

高圧水素タンクの充填時検査技術の開発（第2報）

Development of Inspection Technology for Filling High-pressure Hydrogen Tanks (2nd Report)

材料技術部 金属・物性科 工藤弘行 仲沼岳 佐藤浩樹
分析・化学科 高橋歩弓

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 穴澤大樹

本研究は、高圧水素ガスを水素タンクに充填する時に同時に亀裂の検査を実施する「充填時検査技術」を開発するものである。本年度は、検知された亀裂寸法を基にCAE破壊力学計算により、応力拡大係数を算出し、急速破壊判定や亀裂進展を再現する取り組みを実施し、その有効性を確認した。また、水素環境下強度試験を実施し、水素中の疲労破壊の進展を予測するための基礎データを得た。さらに、各試験、CAEの関係性を、点検技術の全体像を図としてまとめ、水素脆化の影響を亀裂進展特性に反映させる手法を提案する。

Key words: 水素脆化、疲労破壊、破壊力学、亀裂進展予測

1. 緒言

脱炭素社会へ向けた社会変革の動きは確かなものとなり、水素やアンモニアを燃料として活用する「グリーンエネルギー産業」の国際競争がスタートしたとも言われている。日本は、欧米に比べて水素エネルギー活用が先行しているが、さらなる利活用拡大に向けて、普及を後押しする技術開発の必要性が高まっている。

水素の運搬・貯蔵技術としては、液化水素、高圧ガスの2つが代表的であるが、本研究は高圧ガスを対象とする。高圧水素ガスタンクは、製造時にタンク内面に生じた初期欠陥が疲労亀裂として進展し、最終破壊に至る懸念があり、原子力や航空など強度信頼性が重要な分野で実績がある破壊力学を適用した設計が採用されている¹⁾。

金属材料は水素環境下で強度が低下する「水素脆化」の影響があるため、現在、高圧水素分野で多用されるのは、ニッケル当量を規定したSUS316Lなど高価な材料に限定されている。水素利用を拡大するため、今後規制緩和により比較的安価な低合金鋼も使用できる見込みがあるため、民間企業の開発競争がスタートしている。候補材料は「水素脆化」の影響が少なからずあるため、その影響を見極めようと水素脆化分析のニーズがここ1、2年で急速に高まっている。

金属材料の水素脆化の評価を行う場合、(1)水素チャージ、(2)水素分析、(3)強度試験の3要素を一体として考える必要がある。

(1)水素チャージとは、材料中に水素を含有させることであり、高圧ガス暴露法や、電気化学的な陰極チャージ法がある。

(2)水素分析は、サンプルを一定のペースで昇温しながら材料から放出される水素を直ちに質量分析により分析する「昇温脱離法(TDS)」が一般的である。この手法は、全放出量から材料

中の水素含有量を知るだけでなく、金属材料のミクロ情報、特に欠陥情報を取得できることが特徴である。水素原子は最も小さい原子であるため、材料中の欠陥、転位、結晶粒界など特定の場所(水素トラップサイト)に存在する。トラップサイトに捉えられた水素は昇温により得られたエネルギーを得て、初めて材料中を自由に拡散し放出できるため、放出温度はそれぞれ欠陥のエネルギー準位と大きな相関があることが知られる。

(3)強度試験としては、通称SSRT(Slow Strain Rate Tension)と呼ばれる「低ひずみ速度引張試験」、「定荷重試験」、通称CSRT(Conventional Strain Rate Tension)と呼ばれる「通常速度引張試験」があるが、近年、SSRTが優勢である。これは「低ひずみ速度」が、材料中の水素が拡散する時間を確保する意図であり、脆化の原因が「材料の塑性変形と水素の相互作用」にあるという、水素脆化のメカニズムを反映した評価となるためである。

以上のように、水素脆化分析は、要求される技術が高く、試験施設自体が高圧ガス規制を満たす必要もあることから、全国的にも試験ができる機関が限定される。さらに大量の水素ガスを必要とし試験費用も高いため、近年、安価な中空試験法の規格化が進められて、その普及が期待される。中空試験法は、一般的な丸棒試験片の中央に設けた中空部に水素ガスを注入する方法であるため、圧力容器中で中実試験片を用いる従来手法に比べて、ガス使用量が桁違いに少なく、安価で簡便な方法と期待されており、規格化間近である。しかし、先行して発展した中実試験片との整合性を確保するため、あくまで「材料選定」を行う観点の評価である。そのため、疲労試験や亀裂進展特性の把握に関しては、未だ研究段階で発展途上で

ある。

本研究は、高圧水素ガスを水素タンクに充填する時に同時に欠陥の検査を実施する「充填時検査」を開発するもので、昨年度は、画像処理により、亀裂の位置や長さを検知する技術開発を行った。図1は、切欠き円弧試験片の引張試験を画像処理でひずみ測定したものであるが、ひずみ分布の「マイナスピーク」が、亀裂の位置を指し示すことを明らかにした²⁾。

本年度は、画像処理検知で得られた亀裂の位置や長さの情報を基に、破壊力学計算により、タンク破裂や水素ガス漏洩のリスク評価、さらに亀裂の進展予測技術の開発を行った。また、「水素脆化」の影響を考慮するため、水素環境下強度試験を実施し、当研究グループ独自にタンク寿命の根拠となる強度データを得る取り組みも開始した。

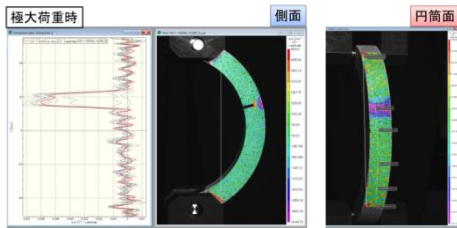


図1 ひずみ分布の「マイナスピーク」による亀裂検知の例

2. CAE解析

2.1. 破壊力学の適用

本研究では、亀裂の位置と寸法から、水素タンクの健全性を判断するため、破壊力学を用いる。はじめに、図2を用いて破壊力学の基本的な考え方を述べる。

破壊力学は、理想的な無欠陥材料を仮定する材料力学と異なり、欠陥の存在を前提として亀裂の成長に着目して破壊を扱う力学分野である。破壊力学において最も基本的なパラメータは応力拡大係数Kであり、亀裂先端近傍の応力状態の厳しさを表すものである。一般式は、 $K = F \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$ で、単位は「MPa・√m」である。ここで、aは亀裂長さである。σは公称応力といい材料力学により計算できる平均的な応力である。Fは形状関数であり、無限に大きい物体の場合Fは1である。亀裂の長さaを代表寸法Wで除した無次元化き裂長さ(a/W)の関数としてまとめられていることが多い。本研究で用いるCT(コンパクト・テンション)試験片の場合の形状関数解を図3に示す。

高圧水素タンクの健全性を保つ上で重要な考えが破裂前漏洩(LBB: Leak Before Break)と呼ばれる設計思想である。十分に強靱な鋼材では仮に疲労破壊が生じたとしても、破裂(=急速破壊)することなく安定亀

裂進展のまま肉厚を貫通するため、漏洩する水素は僅かである。これに対し、低靱性材料では疲労亀裂が肉厚を貫通する前に、急速破壊する可能性があり、危険である。LBB成立のため重要な、急速破壊に関する材料特性は破壊靱性値 K_{IC} である。 K_{IC} は応力拡大係数の限界値であり、 $K > K_{IC}$ の条件で急速破壊が生じる。

以上より、本研究では、CAE破壊力学によりKを算出し、使用材料の K_{IC} と比較することで、タンク健全性診断の根拠とすることとした。

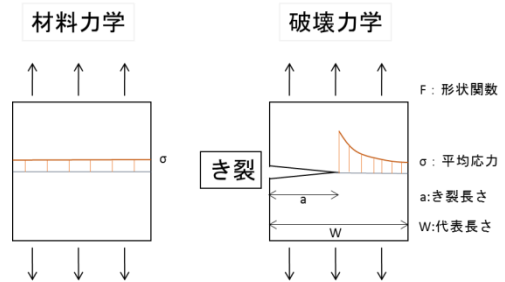


図2 材料力学と破壊力学の説明図

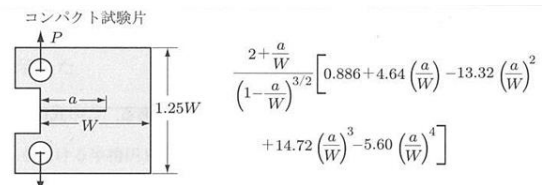


図3 CT試験片の応力拡大係数解³⁾

2.2. CAE破壊力学の利用

本研究では、市販の有限要素解析ソフトウェアANSYSを用いて破壊力学計算を行った。同ソフトは、破壊力学計算機能と、亀裂近傍の要素分割を併せ持つのが特徴である。有限要素解析で適切な破壊力学計算をするには、亀裂先端の要素分割が重要であるが、本ソフトは図4に示すように多様な亀裂用メッシュを作成する機能を有している。例えば、「半楕円亀裂」は、亀裂のないCADモデルに位置座標と半楕円の長径、短径を設定することで、「任意亀裂」は亀裂を指し示す「面」を設定する。いずれも明示的に再現性の良い亀裂メッシュを作成できる。

また、図5に示すように応力拡大係数などの破壊力学パラメータを算出する機能がメニュー化されており、変位や応力といった一般的な解析結果と一体的に評価可能であるため、様々な亀裂を考慮する必要のある本点検技術開発に好都合である。

はじめに、ANSYSによる破壊力学計算の妥当性を確認するため、図6に示すCT試験片モデル及び円弧試験片の計算を行った。CT試験片は、荷重1000[N]を固定し、亀裂長さ21、23、25[mm]の場合の計算を行った。図3の演算式による計算との比較を行った。

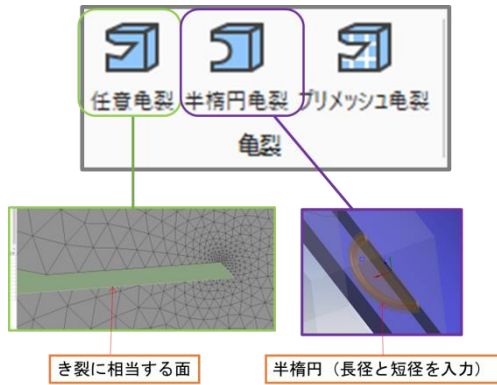


図4 亀裂要素作成機能

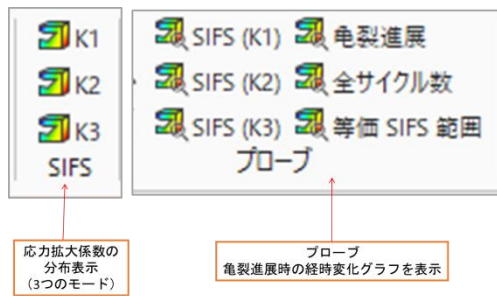


図5 破壊力学評価機能

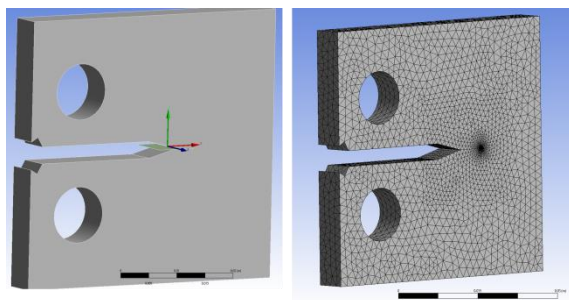


図6 CT試験片モデルの要素分割図

2. 3. CAE破壊力学による水素タンク健全性診断

水素タンク健全性に関する計算例として、材質は耐力490[MPa]の低合金鋼、圧力を105 [MPa]とし、図7に示す直径が400 [mm]、内径が300 [mm]、肉厚50 [mm]のタンクモデルで、肉厚に対する亀裂長さ（無次元化き裂長さ）が0.25、0.5、0.75の3条件で応力拡大係数Kの計算を行い、破壊靱性値 K_{Ic} との比較を行った。図8に亀裂長さ37.5 [mm]（無次元化き裂長さ0.75）の場合の半楕円亀裂機能を用いた要素分割図を示す。

なお、破壊力学では亀裂が成長し貫通する方向の寸法を「長さ」と呼び、直角方向の寸法を「幅」と呼ぶ。

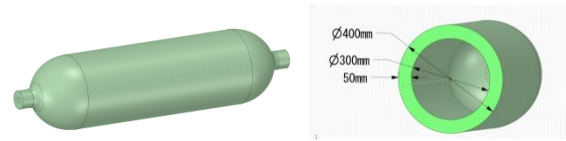


図7 水素タンクモデル

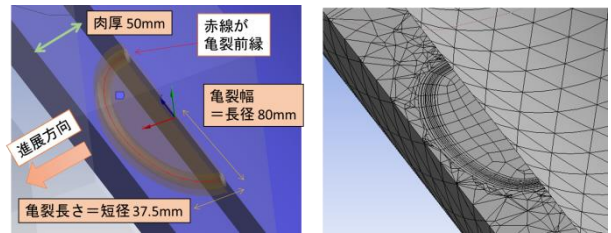


図8 半楕円亀裂設定 (左) と要素分割図 (右)

2. 4. CAE破壊力学による亀裂進展計算

本研究の点検技術は、亀裂の早期発見と使用限界を見極めることを目的とする技術であるため、検知した亀裂が今後数か月や1年間のスパンで、どの程度成長するかを推定する技術も必要である。本研究で使用するANSYSでは疲労亀裂進展速度が計算可能であるため、その計算の妥当性を検証するとともに点検技術への応用を検討した。

はじめに、CAEで正確な亀裂進展計算を行うための考え方を述べる。

図9は本研究グループが昨年度実施した疲労亀裂進展特性試験の結果例である。横軸は応力拡大係数範囲 ΔK といって荷重サイクルに応じた応力拡大係数の変化の範囲を示している。縦軸は亀裂進展速度で1回の荷重サイクルで、進展する亀裂進展量を示す。例えば、 $\Delta K=15[\text{MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}]$ の荷重が100サイクル付与された場合を考える。特性プロットから $\Delta K=15$ における亀裂進展速度は、約 $0.5[\mu\text{m}/\text{cycle}]$ と読み取れる。100サイクルでは約 $500[\mu\text{m}/\text{cycle}]$ と計算できる。

両対数グラフにプロットした特性グラフ中央部では、傾きがほぼ一定となり係数 c と m で疲労進展特性を整理できること、また、金属材料では係数 m が2~4となることが「パリス則」として知られている。ANSYSは、この2つのパラメータを入力することで、ソフトウェア内で上記に述べた亀裂進展の計算の手順を繰り返す仕組みである。なお、亀裂の進展とは形状の変化を意味するため、亀裂が進展する過程を全て正しく計算するためには、計算途中で「要素再分割」(リメッシュ)も重要である。

本報告では図6と同一のCT試験片モデルを対象に亀裂進展計算を行い、負荷荷重を増減した場合と、亀

裂進展特性を変化させた場合の妥当性を検証した。疲労亀裂進展特性は、アルミ合金を対象とした図9のc、mを基準とした。

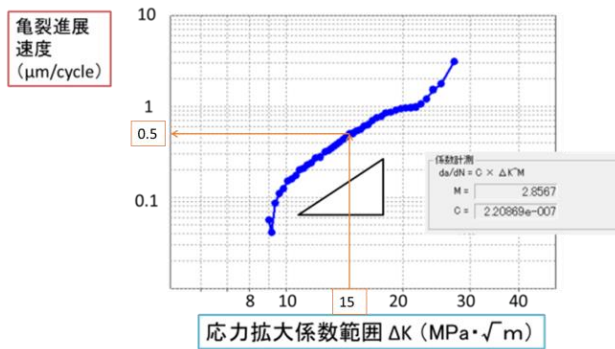


図9 亀裂進展特性グラフ例

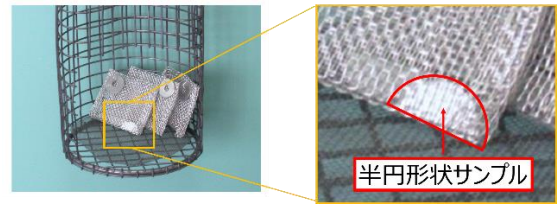


図10 水素暴露サンプル

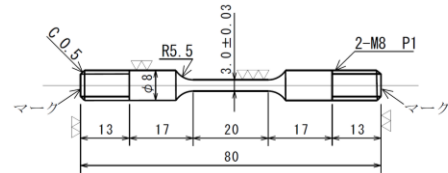


図11 SSRT 試験片 (中実試験片) の形状寸法

3. 実験

3. 1. 供試材

本研究では市場流通している材料の水素脆化特性の実態を知るため、最も代表的な水素材料であるSUS316L 鋼材を2つの異なる流通経路から調達し、A材、B材とし評価した。また、塑性加工で製造される実プラント製品を想定し、加工硬化の影響を調べるため、B材に25%予ひずみを与えたもの(以後、B予ひずみ材とする)も対象とした。表1に供試材の基本特性を示す。

表1 供試材の基本特性

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Mo	Ni当量 (C除く)	硬さ HV
	%	%	%	%	%	%	%		
A材	-	0.54	1.65	11.9	17.45	2.32	2.32	27.4	242
B材	-	0.46	1.42	11.3	17.95	2.05	2.05	26.6	168
B予ひずみ材	-	-	-	-	-	-	-	-	274

3. 2. 水素脆化分析

水素脆化に関する基礎データを収集し、点検技術に活用するため、水素脆化分析を外部機関に委託して実施した。

(1) 水素チャージ法としては、高圧ガス暴露を用いた。図10のサンプル設置写真に示すように、板厚2[mm]、外径6[mm]の半円形状サンプルを対象に、常温、圧力45[MPa]、暴露時間48時間の暴露条件とした。サンプルが小さいため、水素が十分に拡散した状態と見込まれる。

(2) 水素分析は、前項(1)の部材に対して、室温~800[°C]までの条件で昇温脱離分析を行った。

(3) 強度試験は、図11に示す試験片を用いて、低ひずみ速度引張試験(SSRT)を実施した。

3. 3. 中空試験法による水素環境下強度試験

本研究では、中空試験片について、規格案に則った静的強度試験を実施した上で、静的強度試験と整合性の高い疲労試験手法の開発を目的とする。なお、本試験は仙台高専名取キャンパスへの委託研究として実施し、本報告では静的強度試験の結果のみ報告する。

緒言で述べたように中空試験法は、試験片の中空部に水素ガスを注入する方法であり、恒温槽を用いた低温試験が実施しやすい長所を持つため、本研究では低温特性の評価を実施した。現在、商用の水素ステーションでは差圧充填を行い、断熱膨張による発熱を伴うため、タンク素材のFRPを保護する目的から、充填直前まで-40[°C]の予備冷却(プレクール)を行っている。先行研究では、この領域でSUS316材料の特性が変化すると報告があり、重要と考えた。

図12に使用した中空試験片の基本形状を示す。引張試験は、現在策定中の中空試験片高圧水素中低ひずみ速度引張試験規格に準拠して行った。試験速度は平行部の推定ひずみ速度が 5×10^{-5} [1/s]以下となるクロスヘッド速度0.083[mm/min]とした。伸びの計測は評点間距離25[mm]の伸び計(島津製作所製SG25)とクロスヘッド変位データを併用している。

試験温度は、20[°C](室温、大気中)、-10[°C]、-45[°C]であり、低温環境中試験は図13のように液体窒素噴霧式恒温槽を用いた。試験圧力は、試験片中空部が約105 [MPa]になるように昇圧ポンプを用いて昇圧した。

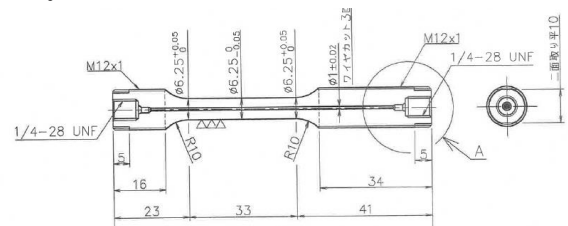


図12 中空試験片の形状寸法



図 1 3 試験片固定部 (恒温槽内)

4. CAE解析結果

4. 1. CAE破壊力学計算結果

図 1 4 は、亀裂長さ 25 mm の場合の CT 試験片の解析結果である。相当応力 100 [MPa] 以上を赤く表示したが、亀裂近傍特有の応力特異場を確認できる。

応力拡大係数は亀裂先端の線に対して算出されるものであり、図 1 5 に破面写真と位置を対応させて示す。

図 1 6 (左) は、亀裂長さ 3 条件の結果を重ねて示したものであるが亀裂長さの増加に応じて、応力拡大係数が増加する。板厚中央で高く、両端が若干低い分布は共通で、これは図 1 6 (右) 写真の疲労亀裂が中央で先行することに対応する一般的傾向である。

図 1 7 に応力拡大係数の CAE 解析結果と図 3 の演算式の結果の比較を示す。両者はおおむね一致しており、ANSYS による計算は概ね妥当と判断した。

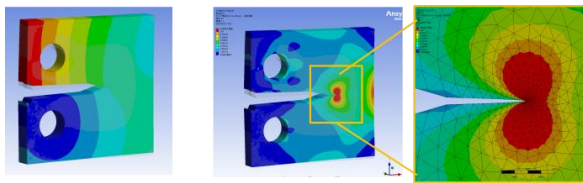


図 1 4 変位図 (左) 相当応力分布 (右)

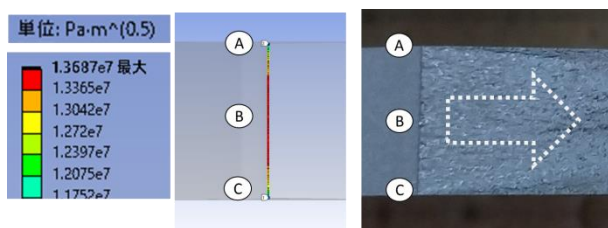


図 1 5 き裂先端の応力拡大係数計算結果

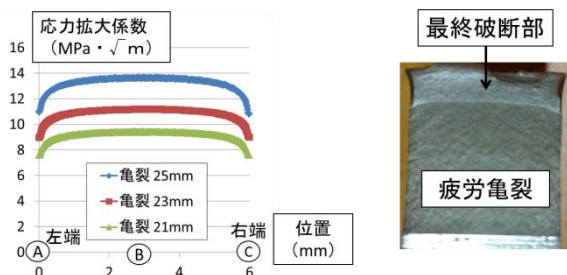


図 1 6 応力拡大数分布 (左) と疲労破面 (右)

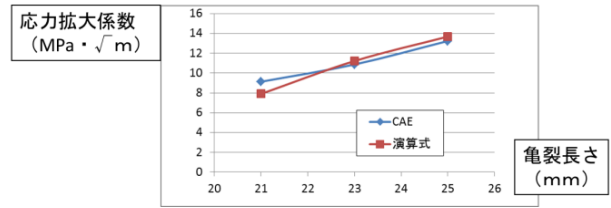


図 1 7 CAE と演算式の応力拡大係数の比較

4. 2. CAE破壊力学による急速破壊判定

次に、亀裂を持つ水素タンクの解析結果を示す。

図 1 8 は、無次元化き裂長さ 0.5 の場合の相当応力分布を、中心軸を含む断面と直交する断面で仮想的に表示したもので、亀裂部を拡大している。亀裂前縁部に激しい応力集中が確認できる。

図 1 9 は応力拡大係数分布である。いずれも中心部の残厚が薄い部位が最大となっており、亀裂が肉厚を貫通するのにつながる様相を確認できる。

現在候補材である低合金鋼の破壊靱性値 K_{IC} は、大気中で $200 \sim 250 [MPa \cdot \sqrt{m}]$ 、 $100 [MPa]$ 程度の高圧水素中で $50 \sim 100 [MPa \cdot \sqrt{m}]$ である¹⁾。この数値を図 1 9 の結果と照合すると、大気中であれば無次元化亀裂 0.75 の場合でも $K < K_{IC}$ となり急速破壊しない、あるいは水素中であれば無次元化亀裂 0.25 でも $K > K_{IC}$ となり急速破断すると判断できる。

以上のように高圧タンクモデルの CAE 破壊力学計算結果と使用材料の破壊靱性値を比較することで、タンク健全性を定量的に診断できることを確認した。

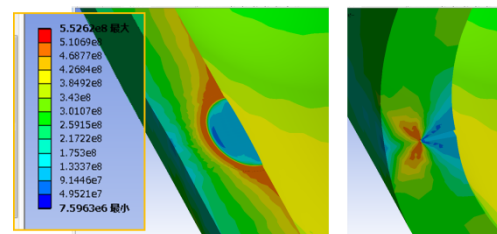


図 1 8 亀裂近傍の相当応力分布 (左) 中心軸断面 (右) 半径方向断面

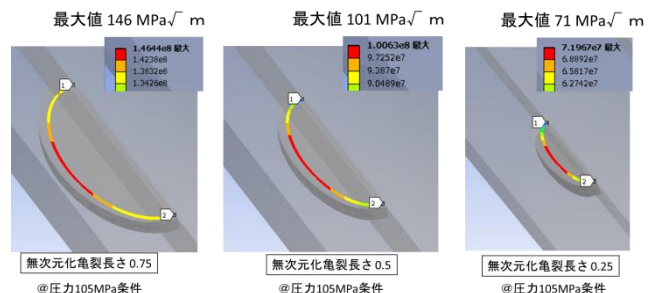


図 1 9 応力拡大係数分布

4. 3. CAE破壊力学による亀裂進展計算

亀裂進展解析の例として、荷重 1400[N]一定とし、分離直前まで計算した場合の相当応力分布を計算経過とともに図 20 に示す。この図は応力 200[MPa]以上を赤で表示したもののだが、き裂先端の応力集中部が大きく成長しながら右に移動し、分離に至る様子を確認できる。なお、亀裂進展解析の制限のため、この結果は弾性解析であることを付け加える。

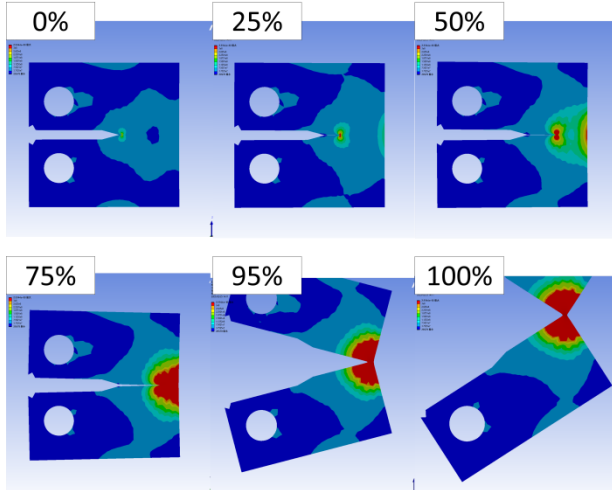


図 20 亀裂進展解析結果 (相当応力分布)

図 21 は、ANSYS のプローブ機能を用いて、亀裂進展中の応力拡大係数と積算サイクル数を表示したグラフである。計算された結果は、実際の亀裂進展試験や、パリス則パラメータと整合性のある結果である。

なお、本計算は亀裂進展の全過程を 51 回のサブステップに分ける設定により毎回再要素分割(リメッシュ)して計算したものである。サイクル数について補足する。有限要素解析は、物体を有限個の要素で離散化するものであるから、亀裂進展計算をする場合も、亀裂進展量も要素長に合わせる方が合理的である。図 9 で示した計算により亀裂進展速度から、1 要素長の亀裂進展に要するサイクル数が計算できる。

亀裂進展解析は、計算途中のステップ(時間)ごとに、サイクル数、応力拡大係数、亀裂進展量を計算しているため、横軸サイクル数のグラフに整理できる。水素タンクは充填回数を記録するのが一般的なので、横軸をサイクル数とした方が好都合である。図 22 は横軸をサイクル数として、亀裂進展量(赤)と応力拡大係数範囲 ΔK (青) をプロットしたグラフである。注目したいのが、ある時点から急速に加速する点である。増加する程度は、 ΔK の方が著しいが、これは前述した形状関数 $F(a/W)$ の寄与である。アルミ合金の破壊靱性値は 50~100[MPa $\cdot\sqrt{m}$]であるため⁵⁾、図 22 は $\Delta K=100$ [MPa $\cdot\sqrt{m}$]で CAE 結果のプロットを打ち切っている。この地点を寿命サイクルとするのが適切と考える

が、急峻な立ち上がりの任意点で判断しても大差ない。

次に、荷重を変化させた場合の亀裂進展量の変化を図 23 に示す。荷重の影響により、寿命サイクルは対数的に大きく変動することを確認した。

図 23 には、亀裂進展特性を変化させた結果例として、荷重を 600[N]、 c を基準の 30 倍とした結果も記載する。水素脆化が生じる場合、最大 30 倍亀裂進展速度が増加するとの報告があり、寿命サイクルへの水素脆化の影響の大きさを再確認した。

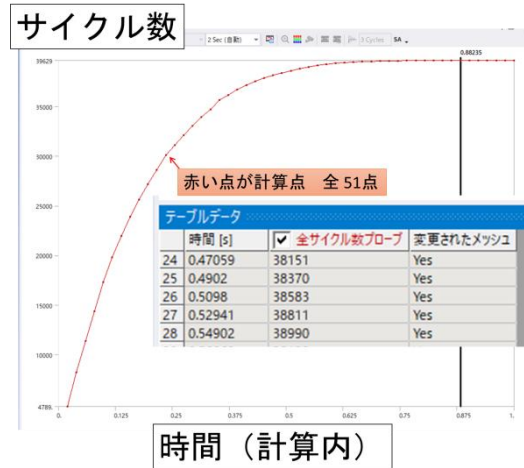


図 21 亀裂進展中の積算サイクル数

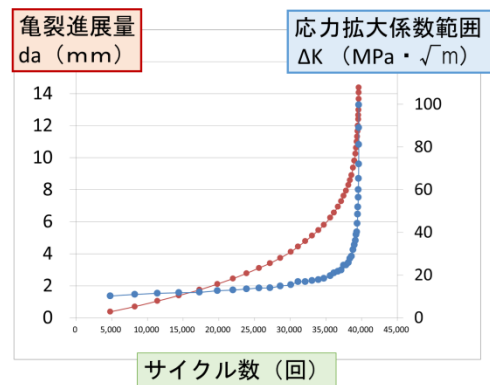


図 22 サイクル数に対する da と ΔK の変化

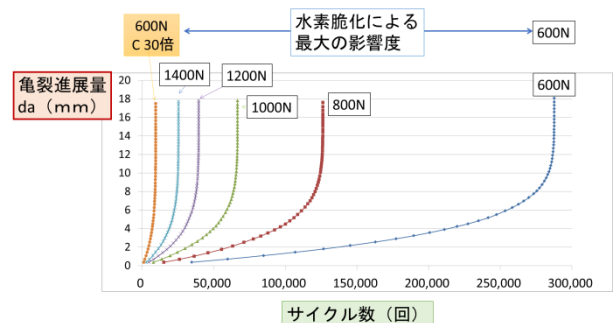


図 23 全サイクル数に及ぼす荷重と材料物性値の影響

5. 実験解析結果

5. 1. 水素脆化分析結果

図24は昇温脱離分析の結果であり、3材種の結果を重ねて表示している。また、グラフ中右上に昇温脱離分析から計算される水素含有率「昇温水素量」として記載した。同じSUS316L材であるが、A材とB材に大きな違いがあることを確認した。また、同じB材でも予ひずみを与えることで違いが生じる。この結果は、「耐水素」の観点では、購入した素材を金属加工すると別の材料に変化するのと同じことと解釈できる。

次に、水素ガス中で実施した低ひずみ速度引張(SSRT)試験の結果を示す。図25は応力-変位曲線、図26は破断後サンプル写真である。水素脆化の影響は、試験前後の断面積減少率を意味する「絞り」に差が出やすい。図27は絞り測定用写真である。SUS316L材は「絞り」が良好で細いくびれまで破断しない材料であるが、水素中でも延性を維持している。SSRTでは水素が拡散する時間を確保しているため、実際の水素環境と整合性の良い評価ができると認められており、SUS316Lは水素の影響がない、すなわち水素脆化しないことを確認した。

なお、水素脆化評価では、水素中の特性値を、大気中の特性値に対する「相対比」で呼ぶことが一般化している。これに倣い、表2に引張強度、破断伸び、絞りの相対値を記す。相対値は1以上であれば、耐水素脆化が良好であり、0.8程度でほどほどと見なすのが一般的である。今回の結果では破断伸びが1を超えたがSUS316Lでの報告例と同じ傾向である。

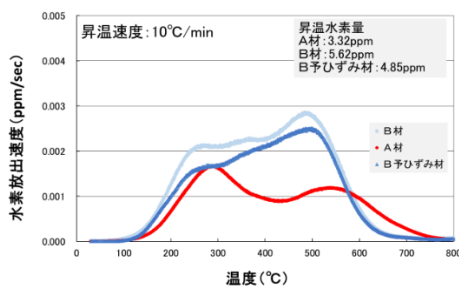


図24 昇温脱離分析結果

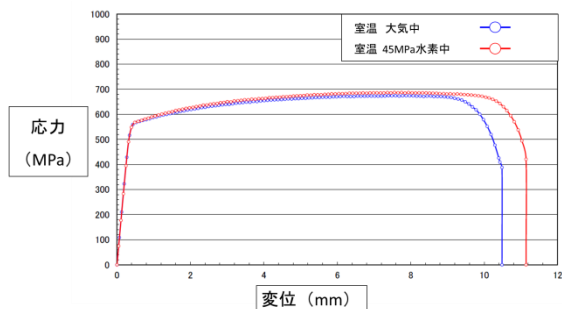


図25 低ひずみ速度引張試験の応力-変位曲線



図26 破断後サンプル写真

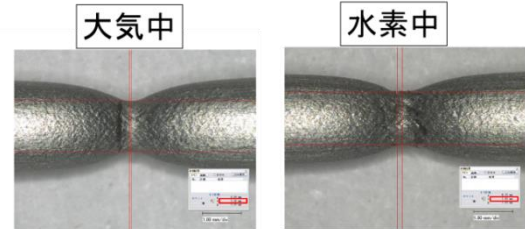


図27 絞り測定用写真 (左) 大気中 (右) 水素中

表2 低ひずみ速度引張試験結果まとめ

		強度 MPa	破断伸び %	絞り %
A材	大気	674	52	82
	45MPa水素中	687	56	80
	相対値 略称	1.02 RTS	1.08 REL	0.98 RRA

5. 2. 中空試験法による強度試験結果

中空試験片法はA材を対象とした。

図28～図30に各試験温度における応力-ひずみ曲線を示す。赤線で示したものが水素ガス、青線で示したものが不活性ガスの結果である。いずれの温度でも、水素ガスと不活性ガスの結果は、ほぼ全域で一致しているが、破断直前に相違が現れる。水素ガス下では、破断前の不均一変形(局所伸び)が生じる段階で急速に荷重が低下して破断に至る。

図28～図30には相対的な3パラメータも記載した。RTSは2本の水素ガス環境の引張強さの平均を不活性ガスの結果で除した相対引張強さであり、RELは同様に相対破断伸び、RRAは相対絞りを示す。

さらに、RTS、REL、RRAに及ぼす温度の影響を図31にまとめると、温度の低下とともにRTSは一定で、RELおよびRRAは減少している。一見、温度の低下に伴って水素脆化が顕著になるとも言えるが、絶対評価で言うと、温度の低下に伴って引張強さおよび破断伸びは大きくなっており、相対値による評価には注意が必要である。

表3に中空試験法の全結果を示す。なお、大気、室温における結果は、表2の中実試験片と近い結果であり、中空試験法の整合性を裏付けるものである。低温で強度が上昇する傾向は、パリス則のcが減少することを意味すると考える。

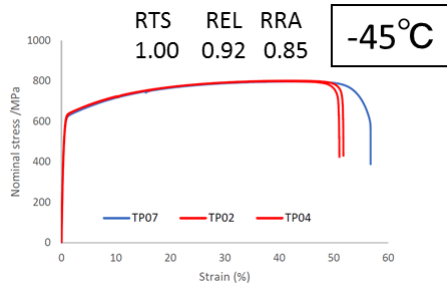


図 2 8 -45°Cにおける応力-ひずみ曲線

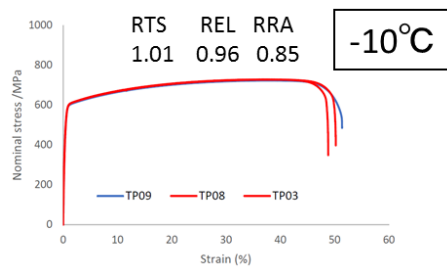


図 2 9 -10°Cにおける応力-ひずみ曲線

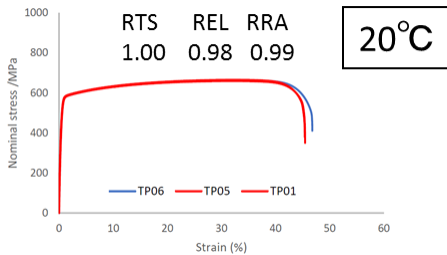


図 3 0 20°Cにおける応力-ひずみ曲線

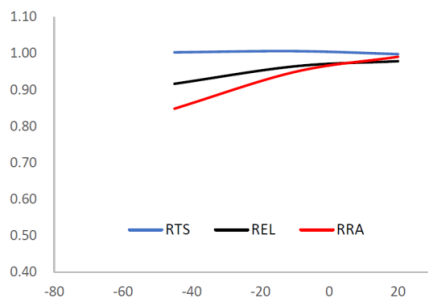


図 3 1 相対物性値に対する温度の影響

表 3 中空試験法結果まとめ

		強度 MPa	破断伸び %	絞り %
室温	不活性ガス	663.7	47.1	71.5
	水素105MPa	659.5	46.3	70.5
	水素105MPa	665.7	45.9	71.1
	相対値	1.00	0.98	0.99
-10°C	不活性ガス	723.6	52.0	70.6
	水素105MPa	728.7	49.7	67.1
	水素105MPa	727.9	50.6	66.9
	相対値	1.01	0.96	0.95
-40°C	不活性ガス	798.1	56.4	71.2
	水素105MPa	799.2	51.7	60.9
	水素105MPa	802.2	51.8	60.0
	相対値	1.00	0.92	0.85

6. 考察

これまでの研究成果を踏まえ、点検技術の全体像を構築し図 3 2 に示す。

図中四角は要素技術を意味し、赤は本研究グループで、緑は外部機関で保有する技術を示す。色の濃淡は習熟度、完成度を意味する。矢印などは各パラメータ、情報の受渡しを示す。

DIC 画像処理で亀裂を検知できれば、亀裂の位置と大まかな亀裂長さ a が分かる。これを反映した CAE タンクモデルの計算により、応力拡大係数 $K(a)$ が求まるため、破壊靱性値 K_{IC} との比較により、急速破壊判定が可能である。次に CAE 亀裂進展解析により、将来の亀裂長さ $a+da$ が算出でき、同時に将来の応力拡大係数 $K(a+da)$ により、将来の急速破壊判定も可能である。

現時点の課題は、「水素脆化」の影響を反映した、水素中の亀裂進展特性に関する情報が不足している点である。「水素脆化」を考慮する必要性は、立場により異なり、材料を入手でき試験が可能な立場である「水素タンク製造者」であれば、当所の大気中亀裂進展特性試験と、何らかの水素脆化分析を組み合わせ、水素下の亀裂進展特性を推定する方法が望ましいと思われる。一方、水素タンクを購入する運営事業者や、点検に特化した点検事業者の立場であれば、「材料特性が未知」であるため、水素脆化による強度低下を最大限見積もった安全側の考え方が望ましいと思われる。

本研究グループは、既に各種 CAE・各種試験が可能であるため、水素脆化の影響を、亀裂進展則のパラメータ c と m に反映する手法を提案する。なお、当所では、人工知能 AI、データサイエンスを活用して材料物性値予測する研究実績⁵⁾があり、これら「水素中」の特性予測にも応用したいと考えている。現在、「水素脆化」に関する国家的長期プロジェクト⁶⁾でも計算技術、データサイエンスが大きな柱となっており、これらの知見を上手く活用していきたいと考える。

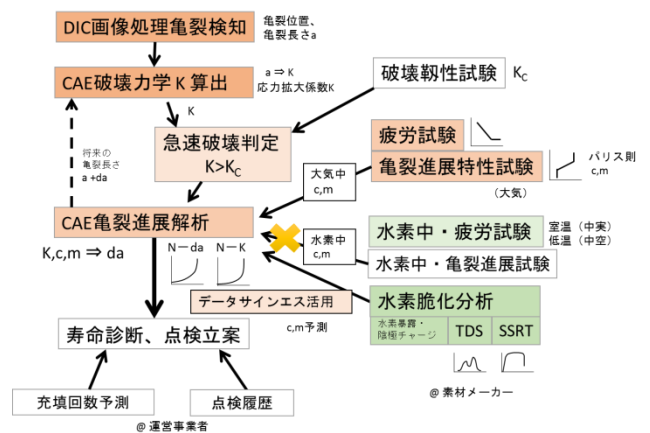


図 3 2 本研究の点検技術の全体像イメージ

7. 結言

高圧水素タンクの安全性を高めるため、CAE 破壊力学計算と水素脆化分析を実施した。さらに、第1報で報告したDIC画像処理によるき裂検知と、疲労亀裂進展試験を統合した点検手法を検討した結果、以下の成果を得た。

- ① CT試験片を対象にしたCAE解析結果より応力拡大係数を計算し、演算式の結果をほぼ一致し、妥当な計算ができることを確認した。
- ② 高圧タンクを対象にしたCAE破壊力学結果と使用材料の破壊靱性値を比較することで、亀裂を持つタンクの急速破壊の可能性を判断できることを確認した。
- ③ CT試験を対象に、本グループが疲労試験により得た亀裂進展特性試験結果に基づいたCAEき裂進展解析を行い、分離直前までの進展計算が可能であることを確認した。また、その結果は、亀裂進展特性試験と整合性があった。
- ④ CAEき裂進展解析結果を、サイクル数増加に対する応力拡大係数、亀裂進展量の変化として整理し、定常的な進展から加速的な進展へ急激な移行を確認した。これは日常点検の重要性を支持する結果である。
- ⑤ SUS316Lを対象に、水素暴露、昇温脱離分析、低ひずみ速度引張強度試験(SSRT)を実施し、基礎的データを得た。
- ⑥ SUS316Lを対象に、中空試験法の低ひずみ速度引張強度試験(SSRT)を実施し、 -40°C にて室温より強度が上昇することを確認した。
- ⑦ 前2項より、SUS316Lの水素ガス中の強度特性は大気と同等であり、水素脆化を示さないと認められることから、大気中の亀裂進展特性を用いて、亀裂進展予測や寿命予測をして差し支えないと考える。
- ⑧ 各CAE解析・各試験の関係性を点検技術の全体像としてまとめた。本研究グループは前項までの成果により、亀裂進展計算が可能であるから、水素脆化の影響を、亀裂進展則のパラメータ c と m に紐づけるアプローチを提案する。

参考文献

- 1) 松岡三郎ら. 115MPa 水素ガス中での低合金鋼SCM435とSNM439の各種強度特性および設計指針の提案. 日本機械学会論文集. 2017, Vol. 83, No. 854, p. 17.
- 2) 工藤ら. 高圧水素タンクの充填時検査技術の開発(第1報). 令和3度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2021

3) 破壊力学(第3版) - 基礎と応用 - . 森北出版, 2011, p. 356.

4) 松岡三郎ら. 大気中と 115 MPa 水素ガス中におけるアルミニウム合金の破壊靱性と厚肉円筒胴の強度設計. 日本機械学会論文集. 2020, Vol. 86, No. 882

5) 穴澤ら. AIを活用した軽量ロボット部材の開発支援. 令和3度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2021

6) 極限環境対応構造材料研究拠点 (RISME), <http://risme.imr.tohoku.ac.jp/about/> (参照 2023-2-13)