

理想化陽解法 FEM による 3 次元スポット溶接解析

大阪府立大学大学院 ○夏目 糧平, 生島 一樹
重政 拓海, 柴原 正和
日産自動車 (株) 千葉 晃司

Three Dimensional Simulation of Spot Welding by Using Idealized Explicit FEM

by Ryohei NATSUME, Kazuki IKUSHIMA, Takumi SHIGEMASA, Masakazu SHIBAHARA
and Koji CHIBA

1. 緒言

スポット溶接は、接合の対象となる複数枚の板を一对の電極で挟み、電極に対して圧力を負荷しながら通電し、電流により生じるジュール発熱を利用して接触部分の金属を加熱、熔融させることで板同士を接合する溶接方法である。このような接合方法をとるため、スポット溶接は、溶接時間が短く、熱変形が小さいという特性を持つ。しかしながら、その施工条件は経験的に設定されていることが多く、施工条件の決定に膨大な実験と工数がかかるのが現状である。よって、数値シミュレーションを活用することで、大幅な効率化が実現できると考えられる。

スポット溶接では、接触状態の変化により電流分布が変化し、それに伴い温度分布が変化する。さらに、温度分布の変化により変形状態が変化するというように、電流、温度、変形の 3 つの現象が相互に連成する問題である。そのため、スポット溶接のシミュレーションは、静電ポテンシャル解析、熱伝導解析、熱弾塑性解析の 3 つを連成させる非常に複雑な解析であり、解析時のメモリ消費量および計算時間が膨大となるため、従来は主として 2 次元軸対称モデルを用いた検討がなされてきた¹⁻³⁾。2 次元軸対称モデルにおいては複数のスポット溶接点を有する継手の解析は原理上不可能であるため、分流を含めた実施工モデルにおける 3 次元的影响の評価は難しい。しかしながら、実施工において溶接間隔が短い場合、隣接するスポット溶接点に顕著な分流が発生し、溶接部の発熱が不十分になるため、十分な強度を保持するのに必要なナゲット径を得ることができない場合がある。また、スポット溶接を行う際、必ずしも電極と板が垂直になるとは限らず、電極に対して板が傾く、いわゆる、打角ずれが生じる場合がある。このような状態では、通常のスポット溶接と比べ、発熱状態が変化してしまう。そのため、適正なナゲット径を得るための溶接施工条件も通常のスポット溶接と異なると考えられる。これらのことから、複数のスポット溶接点を有する場合や、板が傾いた場合におけるスポット溶接解析では、分流を含めた 3 次元的影响について検討する必要がある。3 次元解析は溶接施工条件の決定において非常に重要であると考えられる。

そこで、本研究では、大規模解析が可能な理想化陽解法 FEM⁴⁾による 3 次元スポット溶接解析を行う。同解析手法の精度を検証するため、単点スポット溶接において、解析結果と実験結果の比較を行う。また、分流に関して検討をするために、溶接間隔が短い短ピッチスポット溶接において、適正なナゲット径を得るための施工条件について検討を行う。さらに、板が傾いた場合におけるナゲット形成機構を明らかにするとともに、適正な溶接施工条件についても検討を行う。

2. 理想化陽解法 FEM によるスポット溶接解析

スポット溶接は、電極を加圧することで被溶接部材同士

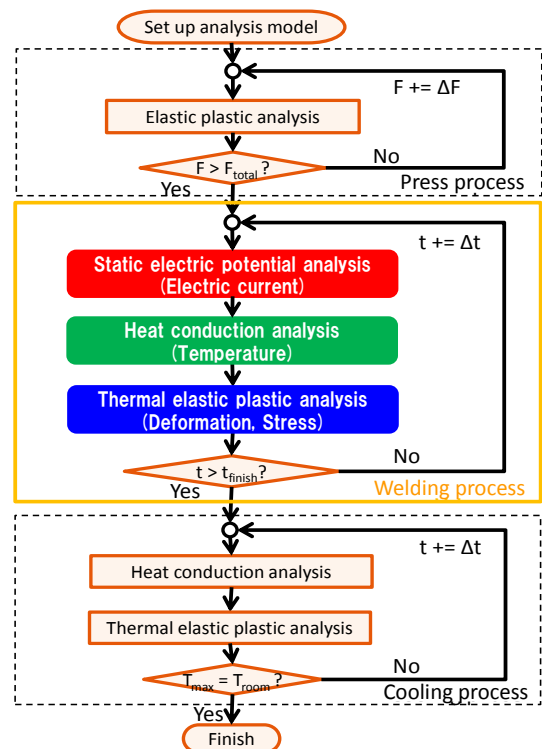


Fig.1 Analysis flow of spot welding by Idealized Explicit FEM.

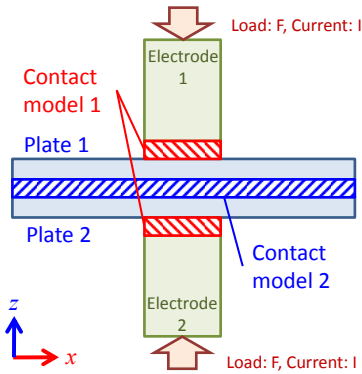


Fig.2 Schematic illustration of contact model.

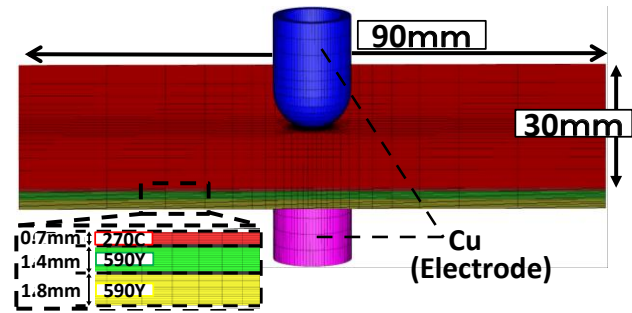


Fig.3 Analysis model of single spot welding.

を接触させ、被溶接部材に電流を流し、発生するジュール熱を利用して部材の接合を行う。ここでは、本研究で用いたスポット溶接解析の流れについて説明する。スポット溶接の解析では、Fig.1に示すように、まず、電極に荷重を与え被溶接材を接触させる工程において、変形を求めるために弾塑性解析を行う。続いて、電流を印加し加熱する工程において、電流場を決定するために静電ポテンシャル解析を行い、得られた電流場を基に、ジュール発熱による温度上昇の過渡的変化を非定常熱伝導解析により求め、温度変化に伴う変形・応力状態の変化を熱弾塑性解析により求める。すなわち、加熱工程において、板-板間および板-電極間の接触状態が変化するため、静電ポテンシャル解析、非定常熱伝導解析、熱弾塑性解析の3者を連成させた解析を実施する必要がある⁵⁾。

また、スポット溶接解析において、電極-板間、および板-板間の接触を表現するために接触面をモデル化する必要がある。Fig.2に示すように、電極-板間、および板-板間で異なる接触モデルを使用する。電極-板間においては、接触面の法線方向のひずみが-1より小さくなった状態、すなわち、電極と板の間の隙間が完全になくなった状態で大きな接触面の法線方向の剛性を持つものとし、また、接触面の法線方向のひずみが-1より大きい状態で剛性を0に近い値とする。こうすることで、電極と板が接触している間は強い反力を持ち、離れている間は反力を生じない接触モデルを定義する。また、板-板の接触面では、材料の溶融による接合をモデル化する必要があるため、前述の電極-板間の接触モデルに加えて、溶融時に一度でも接触した場合は接合されるといふ接合モデルを定義し、この場合には、それ以降の過程において常に高い剛性を持つものと定義する。

3. 理想化陽解法 FEM の精度検証

3. 1 解析モデルと解析条件

ここでは、本研究で構築した理想化陽解法 FEM を基にする解析手法のもつ精度について検証する。

本章における検討では、3枚の板の接合を考える。解析モデルをFig.3に示す。電極には銅を使用する。同図に示す通り、試験片寸法は、30 mm×90 mmであり、板の厚さは上側の板から各々0.7 mm, 1.4 mm, 1.8 mmである。板の種類は、上側の板から各々270C, 590Y, 590Yである。それぞれの板の材料定数の温度依存性をFig.4, Fig.5に示す。なお、270C, 590Yの加工硬化係数はヤング率の1/200とした。また、銅電極は塑性変形を生じないと仮定している。溶接条件としては、入力電流値を3kA~9 kA, 電極の加圧力を2.45kNとし、17cycleにわたって直流電流を印加するものとした。なお、1cycleは20msとし、解析中の時間増分は 4.0×10^{-4} secとした。

3. 2 実験結果と本手法によるナゲットサイズの比較

電流値 7kA における通電時間とナゲットサイズの関係を図.6に示す。本研究では、1530°C以上の範囲をナゲットと定義した。同図○印および□印はそれぞれ解析結果におけるナゲット径 d 、ナゲット厚 h を示しており、また、●印、■印は文献⁶⁾にある実験結果を示している。同図より、通電時間が進むに従ってナゲット径 d は増加していることが分かる。一方、ナゲット厚 h に関しては、3~5cycle程度の通電で最大となり、その後は一定値となっている。これは、電極には熱伝導率の高い銅を使用していることから、電極の冷却効果によるためと考えられる。

電流値とナゲット径 d ならびにナゲット厚 h の関係を図.7に示す。Fig.6と同様に、○印および□印は解析結果におけるナゲット径 d 、ナゲット厚 h を示しており、また、●印、■印は文献⁶⁾にある実験結果を示している。同図において、入力電流値が大きくなるに従って、ナゲット径 d 、ナゲット厚 h が大きくなる事が分かる。また、Fig.6およびFig.7より、解析結果のナゲットサイズは実験計測結果と良好な一致を示しており、理想化陽解法 FEM によるスポット溶接解析結果は妥当であると言える。

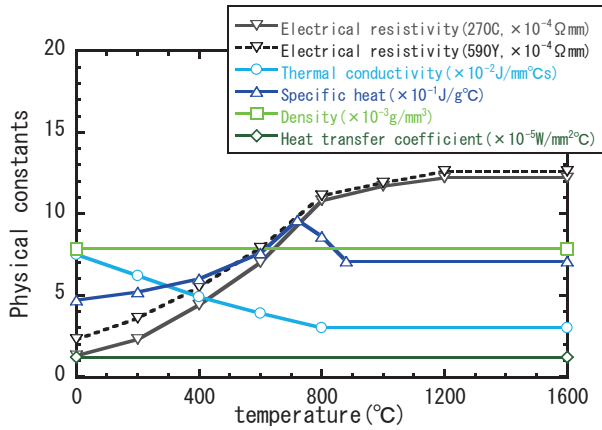


Fig.4 Temperature dependent materials properties used in static electric potential analysis and heat conduction analysis.

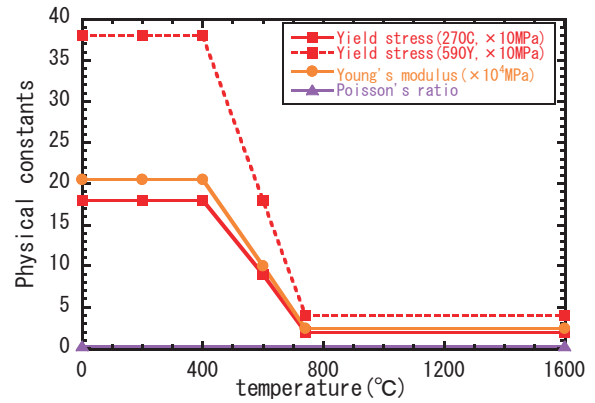


Fig.5 Temperature dependent materials properties used in elastic plastic analysis.

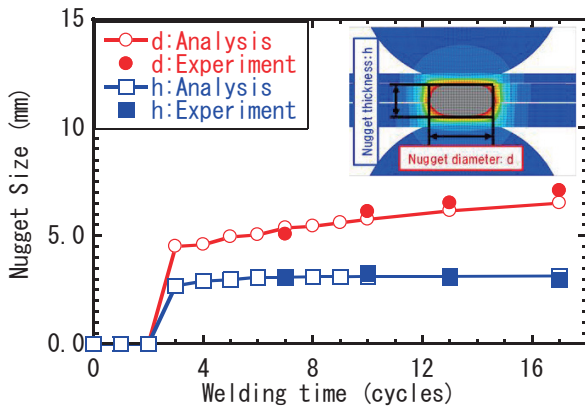


Fig.6 Relation between welding time and nugget size.

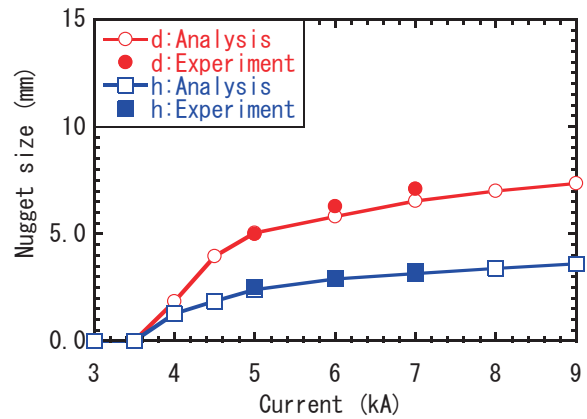


Fig.7 Relation between electric current and nugget size.

4. 短ピッチスポット溶接における適正施工条件についての検討

前章において、理想化陽解法 FEM に基づく解析手法の妥当性について検証した。ここでは、短ピッチスポット溶接の解析を通して、本手法の有用性について検討する。

4.1 解析モデルと解析条件

短ピッチスポット溶接解析に用いた試験片および電極の形状寸法および要素分割を Fig.8 に示す。同図に示すように、本解析では、2枚の板を用い、スポットピッチを $L_p=10 \text{ mm}$, 15 mm , 20 mm および 50 mm の4ケースとした2打点スポット溶接を解析対象とする。試験片の板厚は 1.5 mm であり、材料は 270C である。また、電極には銅を使用している。解析に用いた試験片の材料定数は Fig.4, Fig.5 に示す通りである。解析では、1打点目溶接後、常温まで冷却した後に、もう片方の電極で再び溶接をし、常温まで冷却する工程を再現する。溶接条件は、電流・通電時間・加圧力のそれぞれを変化させて、適正ナゲットが形成される条件について検討する。

4.2 スポットピッチが分流量に及ぼす影響

Fig.9 にスポットピッチ $L_p=10 \text{ mm}$ の場合における2打点目の最高到達温度分布を示す。同図より、溶接部以外の被溶接材上面での温度上昇、すなわち、1打点目に形成されたナゲットへの分流の発生が確認できる。また、Fig.10 は全電流中における2打点目に発生している分流量の割合を入力電流値ごとに示している。同図より、スポットピッチ L_p が小さくなるに従い、分流の割合が増加することが分かる。また、入力電流値に関しては、その値の増加に伴い、分流の割合も増加していることが確認できる。これは、電流の増加と共に発熱量が増加し、それにより温度上昇に伴う電気抵抗の上昇により既溶接点への分流量が増加したためと推察される。また、スポットピッチ L_p が 10 mm と 50 mm とでは 20% 以上もの分流量割合の差が生じることもわかる。

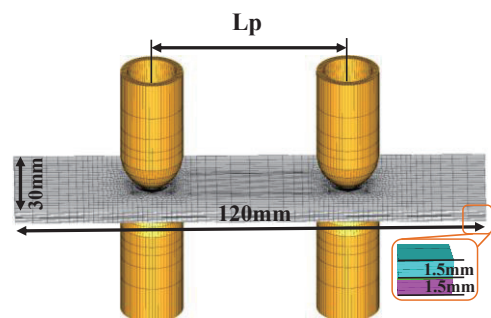


Fig.8 Shape and size of analysis model.

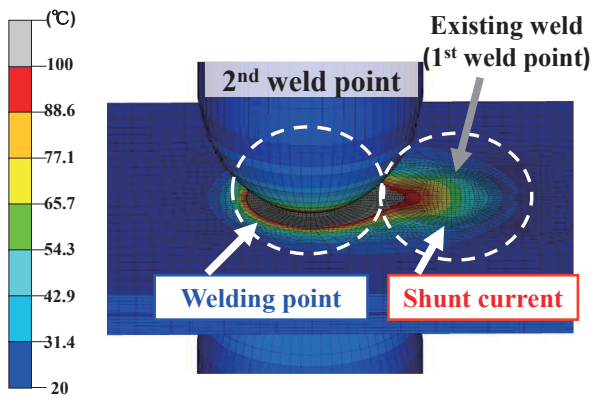


Fig.9 Maximum temperature distribution when shunt current occurs.

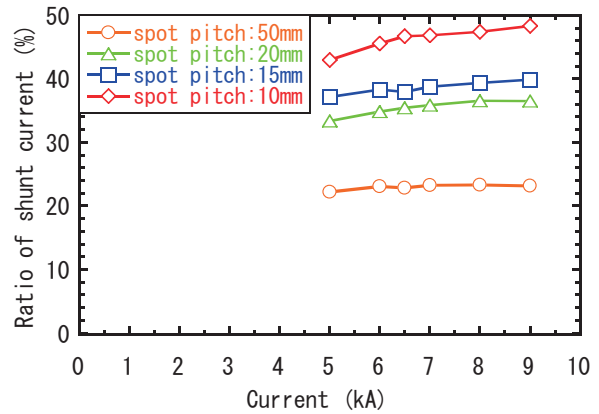


Fig.10 Ratio of shunt current to total current.

4. 3 溶接諸条件がナゲット径に及ぼす影響

ここでは、入力電流・通電時間・加圧力の溶接諸条件がナゲット径に及ぼす影響について検討する。

まず、入力電流がナゲット径に及ぼす影響について検討するため、通電時間を 18cycle、加圧力を 2.45kN で一定とし、入力電流値を 5kA~9kA まで変化させた 2 打点のスポット溶接解析を行った。Fig.11 (a), (b)に、 $L_p=20$ mm における、入力電流が 6kA の時の 1 打点目、2 打点目それぞれの溶接点での最高到達温度分布を示す。また、Fig.12 (a), (b)には、 $L_p=50$ mm における入力電流が 6kA の時の 1 打点目、2 打点目それぞれの溶接点での最高到達温度分布を示す。Fig.11, 12 より、分流影響のない 1 打点目に関しては、 $L_p=20$ mm, 50 mm の場合ともに同一のナゲットが形成されているが、2 打点目においては $L_p=20$ mm, 50 mm の場合ともにナゲットは 1 打点目より小さいことが分かる。さらに、スポットピッチが大きくなるに従い、2 打点目におけるナゲット径は大きくなっていることが分かる。これはスポットピッチが大きい程、分流影響が小さくなるためであると考えられる。

入力電流値とナゲット径 d の関係を Fig.13 に示す。図中●印は 1 打点目の解析結果を示し、○印、△印、□印および◇印は 2 打点目の解析結果を示す。同図より、入力電流値の増加に伴い、ナゲット径 d が大きくなっていることが分かる。また、2 打点目のナゲット径 d は 1 打点目より小さく、スポットピッチ L_p の増加に伴いナゲット径も大きくなっていることが分かる。

次に、通電時間がナゲット径に及ぼす影響について検討するため、入力電流値を 7kA、加圧力を 2.45kN と一定とし、通電時間を 1cycle から 30cycle まで変化させてスポット溶接解析を行った。通電時間とナゲット径の関係を Fig.14 に示す。同図より、全てのスポットピッチにおいて通電時間の増加に伴いナゲット径は大きくなるが、約 20cycle 以降はほぼ一定になることが確認できる。これは、電極の冷却効果により、発生した熱が電極に吸収されるためと考えられる。

さらに、加圧力がナゲット径に及ぼす影響について検討するため、入力電流値を 7kA、通電時間を 18cycle で一定とし、加圧力を 1.0kN から 4.0kN まで変化させて 2 打点のスポット溶接解析を行った。加圧力とナゲ

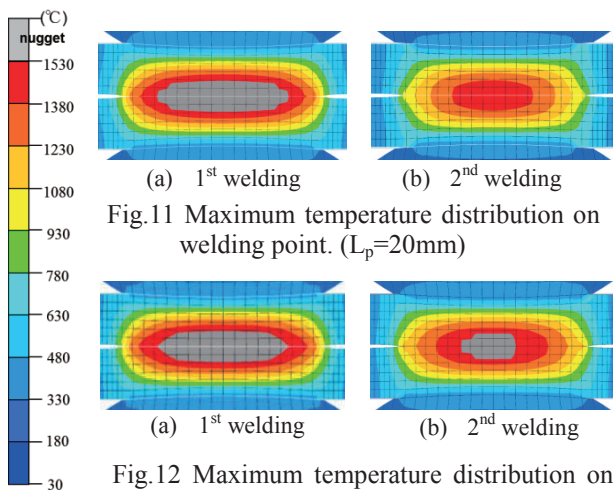


Fig.11 Maximum temperature distribution on welding point. ($L_p=20$ mm)

Fig.12 Maximum temperature distribution on welding point. ($L_p=50$ mm)

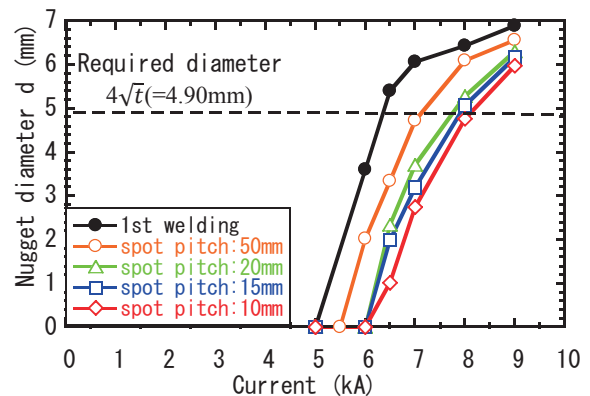


Fig.13 Relation between current and nugget diameter.

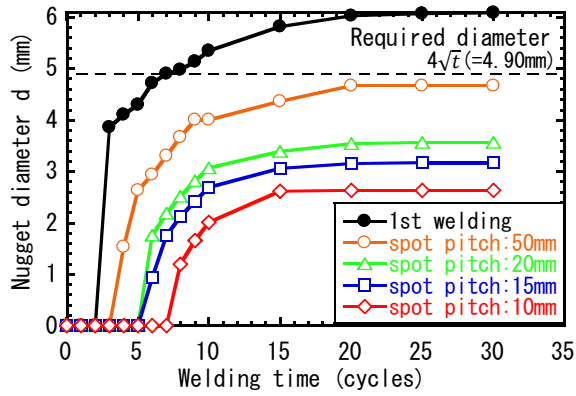


Fig.14 Relation between welding time and nugget diameter.

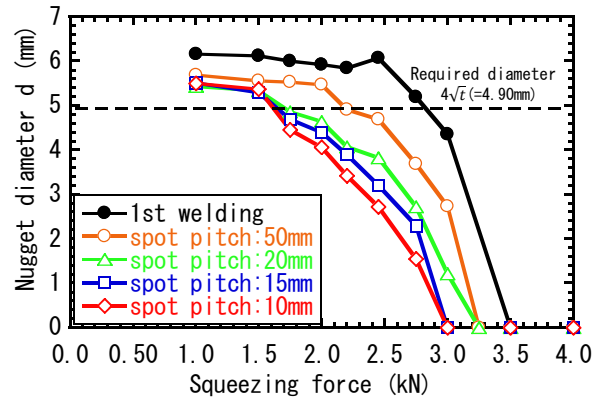


Fig.15 Relation between squeezing force and nugget diameter.

ット径の関係を Fig.15 に示す。同図より、全てのスポットピッチにおいて、加圧力の増加に伴いナゲット径が小さくなる傾向が確認できる。また、加圧力が約 3.3kN 以上ではナゲットは形成されていないことがわかる。これは、加圧力の増加に伴い接触面積が増加し、電流密度が減少することで抵抗発熱量が小さくなるためと考えられる。

4. 4 適正溶接条件の選定

以上の結果を踏まえ、適正なナゲット径が形成される施工条件について検討する。スポット溶接の適切な施工条件は、熔融温度 1530℃以上で定義されるナゲットの大きさで判断されている。一般的に、被溶接材の板厚を t としたとき、継手強度の観点から基準強度を満足するナゲット径の大きさは $4\sqrt{t}$ 等で定義される。また、溶接中に接触径を超えたナゲットが形成されると、熔融金属が飛散するチリが生じ、接合部の強度が低下する。本研究では、チリが発生しない条件を、溶接中におけるナゲット径と接触径の関係により、 $d < d_c$ と定義する。本研究ではこれらの条件を満たすナゲット径を「適正ナゲット径」とし、次式により定義する。

$$4\sqrt{t} < d < d_c \quad (1)$$

d : ナゲット径, t : 板厚, d_c : 接触径

以上で示した適正条件の定義に従い、入力電流値とスポットピッチ L_p がナゲット形成に及ぼす影響について調べたものが Fig.16 である。溶接条件は、通電時間を 18cycle、加圧力を 2.45kN とした。同図において○印の条件のときに適正なナゲットが形成され、×印は要求ナゲット径 $4\sqrt{t}$ を満たさない条件、▲印はチリが発生する条件を示している。同図より、適正なナゲット径を形成するための入力電流値の選定範囲は 1kA 程度と狭いことが確認できる。また、2 打点目においては入力電流値を 1 打点目よりも大きく設定する必要があることが分かる。次に、Fig.17 に、加圧力とスポットピッチ L_p がナゲット形成に及ぼす影響を示す。入力電流値は 7kA、通電時間は 18cycle とした。同図より、加圧力の適正条件範囲は 1 打点目においては 2kN~2.5kN、2 打点目においては図中の点線より下側の領域であることが分かる。このことより、2 打点目の加圧力は 1 打

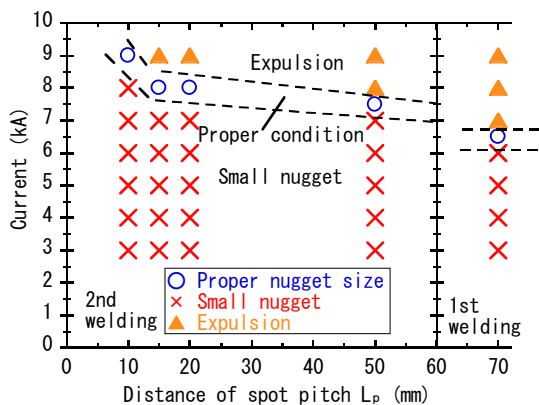


Fig.16 Influence of welding current and distance of spot pitch L_p on proper welding condition.

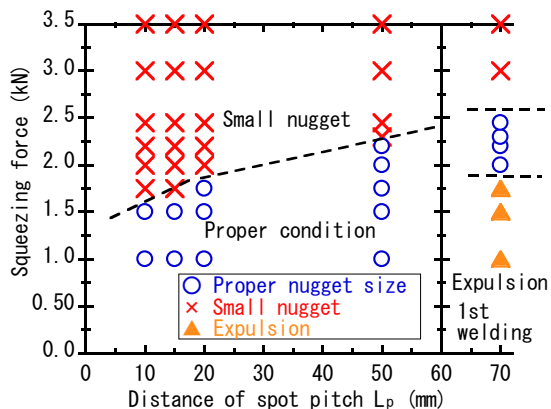


Fig.17 Influence of squeezing force and distance of spot pitch L_p on proper welding condition.

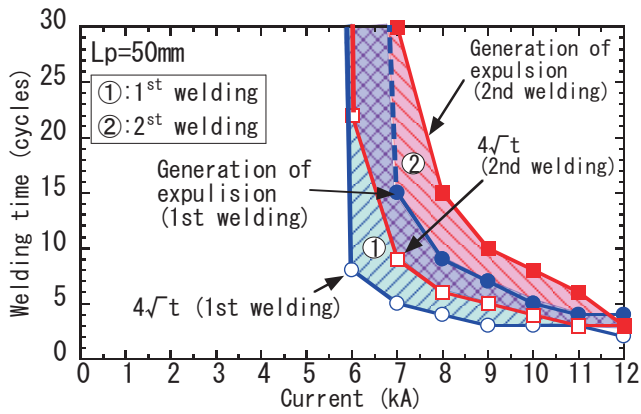


Fig.18 Proper condition of welding time and welding current on both 1st welding and 2nd welding. ($L_p=50\text{mm}$)

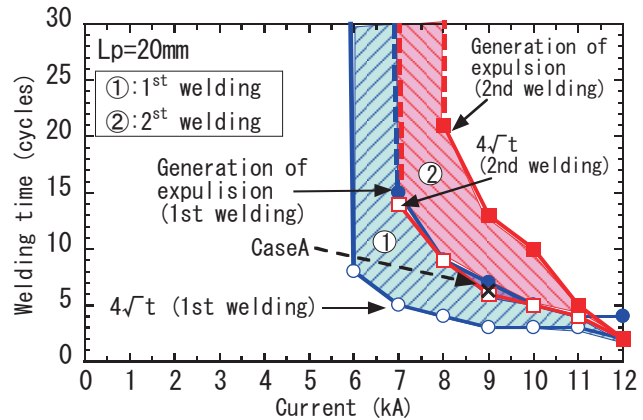


Fig.19 Proper condition of welding time and welding current on both 1st welding and 2nd welding. ($L_p=20\text{mm}$)

点目と同等もしくは小さく設定する必要があることも確認できる。

次に、同一スポットピッチにおいて、2打点とも同じ溶接条件で適正なナゲット径が形成される条件を選定する場合を考える。Fig.18およびFig.19は、それぞれスポットピッチ $L_p=50\text{mm}$ および $L_p=20\text{mm}$ において、入力電流値と通電時間を変化させた際の適正ナゲットが形成される範囲を示す。また、図中の○印および□印はそれぞれ1打点目、2打点目における要求ナゲット径 $4\sqrt{t}$ を満足する条件を示しており、また、●印および■印はそれぞれ1打点目、2打点目におけるチリ発生条件を示している。これらの条件で囲まれる適正範囲を①、②として示しており、それぞれ1打点目、2打点目における、適正ナゲットが形成される溶接条件とみなすことができる。Fig.18より、スポットピッチ $L_p=50\text{mm}$ の場合、①、②が重なる部分は大きく、1打点目と2打点目を同一条件で溶接することが容易であることが分かる。一方、Fig.19より、スポットピッチ $L_p=20\text{mm}$ の場合、①、②が重なる部分が小さく、スポットピッチ L_p が小さいほど適正ナゲットが形成されにくいことが分かる。また、適正条件①∩②の範囲内にあるCase A（スポットピッチ $L_p=20\text{mm}$ 、入力電流値 9kA 、通電時間 7cycle ）の条件下における1打点目および2打点目溶接時の最高到達温度分布をFig.20(a)(b)に示す。同図より、非常に狭い適正条件ではあるが、①∩②に含まれる溶接条件であれば、1打点目、2打点目ともに同じ溶接条件下で適正なナゲットが形成されることが確認できる。

以上に示すように、理想化陽解法 FEM に基づく3次元スポット溶接シミュレーションを用いることで、分流を含めた実施工モデルにおけるスポット溶接問題において、適正なナゲット径を得ることができる施工条件の予測が可能であることが示された。このことは、スポット溶接施行前に行う実験等の事前検討を大幅に低減できることを示唆しており、本手法に基づく3次元解析の有用性が示された。

5. 打角ずれ条件下における適正な溶接施工条件についての検討

本章では、打角ずれ条件下における発熱状態を明らかにすると共に、適正ナゲットが形成される適正溶接施工条件についての検討を行う。

5.1 解析モデルと解析条件

本解析では、2枚の板を用い、打角ずれ角 $\alpha=0^\circ, 2.5^\circ, 5^\circ$ の3ケースを解析対象とした。参考までに、打角ずれが 5° の場合における要素分割をFig.21に示す。板の大きさは $80\text{mm} \times 40\text{mm}$ 、また、板厚は 1.5mm とし、材料は 270C とした。また、電極には前章と同様に銅を使用している。解析に使用した材料定数はFig.4, 5に示す通りである。次節では、打角ずれ角 α

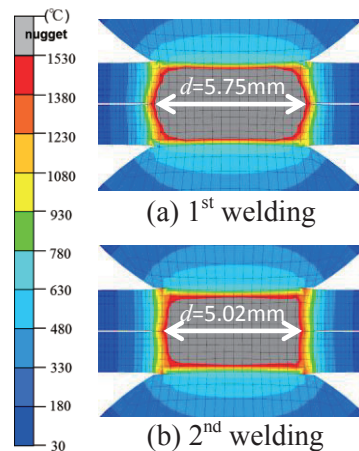


Fig.20 Maximum temperature distribution on the condition of case A.

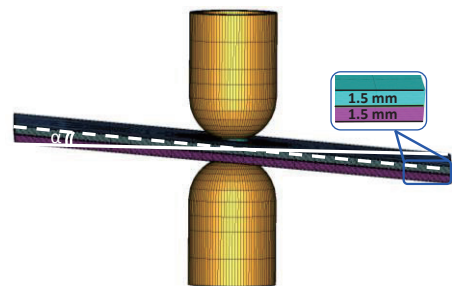
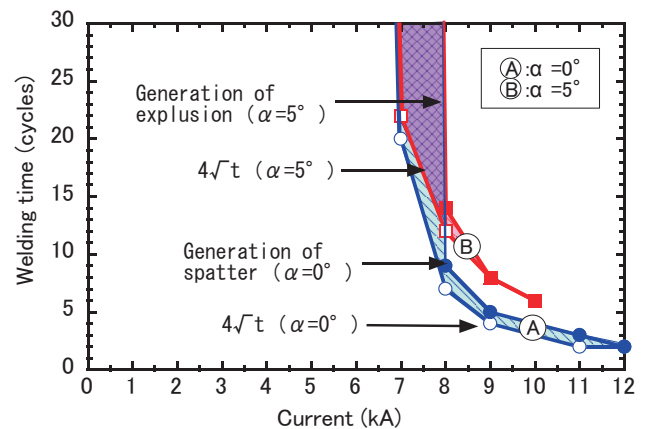
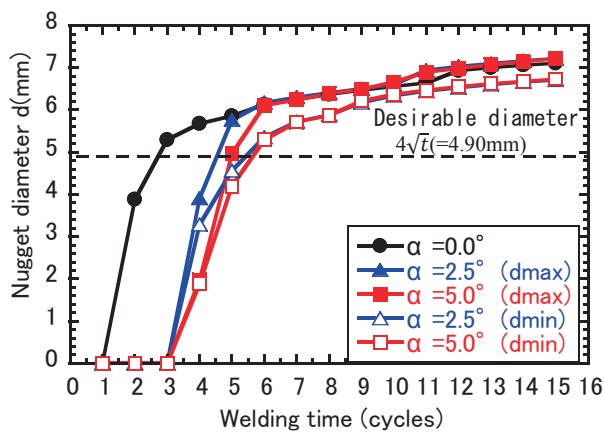
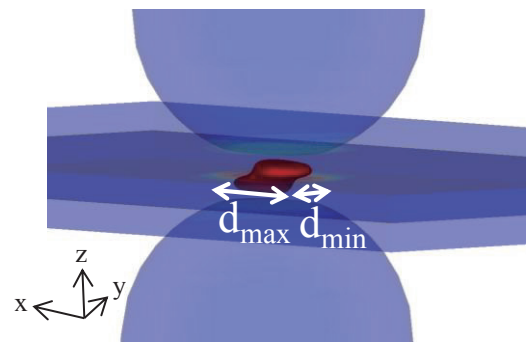
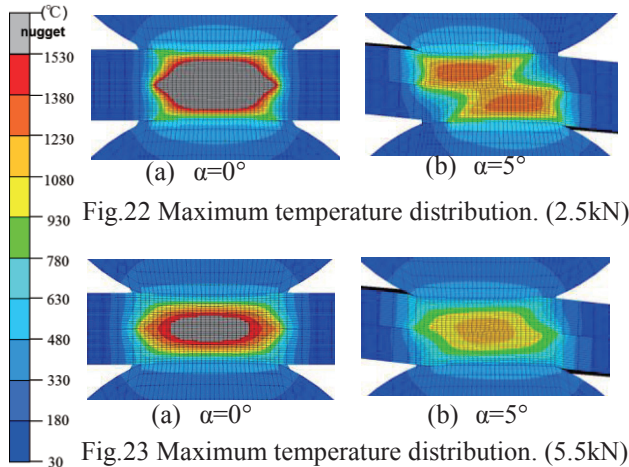


Fig.21 Analysis model of spot welding which has miss-match angle between plates and electrodes.



がナゲット径に及ぼす影響および適正なナゲット径を得るための溶接条件について検討を行う。

5. 2 打角ずれ角がナゲット径に及ぼす影響

本節では、打角ずれ角がナゲット径に及ぼす影響について検討するため、電流値を 10kA で一定とし、打角ずれ角 α を 0° 、 2.5° 、 5° と変化させてスポット溶接解析を行った。Fig.22 (a), (b)に、それぞれ $\alpha=0^\circ$ 、 5° における、加圧力が 2.5kN の場合の最高到達温度分布を示す。また、Fig.23 (a), (b)に、それぞれ $\alpha=0^\circ$ 、 5° における加圧力が 5.5kN の時の最高到達温度分布を示す。Fig.22 (a), (b)より、打角ずれ角 $\alpha=5^\circ$ の場合、電極の中心から発熱せず、電極の両端から発熱していることが分かる。また、Fig.23 (a), (b)より、加圧力が比較的大きい 5.5kN の場合、加圧力が 2.5kN の場合とは異なり、打角ずれ角 $\alpha=5^\circ$ の場合においても電極の中心から発熱していることが分かる。これは、加圧力が増加することで、電極-板間の接触面積が増加するためであると考えられる。

次に、打角ずれ角 $\alpha=0^\circ$ 、 2.5° 、 5° の場合における通電時間がナゲット径に及ぼす影響について検討するため、入力電流値を 10kA、加圧力を 2.5kN で一定とし、通電時間を 1cycle から 15cycle まで変化させてスポット溶接解析を行った。打角ずれが存在する場合において形成されるナゲット形状を Fig.24 に示す。同図より、x 方向のナゲット径 d_{\max} と y 方向のナゲット径 d_{\min} の大きさは異なっている。すなわち、非対称型のナゲットが形成されている様子が確認できる。通電時間とナゲット径の関係を Fig.25 に示す。図中の●印、▲印および■印は、それぞれ打角ずれ角が $\alpha=0^\circ$ 、 2.5° 、 5° における x 方向のナゲット径 d_{\max} の解析結果を示し、△印、□印は打角ずれ角が $\alpha=2.5^\circ$ 、 5° における y 方向のナゲット径 d_{\min} の解析結果を示す。同図より、打角ずれ角 α が大きくなるに従い、ナゲット径が小さくなることが分かる。また、6cycle 以降、ナゲット径は打角ずれ量によらずほぼ等しくなることが分かる。これは、通電時間が大きくなるに従い、電極-板間および板-板間の接触面積が打角ずれ角 α によらずほぼ等しくなることを意味している。

5. 3 適正溶接条件の選定

打角ずれ角 $\alpha=0^\circ$, 5° の場合において, 適正なナゲット径が形成される条件の比較を行う. Fig.26 は, 加圧力 2.5kN における打角ずれ角 $\alpha=0^\circ$, 5° の場合において入力電流値と通電時間を変化させた際の適正ナゲットが形成される範囲を示す. すなわち, 図中の○印および□印は $\alpha=0^\circ$ および 5° における $4\sqrt{t}$ を満足する適正なナゲットが形成される条件を示し, ●印および■印はそれぞれ $\alpha=0^\circ$, 5° におけるチリが発生しない限界条件を示している. 同図より, 打角ずれ角 $\alpha=5^\circ$ の場合は $\alpha=0^\circ$ の場合と比較して, 適正ナゲットを得るためには, 長時間通電しなければならないことが分かる. また, 適正ナゲットを得るための通電時間範囲および電流範囲は共に小さくなっていることが分かる. このことより, 適正なナゲットを得るための打角が存在する場合, スポット溶接の施工が困難であることが, その理由も含めて明らかとなった.

以上で示すように, 本研究で構築された理想化陽解法 FEM に基づくスポット溶接の 3 次元連成シミュレーション手法を用いることで, 3 次元解析でしか解決できない短ピッチスポット溶接や打角ずれのある場合のスポット溶接時の適正溶接条件選定の際に, 非常に有効な手段となることを示した. このことは, 現在膨大な数の実験と工数を必要としている溶接施行条件の大幅な効率化につながると予想できるため, 今後の適用範囲の拡大に期待が持てる.

6. 結 言

本研究では, 理想化陽解法 FEM を用いたスポット溶接の 3 次元連成シミュレーション手法を用いて, 単点スポット溶接と短ピッチスポット溶接, また, 打角ずれが存在する場合におけるスポット溶接の解析を行った. それらの結果, 以下の知見を得た.

- 1) 単点スポット溶接について
 - ・通電時間の増加に従い, ナゲット径が増加することを示した.
 - ・入力電流値の増加に伴い, ナゲット径およびナゲット厚が増加することを示した.
 - ・本手法により得られたナゲットサイズと実験の結果により得られたナゲットサイズが定量的によく一致することから, 本手法の妥当性が示された.
- 2) 短ピッチスポット溶接について
 - ・2 打点目に形成されるナゲットは, 1 打点目に形成されるナゲットより小さくなることを示した.
 - ・2 打点目の溶接において, 分流影響により, ナゲット径はスポットピッチが短くなるに従い減少することが分かった.
 - ・スポットピッチ 10mm と 50mm とでは, 20% 以上もの分流割合の差が生じることが分かった.
 - ・スポットピッチ 20mm の場合, 1 打点目, 2 打点目ともに同溶接条件で適正ナゲットを形成させることは非常に困難であることが分かった. そこで, 本評価手法を用いることで, 実現可能な溶接条件を選定することができることを示した.
- 3) 打角ずれが存在する場合におけるスポット溶接について
 - ・打角ずれが大きい場合, 電極の両端から溶融する可能性があることを示し, その結果として非対称形状のナゲットが形成されることを示した.
 - ・打角ずれ角が大きくなるに従い, 短径側のナゲット径がより小さくなることを示した.
 - ・打角ずれにより適正な溶接施工範囲が通常のスポット溶接より狭くなり, 溶接困難になることを示した. また, 適正なナゲットを得るためには, 通常のスポット溶接より長時間の通電を要することを示した.

参考文献

- 1) H. Murakawa, F. Kimura and Y. Ueda: Weldability analysis of spot welding on aluminum using FEM, Transactions of JWRI, Vol.24, No.1 (1995), pp.101-111.
- 2) H. Murakawa, K. USUI, N. MA, and H. ZHAO: Influence of Initial Gap in Resistance Spot Welding on Weldability: 溶接構造シンポジウム講演論文集(2011), pp263-266
- 3) G. Kashiya, and H. Murakawa: Simulation of Nugget Formation Process in Spot Welding with Process Tape: 溶接学会全国大会講演概要, 第 93 集, pp330-331
- 4) K. Ikushima, M. Shibahara: Prediction of residual stresses in multi-pass welded joint using Idealized Explicit FEM accelerated by a GPU: Computational Materials Science 93 (2014), pp62-67
- 5) K. Ikushima, S. Itoh, M. Shibahara, and H. Murakawa: Development of 3-Dimensional Simulation Method for Spot Welding using Idealized Explicit FEM; 溶接学会全国大会講演概要第, 91 集(2012-9), pp310-311
- 6) N. Ma, H. Murakawa: Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel, Journal of Materials Processing Technology, 210(2010), pp.2045-2052.