

車体軽量化に貢献する次世代抵抗スポット溶接技術の開発

Development of Next Generation Resistance Spot Welding Technologies Contributing to the Weight Reduction of Auto Body

松下 宗生 MATSUSHITA Muneo JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (課長)・Ph. D.
谷口 公一 TANIGUCHI Koichi JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (係長)
大井 健次 OI Kenji JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部長・博士 (工学)

要旨

自動車車体の軽量化を実現する次世代抵抗スポット溶接技術を開発した。インテリジェントスポット™溶接は、溶接中に加圧力および溶接電流を変化することで薄板-厚板間および厚板-厚板間両方のナゲット形成を可能とし、高張力鋼板の適用とともに増加する三枚重ね溶接を容易にした。パルススポット®溶接は、後熱処理として短時間高電流通電を利用し、短いタクトタイムで高張力鋼板の溶接継手強度向上を実現した。また、溶接中の加圧力および溶接電流を可変制御する片側スポット溶接により、片側のみの電極加圧で安定的にナゲットを形成し、閉断面構造での高施工性を実現した。

Abstract:

New generation resistance spot welding technologies were developed to reduce the weight of auto body. By varying the force and welding current during welding, Intelligent Spot welding™ made it possible to perform easier three-sheet-lap-welding more frequently performed with increased application of high strength steels. Pulse Spot® welding, which utilizes high current conduction with short periods as a post-weld heating treatment, increased the weld joint strength of high strength steels without extending welding time. The single-side spot welding which controls the electrode force and welding current during welding realized high applicability to closed-sectional structures by the stable nugget formation only with single-side electrode access.

1. はじめに

自動車の軽量化および衝突安全性向上を達成する材料として、自動車車体には各種の高機能高張力薄鋼板の適用が検討されているが、車体の組立工程においては、これらの鋼板をより有効に活用するための溶接技術が重要になっている。そこで、JFE スチールでは、各種の高機能高張力薄鋼板を提供するとともに、車体組立用の溶接技術についても積極的な研究開発を進め、各種鋼板の自動車車体への適用を目指している。自動車車体の組立溶接には、抵抗溶接、アーク溶接およびレーザー溶接などが主に用いられているが、最も多く使用される溶接法は抵抗スポット溶接であり、高い施工性を有することから今後も重要な溶接技術として位置付けられている。

本報告では、JFE スチールが開発した車体組立用抵抗スポット溶接技術として、今後の高張力薄鋼板のさらなる適用拡大に寄与すると期待されるインテリジェントスポット™溶接技術^{1,2)}、パルススポット®溶接技術³⁾、および閉断面

構造部材の効率的な溶接を可能にする片側スポット溶接技術⁴⁾について紹介する。

2. インテリジェントスポット™溶接技術

高張力薄鋼板は車体補強部材に適用される例が多く、その場合、溶接部は外板(軟鋼板)、補強部材(高張力鋼板)および内板(高張力鋼板)の三枚重ね溶接となる。抵抗スポット溶接では、溶接板組みの中央部付近でナゲットが形成されるため、薄板-厚板-厚板の板組みにおいて板厚比(=板組みの総板厚/板組みの中で外側に配置された最も薄い板の板厚)が大きい場合は薄板-厚板間でナゲットが形成されにくくなることから、一般に、溶接施工可能な板厚比の上限は4~5とされている。そこで、溶接施工上の課題である板厚比制限を緩和できる抵抗スポット溶接技術として、薄板-厚板間および厚板-厚板間の両方にナゲットを形成することが可能な「2段加圧・2段通電」プロセス、インテリジェントスポット™溶接技術^{1,2)}を開発した。

本溶接技術では溶接中に加圧力および溶接電流を変化させる点に特徴がある。すなわち、1段目は、低加圧力・短時

間通電・高電流とすることで薄板-厚板間を確実に発熱させ、2段目は、高加圧力・長時間通電とすることで主に厚板-厚板間にナゲットを形成させる溶接プロセスである。本技術は、すでに自動車メーカーの車体組立ラインにおいて適用されており、板厚比の上限拡大とともに、高板厚比板組み溶接における低スパッタ化にも有効な結果も得られている。

3. パルススポット® 溶接技術

3.1 高張力鋼板の溶接における課題

抵抗スポット溶接継手強度は車体強度および車体剛性を向上させる上で非常に重要である。しかし、鋼板強度が増加するにともない溶接部は硬化するため、**図1**に示すように継手の引張せん断強さ (Tension shear strength, JIS Z 3136) は増加していくが、十字引張強さ (Cross tension strength, JIS Z 3137) には鋼板強度によらず一定で、ナゲット内で界面破断する場合にはむしろ低下する傾向にある。

継手強度を向上させるための溶接方法として、以前より、テンパー通電が検討されている^{5~8)}。テンパー通電は、溶接部をいったん冷却後に焼もどしするプロセスであるため、長時間の冷却時間およびテンパー通電時間が必要であり、タクトタイムは大きく増加する。そこで、タクトタイムの長時間化を抑制することを目的に、短いタクトタイムで高い継手強度を実現可能なパルススポット® 溶接方法を開発した。

3.2 パルス通電による溶接部発熱形態

抵抗スポット溶接用有限要素解析ソフト「SORPAS」(SWANTEC Software and Engineering ApS 社製)を用い、板厚 1.6 mm の 1180 MPa 級高張力鋼板の溶接時の温度分布を解析した。**図2**に、加圧力一定の条件で溶接電流を流しナゲットを形成させた後、一定時間冷却させ、その後に短時間・高電流のパルス電流を流した場合の溶接部断面の温度分布を示す。図2(b)はパルス通電後の温度分布であるが、ナゲット中央部よりもナゲット外周部の熱影響部におい

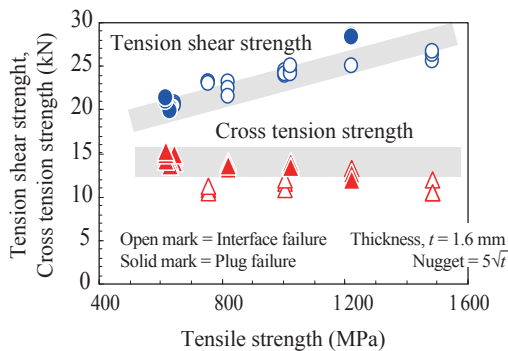


図1 鋼板強度と継手せん断引張強さおよび十字引張強さ
Fig. 1 Comparison of tension shear strength and cross tension strength of the weld joints with respect to steel grade

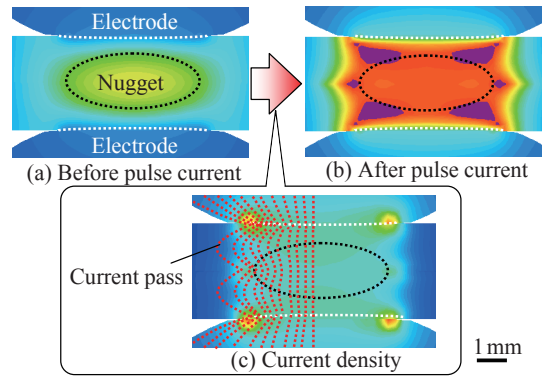


図2 パルス通電時の温度および電流密度の解析結果
Fig. 2 Effect of pulse current on temperature distribution and current density distribution

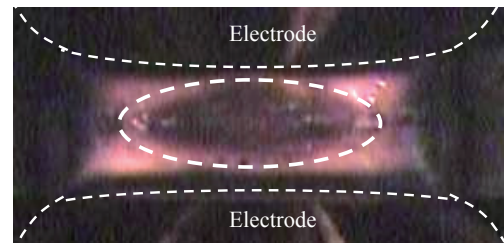


図3 高速度ビデオカメラによるパルス通電時の発熱状況
Fig. 3 Heat distribution after pulse current

て温度が高い。抵抗スポット溶接では、溶接部の抵抗発熱と電極による抜熱のバランスから溶接部中央が最も高温になるが、短時間・高電流のパルス通電では、**図2(c)**に示されるナゲット外周部の電流密度の高い部分がそのまま高温部となっている。短時間・高電流であるために、熱伝導による抜熱速度よりも通電による抵抗発熱速度が上回ったために生じた現象と考えられる。

次に、得られた数値シミュレーション結果を検証するため、鋼板端部を実際に**図2**と同様な通電パターンで溶接し、高速度ビデオカメラを用いて溶接部断面の発熱形態を観察した。供試鋼板には板厚 1.6 mm の 1180 MPa 級高張力鋼板を用いた。**図3**に得られた結果を示す。数値シミュレーション結果と同様、ナゲット外周部が優先的に加熱される現象が観察された。

以上の結果より、本通電後にパルス通電を行うことで、ナゲット外周部を短時間で再加熱することが可能であることが明らかになった。

3.3 パルススポット® 溶接における溶接部特性

上述の結果をもとに開発した、冷却と短時間・高電流のパルス通電を繰り返すパルススポット® 溶接の通電パターンを**図4**に示す。**写真1**に、本通電のみで溶接(以下、従来溶接)した継手およびパルススポット® 溶接継手の断面マクロを比較した。ナゲット径は同じであるが、ナゲット内組織

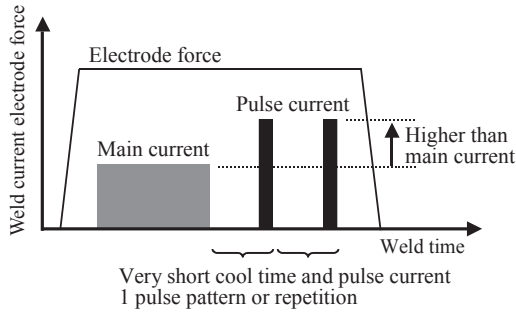


図4 パルススポット® 溶接の加圧・通電パターン

Fig. 4 Current and Electrode force pattern of Pulse Spot® welding

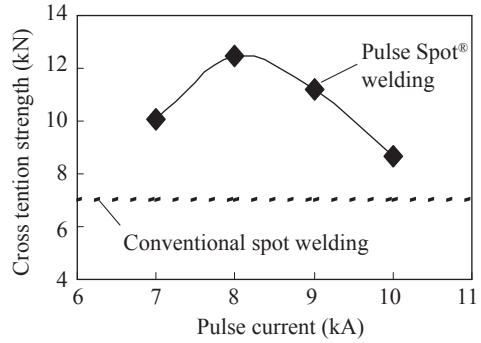


図5 パルス通電適用時のナゲット径 $4\sqrt{t}$ での十字引張強さの比較

Fig. 5 Comparison of cross tension strength at nugget diameter of $4\sqrt{t}$ with respective pulsed current pattern

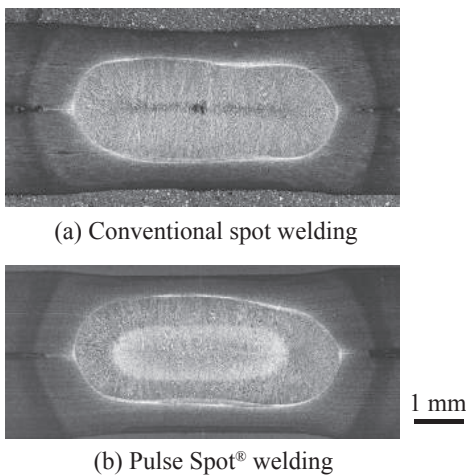


写真1 断面マクロ組織

Photo 1 Cross sectional macrostructure

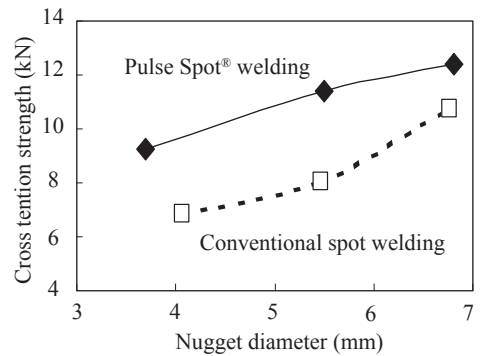


図6 従来抵抗スポット溶接とパルススポット® 溶接の十字引張強さの比較

Fig. 6 Comparison of cross tension strength between of conventional spot welding and of Pulse Spot® welding at each diameter

には大きな差異が確認された。これはパルス通電にともなう再加熱による影響と考えられる。

次に、パルススポット® 溶接における継手強度特性を評価した。図5に、ナゲット径 $4\sqrt{t}$ (t は板厚)でのパルス通電電流と継手の十字引張強さの関係を示す。従来溶接では十字引張強さは波線で示す7.0 kNであったのに対し、パルススポット® 溶接では継手強度が大きく向上し、従来溶接に対して1.3～1.7倍の継手強度が得られた。また、幅広いパルス通電電流範囲において継手強度が増加していることから、溶接時の外乱要因に対しても強い溶接プロセスであるといえる。

図6は、ナゲット径を $3\sqrt{t} \sim 5\sqrt{t}$ の間で変化させた場合の十字引張強さの変化を示す。いずれのナゲット径においてもパルススポット® 溶接は従来溶接より十字引張強さが上昇しており、特に、ナゲット径6 mm ($\cong 4.5\sqrt{t}$)以下では3 kN以上向上しており、パルス通電の効果が非常に大きいといえる。図6の十字引張試験時の溶接破断部の断面を写真2に示す。継手強度が大きく向上したナゲット径 $3\sqrt{t}$ および $4\sqrt{t}$ のパルススポット® 溶接では、従来溶接では破断形態が界面破断あるいは部分プラグ破断であったが、プラグ破断へと変化したことが明らかである。

Nugget diameter, d	Conventional spot welding	Pulsed Spot® welding
$3\sqrt{t}$		
$4\sqrt{t}$		
$5\sqrt{t}$		

t =Thickness of sheet

1 mm

写真2 従来抵抗スポット溶接とパルススポット® 溶接の破断形態の比較

Photo 2 Comparison of fracture pattern between conventional spot welding and Pulse Spot® welding

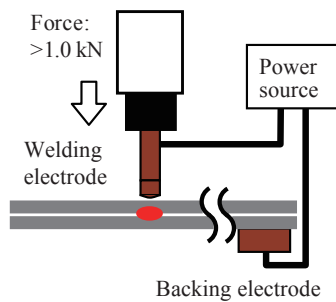
以上の結果から、短時間冷却と短時間・高電流通電となるパルス通電を用いたパルススポット® 溶接を実施すること

により、十字引張強さおよび破断形態を大きく向上させることができ、1180 MPa 級鋼板の継手強度向上が可能であることが明らかになった。さらに、従来のテンパー通電ではナゲット形成後に1s程度の冷却・通電時間が必要であったが、パルス通電は0.5s以下とすることが可能であることから、施工時の溶接タクトタイム増加抑制にも有効であるといえる。

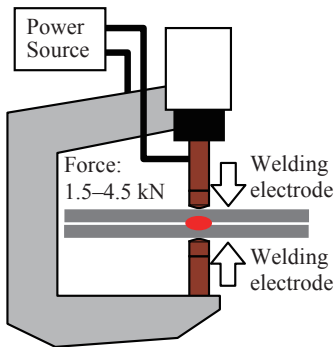
4. 片側スポット溶接技術

4.1 片側スポット溶接性に及ぼす溶接条件の影響

片側からの施工で溶接可能な溶接方法として、インダイレクト式片側スポット溶接法(図7(a))^{9,10}がある。しかし、



(a) Indirect spot welding, with single-side access



(b) Direct spot welding, with both side access

図7 抵抗溶接プロセスの概念図

Fig. 7 Schematic diagrams of resistance welding processes

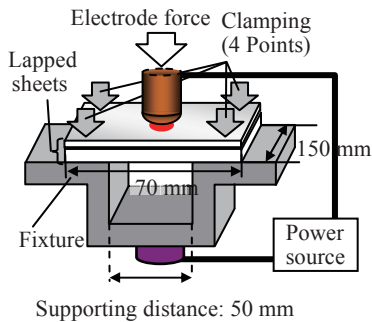


図8 片側スポット溶接の実験構成

Fig. 8 Experimental setup of single-side spot welding

両側からの電極加圧となる通常の抵抗スポット溶接法(図7(b))と比較して、設定加圧力が低く、電極間の通電経路が長くなるため、片側スポット溶接では溶接点以外に電流が流れる分流が生じやすいと考えられる。

図8に示す装置構成で、上板を板厚0.7mmの270MPa級冷間圧延鋼板、下板を板厚1.6mmの980MPa級冷間圧延鋼板とした板組みでインダイレクト式片側スポット溶接を

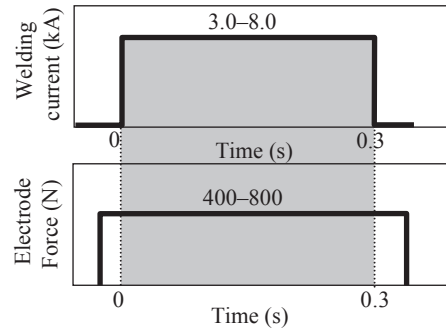
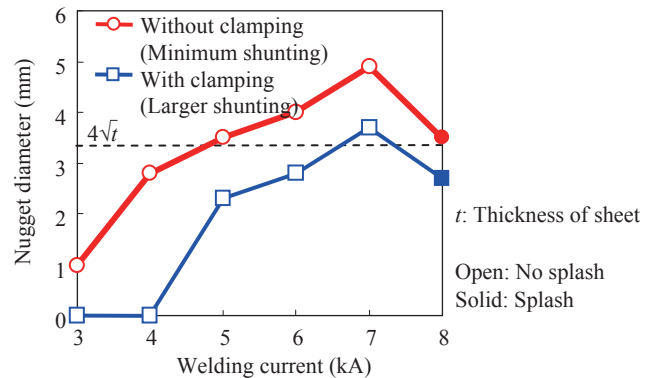
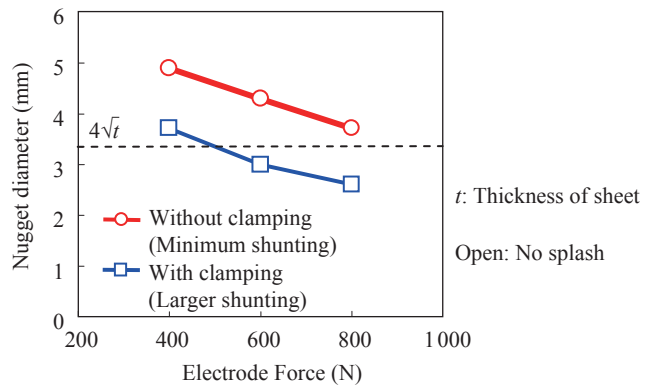


図9 溶接電流・電極加圧力一定プロセスの溶接条件

Fig. 9 Welding conditions of constant welding current and electrode force process



(a) As a function of welding current at 400 N of electrode force



(b) As a function of electrode force at 7.0 kA of welding current

図10 溶接電流・電極加圧力一定プロセスにおけるナゲット形成に及ぼす分流の影響

Fig. 10 Influence of shunting on nugget formation with constant welding current and electrode force

行った。分流を大きくする場合には、鋼板を4ヶ所でクランプし鋼板間を密着させる方法を採用した。溶接には、先端曲率半径40 mmのR形電極を用い、図9に示すように加圧力・電流一定パターンにて溶接を行った。

鋼板のクランプ有無によって分流条件を変化させたときのナゲット形成への影響を図10に示す。図10(a)は加圧力一定とした場合の溶接電流とナゲット径の関係、図10(b)は電流一定とした場合の加圧力とナゲット径の関係である。ナゲット径は電流が増加するほど、また加圧力が低下するほど増加する傾向を示しているが、いずれの関係においてもクランプありの場合はクランプなしと比較してナゲット径が顕著に減少しており、分流増大のナゲット形成に及ぼす影響が非常に大きい結果となった。

4.2 加圧・電流制御を活用した溶接プロセス

図11に示すように加圧力と電流を多段制御した溶接を行った。4.1節と同様の板組み、装置構成、クランプありの条件で、電極は先端曲率半径40 mmのR形を用いた。第1段階の電流値 I_A 、 I_B は、 $I_A < I_B < 8$ kAの関係とし、加圧力 F_A 、 F_B は、 $400 \text{ N} < F_A < F_B$ の関係とした。

図12に、図11に示す加圧力・電流制御パターンにおいて第2段階目の電流を変化させた時のナゲット径変化を示す。図10(a)に示した加圧力・電流一定パターン、クランプありとした場合では、ナゲット径 $4\sqrt{t}$ 以上かつ散り発生しない適正溶接電流範囲は1 kA以下であったが、図12の加圧力・電流制御パターンの場合では、適正溶接電流範囲が拡大した。さらに、第1段階目が電流 I_A 、加圧力 F_A の場合の適正溶接電流範囲は1.6 kAであるのに対し、電流 I_B 、加圧力 F_B の場合は2.6 kAと大きく向上した。写真3に図10に示した加圧力・電流一定パターンで電流が7.0 kAの場合の溶接部断面マクロを、写真4に図12に示した加圧力・電流制御パターンで7.0 kAの場合の溶接部断面マクロを示す。加圧力・電流一定パターンと比較し、加圧力・電流制御パターンではナゲット径が増加している。

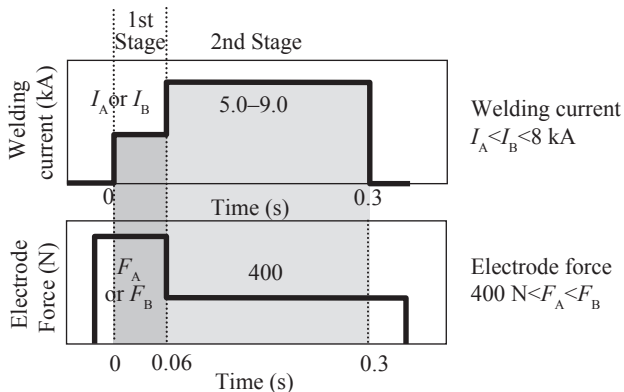


図11 溶接電流・電極加圧力制御プロセスの溶接条件
Fig. 11 Welding conditions of variable current and force control

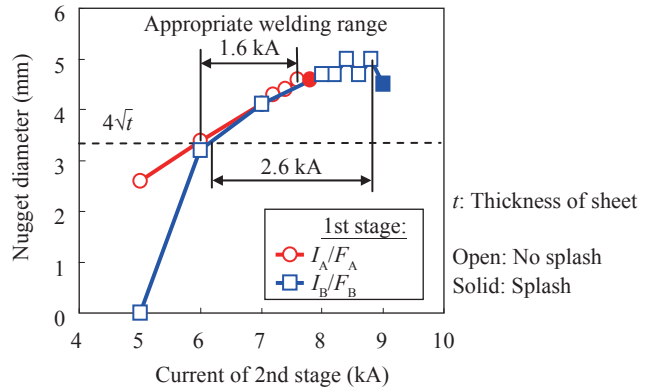


図12 溶接電流範囲実験結果 (クランプあり)
Fig. 12 Welding current range test results (with clamping)

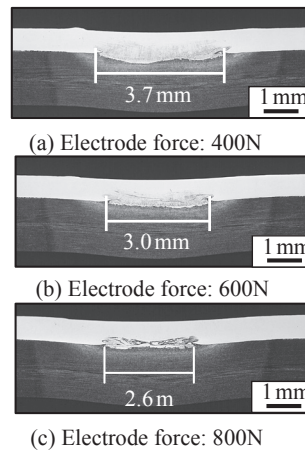


写真3 電流・加圧力一定プロセスにおける溶接部の断面マクロ組織 (7 kA, クランプあり)
Photo 3 Cross-sectional macrostructures of the welds with constant current and force (at 7.0 kA, with clamping)

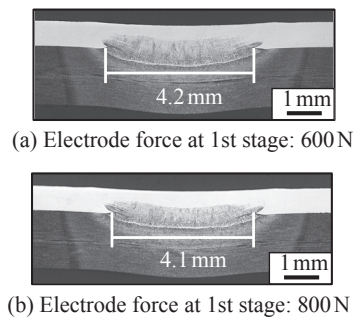


写真4 電流・加圧力制御プロセスにおける溶接部の断面マクロ組織 (7 kA, クランプ有)
Photo 4 Cross-sectional macrostructures of the welds with variable current and force control (at 7.0 kA, with clamping)

4.3 数値シミュレーションによる溶接プロセス解析

ナゲット形成に及ぼす加圧力および溶接電流の多段制御の効果を検討するため、スポット溶接専用の有限要素解析

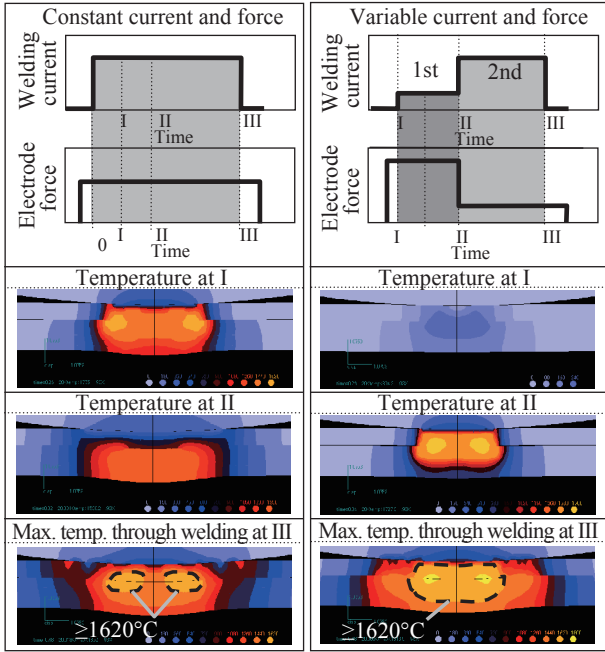


図 13 数値シミュレーションによる溶接時の予想温度分布
Fig. 13 Predicted temperature distribution during welding by numerical simulation

ソフト「Quick Spot」((株) 計算力学研究センター) を使用し、二次元軸対称モデル(熱弾塑性有限要素法)により溶接現象を解析した。鋼板および電極の物理的特性(熱伝導率, 比熱, 電気伝導率, ヤング率, 降伏応力, 線膨張率)は温度依存性を考慮した。

図 13 に溶接プロセス解析結果を示す。(a) 加圧力・電流一定パターンでは、通電開始直後では鋼板間で発熱するが、その後は通電中にもかかわらず溶接部温度は低下し、融点以上に達する温度領域はほとんど形成されない。一方、(b) 加圧力・電流制御パターンでは、第 1 段階目では電極-鋼板間での接触径が確保され、第 2 段階目では開始直後に発熱が集中し、融点を超える高温領域が基石状に形成されることが示された。

以上より、推定される加圧力・電流制御パターンによるナゲット形成促進効果の概念を図 14 に示す。第 1 段階を高加圧力・低電流とし、十分な加圧力を負荷しながら鋼板を予熱することで、上板-下板間においては密着面が形成され、通常の抵抗スポット溶接のような安定した通電経路が確保される。その後、第 2 段階では低加圧力・高電流とし、加圧力低減により電極が鋼板に沈み込みを回避し接触面積が増大することを抑制しながら、電流を増大させることにより、電極直下に集中した発熱部を形成することで、ナゲット形成を促進することができる。

5. おわりに

自動車車体に対して、各種の高機能高張力薄鋼板を有効に活用するためには、鋼板材質の高性能化とともに、プレ

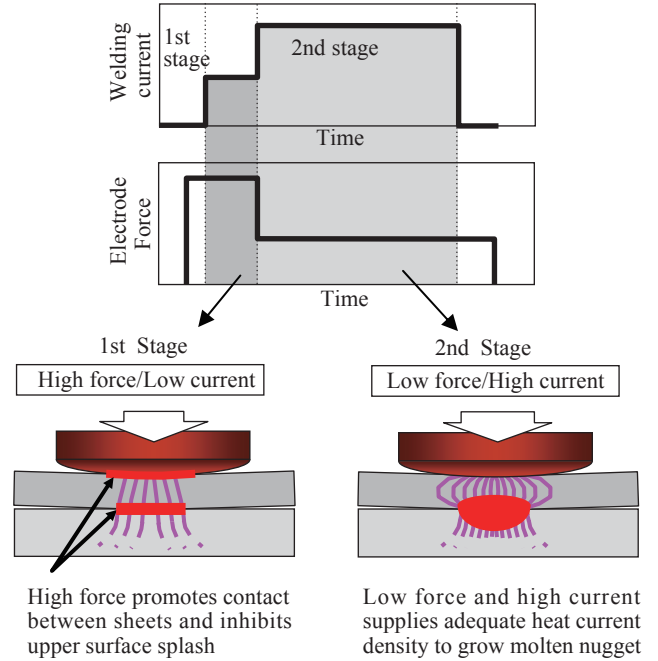
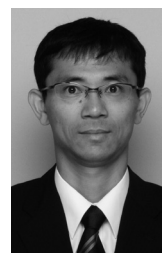


図 14 電流・加圧力制御によるナゲット形成過程の概念
Fig. 14 Concept of nugget formation process of variable current and force control

ス技術、溶接技術などの工法開発が重要である。本報告では、これらの中で、自動車車体組立用の新スポット溶接技術の開発事例を紹介した。今後は、これらの溶接技術の実適用を推進し、高張力薄鋼板の適用拡大による車体軽量化および衝突安全性向上に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 池田倫正ほか. あたりあ. 2009, vol. 48, no. 2, p. 76-78.
- 2) 池田倫正ほか. 溶接学会論文集. 2010, vol. 28, no. 1, p. 141-148.
- 3) Taniguchi, K. et al. Preprints of the National Meeting of JWS. 2010, vol. 2010f, 143.
- 4) Matsushita, M. et al. Preprints of the National Meeting of JWS. 2010, vol. 2011s, 324.
- 5) Mimer, M. et al. Welding in the World. 2004, vol. 48, p. 14-18.
- 6) Beevers, A. et al. Welding Journal. 1962, no. 9, p. 523-532.
- 7) Chuko, L. W. et al. Welding Research. 2002.
- 8) Girvin, B. et al. AISI/DOE Technology Roadmap Program Final Report. 2004, DE-FC36-97ID13554.
- 9) Cho, Y. et al. Weld. J. 2006, vol. 85, p. 26-29.
- 10) Nishibata, H. et al. Welding in the World. 2009, vol. 53, no. 5/6, p. 15-22.



松下 宗生



谷口 公一



大井 健次