

自動車用高強度鋼板の開発

Development of High Strength Steels for Automobiles

高 橋 学^{*(1)}
Manabu TAKAHASHI

抄 録

燃費向上, 省エネルギーと共に衝突安全性向上への要求が強まる中, 自動車車体重量を増加させること無しに安全性を向上させる一つの方法として高強度鋼板の適用が進められている。鋼板を高強度化することによる最大の問題点は加工性の劣化であり, ユーザーからの要求に応えるために様々な高強度鋼板が開発されてきた。自動車各部位で異なるそれぞれの成形様式に適した良好な成形性を示す各種高強度鋼板の特徴と, 同時に要求される衝撃エネルギー吸収能, 疲労, その他の特性について概説する。

Abstract

High strength steels have been intensively applied to autobodies to improve crashworthiness without increasing the body weight under a strong pressure of the requirements for fuel consumption, energy saving and crashworthiness. One of the critical problems of the usage of high strength steels for autobodies is a deterioration of press formability with increasing the strength. Different types of high strength steels have been developed at Nippon Steel Corporation to respond to the requirements of auto-companies. The features of these high strength steels with different kind of press formability will be summarized here with their performances of crash energy absorption property, fatigue strength and so on.

1. 緒 言

我々の生活の一部として重要な地位を占めている自動車は, 生産技術革新を進めながら絶え間無く製造コストの低減を指向されると同時に, 強く求められる社会及び自然環境との調和を達成するために, 燃費向上や安全性向上の対策が進められてきている。自動車用薄鋼板はこのような市場ニーズに応えつつ進歩してきたと言える。最近では特に燃費向上によるCO₂排出量削減を目的とした車体軽量化と衝突安全性向上の両立が自動車における最も重要な課題の一つであり, これらの相反する要求を同時に満足させるための一つの手段として高強度鋼板の適用が拡大している。自動車部材用鋼板はその適用部位によって異なる強度特性が要求され(表1), 部材剛性や

腐食による減肉, 更には溶接部の疲労強度等の鋼板強度上昇による特性向上効果が期待できない場合を除いて, 鋼板の高強度化は鋼板の薄肉化すなわち軽量化に貢献すると考えられる。

1998年に日本鉄鋼協会と自動車技術会材料部門委員会との共同調査研究会の下部組織である高強度鋼板ワーキンググループで調査された結果によると, 4年後にあたる2002年では, 外板パネルでは340MPa級, ピラー, メンバーなどの構造部材では440~590MPa級, 補強材では一部1000MPaを越す超高強度鋼, そしてサスペンション等の床下部材では490~590MPa級の高張力鋼板の適用が期待される平均的な強度レベルとして報告されている¹⁾。本報告では, 自動車部品をパネル系部品, 構造系・補強系部品およびシャーシ系部品に分類し, それぞれの部品での適用が期待される高強度鋼板を

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	耐デント性	部材剛性	耐久強度	動的圧潰強度
外板	ドアアウターなど					
内板	フロアなど					
構造部材	フロントレール, リアピラーなど					
	フロントサイドメンバー, サイドシルなど					
	ドアガードバーなど					
床下部材	サスペンションアーム, ホイールディスクなど					
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

⁽¹⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部 主幹研究員 Ph.D
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:0439-80-2242

中心にその特性を概説する。

2. 自動車用高強度鋼板のプレス成形性

薄鋼板は適用される各部材に要求される強度特性以外に、種々の複雑な形状への造形性が強く要求される。自動車用の鋼板はプレス加工によって最終的な部材形状に成形されるのが一般的であり、そのプレス成形性は図1に示す4種のモードに分類される²⁾。適当なサイズに切断された鋼板をポンチとダイスの間に挟み込むことによって造形するプレス加工は、カップ成形に代表されるように、効率的に材料をポンチとダイスの間に流し込むことによって大きな成形高さを確保する深絞り成形(縮みフランジ成形とも呼ぶ)、板厚を減少させながら風船を膨らます要領で成形する張出し成形、打ち抜いた穴を広げる要領で端部に大きな引張り変形を与える伸びフランジ成形、及び曲げ成形に分類することができ、実際の部品はこれらのモードの組み合わせで成形される。各々の加工モードによって必要とされる鋼板特性(機械試験等によって得られる特性)が異なることから、新日本製鐵においては、採用される加工モード毎に異なるタイプの鋼板を開発してきている。

深絞り成形性は金型によって比較的強く挟み込まれているフランジ部の体積が減少する変形であるために、この部分での縮み変形が必須となる。このような変形特性は例えば円盤状の鋼板を円筒カップ状に成形する際の限界絞り比(成形前の円盤と成形後の円筒径の比によって表現され、LDR: limiting drawing ratio と呼ばれる)によって表現されるが、鋼板の塑性異方性(r 値)と良い相関がある事が知られている。自動車車体の内外板パネル等では特にこの特性が重要な役割を演じ、鋼板中の炭素量の低減やTi, Nbなどを用いて炭素、窒素を析出物として固定する方法などが採用されている。しかしながら500MPaを超える高強度鋼板で r 値を高めることは容易ではない。

張出し成形は材料を流入させずに板厚を減少させながら成形高さを確保する成形であり、限界張出し高さ(LDH: limiting dome height と呼ばれる)によって表現される。限界張出し高さは鋼板の延性、特に均一伸びと強い相関を持つことが知られている。上述のように高強度鋼板では一般的に高い r 値が確保できないため、張出し成形性すなわち延性がプレス成形性の代表的な指標と言える。鋼板の延性は鋼板強度の上昇と共に低下することが知られており、一般的に高強度鋼板ほど張出し成形性は劣化する。

伸びフランジ成形性は端部、特に打ち抜き端部の変形能を表す。代表的には円形に打ち抜いた穴を円錐ポンチで広げる穴広げ試験によって評価される。元穴径 d_0 に対する最終穴径 d までの穴広がり率

(穴広げ率 (%) = $100 \times (d - d_0) / d_0$)がその指標として用いられ、極限変形能と良く対応することが知られている。鋼材の材質としては r 値と対応することが知られているが、前述のごとく高強度鋼板での r 値は一般に1.0以下であることから、その他の支配因子が重要となる。伸びフランジ成形性も鋼板強度の上昇と共に劣化するが、鋼板の金属組織の影響を強く受け、伸びフランジ成形性向上のためには金属組織の均一化や硬質相である炭化物、酸化物の減少、微細分散化が重要である。

曲げ成形性は特に非常に高い強度レベルで問題となる。曲げ性も伸びフランジ成形性と同等に局所的な大変形による破壊現象ととらえることができ、例えば980MPa級の鋼について、硬さのばらつき(金属組織における硬質相と軟質相の分布に対応)によって整理できる。従って曲げ性の向上は伸びフランジ成形性の向上と同様の考え方で達成できると言える。

3. 自動車用高強度鋼板とその特徴

前述のように自動車の部位によって要求される特性や主に適用されている強度レベルが異なるため、ここではパネル系、構造部材・補強材系、シャーシ系に分けて各々の部位に適した高強度鋼板について述べる。

3.1 パネル用高強度鋼板

パネル系部品は深い絞り成形が期待される場合が多く、固溶C、固溶Nを製鋼段階で低減した極低碳素鋼に、更にTiやNbを添加して残存した固溶C、Nを析出物として固定したIF(Interstitial Free)鋼が多く利用されている。これらの鋼に対し、熱間圧延での低温大圧下と急冷によるフェライトの細粒化、高圧下冷間圧延、高温焼鈍を組み合わせて平均 r 値=2.5、加工硬化指数 n 値=0.27を持つ高い成形性を持つ鋼板を開発した³⁾。このような高成形性鋼板は複数部品の一体成形などを通じて金型費用や接合工程省略による生産コスト低減に貢献するものと考えられる。

3.1.1 高BH鋼板

ドア、フード及びトランクリッドなどの外板パネルでは材料のヤング率と板厚及び幾何学的な形状によって決まる張り剛性と共に、人間が押したり小石が飛来したりして凹むことに対する抵抗(耐デント特性)が要求される。デント特性を向上させるためには降伏強度を上げることが有効である一方、プレス成形で面ひずみの発生を避けて高い面精度を確保するためには降伏強度を240MPa程度以下に保つ必要がある。このような相反する要求特性を満足するために、プレス時には低強度(低降伏強度)で使用時には高い降伏強度を示す鋼板として焼付け硬化(BH)鋼板を開発し、実用化した。

BH効果は、鋼板中に固溶状態で残留するCやNが塗装後の焼き付け処理(170℃で20分保持の熱処理に対応)中にプレス時に導入される転位へ拡散し、転位を固着することで降伏点を上げる現象である。従って固溶C、N量が多いほど高いBHが得られる。しかしながら、鋼板中に残留する固溶C、Nは鋼板を室温で時効させ、プレス成形時にストレッチャーストレインと呼ばれる表面欠陥を生じる。100℃で1時間の促進時効熱処理を行った後の降伏点伸びが0.2%以下であれば実用上この表面欠陥が問題にならないことから⁴⁾、実用的なBH量は30~50MPa程度となっている(図2)。

極低碳素鋼をベースにBH鋼板を製造する方法は2通りあり、C、NがTiやNbの添加量より化学当量的に過剰に添加されている場合と逆にTiやNbの方が過剰に添加されている場合がある。前者は固溶C

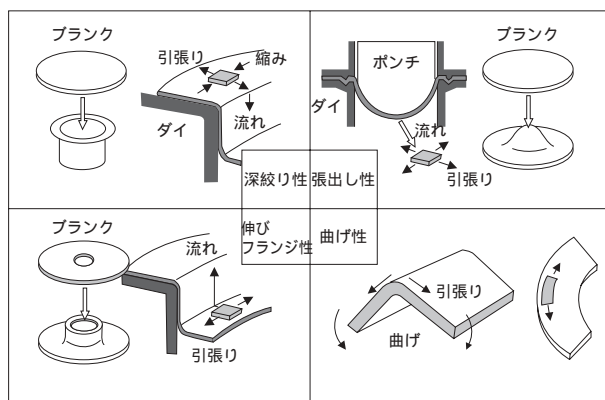


図1 薄鋼板のプレス成形における代表的な変形様式

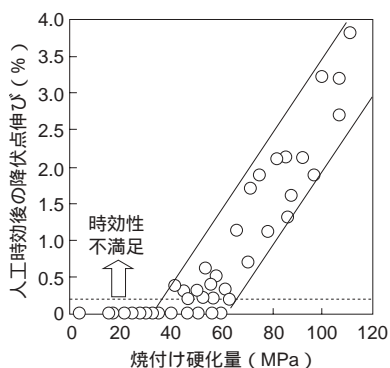


図2 BH特性と時効性の関係

が製造工程中常に存在するため、その存在によりr値に好ましい集合組織が形成しにくいことが知られているが、一方後者の場合にはBH性を発揮させるために焼鈍を高温で行い炭化物を再溶解させて最終製品に固溶Cを適量存在させる必要がある。新日本製鐵においては設備負荷の高い高温焼鈍を避け、TiやNbの添加量を溶鋼成分に合わせて変化させて一定の固溶C、N量になるよう制御する方法を採用し、270、340MPa級の高BH鋼板を実用化している⁵⁾。

3.1.2 深絞り加工性に優れた高強度鋼板

パネルへのより強度の高い鋼板の適用も一部の自動車メーカーでは検討されており、Nb-Ti添加極低炭素鋼をベースにP、Mn、Siにより固溶強化し、440MPa級で全伸び38.3%、n値0.24、r値1.95といった高加工性高強度鋼板を開発した⁶⁾。また、特殊な例としては、TiでIF化した鋼にCuを添加し、冷間圧延・焼鈍によりr値を高めた後に600℃近傍でCuの析出熱処理を行うことで、590MPa級でr値が1.9の高強度高r値鋼板も開発している⁷⁾。

3.2 構造部材・補強材用高強度鋼板

構造部材は衝突時の乗員保護に利用される部品が多く、強まる安全基準と燃費改善への要求の厳格化に伴いここ数年の間に最も高強度化が期待されていた部位である。前突時にはフロントサイドメンバーなどの構造部材の座屈、曲げ変形によりエネルギーを吸収して乗員への衝撃を緩和すると共に、エンジン及びその周辺部品のキャビン進入を阻止し、乗員の生存空間を確保する。一方側突の場合には部材の塑性変形は乗員の生存空間を狭めることから、極力剛な構造としてキャビンへの進入を小さくする構造が選択される。

例えばフロントサイドメンバーの様な前突時に軸圧潰される部位を考えると、そのコーナー部での変形速度は通常の引張り試験での変形速度の100万倍にもあたる1000/s程度のひずみ速度に達することが知られている⁸⁾。以下では通常の引張り試験を“静的”、1000/sでの引張り試験を“動的”と呼ぶ。このような部材の衝突時の衝撃エネルギー吸収能は落錘試験による直接測定やひずみ速度依存性を考慮した材料構成式を用いたFEM解析によって求めることができる。解析結果を見ると角筒の衝撃軸圧潰時の衝撃吸収エネルギーは10%程度以下のひずみ領域での動的変形応力に比例する⁹⁾。また、センターピラーのような側突時に乗員の生存空間を確保するために用いられる部材では、曲げ変形が主体となるが、キャビンへの進入量を極力避けるために補強部材も含めてできるだけ高い強度の鋼板を使うことが有利と言える。

このような衝突時の変形挙動や衝撃エネルギー吸収能を評価するためには動的な変形応力を正しく評価することが重要であり、このために新日本製鐵ではOne-Bar法高速引張り試験装置を導入した⁸⁾。

この設備では約5mの出力棒の弾性変形により実験荷重を測定する。高速試験で問題となる衝撃波がこの出力棒の中を伝播し、荷重検出のためのひずみゲージの位置に戻ってくる前に全ての実験を完了させ、フィルタリング無しで衝撃波に影響されないスムーズな応力-ひずみ曲線の測定を可能としている。また、応力-ひずみ曲線の初期立上り部に発生する衝撃試験方法起因のピークも、検出棒端部の振動を抑制することによって取り除き、精度の高い測定を可能にしている。

3.2.1 衝突安全用高延性複合組織鋼板

衝突時のエネルギー吸収能が期待される構造材やその補強材は、その複雑な形状へプレス成形するための良好な加工性が要求される。高いr値が期待できない高強度鋼板では延性によって支配される張出し成形性が重要となる。延性は一般的に鋼板の強度上昇とともに低下するが、軟質のフェライトを主相としたDR Dual-Phase：フェライト+マルテンサイト組織^鋼や低合金TRIP(Transformation Induced Plasticity：フェライト+ベイナイト+残留オーステナイト)鋼は析出強化、固溶強化、変態組織(ベイナイトなど)強化した同一強度の鋼板に比べて高い延性を示すことが知られている⁹⁾。

DP鋼では従来の鋼にくらべて延性が大きい合金化溶融亜鉛鋼板も開発し、実用化している¹⁰⁾。TRIP鋼はZackayら¹¹⁾によって高合金系で最初に報告されたが、これに対し安価な鋼中炭素を利用してオーステナイトを安定化した鋼が低合金TRIP鋼である。低合金TRIP鋼には数%から20%程度の残留オーステナイトが含まれており、図3に示すように、塑性変形の進行と共にオーステナイトから硬質(高C)マルテンサイトへの変態が進行する。この結果非常に広いひずみ範囲において高い加工硬化特性を示し、良好な張り出し成形性を持つ¹²⁾(図4)。

更に特筆すべきは、この鋼の深絞り成形性である。加工によるオーステナイトからマルテンサイトへの変態はその変形モードに

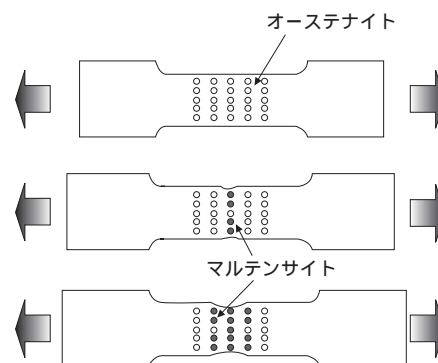


図3 低合金TRIP鋼における変形途中の変態挙動と延性改善効果

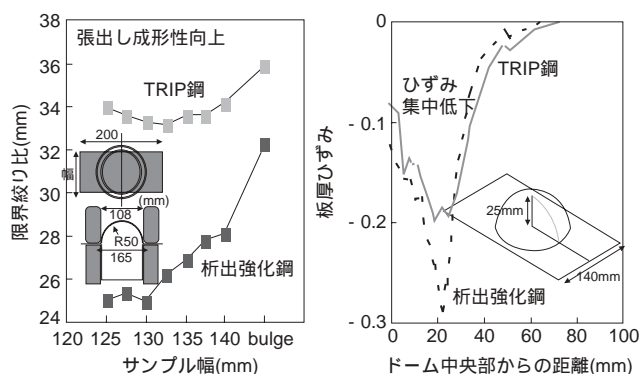


図4 低合金TRIP鋼の張り出し成形性における優位性

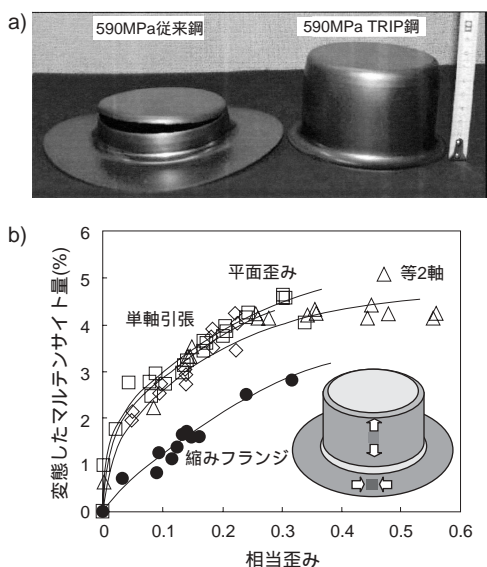


図5 低炭素TRIP鋼の深絞り成形性

よって影響を受けることから、深絞り成形の場合図5に見られるように、フランジ部(縮みフランジ成形)と壁部(平面ひずみ成形)でマルテンサイト変態量が異なる。フランジ部に比べて壁部が硬質になることから破断することなく効率よくフランジ部の材料を引きずり込むことによって高い深絞り成形性が確保できる。

動的応力と静的応力の差(静動差)は鋼板強度の上昇と共に低下するが、鋼板の高強度化の方法によって静動差が変化する。図6に見られるように、主相をフェライトとしたDP鋼や低合金TRIP鋼は従来の高強度鋼板に比べて特に予加工と焼き付け処理が施された後に高いエネルギー吸収能を示す⁸⁾。これら複合組織鋼板は比較的大きなBH効果を示すことがその理由の一つであるが、低合金TRIP鋼はひずみ速度の上昇に伴い、低ひずみ領域でオーステナイトから硬質のマルテンサイトへの変態が加速されることも高い静動差の一因と

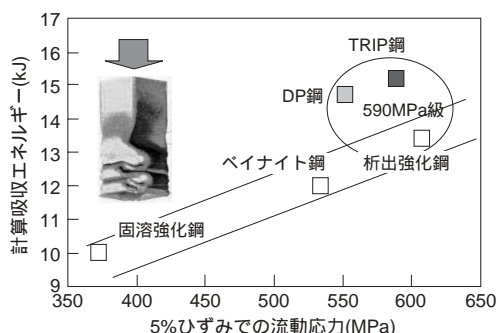


図6 薄肉角筒圧潰時の吸収エネルギー量に及ぼす鋼板強化方法の影響

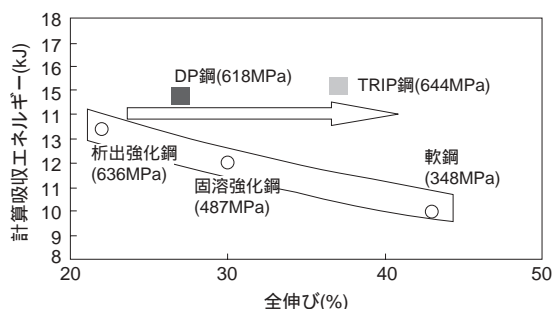


図7 薄肉角筒の吸収エネルギーと鋼板延性の関係

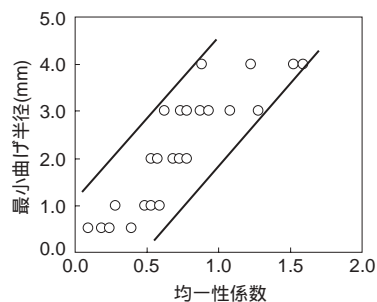


図8 超高強度鋼板の最小曲げ半径と組織均一性の関係(均一性係数はHRcの標準偏差)

言える。また、主相であるフェライトが固溶強化や析出強化鋼に比べて軟質であることも高いひずみ速度依存性を示す因子である。角筒の軸圧潰時の衝撃吸収エネルギー量と鋼板の加工性の指標である延性をプロットしたのが図7である¹³⁾。エネルギー吸収能は鋼板強度の上昇と共に向上するものの鋼板の延性は低下し、複雑形状の衝突安全部品へのプレス成形は困難となる。しかしながらDP鋼やTRIP鋼は高い衝撃エネルギー吸収能と大きな延性を兼備することから、衝突安全部品に適した高強度鋼板と言える。

3.2.2 超高強度鋼板

側突対応やバンパーの補強材等では980MPa級以上の超高強度鋼板の利用が進んでいる。このような超高強度鋼板では延性と同時に曲げ性や伸びフランジ成形性が重要な成形性の因子である。延性の向上の為に前述のように複合組織化が行われ、1180MPaまでの冷間圧延DP鋼を実用化している。しかしながら超高強度鋼板で重要な曲げ性の向上のためには軟質相と硬質相の複合化は不利とされており、組織の均質化が有効である¹⁴⁾。図8に示されるように、組織の均一性を示す硬度の分散が小さいほど超高強度鋼板の曲げ性は良好である。また、本誌中に報告されているように、適用部位毎に要求される異なる成形性指標に対応する980MPa級高強度鋼板も開発し、実用化している。

3.3 シャシー系部材用高強度鋼板

前述のようにシャシー系部材は剛性と共に疲労や腐食に関する耐久寿命が要求され、比較的厚手の鋼板が利用されることから、熱間圧延のままの鋼板が広く使われている。

3.3.1 高延性熱間圧延鋼板

熱間圧延のままの高強度鋼板で最も延性が大きな鋼が低合金TRIP鋼(高残留オーステナイト鋼)である。熱間圧延のままの場合には仕上げ熱間圧延後冷却して約400 付近で巻き取ることによってベイナイト変態が進行し残留オーステナイトが安定化する。低合金TRIP鋼の延性は残留オーステナイト量と良い相関を持つが、熱間圧延のままの場合には熱間圧延条件とその後の冷却条件を最適化することによって、フェライト粒径をフェライト体積率で除した値を大きくすることが有効である¹⁵⁾。熱間圧延TRIP鋼は高延性であると共に、前述のように衝撃エネルギー吸収能に優れており、また良好な疲労耐久性を示すことから、種々の部品への適用が期待される。TRIP鋼はDP鋼同様に硬質相と軟質相の複合組織になっていることから、一般的には穴広げ加工のような伸びフランジ成形性には劣るといわれている。本誌中にも報告されているように、化学成分と金属組織を制御しこのような弱点を改善した高穴広げ加工性の低合金TRIP鋼も開発している。

3.3.2 高バーリング性熱間圧延鋼板

アーム類等の床下部品では打ち抜き端部に引張り変形が加わる伸びフランジ成形が施される場合が多い。この伸びフランジ特性は前述のように主に穴広げ試験によって評価される。伸びフランジ成形性は金属組織の均一性が高いほど向上することから、フェライト+ベイナイトもしくはベイナイト単相に近いマイクロ組織にすることで高い伸びフランジ性を示す高強度鋼板(高バーリング性鋼板)を開発している。このとき、通常の炭素鋼で不可避免的に存在する硬質なセメントサイトを微細に分散させることも伸びフランジ成形性を向上させる有効な手段である。Si等のセメントサイトに固溶しにくい元素を添加し、セメントサイトの成長を抑制することでセメントサイトを微細分散させた590MPa程度までの高バーリング性鋼板を開発した¹⁶⁾。また、より高強度で高い穴広げ性を示す鋼板として、本誌中にも報告されている780MPa級の低炭素高強度鋼板も開発し、実用化している。

3.3.3 溶接性に優れた高強度鋼板

鋼板がアーク溶接によって接合される際には溶接熱影響部(HAZ部)の軟化によって部材強度が劣化する場合があり、注意を要する。このHAZ軟化を抑制するためにNb, Moを添加し、溶接時の昇温時にこれらが転位と相互作用して転位の消滅を抑制し、転位上の(Nb, Mo)C複合析出が促進されることによりHAZ部の軟化を抑制する耐HAZ軟化鋼板を開発した¹⁷⁾。

3.3.4 高疲労強度鋼板

ホイールやサスペンションアーム等の床下部材においては高い疲労耐久性が要求される。一般的には溶接部、打ち抜き端部および形状起因の応力集中部での疲労が問題となるが、疲労亀裂の伝播よりはむしろ発生で寿命が決定される薄板においては、母材の疲労強度を上げることが有効である。

Siで強化されたフェライトと微細分散した硬質マルテンサイトの混合組織であるDP鋼は良好な疲労耐久性を示すことが知られている¹⁸⁾。低サイクル疲労試験結果から、Si添加熱間圧延DP鋼は疲労初期に生成する微細なセル構造が比較的安定であることで高い繰返し応力が持続し、微視的な亀裂の発生を抑制していると考えられる。粗大なベイナイト組織や表層での混粒組織を減少させることによって延性と疲労強度に優れたPD鋼を実用化している¹⁹⁾。現在780MPa級までの熱間圧延DP鋼が実用化されている。疲労強度は繰返し降伏応力と良い相関を示し(図9)、DP鋼と共に低合金TRIP鋼も他の高強

度鋼板より高い疲労強度を示す¹⁹⁾。低合金TRIP鋼が高い疲労強度を持つことは、DP鋼と同様に主相であるフェライトがSiで強化されていると同時に、繰返し応力負荷中に残留オーステナイトがマルテンサイトに変態し膨張することにより発生する圧縮の残留応力にも助けられている²⁰⁾。

また、Cuを固溶させた鋼は繰返し応力負荷中の転位の回復が遅れ、非常に高い疲労限度比(疲労強度/引張強度)を示す²¹⁾。

4. 結 言

今回紹介した高強度鋼板は、自動車メーカーにおける利用技術の工夫とも相まって、自動車車体軽量化と衝突安全性の向上に貢献している。今後更に高強度鋼板の適用を拡大していくためには、耐食性、形状凍結性、接合性等の向上や材質ばらつき低減等を押し進める必要がある。また、厳格化する安全性や環境調和等の自動車に対する要求に添えてゆくためには、高強度鋼板の機能向上と同時に、自動車車体設計の段階から素材を提供する鉄鋼メーカーとそれを利用する自動車メーカーが協力し、最適材料選択と最適利用方法を指向することが重要であろう。

参考文献

- 1) 水井直光:ふえらむ .4(12), 856 (1999)
- 2) 林央:第40回塑性加工学講座力学コース板成形 塑性加工学会, 1985
- 3) 小山一夫 松村義一 佐柳志郎 松津伸彦 木野信幸:日本金属学会会報 31(6), 535 (1992)
- 4) Yamazaki, K., Horita, T., Umehara, Y., Morishita, T.: Proc. of Conf. on Microalloyed HSLA Steels. World Materials Congress, 1988, ASM, p.327
- 5) 山田正人 徳永良邦 伊藤亀太郎:製鉄研究. (322), 90 (1986)
- 6) Takechi, H., Akisue, O.: Proc. of Conf. on HSLA Steels. 1985, The Chinese Soc. of Metals, p.977
- 7) 岸田宏司 秋末治 池永則夫 黒澤文夫 長村光造:日本金属学会会報. 31(6), 538 (1992)
- 8) Uenishi, A., Suehiro, M., Kuriyama, Y., Usuda, M.: IBEC'96, Automotive Body Interior & Safety Systems. Automotive Technology Group Inc., Michigan USA, 1996, p.89
- 9) 岸田宏司:新日鐵技報 (371), 13 (1999)
- 10) 佐久間康治 高橋靖雄:自動車技術会2000年秋期大会前刷集 p.138
- 11) Zackay, V. F., Parker, E. R., Fahr, D., Bush, R.: Trans. ASM. (60), 252 (1967)
- 12) Hiwatashi, S., Takahashi, M., Sakuma, Y., Usuda, M.: Proc. of Int. Conf. on Automotive Technology and Automation, 1993, Germany, p.263
- 13) 高橋学:ふえらむ. 7(11), 34 (2002)
- 14) 山崎一正 水山弥一郎 岡賢:CAMP-ISIJ. 5, 1839 (1992)
- 15) 河野治 脇田淳一 江坂一彬 阿部博:鉄と鋼. 82(3), 56 (1996)
- 16) Matsuzaki, N., Itami, A., Koyama, K.: SAE Technical Paper. 910513, 1991
- 17) Tomokiyo, T., Taniguchi, Y., Yamazaki, K., Tanaba, H., Anai, I.: CAMP-ISIJ. 13, 127 (2000)
- 18) 水井正也:材料. 38, 15 (1989)
- 19) 水井正也 高橋学:CAMP-ISIJ. 5, 1867 (1992)
- 20) Yokoi, T., Kawasaki, K., Takahashi, M., Koyama, K., Mizui, M.: JSAE Review. 17, 191 (1996)
- 21) Yokoi, T., Takahashi, M., Maruyama, N., Sugiyama, M.: J. of Mat. Sci. 36, 5757 (2001)

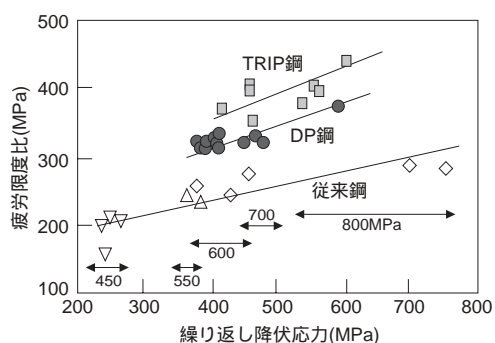


図9 各種高強度鋼板の疲労限と繰返し降伏応力の関係