

特集記事 3

自動車の軽量化に資する鉄鋼材料

—ULSABプロジェクトを中心に—

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 部長 伊藤 叡 Satoshi Itou

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 主幹研究員 岸田宏司 Kouji Kishida

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 主幹研究員 栗山幸久 Yukihiisa Kuriyama

Steel Supporting Lighter Auto Body

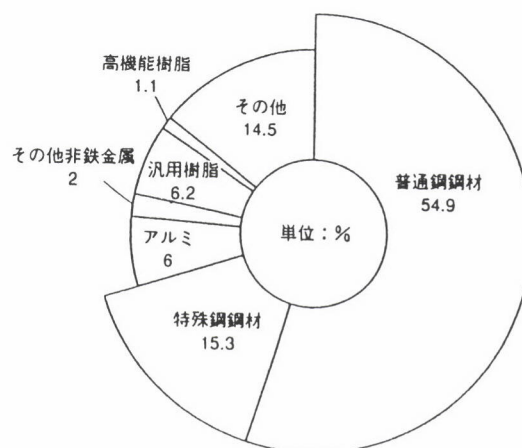
—ULSAB Project as An Example—

1 まえがき

世界的な環境保護の動きに呼応して、鉄鋼の生産プロセス及び鉄鋼製品両面から環境負荷軽減のために、いろいろの努力が払われていることは言うまでもない。前者については既に他章にのべられている。一方後者の分野においても、環境に負荷を与えない材料開発を通じて、他産業のそうした動きに対応してきている。特に自動車産業は、その数量からも環境へのインパクトは大きく、国ごとに多様な対策がとられている。例えば米国では燃費規制CAFE (Corporate Average Fuel Economy : 27.5mile/gallon) の制定後、クリントン大統領提案によるPNGV (Partnership for New Generation of Vehicle : 80mile/gallon 車の開発) プロジェクトが93年度にスタートし、また欧州では100km/3Lの画期的な低燃費車の開発目標が掲げられた。PNGVプロジェクトでは、産学官共同で低燃費エンジンの開発や車体重量50%減を目標に取り組んでおり、すでにP2000と呼ばれる超軽量車(プロトタイプ)の中間報告もなされている。

ところで現行の自動車材料を原材料面からみると、図1¹⁾のように小型普通乗用車の平均材料構成比率はおおよそ鉄鋼70%(うち普通鋼55%、特殊鋼15%)、アルミニウム6%、プラスチック7%となっており、鉄鋼材料が圧倒的な数量を占めている。自動車を構成する主要鋼材は普通鋼鋼材である薄鋼板であり、1995年には表面処理鋼板を含めた冷延鋼板と熱延鋼板を合わせて1000万トンを超える量が自動車産業で消費されている。

従って主要材料である鉄鋼製品により、自動車車体をどこまで軽量化できるかは、当然の帰結とも言うべき課題であった。そこで軽量車体の開発気運に呼応して国際鉄鋼協会(IISI)主導のもと、世界18カ国35の鉄鋼会社が共同で鋼製超軽量車の開発プロジェクトULSAB(Ultra Light Steel

図1 普通・小型乗用車における原材料の構成比率¹⁾

Auto Body) をスタートさせた。このプロジェクトは、鋼製車体でも最先端の技術を駆使することで車体機能・衝突安全性を維持しつつコストアップなしで軽量化可能なことを、机上設計から試作車の製造・評価まで実施することにより実証するのが目的である。各自動車メーカーも低燃費のための軽量車体のみならず、衝突安全確保に補強材を使用することによる重量増対策技術開発も進めており、まさに時宜をえたプロジェクト提案であった。1994年のスタートから4年間遂行してきたプロジェクトは、当初目標を十分満足する結果を得ることができ、鉄鋼メーカーの手による超軽量ホワイトボディの試作は低燃費車の開発に一石を投じることとなった。

ここでは自動車の軽量化に寄与する鉄鋼材料の例として、上記ULSABプロジェクトに、どのようにハイテン(高張力鋼板)が使用されたかを概観するとともにハイテン開発の最近の動きをあわせて述べる。

2 ULSABプロジェクトの概要²⁾

ULSABプロジェクトは、現在ある、最先端の技術を用い、部品相互の相関性まで考慮した車体全体にわたる軽量化設計(Holistic Design)を行うことにより、剛性や衝突安全性を損なうことなく鋼製ホワイトボディを軽量化・低コスト化できることを実証するのが目的である。実際の設計・試作はポルシェ・エンジニアリング・サービスに委託して行われており、以下のフェーズ構成で進められてきた。

フェーズ1：ホワイトボディの設計 '94年春～'95年冬
フェーズ2：詳細設計と試作・評価 '95年冬～'98年春
すでにフェーズ2のULSABカー試作及び評価を完了しており、'98年5月にプロジェクトは終了した。ULSABプロジェクトは、2000年に量産車としての実車化を目標に表1に示す日米欧の代表的な比較9車種の車体寸法をもとに開発目標車の仕様を同表1のように設定した。

具体的にはフォード社トラスクラスの4ドアセダン相当の車体が目標である。また、ホワイトボディの軽量化を検討するに当たり、現行車種の車体性能を損なうことがないように車体剛性、NVH(Noise Vibration Hindrance；騒音振動障害)を基準パラメーターに選び、表1に示す比較車の平均を目標値として設定した。

図2は「車体ねじり剛性」について比較車9車種とULSABプロジェクトの目標を比較対照した図である。図中の●印は表1の比較参考車のホワイトボディ重量とねじり剛性の値の関係を示す。また、図中に示された線は、車体重量を単純に低減した場合のねじり剛性低下割合を示す。比較車の平均重量は271kgであるが、これら比較車種も2000年には250kgまで軽量化が進むと推定(参照車値とする)し、2000年時点でも競争力があるように参照車値からさらに20%減の200kgがULSABカーの車重目標値である。

表1 ULSABプロジェクト車体の開発目標
(仕様、重量、剛性など)

開発目標車の仕様			
ボディ形式	4ドアセダン	ホイールベース	2700mm
乗員	5名	全長	4800mm
駆動形式	F.F.	全幅	1800mm
エンジン	3L V6	車重	1350kg

比較車の重量と剛性と ULSAB 達成目標

	比較車 Av.	参照車	ULSAB 目標
重量 kg	271	250	<200
ねじり剛性 Nm/deg	11,531	13,000	>13,000
曲げ剛性 N/mm	11,902	12,200	>12,200
1次固有振動数 Hz	38	40	>40

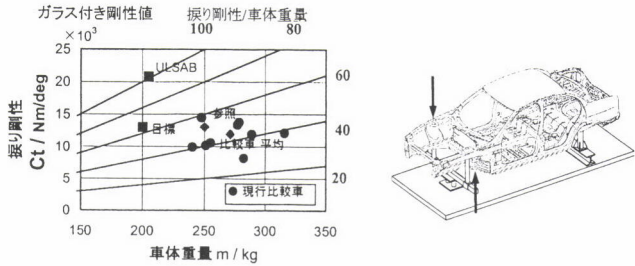


図2 車体重量とねじり剛性の関係及びその測定方法

重量に対する曲げ剛性の目標値は、現在の比較車のまげ剛性平均値を若干上回る12,200N/mmとしている。同様に表1に示したねじり剛性やNVHにも目標値を設け、対重量とのバランスを取っている。

衝突安全に関しては、35mile/hでのフルラップ全面衝突と後面衝突、欧州動的バリア測定テストによる側面衝突、及びブルーフラッシュの有限要素法(FEM)解析を実施し、フェーズ2では'98年の欧州規制に対応するようにオフセット衝突の解析も追加して、最新の衝突規制をクリアできるよう設計している。

3 プロジェクトと鉄鋼材料³⁾

現行比較車に比べ25%以上の車体重量低減と衝突安全性を両立させるために、ULSABプロジェクトでは有限要素法(FEM)による数値シミュレーション技術を駆使して「設計・材料・製造技術の最適化」を同時に進めていった(即ち Simultaneous Engineering)。

その結果、構造設計、生産技術、材料技術それぞれに特徴ある要素技術を得ている。即ち、貫通継手をもつ一体成形構造部材など合理的な応力伝達構造、テーラードブランク、ハイドロフォーム、レーザ溶接などの新しい生産技術、さらにハイテンの多用である。

ここでは特に材料仕様の状況から如何にハイテンが軽量化と衝突安全確保に大きな役割を果たしたかをみでみる。

設計された車体性能はねじり剛性19,056Nm/deg、曲げ剛性12,529N/mm、1次固有振動数51Hzとなり、当初の剛性目標値をすべて満足している。すなわち、比較車平均以上の剛性を満足し、全面衝突などの安全対策も十分満足しながら、ホワイトボディ205kgと比較車平均重量に対し66kg(24%)の軽量化を達成できた。この軽量化における各技術の寄与は明示されていないが、構造最適化+ハイテン化の寄与が軽量化効果の約6割、テーラードブランク材とハイドロフォームの寄与が合わせて約3割強と推定されている。

また安全基準に関しては'98年10月よりフルラップ(全前

面)より厳しいオフセット(片側前面)衝突対応が欧州で導入されるため、フェーズ2ではオフセット衝突解析を実施し、側面衝突対策と併せて表2の設計変更を行った。

衝突対策での最大の変更点は、ハイテン強度及びその使用比率の大幅なアップである。これは部材の強度を上げることにより衝突時のエネルギー吸収を向上させられること及び客室の変形を抑制し、生存空間をより確保できることのためである。図3にホワイトボディに用いた材料を強度レベル(YP)で整理した。YP210MPaをハイテンと定義すれば、フェーズ1初期の衝突対策前にはハイテン使用比率は20%程度であったが、フェーズ1の前面・側面衝突及びフェーズ2でのオフセット衝突対策後にはハイテン使用比率が91%まで高くなり、かつYP350MPaの割合が45%を占めた。日本と欧米でハイテン定義が異なるため正確な比較は難しいが、日本の定義である $TS \geq 340\text{MPa}$ とすればハイテン比率は64%~91%の間となる。なお、 $YP > 550\text{MPa}$ 級ハイテンも用いられたが、適用部位はクロスメンバーの3点に限られる。ハイテン使用の全体展開図を図4に示す。(図3の色別に強度の別を表す。)日本の現行車のハイテン使用が30%前後であることを考えると非常に高い使用率である。

TS換算(推定)での用いた材料の伸びとTSの関係を図5に示すが、グローバル調達を前提としているので、一部のDP鋼(Dual Phase鋼)を含め、一般的なハイテンである。

表2 衝突対策のための主要な設計変更点

技術	部品	設計変更点
材料 (ハイテン)	全体	・ハイテン適用割合・強度の大幅アップ → YP210MPa以上のハイテンが91%。
	フロント・サード・レール・イン	・350MPa → 420MPa化し、ビードを3本付与。
	フロントメンバー	・YP600MPa以上の超ハイテン化。
材料(軽量化)	フロントメンバー	・排気系の熱と衝突対策の問題のため軽量化用鋼板は中止。
チーロード・アライク	フロントレール	・チーロード・アライクの分割数を2→3とし、350MPa(YS)化。
16部品 重量比45%	ピッチ〜A・ピッチ〜B	・ピッチ〜B・チーロード断面大型化。
	ピッチ〜A・チーロードのB・チーロード前面相当部	・ピッチ〜A・チーロードのB・チーロード前面相当部は350MPa化し、板厚1.4mm → 1.7mm。
構造	B・ピッチ	・ロガー・インナーをB・ピッチ付け根に延長挿入し、リブ形状変更。
	フロントレール・エクステンション	・断面寸法を拡大するとともにビードを設置して断面剛性向上。

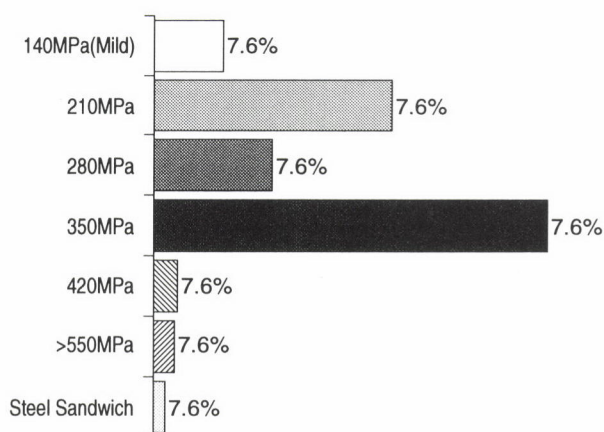


図3 使用された鋼板の強度別の割合 (但しYP降伏強度による表記)

また使用された板厚の分布を図6に示す。32%以上が0.7mmと0.65mmの板厚で薄肉化している。このような材料で目標の車を試作し、車体性能を評価した結果表3に示す様にオフセット衝突対策などにより重量増があったものの、最終的に203kg、比較車に比べて68kg(25%)もの軽量化を達成した。図7にその車体の状況を示す。

以上のようなハイテンの軽量車体による低燃費車のほかに、環境に対してはリサイクルの観点も必要である。欧州では廃車リサイクル法案(廃車時の車体重量に占めるリサイクル・リユース・リカバリング率を1997年時点の75%から2005年85%、2015年95%へ)が検討され、年々厳しくなる状況にある。その点、鉄は他の競合材料に比べリサイクル率やインフラ整備状況において優れており、リサイクルに適した材料といえる。さらに、鉄の再生時に排出されるCO₂は鉱石からの場合に比べて75%削減できるなどリサイクルによる環境問題への寄与も大きい。また、ホワイトボディ重量25%軽減は車体重量換算で約7%程度と見込まれ、エネルギー使用量、排出物削減にも大きな効果をもたらす。

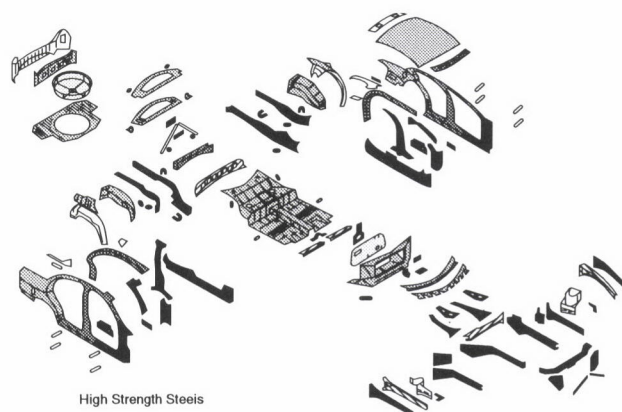


図4 強度別使用部品の展開図

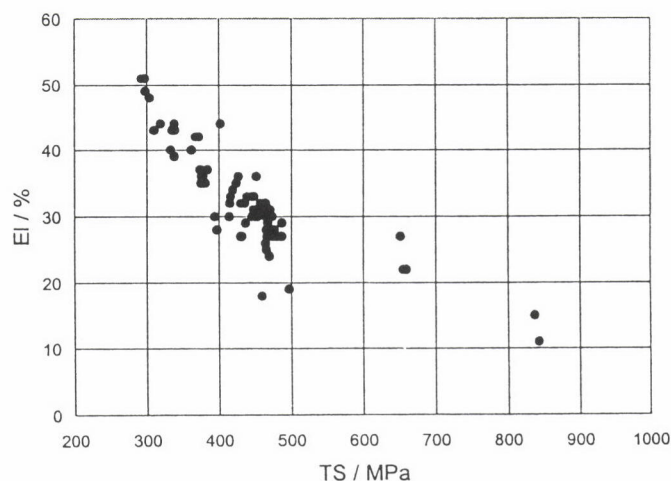


図5 使用された鋼板のTS引張り強度(換算値)と伸びの関係

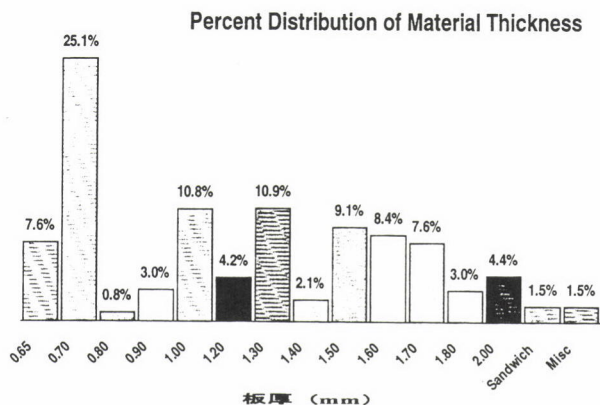
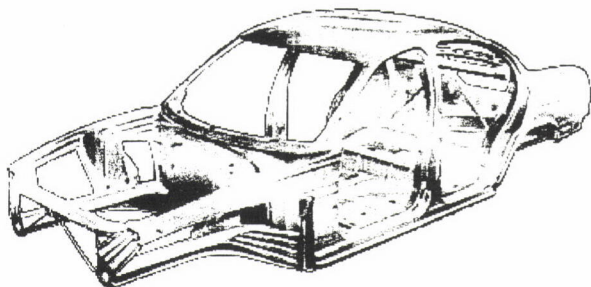


図6 使用された鋼板の板厚分布

表3 ULSABプロジェクト車体の試作結果

	比較車	参照車	目標値	ULSAB(1)	ULSAB 試作	対比較車
ホワイトボディ重量 (kg)	271	250	200	205	203	-68
ねじり剛性 (Nm/deg)	11,531	13,000	13,000	19,056	20,800	9,269
曲げ剛性 (N/mm)	11,902	12,200	12,200	12,529	18,100	6,198
1 次固有振動数 (Hz)	38	40	40	51	60	22
部品点数 (個)	195	200		169	158	-37


図7 ULSABプロジェクト車体の外観
(ユニボディ構造+フレーム構造)

4 自動車用高強度鋼板(ハイテン)

前節までに述べたように、自動車の軽量化と衝突安全の確保には高強度鋼板が必須である。図8にいろいろの熱延鋼板、冷延鋼板のハイテンの伸びー強度バランスを示す。最も一般的に用いられるのは固溶体強化ハイテンであり、下記のP、Si、Mnなどの添加鋼板がその例である。析出強化ハイテンも時に使用されるが、伸びが十分でなく成形性を重視する自動車用には少ない。

本節では上記の自動車への応用からみた最近の高強度鋼板の特徴を述べる。

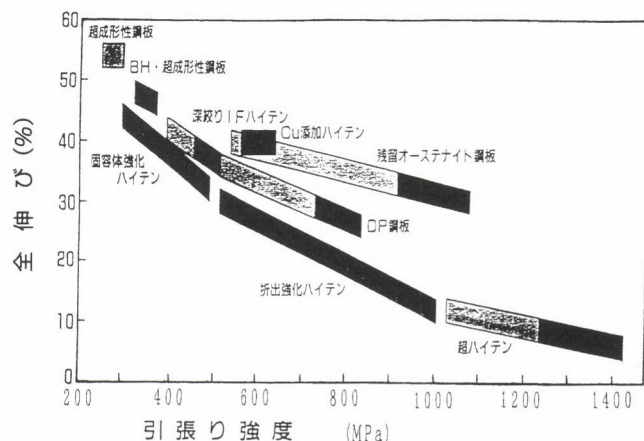


図8 主要な熱延鋼板・冷延鋼板のTS引張り強度と伸びの関係

4.1 固溶体強化型鋼板

これらはいずれも自動車外板や内板パネルへの使用を第一に考えた高強度鋼板で、難しい成形性から引張強さで340Mpa以下のものが多い。補強材等には合金添加より450Mpa級にしたものも時に使用されている。

自動車外板パネルに使用される高強度鋼板の必要条件は、高いr値と低い降伏点である。低降伏点が必要な理由は、プレス時の面ひずみを防止するためには降伏点は240Mpa以下でなければならないことが経験的に知られているからである⁴⁾。C、Si、Mn、Pなどを添加してフェライト地を硬くすることが鋼を強化する基本であるが、深絞り用鋼板に主として用いられるのはPである。この理由はP以外の元素は固溶Cが共存するとr値を低下させるためである⁵⁾。P添加低炭素Alキルド鋼板は1.6程度の高いr値をもち広く使用されているが、外板パネルに使用される場合には、降伏点を240Mpa以下にするために、その強度グレード(日本では引張り強さで表す)は340Mpa級以下に現在は制限されている。

P添加低炭素Alキルド鋼板よりもさらに深絞り加工性の優れた鋼板が、IF鋼にP、Mn、Siなどの固溶体強化元素を添加して製造される^{6,7)}。この鋼板には固溶炭素や固溶窒素が存在しないので基本的には非時効性鋼板である。固溶炭素が存在しないと二次加工脆化が起りやすくなるが、これを防止するのにBを微量添加⁸⁾することもある。

4.2 焼付硬化型(BH: Bake Hardening)鋼板

焼付硬化型鋼板はプレス成形時は軟質で、塗装焼付時に硬化する。この鋼板は当初、低炭素Alキルド鋼の箱焼鈍法で開発されたが、現在は主として成形性の優れた極低炭素鋼板をベースに製造されている。この鋼板は固溶炭素を鋼板中に適量残存させ、プレス成形時に導入される転位を塗

装焼付時の熱を利用して固溶炭素で固着し、降伏点を上げることが意図した鋼板である。焼付硬化(BH量)はプレス成形時のひずみ量によって変化し、低ひずみ域で大きいので、BH鋼板の用途としてはドアやフードなど比較的加工度の低い部品が適している。この種のパネルでは小石が飛来して凹むことに対する抵抗(耐デント性)が必要で成形後高降伏強度になるBH鋼板は最適である。図9にデント深さと焼付硬化鋼板の効果を示す⁹⁾。ただし常温時効による劣化を起こさせないためにBH量は約30~50MPaの範囲に制限される。最近ではハイテン化の動きから340MPa級のものがパネル類に多用されてきている。

4.3 組織強化型鋼板

自動車のメンバー類や足廻り用の鋼板として引張り強さが450Mpa級の組織強化鋼板が使用され始めている。その一つであるDP鋼板(Dual Phase鋼板)はフェライト相とマルテンサイト相からなるミクロ組織をもつ鋼板であり、マルテンサイト相に隣接するフェライト相の粒界近傍に存在する可動転位により、同じ引張り強さでも降伏点が低く、低降伏比となる。このため加工時の弾性回復量が小さく形状凍結性に優れる。また析出強化鋼板に比べて伸びが大きく、張り出し加工性に優れ、疲労耐久性も優れている¹⁰⁾ことからホイールディスクなどに使用されている。また後述のTRIP鋼とともに衝突時相当の高ひずみ速度下で、比較的エネルギー吸収に優れるので強度メンバー材にも試用されつつある。

ベイナイトを主体にした熱延鋼板は強度範囲が440~880MPaにわたるが、その特徴は伸びフランジ性に優れる点にある。これはミクロ組織が非常に均一なためである。ミクロボンドの起点となりうるセメントサイトを成分および熱延条件によって微細分散させた高伸びフランジ性の鋼板が開

発されている¹¹⁾。これらはサスペンション・リンクなど厳しいバーリング加工性が求められる部品に適している。

高残留オーステナイト鋼板は、最近その優れた成形性のみならず、衝突時のエネルギー吸収能の高さからも注目されている。図10¹²⁾に吸収能の結果を示す。この鋼板はもともとは張り出し成形性に優れた鋼板として開発された。この鋼はTRIP効果(変態誘起超塑性：Transformation Induced Plasticity)を利用した超延性鋼板であり、TRIP鋼板とも呼ばれる。ベイナイト、あるいはフェライト+ベイナイトの基地中に、変形によりマルテンサイトに変態する準安定オーステナイトが数%から30%程度残留した鋼板である¹³⁾。この鋼板はn値が高く張り出し性に優れているが、r値が1.0以下と低いにもかかわらず深絞り性にも優れていることは驚きである。上に述べたように、冷延鋼板の深絞り性は従来r値によりほぼ支配されるというのが一般的理解であった。ところがTRIP鋼は集合組織がランダムなためにr値は低い。にもかかわらずTRIP鋼が深絞り性に優れる理由は、オーステナイトが変形に誘起されてマルテンサイトに変態する仕方が、変形様式によって変わるためである。

4.4 熱処理強化型鋼板

また最近熱処理前には成形し易く、熱処理後強度向上するCu添加型高强度鋼板も使用され始めている。この鋼板は極低炭素IF鋼に1mass%を越えるCuが添加されており、熱処理前には390Mpa級IFと同等の成形性があり、500~700℃で数分間の熱処理後に590Mpa級の強度になる。この鋼板は熱延工程においてCuを固溶状態に保つために低温で巻き取り、冷延後、連続焼鈍すると深絞り性に好ましい再結晶集合組織が形成される。この鋼板は図11¹⁴⁾に示すように再結晶後に短時間熱処理をして、微細なCu粒子を析出

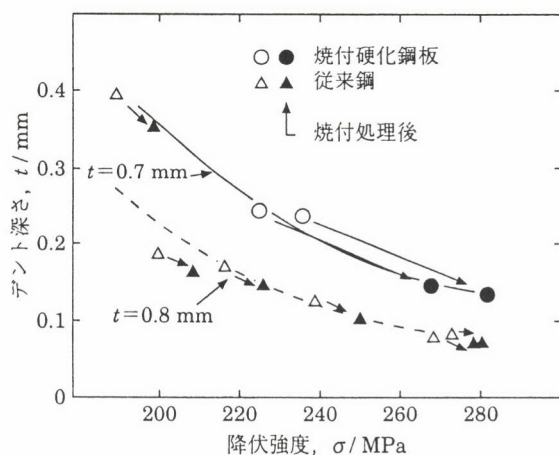


図9 デント深さに及ぼす焼付硬化鋼板の効果⁹⁾

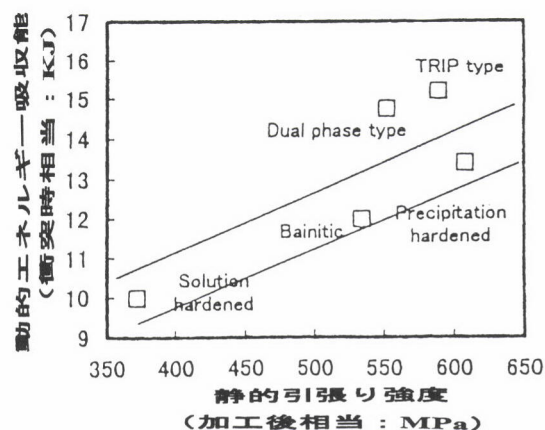


図10 いろいろな鋼板の静的引張り強度と動的エネルギー吸収能の関係¹²⁾

させることにより強度を上げることができる。そのため、引張り強さが590MPa級でr値が約1.9と高い鋼板として利用されるほかに、プレス成形したあとに熱処理を行う熱処理強化型鋼板として利用される。

4.5 超高強度鋼板

自動車の補強部品用途に、ベイナイトあるいは焼き戻しマルテンサイトを活用した強度レベルが980~1,470MPa級の超高強度冷延鋼板が開発されている¹⁵⁾。バンパーレインフォースメントなどの補強部品は主に曲げ成形で加工されるので、曲げ成形性を確保する必要がある。超高強度鋼板の曲げ成形性はミクロ組織の均一性との相関が強い。これは曲げ変形が加えられた時の亀裂発生が、軟質部と硬質部の界面あるいは硬質部の内部で生じることによると考えられる。また980MPa超の高強度鋼板では水素に起因する遅れ破壊にも配慮する必要がある。遅れ破壊の防止には水素のトラップサイトを制御することが必要で、炭化物の制限や残留オーステナイト量の制限¹⁶⁾がなされている。バンパーレインフォースメントは軽量化と運転操作性向上のために近年では980~1,180MPa級超高強度鋼板の成形品が使用されている。

5 おわりに

以上、ハイテン即ち高強度鋼板の使用による自動車の軽量化の具体例としてULSABプロジェクトの概要とその材料を述べるとともに、最近の自動車用高強度鋼板の動向をみてみた。

図5に示すように、それでもULSABではTS<500MPa

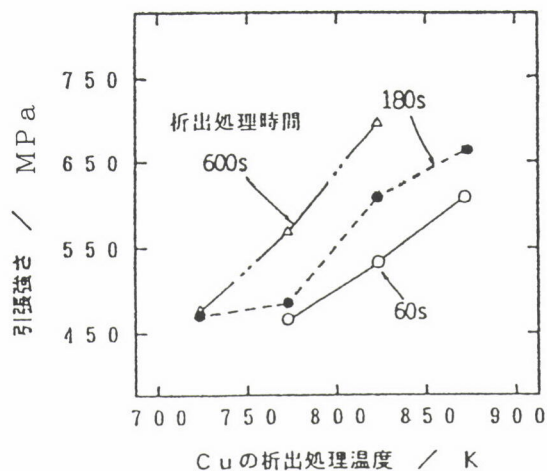


図11 Cu添加鋼の引張り強度に及ぼすCu析出熱処理温度の影響¹⁴⁾

の鋼板が大半であり、DP鋼なども一部に使ったにすぎない。それでも構造+ハイテンでホワイトボディ車体重量25%軽量化の6割を可能にできた。これはハイテンの自動車軽量化材料としての高いポテンシャルを示したものと言えるだろう。

4.3項のDP鋼板以降に述べた新しいハイテンも日本では既に使用され始めてきている。とくにTRIP鋼はその衝突安全確保への有効性も兼ね備えており、今後期待できるものの一つであろう。

引用文献

- 1) 自動車産業と共に歩む鉄鋼業, 自動車材料検討部会編, 日本鉄鋼協会, (1997)
- 2) 栗山幸久, 西野 誠, 滝田道夫: 自動車技術会, 材料フォーラム, (1996), 8.
橋本浩二, 栗山幸久, 滝田道夫: 自動車技術会, 材料フォーラム, (1998), 1.
- 3) E. D. Drewes, B. Engl: 同上 (1998), 37.
- 4) O. Akisue, M. Usuda: Nippon Steel Technical Report 57 (1993), 11.
- 5) 松藤和雄, 下村隆良, 大沢紘一ら: 日本鋼管技報, 84 (1980), 14.
- 6) 高橋延幸, 柴田政明, 古野嘉邦: 鉄と鋼, 66 (1980), s1127.
- 7) C. Brun, P. Patou, P. Parniere: Proc. Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel, (1982), 173.
- 8) 高橋延幸, 柴田政明, 早川 浩, 古野嘉邦, 白田松男, 山本広一: 鉄と鋼, 69 (1983), A297.
- 9) K. Yamazaki, T. Horita, Y. Umehara, T. Morishita: Proc. of Microalloying '88, 1988 World Material Congress, USA, ASM International, 327 (1988)
- 10) 水井正也, 武智 弘, 関根知雄: 鉄と鋼, 73 (1990), 414.
- 11) N. Matsuzo, A. Itami, K. Koyama: SAE Technical Paper Series, 910513 (1991)
- 12) M. Takahashi, A. Uenishi, Y. Kuriyama: IBEC '97, (1997), 26.
- 13) O. Matumura, Y. Sakuma, H. Takechi: Trans. Iron & Steel Inst. Japan, 27 (1987), 570.
- 14) 岸田宏司, 秋末 治, 池永則夫, 黒沢文夫, 長村光造: 日本金属学会会報, 31 (1992), 6, 538.
- 15) 山崎一正, 水山弥一郎, 岡 賢, 土屋裕嗣, 安田秀名: 新日鉄技報, 354 (1994), 32.
- 16) 山崎一正, 水山弥一郎: 鉄と鋼, 83 (1997), 754.

(1999年3月29日受付)