

論文・解説

21

多段加圧スポット溶接によるエネルギー削減 Energy Reduction by Multi-Step Force Spot Welding

上川路 太雅^{*1} 森田 直輝^{*2} 水篠 友哉^{*3}
Taiga Kamikawaji Naoki Morita Tomoya Mizushino

要約

カーボンニュートラルの実現に向け、車体組立領域において消費エネルギーの占める割合が大きいスポット溶接のエネルギー削減を進めている。しかし高強度材料の適用拡大等を背景に、溶接品質の安定確保のためスポット溶接のエネルギーは増加傾向にある。そこで品質安定確保と消費エネルギー削減を両立させるため溶融プロセスを必要エネルギーの観点で見直し、加圧力をナゲット形成過程に合わせて変えることが有効であることを明らかにし、多段加圧スポット溶接システムを開発した。このシステムは既存設備を活用し低コストで展開が可能なシステムとして開発し、量産導入した。本稿では溶融プロセス最適化の内容と、これを実現するための設備の開発について紹介する。

Abstract

To achieve carbon neutrality, I am working on reduction of energy consumption of the bodywork process, because the ratio that the energy of the spot welding accounts for is substantial in the process. However, with increasing application of high strength materials as background, the energy of spot welding is increasing to keep welding quality stable. Therefore, I paid attention to why energy was needed from a melt process point of view to balance secure welding quality and reduction of energy consumption then clarified that it was effective to change the pressurization power according to the nugget formation process. This is called Multi-step force spot welding. In addition, it is developed to utilize existing facilities and introduced a mass production with less investment. In this report, I introduce the optimization of the melt process and the development of facilities to achieve the innovation.

Key words : Spot welding, Body production development, Energy reduction

1. はじめに

世界的な平均気温上昇を抑えるため、世界共通の目標として温室効果ガスの排出量と吸収量の均衡を掲げ、日本としても2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。マツダはこれに対し2035年までの自社工場でのカーボンニュートラルを掲げており、車体組立領域としても消費エネルギーの削減を進めている⁽¹⁾。車体組立領域の消費エネルギーの内訳のうち約25%を溶接が占め、その大半がスポット溶接であることから、スポット溶接の消費エネルギー削減が必須である。しかしボディーの軽量化に向け、材料の更なる高強度化を進めていることで、後に説明するように、スポット溶接の消費エネルギーは増加傾向にある。これまで溶接打点ごとの溶接条件改善により消費エネルギーの削減を図ってい

るが、現状の溶接システムで制御可能な溶接条件だけでは限界がある。目標達成に向けては、抜本的な工法の進化が必要である。スポット溶接については、高張力鋼板に適した通電パターンを実現する技術⁽²⁾や、加圧力を溶接中に変化させる技術⁽³⁾等、多くの研究開発が報告されている。しかしあらゆる板組全般に消費エネルギーを低減させる技術で、かつ低コストに量産導入を実現させたシステムとしての報告は少ない。この技術開発では、量産におけるあらゆる板組の溶接条件、実態をベースに、CAEを用いて溶融メカニズムを詳細に分析したことで確立できた。またシステム開発としては、溶接タイマーメーカー、ロボットメーカーと三社で開発することで実現できた。本報告では溶融プロセスに着目し確立したスポット溶接技術と、量産で安定的にこれを実現するシステムの開発について報告する。

*1,2 車体技術部
Body Production Engineering Dept.

*3 車体製造部
Body Production Dept.

2. スポット溶接とは

スポット溶接は被溶接材料を水冷銅電極で挟んで加圧し、ここに大電流を流し、溶接部に生成するジュール発熱を熱源とする溶融接合方法である⁽⁴⁾。溶接中の通電面積が時間的に増大しながら溶接が進行する。この溶融凝固部の径をナゲット径とする (Fig. 1)。このとき生成する熱量 Q [J] は、ジュールの法則に従い、抵抗値 R [Ω]、電流値 I [A]、時間 t [s] によって式(1)で示すことができる。更にこの抵抗値 R は材料固有抵抗値 ρ [$\Omega \cdot m$]、通電長さ L [m]、通電面積 S [m^2] によって式(2)に置き換えることができる。

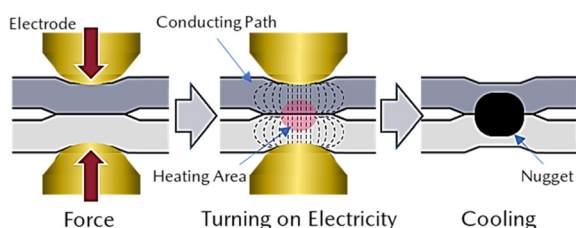


Fig. 1 Schematic of Spot Welding Process

$$Q = \int RI^2 dt \tag{1}$$

$$= \int \rho \frac{L}{S} I^2 dt \tag{2}$$

通電面積は材料の降伏強度と、加圧力、及び電極先端形状によって変化するため、電流値、通電時間、加圧力、電極先端形状はスポット溶接の4大制御因子である。

スポット溶接継手品質は、多くの場合ナゲット径を基準に議論され、スポット溶接性については、基準となるナゲット径を取得できる電流値から、入熱過多により散り(溶融金属が飛散すること)が発生する直前の電流値までの範囲(適正電流範囲と呼ぶ)の広さで評価している。

スポット溶接は他の接手法と比較して初期投資、ランニングコストの両面で安価で、溶接対象に対する表裏両面からの加圧により安定して品質を得られるため広く使われている⁽⁵⁾。

3. 消費エネルギーを増加させる要因

消費エネルギーが増加傾向にある主な原因として、①材料の高強度化に伴う高加圧力化と、②材料強度差の大きい板組における高電流長時間化、の2点がある。この2点について説明する。

3.1 高加圧力化に伴う増加

高強度な材料では板間隙等のノイズを抑え、必要なナゲット径を得られる通電面積を得るための必要加圧力は材料の降伏強度の増加に伴い大きくなる。Fig. 2に2枚組におけるノイズを加味した適正電流範囲を示す。

440MPaの鋼板2枚組と1310MPaの鋼板2枚組を比較する。縦軸に示す力は加圧力である。通電時間は300ms、ノイズとしてFig. 3のように評価した。

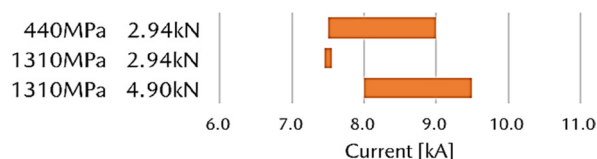


Fig. 2 Weldability Differences between Steel Grades

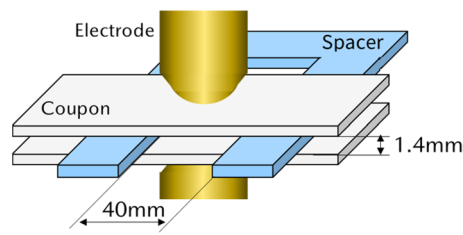


Fig. 3 Schematic of Noise Test

1310MPaの鋼板で440MPaの鋼板と同等の溶接性を確保するためには、加圧力を約2kN上げる必要がある。

加圧力の増加により通電面積が大きくなると式(2)より発熱量 Q が小さくなるため、それを補うために大きな消費エネルギーが必要となる。

3.2 材料強度差の大きい板組適用に伴う増加

例えばAピラーのような外板とつながる部分では、外板は薄肉軟鋼板に対し、中の補強材及び内板は厚肉高張力鋼板となり、板厚比・強度比の大きな3枚重ね板組となる (Fig. 4)。高張力鋼板は一般的に高強度になるにつれ炭素含有量等が増えることにより、固有抵抗値が高くなる傾向にある。固有抵抗値の異なる材料の組合せにおいては、固有抵抗値の高い材料から発熱溶融する。従ってTable 1のような板組においては高張力鋼板の板間から発熱溶融し、拡大し軟鋼板に到達するというような溶融プロセスとなる (Fig. 5)。

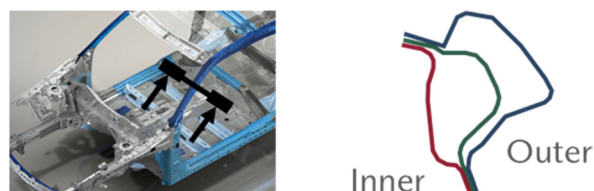


Fig. 4 Example of Sheet Combination

Table 1 Sheet Combination

Sheet1	Thin mild Steel
Sheet2	Thick high tensile steel
Sheet3	Thick high tensile steel

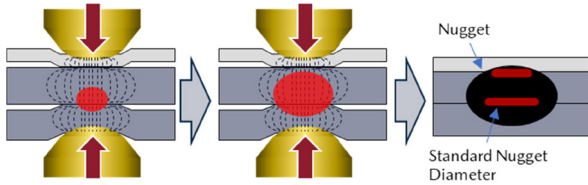


Fig. 5 Schematic of Spot Welding Process

本来、薄肉-厚肉のナゲットを形成するためには電極近傍の通電面積を狭くすることが有効である。一方で厚肉-厚肉間は基準ナゲット径まで拡大させるため通電面積を広くする必要がある。そのため現状、溶接品質を担保するため、高加圧力を設定し、広い通電面積を確保している。

Fig. 6 に薄肉-厚肉間のナゲット径 (Diameter between 1 & 2) と厚肉-厚肉間のナゲット径 (Diameter between 2 & 3) の電流値との関係を示す。この結果は板間隙 1.4mm を付けた 1 回の通電 (5.39kN, 500ms) での結果である。Fig. 5 のような溶融プロセスとなるために薄肉-厚肉間のナゲットを作るために、厚肉-厚肉間のナゲットが過大に形成されていることが分かる。そのため、厚肉-厚肉間の散りを抑えるために更に高加圧が必要となり、薄肉-厚肉間のナゲットを形成するために、長時間高電流が必要となっている。

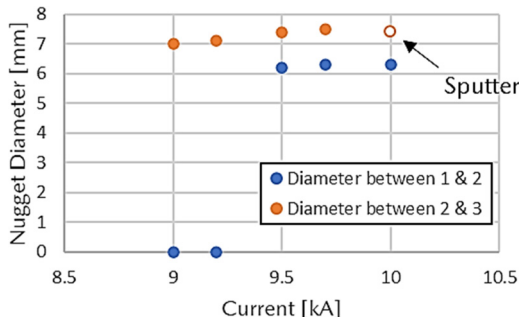


Fig. 6 Relationship between Nugget Diameter and Current

結果として上記のような非効率な溶融プロセスとなり、不必要なエネルギー消費を招いている。

4. 目指す溶融プロセス

上記より溶接品質の安定確保と消費エネルギー削減を両立させるためのキーとして、発熱量を決める要素の一つである通電面積に注目した。従来は必要なナゲット径やノイズ等から決めた加圧力で通電面積が決まっているが、ナゲットの形成過程に合わせて通電面積を適切にコントロールすることで効率的なナゲット形成につながると考えた。そしてこの通電面積のコントロールを加圧力によって行うことを考えた。

2つの板組を事例にしてねらいのプロセスを説明する。1つ目として厚肉高張力鋼板の2枚重ねについて説明

する。溶接の序盤では低い加圧力で通電面積を狭くし通電密度を高めることにより、電流値を下げる。後半は基準ナゲット径まで拡大させるために高い加圧力で広い通電面積とする (Fig. 7)。

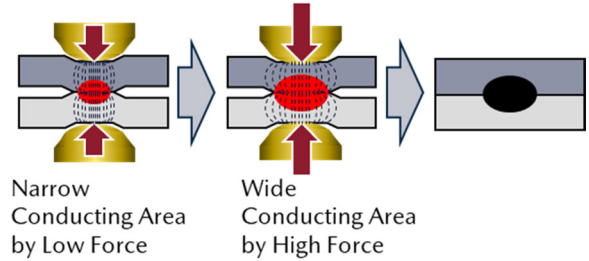


Fig. 7 Schematic of Conducting Area Control

2つ目として Table 1 に示すような3枚組について説明する。ねらいとする溶融プロセスは、薄肉-厚肉間のナゲットを形成した上で、厚肉-厚肉間のナゲットを基準ナゲット径まで拡大することである。薄肉-厚肉間のナゲットを形成するために、電極近傍の発熱を促すべく、低い加圧力で通電面積を狭くする。そして厚肉-厚肉間のナゲットを基準ナゲット径まで拡大させるために高い加圧力で広い通電面積とする (Fig. 8)。

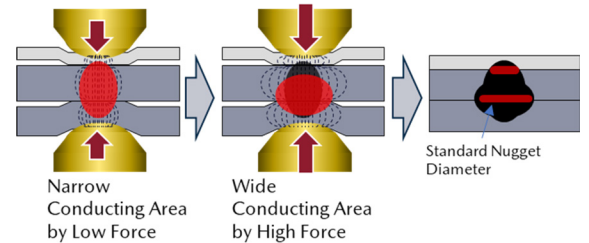


Fig. 8 Schematic of Conducting Area Control

上記のように加圧力を変化させることで通電面積をコントロールし溶融プロセスを最適化させることを考えた。

5. 多段加圧スポット溶接による理想プロセス実現

まず加圧力を変化させることで通電面積のコントロールが可能かどうかについて、CAEにより机上評価を行った。サンプルは、板厚 2.0mm、材質 1180MPa 非メッキの2枚組を使用し、加圧力一定の溶接 (Normal Force) と多段加圧スポット溶接 (Multi-step Force) で、通電面積の変化を比較した。溶接条件を以下に示す (Fig. 9, 10)。

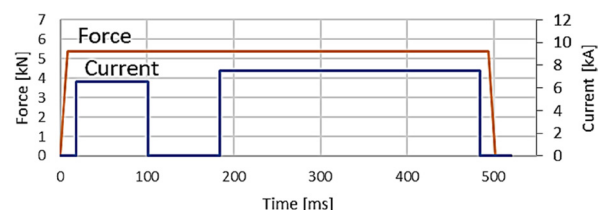


Fig. 9 Welding Condition of Normal Force

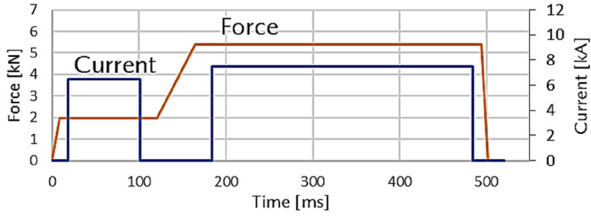


Fig. 10 Welding Condition of Multi-Step Force

Fig. 11 に示すように加圧力一定の溶接では通電面積は通電初期からなだらかに拡大しているのに対し、多段加圧スポット溶接では低加圧力時に、通電面積を小さく抑えることができていることが分かる。

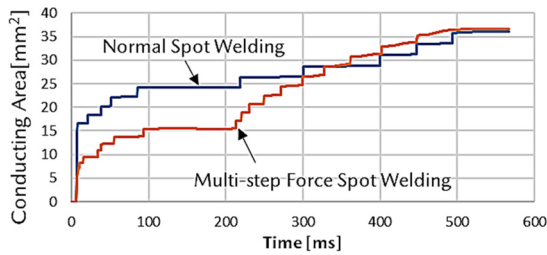


Fig. 11 Change of Conducting Area

また同電流値 (6.5kA) において加圧力一定 (5.39kN) の溶接での通電では 115ms 時点では溶融部は微小であるのに対し、多段加圧 (初期 1.96kN) での通電では 4mm までナゲット径が確保できる (Fig. 12)。

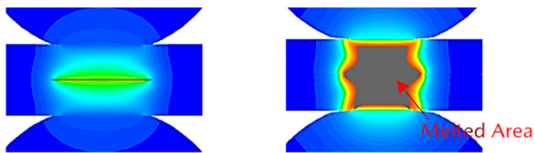


Fig. 12 Nugget after Initial Current Carrying

その後 500ms 時点では多段加圧スポット溶接の方が大きなナゲットを確保することができた (Fig. 13)。

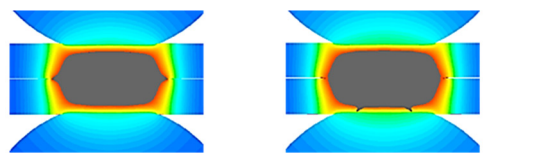


Fig. 13 Nugget of the End

これらより多段加圧により通電面積をコントロールすることができ、それにより溶融プロセスを変化させ、ナゲット径を拡大できることが分かった。

そこで実際にテストピースを用いて、多段加圧スポット溶接により消費エネルギーの削減が可能か実験にて確

認した。Fig. 14 に消費エネルギーとナゲット径の関係を示す。この結果より、同じナゲット径を確保するための消費エネルギーは多段加圧スポット溶接の方が 13%以上低く、厚肉 2 枚組において多段加圧スポット溶接により消費エネルギーを削減できることが分かった。

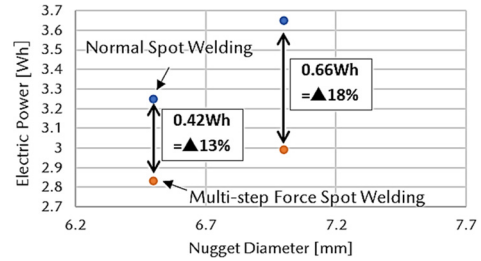


Fig. 14 Relationship between Electric Powers and Nugget Diameter

次に上記を薄肉軟鋼板と厚肉高張力鋼板 2 枚の 3 枚重ねに応用した。3 枚重ねの板組を Table 2 に、溶接条件を (Fig. 15, 16) に示す。

Table 2 Sheet Combination

Sheet1	270MPa Thickness: 0.65mm
Sheet2	1180MPa Thickness: 2.0mm
Sheet3	1180MPa Thickness: 2.0mm

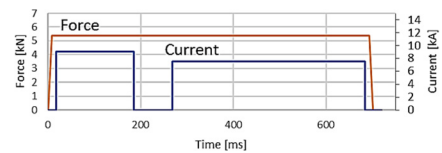


Fig. 15 Welding Condition of Normal Force

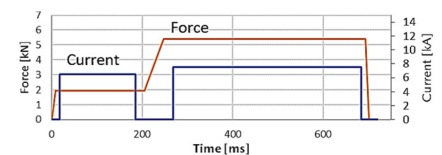


Fig. 16 Welding Condition of Multi-Step Force

2 枚組と同様に加圧力によって薄肉-厚肉間、厚肉-厚肉間ともに通電面積が変化することが CAE の結果から分かる (Fig. 17, 18)。

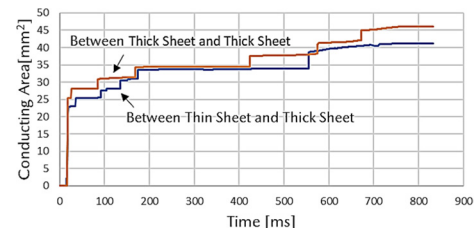


Fig. 17 Conducting Area of Normal Spot Welding

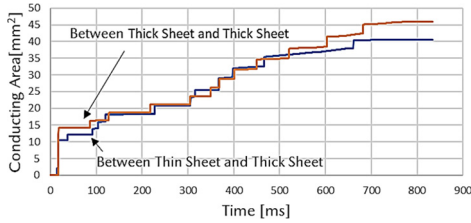


Fig. 18 Conducting Area of Multi-Step Force Spot Welding

これによって多段加圧では、通電初期で薄肉-厚肉間の発熱を促すことができ、溶融部を電極近傍まで形成でき、その後高加圧力時で厚肉-厚肉間のナゲットを拡大できた (Fig. 19, 20)。

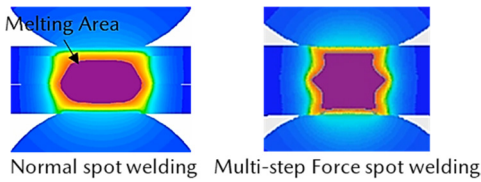


Fig. 19 Nugget after Initial Current Carrying

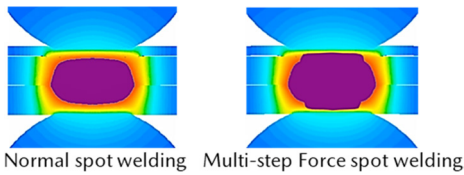


Fig. 20 Nugget of the End

これを実際のテストピースを用いて実験を行った結果、CAE で確認したようにナゲットの形成過程が加圧力一定の溶接と多段加圧で異なり、多段加圧によりねらいとする溶融プロセスが実現できることを確認できた (Fig. 21, 22)。

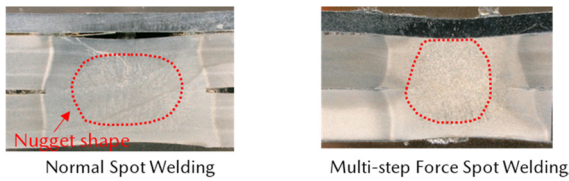


Fig. 21 Nugget after Initial Current Carrying

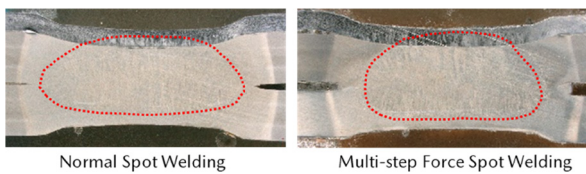


Fig. 22 Nugget of the End

上記のように多段加圧により厚肉-厚肉間のナゲットを過大にすることなく、薄肉-厚肉間のナゲットを形成できるようになった。その結果、Fig. 23 に示すように適正電流

範囲が拡大し、Fig. 24 に示すように消費エネルギーを30%以上削減することができた。

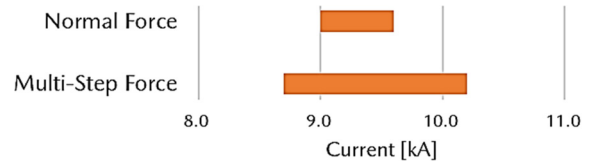


Fig. 23 Weldability of 3 Sheets Welding

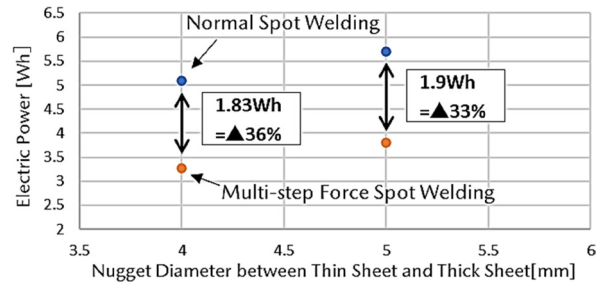


Fig. 24 Relationship between Electric Powers and Nugget Diameter

6. 多段加圧スポット溶接システムの開発

ねらいの溶融プロセスを工場量産の中で安定的に実現するためには、加圧力と通電の同期制御を行うことが重要となる。前述の評価ではマツダの量産では使用されていない特殊な設備を使っており、コストの高さや、溶接のさまざまな姿勢への対応等の難しさがあった。一方で従来の量産の制御では、加圧力と通電は、制御する設備が異なることから緻密に同期制御を図ることができなかった。そこで上記を解決するシステムの開発を行った。カーボンニュートラルのためには多段加圧スポット溶接を広く使っていくことが必要であるため、低コスト、低工数での量産導入実現を目指し、既存設備の活用を前提とした。

6.1 現行設備構成と同期性の課題

一般的なスポット溶接の設備ではロボットにより加圧力、溶接タイマーにより電流値、通電時間を制御している。加圧力と通電を同期させることが難しい原因はこの役割分担にある。Fig. 25 に示すようにロボットと溶接タイマーで、通電開始と終了のみ信号をやり取りし、通電途中は互いの動作を切り離している。

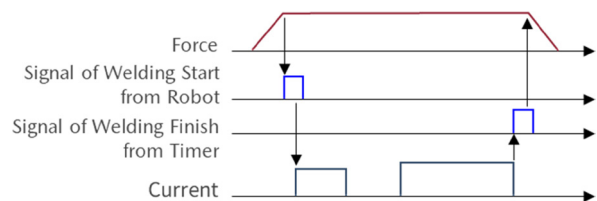


Fig. 25 Current Welding Sequence

通電途中に同期を図る場合、どちらか片方で両者を制御すればよいが、それでは設備自体を交換する必要があり、また工場全体の制御システムの改造も必要となるため、コスト、工数ともに大きくなってしまふ。そこでこの役割を変えずに同期制御を実現するシステムの開発をすることとした。

6.2 高速通信による同期制御システムの実現

加圧力と通電を同期させるため、通電途中においても、加圧力変更時にロボットと溶接タイマーで信号をやり取りさせることで同期を担保するようにした。まず品質の安定のため加圧力の切り替えは通電間の時間（クールタイム）内のみ実施することを前提とした。加圧力を変更するとき、溶接タイマーからロボットへ信号“Force Switching”を送る。この信号をトリガーとしてロボットは加圧力を切り替え始める。そして切り替え完了した後ロボットから溶接タイマーへ信号“Force complete”を送る。溶接タイマーは設定されたクールタイム経過時に、この信号がONしていることを確認して次の通電を実行するようにした（Fig. 26）。

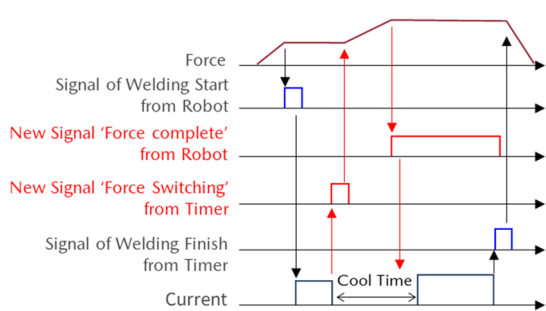


Fig. 26 New Welding Sequence

この信号のやり取りはクールタイムの間で行うため、通信時間が長期化することはクールタイムを延ばすことにつながる。それは加工時間の長時間化、エネルギーのロスにつながるため、高速かつ安定した信号品質が必要である。そこで通電間に使う通信として、デジタル入出力（DIO）通信を採用した。DIO通信は汎用的に使われている通信の一つであり、1つの線に1つの信号を割り当て、電圧によってON/OFFを検出する通信である。そのためDIO通信により高速かつ安定した通信を実現できる上、既存のロボット、溶接タイマーに実装することが容易であることから、コストを抑えることもできる。

これらにより多段加圧スポット溶接システムを、既存ロボット、溶接タイマーを現地改造することで実装できるシステムとした。

7. 量産工程への適用

今回開発した多段加圧スポット溶接システムを、MX-30のアンダーボディー領域に適用した。アンダーボ

ディーから適用した理由は、厚肉、高張力鋼板を含む板組が多くあり、消費エネルギーが高いためである。この領域で、従来相当のナゲット径を確保しながら消費エネルギーの低減を実現した。

7.1 工場量産における効果

導入効果の事例として2板組の効果を紹介する。

(1) 高張力鋼板の2枚重ねの例

Table 3に示す板組において、Fig. 27に示すような溶接条件を適用した。通電初期を低加圧力とすることで通電初期の電流値を落としても現行同等のナゲット径が確保できた。これにより従来の溶接条件から25%の消費エネルギーの低減を実現した。

Table 3 Sheet Combination

	Strength	Coated/Uncoated	Thickness
Material 1	590MPa	Uncoated	0.9mm
Material 2	590MPa	Coated	0.9mm

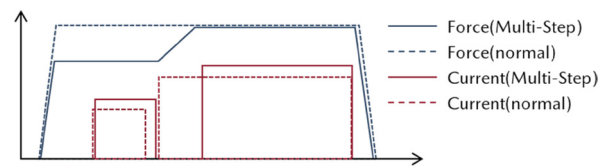


Fig. 27 Welding Condition

(2) 材料強度比板厚比の大きい3枚重ねの例

Table 4に示す板組において、Fig. 28に示すような溶接条件を適用した。現行の溶接条件と比較して通電初期を低加圧力とすることで低電流化することができ、より薄肉の発熱を促すことができたことで、2段目の電流値を下げる事ができ、従来の溶接条件から30%の消費エネルギーの低減を実現した。

Table 4 Sheet Combination

	Strength	Coated/Uncoated	Thickness
Material 1	590MPa	Coated	0.65mm
Material 2	980MPa	Coated	1.0mm
Material 3	980MPa	Coated	1.8mm

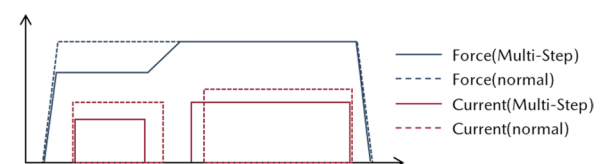


Fig. 28 Welding Condition

7.2 今後に向けた取り組み

今後は板組、打点状況等から多段加圧スポット溶接の最適条件を導出するための標準を確立し、円滑に多段加圧スポット溶接を量産適用できるようにする。更に溶融プロセスに着目した今回の取り組みの知見を活かし、従来の加圧力一定の溶接における消費エネルギー削減も進めていく。多段加圧スポット溶接を広く活用していきながら、この多段加圧スポット溶接をひとつの新たな手段として、溶接条件の最適化を図ることで車体組立領域の消費エネルギーを削減し、カーボンニュートラルに貢献していく。また、この多段加圧スポット溶接によってこれまで以上の板厚比、高強度材料、板組枚数の適用を可能とする知見が得られた。これにより構造の点での軽量化が見込める。設計とともにさらなるボディーの軽量化を実現し、クルマの製造、使用を含めた全体のカーボンニュートラルに貢献する。

8. おわりに

スポット溶接の溶融プロセスに着目し、加圧力により通電面積をコントロールする多段加圧スポット溶接を開発する中で以下の成果を得た。

(1) 加圧力を変化させることで通電面積が変化し得ることが分かった。溶融プロセスの中でこのコントロールを適切に行うことで溶融プロセスの最適化が図れた。

(2) 板組によって効果の差はあるが、多段加圧スポット溶接によって溶接品質ロバスト性の向上と消費エネルギーの低減を両立することができた。

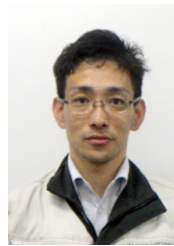
(3) DIO 通信を使うことで高速かつ安定した通信を実現でき、加圧力と通電の同期を図りながら最小限のクールタイムとしたことでロバストな溶接品質につなげられた。

最後に本開発は川崎重工(株)、(株)ナ・デックスとマツダの3社での共同開発である。川崎重工(株)、(株)ナ・デックスの皆様には深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) MAZDA INTEGRATED REPORT 2022, P28
- (2) 安江ほか：高張力鋼板の最新スポット溶接技術，溶接学会誌，第84巻，第6号（2015）
- (3) 池田ほか：通電中の加圧力および溶接電流制御を活用した抵抗スポット溶接技術の開発，溶接学会論文集，第28巻，第1号（2010）
- (4) 松山ほか：薄鋼板及びアルミニウム合金の抵抗スポット溶接，p.7（2008）
- (5) 近藤：溶接・接合技術の適用，溶接学会誌，第79巻，第8号（2010）

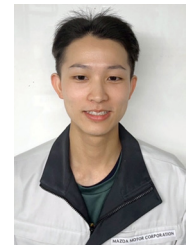
■著者■



上川路 太雅



森田 直輝



水篠 友哉