

(解説)

## 590MPa級低YP型合金化溶融亜鉛めっき鋼板の特性

## Characteristics of 590MPa Grade Low YP Type Hot Dip Galvannealed Steel Sheet

大宮良信  
Yoshinobu Omiya嘉村 学  
Manabu Kamura

In order to improve fuel economy through car body weight reduction, 590MPa grade low YP type hot-dip galvannealed steel has been developed. This steel has the same deep drawability and stretch formability as 440MPa steel, combined with stabler high tension strength spot welded joints (achieved through lower carbon levels and other alloying elements). Crash test results suggest that it's possible to replace conventional 440MPa steel with new, thinner 590MPa steels designed for maximum load or energy absorption.

まえがき = 地球環境保全意識の高まりから、自動車からの炭酸ガス排出量削減に向けた燃費改善が近年強く求められている。車体の軽量化は低燃費化に加えて車両性能向上にも有効な方策であることから、設計、生産技術の革新と同時に材料技術に対する期待は非常に大きくなっている<sup>1)2)</sup>。高強度鋼板(ハイテン)は軽量化素材としてコスト面からも有望であるが、これまでは加工、溶接などの生産技術上の課題から、車体部品には主として440MPa級までの比較的強度の低いハイテン材が適用されてきた。しかし最近、成形性、衝撃特性、溶接性にすぐれた低YP型590MPa級鋼板が開発され、自動車メーカーにおいても車体部品への採用に向けた検討が開始された<sup>3)</sup>。

ここでは軽量化と同時に車体の強度向上、防錆性能を満たす材料として着目されている低YP型590MPa級合金化溶融亜鉛めっき(GA)鋼板<sup>4)</sup>の特性について紹介する。

## 1. 開発鋼の考え方

590MPa級のGA鋼板としては、Nb・Ti・Vなどの微細炭化物による析出強化鋼(HSLA鋼: High Strength Low Alloyed 鋼)が主に製造されてきた。しかし自動車用鋼板としては、成形性や溶接性の一層の向上が求められた。そこで既に440MPa級で開発されたCr添加複合

組織強化鋼<sup>5)~7)</sup>をベース鋼として検討し、微量のCrとMoの複合添加によってベイナイトを含む3相組織から完全なフェライト・マルテンサイト複合組織化(Dual phase化: DP化)をはかり、要求特性を満足する低YP型590MPa級鋼の成分系を構築した。その考え方は以下のとおりである。

- 1) Cは440MPa級鋼同等とし、高延性フェライト相を最大限確保する。
- 2) Mnはベイナイトをマルテンサイト化する上で効果が小さく、逆に溶接性などの低下が顕著になるため添加量は最低限にとどめる。
- 3) Siはめっき性、Pは溶接性の改善のため、できるかぎり低減する。
- 4) Cr, Moはオーステナイトの安定性を高めベイナイトを有効にマルテンサイト化する。しかしそれぞれを単独で用いるとその添加量が多くなり、その結果、Crの場合はめっき性の低下を、Moの場合は延性の低下を招きやすい。特性を劣化させない範囲で複合添加することで、伸び特性の改善と溶接性の確保の両立を可能にした。

開発鋼の成分例を表1に示す。本開発鋼は上記した成分設計により工業量産レベルにおいても安定した特性を得ることができる。

表1 590MPa級低YP型合金化溶融亜鉛めっき鋼板の化学成分  
Table 1 Chemical compositions of 590MPa grade low YP type hot dip galvannealed steel

Steel	TS grade	C	Si	Mn	P	Other element
Developed steel	590MPa	0.06	0.01	1.75	0.007	Cr, Mo
Conventional steel	590MPa	0.06	0.01	2.10	0.007	Nb
Base steel	440MPa	0.06	0.01	1.55	0.031	Cr

表2 供試材の機械的特性  
Table 2 Mechanical properties of steels

Steel	TS grade (class)	YP (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	n value (10-15%)
Developed steel	590MPa (590Y) Dual phase	338	602	33	0.165
	590MPa (590R) HSLA	503	598	26	0.129
	590MPa (590W) C-Mn	480	605	28	0.134
Conventional steel	440MPa (440R) HSLA	396	471	34	0.17
	440MPa (440W) C-Mn	354	455	39	0.18
	270MPa (270E) IF	163	282	54	0.232

• Thickness : 1.4mm, JIS No.5 specimen • HSLA : High Strength Low Alloyed  
• IF : Interstitial Free

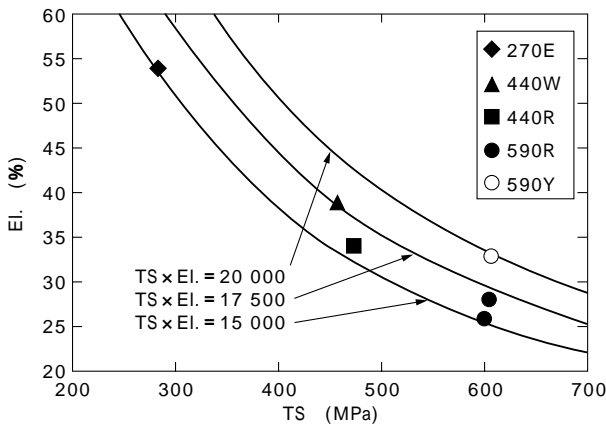


図1 供試材の TS-El. バランス  
Fig. 1 Combination between TS and El. of steels

## 2. 590MPa 級低 YP 型合金化溶融亜鉛めっき鋼板の特徴

### 2.1 成形性

特性比較に用いた供試材の機械的特性を表2に示す。開発鋼は伸び、n値が高く440MPa級鋼(440R)とほぼ同等である。また図1に示すように強度-延性バランスにも優れている。穴広げ率(値)で評価される伸びフランジ性に関しては、一般的に複合組織鋼では低いと言われている。しかし、Cなどの添加元素の低減によって体積率を高めたフェライト相中に第二相を連結せず島状に分散させた開発鋼は、析出強化鋼と同程度の伸びフランジ性を有している。

図2に直径50mmの円筒パンチ(パンチ肩R: punch radius:  $r_p = 2, 6, 25\text{mm}$  [25mmは球頭パンチ])での張出し成形高さ、供試材の応力-歪み関係をSwiftの式[ $\sigma = F(E_0 + \sigma_p)n^*$ ]で近似した際の $n^*$ 値との関係を示

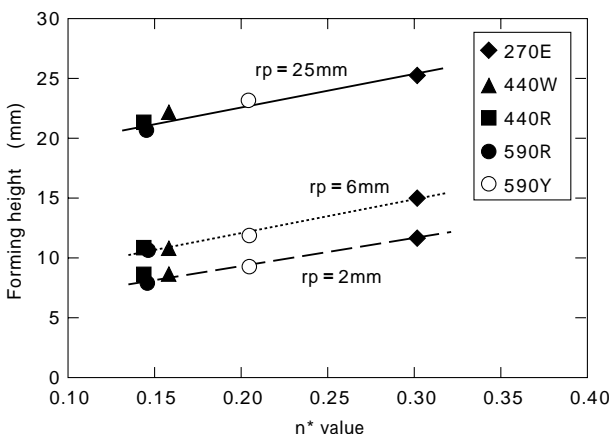


図2 張出し成形高さとの関係  
Fig. 2 Relation between stretch forming height and  $n^*$  value

す。張出し成形には材料の加工硬化特性が強く影響を与えるが、成形高さは $n^*$ 値によってよく整理でき、軟鋼板を除いて最も $n^*$ 値の高い開発鋼が優れた張出し成形性を有していることがわかる。

図3にパンチ肩Rを $r_p = 2, 6\text{mm}$ と2水準変化させた場合の限界絞り率を示す。開発鋼は440MPa級鋼と同等またはそれ以上の深絞り性を有していることがわかる。組織強化型高強度鋼板の場合は深絞り性への $r$ 値の寄与が期待できないが、加工硬化特性も寄与することが知られており<sup>8)</sup>、高い $n^*$ 値を有する開発鋼は深絞り性にも優れている<sup>9)</sup>。

### 2.2 スポット溶接性

溶接性の評価は、開発鋼を含む440W, 590R鋼の3種類で実施した。ここでは590R鋼は良溶接性のNb添加鋼を用いた。表3に示す条件で溶接電流値を変化させ、板厚1.4mmの各供試材の溶接を行った。図4は、溶接継手のせん断引張強度を破断後に測定したボタン径で整理したものである。これまでに報告されている溶接部断面の光学顕微鏡観察によって測定できるナゲット径とせん断引張強度との関係<sup>3)</sup>と同様の関係が得られており、開発鋼においては、破断様式(図5)がボタン破断となる臨界ボタン径が590R鋼と比較してより小さい側にあることがわかる。また各鋼種ともボタン破断する場合にはJIS基準を上回る十分な継手強度が得られている。図6に板

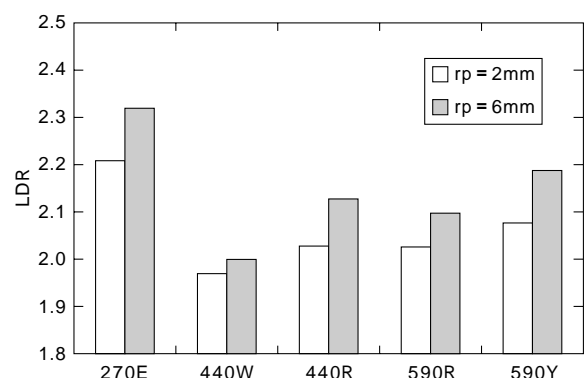


図3 供試材の限界絞り率  
Fig. 3 Limited drawing ratio (LDR) of steels

表3 スポット溶接条件  
Table 3 Spot welding conditions

Electrode tip	Dome type Cu-Cr, Tip diameter: 6mm
Electrode force	4 310N
Welding time	17cycle (60Hz)
Welding current	5-20kA
Cooling water	3l/min (Upper : 1.5l/min, Lower : 1.5l/min)

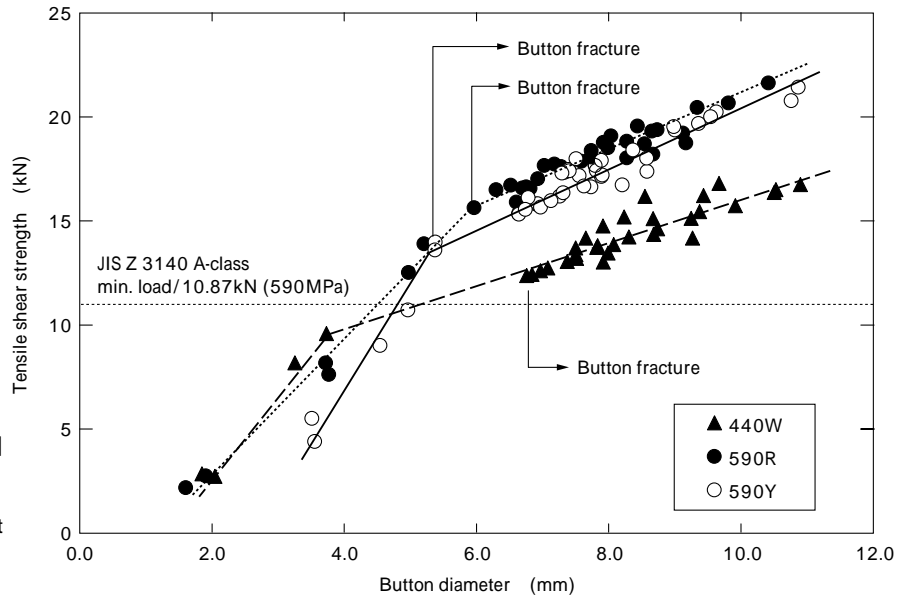


図4 スポット溶接継手におけるせん断引張強度とボタン径との関係  
Fig. 4 Relation between tensile shear strength and button diameter in spot welded joint

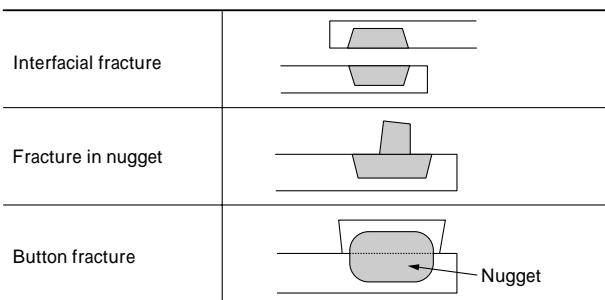


図5 スポット溶接継手の破断形態  
Fig. 5 Fracture mode of spot welded joint

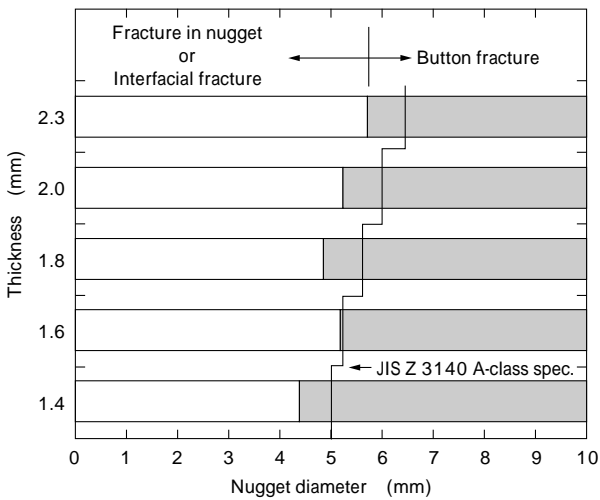


図6 臨界ナゲット径に及ぼす板厚の影響（開発鋼）  
Fig. 6 Effect of thickness of steel sheet on critical nugget diameter (developed steel)

厚ごとに開発鋼の臨界ナゲット径をまとめたものを示す。板厚が厚くなるとともに臨界径は大きくなるものの、1.4mm から 2.3mm までの範囲では JIS Z 3140 における A 級規定の最小ナゲット径以下であり、開発鋼は安定してボタン破断が得られる良好な継手性能を有している。

一方、母材強度との対応が良いせん断引張強度とは異なり、十字引張強度は C, P, S などの化学成分によって左右される破断様式が大きく影響する。従って母材強度が増加してもナゲット内破断あるいは剥離破断が起こる場

合には、強度があまり変化しないか、逆に低下する場合がある<sup>10)</sup>。開発鋼の十字引張強度を図7に示すが、低電流領域から十分な強度を得、チリ発生以後溶着まで、ほとんどナゲット内破断を起こさないため著しい強度の低下も認められない。また強度のばらつきも 440W 鋼よりむしろ小さく、非常に安定した挙動を示していることがわかる。これらの優れた溶接性は C をはじめとする低成分設計の効果として発揮されたものと考えられる。

### 2.3 動的強度特性

電気油圧サーボ式の高速度引張試験<sup>11)</sup>によって開発鋼を 440MPa 級鋼と比較評価した。歪み速度は  $875\text{sec}^{-1}$  で行った。図8は得られた動的応力 - 歪み曲線から求めた 5% 歪みごとの吸収エネルギーに初期断面積を乗じたものであるが、低歪み域において開発鋼は急激な加工硬化によって吸収エネルギーが著しく増大しており、440MPa 級鋼と明らかに異なる挙動を示している。この引張試験を部材の評価と見立てても開発鋼は歪 0.5% の変形初期を除き

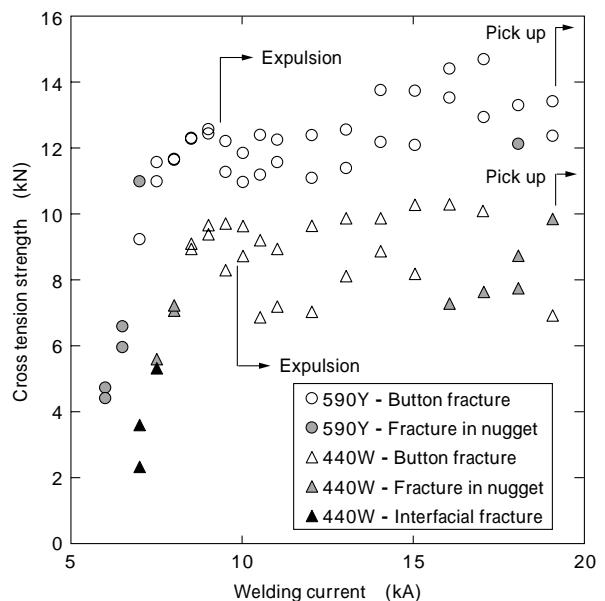


図7 十字引張強度に及ぼす溶接電流値の影響（開発鋼）  
Fig. 7 Effect of welding current on cross tension strength (developed steel)

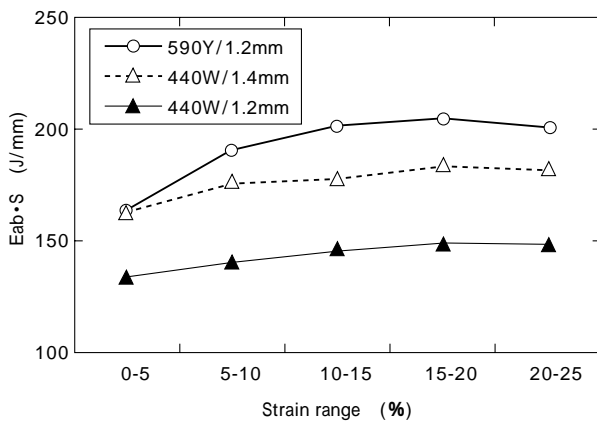


図8 動的引張試験における吸収エネルギーの変化  
Fig. 8 Absorbed energy increment on dynamic tensile test

全歪み領域で1ゲージ板厚の厚い440MPa級鋼を上回る吸収エネルギーを示したことがわかる。さらに実部品においてはDP鋼である開発鋼はプレス加工などの歪み付与や塗装焼付けによる応力の上昇を付加できる<sup>12)</sup>ため、440MPa級鋼から開発鋼への高強度、薄肉化は十分期待できるものと推察できる。

次に同じ材料を用いて曲げ加工によりハット形状の圧壊用試験体を作製した。試験体断面形状を図9に示す。なお背板は440W鋼(板厚1.4mm)を用い、打点間隔50mmで試験体にスポット溶接した。部材の軸方向長さは軸圧壊用300mm、3点曲げ圧壊用1000mmとし、それぞれ表4に示す条件で重錘を一定高さから落下させ試験した。衝撃荷重は試験体直下のロードセルによって、変位出力はレーザ変位計によってそれぞれ測定した。測定例として開発鋼の荷重-変位曲線を図10に示す。この荷重-変位曲線から両圧壊モードとも最大荷重と吸収エネルギーを求め $n=3$ の平均値を評価に用いた。吸収エネルギーは変形開始から重錘がストップに当たる最大変位直前までを計算している。結果を表5にまとめる。開発鋼は軸圧壊においては最大荷重、吸収エネルギーともわずかに1.4mm厚の440W鋼におよばないが、その差は非常に小さい。一方、3点曲げ圧壊では1.4mm厚の440W鋼と同等以上の荷重、吸収エネルギーを示している。これらの実験結果から、開発鋼が1ゲージ板厚の厚い440MPa級鋼とほぼ同等の衝撃特性を有していることが明らかである。

### 3. 今後の展開

現在、開発鋼は車体軽量化を目的にメンバなどの車体構造部材を中心に適用されており、ユーザでの評価も高い。一方で自動車メカにおいて生産のグローバル化が進んでいることから、高性能な高強度鋼板を世界規模

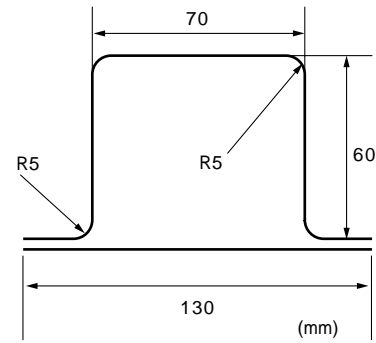


図9 圧壊試験体断面形状  
Fig. 9 Cross section geometry of crash test specimen

表4 圧壊試験条件  
Table 4 Crash test condition

	Axial crash	Crash bending
Weight	2 843N	1 667N (R=150mm)
Impact speed	50km/h	50km/h
Displacement	max. 160mm	max. 110mm (span : 900mm)

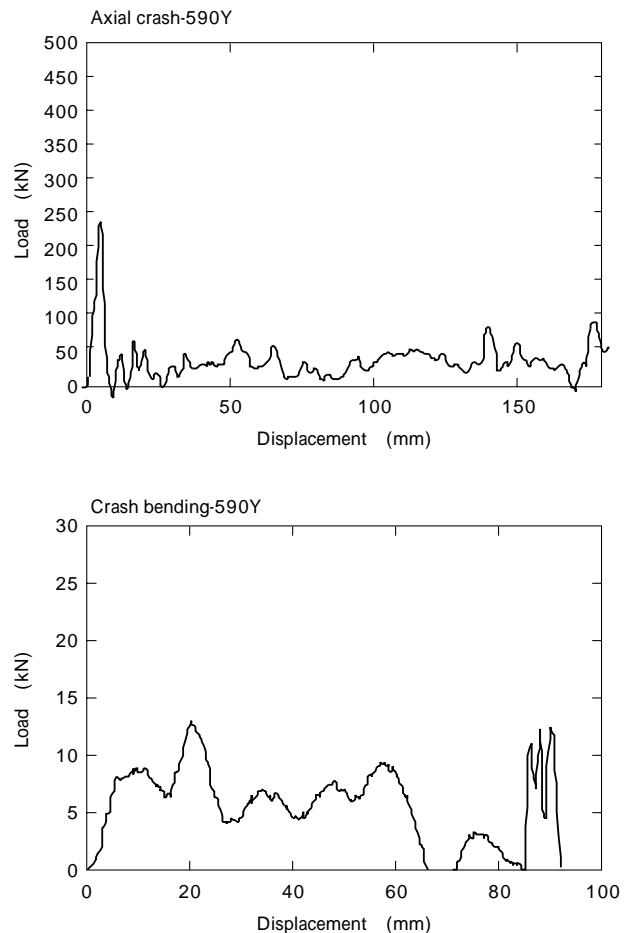


図10 衝撃圧壊試験における荷重-変位曲線  
Fig.10 Load-displacement curve on dynamic crash test

表5 衝撃圧壊試験結果  
Table 5 Results of crash test

	Thickness (mm)	Axial crash		Crash bending	
		Maximum load (kN)	Absorbed energy <0-150mm> (kJ)	Maximum load (kN)	Absorbed energy <0-100mm> (kJ)
Developed steel	590Y	249	5.36	12.8	0.52
	440W	255	5.47	12.3	0.51
Conventional steel	440W	186	4.94	8.9	0.38

で供給する体制の構築が鉄鋼メーカーの大きな課題となっている。当社は本開発鋼を 2000 年に U. S. Steel 社へ技術供与し、同社との合併である PRO-TEC COATING COMPANY 社にて量産体制を整えた。既に北米の日系自動車メーカーを中心に納入を開始しており、国内と同様、その品質を高く評価されている。また U. S. Steel 社とは、北米における自動車のハイテン化に寄与するため共同性能評価<sup>9) 13) 14)</sup>を行うなど本技術を積極的に紹介しており、BIG3 と呼ばれる米系自動車メーカーも採用検討を開始したところである。

今後はさらに高強度化が指向され、材料への開発要望が高まることが予想される。当社は 780-980MPa 級についても本開発鋼と同様の設計思想で開発を完了し、優れた成形性、スポット溶接性、衝撃特性を有していることを明らかにした<sup>15) 16)</sup>。そして、これら新しい高性能鋼板についても北米 (U. S. Steel 社) 及び欧州への技術移転を進めているところである。

むすび = 新たに開発した低 YP 型 590MPa 級 GA 鋼板の性能について紹介した。近年ますますハイテン材の自動車車体への適用が拡大する中で、防錆をはじめとして成形、溶接、塗装、動的強度など材料が満たすべき性能には非常に高い水準が求められている。解決すべき課題は少なくないが、ハイテン材が特殊な材料ではなく普通に使えるよう、設計技術、利用技術と歩調を合わせた材料技術の開発を今後とも進めていく。

#### 参 考 文 献

- 1) 小吹信三: TOYOTA Technical Review, Vol.52, No.1 (2002), p.8.
- 2) 柴田公博: 日産技報, No.50 (2002), p.26.
- 3) 村上 泰ほか: 自動車技術, Vol.53, No.12 (1999), p.77.
- 4) 中屋道治ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.1 (2000), p.75.
- 5) 大宮良信ほか: CAMP-ISIJ, Vol.5 (1992)-2057.
- 6) N. Nakajima et al.: Symposium on New Aspects of Microstructures in Modern Low Carbon High Strength Steel sponsored by ISIJ, Nov. 29-Dec. 1 (1994), Tokyo, p.59.
- 7) 岡野洋一郎ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.47, No.2 (1997), p.38.
- 8) 薄鋼板成形技術研究会編: プレス成形難易ハンドブック, (1997).
- 9) K. Watanabe et al.: 自動車技術会学術講演会前刷集 (2000), 20005488.
- 10) 野村伸吾ほか: 抵抗溶接研究委員会, RW-192-81 (1981).
- 11) 渡辺憲一ほか: 第 48 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1997), p.257.
- 12) 古迫誠司ほか: 自動車技術, Vol.55, No.10 (2001), p.36.
- 13) J. Shaw et al.: 自動車技術会学術講演会前刷集 (2000), 20005487.
- 14) J. Shaw et al.: SAE World Congress Technical Paper, (2001), 2001-01-1053.
- 15) 嘉村 学: R&D 神戸製鋼技報, Vol.51, No.2 (2001), p.79.
- 16) M. Kamura et al.: IBEC2002, Proceedings of the 2002 IBEC and ATT Conferences on CD-ROM, (2002), 2001-01-3094.