

NEDO水素・燃料電池成果報告会2023

発表No.B1-1

超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業/水素ステーションのコスト低減等に関連する技術開発/水素ステーション用高压水素ホース加速耐久性評価法開発及び耐久性向上に関する研究開発

発表者名 西村 伸

団体名 国立大学法人九州大学

国立大学法人山形大学（再委託）

国立大学法人大阪大学（再委託）

国立大学法人弘前大学（再委託）

一般社団法人日本ゴム工業会

発表日 2023年7月13日

連絡先：西村 伸

国立大学法人九州大学

snishimu@mech.kyushu-u.ac.jp

# 事業概要

---

## 1. 期間

開始 : 2018年6月

終了 : 2023年3月

## 2. 最終目標

- ・高圧水素ホース加速耐久性評価法規格案の作成
- ・ホース交換サイクル 充填回数 30,000回以上の耐久性判断に資するデータ取得

## 3. 成果・進捗概要

- ・高圧水素ホース加速耐久性評価法規格案の作成

水素ステーションにおいて、ホースの揺動による変形は車両への接続と収納による変形を模擬し、水素ガスによる内圧の負荷は充填時の圧力変動を模擬していることから、揺動による変形において、車両接続時の状況を模擬したホース伸長時の状態で水素ガスによる内圧負荷を実施するホース揺動水素インパルス試験を高圧水素ホース加速耐久性評価法として提案した。

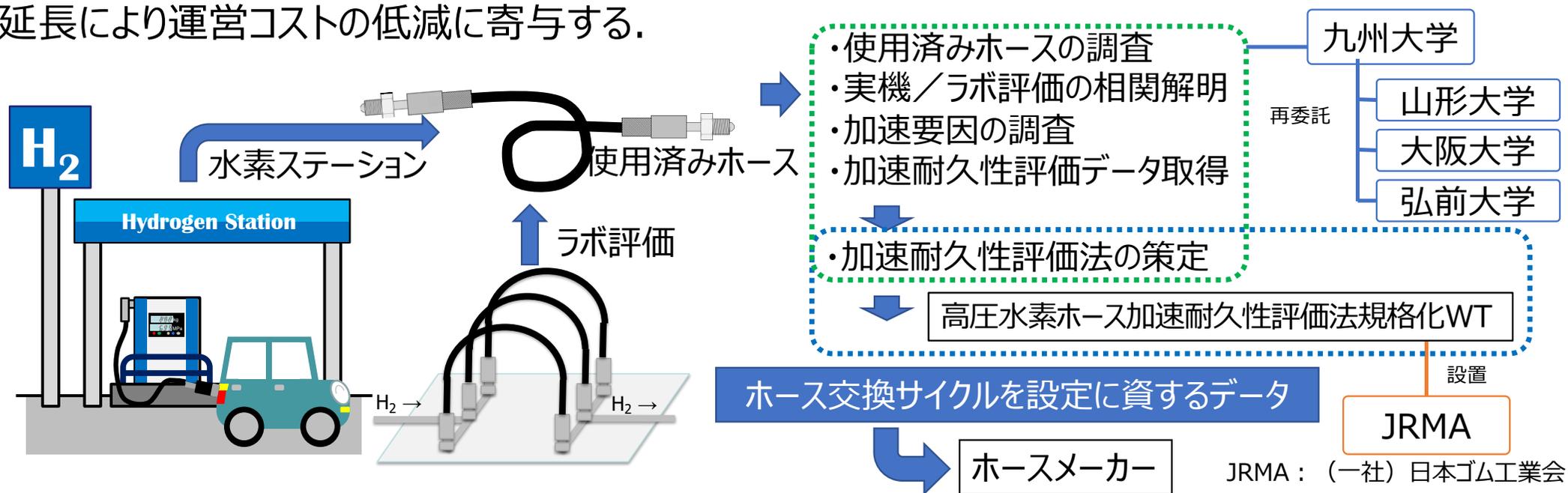
策定したホース揺動水素インパルス試験法について、「高圧ガスホース揺動インパルス試験法」としてJIS文書を想定した規格案を作成した。

- ・ホース交換サイクル 充填回数 30,000回以上の耐久性判断に資するデータ取得

本プロジェクトで策定した加速係数1.2となる水素揺動インパルス法により水素ステーションにおける耐久回数換算で30,000回を超える耐久性を確認した。さらに継続して評価した結果、8万回から11万回を超える耐久性を示すことが判明した。

# 1. 事業の位置付け・必要性

ホースメーカー各社がそれぞれの高圧水素ホース実用化，事業化を進める上で，共通の開発課題である高圧水素ホースの耐久性評価法に関する開発を目的とする。高圧水素ホース耐久性評価法及びその評価基準をホースメーカー，関係者と共有することによって，高耐久性高圧水素ホースの開発及びその水素ステーションへの実装を進め，高圧水素ホースの使用可能充填回数の延長により運営コストの低減に寄与する。



ラボ評価（ホース加速耐久性評価）と水素ステーション実機における耐久回数の相関を把握し，実機における耐久回数を加速的に評価する手法を開発する。

## 2. 研究開発マネジメントについて

実施項目	成果
<b>① 水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関解明</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・米国CAにて2017年度版試作ホースのHRS試用により実HRSにおける充填可能回数3,000回と判断</li> <li>・水素インパルス試験の検討により, 加速耐久性評価として揺動インパルス試験を開発</li> </ul>
<b>② 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明 (山形大, 大阪大, 弘前大 [2021/9から]再委託)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・漏洩の原因である内層樹脂貫通クラック形成は高温, ホースの揺動変形が加速因子となることが判明</li> <li>・内層樹脂の結晶性高分子材料に対する高圧水素の影響把握, ホースの大変形により発生する局所ひずみの評価法を開発</li> </ul>
<b>③ 高圧水素ホース加速耐久性評価法の開発及び加速耐久性評価法規格案の策定</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JIS文書を想定した規格式案策定</li> </ul>
<b>④ ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへの提供</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PJ開始時：650～1000回充填で交換</li> <li>・PJ終了時：3,000～4,000回程度充填可能</li> <li>・揺動水素インパルス法により8万～11万回の耐久性を確認</li> </ul>

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目① 実水素ステーションにおける実証

- ・ホースメーカーおよび北米水素ステーションオーナーの協力を得て2019年1月より水素ステーションにおける2017年度までに開発された**試作87.5MPaホース**を用いたホース実証試験を実施.
- ・米国カリフォルニア州ロサンゼルス近郊の水素ステーションにおいてホースの試用により耐久性実証. 当該ステーションの充填回数は40～50回/日程度.



ホース取り付け作業

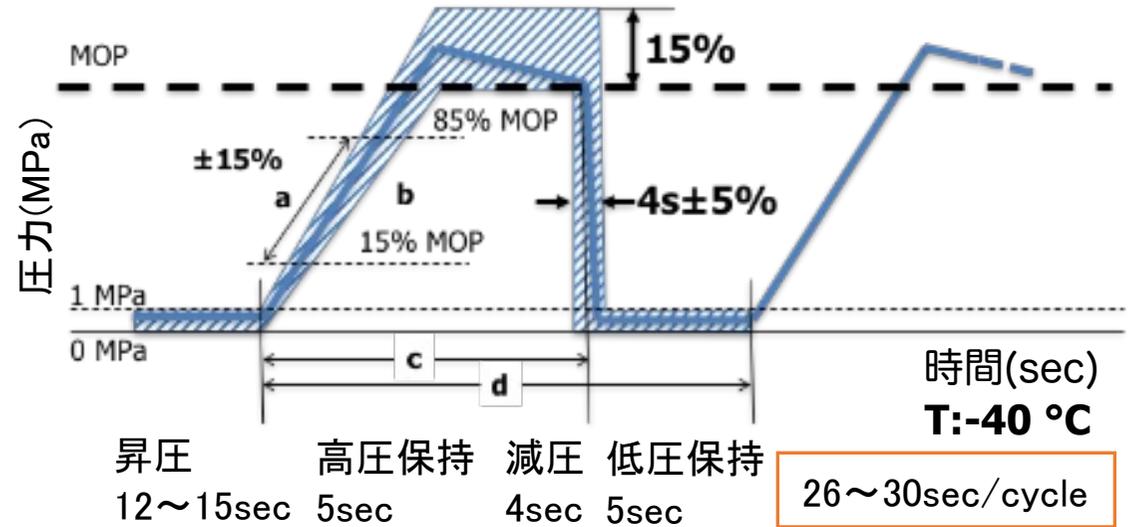
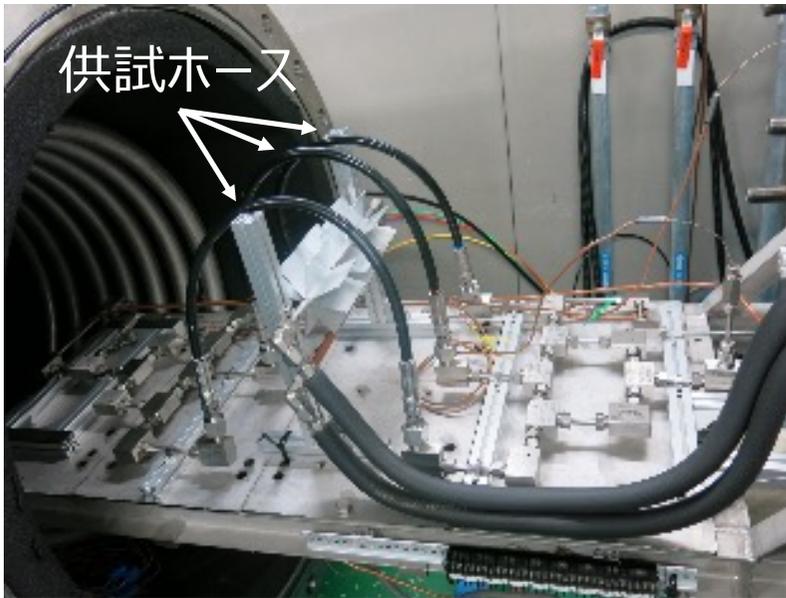
FCV充填状況

水素ステーションにおいて水素漏洩に至るまで使用した結果, 試用ホース (N=3) は3,000回を超える充填回数を実証. 試用した**試作87.5MPaホース**の水素ステーション実機における耐久回数を3,000回と判断. **試作87.5MPaホース**の耐久回数3,000回を基準としてラボ評価である加速耐久性評価法と比較することで加速性を評価.

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目② 水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数の相関説明

水素インパルス試験 (ISO 19880-5、7.9項及びAnnex Cに記載)



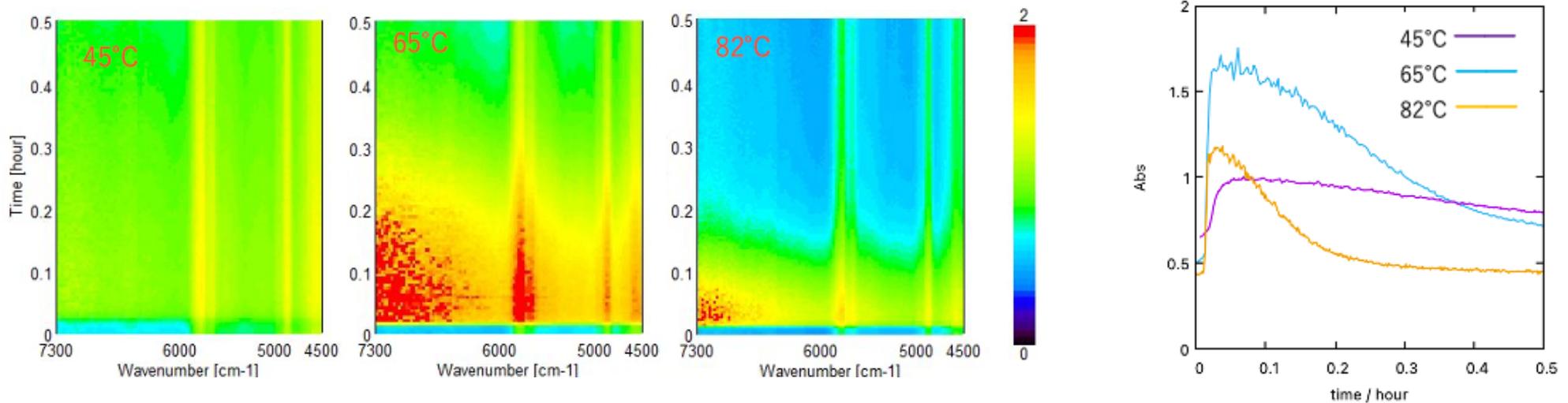
水素インパルス試験圧カプファイル

試作87.5 MPaホースの水素インパルス試験により50,000回~70,000回程度の耐久性確認  
→水素ステーション実機の耐久性と一致しない。実水素ステーションにおいてホースに与えられる  
負荷を想定した加速因子を検討

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目②高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明

##### 高圧水素ホース内層樹脂の劣化メカニズムの検討（大阪大学再委託）

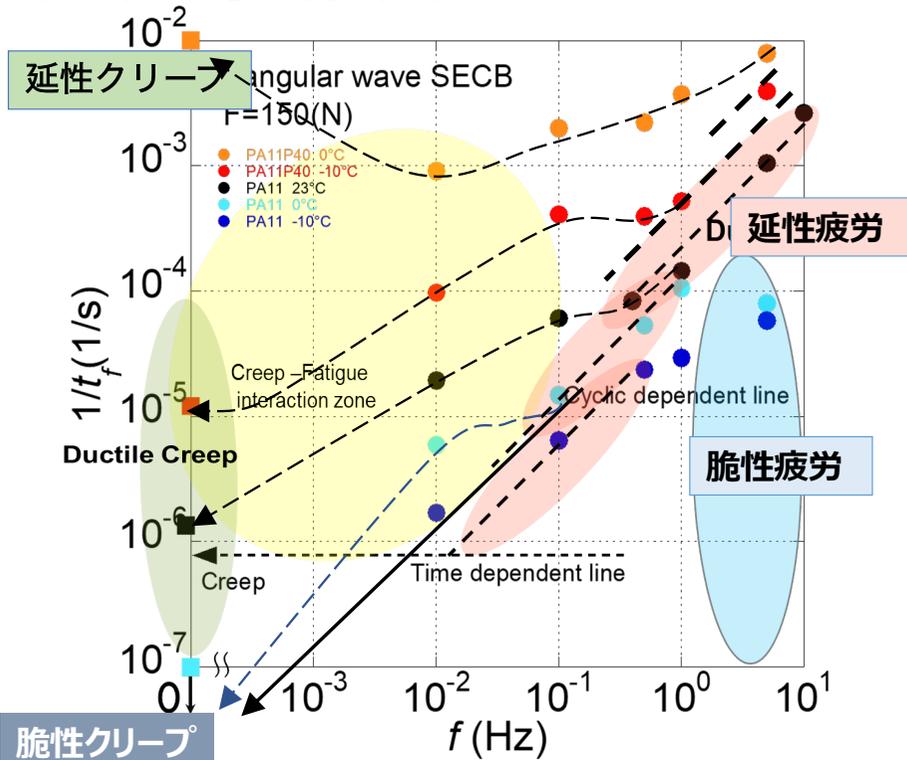


ポリアミド11の透過赤外スペクトルの脱圧後の経時変化(左)と波数 $6001\text{cm}^{-1}$ の位置におけるベースライン高さの時間依存性

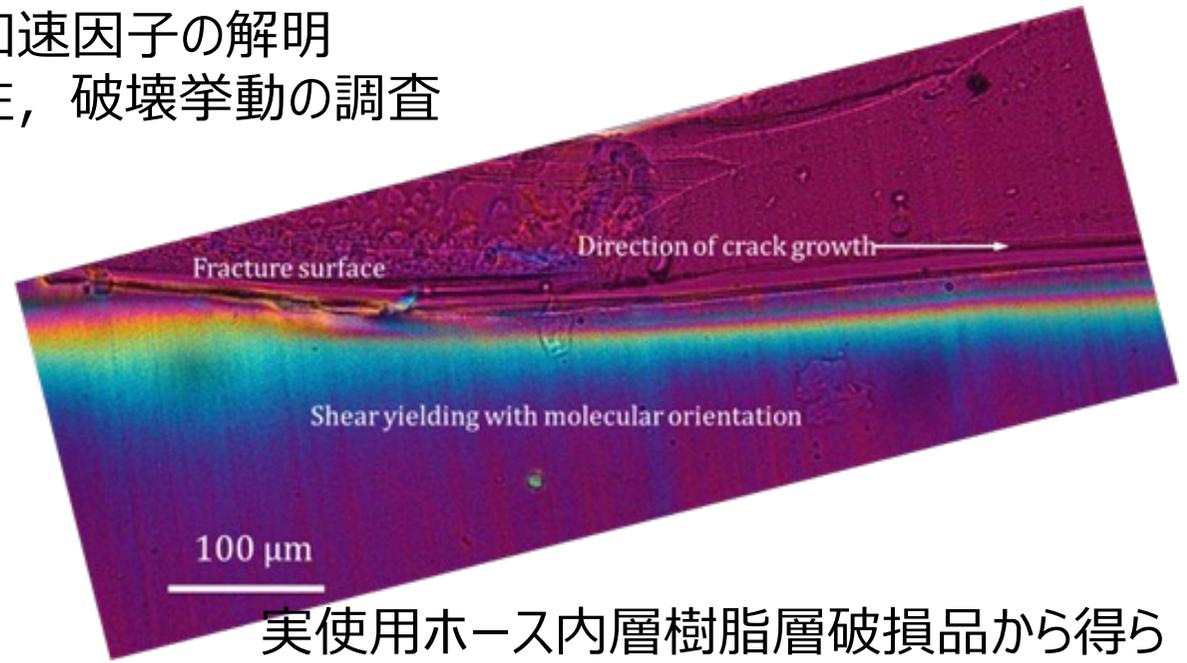
ベースラインの変動は試料内のボイドによる光散乱原因であり、脱圧過程で試料中に発生するボイド量は $65^\circ\text{C}$ で最も大きいこと、発生したボイドの収縮は温度が高い程速いことを示している。

### 3. 研究開発成果について

実施項目② 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明  
 高圧水素ホース内層樹脂の材料強度特性，破壊挙動の調査  
 (山形大学再委託)



内層樹脂材モデル材PA11の疲労／  
 クリープ挙動の疲労寿命線図を作成



実使用ホース内層樹脂層破損品から得られた破面直下の偏光顕微鏡観察写真

可除圧時のホース曲げ変形から、局所的にホース内層の軸方向引張応力，曲げ変形による応力三軸度の高い部位が存在することから，ホース内層内面近傍に，き裂の前駆段階となる局所なボイド列，すなわち，クレイズの発生がある。

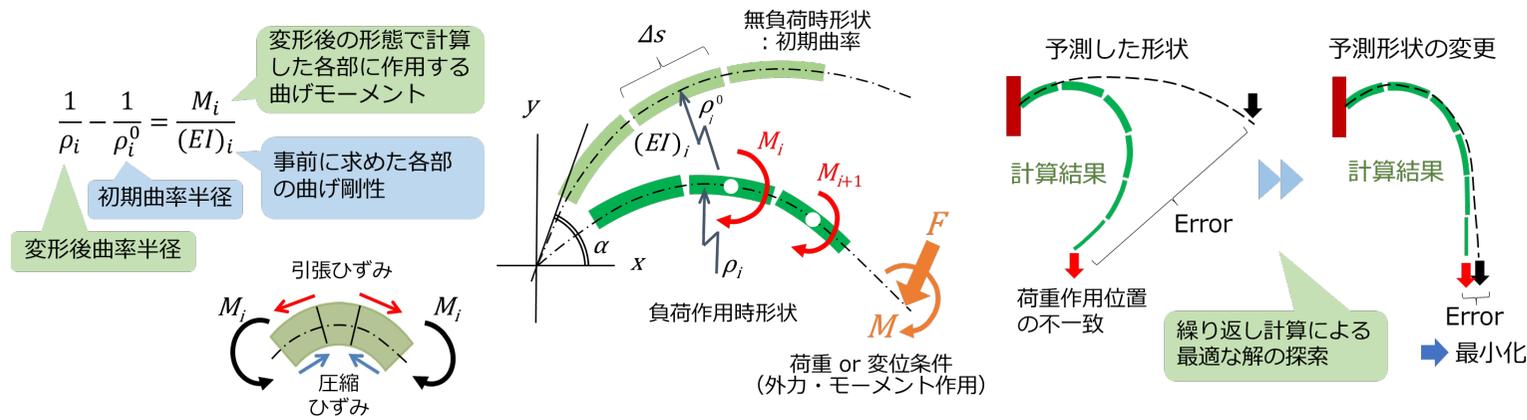
水素漏洩の要因である内層樹脂材の破壊，貫通き裂形成メカニズムを解明

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目② 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明

#### ホースの大変形挙動の解析手法の検討（弘前大学再委託，2021年9月～2023年3月）

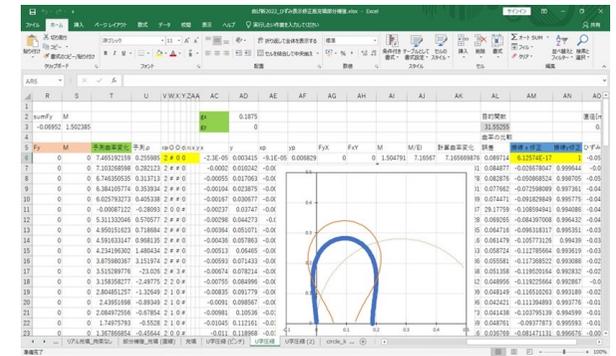
ホースの変形に由来する局所的な応力発生解析のため有限要素法を適用場合，構成材料をモデル化計算要素への分割が必要である。ホース全体にわたって要素分割すると，要素総数が膨大となり計算の実施が困難になる。このため，ホース形状変化の主要因となる曲げ変形に注目し，大変形挙動を記述するための数理モデルを構築することによりホース全体の変形形状を予測し，局所に発生するひずみ，応力場の解析を実施した。



Excelに  
実装

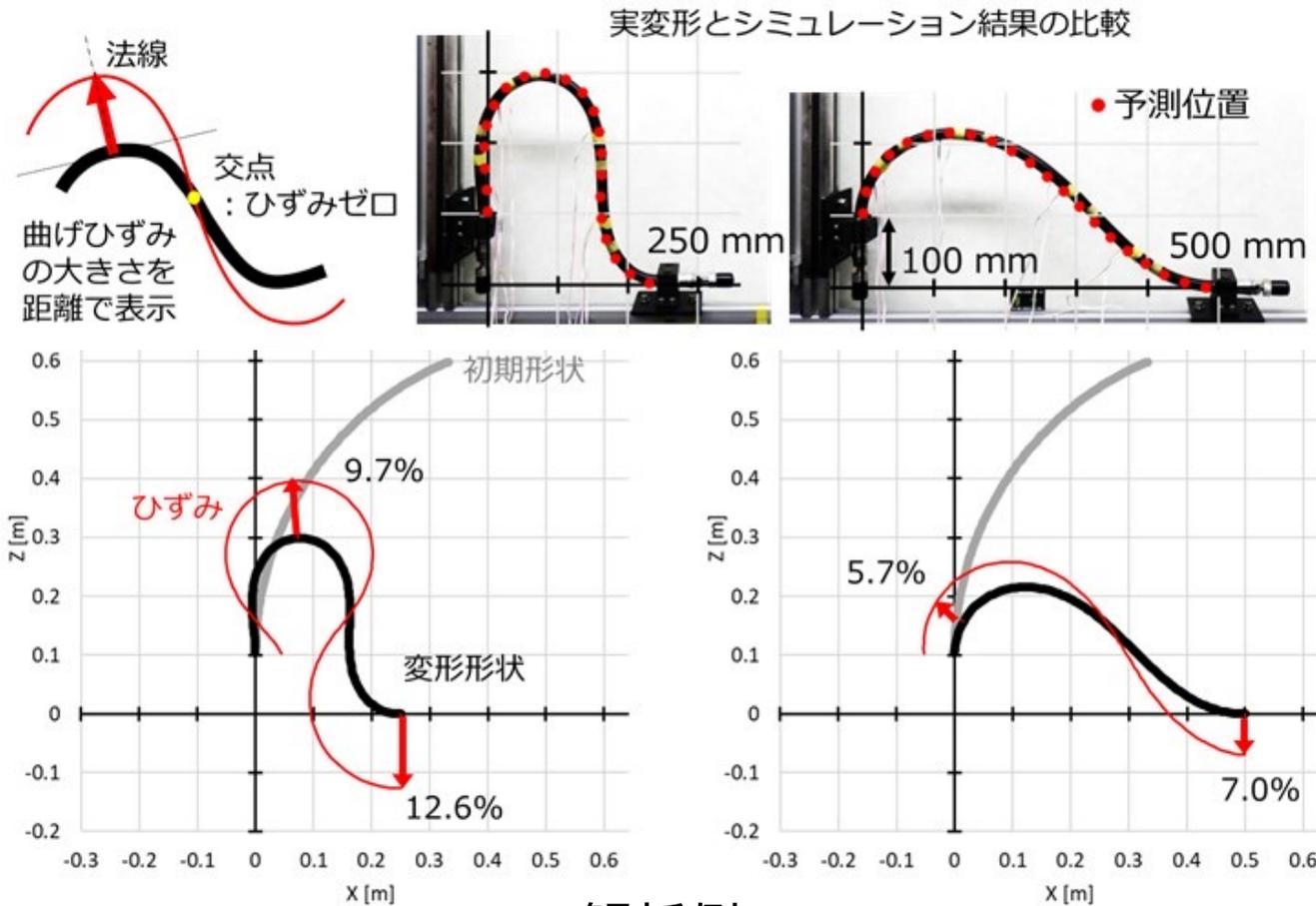
#### 曲げ変形の数理モデルに基づく解析手法

長尺ホースの曲げ変形の数理モデルによる局所応力・ひずみ解析手法を開発，Excelに実装



### 3. 研究開発成果について

実施項目② 高圧水素ホースの劣化・破壊加速因子の解明  
ホースの大変形挙動の解析手法の検討（弘前大学再委託，2021年9月～2023年3月）



解析例

本プロジェクトで開発した揺動水素インパルス試験について，ホース端部の固定位置を耐久試験に合わせて制約条件として定め，変位の境界条件（強制変位）を満たすホースの変形を予測。

揺動水素インパルス試験の駆動範囲において最大で10%を超える大きなひずみが生じていることを確認した。最大ひずみの発生位置や大きさが変化する様子を可視化することが可能になった。

### 3. 研究開発成果について

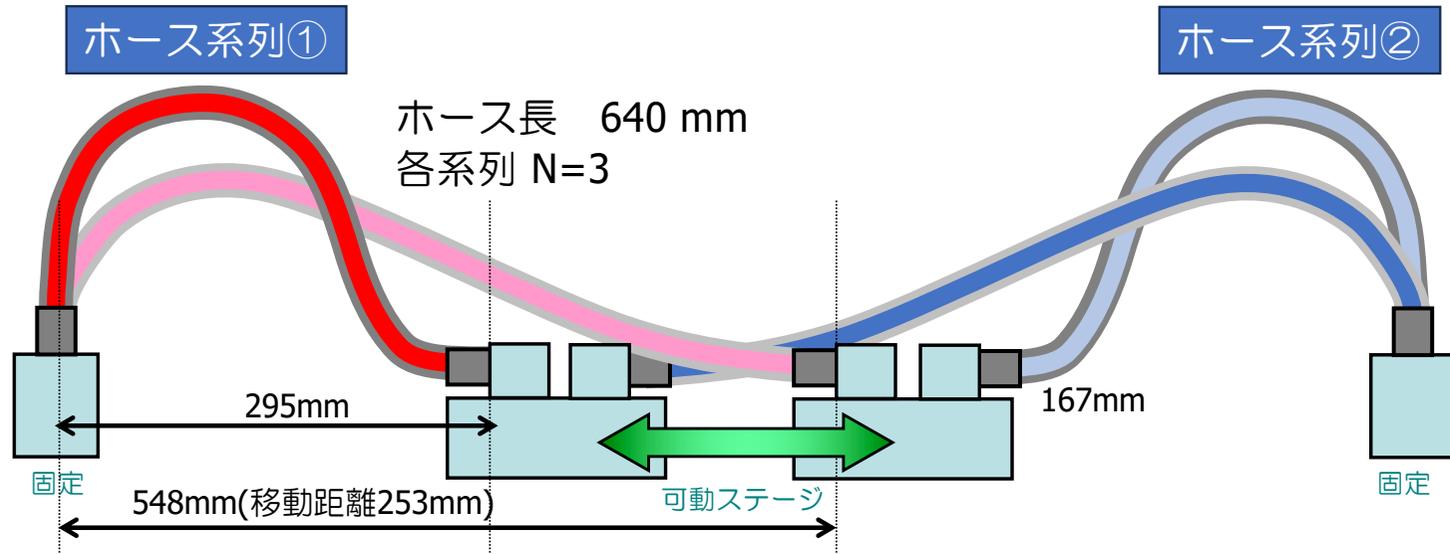
#### 実施項目③ 水素インパルス試験法による高圧水素ホース評価結果と水素ステーションにおける充填回数 の相関説明

	ホース形状	上限圧力 (MPa)	加圧時間 (秒)	上限圧力 保持時間 (秒)	環境温 度 (℃)	ホース 表面温度 (℃)	水素ガス 温度 (℃)	結果 (回)	備考
Test 0 (基準)	U字 最小曲げ半径	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	ISO 19880-5 7.9項記載の 方法
Test 1	U字 最小曲げ半径	87.5	12~13 (50 MPaま で急加圧)	1	55	制御せず	-40	> 10,000	50 MPaまでの急加圧、高い環 境温度による実機模擬
Test 2-1	U字 最小曲げ半径×2	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	フィッティング間隔を最小曲げ半 径の2倍に設定
Test 2-2	U字 最小曲げ半径/2	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	フィッティング間隔を最小曲げ半 径の半分に設定
Test 2-3	U字 最小曲げ半径×2	87.5	12~15	5	室温	85	-40	> 10,000	フィッティング間隔を最小曲げ半 径の2倍、高い環境温度を設定
Test 3-1	ハーフΩ	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	ホース揺動試験におけるホース形 状
Test 3-2	ハーフΩ	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	試験前にホース揺動試験 30,000回実施
Test 3-3	ハーフΩ	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	試験前にホース揺動試験 50,000回実施
Test 3-4	ハーフΩ	87.5	12~15	5	-40	制御せず	-40	> 10,000	試験前にホース揺動試験 100,000回実施

負荷を加えた水素インパルス試験では加速効果が見られなかった。

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目③ 水素揺動インパルス試験



STEP	ホース系列①		ホース系列②		時間
	面間 (mm)	圧力 (MPa)	面間 (mm)	圧力 (MPa)	
1	548	1.0→90→1.0	167	1.0	26 sec
2	548→295	1.0	167→420	1.0	3 sec
3	295	1.0	420	1.0→90→1.0	26 sec
4	295→548	1.0	420→167	1.0	3 sec

- 中央部の稼働ステージ水平にフィッティング。垂直の固定側との間にホース揺動試験時のハーフΩ型にホースを接続。
- ステージを稼働させることでホースが伸長・収縮する。ホースが伸長した状態で水素インパルス試験と同様-40℃／87.5 MPaの水素ガスが流通。
- 加減圧サイクル約60秒となる評価パターンを設定。
- ホース外表面にリボンヒータを設置，ホース表面温度を所定の温度に制御

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目③ 水素揺動インパルス試験

##### 水素揺動インパルス試験評価結果（室温・30℃）

ホース	ホース表面温度	耐久回数	加速係数
試作87.5MPaホース	室温	5,145	0.58
試作87.5MPaホース	室温	3,819	0.79
試作87.5MPaホース	30℃	2,259	1.33
試作87.5MPaホース	30℃	2,478	1.21
試作87.5MPaホース	30℃	2,479	1.21

水素インパルス試験にホース揺動を負荷することで、形状を固定したホースの水素インパルス試験に対してより小さい回数で漏洩が発生し、耐久性評価の加速が確認できた。  
加速係数（実水素ステーション充填耐久回数[3,000]／揺動水素インパルス試験耐久回数）は1を超え、本法により加速的な耐久性評価が可能であることが判明した。

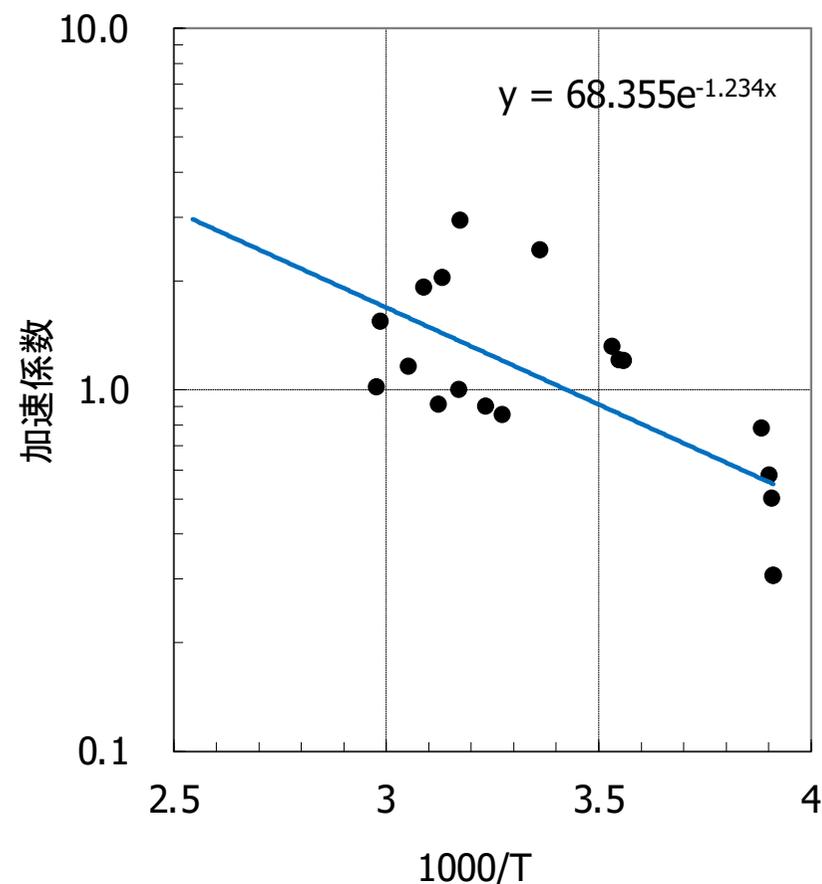
### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目② 水素揺動インパルス試験

##### 水素揺動インパルス試験に対するホース温度の影響

水素揺動インパルス試験の加速係数は、30℃から85℃の範囲において、ばらつきが大きいものの、加速係数の対数が温度の逆数に比例するアレニウス型の依存性と考えられる。

揺動水素インパルス試験による加速耐久性評価はホース温度が高いほど加速が促進され、加速係数はおおよそ60℃で $1.3 \pm 0.2$ 程度と考えられる。



ホース揺動水素インパルス試験の温度依存性

### 3. 研究開発成果について

#### 実施項目③ 加速耐久性評価法規格案の策定

高圧水素加速耐久性評価法規格案策定のため、（一社）日本ゴム工業会において「高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化ワーキングチーム（WT）」を設置した。期間中18回のWTを開催し、最終的にJIS文書を想定した規格案を策定した。

#### 高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化ワーキングチーム開催状況

回	開催日
第1回	2018年6月25日
第2回	2019年1月23日
第3回	2019年3月4日
第4回	2019年5月17日
第5回	2019年8月29日
第6回	2020年1月15日
第7回	2020年7月17日
第8回	2020年10月9日
第9回	2021年1月21日
第10回	2021年3月15日

回	開催日
第11回	2021年6月3日
第12回	2021年9月28日
第13回	2021年12月17日
第14回	2022年3月18日
第15回	2022年6月24日
第16回	2022年9月27日
第17回	2022年12月15日
第1回SWT	2022年12月21日
第2回SWT	2023年1月16日
第3回SWT	2023年2月17日
第18回	2023年2月21日

\* SWT : サブワーキングチーム

### 3. 研究開発成果について

実施項目④ ホース交換サイクル設定に資するデータの取得及びホースメーカーへのデータ提供  
試作87.5 MPaホースの評価結果及び漏洩の要因調査、加速因子に関する検討結果について、  
高圧水素ホース加速耐久性評価法規格化WTを通じて共有し、ホースメーカーにおける開発に活用いただいた。

提供ホース水素揺動インパルス試験結果

ホース	ホース表面温度	耐久回数	備考
提供ホースA	30℃	91,690	
提供ホースA	30℃	87,644	
提供ホースB	30℃	99,359	
提供ホースB	30℃	113,278	漏洩なく終了
提供ホースB	30℃	115,726	漏洩なく終了

上記結果を踏まえたホースメーカーによる検討の結果、2018年度当初の水素ステーションにおける使用回数は650回から1,000回であった水素ステーションにおける使用回数は、3,000回から4,000回程度となることが見込まれた。

## 4. 今後の見通しについて

---

本プロジェクトで策定した加速係数1.2となる水素揺動インパルス法により水素ステーションにおける耐久回数換算で30,000回を超える耐久性を確認した。さらに継続して評価した結果、8万回から11万回を超える耐久性を示すことが判明した。



水素揺動インパルス法による評価は水素ステーションにおける定常的な負荷を想定したものである。実機の水素ステーションにおけるホースの取り回し、気温など環境の変動などにより想定される非定常的な負荷が発生した場合の影響や、今後想定されるヘビーデューティ用途のための高流量充填の影響については考慮されていない。

2023年度より「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業／水素ステーションの低コスト化・高度化に係る技術開発／水素ステーション低コスト化・高度化基盤技術開発」において、水素ステーション実機における非定常負荷、高流量化が水素充填ホースの耐久性に対する影響について検討を進める。