

# B16 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

横山 沙織 (指導教員 柴原・伊藤)

Three-dimensional Simulation of Resistance Spot welding Using Idealized Explicit FEM

by Saori Yokoyama

## Abstract

Resistance spot welding is widely utilized in various products due to its high productivity. However, many experiments are performed to determine spot welding condition. In this paper, three-dimensional resistance spot welding analysis is developed using Idealized explicit FEM to reduce the memory consumption. The developed method is applied to single-point spot welding problem. Through the comparison between computational results and experimental results, it is found that the nugget size obtained by developed method agree very well with each other. In addition, the developed method is applied to problems that have multiple spot welding to evaluate the effect of shunt current. Furthermore, the proposed method is applied to the practical problems which happen in automobile factories. As a result, It is demonstrated that the developed method is applicable to the practical spot welding problems.

## 1. 緒 言

スポット溶接は複数枚の板を一对の電極で挟み、適度な圧力を加えながら通電して、電極と板、板間の接触抵抗による発熱を利用して加熱、熔融することで接合する溶接方法である。溶接時間が短いため、熱ひずみが少なく、作業者の熟練度がほとんど不必要なため自動化が容易であるという利点が挙げられる。このようにスポット溶接は品質の安定した生産性に優れた溶接法として、薄板を多く利用する自動車、車両、電気製品等に用いられている。

しかし、溶接条件である、被溶接材に与える加圧力、溶接電流、通電時間は経験的に設定されていることが多く、材質や板厚の組み合わせも多種多様に存在するために、スポット溶接の条件出しに膨大な実験と工数がかかっているため、溶接条件による変形、応力、等の影響について定量的な検討を行うことが必要であると考えられている。また、スポット溶接は、静電場解析、熱伝導解析、熱弾塑性解析を行うため非常に複雑な解析となる。さらに、メモリ消費量の制約により従来 2 次元軸対称モデルを用いた検討が一般的であるが、3 次元的問題提起が必要である<sup>(1)-(6)</sup>。

そこで本研究では、省メモリかつ高速な動的陽解法をさらに収束計算を行うことで精度を向上させた理想化陽解法 FEM スポット溶接に適用し、3 次元解析を行った。まず、単点のスポット溶接の現象を実験結果と比較し、本解析のシミュレーションの精度および妥当性を確認する。また、多点のスポット溶接による影響を検討することにより、各々の溶接部分その他の打点に影響を及ぼすことを示した。

さらに、このシミュレーションを実施工問題にも適用することを目指し、実際に自動車に使用されている片ハット部材を取り上げ、現在問題となっている多点スポット溶接による変形の問題について考察を行う。

## 2. 解析手法

### 2.1 連成解析

#### 2.1.1 静電場解析

スポット溶接問題の場合、電界の時間変化が小さく、時間微分項を無視でき、静電場の問題と考えることができる。よって、静電ポテンシャル  $\phi$  を定義し、ポアソン方程式を基に残差法を用いて有限要素方程式を導くと、式(1)、(2)で電流場を求めることができる。

$$[K_{elec}] = \sum_{i=1}^{N_e} \epsilon \left( \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right]^T \left[ \frac{\partial N}{\partial x} \right] + \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right]^T \left[ \frac{\partial N}{\partial y} \right] + \left[ \frac{\partial N}{\partial z} \right]^T \left[ \frac{\partial N}{\partial z} \right] \right) dV \quad (1)$$

$$\{\hat{q}\} = \int_{S_i} [N]^T [N] \{q\} dS \quad (2)$$

ここで、 $[N]$ は要素の形状関数、 $[\partial N / \partial x]$ 、 $[\partial N / \partial y]$ 、 $[\partial N / \partial z]$ はそれぞれ要素の形状関数の  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向勾配、 $\{q\}$ は節点に流れる電流である。

#### 2.1.2 非定常熱伝導解析

非定常熱伝導問題の基礎方程式は式(3)で表される。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (3)$$

また静電場解析と同様にポアソン方程式を離散化し、形状関数を用いて導くと、式(4)を解くことにより、非定常温度解析を行うことができる。

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} + [K_{therm}] + \int_S \alpha_c [N]^T [N] dS \right) \{T\}_{t+\Delta t} = \int_V Q [N]^T dV + \int_S \alpha_c T_c [N] dS + \frac{[C]}{\Delta t} \{T\}_t \quad (4)$$

ここで、 $\Delta t$ は時間増分、 $\{T\}_{t+\Delta t}$ は時刻  $t + \Delta t$  における温度、 $\{T\}_t$ は時刻  $t$  における温度とする。

#### 2.1.3 熱弾塑性解析

熱弾塑性解析の基礎式は、ひずみ応力増分関係式と仮想仕事の原理より、式(5)で示される。

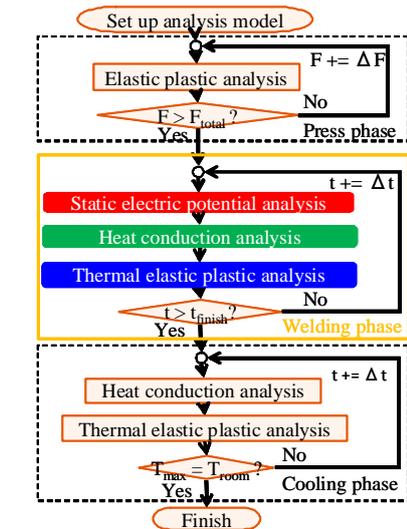


Fig.1 Flow of spot welding analysis

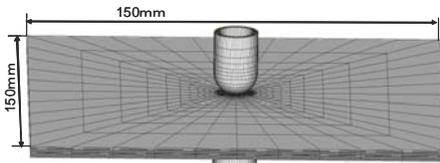


Fig.2 Analysis model

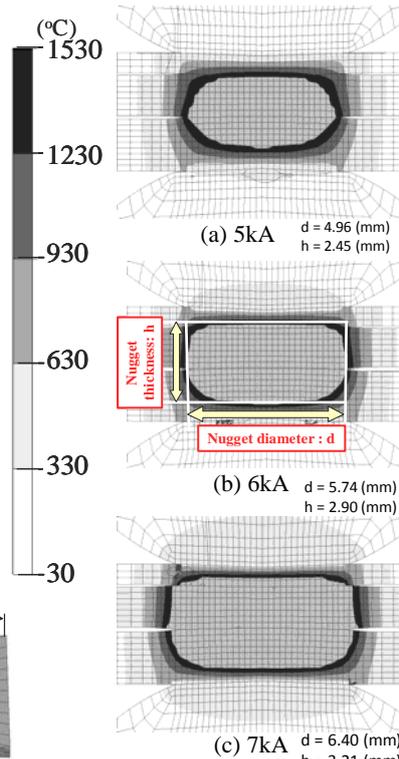
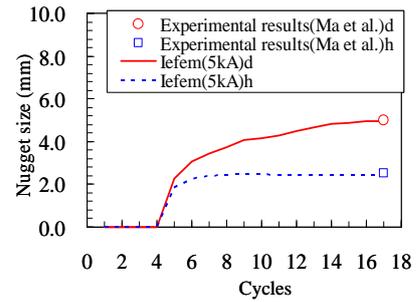
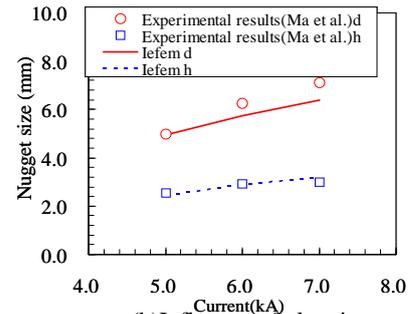


Fig.3 Influence of electric current on nugget shape and size



(a)Influence of heat cycles on nugget size



(b)Influence of electric current on nugget size

Fig.4 Effect of various factors on nugget size

適切な応力ひずみ関係式を選ぶことで、要素  $i$  の応力増分による仮想仕事は次のように表される。

$$\delta \Delta U_i = \{\delta u_i\}^T [K_i] \{\Delta u_i\} - \{\delta u_i\}^T \{G_i\} \quad (5)$$

ここで、 $\{G_i\}$  は温度増分に対応する等価節点力変化、 $[K_i]$  は要素剛性マトリックスである。また、系全体の仮想仕事の原理より、平衡方程式は以下の式(6)で示される。

$$[K] \{\Delta U\} = \{\Delta F\} + \{G\} + \{F^n - f^n\} \quad (6)$$

式(6)を適切な境界条件の下で解くことで、変位増分が得られる。しかし、熱弾塑性問題のような非線形解析の場合は、式(6)を一度解くだけでは静的平衡状態が得られないので、反復計算を行い、解を静的平衡状態に収束させる必要がある。

## 2.2 理想化陽解法 FEM

本解析手法である理想化陽解法 FEM は、静的陰解法 FEM の各荷重ステップにおいて、動的項を付加し、その影響が十分小さくなるまで反復計算を実行することで、静的平衡状態を得る手法である。ここで、動的項の係数マトリックスを節点集中型、つまり対角行列とすることにより、連立方程式を構築・求解する必要をなくし、計算の高速化、省メモリ化を実現する。本手法では、この理想化陽解法 FEM を用いてスポット溶接の 3 次元シミュレーション解析を行う。

## 2.3 本シミュレーション解析手法

本解析は理想化陽解法を用いており、フローチャートを Fig.1 に示す。

まず、電極に荷重を与え、被溶接材同士が接触する過程を弾塑性解析により求める。所定の荷重が与えられた後、電極より電流を流し、溶接を行う過程を解析する。ここで、電流を電位ポテンシャル解析により求め、得ら

れた電流を基にジュール発熱による温度変化を熱伝導解析により求める。そして、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。また、これらの解析を所定の溶接時間が経過するまで繰り返し実施する。加熱が終了した後は材料が冷却され、最終変形にいたるまでを、熱伝導解析、熱弾塑性解析により解析する。

## 3. 単点スポット溶接による精度検証

### 3.1 解析モデルと解析条件

解析モデルを Fig.2 に示す。電極には銅を使用し、3 枚板の単点スポット溶接を解析する。板は 150mm×150mm で板厚は上から 0.7mm, 1.4mm, 1.8mm で、板の種類は 270C, 590Y, 590Y である。また、節点数は 77536 で要素数は 85520 である。溶接電流(直流)は 5kA, 6kA, 7kA で各々行い、加圧力は 2450N, 加熱時間は 17cycle とする。また、熔融温度を 1530°C とし、熔融温度以上になった箇所をナゲットと呼び、板が熔融し、接合している部分を示す。

### 3.2 実験結果とナゲット径の比較

Fig.3(a), (b), (c) は電流を各々 5kA, 6kA, 7kA の通電サイクル 17cycle を流した後のナゲットのサイズを示している。このコンタ図からわかるように電流が大きくなるほどナゲットサイズが大きくなっていることがわかる。これは電流が大きくなるほど板と電極、板と板の接触している部分の抵抗発熱が大きくなるためと考えられる。

また、電流 5kA の解析における通電サイクルとナゲット径関係のグラフを Fig.4(a) に、電流とナゲット径の関係のグラフを Fig.4(b) に示す。ただし、グラフ中におけるプロットは実験結果を示している。これらのグラフから実験結果とほぼ同様な解析結果が得られているため、本解

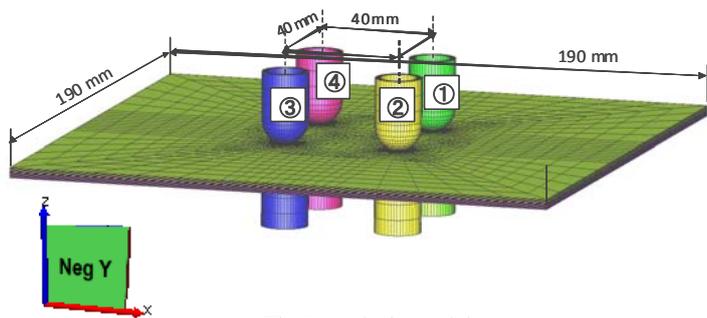


Fig.5 Analysis model

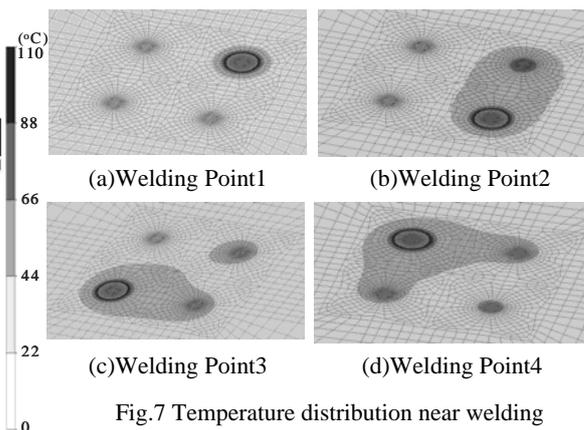
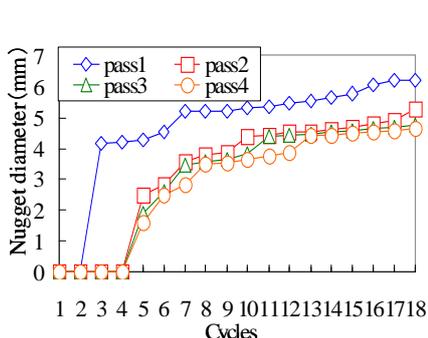
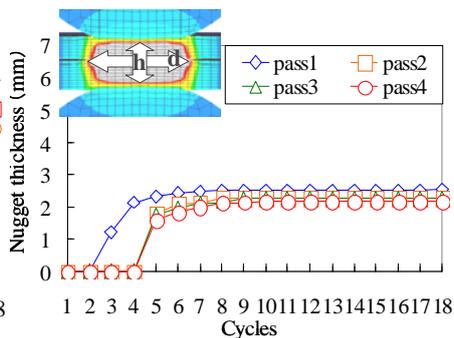


Fig.7 Temperature distribution near welding



(a) Nugget diameter: d



(a) Nugget thickness: h

Fig.6 Computed nugget sizes at different heat cycles

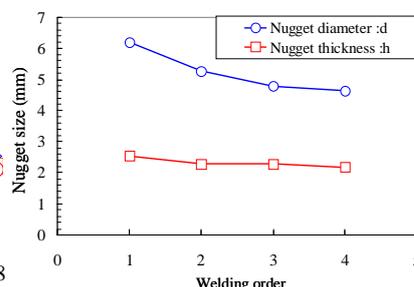


Fig.8 Computed nugget sizes at each welding points

析は良好な定性的傾向を有していると考えられる。

#### 4. 多点スポット溶接における基礎的検討

##### 4.1 解析モデルと解析条件

多点スポット溶接(4点スポット)の解析モデルを Fig.5 に示す。この解析モデルの電極には銅を使用し、2枚板の多点スポット溶接を解析する。2枚の板は190mm×190mmで板厚は上から1.4mm, 1.8mmであり、板の種類はどちらも590Yである。また、本解析の節点数は98554、要素数は85376である。溶接電流(直流)は7kA、加圧力は2450N、加熱時間は18cycle(1 cycleあたり20ms)とする。なお、時間刻み幅は40msである。また、溶接はFig.5の電極に示されている番号、①→②→③→④の順で行う。

##### 4.2 ナゲットサイズに及ぼすサイクル数の影響

サイクル数変化毎のナゲット径について調べた結果を Fig.6(a)に、ナゲット厚の変化を Fig.6(b)に示す。同図からわかるようにナゲット径は通電サイクル数が進むごとに大きくなり、ナゲット厚はサイクル数による変化があまりないことがわかる。

##### 4.3 ナゲットサイズに及ぼす各溶接点の影響

1点目溶接後のナゲットの様子を Fig.8(a)に、2点目溶接後のナゲットの様子を(b)に、3点目溶接後のナゲットの様子を(c)に4点目溶接後のナゲットの様子を(d)に示す。Fig.8から、溶接点が増えることにナゲットサイズが減少していることがわかる。また、Fig.7にスポット溶接後の電極近傍の温度分布を示す。同図より、溶接箇所以外で発熱している様子がわかる。この発熱は電流量の増大を意味するものであり、溶接点が増加するごとにナゲ

ットサイズが減少する原因は、分流量の増大であると結論づけられる。

#### 5. ハット部材の12点スポット溶接

##### 5.1 解析モデルと解析条件

実施工(片ハット部材)の解析モデルを Fig.9 に示す。また、溶接順序 case1, case2 をそれぞれ Fig.10(a), (b) に示す。電極には銅を使用し、片ハット部材の12点の多点スポット溶接を解析する。上板であるハット部材は Fig.9 に示されるように上下フランジ長20mm×2を含む、縦180mm×横70mm×270mmの部材である。また、下板は180mm×270mmである。板厚は、上板も下板も1.6mmである。溶接間隔は50mm、板の種類はどちらも270Cである。節点数は935904、要素数は803500である。電極と被溶接材間、被溶接材間には接触要素を導入した。溶接電流(直流)は7kA、加圧力は2450N、加熱時間は18cycle(1 cycleあたり20ms)とする。なお、時間増分は40msである。また、溶接順序は Fig.10 の図に示す①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧→⑨→⑩→⑪→⑫の順で行う。

##### 5.2 接点の影響によるナゲットサイズの変化

各溶接点におけるナゲット径およびナゲット厚を Fig.11(a), (b) に示す。同図より、溶接点①～⑤まではナゲット径が減少しているが、溶接点⑥以降はナゲット径がほぼ一定となっていることがわかる。この現象は、板をプレスするのにかかる圧力が原因であると考えられる。本章では、実施工モデルに本解析手法を適用し、ナゲットサイズに関して検討することによって、各点における実施工モデルへの適用可能性について示した。

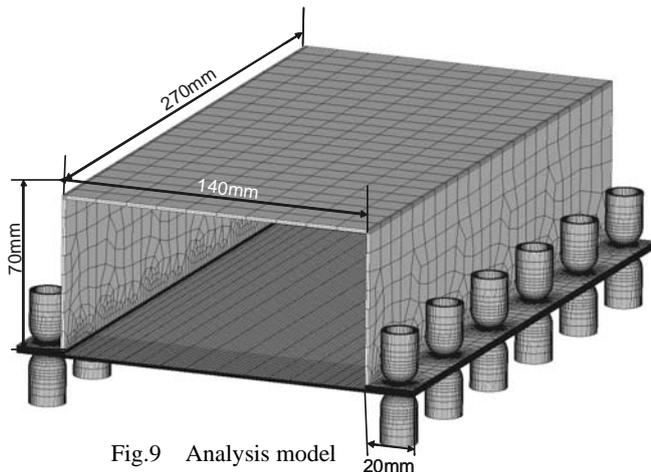


Fig.9 Analysis model

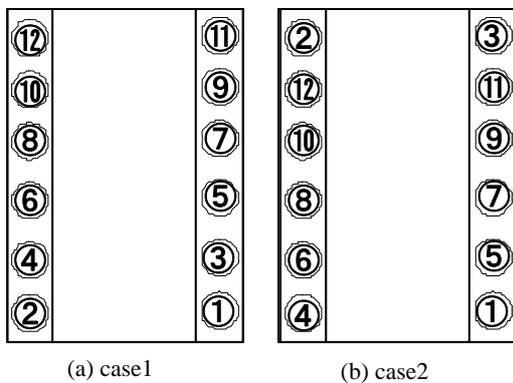


Fig.10 Welding sequence

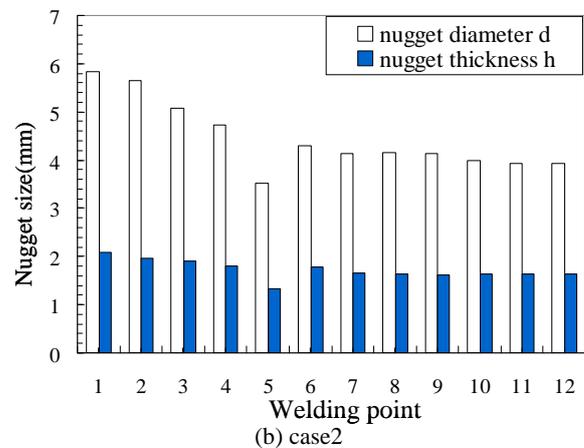
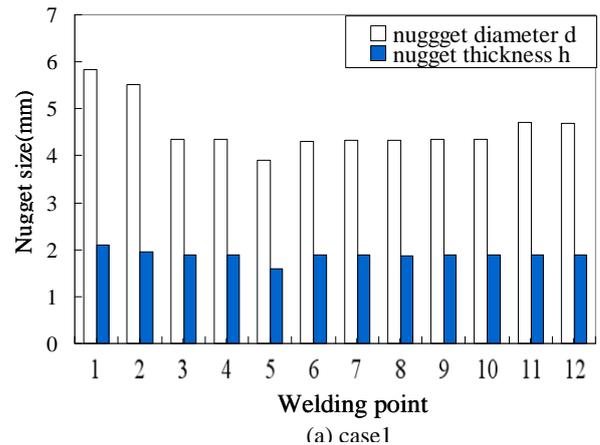


Fig.11 Influence of welding sequence on nugget size

## 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の開発を行った。この手法を用いて1点のスポット溶接と、4点のスポット溶接、片ハット部材(実施工モデルかつ12点スポット溶接)において、3次元連成シミュレーション解析を行った。結果、以下の知見を得た。

- 1) 1点のスポット溶接について
  - ・ 電極に流す電流の値が大きいほどナゲット径が大きくなることわかる。
  - ・ 通電サイクル数が増えるごとにナゲット径が大きくなる。
  - ・ 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を確認した。
- 2) 多点(4点)スポット溶接について
  - ・ 通電サイクルが増えるごとにナゲット径が大きくなる傾向がある。
  - ・ 溶接点が増えるほどナゲット径が小さくなることわかった。これは分流の影響と考えられる。
- 3) 片ハット部材のスポット溶接について
  - ・ 溶接点が進むごとにナゲットサイズが変化することを示し、実施工モデルへの本解析手法の適用可能性について示した。

## 参 考 文 献

- 1) MA Ninshu, MURAKAWA Hidekazu : Numerical and Experimental Study on Nugget Formation in Resistance Spot Welding for High Strength Steel Sheets in Automobil Bodies, Transaction of JWRI, Vol.38, No.2, pp.19-24
- 2) Y.Ueda, H.Murakawa and N.Ma:Computational Approach to Welding Deformation and Residual Stress (in Japanese),Sanpo-pub,Oct.2007, ISBN 978-4-88318-033-2
- 3) H.Murakawa, H.Kimura and Y.Ueda:Weldability analysis of spot welding on Aluminum using FEM, Trans of JWRI, Vol.24 , No.1, Mathmatic modeling of weld phenomena 3,Edited by H.Cerjack, pp.944-966, ISBN 1-86125-010-X
- 4) J.Zhang and H.Murakawa:FEM Simulation of the Spot Welding Process(Report2), Effect of Initial Gap and Electrode-type on Nugget Formation and Expulsion, Trans.JWRI.Vol27, No.2, 1998, pp73-79
- 5) H.Murakawa, J.X.Zhang and H.Minami:FEM Simulation of the Spot Welding Process(Report-3) Control of Welding Current Using Electrode Displacement for Formation of Large Enough Nugget without Expulsion, Trans.JWRI.Vol.28,No.1,pp41-46
- 6) MURAKAWA Hidekazu : Simulation of Resistance Welding for Selection of Optimum Welding Conditions and Process Control, Trans,JWRI, Vol.32, (2003), No.1