

連携記事

実用化が進む自動車用超ハイテン材

Progress in Ultra-high Strength Steels for Automotive Body Structure Applications

高橋 学

Manabu Takahashi

新日鐵住金(株) 技術開発本部
フェロー

1 緒言

燃費向上への強い要求と規制強化への対応は、近年の自動車分野における最も重要な活動の一つと言える。1970年代に米国で設定された企業平均燃費規制であるCAFE (Corporate Average Fuel Economy) を代表として、当初は石油ショックを契機とした省エネルギーの観点から、また、後には地球温暖化問題と連動しながらのCO₂排出削減を目的の一つとして燃費改善の為に技術開発が進められてきた。1994年に評価試験が義務付けされた車体の衝突安全性に関する規制強化がこの動きを一層加速したと言える。

燃費向上を目指した動きは、エンジンをはじめとした各種駆動系部品でのエネルギー損失低減とともに、新たな動力源の導入ハイブリッド自動車や電気自動車等の市場導入も加速している。しかしながら、動力源が変化した場合でも省エネルギーは重要な意味を持ち、現在進められている各種燃費向上の為に技術開発の多くは有効な手段として存続すると考えられる。車体の軽量化は直接的に自動車走行時の消費エネルギー削減につながることから重要な燃費向上対策の一つととらえられており、アルミ合金、マグネシウム合金、樹脂等の低比重材料の採用とともに、鋼材の強度や特性を向上させることによる薄肉化が進められている。

このような背景のもと、自動車車体に適用される高強度鋼板(ハイテン)の割合は新しい車種の導入毎に年々向上している。更に特筆すべきは、使用される鋼板強度レベルも上昇している点である。従来440MPa級の鋼板が多用されていた部位にも、衝突特性の向上を目的に590MPaが、更に最近では980MPaやそれ以上の強度のハイテンが適用される様になっている。2002年に自動車用材料共同調査研究会で調査された結果も非常に興味深い¹⁾。自動車会社へのアンケートの集約として報告された結果には、外板、骨格部品、足回り部品等における鋼板強度の推移(各社回答の平均値)と将来の

予測(2002年時点の予測値としての2012年での強度レベル)が示されている。この中で、センターピラーやサイドレール等の側突対応部品を見てみると、2012年時点での期待される強度レベルの5社平均値が約1000MPaであり、センターピラーに関しては、最大値は1200MPaとなっている(図1)。現時点でのハイテン化状況を見てみると、この様な側突部品に980MPa級ハイテンが実際に適用されており、一部1180MPa級の適用がプレスリリース²⁾されている点から、10年前の期待通りにハイテン化が進展したことは特筆に値する。

このような着実なハイテン化の背景には、鋼板そのものの加工性向上に加えて、ハイテン化で不可避免的に劣化するプレス成形性を補うため、CAE (Computer Aided Engineering) による成形予測技術の進歩や新たなプレス加工法の開発を挙げることができる。また、溶接技術の進歩も忘れてはならない重要なポイントである。

2 ハイテン化の意義

自動車各部品は、その部位によって担うべき役割が異なる

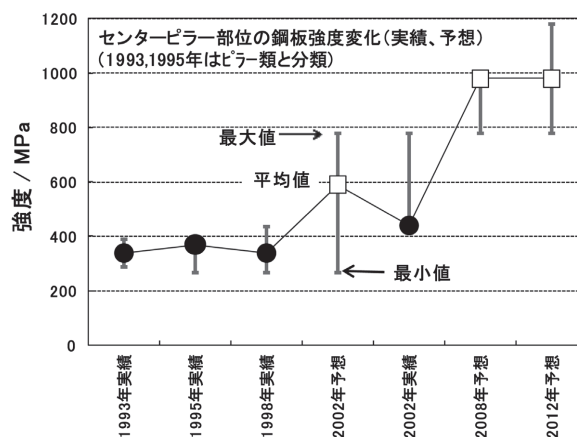


図1 ハイテン化動向についてのアンケート結果例(2000CCクラス)

る。各部位の強度特性と、板厚以外の材料面からの支配因子を表1に示した。この中で特に衝突安全性等で問題となる部品の圧潰強度は材料の強度の影響を強く受けることから、鋼板のハイツ化が最も効果的に利用できる分野である。

衝突時の部品の変形速度は、ひずみ速度で1000/秒 (JIS規格による材料評価試験の約百万倍) にも達すると言われている³⁾。鋼材は変形速度の上昇とともに大きく強度が上昇することから、強度の変形速度 (ひずみ速度) 依存性を評価することが重要である。この高速での変形特性評価方法はそれまでに報告されてきた種々の試験方法を包含する形で2010年 (ISO 26203-1)、2011年 (ISO 26203-2) に規格化が成立した⁴⁾。

落錘試験装置を用いて行ったハット型断面を持つサンプルの軸圧潰及び曲げ圧潰試験の結果から、衝撃吸収エネルギーは鋼板強度の向上とともに上昇する事が分かる (図2)。この効果を利用することで鋼板の薄手化、即ち軽量化が可能となる。ハイツ適用の効果については実際の部品や簡易形状サンプルの落錘試験に加えて、CAEによる材料置換効果や最適形状検討が進められている。超ハイツの領域ではないが、単純なハット部材の軸圧潰に対するハイツ適用による軽量化検討の例を (図3) に示した。形状や構造、更には剛性等から、常にこの様な効果が期待されるわけではないが、ハイツ適用の最大の魅力である。衝突時のエネルギー吸収特性にはプレス加工によって導入されたひずみや、その時の板厚減少、塗装後の焼付け硬化等も影響することから^{5,6)}、CAE検討時にはこれらの効果も取り込んだ精度の高い材料構成式が必要となる。また、最近では実際の車体の衝突時に発生する母材やスポット溶接部の破断による自動車車体の変形挙動やエネルギー吸収挙動の変化についても検討が可能となっている。母材の破断は後述する応力FLDを適用することでプレス加工の影響も考慮した破断挙動の予測が検討されている⁷⁾。また、スポット溶接部の破断挙動は、鋼板材質に加えて、板厚、溶接条件、形状、荷重の入力条件等多くの因子の影響を、ナゲット周りの変形拘束を考慮した応力集中係数を用いて表現する方法が報告されている⁸⁾。この衝突特性解析は後述のプレス成形解析とともにCAE技術適用の成功例の一つと言える。

表1 自動車を構成する車体部品に必要な強度特性と材料要因

部品		必要特性				
		張り剛性	耐ゲージ性	部材剛性	耐久強度	動的圧潰強度
外板	ドアウレ等	重要	重要			
内板	フロント等	重要		重要	要	要
構造部材	リアウレ等			重要	要	要
	フロントサイドメンバー			重要	要	重要
	サイドシル等			要	要	重要
床下部材	トリアードバー等			要	要	重要
床下部材	サスペンションアーム			重要	重要	
床下部材	ハイデンズ等			重要	重要	
板厚以外で特性を支配する材料因子		ヤング率	降伏強度	ヤング率	強度	強度

3 衝突安全性向上に貢献するハイツ

衝突時の乗員保護のためには、乗員の存在空間を守る事 (特に側突) と、衝突時に乗員に伝わる衝撃エネルギーを減少させる事 (前突や後突) が必要である。この為に、キャビンまわりは極力強くして変形を少なくし、前・後部は構造部材が塑性変形することによって限られた変形領域内で効率的に衝撃エネルギーを吸収する様に設計される。この特性を評価する為に自動車アセスメント (JNCAP) が導入され (図4)⁹⁾、その結果は公開されている。以下ではこの様な衝突対応部位に適用される代表的なハイツとその特徴について概説する。

3.1 冷間プレス用各種ハイツとその特徴

鋼板はほぼ全ての場合にプレス成型によって部品形状に加工されることから、ハイツ化で第一に問題となるのはプレス成形性の劣化である。超ハイツでは深絞り成形ができない為に、張り出し成形性の指標である延性と伸びフランジ成形等

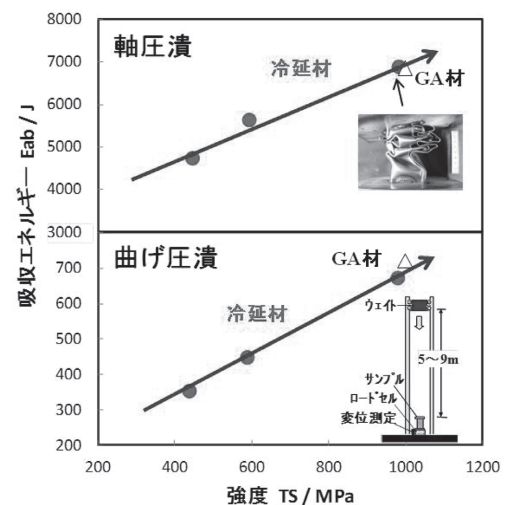


図2 圧潰吸収エネルギーの鋼板強度依存性

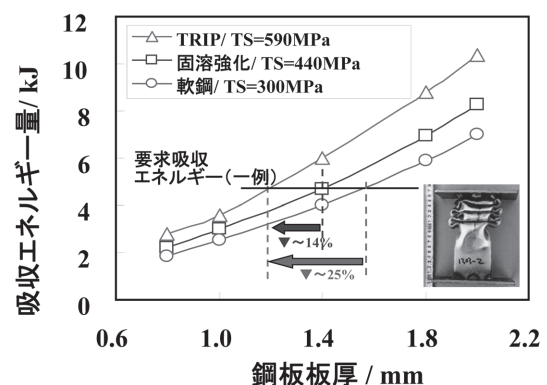


図3 軸圧潰部品へのハイツ適用による軽量化検討例

の切断端部の成形性の指標となる穴広げ性、更には所望のコーナー R を達成する為の曲げ性が重要な成形性の指標となる。

プレス成形性に優れたハイテンとして最も広範囲に利用されているのが DP (Dual Phase) タイプの鋼板である。DP 鋼は従来 2 相域からの急冷によって得られるフェライトとマルテンサイトの 2 相組織がその起源ではあるが¹⁰⁾、現在ではベイナイトを含む場合等でも DP 型と呼ばれる事が多く、いわゆる複合組織鋼を指す場合もある。DP 鋼は軟質のフェライトが鋼板全体の延性を確保し、硬質マルテンサイトによってその強度が担保される。初期の DP 鋼研究でも、未変態オーステナイト (残留 γ) の存在が知られており、一部ではこの残留 γ による延性向上が議論されている¹¹⁾。この残留 γ の働きをより顕著にしたものが低合金 TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼である。Si 等を添加し、400℃ 近傍でのベイナイト変態を利用することによって未変態オーステナイトを安定化し、加工誘起マルテンサイト変態を利用して大きな均一伸びを達成している。この様な鋼は高延性ではあるが、一般的には穴広げ性や曲げ性には劣るとされている。これに対して、より均一なミクロ組織 (例えばベイナイト単相やベイナイト+マルテンサイト等) にする事で穴広げ性は改善できるが、延性は劣化する。この様に、延性と穴広げ性は一般的に相反する特性と理解されており、部品形状に合わせて延性もしくは穴広げ性に優れた鋼板が選択される。

超ハイテンのプレス成形性向上においても、上記 DP 鋼や低合金 TRIP 鋼の考え方が適用されており、例えば 980MPa 級の冷延鋼板では図 5 で○印で示す様な 3 種類の特徴的なハイテンが開発されている^{12,13)}。高延性型はフェライトとマルテンサイトの混合組織で比較的複雑形状の部品成形への張出し成形や絞り成形が可能となる。しかしながら穴広げ性等の局所変形能は低いため、この様な特性が必要な場合には均一組織に制御された高穴広げ型が有利である。これらの中間に位置するのがバランス型であり、軟質組織の硬度を高め、硬質組織との硬度差を小さくすることで、延性を確保しながら

穴広げ性や曲げ性を向上させている。

これに対し、穴広げ性や曲げ性を極力維持しながら延性を向上させる為に、ベイナイトを主相とした低合金 TRIP 鋼 (冷延) が提案されている (図 5 の□印¹⁴⁾)。主相が比較的延性に乏しいベイナイトである為に、高延性型ほどの延性は確保できていないものの、延性と穴広げ性・曲げ性の両立が必要な部品への適用が期待される。一方、低合金 TRIP 鋼の特徴を十分に発揮する為にフェライト+ベイナイトを主相とした 980MPa 級の低合金 TRIP 型冷延ハイテンも報告されており、穴広げ性は低いものの、20% と言う大きな延性を持つハイテンとなっている (図 5 の○印¹⁵⁾)。2002 年にベルギー開催された低合金 TRIP 鋼に関する国際会議でも種々報告されている様に、980MPa 級でも鋼中炭素量を増加した系でより高延性の鋼板の研究成果も報告されている¹⁶⁾。しかしながら、スポット溶接性を確保する為には炭素量を 0.2 重量% 程度以下の比較的低位に限定する必要があり、実用的には 20 ~ 25% 程度の伸びが現実的に達成可能なレベルと考えられる。今後の開発の方向性は例えば図 5 中のハッチング領域の方向であり、この為には延性や穴広げ性の支配因子の更なる解明と最適化が必要と思われる。

ベルトラインより下部の構造部品では防錆性確保の為に合金化溶融亜鉛めっき (GA) 化が要求される。DP 型の超ハイテンでは GA 化は達成されており、高延性型の冷延 980MPa 級ハイテンと同等の成形性を持つ合金化溶融亜鉛めっき (GA) DP 型ハイテン¹⁷⁻¹⁹⁾ が報告されている。一方、より良好な延性を示す低合金 TRIP 型の超ハイテンの場合、延性発現の主因である安定な残留 γ を十分な量確保する為に Si が添加される場合には、Zn の濡れ性や合金化が困難となり、GA 化は容易ではない。これに対し、合金元素を調整することで 590 及び 780MPa 級の低合金 GA-TRIP が開発され、リアフレームに適用することで約 10% の軽量化を達成した結果が報告されている²⁰⁾。TRIP 現象も利用していると考えられる高延性で高穴広げ性を示す GA980MPa 級ハイテン、低合金

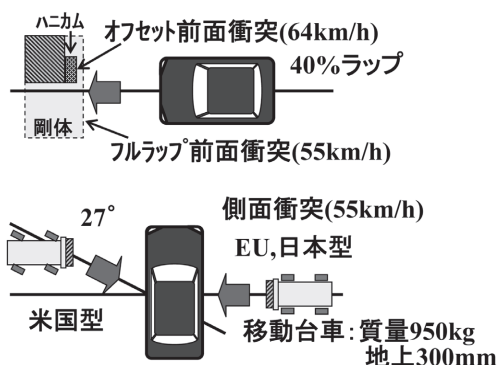


図4 自動車衝突特性評価方法

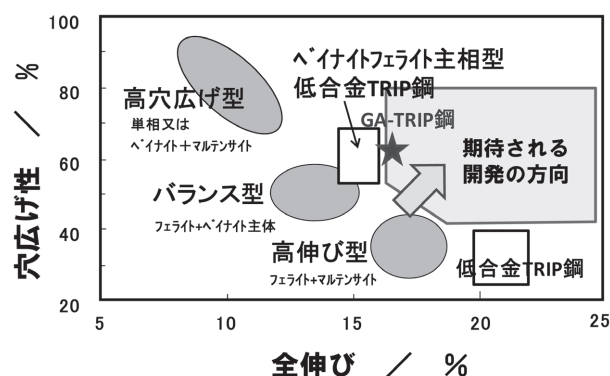


図5 延性と穴広げ性バランスが異なる各種980MPa級ハイテン

TRIP型と同等の延性を示す高延性GA980ハイテン等も報告されており(図5の★印)¹⁹⁾、防錆性も具備した上で上述の様な更なる良加工性へ開発が進められていることが伺える。

また、この様な超ハイテンでは曲げ性も重要な成形因子であり、角部の曲げRを小さくすることで衝突エネルギー吸収量が増加することが報告されており¹⁷⁾、制約された空間で断面積を稼ぐためにも重要となる。曲げ性は曲げ外面の大変形での割れであり、機械的性質以外にミクロ組織や結晶方位の異方性や変動にも影響されると考えられる。980MPa級では90°のV字曲げ試験で割れ発生限界の曲げRが板厚の1倍以下となるような良好な曲げ性を示すハイテンが報告されている^{19,21,22)}。また、ランダムに測定した微小硬度のパラツキの小ささが良好な曲げ性の原因の一つと報告されている²¹⁾。この様な曲げ性に優れた超ハイテンでは炭素含有量が比較的低位に制御される場合が多いため、良好なスポット溶接性が確保されている^{17,19,21,23,24)}。

さらなる高強度化の動きとして、複雑形状部品への1180MPa級ハイテンの適用も始まっている。最適な成分設計と製造プロセスにより、材料の組織を極限まで微細化させる技術を確立し、硬質相・軟質相の最適な組織分率を持った1180MPa級複合組織を開発したと報告され、延性を確保する為のミクロ組織制御がなされていることが伺える。この1180MPaハイテンは冷間プレス成形により車体のセンターピラーレインフォース、サイドルーフレール、フロントルーフレールなどの車体構造部材に適用される予定である²⁾。車体骨格部品へのハイテン適用はまさにGPaの世界に入っていることが実感できる。

これら低合金鋼と少し異なる開発ルートにあるのがTWIP(Twinning Induced Plasticity)鋼である²⁵⁾。TWIP鋼とは、例えば0.6～0.8wt%C鋼に12～20wt%のMnを添加し、塑性加工中のTwinningによる加工硬化を利用することで、1000MPa以上で50%程度以上の伸びを持つ高延性ハイテンである。実際に車体構造に適用された例は少ないが、バンパー補強材に適用することで軽量化を達成した例が報告されている²⁶⁾。TWIP鋼はMn添加量が多い為に製造コスト高や難製造性等の欠点があるため、最近ではMn添加量を10wt%以下まで低減し、プロセス条件を工夫することで良好な強度ー延性バランスを発現する第三世代鋼板についても報告されている²⁷⁾。製造プロセスや化学成分最適化等の工夫による低コスト化の必要が強く要求されるが、成形性としては魅力ある将来の材料と言える。

3.2 熱処理硬化型の高強度部品製造技術

冷間プレスを前提とした自動車部品の高強度化はプレス成形性を劣化させるが、必ずしも材料開発・改善だけで解決

できるわけではない。冷間プレス成形時の課題は、鋼板の成形性に起因する割れやしわの発生、形状凍結性、プレス荷重の上昇、打抜きやトリミング時も含めた金型寿命等があげられる。この中で、形状凍結性やプレス荷重の問題を解決する一つの方法として提案されたのが、熱間でプレス成形するホットスタンプ技術である。図6にホットスタンプの工程を示した。900℃程度まで加熱された鋼板はプレス機の金型内で冷却されて焼き入れられるので、鋼板の化学成分で決まるフルマルテンサイト強度(例えば0.22wt%炭素の場合には約1.5GPa)の部品を得ることができる。高温で加工されることでプレス荷重は非常に小さく、また、金型内でマルテンサイト変態が起こることから、冷間プレスで問題となるような余分な残留応力が存在しないために極めて良好な形状凍結性が達成される(図7)²⁸⁾。金型内では鋼板各部位が必ずしも均一に冷却されるわけではないことから、安定した硬度を確保するためにBが添加されている。当初1.5GPaの材料が実用化され、ホットスタンプ後のデスケーリングが不要となるめっき鋼板(AlやZn)も実用化されており、最近では1.8GPaのホットスタンプ成形部品も実用化されている。熱間で加工されることで鋼板強度も低いことから、形状自由度が高い様に感じられるが、金型に触れた位置の強度が急激に上昇することから、鋼板を流し込むような成形には向いていない。従って、冷間プレスとは異なるホットスタンプに適した形状への設計が必要となる。

熱間での加工と焼き入れを組み合わせる技術の応用として鋼管の熱間3次元加工後に焼き入れを行う3DQ(3 Dimensional Hot Bending and Quenching)プロセスも開発されている²⁹⁾。閉断面構造で1.5GPaの強度を持つ部品が製造可能であり、クロスメンバーフレームに適用することで50%の軽量化を達成した結果が報告されている³⁰⁾。

4 ハイテン適用拡大を支える利用技術

自動車部品をハイテン化する為には、ハイテンそのものの

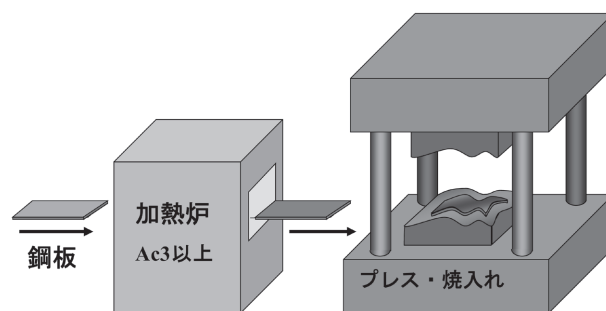


図6 ホットスタンプの工程概念図

プレス成形性向上も必要であるが、同時にプレス加工技術そのものやアッセンブリに使われる溶接技術の発展、更には高強度化に伴って懸念が広がる各種信頼性の評価、保証技術も不可欠である。

4.1 プレス加工技術

プレス加工工程にもCAE技術が導入され、自動車製造工程における最適化の為に繰返し作業の削減や、開発工期短縮、金型修正回数の削減などの経済的なメリットをもたらしている。この様な各種CAE検討の際に重要となるのは各種材料毎の材料構成式と個々の課題へのFEM適用技術である。前述した各種ハイテンの適用も、このCAE技術なしには具現化が困難となる。

プレス成形時の割れについては各変形モードでの成形限界を示すFLD（成形限界曲線）とFEMで得られるひずみを比較検証することで判断できる。しかしながら、プレス成形時に変形経路が変化した場合や、複雑形状のプレス成形や衝突解析の場合には比例負荷時のFLDをそのまま適用することはできない。これに対し、変形経路が変化した場合でも同一のFLDで評価することができる応力FLDも提案されている⁷⁾。

割れやしわ発生は経験的な手法でも解決可能ではあるが、形状凍結性はハイテン化とともに加速的に困難性を増す課題である。形状凍結不良は、1) 角度変化、2) 壁反り、3) 三次元的不良（ねじれ、稜線反り）、が挙げられ、解決の為にプレス技術としては、1) クリアランスやダイ肩Rを制御することでクリアランス内での逆曲げを利用する方法、2) プレス成形後期にBHFを高くする可変ビード法等による縦壁への張力付与、3) 決め押しによる板厚方向応力の付加の適用、4) 引

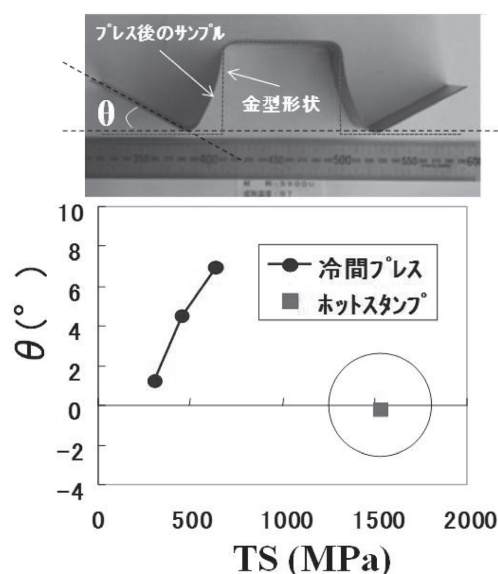


図7 ホットスタンプと冷間プレスのハット形状成形における形状凍結性

張り強度が低下する温間での成形、等に加え、5) 成形方法としてフォーム成形やフォーム成形の下死点前で張力を加えることによって縦壁部に張力を加えるフォームドロー成形等が提案されている³¹⁾。この様なプレス手法を有効に適用する為には、FEM計算によるスプリングバック量の事前予測が不可欠である。この為、材料構成式の中にバウシinger効果や応力除荷時の見かけのヤング率の低下現象を考慮した(図8)、Lemaitre-Chabocheモデルや、吉田-上森モデル、更には材料の微視的構造変化を内部状態変数の発展側として記述したTeodosiuモデル等が導入され、精度の高い形状予測とそれに基づいた対策技術開発が可能になった³²⁾。

最近では更なる成形方法の工夫として、フロントピラーやセンターピラーに特徴的なL字、T字形の部品に適し、材料歩留まり向上や成形荷重の低減などの効果がある新しいプレス成形方法等も報告されており³³⁾、CAE技術との組み合わせによりハイテンの適用拡大に大きく貢献するものと考えられる。

4.2 溶接技術

自動車の車体は約300点以上のプレス部品によって構成されており、一般的には3500～5000点の抵抗スポット溶接で組み立てられている。これ以外にレーザー溶接や接着、機械接合、摩擦拡散接合等が適用されているが、経済的な観点及び管理方法の知見などから、依然として抵抗スポット溶接が接合技術の主役である。従ってこのスポット溶接部の信頼性が車体全体の信頼性も左右すると言える。

鋼板の抵抗スポット溶接継手の強度は、せん断方向の引張り強度TSS (Tensile Shear Strength) と剥離方向の強度CTS (Cross Tension Strength) によって評価される。鋼板がハイテン化された場合のこれら抵抗スポット溶接継手強度の変化を図9に示した³⁴⁾。TSSは鋼板強度の上昇とともに向上するが、CTSは800MPa程度以上でむしろ低下する。鋼板強度が高くなるに従ってナゲット端部への応力集中が増加することや、ナゲット端部の延性や靱性が低下すること等がその原

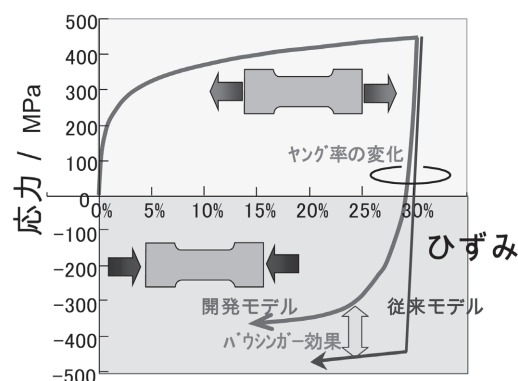


図8 反転負荷時の応力ひずみ曲線

因と言われている。この結果からは、スポット溶接部の剥離強度が構造強度を支配する場合には鋼板をハイテン化しても構造強度は向上しない場合があると理解できる。しかしながら、これらの溶接継手試験では試験片の回転やたわみが発生する場合があります、TSSやCTSが純粋なせん断または剥離強度を表してはいない事にも注意が必要である。この様な試験片の変形の影響を小さくし、実構造物上での複合荷重モードでの疲労強度を評価する為にDC (double cup) 試験片を用いた試験方法が提案され、公称構造応力を用いることで種々の荷重モード、板厚の疲労試験結果が統一的に理解できると報告されている^{35,36)}。しかしながら、この試験方法そのものの難易度が高く、一般的な試験方法にはなっていない。

この様なハイテンの抵抗スポット溶接技術については種々の検討がなされている。CTSの改善の一つとして、ナゲット形成の為に通電後に無通電と短時間通電を繰り返す方法があげられる。この通電パターン選択によりHAZ (Heat Affected Zone) の軟化幅拡大と負荷時の応力拡大係数の低下がCTS改善のメカニズムと報告されている³⁷⁾。また、同様にナゲット形成後に無通電と後通電を繰り返す場合に、CTSを最大化する為の無通電時間についても報告されている(図10)³⁸⁾。ここではナゲット端部のP偏析の緩和も重要な要因となる。また、溶接部の強度が鋼板の化学成分にもよることが知られており、Cの低下やSiの増加なども効果があると報告されているが、鋼板の化学成分は鋼板の機械特性に直接影響する為に、必ずしも自由に設定することはできない。

4.3 その他の課題

プレス成形性や溶接性以外にも超ハイテンの適用拡大の為に解決すべき課題がある。構造的には鋼板の薄肉化による部品剛性の低下であり、解決の為に形状や構造、更には継手構造の最適化等が必須であるが、今後更なる軽量化を検討する中では他素材と組み合わせたマルチマテリアル化も視野に

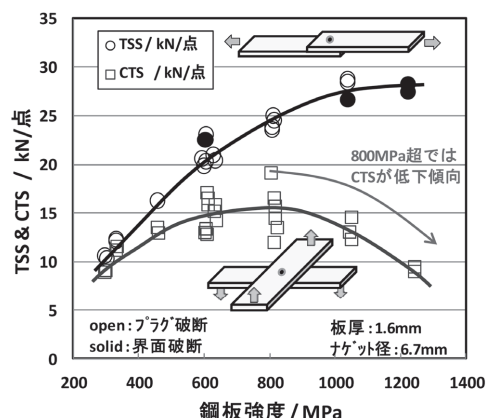


図9 CTS、TSSに及ぼす母材強度の影響

入れる必要があるだろう。また信頼性も重要な課題であり、耐疲労、耐腐食及び耐水素脆化も重要性を増す。

水素脆化はボルト等で評価技術や環境適合性評価技術が開発されており、超ハイテン薄板にもこれらの考え方を適用することができる。プレス成形(塑性変形)の有無はボルトと自動車用薄板の利用方法の大きな違いであり、これを考慮した耐水素脆化挙動評価方法も報告されている^{39,40)}。水素脆化は、引張り応力が働く位置に一定以上の拡散性水素が集中した場合にのみ起こるが、実際の自動車車体構造部品での水素脆化現象に関する情報がまだ十分に蓄積されていない事や、部位ごとの実効応力や水素侵入状況が必ずしも明確になっていないことから、有効な基準策定には上記耐水素脆化評価方法によるデータ集積と同時に、応力や水素侵入状況に関する一層の調査、状況把握が不可欠と考えられる。

5 おわりに

自動車の衝突安全性と燃費向上を両立させる為に自動車車体構造部品用鋼板のハイテン化が進んでいる。冷間プレス用高成形性ハイテンの開発や熱の利用等に加え、ハイテンを精度良く部品に加工し、アッセンブリする為のプレス加工技術や接合技術の進歩がそれを可能にしている。今後一層のハイテン適用を進めるためには、これらの技術革新が進むと同時に、部品構造の最適化、適材適所化等の最適手法の確立も期待される。世界競争力を有する鉄鋼材料開発・製造技術とその利用技術が世界をリードする自動車産業を支える物造り力の基盤となることを期待したい。

参考文献

- 1) ハイテンハンドブック, 自動車用材料共同調査研究会編纂, 日本鉄鋼協会, 自動車技術会, (2008)
- 2) 日産自動車株式会社ホームページ, 2011年10月5日付けニュースリリース

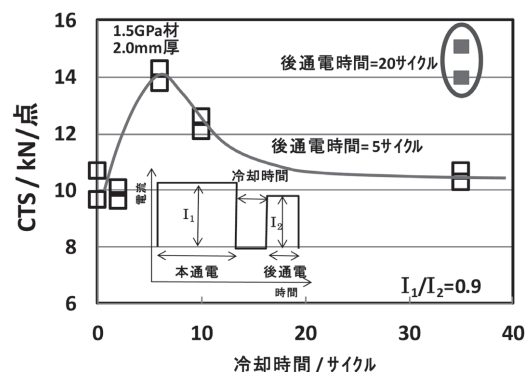


図10 本通電後の冷却時間がCTSに及ぼす影響

- http://www.nissan-global.com/JP/NEWS/2011/_STORY/111005-01-j.html
- 3) A.Uenishi, M.Suehiro, Y.Kuriyama and M.Usuda : IBEC'96, Automotive Body Interior & Safety Systems, Automotive Technology Group Inc., Michigan USA, (1996) , 89.
 - 4) 八木隆義 : 塑性と加工, 54 (2013) 624, 14.
 - 5) 渡辺憲一, 岩谷二郎, 岡野洋一郎 : 自動車用材料シンポジウム“自動車の衝突安全性と高張力鋼鉄の高速変形特性”, (1997) , 73.
 - 6) 吉武明英, 佐藤健太郎, 細谷佳弘 : 自動車用材料シンポジウム“自動車の衝突安全性と高張力鋼鉄の高速変形特性”, (1997) , 49.
 - 7) 米村繁, 上西朗弘, 樋渡俊二, 吉田博司 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 20075066, (2007) 21-07.
 - 8) 吉田博司, 上西朗弘, 栗山幸久, 野村成彦 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 49-05, 20045205, (2004) 08-04.
 - 9) 例えば, 竹内啓, 大野祐司 : 国際交通安全学会誌, 31 (2006) 2, 21.
 - 10) 例えば, S.Hayami and T.Furukawa : Proc. of Microalloying 75, Session 2A, Vanitec, London, (1975) , 78.
 - 11) A.R.Marder : Proc. of Formable HSLA and Dual-Phase Steels, Chicago, Illinois, (1977) , 87.
 - 12) 野中俊樹, 後藤貢一, 谷口裕一, 山崎一正 : 新日鐵技報, 378, 12 (2003)
 - 13) 田中福輝, 白沢秀則 : R&D 神戸製鋼技報, 42 (1992) 1, 20.
 - 14) 鹿島高弘, 塚谷一郎, 井上毅 : CAMP-ISIJ, 6 (1993) , 1696.
 - 15) 橋本俊一, 鹿島高弘, 池田周之, 杉本公一 : 鉄と鋼, 88 (2002) 7,400.
 - 16) Proc. Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys, GRIPS' Sparkling World of Steel, Belgium, (2002)
 - 17) 野中俊樹, 藤田展弘, 友清寿雅, 松村賢一郎, 宮城 隆司 : 自動車技術会予稿集 257-20085637, (2008)
 - 18) 二村裕一, 三浦正明 : R&D 神戸製鋼技報, 57 (2007) 2, 11.
 - 19) 長谷川浩平, 金子真次郎, 瀬戸洋 : JFE技報, (2012) 30, 6.
 - 20) 種植隆浩, 金子勝吉, 高田良久, 伊円淳 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 20045651, (2004) 82-04.
 - 21) 吉永直樹, 佐久間康治, 樋渡俊二, 塩崎克美, 高木潔 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 20045745, (2004) 81-04.
 - 22) 三浦正明, 中屋道治, 向井陽一 : R&D 神戸製鋼技報, 57 (2007) 2, 15.
 - 23) 大沢一典, 黒澤伸隆, 清水哲雄, 坂田敬 : 自動車技術会学術講演会前刷集, (2002) 106-02, 9.
 - 24) 二村裕一, 三浦正明, 経澤道高 : R&D 神戸製鋼技報, 61 (2011) 2, 41.
 - 25) O.Grassel, G.Frommeyer, C.Derder and H.Hofman : J. Phys. IV France, 60 (1997) , 383.
 - 26) S.Maggi, C.Federici and F.D'Aiuto : Int. Conf. on Materials in Car Body Engineering, Automotive Circle International, Bad Nauheim, Germany 10-11 May, (2012).
 - 27) 例えば, H.Dong, W.Cao, J.Shi, C.Wang and M.Wang : Proc. of Int. Conf. on High Manganese Steels HMnS2011, May 15-18, 2011 , Seoul, Korea, (2011) 1.
 - 28) 瀬沼武秀, 楠見和久, 末廣正芳 : ふえらむ, 11 (2006) 2, 28.
 - 29) 新日鐵住金株式会社ホームページより, 「3次元熱間曲げ焼き入れ (3DQ) 量産加工技術」
http://www.nssmc.com/tech/nssmc_tech/car/car_02/02.html
 - 30) マツダ自動車ホームページ 2013年1月24日ニュースリリースより
<http://www.mazda.co.jp/corporate/publicity/release/2013/201301/130124a.html>
 - 31) 吉田亨, 片山知久, 橋本浩二, 栗山幸久 : 新日鐵技報, 378, 25 (2003)
 - 32) 鈴木規之, 樋渡俊二, 上西朗弘, 桑山卓也, 栗山幸久, X.Lemorene, C.Teodosiu : 塑性と加工, 46, 534, 636 (2005)
 - 33) 新日本製鐵株式会社ホームページ 2012年9月6日プレスリリースより
http://www.nssmc.com/news/old_nsc/detail/index.html?rec_id=4328
 - 34) 及川初彦, 村山元, 崎山達也, 高橋靖雄, 石川忠 : 新日鐵技報, 385 (2006) 36.
 - 35) 例えば, Y.Nakahara et. al.:SAE paper 2000-01-0779, (2000)
 - 36) 川本淳, 中原裕司, 日下部雅幸, 角田浩一, 荻野正人, 金子光輝, 横井龍雄, 田村浩, 渡辺憲一, 瀬戸一洋, 藤本正男 : JSAE Symposium「これからの車体の疲労耐久性評価への新しい提案」, (社) 自動車技術会疲労信頼性部門委員会企画, 20004242, (2000) 13.
 - 37) 山崎一正, 佐藤浩一, 徳永良邦 : 溶接学会論文集, 17 (1999) 4, 553.
 - 38) 浜谷秀樹, 渡辺史徳, 宮康信, 田中智仁, 真木純, 及川初彦, 野瀬哲郎 : 溶接学会全国大会概要, 89 (2011) 44.
 - 39) 林邦夫, 藤田展弘, 竹林重人, 高橋学, 佐久間康治 : 自動車技術会学術講演会前刷集, 20045132, (2004) 18-04.
 - 40) 衣笠潤一郎, 湯瀬文雄, 経澤道高, 向井陽一 : R&D 神戸製鋼技報, 61 (2011) 2, 65.

(2013年2月18日受付)