

自動車構造部品用高強度鋼板の最近の進歩

—地球環境保全と衝突安全の両立を目指して—

Current Progress in Advanced High-strength Steels for Structural Parts of Automobiles
—Toward the Compatibility of Global Environmental Consciousness with Crash Safety—

新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所 鋼材第一研究部長 潮田浩作 Kohsaku Ushioda
同上 主幹研究員 高橋 学 Manabu Takahashi

1 背景

優れた燃費特性と衝突安全性は将来に亘って自動車に要求される基本機能である。燃費の主な支配因子には、車体重量、エンジン性能、及びタイヤと道路との摩擦があるが、その約40%は車体重量と言われており、車体軽量化の意義は極めて大きい。一方、衝突安全性は軽量化により一般的に低下するので、軽量化しても安全性が確保できるような取り組みが行われており、材料と構造そして工法の最適化はその例である。高強度鋼板の適用は、相反する軽量化と衝突安全性を両立する有効な手段であり、各種高強度鋼板とその利用技術が開発されてきた。

本報では、構造部品用高強度鋼板(補強部品を含む)に焦点をあて最近の進歩を述べるとともに、更なる高強度化を阻害する因子や高強度鋼板の将来展望についても触れる。

2 部品の板厚支配因子及び車体軽量化に貢献する高強度鋼板の歴史

鋼板が使用される自動車部品には、パネル部品、構造部品、足回り部品、補強部品がある。夫々の部品に要求される基本特性と板厚支配因子は図1の通りである。特に、構造部品や補強部品においては、剛性と衝撃特性が重要となる。図1から、高強度鋼板を用いることにより板厚減少が可能となることがわかるが、構造や工法との最適化が常に前提となる。構造部品に使用される鋼板の強度は、現状では主に440~780 MPaの範囲にあるが、将来は980 MPaが主となると予想されている。同様に補強部品は現状では780~1180 MPaであるが、1470 MPaへの高強度化が期待されている¹⁾。

日本における自動車用鋼板の高強度化は、図2に示すように自動車を取り巻く環境を反映して、鋼材ユーザー(完成車メーカー、部品メーカー)と鉄鋼メーカーとの連携により推

進されてきた²⁾。1969年のESV (Experimental Safety Vehicle) 計画が引き金となり高強度化の動きが開始した。1970年代における2度のオイルショックは高強度鋼板の開発を加速し、C-Mn鋼板、P添加高強度鋼板、析出強化鋼板や二相組織(DP)鋼板が開発された。最近の地球環境保全活動の一層の高まりにより、高強度鋼板の開発に拍車がかかり、

部品	基本特性と板厚支配因子	
パネル	パネル剛性	$E \cdot t^m$ (m=1~3)
	耐デント性	$YS \cdot t^2$
構造	剛性	$E \cdot t$
	衝撃特性	$\sigma^{0.5} \cdot t^2$
足回り	剛性	$E \cdot t$
	疲労特性	$TS \cdot t^{2.6 \sim 3.6}$
補強	衝撃特性	$YS^{0.5} \cdot t^2$

図1 自動車部品に要求される基本特性と板厚支配因子 (E: ヤング率、YS: 降伏強度、TS: 引張強度、σ: 流動応力、t: 板厚、m: 形状で支配される係数)

年	1960	1970	1980	1990	2000
自動車を取り巻く環境変化	モータリゼーション	オイル危機 ESV 計画	CAFÉ導入計画	高級化	京都議定書 CO ₂ 排出規制 衝突安全性 リサイクル性
			耐食性強化		
	300	低YS軟質鋼板	IF鋼板 BH 鋼板	超成形性鋼板	
	400	C-Mn 鋼板	P添加鋼板	IF ハイテン	DP 鋼板
TS MPa	600	析出強化鋼板	DP鋼板	TRIP 鋼板	
	800		DP鋼板	TRIP 鋼板	ベイナイト鋼板(穴抜け性) ナノハイテン
	≥1000			1000MPa級超ハイテン	1500MPa級超ハイテン
鋼板製造プロセス	バッチ焼鈍	連続焼鈍	脱ガス CGL: IF・IFM/IF	連続熱延	CGL: DP・TRIP

図2 自動車を取り巻く環境変化と日本における自動車用高強度鋼板の歴史

TRIP 鋼板や 980 MPa 超級の複合組織高強度鋼板が開発されている。高強度鋼板の使用比率も年代とともに増加したが、1990 年代においては約 30 % と一旦飽和状態にあった。最近では、地球環境保全と衝突安全の厳しい要請を受けて、再上昇し 40 % 以上となっている^{1,2)}。

高強度鋼板の実用化には、成形技術や溶接技術等の利用技術が必須である。その意味において、日本における薄鋼板成形技術研究会の役割は大きい。一方、鉄鋼メーカーにおいても技術革新があった。パッチ焼鈍から連続焼鈍への変革はその例であり、製造プロセスの効率性・合理性という意味だけではなく、高強度鋼板を中心とした新商品開発という点においても意義深い。

3 先進的な構造部品用高強度鋼板

3.1 TRIP 鋼

構造部品には優れた剛性と衝突エネルギー吸収能が要求される。構造部品に使用される鋼板は複雑な形状に成形されるので良好な成形性が必須であるが、同時に安全性の観点から高歪速度変形下で変形応力が増加することが望ましい。TRIP 鋼は各種高強度鋼板の中でも、最も優れた強度－延性バランスと衝突エネルギー吸収能を持つと考えられ、その例について述べる。

3.1.1 強度－延性バランスおよび組織・引張特性の予測モデル

TRIP 鋼板を変形させると、くびれ発生部に優先的に加工誘起マルテンサイト変態が生じくびれが拡散するため、TRIP 鋼板の延性は良好となる。溶接性の観点から C 量は約 0.2 % 以下に設計する必要がある、強度レベルは 590 から 980 MPa である。連続焼鈍後に残留オーステナイトを安定的に得るためには、オーステナイト相に C を濃縮する必要がある。C のオーステナイト相への濃縮は、オーステナイトからフェライト及びベイナイトへの変態時に起こる。濃縮 C 量を増加させるためにはセメンタイト析出を防止する必要がある、Si や Al を添加する。最近、フェライト／ベイナイト変態中のオーステナイト相への C の濃縮とセメンタイト析出の

競合反応を数学的に記述するモデルが開発された³⁾。同様に、TRIP 鋼板の応力－歪曲線の予測モデルが、各相での仕事量が一定という仮定を基に構築されている⁴⁾。部品特性を基軸に要求材料特性を設定し、必要な組織とそれを実現するための成分とプロセスを設計するという将来的な観点から、このような計算工学的な取り組みは今後、益々重要になるものと考えられる。

3.1.2 ハイドロフォーム特性

TRIP 鋼板は n 値が高く優れた張り出し性を有すること、さらには低 r 値であるが優れた深絞り性を有することは知られている⁵⁾。最近、構造部品を製造する上で注目されているハイドロフォーム成形にも TRIP 鋼は適する。表 1 に示す ERW 鋼管を T 字ハイドロフォーム成形した場合、図 3 に示すように TRIP 鋼はほぼ同一強度の析出強化鋼と比較して、バーストやしわが発生し難く、成形可能範囲（軸力、内圧）が広い⁶⁾。張り出し部分（引張歪）においては TRIP 現象が促進され限界歪量が増すとともに、軸押し部分（圧縮歪）と比較し相対的に変形応力が増すため軸部分からの材料流入を容易にするためと考えられる。今後、TRIP 鋼のハイドロフォーム成形部品への適用が期待される。

3.1.3 衝突特性

衝突時のエネルギー吸収量は、材料的には高歪速度（1000 / s）変形下の強度レベル（一般的には 5 % 程度の変形時の流動応力）で決まる⁷⁾。TRIP 鋼は、DP 鋼とともに図 4 に示すように優れたエネルギー吸収能を有する。両鋼とも高い塗装焼付け硬化特性を持つことに加えて、TRIP 鋼では歪誘起マルテンサイト変態が歪速度の増加により促進されるためである⁷⁾。このような特徴を活かして、TRIP 鋼も DP 鋼も構造部品用鋼材として実用化されている。

3.2 伸びフランジ特性に優れた GA980MPa 級複合組織鋼板

構造部品の形状を作り込むためには、伸びのみならず、良好な穴拡げ性、伸びフランジ性や曲げ性が必要となる場合が多い。同一強度の高強度鋼板の伸びと穴拡げ性をプロットす

表1 T字チューブハイドロフォーミングに供せられたERW鋼管 (63.5φ×2.0)⁶⁾

鋼	JIS12B ¹⁾				JIS5 ²⁾	オーステナイト体積分率 (%)
	YS (MPa)	TS (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	r-値 (10%)	
TRIP	539	634	20.1	33.3	0.91	6.25
Conventional	579	673	10.5	22.0	0.85	—

1) 弧状試験片、2) 板状試験片： 板厚=2mm、幅=25mm、GL=50mm

ると図5のように、両立は一般的には難しい⁸⁾。すなわち、軟質相と硬質相からなる複合組織鋼板は良好な伸びを示すが、穴拡げ性が劣位となる。一方、均一な硬質組織からなるベイナイト鋼板⁹⁾やセメタイトフリーにした析出強化鋼板¹⁰⁾は穴拡げ性に優れるが、伸びが劣位となる。

構造部品の更なる高強度化に対応するため、伸びフランジ

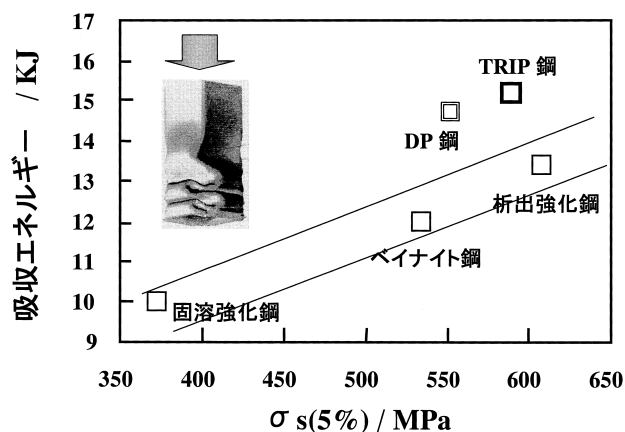


図4 各種高強度鋼板の静的強度と角型鋼管軸圧潰高速変形時（塗装焼付け後）の吸収エネルギーとの関係⁷⁾

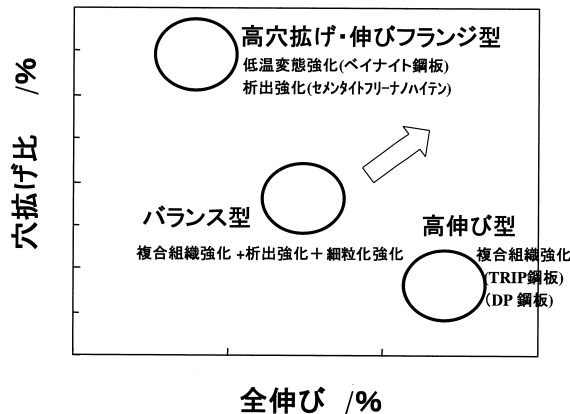


図5 鋼の強化機構と全伸び・穴拡げバランス（概念図）⁸⁾

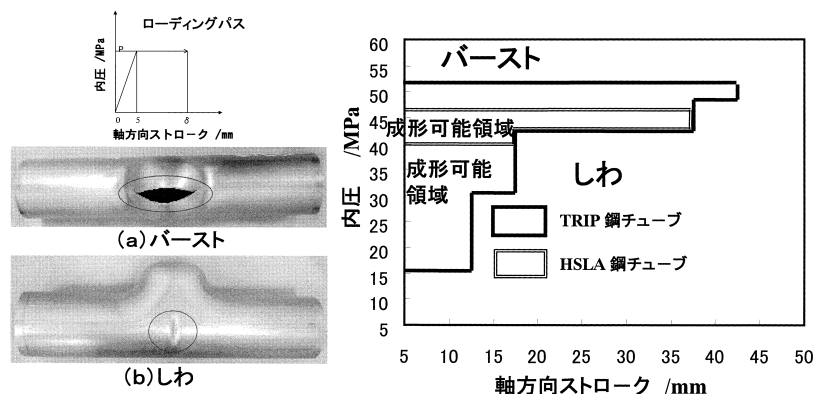


図3 T字チューブハイドロフォーミング特性とTRIP現象⁶⁾

性と衝突特性および溶接性に優れた980 MPa級冷延鋼板⁸⁾および980 MPa級GA鋼板¹¹⁾が開発され、シート部品⁸⁾やメンバー部品¹¹⁾として使用されている。GA鋼板を例にコンセプトを述べる。まず、伸びフランジ性を確保するために比較的硬質なフェライト相と低温変態組織を導入し組織の均質化を図った。良溶接性の観点から低Ceqを前提としており、細粒化強化と析出強化も併用して高降伏比化による衝突特性の向上も図った。また、GAとしての性能は、合金化溶融亜鉛めっきライン（CGL）における酸化還元バランスの適正化によりSiを添加した鋼においても確保している¹²⁾。0.07C-0.6Si-2.4Mn-その他元素からなる鋼板の代表的な特性は、YS/710 MPa、TS/1010 MPa、T.El/14%、U.El/8%であり、優れた曲げ性とスポット溶接性を有すると同時に、衝撃特性も良好であることが確認されている¹¹⁾。光学顕微鏡ミクロ組織（図6）から明らかなように、2 μm程度の極めて微細なフェライトと低温変態生成物で構成される複合組織が本鋼板の特徴である。

3.3 980MPaを越える超高強度鋼板

自動車の骨格構造は、乗客の安全確保を第一に、まず衝突エネルギーを吸収すべきところで吸収し、その後は衝撃力を分散し、キャビン周囲を守るように設計されている。引張強度が980 MPaを越える超高強度鋼板は主として補強部品として使用されており、強度は1470 MPaまで達する。このような鋼板は、プレス成形やロール成形により主として曲げ成形して部品となる。その際、超高強度鋼板は一般的に成形が困難であり、割れやスプリングバックが生じ易い。前述のように、曲げ性は必ずしも伸びと相関があるわけではなく、組織の均一性が重要となる¹³⁾。これは、成形時に軟質相と硬質相の界面にクラックが発生し伝播するためと考えられている。超高強度鋼板ではMnを多用するが、Mnのミクロ偏析は組織の均一性を阻害すると考えられている¹³⁾。

4 ホットスタンプ技術

超高強度鋼板の冷間成形の困難さを克服する目的で、最近ではホットスタンプ技術が注目されている^{14, 15)}。図7に示すように、鋼板を先ず加熱炉に挿入し、 Ac_3 以上のオーステナイト域に加熱し、その後鋼板をプレス機まで搬送しオーステナイト域でプレス加工し、 Ar_3 変態点以上の温度からダイで急冷する。焼入れマルテンサイトを活用することにより、1470 MPa以上の強度を有する部品が得られる。代表的成分は0.2C-1.2 Mn-0.002B鋼であり、図8に示したCCT図から明かなように上記鋼の場合には焼入れマルテンサイトを得るために冷却速度を約30℃/s以上とする必要がある¹⁴⁾。ホットスタンプ技術で製造された超高強度部品は優れた形状凍結性を有する特徴があり、センターピラー補強部品のような複雑形状部品に実用化されている。ホットスタンプ用鋼板には、裸鋼板とともにAlやZnめっきした鋼板が使用されている。裸鋼板の場合にはプレス部品をショットブラストしてデスケリングする必要があるが、表面処理鋼板では不要である。例えばAlめっき鋼板の場合には、Alの融点以上の950℃まで加熱するがAl-Fe金属間化合物が形成されるので、固相でのプレスが可能となる。また、Alめっき鋼板は加熱中に5層からなるAl-Fe合金相が形成され、優れた塗装密着性と耐食性を有する特徴もある¹⁴⁾。

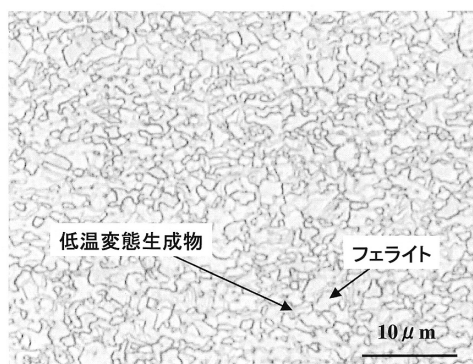


図6 980MPa級GA鋼板の光学顕微鏡ミクロ組織（フェライト：68%、ベイナイト：18%、マルテンサイト：14%）¹¹⁾

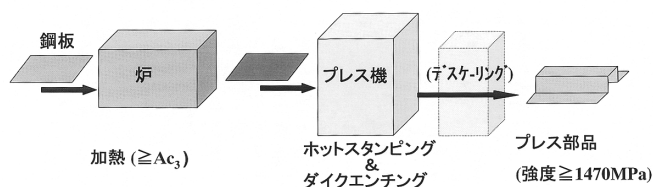


図7 ホットスタンピングプロセスの概念図¹⁴⁾

5 更なる高強度化を阻害する因子及び高強度鋼板の今後の展望

高強度鋼板の活用は、安全と軽量化を両立する有効な手段であるが、更なる高強度化には図9に示すように克服すべき課題が多い²⁾。特に、構造部品用には、曲げ性や形状凍結性及び溶接性等の生産技術的な課題を解決する必要がある。また、高強度鋼板を製造する上での課題として、機械的性質のばらつき増大や溶融亜鉛めっき特性の劣化がある。

溶接性は、特に表面処理高強度鋼板で顕在化する。スポット溶接性は $Ceq (=C+Si/30+Mn/20+2P+4S)$ が0.24以上となると劣化し、破断位置が母材からナゲットに移行する。高強度鋼板を使用すると成形精度が低下するためスポット溶接電極の押し付け圧力の調整が重要となる¹⁶⁾。厚手の合金化溶融亜鉛めっき鋼板をスポット溶接する場合には、溶接電流が高いと溶接割れが生じる。ナゲット近傍には、ブローホールや凝固収縮孔が現れる。したがって、押し付け圧力、

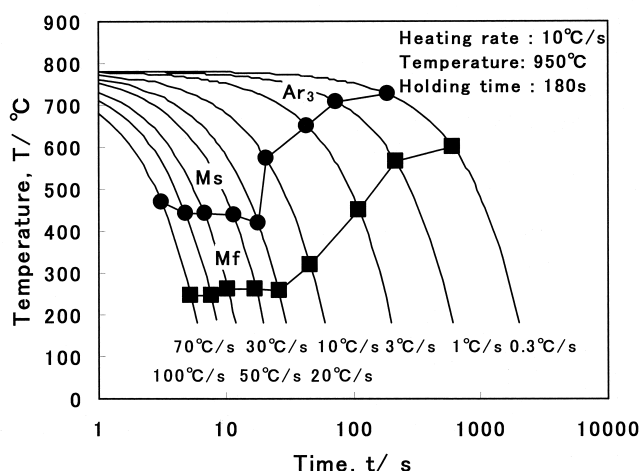


図8 ホットスタンプ用代表鋼 (0.2C-1.2Mn-0.15Cr-0.002B) のCCT変態曲線¹⁴⁾

要因	部品		構造	足回り	補強
	外板	内板			
剛性	◎	◎	◎	◎	○
面歪	◎				
形状凍結性	◎	◎	◎	◎	◎
穴拡げ・伸びフラジリティ			◎	◎	
曲げ性			○		◎
衝突安全性 ($\sigma_{dynamic}/\sigma_{static}$)		○	◎	○	◎
溶接性	◎	◎	◎	◎	◎
疲労		○	◎	◎	○
遅れ破壊(水素脆化)					◎
表面処理性	◎	◎	◎	○	○
リサイクル性	○	○	○	○	○

◎：極めて重要 ○：重要

図9 高強度鋼板の更なる高強度化を阻害する因子

溶接電流、溶接時間や電極の径や形状の調整が重要となる¹⁶⁾。

強度レベルが1180 MPa以上の超高強度鋼板では、水素脆化の問題が生じる可能性がある¹⁷⁾。環境から侵入する水素量 (H_E) が拡散性限界水素量 (H_C) を超えると、水素脆化が発生する。ここで、水素の侵入は、鋼板の製造プロセス中、及び電着塗装時や自動車の使用期間中に生じる。一方、 H_C は部品製造時に導入される残留応力や鋼板組織の影響を受ける。従って、水素脆化を防止するには、 H_E を抑制すること、及び H_C を増大するために引張残留応力の低減や水素脆化に鈍感な組織に制御することが重要となる。例えば、ホットスタンピングの活用による残留応力の低減は、本質的な一つの対策例と考えられる。

将来、高強度鋼板の適用を更に推し進めたり、鋼材の持つポテンシャルを引き出し現状より更に高強度な鋼板を使用するためには、材料メーカーと鉄鋼ユーザー（完成車メーカー及び部品メーカー）とが企画段階から深く連携することが必須である。その際、自動車を起点に自動車性能の向上に資する材料、構造及び工法の観点からの全体最適化提案がキィとなる¹⁸⁾。そのためにも、異分野の交流が今後益々重要になるものと考ええる。

参考文献

- 1) 例えば、自動車用高強度鋼板 ―材料開発と成形技術― 特集号：塑性と加工, 46 (2005), 534.
- 2) K. Ushioda : Scand. J. Metallurgy, 28, (2000), 33.
- 3) M. Azuma, N. Fujita, M. Takahashi, T. Senuma, D. Quidort and T. Iung : ISIJ Int., 45, (2005) 2, 221.
- 4) M. Azuma, N. Fujita, M. Takahashi, T. Iung, O. Bouaziz, M. Goune, A. Perlade and D. Quidort : International Conference on Advanced High Strength Sheet Steels for Automotive Applications Proceedings, Colorado, (2004), 269.
- 5) 樋渡俊二, 高橋学, 片山知久, 臼田松男 : 塑性と加工, 35 (1994) 9, 1109.
- 6) S. Sakamoto, Y. Terada, K. Ushioda and M. Mizumura : Proc. of International Conference on Tubehydroforming Processes, Kyungju, Korea, (2005), 42.
- 7) A. Uenishi, Y. Kuriyama, M. Usuda, M. Suehiro : IBEC '97, Automotive Body Materials, (1997), 59.
- 8) 野中俊樹, 後藤貢一, 谷口祐一, 山崎一正 : 新日鉄技報, 378 (2003), 12.
- 9) N. Matsuzu, A. Itami and K. Koyama : SAE Technical Paper, 910513, (1991), 47.
- 10) Y. Funakawa, T. Shiozaki, K. Tomita, T. Yamamoto and E. Maeda : ISIJ Int., 44, (2004), 1945.
- 11) 吉永直樹 : 自動車用材料シンポジウム, 日本鉄鋼協会, (2006), 15.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) M. Suehiro, J. Maki, K. Kusumi, M. Ohgami and H. Miyakoshi : IBEC '03, (2003), 267.
- 15) 小嶋啓達 : 自動車技術会春季大会材料フォーラム, (2004), 13.
- 16) 佐久間康治, 及川初彦 : 新日鉄技報, 378 (2003), 30.
- 17) 林邦夫, 藤田展弘, 竹林重人, 高橋学, 佐久間康治 : まてりあ, 44, (2005) 3, 254.
- 18) K. Ushioda and M. Takahashi : Proceedings of Asian Steel International Conference 2006, ISIJ, (2006), 114.

(2006年8月31日受付)