



特集記事・7

我が国のエネルギーを支える鉄鋼技術
【使う】

自動車用先進ハイテンとその適用事例

Advanced High Strength Steels for Automobile and Their Applications

瀬戸一洋
Kazuhiro Seto

JFEスチール(株) スチール研究所
薄板研究部 部長

1 緒言

自動車における省エネルギー技術はエンジンの効率化から走行時抵抗の低減まで多岐に渡るが、車体の軽量化はその中でも重要な技術のひとつである。特に、オイルショックを機に1970年代に始まった高強度鋼板(ハイテン)の開発・適用は現在まで一貫して車体軽量化の鍵となっている。1990年代の冒頭にはオールアルミモノコックボディからなるスポーツ車が市販され、一時は鋼板からアルミへの材料置換が盛んに検討されたが、1994年からスタートした世界鉄鋼協会のULSAB(Ultra Light Steel Auto Body)およびこれに続くULSAB-AVC(Advanced Vehicle Concept)の各プロジェクトでは車体骨格部分にハイテンを適用することで25~32%の軽量化が達成可能であることを示し¹⁾、再びハイテンの開発・適用が加速することになった。また、外板パネルを対象としたULSAC(Ultra Light Steel Auto Closures)やサスペンションを対象としたULSAS(Ultra Light Steel Auto Suspension)でも同様に30%程度の軽量化の可能性が示唆された。これらのプロジェクトの後、2003年に自動車用材料共同調査研究会高張力鋼板WG(日本鉄鋼協会、自動車技術会)が行った自動車会社へのアンケート²⁾では、2012年の期待値として外板パネルで390~440MPa、主要車体骨格部品で980MPa、ドア・ガード・バーなどの補強部品で1470MPa、サス・アーム類で690MPaまでの高強度化が進行すると予測しているが、昨今の状況を見ると概ねこの予測通りにハイテン適用が進んでいるものと思われる。

車体を形成する板金部品は表1に示すように部品ごとに要求される特性や加工に必要な材料特性が異なるため、自動車用ハイテンはそれぞれの部位に適合するように様々な種類が開発されてきた。本報では部位ごとに最適化された先進ハイテンの設計思想とそれを実現するための組織制御技術、および実部品への適用事例について概説する。

2 ハイテンの強化機構とその特徴

自動車用ハイテンの主な強化機構としては、(1)固溶強化、(2)析出強化、(3)変態組織強化、(4)結晶粒微細化強化の4つがあり、それぞれ材質への影響が異なるため、部品ごとの必要な特性に応じこれらを組み合わせて材料設計が行われる。

図1は例として冷延ハイテンの引張強度(TS)と降伏強度(YS)・伸び(EI)・穴広げ率(λ)・r値の関係強化機構ごとにまとめたものである。よく知られたように強度が高くな

表1 自動車部品ごとの必要特性

部品例と推定重量			部品としての必要特性					加工に必要な材料特性
			張り剛性	耐腐蝕性	部材剛性	耐久強度	動的圧縮強度	
外板	フード、ドア	60kg	◎	◎				n値、EI
	フェンダー	30kg	◎	◎				r値
車体骨格	ビラー	40kg			◎	○	○	EI
	フロント・サイド・メンバー	20kg			◎	○	◎	EI
足回り	ロア・アーム	10kg			◎	◎		λ 、EI
板厚以外で特性を支配する材料因子			ヤング率	YS	ヤング率	YS, TS	YS, TS	

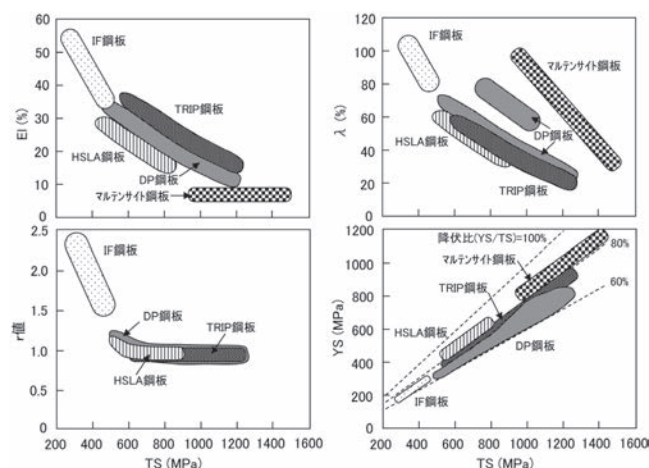


図1 冷延ハイテンの強度と特性の関係

ると一般に鋼板の加工性は低下するが、強化機構によって一律ではなく、たとえばEIについては固溶強化と析出強化を利用したHSLA (High Strength Low Alloy) 鋼板、DP (Dual Phase) 鋼板、TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼板の順に高くなる。DP鋼板は軟質なフェライトが変形を担うため、低降伏比 ($YR = YS/TS$) で加工硬化指数 (n 値) が高く、大きな均一伸びが得られる。TRIP鋼板は室温で準安定なオーステナイト相を組織中に残留させたもので、変形が進んだ部分から優先的に硬質なマルテンサイト相に変態するためくびれの進展が抑制されDP鋼板以上に大きな均一伸びが得られる³⁾。一方でDP鋼板、TRIP鋼板は軟質相と硬質相の硬度差が大きいため、打抜きのような極限変形時に両相の変形能の差に起因したマイクロボイドが発生しやすく、打抜き後の加工となる λ は一般に低くなる。ただし、後述するように同じDP鋼板であってもマルテンサイト相の分率やフェライト相とマルテンサイト相の硬度差を制御することによってEIと λ のバランスは広い範囲で制御可能である。

ハイテンを実部品に適用する場合には、表1に示した部品として必要な要求特性のほか、部品形状や加工方法を加味して鋼種の選択がなされることになる。

3 部品別にみた先進ハイテンとその適用事例

3.1 外板パネル

外板パネルはフェンダーなど絞り加工が重要な部品とドアやフードなど張り出し加工が重要な部品に大別される。鋼中のCを0.002%程度まで低減し、これにTiやNbを添加して炭化物を形成させることで実質的に固溶CをゼロとしたIF (Interstitial Free) 鋼板は、深絞り性の指標である r 値と張り出し性の指標であるEIのどちらも高いレベルとすることが可能であることから、現在外板パネルのほとんどがIF鋼板化されている。

IF鋼板にSiやMnなどの固溶強化元素を添加していくと高い r 値とEIを維持したまま高強度化ができる。これまでに、440MPa級で全EI36~38%、 r 値1.95といった材料^{4,5)}が開発されており、内板や構造部材を含めた一部の部品に適用されている。

外板パネルに要求される部品性能は主として張り剛性と耐デント性であるが、張り剛性を支配するヤング率は通常の方法では向上させることが難しいため、材料特性で改善可能なのは耐デント性のみとなり、それにはYSの向上が必要となる。これが外板パネルをハイテン化する根拠であるが、一方、自動車の外観を構成する外板パネル用鋼板は、プレス加工時に面ひずみを生じないよう母材のYSが低いことが求められ、部品

性能からの要求と矛盾する点が長年の課題となっていた。

この矛盾を解決するために開発されたのが、固溶Cによるひずみ時効を活用して車の塗装焼付工程で硬化するBH (Bake Hardenable) ハイテンである。焼付硬化は、鋼中の固溶Cが塗装焼付処理 (170℃で約20分保持される) 中にプレス加工で導入された転位に拡散移動・固着することによってYSが上昇する現象である。IF鋼板をベースとした固溶Cの制御方法には、製鋼段階でTiやNbに対して過剰のCを残す方法⁶⁾と、高温焼鈍により炭化物の一部を溶解させる方法⁷⁾の2種類がある。前者ではC、Ti、Nbの高精度な精錬技術が必要のほか、冷延・焼鈍工程で固溶Cが存在するため高 r 値を得るには不利となる。後者では高温焼鈍が可能な設備が必要となり設備の負荷が大きい。それぞれに一長一短があり、鋼板を製造する設備に応じて最適設計がなされている。BH量 (塗装焼付後に上昇するYSの量) は固溶C量に概ね比例するが、BH量が60MPaを超えると室温での時効が進み、プレス加工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ため、一般にBH量は20~50MPaに制御される。IF鋼板をベースとしたBHハイテンは現在340MPa級まで実用化されている。

最近、低炭素鋼をベースとし、組織制御によりYSを340MPa級と同等に抑えた390~440MPa級のBHハイテンも開発されている⁸⁾。この鋼板ではこれまでのIF鋼板をベースにしたものとは異なり、降伏比 (YR) の低いDP鋼板をベースとし、焼鈍の過時効工程でフェライト相中の固溶C量を制御する。DP組織化したことで高BHと室温での時効性の両立も達成されている。DP鋼板は一般に r 値が低い伸びが高く張り出し性に優れるので、この鋼板はドアやフードなど蓋物外板への適用が進んでいる。パネル用BHハイテンの特性例を表2に示す。

3.2 車体骨格

車体骨格用には現在主として590~980MPa級のHSLA鋼板やDP鋼板の冷延もしくは合金化溶融亜鉛めっき (GA) ハイテンが使用されている。HSLA鋼板は比較的軽度の加工を受ける部品や曲げ主体の部品に、またDP鋼板は張り出し加工などで大きなEIが必要となる部品に用いられる。第2章で述べたように一般にDP鋼板の λ は低いが、980MPa級の冷

表2 外板パネル用BHハイテンの特性例

	YS/MPa	TS/MPa	EI/%	r 値	BH/MPa
340BH	242	354	41	1.93	35
440BH	257	455	37	1.01	57

延ハイトンではフェライトの強化やマルテンサイトの軟質化によって λ を改善する手法が開発されている⁹⁻¹¹⁾。当然EIと λ とはトレードオフの関係になり、部品の形状・加工方法に応じて材料が選択される。一方、通常のDP鋼板をベースにした従来のこうした手法に加えて、DP鋼板中のマルテンサイト相を微細かつ連結するように制御する方法¹²⁾やベイニティックフェライトをベースにラス間に微細な残留 γ を導入する方法¹³⁾などにより従来よりもEIと λ のバランスに優れた鋼板も開発されている。さらに、フルマルテンサイトを焼き戻すことで機械かしめにも適合する高い λ を実現した鋼板¹⁴⁾や、よりEIを向上させたTRIP鋼板¹⁵⁾の開発も進んでいる。980MPa級におけるこれらのまとめを図2に示す。

近年、さらなる軽量化を目指して980MPa級を超えるDP鋼板およびTRIP鋼板のニーズが高まっている。いずれの鋼板の場合も980MPaを超える強度を得るには硬質相の分率を上げるか、C量を上げて硬質相の硬度を上げる必要があるが、前者は伸びが低下する傾向があるため後者の手法が取られることが多い。一方、C量を上げるとスポット溶接部の十字引張強度(CTS)が低下するほか、軟質相と硬質相の硬度差が広がるため穴広げ率も低下するので、どこでバランスさせるかは製造側(鉄鋼メーカー)と使用側(自動車・部品メーカー)の密接な情報交換が必要となる。高C化した材料のスポット溶接部CTSの問題に関しては、本通電後に接合部を焼き戻すテンパー通電や、それをベースに生産性向上を図った新しい手法などが開発されつつある^{16,17)}。1180MPa級適用の動きは徐々に活発になってきており、至近1180MPa級の冷延TRIP鋼板をセンターピラーに適用する事例が報告されている¹⁸⁾。

ところで、GA鋼板の場合はめっきポットから合金化処理の工程でパーライトが生成する温度域に保持されるため、マルテンサイトの分率低下や残留オーステナイトの分解が生じ

やすい。すなわちGAのDP鋼板、TRIP鋼板を製造するのは難度が高く、パーライト変態を抑制するために冷延鋼板に比べてMn、Mo、Crなどの元素が多量に添加される傾向にあるが、これらの添加元素もスポット溶接性に影響をおよぼすので注意が必要である。一方でめっき品質の観点からこれまで添加を避けてきたSiの活用¹⁹⁾を含め、めっき技術の改善によるGAハイテンのEI向上も開発が進んでいる²⁰⁾。

980MPa級を超える超ハイテンを冷間プレスする場合、最も大きな問題となるのが寸法精度(スプリングバック)である。成形品の寸法精度不良は後工程のスポット溶接で溶接不良を招くだけでなく、車体剛性などの性能にも悪影響をおよぼすことがあるので様々な対策がとられている。

加工工法の観点では、成形様式を絞りからスプリングバックの起きにくい曲げに変更したり、張力制御成形²¹⁾を取り入れるなどの工夫がなされている。一方、近年急速に発達してきた成形シミュレーション技術を活用してスプリングバックを事前に予測し金型形状を最適化する方法も活発に開発が行われている。複雑な成形工程が取られる場合にはバウシinger効果に注意する必要がある。バウシinger効果は鋼板をある方向に変形した後で逆方向の変形を加えらるとのYSよりも低いYSで降伏する現象であり、材料の強化機構によっても変化することが知られている。

超ハイテンを適用する場合のもうひとつの問題が遅れ破壊である。遅れ破壊は高強度の部品が静的な負荷を受けた状態である時間経過後に突然脆性的に破壊する現象で、自動車部品の場合、外部(環境)から侵入した水素に起因すると考えられている。

プレス加工後に使用される自動車用薄鋼板の遅れ破壊に関しては、(1)材料の微視組織、(2)加工ひずみ、(3)残留(負荷)応力、(4)環境水素量の4つの要因が重要となる。すなわち、材料に応じて遅れ破壊が懸念される使用条件(ひずみ、応力、侵入水素量)の領域を予め試験評価で明確化し、実際のプレス部品の加工状態、応力状態、侵入水素量と比較することでプレス部品の実使用環境での遅れ破壊の危険性を予測できるものと考えられる。これに対応した手法はいくつか考えられるが、たとえば曲げRを変えることで加工ひずみを、またボルトによる締め付け量で負荷応力を調整した曲げ試験片を種々の濃度の塩酸溶液に浸漬することによって遅れ破壊の危険領域をマップ化する手法が提案されている²²⁾。結果の一例を図3に示す。酸に浸漬する手法は簡便な加速試験として広く用いられているが、鋼板とさびの界面が酸による溶解で平滑となるため、実際の大気腐食で生じる鋼板表面の凹凸の影響が反映されないという問題がある。表面の凹凸は実効面積の増大や応力集中として作用する可能性が考えられる。そこで実際の腐食環境に近い状態で遅れ破壊を評価する

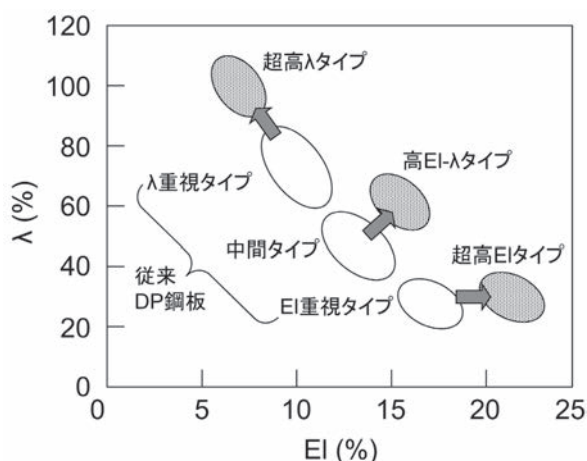


図2 980MPa級冷延ハイテンのEI- λ バランス

ため、上記と同様に作製した曲げ試験片を複合サイクル試験 CCT (Cyclic Corrosion Test) に供する手法も提案されている²³⁾。

骨格部品の一部やドアインパクトビームなどの補強部品では1180MPaを超えさらに強度の高い1320~1470MPa級を適用するニーズも高まっている。このクラスになると、通常のプレス加工で形状を出すのは困難になるため、ロールフォーミングや後述する熱間プレスなどの方法が用いられることが多い。ロールフォーミングのような冷間加工を行う場合には曲げ性が重要となることから、組織が均一で全EIが大きくなる焼き戻しマルテンサイトやベイニティックフェライト中に微細残留 γ が分散した組織がベースにされる。

補強部品では熱間プレス (ホットスタンプ、ダイクエンチなどとも呼ばれる) 技術の適用も進んでいる。この手法は鋼板を900℃前後に加熱した後、水冷金型でプレスすることにより成形と焼入れをほぼ同時に行うもので、Cを0.2%程度添加した鋼板の場合約1500MPaのTSが得られる。加工中は軟鋼とほぼ同等の強度になるので図4に示すように前述したスプリングバックの問題がなく²⁴⁾、遅れ破壊に関しては加工歪の影響を除外できるメリットがある。課題は焼入れのためにプレス下死点で数十秒保持する必要がある点と表面酸化を生じる点、すなわち生産性である。めっきのない裸材は900℃の加熱中に酸化してスケールを生成し、部品加工後にショットブラストなどで除去する必要があるため、スケールガード用にAl系、Zn系の様々な種類のめっき材が開発されている。ただし部品に加工した後の防食仕様を満足するめっき材はまだ実用化されておらず、今後の開発が期待される。熱間プレスが適用された部品の例を図5に示す²⁵⁾。

3.3 足回り

足回り部品は剛性のほか、疲労強度や穴あき耐食性などが

要求されるため、車体骨格部品に比べると相対的に板厚の厚いものが多く、一般に熱延鋼板が使用される。熱延ハイテンが使用された自動車の足回り・シャシー部品の例を図6に示す²⁶⁾。

足回りの中でもハイテン化が進んでいる強度部品のひとつに、フロント・サスペンションのロア・アームがある (図7)。この部品はプッシュを入れる部分にフランジを立てる加工 (バーリング加工) があり、湾曲した部分の伸びフランジ加工とともに高い λ が要求される。図1は冷延鋼板におけるEI- λ バランスの例であるが、強化機構と各特性の関係は熱延鋼板でも原理的に同様で、DP鋼板やTRIP鋼板はEIは高いが λ は低いのでこのような部品には適さない。むしろEIは低い λ が組織的に均一で λ の高いベイナイト鋼板²⁷⁾ (ベイニティックフェライトと炭化物からなる組織) やフェライトを超微細炭化物で強化した鋼板²⁸⁾などが適しており、既に780MPa級が実用化されている。強度が重要なロア・アームについては今後さらに高強度の熱延ハイテンの適用も検討されていくものと思われる。

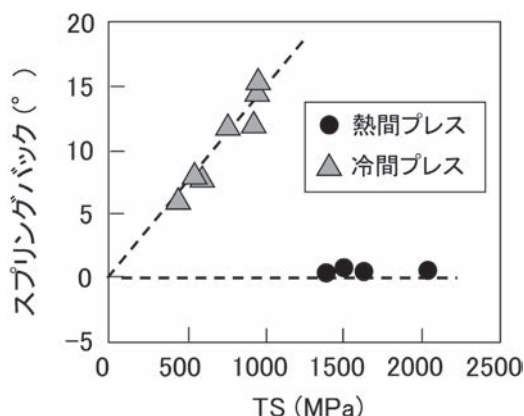


図4 熱間プレスと冷間プレスのスプリングバックの比較

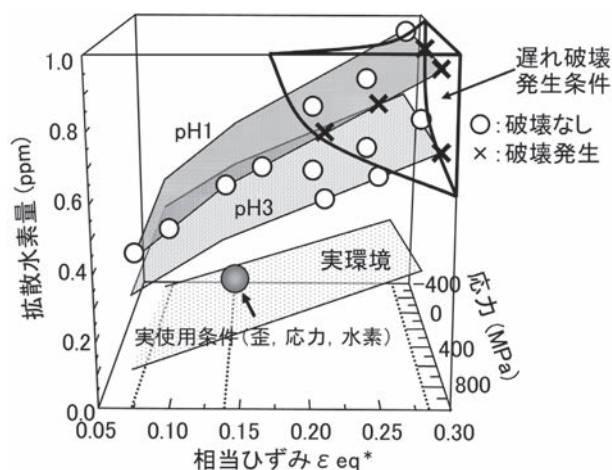


図3 曲げ試験片を用いた1180MPa級冷延ハイテンの遅れ破壊評価例

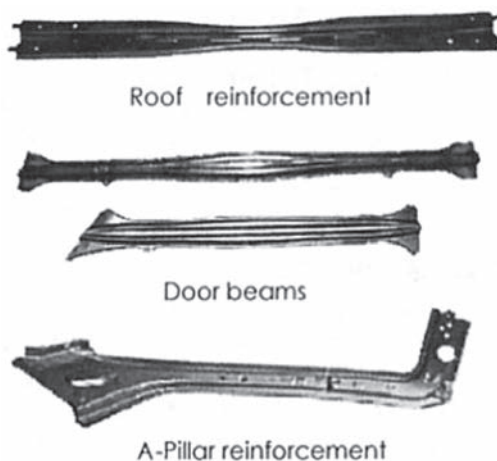


図5 熱間プレスによる部品の例

また、ロードホイールも比較的高テン化が進んだ部品のひとつである。銅板製のホイールはディスクとリムを別々に成形し最後に溶接して製造される。

ディスクは一部穴広げ成形される部分もあるが非常に複雑な絞り・逆絞りなどの工程があるため、伸びの高いDP銅板が主として使用される。部品にはハブ穴、ボルト穴、飾り穴など多くの穴があげられ、応力集中部となるため、部品特性上は切り欠き疲労強度も非常に重要である。疲労亀裂は銅板組織内で最も強度が弱い部分（DP銅板の場合はフェライト相）を伝播するので、フェライト相の強化や組織内での硬度差低減は切り欠き疲労強度の向上に対して効果がある。ホイールディスクについては590MPa級の適用が一般的となり、ごく一部で780MPa級の適用事例もある²⁹⁾。

一方、リムについては切断されたシートを円筒に丸めた後、フラッシュバット溶接などで溶接され、さらにロール成形で複雑な断面に加工される。従って溶接部の加工性や耐久性が重要であり、HAZ軟化を生じにくい析出強化銅板が多用される。要求される加工性がディスクほどは厳しくないことに加え、縁石に乗り上げた際に変形しない強度が要求されることなどから、リムでは既に780MPa級化が進んでいる。

さらに、熱延ハイテンはトラックフレームにも多用されている。トラックフレームは長尺の熱延銅板をプレスで曲げ加工し、左右の二本のフレームをクロスメンバーで接合して製造される。すなわち、使用される銅板には曲げ加工性に加え

良好な溶接性と疲労強度が必要となる。

トラックフレームは積載量制限が厳しい小型トラックの車体重量軽減のため1960年代からいち早くハイテン化された部品のひとつである。1970年代には現在の590～690MPa級の析出強化銅板の基礎とも言うべきTiあるいはNb添加型の熱延ハイテンが開発・適用された³⁰⁾が、それ以上の高強度化は軽量化のためにあけられる打ち抜き穴とアーク溶接部の疲労強度が律速して思ったようには進んでいない。

打ち抜き穴の疲労に関しては打ち抜き端面の粗度が影響すること、および打ち抜き端面の粗度には銅板組織の均一性が影響する³¹⁾ことが知られており、組織を微細化したDP銅板やペイナイト系の単相銅板などが開発されている。

アーク溶接部の疲労強度は銅板自体の特性よりも溶接止端部の形状（応力集中）の影響が強く、施工方法に依存する部分が大きいが、プラズマアーク溶接と炭酸ガスアーク溶接を組合せ、止端部の応力集中を軽減するような溶接方法の開発³²⁾も進んでおり、これを適用することで疲労強度が格段に向上することが確認されている。

4 おわりに

車の部品ごとに最適化された先進ハイテンについて、その設計思想と組織制御の方法、および至近の適用事例について主なものを紹介した。自動車車体におけるハイテン適用部位をまとめたものを表3と図8に示す。

今後ハイブリッドカーや電気自動車が普及したとしても車体軽量化による省エネルギーのニーズは変わらず、銅板のハイテン化を中心としてコストパフォーマンスを考慮しながら材料選択がなされていくものと思われる。車体骨格用のハイテンの強度が1500MPaに達する中、加工性の優れたハイテンの開発に加えて超ハイテンの成形や異種材料との接合、防食など様々な利用技術の重要性もますます高まるものと考えられる。

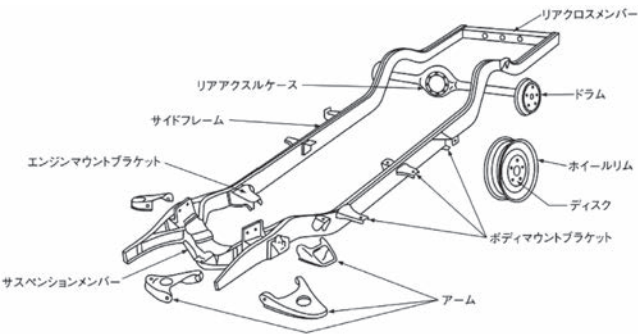


図6 熱延ハイテンが適用された足回り・シャシー部品の例



図7 ロア・アームの外観例とλが必要な部位

表3 部品別適用ハイテンの強度と品種・鋼種

部品名		TS (MPa)							
		340	440	590	780	980	1180	1320	1470
外板	フード、ドア	○●	●						
	フェンダー、ボディサイド	○●							
車体骨格	ビラー(アッパー部品)			●	●	●	●	●	△
	ロッカー(アンダー部品)			●	●	●	●	●	●
	フロント・サイド・メンバー		○●	●	●	●			
補強	ドア・ガード・バー、バンパー・レインフォース						●	●	△
足回り	ロア・アーム		■	■	■				

【品種】 ○:冷延、●:冷延GA、□熱延、■熱延GA、△:熱間プレス
【鋼種】 □:IF鋼、▨:HSLA鋼、■:DP鋼、■:TRIP鋼、▨:マルテンサイト鋼

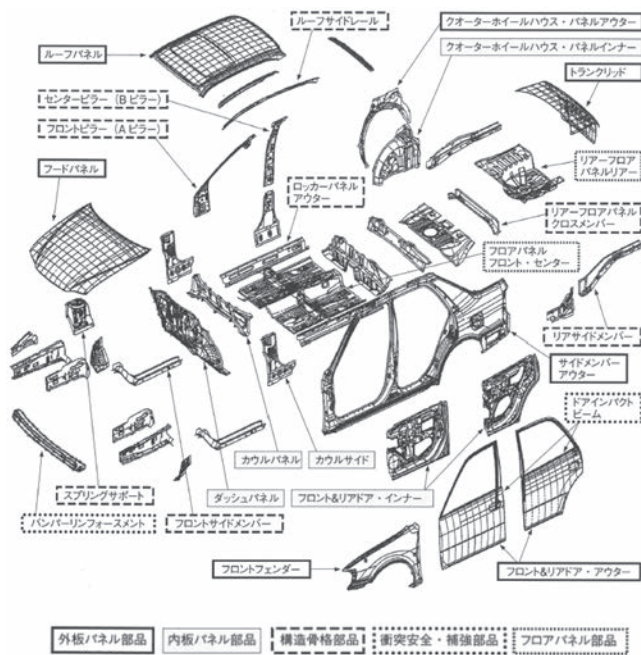


図8 自動車車体のハイテン適用部位

参考文献

- 1) たとえば滝田道夫, 橋本浩二, 栗山幸久: 材料フォーラム, 9835168, JSAE, (1998)
- 2) 高張力鋼板WG活動報告書 (平成13・14年度), 日本鉄鋼協会・自動車技術会, 自動車用材料共同調査研究会編, 日本鉄鋼協会, (2003)
- 3) 田村今男: 鉄と鋼, 56 (1970), 429.
- 4) H.Takechi and O.Akisue: Proc. of Conf. on HSLA Steels, The Chinese Soc. Of Metals, (1985), 977.
- 5) 瀬戸一洋, 奥田金晴, 坂田敬: 川崎製鉄技報, 27 (1995), 156.
- 6) 伊丹淳, 浅野裕秀, 潮田浩作, 木村義孝, 木村徳俊, 小山一夫: 新日鉄技報, 354 (1994), 22.
- 7) 佐藤進, 岡田進, 加藤俊之, 橋本修, 花澤利健, 恒川裕志: 川崎製鉄技報, 23 (1991), 294.
- 8) 小野義彦, 高橋健二, 岩間隆史, 梶山浩志, 櫻井理孝: までりあ, 51 (2012), 22.
- 9) 大宮良信: 神戸製鋼技報, 50 (2000) 3, 20.
- 10) 野中俊樹, 後藤真一, 谷口裕一, 山崎一正: 新日鉄技報, 378 (2003), 12.

- 11) 妻鹿哲也, 長谷川浩平, 川邊英尚: JFE 技報, 4 (2004), 33.
- 12) 杉本公一, 坂木庸晃, 福里俊郎, 宮川大海: 鉄と鋼, 71 (1985), 994.
- 13) K.Sugimoto, J.Sakaguchi, T.Iida and T.Kashima: ISIJ Int., 40 (2000), 920.
- 14) 長谷川浩平, 占部俊明, 山崎喜政, 吉武明英, 細谷佳弘: まてりあ, 42 (2003), 76.
- 15) 中屋道治, 向井陽一: 神戸製鋼技報, 59 (2009) 1, 46.
- 16) 松下宗生, 谷口公一, 大井健次: JFE 技報, 30 (2012), 32.
- 17) 古迫誠司, 渡辺史徳, 村山元, 濱谷秀樹, 及川初彦, 高橋靖雄, 野瀬哲郎: 新日鉄技報, 393 (2012), 69.
- 18) 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.
- 19) 二村裕一, 三浦正明, 経澤道高: 神戸製鋼技報, 61 (2011) 2, 41.
- 20) 長谷川浩平, 金子真次郎, 瀬戸一洋: JFE 技報, 30 (2012), 6.
- 21) 山崎雄司, 由田征史, 佐藤健太郎: 特開 10-225723.
- 22) 田路勇樹, 長谷川浩平, 重本晴美, 川邊英尚, 藤田毅, 田中靖, 中村肇, 石田博, 坂本博之: 自動車技術会論文集, 39 (2008), 133.
- 23) 衣笠潤一郎, 湯瀬文雄, 経澤道高, 向井陽一: 神戸製鋼技報, 61 (2011) 2, 65.
- 24) 小嶋啓達: 材料フォーラム, 20044499, JSAE, (2004)
- 25) 中嶋勝司: CAMP-ISIJ, 17 (2004), 980.
- 26) 堀敬二: 住友金属, 33 (1981) 4, 468.
- 27) 高橋学, 河野治, 林田輝樹, 岡本力: 新日鉄技報, 378 (2003), 7.
- 28) Y.Funakawa, T.Shiozaki, K.Tomita, T.Yamamoto and E.Maeda: ISIJ Int., 44 (2004), 1945.
- 29) 森田正彦, 清水哲雄, 古君修, 青柳信彦, 加藤俊之: まてりあ, 37 (1998), 513.
- 30) 本田英美: 自動車技術, 23 (1969), 648.
- 31) 富田邦和, 塩崎毅, 占部俊明, 大澤紘一: 鉄と鋼, 87 (2001), 557.
- 32) 松下宗生, 片岡時彦, 池田倫生, 遠藤茂: 溶接学会論文集, 30 (2012), 77.

(2013年8月21日受付)