

水素社会実現のためのプラント運転管理・点検技術の開発

Development of plant operation & maintenance technology for realizing "hydrogen society"

技術開発部 工業材料科 工藤弘行 穴澤大樹 鈴木雅千
技術開発部 生産・加工科 柿崎正貴 尾形直秀

水素プラント設備に適したプラント運転管理・点検技術を開発するため、水素ステーションで使用されるバルブ、蓄圧器、配管継手の実験モデルを作製し、各種試験、CAE解析を実施し、早期に故障を検知できる点検技術を提案した。また、点検技術を広く普及する観点から、CAEをカスタマイズした「点検アプリ」をベースにする点検システムを考案し、これを配信するプラットフォームを構築した。

Key words: IoT、予知保全、デジタルツイン、CAE

1. 緒言

福島県では、福島新エネ社会構想の一環として、水素エネルギー活用に関する様々な取組みが行われている。令和2年3月には、浪江町に福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)が開所し、水素製造を開始するなど、水素活用の機運が一段と高まっている。

水素の利用に当たっては、ガス漏洩などに対する懸念があり高い安全性や長期信頼性の確保が急務となっている。また、水素関連施設の普及のためには、建設費のみならず、管理保守費の低減も必要であり、安全性と経済性を両立する技術が望まれる。

ここで期待されるのが、IoT、AI、ビッグデータ解析などを活用した新しいプラント運転管理・メンテナンス(O&M)技術である。経済産業省では、近い将来、これらの技術を活用した新しいタイプのO&M産業が生まれると予見し、産業育成を強化している。

以上より、本事業では福島県が水素社会の実証拠点化することを活かし、いち早く水素プラント設備に適用できる運転管理・点検手法の技術や仕組みを県内企業や各機関と連携して構築することを目指し、研究開発を進めている。最終年度となる本年度は、バルブ、蓄圧器の点検技術を実証段階に向けて最適化するとともに、点検システムの構築に取り組んだ。

2. 実験及びCAE解析

2. 1. 点検技術の概要

表1に本研究が点検対象とする部品を示し、各部品に対する点検技術の概要を下記に記す。

(i) 配管継手・・・機械式継手では締結力低下に起因する漏洩の危険性がある。本研究では、移動式水素ステーションの配管継手に着目し、移動時の振動による締結力低下を点検対象とする。漏洩のメカニズムとして、図1に示す「接触面漏洩」の考え方を用いる。

(ii) 圧力容器(蓄圧器)・・・水素充填に伴う繰り返し荷重により、容器内面に生じた初期き裂が進展し、表面に達することで漏洩が生じる。本研究では独自技術としてDIC画像処理による変位・ひずみ測定で、き裂の影響を捉える手法を適用する。

(iii) バルブ・・・液体水素の沸点は $-253[^\circ\text{C}]$ であり、異常低温による動作不良が考えられる。本研究ではCAE解析を併用することで、センサやカメラでは測定できない製品内部の温度を推定する技術の活用を行う。

表1 点検対象部品と故障モードの絞り込み

水素運搬形態	部品	故障モード	頻度	危険度
高圧ガス	配管継手	シール面からの漏洩	大	大
高圧ガス	圧力容器(蓄圧器)	容器からの漏洩(疲労、水素脆化)	中	大
液体水素(極低温)	バルブ	異常冷却による動作不良	小	大

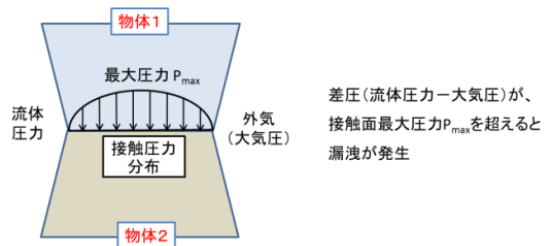


図1 接触面漏洩の概念図

2. 2. バルブ冷却試験

本研究では、IoTセンシングやサーモカメラ撮影とCAE解析を連携する点検技術を用いる。CAE連携の実用性を検討するため、バルブ冷却試験を行った。

図2に本事業で使用したバルブ実験モデルを示す。実験モデルは液体水素貯槽の払い出し部を模している。実験モデルは大野ペロー工業(株)が製作したもので、バルブを構成する部材や寸法は、実際の水素ステーション

ョンで使用されているものと同一である。通称、「首下」と呼ばれる細長い部品が特徴である。

これまでの研究により、フランジ部の温度がバルブ全体の温度分布を代表するとの知見が得られている。本年度は、より実用化に適した測定点として、図3に示すようにボルト頭部に熱電対を埋め込み、IoT センサ測定点とする検討を行った。温度測定はナショナルインストルメンツ社製 CompactDAQ システムを使用し、サンプリング速度 1 サンプル/秒とした。

図4は、組込み用途向け小型サーモカメラである。据置型の装置に比べて、測定可能な温度範囲が狭いことが課題であるが、CAE との連携が可能か検討した。

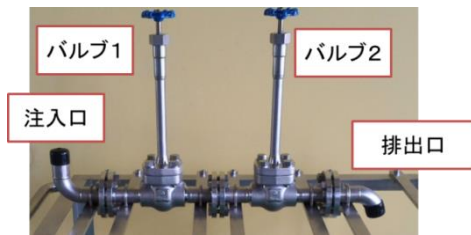


図2 バルブ実験モデル



図3 ボルトへの熱電対の取付状況



図4 組込み用途向け小型サーモカメラ

2. 3. バルブ実験モデルのCAE伝熱解析

IoT と CAE と連携した点検技術の検討のため、バルブ実験モデルの CAE 伝熱解析を実施した。図5に CAE 解析モデルを示す。解析ソフトウェアとして COMSOL Multiphysics を使用し、伝熱解析において課題となる熱伝達係数の逆同定を効率よく行うため、指定したパラメータの組合せを一括して計算する「パラメトリックスイープ機能」を用いた。

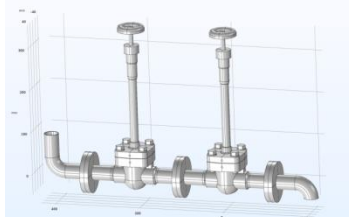


図5 バルブ実験モデルのCAE解析モデル

2. 4. 蓄圧器実験モデルによるDIC測定試験

図6に、本研究で使用した蓄圧器実験モデルを示す。このモデルは移動式水素ステーションの製造実績が豊富な大陽日酸エンジニアリング(株)会津若松事業所が製作したもので、部材や寸法は実際の移動式水素ステーションと同一である。蓄圧器の代替として直径約400[mm]、板厚5[mm]の模擬容器が取り付けられている。

本研究で使用する画像処理ソフトウェア VIC-3D は、照明やピントなどの撮影条件などから、期待精度を mm 単位で算出できる。そこで、図7に示すように模擬容器を対象に期待精度を調べる DIC 視野確認試験を行った。測定距離は 0.5[m]、1[m]、3[m]、8[m]の4条件、レンズは焦点距離 17[mm]、35[mm]の2条件とした。

また、DIC 測定精度検証のため、図8に示すように円弧試験片を用いた試験を行った。円弧試験片は、模擬容器と同一の曲率を持ち、幅 100[mm]、板厚 5[mm]である。試験片の一端を支持固定し、他端を DIC 測定面とした。DIC 測定面の内径側にひずみ変換式変位計を取り付け、測定面内径部を指で押した時の変形を測定した。測定距離は 1 [m]、レンズは焦点距離 17[mm]とした。変位は約 0.02[mm]～約 2[mm]の 5 条件とした。



図6 蓄圧器実験モデル



図7 蓄圧器模擬モデルのDIC測定試験状況

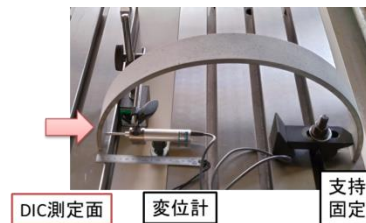


図8 DIC測定精度試験状況

2. 5. 蓄圧器のCAE破壊力学解析

蓄圧器にき裂が生じた場合の影響を調べ、点検技術の参考とするため、CAE 破壊力学解析を実施した。図9に、蓄圧器の CAE 解析モデルを示す。解析ソフトウェアは、破壊力学解析機能を持つ ANSYS Mechanical を

用いた。直径 400[mm]、全長 2500[mm]、板厚 30[mm]、ステンレス鋼製とした。図中に拡大して示したように、内径部に板厚の3分の1の長さを持つ半楕円き裂を作成した。内圧条件を 70[MPa]として、破壊力学パラメータである応力拡大係数を算出した。

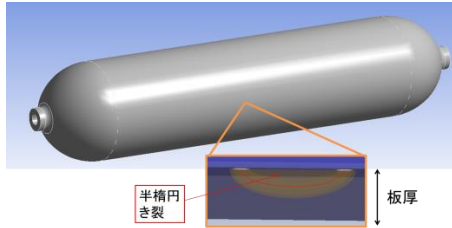


図9 蓄圧器CAEモデル

2. 6. 配管継手モデルの荷重試験、振動試験

図10に、本研究で使用した配管継手実験モデルを示す。この実験モデルは大陽日酸エンジニアリング(株)会津若松事業所が製作したもので、部材や寸法は、実際の移動式水素ステーションと同一としている。

荷重試験は図11に示すように鉛直下向きに200[N]の荷重を付与した。図12に示すように、継手根元にひずみゲージを貼付し、ひずみ測定を行った。

振動試験は、実製品が移動時に受ける振動の方向を踏まえ、図13に示す加振方向とした。製品の特徴点に加速度センサを取り付け、共振点探索試験を実施した。共振点探索試験は、周波数範囲 50~1000[Hz]、入力加速度 1[m/s²]とした。

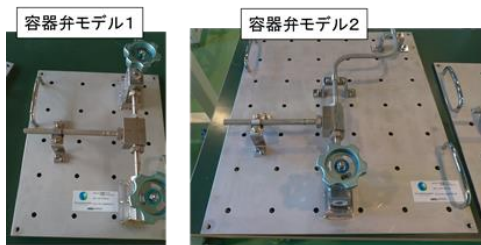


図10 配管継手実験モデル

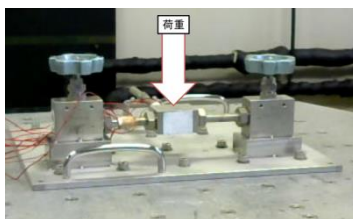


図11 荷重試験時の荷重方向

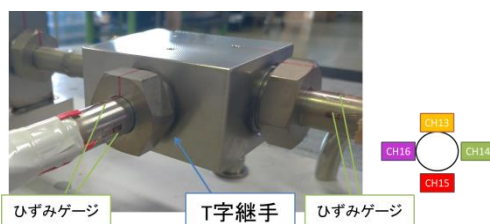


図12 荷重試験時のひずみ測定状況

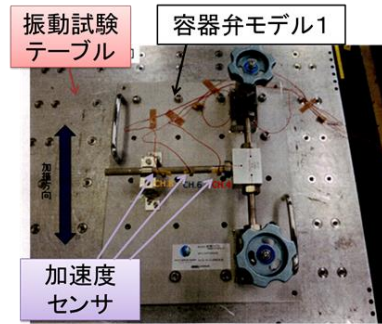


図13 振動試験取付状況

2. 7. 配管継手モデルのCAE解析

点検技術の検討のため、配管継手実験モデルの荷重試験と振動試験に関するCAE解析を実施した。解析ソフトはCOMSOL Multiphysicsを用いた。図14に配管継手のCAE解析モデルを示す。荷重試験、振動試験に関する静解析と固有値解析を実施した。

接触面漏洩に関する詳細な検討のため、接触面のCAE解析を行った。解析ソフトウェアはANSYS Mechanicalを用いた。図15は解析モデルを示したもので、対称性を考慮し2分の1モデルとした。継手はカラー、ナット、パイプの3部品からなるが、簡略化のため、カラーはナットと一体化し、ねじ山形状を省略した。実験モデルに使用したフジキン(株)製の継手は円錐面の接触部において、ボディ受け側の開口角度60度に対し、パイプ側先端の開口角度59度とわずかに角度を変化させているため、モデルに反映させた。

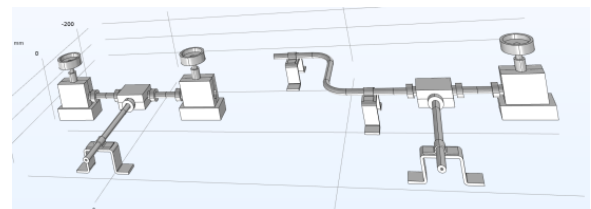


図14 配管継手実験モデルのCAEモデル

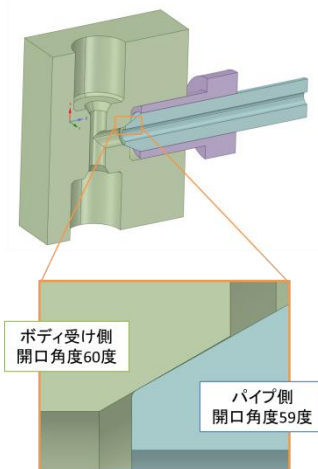


図15 CAE解析モデル
(上:全体図、下:接触部拡大図)

2. 8. 点検システムの構築

3年間計画の最終年度となる本年度は、実プラントや実設備での実証段階に向けた点検システムの構築を行った。

また、本事業が提案する技術は、5～10年後に一般化する点検技術の先取りを目指したものであり、新しい点検技術の方向性を多くの関連企業に周知し、体験してもらうことも重要である。よって、点検技術を普及するための仕組みづくりについても併せて検討した。

3. 結果

3. 1. バルブ試験モデル冷却試験結果

図16に冷却試験時の温度-時間グラフを示す。この測定例では、図中、矢印で示すように約25分間の冷却を2回に分けて行い、下フランジは最低-145[°C]に達しており、定常状態に近い。ボルト部は上下フランジの中間的な温度で、他の測定点との運動性が高く、測定点として優れていることが確認できた。

組込み向けサーモカメラの測定結果として、図17に33分後と74分後の熱画像を示す。いずれも流路に近い部分は測定下限以下となるが、首下部の温度分布を測定することは可能である。カメラ付属のソフトウェアでは、熱画像中のラインカーソル上の温度プロファイルを実タイム表示することが可能である。バルブの温度分布は単調なので、熱画像自体を記録するより、温度プロファイルを連続的に記録する方法がデータ量削減という意味から望ましいと考える。

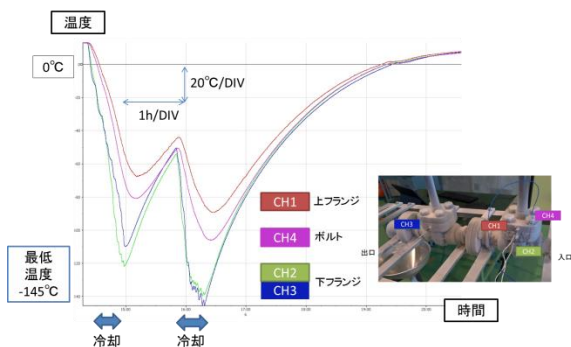


図16 冷却試験時の温度-時間グラフ

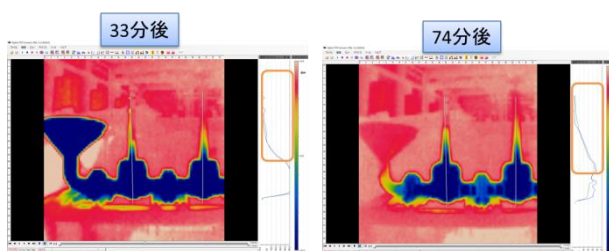


図17 冷却試験時のサーモカメラ画像

3. 2. バルブ試験モデルのCAE解析結果

バルブ試験モデルのCAE解析結果の例として、図18に液体水素で冷却した場合の温度分布を示す。温度分布は、冷却試験時のサーモカメラ結果と酷似しており、冷却現象をよく再現できていると考える。

次に、「パラメトリックスイープ機能」の例として、図19に、バルブ下フランジの温度-時間グラフを示す。この例では、冷却流体の熱伝達率3条件と周囲大気の熱伝達率3条件の組合せによる9条件の計算を一括で実施している。このグラフから、冷却過程の初期においては冷却流体の熱伝達率が、終期においては周囲大気の熱伝達率が支配的であるとの知見を得ることができた。

フランジ間のシール部やボルト部の伝熱パラメータについても同様に複数条件の計算を行い、冷却実験結果に合致するように各パラメータを逆同定した。得られたパラメータを用いて再現した冷却試験の温度-時間グラフを図20に示す。実験結果である図16とほぼ同等のカーブを示しており、実際の冷却現象を再現できている。CAE解析においても、ボルト温度は他の測定点との運動性が高いことが確認できた。

次に、サーモカメラの温度プロファイルと比較のため、CAE解析中のバルブ中心線上の結果を取得し、図21に座標-温度のグラフとして示した。温度プロファイルは、サーモカメラの結果と類似の形状を維持したまま、冷却に応じて移動する挙動となった。バルブでは、形状が比較的単純で、熱伝達条件も確定的であるため、伝熱の法則に基づいた単調な温度分布しか取り得ないことを意味している。点検技術としては、サーモカメラとCAE解析の温度プロファイルを照合することで、バルブ全体の温度を推定する手法が有望である。



図18 温度分布（液体水素冷却の場合）

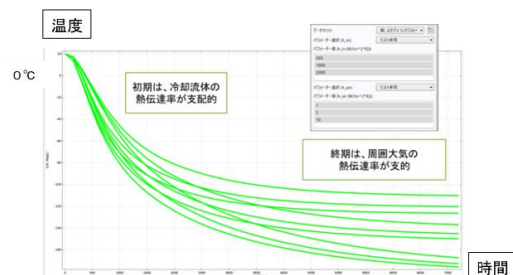


図19 冷却試験時の温度-時間グラフ

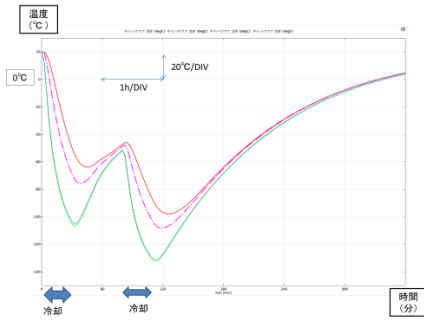


図 20 冷却試験時の温度-時間グラフ

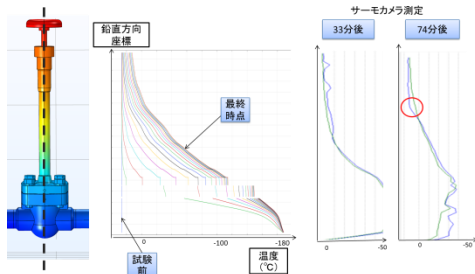


図 21 冷却試験時の温度-時間グラフ

3. 3. 蓄圧器モデルの D I C 試験結果

図 2 2 は撮影距離 0.5[m]、レンズの焦点距離 17[mm] の場合の DIC 視野確認試験結果である。図中、紫色の部分には精度が良好な範囲である。点検への応用を踏まえ、紫色領域の横幅、縦幅を X 視野、Y 視野、コンター図区分の上限値を期待精度として、表 2 にまとめた。表中には実画像も併せて記載した。

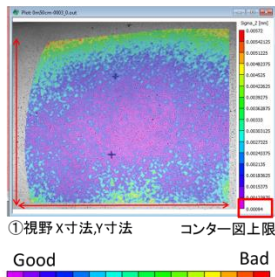


図 2 2 冷却試験時の温度-時間グラフ

表 2 D I C 視野確認試験結果

	撮影距離							
	0.5m		1m		3m		8m	
	X視野 (mm)	Y視野 (mm)	X視野 (mm)	Y視野 (mm)	X視野 (mm)	Y視野 (mm)	X視野 (mm)	Y視野 (mm)
レンズ 17mm	190	170	500	400	1400	400	-	-
	期待精度 0.001mm		期待精度 0.003mm		期待精度 0.057mm		-	
レンズ 35mm	-	-	220	200	630	400	1800	400
	-		期待精度 0.001mm		期待精度 0.023mm		期待精度 0.204mm	

次に、DIC 精度確認試験の例として、約 0.1[mm] の変位を与えた場合の変位-時間グラフを図 2 3 に示す。DIC 測定と変位計測定はほぼ同等の結果が得られた。微小変位では、試験テーブルや治具の変位も障壁となるため、テーブル上に基準ブロックを設置して差分を求める補正を行った。5 条件の変位-時間グラフのピーク値を読み取り、表 3 に結果をまとめた。

また、図 2 4 に DIC 補正值と変位計測定値の相関性を示した。測定点数が少ないものの、プラント点検分野で想定される程度の変位について、DIC 測定が実用上十分な精度を持っていることを確認した。

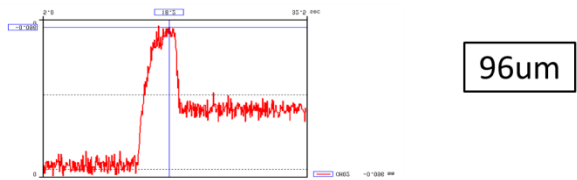
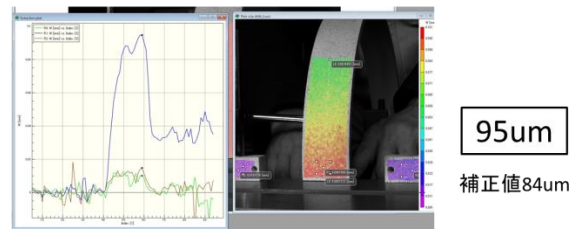


図 2 3 DIC 精度検証試験結果
(上) DIC 測定 (下) 変位計測定

表 3 D I C 精度確認試験の結果

サンプル名	DIC 測定点 (mm)	DIC 基準点 (mm)	DIC 補正值 (mm)	変位計 (mm)	誤差 (mm)
N12	1.947	0.411	1.536	1.580	-0.044
N5	0.372	0.036	0.336	0.354	-0.018
N9	0.126	0.014	0.112	0.119	-0.007
N4	0.094	0.01	0.084	0.096	-0.012
N10	0.029	0.015	0.014	0.016	-0.002

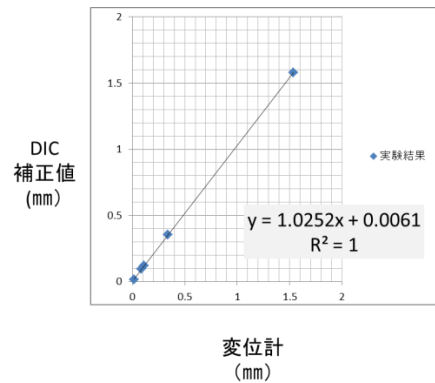


図 2 4 DIC 補正值と変位計測定値の比較

3. 4. 蓄圧器モデルの C A E 解析結果

図 2 5 に、き裂長さ 10[mm] の場合の変位分布図を示

す。図25右は視点と欠陥の位置関係を示したもので、赤い三角形が欠陥を丸数字が視点を示す。き裂の影響は広範囲に及ぶため、図中橙色の四角枠の測定範囲が適切と考える。表2と照合すると、レンズ17[mm]、撮影距離1[m]のDIC測定が適切である。

この時の応力拡大係数の最大値は約 $55[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$ であり、既知のき裂進展特性データ¹⁾に基づく、き裂進展速度は $1 \times 10^{-6}[\text{m}/\text{cycle}]$ 前後である。これは、1000回のFCV充填により、き裂が1[mm]進展することを意味しており、このレベルのき裂の影響を捉えることができれば、漏洩事故を未然に防げると考える。

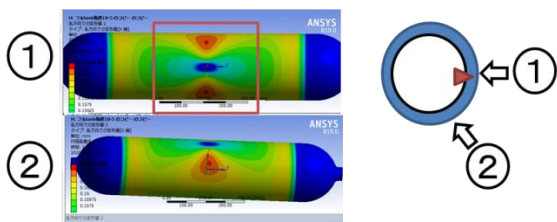


図25 蓄圧器モデルの変位分布図

3. 5. 配管継手モデルの荷重・振動試験結果

容器弁モデル1の荷重試験の結果を、図26に示す。この図は荷重試験中の4点のひずみ測定結果を、縦軸に荷重、横軸にひずみのグラフとして示したものである。試験中、200[N]の荷重を負荷・除荷するサイクルを3回繰り返したが、いずれの測定点も線形関係を示し、同じ経路を往復する挙動であった。荷重が付与された鉛直方向であるCH13とCH15で最大 $40[\mu\epsilon]$ 程度、水平方向のCH14とCH16は最大 $10[\mu\epsilon]$ 程度であった。荷重負荷方向と合致した位置にひずみを貼付すれば、継手に掛かる荷重を測定できると考えられる。

振動試験例として、図27に100~1000[Hz]までのサイン掃引試験結果を示す。403[Hz]、530[Hz]、671[Hz]、751[Hz]に共振点があることが分かった。輸送時の振動負荷を再現するランダム振動条件には200[Hz]までの周波数成分しか存在しないため、T字継手など基本構造が、輸送振動に対して十分な耐振動性を持っていることと考えられる。今後の着眼点としては、基本構造以外の配管支持部に着目すべきである。

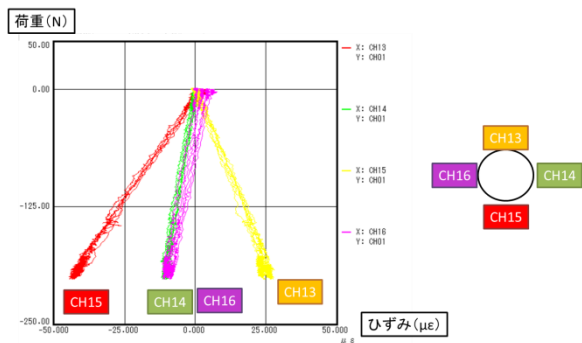


図26 荷重試験時の荷重-ひずみグラフ

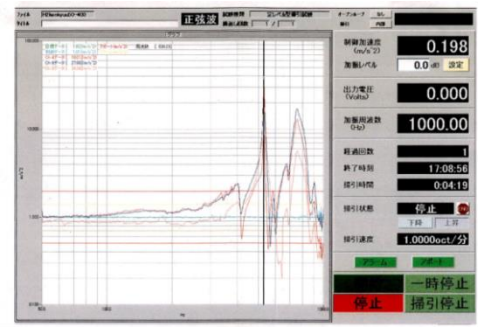


図27 サイン掃引試験結果(加速度一周波数グラフ)

3. 6. 配管継手モデルのCAE解析

荷重試験を再現したCAE解析結果例として、図28にひずみ分布図を示す。ひずみがピークとなるのは、T字継手に接続された配管の根元で、左右方向の配管で最大約 $40[\mu\epsilon]$ 、中央方向の配管で約 $15[\mu\epsilon]$ である。これは図26に示したひずみ測定値とほぼ同等である。配管継手の構造は比較的シンプルなので、試験結果とCAE解析が一致しやすいと考えられる。

図29に水平方向に1G加速度負荷した場合の変位分布図を示す。いずれのモデルも配管支持部での変位が大きい。これは高圧水素ガス用の配管肉厚が大きく、配管の剛性が高いことが理由と考えられる。

図30に容器弁モデル2の固有値解析結果を示す。図示したのは1次モードの結果で、共振周波数は442[Hz]である。この結果から明らかなように、長い配管を持つ製品の共振は配管支持部を節とする変形モードとなる。従って、実プラントの点検技術としては、配管支持部も含めたCAE固有値解析を予め実施しておき、危険な変形モードと危険位置を絞り込むことが有効だと考えられる。

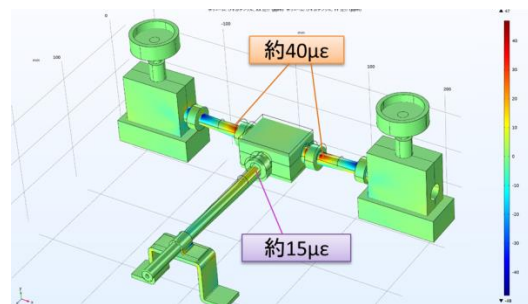


図28 荷重試験時のひずみ分布図

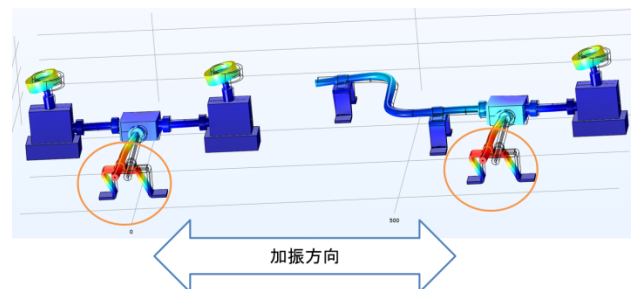


図29 1G負荷時の変位分布図

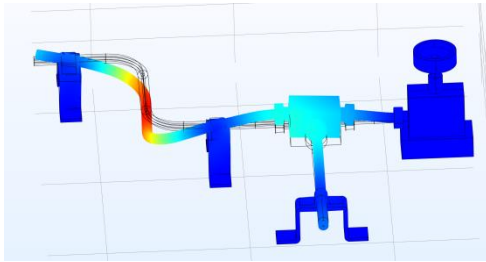


図30 蓄圧器モデル2の固有値解析結果
(1次モードの変位図)

次に、接触面漏洩に関する CAE 解析結果を示す。

ねじ締結を再現するため、軸方向に強制変位を与えた場合の応力分布図を図31に示す。円錐面では、非常に狭い範囲で接触が生じ、材料力学分野で良く知られる典型的な接触応力分布が生じている。

ねじ締結に加え、曲げモーメントを与えた場合の応力分布を図32に示す。円錐接触面だけでなく、ナットとボディとの接触部などで変形が生じている。また、接触面の上下で応力分布の違いが生じている。

接触面漏洩への影響を調べるため、接触面圧に着目し、図33に接触面圧図を示した。図33(a)ねじ締結では均等な面圧が生じているのに対して、図33(b)曲げモーメント負荷では、下部の接触部面圧が低下し、接触幅も狭くなっている。このような部位では、水素ガス漏洩の危険性が高まると考えられる。

図34は、曲げモーメント負荷時のひずみ分布を示している。図中、矢印で示したのは、図12の荷重試験時のひずみゲージ測定点である。この分布から分かる通り、測定点のひずみと円錐面のひずみ分布は相関性がある。従って、荷重試験など測定していたひずみゲージ測定値を基に CAE 解析と連携することで、バルブ点検技術と同様に、直接測定することはできない接触部の状況を予測することが実現可能であり、今後、追加の検証試験が必要と考える。

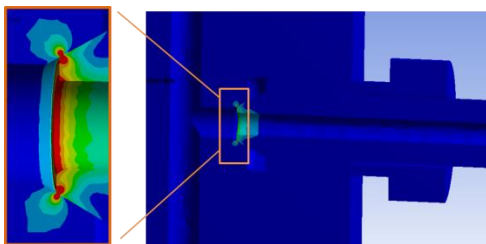


図31 締結時の相当応力分布図

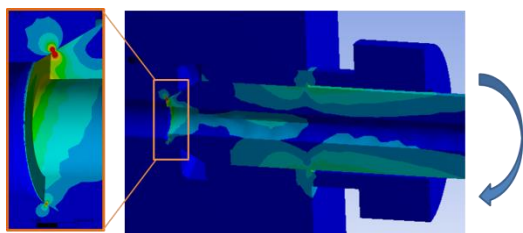
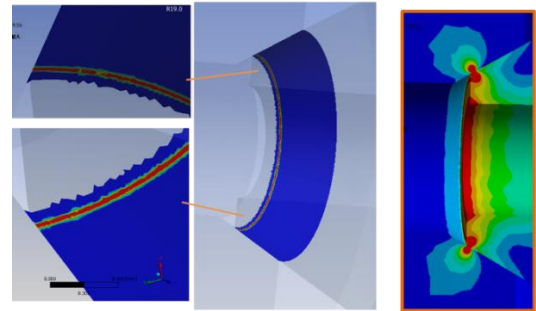
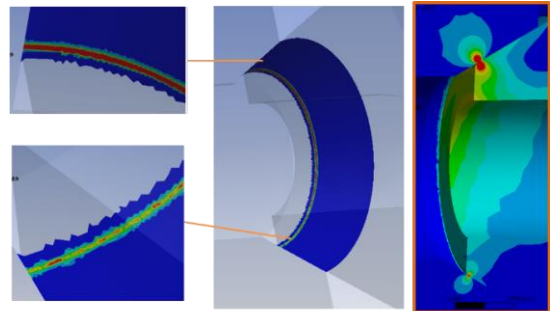


図32 曲げモーメント負荷時の相当応力分布図



(a) 締結時の場合



(b) 曲げモーメント負荷した場合

図33 円錐接触部の面圧分布と応力分布
(左) 面圧拡大図 (中央) 面圧全体図 (右) 応力分布図

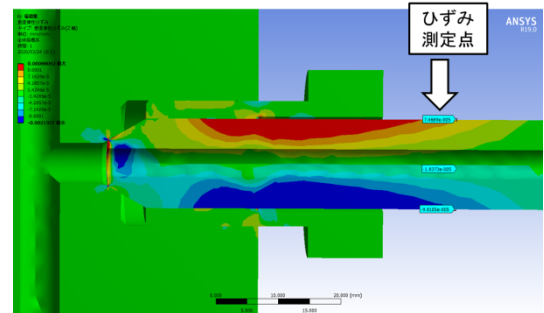


図34 曲げモーメント負荷時のひずみ分布

3. 7. 点検システムの構築

本研究で提案した点検技術は、CAE 解析を活用する点の特徴である。この特徴を活かすため、CAE 解析ソフト COMSOL Multiphysics が持つ「CAE アプリケーション (CAE アプリ)」機能を全面的に採用した点検システムを考案した。この機能は、解析済みの CAE を再利用し、GUI 画面を作成するもので、数値入力やボタン操作だけで容易に CAE 計算を行うことが可能である。我々は、これを「点検アプリケーション (点検アプリ)」として活用することとした。図35は、バルブに関する点検アプリケーション例であり、伝熱条件を入力することで、霜層の発生状況を予測するものである。

さらに、オプション製品である COMSOL Server を用いることで、遠隔地からインターネット通信を介して「CAE アプリ」が保存されたサーバへアクセスし、Web

ブラウザ上で「CAE アプリ」を実行することが可能である。この時、CAE 計算はサーバのコンピュータが行うため、遠隔地で使用するデバイスはスマートフォンなど計算能力に劣るもので十分である。

我々は、この仕組みをプラント点検に応用し、図36に示すような点検プラットフォームとして共同利用することを提案する。この画面上の一つ一つの画像が、本研究の成果の一部を点検アプリケーションに作り替えて表現したものである。

図37に著者らが考える点検システムの全体概要図を示す。IoT や AI 関連技術は、様々な要素技術の集合体であるため、全体像を把握することや、他者と技術的なアイデアを共有することが困難であるが、この図をベースにすれば、共有の助けになると考える。この図はセンサ、データ、解析の3つの主要な技術要素を、プラント点検現場、解析拠点、サーバ拠点の3拠点に割り振った基本形と言える。インターネット通信を前提とすれば、3拠点の空間的な制限はなく、様々な組合せが想定される。この図をベースすれば、どんな組合せも基本形のバリエーションと捉えることができる。例えば、現場作業員が表示デバイスを使用する場合は、点検現場と解析拠点が同じ場合であり、エッジコンピューティングとはサーバ拠点と解析拠点が現場近くに存在する場合である。

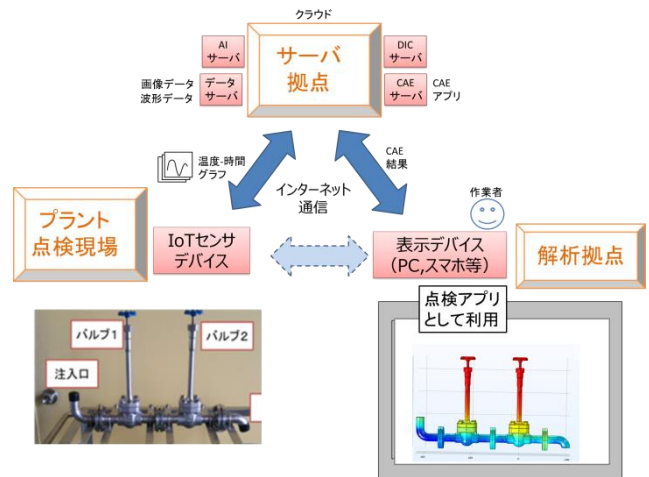


図37 点検システムの概要図

4. 結言

水素プラント点検技術開発のため、水素ステーションで使用されるバルブ、蓄圧器、配管継手に関する各種試験やCAE解析を実施するとともに、新しい点検技術を普及するための点検システムや仕組みについて検討を行い、以下の成果を得た。

- ① バルブ実験モデルの冷却伝熱実験を実施し、ボルト部に熱電対を埋め込み温度測定をする方法、サーモカメラで首下部分の温度分布を測定する方法が有効であることを確認した。
- ② バルブ実験モデルのCAE解析を実施し、冷却実験時の温度分布や温度変化を再現することを確認した。
- ③ 蓄圧器のDIC測定試験、CAE解析を行い、撮影距離1[m]で直径全体を測定視野とする手法が、点検技術として有望であることを確認した。
- ④ 配管継手に関する荷重試験やCAE解析を行い、配管根元のひずみ測定値を基にCAE解析を行うことで、継手接触部の力学的な状況を推定できる可能性を示した。
- ⑤ CAE解析をカスタマイズした点検アプリケーションをベースとする点検システムを考案した。
- ⑥ 研究成果の一部を点検アプリケーションとして共有できるプラットフォームを構築した。

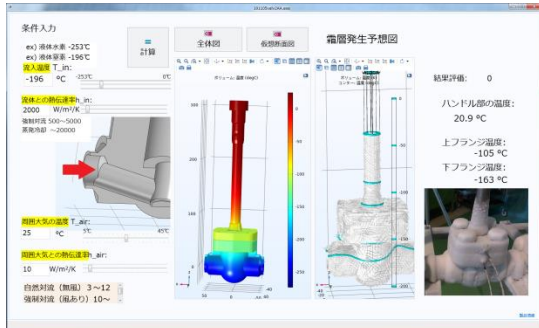


図35 点検アプリケーション画面例

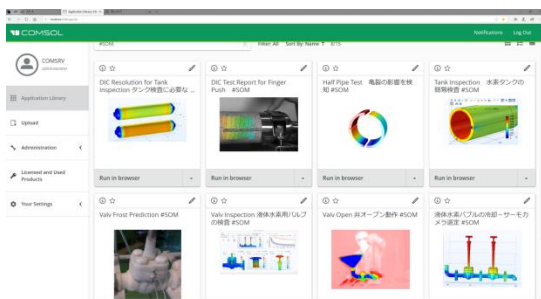


図36 点検プラットフォームのトップ画面例

参考文献

1) 日鉄テクノロジー(株): 高圧水素環境下の疲労試験, <https://www.nstec.nipponsteel.com/technology/mechanical/fatigue/fatigue09/> (参照 2020-3-24)