

(技術資料)

1300MPa, 1500MPa級マルテンサイト鋼板

Martensitic Steel Sheets of 1300 and 1500MPa Grades



内海幸博*¹
Yukihiko UTSUMI



白木厚寛*¹
Atsuhiko SHIRAKI



濱本紗江*¹
Sae HAMAMOTO



衣笠潤一郎*²
Junichiro KINUGASA

Super-high strength steel sheets with strength exceeding 980 MPa have been used for automotive bumpers and door reinforcement parts to meet strengthened collision safety standards and to decrease weight for the sake of emission reduction. A study has been conducted to improve the bending workability, resistance weldability and delayed-fracture immunity required of steel sheets used in parts produced by cold forming, such as bumper reinforcements. The study has led to the development of martensitic steel sheets of 1300 MPa and 1500 MPa grades. The newly developed steel has enabled the production of bumpers of 1300 MPa grade and 1500 MPa grade, among the world's highest grades for cold worked bumper reinforcements, allowing a 10 to 15% weight reduction compared with conventional bumper reinforcements.

まえがき = 近年、自動車の衝突安全基準強化および排出ガス削減のための軽量化を目的として、超高強度を有する鋼板や部材のニーズがますます増大している。現在では、自動車のバンパやドアの補強部品には、980 MPaを超える超高強度の鋼板が使用されている。

本稿では、主としてこれら用途に採用されている1300 MPa級および1500 MPa級マルテンサイト鋼板について紹介する。

1. 鋼板設計の考え方

バンパレインフォースメント（以下、バンパR/Fという）は、車両前後に固定されている補強部品であり、衝突時に衝撃を受け止める役割を担っている。その形状は、コの字型断面や図1に示すようなBの字型断面などがある。薄板のコイルから所定の長さで切断して穴あけ加工した後、ロールフォーム成形またはプレス成形により加工し、シーム溶接やスポット溶接などで最終形状に組み上げる¹⁾。ロールフォーム成形の場合、成形、シーム溶接後に車体のフロント側またはリア側の形状に合わ

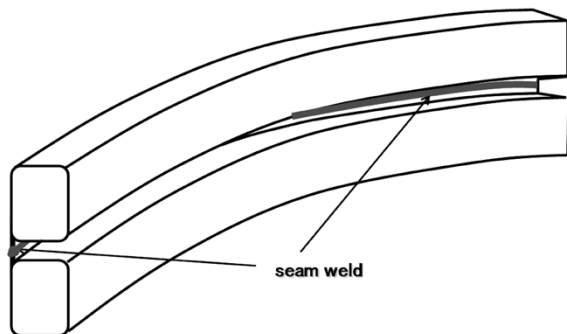


図1 バンパR/Fの例
Fig. 1 Example of bumper reinforcement

せて曲げ加工が施される。したがって、バンパ用途として使用される鋼板には以下の特性が必要となる。

- ①母材の曲げ加工性（ロールフォーム成形性）
- ②抵抗溶接性（シーム溶接やスポット溶接時の適正電流範囲の広さ、溶接継手の強度、シーム溶接部の曲げ加工性）
- ③耐遅れ破壊性（高強度材特有の必要特性）

1.1 曲げ加工性

1300 MPa級および1500 MPa級の超高強度で優れた曲げ加工性を得るためには、均一で高強度が得られるマルテンサイト単相組織とすることが有効である。しかし、焼入れしたままのマルテンサイト組織は高い強度を有するが脆性（ぜいせい）的であるため、延性や靱性（じんせい）を向上させる目的で焼戻し処理を行う。いっぽうで、曲げ加工性は焼戻し温度の影響を受け、いわゆる低温焼戻し脆性が生じる焼戻し温度域では曲げ加工性も劣化することが知られている²⁾。

そこで、板厚1.0 mmの0.22% Cマルテンサイト鋼板の引張強度あるいは曲げ加工性（最小曲げ半径）に及ぼす焼戻し温度の影響について検討した。その結果を図2に示す。本検討結果でも上記と同様の現象が起こることを確認しており、曲げ加工性が劣化する温度域より低い焼戻し温度域で高強度と曲げ加工性の両立が可能であることを確認した。

1.2 抵抗溶接性

高張力鋼板の課題として、スポット溶接時の適正溶接電流の範囲（所定のナゲット径が得られてからちり（溶融金属の飛散）が発生するまでの電流範囲）が狭くなること³⁾、および十字引張強度が上がらないこと⁴⁾が挙げられる。この現象は、同じ抵抗溶接であるシーム溶接で

*¹ 鉄鋼事業部門 技術開発センター 薄板開発部 *² 技術開発本部 材料研究所

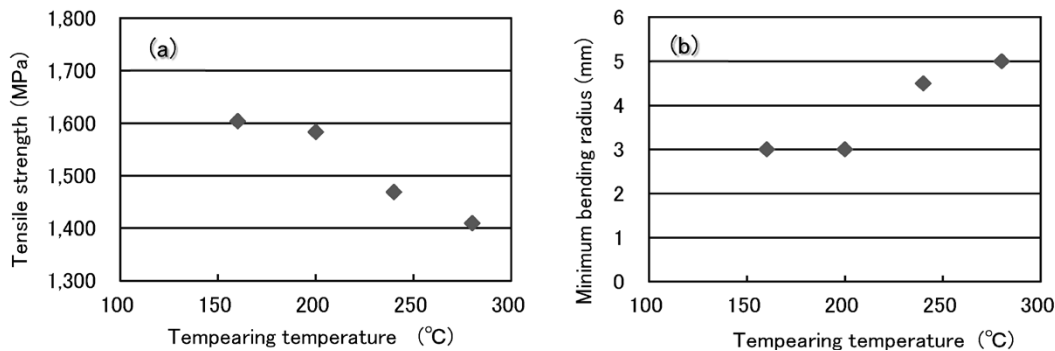


図2 焼戻し温度が (a) 引張強度および (b) 最小曲げ半径に及ぼす影響 (0.22%Cマルテンサイト鋼)
Fig. 2 Effect of tempering temperature on (a) tensile strength and (b) minimum bending radius

も同様であると考えられる。適正溶接電流の範囲を広くするには、ちり発生電流を高電流側にすることが重要で、このためには鋼の電気抵抗を増加させる元素であるP, Si, Mnなど⁵⁾の添加量を少なくすることが有効である。

ロールフォーム成形で製造される閉断面のバンパーR/Fに必要な特性は、溶接部の剥離（はくり）強度とシーム溶接部の曲げ加工性である。そこで、シーム溶接における剥離強度および溶接部の曲げ加工性と添加元素との関係を調査した。表1に示す化学成分でラボ溶製した鋼を熱間圧延、酸洗、冷間圧延し、ソルトバスにて熱処理を行って板厚1.2mmのマルテンサイト鋼を作製した。熱処理条件は900℃で90秒保持しオーステナイト化した後、水焼入れを行い200℃で360秒の焼戻し処理を行った。得られた材料を2枚重ねでシーム溶接し、図3に示すような試験によって溶接部の剥離強度を測定した。また、図4に示すように溶接部を溶接線と直角方向に先端Rが2mm, 3mm, 5mm, および10mmのダイスでU曲げ試験を行い、溶接部にクラックが生じない最小曲げ半径を求めた。そして、これらの測定値と成分との関係を重回帰分析により求めた。図5にシーム溶接部の剥離強度の測定結果を、図6にシーム溶接部の最小曲げ半径の測定結果を、回帰式で求めた $Ceq1$, $Ceq2$ との関係を示す。

溶接部の剥離強度は $Ceq1 = C + Mn/5 + Si/13$ との相関があり、 $Ceq1$ が小さくなるほど、向上することがわかった。いっぽう、溶接部の曲げ性は $Ceq2 = C + Mn/7.5$ との相関があり、 $Ceq2$ が小さくなるほど向上することがわかった。

1.3 耐遅れ破壊特性

鋼材は高強度になると水素脆化による割れ、いわゆる遅れ破壊に対する感受性が高くなることは良く知られた問題である⁶⁾。鋼板の耐遅れ破壊特性には、強度だけでなく化学成分やマイクロ組織などが影響するといわれている。高強度鋼の遅れ破壊は、鋼材の腐食反応に伴って発生した水素が鋼中に侵入し、引張応力勾配にしたがって局部的に集中した箇所において鋼が水素脆化割れを起こすと考えられている現象である。すなわち水素脆化は、(1) 鋼中への水素の侵入しやすさ、(2) 鋼中の水素の拡散しやすさ、(3) 鋼材組織の水素脆化感受性の高さ、の三つの要因が相互に関連した現象と理解される。

表1 ラボ溶製材の化学成分
Table 1 Chemical composition of steels (mass%)

C	Si	Mn	others
0.12~0.26	tr~1.4	0.5~2.1	Ti, Nb, V, Cr, Mo, B, Cu, Ni

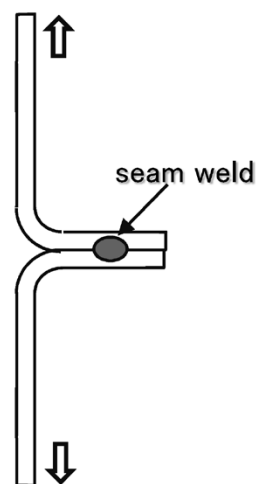


図3 シーム溶接部の剥離試験
Fig. 3 Peel test of seam weld

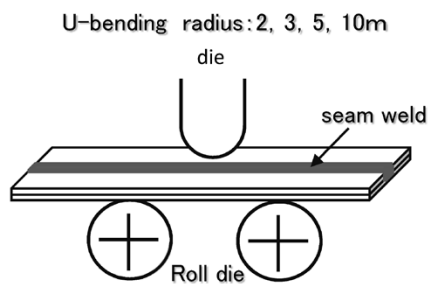


図4 シーム溶接部の曲げ試験
Fig. 4 Bending test of seam weld

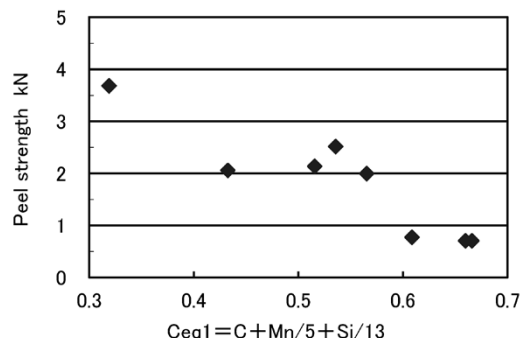


図5 成分とシーム溶接部の剥離強度の関係
Fig. 5 Effect of chemical composition on peel strength of seam weld

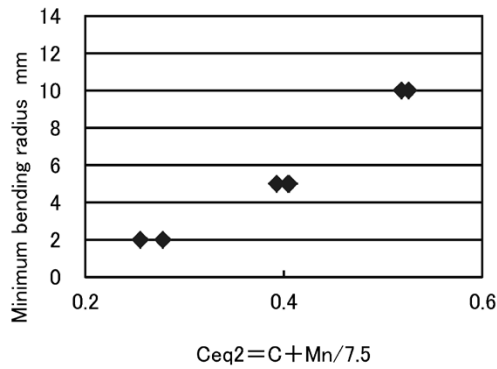


図6 成分とシーム溶接部の最小曲げ半径の関係

Fig. 6 Effect of Chemical composition on minimum bending radius of seam weld

したがって、水素脆化におけるそれぞれの要因に対する鋼材側からの対策としては、(1) 耐食性の向上によって水素の侵入を防止すること、(2) トラップサイトを導入して鋼中での水素の拡散と引張応力部への集中を抑制すること、(3) 結晶粒微細化などで鋼自身の水素脆化感受性を低下することが有効である。本開発鋼においても上記のような観点で実験的に検討を行い、耐遅れ破壊対策を講じた。

また、上述したようにマルテンサイト組織では、曲げ性ばかりでなく耐遅れ破壊特性も焼戻し温度の影響を受けることが知られている^{7), 8)}。本稿の検討結果では、曲げ加工性が劣化する焼戻し温度とほぼ同じ温度域で耐遅れ破壊特性も劣化することを確認しており、この温度域より低い焼戻し温度域で高強度と曲げ加工性、耐遅れ破壊特性の両立が可能であることを確認した。

薄鋼板は通常、部品に加工される工程で所定の長さや形状に切断、あるいは穴を開けることが多い。こうした加工部の端部には非常に大きな塑性ひずみが導入されているため、遅れ破壊が発生しやすいとされている。すなわち、上記三つの耐遅れ破壊対策のなかでも、母材組織制御による効果は失われる傾向にあるため、水素の侵入、拡散を防止する対策が有効になる。この観点からも、対応できる元素を抽出して最適化した成分設計としている。

2. 実機で製造したマルテンサイト鋼の特性

実験室での検討結果に基づき、板厚1.2mmの1300MPa級および1500MPa級の冷延鋼板を実機で製造した。鋼板の製造にあたっては、当社の連続焼鈍設備の特徴である水焼入れプロセスの利点を最大限に活用し、鋼の曲げ加工性、抵抗溶接性、および耐遅れ破壊特性を兼備する品質設計を行った。図7に本開発鋼のSEM組織を、表2に機械的性質を示す。また、曲げ加工性の確認にあたっては、90°V曲げ試験およびL曲げ試験を実施し(図8)、最小曲げ半径を求めた。結果を表3に示す。1300MPa級および1500MPa級はいずれも均一なマルテンサイト単相組織となっており、曲げ加工性も良好である。

スポット溶接性は、板厚1.2mmの供試材に対し、先端径φ6mmのDR形電極、加圧力4.1kN、溶接時間10サイクル/60Hz、溶接電流4~13kAによる溶接を行っ

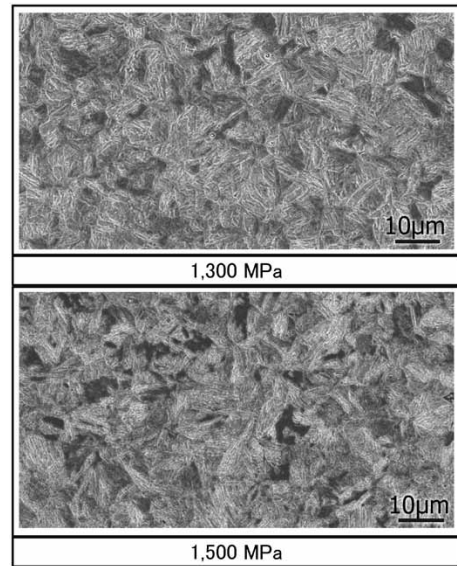


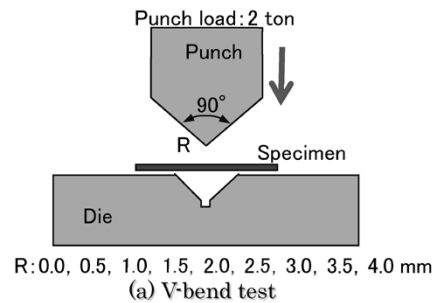
図7 開発鋼のSEM組織

Fig. 7 SEM image of developed steels

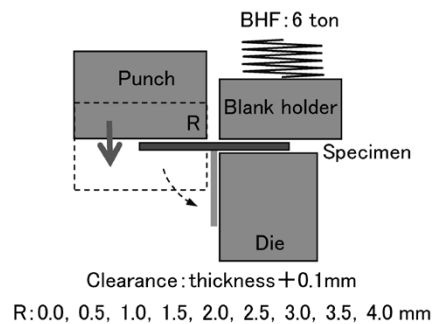
表2 開発鋼の機械的性質

Table 2 Typical mechanical properties of developed steels

Developed steel	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
1300 MPa	1,180	1,370	7
1500 MPa	1,280	1,570	6



(a) V-bend test



(b) L-bend test

図8 曲げ試験方法

Fig. 8 Experimental procedure of (a) V-bend test and (b) L-bend test

表3 開発鋼の機械的性質

Table 3 Typical bendability of developed steels

Developed steel	90°V bend test		L bend test	
	Minimum bend radius	Minimum bend radius	Minimum bend radius	Minimum bend radius
	Long.	Trans.	Long.	Trans.
1300 MPa	3.0	3.5	2.0	2.0
1500 MPa	3.5	4.5	2.5	3.5
DP980 MPa	1.0	2.0	1.0	1.5

Rmin: Minimum bend radius
Thickness: 1.2 mm

て評価した。引張せん断強度および十字引張強度をそれぞれ溶接電流値で整理した結果を図9に、また適正溶接電流範囲とその電流範囲で得られるナゲット径、引張せん断強度、および十字引張強度を表4に示した。なお、本評価の適正溶接電流範囲の下限は、ナゲット径がJIS Z 3140のB級規格の最小ナゲット径4.4mm ($4\sqrt{t}$)となる電流値とした。また、高延性型の980MPa級DP鋼の評価結果も併せて示した。

1300MPa級および1500MPa級の引張せん断強度は

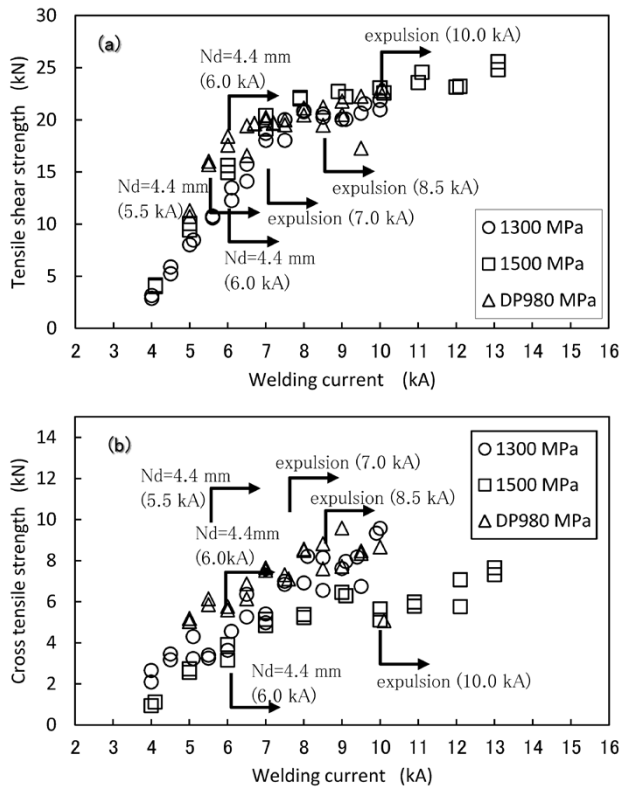


図9 溶接電流が (a) 引張せん断強度および (b) 十字引張強度に及ぼす影響

Fig. 9 Effect of welding current on (a) tensile shear strength and (b) cross tensile strength in the developed steels

表4 開発鋼に対する適正溶接電流範囲とその時のナゲット径、引張せん断強度、および十字引張強度

Table 4 Suitable welding current for developed steels and their nugget diameters, tensile shear strengths, and cross tensile strengths

Developped steel	Suitable welding current (kA)	Nugget diameter (mm)	Tensile shear strength	Cross tensile strength
			($\times 10^3$ N)	($\times 10^3$ N)
1300 MPa	6.0~8.5	4.4($4\sqrt{t}$)~7.0	12.0~21.0	4.0~8.0
1500 MPa	6.0~10.0	4.4($4\sqrt{t}$)~7.5	15.0~23.0	3.0~6.5
DP980 MPa	5.5~7.0	4.4($4\sqrt{t}$)~6.5	15.0~20.0	5.0~7.0

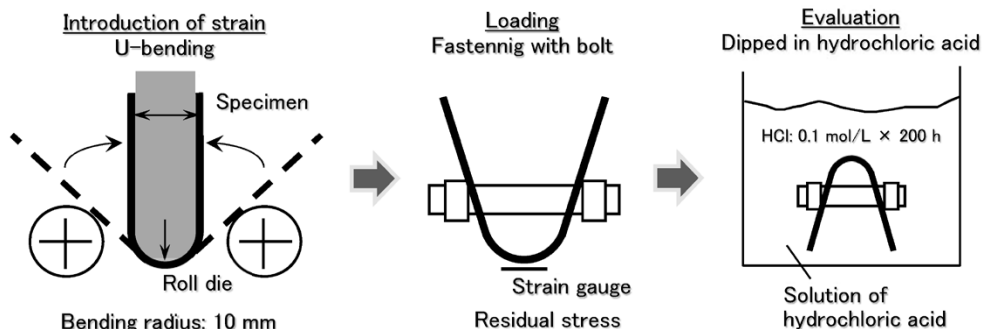


図10 耐遅れ破壊試験 (U曲げ-塩酸浸漬法)

Fig.10 Experimental procedure for delayed fracture resistance test

980MPa級とほぼ同等である。いっぽう、十字引張強度は、980MPa級、1300MPa級、1500MPa級の順で低下傾向にあった。この結果は、及川らの検討結果⁹⁾、すなわち、引張せん断強度は1,100MPa以上で飽和してくること、および十字引張強度は590MPaから780MPaで飽和し780MPa級鋼では鋼板強度が上がることも低下傾向を示すことと一致している。

1300MPa級および1500MPa級の適正溶接電流範囲は、980MPa級が1.5kAであるのに対し、1300MPa級が2.5kA、1500MPa級が4kAとかなり広い。また、適正溶接電流範囲の上限電流で得られるナゲット径は980MPa級に比べ大きくなっている。このため、1300MPa級および1500MPa級の適正溶接電流範囲の上限電流で得られる十字引張強度は980MPa級とほぼ同等となっており、実用上の溶接性能は980MPa級とほぼ同等と考えられる。

耐遅れ破壊特性は、図10に示すU曲げ-塩酸浸漬法により評価した。短冊状の試験片を曲げ半径10mmでU曲げを行い、1300MPa級は1,300MPa、1500MPa級は1,500MPaの応力を負荷した状態で0.1mol/Lの塩酸に200時間浸漬し、割れ発生の有無を調べた。なお、短冊状の試験片は通常、エッジを機械仕上げして試験を実施する。また、薄板成形部品は一般的に切断端面であることから、エッジの機械仕上げをせずにシヤー切断したままの短冊状試験片でも試験を実施した。それらの試験結果から、1300MPa級および1500MPa級ともに、機械仕上げ端面、およびシヤー切断まま端面の両試験片とも割れは発生せず、耐遅れ破壊特性は良好であることが確認できた。

本開発鋼を用いることにより、例えば、バンパR/Fの強度としては世界最高レベルの1300MPa級および1500MPa級のバンパの製造が冷間成形加工で可能になり、さらに従来のバンパR/F部品と比較して10~15%の軽量化が実現できる。

むすび=当社は1180MPa級冷延鋼板を商品化し、バンパーR/F用として製造販売している。本稿では、さらなる高強度化のニーズに対応して、新たに開発した1300MPa級、および1500MPa級マルテンサイト鋼について紹介した。本開発鋼板は一部の顧客でロールフォーム加工のバンパーR/Fとして採用され、既に量産を開始している。

自動車においては、衝突安全性の向上と軽量化の両立が今後とも重要な課題であり、ボデー用途では980MPa級および1180MPa級の適用拡大に加え、1470MPa級の適用が求められる。また、バンパーR/Fにおいては1700MPaへのさらなる高強度化が次の課題である。

このように当社は、さらなる高強度化や高加工性のニーズに寄与できる材料開発を進めていく所存である。

参 考 文 献

- 1) 山口雅教ほか. "アルミニウムおよび鋼製の自動車用フードとバンパー・レインフォースメントのライフサイクルインベントリ". 第6回エコバランス国際会議. 2004.10.26, 一般社団法人日本アルミニウム協会, アルミと環境, <http://www.aluminum.or.jp/environment/index.html>, (参照2016-06-03).
- 2) 長滝康伸ほか. 鉄と鋼. 2013, Vol.99, No.3, p.71.
- 3) 田中福輝ほか. 鉄と鋼. 1982, Vol.68, No.9, p.1437.
- 4) 小野守章. 第184・185回西山記念講座. p.139.
- 5) D. C. Ludwigson et al. METALLURGICAL TRANSACTIONS. 1971, Vol.2, December, p.3500.
- 6) 松山晋作. 遅れ破壊. 日刊工業新聞社, 1989.
- 7) 福井彰一. 鉄と鋼. 1969, Vol.55, No.2, p.151.
- 8) 松山晋作. 鉄と鋼. 1972, Vol.58, No.3, p.395.
- 9) 及川初彦ほか. 新日鉄技報. 2006, No.385, p.36.