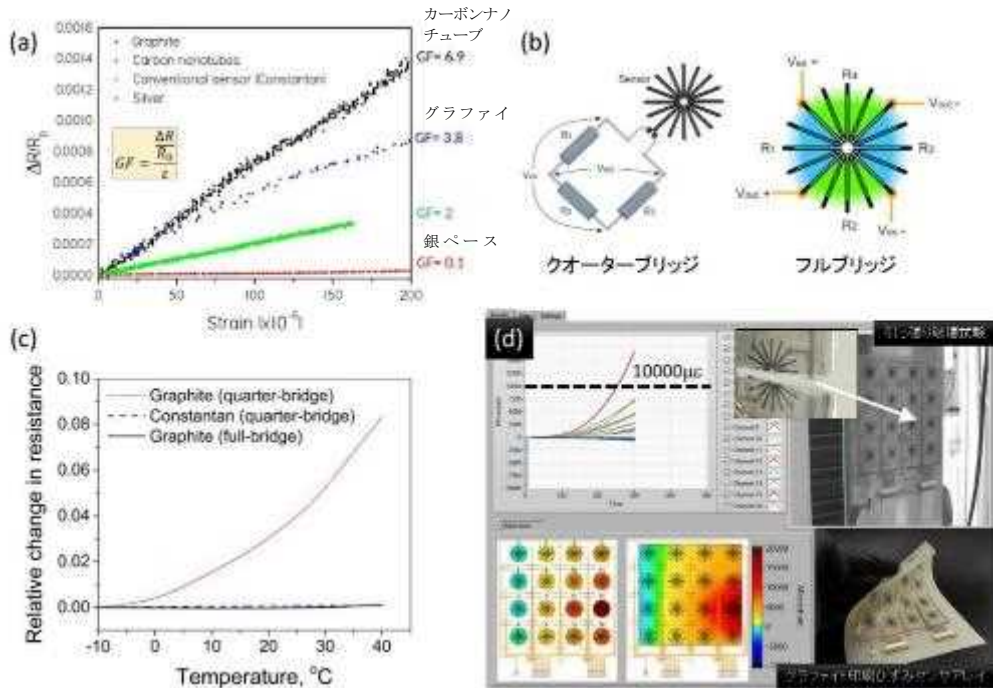
### <意義>

このような厚さ  $5\mu\text{m}$  程度の極薄半導体デバイスを実装機でフレキシブルシートに位置決め転写する技術は世界でも類を見ず、他の極薄デバイスにも幅広く応用できる画期的な手法である。

また、地震等で発生する大きな亀裂に対応する  $10,000\mu\epsilon$  以上の大ひずみに対しても破損することなく計測できる安価な印刷ひずみセンサも開発した。



図Ⅲ-【①-1】-8 (a)開発した極薄半導体ひずみセンサアレイの製造プロセス、(b)作製した極薄半導体ひずみセンサアレイ、(c)極薄半導体ひずみセンサの評価結果



図Ⅲ-【①-1】-9 (a)銀ペースト、カーボンナノチューブ、グラファイトを印刷したひずみセンサのゲージ率、(b)グラファイトひずみセンサに用いた温度補償用フルブリッジ、(c)クォーターブリッジとフルブリッジを用いたグラファイトひずみセンサの温度特性、(d)フルブリッジグラファイトひずみセンサをアレイによる、亀裂発生時のひずみ分布測定結果

### (b) 配線付きフレキシブルシート、センサ実装技術、及び封止プロセスの開発 ＜研究開発成果＞

図Ⅲ-【①-1】-10 のような、フレキシブル面パターンセンサの基本部材となる耐候性保護フィルム、フレキシブル回路基板、粘接着シートを開発した。

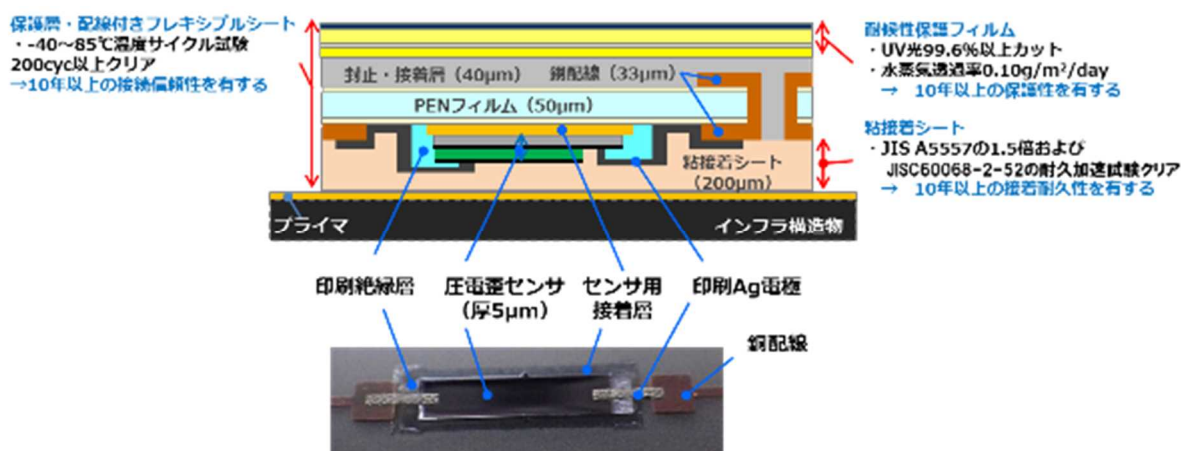
耐候性保護フィルムは、UV 光カット機能を持つ無機/有機ハイブリッド耐候性材料を最外層にコーティング形成して下地 (PET (ポリエチレンテレフタレート) 基材) を保護する構造とした。UV カット率は 99.6% 以上であり、下地の PET 層を 10~15 年間相当の UV 光から守ることが出来る。また  $\text{SiO}_x$  が蒸着されたバリアフィルムとの積層構造とすることで、水蒸気透過率  $0.10\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$  を達成、 $85^\circ\text{C}/85\%$ 、10V の恒温恒湿バイアス試験 1000 時間でマイグレーション不良無く、センサや配線を水分から保護できる構成を実現した。

粘接着シートは、光 (UV) で硬化反応が開始し完全硬化するまでの数時間は粘着性を保つので、現場での貼り付け作業が容易になる。本粘着シートはコンクリート剥落に対する仮補修シートにも採用されており接着強度と屋外耐久性を併せ持つ。JIS A5557 の 1.5 倍及び JISC60068-2-52 の接着耐久性試験 (アルカリ温水浸漬、凍結融解、熱劣化、塩水噴霧) において、接着強度を保持でき 10 年以上の接着耐久性を有することを確認した。

フレキシブル回路基板については、ベースとなる基材に透明性を有し熱耐久性に優れる PEN (ポリエチレンナフタレート) フィルムを適用した。フレキシブル回路基板と耐候性保護フィルムを積層し粘接着シートで鋼材へ貼り付け耐久性を評価した。 $-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}\times 200$  サイクルの温度サイクル耐久性試験にて、電気的な断線や各層での剥れなどの外観不良も発生無く、温度変化ストレスに対する 10 年以上の耐久性を確認した ( $\times -40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}\times 120$  サイクルが、10 年間に相当)。上述の基本部材と極薄シリコン圧電センサをインテグレートし、フレキシブル面パターンセンサを試作、実動作を確認することが出来た。

## <意義>

10年以上の耐候性を有するフレキシブル回路及び現場での簡易施工を可能とする粘着シートは、他に例がなく、フレキシブルセンサの実用化を進める上で意義がある。



図III-【①-1】-10 保護層、極薄PZT/Si圧電ひずみセンサ集積化フレキシブル回路基板、粘接着層からなるフレキシブル面パターンセンサをインフラ構造物に貼りつけた様子

## (c) フレキシブル面パターンセンサのシステム化と実証試験

### <研究開発成果>

プロジェクト当初は、アンプ、ADコンバータ、マイコン、RF-ICなどのICパッケージもフレキシブル基板上に実装することを想定していた。しかしながら、フレキシブル回路基板の設計が変わるたびにTELEC認証を取得する必要があること、パッケージの凹凸があるために施工時の破損が懸念されることから、アンプ、ADコンバータ、マイコン、RF-ICは別ユニットの通信回路モジュールとしてまとめて、フレキシブル回路基板上のコネクタを介して接続することとした。

図III-【①-1】-11はフレキシブル面パターンセンサ、通信回路モジュール、受信機、PC、コンセントレータまでを含めたフレキシブル面パターンセンサを用いたセンサネットワークのシステム全体構成図である。5枚の25chフレキシブル面パターンセンサからの出力を受信機1台で受け、PCを介してNTTデータのコンセントレータにデータを転送する。開発した通信回路モジュールには、極薄PZT/Siセンサからの圧電出力を増幅するチャージアンプ、ADコンバータ、マイコン、RF-ICが3cm x 4.5cm x 2cmのケースに収められており、全体の消費電力は123mW (3.7V-40mA)、待機電力は0.04mWである。横浜国立大学西尾准教授によると、高速道路において平均的な通行量が得られるのは2分であり1時間に2分間の測定を行うとすると、消費電力は4mWとなる。7cm x 4cmの数百円の太陽電池(300mW)により、日差しのある場所であれば自立電源動作が可能である。さらに、3cm x 2cm、200mAhの簡易なLiPoバッテリーでも、150時間は動作させられる計算である。この程度のサイズの太陽電池、LiPoバッテリーであれば、開発したフレキシブル面パターンセンサの上に十分に搭載可能である。

実証試験は阪神高速法円坂付近にて行うこととした。当該箇所は上下線2車線であり、7本のI桁によって支えられている。フレキシブル回路基板が保護層と粘接着シートで挟まれている状態のフレキシブル面パターンセンサを持参し、現場で日光を10分間程度照射して粘接着シートの紫外線硬化を開始させた。鋼橋表面にプライマを塗布して1時間後に、図III-【①-1】-12のようにして粘接着シートを貼り付けた。貼り付け自体はわずか2分であり、特殊な工具を用いることもないため、点検業者による施工も容易に行える方法が実現されている。

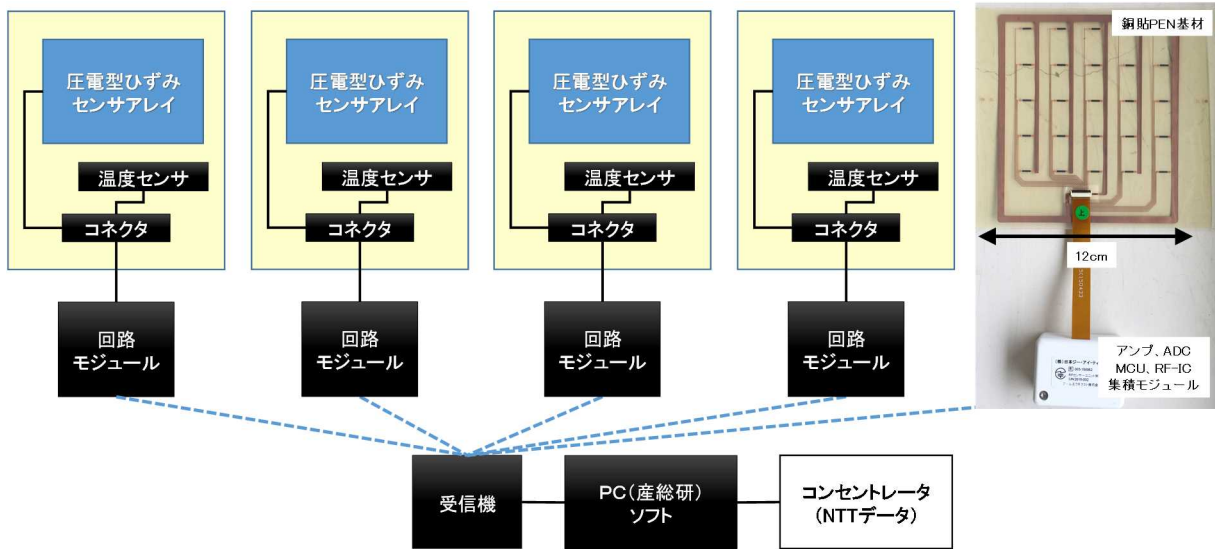
図III-【①-1】-13は実際に施工したフレキシブル面パターンセンサで、高速道路を通過する車両の動ひずみの測定中の様子である。比較のために、市販の箔ひずみゲージでの測定も行った。図中の波形データからわかるように、車両通過によって発生する10μ $\epsilon$ -100μ $\epsilon$ 程度の動ひずみを検出することができた。比較用の箔ひずみゲージのデータは高精度のアンプ、フィルタ回路を通したものである一方、フレキシブル面パターンセンサのデータはわずか3cm x 4.5cm x 2cmのケースに25ch分を収めたアンプのみを通し

たものであるため、現状では SN 比は劣る。しかしながら、フィルタ回路を加えることで SN 比を同等レベルにまで向上できる見込みである。

図Ⅲ-【①-1】-13 中の 25ch ひずみ分布に示したように、溶接部付近の出力が最大となることが示されている。箔ひずみセンサを用いて行った予備実験により、溶接部付近とそれ以外での動ひずみ値の差は  $5 \times 10^{-6}$  程度であることが分かっている。今回の結果は、SN 比が十分でなくともひずみを分布として測定することで、溶接部のひずみ集中というわずかな差を可視化できることを示している。

<意義>

フレキシブル面パターンセンサを実橋梁に簡単施工でき、高速道路を通過する車両の動ひずみならびに溶接部付近の出力が最大となるようなひずみ分布が計測可能なことを実測したことは世界初であり、フレキシブル面パターンセンサの適用可能性を示せたことで意義がある。



図Ⅲ-【①-1】-11 フレキシブル面パターンセンサを用いたセンサネットワークのシステム全体構成図



図Ⅲ-【①-1】-12 鋼橋へのフレキシブル面パターンセンサの施工



図Ⅲ-【①-1】-13 フレキシブル面パターンセンサによる阪神高速鋼橋のひずみ分布評価実証試験

## (1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

### (a) MEMS センサデバイスの開発

#### <研究開発成果>

傾斜出力安定性に悪影響をおよぼす可能性のあるいくつかのパラメータについての机上検証、パラメータを換えた一連の温度サイクル試験により影響因子の絞込みを行い、フロントエンド回路とプリント基板ストレイ容量変動が要因であることを突き止めた。フロントエンド回路の改良とフロントエンド回路を含めユニットを構造化し封止することで、目標の安定性  $0.855\text{gal}$  ( $=0.05\text{deg}$  相当) を達成した。その効果を確認するため、図Ⅲ-【①-1】-14 に示す原理試作サンプルを用い、温度試験による確認を実施し、封止構造とすることで目標の安定性が得られることを確認した。試験結果を図Ⅲ-【①-1】-15 に示す。原理試作 1 (乾燥封止) :  $0.33\text{gal}$  (X 軸)、 $0.12\text{gal}$  (Y 軸)、原理試作 2 (気密封止) :  $-0.69\text{gal}$  (X 軸)、 $-0.44\text{gal}$  (Y 軸) を確認した。原理試作品は共に目標を達成し、原理試作品 1 がより安定性があることを確認した。上記よりフロントエンド回路を含む MEMS センサユニット(図Ⅲ-【①-1】-16)の設計・試作を行った。試作した MEMS センサユニットの評価系構築及び評価を実施中である。

試作したフロントエンド回路に模擬コンデンサーを実装し、チャージアンプのノイズを測定し、センサ感度を考慮してノイズ評価した結果を表-②-(1-2).1 に示す。各軸とも目標の振動分解能 ( $0.1\text{gal}$ ) 達成の見通しを得た。MEMS センサを実装し、センサ端末の評価のため、静置試験を準備中である。

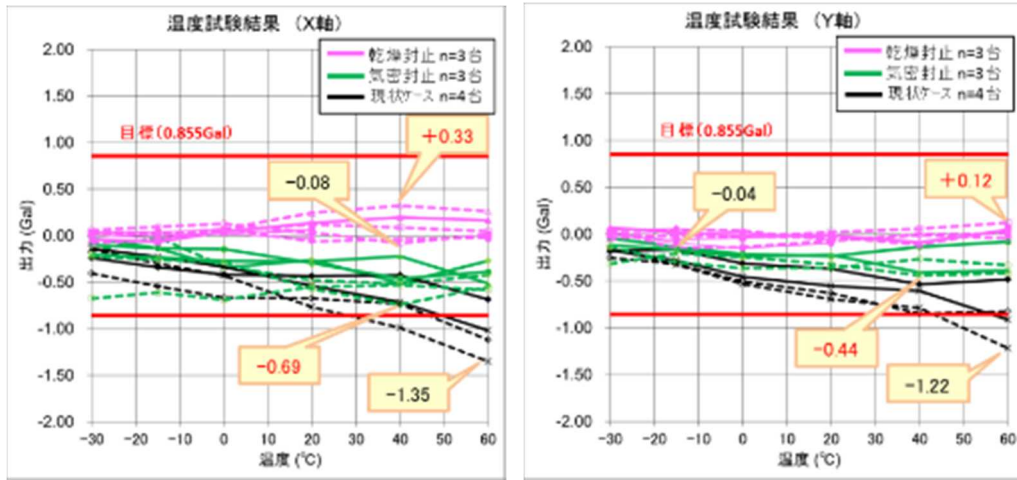
#### <意義>

道路付帯構造物の劣化を判定できる傾斜出力安定性:  $0.057\text{deg}$ 、振動分解能:  $0.1\text{gal}$  の高精度振動センサを開発した。



原理試作1 (乾燥封止) 原理試作2 (気密封止) 現状品 (比較サンプル)

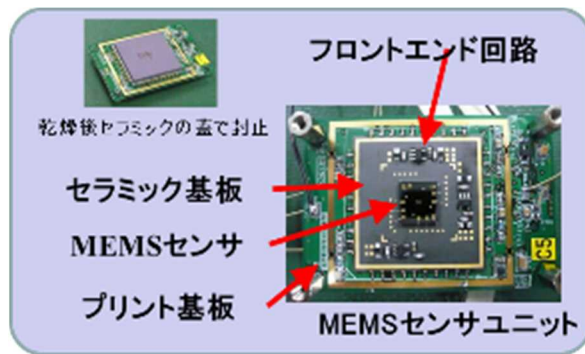
図III-【①-1】-14 温度試験に使用したサンプルの写真



X 軸試験結果

Y 軸試験結果

図III-【①-1】-15 温度試験結果



図III-【①-1】-16 MEMS センサユニット

表III-【①-1】-1 フロントエンド回路ノイズの評

加速度の検出軸	ノイズ電圧 評価結果	目標分解能のノイズ電圧
	[ $\mu$ V]	[ $\mu$ V]
X軸	27.6 (0.076gal)	< 36.4 (< 0.1gal)
Y軸	28.8 (0.078gal)	
Z軸	17.1 (0.047gal)	

## (b) 傾斜マルチセンサ端末の開発

### <研究開発成果>

無線モジュール(図Ⅲ-【①-1】-17)を試作し、免許取得・評価を完了した。セラミックパッケージ(アンテナ含む)との組合せ評価で通信試験を実施し、通信距離 65m(目標 30m 以上)と目標の通信速度1Mbps を確認した。

回路設計を完了し、消費電力試算の結果、目標の3.5mW(平均)以下の2.9mW(平均)を得た。また、太陽電池を用いた電源回路のソーラーシミュレータを使用した性能評価結果と NEDO の日照データ(東京、平均年)を用いたシミュレーションにより、年間を通し自立電源による連続動作を確認した。課題として NEDO の寡照年のデータにより評価した場合に連続動作が途切れる場合があることが判明した。データ測定時間の短縮化等を先行フィールド試験にて取得したデータにより検討し、寡照年の場合への対応を検討する。

傾斜マルチセンサ端末はインナーユニット構造(図Ⅲ-【①-1】-18)とした。インナーユニットには各プリント基板、太陽電池、リチウムイオンキャパシタを組み込み、インナーユニットをセラミックケースの筐体内に組込んで固定する構造とした。傾斜マルチセンサ端末の外観写真を図Ⅲ-【①-1】-19 に示す。傾斜マルチセンサ端末の大きさは目標サイズ:7cm×10cm×5cmを達成した。

試作した傾斜マルチセンサ端末の基本的動作を確認するとともに、傾斜、振動、温度のマルチ出力を確認した。

### <意義>

自立電源で駆動できる傾斜マルチセンサ端末により、傾斜、振動、温度のマルチ出力を確認するとともに、セラミックパッケージ内蔵アンテナにより、目標以上の通信距離 65m の通信を確認できた。



図Ⅲ-【①-1】-17 無線モジュール写真



図Ⅲ-【①-1】-18 インナーユニット



図Ⅲ-【①-1】-19 傾斜マルチセンサ端末外観

## (c) センサネットワークシステムの構築と実証試験

### <研究開発成果>

当初計画には無かったが、平成 29 年度からの実証実験に先立ち、現在入手可能なセンサを用いて基礎データを取得するために先行フィールド試験を実施した。高速道路会社と協力し、先行フィールド試験を行う情報板を吾妻山トンネル入口情報板(東名下り線 左ルート 66.6KP)に決定した(図Ⅲ-【①-1】-20)。

- ・先行フィールド試験用に市販のセンサを用いた簡易計測システムを構築した(図Ⅲ-【①-1】-21)。本簡易計測システムを 2015 年 12 月中旬に設置し測定を継続している。
- ・今回の先行フィールド試験の機器設置では技術的な課題は見られなかったが、配線作業が工事の大きな部分を占めることが再確認された。
- ・取得データを解析し、正常時の傾斜と卓越周波数の挙動が明らかになってきた。(i)支柱温度と気温に温度差が生じるタイミングで傾斜変動が大きくなることが判明した(図Ⅲ-【①-1】-22)。長期的な傾斜変動を監視するには、支柱温度と気温差が小さな夜間の時間帯(23 時～5 時)のデータをモニタリングすることが有効であることが分かった(図Ⅲ-【①-1】-23)。(ii)情報板の卓越周波数は略支柱材質のヤング率の温度特性に起因する温度特性を持つことが判明した(図Ⅲ-【①-1】-24)。

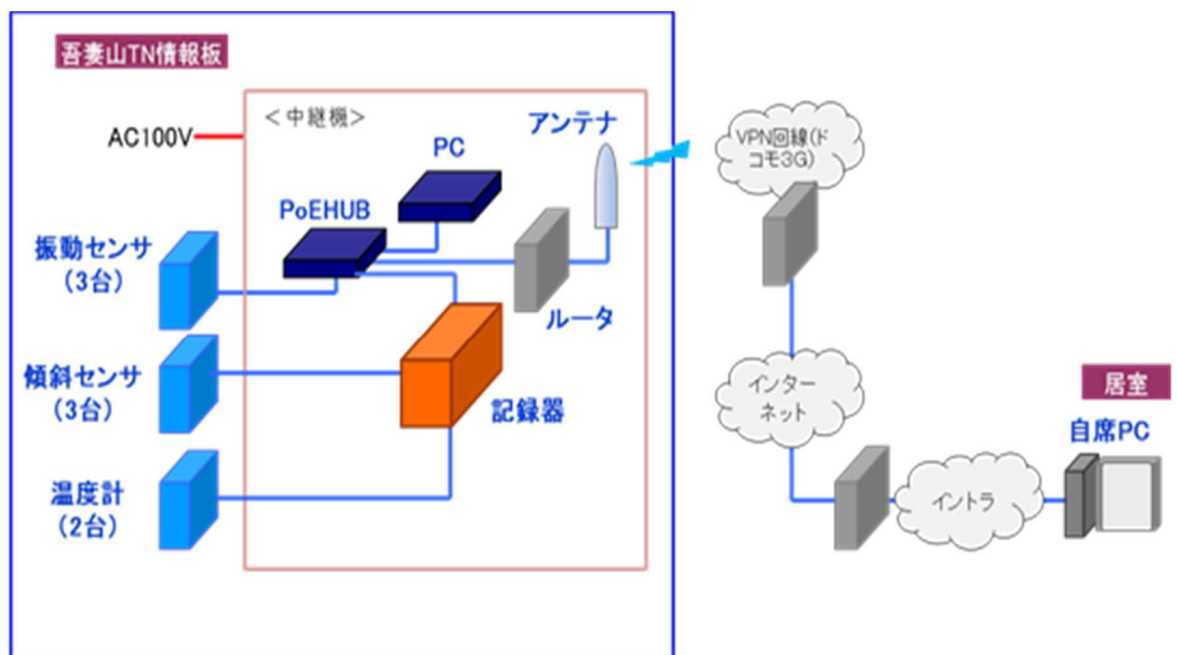
また、平成 29 年度からの実証試験に必要となる集約器について開発仕様のまとめ、設計・製作を完了した。さらに、コンセントレータとの通信確認を完了するとともに、傾斜マルチセンサ端末と無線通信との連携動作試験に着手した。

<意義>

先行フィールド試験のデータから、支柱温度と気温に温度差が生じるタイミングで傾斜変動が大きくなることが判明し、長期的な傾斜変動を監視するには、支柱温度と気温差が小さな夜間の時間帯(23 時～5 時)のデータをモニタリングすることが有効であることが分かった、また、傾斜と振動をモニタリングすることで、情報板の状態変化発生有無を確認することが可能と考えられることが分かった。

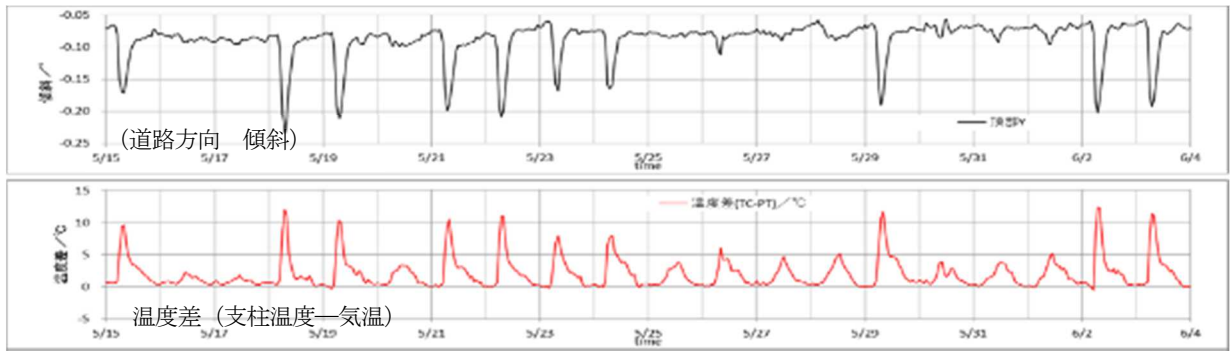


図Ⅲ-【①-1】-20 先行フィールド試験場所(吾妻山トンネル入口情報板)



図Ⅲ-【①-1】-21 簡易計測システムの構成

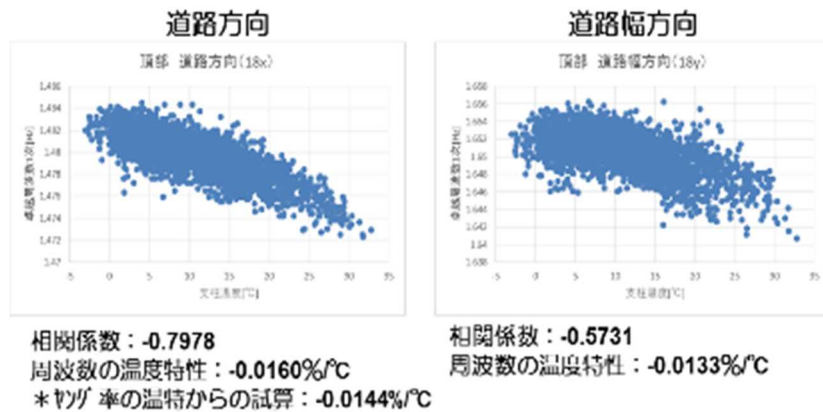




図Ⅲ-【①-1】-22 情報板 傾斜時系列トレンド例（頂部道路方向）2016/5/15～2016/6/4



図Ⅲ-【①-1】-23 情報板 夜間傾斜時系列トレンド（頂部道路方向）2015/12/17～2016/6/4



図Ⅲ-【①-1】-24 情報板卓越周波数と支柱温度との相関

### (1-3) 法面変位センシングシステムの開発

#### (a) 法面用多機能型センサ端末の開発

##### <研究開発成果>

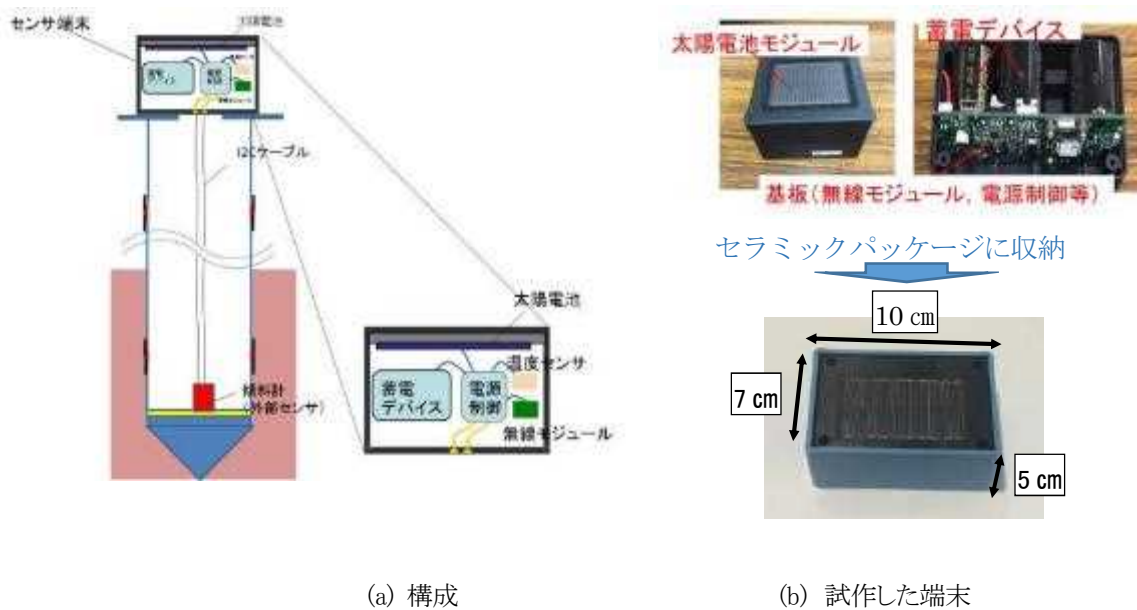
自立電源でかつ 10 年間無線通信を継続して行うために太陽電池モジュール+蓄電デバイス+無線モジュールを基本構成とし、さらに、温度や傾斜データを同時に計測するために図Ⅲ-【①-1】-25 (a)に示すような構成とした。傾斜計には、「高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発」(委託先:横河電機(株))で開発された傾斜計を使用する。上記の構成に基づき、試作した端末を図Ⅲ-【①-1】-25 (b)に示す。試作したセンサ端末を用いて、図Ⅲ-【①-1】-26 に示すように、三菱電機(株)情報技術総合研究所の芝生上にセンサ端末、子受信機、親受信機を設置し、端末の動作及び変位計測の検証を行い、以下を確認した。

(ア) 図Ⅲ-【①-1】-26 に示した基礎実験により、温度・変位・傾斜データを同時に計測できることを確認した。

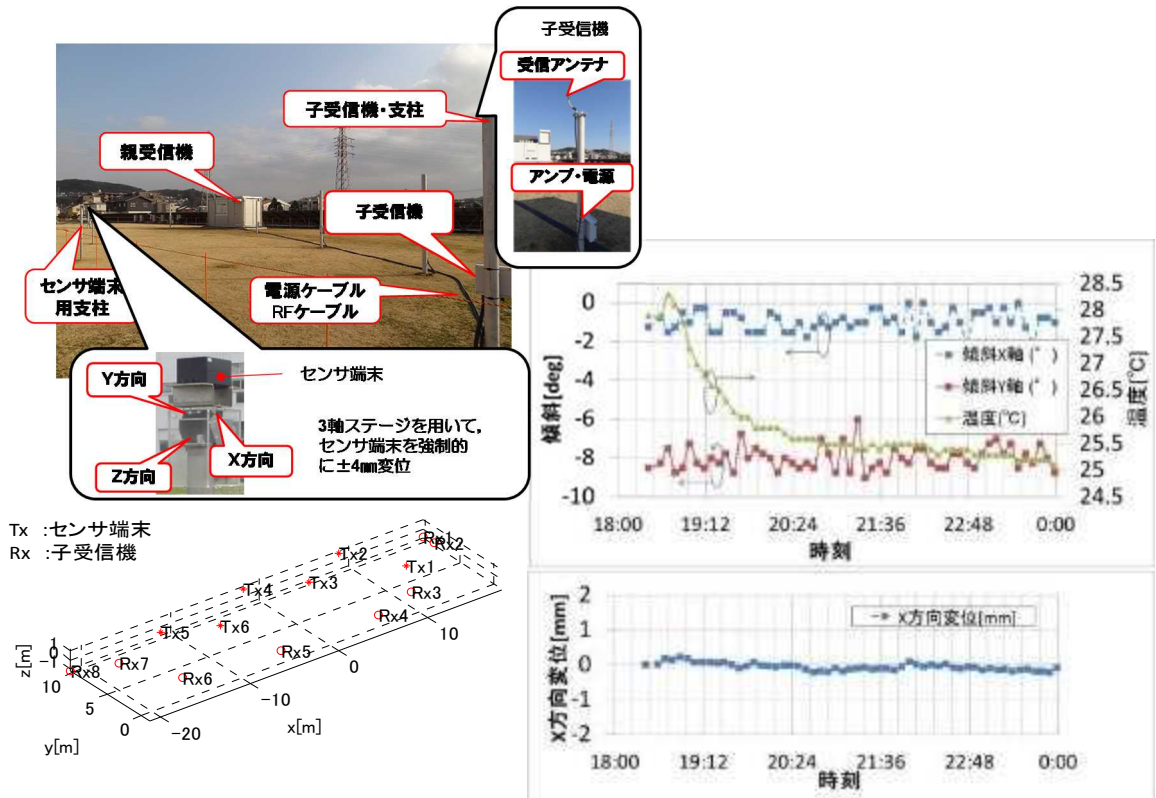
- (イ) 無線通信を含む全ての動作は太陽光発電を利用した自立電源により行われ、図Ⅲ-【①-1】-26 に示すように 6 分間に1回収集できることを確認し、これより突発事象に伴い、最大1時間あたり 10 回の無線通信が可能であることを確認した。
- (ウ) センサ端末のサイズは図Ⅲ-【①-1】-25 (b)に示すように概ね 5cm×7cm×10 cmを満足した。
- (エ) 無線通信には 920MHz 帯の特小無線を用いることで無線局の免許を受けることなく使用可能であり、図Ⅲ-【①-1】-27 に示すように、実証実験候補場所(山形自動車道月山湖PA(上り)斜面)にて通信距離が1端末あたり最大約 40m、マルチホップにより約 90m までの通信を確認した。
- (オ) 10年以上の信頼性については、高耐久性セラミックパッケージの使用及び蓄電デバイスの搭載により確保する。標準的な日本の直近 10 年間の雨量を調査したところ、10 年間で 6 日連続して雨天が続いた年があったことから、6 日間太陽光による発電が無かったとしても連続して動作するように蓄電デバイスの容量を決定し、図Ⅲ-【①-1】-28 に示すように、太陽光発電モジュールを取り外した実験により 6 日間の連続動作を確認した。

<意義>

自立電源でかつ 10 年間無線通信を継続して送受信できる太陽電池モジュール+蓄電デバイス+無線モジュールを基本構成とする電波位相差変位センサ端末の動作を確認した。



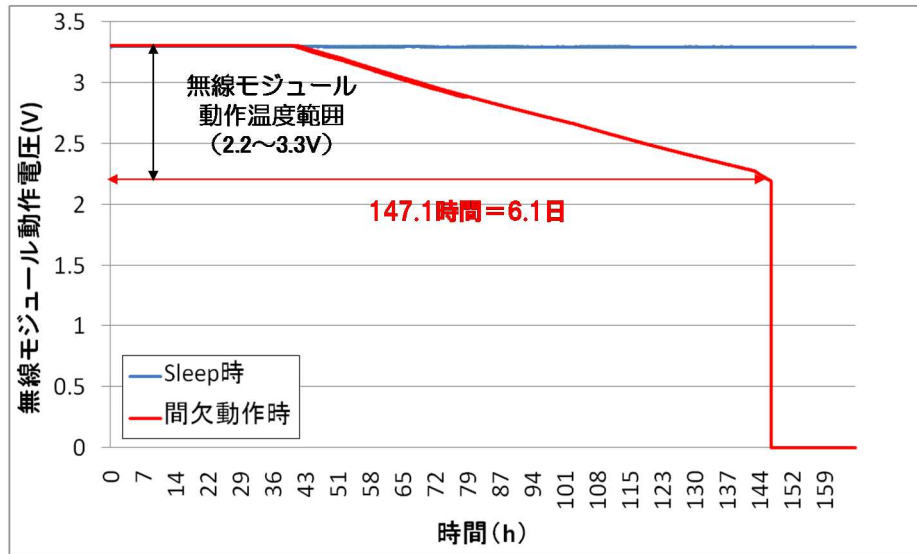
図Ⅲ-【①-1】-25 法面用多機能型センサ端末



図Ⅲ-【①-1】-26 試作したセンサ端末を用いた基礎実験の様子と計測結果例



図Ⅲ-【①-1】-27 実証実験場所候補地(月山湖 PA(上)斜面)における通信実験



図Ⅲ-【①-1】-28 蓄電デバイスのみで動作させた場合の無線モジュール動作確認

### (b) センサネットワークシステムの構築と実証実験

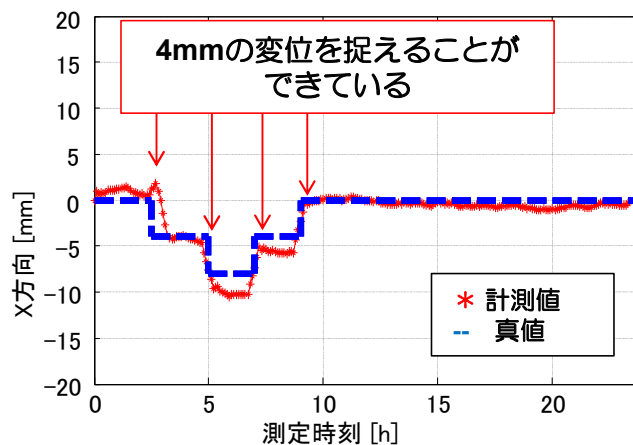
#### <研究開発成果>

センサネットワークシステムの構築と実証実験を実施し、以下を確認した。

- (ア) センサネットワークシステムの構築と実証実験では、試作したセンサ端末を用いて図Ⅲ-【①-1】-26 に示すネットワークシステムを構築し、通行止めの判断基準の目安となる 4 mm/h の変位を検出することができるか検証した。図Ⅲ-【①-1】-29 にセンサ端末を強制的に変位させた結果を示す。これより 4 mm の変位を検出できることを確認した。
- (イ) 図Ⅲ-【①-1】-27 に示すように試作したセンサ端末を用いたネットワークシステムを実証実験候補場所にて一時的に構築し、実証実験を開始した。

#### <意義>

電波位相差方式により、通行止めの判断基準の目安となる 4 mm/h の変位を検出できることを実証実験で確認した。



図Ⅲ-【①-1】-29 強制変位実験結果

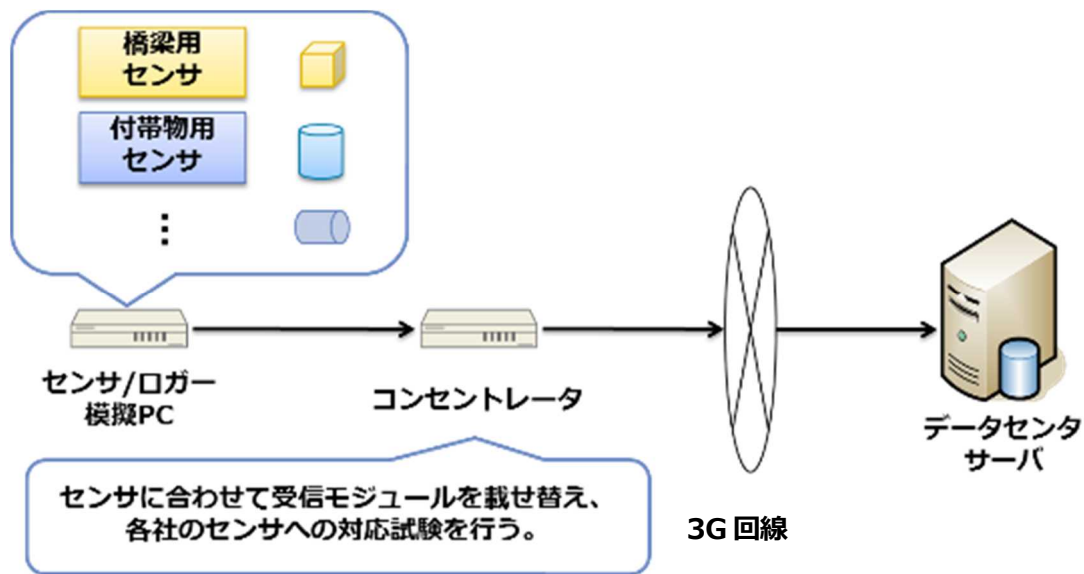
(2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

(2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

(a) 多種多様なセンサへの対応技術の開発

<研究開発成果>

平成 26 年度に、多種多様なセンサからデータを受信、データを分解し、サーバへ送信できるコンセントレータのモジュールを開発し、平成 27 年度に、各センサのデータ送信方式とデータ項目をヒアリングし、平成 28 年度に各テーマ仮センサ/ロガー模擬 PC を使用して、インターフェース仕様の妥当性を検証した。図Ⅲ-【①-1】-30 に各センサとのインターフェース接続検証のシステム構成図を示す。各テーマのセンサは開発段階であることから各テーマの仮センサを使用した。加えてコンセントレータからデータセンタへデータ送信する際は、実証時の通信回線方式を想定して 3G 回線を使用した。



図Ⅲ-【①-1】-30 各センサとのインターフェース接続検証のシステム構成図

各テーマのデータ項目モデルの例を表Ⅲ-【①-1】-2 に示す。

表Ⅲ-【①-1】-2 主なデータ項目例(法面変位システム)

データ項目	単位	備考
センサID	文字列	センサを識別するためのID
観測時刻	年月日時分秒	
変位量x	mm	経度方向のセンサの変位量(東経方向を+)ベクトルを算出し、「変位量」に利用。
変位量y	mm	緯度方向のセンサの変位量(北緯方向を+)ベクトルを算出し、「変位量」に利用。
変位量z	mm	高さ方向のセンサの変位量(海面から垂直方向を+)ベクトルを演算し、「変位量」に利用。
センサx方向傾き	度	経度方向への傾きを示す。(東経方向を+)よりベクトルを演算し「センサ傾き」に利用。
センサy方向傾き	度	緯度方向への傾きを示す。(北緯方向を+)よりベクトルを演算し「センサ傾き」に利用。

各テーマデータ項目に加え、想定しているセンサ数や送信頻度から算出したデータ送信量を表Ⅲ-【①-1】-3 に示す。結果としてコンセントレータと各センサは問題なく接続でき、業務要件を想定したデータ項目と頻度で、問題なくデータをサーバに送信できることを確認した。この確認により、インターフェースの方式とコンセントレータの性能、通信回線の帯域、データセンタのサーバの CPU やメモリなどリソース性能に問題なく接続できることが確認できた。

表Ⅲ-【①-1】-3 各テーマのデータ送信量見込み

	センサ数	ユニット数 /1センサ	ユニット数計	単位データ量 [Byte]	データ項目数	センサデータ量 /1センシング [byte]
東芝	10	4	40	2	20	40
産総研	3	9	27	1.25	1200	1500
富士電機	3	1	3	4	108900	435600
三菱電機	33	1	33	4	6	24

※ユニット：1センサに含まれるセンシング機器。

産総研データ量 10bit \* 10Hz \* 120s = 1500byte  
 富士電機データ量 4bytes \* 108900データ = 436000byte

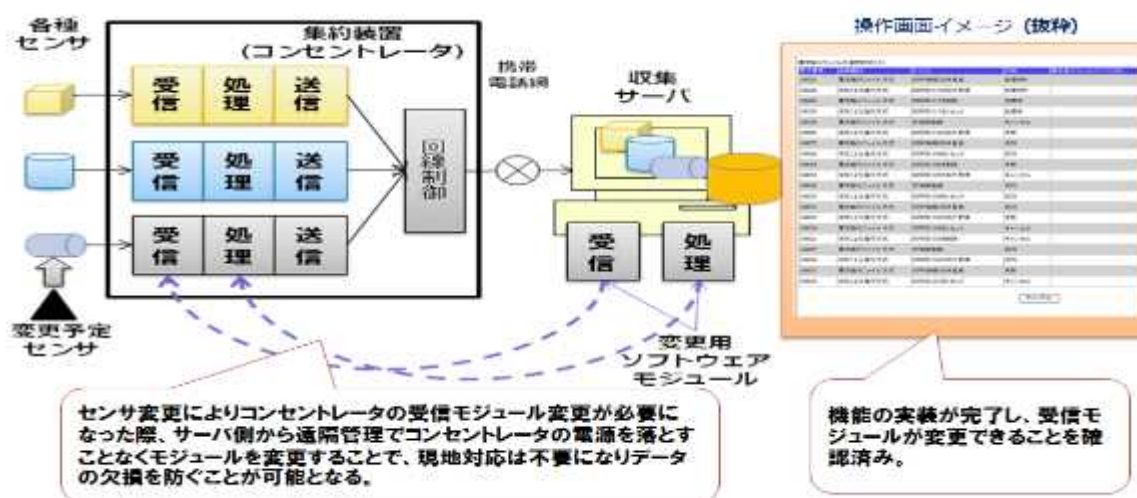
	ユニット数計	センサデータ量 /1センシング [byte]	1センサのセンシング頻度 定期センシング/1時間	係数*	データ送信量 (Mbps)
東芝	40	40	10	2	0.0001
産総研	27	1500	1	2	0.0002
富士電機	3	435600	1	2	0.0055
三菱電機	33	24	10	2	0.0000

※下記を想定した安全率  
 データ量変動、コンセントレータ処理（圧縮/暗号）、データ再送

また、平成 26 年度にコンセントレータのセンサデータ受信機能の受信モジュールを遠隔で変更できる仕組みを構築し、平成 27 年度はデータセンタに構築したサーバから実際に遠隔管理によって変更できることを検証した。図Ⅲ-【①-1】-31 に受信モジュール遠隔管理のシステム概要図を示す。モジュール変更は、サーバの管理画面でモジュール変更するコンセントレータを選択し、変更するモジュールを登録する。検証環境では実証時の通信回線方式を想定して 3G 回線を使用した。試験を実施した結果、コンセントレータはセンサデータの送信を優先して実行した後に、変更するモジュールが登録されている場合にモジュールを変更することが確認できた。設計通りセンサデータ送信を優先し、遠隔からモジュール変更を実施することができたので、本機能は実フィールドでの動作に問題はないと考える。

<意義>

従来は単独のデータしか取り扱えなかったが、多種多様なセンサからのデータを統一的に収集サーバに送信できるとともに、収集サーバからセンサデータ受信機能の受信モジュールを遠隔で変更できるようになった。



図Ⅲ-【①-1】-31 受信モジュール遠隔管理のシステム概要図

## (b) コンセントレータ間の連携通信対応技術の開発

### <研究開発成果>

コンセントレータの連携通信とは、複数のコンセントレータが無線 LAN(Local Area Network : Wi-Fi) で自立的にネットワークを構築し、相互に連携した通信を行う機能である。図Ⅲ-【①-1】-32 に連携通信のイメージを示す。



図Ⅲ-【①-1】-32 連携通信イメージ図

本機能(メッシュネットワーク機能)を活用することで、以下のメリットが考えられる。

- ・3G 回線費用の削減
- ・現場状況にあわせたコンセントレータの設置

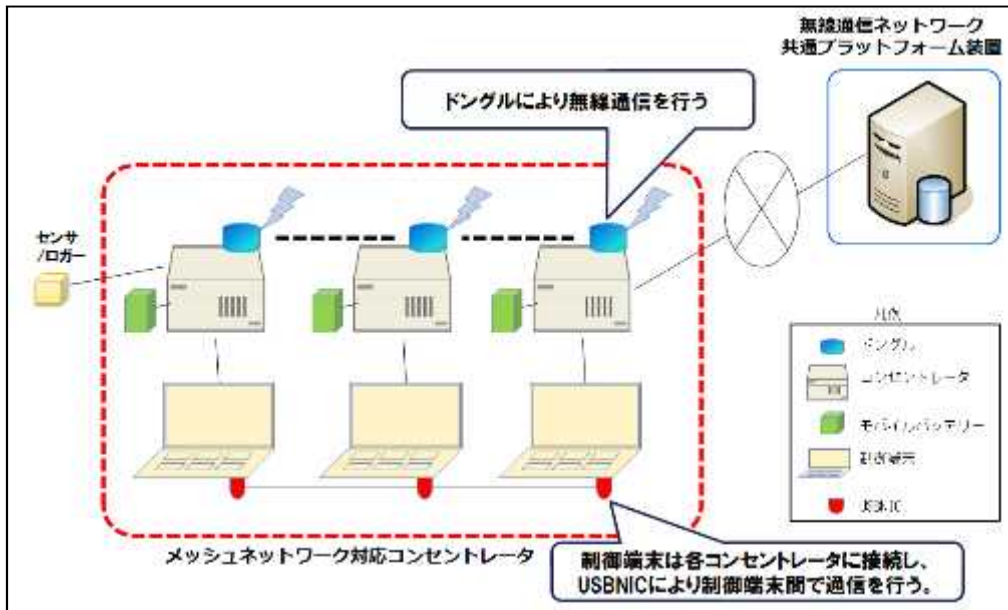
コンセントレータがそれぞれの 3G 回線でデータを送信する場合は、コンセントレータ数と同数の 3G 回線が必要であるが、送信データが少量の場合は帯域に余剰が発生し効率が悪い。この課題に対して、メッシュネットワーク機能を活用すればコンセントレータ間の連携通信により送信データを 1 つのコンセントレータにまとめることが可能になる。よって、送信データをまとめてサーバに送信するコンセントレータのみ 3G 回線を使用することで、通信回線帯域を効率よく利用し、3G 回線コストを削減することが可能となる。

加えて、3G 回線を使用するコンセントレータは電波状況がよい箇所に設置する必要があるが、センサ設置場所により電波状況が悪い箇所にしか設置できない場合が想定される。このような場合は、コンセントレータをメッシュネットワーク機能で連携させ、送信データをホップ通信させることでデータを転送し、電波状況のよい場所に設置したコンセントレータから送信データをサーバに送信することが可能となり、現場状況にあわせたコンセントレータの設置が可能となる。3 台まで連携した場合の機能検証とコスト抑制効果を検証し、各社毎の最適なモデルを整理した。図Ⅲ-【①-1】-33 にメッシュネットワーク対応コンセントレータ概要図を示す。メッシュネットワーク対応コンセントレータは、無線機能を実装するドングルを使用し連携通信を行う。検証は干渉電波の少ない海辺で実施した。

表Ⅲ-【①-1】-4 と図Ⅲ-【①-1】-34 より、距離が離れると帯域速度が遅くなり、通信遅延も大きくなることが分かる。結果として、ドングルを適切に選択することにより、コンセントレータ間 50m の場合で帯域速度約 7Mbps で、遅延速度約 3ms で通信できることが確認できた。各社が現時点で想定しているデータ送信量の帯域は最大 5kbps 程度なので(表Ⅲ-【①-1】-3) 各社のデータ送信量見込みの富士電機のデータ送信量の値)、3 台までのホップ通信の機能検証は、業務要件を想定した場合の通信量でも問題ないことが確認できた。

### <意義>

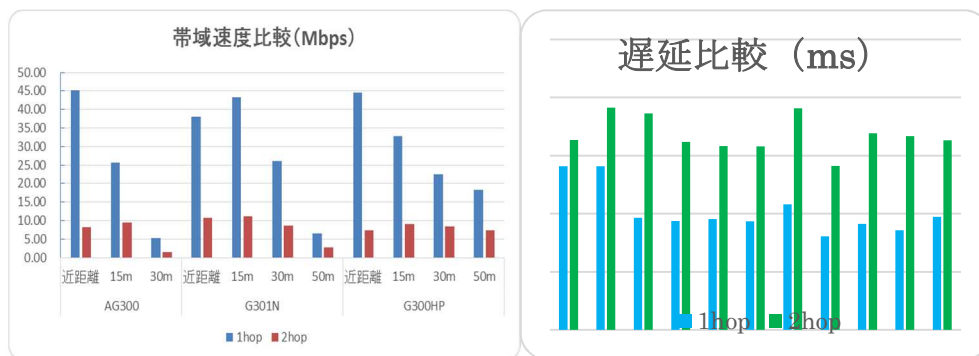
コンセントレータ間の連携通信対応技術により、3G 回線費用の削減並びに現場状況にあわせたコンセントレータの設置が可能となる。



図Ⅲ-【①-1】-33 メッシュネットワーク対応コンセントレータ概要図

表Ⅲ-【①-1】-4 通信測定結果

ドングル	距離	帯域速度[Mbps]		遅延[ms]		欠損率	
		181	182	181	182	181	182
AG300	近距離	45.19	8.23	2.82	3.27	0%	0%
	15m	25.74	9.38	2.82	3.83	0%	0%
	30m	5.19	1.47	1.93	3.73	0%	2%
G301N	近距離	38.12	10.75	1.87	3.24	0%	0%
	15m	43.36	11.11	1.91	3.16	0%	0%
	30m	26.00	8.65	1.87	3.16	0%	2%
	50m	6.50	2.78	2.16	3.81	6%	20%
G300HP	近距離	44.56	7.34	1.61	2.82	0%	2%
	15m	32.77	9.02	1.83	3.39	2%	0%
	30m	22.49	8.34	1.72	3.33	0%	0%
	50m	18.30	7.39	1.95	3.27	0%	0%



図Ⅲ-【①-1】-34 帯域速度比較及び遅延比較グラフ



(c)セキュアな情報収集への対応技術の開発

<研究開発成果>

センサからサーバまでデータ送信する際には、不正なデータ受信を防止するためのセキュリティ対応が必要になる。セキュアな情報収集を可能とするため、プログラムの不正な改ざん、及び、許可されていないセンサ機器の接続のリスクを詳細化し、開発要件を整理した(図Ⅲ-【①-1】-35)。センサからサーバまでは各種機器や回線を経由するので、ネットワーク領域を定義し、それぞれのネットワーク領域内でリスク検討を実施した。

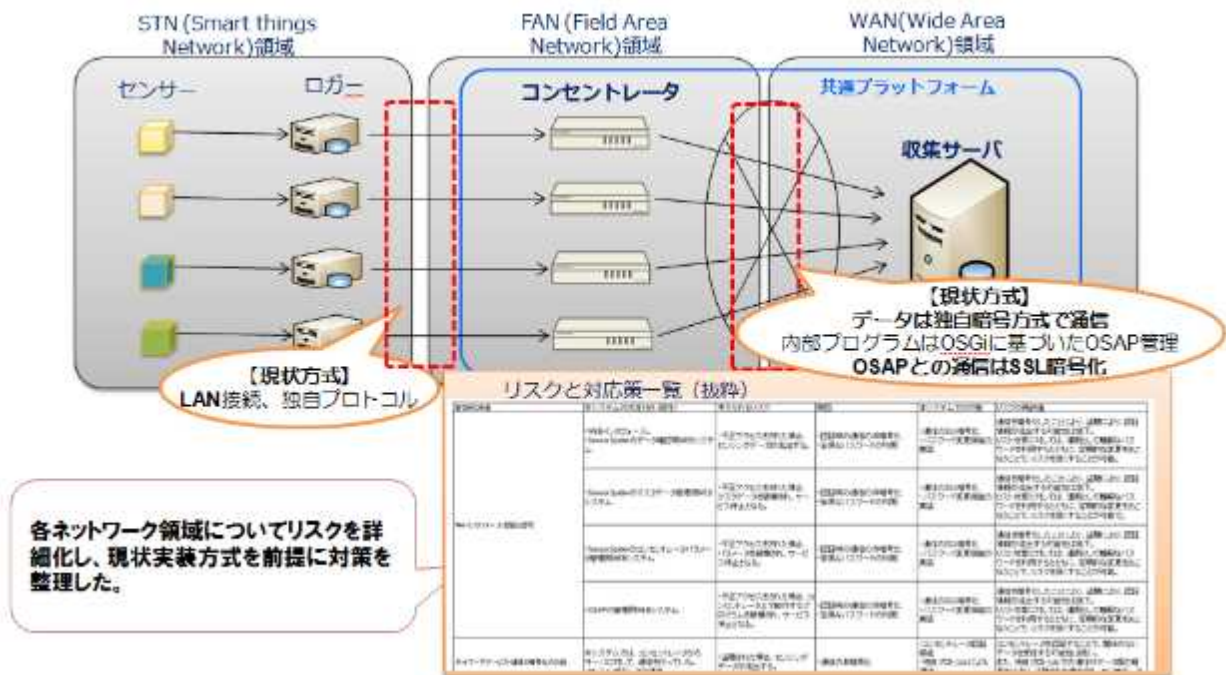
共通プラットフォームにおいて、プログラムの不正な改ざんは、コンセントレータとデータセンタのサーバが対象になる。特に実証フィールドに設置されるコンセントレータは外部から侵入できないための対策に加え不正な改ざんの検知と防止ができる機能が必要になるため、FAN(Field Area Network)領域としてリスクの洗い出しと開発要件を抽出した。

また、許可されていないセンサ機器の接続に関しては、コンセントレータとロガーを接続するインターフェースにおいてリスクを詳細化することが必要であるため、STN(Smart Things Network)領域とFAN領域のインターフェースについて、現状方式を前提にリスクの洗い出しと開発要件を整理した。

コンセントレータとサーバにおいてもインターネットを経由してデータ送信するため、FAN領域とWAN(Wide Area Network)領域のインターフェースにおいても同様に整理を実施した。整理した開発要件をもとに平成28年度に機能開発と検証を実施する。

<意義>

センサネットワークのセキュアな通信が可能になる。



図Ⅲ-【①-1】-35 各ネットワーク領域のリスク検討

## (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

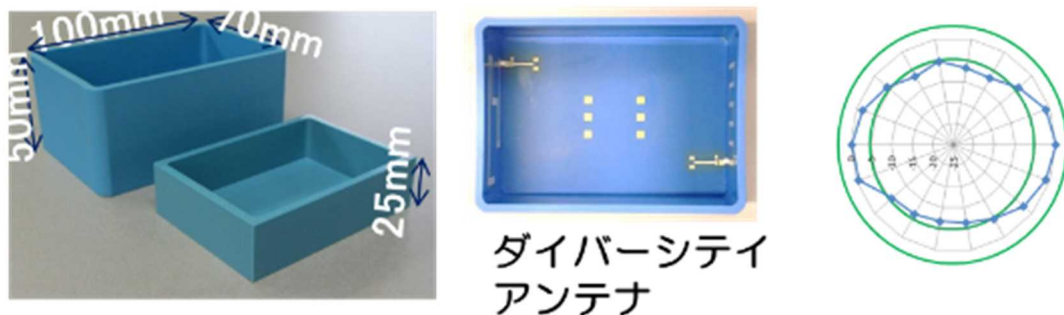
### (a) 高効率アンテナ内蔵 LTCC 基板及び透光性セラミック基板の開発

#### <研究開発成果>

70mm×100mm×50mm の大型サイズ、かつ低指向性ダイバーシティアンテナ付きの LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramics)パッケージを完成した。図Ⅲ-【①-1】-36 に開発した低指向性ダイバーシティアンテナ付きの LTCC パッケージを示す。

#### <意義>

ガラスと比較して強靱性を備え、電氣的絶縁性を持ち、光透過性を有し太陽電池のパッケージ内実装に最適な透光性セラミック材料と、使用する高周波数帯域の電波を遮らないで高効率でかつ無指向放射パターンを可能にするアンテナと低抵抗配線を内蔵でき、かつ各種センサ、発電素子、無線回路の実装用キャビティを形成できる LTCC 基板でかつ大型サイズのパッケージは従来に無いものである。



図Ⅲ-【①-1】-36 低指向性ダイバーシティアンテナ付きの LTCC パッケージ

### (b) 高気密封止接合技術の開発

#### <研究開発成果>

LTCC 基板と透光性セラミック基板を低温 (50℃～60℃) で接合できる無機有機複合接合材を開発し、パッケージ封止実装プロセス(図Ⅲ-【①-1】-37)の開発を完了した。リーク速度の測定評価を除いて、中間目標を達成した。

#### <意義>

本成果により、パッケージに実装するセンサ・電子回路部品への熱影響・ダメージを少なくしつつ、封止部の気密性を確保したオールインワンパッケージセンサ端末が実現でき、実装工程の革新化ができた。



図Ⅲ-【①-1】-37 YAG レーザによるパッケージ封止実装プロセス

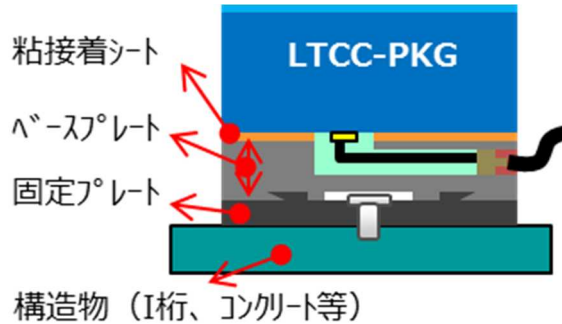
(c) ベースプレート実装構造及びプロセスの開発

<研究開発成果>

橋梁向け、道路付帯物向け、法面向けのセンサ端末ごとに外部端子の取出し方法や実装のプロセスフローを策定し、最適なベースプレート構造案(図Ⅲ-【①-1】-38)を決定した。また、ベースプレートの材質として耐久性に優れる SUS312L に決定した。

<意義>

外部端子やセンサ素子を持つ様々な形態のセンサ端末に対して、高耐久かつ簡便に構造物への取付を可能とする。



図Ⅲ-【①-1】-38 ベースプレート実装構造の例(SA センサ端末)

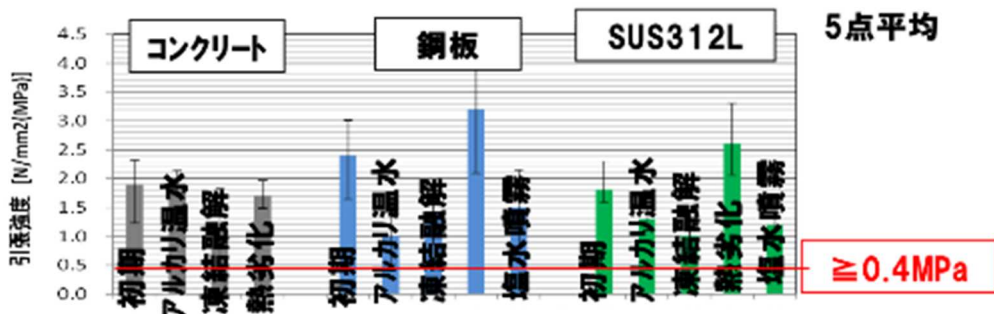
(d) 構造物への取付・接合開発

<研究開発成果>

10 年相当の耐久加速試験として JISA5557 耐久加速試験条件 1.5 倍を完了し、コンクリート、鋼板、SUS312L において LTCC との引張強度 0.4MPa 以上であることを確認した(図Ⅲ-【①-1】-39)。

<意義>

樹脂系の接合材料である粘接着シートの耐久性が確認でき、10 年以上の屋外環境で使用されるセンサ端末の取付けに適用可能であることが証明された。



図Ⅲ-【①-1】-39 耐久加速試験 引張り試験結果

(e) パッケージング評価用モジュールと耐久性加速試験法の開発

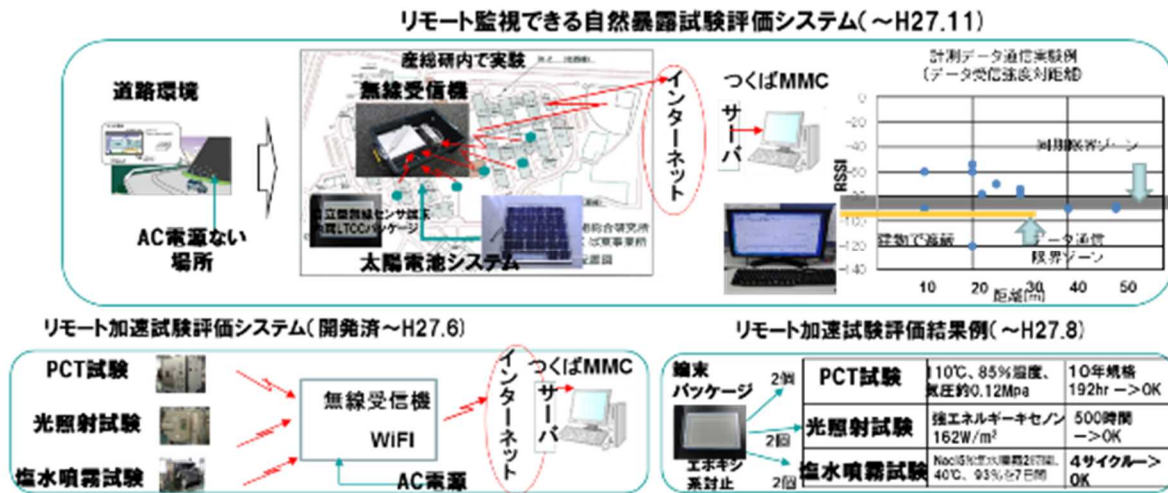
<研究開発成果>

リモートで信頼性データを観察評価できる完全自立型耐久性加速試験法を開発できた。また、自然暴露(実証)試験を阪神高速橋梁下、NEXCO 西日本西安堵橋橋梁下で実施した。リモート監視できる自然暴露試験評価システムの概要を図Ⅲ-【①-1】-40 に示す。

<意義>

無線リモートで加速試験機の中の試験体の劣化データを観察評価できる完全自立型耐久性加速試験

法は、非常に効率的な方法であると試験認定機関から評価を受けている。この方法より、複数の場所に設置した自然暴露試験データを同時に比較計測評価できる。



図Ⅲ-【①-1】-40 リモート監視できる自然暴露試験評価システムの概要

### (3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

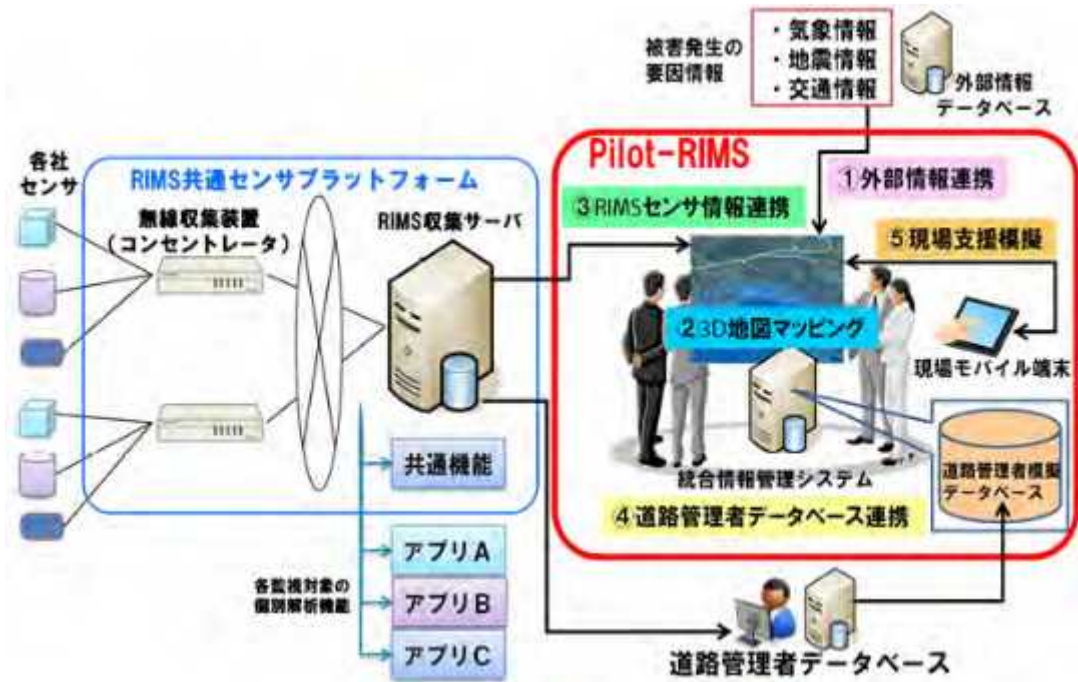
#### <研究開発成果>

道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究を行うため、無線センサネットワークによる継続モニタリングが有効な橋梁、道路付帯物、法面を対象にしたモニタリングシステムを検討した。また、RIMS の高速道路会社及び一般道等への普及を加速させるために、RIMS センサ情報だけでなく、外部要因情報(地震、気象、交通情報等)の収集、表示、3次元地図への情報マッピング、RIMS センサ情報との連携、高速道路会社データベースとの連携や現場作業支援に向けたタブレット等のモバイル端末への情報提供機能を備えた Pilot-RIMS を開発した。Pilot-RIMS ならびに各機能モジュールの概要を図Ⅲ-【①-1】-41 に示す。

また、毎月開催する研究会において高速道路会社とセンサシステム開発機関が橋梁、道路付帯物、法面を対象とした個別フィールドでの実証実験内容について審議を行い、これらの検討結果を踏まえ、本プロジェクトに参加している高速道路会社(NEXCO3 社及び阪神高速道路)が管理する高速道路から各センシングシステムの実証場所候補を選定するとともに、その場所での予備実証試験を実施し、来年度からの本格実証実験の問題点の洗い出しを完了し、本格実証の目途を得た。予備実証実験の様子を図Ⅲ-【①-1】-42 に示す。

#### <意義>

これまで、個別対象のモニタリングシステムはあるが、道路インフラ全体を統合したモニタリングシステムはなく、Pilot-RIMS でその実現イメージを明らかにした意義は大きい。また、参画する高速道路会社(NEXCO3 社及び阪神高速道路)が管理する来年度からの本格実証場所において、予備実証を実施し、実証実験の問題点の洗い出しを行ったことにより、来年度からの本格実証実験を円滑に実施することが可能となった。



図III-(①-1)-41 Pilot-RIMS 概要図



図III-(①-1)-42 予備実証実験の様子

(4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

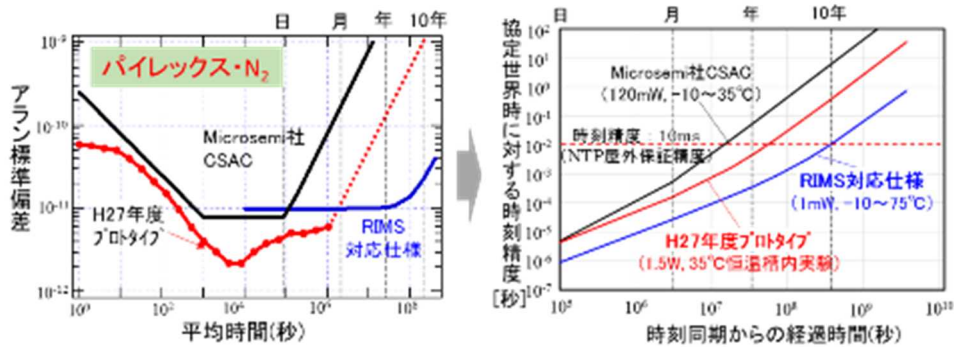
(4-1) 小型、低消費電力を支える CSAC 用ガスセルの開発

(a) 長期安定度向上策の検討1 ー高純度蒸気 Cs 封入主産の調査、及び開発

<研究開発成果>

本研究開発では、Microsemi 社のマイクロマシニング技術を用いたガスセル製造方法とは異なるガラス

加工方式ガスセルで試作を進めている。本方式は、産総研の計測分野で培われてきた高純度のガスセル製造技術を応用しており、ガスセル内の(i)真空焼出しによる清浄化、(ii)蒸留による高純度 Cs 導入、(iii)バッファガス透過(流出)の抑制、の 3 つの基盤技術によりガスセル内環境を理想状態に近づけることで、理論モデルの推定値と実験値がほぼ一致するようになり、ガスセル内に封じる Cs やバッファガスの種類や量を定量的に決める設計手法が確立できた。平成 27 年度に試作したガスセル(φ5mm×9mm<sup>3</sup>)の恒温槽内評価の結果を図Ⅲ-【①-1】-43 に示す。図の左はアラン標準偏差であり、下側ほど発振周波数のばらつきが小さいことを示すことから Microsemi 社 CSAC よりばらつきが小さいことを確認できる。右の図は、それを基にした時計としての協定世界時に対する精度を表しており、平成 27 年度のガスセルは 10ms 以下の精度を 20 カ月維持しており、Microsemi 社 CSAC の 10ms の維持期間 5 ヶ月の 4 倍とした(平成 27 年度のガスセル評価用プロトタイプは、実験環境の温度の影響を受ける構造のため、恒温槽内で評価)。平成 28 年度は、本方式で小型化の障害となっていたバーナー封じ切り工程などに工夫を凝らすことで、図Ⅲ-【①-1】-44 に示すようにガスセルの小型化(2mm×2mm×2mm)を実現した。これは、マイクロマシニング技術を用いた NIST(National Institute of Standards and Technology)の CSAC と同等レベルにあり、世界最小級である。この小型化により、(4-1)(c)で設計した真空断熱構造を持つ量子部へのガスセルの実装が可能となり、(4-1)(d)で試作する平成 28 年度原子時計プロトタイプから温度範囲を振った実験が可能となる。



図Ⅲ-【①-1】-43 平成 27 年度試作ガスセルの性能評価結果



(a) 平成 27 年度試作ガスセル(φ5mm×9mm<sup>3</sup>) (b) 平成 28 年度試作ガスセル(2×2×2mm<sup>3</sup>)

図Ⅲ-【①-1】-44 ガスセルの小型化

また、Microsemi 社 CSAC と同様にマイクロマシニング技術を用いたガスセルの基礎検討を進めており、平成 27 年度は、微細加工した石英ウェハを接合して Cs とバッファガスを封止したガスセルを試作し、Cs が封止できていることを確認した(図Ⅲ-【①-1】-45 参照)。平成 28 年度は、小型化が困難な低ガス透過率材料であるサファイアに特化して、マイクロマシニング技術を用いた小型ガスセル製造技術の開発を進めている。ガスセル内に封止する Cs やバッファガスはガラス加工方式ガスセルでの知見を基に決める。



(a) 10mm 角石英基板を用いたガスセルの試作 (b) ガスセル内に封止した Cs

図Ⅲ-【①-1】-45 ウェハ直接接合によるガスセルの製造

<意義>

ガスセル内の環境を確実に制御できる方式を用いたことで、先行する Microsemi 社 CSAC を圧倒する

性能を出すとともに、CSAC のガスセルの課題を明確にし、それを本研究にフィードバックすることで、量産性に優れたマイクロマシニング技術を用いたガスセル内での環境制御技術の基礎検討に着手した。理論モデルからガス透過率の小さなサファイアもしくはアルミノ珪酸ガラスでガスセルを作製することでガスセル内環境の安定性を更に数桁改善できると推定している。そこで、ガラス加工方式ガスセルだけでなく、マイクロマシニング技術を用いたガスセルでも Microsemi 社 CSAC の性能を圧倒する原子時計を実現することが可能になる。

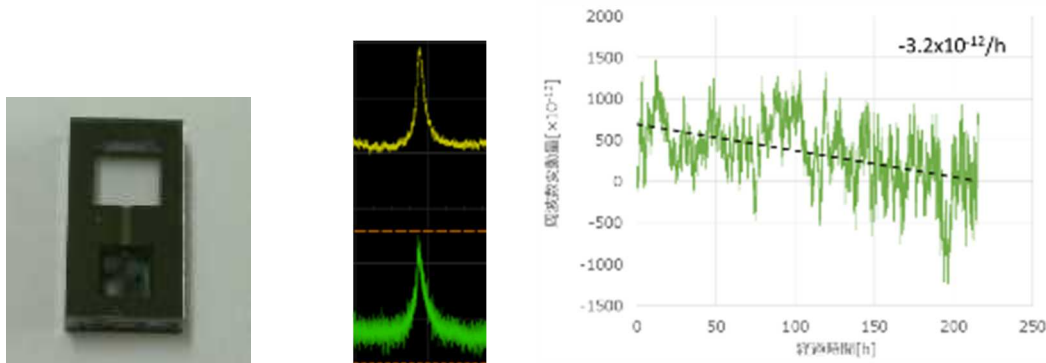
## (b)長期安定性向上策の検討2 -Cs、Rb 併用ガスセルの検討-

### <研究開発成果>

アルカリガスの Cs と Rb を一つのガスセルに封入したデュアルガスセルを作製し(図Ⅲ-【①-1】-46 (a)参照)、チップスケール原子時計(CSAC)に適用可能な方式による同時観測測定装置を構築して観測を行った。まず、図Ⅲ-【①-1】-46 (b)に示すように、Cs、Rb の 2 つの CPT 原子が同時に観測できることを確認し、各種のパラメータを測定した。次に、同時計測を行いながら長期安定度の評価を行った。9 日間における周波数変動特性からは、それぞれの CPT 共鳴の変動が異なる振る舞いをしていることを明らかにした。図Ⅲ-【①-1】-46 (c)は、2 つの CPT 共鳴周波数差を算出したものであり、1時間当たり $-3.2 \times 10^{-12}$ の変動があることを示している。自立している原子時計は、このような周波数差または周波数比の変動を計測することは可能であり、このデータを基にバッファガス変動による周波数ドリフト量を推定して周波数補正を行うことで長期安定度を大幅に向上可能である。このことにより長期的な変動量を原子時計自身が検出可能である事を確認した。以上の結果より、提案法の実現可能性を実証できた。

### <意義>

本研究開発における提案手法は、ガスセル内のバッファガスの変動をリアルタイムで検出可能な世界初の試みであり、新規性が非常に高い。測定結果からは、バッファガス変動が検出可能な事を実証できており、チップスケール原子時計の長期安定度向上に大きな貢献が可能である。



(a) デュアルガスセル外観 (b) 同時観測した CPT 共鳴 (c) 同時観測した CPT 共鳴の周波数差

図Ⅲ-【①-1】-46 マイクロマシニング技術で試作したデュアルガスセルと同時観測した CPT 共鳴

## (c)量子部構造の熱解析

### <研究開発成果>

熱解析と要素実験により、ガスセルサイズ 2.1mm×2.1mm×2.1mm 以下、VCSEL 消費電力 2mW 以下、量子部内気密圧力 0.1Pa 以下とすることで、量子部の消費電力を 10mW 以下とする設計を終えた。H27 年度より検討を進めてきた真空気密封止パッケージング技術、断熱とヒーターへの電力供給を両立するための薄膜配線形成技術、ガスセル表面からの輻射による熱の放出を抑制するための金属膜コーティング技術開発を適用することで、H28 年度中に量子部の消費電力 10mW 以下を達成できる見込みである。

### <意義>

昨年度の量子部消費電力は 500mW と大きかったが、低消費電力化に向けた要素技術の短期立上により、本年度の量子部消費電力 10mW 以下への試作に繋がった。Microsemi 社 CSAC と同等の量子部消費電力となり、更なる低消費電力化に向けた取り組みへ繋がった。

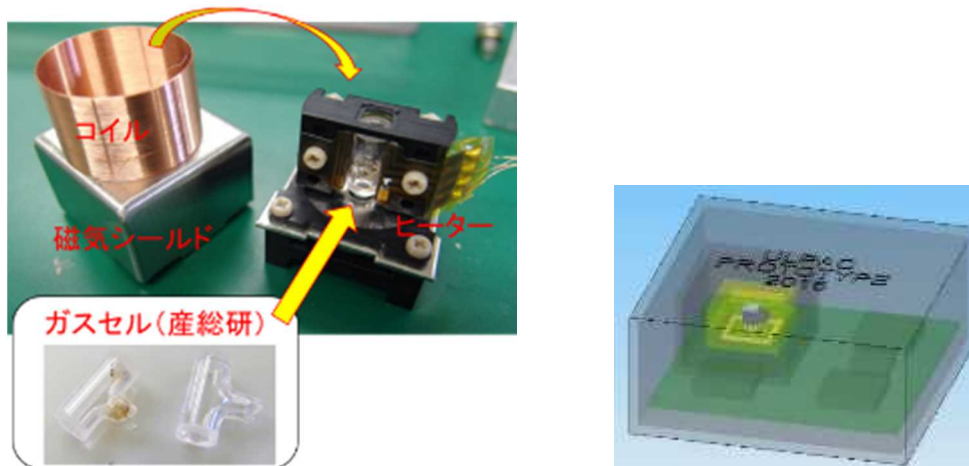
#### (d) ガスセル評価用 CSAC プロトタイプの開発

##### <研究開発成果>

図Ⅲ-【①-1】-47 に、平成 27 年度ガスセル評価用プロトタイプと平成 28 年度原子時計プロトタイプを示す。H27 年度は、(4-1)(a)で試作したガスセルを評価するための CSAC プロトタイプを開発し、動作検証により正常に機能することを確認した。20 台のプロトタイプを試作し、産総研にて製作したガスセルの比較評価を行う事で、ガスセル起因の長期安定度影響因子を抽出することができた。H28 年度は H27 年度ガスセル評価用プロトタイプの 30%弱に小型化し、かつ、約 1W あった制御回路部の消費電力を 110mW に低減する回路を設計し、試作により長期安定度とともに消費電力を検証中である。

##### <意義>

原子時計の基本構成要素である量子部(ガスセル、VCSEL など)と制御回路を独自に設計・試作することで、原子時計として機能させることに成功した。これにより、機能評価結果の設計へのフィードバックが容易になり、性能向上を図る開発期間の短縮が可能となる。



平成 27 年度ガスセル評価用プロトタイプ  
(55 mm×55 mm×35mm)

平成 28 年度原子時計プロトタイプ  
(40mm×40 mm×18mm)

図Ⅲ-【①-1】-47 平成 27 年度および平成 28 年度プロトタイプ

#### (4-2) CSAC の制御回路開発

##### <研究開発成果>

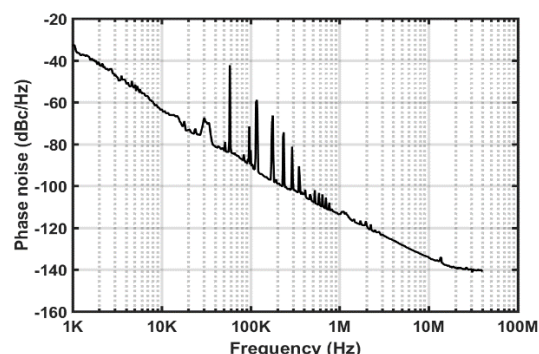
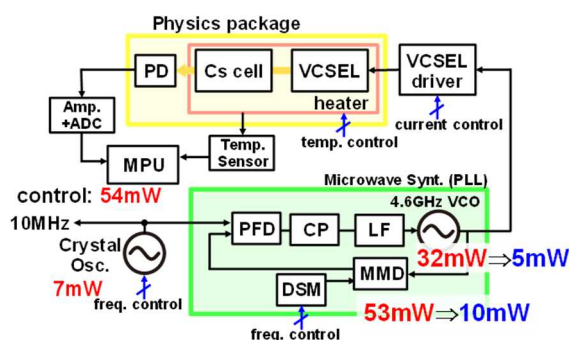
図Ⅲ-【①-1】-48 に原子時計に占める発振器の消費電力を示す。発振器だけで 32mW を消費しているため、この部分の低消費電力化が重要となる。電圧制御発振器 VCO の低消費電力化が可能な新たな回路方式として、テールポンプ型 VCO を回路シミュレーションで設計し、4.6GHz 帯の CMOS 集積回路として試作した。図Ⅲ-【①-1】-49 に位相雑音の測定結果を示す。発振周波数範囲が 4.4-4.9GHz、その際の位相雑音が 1MHz 離調周波数で 113.2dBc/Hz であった。消費電力は非常に低く 0.52mW を達成した。これは同周波数帯のものにおいて世界最小である。現状の CSAC では、図Ⅲ-【①-1】-48 に示したように、発振器部分の消費電力のみならず、基準周波数源となる水晶発振器において 7mW の消費電力を要している。本研究項目では、この水晶発振器を使わない制御方式の検討を行った。量子部からの透過信号を 4.6GHz 帯のまま受け、その周波数を基準として電圧制御発振器 VCO の位相同期を実現する。本年度は、そのために必要となる量子部の数値モデルを作製するため、現状品の CSAC を実測した。また、回路シミュレーションにより、分数分周が可能な周波数分周器の動作を確認できた。

##### <意義>

原子時計の制御回路で消費電力の大きな部分として、発振器があり、その消費電力 32mW の 0.52mW への低減を実証した。この発振器を含む PLL 回路の消費電力 53mW も回路シミュレーターにより数 mW と



世界最小となる可能性を見出しており、Microsemi 社 CSAC を圧倒する性能を実現している。



図Ⅲ-【①-1】-48 CSAC に占める発振器の消費電力

図Ⅲ-【①-1】-49 位相雑音の測定結果

### (4-3) CSAC 用面発光半導体レーザ(VCSEL)技術の開発

#### <研究開発成果>

H27 年度は、波長調整層を挿入した新規の VCSEL 構造を試作し、発振波長を 1nm ステップで数 nm の範囲で調整可能である事を実証した。この技術を適用し、ウェハ面内での波長ばらつき分布を打ち消すように波長調整層をパターンニングする波長調整 VCSEL 方式を提案した。H28 年度は、ばらつき補正前の波長分布を均一化するように複数段の描画パターンを生成するソフトにより波長調整 VCSEL を効率的に作製するプロセスの確立に取り組んでおり、このプロセスで試作した VCSEL を H28 年度プロトタイプに組み込んで評価を進める予定である。

#### <意義>

VCSEL の発振波長は、エピタキシャル成長層の厚みに依存するため、ウェハ内で完全に均一にすることは困難だが、その厚み分布を計測して、それを打ち消すような複数枚のパターンを設計して、多段加工を施すことは現実的ではないが、それを分布データから自動でパターンを生成して描画をするシステムを組みこむことで、効率的に実現しており、開発を加速できる。

### (4-4) 新技術導入の適用可能性検討、及び、CSAC の事業化に向けた技術ロードマップの策定

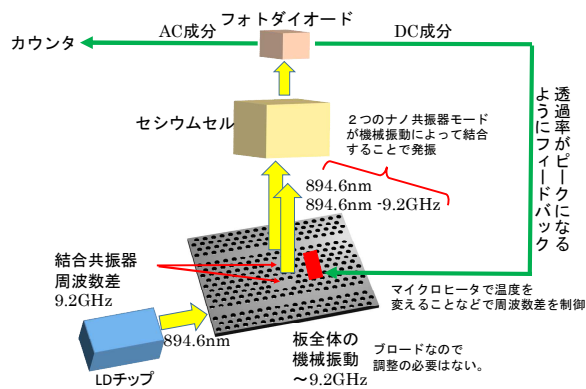
#### (a) フォトニック結晶技術の CSAC への適用可能性調査

#### <研究開発成果>

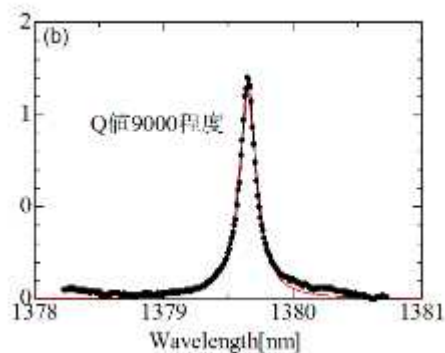
ラマンレーザを用いた Cs の固有周波数検知システムの模式図を図Ⅲ-【①-1】-50 に示す。図Ⅲ-【①-1】-51 に試作した SiC 2 次元フォトニック結晶共振器の光学評価結果を示す。現状の Q 値は 9000 程度であるが、加工プロセスの最適化により穴形状の揺らぎ等を低減することで、H28 年度末までに 200000 程度に改善する。また、2 つのコヒーレント光の周波数間隔を 9.2GHz とするために、Si 系で実績のある導波路を用いた機械振動系の結合を検討中である。

#### <意義>

このシステムは、VCSEL に対して数桁の消費電力削減を実現できる可能性を秘めており、消費電力 1mW を実現する上で重要な意味を持つ。現状では、レーザを発振するまでに至っていないが、高 Q 値化によるレーザ発振を目指す。



図Ⅲ-【①-1】-50 ラマンレーザを用いたCsの  
固有周波数検知システムの模式図



図Ⅲ-【①-1】-51 作製したフォトニック結晶  
共振器の光学評価結果

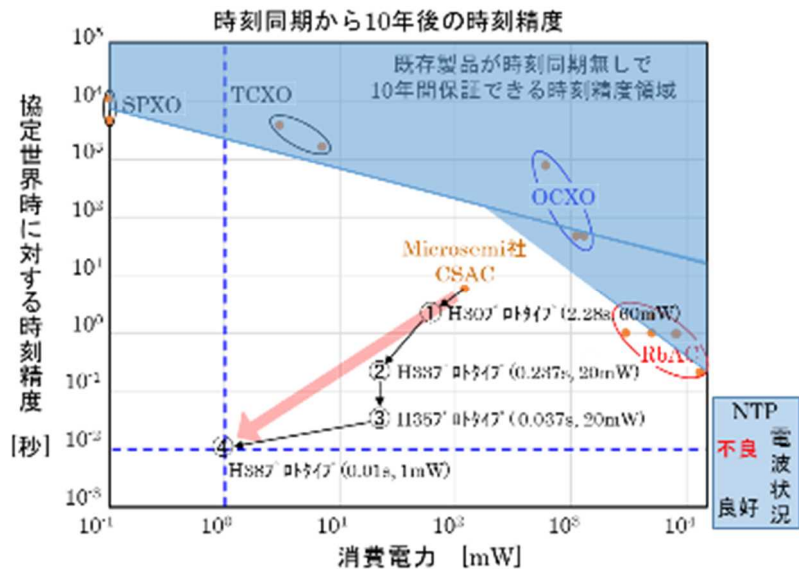
(b) 技術ロードマップの策定

<研究開発成果>

RIMS のセンサ端末に搭載する原子時計の仕様は、市場・技術調査資料やセンサネットワークの研究開発者へのヒアリングなどにより調査検討し、図Ⅲ-【①-1】-52 に示す④とした。横軸は消費電力、縦軸は時刻同期から10年後の協定世界時に対する時刻精度であり、左下ほど時計としての機能は高い。Microsemi 社 CSAC は、他のタイミングデバイスに対して、優れた位置にあるが、RIMS などで求める仕様④は、更に時刻精度で3桁、消費電力で2桁の改善を必要とする。この実現可能性は、時刻精度に関しては、ガスセル内環境を安定化するガスセル前処理(ガスセル内不純物除去)、ガスセル内封止ガスの高純度化、ガスセル内ガスの透過防止の3つの技術が重要であり、特にガス透過率の低い材料でガスセルを作製することで格段の性能向上が期待できることから実現可能と判断した。ガス透過率の低いアルミノ珪酸ガラスは、現状の石英製ガスセルほど小さなガスセルを作製する生産技術が確立できていないため、平成30年度は他の2つの技術の最適化により石英製ガスセルでの性能改善を目指している。更なる長期安定度の向上は、低ガス透過率材料によるガスセルの小型化技術の確立を図り、消費電力は(4-2)で消費電力を20mWまで削減し、更なる削減は原子時計の間欠駆動で実現する。以上により、①→②→③→④のように性能改善を図っていく計画である。

<意義>

これまでのヒアリングなどで Microsemi 社 CSAC が切り開いた市場や性能不足で採用されなかった分野などが見えてきており、それらで求められる仕様と各プロトタイプ仕様とのマッチングを図ることで、最適な製品を市場に供給することで、RIMS へと繋げていく。



図III-【①-1】-52 センサ端末同期用原子時計での研究開発における性能予測

※ SPXO(Simple Packaged Crystal Oscillator)、TCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator)、OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator)、RbAC(Rubidium Atomic Clock)

(3) 成果の最終目標の達成可能性

(1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

(1-1) 橋梁センシングシステムの開発

(1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・感度-80dB(re 1V/<math>\mu</math>bar)、帯域 1Hz~1MHz の仕様を満たす MEMS SA センサデバイスの開発を完了する。</li> <li>・SA センサを複数搭載し、概ね 7cm×10cm×5cm のサイズの小型センサ端末の開発を完了する。</li> <li>・開発したセンサ端末・ネットワークシステムを用いて、高速道路会社管轄の実環境下にて実証実験を行う。</li> <li>・高速道路会社管轄の実環境下にて実証実験を行い、橋梁構造の健全性評価手法の有効性を確認する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現時点では、SA センサが市販 AE センサより帯域が広いことを確認した。SA センサが少なくとも 10Hz~1MHz の帯域を持っていることを確認した。</li> <li>・ SA センサを複数搭載可能で、概ね 7cm×10cm×5cm のサイズの小型センサ端末の設計を完了した。</li> <li>・ 市販の AE センサを用いて、開発したセンサ端末・ネットワークシステムを用いて、高速道路橋梁にて交通荷重に伴う弾性波の計測、データ送信試験を完了した。開発した SA センサにより実橋梁で計測可能なことを確認している。</li> <li>・ 市販の AE センサを用いて交通荷重や雨滴に伴う弾性波を収集し、得られたデータに基づき床版の健全性評価を実施した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計測機の関係で現状 10Hz までの計測しか行っていないが、10Hz でも十分に感度を有するので、最終目標を達成できる見通しである。</li> <li>・ 現状設計を完了しており、最終目標を達成できる見通しである。</li> <li>・ 現状開発したセンサでの実証を行っており、最終目標を達成できる見通しである。</li> <li>・ 現状弾性波を用いた評価と床版の劣化状態の相関がとれており、最終目標を達成できる見通しである。</li> </ul>

(1-1-2) フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 30 年度までにユーザ機関の橋梁にシートデバイスを貼り付けて、損傷の経過観察について実証試験を行いながら、シートデバイスの最適化を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・平成 28 年度 8 月より、阪神高速法円坂付近の鋼橋にフレキシブル面パターンセンサを貼り付け、実証試験を開始している。これまでに、<math>1 \times 10^{-5}</math> の精度で、車両通過時の動ひずみ分布を測定できることを示している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 損傷のある箇所を探し出し実際に経過観察をしながら、そこに適切なシート形状、センサ密度などの最適化を行うことで、達成の見通しである。</li> </ul>

(1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>(a)MEMS センサデバイスの開発：信号処理回路も含め、傾斜測定（安定性：0.05deg）、振動測定（分解能：0.1gal）を満足する MEMS センサデバイスの開発を完了する。</p> <p>(b)傾斜マルチセンサ端末の開発：平成 28 年度までに開発した傾斜センサ端末をベースに開発した MEMS センサデバイスを搭載し、小型化を実施する。最終目標の大きさ 70×100×50[mm] を達成する。また抽出された課題の対策を行う。</p> <p>(c)センサネットワークシステムの構築と実環境試験検：28 年度までに開発した傾斜センサ端末及び構築した通信システムを用い、高速道路会社と協力して実環境試験を実施する。課題の抽出と対策の検討を行うと共に傾斜マルチセンサ端末の要求仕様の明確化を行う。</p>	<p>(a)原理試作品により、フロントエンド回路も含めた気密構造化により、傾斜測定の出力安定性 ±0.05deg 以内振動分解用 0.1gal 以下を確認した。小型化した MEMS センサユニットを設計・試作した。MEMS センサユニットの評価系を構築中であり、評価を行い課題の抽出と対策を実施予定である。</p> <p>(b)傾斜マルチセンサ端末の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試作品により、傾斜・振動・温度の同時測定と間欠測定動作を確認した。</li> <li>・無線通信は通信距離 65m、通信速度 1Mbps を確認した。実情報板内外にて無線通信可能なことを確認した。</li> <li>・外形 7cm×10cm×5cm のセラミックケース内に収納できることを確認した。</li> </ul> <p>(c)センサネットワークシステムの構築と実環境試験検</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・集約器の設計製作を実施した。傾斜マルチセンサ端末との無線通信、コンセントレータ間通信を確認した。実フィールドでのシステムを確認予定である。</li> <li>・実証実験場所：東名 吾妻山トンネル入口情報板を選定した。</li> <li>・先行フィールド試験にて情報板基礎データ取得を継続中である。傾斜と卓越周波数の挙動が明らかになってきた。本試験データと開発品の実証実験結果より、傾斜マルチセンサ端末の商品化における要求仕様を明らかにする。</li> </ul>	<p>(a)現状目標精度を達成しており、目標性能を満たすセンサユニットの開発を完了の見通しである。</p> <p>(b)現状目標を満足する端末が開発されており、実証試験他で抽出された課題の対策を行い、開発完了する見通しである。</p> <p>(c)実情報板での実証実験を行い、ネットワークシステムの課題を抽出し、対策の検討及び、傾斜マルチセンサ端末の商品化要求仕様を明確にし、開発を完了する見通しである。</p>

(1-3) 法面変位センシングシステムの開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>(a)法面用多機能型センサ端末の開発 以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末の開発を完了する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できる。</li> <li>・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、突発事象を検出できる。</li> <li>・片手で取り付け可能なサイズ(概ね 7cm×10cm×5cm)以下である。</li> <li>・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数及び出力強度とし、その通信距離は実環境下で 30m 以上である。</li> <li>・実環境下で 10 年以上の信頼性を有する。</li> </ul> <p>(b)センサネットワークシステムの構築と実証実験 以下の全てを満たすセンサネットワークシステムの構築と実証実験を完了する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・(a)で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムはインフラの実環境</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試作した端末を用いた基礎実験により、変位・傾斜・温度データを同時に計測できることを確認した。</li> <li>・太陽光発電を用いた自立電源により、変位・傾斜・温度データを6分間に1回の無線通信で収集できることを確認した。</li> <li>・センサ端末サイズは 5cm×7cm×10cm を達成した。</li> <li>・920MHz 帯の特小無線を用いることで、無線局の免許を受けることなく使用可能で、通信距離が 30m 以上あることを実証実験候補場所で確認した。</li> <li>・セラミックパッケージを使用することで耐久性を凶るとともに、試作機にて雨天が連続しても継続動作することを確認し、長期間動作する見通しを得た。</li> <li>・ネットワークシステムを試作し、実証実験候補場所において動作確認試験を行い、実環境下へ適用できる見通しを得た。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・法面崩壊の検知に必要な変位・傾斜・温度データを同時に計測できることを確認しており、最終目標を達成できる見通しである。</li> <li>・6 分間に 1 回の無線通信を自立電源で無線通信できることを確認しており、これにより、突発事象の検出に十分対応できるものとする。従って最終目標を達成できる見通しである。</li> <li>・現状も最終目標を達成している。</li> <li>・現状も最終目標を達成している。</li> <li>・加速試験で 10 年の耐久性の見通しを得たセラミックパッケージを使用することで、最終目標を達成できる見通しである。</li> <li>・ネットワークシステムは完成しており、実環境下での実証実験を進めることで最終目標を達成でき</li> </ul>

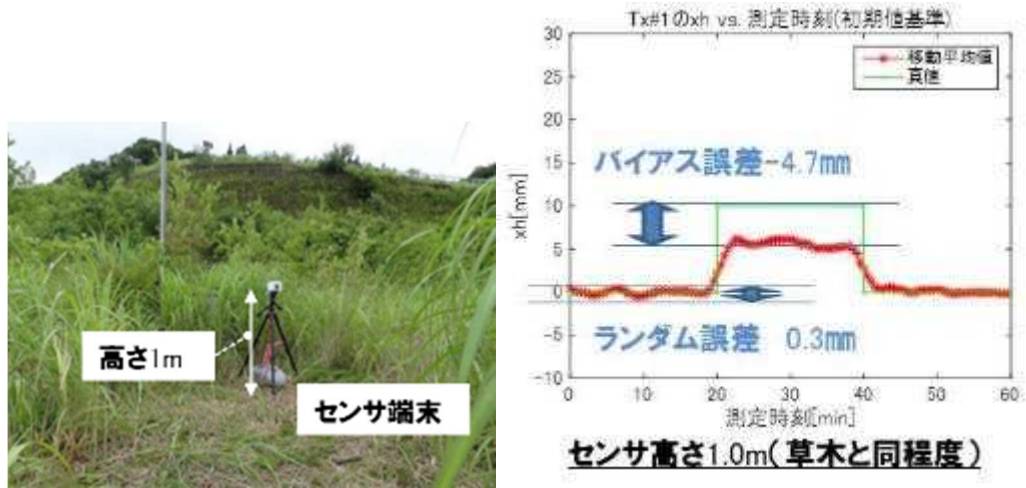
最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び今後の取組み	達成の見通し
下で適用できる。 ・実環境下で 1 時間に 4mm 以上の法面の変位を検出できる。	・実証実験候補地にて、試作したモジュールを用いて強制変位実験を行い、変位を検出できることを確認した。バイアス的な誤差が発生したが、対策案により達成見込みである。	る見通しである。 ・下記の対策案等を実施することで最終目標を達成できる見通しである。

(a) 法面用多機能型センサ端末の開発については、中間目標の達成をもって最終目標の達成見通しを得たと考える。(b) センサネットワークシステムの構築と実証実験(ア)については、図Ⅲ-【①-1】-27 の実証実験場所候補地での動作確認試験により、達成見通しを得た。(イ)について、試作した無線モジュールを用いた実証実験場所での強制変位実験により課題が明らかになったので、以下にて課題と対策案について示す。

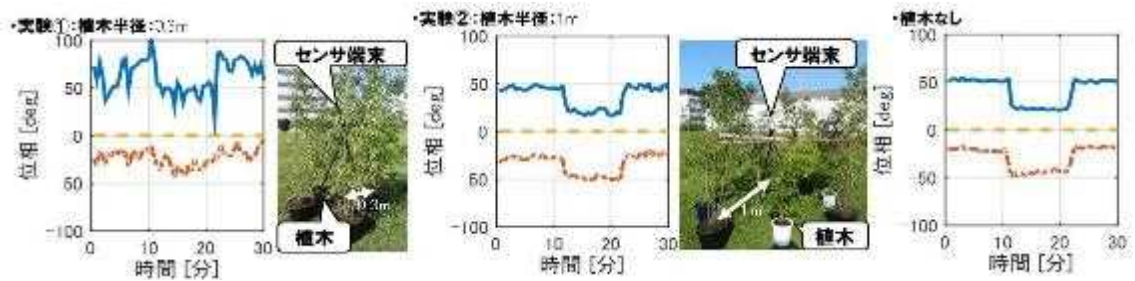
試作した無線モジュールを用いた実証実験場所での簡易実験の様子を、図Ⅲ-【①-1】-53 に示す。無線モジュールを搭載したセンサ端末を計測ポイント#1 に設置し、端末を強制変位させて実験を行った。結果を図Ⅲ-【①-1】-54 に示す。実際に与えた変位(真値)に計測値が追従しており、変位を検出できることは分かった。ただし、10 mmの変位を与えたのに対し、実際に計測された変位は 5 mm程度であり、4.7 mmの差が生じていることが分かった。解析の結果、この誤差はセンサ端末周辺の草木に電波が散乱されることにより、電波位相に誤差が生じたためと考えられる。そこで図Ⅲ-【①-1】-55 に示すように芝生にて、センサ端末の周囲に草木を設置し、半径を変えた場合の位相を計測した。その結果、草木を 1m 程度離すことにより、位相誤差が大きく改善され、植木無しの場合と同等になることが分かった。これらを踏まえて、図Ⅲ-【①-1】-56 に示すような対策案を考えた。センサ端末の周囲1m の範囲を防草シートで覆い、草木の影響を低減する。



図Ⅲ-【①-1】-53 月山湖 PA での事前実験

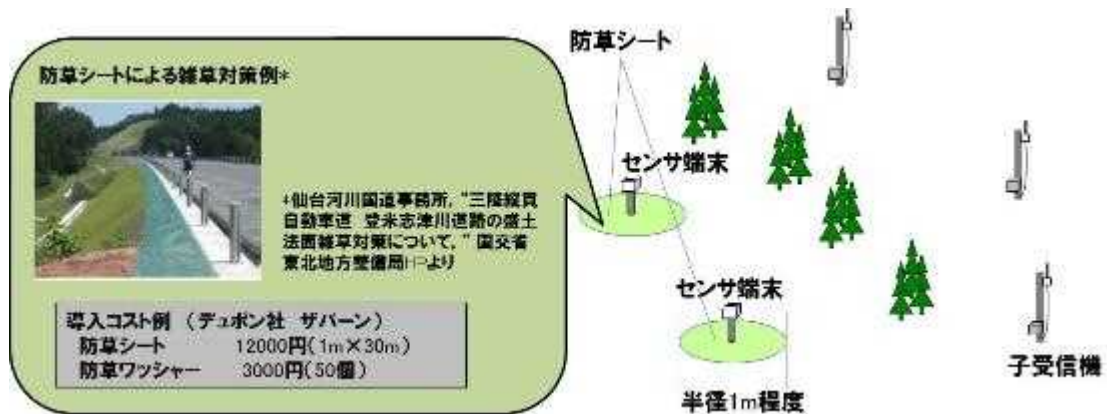


図III-【①-1】-54 センサ端末周辺の状況と強制変位結果



(a)周囲 0.3m に植木を設置 (b)周囲 1m に植木を設置 (c) 植木無し

図III-【①-1】-55 センサ端末周辺に草木を置いた場合の電波位相計測実験



図III-【①-1】-56 バイアス誤差への対策



(2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

(2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>(a)多種多様なセンサへの対応</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・センサのデータフォーマットの変更や追加に対して、遠隔から受信のソフトウェアモジュールを更新して、対応可能なことを検証する。更新の際には、データ受信の不可能となる時間を 30 秒以下とする。</li> <li>・1 台のコンセントレータで 2 種類以上のセンサデータを受信可能とする。</li> <li>・センサデータを収集している、少なくとも 10 台のコンセントレータでソフトウェアモジュールの管理及び同時更新を可能とする</li> </ul> <p>(b)コンセントレータ間の連携通信対応</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ネットワークや機器に障害が発生した場合の通信経路の自動変更機能を検証する。具体的には、10 コンセントレータに対して 3 コンセントレータに障害が発生した場合にも通信継続を確認する。なお、機器障害を模擬的に発生する必要があるため、この検証は屋内実施とする。</li> </ul> <p>(c)セキュアな情報収集への対応</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・セキュリティアセスメントを実施し、コンセントレータに対するリスクを網羅した上で、対策が実施されていることを示す。</li> <li>・上記の検証を実構造物からのデータ収集した状態で実施する。具体的には、セキュリティアセスメントによって想定される脅威に対して実証システム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンセントレータ内の受信モジュールを変更することで、複数のセンサのデータ受信に対応する仕組みを構築した。</li> <li>・各インフラ構造物種別から各1種類、合計 4 種類のデータフォーマットに対応し、仮センサからのデータ通信が問題ないことを確認した。</li> <li>・コンセントレータ内の受信モジュールを変更することで、複数のセンサのデータ受信に対応する仕組みを構築した。</li> <li>・少なくともコンセントレータ 3 台を連携して、センサデータ伝送させて機能を検証した。</li> <li>・プログラムの不正な改ざんへの対応を実施した。具体的にはコンセントレータの動作中に不正なソフトウェアモジュールに変更する処理が失敗することを確認した。</li> <li>・IoT のセキュリティ要件を情報収集するなど一部着手した。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・仕組みは構築済であるので、最終年度までに達成の見通しである。</li> <li>・複数センサの受信の枠組みは構築済であるので、最終年度までに達成の見通しである。</li> <li>・仕組みは構築済であるので、対応台数を増加させることで、最終年度までに達成の見通しである。</li> <li>・3 台のマルチホップの枠組みは構築済であるので、最終年度までに達成の見通しである。</li> <li>・平成 28 年度にリスクの洗い出しは完了しているので、運用指針も含め整理することで、最終年度までに達成の見通しである。</li> <li>・平成 28 年度にリスクの洗い出しは完了しているので、運用指針も含め整理することで、最終年度までに達成の見通しである。</li> </ul>

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
上で対策の有効性を確認する。		る。

### (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> ・平成 28 年度までに開発したオールインワンパッケージの要素技術開発を用いて、実証実験を実施する。開発目標 7cmx10cmx5cm パッケージサイズで 10 年間耐久性を達成する。	・要素技術開発の 5 項目は、ほぼ (80%) 開発完了し、平成 28 年度末には完了予定である。	・実証実験を継続することにより、最終目標を達成できる見通しである。

### (3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> ・開発したセンサ端末を活用した各フィールドのインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムの構築を完了する。 ・各フィールドでの実証実験を 1 年以上実施し、各フィールドの劣化・損傷診断に必要な基礎データの取得を完了する。  ・NEDO が別途委託している日立製作所及び横河電機と連携して、道路インフラへの実証評価及び傾斜センサの法面モニタリングへの適用可能性を評価する。	・各センシングシステムのプロトシステムがほぼ完成した。  ・各システムの実証場所を参画高速道路会社の中で 1カ所選定し、予備実証試験により問題点の洗い出しを行って、来年度からの 2 年間の本格実証試験の目途を得た。  ・日立製作所とは毎月開催の研究会に参加してもらい強い連携をもって研究開発を実施している。横河電機とは横河電機開発の傾斜センサを法面変位センサの下に設置して法面モニタリングへ適用する方向で進めている。	・各センシングシステムのプロトシステムがほぼ完成しているため、最終目標を達成できる見通しである。  ・各システムの実証場所を参画高速道路会社の中で 1カ所選定し、予備実証試験により問題点の洗い出しを行って、来年度からの本格実証試験の目途を得ていることから最終目標を達成できる見通しである。  ・日立製作所とは毎月開催の研究会に参加してもらい強い連携をもって研究開発を実施している。横河電機とは横河電機開発の傾斜センサを法面変位センサの下に設置して法面モニタリングへ適用する方向で進めていることから最終目標を達成できる見通しである。

(4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

(4-1) 小型、低消費電力を支える CSAC 用ガスセルの開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・(4-1)(a)で開発するガスセルと(4-1)(c)で開発する量子部、(4-2)で開発する極低消費電力制御回路、(4-3)で開発する VCSEL を搭載することで、(4-1)(d)で開発する原子時計プロトタイプの様として、 長期安定度:0.01 秒/年 消費電力:60mW サイズ:30mmx30mmx11mm を実現する</li> <li>・デュアルガスセル搭載原子時計プロトタイプを試作し、リアルタイム周波数補正システムを確立する。デュアルガスセル動作により、長期安定度を 10 倍以上改善する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・H27 年度プロトタイプにて、直径 5mm、長さ 9mm の円筒形ガスセルで 10ms/年以上の時刻精度に相当する長期安定度を確認した。H28 年度は、ガスセルの温度制御電力削減のため、ガスセルの小型化を進めており、小型化により長期安定度が低下しないことを実証する。H28 年度原子時計プロトタイプは、長期安定度 0.01 秒/半年、消費電力 120mW (量子部 10mW、制御回路 110mW)、サイズ 40mm×40mm×18mm を目標に設計した。現在、試作中であり、これから性能評価を進めていく。</li> <li>・デュアルガスセルを用いて、CsとRbのCPT共鳴を同時に観測可能であり、なおかつ 2 つの CPT 共鳴周波数の長期的な変動に違いが出ることを明らかにした。2 つの変動に違いが出ることは、その周波数の差や比を観測することでガスセル内の長期的な変動を検出することが可能であることを示す。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長期安定度の最終目標は、H27 年度のガスセルで達成の見通しを得たが、ガスセルの小型化により長期安定度が低下しないことを実証していく。消費電力は、(4-2)で開発する極低消費電力制御回路を用いることで 60mW 以上削減する。サイズは、制御回路の一部 CMOS 集積化で小型化する。以上により、最終年度末には達成の見通しである。</li> <li>・周波数比を計測することは、原子時計本体だけで可能であるため、最終年度には達成の見通しである。</li> </ul>

#### (4-2) CSAC の制御回路開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ VCO 及び PLL を CMOS 集積回路として設計し、VCO を含む PLL 全体で消費電力 10mW 以下とする。</li> <li>・ 水晶発振器を用いずに低消費電力化を図る PLL を CMOS 集積回路として作製し、VCO を含む PLL 全体で消費電力 10mW 以下とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・4.6GHz PLL 回路の主要部分である 4.6GHz 電圧制御発振器 VCO において、0.52mW の消費電力で実現した。</li> <li>・分数分周が可能な周波数分周器について回路シミュレーションにより動作を確認した。また、低消費電力化の必要な VCO については、(4-2)(a)の成果を用いる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・順調に進んでおり、最終年度末には達成の見通しである。</li> <li>・水晶発振器の消費電力 7mW を必要とせず、PLL 部分の消費電力 10 mW 以下を最終年度末には達成の見通しである。</li> </ul>

#### (4-3) CSAC 用面発光半導体レーザ (VCSEL) 技術の開発

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・(4-1)(d)の原子時計プロトタイプに搭載し、 長期安定度:0.01 秒/年 消費電力:60mW サイズ:30x30x11mm を実現する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長調整層を挿入した VCSEL を試作し、発振波長を数 nm の範囲でシフトできることを実証した。この技術を基にウェハ面内での波長ばらつき分布を打ち消すように波長調整層を形成するプロセスを開発しており、波長調整 VCSEL を試作し、プロトタイプに搭載する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・製造プロセスの技術開発は、本年度で終了し、量子部の発振特性に合わせて VCSEL の性能を調整することで、最終年度末には達成の見通しである</li> </ul>

#### (4-4) 新技術導入の適用可能性検討、及び、CSAC の事業化に向けた技術ロードマップの策定

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・実験的に SiC 微小光共振器の特性を向上させつつ共振器の設計及び発振の理論検討を行い、Cs 原子の遷移周波数の読み取りが可能な 2 波長レーザ発振が理論的に可能かどうかを明らかにする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現状の SiC 微小光共振器の損失要因を明らかにした。それを回避できる作製手法を開発している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SiC フォトニック結晶光共振器によるラマンレーザ発振には課題も多く、十分な成果が得られない可能性もあるが、全ての問題を解決して低パワーで 2 つのコヒーレント光を発生させる見通しを得ることができれば、原子時計の低消費電力化にとって非常に有効な技術となると考えられる。</li> </ul>

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>・事業化に向けて、想定環境下での原子時計プロトタイプの性能評価を進め、実用性を実証する。</p>	<p>・原子時計の評価は、実験室内で進めており、その結果を踏まえて、技術ロードマップを策定している。これまでのヒアリングなどにより、Microsemi 社 CSAC が切り開いた市場や性能不足により採用されなかった分野があることが判っている。その中には、RIMS と同様に橋梁などのモニタリングシステムに取り組んでいる研究グループが複数あり、それらとの連携も視野に入れつつ、時刻同期を不要とすることのメリットが明確になる実証試験方法を検討している。</p>	<p>・本プロジェクトのセンサ端末は、既に実証段階で、今から改造することは困難であるため、外部グループとの連携も視野に、平成 29 年度以降の実証試験方法を検討しており、最終年度末には、実環境下で目標性能を達成する見通しである。</p>

#### (4) 成果の普及

##### 【全体】

詳細に関しては、各テーマで記載するが、プロジェクトトータルとして、下表のとおり、これまで査読有論文発表 2 件、査読無論文発表 2 件、外部発表 68 件を行った。

#### (1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

##### (1-1) 橋梁センシングシステムの開発

##### (1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組みの表、及び、別添資料の通り、これまでに論文 2 件、学会・講演会発表 17 件、新聞・雑誌掲載 5 件、展示会への出展等 4 件を実施した。また、英国で開催された国際学会 Structural Faults & Repair 2016 にて、NDT Award を受賞した。学会・講演会では、センサデバイスは MEMS 系学会、モニタリングシステムについては機械系学会、構造物評価については土木系学会を中心に積極的に発表している。学術的な取り組みに留まらず、一般に向けての情報発信の一環として、報道発表を行い、本年 8 月に日本経済新聞科学技術面に記事が掲載された。また、NMEMS 主催の MEMS 関連の展示会だけでなく、東芝独自の取り組みとしてインフラ検査関連の展示会に出展し、成果アピール、ニーズ収集に努め、事業化、実用化の戦略構築に活用しつつある。

##### (1-1-2)フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

(5)知的財産権等の確保に向けた取り組みの表のように、査読付き国際学術論文誌に 2 件、学会・講演会発表 9 件を実施するとともに、プロジェクト全体としての展示会の出展の中で成果の普及に努めた。学会発表では採択率が 35%程度と厳しい MEMS2016 国際学会に採択されたほか、2016 年 11 月に開催の IEEE Sensors 国際会議からは招待講演を依頼されており、国際的にも注目度が増えつつある。

成果の普及については鉄道への適用を視野に入れ、鉄道会社と直接面談をして成果の紹介を行った。また、本研究開発成果である極薄シリコン転写、配線技術を基盤に、ひずみセンサとは異なる独自の構造により極薄マイコン、極薄通信回路を実現し、健康・医療情報を取得するウェアラブルデバイスへの実装を目的とする NEDO プロジェクト(NEDO 次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発／⑥フレキシブル複合機能デバイス技術の開発／極薄シリコン回路と配線・電極形成テキスタイルによるセンシングウェアの開発)を新規に起こした。

##### (1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

ユーザ企業である中日本高速道路㈱と協力し実証実験を実施する情報板の選定を実施した。当初計画には無かった先行フィールド試験を簡易なシステムを構築し追加で継続実施している。

ユーザ企業である阪神高速道路㈱に傾斜マルチセンサ端末の開発及び先行フィールド試験の実施状況を PR する共に、ユーザの課題をヒアリングした。

プロジェクト全体として出展したナノ・マイクロビジネス展(2015年4月22日～24日)にて研究概要・成果を発表した。

### (1-3) 法面変位センシングシステムの開発

センサ端末の試作結果及び変位計測シミュレーション結果を、プロジェクト全体の出展であるナノ・マイクロビジネス展(2015年4月22～24日)の他にインフラ検査・維持管理展(2015年7月22～24日)にて展示し、成果の普及に努めた。また、鉄道事業への適用を視野に入れ、JR 東日本社員向けの第5回オープンイノベーション企画・技術展示会(2015年8月21日)に出展し、成果をアピールするとともに実用化に向けて適用先や課題等をヒアリングした。

また、電子情報通信学会 総合大会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会(2015年3月15日)にて試作したセンサ端末を用いた強制変位実験を報告し、GPS 測位技術や電波センシング技術の有識者と議論した。

## (2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

### (2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

第31回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(2014年10月20日～22日 島根県松江市)にて、「社会インフラモニタリングに求められるシステムインテグレーション」の講演発表をするとともに、展示会としては、プロジェクト全体として出展したナノ・マイクロビジネス展(2015年4月)にて展示し、成果の普及に努めた。

### (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

実用化の担い手・ユーザであるセンサ端末開発各社とは、パッケージや透光性セラミック、ベースプレート等パッケージ仕様の定期的打ち合わせを実施した。

情報発信としては、プロジェクト全体として出展したナノ・マイクロビジネス展 2015、ハイウェイテクノフェア 2015の他に CEATEC2015に出展し、成果の普及に努めた。

## (3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

技術研究組合 NMEMS 技術研究機構のホームページ(<http://rims.la.coocan.jp/>)を開設し、プロジェクトの概要及び活動情報を公開するとともに MICRONANO 広報誌にてプロジェクトの活動状況を紹介した。また、ブログ(<http://www.nanomicro.biz/mems/cat23755847/index.html>)にて 27 件の成果発信をすることで、プロジェクトの成果を広報した。また、ナノ・マイクロビジネス展 2015(2015年4月22日(水)～4月24日(金)、パシフィコ横浜で開催)、ハイウェイテクノフェア 2015(2015年11月25日(水)～11月26日(木)、東京ビッグサイト西 3・4 ホールで開催)に出展して成果を広く公開するとともに、第1回道路インフラモニタリングプロジェクト成果報告会(2015年4月23日(木)、パシフィコ横浜アネックスホール)を開催し、プロジェクトの成果を広報した。さらに、日経 BP 社や日経新聞社等の取材を受け、日経エレクトロニクス(2014年12月8日号)の特集記事「現実解へ動くインフラ電装化」に掲載される等プロジェクトの成果が注目されている。また、プロジェクトリーダをはじめとして、本部から学会等の講演会において 15 件の講演を行い、プロジェクトの成果を広報した。

## (4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

本年度9・10月に7件の特許申請を行う準備を進めており、特許出願以降は、研究項目(4-1)から(4-4)までの成果を用いた原子時計として、学術論文発表を含め、積極的に研究開発成果を公表していく方針である。また、個別の要素技術としては、デュアルガスセルや制御回路の構成、極低消費電力発振器についても、集積回路分野での最大の国際会議である ISSCC(International Solid-State Circuits Conference)などの主要会議において発表を行い、技術の普及を図る予定である。講演などの講師としての依頼も来ており、積極的に成果の発表や普及に努めていく予定である。

平成30年度以降は、原子時計プロトタイプをベースにしたサンプル(タイムスタンプモジュール含む)を想定ユーザへ提供し、ニーズの抽出や、実用化に向けた仕様の具体化を行う。

(5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

【全体】

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	17 件
2	査読有論文発表数	2 件
3	査読無論文発表数	2 件
4	外部発表	66 件

(1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

(1-1) 橋梁センシングシステムの開発

(1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	5 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	2 件
4	外部発表	25 件

(1-1-2) フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	4 件
2	査読有論文発表数	2 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	9 件

(1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	2 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	1 件

(1-3) 法面変位センシングシステムの開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	2 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	3 件

## (2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

### (2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	1 件

### (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	4 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	2 件

## (3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	24 件

## (4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	1 件



## 【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイクロマシンセンターコンソ

### (1) 研究開発目標

今回の開発では、都市ライフラインの心臓部ともいえる搬送ポンプを主対象としている。ポンプを中心とした搬送システムに不具合が生じると、配管経路の末端にある空気調和機器まで搬送する能力が無くなるため、空調の完全なる停止となってしまう。他の設備機器である熱源システム、空気調和システムでは、不具合が生じて多少なりの出力が得られることから、空調の完全なる停止までは陥りにくい。つまり、設備中の最重要機器は熱媒を搬送するポンプで、これを主対象とすることの意義は大きい。ポンプの製造台数は、近年減少傾向にあるものの年間 230 万台(ターボ機械協会、2013 製造統計より)におよび、その中から軸動力が数 10kW を超える横型および立型ポンプを監視対象としても膨大な件数があり、予防保全による設備の安全な維持への効果は大きい。

また、モニタリングシステムにはクラウド利用型のネットワークシステムを構築し、都市インフラである熱エネルギーの供給施設、災害時の防災拠点ともなる病院施設など施設群を実証試験する。地域エネルギー供給設備では、設備機器容量が大型で振動発電用の加振力も十分に獲得できる。しかし、大容量の電動機やインバータ機器が多数設置されていることから、ノイズ等による無線通信への影響、受信不良によるデータ欠測が課題である。実証実験では、これらの施設環境に対してデータサンプリング、データ伝送、監視が確実に実行されることを検証する。一方、病院施設では、機械室が分散し(熱源機械室、空調機械室、医療用ユーティリティ機械室)、機器容量が中小規模、かつ振動強度が小さい。このため鹿威しセンサデバイスからのパルス出力の時間間隔が、通常時において 1 時間に数回程度と想定され、監視に必要な十分なデータが得られるかが課題である。これらから、開発システムの普及展開を実現させるには、両特質をもつ施設での実証が有意義である。

このシステムを普及させるためには、設置コストを含めポンプ 100 ヶ所程度を常時モニタリングできるシステムとして数百万円程度に抑える必要がある。また、設置環境が暗所・消灯の場合もあり、安定的に光発電を行うことができないため、振動発電だけの発電量で自立動作し、限られたデータ量でモニタリングを可能にする低コストの端末が求められる。本プロジェクトで開発した圧電 MEMS 発電型振動センサと鹿威し(蓄電キャパシタの電力が閾値を超えるとデータ送信する)回路の組み合わせたセンサ端末(P 型端末)は、ポンプの異常振動の周波数領域に合わせて MEMS をアレー化することで周波数変化および強度変化を検知可能で、ペットボトルサイズ(直径 30mm)に小型化することができる。このサイズであれば、振動センサのピックアップと同様の大きさであることから、設置場所の制約も小さく、異常を捉えやすい場所に固定することができる。この端末(無線モジュールを含む)は、1 個あたり数千円程度での製品化を目指して、開発と現場実証を進める。

また、モニタリングシステムの設置環境は、コンクリートの壁、鉄扉、金属配管、大型機器等による通信障害物も多く、センサ端末とモニタリングシステムの親機間を、データ欠損なく送受信することは困難である。さらに、設備の更新によるレイアウト変更によっても電波環境が変化することから、マルチホップによる中継が必要となる。本プロジェクトでは、30m の通信距離を確保しつつ、マルチホップ通信を低消費電力化するための技術として、高精度な時刻同期技術、データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式を開発することで、電池だけで 10 年動作し、設置が容易な小型マルチホップ中継端末及びそれを用いた高信頼性ネットワークの構築と実証を実施する。

(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

① 研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>①-(1)コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発</p> <p>【実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電量 2V、0.5 μW の MEMS 圧電振動センサデバイスの開発</li> <li>・低損失整流回路の開発</li> <li>・低消費電力鹿威し回路の開発</li> <li>・P 型端末の模擬的な動作実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在までに、最大で AlN の 5 倍の圧電定数を持つ新材料 ScAlN を導入し、2V、0.21 μW の出力を達成した。H28 年度中に Sc の添加量を最適化し ScAlN の圧電定数を現行から 1.5 倍に増大させ発電量を 2 倍以上に増加させることによって目標を達成する見込みである。</li> <li>・整流回路の構成を工夫すると共に低い順方向電圧降下を持つ MOSFET を採用し、さらにこれらをワンチップ化した。これにより AlN 振動発電センサデバイスの出力電圧を従来品比 2.4 倍に増強させ、そのパッケージサイズを 2mm□以下に小型化した。</li> <li>・コンパレータのバイアス電流を削減することによって、従来品の低消費電力コンパレータに比べて消費電流を 90%削減した。また参照電圧発生回路においては、弱反転領域を利用することによって 90%以上の消費電流を削減した。</li> <li>・AlN 振動発電センサデバイスと低消費電力鹿威し回路を組み合わせることによって、実際のポンプ振動と同等程度の振動加速度を発生させた加振器上において、鹿威し方式の動作実証を行った。</li> </ul>	<p>H28 年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>
<p>①-(2)コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発</p> <p>【実施計画】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) AlN 圧電デバイス量産試作プロセス技術</li> <li>・前年度で開発した基本プロセス工程を用いて、P 型端末向けセンサ・発電デバイスを試作評価実施して、動作品を明星電気に収める。</li> <li>・AlN プロセスは、量産対応できるようにプロセス確立する。ScAlN プロセスは、小容量ポンプに対して、デバイスが適用できる事を確認し、実用化を図る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今年度、新たに設計された発電デバイスの試作評価を実施して、外観、AC 特性が良品のデバイスを得られた。産総研により、設計通りの出力、共振周波数を得ることを確認した後、明星電気に動作品を収めた。今年度中に、これも新たに設計される高出力の P 型端末用高周波センサを試作して、明星電気に収める予定。</li> <li>・8 インチ基板を用いた AlN 圧電プロセスは、Pt/AlN/Pt 圧電電極構造のドライエッチング工程を確立することにより、カンチレバー構造を形成することが出来た。さらに、この多層構造のスパッタ成膜条件を検討して、DC/RF パワーを調整することにより 8 インチ基板の最外周を除く領域で、圧電積層膜の応力に起因するカンチレバーの反りを低減し、形状でも良品歩留りを向上することが出来た。このように、AlN プロセスは、形状歩留 70%を得ることが出来るプロセス条件を確定し、ウエハ内全領域で d31 が 1.00pm/V 以上の安定した圧電特性を得られたので、ほぼ量産プロセスは確立できたとと言える。</li> <li>・ScAlN 圧電プロセスも 43% ScAlN ターゲットを用いて、8 インチ基板で d33 15pm/V と良好な圧電特性を得るスパッタ装置の成膜条件を</li> </ul>	<p>達成</p> <p>H28 年度 達成見込み</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>・カンチレバーの共振 Q 値の広帯域化等によって、振動出力を確保し、ScAlN プロセスと AlN プロセスの発電効率、コスト、温度特性等の評価項目によるベンチマークテストを行う。</p> <p>b)ウエハレベルパッケージ技術</p> <p>・P型端末向けセンサ・発電デバイスおよび高周波振動デバイスのウエハレベルパッケージ構造の試作を実施し、歩留まり向上の為のプロセス改良を行う。</p> <p>c)振動センサ・発電デバイス技術動向調査(東大再委託)</p> <p>・振動発電センサデバイス、センサネットワーク、MEMS 技術関連等の最新動向調査を行う。</p> <p><b>①-③コアモニタリング用センサ端末の開発</b></p> <p><b>【基本計画】</b></p> <p>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するため振動または変位、温度も同時に計測可能なセンサ端末を開発</p> <p>・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作でき、さらに地震等の突発事象を検出できるセンサ端末を開発</p> <p>・片手で取り付け可能なサイズ(概ね 7cm × 10cm × 5cm)以下のセンサ端末を開発</p>	<p>見出した。今年度中に発電デバイスを試作して、カンチレバー加工プロセスを確立する。</p> <p>・今年度後半、産総研が設計検討している共振を広帯域化した新センサを試作し、出力の向上を図る。AlN と ScAlN デバイス・プロセスの比較は、これまで試作開発を行ってきたカンチレバー構造のデバイスの特性から、各性能指標を明確化する。</p> <p>・ウエハレベルパッケージ技術開発は、圧電デバイスの特性を劣化させないために、有望な接合方法として抽出された Au-Au 活性化低温接合技術をベースにした、P型端末0次試作用 AlN 圧電デバイス向けの 4 層の基板を含むパッケージ構造の設計・試作を行い、明星電気に提供した。この作業は、チップとチップを接合して実施したが、開発した Au-Au 活性化低温接合技術はウエハレベルの接合が可能であり、今年度後半には、P型端末用高周波センサのパッケージ構造として必要とされる、真空封止接合技術に取り組む。</p> <p>・振動センサ・発電デバイス技術動向の収集を、2015 Transducers、第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、IEEE SENSORS 2015、Power MEMS 2015、IEEE MEMS 2016 の文献あるいは会議出席により実施した。それらの収集から AlN 圧電デバイスに適用可能な周波数ブロードバンド化技術を抽出するとともに、それらの技術の本開発への適用可能性について調査を行った。</p> <p>・P型端末(低周波振動センサ、高周波振動センサおよびサーミスタ搭載して発電素子からのトリガーで無線送信する端末)を開発。回転機器の健全性を診断するため 低周波振動センサと高周波振動センサと回転機器の表面温度上昇にて検出する端末を作成。高周波振動計測を改善して達成する見込み。</p> <p>・P型端末を回転機器に装着して、1時間に1度以上の無線通信をできる端末を開発。自立電源自己動作は低周波振動の発電量の安定化を図り、地震等の突発事象はセンサデータ収集端末に機能を搭載して達成する見込み。</p> <p>・P型端末の外形寸法を(直径 30mm、高さ 50mm突起部除く)を開発。</p>	<p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>・実環境下で 10 年以上の信頼性を有するセンサ端末を開発</p> <p><b>【実施計画】</b></p> <p>a)センサデータ収集端末の試作 受信モジュール(産総研)、M 型中継端末(沖電気工業試作)、システム制御モジュール(地震情報の入力端子含む)</p> <p>b)P 型端末(0 次試作)開発 外径:約 35φ 質量:50g 以下 (1 次電池除く)</p> <p>c)P 型端末耐久試験(実環境 1 年以上)</p>	<p>・P 型端末を 10 年以上性能保証できる端末の開発。センサ素子の耐久性をはかり加速度試験を実施して確認する。</p> <p>・P 型端末からの電波を受信して M 型端末に中継するセンサデータ収集端末を開発。センサデータ収集端末は P 型端末からの電波を受信する受信モジュール、M 型中継端末無線モジュールとシステム制御モジュールから構成される。M 型中継端末無線モジュールは H29 年度に入手して現行無線モジュールから変更設計 製作を実施する。地震情報のプログラムについては H29 年度に実装予定。</p> <p>・P 型端末(0 次試作)外径 30mm、質量約 40gを試作した。</p> <p>・実環境動作 1 年以上の P 型端末を開発。実証で確認中。</p>	<p>H29 年度 達成見込み</p> <p>H29 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p> <p>H28 年度 達成見込み</p>
<p><b>①-(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発</b></p> <p><b>【基本計画】</b></p> <p>・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数を用い、その距離は実環境下で 30m 以上</p> <p><b>【実施計画】</b></p> <p>M 型中継端末</p> <p>・省電力性能 稼働年数 1 年以上(実証実験環境下での見込) 端末消費電力:160μW 以下</p> <p>・悪環境下での無線通信距離:30m 以上 (920MHz 特定省電力・マルチホップの動作条件として)</p>	<p>・920MHz 帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56m の距離(中継機1台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。</p> <p>・本研究で開発したクロック補正方式を適用した時刻同期型省電力無線機(M 型中継端末)の試作機を作成した。 次年度実環境にてモニタリングデータの中継サービスを行い 1 年以上の動作が可能であることを確認する。</p> <p>・本研究で開発したクロック補正方式本方式を実装した評価機で消費電力を測定した結果、1 時間の平均消費電力が 154μW で、H28 年度中間目標で設定した、端末消費電力 160μW 以下の目標値を達成していることを確認した。</p> <p>・920MHz 帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56m の距離(中継機1台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。 測定した無線経路は途中で障害物(コンクリート壁で覆われたエレベータホール)のある環境で実施した。 同じ経路でマルチホップなしの場合、通信エラーの発生頻度が高くなることを確認しており、マルチホップによる中継が必要となるケースが実環境であることも確認した。</p>	<p>達成</p> <p>H29 年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>①(5)コアモニタリングシステムの開発</b></p> <p><b>【基本計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>フィルタリング、異常検知、保全までの余裕時間予測の要素技術を開発</li> <li>異常検知の精度確保: 異常発生頻度に対し、検知率 95%(2σ)を達成</li> <li>安全な維持管理の持続: 回転部位に起因する保全項目の 70%をカバー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>P 型0次試作機の発電素子から出力される鹿威し方式データ、ならびに振動素子から出力される振動データ、センサ部温度を収集する装置を開発。</li> <li>実証サイトにて実稼働中のポンプに設置して動作を確認。</li> <li>従来の振動加速度ピックアップを用いて収集したポンプの振動加速度から、運転/停止時、軸回転数の違いによる振動加速度の特性を把握。</li> <li>鹿威し方式データを用いた異常検知のロジックならびに余裕時間の予測手法を特定。以上の知見からモニタリングシステムの要件を完成。</li> <li>既存の軸受の劣化進行に伴う振動データと保全前後の振動データで異常検知の感度を確認。</li> <li>引き続き、故障シミュレータから発生する異常振動、ならびに高砂熱学工業で実稼働しているポンプにて異常を故意に発生させ、その診断を予定している。これらから診断確度が 95%であることを検証。</li> <li>実証サイトの運転管理者、メンテナンス業者と、保全作業と振動監視での代用についてのヒアリングを予定している。その結果から、ポンプの日常保全項目の 70%について振動による検知の代用が可能であることを検証。</li> </ul>	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>H29 年度達成見込み</p> <p>H29 年度達成見込み</p>
<p><b>②コアモニタリングシステムの構築と実証</b></p> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>モニタリングシステムの連続稼働: 実設備にて、データ収集、伝送から異常検知、保全までの余裕時間予測までを一連に処理</li> <li>実証実験: 代表的な病院施設、地域熱供給施設の各 1 件で実証</li> <li>クラウド利用型ネットワークシステム: ネットワークを構築し、モニタリングシステムの連続稼働を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鹿威し方式データの収集からフィルタリング、異常検知、結果表示、異常に対して保全までの余裕時間を予測するモニタリングシステムの試験機を完成。</li> <li>地域熱供給施設(所在地:東京都)にて、モニタリングシステムの試験機を稼働。引き続き、H28 年度下期には病院施設(所在地:神奈川県所在)での稼働を予定</li> <li>地域熱供給施設の機械室にて、P 型端末機からモニタリング装置までのローカルネットワークを構築し、モニタリングシステムを稼働。</li> </ul>	<p>達成</p> <p>病院施設は H28 年度達成見込み達成</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

### ①-1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発

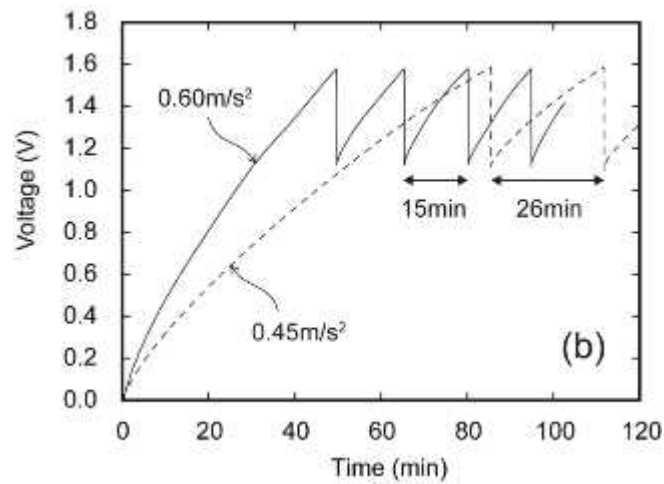
当該コアモニタリングシステムの中核をなす自立型振動センサ端末の開発において、端末に電力を供給する振動発電センサデバイスの開発を行った。振動発電用の圧電材料として代表的な PZT あるいは AlN を用いてデバイスの開発を行い、ポンプが発する振動と同等程度の振動加速度の調和振動において出力電圧と発電量がそれぞれ直流で 1V、 $0.1 \mu\text{W}$  を達成した。さらに平成 26 年度に行われた調査により、AlN に比べて 5 倍程度大きな圧電定数を持つ ScAlN 薄膜が振動発電デバイスに有効であることが示唆されたため、これの適用を試みた。図 III-【①-2】-1 は試作された ScAlN 薄膜を備える振動発電センサデバイスの出力特性を示している。整流後の直流出力として、電圧 2.1V、発電量  $0.21 \mu\text{W}$  を達成した。これにより AlN 振動発電センサデバイスに比べて発電量が增強しており、ScAlN が振動発電に対して有用であることを明らかにした。ScAlN 薄膜は産総研九州センターで発見された圧電材料であり、産総研の内部技術である優位性を生かし世界に先立って振動発電デバイスへの搭載が達成された。現段階では事業化を念頭に、成膜の制御性が高いが大口径化の難しい多元スパッタではなく、AlSc 合金ターゲットを使用した単元スパッタによる成膜技術の開発に取り組んでいる。それ故、ScAlN 薄膜の成膜最適化が不十分であるため発電量が予想よりも乏しいが、今後十分に最適化を行うことによって出力電圧 2V、発電量  $0.5 \mu\text{W}$  が達成される見込みである。

回路に供給可能な電力量を向上させ端末の自立動作を達成するためには、振動発電センサデバイスの性能向上と同時に整流回路の高効率化も極めて重要である。そこで、圧電材料を用いた振動発電に特化した整流回路の開発に着手した。具体的には、試作した実際の振動発電デバイスの評価結果からデバイスの等価回路モデルを生成し回路シミュレーションに適用することで最適化を行った。加えて、整流回路構成を工夫することによって最適化された整流回路を Silterra 社の  $0.18 \mu\text{m}$  テクノロジーにより試作したところ、従来品に比べて 2.4 倍の出力電圧を得た。

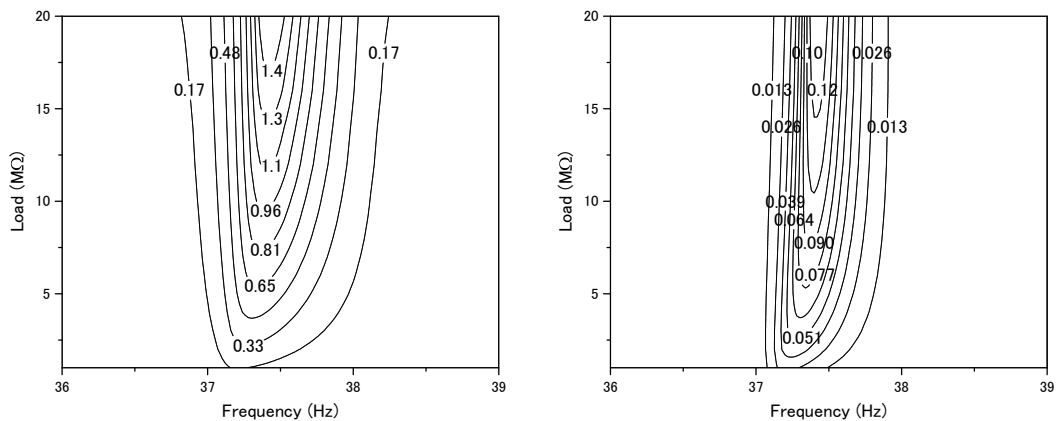
発電性能の向上に加えて鹿威し回路の省電力化にも取り組んだ。従来品を用いた回路構成では、振動発電センサデバイスからの電力のみで回路を駆動することは不可能であった。中でもコンパレータ並びに参照電圧発生回路の消費電力が支配的であるため、これらを独自開発することで省電力化を試みた。コンパレータにおいては、バイアス電流を大幅に削減し省電力化を行った。これにより応答性が失われるが、当該コアモニタリングシステムでは特段高速の応答性が要求されないために問題は生じない。参照電圧発生回路においては、ドレイン電流がほぼ流れない MOSFET の弱反転領域を利用し消費電力の削減を行った。これらの回路は、端末の小型化を考慮し整流回路と鹿威し回路をワンチップに集積化可能なように、整流回路と同じ Silterra 社の  $0.18 \mu\text{m}$  テクノロジーを用いて試作した。その結果、コンパレータにおいては従来品に比べておよそ 1/10 に、参照電圧発生回路においてもおよそ 1/30 に省電力化が達成された。これにより、回路の駆動電圧と待機時の消費電流は 1.6V、74nA となり、消費電力としてはおよそ  $0.12 \mu\text{W}$  にまで省電力化された。これは、上述した ScAlN 振動発電デバイスと高効率整流回路の供給できる電力量を下回っており、端末の完全自立動作への見通しが得られた。

開発した AlN 振動発電センサデバイスと鹿威し回路を組み合わせ、端末の動作実証を行った。その結果、実際のポンプと同等程度の微弱な振動から発電した電力を用いて無線送信を行うことに成功した。図 III-【①-2】-2 は動作試験における鹿威し回路中の蓄電キャパシタの電圧の時間変化を示したものである。蓄電キャパシタには振動発電デバイスで発電された電力が充電される。電圧が一定のしきい値電圧 (1.55V) に達したときに、充電された電力を消費して MCU 並びに RFIC が駆動し無線送信を行うため、電圧が下降している様子が分かる。試験では 40bit のペイロードを有するデータ列の送信に成功した。図中の実線と点線はそれぞれ印可している振動の加速度が  $0.60$ 、 $0.45\text{m/s}^2$  のものを示しており、振動加速度の違いにより送信頻度が異なることが分かる。これは、振動発電デバイスと鹿威し回路を組み合わせたシ

システムによって当該研究開発が目指すモニタリングシステムの基本的な動作が実証されたことを示している。



図III-【①-2】-1 AlN 振動発電デバイスを接続した鹿威し回路の動作試験における、蓄電キャパシタの電圧の時間変化



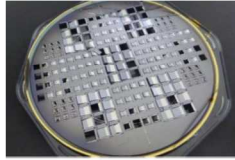
図III-【①-2】-2 整流後の ScAlN 振動発電デバイスの (左図) 出力電圧 (V) と (右図) 発電量

### ①-2)コアモニタリング用 AlN圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発

AlN圧電デバイスは、量産を想定し、8インチSiウエハを用いたカンチレバー構造(図III-【①-2】-3)を作製し、目標とする圧電特性を確認した。(圧電定数 $d_{31}$ :目標1.0 → 1.14 pm/V)また、この試作の過程で、オールドライエッチング技術及び、AlN圧電薄膜の8インチウエハ面内応力制御技術を確認し、歩留り80%の加工技術を獲得した。今後、専用の圧電カンチレバー専用の洗浄技術及び面内応力制御技術の精密化により、さらに歩留りの向上、低コスト化を図る。

**Ar+Cl<sub>2</sub>系ガスによる  
Pt電極、AlN圧電薄膜の  
ドライエッチング技術確立**

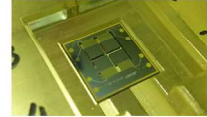
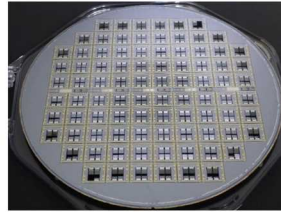
8インチ基板でAlN圧電カンチレバーを試作



カンチレバー形状不良 多  
鏽破損、カンチレバー反り大  
形状歩留り 約15%

**Pt/AlN/Pt 積層膜成膜技術確立**

DC/rf 連続スパッタ成膜条件を改善し、  
AlN圧電電極構造の残留応力低減、均一化



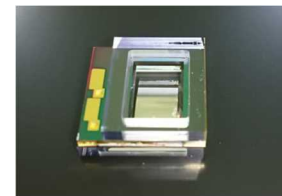
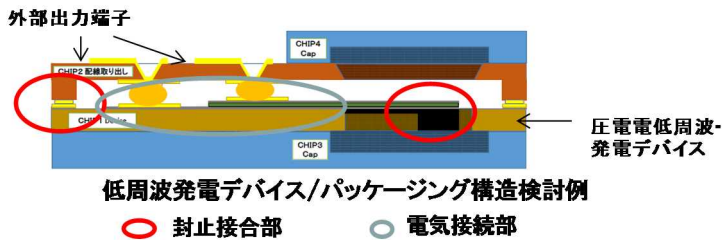
低周波、発電用カンチレバー  
(15×15mm)

カンチレバー形状 歩留り 70%  
(最外周にやや大きな反りが残る)

図Ⅲ-【①-2】-3 AlNカンチレバー試作ウエハ・デバイス例

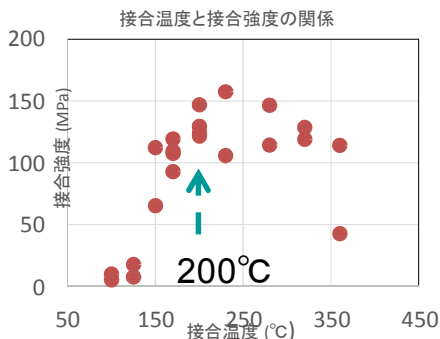
試作したカンチレバー型振動センサ素子・発電素子を産総研、明星電気提供し、発電特性の基本動作を確認した。また出力向上を狙い、8インチ基板によるScAlN圧電薄膜成膜技術を開発し、カンチレバー加工プロセス開発に着手した。

AlN圧電振動デバイスのウエハレベルパッケージ構造を検討し、電極取り出し構造と封止構造を同時接合プロセスで可能にするウエハレベルパッケージプロセスの開発に着手した(図Ⅲ-【①-2】-4)。その過程で、プラズマ活性化法によるAu-Au低温活性化接合で200℃と比較的低温で圧電振動デバイスのパッケージとして求められる、良好な電気特性、高い接合強度を伴う封止性能が実現できることを確認した(図Ⅲ-【①-2】-5、表Ⅲ-【①-2】-1)。今後、振動特性を向上するために、開発したAu-Au低温活性化接合をベースにした真空封止接合にも取り組むこととした。



AlN カンチレバー実装例

図Ⅲ-【①-2】-4 ウエハレベルパッケージ構造



Au-Au接合実験結果(温度vs接合強度)

図Ⅲ-【①-2】-5 Au-AU接合温度と強度の関係

表Ⅲ- 【①-2】 -1 Au-Au 低温接合封止特性評価結果

条件	1	2	3
接合温度(°C)	170	200	230
試料1	<6.0E-11	<6.0E-11	<6.0E-11
試料2	<6.0E-11	<6.0E-11	<6.0E-11
試料3	<6.0E-11	6.0E-06	<6.0E-11

JIS合格判定基準: 1~2E-9 Pa·m<sup>3</sup>/s



## ①-③コアモニタリング用センサ端末の開発

### P型センサ端末の試作と耐久性評価

#### 背景と必要性

予知保全のために回転機器に設置されているモニタリングセンサは、データ伝送および電源供給のため有線接続する必要かつ工事費用とセンサの点検費用が大きな客先の負担となっていた。そのため設置工事の簡易化、配線工事の低減、センサメンテナンスコスト低減した小型パッケージ、無線自立発電動作、耐久性の振動センサが必要となった。

#### 課題

- ・回転機器の予知保全に有効な高周波振動レベル計測が必要。端末の共振周波数を高くするためにシミュレーションの結果 直径約35mm以下のプリント基板大きさが必要となった。そのため部品実装面積が制限される課題があった。
- ・突発事象である地震検出機能の要求があるが、自立発電の小型センサ端末では常時検出の電力を確保できずかつ小型端末には実装できない課題があった。

#### 成果

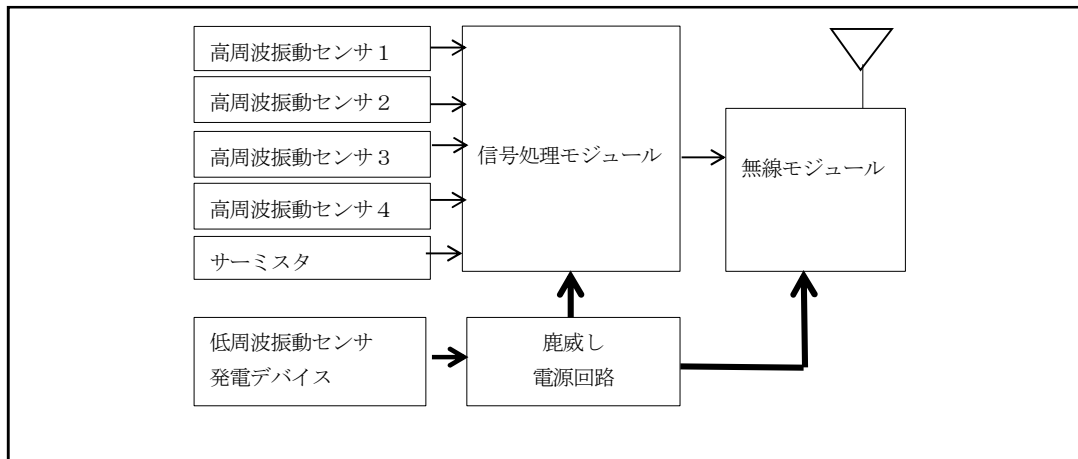
- ・振動センサとサーミスタを搭載した直径30mmのP型センサ端末を開発した。
- ・突発事象の地震検出実現するために感震器(地震センサ)を接続できるセンサデータ収集端末を開発した。

#### (1)P型センサ端末の試作

低周波振動発電デバイス、高周波振動センサデバイス、サーミスタ、無線モジュールを搭載したP型センサ端末(取付寸法直径30mm)を作成した(図Ⅲ-【①-2】-6、図Ⅲ-【①-2】-7、図Ⅲ-【①-2】-8)。高周波の伝達特性のため高周波振動センサ基板を固定個所に近い最下位層基板に設置することで実現した。

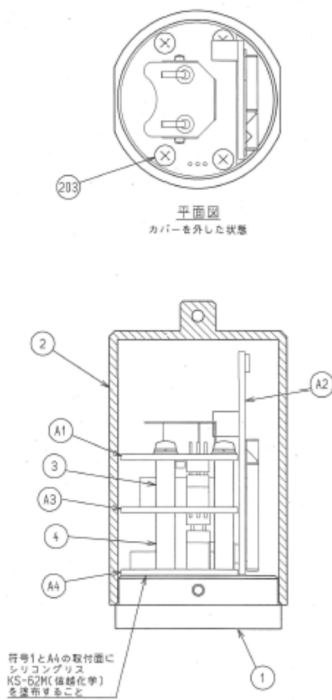
低周波振動発電のトリガーで送信動作を確認。

低周波振動で加振周波数35Hz、加振加速度 $0.1\text{m/s}^2 \sim 0.8\text{m/s}^2$ で無線送信周期の変化を確認できた。

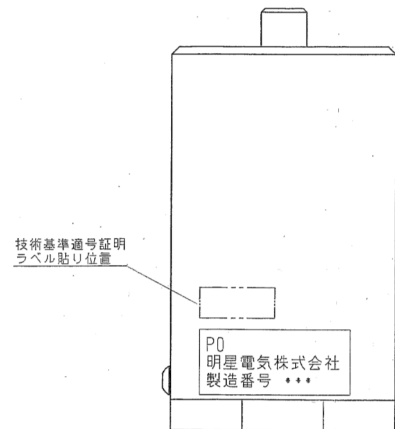


図Ⅲ-【①-2】-6 P型端末ブロック

番号	品名	
1	ベース	
2	カバー	
3, 4	スペーサ	
A1	P0 PW	電源ユニット
A2	P0 RF	無線ユニット
A3	P0 SL	低周波センサユニット
A4	P0 SH	高周波センサユニット
203	ネジ	
5	サーミスタ	表面温度測定用
201, 201	ネジ	



図Ⅲ-【①-2】-7 P型端末構造図

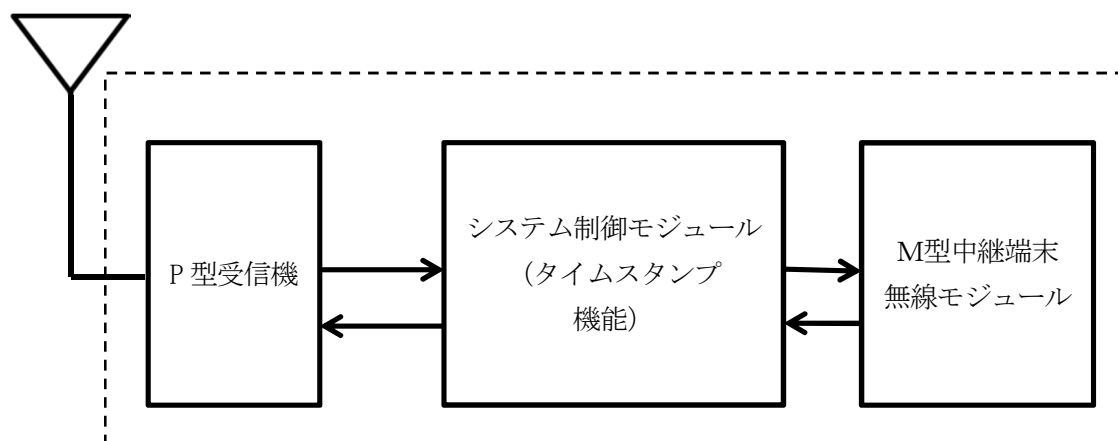


図Ⅲ-【①-2】-8 P型端末外観図

## (2)センサデータ収集端末の試作

P型センサ端末から送信された(P型センサ端末ID、振動センサ、表面温度)データをセンサデータ収集端末で受信し、タイムスタンプ(受信時刻情報)を付加し、P型センサ端末の複数台データをまとめ、センサデータ収集端末の(送信タイムスタンプおよびセンサデータ収集端末ID)を付加して、M型中継端末に送信するセンサデータ収集端末を開発した(図Ⅲ-【①-2】-9)。

試作完了されたことで実証実験を開始できる。



図Ⅲ-【①-2】-9 センサデータ収集端末 ブロック図

## ①-4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発(沖電気工業)

本開発では、ライフラインコアモニタリングシステム用ネットワークシステムを実現するための、無線マルチホップネットワークプロトコルスタックと無線端末の管理方式を開発する。

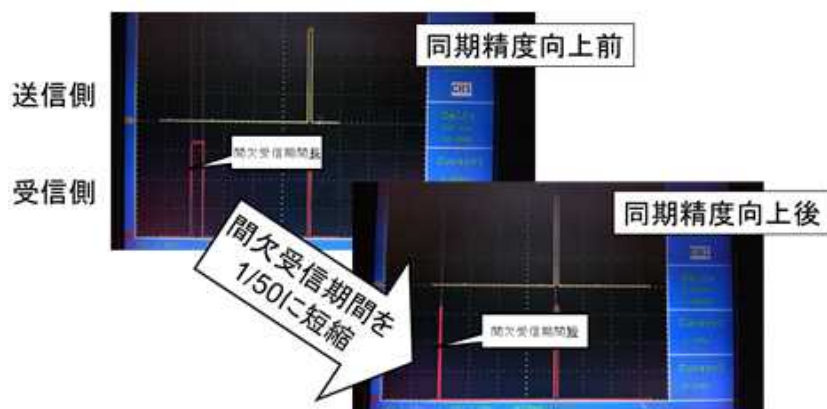
《M型中継端末 省電力性能について》

### ・時刻同期型の省電力通信方式の開発

既存の時刻同期型省電力通信方式に、クロック補正方式を盛り込んだ時刻同期型省電力通信方式を開発した。既存の時刻同期型省電力通信方式は、受信側がフレーム受信時に送信側へ時刻情報の同期ずれ幅を通知し、送信側が同期ずれを修正する方法であった。本研究で開発したクロック補正方式は、短い間隔(同期ずれ測定間隔 10分~20分程度)で連続して通信を実施することで微細な同期ずれを測定し、その値を元に送信側と受信側のクロックの誤差を計算しクロック補正を実施する。

本クロック補正機能を追加することで間欠受信期間を100msecから2msecまで短縮しても、1時間以上の時刻同期が維持できることを確認した(図Ⅲ-【①-2】-10)。本方式を実装した評価機で消費電力を測定した結果、1時間の平均消費電力が154 $\mu$ Wで、H28年度中間目標で設定した省電力性能で、端末消費電力160 $\mu$ W以下の目標値を達成していることを確認した(表Ⅲ-【①-2】-2)。

マルチホップネットワークスタックの実装に際しては、データ収集のための実装にとどまらず、実際に運用するための機能検討(M型中継端末ハードウェアに必要な機能検討、セキュリティ方式、参加認証方式)を検討し実装をした。



時刻同期精度向上による間欠受信期間の短縮  
⇒消費電力削減に成功

図Ⅲ-【①-2】-10 時刻同期精度向上による間欠受信期間の短縮

表Ⅲ-【①-2】-2 時刻同期精度向上による省電力効果

	従来 (2013年度以前)	2014年度 開発方式適応	2018年頃に開発が期 待されるHW利用
駆動電圧	3V	3V	1.8V
動作時電流	50mA	50mA	10mA
スリープ時電流	20uA	20uA	5uA
省電力 通信方式	従来の省電力通信方式 同期の高精度化および パラメタ最適化無	開発した省電力通信方式 同期の高精度化および パラメタ最適化無	開発した省電力通信方式 同期の高精度化および パラメタ最適化無
モニタリングシステムへ 適応時の平均消費電力 <small>(1時間あたり1回データ送信)</small>	2500uW	160uW	20uW

方式適応&最適化で1/15
ハードウェア進化で1/8

・データ通信の再送を伴わない衝突回避制御方式の開発

制御情報としてすべてのノードが持っている「周辺ノードの数」からデータ通信時のランダムバックオフの幅を算出して衝突回避をする方式を検討した。周辺ノード数が増えると通信発生時のランダムバックオフ幅が増えるので、データ通信タイミングが集中した際の通信の衝突確率が下がるが、代わりに通信遅延が非常に大きくなる課題があるため、特定のノードにデータ中継が集中しないようにして遅延を短くする必要があることがわかった。H28年度は通信遅延を減らすための方式を検討している。

・M型中継端末の試作

M型中継端末を試作した(図Ⅲ-【①-2】-11)。試作機はRFLSIおよびマイコンが1チップになったRFLSIを利用したことにより、15mm×35mmのサイズで実装できた。

中間目標の省電力性能である稼動期間1年以上については、実環境で次年度以降に確認を実施する。



図Ⅲ-【①-2】-11 M型中継端末の試作機

《M型中継端末 悪環境下での無線通信について》

・実環境での最適な無線ネットワーク設計方式の開発

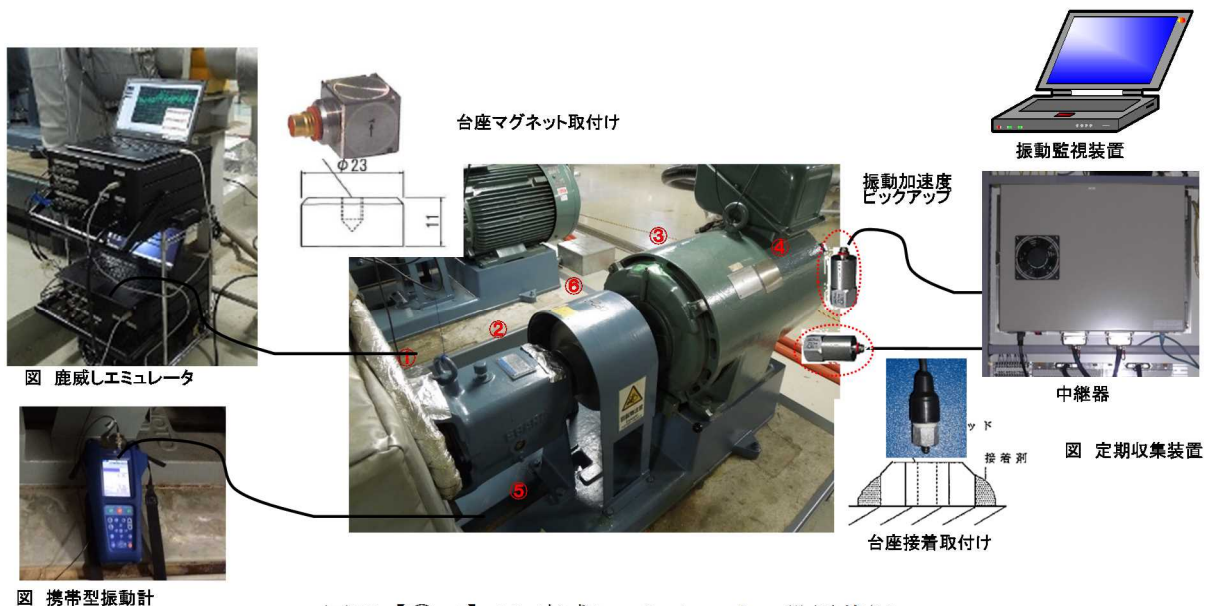
実環境での電波測定から、実環境では理論値に比べて電波強度の減衰量が 20～30dB 程度大きいこと、および受信機の設置高(0m⇒2m)により受信電波強度が 10dB 程度変わることを確認した。

さらに、実証実験を通じて、無線ネットワークの通信経路の構築を人手で明示的に実施したいというニーズがあることが分かった。

H28 年度以降は以上のことを踏まえ、無線ネットワーク監理ツールを開発する。

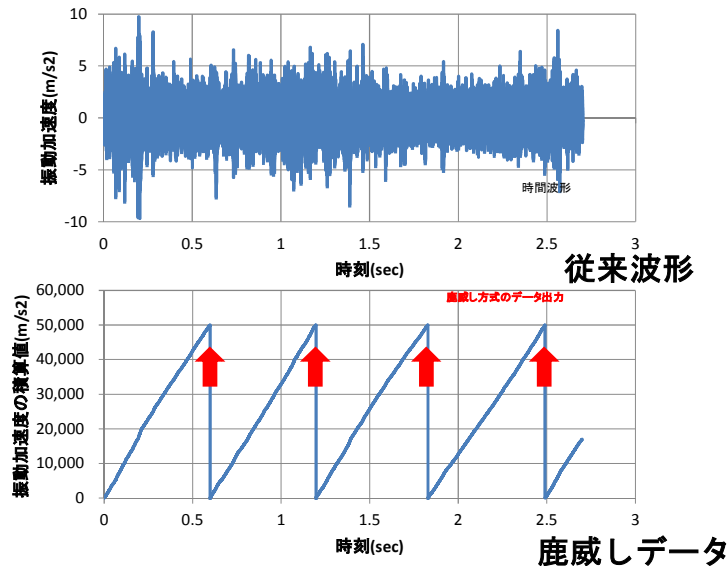
### ①-(5)コアモニタリングシステムの開発(高砂熱学工業)

P型端末機の開発とモニタリングシステムの開発を同時進行させるために、P型端末機の疑似データを生成する信号発生器「鹿威しエミュレータ」を開発した(図Ⅲ-【①-2】-12)。これにより、コアモニタリングシステムの要素技術であるデータのフィルタリング機能および異常検知のロジック、保全を必要とするまでの時間を示す余裕時間の予測の仕様特定が、P型端末機を用いた試験を待つことなく進められた。



図Ⅲ-【①-2】-12 鹿威しエミュレータの設置状況

P型端末機が出力する鹿威し方式データは、振動強度の大小に伴い出力の時間間隔が異なるため不連続である(図Ⅲ-【①-2】-13)。この不連続信号を用いたモニタリング装置のシステム化は、これまでに事例がない。そこで、異常検知の確度を高めるための信号前処理として、運転/停止判断、軸回転数による振動特性の補正などのフィルタリング機能を特定した。これにより、鹿威し方式データを用いた異常検知の再現性が保障できるようになった。異常検知では、振動発電の駆動源である低周波領域の振動と振動センサが検出する高周波領域の振動にて、ガタ・アンバランスなどの機械的不具合や軸受劣化の進行を判断する。



図Ⅲ-【①-2】-13 従来の振動波形と鹿威し方式データ

異常検知ロジックでは、定常運転時と起動・負荷変動などの非定常運転時の異常検知アルゴリズムを検討し、モニタリングシステムの仕様を特定するに至った。

これら、フィルタリング機能ならびに異常検知ロジックにP型端末機のデータ収集機能を組み込んだコアモニタリングシステムの試作機を開発し、実証フィールドへ持ち込めるまでに至った。

## ②コアモニタリングシステムの構築と実証実験(高砂熱学工業)

実証実験のサイトとして、平成26年度は災害時の防災拠点となりかつ、医療機関として設備の頑健性が求められる病院施設を選定した。さらに、平成27年度からは地域熱供給施設を選定し、平成28年度まで継続してポンプの振動データを収集してきた。

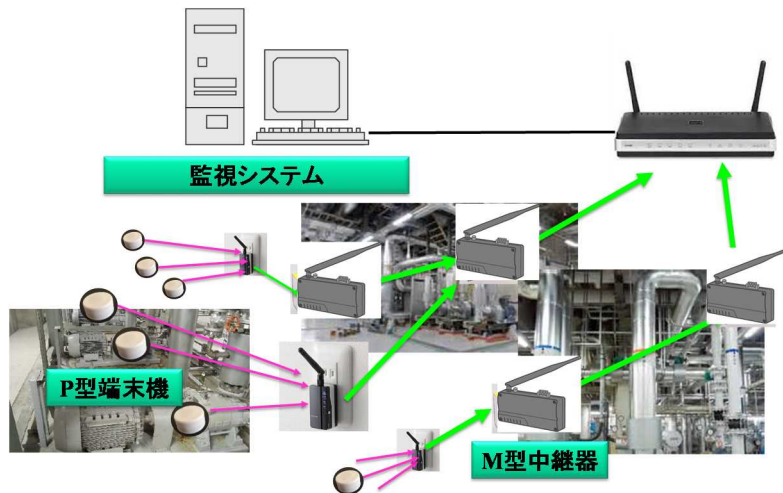
病院施設では、立型ラインポンプを対象とした。近年、高効率なことから導入が進んでいるものの、実運転下での振動データに関する知見がなく、今回の実証データは貴重である。立型ポンプの各部位と振動方向(Y方向:水平での水の流れ方向、Z方向:垂直方向)の分布から、モニタリングに好適な場所を特定するに至った。また、地域熱供給施設では、数10kWの大型ポンプを対象に、ポンプの振動データを収集した。

これらの収集した振動データに既存の振動データをサンプルとして加えて、信号解析ソフトによるデータ解析を行い、鹿威し方式データによる異常検知の可能性を検討した。サンプルとした時間領域での振動波形には、軸回転数に同期した衝撃波が見られ、軸受け損傷の可能性が高いものであった。鹿威し方式の振動加速度データでは、信号出力から次の出力までの積分値となるため、衝撃波の検出感が不明である。今回の解析結果では、衝撃波の発生頻度が高まる、つまりは異常の程度が高まるにつれて衝撃波に含まれる高周波数帯域の振動成分が増加することを見極めた。次に、バンドパスフィルタの帯域を変更しながら所定のしき値を超える回数をカウントアップする信号解析から、異常の程度によってカウント数が増加することを確認した。以上の結果から、衝撃波に対しても、P型端末機の振動センサデバイスにて異常を検知できる可能性を得た。

現場におけるセンサの設置方法としては、P型端末機を設置する台座の固定方法として、接着とマグネットによる振動特性の違いを検証し、4kHz程度までの振動加速度に差異が無いことを確認し、現場での実用化に道筋を立てた。

実証サイトにおけるモニタリングシステムの構築と実証では、稼働中のポンプにP型端末機の試作機を設置し、ハーベスト電源による鹿威し方式データの収集、同じくP型端末機に内蔵した振動センサデ

バイスによる比較的高い周波数帯域での振動値の収集と、モニタリングの試験を行った(図Ⅲ-【①-2】-14)。引き続き実証試験を重ねることで、コアモニタリングシステムの実用性を高められる。



図Ⅲ-【①-2】-14 ローカルネットワーク型コアモニタリングシステムの構成

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
①-(1)コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発 <b>【実施計画】</b> ・ $5\mu\text{W}$ 以上の発電性能を有する振動発電センサデバイスの開発 ・消費電力 $0.5\mu\text{W}$ 以下の鹿威し回路の開発 ・自立電源センサ端末動作の実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>ScAlN 薄膜を備える振動発電センサデバイスを開発し、<math>1\text{V}</math>、<math>0.12\mu\text{W}</math> の出力を達成。ScAlN 成膜の最適化により圧電定数を 3 倍、発電量を 10 倍程度上昇させる。加えて応力緩和構造の採用と圧電膜の厚膜化により、さらに発電量を 5 倍程度上昇させ最終目標を達成する。</li> <li>開発されたコンパレータ、参照電圧発生回路を用いることで、回路の消費電力を <math>0.12\mu\text{W}</math> にまで削減</li> <li>待機時の電力を電池で賄うが、振動発電センサデバイスで発電された電力による無線送信を実証した。</li> </ul>	左記の開発を行うことにより達成される見通しである。  達成  これまで開発されてきた低省電力鹿威し回路と ScAlN 振動発電センサデバイスを組み合わせることで達成される
①-(2)コアモニタリング用 AlN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発 <b>【実施計画】</b> ・本PJにおける圧電カンチレバーは、固有振動数、約 $100\text{Hz}$ 帯域と $1\text{kHz} \sim 16\text{kHz}$ 帯域を持つようなこと	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまでも 6 回の試作を通して、求められる振動数の AlN 圧電カンチレバーを産総研に渡し、最近、パッケージ加工されたカンチレバーを明星電気に収めた。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>蓄積された知見を元に、これまで以上に産総研と連携を深めて、試作開発を実施することにより達成できる。</li> </ul>

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>が求められる。そこで平成27年度までに、上記の固有振動数をもつような高周波数域と低帯域の振動子の全工程自前試作を行い、産業技術総合研究所に供給する。</p> <p>・平成29年度以降は、試作したデバイスを用いて実証実験あるいは当該プロジェクトにて開発される予定の長期信頼性試験を行った結果を反映させ、安定した品質のデバイスものづくりをする。</p> <p>①-(3)コアモニタリング用センサ端末の開発</p> <p>【基本計画】</p> <p>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するため振動または変位、温度も同時に計測可能なセンサ端末を開発</p> <p>・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作でき、さらに地震等の突発事象を検出できるセンサ端末を開発</p> <p>・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下のセンサ端末を開発</p> <p>・実環境下で10年以上の信頼性を有するセンサ端末を開発</p>	<p>・Au-Au 低温活性化接合技術を開発し、圧電カンチレバーにはほとんどダメージが無い条件で、室温で信頼性的にも問題の無い封止特性が得られた。</p> <p>・インフラ構造物の健全度を診断するための振動計測</p> <p>・低周波振動計測は送信間隔測定で判断できるため達成。</p> <p>・高周波振動計測はセンサ出力レベルが低く判断出来にくい。</p> <p>・インフラ構造物の健全度を診断するための温度計測は達成できている。</p> <p>・自立発電自立動作。 発電素子からのトリガーで無線送信している。</p> <p>・地震等の突発事項検出 初年度 M 型端末にて確認済み。(M 型端末開発中止)</p> <p>・P 型センサ端末サイズ:直径 30mm、高さ 50mm(突起部除く)</p> <p>・センサデータ収集端末 サイズ 5.4×9.0×4.4cm(アンテナ、AC-ADP 接続コネクタ除く)</p> <p>・10年以上の信頼性</p> <p>・低周波発電センサ素子の耐衝撃性が弱い丁寧な取扱いにて対応。</p>	<p>・これまで開発した Au-Au 低温活性化接合技術をベースに、特性改善をすることにより実証実験の長期信頼性試験に対応する。また、試作中の工程品質の改善をさらに進め安定した品質のデバイスものづくりをする。</p> <p>高周波振動計測 高周波センサ素子の材質改善により出力アップおよび、アンプ回路追加により計測を実現できる見通し。</p> <p>自立電源 自立動作 P 型端末の電源キャパシタ容量の増設と低周波発電デバイスの共振周波数ワイドバンド化により安定的に発電量が確保でき自立発電自立動作が可能となる。</p> <p>・地震等の突発事象検出をセンサデータ収集端末に感震器を接続することにより実現予定。</p> <p>達成</p> <p>センサ素子を改良化する および小型化により改善される見通し。</p>



最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>①-(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発</p> <p><b>【基本計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数を用い、その距離は実環境下で30m以上</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b></p> <p>M型中継端末</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>省電力性能 稼働年数1年以上(実証実験環境下での見込) 端末消費電力:20<math>\mu</math>W以下</li> <li>悪環境下での無線通信距離:30m以上 (920MHz 特定省電力・マルチホップの動作条件として)</li> </ul> <p>①-(5)コアモニタリングシステムの開発</p> <p><b>【基本計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>異常検知の精度確保:異常発生頻度に対し、検知99%(3<math>\sigma</math>)を達成</li> <li>安全な維持管理の持続:回転部位に起因する保全項目の95%(2<math>\sigma</math>)をカバー</li> </ul> <p>②コアモニタリングシステムの構築と実証</p> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>モニタリングシステムの連続</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>920MHz帯特定小電力無線を使い、利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて、56mの距離(中継機1台によるマルチホップ構成)で問題なく無線通信が実現できることを確認した。</li> <li>H28年度に再送を伴わない衝突回避制御方式を検討し効果の確認を行う。 H29年度は確立した再送を伴わない衝突回避制御方式をM型中継端末向けネットワークシステムへ適用・評価を行い、無線ネットワークシステムとして、本方式の有効性や問題点・改善点の有無、実証現場で想定するセンサの数と通信発生数・衝突数の相関を明らかにする。</li> <li>利用が想定される熱供給システムのポンプ室にて920MHz無線の到達距離の30m以上(マルチホップ利用)は確認済み。 今後実環境での現地調査や、文献の調査を行い、冷熱供給施設における無線ネットワークシステム構築のためのガイドラインを作成する。</li> <li>モニタリングシステムの試作機を完成し、実証試験に着手。</li> <li>最終目標の達成に向けては、現場実証を積み重ね、実環境下で運用できるシステムの完成。</li> <li>既存の振動データ、保全前後の振動データ、故障シミュレータの異常振動にて、異常検知の確度を検証。</li> <li>最終目標の達成に向けては、連続稼働による診断結果の妥当性を検証。</li> <li>日常保全の項目の70%についてモニタリングシステムによる代用可否を検討。</li> <li>最終目標の達成に向けては、保全項目の代用となる機能をモニタリングシステムに付加。</li> <li>鹿威し方式データの収集から余裕時間の予測までの一連の処理をするモニタリングシステム</li> </ul>	<p>達成</p> <p>H30年度達成見込み</p> <p>H30年度達成見込み</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>フィルタリング機能、異常検知ロジックの現場実証を重ねることで、高信頼性のモニタリングシステムが完成する見通しである。</li> <li>従来の振動監視システムと診断結果を比較検証しながら、パラメータを調整することで、達成する見通しである。</li> <li>日常運転の性能監視など、モニタリングシステムの機能を追加することで達成する見通しである。</li> <li>地域熱供給施設、病院施設に加え大型ポンプ</li> </ul>

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
稼働： 1年間の連続稼働によるヒートラン試験で監視システムに不具合が生じないこと ・実証実験： 代表的な病院施設、地域冷暖房施設の各1件にてモニタリングシステムの実用性を検証 ・クラウド利用型ネットワークシステム： クラウド利用型ネットワークシステムにより、複数の施設を遠隔監視	の試験機を完成。 ・最終目標の達成に向けては、多様な環境の機械室に設置し、システムの安定稼働を検証。 ・病院施設、地域熱供給施設にて、モニタリングシステムの試験機を稼働。 ・最終目標の達成に向けては、施設管理者の日常業務にモニタリングシステムの運用を組み込むことでモニタリングシステムの有効性を評価。 ・機械室内のローカルネットワークを構築し、モニタリングシステムを稼働。 ・最終目標の達成に向けては、機械室から外部へのデータ通信機能を組み込み、クラウド環境下での施設群管理を構築。	を有する施設での実証を行うことで達成する見通しである。 ・施設管理者との協力のもと達成する見通しである。 ・実績のあるクラウド型設備管理システムにモニタリングシステムを組み込むことで、達成する見通しである。

#### (4) 成果の普及

展示会への出展や種々の講演会・セミナーでの成果報告ならびにホームページ、ブログ、ユーザとの技術交流を通じて本研究開発の普及・広報を図った。

##### (i) プロジェクトホームページの開設

プロジェクトのホームページ(<http://ucoms.la.coocan.jp/index.html>)を開設し、研究アウトライン(研究開発概要、研究コンセプト、研究テーマ)、研究体制について紹介、さらにナノ・マイクロビジネス展(2015年)において、プロジェクトブースでのパネル展示、成果報告会(2015年)を実施し、広報普及を図った。



第1回 ライフラインコアモニタリングプロジェクト成果報告会	
主催	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、コアモニタリング研究体
セッション2	重要な社会課題の一つである都市機能を支えるライフライン系の都市インフラ(電気、ガス、上下水道、情報、エネルギー)の安全な保全のためのライフラインコアモニタリングシステム(UCoMS)の研究開発(「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」インフラ状態モニタリング用センサシステム開発)第一回成果報告会です。特に、ライフラインの心臓部にあたるモーター、ポンプ、コンプレッサー等の動力機械に焦点を当てたコアモニタリングに取組みます。 司会：コアモニタリング研究体 逆水 登志夫
12:45 ▶ 13:15	UCoMSプロジェクトのミッションとIoTへのインパクト コアモニタリング研究体 研究体長 伊藤 寿浩
13:15 ▶ 13:30	圧電MEMS振動発電センサデバイスの開発 (独)産業技術総合研究所
13:30 ▶ 13:45	環境センサ・発電用MEMSプロセスプラットフォーム技術の開発 (一財)マイクロマシンセンター
13:45 ▶ 14:00	ネットワーク気象計と小型無線センサへの取組み 明星電気(株)
14:00 ▶ 14:15	920MHz無線マルチホップネットワークの低消費電力化技術の開発 沖電気工業(株)
14:15 ▶ 14:30	回転機器の振動特性とモニタリングシステムの開発 高砂熱学工業(株)

ナノ・マイクロビジネス展でのブース展示  
2015年4月22～24日@パシフィコ横浜

ナノ・マイクロビジネス展での成果報告会  
2015年4月23日@パシフィコ横浜

##### (ii) ブログによる情報発信

一般財団法人マイクロマシンセンターが管理するブログニュース(MEMSの波、<http://gsnpj.blogspot.jp/>)に成果展示や成果報告会の内容を発信して、本プロジェクトの広報・普及を図った。

### (iii) ユーザとの技術交流

モニタリングシステムのユーザとな地域冷暖房施設のニーズや本システムの仕様等に対する意見を抽出するため、27 年度は、九州博福岡地区で供給サービスを行っている西部ガステクノソリューション(株)千代事業所の現場を視察、管理部門・営業部門と本システムについて意見交換を実施した(NEDO 同席)。現状の点検・検査では、簡易振動計でポンプの振動値の確認はしているものの、系統的なデータ収集・分析など行われていないこと、また、本システムの P 型端末(鹿威し方式)で、気付きの情報が得られれば使えそう、設置については、マグネットのような簡易的なものを使いやすそうであるとの意見が出た。

### (iv) 成果表彰

①-(4)コアモニタリング用ネットワークシステムの開発において、2014～2015 年に開発した「時刻同期型の省電力通信方式」に関する研究会発表が短距離無線通信研究会論文賞(IEICE SRW Best Paper Award)に選ばれました。<http://www.ieice.org/~srw/awardee.htm>

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	3 件
2	査読有論文発表数	2 件
3	外部発表	18 件

### 【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所

#### (1) 研究開発目標

本研究開発では、道路付帯構造物(トンネル内(ジェットファン)、トンネル外(照明柱等))を管理対象インフラとし、道路付帯構造物の確実かつ効率的なモニタリングを実現するために必要な要件を満たし、実用に求められるセンサ端末およびセンサネットワークシステムの研究開発、実証実験を実施するものである。研究開発要素を8つに分類し、平成26年度に仕様検討、評価、平成27年度に1stプロトセンサ端末・ネットワークシステムの開発・評価、平成28年度に2ndプロトセンサ端末・ネットワークシステムの開発・評価を実施する。

センサ部については、道路付帯構造物の状態を適確に把握するために、道路付帯構造物の固有振動数と振幅に着目し、評価を実施する。

電源部については、センサ端末自身で自己動作可能な自立発電仕様の策定として、センサ端末サイズ(7cm×10cm×5cm)で搭載可能かつ発電量が消費電力を上回る光発電センサと振動発電センサを選定し、平成27年度は中間目標サイズ(16cm×16cm×10cm)、平成28年は最終目標サイズ(7cm×10cm×5cm)を前倒して開発・評価を実施する。また、長期メンテナンスフリーを実現するための蓄電部の開発に向け、充放電レート・使用電圧範囲等の条件変更と最適な添加剤を投入することで、充放電4000サイクル性能を満たす蓄電池を目指す。

無線部については、道路走行する点検車両等でデータ収集する巡回型データ回収方式を実現させるために、平均消費電力が最も低消費である「モバイルリーダ駆動方式」を策定した。そして平成27年度にモバイルリーダ駆動方式による製品開発を実施し、静止した状態で通信距離100mの場合でも問題なくセンサデータの取得できることを評価し、平成28年度は、時速80kmで通信距離約200mの場合や実フィールドのトンネル内でも問題なくセンサデータを取得できることを目標とする。

#### (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

本事業では、道路付帯構造物(ジェットファン、照明柱等)を管理対象インフラとし、道路付帯構造物の確実かつ効率的なモニタリングを実現するために必要な要件を満たし、実用に求められるセンサ端末およびセンサネットワークシステムの研究開発、実証実験を実施する。

道路付帯構造物のモニタリングを実現するためのセンサネットワークシステムは、複数方式が考えられるが、点検車両等で走行中に道路付帯構造物の計測データを収集できる巡回型データ回収方式が有用な仕組みの1つであると考えられる。よって、構造物に設置したセンサ端末のデータを、受信装置(携帯可能なモバイルリーダ)によって、タブレットPCやスマートフォンでの閲覧・管理を可能にするセンサネットワークシステムを研究開発する。

NEDO基本計画の仕様と本事業の研究開発要素を下記に示す。下記に示す通り、12つのNEDO基本計画の仕様に対して、8つの研究開発要素を設定し研究開発を実施する。

NEDO基本計画の仕様	本事業の研究開発要素
(a) 構造物の状態を正確に把握するために必要なセンシング性能 (b) インフラ構造物の健全度を診断するための振動、変位等	(i) 構造物の状態を正確に把握するためのセンシング技術開発
(c) センサ端末自身で自己動作可能な低消費電力、自立発電 (d) 少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できる	(ii) センサおよび無線機の低消費電力化の技術開発 (iii) 自立電源および電源制御の技術開発
(e) 安定な接続性と信頼性がある無線通信機能 (f) 実環境下で30m以上通信可能 (g) 無線局免許不要な周波数無線の適用	(iv) 安定した無線通信の技術開発
(h) 設置容易性(小型化:7cm×10cm×5cm) (i) 実環境下で10年以上の信頼性を有する	(v) センサ端末の小型化および耐久性・信頼性の技術開発
(j) 実用に求められるセンサーネットワークシステムの構築 (k) ユーザ機関と連携した実環境での実証実験 (l) 地震等の突発事象を検出できる	(vi) 実用に求められるニーズ調査・要件整理 (vii) 道路付帯構造物モニタリングシステムの開発・構築 (viii) 実証実験

表Ⅲ-【①-3】-1 NEDO基本計画の仕様と本事業の研究開発要素

以下、本事業にて設定した8つの研究開発要素の中間目標に対する現時点での、研究成果及び達成度を記載する。

① 研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b> (i) センシングの検出・解析制度の測定誤差10%以下、数十バイトのデータ量伝送を実現するプロトタイプ完成を目指す。</p>	解析区関数・応答周波数に対応したセンシングアルゴリズムの使用策定を実施し、誤差±10%のセンシング精度、数十バイトのデータ量伝送を実現した。	H28年度 達成見込み
<p><b>【実施計画】</b> (ii) センサ部と無線モジュール部において下記内容を実現するプロトタイプの完成を目指す。 センサ部:(収録時)70mW以下、(待機時)170μW以下 無線モジュール部:10mW以下</p>	センサ部、無線部それぞれ低消費電力化したソフトウェアを設計、実装した。センサ部については消費電力を計測し、目標値(明かり部平均3.0mW、トンネル内平均0.9mW)を満たした。無線部についても同様に、消費電力の評価を実施し、目標値(明かり部平均0.9mW以下、トンネル内平均0.3mW以下)を満たした。	達成
<p><b>【実施計画】</b> (iii) 自立発電のプロトタイプ実装、蓄電部のサイクル寿命2000サイクル(充電回数2日に1回以上目指す)を実現するプロトタイプ完成を目指す。</p>	電源部については、長期メンテナンスフリーを実現するための蓄電部の開発に向け、充放電レート・使用電圧範囲等の条件変更と最適な添加剤を投入することで、充放電4000サイクル性能を満たす蓄電池を開発した。	達成
<p><b>【実施計画】</b> (iv) 本研究開発要素の中間目標として、安定した無線通信を確保するために、30m以上の遠距離通信を実現するプロトタイプ完成を目指す。</p>	センサ端末無線部およびモバイルリーダの設計、実装を実施した。無線部・モバイルリーダ単体の通信距離確認試験では静止距離30m、で問題なく通信可能なことを確認した。	達成
<p><b>【実施計画】</b> (v) 各部それぞれ下記内容を実現するプロトタイプ完成を目指す。 サイズ:7cm×10cm×5mm 保護等級:(センサ端末本体)IP65相当(無線アンテナIPX相当)</p>	センサ端末のサイズを、中間目標サイズ(16cm×16cm×10cm以下)を目標に、センサ部は内部機構の小型化の検討、電源部は電力構造の小型化を検討し、センサ部、無線部、電源部を一体化させたセンサ端末を開発、実装した。	H28年度 達成見込み

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>【実施計画】 (vi)道路附帯構造物ならびに道路分野においてニーズ調査、要件策定を実施する。</p>	「センサ単体基礎実験の条件整理」として、対象とするジェットファンの損傷事例の再現、6本吊りなど固定方法の再現、使用するセンサの選定、固有振動数計の精度に関する検討等を挙げ整理した。	達成
<p>【実施計画】 (vii)道路附帯構造物のインフラ維持管理に必要な機能を要するプロトタイプシステムの開発・構築を実施する。</p>	要件定義書をもとに、スマートフォンアプリ機能(センサデータ受信機能、センサデータ送信機能、グラフ表示機能、作業履歴表示機能、時刻同期機能)を設計し、開発した。	達成
<p>【実施計画】 (viii)道路の実フィールドにセンサ端末のプロトタイプを設置し道路区間限定で短期間の検証を実施する。</p>	1st プロト実証実験を新東名高速道路/三岳山トンネル(上り線)にて実施し、検証を行った。	達成

## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) 構造物の状態を適確に把握するためのセンシング技術開発

仕様策定したセンシングアルゴリズムの改良として、解析可能な周波数の区間を1区間から2区間に増加させ、応答周波数範囲を0.1~30Hzから0.1~50Hzへ拡大させるソフトウェアを実装した。実装したソフトウェアについて、0.1~50Hzの区間内、2つ(9~10Hz、23~24Hz)を設定することで、それぞれの区間の卓越周波数を2つ検出可能となることを評価した。また、センシング精度の向上として、固有振動数計、傾斜計それぞれに対し、小数点以下1桁から2桁へと拡張させ、検出した計測値の桁数が2桁へ増加していることを評価した。

また、ジェットファンを用いた1stプロト実証実験にて、周波数範囲を設定(X軸モード4、モード5、Y軸モード2、Z軸モード4、モード5)し、固有振動数の卓越周波数が出力されることを確認した。今後はジェットファンの変化をより詳細に把握するため、固有振動数の卓越周波数・振幅双方の変化を検出可能とすること、およびその変化とジェットファンの異常検知の関連性の検討が必要である。

### (ii) センサおよび無線機の低消費電力化の技術開発

センサ部、無線部それぞれ低消費電力化したソフトウェアを設計、実装した。また、センサ部、無線部間の連動テストを実施し、センサ部内部処理や無線部内部処理のタイミング等を調整し、実装したソフトウェアが設計通りに動作するかを確認した。そしてセンサ部について消費電力を計測し、目標値(明かり部平均3.0mW、トンネル内平均0.9mW)を満たしていることを確認した。無線部についても同様に、消費電力の評価を実施し、目標値(明かり部平均0.9mW以下、トンネル内平均0.3mW以下)を満たしていることを確認した。今後は2ndプロトセンサ端末においても目標値を満たしているかどうか同様に評価していく。

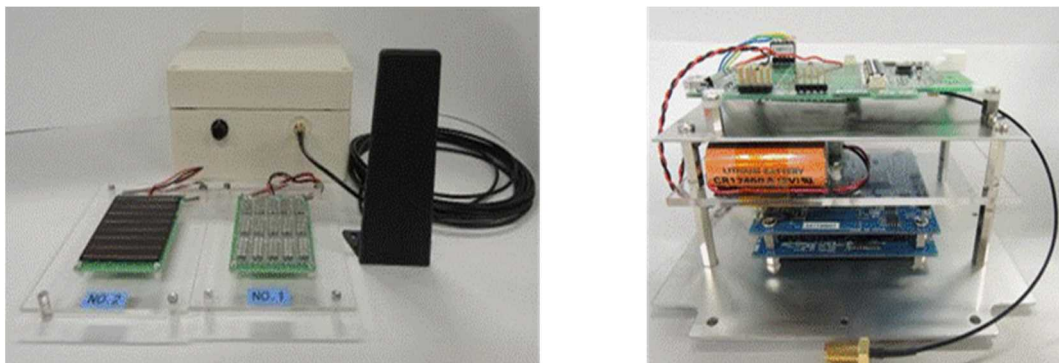
### (iii) 自立電源および電源制御の技術開発

電源部については、長期メンテナンスフリーを実現するための蓄電部の開発に向け、充放電レート・使用電圧範囲等の条件変更と最適な添加剤を投入することで、充放電4000サイクル性能を満たす蓄電池を開発した。また、自立発電部においては、平成26年度に選定した国内外2社の光発電モジュール、国内2社の振動発電モジュールの単体評価を行い、それぞれ設計値(14.1mW-10%、0.14mW-10%)を満たしていることを確認した。しかしながら振動発電モジュールをジェットファンに取り付け評価した結果、最大値約0.01mWとなり、目標値未達となった。これはジェットファンの振動が一定ではないために振動発電モジュールがうまく共振できなかったことが要因である可能性が高い。そのため、再度ジェットファンの振動加速度の変動を詳細に把握することを目的として実証実験を実施した。結果として、振動が大きい部分では、ダンパーの加震効果により発電量が増加していることが分

かった。そのため今後はダンパーの加震効果が得られる振動加速度の範囲を広げる(ダンパーの最適化)必要がある。また発電電圧が小さく、加速度変化が発生している時は 2.5V 程度まで落ちていることも分かった。電圧が低いと整流回路でロスが発生し発電電力を有効に使用できないため振動発電デバイスの出力を交流(AC)から、ダイオードブリッジ回路で整流を行い直流(DC)に変換する。今後はこれらの対策を実施することで振動発電についても、目標値を達成予定である。

#### (iv) センサ端末の小型化および耐久性・信頼性の技術開発

センサ端末のサイズを、中間目標サイズ(16cm×16cm×10cm 以下)にするために、センサ部は内部機構の小型化の検討、電源部は電力構造の小型化を検討し、センサ部、無線部、電源部を一体化させたセンサ端末を開発、実装した。以下に実装したセンサ端末の外観と内部基板を示す。



図Ⅲ-【①-3】-1 1st プロトタイプセンサ端末外観と内部基板

内部基盤については、センシング対象物との距離を短くするためセンサ部をセンサ端末の下部へ設置し、外部との通信距離を短くするため無線部をセンサ端末の上部へ配置した。以下 1st プロト端末を示す。

また、実装した 1st プロトセンサ端末について、鉛直方向から水滴(500ml/分)を 10 分間散水し、端末内に水滴が混入していないことを確認する簡易耐水試験、直径 0.01mm 以下の粉塵を模擬した固形物(石灰)を 4 方向から約 10g 振り掛け、端末内に粉塵が混入していないことを確認する簡易防塵試験を実施し、それぞれ問題がないことを確認することで、中間目標(IP61)を達成する見通しである。また現在は最終目標サイズを満たす 2nd プロトタイプを開発中である。

#### (v) 安定した無線通信の技術開発

1st プロト実証実験にて、中日本高速道路株式会社の協力により、実際のジェットファンにセンサ端末を設置し、走行中における無線通信のフィールド検証を実施した。以下の 3 つの実験条件に関して計 8 パターンでそれぞれ 2 回ずつ性能評価を実施した。検証結果については RSSI 値が-86dBm 以上(正常に通信可能)となる時間が 9 秒以上確保可能かどうかを一つの判断基準とした。

- ① 走行条件による違い(走行車線、追い越し車線)
- ② 走行速度による違い(自足 80km、時速 100km)
- ③ 受信機の設置位置による違い(ダッシュボード上、作業着ポケット)

結果としてそれぞれのパターンについて 2 回実施した平均値を採用した。走行条件が追越車線、受信機の設置位置が作業着ポケットとなるパターン以外については、RSSI 値が-86dBm 以上となる時間が 9 秒以上確保可能という結果となった。設置場所を作業着ポケットとした際に、通信可能となる時間が 9 秒を満たさなかった点に関しては作業着の材質や、シートベルトの被さり等の影響があったと考えられる。

しかしながら、設置場所がダッシュボード上の場合であれば、条件に関わらず走行しながらセンサーデータが受信可能であることを示した。現在は2ndプロトフィールド実験に向けて最終目標である時速80kmの走行中に30m以上の通信距離でデータ受信を実現するための仕様検討中である。

#### (vi) 実用に求められるニーズ調査・要件整理

先ず初年度に高速道路管理会社や地方整備局のヒアリングを実施し、実際の点検における課題やシステム運用、センサ活用の可能性を確認した。またその中で「実証課題の抽出」として、センサ部については測定誤差、データ量の妥当性や異常振動に対する計測項目(事象、設置位置、設置個数等)の洗い出しを実施した。無線部については計測頻度、データ回収頻度の妥当性や適用する道路トンネルの条件(断面・線形)と管理方法の明確化を課題として整理した。電源部についても同様に、消費電力に対する発電能力の妥当性、管理方法の明確化を課題として整理した。また、「センサ単体基礎実験の条件整理」として、対象とするジェットファンの損傷事例の再現、6本吊りなど固定方法の再現、使用するセンサの選定、固有振動数計の精度に関する検討等を挙げ整理した。そして、「1stプロト適用実験の条件整理」として、センサの設置数(AMA5つ、1stプロトセンサ端末2つ)、設置箇所(端子箱内、端子箱横、ジェットファン上部等)、ターンバックルの緩み(1cm、2cm、3cm、4cm)、ジェットファン稼働状態(運転、停止)等を整理し、1stプロト適用実験のシナリオを作成した。

#### (vii) 道路付帯構造物モニタリングシステムの開発・構築

スマートフォンアプリ機能(センサデータ受信機能、センサデータ送信機能、グラフ表示機能、作業履歴表示機能)を設計し、開発した。また、開発したアプリが正しく実装されているかどうかを確認するため、ソフトウェアの単体テスト、組合せテスト、1stプロト端末との連動テスト、システム全体の動作を確認するシステムテストを実施し、1stプロト適用実験にて運用時のテストを実施した。本機能により、ユーザが受信したいセンサデータを指定・受信した後、受信したデータのグラフを閲覧することが可能となり、また、サーバへデータを送付することでサーバでのグラフの閲覧も可能となった。以下、開発したスマートフォンアプリ機能の画面を示す。

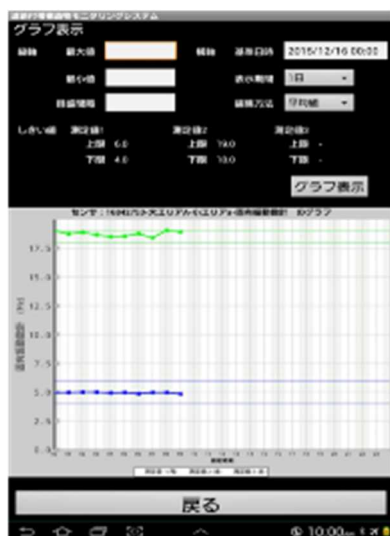


(a)センサデータ受信機能



(b)センサデータ送信機能





(c) グラフ表示機能

道路付帯構造物モニタリングシステム							
作業履歴							
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:58.464	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:58.355	データ送信		
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:58.246	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:57.903	データ送信		
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:57.695	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:57.549	データ送信		
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:57.465	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:57.319	データ送信		
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:57.221	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:57.095	データ送信		
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:56.998	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:56.871	データ送信		
正常	SERV	R	2015/08/01	21:16:56.656	応答受信		
正常	SERV	S	2015/08/01	21:16:56.320	データ送信		
異常	SERV	R	2015/08/01	21:15:02.043	応答受信		
異常	SERV	S	2015/08/01	21:14:40.797	データ送信		
異常	SERV	R	2015/08/01	21:14:15.763	応答受信		
異常	SERV	S	2015/08/01	21:13:54.463	データ送信		
正常	RFID	S	2015/08/01	17:47:12.703	受信応答		
正常	RFID	R	2015/08/01	17:47:12.649	データ送信		

戻る

(d) 作業履歴表示機能

図Ⅲ-【①-3】-2 開発したスマートフォン画面一覧

今後は1stプロトセンサ端末の開発や1stプロト実証実験で得られた結果を踏まえ、スマートフォンアプリ機能やサーバアプリ機能の機能拡充を検討していく。

### (viii) 実証実験

平成27年度に開発した1stプロトセンサ端末固有振動数計を高速道路にて供用中のジェットファンに適用し、下記項目を確認し、課題を整理することを目的として東名高速道路 三岳山トンネル(上り線)にて実証実験を実施した。

- ジェットファンに対する加速度計測による基礎情報の収集及び1stプロトセンサ端末固有振動数計の計測値の検証
- 1stプロトセンサ端末固有振動数計の無線アンテナ設置位置による通信特性の検証

実証実験を実施するにあたり、センサ端末の実装方法については安全面や将来的な実製品(サービス化)することを考慮し、ジェットファンの外装部分では部品落下で事故につながるリスクがあるため、端子箱内にセンサ端末を実装した。以下実際のジェットファンにセンサ端末を設置している様子と、設置後の様子を示す。



(a)端子箱上蓋交換(センサ端末設置)の様子 (b)端子箱上蓋交換後(センサ端末設置)

図Ⅲ-【①-3】-3 端子箱上蓋交換(センサ端末設置)の様子とセンサ端末設置後

結果として(v)でも示したとおり、無線性能を確認することが出来た。現在は 1st プロトフィールド実験で得たを元に各機能に対してフィードバックを実施中である。

### (3)成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b> (i)センシングの検出・解析精度の測定誤差1%以下、数バイトのデータ量伝送を実現する製品完成を目指す。</p>	<p>誤差±10%のセンシング精度、数十バイトのデータ量伝送を実現した。現時点では、センシング精度を向上させ、測定誤差 10%以下を実現する 2nd プロトタイプ完成を目標に開発中である。</p>	H30 年度 達成見込み
<p><b>【実施計画】</b> (ii)各部それぞれ下記内容を実現する製品完成を目指す。 センサ部(固有振動数計):(収録時)35 mW以下、(待機時)35 μW 以下無線モジュール部:1mW 以下</p>	<p>センサ部、無線部それぞれ低消費電力化したソフトウェアを設計、実装した。センサ部、無線部共に、消費電力の評価を実施し、目標値を満たした。</p>	H30 年度 達成見込み
<p><b>【実施計画】</b> (iii)設置環境を考慮した最適な自立発電の実装、蓄電部のサイクル寿命 4000 サイクル(充電回数:1 日に 1 回以上)を実現する製品完成を目指す。</p>	<p>電源部については、長期メンテナンスフリーを実現するための蓄電部の開発に向け、充放電レート・使用電圧範囲等の条件変更と最適な添加剤を投入することで、充放電 4000 サイクル性能を満たす蓄電池を開発した。</p>	H30 年度 達成見込み
<p><b>【実施計画】</b> (iv)実環境下で安定した無線通信を確保するために、時速 80km の走行中に 30m 以上*の通信距離でデータ受信を実現する製品完成を目指す。</p>	<p>無線性能向上のため、既設モバイルリーダに専用の外付けアンテナを取付けた車載設置用受信機の開発、ビームフォーミング方式、ダイバーシティ方式の検討を実施し、走行しながら30m以上の通信距離を実現するプロトタイプを開発中である。</p>	H30 年度 達成見込み
<p><b>【実施計画】</b> (v)各部それぞれ下記内容を実現する製品完成を目指す。 サイズ:7cm×10cm×5cm以下 保護等級:(センサ端末本体)IP65相当、(無線アンテナ)IPX5相当*</p>	<p>各モジュール基板の小型化や各モジュールの基板結合も考慮し、サイズ:10cm×7cm×5cm(見通し)を実現する2ndプロトタイプを開発中である。</p>	H30 年度 達成見込み
<p><b>【実施計画】</b> (vi)道路附帯構造物ならびに道路以外のインフラ維持管理が必要な分野においてニーズ調査、要件策定を実施する。</p>	<p>1st プロトフィールド実験にて抽出された課題を整理し、2nd プロトフィールド実験に向けて実証課題の抽出や、実験条件を整理中である。</p>	H30 年度 達成見込み

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> (vii)道路附帯構造物ならびに道路以外の インフラ維持管理に必要な機能を有する モニタリングシステムの開発・構築を実施 する。	15年度に実装したモニタリングシステムを カスタマイズしインターネット上のクラウド環 境に構築、実際の道路にて構築したモニタ リングシステムを評価中である。	H30 年度 達成見込み
<b>【実施計画】</b> (viii)道路区間を拡大し長期間での検証を 実施し、管理対象物および適用センサを 拡大した実証実験を実施する。	1st プロトフィールド実験、今後実施予定の 2nd プロトフィールド実験を用いて実フィー ルドに適用するセンサ端末・システムの課 題を抽出し、ジェットファン他におけるセン サ適用拡大を検討中である。	H30 年度 達成見込み

#### (4) 成果の普及

成果の普及に向けた取り組みとして、弊社「施設モニタリングサービス」を Hitachi Innovation Forum や日  
立グループ展に計 4 回出展済み。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	4 件

【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株)

(1)研究開発目標

近年、インフラ構造物の維持管理費が増加する傾向にある。また、メンテナンスや診断を行う熟練した人材の高齢化・減少に伴い、建物の経年変化による老朽化や異常の把握を行うための常時モニタリングシステムが必要となってきた。また、国土強靱化基本計画で“起きてはならない最悪の事態”に示されている、『大規模自然災害が発生したときでも人命の保を最大限図る』ための手段として、公共性の高い建築物における健全性を確認し、居住安全性を自動的に判定するシステムへのニーズは今後高まっていくと考えられる。それに対して、建物の健全性を確認するために必要十分なシステムが確立していないのが現状である。

本プロジェクトに於いては、建物の耐用年数と同等の耐久性・長期安定性のある、長期安定・高信頼性を具備する低消費電力で安価なセンサを開発し、多点での計測を安価に行うための無線センサシステムの構築を目標とする。これにより、計測データに基づいた建物の診断指標を構築し、詳細な老朽箇所・損傷箇所の特定を可能にし、点検コストの削減、及び修繕費用の低減化を支援する。

(2)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【基本計画】</b> 以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測、温度も同時に計測。</li> <li>・少なくとも1時間に1回の無線通信を自立電源で自己動作、地震等の突発事象を検出。</li> <li>・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下。</li> <li>・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上。</li> <li>・実環境下で10年以上の信頼性を有する。</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b> ①高信頼性・高感度振動式加速度センサデバイスの開発 振動式加速度センサデバイスの完成。検出感度は1/100gal、測定範囲は±2G。XYZ3軸の加速度を個別に同時測定可能。動作温度範囲は、-10℃～50℃。振動出力を周波数へ変換する信号処理回路は1チップのCMOS専用集積回路で構成し、測定時の消費電流が1mA以下を達成する。</p> <p>②高信頼性歪みセンサデバイスの開発 精度の高いシリコン振動式歪みセンサと破壊耐力の高いシリコンピエゾ抵抗式歪みセンサを完成させる。測定感度は±10με、測定範囲は±5000με。使用温度範囲は-10℃～50℃。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物として、建物を対象として振動(加速度)、変位(加速度を積分)、温度データを計測。</li> <li>・定時(設定可)でのセンサデータを無線で収集、突発事象時も検出可。</li> <li>・現状では現状では9cm×16cm×5cm</li> <li>・920MHz帯特定小電力標準規格に準拠、実環境を想定した建物での通信距離として水平距離で100m以上の見込み。</li> <li>・未実施であるが、実証試験期間中に評価する。</li> </ul> <p>シリコン振動式加速度センサデバイスを開発し、検出感度として1/1000gal(1μG)を達成。温度範囲は同型他センサの特性として-10℃～50℃は達成可能。信号処理回路は、他センサで開発済のCMOS専用IC(ASIC)で構成した。消費電流は1.5mA(5.5V動作時)。電源電圧を下げる設計変更で1mAは達成可能。</p> <p>シリコン振動式歪みセンサとして、測定感度0.1με以下を達成。測定歪み範囲は評価中。環境の温度変化による歪み変化を補償する機能を付加し、測定範囲として±1,000μεを達成可能。±5,000μεの測定</p>	<p>H28年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>H28年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>未達成</p> <p>達成</p> <p>H28年度 達成見込み</p> <p>一部超過 達成</p>

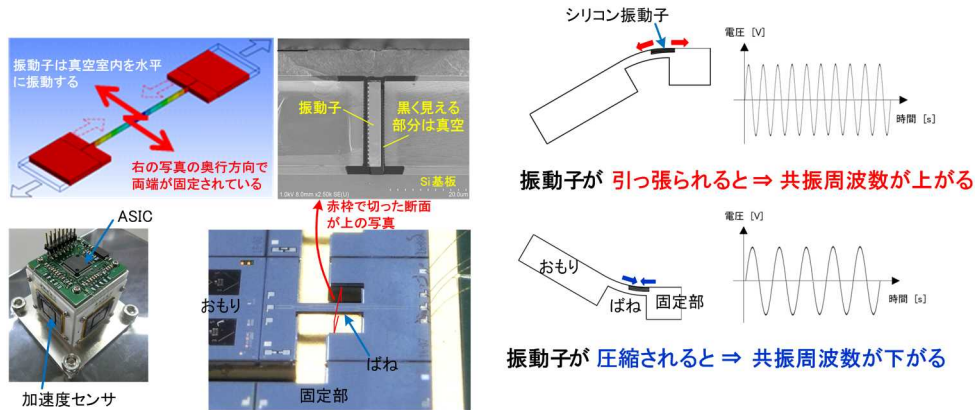
中間目標	研究開発成果	達成度
<p>鉄骨材料、コンクリートに接合できる構造とし、振動式センサからの信号処理は加速度センサの信号処理回路と同じもの、ピエゾ抵抗式センサからの信号出力は汎用集積回路で構成する。</p> <p>③無線通信モジュールの開発 無線モジュールによる測定信号の送受信検証を行い、30m以内に設けるデータ受信モジュールによる信号受信を行う。測定モジュールの最大数は、1個の受信モジュールに対して255個、通信時間間隔は1時間置きとする。周波数帯は、2.45GHz、920MHz、400MHz帯を候補として、消費電力・設置場所の状況に応じて適切なものを選定する。</p> <p>④センサ用自立電源モジュールの開発 センサ及び無線モジュールの消費電力量の最適化を図り、想定される設置環境で収集可能なエネルギーに適した発電素子と二次電池を各種検討し、エネルギーハーベスト電源の基本構成を完成させる。更に、外部からのワイヤレス充電を可能にする為にセンサ端末のサイズに納まる形で受電コイルと受電回路を構成する。送電装置は充電作業の利便性を上げるために、可搬型とする。送電装置と受電装置間の給電可能な距離は50mm以上、1年に1回5分間程度の給電で運用可能を目標とする。</p> <p>⑤データ収集システムの開発 センサからのデータ収集を既製のデータ収集計測システムで行う。センサとの通信確認を行うために、初期は有線でのデータ送受信方法で検証を行うことも合わせ、中間最終目標では、無線通信モジュールによるデータ収集を確立する。データ解析への受け渡しとして、各センサからのデータの時間同期の確保が課題となる。</p> <p>⑥データ解析システムの開発 各ノードで測定された加速度データから外乱（地震、風、環境振動など）前に実施した常時微動測定や人力加振などで把握した周波数特性と外乱後の周波数特性の差をセンサシステムで評価する周波数解析プログラムを開発する。</p> <p>⑦システム同定による建物の詳細な損傷評価</p>	<p>範囲は、ピエゾ抵抗式センサで達成可能の見込み。振動式歪みセンサは加速度センサと同じ回路を使用。</p> <p>無線システムは、データ通信時間、伝搬距離を検討し、920MHz帯と決定した。標準規格 ARIB STD-T108 に準拠し、最大送信電力 20mW、データ伝送速度 50kbps、チャンネル数 29。建物を想定した屋内実験で 30m以上の伝搬距離を得た。</p> <p>エネルギーハーベストおよびワイヤレス給電にて共通で使用する二次電池を選定し、-30/+25/+60℃の各温度で大電流および微小電流性能を確認した。エネルギーハーベスト回路は、屋内向けアモルファス太陽電池（70×100mm 面積相当）、MPPT 機能付き降圧電力変換回路および二次電池で構成される。周囲照度 200lx にて充電電力は 365μW を得た。</p> <p>ワイヤレス給電は、本システムに最適化したプロトタイプ機を開発し、伝送距離 50～80mm にて受信電力 20W 以上が得られることを確認した。</p> <p>データ収集システムは、既製システムでは冗長また不足の能力があることが判明し、新たにシステムの開発を行った。サイトビジットでデモ実験を行い、センサからのデータを無線で受信し表示することまで達成した。センサノードの時刻同期は、無線通信モジュール内に組み込んだ GPS-1PPS 信号で行った。有線での事前検証は省略し、最初から無線通信でのシステムの検証を行った。</p> <p>加速度波形データから周波数特性のプログラムが完了した。さらに計画目標に掲げてなかった震度算出プログラムを追加し、建物の各階に設置したセンサの揺れの度合いをわかりやすく、客観的な指標で示すことを新たに組み込んだ。最終目標である時刻歴変位波形算出するプログラムの開発を前倒しで実施し完了した。</p> <p>木造軸組架構および小型模型を用いた振</p>	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><u>手法の開発</u> システム同定アルゴリズムを利用した建物損傷評価プログラムを作成し、損傷評価システムの妥当性および有効性を検証する。</p>	<p>動台実験で得られた試験体の加速度データに逐次部分空間法を適用し、固有振動数および建物層剛性の同定精度について、従来のシステム同定法と比較した。その結果、逐次部分空間法を用いることで、従来法では評価できなかった試験体の各層の剛性の瞬間的な低下をも詳細に評価可能であることが分かった。</p>	

## ②研究開発成果の概要及び意義

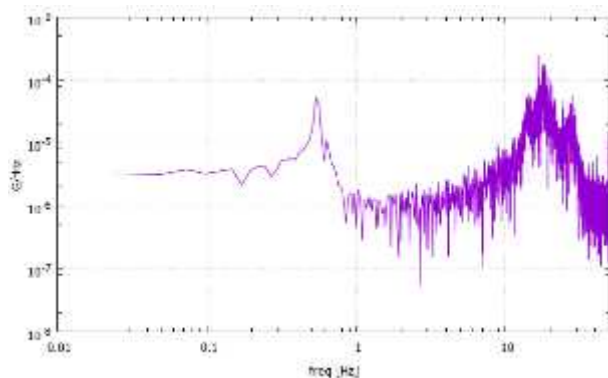
### (i) 高信頼性・高感度振動式加速度センサデバイスの開発の開発

高感度、高安定な加速度センサを得るため、安定で機械的特性に優れた単結晶シリコンで加速度センサを作成した。シリコンで図Ⅲ-【①-4】-1 のようなおもりとばねの構造を作成し、ばねの表面にはシリコン振動子を埋め込んだ。おもりに加速度が加わるとばねが変形しシリコン振動子の張力が変化するため、シリコン振動子の共振周波数を測ることで加速度を精度よく測定することが出来る。



図Ⅲ-【①-4】-1 シリコン振動式加速度計

シリコン振動子はひずみ計として用いた場合、シリコンピエゾ抵抗の 100 倍程度と、非常に高いゲージ率を持つため、本加速度計のような簡便な構造でも高い加速度感度を得ることが出来る。本加速度センサは、シリコン MEMS を用いた加速度計の中では非常に高い分解能である  $1\mu\text{G}/\text{rHz}$  を達成している。図Ⅲ-【①-4】-2 にセンサのノイズフロア測定結果を示す。評価系の振動 ( $0.6\text{Hz}$  付近及び  $20\text{Hz}$  付近) を拾っているため、図Ⅲ-【①-4】-2 では 2 つのピークが見られる。



図Ⅲ-【①-4】-2 試作したシリコン振動式加速度計のノイズフロア

容量式、サーボ式、抵抗式等の他方式の加速度計では加速度に比例した電圧値(または電流値)の読み取りに AD コンバータが用いられるが、本振動式加速度センサと同等の精度を得ようとすると AD コンバータの消費電力が非常に大きくなる。一方、本加速度センサのように、シリコン振動子の共振周波数を測定し共振周波数の変化から加速度を測定する方式では AD コンバータのかわりに回路構成が単純な周波数カウンタを用いるため、現状では消費電流を約  $1.5\text{mA}$ 、将来的には更に専用 ASIC 回路設計で  $1\text{mA}$  以下に抑えることが可能である。よってシリコン振動式加速度センサは無線を用いたヘルスマモニタリングに適していると考えられる。

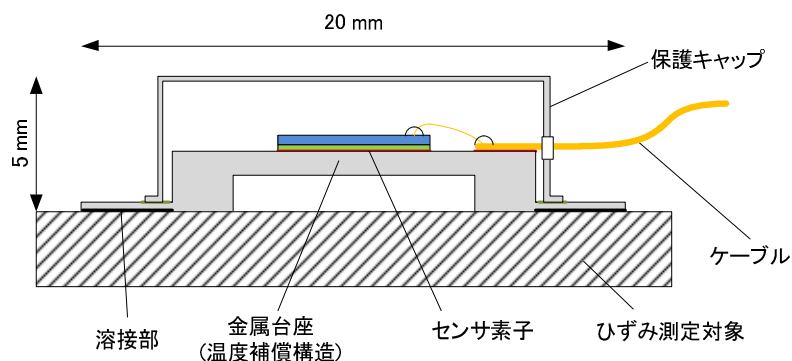
## (ii) 高信頼性歪みセンサデバイスの開発

本年度は、開発済みのシリコンセンサ素子を用い、高精度歪みセンサデバイスに適用する歪みセンサの作製と特性評価を進めている。センサの開発は、高精度歪みセンサ(測定感度 $\pm 1 \mu \epsilon$ )と広帯域歪みセンサ(測定範囲 $\pm 5,000 \mu \epsilon$ )の二本立てとし、高精度歪みセンサはシリコン振動式を用い、高帯域歪みセンサはシリコンピエゾ抵抗式を用いて実現する。双方の方式のセンサは、センサ素子が異なるが、センサ構造は同一である。また、シリコン振動式ひずみセンサの信号処理回路は、加速度センサと同一である。以下、開発の概要を示す。

- ① 開発の進捗を、表Ⅲ-【①-4】-1 に示す。シリコン振動式歪みセンサについては、測定範囲および測定感度(分解能)について、目標仕様を超過達成できる見通しが得られた。センサの断面構造を、図Ⅲ-【①-4】-3 に示す。金属台座の形状を最適化することで、測定する歪みに対する感度を得ながら温度歪みの影響を抑制する温度補償構造を有し、また、長期の安定性を得るため、接着剤を使用しない構造を実現している。
- ② シリコン振動式歪みセンサにより、 $\pm 0.1 \mu \epsilon$  の測定感度(分解能)が得られる見通しが得られた。分解能の評価結果を、図Ⅲ-【①-4】-4 に示す。センサの出力が高安定かつ高感度であることから、従来の歪みセンサでは実現が困難な高い分解能が実現可能である。
- ③ シリコン振動式歪みセンサにより、動的な歪みの測定が可能であることを確認した。動歪みの測定結果を、図Ⅲ-【①-4】-5 に示す。ここでは、センサ素子をステンレスの板バネに固定し、板バネの変形によりセンサ素子に発生した歪みを検出している。サンプリング周波数は100Hz であり、微小な歪みを動的に検出することが可能である。

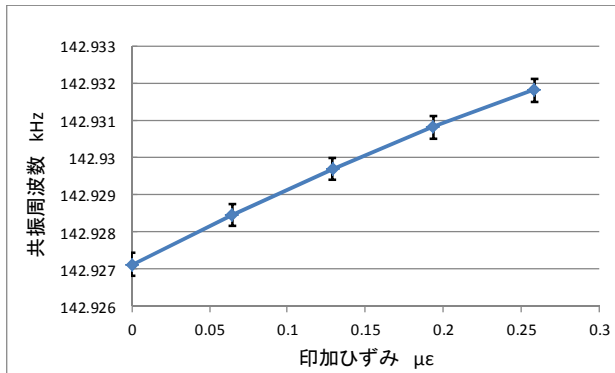
	シリコン振動式		シリコンピエゾ抵抗式	
	目標仕様	進捗	目標仕様	進捗
測定範囲	$\pm 500 \mu \epsilon$	$\pm 1,000 \mu \epsilon$ を達成見込み	$\pm 5,000 \mu \epsilon$	H28 年度中に確認
測定感度(分解能)	$\pm 1 \mu \epsilon$	$\pm 0.1 \mu \epsilon$ を達成	$\pm 10 \mu \epsilon$	達成
長期ドリフト	$\pm 1 \mu \epsilon / \text{年}$	H28 年度中に確認	$\pm 10 \mu \epsilon / \text{年}$	H28 年度中に確認
使用温度範囲	$-10 \sim 50^\circ\text{C}$	達成	$-10 \sim 50^\circ\text{C}$	達成
温度誤差	$\pm 1 \mu \epsilon / ^\circ\text{C}$	達成	$\pm 1 \mu \epsilon / ^\circ\text{C}$	達成

表Ⅲ-【①-4】-1 目標仕様と進捗

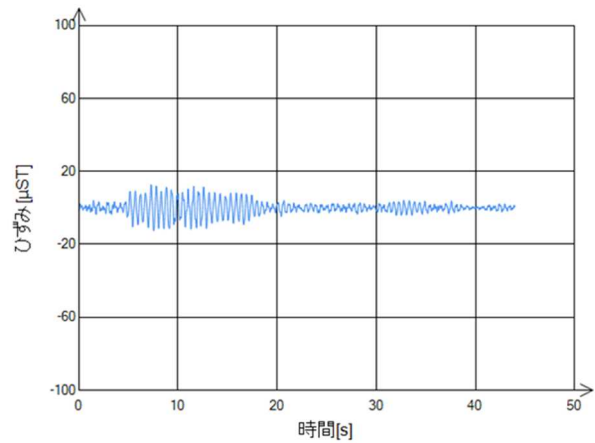


図Ⅲ-【①-4】-3 センサの断面構造





図III-【①-4】-4 シリコン振動式ひずみセンサの分解能評価結果



図III-【①-4】-5 シリコン振動式歪みセンサによる動歪みの測定結果

### (iii) 無線通信モジュールの開発

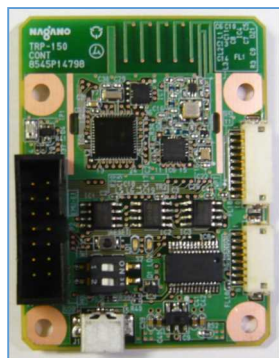
無線システムは、データ通信時間、伝搬距離を検討し、920MHz 帯と決定した。標準規格 ARIB STD-T108 に準拠し、最大送信電力 20mW、データ伝送速度 50kbps、チャンネル数 29。建物を想定した屋内実験で 30m以上の伝搬距離を得た。

センサノード用無線通信モジュールは、外形 60×45mm、センサデータ用メモリ(常時 1 回、非常時 3 回分)を有する。

受信機は、外形 28×28×13cm(筐体)、無線通信モジュール 1 台、イーサネット通信、GPS-1PPS 受信機能を有する。

センサノードの運用時消費電流を下げるために、時刻同期による通信方式を開発した。受信機とセンサノードは、1 分間を 1/100 秒単位で規定したスロットに合わせて無線通信を行う。

受信機は GPS を受信し、時刻と GPS-1PPS 信号を取得する。センサノードに向け同期信号を指定スロットに 1 分間隔で送信する。センサノードは始め連続受信を行うが、同期信号を受信後、時刻とタイマーを設定し低消費電力モードに入る。定期的に低消費電力モードから通常動作モードに移行し送受信することで、通信の確立と低消費電力化を両立している。



図III-【①-4】-6 無線通信モジュール



図III-【①-4】-7 受信機

(iv) センサ用自立電源モジュールの開発

① 二次電池

エネルギーハーベストおよびワイヤレス給電にて共通で使用される二次電池を選定し、-30/+25/+60°Cの各温度で大電流および微小電流性能を確認した。

② エネルギーハーベスト回路

エネルギーハーベスト回路は、屋内向けアモルファス太陽電池(70×100mm 面積相当)、MPPT 機能付き降圧電力変換回路および二次電池で構成される。周囲照度200lxにて充電電力365μWを得た。この結果より発電電力が消費電力を上回るためセンサノードの自立動作が成立する。

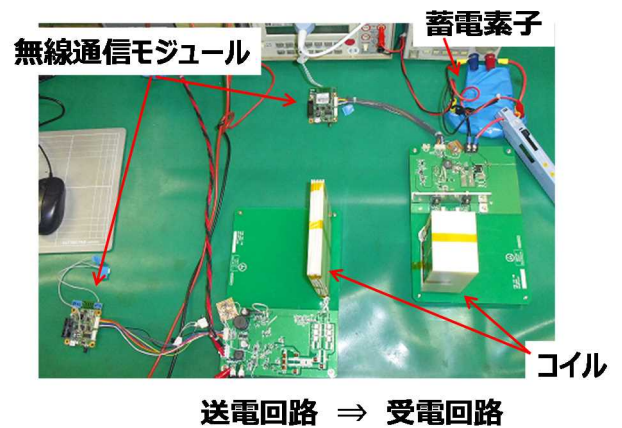
二次電池



図Ⅲ-【①-4】-8 エネルギーハーベスト評価回路

③ ワイヤレス給電回路

本システムに最適化したワイヤレス給電評価機を開発し、伝送距離50~80mmにて受信電力20W以上が得られることを確認した。また、無線通信モジュールを使用し、無線通信による自動充電制御(充電開始・完了)を実装した。



図Ⅲ-【①-4】-9 ワイヤレス給電評価回路

### (v) データ収集システムの開発

モニタリングシステムの全体構成を下記のように決定した。

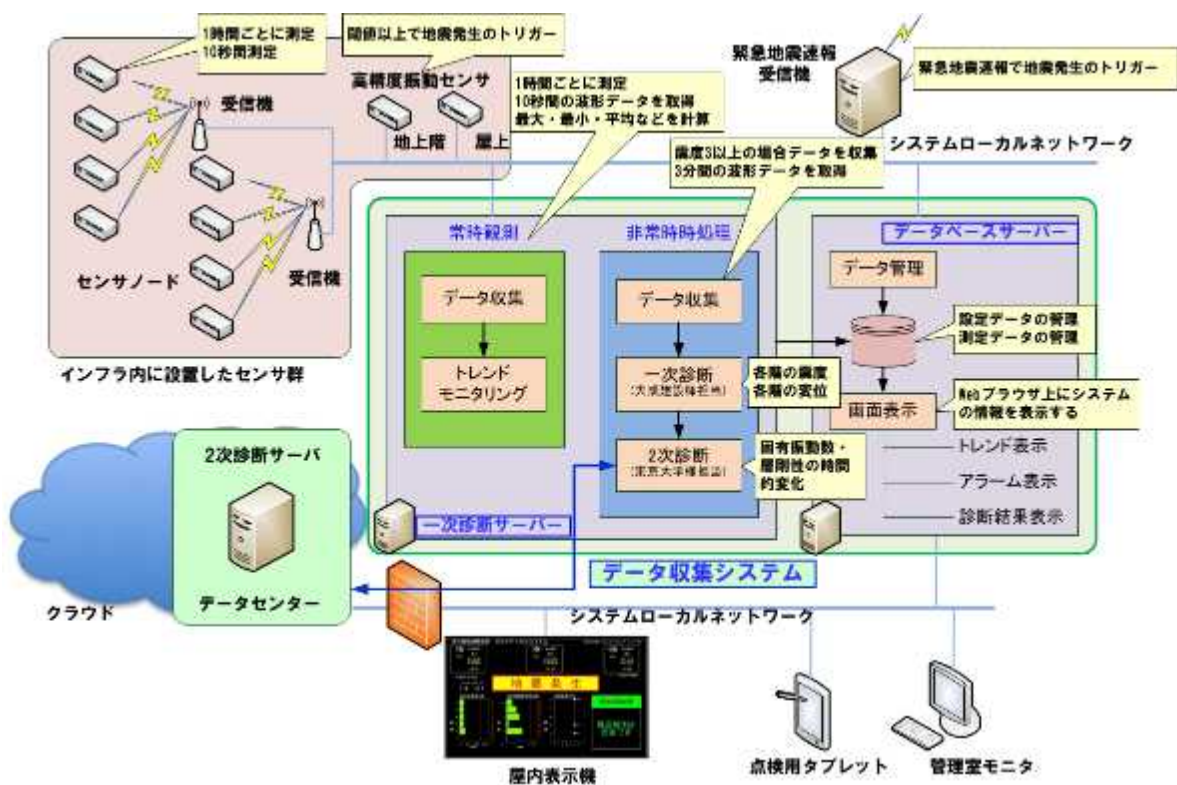
センサノード、高精度振動センサは構造物内に設置する。データ収集システムは構造物内に設置し、システム全体のシーケンス管理とデータ管理を行う。一次診断処理は構造物内に設置し、二次診断はクラウド上のデータセンターに設置することを想定している。

常時観測として、1 時間に 1 回、各センサにて 10 秒間の波形データを測定する。データ収集システムにてこの波形データを集め、各時刻のパラメータを計算し、データベースに格納する。このパラメータは閾値と比較され、アラーム判定を行う。

高精度振動センサでの振動検知、緊急地震速報の受信などをトリガーとして非常時観測が行われる。このときは各センサで最短 3 分、最長 9 分の振動波形の計測が行われ、データ収集システムにより波形データが集められる。データ収集システムはこれらの波形を一次診断処理、二次診断処理に提供する。さらに、各診断処理結果を受け取り、管理するとともに、診断結果を画面に表示する。

常時観測において、実加速度センサからの波形データを受信機より受け取り、パラメータ計算を行い、アラームの発報、パラメータのトレンド表示が問題無く行えることを確認した。

非常時観測においても、実加速度センサからの波形データを受信機より受け取り、各診断処理部に波形データを提供し、診断結果を受け取り、診断結果を管理・表示できることを確認した。



図Ⅲ-【①-4】-10 データ収集システムの構成図

### (vi) データ解析システムの開発

本システムは、振動式加速度センサで収集したデータを用いて、構造物の健全性評価を行うプログラムであり、速やかな損傷判定を可能にした一次診断として位置づけている。平成28年度までの中間目標では、常時観測および非常時観測による周波数特性の変化を確認するための周波数解析プログラムの開発を実施する。さらに平成30年度までの最終目標は、加速度センサによる波形データから、構造物の変形を確認するための時刻歴変位を算出するプログラムを開発し、部材角から構造物の健全性を確認する計画である。

上記の中間目標計画に掲げてきた構造物の常時および非常時の周波数解析結果を図Ⅲ-【①-4】-11に示す。この波形は、建設現場で常時起きている揺れとクレーンの旋回や吊り荷を行うときの非常時の揺れが複合した時刻歴加速度波形(3成分)である。この時刻歴加速度波形を周波数解析プログラムで処理することで、構造物の周波数特性を確認することができた。これより中間目標で掲げた周波数解析プログラムの開発が完了した。

また、本計画目標に設定していなかった時刻歴加速度波形データから各センサ位置の震度計算プログラムを追加で開発した(図Ⅲ-【①-4】-12)。現在気象庁で通報している震度は、震源地や市町村の代表的な拠点のみであり、構造物ごとの震度を知るべき手段がなかった。本システムに震度算出する機能を搭載することで、構造物に設置したセンサ位置の震度が確認でき、客観的な揺れの度合いを確認することができる意義は大きい。震度算出プログラムの検証のために、防災科学技術研究所(K-NET)で蓄積されている過去10年間(2005年1月～2014年12月)の地震波データの中から計測震度4.5(震度5弱)以上の観測記録地震波を抽出・整理した。その内、計測震度が最大を経験した東日本大震災時期の2011年と2014年の2年間の計算結果と、K-NETで公開された計測震度とを比較し、一致していることを確認した。

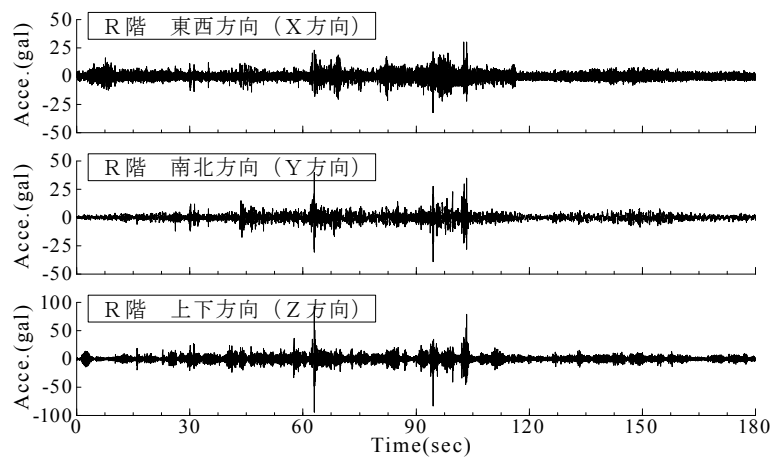
一方、最終目標計画である時刻歴加速度波形データから、時刻歴変位波形データに算出するプログラムを前倒して完了させた。変位算出プログラムの具体的な検証方法は、市販の加速度センサを振動台に設置し、計測された時刻歴加速度波形データ(八戸地震波)を変位算出プログラムで処理することで得られた時刻歴変位波形データと、振動台に予め設置したレーザー変位計による変位計測データとを比較検討した。その結果、図Ⅲ-【①-4】-13に示すように振動台の変位挙動をほぼ正確に捉えることができ、変位算出プログラムの検証が確認できた。八戸地震波と異なる周波数特性であるEL-Centro地震波でも同様な結果を得ることが確認できた。

これら3種類のプログラムは、小型模型試験体を用いた振動台実験システムに全て搭載し、動作確認済みである。

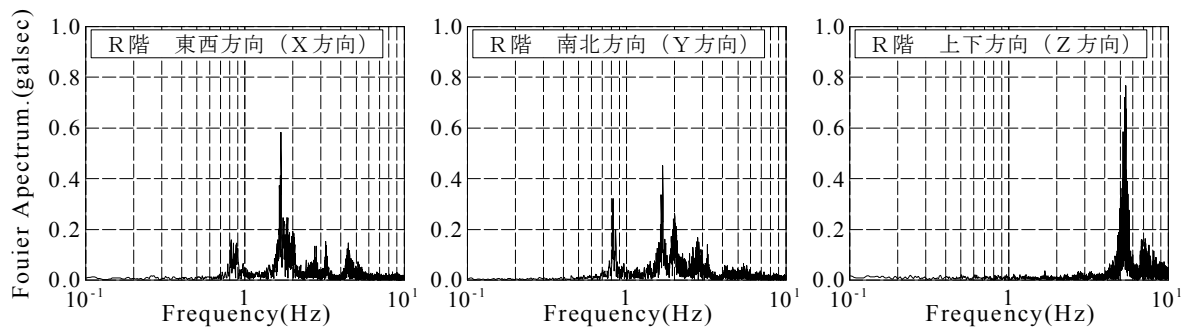
表Ⅲ-【①-4】-2に他社のモニタリングシステムの動向調査した結果を示す。この結果より、他社より優れていることが確認できた。



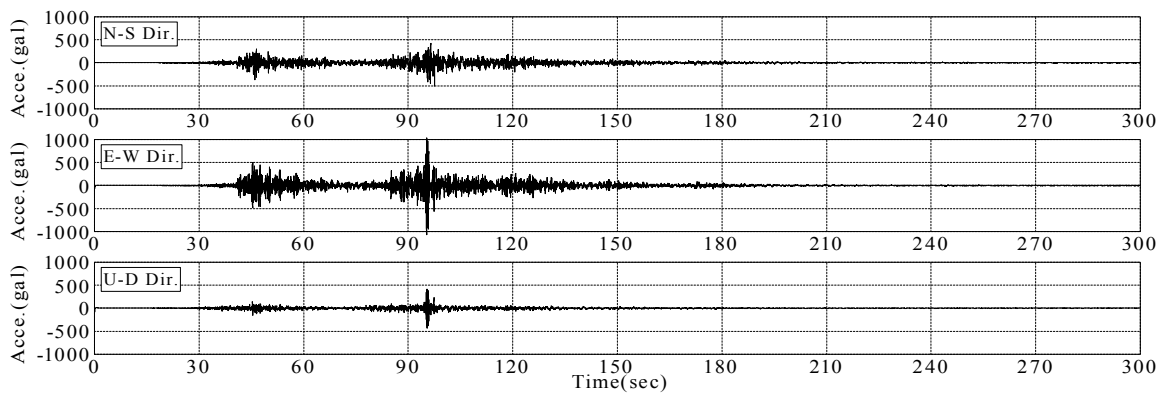
建設現場



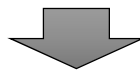
加速度センサ設置階の時刻歴加速度波形



図Ⅲ-【①-4】-11 構造物の各成分の周波数特性

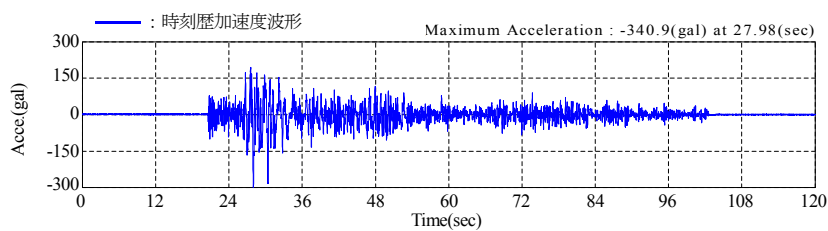
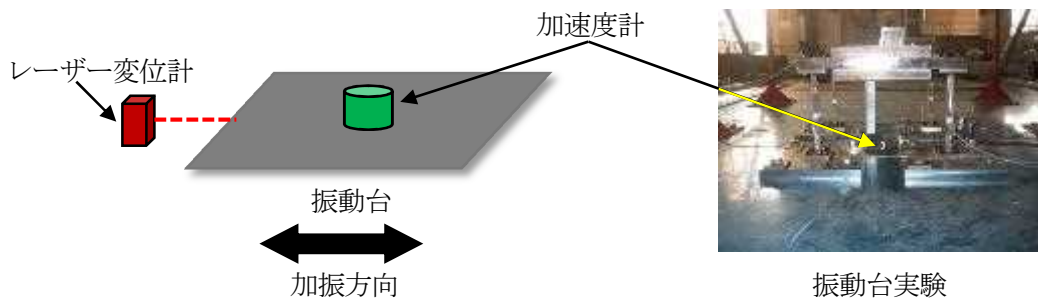


2011/3/11 14:46 東日本大震災(K-NET コード名 : MYG004(築館))の時刻歴加速度波形

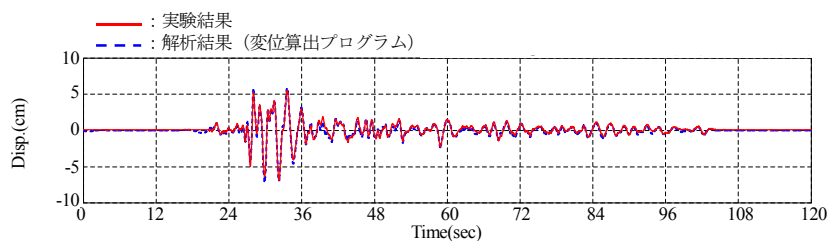


計測震度 : 6.6、震度 : 7

図Ⅲ-【①-4】-12 3成分の時刻歴加速度波形から計測震度および震度算出



(a)時刻歴加速度波形



(b)時刻歴変位波形

図Ⅲ-【①-4】-13 八戸地震波の加速度波形から算出した変位波形算出と計測結果との比較

表Ⅲ-【①-4】-2 他社のモニタリングシステムの動向調査

構造ヘルスマニタリングの動向調査

名称		本プロジェクト		「揺れモニ」NTTファシリティーズ	「被災度判定システム」鹿島	「構造ヘルスマニタリング」日建設計			
センサ	方式	単結晶Siレゾナントセンサ (MEMS) (新開発：世界初)		微小電気機械素子 (MEMS) (自社開発)	静電容量式加速度センサ (白山工業製)	静電容量式加速度センサ (白山工業製)			
	加速度計	分解能	1/1000gal		?	1/100gal	1/100gal		
		測定範囲	±2G		?	±1.5G	±1.5G		
		サンプリグ周波数	100Hz		?	100Hz	100Hz		
		周波数特性	0.1Hz～50Hz		0.1Hz～1Hzも計測可能	0.1Hz～50Hz	0.1Hz～50Hz		
	ひずみ計	分解能	±1μ		×	×	×		
		測定範囲	±500μ		×	×	×		
	傾斜計	分解能	0.01°		×	×	×		
	通信・電力方式	LAN (PoE)、 無線 (イーサネット、Wi-Fi給電)		LAN (PoE)	LAN (PoE)	LAN (PoE)			
	サイズ(mm)	70×100×50 (見込み)		?	140×140×58	140×140×58			
設置場所	全層		代表階	全層	1階、最上階および中間階	2階、最上階および中間階			
出力データ	加速度波形	○ (測定)		○ (測定)	○ (測定)	○ (測定)			
	変位波形	○ (解析)		○ (解析)	×	○ (測定・解析)			
	固有周期	○ (解析)		○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)			
	層間変位	○ (解析)		○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)			
	柱の傾斜	○ (測定)		○ (測定)	×	×			
	柱およびはりのひずみ	○ (測定)		○ (測定)	×	×			
	震度	○ (解析)		○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)			
評価方法	1次診断	5分以内	測定値の分析により固有周期と層間変位より評価	即時判断	クライテリアを設定し、赤・黄・青で評価	数分間	構造および非構造部材を健全、小修復と中修復で評価	?	構造および非構造部材の分析指標で評価
	2次診断	24時間以内	測定値によりシステム同定で固有周期と減衰定数の評価	×	×	?	?	日建設計が2次判定の必要性がある場合のみ元設計会社へ依頼。	
	評価レポート	検討中		?	?	?	?	簡易出力版と詳細出力版あり	
備考	無線通信	920MHz		×	×	×	×	×	
	エナジーハーベスト	太陽電池		×	×	×	×	×	
	ワイヤレス給電	磁界共鳴方式		×	×	×	×	×	
	バッテリー	搭載		搭載	×	×	×	×	
	トリガー方式	センサノード (各階) (加速度振幅レベルで設定)		×	×	×	×	×	×
		緊急地震速報 (加速度振幅レベルで設定)		緊急地震速報：検討中		緊急地震速報		緊急地震速報	
		高精度振動センサ (GLまたは屋上階) (加速度振幅レベルで設定)		地下またはGL階のセンサ (想定) (加速度振幅レベルで設定 (想定))		地下またはGL階のセンサ (想定) (加速度振幅レベルで設定 (想定))		地下またはGL階のセンサ (想定) (加速度振幅レベルで設定 (想定))	
センサ時刻同期	GPSの時刻を定期的受信 (1回/分)		×		×		×		
時刻設定	GPS		?		?		?		

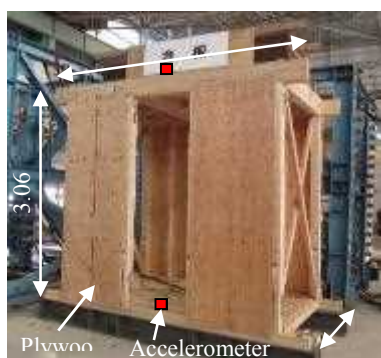
### (vii) システム同定による建物の詳細な損傷評価手法の開発

ここでは、建物の健全性を評価する手法の一つとして、システム同定法を用いた建物の剛性評価手法を開発する。

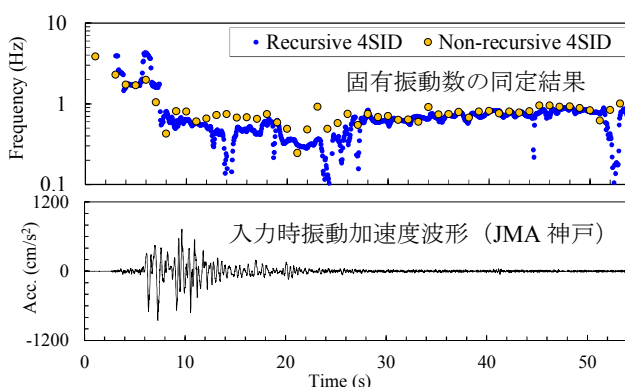
システム同定とは、主に建物で観測された常時・非常時における建物に作用する振動(入力)と、それに対する建物の応答(出力)波形を用いて、両波形から逆算的に建物の振動特性を求める手法である。この手法により、固有振動数、減衰定数および建物の層剛性等やそれらの時間的な変化を求めることが可能となる。ここでは、同定された建物剛性等の変化から、建物の損傷の有無を評価する一連の手法を開発することを目的とする。

損傷評価手法の開発に先駆け、システム同定手法による建物固有振動数や剛性の同定精度を検討した。システム同定手法としては、2種類のアプローチを選定し、それら各手法の同定精度を比較した。一つは、建物で観測されたある一定の時間長の加速度波形データを用いて、その時間帯内の平均的な動特性を評価する「非逐次的部分空間法(Non-recursive 4SID)」である。もう一つは、建物の加速度波形データに対し、1 サンプルステップごとに同定結果を逐次的に更新して、時々刻々の動特性を評価する「逐次部分空間法(Recursive 4SID)」である。

上記の2種類の手法を、過去に実施された実大木造軸組み架構の振動台実験から得られた加速度波形データに対して適用し、同定結果を比較した。試験体の外観を図Ⅲ-【①-4】-14に示す。試験体の1階床に設置した加速度計のデータを入力とし、屋上階に設置した加速度計のデータを出力としてシステム同定を行った。固有振動数の同定結果を図Ⅲ-【①-4】-15に示す。従来の同定手法(Non-recursive 4SID)に比べ、逐次部分空間法(Recursive 4SID)では、固有振動数の瞬間的かつ急激な低下をも詳細に評価できることが分かった。



図Ⅲ-【①-4】-14 試験体



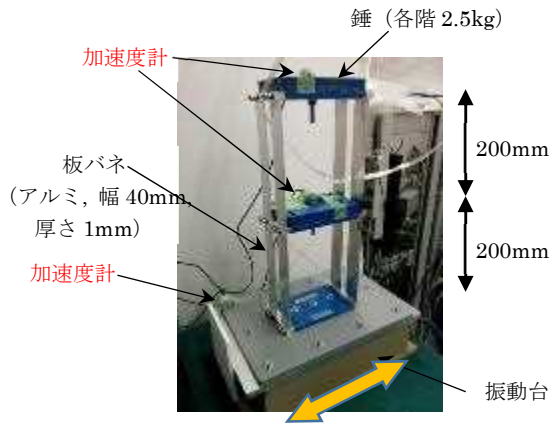
図Ⅲ-【①-4】-15 固有振動数の同定結果の比較

次に、小型模型の振動台実験を行い、建物の層剛性の評価可能性について検討した。模型の外観を図Ⅲ-【①-4】-16に示す。試験体は2階建てを想定し、振動台、2階床、屋上階にそれぞれ加速度計を設置した。1階部分にはブレースを模擬した糸を2構面に合計4本交差して設置した。振動台の加速度を入力、2階床と屋上階の加速度を出力として逐次部分空間法によるシステム同定を行い、1次固有振動数と固有モードを同定し、それらから建物各層の剛性を求めた。固有振動数と層剛性の同定結果を図Ⅲ-【①-4】-17に示す。建物の応答加速度が大きくなる時間帯(50秒および100秒付近)で1階のブレースが破断し、1次固有振動数が急激に低下する。加振中、2階の層剛性はほぼ一定値を保っているのに対し、ブ

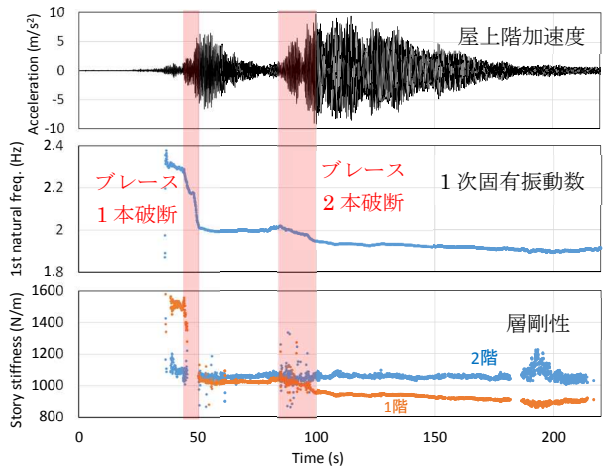


レース破断のタイミングで1階の層剛性が急激に低下している様子が検出されている

以上から、逐次部分空間法を用いて、地震時における建物各層の剛性の低下を詳細に評価できることが明らかとなり、ここで開発した手法が建物の層毎の損傷評価を行う際に有用であることが示された。



図III-【①-4】-16 小型模型試験体



図III-【①-4】-17 層有振動数と剛性の同定結果

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> <b>①高信頼性・高感度振動式加速度センサデバイスの開発</b> 加速度センサ+傾斜センサとしての機能追加。測定分解能は 0.01 度、高信頼性の指標となるゼロ点の安定性は 0.01 度/年。デバイス実装に関して、10 年以上の信頼性を確保する。センサは最小限の動作状態を保持し、消費電力を節減する。	測定分解能は目標仕様以上を達成済みで、安定性評価を実施中。デバイスの実装方法に関しても屋外設置にも対応することを検討中。	達成見込み
<b>②高信頼性歪みセンサデバイスの開発</b> シリコン振動式歪みセンサの測定感度を ±1μ ε と高感度化させ、ストレインゲージ型の歪みセンサとの 2 種の歪みセンサで実証評価する。測定箇所の構造体材料に応じた実装方法も確立する。	測定感度目標に関しては超過達成済み。実装方法についても測定箇所に応じた最適設計を検討中。	達成見込み
<b>③無線通信モジュールの開発</b> 100m以内に設けるデータ受信モジュールによる信号受信を行う。測定モジュールの	距離 30mにてデータ通信を確認した。1台の受信機と接続する測定モジュールは最	距離 100mにて通信確認試験を行い、目標を達成

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>最大数は、1個の受信モジュールに対して1000個、通信時間間隔の基本は1時間置き、突発的な地震等が発生した場合は、システムからの信号を受けて、センサを起動させる制御も含む。</p> <p><u>④センサ用自立電源モジュールの開発</u> 開発したエネルギーハーベスト電源及びワイヤレス給電装置を実証評価し、センサ用自立電源としての発電システム、ワイヤレス給電方法を確立する。</p> <p><u>⑤データ収集システムの開発</u> 通常の測定では、センサノードで測定した波形データを受信機で中継して収集し、構造物マップ上に表示し、機械的強度耐力に応じたアラームを含めた表示が可能となる。また、別置きする地震センサと、気象庁の早期警戒情報を併用し、地震波到達より前に各センサへの起動信号を送り、通常時より長時間の計測を行い構造物の健全性を診断するシステムを構築する。</p> <p><u>⑥データ解析システムの開発</u> 対象となる構造物の加速度センサデータなどや、別置き地震センサを併用し、構造物の変形を確認するための時刻歴変位算出プログラムを開発し、部材角などの結果データを確認するシステムを構築する。</p> <p><u>⑦システム同定による建物の詳細な損傷評価手法の開発</u> 建物各所に設置したセンサから地震時の加速度データを収集・蓄積するWebサーバを構築し、これに建物の健全性モニタリングシステムを組み込む。</p>	<p>大15台。通信時間間隔の基本は1時間。 突発時にセンサを起動させる制御を開発した。</p> <p>部分的な回路評価を行い、性能を確認した。</p> <p>予定された機能をほぼ実現するデータ収集システムを開発し、サイトビジットにてデモを行った。</p> <p>時刻歴変位算出プログラムが完了。部材角の算出は、未着手であるが、この計算は建物の上下変位差を階高で除すれば算出されるため、比較的簡便に計算できる。 建物の損傷評価のためのシステム同定手法を選定し、プログラムの作成が完了した。</p>	<p>する見込み。 送信データ量により、受信可能モジュールは目標を修正する。 総合的な評価を行い、目標を達成できる見込み。</p> <p>目標を達成見込み。</p> <p>平成30年度内には、部材角の算出法は、完了見込み。</p> <p>平成30年度末には、健全性モニタリングシステムの組み込みが完了見込み。</p>

#### (4) 成果の普及

本プロジェクトではセンサ開発とともに、センサデータにより建物の健全性について、どのような知見が得られるのかが重要と捉え、データ解析についても重点的に検討を続けてきた。この結果、部分空間法による建物の固有振動数解析や層剛性の高さ分布を推定する手法に関する研究等で学会発表を4件行った。また、NEDOプロジェクトで建物を中心としたインフラモニタリングシステム開発の概要、並びに進捗状況について、インフラ検査関係の展示会に2件、MEMS センサ関連展示会で1件のパネル展示、及びセンサの動態展示を行い、世の中で必要とされているモニタリングシステムに

についての動向把握を行ってきた。

**(5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み**

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	3 件
4	外部発表	4 件

## 【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株)コンソ

### (1) 研究開発目標

近年、高度経済成長期の集中投資により一斉に整備された社会インフラの老朽化が深刻な問題となっている。老朽インフラの割合が増加する中で、適切な維持管理が行われなければ、老朽化を原因とした重大事故発生の危険性が高まることが予想される。一方で老朽化した全ての社会インフラ、例えば道路橋の架け替えを行うことは経済的にも工事中の影響の面でも困難な点があり、道路橋の状況を定期的に点検・診断し、致命的欠陥になる前に速やかに対策を行なう予防保全への取り組みが急務となっている。また、社会インフラの保守・点検作業には目視、触手、打音といった手法を用いた損傷や異常の発見や予兆を行なうといった、高度な熟練技術が求められ、作業品質の維持が重要である。団塊世代の高齢化と共に熟練技術者が減少し、技能の伝承問題が顕在化している。特に「土木・測量」「建築」部門の技術者の高齢化は顕著である。

また、定期点検(近接目視点検)は5年周期の近接目視点検で行われることから、平常時での急激な劣化進行や近接目視点検困難箇所の損傷把握が困難であり、さらに災害時における迅速な変状把握が困難であるという課題がある。

一方、地震等による被災時には、円滑な救急・救援活動、緊急物資の輸送、復旧活動に不可欠な緊急輸送道路を確保しなければならない。このためには、道路の異常発生の早期検知、損傷箇所及び損傷程度の迅速な把握が必要である。これにより道路利用者への情報提供及び優先順位を付けた応急復旧が可能となる。

上記の社会課題に対応するため、道路橋を対象とした、平常時においては維持管理のため、大地震などの災害時においては防災・減災のために役立てるセンサシステムの研究開発を目標とする。

#### ① センサシステムの開発(平成26年度から平成28年度)

橋梁上部構造全体の鋼部材における腐食・疲労き裂及びコンクリート部材の顕著なひび割れ等による剛性の低下を振動特性の変化として捉えるためのセンサとして、振動センサを使用し、計測したデータをセンサ端末で管理する。外部入力をトリガに用いた計測についても、実現に向けた検討を行う。

常時における橋梁支承部の劣化による固着損傷、地震等による橋梁支承部の変位機能低下、路面段差の検知に変位センサが有効である。

そこで橋梁支承の変状検知を目的とした変位センサを開発する。

また、センシングされたデータを、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる920MHz帯の近距離無線によって、センサ端末(子機)からゲートウェイ(親機)へ無線通信を行う機能を有するハードウェアを開発する。

エネルギーハーベストによる発電機能とリチウムイオンキャパシタによる蓄電機能を有した自立電源のハードウェア研究開発を行う。

固定クランプによる設置性を考慮した筐体の設計および、腐食など耐環境性も考慮した筐体のハードウェア設計開発を実施する。

複数のセンサ端末(子機)からのセンシングデータを集約管理し、遠隔サーバに対して、センシングデータを送信するゲートウェイの開発を行う。今回開発するゲートウェイ(親機)では3G通信及び有線の両方で通信が可能となるような開発を行う。

またゲートウェイ(親機)に、センサ端末(子機)を制御する機能を持たせ、センサ端末(子機)のソフトウェアの更新を遠隔サーバよりリモートにて行うソフトウェア機能を開発する。

さらに、センサ端末(子機)に加速度センサを内蔵することで、センサ端末(子機)にて地震等の突発事象による揺れを検知し地震時のセンサデータを取得するソフトウェア機能を開発する。

ゲートウェイ(親機)から送信されたデータをデータ蓄積基盤へ蓄積し、分析するために必要な表示

を行う遠隔サーバのソフトウェア開発を実施する。

また、遠隔サーバからゲートウェイ(親機)を介してセンサ端末(子機)に各種設定変更等を可能にするためのリモート制御ソフトウェア機能を開発する。

センサ端末(子機)とゲートウェイ(親機)を、道路橋に簡易取り付けし、無線センサネットワークシステムを構築して近距離無線の送信距離等のフィールド評価を行う。

## ② センサシステムのニーズ・運用・導入の検討(平成26年度から平成30年度)

センサシステムのニーズ・運用・導入の検討は、道路管理のコンサルティング等の業務を通じた知見や、『先導研究』で得られたセンサシステムの課題からの知見を活用し、①センサシステムの開発のために必要な要件、ニーズを洗い出す。また、開発するセンサシステムを実環境下で運用、導入するにあたっての要件を道路橋の維持管理する立場から検討を実施し、開発及び実証実験の計画へ反映する。

## ③ 実証実験の実施(平成29年度から平成30年度)

実証実験の実施は、開発したセンサシステムを製造し、実橋梁に構築し、維持管理する立場から設置・運用の評価を実施するとともに継続的にデータを収集し遠隔サーバでデータ蓄積、処理、分析を実施する。

## ④ 事業化の検討(平成29年度から平成30年度)

センサシステムの販売先・運用者の検討及び市町村へのビジネスモデルの検討を実施する。

## (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

### ① 研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【基本計画】</b> 以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測、温度も同時に計測。</li> <li>・少なくとも1時間に1回の無線通信を自立電源で自己動作、地震等の突発事象を検出。</li> <li>・片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下。</li> <li>・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・インフラ構造物として、建物を対象として振動(加速度)、変位(加速度を積分)、温度データを計測。</li> <li>・定時(設定可)でのセンサデータを無線で収集、突発事象時も検出可。</li> <li>・現状では現状では9cm×16cm×5cm</li> <li>・920MHz 帯特定小電力標準規格に準拠、実環境を想定した建物での通信距離として水平距離で100m以上の見込み。</li> </ul>	<p>H28年度 達成見込み</p> <p>達成</p> <p>H28年度 達成見込み 達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>・実環境下で 10 年以上の信頼性を有する。</p> <p><b>【実施計画】</b></p> <p>① <u>高信頼性・高感度振動式加速度センサデバイスの開発</u> 振動式加速度センサデバイスの完成。検出感度は 1/100gal、測定範囲は±2G。XYZ3 軸の加速度を個別に同時測定可能。動作温度範囲は、-10℃～50℃。振動出力を周波数へ変換する信号処理回路は1チップの CMOS 専用集積回路で構成し、測定時の消費電流が 1mA 以下を達成する。</p> <p>② <u>高信頼性歪みセンサデバイスの開発</u> 精度の高いシリコン振動式歪みセンサと破壊耐力の高いシリコンピエゾ抵抗式歪みセンサを完成させる。測定感度は±10μ ε、測定範囲は±5000μ ε。使用温度範囲は-10℃～50℃。鉄骨材料、コンクリートに接合できる構造とし、振動式センサからの信号処理は加速度センサの信号処理回路と同じもの、ピエゾ抵抗式センサからの信号出力は汎用集積回路で構成する。</p> <p>③ <u>無線通信モジュールの開発</u> 無線モジュールによる測定信号の送受信検証を行い、30m以内に設けるデータ受信モジュールによる信号受信を行う。測定モジュールの最大数は、1個の受信モジュールに対して 255 個、通信時間間隔は 1 時間置きとする。周波数帯は、2.45GHz、920MHz、400MHz 帯を候補として、消費電力・設置場所の状況に応じて適切なものを選定する。</p> <p>④ <u>センサ用自立電源モジュールの開発</u> センサ及び無線モジュールの消費</p>	<p>・未実施であるが、実証試験期間中に評価する。</p> <p>シリコン振動式加速度センサデバイスを開発し、検出感度として 1/1000gal(1μG)を達成。温度範囲は同型の他センサの特性として-10℃～50℃は達成可能。信号処理回路は、他センサで開発済の CMOS 専用 IC (ASIC) で構成した。消費電流は 1.5mA(5.5V 動作時)。電源電圧を下げる設計変更で 1mA は達成可能。</p> <p>シリコン振動式歪みセンサとして、測定感度 0.1μ ε 以下を達成。測定歪み範囲は評価中。環境の温度変化による歪み変化を補償する機能を付加し、測定範囲として±1,000μ ε を達成可能。±5,000μ ε の測定範囲は、ピエゾ抵抗式センサで達成可能の見込み。振動式歪みセンサは加速度センサと同じ回路を使用。</p> <p>無線システムは、データ通信時間、伝搬距離を検討し、920MHz 帯と決定した。標準規格 ARIB STD-T108 に準拠し、最大送信電力 20mW、データ伝送速度 50kbps、チャンネル数 29。建物を想定した屋内実験で 30m以上の伝搬距離を得た。</p> <p>エネルギーハーベストおよびワイヤレス給電にて共通で使用する二次電池を選定し、-30/+25/+60℃の各温度で大電流および微小電流性能を確認した。</p>	<p>未達成</p> <p>達成</p> <p>H28 年度達成見込み 一部超過 達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>電力量の最適化を図り、想定される設置環境で収集可能なエネルギーに適した発電素子と二次電池を各種検討し、エネルギーハーベスト電源の基本構成を完成させる。更に、外部からのワイヤレス充電を可能にする為にセンサ端末のサイズに納まる形で受電コイルと受電回路を構成する。送電装置は充電作業の利便性を上げるために、可搬型とする。送電装置と受電装置間の給電可能な距離は50mm以上、1年に1回5分間程度の給電で運用可能を目標とする。</p> <p>⑤データ収集システムの開発 センサからのデータ収集を既製のデータ収集計測システムで行う。センサとの通信確認を行うために、初期は有線でのデータ送受信方法で検証を行うことも合わせ、中間最終目標では、無線通信モジュールによるデータ収集を確立する。データ解析への受け渡しとして、各センサからのデータの時間同期の確保が課題となる。</p> <p>⑥データ解析システムの開発 各ノードで測定された加速度データから外乱(地震、風、環境振動など)前に実施した常時微動測定や人力加振などで把握した周波数特性と外乱後の周波数特性の差違をセンサシステムで評価する周波数解析プログラムを開発する。</p> <p>⑦システム同定による建物の詳細な損傷評価手法の開発 システム同定アルゴリズムを利用した建物損傷評価プログラムを作成し、損傷評価システムの妥当性および有効性を検証する。</p>	<p>エネルギーハーベスト回路は、屋内向けアモルファス太陽電池(70×100mm 面積相当)、MPPT 機能付き降圧電力変換回路および二次電池で構成される。周囲照度 200lx にて充電電力は 365μW を得た。ワイヤレス給電は、本システムに最適化したプロトタイプ機を開発し、伝送距離 50～80mm にて受信電力 20W 以上が得られることを確認した。</p> <p>データ収集システムは、既製システムでは冗長また不足の能力があることが判明し、新たにシステムの開発を行った。サイトビジットでデモ実験を行い、センサからのデータを無線で受信し表示することまで達成した。センサノードの時刻同期は、無線通信モジュール内に組み込んだ GPS-1PPS 信号で行った。有線での事前検証は省略し、最初から無線通信でのシステムの検証を行った。</p> <p>加速度波形データから周波数特性のプログラムが完了した。さらに計画目標に掲げてなかった震度算出プログラムを追加し、建物の各階に設置したセンサの揺れの度合いをわかりやすく、客観的な指標で示すことを新たに組み込んだ。最終目標である時刻歴変位波形算出するプログラムの開発を前倒しで実施し完了した。</p> <p>木造軸組架構および小型模型を用いた振動台実験で得られた試験体の加速度データに逐次部分空間法を適用し、固有振動数および建物層剛性の同定精度について、従来のシステム同定法と比較した。その結果、逐次部分空間法を用いることで、従来法では評価できなかった試験体の各層の剛性の瞬間的な低下をも詳細に評価可能であることが分かった。</p>	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

### ②-1 研究開発成果の概要

#### (i) センサ端末の開発

##### ・センシング、無線機能の開発

圧電セラミック方式の振動(加速度)センサを取り付け可能な無線センサ端末の開発を行った。振動センサは、アナログ出力で 1Hz~10kHz までの周波数帯域を持つため、無線センサ端末のアナログ増幅部についても同様の周波数範囲に対応したアンプ部を実装している。アンプ部から出力された振動データは、MCU 内蔵の 12bitAD コンバータによりデジタル化される。また I2C インタフェースを有しており、MEMS 温湿度センサのデータを収集可能である。I2C インタフェースは、半導体部品の制御に使用される汎用シリアルインタフェースで、拡張性、汎用性も高いインタフェースである。デジタル化されたデータは MCU によりメモリ(SRAM)上に蓄積される。

また MCU のファームウェア処理により定期的にデータ収集が可能で、サンプリング周波数、収集周期/時間、通信設定などの設定変更、保存が可能である。これらアンプ部、MCU、メモリ部、通信部、電源部の組み合わせにより、低消費電力の無線センサ端末を実現した。

##### ・保守性向上機能の実装

920MHz 特定小電力無線経路でゲートウェイから動作パラメータとファームウェアアップデートデータを取得し反映・更新する機能を実装した。無線センサ端末はゲートウェイとの間で定期的に行われる通信の中でゲートウェイから動作モードを取得しモードに応じた動作を行う。パラメータ変更モードではゲートウェイから変更対象のパラメータと設定値を取得し反映する。ファームウェア更新モードではゲートウェイからファームウェアのアップデートデータを受信しファームウェア更新を行う。

##### ・変位センサの開発

インダクタンス検知式の変位センサを試作した。試作した変位センサの検知可能変位量は最大±50mm である。センサにて計測された変位量はデジタルデータとして I2C デジタル通信により無線センサ端末へ送信される。センサは 3 個までのデイジーチェーン接続が可能のため X 軸・Y 軸・Z 軸の 3 方向の変位データを同時に無線センサ端末側の 1 つのチャンネルで受信可能である。無線センサ端末には試作した変位センサを接続可能な物理コネクタ×1と I2C インタフェースチャンネル×1を増設した。計測データは振動データと同様に 920MHz 特定小電力無線を用いてゲートウェイへ送信される。

温度変化によるインダクタンス変動に課題があるが、試作で用いたコンデンサの容量値が 20℃付近を中心として減少することが原因と考えられるため、温度変化で容量値が変化しないコンデンサに変更し、かつ温度依存性に対しキャリブレーションを行うことで対応予定。

##### ・自立発電の開発

エネルギーハーベストについて平成 26 年度の検討結果に基づき風力発電と太陽光発電の比較を行い、道路橋での使用を想定した安全性の観点から太陽光発電を用いる方針とした。

自立発電装置の装置構成と主要構成部材の検討を行った。装置は太陽光パネルの他、充放電コントローラと蓄電媒体からなる構成であり、太陽光パネルで発生した電力は充放電コントローラを介して蓄電媒体に蓄積され、無線センサ端末へ給電される。太陽光パネルは耐久性確保の観点より温度や汚れに強く洋上ブイ等にも用いられる耐環境性に優れた製品を用い、蓄電



媒体については中程度のエネルギー密度を持ちながら充放電回数 10 万回以上と寿命が非常に長い LIC(リチウムイオンキャパシタ)を用いる計画とした。

無線センサ端末の待機時・計測時・送信時の電流量より無線センサ端末を 1 日動作させるために必要となる蓄電媒体の容量を算出した。

現時点の課題として、筐体の収容設計、実環境下での自立発電の稼働率検証、蓄電デバイスのチャージ回路の高効率化・安定化があり、平成 28 年度未完了予定である。

#### ・ 筐体の開発

無線センサ端末のサイズは目標達成の目途がしたが、無線通信と自立発電を考慮した設置性等の実運用観点から、センサ及び自立発電部は無線センサ端末本体と分離型とした。小型化のため一次電池を廃止し自立発電装置から直接給電される構成に変更したほか基盤レイアウトの工夫、実装の高密度化等により高さ 2.6cm×幅 10cm×奥行 4.8cm の筐体サイズを実現し、平成 26 年度試作より体積で約 460 立方 cm 小型化した。

筐体を耐食性アルミニウム合金ダイキャストとし塗装を施したほか、筐体内部へのパッキン設置や電源等のコネクタ類への防水対策により IP54 の防塵・防滴設計とした。

10 年以上の使用を考慮し、MTBF の長い部品を使用する設計とし、個々の部品、部材のマージン(電子部品では、電圧、電流など)を考慮し設計した。

### (ii) 無線ネットワークの開発

#### ・ 地震検知及び、検知後の動作方式検討

無線センサ端末に地震検知用センサを追加することで地震を自ら検知しデータ計測を開始する方式について検討し、実現可能であるという結論を得た。検討結果に基づいて無線センサ端末のハードウェアの設計変更を行った。

#### ・ 通信プロトコルの更新

無線センサ端末との間の通信プロトコルを更新し双方向にデータの送信を行うものとした。更新したプロトコルに基づき無線センサ端末の動作パラメータ更新機能とファームウェアアップデートデータ配信機能を実装した。また、1台のゲートウェイに最大 25 台の無線センサ端末を接続可能な設計とし、無線センサ端末のセンシング実行タイミングの同期のためにセンサ端末間の時刻同期機能を実装した。また地震時の無線センサ端末の動作及びデータ送信に関して検討し地震時動作に対応した通信プロトコルを実装した。

#### ・ プロトタイプでの動作検証(フィールド評価)

無線センサ端末とゲートウェイの試作品を道路橋(PC 橋)に簡易設置し、センシング／無線センサ端末からゲートウェイへの通信／遠隔サーバとの通信を実際に行う動作検証を実施した。無線センサ端末とゲートウェイを径間の両端に設置しセンシングしたデータが 920MHz 特定小電力無線経路でゲートウェイへ送信され遠隔サーバに蓄積されることと蓄積されたデータが分析に使用できる状態であることを確認できた。また、使用予定の太陽光パネルを持ち込み設置が想定される位置付近における出力電圧と照度の関係を調査した。

#### ・ データ圧縮機能の検討

通信時のデータ量削減方法を検討し、データ量削減(50%以下)機能を平成 28 年度未完了予定で実装中である。

- ・サーバアプリケーションの機能追加の検討

分析手法の変更に対して柔軟な対応が可能となるようデータの収集・格納・提供を行う機能部分と分析を行う機能部分を分ける設計とした。データ提供機能については外部システムとの連携も視野に入れ、Web-APIとして実装済みである。

### (iii) センサシステムのニーズ・運用・導入の検証

- ・センサシステムの設置対象橋梁

供用中の道路橋における損傷実態を把握するため、「平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集」(国総研資料第 822 号)での平成 24 年 4 月時点(対象 23,625 橋)の損傷種類別の判定区分別の橋梁数を「健全性の区分」に分けて表Ⅲ-【①-5】-1 に整理した。

表Ⅲ-【①-5】-1 損傷種類別の判定区分別橋梁数と比率

部位	材料	損傷種類	I (健全)	II (予防保全段階) III (早期措置段階)	IV (緊急措置段階)	橋梁数計
主桁	コンクリート	ひびわれ	14,573(92.1%)	1,242(7.9%)	2(0.0%)	15,817
	鋼	き裂	7,942(91.8%)	702(8.1%)	10(0.1%)	8,654
		腐食	7,208(83.3%)	1,436(16.6%)	10(0.1%)	8,654
床版	コンクリート	ひびわれ	17,891(97.4%)	469(2.6%)	2(0.0%)	18,362
	鋼	き裂	2,435(98.2%)	45(1.8%)	1(0.0%)	2,481
		腐食	2,152(86.7%)	329(13.3%)	-	2,481

- ・想定する損傷と異常検知の手法

代表的損傷は、鋼橋の主桁腐食、主桁疲労き裂、コンクリート橋の主桁ひび割れ、支承の機能障害及びコンクリート床版のひび割れである。

橋梁の定期点検結果から主桁の損傷が高いこと及び支承の移動・回転機構の損失が上部構造の損傷を招くことから、橋梁主桁の損傷検知及び支承の移動・回転機構の損失検知に着目したセンサシステムを検討した。想定する損傷に対してセンサ種別を特定し、想定する損傷検知手法を検討した。

主桁の損傷について、鋼部材の腐食・疲労き裂及びコンクリート部材の顕著なひび割れにより桁の剛性が低下し、振動特性の変化及び桁たわみ量の変化が生じる。上部構造の損傷が構造特性に与える影響を検討し、主に振動センサについて計測項目、計測範囲(周波数計測範囲、加速度検出範囲)及び計測精度(ノイズ密度)を明確化した。

センサシステム設置時には、数値解析モデルにより閾値を設定し、計測データの蓄積と統計的分析により閾値を修正する。異常検知の手順を以下に整理した。

- 計測対象橋梁について3次元FEMモデルによる健全時の振動特性(固有振動数、振動モード他)と想定される損傷での振動特性の分析
- 計測データの取得と特徴量の抽出方法の定義(ノイズの少ない計測データ、ノイズの除去)
- 計測値の温度依存性の把握と評価値の補正方法(道路橋示方書 I 共通編(平成 24 年 3 月)に準拠して基準温度を+20℃、寒冷な地域では+10℃とする。)
- 数値解析モデルによる振動特性と計測値(統計値)との比較分析とキャリブレーション手法の

## 検討

- (d) 統計的手法による「a.分布推定」「b.異常度の定義」「c.閾値の設定」の手順で閾値を設定。
- (e) 計測値の2次処理として経年的変化の把握、季節変動の把握。

### ・センサ計測精度

振動センサ及び接触型変位センサの各社仕様の比較評価を行った。

### ・センサシステムへの電源供給

センサシステムでのセンサ端末での消費電力と電源供給量が整合しなければならないため、センサ端末の振動データを無線でゲートウェイ経由にて遠隔サーバ上にデータ保存するシステムを想定して、センサ端末の構成と消費電力を検討した。

計測頻度を1時間に1回とした場合の1日当たりの消費電力については、1日当たりの計測回数=1回/1時間×24時間=24回、その他の条件を「1軸振動センサを使用」「サンプリング周波数200Hz」「センシング時間120秒」「データ送信時間38.4秒」とすると、センサ端末の平均消費電力は1日当たり約131mWhとなった。

## ②-2 本研究成果の意義(他研究開発動向との比較、優位性)

競合技術として光ファイバーセンサシステムが挙げられ、長大橋の橋梁モニタリングに適用の可能性が考えられるが、中小橋梁に適用するには相対的に導入費用・運用コストをいかに低減していくかが課題となる。

また、有線配線のセンサシステムであるため設置工事の面で、配線工事で期間を要し、工事部材等のコストが高くなる。地震等の異常時には断線のリスクもあり、橋梁の点検時・補修工事の障害となる可能性がある。

以上より、研究開発中の無線センサシステムは、これらの課題を解決するシステムとしてユーザ視点でも優位である。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b>            中間目標までに開発したセンサシステムを実環境下のフィールドに設置し、継続的な実証を実施することにより、本研究が終了する平成30年度末時点で、ユーザ機関が実施する点検作業の延長として作業員が容易に設置、導入、試行できるレベル(運用性・操作性、信頼性、安全性等)を有し、道路橋の状態を継続的に把握するセンサネットワークシステムを完成することを最終目標とする。道路橋には多くの構造形式があるが、代表的な構造形式として鋼橋及びPC橋を対象として目標達成を目指す。            また、開発するセンサシステムの販売先と、運用者を明確にし、市町村に対しても事業化可能なビジネスモデルを確立する。</p> <p><b>【基本計画】</b>            センサネットワークシステムの構築と実証実験            開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。</p>	<p>センサ端末(変位センサ、自立発電装置含む)・ゲートウェイ装置・遠隔サーバを平成 28 年度末までに開発完了見込み。            平成 29 年度からはこれらの機器を用いて実橋梁にセンサシステムを構築し、継続的なモニタリングを行い、設置・運用を評価する。            事業化についても計画策定中。</p>	<p>平成30年度末に達成の見通しである。</p>

### (4) 成果の普及

平成 28 年度下期(平成 28 年 11 月)に NEC 主催の社外向け展示会で開発中のセンサ端末の展示を予定しており、準備をすすめている。

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	0 件

## 研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

### 【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ

#### (1) 研究開発目標

コンクリート構造物に代表される道路インフラの維持管理に必要なひび割れの定量的把握および経過観察を支援するひび割れ自動検出技術およびモニタリングシステムの研究開発を行う。実施にあたっては、産総研のもつ画像解析技術および異常検出技術、合成処理技術、東北大学のもつコンクリート構造物の耐久性の調査解析および維持管理技術を技術シーズとして、提案代表者である首都高技術が道路インフラの各構造物を対象とした実験および試験体を用いた模擬経年変化実験を通じて取得したデータや技術的課題に対し課題解決型の技術開発を行う。さらに、実際の点検作業への適用を検討し、実証評価を通じて持続的に実運用可能なひび割れモニタリングシステムを実現する。

モニタリングシステムには、必要な要素技術として開発するひび割れ自動抽出技術、およびパノラマ合成技術、経年変化モニタリング技術を実装し、利用可能とする。

適用対象はコンクリート構造物を中心とした、橋梁、トンネル、舗装、付帯構造物とし、実環境にある構造物に広く適用可能な技術を目指し、開発期間中の実験データおよび解析データの蓄積に努めるとともに、効率的な技術開発を行う。

従来のコンクリート構造物を点検・調査する際に行われるひび割れ調査では、熟練した点検実施者が必要とされるうえ、定量的な評価が難しかった。しかし、ひび割れを自動で抽出することが可能になれば、測定や記録に要する労力を軽減しながら定量評価を実現することができる。また、望遠撮影や他の点検ロボット開発の成果と組み合わせることで、従来の点検・調査をより効率に実施することが可能となる。

開発システムをどこからでも利用し、結果を確認することができる運用方法を実現するために、現場等において対象構造物を撮影した画像データを、開発技術を実装したクラウドサービスに送付することで、結果が得られるよう機能やシステムを構成する。また、ひび割れ検出性能として、道路橋の主要な構造物である床版および橋台に置いて 0.2mm 幅以上のひび割れを 80%以上、橋脚、トンネル、路面等において 70%以上の精度で検出することを目標とする。

(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

① 研究開発目標の達成度

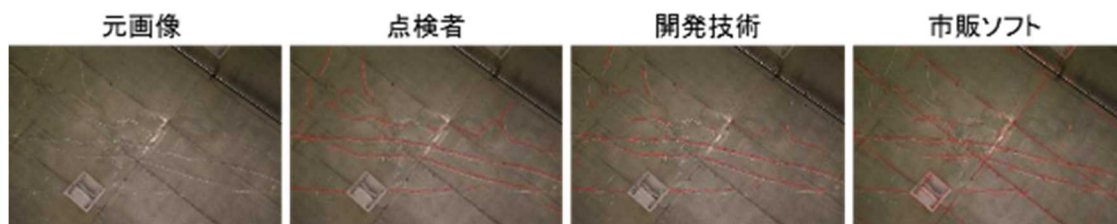
中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>①ひび割れ自動検出技術の開発 (目標:幅 0.2mm 以上のひび割れを床版、橋台で 80%以上の確率で検出する。)</p> <p>②ひび割れデータの採取と模擬試験 (目標:1,000 のひび割れ画像を取得しラベル付する。)</p> <p>③パノラマ合成技術の開発 (目標:140 m<sup>2</sup>程度の対象に対して取得した画像を 2 分以内に合成する。)</p> <p>④経年変化モニタリング技術の開発(目標:対応部分を自動検出し位置合わせする技術を開発し性能を評価する。)</p> <p>⑤モニタリングシステムの開発、性能評価および判別性能の高精度化(目標:プロトタイプを開発し、実データ数 1000 サンプルを適用し、処理速度等の性能を評価する。)</p> <p>⑥モニタリングシステムを用いた点検ワークフローの開発、実証評価(目標:モニタリングシステムの利用を想定した業務モデルを検討する。)</p>	<p>ひび割れ検出精度は 79.1%となっている。</p> <p>首都高速道路をはじめ、寒冷地、沿岸部等の道路構造物を調査し、約 4,000 枚の画像データを取得した。現在までに約 600 枚のラベル付けを完了した。</p> <p>コンクリートに適した局所特徴量抽出方法を開発し、従来接続できなかった断片画像からパノラマ合成が可能になった。現在、約 8 分の処理速度を要する。</p> <p>点検時期が異なる同一の部位について劣化や損傷の進行を検出するため、ひび割れの詳細な形状を抽出し、記録する技術を開発した。</p> <p>クラウドプラットフォーム上にひび割れ検出機能を実装したシステムにおいて、約 4,000 枚のサンプルを用いて評価を行ったところ、最も処理負荷の高いひび割れ自動検出機能において 30 秒/枚の処理性能であった。</p> <p>撮影マニュアル案の作成と、報告書として出力する際の基本様式を設計中。</p>	<p>H28 年度末 達成見込み</p> <p>H28 年度末 達成見込み</p> <p>H28 年度末 達成見込み</p> <p>H28 年度末 達成見込み</p> <p>H28 年度末 達成見込み</p> <p>H28 年度末 達成見込み</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) ひび割れ自動検出技術の開発

コンクリート表面を撮影した画像データをもとに画像解析技術によってひび割れを自動で検出し、その位置等を自動的に算出するシステムの開発を目標とした。実際の道路構造物は、長年過酷な環境下で供用されており、傷汚れや浸潤、チョークライン、補修跡などを含む様々な表面状態を呈している。また、点検現場によっては撮影条件を十分に整えられず、撮影画像のコントラストや色調などがばらつく場合も少なくない。このため、従来型の逐次的画像処理では、外乱や状態変動に十分適応させることが難しく、実際の構造物を対象にした検出では実用に足る精度が出なかった。

このため本開発では、状態変動や環境光などの外乱の影響を受けにくく高精度な検出が可能な技術として、ひび割れそのものの形状的特徴に着目した特徴抽出法および判別性能の高い学習型識別手法をもとにひび割れ自動検出技術の開発に着手し、画像データからひび割れ領域を高精度に検出する技術を確立した。これにより、床版、橋台を対象とした評価実験において、見落としと過検出の両方を考慮した評価法(適合率と再現率に関する Mean Average Precision)によって 79.1%の検出精度を実現した。本技術は、下図の例に示すように従来ひび割れの見落とし防止を重視して開発された技術より低い見落とし率である上に、過検出が非常に少ないという特徴を有する。また、開発期間中に行った点検事業者へのヒアリングで要望の高かった防水防塵小型デジタルカメラの撮影品質でも検出を可能とした。その結果、点検・調査実施者が行う計測作業に代替し得る非常に有効な技術であると考えられる。



図Ⅲ-【②-1】-1 撮影画像とひび割れ教示画像およびひび割れ検出画像

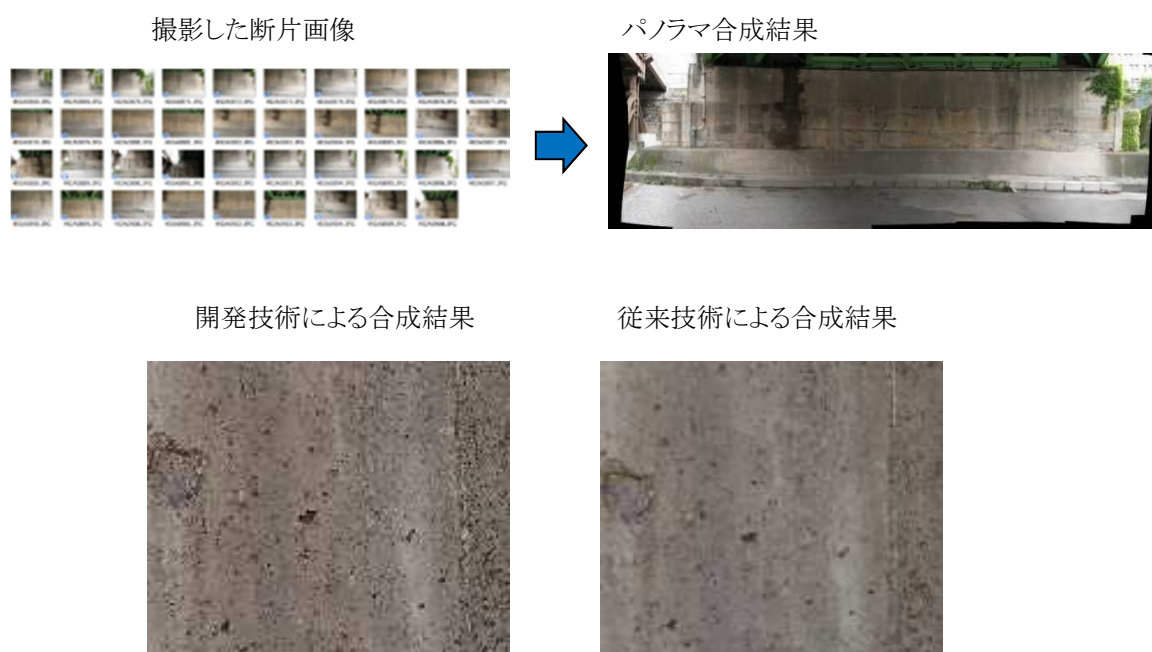
### (ii) ひび割れデータの採取と模擬試験

コンクリート構造物におけるひび割れの実態把握および客観データの収集とともに(i)のひび割れ検出技術に対する教示データとして、汚れや表面状態等に様々な変動があるひび割れ画像データを採取し、ひび割れ形状の確認および分類を首都高技術と東北大が分担して実施した。

これまで、約 4,000 枚の画像を取得し、約 600 枚においてラベル付けが完了している。また、コンクリート供試体を作成し、実際の現場では行えない条件統制実験(ひび割れ状態、汚れ、照明条件等の要因を操作しながらの実験)、および短期間では得られにくいひび割れの経年変化を模擬したデータも取得した。

### (iii) パノラマ合成技術の開発

本開発項目は現場ニーズが高い対象構造物全体を把握可能なパノラマ画像を生成するための合成技術の開発が目的である。従来のパノラマ合成では、ひずみの大きい近景画像や特徴の少ないコンクリート表面を適切に処理できず、破たんやボケが発生していた。これに対し、外観特徴を捉えにくいコンクリート面であっても局所的な特徴を多く捉えることができる特徴抽出法を開発したことにより、高精度な位置合わせを可能とした。その結果、コンクリート面でのつなぎ目において鮮明な画像が得られるようになった。現在、道路橋1スパンあたりの断片画像の処理に約8分を要している。



図Ⅲ-【②-1】-2 パノラマ合成の概要と出力比較

### (iv) 経年変化モニタリング技術の開発

点検・調査実施年度毎の同一部分のひび割れ状態の進展等の変化の有無を抽出可能とするため、データの対応部分を自動検出して比較可能とするモニタリング機能の実現を目的としている。このために、まずひび割れ自動検出の結果をもとにひび割れの詳細な形状を抽出しベクターデータとして記録する技術を開発した。これにより、異なる点検時期に取得され、撮影位置その他の条件に差がある場合でも補正することによって相互比較を可能とした。

### (v) モニタリングシステムの開発、性能評価および判別性能の高精度化

道路を構成するコンクリート構造物の欠陥や劣化状況に関する情報を収集し管理するモニタリングシステムを開発している。モニタリングシステムは、データ収集管理機能のほか、解析機能としてのひび割れ自動検出および経年変化自動検出、可視化・レポート生成機能としてのパノラマ画像合成機能および検索・閲覧・情報抽出機能を有する。これらの機能を実利用可能な性能で実現し、安定稼働させるため、クラウドプラットフォーム上に利用状況に応じてリアルタイムに増強・削減が可能な構成で実装した。モニタリングシステムの主要機能である画像データからのひび割れ自動検出機能では30秒/枚の処理速度を実現し、安定稼働に



成功している。

また、従来の人手による点検・調査作業の支援技術としてだけでなく、他機関が開発している点検用ドローンが撮影した画像データの提供を受け、ひび割れ自動検出を適用した。

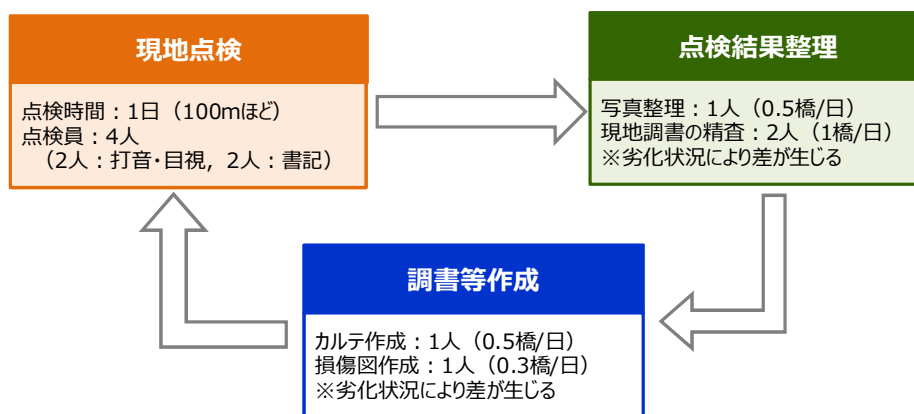


図Ⅲ-【②-1】-3 システム運用イメージ

(vi) モニタリングシステムを用いた点検ワークフローの開発、実証評価

モニタリングシステムを用いた新たな点検ワークフローを構築するため、計画、事前調査、作業要領検討、指示、実施、審査等の各工程において発生する作業や情報流通を設計・試行し、従来の作業フローと比較することでその効果や効率を明らかにすることを目標としている。さらに、点検作業に要した工程毎の時間や作業員数などの数値データをもとに効率性やリスクを評価し、改善すべき事項を明確化し、実証を重ねながら業務効率を向上させ、ガイドラインやノウハウを蓄積しドキュメント化させる。

これまで、各自治体の点検マニュアルや点検様式を取得し、整理をおこなっている。



図Ⅲ-【②-1】-4 点検の流れ(例)

(3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成 30 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>①ひび割れ自動検出技術の開発 (目標:データ10万件に対し、幅0.2mm以上のひび割れを80%以上の確率で検出)</p> <p>②ひび割れデータの採取と模擬試験 (目標:2000枚のひび割れ画像を採取してラベルづけ)</p> <p>③パノラマ合成技術の開発 (目標:断片画像を1分以内でパノラマ合成する)</p> <p>④経年変化モニタリング技術の開発 (目標:差分抽出技術および重ね合わせ機能を開発)</p> <p>⑤モニタリングシステムの開発、性能評価および判別性能の高精度化 (目標:管理運用機能を向上させ、事業適用を想定したシステム形態とする)</p> <p>⑥モニタリングシステムを用いた点検ワークフローの開発、実証評価 (目標:新たな点検ワークフローにもとづきガイドライン等を整備する)</p>	<p>ひび割れ検出精度 79.1% (目標に向けた対策:大量の画像データに対し、目標検出精度を達成するための効率的な学習システムの開発と、大量データを収集するための受け入れ態勢の整備を行う)</p> <p>約 4,000 枚の画像データ取得 約 600 枚のラベル付済(目標に向けた対策:ラベル付実施者の増加)</p> <p>特徴の少ないコンクリート表面の画像データでも合成が可能となった (目標に向けた対策:合成アルゴリズムを改良して計算リソースに最適化し、8分の処理時間を1分に短縮する)</p> <p>詳細なひび割れ形状の抽出と記録が可能となった (目標に向けた対策:ひび割れの進展等の差分を算出するための形状差分検出技術の開発)</p> <p>モニタリングシステムの試験運用中 (目標に向けた対策:実証評価に向けたシステム運用管理体制の確立)</p> <p>各自治体におけるマニュアルを取得済 (目標に向けた対策:各マニュアルを整理し、新たなワークフロー案を策定し、実証評価する。)</p>	<p>H30 年度中 達成見込み</p> <p>H29 年度中 達成見込み</p> <p>H29 年度中 達成見込み</p> <p>H30 年度前半 達成見込み</p> <p>H29 年度中 達成見込み</p> <p>H29 年度中 達成見込み</p>

#### (4) 成果の普及

事業化の対象ユーザーに向けた、研究情報の発信を目的とした対外発表を実施し、一般向けとして、研究情報が閲覧できる HP を開設した。この結果、ひび割れ自動検出技術に関する内容照会2件(高速道路事業者、鉄道事業者)、技術移転の打診1件(検査計測事業者)があった。また、展示会にも積極的に参加し、研究開発内容を PR し普及に努めた。

事業化に向けた課題抽出の目的として実施したユーザーへのヒアリングにおいても、実施前に研究開発の目的や、状況、目標を説明し、成果の普及に向けアナウンスを実施した。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	1 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	7 件

## 【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ

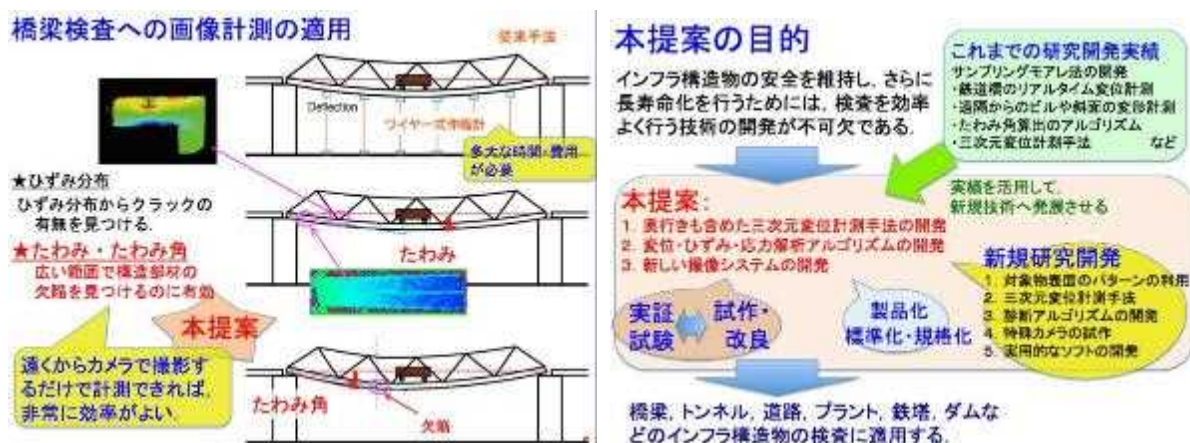
### (1) 研究開発目標

鉄道橋、道路橋をはじめ、多くのインフラ構造物の老朽化が進んでおり、効率よく点検を行う手法の開発が急務である。本研究開発では、そのようなインフラ構造物の点検を効率よく行うために、画像を用いて遠隔から撮影することにより構造物の変位やたわみ角などを計測する技術の開発を行う。図Ⅲ-【②-2】-1に橋りょう計測を例として、インフラ検査への画像計測の適用を示し、図Ⅲ-【②-2】-2に本研究の目的を図式化したものを示す。

対象とするインフラ構造物は、鉄道橋梁と一般土木構造物である。双方とも、現場では作業者が開発したカメラを設置して計測作業を行うことを想定している。現場で容易に扱える計測・検査装置の開発をめざす。

鉄道橋梁については、従来手法より精度よく変位計測が行え、さらに従来手法では計測できなかったたわみ角についても精度よく計測できるようにして、新しい管理手法の提案を行う。一般土木構造物に対しては、多くの構造物への適用実験を行うことで、サンプリングモアレ法が有効に適用できる用途と可能性について調査を行い、その用途に必要とされる計測システムを構築する。

平成28年度までの目標としては、変位 0.2mm(x,y 方向)、2mm(z 方向(奥行き方向))、たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす。また、平成30年度までの目標としては、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発し、実証試験を行うことである。



図Ⅲ-【②-2】-1 インフラ検査への画像計測の適用 図Ⅲ-【②-2】-2 研究開発の目的  
(橋りょうの例)

### (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

#### (1) 鉄道橋りょうの計測に適したサンプリングモアレカメラシステム

計測精度を向上させることによって、時系列管理に資する計測手法とした。とりわけ、変位量が極めて小さい支点部のたわみ角についても、視準距離 25mまでの範囲で計測可能であることを確認した。また、複数台で同期計測することによって、新しい桁の健全度評価に関する提案を行った。また、鉄道事業者のヒアリングも行うことができ、BP沓の回転機能の検査など、具体的なニーズを得ることができた。

#### (2) 一般土木用のサンプリングモアレカメラシステム

変位計測だけでなくたわみ角も時系列で計測できるサンプリングモアレカメラと既開発の各種センサーのデータ取得ソフトウェアを組み合わせ、一般土木用の時系列XYθ計測システムを開発した。

道路橋や風車タワー、トンネル、駅舎建物など、多数の構造物で実証試験を行った。実証試験を行うことで、ユーザー事業者のヒアリングも行うことができ、適用できる用途や現場で必要となる機能など多くの知見を得ることができた。

### (3)ソフト版のサンプリングモアレカメラ

1台のノートパソコンに複数台のカメラを接続でき、また、新しいアルゴリズムを容易に組み込むことができるように設計されている。これを用いて屋外で鉄道橋りょうや道路橋りょうで実証試験を行った。試作装置を用いることで、展示会や営業活動において市場調査を行うことができた。研究機関からの引き合いの他、建設・金属関連企業からの材料物性試験などのニーズもあることがわかった。

### (4)横長カメラ

橋りょう等の横長構造物や鉄塔等の縦長構造物に適用することができる横長カメラの第一次試作を行った。今回の試作では、撮像素子間の隙間の部分があり、飛び飛びにはあるが、8領域の計測を同時に行うことができる。実験室における梁の実験装置で変位計測試験を行った。また、隙間の部分のない横長カメラを構築する手法を提案した。

### (5)無線トリガ装置

無線を使い、離れた位置に設置したカメラに撮影スタートと1フレーム毎の同期が GPS 信号を利用することで 1ms 以内のずれで同期することができる。1次試作を用いて、屋外において数十メートルから 100 メートル離れた位置で確認実験を行った。現在、本試作をしている。

## ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【基本計画】</b> 1. 奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法の開発 2. 1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。	・3次元の変位計測手法を開発した。原理の確認実験を行い、有効性を確認した。  ・20mの構造物の場合は、2万分の1は2mmとなる。十分な精度で計測できることを橋梁等の15m以上の実構造物で確認した。	達成  達成
<b>【実施計画】</b> 1-②. 「サンプリングモアレ計測システム」として、変位0.3mm(x,y 方向)3mm(z 方向(奥行き方向)たわみ角1/5000 ラジアンをめざす。 1-③. 雨や雪などの外乱がある場合の計測できる限界値を得る。	・3次元の変位計測手法を開発した。実験室内で原理の確認実験を行った。原理の確認実験、屋外での実証試験、実構造物での適用実験を行った。  ・効率よく実験が行えるシステムを構築した。一部の気象条件で実施したが、十分なデータ取得と整理は未実施である。通常レベルの降雨では計測に支障がないことを確認した。	達成 (現場での実証は H28 達成予定)  60%. H28 達成予定.

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>2-①. 橋梁や構造物の変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向 (奥行き方向))が計測できることおよび加速度センサーやレーザー変位計等の他の計測機と 50fps 以上で同期できる.</p> <p>2-②. 格子パターンを用いない変位計測として, 橋りょうの変位 0.2mm(x,y 方向)が計測できること</p> <p>2-③. 「橋梁用診断アルゴリズムの開発」として, 50fps 以上のデータが取得できること. 精度および速度の評価を行うことができ, 実験室内で評価実験を行うことができること</p> <p>2-④. 10Hz 程度の固有振動数の計測ができるように撮影速度 50fps 以上のデータが取得できること. 精度および速度の屋外評価実験を行い, 距離 20m, 各環境条件(晴天, 曇天, 昼夜間)で精度 0.2mm で時系列データが取得できること. 距離 20m にて, 変位の時間安定度 0.2mm/H 以内. 温度安定度 0.2mm/10°C 以内(屋外, 晴天下, コンクリート地面カメラ三脚設置想定)</p> <p>3-①. 横幅の画素数 5000 画素程度の横長のカメラを試作し, 支点付近と中央部の両方を同時に計測できることをめざす. 実際のフィールドで試験を行い橋梁の支点付近と中央部の両方の変位を 200mm 角程度の領域に対して同時に 0.2mm 程度の精度で計測できること.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3次元の変位計測手法を開発した. 実験室内で原理の確認実験を行った. 離れた位置に設置したカメラ間の同期については 50fps 以上で同期については, 同期ができるトリガ信号出力装置を試作中である.</li> <li>• アルゴリズムの構築と, 実際の新幹線橋りょうを計測した画像を用いたデータ解析を行い, サンプリグモアレカメラの結果と比較した. 橋梁での実験により, 50m の距離で変位計測精度 0.5m を達成(y 方向).</li> <li>• 実際の現場で適用できるサンプリグモアレカメラを用いた計測システムを構築した. 評価実験は, 室内, 屋外とも実施した.</li> <li>• 実際の現場で適用できるサンプリグモアレカメラを用いた計測システムを構築した. 一般土木用計測システムにおいては, 多くの対象物に適用することを試している. 屋外評価実験については, ほぼ達成している.</li> <li>• 計測領域が飛び飛びではあるが, 横長カメラの試作を行い, 橋梁のような横長構造物に適用する実験を屋内で行った.</li> </ul>	<p>80%. 原理は達成(現場での実証は H28 達成予定)</p> <p>70%. アルゴリズム完成. 精度評価と改良を引き続き行う.</p> <p>達成</p> <p>90% (H28 に屋外評価実験の目標の条件について不足するデータを取得する.)</p> <p>70% (現場での適用実験 H28 予定)</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
3-②. 「三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))が計測できることをめざす.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•3次元の変位計測で用いる三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作を行った.</li> </ul>	達成(ただし、屋外での計測精度の検証は未実施である. H29 に実施予定)
4-①. 10Hz 程度の固有振動数を計測でき、50fps 以上でデータを取得できるようにする. 対照比較実験を通して、アルゴリズムの評価を行い、評価目標値を定める.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ソフト版サンプリングモアレカメラによって試作済み.</li> </ul>	70%(対照比較実験についてはH28中に実施予定)
4-②. 各機関との計測実験を通してアルゴリズムの評価を行い、②-4 で定めた精度を確認する. 中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	<ul style="list-style-type: none"> <li>•実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価を行った.</li> </ul>	50%(H28に中間目標を達成するようにする)
4-③. 「アルゴリズム評価試験用計測システムの改良」中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	<ul style="list-style-type: none"> <li>•実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価結果を元に、アルゴリズム評価試験用計測システムの改良(ソフトウェアの改良)を行った.</li> </ul>	30%(H29に中間目標を達成するようにする)
5-①. 「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•奥行き方向以外の変位とたわみ角について、実橋梁での実証試験を行った.</li> </ul>	達成. 奥行きはH28実施予定.
5-②. 稼働率 100%の安定して計測できるシステム構築をめざす. 発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす. 「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす.	<ul style="list-style-type: none"> <li>•バッテリーで撮影実験ができる装置を試作している. また、50m 程度離れていても 1ms 以内のずれで撮影の同期ができるトリガ装置の試作を行っている. 一次試作により評価を行い、改良版の本試作中である.</li> <li>「橋梁用計測システム」としては、試作を行い、x,y 方向とたわみ角については、現場での検証実験により目標値を達成した.</li> </ul>	70%(H29達成予定)
6-①. 「一般土木用計測システム」として、標点距離 80mにて、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40℃, 昼間晴天	<ul style="list-style-type: none"> <li>•一般土木用計測システムにおいては、多くの対象物に適用することを試している.</li> <li>タワー上部(標点距離 78m, 平均風速 8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続2分間)では、±10mm 前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した. バンドパスフィルタの</li> </ul>	70%. H29達成予定

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>下)を受けずに連続 1 分間の動的 (20Hz) 計測 (相対変位), 連続 24H の静的(1FPS) 計測 (絶対変位) ができること.</p> <p>6-②. 稼働率 100%の安定して計測できるシステム構築をめざす. 発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす. 「一般土木用計測システム」として, 標点距離 80mにて, 変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))を, 屋外計測現場での使用環境の影響(0~40℃, 昼間晴天下)を受けずに連続 1 分間の動的 (20Hz) 計測 (相対変位), 連続 24H の静的(1FPS) 計測 (絶対変位) ができること.</p> <p>7-①. 2 機関以上の規格を調査する. 規格の提案先を固定する.</p> <p>7-②. 日本非破壊検査協会に提案を行う. 規格化の活動を行う.</p> <p>8-①. ターゲットについて調査して, 目標仕様を設定する.</p>	<p>使用により加速度波形とも良く一致した.</p> <p>また, トンネル内での 24 時間連続計測(1FPS), 擁壁の約 1 か月間断続(昼間のみ)計測(1FPS)では X,Y 方向の 0.2mm 絶対変位が計測できた. (測量機器, ワイヤ式変位計との比較)</p> <p>・50m 程度離れていても 1ms 以内のずれで撮影の同期ができるトリガ装置の試作を行っている. 一次試作により評価を行い, 改良版の本試作中である.</p> <p>タワー上部(標点距離 78m, 平均風速 8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続 2 分間)では, ±10mm 前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した. バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した.</p> <p>また, トンネル内での 24 時間連続計測(1FPS), 擁壁の約 1 か月間断続(昼間のみ)計測(1FPS)では X,Y 方向の 0.2mm 絶対変位が計測できた. (測量機器, ワイヤ式変位計との比較)</p> <p>・日本非破壊検査協会の規格化と, 国土交通省のデータベース「NETIS」への登録について調査を行った.</p> <p>・規格化と登録の手続きについて調べた.</p> <p>・実証試験を通して検討した.</p>	<p>60%. H29 達成予定</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>70%(H28 達成予定)</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

サンプリングモアレ法を用いた回転角の計測手法については、屋外で 30 m 離れた位置から  $30 \mu$  rad の精度で微小な回転角の計測が行えた。鉄道橋においては、支点付近の回転角(たわみ角)が数千~10000  $\mu$  rad 程度であり、実際の橋りょうにおけるたわみ角の計測にも適用できることが確認できた。画像を用いてこの精度のたわみ角を計測できる手法は見当たらず、世界最高水準と言える。

この度、本計測手法が高精度で計測できる利点を活かして主にこれまで客観的・定量的評価が困難であった支承部の検査に有効な管理指標としてたわみ角を提案した。また、たわみ角が精度よく計測できることから、たわみとたわみ角の両方を使った新しい管理手法を新たに提案している。この管理手法は、これは当初想定していなかった新しい技術成果と言える。

また、サンプリングモアレ法は国内外で普及しはじめている。顕微鏡内のマイクロ構造物の変位を精度よく計測する手法として用いられ、プログラムを自作する研究者や、ソフトウェア版のサンプリングモアレカメラを購入して利用する研究者がいる。社内インフラとして製鉄所の老朽化対策としての活用について検討がされており、(一社)日本鉄鋼協会では、「適応的エリアセンシング手法を用い



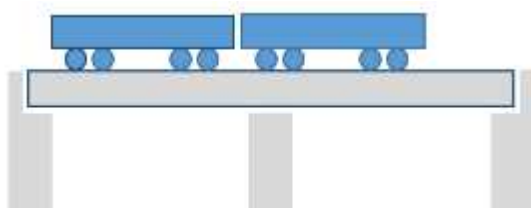
た「知能化設備異常診断」研究会が平成 28 年度に発足し、その中の画像検査手法として使われる予定で進んでいる。さらに、「i-Construction」の入力センサーのひとつとしても注目されており、サンプリングモアレ法による土構造の変位計測を含むテーマが国土交通省近畿地方整備局の「新都市社会融合創造研究会」のひとつのテーマ「3 次元データ活用に関する研究」が平成 28 年度に採択されている。このように、本プロジェクトの成果は、インフラ構造物だけでなく、多方面で広く活用されはじめている。

競合技術としては、ランダムなパターンを利用したデジタル画像相関法(DIC)がある。橋りょうなどの大型構造物の変位計測への適用もされているが、ランダムパターンを取り付ける必要がある点や、変位計測の際にキャリブレーションが必要な点などがあり、サンプリングモアレ法の方が現場での適用に取って有利である。また、最近、産業技術総合研究所と NEXCO 東日本が共同でサンプリングモアレ法を用いた高速道路橋りょうの検査技術の開発を進めて、メディアでも発表し、実用的であることを示している。基本的な技術は、和歌山大学で開発されたサンプリングモアレ法で同一である。その撮影方法等で産総研は工夫をしている。ただし、たわみ角については計測されていない。

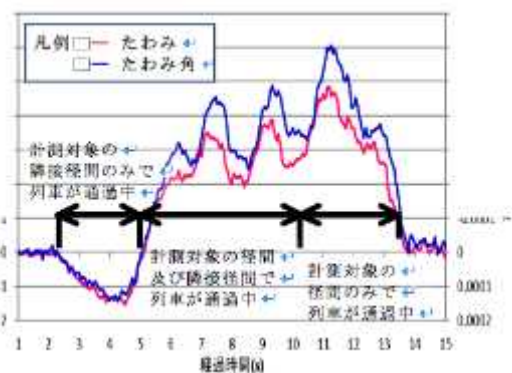
### (i) サンプリングモアレ法による変位計測システム

鉄道橋梁用と一般土木用として適用可能性の調査を行った。鉄道橋梁用としては、実際の鉄道橋梁に対して従来手法(リング式変位計など)と比較を行った。図Ⅲ-【②-2】-3 に鉄道橋梁の模式図を示し、図Ⅲ-【②-2】-4 にたわみとたわみ角をサンプリングモアレ法を使って計測した例を示す。

一般土木用としては、駅舎の列車通過時の挙動や、風車タワー動揺、道路橋梁(たわみ)、トンネル内変状計測、擁壁の変状計測などの多種の構造物に対して適用実験を行うことで有効性の確認を行っている。図Ⅲ-【②-2】-5 に風車タワーの計測の様子を示し、図Ⅲ-【②-2】-6 に小型道路橋の計測実験の様子を示す。



図Ⅲ-【②-2】-3 2径間連続桁の概念図



図Ⅲ-【②-2】-4 列車通過時の計測波形



図Ⅲ-【②-2】-5 風車タワーの計測の様子



図Ⅲ-【②-2】-6 富山県で実施した小型道路橋

### (ii) アルゴリズムの開発

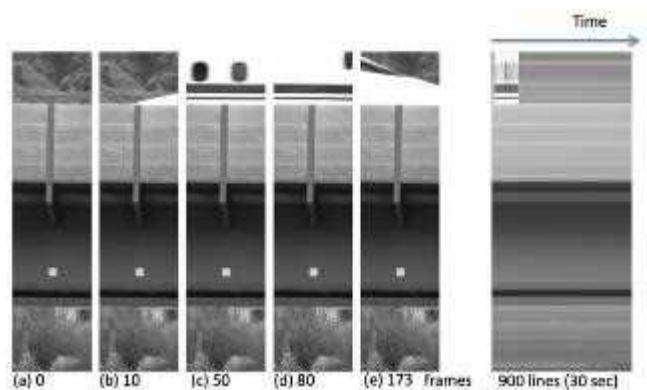
アルゴリズムの開発として、三次元変位計測アルゴリズムの開発、格子パターンを用いない変位計測アルゴリズムの開発、橋りょう用診断アルゴリズムの開発、一般土木用診断アルゴリズムの開発を行っている。

橋りょうの場合は面内の変位がほとんどであるが、風車や鉄塔等は三次元的に変位する。三次元変位計測アルゴリズムが開発できたことで、三次元的に変位する対象物の計測ができるようになる。また、既存の構造物によっては、格子パターンを取り付けることができない部位もある。格子パターンを用いない変位計測アルゴリズムは、そのような対象部位の変位が計測できるようにするための手法である。図Ⅲ-【②-2】-7 に山陽新幹線橋りょうにおける計測実験の様子を示す。撮影された時系列画像の一部を図Ⅲ-【②-2】-8 (a)～(e)に示し、時系列のライン画像を図Ⅲ-【②-2】-8(右)に示す。この時系画像からフーリエ変換を用いた解析手法により得られた変位を図Ⅲ-【②-2】-9 に示す。列車通過後 18 秒経過後の変位が平坦になっている部分の標準偏差は 0.07mm であった。また、図Ⅲ-【②-2】-10 に示すように、同時に計測したサンプリングモアレカメラによる計測結果と比較したところ、約 0.5mm 程度の違いとなり、有効な結果が得られていることが確認できた。

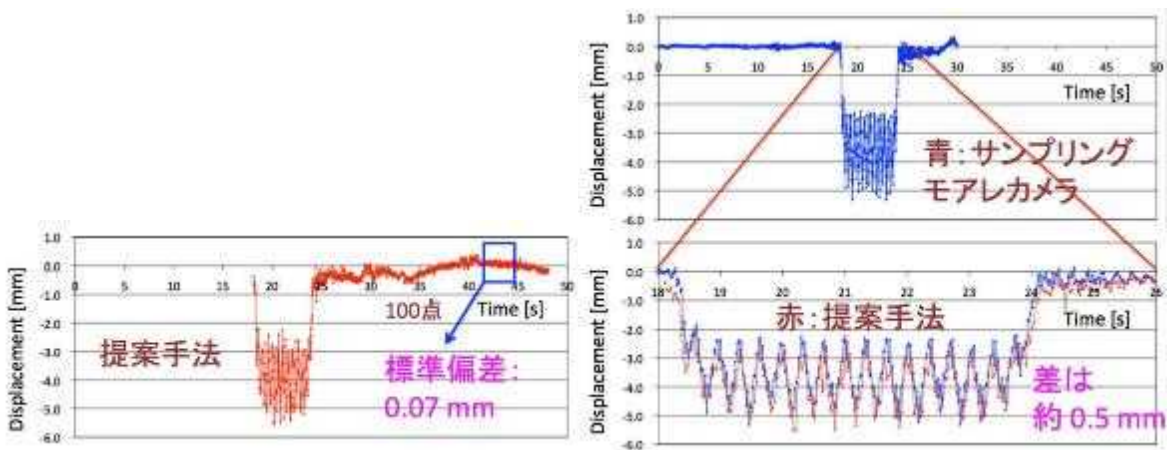
これまでに開発してきたサンプリングモアレ法を中心にして、必要な所で上記の新しいアルゴリズムを用いることで、対象物に応じて必要な計測が実現できる。



図Ⅲ-【②-2】-7 新幹線橋りょうの計測の様子



図Ⅲ-【②-2】-8 撮影画像(a)～(e)と時系列ライン画像(右)



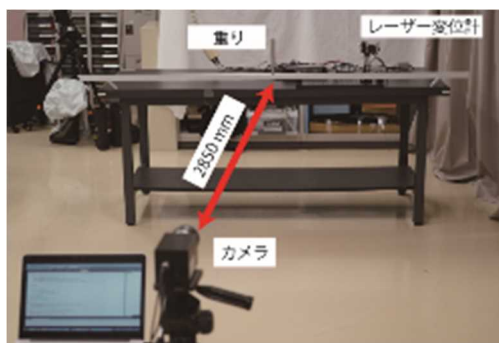
図Ⅲ-【②-2】-9 変位計測結果

図Ⅲ-【②-2】-10 サンプリングモアレ

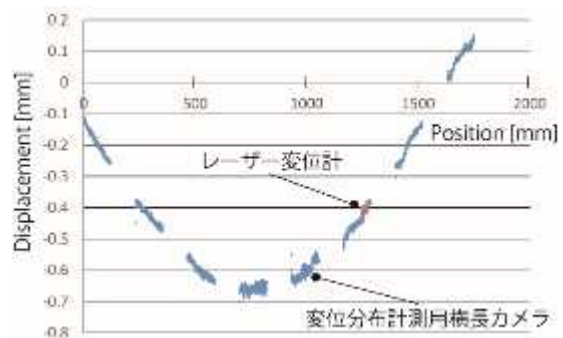
カメラによる変位計測結果との比較

(iii)ハードウェアの開発

横長カメラ、三次元変位計測用キャリブレーション装置、無線トリガ装置を開発している。横長カメラは、橋りょう等の横長構造物や鉄塔等の縦長構造物に適用することができる。図Ⅲ-【②-2】-11 に横長カメラによる計測実験の様子と600グラムの荷重をかけた時の変位計測結果の例を示す。三次元変位計測用キャリブレーション装置は、上述の三次元計測時のキャリブレーションを行うために必要となる装置である。無線トリガ装置は、無線を使い、離れた位置に設置したカメラに撮影スタートと1フレーム毎の同期をGPS信号の利用により、1ms以内のずれで同期することができる装置である。



(a)写真



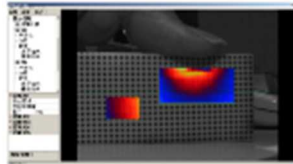
(b)図

図Ⅲ-【②-2】-11 横長カメラによる計測実験の様子と600グラムの荷重をかけた時の変位計測結果の例

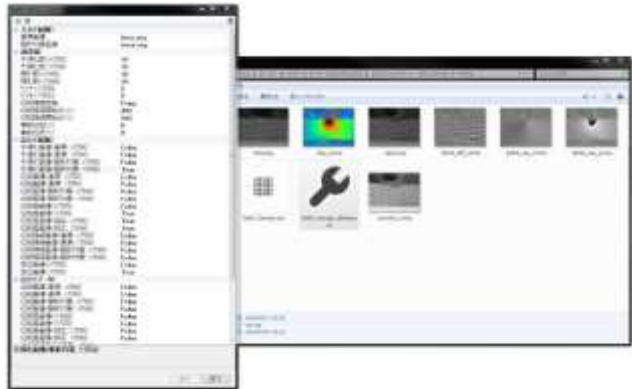
(iv)アルゴリズム評価試験用計測システムの開発

図Ⅲ-【②-2】-12 は、新しいアルゴリズムを容易に組み込むことができるように設計されたソフトウェア版のサンプリングモアレカメラの画面の様子である。

複数領域対応(領域間比較あり)



複数の領域を異なるピッチ(関引数・平滑化数)で同時に解析.



(a)変位計測デモの様子 (b)新規アルゴリズム評価用 SDK 使用の様子

図Ⅲ-【②-2】-12 ソフトウェア版のサンプリングモアレカメラ

(v) 橋梁用計測システムの開発

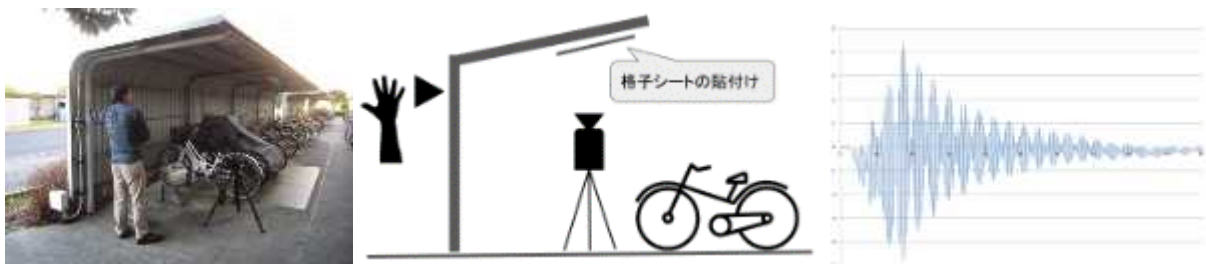
沓周辺(支承部付近)のたわみ角を計測する計測システムを開発している。実橋りょうでの計測を通して、各種外乱を低減して高精度な計測を実現した。図Ⅲ-【②-2】-13 に開発した夜間対応の同期計測システムを示す。



図Ⅲ-【②-2】-13 夜間対応の同期計測システム

(vi) 橋梁用・一般土木用計測システムの開発

仕様・設計を策定し、機器選定・見積りを行った。性能評価を行った。原画像保存による後解析評価試験用システムを開発し、屋外試験を行った。新規アルゴリズム評価用ソフトウェア開発キット(SDK)の要件抽出・設計を行った。図Ⅲ-【②-2】-14 に屋外での実験の様子と結果を示す。



(a)写真と模式図 (b)計測データの例

図Ⅲ-【②-2】-14 屋外での振動(変位)実験の様子

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【基本計画】</b></p> <p>1. 奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法の開発と実証</p> <p>2. 1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。</p> <p><b>【実施計画】</b></p> <p>2-①. 「三次元変位計測アルゴリズムの開発」として、橋梁や構造物の変位 (0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))が計測できることおよび加速度センサーやレーザー変位計等の他の計測機と 50fps 以上で同期できること</p> <p>2-②. 格子パターンを用いない変位計測として、橋りょうの変位 (0.2mm(x,y 方向)が計測できること</p> <p>2-③. 「橋梁用診断アルゴリズムの開発」として、精度および速度の評価を行うことができ、実験室内で評価実験を行うことができること</p> <p>2-④. 精度および速度の屋外評価実験を行い、距離 20m、各環境条件(晴天、曇天、昼夜間)で精度 0.2mm で時系列データが取得できること. 距離</p>	<p>・3次元の変位計測手法を開発した. 原理の確認実験を行い, 有効性を確認した.</p> <p>・20mの構造物の場合は, 2万分の1は 2mm となる. 十分な精度で計測できることを橋梁等の15m以上の実構造物で確認している.</p> <p>・3次元の変位計測手法を開発した. 実験室内で原理の確認実験を行った. 離れた位置に設置したカメラ間の同期については 50fps 以上で同期については, 同期ができるトリガ信号出力装置を試作中である.</p> <p>・アルゴリズムの構築と, 実際の新幹線橋りょうを計測した画像を用いたデータ解析を行い, サンプリングモアレカメラの結果と比較した. 橋梁での実験により, 50m の距離で変位計測精度 0.5mm を達成(y 方向).</p> <p>評価実験は, 室内, 屋外とも実施した.</p> <p>・屋外評価実験については, ほぼ達成している. 一部の気象条件で実施したが, 十分なデータ取得と整理は未実施である. 通常レベルの降雨では計測に支障がないことを確認して</p>	<p>・H29,30 に, 現場で使いやすいシステムを開発する. 現場での実証試験を行い, システムの改良を行うことで目標が達成する.</p> <p>・構造物の部分的な計測に置いては, すでに達成済み. 構造物全体の変位分布を計測するためには, 連続的に撮影できる横長カメラの試作が必要となるが, それにより実証試験が行える.</p> <p>・計測精度については, 現場での実証はH28 達成予定である. ソフト版のサンプリングモアレカメラで, 他のセンサーとの同期は H28 に完成できる. トリガ信号出力装置の第二次試作は, H28 に完成予定である.</p> <p>精度評価と改良を引き続き行う。</p> <p>達成</p> <p>屋外評価実験の目標の条件について不足するデータを取得する.</p>

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>20mにて、変位の時間安定度 0.2mm/H 以内. 温度安定度 0.2mm/10℃以内(屋外, 晴天, コンクリート地面カメラ三脚設置想定)</p> <p>3-①. 実際のフィールドで試験を行い橋梁の支点付近と中央部の両方の変位を 200mm 角程度の領域に対して同時に 0.2mm 程度の精度で計測できること.</p> <p>3-②. 「三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作」として, 変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))が計測できることをめざす.</p> <p>4-①. 対照比較実験を通して, アルゴリズムの評価を行い, 評価目標値を定める.</p> <p>4-②. 各機関との計測実験を通してアルゴリズムの評価を行い, ②-4 で定めた精度を確認する. 中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値</p> <p>4-③. 「アルゴリズム評価試験用計測システムの改良」中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値</p> <p>5-①. 「橋梁用計測システム」として, 変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす.</p>	<p>いる.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•計測領域が飛び飛びではあるが, 横長カメラの試作を行い, 橋梁のような横長構造物に適用する実験を屋内で行った.</li> <li>•3次元の変位計測で用いる三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作を行い, 室内での原理確認実験を行った.</li> <li>•ソフト版サンプリングモアレカメラによって試作済みであるが, 対照比較実験については H28 中に実施予定である.</li> <li>•実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価を行った.</li> <li>•実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価結果を元に, アルゴリズム評価試験用計測システムの改良(ソフトウェアの改良)を行った.</li> <li>•奥行き方向以外の変位とたわみ角について, 実橋梁での実証試験を行った.</li> </ul>	<p>達成の見通し</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•現場での実験を行い, 改良を加えることで目標の精度をめざす.</li> <li>•屋外での実験を行うことで, 目標の精度が得られることを確認する.</li> <li>•対照比較実験を行い, 目標値を定める.</li> <li>•共同で計測実験を行えるように各機関との調整を行い, 目標達成をめざす.</li> <li>•設定した目標を達成するように, システムの改良を進める.</li> <li>•奥行きは H28 実施予定.</li> </ul>

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>5-②. 「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000 ラジアンをめざす.</p> <p>5-③. 変位 0.1mm(x,y 方向), 1mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/20000 ラジアンをめざす. 平成 27 年までにユーザー要求を把握して仕様を決める.</p> <p>6-①. 「一般土木用計測システム」として、標点距離 80mにて、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40℃, 昼間晴天下)を受けずに連続 1 分間の動的(20Hz)計測(相対変位), 連続 24H の静的(1FPS)計測(絶対変位)ができること.</p> <p>6-②. 稼働率 100%の安定して計測できるシステム構築をめざす. 発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす. 「一般土木用計測システム」として、標点距離 80mにて、変位 0.2mm(x,y 方向), 2mm(z 方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40℃, 昼間晴天下)を受けずに連続 1 分間の動的(20Hz)計測(相対変位), 連続 24H の静的(1FPS)</p>	<p>・「橋梁用計測システム」としては、試作を行い、現場での検証実験により目標値を達成した.</p> <p>・x,y 方向の変位については、現場での適用実験で実証した. z 方向は、実験室内での検証は行った. たわみ角は、屋外での検証実験で、約 1/30000ラジアン(30<math>\mu</math>ラジアン)を達成した.</p> <p>・一般土木用計測システムにおいては、多くの対象物に適用することを試している. タワー上部(標点距離 78m, 平均風速 8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続 2 分間)では、<math>\pm 10</math>mm 前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した. バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した. また、トンネル内での 24 時間連続計測(1FPS), 擁壁の約 1 か月間断続(昼間のみ)計測(1FPS)では X,Y 方向の 0.2mm 絶対変位が計測できた. (測量機器, ワイヤ式変位計との比較)</p> <p>・50m 程度離れていても 1ms 以内のずれで撮影の同期ができるトリガ装置の試作を行っている. 一次試作により評価を行い、改良版の本試作中である. タワー上部(標点距離 78m, 平均風速 8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続 2 分間)では、<math>\pm 10</math>mm 前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した. バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した. また、トンネル内での 24 時間連続計</p>	<p>・達成しているが、現場で使いやすいシステムを構築し、現場での試験とその結果を元にした改良を行う.</p> <p>・z 方向について現場での適用実験を行う. 現場で使いやすいシステムを構築し、現場での試験とその結果を元にした改良を行う.</p> <p>・対象とする構造物をある程度絞り込み、それに合わせて目標の検証を進める.</p> <p>・H28 に第二次試作ができる. それを用いて H29 に現場で評価実験を行う予定である.</p>

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>計測(絶対変位)ができること.</p> <p>6-③. 変位 0.1mm(x,y 方向), 1mm(z 方向(奥行き方向)), たわみ角 1/20000 ラジアンをめざす.</p> <p>7-①. 鉄道橋梁を対象として既存の計測装置と比較することにより実証試験を行う.</p> <p>7-③. 鉄塔等の土木建造物を対象として実証試験を行う. ひずみゲージ等の各種センサと組み合わせ, それらと比較することで評価を行う.</p> <p>7-④. 鉄塔など土木建造物等を対象とした実証試験の結果を元にしてアルゴリズムの検討(株式会社共和電業, 4Dセンサー株式会社, 福井大学)および改良(株式会社共和電業, 4Dセンサー株式会社)を行い, さらに評価実験(株式会社共和電業)によって性能を確認することで, 目標の計測装置を開発する(株式会社共和電業, 4Dセンサー株式会社).</p> <p>8-①. 規格の提案先を固定して, 8-②において提案する.</p> <p>8-②. 規格化をする.</p>	<p>測(1FPS), 擁壁の約 1 か月間断続(昼間のみ)計測(1FPS)では X,Y 方向の 0.2mm 絶対変位が計測できた.(測量機器, ワイヤー式変位計との比較)</p> <p>・対象物によっては目標を達成している</p> <p>・一部, 前倒して実施している.</p> <p>・一部, 前倒して実施している.</p> <p>・現在, 未実施である.</p> <p>・日本非破壊検査協会の規格化については, 申請準備に入った.</p> <p>・現在, 未実施.</p>	<p>達成の見通し</p> <p>・鉄道橋りょうと同じ技術を用いるため, 鉄道橋りょうで評価と改良を行った後に, 一般土木用のシステムとしても評価実験を行う.</p> <p>・H29,30 に現場で使いやすい計測システムを試作し, 現場への適用試験を実施する.</p> <p>・H29,30 に現場で使いやすい計測システムを試作し, 現場への適用試験を実施する.</p> <p>・H29,30 に現場で使いやすい計測システムを試作し, 現場への適用試験を実施する. それを元に本項目を実施する.</p> <p>・H28,29,30 に実施予定</p> <p>・H29,30 に実施予定</p>



#### (4) 成果の普及

成果の普及として、2 件の論文発表と 27 件の発表や講演を行った。その中には、メンバー企業からの発表も多く含まれており(論文 2 件, 発表 8 件)、実用化をめざした技術開発であることを対外的にアピールする機会となっている。また、展示会への出展, 業界誌への紹介記事なども積極的に進めており、成果の普及に努めている。

一般に向けての情報発信としては、製品紹介をホームページに掲載している(共和電業, 4Dセンサー)。富山県で行った現場での実験の様子が地元テレビのニュースで放映された(共和電業)。福井大学においては、オープンキャンパスでの展示を行い、また、大学広報誌「ふくだいプレス」や産学連携関連の雑誌「テクノふくい」にも掲載した。ホームページにも研究成果を掲載している。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

知財運営委員会を8回開催し、本プロジェクトにおける知的財産取得の方針等を決めた。発明が生まれた時は、知財運営委員会で審議を行い、そこでブラッシュアップして新しいアイデアなどを加えた場合には発明者に加えて共同で出願する。

平成 28 年 8 月に格子パターンがない位置での変位計測手法について特許出願を行った。また、本プロジェクト開始前に出願していた次の発明については、早期審査請求により権利化を行った。これはサンプリングモアレ法の上位互換になる新しいアルゴリズムであり、サンプリングモアレ法よりも計算方法が単純で、さらに精度よく計測ができる手法である。

特許, 論文, 外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	1 件
2	査読有論文発表数	2 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	27 件

## 研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発

### 【全体概要】

#### (1) 平成 27 年度(事業期間前半)終了時の開発成果

本事業の中間目標については、「③(1)ロボット技術開発」では、平成 27 年度末までに概ねの研究開発を終了する、「③(2)非破壊検査装置開発」では、平成 28 年度末までに概ねの研究開発を終了することとしており、中間目標に対する現状の開発状況を以下に示す。

下表には平成 27 年度末時点のロボット及び非破壊検査装置の開発状況に関し、13の研究コンソーシアム(コンソ)について、点検・調査分野、プロトタイプ<sup>①</sup>の完成、形式等を示した。なお、「プロトタイプ」とは、現場を模擬したインフラ施設において、目標機能を検証できる機能及び性能を備えたロボット機構、駆動ソフト、操作系・検出データ整理系のシステムを有するロボット等を指している。また、備考に示す「追加採択」とは、平成 28 年度に追加採択したコンソであり、採択の条件として現場実験を開始できるプロトタイプシステムを保有していることを付していることから、(所有機)と示している。

以上の結果を踏まえ、中間目標に対して、13テーマすべてにおいてプロトタイプが完成しており、中間目標を達成していると言える。

表Ⅲ-【全体概要】-1 平成 27 年度(事業期間前半)終了時の開発成果

コンソ名	点検・調査分野	プロトタイプ <sup>①</sup> 完成	形式	備考
川田テクノロジーズ	橋梁点検	○	飛行	
ルーチェサーチ	橋梁点検	○(所有機)	飛行	追加採択
富士フイルム	橋梁点検	○	懸架	
ジビル調査設計	橋梁点検	○(所有機)	アーム	追加採択
開発設計コンサルタント	橋梁点検	○	吸着	
熊谷組	橋梁点検	○	吸着	追加採択
キュー・アイ	水中点検	○	潜水	
朝日航洋	水中点検	○(所有機)	水上航行	追加採択
国際航業	災害調査	○	飛行	
日立製作所	災害調査	○	複合	
大林組	災害調査	○	走行	
三菱重工業	災害調査	○	走行	
産業技術総合研究所	非破壊検査	○	パイプ跨座	

#### (2) 平成 28 年度の実用化開発の開始状況

中間目標以降は実用化開発及び実証実験を中心に実施することとしており、下表に現時点の状況を示す。「実用化開発の開始」とは、システムが使用されることを想定した最終目標施設に類似した施設において、実証実験を実施していることによって判断し、各コンソにおける実験場所、実施フェーズ等を示している。なお、追加採択にあつては、当該事業に参画する以前から所有する自社ロボットを用いて実証実験した場合は(所有機)と示した。

下表に示すとおり、現時点で13テーマすべてにおいて現場環境における動作実験を開始していることから、全テーマが実用化開発を開始している。

表Ⅲ-【全体概要】-2 平成 28 年度の実用化開発の開始状況

コンソ名	実施	実験場所	実験フェーズ	備考
川田テクノロジーズ	○	新鬼怒橋 他	動作実証	
ルーチェサーチ	○	福山市三曲橋 他	基本検証(所有機)	追加採択
富士フィルム	○	首都高葛西橋梁 他	実用化試験	
ジビル調査設計	○	福井市板垣橋 他	基本検証(所有機)	追加採択
開発設計コンサルタント	○	幸久橋 他	動作実証	
熊谷組	○	NEXCO中日本橋梁他	動作実証	追加採択
キュー・アイ	○	弥栄ダム、城山ダム他	実用化試験	
朝日航洋	○	新田リハーステーション他	基本検証(所有機)	追加採択
国際航業	○	富士大沢扇状地他	実用化試験	
日立製作所	○	産総研北サイト 他	動作実証	
大林組	○	雲仙普賢岳	動作実証	
三菱重工業	○	自社構内模擬環境	基本検証	
産業技術総合研究所	○	三菱レイコン大竹事業所他	動作実証	

(3)特筆すべき成果

特筆すべき成果の一例として、三菱重工業(株)による「災害調査用ロボット」を挙げる。本ロボットは、トンネル災害用ロボットとして開発され、トンネル内に引火性ガスが噴出している状況や交通事故等によりガソリンが漏れている状況下においても、発火させることなく稼働が可能なロボットである。

消防等の現場ユーザからは発火しないことの保証が求められ、これに答えるために産業安全技術協会から「防爆形式検定」を取得し、遠隔操縦可能な陸上移動ロボットとしては国内初の快挙である。本ロボットのプレス発表は、三菱重工業(株)品川本社で行われ、35社のマスコミが出席する注目度の高いものであった。今後は、本ロボットがトンネル災害のほか、引火物を取り扱う工場での災害、石油プラットフォーム等の危険箇所での活躍が期待されている。このため、実用化開発では、主にトンネル災害を想定して、ロボットの動作検証や運用についての開発を継続する予定である。

**防爆型式検定合格！**  
**陸上移動ロボットとしては国内初！**

防爆構造電気機械器具型式検定合格証	
申請者	兵庫県神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号 三菱重工業株式会社 エネルギー・機械ドメイン 原子力事業部
製造者	兵庫県神戸市兵庫区和田崎町一丁目1番1号 三菱重工業株式会社 エネルギー・機械ドメイン 原子力事業部
品名	移動ロボット
型式名称	MH1-Wa11aby-Ex
防爆構造の種類	本体 内圧防爆構造(p x) バッテリーボックス 耐圧防爆構造
対象ガス又は蒸気の爆発等級及び点火度	II B + H <sub>2</sub> T4 Gb
規格	適用基準 工場電気設備防爆指針(国際整合技術指針) JIS1000-10-40-1,2及び3:2015 バッテリーボックス リチウムイオン二次電池 製造者 三菱重工業株式会社 型式 MH1-Wa11aby-Ex 電圧 DC29.6V 容量 15Ah 入出力伝導 無線LAN 10mW/2.4GHz 最低動作圧力 3kPa
使用条件	組立防爆適合の選定については、取扱説明書を参照すること。
型式検定合格番号	第 TC22032X 号
有効期間	平成28年 7月 8日 から 平成31年 7月 7日まで 平成 年 月 日 から 平成 年 月 日まで 平成 年 月 日 から 平成 年 月 日まで 平成 年 月 日 から 平成 年 月 日まで
機械等検定範囲による型式検定に合格したことを証明する。 平成28年 7月 8日	
型式検定実施者 公益社団法人 産業安全技術協会	

**プレス発表@三菱重工品川本社(2016年07月12日)**



マスコミ出席者35社59名

**掲載:**

- ・朝日新聞、産経新聞、日経新聞 他
- ・Response(<http://response.jp/article/2016/07/13/278418.html>)
- ・NIKKEI Robotics(2016年8月10日発行 第14号) 他多数掲載

**インフラ検査・維持管理展(7月20日~22日)出展**



図Ⅲ-【全体概要】-1 三菱重工業(株)の防爆ロボットの成果

#### (4)平成 27 年度国土交通省現場検証の結果

平成 27 年度の国土交通省が実施する現場検証の結果を、12 コンソについて以下に示す。平成 27 年度の現場検証においては、平成 28 年度から開始する「試行的導入」フェーズに向けた評価を行っており、優秀なシステムは国土交通省の設定する点検現場にて実用的点検についての実験及び検証を行う予定となっている。

以下に示す「評価」については、ランクの記号が分野毎に異なり、橋梁分野ではⅠ、Ⅱ、Ⅲ評価（Ⅰが最高位）、水中及び災害分野は星の数による評価（最高位が★★★）にて示されており、参加した11コンソのうち5コンソが最高位として評価され、試行的導入に向けての実力を有すると判定されている。また、1コンソが準最高位であり、「課題の解決を前提に試行的導入に向けた検証を推奨する」と判定されている。なお、三菱重工業(株)の防爆ロボットについては、防爆検証の現場検証がなされなかったことから不参加であった。

上記のとおり、数テーマが既に高評価を得ており、その他のロボットにおいても課題の解決により達成する可能性が高いことから、多くのコンソにおいて最終目標の達成可能性が高い状況である。

表Ⅲ-【全体概要】-3 平成 27 年度国土交通省現場検証の結果

コンソ名	参加実績	評価(※)	備考
川田テクノロジーズ	○橋梁	Ⅱ	
ルーチェサーチ	○橋梁	Ⅰ	「Ⅰ 試行的導入に向けた検証を推奨する」
富士フィルム	○橋梁	要素検証	実証施設が古い設計で、稼働対象構造でなかった
ジビル調査設計	○橋梁	Ⅰ	「Ⅰ 試行的導入に向けた検証を推奨する」
開発設計コンサルタント	○橋梁	要素検証	
熊谷組	○橋梁	要素検証	
キュー・アイ	○水中	要素検証	個別評価項目は★★★並み。ただし「要素検証」として評価外
朝日航洋	○水中	★★★	河床★★★。護岸★★。
国際航業	○災害	★★★	「活用を推奨する(地形データの取得)」
日立製作所	○災害	★★★	「活用を推奨する(無人航空機による調査)」
大林組	○災害		「課題が解決されれば活用を推奨する」
三菱重工業	×		

※橋梁分野はⅠ、Ⅱ、Ⅲ評価(最高位はⅠ)、水中・災害分野は星で評価(最高位は★★★)

#### (5)最終目標に向けた課題とその解決の道筋

最終目標を達成できる可能性について、開発はおおむね順調であり、現場での実用化試験を実施しているコンソも多数あることから、達成の可能性は高いと考えられる。一方で、最終目標に向けた、課題とその解決については、以下の2点が挙げられる。

##### 1. 安全性、操作性、安定性及び耐久性の向上

システムを現場で安全確実に動作させるには、安全性、操作性、安定性及び耐久性の向上が課題であり、操作者や第三者に被害を与えることのない安全性、操作が容易で誤った操作を回避できる操作性、機械やソフトの安定性、外乱や過酷な環境に対する耐久性が求められる。これらは、プロジェクト期間後半に行う実証試験にて改良を図る予定であり、繰返しの動作実証試験を奨励し、また有識者による委員評価の機会を設けて指摘やアドバイスの機会を増やし、改良を加速させることを検討していく。

## 2. 幅広いユーザによる動作実証

実際の現場で活用するロボットシステムを開発するには、ロボットのユーザである建設コンサルタント等による実用性の評価が重要である。実用性を評価する動作実証の機会をH27及びH28年度に設定することを計画していく。

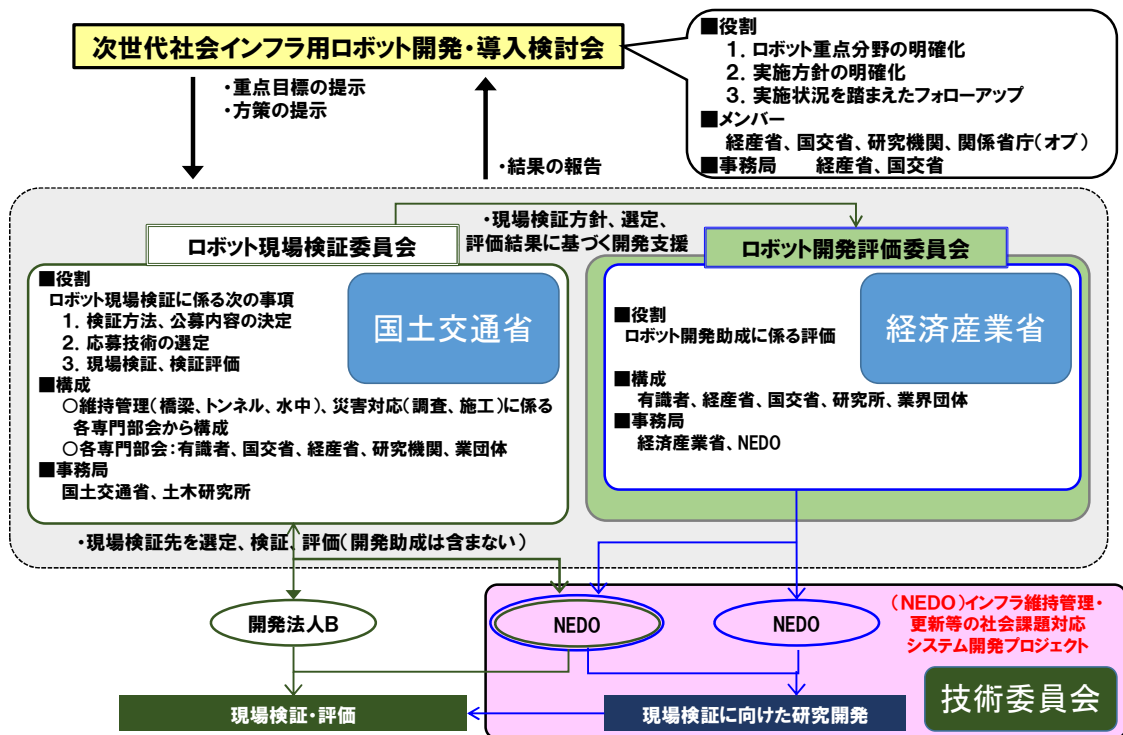
### (6) 出口指向の開発体制

本プロジェクトは国土交通省と連携した開発体制を構築しており、インフラ施設の管理者であり、維持管理の現場のニーズを知る国土交通省と深く連携しつつ、ロボットの開発力を有する経済産業省が関わることで、現場で役に立つすなわち出口指向の開発体制としている。

上部委員会である「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」では、経済産業省、国土交通省及び研究機関をメンバーとして、①ロボット重点分野の明確化、②実施方針の明確化、③実施状況を踏まえたフォローアップを担い、本委員会の下には、国土交通省の「ロボット現場検証委員会」、経済産業省の「ロボット開発評価委員会」を組織し、連携してインフラ維持管理用ロボットの開発及び評価を行っている。

「ロボット現場検証委員会」は、維持管理(橋梁、トンネル、水中)、災害対応(調査、施工)に係る各専門部会から構成され、各専門部会には有識者、国土交通省、経済産業省、研究機関及び業界団体をメンバーとしており、①検証方法、公募内容の決定、②応募技術の選定、③現場検証、検証評価の役割を担っている。一方で、「ロボット開発評価委員会」では、有識者、経済産業省、国土交通省、研究所及び業界団体を構成員とし、ロボットを開発し開発助成に係る評価を担っている。

「ロボット開発評価委員会」の決定事項に従い、実際のロボット開発する業務として本プロジェクトが位置付けられており、このような公的な体制の下で、国土交通省のニーズや評価基準、点検管理の意向に沿ったロボットを開発することにより、将来の現場導入の際に円滑にロボットが活用される体制となっている。



図Ⅲ-【全体概要】-2 国土交通省及び経済産業省との連携

実証試験に参加するユーザを以下に示す。開発したロボットを普及させるためには、開発時からロボットを活用するユーザが参加し、動作評価による課題の抽出や解決に向けての提案を行うことが重要である。本プロジェクトにおいては、開発段階からユーザの参加を促しており、大多数のコンソにユーザが参画している。なお、三菱重工業(株)の防爆ロボットについては、ユーザとなる消防が参画していないものの、綿密に連携を図っていることから△としている。

以上を踏まえ、すべてのコンソにおいてシステム導入を意識したユーザを巻き込んだ研究開発を進めていることから、成果普及を見据えた活動を行っていると言える。

表Ⅲ-【全体概要】-4 実証試験に参加するユーザの設定状況

コンソ名	ユーザの設定	実証試験に参加のユーザ
川田テクノロジーズ	○	大日本コンサルタント
ルーチェサーチ	○	建設技術研究所、広島市
富士フィルム	○	首都高技術センター、地方自治体
ジビル調査設計	○	ジビル調査設計、福井市
開発設計コンサルタント	○	電源開発
熊谷組	○	西日本高速エンジニアリング
キュー・アイ	○	ノダック、神奈川県
朝日航洋	○	朝日航洋(自社内点検部署)
国際航業	○	国際航業(自社内点検部署)
日立製作所	○	八千代エンジャリング
大林組	○	大林組(自社事業)
三菱重工業	△	消防
産業技術総合研究所	○	三菱化学

#### (7) 競合技術と比較しての優位性

本プロジェクトで開発中のロボット等と競合する技術として、①従来型のインフラ点検用機械、②他のインフラ点検ロボットが挙げられる。①従来型のインフラ点検用機械の代表例は「橋梁点検車」であり、本車両はトラック上に点検員が搭乗できるアームを設置し点検員を橋梁下部に運ぶもので、現在、比較的普及しているものである。車両が高価であることが課題として挙げられ、また点検車は大型車両であり橋上の車線に停止して作業することから、車線規制が必要となる点も大きな課題といえる。また、アームの操作には熟練者の技能が必要であり、今後の点検需要の増大に対応するためには、操作員の育成が課題となる。

一方で、本プロジェクトで開発中の橋梁点検用ロボットは、いずれも小型であり、点検時に橋上の車線を占有しないことから、交通量の多い橋梁においても交通の妨害となることがない。加えて、導入費用も橋梁点検車に比較して低減される予定である。また、ロボットの操作はコンピュータで行い自動化されているものが多いため熟練度も低く、万一の事故においても点検員や操作員が重篤な怪我をすることがない利点がある。

第2の競合技術として「他の点検ロボット」が挙げられる。特に、今年度になってドローン展やインフラ維持管理展において数社から維持管理用ロボットが発表されており、例えば、高速道路管理会社によるドローンを用いたコンクリート橋の維持管理の構想や大学による新機構のロボット試作が発表さ

れている。これらの点検ロボットに対して、本プロジェクトの橋梁点検用ロボットは、以下の2点について有意性を示すと考える。

1. 本プロジェクトは国土交通省と連携しており、開発するロボットは国土交通省直轄のインフラ施設で動作検証を行い、国土交通省の選んだ有識者により指導を受けている。また、完成度の高いロボットは「試行的導入フェーズ」に移行し、実点検現場において実用性を検証している。このように国土交通省関連の点検現場において導入可能性が高い。
2. 本プロジェクトのロボットは、国土交通省及び NEDO 技術委員が参加する各事業者設定の現場実験において、ロボット専門家やインフラ専門家、点検業者に指導を受けている。広い分野の専門家から有益な指導を受けることにより、実用化開発を加速させている。

## (8) 実用化・事業化に向けての課題とその解決方針

実用化及び事業化に向けての課題とその解決方針として、以下の3項目を挙げる。

### 1. 安全性・操作性・安定性・耐久性の向上

開発中のロボットは開発過程であることから、実際の業務で使用する際に必要な安全性、操作性、安定性及び耐久性が不足しており、プロジェクト期間後半の実用化開発において、実証試験を行いながら改良を進める予定である。

### 2. 関係省庁におけるロボットによる定期点検の許可

現在の橋梁点検は国土交通省から公開された点検要領に従って行われており、本要領には、定期点検について「近接目視」が義務付けられている。「近接目視」は、人が肉眼で近接距離から観察することと解釈され、現在では機械による撮影は含まれていない。このため、定期点検においては、ロボットによる観察のみでは要領から逸脱していると見なされかねない。このため、現状のルールでは点検員による目視を補助する、あるいは支援する業務のみで使用可能であり、例えば、記録用撮影や定期点検以外での日常点検などがこれに該当する。このため、本格的にロボットによる点検を普及させるためには、点検要領の改定が必要である。

これに対応するため、本プロジェクトでは国土交通省に協力し、ロボットによる点検実績や取得データ及び点検性能を蓄積し、ロボット点検の実用化の早期実現を目指している。

### 3. 実績と社会的認知が必要

ロボットによるインフラ維持管理業務には社会的な認知が必要である。一般的に、新しい技術に対しては抵抗感を感じる場合があり、例えば、新しい技術により職が脅かされたり、事故に繋がる危険性があると拒否観を呈する場合がある。

このため、ロボットによるインフラ維持管理について、肯定的な社会観を醸成することが重要であることから、未来を感じさせる広報活動や、社会に役に立ち人の味方になる機械であることを認知してもらうことが重要である。

また、地方自治体や道路管理者等の将来のロボット使用者に対しては、ロボットを活用した維持管理が有用であり、今後の主流であることを示していかなければならない。このためには、地道な実績作りが必要であることから、NEDO 等の推進者が実証試験場所を提供する努力を重ね、ロボット開発者と協力して実績を重ねる必要がある。今後も継続して、NEDO の地域協定や関係省庁との仲介を通じて、現場を実施者に紹介して実績を蓄積していく。また、現場での実証実験についてもできる限り公開とし、想定ユーザやマスコミへの情報開示や見学会の実施することも重要である。

## 【個別テーマ】

### 研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(i)ロボット技術開発

#### 【③-(1)-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジーズ(株)コンソ

##### (1)研究開発目標

本研究開発では、コンクリート橋及び鋼 I 桁橋の下面(床版下面、桁外面、下部工外面、支承部)の定期点検を支援するためのロボットシステム(マルコ™)を開発する。

道路橋の定期点検の現場においては、点検の担い手である建設コンサルタントの現状から、以下のようなニーズが顕在化している。

- ・点検診断の省力化、円滑化を支援する技術
- ・点検困難箇所の点検を支援する技術
- ・危険作業が伴う作業の削減を図る技術

この中で、点検診断の省力化技術に関しては、道路橋の長寿命化という施策に伴い、点検・診断が高度化する一方、熟練した点検員の不足、育成の難しさ等により、質を確保しながら全橋点検を実現することが課題となっている。これに対し、健全度、コメント、損傷写真という従来の点検結果に加え、より多くの客観的情報を取得してメンテナンスサイクルに流通させることができれば、熟練した点検員の不足を補うことができる。特に地方公共団体の管理する道路橋に関しては、健全度の最小評価単位が部材ごとであること、損傷図の作成が求められていないこと、代表的な損傷写真の記録に留められていることなどから、補修設計や工事に向けた情報としては不足しており、点検の後工程の作業効率の向上を妨げる要因となっている。従って国の点検要領で定められた点検を妨げることなく、それに加えて客観的かつ網羅的なデータを点検時に短時間に手間をかけずに取得するシステムがあれば、橋梁の維持管理現場にとっては非常に有用なツールとなる。

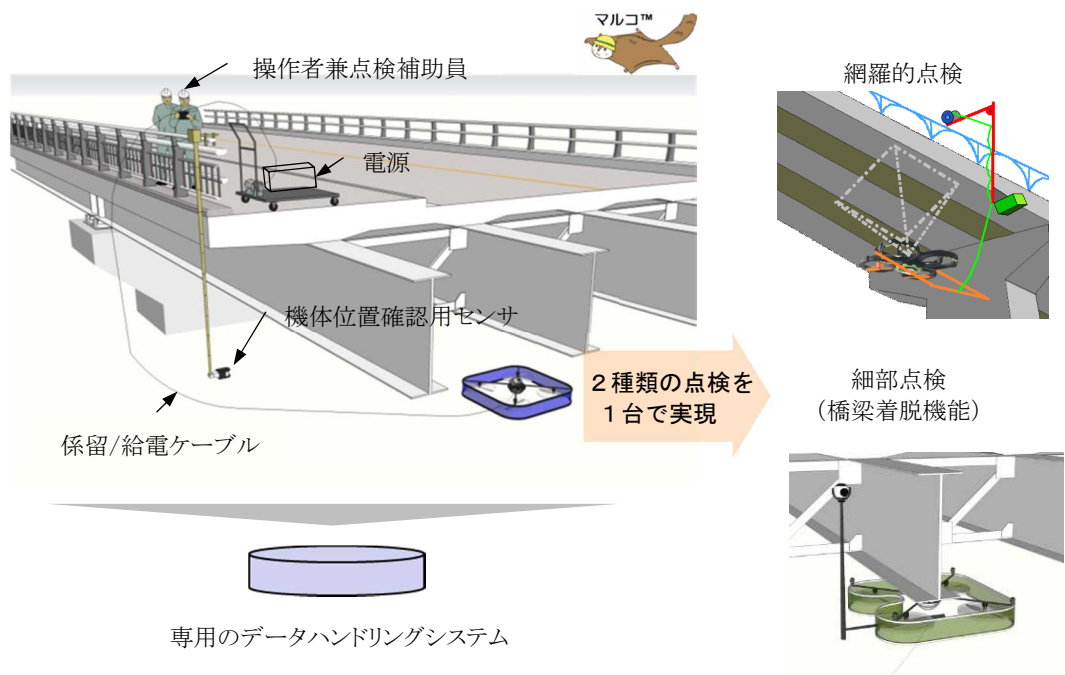
次に、点検困難箇所を点検する技術に関しては、高橋脚を有する橋梁や幅員の大きな橋梁の点検に対してロボットによる省力化が望まれている。現状このような橋は、橋梁点検車やロープアクセスによる点検が行われているが、機材数や特殊技能者の数、コストに課題を抱えている。特にロープアクセスによる点検は大きな危険を伴う作業であるため、作業を支援する技術の開発は、危険作業の削減という観点からも、ロボット技術の適用に対して大きな期待がある。

このようなニーズに対し、本研究開発では、マルチコプタを利用した橋梁点検システムを実用化することで課題の解決を図る。マルチコプタの特徴はその機動性にある。この飛行体は比較的簡単に空中を移動することができるため、アクセス性の悪い橋梁点検に対してはメリットが非常に大きい。一方で、橋梁下面はGPSの取得が困難かつ、風の強い環境であるため、操縦に一定の技量を要するという課題を抱えている。本研究開発において我々は、マルチコプタを橋梁点検に適用する際に発生する上記の技術課題の解決を図り、且つ橋梁点検に適したシステムにまとめ上げることで、装置の実用化、事業化への目途をつける。

本研究開発で開発するシステムの内容は以下の通りである。

- ・橋梁下面を網羅的に飛行し均質な画像を取得する。
- ・高度な操縦技術を要しない(短時間の講習での運用。)
- ・交通規制を実施せずに橋上から運用可能。
- ・少人数での運用が可能(最大3名での運用。)
- ・飛行準備と撤収を短時間でできる(併せて30分以内。)
- ・実用に供する耐久性を確保。
- ・得られた画像は3次元化するとともに、開発する処理システムにより、画像のハンドリングを容易にする。
- ・構造の複雑な鋼I桁橋に対しては、橋梁着脱機能を有するモジュールを搭載して近接画像を取得する。





- ・ 橋上から歩道の一部のみを使用して運用。
- ・ 橋下からの運用にも応用可能。
- ・ 点検車や高所作業車からの運用に対しても適用可能。

図Ⅲ-【③-(1)-1】-1 システムのイメージ図

図Ⅲ-【③-(1)-1】-1 にシステムの運用イメージを示す。

実用化する橋梁点検用マルチコプタの運用シナリオは以下の通りである。

- ・ 装置を利用する場面: 主として定期点検時。
- ・ 運用方法: 交通規制することなく、橋上からの間接目視と位置情報のみで飛行体を操縦し、床板及び橋桁の画像を網羅的に撮影する。得られたデータは3次元化処理を行うとともに、開発する画像ハンドリングシステムによって2時間以内に橋梁全体の画像をまとめる。
- ・ 目標とする画像取得性能: 5分/100m<sup>2</sup>、網羅率 100%、健全性の診断において、「要補修(一般に健全度Ⅲ)」レベルの損傷の状況や寸法を認識可能な画像精度。
- ・ 鋼橋に対しては、橋梁に磁着して安定した状態でカメラを対象に近接させ、画像を取得する。桁下から点検できない箇所の点検をピンポイントで行う。
- ・ 目標とする効果: これまで記録に残されていない情報を画像データとして記録することで、メンテナンスサイクル全体での作業の削減を図り、かつ橋梁の経年変化を把握するための客観的資料として活用するという付加価値を創出する。

(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

① 研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
【実施計画】 「ロボット現場検証委員会」の検証評価の下、従来の作業員による点	H26,H27 年度に実施された国交省実証試験に参加し、鋼橋、コンクリート橋の両方について、開発したシステムを用いて点検作業を行い、点検・調書作成の一連の作業を試	H28 年度未達成 見込み

<p>検や重機を用いた作業と同程度のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発する。</p>	<p>行した。検証の結果、調査作成の支援・作成、アクセス性、効率、安全確保については、○の判定を得ることができた。一方で、ひび割れの認識率には課題を残した。総合的に、「課題の解決を前提に試行的導入に向けた検証を推奨する」という評価を得た。</p>	
<p><b>【実施計画】</b> 網羅的画像取得と細部点検をモジュールの交換で実現できるマルチコプタシステムを設計・製作し、評価する。</p>	<p>これまでに、網羅的画像取得用マルチコプタと橋梁着脱型マルチコプタを別々に開発し、それらの機能、性能を実証試験(H26,27 国交省実証試験、独自実証試験)にて評価し、課題を抽出した。これらの課題を解決するための技術開発を H28 年度中に実施し、網羅的画像取得と橋梁脱着機能による細部点検をモジュールの交換により 1 台で可能とする機体を製作、評価する。</p>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>
<p><b>【実施計画】</b> 機体の操縦を容易にするためのマルチコプタ制御技術を開発し評価する。</p>	<p>機体の操縦を容易にするための制御技術として、外乱抑制技術、衝突回避技術、機体の位置認識技術の開発を行った。外乱抑制技術については、H26,27 の国交省実証試験にてデモンストレーションを行い、有効性を示した。衝突回避技術、機体の位置認識技術については、独自サイトでの実証試験を行い、開発した技術の検証を行った。H28 年度中に実環境に耐えうる機体制御技術として改良を重ねる。</p>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>
<p><b>【実施計画】</b> 運用に必要な周辺機器を開発するとともに全システムを統合し、運用性の評価を行う。</p>	<p>橋上からの安全な運用を目標に、有線給電等の機体係留システム、機体位置計測センサ、装置の操作インタフェースを開発し、実証試験(H26,27 国交省実証試験、独自実証試験)にて評価した。運用性、安全性に関するユーザからのニーズを取り入れ、H28 度中に統合システムを完成させ、評価する。</p>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>
<p><b>【実施計画】</b> 画像データハンドリングシステムの仕様抽出</p>	<p>実証試験(H27 国交省実証試験、独自実証試験)で得られたデータをもとに、データをハンドリングする際の課題を抽出した。特に、大容量のデータの取り扱い、データの位置特定に課題があることが分かった。H28 年度中にこれらの課題に対応できるソフトウェアの仕様として取りまとめる。</p>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) 橋梁点検用マルチコプタの開発

網羅的画像取得機能と細部点検機能(橋梁着脱機能)の開発を別々の機体を用いて行い、機

能・性能に関する評価を行った。

図Ⅲ-【③-(1)-1】-2, 図Ⅲ-【③-(1)-1】-3 に開発したマルチコプタシステムの外観を示す。



図Ⅲ-【③-(1)-1】-2 網羅的画像取得用マルチコプタ



図Ⅲ-【③-(1)-1】-3 橋梁着脱型マルチコプタ

これらの機体を用いてH26,27年度国交省実証試験の他、計4回の独自サイトでの実証試験を行い、画像取得性、画像の鮮明度、運用性、安全性に関する評価を実施した。図Ⅲ-【③-(1)-1】-4, 図Ⅲ-【③-(1)-1】-5にH27年度に国交省実証試験で得られた画像を示す。



撮影写真から3次元化した橋梁モデル



図Ⅲ-【③-(1)-1】-4 高精細画像取得用マルチコプタが取得した画像



図Ⅲ-【③-(1)-1】-5 高精細画像取得用マルチコプタが取得した画像

H28年度は、これらの機能を統合し、1台の機体で網羅的画像取得と細部点検を可能とする装置の開発を行う。

本装置は下記の特長を有している。

- ・橋上から一部のみの歩道の占有で運用可能なため、大規模な交通規制を必要としない。
- ・係留用リールを用いて安全索で係留して運用するため、機体飛散等の危険性が少ない。
- ・多用途機とすることで、定期点検だけでなく、災害時の調査等への適用も可能とする。装置の利用場面を広めることで、導入メリットを増やす。

## (ii) 機体制御技術の開発

橋梁下面はGPS電波の受信が困難な環境であるため、マルチコプタの運用には一定の技量が必要である。そこで、本開発では、位置認識を実現する技術、障害物への接触回避制御技術、外乱に対して高応答に反応して機体を安定させる外乱抑制制御技術を開発し、簡便な操縦の実現を図る。

このうち、外乱抑制技術と接触回避制御については制御機能を機体の実装し、屋外での実証試験を行い、最大10m/sの風速においても橋梁との接触を回避し、突風等の外乱にも対応できることを確認した。

機体の位置を認識する制御技術については、外部カメラを用いて機体の位置を同定し、機体を誘導するシステムを開発し、屋外での評価試験を行った。この方法の課題として、距離や環境光に起因する運用範囲についての制約があることが分かった。そこで、機体にカメラを設置し、地上に特殊なマーカーを配置して、それを認識することで、機体の位置を算出する方法を新たに考案し、実装中である。H28年度中に機体への実装し評価を行うことを目標としている。

本開発は以下の点において意義がある。

- ・橋梁点検にマルチコプタを利用する上での最大の障害は、橋梁下面がGPSの取得困難な環境下であるということである。他の研究では、外界をレーザでスキャンしたり、大量の画像情報を処理することで機体の自己位置を同定する技術の開発例があるが、システムの規模が大きくなることや、位置同定の確実性に課題があり、実用化には至っていない。本プロジェクトで開発する技術は、物理的な適用範囲が限定されるものの、確実にかつ容易に機体の位置取得を行えるという点に特徴があり、実用化すれば、マルチコプタの利用拡大に大きな一歩となる。
- ・さらに、位置情報の確実な取得が可能になれば、点検画像の位置情報を知ることができるため、画像データの後処理を容易にするという観点から大きな効果がある。

## (iii) データハンドリングシステムの開発

本研究開発では、点検員が調書を作成する際に、画像のハンドリングの手間を削減するためのシステムの仕様を検討した。これまでに、橋梁着脱型マルチコプタと網羅的画像取得用マルチコプタを用いた実証試験から得られたデータを効率的に処理するためのソフトウェア機能について検討し、一部試作を行った。

まず、橋梁脱着型マルチコプタにより取得した画像の処理に関しては、機体の位置、方向、アームの位置から順運動学を用いて画像を取得した際のカメラの方向を算出し、橋梁図面上に図示するプログラムを作成した。

次に、高精細画像取得用マルチコプタにより取得した画像の処理に関しては、画像のハンドリング性を向上させるシステムの仕様検討を行った。まず、実証試験で取得したデータを用いて画像のハンドリングの手間となる要素を抽出した。その結果、3次元化されたデータとオリジナルの平面画像との関連付けの方法に課題があることが分かった。そこで、その対策となる機能を明確にし、必要機能をまとめた。

マルチコプタで取得するデータは、客観的データの取得という目的からもできるだけ高精細なものが望まれる。そのためデータ量は膨大となる。これらのデータをコンピュータの処理時間を要せずに整理できるシステムは、メンテナンスサイクル全体で点検データを有効利用するという観点からも必要不可欠な機能であると考えている。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び今後の取組み	達成の見通し
<p>網羅的画像取得と細部画像取得(橋梁着脱)をモジュールの交換によって可能とする橋梁点検用マルチコプタを実用化する。</p> <p>本システムは交通規制することなく、橋上からの間接目視と位置情報のみで飛行体を操縦し、床版及び橋桁の画像を撮影する。得られたデータは3次元化処理を行うとともに、開発する画像ハンドリングシステムによって橋梁全体の画像をまとめる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・網羅的画像取得用モジュールの設計終了。</li> <li>・細部画像取得(橋梁脱着)モジュールの構想設計終了</li> <li>・マルチコプタ本体の基本設計終了</li> <li>・機体位置認識技術の基本仕様検討終了</li> <li>・外乱抑制技術、接触回避制御技術開発終了</li> <li>・外部給電装置、係留装置の基本設計終了</li> <li>・画像ハンドリングシステムの要求機能設定終了</li> <li>・初期試作品を用いた実証試験、用途開発を行い、運用上の問題点や効果の出る使用方法の検討を実施。</li> </ul>	<p>当初計画しているシステムを達成できる見通しである。</p>

### (4) 成果の普及

ロボット技術関連、橋梁点検関連の展示会に積極的に開発品を出展している。また、関連する学会や雑誌への投稿も積極的に行っている。これらの対外発表を通して、開発品をアピールすることで、ポテンシャルユーザへの認知、開発に対するフィードバックのための意見収集に努めている。

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	1 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	10 件

### 【③-(1)-2】 小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ

#### (1) 研究開発目標

3年前から小型無人ヘリを用いた構造物点検に取り組んでおり、実存する橋梁で点検を試みる一方で、公的機関での評価を受けるため、国土交通省が公募する橋梁点検の現場検証に参画してきた。

平成27年度の現場検証結果の評価として、総合評価は最上位ランクIを得たが、0.2m以上のひび割れ検出率に着目する61%と判定された。この検出率を最終的に90%までアップすることを研究開発目標として定めた。検出率を改善するための要素として、高画質の画像撮影と確実な検出技術確立が必要となる。このうち、前者に関係する撮影機材の選択と撮影手順の工夫はほぼ技術が固まっており、今年度は安定した飛行を実現するために、①プロペラガード、②可変ピッチプロペラに新たに取組んでいる。また、③合成画像作成技術も検出率向上や効率化に寄与すると考え、半自動化や汎用ソフト活用にも取り組んでいる。

#### (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

ヘリコプター型の点検ロボットにデジタルカメラを搭載し、橋梁等の構造物の損傷状況を撮影することで、足場や高所作業車を使用することなく、安全かつ容易に構造物全体の健全度を把握できるシステムが研究開発対象である。



図Ⅲ- 【③-(1)-2】 -1 点検ロボット



図Ⅲ- 【③-(1)-2】 -2 制御・モニター



図Ⅲ- 【③-(1)-2】 -3 国土交通省の現場検証

表Ⅲ- 【③-(1)-2】 -1 機体の主な仕様

項目	仕様
機体重量	8kg(カメラを含む)
外形寸法	950x950x400mm
飛行時間	20分(リチウムポリマー電池)
耐風	10m/s
カメラ解像度	4,240万画素

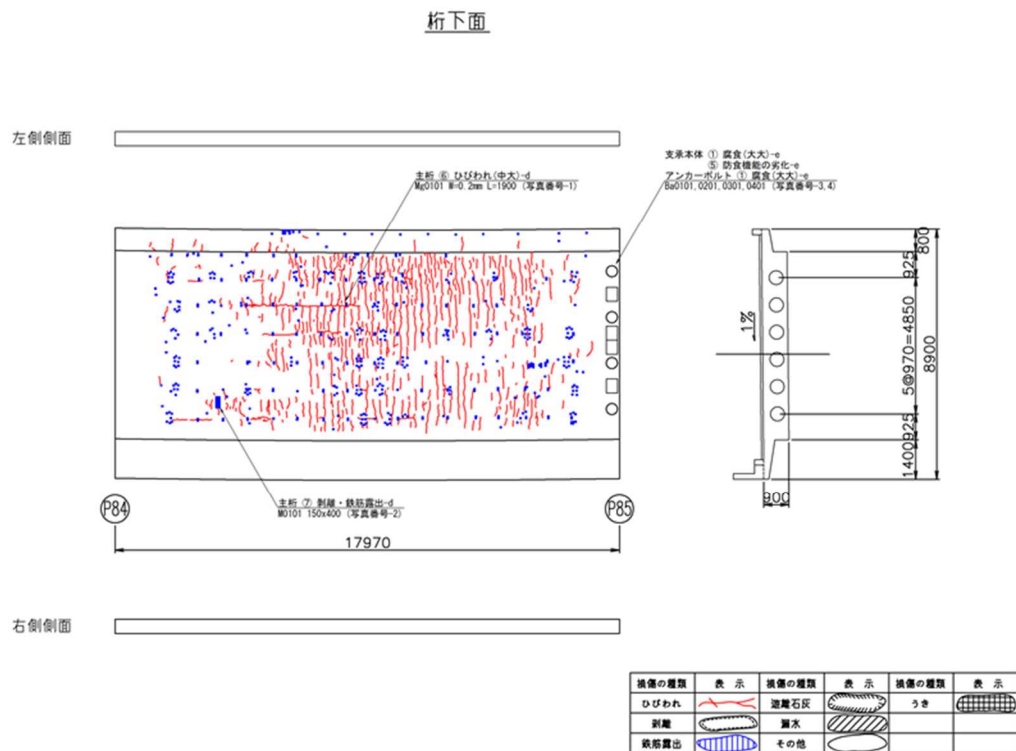
自社にて性能・能力を確認するとともに、国土交通省の「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進 橋梁維持管理技術」の公募に、平成26年度、平成27年度およびこれに先立つ予備的な平成25年度と連続して応募した。平成27年度の検証結果、評価の最上位である

表Ⅲ- 【③-(1)-2】 -2 現場実証場所一覧

	実施場所	年月日	備考
1.	新浅川橋(八王子市)	平成25年11月	非合成板桁橋
2.	浜名大橋(浜松市)	平成26年10月	PC箱桁橋
	新浅川橋(八王子市)	平成26年11月	非合成板桁橋
3.	蒲原高架橋(静岡市)	平成27年10月	PC中空床版橋

「Ⅰ：試行的導入に向けた検証を推奨する」と判定された。細部に関しては、安定した飛行と画像取得技術は一定の評価を受けたが、飛行体の安定性が高いものの操縦者の技量に依存する部分が多いとの指摘もあり、安全性の面からも改善を図ることが望まれると付記された。今後の研究開発のために入手した個別評価表では、損傷の検出率を高めることも重要であると記載されており、この点も課題であると認識した。下図は、提出したロボット点検による損傷抽出図を示す。

蒲原高架橋下り  
第85径間



図Ⅲ-【③-(1)-2】-4 平成27年度現場検証、蒲原高架橋の損傷図

## ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【実施計画】</b>  <b>【目標機能・性能】</b>                      0.2mm幅のひび割れに対し、平成28年度は75%以上とする</p>	<p>平成27年度の検出率61%の算出根拠を、今後の参考のために具体的に入手し、分析を行った。高画質の画像撮影のために、①撮影機材の選択、②撮影手順の工夫、③安定した飛行、④撮影時間の余裕、などが要素として重要であり、①と②はほぼ技術が定着してきたが、③は改善の余地があり、「プロペラガード」と「可変ピッチプロペラ」を改善項目として選択した。また、確実な損傷箇所検出技術向上も検討していく。</p> <p>国土交通省の現場検証という同じ土俵で、改善後の評価を受けるべく参加を視野に入れている。</p>	H28年度末 達成 見込み
<p><b>【運用目標】</b>                      コンクリート箱桁橋を対象とし、点検員を支援して損傷図作成までの作業時間合計を平成28年度10%削減させる。</p>	<p>技術面で目標に達成するとともに、効率的に一連の作業を進める必要を認識している。改善するための要素として、①現場での撮影、②合成画像の作成、③構造物点検調書の作成、④高画質ビューアーで確認、を考えている。それぞれの作業ステージで効率化を図る必要があるが、特に②のステージで、「半自動化」と「汎用ソフト活用」を具体的に検討していく方針を固めた。</p>	H28年度末 達成 見込み

## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) プロペラガードの装着

機体にプロペラガードを装着することで、構造物に接近することができ、操縦者の不安軽減などの効果も期待できる。これまでは、風への抵抗とバッテリー消費、輸送サイズアップなどから装着することに消極的であったが、一方ロボット開発の関係者の中には、第三者への安全・安心を疎かにしてはならないという意見もあり、方針を見直して取り組んでいく。また、実用化や事業化のためにも必要な措置であると認識している。



図Ⅲ-【③-(1)-2】-5 プロペラガード装着図



## (ii) 可変ピッチプロペラの開発

現在市場に出回っているマルチコプターは、プロペラの角度が一定で、回転数で機体制御している固定ピッチが大半である。この場合、上昇時はともかく下降時に機体が不安定になりやすい傾向がある。自由落下に近い性状となり、下降時や突風に対して姿勢が乱れ、操縦者に不安感を与えることもある。飛行時にプロペラの角度を変えるなどの操作が可能になれば、これらを解消する可能性がある。



図Ⅲ-【③-(1)-2】-6 可変ピッチプロペラ



図Ⅲ-【③-(1)-2】-7 拡大図

## (iii) 合成画像作成に半自動化、汎用ソフト活用

橋梁点検の際、照度不足の場合は撮影条件を幾つか用意し、風による飛行不安定さに配慮、またラップ率を確保するなど、取得した画像枚数は数百枚以上となる。これらから全体を合成画像とする作業に手を取られ、またここでの作業が損傷個所の抽出の鍵となる。半自動化、汎用ソフト活用が、技術面でも運用面でも重要となる。

## (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成29年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> <b>【目標機能・性能】</b> 0.2mm 幅のひび割れに対し、平成29年度は90%以上とする	高画質の画像撮影のために、①撮影機材の選択、②撮影手順の工夫、③安定した飛行、④撮影時間の余裕、などが要素として重要であり、この中から③の解決策として、「プロペラガード」と「可変ピッチプロペラ」を改善項目として選択し、引き続き実現に向けて推進する。また、確実な損傷個所検出技術として、合成画像作成のステージで、半自動化か汎用ソフト活用の何れかに方向を見極める。 国土交通省の現場検証という同じ土俵で、改善後の評価を受けるべく参加を視野に入れている。	「プロペラガード装着」については、実現可能の見通しである。 「可変ピッチ」に関しても、模型飛行機分野では実現しており可能と考えている。但し、マルチコプターで採用するにあたり、構造・操縦性・バッテリー消費などを総合的に判断し、実用化へは慎重にのぞむ。

最終目標 (平成29年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【運用目標】</b> コンクリート箱桁橋を対象とし、点検員を支援して損傷図作成までの作業時間合計を平成28年度20%削減させる。	技術面で目標に達成するとともに、効率的に一連の作業を進める必要を認識している。改善するための要素として、①現場での撮影、②合成画像の作成、③構造物点検調書の作成、④高画質ビューアーで確認、を考えている。	作業時間削減については、実現可能の見通しである。

#### (4) 成果の普及

国土交通省の現場検証評価結果について、第16回建設ロボットシンポジウム（土木学会・日本建築学会・日本ロボット学会・先端建設技術センター・日本建設機械施工協会・日本ロボット工業会）に論文を提出し、査読後採択された。また、日本ロボット学会誌 34巻8号の「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」の解説記事、および計測自動制御学会誌2017年1月号「マルチコプター特集号」に橋梁点検ロボットの原稿の要請を受け、投稿した。

無人ヘリコプターおよび写真測量、写真撮影、レーザ計測などの普及を図る目的で、日本写真測量学会をはじめとする展示会に毎年4、5回出展している。その開催場所は、地元広島だけでなく、関東・関西・東北と広範囲にわたっている。

また昨今、無人ヘリの安全飛行が重要な課題となっている中、広島県で「小型無人機（UAV）適正活用促進協議会」設立に参画し、講演会や無人ヘリ講習会の講師派遣などで主催団体に全面協力している。この協議会での実技講習は、昨年11月と今年7月の2回開催された。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数（平成28年8月末現在）

	件名	件数
1	特許出願件数	1件
2	査読有論文発表数	1件
3	査読無論文発表数	0件
4	外部発表	12件

### 【③-(1)-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フイルム(株)コンソ

#### (1) 研究開発目標

日本国内において建設後 50 年を超える橋梁 (2m 以上) の割合は、約 20 年後の平成 44 年には 65% に達する。橋梁等の社会インフラ維持は自治体の点検作業を増大させ、①費用、②点検技術を有する人的資源の不足から点検の質の維持が懸念されている。このような状況の中、日本再興戦略「安全・便利で経済的な次世代インフラの構築」が閣議決定後に策定され、センサーやロボットの開発が本課題解決の為に期待されている。さらに 2015 年 1 月 23 日に経産省が「ロボット新戦略」(ロボット革命実現会議とりまとめ) を公表、この中で 2020 年に目指すべき姿として、「国内の重要・老朽化インフラの 20% はセンサー、ロボット、非破壊検査技術等の活用により点検・補修を高効率化する」ことが示された。

このような社会状況に鑑み、本研究開発の目的は、成果物であるロボットシステムの導入により地方自治体の橋梁インフラ維持・管理に於ける①コスト削減、および②技術者不足を解決すること、具体的には、『点検に伴う交通規制の緩和、作業員の安全性確保、肉体的負担の軽減』とする。

この目的を達成するため、本研究開発では道路橋のうち鋼橋を対象とした「桁の腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化」について、点検要領に基づく近接目視の代替または支援ができるロボットシステムを開発する。具体的な開発目標は、当コンソーシアムメンバーである(一財)首都高速道路技術センターと協議の上、下記のように設定した。

#### 開発目標

- ①橋梁点検員による近接目視と同等レベルの計測精度を有すること。
- ②現場点検から点検調書作成までの橋梁点検員の業務量が、画像処理技術を活用することにより、橋梁点検員による点検と同等であること。(橋梁点検車等を不要とし、総コストを縮減)
- ③現場での人員は、現状の橋梁点検員等 3 人と同等の人数であること。
- ④ロボットの落下防止等安全対策がなされていること。

開発目標①を実現するため、桁内の全ての箇所にアクセスでき(添架物等の点検困難箇所を除く)、二眼カメラ及びステレオ処理によって桁内にある損傷等の寸法を高精度に計測することができる、懸垂型ロボットを開発する。

開発目標②を実現するため、懸垂型ロボットに加えステレオ処理による平面推定を応用した自動正対補正による床版画像合成処理、びび割れの自動検出・ひび幅測定処理、および現場での点検と事務所作業を画像処理により支援するソフトウェアを開発する。

開発目標③を実現するため、ロボットは小型で設置撤去が容易、また操縦も比較的容易で、点検員 1 名および点検補助員 2 名による設置・撤去・操縦を可能とするよう開発する。さらにスクリプトに従って動作する半自動運転の実現を目指す。

開発目標④を実現するため、桁に安定的に懸垂するロボットとし、落下防止機能を検討する。

## (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

### ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b> ①計測精度 ・床版ひび割れ図作成支援、ひび幅検出率 0.2mm90%, 0.1mm50%  ②業務量 ・半自動(スクリプト)操作で点検時間 15分/格間  ・部材・要素番号の自動認識  ・点検調書作成支援ソフト、国交省・地方自治体対応  ③現場人員 ・3名で設置時間 20分、撤去時間 15分  ④安全対策 ・実用化に向けた安全性、回収性検討 その他 ・自己サイト(首都高)に加え、積極的な第三者評価実施	・約 0.1mm～0.2mm 幅のひび割れ損傷画像を対象に、検出率 85%、誤検出率 30%(当社評価基準)  ・床版撮影時間を約 4 分(手動)から 2.5 分に短縮。鋼部材撮影時間(手動)との合計時間、約 12.5 分。  ・手動 8.5 分/格間を数秒/格間に短縮。  ・国交省橋梁定期点検要領に加え、地方自治体の調書様式に対応済み。  ・架台のユニット化及び重量の軽減、撮像装置周辺のケーブル整線により目標達成した。  ・命綱を用いた落下防止機能、および車輪の逸脱防止機能を追加し、性能評価中。  ・川崎市、岩見沢市で実施済み。伊勢原市で実施予定。	H28 年度末達成見込み  達成  達成  達成  達成  H28 年度末達成見込み  達成

### ②研究開発成果の概要及び意義

#### (i) 懸垂型ロボットの開発

鋼桁内の全ての箇所へアクセスでき（添架物等の点検困難箇所を除く）、二眼カメラ及びステレオ処理によって桁内にある損傷等の寸法を高精度に計測することができる、懸垂型ロボットを開発した。本ロボットにより撮影した静止画像から、0.1mm 付近のひびまで解像可能であることを確認した。さらに架台のユニット化及び重量の軽減、撮像装置周辺のケーブル整線により、設置時間を 20 分間に短縮した。また安全対策として命綱を用いた落下防止機能、および車輪の逸脱防止機能を追加し、性能評価中である。

これらの開発成果により上述の開発目標①橋梁点検員による近接目視と同等レベルの計測精度を有すること、および③現場での人員は現状の橋梁点検員等 3 人と同等の人数であること、④ロボットの落下防止等安全対策がなされていること、の実現に目途が立った。

次頁に開発したロボットの外観写真を示す。

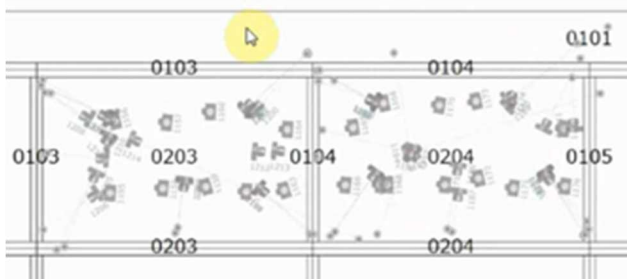


図Ⅲ-【③-(1)-3】-1 懸垂型ロボットの外観、およびカメラ昇降装置

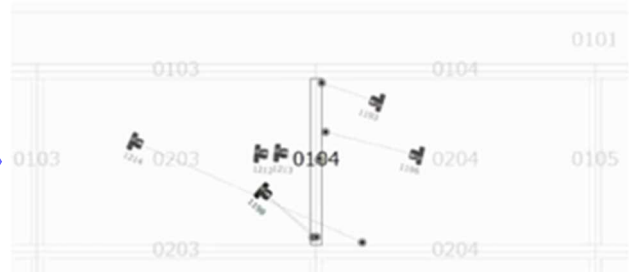
(ii) 点検支援ソフトウェアの開発

ステレオ処理による平面推定を応用した自動正対補正による床版画像合成処理、びび割れの自動検出・ひび幅測定処理、および現場での点検と事務所作業を画像処理により支援するソフトウェアのプロトタイプを開発し、ほぼ目標の性能を達成した。

これにより上述の開発目標②現場点検から点検調書作成までの橋梁点検員の業務量が、画像処理技術を活用することにより橋梁点検員による点検と同等であること、の実現に目途が立った。



カメラ位置と撮影箇所を表示可



撮影画像を部材・要素番号に自動割り当て

橋梁点検要領			
橋梁管理番号	橋梁名	撮影機	記録名
1100010010			107号
		撮影IDNo.	1
		区間番号	1
		橋梁IDNo.	2
		区間番号	1

橋梁写真管理			
橋梁管理番号	橋梁名	撮影機	記録名
1100010010			107号
		写真番号	1
		区間番号	1
		部材IDNo.	100
		区間番号	10
		橋梁IDNo.	---
		区間番号	---
		写真番号	2
		区間番号	1
		部材IDNo.	100
		区間番号	---

道路橋定期点検要領に対応

図Ⅲ-【③-(1)-3】-2 点検支援ソフトウェアの機能説明

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成29年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>①計測精度 ・床版ひび割れ図作成支援、ひび幅検出率 0.2mm ほぼ 100%, 0.1mm80%</p> <p>②業務量 ・半自動(スクリプト)操作で点検時間 12分/格間 ・点検調書作成支援ソフト、使いやすさ向上(UI,操作性)</p> <p>③現場人員 ・3名で設置時間 15分、撤去時間 15分</p> <p>④安全対策 ・実用化 に向けた安全性確保、回収性付与</p>	<p>・約 0.1mm~0.2mm 幅のひび割れ損傷画像を対象に、検出率 85%、誤検出率 30%。今後は損傷画像収集と機械学習による精度向上を図る。</p> <p>・床版撮影時間 2.5分(スクリプト)+鋼部材撮影時間(手動)で約 12.5分。 ・第三者評価により操作性を評価中。</p> <p>・設置時間 20分、撤去時間 15分。更なる機構改良、小型軽量化を図る。 ・命綱を用いた落下防止機能、および車輪の逸脱防止機能を追加。今後は信頼性、確実性、安全性の向上を図る。</p>	<p>川崎市、岩見沢市などの協力を得て損傷画像収集に着手済みで、達成可能の見通し</p> <p>鋼部材撮影もスクリプト化し時間短縮を図る。UI,操作性は第三者評価結果をフィードバックし、達成可能の見通し</p> <p>機構改良、小型軽量化で達成可能の見通し</p> <p>より確実な落下防止方法の検討、および更なる小型軽量化により達成可能の見通し</p>

### (4) 成果の普及

講演会・学会等での発表に関しては、H27年9月、第33回日本ロボット学会学術講演会オーガナイズドセッション「NEDO インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトの概要と成果」にて発表したほか、H28年6月、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama (ROBOMECH2016)でも発表した。展示会に関しては、Japan Robot Week 2014 NEDO ブースにてパネル展示を実施、また H27年12月、国際ロボット展 NEDO ブースにて、実物展示およびパネル展示を実施した。

今後も、第34回日本ロボット学会学術講演会にて講演予定のほか、さがみロボット特区イノベーション交流会、などでも技術発表を予定している(いずれも H28年9月開催予定)。

また、本システムを想定ユーザーに試用してもらいフィードバックを研究成果に反映することで、より現場のニーズに則したシステムとするとともに、普及に向けて研究成果を情報発信することを目的に、複数の地方自治体のご協力のもと第三者評価を進めている。H28年7月には、川崎市上子橋にて実証実験を行い、マスコミ含め 60名以上の方が参集したほか、H28年度内では9月以降、岩見沢市、伊勢原市、および埼玉県内(場所調整中)でも実証実験を予定している。

(5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数（平成 28 年 8 月末現在）

	件名	件数
1	特許出願件数	9 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	7 件

### 【③-(1)-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発/ジビル調査設計(株)コンソ

#### (1) 研究開発目標

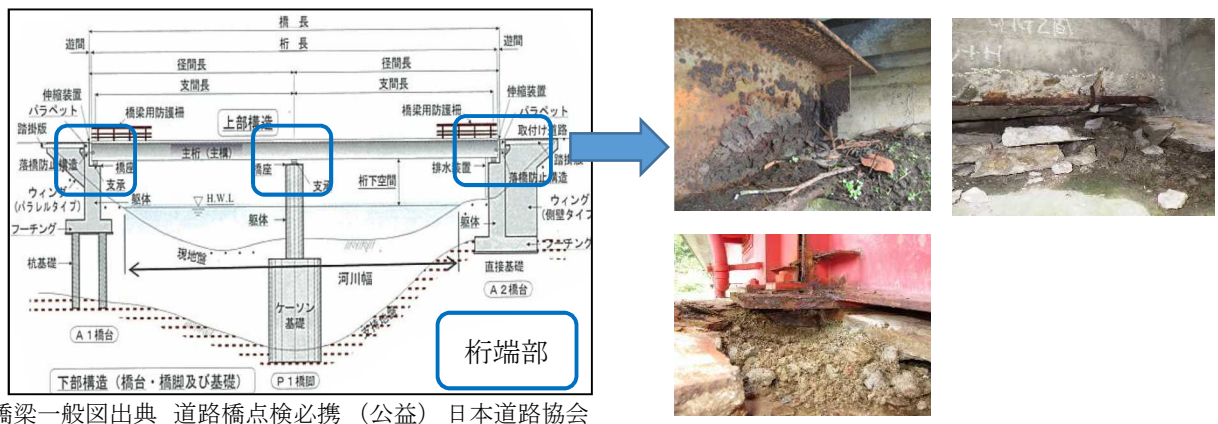
##### ①背景

高度経済成長期に整備された社会インフラ施設の老朽化が進行している。国土交通省では、老朽が進行する構造物の維持管理対策として、平成 26 年度に「定期点検要領」を策定・施行し、橋梁の定期点検を、5 年に 1 回の頻度で肉眼による近接目視を基本として実施されている。

##### ②点検作業における要望と問題点

###### (i) 損傷発生状況

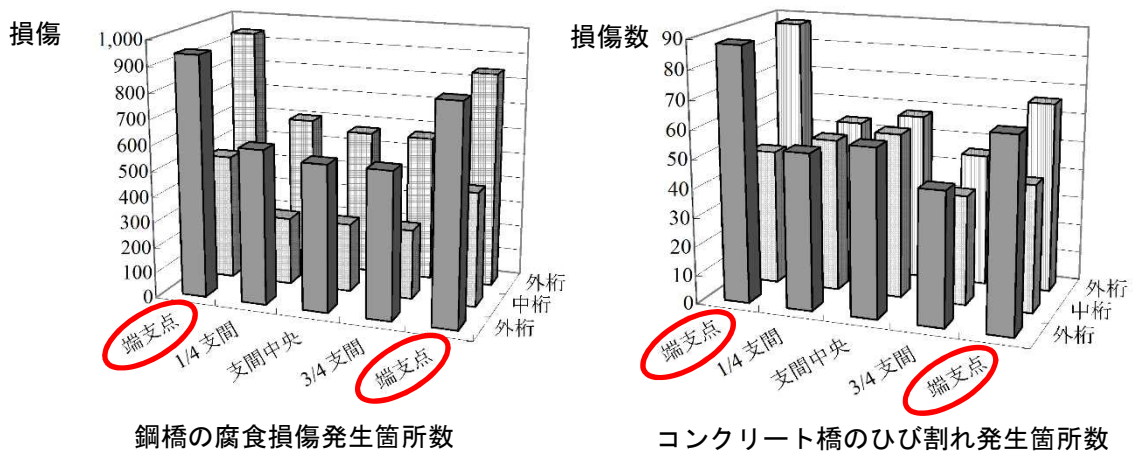
橋梁点検において、進行性が認められる損傷の把握・確認は、重要な点検項目である。このような損傷を正確に点検する事が、橋梁の健全性を診断する上で重要となる。このような、損傷の多くは、橋梁の桁端部に多く発生する。(図Ⅲ-【③-(1)-4】-1)



橋梁一般図出典 道路橋点検必携 (公益) 日本道路協会

図Ⅲ-【③-(1)-4】-1 橋梁の桁端部の位置と、桁端部に発生する進行性が認められる橋梁桁端部の損傷例

図.2 の、国土技術政策総合研究資料 No.381 道路橋の健全度に関する基礎的調査に関する研究によれば、橋梁の桁端部に発生する損傷数は、その他の部位に発生する損傷数の 1.5 倍近い数がある事から重要な点検箇所と言える。



出典 国土技術政策総合研究資料 No. 381 道路橋の健全度に関する基礎的調査に関する研究

図Ⅲ-【③-(1)-4】- 2 上部工の損傷発生箇所 (鋼橋・コンクリート橋)



## (ii) 桁端点検作業現場における問題点

重要な点検箇所である橋台や橋脚周辺の桁端部付近は、部材が多いため人間の立ち入りが難しく近接目視が困難な狭隘な部位である。(図.3)また、これら狭隘な桁端部には、堆積物や付着物が存在し、損傷状況の十分な点検の障害となり正確な診断に支障を来す可能性が考えられる。(図.4)



図Ⅲ-【③-(1)-4】- 3 狭隘空間の近接目視



図Ⅲ-【③-(1)-4】- 4 桁端部の堆積土砂

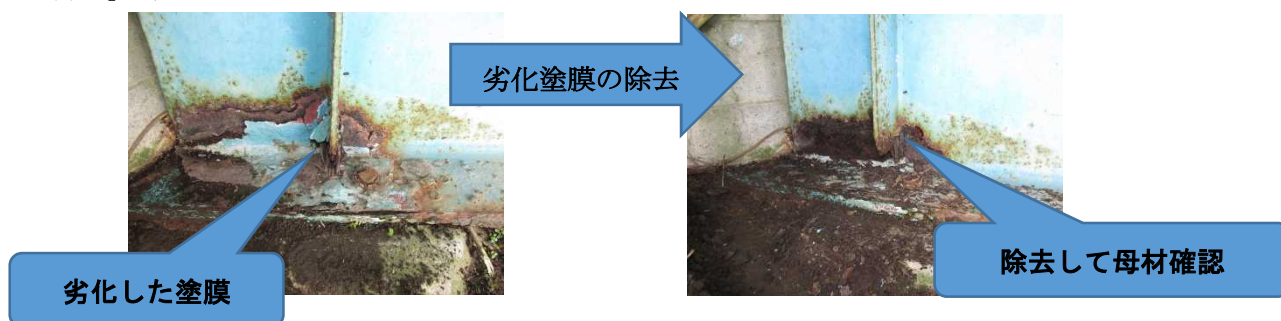
申請者が平成25年度～27年度の3か年で福井県内の県市町村管理の橋梁896橋で実施した定期点検で支承に進行性のある損傷が発生していた橋梁数は、137橋であった。(全体の15%)また、支承の損傷種別は、137橋中57橋(全体の42%)で土砂の堆積による機能障害(図Ⅲ-【③-(1)-4】-5)が確認できた。ロボット技術を使用してこれらの桁端部の点検を行う場合、土砂堆積物・付着物の除去を行い、支承周辺の状態を正確に点検するための技術が必要である。



土砂堆積による  
点検障害

図Ⅲ-【③-(1)-4】- 5 支承周辺の土砂堆積による点検障害

また、桁端部周辺の鋼製主桁は、湿潤状態の継続や凍結防止剤の影響で鋼材腐食の劣化が顕著に認められる。鋼材母材の板厚減少を点検するためには、劣化した塗膜の除去が必要(図Ⅲ-【③-(1)-4】-6)







図Ⅲ-【③-(1)-4】- 6 鋼製主桁の劣化した塗膜除去による点検状況

### ③点検手法に関する点検実務者のニーズ

点検実務者の点検方法に対するニーズとして、一般的な点検手法(橋梁点検車・はしご等)が使用できない橋梁形式を点検する場合、近接目視を行う仮設方法が、(ロープアクセス)(大型橋梁点検車)(点検吊り足場)など特殊な仮設方法となり、点検コスト・仮設時間などが増加するため、このような現場状況での有効な点検方法の開発が求められている。

表Ⅲ-【③-(1)-4】-1 従来点検手法(橋梁点検車)と特殊点検手法の作業時間・費用の比較

点検手法	一般的手法	特殊点検手法		
	橋梁点検車	ロープアクセス	大型橋梁点検車	点検用吊り足場
作業写真				
作業時間の比較	1.0倍	2.0倍	1.0倍	6.0倍
作業費用の比較	1.0倍	2.7倍	3.0倍	6.0倍

### ④本研究開発の目標

橋梁点検作業のうち、特殊な点検仮設方法が必要となる橋梁を対象に、その重要点検箇所である、橋梁桁端部の点検を含む橋梁全体の点検作業を「安全」「効率的」「低コスト」「高精度」に実施可能となるロボットシステムの開発が求められている。

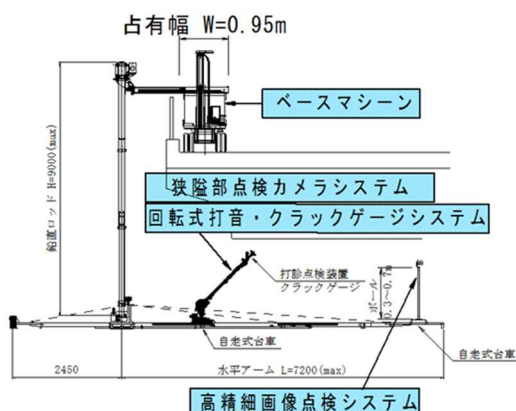
本研究開発は、橋梁桁端部の人間の目が届かない狭隘空間に挿入して点検可能な自由度を持たせたロボットアームによる狭隘部点検カメラ要素技術及び、狭隘部の点検障害物を除去する噴射清掃メンテナンス要素技術を開発する事で、効率的かつ高精度に桁端部の近接目視点検を支援・補完する事を目標とする。

## (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

### ①開発ベースロボット

本研究開発は、平成 26 年～27 年度に開催された、次世代社会インフラ用ロボット開発・導入に係る公募で「試行的導入に向けた検証を推奨する」と評価された、車両型の点検支援ロボットである橋梁点検カメラシステム「視る・診る」(タイプ 27)をベースロボットとする。(図Ⅲ-【③-(1)-4】-7)

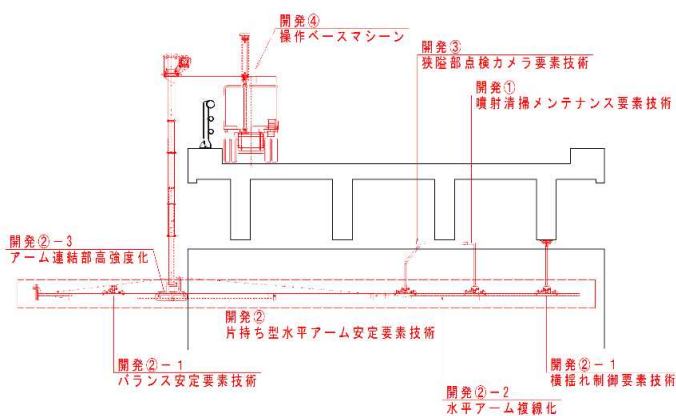
このベースロボットは、平成 21 年に開発され、これまでに「橋梁点検車の使用が困難な橋梁」の点検作業を主として 250 橋以上の橋梁点検の実績を有する。(図Ⅲ-【③-(1)-4】-8)



図Ⅲ-【③-(1)-4】-7 開発ベースロボット概要図 図Ⅲ-【③-(1)-4】-8 開発ベースロボットによる実橋点検状況

### ②開発項目一覧 (開発イメージは図Ⅲ-【③-(1)-4】-9)

- (i) 開発①：噴射清掃メンテナンス要素技術
- (ii) 開発②：片持ち型水平アーム安定要素技術
  - ②-1：バランス安定要素技術及び、横揺れ制御要素技術
  - ②-2：複線化水平アーム
  - ②-3：アーム連結部高強度化
- (iii) 開発③：狭隘部点検カメラ要素技術
- (iv) 開発④：操作ベースマシーン



図Ⅲ-【③-(1)-4】-9 新規開発ロボットのイメージ

### ③研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果 (H28.8 現在)	達成度
<p><b>【実施計画】</b> 開発①：噴出清掃メンテナンス要素技術</p> <p>室内実験で使用機材の基本性能測定実験より設計条件を整理し試作機を製作する。基本性能測定のための試験は、高圧噴射による発生反力・障害物除去能力・必要水量等を測定する。</p>	<p>基本性能試験を実施して設計条件の整理を実施。</p> <p><input type="checkbox"/>実施した試験項目</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○高圧散水時の発生反力の計測</li> <li>○高圧散水の水の衝撃力の計測</li> <li>○点検障害物除去性能試験 (土砂・鋼製の錆・コンクリート表面の付着物)</li> </ul>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>
<p><b>【実施計画】</b> 開発②：片持ち型水平アーム安定要素技術</p> <p>開発②-1：アームバランス安定・横揺れ制御要素技術</p> <p>室内試験により設計条件整理し、基本設計を実施。試作機を製作し、開発ベースロボットを用いて実橋梁での動作・性能確認試験を実施して要素技術の基礎構造の確立を目標とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 設計条件整理 (荷重条件 (自重・反力))</li> <li>2) 構造基本設計</li> <li>3) 機構部の設計及び製作</li> <li>4) 電気系統制御・操作盤他の設計及び製作</li> <li>5) 試作機における現場実証試験の実施</li> </ol>	<p>基本性能試験を実施して設計条件の整理を実施。</p> <p><input type="checkbox"/>実施した試験項目</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○高圧散水時の発生反力の計測</li> </ul>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>
<p><b>【実施計画】</b> 開発②-2：複線水平アーム開発</p> <p>開発②-3：アーム連結部高強度化開発</p> <p>仕様検討を行い複線式水平アームのプロトタイプを製作し、室内で各アームの結合方式・結合強度・バランス性能等の試験を実施してアームの基礎構造の確立を目標とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 設計条件整理 (荷重条件・自重・反力・ねじりモーメント)</li> <li>2) 強度試験用試作アーム (単線) 及び、アーム連結部の基本設計・試作機製作</li> <li>3) 同上強度試験・評価</li> <li>4) 複線式アーム・連結部の設計・製作</li> </ol>	<p>基本性能試験を実施して設計条件の整理を実施。</p> <p><input type="checkbox"/>実施した試験項目</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○高圧散水噴出時の反力により生じる鉛直ロッドねじりモーメントの測定</li> </ul>	<p>H28 年度未達成 見込み</p>

中間目標	研究開発成果 (H28.8 現在)	達成度
<p><b>【実施計画】</b>  <b>開発③：狭隘部点検カメラ要素技術</b>            自由度を持たせたロボットアーム及び狭隘部点検カメラの基本動作、姿勢制御、カメラ解像度等の要素仕様を決定するため室内試験を実施する。室内試験は、模擬損傷を設けた狭隘空間試験体（隙間 100mm・奥行 1000mm）を作成し、カメラを挿入し模擬損傷の情報を 10 分以内に取得する事を目標とする。</p>	<p>○カメラ要素の仕様検討、選定作業を実施</p>	<p>H28 年度未達成見込み</p>

#### ④研究開発(成果)の概要及び意義

##### (i) 開発①：噴出清掃メンテナンス要素技術の開発

橋梁点検の点検精度を高めるために点検診断の障害物である土砂堆積物や付着物を噴出機能で除去する噴出清掃メンテナンス要素技術の開発。

##### (ii) 開発②：片持ち型水平アーム安定要素技術の開発

狭隘部に噴射清掃メンテナンス要素や狭隘部点検カメラ要素などを安定的に挿入し点検作業が行えるよう片持ち型水平アーム安定要素技術を開発する。

具体的な開発目標を以下に示す。

- ②-1: 噴射位置へ噴射先端ノズルを確実に誘導するため水平アームの水平方向バランスを安定させるバランス安定要素技術及び、水平アームの横揺れ・たわみを制御し安定化させるための横揺れ制御要素技術の開発。
- ②-2: 複数の要素技術が水平アーム上を自由に前後移動して点検作業の効率の向上が図られるよう水平アームを2本の複線化とする。
- ②-3: アーム連結部高強度化として、鉛直ロッドと水平アームとの支持機構及び連結部位の剛性・強度を高め、アームの揺れ・撓みに対する制御と耐久性を高める。

##### (iii) 開発③：狭隘部点検カメラ要素技術の開発

狭隘部の支承背面・主桁端部背面等の狭隘部の点検が可能となる、自由度を持たせたロボットアームによる狭隘部点検カメラ要素技術の開発を行う。

##### (iv) 開発④：操作ベースマシンの開発

開発①～④の各点検要素技術が安定的・効率的に操作可能となる操作ベースマシンの開発。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成29年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p><b>【実施計画】</b></p> <p>●ロボット技術の最終目標 開発ロボットの最終目標は、下記モデル橋梁における桁端部の点検に要する時間を現行の点検時間の50%短縮する事を目標とする。</p> <p>□モデル橋梁□ ・鋼鈹桁橋 ・幅員 10m ・主桁 4 本</p> <p>□点検作業時間の短縮□ ・現在の点検時間 3 時間 ↓(ロボット開発) ・点検時間 1.5 時間(50%短縮)</p> <p>□点検準備時間の短縮 ・現行ロボットの作業前後の準備時間 60 分 ↓(ロボット開発) ・作業前後の準備時間 30 分 (50%短縮)</p>	<p>点検ロボットを構成する各要素技術の基礎的実験の実施</p>	<p>平成 29 年度末には完成の見通しである。</p>

### (4) 成果の普及

助成事業開始後、開発の情報発信として、7 月に東京都、8 月に福井県で開催された技術展示会へ出展を行い、橋梁管理者や点検実務者等のユーザーに開発内容・事業化へ向けた動き等の説明を実施した。

一般に向けては、地方紙の福井新聞・朝日新聞(福井版)に開発内容の記事掲載を行う等、各方面に向けた情報発信を積極的に実施している。

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	4 件

## 【③-(1)-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ

### (1) 研究開発目標

#### (i) 対象とする構造物

当社が開発しているロボットシステム(ALP)は、『次世代社会インフラ用ロボット開発・導入における重点分野』に指定される維持管理業務の中での、『橋梁：下部構造：コンクリート製橋脚』に適用することを目指している。

#### (ii) 対象とする点検項目

対象とする構造物の点検に対しては、平成 26 年 6 月に国土交通省道路局国道・防災課より『橋梁定期点検要領』が定められおり、『4.2 点検の項目及び方法：表-4.2.1 点検項目の標準』に、『ひびわれ』他の具体的な点検項目が定められているので、同項目を対象とした。

また、本点検要領には規定されていないが、土木学会が定める『2013年コンクリート標準示方書』では、劣化速度が速い要因の一つとして塩害があげられている。当社は独自に塩害の診断法を開発していることから、塩害についても対象とする点検項目の一つとした。

#### (iii) 対象とする調査方法

国土交通省の点検項目に対しては、点検要領の『4.2 点検の項目及び方法：表-4.2.2 点検の標準的な方法』に、必要に応じて採用することができる調査方法の例として、写真撮影（画像解析による調査）・打音検査が示されている。

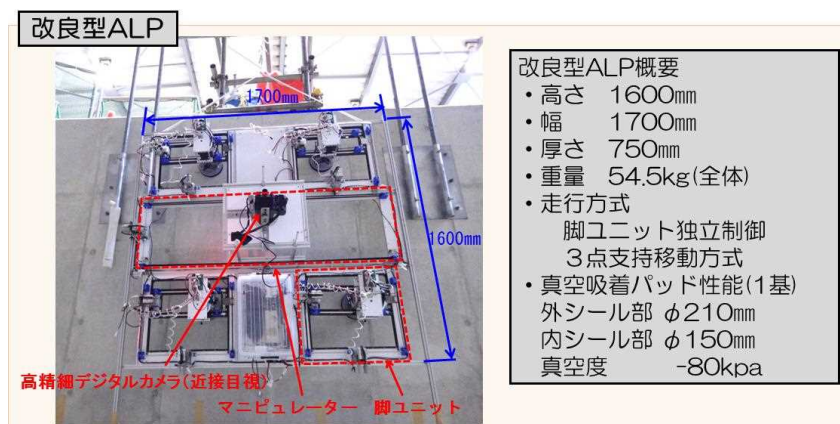
写真撮影（画像解析による調査）は、『ひびわれ・剥離・床版ひび割れ』に適用されるとしているので対象とした。また、調査すべきひび割れ幅については、日本コンクリート工学会『コンクリートひび割れ調査、補修・補強指針-2013-：4.2 評価 | 方法』では、幅 0.2mm 以上のひび割れは『対策により対処が可能』とされていることから、0.2mm 以上をひび割れの調査精度とした。

打音検査は、『剥離・鉄筋露出・うき』に適用されるとしているため、対象とした。

また塩害については、コンクリート中の塩化物イオン量から最適な補修時期を判断することができること、当社は電磁波レーダを用いて鉄筋位置とその位置における塩化物イオン量を推定する方法を開発していることから、調査方法として電磁波レーダも対象とした。

#### (iv) 解決・実現方法

当社が開発しているロボットシステム『ALP』は、図Ⅲ-【③-(1)-5】-1 に示すように、真空吸着式パッドを用いてコンクリート壁面に吸着しながら上下・左右に移動し、搭載したカメラ・打音装置・電磁波レーダで、測定を実施していく機構である。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-1 ALP 概要

壁面に吸着する機構であることから、壁面との距離が近く、打音装置や電磁波レーダを壁面に接触・密着させて測定できること、また 0.2mm 以上の幅のひび割れが正確に判定できるための高解像度の画像を近接して撮影できること等、人間による調査とほぼ同等の近接調査が可能である。

### (v)現場での運用と目標

『ALP』は当面、高さ約 20m・幅約 5m（面積約 100 m<sup>2</sup>）の鉄筋コンクリート製橋脚の壁面に適用することを指向している。

人間が調査する場合には、作業を実施すること、合わせて安全を確保するため作業足場を設置する必要があるが、『ALP』は吸着しながら壁面を自走してゆくロボットであることから、作業足場は必要ないと考えている。ただ、何らかの理由で吸着がはずれ、ロボットが落下することも考えられることから、落下を防止する安全装置は設置することを考えている。また、連続して電力を供給する必要があることから、電力供給を併用してできるようなケーブルを用いた安全装置を指向する。

面積約 100 m<sup>2</sup>の壁面を、従来用いられている人間が調査する方法を行う場合、国土交通省の積算基準に従うと、一般的な足場を組むのに約 1.6 日、また調査が約 1 日で、トータル約 2.6 日が必要である。これに対してロボットによる調査が、高さ約 20m を一往復、幅にして 2m を 1 日で調査できれば、幅約 5m の壁面を 2～3 日で調査できることとなり、従来の方法とほぼ同じ時間となる。

これを可能とするよう、10cm の鉛直移動と幅 1.0m の測定を 1 サイクルとするロボットの移動・測定動作を、約 1 分間でできることを指向する。

また、1 日 7 時間程度連続して調査ができるためには、安定した連続稼動を可能とする耐久性が必要と考えている。

更に、現場においては天候が急変する等の外乱因子（風雨日射等）に対しても、ロボットを回収するまでの間、故障しない程度の耐水性を保つため、カバーリング等の対策が必要と考えている。

## (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

### ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b>		
①走行機構の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 三点支持改良型ロボットの開発</li> <li>・ 走行安定性・耐久性の向上</li> </ul>	達成 H29 年度達成見込み
②計測機構の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 画像撮影用マニピュレーターの開発</li> <li>・ 3 測定装置対応マニピュレーターの開発</li> <li>・ 画像解析によるひび割れ判定の確立</li> <li>・ 打音装置の開発</li> <li>・ 電磁波レーダによる塩害判定の確立</li> </ul>	達成 H29 年度達成見込み 達成 達成 達成
③姿勢制御・通信機構の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安定走行用の姿勢制御の実用化</li> <li>・ 制御用 920MHz 帯通信の実用化</li> </ul>	H29 年度達成見込み H29 年度達成見込み
④安全装置他の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 燃料電池等独立電源による走行の実現</li> <li>・ リフターを用いた安全装置の実用化</li> <li>・ 電力通信併用ケーブルを用いた安全装置の実用化</li> </ul>	計画変更 H28 年度達成見込み H29 年度達成見込み



## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) 検証実験

開発・改良したロボットの動作・機能に対する検証試験は、以下の場所で実施している。

J-POWER 茅ヶ崎研究所の構内では、図Ⅲ-【③-(1)-5】-2 に示すように実験棟の約 2m 壁面では日常的な改良による動作テストを、また図Ⅲ-【③-(1)-5】-3 に示すように外壁高さ約 5m の壁面では動作の安定性や耐久性等の現場に準じた試験を実施している。

平成 27 年 11 月には、図Ⅲ-【③-(1)-5】-4 に示すように茨城県常陸太田市の幸久橋において現場検証試験を実施し、幅約 1m・高さ約 1m 弱の範囲で移動・画像撮影を行い運用性について、また撮影した画像から作成した 3 次元モデルにより調査精度について検証した。

実構造物への適用に対する検証としては、図Ⅲ-【③-(1)-5】-5 に示すような J-POWER が保有するダムにおける高さ約 20m・幅約 5m の洪水吐ゲートピアの壁面を予定している。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-2 構内実験設備(1) 図Ⅲ-【③-(1)-5】-3 構内実験設備(2)



図Ⅲ-【③-(1)-5】-4 幸久橋(国土交通省現場実証試験) 図Ⅲ-【③-(1)-5】-5 洪水吐 ゲートピア

### (ii) 走行機構

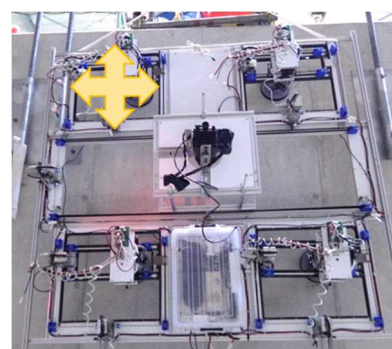
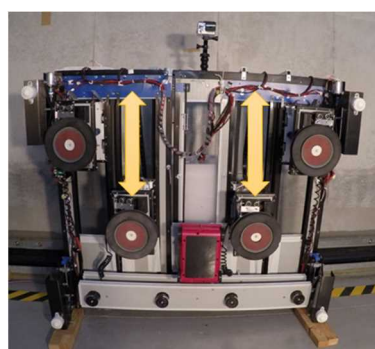
平成 26 年開発が開始された当初のロボット（従来型）は、全体を軽量化することを優先し、図Ⅲ-【③-(1)-5】-6 に示すように、2 本の脚を吸着させて姿勢を保持した状態（2 点支持）で、別の 2 本の脚を同時に動かして吸着させ、ロボット全体を移動させる機構であったため、動作テストでは、上下移動に対しては非常に姿勢が不安定となる状況が、また左右移動は数 cm 程度した枠を広げられず、ほとんど走行不能の状況であった。また測定装置は、枠に固定する方法であったため、測定に制約が多かった。

このような結果踏まえて、平成 27 年より図Ⅲ-【③-(1)-5】-7 に示すような改良型の開発を実施してきた。

改良型は、精密な測定・調査ができることを優先し、中央部に測定装置を水平に移動させるためのマニピュレーターを配置し、その上下には走行装置を配置し、走行装置には壁

面に吸着する機構をユニット化した脚 2 本を配置した構造となっている。また、走行に際しては、3 本の脚を吸着させて全体をしっかりと保持した状態（3 点支持）で、1 本の脚を移動させ、全部の脚が移動したら全体を移動させることとし、移動が終了したらロボットを静止させ、姿勢が安定した状態で測定装置を水平に移動させて測定を行うこととした。

これにより、幸久橋における現場検証試験で検証されたように、従来型に比べてかなり安定した走行を実現することができ、主筋が配置されている水平方向に精密な測定ができるようになった。また必要があれば、調査方法に応じてマニピュレーターに搭載する測定装置を変更したり、マニピュレーターの長さを変えることにより、測定長さを変更したりすることができると共に、搭載機器の増加による重量増加に対しても、脚ユニットの個数や配置を変更することで対処することが可能となった。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-6 従来型ロボット

図Ⅲ-【③-(1)-5】-7 改良型ロボット

### (iii) 計測機構

従来型ロボットでは、ビデオカメラをロボットの空きスペースに固定して取り付け、ロボットが連続的に移動する中で動画を撮影する方式となっていた。この方式では、0.2mm 幅のクラックを正確に判定できる画像を取得することが難しいことから、改良型ロボットでは、画像測定用マニピュレーターに 5,140 万画素のカメラ（重量約 3kg）を搭載し、水平方向に移動させ、隣り合う画像のラップ率が 60%以上となるよう撮影する方式を実現した。

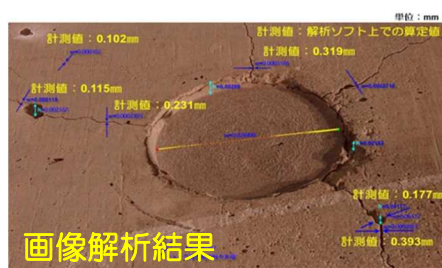
ひび割れ等の点検項目の判定は、精密写真測量の原理を用いて、高解像度画像から作成した高精度 3 次元モデルによることとし、茅ヶ崎試験所構内の壁面、および幸久橋の現場検証試験で撮影した画像により 3 次元モデルを作成して精度を検証した結果、図Ⅲ-【③-(1)-5】-8 に示すように本撮影方法であれば幅 0.2mm のひび割れが十分な精度でモデル化でき、対象とする点検項目の判定が可能であることが判明した。

株式会社シミックと共同で、図Ⅲ-【③-(1)-5】-9 に示すような、ソレノイド磁石を用いて鉄心で壁面を打撃し、発生した音の第一波と第二波との波長・振幅比を求めることにより、壁面の健全性を判定する打撃装置を開発した。法政大学が作成した模擬供試体、および名古屋大学にある模擬構造物でテストを行い、打撃ストロークを長くして打撃エネルギー量を増加させること、一箇所での打撃を 5 回に増やしデータの棄却検定を行う等の改良を加えた結果、表面から 5cm 程度のやや深い位置にある内部空洞までは、判定できることが判明した。

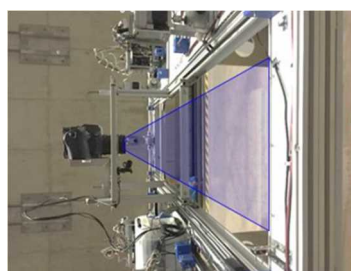
図Ⅲ-【③-(1)-5】-10 に示すような小型化された最新の電磁波レーダを用いて、鉄筋の平面的な位置とかぶり（表面からの深さ）を測定し、鉄筋のある位置における入射波と反射波との振幅比から得られる減衰率を基本として、塩害の評価指標として用いられているコンクリート中の塩化物イオン量を推定する技術を開発した。栈橋等の構造物で実施した

検証実験の結果、従来の測定方法と比べても十分な精度で塩化物イオン量を推定できることが判明した。

現状では、図Ⅲ-【③-(1)-5】-11に示すように、カメラを横移動させる画像測定用のマニピュレーターは実現できているが、打音装置・電磁波レーダは搭載できていない。今後、横移動に加えて壁面に押し付ける動作が必要な打音装置と電磁波レーダを搭載すべくマニピュレーターの改造を行い、1回の走行動作で3種類の調査ができるようにする。また、晴天日に行われた幸久橋の現場検証実験では、ロボット自身の影等が画像に写り込み、これがモデル作成に影響したことから、今後はカウリングの設置やLED照明等の対策により、撮影条件を一定とする必要があると考えている。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-8 画像解析:3次元モデリング結果 図Ⅲ-【③-(1)-5】-9 打音装置



図Ⅲ-【③-(1)-5】-10 電磁波レーダ 図Ⅲ-【③-(1)-5】-11 マニピュレーター(計測装置)

#### (iv) 制御機構・通信機構

改良型ロボットの制御・通信システムは、現状では走行機構・測定機構・走行用モニタリングカメラ機構をそれぞれ別々に、パソコンから操作する状態となっており、それぞれ2.4GHz帯の通信方式を用いているが、通信距離が短いこと、遮蔽や混雑による通信障害が多いことがあり、幸久橋の現場検証実験でも、試験中に回線の混雑による通信障害が発生している。

実用化に向けたロボットの制御には安定した通信方式が必要であることから、通信距離が長く、遮蔽等の通信障害が少ないといわれている920MHz帯について通信ユニットを試作しテストした結果、屋内から500m程度離れていても通信可能であることがわかり、今後コマンドラインを主体とした制御系の通信は920MHz帯に移行するとともに、それぞれに行っている制御を統合化することを考えている。

また、高精細デジタルカメラで撮影した画像データは、1画像約20MBであることから、無線によるデータ通信では時間がかかりすぎるため、カメラ本体に保存しておいて、後で回収して処理している。今後は、高解像度画像等の大量データを高速転送する方法として、後述する電力・通信併用安全ケーブル等の有線を利用すること等を指向する。

#### (v) 安全装置その他

独立電源による走行を目指して、燃料電池の実用性を調査すると共に、市販前のロボット用リチウム電池を購入しテストしたが、どちらも性能が不十分のため、実用化には有線

による電力供給が必要であること、また当面目標とする高さ約 20m の壁面では、茅ヶ崎研究所構内や現場検証実験の幸久橋で用いたポリタンクによるバランス方式では不十分であることから、電力通信併用ケーブルを用いた電力通信併用安全装置を試作し、機能を検証するものとする。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

幸久橋現場検証実験等により、以下のような課題が明確となったため、目標の実現のための主要な取り組みとする。

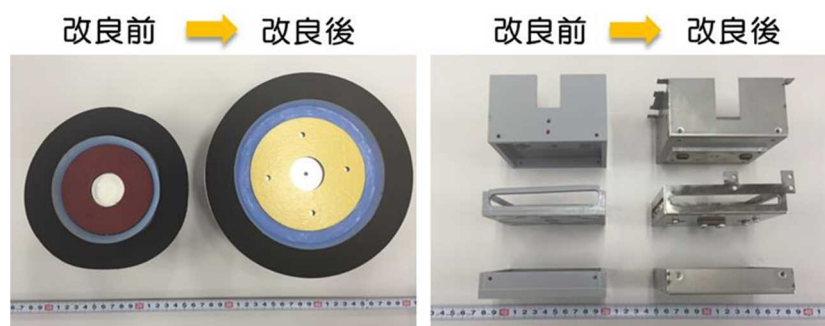
#### (i) 走行機構の強化

幸久橋の現場検証実験では、吸着パッド内面の摩擦材の接着力不足や、ネジ類の緩みが確認されるなど、実際に調査できた範囲は高さ約 1m 弱であり、耐久性不足が確認されたことから、脚ユニットを中心として、以下の対策を実施すると共に、更なる耐久性の向上を図る。

吸着パッドについては、図Ⅲ-【③-(1)-5】-12 に示すように、外直径を 160mm から 210mm(1.3倍)に、内直径を 110mm から 160mm (1.5倍)に変更したことにより、吸着面積を 95c㎡から 201c㎡(2.1倍)に増加させ、吸着力を 57kg から 120kg(2.1倍)に強化した。

各種部品・部材の耐久性を向上する一環として、図Ⅲ-【③-(1)-5】-13 に示すように、伸縮脚を構成する部材の材料を、樹脂製から金属製へ変更して、耐久性の向上を図った。引張強度は 50N/㎡から 500N/㎡(約 10倍)にかなり増加でき、脚重量は 5.8kg から 6.1kg(1.05倍)への増加と、重量を増加させずに強度の増加を図ることができた。

また速度の向上については、現状の 2倍となる 10cm/min の移動と画像計測 (幅 1.0m) を実現するようモーターの回転速度の向上等を指向する。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-12 真空吸着パッド改良 図Ⅲ-【③-(1)-5】-13 伸縮脚 材料改良

#### (ii) 計測機構の強化

現場検証実験で実際に調査できたのは、高精彩デジタルカメラによる近接目視のみであることから、本来の目論見である打音装置・電磁波レーダも一緒に搭載し測定できるよう、以下のような計測機構の拡張を実施する。

デジタルカメラに加えて、打音装置・電磁波レーダの 3つの測定装置を一緒にロボットに搭載して、それぞれを切り替えて水平方向に移動させて測定する機構、および打音装置・電磁波レーダは壁面に密着させる機構を実現する。

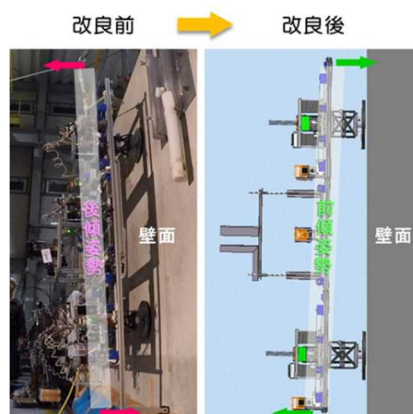
デジタルカメラのみで計測長さ 1m を実現しているが、3つの測定装置全てについて長さ 1m の計測を行うためには、マニピュレーターの長さの延長が必要とされる。

以上の対応で発生する重量増加に対しても、足ユニットの個数を増やしたり、配置を工夫することで、吸着力を増加させ安定した走行を実現する。

### (iii) 制御機構・通信機構の強化

現場検証実験を含め動作テストでは、ロボットを下降させようとするとき、偏心モーメントにより上部の脚が壁面から引き剥がされるようになるため、姿勢が崩れて吸着盤が脱着して、ロボットが落下する事象も発生しており、姿勢制御の強化が必要であることが判明した。

そのため超小型の傾斜センサーやパッドと壁面間の距離センサーを活用し、自らの姿勢を確認できるようにすること、また図Ⅲ-【③-(1)-5】-14に示すように、ロボットと壁面の距離は基本 165mm であるが、上部の脚を 5mm または 10mm 壁面に近づけるよう調整したり、下部の脚を 5mm または 10mm 壁面から遠ざけるよう調整して、前傾姿勢をつくり偏心モーメントの影響を軽減させて姿勢を安定化させる等、制御システムを改造する。

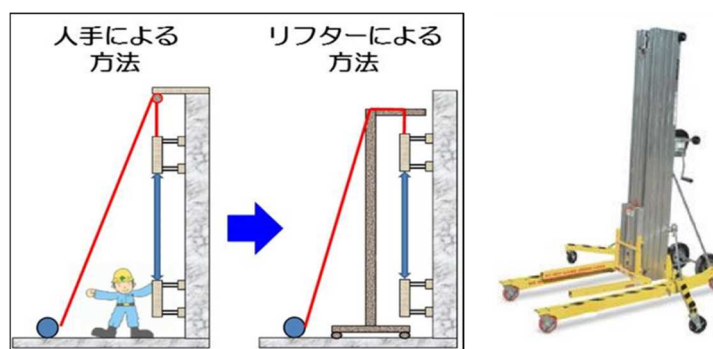


図Ⅲ-【③-(1)-5】-14 姿勢制御 改良

また、現場検証実験では隣接して複数の開発者が無線通信を用いた試験を実施していたため、混信による障害が発生しており、通信機能の強化が必要と認められたので、引き続き 920MHz 帯の利用も検討し、通信安定性を高める対策を実施する。

### (iv) 安全装置その他

従来の安全装置では、設置等に手間と人数を要していること、また今後改造を実施してゆくと現在約 55kg の重量は増加することは目に見えており、人による作業が安全面においても困難になることが必然であることから、最終的な安全装置の前に、図Ⅲ-【③-(1)-5】-15に示すように市販されているリフターを用い、リフターにロボットを吊るすことにより、1人ででもロボットの運搬と壁面への設置を可能とし、高さ約 5m 程度までは伸ばしたアームで安全装置をかねた装置を指向する。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-15 安全装置改良方法

#### (v)機能検証実験

ロボットの機能については、茅ヶ崎研究所構内における耐久性試験とダム洪水吐ゲートピアにおける現場検証実験を予定している。

構内耐久性試験では、ロボットの上部や下部と壁面との距離を調整して、若干前傾姿勢を作ることにより、偏心モーメントの影響を小さくして走行の安定を向上することを目指しているが、高解像度ビデオ撮影およびレーザー変位計測による動作解析により、姿勢の前傾度と効果の関係、また発生した不都合の事象・課題・原因・対策が何かを正確に把握することを考えている。

また、現場検証試験の事前準備として、走行計画を策定するためにコンクリート打設ブロック割りを、電磁波レーダによる調査結果を評価するために鉄筋の配筋図等を、また画像解析によるひびわれの調査結果や打音装置による浮き・剥離等の調査結果を評価するために既存の劣化調査結果について調査を実施している。

#### (4) 成果の普及

成果を普及する取り組みとして、平成 27 年 12 月に開催された「2015 国際ロボット展」の NEDO ブースにて、図Ⅲ-【③-(1)-5】-16 に示すように実機およびパネルの展示を行った。今年度は 10 月に開催される「Japan Robot Week2016」に実機を展示予定である。



図Ⅲ-【③-(1)-5】-16 2015 年 国際ロボット展 出展状況

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数 (平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	1 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	5 件

### 【③-(1)-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発/(株)熊谷組コンソ

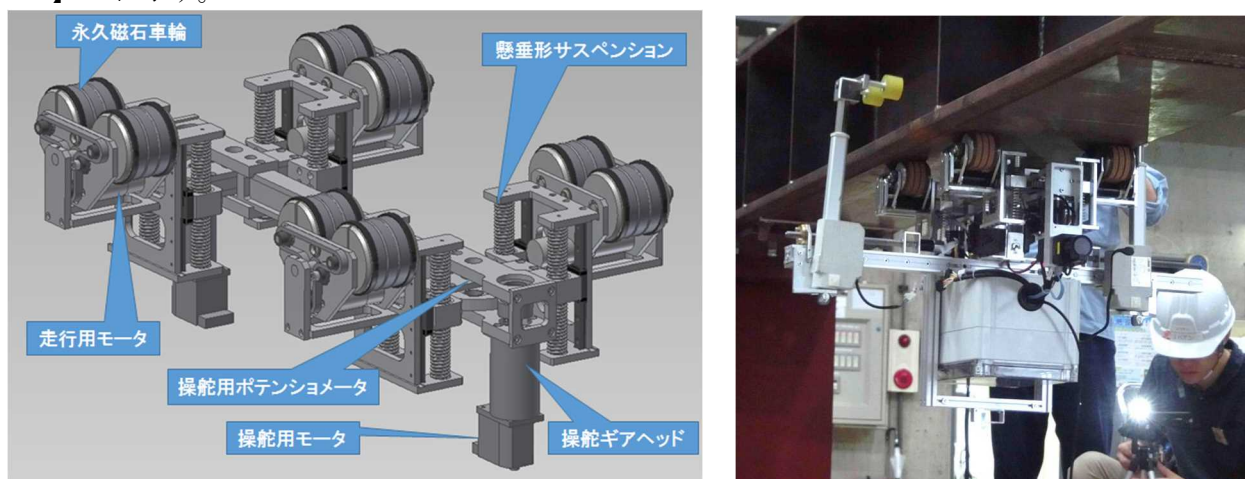
#### (1) 研究開発目標

鋼橋コンクリート床版の点検作業は、一般的に橋梁点検車や吊り足場等により近接して目視で調査を行っている。一方で、橋梁には添加物や横構等の障害物背面や桁端部のような狭隘箇所には、損傷箇所が隠れている可能性があり、橋梁点検を行う事業者にとっては見えない箇所の点検というニーズがある。そこで、本研究開発では、①静止状態でのひび割れの高精細画像が確実に取得できる磁石走行式ロボットによる移動機構の確立と、②これまで適用が困難とされていた桁端部等の狭隘箇所での撮影を可能にするロボットアームの開発を図るものである。

#### (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

##### ■ 磁石走行式ロボットの改良

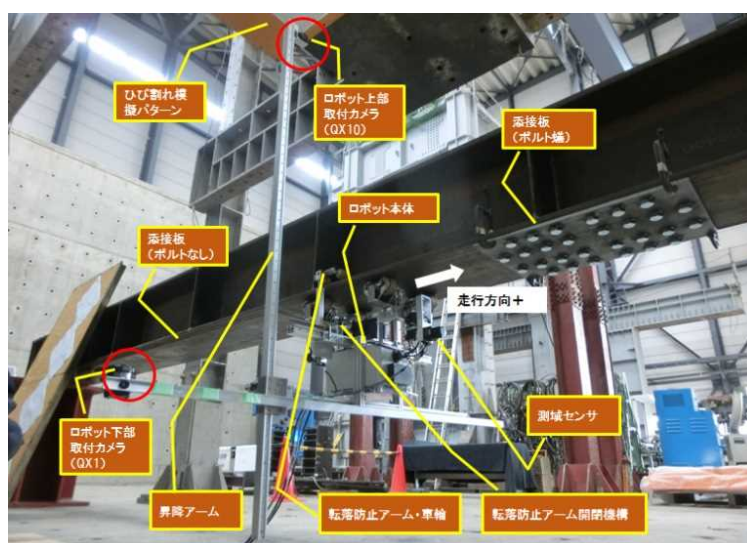
委託研究開発で製作した磁石走行式移動ロボットシステムをベースとして、操舵機構ならびに懸垂形サスペンションを付加した改良型ロボットを製作した。その改良点を図Ⅲ-【③-(1)-6】-1に示す。



図Ⅲ-【③-(1)-6】-1 操舵機構，懸垂形サスペンション付の改良型ロボット

##### ■ 非健全部等の撮影を可能にするロボットアームの開発

ひび割れ等の詳細調査が必要と認められる箇所へ近接し、高精細映像から0.2mm程度のひび割れデータを取得収集するロボットアームを開発した。その要素実験状況を図Ⅲ-【③-(1)-6】-2に示す。



図Ⅲ-【③-(1)-6】-2 要素実験状況

■ **コンクリート床版のひび割れ展開図をリアルタイムに作成**

移動ロボットに搭載した高精細カメラによりコンクリート床版の画像を連続して取得し、画像の連続合成により、リアルタイムでの概査展開図を作成し目視点検の補助を実現にする。その要素技術による画像合成状況を図Ⅲ-【③-(1)-6】-3に示す。



図Ⅲ-【③-(1)-6】-3 事例紹介：開発中のソフトで作成した概略展開図

■ **ユーザーヒアリングでの新たな知見**

作業業務の効率向上を行える技術開発として、落下防止ネットの外からカメラで撮影し、ひび割れ等の調査が可能になる。

① **研究開発目標の達成度**

中間目標	研究開発成果	達成度
【実施計画】 支間 30m 程度の鋼橋の主桁をロボットが走行する。	添接部における各種のボルトパターンでの走行実験を実施中である。	H28 年度未達成 見込み
【実施計画】 高精細カメラを搭載して同時処理で概略展開図を作成する。	主桁 1 支間分の撮影データを PC に伝送し、リアルタイムに床版の概略展開図を作成する。(ソフトを開発中)	H28 年度未達成 見込み
【実施計画】 カメラ搭載ロボットアームにより 0.2 mm のひび割れを撮影する。	点検員が近づけない環境下においても、0.2mm 幅のひびわれを検出できる画像を取得する。(実験環境下では取得可能)	H28 年度未達成 見込み



## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) 磁石走行式ロボット（改良型）を活用した橋梁点検機構の開発

様々な主桁添接板を乗り越える移動機構と操舵機構の改良により、展開図作成用の画像取得を実現する。また、RC床版の画像の連続合成により、リアルタイムでの概査展開図を作成し目視点検の補助を実現する。

現状、取得画像からコンクリート床版のひび割れ展開図を作成するためには、時間とコストを要している。概査とはいえ、調査とほぼ同時に展開合成写真を実現する本研究開発は、新たな技術の開拓ならびに汎用性を有する開発であり、競合技術に対して優位性があるといえる。

### (ii) 点検困難箇所での調査を可能とするロボットアームの開発

ポール取付け型ロボットの開発により、狭隘箇所での点検を実現にするものであり、最終的には移動ロボットに搭載したポール取付けカメラにより、床版ひび割れの高精細画像からの詳細展開図作成を実現する。

床版や桁端部等の狭隘箇所へ近接し、非健全部等の撮影を可能にする自由度を有するアームの開発を行い、目視点検を補助する検査システムの確立するところに汎用性を有するものであり、競合技術に対して優位性があるといえる。

また、大規模更新により撤去された道路橋 RC 床版を有効活用することにより、損傷床版の各種データの収集にも積極的に取り組むものである。

## (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成29年度末)	現時点の研究開発成果、課題及び 今後の取組み	達成の見通し
【実施計画】 支間30m程度の鋼橋の主桁をロボットが走行する。	添接部における各種のボルトパターンでの走行実験を実施中である。	一般部 20cm/sec、ボルト添接部 1箇所 1minで走行する見通しである。
【実施計画】 高精細カメラを搭載して同時処理で概略展開図を作成する。	主桁1支間分の撮影データをPCに伝送し、リアルタイムに床版の概略展開図を作成する。(ソフトを開発中)	1m毎に高精細カメラで画像を取得し、リアルタイムに概略展開図を作成する見通しである。
【実施計画】 カメラ搭載ロボットアームにより 0.2 mmのひび割れを撮影する。	点検員が近づけない環境下においても、0.2mm幅のひび割れを検出できる画像を取得する。(実験環境下では取得可能)	一定環境下(ユーザーの点検作業での試行)で点検不可能箇所を3割削減する見通しである。

#### (4) 成果の普及

##### ■論文等の対外的な発表

平成 26～27 年度の委託業務に関しては、土木学会全国大会、第 33 回・第 34 回日本ロボット学会年次講演会、第 16 回・第 17 回建設ロボットシンポジウム等で論文発表を行ったが、今年度、新たに受託した助成事業は新たな開発テーマであり、論文の発表までには至っていない。

##### ■成果の活用・成果の普及に関する取組み

ユーザー（西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社）を交えた技術交流を実施し、開発したロボット技術の試験運用等を実施する予定であり、成果の実用化・事業化に向けて適切な取組みを行っている。

##### ■一般に向けての情報発信

新たな開発テーマであるため、8 月末の段階では情報発信までは至っていない。しかしながら、10 月下旬開催の建設技術展近畿、11 月上旬開催のハイウェイテクノフェアでは、ロボット実機の展示を行い、広く一般に向けて情報発信を行う予定である。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取組み

特許、論文、外部発表等の件数（平成 28 年 8 月末現在）

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	0 件

### 【③-(1)-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコンソ

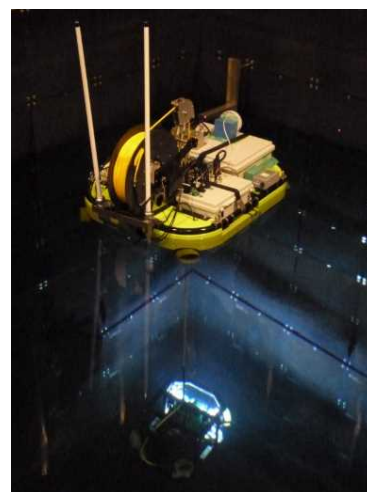
#### (1) 研究開発目標

##### ■ダム調査ロボットシステム

本開発のシステムは重力式コンクリートダムの近接目視点検を対象としている。システムは濁水中でも点検が可能な事、また点検箇所的位置取得が可能な事が求められる。開発システムは水中ロボットを水面の水上ロボットから吊下げる構成をとることで、水上ロボットを基点とした点検箇所的位置情報の取得、目視による操縦を可能とする。平成 26 年度～平成 27 年度の委託開発事業において実験機を開発し、広島県弥栄ダムにて行われた「国土交通省 平成 27 年度次世代社会インフラ用ロボット現場検証」にてダムにおけるコンクリートの目地、コンジットゲートの変状点検等を実施した。平成 28 年度以降の開発においては現場検証で得た知見を踏まえた実用機開発を進めている。実用化のため機体の小型化・軽量化を進め、現場での運用性を向上させると共に、使用する部品を見直し機体のコストを削減する。また、各作業環境にロバストな機体及び自動制御技術を開発し、操作性を向上させる。さらに、得られたデータから調査報告書を作成する際、点検者が測定データを効率良く扱えるシステムを開発し、報告書作成までの時間を短縮化する。

主要な目標数値を以下に示す。

ロボット寸法	
水上ロボット	: 1.0×0.7×0.5 [m]
水中ロボット	: 0.4×0.35×0.3 [m]
ロボット重量	
水上ロボット	: 60[kg]
水中ロボット	: 20[kg]
システム稼働時間	: 7 時間
最小運用人数	: 2 名
耐圧深度	: 130[m]
外部環境	: 風速 8[m/sec]まで外部補助なし 8[m/sec]以上は外部補助装置で対応する



図Ⅲ-【③-(1)-7】-1 システム図

##### ■水中音響イメージングソナー

混濁した水中においてダム堤体のコンクリート等の構造物の点検をするためには、潜水士による近接目視が必要であり膨大な点検時間を要してしまう。そこで、予めソナーにより広範囲の概査を実施することで潜水士による近接目視が必要な箇所を限定し、点検効率の向上を図る。また、ソナーによる広範囲の概査データ取得は、事後のオフライン解析によりコンクリート構造物の欠損等を発見するのでは点検効率が悪いと、リアルタイムに3次元で確認できる機能を有することと、ソナーはボート等から吊下できる程度のサイズであることを研究開発の目標とする。

主要な目標数値を以下に示す。

ソナー画面出力	: 3 次元
フレームレート	: 1 回/1 秒以上
分解能	: 水平 17cm、垂直 17cm、距離 26cm (離隔距離 10m において)
視野範囲	: 1m×10m 以上/1 回 (離隔距離 10m において)

## (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

### ■ダム調査ロボットシステム

平成 26 年度～平成 27 年度開発において実験機を開発した。水上ロボット・水中ロボット、ヒューマンインターフェースとなる操作インターフェースより構成される。ロボットは操作インターフェースによって遠隔操縦する。

操縦の支援機能として、一定の位置関係で点検対象を捉える壁面相対位置制御、及びガイドアーム機構を備える。前者は水上・水中ロボットそれぞれに備えた距離センサを用い、壁面との相対距離、角度を計測し、これを一定に保つ。後者は水中ロボットより突き出したガイドアームを壁面と接触させることで、同じく相対位置を一定に保つ。また点検の省力化のため、水中ロボットが水中壁面に沿って矩形波状に自動的に航行し、広範囲の壁面映像を撮影する機能を備える。水中壁面自動調査機能は実験プール壁面に対して実施し、広範囲の壁面画像を得ることに成功した。

平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機は広島県弥栄ダムにおいて現場検証を行いコンクリート目地の開き調査、コンジットゲートの変状調査、水深 76m の仮法水路呑口と思われる箇所への潜航・映像取得を実施した。コンクリート目地の点検においては、ガイドアームを用いた近接撮影により、数十 m の距離にわたり均一な条件での目地の映像を取得することに成功した。平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機を用いた実証試験とその成果について、意見交換を行っているノダック(株)より、「目地の状態が一目瞭然」といったコメントを得た。また、現場検証の当日は瞬間最大風速 18[m/sec]の強風であり、十分な機動性が確保できない場面が散見された、この知見から、実用機開発においては推進力の増強を図るとともに、強風下でも位置保持が可能な機能を追加する。

### ■水中音響イメージングソナー

平成 26 年度～平成 27 年度においてリアルタイムに水中構造物を映像化できる水中音響イメージングソナーを開発した。水中音響イメージングソナーは、離隔距離 10m において、位置(水平、垂直)は 17cm の分解能、距離は 26cm の分解能でリアルタイムに映像化する機能を有する。平成 27 年度には独自サイト(日立所有水槽)において、実証実験を実施し水中構造物を映像化する機能について確認をした。

#### ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【基本計画】</b> 2015 年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実用化開発、実証実験を中心に実施する。	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機を用いた現場実証試験により得られた課題を踏まえた、実用機の開発を進めている。新規の要素技術を試作し、実験機(現行機)に適応し評価を行った。	達成
<b>【基本計画】</b> 従来の作業員による点検や重機を用いた作業と同程度のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発する	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機を用いた現場実証試験の成果では、作業員による点検よりも低コストであり、ダム壁面に近接した精密な映像を取得することに成功している。	達成

中間目標	研究開発成果	達成度
<p>【実施計画】 D.1 調査プラットフォームおよび操作インターフェースの開発 平成 28 年度計画:設計・製作・仮組立を完了</p>	<p>平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機での現場検証結果を踏まえ、設計改良を行った実用機開発を進めている。新規要素技術として水上ロボットの点検対象の壁面に対する移動距離を計測する距離計測機能付ガイドローラの評価モデルを試作、有効性を確認した。また、航行性能向上のため高効率スラスタ開発を進めている。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>
<p>D.2 水中壁面自動調査技術の開発 平成 28 年度計画:設計・プログラムデバッグを完了</p>	<p>水中壁面に対して正対し、一定の離隔をとりながら矩形波状に水中機の自動的に航行させることで広範囲の水中壁面を効率的に点検する。これまでの成果として、実験プールにて自動調査を実施画像取得に成功している。実用機に向け、距離計測機能付ガイドローラを利用した、実用性を高めた機能として開発を進めている。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>
<p>D.3 外部環境対応技術の開発 平成 28 年度計画:概要設計を完了</p>	<p>実環境における風の影響下においても運用可能とするため、 ①風力の影響を低減する運用方法 ②外部補助装置による人的補助による水上ロボットの位置保持手法を開発する。①について、スラスタを用いた壁面に対する位置保持機能の検証実験を実施し、位置保持力を計測し有効性を確認した。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>
<p>D.4 報告書作成支援プログラムの開発 平成 28 年度計画:概要設計を完了</p>	<p>報告書作成支援プログラムとして、 ①異常箇所のリアルタイム記録機能、 ②水中マップ自動生成プログラム、 ③自動報告書作成プログラム の開発を行う。これまでの成果として②を開発しており、実験プール、弥栄ダムにおける点検映像について、画像をつなぎ合わせ一枚の画像を得る事に成功している。実用化に向け総合的な支援プログラムとするよう①、③の概要設計を進めている。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>
<p>D.5 水中ロボット用アタッチメントの開発 平成 28 年度計画:概要設計を完了</p>	<p>調査内容・現場環境に柔軟に対応するため、状況に応じて装着可能なアタッチメントとして、クリアサイト搭載近接撮影用ガイドアームを開発する。これまでの成果として、ガイドアームを平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機に付加し、実証試験において安定な映像取得に有効であることを確認している。これにクリアサイトを付加することで、濁水中でも明瞭な視界の確保を可能とする。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>
<p>S.1 水中音響イメージングソナーの開発</p>	<p>平成 26 年度～平成 27 年度開発における独自サイト(日立所有水槽)での実証試験結果等を踏まえ、距離分解能の向上等の設計改良を進めている。新規要素技術を検討、評価モデルを製作し、平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機にて評価予定である。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>
<p>S.2 環境地図作成技術の開発</p>	<p>平成 26 年度～平成 27 年度開発における独自サイト(日立所有水槽)での実証試験結果を踏まえ、設計改良を進めている。新規要素技術を検討、評価モデルを製作し、平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機にて評価予定である。</p>	<p>H28 年度末 達成 見込み</p>

## ②研究開発成果の概要及び意義

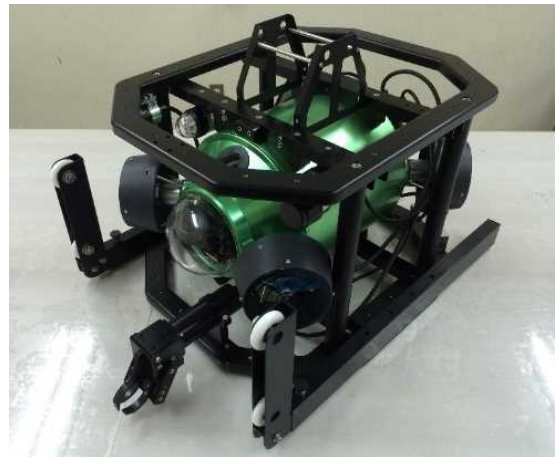
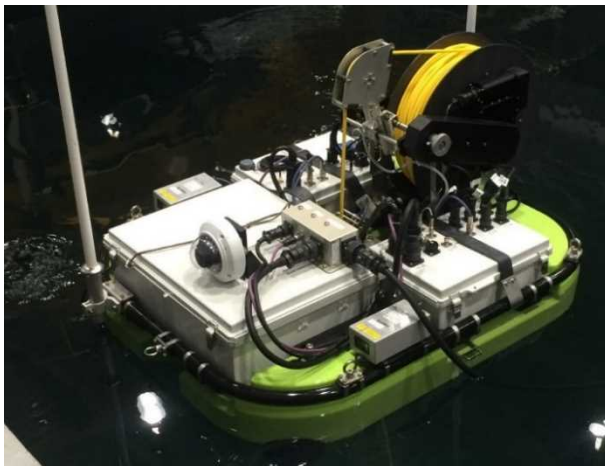
### (i) 調査プラットフォームおよび操作インターフェースの開発

水上ロボット・水中ロボットにより構成される調査プラットフォームを開発した。またヒューマンインターフェースとなる操作インターフェースを開発した。

水上ロボットは水中ロボットによる点検を水上から支援するため、水中ロボットと連携し動作を行う、水平方向に4基配置された水中スラスタにより、自在な水面移動を可能としている。またアタッチメントの取付けのため各機器をモジュール化し、交換、メンテナンス、仕様変更が容易な自由度の高い構成とし、かつ現場での運用性を考慮し堅牢かつ小型軽量の設計としている。

水中ロボットは水上ロボットからの支援を受け、水平方向の位置を常に把握し、水上ロボットと連携し動作する、水平方向に4基配置された水中スラスタにより、水上ロボットと完全に同期した水平移動を行う。アタッチメントの取付けのため各機器をモジュール化し、交換、メンテナンス、仕様変更が容易な自由度の高い構成とし、かつ現場での運用性を考慮し堅牢かつ小型軽量の設計としている。

操作インターフェースは操作用 PC とそれに表示されるコントロールアプリケーション、ジョイスティック型リモートコントローラ、無線装置により構成される。遠隔操縦・自律航行ともに直感的な操作が可能な操作インターフェースを開発することにより、可変構成型水中調査用ロボットを誰でも容易に操作可能としている。オペレータの習熟度を必要とせず、均一な調査精度が得られる操作インターフェースを開発した。



図Ⅲ-【③-(1)-7】-2 平成 26 年度～平成 27 年度開発の調査プラットフォーム

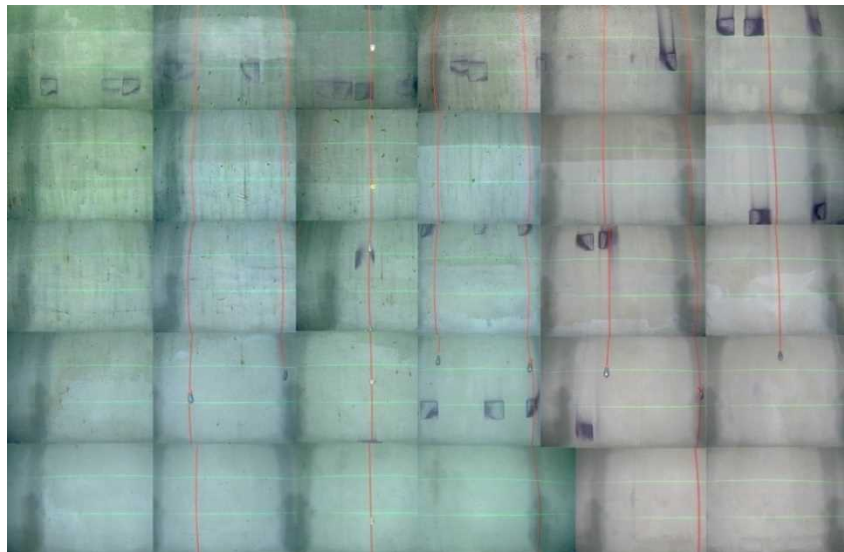


図Ⅲ-【③-(1)-7】-3 平成 26 年度～平成 27 年度開発の操作インターフェース

**(ii) 計測対象と自己の位置認識及び自律・半自律航行技術の開発**

自己位置認識技術の研究開発を行った。水上ロボットの位置を GPS、及びダムとの相対位置により求める手法を開発した。本開発機の特長として、水上ロボットの水平位置を常に目視可能であり、その鉛直下に水中ロボットが位置し、その鉛直位置はケーブル繰出量と深度計より把握可能である。そのため、高価な水中音響位置測位装置（トランスポンダ）や RTK-GPS を設置することなく、水上ロボットおよび水中ロボットの位置把握を可能としている。

ダム堤体面の自動調査を行うため、水中壁面自動調査技術を開発した。水中壁面自動調査技術は、水中ロボットを水中壁面に対し矩形波状に自動航行させることで、広範囲の調査映像の効率的な取得を可能とする。航行中、水中ロボットは壁面に対して正対かつ一定の離隔を保つよう制御され、均一な撮影姿勢による映像取得が可能である。また、水中壁面自動調査技術により取得した映像を、複合画像として自動出力するプログラムも開発した。実験プール、弥栄ダムにおける点検映像について、画像をつなぎ合わせ一枚の画像の取得に成功している。



図Ⅲ-【③-(1)-7】-4 自動生成プログラムによる複合画像（日立製作所実験水槽）

### (iii) 水中環境認識センサと環境地図作成技術の開発

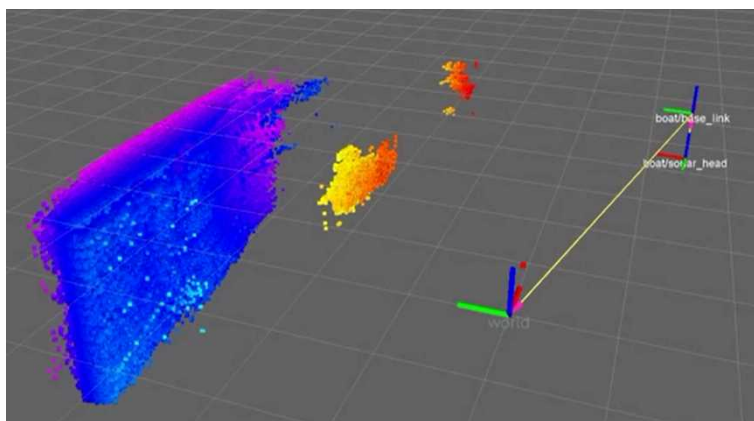
水中に吊下する構造体を極力小さくすることにより、流水による影響を最小限に抑える必要がある。そこで、水中音響イメージングソナーは、水中部と筐体部に分離した構造とする方針としプロトタイプ機を製作した。更に、水中における動作検証である現場検証を実施し、平成 28 年度以降の改良事項を抽出した。

表Ⅲ-【③-(1)-7】-1 水中音響イメージングソナーの要改良事項一覧

ソナー画面	実運用を考慮した画面に改良する必要あり
質量	運搬、取付の容易性を考慮して、軽量化を要する
耐環境性	実運用に耐えうる品質(耐久性, 安全性)を高める必要がある



図Ⅲ-【③-(1)-7】-5 水中音響イメージングソナー



図Ⅲ-【③-(1)-7】-6 3次元地図

### (iv) 流水環境対応用アタッチメントの開発

水上ロボットは流速の速い河での調査において、漂流または沈没してしまう可能性がある。この問題を解決するために流水環境対応用アタッチメントの開発を行った。

平成 26 年度に水上ロボット試験機を開発し、同年 11 月に開催された国交省主催の現場検証に参加し、水中調査作業を実施した。平成 27 年度に河川調査機を構成するための流水環境対応用アタッチメントを開発した。これらは河川用フロート（浮力体）・スラスト（推進器）と川岸から水上ロボットを支援・制御するための係留装置で構成される。



図Ⅲ-【③-(1)-7】-7 平成 26 年度 水上ロボット試験機



図Ⅲ-【③-(1)-7】-8 平成 27 年度 河川調査構成機



平成 27 年度に独自サイト（日立実験水槽・西日本流体技研）にて河川護岸計測を想定した河川調査構成システムの機能検証を行った。具体的には、音響イメージングソナーを用いた水中環境の地図作成機能、ならびに急流環境における航行制御機能に対する検証を行った。

**(v) 水中作業用アタッチメントの開発**

作業用アームと回転駆動ユニットの開発を行った。作業内容に応じてユーザがエンドエフェクタを付け替えて使用する。



図Ⅲ-【③-(1)-7】-9 作業用アーム（簡易グリップ付） 図Ⅲ-【③-(1)-7】-10 回転駆動ユニット（清掃用ブラシ付）

**(3) 成果の最終目標の達成可能性**

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果	達成の見通し
<p><b>【基本計画】</b> 実用化開発、実証試験を中心に実施する。</p>	平成 26 年度～平成 27 年度開発の成果をもとに、実用機開発を実施している。	達成
<p><b>【実施計画】</b> D.1 調査プラットフォームおよび操作インターフェースの開発 平成 29 年度計画：組立調整・水槽試験を踏まえた改良・実環境による評価を実施。</p>	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機の成果をもとに、実用機開発を進めている。実用機での新規要素技術は平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機にて評価を行い、有効性を確認している。平成 28 年度末までに仮組立を完了した後、実環境による評価を実施する。	平成 29 年度末 達成見込み
<p>D.2 水中壁面自動調査技術の開発 平成 29 年度計画：水槽試験を踏まえた改良・実環境による評価を実施。</p>	平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機の成果をもとに改良を進める。新たに利用する距離計測機能付ガイドローラは上記 D.1 での研究開発により有効性を確認している。平成 28 年度末までにコーディングを完了した後、実環境による評価を実施する。	平成 29 年度末 達成見込み
<p>D.3 外部環境対応技術の開発 平成 29 年度計画：外部補助装置の開発および実環境試験による評価を実施。</p>	<p>実環境における風の影響下においても運用可能とするため、</p> <p>①風力の影響を低減する運用方法の開発 ②外部補助装置による人的補助による水上ロボットの位置保持手法の開発を行う。①として、スラストを用いた壁面に対する位置保持機能の検証実験を実施し有効性を確認した。</p>	平成 29 年度末 達成見込み

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果	達成の見通し
D.4 報告書作成支援プログラムの開発 平成 29 年度計画:プログラム製作・評価を実施する。	報告書作成支援プログラムとして、 ①異常箇所のリアルタイム記録機能、 ②水中マップ自動生成プログラム、 ③自動報告書作成プログラム の開発を行う。これまでの成果として②を開発している。平成 28 年度末までに、概要設計を終えた後、実環境試験にて評価を実施する。	平成 29 年度末 達成見込み
D.5 水中ロボット用アタッチメントの開発 平成 29 年度計画:部品製作・実環境試験による評価を実施。	これまでの成果として、ガイドアームを平成 26 年度～平成 27 年度開発の実験機に付加し、安定な映像取得に成功している。これにクリアサイトを付加することで、濁水中でも明瞭な視界の確保を可能とする。平成 28 年度末までに、概要設計を終えた後、実環境試験にて評価を実施する。	平成 29 年度末 達成見込み
S.1 水中音響イメージングソナーの開発	平成 26～27 年度で製作したソナーに対し、距離分解能の向上の検討を実施し、平成 28 年 9 月末に設計完了の見込みを得ている。今後、部品入荷・組立完了(平成 29 年 1 月末)、評価完了(平成 29 年 2 月末)の予定で進める。	平成 29 年度末 達成見込み
S.2 環境地図作成技術の開発	平成 26～27 年度で製作した環境地図作成技術に対し、移動する計測器の位置・姿勢情報により補正した計測点群データを繋ぎ合わせて形状認識可能な計測領域の 3 次元形状地図を作成すべく開発推進中である。	平成 29 年度末 達成見込み

#### (4) 成果の普及

##### ■国内発表

2016 年 8 月 30 日 第 5 回 ロボット研究会フォーラム

##### ■国際学会発表

2015 年 10 月 21 日 OCEANS' 15 MTS/IEEE Washington DC

2016 年 9 月 22 日 OCEANS' 16 MTS/IEEE Monteley (予定)

##### ■ユーザーアピール

開発システムのテストユーザーとなりうる水中調査会社「ノダック(株)」に協力を仰ぎ、開発に対する助言を得ると共に、研究開発の取り組みへの認知を図っている。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

表Ⅲ-【③-(1)-7】-4 特許、論文、外部発表等の件数 (平成 28 年 8 月末現在)

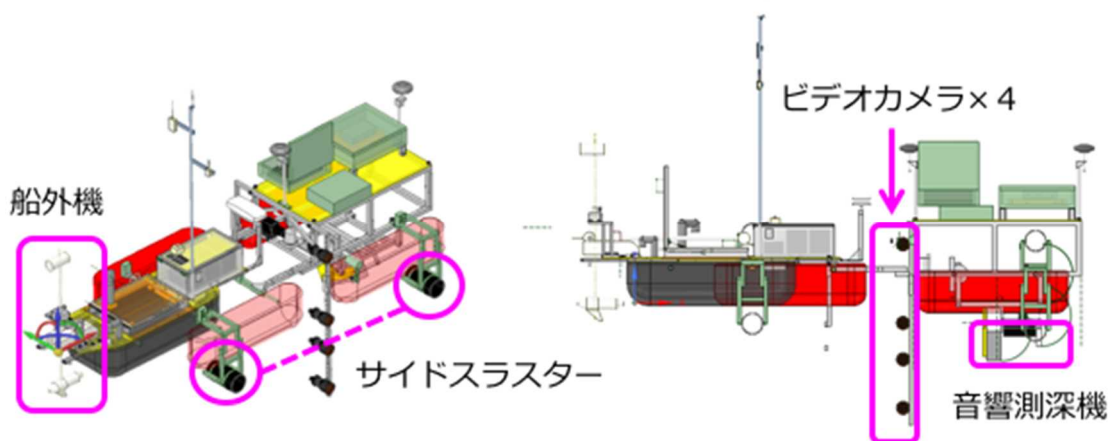
	件名	件数
1	特許出願件数	1 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	1 件
4	外部発表	7 件

【③-(1)-8】河川点検を効率化・高度化するフロートロボットの研究開発/朝日航洋(株)

(1) 研究開発目標

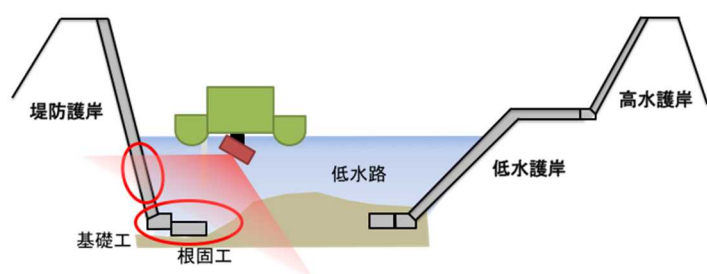
我が国のインフラは、多くが高度経済成長期に建設されたものであり、老朽化への対策が急務になっている。一方で人口減少・少子高齢化が進行し、働き手の減少が課題となっており、より効果的・効率的な対応が可能な技術開発が求められている。特に長大な河川の維持点検においては、ダイバーによる構造物点検、有人船による深浅測量等が行われているが、調査精度、調査頻度、コスト面等で課題が多い。

当社は平成 27 年度より、国土交通省「次世代社会インフラ用ロボットの開発・導入の推進」事業に参画し、上記課題の解決に資するためのロボット研究開発を実施している。平成 27 年度に開発したロボット（以降、試作一号機）は、動力船と台船の連結構成で、前方に船外機 1 機、下部にサイドスラスター 4 機を搭載し、前側方向への推進を実現している。また、護岸と河床を把握する機器として、下部に音響測深機、側部に光学ビデオカメラを 4 台設置している。（図Ⅲ-【③-(1)-8】-1）。



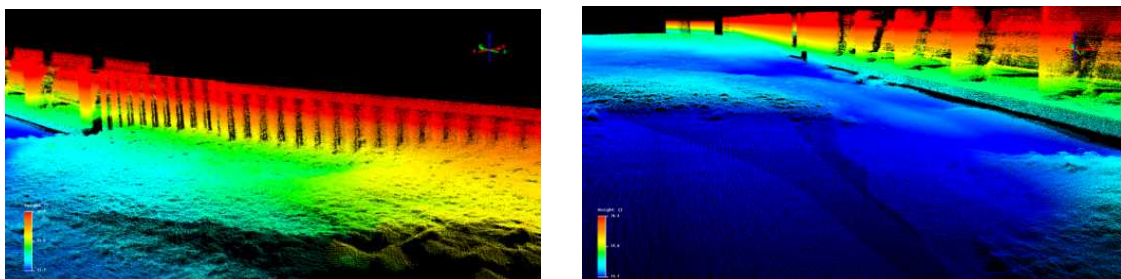
図Ⅲ-【③-(1)-8】-1 試作一号機

音響測深機は水平面から 30 度傾けた状態で設置し、離隔 5m で護岸に並走させ、護岸および



周辺河床の三次元点群データを取得する（図Ⅲ-【③-(1)-8】-2）。取得したデータから三次元地形モデル（図Ⅲ-【③-(1)-8】-3）を作成し、河床の洗掘や堆砂、護岸構造物のはらみ出し、傾斜、基礎部の沈下、陥没、流出、等を確認する。

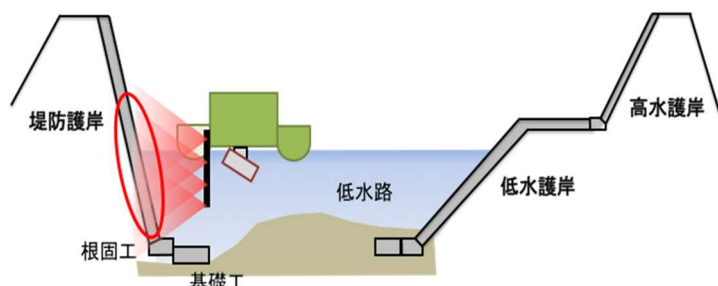
図Ⅲ-【③-(1)-8】-2 音響測深機による護岸・周辺河床把握



図Ⅲ-【③-(1)-8】-3 護岸・周辺河床の三次元地形モデル

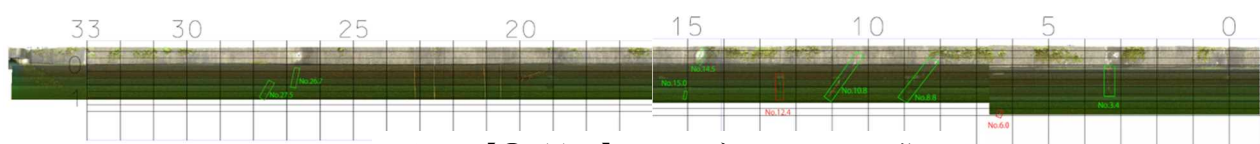
なお、傾きなく音響測深機を設置することで、河床のみを効率よく計測することも可能となる。

光学ビデオカメラは、水上1台、水中3台、の計4台を縦に並べて設置し、離隔0.5mで護



図Ⅲ-【③-(1)-8】-4 光学ビデオカメラによる護岸把握

岸に並走させ、水面付近2m幅（水上0.5m、水中1.5m）の護岸を撮影する（図Ⅲ-【③-(1)-8】-4）。撮影映像からモザイクオルソソ画像（図Ⅲ-【③-(1)-8】-5）を作成し、護岸構造物の目地の開き、クラック、腐食、欠損、等を確認する。

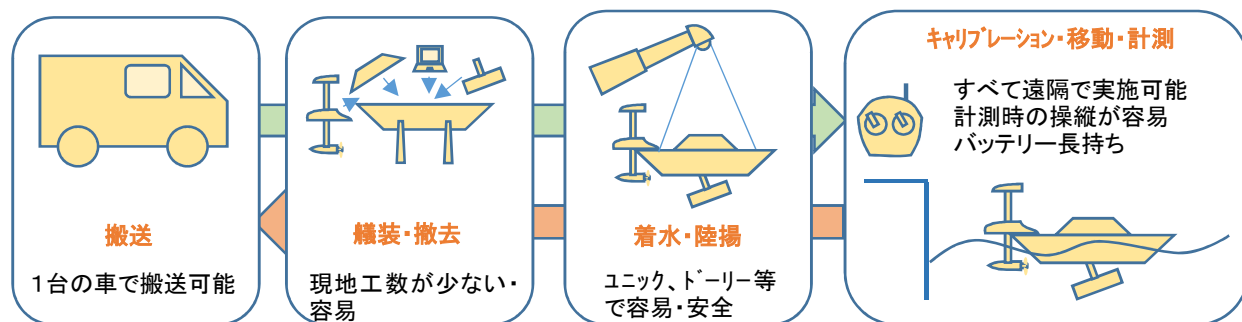


図Ⅲ-【③-(1)-8】-5 モザイクオルソソ画像

当該ロボットは、河川の定期点検、経過観察、出水後点検、等での活用を想定しており、一連の作業フロー：点検計画⇒点検（作業計画⇒計測⇒解析⇒レポート）⇒評価⇒措置、の「計測」を担う。計測の精度は、

- ・ 護岸および周辺河床の三次元点群：点密度10～20cm/点、位置精度10cm以内
- ・ 護岸の画像：分解能0.5mm以内、位置精度10cm以内

であれば、点検対象となる異常個所を検出し場所の特定が可能と判断している。また、当社は当該ロボットを使って現場で計測を実施するユーザーとしての立場もあり、計測時の操船のし易さ、覚えやすさ、計測ミスの回避、搬送、艀装、着水、キャリブレーション、陸揚、撤去、等、前後作業の効率化も社会実装に向けた重要な要件として捉えている。



図Ⅲ-【③-(1)-8】-6 社会実装に向けた要件

平成27年度の現場検証において、当該ロボットは護岸・河床の两点検で国土交通省から「試行的導入の推薦」を受けており、現場検証委員会から得た評価結果を基に下記4点の改善要求を導出し、本件の研究開発目標に定めた。

### I. 運動性能の向上

流速への対応を可能とし、より多くの現場条件で活用可能なシステムとする。対応可能な流速は1.5m/sを目標数値とする。この目標を達成するには試作一号機の抜本的な見直しが必要と判断し、水中抵抗を低減した機体の設計、船外機の出力見直しと増設、搭載機材配置の最適化による軽量化を行う。

### II. 点検性能の向上

操船支援機能の向上によって計測時におけるデータ欠測を回避し、作業効率化（コスト低減）、品質向上を行う。欠測がなく品質の良い計測は、機体の向きや速度、軌跡、が大きく影響する為、複数船外機の組み合わせによる姿勢制御プログラムの開発、各種操船支援センサーの搭載による航行支援機能の開発、を行う。

### III. 運用性能の向上

艀装、計測、陸揚を省人化・短縮化する。目標は2名1時間で現地計測準備できること。動力船と台船を一体化し、かつ、つり上げ強度等を向上することで、艀装・撤去、着水・陸揚、にかかる人手を省く。また、遠隔操作による計測機器設定機構の開発や運用マニュアルの策定により、最適な手順で準備作業を実施できるようにする。

### IV. 安全性能の向上

操船支援機能の向上により、衝突、座礁を回避できるようにする。安全に操船する上で必要なセンサーを機体に搭載し、遠隔から機体状況を確認できる機能を開発する。

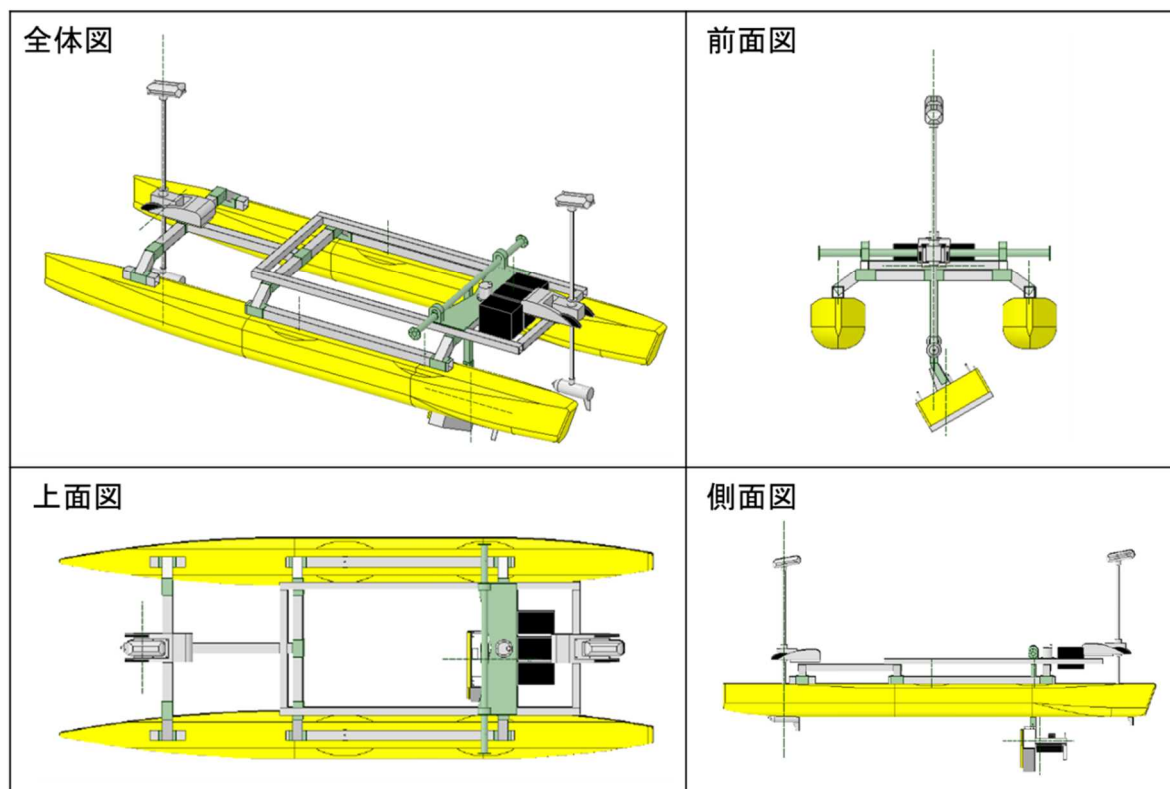
## (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

### ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
I. 【実施計画】運動性能の向上 ・ 流速 1.0 m/s 以下の環境下で計測可能とする。	機体のベースとなるフロートと船外機の選定・走行実験、フレーム設計、遠隔操縦機による船外機の制御プログラム設計が完了	H28 年度未達成見込み
II. 【実施計画】点検性能の向上 ・ 観測時の視野角の最適化を図る。 ・ 欠測を防ぐ操船支援機能を確認する。	観測時の視野角については H28 下期で検討予定。操船支援機能は、各種搭載センサーの選定が完了。	H28 年度未達成見込み
III. 【実施計画】運用性能の向上 ・ 機体の全長を 3m 以内にする。	実施計画書に記載している左記目標に関しては再設定が必要。詳細は②を参照のこと。	未達成
IV. 【実施計画】安全性能の向上 ・ 安全航行を実現する操船支援機能を検討する。	安全航行を実現する操船支援機能として、遠隔から機体状況を確認する機能を検討中。H28 下期で具体化する予定。	H28 年度未達成見込み

## ②研究開発成果の概要及び意義

試作一号機の抜本的な見直しとして、空中重量 200kg の搭載量（計測機器・バッテリー・フレーム）を双胴船タイプで実現する流線形フロートを採用した。フロートの上にユニックによるつり上げ強度を考慮したアルミフレームを取り付け、推進力を見直した船外機を前後に 2 機搭載する構造とした（図Ⅲ-【③-(1)-8】-7）。



図Ⅲ-【③-(1)-8】-7：新しい機体の設計

フロートおよび船外機 2 機による走行性能の実験は、群馬県の神流湖で有人操船により実証済みである。この実験の結果として、搭載機器の予定重量を加えても、前後左右のバランスが安定した状態で 3.5m/s の速度が出ることを確認した。また、船外機 2 機の向きの組み合わせで、横スライド、回転、等の機動性実現を実証でき、サイドスラスタを廃止して水中抵抗を低減した。重心の位置、船外機の取り付け位置、プロペラの深さ、等が速度および回頭性に影響を与えることも実証記録しており、その最適配置を、今後の実験や搭載機器配置の最適化設計を経て決定していく。

課題としては、音響測深機に見立てたモックアップを水中に降ろして航行すると、水中抵抗が大きく推進力が低下し、バッテリーの消耗が激しくなる事への対処があげられる。現時点で抜本的な打開策はないが、音響測深機に水中抵抗を軽減するカウルをつける、船外機のプロペラを変更する、等のアイデアを実証し、推進力強化につながらないか調査・検討を進める。

なお、現地偽装工数の削減手段として小型 2t ユニックで組上げた状態の機体を運べるように、機体の最大幅を 1.75m としている。この幅を基準に、搭載量 200kg で小回りが利き、安定した航行を実現するフロートを選定し、現段階では長さを犠牲にした 4.5m のフロート（ポリエチレン製）を採用している。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果	達成の見通し
I. 【実施計画】運動性能の向上 ・ 流速 1.5 m/s 以下の環境下で計測可能とする。	前述の中間目標の成果を参照のこと。	H29 年度末達成見込み
II. 【実施計画】点検性能の向上 ・ 光学カメラ: 欠測率 5%未満 ・ 音響測深機: 欠測率 1%未満	前述の中間目標の成果を参照のこと。	H29 年度末達成見込み
III. 【実施計画】運用性能の向上 ・ 2名1時間で現地での計測準備を可能とする。	前述の中間目標の成果を参照のこと。	H29 年度末達成見込み
IV. 【実施計画】安全性能の向上 ・ 安全航行を実現する操船支援機能を確立する。	前述の中間目標の成果を参照のこと。	H29 年度末達成見込み

### (4) 成果の普及

国土交通省の試行的導入に向けて、国土交通省と共に検討を行っている。また、各地方整備局に赴き、当該ロボットの説明と現場要望等の意見交換を実施した。同様に第 16 回建設ロボットシンポジウムに参加し、当該ロボットの論文投稿およびポスターセッションを通して一般企業への情報発信を行っている。

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数（平成 28 年 8 月末現在）

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	2 件
4	外部発表	1 件

**【③-(1)-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発/国際航業(株)コンソ**

**(1) 研究開発目標**

本研究では、火山地域の災害の中でも、発生確率が高く、小規模でも被害の拡大が予測される土石流災害に着目し、高精度の土石流予測シミュレーションを実施するためのセンシング技術の開発と実用化を行う。具体的には、

- ・複数台マルチコプタによる地形データの収集技術の開発
- ・遠隔からの地表調査技術の研究開発
- ・遠隔からの透水性・雨量計測技術の研究開発

を行い、これらの情報を基にした高精度な土石流予測のためのシミュレーションシステムの構築を目指す。なお、これらのセンシング技術ならびに土石流シミュレーションは、単独でも有用であるため、開発された技術から順に実用化を行い、非常時に備えた情報収集訓練を実施する。また、実際に火山災害が起こった際は、官からの委託により、即座に現場に投入し、情報収集を実施する。このような、自然災害への対応は、国際的な課題でもあるため、国内のみならず海外での展開も視野に入れて、研究開発を進める。

**(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義**

**①研究開発目標の達成度**

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b>		
(1)画像データ・三次元地形データの収集技術の開発	最大飛行時間 30～40 分の 4 枚プロペラ型のクアッドコプターを開発し、活動中の桜島火口の動画を撮影することにより、世界で始めて成功した。また、本研究で開発したマルチローター機に搭載したカメラで撮影した連続静止画を用いて、三次元モデルやオルソ画像を作成し、解析ソフトやGCPの有無、撮影高度による違い等について検証した。	H27 までの目標は達成
(2)デバイスの運搬・設置・通信技術の開発	災害時に適応可能な、レーザーを用いたデバイス運搬・設置・通信技術を開発した。	H27 までの目標は達成
(3)土砂サンプリング技術の開発	ローラ式の土砂サンプリングデバイスを開発し、このデバイスの基本性能試験や、フィールドにおける動作試験を実施した。また、実用機の製作を行った。	H27 までの目標は達成
(4)含水率・透水性計測技術の開発	透水試験を簡易的に実施すると想定した場合でも、多くの課題が存在することが分かった。今後、雨量や加速度等の間接的な情報から、対象箇所の湿潤状況や土砂移動発生の可能性を推定する手法も検討する。	当初計画の見直し実施



中間目標	研究開発成果	達成度
(5)火山災害地域のリアルタイムデータベースの構築	リアルタイムデータベースシステムのプロトタイプが完成した。なお、現時点では、計算プログラムの入力条件に利用できる観測データが少ない状況であるため、今後は、観測項目の追加状況に合わせてシステムの改修を行う予定である。また、観測データのデータベース登録方法についても、今後の検討課題である。	H27 までの目標は達成

## ②研究開発成果の概要及び意義

本研究では、土石流予測を目的とした火山災害地域のリアルタイムデータベースを実現するためのセンシング技術の開発と実用化を目指し、以下の5項目に関する研究開発を進めてきた。

### (1)画像データ・三次元地形データの収集技術の開発

立入制限範囲内の状況把握を目的とした、複数プロペラを有する無人マルチロータ機を開発した。開発した機体には、高解像度カメラが搭載されており、GPS誘導により自律で飛行し、ターゲットとなる画像情報を取得することが可能となる。このシステムにより、2014年の桜島における実証実験では、飛行距離 8,000m、飛行時間 20 分を実現し、昭和火口の近傍からの撮影に成功した。さらに、2015年の雲仙普賢岳における実証実験では、Structure from Motion (SfM) の技術を用いて、対地高度 50m で撮影した連続静止画像から地上解像度が約 1cm の三次元地形モデル生成に成功した。下図は、2014年12月に取得した、桜島黒神地区の三次元地形モデル鳥瞰図である。



図Ⅲ-【③-(1)-9】-1 三次元地形モデル俯瞰図

### (2)デバイスの運搬・設置・通信技術の開発

火山噴火後、必要な位置に観測デバイスを運搬・設置するため、マルチロータ機を用いたデバイスの切り離し機構ならびに、ワイヤを用いたスカイクレーン方式によるデバイス降下装置を開発した。この装置は、各地の火山環境（桜島、三原山、富士大沢扇状地、雲仙普賢岳）にて実施した実証試験にて、想定通り機能することを確認した。また、マルチロータ機が取得した画像の無線伝送技術に関する研究開発を行った。2014年の桜島ならびに、2015年の雲仙普賢岳にお

る実証実験では、1.2GHz 帯の X-Link 通信を用いて、解像度は低いですが、4000m 先の離れた地点の飛行ロボットが取得した映像を、リアルタイムに確認することに成功した。

### (3)土砂サンプリング技術の開発

火山噴火により山体斜面に堆積した火山堆積物を直接収集するための土砂サンプリング装置を開発した。この装置は、マルチロータ機に搭載するために小型軽量であり、100g 程度の土砂を遠隔から自動で採取することを可能とする。2014 年、実火山環境において実施した実証実験では、土砂サンプリングに成功すると共に、接地時に転倒する問題が生じた。そこで 2015 年には、スカイクレーン方式を用いた採取方式でこの問題解決を図り、各火山環境における実証実験を通じて、その有用性を確認した。下図は、2015 年 10 月に実施したフィールド試験における、スカイクレーン降下型土砂サンプリングデバイスの土砂採取の様子である。



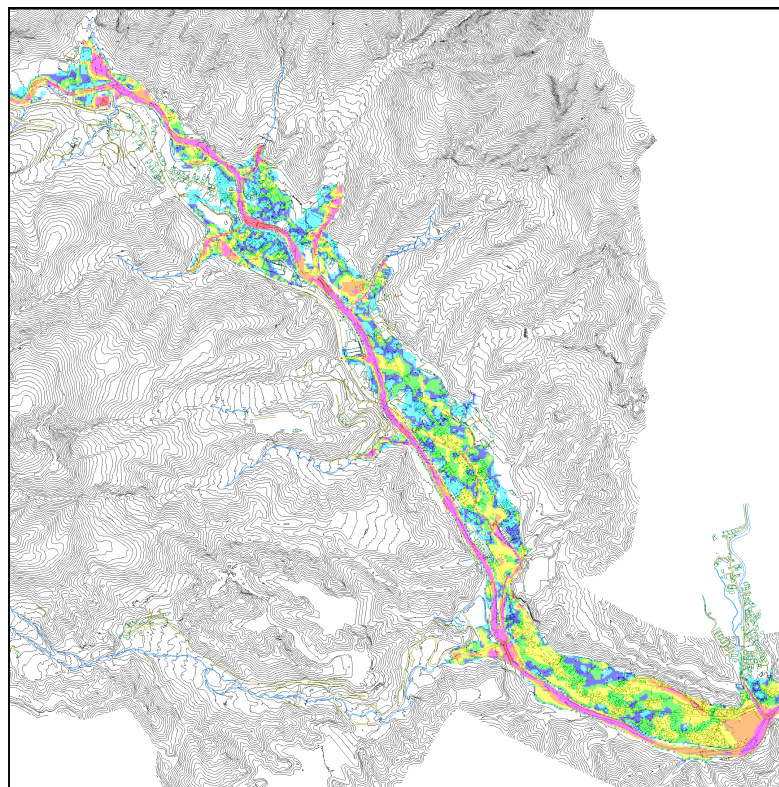
図Ⅲ-【③-(1)-9】-2 スカイクレーン降下型土砂サンプリングデバイス

### (4)含水率・透水性計測技術の開発

山体斜面の無人透水性計測の実現を目指し、円筒を用いた冠水型の透水性計測実験を行い、無人での計測手法の妥当性を検討した。その結果、軽量デバイスでは、無人による本手法の適用が困難であることを確認した。そこで、本研究では、雨量計測などの別手法により、間接的に土砂移動発生の可能性推定や状況観測を行う手法を検討する。これまでに、光学式の雨滴センサを開発すると共に、スカイクレーン方式を用いた設置機構を開発した。本手法については、2015 年の雲仙普賢岳での実証実験において、その有用性を確認した。

### (5)火山災害地域のリアルタイムデータベースの構築

上記(1)～(4)で得た情報を集約し、精度の高い土石流発生予測や危険範囲の特定を行うため、火山災害地域専用のリアルタイムデータベースについて研究開発を進めてきた。これまでに、Web 上で二次元の氾濫計算の条件を登録して計算を行うシステムならびに、蓄積した計算結果をクライアントがサーバから取得し、クライアントの汎用 GIS ソフト上で表示させる機能を実装した。2015年には、構築したデータベースを用いた土石流氾濫シミュレーション機能を雲仙普賢岳に適用し、その有用性を確認した。下図は、土石流氾濫シミュレーション事例である。



図Ⅲ-【③-(1)-9】-3 土砂氾濫シミュレーション事例

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

平成 28 年以降、研究助成に移行するにあたり、以下に示す 6 項目に実施計画を見直した。現時点の研究成果について、以下の表にまとめる。

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果	達成の見通し
<b>【実施計画】</b>  <b>①マルチコプタの機能開発</b> ・フライトコントローラのセルフチェック機能 ・パラシュート機能 ・自動航行 Interface/飛行モニタープログラムの開発	フライトコントローラのセルフチェック機能については実装し、実フィールドでの試験の実施を予定している。パラシュート機能等のセーフティに関する機能についても、順次実装を進める予定である。	継続して研究開発を進めている。平成 29 年度末には、掲げた目標が達成できると考えている。

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果	達成の見通し
<ul style="list-style-type: none"> <li>・遠隔サポート機能の追加</li> <li><b>②大容量無線通信技術の開発</b></li> <li>・長距離テレメトリ装置開発</li> <li>・フルハイビジョンレベル以上の画像伝送装置</li> <li>・低消費電力短距離通信装置</li> <li>・飛行するマルチコプタからの情報回収システム</li> <li><b>③降灰量推定技術の開発</b></li> <li>・150m 高度で地形変化を取得しデータベースとして格納</li> <li>・画像データからの cm オーダーの降灰厚推定</li> <li>・投下型スケールの開発・投下・設置・1cm 降灰厚の読み取り</li> <li><b>④地表調査技術の開発</b></li> <li>・土砂サンプリングデバイスの転倒防止装置の追加</li> <li>・土砂サンプリング装置に視覚センサを搭載し粒径分布の取得</li> <li>・小型移動ロボットに土砂サンプリングデバイスを搭載</li> <li><b>⑤透水性・雨量計測技術開発</b></li> <li>・雨滴センサを凹凸地面に対し接地する技術・素材の研究開発</li> <li>・雨量データ送受信システム</li> <li>・雨量以外の気象データ感知センサの搭載</li> <li>・加速度センサの搭載</li> <li><b>⑥火山災害地域のリアルタイムデータベースの構築</b></li> <li>・分布型土石流シミュレーションシステム</li> <li>・降灰分布データからの自動等層</li> </ul>	<p>現在、長距離無線通信が可能なシステムの選定を進めている。また、アンテナについても、通信機器メーカーと共同で製作を進めている。画像伝送装置についても、同様に、通信機器メーカーと共同で製作を進めている。また、長距離通信を実現するための、指向性アンテナの制御についても、研究開発を進めている。</p> <p>画像データからの cm オーダーの降灰厚推定手法について、投下型三角錐マーカーを用いた手法を提案した。今後、実証実験を行う予定である。その他、降灰量測定手法については、継続して検討し、降灰量 1cm 厚の測定手法の実現を目指す。</p> <p>転倒防止装置については、重量増を考慮し、実装しない方針となった。また、粒度分布取得のための視覚センサは、実証実験にて確認を行う予定である。サンプリング用小型移動ロボットの製作については、現在設計・製作を進めているところであり、平成 28 年度末には試作機が完成する予定である。</p> <p>雨量センサについては、既に目処が立っており、今後フィールドで試験を行う予定である。現在問題となっているのは、通信の頻度と、バッテリーの持ち時間の問題である。また、透水性確認のための UAV 搭載型デバイスの開発については、別途製作を行い、今後フィールド試験を通じて評価を進める予定である。</p> <p>UAV や各デバイスから取得できる計測データの活用方法や流出解析に用いる計算モデルを検討中である。今後、取得したデータを、順次、シミュレーションに反映していく予定である。</p>	<p>試験を行う上で、許可申請が必要なものがあるため、試験に時間がかかると考えられる。H29 年度末までには、長距離通信システムが完成する予定である。</p> <p>地形情報からの降灰量推定については、すでに確立しており、H29 年度までに、更なる精度向上(1cm)を目指す。</p> <p>H29 年度末までにサンプリング用途の小型移動ロボットの実用機が完成する予定である。</p> <p>H29 年度末までに、ここに掲げたうちの、幾つかの装置を実用化し、シミュレーション精度向上に貢献する予定である。</p> <p>H29 年度末までに、①～⑤から得たデータを⑥に統合する枠組みを構築し、現在のシミュレータの精度向上を図る予</p>

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果	達成の見通し
厚線作成機能 ・パラメータ入力～土石流シミュレーション結果の表示時間 ・撮影画像のアーカイブ化		定である。

#### (4) 成果の普及

論文等、対外的な発表を順次進めている。また、Webpage を活用し、成果を公表している。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	7 件
3	査読無論文発表数	7 件
4	外部発表	48 件

### 【③-(1)-10】 災害調査用地上／空中複合型ロボットシステムの研究開発の研究開発/(株)日立製作所コンソ

#### (1) 研究開発目標

土砂崩落、火山災害、トンネル災害等の現場では、二次災害の危険性が高いこと、現場の条件が過酷であることから、現場の状況把握を確実に実施することは困難な状況にある。このような現場においては、一刻も早く現場の詳細な状況を把握し、人命救助はもとよりの確な被害予測を行い、災害対応策の検討並びに迅速な実施が求められる。また、災害直後の対応のみならず、災害直前の状況把握から近い将来の災害発生を予測する事前防災の観点からも、できるだけ精度の高い情報を収集する手段が必要とされている。

このような危険な現場やわずかでも危険性が想定される現場においては、技術者等の人材派遣が困難であるため、情報収集や各種作業におけるロボット技術の活用が今後益々重要になると考えられている。特に、災害現場の上空からの状況把握（地形変化、状況詳細映像等）と共に、その情報を基に調査箇所の絞り込みを行い、空中からでは把握が困難な現場に対して地上からアクセスすることで詳細な情報収集を行うことも必要である。

更に、上記で取得した災害情報に加え、対象地域の道路、地形データなど基礎的な情報、他機関が取得した情報等も併せて可視化することで、現場管理者が災害時に的確な判断を実施することが可能となる災害情報を提供するシステム（災害情報データベース）の提供も迅速／正確な災害対処の観点から必要である。

システムの運用概念図を図Ⅲ-【③-(1)-10】-1 に示す。統合システムとして災害現場での実用に耐えるものとするためにクリアすべき課題は大きく以下の 2 点がある。

- ・災害により現場の状況は大きく異なることから、様々な状況に対応できるための多様な選択肢を用意し、現場に合わせてデバイスを柔軟に組み合わせることができること。

[例] UGV/UAV を組み合わせて電波中継を行い、遠隔地のデータ収集を行う。

UAV で計測した地形データと UGV で採取した物性データの重ね合わせ/分析する。

- ・災害現場での意思決定に使うための情報を収集するために、災害のタイムラインに応じて必要な情報精度が得られること。

[例] 天然ダム形成から 24 時間以内：写真測量による地形取得(精度 1m)

天然ダム形成から 48 時間以内：地すべり検知ノードによるニアリアルタイム監視



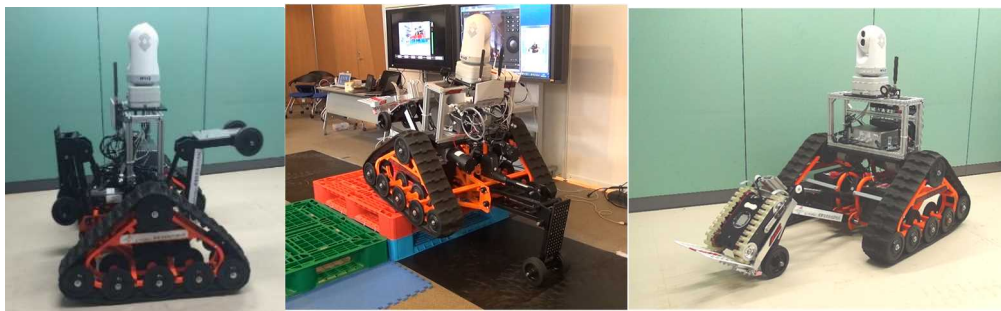
図Ⅲ-【③-(1)-10】-1 運用概念図

(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

●研究開発目標の達成度

①無人調査プラットフォーム車両と操作用インタフェースの開発

- ・無人調査プラットフォーム車両(探査用)



図Ⅲ-【③-(1)-10】-2

CRoSDI : Crawler Robot System for Disaster Investigation (災害調査用クローラロボットシステム)

表Ⅲ-【③-(1)-10】-1 達成度一覧 (無人調査プラットフォーム車両(探査用))

目標		研究開発成果	達成度
機体	質量	300kg 程度(全装備)	達成
	寸法	D1.5m×W1m×H1m 程度	達成
航行性能	連続航行時間	最大 3 時間(バッテリー駆動)⇒1.5 時間	未達成
	航行速度	8km/h 程度	達成
	航行距離/範囲	約 15km 程度⇒10km 程度	未達成
	登坂能力	最大斜度 35 度 程度⇒30 度程度	未達成
	段差	300mm 以下	達成

	操作距離	500m以内(オープンエア空間) 中継局により 300m 程度の延長 (2 台中継までのマルチホップ機能)	達成
環境性能	照度	暗闇でも調査が可能(照明装置あり、赤外線カメラも装着可能)	達成
	防塵防水性	IP65 程度	達成
	冠水路走行	深さ 25cm、距離 2m の航行が可能	達成
運用性	運搬方法	小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	運用人数	2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	準備/撤収	各 40 分程度	達成
	自動航行	GPS 情報とセンサ情報を用いた自律航行が可能 (オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	未達成
	マニュアル航行	GPS の届かないトンネル内では映像を確認しながら、半 自律操作が可能	達成
調査機能	映像	可視光カメラによるリアルタイム映像取得、記録が可能	達成
		赤外線カメラによるリアルタイム熱画像取得、人の検知等が可能	達成
	ガス検知	ガスセンサのリアルタイム画像取得、記録により、ガス検 知が可能(ガス種類はセンサに依存)	達成
	測量	レーザースキャナーの搭載による概査測量が可能 (周辺 100m、360 度、誤差 5cm 程度)	達成
		レーザー測量センサーの搭載による精密測量が可能 (周辺 300m、360 度、誤差 1cm 程度)	達成
	無線中継	遠距離調査のための無線中継が可能 (オープンエア空間で 300m 程度の延長、2台中継までの マルチホップ機能)	達成
	狭隘部	搭載可能な小型探索ロボットを用いて狭隘部の調査が可能 (幅 20cm、高さ 15cm、段差 15cm の走行可能)	達成
安全性能	緊急停止	機体および遠隔操作コンソールに非常停止ボタンを装備 し、誤操作や衝突した際に緊急停止が可能	未達成
	始動時自動点検	始動時にセンサ、アクチュエータ等の作動状態のセルフ チェック機能を有する	未達成



図Ⅲ-【③-(1)-10】-3 無人調査プラットフォーム車両(ヘリ搭載用)



表Ⅲ-【③-(1)-10】-2 達成度一覧(無人調査プラットフォーム車両(ヘリ搭載用))

目標		研究開発成果	達成度
機体	質量	100kg 程度	達成
	寸法	D1.2m×W0.8m×H1.0m 程度	達成
航行性能	連続航行時間	最大 4 時間程度(バッテリー駆動)	達成
	航行速度	10km/h 程度	達成
	航行距離/範囲	約 20km 程度	達成
	登坂能力	25 度 程度	達成
	段差	100mm 以下	達成
	操作距離	500m以内(オープンエア空間) 中継局により 300m 程度の延長 (2 台中継までのマルチホップ機能)	達成
環境性能	防塵防水性	IP65 程度	達成
	冠水路走行	深さ 25cm、距離 2m の航行が可能	達成
運用性	運搬方法	小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	運用人数	2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	準備/撤収	各 40 分程度	達成
	自動航行	GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能 (オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	達成
	マニュアル航行	GPS の届かないトンネル内では映像を確認しながら、半自律 操作が可能	達成
調査性能	無線中継	遠距離調査のための無線中継が可能 (オープンエア空間で 300m 程度の延長、2台中継までのマ ルチホップ機能)	達成
安全性能	緊急停止	機体および遠隔操作コンソールに非常停止ボタンを装備し、 誤操作や衝突した際に緊急停止が可能	未達成
	始動時自動点検	始動時にセンサ、アクチュエータ等の作動状態のセルフ チェック機能を有する	未達成

②不整地踏破アーム付無人車両の開発

環境計測用ステレオカメラ



シリンダ駆動機構  
(サーボモータで7自由度を制御)

図Ⅲ-【③-(1)-10】-4 不整地踏破アーム付無人車両

表Ⅲ-【③-(1)-10】-3 達成度一覧(不整地踏破アーム付無人車両)

目標		研究開発成果	達成度
機体	質量	550kg 程度	達成
	寸法	D3.0m×W1.8m×H1.5m 程度	達成
航行性能	連続航行時間	最大8時間(内燃機関駆動)	達成
	航行速度	4km/h 程度	達成
	航行距離/範囲	約 20km 程度	達成
	登坂能力	30 度 程度	達成
	段差	400mm 以下	達成
	操作距離	500m以内(オープンエア空間) 中継局により 300m 程度の延長 (2 台中継までのマルチホップ機能)	達成
環境性能	防塵防水性	IP65 程度	達成
	冠水路走行	深さ 25cm、距離 2m の航行が可能	達成
操作機能	運搬方法	小型トラック(2t 程度)での運搬が可能	達成
	運用人数	2 名で運用が可能(安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	準備/撤収	各 40 分程度	達成
	自律運用	GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能 (オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	未達成
	半自律運用	GPS の届かないトンネル内では映像を確認しながら、半自律 操作が可能	達成
調査性能	無線中継	遠距離調査のための無線中継が可能 (オープンエア空間で 300m 程度の延長、2台中継までのマルチホップ機能)	達成
安全性能	緊急停止	誤操作や衝突した際に緊急停止が可能	未達成
	始動時自動点検	始動時にセンサ、アクチュエータ等の作動状態のセルフ チェック機能を有する	未達成

③ 無人調査プラットフォームヘリと操作用インタフェースの開発



図Ⅲ-【③-(1)-10】-5 無人調査プラットフォームヘリ(長距離用)

表Ⅲ-【③-(1)-10】-4 達成度一覧(無人調査プラットフォームヘリ(長距離用))

目標		研究開発成果	達成度
機体	質量	8kg 程度	達成
	寸法	D1.2m×W1.2m×H0.6m 程度	達成
航行性能	連続航行時間	最大 60 分(バッテリー駆動)	達成
	航行速度	20m/s 以上	達成
	航行距離/範囲	40km	達成

	実用ペイロード	1kg	達成
	飛行高度	4,000m	達成
環境性能	耐風速	10m/s	達成
	耐水性	100mm/h 程度の雨天での航行が可能	達成
操作性	運搬方法	小型トラック(2t 程度)や大型バンでの運搬が可能	達成
	運用人数	2名で運用が可能(安全管理者1名、操作者1名)	達成
	準備/撤収	各30分程度	達成
	自動航行	GPS情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能(オープンエア空間、GPS衛星受信数5個以上時)	達成
	マニュアル航行	映像を確認しながらリアルタイム無線操縦航行が可能	達成
調査性能	映像	デジタルカメラによるリアルタイム動画調査が可能	達成
		デジタルカメラによる高精細動画録画調査が可能	達成
		デジタルカメラによる高精細静止画調査が可能	達成
		赤外カメラによるリアルタイム動画調査が可能	達成
		赤外カメラによる静止画調査が可能	達成
	地滑り検知	地滑り検知センサの設置が可能	達成
		地滑りのリアルタイムモニタリングが可能	達成
無線中継	遠距離調査のための無線中継が可能	達成	
安全性能	緊急対策	緊急時に設定したポリシーに対応した運用が可能	達成
	セルフチェック	システムを構成するパーツ(モーター、モータードライバー、バッテリー)は、制御装置との通信セルフチェック機能を有する	達成



図Ⅲ-【③-(1)-10】-6 無人調査プラットフォームヘリ(電磁探査用)

表Ⅲ-【③-(1)-10】-5 達成度一覧(無人調査プラットフォームヘリ(電磁探査用))

目標		研究開発成果	達成度
機体	質量	10kg 程度	達成
	寸法	D1.5m×W1.5m×H0.7m 程度	達成
航行性能	連続航行時間	最大 20 分 (バッテリー駆動)	達成
	航行速度	10m/s 以上	達成
	航行距離/範囲	5km	達成
	実用ペイロード	5kg	達成
	飛行高度	2m 程度を保持した探査航行が可能	達成
環境性能	耐風速	10m/s	達成
	耐水性	100mm/h 程度の雨天での航行が可能	達成
操作性	運搬方法	小型トラック (2t 程度) や大型バンでの運搬が可能	達成
	運用人数	2名で運用が可能 (安全管理者1名、操作者1名)	達成

	準備／撤収	各 40 分程度	達成
	自動航行	GPS 情報とセンサー情報を用いた自律航行が可能 (オープンエア空間、GPS 衛星受信数 5 個以上時)	達成
	マニュアル航行	リアルタイム無線操縦航行が可能	達成
調査性能	電磁探査	電磁探査システムによる地質調査が可能	達成
	無線中継	遠距離調査のための無線中継が可能	達成
安全性	緊急対策	緊急時に設定したポリシーに対応した運用が可能	達成
	セルフチェック	システムを構成するパーツ(モーター、モータードライバー、バッテリー)は、制御装置との通信セルフチェック機能を有する	達成

#### ④無係留型ヘリ用離発着装置の開発

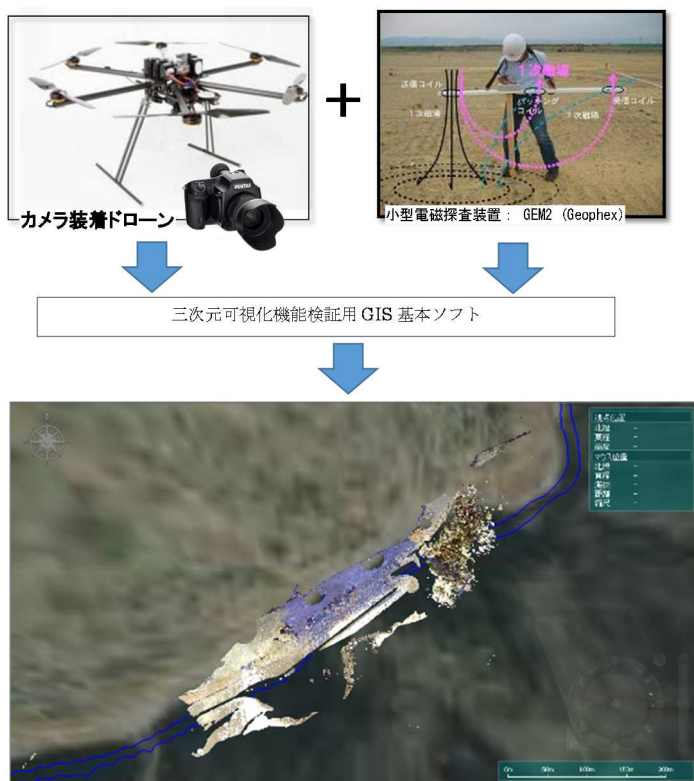


図Ⅲ-【③-(1)-10】-7 無係留型ヘリ用利発着装置

表Ⅲ-【③-(1)-10】-6 達成度一覧(無係留型ヘリ用利発着装置)

目標		研究開発成果	達成度
航行性能	連続航行時間	有線給電で 12 時間以上ヘリ運用が可能	達成
	飛行高度	30m 以上	達成
	離着陸	10km/h 以上の走行状態での離着陸が可能	達成
	上昇	3m/秒程度の上昇	達成
	下降	3m/秒程度の巻取り	達成
環境性能	耐風速	10m/s	達成
	耐水性	100mm/h 程度の雨天での航行が可能	達成
操作性	運搬方法	小型トラック (2t 程度) や大型バンでの運搬が可能	達成
	運用人数	2 名で運用が可能 (安全管理者 1 名、操作者 1 名)	達成
	準備／撤収	各 40 分程度	達成
調査性能	無線中継	遠距離調査のための無線中継が可能	達成
安全性能	緊急対策	緊急時に設定したポリシーに対応した運用が可能	達成
	セルフチェック	システムを構成するパーツ(モーター、モータードライバー、バッテリー)は、制御装置との通信セルフチェック機能を有する	達成

⑤地形情報の三次元可視化技術の開発

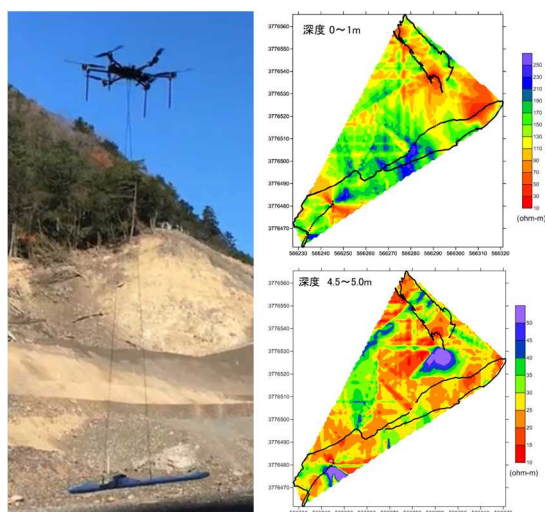


図Ⅲ-【③-(1)-10】-8 三次元可視化技術概要

表Ⅲ-【③-(1)-10】-7 達成度一覧(三次元可視化技術)

目標		研究開発成果	達成度
調査性能	地形解析	二次元リアルタイム解析が可能	達成
		30分程度でサンプリング三次元地形解析が可能	達成
		3時間程度でフル三次元地形解析が可能	
	GIS 統合	各解析結果の GIS (地図システム) 上への重畳が可能	達成
電磁探査システムのデータ処理・解析ソフトと連動し、GIS 上への重畳が可能		達成	

## ⑥地質調査情報の解析技術の開発



図Ⅲ-【③-(1)-10】-9 地質調査情報の解析技術概要図

表Ⅲ-【③-(1)-10】-8 達成度一覧(地質調査情報の解析技術)

目標		研究開発成果	達成度
調査性能	地質解析 (電磁探査)	吊下型電磁探査が可能	達成
		災害現場での電磁探査結果のデータ処理・解析が可能	未達成
		地下 10m 程度までの解析が可能	達成
	地質解析 (土壌物性計測)	土壌物性計測プローブデータ取得が可能	達成
土壌物性計測プローブデータの表示が可能		達成	

## ⑦災害情報データベースの開発

表Ⅲ-【③-(1)-10】-9 達成度一覧(災害情報データベース)

目標		研究開発成果	達成度
情報管理 機能	災害情報管理	撮影時刻及び解析イベント発生毎に時系列で災害情報の管理が可能	達成
		国や自治体の防災システムとの情報共有するフォーマットでの出力が可能	達成

### ●研究開発成果の概要及び意義

#### ①無人調査プラットフォーム車両と操作インターフェースの開発

無人調査プラットフォーム車両は、不整地を走行可能に改変するなどの高い走破能力を持ち、長時間の運用と作業が出来る車両の開発を目標としたものである。

- ・無人調査プラットフォーム車両(探査用)

現状の試作機での機能・性能検証を基に、改良設計中。

- ・無人調査プラットフォーム車両(ヘリ搭載用)

現状の試作機での機能・性能検証を基に、改良設計中。

#### ②不整地踏破アーム付無人車両の開発

不整地踏破アーム付無人車両は、内燃機関を用いることで、不整地を走路可能に改変するなどの高い走破能力を持ち、長時間の運用と作業が出来る車両の開発を目標としたものである。走路環境に応じた、調査機能を有するものとし、センサの付加を可能とする。災害現場の状況に応じて、無人調査プラットフォーム車両(探査用)と組み合わせた運用などを想定。現状の試作機での機能・性能検証を基に、改良設計中。

### ③無人調査プラットフォームヘリと操作用インタフェースの開発

無人調査プラットフォームヘリは、広範囲の災害調査を効率的に行うヘリの開発を目標にしたものである。

- ・無人調査プラットフォームヘリ(長距離用)

現状の試作機での機能・性能検証を基に、改良設計中。

- ・無人調査プラットフォームヘリ(電磁探査用)

電磁探査センサを吊り下げて、指定高度 5m 程度を保ち、調査範囲の自動飛行を可能とする。

現状の試作機での機能・性能検証を基に、改良設計中。

### ④係留型ヘリ用離発着装置の開発

係留型ヘリ用離発着装置は、係留型の有線給電ヘリの離発着を行う装置の開発を目標にしたものである。現状の試作機での機能・性能検証を基に、改良設計中。

### ⑤地形情報の三次元可視化技術の開発

現状の基本ソフトを基に、実用ソフトとして改良設計中。

### ⑥地質調査情報の解析技術の開発

電磁探査システムを利用し、地上 1m の走査探査により、地下 10m 程度の水分量を面的に解析が可能。現状のソフトを基に、実用ソフトとして改良設計中。

### ⑦災害情報データベースの開発

現状の基本ソフトを基に、実用ソフトとして改良設計中。

## (3) 成果の最終目標の達成可能性

未達成の項目に関しては、平成 29 年度末までに達成する予定。

## (4) 成果の普及

6 件の研究発表及び講演、5 件の展示会、その他新聞掲載等にて成果の普及を図っている。

## (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数 (平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	12 件

### 【③-(1)-11】 遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組 コンソ

#### (1) 研究開発目標

土砂崩落等の災害を早期に復旧するには、安全性を定量的に検討するための情報として、崩落土砂の地盤性状を迅速かつ正確に収集し、重機を使用する復旧作業に引き継ぐことが重要である。しかし、現状では、初動段階での情報収集は有人での調査であり二次災害リスクを伴うこと、有人での準備作業を必要とせず無人で地盤性状調査を行う技術が無いこと、これらに起因して復旧作業に着手するまでに多くの時間を要すること等の問題がある。

これらの問題を解消するため、崩落土砂等の調査が遠隔操作によって直ちに行える「無人調査ロボット」を開発する。無人調査ロボットとは、散在した岩塊の乗越えや泥濘地での走破を可能にし、車載の地盤試験装置により、堆積土砂の地盤性状を短時間で調査可能とするものである。

危険個所でのロボットの使用により、人命被害リスクの解消、地盤情報を得ることによる応急復旧設計精度の向上、工期短縮、コスト縮減に貢献する。開発目標を以下の通り設定する。

#### ①走行性能

災害復旧用一般的建設重機に先行して乗り込むため、建設重機を上回る以下の走行性能を確保することとする。過去の比較的大規模な土砂災害事例(H23年台風12号による和歌山県熊野地区土砂災害)より以下の開発目標を設定する。

- ・堆積土砂の一般的な安息角が $30^{\circ}$ 程度であるため、地盤がスリップしない条件下で $30^{\circ}$ 登坂することを目標とする。平成27年度にて地盤がスリップしない条件で登坂可能であることを確認したが、駆動トルクの不足が認められ、平成28年度以降で駆動モータの変更と駆動力伝達機構の変更を行う。
- ・岩塊や倒木等を回避するには、直登坂だけでなく横断方向走行も必要となるため、勾配に対し全方向の走行が可能であることを目標とする。平成27年度ではトラバース機構が斜面の横断走行に対し有効に機能することを確認したが、左右のメインクローラ連結部の剛性が不足し、ねじれ方向のたわみが生じていたため、平成28年度は連結部の剛性を確保する仕様で再製作を行う。
- ・土砂崩落現場では水流と共に土砂の細粒分が流出し、堆積する場所では人が歩けないくらい軟弱な状態となる。人が歩けない状態、建機が走行できない状態の目安がコーン指数 $200\text{kN}/\text{m}^2$ 未満とされるため、コーン指数 $200\text{kN}/\text{m}^2$ 未満の軟弱地盤の走行が可能であることを目標とする。平成27年度で上記軟弱地盤の走破性は確保した。ただし、実際の土砂災害現場では冠水地の走行も想定されるため、H28年度では、走行装置下部の防水性能を確保する。また、新たに追加する各種装置により搭載設備重量の増加が見込まれるため、重量の増加に応じて接地面積を拡大する。
- ・沢筋に沿って流された土砂は上流に行くほど礫が大きくなり、 $50\text{cm}\sim 80\text{cm}$ の礫が存在する。あ



る程度の回避を前提とし、高さ 50cm程度の段差や障害物の乗越えが可能であることを目標とする。平成 27 年度ではサブクローラの使用により、サブクローラ長さ以下の段差乗越えが可能であることを確認した。しかし、サブクローラの起倒トルクが不足し、機体を持ち上げて姿勢を変更するほどの能力は得られなかった。平成 28 年度はサブクローラの起倒機構を変更し、押し上げ力を増強して再製作を行う。

## ②画像取得性能

- ・従来の応急復旧段階での無人化施工では俯瞰画像が必須とされているが、俯瞰カメラの設置は有人作業によるため危険を伴う。よって俯瞰画像無しに走行その他の操作が可能な画像情報を取得するため以下の目標を設定する。
- ・平成 27 年度の開発において、障害物の無い平地走行では2D 全方位カメラによる画像で走行可能なことが確認された。一方で走行に慎重を期する必要がある、障害物の回避動作や段差乗越え動作には、3D画像を取得するロボット(TORSO ロボット)による運動視差や両眼視差による遠近感の把握が有効であることを確認した。ただし、ロボットヘッドの防水性の不足や強風時のブレ、動作の不安定性、ヘッドマウントディスプレイ(以下 HMD とする)の画質の低さなどの問題、個人によっては3D 酔いの感覚があることが確認された。3D 酔いの原因としては、HMD 画像と身体感覚のズレ、つまり、HMD とロボットヘッドの連動性が不安定であることや HMD 画質の粗さが考えられる。平成 28 年度はロボットヘッドの防水性、耐風性、ソフト的動作の安定性、HMD 画質向上のための改良を行う。また、ソフト的な動作の安定性確保のため、制御用 PC とグラフィック用 PC を独立させる。平成 29 年度は、走行装置に全ての装置を搭載した状態での耐久試験後、必要な改良を行う。

## ③無線通信性能

土砂崩落現場から離れた、安全が確認された場所から立木等の通信障害を回避しつつ崩落箇所のロボットと通信するため以下の通信性能を確保することとする。

- ・中継アンテナを用いて立木等の通信障害を回避することが可能であること
- ・2kmの長距離通信(基地局～中継局 1.5km+中継局～調査ロボット 0.5km)が可能であること(崩落土砂は沢筋に沿って流れ、災害調査は下流側から沢筋に沿ってのアプローチとなることが一般的とされる。下流側の比較的安全な地点から崩落部への離隔は 2km 程度ある場合が多い)
- ・平成 27 年度の開発においては、基地局アンテナ及び中継アンテナを用いての 2km 通信の性能は確認したが、画像及び制御信号等を伝送するに十分なスループット(目標 10Mbps 程度)が確保できない場合があった。平成 28 年度では通信方式等を変更し、スループットを確保する。平成 29 年度は、走行装置に全ての装置を搭載した状態での耐久試験後、必要により改良を行う。

#### ④貫入試験性能

有人作業による崩落地盤調査を回避するため以下の機能を確保することとする。地盤の性状を得るにはボーリングや貫入の行為が必要となるが、貫入反力の増加は機体重量の増加と同義であり、走行性能とトレードオフの関係にある。よって調査対象を軟弱な地盤の表層付近に限定し、走行性能を確保しつつ地盤性状の調査を行う。

- ・遠隔でスウェーデン式貫入試験を実施できること(N値 5 以下の軟弱地盤で GL-3.0m程度)
- ・測定結果を無線にて通信可能であること
- ・平成 27 年度の開発において基本性能は確保した。平成 28 年度は実現場での冗長性を確保するため、貫入ロッドが地盤に拘束された場合のロッド切断機能を追加する。また、現状人間により行っている貫入音からの土質判定を、将来的に自動判定できるよう貫入音データの収集と解析を行う。平成 29 年度は走行装置に全ての装置を搭載した状態での耐久試験後、必要な改良を行う。

#### ⑤測位性能

- ・平成 27 年度は正規の測位機能を搭載しておらず、簡易 GPS 搭載による走行地点表示に留めたが、平成 28 年度は GNSS アンテナを搭載し、走行ルートの提示や貫入点の位置情報の取得を行う。

#### ⑥運用

山間部の狭隘な場所にて迅速な立上げ、調査を行うため以下の性能を確保する。

- ・狭隘な林道等でも搬入が可能となるよう、2t車に積載可能な外形寸法及び重量とする
- ・2kmの走行及び調査箇所、2点以上の貫入試験が実施可能となる電源容量を確保する
- ・現地到着後 2 時間程度の短時間で立上げが可能であること
- ・調査ロボットの各種遠隔操作は基地局に別途設営される仮設ハウス等屋内から行う  
(基地が設営されない場合は仮設ハウス調達の上、持ち込みとする)
- ・基地局電源については災害の状況により商用電源または発電機等の調達により対応する

### (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

平成 27 年度に、国土交通省「次世代社会インフラ用ロボットの開発・導入プロジェクト」の実証試験に参加し要素技術である「走行装置」および「画像取得装置」について要素試験を行った。また、平成 28 年にも同上実証試験に参加し、そこでは調査ロボット全体の試作機を作成して臨んだ。

## ①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b> ・走行装置 重量:1.2t 接地圧:16kPa 登坂角:30° 段差乗り越え:50cm	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。 平成 28 年度以降、駆動力を増強しつつ信頼性・耐久性を向上させた新規モデルを製作中。	達成  H28 年度 達成見込み
・画像取得装置 俯瞰画像を必要としな い 3D 画像を取得する ロボットヘッドの製作	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。 平成 28 年度以降、より耐久性を高めたロボットとシステムの安定化を目指し改造中	達成  H28 年度 達成見込み 達成
・無線通信装置 帯域:10Mbps 以上 総遅延:300msec	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。 平成 28 年度以降、より安定的な通信をめざし、周波数帯・出力の再検討中	H28 年度 達成見込み 達成
・貫入試験装置 遠隔にてスウェーデン 式サウンディング試験 を実施	平成 27 年度に試作機を製作し、実証試験を実施。実施計画記載の目標を達成。 平成 28 年度以降、ロッドが試験中に拘束された場合などのリスクに対処するための改造を実施中。	H28 年度 達成見込み
・測位	平成 27 年度は簡易な測位装置にて基礎試験を実施 平成 28 年度以降、GNSS 受信機を搭載し、走行・試験軌跡表示や走行ナビゲーションの実施見込み	H28 年度 達成見込み
・運用 2t車への積載 2 時間での作業準備	平成 27 年度における実証試験にて確認済み	達成

## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) 走行装置の開発

本開発では、(株)移動ロボット研究所のレスキューロボット技術である「マルチクローラ型走行装置」の技術を応用して開発することとした。これはメインクローラに前後サブクローラを追備したもので、今回の仕様に合わせスケールアップし、試作機を製作し要素試験を実施した。近年、EV の出現により高出力モータが市販されるとともに、大容量で比較的軽量の Li-ion バッテリーの入手が可能となったことから駆動はモータとした。

走行装置の仕様の選定を進めるとともに、調査ロボット全体の接地圧および転倒角の検討も行った。これは、段差乗り越え性能や登坂力を増強するために駆動力やサブクローラの起倒力を高めると、走破装置の重量増に繋がり接地圧は増加する。また、試験装置は反

力を必要とするが、それも接地圧とトレードオフの関係にある。さらに、試験装置の重量増は重心が高くなり転倒角が増加してしまうというすべてを解決するための検討を行い、走行装置のモデル実験等を経て仕様を決定した。

## (ii) 画像取得装置の開発

従来の応急復旧段階での無人化施工では俯瞰画像が必須とされているが、俯瞰カメラの設置は有人作業によるため危険を伴うことが課題となっていた。このため、今回は慶應義塾大学のトレイグジスタンス技術を応用した TORSO ロボット (3D カメラ+6 自由度ロボットヘッド) を改良し、俯瞰画像を用いず HMD 上の映像のみで障害物の回避や乗り越えといった走行の遠隔操作が可能となるよう画像取得部分の開発を行った。なお、TORSO ロボットによる 3D 画像のみでなく、状況に応じて 2D 全方位画像も併用することで、いわゆる 3D 酔いのリスク低減を図ることとした。

トレイグジスタンスとは、操縦者の身体運動と全く同期した運動を行なうロボットの頭部に人間の左右眼と同等のステレオカメラを配置し、操縦者に HMD を装着してステレオカメラの映像を投影することによって、操縦者が自在に身体を動かした際に、ロボットがあたかも操縦者の「分身」のように動き、操縦者が遠隔地からロボットに乗り移ったかのような感覚を得ることができる技術概念である。実装にあたっては、耐振性・防塵性・防水性を向上した屋外現場仕様のトレイグジスタンス画像取得装置を新規に開発した。

災害現場を想定して新たに開発した TORSO システムにおいては、カメラは操縦者が VR 酔いの影響を受けないように、非球面レンズを用いた 13 メガピクセルのカメラモジュールを用いた。カメラはステレオとして人間の左右眼と同様に 64mm 離して配置し、搭載したボード PC により画像の圧縮と伝送を行った。また、新型 TORSO ロボットの制御系は 2 本の RS485 規格で接続し、頭部角度・出力トルク等のデータの制御を行っている。最終的に各眼 720p・60fps の解像度で伝送され各フレームは H264 規格で圧縮され、UDP 通信により伝送される仕様とした。

## (iii) 無線通信装置の開発

無線通信は距離や障害物等を想定して、基地局・中継局・移動局の 3 つから構成することとした。

基地局は定置式とし、通信距離を最大限確保するため、全通信距離 2km のうち 1.5km 通信することを目標とした。中継局は、運搬する装置上に搭載することでそれ自身が移動可能とし、基地局および移動局との通信を常時確保するために追従機能を持たせることとした。中継局から移動局の通信距離は残りの 500m となり、移動局は散在する岩塊や樹木等を乗り越える為に絶えずアンテナ方向が変わることから、安定的に無線通信ができるよう全方位無指向性のアンテナを採用した。

なお、使用した周波数帯域は、通信距離・回り込みのどちらも期待できる 2.4GHz 帯

(出力 10mW) を選定し、電波干渉リスクはアンテナの指向性で対処することとした。

基地局および中継局は、パッチアンテナを搭載するが、見通しでの通信距離を最大限確保するため、伸縮ポールでアンテナを水圧シリンダで上昇させる仕様とした。

#### (iv) 貫入試験装置の開発

陸路からアクセスすることにより、崩落地盤そのものの性状を得ることを目的として、災害地の地盤性状を把握するためのサウンディング方法を選定し、住宅の地耐力調査などで用いられているスウェーデン式サウンディングによる試験方法を採用することとした。

取得できるデータは、静的貫入抵抗の  $W_{sw}$  と  $N_{sw}$  で、その値から換算  $N$  値を算出し、その  $N$  値から内部摩擦角、粘着力、一軸圧縮強さが換算値として求められる。また、一般的なスウェーデン式サウンディングにおいては、オペレータが貫入ロッドから発する音によって土質を判定しているが、今回は現地のロッド周辺音を取得し、基地局の操作場所で判定できるようにすることとした。さらに、一般のスウェーデン式サウンディング試験機では間隙水圧の測定は不可であるが、ロッドの先端部に間隙水圧計を埋込むことで、間接的ではあるが地下水位の計測も可能とした。

試験可能深度は、できる限り深い方が好ましいが、今回はロッドは継ぎ足すことは行わず予め貫入深さ分のロッドを装着した状態で走行することとした。ロッドの長さは走行時の機体全長を 4m まで搭載は可能であるが、運搬時に立木等との接触リスク等と勘案して、ロッド長（貫入深度）を 3m とした。なお、今回はロッドとそれを保持する貫入機構を伴うリーダー自体を起倒式とする方法を採用することとした。このリーダー可倒機構によって、試験地でベース部の鉛直が確保できない場合にも起倒装置によって角度調整することにより、常に鉛直方向にロッドを貫入することを可能とした。

#### (v) 測位装置の開発

現在製作中で、具体的な成果無し。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> ・走行装置 各数値目標を達成しつつ、耐久性の向上する。 ・画像取得装置 システムの安定化とロボットの耐久性向上する。 ・無線通信装置 より安定した通信のため周波数帯の再検討および回線遮断時の緊急無線の確保をする。 ・貫入試験装置 貫入音から土質の自動判定が可能とする。 ・測位 予め得た災害地の 3 次元地形データを元に自動ルート選定する。	新規にマルチクローラ型走行装置を製作中。  既存試作機を改造中。  既存試作機を改造中。  試験音をサンプリングし、解析中。  地形データを取得し、ルート選定ソフトを開発中。	達成の見通しである。  達成の見通しである。  達成の見通しである。  達成の見通しである。  達成の見通しである。

### (4) 成果の普及

本研究開発で得られた成果は、同業種のみならず広く一般に普及するよう、新聞や雑誌をはじめとする媒体や、各展示会への出展、学会等への論文発表にて広く情報発信に努めている。

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

特許、論文、外部発表等の件数 (平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	0 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	13 件

### 【③-(1)-12】 引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)コンソ

#### (1) 研究開発目標

本研究開発では、既存インフラの1つであるトンネルにおいて崩落災害が起こった場合、人にかわって引火性ガス等に係る情報および崩落状態や規模を把握するための高精細な画像・映像等の取得ができる装置を開発することを目的とし、原子力発電プラント事故収束支援活動などで実績のあるロボット Quince の改良型として開発された「櫻Ⅱ号」をベースに、防爆性能や探査機能の付加および小型軽量化により、最終的には、トンネル崩落現場において遠隔操作により人に代わって引火性ガスの有無や崩落状態を探査する走行型ロボットを開発する。



本研究開発における開発項目を以下に示す。

図Ⅲ-【③-(1)-12】-1

櫻Ⅱ号(千葉工大開発)

#### (i) 防爆ロボットシステムの開発

引火性ガス雰囲気内での活動を可能とするために、国際整合防爆指針(Ex2015)に適合した防爆性能を付加した探査ロボットを開発し、防爆型式検定を取得する。

#### (ii) 高踏破ロボットの軽量化開発

「櫻Ⅱ号」の持つ高い踏破性と可搬能力・すぐれた耐環境性(防塵・防水)を維持しつつ、取扱い性向上を目指した小型・軽量化により防爆性能を付加したうえで質量 60kg を実現する。

そして、開発したロボットを用いて、暗所や建屋内、砂地など、様々なフィールドにおいて走行試験を実施し、その走破性能と可搬能力、耐環境性を検証するとともに、課題を抽出する。

#### (iii) ロボットによる探査技術の開発

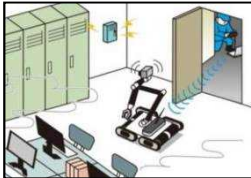
防爆仕様のケーブルリール(ケーブル長 1000m)開発することで、有線により遠隔操作を可能とし、高精細な映像を取得する。また、トンネル内などの閉鎖空間において、ロボット駆動モータ回転数、加速度計の情報等を用いたオドメトリ情報に、ケーブルリールから送り出される通信線長情報などを併用し自己位置を推定する技術を開発する。

#### (2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

本研究開発は、既存インフラの1つであるトンネルにおける崩落災害への適用を想定している。災害現場では、崩落による引火性ガスの噴出、自動車燃料の漏洩等により引火・爆発の可能性があるため、投入するロボットは引火性ガス雰囲気内においてロボット自身が発火源とならないことが必要である。

一方、原子力プラントにおいても、福島原子力発電所での爆発事故のように、災害発生時に引火性ガスが発生する危険があり、化学プラントや石油プラントと同様、防爆ロボットの要望が高い。一般に、引火性ガス雰囲気になり得る環境において、防爆の公的な認証のないロボットが活動することは許容されず、ユーザ(電力会社や ENEOS など石油会社)は防爆ロボットに対し、メーカー自主検査でなく、防爆型式検定(公的機関のお墨付き)を求めていることが判ってきた。表Ⅲ-【③-(1)-12】-1 にユーザニーズと開発コンセプトを示す。

表Ⅲ-【③-(1)-12】-1 ユーザニーズと開発コンセプト

ロボットの市場性	導入における課題	対応策
消防 国交省地方整備局など ・トンネル災害 	★なにが起こっているか分からない災害現場であり、最も厳しい危険場所0種を要求されるが、現行法律では実現は不可。	防爆ロボットを早期実現し、消防と実際の運用について協議できる環境を整える
消防 ・ガス漏れ 警察 ・危険物処理 	★消防は自ら所有し訓練したもののみ現場で使用するため、該当する全消防署に配備する必要がある。	導入コストの低減
化学プラント 石油コンビナート 火力プラント事業者 ・巡回点検 	★防爆検定（公的機関のお墨付き）が必要。	防爆検定の取得
原子力防災支援センターなど ・原子力災害への備え 	★防爆として最も厳しい水素ガス対応が必要	上記 +水素ガス対応での検定取得

①研究開発目標の達成度

実施計画書に記載の H28 年度実施項目の達成度を以下に示す。

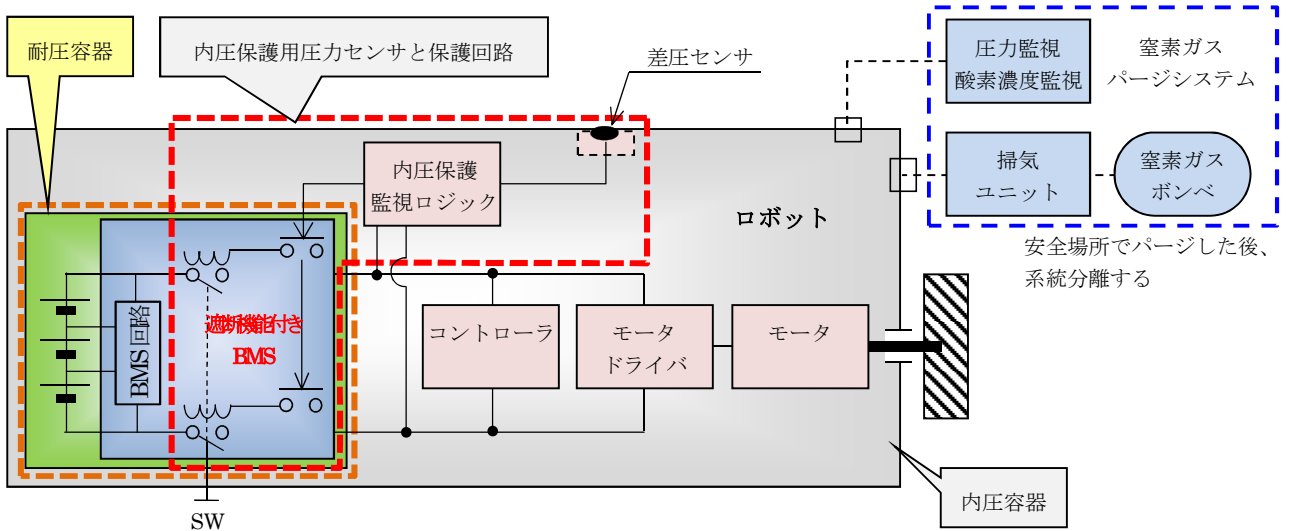
中間目標	研究開発成果	達成度
<b>【実施計画】</b> 国内における防爆型式検定の取得 ATEX の取得に必要な課題抽出 走行試験の実施、走破性能の検証、課題抽出 ケーブルリールの検証、性能評価	バッテリー式陸上移動ロボットとしては国内初となる防爆型式検定を取得。 産業安全技術協会への問合せも含め調査中。 社内に模擬コースを設定し、無線通信・目視操作でプレ試験を実施し、大きな問題なく完走。走破性を確認した。 リールから送出されるケーブル長から自己位置を推定する機能の評価試験を実施し、誤差±2m に収まることを確認。トンネル内での自己位置推定に目処を得た。	達成 H28 年度未達成見込み H28 年度未達成見込み 達成



## ②研究開発成果の概要及び意義

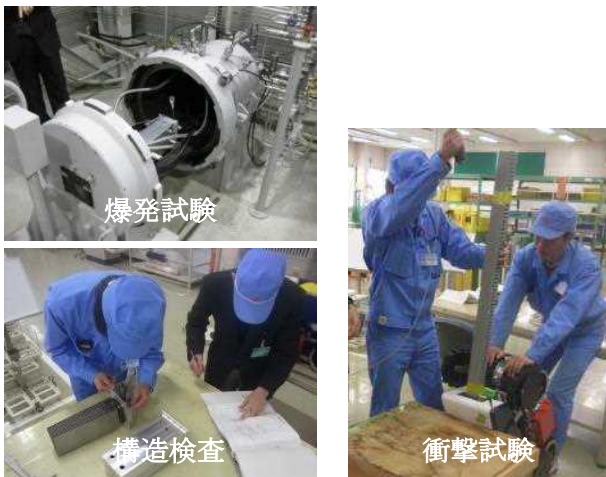
### (i) 防爆ロボットシステムの開発

国際整合防爆指針(Ex2015)に適合した探査ロボットとして、バッテリー/BMS 回路/遮断器を耐圧防爆構造のバッテリーケースに収納することとし、内圧防爆構造のロボット本体に耐圧防爆構造のバッテリーケースを内包する構造を採用した。また、水素対応等のユーザーニーズを考慮し、ロボットの防爆性能を Ex px d II B + H<sub>2</sub> T4 Gb と決定した。



図III-【③-(1)-12】-2 内圧防爆+耐圧防爆のシステム構成

ロボットの防爆方針に基づき、遮断機能付き BMS の開発を含む保護回路の二重化、耐圧防爆バッテリーケース、掃気ユニット等を開発し、これらの機器を探査ロボットに組み込み、防爆検定申請に必要な公的検定機関(国内では産業安全技術協会のみ)立会のもと試験・検査を実施し、全ての試験に合格した。その後、防爆型式検定を申請し、バッテリー式の陸上移動ロボットとしては国内初となる防爆型式検定を取得した。



図III-【③-(1)-12】-3 防爆型式検定に係る試験

防爆構造電気機械器具型式検定合格証	
申請者	兵庫県神戸市長谷区和田町一丁目1番1号 三進工業株式会社 本社(神戸)・福岡(福岡) 電子力学事業部
製造者	兵庫県神戸市長谷区和田町一丁目1番1号 三進工業株式会社 本社(神戸)・福岡(福岡) 電子力学事業部
品名	移動ロボット
型式の名称	MII-Walky-Ex
防爆構造の種類	本体 内圧防爆構造 (px) バッテリーケース 耐圧防爆構造
防爆型式は国際規格等及び国内規格	Ex px d II B + H <sub>2</sub> T4 Gb
適用基準	産業安全技術協会 (国際規格技術情報) 2019年7月1日現在適用
認定機関	パナソニック システムインテグレーション事業部 認定 三進工業株式会社 型式 MII-Walky-Ex 電圧 AC200V、6V 電流 1.8A
出力容量	最大出力 無負荷 1.0kW/2.4GHz 最大動作圧力 0.3Pa
使用条件	認定試験機関の認可範囲については、取扱説明書を確認すること。
型式検定合格番号	第 T C 3 3 3 3 3 3 号
有効期間	平成28年7月1日から平成31年7月31日まで 平成 年 月 日から平成 年 月 日まで 平成 年 月 日から平成 年 月 日まで 平成 年 月 日から平成 年 月 日まで
機械等検定規則による型式検定に合格したことを証明する。 平成28年7月 日付	
型式検定実施者 公益社団法人 産業安全技術協会	

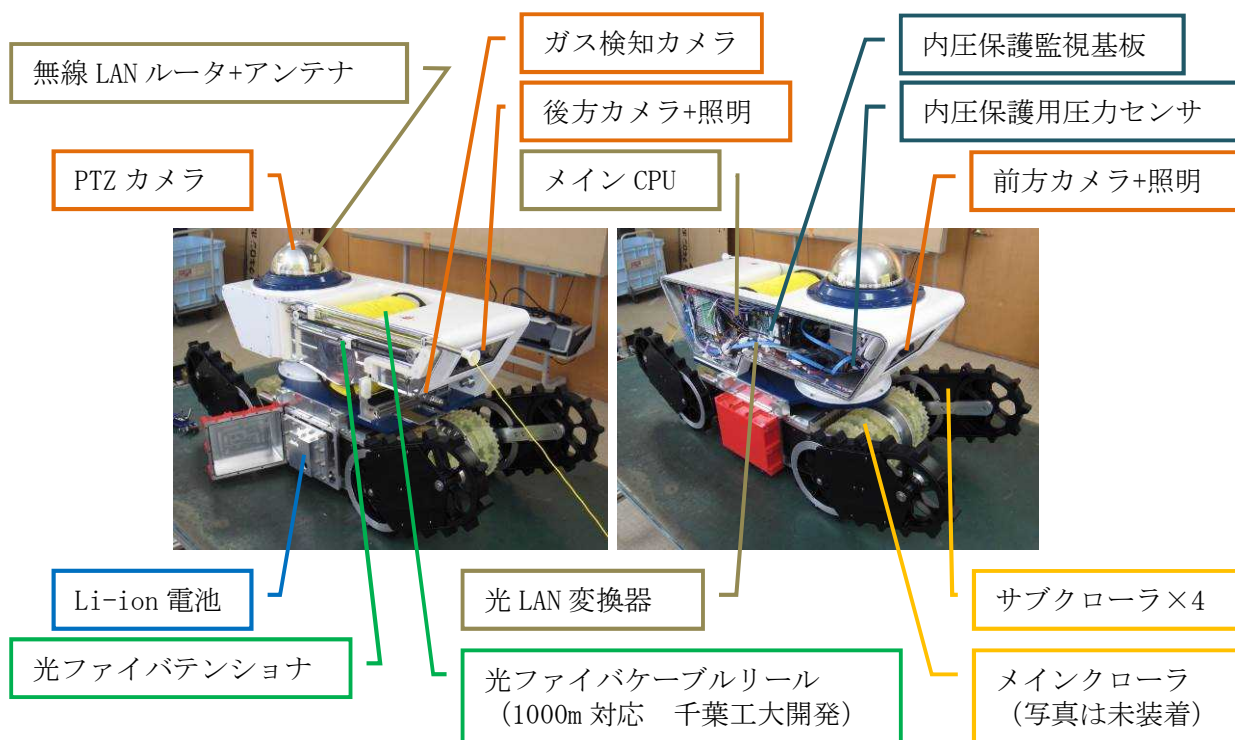
図III-【③-(1)-12】-4 型式検定合格証

(ii) 高踏破ロボットの軽量化開発

ベースとなる“櫻Ⅱ号”は、本体のほぼ全面を覆う2つのメインクローラと4つの独立サブクローラを有し、45度の階段昇降も可能なすぐれた不整地踏破性能を有する。この踏破性を維持しつつ軽量化開発したロボットは、防爆や探査に必要な装備を搭載した状態でも2人で持ち運び可能な質量約60kgを達成した。

表Ⅲ-【③-(1)-12】-2 開発したロボットの仕様

項目	仕様
外形寸法(収納時)	L710×W420×H540mm
本体質量	60kg
走行速度	1.2km/h
階段昇降角度	45°
環境情報取得	PTZカメラ、ガス検知器
連続稼働時間	1.5時間
耐環境性	IP47相当



図Ⅲ-【③-(1)-12】-5 ロボット概要(カバーを外した状態)

本研究開発は、トンネル災害対応を想定しているが、実トンネル災害での検証は難しいため、社内に屋内/外を走行する模擬コースを設定し、目視操作・無線通信にてプレ走行試験を実施。当該試験にて、アスファルト、雑草地、砂利道、水溜り、階段昇降、段差乗越え、狭隘部等を完走し、その走破性能を確認した。

今後、遠隔操作・有線通信にて試験実施し、走行性能、操作性(使い勝手)を検証するとともに、操作ノウハウを蓄積し、障害物乗越え時の転倒や滑落、そしてこれらによって引き起こされるメカニカルスパーク等の危険に配慮した操作手法や注意事項をマニュアルに纏めていく。

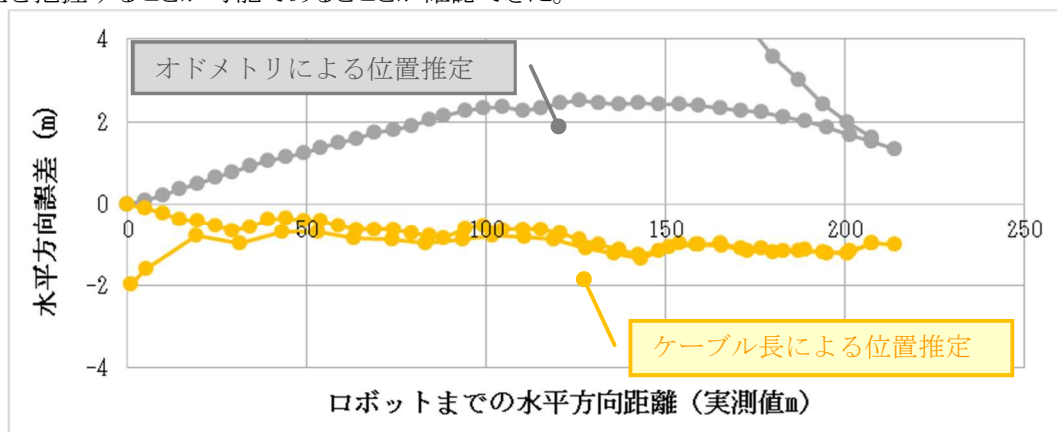


図Ⅲ-【③-(1)-12】-6 プレ走行試験

### (iii) ロボットによる探査技術の開発

防爆仕様の光ファイバ自動ケーブルリール(ケーブル長 1000m)を開発し、トンネルのような無線状態の悪い環境においても、有線により遠隔操作が可能で高精細な映像を取得できること、ロボットの前進/後進に伴うケーブルの吐出し/巻取り動作に問題ないことを確認した。

また、トンネル内などの閉鎖空間において、ケーブルリールから送り出される通信線長情報を用いて自己位置を推定する技術を開発し、約 220m の直線を往復し、スタート地点からの実測値と推定される自己位置との誤差を評価する試験を実施した。結果は誤差が±2m に収まることを確認し(図 7 黄色グラフ)、適用対象であるトンネルのようなほぼ直線の場所においては、大凡の自己位置を把握することが可能であることが確認できた。



図Ⅲ-【③-(1)-12】-7 自己位置推定の試験結果

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成 29 年度末)	現時点の研究開発成果、 課題及び今後の取組み	達成の見通し
<b>【実施計画】</b> ロボットの総合的な防爆性能、走行性能や操作性(使い勝手)を検証する。 また、現場投入の判断材料として、探査ロボットの利用条件や制限事項、環境条件等を明確にする。	防爆性能については、防爆指針に適合した探査ロボットを開発し、防爆型式検定を取得済。 走行性能については、社内に模擬コースを設定し、目視・無線操作にて、プレ試験を実施済みであり、ベースとした桜Ⅱ号に遜色ないことを確認した。	今後、遠隔・有線操作による走行試験を実施し、走破性、操作性の検証を行うとともに、走行データ、操作ノウハウを蓄積し、ロボットの利用条件等を含めマニュアルに纏めていく。 平成 29 年度末に達成の見通しである。

### (4) 成果の普及

国内初となる防爆型式検定の取得を受け、三菱重工品川本社において、プレス発表を実施。マスコミ 35 社 59 名を前にロボットの防爆性能や走破性能のプレゼン、走行デモを実施した。記事は、朝日新聞、産経新聞、日経新聞、日経電子版他に多数掲載され、一般に広く情報が発信された。

また、第 8 回インフラ検査・維持管理展(2016 年 7 月 20 日～22 日 東京ビッグサイトにて開催)に出展し、成果の普及に取り組んでいる。今後、危機管理産業展(2016 年 10 月 19 日～21 日 東京ビッグサイトにて開催)や JOGMEC Techno Forum(2016 年 11 月 29 日～30 日 パレスホテル東京にて開催)への出展を計画している。



図Ⅲ-【③-(1)-12】-8 プレス発表(7/12 @三菱重工品川本社)

### (5) 知的財産権等の確保に向けた取組み

特許、論文、外部発表等の件数(平成 28 年 8 月末現在)

	件名	件数
1	特許出願件数	1 件
2	査読有論文発表数	0 件
3	査読無論文発表数	0 件
4	外部発表	6 件

**研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発 (ii) 非破壊検査装置開発**

**【③-②】超小型 X 線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発/(国研)産業技術総合研究所コンソ**

**(1) 研究開発目標**

高度成長期に整備された社会インフラ及び産業インフラを適切に維持管理するには、その健全性を効率的に検査することが必要とされており、X線や中性子等を用いて非破壊で検査できる技術が注目されているが、現状では人手に頼っている面が多く効率的な検査ができていない。本課題ではロボットに搭載できる X 線や中性子の線源および検出器等の非破壊検査コンポーネント及び自動検査装置を開発するとともに、それらを化学プラント等の保温材被覆配管の移動ロボットに搭載した非破壊検査システムを開発し、その有効性を実証することを目的とする。

具体的には、産業インフラの中でも特に検査ニーズが高い保温材で被覆されたプラント配管の腐食は、保温材中の水の存在によって引き起こされることから、ロボットを用いて腐食可能性をスクリーニング検査するため、ロボット搭載可能な中性子水分センサを開発するとともに、ロボットに搭載して、実環境での実証試験を行い実用的効率的な検査が可能であることを実証する。

さらに、中性子水分センサ搭載ロボットで明らかになった腐食の可能性がある箇所を X 線非破壊検査装置にて詳細検査するための X 線非破壊検査システムを開発する。プラント配管の腐食による減肉を検査するには、X 線が数 cm の鉄を透過してイメージングできる能力が必要であり、そのためには管電圧 200kV 以上の X 線源とそれに対応した検出器が必要である。そこで本課題では、自走ロボットに搭載してロボットのバッテリー駆動で動作する管電圧 200kV 以上の X 線管及び超小型パルス X 線源を開発するとともに、この 200kV の管電圧のパルス X 線のイメージングに適したテルル化カドミウム (CdTe) 半導体を用いた高効率 X 線イメージセンサを開発し、ロボットに搭載して実用的な検査が可能であることを実証する。

さらに、X 線非破壊検査の応用範囲を拡大させるため大面積 X 線イメージセンサの基盤技術開発として、隔壁シンチレータと IGZO 素子を用いた大面積化に適したフラットパネル型イメージセンサの要素技術を開発し、従来の技術では困難である低ノイズ・高検出効率・高空間分解能の仕様の実現を検証する。

数値目標としては、平成 28 年度までに、X 線及び中性子水分センサの基本コンポーネントを完成させ、自走ロボットに搭載して 6 インチ保温材付き配管のスクリーニング検査を可能にする。各コンポーネントの数値目標としては、X 線源：管電圧 200kV 以上、筐体厚 7cm 以下、重量 3kg/組以下、外径測定精度 0.3mm 以下、外形測定間隔 0.8 秒以下、検出器：センサピッチ 0.1mm の CdTe イメージセンサを開発するとともに、70mm の鉄を透過した X 線のイメージングが可能であることを確認、中性子水分センサ：重量 2.0kg 以下、検査スピード 670 箇所/日、自走ロボットに搭載した場合のスクリーニング検査能力：100m/日以上を目標とする。

また、平成 30 年度までに、中間目標のスクリーニング検査に加えて、6 インチ保温材付き配管直線部における内径・減肉について 0.3mm 以下の精度でロボットによる自動測定を可能にする。これらの装置の性能を、現場での実証試験によって確認する。また、X 線源や検出器について、20000 時間以上の稼働寿命であることを確認する。さらに、パルス X 線源に対応した線量モニタや自動停止機構を開発し、検査システムに搭載する。

(2) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

①研究開発目標の達成度

中間目標	研究開発成果	達成度
<p><b>【基本計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・X線源:管電圧 200kV 以上、筐体厚 7cm 以下、重量 3kg/組以下</li> <li>・外径測定精度 0.3mm 以下、外径測定間隔 0.8 秒以下</li> <li>・センサピッチ 0.1mm の CdTe イメージセンサ開発。</li> <li>・70mm の鉄を透過した X 線のイメージングが可能であることを確認。</li> <li>・中性子水分センサ:重量 2.0kg 以下、検査スピード670箇所/日、自走ロボットに搭載した場合のスクリーニング検査能力:100m/日以上</li> <li>・X線及び中性子水分センサの基本コンポーネントを完成させ、自走ロボットに搭載して6インチ保温材付き配管のスクリーニング検査を可能にする。</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・X線源 管電圧 200kV 2.5kg/個以下</li> <li>・CdTe 検出器 センサピッチ 0.1mm, センサ領域 44mmx24mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・カーボンナノ構造体 X線源を用いて、ロボットに搭載可能な管電圧 200kV 以上、筐体厚 7cm 以下、重量 3kg/組以下の X線源を開発した。</li> <li>・測定間隔 0.8 秒以下で外径を 0.3mm 以下の精度で外径を測定できるシステムを開発した。</li> <li>・センサピッチ 0.1mm, 素子厚 1mm の高エネルギーX線に対応した CdTe イメージセンサを開発した。</li> <li>・開発したカーボンナノ構造体X線源を用いて、70mm の鉄の透過イメージングが可能であることを確認した。</li> <li>・重量 2.0kg、検査スピード30秒/箇所検査可能でロボットに搭載可能な中性子水分センサを開発した。この水分センサをロボットに搭載し、化学プラント現場での実地試験により、スクリーニング検査能力 100m/300 分以上であることを確認した。</li> <li>・中性子水分センサの基本コンポーネントを完成させ、自走ロボットに搭載して6インチ保温材付き配管のスクリーニング検査を可能にした。X線非破壊検査システムに関しては、検証用ロボットに搭載して外径測定精度 0.3mm の検査能力を確認した。H28 年中に X線システム用自走ロボットに搭載して外径検査を可能にする見込みである。</li> <li>・管電圧 200kV,重量 2.5kg/個、ロボット用バッテリーで駆動可能な X線源を開発した。</li> <li>・センサピッチ 0.1mm、センサ領域 44mmx24mm で素子厚 1mm、ロボット用バッテリーで駆動可能な高エネルギーX線対応の検出器を開発した。</li> </ul>	<p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>達成</p> <p>中性子: 達成 X線: H28 年 度達成 見込み</p> <p>達成</p> <p>達成</p>

中間目標	研究開発成果	達成度
<ul style="list-style-type: none"> <li>・中性子水分センサ He3 センサ完成、シンチレーション式開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボットに搭載できる He3 型の中性子水分センサを開発するとともに、シンチレーション式中性子センサを試作し、ロボット搭載水分センサとして使用できることを確認した。</li> </ul>	達成
<ul style="list-style-type: none"> <li>・大面積検出器 素子厚 600 <math>\mu</math> m, 有感面積 10cm<math>\square</math>の試作器のイメージセンサ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・素子厚 600 <math>\mu</math> m、有感面積 10cm<math>\square</math>の隔壁シンチレータと低リーク電流イメージセンサを組み合わせたX線検出器を試作し、高エネルギーX線を用いてその性能を確認した。</li> </ul>	達成
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボットのフィールド検証: 中性子水分センサ搭載ロボットの化学プラント現場でのフィールド検証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中性子水分センサ搭載ロボットの化学プラント現場での保温材被覆配管のスクリーニング検査のフィールド検証を行い、基本計画の目標を達成できることを確認した。</li> </ul>	達成

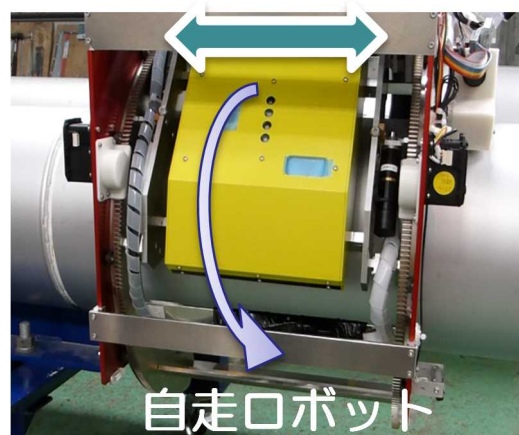
## ②研究開発成果の概要及び意義

### (i) 超小型 X 線・中性子非破壊検査システム開発

X線や中性子線源とロボット技術を用いたインフラ点検用自動検査システムの有効性を実証するため、非破壊検査6インチ保温材被覆配管検査用の自走ロボットに中性子水分センサを搭載した保温材被覆配管水分計測システムを開発し、化学プラント配管の腐食可能性をスクリーニング検査できるようにした。このシステムは、配管水平部のサポート等の障害物を回避しながら、ロボットの移動・停止・中性子水分センサによる計測の繰り返し動作を行うことにより、保温材被覆配管の上部及び下部の水分計測ができる。模擬配管を用いてこのシステムの動作試験を行い、配管の走行やサポートの回避などの動作が問題無く動作できることを確認し、化学プラントの現場でのフィールド試験に移行した。

また、X線非破壊検査装置でも6インチ保温材被覆配管の検査ができるようにするため、X線の非破壊検査システム性能検証用のメカを試作した。このメカに(ii)及び(v)で開発したX線源及びX線検出器を搭載して配管の周囲を回転してX線の出射・検出ができるようにしてX線による配管検査技術の開発を進めた。さらに、中性子水分センサ搭載ロボットとX線非破壊検査装置ロボットの複合システムの運用シナリオの検討を行い、実地での動作検証用のX線非破壊検査装置搭載自走ロボットの製作を開始し、H28年度中に完成予定である。

さらに、X線管及び非破壊検査システムの長時間のX線発生動作試験を行うことができる施設を整備し、長尺の模擬配管試験体を同施設に設置して実地試験に近い形でX線非破壊検査システムの動作検証をできるようにした。



図Ⅲ-【③-(2)】-1  
中性子水分センサ搭載自走ロボット

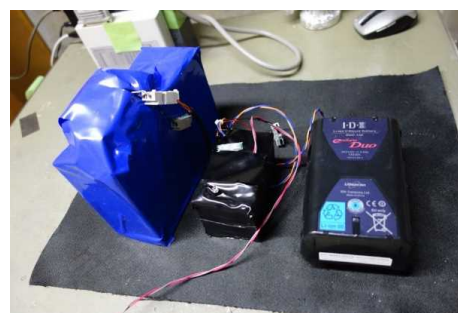
## (ii) 超小型 X 線源開発

### (a) 200kV X 線管の開発

化学プラントの6インチ配管の肉厚などを計測するには、数 cm の鉄を透過でき、ロボットに搭載して配管と配管の間に挿入してイメージングできる小型軽量のX線源が必要であり、そのために管電圧 200kV の小型X線管を開発した。このX線管は、針葉樹型のカーボンナノ構造体冷陰極電子源を用いたX線管で、X線発生時以外は電力を消費しないで、バッテリー駆動に最適なX線管とした。X線管の放電対策や長寿命化対策のため、真空アニール脱ガス処理、高電圧印加エージング処理等の適切な処理技術を確認した。

### (b) ロボット搭載用超小型 X 線源開発

ロボット用バッテリーで駆動する 200kV X線管を駆動するためのドライブ回路を開発し、最大 40W 程度の電力で 200kV 以上のパルスX線を発生できる小型X線源を完成させた(図Ⅲ-【③-(2)】-2)。また、X線源のパルス発生タイミング制御機構を設け、検出器と絶縁を保ちつつ同期して計測ができるようにした。このX線源は 2.5kg 以下であり、検出器と合わせて 3kg 以下である。この試作X線源に 200 kV 以上の高電圧を印加して管電圧のX線が出ることを確認した。さらに、X線発生・透過能力試験を行い、鉄 70mm の透過能力があることを確認した。



図Ⅲ-【③-(2)】-2 バッテリー駆動

従来の非破壊検査用X線源は、高出力型のものは 200V 等の商用電源が必要で大きく重



く現場での操作性が悪い、バッテリー駆動のものは出力が弱く寿命が短いという問題があったが、本課題で開発したX線源は、小型軽量で数 cm の鉄を透過させてイメージングできるだけの出力があり、本課題で開発しているプラント配管自動検査システム以外にも様々な現場の非破壊検査に利用できると考えられる。

### (iii) 中性子水分センサ開発

#### (a) ロボット搭載用ヘリウム3中性子水分センサ

非破壊で保温材被覆プラント配管の保温材中の水分量を計測できるヘリウム3中性子検出器を用いた水分センサをロボットに搭載可能にし、重量 2.0kg を実現した。この中性子水分センサ搭載ロボットを日立パワーソリューションズ事業所内にて基本性能を確認した後、フィールド試験において実配管の水分計測を行い、再現性高く水分計測ができることを確認した。

#### (b) シンチレータ式中性子水分センサの開発

ヘリウム3は稀少で、量産には向いていないため、資源の枯渇の心配のないシンチレータ式中性子検出器の開発を行い、ロボットに搭載できるようなシンチレータや光検出器を製作するとともに信号処理基板の開発を行った。開発した検出器の性能を評価し、ロボット搭載水分センサとして問題無いことを確認した。

### (iv) 配管検査用直線移動ロボット開発

開発している非破壊検査装置を搭載可能で、化学プラント保温材被覆配管の直線部を移動し、フランジとの衝突や配管サポートなどを回避しながら検査できるロボットの開発を行い、中性子水分センサ搭載ロボットを試作した。このロボットの操作性や性能を確認するためフィールド試験を行い、その中で明確になった課題について対応した。これにより、フィールドでのロボットの操作性を大幅に改善した。

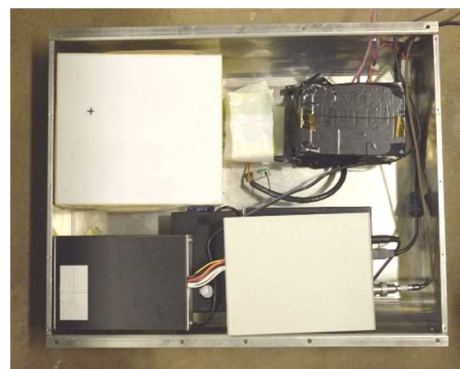


図Ⅲ-【③-(2)】-3

配管検査用直線移動ロボット

## (V) 超小型 X 線源用 X 線検出器開発

0.1mmピッチで高エネルギーX線の2次元イメージを撮ることができる素子厚1mmのCdTe X線イメージングセンサーをロボット搭載可能にするため、イメージセンサの小型化、低消費電力化をすすめ、図III-【③-(2)】-4のようにロボットの回転ユニット筐体内にX線源とともに収めた。さらに、ロボット用14.8Vバッテリーで駆動できるようにした。また、コントラスト低下の原因となっていたCdTe素子ピクセル毎の感度差によるノイズを低減するアルゴリズムを開発、実装した。



図III-【③-(2)】-4 ロボット搭載用筐体に収めたX線源（上部）及びCdTe検

## (Vi) 動作・実証試験及び技術移転

### (a) 中性子水分センサ搭載ロボットによる非破壊検査システムのフィールド試験

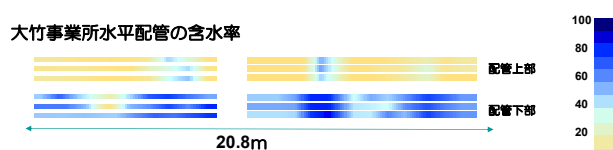
開発した中性子水分センサ搭載ロボットの現場での性能評価を行うため、三菱レイヨン大竹事業所および、三菱化学四日市事業所の実配管にて中性子水分センサ搭載システムのフィールド試験を実施した（図III-【③-(2)】-5）。

試験では、保温材付き6インチ配管の直線部を使用し、地上配管に加えて高所配管でも試験を実施した。これらの動作試験の結果は良好であり、性能限界として走行速度を変化させての試験を実施し、最高速度は15cm/secと評価した。

このフィールド試験により、スループット100m/300分で保温材被覆配管の上部及び下部の水分検査ができることを確認するとともに、ロボットによる自動計測の再現性が、作業者が手動で行うよりも高いことを明らかにした。さらに、現場での操作性、安全性を中心に改善点を明確にし、検査システムの改良を行った。



図III-【③-(2)】-5 フィールド試験中の中性子水分センサ搭載ロボット



図III-【③-(2)】-5 大竹事業所水平配管の含水率計測結果(3回計測)

### (b)超小型エックス線源及び検出器のモックアップ試験体による単体試験

保温材被覆配管の外装板金を透過したX線イメージを模擬するため、2mm の鉄板をX線チャートの前に置いて開発したX線源を用いてX線の透過像を撮り、シンチレータ+CCD、シンチレータ+カメラ、イメージングプレート、CdTe 検出器などのX線検出器の性能を評価したところ、CdTe 1mm 厚の検出器が最も鮮明な像を撮ることができることを確認した。

### (c)モックアップ配管によるX線撮像試験

X線源および検出器を配管の外に配置し、凹みが60度毎にあるモックアップ配管を回転させた条件でX線撮像試験を行い、外径は0.1mm程度のばらつきで計測できることを確認した(図III-【③-(2)】-7)。また、配管の厚さに関しては0.3mmの差がX線透過像の差として観測できることを確認した。今後、検証用ロボットにX線源および検出器でX線源・検出器を搭載して配管の外径や肉厚計測の検証を行う予定である。



図III-【③-(2)】-7 X線による外径計測の角度依存性

### (Vi) 大面積X線検出器の開発

X線非破壊検査のスループットを向上させるため次世代の大面積X線イメージセンサの基盤技術開発を行った。隔壁シンチレータとIGZO素子を用いた大面積化に適したフラットパネル型イメージセンサの要素技術を開発し、従来の技術では困難である低ノイズ・高検出効率・高空間分解能の仕様の実現を検証することを目的としたフラットパネル型の検出器の開発を行っており、実証機の開発に取り組み、高エネルギーX線に対する感度を向上させるため、素子にGOSシンチレータを用いた隔壁シンチレータ型検出器の開発を行った。素子厚400μm、素子ピッチ200μm、有感面積100mm<sup>2</sup>以上を実現できる隔壁型シンチレータ製造プロセスを開発し、受光素子にIGZO素子を用いた半導体受光素子と組み合わせた試作機を製作し、X線撮像の実証に成功した。

### (3) 成果の最終目標の達成可能性

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
【基本計画】 ・6インチ保温材付き配管直線部における内径・減肉に	・開発した200kVX線源とCdTe検出器を用いて、6インチ配管の試験体を用いて配管の径や減肉厚の計測のテストを行っており、厚み	・今後実配管検証用のロボットに搭載して検証・改良することにより、達

最終目標 (平成30年度末)	現時点の研究開発成果、課題 及び今後の取組み	達成の見通し
<p>ついて 0.3mm 以下の精度でロボットによる自動測定を可能にする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>開発した装置の性能を、現場での実証試験によって確認する。</li> <li>X線源、X線検出器、中性子検出器について、2万時間以上の稼働寿命であることを確認する。</li> <li>パルス X線源に対応した線量モニタを開発し、周囲の線量がある値を超えた場合に自動的に停止する安全機構を検査システムに搭載する。</li> </ul> <p><b>【実施計画】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>有感面積 20cm<sup>2</sup>以上のワイヤレス型大面積フラットパネル型イメージセンサを開発する</li> </ul>	<p>計測での課題を明らかにするとともに、0.3mmの厚みの差をイメージングできることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>平成29年度～30年度に現場での実証試験を計画しており、そこで開発した装置の性能を確認する予定である。</li> <li>X線源はX線用電子源単体での寿命試験、CdTe検出器は検出器単体にて2万時間以上の推定寿命を確認しているが、今後ロボットに搭載するコンポーネントでの寿命試験を行う予定。</li> <li>パルスX線に対応し、無線でリアルタイム線量をモニタできる計測系のプロトタイプ及び自動停止機構を試作した。今後これらを現場で使用できる線量モニタ・自動停止システムに仕上げ、非破壊検査システムに搭載する予定である。</li> <li>有感面積10cm<sup>2</sup>の試作機で問題無く高エネルギーX線のイメージングが可能であることを確認したことから、有感面積20cm<sup>2</sup>に拡大した製造プロセスを確立する予定である。</li> </ul>	<p>成できる見通しである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>達成できる見通しである。</li> <li>達成できる見通しである。</li> <li>達成できる見通しである。</li> <li>達成できる見通しである。</li> </ul>

#### (4) 成果の普及

論文で開発した技術の特筆すべき成果を発表するとともに、業界紙等にて成果を積極的に発信している。

また、ロボット学会や展示会などで開発した技術やシステムの一般者への発表を行うとともに、X線新技術産業化コンソーシアムにてX線の新技術の事業化に興味を持つ企業への事業の紹介等も行い、成果普及に努めている。

#### (5) 知的財産権等の確保に向けた取り組み

表Ⅲ-【③-(2)-1】-3 特許、論文、外部発表等の件数（平成28年8月末現在）

	件名	件数
1	特許出願件数	0件
2	査読有論文発表数	1件
3	査読無論文発表数	3件
4	外部発表	19件

## IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

### 1. 事業全体の成果実用化・事業化の見通し

本プロジェクトは、「研究開発項目①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」の5コンソ、「研究開発項目②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」の2コンソ、「研究開発項目③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」の13コンソ、「研究開発項目④ロボット性能評価手法等の研究開発」の6コンソにより構成されている。

「研究開発項目①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」及び「研究開発項目②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」においては、コンソ内のユーザー機関が、インフラの健全性を監視・診断するシステムを自社管轄の構造物へ適用、また当該システムを他社へ提供する事業等を検討している。本プロジェクトの対象分野は、道路インフラを中心に、鉄道インフラや産業インフラなど幅広く、応用先として、港湾、河川、空港、ダム等の社会インフラ、鉄鋼、石油、化学等の産業インフラ、エネルギー施設（火力、風力、太陽光等）、ビル建物、商業施設、製造装置等への展開を検討する事業者も複数あげられる。加えて、海外での新規インフラ建設へ対応すべく海外展開を計画する事業者、国内ユーザへのヒアリングを踏まえたマーケティングを実施する事業者、国土交通省の新技术情報提供システム(New Technology Information System: NETIS) への登録について検討する事業者など、各事業者の特有技術で得意分野を活かした事業化の展開を検討中であり、従来技術に比べたコスト、精度、メンテナンス等の取扱いなども踏まえた戦略を各事業者が計画している。

「研究開発項目③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」の事業化の形態としては、当該事業者が開発するロボットを製造販売する事業、開発するロボットを用いた点検等サービスを提供する事業などを検討している。

また、国や地方公共団体の官公庁、道路管理会社、建設コンサルタント、測量会社等をユーザとして捉え、ユーザに対するニーズ調査を実施する事業者や、東南アジアなど国際への展開を計画する事業者など、従来技術に比べたコスト、安定性や信頼性、性能や効率、メンテナンス等の取扱いなども踏まえた戦略を各事業者が計画している。

## 2. 個別テーマ毎の成果の実用化・事業化の見通し

### 研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

#### 【①-1】道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発/技術研究組合NMEMS

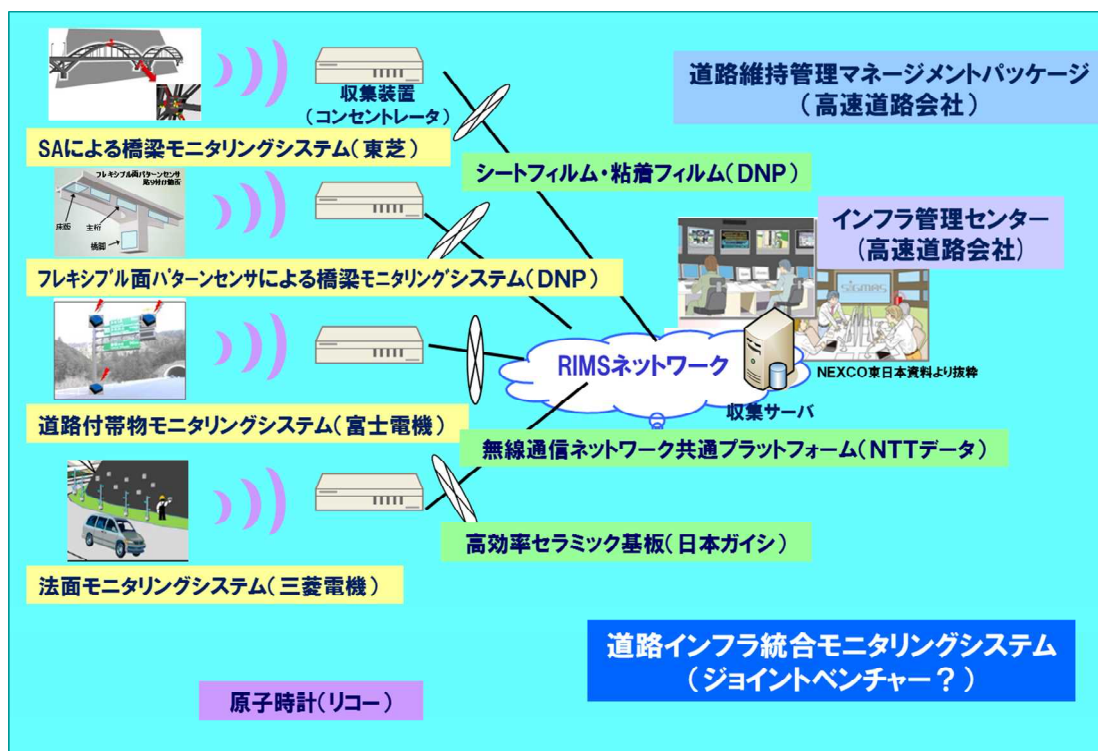
##### 技術研究機構

##### 【全体】

##### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

図IV-【①-1】-1にRIMS全般の事業化戦略の模式図を示す。橋梁、道路付帯物、法面を対象とした各モニタリングシステムに関しては、担当した東芝、大日本印刷(DNP)、富士電機、三菱電機において事業化を進める。高速道路への適用化に関しては参画高速道路会社において検討を進めており、現状の課題を解決できる可能性のある有望なセンシングシステムであるとの見通しが得られている。今後2年間的高速道路での実証試験により、各ターゲットの劣化・損傷を検出するのに最適なパラメータを抽出して、安価な簡易システムの開発を目指し、維持管理体制がしっかりとした高速道路会社だけでなく、一般道への展開を図っていく。共通基盤技術に関しては、DNPがシートフィルム・粘着フィルムの事業化をNTTデータが無線通信ネットワーク共通プラットフォームの事業化を日本ガイシが高効率セラミック基板の事業化をそれぞれ進める。また、NEXCO西日本等ではこれらのシステムを含め、道路維持管理マネージメントパッケージとしての海外展開も模索している。さらに、各センシングシステムを統合した道路インフラ統合モニタリングシステムに関しては、今後ジョイントベンチャー等も視野に入れて参画会社で検討を実施する予定である。昨年度から加速予算で開始した将来技術の原子時計に関してにも担当するリコーが事業化を進める。

(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み及び(3) 成果の実用化・事業化の見通しに関しては、個別テーマにおいて詳述する。



図IV-【①-1】-1 RIMS 全般の事業化戦略

## **(1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発**

### **(1-1) 橋梁センシングシステムの開発**

#### **(1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発**

##### **(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略**

本検討で開発された成果の事業化については主に 2 つの取り組みに分けられる。1 つは SA センサデバイスの製造販売、もう 1 つはセンサ端末を用いた橋梁健全性診断サービスである。

本検討において、センサデバイスを試作し、実証試験を行うことでその実用性の確認を進める。実証試験で抽出された実用上の課題に対する対策及び、最終仕様における量産性を確保した上で事業化を進めていくことから、実証期間から実用化まで一定の期間が必要と考えられる。

また、本検討において試作した小型センサ端末を用いて実証試験中に得られたデータを分析することで、橋梁健全性の評価性能の妥当性を確認する。実用化に向けては、実証場所を追加して、評価手法のロバスト性の確認を行っていく。

想定される事業規模（橋梁インフラモニタリング）は、2020 年で 600 億円、2030 年で 3,200 億円が見込まれ、道路橋以外への展開を含めればさらに想定される事業規模は拡大する。

##### **(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み**

センサデバイスの製品化及び小型センサ端末製品化と橋梁健全性診断サービスの事業化については、(株) 東芝にて行うことを検討している。現時点での事業化の計画は研究開発部門のものであり、事業部門での計画策定はこれからである。一方、本検討による開発デバイス、サービスは東芝のデバイス、ソリューション技術を応用できる対象であるが、道路インフラ分野のモニタリングの経験を補完するため、事業化に当たっては当該分野でのニーズに明るいパートナー作りが必要と考えている。本検討における連携をベースにその可能性を検討する。

##### **(3) 成果の実用化・事業化の見通し**

インフラ維持管理において、老朽化インフラ増加と労働力人口低下という社会課題を背景として、人手に頼る点検・診断が、財政面を含めて困難となることが予測される。このため、低コストで精度の良い、センサによる点検診断が開発されれば、ニーズ面から広く利用される見通しである。本検討で進めてきた開発・予備実証により、本開発技術が橋梁に適用可能となる見通しも得られつつあり、本検討を通して実用化の可能性が高まりつつある。また、本検討において、対象とする構造物の状態・ニーズに応じて、モニタリング期間を最適化しコスト面での優位性を確保する技術も開発されつつある。

一方、本検討により開発された健全性モニタリング技術は、道路インフラ以外の鉄道や港湾施設、プラント等の構造物モニタリングにも応用することが可能であり、経済的、技術的、社会的な波及効果は大きく、本検討が継続されることの意義は大きい。

#### **(1-1-2)フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発**

##### **(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略**

本プロジェクトの成果であるフレキシブル面パターンセンサシート（以下、センサシート）については、道路インフラ分野で実績をつくり他の分野にも展開していく。鉄道、プラ

ント、自動車・船舶・航空機産業、電気機器、製造装置、製造プロセス管理など幅広い分野でニーズがあると予想する。また、本センサシート開発を通じて生まれた、高耐久性透明保護フィルムやフレキシブル配線シートなど基本部材の個別展開、さらに、センサ貼付技術に適用できる事を証明した粘接着シートについてもその汎用性の高さから分野や用途を問わない展開が可能である。

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

道路インフラ分野向けではユーザ企業である道路会社各社から適用場面やセンサシート仕様、施工方法等に関するコメントを反映し研究開発にフィードバックしている。

本センサシートはシリコンセンサとフィルム部材からなる構成であり、DNP の既存事業との親和性が高く移管先候補となる関連部門とも密に連携している。具体的には、MEMS 部門（シリコンウェハ加工）、太陽電池用部材部門（高耐久性フィルムやフレキシブル配線シート加工）、包装部門（バリアフィルム）、接着シート部門、などである。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通し

DNP の既存設備が流用でき量産化のハードルは低い。特に、高耐久性透明保護フィルムとフレキシブル配線シート、粘接着シートなど個別部材については、市場の要求があれば短期間での量産対応が可能である。センサシートについては市場性をみながら総合的に判断し、設備投資や外注先選定などを進め、プロジェクト終了後5年以内の事業化を目指す。

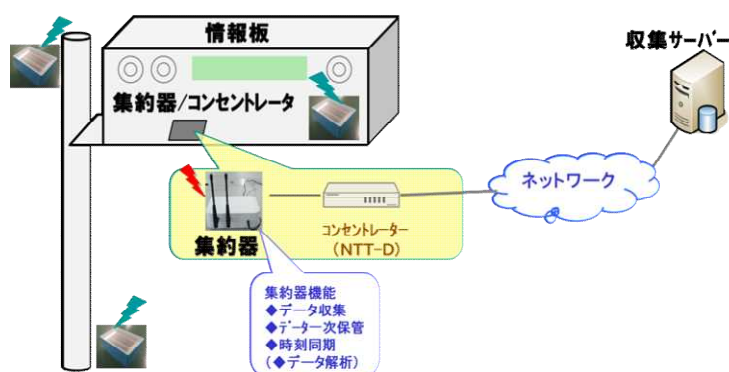
本センサシートは基本的にフィルム構造なので DNP が得意とするロール to ロールプロセスやシートプロセスが適用できコストダウンに有利である。またパターンやサイズの変更などカスタマイズも容易である。

長期間の屋外使用に耐え、貼り付け施工が可能な本センサシートは、設置場所を選ばず様々な場面に適用でき高い競争力を持つ。

## (1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

傾斜マルチセンサ端末は、傾斜（2軸）・振動（3軸）と温度を測定するマルチセンサ端末となり自立電源、無線通信機能を有する（図IV-【①-1】-2）。また、同時に開発を行う集約器は複数の傾斜マルチセンサ端末と無線通信、データ収集、データ一時保存、センサ端末間の時刻同期に必要なタイムサーバの機能を有し、上位への通信機能を有する。さらに、将来的には、センサ端末から収集したデータを演算処理し、モニタリングに有用な特徴量の抽出機能も追加予定で、上位への通信負荷と上位での演算負荷を軽減することが可能となる。



図IV-【①-1】-2 システム構成図

を有し、上位への通信機能を有する。さらに、将来的には、センサ端末から収集したデータを演算処理し、モニタリングに有用な特徴量の抽出機能も追加予定で、上位への通信負荷と上位での演算負荷を軽減することが可能となる。

本システムをベースに、まずは参加の高速道路会社と協力し、情報板モニタリングシステム



ムの普及を図り、点検業務の合理化、常時モニタリングによる、災害時対応の優先順位付判断に資する情報を提供し、対応の迅速化に貢献する。高速道路会社での実績を元に、地方高速道路会社や地方自治体への展開を図る。

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- 製品内容：研究開発終了後 1～2 年で、マルチセンサ（傾斜、振動、温度：無線・自立電源対応）の製品化。道路構造物モニタリングシステム及び建物構造ヘルスマニタリングシステムに適用。
- 用途：国、県等自治体及び高速道路管理会社（販売ルート確立済み）。鉄道、港湾、河川、空港、ダム等の社会インフラ、鉄鋼、石油、化学の産業インフラ、電力施設（発電施設、送電施設）、ビル建物へも展開（販売ルート確立済み）。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通し

- 成果の実用化・事業化を進める上では、ユーザ企業（高速道路管理会社）のニーズとのマッチングが重要となる。この点は、開発段階からユーザ企業の方と情報交換、協議を行い、開発を進めている。
- MEMS センサデバイスを核に、センサ端末を構成しており、従来の機械式センサと比較し、大きさ、コスト、取扱いが容易であり優位性を確保できる。
- 傾斜マルチセンサ端末は汎用性があり、道路インフラ（附帯設備）以外へのインフラ構造物、プラント構造物、電力関連施設や建築構造物への展開も可能である（図IV-【①-1】-3）。例えば、建築物の構造ヘルスマニタリング（SHM：Structural Health Monitoring）への適用。従来の建築物 SHM は振動計測結果の解析から地震発生時の建物構造躯体安全性診断や微小地震・常時微動を活用した構造躯体状態変化検出を行っている。傾斜マルチセンサを適用することで、新たにセンサ端末を追加すること無く、現状のシステム構成のまま傾斜測定が追加可能となる。建物の構造躯体だけでなく、傾斜変化から地盤（杭施工問題、地盤の変化）も同時にモニタリングできることで建物 SHM システムの高度化が図れる。



図IV-【①-1】-3 応用展開

### (1-3) 法面変位センシングシステムの開発

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

本研究終了後、H32 年度以降の製品化に向けて、研究成果に対する社内評価を実施する。ここでは法面だけでなく、橋梁、建築物、エネルギー施設等の監視を含めた設備監視に関する事業全体に対する適用可能性を検証して、H32 年度に最終的な事業化判断と事業戦略を決定

する。この判断を受けて、製品設計、開発を行い、H33 年度から高速道路の法面監視システムとしての出荷を開始する。さらに H34 年度からは、低価格化を図った廉価版による自治体（一般道）への展開、H35 年度からは、長寿命化や高頻度計測化を行った強化版による橋梁、建築物、エネルギー施設等の監視システムへの展開を開始する。これら監視システムのシリーズ化から、多様な条件での適用が求められる海外の道路監視へも事業を展開する。

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

以下に実用化・事業化の計画及びマイルストーンを示す。

表IV-【①-1】-1 実用化・事業化のスケジュール

年度	H31 年度	H32 年度	H33 年度	H34 年度	H35 年度
法面監視システム 製品化設計/開発	追加実証実験	(橋梁、エネルギー施設等の監視システム) 製品化設計/開発 (廉価版開発)	(強化版開発)		
法面監視システム生産 (高速道路設備監視)		▲事業化判断	▲法面監視出荷開始		
法面監視システム生産 (一般道路設備監視)				▲ポータビリティ、運用性強化、 低価格化	
各種監視システム生産 (橋梁、建築物、エネルギー施設等)					▲長寿命化、 高頻度計測化

## (3) 成果の実用化・事業化の見通し

計測精度に対する植生の影響などの残課題はあるが、端末の設置方法や設置位置の工夫等で解決の見通しであり、実用化に向けた技術的な課題はほぼ解決しつつある。本開発のシステムは、高速道路会社等のユーザ意見を取り入れて開発を進めており、ユーザニーズに合致する。また、高速道路以外にも一般道や鉄道の法面にも本開発のシステムを適用可能であり、潜在ニーズも含めて市場規模が大きいと考える。

競合する製品は、従来から用いられてきた光波測量器やワイヤー伸縮計などがあるが、前者は計測毎に人件費がかかる、悪天候時には計測できないなど、災害発生を想定した常時計測システムとしては問題があり、また後者は、亀裂広がりなどの計測など限定的な用途にしか適用できないという問題がある。本開発のシステムは全天候で常時の 3 次元計測が可能であり、性能面で優位があるばかりでなく、法面全体を見張るために複数個所を同時計測する場合のトータルコストでは従来方式を上回るメリットがあると考えられる。さらに普及が進み、よりポータビリティの高い簡易版を開発すれば、単一箇所の簡便な計測においてもワイヤー伸縮計などのコストを下回る可能性もある。

実用化・事業化に向けて、社会インフラ開発を担当する事業部との間でも研究進捗と事業状況に関して定期的な情報共有を行っており、監視システム事業の拡大、新たな市場開拓に向けた活動を推進中である。法面監視ばかりでなく、橋梁、建築物、風車やダム等のエネルギー施設への適用も視野に入れており、事業部からの期待は高い。

## (2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発

### (2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

<新規性・優位性>

- ・複数メーカー及び複数センサのデータを一元的に取り扱うことができる。
- ・既存センサの変更や新規センサの追加が発生した場合にも、データ受信部のモジュール更新のみで対応可能である。

<実用化に向けた計画>

- ・実証事業の検討結果を受けて、システムの信頼性、安定性に関して商用レベルの品質向上を図り、実用化開発を実施する。具体的には、冗長化構成や通信高負荷への対応などを想定している。

<事業化に向けた計画>

- ・本研究で連携するセンサメーカー各社の事業展開と歩調を合わせ、各社のセンサ機器の市場投入のタイミングに併せて連携ソリューションとして事業化を目論む。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

本研究開発への提案に際し、上記の実用化・事業化を十分考慮した開発を行うように事業部の責任者より指示を受けている。事業化スケジュールを下記に示す。

表IV-【①-1】-2 事業化スケジュール

年度	H31年度	H32年度	H33年度	H34年度	H35年度
実用化対応	▲ <u>実用化完了</u> ▲				
ソフトウェア投資	▲ <u>(検証結果により金額決定)</u>				
販売		▲ <u>試験導入</u>	▲ <u>初期ユーザー獲得</u>		
		▲ <u>連携センサメーカー1</u> (システム接続センサ数)		▲ <u>1万台</u>	▲ <u>2万台</u>
		▲ <u>連携センサメーカー2</u> (システム接続センサ数)			▲ <u>1万台</u>
収益発生					

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

インフラモニタリングは、その目的や用途により、様々なセンサや監視業務アプリケーションとの組合せが考えられる。こうした複数メーカー、複数種の監視目的に対応するオープンなセンサネットワークとして、共通センサプラットフォームを実現することで、社会的な課題解決への寄与ができるものとする。また、このプラットフォームの担い手として、マルチベンダ・マルチキャリアを標榜する弊社の長が活かせるものと考えている。

<実用化・事業化までの課題と解決方法>

本研究開発において基本的な技術的な課題はクリアできるものとする。

一方、実用化に向けては、サービスレベルの担保をどこまで行うかが必要な視点となるため、製品導入や維持保守などの運用面のサポートに関する課題や、商用システムとしての品質担保などの性能面の課題が考えられる。

この課題解決に向けては、商用レベルを見据えた運用設計、各種ドキュメントの整備、性能検証等を行う必要があると考えている。なお、併せて、市場動向等を鑑みた製品価格や広報などの販売に関する検討も必要と考えらる。

#### <予想される重大な障害>

実用化対応段階：製品化への技術面・販売面での致命的課題の発覚（特許、競合など）

投資段階：投資承認の不調

販売段階：初期ユーザの獲得不調

収益発生段階：販売不調

#### <生産・販売の委託先>

生産については、ソフトウェア開発作業の支援として一部委託等を検討する。

販売については、販売代理店等への販売業務の一部委託等を検討する。

## (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

<日本ガイシ> まずは RIMS に参加しているセンサ端末開発各社の要求に応えるパッケージの開発を行うことで、参加企業での実用化・事業化に採用されるよう進める。それと並行して、セラミックパッケージは高耐久性が最大の特徴であるので、屋外で長期使用を前提とした IoT 端末の、その他の用途について調査を行い、RIMS 参加企業以外も含めて商品提案を行うべく活動する。

<DNP> 粘接着シート接合技術の耐久性や実用性について、本プロジェクトの成果を広くアピールし、道路インフラ分野以外の鉄道や工場など屋外に設置される IoT 端末に対しても「高耐久接合技術」が適用できるよう拡販を図る。

### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

<日本ガイシ> 実用化に向けて大きなポイントとなるのがコストである。現状は開発レベルの試作プロセスであるため、今後コストを考慮した量産プロセスの開発を検討する。

<DNP> 本方式の実用化に向けてユーザ企業である道路会社各社から使用場面や施工方法に関するコメントを反映した研究開発を行う。特に粘接着シートについては、接着強度、耐久性などの性能のみならず、シート構成の改善などユーザ目線での開発を行っている。

粘接着シートの製造には生産性に優れたロール to ロールプロセスを適用する。製造上の課題を今年度中に明確にし、量産プロセス開発に取り組む。なお、来年度からの実証試験結果も製品化にフィードバックし、プロジェクト終了後 5 年以内の量産開始を目指す。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

＜日本ガイシ＞ 大型 LTCC パッケージと透光性セラミックについては、大型化や高耐久性について問題は無い結果が得られている。そのため、屋外で長期使用する交通インフラの常時モニタリングのセンサ端末用パッケージとしては十分な性能を有していると考えている。競合する樹脂パッケージや金属パッケージに対しても優位な特徴を有すると考えられるため、コストダウンを進めて事業に繋がるようセンサ端末メーカーに提案する。

＜DNP＞ 様々な現場への施工に関する課題については、実証試験の中で下地処理方法や治具の開発などを行い、改善を図る。

高耐久性を有する粘接着シートによる貼付施工は、液状接着剤と比較して簡便で且つ高い設置品質の施工方法が提案できる。また、屋外環境 10 年以上の使用に耐えることが可能であり、これらの利点を強みとした事業化計画を検討する。

### (3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

各センシングシステムの高速道路への適用化に関しては参画高速道路会社において検討を進めており、現状の課題を解決できる可能性のある有望なセンシングシステムであるとの見通しが得られている。今後 2 年間の高速道路での実証試験により、各ターゲットの劣化・損傷を検出するのに最適なパラメータを抽出して、安価な簡易システムの開発を目指し、維持管理体制がしっかりとした高速道路会社だけでなく、一般道への展開を図っていく。また、NEXCO 西日本等ではこれらのシステムを含め、道路維持管理マネジメントパッケージとしての海外展開も模索している。さらに、各センシングシステムを統合した道路インフラ統合モニタリングシステムに関しては、今後ジョイントベンチャー等も視野に入れて参画会社で検討を実施する予定である。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

まずはプロジェクトの実証実験により、計測したセンサデータと道路インフラの劣化・損傷メカニズムとの相関関係を明らかにして、開発したモニタリングシステムの有用性を明らかにするとともに、データベースの蓄積を図っていく。さらに、道路インフラの劣化・損傷の予兆を検知するために最適なパラメータを抽出して、一般道への適用可能な安価な簡易システムの開発を行う。

道路インフラ統合システムの事業化に関しては、プロジェクト参画企業の技術トップが委員となっている推進連絡会でジョイントベンチャー等の事業化の可能性に関して議論を進める。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

道路インフラに関しては、今後益々老朽化が進むとともに、少子高齢化に伴い熟練点検者の減少も相まって、従来の事後保全を主とした点検・維持管理は破綻をきたすと考えられる。現状でも大規模修繕・保全の予算が膨らむ中、予防保全に軸足を移す必要があり、センサを活用した常時モニタリングシステムへの期待は高まると考えられる。従って、開発中の常時モニタリングに適した新規なセンサシステムの事業化の見通しは

良いと考える。また、開発しているモニタリングシステムは道路インフラだけでなく、鉄道インフラのモニタリング、エネルギー施設のモニタリング、港湾施設のモニタリングにも適用可能な技術であるため、その発展が期待される。さらに、開発したセンサシステムは日本のインフラへの適用だけでなく、日本以上に老朽化が進んでいる欧米への輸出がもちろんのことながら、アジア、アフリカ、BRICs 等の新興国の新規インフラ建設に対しても適用可能であり、これらは大きな市場になると考えられる。

#### **(4) センサ端末同期用原子時計の研究開発**

##### **(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略**

本研究で開発する CSAC はデバイス単体での事業と CSAC を組み込んだモジュールでの事業、及びインフラモニタリングに関する時刻配信システムの事業、それぞれの事業化を検討する。

事業化は、CSAC デバイス単体から進める。まず、先行する Microsemi 社の CSAC が切り開いた応用分野への導入を図る。最終目標である道路インフラモニタリングでの目標仕様を満たす原子時計を開発するまでには 10 年程度の時間を要するが、現在得られている性能仕様でも十分適用可能な応用分野がある。例えば計測の分野では携帯電話基地局の周波数測定に Microsemi 社の CSAC を基準周波数とする計測器が利用されている。また、資源探査の分野でも Microsemi 社の CSAC が海底地震計に搭載されている。本年度の成果では、Microsemi 社の CSAC を超える性能が得られる見込みであり、この性能での実用化を図り、まず計測と資源探査の分野での置き換えを狙う。早期に CSAC デバイス単体の事業を確立することにより、平成 38 年以降での適用を目指す道路インフラモニタリング向けには、デバイスの量産効果によって製造コストが低減され、かつ品質が高い CSAC の導入が期待できる。

また、CSAC デバイス単体の供給ではなく、時刻同期機能を搭載した時刻同期モジュールを供給することで、CSAC による時刻同期技術の普及を促進する。例えば、ビルのヘルスマニタリング分野では、建造物の各階から収集した振動データから震災後の建造物の健全性を診断するシステムが製品化されているが、各データに付与するタイムスタンプの精度を維持するための時刻同期システムの構築に手間が掛かっている。このような時刻同期機能を必要とする分野に、CSAC デバイスを搭載した時刻同期モジュールを提供する。

さらに、道路インフラ状態モニタリングにおいて、リコーでは独自に画像処理計測技術などを用いた研究開発を実施しており、それらとのシナジー効果を出せるようにシステム事業戦略を検討する。具体的には自社開発の道路インフラ状態モニタリングサービスに、CSAC を用いた時刻同期による付加価値を加えて、より多くのモニタリングシステムのサービス提供を狙う。

##### **(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み**

道路インフラモニタリングに関しては、前記のように、リコー社内ですすめている画像処理計測技術を用いた研究開発と協調して進めている。また、事業部開発部門と定期的な情報交換を行い新規事業の立ち上げを準備している。並行して想定顧客ヒアリングをマイクロマシンセンターと実施しており、上記(1)の計測分野や資源探査分野もそのヒアリングから得られた情報である。さらに、リコー社内の営業部門と同行しての顧

客ヒアリングを行なっているところである。これらのヒアリング活動により CSAC に求められるデバイスやモジュールの性能仕様やサービスの市場調査を行なっている。

生産に関して、本研究の VCSEL 開発は、実際にプリンタ光源用 VCSEL を生産している装置を利用している。また、ガスセルは量産を見据えて量産に適した半導体作製プロセスでの加工技術を開発課題として設定して取り組んでいる。また、デバイス検査の工程も重要であり、こちらは産総研の評価技術を利用して効率よく大量のデバイス进行评估する工程を開発している。

来年度はサンプル提供を計画しており、ある程度の数量の CSAC を作製する技術を立ち上げる。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

実用化の課題の一つに、製造プロセスの構築があるが、量子部の製造方法などを具体的に検討している。量子部では、ガスセル製造や各 부품の組み立て、真空封止などの工程が課題である。個別の要素技術としては、既に技術開発に取り組んでいるが、歩留まり対策や品質確保の視点での開発を進めて、平成 30 年にサンプル品提供を目指す。その後、定めた工程に従い生産装置を使つての試作を平成 31 年度に行なう予定である。

キーデバイスのひとつである VCSEL は、すでにリコー社内でプリンタ向けに量産しており、CSAC 向けにもリコー内の設備を使つて製造する予定である。リコーでの VCSEL の生産技術は進んでおり、高品質なデバイスを生産し続けている。

デバイスやモジュールはリコーグループ内での製造を第一としているが、よりふさわしい場所の製造も視野に入れて他社の情報も収集している。

センサ端末で収集するデータに付与するタイムスタンプの時刻精度は、時刻同期で維持している。この時刻同期は、GPS タイムサーバなど協定世界時と同期したシステムを利用して、有線や無線で実現できる既存の技術であるが、CSAC を使用することにより、有線での配線や GPS アンテナを敷設する必要がなくなる。また、無線では、その使用環境（山間部、海岸沿い、都市部など）や天候により時刻同期の精度が影響を受けるため、時刻同期システムの設計にノウハウが必要となる。また、利用シーンによっては、有線の配線や GPS が使えないこともある。最たるものは無線や有線の配線が届かない海中であり、数ヶ月から 2 年程度海底に沈める海底地震計は、外部との通信ができないため、時刻を保持するために正確な時計を内蔵する必要がある。電源も内蔵電池でまかなうため低消費電力が必須であり、資源探査向けの海底地震計には、既存の米 Microsemi 社の CSAC が使われている。製品の立上時は、この既存の CSAC の置き換えをターゲットとする。

一方で、平成 30 年よりサンプル品を（2）に記載したヒアリングで得た想定顧客へ提供する。使用してもらうことで、より強いニーズや、これまで想定できなかった潜在ニーズを引き出す。

デバイス性能のうち、回路部分の消費電力に対して東工大の開発した CMOS 発振器や PLL 回路を使うことで大きな電力削減が可能である見通しが得られている。この回路は、専用回路であるため、ASIC 化を行う必要がある。売上げにより投資回収が見込めた時点で ASIC 開発をスタートする。

コストに関しては、リコーで VCSEL を製造する技術を持っているのが強みである。VCSEL はコストを抑えるための開発課題を設定して取り組んでおり、その成果を持ってさらに競合製品対して優位性を確保する。

現在、小型の原子時計として CSAC 以外に共鳴現象を利用した Rb 時計が市場で販売されている。この小型の Rb 原子時計に対して現状の CSAC は大きさや消費電力や価格では優れるが、安定度では大きく劣っている。本研究で開発する CSAC の開発目標を達成した際には、この小型の Rb 原子時計に匹敵する安定度が得られることになり、このデバイスが使われている市場が CSAC に置き換わる可能性がある。また、一般に CSAC が認知されることで、潜在的ニーズが掘り起こされ、さらに CSAC の市場を拡大することが期待される。



## 【①-2】ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発/(一財)マイコマシセンターコンソ

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

#### ・コアモニタリングシステム（高砂熱学工業）

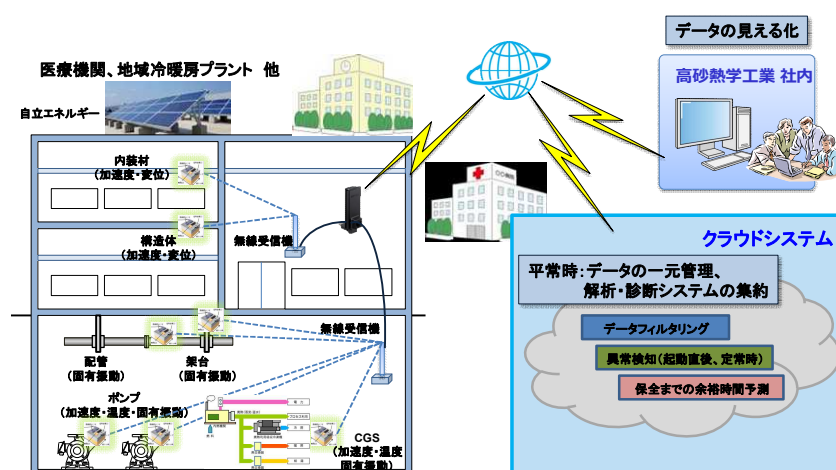
実用化に向けては、2つのステージを想定している。ひとつは、総合監視である。今回開発のセンサ装置にグリーン MEMS センサ開発の成果である電流センサ他との組み合わせからポンプ他回転機器本体の異常原因探索の容易さなどから効率的な復旧対応も期待でき、これらの高効率正常運転維持の確保につなげる。もうひとつには、個々の測定機器の異常変異が少ない場合でも、全ての情報を比較精査することにより系統全体の状態監視、非常時の対応が期待できる。具体的には以下の通りである。

ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発で得られた成果をクラウド型振動監視診断システム（無線センサデバイス・受信機・中継機・クラウドシステム等で構成）として販売するとともに、有償での診断サービスを顧客に提供する。販売先としては、病院や地域冷暖房施設だけでなく、官庁施設、さらには生産施設も含めた重要施設を対象とし、特にエネルギー管理指定工場相当の大規模施設をターゲットとする。販売は、当社からの直接販売の他、各種施設の維持管理を行う当社のメンテナンス子会社からの管理対象施設への販売及び有償での診断サービスの提供を行う。

市場規模としては、プロジェクト終了後1年目の平成31年度で1,198億円、5年目の平成35年度で1,328億円と試算<sup>1)</sup>しており、当社は平成35年度で約20億円の売上げを目指す。なお、市場規模の数値はビル、商業店舗、工場・プラント向けを対象としているが、保全マネジメントの市場としては電力インフラ分野（火力、風力、太陽光等）では平成25年比で平成42年は81.6%増と大幅な増加が予測<sup>2)</sup>とされており、この分野へ本システムを導入できればさらに大きな市場が見込まれる。

参考資料：1) 富士経済「2013 リモート監視 関連市場徹底総調査」より試算

2) 富士経済「インフラ・設備機器保全マネジメント関連市場の現状と将来展望 2014」



図IV- 【①-2】-1 クラウド型振動監視診断システムのイメージ

#### ・コアモニタリング用センサ端末（明星電気）

回転機器のモニタリング業界では 現状のモニタリングセンサと比較して、低消費電力でかつワイヤレスであり 耐久性を向上により低消費電力の低価格のコアモニタリング用センサ端末をユーザに供給できるため 現状購入できないユーザ層にも市場が広がること

が期待される。

その他のモニタリング業種では要求事項も異なることから、モニタリング装置試作品を持ってユーザからの要求事項のヒアリングを行い、新たな業界のモニタリングセンサの実用化に取り組む。

#### ・コアモニタリング用ネットワークシステム（沖電気工業）

本研究で開発したクロック補正方式を適用した製品を、バッテリー駆動型の 920MHz 帯マルチホップモジュールとして 2016 年 9 月より出荷する。

当該製品については、市場ニーズや事業の成長性を鑑みて、早期に通信モジュールとして市場に投入し、センサベンダなどに採用頂くことによって、さまざまな製品として市場に流通することが可能となり、電池駆動型センサネットワークとして需要拡大が狙える戦略商品として位置づけ、製品化することとした。

### （2）成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

#### ・コアモニタリングシステム（高砂熱学工業）

当社の担当する「ライフラインコアモニタリングシステムの開発」は、プロジェクト期間中にシステム連続稼働のヒートラン試験を完了し商品化する予定である。プロジェクト期間終了後 2 年目にトライアル販売を行い、3 年目から本格販売を開始し、プロジェクト終了後 5 年目には年間 80 セットのシステム販売を目標とする（5 年間の累計で 150 セット）。事業化開始後、振動以外のセンシング項目を用いた診断技術の開発を行い、振動監視以外の診断機能を順次追加していく予定である。

#### ・コアモニタリング用センサ端末（明星電気）

本研究で得られた成果をもとに回転機器のモニタリングセンサについてはセンサ端末、中継装置の性能耐久性評価を実施し実証実験で実績を得ることにより実用化を図る予定である。

#### ・コアモニタリング用ネットワークシステム（沖電気工業）

当社では 2012 年から 920MHz 帯マルチホップ無線端末の販売を行っており、事業活動を通して 920MHz 無線システムは、その電波到達距離の長さや、特小無線としての位置付けから、屋外での利用を想定されるユーザの声を聞く機会があり、バッテリー駆動に対するニーズを認識していた。

今回、本研究成果であるクロック補正方式を採用することにより、バッテリー駆動の無線システムの商品化が技術的に可能となり、かつ市場でのバッテリー駆動型 920MHz 無線システムへのニーズの拡大を受け、できるだけ早期に無線モジュールとして商品を提供するのが最適と判断した。

引き続きネットワークシステムについての研究は継続し、さらなる製品の強化を検討する。

### （3）成果の実用化・事業化の見通し

#### ・コアモニタリングシステム（高砂熱学工業）

安価でメンテナンスフリーな監視診断システムの普及は、日々の五感を中心としたパトロール型の非連続の設備管理労務から開放され、連続した情報を基に信頼性の高い設備管

理体制が確立するとともに、先鋭的な PM (Preventive Maintenance : 予防保全) 技術への進化が期待される。特に、施設運営のアウトソーシング化の流れの中、システム販売を事業とするだけでなく、FMS (Facility Management Service : ファシリティマネジメントサービス) や ESP (Energy Service Provider) のメニューの一つとしてシステムやサービスを提供することにより新たなビジネスモデルが構築される。本技術の確立はこのモデルを飛躍的に進化させるとともに、日本から世界に発信できるビジネスモデルとしても期待できる。

・**コアモニタリング用センサ端末 (明星電気)**

本研究で得られた成果をもとに回転機器のモニタリングセンサについてはセンサ端末、中継装置の性能耐久性評価を実施し 実証実験で実績を積むことにより実用化を図る見通しである。

・**コアモニタリング用ネットワークシステム (沖電気工業)**

本製品は通信モジュールとしてセンサベンダ等に提供され、各種センサと組み合わせることにより最終製品として市場に流通することを想定している。

製品の適用領域は産業インフラ基盤のモニタリングから、建造物や構造体の健全度モニタリング、斜面モニタリング、移動体用途などへの利用を想定している。

(想定出荷台数) 2万台/年

### 【①-3】道路付帯構造物モニタリングシステム開発/(株)日立製作所

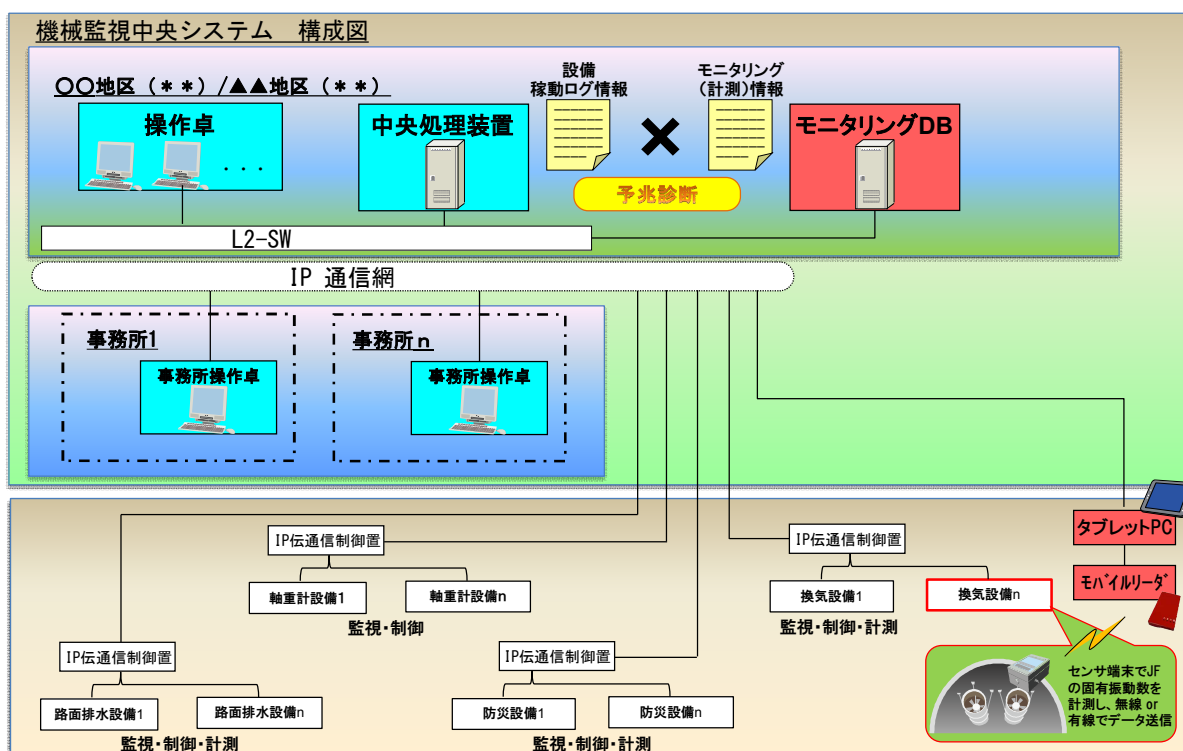
#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

弊社が行った高速道路管理会社や地方整備局へのヒアリングや自治体の調査案件での結果、これまでも色々なセンサを活用したモニタリングは実施されてきており、新たなセンサによる計測手法確立が課題の全てではなく、運用や全体システムとしてのコストも考慮した提供の仕方が重要であると言える。

上記を踏まえると、今回の「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」の成果としての出口は2つに分かれると考えている。1つは高速道路管理会社に向けた広範囲を管理するためのオンプレでのシステムの提供と、もう1つは自治体向けの低コストでのサービス提供である。既に日立製作所では、平成25年10月にインフラ分野をターゲットとした「施設モニタリングサービス」の事業化を発表しており、何社かのパートナー会社とも連携を取りながら本事業を推進している。本プロジェクトでの研究成果も施設モニタリングサービスの一部として適用を進めることで、早期実用化が見込まれると考えている。

先ず高速道路管理会社向けであるが、高速道路管理会社ではモニタリングシステムそのものはないものの、既に関連する幾つものシステムを構築しており、且つグループ会社と一体となってこれを運用している。また点検自体もグループ会社が請負っており、診断やその後の補修も実施している。それぞれのシステムで所謂アセットとしての基本情報は管理されており、また情報を収集するためのインフラも整備されている。従って新たにモニタリングシステムを構築することは、単にコスト増になるばかりでなく、似たような情報を重複して管理する必要が出てくるため、管理上も好ましくない。

そこで本プロジェクトの成果より一部機能を切り出して、高速道路管理会社向けに弊社が導入、構築している制御システムや点検システムに付加する形で提供していくことを一つの戦略として考えている。下図はその一例であり、弊社導入済の「機械監視中央システム」に対してデータ収集や蓄積機能を加えた想定システム図である。



こうする事で基本情報などを2重管理することなく、また必要な情報を連携した形で活用することが可能である。

次に自治体への展開であるが、自治体では規模は小さいもののコンサル会社が提供するパッケージやMicrosoft社のExcelを活用して管理を行っている。但し高速道路管理会社と異なり、点検や点検記録(結果)を基にした判定などもコンサル会社に委託しており、且つ2~3年で職員の異動もあることから、専任で高価なシステムを運用していくのは難しいのが実態である。

そこで本プロジェクトの成果を、サービス提供という形でコンサル会社に活用する方法で、自治体への適用を図るよう戦略を考えている。そうすることで自治体としては開発費用やパッケージ費用、運用としてのコストもかからず、且つ資産化する必要もない。また現在の委託業務の付帯業務としてコンサル会社へ発注することや、診断機能を作り込むことなく、コンサル会社のノウハウを活用した診断サービスとして提供することで実現可能と考えている。

さらに自治体では広範囲をカバーするインフラが整備されている訳ではなく、各施設で通信設備(機器)を構築することはランニングも含めて現実的ではない。この点も日立が推奨する「巡回型データ回収方式」を適用し、例えばコミュニティバスや宅配便、ドローンなど定期的に点検箇所のデータ収集を行うようなビジネスモデルとすることで、コストも踏まえた運用が出来ると考えている。

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

成果の実用化に向けては以下の取組みを始めている。

高速道路管理会社に対しては、弊事業部がサービスプラットフォーム部門であるため、実業で制御システムや点検システムの構築、運用を行っているインフラ部門のエンジニアと連携を図り、顧客システム更新や新規構築などのタイミングで提案内容にモニタリング機能を追加するようにし

ている。既に幾つかの引合いもあり、既存のセンサ単体での計測やデータマイニングを活用した診断に関するPoCも一部進めている。

また自治体に関しては、コンサル会社と連携して実用化に取り組んでいる。先に述べた施設モニタリングサービスのパートナー会社である日本工営株式会社では、東京都を始めとする全国の自治体での点検業務の委託や長寿命化計画などのコンサル業務を請けている。そこで日本工営と連携し、本分野に関連する調査案件ではモニタリング(特に巡回型データ回収方式)を有効な手段の一つとして報告書に纏めたり、点検計画にモニタリングサービスを適用した運用を反映することで実用化を目指している。

### (3)成果の実用化・事業化の見通し

実用化に向けての課題はやはりセンサ端末のコストである。直ぐに何千、何万ものインフラ設備に対して適用される訳ではないため、システム稼動、サービス開始にあたっての原価管理が非常に難しい。

解決策として、日立製作所では高速道路管理会社向けには既に他の制御システムや点検システムを納めており、そのシステム費用や運用費用の中で管理することで平準化を図ることを検討している。またサービス提供に関しては、「日立クラウド」というサービスプラットフォームを運用しており、最初のサービス開始時点ではデータ容量も大きくないと想定されるため、VMwareにより他分野/システムとの共存を図ることでハードコストを抑えた運用モデルを検討していく。

競合する製品・サービスとの比較であるが、上記の通り既存の顧客システムとの連携、もしくは機能としての追加というビジネスモデルや、サービスプラットフォームとしての他サービスとの共存といったビジネスモデルを考えると全体的なコスト面では非常に優位であると考えられる。結局センサ(製品)単位では価格競争になり、コスト的な優位性は失われるため、運用も含めたコストバランスを考えていく必要がある。

性能面に関して、センサ単体ではモニタリングを適用するシーンによってその精度や性能が求められると考えている。インフラ設備の維持管理サイクル(点検→診断→補修→記録)の中で最も求められるのが診断を補助するためのモニタリングであるが、日立が戦略として適用を検討しているのは点検を補助するためのモニタリングであり、多くの道路管理者からはスクリーニングとしての機能があれば先ずは十分であると言われている。逆に非常に低コストであることが求められるため、状態の変化を捉える程度の性能でコストを抑えたセンサ端末を適用することが重要であると考えている。また全体的なシステムやサービスとしての性能については、これまでの日立の金融系のシステムやインフラ系のシステムなどの品質や性能面の実績を考えると特に問題ないと考えている。

その他の波及効果としては、日立して幅広くシステム構築や運用を行っているため、道路分野だけでなく、鉄道や、電力、プラント、河川といったあらゆる分野への同様のビジネスモデルの展開が期待されることと考える。例えば鉄道分野では、運行支援システムだけでなく、券売機のシステムや鉄道車両そのものも提供しており、様々なデータとモニタリングデータを結びつけることで新たな価値を提供できる可能性もある。

## 【①-4】高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発/横河電機(株)

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

基本的に本システムは、常時微動観測、地震等の突発事象発生前後での建物の状態変化を検知し、設計クライテリアと比較することで建物の損傷度合い、損傷箇所を特定するものであるが、現状の建物の構造状態を元に、今後発生するであろう突発事象が起きた場合にその建物がどうなるか、大丈夫なのか、危険なのかを予測する機能を今後の実証試験を通じて検討・検証していく。このことで、更に本システムの他との差別化が図れ、将来来るであろう大都市での大規模地震災害に対して、最大限の人命の保護を担えるものと確信する。また、本システムが建物モニタリングシステムでのデファクトスタンダードとなることで、将来的にはある一定の規模以上の建築物には設置を義務化するような法的整備も目指していく。

### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

本システムの有効性確認の為に先行して、既に取り壊しが進められている東京八重洲のビルで状態監視を本年度内に実施する。ここでは加速度センサ、ひずみセンサを設置して通常時の振動とひずみの状態を観測するとともに、突発事象発生にも対応した観測を行う。これにより、来年からの実証試験に向けた、実際の建物でのセンサの設置場所、設置方法、無線伝搬状況の確認等を行う。

更に来年度に当たっては、福島県内の役所・病院などで数カ所の実証試験候補が上がっている。特に耐震工事を予定している候補箇所では、加速度センサ・ひずみセンサ・傾斜センサを可能な限り設置し、工事前後のデータ比較から、建物の固有振動数の変化、剛性の変化等の有益な情報が得られ、本システムで付加する予定の将来予測の判定機能において、重要な知見が得られると考えている。

こう言った公共性の高い場所での本システムの有効性を検証確認し、実用化に向けたビジネスプランの検討を並行して進めていく。

具体的には、すでに社会インフラ関連ビジネスを展開している横河電機子会社の横河ソリューションサービス(株)を中心に、実際のお客様のニーズと本プロジェクトのシーズをマッチングさせるための展示会活動や客先訪問を重ねている。本プロジェクトでは建物を主ターゲットとして進めてきたが、本年度から土木関係への展開も図るべく、専門家チームも参画している。本プロジェクトで培われたノウハウを元に、インフラモニタリングで主戦場となる橋梁の健全性確認へも適用検討を進める。また、2020年というエポックに向けた、様々な取り組みの中で、本インフラモニタリングシステムの導入を一気に加速するビジネスチャンスと捉え、各社と連携して取り組みを進めて行く。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

本システムのビジネスとしての成功成否を分けるのは、客先が享受する価値と負担するコストとのトレードオフ関係をクリアすることであろう。本システムは、売り切りの製品では無く、常時客先の建物の状態を監視して、安全性を担保できるもので無ければならない。然るに、本システムは長期に渡る保守契約型ビジネスが有効な手段と考えている。こうしたビジネスは、エレベータ業界で進められており、同じ建物を対象としていることで関連企業との協業化も視野に入れていく。客先の支払う初期コストを極力抑え、建物オーナーとして人命の安全・安心を担保する責任を全うするシステムとして、相応の対価を得ることは可能と考える。

## 【①-5】道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発/日本電気(株) コンソ

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

事業化には、定期点検と連携したセンサシステムが必要と考えている。開発したセンサシステムによる実環境でのデータ収集を重ね、損傷検知・進行把握の精度向上を図る。

事業化のため、実環境検証と並行して道路橋の点検業務を実施しているコンサルタント事業者との協業関係を構築することを予定している。

### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

本研究開発終了後2年以内（平成32年度中まで）に事業化を考えている。各道路管理者がクラウド方式によりモニタリングシステムを導入し、橋梁の専門技術者が計測データを管理する方式での実用化・事業化を目指している。

また、平成28年度下期（平成28年11月）にNEC主催の社外向け展示会で開発中のセンサ端末の展示を行うことでユーザへの情報発信とニーズの収集を予定している。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

地方自治体が管理する橋梁にモニタリングシステムを普及させるためには、道路管理者の予算制約及び技術者不足を考慮すれば、道路橋毎に単独システムを導入するのではなく、クラウド方式によりモニタリングシステムを導入し、橋梁の専門技術者により計測データを管理していくことが妥当である。

センサシステム運用会社がサーバに計測データを集約して解析し、結果をそれぞれの道路管理者に通知するクラウド方式が適当と考えられる。

センサシステムの設置対象となる15m以上の道路橋は約17万橋である。全国の点検結果から建設後30年以上を経過すると健全度「判定区分Ⅲ：早期措置段階」が増加する。クラウド方式のセンサシステムの事業化が課題解決に資する。



研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

【②-1】道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発/首都高技術(株)コンソ

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

本研究の成果物として得られる、①ひび割れ検出技術、②ひび割れデータ、③パノラマ合成技術、④経年変化モニタリング技術を用いて、①から④を包括した⑤モニタリングシステム及び⑥モニタリングシステムを用いた点検ワークフローを作成し、点検・調査を行うユーザーのニーズに応じた形態で販売する事業、および成果物を活用した点検・調査受託事業を展開する。

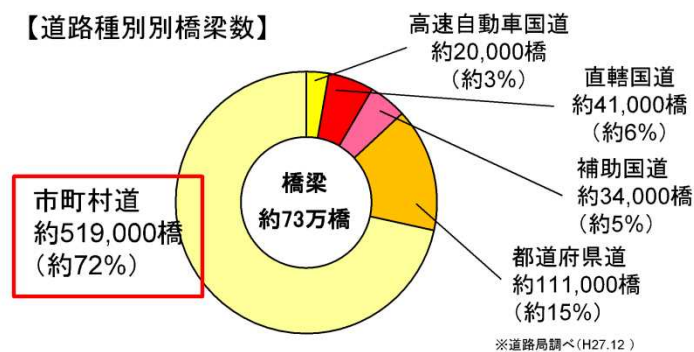
販売形態としては、ネットワークを介したシステム利用形態である従量制のクラウドサービス、および導入者のセキュリティ基準に準拠したスタンドアロンパッケージを提供する。

また、現行の汎用機材を用いて取得した画像データでも適用可能なシステムを構築することで、システム導入時に係るコストを抑え、導入時の障壁が少ないものとする。

事業化の戦略として、首都圏の大動脈である首都高速道路に関わる橋梁（国内シェアの2%）や、技術者が少ないモデル自治体の橋梁等における遠方目視による点検・調査として試験導入し、その実績を踏まえて全国展開を図る。

開発中のシステムは、従来手法によるひび割れ描画の5分の1程度の時間で実施できるため、今後設定するシステム利用料金を反映しても十分なコスト縮減、効率化が可能となり、顧客の要求度は高いと考える。

想定する市場規模は、全国のコンクリート構造物を対象としており、橋梁だけに限定しても68万橋の規模があり、今後もインフラの老朽化が進む中で、詳細かつ定量的な調査や記録は重要であり市場の成長性やコスト縮減高価は非常に高いと考えている。



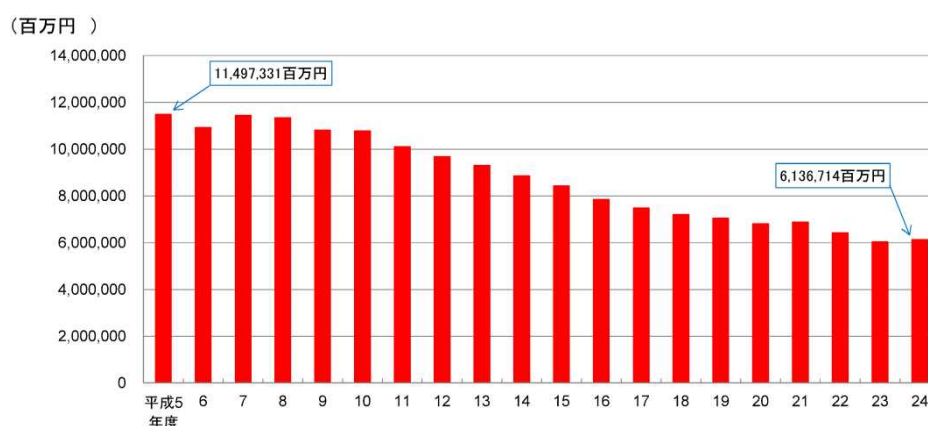
【建設後50年を経過した橋梁の割合】



※この他に建設年度不明橋梁 約23万橋

※道路局調べ(H27.12)

図IV-【②-1】-1 道路種別別橋梁数(国土交通省 道路局調べ(H27.12))



図IV-【②-1】-2 市町村における土木費の推移

(引用)国土交通省社会資本整備審議会・交通政策審議会技術分科会技術部会「市町村における持続的な社会資本メンテナンス体制の確立を目指して」, 2015年2月

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

より汎用性の高いモニタリングシステムとするため、計 19 社の事業者に対してヒアリングを実施した。ヒアリングでは、下表に示す意見や要望があった。これらの意見や要望を、可能な限り満足するシステムを構築することを目標に研究開発を進めている。

H28 年度中に、モニタリングシステムの事業化に向けた試作品を稼働させ、協力者を募って試験利用を開始し、課題や問題点を抽出する。

表IV-【②-1】-1 ヒアリングで得られた代表的なコメント

ひび割れの伸展の有無、ひび割れ密度が出せるとよい
検出精度 80% あれば実用的である
一般的に使用するカメラは防水コンデジである
撮影距離や角度はどの程度まで可能なのか、検証して欲しい
対象面に対して、撮り漏らし防止機能があるとよい
CAD への出力ができるものがよい
遊離石灰や角欠けが抽出できるとよい

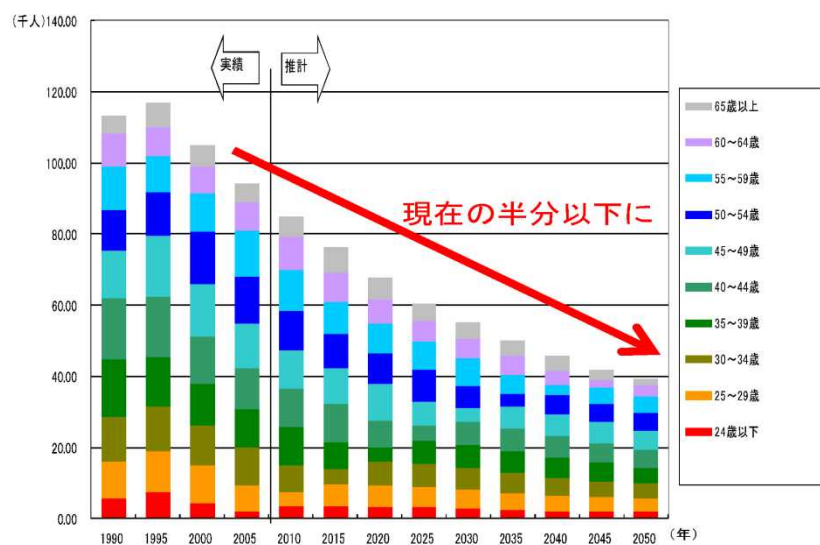
## (3) 成果の実用化・事業化の見通し

顧客に対して実施しているニーズ調査の結果から、損傷データの安全管理に関する高い意識によって、当初計画していた上述のクラウドサービスの利便性や安全性が浸透するまで時間がかかることが分かった。このため、現場での通信状況や各者のセキュリティ状況を考慮したスタンドアロンタイプのサービス提供も展開することとした。これにより、ネットワーク型のサービス提供をデメリットと感じている顧客の需要を事業化初期段階から捉え、より幅広いシェア獲得を目指す。

ひび割れ自動検出を有する競合製品、サービスと比較して、環境条件、撮影条件による検出精度の低下がないシステムを開発しているため、優位性は高いと考えている。また、(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略に記述したとおり、従来製品と比較して 5 分の 1 程度の時間短縮を実現しているため、コスト削減効果においても高い優位性を確保する見通

しである。

顕著な波及効果として、本開発技術を用いることで、通常のデジタルカメラを用いた撮影であっても、簡易かつ高精度にひび割れ抽出を可能とするシステムを構築中であるため、技術者不足により点検に従事する者が技術者でなくとも効率的にひび割れの状況や進展の有無を把握し、定量的な評価が可能となる。



図IV-【②-1】-3 市町村における技術者の推移

(引用) 国土交通省国土審議会政策部会長期展望委員会「国土の長期展望」中間とりまとめ, 2011年2月

## 【②-2】位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発/福井大学コンソ

### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

#### (1) 鉄道橋りょう用 (ジェイアール西日本コンサルタンツ)

##### ①ニーズの掘り起こし

鉄道事業者は一定レベルの検査体系が構築されており、遠隔非接触での計測や同期計測という優位性だけでは、事業者自らがその優位性を従来手法との比較を行い評価することは望み薄である。よって、これまでの計測実績のある計測機器の機能を上回り新たな価値を創造するとともに、事業者へのインパクトのあるアピールが重要である。そこで、「サンプリングモアレカメラ(以下「SMC」という)でしか計測できない定量的評価指標等の提案」、「1台のカメラで複数点を計測できる機能による優位性の追求」、「複数台のカメラの同期計測による優位性の追求」、「事業者ヒアリングによる維持管理上のニーズの模索」、「作業性に優れた計測手法の追求」による事業者ニーズの掘り起こしを視野に入れて取り組んだ。

##### ②屋外計測における精度確保・計測可能な環境の開拓

鉄道事業者は長年の維持管理に基づく検査等を経験しており、計測機器の実用性、すなわち「屋外計測における計測精度確保に向けた手法の構築」度合に対する関心が高い。また、鉄道事業者は24時間体制の安全確保が責務であり、計測環境に対するバリエーションにも関心が高いため、「夜間計測等の実現」等による、計測環境に対するバリエーション向上に取り組んだ。

##### ③事業者が優位性を認知できる計測実績の構築

鉄道事業者自身も、純技術的な要素だけで新手法を採用することは稀であり、新規技術の導入に当たっては実績も重視される傾向にある。そこで「公的認知の獲得に向けた計測実績の構築」、とりわけ社会的にもインパクトの強い「北陸新幹線開業後の計測データの取得に向けた事業者との調整」に取り組んだほか、データ公表に関する調整進捗・事業者合意を明確にするため「社外発表や学会関係の受賞、記事掲載による優位性の公表」を行い、計測データの活用環境の整備に努めた。

#### (2) 一般土木用 (共和電業)

インフラ構造物の維持管理に向けたシステムとしては、その対象となる構造物により、短期動的計測と長期モニタリングに分けられる。構造物毎の計測目的(短期動的計測、長期モニタリング、測定点数)の適用性について、ユーザー・管理者と共同で実証確認を行い実用化に必要な要素を抽出する。

維持管理が必要な構造物としては、橋梁、大型土木構造物、高層建築物等があげられる。まずは、各構造物について現状の計測手法や計測内容との比較試験を行い本計測手法の優位性を検討する。

実証試験により、各インフラ構造物用途毎の要求性能、操作性を考慮した差別化商品開発を目指す。

#### (3) 橋梁用・一般土木用計測システムの開発 (4Dセンサー)

##### ① 橋梁用・一般土木用アプリケーションの開発

新アルゴリズムの開発を含め、市場ニーズに即したアプリケーションが求められるため、設計・実装においても柔軟な対応が求められている。これらのニーズに対し後付のアルゴリズム追加、ハードウェアの改良の点で多くの課題が存在することを認識してい

る。現時点で特に、格子板を用いない方式でのより簡素な計測にニーズが高まっていることを踏まえ、アプリケーションの仕様の策定・設計が急務である。

## ② 橋梁用・一般土木用アプリケーションによる計測検証

市場ニーズの調査を考慮すると、ユーザは実地での計測実績を重視することが判っている。様々な条件で計測に支障がないか、精度保証できるかが課題となるため、ソフトウェア・ハードウェアの品質のみならず、屋外での使用実績は重要である。このため実地検証に近い形での検証は、本製品の品質を総合的に保証するための必要事項として優先して行っている。

## ③ 市場ニーズ調査への取組み

現時点では、一般土木関連の引合いが多く、派生的使用目的の提案も多い。例えば擁壁や亀裂、振動などの検査への適用が考えられるが、場合により個別の用途に応じたカスタマイズが必要になるケースもある。対応には品質保証のためにも検証・検査が必要になるため、本プロジェクト主要課題に近い項目から対応していきたい。

## ④ 規格化・標準化についての取組み

規格の策定・標準化の取組みは本方法論および製品の品質への信頼高めるものとして重要である。特に本領域での精度基準の提案はインフラ維持管理にける一般的な計測要件とも関連するため、既存の土木・建設関連の検査基準を考慮しつつ調査を行うものとしている。また NETIS への登録を通して、提案手法・製品の競争優位性を確立したい狙いもある。

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組み

### (1) 鉄道橋りょう用 (ジェイアール西日本コンサルタンツ)

#### ① ニーズの掘り起こし

成果の実用化・事業化に向けた戦略の最初の取組み項目に対しては「橋りょうの重点点検箇所である支承部の定量的評価指標としてたわみ角を提案」を行い、さらに、SMCの優位性をフル活用した客観的評価指標を提案し、変位量が小さくこれまで計測が困難であったその計測実現に向けて「1台のカメラで複数点を計測できる機能を活用した支承部のたわみ角の計測精度の確保」を果たして、「時系列管理に資するデータ処理手法の提案」を実計測データに基づいて提示した。

また、「複数台のカメラの同期計測機能を活用した健全度評価指標の提案・計測実績に基づく事例の提示」も実計測データに基づいて行い、SMCの優位性をアピールした。

また、具体的なニーズに対する活用事例を示すため、「事業者ヒアリングによるBP脊の回転機能の検査に資する計測手法の構築と有効性を証明する実証計測データの提供」、「橋脚の固有振動数の計測に向けた挑戦」に取り組み実計測データによる健全度評価の可能性を示した。

普及に向けたさらなる取組みとして、「NON-TARGETの計測手法の開発」に取り組み、手軽に計測でき、タイムリーな検査が可能となることをアピールできる環境づくりに取り組んでいる。

#### ② 屋外計測における精度確保・計測可能な環境の開拓

屋外での計測精度確保という根本のニーズに対しては、「事業者調整による屋外計測の実施、それらのデータを踏まえた屋外計測における外乱要因の洗い出し・分析・対策の策定」を行うとともに、「夜間計測システムの構築」を果たして、夜間での計測を可能とするとともに外乱の少ない時間帯での計測を可能とすることで、屋外での計測精度の向

上を実現した。

### ③事業者が優位性を認知できる計測実績の構築

技術力のない事業者でも一定の有効性を判断できる環境整備として、普及に資する実績づくりに努め、「公的認知に繋がる計測実績の構築」「北陸新幹線におけるBP沓を有するすべての桁における開業初年度の計測実績の構築、山陽新幹線・在来線における計測実績の構築」「データ公表に向けた事業者同意の調整・合意、社外発表による優位性のアピール」を実施した。

現在は、健全度評価手法を提案し、計測データに基づく評価を示して、その導入を促しているところであり、最終目標である、事業者の検査ルーチンに盛り込ませ、唯一検査が非接触とならない瞬間であるターゲットの設置を建設時点や補修時点で設置することの合意を図る前段階で調整中である。

## (2) 一般土木用（共和電業）

### ①道路橋梁向けたわみ多点変位・振動計測システム（自治体、道路管理者との共同）

道路橋梁向けシステムとして、鋼橋、コンクリート橋のたわみおよび固有振動数計測の可能性について一般道3橋梁、高速道2橋梁での実証試験を行った。遠望からの変位計測として、ターゲットサイズによる計測精度の違いや、望遠レンズ（点計測）広角レンズ（多点計測）による画角範囲の確認により、橋梁毎の計測方法の違い、サンプリング（FPS）速度の適応について把握することができた。（リング式変位計、加速度計等との比較計測）

### ②土木構造物長期変状モニタリングシステム（土木コンサル会社、大手ゼネコンとの共同）

土木構造物モニタリングシステムとして、擁壁変形多点計測試験を行った。約1か月間の連続計測を行い、画像による長期計測の問題点抽出や、可能性の検討を行った。（ワイヤー変位計との比較計測）

また、トンネル変状の24時間連続計測を行い、現場環境（粉じん、温湿度、計測距離など）耐環境性について確認した。（レーザー測量機との比較計測）

### ③高層建築物の動揺・振動計測（風車メーカーとの共同）

高層建築物の大変位および振動計測への適用確認の為、風車タワー（実運用機）によるナセル部の動揺計測を実施した。（加速度計との比較計測）

## (3) 橋梁用・一般土木用計測システムの開発（4Dセンサー）

### ① 橋梁用・一般土木用アプリケーションの開発

一台のカメラで同時に複数箇所を計測し、評価できるような橋梁用・一般土木用変位計測アプリケーションの設計・開発を行った。本製品は一部販売済みのものも含め、以下②において検証中である。同時に、アルゴリズム確認用のモジュール追加機構の設計・実装、三次元変位計測のための複数台カメラ接続対応、新アルゴリズムである（参照点：格子板を使用しない）2線式計測法の実装を行っている。また、高速度撮影および遠距離撮影に対応するためのUSBカメラおよび動画画像解析機能もあわせて実装中である。

### ② 橋梁用・一般土木用アプリケーションによる計測検証

実際の橋梁・道路橋（和歌山県内）で一台のカメラにより所定の箇所を計測し、評価を行った。この際に、他の同様の計測手段（光学的計測法：画像相関法による）との比較調査、新アルゴリズム（2線式計測法）を評価している。結果として光量の変化に対

しロバストで、新アルゴリズムについても既存の方法であるサンプリングモアレ法と同等の性能を有することを確認している。

### ③ 市場ニーズ調査への取組み

4Dセンサー株式会社では既存のサンプリングモアレカメラソフトウェア版の販売を通じて、市場ニーズの調査を行った。主に大学研究機関・民間の研究開発部門からの引合いが多いが、徐々に一般土木関連のニーズも高まっているものと認識している。建設・金属関連企業からは材料物性試験の側面から、木材加工や（道路等インフラ関連の）計測コンサルタント企業からは実地での計測に近い側面からのニーズが判った。

### ④ 規格化・標準化についての取組み

非破壊検査協会等、規格化・標準化についてすでに取り組みのある担当部署とともに調査を進めている。またNETIS登録についても準備を進めている。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通し

### (1) 鉄道橋りょう用（ジェイアール西日本コンサルタンツ）

現時点の成果として、「通常の計測条件（視準距離 30m以内）における計測精度は実用レベルに到達」、「BP 沓を有する桁における計測に対する優位性は事業者の理解を得たと思われる状況への到達」、「たわみ角を管理指標として用いることの事業者の支持は得られたと思われる状況への到達」を果たしている。現在、本計測システム特有の健全度評価手法を提案し、事業者と本手法の有効性について協議・調整中であり、事業者の検査ルーチンに盛り込ませ、普及の促進環境を整備すべく鋭意努力中である。

普及促進のうえでの重要事項として、機器稼働の信頼性向上や機器の使い勝手が優れていることが挙げられるが、今後は防滴性の向上をはじめとした降雨時の信頼度の向上、発電機不要なシステムの構築等の機器のコンパクト化に取り組む所存である。

### (2) 一般土木用（共和電業）

今までの各実証試験により「遠望多点同時変位計測方法」として従来計測手法（センサ取付方式、レーザー方式、画像計測方式）を凌ぐ可能性をユーザーとともに確認したが、課題もある。ターゲットの取付方法とサイズ、撮影距離との関係を整理し、構造物毎に異なる提案をする必要がある。また、天候による計測誤差対処法、あるいは長期計測時のカメラ固定方法や誤差の補正方法（固定点補正）を確立しなければならない。これらの課題について改良し実証試験を行い次年度の実用化を目指す。

事業化としては「①計測システムの販売」「②計測コンサルティング事業」がある。①は既存のメンテナンス・計測会社や事業主・管理者への機器単品販売であり、ユーザーの継続的な定期点検や長期定点観測がメインとなる為、画一的な計測方法となり販売台数が見込める。まずは橋梁、タワー等がターゲットとなる。②は本計測による点検業務を請け負う事業である。計測コンサルティングサービス事業として、様々な構造物に対応できるノウハウが必要となるが、共和電業計測エンジニアリング部門で可能。

### (3) 橋梁用・一般土木用計測システムの開発（4Dセンサー）

#### ① 橋梁用・一般土木用アプリケーションの開発

現在、三次元変位計測への同期装置の見積・購入により設計・実装を行う予定である。また新アルゴリズムの実装および使用手順の作成も進みつつある。アプリケーションの計測検証や市場ニーズの調査も並行して行っているため、これらのフィードバックによ

り、より実地計測に即した製品となる見通しである。

#### ② 橋梁用・一般土木用アプリケーションによる計測検証

一般土木関連での引合いも多く、計測現場の提供はあるものの、実際上の計測において準備・各機関への調整に手間どる場合も多い。また計測上の制約によりコストがかかる場合もあるが、新アルゴリズムはコストを低下させる面もあり期待できる。

#### ③ 市場ニーズ調査への取組み

市場ニーズ調査は主に引合いに関連して行っているが、現時点の委託事業との絡みで研究要素を含むことに了解を得ている。大学研究機関・民間の研究部門の引合いが多いため、場合により新規提案分の研究案件に近い形にできるものの、他の補助金との関連で進行・棲分けが必要な場合もある。

#### ④ 規格化・標準化についての取組み

「イノベーション・ジャパン 2016」での展示の中で内閣府担当大臣からも直接、製品化への取組みにおいて多様な側面があること、知財面、規格化、製品の周知（NETISI）で力を入れるよう要請されている。規格化・標準化については引続き関連する協議会内での調査をおこないつつ、NETIS 登録についても努めていきたい。



## 研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(i)ロボット技術開発

### 【③-(1)-1】マルチコプタを利用した橋梁点検システムの研究開発/川田テクノロジー(株)コンソ

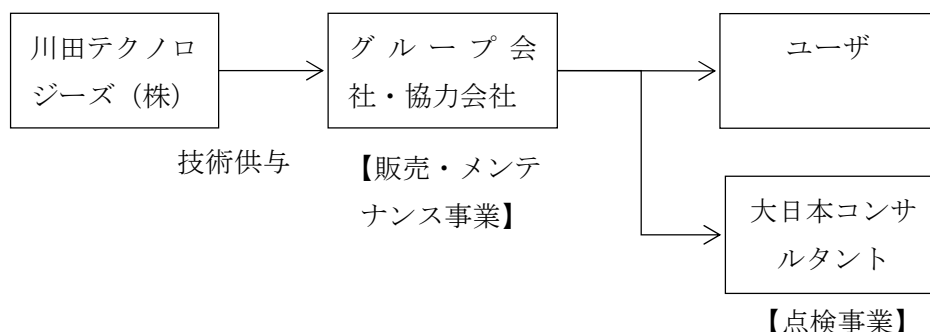
#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

助成期間中に、装置本体、運用をサポートするための周辺機器、データを容易にハンドリングするためのソフトウェアの開発、実証試験、評価、改良まで行う。

助成期間終了後は、開発品を用いた点検事業及び開発品の製造販売の2種類の事業展開を行う。このうち、開発品を用いた点検事業を優先して実施する。装置の製造販売については、初期段階では、自らが実施する点検事業用としての装置の供給を主な事業とする。ロボットによる点検のノウハウが蓄積され、地方公共団体を含めた国内橋梁にロボットを用いる土壌が整った段階で、本格的な装置の製品販売事業を立ち上げる。ロボットを用いた橋梁点検については、国が定める点検要領との関連が深いため、国が行うパイロット事業等での利用も想定する。また、東南アジアを中心とした国際展開も視野に入れ、最終的にはパイロット事業や国際展開によって得られたノウハウを国内でのロボット点検の利用に役立て、ロボット点検の普及を目指す。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

開発品を用いた点検事業は、初期段階では大日本コンサルタント(株)が中心となって実施する。製品の製造・販売は、川田テクノロジー(株)グループ会社・関連会社とその協力会社が担当する予定である。製品の販売予定先としては、国または地方自治体から橋梁点検業務を受注し橋梁点検を実施している建設コンサルタント、その他の調査会社及び施工業者を想定している。点検業者にとっては初期投資が負担になることも考えられるため、地方公共団体の建設技術センターでの一括購入等の可能性についても働きかけていく。



#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

本事業が成功すると考えた理由は以下の通りである。

##### ① 事業の新規性

橋梁の点検用として用いるマルチコプタは市場に既に存在するものの、その運用には特別な技量や知識を要する。従って、事業規模も限られている。本研究で開発するシステムは、操作を容易とするところに特徴があり、講習会等の簡単な教育を受けたものであれば運用がすぐにできるシステムとすることを目標としている。この点において製品の新規性を有しており、ユーザ数の拡大が見込まれる。

##### ② 事業の独創性

我々の研究開発グループにおいては、橋梁点検のニーズとシーズがマッチングできる共同体制が構築できており、開発終了後もその役割分担の中で事業化を推進する計画であることが独

創的な点である。すなわち、橋梁の製作・工事並びにロボットの開発・販売の実績が豊富な川田テクノロジーズ(株)、橋梁点検の実績が豊富で点検ニーズを把握している大日本コンサルタント(株)、制御・処理技術の優れた国立研究開発法人産業技術総合研究所で共同体制を組んでいるため、より実用的で競争力のある事業を持続的に推進できる。

### ③競合優位性

橋梁点検ロボットに関しては、現在、各社で開発が進められている段階にある。開発中の代表的なロボットと当システムの相違を下記に記す。特に、橋上からの運用、交通規制を伴わないシステムという仕様の観点から、他社開発品と比して橋梁への適用範囲が大きく、事業性が高いと判断している。

	今回の開発品	手動操縦	GPS 誘導型
適用橋梁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼桁、コンクリート橋</li> <li>・橋の下にアクセスできない場所でも橋上から運用できる。</li> <li>・橋梁への着脱型は、鋼橋に限られる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼桁、コンクリート橋</li> <li>・目視操縦できる範囲に限定される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼桁、コンクリート橋(側面のみ。橋下は GPS 取得が困難)</li> </ul>
取得できる情報	<ul style="list-style-type: none"> <li>・網羅型は 2m 程度の離隔での画像</li> <li>・着脱型については 1m 以内の近接画像</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・数メートル遠方からの画像</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・数メートル以上遠方からの画像</li> </ul>
連続飛行時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・制限なし(有線給電式)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・10～25分程度</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・30分程度</li> </ul>
運用の手間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・位置安定飛行制御システムによる半自律により高い操縦技量を必要としない</li> <li>・歩道がある場合は道路規制不要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・操縦に熟練度が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自律制御(但し GPS 取得範囲のみ)</li> </ul>
安全性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全索による係留</li> <li>・ロータガード</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全索による係留</li> <li>・ロータガード</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・安全索による係留</li> <li>・ロータガード</li> </ul>

図IV-【③-(1)-①】-1 当該システムと他社開発品との比較

### 【③-(1)-2】 小型無人ヘリを用いた構造物点検技術開発/ルーチェサーチ(株)コンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

開発を推進しているシステムを活用して、当社は二つの事業を既に実施している。

①小型無人ヘリを用いた構造物点検業務を受注し、画像データを提供する

②小型無人ヘリの販売（操作指導・機体点検マニュアルなどソフト面も含む）

構造物点検の対象は橋梁のみに限らず、ダム・港湾岸壁・浮消波堤など多方面にわたっている。こうした業務を受注し、撮影後画像データを解析する業務を通じ、それぞれの構造物の維持・管理上の特徴や留意点を把握し、点検システムの改良を加えている。

小型無人ヘリの販売台数は、現在までに39機で、用途は構造物点検だけでなく、写真測量・上層の気象観測など様々な用途がある。購入先は構造物点検を目的とした官公庁だけでなく、建設（設計）コンサルタント、測量会社など広範囲に及ぶため、機体への搭載機器や使用方法も特徴があり、こうした要望を満たすための改良作業を通じ、構造物点検システムへのヒントを得ている。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

（一財）橋梁調査会のレポート（平成27年6月）では、我が国の道路橋70万橋の内、建設後50年を経過した橋梁が16%（11万橋）を占め、5年後の平成32年には40%（28万橋）に増加するとの試算があり、維持管理がますます重要な任務となる。

現状、法令により5年サイクルの定期点検が義務つけられているものの、特に地方公共団体では維持管理部門の人手不足や技術経験者の不足により、対象となる全ての点検業務を実施するのが極めて困難な状況にある。ここにインフラ用ロボット技術開発の果たす大きな役割があると認識している。

実用化に向けて、一つの阻害要因は、現在の点検要領などの公的な基準の中に、ロボットによる点検手法が明記されていないことである。国土交通省の現場検証の動きは、やがてこうした点検要領・基準の改定につながる動きではあるが、一方で地方から動かす方法もあるのではと、独自で動いている。一つは、広島県の「長寿命化技術活用制度」に小型無人ヘリの橋梁点検方法を登録し、広島県の橋梁をまずは足掛かりに出来ないかと目論んでいる。さらに、今年度から広島県・今治市国家戦略特区における「ドローンによる構造物点検」実施に参画し、事業の本格化に向けて、事業化の先端に立っている。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

橋梁点検におけるロボット開発は、平成26年度当初は足場や高所作業車を用いた近接目視点検の「代替」を目標としていたが、平成27年度から「支援」を目指すことになった。実用化・事業化という観点から、より実現が容易になったと判断される。ロボット点検の得意とする分野・部分・タイミングなどが生かせる環境が整いつつあると判断される。

また、無人ヘリという飛行ロボットはその利点を伸ばし、これまで点検困難であった山岳部ハイピアや斜張橋塔などを点検することができるという点でも優位を確保できると考えている。

### 【③-(1)-3】複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステムの研究開発/富士フイルム(株)コンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

システムの基本的な構成はほぼ固まり基本機能は達成できた。今後は実用化に向けたブラッシュアップのため、実際のユーザーである建設コンサルタントに参加してもらう現場実証実験を重視し、機能や使い勝手に関するユーザーの要望を漏れなく吸い上げ、に示した最終目標を達成するとともにユーザーが必要とする機能・性能を確実に搭載・達成できるよう、フィードバックループを重ねていく。またこれらの実証実験を通じて実際の現場での点検実績を積み上げることで、ユーザーの信頼を得て市場導入に活かす。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

H27年度より実証実験に向けて各地方自治体への協力依頼、場所の検討、日程調整等の活動を開始、H28年7月川崎市での実証実験を皮切りに、H28年度中は岩見沢市、伊勢原市、埼玉県内の橋梁にて実証実験を計画している。なお熊本県でも実施を計画したが、地震のため来年度以降に延期した。H29年度も同数以上の現場実証実験を計画している。

川崎市での実証実験では1格間のみ点検データ取得にとどまったが、その後のシステム改良などにより高速化、効率化を進め、岩見沢市では橋長約30m、幅約20mの橋梁1橋分の点検データ取得を予定している。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

川崎市での実証実験では、実際に川崎市の橋梁点検業務を実施している建設コンサルタント2社が参加し、ロボットの設置撤去を含めた現場での使い勝手や操作性を見学し意見を得たほか、取得した画像データを本システムで解析・作成した点検調書の内容について後日ヒアリングを行い、ロボット、点検支援ソフトウェア、システム全体およびコストについて、具体的なご意見をいただくことができた。今後実施する岩見沢市、伊勢原市などでの実証実験でも同様に意見集約、開発課題抽出を進め成果物に反映していくことで、実際にユーザーが現場で使うシステムに仕上げていく見通しである。

### 【③-(1)-4】橋梁桁端部点検診断ロボットの開発/ジビル調査設計(株)コンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

本事業の背景には高度成長期に整備されてきた社会インフラ（トンネル、橋梁等）の老朽化の進行に対して、本事業では、国土交通省が平成26年度に策定・施行した「橋梁点検要領」に規定された全国の2m以上の道路橋約70万橋に対する5年に1回の頻度での定期点検の義務化がその背景にある。その70万橋の内、従来の点検技術である橋梁点検車による点検が出来ない橋梁（推定約40万橋）で人が容易に近づくことが困難な橋梁の点検を橋梁点検ロボットが支援するニーズを具体化するものである。システム構成は昨年度国土交通省が実施した次世代社会インフラロボットの現場検証に参加して橋梁維持管理部門で高い評価を受けた「橋梁点検カメラシステム Type 27」（以下、現行ロボットと言う）をベースにして、人が容易に近づくことが困難な狭隘部位でもある「橋梁桁端部点検診断ロボット」の開発を行う。その主な機能・性能は、狭隘部位の点検精度を向上させるための長い年月をかけて狭隘部位に堆積している障害物（土砂、誇り、鋼材のさび等）を除去するための噴射清掃メンテナンス要素技術（高圧水噴射装置）、狭隘部位に容易に挿入可能な狭隘部点検カメラ要素技術（自由度のあるロボットアーム）、これらの技術要素を安定的に機能させるための片持ち式水平アームの安定要素技術（揺れ防止、荷重移動によるバランス安定要素技術、アームの複線化等）を開発して現行ロボットを更に高機能化させる。尚、現行ロボットはこれまでに約250橋を超える実際の各種橋梁での点検実績を有し、一般的な点検には対応可能なロボットと言える。よって、今後の事業化戦略のプロセスは、平成28年12月に実施される点検ロボットの現場検証（昨年度より高度な機能を要求される橋梁で実施予定）の結果が昨年同様の結果が出れば、その事業化は大きく進展すると予測されるなかで、更なる高機能化を付加した本事業におけるロボットの完成は、他の類似ロボットとの差別化を明確にするものと思われる。

想定される市場規模は、現時点では本事業により開発されるロボットとその機能は他に類を見ない、聞かない状況にある。これは、昨年度の次世代社会インフラロボットの実証実験参加ロボットからもある程度判断できる。さらに現存する約70万橋の内、従来の点検技術である橋梁点検車による点検が出来ない橋梁（推定約40万橋）で人での点検が困難な部位でもある桁端部の点検が可能になることは、大きな市場規模が期待できると共に、比較的容易に、安価に点検できるロボットであることを考慮すると、点検費用の低減化、コンパクトな点検装置による点検時の道路交通規制の回避など社会的損失の削減にも大きく貢献できる。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

本事業は開始1.5ヶ月が経過したが、平成28年度の開発日程表に記載の通り目標開発1の噴射清掃メンテナンス要素の仕様検討が80%程度進行した状態で今後、これを完成させて次の段階の設計・試作機製作段階に入る。また、これまでの噴射清掃メンテナンス要素の仕様検討結果からは、各種部材に係る応力が当初想定した値以下となることが判明し、その開発に弾みがついた現状で、ほぼ計画通りの工程の進捗となっている。今後は、計画されている各要素技術を完成させ、共同研究先である福井県土木部の協力を得て、実際の橋梁での実証実験を繰り返し行い現場で使用可能な完成度を指すと共に対応可能な研究組織を構成している。この様な現状から一つの節目となる平成28年度開発日程は計画通りの進捗が予想される。

### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

開発開始 1.5 カ月時点での実用化・事業化への課題とし明確なものは出現していないが、今後開発の進捗に伴い多くの課題が表面化してくることが十分予想される中で、その解決方針の基本には顧客ニーズへの的確な対応が可能なロボットを目指す方針を基本として堅持したい。市場ニーズ、ユーザーニーズへの合致に関しては、本事業者は開発者であり、エンドユーザの立場でもあるため事業者の顧客である国土交通省並びに地方自治体の橋梁管理者ニーズには日々実施している点検業務を通して最新ニーズを体感できる業務環境下にある。また本事業の研究協力先にも自治体の橋梁管理者を包括していて、点検ニーズの変化に対しても対応可能な意識を持った開発を目指している。また、競合他社に関しては性能面、コスト面等の詳細な情報取得が困難な状況（競合他社もそれぞれが更なる高機能化への開発を進めているため）である。よって、現時点では本開発がエンドユーザーニーズにマッチした開発を目指すことに専念したい。このような開発がその結果を出せば前述の通り、70万橋の内、従来の点検技術である橋梁点検車による点検が出来ない橋梁（推定約40万橋）でかつ、人が容易に近づくことが困難な橋梁の点検を本開発で完成させる橋梁点検ロボットが比較的容易に、安価に点検支援が可能になることで点検費用の低減化とコンパクトな点検装置による点検時の道路交通規制の回避など社会的損失の削減にも大きく貢献できる。しかし、点検ロボットの遠隔操作による点検技術の習得が容易でない現状もあり、多くの人材育成のための組織作りが今後の課題と言える。

### 【③-(1)-5】インフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発/(株)開発設計コンサルタントコンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

当社は、電力公益事業を営む J-POWER グループの一員であり、電力設備をはじめ多くの構造物の点検診断を行っている建設コンサルタント会社である。これまで J-POWER が所有する発電設備の高経年化や、近年のインフラ設備の維持管理に対する社会的需要の増大を受けて、調査・診断の技術向上や効率化・迅速化を模索してきた。

開発中のロボット『ALP』が本格的に実用化されれば、高い構造物における点検箇所に対しても足場等を用いずに迅速かつ安全な調査が可能となり、規格化されたデータを用いることにより調査結果をまとめる時間が短縮化でき経済性の向上が期待できる。また、取得される 3 次元モデルの精度が高いことから、専門技術者による正確な確認・評価が事務所内で可能となり、現在の社会的課題となっている熟練技術者不足に一部対応することが可能であると考ええる。

当社としては、当面の実用化の実現が見えたら、まずは当社の最大のユーザーである J-POWER の発電設備への展開を図りたいと考えている。当初は、当面の目標と同程度の高さ約 20m 程度のダム洪水吐ゲートピア等の構造物への適用を図り、順次高さが 80～100m 級の、図-17 に示すような水力発電設備であればダムや調圧水槽の壁面に、また火力発電所であればコンクリート製の煙突や石炭サイロ等に展開することを目指している。

また、J-POWER 発電設備へ適用した実績を足がかりに、将来的には電力会社の発電設備や国・自治体が管理する橋脚・ダム等のインフラ設備に展開したいと考えている。



図IV-【③-(1)-5】-1 ALP 適用構造物

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

J-POWER の発電設備に『ALP』を試行していくために、以下のように取り組むものとした。

J-POWER が保有する発電設備について、電力設備保有者としてのニーズをくみ取り、構形式毎に、必要とする点検項目やそれを調査するために必要とするロボットの機能を分析し、技術的課題や必要とする改良等を明示したコンセプトを作成する。

開発した『ALP』を用いたデモンストレーション等により、ロボットの活用を啓蒙することにあわせて、J-POWER 発電設備への展開について上記コンセプトへの理解と協力を要請し、資金面も含めて支援を得る。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

発電設備に限らずさまざまなインフラ設備においては、竣工より 50 年を経過する構造物も増えてきており、高経年化した構造物における劣化調査・診断の重要性は、喫緊の課題となっている。またさまざまな事故の原因となっている日常点検では点検できない

難点検箇所への対応が、特に重要課題となってきた。

社会的にも、このような点検に ICRT (Information Communication & Robot Technology) を活用する等の取り組みがなされており、開発中の『ALP』はそれを実現する一つの有力な方法として可能性が高いと考えている。



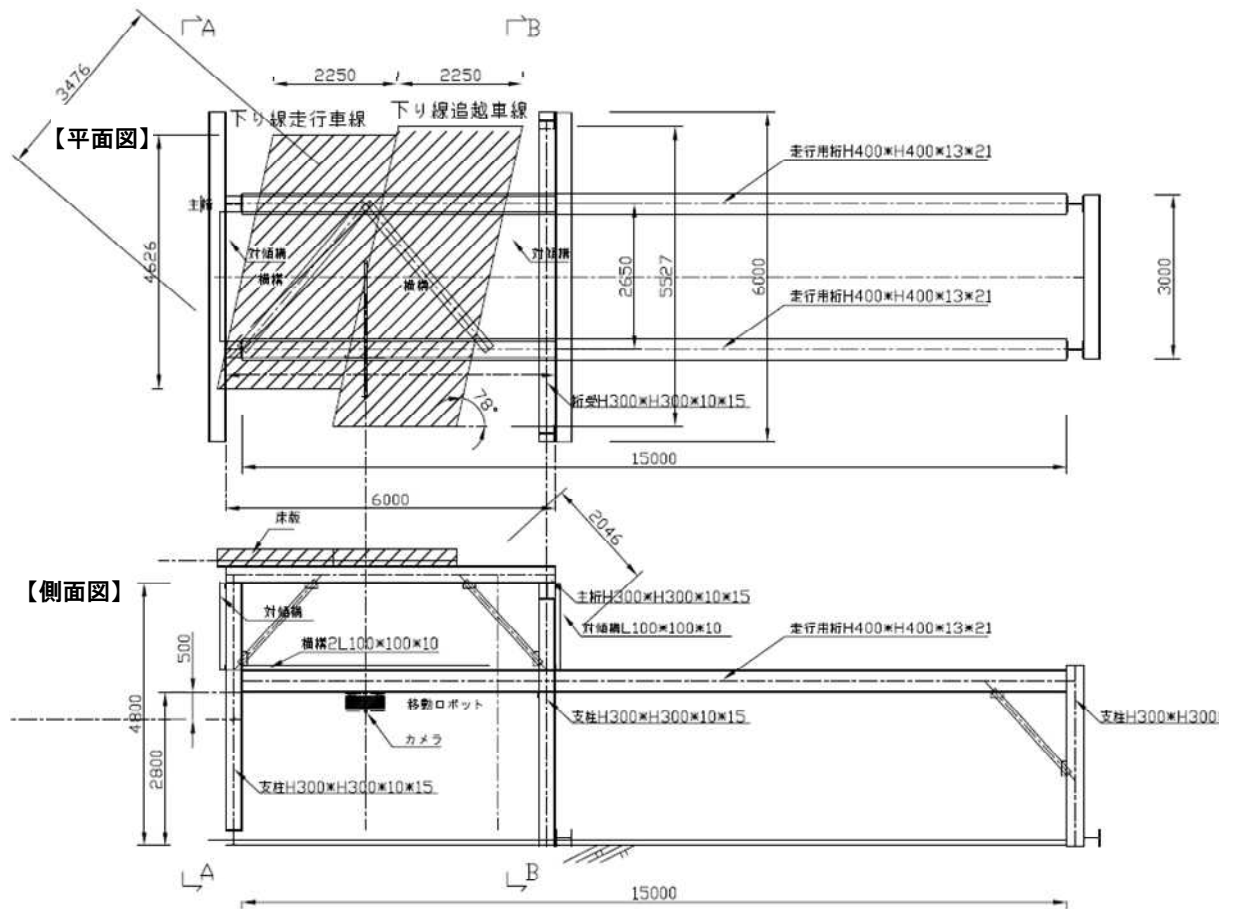
【③-(1)-6】磁石走行式ロボット等を活用した橋梁点検システムの開発/(株)熊谷組コンソ

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

■開発予定のシステム構成

磁石走行式ロボットに搭載する高精細カメラ 4 台による画像取得センサ類ならびに非健全部等の撮影を可能にするロボットアームによる橋梁点検システムを開発する。橋梁1径間(幅員 12m 程度、橋長 30m 程度の主桁 4 本)の測定と展開図作成は、240 分程度の性能のシステムを開発している。運用時の性能については、鋼桁橋のコンクリート床版を対象に、損傷のある床版の 0.2mm のひび割れを 80%の精度で特定する。

その要素技術の検証のために、研究所内に模擬橋梁を設置し、基礎実験を行うとともに、実橋梁での現場実証を通してシステム全体の性能を確認する予定である。



図IV-【③-(1)-6】-1 模擬橋梁の設置(実橋損傷床版を活用)

■実用化・事業化に向けての取り組み

予想市場としては、橋長 15m 以上の道路橋梁 15 万橋のうち、その 38%を占める鋼橋 5.7 万橋をターゲットとする。その年間市場規模は 97 億円(定期点検 1 回/5 年、85 万円/橋(直接経費ベース)、シェア 20%)と想定している。現在、ユーザー(西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社)を交えた技術交流を実施し、開発したロボット技術の試験運用等を実施する予定であり、成果の実用化・事業化に向けて取り組みを開始している。

## (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

### ■事業化計画

事業化については、以下のような検討を行っている。

第1段階: ロボットによる橋梁点検を促進する

道路管理者・点検業者へ製品を使用した点検手法を提案し、点検の実施を協力先と一緒に請け負う。協会を設立し、製品による点検手法の教育・普及を図る。

第2段階: 市場の拡大

橋梁点検を請け負う建設コンサルタント、道路管理者などに1年目はリース、2年目以降は、リース会社も含めて販売を行う。

### ■事業化スケジュール計画

全体のスケジュールは図IV-【③-(1)-6】-2 に示すとおりである。

	プロジェクト期間						
	H28年	H29年	H30年	H31年	H32年	H33年	H34年
■設計・開発	■						
■事業化			■				
協会設立			▲協会立上				
設備投資(億円/年)				0.2億円	1.8億円	4.0億円	6.0億円
生産(台/年) 1年目はリース品生産			生産開始	1	9	20	30
リース(橋/月)				4橋	40橋	120橋	240橋
販売(台数/年)					7台	25台	50台
収益(億円:売上の10%)					0.3億円	1.1億円	2.2億円

図IV-【③-(1)-6】-2 事業化スケジュールの計画

## (3) 成果の実用化・事業化の見通し

道路管理者、道路維持管理会社、コンサルタントのニーズ調査結果からは、以下のような事項のユーザーニーズがあり、それらの課題を解決する技術開発が求められている。

- 落下防止ネットの外からカメラで撮影し、ひび割れ等の調査可能な技術が必要
- 床版のひび割れ展開図を作成するのに時間を要するため、短時間に展開図が作成可能
- 配管背面や桁端部等の損傷部位把握困難箇所での点検方法が行える技術開発が必要
- ロボットアームで診断対象箇所へ接近でき、死角が少ない損傷マップや展開図が作成可能

事業化に際して、ビジネスプランの優位性は、以下のように考えられる。

近年の構造物診断方法として画像診断技術があるが、①視覚的な診断が主体であり構造物の不可視部分等の診断には限界がある。②磁石走行ロボットの特性として、コンクリート片等の落下防止ネットの上からも走行が可能、③ほぼリアルタイムにRC床版の概査展開図が作成可能であり、要詳細検査箇所を継続して実施できる利点がある。これらの点から、技術的、経済的に効率的調査が可能となる。よって、本研究開発の新規性、独自性、他との競争力が認められる。

### 【③-(1)-7】可変構成型水中調査用ロボットの研究開発/(株)キュー・アイコンソ

#### (1)成果の実用化・事業化に向けた戦略

##### ■ダム調査ロボットシステム

ダムの点検や作業を目的として、何種類かのロボットが現在開発中途上にある。これらは従来のROV技術を用いた装置と新しいコンセプトの装置に分類できる。我々は新しいコンセプトの装置を試作開発し実験設備や実際の現場で動作確認試験を行い、ROVに対する優位性を確認し、また、新しいコンセプトの装置に対しても、既に安定性・信頼性・仕様・性能・観測速度で優位性がみられる。今後の開発に於いては、システムのコンパクト化(低コスト化)、調査効率を向上させ、他システムとの差別化を図ってゆく。

株式会社キュー・アイは、40人規模の特殊環境下で使用する映像機器を製造販売する会社であり、世の中に無い製品を数多く生み出してきた実績がある。また、販売に関する優位性として、ダイバー・水中調査・管内検査会社に対し既存の販売ルートを持っている事、各地に協力会社や代理店を持っている事、海洋・水産関係・ロボット関係の展示会や行事を熟知している事等があげられ、事業化までの期間を最短で行える。

##### ■水中音響イメージングソーナー

本事業の終了時点で、水中構造物をリアルタイムに3次元で映像化できる水中音響イメージングソーナーが完成する。本事業においては、主としてダムのコンクリート構造物を対象として広範囲に映像化することで、コンクリートの欠落等を視認することができ点検効率が向上する。なお、本事業で得た成果はダムのコンクリート構造物以外にも、水中障害物や水中投棄物の搜索、水中工事のリアルタイムモニタ、水中工事後の施工状態の確認等、幅広く活用できる。

#### (2)成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

##### ■ダム調査ロボットシステム

本事業の終了後の2年間にダム構造物の点検を目的とした可変構成型水中調査用ロボットの事業化を行う。事業化段階では、コストダウンを含めたロボットの製造方法の確立・販売ルートの確立・保守点検体制の確立を行う。

##### ■水中音響イメージングソーナー

本事業の終了後、ダムの調査会社や各種建設会社に対する製品のデモンストレーションを実施し、本事業の成果が実用化・事業化されるよう活動推進する。

#### (3)成果の実用化・事業化の見通し

##### ■ダム調査ロボットシステム

水中インフラ調査を専門としたロボットシステムで、従来にはない以下のメリットがある。

- ① 柔軟にシステム構成を変更でき、多様な水中調査に対応できる。
- ② 自動航行による調査機能は継続的なデータの蓄積を容易にする。
- ③ 稼動状態のままでの調査ができるため、安全かつ低コストでの調査を実現する。

上記に掲げた特徴は、劣化・損傷の状態・分布を短期間に調査可能で、適切な段階での補修を可能にし、厳しい財政状況の下でもライフサイクルコストの縮減を達成した効率的なインフラ維持管理を実現できる。また、インフラの老朽化への対応は万国共通の課題であり、海外への輸出も期待できる。

##### ■水中音響イメージングソーナー

近年、港湾施設の水中部維持管理や各種建設メーカーによる水中工事においてソーナーを適用する例は多くなってきており、市場環境としては整ってきている状況である。現状は、これら市場に適用できるソーナーは海外製品のみであるため、価格が高い点と維持サポート体制上問題がある状況と見ている。本事業における成果はこれら海外製ソーナーの問題点を補いかつ、代替することのできるものであり、成果の実用化・事業化の見通しは得られている。

【③-(1)-8】オートパイロット可能な水中心検ロボットの開発/朝日航洋(株)

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

当社は、当該ロボットの活用を含めた総合的な河川維持管理サービスの展開を戦略として推進している。河川維持管理サービスを構成する技術は以下のとおりである。

構成技術	点検対象	備考
水中心検フロートロボット	<ul style="list-style-type: none"> <li>河川構造物本体の変状</li> <li>構造物周辺の洗掘、堆積</li> <li>河床全体の洗掘、堆積</li> </ul>	国土交通省総合政策局公共事業企画調整課主管 「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入」現場 検証に参画
航空測深システム (ALB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>河道全体の地形</li> <li>堤体の変状</li> </ul>	国土交通省大臣官房技術調査課主管 「社会インフラモニタリング技術 (河川)」に参画 国土交通省水管理・国土保全局主管 「河川砂防技術公募」に参画
大型除草機 MMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>堤体の微細な変状</li> </ul>	国土交通省大臣官房技術調査課主管 「社会インフラモニタリング技術 (河川)」に参画



図IV-【③-(1)-8】-1 河川維持管理サービス

これらの構成技術を組み合わせ、「維持管理から洪水予測」までの高度な河川維持管理サービスを展開することで、当該ロボットの実用化・事業化を推進する。また、河川維持管理サービスを構成する各技術は、自社単独で技術開発を行うのではなく、管理者である国土交通省の公募に参画することでいち早い実用化・事業化を目指している。

## **(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み**

当社は、「次世代社会インフラ用ロボットの開発・導入」に参画している。平成 27 年度に行われた現場検証において、国土交通省より「試行的導入の推薦」をいただき、今年度に「試行的導入」を実施する。来年度以降は国土交通省直轄河川での本格導入に向けた技術開発を行う。

## **(3) 成果の実用化・事業化の見通し**

当社は、平成 27 年度の「次世代社会インフラ用ロボットの開発・導入」現場検証の成果報告会を各国土交通省地方整備局に対して実施した。実際の管理者である地方整備局の方々に当該ロボットの説明を行い、ロボットに対する実際のニーズをヒアリングした。ヒアリングした結果を当該ロボット開発にフィードバックすることで、ニーズに合致したロボットを開発している。

「(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略」で述べたとおり、当該ロボットだけでなく航空測深システムや大型除草機 MMS を用いた河川維持管理サービスを提供することで競合他社との差別化を図る。

【③-(1)-9】土石流予測を目的としたセンシング技術ならびに高精度土石流シミュレーションシステムの開発/国際航業(株)コンソ

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

近年、霧島、御嶽山、箱根、阿蘇など各地の活火山が活発になっているなか、全国の活火山に対して噴火時の対策を立案することが急務となつてきている。対策を立てる上で重要なのが火山噴火の状況を正確に把握することであるが、これまでの火山噴火時には、火口から一定の範囲が立ち入り禁止になるとともに噴煙の状況によっては航空機の飛行も規制されるため、その範囲内での調査が行えず、その後の災害対応が十分に行えない場合が多かった。

本研究では、火山噴火時の現場において、安全上の問題から人や航空機が進入できない区域の中で活動できる無人飛行機やロボットを開発し、火山噴火の状況を正確に把握することにより、その後の災害予測の精度を上げ、火山噴火後の各種災害から住民を守ることを目的とする。

(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

【国際航業の開発する製品・サービス】

国際航業で開発を行う主な製品・サービスは、火山噴火時には、本研究で開発した各種調査機器を用いて災害対策に役立つ様々な情報を提供することと、平常時には、開発した技術を基に、火山噴火を想定した各種災害の予測・調査をおこなうことや火山噴火に対応する防災計画の立案を支援することである。

【エンルートの開発する製品・サービス】

エンルートで開発を行う主な製品・サービスは、本研究で開発した無人飛行機やロボット、各種センサーなどの機器を製造・販売し、火山噴火時に対応できる体制の整備を支援することである。

(3) 成果の実用化・事業化の見通し

現在の事業化スケジュールを以下に示す。

表IV-【③-(1)-9】-1 事業化スケジュール

年度	H28年度	H29年度	H30年度	H31年度	H32年度
複数マルチロータ機の映像・地形データ取得	製品開発	販売開始：随時現地で利用し随時改良			
マルチロータ機による遠隔土砂サンプリング	製品開発	販売開始：随時現地で利用し随時改良			
透水性、雨量、土砂移動などの遠隔計測技術	製品開発	販売開始：随時現地で利用し随時改良			
火山噴火緊急調査マニュアル	製品に合わせ随時作成				
	製品に合わせ販売：随時現地で利用し随時改良				
リアルタイムデータベース 噴火を想定した訓練	製品に合わせ随時作成				
	製品に合わせ販売：随時現地で利用し随時改良				
災害発生時調査・解析業務委託	災害発生時に随時				

**【③-(1)-10】 災害調査用地上／空中複合型ロボットシステムの研究開発の研究開発/(株)  
日立製作所コンソ**

**(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略**

災害現場の地形状況や現状把握を地上、空中から観測、分析する製品及びこれを用いた災害現場観測サービス業務等に適用する。

製品／サービスについては、①国土交通省 TEC-FORCE が全国配備する事業、②製品あるいは構成サブシステムを消防庁、防衛省などの災害対応機関あるいは自治体、指定公共機関、インフラ会社などへの販売を想定する。また、③国土交通省地方整備局や自治体等が発注する観測業務サービスあるいは得られた観測情報から災害現場の復旧工事計画作成に係るサービス事業も想定する。

想定する市場規模、産業創出効果は下表の通り見積り。

表IV-【③-(1)-10】-1 想定する市場規模、産業創出効果

時期	市場規模(MY)	シェア(%)
現状	0	0
プロジェクト期間終了時点	500	100
終了後1年目(H31年度)以降	500	100

**【市場規模算出の根拠】**

- ・最低限確保する市場規模として国土交通省 TEC-FORCE 10箇所25式への配備を前提
- ・100MY/式を5年間で配備⇒500MY/年

**(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み**

それぞれの会社／機関が連携して市場調査を実施しつつ、役割分担の見直し・最適化等、事業化にむけた体制構築の準備を実施するが、現場検証による評価状況を見て製品化事業への移行可否を判断する。市場調査については国土交通省以外、消防庁、防衛省など、本研究開発で得られた技術・製品の展開・拡販等、事業規模拡大を考慮する。

具体的には、国交省地方整備局への成果報告や拡販活動、消防組織を含む地方自治体への拡販活動を進める。

**(3) 成果の実用化・事業化の見通し**

高い走破能力を持ち、長時間の運用と作業が出来る無人プラットフォーム車両、広範囲の災害調査を効率的に行う無人プラットフォームヘリ、情報共有に必要な災害調査情報の可視化及び災害情報 DB を試作機レベルで開発がほぼ完了しており、製品化に向けた改良設計等、製品化に向け研究開発を推進する。

リスクとしては、製品設計段階では、国の安全性・信頼性等の評価基準不確定、生産段階では、試験フィールドの確保、販売段階では、購入品等の生産中止、購入先の本事業からの撤退による代替え品等の確保等が想定されるが、リスクヘッジを行いながらプロジェクトを推進する。



### 【③-(1)-11】遠隔搭乗操作によるマルチクローラ型無人調査ロボットの研究開発/(株)大林組コンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

本研究開発を行うことで、高い走破性能を持った小型重機サイズの走行装置と、高い臨場感をもった画像取得機能の実用化が期待される。同時に当該製品を制御するために必要な、長距離伝送が可能な無線通信技術並びに遠隔操作及び情報伝送が可能な地盤性状調査装置の確立を行う。株式会社大林組(以下、大林組と記す)は、これらを合わせてパッケージ化することにより、当該製品を国土交通省の各地方整備局等に配備し、土砂崩落災害時に当該製品を用いた初動調査を支援することで、土砂崩落災害の早期復旧に尽力することを目標としている。

当面は民間への販売は行わず、国土交通省若しくは地方自治体等の公的機関等に対する販売を想定している。大林組自身においても保有し、土砂崩落災害時の緊急対応を行えるように、人と物の両面から体制を整える。また、遠隔モニタリング技術及び低遅延型遠隔画像伝送システム等の個別の成果は移動手段を適宜変更することにより、鉄橋、PC 橋等で人間の立ち入りが困難な箇所での情報収集作業への展開も可能であり、他のインフラ維持管理用ロボット技術等との融合も期待される。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

プロジェクト期間終了後、半年から一年を目処に国土交通省の各地方整備局を中心に販売先を確保し適宜製作にかかる。ただし、販売先が未定であっても本プロジェクトにより製作されるプロトタイプの流用も含む最低1組の当該製品を製作し、自社で保有し有事に備える。

自社で保有する当該製品は所定の法定耐用年数をもって償却する償却資産とし、該当する償却金は大林組の技術開発費用等の予算で充当する。

また社外への販売後は定期的な点検や販売先が行うであろう訓練等に有償にて参加し、適切な助言と指導を行うことで当該製品の品質を維持するとともに、土砂崩落災害時の初動体制への協調性を向上させる。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

	市場規模(国内)	申請者シェア
(国内)		
プロジェクト開始時点 (H26 年度)	500 百万円	0%
プロジェクト終了時点 (H30 年度)	5,000 百万円	0%
終了後2年目 (H32 年度)	6,000 百万円	14%

市場規模算出の根拠：経済産業省発表の「2035 年に向けたロボット産業の将来市場予測」(2010 年 4 月 23 日)において災害対応ロボット市場は 2020 年(平成 32 年)に 60 億円、2035 年(平成 47 年)には 670 億円と試算している。本予測の発表後、東日本大震災が発生し災害対応ロボットに対する国民の期待と関心はますます高まっているため、本予測は妥当であるか、むしろ上回るものと想定することができる。COCN(産業競争力懇談会)の「産業対応ロボットと運用システムのあり方」及び「災害対応ロ

「ロボットセンター設立構想」等の報告書においても条件を整えば災害対応ロボットの市場規模は加速度的に拡大することも期待できるとしている。

シェア見通しの根拠：大林組は当該製品を国土交通省の全国に 8 箇所ある各地方整備局と北海道開発局及び沖縄総合事務局が管轄する災害対応機器の一種として配備されることを想定している。プロジェクト終了後の 1 セット当たりの単価を 8,300 万円として 10 箇所に配備されると希望しており、採用されれば 8.3 億円の事業規模となる。実際の製造、販売を行うプロジェクト終了後 2 年目の市場規模を 60 億円と想定するとそのシェアは 14%となる。

### 【③-(1)-12】 引火性ガス雰囲気内探査ロボットの研究開発/三菱重工業(株)コンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

開発したロボットの製造・販売・メンテナンスおよび応用アプリケーションの開発受託を事業化戦略として掲げている。

現有技術におけるロボット（櫻Ⅱ号）は原子力災害対応用途として、すでに福島原子力発電所や原子力緊急事態支援センターなどへ PR 中である。今回開発したロボットは、現有技術と同等の踏破性を有しながら軽量であり、取扱い性に優れることから、より一般的な CBRN 災害対応として、消防・警察・防衛などへ展開予定である。

また、今回の開発テーマであるトンネル崩落現場対応として、国交省管轄の 8 地方整備局および北海道開発局・沖縄総合事務局への防爆仕様ロボットの配備は必達であり、これ以外に TEC-FORCE や高速道路会社などへの配備をめざす。

更に、防爆性能を有することから、消防や、化学プラント・石油コンビナートなどへの展開も予定しており、大手石油関連企業への直販の他、防爆機器メーカー（IDEC など）と協力して販売及びメンテナンスルートを確保する。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

防爆型式検定の取得を受け、開発した防爆ロボットのプレス発表を三菱重工品川本社にて 7/12 に実施し、ロボットの防爆性能や走破性能のプレゼン、走行デモを公開。また、インフラ検査・維持管理展（7/20～22 @東京ビッグサイト）に出展し、成果の普及活動を実施。

プレス発表等の普及活動により、海外石油化学系の企業より問合せが複数あり、ユーザの関心が高いことが伺える。現在、問合せのあった企業に、本社よりニーズ調査及びロボット共同開発を打診中。また、本来の目的であるトンネル災害対応として、国内のユーザである消防に対し、防爆ロボットのニーズ調査を打診するとともに、開発したロボット操作性等の試験に協力いただくことを計画中。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

2013 年度 COCN「災害対応ロボットセンター設立構想」最終報告書の配備基準（案）によると、今回研究開発を提案するロボットは、陸上ロボット-小型に該当し、国内で 2673 台（1 台あたり平均価格 15 百万円）の配備が見込まれている。このうち、防爆構造を要するものは、今回提案の現場対象としているトンネル崩落現場を所轄する国交省（23 台）や高速道路会社の一部（55 台×5 割と見込み）、その他として消防の一部（87 台×2 割と見込み）、石油コンビナートおよび化学プラントの一部（1180 台×1 割と見込み）の合計 186 台、1 台あたり価格は平均価格に付加価値がついて 25 百万円と見込む。

よって市場規模としては、非防爆（ノーマル）小型陸上ロボットが 37,305 百万円、防爆小型陸上ロボットが 4,650 百万円と計算される。

潜在的ではあるが、十分な市場規模があり、特に防爆仕様の独創性は大きな強みとなると考えられる。また、配備の義務化など、法整備にも期待できそうである。

更に、国内においては、現在の防爆規格・指針では、バッテリー式移動ロボットの検定実績がないため、防爆指針に適合したロボットを開発し、防爆検定を取得することは、他社に対し大きなアドバンテージとなる。今回、防爆検定取得の実績を示すことで、数年後には他社の追従も考えられるが、これは容易ではない。そのため、価格面、競争力において優位性を保つことができると考えられる。

引用 産業競争力懇談会COCN 2013年度報告書「災害対応ロボットセンター設立構想」より

表6.4 災害対応ロボットの配備基準(案)

区分 (全国配備想定数)	陸上ロボット				航空ロボット				水中ロボット			数量合計 (セット)	取得経費 (億円)	
	特殊	小型	中型 ~大型	水陸	局地 10分	狭域 60分	広域 12h	管制・ 処理	小型 ROV	中型 UUV	大型 瓦礫			
コスト/1セット (単位100万円)	3	15	50	100	5	30	50	100	50	500	300			
官有	国交省TEC-FORCE (10ヶ所)		23	25	23	46		23	23	23		46	232	225.3
	消防庁(103ヶ所)	127	87	23	1	127		23	23	127	1		539	138.7
	警察庁(103ヶ所)		127			127							254	25.4
	海保庁(11管区)					52	11	11	11	30	15		130	112.4
	防衛省(5方面)	300	75	75	15	300	75	15	15	75	15	5	965	260.3
	自治体(103ヶ所)	127				127							254	10.2
指定公共 機関	高速道路会社 (55事業所)		55					52		52			159	60.3
	電力会社(721事業所)		352	102	102	250	102			420			1,328	458.9
	ガス会社					47							47	2.4
	鉄道会社		94				94			15			203	49.8
民有	石油コンビナート (370事業所)	1,850	740	370		740	370	370	370	740			5,550	1,424.5
	化学プラント(有毒) (220事業所)	1,100	440	440		440	220			440			3,080	627.0
	有毒ガス利用事業者 (120事業所)	600	240	240		240	120						1,440	222.0
	プラント会社 (全国220+α事業所)	1,100	440	220		440	220			440			2,860	517.0
数量合計(セット)	5,204	2,673	1,495	141	2,936	1,212	494	442	2,362	31	51		4,133.2	
備考	コスト及び配備定数は目標値であり、詳細は今後の関係機関との調整により変動する。													

図IV-【③-(1)-12】-1 災害対応ロボットの配備基準(案)

## 研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発(ii)非破壊検査装置開発

### 【③-(2)-1】超小型 X 線及び中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発 /(国研)産業技術総合研究所コンソ

#### (1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

中性子センサを搭載したプラント配管スクリーニング検査ロボットは、本開発にて事業化に必要なスループットで配管の腐食可能性をスクリーニング検査ができることが明らかになったことから、今後、国内石油化学プラントでの実績を蓄積し、事業化を目指す。事業化は、石油化学プラントと取引にある検査会社もしくはエンジニアリング会社への販売を予定するが、当面は、装置貸し出しまたはサービスを考えている。

事業化に向けた戦略として、共同実施者である三菱化学にてサービスを実施し、実績を積み重ねる。その後他社プラントまたはプラントへ出入りする検査会社またはエンジニアリング会社への PR を展開する。国内で実績を積み重ねた後は、海外の石油または天然ガスプラントのパイプライン向けに PR を展開する。

また、X線非破壊検査装置を用いたプラント配管の詳細検査用自動検査ロボットも今後完成する予定であることから、その有効性が確認した後、それと組み合わせた複合検査システムを提案して事業化を拡大する。

さらに、本研究で開発した各種非破壊検査技術は、プラント直線部の配管検査だけでなく、様々な検査に応用できると考えられることから、X線新技術産業化コンソーシアム等で様々な応用を検討して、事業化の可能性を探る。

#### (2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組み

事業化を予定している日立パワー社が、開発したシステムのユーザーになる可能性のある企業に技術を紹介し、国内だけでなく海外にて大規模なプラントを有する企業と具体的な検討を開始している。

現在までに、化学プラントの配管にて実証試験を行い有効性を確認したが、今後石油精製プラントなどでの実証試験を予定しており、様々な現場での有効性を確認して具体的な事例が蓄積できれば、実用化の見通しがさらに高まると考えられる。

#### (3) 成果の実用化・事業化の見通し

産業インフラの中でも、化学プラント及び石油精製プラントは国内に 100 万 km 程度あり、その多くが高度成長期に建設されたもので、それらを維持管理していくには適切な検査が必要である。

本研究で開発している装置が対象としている 6 インチ配管直線部の国内の検査ニーズは、5000km/年程度あると予測される。本装置を用いた検査手法は世界的にみても実例はなく、先駆的であるといえる。また、本装置の必要性は共同実施者であるエンドユーザ（三菱化学）からも明らかであり、高い競争力を有する。本研究で開発している装置が年間 250 日稼働すると 1 台あたり年間 25km の検査能力（25km 検査する場合の費用は約 1.5 億円）があり、国内で最大 200 台程度の市場規模があると考えられる。さらに、海外では東南アジアや中東などでも同様の検査が必要なプラントがあり、その規模は国内よりも 1 桁以上大きいと考えられる。そこで、現在海外のプラントを有する企業への紹介なども行っており、よい手応えが得られている。

また、本研究で開発している線源、検出器、ロボットを使った自動計測、安全対策などの基礎的技術は、プラント配管検査以外にも様々な非破壊検査への応用が可能であり、

その市場規模は数千億円以上の規模があると推測され、それぞれの場合に応じたシステムを構築し事業化に繋げる予定である。

## 「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」基本計画

ロボット・機械システム部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

## (1) 研究開発の目的

## ① 政策的な重要性

本研究開発を実施するにあたり、関連する政策は以下（抜粋）のとおり。

日本再興戦略（平成25年6月14日 閣議決定）

## ○IT等を活用したインフラ点検・診断システムの構築

センサーやロボット、非破壊検査技術等による点検・補修の信頼性・経済性が実証できたところから、順次、これらの新技術を導入する（点検等の基準の見直し、政府調達等への反映等）。（中略）モニタリング技術の高度化、ロボットによる点検・補修技術の開発等により、効率的・効果的なインフラ維持管理・更新を実現する。

科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～（平成25年6月7日 閣議決定）

## (1) 効果的かつ効率的なインフラ維持管理・更新の実現

この取組では、効果的、効率的に構造物の劣化・損傷等を点検・診断する技術やインフラを補修・更新する技術、インフラの構造材料の耐久性を向上させる技術等の開発を推進する。この取組により、災害時対応や確認困難な箇所等の対応が安全かつ適切に行えるようになるほか、近年進むインフラ老朽化にもコスト・安全性のバランスを鑑みて戦略的に対処することが可能となり、長期にわたり安心してインフラを利用できる社会を目指す。

世界最先端IT国家創造宣言（平成25年6月14日 閣議決定）

## ②IT活用による世界一安全で経済的な社会インフラの実現

劣化・損傷個所の早期発見、維持管理業務の効率化につながるセンサー、ロボット、非破壊検査等の技術の研究開発・導入を推進する。研究開発に当たっては、開発された技術が現場での導入につながるよう、ニーズや信頼性、経済性に十分配慮するなど、将来的な普及促進を見据えた研究開発を行う。

## ② 我が国の状況

高度成長期以降に整備されたインフラのうち、社会インフラは、今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。これは、石油精製プラント、化学プラント、鉄鋼所などの産業インフラも同様である。適切な維持管理が行われないことにより、インフラの崩壊や機能不全が発生し、人命や社会に影響を及ぼす危惧が高まっている。

我が国のインフラの維持管理・更新に対する課題は以下に集約されると考えられる。

・維持管理・更新に対する財政問題

今後、維持管理・更新に従来どおりの支出を行うと仮定すると、2037年度には現在のレベルの投資総額を上回り、2011年度から2060年度までの50年間に必要な更新費（約190兆円）のうち、約30兆円（全体約16%）の更新ができなくなる。

・維持管理の人材・技術不足

維持管理の技術者の高齢化が著しく、一定レベルの知見を有する技術者が不足している。また、共用年数の長い施設に関する知見が不足し、維持管理に必要な技術が不十分である。

また、我が国の主要なインフラでは、数年毎に定期点検を実施しているが、定期点検間の急激な劣化進行等の異常の把握は、人材の確保及び人件費の削減により困難である。加えて、定期点検時においても目視点検が困難な箇所も存在する。さらに、災害時には、緊急点検に時間を要し、迅速な復旧が困難であるといった課題もある。

③ 世界の取組状況

米国では、1960年代後半から橋の事故が続発した。70年代はじめに、全ての道路橋に2年に1度の点検を義務化しており、現在は、毎年約30万の橋の点検のために1,000億円を超える予算を連邦政府が支出しているが、費用面・検査時間・人材面などにおいて課題がある。また、欧州においても建設後50年を経過したインフラが多数存在するとみられており、同様な課題がある。中国では、新規のインフラを中心にモニタリングが進みつつある。

④ 本事業のねらい

本事業では、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図るため、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステムの技術開発及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置の技術開発を行い、インフラの維持管理・更新等における財政問題及び人材・技術不足の解決に寄与する。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

(i) 【(別紙参照) 研究開発項目①「インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」、研究開発項目②「イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」及び研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」(2)「非破壊検査装置開発」】

本研究開発は、2018年度末までに、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステム及び非破壊検査装置を開発する。なお、開発するモニタリングシステム及び非破壊検査装置は、事業終了後2年以内の実用化を目指した、妥当なコストを考慮したものとする。

(ii) 【(別紙参照) 研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」(1)「ロボット技術開発」及び研究開発項目④「ロボット性能評価手法等の研究開発」】



本研究開発は、2017年度末までに、的確にインフラの維持管理を行うロボットを開発する。なお、開発するロボットは、事業終了後2年以内の実用化を目指した、妥当なコストを考慮したものとする。

## ② アウトカム目標

開発するモニタリングシステム及びロボット等からのデータとインフラの損傷程度の関連付けやインフラ安全度の基準設定や導入技術の評価基準が出来ることにより、安全性を維持しつつ、低コストでインフラの維持管理を行うことが可能になる。また、こうしたインフラ維持管理・更新・マネジメント技術について2030年に約7,000億円超の市場創出が期待できる。

## ③ アウトカム目標達成に向けての取り組み

本研究開発の確実な成果が得られるよう、本事業とは別に実施する府省連携のインフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関する事業と連携してゆく。

## (3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業及び助成事業として実施する。

### 【委託事業】

#### ①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

インフラ構造物及びその構成部材の状態を常時・継続的・網羅的に把握するセンサシステム開発及びそのセンサシステムを用いたセンサネットワークシステムの構築と実証実験を行う。

#### ②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

完全自動により取得データからひび割れ等を判別できるデータ処理手法、撮影時の位置ずれを補正でき平面のみならず、奥行き(3D)もわかる画像解析手法を開発し、実証実験を行う。

#### ④ロボット性能評価手法等の研究開発

今後実用化が期待されるロボットを対象に、各種ユースケースに応じて、必要とされる性能や安全性等の評価を測定するための、標準的な試験方法を開発する。なお、本研究開発は、福島県において実施されるイノベーション・コースト構想推進の観点も含まれる。

### 【委託事業及び助成事業<NEDO 助成率 2/3、ただし大企業は 1/2>】

#### ③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発

インフラ構造物の中で、人間の立入りが困難な箇所へ移動し、インフラの維持管理に必要な情報を取得できるロボットの開発と実証実験を行う。また、これらのロボットに搭載可能な、小型の非破壊検査装置の開発と実証実験を行う。

なお、インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発のうち、(1)「ロボット技術開発(※)」に関しては、早期の事業化に向けて委託事業を2015年度末までとする。2016年度、2017年度においては助成事業とし、ロボットの実用化開発と実証実験を行う。

※(別紙)研究開発計画における③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発のうち、(1)ロボット技術開発を指す。

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャーにNEDO ロボット・機械システム部 安川裕介を任命して、プロジェクトの進行全体の企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的及び政策的効果を最大化させる。

NEDOは公募によって研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等(以下、「団体」という。)のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOが選定した研究開発責任者(プロジェクトリーダー) 芝浦工業大学工学部教授(特任) 油田信一氏の下で、各実施者が、それぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

(別紙参照)研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」のうち(1)「ロボット技術開発」に関しては、助成期間における体制を企業中心とする。

### (2) 研究開発の運営管理

PMは、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

#### ①研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、主としてプロジェクトリーダーをとおして研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、2018年度までの各年度に必要な応じ推進委員会等で研究開発内容を評価し、目標達成の見通しを把握することに努めるとともに、その評価結果を踏まえプロジェクトの見直し等を行う。

なお、(別紙参照)研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」のうち(1)「ロボット技術開発」及び研究開発項目④「ロボット性能評価手法等の研究開発」に関しては、2017年度までとする。

#### ②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について必要に応じて調査し技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査の効率化の観点から、本プロジェクトにおいて委託事業として実施する。

### 3. 研究開発の実施期間

(i) 【(別紙参照) 研究開発項目①「インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」、研究開発項目②「イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発」及び研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」(2)「非破壊検査装置開発」】

本研究開発の期間は、2014年度から2018年度までの5年間とする。

(ii) 【(別紙参照) 研究開発項目③「インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発」(1)「ロボット技術開発」】

本研究開発の期間は、2014年度から2017年度までの4年間とする。

(iii) 【(別紙参照) 研究開発項目④「ロボット性能評価手法等の研究開発」】

本研究開発の期間は、2016年度から2017年度までの2年間とする。

### 4. 評価に関する事項

NEDOは技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。

評価の時期については、中間評価を2016年度、事後評価を2019年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

また、中間評価の結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

### 5. その他の重要事項

#### (1) 研究開発成果の取扱い

##### ①標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準案の検討及び提案等を積極的に行う。

##### ②知的財産権の帰属

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

#### (2) 基本計画の変更

NEDOは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発

動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応をおこなう。

### (3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第2号及び第3号に基づき実施する。

## 6. 基本計画の改訂履歴

2014年3月、制定。

2015年2月、研究開発項目③(1)「ロボット技術開発」に関し、2016年度からの助成事業導入、及び期間変更(2017年度まで)につき改訂。

2016年3月、研究開発項目④「ロボット性能評価手法等の研究開発」の追加改訂。

## (別紙1) 研究開発計画

### 研究開発項目① インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

#### 1. 研究開発の必要性

インフラの維持管理は、定期的な目視点検が基本であるが、地方自治体では財政面や人材面等の問題により十分行われていないのが実態である。また、過去に経験のない程インフラの老朽化が進んでいることから、定期点検間もインフラ構造物及びその構成部材の状態を常時・継続的・網羅的に把握する必要性が高まっている。さらに、災害時に構造物の変状を即時に把握することや目視点検で確認困難箇所の状態を把握することも必要である。

センサを活用したモニタリングシステムは、インフラの健全度を的確に把握できる技術として期待されているが、現状では試験的活用に留まっており、広く普及されていない。この理由としては、センサに対して以下の技術面での問題点が挙げられる。

- ・センシング性能が不十分なため、インフラ状態を完全に把握するには限界があり、健全度を診断することが出来ない。
- ・センサの大きさ、設置面積等による設置箇所や設置個数の制約が大きい。
- ・センサの電源や通信を有線で配線すると設置工事で大きな負担が生じる上に、設置にも最適な技術や方法がない。
- ・電池を内蔵して無線にする場合、現状のセンサや送信技術では電力消費が多く、電池交換等のメンテナンスが必要である。
- ・センサの耐久性や信頼性が不十分である。

したがって、センサを活用したモニタリングシステムの普及のカギとなるポイントは、①構造物の状態を適確に把握するために必要なセンシング性能、②センサ自身で自己動作するための、低消費電力、自立電源、無線通信機能、③センサを長期メンテナンスフリーとするための耐久性、信頼性、④センサ設置容易性（小型化等）の技術開発が必要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### (1) センサ端末開発

橋梁、トンネル、プラント等及びそれらの付帯物を対象とし、それら構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位等を計測でき、安定な接続性と信頼性がある無線通信機能を搭載したセンサ端末を開発する。これらのセンサ端末を駆動させるため、振動、熱、風、光等の環境エネルギーを利用して発電する長寿命で高効率な発電・蓄電一体型自立電源、長期耐久性や信頼性を確保するためのパッケージング技術等を開発する。

##### (2) センサネットワークシステムの構築と実証実験

(1) で開発したセンサ端末を活用した設置容易なセンサネットワークを構築し、実環境下でインフラ状態のモニタリングを行い、実用に求められるセンサ端末及びネットワークシステムの機能を検証する。

### 3. 達成目標

本研究開発は、2016年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

#### (1) センサ端末開発

以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。

- ・ インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。
- ・ 少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、地震等の突発事象を検出できるものとする。
- ・ 片手で取り付け可能なサイズ（概ね7cm×10cm×5cm）以下とする。
- ・ 無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。
- ・ 実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする。

#### (2) センサネットワークシステムの構築と実証実験

(1) で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

### 4. 特記事項

(1) 「(1) センサ端末開発」については、可能な限り早く目標達成の見通しを得て、「(2) センサネットワークシステムの構築と実証実験」が実施できるよう努める。また、実証実験等の結果は、開発にフィードバックしつつ研究開発を実施する。

(2) 開発したデバイスやモニタリングシステムを実用化するメーカ及びそれらを受け取ることが期待できるユーザ機関を確保し、本研究開発成果の有効性を検討しつつ、連携して研究開発できる体制で実施する。なお、ユーザ機関はインフラを維持管理しており、実証実験のためのインフラの実環境を提供できる機関とする。

(3) 研究開発項目②、③と連携して研究開発を進めることとする。

## 研究開発項目② イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

### 1. 研究開発の必要性

イメージング技術を用いたモニタリングシステムは、インフラ構造物をカメラで撮影し、取得した画像をデータ処理することにより、構成部材のひび割れや亀裂等を検知できることから、目視点検を補完できる技術として様々な取組が行われている。しかしながら、既存技術では、1つの構造物に対して大量に撮影しなければならないこと、取得した画像データの処理に手間がかかる、構成部材の変状しか検知できず構造物全体の状態を把握できない等の問題点がある。これらの課題を解決するようなイメージング技術の開発が必要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) イメージング技術開発

橋梁、トンネル、道路、プラント等のインフラ構造物を対象として、①構成部材の画像データから完全自動で確実にひび割れや亀裂等を検出し、損傷予知を把握できるデータ処理技術及び、②構造物の全体もしくは広い範囲を遠方からカメラで撮影し、取得した画像をデータ処理することにより、それらインフラ構造物全体の変形挙動や応力集中箇所の局所的な変形分布を簡易に把握できるイメージング技術を開発する。

#### (2) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験

(1) で開発した技術を用いたモニタリングシステムについて、実環境下でのインフラ状態モニタリングの実証実験を行い、実用に求められる機能を検証する。

### 3. 達成目標

本研究開発は、2016年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

#### (1) イメージング技術開発

- ① 完全自動により画像データから0.2mm以上のひび割れ等を8割以上の確率で判別できる画像処理手法を開発し、実証する。
- ② 撮影時の位置ずれを補正でき、平面のみならず、奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法を開発し、実証する。なお、1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。

#### (2) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験

(1) で開発したイメージング技術を用いて、インフラ状態をモニタリングするシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

#### 4. 特記事項

- (1) 「(1) イメージング技術開発」については、可能な限り早く目標達成の見通しを得て、「(2) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験」が実施できるよう努める。また、実証実験等の結果は、開発にフィードバックしつつ研究開発を実施する。
- (2) 開発したデバイスやモニタリングシステムを実用化するメーカ及びそれらを受け取ることが期待できるユーザ機関を確保し、本研究開発成果の有効性を検討しつつ、連携して研究開発できる体制で実施する。なお、ユーザ機関はインフラを維持管理しており、実証実験のためのインフラの実環境を提供できる機関とする。
- (3) 研究開発項目①、③と連携して研究開発を進めることとする。



## 研究開発項目③ インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発

### 1. 研究開発の必要性

高度成長期を中心に大量に整備された社会インフラや産業インフラが老朽化して一斉に更新時期を迎えるのに対し、それらの長寿命化を図るためには適切な維持管理を行う必要があるが、維持管理に必要な財源や専門人材が不足している現状では、ロボットを活用した経済的な維持管理技術を研究開発する必要がある。

また、適切な維持管理には、従来人間が立ち入れない箇所での点検も必要となり、特に笹子トンネル天井板落下事故以降に国土交通省が実施している「総点検」の実施要領では、従前の点検箇所・点検方法からの内容強化が図られていることから、ロボットを活用した点検への期待が大きくなっている。

さらに、インフラの構造は総じて大規模であり、今後、目視や打音検査に加えて非破壊検査が必要となる機会が増大すると考えられることから、ロボットに搭載可能な非破壊検査装置を開発する必要がある。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) ロボット技術開発

「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」（国土交通省、経済産業省、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構、(独)産業技術総合研究所、(独)土木研究所）が平成25年12月に公表した「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入における重点分野」が指定するロボット技術を開発する。

開発の検証評価は、国土交通省平成25年12月25日付け報道発表資料「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」を策定致しました」の「別紙3 現場検証及び開発評価に係る体制・スケジュールについて」に掲載される「ロボット現場検証委員会（仮称）」の下で行う。

なお、これらの重点分野や評価体制は、当該検討会での議論を経て改定等が行われた場合には、改訂後の内容に準じる。

#### (2) 非破壊検査装置開発

上記のロボット技術開発で開発されるロボットへ搭載可能な非破壊検査装置を開発する。

### 3. 達成目標

#### (1) ロボット技術開発

本研究開発は、2015年度末までに、概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実用化開発、実証実験を中心に実施する。

「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入における重点分野」が指定する維持管理業務について、従来の作業員による点検や重機を用いた作業と同程度のトータルコスト及び同程度の精度を有するロボットを開発し、「ロボット現場検証委員会」の評価の下、実証実験を行う。

## (2) 非破壊検査装置開発

本研究開発は、2016年度末までに、概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は実証実験を中心に実施する。

上記のロボット技術開発で想定されるロボットへの搭載可能な非破壊検査装置を開発する。開発する装置は、X線や赤外線等を検査光源とし、正確な計測を可能にするために必要と考えられる光源数を搭載する。また、ロボットに搭載可能なサイズ、重量とし、検査対象の健全性を診断するための検査精度を備えたものとする。さらに、稼働寿命は2万時間以上とし、検査光源に対する安全性を十分に考慮したものとする。

## 4. 特記事項

- (1) ロボット技術開発について、各年度に必ず指定する実証フィールドを用いた実証試験と検証評価を行う。なお、「ロボット現場検証委員会」におけるフィールド実証試験の検証評価において、著しく評価の悪い事業については、当該年度で事業終了となることがある。
- (2) フィールドを用いた実証開発、試験により、研究開発の手段、方法、体制等について柔軟に見直すことにより、実用性の高い技術の開発を実施する。
- (3) 上記の研究開発と併行して、産業インフラへの応用展開について、適宜、開発・調査・検討を行う。
- (4) 研究開発項目①、②と連携して研究開発を進めることとする。

## 研究開発項目④ ロボット性能評価手法等の研究開発

### 1. 研究開発の必要性

ロボット開発が進むことにより、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図り、インフラ維持管理・更新等における財政問題及び人材・技術不足の解決が期待される。

しかしながら、開発されるロボットは多様であるうえ、経済性が優先されるとともに、操縦者の目視内を想定したロボットが大半であり、より確実な実用化のためには、各種ユースケースに応じた適切な性能と安全性を備える必要がある。

そのため、性能及び安全性の評価軸、評価軸に沿った性能レベル（数値）、それを測定するための標準的試験方法を研究開発する。

### 2. 研究開発の具体的内容

対象とするロボットの分野は、①無人航空機を活用した流通分野、②無人航空機及び水中ロボットを活用したインフラ点検分野、③無人航空機及び陸上ロボットを活用した災害対応分野とし、ユースケースごとに、既存のロボットによる各種試験を行った後、結果データを基に求められる性能レベルを設定し、それを踏まえて開発されたロボットによる各種試験を実施する。このサイクルを繰り返すことで、最適な性能評価手法等を研究開発する。

#### (1) 各種ロボットの性能評価基準の策定等

各種ロボットの性能評価基準・安全基準・整備基準・安全管理統制基準（オペレータの操縦資格基準等）及びその検証・検定手法の調査・研究開発を実施する。

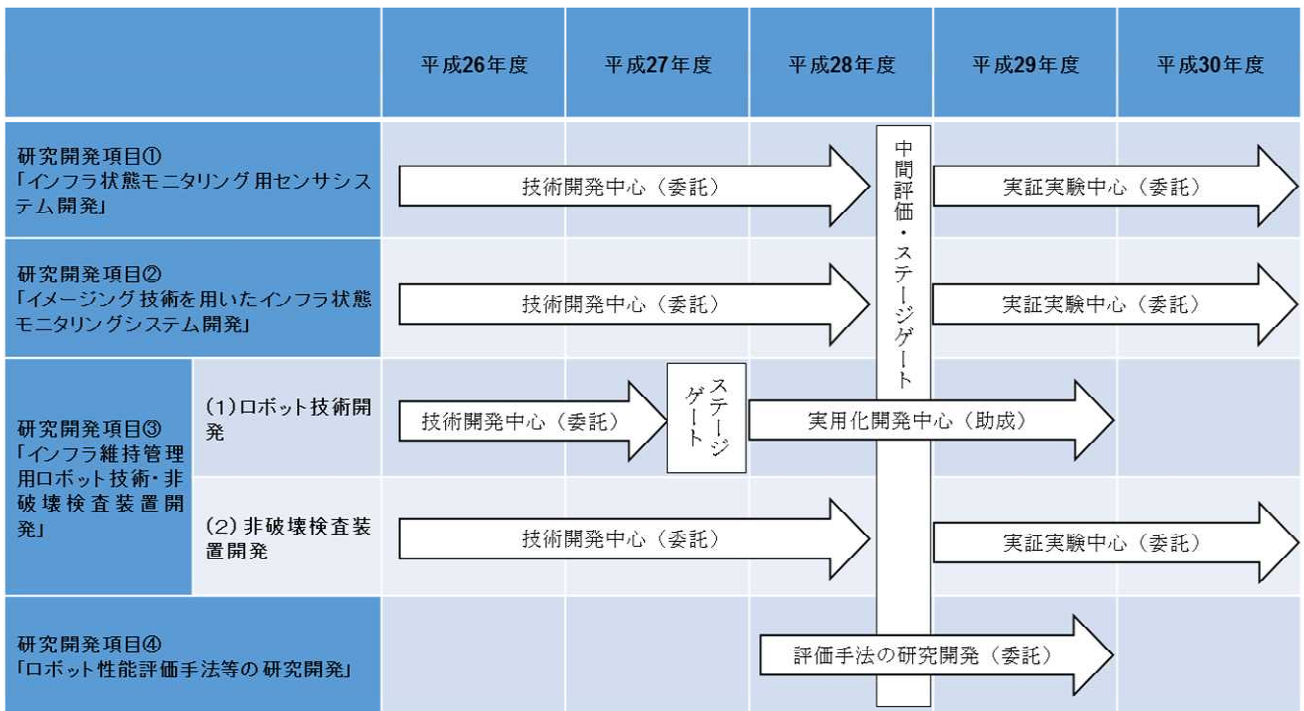
#### (2) 各種ロボットの試験等

既存のロボットによる各種試験（衝突実験等）の複数回の実施及び（1）の性能評価基準等を導入した各種ロボットの試験等を実施する。

### 3. 達成目標

各種ロボットの運用に必要とされる性能や操縦技能等に関する評価基準やその検証方法を明らかにし、標準化の方策を含め検討する。

(別紙2) 研究開発スケジュール



# 事前評価書

	作成日	平成 26 年 2 月 4 日
1. プロジェクト名	インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト	
2. 推進部署名	技術開発推進部	
3. プロジェクト概要（予定）		
(1) 概要		
1) 背景		
<p>高度成長期以降に整備されたインフラは、今後 20 年で建設後 50 年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる。適切な維持管理が行われないことにより、インフラの崩壊や機能不全が発生し、人命や社会に影響を及ぼす危惧が高まっている。我が国のインフラの維持管理・更新に対する主な課題としては、財政問題と人材・技術不足が考えられる。</p>		
2) 目的		
<p>本事業では、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図るため、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステムの技術開発及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置の技術開発を行い、インフラの維持管理・更新等における財政問題及び人材・技術不足の解決に寄与する。</p>		
3) 実施内容		
①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発		
<p>インフラ構造物及びその構成部材の状態を常時・継続的・網羅的に把握するセンサシステム開発及びそのセンサシステムを用いたセンサネットワークシステムの構築と実証実験を行う。</p>		
②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発		
<p>完全自動により取得データからひび割れ等を判別できるデータ処理手法、撮影時の画像ボケや位置ずれを補正でき平面のみならず、奥行き（3D）もわかる画像解析手法を開発し、実証する。</p>		
③インフラ維持管理用ロボット技術・非破壊検査装置開発		
<p>インフラ構造物の中で、人間の立入りが困難な箇所へ移動し、インフラの維持管理に必要な情報を取得できるロボットの開発と実証実験を行う。また、これらのロボットに搭載可能な、小型の非破壊検査装置の開発と実証実験を行う。</p>		

(2)規模 総事業費（一般）64.8億円（委託）

(3)期間 平成26年度～30年度（5年間）

#### 4. 評価内容

##### (1) プロジェクトの位置付け・必要性について

###### 1) NEDOプロジェクトとしての妥当性

本研究開発は、「日本再興戦略（平成25年6月14日 閣議決定）」、「科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～（平成25年6月7日 閣議決定）」、「世界最先端 IT 国家創造宣言（平成25年6月14日 閣議決定）」の政策に関連する取組である。インフラの維持管理・更新に対する財政問題及び人材・技術不足の課題については、我が国のみならず、欧米でも同様に課題となっており、これらを解決する技術をいち早く確立することが、我が国産業の国際競争力の向上に必要である。

###### 2) 目的の妥当性

今後、国内外のインフラにおいて老朽化が進んでいくため、既存インフラの状態に応じて効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図ることが必要不可欠となり、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステムの技術開発及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置の技術開発を行い、インフラの維持管理・更新等に対する財政問題及び維持管理の人材技術不足の解決に資する。

##### (1) プロジェクトの位置付け・必要性についての総合的評価

我が国の施策と整合すると共に産業力強化に資すること、長期展望に基づいた総合的な取り組みは企業単独では実施困難であること等から、NEDOプロジェクトとして妥当である。また、本研究開発の成果は、インフラの維持管理・更新に対する財政問題及び人材技術不足の課題解決に貢献すると考えられ、位置づけ・必要性は妥当である。

##### (2) プロジェクトの運営マネジメントについて

###### 1) 成果目標の妥当性

本研究開発では、国の政策等を踏まえつつ、2018年度末までに、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステム及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置を開発する。なお、開発するモニタリングシステム及びロボットは、事業終了後2年以内の実用化を目指した、妥当なコストを考慮したものとする。

###### 2) 実施計画の想定と妥当性

5年のプロジェクト期間中、概ね3年間で技術開発目標を達成し、4年目

以降は実環境下での実証実験を中心に実施する。

また、本研究開発の確実な成果が得られるよう、本事業とは別に実施する府省連携のインフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関する事業と連携してゆく。

### 3) 評価実施の想定と妥当性

NEDOは技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。

評価の時期は、中間評価を2016年度、事後評価を2019年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

また、中間評価結果を踏まえ必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

### 4) 実施体制の想定と妥当性

NEDOが公募によって研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。

また、本事業は、複数の企業、大学等が共同研究契約等を締結し、プロジェクトの推進を目的とする研究開発組織（技術研究組合等）を設置し、プロジェクトリーダーによる集中的管理の下で、企業、大学等が研究開発を分担して実施する。

### 5) 実用化・事業化戦略の想定と妥当性

本プロジェクトの成果は、ニーズ側となる国交省等との連携によってインフラ現場への導入のための検証・改善への検討へつなげてゆく予定である。

### 6) 知財戦略の想定と妥当性

研究開発成果にかかる知的財産権は、委託先に帰属させることを原則とした上で、NEDO知財マネジメント基本方針を適用する。

### 7) 標準化戦略の想定と妥当性

得られた研究開発の成果については、標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準案の検討及び提案等を積極的に行う。

## (2) プロジェクトの運営マネジメントについての総合的評価

本事業の目的、実施計画等は的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステム及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置の早期実用化及び普及を図る取り組みとして適切である。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通しについて

### 1) プロジェクト終了後における成果の実用化・事業化可能性

本研究開発は、2018年度末までに、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステム及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置を開発する。なお、事業終了後2年以内の実用化を目指し、実環境下での実証実験・実証試験をプロジェクト期間内に実施する。

また、本研究開発の確実な成果が得られるよう、本事業とは別に実施する府省連携のインフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関する事業と連携してゆく。

### 2) 成果の波及効果

開発するモニタリングシステム及びロボット等からのデータとインフラの損傷程度の関連付けやインフラ安全度の基準設定や導入技術の評価基準が出来ることにより、安全性を維持しつつ、低コストでインフラの維持管理を行うことが可能になる。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通しについての総合的評価

プロジェクト期間内に実環境下での実証実験・実証試験を実施することで、ニーズや課題が明確になる。さらに、本研究開発の確実な成果が得られるよう、本事業とは別に実施する府省連携のインフラの維持管理・更新・マネジメント技術に関する事業と連携することとなっており、本事業成果の実用化・事業化の見通しは十分高い。



「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト基本計画（案）」  
に対するパブリックコメント募集の結果について

平成26年3月3日  
NEDO  
技術開発推進部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。  
貴重なご意見を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間  
平成26年2月13日～平成26年2月26日
2. パブリックコメント投稿数<有効のもの>  
計13件
3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

	ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画への反映
全体について			
1	<p>インフラを維持する事は非常に重要であり、それが年々困難になって行く事には同意します。従ってそれをモニタリングして管理し維持更新を効率よく行うように技術開発を行う事までは理解できます。しかし、その実施法案が画像を活用したイメージング技術をセンシングとして”常時”行う事には著しい飛躍を感じました。物が壊れるのをセンスする方法は色々あると思います。一番分かりやすいのが振動や音による応答信号を判定する触診法だと思います。勿論ひび割れが目に見えて危ない状態というのは直感的で分かりやすいのですが、中身の構造体により、進行度合いや危険度は視覚では判断し難いものに思えます。それもトンネルや架橋のような大きな構造物の隅から隅まで日本全国の物件を網羅し”常時”モニタリングするとなると現実的な手法だとは思えません。定期的で効率が良く、確実性が高い技術手法の開発と言う風にもう一度視野を拡げた研究テーマにしたら如何でしょうか？ カーナビやグーグルのマップは全国津々浦々毎日のように更新されています。これは”常時”ではありませんが必要にして充分だと思います。新幹線のかんざし列車のように測定器を積んだ車両が安く準備できて簡単に操作、良否判断できれば所定の目的は達せられると思います。例えば、加振器と加速度ピックアップをセットにしてデータをストックして行ける車とかです。以上、素人の意見ですが、多少なりともご参考になれば幸いです。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 イメージング技術は目視点検の補完として、”常時”ではなく「定期的」かつ「効率的」に行う技術として考えております。 また、御指摘の通り構造物の隅から隅まで日本全国の物件を網羅し“常時”モニタリングすることは困難であり、老朽化が進んでいるインフラ構造物に、定期点検間や修復前後にモニタリングするためにセンサシステムが有用であると考えております。</p>	特になし。

2	<p>大学でロボットをメインとする研究科に所属しています。ロボット技術によるインフラ維持作業の省力化・センサネットによる常時モニタリング化は、人口が減りつつある現在の日本で、少ない人数で高度なメンテナンスを提供する上で、非常に重要な技術だと思います。個々のセンサをより高度にしてゆくことももちろんですが、Googleなどにみられるように巨大なデータ群からいかに有用な情報を抽出していくかというデータサイエンス的な観点での取り組みにも注目しています。例えば、Googleは現状ではカメラやGPSなど、市販のありあわせのセンサを組み合わせ、あれほどのインパクトのあるサービスを多数提供しています。当プロジェクトでは、新規センサを生かしたデータ収集が期待できるわけですから、きっと思いもかけないような、優れたインフラサービスを生み出せるものと思います。新たなデータサイエンスの地平を切り開いていただけることを楽しみにしています。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 御指摘のとおり、センサで計測したデータを収集し、インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための有用な情報を抽出していくことが最終的に重要であると認識しております。そのためにも、本プロジェクトでは実際にインフラを維持管理しているユーザー機関との実証実験を実施していくことにしております。</p>	特になし。
3	<p>「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」は、日本が直面している社会インフラのエイジングという喫緊の課題を解決するための有力な手段となります。そのなかで、インフラの状態モニタリングのコアとなるセンシング技術として、AE (Acoustic Emission) を強く推奨します。</p> <p>AEは、橋梁などの構造材が変形あるいは破壊する際に、クラックの進展に伴い内部に蓄えていた弾性エネルギーを弾性波として放出するものです。通常、橋梁のモニタリングには、加速度センサを用いて橋梁の固有振動数の変化を計測する手法が用いられています。しかし、固有振動数の変化が見えるのは構造材の破壊の結果であり、すなわち橋梁の破壊がかなり進んだ段階になって初めて計測できるものです。それに対してAEは、破壊が進展する際のクラックを直接検出するものであり、橋梁の劣化の経時変化をリアルタイムにモニタリングすることが可能となります。</p> <p>AEは1960年代に広く研究されましたが、感度が低い、ノイズに弱い等の点から、実用化は難しいと言われてきました。しかし近年の技術革新、すなわちセンサデバイスの高感度化技術、数MHzの高速サンプリングおよび大規模データハンドリング技術、多点相関計測によるトモグラフィ（断層映像）技術などによりこれらの問題は克服されつつあり、実用段階に達しています。</p> <p>AE関係の基礎技術、すなわちAEセンサや信号処理技術は、日本の強みでもあります。AEがインフラの状態モニタリングのコア技術の一つとして採用されることを期待します。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 センシング対象として、「振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるもの」としてしております。 御提案のように、AEセンサが特性改善され、インフラ状態モニタリング技術として実用段階に達していらっしゃいましたら、振動や変位に加えて「その他必要と考えられるデータを計測」の候補のひとつとして考えられるかと存じます。</p>	特になし。

4	<p>インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発ということであるが、まさに国民の安全、安心に直結する課題であり、政府、行政が主導となり推し進めていくべきプロジェクトかと考えられる。もちろん、全てのインフラについて、建設後例えば40年経過した場合、全て再建築することが可能であれば、ここで提案するプロジェクトは不要である。しかし、財政的にそれは不可能であり、限られた予算の中で、いかに最も安全なシステムを構築するかが重要となるはずである。特にトンネルや橋梁など崩壊した場合、人命に多大な被害を及ぼしうるインフラについて重点的に維持管理して欲しい。維持管理のための方法として、センサによるモニタリングが最も効果的と思われる。基本計画案に記載されている現状の「センシング性能が不十分なため、インフラ状態を完全に把握するには限界があり、健全度を診断することが出来ない。」という点に関しては、裏を介せば、新たなセンサ技術を開発すれば、この分野で世界をリードする可能性が多いにあるということであり、今後インフラ技術を世界に売りだしていこうとしている日本の戦略に大いに一致している。センサ技術として、振動及び変位を検出可能なものとあるが、是非この分野において世界的ブレイクスルーとなるような技術の開拓に努めて欲しい。また今後、建設予定のインフラについても、維持管理するため、これらモニタリングシステムの搭載を義務付けることで結果的に、低コストで管理維持が可能になると考えられる。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 御指摘の通り、インフラ維持管理・更新に対する重要な課題のひとつとして財政問題がありますが、一方でインフラ事故により人的被害が発生した場合には、社会的損失のインパクトが大きく、効果的かつ効率的な維持管理・更新等を図っていくことが必要不可欠であると考えております。 今回のプロジェクトでは、的確にインフラ状態を把握できるセンサシステム及び維持管理を行うロボット・非破壊検査装置の技術開発を行い、課題解決に貢献すべくプロジェクトを推進いたします。</p>	特になし。
5	<p>提唱されている様々なプロジェクトの中で、本プロジェクト「インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト」が重要であると考えます。現在、日本で使用されている様々なインフラ設備は50年以上前の高度経済成長期に実現されたものが多く、既に多くの設備が老朽化している状態です。しかもこうした老朽化は、建造物内部で徐々に進行し、目視で確認できる状態になれば既に手遅れとなる場合が多くなります。このため、目視では確認できない構造物内部の破損やその兆候を監視し、通達するネットワークシステムは必須の技術であると考えます。また、こうしたインフラ設備の老朽化に関わる課題は、日本だけでなく、多くの先進国や今後発展するすべての国が潜在的に抱える課題です。このため、今後の発展を見込むことができる新しい産業の一つとなると考えられます。こうした課題にいち早く取り組むことで、国民の生活を守る手段としてだけでなく、対外的な技術の輸出なども見込める産業としても期待できる技術となるのではないかと考えます。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。 御指摘のとおりインフラが老朽化は進んでおり、状態に応じて維持管理・更新等を図るために、的確にインフラの状態を把握できるモニタリングシステムの技術開発が必要となります。 また、本課題は海外でも同様にあり、世界に先駆けて実用化することにより海外展開も期待できると考えております。</p>	特になし。

6	<p>1. 全体として、喫緊の課題としてニーズの高い社会インフラ・産業インフラをガードするための適切なプロジェクトの提唱になっていると思います。実りあるプロジェクトの遂行を期待しております。</p> <p>2. 基本計画（案）P7の達成目標「センサー端末開発の部分に、「温湿度も同時に計測できるものとする」の記述があります。これは、その下の「実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする」の記述と相反する面があると思います。すなわち、10年以上の信頼性を持たせるためには、出来るだけ外界と遮断してしっかりとしたパッケージングが必要となりますが、そうすると湿度の測定は困難になるかと思えます。整合性を取っていただければと思います。</p> <p>3. 「センサー」分野において「センサー端末開発」と「センサーネットワークシステムの構築と実証実験」の開発を進め、フィードバックをしつつ研究開発を実施することとされていますが、極めて適切なやり方であると思います。センサーを用いてインフラ状態をモニタリングするという目標を達成するためには、センサー単体だけに着目しただけでは実効が上がりず、トータルシステムとして開発を進めることが重要です。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>1. 課題解決に貢献すべくプロジェクトを推進いたします。</p> <p>2. 温湿度計測は高いニーズがございますが、御指摘の通り湿度計測の長期信頼性確保は困難であると考えられます。また、コンクリート建造物の健全性診断には湿度の把握は重要であると考えておりますが、インフラ建造物全てに必ずしも必要では無いと考えておりますので、検討させていただきます。</p> <p>3. メーカーとユーザが一体的に取り組むことにより、プロジェクト終了後の早期の実用化を目指していきます。</p>	<p>「温湿度も同時に計測できるものとする」を「温度も同時に計測できるものとする」に変更する。</p>
7	<p>「インフラの維持管理・更新等の社会課題対応システム」の開発が喫緊の課題であることは誰もが納得するものと考えます。その中でも「状態モニタリング用センサシステム」および点検困難な箇所へのアプローチを含めた「インフラ維持管理用ロボット技術」の適用は非常に洞察力に富んだ視点と考えております。ただ企業出身者の視点で考えると、事業的にはまだまだ不透明な所もあり（いつ、どれだけ儲かるのか）、研究開発投資に逡巡するところです。その意味で国家が実用化の後押しをしていただけるのはありがたい限りです。センサシステムに関しては、「無線、自立電源を搭載し、地震など突発への対応可」での稼働は非常に重要な視点であり、設置の容易性のみならず、世界に類を見ないシステムで、将来の輸出をふくめた国際競争力の視点からも重要と考え、基本計画案に賛同致します。また「ユーザ機関を巻き込むこと」とされているのは非常に重要な視点です。センサのみ、電源のみ、無線のみと、それぞれの部品に専用の回路技術を駆使して最高の一品モジュールを開発しても意味がなく、それぞれの部品を統合して、最適な超低消費電力回路と耐環境性に優れたパッケージ技術の開発で、センサシステムを「実際に使われるシーン」に合わせて開発していく、ある意味「すりあわせ技術」こそが重要です。その意味で、「橋梁モニタリングシステム」「道路付帯建造物モニタリングシステム」等、</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>基本計画案にご賛同いただきありがとうございます。</p> <p>ユーザ機関を含め、それぞれ得意分野を有する企業・大学等の英知を用いて、いち早く成果を創出し、我が国のインフラ維持管理・更新等の課題解決に貢献すべく研究開発を推進いたします。</p>	<p>特になし。</p>

	それぞれのシステムをユーザ機関と一緒に作り上げていく視点が重要です。従ってそれぞれのシステムを完成させる機関、および機関連合が本プロジェクトを担うことが重要と考えます。		
8	今回のプロジェクトでは、インフラ維持管理と防災のためのセンサーやロボット等の技術開発とその現場における実証が中心になるが、プロジェクトの成果を生かし、インフラ点検や防災の分野で開発されたロボットを実際に利用していくためには、潜在的ユーザーに対し十分な情報を提供することが必要である。産業競争力懇談会（COCN）災害対応ロボットセンターの構築プロジェクトの2013年度の報告書では、「災害対応ロボットセンター構想における技術データベース構築」が取り上げられているが、本プロジェクトにおいても、プロジェクトの中で開発されるインフラ点検や防災ロボットに加え、そうした分野で現在利用可能なロボットについてデータベースを作成し、それを公開していくことは非常に有意義であり、プロジェクトに関連する調査研究として実施すべきである。	ご意見ありがとうございます。お寄せいただいたご意見も重要な視点と考えられますので、ご指摘の点も踏まえて、我が国のインフラ維持管理・更新等の課題解決に貢献すべくプロジェクトを推進いたします。	特になし。
9	<p>(1) 社会インフラの老朽化が大きな社会課題となっている。この問題の解決は単独の会社でできるものではなく、国の支援が必要であり、本プロジェクトはこの社会課題を解決する上で非常にタイムリーかつ有用なものであると考える。このプロジェクトを通じて真に役に立つ成果が出されることを期待する。</p> <p>(2) 特に、現在行われている人による点検を補完するインフラ状態の常時・継続的なモニタリングシステムの開発に期待する。</p> <p>(3) また、単なる要素技術の開発ではなく、ユーザ機関とメーカーが一体となり、実証実験結果をフィードバックして研究開発を推進することが基本計画に記載されており、真に役に立つ開発にとって、非常に適切な基本計画になっていると考える。なお、実際のフィールドで役に立つモニタリングシステムを開発するためには、センサだけ、自立電源だけというような要素部品や技術を独立して開発するようなやり方でなくモニタリングシステムとしての開発を実施することが重要であり、システム開発と実証に重きを置いたプロジェクトを計画することを切に望む。</p> <p>(4) また、今回の計画では自立電源を有する無線システムの開発が計画されており、今の有線や電池交換が必要なシステムの課題を解決し、真に役に立つシステムが実現できると期待される。</p> <p>(5) 細くなるが、基本計画書P7の達成目標の中で健全度を診断する信号と温湿度が同時に計測されることが要求されている。温度は温特を補償するためにセンサの直近に実装し、センサ信号と同時に計測することが必要であると考え。しかし、環境の湿度を計測することは劣化診断に有用と考えるが、必ずしもセンサ直近に実</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>(1) 御指摘の通り、インフラ老朽化は喫緊の社会課題であり、早期の実用化に向けて取り組んでまいります。</p> <p>(2) ご期待に応えるように取り組んでいきます。</p> <p>(3) センサ端末は、要素部品や技術を一体的に開発し、ユーザが確保した実フィールドでの実証試験を実施することによりシステムを最終的に完成させることを目標としております。</p> <p>(4) 無線と自立電源を有するシステム開発をすることにより、設置工事で大きな負担がなく、メンテナンス不要になることで広く普及されることを目指します。</p> <p>(5) 湿度の計測は環境条件の計測のひとつとして考えておりま</p>	「温湿度も同時に計測できるものとする」を「温度も同時に計測できるものとする」に変更する。

	<p>装して、センサ信号と同時に計測する必要はないと考える。特に、今回のプロジェクトでは実環境下で10年以上の信頼性を有することが要求されており、過酷な外界と遮断した気密パッケージが必要であるが、湿度センサは外界に晒す必要があり、この面でも研究開発が非常に困難になると考える。</p> <p>(6) また、「少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できる」ことが要求されているが、通常の経時変化の検出は1日に1回程度の通信で十分であり、多くても道路を考えるとラッシュ時の朝、夕および太陽光の影響が最も大きく、最も高温になると思われる昼と気温が最も下がる夜(高速道路では夜間に大きなトラックが最も走行することも考えられる)の4回を計測すれば十分と考えるとのユーザ意見が大半であり、実用的な要求仕様になっていないと考える。</p>	<p>したが、モニタリング対象としてコンクリート構造物に限られることや信頼性の確保が厳しいことから必須項目から除くことを検討いたします。</p> <p>(6) インフラの健全度を診断するためにはよりきめ細かいデータが必要と考えられます。</p>	
10	<p>インフラ維持管理の方法が安価なセンサシステムで実現でき、かつ日本のインフラにおいて今後数年間にわたり実証できたら、世界的にスタンダードな方法としてアピールできる可能性を強く感じました。インフラは日本の強みだと思いますが、インフラ自体ではなく、維持管理でビジネスを展開していくことは魅力的なビジネスモデルだと思います。このプロジェクトが成功したら、是非とも世界にアピールし、ビジネスチャンスをも日本の企業に与える役割を国に担っていただきたく思いました。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。世界に先駆けてインフラ維持管理技術を実用化できるように、研究開発を推進いたします。</p>	特になし。
11	<p>「インフラ状態モニタリング用センサシステム開発」についてです。</p> <p>1) モニタリング用センサシステムから得られる計測結果より対象インフラの劣化進行や損傷状態を推定評価する事が全体として重要と考えます。従って、「モニタリング用センサシステム」と「劣化の進行や損傷判定に必要な解析・診断システム」研究との連携がインフラ状態モニタリングシステムの構築には不可欠と考えます。関連のPJとの密な連携体制の構築が重要と思います。</p> <p>2) 社会インフラ(構造物)の解析や診断に温度、場合によって湿度の測定は必要となると考えますが、構造部の解析・評価に有効な温度や湿度の測定位置と、他のパラメータ(振動、変位、傾斜など)の測定位置は必ずしも同じ位置になるには限らないので、同一のセンサユニットでの温湿度同時測定は必要条件にする必要性は無いかと思えます。モニタリングシステムとしては測定項目の一つとして必要と思えます。</p> <p>3) 取り付け工事の容易性については下記の2項目があると思えます。</p> <p>①配線工事の軽減(信号線、電源線)</p> <p>②センサ設置の容易性と信頼性</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>1) プロジェクト内で、センサシステム開発のシーズ側と使用するニーズ側の連携体制を構築いたします。</p> <p>2) よりきめ細かくインフラ構造物の健全性を把握する上で、振動、変位等の計測において環境条件を同時にかつ同一箇所で計測することがニーズ調査も踏まえて必要であると考えております。</p> <p>3) 御指摘のとおり、落下防止には、ボルトとワイヤーで固定するのが有効であると考えております。高所等にセンサ端末を設置</p>	特になし。

	<p>この中で②センサの設置の容易性と信頼性に関しては、土木構造物への設置を考えた場合、固定の信頼性の要求の方が高い（高速道路上に設置した場合落下すると事故を引き起こす要因となる。場所によっては、ボルト+ワイヤーでの落下防止の確実性を要求される）。従って、設置時の持ち運びに支障がなければ、小型化の寸法目標よりも、現場の要求に答えられる構造を優先とすべきと思います。</p>	<p>する際に、片手でセンサ端末を扱うというユーザ側の要求に基づいてサイズを決めております。</p>	
12	<p>プロジェクト概要の「研究開発の内容」の①について、インフラに生じる負荷やひび割れ等を、的確に、かつ効率的にモニタリングするためには、構造物及び構成部材に影響を与えない程度の微小なMEMS力センサを、多数内部に埋め込むことが考えられます。構造物及び構成部材ごとに、また構造物の場所ごとに、負荷が生じる力のレンジが異なることを考えますと、計測対象・箇所に応じた力センサの感度を、理論に基づいて見積ることが重要と考えます。また見積だけでなく現段階である程度、建築に限らずとも、剛体からゴム材料等まで部材に埋め込みを行った力センサとして実績があることが望まれると思います。</p> <p>③については、人間の出入りが困難な箇所へ移動するロボットを開発する場合、ロボットと構造物との接触を検知し、移動（歩行、這う等）を行う必要があります。これについても、①と同様の原理の力センサを用いることが可能であり、目的の力及び圧力の計測を行えるセンサを、理論的に検討し、理論通りの実測が得られることを、現段階である程度確認できることが望まれると考えます。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>①は、センシング対象として、振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとしております。</p> <p>御提案のように、MEMS力センサがインフラ状態モニタリング技術として有効でしたら、「その他必要と考えられるデータを計測」のひとつとして用いられることも考えられると存じます。</p> <p>③お寄せいただいたご意見も重要な視点と考えられますので、想定されるユーザーの意見や実際の利用環境を踏まえて構造物との接触を検知する技術等の検討も進め、我が国のインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システムの開発を推進いたします。</p>	<p>特になし。</p>
13	<p>インフラの維持管理は我が国において喫緊の課題であり、国外に目を向けても、現在各地でつくられているインフラは数十年後には同じように維持管理の課題に直面するものと思われる。その観点から本プロジェクトの成果は今後世界中で活用されることが見込まれるものであり、ぜひとも推進すべきものである。</p>	<p>ご意見ありがとうございます。</p> <p>早急な課題解決に向けて研究開発を推進いたします。</p>	<p>特になし。</p>

以上

【特許・論文・外部発表リスト】

1.特許(36件)(出願者、出願番号、出願地域、出願日、状態、発明の名称)

番号	出願者 (権利者)	出願番号 /特許登録番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	発明の名称
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>						
1	(一財)マイクロマ シンセンター、日 本ガイシ(株)	特願 2015-036009	国内	2015.2.26	公開	無線センサ端末
2	(株)東芝	特願 2015-131631	国内	2015.6.30	登録	センサ
3	(国研)産業技術 総合研究所	特願 2015-171314	国内	2015.8.30	未公開	電子デバイス及びその 製造方法
4	富士電機(株)	特願 2015-190301	国内	2015.9.28	未公開	加速度補正データ算出 装置及び加速度センサ の製造方法
5	三菱電機(株)	PCT/JP2015/081018	PCT	2015.11.04	未公開	測位装置および測位方 法
6	(一財)マイクロマ シンセンター、(国 研)産業技術総合 研究所	特願 2015-227187	国内	2015.11.20	未公開	無線センサ端末
7	(国研)産業技術 総合研究所	特願 2015-231423	国内	2015.11.27	未公開	構造物の亀裂発生検出 システム及びそれに用 いるひずみセンサ
8	東京大学	特願 2016-003902	国内	2016.1.12	未公開	弾性波計測センサ
9	三菱電機(株)	特願 2016-035567	国内	2016.2.26	未公開	測位装置および測位方 法
10	大日本印刷(株)	特願 2016-048299	国内	2016.3.11	未公開	センサーモジュール及 びシートモジュール
11	大日本印刷(株)	特願 2016-048306	国内	2016.3.11	未公開	電子部品モジュール、 電子部品構造体、及 び、シートモジュール
12	(株)東芝、京都大 学	特願 2016-52944	国内	2016.3.16	未公開	構造物評価装置、構造 物評価システム及び構 造物評価方法
13	(一財)マイクロマ シンセンター	特願 2016-079236	国内	2016.4.12	未公開	自立型端末
14	(株)東芝、京都大 学	特願 2016-98951	国内	2016.5.17	未公開	構造物評価システム、構 造物評価装置及び構造 物評価方法



15	富士電機(株)	特願 2016-115154	国内	2016.6.9	未公開	センサ装置、センサシステム及び測定方法
16	(株)東芝、京都大学	特願 2016-119306	国内	2016.6.15	未公開	構造物評価システム、構造物評価装置及び構造物評価方法
17	(国研)産業技術総合研究所	特願 2016-141301	国内	2016.7.19	未公開	ひずみセンサ、クラック検出用センサ及びクラック検出装置
<b>【①-2】(一財)マイクロマシンセンターコンソ</b>						
1	(一財)マイクロマシンセンター	特願 2015-134999	国内	2015.7.6	出願	振動発電デバイス及び無線センサ端末
2	魯 健、張 嵐、小林 健	特願 2015-219413	国内	2015.11.9	出願	振動検出素子
3	沖電気工業(株)	特願 2016-130239	国内	2016.7.8	出願	無線通信装置、管理装置及び無線通信システム
<b>【②-1】首都高技術(株)コンソ</b>						
1	首都高技術(株)、東北大学、(国研)産業技術総合研究所	特願 2016-054447	国内	2016.3.17	出願中	損傷抽出システム
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>						
1	福井大学、和歌山大学、4Dセンサー(株)、ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)	特願 2016-159212	国内	2016.8.15	出願	変位を測定する方法
<b>【③-(1)-1】川田テクノロジーズ(株)コンソ</b>						
1	川田テクノロジーズ(株)	特願 2015-220086	国内	2015.11.10	出願中	浮上式点検装置およびそれを具える点検システム
<b>【③-(1)-2】ルーチェサーチ(株)コンソ</b>						
1	ルーチェサーチ(株)	特願 2016-084490	国内	2016.4.20	審査請求中	無人飛行体
<b>【③-(1)-3】富士フイルム(株)コンソ</b>						
1	富士フイルム(株)、(株)イクシスリサーチ、(一財)首都高速道路技術センター	特願 2014-210150	PCT /JP2015/78968	2014.10.14	審査請求なし	橋梁検査ロボットシステム

2	富士フイルム (株)、(株)イク スリサーチ、(一 財)首都高速道路 技術センター	特願 2014-210151	PCT /JP2 015/ 7896 9	2014.10.14	審査請 求なし	橋梁検査ロボットシステ ム
3	(株)イクスリサ ーチ	特願 2014-219703	--	2014.10.28	審査請 求なし	劣化診断支援システム、 データベース、データベ ース作成装置および劣 化診断支援方法
4	富士フイルム(株)	特願 2016- 068792	--	2015.3.30	審査請 求なし	撮像装置及びフォーカ ス制御方法
5	富士フイルム(株)	特願 2015-130132	--	2015.6.29	審査請 求なし	撮像装置および撮像方 法
6	富士フイルム(株)	特願 2016-000894	--	2016.1.6	審査請 求なし	構造物の部材特定装置 及び方法
7	(株)イクスリサ ーチ	特願 2016- 50148	--	2016.3.14	審査請 求なし	走行装置
8	(株)イクスリサ ーチ	特願 2016- 50149	--	2016.3.14	審査請 求なし	吊下型走行装置
9	富士フイルム(株)	特願 2016-125534	--	2016.6.24	審査請 求なし	損傷図作成支援システ ム及び損傷図作成支援 方法
<b>【③-(1)-5】(株)開発設計コンサルタントコンソ</b>						
1	林 健治	特願 2015-234253	国内	2015.11.30	出願	ユニット型壁面走行ロボ ット
<b>【③-(1)-7】(株)キュー・アイコンソ</b>						
1	(株)キュー・アイ	特願 2016-099988	国内	2016.5.18	公開	水中調査装置
<b>【③-(1)-12】三菱重工業(株)</b>						
1	三菱重工業(株)	特願 2015-184281	国内	2015.9.17	出願係 属中 (審査請 求未)	防爆機器

2. 論文(30件)(発表者、所属、発表内容、発表先、発表年月)

番号	発表者	所属	発表内容	発表先	発表年月	査読
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>						
1	渡部 一雄, 大森隆広	(株)東芝	橋梁センシングシステムの展望と開発	日本機械学会誌	2015年7月	無
2	大森 隆広, 碓井隆, 渡部 一雄	(株)東芝	AE センサを用いた橋梁モニタリングシステム	東芝レビュー2015年9月号	2015年9月	無
3	Takahiro Yamashita, Hironao Okada, Toshihiro Itoh, Takeshi Kobayashi	(国研)産業技術総合研究所	極薄圧電ひずみセンサの転写によるフレキシブル基板上への実装に関する研究内容	Japanese Journal of Applied Physics	2015年10月	有
4	Takahiro Yamashita, Seiichi Takamatsu, Hironao Okada, Toshihiro Itoh, Takeshi Kobayashi	(国研)産業技術総合研究所	Ultra-thin Piezoelectric Strain Sensor Array Integrated on a Flexible Printed Circuit Involving Transfer Printing Methods	IEEE Sensors Journal	2016年6月	有
<b>【①-2】(一財)マイクロマシンセンターコンソ</b>						
1	Ryohei Takei1, Natsumi Makimoto1, Hironao Okada1, Toshihiro Itoh1,2 and Takeshi Kobayashi1	(国研)産業技術総合研究所	Design of piezoelectric MEMS cantilever for low-frequency vibration energy harvester	Japanese Journal of Applied Physics	2016年5月	有
2	Lan Zhang, Jian Lu, Ryohei Takei, Natsumi Makimoto, Toshihiro Itoh, and Takeshi Kobayashi	(国研)産業技術総合研究所	S-shape spring sensor: Sensing specific low-frequency vibration by energy harvesting	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS	2016年8月	有
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>						
1	藤垣 元治, 富田大樹, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学	サンプリングモアレ法による動的たわみ角分布計測	実験力学	2015年12月	有
2	栗林 賢一, 藤垣元治, 木村 元哉, 丹羽 雄一郎	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株), 和歌山大学, 西日本旅客鉄道(株)	たわみ角を管理指標として用いた鉄道橋の健全度評価手法に関する一考察	構造工学論文集	2015年3月	有
<b>【③-(1)-2】ルーチェサーチ(株)コンソ</b>						

1	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	小型無人ヘリとポール搭載カメラを用いた構造物点検および点検調査調書作成支援システム	第16回建設ロボットシンポジウム	2016年 8月	有
【③-(1)-7】(株)キュー・アイコン						
1	下野 宗司	(株)キュー・アイ	Development of underwater inspection system for dam inspection	OCEANS'15 MTS/IEEE Washington D.C.	2015年 10月	無
【③-(1)-8】朝日航洋(株)						
1	杉山 史典	朝日航洋(株)	自動航行ロボットを用いた河床の洗掘把握と河川護岸の概査システム	日本ロボット学会	2016年 6月	有
2	今井 友桂子	朝日航洋(株)	小型自動航行船を用いた写真測量による河川構造物の維持管理支援について	日本測量調査技術協会先端測量技術(108号)	2016年 8月	無
【③-(1)-9】国際航業(株)コンソ						
1	Keiji Nagatani, Ken Akiyama, Genki Yamauchi, Kazuya Yoshida, Yasushi Hada, Shin'ichi Yuta, Tomoyuki Izu, Randy Mackay	東北大学, 工学院大学, (株)エンルー ト	Development and Field Test of Teleoperated Mobile Robots for Active Volcano Observation	Proceedings of the 2014 IEEE Int'l Conference on Intelligent Robots and Systems, Interactive session, pp. 1932-1937	2014年 10月	有
2	Ryosuke Yajima, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida	東北大学	Development and Field Testing of UAV-based Sampling Devices for Obtaining Volcanic Products	Proceedings of the 2014 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, #27	2014年 10月	有
3	Genki Yamauchi, Takahiro Noyori, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida	東北大学	Improvement of Slope Traversability for a Multi-DOF Tracked Vehicle with Active Reconfiguration of Its Joint Forms	Proceedings of the 2014 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, #12	2014年 10月	有
4	速水 邦晃, 永谷 圭司, 吉田 和哉	東北大学	火山斜面転がりを利用した移動探査ロボットの操舵制御	計測自動制御学会東北支部50周年記念学術講演会 予稿集, B301	2014年 12月	無
5	谷島 諒丞, 永谷 圭司, 吉田 和哉	東北大学	回転ローラを用いた MUAV 搭載型火山噴出物採取装置の開発とフィールド試験	第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション	2014年 12月	無

				部門 講演会 予稿集, pp.309-314		
6	永谷 圭司, 伊豆智幸, 手束 宗弘	東北大学, (株)エンルート, 国際航業(株)	マルチコプターによる桜島昭和火口と周辺の撮影	写真測量とリモートセンシング, Vol.54, No.3, pp.116-117	2015年3月	有
7	藤原 伸也, 手束宗弘, 森山 裕二, 島田 徹, 阪上 雅之, 金井 啓通, 永谷 圭司, 伊豆 智幸	国際航業(株), 東北大学, (株)エンルート	小型無人機を用いた立入不可の火山地域における調査手法開発に向けて	日本地球惑星連合大会 2015 予稿集, H-TT30	2015年5月	無
8	谷島 諒丞, 久利美和, 永谷 圭司, 吉田 和哉	東北大学	UAV 搭載型火山砕屑物採取装置の開発と評価	日本地球惑星連合大会 2015 予稿集, S-VC45-16	2015年5月	無
9	永谷 圭司	東北大学	活火山地域における遠隔調査を目的とした飛行ロボットシステム	システム/制御/情報, Vol.59, No.6, pp.209-214	2015年6月	有
10	永谷 圭司	東北大学	NEDO インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト～東北大学コンソーシアムの 2014 年の取り組みと今後の課題～	第 33 回日本ロボット学会学術講演会 予稿集	2015年9月	無
11	手束 宗弘	国際航業(株)	火山噴火と災害調査ロボット	土木技術 Vol.71, No. 4	2015年10月	無
12	山内 元貴, 秋山健, 永谷 圭司	東北大学	飛行ロボットと小型地表移動ロボットの複合システムによる火山活動区域の無人調査	日本ロボット学会誌, Vol.34, No.3, pp.220-225	2016年4月	有
13	永谷 圭司, 伊豆智幸, 藤原 伸也, 金井 啓通	東北大学, (株)エンルート, 国際航業(株)	災害対策のドローン活用事例: 土石流予測を目的とした火山災害地域のセンシング技術	OplusE, No.439, pp.529-532	2016年5月	有
14	谷島 諒丞, 永谷圭司	東北大学	テーパ付きローラを用いた旋回式 UAV 搭載型土砂サンプリングデバイスの開発と評価	日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集, 1P1-18a7	2016年6月	無
<b>【③-(2)-1】(国研)(国研)産業技術総合研究所コンソ</b>						
1	三浦 到	三菱化学(株)	「ノイズ低減型中性子水分計」	検査技術(日本工業出版社)	2015年2月	無
2	三浦 到	三菱化学(株)	産業プラント維持管理における課題と技術開発の今後	検査技術(日本工業出版社)	2016年1月	無

3	加藤 英俊, 鈴木 良一	(国研)産業 技術総合研 究所	ロボット搭載用小型軽量な パルス X 線源の開発	検査技術(日本工業 出版社)	2016 年 2 月	無
4	H. Kato, T. Fujiwara, B. E. O' Rourke, H. Toyokawa, A. Koike, T. Aoki and R. Suzuki	(国研)産業 技術総合研 究所, 静岡大 学	Development of a compact X-ray source and detector system for high throughput, fully autonomous inspection	Sensors and Materials	2016 年 7 月	有

3. 受賞実績(6件)(発表者、所属、受賞種類、受賞内容、受賞年月)

番号	発表者	所属	受賞種類	受賞内容	受賞年月
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>					
1	Hisafumi Asaue, Tomoki Shiotani, Takahiro Nishida, Kazuo Watabe, Hirokazu Miyata	Kyoto Univ. Toshiba NEXCO West	NDT Award 2016	Structural Faults & Repair- 2016	2016年 5月
<b>【①-2】(一財)マイクロマシンセンターコンソ</b>					
1	川本 康貴	沖電気工業 (株)	短距離無線通信研 究会論文賞	「クロック補正機能による同期型 省電力無線通信方式の性能向 上に関する考察」	2016年 8月
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>					
1	富田 大樹, 藤 垣 元治, 生駒 昇, 玉井 博 貴, 浅井 大 介, 宮城 貞 二, 村田 頼信	和歌山大学, ジェイアール西 日本コンサルタ ンツ(株), (株) ヒカリ	日本実験力学会技 術賞	日本実験力学会 2014 分科会 合同ワークショップ講演論文「改 良型サンプリングモアレカメラの 開発と鉄道橋梁の変位および たわみ角への適用」	2015年 8月
2	富田 大樹	和歌山大学	和歌山大学大学院 システム工学研究科 長表彰	「日本実験力学会技術賞, 日 本実験力学会 2014 分科会合 同ワークショップ講演論文「改良 型サンプリングモアレカメラの開 発と鉄道橋梁の変位およびた わみ角への適用」受賞により 表彰	2015年 11月
<b>【③-(1)-2】ルーチェサーチ(株)コンソ</b>					
1	渡邊 豊	ルーチェサー チ(株)	第21回ひろしまベ ンチャー大賞	小型無人ヘリコプターと画像処 理による構造物点検サービス業 務	2014年 12月
2	渡邊 豊	ルーチェサー チ(株)	中国地域ニュービジ ネス優秀賞	小型無人ヘリ「SPIDER」による 航空レーザ計測事業	2016年 6月

4. 外部発表

4-1. 学会発表・講演(148 件) (発表者、所属、発表内容、発表先、発表年月)

番号	発表者	所属	発表内容	発表先	発表年月
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>					
1	Isao Shimoyama	The University of Tokyo	MEMS Sensor Systems for Infrastructure Monitoring	2nd International Smart Infrastructure Symposium (CSIC, Cambridge Centre for Smart Infrastructure and Construction)、	2014 年 9 月
2	風間 博之	(株)エヌ・ティ・ティ・データ	社会インフラモニタリングに求められるシステムインテグレーション	第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	2014 年 10 月
3	下山 勲	東京大学	道路インフラモニタリングの取り組み概要	第 31 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	2014 年 10 月
4	下山 勲	東京大学	NEDO 委託事業「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」の概要について紹介	一般社団法人 電子情報技術産業協会「ソーシャル・ソリューションセンシング技術分科会」	2014 年 11 月
5	下山 勲	東京大学	Road Infrastructure Monitoring System	日経テクノロジーオンライン、米 tSensors Summit Inc. 「Trillion Sensors Summit Tokyo 2014」	2014 年 12 月
6	Nguyen Minh-Dung et. Al	東京大学	Measurement of surface acoustic waves propagation using a piezoresistive cantilever array	The 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	2015 年 1 月
7	下山 勲	東京大学	道路インフラモニタリングプロジェクトの概要と成果	ナノ・マイクロビジネス展 2015 社会課題対応システム関連プロジェクト成果報告会	2015 年 4 月
8	山下 崇博, 岡田 浩尚, 伊藤 寿浩, 小林 健	(国研)産業技術総合研究所	スタンピング転写法を用いた圧電ひずみセンサシートの開発	第 32 回強誘電体応用会議	2015 年 5 月
9	Nguyen Minh-Dung	東京大学	Acoustic emission sensor using liquid-on-beam structure	Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS2015)	2015 年 6 月
10	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発	東京大学精密工学特別講義Ⅲ	2015 年 6 月



11	ダニエル ジメルカ, 山下 崇博, 高松 誠一, 伊藤 寿浩, 小林 健	(国研)産業技術総合研究所	Development of resistive strain sensors printed onto flexible thermoplastic polymer substrates	精密工学会 2015 年度秋季大会、仙台、2015 年 9 月 4 日～6 日、口頭発表)	2015 年 9 月
12	山下 崇博, 岡田 浩尚, 伊藤 寿浩, 小林 健	(国研)産業技術総合研究所, 東京大学	道路インフラ状態モニタリング用センサシートの開発(第 2 報) 実装機とスクリーン印刷による極薄センサ転写・配線プロセスの開発	精密工学会 2015 年度秋季大会	2015 年 9 月
13	高峯 英文, 渡部 一雄, 塩谷 智基, 大原 基憲	(株)東芝, 京都大学, 西日本高速道路(株)	高速道路床版の交通荷重を用いた AE モニタリング	土木学会第 70 回年次学術講演会	2015 年 9 月
14	張 凱淳, 塩谷 智基, 大原 基憲, ハツ元 仁	京都大学, 西日本高速道路(株), 阪神高速道路(株)	Applicability of Acoustic Emission Method to Damage Evaluation for RC Decks	土木学会第 70 回年次学術講演会	2015 年 9 月
15	Takahiro Yamashita, Seiichi Takamatsu, Hironao Okada, Toshihiro Itoh, Takeshi Kobayashi	(国研)産業技術総合研究所	転写による極薄圧電ひずみセンサのフレキシブル基板上への実装と、センサの動作確認に関する研究内容	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials	2015 年 9 月
16	Nguyen Minh-Dung	東京大学	MEMS Acoustic Emission Sensor	第 32 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	2015 年 10 月
17	麻植 久史, 塩谷 智基, 西田 孝弘, 張 凱淳, 中山 宏	京都大学	AE 法による輪荷重走行試験下での RC 床版損傷進展評価	平成 27 年度非破壊検査協会秋季講演大会	2015 年 10 月
18	高峯 英文, 渡部 一雄, 塩谷 智基, 大原 基憲	(株)東芝, 京都大学, 西日本高速道路(株)	高速道路橋梁床版の交通荷重下の AE モニタリング	第 31 回日本道路会議	2015 年 10 月

19	今仲 行一	NMEMS 技術研究 機構	IoT 時代の実現に向けて今な すべきこと	第 32 回「センサ・マイクロマ シンと応用システム」シンプ ジウム(電気学会主催)	2015 年 10 月
20	Takahiro Yamashita, Seiichi Takamatsu, Hironao Okada, Toshihiro Itoh, Takeshi Kobayashi	(国研)産 業技術総 合研究所	極薄圧電ひずみセンサの転 写実装によるセンサアレイの 開発に関する研究内容	IEEE Sensors 2015, 韓国・ 釜山, 2015 年 11 月 1 日～4 日	2015 年 11 月
21	Masato Fukuda, Hisafumi Asaue, Takahiro Nishida, Tomoki Shiotani, Toyoaki Miyagawa, Kazuo Watabe	西日本高 速道路 (株), 京都 大学, 東 芝(株)	Assessing Deterioration of an In-field RC Bridge Deck by AE Tomography	World Conference on Acoustic Emission-2015	2015 年 11 月
22	A. Sagradyan, C.Chang, T.Shiotani, K.Watabe, T.Oomori, M.Oohara	京都大 学, (株) 東芝, 西 日本高速 道路(株)	Damage visualization of a field RC bridge deck by AE tomography	第 20 回アコースティック・エ ミッション総合コンファレンス	2015 年 11 月
23	小林 健, 山下 崇博, 高松 誠 一, 牧本 なつ み, 伊藤 寿浩	(国研)産 業技術総 合研究所	Integration of thin PZT/Si onto flexible printed circuit by novel transferring using chip moulder and wiring using screen printer	第 17 回 日米誘電体・圧電 体セラミックスセミナー、長野 県松本市, 2015 年 11 月 15 日～18 日、ポスター発表)	2015 年 11 月
24	麻植 久史, 塩 谷 智基, 高峯 英文, 渡部 一 雄, 大原 基憲	京都大 学, (株)東 芝, 西日 本高速道 路(株)	AE 法による実橋床版の健全 性評価	第 20 回アコースティック・エ ミッション総合コンファレンス	2015 年 11 月
25	下山 勲	東京大学	道路インフラモニタリングプロ ジェクト(RIMS)の概要と成果	日韓未来創造フォーラム	2015 年 11 月
26	下山 勲	東京大学	道路インフラモニタリングプロ ジェクト(RIMS)の概要と成果	近畿化学協会エレクトロニク ス部会平成 27 年度第 2 回 研究会	2015 年 11 月
27	今仲 行一	NMEMS 技術研究 機構	IoT 時代の MEMS 技術とビジ ネス	東大生研奨励会特別研究 委員会	2015 年 12 月

28	今仲 行一	NMEMS 技術研究 機構	IoT 時代に向けた MEMS オ ープンイノベーション	微細構造デバイス研究開発 における事業化推進セミナー	2016 年 1 月
29	下山 勲	東京大学	IoT 時代のセンサ、センサシス テムとアプリケーション	日立製作所 第 191 回 最 新技術セミナー	2016 年 1 月
30	小林 健, 山下 崇博, 高松 誠 一, 牧本 なつ み, 伊藤 寿浩	(国研)産 業技術総 合研究所	ULTRA-THIN PIEZOELECTRIC STRAIN SENSOR ARRAY INTEGRATED ONTO FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT FOR THE APPLICATION TO 2D STRAIN MAPPING	IEEE MEMS 2016	2016 年 1 月
31	柳町真也	国立研究 開発法人 産業技術 総合研究 所	センサ端末同期用小型・低消 費電力原子時計の開発	2015 年度計量標準総合セ ンター成果発表会	2016 年 2 月
32	大島 正資 他	三菱電機 (株)	920MHz帯無線通信の電波位 相差を用いた変位計測実験	2016 年電子情報通信学会 総合大会	2016 年 3 月
33	原田 武, 荒川 雅夫	(一財)マ イクロマシ ンセンター	道路インフラモニタリングシス テムとセンサ端末実装技術の 開発	エレクトロニクス実装学会、 第 30 回春季講演大会	2016 年 3 月
34	山下 崇博, 岡 田 浩尚, 伊藤 寿浩, 小林 健	(国研)産 業技術総 合研究 所, 東京 大学	道路インフラ状態モニタリング 用センサシートの開発 (第 3 報)圧電ひずみセンサアレイシ ートの開発	精密工学会 2016 年度春季 大会、2015 年 3 月 15 日～ 17 日	2016 年 3 月
35	碓井 隆, 大森 隆広, 高 峯 英文, 渡部 一雄	(株)東芝	音響センサを用いたインフラ 劣化モニタリングシステムの開 発	日本機械学会 IIP2016 情 報・知能・精密機器部門講 演会	2016 年 3 月
36	渡部 一雄, 熊 倉 信行	(株)東芝	社会インフラへのセンサ技術 活用事例ご紹介	(公社)日本コンクリート工学 会研究専門委員会	2016 年 4 月
37	Nguyen Minh- Dung	東京大学	MEMS Acoustic Emission Sensor	The 58th Conference of Acoustic Emission Working Group	2016 年 5 月
38	小林 健, 山下 崇博, 高松 誠一, 牧 本 なつみ, 伊 藤 寿浩	(国研)産 業技術総 合研究所	Ultra-thin Piezoelectric Strain Sensor 5 x 5 Array Integrated on Flexible Printed Circuit	(INC 12、2016 年 5 月 10 日 ～12 日、ポスター)	2016 年 5 月

39	Hisafumi Asaue, Tomoki Shiotani, Takahiro Nishida, Kazuo Watabe, Hirokazu Miyata	Kyoto Univ. Toshiba NEXCO West	Applicability of AE Tomography for Accurate Damage Evaluation in Actual RC Bridge Deck	Structural Faults & Repair- 2016	2016年 5月
40	今仲 行一	NMEMS 技術研究 機構	Smart Road Infrastructure Monitoring System (RIMS) for the Reduction of Life Cycle Costs	22nd World Micromachine Summit, 東京、2016.05.25- 26	2016年 5月
41	下山 勲	東京大学	Country Review in Japan - Toward IoT -	22nd World Micromachine Summit, 東京、2016.05.24- 27	2016年 5月
42	塩谷 智基, 麻 植 久史, 西田 孝弘, 宮田 弘 和	京都大 学, 西日 本高速道 路 (株)	AE 法および AEトモグラフィ により推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証	コンクリート工学年次大会 2016	2016年 7月
43	今仲 行一	NMEMS 技術研究 機構	IoT時代に向けたオープンイ ノベーション型センサの開発	(一社)次世代センサ協議会 主催の「IoT・センサ技術懇 談会」での講演(第4回開 催の2016年7月7日)	2016年 7月

【①-2】(一財)マイクロマシンセンターコンソ

1	伊藤 寿浩	(国研)産 業技術総 合研究所	第1回ライフラインコアモニタ リングプロジェクト成果報告会 「UCoMS プロジェクトのミッシ ョンとIoT へのインパクト」	ナノ・マイクロビジネス展 2015	2015年 4月
2	小林 健	(国研)産 業技術総 合研究所	第1回ライフラインコアモニタ リングプロジェクト成果報告会 「圧電 MEMS 振動発電センサ デバイスの開発」	ナノ・マイクロビジネス展 2015	2015年 4月
3	荒川 雅夫	(一財)マ イクロマシ ンセンター	第1回ライフラインコアモニタ リングプロジェクト成果報告会 「回転機器の振動特性とモニ タリングシステムの開発」	ナノ・マイクロビジネス展 2015	2015年 4月
4	坪倉 光佑	明星電気 (株)	第1回ライフラインコアモニタ リングプロジェクト成果報告会 「ネットワーク気象計と小型無 線センサへの取組み」	ナノ・マイクロビジネス展 2015	2015年 4月

5	川本 康貴	沖電気工業(株)	第1回ライフラインコアモニタリングプロジェクト成果報告会「920MHz 無線マルチホップネットワークの低消費電力化技術の開発」	ナノ・マイクロビジネス展 2015	2015年 4月
6	柴田 克彦	高砂熱学工業(株)	第1回ライフラインコアモニタリングプロジェクト成果報告会「回転機器の振動特性とモニタリングシステムの開発」	ナノ・マイクロビジネス展 2015	2015年 4月
7	清水 昭浩	高砂熱学工業(株)	建築設備におけるセンサ活用とエネルギー・ハーベスティング	第6回エネルギー・ハーベスティング技術シンポジウム	2015年 5月
8	川本 康貴	沖電気工業(株)	クロック補正機能による同期型省電力無線通信方式の性能向上に関する考察	2015年第27回短距離無線通信研究会	2015年 8月
9	柴田 克彦	高砂熱学工業(株)	立型ポンプから発生する振動の実態調査	2015年空気調和衛生工学会大会	2015年 9月
10	太田 亮, 原田 武, 野田大二, 網倉正明, 上野昭久, 荒川 雅夫	(一財)マイクロマシンセンター	AIN圧電デバイスのウエハレベルパッケージング技術の開発	第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	2015年 10月
11	R. Takei, N. Makimoto, H. Okada, T. Itoh and T. Kobayashi	AIST	Design of MEMS Cantilever for Low Frequency Vibration Energy Harvesters	the 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference	2015年 11月
12	魯 健, 張 嵐, 山下 崇博, 武井 亮平, 牧本 なつみ, 小林健	AIST	A silicon disk with sandwiched piezoelectric springs for ultra-low frequency energy harvesting	PowerMEMS	2015年 12月
13	川本 康貴	沖電気工業(株)	Clock adjustment for low-power listening wireless infrastructure monitoring system	2016年 IEEE IOTA2016	2016年 1月
14	太田 亮, 原田 武, 野田 大二, 網倉 正明, 上野 昭久, 荒川 雅夫	(一財)マイクロマシンセンター	AIN圧電デバイスのウエハレベルパッケージング技術の開発	2016年度精密工学会春季大会	2016年 3月

15	武井 亮平 他	(国研)産業技術総合研究所	圧電振動発電を用いた無線センサ端末の検討	第 33 回強誘電体応用会議	2016 年 5 月
16	小林 啓洋	沖電気工業(株)	「省電力無線センサネットワークにおける衝突確率低減手法」	2016 年第 33 回短距離無線通信研究会	2016 年 8 月
17	野田大二, 太田亮, 網倉正明, 上野昭久, 原田武, 荒川雅夫	(一財)マイクロマシンセンター	MNOIC の取り組みと振動発電子用圧電膜のスパッタ成膜について	日本真空学会 スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会 (SP 部会)	2016 年 8 月
<b>【①-4】横河電機(株)</b>					
1	肥田 剛典	東京大学	部分空間法によるシステム同定の精度について	第 22 回信頼性設計技術 WS	2015 年 9 月
2	肥田 剛典, 永野 正行	東京大学	確率的部分空間同定法を用いた建物の固有振動数の推定	The 8th Japan Conference on Structural Safety and Reliability	2015 年 10 月
3	李 尚元, 肥田剛典, 高田毅士	東京大学	高層建物の 2 点強震観測から同定される低次振動特性を用いた層剛性の高さ分布の推定手法の提案	日本建築学会関東支部研究発表会	2016 年 3 月
4	李 尚元, 肥田剛典, 田沼 毅彦, 小田 聡, 永野 正行, 高田 毅士	東京大学	超高層建物の 2 点強震観測記録に基づく層剛性の高さ分布推定手法に関する実証的研究	日本建築学会大会	2016 年 8 月
<b>【②-1】首都高技術(株)コンソ</b>					
1	佐藤 久	首都高技術(株)	デジタル画像によるコンクリート構造物のひび割れ自動抽出技術の開発	平成 27 年度土木学会全国大会 第 70 回年次学術講演会	2015 年 9 月
2	早坂 洋平	東北大学	デジタル画像を活用した道路構造物のひび割れ検出技術の開発	2015 年土木学会東北支部技術研究発表会	2016 年 3 月
3	永見 武司	(国研)産業技術総合研究所	道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発	第 22 回画像センシングシンポジウム (SSII2016)	2016 年 6 月
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>					
1	浅井 大介, 宮城 貞二, 藤垣元治	和歌山大学 他	サンプリングモアレカメラによる振動する物体のリアルタイム三次元計測	第 19 回知能メカトロニクスワークショップ	2014 年 7 月
2	藤垣 元治, 中坊 真希子, 田尻 貴大, 富田	和歌山大学	複数カメラを用いたサンプリングモアレ法による三次元変位計測手法の提案	第 19 回知能メカトロニクスワークショップ	2014 年 7 月

	大樹, 村田 頼信				
3	玉井 博貴, 生駒 昇, 藤垣 元治	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株), 和歌山大学	サンプリングモアレカメラを用いた土木構造物の健全性把握のための計測システムの構築	実験力学会 2014 年度年次講演会	2014 年 8 月
4	玉井 博貴, 生駒 昇, 藤垣 元治	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株), 和歌山大学	サンプリングモアレ法を用いた土木構造物の評価	土木学会平成 26 年度全国大会	2014 年 9 月
5	富田 大樹, 藤垣 元治, 村田 頼信	和歌山大学	Evaluation of Accuracy for 3D Displacement Measurement Using Sampling Moire Method with Multiple Cameras	9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics(9th ISEM '14-New Delhi)	2014 年 11 月
6	森本 吉春, 楠芳之, 榎谷 明大, 高木 哲史	4Dセンサー(株)	サンプリングモアレ法に関する講演とデモ(デジタル画像相関法の比較)	日本実験力学会 分科会合同ワークショップ 2014	2014 年 11 月
7	富田 大樹, 藤垣 元治, 生駒 昇, 玉井 博貴, 浅井 大介, 宮城 貞二, 村田 頼信	和歌山大学, ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 他	改良型サンプリングモアレカメラの開発と鉄道橋梁の変位およびたわみ角への適用	日本実験力学会 分科会合同ワークショップ 2014	2014 年 11 月
8	楠 芳之, 森本 吉春, 榎谷 明大, 高木 哲史	4Dセンサー株式会社	サンプリングモアレ法による構造物の変位・ひずみ計測	第 21 回 画像センシングシンポジウム	2015 年 6 月
9	富田 大樹, 藤垣 元治, 村田 頼信	和歌山大学, 福井大学	3D Displacement Distribution Measurement Using Sampling Moire Method with Multiple Cameras	The Fifth International Symposium on Experimental Mechanics & 9th Symposium on Optics in Industry (5-ISEM'2015 & 9-SOI), (2015).	2015 年 8 月
10	藤垣 元治, 富田 大樹, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学	サンプリングモアレ法による複数カメラを用いた三次元変位計測手法とキャリブレーション手法の提案	第 3 回サンプリングモアレ法による構造物の計測技術に関する研究会	2015 年 8 月

11	栗林 賢一, 宮井 真一郎, 山野 芳樹, 玉井 博貴, 藤垣 元治, 浅井 大介, 木村 元哉	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株), 福井大学他	サンプリングモアレカメラによる鉄道橋りょうのたわみ量とたわみ角計測の検証	日本実験力学会 2015 年度年次講演会	2015 年 8 月
12	富田 大樹, 村田 頼信, 江種伸之, 満田 成紀, 吉野 孝, 本塚 智貴, 藤垣 元治	和歌山大学, 福井大学	サンプリングモアレ法を用いた微小変位定点観測システム開発の取り組み	日本実験力学会 2015 年度年次講演会	2015 年 8 月
13	森本 吉春 藤垣 元治, 李 志遠	4Dセンサー(株), 福井大学他	History of Moire Method - Applications to Shape, Deformation and Strain Measurement- 【Plenary lecture】	ATEM'15	2015 年 10 月
14	藤垣 元治	福井大学	遠隔からリアルタイムに微小変位計測ができるサンプリングモアレカメラの開発とインフラ構造物への適用	組込みシステム産業振興機構プライベートセミナー	2015 年 10 月
15	栗林 賢一, 山野 芳樹, 宮井 真一郎, 藤垣 元治, 木村 元哉	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株), 福井大学他	サンプリングモアレカメラを用いた橋りょう計測とその精度向上	非破壊検査協会 平成 27 年度秋季講演大会	2015 年 10 月
16	富田 大樹, 村田 頼信, 藤垣 元治	福井大学, 和歌山大学	複数台のカメラとサンプリングモアレ法を用いた三次元変位計測システムの開発	非破壊検査協会 平成 27 年度秋季講演大会	2015 年 10 月
17	藤垣 元治	福井大学	(講演) 光学的手法による高速・高精度な形状・変形・ひずみ計測, (デモ) 安価で小型な三次元形状計測装置とリアルタイム変位分布計測	日本機械学会関西支部第 339 回講習会「応力計測の基礎とその応用(デモンストレーション付き)」	2015 年 10 月
18	藤垣 元治	福井大学	画像によるインフラ構造物の微小変位計測技術と鉄道橋梁への適用	精密工学会北陸信越支部特別講演会	2015 年 11 月
19	仙波 悠生, 藤垣 元治	福井大学	サンプリングモアレ法による広角レンズを用いた長尺物の変位分布計測	日本実験力学会 分科会合同ワークショップ 2015	2015 年 12 月



20	奥田 悠登, 藤垣 元治, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学	サンプリングモアレ法による変位分布計測用横長カメラの試作	第 47 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム	2016 年 1 月
21	藤垣 元治, 仙波 悠生, 下田 亮太, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学	サンプリングモアレ法を用いた遠距離変位計測における誤差要因の検討	第 47 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム	2016 年 1 月
22	藤垣 元治	福井大学	サンプリングモアレ法によるインフラ構造物のたわみ計測	社会インフラ・モニタリングシステム研究会 1 月度定例会, 主催: 一般社団法人次世代センサ協議会社会インフラ・モニタリングシステム研究会	2016 年 1 月
23	藤垣 元治, 富田 大樹, 栗林 賢一, 木村 元哉, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学, ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 他	Application of Sampling Moire Method to Deflection and Deflection Angle Measurement of Infrastructures	International Conference on Combined Digital Optical & Imaging Methods Applied To Mechanical Engineering	2016 年 5 月
24	栗林 賢一, 得津 明弘, 山野 芳樹, 武内 宣夫, 藤垣 元治, 木村 元哉	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株), 福井大学 他	橋りょうにおけるたわみおよびたわみ角の計測実現に向けた取り組み	写真測量学会 平成 28 年度年次学術講演会	2016 年 5 月
25	藤垣 元治, 富田 大樹, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学	Surface Orientation Measurement Using Sampling Moire Method	SEM 2016 Annual Conference	2016 年 6 月
26	藤垣 元治, Singh, G., 富田 大樹, 村田 頼信	福井大学, 和歌山大学	Displacement Measurement Method of Large Structure with Phase Analysis for Parallel Line Images	17th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM17)	2016 年 7 月
27	仙波 悠生, 藤垣 元治, 中嶋 友朗	福井大学	サンプリングモアレカメラによる建物のリアルタイム2方向変位計測	第 21 回知能メカトロニクスワークショップ	2016 年 8 月
<b>【③-(1)-1】川田テクノロジーズ(株)コンソ</b>					
1	加藤 晋, 安達 弘典, 有隅 仁, 神村 明哉	(国研)産業技術総合研究所	インフラ維持管理・災害対応のためのロボット技術の開発	第 23 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2014)、ADVANTY シンポジウム	2014 年 12 月

2	山田 幸佑, 鎌田 瑞生, 竹内 厚司, 東千 加良, 伊丹 誠, 加藤 晋	(国研)産業技術総合研究所	橋梁点検用飛行体ロボットの研究 - 構造物との距離を一定に保つ制御についての実装-	ロボティクス・メカトロニクス講演会	2015年 5月
3	金平 徳之, 越後 滋, 伊豆 智幸, 平山 博, 加藤 晋	川田テクノロジーズ(株), (株)エンルート, 大日本コンサルタント(株), (国研)産業技術総合研究所	マルチコプタを利用した橋梁点検システムの開発概要	第33回日本ロボット学会学術講演会講演概要集	2015年 9月
<b>【③-(1)-2】ルーチェサーチ(株)コンソ</b>					
1	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	UAV 調査の進化について	JACIC設立30周年記念セミナーin 広島	2016年 1月
2	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	小型無人ヘリによる航空測量と画像解析	中国地区測量技術講演会	2016年 6月
<b>【③-(1)-3】富士フィルム(株)コンソ</b>					
1	山崎 文敬	(株)イクシスリサーチ	複眼式撮像装置を搭載した吊り下げ型ロボットの開発	第33回日本ロボット学会学術講演会	2015年 9月
2	山崎 文敬	(株)イクシスリサーチ	複眼式撮像装置を搭載した橋梁近接目視代替ロボットシステム	ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 in Yokohama	2016年 6月
<b>【③-(1)-5】(株)開発設計コンサルタントコンソ</b>					
1	野嶋 潤一郎	(株)開発設計コンサルタント	真空吸着パッドを用いたコンクリート壁面移動機構によるインフラ診断ロボットシステム(ALP)の研究開発	第33回日本ロボット学会学術講演会	2015年 9月
2	中村 隆史	岡山大学	デジタル画像を活用するインフラ構造物点検ロボットの開発	土木学会中国支部	2016年 5月
<b>【③-(1)-7】(株)キュー・アイコンソ</b>					
1	下野 宗司	(株)キュー・アイ	Development of underwater inspection system for dam inspection	OCEANS'15 MTS/IEEE Washington D.C.	2015年 10月

2	豊島 雄樹	(株)キュー・アイ	ダム調査ロボットシステムの研究開発	第5回 ロボット研究会フォーラム	2016年 8月
【③-(1)-9】国際航業(株)コンソ					
1	永谷 圭司	東北大学	火山地域での遠隔調査を目的とした移動探査ロボット技術とその実用化	第86回ロボット工学セミナー 依頼講演	2014年 9月
2	永谷 圭司	東北大学	原発事故対応ロボット／火山探査ロボットの研究開発の紹介と今後の小中学校 理科教育に期待すること	第2回東北大学・カタールサイエンスキャンパス教育セミナー 依頼講演	2014年 10月
3	谷島 諒丞	東北大学	Development and Field Testing of UAV-based Sampling Devices for Obtaining Volcanic Products	2014 IEEE Int'l Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics 口頭発表	2014年 10月
4	速水 邦晃	東北大学	火山斜面転がりを利用した移動探査ロボットの操舵制御	計測自動制御学会東北支部 50周年記念学術講演会 口頭発表	2014年 12月
5	谷島 諒丞	東北大学	回転ローラを用いた MUAV 搭載型火山噴出物採取装置の開発とフィールド試験	第15回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会 口頭発表	2014年 12月
6	永谷 圭司	東北大学	ロボティクス技術を駆使した防災・減災への取り組み～マルチロータおよび不整地移動 ロボットを活用した災害調査～	公益社団法人日本技術士会東北本部電気電子部会講演会 招待講演	2015年 5月
7	藤原 伸也	国際航業(株)	小型無人機を用いた立入不可の火山地域における調査手法開発に向けて	平成27年度砂防学会研究発表会 栃木大会, 口頭発表	2015年 5月
8	藤原 伸也	国際航業(株)	小型無人機を用いた立入不可の火山地域における調査手法開発に向けて	日本地球惑星連合大会 2015, 口頭発表	2015年 5月
9	谷島 諒丞	東北大学	UAV 搭載型火山砕屑物採取装置の開発と評価	日本地球惑星連合大会 2015, 口頭発表	2015年 5月
10	永谷 圭司	東北大学	ロボティクス技術を駆使した防災・減災への取り組み	仙台第三高等学校進路講演会 招待講演	2015年 7月
11	永谷 圭司	東北大学	NEDO インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト～東北大学コンソーシアムの2014年の取り組みと今後の課題～	第33回日本ロボット学会学術講演会 口頭発表	2015年 9月

12	Keiji Nagatani	東北大学	Research, Development and Field Test of Robotic Observation Systems for Sctive Volcanic Areas in Japan	IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Keynote speech	2015年 10月
13	永谷 圭司	東北大学	次世代インフラ維持管理用ロボット技術開発の現状と火山災害対応ロボットの研究開発	IEEE 仙台支部主催講演会, 招待講演	2015年 11月
14	永谷 圭司	東北大学	ドローン技術を中心としたインフラ維持管理用ロボット/災害対応ロボットのトレンド	東京大学 第1回フィールドロボティクスセミナー, 招待講演	2016年 2月
15	手束 宗弘	国際航業(株)	大沢扇状地におけるインフラ用ロボットのフィールド試験	中部圏インフラ用ロボットコンソーシアム, 口頭発表	2016年 3月
16	永谷 圭司	東北大学	インフラ維持管理/防災における ドローン技術の応用	SIP防災・インフラ維持管理合同シンポジウム, 招待講演	2016年 3月
17	藤原 伸也 他	国際航業(株)	小型無人機(UAV)を用いた土石流発生区域の調査手法開発に向けた取組	平成28年度砂防学会研究発表会 富山大会, ポスター発表	2016年 5月
18	谷島 諒丞	東北大学	テーパ付きローラを用いた旋回式 UAV 搭載型土砂サンプリングデバイスの開発と評価	日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 口頭発表	2016年 6月
19	永谷 圭司	東北大学	人が行けないところで活躍するロボットの話	少年少女ロボットセミナー	2016年 6月
20	島田 徹	国際航業(株)	「防災をめぐる新展開 ～ドローン技術の活用～」	立命館大学防災フロンティア研究センターセミナー	2016年 7月
<b>【③-(1)-10】(株)日立製作所コンソ</b>					
1	加藤 晋, 安達 弘典, 有隅 仁, 神村 明哉	(国研)産業技術総合研究所	インフラ維持管理・災害対応のためのロボット技術の開発	第23回 交通・物流部門大会(TRANSLOG2014) ADVANTY シンポジウム 東京大学 生産技術研究所	2014年 12月
2	ジャヤセカラ ペンヤラ, 有隅 仁	(国研)産業技術総合研究所	無人パワーショベルのアームを併用した障害物乗り越え	第20回ロボティクスシンポジウム 軽井沢プリンスホテル ウェスト	2015年 3月
3	谷村 和彦	(株)日立製作所	無人機の社会実装に向けて	第1回 AIST-ESIP 合同セミナー	2015年 7月

4	谷村 和彦, 伊豆 智幸, 神村 明哉, 植田 大造	(株)日立製作所, (株)エンルート, (国研)産業技術総合研究所, 八千代エンジニアリング(株)	災害調査用地上/空中 複合型ロボットシステム	日本ロボット学会誌 Vol.34 No.2	2016年 3月
【③-(1)-11】大林組コンソ					
1	Charith Fernando	慶應義塾大学	テレイグジスタンスに関する研究	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会	2015年 5月
2	Charith Fernando	慶應義塾大学	建設現場のためのテレイグジスタンス	日本バーチャリアリティ学会	2015年 10月
3	森 直樹	(株)大林組	遠隔操作によるマルチクローラ型無人調査ロボット	建設ロボットシンポジウム	2016年 8月
【③-(1)-12】三菱重工業(株)					
1	大西 献	三菱重工業(株)	三菱重工業のロボット技術への取組み状況および当社ロボット技術のE&P分野への適用可能性	JOGMEC Techno Forum 2015	2015年 10月
2	大西 献	三菱重工業(株)	トンネル災害時の引火性ガス雰囲気内探査ロボットの開発(NEDO インフラ対応ロボット開発プロジェクト)	SI2015	2015年 12月
【③-(2)-1】(国研)産業技術総合研究所コンソ					
1	服部 行也	(株)日立パワーソリューションズ	茨城県における非破壊計測診断ソリューションについて	放射線科学とその応用第186委員会	2014年 10月
2	三浦 到	三菱化学(株)	化学コンビナート等産業インフラ維持管理の課題と対応動向	放射線科学とその応用第186委員会	2014年 10月
3	三浦 到	三菱化学(株)	化学プラント等産業インフラ維持管理の課題と対応動向	日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会	2015年 8月
4	三浦 到	三菱化学(株)	配管の断熱下外面腐食検査の合理化を目指した中性子センサー及びX線を搭載した自走ロボット開発	第33回日本ロボット学会	2015年 9月

5	三浦 到	三菱化学 (株)	配管の断熱下外面腐食検査 の合理化を目指した中性子セ ンサーおよびX線を搭載した 自走ロボット開発	日本機械学会第14回評価・ 診断に関するシンポジウム	2015年 11月
6	三浦 到	三菱化学 (株)	石油化学プラントの実機課題 解決へのX線・中性子技術の 魅力	中性子イメージング専門研 究会	2016年 1月
7	鈴木 良一	(国研)産 業技術総 合研究所	インフラ非破壊検査プロジェク ト概要	X線新技術産業化コンソー シアム研究会	2016年 2月
8	三浦 到	三菱化学 (株)	産業インフラの非破壊検査ニ ーズ	X線新技術産業化コンソー シアム研究会	2016年 2月
9	服部 行也	(株)日立 パワーソ リューションズ	中性子水分センサ搭載ロボッ トの開発と実地試験	X線新技術産業化コンソー シアム研究会	2016年 2月
10	加藤 英俊	(国研)産 業技術総 合研究所	ロボット搭載用カーボンナノ構 造体 X線源の開発	X線新技術産業化コンソー シアム研究会	2016年 2月
11	青木 徹	静岡大学	CdTe X線二次元検出器の開 発	X線新技術産業化コンソー シアム研究会	2016年 2月
12	藤原 健	(国研)産 業技術総 合研究所	大面積 X線二次元検出器の 開発	X線新技術産業化コンソー シアム研究会	2016年 2月
13	浅見 研一	(株)日立 パワーソ リューションズ	中性子水分計および小型 X 線を搭載した配管検査用自走 ロボット開発	日本工業出版(株)配管検査 技術と事例紹介	2016年 5月
14	三浦 到	三菱化学 (株)	保温材下腐食への非破壊検 査の開発と適用状況	MANAGING AGING PLANTS CONFERENCE & EXPO JAPAN 2016	2016年 6月

4-2. 新聞・雑誌への掲載(54件)(発表者、所属、発表内容、発表先、発表年月)

番号	発表者	所属	発表内容	発表先	発表年月
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>					
1	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	特集記事「現実解へ動くインフラ電装化」 (道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発)	「日経エレクトロニクス (2014年12月8日号掲載、日経BP社取材)	2014年 12月
2	下山 勲	東京大学	東京大学 IRT 機構が新たな表面弾性波計測デバイスを実現	東京大学のプレスリリース	2015年 1月
3	下山 勲	東京大学	東京大学 IRT 機構が新たな表面弾性波計測デバイスを実現	日刊工業新聞(2015年1月30日)	2015年 1月
4	下山 勲	東京大学	東京大学 IRT 機構が新たな表面弾性波計測デバイスを実現	日経 TechON (2015年1月21日)	2015年 1月
5	渡部 一雄	(株)東芝	Bridge Monitoring System	東芝レビュー2016年8月号(英文成果号)	2016年 8月
6	渡部 一雄、 塩谷 智基	(株)東芝、京 都大学	コンクリート構造物の内部劣化の非破壊センシング技術を開発	日本経済新聞 2016.8.29 15面	2016年 8月
7	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	RIMS の活動報告	広報誌(MICRONANO Monthly、 <a href="http://mmc.la.coocan.jp/info/monthly/">http://mmc.la.coocan.jp/info/monthly/</a> )	2014年 7月号～ 2016年 8月号
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>					
1	藤垣 元治	福井大学	構造物の形状・変位計測～縞画像解析と光学的手法による計測技術の紹介～	溶接学会誌, Vol. 84, No. 1, 90-95(2015)	2015年 1月
2	藤垣 元治	福井大学	研究者紹介:小さなモノから大きなモノまで、光で測ります!	福井大学広報誌「ふくだいプレス」2015年7月発刊号, 11 ページ	2015年 7月
3	藤垣 元治	福井大学	新しくできた光計測の研究室と全空間画像計測コンソーシアムの紹介	テクノふくい, No. 94, 26-27	2016年 7月
<b>【③-(1)-1】川田テクノロジーズ(株)コンソ</b>					
1	金平 徳之	川田テクノロジーズ(株)	マルチコプタを利用した橋梁点検システム	雑誌「建設機械」 Vol.51 No.11	2015年 11月
2		大日本コンサルタント(株)	橋梁点検を支援する飛行ロボット「マルコ™」	雑誌「橋梁と基礎」 Vol.50 No.6	2016年 6月
3	金平 徳之	川田テクノロジーズ(株)	橋梁点検に対するドローン適用の期待と課題	雑誌「ふえらむ」 Vol.21 No.8	2016年 7月
<b>【③-(1)-3】富士フイルム(株)コンソ</b>					
1		(株)イクシスリサーチ	橋梁点検用ロゴ実証	日刊工業新聞	2016年 7月

2		(株)イクシスリサーチ、富士フィルム(株)、(一財)首都高速道路技術センター	道路橋点検ロボ 19 年度実用化を目指す	建設通信新聞	2016 年 7 月
3		NEDO	橋梁点検用ロボ川崎で実証実験	化学工業日報	2016 年 7 月
<b>【③-(1)-4】ジビル調査設計(株)コンソ</b>					
1	毛利 茂則	ジビル調査設計(株)	橋梁点検ロボット, NEDO 事業に採択	福井新聞 2016.8.18 6 面	2016 年 7 月
2	毛利 茂則	ジビル調査設計(株)	橋梁点検ロボット開発. NEDO プロジェクトに採択される	朝日新聞 2016.8.27 27 面	2016 年 7 月
<b>【③-(1)-5】(株)開発設計コンサルタントコンソ</b>					
1		開発設計コンソ	経済面で老朽橋の最先端点検技術の紹介で ALP 研究・開発状況を紹介。	朝日新聞(山口版)2015.4.9 30 面	2015 年 4 月
<b>【③-(1)-7】(株)キュー・アイコンソ</b>					
1		(株)キュー・アイ	ダム調査ロボット	日本経済新聞	2015 年 5 月
2		(国研)産業技術総合研究所	可変構成型水中調査用ロボットの研究開発 —無人水上航行機による河床状況把握—	日本機械学会	2015 年 5 月
3		(国研)産業技術総合研究所	水上ロボットの位置制御システムおよび位置制御方法	特許庁	2016 年 1 月
4		(国研)産業技術総合研究所	可変構成型水中調査用ロボットの研究開発 —係留型水上ロボットのアームとラダーによる航行制御—	日本機械学会	2016 年 6 月
<b>【③-(1)-9】国際航業(株)コンソ</b>					
1	永谷 圭司	東北大学	「火山噴火を予測せよ」	テレビ東京 ワールドビジネスサテライト	2014 年 10 月
2	永谷 圭司	東北大学	「土石流予測ロボが一役」	東京新聞	2014 年 10 月
3	永谷 圭司	東北大学	「活火山の監視を目指した火山探査ロボットのフィールド試験報告会」	プレス発表	2014 年 10 月
4	永谷 圭司	東北大学	「東北大など、火山噴火後の状態調査する無人ロボット開発」	FNN	2014 年 10 月



5	永谷 圭司	東北大学	「東北大など火山探査ロボ公開 御嶽山で稼働」	日本テレビ	2014年 10月
6	永谷 圭司	東北大学	「東北大など火山探査ロボ公開 御嶽山で稼働」	読売テレビ	2014年 10月
7	永谷 圭司	東北大学	「噴火後の火山、土石流の危険 性調べるロボット東北大が開発 中」	産経ニュース	2014年 10月
8	永谷 圭司	東北大学	「Robot Teams Practice for Japan Volcano Monitoring」	IEEE Spectrum	2014年 10月
9	永谷 圭司	東北大学	「3大学と企業が災害用ロボ実 演」	北海道新聞室蘭版	2014年 10月
10	永谷 圭司	東北大学	「東北大など火山探査ロボ公 開」	朝日デジタル	2014年 12月
11	永谷 圭司	東北大学	「火山対応に小型ロボ、桜島で 実用化実験 国交省」	西日本新聞経済	2014年 12月
12	永谷 圭司	東北大学	「火山噴火調査へ、空から無人 機 桜島で実証実験」	朝日新聞デジタル	2014年 12月
13	永谷 圭司	東北大学	「桜島火口 無人機で撮影調 査」	朝日新聞	2014年 12月
14	永谷 圭司	東北大学	「火山防災の中でロボット技術 ができること」	まなびの杜	2015年 4月
15	永谷 圭司	東北大学	「3.11 後を生きる「噴火現場へ 観測ロボット」」	東京新聞	2015年 5月
16	永谷 圭司	東北大学	「無人機で火山灰採取」	日本経済新聞	2015年 5月
17	永谷 圭司	東北大学	「ドローンで火山灰採取」	時事通信	2015年 6月
18	永谷 圭司	東北大学	「ドローンで火山灰採取」	信濃毎日新聞	2015年 6月
19	永谷 圭司	東北大学	「せんだい ひと模様」	河北新報	2015年8 月
20	永谷 圭司	東北大学	「ニッポン人は頑張った SP」	日本テレビ バンキシャ!	2015年 12月
21	永谷 圭司	東北大学	被災地でロボ活発化 [東北大]土石流の危険を予測	日経産業新聞	2016年 8月
<b>【③-(1)-10】(株)日立製作所コンソ</b>					
1	加藤 晋	(国研)産業 技術総合研 究所	災害無人調査ロボ開発 クロー ラー式親子2台協調 現場で初 期状況把握	日刊工業新聞	2015年 7月
<b>【③-(1)-11】大林組コンソ</b>					
1	栗生 暢雄	(株)大林組	危険地域、安全に調査 大林 組が遠隔ロボ	日刊工業新聞	2014年 7月

2	栗生 暢雄	(株)大林組	無人化ボーリング調査	日経産業新聞	2014年 8月
3	栗生 暢雄	(株)大林組	走行型無人調査ロボット	建設通信新聞	2014年 10月
4	栗生 暢雄	(株)大林組	走行型無人調査ロボット・地盤 調査／解剖 先端拠点	日経産業新聞	2014年 10月
5	栗生 暢雄	(株)大林組	ロボットの活用領域が急速に拡大	日経産業新聞	2015年 2月
6	Charith Fernando	慶應義塾大 学	エレクトロニクスが人手不足を救 う	日経エレクトロニクス	2015年 11月
<b>【③-(1)-12】三菱重工業(株)</b>					
1	大西 献 他	三菱重工業 (株)	桜Ⅱ号(防爆仕様)開発 防爆型式検定取得	プレス発表 (マスコミ 35社)	2016年 7月
2	—	三菱重工業 (株)	遠隔操作ロボ開発	毎日新聞 2016.7.13 夕刊 8面 (朝日・産経・他)	2016年 7月
3	—	三菱重工業 (株)	遠隔操作ロボ開発	NIKKEI Robotics 2016.8.10 第14号	2016年 8月

4-3. 展示会への出展(73件)(出展者、所属、出展先、出展内容、発表年月)

番号	出展者	所属	出展先	出展内容	発表年月
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>					
1	下山 勲	東京大学	ナノ・マイクロビジネス展 2015	振動センサ	2014年 4月
2	武田 宗久	NMEMS 技術 研究機構	ナノ・マイクロビジネス展 2015	道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発他	2015年 4月
3	石橋 他	三菱電機 (株)	第7回インフラ検査・ 維持管理展	センサ端末試作結果、変位計測シミュレーション結果	2015年 7月
4	渡部 一雄	(株)東芝	第7回インフラ検査 維持管理展	SAセンサによる橋梁センシング技術	2015年 7月
5	大島 他	三菱電機 (株)	第5回オープンイノ ベーション企画・技 術展示会	センサ端末試作結果、変位計測シミュレーション結果	2015年 8月
6	柏屋 俊克	日本ガイシ (株)	CEATEC JAPAN 2015	LTCC パッケージと透光性セラミック	2015年 10月
7	武田 宗久	NMEMS 技術 研究機構	ハイウエイテクノフ ェア 2015	NEDO 委託事業「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」の概要及び各テーマの研究開発、高耐久性パッケージについて紹介(パネル 20 枚、配布物+パンフレット)	2015年 11月
8	下山 勲	東京大学	2015 国際ロボット展	振動センサ	2015年 12月
<b>【①-2】(一財)マイクロマシンセンターコンソ</b>					
1		(国研)産業 技術総合研 究所	ナノ・マイクロビジネス展 2015	「コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発」のパネル展示	2015年 4月
2		(一財)マイク ロマシンセン ター	ナノ・マイクロビジネス展 2015	「コアモニタリング用 AIN 圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発」のパネル展示	2015年 4月
3		明星電気(株)	ナノ・マイクロビジネス展 2015	「振動センサ、無線、制御回路の小型パッケージと回転機への固定部の開発」のパネル展示	2015年 4月
4		沖電気工業 (株)	ナノ・マイクロビジネス展 2015	「コアモニタリング用ネットワークシステムの開発」のパネル展示	2015年 4月
5		高砂熱学工 業(株)	ナノ・マイクロビジネス展 2015	「コアモニタリングシステムの開発」及び「コアモニタリングシステムの構築と実証」のパネル展示	2015年 4月
<b>【①-3】(株)日立製作所</b>					

1	荻原 正樹、 上松 正史、 南 幸雄、岡 田 朋子	(株)日立製作 所	Hitachi Innovation Forum 2014 TOKYO	施設モニタリングサービス	2014年 10月
2	上松 正史、 岡田 朋子	(株)日立製作 所	日立グループ展 in KANAGWA 2015	施設モニタリングサービス	2015年 2月
3	荻原 正樹、 上松 正史、 南 幸雄、岡 田 朋子	(株)日立製作 所	Hitachi SOCIAL INNOVATION FORUM 2015 TOKYO	施設モニタリングサービス	2015年 10月
4	上松 正史、 岡田 朋子	(株)日立製作 所	日立グループ展 in KANAGWA 2016	施設モニタリングサービス	2016年 1月
<b>【①-4】横河電機(株)</b>					
1		横河電機 (株)	インフラ検査・維持 管理展 2015	NEDO プロジェクトでのインフラモニタ リングシステムの概要をパネル展示	2015年 7月22 日～25 日
2		横河電機 (株)	MEMS エンジニアリ ングフォーラム	NEDO プロジェクトでのインフラモニタ リングシステムの概要をパネル展示及 び、シリコン振動式加速度センサの無 線での動態展示を行った。	2016年 5月11・ 12日
3		横河電機 (株)	インフラ検査・維持 管理展 2016	NEDO プロジェクトでのインフラモニタ リングシステムの概要をパネル展示及 び、シリコン振動式加速度センサの無 線での動態展示を行った。	2016年 7月20 日～22 日
<b>【②-1】首都高技術(株)コンソ</b>					
1	永見 武司	(国研)産業 技術総合研 究所	ハイウェイテクノフェ ア 2015	デジタル画像によるコンクリート構造物 のひび割れ自動検出技術の開発	2015年 11月
2	久田 真	東北大学	EE 東北'16	道路構造物ひび割れモニタリングシス テムの研究開発	2016年 6月
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>					
1	生駒 昇, 玉 井 博貴	ジェイアール 西日本コンサ ルタンツ(株)	JR 西日本 技術開 発成果発表会 2014	技術開発パネル及び模型によるデモ ンストレーション展示(サンプリングモ レカメラによる変位計測)	2014年 8月
2	藤垣 元治	和歌山大学	防災講演会 地域を 守りぬぐ力! -災害 に強い紀伊半島を 共に- in 和歌山市	(実演)遠隔からの斜面災害前兆検 知・インフラ構造物の健全評価システ ム	2014年 9月

3	森本 吉春, 榎谷 明大, 楠 芳之	4Dセンサー (株)	第 45 回インターネ プコンジャパン	サンプリングモアレカメラを展示	2015 年 1 月
4	森本 吉春, 榎谷 明大, 楠 芳之	4Dセンサー (株)	DIA2015(動的画像 処理実用化ワークシ ョップ)	機器デモ展示(サンプリングモアレカメ ラの紹介)	2015 年 3 月
5	前田 芳巳	(株)共和電業	インフラ維持管理展 2015	ブース動揺計測のデモンストレーショ ン展示	2015 年 7 月
6	前田 芳巳	(株)共和電業	インフラ維持管理展 2016	ブース動揺計測のデモンストレーショ ン展示	2015 年 7 月
7	藤垣 元治	福井大学	北陸発の産学官連 携マッチングイベン ト「Matching HUB Kanazawa 2015 Autumn」	「高速かつ高精度な三次元形状計測 とインフラ構造物の変位分布計測」デ モ展示	2015 年 11 月
8	前田 芳巳	(株)共和電業	第 4 回 [国際] 風 力発電展 ～WIND EXPO 2016～	サンプリングモアレカメラによる風車翼 模型による変形計測デモンストレーシ ョン展示	2016 年 3 月
9	前田 芳巳	(株)共和電業	中部地方の橋をどう 守るかを考えるシン ポジウム	デモンストレーション	2016 年 8 月
10	森本 吉春, 榎谷 明大, 楠 芳之	4Dセンサー (株)	イノベーションジャパ ン 2016	変形計測装置「サンプリングモアレカメ ラソフトウェア版 Ver.2.0」インフラ構造 物のたわみ・変形計測	2016 年 8 月

【③-(1)-1】川田テクノロジーズ(株)コンソ

1		川田テクノ ロジーズ(株)、 (株)エンルー ト、大日本コ ンサルタント (株)、(国研) 産業技術総 合研究所	Japan Robot Week 2014	パネル展示	2014 年 10 月
2		(株)エンルー ト	第 1 回国際ドローン 展	装置、パネル、ビデオ展示	2015 年 5 月
3		川田テクノ ロジーズ(株)、 (株)エンルー ト、大日本コ ンサルタント (株)、(国研)	2015 ロボット展 NEDO ブース	装置、パネル、ビデオ展示	2015 年 12 月

		産業技術総合研究所			
4		大日本コンサルタント(株)	EE 東北'16(建設技術展示会)	装置、パネル、ビデオ展示	2016年 6月
【③-(1)-2】ルーチェサーチ(株)コンソ					
1	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	日本写真測量学会展示	SPIDERによる計測サービス	2014年 5月
2	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	関西大学「スマートインフラ国際シンポジウム」展示会	無人ヘリによる航空写真測量	2014年 9月
3	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	広島県「エコ・イノベーションメッセ展示会」	無人ヘリによる航空写真測量	2014年 11月
4	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	日本写真測量学会展示	SPIDERによる計測サービス	2015年 5月
5	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	SPAR 第11回3次元計測フォーラム	SPIDERによる計測サービス	2015年 6月
6	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	3Dバーチャルリアリティ展	SPIDERによる計測サービス	2015年 6月
7	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	SPAR	小型無人ヘリによるレーザ計測	2015年 11月
8	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	広島県「長寿命化技術活用制度登録技術展」	橋梁点検ロボット SPIDER	2015年 12月
9	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	日本写真測量学会展示	小型無人ヘリによるレーザ計測	2016年 5月
10	渡邊 豊	ルーチェサーチ(株)	JACIC EE東北16	小型無人ヘリによるレーザ計測	2016年 6月
【③-(1)-3】富士フィルム(株)コンソ					
1		(株)イクシスサーチ、富士フィルム(株)、(一財)首都高速道路技術センター	Japan Robot Week 2014	複眼式撮像装置を搭載した橋梁点検目視代替ロボットシステムの研究開発	2014年 10月
2		(株)イクシスサーチ、富士フィルム(株)、(一財)首都高速道	国際ロボット展	複眼式撮像装置を搭載した橋梁点検目視代替ロボットシステムの研究開発	2015年 12月

		路技術センター			
<b>【③-1-4】ジビル調査設計(株)コンソ</b>					
1	毛利 茂則	ジビル調査設計(株)	第 8 回インフラ検査・維持管理展	橋梁点検カメラシステム視る診る	2016 年 7 月
2	毛利 茂則	ジビル調査設計(株)	フクイ建設技術フェア 2016	次世代社会インフラ用ロボット	2016 年 8 月
<b>【③-1-5】(株)開発設計コンサルタントコンソ</b>					
1		開発設計コンソ	Japan Robot Week 2014	NEDO ブースにてパネルおよび実機展示	2014 年 10 月
2		開発設計コンソ	2015 国際ロボット展	NEDO ブースにてパネルおよび実機展示	2015 年 12 月
<b>【③-1-7】(株)キュー・アイコンソ</b>					
1		(株)キュー・アイ	OCEANS'15 Washington D.C.	パネル展示	2015 年 10 月
<b>【③-1-8】朝日航洋(株)</b>					
1	今井 友桂子	朝日航洋(株)	第 38 回測量調査技術発表会	小型自動航行船を用いた写真測量による 河川構造物の維持管理支援について	2016 年 7 月
<b>【③-1-9】国際航業(株)コンソ</b>					
1	永谷 圭司 他	東北大学 他	第1回国際ドローン展(千葉県幕張市)	ドローンを用いた3D モデル作成	2015 年 5 月
2	永谷 圭司	東北大学	EE 東北 2015	火山噴火時の土石流予測を目的としたセンシング技術の研究開発	2015 年 6 月
3	伊豆 智幸	(株)エンルート	イノベーション・ジャパン 2015(東京都江東区)	災害対応 UAV の紹介	2015 年 8 月
4	伊豆 智幸	(株)エンルート	東京エアロスペースシンポジウム(東京都江東区)	災害対応 UAV の紹介	2015 年 10 月
5	藤原 伸也	国際航業(株)	国際ロボット展(東京都江東区)	災害対応 UAV の紹介	2015 年 12 月
6	伊豆 智幸	(株)エンルート	ジャパン・ドローン 2016(千葉県幕張市)	災害対応 UAV の紹介	2016 年 3 月
7	金井 啓通	国際航業(株)	II. 中部ライフガード TEC2016 防災・減災・危機管理展	災害対応 UAV の紹介	2016 年 6 月
<b>【③-1-10】(株)日立製作所コンソ</b>					
1	谷村 和彦	(株)日立製作所	防災産業展 in 仙台	災害調査用地上/空中複合型ロボットシステム	2015 年 3 月

2	谷村 和彦	(株)日立製作所	第1回国際ドローン展	災害調査用地上／空中複合型ロボットシステム	2015年 5月
3	谷村 和彦	(株)日立製作所	2015 国際ロボット展	災害調査用地上／空中複合型ロボットシステム	2015年 12月
4	谷村 和彦	(株)日立製作所	IFCAA2016 大阪国際消防防災展	災害調査用地上／空中複合型ロボットシステム	2016年 6月
5	谷村 和彦	(株)日立製作所	日立グループ展 in 関西 2016	災害調査用地上／空中複合型ロボットシステム	2016年 7月
<b>【③-(1)-11】大林組コンソ</b>					
1	栗生 暢雄	(株)大林組	除染展	マルチクローラ型走行装置「Ursinia」展示	2014年 9月
2	栗生 暢雄	(株)大林組	環境展	マルチクローラ型走行装置「Ursinia」展示	2014年 11月
3	栗生 暢雄	(株)大林組	世界工学会議	パネル展示	2015年 11月
4	栗生 暢雄	(株)大林組	国際ロボット展	パネル展示	2015年 12月
<b>【③-(1)-12】三菱重工業(株)</b>					
1		三菱重工業(株)	第8回 インフラ検査・維持管理展	桜Ⅱ号(防爆仕様)	2016年 7月
<b>【③-(2)-1】(国研)産業技術総合研究所コンソ</b>					
1	鈴木 良一、 加藤 英俊	(国研)産業技術総合研究所	(国研)産業技術総合研究所テクノブリッジフェア	ロボット搭載 X線非破壊検査装置	2015年 10月
2		(国研)産業技術総合研究所、(株)日立パワーソリューションズ、静岡大学、三菱化学(株)	国際ロボット展	中性子・X線非破壊検査ロボット	2015年 12月



4-4. その他(19件)(発表者、所属、発表内容、発表先、発表年月)

番号	発表者	所属	発表内容	発表先	発表年月
<b>【①-1】技術研究組合NMEMS技術研究機構</b>					
1	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	道路インフラモニタリングシステム研究開発	RIMSHP 開設 ( <a href="http://rims.la.coocan.jp/">http://rims.la.coocan.jp/</a> )	2014年 7月
2	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発	半導体産業新聞取材	2014年 12月
3	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発	日経新聞社科学技術部取材 (2015年6月3日)	2015年 6月
4	武田 宗久	NMEMS 技術研究機構	道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発	日経新聞社企業報道部取材 (2015年6月16日)	2015年 6月
5	渡部 一雄	(株)東芝	スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシング	日経 BP 社取材(2015年10月20日)	2015年 10月
6	塩谷 智基	京都大学	非破壊試験による鉄筋腐食やコンクリート損傷の定量評価	SIP 藤野プロジェクトリーダサイトビジット	2016年 4月
7	武田 宗久 他	NMEMS 技術研究機構	RIMS 活動報告	MEMS の波(MMC 運営のブログ)27件投稿	2014年7月16日 ～ 2016年7月13日
8	矢尾 博信	富士電機(株)	傾斜マルチセンサの開発と情報板の先行フィールド試験状況	阪神高速道路(株)	2016年 8月
<b>【②-1】首都高技術(株)コンソ</b>					
1	佐藤 久	首都高技術(株)	デジタル画像解析・診断技術の開発	第47回首都高速道路技術報告	2014年 3月
2	佐藤 久	首都高技術(株)	デジタル画像解析によるひび割れ自動抽出技術の開発	第48回首都高速道路技術報告	2015年 3月
<b>【②-2】福井大学コンソ</b>					
1	栗林 賢一	ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)	サンプリングモアレ法によるたわみ計測について概要を発表	JR 西日本新幹線管理本部現場長会議	2014年 8月
2	藤垣 元治	福井大学	サンプリングモアレカメラによる変位計測デモ	福井大学オープンキャンパス2015	2015年 8月

3	藤垣 元治	福井大学	サンプリングモアレカメラによる変位計測デモ(建物の変位計測デモ)	全空間画像計測コンソーシアム 第10回セミナー	2016年 5月
4	藤垣 元治	福井大学	サンプリングモアレカメラによる変位計測デモ	福井大学オープンキャンパス2016	2016年 8月
<b>【③-(1)-10】(株)日立製作所コンソ</b>					
1	谷村 和彦	(株)日立製作所	技術概要説明	国土交通省「災害対応ロボットに関する成果報告会」(中部地方整備局)	2016年 5月
2	谷村 和彦	(株)日立製作所	技術概要説明	国土交通省「災害対応ロボットに関する成果報告会」(近畿地方整備局)	2016年 8月
<b>【③-(2)-1】(国研)産業技術総合研究所コンソ</b>					
1	鈴木 良一	(国研)産業技術総合研究所	針葉樹型カーボンナノ構造体小型 X 線源の開発とその応用	技術シーズ発表会@浜松	2015年 2月
2	青木 徹	静岡大学	X 線装置と材料認識	第3回しづく会	2016年 3月
3	小池 昭史	静岡大学	工業分野における X 線撮像	第33回 静岡大学会員企業交流会	2016年 3月