

大口径厚肉ステンレス鋼配管継手の溶接シミュレーション — 残留応力解析の高速化と熱源モデルの影響 —

Welding Simulation of Large-Diameter Thick-Walled Stainless Steel Pipe Joints
— Fast Computation of Residual Stress and Influence of Heat Source Model —

前川 晃 (Akira Maekawa) 芹澤 久 (Hisashi Serizawa)
中長 啓治 (Keiji Nakacho) 村川 英一 (Hidekazu Murakawa)



株式会社 **原子力安全システム研究所**

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

〒919-1205 福井県三方郡美浜町佐田64号

Tel 0770-37-9100 Fax 0770-37-2008

URL <http://www.inss.co.jp>

大口径厚肉ステンレス鋼配管継手の溶接シミュレーション — 残留応力解析の高速化と熱源モデルの影響 —

Welding Simulation of Large-Diameter Thick-Walled Stainless Steel Pipe Joints
— Fast Computation of Residual Stress and Influence of Heat Source Model —

前川 晃 (Akira Maekawa)*¹ 芹澤 久 (Hisashi Serizawa)*²
中長 啓治 (Keiji Nakacho)*² 村川 英一 (Hidekazu Murakawa)*²

要約 原子力発電プラントを構成する機器・配管には数多くの溶接部が存在し、溶接により発生する残留応力はプラントの構造健全性確保の重要な影響因子となっている。従来から、数値シミュレーション解析により溶接残留応力の評価が行われているが、膨大な計算時間を要することから、解析の高速化が求められていた。近年、反復サブストラクチャー法 (ISM) が開発され、3次元詳細モデルを用いた残留応力解析の高速化が実用的となった。本研究では、高速計算かつ高精度な溶接シミュレーションを実現するために、ISMを用いた溶接シミュレーションの更なる高速化を検討した。並列処理等の導入により高速化を行った結果、解析速度は市販の有限要素法コードを大幅に上回った。さらに、測定値との比較により解析精度の検証を行うとともに、異なる溶接熱源モデルによる解析結果への影響を考察し、多層多パス溶接における移動熱源モデルの有効性を示した。

キーワード 残留応力 溶接シミュレーション, 反復サブストラクチャー法, 有限要素法, 高速計算, 配管継手, 多層多パス溶接, 溶接熱源モデル

Abstract There are many weld zones in the apparatus and piping installed in nuclear power plants and residual stress generated in the zone by weld process is the most important influence factor for maintaining structural integrity. Though the weld residual stress is frequently evaluated using numerical simulation, fast simulation techniques have been demanded because of the enormous calculation times used. Recently, the fast weld residual stress evaluation based on three-dimensional accurate analysis became available through development of the Iterative Substructure Method (ISM). In this study, the computational performance of the welding simulation code using the ISM was improved to get faster computations and more accurate welding simulation. By adding functions such as parallel processing, the computation speed was much faster than that of the conventional finite element method code. Furthermore, the accuracy of the improved code was validated by measurements. The influence of two different weld heat source models on the simulation results was also investigated and it was found that the moving heat source was effective to achieve accurate weld simulation for multi-pass welds.

Keywords Residual stress, Welding simulation, Iterative substructure method, Finite element method, Fast computation, Welded pipe joint, Multiple-pass welds, Welding heat source model

1. 緒言

原子力発電所の長期運転に伴う構造物や機器類の高経年化については、その健全性を確認することが、原子力発電の安全確保にとって必要である。特に、構造物や機器類の溶接部の健全性評価は発電設備の

信頼性向上や安全性確保の面から重要であり、様々な取り組み^{(1)~(3)}が行われている。この重要課題のひとつとして溶接部の疲労強度やき裂進展速度に影響を与える因子の定量的評価がある。影響因子としては、残留応力や応力集中、機械的性質、金属組織の変化などがある。残留応力は特に重要な因子であ

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 大阪大学 接合科学研究所

り、疲労強度や疲労き裂、応力腐食割れの進展に大きな影響を与えること^{(4)~(6)}が知られている。したがって、残留応力の大きさや分布を精度良く評価した結果を適切に反映して健全性評価を実施する必要がある。

溶接残留応力評価は実機やモックアップの測定^{(7),(8)}または簡易評価式⁽⁹⁾、解析シミュレーション^{(10)~(12)}により実施されるが、最近では計算機性能の向上とシミュレーション技術の高度化により、溶接シミュレーションの活用が盛んとなってきた。溶接シミュレーションとは、溶接の力学現象を有限要素法等により熱弾塑性計算で求める方法であり、古くから取り組まれている⁽¹³⁾。しかしながら、溶接現象が強非線形性の過渡問題であるために、溶接現象を忠実にシミュレーションするには計算時間が膨大となる理由により、2次元解析や解析モデル・解析条件の簡略化による計算が行われており、解析精度に課題が残っている。従来から、この課題については測定値や3次元詳細解析との比較により解析対象のモデル化や解析条件の簡略化の妥当性が議論^{(14)~(18)}されてきた。

一方、3次元の詳細解析モデル用いた溶接シミュレーションを高速化することで解析精度を向上する研究も行われてきた。例えば、構造モデル全体は粗くメッシュ化され、移動する溶接熱源とその近傍のみを細かいメッシュで再メッシュ化しながら溶接シミュレーションを行うことで、少ない要素数で詳細な解析を短時間で行うことができるようにしたアダプティブメッシュ法^{(19)~(23)}や複数の溶接層を一つの溶接パスとして扱えるコンポジット要素の適用により溶接部形状を簡素化して解析時間の短縮を図る方法^{(24),(25)}、構造モデル全体から溶接部を再区分して溶接熱源の移動と共に再分割する動的サブストラクチャー法^{(26),(27)}などが提案されている。しかしながら、これらの方法でも溶接シミュレーションを実用的な時間で行うことが実現できていない。

最近、溶接現象特有の力学現象に着目して溶接シミュレーションを高速化する計算アルゴリズムが、村川ら^{(28)~(35)}により提案された。反復サブストラクチャー法 (Iterative Substructure Method: 以下ISMと称す) と呼ぶこの方法は、溶接では溶接トーチ近傍のみが局所的に非線形挙動を示すことを考慮して、溶接問題を全体領域の大規模定剛性問題と溶接トーチ近傍の小規模強非線形性問題の組み合わせとして解く。この方法は実験・測定による検証^{(36),(37)}

が未だ十分ではないが、計算時間が従来の1/10から1/20に短縮できると報告^{(28),(29),(38)}されている。また、高速計算という長所を活かし、大規模溶接問題の感度解析にISMを適用した結果も報告^{(39)~(41)}されている。このような高速計算かつ高精度な溶接シミュレーションの実現により得られた高精度な溶接残留応力評価に基づいて、原子力発電所の構造健全性評価の信頼性を従来以上に向上させることができると考えられる。

本研究では、高速計算かつ高精度な溶接シミュレーションを実現するために、ISMを用いた溶接シミュレーションの更なる高速化を検討した。並列処理等の導入によりISMの計算アルゴリズムに影響を与えることなく高速化を行った。解析速度は市販の有限要素法コードと比較を行った。さらに、測定値との比較により解析精度の検証を行うとともに、異なる溶接熱源モデルによる解析結果への影響を考察した。

2. 反復サブストラクチャー法 (ISM)

溶接現象は、非常に非線形性が強い過渡問題であるため、有限要素法を用いた解析には膨大な計算時間を要する。原子力機器に多く見られる配管の多層溶接の解析は、一般に普及している汎用解析コードを用いても数週間を要する。このような実機を対象とした溶接変形や溶接残留応力の予測には、より効率の良い解析法が必要であり、その候補の一つがISMである。

溶接問題は二つ大きな特徴を持つ。一つ目は、溶接トーチ付近つまり溶接熱源近傍の極小領域のみが力学的な非線形挙動を示し、大部分の他の領域はほぼ線形挙動を示す点である。二つ目は、非線形領域が溶接トーチと共に移動するという点である。

通常の溶接シミュレーションは、上記のような一部だけが非線形挙動をする場合でも、全体を大規模な非線形問題として時刻歴に従って反復的に解く。そこで、解析対象全体を線形領域と非線形領域とに分離して計算するという方法が考えられる。この考えに基づいて計算速度を高める方法がISMである。類似の考え方として動的サブストラクチャー法^{(26),(27)}があるが、剛性マトリクス計算時の線形領域の定義が異なっている。動的サブストラクチャー法では、剛性マトリクス計算時と応力計算時の線形領域の定義は同じである。しかし、ISMでは、線形領域の

定義が異なっている。剛性マトリクスの計算時に非線形領域を含めた全体領域を線形領域として定義する。これは、効率的に計算を行うための工夫であり、溶接問題のように強い非線形領域が全体に比べて極めて小さな領域であることから、非線形領域を線形領域に含めてもその影響は全体として無視できる。

有限要素法で静力学問題を解く時、次の方程式に帰着される： $[A]\{u\}=\{F\}$ 。ここで、 $[A]$ は剛性マトリクス、 $\{u\}$ は節点変位、 $\{F\}$ は節点力を示す。まず、解析モデル全体の剛性マトリクスを組み立て

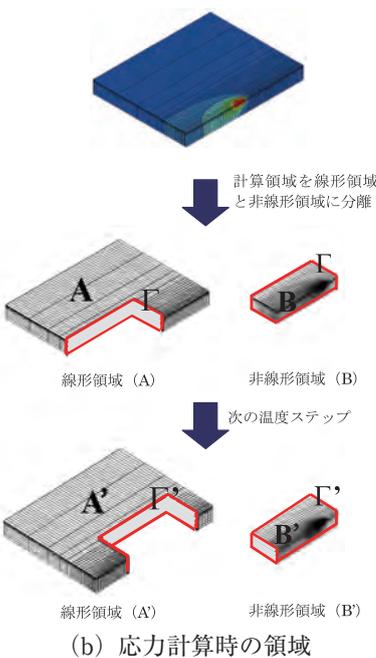
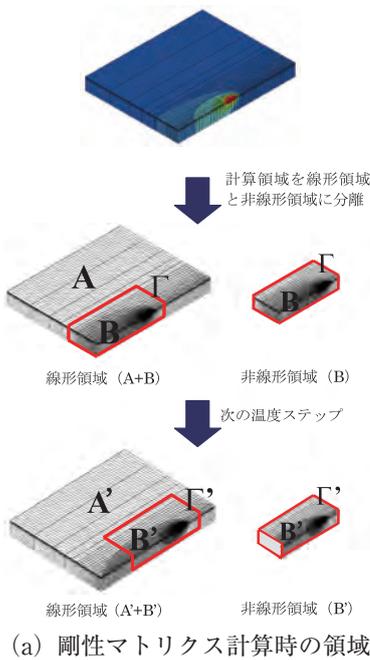


図1 ISMにおける計算領域の定義

た後、節点変位について方程式を解く。図1(a)は剛性マトリクスの線形領域と非線形領域の定義範囲を示す。大規模解析モデルの線形領域と非線形領域の分離では、線形領域を全体領域のA+Bとし、非線形領域をBとしてそれぞれの剛性マトリクスを組み立てる。次の温度ステップに移った場合でも、線形領域は全体領域のA'+B' (=A+B)であり、非線形領域はB'として剛性マトリクスを組み立てる。このような領域区分をすることで、線形領域は常に同じであり、同じ剛性マトリクスを利用できることから、以降のステップで剛性マトリクスの組立てを省略でき、溶接熱源の移動とともに剛性が変化する微小領域のBまたはB'について剛性マトリクスの組立てのみを実施すればよいので、計算時間の大幅な削減が可能である。一方、図1(b)は線形領域と非線形領域の応力計算範囲を示す。図1(a)で得られた剛性を用いて線形領域(A+BまたはA'+B')と非線形領域(BまたはB')の境界ΓまたはΓ'での変位が等しいとして応力計算を行う。応力計算は、AまたはA'領域とBまたはB'領域で独立に行うので、各領域での平衡条件は満足され、境界ΓまたはΓ'における力の連続性すなわち釣合いを反復計算により満足させる。図2に計算フローを示すが、従来の解析コードが溶接を全体領域の熱弾塑性問題として扱うことに対してISMは局所領域のみを更新する問題として扱う。このようにISMは、全体領域に対して非線形領域の割合が小さく、しかも非線形領域が移動するという溶接問題の特徴をうまく利用している。

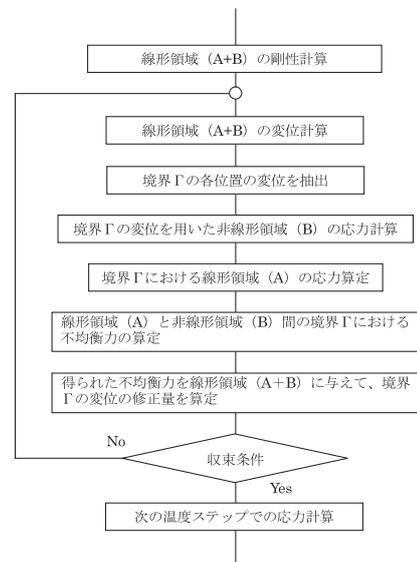


図2 ISMの応力計算フロー

3. ISM を用いた溶接シミュレーションの高速化

3.1 並列処理による高速化

最近のコンピュータにはコアを4あるいは8個内蔵するものがあり、これらを活用して並列処理ができれば、計算速度の向上が可能となる。並列処理の方法として、MPI^{(42)~(45)}とOpenMP^{(46)~(48)}が一般的に使われている。MPIは複数の計算機がネットワークを経由して通信しながら並列処理を行う方法であり、実行すべきプログラムは複数の領域に分割され、それぞれの計算機に割り当てられる。

一方、複数のコアを使って並列計算を行う方法がOpenMPである。既に記述されたプログラムの中で並列化したい部分を、「\$OMP***」という記述で挟むことによりメモリを共有しながら並列処理を行うことができる。本研究ではプログラミングの容易さからOpenMPを利用して並列化を行った。

有限要素法における計算は以下の三つの部分から構成される。

- ①要素剛性の計算（全ての要素についての繰返し）
- ②釣合条件である連立方程式を解く
- ③要素の応力・ひずみの計算（全ての要素について繰返し）

①と③は要素ごとに独立に計算処理されるので、この部分を並列化した。

並列化による高速化の結果を図3に示す。解析モデルとして、節点数1,701、要素数1,040の1溶接パスの平板突合せ溶接（解析ステップ数149）を用いて1CPU、2CPU、4CPUを用いた熱弾塑性解析を実施し、計算時間を比較した。図3では、要素剛性の計算および要素の応力・ひずみの計算、その他に分類して比較した。並列化を行った剛性計算および応力・ひずみ計算ではCPUの数に対応して高速化されていることが確認できる。

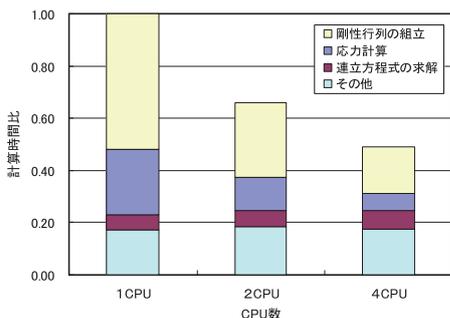
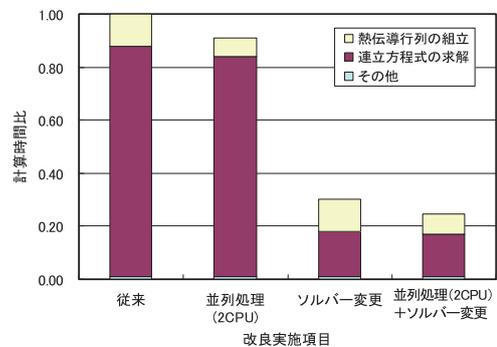


図3 並列処理による熱弾塑性解析の高速化

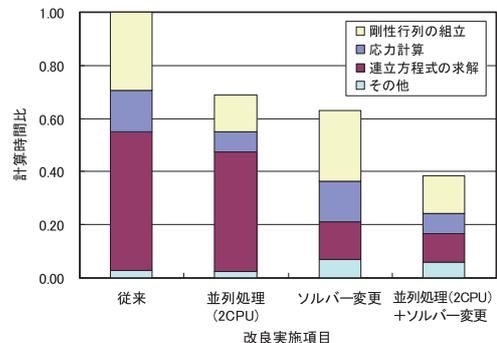
3.2 連立方程式ソルバーの高速化

非定常熱伝導解析プログラムおよび熱弾塑性解析プログラムの並列化とともに、連立方程式ソルバーに「インテル マスカーネルライブラリー」のスパースソルバー⁽⁴⁹⁾を導入して3.1節の②の連立方程式の求解プログラムの高速化を行った。

高速化の結果を図4に示す。解析モデルとして後述する大口径厚肉の配管溶接継手モデルの最初の1溶接パスを用いた。解析ステップ数は483である。図4(a)に非定常熱伝導解析における計算時間の比較を示し、図4(b)に熱弾塑性解析における計算時間の比較を示す。節点数が50,000を超えるような大規模問題では、方程式の求解が計算時間の支配的な部分を占めているので、ソルバーの変更により大幅な計算時間の削減ができた。熱伝導マトリクス組立と応力計算は並列化によりCPU数に応じた計算時間の削減ができた。しかし、方程式の求解では計算時間の削減はほとんどできなかった。これは、採用したソルバーにおいて、方程式の求解の前進消去の部分は並列処理されているが、後退代入の部分は並列処理されていないことによると考えられる。



(a) 熱伝導解析における計算時間の比較



(b) 熱弾塑性解析における計算時間の比較

図4 並列化および高速ソルバーによる溶接シミュレーションの高速化

4. 大口径厚肉配管継手の溶接シミュレーション

4.1 配管継手試験体の製作

試験体材料に JIS G 3459 に準拠した配管用ステンレス鋼管 SUS316LTP を用いて、溶接シミュレーションに供する配管溶接継手試験体を製作した。材料の化学成分と機械的性質を表 1 に示す。300A Sch160 (外径 318.5mm, 肉厚 33.3mm) の直管を周

方向に突合せ溶接した。溶接は GTA (TIG) 溶接を手溶接にて行った。溶接材料は、JIS Z 3321 に準拠した Y316L を用いた。表 2 に化学成分と溶着金属の機械的性質を示す。図 5 に示すように開先を U 字形状に製作した後、溶接電流 63 ~ 180A, 溶接電圧 20V にて全層を TIG 溶接 (全姿勢) した。配管を 0° を下側にして固定し、両端自由の状態 で 90° 側および 270° 側のどちらからも 0° から 180° に向かって溶接を行った。最終的に 18 層 39 パスの多層溶接試験体を製作した。試験体の写真を図 6 に示す。

表 1(1/2) 試験体鋼管 SUS316LTP の化学成分

単位: %

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
ミルシート	0.021	0.20	0.99	0.015	0.001	12.33	16.73	2.04
JIS G 3459	≦0.030	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	12.00 ~ 16.00	16.00 ~ 18.00	2.00 ~ 3.00

表 1(2/2) 試験体鋼管 SUS316LTP の機械的性質

	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
ミルシート	219	520	62
JIS G 3459	≧175	≧480	≧30

表 2(1/2) 溶接金属の化学成分

単位: %

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
ミルシート	0.010 ~ 0.014	0.45 ~ 0.46	1.52 ~ 1.54	0.026	0.001	12.01 ~ 12.11	19.13 ~ 19.17	2.13 ~ 2.14
JIS Z 3321 Y316L	≦0.030	≦0.65	1.0 ~ 2.5	≦0.03	≦0.03	11.0 ~ 14.0	18.0 ~ 20.0	2.0 ~ 3.0

表 2(2/2) 溶着金属の機械的性質

	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
メーカーカタログ値	389	556	40.9
JIS Z 3321 Y316L	(規定なし)	(規定なし)	(規定なし)

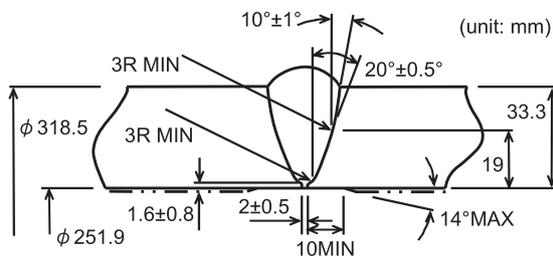


図 5 試験体の開先形状

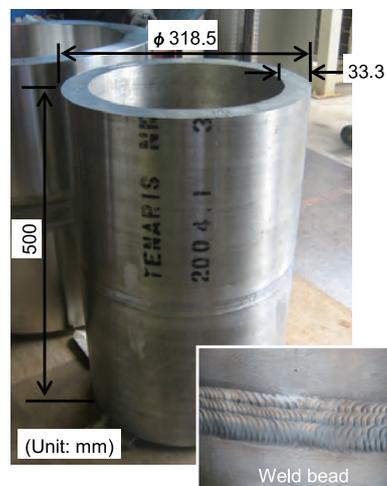


図 6 試験体の外観と溶接ビード

4.2 配管継手の解析モデル

製作した配管継手の形状寸法（図6）を参考にして、図7に溶接シミュレーション用の解析モデルを示す。節点数52,900で要素数47,520の周方向に72分割したモデルを作成した。モデル化には、8節点のソリッド要素を用いた。図7に示すように、溶接部および溶接部近傍を細かくメッシュ分割した。図6の溶接ビードが示すように最外溶接層は3パス溶接であり、図7のモデルでもメッシュをグループ化して、3パスからなる溶接部を構成した（赤色、緑色、黄色で各溶接パスを示す）。図5に示す開先形状と溶接後の断面形状を基に作成したモデルの溶金部断面とメッシュ分割を図8に示す。赤色が溶接部であり、灰色が母材部を示す。

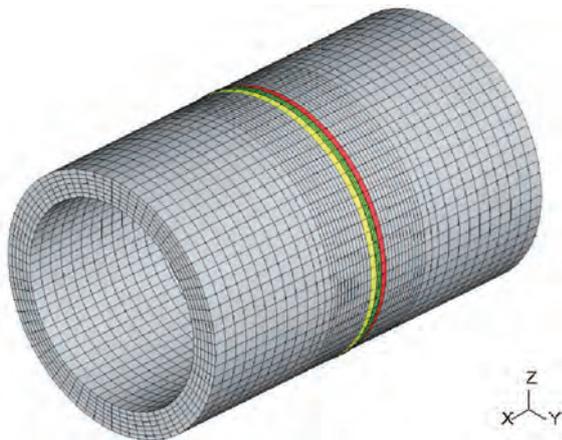


図7 解析モデル

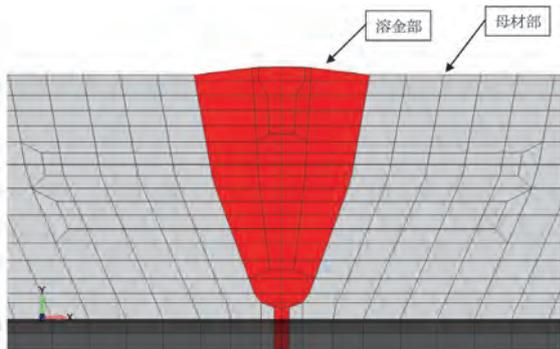
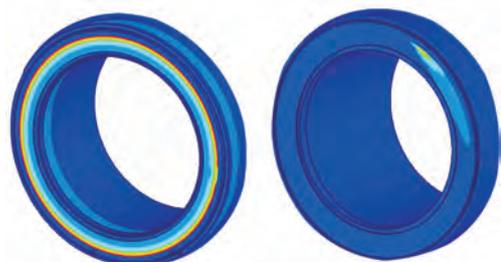


図8 モデルの溶接部とメッシュ分割

4.3 溶接シミュレーション

溶接シミュレーションは、ISMを用いた有限要素法コード（以降ではISMコードと称す）と市販の代表的な汎用有限要素法コード（本研究ではABAQUSコード⁽⁵³⁾を選択した）を用いて実施した。ABAQUSコードのバージョンはVer. 6.8.5である。ABAQUSコードを用いて、節点数50,000を超える大規模溶接問題への市販解析コードの適用性や計算時間などを把握した。ISMコードは上述したように並列化等により高速化改良を行っており、節点数50,000を超える大規模溶接問題の計算時間の把握と測定値による解析精度の検証を行った。図7に示す同じ解析モデルを用いて、二つの解析コードにより溶接シミュレーションを行い、溶接残留応力を計算した。ISMコードは全溶接層に移動熱源モデルを用いて解析を行った。ABAQUSコードでは全層を移動熱源モデルで解析すると現実的な時間で解析できなかったことから、最内層と最外層を移動熱源モデルとした以外は瞬間熱源モデルで解析を行った。したがって、解析結果の差異は熱源モデルの違いを反映する。

図9に二つの熱源モデルの概念を示す。発熱箇所が赤色および黄色で示されている。移動熱源モデルは溶接トーチの移動に伴い溶接熱源が時刻歴に移動する様子を忠実に再現したモデルであり、発熱箇所を時刻歴で移動させて、非定常熱伝導解析を行う。したがって、細かな時間ステップで計算を行うので、膨大な計算時間を要求する。瞬間熱源モデルは溶接シミュレーションを短時間で計算するための簡略化方法の一つであり、図9(a)に示すように、全周に一度に溶接入熱が行われると仮定する方法である。瞬間熱源モデルの妥当性は、1パスなどの少ない溶接パス数の場合について確認されているが、多層多パス溶接については、計算時間の膨大さのために十分な検討が行われていない。



(a) 瞬間熱源モデル (b) 移動熱源モデル

図9 溶接熱源モデルの概要

表3にISMコードとABAQUSコードを用いた解析の解析条件をまとめた。ISMコードでは全層を移動熱源モデルにて非定常熱伝導解析を行った。溶接開始温度が溶接残留応力解析結果に影響を与えることから、パス間温度は、実際の溶接施工条件と同じように150℃まで冷却した。等方硬化則を用いると、多層溶接の過程で累積する塑性ひずみによる加工硬化で残留応力値が実際よりも大きくなる傾向があることから、溶接上層の加熱による下層のアニーリング効果を考慮した。この効果を表現するために、800℃以上になった領域では、累積ひずみ量をゼロになるように設定した。計算は4CPUを用いた並列計算により実施した。

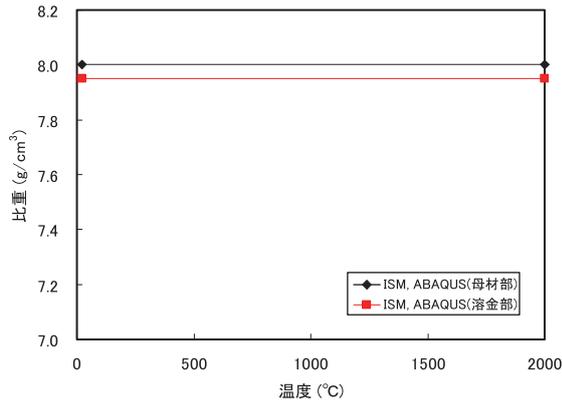
ABAQUSコードでは最内層の1層目と最外層の18層目は移動熱源モデルで実施し、残りの層は瞬間熱源モデルで実施した。ABAQUSコードでは、瞬間熱源にて入熱する場合の単位体積・単位時間あたりの入熱量は、溶接条件より求まる総入熱量に対して各溶接パスの入熱時の温度ピークが約2000℃前後となるように、入熱時間を調整して入熱条件の設定を行った。また、溶接パス間温度が150℃以下になるように十分なパス間時間を与えた。計算時間の削減のため弾完全塑性体を仮定した。等方硬化則を採用し、800℃以上でのアニーリング効果を考慮した。ABAQUSコードは2CPU8Coreのマシンで計算を行った。これは、ISMコードよりも高速計算ができるハードウェアの環境である。

図10に解析に使用した材料物性の温度依存性を示す。比熱および熱伝導度、熱膨張係数、降伏応力、

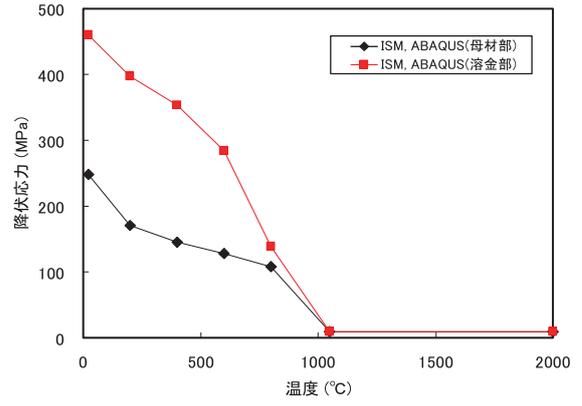
弾性係数に関する材料物性値は、製作した配管継手試験体から切り出した試験片の材料試験結果と文献(51)の記載値を基に作成した。比重については、室温のデータを全温度範囲に適用して母材部が8.00g/cm³、溶金部が7.95g/cm³で一定とした。加工硬化係数は、材料試験より得られた真応力-塑性真ひずみ線図から算定した。モデル表面からの熱伝達率は一般に静止空気では1×10⁻⁶～20×10⁻⁶W/(mm²・℃)である。ISMコードで20×10⁻⁶W/(mm²・℃)、ABAQUSコードで4×10⁻⁶W/(mm²・℃)を使用した。使用した値に差があるが、母材の熱伝導率は空気の熱伝導率に比べてはるかに大きく、発生した熱の大部分は母材部へ散逸し、空気中へはほとんど散逸しないのでここに示された値の差は無視できるものである。図10において、ISMコードとABAQUSコードで使用した物性値には、高温部のデータが異なっている。これは、ABAQUSコードで安定した計算を行うためにデータを簡略化したためである。しかしながら、差はステンレス鋼の力学的溶融温度(800℃)以上においてであり、この温度領域では荷重をほとんど受け持たなくなり、残留応力解析結果にほとんど影響を与えない⁽⁵²⁾ことから、これらの差による影響はほとんどないと考えられる。弾性係数のヤング率等についても若干の差があるが、室温での残留応力値を比較することから、室温時の値が等しいので、解析結果への影響は小さいと考えられる。

表3 ISMコードとABAQUSコードの解析条件

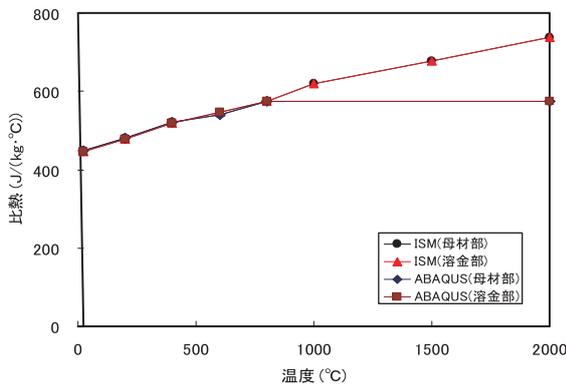
	ISMコード	ABAQUSコード
解析条件	<ul style="list-style-type: none"> 全溶接層に移動熱源モデルを使用し、溶接施工手順を参考に、溶接による加熱を正確に再現 ダミー要素による溶着金属の肉盛をシミュレーション 溶接パス間は、溶接部の温度が150℃以下になるまで空冷(時間指定なし) 上層の溶接熱による下層へのアニーリング効果を考慮 加工効果係数を考慮した弾線形硬化塑性体 等方硬化則 	<ul style="list-style-type: none"> 最内層(1パス目)と最外層(18パス目)に移動熱源モデルを使用 その他の溶接層に瞬間熱源モデルを使用 ダミー要素による溶着金属の肉盛をシミュレーション 溶接パス間は10000秒の保持時間を挟み、溶接部の温度が150℃になるまで空冷 上層の溶接熱による下層へのアニーリング効果を考慮 弾完全塑性体を仮定 等方硬化則
解析環境	<ul style="list-style-type: none"> 4CPUマシンを用いた並列計算 CPU: Intel Xeon X5260 (3.33GHz) メモリー: 64GB OS: SuSE Linux 9.3 (x86-64) 	<ul style="list-style-type: none"> 2CPU8Coreのマシンによる並列計算 CPU: Intel Xeon X5570 (2.93GHz) メモリー: 48GB OS: Red Hat Enterprise Linux Server Release 5.3



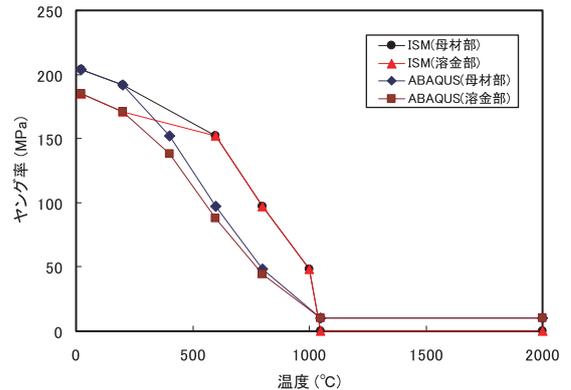
(a) 比重



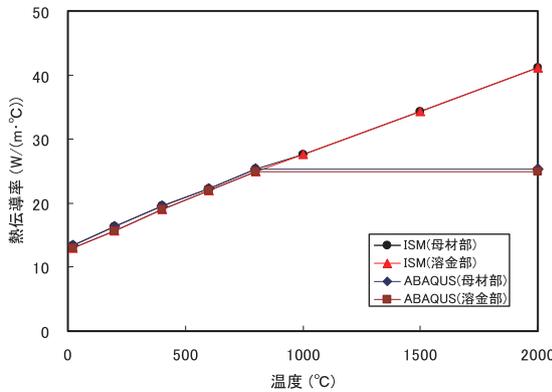
(e) 降伏応力



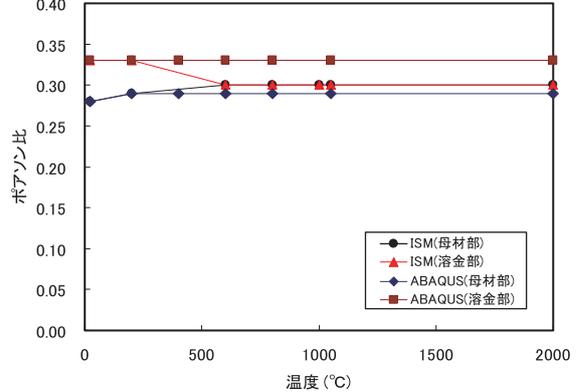
(b) 比熱



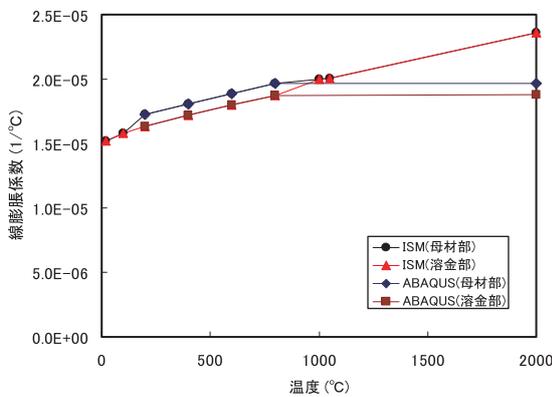
(f) ヤング率



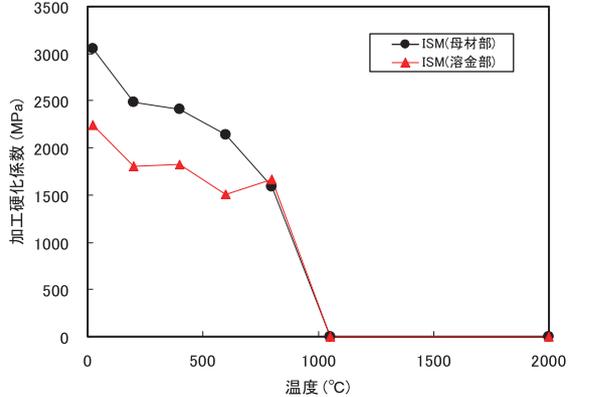
(c) 熱伝導率



(g) ポアソン比



(d) 熱膨張係数



(h) 加工硬化係数

図 10 解析に使用した材料定数の温度依存性

4.4 計算時間の比較

表4にISMコードとABAQUSコードのそれぞれの解析に要した計算時間を示す。解析条件が異なるため、定量的な比較ではないが、移動熱源モデルを用いたISMコードの解析に要した計算時間は、瞬間熱源モデルを用いたABAQUSコードの解析に要した計算時間より若干大きい程度である。ABAQUSコードによる解析は、瞬間熱源モデルを用いて計算時間を大幅に削減したことや2CPU8CoreとISMコードの場合の2倍のCore数を使用したことを考慮すると、ISMコードがABAQUSコードよりかなり高速で溶接シミュレーションを実施できることがわかる。

表4 解析処理・計算時間の比較

解析コード	解析内容	計算時間	解析環境
ISM	熱伝導解析	9.2 h	4CPU マシンを用いた並列計算
ABAQUS		13.2 h	2CPU8Core のマシンによる並列計算
ISM	熱弾塑性解析	61.1 h	4CPU マシンを用いた並列計算
ABAQUS		43.5 h	2CPU8Core のマシンによる並列計算

4.5 解析結果の比較と測定値による検証

図11から図13にISMコードとABAQUSコードによる残留応力解析結果を比較した。図で比較した残留応力分布は解析によって得られた定常的な分布を示す。溶接中心および溶接中心から管軸方向に20mm離れた箇所、同じく40mm離れた箇所の板厚方向分布を比較した。図には、関数表示-固有ひずみ法を用いて測定した配管継手試験体の残留応力測定値^{(53),(54)}を併記した。関数表示-固有ひずみ法^{(55),(56)}は、試験体を細かく切断して残留応力を解放させる時のひずみ変化量を測定し、得られたひずみ変化量を基に固有ひずみ分布を関数表示で表し、この固有ひずみ分布を弾性解析することにより残留応力分布を求める測定方法である。ここでは、固有ひずみを表す関数として式(1)に示す3次の多項関数と式(2)に示す3次の三角多項関数を用いた。

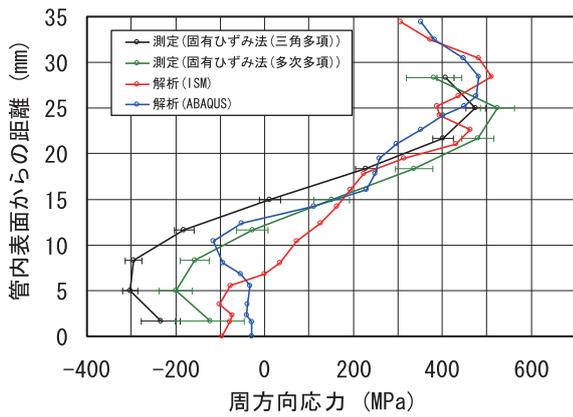
$$\varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ijk} \left(1 - \frac{\zeta}{Z_k}\right)^i \left(1 - \frac{\xi}{R_k}\right)^j \quad (1)$$

$$\varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi) = A_{1k} \left(1 - \frac{\zeta}{Z_k}\right) \left(1 - \frac{\xi}{R_k}\right) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ijk} \cos\left((2i-1)\frac{\pi\zeta}{2Z_k}\right) \cos\left((2j-1)\frac{\pi\xi}{2R_k}\right) \quad (2)$$

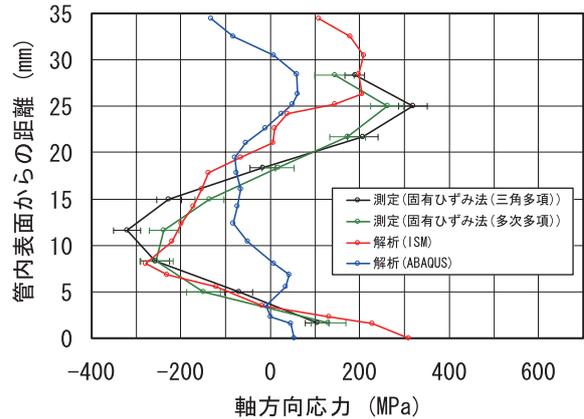
ここで、 $\varepsilon_k^{*f}(\zeta, \xi)$ は固有ひずみ分布、 ζ, ξ は局所座標（軸方向および径方向）、 Z_k, R_k は局所座標系における固有ひずみ領域端部の座標（軸方向および径方向）、 A_{1k}, A_{ijk} は固有ひずみ分布関数、 $k=0, 1, 2, 3, 4, N=1, 2, 3$ である。式(1)および(2)を用いて、周方向には均一な分布を持つ3次元軸対称分布として、残留応力分布を計算した。

図11から13では、二つの解析値は測定値と比較して、残留応力の最大値と最小値の位置がほぼ一致していることがわかる。しかし、図11に示す溶接中心位置の軸方向応力では、ISMコードによる解析値は測定値とほぼ一致していることに対して、ABAQUSコードの解析値の最大値および最小値は測定値よりも小さく、分布形状が測定値と異なっている。図12に示す溶接中心から20mm位置の軸方向応力でも外面側が測定値と異なり小さい。これは、瞬間熱源モデルを用いたことにより溶接熱源の移動に伴い生じる管軸方向の溶接曲げ変形が正確に再現できなかったためではないかと考えられる。移動熱源モデルの場合は、配管周方向に時刻歴で熱源を移動させる。よって、周方向に沿って加熱・冷却が繰り返されるので、周方向に偏った塑性ひずみの蓄積が起これ、この塑性ひずみの偏った分布が曲げ変形を発生させるが、瞬間熱源モデルでは、加熱・冷却の繰り返しはないことから、ひずみ分布の偏りは小さく曲げ変形が小さくなり、発生する曲げ応力も小さいと考えられる。

また、図12に示す溶接中心から20mm位置の周方向応力において、ABAQUS解析値は測定値やISM解析値に比べ、内面側の圧縮応力が小さい。瞬間熱源モデルで溶接シミュレーションをする場合、溶接部を熔融温度まで十分に昇温させるために入熱時間を現実よりも大きくする場合がある。この時、周囲への熱伝導時間が実際よりも大きくなるため、結果として溶接部周辺の残留応力が実際と異なる場合がある。このことに起因して差異が生じたのではないと思われる。

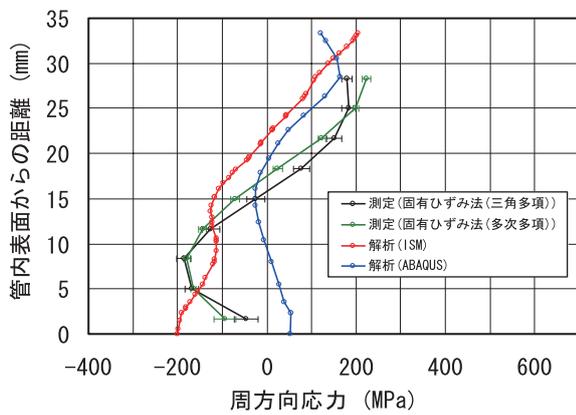


(a) 周方向残留応力

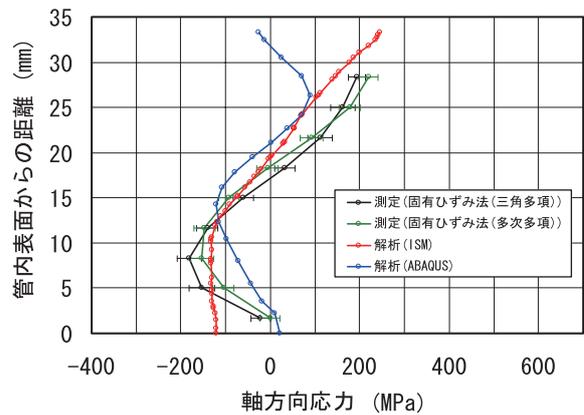


(b) 軸方向残留応力

図 11 溶接中心位置における残留応力の板厚方向分布

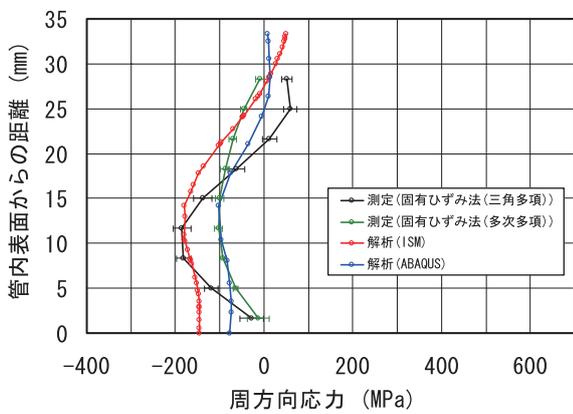


(a) 周方向残留応力

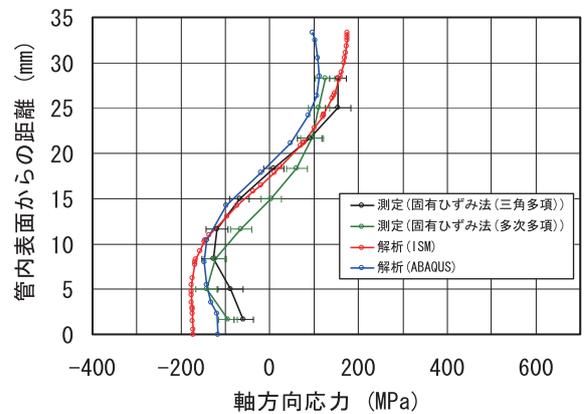


(b) 軸方向残留応力

図 12 溶接中心から 20mm 離れた位置における残留応力の板厚方向分布

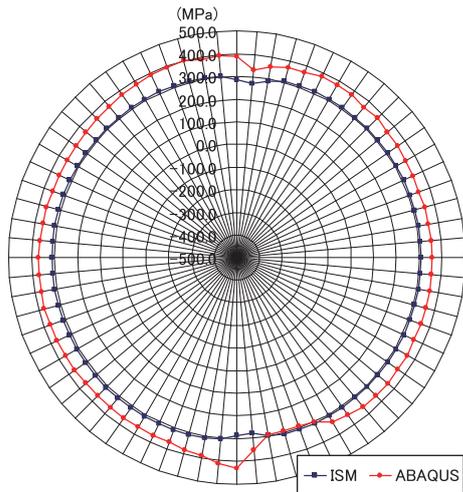


(a) 周方向残留応力

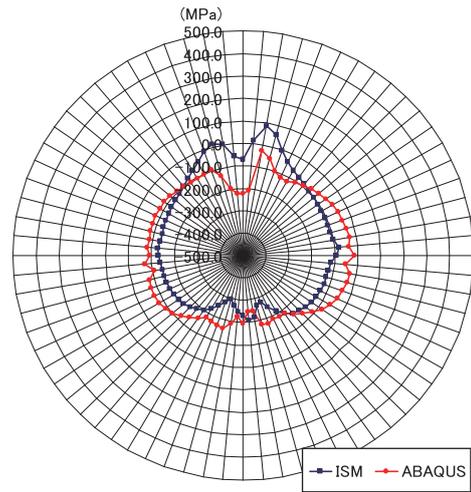


(b) 軸方向残留応力

図 13 溶接中心から 40mm 離れた位置における残留応力の板厚方向分布

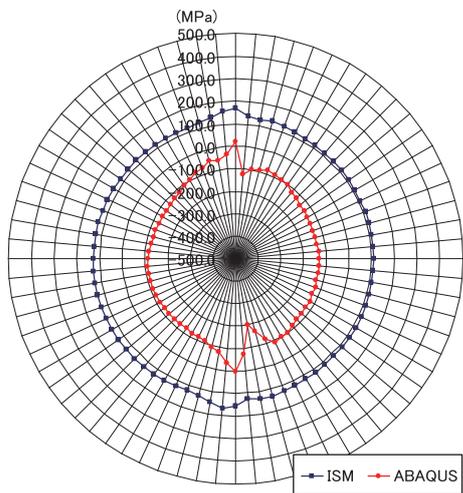


(a) 外表面

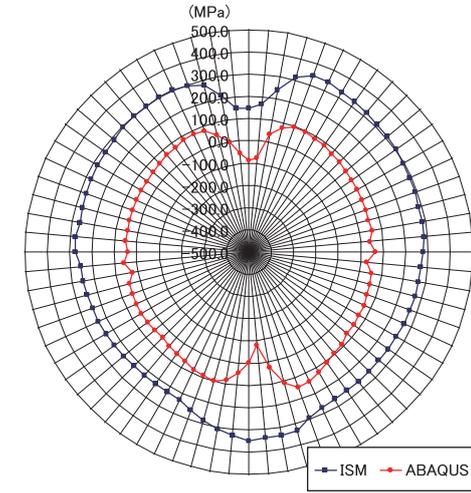


(b) 内表面

図 14 溶接中心位置の周方向残留応力分布 (周方向応力成分)

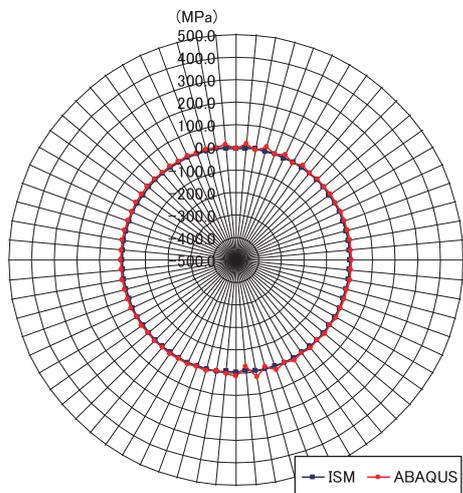


(a) 外表面

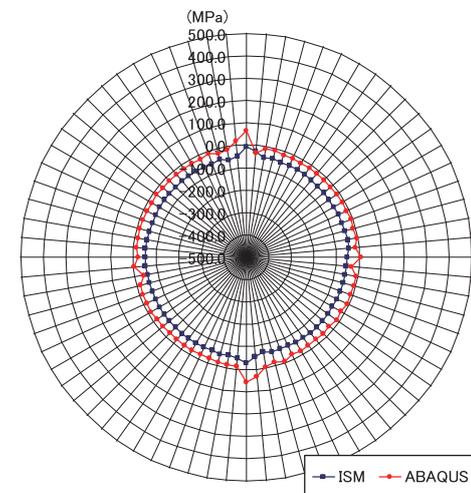


(b) 内表面

図 15 溶接中心位置の周方向残留応力分布 (軸方向応力成分)



(a) 外表面



(b) 内表面

図 16 溶接中心位置の周方向残留応力分布 (径方向応力成分)

図 14 から図 16 に、ISM 解析値と ABAQUS 解析値について、溶接中心位置の内外表面における周方向残留応力分布を比較した。図 14 に示すように周方向応力成分の分布形状はよく一致しているが、大きさは ABAQUS 解析値が若干大きくなった。これは、瞬間熱源モデルを使用した ABAQUS の方が入熱時間は大きいので、温度上昇が実際よりも大きく、その影響により塑性ひずみ蓄積量に差が生じたためと考えられる。図 15 に示す軸方向応力成分では分布形状は一致したが、大きさは ABAQUS 解析値が小さくなった。これは前述したように、移動熱源モデルと瞬間熱源モデルの違いに起因する曲げ変形の大きさの差によると考えられる。図 16 の径方向応力成分では、分布形状と大きさともによく一致した。

以上のように、瞬間熱源モデルと移動熱源モデルの等価性については以前から議論^{(57),(58)}があるが、大口径厚肉の配管継手の多層多パス溶接については、瞬間熱源モデルで解析した残留応力分布形状が測定値の分布形状と大きく異なる場合があることを示した。本研究で用いたような溶接層数の大きな配管継手の溶接シミュレーションに対しては、移動熱源モデルを使用することが精度向上に有効であることがわかった。しかしながら、多層多パス溶接を移動熱源モデルで解析すると膨大な計算時間を要するので、溶接シミュレーションの高速化が必要である。本研究で提案した ISM を用いた溶接シミュレーション手法はこの課題を解決し得ると考えられる。

5. 結言

高速計算かつ高精度な溶接シミュレーションを実現するために、反復サブストラクチャー法 (ISM) を用いた溶接シミュレーションの更なる高速化を行った。さらに、測定値との比較により解析精度の検証を行うとともに、異なる溶接熱源モデルによる解析結果への影響を考察した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) ISM を用いた溶接シミュレーションコードに並列処理機能と高速計算ソルバーを追加することにより、大幅な計算速度の向上を行った。
- (2) 開発した溶接シミュレーションコードの計算速度は市販の解析コードの速度に比べて大幅に速いことを示した。
- (3) 開発した溶接シミュレーションコードは、測定値とほぼ一致し、十分な解析精度を持つことを検証し

た。

- (4) 多層多パスの配管継手において、瞬間熱源モデルによる解析では残留応力を精度良くシミュレーションできない場合があることを示し、移動熱源モデルの有効性を示した。

謝辞

反復サブストラクチャー法 (ISM) を用いたシミュレーション計算において、大阪大学接合科学研究所の河原特任研究員と森下特任研究員のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文献

- (1) 坂下元昭, 松田将省, 柴下直昭, 荒木憲司, “原子力発電所の長期安定運転に向けた高度保全技術,” 日立評論, Vol. 88, No. 2, pp. 183-188, (2006).
- (2) 沖村浩司, 堀展之, 向井正行, 増本光一郎, 鴨和彦, 黒川政秋, “加圧水型原子炉 (PWR) の長期安定運転を支える保全技術 (応力腐食割れ対策技術),” 三菱重工技報, Vol. 43, No. 4, pp. 41-44, (2006).
- (3) 畠沢守, 山本哲夫, 鈴木茂, “原子力発電プラントのリコンストラクションと価値向上,” 東芝レビュー, Vol. 62, No. 11, pp. 16-22, (2007).
- (4) 宮崎克雅, 菅野智, 望月正人, 林眞琴, 白鳥正樹, 干強, “影響関数法および固有ひずみ解析法による溶接残留応力場における表面き裂の応力拡大係数の評価,” 日本機械学会論文集 (A 編), 第 65 巻, 第 636 号, pp. 1709-1715, (1999).
- (5) 望月正人, “残留応力と保全 - 第 2 回 - 溶接残留応力が強度・破壊に及ぼす影響,” 保全学, Vol. 5, No. 3, pp. 28-35, (2006).
- (6) Miyazaki, K., and Mochizuki, M., “The Effects of Residual Stress Distribution and Component Geometry on the Stress Intensity Factor of Surface Cracks,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 133, pp. 011701-1-011701-7, (2010).
- (7) Mahmoudi, A.H., Smith, D., Truman, C.E. and Pavier, M.J., “Application of the Modified Deep Hole Drilling Technique (iDHD) for Measuring near Yield Non-Axisymmetric

- Residual Stresses,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77940, (2009).
- (8) 前川晃, 野田満靖, 大厩徹, 高橋茂, “中性子回折法によるオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の残留応力分布,” INSS JOURNAL, Vol. 16, pp. 62-73, (2009).
- (9) 梅本忠宏, 田中伸治, “管の溶接残留応力の簡便な計算方法,” 石川島播磨技報, 第23巻, 第6号, pp. 527-533, (1983).
- (10) Ueda, Y., Murakawa, H., Nakacho, K. and MA, N.X., “Establishment of Computational Welding Mechanics,” Transactions of JWRI, Vol. 24, No. 2, pp. 73-86, (1995).
- (11) Yaghi, A. and Becker, A., “State of the Art Review – Weld Simulation Using Finite Element Methods,” Report FENET-UNOTT-DLE-08, The University of Nottingham, (2004).
- (12) 前川晃, 高橋茂, 芹澤久, 村川英一, “配管溶接継手の残留応力解析における反復サブストラクチャー法の適用による高速化,” INSS JOURNAL, Vol. 17, pp. 60-74, (2010).
- (13) 上田幸雄, 山川武人, “有限要素法による熱弾塑性挙動の解析,” 溶接学会誌, 第42巻, 第6号, pp. 567-577, (1973).
- (14) Sarkani, S., Tritchkov, V. and Michaelov, G., “An Efficient Approach for Computing Residual Stresses in Welded Joints,” Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 35, pp. 247-268, (2000).
- (15) Fricke, S., Keim, E. and Schmidt, J., “Numerical Weld Modeling - A Method for Calculating Weld-Induced Residual Stress,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 206, pp. 139-150, (2001).
- (16) Warren, A.P., Bate, S.K., Charles, R., O’ Gara, D.M., Wood, P.M. and Gregg, A., “The Effect of Modelling Simplifications on the Prediction of Residual Stresses in Thin-Walled Pipe Butt Welds,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2006-ICPVT-11-93384, (2006).
- (17) Warren, A.P., Bate, S.K. and Hurrell, “The Effect of Modelling Simplifications on the Prediction of Residual Stresses in a Multi-Pass Plate Groove Weld,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2007-26339, (2007).
- (18) Deng, D., Murakawa, H. and Liang, W., “Numerical and Experimental Investigations on Welding Residual Stress in Multi-Pass Butt-Welded Austenitic Stainless Steel Pipe,” Computational Materials Science, Vol. 42, pp. 234-244, (2008).
- (19) Lindgren, L.E., Haggblad, H.A., McDill, J.M.J. and Oddy, A.S., “Automatic Remeshing for Three-Dimensional Finite Element Simulation of Welding,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 147, pp. 401-409, (1997).
- (20) Runnemalm, H. and Hyun, S., “Three-Dimensional Welding Analysis Using an Adaptive Mesh Scheme,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 189, pp. 515-523, (2000).
- (21) Qingyu, S., Anli, L., Haiyan, Z. and Aiping, W., “Development and Application of the Adaptive Mesh Technique in the Three-Dimensional Numerical Simulation of the Welding Process,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121, pp. 167-172, (2002).
- (22) Boitput, F. and Bergheau, J.M., “The Numerical Simulation of Welding in Europe : Present Capabilities and Future Trends,” Transactions of JWRI, Vol. 32, No.1, pp. 196-206, (2003).
- (23) Duranton, P., Devaux, J., Robin, V., Gilles, P. Bergheau, J.M., “3D Modelling of Multipass Welding of a 316L Stainless Steel Pipe,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 457-463, (2004).
- (24) Zhang, J., Dong, P. and Brust, F.W., “A 3-D Composite Shell Element Model for Residual Stress Analysis of Multi-Pass Welds,” Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14) , BLDW/6, pp. 335-344, (1997).
- (25) Dong, P., Zhang, J. Bouchard, P.J., “Effects of Repair Weld Length on Residual Stress

- Distribution,” *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 124, pp. 74-80, (2002).
- (26) Brown, S.B. and Song, H., “Rezoning and Dynamic Substructuring Techniques in FEM Simulations of Welding Processes,” *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 415-423, (1993).
- (27) Liu, C. and Zhang, J., “Numerical Simulation of Welding Stresses and Distortions Based on 3D Dynamic Substructure Method,” *Transactions of the China Welding Institution*, (2008).
- (28) 村川英一, 尾田勇, 伊藤真介, 芹澤久, 柴原正和, 西川弘泰, “溶接における力学現象のFEM解析高速化のための反復サブストラクチャー法,” *溶接学会全国大会講演概要*, 第75集, (2004).
- (29) Nishikawa, H., Oda, I., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Development of High-speed and High-precision FEM for Analysis of Mechanical Problem in Welding,” *Transactions of JWRI*, Vol. 33, No. 2, pp. 161-166 (2004).
- (30) 村川英一, 尾田勇, 伊藤真介, 芹澤久, 柴原正和, 西川弘泰, “反復サブストラクチャー法を用いた溶接熱弾塑性解析の高速化,” *関西造船協会論文集*, 第243号, pp. 67-70 (2005).
- (31) 西川弘泰, 芹澤久, 村川英一, “大規模溶接シミュレーション手法の開発,” *日本船舶海洋工学論文集*, 第2巻, pp. 379-385 (2005).
- (32) 西川弘泰, 芹澤久, 村川英一, “大規模溶接シミュレーション手法の実機適用,” *溶接学会論文集*, 第24巻, 第2号, pp. 168-172 (2006).
- (33) Nishikawa, H., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Actual Application of FEM to Analysis of Large Scale Mechanical Problem in Welding,” *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 12, No. 2, pp. 147-152 (2007).
- (34) Wang, R., Rashed, S., Serizawa, H., Murakawa, H., Zhang, J., “Numerical and Experimental Investigation on Welding Deformation,” *Transactions of JWRI*, Vol. 37, No. 1, pp. 79-90, (2008).
- (35) Tanaka, N., Kawahara, A., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Thermal Elastic Plastic Analysis for Welding Problem of Large Scale Models,” *Proceedings of the Visual-JW2010*, MCJW-12, pp. 97-98, (2010).
- (36) Maekawa, A., Noda, M., Takahashi, S., Oumaya, T., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Evaluation of Residual Stress Distribution in Austenitic Stainless Steel Pipe Butt-Welded Joint,” *溶接学会論文集*, 第27巻, 第2号, pp. 240s-244s(2009).
- (37) Maekawa, A., Takahashi, S., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Fast Computational Residual Stress Analysis for Welded Pipe Joint Based on Iterative Substructure Method,” *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2011-57237, (2011).
- (38) 西川弘泰, “大規模溶接シミュレーション手法の開発および実機への適用,” *大阪大学博士論文*, (2006).
- (39) Itoh, S., Nakata, K., Chimura, I., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Influence of Geometry and Welding Procedures on Welding Deformation of Stiffened Plates,” *Proceedings of 17th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE'07)*, p. 3408, (2007).
- (40) 柴原正和, 伊藤真介, 芹澤久, 正岡孝治, 村川英一, “三次元溶接高温割れ解析法の開発と狭開先溶接時における梨型ビード割れ問題への応用,” *溶接学会論文集*, 第27巻, 第1号, pp. 81-88, (2009).
- (41) Mochizuki, M., and Itoh, S., “Million-Finite-Element-Order Large-Scale Computation of Residual Stress in Complication Weld Structures,” *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2010-25902, (2010).
- (42) 小川宏高, 松岡聡, “部分計算を用いたMPIプログラム最適化システム OMPI,” *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No.6, pp. 1700-1708, (1998).
- (43) Pacheco, P.S. (原著), 秋葉博 (訳), *MPI並列プログラミング*, 培風館, (2001).
- (44) 南里豪志, “PC クラスタを作ってみませんか? MPIによる並列プログラミング入門,” *Journal of Plasma Fusion Review*, Vol. 79, No. 8, pp. 765-771, (2003).
- (45) 小島好紀, 佐藤三久, 朴泰祐, 高橋大介, “MPI上のソフトウェア分散共有メモリシステム,” *情報処理学会 研究報告*, 2004-HPC-98 (8), pp. 4348, (2004).
- (46) 館野論司, 重原孝臣, 長谷川秀彦, 桧山澄子,

- “共有メモリ型並列計算機上の行列計算に対する並列化手法の性能評価,” 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 44, No. SIG 11(ACS 3), pp. 286-296, (2003).
- (47) 長谷川秀彦, “OpenMP を用いた帯行列に対する直接解法の並列化,” 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol. 45, No. SIG 6(ACS 6), pp. 86-94, (2004).
- (48) 牛島省, OpenMP による並列プログラミングと数値計算法, 丸善, (2006).
- (49) インテル(株), インテル マス・カーネル・ライブラリ リファレンス・マニュアル, (2005).
- (50) Dassult Systemes, ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6.8, Dassult Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA, (2008).
- (51) 望月正人, 榎本邦夫, 岡本紀明, 斉藤英世, 林英策, “厚板を貫通する配管溶接による残留応力発生機構の検討,” 溶接学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号, pp. 561-567, (1994).
- (52) 佐藤邦彦, 寺崎俊夫, “構造用材料の溶接残留応力分布におよぼす溶接諸条件の影響,” 溶接学会誌, 第 45 巻, 第 2 号, pp. 150-156, (1976).
- (53) Maekawa, A., Nakacho, K., MA, N.X. and Sato, R., “Residual Stress Measurement of Large-Bore Stainless Steel Pipe with Butt-Welded Joint by Inherent Strain Method,” Proceedings of the Visual-JW2010, MCJW-6, pp. 85-86, (2010).
- (54) 前川晃, 中長啓治, 麻寧緒, 佐藤玲子, “固有ひずみ法を用いた大口径ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の残留応力測定,” 日本機械学会論文集 (A 編), 第 77 巻, 第 777 号, pp. 713-717, (2011).
- (55) 上田幸雄, 麻寧緒, “固有ひずみの関数表示および推定法—固有ひずみ分布の関数表示による残留応力の推定法と測定法 (第 1 報)—,” 溶接学会論文集, 第 11 巻, 第 1 号, pp. 189-195, (1993).
- (56) 中長啓治, 太田高裕, 小川直輝, 麻寧緒, 濱口裕充, 佐藤嶺樹, 名山理介, “固有ひずみ法による原子炉溶接継手の残留応力の測定—原子炉容器管台貫通部の残留応力測定—,” 溶接学会論文集, 第 25 巻, 第 4 号, pp. 581-589, (2007).
- (57) 佐藤邦彦, “移動熱源による熱伝導の特性に関する覚え書,” 溶接学会誌, 第 36 巻, 第 2 号, pp. 154-159, (1967).
- (58) 寺崎俊夫, 秋山哲也, 北村貴典, 中谷光良, “溶接熱伝導への瞬間熱源の適用範囲について,” 溶接学会論文集, 第 23 巻, 第 1 号, pp. 48-52, (2005).