

スポット溶接部静的強度の支配因子とそれにもとづく 溶接部強度特性の優れた高強度鋼板メニューの展開

Factors to Determine Static Strengths of Spot-weld for High-strength Steel Sheets and Developments of High-strength Steel Sheets with Strong and Stable Welding Characteristics

佐久間 康 治^{* (1)}
Yasuharu SAKUMA

及 川 初 彦^{* (2)}
Hatsuhiko OIKAWA

抄 録

自動車車体骨格を想定し、引張剪断強度(TSS)、十字引張強度(CTS)の鋼板強度、板厚、鋼成分とめっき有無による変化を検討した。ボタン抜け破断ではTSS、CTSとも鋼板強度、板厚、ナゲット径に比例するように記述できるが、その定数は一定ではない。TSSに対する比例定数は鋼板が厚いと低下するが、鋼板強度やめっき有無の影響は小さい。CTSに対する比例定数は板厚に依存しないが、冷間圧延鋼板より合金化亜鉛めっき(GA)鋼板で大きく、鋼板強度が増すと低下する。またC量が多いとTSS、CTSとも低下し、Si量が多いとTSSは低下するが、CTSは増加する。この知見をもとに溶接部強度特性の優れた高強度鋼板を980MPa級まで展開しているが、厚手高強度のGA鋼板では散りが生じると特にCTSが大きく低下する。

Abstract

Considering an application for automotive body structure, variations in TSS and CTS for high-strength steel sheets are summarized with their dependence on sheet strength and thickness, steel chemistry, and coating. In case of so-called "button fracture", both of TSS and CTS seem to be proportional to the strength and thickness of sheets and nugget diameter, but the proportional constant is not settled. Proportional constant for TSS decreases with increasing sheet thickness, but does not vary with sheet strength and existence of coating. Contrarily, proportional constant for CTS remains same with varied sheet thickness, but decreases with increasing sheet strength. Proportional constant for CTS is larger in GA steel sheets than that in cold-rolled steel sheets. Both of TSS and CTS decrease with increasing carbon content. Increasing silicon content decreases TSS, but increases CTS. Above-mentioned knowledge gives a series of high-strength steel sheets with excellent characteristics for spot-welds up to a tensile strength of 980MPa, but a large decrease in CTS cannot be avoidable if expulsion occurs in welding.

1. 緒 言

自動車用鋼板の高強度化阻害因子として第一にあげられるのはプレス成形性の劣化であり、船舶、橋梁や油送管の高強度化を阻害する第一の因子が溶接部を中心とした靱性劣化、信頼性の低下であるのと相違する。高強度化阻害因子がこのように相違する理由には鋼材のサイズ、用途の違いもあるが、これまでの自動車用鋼板のほとんどが引張強度(TS)90MPa級未満であったことの影響が大きい。しかしながら、衝突安全性と車体の軽量化を同時に実現するため、TS 590MPa級以上の高強度鋼板の利用が急増し、最近の新車では鋼板使用量の23%にも及んでいる¹⁾。このような自動車用鋼板の変化は国際鉄鋼協会(IISI)のULSAB-AVCプロジェクトにも見られるように今後ますます顕著になり、溶接部の特性に対する要求が他の用途と同じように顕在化するものと考えられる。

自動車車体の組立てにはアーク溶接やプロジェクション溶接も適

用され、またレーザー溶接も近年適用が増えているが、主要な部品はスポット溶接で締結されている。この場合、その強度品質基準としてはJIS Z 3136およびZ 3137で引張剪断強度(TSS)と十字引張強度(CTS)が規定され、JIS Z 3140ではTSSの基準値が鋼板強度、板厚と溶接点への性能要求により定められている。また鋼板強度 TS_{PM} 、板厚 t 、ナゲット径 D_n によるTSSの変化は、溶接部が一体となって一方の鋼板に残り、他方の鋼板がボタン抜けするティア(プラグ、母材)破断の場合には、 K を定数として、

$$TSS = K \cdot D_n \cdot t \cdot TS_{PM} \quad (1)$$

のように、また溶接ナゲットが鋼板間で裁断されるシア(界面、剥離)破断の場合には、ナゲット部の強度を TS_{WM} 、 K' を定数として、

$$TSS = K' \cdot (D_n / 2)^2 \cdot TS_{WM} \quad (2)$$

のように経験的に整理され²⁻⁶⁾、有限要素法による試算も見られる⁶⁾。

これに対し、CTSは鋼板強度が増してもTSSのように増加しないとされる^{3,7-10)}が、鋼板強度、板厚、ナゲット径によるその変化を

^{* (1)} 君津技術研究部 主幹研究員 工博
千葉県君津市君津君 1 〒229-1141 TEL:(0439)50-2544

^{* (2)} 接合研究センター 主任研究員 工博

系統的にとりまとめた報告³⁾は多くない。そこで、ここでは鋼板強度、板厚と鋼成分の異なる高強度鋼板スポット溶接部のCTSを調査し、TSSとともにその支配因子をとりまとめ、自動車車体に必要な溶接部強度特性を得るために必要な鋼板と溶接の条件を提示した。

また以上で得られた知見をもとに、フロントやリアのサイドメンバー、サイドシル、センターピラー等の車体骨格への適用を想定し、溶接部強度特性の優れた高強度鋼板を980MPa級まで合金化亜鉛めっき(GA)鋼板を含めてメニュー化しているので、その一例を紹介する。

2. スポット溶接部静的強度支配因子の検討

2.1 供試鋼板と溶接条件

調査に供した鋼板の厚さと主要な化学成分、強度、表面の状態を表1に示す。GA鋼板の(1),(2)および(3b)はいずれも1.8mm厚であり、C量もほぼ同等であるが、引張強度が390MPa級~780MPa級と異なり、溶接部強度への鋼板強度の影響を検討できる。同様にGA鋼板の(3a),(3b),(3c)、および冷間圧延鋼板(表中では冷薄)の(1a),(1b),(1c)を比較することにより板厚の影響を、冷間圧延鋼板の(1b),(2),(3)を比較することにより鋼成分の影響を検討できる。また高強度鋼板におけるめっきの有無による差違も、GA鋼板の(3a),(3b)と冷間圧延鋼板の(1a),(1c)との比較から、鋼板強度、板厚と鋼成分の差違に煩わされることなく検討可能である。

表1には溶接条件も併記するが、鋼板が平坦で、溶接時になじみ不良の問題を生じにくいことから、590MPa級以上では加圧力は一定とした。また電極はAl₂O₃分散強化Cu製のDR型を用い、1.8mm以上の鋼板では先端径を8mmとしたが、これはTSS測定時にティア破断するような大きな径のナゲットを形成する¹¹⁾ことを主な目的としている。

2.2 ナゲット径による溶接部強度の変化

図1に780MPa級冷間圧延鋼板(1c)での事例を示すが、溶接電流とともにナゲット径が増大し、TSS、CTSとも増加する。しかし、よく知られているように、散りの発生するような過大電流で溶接した場合、TSSには若干の増加が見られても、CTSにはばらつきが大きく、散りが認められない場合に比べて極端に低下することもある。

そこでまず、散り発生なく形成された溶接部に対し、TSS、CTSへの鋼板強度、板厚、鋼成分の影響を検討することとし、ナゲット径の差違による影響を除外することを試みた。すなわちTSSに対し(1)式の σ_{TSS} を求めることとし、CTSに対しても同様の関係

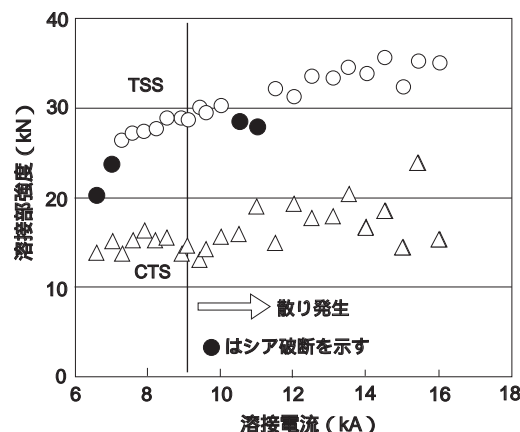


図1 1.8mm厚780MPa級冷間圧延鋼板(1c)の溶接電流によるスポット溶接部強度変化

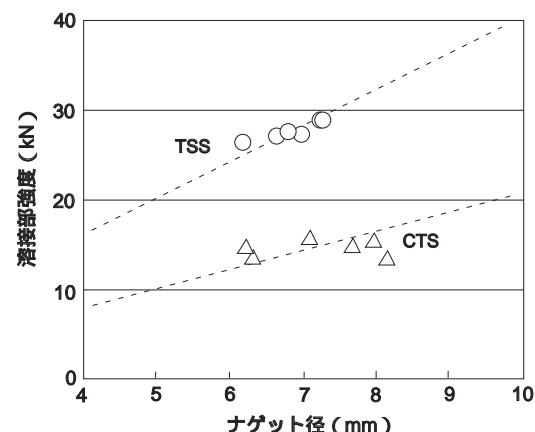


図2 1.8mm厚780MPa級冷間圧延鋼板(1c)におけるナゲット径とスポット溶接部強度の対応(散り発生認められない溶接部がボタン抜け破断する場合)

$$CTS = \sigma_{PM} \cdot D_n \cdot t \cdot TS_{PM} \quad (3)$$

が仮定できる³⁾か否かを調査した。図2は図1に溶接電流に対する変化として示した780MPa級冷間圧延鋼板(1c)の強度のうち、散り発生なく形成された溶接部に対するもののみを、ナゲット径との相関として整理したものであり、表1の条件で得られたナゲットについては(3)式が成り立つことがわかる。

2.3 鋼板強度による溶接部強度の変化

図3に1.8mm厚のGA鋼板(1),(2)および(3b)について、(1),(3)式の σ_{TSS} を求めた結果を示す。TSSに対する定数 σ_{PM} は鋼板強度が

表1 検討対象とした鋼板の板厚、鋼組成、引張試験値、めっきの有無と溶接条件

鋼種	板厚 (mm)	化学成分 (mass%)			引張試験値			めっき目付け (g/m ²)	電極先端径 (mm)	スポット溶接条件		
		C	Si	Mn	YP (MPa)	TS (MPa)	EI (%)			加圧力 (kN)	通電時間 (サイクル)	保持時間 (サイクル)
GA(1)	1.8	0.07	0.02	1.25	314	423	41	52/51	8	4.0	17	10
GA(2)	1.8	0.07	0.47	2.07	385	616	32	48/48	8	5.6	17	10
GA(3a)	1.0	0.07	0.54	2.22	508	820	19	42/51	6	3.4	10	10
GA(3b)	1.8	0.07	0.54	2.22	519	780	19	53/54	8	5.6	17	10
GA(3c)	2.6	0.07	0.54	2.22	546	790	22	54/54	8	7.9	26	10
冷薄(1a)	1.0	0.08	1.39	1.75	456	797	23	-	6	3.1	10	25
冷薄(1b)	1.4	0.08	1.39	1.75	467	831	23	-	6	4.3	14	25
冷薄(2)	1.4	0.14	0.46	2.09	443	809	19	-	6	4.3	14	25
冷薄(3)	1.4	0.17	1.68	1.44	435	816	27	-	6	4.3	14	25
冷薄(1c)	1.8	0.08	1.39	1.75	479	782	24	-	8	5.6	17	25

YP:降伏強さ EI:伸び

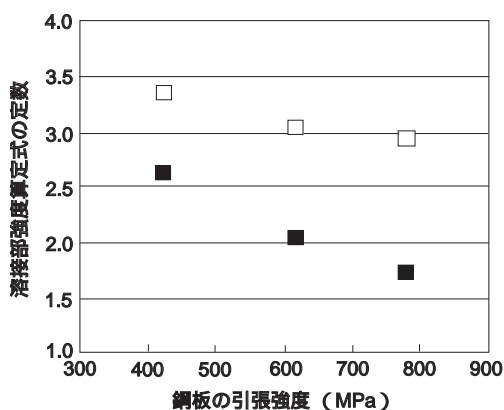


図3 溶接部強度のナゲット径に対する比例定数の鋼板強度による変化(1.8mm厚のGA鋼板(1)(2)および(3b)に対する整理)

増しても大きくは変化しないが、CTSに対するは鋼板強度が増加すると明らかに減少している。これは鋼板強度に見合ってTSSは増加するが、CTSは必ずしも増大しないという従来からの知見に沿うものであるが、のに対する比、すなわち延性比は780MPa級でも0.6弱であり、極端に小さくはない。この原因としては、後で述べるように780MPa級としては比較的C量が低いうえに、少なからずSiが添加されているといった鋼成分の特徴とGA鋼板であることが考えられる。

2.4 板厚による溶接部強度の変化

図4に780MPa級のGA鋼板(3a),(3b),(3c),および冷間圧延鋼板(1a),(1b),(1c)について,(1),(3)式の,を求めた結果を示す。CTSに対する定数には板厚による顕著な変化は見られないが、鋼板が厚くなるとTSSに対する定数は小さくなり、延性比は鋼板の厚さとともに増加する。このようなの変化は試験片の回転に起因すると推定されるが、ナゲット径が同一としても、板厚増加による影響があるためTSSそのものは板厚とともに増加している。またナゲット径が小さく、引張剪断試験においてシア破断となる場合には2式によりTSSが低下するため、延性比はさらに大きくなる場合も散見される。

2.5 鋼成分による溶接部強度の変化

冷間圧延鋼板(1b),(2),(3)の間で顕著に違いのある化学成分はC, Siであり,(1),(3)式の,の差を図5ではその影響として整理した。鋼板強度が等しくとも、鋼中のC量, Si量が多いほどTSSに対する定数は小さくなる傾向にあり、ナゲットの硬さが増

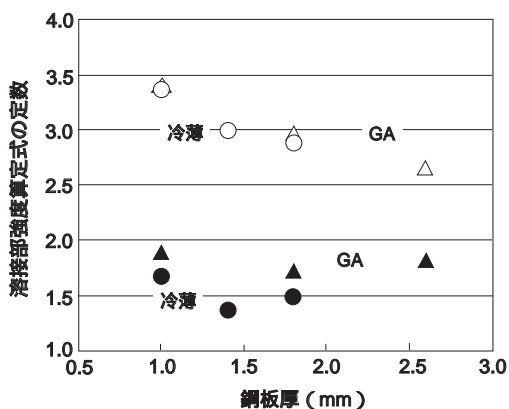


図4 溶接部強度のナゲット径に対する比例定数の鋼板厚による変化(780MPa級のGA鋼板(3a)(3b)および(3c)と冷間圧延鋼板(1a)(1b)および(1c)に対する整理)

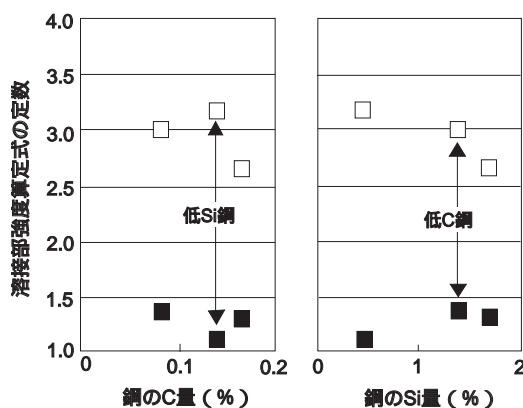


図5 溶接部強度のナゲット径に対する比例定数の鋼成分による変化(1.4mm厚780MPa級冷間圧延鋼板(1b)(2)および(3)に対する整理)

し、応力集中に対する感度が鋭敏化するためと推定される。一方、CTSに対するは冷間圧延鋼板(1b)と(3)ではほぼ同等であり、鋼中のC量が多いと低下するが、780MPa級でもSi量を増すと増大すると判断できる。このようなSiによるCTSの変化はナゲットから母材への硬さ変化が緩やかになるためと推定されている¹⁰⁾。

2.6 めっきの有無による溶接部強度の変化

先の図4から、GA鋼板と冷間圧延鋼板とで(1)式のに差はないものの,(3)式におけるはGA鋼板のほうが冷間圧延鋼板よりも大きく、延性比も増加することがうかがえる。これにはナゲット外のコロナボンド部における合金化めっき層の融着が関与していると推定される。

2.7 散り発生による溶接部強度の変化

以上の傾向は散りを生じない、理想的な状態で溶接された溶接部に対しての知見であり、散り発生の認められる溶接部では様相は一変する。そこで、表1の冷間圧延鋼板(1a)を除く9種類の鋼板について、散りを生じた場合のTSS, CTSが、散りの生じないもとで得られたそれぞれの最大値とどの程度の差があるかを図6および図7に示した。散り発生下の現象は統計的に考察すべきであるが、ここでは実験数が図1のように限られるため、溶接電流の散り発生下限電流との乖離を3段階に分け、TSS, CTSの最大値からの変化をヒストグラム化するとどめた。厚手高強度のGA鋼板(3b)や(3c)では一般に認められているとは異なり、散りが発生すると20%強もTSSが低下することがある。これはシア破断からティア破断に変わる臨界径が大きいため、散り発生によってナゲット径が減少するとシアへと破断形態が変化することが一因である。

390MPa級と低強度のGA鋼板(1)や780MPa級でもC量が低く、1.4mm厚と薄手の冷間圧延鋼板(1b)では、散りが発生してもCTSのばらつきは小さく、散りが生じていない時と比べて低下もないが、その他の鋼板では散りが生じると、CTSは大きくばらつき、同時に低下の傾向を示す。特にC量が0.15%近傍以上の冷間圧延鋼板(2)および(3)や、比較的C量が少なくとも厚手高強度のGA鋼板(3b)や(3c)では、散りが発生するとCTSは大きくばらつき、散りがない時の3分の1となることもある。厚手高強度のGA鋼板の場合、溶接電流が過大であると鋼板表面にクラックを生じる¹²⁾こともあるが、ナゲットの外周近くにブローホールやシュリンケージキャビティが存在することの影響が大きいと推定される。

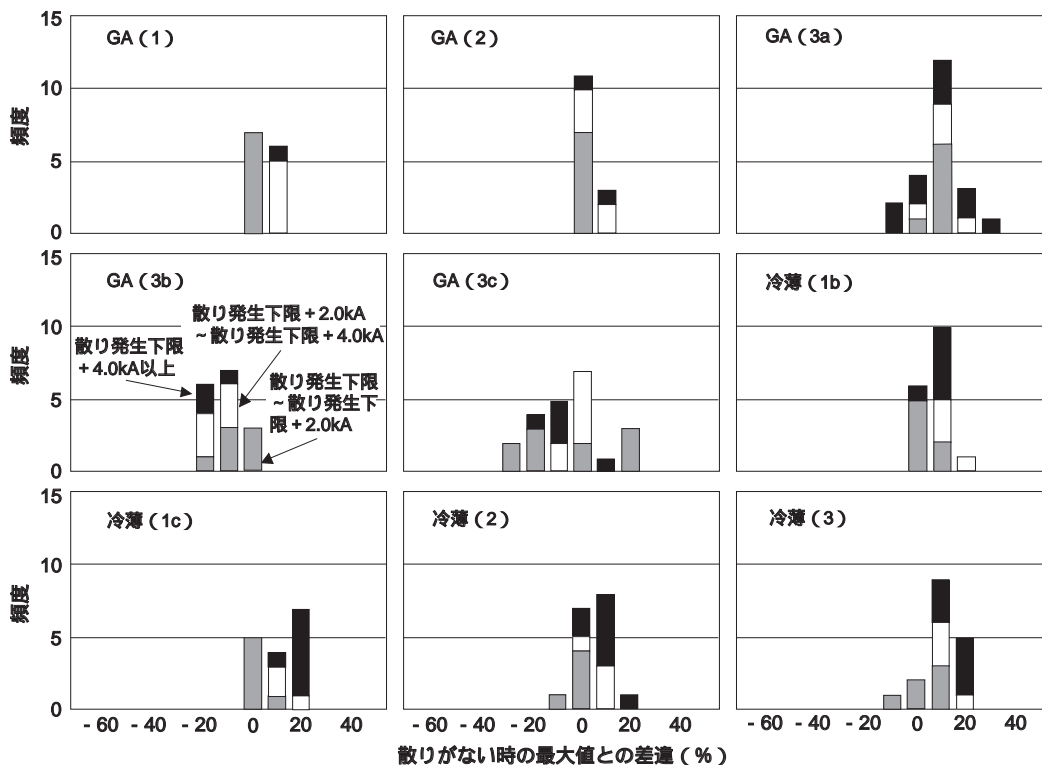


図6 散り発生によるTSSの低下

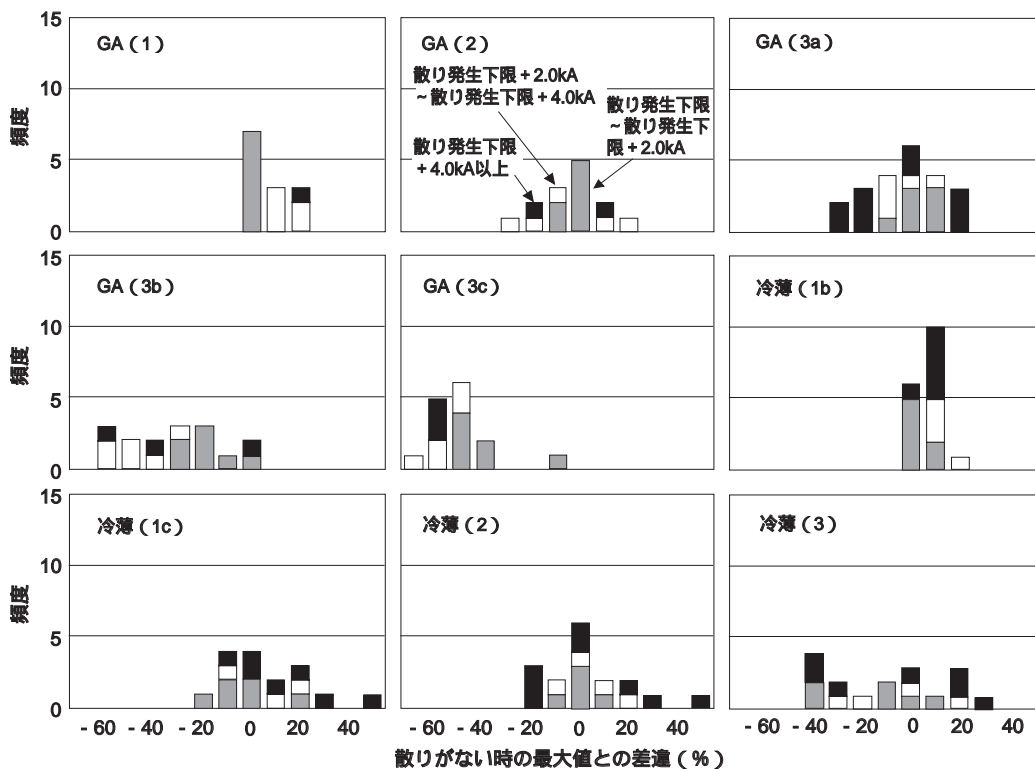


図7 散り発生によるCTSの変化

3. 溶接部強度特性の優れた高強度鋼板メニューの展開

以上から高強度鋼板でスポット溶接部のTSS, CTSを十分安定して確保するためには、C量を抑え、またCTSが低めの冷間圧延鋼板では一定量のSiを含むような組成を選択することが重要なことがわかる。そのうえで微量な添加元素を選択し、圧延条件、焼鈍ないしは溶融垂鉛めっき時の温度条件を制御し、自動車部品への加工性、

強度をはじめとする車体部材としての必要な機能を満足するように鋼板を設計すればよい。新日本製鐵ではこの指針にもとづき、車体骨格への適用にふさわしい、溶接部強度特性の優れた高強度鋼板を開発してきた。

図8はGA鋼板における例を示したものであり、フロントやリアのサイドメンバー、センターピラー等の加工が厳しい部品に適した降伏強度(YP)が低く、伸びの大きな鋼板と、加工時のひずみは小さ

いが、部材としては高い耐力が必要なシルやルーフレール等への適用を想定した、伸びは若干小さいながらYPの高い鋼板を980MPa級に至るまでメニュー化している。図9に2.0mm厚でYPの低い980MPa級GA鋼板を加圧力6.45kN、通電時間19サイクルで溶接した時の溶接電流による溶接部強度変化を示すが、TSS測定時にティア破断となり、延性比も0.5を超えるような溶接部を得ることが可能である。

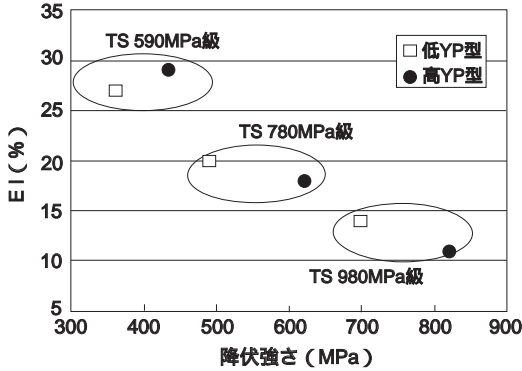


図8 溶接部強度特性に優れた高強度鋼板の一例(2.0mm厚GA鋼板)

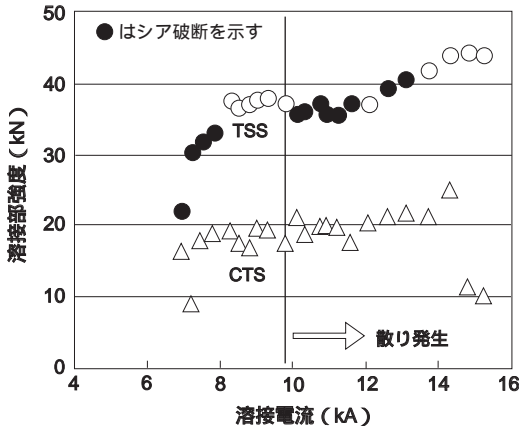


図9 2.0mm厚低YP型980MPa級GA鋼板の溶接電流によるスポット溶接部強度変化

4. 結 言

開発された高強度鋼板は高い溶接部強度を安定して得られるため、信頼性を損なうことなく、衝突安全性と軽量化が両立した自動車車体の実現に資するものである。しかし、そのためには大きな散りを出さないことが前提であり、溶接作業の知能化や鋼板間のなじみ不良を起こさないように部品加工時の形状安定性を改善する等のさまざまな要素技術の融合を図っていく必要がある。もちろん鋼板のさらなる改良、革新も必要であり、その際にも鋼板の基本的性能である溶接性、溶接部強度を考慮に入れながら開発を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) Takagi, K : 4th European Car Body Conference, Bad Nauheim ,2002-9, Technik + Kommunikation Verlags
- 2) Heuschkel, J : Welding Journal 31(10), 931s(1952)
- 3) 能勢二郎, 佐藤之彦: 溶接学会抵抗溶接研究委員会資料 .RW-56-75, 1975
- 4) Sawhill, J.M. Baker J.C.: Welding Journal 59(1), 19s,(1980)
- 5) 山崎一正, 佐藤浩一, 徳永良邦: 溶接学会論文集 .17(4), 553(1999)
- 6) 富士本博紀ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集 .20025623, 2002
- 7) 高橋靖雄, 戸来稔雄, 坂本徹: 溶接学会抵抗溶接研究委員会資料 RW-78-75, 1975
- 8) 高橋靖雄: 溶接技術 25(3) 24(1977)
- 9) 近藤正恒, 斎藤亨: 溶接学会誌 55(2), 97(1986)
- 10) 田中福輝, 野村伸吾, 小久保一郎: 鉄と鋼 68(9), 1437(1982)
- 11) 仲田周次ほか: 溶接学会抵抗溶接研究討論会資料 RWS-54C-82 ,1982
- 12) 佐久間康治, 高橋靖雄: 自動車技術会学術講演会前刷集 20005457, 2000