

溶接現象のモデル化

— NEDOプロジェクトから —

大阪大学

大学院 工学研究科

黄地 尚義

溶接現象のモデル化

——NEDOプロジェクトから——

大阪大学大学院 知能・機能創成工学専攻
○黄地尚義、宮坂史和、山本 剛、辻 陽子

0. はじめに

技術者は、与えられた溶接構造物に対し、適切な溶接施工法、施工条件を選択・決定しなければならない。この決定には高度な技術的判断が要求され、技術者には各施工法に関する広範かつ深い知識が必要とされる。溶接現象の解析手法としてシミュレーションが有用であることは言うまでもないが、施工法の選択、施工条件の設定・最適化など、技術者の意思決定を支援するツールとしてもシミュレーションは重要である。

このような観点から、平成12年度に経済産業省のプロジェクト『溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発』がスタートした。このプロジェクトは5年計画で、「シミュレーションによる溶接技術の高度化」を目指している。計画を具体化するため、シミュレーションに関する3つの分科会：溶接プロセス、金属組織、溶接変形、が設置されている。各分科会では、それぞれのシミュレーション技術を研究・開発することを主たる目的として、精力的に活動している。これに加えて、本プロジェクトでは、これら3つのシミュレーション分科会の成果を統合化し、プロセスから金属組織、溶接変形までを包括的に予測・推定できるシステムについても提案・検討している。

ここでは、まず、溶接プロセスのシミュレーションモデルの開発状況について簡単に述べ、次いで、上述のモデル統合化システムと、その可能性について検討した結果を紹介する。

1. 溶接プロセスのシミュレーションモデル

本プロジェクトで提案・検討した溶接プロセスモデルを Fig. 1 に示す。ここでは、モデルの複雑さを回避し、演算時間を短縮するため、溶接部の熱輸送は熱伝導により支配されるものと仮定している。また、溶接プール表面は、重力、表面張力、アーク圧力の平衡により決定されるものと仮定している。このような仮定のもとで、例えば、平板上の溶接部の温度場と溶接プールの表面形状は、次のように表現される。

$$\rho(T) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right\} + \frac{\partial}{\partial Y} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial Y} \right\} + \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ K(T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right\} \quad (1)$$

$$\sigma \left[\frac{(1 + \phi_y^2) \phi_{xx} - 2\phi_x \phi_y \phi_{xy} + (1 + \phi_x^2) \phi_{yy}}{(1 + \phi_x^2 + \phi_y^2)^{3/2}} \right] = \rho g \phi + Pa - \lambda \quad (2)$$

ここで、 ρ : 密度、 H : エンタルピー、 K : 熱伝導度、 T : 温度、 ϕ : 表面変位、 σ : 表面張力、 g : 重力、 Pa : アーク圧力、 λ : ラグランジュ乗数

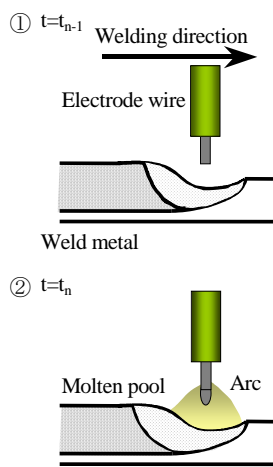


Fig.1 Model of MAG arc welding

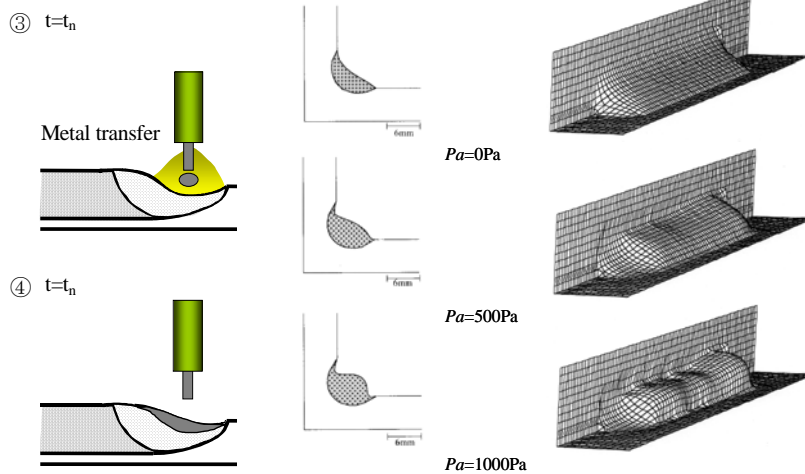


Fig.2 Effect of arc pressure on horizontal fillet weld
($I=230A$, $V=25V$, $v=40cm/min$)

Fig. 2 は、MAG溶接プロセスモデルによる計算例で、水平隅肉溶接に及ぼすアーク圧力 Pa の影響を示している。右図が溶接ビードの形態で、左図がほぼビード中央部におけるビード横断面の形状である。図から、アーク圧力が強くなるにつれてビードの形成が不規則となり、アンダーカットが形成されることがわかる。また、図は、アーク圧力の増加につれてプール表面が押し下げられ、アークによる熱が、この表面上に投与される結果、溶込みが深くなることを示している。

Fig. 3 は、多パス溶接に関する計算例で、下向の隅肉溶接を対象としている。各パスとも同じ溶接パラメータを用いているにもかかわらず、パス数の増加につれて、母材（ワーク）に熱が蓄積される結果、母材の溶込みが増大していくことがわかる。当然のことながら、多パス溶接においては、溶接部の金属は複雑な熱影響を受けることになる。

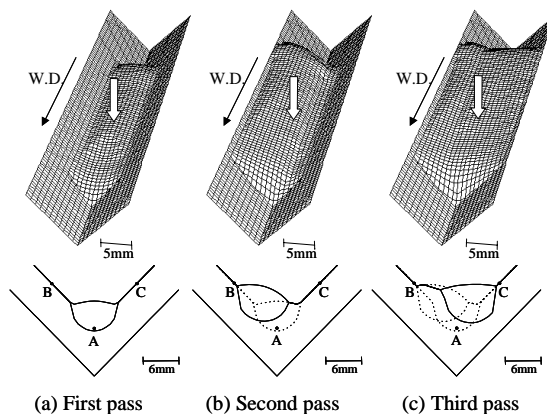


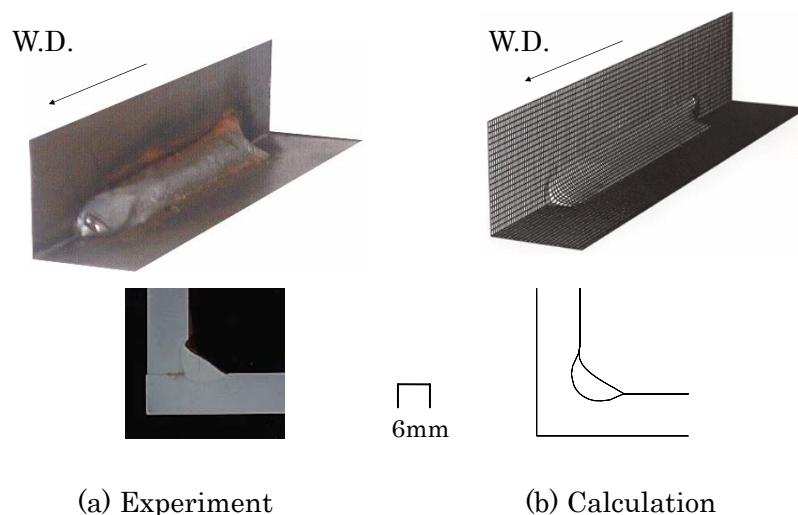
Fig.3 Multi-pass welding

[$I=230A$, $V=25V$, $v=40cm/min$, $Pa=800Pa$]

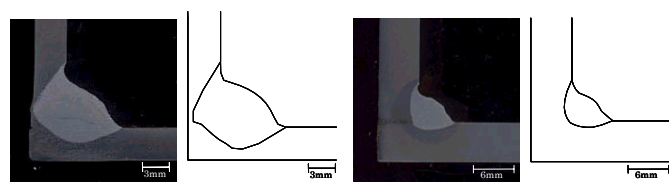
以上では、プロセスモデルによる計算例を簡単に紹介した。このモデルは、実施工で用いられるウィービング付きの溶接や各種姿勢溶接へも容易に適用できる。以下、このモデルについて実験的に検討した結果を簡単に述べる。

2. モデルに関する実験的検討

Fig. 4 は、水平隅肉マグ溶接に関する計算と実験の結果を対比したものである。上部に溶接ビードの外観の比較を、下部にビード中央部におけるビード断面形状の比較を示している。図のように、両者の対応関係は、良好である。Fig. 5 は、板厚を変化させた場合のビードの断面形状に関する実験と計算の比較である。ここでも、両者の対応関係は、極めて良好である。すなわち、これらの図は、ここで提案したモデルが、アーク入熱、アーク圧力等のモデルパラメータを的確に選定してやれば、かなりの程度まで実際の溶接現象をシミュレートできることを示している。



(a) Experiment (b) Calculation
Fig.4 Comparison between experiment and calculation
in horizontal fillet welding
($I=230A$, $V=25V$, $v=60cm/min$)



(a) Plate thickness: 3mm (b) Plate thickness: 6mm
Fig.5 Influence of plate thickness on weld profile
($I=230A$, $V=24V$, $v=40cm/min$)

3. 溶接プロセスシミュレーションソフト"Virtual Weld"の試作

上述のように、本研究で提案した溶接プロセスモデルは、生産現場における溶接プロセスをシミュレートするツールとして十分有用であると判断できる。このような観点から、筆者らは、実際の MAG/TIG 溶接を対象とする溶接プロセスシミュレーションソフトを開発中である。ここでは、その概要を簡単に紹介する。

Fig. 6 は、現在試作中のソフトのメニュー選択画面である。ソフト化の手始めとして、試作中のソフトは、溶接現場で用いられる基本的な継手を対象とし、演算時間を短縮する目的

から、比較的小さなワークを前提としている。具体的には、T-継手、突合せ継手に加えてパイプ継手のソフト化を試みている。図のような入力画面を採用することにより、対象となるワークとそのサイズが比較的簡単に入力できる。

Fig.7 は、MAG溶接プロセスのシミュレーション例である。このソフトでは、入力された溶接条件によるシミュレーションの結果を、図示のような要領で出力する。すなわち、溶接ビードの形状・寸法に加え、任意の点における温度履歴が出力できる。また、溶接ビードの形成プロセスを動画として再現できるようになっている。

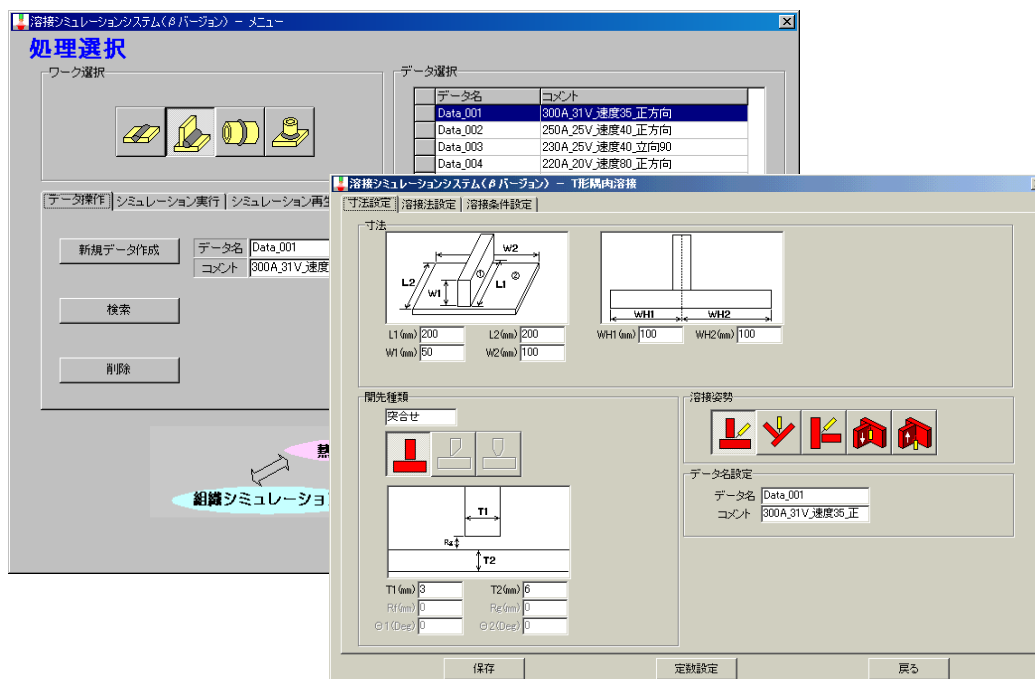


Fig.6 Screens of menu-selection on the software under

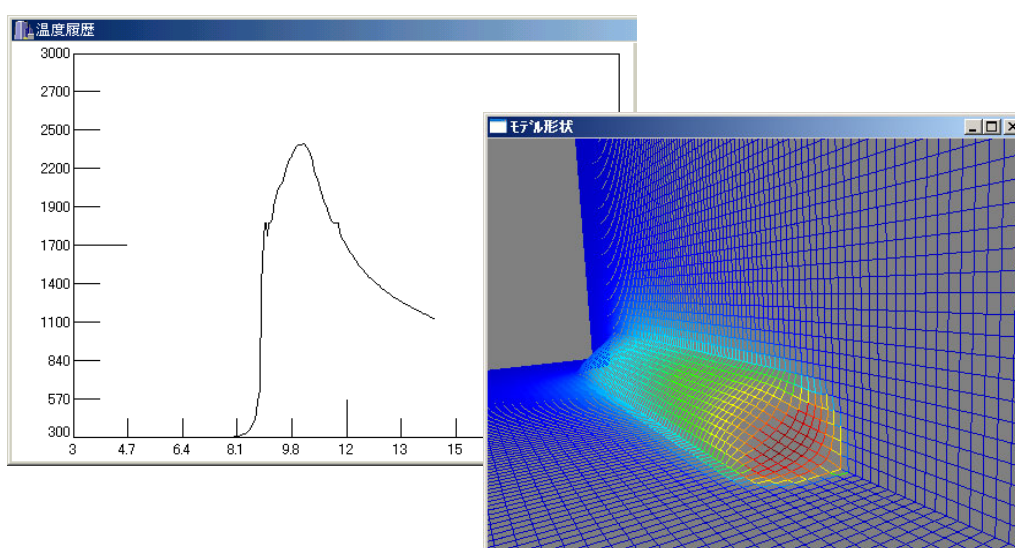


Fig.7 Output-screens of the software under development (temperature and weld-bead profiles)

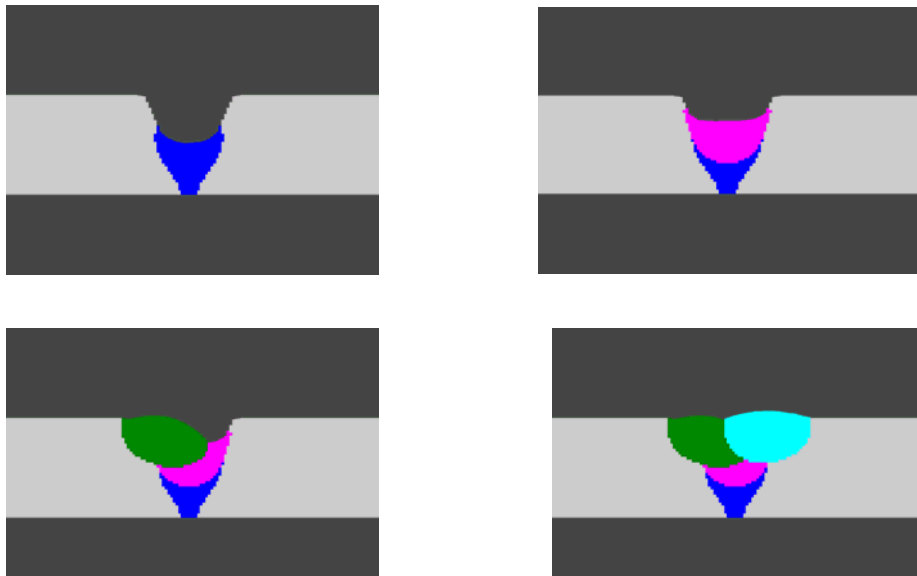


Fig.8 Simulation of multi-pass MAG welding (SM490, 12mmt)
 (I=230A, V=26V, v=40cm/min, V-groove (50°))

Fig. 8 は、板厚 12mm の SM材の突合せ溶接を対象としたもので、4 パス・3 層溶接のシミュレーション例である。突合せ溶接に関しては、初層ビードの取扱い、例えばバック材やギャップの取扱い、に課題を残している。なお、このソフトは、多パス溶接の他、ウィーピング溶接、2 電極（タンデム）アーク溶接等に対応できる。

4. モデル統合化による溶接設計支援システムの提案と検討

筆者らは、開発した溶接プロセスモデルを、溶接金属組織・溶接変形モデルとリンクさせ、溶接プロセスから金属組織・変形までをトータルに予測・推定できるシステムを試作・検討している。

Fig. 9 に試作中のシステムのイメージ、すなわち、*Virtual Welding System*を示す。

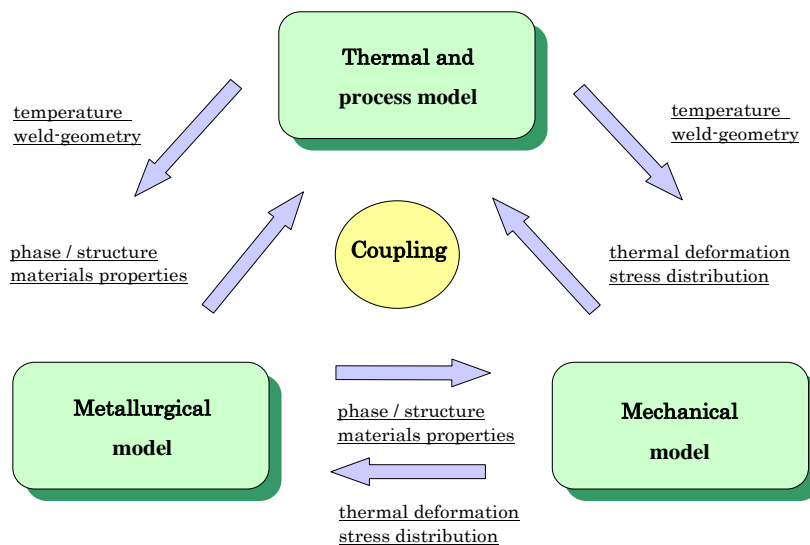


Fig.9 Virtual welding system based on model-coupling

このシステムの特徴は、溶接プロセスのシミュレーション結果をベースに、溶接に伴う材料組織の変化、さらには溶接変形や残留応力分布の予測などをリンクさせ、これらを含めて、シミュレーションの対象としていることである。すなわち、プロセスモデルは、継手形式と開先形状、溶接電流や速度等の溶接パラメータを入力としてシミュレーションを実行し、その結果、たとえば温度場と熱履歴、溶接ビードの形状・寸法を出力する。さらに、溶接変形モデルでは、プロセスモデルの出力結果を入力とし、溶接変形と残留応力状態を予測・推定する。もちろん、その結果を組織モデルとプロセスモデルにフィードバックすれば、溶接変形をリアルタイムでプロセスシミュレーションに反映させることもできる。なお、システムを構成している各モデルをモジュール化しておけば、モデル単体でも利用できるし、モジュールを取替えることにより、多様なシステムが構築できることになる。

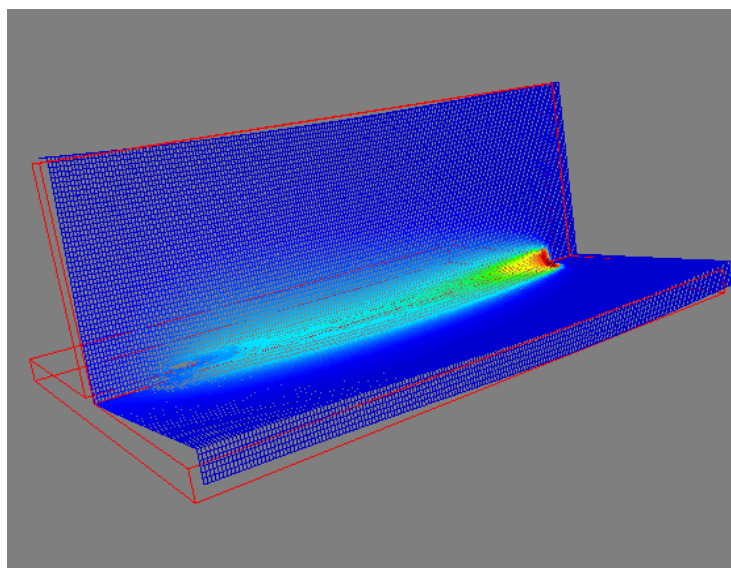


Fig.10 Deformation of work-piece in T-joint welding

Fig. 10 は、開発中のモデル統合化システムの出力例である。図は、T-継手のマグ溶接に関するもので、赤い実線で示した部分が、溶接前の部材形状を、網がけした部分が、溶接後の部材形状を示している。

当然のことながら、溶接の結果としてワークが、複雑に変形する。この例では、角変形に加えて縦曲がりも、強く現れている。

溶接とは、本来、プロセス・組織・変形の3要素が、密接かつ複雑に絡み合った現象である。すなわち、これらの3要素を統合化して、初めて、真の溶接シミュレーションが可能になる。

Fig.11 は、板厚6mmの鋼板(200×100×6mm)2枚を突合せ溶接した場合のワークの変形過程をカラー表示したものである。左上図が、溶接前のワークを示している。紙面の奥から手前に向かって溶接が進行する。この例では、右側鋼板の右辺両端を拘束している。溶接の進行に伴いワークが大きく膨張・変形し、左下図のようになる。溶接終了後、ワークは冷却・収縮し、右上図のようになる。ここでも、各図中の赤い実線はワークの原形を示している。図は、MAG溶接の結果として、ワークが複雑に変形すること、また、この施工条件では、横収縮に加え、角変形が強く現れること、等を示している。

Fig. 12 は、溶接変形に及ぼす溶接条件の影響について検討したものである。Fig. 11の場合と同じ鋼板を突合せ溶接(V開先)している。(a)は一層で溶接した場合を、(b)は、溶接速度を2倍にし、二層で溶接した場合を示している。図のように、横収縮量は、両者で、大差が無いものの、角変形量に差が見られる。すなわち、Fig. 12は、溶接変形が、溶接施工条件、とくに溶接入熱の与え方に強く依存することを示している。

Fig. 13 は、平板上に溶接ビードを置いた場合の変形シミュレーションの結果を示している。この例では、角変形が大きく現れてはいるが、低入熱であるため、横収縮は、それほど顕著ではない。

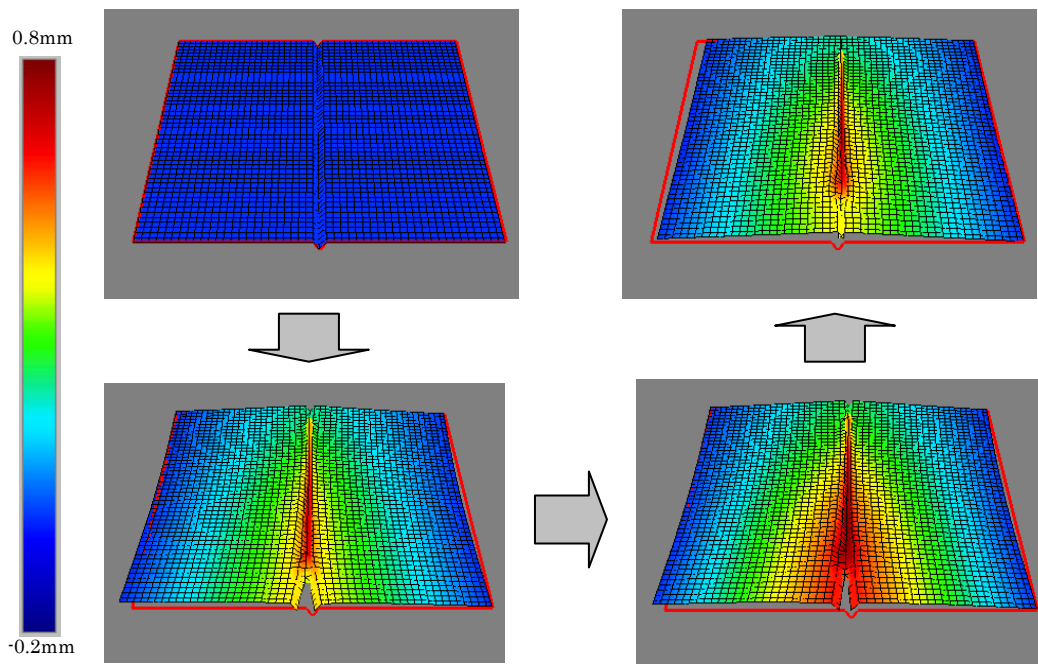


Fig.11 Weld deformation in butt welding of thin plates
 ($I=230A, V=25V, v=40cm/min$)

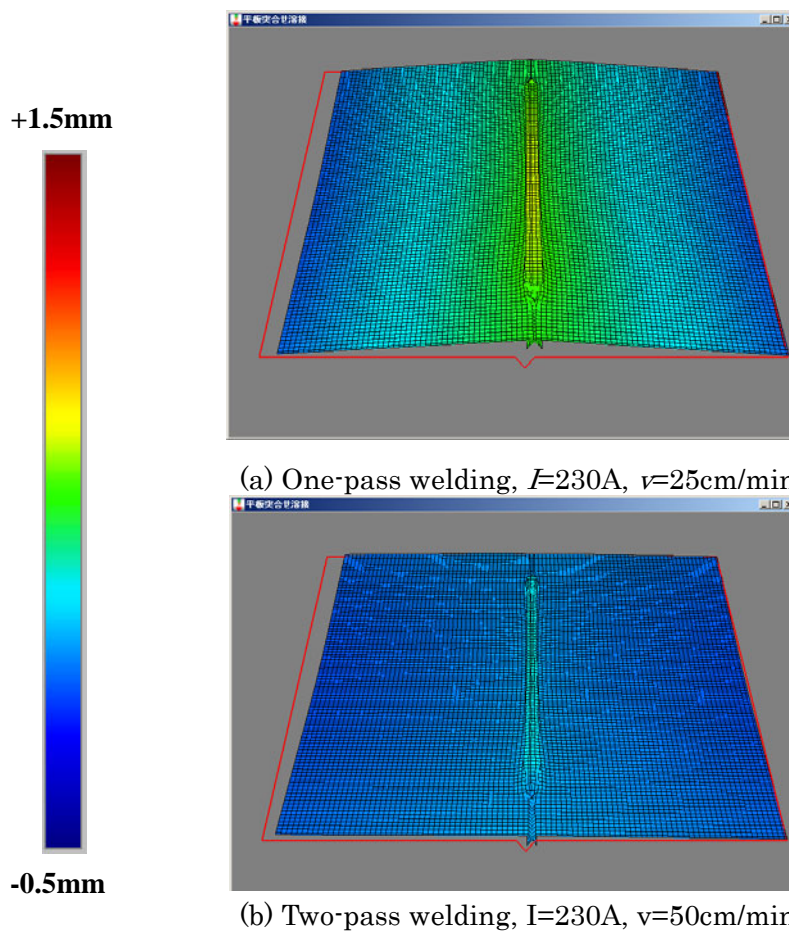


Fig.12 Influence of process condition on weld deformation
 [SM490, 12mmt, $V=25V$]

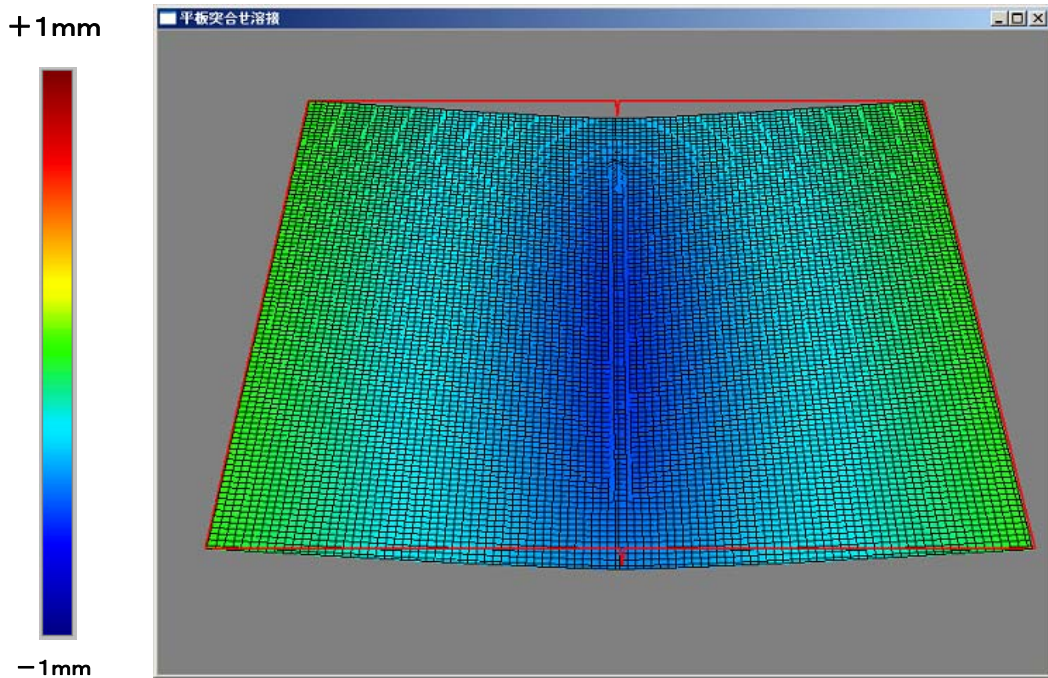


Fig.13 Simulated weld deformation due to bead on plate welding
 [160A, 30V, 70cm/min, SM490, 6mmt,]

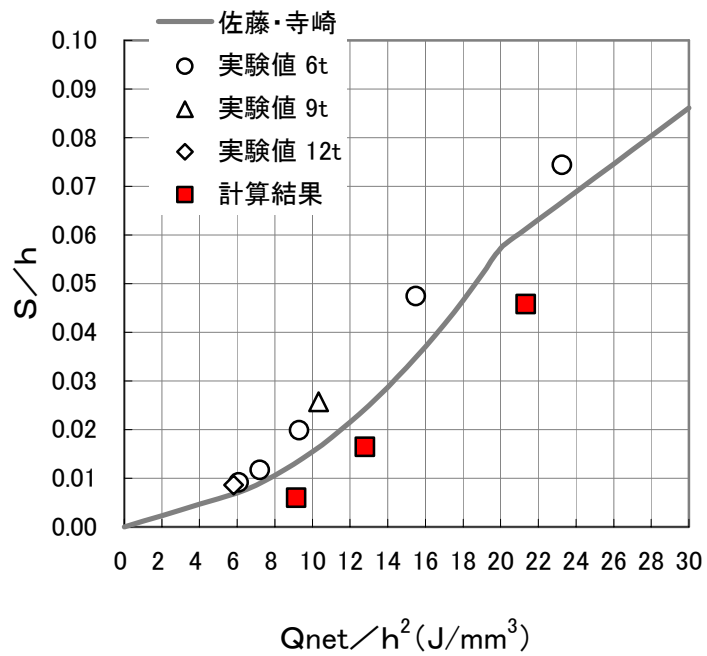


Fig.14 Comparison of transverse shrinkage between experiment and simulation
 {Bead on plate, SM490}

Fig.14 は、ビードオンプレートのマグ溶接における横収縮量に関する実験とシミュレーションの結果を比較したものである。図では、縦軸に収縮量、横軸に入熱を取って示している。図中の赤い■印が、シミュレーションの結果を、白抜きのプロット点が、筆者らによる実験の結果を示している。また、図中の実線は、参考までに示したもので、佐藤・寺崎らによる実験結果である。

図は、モデル統合化によるシミュレーションが、実際の溶接現象を比較的的確に予測・推定していることを示している。

5. 結び

ここでは、生産現場で利用可能な溶接プロセスモデルの開発を目的として検討した。また、開発した溶接プロセスモデルを溶接金属組織・溶接変形モデルと統合化し、複雑な溶接現象を包括的に予測・推定する溶接シミュレーションシステムを提案し、そのプロトタイプを試作・検討した。統合化システムの信頼性は、プロセスモデルの信頼性に強く依存する。このような観点から、プロセスモデルの適用範囲の拡大と信頼性を高めることが、今後の重要な課題である。

謝辞

本研究は、経済産業省重要地域技術開発制度の一環として、NEDOからJSUPを通じて委託された「溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発」の成果である。また、溶接変形の予測に関しては、大阪大学接合科学研究所、村川英一先生、芹澤久先生の強力なご支援を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Ohji, T., Ph.D. Dissertation, Osaka Univ., (1978) (in Japanese).
- (2) Ohji, T. and Nishiguchi, K.: *Technol. Rep. Osaka Univ.*, Vol. 33 (1983), p. 35-43
- (3) Ohji, T., Tsuji, Y., Miyasaka, F. and Yamamoto, T., *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 17, No. 1, p. 167, (2001).
- (4) Yamamoto, T., Ohji, T., Tsuji, Y. and Miyasaka, F., *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6*, (Ed. Cerjak, H.), p193, IOM, Maney Pub., London, 2002.
- (5) Yamamoto, T., Ohji, T., Miyasaka, F. and Tsuji, Y., *Science & Technology of Welding & Joining*, Vol. 7, (2002), 260.