

SPOT 溶接シミュレーション技術の開発

Development of Resistance Spot Welding Simulation Technology

土井良 一 剛*

Kazuyoshi DOIRA

福 本 学**

Manabu FUKUMOTO

大 岡 久 康*

Hisayasu OHOKA

岡 村 一 男**

Kazuo OKAMURA

梅 野 好 和*

Yoshikazu UMEMO

上 田 秀 樹**

Hideki UEDA

要 旨

ABSTRACT

完成車における板組みの早期仕様決定と溶接条件設定の迅速化を目的に、ナゲット径を予測可能なSPOT溶接シミュレーション技術を開発した。本技術では有限要素法による電場・温度場・応力場の増分連成解析を用い、必要な材料物性は、SPOT溶接過程で生じる現象を考慮し選定した。さらに、選定した各材料物性は、化学成分と機械的特性から予測可能とした。また利便性という観点から、板組みや溶接条件を任意に入力できるソフトウェアの開発をおこなった。完成車の板組みにおいて精度検証をおこなった結果、ナゲット径を±5%の精度で予測できることが確認できた。本技術を用いることで、板組みの早期仕様決定ができ、溶接条件設定に要する時間の約45%を短縮できることが期待される。

A technology for simulating resistance spot welding process has been developed that is capable of predicting nugget diameter in automotive steel sheet weldments to determine the specifications of those weldments at an early stage and speed up setting welding conditions. An incrementally coupled analysis was performed for electrical, thermal and mechanical fields using a finite element code. The material properties relevant to this analysis were selected with reference to the phenomena occurring throughout the resistance spot welding process, and they can be predicted by using the chemical compositions and mechanical characteristics. Also, software was developed to aid entry of arbitrary steel sheet combination and welding condition. Verification tests of simulations indicated that nugget diameter was predicted with an accuracy of $\pm 5\%$. We expect that this simulation method will allow us to determine the specifications for automotive welded sheet combination at an earlier stage and reduce the time for setting welding conditions by approximately 45%.

1. まえがき

SPOT 溶接とは任意の加圧力下にて金属の接触箇所に通電を流し、界面での接触抵抗による発熱とジュール発熱(抵抗発熱)により接触部を加熱、溶融させ接合する方法である。歴史的に、この接合方法は生産性、信頼性の観点から自動車組立工程における接合部の大部分に使用されてきた。一方、近年、車体軽量化と衝突性能向上を両立させる必要性から、ボデー骨格部品への高強度鋼板の適用が拡大している⁽¹⁾。それにともないSPOT溶接で接合する鋼板の板組みも多種多様化してきており、これらの溶接条件をより最適

に、かつ迅速に設定することが求められている。従来、各板組みの溶接条件の設定は、引張試験や断面マクロ検査等の実験的な手法によりおこなわれてきたが、高強度鋼板の適用拡大にともない今後ますます増加傾向にある板組みの多様化と車体開発の迅速化に対し、これら実験的な手法だけでは対応が困難となりつつある。

そこで、完成車における板組みの早期仕様決定と溶接条件設定の迅速化を目的に任意の板組みでナゲット径を予測可能なSPOT溶接シミュレーション技術を開発した。

本稿では、ナゲット径予測に必要なシミュレーションモデルの概要および材料物性値の定義方法を中心に述べると

* 栃木研究所

** 住友金属工業株式会社

共に、操作性向上のために開発したソフトウェア、完成車に適用した場合に期待される効果について報告する。

2. 目標の設定

現在、SPOT溶接過程のシミュレーションについては、数多くの研究がなされており^{(2)・(4)}、市販されているソフトウェアもいくつか存在する。しかし、標準で用意されている必要な材料物性の種類が少ないため、解析できる鋼種や板組みが制限されてしまうという問題がある。そこで、完成車に用いられている汎用的な板組みに対し、より容易に溶接条件を設定できるようにするため、下記項目についてそれぞれ目標を設定した。

(1)シミュレーションモデル

複雑なプロセスをとる実際の SPOT 溶接過程を再現するには、電気的、熱的、力学的な現象を連成解析する必要がある。従って、採用するシミュレーションモデルの目標は、電場-温度場-応力場の連成解析が可能で、および各種鋼板の相変態温度や電気的、熱的、力学的な変化にともなう材料特性の予測が可能で、この二点とした。

(2)適用鋼種

現在、車体には軟鋼板から高張力鋼板まで多種多様な鋼板が適用されていることから、270 - 980MPa 級の代表的な鋼種について、任意の板組み、溶接条件にてシミュレーションでの解析が可能であることを目標とした。また耐食性の観点から、自動車用鋼板には合金化溶融亜鉛めっき鋼板(以下 GA 鋼板)が適用されているため、GA 鋼板についても非めっき鋼板同様の解析が可能であることをとした。

(3)精度目標

精度目標の対象は、溶接部の継手強度を考慮し、ナゲット径とした。

一般的に車体組立における各板組みの最適溶接条件は、必要となるナゲット径が得られる電流値からスパッタ発生までの電流値の範囲内で設定される。また、Fig. 1 に同厚二枚合せ

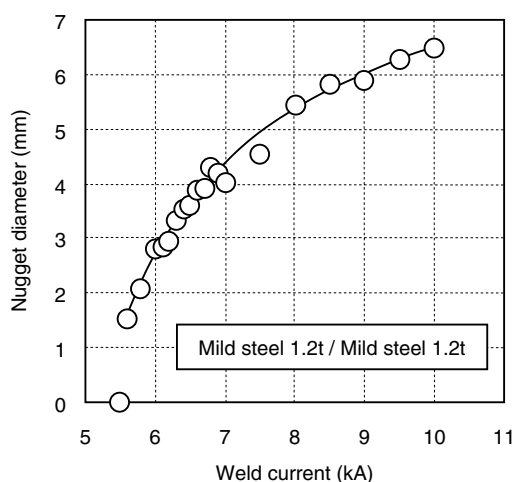


Fig. 1 Relationship between nugget and weld current

における溶接電流とナゲット径の関係を示すが、低電流域では溶接電流のわずかな違いによりナゲット径が大きく変化し、同一条件で溶接した場合でもその実測値自体のばらつきが大きくなる。従って精度検証に用いるナゲット径範囲としては、必要となるナゲット径からスパッタ発生限界電流で生成するナゲット径までが妥当であると考えた。

以上より、ナゲット径の精度目標値としては、実測ナゲット径のばらつきも考慮し、 $\pm 5\%$ 以内であることとした。

3. シミュレーションモデルの概要と材料物性

3.1. シミュレーションモデルの概要

シミュレーションモデルには Fig. 2 に示すように一对の電極と二枚以上の鋼板を含む板組みを二次元軸対称有限要素法モデルで近似したものを用いた。

SPOT 溶接での通電の初期段階における温度上昇は、界面での接触抵抗による発熱が支配的で、その発熱量は一般的に接触界面の温度と圧力に依存する⁽⁵⁾。これらの界面状態は鋼板の熱的変形にともない時々刻々と変化する。さらに加熱が進むと、ある温度域において結晶構造が変化する相変態や固体から液体への相変化が生じることから、機械的特性、熱線膨張係数といった材料物性が変化する。そこで SPOT 溶接現象を正確にシミュレーションするためには、温度上昇にともなう熱的な物性変化と変形過程を、冶金的な現象をふまえ、連成させて解く必要がある。開発したモデルでは、Fig. 3 に示すように、商用の非線形有限要素解析コードをベースとし、通電による鋼板の温度変化を計算する電場-温度場連成解析と鋼板の温度上昇にともなう機械的特性変化を計算する温度場-応力場連成解析を、材料物性の変化を考慮しながら、それぞれ十分小さな間隔で交互に繰り返す増分連成解析手法を構成した⁽⁶⁾。なお電場-温度場の計算には、温度場-応力場で計算された接触面積や圧力分布といった界面における接触の情報が反映され、温度場

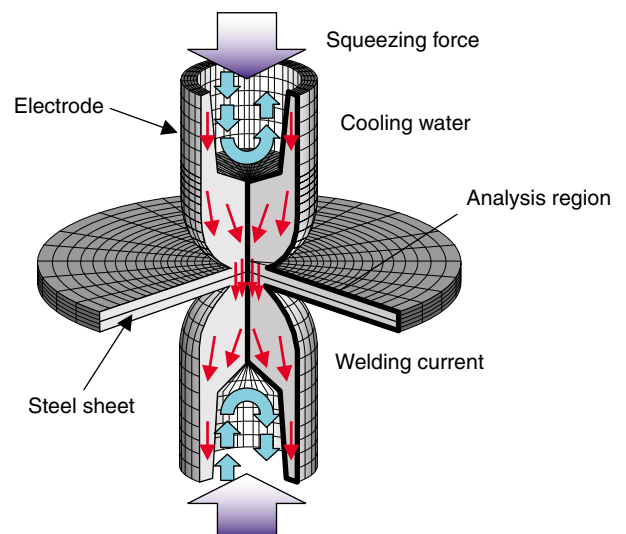


Fig. 2 Simulation model

一応力場の計算には、電場-温度場で計算された熱履歴が反映される。

3.2. 材料物性

目標精度を満足する結果を得るためには、適用鋼種全般にわたり、SPOT溶接過程の材料特性変化をシミュレーション上で考慮する必要がある。そこでシミュレーションに必要な材料物性の選定とそれら各物性の定義手法を検討した。

3.2.1. 必要材料物性の選定

SPOT溶接過程を、Fig. 4に示すように(1)加圧・通電、(2)発熱・溶融、(3)冷却の三つに分け、それぞれにおいて必要な材料物性の選定をおこなった。

(1)加圧・通電 SPOT溶接は一定形状の電極により鋼板を加圧した状態で通電が開始される。通電が始まると鋼板は界面接触抵抗による発熱とジュール発熱により温度上昇し、後述するSPOT溶接の発熱現象に対して重要なパラメータとなる界面の接触面積と接触圧力が変化する。これは温度上昇にともなう鋼板の熱的変形に起因しているため、材料物性として機械的特性と熱線膨張係数の変化を定義することが必要である。従って、加圧・通電における必要材料物

性は温度依存性を考慮した応力-歪関係(S-S特性)および熱線膨張係数と決定した。

(2)発熱・昇温 SPOT溶接による発熱は接触抵抗による発熱とジュール発熱の二つにより生じる。

通電初期に生じる接触抵抗については、いくつかのモデル式が報告されているが、本シミュレーションでは(1)式に示す Babu らによる界面抵抗モデル⁽⁷⁾を適用した。

$$R_{CA} = (\rho_1 + \rho_2) \times \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi \sigma_y}{\eta P}} + \frac{3\pi}{16 \sqrt{\eta}} \right] \quad (1)$$

(R_{CA} : 接触抵抗, ρ_1 および ρ_2 : 電気抵抗率, σ_y : 降伏応力, P : 接触圧力, η : 接触圧力 P の関数)

ある抵抗値の金属に電流を一定時間流した時に生じるジュール発熱量は(2)式で表現できることが知られている⁽⁸⁾。

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

(Q : ジュール発熱量, R : 抵抗値, I : 電流, t : 時間)

ここで(2)式を鋼板の材料物性である電気抵抗率と鋼板の温度上昇により変化する電流密度で整理すると、計算に必要な単位時間あたりのジュール発熱密度は、(3)式で表

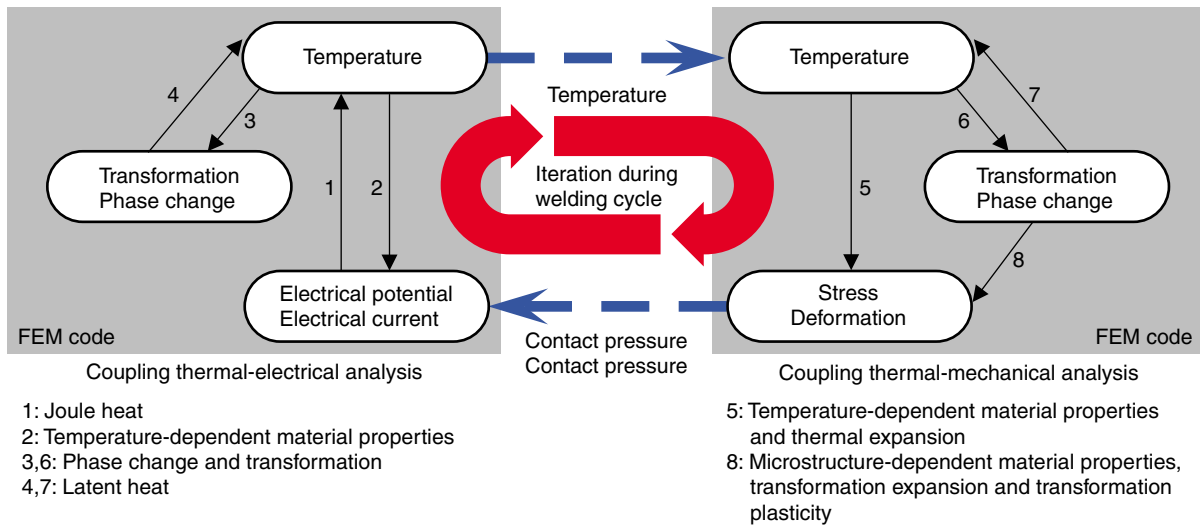


Fig. 3 Schematic illustration of the incrementally coupled electrical-thermal-mechanical analysis procedure

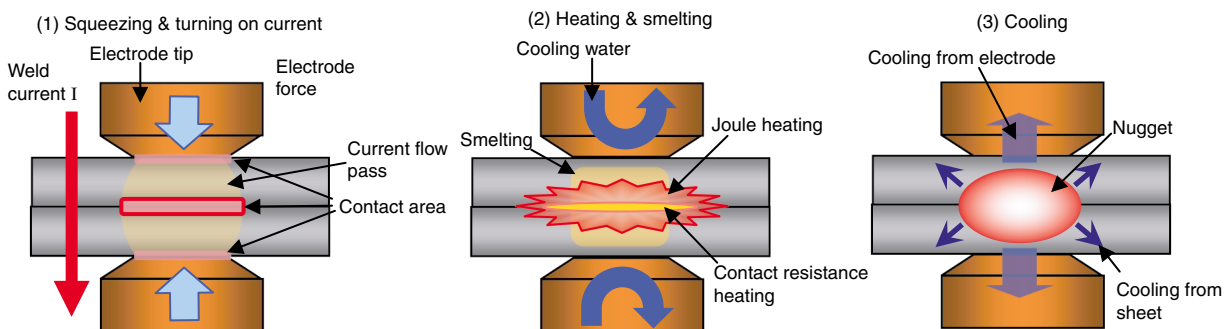


Fig. 4 Schematic explanation of the SPOT welding process

すことができる。

$$q_v = \rho \times \delta^2 \times t \quad (3)$$

$$\rho = R \times \left(\frac{S}{l} \right), \quad \delta = \frac{l}{S}$$

(q_v : 単位時間、単位体積あたりのジュール発熱, ρ : 電気抵抗率, δ : 電流密度, t : 通電時間, S : 接触面積径, l : 板厚)

SPOT 溶接過程において Δt 時間内に発生した熱量と鋼板の温度上昇の関係は、(4)式に示すように、発生した熱量と鋼板の材料物性である比熱、密度の関係によって上昇する。

$$\Delta\theta = \frac{q_v \Delta t}{(c \times D)} \quad (4)$$

($\Delta\theta$: 温度上昇, c : 比熱, D : 密度)

従って、(1)式で定義した界面接触抵抗による発熱と(3)式で定義されるジュール発熱量および(4)式で表される熱量と温度上昇の関係から、発熱・昇温で必要となる材料物性値は電気抵抗率、降伏応力、比熱、密度と決定した。

(3)冷却 一般的に温度差のある物体内ではフーリエの法則に従って、(5)式に示す物体の熱伝導率と温度勾配に依存した形で、単位時間あたりの熱量の移動が生じる。

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (5)$$

(q : 熱流束, λ : 熱伝導率, $\text{grad}(T)$: 温度勾配)

SPOT 溶接過程では、通電による発熱と電極および鋼板の熱伝導による冷却が同時に起こるため、冷却における必要材料物性を熱伝導率と決定した。

以上より、SPOT 溶接シミュレーションに必要な材料物性値としてS-S特性、熱線膨張係数、電気抵抗率、比熱、密度、熱伝導率の六つを選定した。

3.2.2. 材料物性値の定義

前項で選定した各材料物性は、すべて温度依存性を考慮する必要があるが、すべての鋼板についてそれらを実測することは非常に複雑な実験プロセスと多くの時間を要するという問題がある。そこでシミュレーションの利便性と迅速化という観点から、各物性について比較的容易に入手可能な材料物性である室温での機械的特性や化学成分等を用い予測することが必要と考えた。

(1)S-S 特性 S-S 特性については、温度依存性を考慮する必要があるが、より簡易に特性定義が可能となるよう近似式の検討をおこなった。

まず温度依存性を把握するため、各鋼種について S-S 特性の温度変化を測定した。Fig. 5-1に軟鋼板と高張力鋼板の S-S線図の実測値を示す。両鋼種とも高温になるほど強度は低下し、800℃では鋼種間の強度差異がほとんどなくなることがわかる。この理由として、結晶粒成長や相変態が生じる高温域では、鋼板の化学成分や常温でのミクロ組織の影響

がほとんどなくなるためと考えられる。

次に S-S 特性の温度依存性を規格化するために、引張強度と降伏強度の温度依存性に着目した。Fig. 5-2, Fig. 5-3に

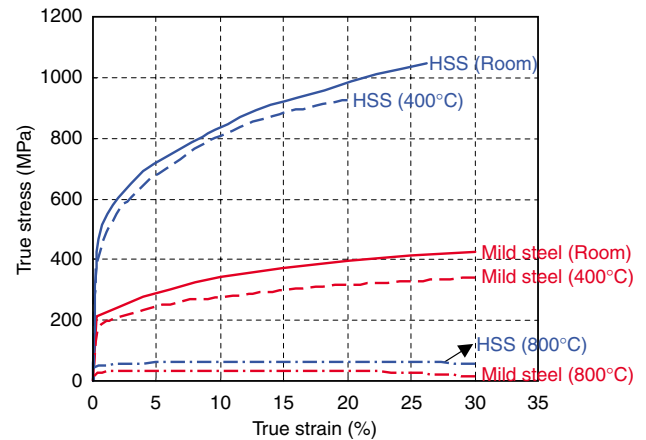


Fig. 5-1 S-S curve of mild steel and high-strength steel (HSS)

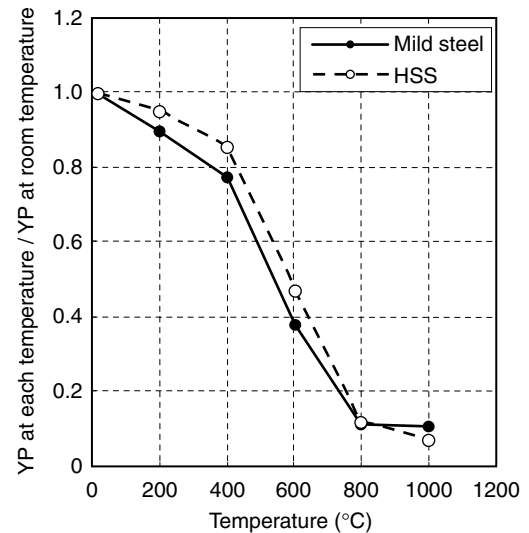


Fig. 5-2 Dependence of 0.2% proof stress on temperature

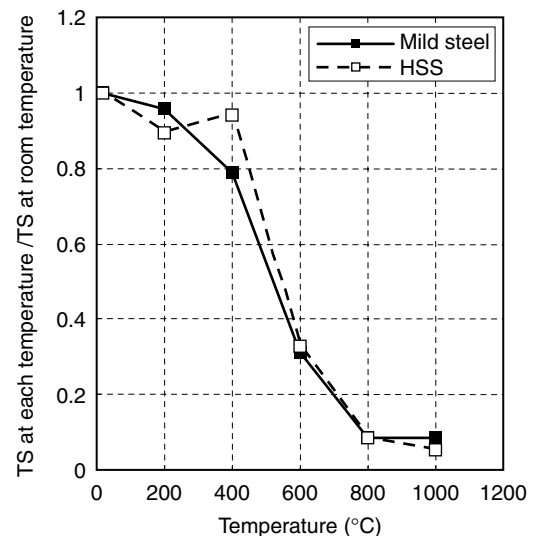


Fig. 5-3 Dependence of tensile strength on temperature

示すように、降伏強度および引張強度は温度の関数として整理することが可能である。

以上より、S-S特性の温度依存性について室温での降伏強度、引張強度、温度を変数とした近似式を構築することができ、室温時の上記物性値の入力のみで高温での S-S 特性を定義できるようになった。

(2)熱伝導率 一般的に金属の熱伝導率は自由電子による熱の伝達が大半をしめ、金属原子の熱振動、固溶元素等により影響を受けることが知られている。そこで、まず化学成分、温度を変数とし、結晶構造の違いにより場合分けした Miettinen の式⁽⁹⁾による検討をおこなった。その検討結果を Fig. 6-1 に示す。軟鋼板については、実測値と計算値でほぼ同等の値を示したものの、高張力鋼板では800℃以下で大きな離が生じている。

そこで筆者らは、この原因として Miettinen の式に要素

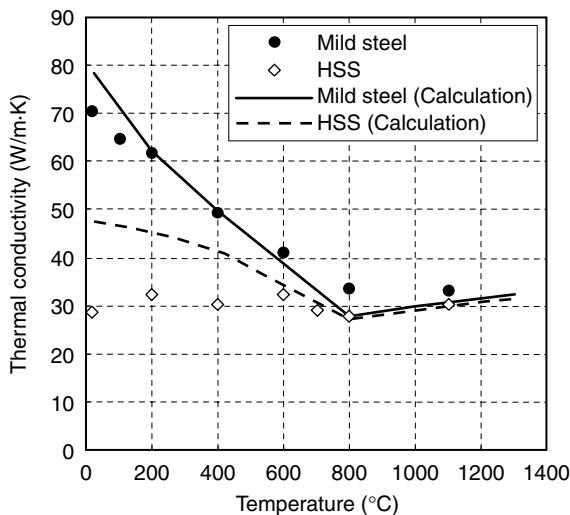


Fig. 6-1 Comparison of thermal conductivity between measurements and predictions by Miettinen's formula

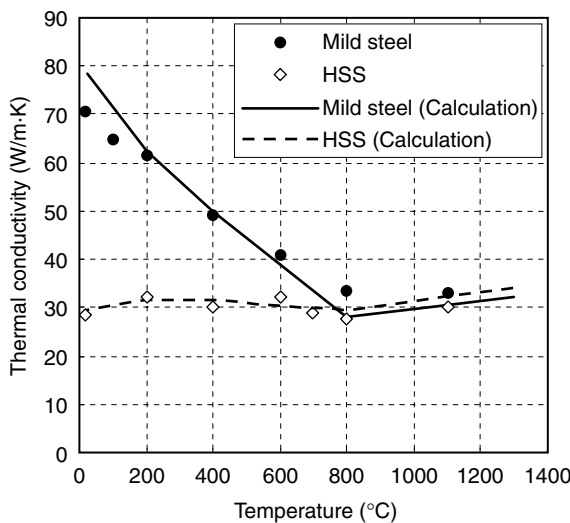


Fig. 6-2 Comparison of thermal conductivity between measurements and predictions by modified Miettinen's formula

として含まれていない元素の影響があると考え、それらの影響を加味した熱伝導率の近似式を構築した。その検証結果を Fig. 6-2 に示す。

構築した近似式による計算値と実測値は鋼種を問わず良好な相関をみせており、化学成分と温度の入力のみで熱伝導率を定義できるようになった。

(3)電気抵抗率 金属では自由電子による大きな熱伝導が支配的であるため、熱伝導率と電気抵抗率の間には(7)式に示す Wiedemann - Franz 則(以下 W - F 則)という逆比例関係が成り立つことが知られている⁽¹⁰⁾。

$$\lambda \rho = L \cdot (T + 273) \quad (7)$$

$$L = 2.45 \times 10^{-8}$$

(λ : 熱伝導率, ρ : 電気抵抗率, T : 温度, L : ローレンツ数)

そこで、まず電気抵抗率の近似式として、W - F 則の適用を検討した。Fig. 7-1 にその検討結果を示す。W - F 則から算出した計算値は、特に高張力鋼板において実測値に対し低めの値となっており、軟鋼板と高張力鋼板の差異についても十分に表現できていなかった。これは W - F 則では、ともに自由電子の移動に影響をおよぼす固溶元素の依存度が熱伝導率と電気抵抗率において、同等であるとして計算されるが、鋼板の場合には必ずしもあてはまらないと考えられる。

そこで筆者らは、金属の電気抵抗は自由電子が金属結晶を構成している原子と衝突することにより生じることから、影響因子として鋼板中に含まれる固溶元素と母材原子の熱振動があると考えた。固溶元素はC, Si, Mn等であらわされる鋼板の化学成分値とし、母材原子の熱振動は温度の関数として表現することとした。以上より、実測値をベースに

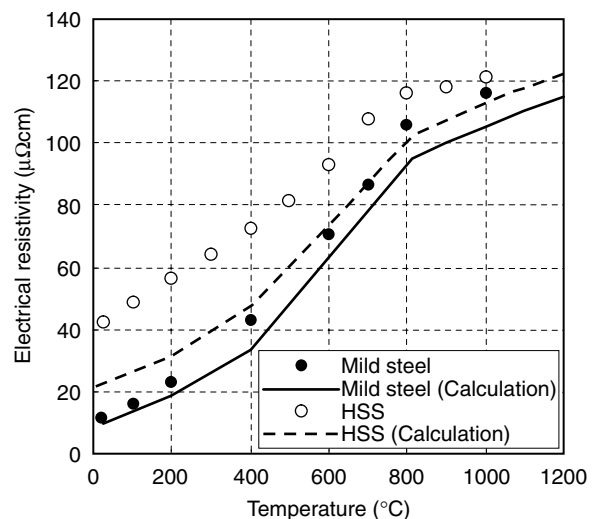


Fig. 7-1 Comparison of electrical resistivity between measurements and predictions by W-F Law

鋼種間差異を表現できるような近似式の構築をおこない、それを用いた検証結果を Fig. 7-2 に示す。W - F 則を用いた場合に比べ、実測値との相関も良く、鋼種間差異についても十分表現できるようになった。

(4)比熱 鋼板の比熱については、系統だった知見がなく鋼種間差異も不明確であったため、各鋼種における温度変化を実測した(Fig. 8)。実測結果より、比熱について鋼種間差異は認められないため、各温度における比熱は鋼種を問わず一定の値で定義することとした。

(5)密度および熱線膨張係数 密度については、従来より含有される炭素量と温度をパラメータとした Jablonka らの計算式⁽¹¹⁾が知られている。一方、自動車用鋼板はC以外にも Si, Mn 等他の添加元素により特性が大きく変化することから、本モデル式としては Jablonka らの式に Si, Mn, Cr, Mo の影響を追加した(8-1)から(8-3)式で表現される Miettinen の式⁽⁹⁾を適用した。

(オーステナイト)

$$\begin{aligned} \rho_v = & 8099.79 - 0.506T + (-118.26 + 0.00739T)C_c \\ & - 68.24C_{Si} - 6.01C_{Mn} + 12.45C_{Mo} + (-7.59 + 3.422 \cdot 10^{-3}T - \\ & 5.388 \cdot 10^{-7}T^2 - 0.014271C_{Cr})C_{Cr} + (1.54 + 2.267 \cdot 10^{-3}T - \\ & 11.26 \cdot 10^{-7}T^2 + 0.062642C_{Ni})C_{Ni} \end{aligned} \quad (8-1)$$

(フェライト)

$$\begin{aligned} \rho_a = & 7875.96 - 0.297T - 5.62 \cdot 10^{-5}T^2 \\ & (-206.35 + 0.00778T + 1.472 \cdot 10^{-6}T^2)C_c - 36.86C_{Si} - \\ & 7.24C_{Mn} + 30.78C_{Mo} + (-8.58 + 1.229 \cdot 10^{-3}T + 0.852 \cdot 10^{-7}T^2 \\ & + 0.018376C_{Cr})C_{Cr} + (-0.22 - 0.470 \cdot 10^{-3}T - 1.855 \cdot \\ & 10^{-7}T^2 + 0.104608C_{Ni})C_{Ni} \end{aligned} \quad (8-2)$$

(セメンタイト)

$$\rho_{Ce} = 7686.45 - 0.0663T - 3.12 \cdot 10^{-4}T^2 \quad (8-3)$$

熱線膨張係数に関しては、フォーマスター試験機にて温度と伸びの関係を実測しなくても、密度の温度変化から(9)式を適用して求めることができる。(9)式における密度には、(8)式により算出した値を用いることで、鋼板の化学成分の影響を反映できることから、この方法を採用した。

$$\alpha(T) = \frac{1}{T - T_R} \left[\sqrt[3]{\frac{\rho(T_R)}{\rho(T)}} - 1 \right] \quad (9)$$

($\alpha(T)$: 熱線膨張係数, T : 任意の温度, T_R : 室温,

$\rho(T)$: 任意の温度 T での密度, $\rho(T_R)$: 室温での密度)

3.3. めっき層の影響

完成車には、耐食性を確保するため、めっき鋼板が適用されている。従って、完成車板組みを想定した場合、めっき層の影響をシミュレーションへ反映する必要がある。

一般的にめっき鋼板は非めっき鋼板と比較して、同等のナゲット径を得るためには、高い溶接電流値が必要となる。その主たる要因は、母材である鉄の融点よりも低融点

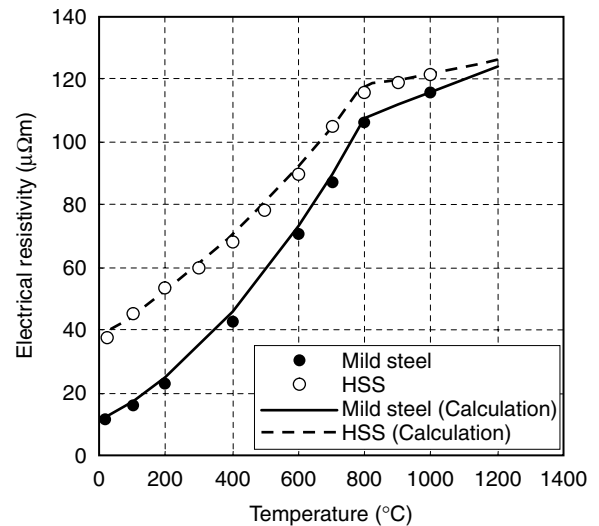


Fig. 7-2 Comparison of electrical resistivity between measurements and predictions using our modified equations

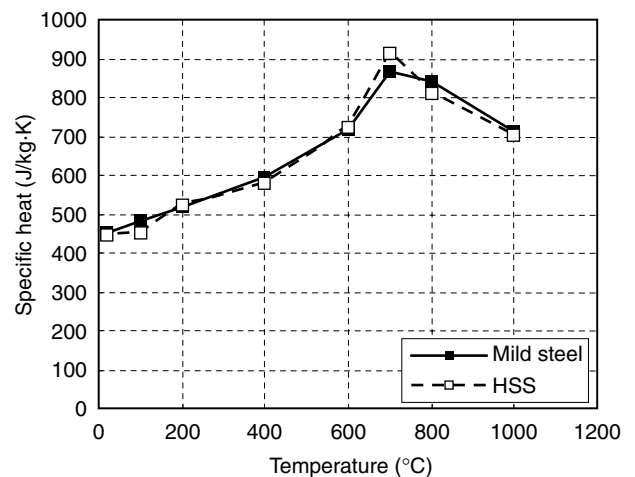


Fig. 8 Relationship between temperature and actual specific heat

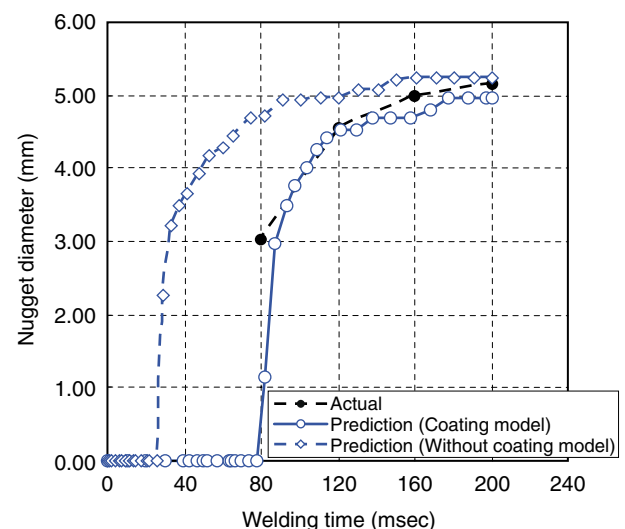


Fig. 9 Verification result of coating model

Table 1 Material properties of two-sheet combination

Sheet combination	Material	t mm	Mechanical properties		
			YP MPa	TS MPa	EI MPa
	HSS	1.6	432	811	27
	HSS	1.6	432	811	27

Table 2 Material properties of three-sheet combination

Sheet combination	Material	t mm	Mechanical properties		
			YP MPa	TS MPa	EI MPa
	Mild steel	0.7	138	305	49
	HSS	1.6	463	832	26
	HSS	2.0	568	631	18

なめっき層が先に溶融し、通電径が拡大することでジュール発熱により発生する熱量が少なくなるためであると考え、めっき層の影響として、通電径が拡大する現象をモデル化し、シミュレーションへ反映した。その効果をFig. 9に示す。めっき層の影響をシミュレーションに反映することで、計算値はナゲット生成初期段階から実測値を正確に表現できており、非めっき材同様の解析ができるようになった。

4. ソフトウェアの開発

本シミュレーションを実行するためには、任意の板組みと電極形状に対し、モデルの作製、境界条件の設定、材料物性および溶接条件の入力が必要である。これを商用の非線形有限要素解析コード上で解析用入力ファイルとして直接作製するためには、FEM解析や冶金学等の専門知識および習熟が必要である。そこで、ユーザフレンドリなインタフェースソフトウェアを開発した。

このソフトウェアを用いる事で、解析したい鋼種や板厚等の板組み情報と加圧力、通電時間、溶接電流といった溶接条件を簡単に入力できるようになり、誰でもが専門的な知識を必要とせず簡単に解析可能となった。これは解析の迅速化という観点でも非常に有効だと考えられる。

5. シミュレーション精度検証結果

代表的な完成車の板組みとして、同厚二枚合せ(Table 1)と異厚三枚合せ(Table 2)を例に、本シミュレーションの精度検証をおこなった。その結果をFig. 10およびFig. 11-1, Fig. 11-2に示す。両ケースとも計算値は実測値と良好な相関を示しており、ナゲット径を精度良く予測できている。以上より、本シミュレーションは、完成車板組みにおいてもナゲット形成を初期段階から精度良く予測できることが確認でき、目標である±5%以内の精度目標値も満足できた。

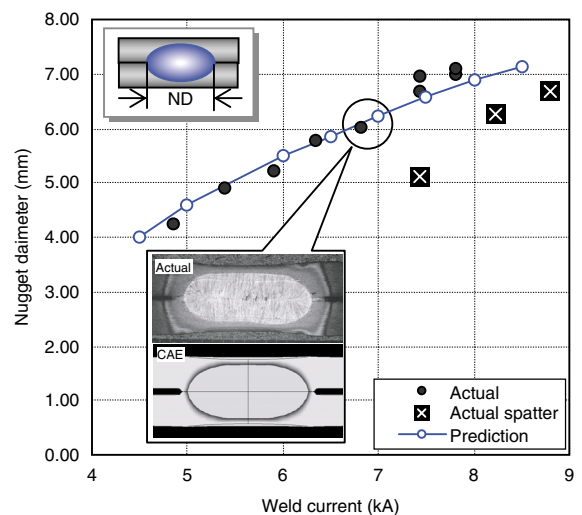


Fig. 10 Comparison of actual nugget diameter and predicted nugget diameter (two-sheet combination)

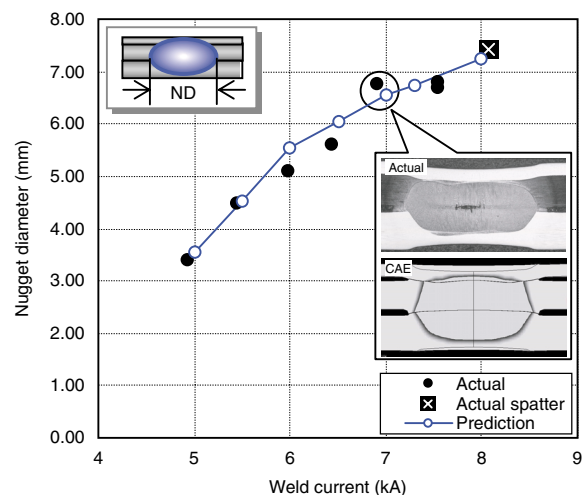


Fig. 11-1 Relationship between welding current and nugget diameter in actual sheet combination

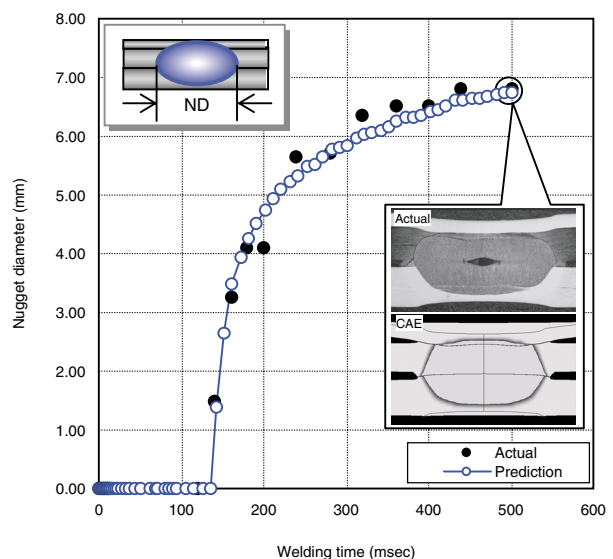


Fig. 11-2 Relationship between welding time and nugget diameter in actual sheet combination

6. 適用による効果

本シミュレーションを車体開発の中で適用した場合の効果として、板組みの早期仕様検討と溶接条件設定の迅速化が上げられる。現状、仕様検討および条件設定は、引張試験および断面マクロ検査といった実験的手法によりおこなわれているため、多くの時間が必要となっているが、本シミュレーションを活用することで、完成車における板組みの溶接可否検討を机上計算することが可能となり、早期仕様検討がおこなえる。また、溶接条件設定に関しては、断面マクロ検査によるナゲット径実測の工程を省略できる可能性があり、最大で約 45%の時間短縮が期待される。

7. まとめ

完成車板組みの SPOT 溶接条件適正化のため、電場・温度場・応力場の増分連成解析で構成された SPOT 溶接シミュレーション技術を開発した。

- (1) 電場-温度場-応力場の増分連成解析に必要な材料物性値を選定し、化学成分および機械的特性値により特性予測が可能なモデル式を構築した。
- (2) 合金化溶融亜鉛めっきの影響をシミュレーションへ反映することができた。
- (3) 任意の板組み、溶接条件を簡易にデータ入力できるソフトウェアを開発し、専門知識を持たずとも迅速に解析結果が得られるようにした。
- (4) 完成車板組みに対し、目標を満足する精度でナゲット生成過程を予測することができた。
- (5) 本シミュレーションを適用した場合、板組み仕様の机上検討が可能になるとともに、溶接条件設定の際、約 45%の時間短縮が期待される。

参考文献

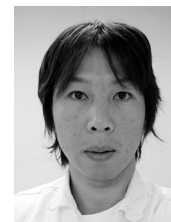
- (1) 種植隆浩, 金子勝吉: 590/780MPa 級高延性型鋼板の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.2, p.183-190
- (2) Murakawa, H.: Simulation of Resistance Welding for Selection of Optimum Welding Condition and Process Control, Transactions of JWRI, Vol.32, No.1, p.215-218 (2003)
- (3) De A., Thaddeus M P., Dorn L.: Numerical Modelling of Resistance Spot Welding of Aluminium Alloy, ISIJ International, Vol.43, No.2, p.238-244(2003)
- (4) Bang, H.S., Joo, S.M., Kim, J.M., Chang, W.S.: Mechanical characteristics of resistance multispot welding joints, Science and Technology of Welding & Joining, Vol.8, No.5, p.369-376(2003)

- (5) Holm, R.: Electric Contacts, Springer — Verlag(1967)
- (6) Fukumoto, M., Fujimoto, H., Okamura, K., Fukui, K.: Finite Element Simulation of Resistance Spot Welding Process, IBEC 20037083, 2003-01-2806
- (7) Babu, S. S., Santella, M. L., Feng, Z., Riemer, B. W., Cohron, J. W.: Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.6, No.3, p.126-132(2001)
- (8) 浮田 勇, 安陪 稔: 電気工学概論, 国民科学社, p.224 (1972)
- (9) Miettinen, J.: Calculation of Solidification - Related Thermophysical Properties for Steels, Metallurgical and Material Transaction, 28B, p.281-297(1997)
- (10) 東京大学物性研究所編, 物性科学辞典, 65(1996)
- (11) Jablonca, A., Harste, K., Scwerdtfeger, K.: Thermophysical iron-carbon alloys: density and thermal contraction, Steel Research International, Vol.62, p.24-33 (1991)

■ 著 者 ■



土井良一剛



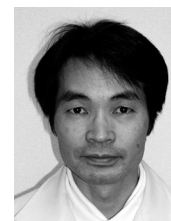
大岡久康



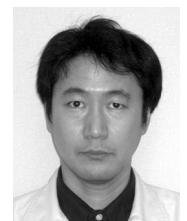
梅野好和



福本 学



岡村一男



上田秀樹