

# 超高強度薄鋼板の自動車部品適用に向けた遅れ破壊評価手法

## Delayed Fracture Evaluation Methods in Ultra-High Strength Steel Sheets for Automotive Components

松木 優一 MATSUKI Yuichi JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員  
戸畑 潤也 TOBATA Junya JFE スチール スチール研究所 薄板研究部 主任研究員  
秦 謙太郎 HATA Kentaro JFE スチール スチール研究所 マテリアルズインテグレーション研究部 主任研究員

### 要旨

JFE スチールは自動車部品への超高強度薄鋼板（超ハイテン）適用に向けて、遅れ破壊評価手法を開発した。引張強度 1 470 MPa 級鋼板に対して、自動車部品製造工程におけるせん断条件、焼き付け処理、せん断端面への成形ひずみの影響を明らかにするため、4 点曲げ試験を用いた遅れ破壊評価を実施し、これを CAE による成形解析と組み合わせることで遅れ破壊の予測可能性をモデル部品で示した。さらに、実環境を模擬したサイクル試験 HeTsACE<sup>®</sup>を開発し、水素侵入挙動と遅れ破壊の関係性を検討した。

### Abstract:

JFE Steel has developed delayed fracture evaluation methods in ultrahigh-strength steel sheets intended for automotive component applications. For TS 1 470 MPa grade steel, the effects of shearing conditions, baking treatment, and secondary forming at the sheared edge during manufacturing processes of automotive components were investigated by delayed fracture tests based on four-point bending. By combining these evaluation methods with forming analysis by CAE, we demonstrated their capability of predicting delayed fracture using model components. To simulate hydrogen absorption behavior under actual environmental conditions, JFE Steel developed a cyclic test method, HeTsACE<sup>®</sup>. This method was utilized to examine the relationship between hydrogen absorption and delayed fracture.

## 1. はじめに

超高強度薄鋼板（超ハイテン）の自動車部品適用における課題の一つとして、鋼板への水素侵入に起因して発生する「遅れ破壊」が挙げられる。一般的な自動車部品の生産工程は、プランキング時のせん断工程、プレス成形工程、塗装および焼き付け処理工程を含む。従って超高強度鋼板の遅れ破壊評価では成分や組織等の材料因子だけでなく、生産工程におけるせん断加工によるひずみや応力の発生<sup>1)</sup>、プレス成形時にひずみが付与される影響<sup>2)</sup>、焼き付け処理での組織変化<sup>3)</sup>も考慮する必要がある。さらに自動車として製品となった後も、実使用時の環境に応じて腐食することで水素が侵入することから、水素侵入影響も考慮して自動車部品への適用可否を判断する必要がある。

生産工程を考慮するという第一の課題に対して、著者らは 4 点曲げ試験片を用いた遅れ破壊評価手法を提案している<sup>1-3)</sup>。本稿の 2 章では、せん断工程、プレス成形工程、塗装および焼き付け処理工程のそれぞれの遅れ破壊への影響について、簡易的に各種浸漬試験を用いて調査した。さら

に、実自動車部品を模擬したモデル部品を作製し、前記の知見から自動車部品のせん断端面の遅れ破壊の CAE による危険度予測可能性を検証した。

水素侵入環境を考慮するという第二の課題に対して、著者らは自動車の実使用環境下における水素侵入挙動を検討した。遅れ破壊の要因となる鋼板中に侵入する水素は、主に鋼板表面で進行する腐食反応によって発生する。一般的に腐食は、一度開始すると完全に停止することではなく、周囲の環境条件の変化に応じてその速度が増減しながら進行し続ける。腐食反応によって生成する水素も環境条件の変化によって増減するため、鋼板中への水素の侵入量は時間とともに変化する。しかし、その詳細な機構については未だ解明されていない点が多く、統一的な評価基準が規格化されていない。本稿の 3 章では、実使用時の耐遅れ破壊性を再現する手法として、実環境での水素侵入挙動を模擬した遅れ破壊評価用サイクル試験（HeTsACE<sup>®</sup>: Hydrogen embrittlement Test to simulate actual corrosion environment）を開発し、その有効性を検証した。

## 2. 自動車部品の製造工程を考慮した薄鋼板の遅れ破壊評価方法

本章では自動車部品の生産工程に着目し、耐遅れ破壊特性に及ぼす影響として、2.1節ではブランクのせん断条件、2.2節ではプレス成形の成形ひずみ影響、2.3節では焼き付け処理影響について調査した。さらに、2.4節では実自動車部品を模擬したモデル部品を作製し、自動車部品のせん断端面のCAEによる遅れ破壊の危険度予測可能性を検証した。

### 2.1 遅れ破壊に及ぼすせん断条件の影響<sup>1)</sup>

本節では1470 MPa級冷延鋼板のせん断加工により生じる、端面の残留応力および格子欠陥が耐遅れ破壊特性に及ぼす影響を報告する。

図1のとおり、下刃の上に位置する板押さえで鋼板を固定した状態で上刃を降下させることでせん断加工し、せん断端面を有する短冊形の4点曲げ試験片を作製した。せん断加工後に下刃の上に残る鋼板のせん断端面（抜き残し側端面）を評価対象として、それ以外の端面は切削加工した。せん断条件の影響を調査するため、板厚に対する上下刃の隙間の割合（以下、クリアランス）を5～20%の間で変化させ、上下刃間の角度（以下、シャー角）を0～2°の間で変化

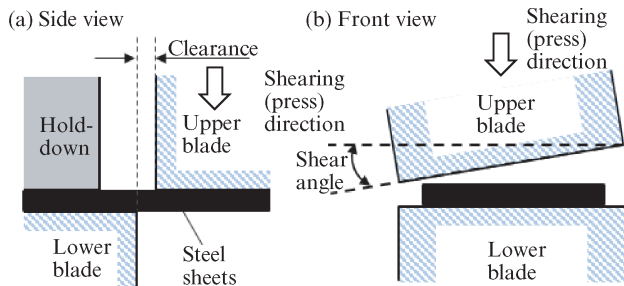


図1 せん断加工方法とクリアランス、シャー角の模式図

Fig. 1 Schematic diagram of shear method with clearance and shear angle

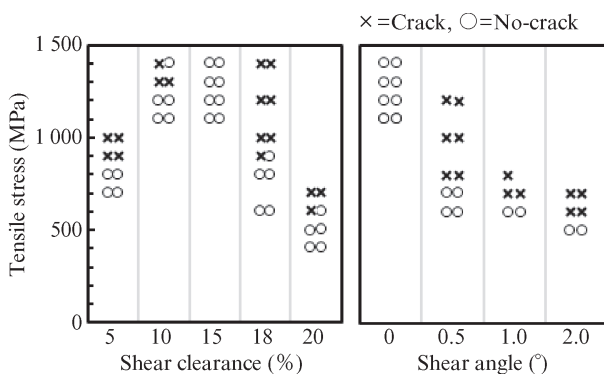


図2 種々のせん断条件での遅れ破壊試験結果

Fig. 2 Delayed fracture test results with various shear clearances and shear angles

させた。短冊形の試験片への応力負荷はせん断端面の破断面側を曲げ外とした4点曲げで実施し、遅れ破壊試験はpH7.0に調整した0.1% NH<sub>4</sub>SCN+McIlvaine 緩衝溶液中に96時間浸漬して実施した。

図2に、シャー角0°で異なるクリアランスでせん断した鋼板の遅れ破壊評価結果と、クリアランス15%で異なるシャー角にてせん断した鋼板の遅れ破壊評価結果を示す。クリアランスが15%以下では、クリアランスの増加に伴い破壊限界応力は上昇し、クリアランスが15%では負荷応力1400 MPaでも割れが確認されなかった。一方で、クリアランス15%以上では破壊限界応力が低下した。シャー角を変化させた場合には、シャー角の増加に伴い破壊限界応力が低下した。耐遅れ破壊特性には、せん断加工により生じる端面の残留応力および格子欠陥が影響することが知られている。図3に、せん断加工により生じる残留応力に及ぼすクリアランス、およびシャー角の影響を示す。シャー角を0°としクリアランスを5%から15%まで増加した場合はせん断端面の残留応力が低下する一方、クリアランスが15%以上ではせん断端面の残留応力はほとんど変化しないことが確

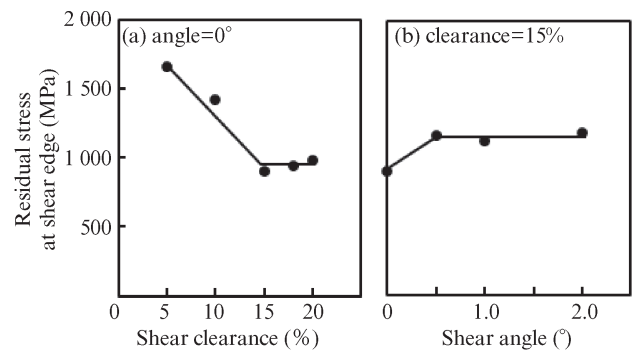


図3 せん断端面の残留応力; (a) シャー角0°でのせん断クリアランス影響, (b) クリアランス15%でのシャー角影響

Fig. 3 Residual stress at shear edge; (a) with 0° shear angle and varied shear clearances and (b) with 15% shear clearance and varied shear angles

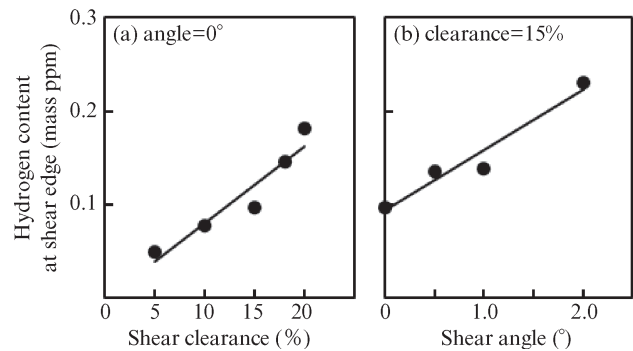


図4 せん断端面の水素含有量; (a) シャー角0°でのクリアランス影響, (b) クリアランス15%でのシャー角影響

Fig. 4 Hydrogen content at shear edge; (a) with 0° shear angle and varied shear clearances and (b) with 15% shear clearance and varied shear angles

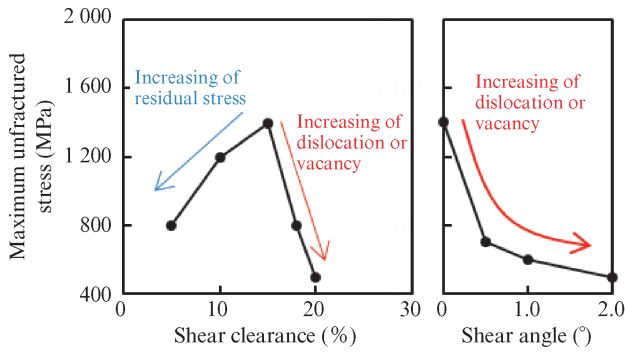


図5 シャー角とクリアランスが、遅れ破壊限界応力に及ぼす影響の模式図

Fig. 5 Schematic illustration summarizing effects of shear angle and shear clearance on maximum unfractured stress

認められた。クリアランスを15%としシャー角を0°から0.5°まで増加した場合はせん断端面の残留応力がわずかに増加し、シャー角0.5°以上ではせん断端面の残留応力はほとんど変化しないことが確認された。図4に、端面から1mm以内の領域における拡散性水素量に及ぼすクリアランスおよびシャー角の影響を示す。水素量の変化は格子欠陥の量と相関があるとされることから、クリアランスおよびシャー角の増加に伴いせん断端面の格子欠陥が増加することが確認された。

図5に、せん断条件の変化に伴う鋼板の破壊限界応力の変化とその主要因を模式的にまとめる。クリアランス15%およびシャー角0°のせん断条件を基準とし、鋼板の破壊限界応力はクリアランスとシャー角の増加に伴って低下する。

その主な原因はせん断により導入される転位や原子空孔の量の増加と考えられる。一方、シャー角0°の条件でせん断した鋼板の破壊限界応力はクリアランスを15%より小さくすることでも低下するが、その主な原因はせん断により導入される残留応力の増加と考えられる。

## 2.2 遅れ破壊に及ぼすせん断端面プレス成形の影響<sup>2)</sup>

本節では超ハイテンモデル合金薄鋼板のせん断加工により生じた端面に対して、プレス成形によるひずみを模擬し、せん断端面に成形ひずみが付与された場合<sup>2)</sup>の耐遅れ破壊特性に及ぼす影響を報告する。

厚さ1.4mmの鋼板を2.1節と同様の方法でせん断加工し、せん断端面の抜き残し側のみを有する短冊形の4点曲げ試験片と図6左に示す八角形のブランクを作製した。厳しめに評価するため、2.1節の知見を参考にせん断条件はシャー角0.5°、クリアランス10%に設定した。

遅れ破壊試験における応力負荷は前節と同様に4点曲げにより実施した。また、4点曲げ試験片とモデル部品の遅れ破壊試験は塩酸溶液に96時間浸漬して実施した。

せん断端面に対するプレス成形ひずみの導入方法は以下のとおりとした<sup>2)</sup>。引張りの成形ひずみはせん断端面を有する短冊状のサンプルに引張変形を加えることで付与した。せん断加工された18mm×100mmのサンプルを用い、端の15mmずつをクランプして引張試験機に固定し、標点間距離50mmの伸び計でひずみを測定しながら短冊状のサンプルに単軸引張変形を加えた。圧縮の成形ひずみは八角形ブランクの絞り成形により付与した。供試鋼を172mm×232mmの矩形に予加工し、シャー角0.5°、クリアランス10%に設定して図6左に示すようにせん断加工して、評価端面がせん断端面抜き残し側となる八角形ブランクを作製した。このブランクを図6右に示す円筒深絞り金型で深絞り加工することにより100mmの長辺に単軸圧縮の成形ひずみを与えた。板押さえ力はフランジしわを抑制できる10tonfに設定した。深絞り加工後、長辺のせん断端面圧縮部が4点曲げ中央の応力負荷部になるように、18mm×74mmの試験片をフランジ部より切り出した。非評価端面は研削加工し遅れ破壊を抑制した。

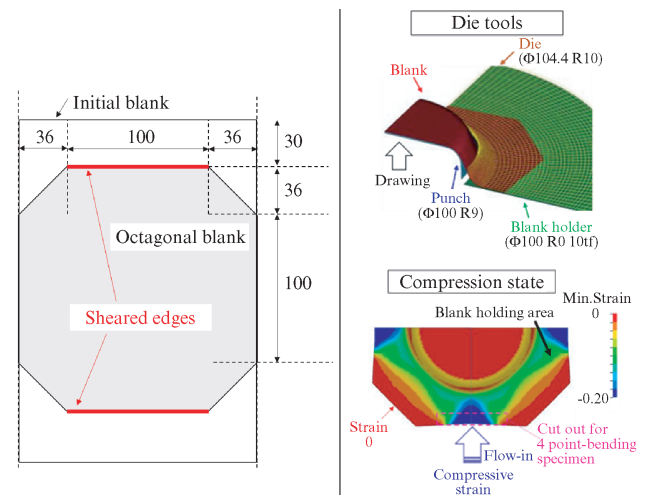


図6 せん断加工による八角形ブランク（左）と深絞り成形による圧縮成形付与方法（右）

Fig. 6 Octagonal blank manufactured by shearing process (left), and compressive secondary forming by deep drawing (right)

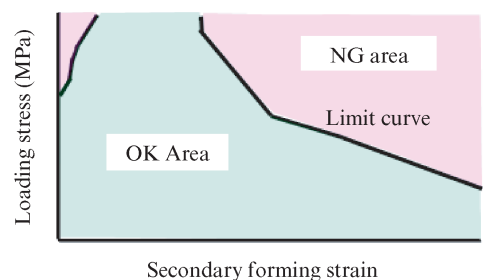


図7 せん断端面への成形ひずみ量と負荷応力による遅れ破壊限界線

Fig. 7 Delayed fracture limit curve with secondary forming strain on sheared edge and loading stress

図7は成形ひずみ量と、遅れ破壊発生の有無の境界となる負荷応力の関係を模式的な限界線図として示したものである。遅れ破壊は、成形ひずみ量が小さく負荷応力が高い領域と、成形ひずみ量が大きく負荷応力が高い領域の二種類の領域で発生した。この線図から成形ひずみ量と負荷応力によって、遅れ破壊が発生しない安全領域と、遅れ破壊が発生し得る危険領域を整理できた。

少量の成形ひずみで遅れ破壊が改善し、一方で過度の成形ひずみで遅れ破壊が悪化する原因は、既往の報告<sup>2)</sup>での考察と同様に、低ひずみ域ではせん断端面の応力緩和が生じる一方で、高ひずみ域ではせん断端面の凹凸や成形ひずみによるダメージが蓄積するためと考えられる。

図7に示す成形ひずみと残留応力の限界線を活用することで、プレス成形部品の遅れ破壊危険度を予測できると考えられる。2.4節ではモデル部品を用いて検証した結果を述べる。

### 2.3 遅れ破壊に及ぼす焼き付け処理の影響<sup>3)</sup>

本節では1470 MPa級冷延鋼板への焼き付け処理が耐遅れ破壊特性に及ぼす影響を報告する。短冊形の4点曲げ試験片は、せん断加工影響を除外するため、端面をすべて研削仕上げとした。試験片への応力負荷は4点曲げで実施した。遅れ破壊試験は0.1% NH<sub>4</sub>SCN+McIlvaine 緩衝溶液中でpH5.0に調整し96時間浸漬して、N数を2として実施した。焼付処理は4点曲げ応力負荷後に実施し、170℃に到達後に20分保持とした。

図8に、焼き付け処理を実施しない4点曲げ試験片(以下、未処理材)と焼き付け処理を実施した4点曲げ試験片(以下、焼き付け処理材)の遅れ破壊試験結果を示す。焼き付け処理材の破壊限界応力は未処理材に対して上昇しており、焼き付け処理により耐遅れ破壊特性が改善した。

未処理材と焼き付け処理材のTDA(Thermal Desorption Analysis)により得られた水素放出曲線からは、いずれの試験片でも80℃をピーク温度とする水素放出曲線が確認され、水素の分布位置にはほとんど差がなかった。一方で水素放出量は未処理材が0.79 ppm、焼き付け処理材が0.59 ppmと

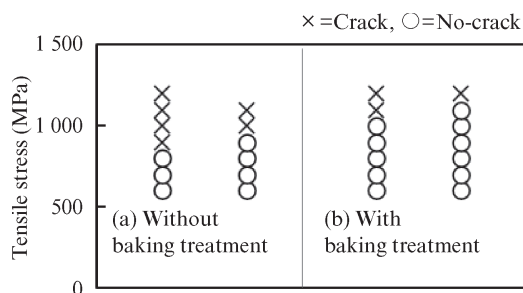


図8 遅れ破壊試験結果; (a) 未処理材 (b) 焼き付け処理材  
Fig. 8 Delayed fracture test results of bending specimens without (a) and with (b) baking treatment

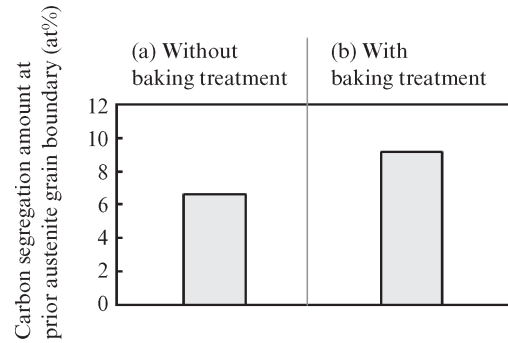


図9 旧オーステナイト粒界の炭素偏析量; (a) 未処理材 (b) 焼き付け処理材

Fig. 9 Carbon segregation amount at prior austenite grain boundary of specimens without (a) and with (b) baking treatment

なり、焼き付け処理により侵入水素量は減少した。

図9に、未処理材と焼き付け処理材の旧オーステナイト粒界の炭素偏析量をSTEM-EDSにより調査した結果を示す。焼き付け処理により旧オーステナイト粒界の炭素偏析量が増加することが確認された。焼き付け処理による耐遅れ破壊特性の改善メカニズムは、鋼板への侵入水素量の低減、および粒界への炭素偏析量の増加により旧オーステナイト粒界への水素侵入が抑制され、同粒界での破壊が抑制傾向になったことによるものと考えられる。

### 2.4 モデル部品による遅れ破壊の危険度予測の検討

自動車部品の遅れ破壊危険部位を事前に予測することは、材料選定や生産準備の短縮化に非常に有用である。本節では前節までの知見を活用した、CAEによる遅れ破壊危険度の予測方法について述べる。

2.2節と同じ薄鋼板を用いて、第一工程のドロー成形と第二工程のフォーム成形により図10に示すモデル部品を作製した。この部品には実部品を想定した形状、①凹み部(Concaved)、②絞り圧縮部(Compressed)、③スポット座面模擬の引張部(Stretched)、④曲げ部(Bended)を含めた。

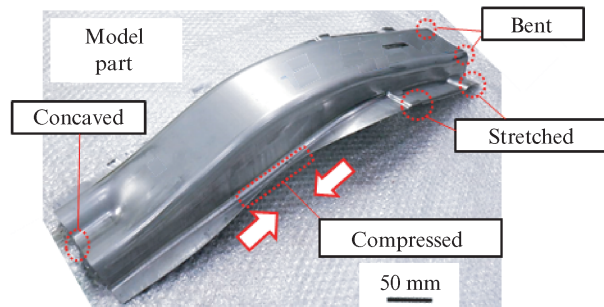


図10 自動車アンダー部品を模擬した遅れ破壊評価用超ハイテンモデル部品(部品A)

Fig. 10 Ultra-high strength steel model (part A) simulating automobile under parts for evaluation of delayed fracture

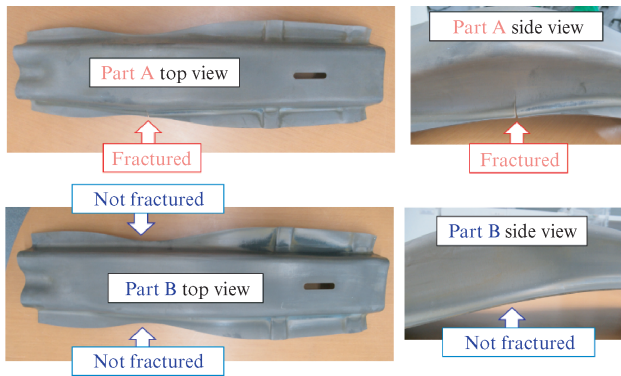


図 11 モデル部品 A と B の遅れ破壊試験結果

Fig. 11 Delayed fracture test results of model part A &amp; B

この部品の外周は blanks せん断加工時の抜き残し側で、せん断条件は 2.2 節と同様シャープ角 0.5°、クリアランス 10% に設定し、厳しめに評価するために 2.3 節を参考に取って焼き付け処理は行わなかった。さらに blanks の短手の幅を変化させることで、強圧縮部の応力が比較的高い部品 A と、比較的低い部品 B の 2 種を作製した (図 10 は部品 A)。

遅れ破壊危険度の検証のため、部品 A と部品 B を 2.2 節と同じ塩酸浸漬の遅れ破壊試験に供した結果が図 11 である。遅れ破壊は部品 A の②絞り圧縮部 (Compressed) のみで発生し、部品 B のいずれの外周端面からも発生しなかった。

この遅れ破壊試験結果の妥当性と予測可能性を検証するため、部品 A と部品 B についてせん断端面の成形ひずみ量と成形の残留応力を FEM 解析により CAE 計算した。

この計算結果を前記の図 7 の遅れ破壊発生境界と比較することで、モデル部品の各部位でのせん断端面の遅れ破壊危険度を予測できるか検討した。CAE 計算したモデル部品の成形ひずみ量と成形の残留応力が図 7 の危険領域 (NG area) に属する部位は遅れ破壊の危険度が高く、安全領域 (OK area) に属する部位は遅れ破壊の危険度が低いと推測される。

CAE 計算した成形ひずみ量と成形の残留応力を図 7 の遅

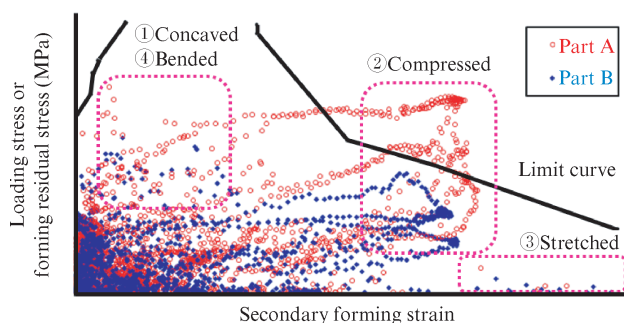


図 12 部品 A と B の成形 CAE 結果と遅れ破壊限界線の比較による遅れ破壊予測の検討

Fig. 12 Comparison between delayed fracture limit curve and forming CAE results of model part A &amp; B for fracture prediction

れ破壊限界線と比較したものが図 12 である。モデル部品の代表的な形状箇所が含まれるプロット領域も併せて示した。この比較によると、部品 A の②絞り圧縮部 (Compressed) のみ遅れ破壊が発生し、部品 B では遅れ破壊が発生しないことが予測された。この予測は図 11 の遅れ破壊評価結果と一致しており、このモデル部品では遅れ破壊評価と成形 CAE を組み合わせることで、遅れ破壊の危険度とその発生部位を予測できたと考えられる。

2 章の内容から、自動車部品の生産工程を考慮した遅れ破壊評価を実施し、成形 CAE も援用することで、自動車部品での遅れ破壊危険度を予測・低減できることが示唆された。

### 3. 実環境を模擬したサイクル試験による材料の耐遅れ破壊性評価

前章までは自動車部品の量産工程が遅れ破壊に与える影響について検討した。続く本章では、自動車の実使用環境下における水素侵入挙動について検討する。

本章では、実使用時の耐遅れ破壊性を再現する手法として、実環境での水素侵入挙動を模擬した遅れ破壊評価用サイクル試験 (HeTsACE<sup>®</sup>: Hydrogen embrittlement Test to simulate actual corrosion environment) を開発し、その有効性を検証した結果を報告する。

供試材として、引張強度が 1470 MPa 級の冷延鋼板をクリアランス 5%、シャープ角 0.8° の条件でせん断後、抜き残し側端面を残して研削加工し、30 mm×100 mm の大きさとした後、治具を取り付ける穴を空け、曲げ角 90°、曲げ半径 7 mm の条件でプレス加工した。さらに、ボルト締め付けにより最大開き部を所定量狭めることで、試験片の V 曲げ加工部の凸側表層に引張応力を負荷した。

また、鋼板中への侵入水素量測定には、電気化学的水素透過法を活用した侵入水素量モニタリングシステム<sup>4)</sup>を使用した。V 曲げ加工時に頂点部に導入されるひずみを参考に、同程度のひずみを冷間圧延により鋼板に付与した。この鋼板の水素透過電流を連続的に測定することで、侵入した水素量を推定した。詳細は引用文献を参照されたい<sup>4)</sup>。

V 曲げ試験片および侵入水素量モニタリングシステムを、実環境を模擬した遅れ破壊評価用サイクル試験 (HeTsACE) に供し、供試材の耐遅れ破壊性と水素侵入挙動を評価した。

HeTsACE は、図 13 に示す湿度条件を繰り返す試験槽内で 9 週間実施した。試験温度は 10°C、30°C もしくは 50°C で一定の 3 条件とし、それぞれの温度条件で NaCl 水溶液の噴霧により試験片に付着する塩化物量を 10 g/m<sup>2</sup> とした。さらに、試験温度が 30°C の条件では、付着する塩化物量が 0.3 g/m<sup>2</sup> と 3 g/m<sup>2</sup> の条件を追加した。一週間に 2 度、湿度 35% 一定の工程で鋼板表面の塩化物を除去する目的で水洗し、再度同じ条件で NaCl 水溶液を噴霧して試験を再開した。

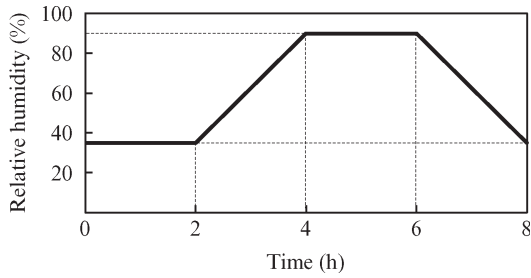


図 13 HeTsACE<sup>®</sup>の湿度変化条件  
Fig. 13 Dry-wet cycle of HeTsACE<sup>TM</sup>

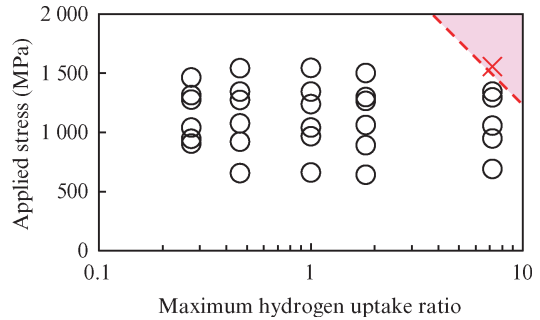


図 16 1470 MPa 級冷延鋼板の遅れ破壊マップ

Fig. 16 Relationship between maximum hydrogen uptake ratio and delayed fracture of 1470 MPa grade cold rolled steel sheet

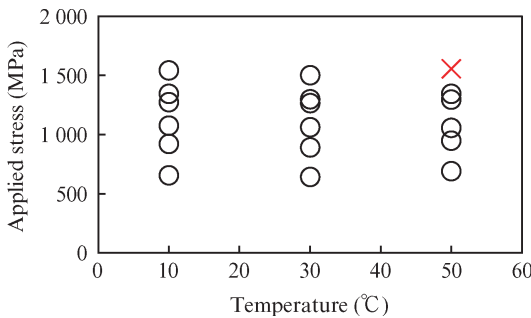


図 14 塩化物付着量 10 g/m<sup>2</sup> の HeTsACE<sup>®</sup>における耐遅れ破壊性の温度依存性

Fig. 14 Relationship between temperature and delayed fracture susceptibility in HeTsACE<sup>TM</sup> with 10 g/m<sup>2</sup> NaCl deposition

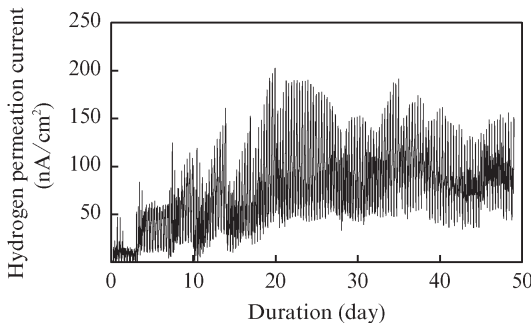


図 15 試験温度 30°C、塩化物付着量 3 g/m<sup>2</sup> の水素侵入挙動

Fig. 15 Hydrogen absorption behavior in HeTsACE with 30°C and 3 g/m<sup>2</sup> NaCl deposition

図 14 は、試験温度の異なる HeTsACE で負荷応力を変化させた V 曲げ試験片の遅れ破壊評価結果である。図中の○プロットは、試験期間内に遅れ破壊が発生しなかった水準、×プロットは、試験期間内に遅れ破壊が発生した水準であることをそれぞれ示している。試験温度により遅れ破壊の発生しうる応力水準は変化した。

図 15 は、試験温度が 30°C、付着塩分量が 3 g/m<sup>2</sup> の条件で実施した HeTsACE で侵入水素量モニタリングシステムが計測した水素透過電流の時間変化である。水素透過電流の値が大きいくほど鋼中に侵入する水素量が多いことを示す。

短期的な時間変化の観点で見ると、水素透過電流は、相

対湿度が約 60% であるときに極大値を示す形で湿度変化に対応した周期的な増減を繰り返した。鋼板の表面に NaCl が付着した状態では、相対湿度が約 60% に達した際に潮解した NaCl を含む水膜が形成する<sup>5)</sup>。形成した水膜の厚さは、相対湿度が上昇すると厚くなり、相対湿度が低下すると薄くなるということが知られている。大気腐食において、腐食界面における Cl<sup>-</sup> イオンの濃縮が Fe<sup>2+</sup> イオンの酸化反応を促進することで局所的な pH が低下し、この pH の低下が水素の侵入を促進する<sup>6)</sup>。相対湿度が約 60% であるとき、鋼板表面の水膜が最も薄くなり、Cl<sup>-</sup> イオンの濃縮が生じたため、周期的に相対湿度が約 60% であるときに極大値を示したと考えられる。

また、長期的な時間変化の観点で見ると、水素透過電流は、試験期間の経過とともに増加するが、ある期間が経過すると最大値を示した後やや減衰し停滞する挙動を示した。試験期間中の水素透過電流の最大値は、付着塩分量が 10 g/m<sup>2</sup> の条件で試験温度が 10°C、30°C、50°C と異なる場合、それぞれ 40 nA/cm<sup>2</sup>、270 nA/cm<sup>2</sup>、3 121 nA/cm<sup>2</sup> であり、試験温度が高いほど増加した。試験温度が 30°C の条件で、付着塩分量が 0.3 g/m<sup>2</sup>、3 g/m<sup>2</sup> の場合、水素透過電流の最大値は、それぞれ 180 nA/cm<sup>2</sup>、202 nA/cm<sup>2</sup> であり、付着塩分量が多いほど増加した。試験開始から最大値を示すまでの期間では、上述の Cl<sup>-</sup> イオンの濃化により侵入水素量が増加していったと考えられるが、試験後期には腐食の進行に伴い安定錆が形成して濃化が抑制され、侵入水素量が減衰・停滞したと考えられる。

大気腐食環境下における冷延鋼板の水素透過電流は、図 15 に示すように、試験期間中に条件に応じた最大値を示して、その後停滞する傾向を示した。すなわち、冷延鋼板が大気腐食環境下で遅れ破壊を生じるか否かは、材料の応力状態に応じた遅れ破壊が生じる限界の水素量を、最大侵入水素量が上回るかで判断できる可能性がある。

図 16 に、試験温度の異なる HeTsACE で実施した 1470 MPa 級冷延鋼板の遅れ破壊評価と侵入水素量測定結果から得られた、遅れ破壊限界応力と最大侵入水素量比依

存性を示す。ここで、最大侵入水素量比とは、各環境条件における侵入水素量の最大値と試験温度 30℃、塩化物付着量 3 g/m<sup>2</sup> における侵入水素量の最大値の比で計算される。本材料を実環境で使用することを想定した場合、負荷応力と侵入水素量の最大値をこの図と比較することで、材料の使用限界までの裕度を定量的に評価できる。

#### 4. おわりに

- ・超高強度鋼板の自動車部品適用のため、自動車部品の製造工程と実使用環境を考慮した遅れ破壊評価技術を開発した。
- ・せん断条件、せん断端面への成形ひずみ影響、焼付塗装処理による熱影響を考慮した遅れ破壊評価を実施した。
- ・モデル部品では前記の遅れ破壊評価と成形 CAE と組み合わせることで遅れ破壊の危険度を予測することができた。
- ・自動車の実使用環境での腐食を模擬するため、遅れ破壊評価用サイクル試験 (HeTsACE<sup>®</sup>: Hydrogen embrittlement

Test to simulate actual corrosion environment) を提案した。

- ・これらの評価技術を活用し、超高強度鋼板を実車に適用した際の遅れ破壊危険度をより現実的に評価することにより、遅れ破壊の危険度を予測・低減できることが期待される。

#### 参考文献

- 1) 戸畑潤也, 木村英之, 金子真次郎, 松木優一, 新宮豊久. 超高強度薄鋼板の耐遅れ破壊特性に及ぼすせん断端面の影響. 自動車技術会論文集. 2024, vol. 55, no. 1, p. 193-198.
- 2) 松木優一, 戸畑潤也, 新宮豊久, 木村英之, 塩崎毅. せん断端面の遅れ破壊特性に与える端面二次成形の影響について. 公益社団法人自動車技術会 2025 年秋季大会学術講演会講演予稿集. 2025, 20256058
- 3) 戸畑潤也, 木村英之, 松木優一, 新宮豊久, 池田幸平, 松原和輝, 友澤方成. 超高強度薄鋼板の耐遅れ破壊特性に及ぼす塗装後焼付け処理の影響. 自動車技術会論文集. 2025, vol. 56, no. 2, p. 274-279.
- 4) Ootsuka, S.; Fujita, S.; Tada, E.; Nishikata, T.; Tsuru, T. Evaluation of hydrogen absorption into steel in automobile moving environments. Corrosion Science. 2015, vol. 98, p. 430-437.
- 5) 押川渡, 篠原正, 元田慎一. 強電解質が吸水してできる水膜組成と水膜厚さの推定. 材料と環境. 2003, vol. 52, no. 6, p. 293-298.
- 6) Akiyama, E.; Matsukado, K.; Wang, M.; Tsuzaki, K. Evaluation of hydrogen entry into high strength steel under atmospheric corrosion. Corrosion Science. 2010, vol. 52, p. 2758-2765.