

片側スポット溶接における 電流・加圧力制御プロセス技術の開発

Development of In-Process Welding Current and Electrode Force Control Process for Single-Side Spot Resistance Welding

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.
池田 倫正 IKEDA Rinsei JFE スチール スチール研究所 接合・強度研究部 主任研究員 (部長)・博士 (工学)
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

自動車分野への適用を目的に、片側からの電極アクセスによるインダイレクト抵抗スポット溶接法を開発した。自動車の生産性、設計自由度を損なうことなく溶融ナゲット形成の促進と散り抑制を達成するため、溶接中の溶接電流と電極加圧力の最適制御プロセスを検討した。従来方法である電流・加圧力一定パターンと電流・加圧力を可変制御したパターンにおける溶接現象の変化を比較するため数値シミュレーションを行なった。その結果、可変制御パターンにおいて溶融ナゲット形成の促進と散り抑制の効果が予測された。次に、板厚 0.7 mm の 270 N/mm² 級冷間圧延鋼板、板厚 1.6 mm の 980 N/mm² 級冷間圧延鋼板の重ねによる試験片を用いて溶接実験を行なった。電流・加圧力一定パターンと可変制御パターンの溶接結果を比較したところ、電流・加圧力一定パターンでは適正電流範囲が 1 kA 程度であったが、可変制御パターンでは適正電流範囲が 2.6 kA へ拡大した。以上より、可変制御パターンによる溶融ナゲット形成の促進と散り抑制の効果が確認された。

Abstract:

Indirect resistance spot welding process with single-side electrode access was developed for the automotive applications. The variable welding current and electrode force control process during welding were studied in order to achieve the promotion of molten nugget formation and suppression of expulsion without sacrificing the productivity and design flexibility of automobiles. Numerical simulations were conducted to compare the difference in the welding phenomena between the constant pattern of current and force during welding, as the conventional process, and variable control pattern, as the developed processes. It was predicted that the variable control pattern has effects on accelerating nugget formation and suppressing expulsion. The welding experiments were subsequently performed on lapped test coupons of 0.7 mm thick cold-rolled steel sheet with tensile strength of 270 N/mm² and 1.6 mm thick cold-rolled steel sheet with tensile strength of 980 N/mm². When welding was performed with the constant current and force pattern, the appropriate current range was less than 1 kA. On the other hand, it extended to 2.6 kA during welding with the variable control pattern, confirming the fact that the variable control pattern successfully suppressed the expulsion and acceleration of the nugget formation.

1. 緒言

自動車車体製造においては、車体の軽量化および高剛性化、もしくは生産コストの低減を目的に片側からの作業工程で重ね溶接可能な溶接方法が要望されている。これに該当する溶接方法としては、アーク溶接、レーザー溶接、抵抗スポット溶接等が挙げられる。アーク溶接は、現状の自動車生産において両側からのアクセスが確保できず通常の抵抗スポット溶接が適用不可能な部位において使用されているが、

溶接トーチ周辺のスパッタ除去作業など維持管理コストに課題がある。レーザー溶接は初期投資コストが大きいことが実適用における大きな課題である。抵抗スポット溶接では、シリーズ方式¹⁻⁵⁾ およびインダイレクト方式⁶⁻¹⁴⁾ が片側溶接が可能な方法として開発されている。どちらも通常の抵抗スポット溶接と同程度の初期投資コストで調達可能であることから商業的には実現性が高いため実用化の期待が高い。

シリーズ方式は重ね合わせた板部材に対し 2 電極を片側から加圧させ、電極間に通電させることにより 2 点同時に溶接する方法である。電極が接触する側の部材に流れる電流

2014 年 2 月 3 日受付

が大きくなる傾向があり、重ね合わせた2枚の部材間を跨って流れる電流が小さくなる。このため、部材間での発熱量が小さくなり、溶融ナゲットの形成が困難であることが報告されている^{2,3)}。

一方、インダイレクト方式は、重ね合わせた部材に対し1本の電極を片側から押し当て、溶接点とは別の箇所に給電端子を取り付け電流を流すことにより溶接する方法である。溶接点で部材間を跨った電流が流れるため抵抗発熱により溶融ナゲットが得やすい。しかし、部材の板厚、既溶接点の存在等により分流状態が大きく変化するため、形成されるナゲット径も影響を大きく受ける^{9,11)}。この課題を克服するために、溶接条件、給電端子の位置、溶接順序、鋼板を組合せる方法が報告されている^{7,9,10)}。

本報告では、インダイレクト方式の片側抵抗スポット溶接において、これまで検討されていない溶接中の電流・加圧力の可変制御に着目し新たに開発した、分流状態が変化してもナゲットを安定形成でき、散りも抑制可能という溶接プロセス¹²⁻¹⁴⁾を紹介する。まず、数値シミュレーションの活用によりナゲット形成促進、散り抑制条件を予測した。さらに、実験により、分流が大きい条件において、電流・加圧力可変制御プロセスを適用することで、適正溶接条件範囲を拡大可能であることを明らかにした。

2. 実験方法

2.1 数値シミュレーション

汎用ソフト「SORPAS[®]」(SWANTEC Software and Engineering ApS)を使用し、数値シミュレーションを行なった。2次元軸対称モデル(熱弾塑性有限要素法)により解析を行なった。計算に際しては鋼板、電極材質の物理的特性(熱伝導率、比熱、電気伝導率、ヤング率、降伏応力、線膨張率)の温度依存性を考慮した。図1に片側スポット溶接の数値シミュレーションモデルを示す。上板が板厚0.7 mmの

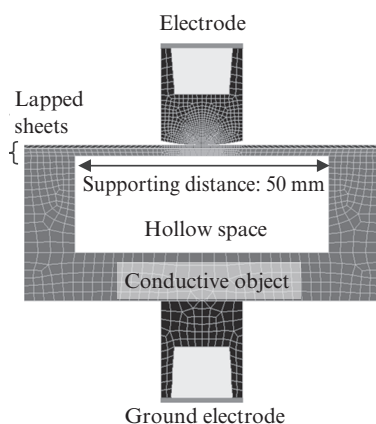


図1 片側スポット溶接の数値シミュレーションモデル

Fig. 1 Models for numerical simulation for single-side spot welding

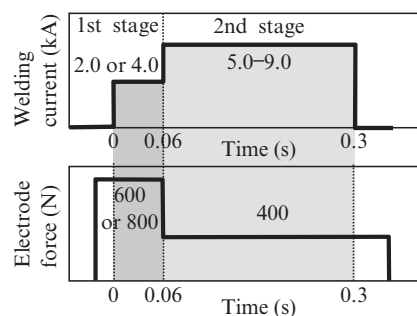


図2 電流・加圧力一定パターンの溶接条件

Fig. 2 Welding conditions of constant current and force pattern

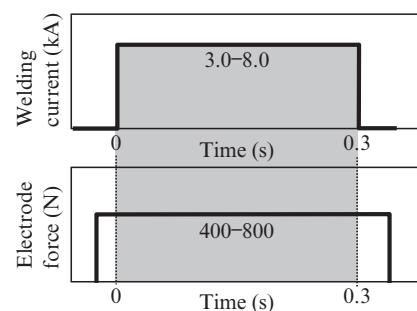


図3 電流・加圧力可変パターンの溶接条件

Fig. 3 Welding conditions variable current and force pattern

270 N/mm²級冷間圧延鋼板、下板が板厚1.6 mmの980 N/mm²級冷間圧延鋼板の重ね部材の溶接とした。

上側電極は溶接電極であり、先端曲率半径40 mmのR形とした。重ね合わせた板部材は、断面が凹形状の導体からなる物体の上に拘束のない状態で配置し、部材は端部で支持した。支持間隔は50 mmとした。給電端子となる下側電極は先端を平面形状とした。電極加圧力および溶接電流は、図2に示す電流・加圧力一定パターン(従来溶接)、図3に示す電流・加圧力可変制御パターン(開発溶接)を用いた。これらの条件における通電中の溶接部の温度分布、電流密度分布の時間変化を計算し、溶融部形成プロセス、発熱形態を推定した。

2.2 溶接実験

上板を板厚0.7 mmの270 N/mm²級冷間圧延鋼板、下板を板厚1.6 mmの980 N/mm²級冷間圧延鋼板とし、図4に示す装置構成でインバータ直流電源を用いて片側スポット溶接を行なった。図4に示すように重ね鋼板の端部を4ヶ所、それぞれ245 Nの荷重でクランプし鋼板間の分流状態を変化させた。すなわち、クランプなしの状態では溶接点以外で電流が流ることがないため分流が小さく、クランプありではクランプ箇所にて電流が流れるため分流が大きくなる。溶接電極は先端曲率半径40 mmのR形を用いた。電極加圧力および溶接電流は、図2に示す電流・加圧力一定パター

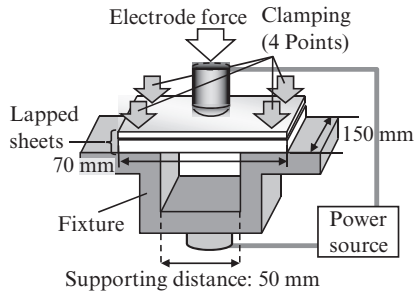


図4 片側スポット溶接の実験構成

Fig. 4 Experimental setup of single-side spot welding

ンおよび図3に示す電流・加圧力可変制御パターンを用いた。さらに溶接現象を詳細に解析するため、溶接中の電流、電圧、電極加圧力を測定した。電流は給電ケーブルにトロイダルコイルを装着し測定した。電圧は、溶接電極と給電端子間の電位差を測定した。電極加圧力は、溶接電極に連結するシャンク部に歪センサーを取り付け、ひずみ量の変化より測定した。また、得られた溶接部の断面より、鋼板間に形成されたナゲット径を測定した。さらにナゲット径が $4\sqrt{t}$ となる電流値から散り発生限界電流値までの適正電流範囲を評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 数値シミュレーションによる溶接現象解析

図5に溶接部の温度分布の数値シミュレーション結果を示す。図5(a)に示す電流・加圧力一定パターンの場合、通電開始直後の0.02 sでは上板で電極近傍に偏って発熱、溶融を開始し、0.06 sでは上板-下板間へと発熱・溶融部が移動した。このような通電開始直後の上板での電極近傍に偏った発熱、溶融の傾向は、鋼板と電極の接触部の周辺から溶融金属が飛散する表散り¹⁵⁾の発生を示唆すると考えられる。0.12 sでは発熱領域は拡大するもののピーク温度が低下するため溶融部が拡大しない状態になっており、0.3 s (通電完了)では上板-下板間に形成されるナゲット径は非常に小さい結果となった。

図6に数値シミュレーションにより予測される溶接部の電流密度分布を示す。図6(a)に示す電流・加圧力一定パターンの場合、通電開始直後の0.02 sでは上板の電極近傍に電流密度が著しく高い領域がみられた。一方で、電極直下の上板-下板間では電流密度の勾配がほとんどみられず、鋼板間には電流が集中する部分が形成されていないといえる。これより、図5(a)で確認された通電初期に電極近傍に偏って発熱、溶融する現象は、電極-上板間での接触部分での発熱が支配的であり、上板-下板間の通電による発熱がごく小さいことに起因していることが確認できた。続いて0.06 sでは電極直下の上板-下板間に連続的な勾配を伴う高電流密度の領域がみられ上板-下板間に通電経路が形成された状態で

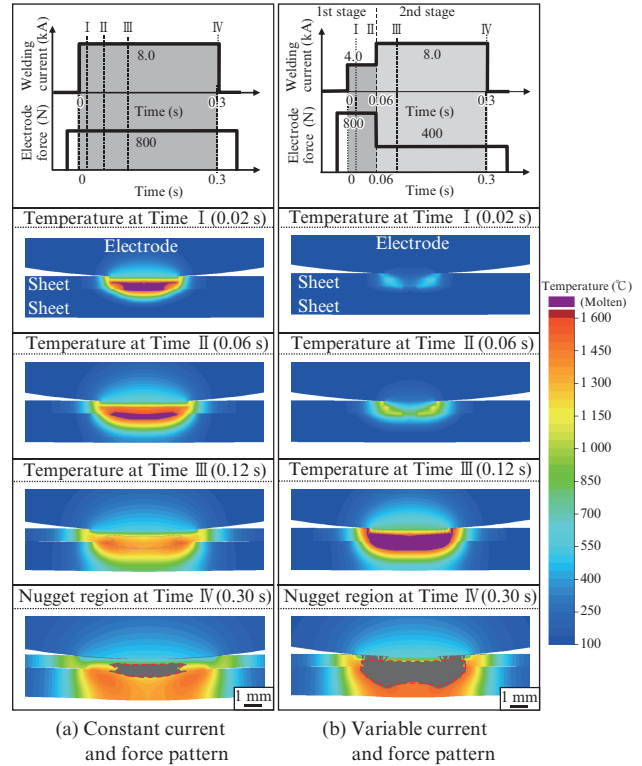


図5 数値シミュレーションによる溶接中の温度分布計算結果
Fig. 5 Temperature distribution during welding predicted by numerical simulation

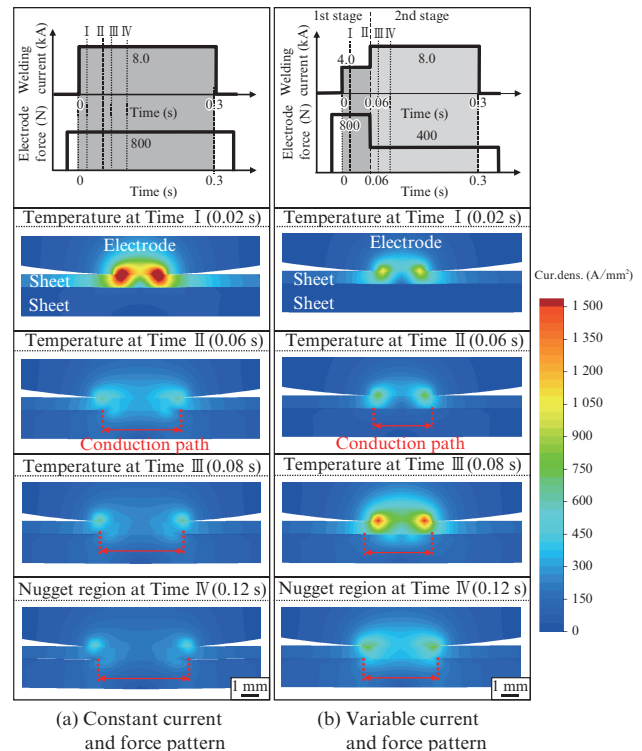


図6 数値シミュレーションによる溶接中の電流密度分布計算結果
Fig. 6 Current density distribution during welding predicted by numerical simulation

あることを示している。0.06 sでは上板-下板間で発熱，溶融する状態へ移行したと考えられる。その後は0.08, 0.12 sでみられるように通電経路が拡大すると共に電流密度は低減した。このため，図5 (a)で見られたように発熱領域は拡大するもののピーク温度が低下することになり，溶融部は拡大しなかったと考えられる。

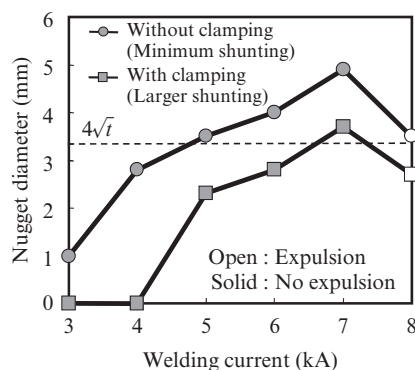
以上より推察されるように，片側スポット溶接では通電開始から終了までの時間経過において温度および電流密度分布が刻々と変化するため，電流および加圧力を一定とするとそれぞれの時間帯で最適な条件とすることができない。そこで，加圧力・電流可変制御パターンを用いることで，通電初期，後期の2つに区分した時間帯で最適な条件を選択し，散り抑制，ナゲット形成促進することが可能か数値シミュレーションを用いて検討した。

図3に示すような加圧力・電流可変制御パターンを用いることで，下記のようなメカニズムにより散り抑制効果，ナゲット形成促進効果が得られることが考えられる。第1段階は低電流・高加圧力とすることで，十分な加圧力を負荷しながら鋼板を加熱する。これにより電極-上板表面間に十分な接触面積を確保し，電極近傍での過度な電流集中による表散りを抑制することができ，また上板-下板間においては密着面の形成により通電経路が確保される。その後，第2段階では高電流・低加圧力とすることで，第1段階で形成された通電経路の電流密度を高め，上板-下板間からの発熱を促進する。さらに，加圧力低減により上板-下板間の接触径拡大を回避し，電流密度の低下を抑制することで，ナゲット形成を促進することが可能となる。

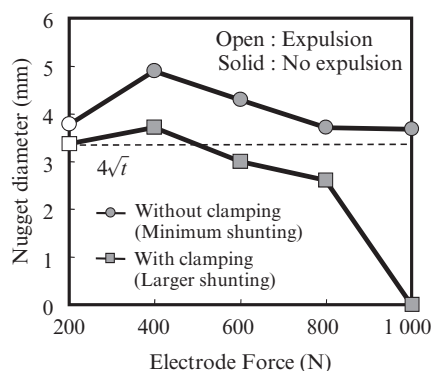
図5 (b)に示す電流・加圧力可変制御パターンの場合の温度分布の数値シミュレーション結果を示す。第1段階では0.02, 0.06 sで見られるように溶融しない程度の発熱状態であったが，第2段階開始直後の0.12 sでは上板-下板間からの発熱により溶融部が形成され，0.3 sでは上板-下板間に5 mm程度の大きな径のナゲットが形成される結果となった。

図6 (b)に電流・加圧力可変制御パターンの場合の電流密度分布を示す。第1段階では高加圧力・低電流としているが，0.02, 0.06 sで見られるように電極近傍での電流密度を低く保ちながら，通電経路を形成することができている。第2段階では低加圧力・高電流となるが，0.08 sで見られるように第1段階で形成された通電経路に高電流密度が負荷され，上板-下板間で発熱，溶融する発熱状態となることが示されている。さらに，0.12 sでは，通電経路の拡大が抑えられ高電流密度が維持されている。これにより，溶融部が大きく拡大したと考えられる。

以上より，数値シミュレーションを用いて加圧力・電流可変制御パターンによる散り抑制効果，ナゲット形成促進効果が予測された。



(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7 電流・加圧力一定パターンでの溶接結果

Fig. 7 Welding results of constant current and force pattern

3.2 溶接実験による検証

図2に示す電流・加圧力一定のパターンにおいて重ね鋼板のクランプ有無によって分流条件を変化させ，実際に溶接したときの電極加圧力，溶接電流，分流（クランプ有無）のナゲット形成への影響を図7に示す。図7 (a)に示すように，加圧力400 Nでは電流の増加とともにナゲット径も増加する傾向を示した。しかし，8 kAでは散りの発生に伴いナゲット径が減少した。散り発生により溶融金属が外部に飛散したためと考えられる。ナゲット径が $4\sqrt{i}$ となる電流値から散り発生限界の電流値までの範囲を適正電流範囲とすると，クランプなしにおいては5 kA付近から8 kA未満までの3 kA程度が適正電流範囲となった。一方，クランプありにおいては，クランプなしの同じ電流値の場合と比較してナゲットが小さくなる傾向を示し，適正電流範囲は1 kA以下となった。図7 (b)は電流値7 kAで加圧力を増加させたときのナゲット径を示す。加圧力200 Nにおいては散りが発生したため加圧力400 Nと比較してナゲット径は減少した。一方，加圧力400 N以上においては散りは発生しなかったが，加圧力の増加に伴いナゲット径は減少した。これはクランプの有無によらず同様な傾向であったが，写真1の

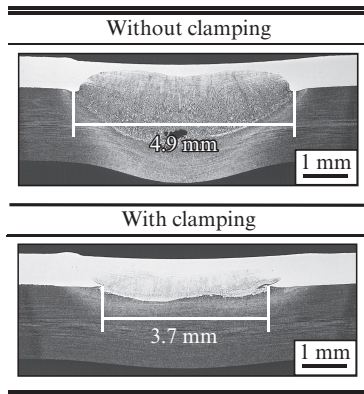


写真1 電流・加圧力一定パターンでの溶接部断面マクロ組織 (電流7 kA, 加圧力400 N)

Photo 1 Cross-sectional macrostructures of the welds with constant current and force pattern (7 kA of current and 400 N of force)

断面マクロ組織に示すようにクランプありの分流が大きな状態においては、ナゲットの減少が顕著であった。以上より、電流・加圧力一定パターンにおいては、クランプなしの分流が小さい状態では、幅広い適正電流範囲を得ることができ良好な溶接が可能であることが示されたが、クランプありの分流が大きい状態では、適正電流範囲が非常に狭くなり、良好な溶接が困難になることが確認された。

図3に示す電流・加圧力可変制御パターンにおいて溶接したときの溶接結果を図8に示す。電流・加圧力可変制御パターンとしては、第1段階を電流2 kA, 加圧力600 Nもしくは電流4 kA, 加圧力800 N, 第2段階の加圧力を400 Nとし、電流を5~9 kAとした。また、ナゲット形成がより厳しい分流が大きい条件での評価とするため、クランプありでの溶接を行なった。適正電流範囲の下限となるナゲット径 $4\sqrt{t}$ を得るための電流値に関しては、第1段階の電流2 kA, 加圧力600 Nの場合と電流4 kA, 加圧力800 Nの場合ともに6 kA付近となりほぼ同等であった。電流・加圧力一定パターンにおいては、図7(a)のクランプありの条件に示すように7 kAをわずかに下回る電流であったことから、電流・加圧力可変制御では、より低い電流値でナゲット径 $4\sqrt{t}$ を得ることが可能であることが示された。適正電流範囲の上限となる散り発生限界の電流値に関しては、第1段階が電流2 kA, 加圧力600 Nの場合では7.6 kAであるのに対し、電流4 kA, 加圧力800 Nの場合では8.8 kAとなり散り発生限界が大きく向上した。電流・加圧力一定パターンにおいては、図6(a)のクランプありの条件に示すように7 kAをわずかに上回る程度であったことから、電流・加圧力可変制御は、散り発生限界電流を上昇させる効果があり、特に電流4 kA, 加圧力800 Nの場合において散り発生限界が大きく向上した。

以上より、電流・加圧力可変制御パターンでは上板-下板間で効果的に発熱・溶融しナゲット形成が促進され、かつ

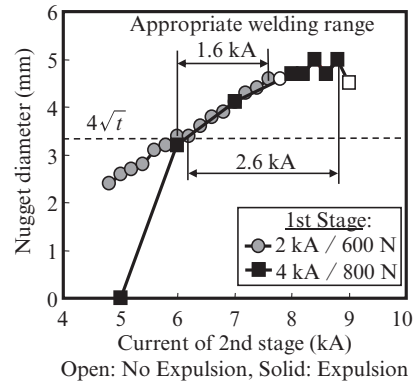


図8 電流・加圧力可変制御パターンでの溶接結果 (クランプあり)

Fig. 8 Welding results of variable current and force pattern (With clamping)

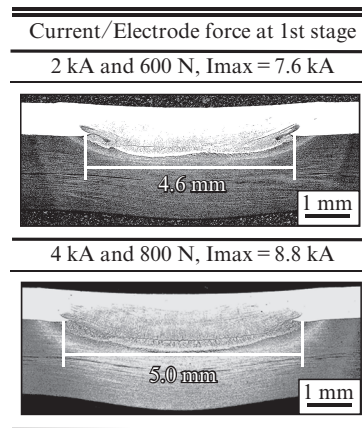


写真2 電流・加圧力可変制御パターンでの溶接部断面マクロ組織 (クランプあり, 第2段階電流Imax)

Photo 2 Cross-sectional macrostructures of the welds with variable current and force pattern (With clamping, Imax of current at second stage)

通電初期に電極-上板表面間で発生する過度な発熱を抑えることで上板表面からの散りを抑えられたものと考えられる。

写真2は、電流・加圧力可変制御パターンにおいて第2段階の電流値が散り発生限界 (図中Imaxと記載) のときの断面マクロ組織を示す。第1段階の電流2 kA, 加圧力600 Nの場合にはナゲット径4.6 mmであるのに対し、電流4 kA, 加圧力800 Nでは5.0 mmとなり、散り発生限界の電流値が向上することでより大きなナゲット径が得られることが示された。

適正条件範囲は、加圧力電流一定パターンのクランプありの条件においては、図7(a)に示すとおり1 kA程度であったのに対し、加圧力電流可変制御パターンにおいては、電流2 kA, 加圧力600 Nの場合が1.6 kA, さらに電流4 kA, 加圧力800 Nの場合では2.6 kAとなり、大きく向上することが確認された。

以上より、数値シミュレーションで予測されたとおり、加圧力・電流可変制御パターンにより上板表面からの散り発生を抑制しつつ上板-下板間に効果的にナゲットを形成することができ、適正電流範囲の拡大が可能であることが示された。

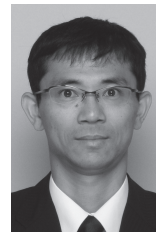
4. 結論

- (1) 数値シミュレーションを用いた発熱・溶融挙動の解析により、電流・加圧力可変制御パターンによる散り抑制効果、ナゲット形成促進効果が予測された。
- (2) 溶接実験から、片側スポット溶接では分流状態によりナゲット形成が顕著に変化し、従来溶接方法である電流・加圧力一定の場合では分流が大きい場合では満足なナゲット径が得られかつ散り発生しない適正溶接条件範囲が顕著に狭くなることが確認された。
- (3) 溶接実験より、散り抑制効果、ナゲット形成促進効果が確認され、分流が大きい条件において、電流・加圧力可変制御パターンにより、電流・加圧力一定パターンと比較して適正電流範囲を顕著に拡大可能であることが示された。

参考文献

- 1) 野間一浩, 加藤慎也. 溶接技術. 2004-01, p. 10-16.
- 2) 平井更之右, 竹内英世, 中垣内達也, 池田倫正. 溶接学会全国大会講演概要. 2006, no. 79, p. 432.
- 3) 池田倫正, 中垣内達也, 平井更之右, 竹内英世. 溶接学会全国大会講演概要. 2006, no. 79, p. 433.

- 4) 二塚貴之, 池田倫正, 平井更之右, 計見竜雄, 竹内英世. 溶接学会全国大会講演概要. 2007, no. 80, p. 316.
- 5) 伊達亮介, 平井更之右, 松下宗生, 池田倫正, 仮屋房亮. 溶接学会全国大会講演概要. 2009, no. 85, p. 118.
- 6) Cho, Y.-J.; Chang, I.; Lee, H. Weld. J. 2006-08, vol. 85, p. 26-29.
- 7) 長谷川芳春, 藤田浩史, 近藤岳晴, 藤本雅昭, 田辺順也, 古田正樹. Honda R&D Technical Review. 2008-10, vol. 20, no. 2, p. 106-113.
- 8) 古川一敏. 溶接技. 2008-03, p. 10-16.
- 9) Nishibata, H.; Fukumoto, M.; Uchihara, M. Welding in the World. 2009, vol. 53, no. 5/6, p. 15-22.
- 10) 西畑ひとみ, 菊池庄太, 福本学, 内原正人. 溶接学会全国大会講演概要. 2009, no. 85, p. 117.
- 11) 菊池庄太, 西畑ひとみ, 福本学, 内原正人. 溶接学会全国大会講演概要. 2010, no. 87, p. 142.
- 12) 松下宗生, 池田倫正, 遠藤茂. 溶接学会全国大会講演概要. 2011, no. 88, p. 324.
- 13) 松下宗生, 池田倫正, 遠藤茂. 溶接学会全国大会講演概要. 2012, no. 90, p. 420.
- 14) 松下宗生, 池田倫正, 大井健次. 溶接学会全国大会講演概要. 2013, no. 92, p. 223.
- 15) 松山欽一. 溶接技術. 2002-03, p. 93-97.



松下 宗生



池田 倫正



大井 健次