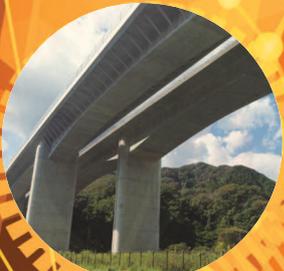


インフラ維持管理・更新等の 社会課題対応システム開発プロジェクト

センサシステム技術・イメージング技術・非破壊検査装置技術 技術資料集



2019年2月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

目 次

はじめに	3
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	4
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	
・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	10
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	
・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	16
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	
・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	20
③道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発	
・道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発	24
④法面変位センシングシステムの開発	
・法面変位センシングシステムの開発	30
⑤無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発	
・無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発	34
⑥高耐久性パッケージング技術の開発	
・道路インフラ状態モニタリングシステム用センサ端末の高耐久性パッケージング技術の開発	38
⑦センサ端末同期用原子時計の研究開発	
・センサ端末同期用原子時計の開発	44
⑧ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発	
・ポンプの異常診断に向けたコアモニタリングシステムの開発	50
・回転機器の維持管理を目的とした小型無線振動センサ端末の開発	54
・ライフラインコアモニタリングのための無線ネットワークシステム	58
⑨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	
・建物の構造ヘルスマニタリングシステムの開発	64
⑩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	
・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研究開発	70
⑪道路付帯構造物モニタリングシステム開発	
・道路付帯構造物モニタリングシステム開発	76

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の開発

⑫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

- ・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…………… 82
- ・橋梁計測用無線サンプリングモアレカメラの開発…………… 86
- ・サンプリングモアレカメラを用いた鉄道橋の客観的健全度評価手法の検討…………… 90
- ・サンプリングモアレカメラの開発と道路橋等への適用例…………… 94

⑬道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発

- ・デジタル画像からコンクリートひび割れを自動検出する技術の開発…………… 98

研究開発項目3の第2項目 インフラ維持管理用非破壊検査装置開発

⑭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

- ・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…………… 102

⑮大面積 FP 型イメージセンサによる X 線非破壊検査装置開発

- ・大面積フラットパネル型 X 線検出器と超小型 X 線源による大型配管検査…………… 106

はじめに

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
プロジェクトマネージャー (PM)
(国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

安川裕介



高度成長期以降に整備された橋・トンネルなどの社会インフラや石油プラントなどの産業インフラは、今後、建設後 50 年を経過するものが加速度的に増加するなど、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が大きな社会課題となっています。そのため、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・更新等を図る必要があります。

これらの社会課題に対応するために、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は、「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」において、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センサシステム分野およびイメージング分野の技術開発及びインフラ維持管理用ロボット・非破壊検査装置の技術開発を行ってまいりました。このうち、ロボットシステムは 2014 年度から 2017 年度の 4 年間の事業期間であり、昨年度発行の開発技術説明書で開発成果を報告しています。センサシステム分野およびイメージング分野、非破壊検査装置については、2014 年度から 2018 年度の 5 年間の事業期間となります。

本冊子は、本プロジェクトのセンサシステム分野およびイメージング分野、非破壊検査装置分野で開発したテーマについて、技術の詳細が書かれた文書をまとめたものです。この冊子によって、今回開発したシステムが社会に広く普及し、実際の現場で役に立つきっかけになればと思っております。

「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

1. プロジェクトの背景

我が国で高度成長期以降に整備された社会インフラは、現在、加速度的に老朽化が進んでおり、例えば、建設年度が分かっている橋長 2m 以上の 40 万橋については、建設後 50 年を経過したものの比率が 2033 年には 67%に達するとされている。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においても同様である。これらのインフラについて、適切な維持管理が行われないと、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ことが危惧される。実際、インフラの高齢化は、2012 年の笹子トンネル事故のような重大な事故リスクの顕在化や、維持修繕費の急激な高まりを引き起こしている。

厳しい財政状況や熟練技術者の減少という状況の中で、事故を未然に防ぎ、予防保全によるインフラのライフサイクルコストの低減化を実現するためには、新しい技術を活用しシステム化されたインフラマネジメントが必須である。インフラ維持管理に関わるニーズと技術開発のシーズとのマッチングにより、新しい技術を現場で使える形で展開すること。それによって、予防保全に基づく維持管理水準の向上と、その低コストでの実現が急務である。

この状況の中で、これに対処するための ICRT (ICT + RT) を活用した技術の開発は、インフラ維持管理市場に新たなビジネスチャンスを生み、また、近い将来に同様な課題に向き合うアジア諸国へのビジネス展開の可能性も期待される。

2. NEDO インフラプロジェクト

NEDO ではこの社会ニーズに応えるため 2014 年度からインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト(以下、本事業)を実施している。本事業の目的は、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、ならびに、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ことにある。

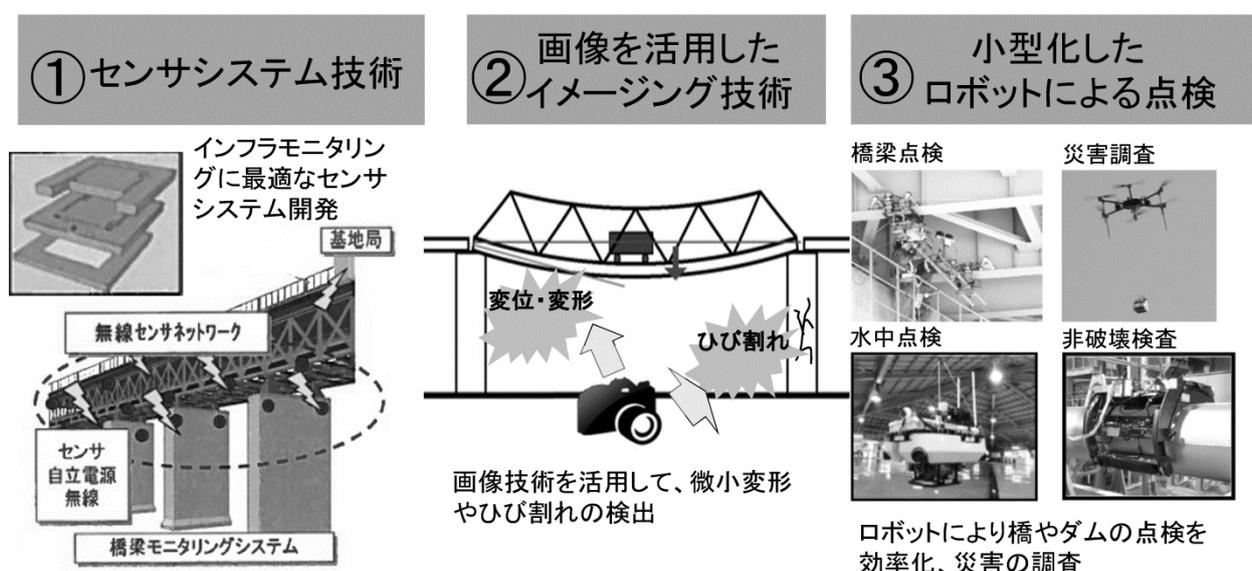


図1 インフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトの構成

本事業は、各種センシング技術やロボットを用いた社会インフラ構造物の維持管理・更新技術を開発するものであるが、単なる技術開発ではなく、社会課題に具体的に対応できるシステムを開発することに特徴がある。すなわち、現場で役に立つシステムを作り上げることこそが最終目的であり、新規性よりは有用性を優先する思想としている。この実現のため、「システムを現場で使い、抽出した課題を改良し実用的技術を開発すること」と、「ユーザを巻き込みつつ、実使用者による評価に基づいて開発すること」を必要条件とした。

例えば、センサシステム開発分野においてはフィールドを用いた実証開発・試験を行いつつ、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ことを求めた。また、開発チームには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含むことで、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にすることとした。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した。また、ロボット分野や非破壊検査装置開発分野では実証フィールドを用いて点検や維持管理等の有効性を実証試験と検証評価により評価し、改良を行うこととした。

本事業では、これらの目的を達成するために、以下の①～③の研究開発項目を設定した。

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

インフラ構造物及びその構成部材の状態を常時・継続的・網羅的に把握するための、主として MEMS 技術に基づく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。

実施期間 平成26年度～平成30年度(5年間)

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

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、及び、撮影時の位置ずれ等に対処し、平面のみならず奥行きもわかる3D画像解析手法の開発と、実証実験。

実施期間 平成26年度～平成30年度(5年間)

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

インフラ構造物の周辺で人間の立入りが困難な箇所へアクセスし、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、ならびに、災害時に危険区域において対処に必要な情報収集を行うシステムの開発と実証実験。

実施期間 平成26年度～平成29年度(4年間) または途中参加者は平成28年度～平成29年度(2年間)
並びに、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。

実施期間 平成26年度～平成30年度(5年間)

3. 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①)の概要

研究開発項目①では、センサシステムによりインフラ構造物を継続的に観察し、状態を把握する技術を開発している。MEMS 技術の開発と利用により、広帯域の振動センサによるモニタリングシステム等の従来にないシステムを開発することを目的としている。インフラ構造物に容易に取り付けるために手のひらに乗るサイズと重量のセンサ端末を開発し、10年間ノーメンテナンスで取得情報を無線送信可能で、自己発電により電源を賄う意欲的な目標を設定している。橋梁や道路付帯設備など、様々なインフラ構造物の状態を継続的に計測するシステムを対象に、5コンソによる11技術を開発した。

(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、自立電源及び無線通信機能、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)の技術開発である。



図2 2018年度に開発対象とした15の技術

(2) 研究開発内容及び達成目標

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こととした。

また、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した。

達成目標として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こととした。

- ・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、変位並びに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。

また、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こととした。

(3) 研究開発成果

当初3年間で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した。これらのセンサ端末を駆動させるため、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の開発を実施した。さらに開発したセンサシステムを実環境に設置し、実証実験を開始し、実用における諸課題の抽出、改善を実施した。

後半2年間は、開発したシステム・装置を実現場に適用し、有用性や信頼性を確認する。実証実験において改善点または不具合が確認された場合は適宜開発品にフィードバックし、実用的なシステム・装置をつくりあげた。また、インフラを常時・継続的・網羅的に把握するセンサシステム及びセンサネットワークシステムの社会実装研究を行った。さらに、開発したセンサシステムを、長大橋、発電所、石油プラント等の大規模インフラに適用し、有用性の確認、改善を行った。加えて、これら大規模インフラを含む社会インフラに開発システムを適用することで期待されるインフラ長寿命化による省エネ効果を検証した。

4. 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②)の概要

研究開発項目②は以下の2課題が開発テーマである。

- (a) 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の開発。具体的には、近年技術発展が著しい機械学習の技術を利用して、コンクリート壁面を撮影した画像からのひび割れ等の検出手法。
- (b) イメージング技術を用いて、撮影時の位置ずれ等に対処し、平面のみならず奥行きもわかる3D画像解析手法の開発。用途として、橋梁等のたわみ量などの変形を遠距離から撮影した画像を元に計測する技術。

(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、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課題がある。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) 研究開発内容及び達成目標

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。また、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。

達成目標として以下を設定して研究開発を推進した。

- 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。

また、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こととした。

(3) 研究開発成果

本研究開発では、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の開発を実施した。

実構造物を対象とした実証実験を開始し、開発したシステムの実用化に向けた諸課題の抽出、改善を実施した。また、開発したシステム・装置を実現場に適用し、有用性や信頼性を確認する。実証実験において改善点及び不具合が確認された場合は適宜開発品にフィードバックし、実用的なシステム・装置をつくりあげた。

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

研究開発項目③では、インフラ点検用のロボット技術開発の分野と災害調査用ロボット技術については2017年度で終了したが、産業用インフラ構造物としてプラントのパイプを対象とした小型の非破壊検査装置の開発と実証実験については2018年度も開発を継続した。仮設足場の設置が必要であった従来の点検員による検査にかわり、保温材の外から化学プラント等の配管の外表面腐食を検出するための、中性子線を用いた水分検出と、X線によるパイプ厚を計測する装置の開発を実施した。

(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。

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) 研究開発内容及び達成目標

インフラ維持管理用として開発された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、光源の人体に対する安全性を十分に考慮したものとする

(3) 研究開発成果

化学プラントで高所に敷設されている保温材付水平配管の健全性確認に活用可能な、ロボットへの搭載可能なサイズ・重量の中性子水分計搭載ロボットと、エックス線搭載ロボットを開発した。6インチの管厚7.1mm配管で50mm厚の保温材が施工されている配管を想定し、実際のプラント配管において走行試験を実施した。また、開発したロボットや搭載装置を実際の現場に適用して計測試験を行い、有用性や信頼性を確認した。実証実験において改善点及び不具合が確認された場合は適宜開発品にフィードバックし、実用的なシステム・装置をつくりあげた。

6. プロジェクト推進の体制

本事業では安川裕介がプロジェクトマネージャーとしてプロジェクトの運営について責任を持ち統括する実務責任者としてプロジェクト遂行にかかる業務を統括した。また、油田信一はプロジェクトリーダーとして技術目標の達成に向けて技術開発を統括した。さらに、ロボット分野やインフラ分野の有識者より構成する技術委員会を組織し、専門家としての助言・指導により、実用的なシステムの開発に向けての体制とした。下山勲はサブプロジェクトリーダーとして、センサシステム分野の技術開発を推進した。

7. まとめ

本事業では「現場での実用性をとくに重視したシステムを開発すること」を方針としており、たとえばセンサシステム開発では、センシング用デバイスの開発だけでなく、端末モジュールの小型化やインフラ施設の健全性の確認、モニタリング結果を管理オペレータに提示するまでの一連の業務の中で、しっかりと役立つシステムに向かって開発してきた。このために、実証試験を繰返してユーザの評価を受けつつ、有用なシステムに改良し作り上げる開発を進めた。本事業で開発したシステムは、それぞれが特徴的であり、適用対象や使用方法が適合すれば大きな効果を発揮する。インフラ施設管理者や関係省庁や自治体、点検コンサルタント等のインフラ点検の関係者に本事業で開発したシステムの特徴や利点等を理解していただければと願っている。本事業で開発されたシステムが広く社会に普及し、社会課題の解決に役立つことが期待される。

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

武田 宗久* 中嶋 正臣 今仲 行一 (NMEMS 技術研究機構)
下山 勲 (東京大学/NMEMS 技術研究機構)

Research and Development of Sensing System for Road Infrastructure Monitoring System
Munehisa Takeda*, Masaomi Nakajima, Koichi Imanaka, (NMEMS Technology Research Organization)
Isao Shimoyama, (The University of Tokyo / NMEMS Technology Research Organization)

This paper addresses outline of Road Infrastructure Monitoring Systems (RIMS), features of developed technologies, and demonstrations in the real expressways and large-scale infrastructure such as dam and power plant. The system enables 24 hours monitoring of total road infrastructure.

キーワード：道路インフラ，モニタリング，センサ，自立電源，無線通信ネットワーク，高耐久性パッケージ，大規模インフラ，MEMS

(Road infrastructure, Monitoring, Sensor, Energy harvester, Wireless communication network, Highly durable package, Large-scale infrastructure, MEMS)

1. はじめに

道路インフラは陸上貨物輸送量の 90%以上を占め⁽¹⁾、国民の豊かな生活を支える重要な社会インフラであるが、高度成長期以降に整備され、今後 20 年で建設後 50 年以上経過するインフラが増加して老朽化が進展する。また、過積載車等の過酷な使用状況による損傷の増加や異常気象等による大規模災害の増加等の建設当初には予想していなかった環境変化が道路インフラの老朽化をより進展させている。さらに、2012 年の笹子トンネル事故や 2011 年の東日本大震災のような災害により、道路インフラが分断されることによって国民の生活が大きく脅かされるのが再認識され、道路インフラのモニタリングシステム導入による予防保全やインフラの長寿命化が重要な社会課題となっている。また、長大橋や発電所等の大規模インフラも高度経済成長期などに整備されたものが多く、老朽化への対応が大きな社会課題となっている。

これらの課題を解決し、道路インフラの効果的かつ効率的な維持管理・更新を行うために、従来の点検を補完する ICT を活用した新たなモニタリング技術の開発が望まれているが、現状は常時・継続的なモニタリングを適用した事例は少ない。また、橋梁等の個別フィールドだけのシステムとなっており、道路インフラ全体を統合的にモニタリングするシステムとはなっていない。

技術研究組合 NMEMS 技術研究機構ではこのような社会要請をうけ、2014 年度から高速道路の橋梁、道路付帯物、法面を対象にして、環境エネルギーを利用した自立電源を

有し、各フィールドのモニタリングに適した新規の小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末並びに各フィールドのセンシングシステムを統合して道路インフラのトータルな維持管理が可能な道路インフラモニタリングシステム (RIMS) の開発を進めてきた。ネットワーク技術、高耐久性のパッケージング技術に関しては共通化を図り、効率的な開発を行っている。また、2015 年度からは将来技術としてセンサ端末同期用原子時計の開発を、2017 年度からはこれらモニタリング技術の長大橋や発電所等の大規模インフラへの展開も検討してきた。本プロジェクトで開発しているモニタリングシステムのイメージを図 1 に示す。本報告では、この RIMS プロジェクト⁽²⁾の概要に関して説明する。

2. RIMS プロジェクトの概要

〈2.1〉 開発概要

本プロジェクトの開発内容をまとめたものを図 2 に示す。本プロジェクトの特徴は既存のセンサを用いたモニタリングシステムを開発するのではなく、道路インフラモニタリングに適した新規のセンサシステムを開発していることにある。新規のセンサ端末として、橋梁用に超広帯域の振動を 1 つのセンサで検出可能な SA(Super Acoustic)センサと 2 次元の歪状態を視覚的に検出可能な面パターン歪センサの 2 種類、道路付帯物用に振動と傾斜を同時に検出することで道路付帯物の劣化状態が判別できる傾斜マルチセンサ及び法面用に電波位相差を用いて法面の 3 次元変位を悪天候下でもミリメートルオーダーで高精度に検出可能な電波位相差変位センサの計 4 種類のセンサ端末を開発している。面パ

ターン歪センサを除く 3 つのセンサは自立電源及び内蔵アンテナを有し、10年間の寿命を保証する共通の耐環境性セラミックパッケージを用いるとともに、全てのセンサ端末は対象物に強固にかつ簡易に接着可能な共通の粘着着シートを用いて対象物に固定している。さらに、ことなるセンサ情報を統一的に扱える共通無線通信ネットワーク技術を用いて道路インフラの統合的なモニタリングを可能とし、実際の高速道路での実証を行っている。これらのモニタリング技術は道路インフラだけでなく、発電所等の大規模インフラにも適用可能な技術であるので、実際の発電所等の大規模インフラでの実証試験も実施している。さらに、多数のセンサ端末によるモニタリングで必要となるセンサ端末の同期を容易にする原子時計の開発も将来技術として実施している。

〈2・2〉 研究体制

図3に研究開発体制を示す。役割を明確にしたこの分野のリーディング17機関（センサデバイス/システム/実装メーカ、産総研、大学、高速道路会社等）が技術研究組合NMEMS技術研究機構に結集し、産学官連携でユーザー参

加型の研究体制を構築して研究開発を実施している。図3に示すように、「(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発」、「(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発」、「(3) 共通実証・評価研究」、「(4)先導研究」の4つの階層に分かれて研究開発を進めている。「(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発」の階層では、橋梁用のスーパーアコースティック（振動）センサを東芝、東大、京大が、フレキシブル面パターンセンサ（歪）を産総研と大日本印刷が、道路付帯物用の傾き・振動センサを富士電機が、法面用の変位センサを三菱電機が担当している。「(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発」の階層では、無線通信ネットワーク共通プラットフォーム（PF）をNTTデータが、高耐久性パッケージング共通PFをMMC、日本ガイシ、大日本印刷、産総研が担当している。「(3) 共通実証・評価研究」の階層では、このプロジェクトに参画している高速道路会社4社（NEXCO 東日本、NEXCO 中日本、NEXCO 西日本、阪神高速道路）を含む全機関が担当して実施している。「(4)先導研究」の階層では、センサ端末同期用原子時計の開発を産総研、リコー、MMC、京大、東工大と首都大東京が担当している。ネットワーク技術、パッケージング技術、信頼性保証技術に関しては共通化を図って高い開発効率を目指すとともに、主要高速道路会社の参画でニーズに沿った速いPDCAサイクルを回して実用化を加速している。

〈2・3〉 スケジュール

図4に本研究開発のスケジュールを示す。本プロジェクトは5年プロジェクトであるが、前半3年で基本的なセンサシステム及び共通基盤技術の開発を終え、後半2年は実際の高速道路や大規模インフラの実フィールドでの実証試験を実施している。今年度は最終年度で、道路インフラの本格実証実験を完了するとともに、大規模インフラへの適用可能性検証を完了する予定である。

3. 開発テーマの特長

〈3・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

本センシングシステムは主としてコンクリート橋の内部亀裂の3次元発生位置、大きさ、進展を、新規開発の超広帯域センサで安価・高精度にモニタリングするものである。こ

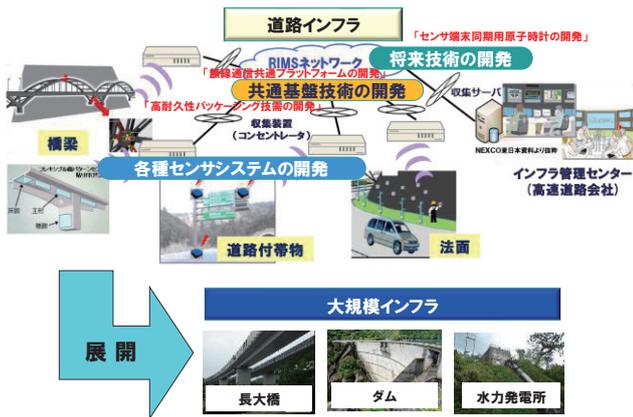


図1 道路インフラモニタリングシステム (RIMS)
Fig.1. RIMS (Road Infrastructure Monitoring System).

対象	新規センサ端末	共通基盤技術	センサシステム	統合化システム
橋梁	SA振動センサ	自立電源 共通耐環境性パッケージング セラミックPKG 無線通信ネットワーク技術 内蔵アンテナ	SAセンシングシステム	道路インフラモニタリングシステム (RIMS)
	面パターン歪センサ		歪センシングシステム	
付帯物	傾斜・傾斜マルチセンサ	センサ端末同期用原子時計 将来技術	付帯物センシングシステム	大規模インフラモニタリングシステム
法面	電波位相変位センサ		法面センシングシステム	

図2 RIMSの開発内容
Fig.2. Development contents of RIMS.



図3 RIMSの研究開発体制
Fig.3. R & D scheme of RIMS.

のシステムの特長は以下である。

(1) 超広帯域(数 Hz~1MHz) 振動センサ (SA:スーパーアコースティックセンサ) の開発

(2) 橋梁の健全状態から限界劣化までを 1 つのセンサでカバー

(3) 手のひらサイズの無線センサ端末により遠隔監視

〈3・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

本センシングシステムは主として鋼橋のクラック進展度・方向及び応力集中部の蓄積歪を、新規開発の 2 次元透明 Chips on Sheet で安価にモニタリングするものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 高感度極薄シリコン歪センサアレイ及び低コスト印刷歪センサアレイの開発

(2) 歪分布の面パターンから橋梁の亀裂を経過観察、発見、予測

(3) UV・水蒸気バリア層による長期耐久性及び粘接着シートによる簡易施工

〈3・3〉 傾斜マルチセンサによる道路付帯物センシングシステムの開発

本センシングシステムは道路標示板、照明柱などの経年・突発劣化を非サーボ MEMS マルチセンサで固有共振周波数と傾きの変化を同時にモニタリングすることで検出するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) MEMS センサによる傾斜マルチセンサ端末の開発(傾斜・振動・温度を同時計測)

(2) 低消費電力化(自立電源)と高速無線通信

(3) 高速道路(実フィールド)での実証、大規模インフラ(発電施設)への展開

〈3・4〉 電波変位センサによる法面変位センシングシステムの開発

本センシングシステムは法面上の複数のセンサから放射した 920MHz 電波の位相差を見ることで 4mm/h の変位ズレを全天候・3次元で広範囲、容易にモニタリングするもの

である。このシステムの特長は以下である。

(1) 電波位相差により高計測頻度・全天候・3次元で法面変位を高精度計測

(2) 端末間の無線メッシュネットワークによる広範囲計測

(3) 天候・昼夜を問わず長期間動作する多機能型センサ端末の開発

〈3・5〉 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

本技術は多種多様なセンサからデータを受信・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するとともに、コンセントレータから送信されるデータを受信・蓄積及び活用が可能な共通プラットフォームを構築するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 様々なデータフォーマットやインターフェースの差異を吸収する通信仕様

(2) 設置容易性とコスト対策を目的としたコンセントレータ間の連携通信

(3) セキュアな情報収集への対応

〈3・6〉 高耐久性パッケージング技術の開発

本技術は暴風雨、強振動、高濃度腐食ガス、塩害等の悪環境下でも長期に耐久性を確保できるパッケージング技術及び簡易施工を可能にするシート実装技術を開発するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 常時モニタリングを長期に保証するセンサ端末パッケージング技術

(2) 自立電源、無線モジュール、環境センサをオールインワンパッケージング

(3) パッケージングやセンサを構造物に強固に接着/接合するシート実装技術

〈3・7〉 センサ端末同期用原子時計の開発

本テーマは将来技術として、多数配置されたセンサ端末間の時刻同期を容易に行うために、端末に組み込み可能な小型・低消費電力の原子時計を開発するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) モニタリングシステムの時刻同期を不要とし、設置・運用労力を革新的に低減

(2) センサ端末に組み込み可能な小型で低消費電力な原子時計

(3) 高い時刻精度の長期間維持を可能とするガスセル内環境維持・計測技術

4. 実証試験

〈4・1〉 実高速道路での実証試験

本プロジェクトのもう一つの特長は NEXCO3 社と阪神高速道路の高速道路会社 4 社がプロジェクトに参画しており、新しく開発したモニタリングシステムに適した実高速道路で実証試験を実施するとともに、実際に高速道路を管理・運用するユーザー企業の意見を反映した研究開発を実施していることである。図 5 に実高速道路での RIMS の実



図 4 RIMS の研究開発スケジュール

Fig.4. R & D schedule of RIMS.

証試験の様子を示す。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に関しては、NEXCO 西日本が、フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングに関しては阪神高速道路が、傾斜マルチセンサによる道路付帯構造物センシングに関しては、NEXCO 中日本が、電波変位センサによる法面変位センシングに関しては NEXCO 東日本が、それぞれ分担して実証場所を提供して実証試験を実施している。各実証場所で高耐久性パッケージング技術を用いて作られたセンサ端末から得られたセンサデータは無線通信

ネットワーク共通プラットフォームを介して、インフラ管理センターに収集され、一元的な道路インフラの管理が可能になっている。

また、図6に示すように、RIMS センサ間の連携及び外部情報や道路管理者情報との連携を模擬するエミュレータ (Pilot-RIMS) を開発し、道路インフラの一元管理が可能なることを明らかにした。

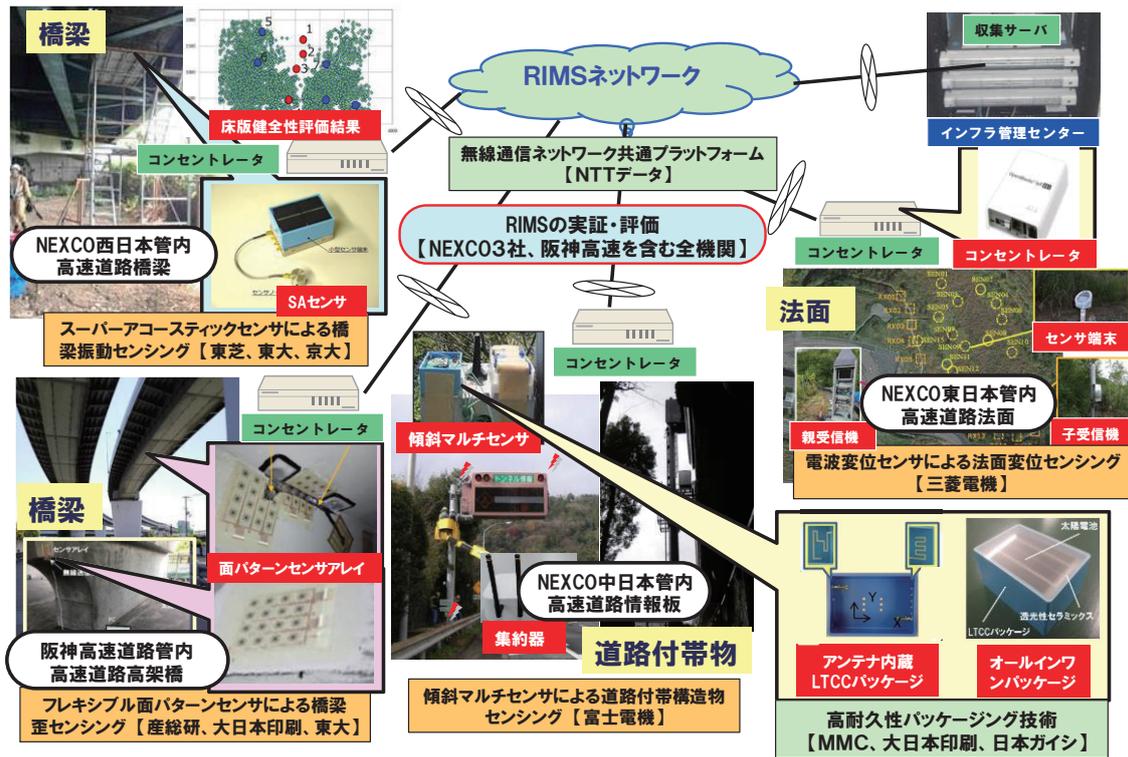


図5 実高速道路でのRIMSの実証実験

Fig.5. Demonstration of RIMS in real expressways.

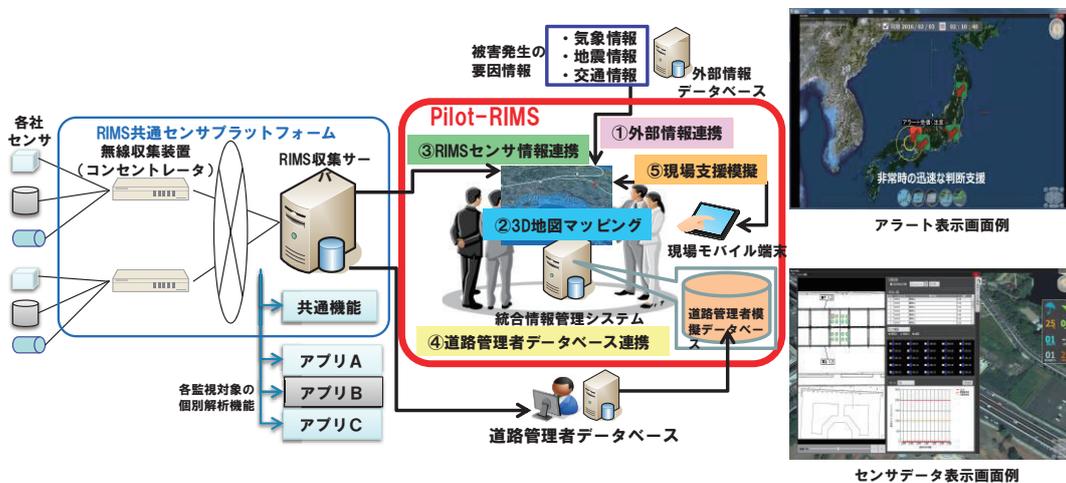


図6 Pilot-RIMSのイメージ

Fig.6. Image of Pilot-RIMS.



図7 実証長大橋

Fig. 7. Long bridge for demonstration.



図8 監査廊内の亀裂上に設置した面パターンセンサ

Fig. 8. 2D strain pattern sensors installed on the crack in reconnaissance gallery.

〈4・2〉 大規模インフラへの展開及び実証試験

道路インフラ用に開発したセンサシステムを、長大橋、発電所等の大規模インフラに適用し、大規模インフラの状態を的確に把握できる省エネ型センサネットワークシステムの社会実装研究を実施し、その有用性の確認、改善を行うことを目的として、以下の大規模インフラの実証試験を実施している。

(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大規模インフラへの展開

大規模インフラの倒壊などの大規模災害に伴う社会課題の解決として、長大橋で用いられているプレストレスト・コンクリート橋 (PC 橋) のスーパーアコースティックセンサによる健全性モニタリングシステムの研究開発を実施している。実証長大橋として、供用開始後約 17 年、橋長 372.3m の 5 径間連続箱桁橋 (PC 片持ち施工) を選定し、実証試験を実施している。実証長大橋を図 7 に示す。

(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大規模インフラへの展開

フレキシブル面パターンセンサの大規模インフラへの展開・実証場所としては電力会社が管理するダム の 監査廊内におけるコンクリート壁面の亀裂を選定した。電力会社では定期的にクラックゲージを用いて、目視で亀裂の状態を監視しており、アーチ状の壁面にフレキシブル面パターンセンサを貼り付けることで、亀裂の進展状況が常時監視でき、亀裂進展の詳細を把握することを目指している。図 8 に



図9 水力発電所に設置した傾斜センシングシステム

Fig. 9. Tilt sensing system installed in a hydroelectric power plant.

ダム監査廊内の亀裂上に設置した面パターンセンサを示す。

(3) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの大規模インフラへの展開

傾斜マルチセンサの大規模インフラへの展開・実証場所としては電力会社が管理する水力発電所を選定した。斜面崩壊等による水力発電設備への被害を未然に防ぐための 1 つの試みとして常時モニタリングの検討を開始した。水力発電所に設置した傾斜センシングシステムを図 9 に示す。

5. おわりに

高速道路の橋梁、道路付帯物、法面を対象にして、環境エネルギーを利用した自立電源を有し、各フィールドのモニタリングに適した新規の小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末並びに各フィールドのセンシングシステムを無線通信ネットワーク共通プラットフォームで統合して道路インフラのトータルな維持管理が可能な道路インフラモニタリングシステム (RIMS) の全体概要、各開発テーマの特長及び高速道路での実証試験と大規模インフラへの展開の概略について紹介した。本技術により、従来の点検技術を補完し、道路インフラの状態を常時・継続的・網羅的に把握することが可能となる。個別テーマの詳細に関しては、別途報告しているので、そちらを参照されたい。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務の結果得られた成果である。

文 献

- (1) 高速道路資産の長期保全及び更新の在り方に関する技術検討委員会報告書, 平成 26 年 1 月 22 日
- (2) 下山:「道路インフラの統合的な常時監視を実現するモニタリングシステムの研究開発」, MEMS センシング&ネットワークシステム展 2017 研究開発プロジェクト成果報告会 (2017)

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

渡部 一雄* ((株)東芝/NMEMS 技術研究機構)
下山 勲 (東京大学)
塩谷 智基 (京都大学)

Bridge Sensing System using Super Acoustic Sensor
Kazuo Watabe*, (Toshiba Corporation / NMEMS Technology Research Organization)
Isao Shimoyama, (The University of Tokyo)
Tomoki Shiotani, (Kyoto University)

This paper addresses a newly developed palm-sized sensor unit for detecting internal deterioration in bridges. The unit utilizes event-driven architecture, energy harvesting and edge computing to conduct an autonomous monitoring of bridges. A vibration sensor, “super acoustic” (SA) sensor, with an extremely wide frequency range is also developed, which is incorporated with the sensor unit.

キーワード: MEMS, ピエゾ抵抗, 無線ネットワーク, アコースティック・エミッション, IoT, 速度構造解析, コンクリート床版, 橋梁
(MEMS, Piezoresistive, Wireless network, Acoustic emission, IoT, Velocity structure analysis, Concrete slab, Bridge)

1. はじめに

国内インフラ構造物は昭和 30 年代にはじまる高度経済成長期に多くが建設されたため、今後、建設後 50 年を迎えるものが急激に増えていくこととなる⁽¹⁾。また、2012 年 12 月の笹子トンネル天井板崩落事故をきっかけに、道路法が改正され、近接目視による 5 年に 1 回の点検が義務化されている。一方で我が国の人口は 2008 年をピークに減少に転じており、中でも生産年齢人口 (15 歳から 64 歳) は 1994 年をピークに減少に転じ、2035 年にはピーク時の 25%以上の減少が予測されている状況である。

このため、老朽化が進むインフラ構造物を厳格化された法令に従って維持管理することは、人的リソース的にも、財政的にも、早晚限界が訪れることが予測され、新たな効率化への取組みが急務となってくると考えられる。損傷が深刻化してから大規模な修繕を行う、「事後保全型」から、損傷が軽微なうちに補修を行う「予防保全型」への転換はその基本となる取組みである。

一方で、予防保全そのものを効率化する取組みも必要となる。予防保全の判断材料となる点検が、人手、特に目視に頼っているためである。そこで人手に出来るだけ頼らずに

健全性を判断する手法、例えばセンサを用いたインフラモニタリングの導入が期待されている。

国内の社会インフラ構造物のなかでも、橋梁 (きょうりょう) について見ると、長さ 2m 以上の橋梁が 70 万橋以上存在しており、2023 年にはこのうち約 43%が建設後 50 年を超えることになる。これらの橋梁の維持管理をどのように効率化していくかは、喫緊の社会課題になりつつある。

このような背景を受け、筆者らは、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のインフラ維持管理に関する 5 ヶ年計画の開発プロジェクトに平成 26 年度より参画し、現在は最終年度の開発を行なっている。この取り組みにおいては、1) 広帯域な振動センサ (スーパーアコースティックセンサ) デバイス、2) 自立電源を搭載した小型無線センサ端末、3) 橋梁の健全性定量評価手法、を統合した橋梁センシングシステムを開発し、昨年度より高速道路の橋梁を対象に実証実験を開始している。本稿では、それぞれの要素技術の詳細について紹介する。

2. スーパーアコースティックセンサ

スーパーアコースティックセンサ (以下、SA センサ) とは、従来の AE センサの有効感度帯域 (概ね数 10kHz~

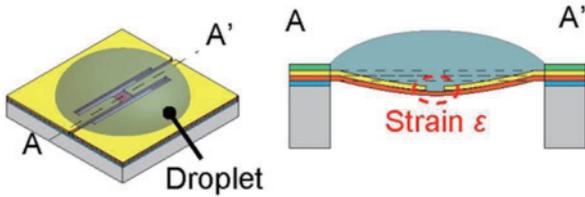


図 1 SA センサの構造模式図

Fig. 1. Schematic diagram of SA sensor.

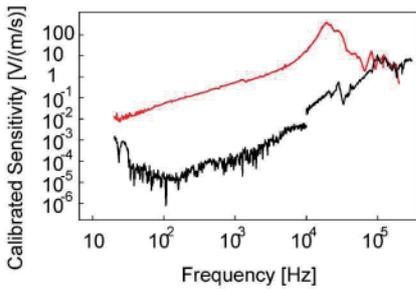


図 2 SA センサの周波数応答 (赤 : SA センサ, 黒 : AE センサ)

Fig. 2. Frequency response of SA sensor (red) and AE sensor (black).

1MHz)を大幅に拡張させ、1 Hz から 1MHz までの非常に広い帯域で感度を持つ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によるセンサデバイスである²⁾⁽³⁾。図 1 に SA センサの模式図を示す。両持ち梁タイプの振動検出部 (左図 A-A'線分に相当する部分) の片面に液体層を設けているのが特徴である。両持ち梁の厚さはおよそ 300 nm と薄いため、液体の表面張力による表面波にならって振動する。振動検出部の中央 (図中赤色部) に形成されたピエゾ抵抗層に振動によるひずみが発生することで、抵抗変化として出力が得られる。両持ち梁の両側のギャップ部はマイクロオーダーの幅で形成されており、表面張力により液体の漏れが抑制されている。

SA センサの特徴である非常に広い帯域は、片面に封入した液体により得られる効果である。大気中での両持ち梁の振動特性は固有振動の影響を強く受け、固有振動の周波数近傍では大きな振幅が得られるが、それ以外の周波数では振動が極端に小さくなる。液体の表面にならって両持ち梁が振動することで、固有振動だけでなく広い帯域での応答が得られるようになる。開発した SA センサにより得られた周波数応答特性の例を図 2 に示す。従来の AE センサと比べて特に低域側において良好な応答を有することが分かる。

3. 自立電源搭載小型無線センサユニット

本章では、SA センサデバイスを搭載し、橋梁の健全性モニタリングを行うための小型センサユニットについて紹介する。開発したセンサユニットを含むモニタリングシステム

のシステムブロック図を図 3 に示す。本システムは、SA センサを含むエッジデバイスである無線 SA センサユニットと集約装置 (コンセントレータ) と、及び解析サーバからなり、無線 SA センサユニットにより計測されたセンサデータは集約装置を介して解析サーバへと送信され、収集・解析される。無線 SA センサユニットは計測対象構造物に直接設置され、後述するイベントドリブンアーキテクチャと完全自立発電によって自律的に計測を行う。センサユニットのエッジ回路では、AE 帯域 (数 10 kHz~数 100 kHz) を含む信号データを検出し、信号増幅、波形整形、一次選別、特徴量ベクトル化をリアルタイムで行う。サーバ装置では、蓄積した AE 計測データを基に主にノイズ除去と損傷の評価を行い、効率的な維持管理を実現する。

SA センサユニットの外観及び内部回路を図 4 に示す。センサユニットは、SA センサを最大 4 チャンネル搭載可能であり、パッケージサイズ (左図青色部分) は片手で持ち運び可能な 100 mm×70 mm×40 mm である。センサユニット内の処理回路は、アナログフロントエンド、信号処理回路、自立発電回路、ウェイクアップ回路により構成される。アナログフロントエンドは SA センサから出力される信号を増幅し、バンドパスフィルタにより帯域外ノイズを除去する。さらに、その信号を AD コンバータにより量子化し、後段の信号処理回路へ送信する。信号処理部は FPGA (Field Programmable Gate Array) で構成され、信号波形から特徴量ベクトルを抽出する。無線インターフェースとしては、構造物などの障害物が多い都市部でも比較的伝搬特性の良い、920 MHz 帯の ISM (Industry, Science, Medical) パ

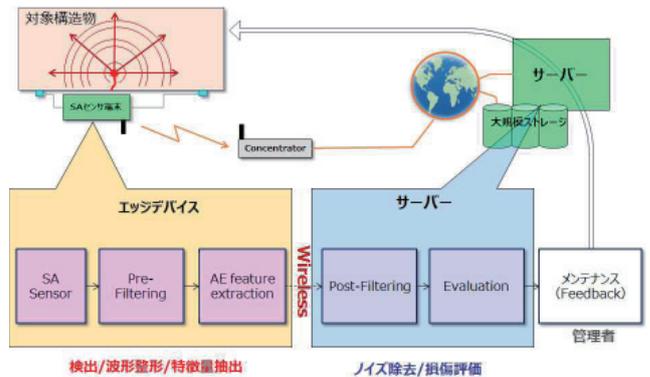


図 3 モニタリングシステムのブロック図
Fig. 3. Block diagram of monitoring system.

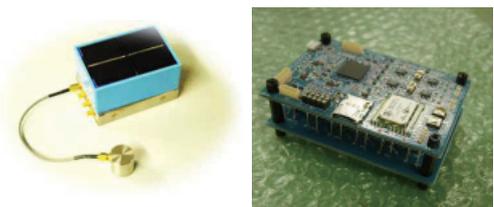


図 4 センサユニットの外観と内部
Fig. 4. Exterior and interior of SA sensor unit.

ンドを利用するものとした。センサユニットの電源は、商用電源の確保が不要で、かつ、長期動作が可能となるように端末上面と概ね同サイズ(90mm×60mm)の太陽光パネルを発電源とし、発電した電力を一時的に蓄電する蓄電デバイスとしてリチウムイオンキャパシタを内蔵した。自立発電回路は、このように太陽光パネルで得られる電力をソースとし、蓄電デバイスの充放電制御を行う。

上述の通り、センサユニットは太陽光エネルギーに基づいた自立電源のみで動作する。しかし、装置を起動したまま、信号計測、データ伝送を継続しつづけると、AEという高周波帯の波形を演算することも電力が枯渇して有効な計測が出来ない恐れがある。そこで、後述するイベントドリブン動作を実装したシステムを提案した。橋梁の場合、例えば大型車の本線走行に伴う交通荷重に相当する一定以上の加速度変化が生じた場合にシステムを起動させ、その直後に発生するAEを計測させることができる。通常の待機状態では低消費電力のウェイクアップセンサのみが給電され、加速度イベントの監視を行う。加速度に変動がない場合は、大部分の回路については電力の供給を停止させることができる。こうすることで、センサユニット全体としての消費電力を大幅に削減することが可能となる。図5に実験状況の模式図を示す。

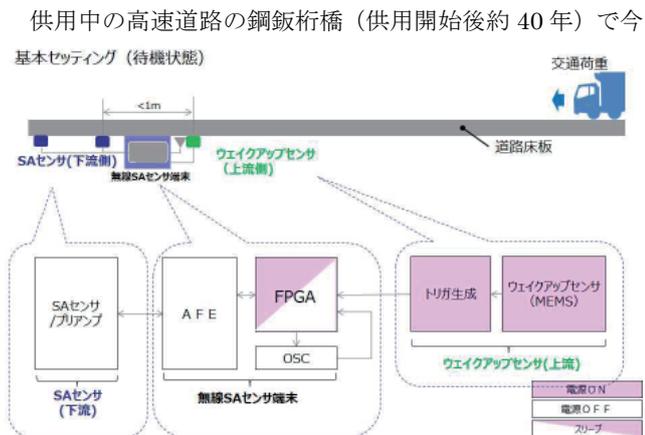


図5 橋梁実験の模式図

Fig. 5. Experimental setup of bridge monitoring.



図6 橋梁外観と計測対象箇所

Fig. 6. Experimental site and close-up view of monitored panel.

後、床版取替工事を検討しているRC床版を対象に、開発したモニタリングシステムの実証実験を開始している⁽⁴⁾。橋梁外観およびセンサ設置箇所の床版の外観を図6に示す。本線の走行車線側に位置する床版下面に4チャンネルのSAセンサを設置した。SAセンサユニットの本体は、太陽光パネルへの日照が得られるように同じ主桁の側面ウェブに設置した。スリーブから計測開始までの遷移時間を吸収するために、ウェイクアップセンサを上流側、SAセンサを下流側に設置している。イベント発生とみなす加速度の閾値は、対象とする荷重以上の大型車両の走行時にシステムが起床するように調整している。また、無線SAセンサユニットからの信号を受信する集約装置は橋脚部等の地上部に設置している。センサユニットから集約装置までの距離は直線で概ね10m程度であるが、センサユニットからの信号を問題なく受信することが出来ている。

4. 橋梁の健全性定量評価手法

本章では、橋梁の健全性をAE帯域の信号をもとに定量評価する手法について、高速道路床版内部の損傷への適用事例を用いて紹介する⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。対象は、供用後40年が経過した道路床版であり、長期間の交通荷重や外環境による経年劣化により、激しい損傷が見受けられ、新しい床版への架替えが実施された。計測は、架替え前の床版の2,000×3,000mm程度に対し、700mm程度の間隔で15個のAEセンサを設置し、車両通行に伴うAEを計測した。得られた計測データに基づき、AE震源の位置標定⁽⁹⁾およびAEトモグラフィ解析⁽¹⁰⁾に基づく弾性波速度分布を算出、評価し、外観目視では確認できない内部の損傷と比較した。対象とした床版におけるAE震源の位置(図中●で標記)および速度分布(図中カラーコンターで標記)を図7に示す。これより、外観目視でひび割れが多いと判断されたパネルAに関しては、全体的にAE震源が少なく弾性波が低速度の領域が広がっていること、外観目視でひび割れが少ないと判断されたパネルBについても対象領域中央部にAE震源が少なく低速度の領域が分布していることが確認される。図7の赤と青で示した数字は、架替えの際に撤去された床版を対象として、内部の損傷を評価する目的でコアコンクリートを削孔した位置であり、それぞれの位置で採取されたコアを図8に示している。特に、赤で示した部分は内部でのひび割れが確認されたもの、青で示した部分はされなかったものである。この結果に基づくと、赤で示したコアは、ほぼ100%の確率で低速度の領域から採取されており、かつAE震源の量が相対的に少ない部分であることが伺える。

以上を踏まえ、センサから得られた信号を処理することにより同定されるAE震源の密度と弾性波速度の構成から、床版内部での損傷は図9のように整理され、センサ開発により床版から生じるAEをある一定期間継続的に計測することが可能となれば、対象とする部位の劣化程度の判定、さらには将来の劣化の進行速度の予測が可能となると期待さ

れる。

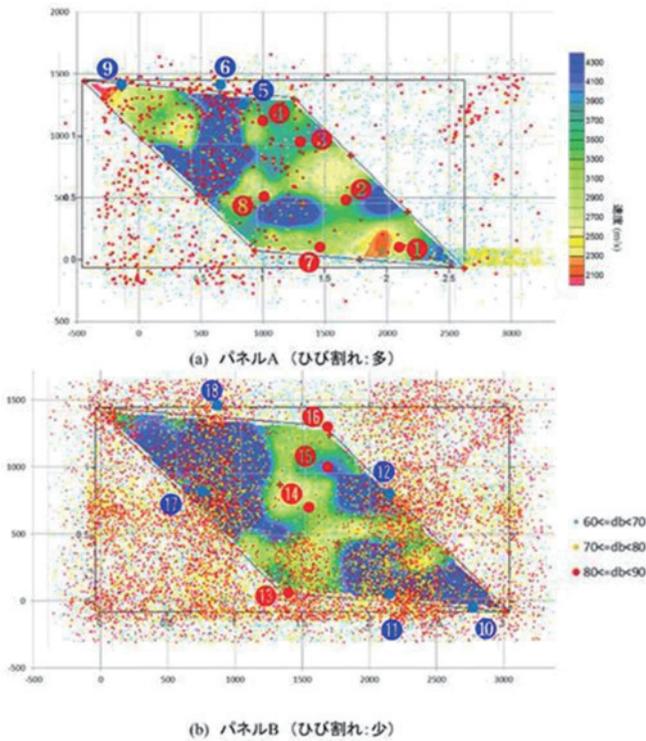


図7 AE震源位置標定とAEトモグラフィによる速度分布
Fig. 7. Results of AE source analysis and velocity structure analysis (AE Tomography).

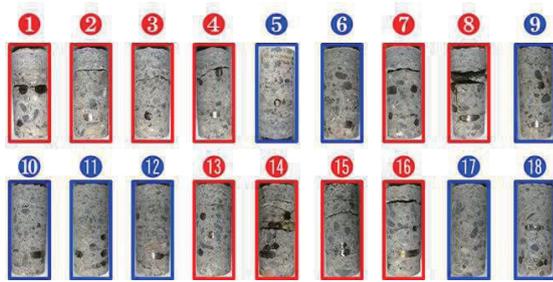


図8 採取されたコアサンプル
Fig. 8. Extracted concrete cores.

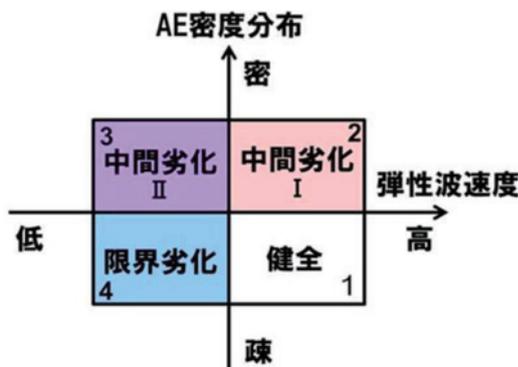


図9 弾性波速度とAE震源の密度に基づく損傷評価
Fig. 9. Damage evaluation based on elastic wave velocity and AE source density.

5. まとめ

高度経済成長期に建設された社会インフラ構造物の老朽化という社会課題を背景に、これらの維持管理を「事後保全型」から「予防保全型」へ転換していく取り組みが必要となってきた。こうした取り組みに活用するための技術開発の一環として、主に橋梁のヘルスマonitoring向けに、広帯域な振動センサ（スーパーアコースティックセンサ）デバイス、自立電源を搭載した小型無線センサ端末、橋梁の健全性定量評価手法、を統合した橋梁センシングシステムを開発した。開発したシステムは、昨年度より高速道路の橋梁を対象に実証実験を開始している。

本稿の技術は、非破壊で自律的に橋梁内部の健全性を把握することが可能なものであり、省力化及び高度化による、維持管理の効率向上への貢献が期待される。また、実証実験を行なっている道路橋梁に限らず、広く社会インフラ構造物、産業機器等への応用展開も同時に期待されるものである。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究業務の結果得られたものである。

文 献

- (1) 国土交通省: "V 既存ストックの長寿化", 平成 18 年度道路行政の達成度報告書 平成 19 年度道路行政の業績計画書, <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-perform/h19/11.pdf>, (2007, 参照日 2018 年 8 月 15 日)
- (2) P. Khang-Quang, N. Minh-Dung, N. Binh-Khiem, P. Hoang-Phuong, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Multi-axis Force Sensor with Dynamic Range up to Ultrasonic", Proceeding of 27th IEEE MEMS Conference (MEMS2014), pp.769-772, (2014).
- (3) 大森隆広, 碓井隆, 渡部一雄: 「アコースティック・エミッション計測を適用した橋梁モニタリングシステムの開発」, 東芝レビュー, Vol.70, No.9, pp.20-23 (2015).
- (4) 上田祐樹, 碓井隆, 大森隆広, 高峯英文, 渡部一雄, 塩谷智基: 「イベントドリブン型無線 AE センサシステムによる橋梁モニタリングの実証」, 日本機械学会 IIP2018 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会 講演論文集, 1B05, (2018)
- (5) 塩谷智基, 西田孝弘, 麻植久史, 渡部一雄, 福田雅人: 「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」, セメント・コンクリート, No.849, pp.20-26 (2017).
- (6) 渡部一雄, 高峯英文, 宮田弘和, 西田孝弘, 塩谷智基: 「高速道路床版の交通荷重 AE 分析とコア採取による整合性検証」, 土木学会第 71 回年次学術講演会, (2016).
- (7) 高峯英文, 渡部一雄, 塩谷智基: 「アコースティック・エミッションモニタリングによる橋梁内部のひび割れ検出技術」, 東芝レビュー, Vol. 72, No.2, pp.49-52, (2017)
- (8) K. Watabe, H. Takamine, T. Nishida and T. Shiotani: "Novel nondestructive technique of internal deterioration in concrete deck with elastic wave approaches", Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2017), paper93, (2017)
- (9) 大津政康: 「アコースティック・エミッションの特性と理論 第 2 版-構造物の診断と破壊現象解析-」, 森北出版株式会社, pp.51-61, (2005).
- (10) Y. Kobayashi, T. Shiotani: "Computerized AE Tomography, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures", State-of-the-Art Report of the RILEM TC 239-MCM, Springer, pp.47-68, (2016).

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

小林 健* Zymelka Daniel 山下 崇博 (産業技術総合研究所/NMEMS 技術研究機構)
富樫 和義 (大日本印刷(株)/NMEMS 技術研究機構)
大東 良一 (大日本印刷(株))

Development of Bridge Monitoring System based on Flexible 2D Strain Pattern Sensor Sheet
Takeshi Kobayashi*, Daniel Zymelka, Takahiro Yamashita (National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology (AIST) / NMEMS Technology Research Organization)
Kazuyoshi Togashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)
Ryoichi Ohigashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd.)

We have developed 2D strain pattern sensor sheet consisting of a strain sensor array sheet by graphite screen printing, a weatherproof protective layer, and an adhesive sheet for easy construction. We have attached the developed sensor sheet to the actual bridge where the stop hole treatment is performed. It has been demonstrated that the strain sensor near the crack and the stop hole shows a particularly large value.

キーワード: スクリーン印刷, ひずみセンサ, 無線センサネットワーク, 構造ヘルスマニタリング
(Screen printing, Strain sensor, Wireless sensor network, Structural health monitoring)

1. 緒言

近年の車両の大型化, 過積載車両の走行に伴い, 鋼橋において疲労亀裂の発生が見られるようになってきている。疲労亀裂の応急処置としては円孔を空けて亀裂の進展を止めるストップホールが代表的であるが, そこから亀裂が進展する事例が報告されている⁽¹⁾。一度応急処置してから, 次の点検までには数年以上かかるため, その間にストップホールから亀裂が進展すると, 重大な事故につながる恐れがある。

亀裂の進展を検出するには, ひずみセンサアレイでひずみ分布の異常をモニタリングする方法が有効である。Glisicらは市販の有線ひずみゲージを並べて貼り付けた鋼材に引張試験を行い, 亀裂の進展に伴い 10000 $\mu\epsilon$ 以上にひずみが増大したエリアが拡大することを示した⁽²⁾。実際の鋼橋に, 多数の有線ひずみゲージを貼り付けるのは施工に手間がかかり, 配線の取り回しも煩雑になる。また, 屋外環境にさらされるため日照や雨水の影響が懸念される。

このような背景から著者らは柔軟性のある基板上に複数のひずみセンサを配置したひずみセンサアレイシート, データ処理と通信を行う無線モジュール, 日照や雨水に対する耐候性保護層, 施工を容易にする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している。本報では印刷技術によるひずみセンサアレイシートの開発を中心に, 耐候性保護層と接着シートとの一体化プロセス, さらに

実際の橋梁モニタリングへの適用について紹介する。

2. 橋梁モニタリングシステム全体像

図1にひずみセンサアレイシートによる亀裂進展モニタリングの概要を示す。図1(a)のように亀裂発生箇所にはストップホールを空けた後, シートを貼り付ける。本システムでは車両通過時の動ひずみピーク値の分布をモニタリングする。図1(a)の例ではシート貼り付け時は亀裂に重なっているひずみセンサのみが大きな値を示す。一定期間を経て図1(b)のように亀裂が進展すると, 亀裂周囲のひずみ値も増大する。このように動ひずみ分布をモニタリングすることで, ストップホールからの亀裂進展を捉えることができる。

図2に実橋梁にシステムを導入した様子を示す。ひずみセンサアレイシートと無線モジュールを測定箇所には貼り付ける。電源用太陽電池はセンサアレイシート付近で日照がある箇所に設置する。受信機, データ処理用小型PCを, 無線モジュールから通信できる範囲内に設置する。無線モジュールから送信されたデータはWiFiルータを通じてクラウドにアップロードされる。

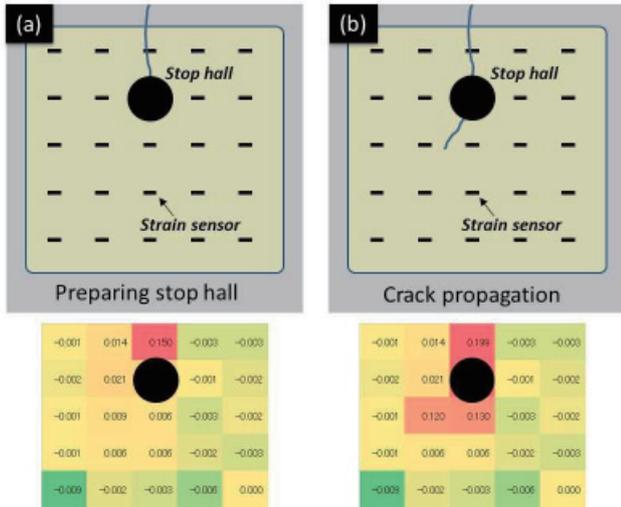


図1 ストップホール周辺へのセンサシート貼り付け
Fig. 1. Sensor sheet attached around stop hall.

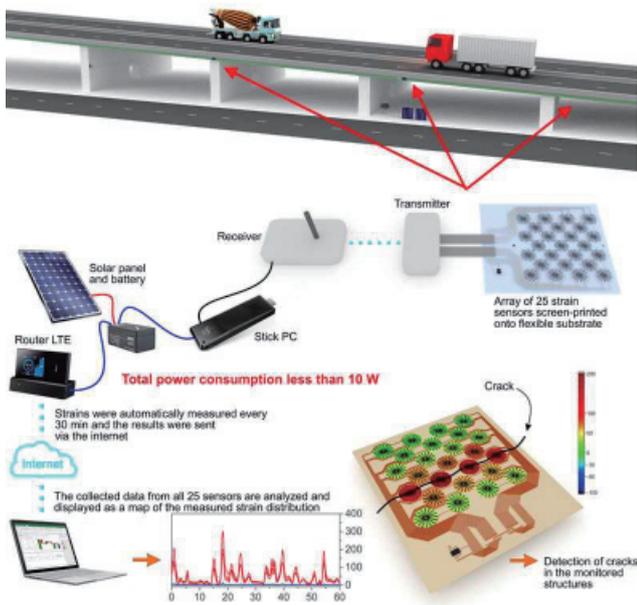


図2 橋梁センシングシステム全体像
Fig. 2. Developed bridge monitoring system.

3. ひずみセンサレイシートの開発

〈3・1〉実橋梁のひずみレベル評価

ひずみセンサレイシートの開発にあたって、まず初めに実橋梁の動ひずみレベルを調べた。図 3(a)のように鋼橋の主桁に市販のひずみゲージを並べて貼り付けた。図 3(b)のひずみ波形より、車両通過時の動ひずみのピーク値は $10 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度であることがわかった。図 3 の測定箇所は溶接部付近であり、溶接点近傍とその周囲のひずみの差は $5 \sim 10 \times 10^{-6}$ 程度であった。図 1 に示したような亀裂進展時のひずみの差は 1000×10^{-6} 以上になることが予想されるため、正常時のひずみ分布をモニタリングしつつ、亀裂進展を検知するには、ひずみセンサの感度が 10×10^{-6} あれば充分であると考えられる。

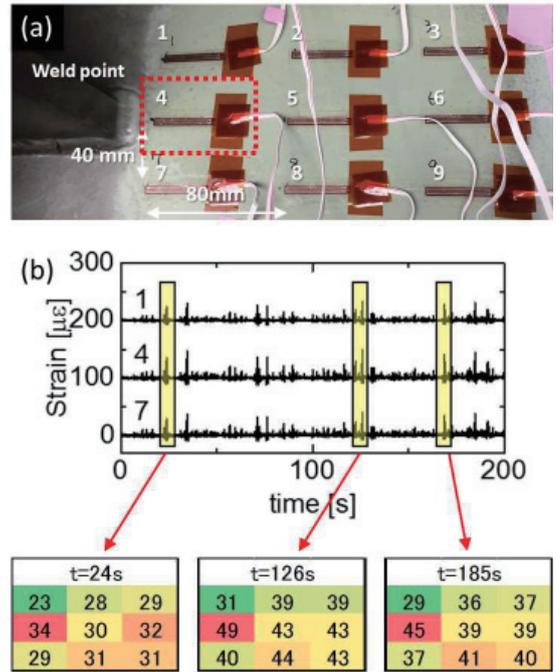


図3 (a)市販ひずみゲージによるひずみレベル評価, (b)ひずみ測定結果

Fig. 3. (a) Measurement of strain by using commercially available strain gauges, (b) Measured strain.

〈3・2〉印刷ひずみセンサレイシートの作製

図 3(a)のように市販の金属ひずみゲージを並べて貼り付ける作業は、実際の現場では困難である。金属ひずみゲージをシート上に並べたものを作製可能ではあるが、消費電力とコストの観点から、実際の橋梁で適用するには現実的でない。そこで我々は印刷技術によるひずみセンサレイシートを開発した。

図 4(a)はひずみセンサレイシートの作製プロセスである。ひずみを検知する抵抗体としてグラファイトを選定した。市販のグラファイトペースト (旭ケミカル, FTU-16R) をスクリーン印刷により、ポリエチレンナフタレート (PEN) を基材とする銅貼フレキシブル回路基板上に印刷した。今回作製した印刷ひずみセンサレイシートのサイズは 120mm 角であるが (図 4(b)), スクリーン版と基材に大判のものを用いることでより大きなサイズのシートも作製できることを確認している。金属ひずみゲージの抵抗は 120Ω であるのに対して、今回のグラファイト印刷ひずみセンサの抵抗は $90k\Omega$ であり、2V 電圧印加時のひずみセンサ 25 個分の消費電力は金属ひずみゲージで $833mW$ 、印刷ひずみセンサで $1.1mW$ と大幅に低減可能である。

続いて印刷ひずみセンサの基本特性を評価した。図 5 は印加ひずみに対する抵抗変化率である。抵抗変化率は実橋梁で測定し得るレベルのひずみ ($-200 \sim 1000 \times 10^{-6}$) に比例していることが確認され、またこの結果からゲージ率は 3.2 と金属ひずみゲージの 2.0 に比べてやや大きな値を示すことが明らかになった。

市販の金属ひずみゲージは抵抗変化の温度依存性がほとんど 0 であるが、今回のグラファイト印刷ひずみセンサは温度依存性が極めて大きく、昼夜だけでも 10℃以上の温度差がある屋外環境の使用には適さない。そこで温度依存性を低減するために、印刷ひずみセンサの形状として図 6 に示したような構造を考案した。この構造ではひずみセンサが 4 つの抵抗に分割されフルブリッジ回路として用いられる。このフルブリッジ構造によりひずみ計測値の温度依存性は $340 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ から $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ へと大幅に低減され、屋外環境での使用に問題ないレベルへと改善された。

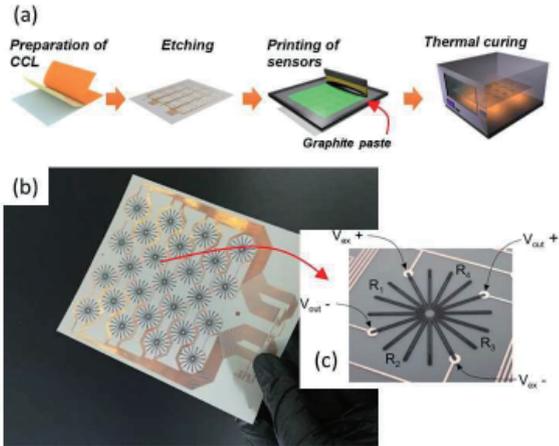


図 4 (a)スクリーン印刷によるひずみセンサアレイシート作製プロセス, (b)作製した印刷ひずみセンサシート
Fig. 4. (a) Fabrication process of strain sensor array sheet by screen printing, (b) Fabricated strain sensor array sheet.

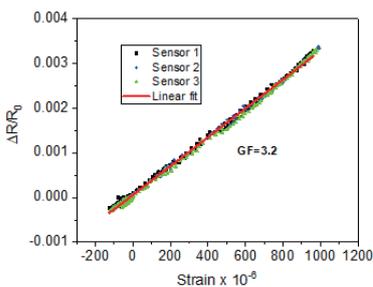


図 5 印加ひずみに対する抵抗変化率
Fig. 5. Resistance change ratio as a function of strain.

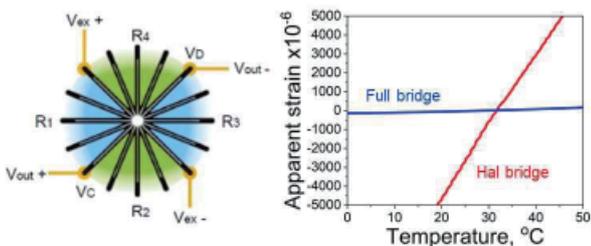


図 6 フルブリッジ構造による温度依存性の改善
Fig. 6. Improvement of temperature dependence by full-bridge structure.

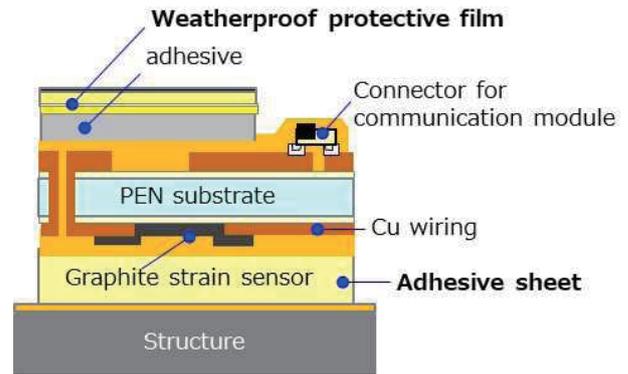


図 7 印刷ひずみセンサアレイシートの施工断面図
Fig. 7. Cross section of printed strain sensor array sheet attached on structure.

〈3・3〉 耐候性保護層および簡易接着手法の開発

長期間ひずみ分布をモニタリングするには、ひずみセンサアレイシートに長期耐久性が求められる。耐久性に影響を及ぼす環境因子としては、昼夜～季節による温度ストレス、太陽光からの紫外線、雨水からの水分、融雪剤や潮風からの塩分、排ガスからの腐食性物質などが考えられる。

図 7 はひずみセンサアレイシートを構造物に貼り付けた断面図である。太陽光や雨水への対策として、最外層に UV カット性と水蒸気バリア性を有する耐候性保護フィルムを設けている。前述のようにフレキシブル回路基板にはポリエチレンナフタレート (PEN) を適用しているが、これは通常用いられるポリイミドに比べて透明性がありコストが低いためである。

ひずみセンサアレイシートの接着には、鋼材やコンクリートに対する接着性と耐久性を有する粘接着フィルムを用いることで、構造物に対して貼るだけの簡単施工を実現している。このフィルムは、紫外線照射により硬化反応が開始し、常温環境で数時間粘着性が維持できる特徴を持つため、その間に余裕を持って貼り付け作業を行なうことができる。実際に使用する場合は、耐候性保護フィルム、印刷ひずみセンサアレイシート、粘接着フィルムが一体化した状態 (これをフレキシブル面パターンセンサと呼ぶ) で現場に持ち込むことで、紫外線を照射して貼るだけという簡易施工が可能となる。

4. 実橋梁での評価

開発したフレキシブル面パターンセンサを実際の橋梁に施工し、ひずみ分布を評価した。高速道路橋にフレキシブル面パターンセンサを施工し、図 2 に示したように受信機や PC などのシステムを導入して測定を行った。今回測定した箇所は図 8(a)に示した鋼橋 I 桁の側面である。図 8(b)は 2016 年 3 月 10 日に施工した後、2016 年 8 月 25 日、2017 年 3 月 9 日、2018 年 3 月 29 日に取得したひずみ波形である。施工からおおよそ 2 年が経過しているが、いずれの場合

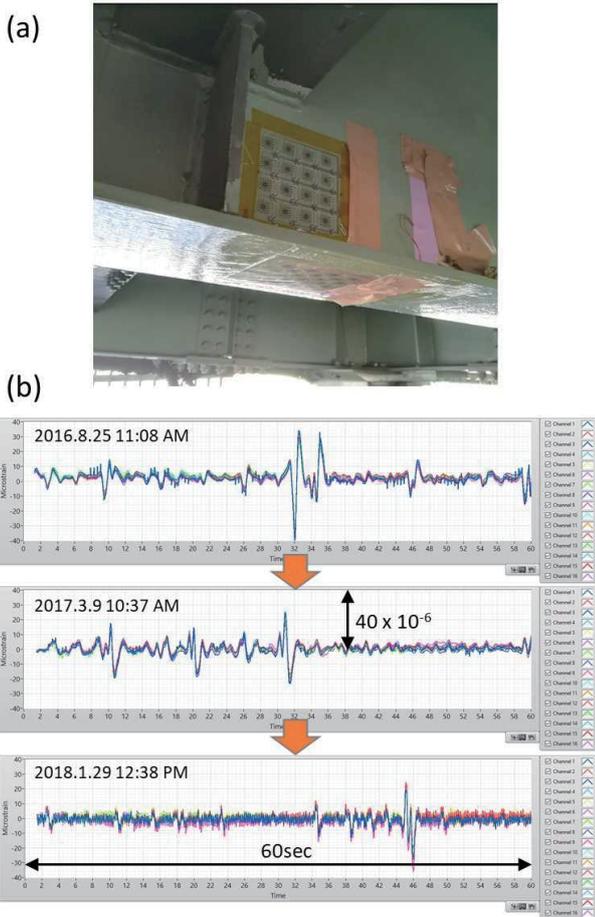


図 8 鋼橋 I 桁のひずみ測定
Fig. 8. Measurement of I shaped steel girder.

も大型車両に由来すると考えられる最大のひずみレベルは 30×10^{-6} 程度であった。当該測定箇所では 2 年間で約 400 万台の大型車両が通過しており、今回開発したフレキシブル面パターンセンサが、多数の車両通過後も安定して計測を行えることが確認された。

実橋梁での評価について、図 1 に示したストップホールの実物に対しても実際にフレキシブル面パターンセンサを貼り付けての評価も行った。図 9(a) は実橋梁でストップホール処置を行った箇所に、フレキシブル面パターンセンサを貼り付けた様子である。図 9(b) のように、亀裂にオーバーラップした部分のひずみが最大値を示していた。しかしながら亀裂の開閉量が予想以上に大きかったため、フレキシブル面パターンセンサに剥がれが生じており正確な計測とはなっていなかった。ストップホールからの亀裂進展モニタリング用には、この点を考慮した設計をひずみセンサアレイシートに対して行う必要があることがわかった。

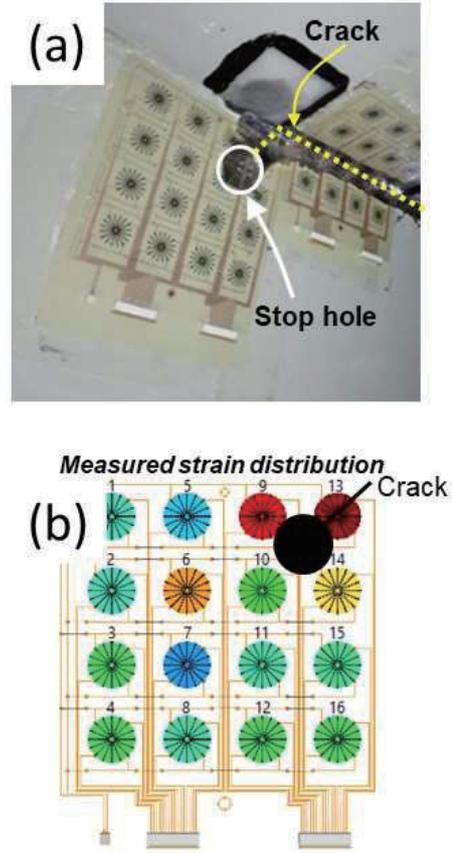


図 9 鋼橋ストップホール箇所のひずみ分布測定
Fig. 9. Measurement of strain distribution around stop hole of steel bridge.

5. 結言

本研究ではグラフィートのスクリーン印刷によるひずみセンサアレイシート、これを保護する耐候性保護層と簡易施工のための接着シートからなるフレキシブル面パターンセンサを開発した。開発したセンサを実橋梁のストップホール処置を行った箇所に貼り付けた結果、クラックやストップホール付近のひずみセンサが特に大きな値を示すことが実証できた。ストップホールからの亀裂進展もひずみが大きな値を示すことで検出できるものと期待される。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務の結果得られたものである。

文 献

- (1) 三木千壽・町田文孝・伊藤博生:「ガセット継手部の疲労き裂のストップホールによる補修および応力改善対策」, 土木学会論文集 A1, Vol.67, pp.283-293 (2011)
- (2) Y. Yao and B. Glisic: "Detection of steel fatigue cracks with strain sensing sheets based on large area electronics Sensors", Sensors, Vol.15, pp.8088-8108 (2015)

道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

矢尾 博信* 鈴木 健 鈴木 信也 北川 慎治 鮫島 友紀 柿沼 実
松井 伸二 (富士電機(株)/NMEMS 技術研究機構)
藤田 友一郎 (中日本高速道路(株))

Development of Road Equipment Monitoring System with Tilt-multi-sensor
Hironobu Yao*, Takeshi Suzuki, Nobuya Suzuki, Shinji Kitagawa, Yuki Sameshima, Minoru Kakinuma,
Shinji Matui, (Fuji Electric Co., Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)
Yuichirou Fujita, (Central Nippon Expressway Company Limited)

This paper addresses development of the MEMS sensor device, the tilt-multi-sensor terminal and the sensor system for monitoring of tilt and vibration of road information boards. In order to grasp an information board behavior, we have conducted a preceding field test and behavior analysis of the road information board.

キーワード: 道路情報板, MEMS, 加速度, 振動, フーリエ変換, 固有振動数
(Road information board, MEMS, Acceleration, Vibration, Fourier transform, Eigenfrequency)

1. はじめに

高速道路には、安全・円滑な道路交通の確保を目的に、道路情報板や照明設備など様々な道路付帯設備が設置されている。従来、これらの付帯設備は目視を主流とした点検が道路管理者により実施されてきた。目視点検は、経験等により個人差があり評価を定量化できないという課題がある。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。⁽¹⁾

センサによる常時モニタリングを行うことで、状態変化を定量的に把握することができ点検の優先順位付けや点検間隔の適正化などの点検の高度化が図られる。また、地震、台風、集中豪雨などの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。

本稿では道路付帯構造物のうち情報板の傾斜と振動の常時モニタリングを目標に MEMS センサデバイス、傾斜マルチセンサ端末およびセンサシステムの開発を行ったので紹介する。また、情報板挙動を把握するため、先行フィールド試験と情報板の挙動解析を行ったので合わせて紹介する。

2. MEMS センサデバイスの開発

〈2・1〉開発目標 本研究開発では、道路付帯構造物の傾斜(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、道路付帯構造物の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。そのため、高精度に傾斜(2軸,出力安定性:±0.05deg)と振動(3軸,分解能:0.1gal)を同時に測定でき、設置性がよい小型のセンサ端末を構成可能な、MEMS 型センサデバイス及び信号処理回路の開発を行った。

〈2・2〉開発結果 図1に MEMS センサデバイスの構造図を示す。シリコンウエハに固定電極、可動電極とばねを形成し、上下をガラスで挟む構造とすることで、一つのデバイスにより3軸の加速度測定が可能な構造とした。また、ゼロ点の安定性を向上させるためにフロントエンド回路も含めた MEMS センサユニット構造とした。ユニットの概略構造と外観写真をそれぞれ図2, 図3に示す。

開発した MEMS センサユニットの出力安定性について評価を行った。評価としては温度試験(温度範囲:-30~60℃)による安定性評価を実施した。ここでは-30℃~60℃の温度範囲を3サイクル変化させ、1サイクル目の出力に対する2サイクル目以降の同じ温度での出力変動量で評価を実施した。評価結果を図4に示す。目標の±0.05deg に対して±0.035degを確認した。

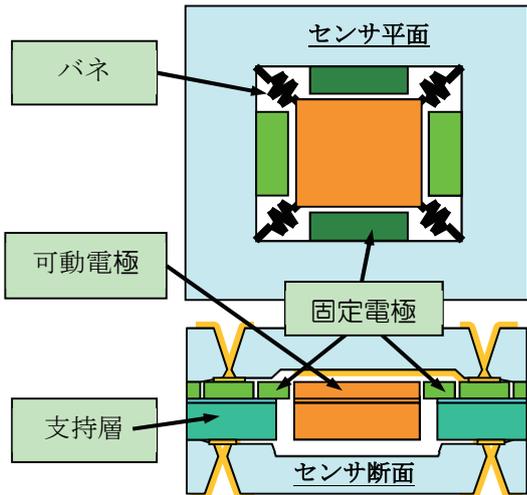


図1 センサデバイス構造図
Fig. 1. Structure drawing of sensor device.

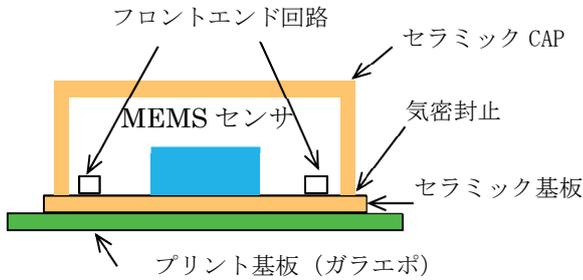


図2 MEMS センサユニット構造図
Fig. 2. Structure drawing of sensor unit.

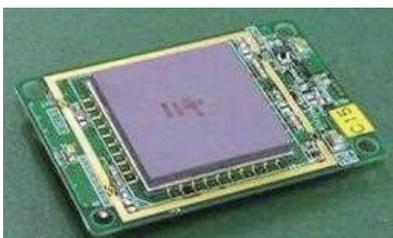


図3 MEMS センサユニット外観写真
Fig.3. Photo of sensor unit.

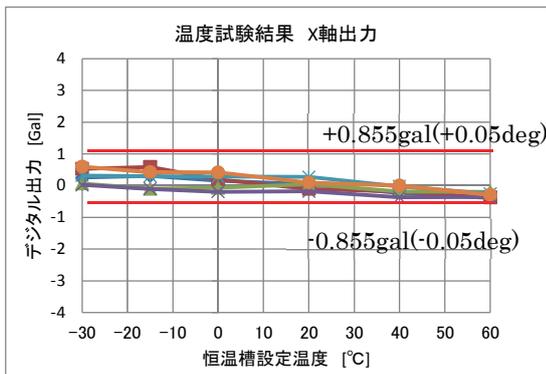


図4 ゼロ点安定性 Fig. 4. Zero stability.

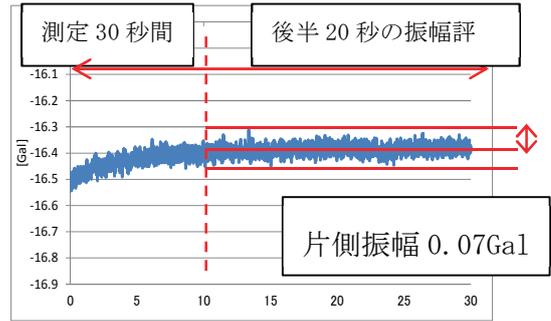


図5 分解能 (ノイズ) 評価結果
Fig. 5. Resolution (noise) evaluation result.

振動測定の分解能 (ノイズ) については、本MEMS センサユニットを用いた傾斜マルチセンサ端末にて評価を実施した。評価は比較的常時微動の小さな環境である免振建屋の地下 (免振層) にて実施した。本評価環境の常時微動は深夜で水平方向 : 0.03~0.04gal, 垂直方向 : 0.06~0.07gal である。図5に評価時の波形例を示す。図5はX軸の例であるが、3軸とも目標の $\pm 0.1\text{gal}$ の達成を確認した。

3. 傾斜マルチセンサ端末の開発

〈3・1〉開発目標 傾斜マルチセンサ端末の開発は下記を目標とした。上記2で開発したMEMS センサデバイスを搭載し、傾斜 (2軸) 振動 (3軸) の測定に加えて温度測定機能も有する複合センサ端末とする。傾斜マルチセンサ端末の大きさは片手で持ち運び可能な $7\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm}$ 以下を目標とした。通信は無線で、通信免許が不要な周波数帯と出力強度 (920MHz, 実使用環境下で 30m 以上) とする。電源は太陽電池を装備するものとし、少なくとも1時間に1回の測定 (間欠測定) とデータの送信に必要な電力をまかなう構成とする。上位システムでの解析対応のため、端末間の時刻同期と振動等大容量データを送信可能とする高速通信 (1Mbps) を目標とした。地震等の突発事象の測定に対応するため、低消費電力で動作する監視モードを設ける。表1に主な開発目標仕様を記載する。

表1 傾斜マルチセンサ端末の主な開発目標仕様
Table 1. Major development target specifications of tilt-multi-sensor terminals.

	傾斜測定	振動測定	温度
測定範囲	$\pm 45[\text{deg}]$	$\pm 2,000[\text{gal}]$	$-40 \sim 80[^\circ\text{C}]$
周波数範囲	DC~2[Hz]	0.1~50[Hz]	(DC~2[Hz])
安定性	0.05[deg]	0.86[gal]	
分解能	0.006[deg]	0.1[gal]	0.1[$^\circ\text{C}$]
無線通信	送信速度: 1Mbps, 通信距離: 30[m]以上, 時刻同期精度: $\pm 1[\text{msec}]$		
使用温度範囲	$-30 \sim 60[^\circ\text{C}]$		
電源	太陽電池 面積: $40 \times 60[\text{mm}]$ 発電量: 600[mW]		
大きさ	$70 \times 100 \times 50[\text{mm}]$		

〈3・2〉開発結果 開発した傾斜マルチセンサ端末のインナーユニットの写真を図6に示す。前記MEMSセンサユニットを含むアナログ回路、無線通信モジュールを含むデジタル回路、太陽電池および電力蓄電用のキャパシタが一体的なユニットとなっている。このインナーユニットを共通基盤Grで開発したセラミックパッケージに収納し透光性セラミックで封止する構造とした。セラミックパッケージに収納後の外観写真を図7に示す。表2に主な目標と評価結果を示す。概ね目標達成を確認した。

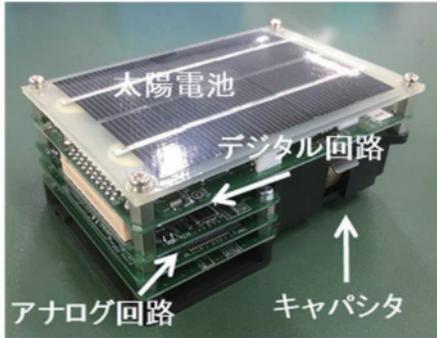


図6 インナーユニットの写真
Fig. 6. Photo of inner unit.



図7 傾斜マルチセンサ端末の外観写真
Fig. 7. Photo of tilt-multi-sensor terminal.

表2 傾斜マルチセンサ端末の目標仕様と評価結果
Table 2. Target specifications and evaluation results of tilt-multi-sensor terminals.

No.	項目	目標仕様	結果
1	マルチ計測動作	傾斜、振動、温度のマルチ計測	傾斜、振動、温度のマルチ計測を確認 傾斜角±45degを確認
2	無線通信	通信速度:1Mbps 通信距離:30m以上	1Mbps、50mの通信を確認、3分間計測データの伝送を確認 (集約器との組合せ評価)
3	時刻同期	時刻同期精度:±1[ms]	時刻差0.07ms以下を確認 (集約器との組合せ評価)
4	間欠計測動作	3分間/1時間の間欠測定 センサ8台接続での間欠計測	3分間/1時間の間欠測定を確認 センサ3台での間欠計測を確認
5	自立電源動作	太陽電池による駆動 *太陽電池:600mW	室内ライトによる動作確認 太陽電池:612mW以上
6	監視モード	突発事象による計測 検出の閾値: 可変:-490~490gal(暫定) 計測:1~3分間(暫定)	突発事象による計測を確認 検出の閾値:50gal、計測 3分 間欠計測中突発、突発計測中の 間欠計測を確認

4. センサネットワークシステムの構成

図8に傾斜マルチセンサシステムの構成を示す。情報板の基部、頂部、内部の3か所にセンサ端末を設置し、センサ端末と集約器間を920MHzの無線通信で、①集約器から各センサ端末へ時刻データを送信し、各センサ端末間の時刻ずれを±1msec以内にする時刻同期と②各センサ端末から集約器へ1時間に1回センシングデータ送信を行っている。一旦集約器へ集められたデータはコンセントレータへ送られ、携帯電話回線を用いてRIMSサーバーへ収集される。また、詳細は省略するが、比較のために傾斜マルチセンサ端末に隣接して既存の加速度センサを設置してデータ比較を行った。

本システムを用いて取得したデータ例を図9に示す。この図に示したように、開発した傾斜マルチセンサ端末と既存センサでは同等の信号が得られていることがわかる。また、開発した傾斜マルチセンサ端末の加速度分解能は0.1gal(約2mgal/√Hz)であるのに対して、情報板の振動は常時10gal程度の強度があるので、十分なSNが確保できている。

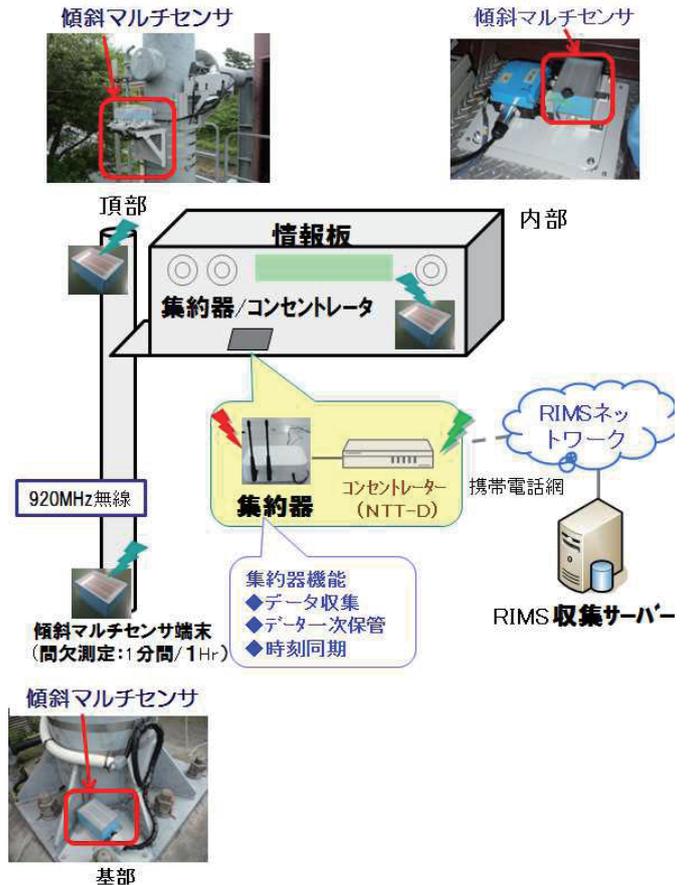


図8 傾斜マルチセンサシステム構成
Fig. 8. Tilt-multi-sensor system configuration.

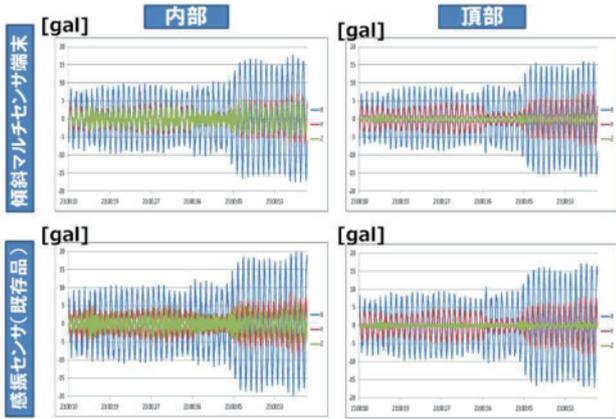


図9 傾斜マルチセンサと既存センサの加速度比較
Fig. 9. Acceleration Comparison of Tilt-multi-sensor and Existing Sensor.

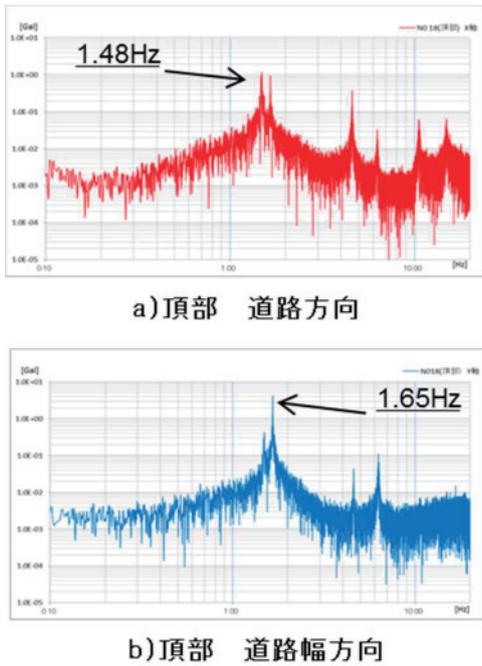


図10 情報板頂部に設置した加速度計のフーリエ変換結果
Fig. 10. Result of Fourier transform of accelerometer installed at top of an information board.

5. 先行フィールド試験による情報板の挙動計測

傾斜マルチセンサ端末による計測に先立ち、情報板の挙動を理解するために、既存センサによる先行試験を行った。計測場所は東名高速道路下り線吾妻山トンネル入り口手前の情報板で計測点は前出と同様に、基部、頂部、内部に既存の加速度センサを設置し、24時間の連続計測を行った。図10は振動をフーリエ変換した結果の代表値を示す。道路方向と道路幅方向で若干の相違が見られるが、1.48Hz, 1.65Hz, 4.63Hz, 6.26Hzに固有振動数のピークが検出された。

図11に期間：2015/12/16～2017/2/23（435日間）で得られた振動から1時間毎の卓越周波数（1.48Hz, 1.65Hz）を

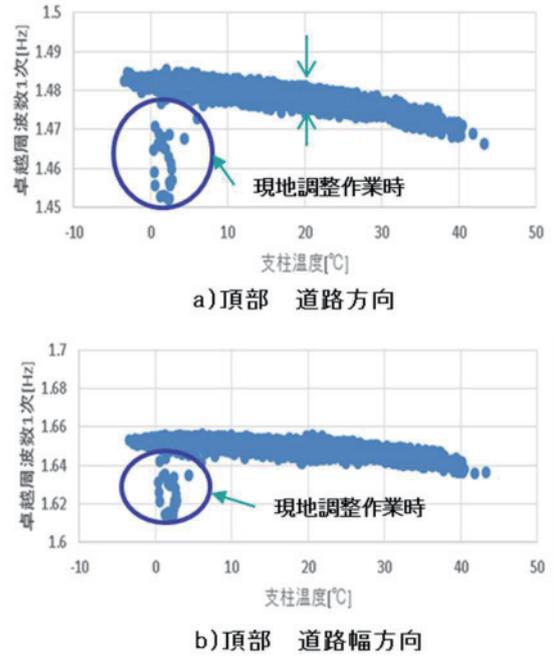


図11 卓越周波数と支柱温度の関係
Fig. 11. Relationship between dominant frequency and strut temperature.

求め、横軸に支柱温度、縦軸にそれぞれの卓越周波数をプロットした結果を示す。図中の楕円で示した領域の周波数低下は現地作業時に情報板へ人が上ったことによる重量増加によって発生したものである。このように卓越周波数は質量増加やバネ定数の変化に敏感な定量値であり、情報板の状態を示す定量値に適していると考えられる。

共振周波数： f_0 とバネ定数： k_0 ,質量： m_0 には、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m_0}} \dots \dots \dots (1)$$

なる関係がある。周波数の逆数を τ と定義して、バネ定数が変化しない場合、(1)式を変換すると、以下の式を導くことができる。

$$\frac{\delta\tau}{\tau_0} = \frac{\delta m}{2m_0} \dots \dots \dots (2)$$

図11で見られた重量増加によって発生した周波数低下実測値から、情報板の質量を1tonとして(2)式で質量増加： δm を算出するとおよそ50kgが得られた。これは、作業中に増加した人の質量にほぼ等しい。

また支柱温度の上昇によって0.02～0.018%/°Cの周波数低下が観測された。質量一定の条件で(1)式を変換すると、以下の式が導かれる。

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{\delta k}{2k_0} \dots\dots\dots (3)$$

鋼のヤング率は温度上昇に伴い 0.03%/℃で低下するので、(3)式から導かれる周波数の温度変化は 0.015%/℃程度であり、実測値とほぼ一致している。

図 12 に 1 時間毎正時の振動データをフーリエ変換する際に、1 時間すべてのデータを使ってフーリエ変換した場合から順に 5 分、3 分、1 分と徐々に使用データ量を減らしてフーリエ変換したときの卓越周波数の標準偏差を示す。この値は図 11(a)の矢印で示した卓越周波数の幅の 1/6 程度に相当する。

傾斜マルチセンサでは低消費電力化のために、1 時間毎に 1~3 分の計測を行う設計とした。したがって、卓越周波数の分解能が 3~5.5mHz にて情報板の変状が観測可能かどうかの確認が必要となる。

6. シミュレーションによる情報板の挙動解析

先行フィールド試験は東名高速道路で実際に使用されている正常な情報板にセンサを設置して計測を行っている。この使用中の情報板に何らかの瑕疵・劣化を加えてどの程度計測値が変化するか実験することはできないので、シミュレーション上で瑕疵を与えて物理量の変化を計算した。

図 13 に示すような 3 次元モデルを構築し、動解析を行い、低周波側から 4 つの固有振動状態をシミュレートした結果を図 14 に示す。それぞれの固有振動数（実測値）は、1.48(1.48) Hz, 1.588(1.65) Hz, 4.529(4.63)Hz, 6.663(6.26) Hz であって、実測値と概略一致する値が得られた。この計算値を正常値と見なして、瑕疵として基部設置ボルトの欠損による周波数の変化を計算した結果、図 13 に示す 8 箇所の基部設置ボルトのうち、1 本を緩めると（完全なフリー状態）、1 次モードで 1~3% (0.02~0.06Hz) 周波数が低下することがわかった。

前項では 1 分の実測で標準偏差が 5.5mHz であることを示したが、シミュレーションした変状の周波数低下は標準偏差の約 4~11 倍であるので 1 本のボルトが緩む変状を問題なく計測できる。

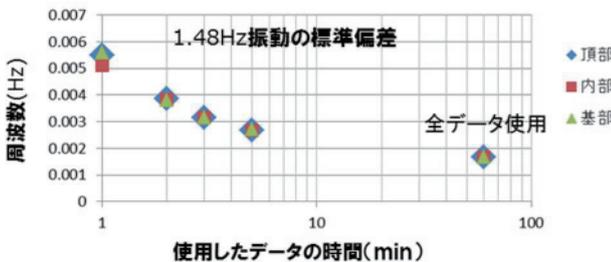
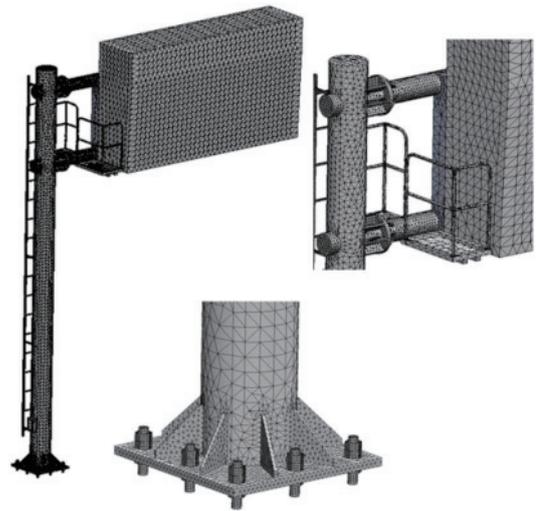


図 12 1 次振動 (1.48Hz) での卓越周波数の標準偏差
Fig. 12. Standard deviation of first order frequency (1.48 Hz).



自由度 : 917,844 節点数 : 306,436 要素数 : 165,008
図 13 情報板のシミュレーションモデル

Fig.13. A simulation model of the information board.

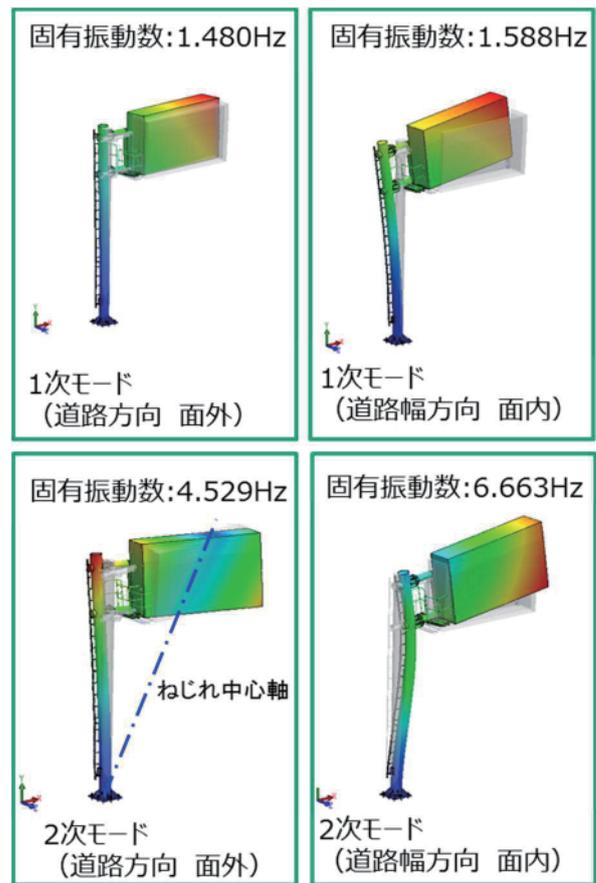


図 14 計算された 4 つの固有振動状態
Fig.14. States of four calculated natural vibrations.

7. まとめ

・本プロジェクトの前半の約3年間でMEMSセンサユニットおよび傾斜マルチセンサ端末のプロトタイプの開発と計測システムの開発を略目標通りに進めることができた。

・先行フィールド試験より下記が確認できた。

①現地調整作業に伴い、40mHz程度の1次モード周波数低下が観測された。この値は約50kgの重量増加と概算できるので人の体重増を計測したと考えられる。

②1分データ長にて情報板の卓越周波数を解析した場合の1次モードの標準偏差は5.5mHzであった。一方基部設置のボルトが1本緩んだ時の1次モードの固有振動数低下をシミュレーションで求めたところ、20~60mHzであった。これは実測の標準偏差より十分大きく、変状を観測可能であると考えられる。

H29年度からは実証実験を開始し、継続中である。センサ端末およびセンサシステムについてすでにいくつかの課題を抽出し、改良検討を実施している。さらに、施設管理者に向けた計測データ解析や表示方法についても研究を進めている。今後は実用化に向け、課題の整理と対策の検討を行う予定ある。

8. 謝辞

本開発は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インフラ状態モニタリング用センサシステム開発にてNMEMS技術開発機構が受託した「道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発」のサブテーマとして実施している。本研究開発の過程でリーダーの下山先生をはじめ多くのプロジェクトメンバーの方から貴重なアドバイスをいただいた。実証実験では実際に道路付帯設備を管理されている中日本高速道路(株)御殿場保全サービスセンターおよび関係者の方々から多大な協力をいただいた、この場をかりてお礼を申し上げる。

文 献

-
- (1) 道路インフラモニタリングシステム (RIMS) の研究開発,2017年 MEMS センシング&ネットワーク展講演資料

法面変位センシングシステムの開発

大島 正資* 網嶋 武 鈴木 信弘 (三菱電機(株)/NMEMS 技術研究機構)
寺田 翼 (三菱電機(株))

Development of Slope Displacement Sensing System

Tadashi Oshima*, Takeshi Amishima, Nobuhiro Suzuki
(MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION / NMEMS Technology Research Organization)
Tsubasa Terada (MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION)

Slope displacement sensing system using the phase difference of 920MHz band radio waves is developed. The displacement of slope can be measured at the accuracy of the order of millimeters by this system. In this paper, the experimental results in the real slope is introduced.

キーワード: 変位計測, 測位, 法面, 地すべり, 位相差, センサーネットワーク
(Displacement measurement, Localization, Slope, Landslide, Phase difference, Sensor network)

1. 概要

自然斜面・法面(のりめん)において, 集中豪雨・積雪等を原因とした地すべりによる災害は国内で年間千件程度が発生しており⁽¹⁾, 地すべり危険箇所は 1 万箇所程度がある⁽²⁾。地すべりによる斜面崩壊の前兆としてミリメートルオーダーの変位が発生することが知られており, 道路法面の管理基準値の目安として用いられている⁽³⁾。土質や工事方法等に応じて管理基準値は現場毎に設定されているが, その計測には 1 時間あたり数 mm 以上の変位量の計測が必要である⁽⁴⁾。

このミリメートルオーダーの変位を計測する技術として, GPS (Global Positioning System), 光波測量, 伸縮計を用いた方法がある。しかし, GPS では衛星の電波が届かない崖や峡谷での計測が困難であり, 光波測量では濃霧等の悪天候時に計測が困難である, 伸縮計は斜面上に不動点を確保することが困難であるという問題がある。

筆者らは上記問題を解決するために, 電波位相差を用いてミリメートルオーダーの微小な変位を長期間に渡り常時 3 次元計測するシステム(変位センシングシステム)を開発してきた。本稿では, センサーネットワークと融合した変位センシングシステム及びこのシステムを用いた実証実験の結果を示す。

2. 電波位相差を用いた法面変位センシング技術

(2-1) 法面変位センシングシステムの概要

図 1 に法面変位センシングシステムの概念及び原理図を示す⁽⁵⁾⁽⁶⁾。本システムは斜面上に設置したセンサ端末から放射された電波を複数の子受信機で受信し, 子受信機間の位

相差を計測することでセンサ端末の変位を高精度に計測する。

これまで 2.4GHz 帯の電波位相差を用いてミリメートルオーダーの微小な変位を長期間に渡り常時 3 次元計測するセンシングシステムの変位計測システムの開発を進め, フィールドでの計測・評価を通じた検証を行ってきた⁽⁵⁾。しかし, 2.4 GHz 帯の周波数は無線 LAN(Local Area Network)等の近距離無線で用いられ, 電波干渉により, 安定したセンシングが困難になるという懸念が生じる。

そこで, 無数のセンサ端末間で安定した通信を行うことを目的として, 近年開発・実用化が進んでいるセンサーネットワーク向けの 920MHz 帯の電波を用いて道路法面の変位をセンシングするシステムの開発を行った。このシステムでは, 温度・傾斜等の様々なセンサ間の通信に用いられる電波を利用して変位計測を行うことにより, 様々なセンサの情報収集と変位計測を同時に行うことが可能となった。また, この通信は変位計測用電波の送信指示にも使用され, センサ端末間のマルチホップ通信により広範囲(数百 m 四方)にセンサ端末が設置可能となった。

(2-2) 電波位相差による変位センシングの原理

電波位相差による変位センシングでは, 電波の位相差(図 1 に示した電波のずれ量)を用いることで高精度な計測を実現する。周波数が 920MHz の電波を用いた場合, 波長は約 30cm である。位相差は波長の数十分の一の精度で計測可能なため, ミリメートルオーダーの変位計測が可能となる。本システムでは, 子受信機間の電波位相差を用いることでセンサ端末と子受信機間の同期を不要とする。ただし, 子受信機間の同期は必要であり, 高周波信号を親受信機に集約することで実現している。

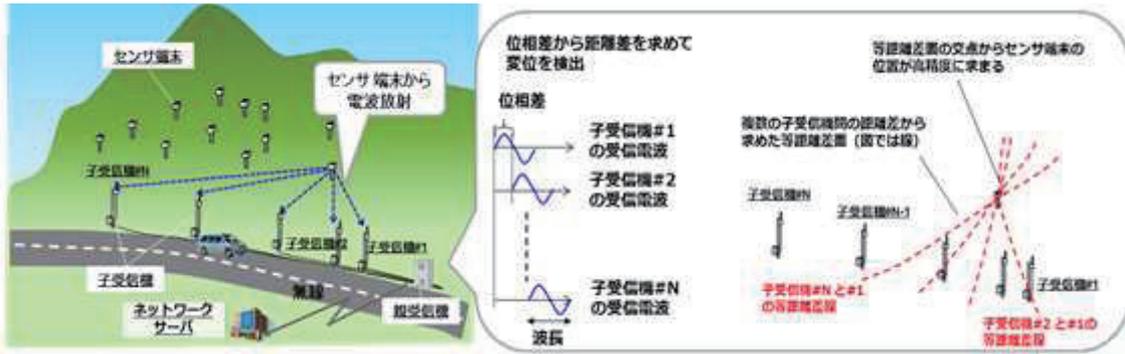


図 1 法面変位センシング技術の概念及び原理図

Fig. 1. Concept and principle of slope displacement sensing system.

次に変位計測の原理を述べる。センサ端末の位置座標を (x, y, z) , m 番目, n 番目子受信機の位置座標をそれぞれ, (X_m, Y_m, Z_m) , (X_n, Y_n, Z_n) とすると, m 番目と n 番目子受信機間の位相差 $\phi_{m,n}$ は以下のようにセンサ端末と m 番目, n 番目の子受信機間の距離差として表される。

$$\phi_{m,n} + 2\pi L = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \sqrt{(x - X_m)^2 + (y - Y_m)^2 + (z - Z_m)^2} - \sqrt{(x - X_n)^2 + (y - Y_n)^2 + (z - Z_n)^2} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

λ は電波の波長であり, $2\pi L$ (L は整数) は整数値バイアスと呼ばれる波長の整数倍の不確定性である。この整数値バイアスの初期値は機器設置時に測距計等を用いて計測し, 変位発生に伴い変動する値に関しては測位値を追尾することで推定する。

(x, y, z) を未知数とした式(1)は, 図 1 に示した等位相差面 (等距離差面) を表し, 複数の子受信機の位相差から複数の等距離差面が求まり, それらの交点からセンサ端末を高精度に測位することが可能である。

本技術の測位原理は, 電波の送受信を逆にした以外は位相差 GPS の原理と同様であり, センサ端末が GPS 受信機, 子受信機は GPS 衛星に相当する。GPS では電離層等の擾乱の影響を受けるのに対し, 本システムでは電波の伝播距離が短いため, 上記の影響を受けない点が利点である。変位計測精度についても GPS と同様の理論に基づき以下のように与えられる。

$$\epsilon_{pos} = \frac{\lambda}{2\pi} \sigma_{DOP} \epsilon_{phase} \dots\dots\dots (2)$$

ϵ_{pos} は変位計測誤差, ϵ_{phase} は受信機雑音や周囲環境に伴い発生する外来雑音による観測位相誤差, σ_{DOP} は, DOP (Dilution Of Precision: 誤差増倍率) と呼ばれるセンサ端末と子受信機の位置関係で決定される係数である。

センサ端末を取り囲むように子受信機を配置することができれば, 等位相差面が直交するので DOP が小さくなり, 測位誤差を低減させることができる。また, 波長 λ に比例して変位計測誤差が増加することが分かる。2.4GHz の波長に

対して 920MHz の波長は約 2.6 倍長い為, このままでは変位計測精度は約 2.6 倍悪くなるが, 観測位相誤差を小さくできれば 920MHz 帯の電波においても高精度計測が可能であり, 原理検証実験により, 2.4GHz 帯と同程度の精度で計測可能なことを明らかにした⁽⁷⁾。

3. 実証実験

〈3・1〉 実験機材

本システムを東日本高速道路 (株) が管理する法面に設置し, 実証実験を行った。実験機材の構成を図 2 に示す。

法面に設置するセンサ端末は, 長期間計測を実現するため, 太陽光発電による自立電源で動作する端末を試作した。連続して 1 週間程度日照が無い場合でも連続動作可能なように蓄電デバイス (キャパシタ) を搭載した。920MHz 帯を用いることで, 無線モジュールの低消費電力化が実現でき, 無日照時でも長期間にわたって高頻度 (6 分周期) で変位計測が可能となった。また, センサ端末の制御基板には温度センサを搭載し, 温度情報も収集可能である。他のセンサと接続可能なインターフェースも設けたので, 傾斜計や雨量計等を接続してデータ収集が可能である。更に, センサ端末間のマルチホップ通信により, 最大 16 台の端末による広範囲 (数百 m 四方) の計測が可能である。

子受信機は, アンテナと RF 回路, E/O (Electronic / Optical) 変換器, AC/DC を備え, 固定用の治具を設けて支柱に固定した。電源は親受信機から AC100V を供給している。子受信機で受信した 920MHz 帯の電波は, RF 回路により増幅・帯域制限を行った後, E/O 変換器により光信号に変換され, 光ファイバを通して親受信機に伝送される。以前の実験⁽⁷⁾ では, 子受信機と親受信機間の信号伝送は同軸ケーブルを用いて行ったが, ケーブル敷設時の取り回しが困難, 伝送損失が大きい等の課題があり, 本実験では, 光ファイバによる伝送とした。

親受信機では, O/E 変換器により光信号を RF 信号に変換した後に, RF 回路による帯域制限, 周波数変換を行った後に A/D 変換部に送られ, デジタルデータに変換される。信号処理部では, このデジタルデータを用いて 2.2 節で紹介した原理に基づき, センサ端末の位置を随時計算する。制

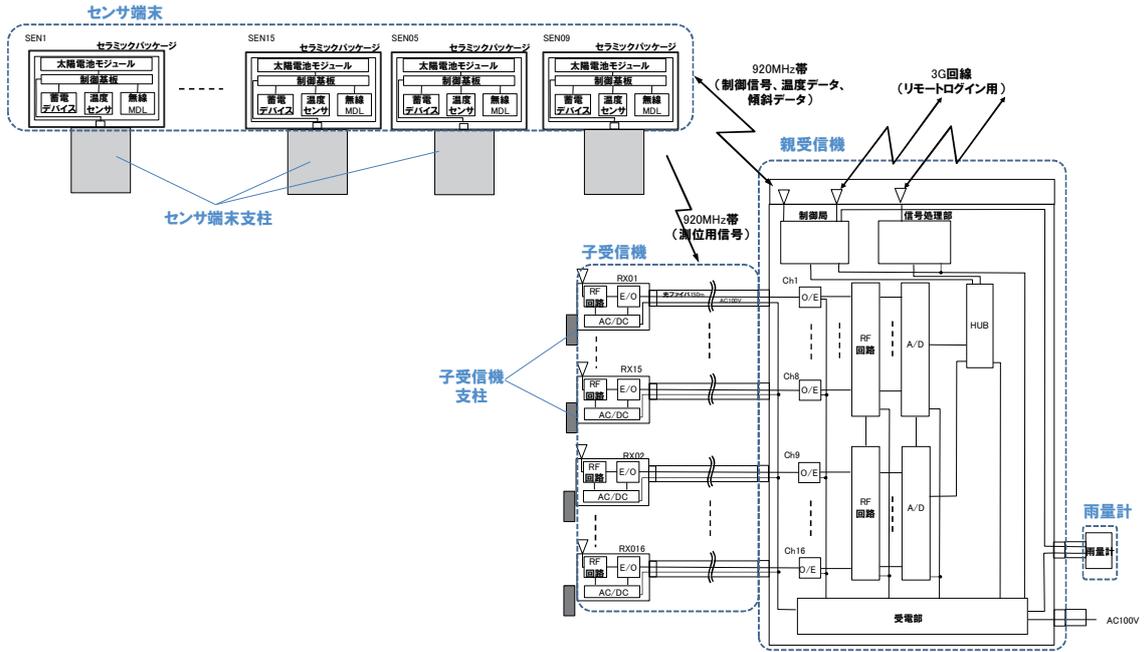


図2 実証実験機材の構成
Fig 2. Block diagram of the experimental equipment.

御部ではセンサ端末と通信を行い、ネットワークの構築，温度センサデータの収集，センサ端末の変位計測用電波の発信制御等を行う。また，雨量計を接続し，雨量情報も同時に取得可能である。これらの変位計測データ，温度データ，雨量データ等は3G回線によるリモートログイン機能により，遠隔でのデータ収集が可能である。

実証実験機材の様子を図3に示す。法面の約100m四方のエリアにセンサ端末8台，子受信機16機を設置した。

センサ端末は全6台のうち4台は，図に示すように強制変位用の治具を設けており，端末を強制的に変位させることができる。地中0.7~1mに埋設した支柱に固定し，積雪対策のためのアクリルカバーを設置した。残りの2台は，温度補償用の端末として，子受信機の支柱（長さ2m）の上

部に設置した。

子受信機は全16機を，コンクリート面にアンカーボルトで固定した支柱に治具を設けて固定した。銀色部分が子受信機の筐体であり，灰色部分は積雪対策のためのアンテナカバーである。設置したセンサ端末と子受信機の配置を図4に示す。図中のSENはセンサ端末を表し，RXは子受信機筐体の位置を表す。センサ端末は，SEN04，07，10，13，15，16に設置した。

親受信機は，コンクリートブロックの上に筐体に乗せてアンカーボルトで固定した。



図3 実証実験の様子
Fig 3. View of the experiment.

〈3・2〉 実験結果

強制変位治具を設けたセンサ端末のうちの 1 台を図 4 の X 方向に 10mm 変位させて実験を行った。実験条件を表 1 に示す。センサ端末の送信出力は 20mW であり、変位計測用電波の送信周波数は 922.0MHz、センサーネットワーク構築のための通信・制御の周波数は 927.5MHz とした。6 分間に 1 回の頻度で変位計測及びセンサ端末の温度・充電電圧を収集した。変位計算処理は、1 時間分 (10 サンプル) の位相データを移動平均した後にを行った。

センサ端末#10 を X 方向に 10mm 強制変位させて計測した結果を図 5 に示す。計測開始 2 時間後に強制変位を行っており、センサ端末#10 は、強制変位に追従でき、誤差も 1mm 程度であった。2~3 時間後に緩やかに変位しているのは、1 時間分の移動平均の影響である。

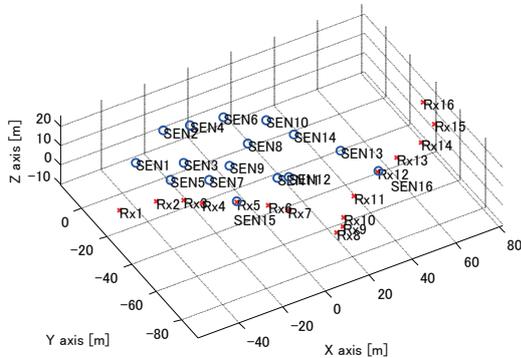


図 4 センサ端末と子受信機の配置

Fig 4. Location of sensor devices and sub-receivers.

表 1 実験条件

Table 1. Experimental condition.

センサ端末送信出力	20mW
センサ端末送信周波数	922.0MHz(変位計測用) 927.5MHz(通信・制御用)
計測周期	6分
データ平均	1時間分(10サンプル)の 位相データを移動平均

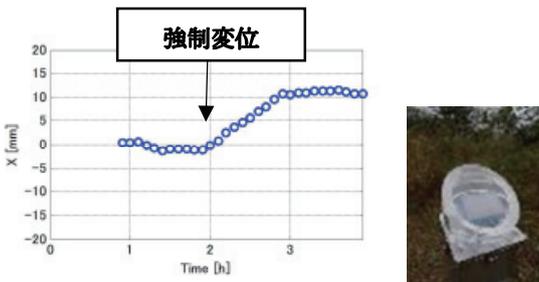


図 5 強制変位計測結果 (センサ端末#10)

Fig 5. Results of the forced displacement experiment.

4. むすび

920MHz 帯の電波を用いて、斜面・法面の変位を高精度に計測可能なセンシング技術の実証実験結果を示した。この実験において、本技術により法面の管理に必要なミリメートルオーダーの計測可能であることを確認した。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization) の委託研究業務の結果、得られたものである。また、実証実験にご協力頂いた東日本高速道路 (株) に感謝する。

文 献

- (1) 国土交通省:「平成 28 年に発生した土砂災害(2016)」, <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/H28dosyasaigai.pdf>
- (2) 国土交通省:「都道府県別土砂災害危険箇所」, <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link20.htm>
- (3) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社:「土質地質調査要領」, pp.185, (2012)
- (4) 例えば、国土交通省 九州地方整備局 災害対策本部:「全面通行での開放について 一般国道 10 号 法面崩落の恐れ」, 第 17 報 (2006)
- (5) 吉崎 互, ほか:「電波位相差変位計測システムを用いた斜面変位計測」, 三菱電機技報, 84, No.8, pp.479-482 (2010)
- (6) 岡村 敦, ほか:「多点震動変位の位相差による計測法」, 電子情報通信学会技術研究報告, 宇宙航空エレクトロニクス研究会, 2000 - 145 (2001)
- (7) 大島 正資, ほか:「電波位相差を用いた法面変位センシング技術」, 三菱電機技報, Vol.92, No.5 pp.8-11 (2018)

無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

渋谷 憲二* 石川 裕治 ((株)NTT データ)

Development of Wireless Communication Networks Common Platforms
Kenji Shibuya*, Yuji Ishikawa, (NTT DATA Corporation)

This paper addresses the development of wireless communication networks common platforms. Due to the deterioration of road infrastructure, as various kinds of sensors are installed in road infrastructure, inefficiency of data collection caused by duplication of communication infrastructure, In order to solve the problem of data utilization inefficiency, it is necessary to absorb differences in specifications of various sensors and manufacturers according to the communication specifications of concentrators. We will introduce network communication infrastructure with cost reduction and secure security through cooperative communication.

キーワード：ネットワーク，データ標準化，モジュール化，マルチホップ通信，セキュリティ
(Network, Data standardization, Modularization, Multi-Hop communication, Security)

1. まえがき

道路インフラの老朽化や橋梁における定期点検要領の更新などにより，道路インフラに多種多様なセンサが設置されるに伴い，センサデータを処理する通信基盤の重複による非効率性が懸念されている。

道路インフラには，床版や橋脚など道路そのものを構成する土木構造物，照明や標識などの道路附帯物など，多くの管理対象があり，それぞれの点検に適したセンサ，具体的には振動センサ，ひずみセンサ，加速度センサ，変位センサ，などの多種多様なセンサが設置される。これらのセンサが取得するデータは，データ形式，大きさ，取得頻度，などがそれぞれ異なるため，データ処理やデータ送受信を

行う通信基盤はセンサデータの特徴に適した方式で構築される。本稿で説明する「通信基盤」とは，センサからデータを受信する現地設置機器（コンセントレータ），データセンサに設置されたデータを蓄積するサーバ類，コンセントレータとサーバ類を接続する通信回線，の3つから構成される（図1参照）。

つまり，通信基盤は当初に設置するセンサや取得するデータの特徴を考慮し構築されるため，新たに別の種類のセンサを追加するなど，当初予定していなかったデータ処理を既存の通信基盤に追加することは一般的に容易ではなく，加えて，蓄積したデータを他のセンサデータと相互利用することも容易でない場合が多い。現状では，道路インフラ管理者はセンサごとに異なる通信基盤を運用しなければならず，通信基盤の重複による非効率が発生している。よって，多種多様なセンサの差異を吸収し，データ収集だけでなくデータ利用においても有用な通信基盤が求められている。

本稿では，多種多様なセンサの差異を吸収し共通的に利用できる通信基盤として，通信回線に電話回線を使用した無線通信ネットワーク共通プラットフォームを開発し，実際の道路に設置した複数のセンサにて実証実験を行った状況を示す。

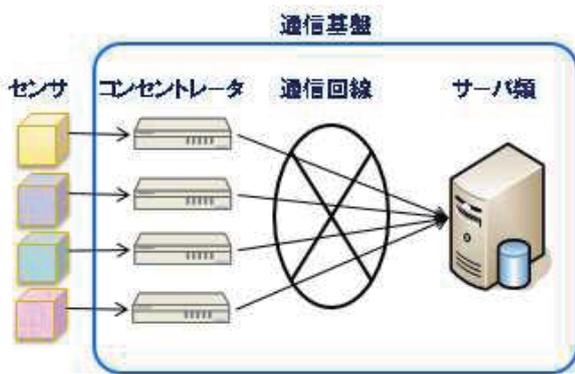


図1 通信基盤

Fig. 1. Communication infrastructure.

2. 無線通信ネットワーク共通プラットフォームが解決する課題

既存の通信基盤に対し、無線通信ネットワーク共通プラットフォームが解決する課題を下記に示す。

- (1) データ収集の非効率
- (2) データ利用の非効率
- (3) 回線や設備の非効率
- (4) セキュリティ

データ収集の非効率やデータ利用の非効率に加えて、ユーザ要望の高い回線や設備のコスト削減と、通信基盤のセキュリティを加えた 4 つを課題とする。それぞれの課題について、解決方法、特徴、実証実験状況を示す。

〈2-1〉 データ収集の非効率

(1) 課題の詳細 点検対象や点検目的、センサ種類によって、センサデータはデータ形式、大きさ、取得頻度など様々なデータ形式の差異に加え、通信プロトコルなどセンサメーカーの仕様の差異を吸収することが課題となる。

(2) 解決方法 多種多様なセンサデータ形式やメーカー仕様の差異を吸収する通信仕様を開発する。具体的にはセンサとコンセントレータで通信処理を行う際のデータフォーマットを標準化し、汎用的な通信プロトコルを複数準備することで実現する。データフォーマットは主にセンサとデータフォーマット等を識別するためのヘッダー部と、自由にデータ項目を設定できるデータ部で構成される(図 2 参照)。

(3) 特徴 センサが取得するデータは必ずしも一種類とは限らず、状況に応じて取得するデータ項目や取得頻度が変わることが想定されるため、センサごとに複数のデータフォーマットを指定することを可能としている。通信プロトコルはインターネットでの標準通信プロトコルである FTP と任意 TCP 通信を準備した。FTP を実装する通信機器は多く存在するため短期かつ容易にシステムを構築する際は FTP での通信が選択でき、独自処理が必要であれば任意の TCP 通信に対応することが可能である。

上記の通信仕様を処理するためのソフトウェアはコンセントレータに実装し、モジュール形式で変更可能とする(図 3 参照)。

この仕組みにより、センサ変更などにおいても最低限のソフトウェアモジュール部分を変更することで、新しいセンサが取得したデータを処理することを可能としている。



図 2 データフォーマット

Fig. 2. Data format.

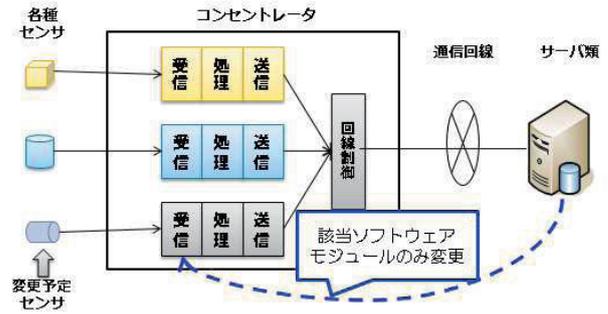


図 3 ソフトウェアモジュール変更概要図

Fig. 3. Software module change overview diagram.

つまり、最低限のデータフォーマットに汎用的な通信プロトコルを含めた通信方式を採用することで、多種多様なセンサに対応できる通信仕様を実現できる。

(4) 実証実験状況 現地に設置した加速度センサや、変位センサなどが取得したセンサデータを、標準フォーマットで通信仕様を定義し、コンセントレータでデータを処理することで、それぞれのセンサが複数のデータフォーマットを使用してデータを処理できることが確認できた。

〈2-2〉 データ利用の非効率

(1) 課題の詳細 種類の異なるセンサデータを相互利用するために、通信基盤としてセンサデータを一元的にアクセスできるようにすることが課題となる。

(2) 解決方法 無線通信ネットワーク共通プラットフォームでは、標準的なデータフォーマットによって、センサ ID とデータ取得日時と値をコンセントレータで処理し、通信回線を経由してデータセンタに設置したデータベースに格納する。よって、1つのデータベースにすべてのデータが格納されることで、データの一元的なアクセスを可能とする。

(3) 特徴 センサデータは基本的に 1 テーブルに格納されるため、データ利用時はシンプルなデータ取得が可能である。

(4) 実証実験状況 現地に設置した各種センサデータは 1 つのデータベースに格納されており、必要なデータは容易に取り出せることが確認できた。実証実験では道路管理者の道路インフラ管理業務を模擬したデモシステムを構築し、センサデータ以外にも他組織が提供する気象データなどを含めた相互利用などの処理が問題ないことを確認した(図 4 参照)。



図4 道路インフラ管理業務模擬システム
Fig. 4. Road infrastructure management system.

さらに、蓄積したデータの容易な利活用方式として、Linked Open Data (LOD) ⁽¹⁾を活用したデータ公開機能を実装するシステムを構築し、LODを使用した場合と使用しなかった場合の処理方式について比較を行った。

LOD とは、インターネットの Web の技術を利用し、計算機が処理しやすい形式で情報を共有する仕組みである。発信された情報が Web 上で相互につながることで、Web 上に巨大な知識データベースが形成され、様々なデータと相互連携することが容易になる。本稿ではセンサが取得したデータを LOD 化し、一般に公開されている LOD を取得し、それぞれのデータをあわせてグラフとして表示するデモシステムを構築した (図5 参照)。

LOD で公開されるデータは SPARQL 言語で自由に取得・加工できる。リンクされているデータをたどることが可能になるため、無線通信ネットワーク共通プラットフォームが保有する LOD と一般に公開されている LOD との連携処理は容易であり、グラフ化も簡易に実装できることが



図5 LOD 評価用デモシステム
Fig. 5. LOD evaluation demo system.

分かった。一方で、LOD 化されていない一般データとの連携はデータ構造などフォーマットが不明であり、データ取得モジュールをそれぞれ作成する必要があるため、LOD 化されたデータと比較するとデータ活用は困難であることが分かった。

〈2・3〉 回線や設備の非効率

(1) 課題の詳細 センサ/ロガーごとにコンセントレータにて取得データをデータセンタのサーバ群に送信する際、データ量が少ないことから、コンセントレータのデータ処理量は小さいため CPU やメモリなどのリソースと、通信回線帯域に余裕が発生する。通信回線は常時ランニングコストが発生するため効率的に回線や設備を活用することが課題である。

(2) 解決方法 コンセントレータ間でのホップ通信により、付近のコンセントレータのデータ送信処理は 1 台のコンセントレータに集約し、まとめて送信処理を行うことで、通信回線コストを低減する。(図6 参照)。

(3) 特徴 ホップ通信はメッシュネットワークを活用しているため、万が一ホップ通信上のコンセントレータが故障した際でもネットワークが再構築され通信が可能である。

(4) 実証実験状況 メッシュネットワークを活用したホップ通信について、見通しが良く電波干渉が少ない海岸沿いで実証実験を行った (図7 参照)。

グラフより、ホップ通信する回数や通信距離により通信

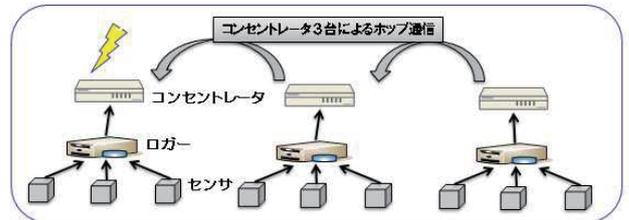


図6 コンセントレータ間のホップ通信
Fig. 6. Hop communication between concentrators.

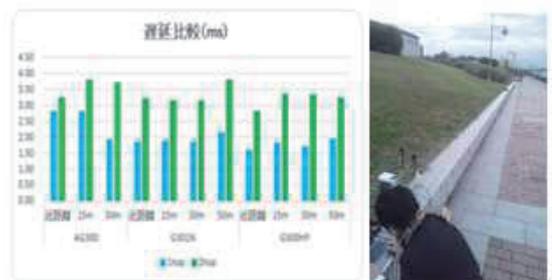


図7 通信遅延比較状況
Fig. 7. Communication delay comparison status.

遅延が大きくなることが判明したが、一定量の通信は可能であることが確認できた。コンセントレータを設置する箇所は、市街地内の高速道路や鋼橋の箱桁内など様々な環境が想定され、継続して検証を実施する予定である。

〈2・4〉 セキュリティ

(1) 課題の詳細 無線通信ネットワーク共通プラットフォームのセキュリティ課題を明確にするため、セキュリティリスク分析を実施した結果、センサやロガーの電子認証や不正検出について取り組むこととした。これは、万が一センサ/ロガーが第三者によって別のセンサ/ロガーに入れ替えられ不正なデータを送信されるリスクに対応するためである。

センサ/ロガーの電子認証と不正検出を選択した理由は、現地に設置される物理的な機器交換のリスクが相対的に大きいと考えたためである。コンセントレータからデータセンタのサーバ群との通信は認証や暗号化など対策済みであり、データセンタのサーバ群はいわゆる情報システムセキュリティ対策を実施しているため、無線通信ネットワーク共通プラットフォームの入口部分が相対的にセキュリティリスクであると判断したためである。

電子認証や不正検出は既に商用サービスが存在するが、そもそもセンサ/ロガー側にセキュリティ機能を実装することが困難であることを前提に、コンセントレータ側だけで本機能を実装することを基本方針とする。

(2) 解決方法 コンセントレータとセンサ/ロガーが通信時に発生する通信パケットをコンセントレータで分析することで不正検出を行い、不正検出した場合は該当通信をブロックし、データセンタのサーバ群にアラームを送信する。具体的には、コンセントレータが受信したパケットについて、センサ/ロガーが入れ替えられた時に発生する通信パターンや情報収集の際の通信パターンを検知する仕組みとする。

(3) 特徴 コンセントレータに実装する不正検出は、

通信状況を踏まえて限られた電力やCPUリソースで動作する最低限の検出パターンで不正検出を行う。センサ/ロガーは定期的にデータを取得し送信すると想定されるため、複雑な通信パターンを判定する必要がないと考えるためである。また、コンセントレータは限られた電力やCPUリソースで動作させる必要があるため、複雑な通信パターンを判定するような実装は困難である。

上記より、不正検出判定レベルとリソース消費のバランスを保つことが課題解決の目標であり、セキュリティ機能の特徴である。

(4) 実証実験状況 不正検出パターンとして、MACアドレス変更時や、ポートスキャンによる情報収集の際に発生するパケットパターンなどシンプルな通信パターンについて、限られたリソースで検知できるか実施した。実証はデモシステムで実施し検知機能はコンセントレータの通常処理による負荷と区別するため、通信パケットをミラーハブでコピーし、コンセントレータとは別の機器で不正検出ができるか確認した(図8参照)。

上記構成で限られたリソースで不正検出が可能であることが確認できた。本機能は実際に現場に設置しているコンセントレータに実装し、継続して検証を実施する予定である。

3. あとがき

本稿では、道路インフラの通信基盤が持つ課題を4つ挙げ、無線通信ネットワーク共通プラットフォームによる解決案の提示および実証検証の結果を示した。

道路インフラの老朽化は、社会全体で取り組むべき大きな課題である。今回開発した無線通信ネットワーク共通プラットフォームは、データ収集やデータ利用の非効率を改善するとともに、運用コストの削減やセキュアな通信に対応した共通基盤であることから、道路インフラの老朽化対策の一つとして有効であると考えられる。今後は、道路インフラに加えてダムや発電所などの大規模インフラにおいても適用検証を進めるなどして、当該プラットフォームの様々な分野での活用を目指すこととしたい。

謝辞

ここで述べた成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務「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」で得られたものである。

文 献

(1) Bizer,C., Heath,T., and Berners-Lee,T.: "Linked Data – The Story So Far", International Journal on Semantic Web and Information Systems (IJSWIS), Vol.5, No.3 pp.1-22 (2009)

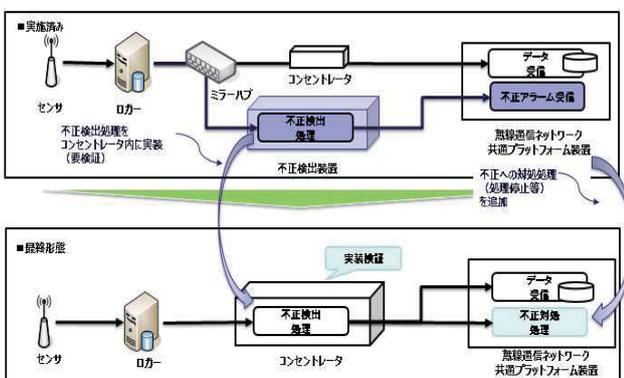


図8 不正検出概要図

Fig. 8. Fraud detection overview diagram.

道路インフラ状態モニタリングシステム用センサ端末の 高耐久性パッケージング技術の開発

福本 宏* 原田 武 (マイクロマシンセンター/NMEMS 技術研究機構)
柏屋 俊克 (日本ガイシ(株)/NMEMS 技術研究機構)
富樫 和義 (大日本印刷(株)/NMEMS 技術研究機構)
大東 良一 (大日本印刷(株))

High Durability Packaging Technology of Sensor Nodes for Road Infrastructure Monitoring System
Hiroshi Fukumoto*, Takeshi Harada (Micromachine Center / NMEMS Technology Research Organization)
Toshikatsu Kashiwaya (NGK INSULATORS, LTD. / NMEMS Technology Research Organization)
Kazuyoshi Togashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)
Ryoichi Ohigashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd.)

This paper describes a high durability package developed for long-term stable operation of sensor nodes composed of sensors, radio circuits, antennas and autonomous power supply under severe environments such as road infrastructure. As a result of the durability acceleration test on the sensor package which adopted LTCC as the housing material and the inorganic-organic composite adhesive as the sealing material, the durability equivalent to the targeted 10 years was obtained.

キーワード : センサ端末, パッケージング, セラミックス, 気密性, 接着接合, 耐久性, 加速試験
(Sensor nodes, Packaging, Ceramics, Air tightness, Adhesive bonding, Durability, Acceleration test)

1. はじめに

橋梁, 道路付帯物, 法面など道路インフラ施設の健全性を無線でモニタリングするセンサネットワークシステムでは, センサ端末を長期安定して稼働させるために, その構成部品の実装には耐久性の高いパッケージが必要となる。そこで, 耐候性に優れた LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) を筐体材料に採用し, センサ端末部品をオールインワンで封止実装する高耐久性パッケージング技術, 及びインフラ構造物への高耐久性設置技術を開発した。

本報では, 試作したパッケージの構成, 気密封止法, 及びインフラへの設置法について, 耐久性加速試験, 実フィールドでの実証試験の結果と併せて報告する。

2. 背景と目的

図 1 に NMEMS 技術研究機構が NEDO からの委託を受けて実行している「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」(RIMS: Road Infrastructure Monitoring System)のコンセプトを示す⁽¹⁾。老朽化が進む橋梁, 道路付帯物, 法面などの道路インフラ施設の健全性をモニタすることで施設維持管理の省人化・省エネルギー

化を目指す無線センサネットワークシステムである。

本システムにおける無線センサ端末は, 高温, 高湿, 排ガス, 塩害などの厳しい外部環境に長期間さらされるため, その構成部品を実装するパッケージには高い耐久性が要求される。

図 2 にセンサ端末用パッケージの概念図を示す。センサ端末は, センサ, 電子回路, 無線回路, アンテナ, 及び自立電源から構成され, 信頼性を確保する観点からもこれらの部品を全てセラミックパッケージの中に実装するオールインワンパッケージ構成とすることとした。

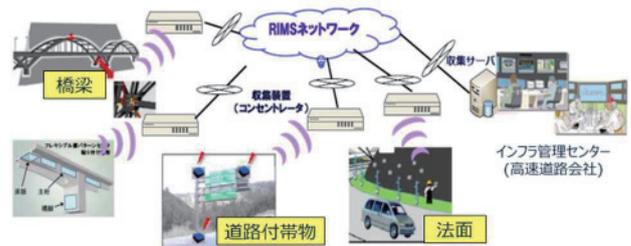


図 1 道路インフラモニタリングシステム

Fig.1. Road Infrastructure Monitoring System.

本パッケージ開発では、図2に示す3項目、(1)大型セラミックパッケージ、(2)高気密封止接合技術、(3)インフラ構造物への設置技術について検討を行った。また、インフラの寿命や点検サイクルから要求される耐久性として、少なくとも10年間の性能維持を目標とした。

3. 大型セラミックパッケージ

〈3・1〉 パッケージ材質・構造

パッケージ材質として、10年以上の耐久性を有すると共に、無線アンテナを内蔵して通信可能なセラミックスが適している。金属材料では耐久性は期待できるものの、電波を遮断するため無線アンテナを内蔵できない問題があり、樹脂材では無線アンテナを内蔵し通信できるものの、10年レベルの耐久性に課題がある。ここでは、セラミックスの中でも、金属配線材料との同時焼成によりアンテナ等を内層配線で形成可能なLTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics)を選定した。また、自立電源として、汎用性が高い太陽電池の採用が望まれるため、太陽電池をパッケージ内部に搭載しても発電できるようにパッケージ上面のリッド(蓋)には太陽光を透過し、かつ長期耐久性を有する透光性アルミナを選定した。なお、今回選定した透光性アルミナの全光線透過率は約83%であった。

パッケージサイズは、内蔵するセンサや電子回路等の大きさによって決定されるが、現場で簡単に設置施工することを考えると、片手で容易に持てる大きさであることが望ましく、サイズは最大で100×70×50mmとした。一般的な電子部品用セラミックパッケージは十数mm程度のサイズであり、今回開発したセラミックパッケージは従来にない大型のものとなっている。図3にアンテナを内層配線で形成し試作したセラミックパッケージの外観を示す。

〈3・2〉 内蔵アンテナの放射特性

道路インフラ状態モニタリングシステムは、センサ端末で計測されたデータを無線で中継器に送信する構成であり、端末と中継器の相対位置関係は設置条件に依存するため一意的には決まらない。そのため、アンテナの特性は、できるだけ全方向に均等に放射する低指向性が求められる。表1に今回設定した内蔵アンテナの仕様(目標値)をまとめて示す。

アンテナ設計は、内蔵する部品の大きさ、位置を考慮して電磁界シミュレーションにより行った。パッケージ内に太陽電池やモジュール等、多くの金属を高密度で、隙間無く実装するため、金属部品の大きさ・配置を考慮してアンテナの位置やサイズを決定している。シミュレーションの結果得られた放射特性(利得)を図4に示す。内蔵アンテナは指向性の低い放射特性であり目標を満たした。なお、図4のYZ面とXZ面の下側で、利得が-5dBiを下回るのは、パッケージ底面に配置した金属部材により電波が遮られるためである。

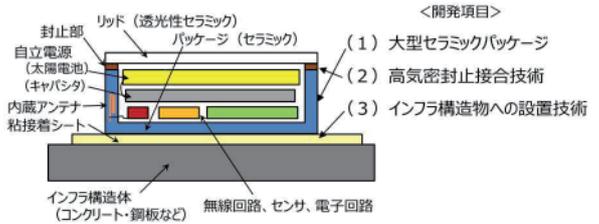


図2 センサ端末用高耐久性パッケージの構成
Fig.2. Structure of the high durability package.



図3 セラミックパッケージの外観
Fig.3. External view of the ceramic package.

表1 内蔵アンテナの目標仕様
Table 1. Target specifications of the antenna.

項目	仕様値
中心周波数	925 MHz
バンド幅(帯域)	min ±20 MHz (over 905~945 MHz)
インピーダンス	50 ohm
利得	max +3 dBi, min -5 dBi

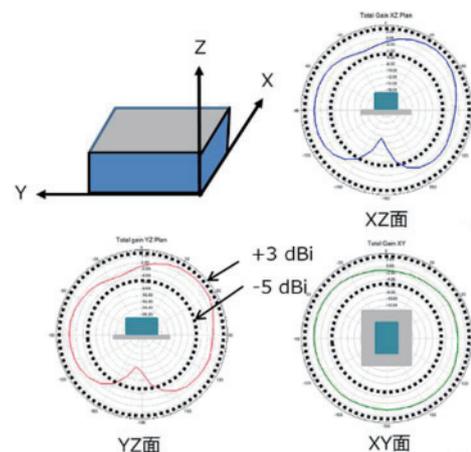


図4 アンテナ放射特性のシミュレーション結果
Fig.4. Simulation results of the antenna radiation characteristics.

〈3・3〉 パッケージの耐久性

パッケージサイズは従来にない大きさであることから、熱膨張に起因する割れが懸念される。そこで、熱衝撃試験機にてパッケージ単体 (LTCC 管体) の試験を実施した。

図 5 に熱衝撃試験の条件を示す。試験後のパッケージ外観検査の結果、割れ、欠けなどの異常は見られず、熱衝撃に対し十分な耐久性を有することを確認した。

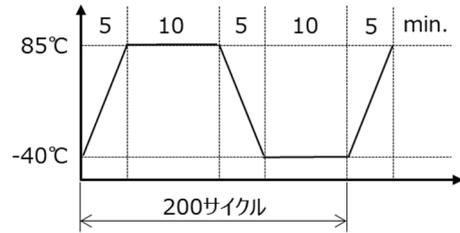


図 5 熱衝撃試験の条件

Fig.5. Conditions of thermal shock test.

4. 高気密封止接合技術

道路インフラ状態モニタリングシステムが設置される環境において 10 年以上の耐久性を有するセンサ端末を実現するため、前章で述べた耐久性に優れたパッケージ (LTCC) とリッド (透光性アルミナ) を高気密封止接合するプロセス技術を開発してきた⁽¹⁾。

表 2 にセンサ端末封止における技術課題と対応策をまとめて示す。ここでは、高い気密性を長期間にわたって保つ封止構造を実現するための封止接合プロセスの開発、及び封止性能の耐久性試験を実施した。

〈4・1〉 封止接合プロセス

前章で示した通り、センサ端末は、パッケージとリッドに異種材料が使用され、さらにパッケージサイズが大きいことから、熱膨張率の違いにより発生する熱応力による接合部の剥離が懸念される。そのため低温での封止が必要になる。プロセス設計において、高耐久性封止材料と低熱影響プロセス方法の選択が重要課題である。

(1) 封止材料 耐久性重視の観点からは無機材料が望ましいが、反面、接合温度が高くなりセンサ端末部品への熱影響が問題となる。そこで、封止材としてアルミナ粒子フィラーをエポキシ樹脂で埋める構造の無機有機複合接着材を選択し、プロセス温度の低温化を図った。

(2) 実装プロセス 表 3 にセンサ端末の封止実装プロセス条件を示す。パッケージの接合枠に封止材を塗布し、乾燥空気雰囲気中でリッドを貼り合せ、熱圧着により封止接合を実施した。図 6 に封止したセンサ端末の外観写真を示す。パッケージ (LTCC) とその上面のリッド (透光性アルミナ) とを無機有機複合接着材で封止接合している。

〈4・2〉 気密封止性能耐久性試験

前節で述べた封止実装プロセスで組み立てたセンサ端末の気密封止性能の耐久性加速試験、及びセンサ端末を道路インフラ環境よりも過酷な環境に設置して環境ストレスをかける過酷環境暴露試験を実施した。

(1) 気密性評価方法 封止したセンサ端末の耐久性を判定する際の性能指標として気密性を用いた。図 7 に構築した気密性評価システムを示す。気密封止されたパッケージの内容積は一定であるので、パッケージ内部の気体の温度と気圧を計測すれば、その比率はボイルシャルルの法則から一定となる。そこで、温・湿度、及び気圧センサを含む評価用センサ端末を試作し、端末周囲の温度を変化させたときのパッケージ内部気圧の変動計測値を無線で読み出し、センサ端末パッケージの気密性を評価した。

表 2 センサ端末封止における課題と対応策
Table 2. Problems and solutions of the sensor node packaging.

項目	技術課題	対応策
パッケージ	異種材料接合	熱膨張率整合、低温プロセス
プロセス	高耐久性封止	無機材料選定
	気密封止	低露点雰囲気中接合
	低熱影響	局所加熱プロセス (レーザー、熱圧着)
性能評価	気密性、耐久性	評価端末の信頼性加速試験 屋外環境暴露試験

表 3 センサ端末の封止実装プロセス
Table 3. Packaging process of the sensor node.

ワーク	LTCC(パッケージ (100×70×50 mm) 透光性アルミナ蓋 (厚さ: 0.73 mm) 接合枠幅: 3 mm
封止材	アルミナフィラー・エポキシ樹脂複合接着剤
封止材塗布	ワーク高さ検出・速度制御ディスプレイによる自動制御塗布
組立雰囲気	乾燥空気 (露点温度: -40°C以下)置換グローブボックス内
接合装置	荷重制御・熱圧着装置
接合荷重 (圧)	100 N (0.1 MPa)
接合温度	40°C, 8 hr + 90°C, 1 hr



図 6 封止したセンサ端末パッケージ
Fig. 6. Sealed sensor node package.

(2) 耐久性加速試験 試験項目として、PCT (Pressure Cooker Test), 耐候性試験, 低温試験, 熱サイクル試験, 塩水噴霧試験, 及び腐食ガス試験を選択し、電気・電子部品の環境試験方法規格 JIS C 60068 に準拠する IECQ 認定試験所⁽²⁾に委託して加速試験を実施した。

表 4 に各試験の条件と結果をまとめて示す。全ての試験項目で合格していることから、概ね 10 年間の耐久性を有する見通しが得られた。

(3) 屋外環境暴露試験 道路インフラ環境は、熱や水分、温度ストレスなどの基本的劣化要因に太陽光（紫外線）、排ガス、振動など複数の劣化因子が重なる複合的環境であり、装置を用いた耐久性加速試験では再現できない劣化が起こり得る。そこで、センサ端末設置環境における耐久性を確認するため屋外環境暴露試験を行なった。

本項では亜熱帯性気候の西表島海岸地区において実施した屋外環境暴露試験の結果を示す。(1)項で述べた温・湿度、及び気圧センサを含む評価用センサ端末を表 3 で示したプロセスで封止した試験体を西表島海岸の試験場に設置し、最長 2 年間の屋外環境暴露試験を実施した(図 8)。この環境では、日照による約 60℃の温度上昇と紫外光照射、海水と豪雨による多湿、高塩分濃度が劣化因子となる。

図 9 に当環境で 1 年間試験を実施した後のセンサ端末の気密性評価結果を示す。端末パッケージ内部の気圧と温度がほぼ線形の関係を持って変動していることがわかる。本試験の結果、西表島の過酷環境においても 1 年以上の気密性とセンシング性能を維持できることが確認された。

5. インフラ構造物への設置技術

LTCC は化学的に安定で耐久性に優れパッケージ材料として適した材料であるが、一方で、脆性材料のため機械加工が難しく、LTCC パッケージをインフラ構造物へ設置する際、金属筐体のように直接ボルト等で固定することは困難である。ここでは、接着剤を用いてセンサ端末の LTCC パッケージをインフラ構造物に簡単・安定的・高耐久に設置できる接合技術を開発した。

接合には、粘接着シート^③(大日本印刷(株)製)を適用し、目標とする屋外 10 年相当の使用環境に耐える接合耐久性を確認するため、各種加速試験装置による耐久性試験、及び屋外環境暴露試験を行なった。

〈5・1〉 粘接着シート接合の耐久性加速試験

粘接着シート接合の耐久性加速試験条件を表 5 に示す。JIS A 5557(外装タイル張り用有機系接着剤)、及び JIS Z 2371(塩水噴霧試験)を適用した。JIS A 5557 の条件は屋外 7 年相当の加速条件と考えられ⁽⁴⁾、試験時間を 1.5 倍することで屋外 10 年相当の加速条件とした。図 10 に試験サンプルの構造を示す。パッケージで使用する LTCC を試験片(40 × 40 mm)に加工し、インフラ構造物として想定されるコンクリート、鋼板、及びステンレスに粘接着シートで接合した。耐久性加速試験環境暴露後の引張強度 0.4MPa 以上の達成が目標である。

図 11 は耐久性加速試験環境暴露後の引張強度の測定結果である。サンプル数 N=5 での平均値と最大/最小値をエラーバーで示している。全ての耐久性加速試験条件において、引張強度は規格の 0.4MPa 以上を満たしており、屋外使用 10 年相当の接着耐久性を有することを確認した。

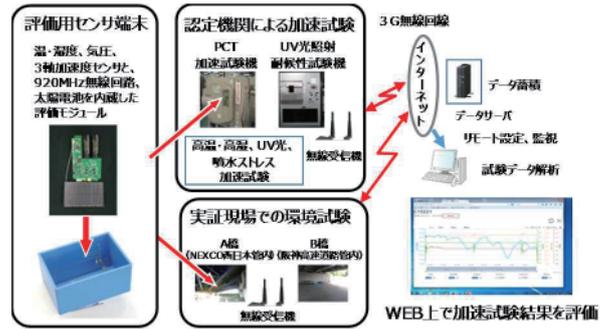


図 7 センサ端末パッケージの気密性評価システム
Fig.7. Air tightness evaluation system of the sensor node package.

表 4 耐久性加速試験条件と結果
Table 4. Conditions and results of durability acceleration test.

試験項目	条件	結果
PCT	85℃, 85%, 0.12 MPa, 672 hr	合格
耐候性試験	UV 162 W/m ² , 63℃, 500 hr	合格
低温試験	-40℃, 100 hr	合格
熱サイクル試験	-40℃ ⇄ 85℃, 各 2 hr × 200回	合格
塩水噴霧試験	(塩水2 hr/ 40℃, 98%, 7日) × 4回	合格
腐食ガス試験	SO ₂ 25 ppm + NO ₂ 4 ppm, 40℃, 80%, 500 hr	合格



図 8 西表島での屋外環境暴露試験
Fig.8. Outdoor environment exposure test in Iriomote Island.

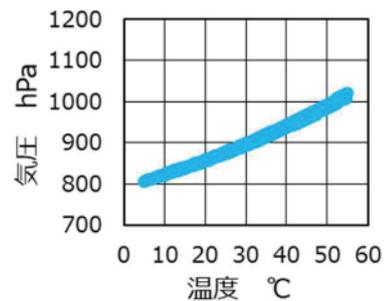


図 9 屋外環境暴露後のセンサ端末の気密性評価
Fig.9. Air tightness evaluation of the sensor node package after outdoor environment exposure.

〈5・2〉 粘接着シート接合の屋外環境暴露試験

前章でも述べた通り、センサを設置する実環境は複数の劣化因子の複合的環境であり、装置を用いた加速試験では再現できない劣化が起こり得る。そこで、実環境における接合耐久性を確認するため屋外環境暴露試験を行なった。

表 6 に屋外暴露試験の実施場所とその内容を示す。阪神高速道路では、実橋梁に試験サンプルを接着しているため、車両通行に伴う振動や歪み負荷がかかる環境である。西表島では、引張試験サンプル (図 10) を海岸に面して設置しているため、亜熱帯性気候の高温多湿に加え、塩分濃度の高い環境である。

阪神高速における試験では、暴露期間 2 年 8 か月の中で数か月毎に現地にてハンディスケールによる引張荷重テスト行なってきた (図 12)。現時点で 20 回以上の引張り負荷を与えてきたが、接着面は剥離すること無く 350 N 以上の引張り荷重に耐えた。

表 5 耐久性加速試験環境条件

Table 5. Environmental conditions for durability acceleration test.

条件	項目	時間 hr	温度 °C	雰囲気条件	引張強度 MPa
初期評価	-	-	-	-	≥ 0.6
耐久条件 JIS A 5557準拠 ×1.5倍	アルカリ 温水浸漬	252	60±2	水酸化カルシウム 飽和溶液	≥ 0.4
	凍結 融解	2	-20±3	低温雰囲気中	≥ 0.4
		1	20±3	水中	
	これを300サイクル繰り返す(900 hr)				
熱劣化	504	80±2	高温乾燥雰囲気中	≥ 0.4	
耐久条件 JIS C 60068-2-52	塩水 噴霧	2	15~35	塩化ナトリウム5%溶液	≥ 0.4
		168	40±2	93% 湿度	
	これを4サイクル繰り返す(680 hr)				

表 6 屋外環境暴露試験

Table 6. Outdoor environment exposure test.

暴露現場	環境の特徴	期間	試験内容
B橋 高架下 (阪神高速道路管内)	振動、排ガス、粉じん	2015/11/25~2018/8/1 (2年8か月)	ハンディスケールによる 引張荷重テスト
沖縄県 西表島	高温多湿、高紫外線 高塩分	2016/7/27~2018/5/29 (1年10か月)	引張強度試験 (JIS A 5557準拠)

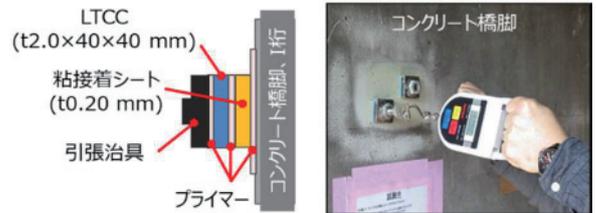


図 12 ハンディスケールによる現地での引張荷重テスト
Fig.12. On site tensile load test by handy scale.

西表島海岸での試験では、暴露期間 1 年 10 か月後の引張試験サンプルを持ち帰り JIS A 5557 に基づく引張強度測定を実施し、規格の 0.4MPa 以上をクリアした。

6. まとめ

道路インフラ状態モニタリングシステムへの適用に向け、センサ、電子回路、無線回路、アンテナ及び自立電源等で構成されるセンサ端末をオールインワンで実装する高耐久性パッケージング技術を開発した。開発項目として、(1)大型セラミックパッケージ、(2)高気密封止接合技術、(3)インフラ構造物への設置技術を取り上げ、検討を行った。パッケージ材として耐候性に優れたセラミック (LTCC)、封止材として無機有機複合接着剤を採用し試作したセンサ端末パッケージにて耐久性加速試験を実施した結果、目標とする 10 年相当の耐久性が得られる見通しを得た。また、インフラ構造物へ設置には、粘接着シートを用いる接合方式を提案し、試験サンプルによる耐久性加速試験にて、同じく 10 年相当の耐久性を確認した。

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られたものである。

文 献

- (1) 下山:「道路インフラの統合的な常時監視を実現するモニタリングシステムの研究開発」, MEMS センシング&ネットワークシステム展 2017 研究開発プロジェクト成果報告会 (2017)
- (2) 一般財団法人 日本品質保証機構ホームページ <https://www.jqa.jp>
- (3) 大日本印刷株式会社ホームページ http://www.dnp.co.jp/works/detail/10113975_18925.html
- (4) 橋向:「有機系接着剤を利用した外装タイル・石張りシステムの開発: その 21.屋外暴露 10 年後の接着強さ」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 269-270 (2005)

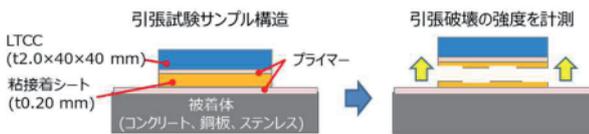


図 10 引張り試験サンプル構造 (JIS A 5557 準拠)
Fig.10. Tensile test sample structure.
(based on JIS A 5557)

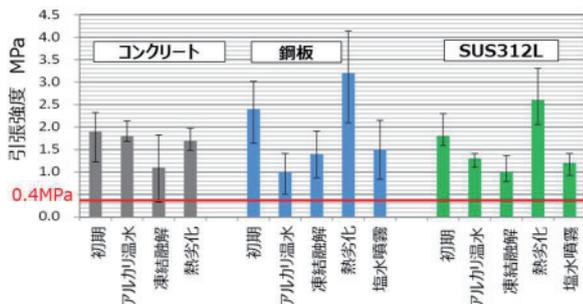


図 11 耐久性加速試験環境暴露後の引張強度
Fig.11. Tensile strength after durability acceleration test environment exposure.

センサ端末同期用原子時計の開発

柳町 真也* (産業技術総合研究所/NMEMS 技術研究機構)

原坂 和宏 鈴木 暢 鈴木 亮一郎 池田 純一 安達 一彦

((株)リコー/NMEMS 技術研究機構)

Development of Ultra Low Power Atomic Clock used for Wireless Sensor Terminal
Shinya Yanagimachi* (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
/ NMEMS Technology Research Organization)

Kazuhiro Harasaka, Mitsuru Suzuki, Ryoichiro Suzuki, Junichi Ikeda, Kazuhiko Adachi
(RICOH Company, Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)

In order to accurately perform safety diagnosis of the infrastructure, it is necessary to guarantee the correlation between the acquired data, then the time synchronization between the sensor terminals becomes important. Road Infrastructure Monitoring System(RIMS) employs a wireless synchronous system. If an atomic clock can be installed in sensor terminals, it is expected that a significant cost reduction in a construction of the wireless synchronous system will be achieved. It is introduced that, for aiming such a goal, the development of Ultra Low Power Atomic Clock(ULPAC) has been proceeded for years.

キーワード: 原子時計, センサ端末, 低消費電力, チップスケール原子時計, 時刻同期

(Atomic clock, Sensor terminal, Low power consumption, Chip Scale Atomic Clock, Time synchronization)

1. はじめに

米国 DARPA では 2001 年頃よりチップスケール原子時計 (Chip Scale Atomic Clock=CSAC) と称した超小型原子時計の国家プロジェクトが進行した⁽¹⁾⁽²⁾。アメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology=NIST), Microsemi, Honeywell, などの 12 グループがお互いに切磋琢磨して競争する体制を採り, 2011 年に Microsemi 社から CSAC が製品化(消費電力 120mW)され, 現在では海底資源探査, 海底地震計などの Global Positioning System(GPS)の電波受信困難地域での時間標準として活用され新たな市場を開拓している⁽³⁾。CSAC は限定された使用時間であればバッテリー駆動が可能であり, また小型で制御ボードに搭載可能であるため, センサネットワークの同期システムを簡略化・広域化し社会インフラ, 建築構造物モニタリングの研究に応用されている⁽⁴⁾。

本研究は道路インフラモニタリングシステム (Road Infrastructure Monitoring System=RIMS)の先導研究として 2015 年 8 月より開始された。開発期間は約 3 年半となる 2019 年 3 月までを予定している。そこでは, 低消費電力型プロトタイプ原子時計 (Ultra Low Power Atomic Clock=ULPAC)を試作しつつ, RIMS で利用されるセンサ端

末に搭載可能な仕様の実現可能性を検討する。表 1 に示す RIMS 適用可能仕様として時刻同期性能(10 ms/10 年)は, 巨大構造物(特に橋梁)の固有振動解析に有効とされるサンプリング周波数 100 Hz⁽⁴⁾, 10 年はインフラ義務化点検周期の 5 年⁽⁵⁾を超えるものとしている。消費電力(1 mW)はセンサ端末に利用されることが多い温度補償型水晶発振器 (Temperature Compensated Crystal Oscillator=TCXO)を置き換えるもの, サイズ(15×15×5 mm³)は汎用の恒温槽付水晶発振器(Oven Controlled Crystal Oscillator=OCXO)を目安とした。

図 1 は消費電力を横軸として ULPAC プロトタイプ試作目標, 及び上記 RIMS 適用可能仕様と共に, 現在市場で入

表 1 ULPAC プロトタイプ目標仕様

Table 1. ULPAC prototype target specification.

	2015 年度	2016年度	2017年度	2018年度	RIMS適用可能仕様
時刻同期性能	0.01 s /3か月	0.01 s / 6か月	0.01 s / 8か月	0.01 s / 12か月	0.01 s / 10年
消費電力	1.5W	120 mW	90 mW	60 mW	1 mW
サイズ	na	(40×40×18) mm ³	(40×35×11) mm ³	(30×30×11) mm ³	(15×15×5) mm ³

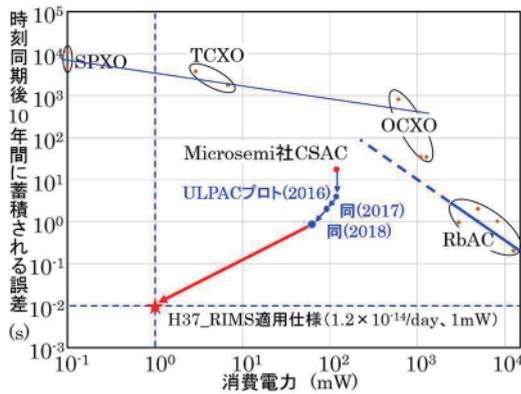


図1 消費電力と時刻維持デバイスの関係

Fig. 1. Time keeping device versus power consumption.

手可能な時刻維持デバイスの時刻同期性能を示したものである⁽⁶⁾。消費電力が大きいほど時刻同期性能が向上する一般則に対して、CSACは消費電力が小さいことが読み取れる。ULPACプロトタイプはCSACを目安に試作を開始し、消費電力を削減しつつ、時刻同期性能向上に取り組んでおり、先導研究の期限である2019年3月時点で目標が達成できる見込みとなっている。本論文ではその概要について紹介する。

2. 低消費電力型原子時計概要

‘時計’と呼ばれるものは、一般的に何らかの周期信号を生成するデバイスとそれを時間情報に変換する同期回路から構成される。日時計であれば、天空中の太陽運行、或は地球自転が発振器に相当する。また機械式時計であればテンブや振り子が発振器、脱進機の一部の機能は同期回路に相当する。

原子時計も電圧制御発振器(Voltage Controlled Oscillator=VCO)から出力された信号を同期回路により‘秒’を刻む機能を備えている。この点は汎用の時計と同様である。異なるのは、電気的な周期信号を原子の固有周波数と比較する仕組みがあり、それらが相異なる場合に、フィードバック機構が働き、原子の固有周波数と一致した状態が保持されることである。発振器の出力信号と原子の固有周波数を比較する部分は求められる精度により種々の方法が採用される⁽⁷⁾。2002年にCSACの技術的な提案が示されて以降、低消費電力型原子時計は、面発光レーザー(Vertical Cavity Surface Emitting Laser=VCSEL)と超小型ガスセルの利用が主流となった⁽¹⁾。ガスセルはmmオーダーのサイズにCsやRbのアルカリ原子をバファガスと共に封入する。VCSELはGHzオーダーまで注入電流を直接変調できるのが特徴で、これらを用いてCoherent Population Trapping(CPT)共鳴と呼ばれる状態を生成する。VCSELの出力光は±1次の側帯波がほぼアルカリ原子の超微細構造間の固有周波数に一致するよう変調周波数 ν_m が選ばれる(Csであれば、 $\nu_m=4.6$

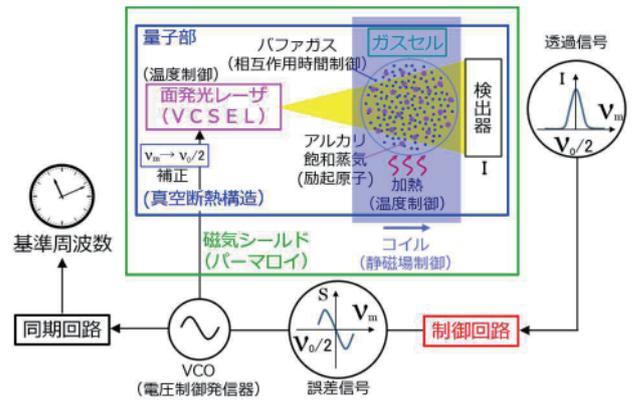


図2 低消費電力型原子時計内部構造概要

Fig. 2. Outline of a low power consumption atomic clock.

GHz, Rbであれば $\nu_m=3.4$ GHz)。それ以前はアルカリ原子の固有周波数に一致するマイクロ波を直接照射していたため、cmオーダーのガスセルが必須であり、光マイクロ波二重共鳴を利用していた。CPT共鳴を利用する場合、光を介してVCOの発振周波数と固有周波数を比較可能なため、省スペースを実現した。±1次の側帯波間の周波数差が固有周波数に一致する場合には、ガスセルを通過するVCSELの透過光強度が極大値とり、これを誤差信号に変換することでVCOの出力周波数が一定になるよう制御する。バファガスはアルカリ原子に対して不活性のガス(希ガスや窒素等)が利用され、ガスセル壁との衝突による緩和を防ぎ、相互作用時間が1ms程度を確保できるような圧力(10~20 kPa)が採用される(図2参照)。

3. 周波数シフト因子と時刻同期性能劣化要因

原子の固有周波数は水晶振動子の発振周波数と比べるとその普遍性は大きい。その一方で、周波数シフト要因も存在する。主なものを表2に示す。これらの値が一定に保持されれば、原子の固有周波数はシフトがあっても定数として扱える。結果、同期回路の設定を調整することで1秒はずれない。すなわち時刻同期性能は劣化しない。しかし周波数シフト要因に関連するパラメータ、例えばガスセルの温度が時間的に変化すると原子時計を駆動している固有周波数が時間的に変動するため時刻同期性能を劣化させる要因となる。

低消費電力型原子時計の場合、相互作用時間を確保するために封入したバファガスとアルカリ原子との衝突により、固有周波数はシフトする⁽⁸⁾。この衝突シフトはシフト量 $\Delta\nu$ とすると

$$\Delta\nu = P_0 \left[\beta + \delta(T - T_0) + \gamma(T - T_0)^2 \right] \quad (1)$$

と表される。ここで P_0 は基準温度0°Cにおけるバファガス圧である。 β 、 δ 、 γ は圧力係数、一次の温度係数、二次の温度係数で、Hz/Pa、Hz/(Pa・K)、Hz/(Pa・K²)のディメン

表2 ULPAC プロトタイプ(2016)の主要条件から推定した周波数シフト量

Table. 2. Frequency shift estimated from the practical condition in ULPAC prototype(2016).

周波数シフト要因となる物理現象	パラメータ	周波数シフト量	相対周波数シフト量
衝突シフト	バファガス分圧 P(=15kPa)	67885 Hz	7.4×10^{-6}
	ガスセル温度 T(=75°C)	1088 Hz	1.2×10^{-7}
ACシュタルクシフト	レーザー光強度 I(=1800μW/cm ²)	570 Hz	6.2×10^{-8}
ゼーマンシフト	磁場 B(=14μT)	9.6 Hz	1.1×10^{-9}

ジョンをもつ。熱力学的に衝突シフトは圧力依存性(衝突頻度由来)と、温度依存性(衝突時の相対速度由来)に分類される。周波数シフト量としては、これらの効果が他と比べると大きい。

衝突シフトの次にシフト量として大きいのは AC シュタルク効果によって発生するものである。これは、レーザー光電場によって誘起される電気双極子モーメントとレーザー光電場の相互作用の結果、原子のエネルギーレベルが変化する現象で、別名ライトシフトとも呼ばれる。発生するエネルギーレベルの変化量を Δw とすると次式の形で表される⁽⁹⁾。

$$\Delta w = \frac{E^2}{4\hbar} |\mu|^2 \frac{(\omega_L - \omega_0 - k \cdot v)}{(\omega_L - \omega_0 - k \cdot v)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (2)$$

ここで、 E はレーザー光電場、 \hbar はプランク定数、 μ は誘起される電気双極子モーメント、 ω_L はレーザー光周波数、 ω_0 はアルカリ原子の D 線の遷移周波数、 Γ は自然幅、 $k \cdot v$ はガスセル内のアルカリ原子がレーザー波面に対して熱運動することで発生するドップラー効果を示す。レーザー光電場はレーザー光強度に由来する。また、実際には VCSEL が変調されレーザー光電場が複数ありそれらの総合的な効果がライトシフト要因となる。表2では簡単のためにパラメータとしてレーザー光強度だけを取り上げたが、より正確には時刻同期性能劣化に結びつくパラメータはレーザー光強度、変調指数、レーザー波長(光周波数)の時間的な変動である。これらは VCSEL のエイジングとも関わり複雑な挙動を示すことが多い。

ゼーマンシフトは、外部磁場と磁気モーメントが相互作用することで原子のエネルギーレベルがシフトすることに由来する。原子時計を構築する際には、外部磁場の直接的な影響を避けるために磁気量子数 $m_F=0$ (F は核スピン I と全角運動量 J の合成角運動量)の遷移が選ばれる。そのため、縮退を解く目的で注意深く制御された磁場が印加され、アルカリ原子の基底状態($J=1/2$)では、Breit-Rabi の式に従っ

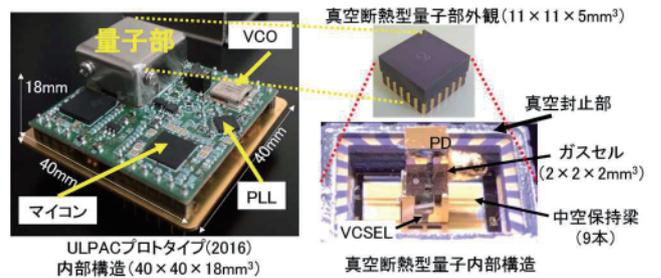


図3 ULPAC プロトタイプ(2016), 及び量子部の内部構造
Fig. 3. Picture of ULPAC prototype(2016) and internal structure of physics package. Vertical Cavity Surface Emitting Laser(VCSEL), Photo Detector(PD), Phase Lock Loop(PLL), Voltage Controlled Oscillator(VCO)

た周波数シフトが発生する⁽¹⁰⁾。

$$\Delta \nu = \frac{x^2}{2}, \quad x = \frac{(g_j - g_i)\mu B}{h\nu_{hfs}} \quad (3)$$

ここで g_j, g_i はそれぞれ軌道角運動量と核スピンの g 因子、 μ はボーア磁子、 B はガスセルに印加されている外部磁場、 ν_{hfs} はアルカリ原子の基底状態超微細構造間の遷移周波数 (Rb : 約 6.8GHz, Cs : 約 9.2GHz) である。

以上記載した四つの周波数シフト要因は、それぞれ VCO 発振周波数と原子の固有周波数を比較する機能を導入するために避けられないものである。そのため、プロトタイプの試作では、これらの周波数シフト量を低消費電力でいかに一定に維持するかが重要な技術となる。

4. プロトタイプ試作

本プロジェクトにおけるプロトタイプの試作では、アルカリ原子として Cs を用いることとした。CPT 共鳴では一般的に D₁線が D₂線よりも S/N 比が大きく、D₁線の観測には Cs が有利となる。理由の一つとして、Rb の D₁線は Rb85 と放射性同位体の Rb87 の共鳴線がバファガス拡がりにより干渉することが挙げられる。

プロトタイプを試作する上で、重要な部品と考えられるガスセルと VCSEL はそれぞれ独自開発した。ガスセルは手作業によるガスセル製造装置を立ち上げ、ガスセルを構成する素材とバファガスのガス透過性の関係を定量的に把握した。また、外形 2 mm 角、内形 1.4 mm 角の非常に小さい石英製のガスセルを製作し、バファガスには N₂ と Ar が 2.55 の分圧比の混合ガスを利用し、動作温度 75°C をピークとした二次温度特性を示すよう配慮した。これは(1)式で示される衝突シフトの温度依存性の一次の温度係数が打ち消されることによる。VCSEL は歩留まり向上を視野に入れ、波長調整層を有する多波長垂直面発光レーザーを考案、作製した⁽¹¹⁾(図3参照)(図4参照)。

これらの部品は CPT 共鳴を観測するためのフォトディテクター(PD)と共に、11×11×5 mm³ のセラミックパッケージ

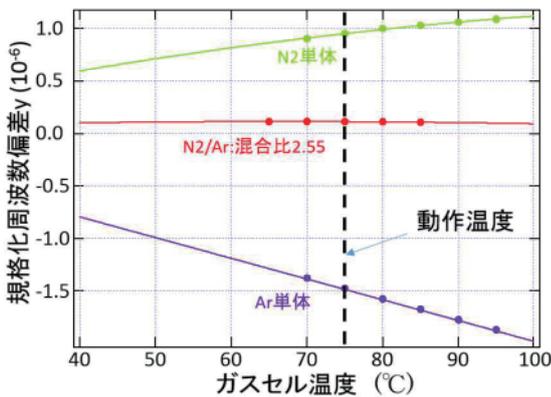


図4 ULPAC プロトタイプ(2016)に搭載されたガスセルの温度特性(赤色, 混合分圧比 $N_2/Ar=2.55$)

Fig. 4. Temperature dependence of gas cell implemented in ULPAC prototype(2016). 緑と紫はそれぞれ N_2 , 或は Ar をバファガスとした場合の温度特性を示す。

内に配置し, 圧力 1~数 Pa の中真空度で封止した。これによりパッケージ外側からの大気を介した伝熱を抑制している。ガスセルの温度安定性を高めるため, 熱を伝えにくいフィルムでガスセルを中空保持する構造を開発した。また, 全体を金でコーティングする事で, 輻射による熱の伝わりも抑制している。これらの真空断熱量子部の熱抵抗は約 5000 K/W で, ガスセル近傍を 75°C に維持するための消費電力は 10 mW 程度である。量子部の周辺には縮退を解くための DC 磁場印加用のコイルを配置し, PC パーマロイ製磁気シールドによって外部磁場の変動を遮蔽する。シールドイングファクターは 60 から 70 である。プロトタイプ(2016)では上記のものが制御回路を含めて 40×40×18 mm³ の筐体中に収められ, 全体の大きさが 4 cm 角以下に収まるプロトタイプを実現した。周波数安定度は CSAC と同等レベルの性能が得られ, 平均時間約 300 000 秒でアラン標準偏差として 2×10^{-11} であった。また, 同時に消費電力も約 120 mW を実験的に確認した(図 5 参照)。

以降の ULPAC プロトタイプ(2017), 同(2018)では VCSEL の長期特性を詳細に把握し, ライトシフト対策に重点を置き開発を進めている。また, 制御回路についても専用の C-MOS 集積回路を新たに開発し, 更なる低消費電力化, 及び小型化の見通しが得られている。予定されている 2019 年 3 月のプロジェクト終了時には時刻同期性能, 消費電力で CSAC を上回る ULPAC プロトタイプを完成することが期待される。

5. 屋外連続稼働実験

RIMS ではセンサ端末を屋外に設置してデータ収集を図る。そのため原子時計も屋外利用を想定する必要があり, 本プロジェクトでは屋外環境での連続稼働実験を進めてい

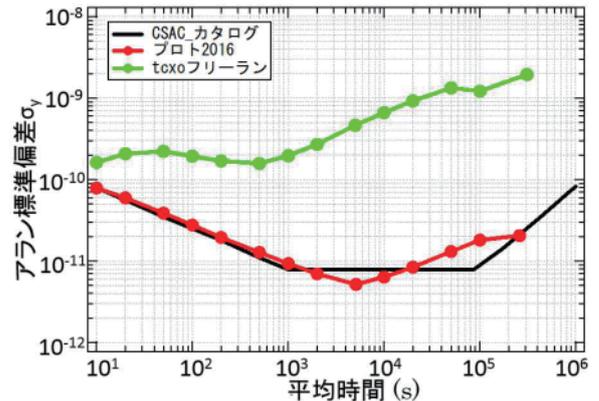


図5 ULPAC プロトタイプ(2016)の周波数安定度 vs 平均化時間

Fig. 5. Frequency stability as a function of the averaging time. CSAC のカタログスペック(黒線), プロトタイプ内に実装している TCXO 自走状態(緑), プロトタイプ(2016)(赤), それぞれの周波数安定度を示す。

る。ULPAC プロトタイプを屋外で単独駆動させた場合は, 時刻同期性能の評価手段がない。そのため, GPS を介して協定世界時(Universal Coordinated Time=UTC)と時刻比較可能な時刻同期モジュールを製作した。5 V の外部電源で稼働し, モジュールのサイズは 100×190×40 mm³ である。外部の基準周波数発生源, または GPS の 1pps 信号を基準として参照し, ULPAC プロトタイプの周波数と 1pps 信号の時間差を自動調整可能となっている。また, ULPAC プロトタイプが基準信号に同期せずに自律制御で動作している状態で, 経過時間ごとに基準時刻との偏差を 100 ns の分解能で検出し, タイムスタンプと共に記録可能なハードウェアも備えている。併せて ULPAC プロトタイプの内部状態(基板温度, ヒーター電圧等)のログも記録する。温湿度計や加速度センサがオンボードとなっている他, 3 個の外部アナログセンサも接続可能である(図 6 参照)。

2017 年 12 月より屋外連続稼働実験を開始した。屋外環境では天候や時間帯による大きな温湿度差や暴風雨などの屋内に比べて過酷な環境での長期的な実験の運用に耐える必要がある。前述した時刻同期モジュールに GPS アンテナを接続して, UTC に同期した 1pps 信号を基準信号として利用できるようにした。屋外における設置場所は宮城県名取市に所在するリコー応用電子研究所の敷地内において, 3 階建てビルの屋上 2 箇所と屋外の 2 箇所の計 4 箇所を選定した。その一例を図 7 に示す。本設置場所は歩道を挟んで交通量の多い国道 286 号線が存在するため, 走行車両によって発生する振動や電磁波の影響が外乱要因として想定される。他にも, 空調用屋外機近傍や, 日光が直射する場所が選定されており, 振動や温度変動が激しい場合等の長期的な安定性を検証する。

屋外連続稼働実験は最長のもので 1 年間継続されている。

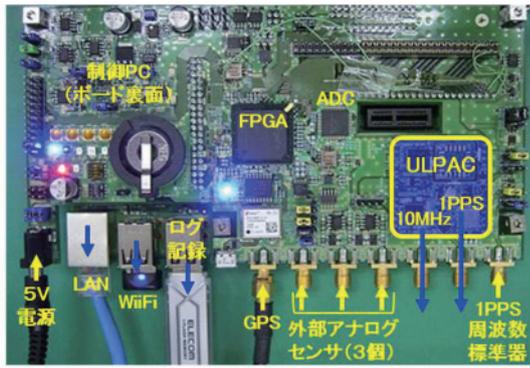


図6 屋外環境で ULPAC プロトタイプを評価するための時刻同期モジュール

Fig. 6. Time synchronization module for evaluating ULPAC prototype in outdoor environment.

これまでに設置環境での磁場や振動は ULPAC プロトタイプ(2016)の特性に影響が無いことが確認された。また、最も大きな変動要因は温度特性であり、補正制御を実装することで影響が軽減することも知見の一つとして得られた。

6. 将来技術の検討

2019年3月にはアメリカ企業により先行発売されているCSACよりも大きき、消費電力、時刻同期性能の点で優れた ULPAC プロトタイプの試作品が出来上がる見通しである。一方、RIMS 適用可能仕様に対しては、特に時刻同期性能と消費電力との観点で、更なる性能向上が求められる。この最終目標仕様を満足するための将来技術の検討も進めている。

時刻同期性能の観点からは、ガスセル内に封止するバフアガス圧の変動を検出するデュアルガス補正法を提案し、実験的な検討を進めている⁽¹²⁾。ガスセル内に封入するアルカリ原子を Cs と Rb の2種類とし、それぞれの CPT 共鳴の周波数差を観測し、原子時計を駆動する周波数に補正を加えることで、更なる高精度化を狙う。また、サファイア単結晶を用いてガスセルを構築することでバフアガス、或は大気中ガスの入出流を究極的に抑え込む技術の有有用性検討も進めている⁽¹³⁾。サファイア単結晶は、ガスセルに通常利用されるホウケイ酸ガラスや石英ガラスに比べてガス透過率が5桁以上小さい。

消費電力の観点からは、更なる低消費電力化を推進するために間欠駆動法の検討を進めている。この手法は通常の原子時計としての動作と、原子による補正機能を休止させた TCXO の自走状態での時刻維持を図るハイブリッド方式である。原子の補正機能が働かない場合には、TCXO 以外の電力は削減できるため省電力化が期待できる。

7. まとめ

RIMS に用いられるセンサ端末に搭載可能な原子時計



図7 設置場所の一つであるリコー応用電子研究所敷地内グラウンド

Fig. 7. One of the outdoor demonstration of ULPAC prototype(2016). 野球グラウンドの隅にあるため打球による衝撃を防止するための保護ゲージ内に設置している。

ULPAC の目標仕様を CSAC と比較しつつまとめた。このような低消費電力型原子時計では CPT 共鳴を利用するが、その場合の周波数シフト因子と時刻同期性能劣化要因について、ULPAC プロトタイプ(2016)の例に照らし合わせて議論するとともに、屋外連続稼働実験の結果を述べた。ULPAC の性能を飛躍させるために必要な将来技術に関して時刻同期性能と消費電力の観点から進めている取り組みを紹介した。

謝辞 ULPAC プロトタイプ試作においては(株)リコー未来技術研究所の本村寛氏、長澤和輝氏、藤原将行氏、庄子浩義氏、高橋啓行氏、中鉢直氏、阿部宏幸氏に多大なるご協力を頂き、謝意を表す。本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究業務の結果得られた成果である。

文 献

- (1) J. Kitching, S. Knappe, and L. Hollberg: "Miniature vapor-cell atomic-frequency reference", *Appl. Phys. Lett.* 81, pp.553-555(2002)
- (2) S. Knappe, V. Shah, P. D. Schwindt, L. Hollberg, J. Kitching, L. Liew, and J. Moreland: "A microfabricated atomic clock", *Appl. Phys. Lett.* 85, pp.1460-1462(2004).
- (3) A. Gardner, and J. Collins: "A second look at Chip Scale Atomic Clocks for long term precision timing", *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. IEEE*, pp.1-9 (2016)
- (4) 倉田成人: 「建築構造物と社会インフラのモニタリング」, 計測と制御, Vol.55, No.3号 p.197-202 (2016)
<https://doi.org/10.11499/sicej.55.197>
- (5) 2014年に国土交通省により近接目視の点検周期が5年と義務付けられた。例えば参考資料として下記がある。
「定期点検の位置づけ」, 国土交通省資料,
http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/0722_01.pdf, (参照 2018-08-14)
- (6) 池上健: 「CPTを利用した小型原子時計開発の世界的動向」, マイクロエレクトロニクス, Vol.52, No.199号 p.77-99 (2008)

<https://doi.org/10.20805/micromechatronics.52.199>

CSAC や、一般的な時刻維持デバイスの性能は当該文献を参考に推測している。

- (7) F. Riehle : “Frequency Standards”, Wiley-VCH, Weinheim, pp.229 (2004).
- (8) M. Arditi, T. R. Carver, “Frequency shift of the zero-field hyperfine splitting of Cs produced by various buffer gases”, Phys. Rev. 112(2), pp.449(1958).
- (9) S. Ohshima, Y. Nakadan, T. Ikegami and Y. Koga, “Light shifts in an optically pumped Cs beam frequency standard” IEEE trans. Instrum. And meas. 40, pp.1003-1007(1991)
- (10) J.Vernier and C.Audoin, “The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards”, Bristol U.K. Adam Hilger , pp.26-30 (1989).
- (11) R. Suzuki, M. Hiroshi, and S. Satoh. "Vertical cavity surface emitting lasers with precise multi-wavelength control." Semiconductor Laser Conference (ISLC), 2016 International. IEEE (2016).
- (12) Y. Furuse, Y. Kase and S. Goka, "Frequency drift detection method using dual alkali gas for coherent population trapping atomic clocks," 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Besancon, pp. 328-331(2017)
- (13) 柳町真也, 池上健, 高木秀樹, 高見澤昭文, 倉島優一: ガスセル, 原子時計および原子センサ, 特願 2016-198702, 2016/10/07

ポンプの異常診断に向けたコアモニタリングシステムの開発

柴田 克彦* 清水 昭浩 陶 昇 (高砂熱学工業)

Fault Diagnosis of Pump using Core Monitoring System

Katsuhiko Shibata*, Akihiro Shimizu, Noboru Sue, (Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.)

This paper presents the result of test conducted in which imitational fault was introduced to understand actual operating conditions and measuring vibration acceleration, etc. The failure of bearing increased current value, surface temperature, vibration acceleration and vibration angular velocity. In addition, we verified that it can detect the failure using the piezoelectric MEMS energy harvester.

キーワード: 異常診断, 異常検知, ポンプ, 軸受, 振動加速度, 振動発電, 不連続

(Keywords, Fault Diagnosis, Fault Detection, Pump, Bearing, Vibration Acceleration, Vibration Harvest, Unsteady)

1. はじめに

熱エネルギー系ライフラインを含む都市インフラの健全化は、インフラ維持管理・更新等の社会課題対応として重要である。特に、病院、地域エネルギー供給システムなどのインフラはその公共性も高く、その中核となる発電機、ボイラ、ポンプ、医療情報機器などの駆動機器、回転機器を核としたシステムの保全が都市機能の安定化・安全化の役割を担う。しかしながら、従来のモニタリングシステムでは、振動加速度センサの設置から信号線のふ設、ソフトウェアを含む監視システムの構築に多大な費用を要し、広く普及するまでには至っていない。

そこで本開発では、ライフラインのコア設備の早期異常検知、健全化が行える常時モニタリングシステムの技術開発に取り組んでいる。モニタリングの対象を、まずは搬送ポンプの振動監視とし、無線通信による配線・センサ設置の制約を無くし、かつ異常振動固有の監視周波数情報だけを収集する小型センサ端末により、周波数解析などの処理を必要としない省電力化で、自己発電デバイスで賄えるシステムの開発を目指している^{(1),(2)}。本報では、モニタリングシステムとセンサ端末である鹿威しセンサの概要を示し、さらに模擬的に発生させた軸受損傷時に発生する各種兆候と、鹿威しセンサでの検出可否について検証した結果を示す。

2. コアモニタリングシステムの概要

〈2・1〉 コアモニタリングシステム 不連続な振動データを用いてポンプの異常検知、異常診断を行うコアモニタリングについて以下に示す。

コアモニタリングシステムの開発では、動力機器の主な

故障原因である回転部位を対象として、機器の劣化兆候を確実に検知し、かつ異常判定の損失(判定漏れ)が格段に少ない高い信頼性と、従来システムに比べ低コスト化を狙う。

(1) 従来型の監視システム 既存の振動監視システムの構成例を示す(図1参照)。信号処理では、振動加速度の時間波形を周波数解析(FFT 解析)し、故障原因との因果関係の強い特定周波数の振動値を監視している。負荷変動の少ない安定した運転に対して、FFTによる周波数領域の解析で異常を検知し得る。しかし、連続監視を行う場合には装置コストが高価となる。また、周波数解析の結果を考察するには専門的な知識が必要となるため、普及が進んでいない。そこで、本開発では、マクロ的に振動の変化を捉え、一次診

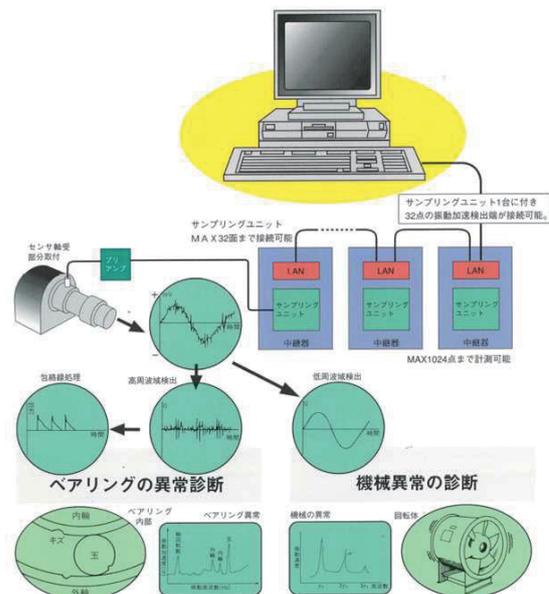


図1 既存振動監視システムの構成例

断として正常と違うことを検知する診断に焦点を当てる。

(2) 不連続データを用いた監視システム 本開発でのポイントは、センシングの低コスト化とメンテフリーである。そのための技術課題として、センサ駆動電源のハーベスト化とデータ伝送の無線化がある。無線化による消費電力を極力少なくするために、センサからは不連続振動データ（以降、鹿威し方式データと呼ぶ）を出力する³⁾(図2参照)。鹿威し方式データの生成回路では、振動発電の電力をキャパシタに蓄電し、電圧が一定のしきい値電圧に達したときに、充電された電力を消費して集積回路と無線回路が駆動し無線送信を行う。無線により電圧が下降するが、振動発電による蓄電で電圧が復電する。蓄電の傾きは、発電に作用する振動加速度の強度によるもので、送信頻度の違いとなる。つまりは、鹿威し方式データの送信間隔が振動加速度の強度や発電素子が共振する周波数の変化を集約した不連続な振動データを意味することになる(図2参照)。

〈2・2〉 鹿威しセンサ コアモニタリングシステムでの重要なセンシング技術である鹿威しセンサについて次に示す。

本開発では、装置コストを含めてポンプ100箇所程度を常時監視できるシステムとして数百万円程度であれば有益性があると考えている。そのための要件としては、センサのコストダウンと配線工事の省略、つまりは自立発電のMEMSセンサと信号の無線伝送である。自立発電では光発電の普及が進んでいるが、機械室を消灯する 경우가多く、安定的に電源が確保できない。そこで、振動発電に焦点を当て、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センサ端末を別途開発している³⁾。この開発では、データ量を削減するアイデアとして鹿威し方式のデータが考案された。鹿威し方式とは、蓄電キャパシタの電力が閾値を越えるとデータを送信する方式で、動作が池の鹿威しに似ていることからネーミングされた。

3. ポンプ軸受の模擬故障試験

〈3・1〉 試験装置 ポンプ軸受の故障を模擬的に発生させた試験装置を次に示す。

試験には、実稼動している冷水ポンプを用いた(写真1参照)。模擬的に軸受損傷を発生させ、ポンプの各種状態値を測定した。対象ポンプと測定器の設置状況は写真に示すとおりである。

ポンプの仕様は、片吸込渦巻きポンプ 200FS4H515, 15kW, 軸回転数 1,440rpm である。振動加速度の測定には、広帯域振動加速度ピックアップ(リオン製 PV-91C)の4分間の時間波形を5分周期でデジタル記録した。振動計の入力設定は、ローパスフィルタ 20kHz, サンプリング周波数 24kHz とした。

また、多方向の振動を同時計測するために、6軸振動センサ(EPSON製 IMU, 振動加速度3軸, 振動角速度3軸)を損傷させた軸受に設置した。このセンサの周波数特性は、共振周波数 200Hz, サンプリング周波数 15.6Hz である。な



写真1 監視対象ポンプと測定位置

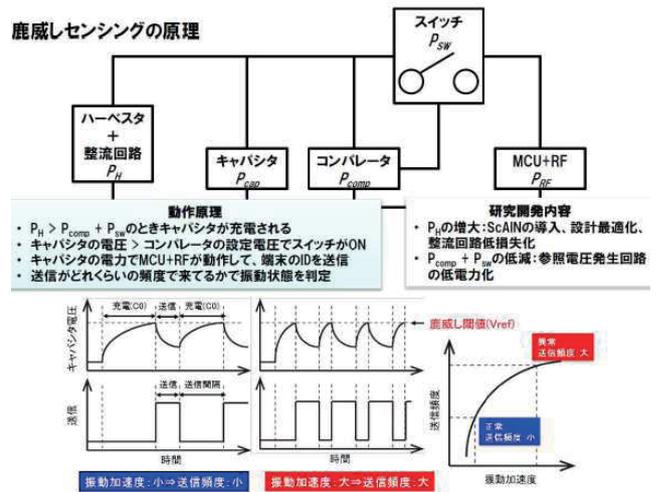


図2 鹿威しセンサの回路と動作



写真2 軸受の模擬損傷

お、このセンサには基板上に温度センサも付いている。

ポンプの運転は、目標流量となるように電源周波数をフィードバック制御している。実験中は、目標流量を固定することでほぼ定速での運転とした。なお、ポンプの部分負荷を確認するため、1分周期で電流値も測定した。

〈3・2〉 軸受の模擬損傷 ポンプ軸受の損傷を模擬的に発生させた状況を次に示す。

軸受損傷として、軸受に異物が混入し、外輪もしくは内輪の転動体と接触する内面にフレーキング(引っかき傷のような損傷)⁴⁾の発生を模擬した。損傷の進行を早めるために、軸受内部の潤滑油をパーツクリーナーにて洗浄することで脱脂した。異物には、SUS304の試験粉体(榊ニラコ製, 100mesh)を用い、耳かき大の葉さじで挿入した(写真2参照)。なお、脱脂、並びに異物混入が、異物混入による実態の損傷に比べてどの程度の加速倍率であるかについては不明であるため、実験データからの実時間換算は不可能である。ただし、同様の模擬破壊試験を行った既往の文献などから⁵⁾、損傷の現象については再現性があると考えられる。なお、

異物混入前の軸受外輪，内輪および転動体表面を目視にて確認した結果では，傷などが見当たらず，正常な状態からの実験開始と思われる。

4. 軸受損傷時の各種状態値

〈4・1〉 モータ電流、軸受部の温度 ポンプに連結しているモータの入力電流ならびに軸受に設置した振動加速度センサ部の温度の経時変化を次に示す。

異物混入後の運転開始から，約 18 時間後の軸受損傷にて電源サーマルトリップで自動停止するまでの電流値ならびに 6 軸振動センサの基板上温度の推移を示す(図 3 参照)。電流値は運転開始から 4 時間程度は，ほぼ 57A で安定した値を示していた。その後 12 時間まで，毎時 1A 程度の上昇が見られた。12 時間から 16 時間までは一旦安定期に入ったものの，さらに上昇が続き，停止直前には最大 94A 程度まで急上昇した。0 時から 40 分間程度上昇したが，これは後述の振動加速度の推移と合わせて考察する。

軸受表面から 15mm 程度離れた 6 軸振動センサ基盤温度では，運転開始時に 32.5℃が 2 時間で約 38℃に上昇したものの，その後は安定し，7 時間経過以降は周囲温度の低下に随伴したと思われる温度低下が起きた。14 時間経過後は，電流値と同様に徐々に上昇し，停止の 12 分前頃から急激に上昇し停止直前には約 65℃に達した。軸受の温度監視では，通常周囲温度+30℃を閾値とするが⁴⁾，停止前には明らかに閾値を越えて異常と判断できる。ただし，温度上昇が急激なことから，傾向管理には不向きな監視項目と思われる。

〈4・2〉 軸受の振動加速度 ポンプ本体及びモータ軸受に設置した振動加速度センサの経時変化を次に示す。

6 軸振動センサで計測した振動加速度を図に示す(図 4 参照)。図中，センサの X 軸は回転軸方向，Y 軸は水平方向，Z 軸は鉛直方向である。図より，X 軸，Y 軸の振動加速度は，運転開始からしばらく同じ変動幅で推移していた。サーマルトリップによる停止の 3 時間前頃から徐々に振幅の変動が大きくなり，停止の約 15 分前には一時変動が小さくなるものの，急激に振動が激しく変動し停止に至った。

一方 Z 軸の振動加速度は，センサ基盤温度と同様に，運転開始から徐々に振幅が大きくなるものの一時変動が小さくなり，10 時間経過後から振幅が激しく変化し，停止に至った。特に，12 時間経過以降は，損傷の進行に伴う増加と，損傷面の馴染みと思われる回復現象による減少が繰り返す呼吸域が発生し，停止直前には急激に大きくなった。振動加速度の大きさは X 軸，Y 軸の 2 倍程になった。

〈4・3〉 振動加速度の周波数変化 振動加速度の周波数成分の変化について次に示す。

広帯域振動加速度ピックアップのデジタル記録データを FFT 解析して得られたパワースペクトルの時間変化を図に示す(図 5 参照)。運転開始当初から 1kHz~4kHz の高周波帯域の振動加速度が大きくなっていった。これは，SUS の試験粉体が，転動体と内輪・外輪の接触面に入り込むことで発生する衝撃波が，脱脂をしたことで減衰することなく伝播

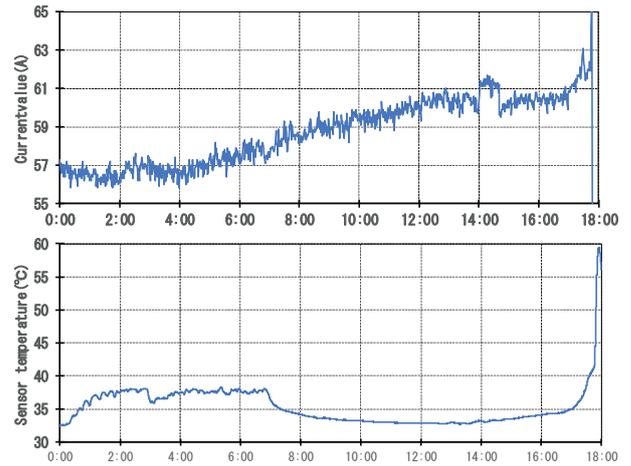


図 3 ポンプ電流値、軸受温度の経時変化

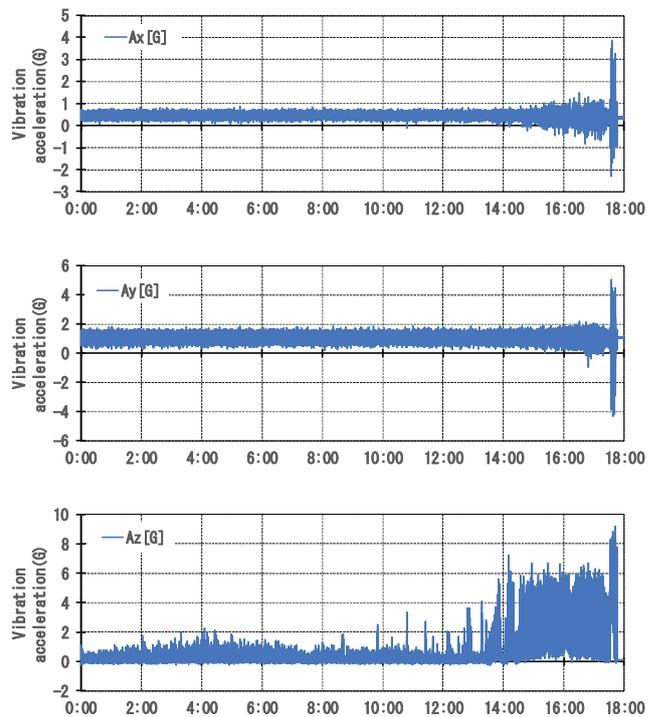


図 4 ポンプ本体軸受の振動加速度の経時変化

されたためと考えられる。停止の 3 時間前ごろから低域から高域の広帯域で振動加速度が大きくなり，サーマルトリップによる停止直前では 4kHz あたりにピークが出現した。

5. 鹿威し方式データの作成

〈5・1〉 鹿威し方式データの生成 振動加速度の時間波形から生成した鹿威しデータについて次に示す。

2 章で示した鹿威し回路の動作を想定して，広帯域振動加速度ピックアップのデジタル記録データを用いて鹿威しデータを生成した。信号処理の手順は次のとおりである。所定の周波数(125Hz)を中心周波数として，カットオフ周波数 3Hz，フィルタにバターワースを用いたバンドパスフィルタを介して再構成した信号を整流し，加算した。この整流した信号はキャパシタの充電に相当するもので，蓄電量に相当する加算値が任意の閾値を超えた時刻が鹿威し方式のデ

ータ発生となる。鹿威し方式のデータ発生後は、加算値をゼロとして再度加算することで、次の鹿威し方式のデータ発生までの時間間隔を鹿威しデータの送信間隔として擬似的に再現できる。

〈5・2〉 鹿威し方式データの変化 軸受の損傷に伴う鹿威しデータの送信間隔の変化を次に示す。

振動発電デバイスの共振周波数を 125Hz とした場合の、擬似的な鹿威し回路のキャパシタへの充電状況と鹿威し方式データの送信動作について、運転開始から停止までの時間変化を図に示す(図 6 参照)。図中、横軸がデジタルデータの保存時間 (4 分)、縦軸がキャパシタへの充電量を示す。連続した増加傾向を示す折れ線は、キャパシタへの充電状況で、閾値とした 0.05 を越えると鹿威し方式のデータ発生により、キャパシタ内の蓄電量がゼロとなった様子を示す。

図より、運転開始当初は鹿威し方式のデータが発生しないものの、運転の経過とともに鹿威しデータの送信間隔が 200 秒程度で出力し始めた。運転の途中で少し間隔が長くなるものの、サーマルトリップ停止の 2 時間程前には送信間隔が 1/5 程度までに短くなった。この変化は、軸受損傷の兆候として先に示した電流値、温度、振動加速度の振幅と角速度に比べ、初期地から変化度合いが大きい。すなわち、劣化兆候を検出するのに、高い S/N 比が得られると言える。

6. おわりに

鹿威しセンサを用いて低コストで簡便な異常診断を可能とするコアモニタリングシステムの開発に向け、実験動しているポンプの軸受損傷を模擬的に発生させ、その各種状態値から損傷前の兆候を観察した。さらに、鹿威し方式データの発生を擬似的に再現した結果から、劣化兆候の可能性を検証した。

今後は、鹿威しセンサによる異常診断の実現に向け、実証実験を積み重ねる。

謝 辞

本研究は、NEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) 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①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発「ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発」による国立研究開発法人 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㈱、沖電気工業㈱、高砂熱学工業㈱の共同研究の一環として実施しているものである。

文 献

- (1) 伊藤寿浩: ライフライン系都市インフラへの自律電源無線モニタリングシステムの活用, MEMS センシング&ネットワークシステム展 2016 研究開発プロジェクト成果報告, 2016
- (2) 柴田ほか: 不連続振動データを用いたポンプ異常診断技術の開発 (第 1 報) 異常モードと振動特性, 空衛学会大会, 1-77, pp.353-356, 2017
- (3) 小林ほか: 圧電 MEMS 振動発電デバイスと鹿威し回路を用いた振動モニタリングシステムの開発, 精密工学会秋季大会, pp.869-870, 2015
- (4) 豊田利夫: 設備診断の進め方, p.88, 1987
- (5) 國枝ほか: ポンプ設備の劣化兆候を検出する技術に関する研究, 農業農村工学会論文集, 00. 1_123-131, 2015

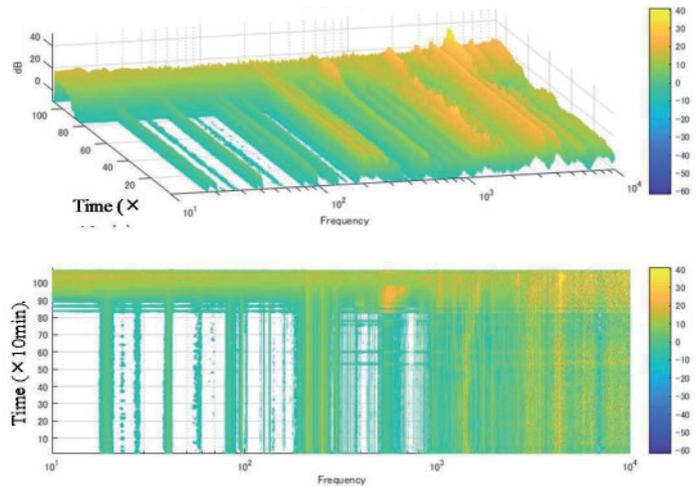


図 5 ポンプ本体軸受の振動加速度の周波数変化

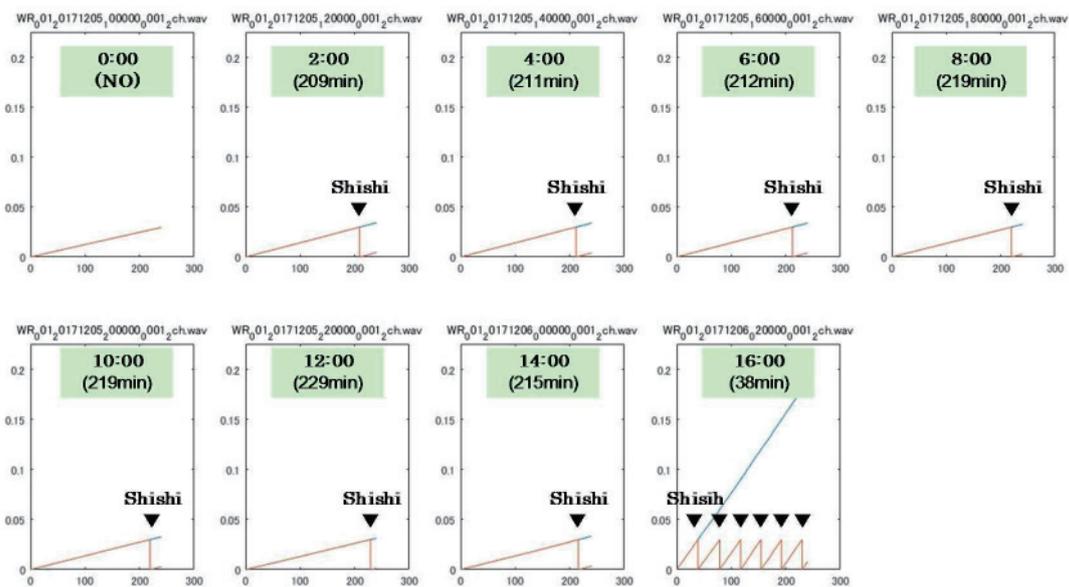


図 6 ポンプ本体軸受の鹿威し方式データ送信間隔の経時変化

回転機器の維持管理を目的とした小型無線振動センサ端末の開発

武井 亮平* 牧本 なつみ 岡田 浩尚 小林 健 (産業技術総合研究所)
伊藤 寿浩 (東京大学)

Compact Wireless Vibration Sensor module for Health-Monitoring of Ro
Ryohei Takei*, Natsumi Makimoto, Hironao Okada, Takeshi Kobayashi, (AIST)
Toshihiro Itho (The University of Tokyo)

We report a compact wireless vibration sensor module powered by a vibration energy harvester for health-monitoring of rotating machinery especially like water pump. The key technologies are an ultralow-power power management circuit and a ScAlN piezoelectric MEMS energy harvester. The power consumption of the power management circuit during standby was suppressed to be 200 nA. The intrinsic compressive stress of the ScAlN film was overcome so that the power generation was increased by 3.7 times. Combining these technologies and prototyping the module, it was demonstrated that the module operation in which the frequency of wireless transmission varies according to the magnitude of input vibrational acceleration.

キーワード: 無線センサ端末, 振動発電, ScAlN、圧電 MEMS
(Wireless sensor module, vibration energy harvester, ScAlN, piezoelectric MEMS)

1. はじめに

ポンプに代表される回転機器のメンテナンスには多くの手間と費用が費やされている。現状のメンテナンス手法は人による目視等の点検がまだ主流のようだ。高い信頼性の要求される回転機器に至っては、過剰なオーバーホールが実施されているという現状である。これを効率化し生産性を向上させるために、回転機器の維持管理をサポートする技術への期待が高い。特に対象の振動を検知する無線振動センサ端末が有用であると考えられている。

いくつかの無線振動センサ端末はすでに上市されている。これらの端末に共通して言えることは、端末の寿命がポンプのメンテナンス間隔よりも短いこと、そしてポンプに設置するには端末サイズが少々大きい(100mm 以上)ことである。そこで我々のプロジェクトでは、振動発電素子の搭載と超低消費電力の電源制御回路を組み合わせて電池容積を大幅に削減し、小型で長寿命な無線振動センサ端末の開発を目指している。

2. 端末構成

我々の開発する端末は、既存の回転機器に後付けで導入可能であることが必須である。老朽化した既存のポンプこそが、最もメンテナンスを要求している。新規の配線敷設は受け入れ難く、無線端末であることが強く求められる。加えて安全性の観点から端末サイズは小型・軽量でなければな

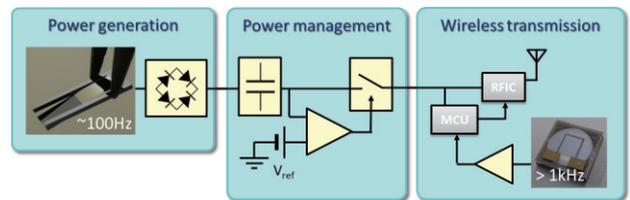


図 1 開発する小型無線振動センサ端末構成
Fig. 1. Configuration of the compact wireless vibration sensor module.

らない。実際の設置現場では、剥き出しのシャフトが高速回転していることは通常の光景であって、大きくて重い端末は据え付けが難しくなり、仮に不十分な据え付けによって端末が落下するような場合には大事故につながる。

これらの課題を克服すべく、我々は図 1 に示すような端末構成を考案した。振動発電素子を搭載しセンシング対象であるポンプなどから発せられる振動を電気エネルギーに変換して利用する。発電素子から得られる電力はほぼ素子体積に比例であり、発電量と小型化とはトレードオフの関係にある。つまり我々の目標サイズ(30mm 角)では端末駆動に足る電力を普通には確保できない。そこで得られた電力をキャパシタに一旦充電し、キャパシタの電圧が所望の電圧に達したところで電力を MCU (Micro Controller Unit) と RFIC に供給し、無線送信を行う方式とした。この場合、常時電力を消費する箇所は、充電キャパシタの電力を監視

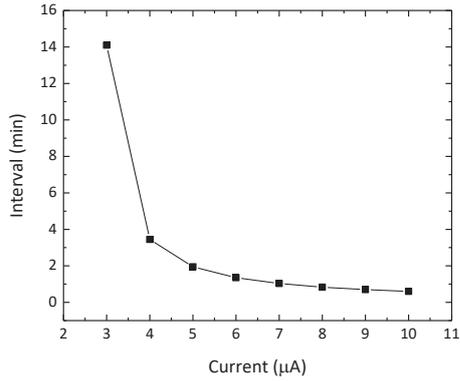


図2 振動発電素子の出力電流と端末の無線送信間隔のシミュレーションされた相関関係

Fig. 2. Simulated relationship between current generated in an energy harvester and time-interval of wireless transmission events.

するコンパレータと電圧比較用の参照電圧を生成する部分(図1のPower managementの箇所)のみであり、消費電流は200nA程度で足りる。十分な寿命(10年)を持たせるために必要な電力量は18mAhであり、腕時計などに利用される小型なボタン電池で賄うことができる。これにより端末重量の大部分を占める電池の大幅な削減ができる。

本方式では、センシング対象である振動と無線送信の頻度には相関があることも大きな特徴である。大きな振動が入力されると発電量も大きくなり、それだけ早く充電され無線送信の間隔が早まることになる。センシング情報をわざわざ送信せずとも、送信頻度に着目することで、ある程度対象の振動の大きさを知ることができる。これは究極的な情報の圧縮にほかならず、端末の識別番号を送信さえすればよい(時刻情報は受信側で付与できる)。図2は振動発電素子から出力される電流と送信頻度の相関をシミュレーションにより求めたものである。これによると、感度が線形でない

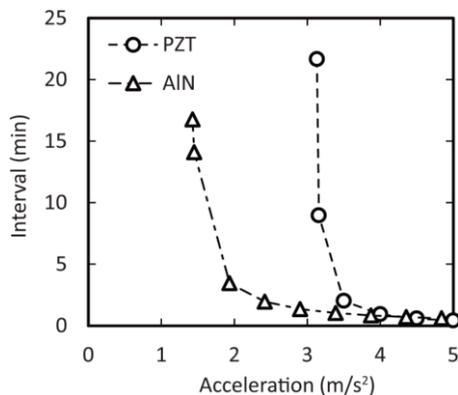


図3 入力振動加速度と端末の無線送信間隔のシミュレーションされた相関関係⁽¹⁾

Fig. 3. Simulated relationship between acceleration of input vibration and time-interval of wireless transmission events.

いにしても振動発電素子の出力は入力された振動加速度の二乗に比例であるので、対象の振動加速度と送信間隔に明確な相関があり、対象の振動加速度の大きさを知ることができることが示されている。

3. 振動発電素子

ここまでは回路側の工夫によって消費電力を削減することで小型の振動発電素子から得られる電力でも端末を駆動できる手法を示した。ここからは振動発電素子そのものの発電量を寸法を大きくすることなく、いかに増強するかについて我々の取り組みを紹介する。

そもそも振動発電の方式は大きく静電、圧電、電磁、磁歪の4つに分類される。中でも静電と圧電は素子寸法が小さくなった時に発電効率が上がる。加えて小型な素子を作製しなければならない要求から、高度な微細加工技術が発達している半導体MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いることとした。そのため半導体微細加工技術と整合性が高く加工性に優れた圧電薄膜技術を採用することとした。

最も代表的で高い圧電定数(d)を有する圧電材料はPZTであるのは言うまでもないが、本研究では窒化アルミニウム(AlN)系の圧電薄膜を採用した。PZTは非常に高い圧電定数を持っている反面、比誘電率(ϵ_r)も非常に高く十分な出力電圧を得にくい。一方でAlNは、圧電定数は高くはないものの比誘電率が低く高い出力電圧が期待できる。発電性能指数(d^2/ϵ_r)でみるとPZTは概ね10程度であるのに対して、AlNは0.6と一桁以上小さい。ところが図3に示すように、PZTの場合は振動加速度が3 m/s²以下では出力電圧が不足しているために端末が動作しない一方で、AlNはその半分程度の1.5 m/s²程度まで低い入力でも動作することが明らかとなった。加えてAlNに対してスカンジウム(Sc)を適量添加することで、圧電定数が最大でおよそ5倍近くまで増大する⁽²⁾。その場合の発電性能指数は7まで向上し、PZTと遜色ない発電性能が期待できる。

ただしScAlNは本質的に非常に強い圧縮応力を有する薄

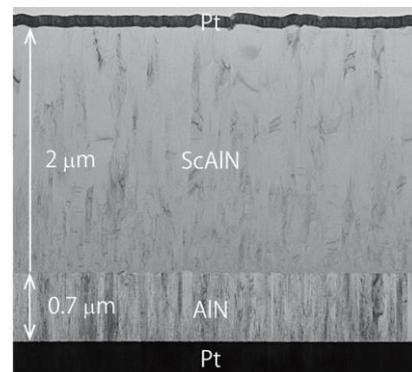


図4 AlN/ScAlN積層膜の断面TEM像
Fig. 4. Cross-sectional TEM (Transmission Electron Microscope) image of a AlN/ScAlN thin film.

膜であるため、Si 基板上に成膜すると非常に大きな基板反りを引き起こす。そうすると微細加工自体が困難となるため、膜応力を緩和する必要があった。応力を緩和する成膜技術の報告はすでになされているが、結晶性の劣化が避けられなさそうだ⁽³⁾。そこで我々は引張応力を有する AlN を積層させて成膜し応力を補償する手法を考案した。図 4 には実際に成膜した AlN/ScAlN 積層膜の断面透過電子顕微鏡像を示している。応力補償の効果は実際に素子を作製することで確かめた。

AlN/ScAlN 積層膜を有する振動発電素子は通常の半導体 MEMS 微細加工技術を用いて作製された。比較用に ScAlN 単層膜の素子も併せて作製した(先述した通り加工は困難を極めた)。SOI 基板上に熱酸化膜、Pt 薄膜、ScAlN 薄膜を成膜した後に、フォトリソグラフィと反応性インエッチング、Ar イオンミリングを用いて微細加工を行った。最後に基板裏面から深堀 Si エッチングで梁の薄肉部を形成した。図 5 中に作製された素子の写真を示す。単層膜の場合、ScAlN の持つ強烈な圧縮応力の影響で片持ち梁が大きく下側に垂れ下がって変形している。その角度およそ 40 度であった。一方で、AlN/ScAlN 積層膜の場合、垂れ下がり角度は 15 度まで抑制されており、全応力が緩和された。蛇足ではあるが、

AlN と ScAlN は親和性が高いと考え、ScAlN の下部に AlN を積層する順序としたところ、わずかではあるが Pt 薄膜上に ScAlN 単層膜を成膜した場合に比べ、X 線回折の θ -2 θ スキャンの半値幅が 0.52° から 0.33° へ改善した。

作製された素子を加速度ピックアップと共に加振器上に設置し、PID (Proportional-Integral-Differential) 制御により入力振動加速度の振幅を 0.5 m/s^2 に保ち加振した。素子は清流回路と負荷抵抗に接続され、交流電力を直流電力に変換して電圧を測定した。振動周波数と負荷抵抗をそれぞれ変化させながら出力電圧を測定した。測定された出力電圧と接続されている負荷抵抗値から発電量を求めて、図 5 に示した。測定された発電量を示している。横軸は振動周波数で縦軸は負荷抵抗を示している。応力補償をした素子では振動周波数 86.8 Hz で最大の発電量 $0.21 \mu\text{W}$ (出力電圧 2.1 V)、応力補償のない素子では振動周波数 37.4 Hz で発電量 $0.13 \mu\text{W}$ (出力電圧 1.6 V) であった。共振周波数が応力補償ありなしの場合で異なるが、入力された振動に対する最大の発電量 (P_{max}) が以下の式で表されるため、規格化して議論できる。

$$P_{max} = \frac{mQa^2}{16\pi f} \dots\dots\dots (1)$$

m は錘の質量、 Q は機械 Q 値、 a は入力振動の振動加速度、 f は入力振動の振動周波数である。得られた発電量 (P_{meas}) を P_{max} で除すことで規格化したところ(次元は無次元)、AlN/ScAlN 積層膜を有する素子の規格化発電量は 282、一方で ScAlN 単層膜素子の規格化発電量は 75 となり、応力補償することで発電量を 3.7 倍に増強させることができた。

3. 端末動作

開発した電源制御回路と振動発電素子を組み合わせ、端末動作を検証した。無線送信のキャリア周波数には 920 MHz 帯を用いた。これは実際に端末を設置する現場の環境

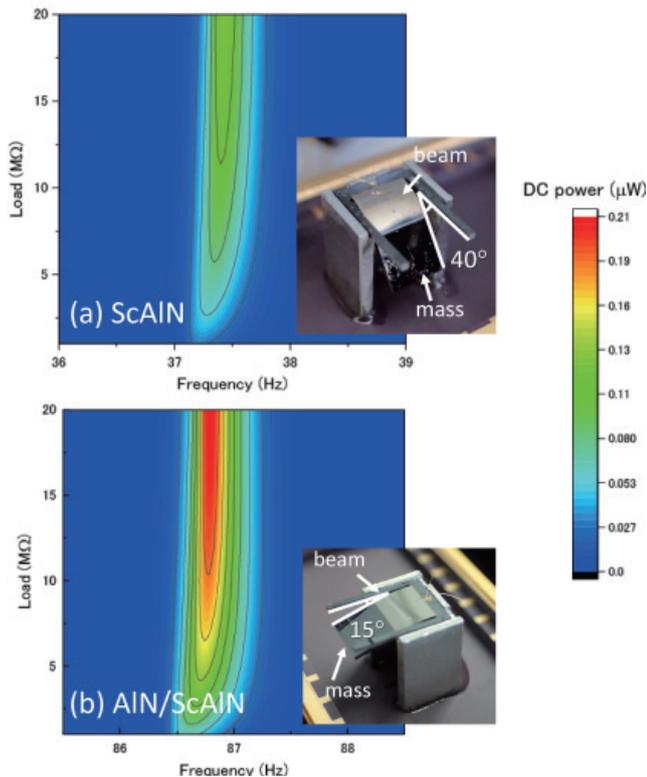


図 5 (a) 応力補償のない ScAlN 単層膜の振動発電素子と (b) 応力補償のある AlN/ScAlN 積層膜の振動発電素子の発電量

Fig. 5. Generated power through a vibration energy harvester (a) without and (b) with stress compensation

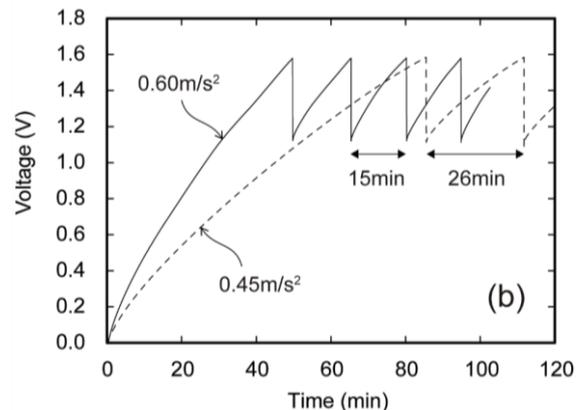


図 6 振動発電素子からの発電量を充電するキャパシタの電圧の時間依存性⁽⁴⁾

Fig. 6. Time-dependence of voltage at a capacitor that generated power from the vibration harvester is charged.

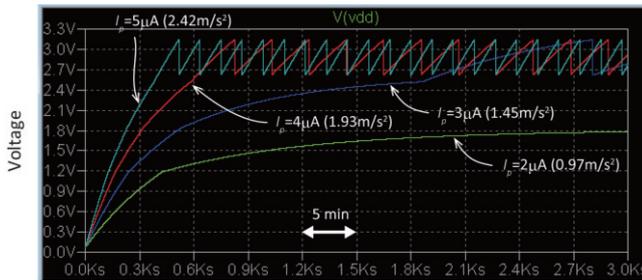


図 7 入力振動加速度と端末無線送信間隔のシミュレーションされた相関関係⁽¹⁾

Fig. 7. Simulated relationship between acceleration of input vibration and time-interval of wireless transmission events.

を屋内であって障害物が存在する環境と想定し、無線送信の到達距離を少なくとも 10 m 程度は確保するためである。送信電力は-2 dBm に設定し、送信するパケットは 42 bit のヘッダーと 40 bit のペイロードの計 82 bit である。MCU には Silicon Labs 社製の C8051 シリーズ、RFIC には Nordic Semiconductor 社製の nRF905 を用いた。

振動の入力には加振器を用いて正弦波振動を振動発電素子に入力し、端末を駆動させた。図 5 は、入力振動加速度を変化させたときの充電キャパシタの電圧を示している。キャパシタが空の状態から、振動発電によって充電され電圧が上昇し、一定の電圧に到達したときに MCU が起動し無線送信を行う。無線送信が起こると電力が消費されるためキャパシタの電圧は降下し、再び充電によって電圧が上昇する。以降はこれを繰り返す。図 5 では入力振動加速度を 0.06 G と 0.045 G としたときのキャパシタ電圧を示しており、無線送信頻度が入力した振動加速度に応じて変化することが確認された。図 6 はシミュレートされたキャパシタ電圧の時間変化を示しており、実験結果とよく一致している。これにより入力振動レベルに応じて送信頻度に相関があることが明確となった。

4. まとめ

本プロジェクトでは、振動発電素子を備える小型無線振動センサ端末を開発している。主要な要素技術として、消費電流 200nA の超低消費電力電源制御回路と、高い出力電圧で PZT に匹敵する発電性能を有する ScAlN 圧電薄膜を用いた振動発電素子について我々の取り組みを紹介した。これらの主要技術を組み合わせて無線振動センサ端末を試作したところ、入力振動加速度の違いに応じて無線送信頻度が変化する端末動作が実証され、ポンプをはじめとする回転機器の傾向管理に有用な端末を開発できた。今後は、実際にポンプに取り付け実証実験を重ねていくことで、さらなる端末性能の向上に努めたい。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託研究業務の結果得られたものです。

文 献

- (1) R. Takei, H. Okada, N. Makimoto, T. Itoh, and T. Kobayashi : "Simulation of an ultralow-power power management circuit for MEMS cantilever piezoelectric vibration energy harvesters", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.55, No.10S 10TA06 (2016)
- (2) M. Akiyama, T. Kamohara, K. Kano, A. Teshigahara, Y. Takeuchi, and N. Kawahara : "Enhancement of Piezoelectric Response in Scandium Aluminum Nitride Alloy Thin Films Prepared by Dual Reactive Cosputtering", Adv. Mat., Vol.21, No.5 pp.593-596 (2009)
- (3) S. Mishin, M. Gutkin, A. Bizyukov, and V. Sleptsov : "Method of controlling coupling coefficient of Aluminum Scandium Nitride deposition in high volume production", 2013 Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC) p.126-128 (2013)
- (4) R. Takei, H. Okada, T. Kobayashi, D. Noda, R. Ohta, and T. Itoh : "Wireless vibration sensing system powered by a piezoelectric MEMS vibration energy harvester," IEEE SENSORS (2016)

ライフラインコアモニタリングのための無線ネットワークシステム

川本 康貴* 小林 啓洋 松永 聡彦 山口 浩平 (沖電気工業株式会社)

Wireless network for utility infrastructure core monitoring system
Yasutaka Kawamoto*, Akihiro Kobayashi, Toshihiko Matsunaga,
Kohei Yamaguchi (Oki Electric Industry Co., Ltd.)

ライフラインのコアを担うポンプ等を安定稼働させるためには常時モニタリングシステムの設置が有効である。しかし常時モニタリングシステムは設置コストが高いためあまり普及していなかった。設置コストを下げるにはシステムのケーブルレス化が有効である。そこで我々は、ケーブルレスなモニタリングシステムを実現するために容量が5000 mAh程度の電池を使って10年間連続動作する無線ネットワークシステムを開発した。本報告では、本無線ネットワークシステムの開発内容及び動作について報告する。

キーワード: ライフラインコアモニタリング, 無線ネットワークシステム, 省電力、長寿命
(Lifeline core, Wireless network system, low power consumption, long life time)

1. はじめに

本論文は2017年にOKIテクニカルレビューにて発表した内容を拡張したものである⁽¹⁾。

2012年の笹子トンネル崩落事故以来、我が国ではICTを利用したインフラ維持管理・更新・マネジメントに関する研究開発が活発になっている。例えば各省庁が積極的にICTを利用した社会インフラの維持管理技術の開発に注力している⁽²⁾。

病院や地域エネルギー供給システムといった公共性の高いインフラシステムは、安全かつ持続的に利用できることが望まれる。そのためにはシステムの中核である発電機やボイラ、ポンプなどの駆動機器、回転機器の異常を早期に検知し、機器が本格的に故障する前に修理をしてシステム全体の健全性を確保することが重要である。

機器異常の早期検知には機器の状態を常時モニタリングするシステムの導入が効果的であることがわかっている。しかしながら、このようなシステムはデータ通信や電源のためのケーブル敷設工事等の導入コストが高く、普及には至っていない。

こういった情勢を踏まえ、我々は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務として、発電機やポンプといったライフラインのコアを担う駆動機器の健全性を常時モニタリングするシステム(UCoMS: Utility Infrastructure Core Monitoring System)を研究開発中である⁽³⁾。本稿では開発中のシステム

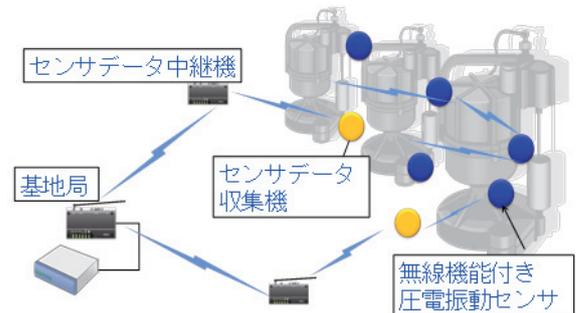


図1 UCoMSの無線ネットワーク構成

の内、特にOKIが担当する無線ネットワークシステムに関する研究開発について紹介する。

2. UCoMSの無線ネットワークに対する要求

インフラとしての信頼性が求められるポンプや発電機といった駆動機器の常時モニタリングシステムを普及させるためには、システムの導入コストを下げる必要がある。システム導入コスト削減には、通信配線や電源配線を無くした「システムの完全ケーブルレス化」が効果的である。システムを完全にケーブルレス化することで、配線の敷設費用が削減されるだけでなく、モニタ用センサの設置容易性も高まりシステム全体の導入コストが大幅に削減できる。

センシングしたデータをデータ処理用PCに接続された無線基地局で収集する無線ネットワークのネットワーク形態

には、スター型ネットワークとツリー型ネットワークの 2 種類がある。スター型ネットワークとは、ネットワークに参加しているすべての機器が基地局と直接通信可能なネットワーク形態である。一方、ツリー型ネットワークは、基地局と直接通信できない機器もネットワークに参加できるネットワーク形態である。基地局と直接通信できない機器は、基地局と直接通信できる他の機器にデータの中継を依頼することにより、基地局と通信する。このような中継を利用した通信をマルチホップ通信とよぶ。ツリー型ネットワークは、マルチホップ通信をすることで機器間の通信距離を短くできるので通信部分の回路を簡素化でき、機器の無線部分を小型安価に作成可能である。また、通信距離が短いと通信時の消費電力も低く、電池での長期間動作が可能となる。さらに、基地局と機器との間に遮蔽物があり直接通信ができない場合でも、マルチホップ通信で障害物を回避して通信ができるので通信の到達性能も高い。

モニタリング対象となるポンプ等が設置されている環境はパイプや他の設備といった多くの遮蔽物が存在するので、通信の際にはこれらを回避して通信する必要がある。また、さらに、電源配線をなくすためには電池駆動で動作する必要がある。よって、UCoMS のための無線ネットワークは、マルチホップ通信である必要がある。

UCoMS の研究開発が始まった 2013 年当初、データの中継をする機器も含めて電池駆動でネットワークを構築する技術は確立されていなかった。以上のことから、UCoMS のネットワークを完全化するためには、中継機も含めて電池駆動可能な省電力無線マルチホップネットワークプロトコルを開発する必要があった。

3. UCoMS のシステム構成

UCoMS のシステムの構成を図 1 に示す。

UCoMS が対象としているポンプ等の駆動機器は、振動の周波数特性をモニタリングすることで異常発生を早い段階で検知できることがわかっている⁽⁴⁾。例えば、ポンプのねじが緩んでいる場合や回転軸がずれている際にポンプの振動を測定しフーリエ変換すると、ポンプの回転周波数の N 倍成分が強くなっている。

ポンプ等の監視対象機器には無線機能を持つ圧電振動センサ（以下、センサ）を取り付ける。このセンサは特定の周波数成分に反応して発電するエナジーハーベスティング機能を持つ。振動により発電した電力が一定量たまるとセンサデータ収集機へ信号を送信する。ポンプに異常が発生して振動の周波数特性が変わると、センサの発電量が変化する。その結果、センサから信号は送信される時間間隔が変わる。よって、センサから信号が送信される時間の間隔を測定することにより、ポンプの振動の周波数特性の変化を推測でき、結果としてポンプの異常を検知できる。

一般的なポンプの設置現場では、ポンプの近くにメンテナンス機器を動作させるためのコンセントが用意されてい

る。センサデータ収集機はこのコンセントを利用して動作する。なぜならセンサからの信号はいつ来るかわからないので、連続受信状態で待機する必要があるからである。センサデータ収集機はセンサからのデータを収集してタイムスタンプをつけ、センサデータ中継機や基地局へ転送する。

センサデータ中継機は電池駆動であり、センサデータ収集機からのデータを転送する機能を持つ。センサデータ中継機の電池として想定されている電池容量は約 5000 mAh であり、動作期間は 10 年程度を目標にしている。

基地局へ集められたデータはログとして保存され定期的に解析される。

前述のマルチホップ通信を使って通信するのはセンサデータ収集機、センサデータ中継機、基地局間である。

4. 目標性能達成のための取り組み

UCoMS は通信に対する省電力目標が高い。例えば、現在のセンサデータ中継機の、受信待機時の消費電流は 20 mA である。よって、省電力の工夫を何もしない場合、利用を想定している電池ではセンサデータ中継端末を 10 日間程度しか動作させることができない。データ送信時の消費電流は 30 mA と受信待機時の消費電流よりも大きいので、運用時の動作時間は更に短くなる。10 年間連続動作させるためには消費電力を 500 分の 1 程度にする必要がある。

マルチホップ通信は通信レイヤとして少なくとも通信に利用する伝送媒体とその利用方法を規定する物理層、周囲の通信機との通信方式を規定する Media Access Control (MAC) 層、マルチホップ通信の際の通信経路の決定やデータの中継方法を規定する Network (NW) 層からなる。UCoMS の通信に対する消費電力目標を達成するためには、上記 3 つのレイヤすべてに対して省電力に対する施策を実施する必要があった。以下にそれを説明する。

〈4・1〉 物理層に対する施策

UCoMS のようなインフラモニタリングのための無線ネットワークで利用する通信帯域として 920 MHz 帯域が目ざされている。920 MHz 帯域は、同じく Industrial, Scientific and Medical radio bands (ISM バンド) として普及している 2.4 GHz 帯域に比べて長距離通信が可能である。また、回り込み性能も高い。更に、2.4 GHz 帯域はすでに ISM バンドして様々な用途に使われるので 920 MHz に比べて雑音が多く、パケットロスが発生ししやすい。日本では IEEE 802.15.4g⁽⁵⁾ が 920 MHz 帯域で使える通信規格である。

IEEE 802.15.4g は、通信レートこそ 100 kbps と、2.4 GHz 帯域を利用する IEEE 802.15.4⁽⁶⁾ の通信レートである 250 kbps に比べて遅いが、通信距離は 20 mW 出力で見通し 1 km 以上になる。これは通信距離が見通しで高々 250 m 程度である IEEE 802.15.4 に比べて長い⁽⁷⁾。よって、IEEE 802.15.4g を利用したほうがセンサデータ中継機の設置台数をへらすことができる。また、IEEE 802.15.4g は IEEE

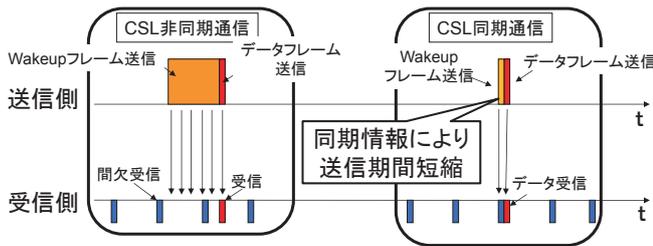


図 2 CSL の動作シーケンス

802.15.4 に比べて回り込み性能が高いので、UCoMS が設置されるような、パイプシャフトといった多くの遮蔽物が存在する環境に適している。以上の検討から、UCoMS で利用する通信方式の物理層として 920 MHz 帯域が最適であると判断し、採用した。

〈4・2〉 MAC 層に対する施策^{(8) (9)}

電池を利用した長寿命を実現するための MAC 層の技術として、Low Power Listening (LPL)⁽¹⁰⁾がある。LPL は受信側が間欠受信動作をし、送信側が受信側の間欠受信タイミングに合わせてデータを送信することで省電力通信をする方式である。IEEE 802.15.4e⁽¹¹⁾で定義されている Coordinated Sampled Listening (CSL)も LPL をベースとした方式である。今回の開発では CSL を採用している。

CSL の通信シーケンスを図 2 に示す。

送信側が受信側の間欠受信タイミングを知らない場合、データ送信は CSL 非同期通信となる。これは送信側がデータフレームを送信する前に Wakeup フレームを長期間連続送信する通信である。Wakeup フレームにはデータフレーム送信タイミング(「後何 msec 後にデータフレームを送信するか」)に関する情報が入っている。受信側は間欠受信タイミング時に Wakeup フレームを受信した場合、Wakeup フレーム内の情報に従ってデータ受信する。受信側はデータに対する Ack 内に情報を入れることで自身の間欠受信タイミングを送信側へ通知する。

送信側が受信側の間欠受信タイミングを知っている場合、データ送信は CSL 同期通信となる。データ送信の前に Wakeup フレームの連続送信をする点は CSL 非同期通信と同じだが、違いは Wakeup フレームの連続送信期間である。CSL 非同期通信時の Wakeup フレーム連続送信期間は間欠受信期間(秒オーダー)より長く設定されている場合が多い。しかし、CSL 同期通信の Wakeup フレーム連続送信期間は 20 msec 程度である。何らかの理由で送受信間の同期が外れて CSL 同期通信が失敗した場合、送信側はデータ送信時に CSL 非同期通信をするようになる。

CSL 非同期通信時の Wakeup フレーム連続送信期間はデータフレーム送信にかかる期間(msec オーダー)に比べて十分長く、オーバーヘッドが大きい。よって、CSL を使って通信をする場合は同期を維持して CSL 同期通信を続けることが重要になる。

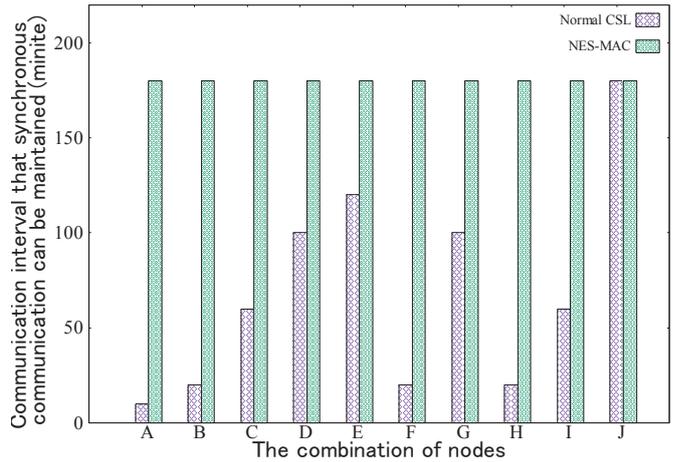


図 3 NES-MAC の同期性能の検証実験結果

NES-MAC を利用するとすべてのノードで再同期間隔が 3 時間以上になっても同期が維持できている

ノード間の同期ずれを修正すると CSL 同期通信を長期間維持できることは判っていた。そこで、ソフトウェア的に同期ずれを補正する機能を持つ省電力無線通信プロトコルスタックである NES-MAC を開発した。CXO の誤差を補正することによって、同期維持のための通信頻度を下げることができた。

NES-MAC による性能向上を明らかにするために、100 台程度の無線機から無線機のペアを無作為に A~J の 10 組選んで同期維持性能の測定実験をした結果を図 3 に示す。図 3 の横軸は無線機のペアを示し、縦軸はそのペアで同期維持が可能な同期通信間隔を示す。CXO の誤差を補正せずに CSL 通信をしたところ、同期維持ができる再同期間隔は、組み合わせにより 5 分~3 時間のばらつきがあった(図 3 の Normal CSL)。例えばペア A の場合、CSL 同期通信確立後、5 分以内に再同期のための通信をしないと同期が外れてしまい CSL 同期通信が維持できない。しかし、NES-MAC を利用した場合にはすべての無線機の組み合わせで再同期の間隔が 3 時間程度開いても同期が維持できていることが明らかになった(図 3 の NES-MAC)。

〈4・3〉 NW 層に対する施策⁽¹²⁾

NW 層に対する施策はデータ中継ノードに通信が集中することを防ぐプロトコルである Statistical Smoothing Method (SSM) および省電力優先の通信経路構築方式を開発した。

多くの無線マルチホップネットワークプロトコルでは、通信環境を元に各ノードが自律的に親ノード(=データ中継ノード)を選択してネットワークを構築する。よって、例えば通信環境の良い特定のノードに子ノードが偏るといった事態は頻繁に発生する。外部電源で動作する通常の無線マルチホップネットワークではこれは問題にならない。し

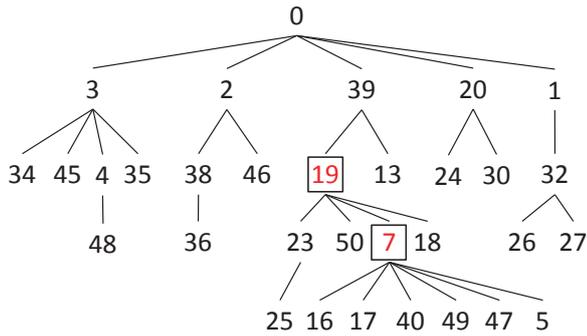


図 4 初期状態

ノード 19 および 7 に子ノードが集中
 かし、データを中継する親ノードがバッテリー駆動かつ省電

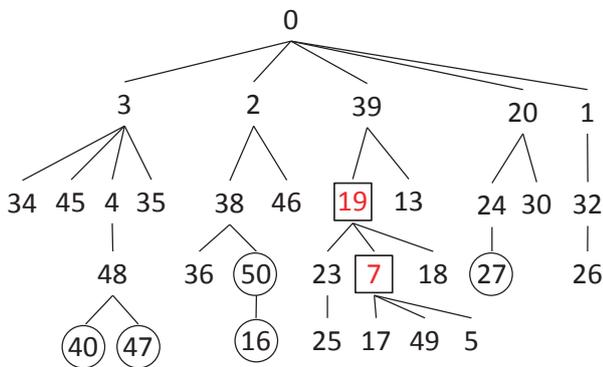


図 5 平滑化実施後

子ノードが平滑化されている
 力動作をする場合、このことは課題になる。例えば、親ノードの電池が 10 年程度持つようにネットワークを設計しても、子ノードの偏りが生じて特定の中継機へデータ中継が集中すると、親ノードの電池が途中で切れてしまいシステムを長期間維持できない。また、CSL を使った子ノードは、受信側である親ノードが間欠受信するタイミングでデータ送信をするので送信が集中し、輻輳が発生する確率も高い。

そこで、こういった課題を解決するための子ノード平滑化プロトコルである SSM を開発した。SSM ではネットワークのトポロジ情報を元に子ノードの数が他のノードに比べて著しく多いノードである「外れ値ノード」を見つけ出し、そのノードに対して子ノードの数を調整するようにコマンドを発行することで子ノードの平滑化を実現する。

平滑化を適切に実施するためには外れ値ノード検出方法が重要になる。子ノード数の標準偏差と平均値を利用した外れ値ノード検出方法は、今回のように外れ値の存在が想定されるデータの外れ値検出基準としては適切ではない。なぜなら、標準偏差や平均値といった値は外れ値の影響を受けやすいので検出すべき外れ値を見逃してしまう現象が発生するからである⁽¹³⁾。

SSM では外れ値ノードの検出方法として、データの個数とデータ順序から外れ値を選別する箱ひげ図法⁽¹³⁾を採用した。箱ひげ図法は、その外れ値の選別方法が外れ値の影響

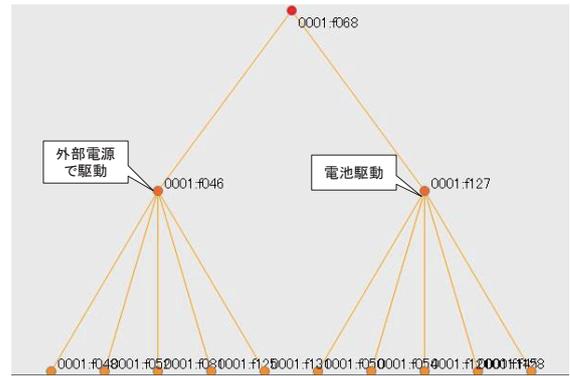


図 6 通信路を電波環境でのみ決定

設置場所から最も近いノードの中継機として決定

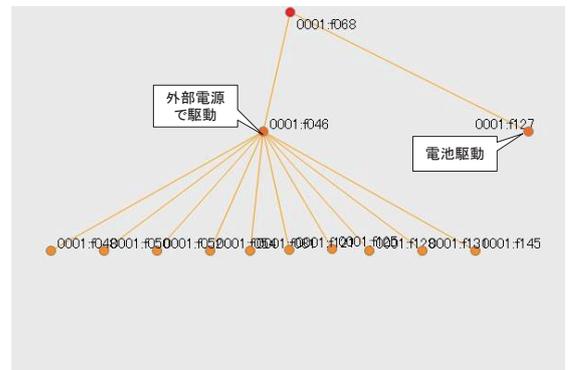


図 7 通信経路を電波環境および外部電源の有無で決定

外部電源駆動しているノードに中継が集中

を受けにくいという特徴を持つ。箱ひげ図法を利用することにより、一般的な統計的手法を利用するよりも適切に外れ値ノードを検出できるようになった。

例えば、図 4 のように特定のノードに子ノードが偏っているネットワークに対して SSM を適応すると、図 5 のように平滑化される。机上シミュレーションの結果、子ノードの平滑化によって送信電力を最大二分の一に、輻輳発生率を最大四分の一まで低減できることがわかった。

多くの無線マルチホップネットワークプロトコルでは、ネットワーク構築の際には、通信環境のみを元にネットワークを構築していた。しかし、例えば UCoMS のように外部電源で動作するノード (センサデータ収集機) と、電池で動作するノード (センサデータ中継機) が混在するネットワークである場合、少々通信環境が悪い場合でもデータ中継を外部電源で駆動するノードで実施したほうがシステム全体の寿命は伸びる。そこで我々はネットワーク構築を、通信環境だけではなく、中継機の電源種類を考慮して実施する、省電力優先の通信経路構築方式を開発・実装した。

具体的にはノード間で自身の情報をやり取りする際に自身が外部電源で動作しているか、電池で動作しているかの情報を追記しておく。各ノードは通信経路を構築する際にデータの中継するノードの選定を、そのノードとの通信状況 (通信時の RSSI 値) とともに、動作電源の種類を加味し

て実施する。

例えば、従来の方式では図 6 のようなネットワークに対して本方式を適応すると、図 7 のように子ノードは外部電源で動作するノードを中継機として選択するようになる。外部電源ノードは間欠受信する必要がないので、送信側のデータ送信タイミングが集中することを起因とする輻輳も発生しない。

5. あとがき

ケーブルレスなポンプ常時モニタリングシステムの内、特に OKI が担当している省電力無線ネットワークに関する取り組みを紹介した。UCoMS で利用する無線マルチホップネットワークの物理層、MAC 層、NW 層のすべてのレイヤに対して施策を施した結果、目標である電池での 10 年動作を達成する見通しが立っている。

本研究開発プロジェクトは 2018 年 8 月現在、5 カ年計画の最終年度にあたる。現在、様々な環境での実証実験を通してシステムの検証および、新たな課題対応を実施中である。

6. 謝辞

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものです。

文 献

- (1) 川本康貴・小林啓洋:「ポンプ常時モニタリングシステム向けネットワークシステムの開発」, OKI テクニカルレビュー, Vol.84, No.1 p.16-19 (2017)
- (2) http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/infra_roukyuuka/dai1/sankou.pdf (2018/08/17 Access)
- (3) <http://ucoms.la.coocan.jp/> (2018/08/17 Access)
- (4) 横田伸夫:「ポンプの異常診断と予知予防について」, ターボ機械, Vol.16, No.8 pp.448-454 (1988).
- (5) IEEE Computer Society: “IEEE standard for local and metropolitan area networks--Part 15.4: low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs) amendment 3: physical layer (PHY) specifications for low-data-rate, wireless, smart metering utility networks.”, IEEE Standards, (2012)
- (6) IEEE Computer Society: “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”, IEEE Std (2011)
- (7) <https://www.oki.com/jp/rd/wl/> (2018/08/17 Access)
- (8) 川本康貴, 松永聡彦, 門勇一: 「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」, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, No.189 pp65-70 (2015)
- (9) Yasutaka Kawamoto, Toshihiko Matsunaga and Yuichi Kado: “MAC protocol with clock synchronization correction for a practical infrastructure monitoring system”, International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol.14, No.4, (2018)
- (10) Cano, Cristina, et al.: "A low power listening MAC with scheduled wake up after transmissions for WSNs." IEEE Communications Letters, Vol.13, No.4 (2009).
- (11) IEEE Computer Society: “IEEE standard for local and

metropolitan area networks--Part 15.4: low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs) amendment 1: MAC sublayer. IEEE Standards”, IEEE Std, (2012)

- (12) 小林啓洋, et al: 「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」, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.116, No.187 pp.19-24 (2016)
- (13) 野呂竜夫,和田かず美: 「統計実務におけるレンジチェックのための外れ値検出方法」, 統計研究彙報, Vol.72, pp.41-53 (2015)

本論文中に記載されている会社名、商品名は一般に各社の商標または登録商標です

建物の構造ヘルスマニタリングシステムの開発

吉田 隆司* (横河電機) 下坂 哲也 (長野日本無線)

佐藤 貢一 (大成建設) 肥田 剛典 (東京大学)

Development of structure health monitoring system for building

Takashi Yoshida* (Yokogawa Electric Co.), Tetsuya Shimosaka (Nagano Japan Radio Co.)

Kouichi Sato (Taisei Co.), Takenori Hida (The University of Tokyo)

The structure health monitoring system of the building using high sensitivity silicon vibration-type resonance sensors was developed. The system was installed in the building of 10 stories, and the behavior of the natural frequency could observe the difference between in the normal state and at the time of the storm.

キーワード: MEMS, シリコン振動子, 振動式加速度センサ, 振動式ひずみセンサ, 構造ヘルスマニタリング (Keywords, MEMS, silicon resonator, resonant acceralate sensor, resonant strain sensor, structure health monitoring)

1. はじめに

政府地震調査研究推進本部 (地震本部) が公表している“全国地震動予測地図 2018 年度版¹⁾によると、太平洋ベルト地帯を中心に今後 30 年間に震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率が高く示されている。2018 年 6 月 18 日に発生した大阪府北部地震では、地震の規模は M6.1, 最大震度 6 弱を観測し、大阪では交通機関の乱れから多数の帰宅困難者が発生した。かつての 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災の際にも首都圏では 515 万人の帰宅困難者が発生し、帰宅困難者を受け入れる施設の不足が明らかになった。東京都では、帰宅困難者対策条例が平成 24 年に制定され²⁾、企業は発災時には施設の安全確認を行い、帰宅困難者への建物内への待機に備えなければならないとされている。しかし施設の安全点検は、現状では専門家による応急危険度判定が必要で、大都市での建物の健全性を判定するには膨大な時間と労力を要している。

このような背景から、本開発では加速度センサ、ひずみセンサなどの観測データと解析技術を併用して、インフラ構造物の健全性評価をリアルタイムに行い、発災時直後の建物の使用継続可否を即時に判定し、さらに将来の発災による建物の損傷予測まで可能とする構造ヘルスマニタリングシステムの開発を目指している。本報告では、モニタリングシステムの要となるセンサに高感度で高い信頼性を兼ね備えたシリコン振動式レゾナントセンサによる加速度センサ、傾斜センサ、ひずみセンサを開発し、これを用いた構造ヘルスマニタリングシステムの概要を紹介する。

2. シリコン振動式レゾナントセンサ

シリコン基板を微細加工して振動子を形成し、振動子に加

わる機械的ひずみを共振周波数の変化として検出する。周波数を検出する測定方法はカウンタを用いるため、電圧で計測する方法に比べて高い測定精度が実現できる。また、シリコン単結晶のもつ弾性領域での良好な再現性と長期安定性の材料特性から、信頼性の高いセンサが製造可能となる^{3),4)}。

シリコン振動子を、錘を支えるバネ部に配置することで、加速度によって加わるひずみから加速度を検出できる。図 1 にセンサチップの部分図を示す。センサの大きさは 20mm \square で、加速度感度は 1 μ G/ \sqrt Hz を達成している。このセンサと

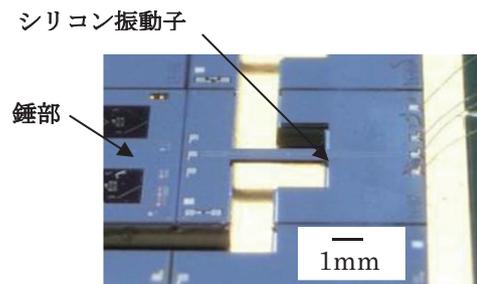


図 1. シリコン振動式加速度センサ

Fig.1. Silicon resonant acceralate sensor

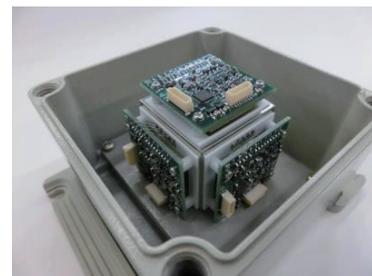


図 2. 3 軸加速度センサ

Fig.2.3-axis acceralate sensor

回路基板を実装した、3軸加速度計を図2.に示す。キューブの1辺の長さは35mmである。

3. 構造物の健全性評価法の概要

構造物の健全性評価を行うモニタリングシステムの概念図を図3.に示す。構造ヘルスマニタリングシステムは、建物の構造部材に設置した加速度計のセンサデータから建物の固有振動数を常時観測から確認し、さらに地震などの外乱を受けた非常時観測の場合には、固有振動数の算出に加え伝達関数や震度など構造物の基礎的な動特性を導き出すフェーズを有している。特に強い地震が発生した場合の非常時観測の場合は、構造物の健全性を評価する1次診断、2次診断のフェーズからなり、1次診断では加速度波形データから変位を算出し、各層の層間変形角と設計クライテリアと比較し即時に建物の健全性を判断する。2次診断では層間変形角が設計クライテリアを超えた場合に観測波形データを用いて層の剛性変化をとらえ、局所的損傷箇所の評価までを行う。

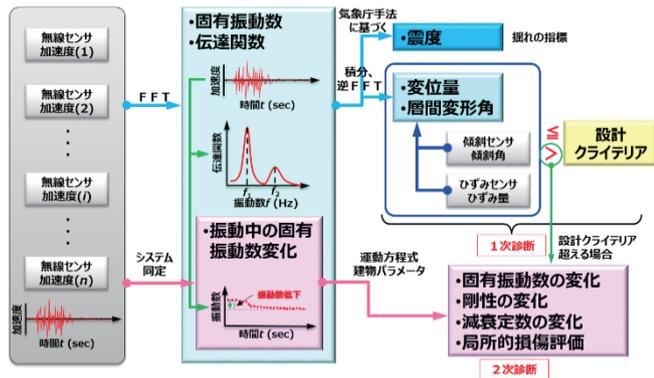


図3. 構造物の健全性評価法の概念図

Fig.3. Overview of health evaluating method of structure

4. 構造ヘルスマニタリングシステムの概要

構造ヘルスマニタリングシステムの概要を図4, センサの種類と性能を表1に示す。本システムは、常時と非常時(地震や強風時など)の観測記録を可能にするため、常時は1時間おきに10秒間の計測、非常時はトリガ発生から3分間の計測を行うこととした。サンプリング振動数は、100Hzとした。非常時のトリガ発生方法として、緊急地震速報による方法、サイト内の高精度加速度計による方法と無線加速度計による方法の3種類から選択できるようにした。加速度計、傾斜計やひずみ計は、920MHz帯の無線機能を有しており、有線と比べて設置工事の負担を大幅に軽減させた。課題となっていた各センサ間の時刻同期は、まずセンサと無線通信する全受信装置にGPSを搭載し同期させ、次に受信装置から

センサへ定期的に時刻情報を通知することで解決した。センサで測定された常時および非常時データはタイムスタンプを添付しサーバへ送られる。データを収集したサーバは、各センサの時刻を確認し最終時刻のタイムスタンプにすべてのセンサデータをあわせて開始時刻を一致させている。ただし高精度加速度計は、地震や風の振動を常に監視するため、サーバとの接続を有線方式とした。観測されたデータは、診断システムによって建物の健全性を迅速に評価する。

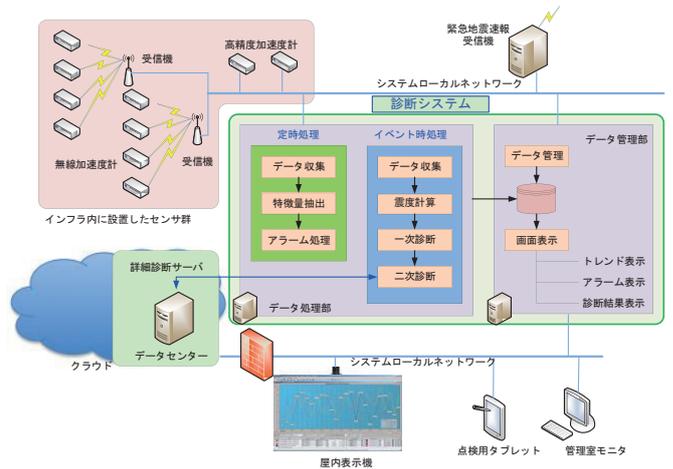


図4. 構造モニタリングシステムの概要

Fig.4. Overview of Structural Monitoring System

表1 センサの種類と性能目標

Table1. Sensor type and performance characteristics

種類	計測対象	分解能	測定範囲
加速度計	振動	10 ⁻⁶ G	±2G
	傾斜	0.01°	±1°
ひずみ計	ひずみ	0.1µε	±5000µε

5. 実建物の構造ヘルスマニタリング

5.1 建物概要

構造ヘルスマニタリングシステムを設置した対象建物は、写真1に示すヤマハ発動機様の事務所ビルである。建物概要を表2に示す。この建物は平面寸法が長辺49m×短辺20.09m、最高軒高さ47.97mの矩形形状であり、基礎形式を地耐力基

表2. 建物概要

Table 2 Building Overview

場所	静岡県磐田市
建築面積	1,130.61m ²
延床面積	11,302.25m ²
構造形式	SRC造(柱:CFT, はり:S造)
地下階数	1階
地上階数	10階
塔屋	2階

礎 (GL-5.98m) としている。対象建物は、東海地震の予知可能性がある地域に属しているため、人命保護や BCP 対策が急務である。そのため常時の状態から観測を行い建物の初期状態をモニタリングしておく必要がある。このような背景により、竣工以降の事務所ビルに本システムを設置し、システムの動作確認と共に常時観測から建物の動特性を確認する。さらに強風時の非常時観測も行い、経年変化に伴う常時観測との比較を行う。



写真 1. 外観写真
Photo.1. Exterior

5.2 加速度計配置による解析的検討

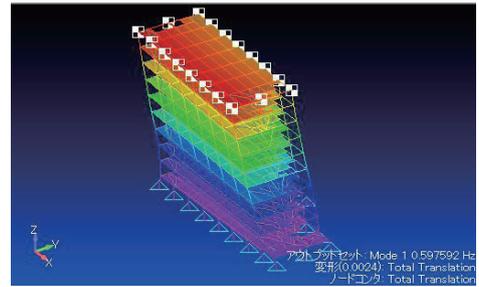
速度計の配置は、施工時の建物モデルからの変換ツールを用いて解析モデルを生成し、固有値解析により決定した^{5)~8)}。代表的な固有値解析結果を図 5. に示す。この解析結果より、1 次固有振動数は EW 方向の並進 1 次モード 0.60Hz、3 次固有振動数はねじれモード 0.98Hz であった。4 次モードは、EW 方向の並進 2 次モード 1.83Hz であった。これらの結果のモードにより、加速度計の配置は 5 階と 10 階とし、ねじれを考慮して東西方向 (X 方向) の隅角部に各々 1 台ずつ、また 1 階に 1 台配置する計画とした。また各加速度計は、3 成分 (水平 2 成分, 上下 1 成分) とした。加速度計の配置を図 6. (青丸印) に示す。

5.3 常時観測結果

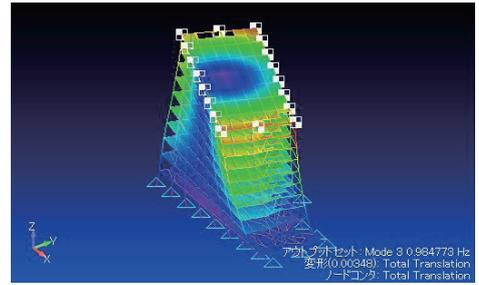
常時観測結果を図 7. に示す。1 次固有振動数は東西並進モード 0.64Hz、2 次固有振動数は南北並進モードの 0.69Hz、3 次固有振動数はねじれモード 0.90Hz であった。①通りと⑧通りに V 字架構の設置により耐震壁効果を有したため、南北方向より東西方向の固有振動数が低くなったと考えられる。

5.4 風観測結果

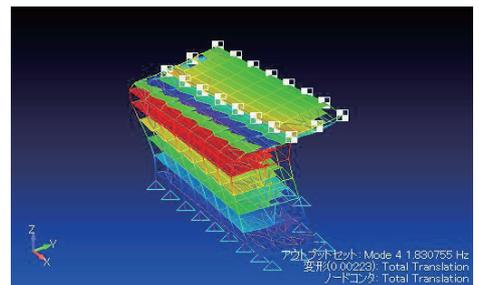
2018 年 3 月 1 日 (木) から翌日にかけて低気圧の影響により暴風が発生し、最も強風が発生した時刻 11:20 から 180 秒間の計測について分析を行った。この時刻の気象庁の観測では、西の風最大瞬間 14.8(m/sec) の記録であった。非常時観測の周波数分析結果を図 8. に示す。1 次固有振動数は東西並進モード 0.64Hz、2 次固有振動数は南北並進モードの 0.70Hz、3 次固有振動数は、常時観測の結果より若干低く 0.8~0.9Hz の間で複雑に振動していることを確認した。ま



1 次モード(0.60Hz)
1st mode(0.60Hz)



3 次モード(0.98Hz)
3rd mode (0.98Hz)



4 次モード(1.83Hz)
4th mode (1.83Hz)

図 5. 固有値解析結果

Fig.5.Eigenvalue analysis result

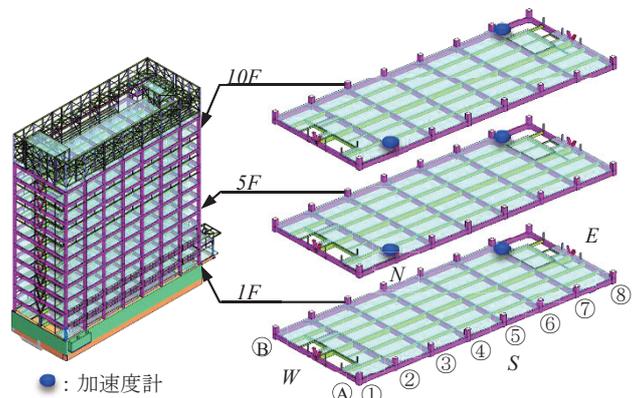


図 6. 加速度計の配置図

Fig.6.Arrangement of accelerometer

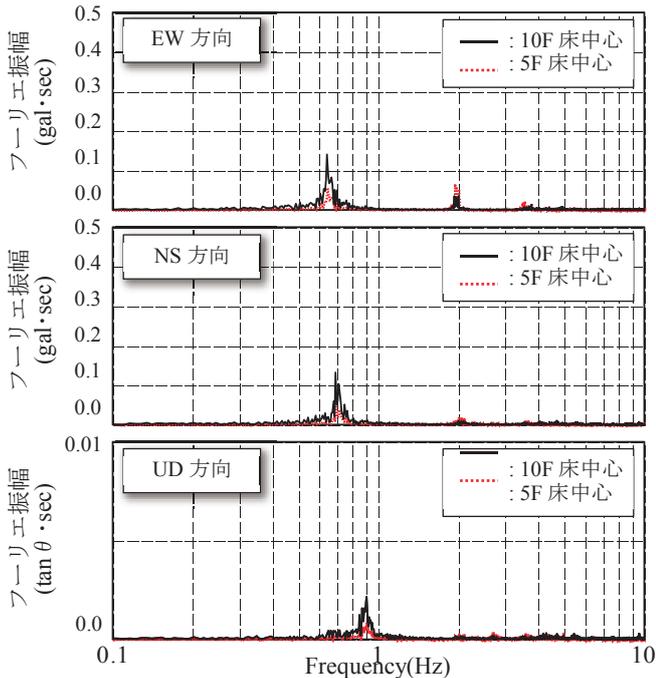


図 7. 常時観測の周波数特性

Fig.7.Frequency characteristics of constant observation

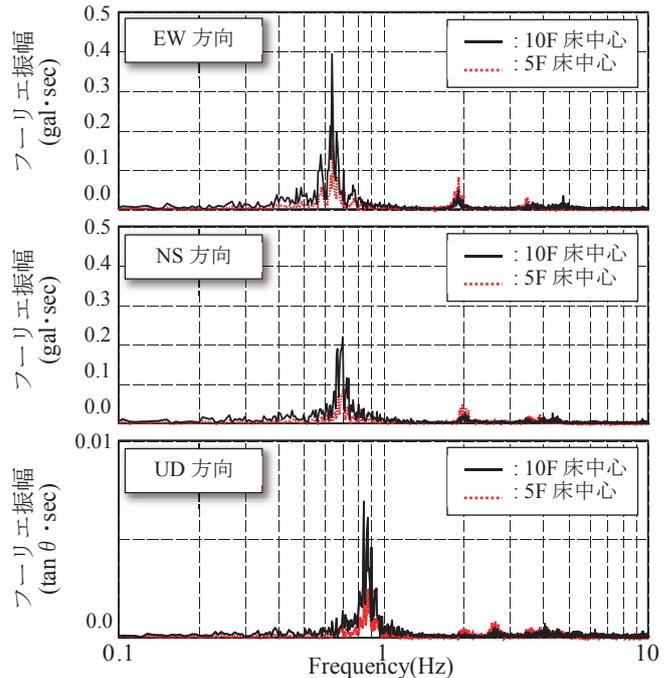


図 8. 非常時観測の周波数特性

Fig.8. Frequency characteristics of emergency observation

た東西方向と南北方向の 2 次固有振動数は、各々 1.92Hz、2.04Hz であった。

5.5 地震観測結果（一次診断結果例）

2018年6月18日（月）7時58分に大阪府北部で地震が発生した。本システムで180秒間の非常時観測を行い、その後、一次診断を実施した。各センサ位置の震度を表3に示す。加速度データから積分して算出した各センサの最大絶対変位を表4に示す。1階から5階と5階から10階の階高は、各々16.935mと22.000mであり、1階～5階間と5階～10階間の最大層間変形角を表5に示す。この最大層間変形角の結果により、設計クライテリア 1/200 以下であるため、建物の健全性が確保されていることが確認できた。

表 3. 震度
Table 3 Seismic intensity

位置	計測震度	震度
1 階 (北東方向)	1.4	震度 1
5 階 (南西方向)	2.4	震度 2
5 階 (北東方向)	2.4	震度 2
10 階 (南西方向)	2.8	震度 3
10 階 (北東方向)	データ欠落により震度無し	

表 4. 最大変位 (上段: 正值、下段: 負値)

Table 4 Maximum displacement (upper row: positive value, lower row: negative value)

	南西方向			北東方向		
	EW 方向 (mm)	NS 方向 (mm)	UD 方向 (mm)	EW 方向 (mm)	NS 方向 (mm)	UD 方向 (mm)
1 階	センサ未設置のためデータ無し			+0.47 -0.51	+0.36 -0.30	+0.14 -0.19
5 階	+1.36 -1.22	+1.02 -1.11	+0.17 -0.23	+1.27 -1.13	+1.03 -1.02	+0.15 -0.17
10 階	+2.76 -2.89	+1.65 -1.84	+0.21 -0.26	データ欠落により変位計算値無し		

表 5. 最大層間変形角

Table 5 Maximum interlayer deformation angle

	EW 方向	NS 方向
1 階～5 階間	1/144702	1/170519
5 階～10 階間	1/104672	1/154042

6. まとめ

高感度なシリコン振動式レゾナントセンサを用いた構造ヘルスマニタリングシステムを開発した。本システムを用いて実建物の常時観測および非常時観測結果から常時微動データから建物の動特性を捉えることが確認できた。また施工時の建物モデルから解析モデルを作成し、モニタリングを行う際の初期条件を固有値解析により確認できた。今後モニタリングを継続して行い、非常時観測と経年変化に伴う常時観測データの蓄積を図り、構造ヘルスマニタリングシステムとしての診断アルゴリズムの構築を目指していく。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

また本研究の趣旨を理解し快くご協力・ご提供を頂きました

たヤマハ発動機株式会社生産本部の鈴木貴博様および永岡伸介様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/
- 2) http://www.bousai.metro.tokyo.jp/kitaku_portal/1000050/1000536.html
- 3) 野田隆一郎, 松尾雄祐, 渡辺哲也, 吉田隆司:「コンレゾナント気圧センサの高分解能化」, 横河技報, Vol.60, No.1, pp.39-42 (2017)
- 4) 鮫島健, 鈴木良孝, 濱松伸到, 横内裕, 吉田隆司:「シリコンレゾナント高感度ひずみセンサ」, 横河技報, Vol.60, No.1, pp.43-47 (2017)
- 5) 佐藤康弘, 佐藤貢一:「計測-解析融合型モニタリングシステムの開発-その1 施工時におけるモニタリングシステムの概要-」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015 年度大会 (関東), pp.985-986 (2015)
- 6) 佐藤貢一, 佐藤康弘:「計測-解析融合型モニタリングシステムの開発-その2 逆解析アルゴリズムと精度検証-」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2015 年度大会 (関東), pp.987-988 (2015)
- 7) 佐藤貢一:「計測-解析融合型モニタリングシステムの開発-その3 反復法による検討-」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2016 年度大会 (九州), pp.975-976 (2016)
- 8) 佐藤康弘, 佐藤貢一:「ピロティ建築を実現する大架構の設計と施工-その3 施工時の建物モニタリングの検討-」, 日本建築学会学術講演梗概集, 2016 年度大会 (九州), pp.717-718 (2016)

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

佐藤 正* 高取 成毅 (日本電気株式会社 デジタルサービスソリューション事業部)
式田 直孝 村野 益巳 張 広鋒 (一般財団法人首都高速道路技術センター)

Research and development of sensor systems aimed at maintenance and management of road bridges and disaster prevention / reduction

Tadashi Satoh*, Naruki Takatori, (NEC Corporation Digital Service Solution Division)
Naotaka shikida, Masumi Murano, Zhang Guangfeng, (Highway Technology Reserch Center)

This paper addresses the research and development of a sensor system which can grasp the progression of damage during the period of 5 years during periodic inspection and the rapid change at the time of a disaster by the vibration / displacement sensor.

キーワード : 橋梁モニタリング, 近距離無線ネットワーク, 振動センサ, 変位センサ, 自立発電
(Keywords,Bridge monitoring, Short-range wireless network, Vibration sensor, Displacement sensor, Autonomous power generation)

1. はじめに

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。

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 of 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は防災・減災のために役立つセンサシステムの研究開発を目標とする。

2. センサシステムの開発

本センサシステムはセンサ端末に接続された振動センサ、変位センサ及び温湿度センサの信号を920MHz特定小電力無線ネットワークを介してゲートウェイに集約後、広域無線(3G)を使い遠隔サーバに収集する。遠隔サーバには収集したセンサデータの分析/管理・センサ端末/ゲートウェイの状態管理等の機能を実装している。

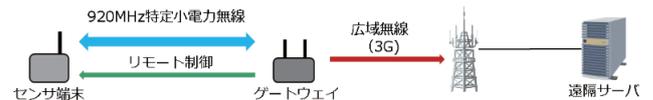


図1 センサシステムの構成

Fig.1. Configuration of sensor system

(2・1) センサ端末

(1) センシング・無線機能 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ものを使用し、センサ端末のアナログ増幅部については100Hzのローパスフィルタ機能を有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。

(2) 保守性向上機能の実装 920MHz特定小電力無線経由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。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。

(3) 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で精度は0.02mm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センサ端末へ送信される。センサは3個までのデジタイ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センサ端末側の1つのチャンネルで受信可能である。

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が課題であったが、個体毎に温度特性を計測し、4次式で近似することで温度依存性に対しキャリブレーションを行っている。

また、後述の自立発電での運用を考慮し低消費電力化を行った。

(4) 自立発電の開発 エナジーハーベストについて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。

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、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)を用いた。

(5) 筐体の開発 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とし基板レイアウトの工夫、実装の高密度化等により高さ2.6cm×幅10cm×奥行4.8cmの筐体サイズに小型化した。

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。

また、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た。



図2 センサ端末外観

Fig.2. Appearance of sensor terminal

〈2・2〉無線センサネットワーク

(1) 地震検知及び検知後の動作 センサ端末は低消費電力化のため、通常、データ測定時以外はスリープ状態となっている。センサ端末に地震検知用センサを実装することで地震を自ら検知し、地震発生時にセンサデータ計測を開始する機能を実装した。本機能により地震発生時にセンサデータを取得することで地震による変状把握と余震等の状況下における連続的な状況把握に有効なセンサデータの取得を可能とした。

(2) データ圧縮機能 無線通信時はセンサ端末の消費電力が増加することから通信データ量を削減するため、センサデータを1/4に圧縮する機能を実装した。

〈2・3〉遠隔サーバアプリケーション 分析手法の変更に対して柔軟な対応が可能となるようにデータの収集・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。データ提供機能部については外部システムとの連携を考慮し、Web-APIとして実装した。

3. センサシステム設置及び運用

〈3・1〉センサシステムの設置対象 対象橋梁は橋長15m以上の単純桁橋で定期点検での健全度判定区分が「Ⅲ:早期措置段階」以上の橋梁である。判定区分Ⅲ以上の道路橋の措置までの期間の損傷進展を監視する。

対象橋梁を上記の条件で絞った理由としては単純桁橋は損傷による振動特性の変化が発現しやすいこと、及び判定区分Ⅲ以上の道路橋で措置までの期間の損傷進展を監視することを目的としたためである。

橋梁の種類別の延長比率は、桁橋が76.2%、床版橋が13.1%、トラス橋・アーチ橋・ラーメン橋が8.9%、斜張橋・吊橋・その他が1.8%であり、桁橋が多くを占めている。桁橋の内、約7割が単純桁橋であることから、橋長15m以上の橋の約5割が対象となる。

表1 種類別橋梁比率

Table.1. Bridge ratio by type

	合計	床版橋	桁橋	トラス橋	アーチ橋	ラーメン橋	斜張橋	吊橋	その他
箇所数	165,322	32,342	122,792	1,814	2,582	4,354	317	888	238
比率%	100	19.6	74.3	1.1	1.6	2.6	0.2	0.5	0.1
延長(m)	10,612,478	1,386,132	8,093,575	258,212	277,638	410,420	92,610	87,241	6,650
比率%	100	13.1	76.2	2.4	2.6	3.9	0.9	0.8	0.1

〈3・2〉センサシステムの運用 本センサシステムは橋梁定期点検と連携した運用を想定している。

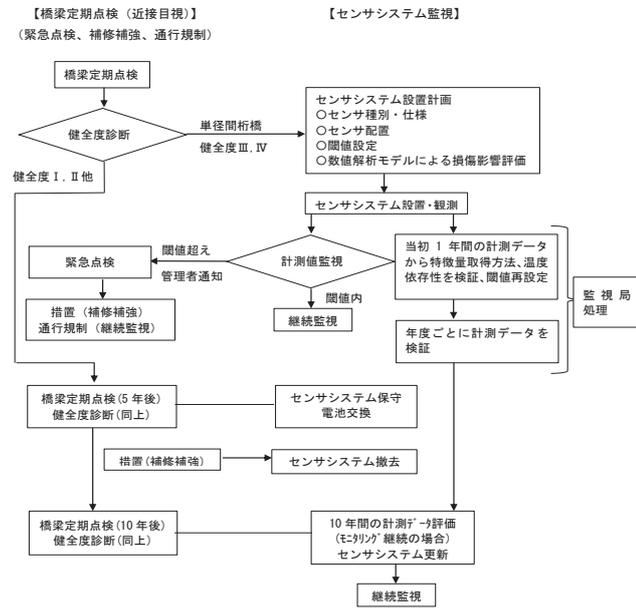


図3 センサシステムの運用

Fig.3. Operation of sensor system

4 実証実験

〈4・1〉実証実験機器構成 下図の現地橋梁枠内の機器を製造し、地方自治体が管理する橋梁へセンサシステムを設置し、平成 29 年 11 月に計測を開始し、約 1 年間計測した。

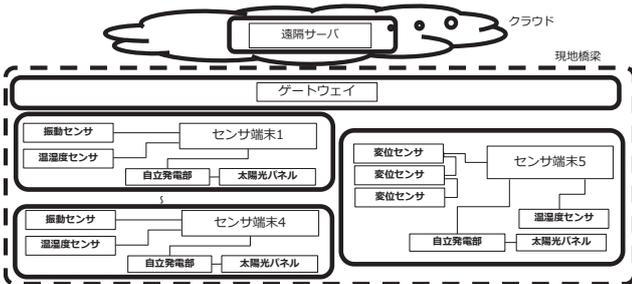


図4 実証実験システム構成

Fig.4. Demonstration experiment system configuration

〈4・2〉実証実験対象橋梁 地方自治体が管理する橋梁に下図に示すセンサを配置した。対象の橋梁は昭和 48 年 1 月に供用を開始し、橋梁上部構造は単純合成鋼板桁橋で交通量は 3,949 台 (昼間 12 時間) で大型車両混入率は 22.7% の橋梁である。

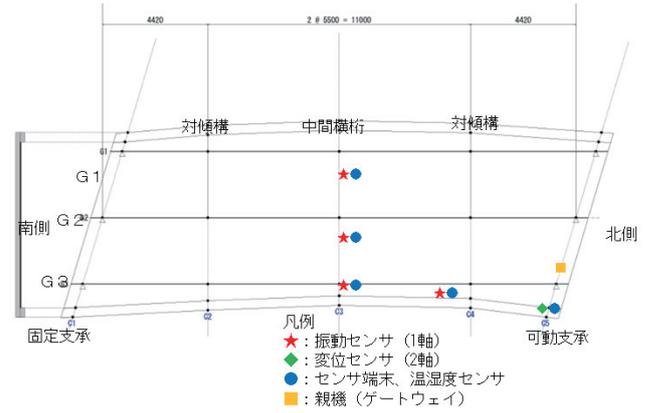


図5 センサ配置図

Fig.5. Sensor layout

(1) 計測対象と異常値検出方法 振動センサと変位センサを設置し、橋梁の卓越振動数が変化する「桁の剛性(耐荷力)に影響を与える損傷 (鋼橋の腐食、疲労き裂、RC・PC 桁のひびわれ等)」及び変位(追従性)と卓越振動数が変化する「支承の機能に影響を与える損傷」を対象損傷とする。尚、卓越振動数については 5% の変化を検出できることを目標としている。

観測対象は卓越振動数 (曲げ 1 次, 2 次, 3 次、ねじれ 1 次, 2 次, 3 次) と支承変位 (温度変化への追従性) である。尚、FEM モデルを用いた対象橋梁の解析結果と計測データから抽出した卓越振動数との比較検証も実施した。

観測頻度は 1 回/時間(60~120 秒)の定期的な常時観測と地震発生時にセンサデータを取得する。尚、データ取得タイミングと地震検出レベルは遠隔サーバからリモートで変更可能となっている。

振動データは 200Hz でサンプリングし、単独走行車両の通過直後の減衰区間 1.25 秒分を分析することで特徴量である卓越振動数を抽出する。また、1 年間の計測結果から温度依存性を分析し、温度補正を行うことで卓越振動数の安定性の向上(管理限界幅の縮小)を行った。異常検出判定手法としてシューハート管理図(JIS Z9021:1998)の異常値検出ガイドラインを準用する。

(2) 実証実験計測結果 平成 29 年 12 月の振動センサデータから抽出した卓越振動数を下表に示す。第 1 卓越振動と推測される周波数の分布について、G1 桁中央部と G3 桁中央部には隣接した 2 つの山が見受けられる。G2 桁中央部は 2 つの山の低い方の周波数が現れており、下記の卓越振動を抽出しているものと推測される。

- ・G2 桁中央部の周波数が曲げ 1 次の卓越振動数(6.8-6.9Hz)
- ・G1 桁中央部と G3 桁中央部の周波数が高い方がねじれ 1 次の卓越振動数(8.3-8.4Hz)

第 3 卓越振動、第 4 卓越振動については「ねじれ振動」と推測される。

表 2 抽出した卓越振動数の例

Table.2. Exemplary dominant frequency examples

	第 1 卓越振動数	第 2 卓越振動数	第 3 卓越振動数	第 4 卓越振動数
G1 桁中央部	6.9Hz	8.3Hz	—	—
G2 桁中央部	6.9Hz	—	18.9Hz	—
G3 桁中央部	6.8Hz	8.4Hz	19.1Hz	—
G3 桁 L/4	6.8Hz	8.3Hz	14.4Hz	20.4Hz

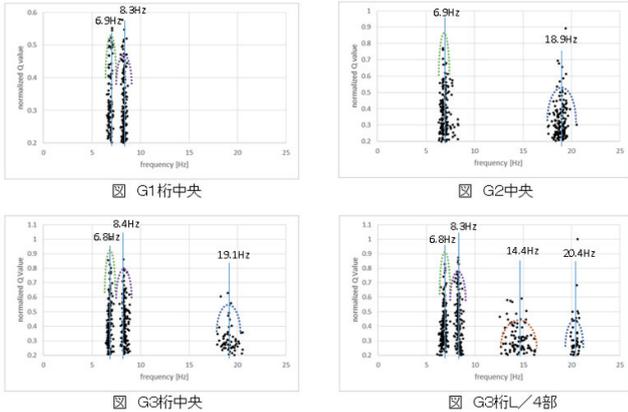


図 6 卓越振動数の分布と代表値

Fig.6. Distribution of dominant frequency and representative value

計測データが 1 年間分蓄積された段階で卓越振動数と温度との関連を分析し、温度補正を行うことで温度による依存性を除去し、卓越振動数の安定性の向上を図った。その結果、G1 桁の第 1 卓越振動数と桁温度の分布から補正式を導いた。平均桁温度 20℃としたときの補正式は以下のとおり。
 $y = 0.0005x^2 - 0.0199x + 6.8857$ $R^2 = 0.185$ (20℃ : 6.69Hz)
 この補正式を用いることにより管理限界幅 (3σ) を絞ることが出来る。G1 桁第 1 卓越振動数 (平成 29 年 12 月 - 平成 30 年 10 月) の 10 個の月単位計測値での標準偏差は補正前が 0.07Hz、補正後が 0.02Hz で、管理限界幅 (3σ) が 6.64 ~ 6.76Hz になり、約 1% 以上の変化を検出可能となった。

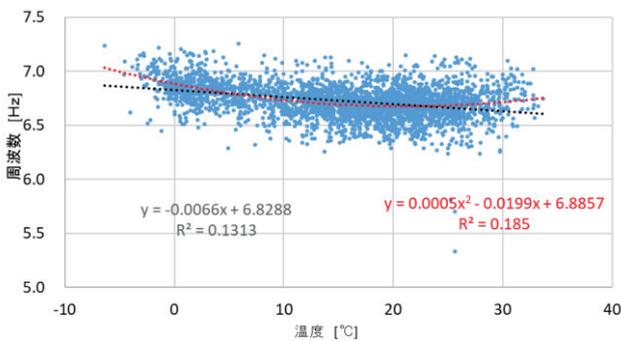


図 7 卓越振動数の温度依存性

Fig.7. Temperature dependence of dominant frequency

対象橋梁の復元設計を行い FEM モデルとして再現した。対象橋梁の線支承は変位拘束性が高いことから、モデル化において硬いバネ要素 (水平方向) とした。

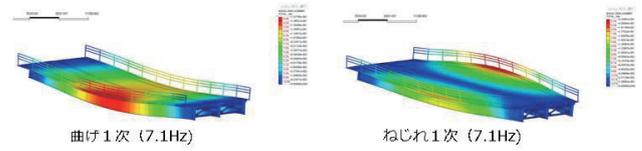


図 8 FEM モデル解析

Fig.8. FEM model analysis

計測結果 (平成 29 年 12 月と FEM 解析結果は下表に示すとおり、概ね一致していることが確認できた。

表 3 計測結果と FEM 解析結果の比較

Table.3. Comparison of measurement results and FEM analysis results

	第 1 卓越振動数	第 2 卓越振動数	第 3 卓越振動数	第 4 卓越振動数
計測結果	6.8-6.9Hz	8.3-8.4Hz	14.4-19.1Hz	20.4Hz
FEM 解析結果	曲げ 1 次 7.1Hz	ねじれ 1 次 7.1Hz	—	—

変位センサについて、計測した橋軸方向の変位量と温度との関連を確認した結果、理論式 ($y = -0.24x - \alpha$) に対し、計測データの回帰式が ($y = -0.26x - 12$) であり、概ね一致していることが確認できた。

また、本実証実験中に橋梁が劣化し、物理特性が変化する可能性は低いことから、本センサシステムによって橋梁の健全性の劣化による物理特性の変化を卓越振動数の変化として捉えられることを示すために可動支承部 3 か所を順次ジャッキアップし卓越振動数の変化を計測した (ケース 1: 現状、ケース 2: 1 桁ジャッキアップ、ケース 3: 2 桁ジャッキアップ、ケース 4: 3 桁ジャッキアップ)。ジャッキアップ箇所が増えるに伴い第 1 卓越振動数 (曲げ 1 次) が上昇した。桁剛性に影響を与える損傷の発生・進展を卓越振動数の変化として検知できることを確認した。

更に橋梁の物理特性が変化したことを確認するためにリファレンスとして採取した荷重車 (20t) 通過時の振動データから確認した卓越振動数と一般車の卓越振動数はほぼ一致し、一般車によるモニタリングの有効性を確認した。

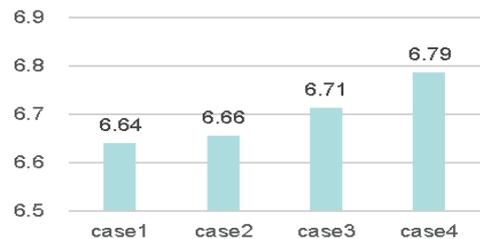


図 9 卓越振動数の変化 (荷重車)

Fig9. Changes in the dominant frequency (design vehicle)

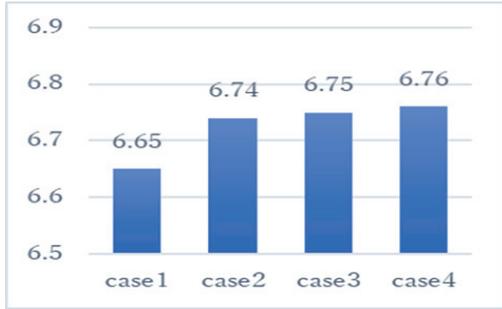


図 1 0 卓越振動数の変化 (一般車)

Fig10. Changes in the dominant frequency (general vehicles)

5 事業化計画

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、共通プラットフォーム (クラウド基盤) 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方式が妥当と考えられる。

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。

事業化のため、技術開発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。

定期点検で損傷が検出された場合における劣化進行を把握するためのセンサシステムの必要性の有無、設置する場合のセンサ種別・仕様、センサ配置、閾値設定の業務実施あるいは技術支援する。また、センサシステムの適切な維持管理、コスト低減のためには、道路橋毎の単独システムではなく、クラウド基盤によるシステム構築が望ましい。このためにはセンサシステムの標準化、計測データの分析手法の標準化、閾値設定手法の標準化が必要となる。このような標準化のための技術支援を行う。

道路橋センサシステムの運用管理はクラウド基盤で実施することが妥当であることから、センサシステム業務は「センサシステム設置」と「センサシステム運用管理」に区分することが妥当である。「センサシステム運用管理」は都道府県単位で運用管理者を特定し、「センサシステム設置」は標準化し、仕様を統一して、橋梁単位あるいは地区単位 (対象橋梁をまとめ) で建設コンサルタントに発注することが妥当と考えられる。

地方自治体における「多様な入札契約方式」として「包括発注方式」があり、この適用が考えられる。

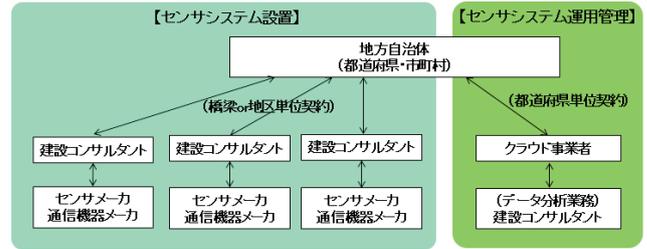


図 1 1 センサシステムの発注区分

Fig.11. Order classification of sensor system

文 献

- (1) 「国土交通省 道路統計年報 2014」
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html>

道路付帯構造物モニタリングシステム開発

日立製作所

1. はじめに

我が国では、社会インフラ施設の老朽化が進み、早急な対応が重要課題となっている。従来における社会インフラ施設の維持管理では、目視点検を主とした定期点検を行い、損傷箇所を発見した場合、詳細な調査の後に修繕を実施する「事後保全」が一般的である。しかし、「事後保全」ではトンネル崩落等の甚大な損壊が発生する可能性があり、「利用者の生命の危険」や、再建設に近い修繕にかかる「施設の維持管理にかかるコスト増大」という課題がある。

これら課題を解決するため、今後の施設維持管理においては、施設の状態を正確に把握してタイムリーに修繕を行う「予防保全」の概念が重要視されている。予防保全の実現に向けては、点検業務の更なる効率化や状態把握の精度向上が不可欠である。また、更に近年では高いレベルを持った技術者の不足も相まって、AI、IoTといった技術、ノウハウの組み合わせをワンストップサービスシステムとして提供することへの期待が高まっている。そこで日立はスマートメンテナンスの実現に向けたIoTシステムの開発に取り組んでいる。

一般的なIoTシステムは、以下の流れ(要件)にて構成される。

- ① モニタリング対象設備に計測デバイス(センサ端末)等を設置し、対象設備を計測する。
- ② 対象設備で計測したデータを、ネットワーク等を用いて回収する。
- ③ 回収したデータを管理者PC等で蓄積・閲覧(見える化)を実施。
- ④ 蓄積したデータに対してAI等を利用し分析する。

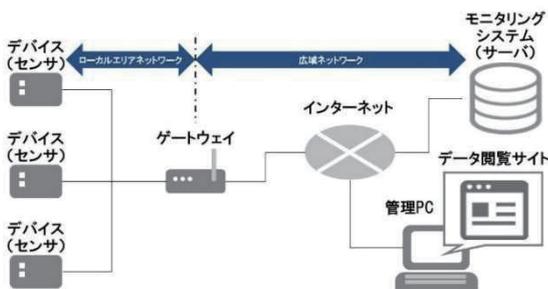


図 1 IoTシステムの構成図

本研究ではNEDOから委託を受け、日立がこれまでユーザ機関に対してヒアリングを実施したところ、維持管理のターゲットとしてフォーカスされてこなかった道路付帯構造物のモニタリング技術に強いニーズがあった。

以上より、道路事業者からニーズの高い「道路付帯設備」をターゲットとし、モニタリングシステムに関するセンサ端末及びセンサネットワーク技術の研究開発を実施した。

2. 研究開発要素

本研究はNEDO基本仕様に基づき8つの開発項目で整理して推進している。

次章以降で各研究開発要素の開発実績を述べる。

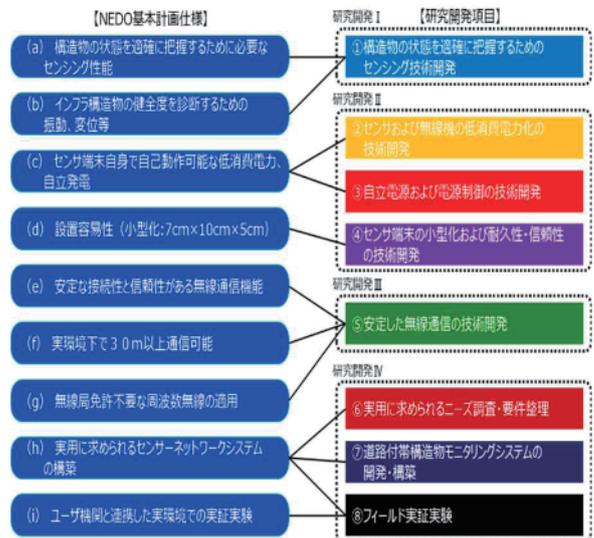


図 2 研究開発要素一覧

また本研究で開発する道路付帯構造物モニタリングシステム概要とセンサ端末の構成図を以下に示す。

表 1 消費電力評価結果

区分	当初の目標値	設計上の目標値	結果	判定
センサ部	3.7mW 以下	①屋外 3.0 mW ②屋内 0.9mW	①2.0 mW,2.5mW ②0.8 mW,0.7mW	OK
無線部	10mW 以下	①屋外 0.9 mW ②屋内 0.3mW	①0.7mw ②0.2mw	OK

次に要件定義時に設定した目標値に対する、振動・太陽光発電モジュール単体の評価も実施した。
以下に評価機器構成と評価結果を示す。



図 10 発電モジュール評価機器構成

表 3 発電モジュール評価結果

名称	設計値	結果	判定
振動発電 (A社製)	発電量: 0.14mW・10%	①0.14 mW, 0.15 mW (0.15G, 25Hz) ②0.28 mW, 0.29 mW (0.15G, 30Hz)	OK
太陽光 (B社製)	照度: 10,000lux の時 発電量: 14.1mW・10%	①15.3 mW (照度 10,790lux) ②15.9 mW (照度 10,670lux)	OK
太陽光 (C社製)		①0.1 mW (照度 10,230lux) ②19.3 mW (照度 10,310lux)	OK

これらの評価結果より、消費電力とモジュール単体の性能に関しては、要件定義時に設定した目標値を満たす結果となった。

次に、センサ端末に搭載する二次電池の開発について述べる。10年間の充放電に耐えうる性能(4000サイクル時電池容量50%)を目標として開発を実施した。

事前検証の結果、既存の二次電池では目標を達成することが難しい為、添加剤を二次電池に投入することで目標を達成することとした。

以下に既存の二次電池と添加剤を投入した二次電池に関してサイクル試験を実施した。以下に試験結果を示す。

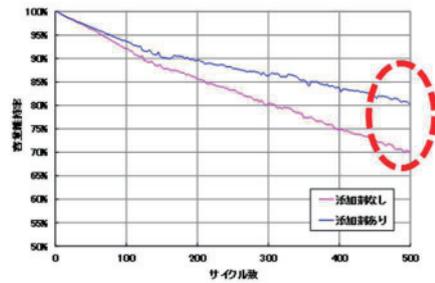


図 11 二次電池サイクル試験結果

結果として、添加剤には使用後半において劣化頻度を遅らせる効果があると判明した。

この結果より、小型添加剤を投入した二次電池を作成し、4000サイクル試験を実施することとした。

以下に作成した二次電池の仕様を示す。

表 4 作成した二次電池仕様

項目	仕様
品名	リチウムイオン二次電池
公称電圧	3.7 V
外径寸法	36×49×1.3 mm
容量	70 mAh
使用電圧範囲	3.5V~4.0V
最大放電電流	50mA
サイクル寿命	4,000 サイクル (初期容量の 50%, 35mAh)
動作温度範囲	充電 0~45℃ 放電 -20~60℃



図 12 作成した二次電池外観

作成した二次電池に対して実施したサイクル試験結果は以下の通り。

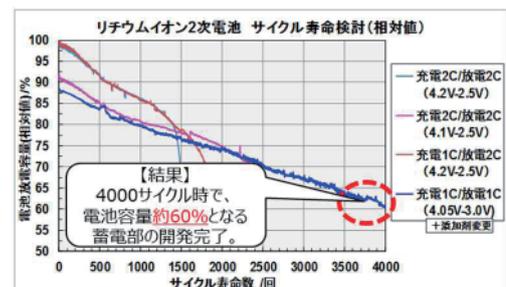


図 13 作成した二次電池でのサイクル試験結果

試験結果より開発した二次電池が最終目標を達成していることを確認した。

次にセンサ端末の小型化及び耐久性・信頼性の技術開発について述べる。実施計画は以下の通り



図 14 小型化及び耐久性・信頼性の技術開発実施計画

センサ端末の小型化として、仕様検討を実施し、検討内容を基に、中間目標サイズ(16×16×10cm)を満たす1stプロト端末を開発した。

さらに、開発した1stプロト端末を基に、最終目標サイズを満たす2ndプロト端末を開発した。開発した端末に対して耐久試験も実施し、最終目標であるIP65を満たすことを確認した。以下に2ndプロト端末の仕様を示す。

表 5 2ndプロト端末仕様

項目	仕様
消費電力	max. 35mW(1回/時間)
消費電流	max. 50mA(過渡時)
外径寸法	10×7×5cm
質量	約 700g
材質	アルミニウム合金



図 15 2ndプロト端末外観

5. 研究開発Ⅲ

研究開発Ⅲでは無線技術開発を実施した。実施計画は以下の通り。



図 16 無線技術開発実施計画

無線技術の開発では、開発しセンサ端末を実フィールドに設置し、通信可能距離の検証を実施した。

実際に走行車線、追越車線を時速 80km, 100km でそれぞれ走行し、走行車内に設置する受信機の設置位置の違いによる通信可能時間についての検証を実施した。

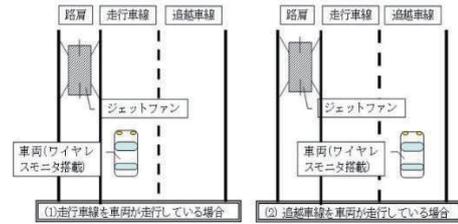


図 17 実験方法(走行試験)



図 18 走行試験での受信機設置位置



図 19 ジェットファンへのセンサ端末設置状況

実験条件毎に走行中の車内にて計測した RSSI が -86dBm 以上となる時間について着目し検証を実施した。評価方法については下記図の通り、グラフの大きい山の部分を中心的部分と考えることし、該当区間の計測時間を検証した。

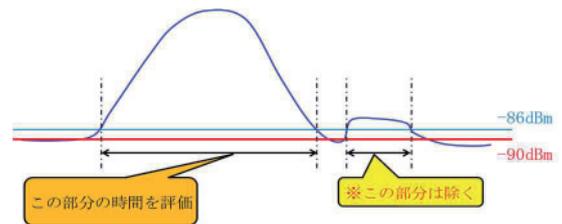


図 20 走行試験評価方法

表 6 走行試験結果

走行条件	受信機設置位置	走行速度		通信距離	
		80km/h	100km/h	80km/h	100km/h
走行車線	ダッシュボード	31.235秒	16.482秒	694m	362m
	作業着ポケット	11.244秒	9.544秒	247m	210m
追越車線	ダッシュボード	32.049秒	15.073秒	705m	331m
	作業着ポケット	8.338秒	7.545秒	183m	166m

ダッシュボードに受信機を設置した場合には車線や走行

速度に関わらず、安定して受信可能となった。しかし受信機を作業着のポケット内に入れて走行した場合は、走行車線では安定して受信可能であったが、追越車線では他の実験パターンと比較し、大幅に評価を落とす結果となった。しかし、どのパターンにおいても通信距離に関して最終目標を達成することを確認した。

6. 研究開発Ⅳ

研究開発Ⅳではモニタリングシステム開発と実証実験を実施した。

まずモニタリングシステム開発について述べる。実施計画は以下の通り。



図 31 モニタリングシステム実施計画

モニタリングシステムでは実ユーザーにヒアリングを実施し、ヒアリング結果の内容を基に、タブレット端末で動作するモニタリングシステムのプロトアプリの要件定義・設計・開発・実装を実施した。

以下に開発したアプリ画面の例を示す。



図 42 開発したアプリ画面例

次に実証実験について述べる。実施計画は以下の通り。



図 53 実証実験実施計画

実証実験では、センサ端末を開発する為の基礎実験、開発したセンサ端末を用いた場内試験、フィールド実証を実施した。

基礎実験では実機での検証の前に計測データの傾向を分析する為にジェットファンの模擬モデルを作成し、実験を実施した。以下に作成した模擬モデルを示す。

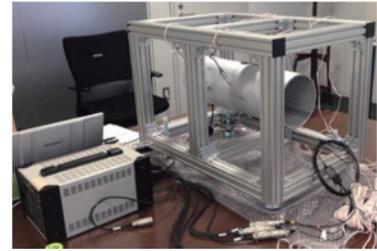


図 64 模擬モデルを用いた基礎実験

またプロト端末開発に向け、プロト端末内に利用するセンサ端末単体をジェットファンに取り付け、計測データの分析などの事前検証も実施した。



図 75 センサ端末単体基礎実験

7. 今年度の実証実験について

今年度の実証実験として、以下の実験を実施した。

- ① 走行している車内から回収可能なデータ量の検証
- ② 検知ルールの検証を目的とし、場内にてジェットファンの異常を再現し、正常時のデータとの比較分析

①の実験ではテストコース内にセンサ端末をパターンごとに複数台設置し、設置パターンごとにおけるセンサ端末内のデータ回収量を検証した。(データ量は7日分、14日分、21日分をそれぞれ設定)

センサ端末の設置パターンは以下の通り。

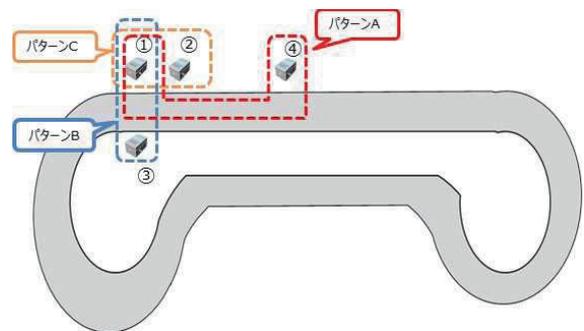


図 26 センサ端末の設置パターン



図 27 データ受信器取り付け位置



図 28 センサ端末設置位置

実験の結果として、7日間のデータ量であれば設置パターンに関わらず、問題なくデータ回収することが可能だと判明した。

14日分、21日分では設置パターンによって全てのデータを回収できない場合があったが、センサ端末間の距離の調整などにより安定してデータを回収できるようになると考える。

②の実験では場内に設置したジェットファンに対して、ターンバックルの緩みと、羽根車のアンバランスによる振動異常を再現し、正常時との計測データの比較分析を実施した。実験の条件は以下の通り。

表 6 場内実験条件

異常内容	変状条件	調整方法	備考
ターンバックルの緩み	・緩み量 0/20/30/50mm	黄丸部を緩め、緩み量をメジャーで測定	
羽根車のアンバランスによる振動異常	・車の材質 アルミテープ ・付加方法 テープ貼付け ・付加質量 0/10/20/30/40g	羽根車の赤丸部にアルミテープを貼り、飛散防止用に養生テープを貼る	張り付ける錘とテープは、下図のように質量を測定

計測データから異常・正常を検知する為以下の通り、検知ルールを適用した。

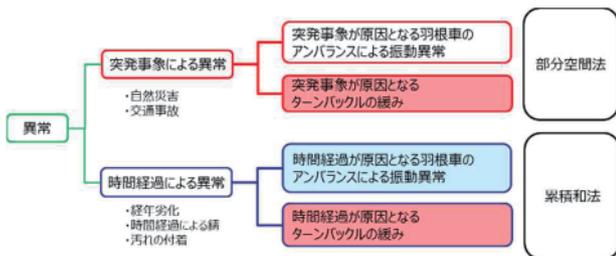


図 29 検知ルール

検知ルールの適用結果例を以下に示す。

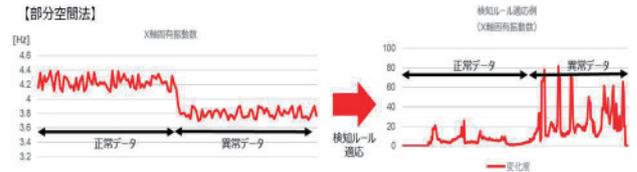


図 30 検知ルール適用結果例(部分空間法)

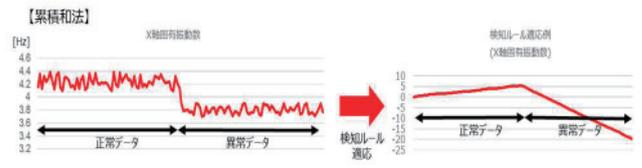


図 31 検知ルール適用結果例(累積和法)

結果よりターンバックルの緩み・羽根車のアンバランスによる振動異常がそれぞれ検出できることを確認した。

8. まとめ

本研究の結論として、研究結果が道路付帯構造物モニタリングシステムとして実用可能であることが分かった。

本研究はトンネル内のジェットファンを対象とし、実証実験を実施したが、センサ端末は屋外でも利用可能であり、情報板や照明柱等他の設備に対しても適用可能であると考えられる。

今後は、本研究の成果を、道路付帯構造物モニタリングシステムに組み込んでいくことで、直接の目視・管理が難しい道路付帯構造物に対してライフサイクルコストの低減や、予防保全の実現をめざす。

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

藤垣 元治* (福井大学) 村田 頼信 (和歌山大学) 栗林 賢一 武内 宣夫 (ジェイアール西日本コンサルタンツ (株)) 前田 芳巳 津田 仁 ((株) 共和電業)
梶谷 明大 森本 吉春 (4 Dセンサー (株))

Research and Development for Imaging Measurement System for Infrastructure Using Phase Analysis Method

Motoharu Fujigaki* (University of Fukui), Yorinobu Murata (Wakayama University), Kenichi Kuribayashi, Nobuo Takeuchi (JR West Japan Consultants Company), Yoshimi Maeda, Hitoshi Tsuda (KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.), Akihiro Masaya, Yoshiharu Morimoto (4D Sensor Inc.)

The main activities of our project are to apply sampling moire method to the displacement measurement and the rotation angle measurement of infrastructures. We developed an inspection system for general civil structures and an inspection system for practical railway bridges. Several experiments were performed to confirm the effectiveness. In this paper, our project and the developed inspection systems are introduced.

キーワード: インフラ構造物, 位相解析, サンプルングモアレ法, 変位計測, たわみ角計測
(Keywords, Infrastructure, Phase analysis, Sampling Moire Method, Displacement Measurement, Deflection Measurement)

1. はじめに

近年, 土木構造物の健全性評価と延命化を効率よく進めるために, 光学的手法を用いた計測技術の開発が注目されている⁽¹⁾. 光学的手法を用いることで, 設置に要する労力の削減にも有効である.

これまでに構造物の変位計測技術として, 物体表面貼付けられた2次元格子パターンの位相分布を高精度に求めることができるサンプルングモアレ法^{(2),(3)}を提案してきた. この手法は, 格子画像に対してサンプルング処理を行うことで位相シフトされたモアレ画像を生成し, そこから位相分布を解析する空間的縞解析法^{(4),(5)}を2次元に拡張したものである. 著者らはこれをサンプルングモアレ法と呼び, これまでに, 梁の変形計測などに適用してきた.

これをシーズとして, 2014年からNEDOのプロジェクトとしてインフラ構造物用画像計測システムの研究開発に取り組んできた. 本稿では本プロジェクトで開発したアルゴリズムとインフラ構造物用変位計測装置について述べる.

2. 開発するインフラ構造物用画像計測システム

図1に橋梁のたわみとたわみ角計測を模式的に示す. 車両等の通過により, 橋梁にはたわみが発生し, 支承部には

たわみ角が発生する. 画像を用いてこれらを遠隔から計測することで, 効率よく点検を行うことができる.

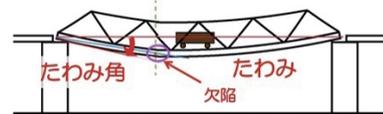


図1 橋梁のたわみとたわみ角計測の模式図

Fig. 1 Deflection and deflection angle measurement of bridge

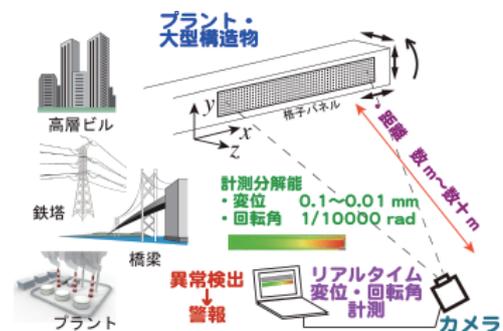


図2 位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システム (概念図)

Fig. 2 Imaging measurement system for infrastructure using phase analysis

3. サンプリングモアレカメラ

サンプリングモアレカメラ⁽⁶⁾は、格子画像を撮影すると、カメラ内部で前述のサンプリングモアレ法の計算を行い、格子の位相分布と基準の位相分布との位相差分布をリアルタイムで出力することができる。内部構造は図3に示されるように、CMOSの撮像素子、FPGA(Field Programmable Gate Array)、メモリー、USBインターフェース、電源ユニットで構成されている。位相差分布(変位分布)をリアルタイムに出力することができる。

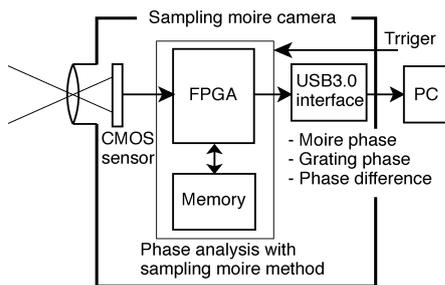


図3 サンプリングモアレカメラの内部構成

Fig. 3 Block diagram of sampling moire camera

本プロジェクトでは、撮像光学系を改良し、奥行き方向にピントを合わせることができるあおり付きサンプリングモアレカメラも試作した。カメラ内部で撮像素子を傾けることで、ピントが合う領域を大きく傾けることができる。このカメラは、橋梁側面を正面からではなく、橋梁近くから斜めに撮影する場合に用いることができる。

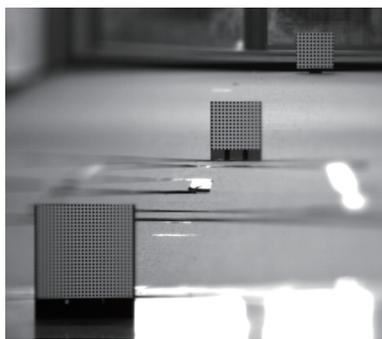


図4 あおり付きサンプリングモアレカメラによる撮影画像例

Fig. 4 Sample image taken by a developed sampling moire camera with tilting function

4. アルゴリズムの開発

本研究では、サンプリングモアレ法による変位計測手法をシーズとして用いて、それを発展させることで3次元の変位計測、回転角、格子パネルの角度などを計測するアルゴリズムを開発した。また、格子パターンの取り付けが困難な部位に対して、ターゲット無しで変位計測を行う手法

を開発した。以下、回転角の計測とターゲット無しの変位計測手法について述べる。

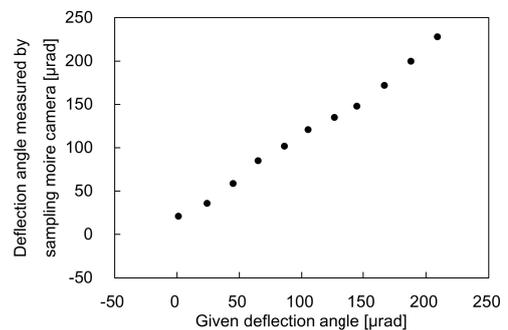
〈4.1〉 回転角(たわみ角)の計測手法⁽⁷⁾

橋梁のようなインフラ構造物の場合は、荷重によって変位の分布が発生することにより、微小な回転角(たわみ角)が発生する。サンプリングモアレ法の場合は、ピッチが既知の2次元格子が表面に取り付けられている。そのため、その2次元格子の位相値から、各画素に撮影されている物体上の点の変位だけでなく、座標も同時に求めることができる。これを利用すると回転角を算出することが可能となる。このとき、多数点の値を用いて最小二乗法によって算出するため、高い精度で回転角を得ることができる。

本手法による回転角の計測精度を確認する実験を行った例を図5に示す。屋外において、30mの距離から撮影することによって回転角を計測した。画像サイズを448x448画素とし、露光時間を15msとした。変位前にフレームレート50fpsで格子を500枚撮影しており、500枚の画像で平均化した位相分布を変位前の基準画像とした。回転ステージを20μradずつ200μradまで回転させながら、各回転角においてフレームレート50fpsで10秒間撮影した。図5(b)に与えた回転角と計測した回転角の関係を示す。ほぼ直線状になっており精度よく計測できているのがわかる。この実験の場合、与えた回転角との差は20μrad以下であった。



(a)実験の様子



(b)計測結果

図5 回転角計測精度検証実験(屋外)

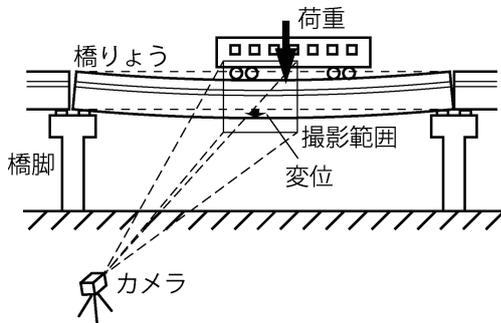
Fig. 5 Experiment of deflection angle measurement

〈4.2〉 ターゲット無しで変位計測を行う位相解析手法⁽⁸⁾

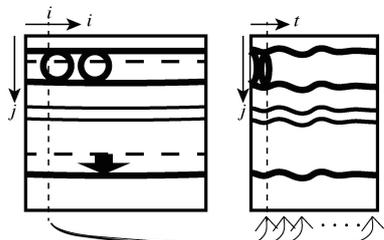
格子パターンを対象物に取り付けずに、人工の構造物が持つ平行線パターンとその設計値が既知であることを利用

した変位計測アルゴリズムを開発した。これを「ロードスメソッド」と呼んでいる。

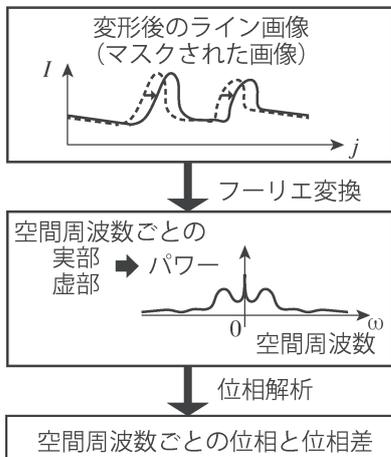
図6に計測原理の概要を示す。まず、図6(a)に示すように、遠隔から撮影した橋梁の時系列画像から、図6(b)に示すように縦のライン画像を抽出して時系列の画像を作成する。その1ラインをフーリエ変換することで図6(c)に示すようなスペクトルを得る。これより低周波の成分を抽出し、周波数ごとに基準の位相との差を求めて変位に換算する。周波数ごとに求めた変位に対してそのパワーに応じた重み付け平均を求めることにより変位を求める。さらに図6(b)において抽出する縦ラインの近傍はほとんど同一の変位となるため、多数のラインに対して同一の処理を行い平均化する。このようにして多くの画素の情報を用いて変位を算出することで計測精度を高めている。



(a) 橋りょうの撮影の様子



(b) 撮影画像から抜き出されたライン画像を用いた時系列画像の生成

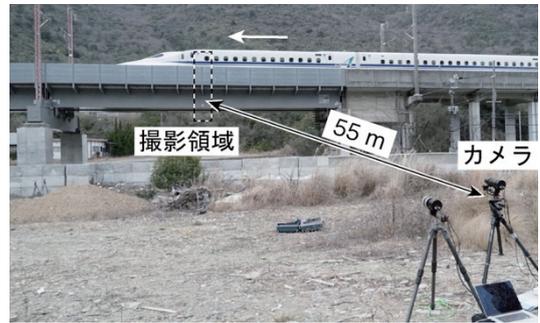


(c) フーリエ変換による位相差の抽出

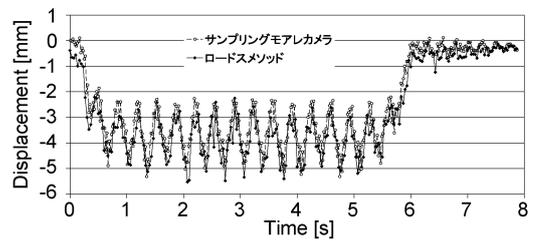
図6 ロードスメソッドの原理

Fig. 6 Principle of Rhodes method

鉄道橋梁において、列車通過時の変位を計測した例を図7に示す。サンプリングモアレ法と比較したところ、同程度の計測精度が得られていることがわかる。



(a) 実験の様子



(b) 実験結果 (サンプリングモアレ法との比較)

図7 ロードスメソッドによる変位計測実験

Fig. 7 Experiment of displacement measurement using Rhodes method

5. 一般土木用変位計測システムの開発

サンプリングモアレカメラを用いて、図8に示すような一般土木用変位計測システムを開発した。これは、XYZの3方向の変位と回転角 θ を最大500fpsで計測できる。解析ソフトウェアにおいては、各種フィルタ処理、多Ch演算、動画同期再生、FFTや、他の計測データと比較することもできる。また、各測定ポイントの変位データを用いた3Dモデル挙動画像表示を行うことができ、視覚的に振動などの様子を把握することができる。

この一般土木用変位計測システムを図4に示す長さ50.2mの人道橋の変位計測に適用した。カメラを橋梁桁端部に設置し、橋梁の舗装面に設置したピッチ10mmの格子ターゲットの変位を200fpsで計測した。橋梁中央部を垂直方向



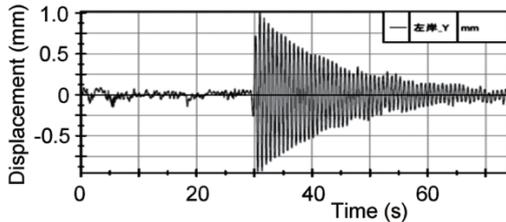
図8 開発した一般土木用変位計測システム

Fig. 8 Inspection system for general civil structures

文 献



(a) 計測実験の様子



(b) 加振時の変位計測結果

Fig. 9 Experiment of displacement measurement using inspection system for general civil structures

に加振した時に計測した端部から 12.5 m 位置での変位の様子を図 9 に示す。これより加振後の減衰の様子が確認できる。

6. おわりに

本研究では、インフラ構造物の変位やたわみ角を遠隔から高精度に計測できるシステムの開発を行った。新しいアルゴリズムや装置を試作し、多くの現場での実証試験を行うことで、実用的なシステム開発を行うことができた。

また、本稿で紹介した以外に、横長カメラや、鉄道橋梁用の無線式サンプリングモアレカメラ、複数台のカメラを同期させて撮影することができる無線トリガ装置などの試作を行なっている。また、本プロジェクトを進めることで、たわみ角を用いた新しい健全性評価の指標の提案⁽⁹⁾も行なっている。今後、さらに実証試験を進めて改良していくことで、多くのインフラ構造物において実際に利用されるものにしていきたい。

謝辞

本研究は、NEDO 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として行った。協力いただいた株式会社ヒカリ、関西ティー・エル・オー株式会社、関係諸氏に感謝する。

- (1) 松田浩, 伊藤幸広:「光学的計測法によるインフラ構造物の施工と維持管理」, 実験力学, Vol. 11, No. 3, pp. 161-170 (2011).
- (2) S. Ri, M. Fujigaki and Y. Morimoto: “Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, Experimental Mechanics”, Vol. 50, No. 4, pp. 501-508 (2010).
- (3) 李志遠, 藤垣元治:「サンプリングモアレ法による高精度微小変位分布計測とその応用」, よくわかる実験技術・学術用語第 2 版, 格内敏, 加藤健司, 加藤章, 新川和夫 編, 日本実験力学会, pp. 44-47 (2012).
- (4) 新井泰彦, 白木万博, 山田朝治, 横関俊介:「CCD 画像のサンプリング技術を用いた二次元空間的縞解析法」, 光学, Vol. 25, No. 1, pp. 42-47 (1996).
- (5) Y. Arai, S. Yokozeki, K. Shiraki and T. Yamada: “High Precision Two-Dimensional Spatial Fringe Analysis Method”, Journal of Modern Optics, Vol. 44, No. 4, pp. 739-751 (1997).
- (6) M. Fujigaki, Y. Sasatani, A. Masaya, H. Kondo, M. Nakabo, T. Hara, Y. Morimoto, D. Asai, T. Miyagi, N. Kurokawa: “Development of Sampling Moire Camera for Real-time Phase Analysis, Applied Mechanics and Materials”, Vol. 83, pp. 48-53 (2011).
- (7) 藤垣元治, 富田大樹, 村田頼信:「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, Vol. 15, No. 4, pp. 315-319 (2015).
- (8) 藤垣元治, 栗林賢一, 木村元哉, 村田頼信:「位相解析を用いた列車通過時における鉄道橋りょうの動的微小変位計測」, 第 48 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, pp. 111-112 (2017).
- (9) 栗林賢一, 藤垣元治, 木村元哉, 丹羽雄一郎:「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, Vol. 62A, pp. 617-629 (2016).

橋梁計測用無線サンプリングモアレカメラの開発

梶谷 明大* 森本 吉春 Luong Anh Duy Quarles Quentin Antonio (4Dセンサー (株))
栗林 賢一 川下 光仁 武内 宣夫 津野 義博 (ジェイアール西日本コンサルタンツ (株))
藤垣 元治 (福井大学)

Development of Wireless Sampling Moire Camera for Bridge Measurement

Akihiro Masaya*, Yoshiharu Morimoto, Luong Anh Duy, Quarles Quentin Antonio, (4D Sensor Inc.)
Kenichi Kuribayashi, Mitsuhiro Kawashita, Nobuo Takeuchi, Yoshihiro Tsuno, (JR West Japan Consultants
Company), Motoharu Fujigaki, (University of Fukui)

Wireless sampling moire camera for bridge deflection measurement device was developed. As a result, accuracy was improved. Also, the difficulty of installation was greatly reduced. In this research, we describe the development of the wireless sampling moire camera for bridge measurement. The features of the developed device were evaluated using a test bench. The displacement measurement result of an actual railroad bridge while a train was passing was shown.

キーワード: 無線サンプリングモアレカメラ, サンプリングモアレ法, 橋梁たわみ計測, 変位計測

(Keywords, Wireless Sampling Moire Camera for Bridge Measurement, Sampling Moire Method, Bridge Deflection Measurement, Displacement Measurement)

1. はじめに

橋梁の健全性評価の一つとして、たわみ計測が行われている。橋梁のたわみ計測の計測値は、橋梁を通過する列車の速度や乗客の数、あるいは橋桁の状態等で変化する。橋梁の変位を計測する技術として、橋梁上の所定位置に複数のターゲットを配置し、このターゲットを既設の橋台上または陸上の固定点に設けた画像センサーで撮像して計測する方法(引用文献⁽¹⁾)が知られている。また、橋梁架設施工管理において、橋梁上においてターゲットとズーム付きCCDカメラとを互いに離間した位置に配置し、ズーム付きCCDカメラで撮像したターゲットの画像データを画像処理機で画像処理し、橋梁のたわみ成分とねじれ成分の変位を計測する装置及び方法(引用文献⁽²⁾)が知られている。CCDカメラで撮像した画像データを用いた計測では、正方形マーカーを用いた橋梁のたわみ計測法も提案されている(引用文献⁽³⁾)。サンプリングモアレ法を用いることにより精度よくたわみを計測することも行われている(引用文献⁽⁴⁾)。サンプリングモアレ法は、予め橋梁のたわみを計測したい場所に格子模様様のシートを貼り付け、離れた場所からその格子をカメラで撮影することでたわみを計測することができる。このとき、格子の位相を求め、変形前と変形後のそれぞれの位相の差を出し、格子の1ピッチの長さ情報を用い

て位相を変位量に変換するため、精度よくたわみを計測することが可能である。

筆者らが使用してきた従来の橋梁たわみ計測装置(引用文献⁽⁵⁾)は、高速ではあるが、コントロールユニットが大きく重量があり、運搬が困難であった。また、動作のための電源が別途必要であった。さらに、カメラとコントロールユニットの接続のため、ケーブルが用いられていた。この際、ケーブルの自重や風の影響により、カメラに揺れを発生させ、計測誤差につながっていた。

本研究は、以上の問題を解決するため、カメラを無線化することで風の影響を無くし、設置の労力を大幅に低減する橋梁計測用無線サンプリングモアレカメラの開発を行う。

2. 無線サンプリングモアレカメラ

〈2.1〉 サンプリングモアレ法

サンプリングモアレ法の原理について述べる(引用文献⁽⁶⁾)。サンプリングモアレ法における位相分布の求め方を図1に示す。図1(a)はデジタルカメラの画素位置を示す。このカメラを用いて、計測対象物の表面に貼り付けた格子(図1(b))を撮影すると、格子のデジタル画像(図1(c))が得られる。ここで、格子のデジタル画像の間引きを行う。このとき、間引き数を格子の1ピッチ分の画素数とほぼ一致させ

る。図1の(b)と(c)より、1ピッチの画素数は約4であることがわかる。そのため、図1(c)に対して4画素間引きを行った間引き画像が図1(d)である。さらに、間引き開始位置を1画素だけ右にずらして4画素間引きを行った画像が図1(e)である。さらに1画素ずらした間引き画像が図1(f)で、その上1画素ずらした間引き画像が図1(g)である。(d)から(g)までそれぞれの間引き画像について、輝度値で線形補間し、なめらかに画像をつないだ線形補間画像がそれぞれ図1(h), (i), (j)および(k)である。このとき、(h), (i), (j), (k)の左から同じ位置の輝度値を抜き出す。この4つの輝度値は、格子が位相シフトしたときの輝度値である。

ここで、位相シフト回数をN、位相シフト量を $2\pi k/N$ としたときの輝度値を $I(k)$ とすると、求める各画素の位相 θ は式(1)で与えられる。式(1)より、簡単に位相値を求めることができる。

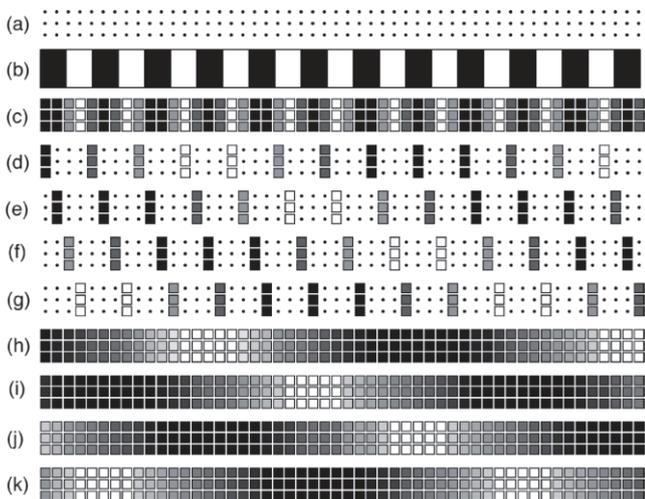


図1 サンプルングモアレ法の原理

Fig. 1. Principle of Sampling Moire Method

$$\frac{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \sin(k \frac{2\pi}{N})}{\sum_{k=0}^{N-1} I_k \cos(k \frac{2\pi}{N})} = -\tan\theta \dots\dots\dots (1)$$

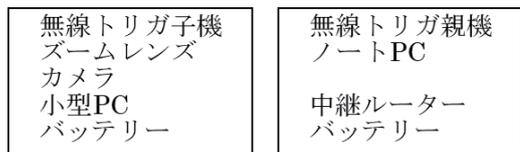
上記の手順によって、サンプルングモアレ法を用いると、1枚の格子輝度画像から位相分布画像を求めることができる。最後に、1ピッチの長さから位相値を変位量に変換することができる。そのため、対象物が変形する前の画像から位相分布と、変形した後の位相分布を求め、その差を求めたうえで、全体を変位量に変換すると変位分布を得ることができる。

サンプルングモアレ法を用いると、橋梁のたわみを計測することが可能である。格子を予め橋梁に貼り付け、離れた場所からカメラで格子を撮影し、撮像画像にサンプルングモアレ法を適用することで、橋梁の変位、すなわち、橋梁の

たわみを得ることが可能である。

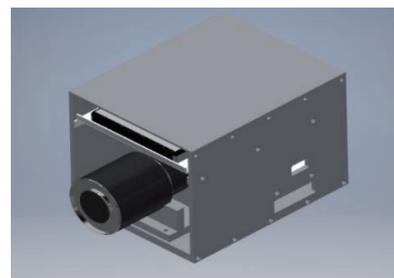
〈2・2〉 無線サンプルングモアレカメラの構成

筆者らが使用してきた従来の橋梁たわみ計測装置サンプルングモアレカメラ(引用文献⁽⁵⁾)は、画像解析のためFPGAを用いていた。そのため、高速ではあるが、カメラの制御とFPGAから出力されるデータの受信のため、カメラのすぐ側にコントロールユニットを配置する必要があった。コントロールユニットは約200Nあり、また、動作のための電源が別途必要である。電源の重さは約200N以上あり、ガソリンエンジンの場合、振動も発生するため、数メートル以上カメラから離れた場所に設置していた。さらに、カメラとコントロールユニットの接続のため、ケーブルが用いられていた。カメラは三脚を使って地面から2m以上の位置に設置されることも多い。高い位置にカメラが設置されると、ケーブルも長く配線する必要がある。この際、ケーブルの自重や風の影響により、カメラに揺れを発生させ、計測誤差につながっていた。そこで、装置運搬、設置方法の改善と、風によってカメラが振動することで生じる撮像画像のぶれ、撮像画像の画像データのノイズ成分を抑制することを目的とし、変形計測の計測精度の向上を図ることを目的とする無線サンプルングモアレカメラの開発を行った。

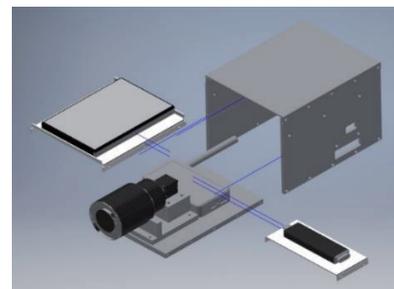


(a) 子機内部

(b) 親機内部



(c) 子機



(d) 子機内部

図2 無線サンプルングモアレカメラ

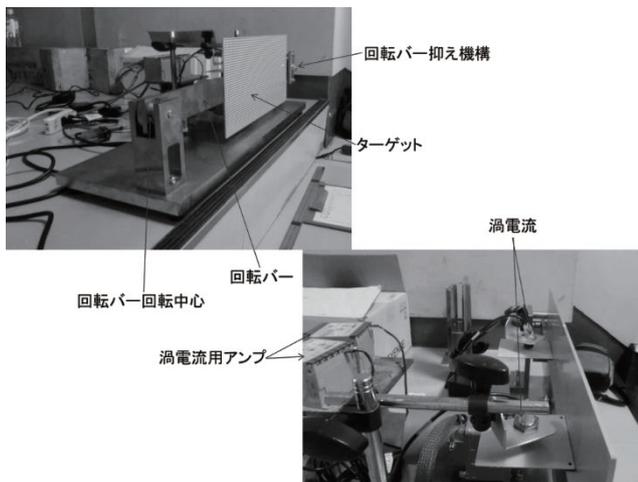
Fig. 2. Wireless Sampling Moire Camera

図 2 に開発した無線サンプリングモアレカメラの構成を示す。図 2(a)は無線サンプリングモアレカメラの子機である。カメラにはズームレンズが取り付けられており、5m から 20m までの距離で撮影が可能である。また、子機の内部に小型 PC と動作用のバッテリーを備え、子機内部でサンプリングモアレ法を使って変位を解析することが可能である。さらに、無線トリガ子機を備え、3 台までの子機で無線で同期を取って撮影することが可能である。無線トリガ子機は無線トリガ親機の指令信号に基づいて撮像対象（ターゲット）を撮像して画像データを取得する。子機は、取得した画像データをサンプリングモアレ法により解析して撮像対象の変位を計測する。図 2(b)は、無線サンプリングモアレカメラの親機である。親機は、中継ルータを使って、50m の距離まで離れた複数の子機から変位の解析結果を受信し、グラフや画像を表示する。図 2(c)は子機のイメージ図である。図 2(d)に子機内部のイメージ図を示す。

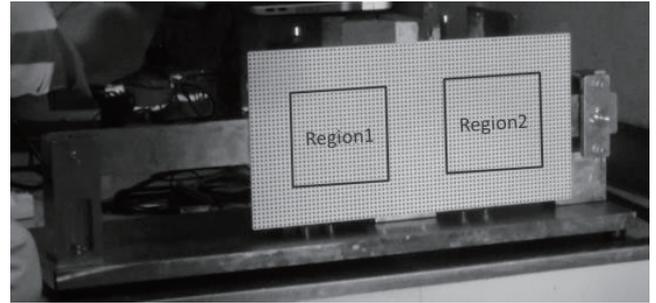
本変位計測システムは、子機と親機との間を相互に無線通信することにより、子機で取得したデータを親機にケーブルを介することなく送信することができる。そのため、子機と親機とがケーブルで繋がれた構成において、ケーブルが揺れることにより生じる撮像画像のぶれや、撮像画像の画像データのノイズ成分を抑制することができる。

〈2・3〉 無線サンプリングモアレカメラの精度評価

回転速度 200rpm、フレームレート 100fps で上下に揺動回転する板に 5mm ピッチの格子を貼り付けた精度確認用実験装置を用いて精度確認実験を行った。計測に使用した変位計測装置は、渦電流センサ式変位計、従来のサンプリングモアレカメラおよび無線サンプリングモアレカメラである。これら 3 種類の機器で計測し、変位量の精度検証を実施した。計測時間は 20 秒、計測範囲は 1 領域 256 画素×256 画素を 2 領域使って計測を行った（図 3）。



(1) 精度確認用実験装置構成



(2) 精度確認用実験装置に取り付けた格子の計測領域

図 3 精度確認用実験装置

Fig. 3. Accuracy Evaluation Experiment

環境条件は気温 28.4℃、湿度 40%であった。照明条件は HOLOLIGHT を 1 基用いた。輝度のちらつきをなくすため室内照明は消灯して実験を行った。計測距離は 5m および 10m で計測を行った。計測の結果を表 1 および表 2 に示す。計測の結果、無線サンプリングモアレカメラの誤差は、距離 5m, Region1 の場合、平均 0.0102mm、標準偏差 0.0014mm であった。距離 5m, Region2 の場合、平均 0.0069mm、標準偏差 0.0021mm であった。距離 10m, Region1 の場合、平均 0.0207mm、標準偏差 0.0031mm であった。距離 10m, Region2 の場合、平均 0.0115mm、標準偏差 0.0016mm であった。

表 1 距離 5m の精度確認実験計測結果 (数値は振幅幅)

Table 1. Mesurment Result by Accuracy Evaluation Experiment (Working distance:5m)

No.	計測装置	Region1		Region2	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	渦電流センサ式変位計	0.1982	0.0037	0.3406	0.0050
2	サンプリングモアレカメラ	0.2132	0.0031	0.3521	0.0042
3	無線サンプリングモアレカメラ	0.2084	0.0023	0.3475	0.0030
4	No. 2-No. 1 差分 (No. 2の誤差)	0.0150	0.0006	0.0115	0.0008
5	No. 3-No. 1 差分 (No. 3の誤差)	0.0102	0.0014	0.0069	0.0021
6	No. 2-No. 3 差分 (従来との差)	0.0048	0.0008	0.0046	0.0013

単位：mm

表 2 距離 10m の精度確認実験計測結果 (数値は振幅幅)

Table 2. Mesurment Result by Accuracy Evaluation Experiment (Working distance:10m)

No.	計測装置	Region1		Region2	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	渦電流センサ式変位計	0.1984	0.0046	0.3410	0.0069
2	サンプリングモアレカメラ	0.2158	0.0056	0.3512	0.0059
3	無線サンプリングモアレカメラ	0.2192	0.0077	0.3525	0.0085
4	No. 2-No. 1 差分 (No. 2の誤差)	0.0174	0.0010	0.0102	0.0009
5	No. 3-No. 1 差分 (No. 3の誤差)	0.0207	0.0031	0.0115	0.0016
6	No. 2-No. 3 差分 (従来との差)	0.0033	0.0021	0.0013	0.0025

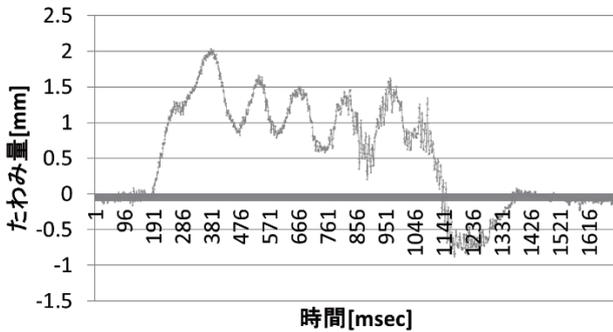
単位：mm

3. 無線サンプリングモアレカメラによる橋梁たわみ計測

開発した無線サンプリングモアレカメラを用いて、実橋梁の計測実験を行った。実験は、無線サンプリングモアレカメラ1台を用いてA橋梁の鉄道橋のたわみの時間変化を計測した。橋梁の中央付近に5mmピッチの格子を貼り付け、6両編成の車両が通過したときの変位を表すグラフを図4に示す。図4(a)は、6両編成の車両が通過するときの写真である。図4(b)は、通過するまでの間、無線サンプリングモアレカメラを用いて、100fpsで計測を行ったときの変位を表すグラフである。グラフの数値は、大きいほど下にたわんでいることを表している。本実験では、最大約2mmのたわみが計測された。



(a) 6両編成の車両が通過するときの写真



(b) 6両編成の車両が通過したときの時間変化

図4 無線サンプリングモアレカメラを用いた橋梁たわみ計測実験

Fig. 4. Displacement measurement result of an railroad bridge while a train was passing

4. おわりに

本研究では、カメラを無線化することで風の影響を無くし、設置の労力を大幅に低減する橋梁計測用無線サンプリングモアレカメラの開発を行った。サンプリングモアレ法は、あらかじめ橋梁に貼り付けた格子をカメラで撮影し、撮影された格子の位相を解析することで、高速かつ精度よく変位を計測することができる。従来の橋梁たわみ計測装置

は、高速ではあるが、コントロールユニットが大きく、重量があり、運搬が困難であったが、開発した無線サンプリングモアレカメラは小型・軽量（子機約30N）である。また、動作のための電源は不要である。さらに、無線化により、ケーブルの自重や風の影響による揺れが無くなり、計測精度が向上した。

開発した無線サンプリングモアレカメラは、子機と親機との間を相互に無線通信することにより、お互いのデータをケーブルを介することなく送信することができる。ケーブルが揺れることにより生じる撮像画像のぶれや、撮像画像の画像データのノイズ成分を抑制することができた。計測精度は、10m離れた場合でも20μmであった。今後は、さらなる装置の小型化やインターネットを用いた通信等、改良を進めていきたい。

謝辞

本研究は、NEDO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として行った。関係諸氏に感謝する。

文 献

- (1) 宇田川 清・加藤 征也・長谷川 壽男:「橋梁鈹桁など長尺構造物の自動計測装置及び方法」, 特開平8-210852号公報 (1996)
- (2) 田島 昌則・久留島 匡籍・倉川 義弘:「橋梁架設施工管理方法及び装置」, 特開2008-57243号公報 (2008)
- (3) 志岐 和久・伊藤 幸広・石橋 孝治・内田 慎哉・松田 浩・出水 享・木村 嘉富:「正方形マーカーを用いた橋梁のたわみ計測法」, 実験力学, Vol.12, No.4, pp.375-382 (2012.12)
- (4) Ri, S., Fujigaki, M., and Morimoto, Y: "Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement", Experimental Mechanics, Vol.50, pp.501-508 (2010.4)
- (5) 栗林 賢一・大久保 洵・松本 理佐・服部 篤史・木村 元哉・藤垣 元治・河野 広隆:「サンプリングモアレカメラによる鉄道橋のたわみ角測定精度向上および支承部の健全度評価に関する検討」, 実験力学, Vol.18, No.1, pp.18-23 (2018.3)
- (6) 森本 吉春・藤垣 元治・梶谷 明大:「サンプリングモアレ法による変位・ひずみ分布計測」, Journal of the Vacuum Society of Japan, Vol.54, No.1, pp.32-38 (2011.3)

サンプリングモアレカメラを用いた 鉄道橋の客観的健全度評価手法の検討

栗林 賢一 川下 光仁 武内 宣夫 津野 義博 (ジェイアール西日本コンサルタンツ(株))
藤垣 元治 (福井大学)

A Study on Objective Soundness Evaluation Method for Railway Bridge
Using Sampling Moire Camera Measuring Instruments System
Kenichi Kuribayashi, Mitsuhiro Kawashita, Nobuo Takeuchi, Yoshihiro Tsuno
(JR West Japan Consultants Company)
Motoharu Fujigaki (University of Fukui)

This paper addresses a study of developing useful measuring instruments system which contributes to soundness evaluation for railway bridges by providing objective and quantitative index. Both displacement and deflection angle of a bridge are measured in time-series using this system while a train is passing. We confirmed this system's possibility of application to the soundness evaluation by measuring the behavior of the existing bridges. These results show that the system can contribute to soundness evaluation for railway bridges.

キーワード: たわみ角, たわみ, 健全度評価, 鉄道橋, サンプリングモアレカメラ
(Keywords, deflection angle, deflection, soundness evaluation, railway bridges, Sampling Moire Camera)

1. はじめに

橋りょうの維持管理上の定量的評価指標として、桁のたわみや橋脚の固有振動数等が挙げられるが、桁の挙動の計測値の活用は設計値との比較に留まり十分な実用レベルには至っていない状況にある。また、橋りょうの支承部は重点検査箇所ではあるが、計測作業環境が厳しいことや、その挙動が微細であることに起因して客観的・定量的な評価手法が十分に確立されていない。また、BP-A 沓（高力黄銅支承板支承）のソールプレート周辺はベアリングプレートの可動不良が主要因と考えられる疲労亀裂等の変状が報告されており⁽¹⁾、鋼鉄道橋の維持管理上の重要課題の一つとなっている。

本研究では効率的・客観的な健全度評価に資する計測精度確保を目的にサンプリングモアレカメラ（以下「SMC」という）を用いた計測システムを構築した。さらに、実橋りょうの支承部の沓の劣化に伴う沓の交換前後での支承部付近のたわみ角の挙動を計測した。構造が複雑で点検上の課題が顕在化しつつある BP-A 沓を有する桁の支承部付近の挙動計測を実施し、沓の回転性能を評価した。本研究では、本計測手法が健全度の評価手法として有効であることを検討する。

2. SMC を用いた計測システムの構築

〈2・1〉サンプリングモアレ法の概要

サンプリングモアレ法（以下「SM法」という）とは画像処理による位相解析手法の一つで、1次元格子の位相を解析する空間的縞解析法を2次元格子の位相解析に拡張した手法である⁽²⁾。本手法が動的計測に優位な点は位相シフト法を用いることにより、1枚の2次元格子標識（以下「ターゲット」という）の撮影画像から高精度に各画素の初期位相を取得できることである。

解析手順は、図1に示す格子画像の撮影、算出する変位に対する直交方向への平準化、撮影画像の間引き、間引き画像に対する輝度補間、位相シフト法を用いた画素毎の初期位相の算出、以上の処理を経た位相分布画像の取得である。変位後についても同様に位相分布画像を得て、変位前後の位相差に関する分布画像を得る。

なお、間引き処理は、図2に示すとおり変位方向に間引き始点を1画素毎にスライドさせて新たに得た間引き数分の画像に対し、同様の処理を実施するものである。また、輝度補間処理は、間引かれた画素に輝度値に関する正弦波となるように輝度を補間してモアレ縞画像を得るものである。本手法を用いればターゲットに対し、x方向とy方向の

輝度に関する波形の位相を高精度に解析することができる。

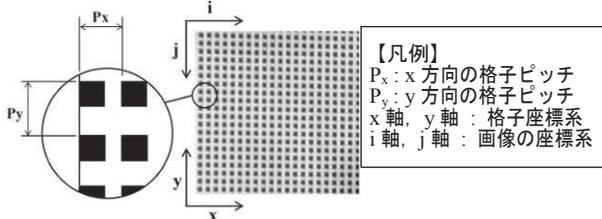


図 1 ターゲットの撮影画像
 Fig.1 Shot image of the target

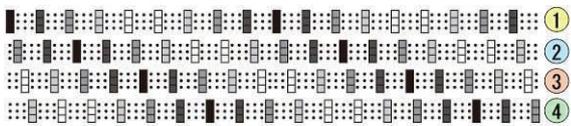


図 2 間引き処理画像 (4 画素間隔での間引き例)
 Fig.2 Thinned image(Example of thinning out 4 pixel intervals)

〈2・2〉 SMC の開発・改良

SMC は内装した FPGA (Field Programmable Gate Array) にて撮影画像に対して、リアルタイムに SM 法に基づく位相解析する機能を具備したカメラである。これによって、x 方向および y 方向の変位前後の位相差を 2π で除した値に格子ピッチ量を乗じて x, y, 2 方向の変位量および回転角を高精度に取得できる⁽³⁾。撮影速度は、撮影する画像サイズによってその最大値が決まり、画像サイズが 2048×2048 画素の場合は 14fps, 512×512 画素の場合は 143fps, 128×128 画素の場合は 230fps である。そのため、比較的速い振動数に対しても計測が可能で、多様なニーズに対応した計測を実現できる利点を有する。

また、SMC の撮影画像内で焦点の合う複数点に対して 1 台のカメラでの計測を可能とした。一方、画像内に収まらない離れた箇所での同期計測については複数台のカメラのケーブル接続によって方向や焦点距離の異なる複数点の撮影フレーム単位での同期計測を可能とした。これによって、列車通過時のたわみ計測波形から旅客の乗車率や貨物の積載量の変動等の不確定要素を反映したたわみ角の理論波形を作成する⁽⁴⁾等、複数点の同期計測結果の組み合わせによる桁の挙動等の検討を可能とした。

列車通過時の桁の挙動を計測する際、これまで列車接近にタイミングを合わせた計測開始のコマンド入力を要していた。しかし、山間区間のトンネル出口付近に橋りょうが存在する等の見通しが悪い場合や新幹線等の高速走行の場合、タイムリーな計測開始が困難となる。

これに対し、列車通過後の計測時間の終了時点に計測終

了コマンドを入力することで必要な時間を遡った変位データの取得を可能としたエンド同期システムを導入した。

これにより、計測の実施成功確率の向上、計測データ量の適正化、進来合図要員等の削減に伴うコスト削減を実現した。これらの取り組みにより、ターゲットを一旦設置すれば地上から遠隔・非接触で高精度な計測を可能とする計測システムを構築した。

計測状況を図 3 に示す。なお、図で示すコントローラーはその右側に設置した SMC とケーブルで接続し、他の計測点との同期を操作するものである。

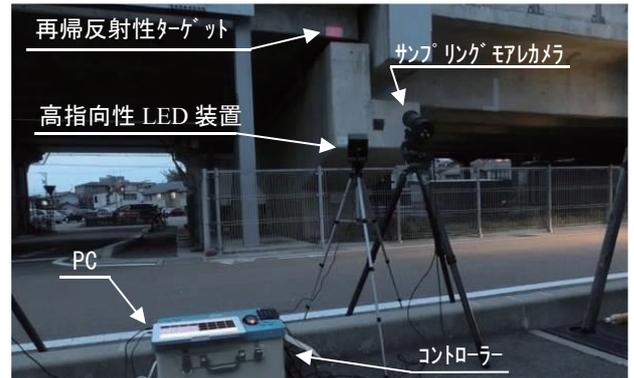


図 3 計測状況図
 Fig.3 Measurement situation

3. SMC を用いた計測による有効性の検証

支承部付近等における客観的・定量的な評価指標として本計測手法によるたわみ角計測値の活用可能性を検証する。検証には支承直上とその近傍のたわみ角を計測し、両者を相対的に評価することで図 4 に示すような支承およびその近傍部の局所的な応力集中につながる変形の有無について検討した。検証計測は、図 5 に示す支承直上のたわみ角 θ_1 およびたわみ角 θ_2 に対して実施した。たわみ角 θ_2 はソールプレートの径間側縁端部等の剛性の急変部における局部変形を捉える目的で計測した。

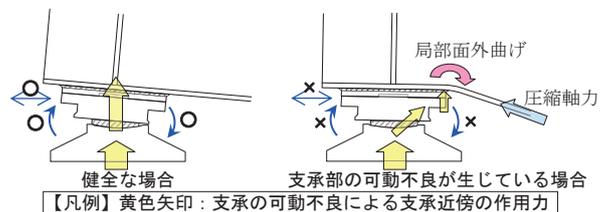


図 4 支承の可動不良による支承近傍の挙動⁽⁴⁾
 Fig.4 Behavior of the bearing near by the movable defective bearing

検証対象の桁は、図 6 に示す経年約 40 年の上下線連結材で連結された単線並列箱断面合成桁 (以下「A 橋」という) の下り線側を選定した。構造諸元は、A 橋が支間長 45.2m, 桁長 46.0m で、B 橋が支間長 20.5m, 桁長 21.1m である。A

橋の支承は、列車進出側が経年劣化による交換が行われ、列車進入側の変状はドライパッキングの割れ程度であり計測時点で交換や補修等の予定はない。

【凡例】
 θ_1 : 支承直上のたわみ角、 θ_2 : ソールプレート縁端部等を跨いだ箇所なたわみ角
 δ_1 , δ_2 , δ_3 : 各ターゲットにおける鉛直変位量

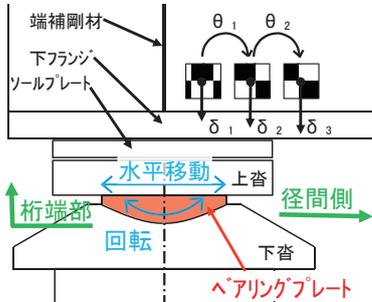


図5 支点部の回転機能確認時のターゲット配置図
 Fig.5 Target placement diagram when rotation function of fulcrum part is confirmed

沓交換前の A 橋の計測条件は、3 月 22 日 16 時 43 分頃に 100 fps で計測、気温 14.6℃、湿度 54%、天候晴れ、SMC の配置は図 7 に示すとおりである。沓交換の概ね 1 カ月後の A 橋の計測条件は、4 月 27 日 16 時 36 分頃、100fps で計測、気温 18.9℃、湿度 42%、天候曇りであった。沓の交換前後の支承部のたわみ角を計測することにより、支承部の回転性能を評価する。図 8 に示す車軸配置の列車が A 橋を通過時の沓の交換前後の支承部付近のたわみ角データ処理波形を図 9~12 に示す。B 橋の計測条件は、4 月 10 日 0 時 40 分頃に 50 fps で計測、気温 12℃、湿度 77%、天候曇り、SMC の配置は図 13 に示す。

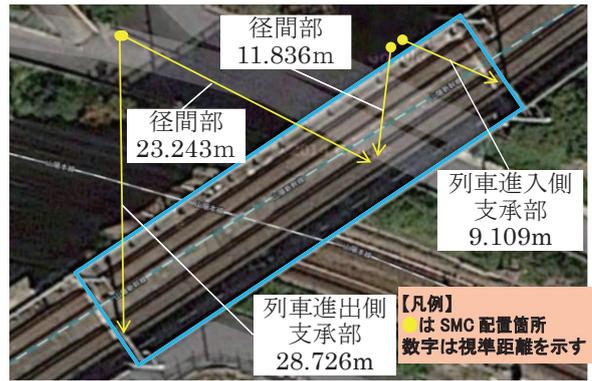


図 7 A 橋計測時における SMC 配置図
 Fig.7 SMC arrangement diagram at the time of A bridge measurement

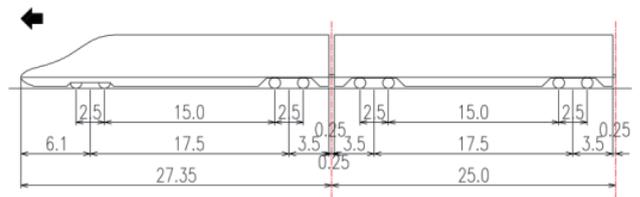


図 8 新幹線の車軸配置図
 Fig.8 Axle Layout view of the Shinkansen

沓交換前の A 橋の列車進出側の支承は、図 9 から、その回転機能が円滑でなく、支承部を外れて剛性が急変する箇所においてたわみ角が大きくなっていることから、角折れが生じていると考えられる。これに対し、沓交換後には図 10 から回転機能が円滑になっており、改善されていることがわかる。一方、沓の交換を行っていない A 橋の列車進入側の支承は、図 11 および図 12 から支承直上のたわみ角 θ_1 とソールプレートの径間側縁端部を跨いだ 2 点間のたわみ角 θ_2 の挙動は概ね一致していることから回転性能は円滑であることが分かる。列車進出側の沓が経年劣化による交換を実施したこと、また、列車進入側の支承は現時点で交換予定・補修予定がないという検査判定結果と整合する。

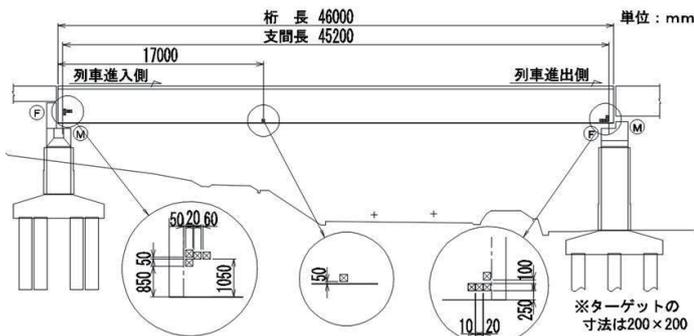


図 6 A 橋の構造一般図・ターゲット配置図
 Fig.6 Structure general of the A Bridge and target placement

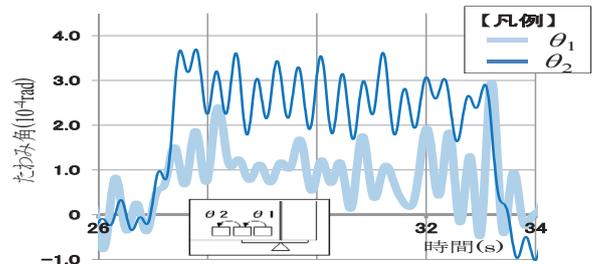


図 9 沓交換前 A 橋の列車進出側支承部付近のたわみ角波形
 Fig.9 Deflection angle waveform near the train advance side support of A bridge before replacement of bearing

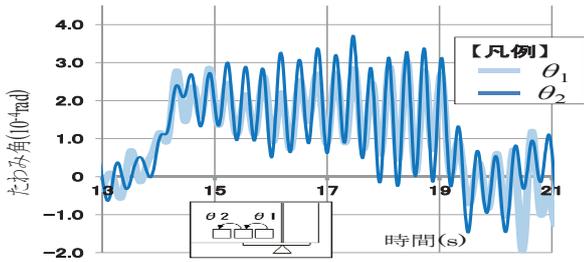


図 10 沓交換後 A 橋の列車進出側支承部付近のたわみ角波形
 Fig.10 Deflection angle waveform near the train advance side support of A bridge after replacement of bearing

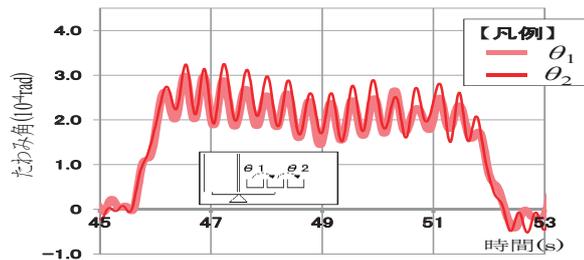


図 11 沓交換前 A 橋の列車進入側支承部付近のたわみ角波形
 Fig.11 Deflection angle waveform near the train entrance side support of A bridge before replacement of bearing

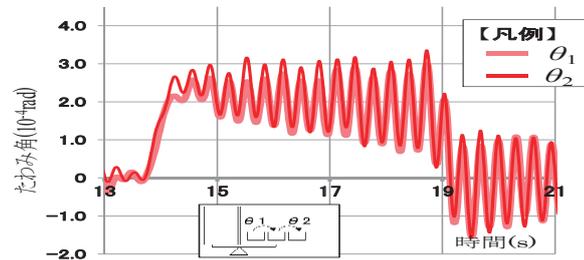


図 12 沓交換後 A 橋の列車進入側支承部付近のたわみ角波形
 Fig.12 Deflection angle waveform near the train entrance side support of A bridge after replacement of bearing

なお、本計測波形は同期計測した径間部のたわみ計測波形を活用してデータ処理波形を取得した。

以上のことから、本計測機器システムは、変位量が少ない支承の回転機能の状態把握等の健全度評価に適用できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、鉄道橋の維持管理データの時系列管理を適切に進めていく上で必要なタイムリーに高精度な計測を可能とする SMC を用いた計測システムの開発を目的として取り組み、実橋計測によりその有効性を検証した。計測対象には、鉄道橋の維持管理上の重要検査箇所である支承部の管理指標としてたわみ角を提案し、桁支承部付近のたわみ

角を選定し、その計測データに対して検証した。支承部の可動状況を示す計測データを取得し、たわみ角の計測精度が局部変形等の異常を捕捉できるレベルであることを示した。

この安全性、作業性、経済性に優れた作業を実現する計測システムの構築により、健全度判定に資するデータ取得が可能であることを示した。

謝 辞

本研究は、NEDO 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として行った。本研究の実施に当たり、西日本旅客鉄道株式会社の長田文博氏、木村元哉氏、小山敏弘氏に多大なご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) 丹羽雄一郎, 松本健太郎, 矢島秀治, 小林裕介: 鉄道合成桁ソールプレート溶接部の疲労対策, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.611-621, 2012.3
- (2) Ri,S., Fujigaki,M. and Morimoto,Y. : Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, Experimental Mechanics, Vol.50, No.4, pp.501-508, 2010.4
- (3) 藤垣元治, 富田大樹, 村田頼信: 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, Vol.15, No.4, pp.315-319, 2015.12
- (4) 栗林賢一, 藤垣元治, 木村元哉, 丹羽雄一郎: たわみ角を管理指標として用いた鉄道橋の健全度評価指標に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.617-629, 2016.3

サンプリングモアレカメラの開発と道路橋等への適用例

前田 芳巳* 津田 仁 (株式会社共和電業)

Development of Sampling Moire Camera and its application to road bridges
Yoshimi Maeda, Hitoshi Tsuda (KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.)

サンプリングモアレカメラによる遠望多点変位・振動測定システムの構成および搭載される最新機能と、一般道路橋や土木構造物等へ適用した現場事例の紹介

This paper introduces the system configuration of distant-view multi-point displacement and vibration measurements by using the Sampling Moire Camera, additional functions of the Sampling Moire Camera, and on-site examples for general highway bridges and civil engineering structures.

キーワード: サンプリングモアレ, 道路橋, 土木構造物, 変位, 変形, カメラ, 非接触, 格子, 振動

Keywords: Sampling Moire, highway bridge, civil engineering structure, displacement, deformation, camera, non-contact, grid, vibration

1. 橋梁モニタリングにおけるたわみ測定と課題

道路橋及び鉄道橋等のたわみ測定は、橋梁の健全性指標として長く行われてきた。その計測方法はリング式変位計等の接触式が古くから採用されている。しかし、橋梁下部が河川や道路、軌道などにより変位計用ワイヤーの設置が困難な場所も多くあるため、その場合にはサーボ型加速度計等の使用、又はレーザー光等による非接触式のたわみ計測も行われてきた。

橋梁の健全性評価を行う場合、多点同時にたわみを計測することがある。接触式及び非接触式変位計では各計測点に対し1台の計測機器が必要となり、計測点が多い場合には準備に多大な時間と費用を要することもある。そのため、多点のたわみを効率よく簡易に計測できる方法が求められている。

これらの課題を解決するために「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 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 (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)」の委託開発において、サンプリングモアレ法を使用した、カメラ画像による各種構造物の多点同時変位計測 (サンプリングモアレカメラ) の実証試験を実施した。

2. サンプリングモアレ法

サンプリングモアレ法とは、2次元の格子画像に対する位相解析手法のひとつである。ワンショットの画像から2成分の位相を得ることができる。周囲の画素を平均化する

処理が含まれているため、ノイズに強く、格子ピッチの1/100~1/1000の計測精度が得られる。

図1に撮影された2次元格子画像に対するサンプリングモアレ法による位相解析の流れを示す。2次元格子画像をy方向に平滑化することで、x成分の格子が得られる。これに対して、格子の画素数に近い整数の画素数Nで間引き処理を行う。このとき、間引く位置を1画素ずつ変えることによって、位相シフトされたN枚のモアレ画像が得られる。これらの画像に位相シフト法を適用することで、x方向のモアレの位相分布が得られる。さらにN画素で 2π となる位相を加えて 2π にラッピング処理をすることで、x方向の格子の位相分布が得られる。y方向についても同様の処理でy方向のモアレの位相分布とy方向の格子の位相分布がそれぞれ得られる。(図1)

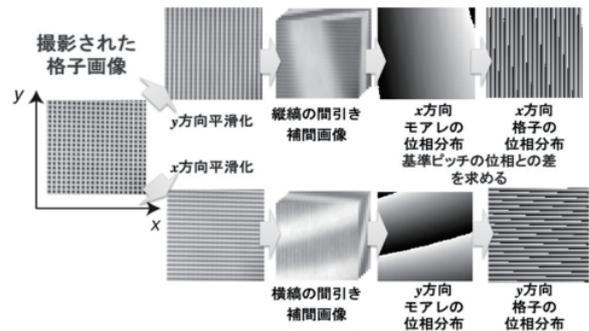


図1 サンプリングモアレ法による位相解析の流れ

変位については変形前後の格子の位相の変化から求める

ことができる。

変位は位相差に定数を掛けたものとなっており、カメラの位置や撮影画像内での格子のピッチとは無関係に値が得られることになる。そのため、本手法はカメラのキャリブレーションが不要で、計測対象に取り付けられた格子パターンの正面にカメラを配置する必要もなく、レンズの歪曲収差にも影響されずに変位分布を得ることができる。

計測対象物に貼付けられた2次元格子パターンを斜め方向から撮影すると、撮影された画像においては、格子の向きもピッチも場所によって異なるように撮影される。それでも格子のピッチが既知であるために、得られる位相差から変位への換算式は変わらない。サンプリングモアレ法の詳細については福井大学大学院工学研究科 光計測システム研究室 藤垣元治教授の論文資料を参照されたい。引用文献⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

3. サンプリングモアレ法の特徴

サンプリングモアレ法の特徴としては、

- ワンショットで撮影した画像からx方向とy方向の2次元の変位が同時に計測できる
- 変位計測分解能は、格子ピッチの1/100から1/1000程度が得られる
- 計測対象側は、格子パターンを固定するだけでよい
- 格子ピッチが既知の格子を用いるため、キャリブレーションが不要

が挙げられる。

また、格子画像は位相を用いるため正確に格子に焦点を合わせる必要がなく、例えば測定する格子パターン毎にカメラ方向に対して距離が異なっても計測を行うことができる。カメラの画角範囲内に格子パターンの測定点があれば、多点での同時計測が可能である。

4. サンプリングモアレカメラのシステム構成

サンプリングモアレカメラシステムは、サンプリングモアレカメラとコントロールPC及びデータ処理・解析ソフトを基本システムとしており、複数台のカメラによる同期撮影が可能となる「同期ユニット」も用意している。また、測定対象部分に貼付する「格子シート」についても、撮影範囲や距離に応じて2mmピッチ～40mmピッチ等各種用意した。(図2)

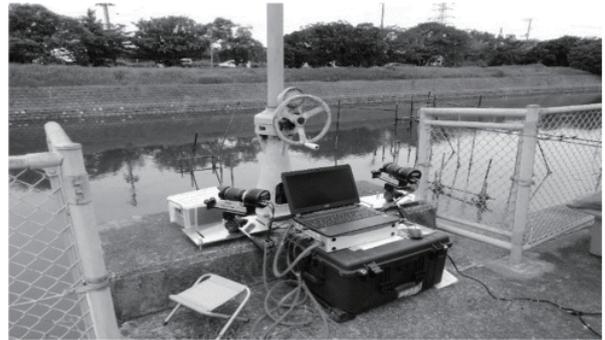


図2 測定システム構成例

開発した搭載機能としては、

- 面外変位計測アルゴリズム (XYZの3方向の変位)
- 500fps以上の高速撮影
- 多チャンネルリアルタイムモニタ
- 定点観測モード (長期連続モニタリング対応)

などがある。

5. サンプリングモアレカメラでの計測事例

現在、さまざまな橋梁において実証試験計測を行っている。以下に事例を紹介する。

〈5・1〉鋼橋のたわみ測定

鋼橋のたわみ測定には格子パターンが印刷されたマグネットシートを採用している。簡単に貼り付け取り外しができ、位置の修正も簡単である。今回の測定では格子ピッチ間隔の異なる2種(10mm、20mm)の格子シートを同じ場所に貼り付けて、撮影点距離30mで望遠レンズを使用している。両測定点のたわみ量及び周波数解析結果に違いは見られなかった。(図3、図4)



図3. 鋼橋でのたわみ測定例



図4 測定データ例

〈5・2〉コンクリート橋の多点変位測定

コンクリート橋の測定ではシートタイプの格子シートを採用している。今回の測定では桁全体のたわみ分布を測定するために等間隔でシートを貼りつけた。画角を広くとるために広角レンズを使用している。また、シートの格子ピッチ間隔及びシートサイズも大きくする必要がある。(図5)

多点測定により、変位のモデル解析が容易になり、桁全体の变形状態を確認することが可能となる。(図6)



図5 コンクリート橋の多点変位測定例

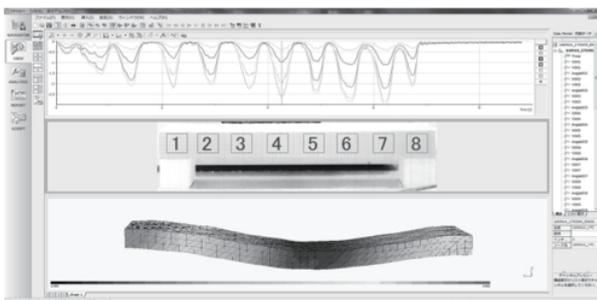


図6 単純梁の変形モデル例

〈5・3〉接触式（リング変位計）との比較測定

サンプリングモアレカメラの精度確認のために、リング式変位計との比較計測を行った。リング式変位計は追越し車線側のみに設置し、サンプリングモアレカメラは、走行車線側と追越し車線側2つの桁下部に格子シートを貼りつけたアルミ板を鉛直に固定し、1台のカメラによる複数桁の同時測定を行った。

桁端部から撮影し測定した結果、両方式でのたわみピーク値及び波形に違いは見られなかった。(図7、図8)

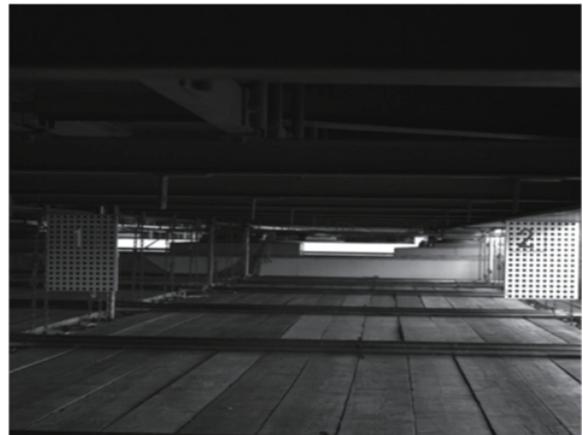


図7 複数桁の同時測定例

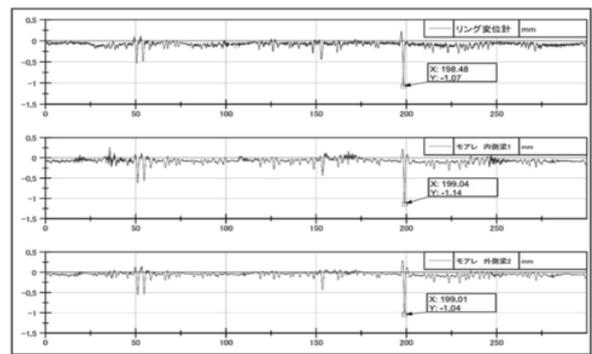


図8 リング変位計との比較測定結果

〈5・4〉オフライン解析ソフトによる変位分布解析

桁全体に格子模様があれば、変位分布測定も可能である。各画素間の位相変化をみることで、局部的な変形や異常なひび割れの動的な確認もできる。(図9)

オフライン解析ソフトでは、市販カメラや高速カメラの画像を使用して解析することも可能である。

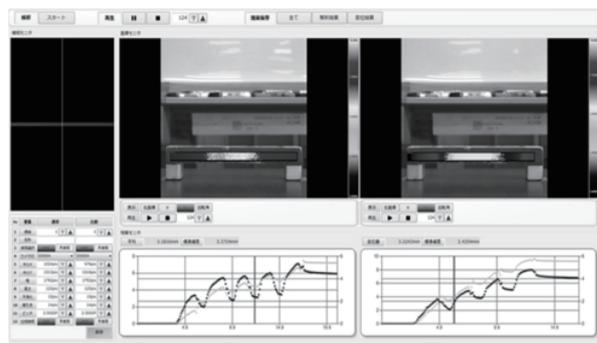


図9 オフライン解析ソフトによる変位分布解析

6. 橋梁たわみ計測における課題

橋梁等の大型構造物のたわみ、変位計測を精度良く測定するための課題を以下に挙げる。

① 撮像範囲と距離の関係

長スパン橋全体を側面から複数点同時計測する場合、カメラと測定物を離し画角を広くする必要があるので、格子サイズを大きくする必要がある。

対策として、桁端からの橋軸方向への撮影または複数台カメラでの同時計測で対応する。

② カメラのぶれ対策

屋外の現場では風や他の振動源からの影響によりカメラぶれが起きる。この対策としては、各計測点の他に変位しない固定点を撮影しておき、その変位データから各測定点データを補正することができる。固定点が取れない場合には、計測後のデータをデジタルフィルタ等で処理することが必要となる。

③ ゆらぎ対策

光学系の避けられない課題として「ゆらぎ」がある。梁下が河川等の場合水面からの反射や気温差による空気の乱れによる画像のゆらぎが発生する。これらの対策は難しいため、現場状況によっては夜間計測を行っている。

④ 遠望計測用ターゲットマークの標準化

既設橋ではターゲットシート(格子シート)の設置困難場所が多くある。このため画像やレーザー等による各種遠望計測にも対応できる統一ターゲットマークの恒久設置を提案したい。測定毎にターゲット設置が不要となり、点検コストの大幅削減や定期測定毎のポイントの固定化による繰り返し性の向上、測定誤差の低減ができる。また、各種計測法に対応できれば計測機器の開発促進にもつながる。新設橋においては施工時に設置、既設橋では定期点検時に設置を行えば、以後の点検をいつでも簡易に行うことができる。

7. 他の構造物等への応用

本計測手法は、橋梁などの道路構造物の他、各種インフラ構造物等の計測にも応用している。

建屋の柱やガラス面の風圧等による変位や振動、風力発電タワーでは、地上に設置したカメラによるナセル部の振動・変位計測も行った。

工場関係ではクレーンの荷重による変位、プレスなどの稼働中設備の振動・変形計測、家電製品のモータ振動変位などにも使用できる。

橋梁の長期モニタリングも実施している。日中の気温変化や季節変動による変位が確認できている。

高速度カメラを使用した自動車部品の回転振動影響、高温下における振動・変位計測など本計測手法が応用できる

範囲は多岐に広がっている。

8. おわりに

近年、橋梁点検の効率化が求められており、遠望からの非接触計測が注目されている。本稿では、サンプリングモアレ法を用いた実際の橋梁のたわみ計測の実例をいくつか示した。サンプリングモアレ法は、たわみだけでなく、たわみ角も精度よく計測することができ、今後の発展も期待できる。本手法を含めた簡易計測手法が今後のインフラ構造物維持管理に役立つことを目指して、産官学連携を取りながら、より使いやすく、より安心できる計測機器の開発に取り組んでいきたい。

文 献

- (1) 藤垣元治, 原卓也, 生駒昇, 村田頼信, 列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用, 実験力学, Vol. 12, No. 3, 179-184(2012).
- (2) Fujigaki, M., Sasatani, Y., Masaya, A., Kondo, H., Nakabo, M., Hara, T., Morimoto, Y., Asai, D., Miyagi, T., Kurokawa, N., Development of Sampling Moire Camera for Real-time Phase Analysis, Applied Mechanics and Materials, Vol. 83, 48-53(2011).
- (3) 藤垣元治, 富田大樹, 村田頼信, 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, Vol. 15, No. 4, 315-319, (2015).

デジタル画像からコンクリートひび割れを自動検出する技術の開発

佐藤 久 遠藤 重紀 (首都高技術)

早坂 洋平 皆川 浩 久田 真 (東北大学)

永見 武司 小林 匠 増田 健 (産業技術総合研究所)

Development of technology to automatically detect concrete cracks from digital images

Hisashi Sato, Shigenori Endo (Shutoko Engineering Company Limited)

Yohei Hayasaka, Hiroshi Minagawa, Makoto Hisada (Tohoku University)

Takeshi Nagami, Takumi Kobayashi, Takeshi Masuda (Advanced Industrial Science and Technology)

In recent years, the aging of the road structure has progressed, and the importance of inspections and investigations has further increased. Since June 2006, the road bridge of 2.0 meters or more has to be regularly inspected every five years, the work of the inspector is increasing. On the other hand, as the number of civil engineers decreases along with the declining birthrate and aging population, burdens on the subjects to be examined increase, and labor saving of inspection work is desired.

In this research, we focused on cracks in concrete generated in structures and developed a technology to automatically detect cracks from digital images. In this paper, we report the development function and the outline of the development situation.

キーワード: コンクリート, 点検, ひび割れ, デジタル画像, 自動検出, 画像処理, 人工知能

Keyword: concrete, inspection, crack, digital image, automatically detect, Image processing, Artificial intelligence

1. はじめに

日本の道路インフラは、高度経済成長期に数多く建設され、その高齢化が進み、劣化損傷が増加し続けている。今後、これらのインフラ構造物を維持し続けるためには、適宜最適な維持計画を立案し補修する必要がある。維持計画を立てる上で重要となるのが、精度の高い「点検」である。

H26年6月より、2.0m以上の道路橋に対し、五年に一度の定期点検が義務付けられた。⁽¹⁾これに伴い点検に係る作業は増加し続けている。一方で、労働人口の減少により土木技術者の減少も進み、点検従事者への負担がより大きくなっている。こうした課題の中、我々は構造物に発生するコンクリートひび割れに着目し、デジタル画像からひび割れを自動検出する技術を開発した。

開発技術は2014年度から、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より研究開発委託業務として、首都高技術、東北大学、産業技術総合研究所の三者が協力して行った。開発内容は、ひび割れ自動検出を始めとし経年変化検出、デジタル画像データの自動パノラマ化な

ど実務に導入可能な機能を実装し、容易に活用できるシステムを構築し事業化することとした。

本稿では、本開発技術を概説するとともに、核となる技術であるひび割れ自動抽出技術について解説する。

2. 開発技術の概要

開発技術は要素技術開発で留まるものではなく、実務で活用できるシステムを構築することを前提とし、事業化への利用形態も考慮して以下のシステムを開発した。

目標性能として、橋梁などで補修が必要な目安である0.2mmのひび割れを対象とし、検出精度80%以上とした。また機能は、ひび割れの位置、幅、長さ、および形状を自動で検出し、描画できるシステムとした。それに対し、従来の点検では、構造物に近接し点検しながら、ひび割れの発見・記録を現場で野帳などに記録し、帰所後にCAD(データ)化しているが、これらの作業の多くは人手に頼っている。

現況調査で記録すべきひび割れの情報としては、発生位置、幅、長さ、総延長、範囲、発生パターン、深さ、段差な

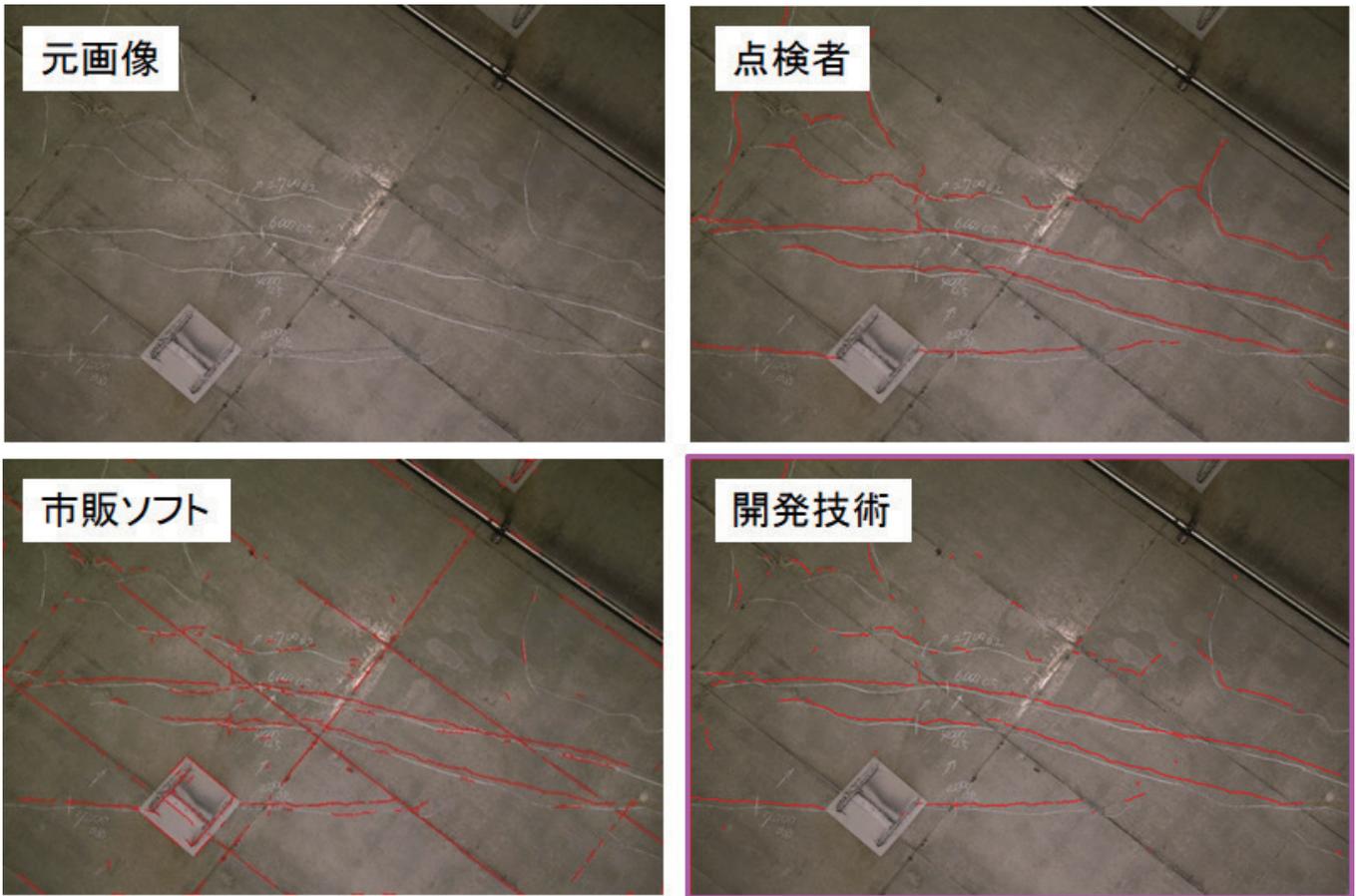


図1 ひび割れ検出結果の比較

どがあるが、自動検出技術の開発に際してはカメラ撮影画像からの読み取りが困難な深さおよび段差は対象としなかった。その代わりに、人が画像からひび割れと判断し得るものは全て検出対象とし、ひび割れと判断しないものは極力検出しなかったこととした。様々な状態に置かれたコンクリート構造物の多様な外観にも左右されず、0.2mm以上のひび割れを80%以上の精度で検出することを数値目標とした。精度についてはその算出方法とともに後述する。

利用形態としては、現行の点検業務に円滑に導入されるよう点検従事者の行動や携行機材の変更は軽微に留めることとし、撮影はデジタルカメラを手持ちで扱って行うことを想定した。そして、撮影不良などによって再度現場へ向かうなどの手戻りを防ぐため、撮影した点検現場でひび割れ検出が行え、検出結果が確認出来るシステムを実現することとした。また、大きな構造物の撮影にあたっては、対象を部分的に撮影した複数の断片画像を合成して全体の画像を得るパノラマ合成技術が周辺技術として不可欠と考えられたため、これも開発することとした。

2014年からこれまでの技術開発によって、初年度61%の検出精度であったものが2017年末の時点で82.4%に向上した。図1に例示した検出結果のように、開発技術の特徴として過検出を抑えながら見落としも少ないことが上げられる。さらにこの技術をひび割れ検出サービスとして機能す

るようクラウド上に利用システムを構築し、点検現場でもオフィスでもひび割れ検出結果を確認できるようにした。これにより、インターネットに接続していれば簡単な操作でひび割れ検出を実行でき、結果を確認出来るような利用環境を実現した。現在、キャリア回線やWi-Fiが利用可能であれば、現場やオフィスからでも利用でき、撮影画像1枚当たり20秒余りで結果が得られるシステムとなっている。また、本システムは、実証の一環として点検事業者を主な対象に試験公開している。

試験公開：ひび割れ検出 Web サービスβ

【<https://concrete.mihari.info>】

3. ひび割れ自動検出

これまで画像処理などの研究分野において、ひび割れ検出は長年取り組まれてきたテーマであり、様々な手法が提案されてきた。しかしこれらの技術では、風雨や通行車両の排出物等の様々な環境要因に長年晒され多様な表面状態を示すコンクリート構造物に対応できず、ひび割れ以外の型枠跡や、チョーク跡といったひび割れではないものを実用レベルまで排除できない。このため、ほとんどのひび割れ調査が手作業で行われているのが現状である。その課題に対し、我々はひび割れの見落としをさずに、ひび割れ以外の事象の

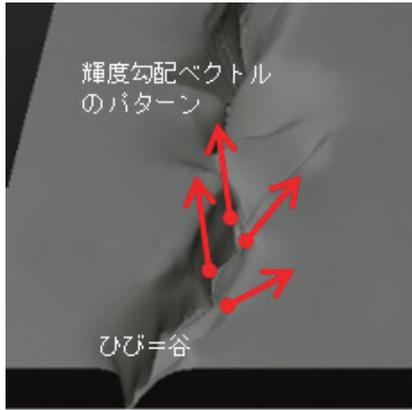


図2 谷形状特有パターン

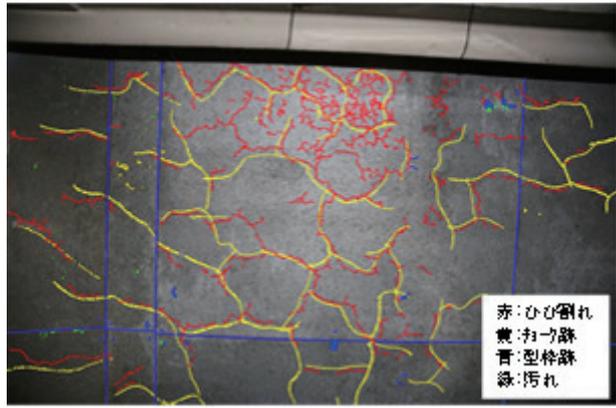


図3 学習データの作成

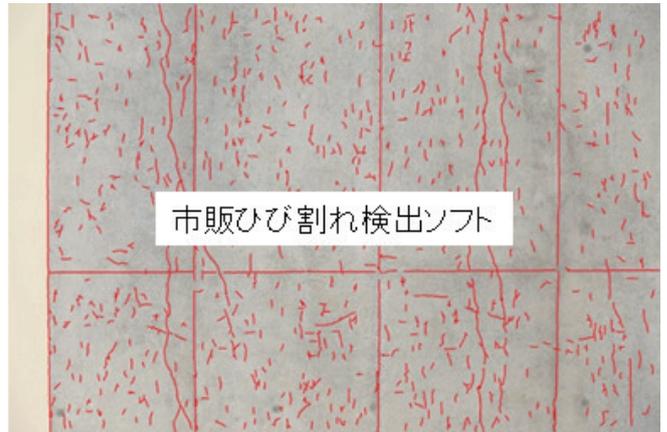
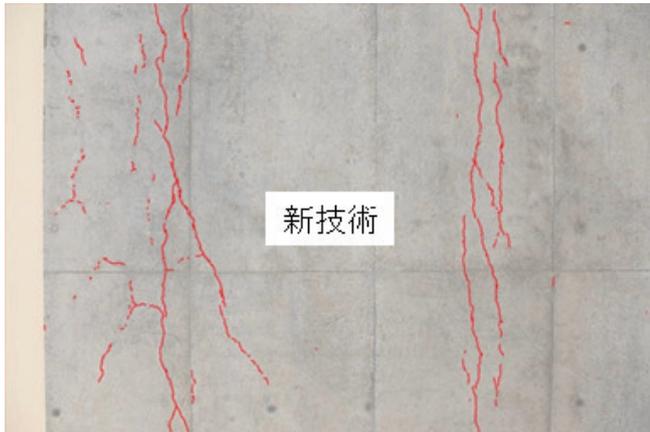


図4 ひび割れ検出結果

誤検出も極力抑えることを目標とし開発に着手した。

我々はひび割れ特有の谷形状に着目し、抽出した特徴パターン(図2)を機械学習させることでひび割れ検出を行う技術を開発した。ひび割れを撮影した画像に対して人(専門家)がひび割れ箇所をトレースして教師データとして用い、入力画像からひび割れに最適化した特徴抽出を行い、特徴パターンからひび割れの有無を判定する識別器に学習させた。実データを用いて学習することで、ルールを規定して外乱除去等の処理をすることなく、実環境の様々な変動に対応可能な識別器を実現できた。

識別器には、ディープニューラルネットワークを用いており、これによりひび割れを高精度で自動的に検出することが可能となった。

4. 学習用データの取得

多様なひび割れを高精度で自動的に検出するにあたり、前述した学習型識別器に、様々なひび割れの特徴を教示する必要があった。学習データを収集するため、日本各地で様々なひび割れを撮影し、トレースすることで教師データとした。

学習用データを取得するため以下の内容を実施した。

(1)発生原因別ひび割れ写真の取得

ひび割れ発生の原因は、乾燥収縮、アルカリ骨材反応、凍害、塩害、中性化、疲労、耐力不足などである。本技術では、これらの発生原因に左右されずに、高精度でひび割れを自動検出することを目標としているため、様々な要因によって損傷を受けた構造物を対象に撮影し、データを取得した。

(2)ひび割れ特徴の教示

従来のひび割れ検出システムで誤検出する表面変状は、チョーク跡、型枠跡、あばたなどがある。これらの表面変状とひび割れを大別し、それぞれをトレース(図3)し、教師データを作成した。

5. ひび割れ自動検出結果

学習済みの識別器を用いて、ひび割れを自動的に検出した結果を図4に示す。現在、ひび割れ検出精度は82.4%であり、目標としていた80%以上を満足することができた。これまでの技術による検出結果に比べても、チョーク跡、型枠跡など、誤検出されていたものが排除できており、開発中の本システムによる検出結果が、より点検技術者が出す結果に近いことがわかる。

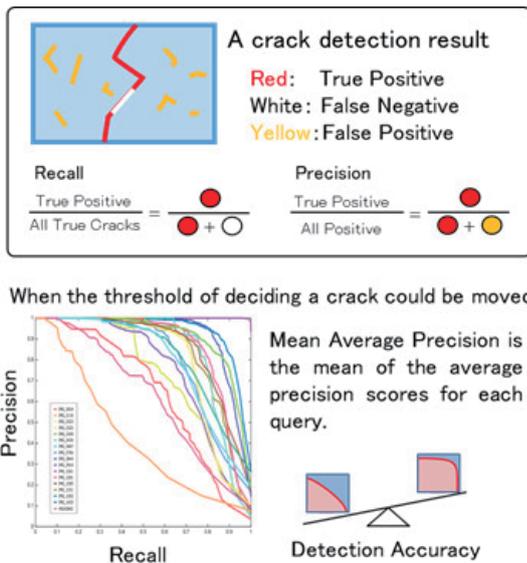


図5 精度評価指標の概要

6. 検出精度の評価方法

従来、ひび割れ自動検出技術の評価は、ひび割れを見落とさないことが重視され、画像中に存在するひび割れのうち正しく検出したひび割れの割合を数値として示すことが多かった。しかしながら、実務に導入するにあたっては、ひび割れ以外のものを誤って検出してしまうことも考慮しなければならない。実際、市販されている検出ソフトを利用してある事業者へのインタビューにおいては、検出結果から汚れやチョークライン、型枠跡などの誤検出を手作業で取り除くことによりかなりの労力を割いており、検出ソフトの導入は効率化には寄与していないとの回答があった。

開発しているひび割れ自動検出技術も他の類似技術も検出されたひび割れ候補を何らかの評価軸によって点数化し、閾値を設定して選別を行っている。一般的にこの閾値を下げれば検出結果から見落としを少なく出来る反面、誤検出が多くなり、上げれば逆に働くトレードオフの関係となる。このような点数化された出力を評価する場合、多くは見落としと誤検出についてF値をとることが多い。しかしながら、開発者などのその検出システムを熟知した者が試験サンプルをもとに調整して算出した場合と、一般利用者が様々な利用条件で使用した場合には乖離する場合がある。

そこで本開発課題では、より客観的な評価指標としてMAP(Mean Average Precision)を採用した。これは情報検索や機械学習の分野では一般的な評価手法で、検出結果に誤りが含まれていない割合と正解の内どれだけ検出できたかの割合について、閾値を動かしながら集計し平均を算出したものである。図5に示すグラフのように見落としが少なく誤検出も少ないほど右肩が張り出すことになる。

開発しているひび割れ自動検出の精度はこれを用いて算出しており、単に見落としだけに着目して算出した精度とはそのままでは比較できないが、実用に供した場合の利用者が求める性能指標としては適切と考えている。

7. ひび割れ自動検出がもたらす可能性

開発した手法により、ひび割れを高精度に自動検出することが可能となれば、コンクリート構造物の近接点検を一部補完することが期待される。従来の近接点検と比較しながら、デジタル画像を用いた点検の可能性を考察した。

(1)従来の近接点検

近接点検では、高所作業車などの足場を用いて構造物に近接して点検するため、費用や時間がかかる。しかしながら、触診や打音などによる目視以外の情報も含んだ構造物の状況確認が同時に行え、目視のみでは確認が困難な浮きなどの損傷も把握できる。

(2)提案するデジタル画像を用いた点検

従来の近接点検で行われている、触診や打音といった視覚以外から得られる点検を伴う場合には、同様に高所作業車等が必要になり、費用的なメリットは少ないものの、事前にデジタルカメラを用いて構造物の表面を撮影し損傷位置が容易に記録できることで、点検時の作業時間を削減し、規制時間の低減や、1日当たりの点検数量が増加し、結果として渋滞の減少に繋がり、トータルコストが圧縮されることも考えられる。また、記録したデジタル画像データを用いて作図された損傷図は、ひび割れの実態を写し込んだ画像から作図するため、損傷位置や損傷の進展を正確に把握することができる。以上のことから、従来の点検の一部を補完するのに十分な効果を得ることができ、最適な補修計画が立案できると考えている。

8. まとめ

開発したひび割れ自動検出技術によって、目標としていた80%以上の検出精度を満足することができ、従来技術に比べて、良好な結果を得ることができた。また、試験公開サービスにおいて実施したユーザーへアンケートを集計したところ、求められる検出精度については平均で84.4%であったため、もう少し検出精度を向上させたい。

今後は事業化に向け、よりユーザーニーズを満足し、インフラ維持管理に資する技術の開発に取り組んでいきたい。

文 献

- (1) 橋梁定期点検要領, 国土交通省 道路局 国道・防災課, 2014.6
- (2) 早坂洋平, 佐藤久, 永見武司:「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」,第27回東北支部技術研究発表会,2016
- (3) 佐藤久, 早坂洋平, 永見武司, 小林匠, 増田健:「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」,土木学会第70回年次学術講演会, 2015
- (4) 永見武司, 小林匠, 増田健, 佐藤久, 吉川直志, 由井稔也, 高津惣太, 森清, 早坂洋平, 小早川正樹, 皆川浩, 久田真:「道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発」, SSI2016 第22回画像センシングシンポジウム
- (5) 佐藤久, 早坂洋平, 永見武司, 小林匠, 増田健, “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”, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016

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

浅見 研一* (日立パワーソリューションズ) 鈴木 良一 (産業技術総合研究所)

青木 徹 (静岡大学) 三浦 到 (三菱ケミカル)

Development of self-traveling robot for pipe inspection equipped with neutron moisture meter and X-ray thickness meter

Kenichi Asami*(Hitachi Power Solutions),

Ryoichi Suzuki, (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

Toru Aoki, (Shizuoka Univ)

Itaru Miura, (Mitsubishi Chemical Corporation)

This paper addresses we describe the development of a self-propelled robot equipped with ultra-compact X-ray and neutron moisture meter out of non-destructive inspection technology among piping maintenance and management in industrial infrastructure.

キーワード: 外面腐食, スクリーニング, 配管, 非破壊検査, 中性子水分計, エックス線, ロボット, 合理化, 予防保全, 維持管理

(Keywords, CUI, screening, piping, Non destructive inspection, Neutron moisture meter, Xray, Robot, Rationalization, Preventive maintenance, Maintenance)

1. 開発の背景・目的

高度経済成長期に建設された基幹産業インフラは、主力製造施設が既に建設後 40 年を経過し、大規模保全を本格的に考えなければならない段階となっている。このうち配管の保温材下外面腐食 (CUI) は喫緊の課題のひとつとして位置づけられている。

CUI は、断熱材中に侵入、滞留する雨水等が要因となって配管表面を腐食させる事象であるが保温材付配管全ての範囲において発生しうる。CUI は発生場所の予想が難しく、検査においては全て保温材を解体する必要がある。さらには高所の場合、図 1 のように全面足場が必要となり、多大な付帯工事のコスト・時間を要することになる。

CUI 検査としては、保温材解体後の目視検査や超音波による配管肉厚検査が一般的である。検査前の段階で中性子水分計により検査箇所をスクリーニングする手法はこれまでであったが、作業員が装置を手動で移動させながらの作業が主となっている。

一方、保温材を解体しないで配管の状態を確認する手法としては、エックス線に代表される放射線透過試験が挙げられる。エックス線検査は配管円周の接線方向に照射して定量的に配管厚さを測定する方法と配管表面方向に照射し

て配管表面の状態を定量的に確認する方法の 2 種類に大別されるが、本開発では配管厚さの定量的な測定にこだわり前者の手法を採用し、エックス線管厚計と定義する。

これらの検査装置をロボットに搭載して図 2 に示すように検査を自動化できれば、検査の大幅な効率化を実現できる。

本開発ではロボットに搭載可能とするエックス線や中性子の線源および検出器等の非破壊検査装置を開発するとともに、それらをプラント水平配管の直線部を移動できるロボットに搭載した配管検査用自走ロボットを開発し、その有効性を実証することを目的とする。

全てを足場レスとするのではなく、明らかに腐食リスクの高いフランジ部やバルブなどの不連続部は足場を設置しての検査が必要である。この部分的な足場を利用することで総コストを最小化するベストミックスな検査手法を構築する。

本開発において対象となる配管条件は、プラントで多く使用されている STPG-370 Sch40(管肉厚 7.1mm)で保温材厚さ 50mm を想定した。測定精度は従来の検査と同等の精度である対真値 $\pm 0.3\text{mm}$ を目標値とした。

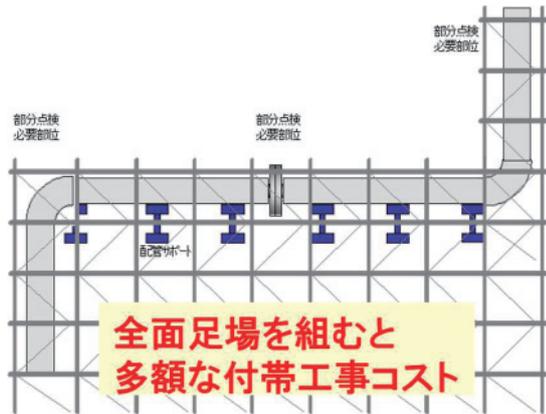


図 1. 従来の検査

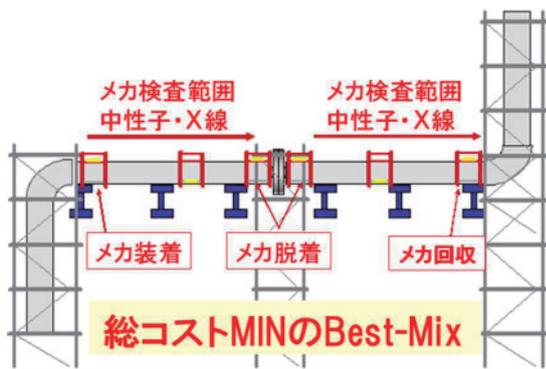


図 2. 本開発導入での検査

2. 搭載するセンサ

〈2・1〉 中性子水分計

雨水侵入や結露により滞留する保温材中の水分は CUI の主要因のひとつと位置づけられており、水分が存在する箇所は腐食リスクが高いといえる。

図 3 に中性子水分計測の概念を示す。放射線の一種である中性子の特性を利用して保温材中の水分を非破壊で検出することが可能であるが、保温材以外の水分も検知してしまう難点があることから、コリメータを採用するなどして外乱の影響なく保温材中の水分のみを検出する仕組みを採用している。中性子水分計は腐食を直接検出することは出来ないが、プラント運転状態問わず計測することができ CUI 検査箇所のスクリーニングに有用である。

上記は㈱日立パワーソリューションズにてノイズ低減型中性子水分計として製品化しポータブル機 (図 4) を運用している。

このポータブルタイプをベースに自走ロボットに搭載できるモデルを開発した。中性子検出器は従来ヘリウム 3 ガス式が一般的であるが、ヘリウム 3 ガスは完全輸入によるコスト変動、入手性に難点がある。より安定供給さらには検出性能の高度化を探索すべく、リチウム化合物によるシンチレータ方式を検討した。シンチレータは㈱トクヤマ製の純国産でラバータイプであり、測定に最適なセンサ形状

を実現できるのが最大の特徴である。

これを次世代中性子水分計と位置づけ、将来的には自走ロボットに搭載可能とすべく、まずはポータブルにて検証を進めている。図 5 に次世代中性子水分計の概念図を示す。ヘリウム 3 ガス式ポータブル機と同等の寸法、質量を目標としており、2018 年 3 月に試作機が完成した。当面はヘリウム 3 ガス方式を自走ロボットに搭載して実績を蓄積することとする。

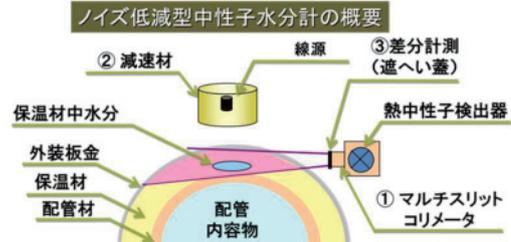


図 3. ノイズ低減型中性子水分計測概念



図 4. 中性子水分計ポータブルタイプ



(a)



(b)

図 5. シンチレータ式中性子水分計

〈2・2〉 エックス線管厚計

エックス線撮影には配管肉厚を測定する方法と配管表面の状態を撮影する方法があることを前述した。エンドユーザの保安全管理は配管の厚さを定量的に把握することが大前提であり、エックス線管厚計が要求仕様に最もマッチングしているといえる。

エックス線管厚計は、図 6 のようにエックス線源とエックス線検出器で構成され、配管の接線方向に照射し、透過像から配管外面および内面のエッジ位置を捉えることにより配管の肉厚を測定する装置である。

図 7 に配管肉厚撮影のシミュレーションを示す。横軸が配管肉厚方向の幾何学的長さであり、縦軸がエックス線の透過量になり、エッジ部分でカーブが変化する。自走ロボットに搭載することを前提条件とすると、エックス線管厚計は超小型であることに加え、バッテリー駆動とする必要がある。

エックス線源として、200kV の超小型線源を産業技術総合研究所が開発した(図 8)。エックス線検出器として、CdTe 半導体検出器を静岡大学が開発した(図 9)。エックス線源からのノイズ散乱、分解能向上などの課題があるが、コリメータの導入等により単体レベルでは改善の見通しが得られ、シミュレーションに近づいた結果が得られている。エックス線検出器についても低ノイズタイプの開発により、SN 改善の見通しが得られている。

エンドユーザの要求仕様は、自走ロボットに搭載した状態での測定誤差0.3mmであり仕様を満足するための改善を実施中である。

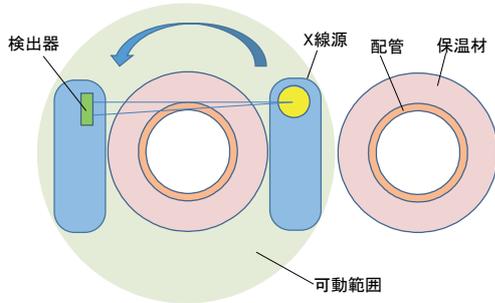


図 6. エックス線管厚計概要

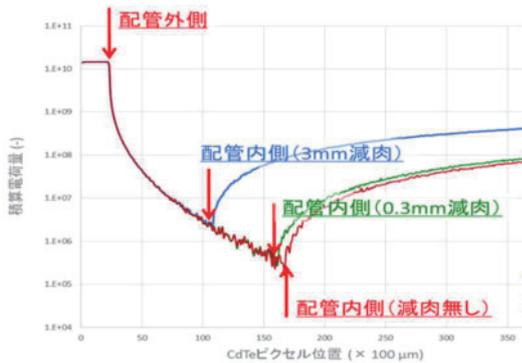


図 7. 配管肉厚計測 (シミュレーション)



図 8. ロボット搭載用超小型エックス線源

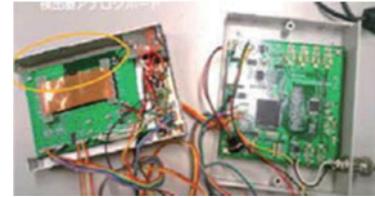


図 9. ロボット搭載用 CdTe 半導体検出器

3. 中性子水分計搭載自走ロボットの開発

図 10 に中性子水分計搭載自走ロボットを示す。配管上部に接触する 4 輪により管軸前後方向走行し、走行姿勢制御機構を有している。センサを周方向に移動させるための回転機構およびセンサと配管表面間の位置を調整する昇降機構を有している。計測位置までの移動速度は目標 15cm/秒程度である。

保温材の外側にある外装板金上を走行することになるが、外装板金つなぎ目、板金表面の凹凸など走行安定性が課題となる。

自走ロボットは当然ながら作業員から離れて自走することから、ワイヤレスである必要がある。データ収集、制御は無線 LAN とし、電源バッテリーを搭載している。

水平配管にはサポートやフランジなどの付帯設備があるが、走行の支障監視として、テレビカメラ、衝突防止センサを配備した。万が一衝突しても接触センサ作動により自動で停止するようにしている。さらなる異常時の対策としては落下防止機構を設置し、安全面を考慮した構造としている。総重量は 20kg 程度となる見込みであり、2 名で配管への着脱を可能としている。



図 10. 中性子水分計搭載自走ロボット

4. エックス線管厚計搭載自走ロボットの開発

図11にエックス線管厚計搭載自走ロボットを示す。基本ベースは中性子計搭載自走ロボットの機構を踏襲している。

エックス線管厚計にて配管肉厚を0.3mmの測定誤差を満足させるためには、装置誤差を0.1mmとすると機構の許容誤差は0.2mm以下に抑えなければならない。繊細な配管周方向の回転機構と中心軸合わせ機構が肝要となる。

エックス線照射時は放射線管理区域の設定が必要となり、照射中の警告灯を配備し現場での視認性が良好であるものを採用した。

さらには、エックス線撮影は夜間での運用となることから、夜間照明を配備している。

作業員2名で持ち運び可能とするため、総重量は45kg程度を目標としている。



図11. エックス線管厚計搭載自走ロボット

5. フィールド試験

某化学プラントにおいて実配管をもちいてロボットの動作確認を中心に検証を実施した。

走行安定性、ロバスト性を中心に課題抽出し、改善対策を進め試験による確認を継続する。

図12は夜間運用を想定しての日没後の動作確認試験であり、LED面照明により視認性が良好であることが確認できた。

今後は、センサとの組み合わせにて一気通貫での試験を実施する予定である。



図12. エックス線管厚計搭載自走ロボット（夜間運用）

6. おわりに

中性子水分計、エックス線管厚計を搭載した自走ロボットを開発中であり、開発成果が現れ始めている。2018年度末には中性子水分計ロボットは実用レベルまで高め、早期実用化を図る。エックス線管厚計に関しても性能向上を最優先として単体レベルでの開発をめざし、将来的には自走ロボットに搭載できるレベルを目指すこととする。

文 献

- (1) 三浦到：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、Vol.21 No.1 (2016)
- (2) 永井浩昭：超安定運転実現のための保全技術開発、PLANT ENGINEER、(2016)
- (3) 三浦到・永井浩昭：配管検査ロボットの開発と高性能X線検査技術の現場適用、非破壊検査、Vol.66 No.10 (2017)
- (4) 三浦到：石油化学プラント設備診断の高度化への取り組み Society5.0とスマート設備管理、PLANT ENGINEER、1月号 (2018)
- (5) 浅見研一・鈴木良一・青木徹・三浦到：「中性子水分計およびエックス線管厚計を搭載した配管検査用自走ロボットの開発」、検査技術、Vol.23、No.6(2018)

大面積フラットパネル型 X 線検出器と 超小型 X 線源による大型配管検査

藤原 健* 加藤 英俊 鈴木 良一 (産業技術総合研究所)

Non-destructive X-ray inspection of large scaled pipes with battery driven X-ray tube and Flat-Panel Detector

Takeshi Fujiwara*, Hidetoshi Kato, Ryoichi Suzuki (AIST)

We have developed a compact, battery driven X-ray inspection system with cold electron emission X-ray source and Flat-Panel Detector. Our system was tested at large-scaled piping facility and high-resolution non-destructive X-ray inspection was successfully demonstrated.

キーワード : X 線非破壊検査、X 線センサ、FPD、小型 X 線源、TFT
(X-ray NDT, X-ray sensor, FPD, compact X-ray source, TFT)

1. 緒言

産業プラント配管などの構造物の維持・管理や生産現場では効率的で信頼性の高い検査技術が必要とされている。X線検査技術は、検査対象物の内部を非破壊で観察が可能であるためすでにプラント保守の現場で広く普及している。しかし、従来の X 線検査装置は大きく重く作業員の負担が大きい、検査結果にばらつきが生じるという課題があり、軽量化と効率化が求められている。我々は、バッテリーで長時間駆動可能な X 線源と大面積デジタル X 線検出器を開発し、さらにそれらを駆動装置に搭載してオンラインで X 線検査を可能にした。

2. X 線検査システム

X 線検出器(フラットパネル型検出器)

老朽化した産業インフラなど、劣化箇所を高効率で診断する技術が求められている。X 線を使用することで、保温材付の配管など、目視検査や超音波探傷などの技術で診断が困難だった箇所の非破壊検査が可能になる。X 線検出器に要求される性能は様々だが、大型配管の検査ではより効率的に検査をするために、バッテリー駆動化、高感度化、高分解能化、大面積化が求められており、かつ現実的な価格の装置であることが求められる。

我々はこれらの要求に応える新しい X 線フラットパネル型検出器(FPD)を、最先端の薄型ディスプレイ製造プロセスを転用して開発した⁽¹⁾。その構造を図 1、2 に示す。X 線を可視光に変換する蛍光体にはシート状に加工した $Gd_2O_2S:Tb$ を用いて高解像と高感度、大面積を両立させた。蛍光体からの発光を受ける受光センサには、ガラス板に成膜した

フォトダイオードアレイと、フォトダイオードから生じる微小な電荷をデジタル信号に変換する部分には、TFT 液晶ディスプレイの製造プロセスを転用し長時間保持可能な低リークの TFT を用いた。本研究で開発した試作機の外観を図 3 に示す。有感面積は $26 \times 31 \text{ cm}^2$ で、ピクセルサイズは $200 \times 200 \mu\text{m}$ である。消費電力は約 15W であり、バッテリー駆動を可能とした。また、本装置はパソコンと接続し、オンラインでリアルタイムのデータ取得が可能である。

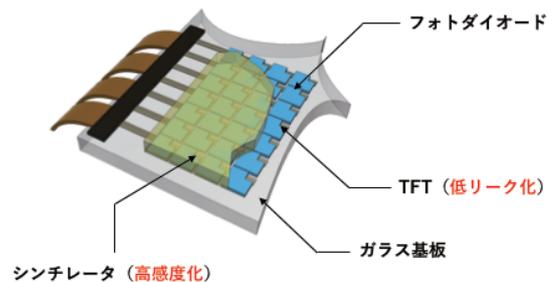


図 1 X 線検出器の構造

Fig. 1. Diagrammatic sketch of FPD.

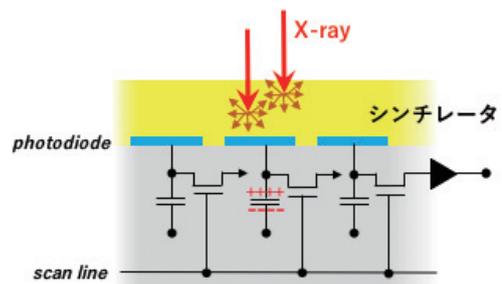


図 2 X 線検出器の構造 (断面)

Fig. 2. Cross-section view of FPD sensor.

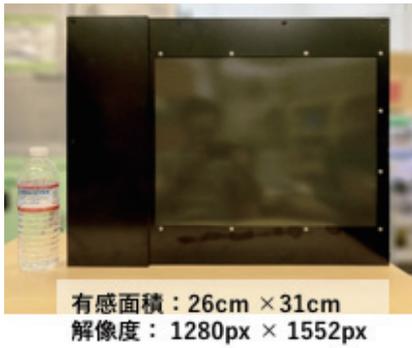


図3 開発した X 線 FPD (試作機) の外観
Fig. 3 Outlook of the proto-type FPD.

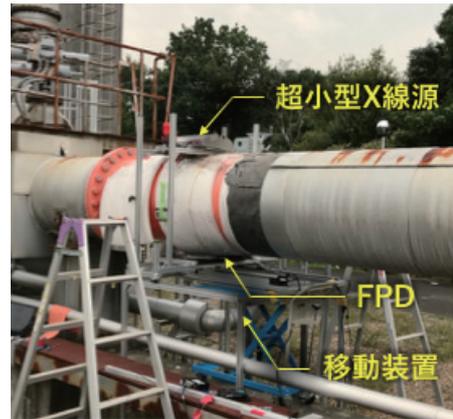


図5 X 線検査の様子
Fig. 5 X-ray inspection system.

X 線検査システム

大型プラント配管の現場での非破壊検査に対応するため、電子源にカーボンナノ構造体を用いた最大管電圧 200 kV のバッテリー駆動 X 線源を開発した⁽²⁾。図 4 に示すように、従来の熱フィラメントを有する X 線管は 30 kg 以上あり、発電機などの外部電源が必要になるが、本研究で開発した X 線管は電子の発生部に冷陰極を用いているため、大幅な低消費電力化と小型化を実現した。これにより、X 線装置全体をバッテリー駆動化し、これらを移動装置に搭載して、保温材を剥がすことなく高精度で、かつ高効率で配管の検査を行うことが可能になった。

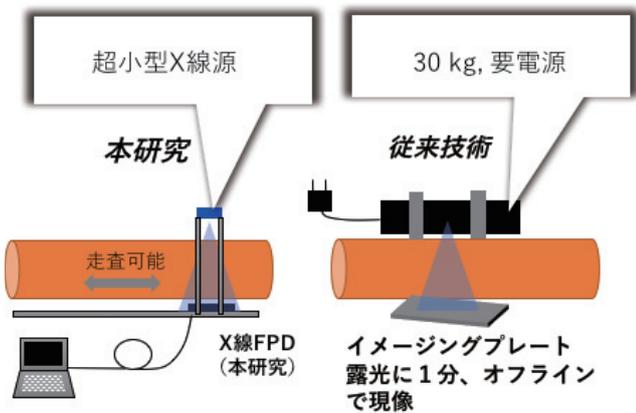


図4 X 線検査システムの概要
Fig. 4 Sketch of the NDT system.

3. 大型配管での実証実験

開発した X 線検査システムの実証実験を大型配管設備内にて行った。実験では老朽化し、減肉箇所を補修済みの直径 70 cm の大型配管を検査の対象とした。実際の現場と X 線非破壊検査の様子を図 5 に示す。移動装置を外部から操作して、配管内の複数の箇所を効率的に検査した。1 枚の X 線画像の取得に要する時間は約 3 秒であり、図 6 に示すように補修済みの減肉箇所の他、新たな減肉箇所を複数検知することに成功した。

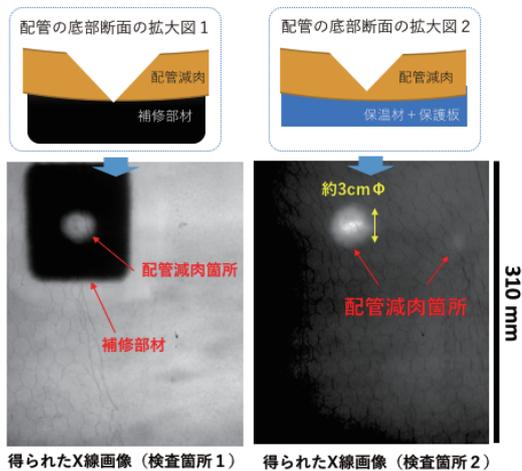


図6 得られた X 線画像
Fig. 6 Obtained X-ray images.

4. 結言

バッテリー駆動可能な、カーボンナノ構造体を用いた X 線源とフラットパネル型検出器を組み合わせた X 線検査装置を開発した。本システムは、老朽化した産業インフラなど、劣化箇所を高効率で診断することが可能になる。X 線源に関してはさらなる高エネルギー化を進めるとともに、検出器に関しては、液晶ディスプレイのプロセスを基盤技術としているため、原理的には市場に流通している液晶ディスプレイサイズにまで拡大できるため、さらなる大面積化を目指し研究開発を進めている。

文 献

- (1) 藤原健、他：「薄型テレビ製造プロセスを用いた高解像フラットパネル X 線検出器の開発」, 応用物理学会春季学術講演会予稿集 (2017)
- (2) H. Kato, et al., : "Development of a Compact X-ray Source and Detector System for High-Throughput, Fully Autonomous Inspection", Sensors and Materials. **28**, No. 7, 763 (2016)

本プロジェクトで開発したモニタリングシステム、非破壊検査装置を紹介する動画をNEDO Channel(ネドチャンネル)に掲載しています。

http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100081.html



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

〒212-8554

神奈川県川崎市幸区大宮町 1310 ミューザ川崎セントラルタワー

TEL.044-520-5244 FAX.044-520-5243

<http://www.nedo.go.jp>