片側スポット多点溶接におけるナゲット形成挙動への影響因子の検討*

西畑ひとみ**, 菊池 庄太**, 内原 正人**, 佐藤 裕***, 粉川 博之***

Influencing Factors on Nugget Formation during Multipoint Welding by Single Side Resistance Spot Welding*

by NISHIBATA Hitomi**, KIKUCHI Shota**, UCHIHARA Masato**, SATO Yutaka S*** and KOKAWA Hiroyuki***

Recently, weight reduction and improvement of crashworthiness of auto bodies have been important issues. At the same time, stiffness of auto bodies is also needed to ensure a smooth ride. Using hollow parts, such as bended pipes and hydroformed parts, is one of the solutions to the demand for both rigidity and light weight.

To weld hollow parts and sheet panels together, welding methods which allow us to access from one side are required. Single side resistance spot welding (single side RSW) process is one of those, and has recently been attracting attention.

However, because of the long current path and small electrode force, it is difficult to concentrate the electric current in the welding spot compared with conventional direct resistance spot welding (direct RSW). Furthermore, in multipoint welding, shunt current will occur easily, and the nugget formation will be inhibited.

To obtain a guideline for making sound nuggets, influencing factors for shunt current were investigated. And a numerical study was carried out to discuss the difference between direct RSW and single side RSW.

According to the CAE analysis, the shunt current of single-side RSW will be higher rate than direct RSW. The rate of shunt current was influenced by the electrical resistance of its current path. For this reason, with shorter distance between welding points, or with lower electrical resistance of material, it is difficult to get large nuggets. By enhancing the electrical resistance of shunt current path, shunt current could be reduced and a larger nugget would be obtained.

Key Words: Single side, Resistance spot welding, multipoint, shunt current, automobile, nugget growth, CAE analysis, current path

1. 緒 言

自動車車体の開発において、環境負荷軽減のため車体軽量化が推し進められ、近年では高強度鋼板の使用が拡大する¹⁻³⁾とともに、Al合金やCFRPなどを活用したマルチマテリアル構造による軽量化も検討されている^{4, 5)}。また、衝突安全性の向上も重要な課題であり、衝撃吸収部材や補強部材の追加、破壊・変形の挙動やこれに伴うエネルギー吸収を考慮した部品設計など、構造面での最適化も進められてきた^{1, 6, 7)}。一方、乗り心地や操縦安定性を確保するためには、車体の剛性を高めることが重要である。

軽量化、衝突安全向上、剛性向上というニーズを同時に満たすため、自動車車体に用いられる材料や部品構造は多様化している。その方法の一つとして、高強度鋼管やハイドロフォーム部品を含む中空部材の活用⁷⁾が増えている。一方、自動車の組み立てには抵抗スポット溶接が広く用いられているが、中空部材とパネル部材を接合するためには片側か

らアクセス出来る接合方法が必要となり、アーク溶接、レーザー溶接とともに、片側スポット溶接が注目されている⁸⁻¹⁴⁾。

ダイレクトスポット溶接および片側スポット溶接の模式図をFig. 1に示す。溶接位置を上下から電極で加圧して通電するダイレクトスポット溶接とは異なり、片側スポット溶

Fig. 1 Welding process of direct resistance spot welding (RSW) and Single-side RSW

*受付日 平成27年11月10日 受理日 平成28年1月16日 平成22年度秋季全国大会で発表、平成23年6月軽構造接合加工研で発表

**正 員 新日鉄住金株式会社 Member, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

***正 員 東北大学 Member, Tohoku University

接では溶接位置に片側から溶接電極を押し当てる。この溶接電極と、任意の位置に押し当てたバック電極との間を通電することにより、チップ電極直下の溶接位置にナゲットを形成させる。片側スポット溶接は、ダイレクトスポット溶接と比べると溶接電極からバック電極に至る通電パスが長く、また部品の変形を避けるために低加圧力で溶接する。このため溶接点以外の接触箇所にも電流が流れ、溶接点の電流密度が低下する場合がある¹⁰⁻¹⁴⁾。特に近接して既溶接打点が存在する場合には、既溶接打点を通してバック電極に至る無効分路が発生し、溶接部における電流損失が生じることが懸念される^{15, 16)}。

本研究では、実験的手法を用いて、片側スポット多点溶接におけるナゲット形成・成長への影響因子を調査するとともに、多点溶接時のナゲット径拡大方法を検討した。また、FEM 解析により、ナゲット径および溶接点に流れる電流に及ぼす打点ピッチの影響を調査し、ダイレクトスポット溶接の場合と比較検討した。

2. 供試材および実験方法

本検討にはエア加圧式のインバータ直流電源溶接機を用い、先端 R40、直径 16 mm のシングル R 形電極を用いた。片側スポット溶接試験装置の構成は、Fig. 2 に示す両端支持梁モデルとし、中空部品への薄板部材の溶接を想定して実験を行った。なお試験片と下部電極の接触不良による通電不良を防ぐため、試験片の両端はハンドクランプで固定した。ここで、本研究で想定している薄鋼板と中空部材の片側スポット溶接と、Fig. 2 に示した実験装置の電流経路について Fig. 3 で概略を説明する。Fig. 3 (a) は、Fig. 1 (b) に相当する電気回路を示す。溶接電源より供給された電流は、溶接電極から上側の薄鋼板に流れる。その後溶接点と既溶接打点の 2 経路に分かれて中空部材に至り、中空部材中を通してバック電極に到達する。厳密には例えば中空部材の稜線部など、薄鋼板と中空部材が強く接触する箇所にも分路が生じる場合があるが、溶接電極により上下材料が強く加圧されている溶接点、既に安定した電流パスが形成している既溶接打点に比べてその量は少ないと考えられることから、ここでは省略する。Fig. 3 (b) は、Fig. 2 に示した実験装置に相当する電気回路を示す。溶接電源より供給された電流は、溶接電極から上側の薄鋼板に流れ、鋼板内で溶接点と

既溶接打点の 2 経路に分かれて下側の薄鋼板に至った後、左右に配置されたバック電極のいずれかに至る。中空部材との接合時と同じく、実際にはクランプ部や下部電極端部の直上などの上下鋼板が強く接触する箇所にも分路が生じる場合があるが、ここでは省略している。

供試材には、板厚 2.0 mm および 1.2 mm、母材引張強さ 270 MPa から 980 MPa の非めっき自動車用鋼板を用いた。各供試材の機械的特性および室温における固有抵抗値を Table 1 に示す。Fig. 4 に示すように、幅 30 mm、長さ 120 mm また

(a) Circuit diagram of sheet-pipe welding with a welded point (fig.1(b))

(b) Circuit diagram of experimental setup with a welded point (fig.2)

Fig. 3 Circuit diagrams of sheet-pipe welding and experimental setup

Table 1 Chemical compositions (mass%) and resistivity ($\mu\Omega\text{m}$)

Steel (TS-MPa)	C	Si	Mn	Resistivity
Mild Steel (270)	0.04	0.01	0.14	0.117
HSS-1 (440)	0.10	0.13	1.05	0.157
HSS-2 (590)	0.09	0.70	1.40	0.302
HSS-3 (780)	0.09	0.50	2.45	0.320
HSS-4 (980)	0.15	0.52	2.00	0.280

Fig. 2 Schematic drawing of testing procedure

(a) Distance $D \leq 50\text{mm}$

(b) Distance $D \geq 60\text{mm}$

Fig. 4 Schematic drawing of specimens

は 160 mm のクーボン状試験片を重ね合わせて様々な位置に既溶接打点 (図中○印) を設けた後、この試験片を片側スポット溶接し (図中●印)、板-板界面のナゲット径または溶接部径を求めた。以下では、試験片長手方向の断面調査による計測結果をナゲット径、ねじり試験による破断面からの計測結果を溶接部径と表記する。また、以下文中では、溶接位置の中心から既溶接打点の中心までの距離を打点間距離 D と呼ぶ。

また、Fig. 5 に示すように、ダイレクトスポット溶接機を用いて、分流経路の電気抵抗測定を試みた。供試材を重ねて所定の位置に既溶接打点を設けた後、図中に示すように電極加圧位置に当たる板間に厚さ 0.5 mm のテフロンシートを挟み込んで絶縁し、全ての入力電流が既溶接打点を通して対面する電極に至る状態とした。この状態で通電中の電極間抵抗を測定し、打点間距離 D や供試材、既溶接打点数が異なる条件下での分流経路電気抵抗を相対比較した。

さらに Fig. 6 に示す方法で、片側スポット溶接における入

力電流を、①溶接位置を通りバック電極 1 に至る有効電流と②既溶接打点を通りバック電極 2 に至る無効電流の 2 つに分岐させ、有効電流を測定した。溶接位置を通して下側の薄鋼板に至った電流がバック電極 1 に至る事がないよう、下側の薄鋼板は分断した。測定された有効電流を入力電流で除した値を、その溶接条件における有効電流割合とした。なお、Fig. 5 (a) 中に点線で示すように、溶接点・既溶接打点以外の接触箇所を経由してバック電極 1 または 2 に至る無効分流も発生している可能性がある。従って上記の方法で計測するバック電極 1 に至った電流には、厳密には溶接点以外を通る無効分流も含まれる。

また、汎用 FEM コード Abaqus をベースに構築されたスポット溶接用 CAE ソフト^{16, 17)}を用いて、三次元 FEM 解析を行った。解析モデルは Fig. 7 に示すように試験片長手方向に軸対象とし、実験の 1/2 モデルとした。

3. 実験結果および考察

3.1 各溶接法における多点溶接性に及ぼす打点間距離の影響

前述のように、抵抗スポット溶接においては、新たに溶接しようとする点と既溶接打点の打点間距離 D が狭いほど分流が生じやすいことが知られている。そこで、片側スポット溶接およびダイレクトスポット溶接のそれぞれについて、打点間距離 D を様々に変えて 1 組の試験片に各 2 点の溶接を行い、2 打点目、すなわち既溶接点を設けた状態で溶接された打点のナゲット径を調査し、各溶接法で得られたナゲット径を比較調査した。なお、供試材には板厚 2.0 mm の軟鋼を用いた。また、それぞれの溶接方法であらかじめ単点溶接の試験を行ってナゲット径が約 4.5 mm となる条件を選定し、これを 2 打点目の溶接条件とした。前記溶接条件を Table 2 に、2 打点目のナゲット径を測定した結果を

Fig. 5 Measuring method of resistance of shunt current path

(a) Schematic drawing of testing procedure

(b) Circuit diagram of experimental setup

Fig. 6 Schematic drawing and circuit diagram of experimental procedure

Fig. 7 Analytic model of the single-side RSW

Table 2 Welding conditions

	Single side RSW	Direct RSW
Electrode force	490N	3136N
Welding time	416ms	416ms
Current	7.0kA	6.1kA

Fig. 8に示す. いずれの溶接法においても, 打点間距離 D が長いほどナゲット径は4.5 mm, すなわち単点溶接で得られるナゲット径に近づいた. 本検討の条件では, 打点間距離 D が40 mm 以上の場合, 片側スポット溶接とダイレクトスポット溶接のナゲット径に大きな差は無かったが, D が40 mm 未満の条件では片側スポット溶接によって得られるナゲット径が急激に減小し, 30 mm 以下では板間にナゲットが得られなかった.

打点間距離 $D=20$ mm の条件で得られた溶接部, および同一溶接条件で単点溶接して得られた溶接部の断面写真をFig. 9に示す. 図中の白い点線は板-板界面の位置を示している. 片側スポット溶接, ダイレクトスポット溶接のいずれの溶接法においても, 多点溶接ではナゲットの体積が小さくなっており, 既溶接打点への無効分流発生により, 溶接位置で発熱に寄与する電流が減少したものと推定された. しかしダイレクトスポット溶接の場合には, 板-板界

Fig. 8 Influence of the distance between weld point and other welded nugget on nugget formation in Single-side RSW and Direct RSW

Fig. 9 Cross sections of welded point

面の電流密度が高く, かつ冷却媒体である上下の電極からの距離がほぼ均等であるため, 板-板界面からナゲットが形成・成長し, 面積は狭いながらも上下の材料の接合が得られた. これに対し片側スポット溶接の場合には, 板-板界面よりも溶接電極に近い上板側で電流密度が高いため, 上板内からナゲットが形成・成長する^{11, 18)}. このため, この条件下では板-板界面までナゲットが成長できず, 接合が得られなかったと推定される. このように, 片側スポット溶接, ダイレクトスポット溶接のいずれの場合にも, 近接する既溶接打点がある場合には無効分流の発生とこれに伴うナゲットの減小が生じるが, 片側スポット溶接の方が, より板-板界面でのナゲット形成が得難いため, 分流を考慮した溶接設計が重要と考えられる.

3.2 FEM 解析による分流現象の検討

Fig. 7に示した解析モデルを使用したFEM 解析によるナゲット径計算結果を, 先の実験結果と併せてFig. 10に示す. 解析結果と実験結果の傾向は概ね一致し, 打点間距離 D の減小とともにナゲット径が減小し, 打点間距離 D が短い場合には, 片側スポット溶接の方がより強くその影響を受けた.

Fig. 11に模式図を示すように, 二打点目溶接時の溶接電流は, ダイレクトスポット溶接の場合には①溶接位置と②既溶接打点に分岐すると考えられる. 一方, 片側スポット溶接の場合には上記の①と②に加えて, ③クランプ直下部も通電経路になっているものと推測される. そこで, 板厚2.0 mm の軟鋼の2枚重ね溶接を対象に, この三カ所を通る

Fig. 10 Results of CAE: Influence of the distance between weld point and other welded nugget on nugget formation in Single-side RSW and Direct RSW

Fig. 11 Schematic views of shunt current path during weld

Fig. 12 Percentage of retained current passing through the weld point

電流の全入力電流に対する割合をCAEにより算出し、ダイレクトスポット溶接と片側スポット溶接の比較、およびそれぞれの溶接法で打点間距離が異なる場合の分流の比較を試みた。既溶接打点を設けない単点溶接、および打点間距離 $D=20\text{ mm}$, 40 mm の多点溶接における、各経路の電流計算結果を Fig. 12 に示す。なおクランプ部での分流は、左右二箇所の合計を示している。

単点のダイレクトスポット溶接では、全電流が溶接位置を通る。これに対し片側スポット溶接では、単点溶接の場合にも③クランプ部への分流が生じており、前述の通り元々溶接打点への電流集中を得ることが難しい。既溶接打点を設けた場合には②既溶接打点を通る電流が出現し、いずれの溶接法でも、打点間距離 D が短いほど、溶接部の発熱に寄与する経路①の電流（以下、有効電流）が少なくなった。また、いずれの条件においても、片側スポット溶接の方がダイレクトスポット溶接と比べ有効電流の割合が小さく、特に通電初期に有効電流が得難い傾向が見られた。

ここで、溶接部全体を、溶接位置を通る有効電流の通電経路と既溶接打点を通る無効分流の通電経路からなる並列電気回路として考えると、片側スポット溶接の方が有効電流の割合が小さい理由を以下のように推定できる。ダイレクトスポット溶接の場合、有効電流の通電経路は被溶接材の総板厚程度と短く、また加圧力が大きく板-板間の通電パスが安定している。このため、有効電流通電経路の電気抵抗は、無効分流通電経路の電気抵抗と比べて十分低いと考えられる。これに対し片側スポット溶接の場合、前述のようにバック電極に至る通電経路が長いこと、電極加圧力が

小さいことに起因して有効電流の通電経路電気抵抗も高いため、無効分流の通電経路電気抵抗との差異が小さい。このため、ダイレクトスポット溶接と比べて、片側スポット溶接の方が有効電流の割合が低くなったものと考えられる。

また、片側スポット溶接において有効電流の割合が通電初期に小さく後期に増大する理由としては、有効電流の通電経路の一部である溶接位置の板-板間において、通電初期の接触抵抗が失われバルク抵抗のみとなること、溶接位置の板-板界面において変形やナゲットの形成により通電パスが広がることにより、抵抗が低くなったことに起因すると考えられる。

3.3 片側スポット多点溶接性に及ぼす分流経路電気抵抗の影響

前述のように、片側スポット溶接による多点溶接においては、ダイレクトスポット溶接よりも分流現象によるナゲット径の減小が問題になりやすく、溶接施工時に分流現象への配慮が必要と考えられる。また、3.2で述べたように、有効電流量と無効電流量にそれぞれの通電経路電気抵抗が影響すると考えられる。無効分流通電経路の電気抵抗に対しては、打点間距離 D 以外に、分流経路を構成する材料の固有抵抗、経路の断面積、分流経路の数や方向も影響すると推定される。そこで次に、被溶接材の種類、板厚、既溶接打点の数および配置を変更して片側スポット溶接を行い、それぞれが多点溶接性に及ぼす影響を調査した。

3.3.1 被溶接材料の固有抵抗の影響

母材引張強さ 270 MPa から 980 MPa の各種鋼板に、打点

Fig. 13 Influence of electro resistance on nugget formation in Single-side RSW

Table 3 Welding conditions

Steel	Electrode Force (N)	Welding Time (ms)	Current (kA)
Mild Steel	490	416	7.0
HSS-1			7.2
HSS-2			6.5
HSS-3			6.0
HSS-4			5.6

間距離 $D=30\text{ mm}$ となる位置に既溶接打点を設けて片側スポット溶接し、ナゲット径を測定した結果を Fig. 13 に示す。なお溶接条件は、それぞれの材料において単点溶接でナゲット径が 4.5 mm となる条件 (table 3) とした。同一の打点間距離であっても被溶接材料により得られたナゲット径は異なり、母材の固有抵抗が高いほどナゲット径が大きくなる傾向が見られた。

先に示したとおり、多点溶接時の分流電流は、主に隣接する既溶接打点を通じてバック電極に至ると考えられるため、Fig. 5 に示す方法で溶接通電中の電極間抵抗を測定し、分流経路の電気抵抗を測定した。なお、実際にはこの方法で測定しているのはダイレクトスポット溶接において片方の電極から既溶接打点を通ってもう一方の電極に至る分流経路の電気抵抗である。片側スポット溶接において、電極側に配した薄鋼板内で溶接位置から既溶接打点に至る分流経路の電気抵抗がこの約半分に相当すると考えられる。その後、バック電極側の薄鋼板を経てバック電極に至るまでの経路の電気抵抗は、被接合体の形状やバック電極の設置位置により異なるが、ここでは被溶接材および打点間距離 D が異なる条件で相対比較としてこの値を用いることとした。母材引張強さ 270 MPa 級鋼（軟鋼）と 590 MPa 級鋼を供試材とし、打点間距離 $D=30\text{ mm}$ および 60 mm で測定した結果を Fig. 14 に示す。同一の打点間距離の場合には母材の固有抵抗が高い方が、また同一の材料では打点間距離 D が大きい方が分流経路の電気抵抗が高かった。

また、Fig. 6 に示した方法で溶接位置を通りバック電極に

Fig. 14 Measured values of the electrical resistance of current path

Fig. 15 Measured current passing through the welded point

至る有効電流を測定した結果、Fig. 15 に示すように、母材の固有抵抗が高い場合、すなわち分流経路の電気抵抗が高い場合に、有効電流が大きくなることを確認できた。

なお、上記に加えて、被溶接材の固有抵抗が高い場合には、溶接位置での有効電流による発熱量も大きいためナゲット形成・成長が得やすく^{11, 19)}、これも材料間の多点溶接性の差を生む要因と考えられる。

3.3.2 被溶接材料の板厚の影響

次に、板厚 2.0 mm および 1.2 mm の軟鋼を供試材として片側スポット溶接試験を行った。それぞれ単点溶接時に板厚 t に対し $4\sqrt{t}$ 相当のナゲット径が得られる溶接条件で溶接し、得られたナゲット径の $4\sqrt{t}$ に対する割合をナゲット成長率 (%) として、異なる板厚での片側スポット多点溶接性を比較した。打点間距離 D を変更して溶接した結果を Fig. 16 (a) に示す。板厚 1.2 mm の方が、板厚 2.0 mm の場合と比べ、打点間距離 D に対するナゲット成長率の変化が小さく、 $D=10\text{ mm}$ でも板間の接合を得ることが出来た。

Fig. 16 (b) に示すように、試験板厚が薄くなると無効分流電流経路の断面積が減少することにより、その電気抵抗が上昇した事に加え、通電中の温度上昇による電気抵抗の増加も大きくなり、無効分流が抑制されたと考えられる。また、前述の通り片側スポット溶接においては溶接電極側に偏ったナゲット形成が生じるため、板厚が小さい材料、すなわち電極チップ近傍に板-板界面がある材料ではより容易に板間の接合が得られた^{11, 19)}と考えられる。

(a) Relationship between nugget diameter and distance D

(b) Measured value of the electro resistance of shunt current path

Fig. 16 Influence of thickness on nugget formation in Single-side RSW and erector resistance of shunt current path

3.3.3 既溶接打点数および配置の影響

板厚 2.0 mm の軟鋼を供試材とし、打点数および打点位置を変えて既溶接打点を設けた後、同一溶接条件で片側スポット溶接し、ナゲット径を測定した結果を Fig. 17 に示す。各打点間の距離 D は 40 mm に統一し、(a) 単点溶接の場合、(b) 1 点の既溶接打点がある場合、(c) 溶接位置から見て一方に 2 点の既溶接打点がある場合、(d) 溶接位置の左右に 2 点の既溶接打点がある場合を比較した。既溶接打点を設けた (b) (c) (d) では、いずれも (a) 単点溶接の場合と比べナゲット径が減少したが、(b) と (c) にはほとんど差が認められなかった。一方、既溶接打点数は同一でも (c) と (d) には明確な差が認められ、(d) の場合には板間にナゲットが得られなかった。

Fig. 5 に示した方法で、試験片形状 (b), (c) および (d) の分流経路電気抵抗を測定した結果を Fig. 18 に示す。(b) と (c) では通電時間全体を通して経路電気抵抗にほとんど差が見られなかった。このことから、(c) のように複数の既溶接打点が並んでおり最も外側に新たに溶接する場合には、主として最近接打点への分流が生じ、更に離れた既溶接打点にはほとんど通電していないことが推察される。一方、(d) のように 2 点の既溶接打点の間を新たに溶接する場合の分流経路電気抵抗は、溶接中の全時間を通して (b), (c) よりも低かった。また通電時間に対する傾きが (b) (c) と比べて小さく、温度上昇が小さかったと推定される。これは、入力電流が二手に分かれており、左右それぞれの経路の電流密度が低下したためと考えられた。

Fig. 17 Influence of number and positions of welded points **Fig. 18** Measured values of electro resistance of shunt current path

4. 結 言

- ・片側スポット多点溶接時には既溶接打点への分流が生じ、溶接位置で板間にナゲット形成が得られない場合があった。
- ・三次元 FEM 解析の結果から、片側スポット溶接はダイレクトスポット溶接と比べて既溶接打点への分流の割合が高く有効電流が得難いと考えられた。
- ・分流経路の電気抵抗が高いほど無効分流が抑制され、溶接位置でのナゲット形成が得やすくなると考えられた。
- ・上記の分流経路の電気抵抗には、打点間距離、被接合材の固有抵抗および板厚、既溶接打の数及び配置が影響し、例えば最近接打点までの打点間距離が長いほど分流経路の電気抵抗が上昇し、多点溶接性の改善が得られると考えられた。

参 考 文 献

- 1) A. Yoshitake: Ultra Light Steel Auto Body-Advanced Vehicle Concept - Materials and processing -, Journal of the Japan Welding Society, vol.71 (2002), No.8, pp559-563 (in Japanese)
- 2) K. Watanabe, Y. Kuriyama, T. Inazumi and K. Fukui: World Auto Steel Program: Future Steel Cehicle (Third Report), Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, vol.44 (2013), No.2, pp523-528 (in Japanese)

- 3) 吉武明英, 池田倫正: 高張力鋼板を活用した自動車軽量化技術に関する展望, 塑性と加工, vol.52 (2011), No.606, pp766-771
- 4) H. Aiba, T. Koyama, A. Tanabe, I. Matsuzaki and Y. Yamashita: Trend of Materials and Production Engineering for Automotive, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, vol.65 (2011), No.6, pp10-15 (in Japanese)
- 5) R. Kageyama: Today's and Future's CFRP Technologies for Automobile, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan, vol.68 (2014), No.11, pp75-81 (in Japanese)
- 6) J. Iwaya: Body Structure and Crashworthiness in ULSAB-AVC, Journal of the Japan Welding Society, vol.71 (2002), No.8, p564-569 (in Japanese)
- 7) A. Tomizawa, N. Shimada, H. Matsuda and H. Mori: Development of Three-Dimensional Hot Bending and Direct Quench (3DQ) Mass Processing Technology, Proc. of IFU 2011., pp127-138
- 8) Y. Cho, I. Chang and H. Lee: Single-sided Resistance Spot Welding for Auto Body Assembly, Welding Journal, August (2006), pp26-29
- 9) Y. Hasegawa, H. Fujita, T. Endo, M. Fujimoto, J. Tanabe and M. Yoshida: Development of Front Pillar for Visibility Enhancement, Honda R&D Technical Review, vol.20 (2008), No.2, pp106-113 (in Japanese)
- 10) H. Nishibata, M. Fukumoto and M. Uchiyara: Influence of Welding Conditions on Nugget Formation in Single Sided Resistance Spot Welding Process, Welding in the world, vol.54 (2009), No.5/6, p15-22
- 11) H. Nishibata, S. Kikuchi, M. Fukumoto, and M. Uchiyara: Single-Side Resistance Spot Welding Process for Joining Pipes and Sheets, Int. J. of Automation Technology., vol.7 (2011), No.1, pp114-119
- 12) M. Matsushita, R. Ikeda and K. Oi: Development of In-Process Welding Current and Electrode Force Control Process, JFE 技報, No.34 (2014), pp22-27 (in Japanese)
- 13) M. Matsushita, R. Ikeda and K. Oi: Development of Single-Side Resistance Spot Welding Technology Applying In-Process Welding Current and Electrode Force Controls, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, vol.32 (2014), No.3, pp191-200
- 14) 西畑ひとみ, 菊池庄太, 福本学, 内原正人: 3次元CAEによる片側スポット溶接の多点溶接性影響因子の検討, 軽構造接合加工研究委員会資料, MP-497-2011
- 15) 例えば 産報出版: 現代溶接技術体系, 第8巻(抵抗溶接)
- 16) H. Ooka and T. Nomura: Weight Reduction of car Body Using Short Pitch Resistance Spot Welding, Journal of the Japan Welding Society, vol.84 (2015), No.7, pp509-513 (in Japanese)
- 17) M. Fukumoto, H. Fujimoto, K. Okamura and K. Fukui: FEM Simulation of Residual Stress Fields in Resistance Spot Welding, Proc. of Annual Meeting of JWS, vol.72 (2003), pp60-61 (in Japanese)
- 18) S. Kikuchi, H. Nishibata, M. Uchiyara and M. Fukumoto: Numerical Study of Effect of Shunt Current on Weldability in Single-sided RSW, Proc. of Annual Meeting of JWS, vol.87 (2010), pp86-87 (in Japanese)
- 19) H. Nishibata, S. Kikuchi, M. Fukumoto and M. Uchiyara: Influence of Parts Design on Nugget Formation of Single-side RSW, Proc. of Annual Meeting of JWS, vol.85 (2009), pp34-35 (in Japanese)