

短ピッチスポット溶接技術の開発

Development of Short Pitch Resistance Spot Welding Technology

大岡 久康*
Hisayasu OOKA
大塚 啓太*
Keita OTSUKA

鈴木 敦*
Atsushi SUZUKI
岡田 安正*
Yasumasa OKADA

後東 光繁*
Mitsushige GOTO

要 旨

抵抗スポット溶接を短い間隔でおこなうには、電流が短絡する現象を定量化する必要がある。そこで3次元スポット溶接シミュレーションを用いて、電流の状態を予測する技術を構築した。実験の結果、電流が短絡する現象が発生したときの溶融部径は、予測値と精度良く一致していることを確認した。短い間隔で抵抗スポット溶接をおこなうには、短絡電流による発熱ロスに対して投入エネルギーを増加させることにより、溶融部径が確保できることをこの手法を用いることで検証した。さらに、実車に適用する上で効果的な部位の検証をおこない、応力が集中する車体部位に15 mmの短い間隔で抵抗スポット溶接を配置することにより、溶接点に掛かる最大応力を低減させ、鋼板板厚を下げる事が可能であることを証明した。

ABSTRACT

In order to reduce the pitch used in resistance spot welding, it is necessary to quantify the phenomenon of shunting, or short-circuiting of current flow. A technology for predicting the state of current flow using a three-dimensional spot welding simulation was therefore developed. Test results showed that predicted spot weld diameter values when current shunting occurred, corresponded well with measured values. Using this method, it was shown that it was possible to realize sufficiently sized spot welds in short-pitch resistance spot welding by increasing input energy to compensate for heat loss caused by the short-circuiting of the welding current. In addition, an application study of short pitch spot welding showed that a reduced weld pitch of 15 mm in high stress regions reduced peak stress in the weld, making the use of thinner steel sheets possible.

1. まえがき

近年、地球環境問題に対応するために自動車メーカ各社では、CO₂排出削減につながる燃費向上に関する技術開発が進められている。車体としてはレーザー溶接や接着剤を用いた連続的な接合により、接合強度を確保して板厚を下げる軽量化がおこなわれている。しかし、断続的な接合方法である抵抗スポット溶接（以下スポット溶接）に比べ接合工程におけるコストや行程時間の増加が課題となっている。

スポット溶接は、任意の加圧力下にて金属の接触箇所にて電流を流し、界面での接触抵抗と金属材料の固有抵抗から生じるジュール熱（抵抗熱）により接触部を発熱、溶融させ接合する方法である。このスポット溶接点の間隔を短くすることができれば、接合面積の増加に比例して接合強度を増加させることができる。しかし、溶接間隔を短くすると、隣接する溶接点を經由して電流が短絡する分流と呼ばれる現象（Fig. 1）が発生し、溶接部分の発熱が不十分になるた

め、強度基準を満足するために必要なサイズの溶融部（以下ナゲット径）ができにくくなる。そのため、スポット溶接においては30 mm程度の溶接間隔を確保することが一般的である。

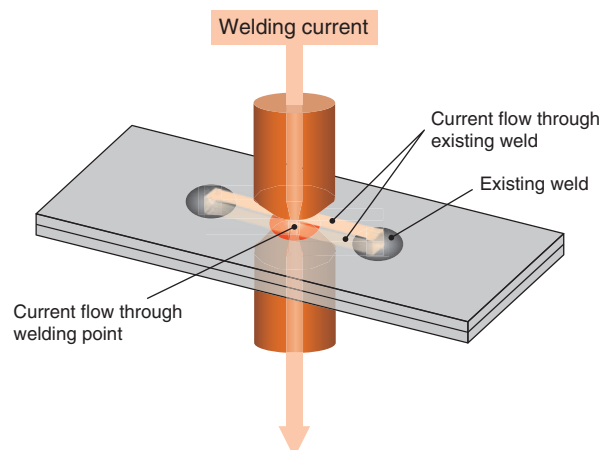


Fig. 1 Phenomenon of current shunt

*四輪 R&D センター

15 mm 程度の間隔でのスポット溶接 (短ピッチスポット溶接) を実現するためには、この分流という現象を解明する必要がある。そこで、3次元スポット溶接シミュレーションを用いて分流を予測する手法を構築した。この手法を用いることにより、分流現象による発熱ロスを投入エネルギー増加によって補えばよいことを明らかにした。さらに、板厚、板組、材質などの条件が異なる場合においても、ナゲット径基準を満足する溶接条件を設定することが可能であることを検証した。その結果について報告する。

2. スポット溶接シミュレーション

2.1. スポット溶接シミュレーションによる検証条件

短ピッチスポット溶接の分流現象は、微小範囲における現象のため、実験による測定が困難である。そこでシミュレーションによる電流経路解析を実施した。一般に市販されているスポット溶接のシミュレーションソフトは、ナゲット生成のシミュレーションをおこなうものであるため対象は2次元軸対称モデル解析であり、今回のような分流現象を計算することは不可能である。そこで、新日鐵住金株式会社にて開発された3次元解析が可能なスポット溶接シミュレーションソフトを活用し、Fig. 2に示す3次元モデルを作成し解析を実施した。モデルは対称性と計算速度を考慮し1/4モデルを使用した。スポット溶接で重要となる鋼板界面の接触抵抗には、接触圧力や鋼板の材料特性 (降伏応力、比抵抗、およびこれらの温度依存性) の影響が考慮されている⁽¹⁾。解析板組は分流への影響が大きいと推測される固有抵抗値の低い軟鋼板 (板組 A) と、逆に固有抵抗値の高い 590 MPa 級高張力鋼板 (板組 B) で比較をおこなった。材質および溶接条件は Table 1 に示す。

2.2. スポット溶接シミュレーションによる解析精度検証

まず本シミュレーションの解析精度検証をおこなった。シミュレーションと実験によるナゲットの形状を Fig. 3 に示す。上段はシミュレーション結果の画像であり、下段は実験結果の画像である。いずれの画像においても分流の発生しない単点から溶接間隔が 15 mm になることにより、分流の影響によりナゲット径が減少していることが確認できる。

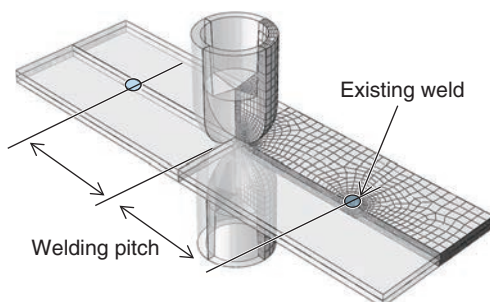


Fig. 2 Analysis model by CAE

Table 1 Spot welding conditions

Sheet combination	A	B
Material	JSC270D	JSC590R
Thickness	1.4 mm	1.0 mm
Electrode force	3.5 kN	3.5 kN
Welding current	7.8 kA	6.2 kA
Welding time	17 cycles	12 cycles
Existing weld diameter	5.2 mm	4.5 mm
Welding pitch	Single weld, 15 mm	

シミュレーションと実験によるナゲット径の結果を Fig. 4 に示す。いずれの板組においても、分流によるナゲット径の減少傾向が一致しており、本シミュレーションによる評価が妥当であるといえる。

2.3. スポット溶接シミュレーションによる分流検証結果

板組 A における溶接時の電流密度分布のシミュレーションの結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は分流が発生しない単点の溶接であり、Fig. 5(b) は溶接間隔が 15 mm の場合の結果である。Fig. 5(b) の条件ではナゲットを介して電流が流れるため、溶接点以外でも電流密度が高くなっており、分流が発生している様子が確認できる。Fig. 6 では板組 A における分流量のシミュレーション結果を示す。単点の場合では、電流は溶接点に 100% 流れるが [Fig. 6(a)], 溶接間隔が 15 mm の場合では、溶接点に流れる電流が平均約 67% になっており、約 33% が分流していることがわかった。

Fig. 7 に通电時間と溶接点に流れる電流量の関係を示す。通电初期から 3 cycle にかけて溶接点に流れる電流量が減少、つまり分流量が拡大しており、3 cycle 以降では逆に分流量が減少に転じている。この現象が発生する理由として、3 cycle までは溶接点の発熱により抵抗が高くなり、溶接点に電流が流れにくくなるためと考えられる。また 3 cycle 以降では、ナゲット径の拡大と共に通电する範囲が拡大し、溶接点の抵抗が低くなるため、溶接点に電流が流

Sheet combination	Method	Single weld	Welding pitch 15 mm
A	CAE		
	Test piece		
B	CAE		
	Test piece		

Fig. 3 Results by analysis and experiment of spot welding (cross-sectional images)

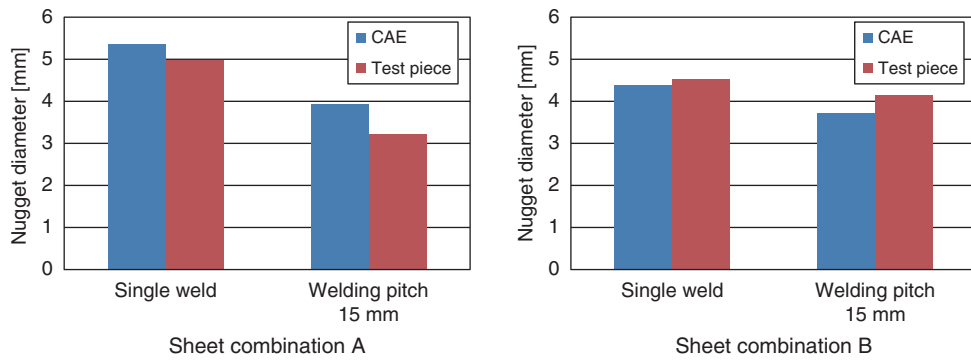


Fig. 4 Results by analysis and experiment of spot welding (nugget diameter)

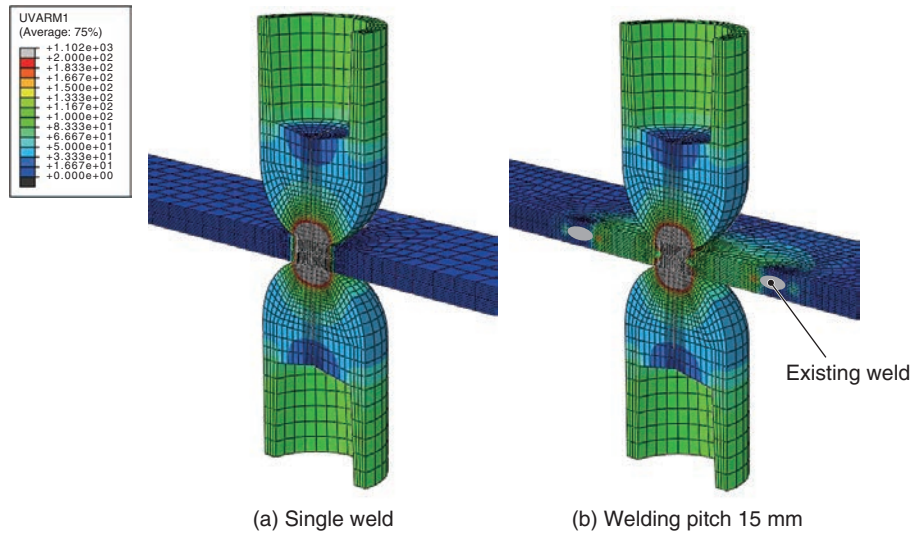


Fig. 5 Results of current density distribution by CAE

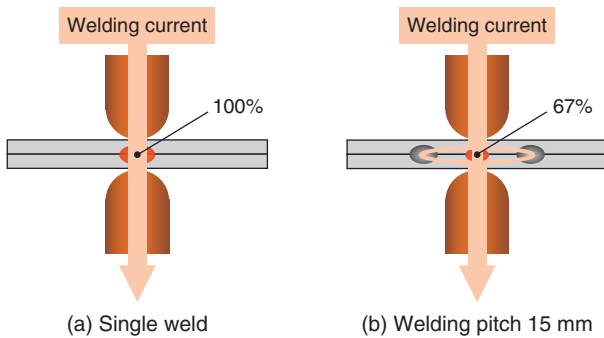


Fig. 6 Measurement of current shunt by CAE

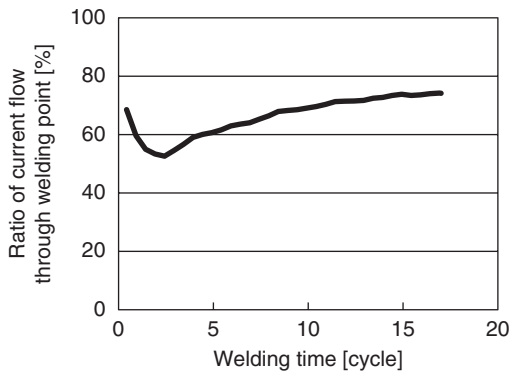


Fig. 7 Relationship between welding time and current shunt

れやすくなると考えられる。

このようにシミュレーションにより、実験では測定できなかった溶接中の分流現象を可視化して検証することが可能になった。また、材質や板厚、溶接条件の変化によって分流の変化量を検証することが可能になった。

3. 溶接条件設定手法

3.1. 投入エネルギー補正手法の検証

分流による発熱ロスに対し、投入するエネルギーを拡大することにより、例えば日本工業規格⁽²⁾に規定されるナゲット径基準を満足できる溶接がおこなえると考えた。Fig. 8(a)は直流電流での通電波形を表した模式図である。黄色の部分の面積は投入エネルギーを意味しており、入熱量拡大には投入する電流量を増やす高電流化 (Fig. 8(b))、もしくは投入する電流の通電時間を長くする長通電化 (Fig. 8(c))、そして高電流化と長通電化を組み合わせる手法が考えられる。今回は高電流化および長通電化についてシミュレーションと実験による検証をおこなった。

板組と基本溶接条件を Table 2 に示す。高電流化と長通電化の検証は、基本溶接条件下で電流および通電時間を変

化させておこなった (Fig. 9). 高電流化 [Fig. 9(a)] において黒色は単点を示し、灰色は溶接間隔 15 mm を示す。また、実線は CAE、丸のプロット点は実験の結果を示す。分流の影響により同じ電流条件ではナゲット径の減少が見られるが、高電流化することによりナゲット径が拡大し、単点と同じナゲット径を確保できることが確認できた。一方長通電化 [Fig. 9(b)] では 14 cycle 以上に飽和する現象が見られた。ジュールの法則式 (1) においても発熱量 Q を拡大するには電流 I の影響が大きく、その理論からも電流を増加させる方が効果的と考えられる。また実際の生産ラインでの長通電化は工程内における溶接可能な打点数への影響が考えられるため、高電流化で補正する方が効果的と考えられる。

$$Q = R \times I^2 \times t \quad (1)$$

Q : ジュール熱 [J]

R : 抵抗値 [Ω]

I : 電流 [A]

t : 時間 [s]

3.2. 実車板組における短ピッチスポット溶接条件の検証
一般的に車体に使用されている板組から代表的な 3 枚合わせの板組を使いシミュレーション解析を実施した。板

Table 2 Spot welding conditions

Sheet combination	JSC270D
Thickness	1.4 mm
Electrode force	3.5 kN
Welding current	7.6 kA
Welding time	14 cycles

Table 3 Spot welding conditions

Sheet combination	JSC270F	JSC590R	JSC590R
Thickness	0.7 mm	1.4 mm	1.4 mm
Sheet size	30 mm × 100 mm		
Electrode force	3.5 kN		
Welding time	18 cycles		
Welding pitch	Single weld, 15 mm		

組および溶接条件は Table 3 に、溶接結果を Fig. 10 に示す。ナゲット径の評価基準 4.5 mm 以上を満足する領域では、単点と 15 mm ピッチを比較すると約 2.0 kA 高電流化することにより、単点と同じナゲット径ができると予測された。

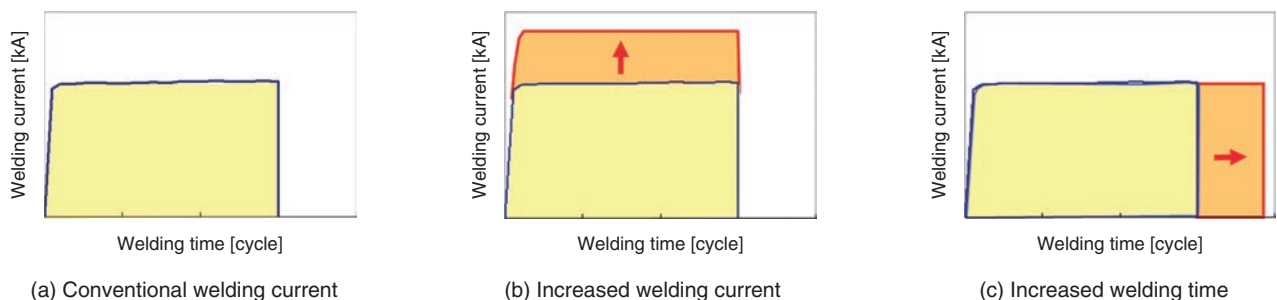


Fig. 8 Current waveform

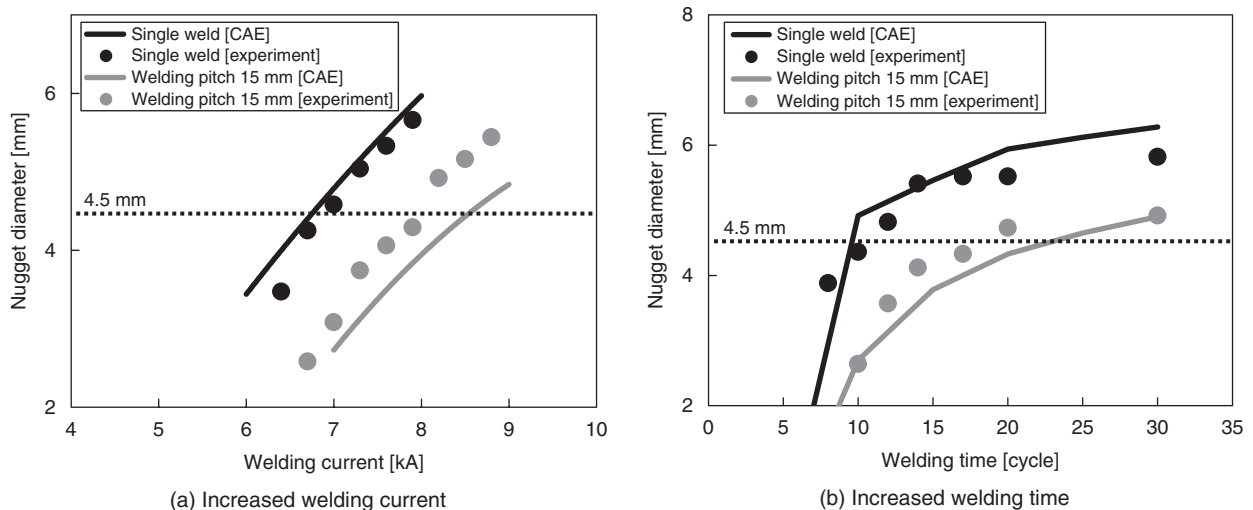


Fig. 9 Influence of welding current and welding time on nugget diameter

シミュレーションの予測結果を元に実験をおこなった。単点における溶接電流条件として、ナゲット径基準を満足する 6.5 kA に設定した。15 mm ピッチにおける溶接電流条件は 2.0 kA 高電流化させて 8.5 kA に設定して実験をおこなった。Fig. 11 に実験の結果を示す。単点におけるナゲット径に対し、15 mm ピッチのナゲット径がほぼ同等を確保できていることが確認された。

このように 3 枚合わせの板厚違い、材質違いを含む実車板組においてもシミュレーションによる予測が可能であることが確認できた。

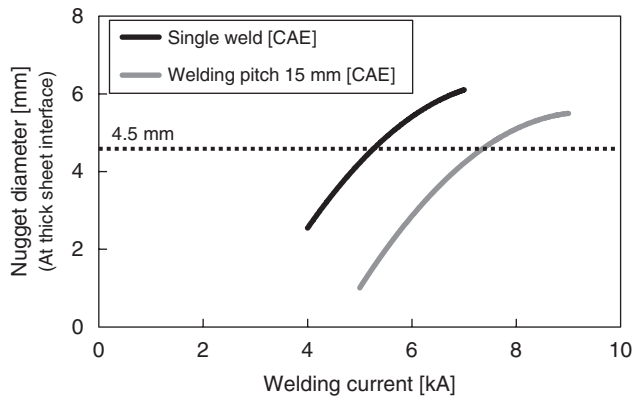


Fig. 10 Influence of short-circuit on nugget diameter by CAE

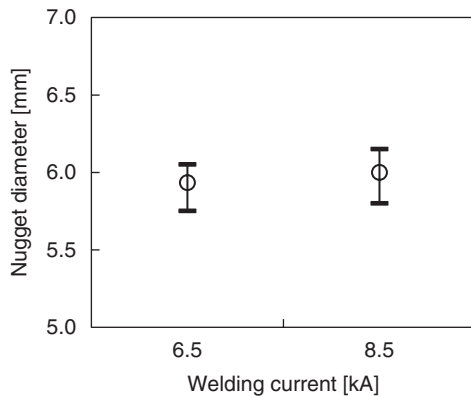


Fig. 11 Influence of short-circuit on nugget diameter by experiment

従来同じ板組は同じ溶接条件で加工をおこなっていたが、短ピッチスポット溶接の場合は、溶接間隔や板組、溶接条件下における分流の影響があるため、溶接条件を最適化させ、ナゲット径基準を満足させることが必要である。

4. 実車への適用構造

実車において短ピッチスポット溶接が有効である部位の検討をおこなった。強度耐久条件で応力集中によるスポット溶接の破壊が発生しやすい部位に注目し、CAE 解析を実施した。Fig. 12 はフロントダンパハウジングの構造を示す。ダンパからの入力により部品に発生する応力分布を Fig. 13(a) に示す。特に部品のコーナ部には大きい応力が発生する。従来のスポット溶接点配置では、最大約 332 MPa の応力が発生していた。このダンパハウジングのコーナ部に短ピッチスポット溶接を適用することにより、応力が分散しスポット打点の最大応力を 48% 減少させることができた (Fig. 13(b))。これにより、板厚を薄く (約 13% の軽量化) してもスポット打点の応力が目標値である 250 MPa を満足することがわかった。なお本検討は溶接位置の変更であり、溶接点数の変更はない。つまり溶接点数増加によりコストアップすることなく、板厚を下げることによる軽量化および素材費の低減が可能となった。

車体全体として、特にドア開口部やテールゲートといった車体の大開口部のコーナには応力が集中する。Fig. 14 はリヤの左側ダンパに入力を入れたねじり試験による応力解析の結果を示す。今後このような部位への短ピッチスポット溶接の適用を検討していく。

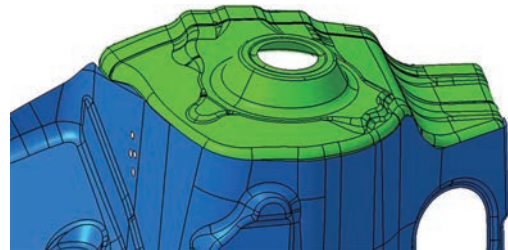


Fig. 12 Front damper housing structure

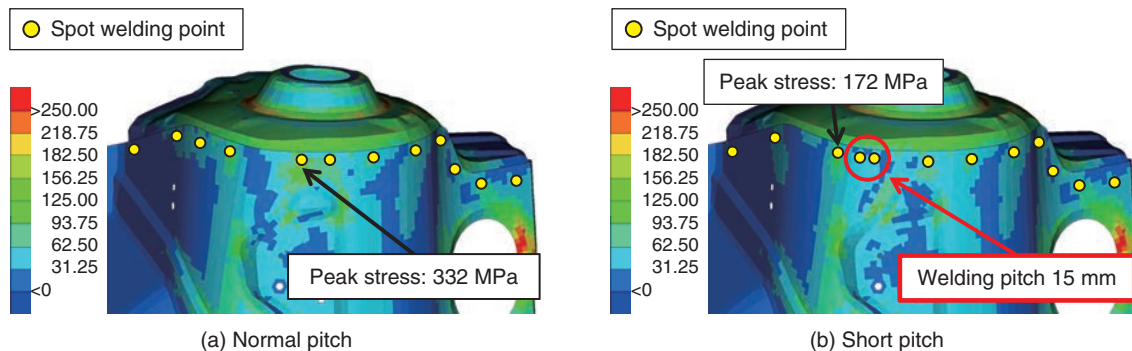


Fig. 13 Stress distribution



Fig. 14 Result of stress analysis by torsion test

5. まとめ

短ピッチスポット溶接技術の開発をおこない、以下を明らかにした。

- (1) 3次元スポット溶接シミュレーションを用いて、分流現象を明確にし、板厚、板組、材質、溶接条件などが違う状況でも、分流量の予測ができることを明らかにした。
- (2) 短ピッチスポット溶接において、分流による発熱ロスはエネルギーを適切に投入することで対応できることを明確にした。また、板厚、板組、材質などの条件が異なる場合においても、安定したナゲット径を確保する溶接条件が設定できることを検証した。
- (3) 車体への適用検討としては、強度耐久条件において応力が高くなる部位に短ピッチスポット溶接を配置することで、ピーク応力を緩和し当該部品の板厚を下げられることを検証した。

本技術は2014年モデルのフィットより適用を開始し、順次適用拡大により軽量化へ貢献できると考えている。

参考文献

- (1) 土井良一剛, 大岡久康, 梅野好和, 福本学, 岡村一男, 上田秀樹:SPOT 溶接シミュレーション技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.185-192
- (2) 日本工業規格 JIS Z3140:1989, スポット溶接部の検査方法

■ 著 者 ■



大岡 久康



鈴木 敦



後東 光繁



大塚 啓太



岡田 安正