大規模溶接シミュレーション手法の開発

正員 西 川 弘 泰* 正員 芹 澤 久**
正員 村 川 英 一**

Development of Large-scaled FEM for Analysis of Mechanical Problems in Welding

by Hiroyasu Nishikawa, *Member* Hisashi Serizawa, *Member*
 Hidekazu Murakawa, *Member*

Summary

Finite element method is a powerful tool for predicting welding distortion. However, the mechanical phenomena in welding are strong non-linear transient problems and thermal-elastic-plastic FE analysis requires very long computational times. To overcome this problem, an interactive substructure method is developed as a method to reduce the computational time in three-dimensional analysis. In this paper, by comparing with commercial software, the calculation accuracy and speed of this method is discussed. In order to confirm calculation efficiency for a large scale problem, calculation of the model with 670,000 degree of freedoms is performed. Further, calculation of the rotational distortion in FSW is performed and its applicability for practical problems is demonstrated.

1. 結 言

熟練者不足を補い、人的誤差によるばらつき、試行錯誤による非効率性などを最小にし、科学的根拠に基づく工作・検査技術を確立することを目的として、近年、数値シミュレーション技術の工作加工分野への適用化研究が盛んに行われている。工作加工分野の中でも、プレス成形や鋳造等のシミュレーション技術は実用の域に達しているが、溶接におけるシミュレーションは未だ広く普及するに至っていない。この理由としては、溶接現象が強非線形の過渡問題であるため、膨大な計算時間を要する点が考えられる。

溶接シミュレーションを高速化する研究も多数行われており、全体のソリッドモデルの中に溶接熱源近傍を表現するリファインメッシュというソリッド要素を埋め込み、そのリファインメッシュを動かすアダプティブメッシュ法¹⁾や、全体構造のメッシュに溶接熱源近傍のメッシュを埋め込むコンポジットメッシュ法²⁾、全体構造から溶接部を再区分して、溶接熱源の移動とともに再分割する動的サブストラクチャー法³⁾などが報告されている。しかし、これらの方法でもまだ実用的な計算時間で溶接の力学現象を計算することは実現できていない。

そこで、著者らは、生産技術者の問題解決ツールとしての適用を目的として、溶接の力学的現象の特徴に着目した高効率かつ高精度な大規模溶接シミュレーション手法の開発を行った^{4), 5), 6)}。本報では、開発した手法の計算精度の検証と大規模問題の例題計算を行い、さらに、実際の溶接問題に適用してその実機適用性を検証した。

2. 反復サブストラクチャー法

溶接シミュレーションを高速化するために、溶接の力学的現象に注目して、反復サブストラクチャー法 (Iterative Substructure Method: 以下 ISM と称す) を開発した^{4), 5), 6)}。以下に ISM の概要を述べる。

溶接問題の最も大きな特徴は、熱弾塑性挙動に起因する強非線形性状態となる領域は、溶接トーチ周辺の狭い範囲に限られており、大部分を占める他の領域は弾性もしくは弱非線形状態であるという点である。第二の特徴は、強非線形領域が溶接トーチと伴に移動するという点である。

通常の FEM 解析では、モデルの一部だけが非線形挙動する場合でも、全体を非線形問題として解く必要があり、大規模な非線形問題を時刻歴にしたがって解くことになる。そこで、全体領域を弱非線形領域 A と強非線形領域 B に分離する方法を考案した。このとき、B 領域が溶接トーチと伴に移動するので、A 領域の剛性行列が時間とともに変化する。こ

* 川崎重工業 (株)

** 大阪大学接合科学研究所
原稿受理 平成 17 年 10 月 13 日

Fig.1 Iterative substructure method.

れを回避するために、Fig. 1 に示すように、 $(A+B)$ 領域の非線形問題を、 $(A'+B')$ 領域の弱非線形問題と、 B 領域の強非線形問題の組み合わせとして解く方法を採用した。なお、 $(A'+B')$ 領域は解析対象全体を意味するが、増分計算における剛性としては過去のステップの剛性を用いても計算可能である。この方法では、 $(A'+B')-(B)$ 領域内と B 領域内での平衡条件を満足させると同時に、 $(A'+B')-(B)$ 領域と B 領域の境界 Γ では変位は常に連続するように定義し、境界における反力の釣合を反復計算により満足させる。

具体的な計算の流れは以下になる。

- $(A'+B')$ 領域を弱非線形問題として解き、境界 Γ の変位を求める。
- 境界条件としてステップ(a)で求めた境界 Γ の変位を受けた B 領域を強非線形問題として解く。
- $\{(A'+B')-(B')\}$ 領域と B 領域間の不均衡反力を計算する。
- 上記の不均衡反力を $(A'+B')$ 領域に与えて、境界 Γ の変位の修正量を計算する。
- 収束に到達するまで、(a)から(d)のステップを繰り返す。

なお、この収束計算の間は $(A'+B')$ 領域の剛性は更新されないで、強非線形問題である B 領域に対応する小規模な連立方程式のみを繰り返し解けばよいことになる。さらに、温度ステップが進み B 領域が移動しても、 $(A'+B')$ 領域の剛性が大幅に変化しない間は同じ剛性を用いることができるので、大規模な連立方程式を解く回数を減らすことができ、全体としての計算時間が飛躍的に低減できる。

また、 B 領域に含まれる要素の判定条件は、要素内の温度差が 50°C 以上の要素、要素温度が 300°C 以上の要素、または要素温度が 200°C 以上で塑性負荷中の要素としてプログラム内部で自動判定している。

Fig.2 Temperature distribution of disk model.

Fig.3 Deformation and stress distribution of disk model.

Fig.4 Stress history of disk model.

3. 例題計算

3.1 円板モデル

ISM の計算精度を確認するために、円板内周のビードオン溶接の計算を行った。内径 100mm、外径 200mm、板厚 12mm の円板を、円周方向 64、半径方向 12、板厚方向 6 に分割した。モデル規模は 3,520 要素 4,608 節点 13,756 自由度である。また、計算精度の検証のために、ISM ですべての領域を強非線形問題として解いた場合（以下 ORIGINAL と称す）および汎用 FEM プログラム MSC.Marc で計算を行った。計算に

Inc: 400
Time: 4.602e+02

Fig.5 Nonlinear region B of disk model.

Fig.6 Number of B element of disk model.

Fig.7 Computing time history of disk model.

用いたのは Itanium2 1.5GHz+24GB メモリのマシンである。なお、剛性行列の解法には、ISM および ORIGINAL ではスカイライン法、MSC.Marc ではマルチフロンタル法を用いた。

準定常状態での温度分布を Fig. 2 に示す。トータルの温度ステップ数は 697 である。ISM で得られた準定常状態での変形モードと応力分布を Fig. 3 に、各温度ステップでの溶接開始位置の応力を Fig. 4 に示す。溶接開始位置は Fig. 4 中 に示している。計算結果は ISM と ORIGINAL では完全に一致しており、MSC.Marc とほぼ一致している。

Table 1 Computing time of disk model.

Program	Computing time	Ratio	Memory size	Ratio
ISM	0.7Hr	1.0	471MB	1.0
ORIGINAL	112.9Hr	161.3	469MB	1.0
MSC.Marc	6.7Hr	9.6	258MB	0.6

Model size: 3,520 elements, 4,608 nodes,
13,756 freedoms, 697 steps

ISM での準定常状態での強非線形領域 B を Fig. 5 に、各温度ステップでの B 領域の要素数を Fig. 6 に示す。準定常状態では B 領域は同じ形状で移動しており、B 領域の要素数は約 150 で全体の 4% である。

各温度ステップでの計算時間の積算値を Fig. 7 に、計算時間と使用メモリの比較を Table 1 に示す。計算時間は ISM で 0.7 時間と実用的な時間となっており、ORIGINAL より 161 倍、汎用ソフト MSC.Marc よりも 9.6 倍高速である。メモリサイズは ISM と ORIGINAL はほぼ同じだが、MSC.Marc は 0.6 倍と小さくなっている。

Fig.8 FEM model of plate model.

Fig.9 Temperature distribution of plate model.

Fig.10 Deformation and stress distribution of plate model.

Fig.11 Nonlinear region B of plate model.

Fig.12 Number of B element of plate model.

3.2 大規模モデル

大規模問題における ISM の性能を調べるために、長さ 100mm、幅 400mm、板厚 10mm の平板の中央をビードオン溶接する計算を行った。分割数は長手方向 50、幅方向 400、板厚方向 10 とし、モデル規模は 200,000 要素、224,961 節点、669,248 自由度である。FEM モデルを Fig. 8 に示す。計算マシンは前節と同じである。

準定常状態での温度分布を Fig. 9 に示す。トータルの温度ステップ数は 1,178 である。準定常状態での変形モードと応力分布を Fig. 10 に示す。準定常状態での強非線形領域 B を Fig. 11 に示す。大規模なモデルになると、全体領域に対して溶接トーチ直下の非線形領域の占める割合が小さくなるため、準定常状態で B 領域に含まれる要素数は約 800 で全体の 0.4% と非常に少ない。したがって、大規模な問題になるほど、ISM のメリットが大きくなると考えられる。

各温度ステップでの B 領域の要素数を Fig. 12 に示す。溶接終了の 1,000 ステップでの B 領域の要素数が急激に増加しているが、これは、溶接終端部で塑性領域が広がっていることに起因していると考えられる。

各温度ステップでの計算時間の積算値を Fig. 13 に、計算時間と使用メモリを Table 2 に示す。トータルの計算時間は

Fig.13 Computing time history of plate model.

Table 2 Computing time of plate model.

Model	Computing time	Memory size
Plate	105.6Hr (4.4day)	20GB

Model size: 200,000 elements,
224,961 nodes, 669,248 freedoms, 1,178 steps

105.6 時間 (4.4 日) であるが、汎用 FEM では同じ計算マシンを使用しても、現時点ではソフトが使用できるメモリの上限が 8GB に制限されているため大規模な溶接シミュレーションを実行することは困難であり、67 万自由度で 1,178 ステップの溶接シミュレーションが約 1 週間以内で計算できることは非常に有効である。

3.3 FSW モデル

実際の溶接問題への適用性を確認するために、以前に報告している FSW の回転変形制御⁷⁾の計算を ISM で行った。

前報では、アルミ中空型材の突合せ接合に、アルミ薄板では実績のある FSW を適用した場合、FSW ツールが進むにつれて接合線の前方で口開き (以下、回転変形と呼ぶ) が発生し、施工が出来なくなる場合がある。この問題を解決するために、接合線に対して平行な位置で加熱することにより、温度分布を制御して回転変形を抑制する方法を考案し、解析的および試験的にその効果を実証した。

Fig.14 FEM model of FSW model.

Fig.15 Material properties of A6N01-T6.

本報では、前報で実施した FSW 回転変形制御確認試験の
変形シミュレーションを行うこととした。複数ある試験ケー
スのうち、板幅中央を FSW で接合する場合(以下 FSW-single)
と、FSW と同時に板幅両端を加熱する場合 (以下 FSW-para)
の 2 ケースの計算を行った。加熱には TIG 装置を用いた。
FSW の入熱量と裏面からの熱伝達係数は試験時の温度計測
結果より同定した値を用いた。

試験体の FEM モデルを Fig. 14 に示す。概略寸法は長さ
300mm、幅 340mm、板厚 4mm で、分割数は長手方向 75、
幅方向 50、板厚方向 2 とした。モデル規模は 17,025 要素、
27,664 節点、81,716 自由度である。計算マシンは前々節と同
じである。

FSW 試験体の材質は A6N01-T6 であり、溶接シミュレ
ーションに必要な溶融温度近傍までの物性値の温度依存性デ
ータは、ほとんど報告されていない。物性値のデータは溶接
シミュレーションの精度に大きく影響するので、今回は、
A6N01-T6 の物性値の温度依存性データを取得して計算に用
いた。取得した A6N01-T6 の物性値の温度依存性データを
Fig. 15 に示す。図中の矢印は、各物性値の縦軸の参照を示
している。

準定常状態での温度分布を Fig. 16 に示す。トータルの温
度ステップ数は FSW-single で 320、FSW-para で 335 である。
試験での温度計測結果と計算結果の比較を Fig. 17 に示す。
温度計測位置は、試験片中央部において幅方向に FSW ツー

(a) FSW-single

(b) FSW-para

Fig.16 Temperature distribution of FSW model.

(a) FSW-single

(b) FSW-para

Fig.17 Temperature transitions of FSW model.

Inc: 110
Time: 1.100e+00

(a) FSW-single

Inc: 110
Time: 1.100e+02

(b) FSW-para

Fig.18 Nonlinear region B of FSW model.

Fig.19 Number of B element of FSW model.

ルに近い中央から 20mm 離れた位置を T1、加熱源に近い板端部から 20mm 離れた位置を T5 とし、その間を等間隔で合計 5 点としている。グラフの横軸は FSW ツールが計測位置を通過する時間を原点としている。計測結果から同定した入熱条件を用いているので、実測と計算の温度履歴は良く一致している。

準定常状態での強非線形領域 B を Fig. 18 に、各温度ステップでの B 領域の要素数を Fig. 19 に示す。準定常状態で B 領域に含まれる要素数は FSW-single で約 350 と全体の 2%、FSW-para で約 750 と全体の 4.4% となっている。また、FSW-para に示すように、ISM では B 領域が複数個所に分かれて存在する場合でも解析が可能である。

Inc: 110
Time: 1.100e+00

(a) FSW-single

Inc: 110
Time: 1.100e+02

(b) FSW-para

Fig.20 Deformation and stress distribution of FSW model.

Fig.21 Rotational distortion of FSW model.

準定常状態での変形モードと応力分布を Fig. 20 に、回転変形量の計測結果と計算結果の比較を Fig. 21 に示す。FSW のみの FSW-single では最終的な回転変形量は一致しているが、途中の回転変形量の差は大きくなっている。これは、実際の接合線には初期すき間があり、さらにラップしている合わせ面の摩擦があることを、ISM による計算では考慮していないことに原因があると考えられる。FSW+端部加熱の FSW-para では計測と計算は共に回転変形が発生していない。この結果より、FSW のみの場合では回転変形が発生し、FSW+端部加熱の場合では回転変形が抑制されている計測結果と同じ傾向が ISM を用いた溶接シミュレーションの結果でも得られることが確認できた。

Fig.22 Computing time history of FSW model.

Table 3 Computing time of FSW model.

Model	Temperature steps	Computing time	Ratio	Memory size
FSW-single	320	3.9Hr	1.0	1.7GB
FSW-para	335	12.1Hr	3.1	1.7GB

Model size: 17,025 elements,
27,664 nodes, 81,716 freedoms

各温度ステップでの計算時間の積算値を Fig. 22 に、計算時間と使用メモリを Table 3 に示す。計算時間は FSW-single が 3.9 時間、FSW-para が 12.1 時間となっており、B 領域が 1 箇所から 3 箇所に増えたので計算時間も約 3 倍となっている。

4. 結 言

著者らが開発した反復サブストラクチャー法による溶接シミュレーションの実機適用性を確認するために、まず、円板の例題を実施し、汎用 FEM と同等の計算結果が得られることを確認し、従来よりも 161 倍、汎用 FEM より 9.6 倍高速であることを確認した。次に、67 万自由度の大規模モデルの計算を行い、4.4 日で計算可能なことを確認した。最後に実機例題として FSW 回転変形試験の計算を行い、実機での溶接変形発生状況を模擬できる計算を 12 時間で行えることを確認し、本手法の有効性を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) F. Boitout and J. Bergheau, The Numerical Simulation of Welding in Europe : Present Capabilities and Future Trends, Proc. of the International Symposium of JWRI 30th Anniversary, 2003, 87-100.
- 2) J. Goldak, M. Mocanita, V. Aldea, J. Zhou, D. Downey and D. Dorling, Predicting Burn-through When Welding on Pressurized Natural Gas Pipelines, Proc. of PVP' 2000, 1-8.
- 3) S. B. Brown and H. Song, Rezoning and Dynamic Substructuring Techniques in FEM Simulations of Welding Processes, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, 1993, 415-423.
- 4) H. Nishikawa, I. Oda, M. Shibahara, H. Serizawa and H. Murakawa, Three-dimensional Thermal- elastic-plastic FEM Analysis for Predicting Residual Stress and Deformation Under Multi-pass Welding, Proc. of ISOPE'04, Toulon, France, CD-ROM.
- 5) H. Nishikawa, I. Oda, H. Serizawa and H. Murakawa, Development of High-speed and High-precision FEM for Analysis of Mechanical Problems in Welding, Trans. JWRI, Vol.33, (2004), No.2.
- 6) H. Murakawa, I. Oda, S. Ito, H. Serizawa, M. Shibahara, H. Nishikawa, Iterative Substructure Method for Fast Computation of Thermal Elastic Plastic Welding Problems, J. Kansai Soc. N. A., Japan, No.243,(2005)
- 7) H. Nishikawa, M. Fujimoto, T. Yoshikawa, Control of Rotational Distortion in Friction Stir Welding, J. Kansai Soc. N. A., Japan, No.242, (2004)