

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

Fast Computable Residual Stress Analysis for Welded Pipe Joint Based on Iterative Substructure Method

前川 晃 (Akira Maekawa)*¹

高橋 茂 (Shigeru Takahashi)*²

芹澤 久 (Hisashi Serizawa)*³

村川 英一 (Hidekazu Murakawa)*³

要約 原子力発電プラントの機器・配管に発生する応力腐食割れ (SCC) に対する重要な影響因子のひとつに溶接による残留応力がある。溶接残留応力の評価には、解析による評価が測定データの補完や支配因子の系統的な検討等に有効であるが、実機を想定した場合、解析の対象となる構造物の規模や溶接条件等によっては計算時間が長くなり過ぎて解析が困難となる場合もある。本論文は、大規模な問題となる配管溶接継手の溶接シミュレーションに対する高効率で信頼性の高い溶接残留応力解析技術の開発について報告する。反復サブストラクチャー法を適用して配管溶接継手の残留応力解析を実施し、解の精度や高速解析性能について汎用有限要素法解析コードと比較した。両者の残留応力分布はほぼ一致し、本開発手法が十分な解析精度を有することを示した。さらに、本開発手法がより短時間で解析できることを明らかにした。これらの結果は大規模溶接構造物に対しても本開発手法が解析精度を低下させずに高速解析可能であることを示す。

キーワード 残留応力, 数値解析, 有限要素法, 突合せ溶接継手, 反復サブストラクチャー法, 溶接シミュレーション, 高速解析

Abstract Residual stress caused by welding is one of the most influential factors on stress corrosion cracking (SCC) to occur in vessels and piping of nuclear power plants. Among various evaluation methods of welding residual stress, numerical simulation is effective for complement of measured data and systematic study on dominant factors. However, an application for actual size components frequently makes it difficult to analyze the residual stress because of extremely long calculation time depending on the structural size and welding conditions. In this paper, a development of an efficient and reliable technique for welding residual stress analysis is reported. The analysis technique to calculate the residual stress using iterative substructure method was developed and compared with conventional one using a commercial finite element analysis code concerning the analysis accuracy and the computational speed for the residual stress of welded pipe joint. The residual stress distributions obtained by the both methods agreed well with each other. Moreover, it has been clear that the developed technique can calculate the residual stress with less computing time. From the results, it is concluded that the analysis technique using the iterative substructure method can also calculate the residual stress distribution much faster with nearly same accuracy as the conventional methods when the size of welding structure is larger.

Keywords Residual stress, Numerical simulation, Finite element method, Butt-welded joint, Iterative substructure method, Weld simulation, Fast computation

1. 緒言

原子力発電プラントにおいて、応力腐食割れ (SCC) や高サイクル疲労は防止すべき重要な損傷モ

ード⁽¹⁾である。SCC や疲労は環境、材料特性、負荷応力等の影響因子^{(2)~(5)}に支配されるが、その中でも重要な影響因子として、溶接、冷間加工、熱処理、ピーニング、切削加工等によって生じる残留応力が

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 3 大阪大学 接合科学研究所

挙げられる。

一般に、き裂発生といった損傷が懸念される部位の多くが配管や容器の溶接部ないしはその近傍であり、溶接残留応力⁽⁶⁾⁽⁷⁾は最も代表的な残留応力のひとつである。SCCや疲労によるき裂の発生・伝播、破壊を評価するには溶接残留応力分布の評価⁽⁸⁾が不可欠であるが、現状ではその評価精度は十分ではなく、評価精度の向上が求められている。

溶接残留応力の評価法としては、実機またはモックアップによる残留応力測定^{(9)~(17)}や解析シミュレーションによる予測^{(18)~(27)}があり、通常は両者を比較しながら相補的に組み合わせて使っている^{(28)~(30)}。

測定には多くの時間や費用を要すること、さらには、対象物の大きさや放射化といった制約があることから、測定による評価では測定データ量に限界がある。

解析シミュレーションは測定データの補完や支配因子の系統的な検討に有効であり、汎用構造解析コードや溶接シミュレーション専用コードを適用した検討が広く行われている。しかしながら、実機を対象とした場合、対象構造物の規模や溶接条件等によっては計算時間が長くなり過ぎて、實際上、解析が困難なケースが多い。計算時間が長いという制約から、例えば、解析モデルを簡略化して計算時間を短縮するなどの措置を採ると解析精度の低下に繋がり、感度解析といった解析検討も実際には困難⁽³¹⁾というのが現状である。そのため、大幅に高速化でき実機規模の溶接条件に対して実用的な時間内で解析が実施できるようになれば、溶接残留応力分布評価に解析シミュレーションを用いる大きな利点と成り得る。

近年、国内外で溶接残留応力解析の高度化研究^{(32)~(40)}が進められている。しかし、解析自体は汎用解析コードを用いることとし、解析手順や解析モデルの技術的な工夫に研究の主眼が置かれており、解析速度や解析精度を向上させるには効果は限定的と考えられる。溶接残留応力解析の計算速度や解析精度の向上には精密な3次元モデルを用いることや溶接シミュレーション手法の更なる高速化が必要と考えられる。

本論文では、多層多パス配管溶接継手の溶接シミュレーションに反復サブストラクチャー法と呼ばれる高速解析法⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾を適用し、残留応力解析の高速化と高精度化について検討した結果を報告する。

2. 反復サブストラクチャー法

溶接問題の特徴は、溶接の力学現象に着目した場合、大きく分けて2つある。一つ目は、溶接熱源近傍の極めて小さい領域のみが熱弾塑性挙動に起因する非線形状態になり、大部分を占める他の領域は弾性状態もしくはほぼ弾性状態になる局所非線形性を示すことである。二つ目は、非線形領域が溶接熱源とともに移動する移動非線形性を示すことである。従来の有限要素法などを利用した溶接シミュレーションでは、解析モデルの一部が非線形挙動を示す場合でもモデル全体を非線形領域として解く必要があり、大規模な非線形問題を時刻歴で解くこととなり、計算時間が非現実的に長くなる。

そこで、本研究で用いた方法では、計算領域を線形領域と非線形領域に分けて計算を行う。線形領域では領域の剛性は不変であると仮定し、計算負荷の大きい前進消去を最初に一度だけ行い、以後は前進消去を行わず、計算負荷の小さい後退代入のみを実行する。このようにして解析ステップ毎の計算時間を短縮する。一方、非線形領域ではステップ毎に領域の剛性を変更して熱応力計算を実行し、変位や荷重を計算する。そうすれば、計算領域が小さいために計算時間は短くて済む。したがって、従来の解析法に比べてステップ毎に解析モデル全体を解く必要がないため計算時間を短縮できる。線形領域と非線形領域の判定は要素温度や塑性状態により行い、線形領域と非線形領域の境界における変位は常に連続するように設定し、荷重の釣り合いを反復計算により満足させる。このような計算アルゴリズムにより溶接における熱弾塑性解析の高速計算化を図った方法を反復サブストラクチャー法と呼び、村川ら⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾により提案されている。

反復サブストラクチャー法の計算手順について図1を基に詳細に説明する。

- (1) 図1 (a) に示す全体領域を図1 (b) に示すように弾性（線形）領域のA'領域と非線形領域のB'領域に分ける。ここで(A' + B')領域をほぼ弾性領域として定剛性問題として解き、図1 (c) に示す{(A' + B') - (B)}領域内の釣合条件を満足する解を求め、境界Γの変位を抽出する。
- (2) ステップ(1)で求めた境界Γの変位を強制変位としてB領域を非線形問題として解く。
- (3) {(A' + B') - (B)}領域とB領域間の不均衡反力を計算する。

- (4) ステップ (3) で求めた不均衡反力を (A' + B') 領域に与えて、境界 Γ の変位の修正量を計算する。
- (5) 不均衡反力が収束するまで、(2) から (4) まで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ので、図 1 (c) に示すように非線形問題である 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いている。さらに、温度ステップが進み、つまり熱源移動して 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、解析ステップ毎に全体の剛性を求める必要がなく、全体として計算時間が飛躍的に低減できる。(A' + B') 領域の剛性は B 領域の計算が収束しなかった場合に更新する。

本論文では、B 領域の範囲は有限要素の温度が 400℃ 以上で塑性負荷中という条件によりプログラム内で自動判定させた。

反復サブストラクチャー法の高速解析性能は村川ら (41) (42) や西川ら (43) ~ (48) により検討されている。例えば、円板の肉盛り溶接問題に適用し、市販の汎用有限要素法解析コードと同等の解析精度で 16.8 倍高速で解析できることを確認している。さらに、解析モデルが大規模になればなるほど反復サブストラクチャー法による計算速度の向上が顕著になることを確認している。

本論文では、反復サブストラクチャー法を利用した溶接シミュレーションを多層多パス配管溶接継手に適用し、残留応力解析の解析速度と解析精度について検討した。節点数 30,000 程度の中規模解析モデルを作成して検討するとともに市販の有限要素法解

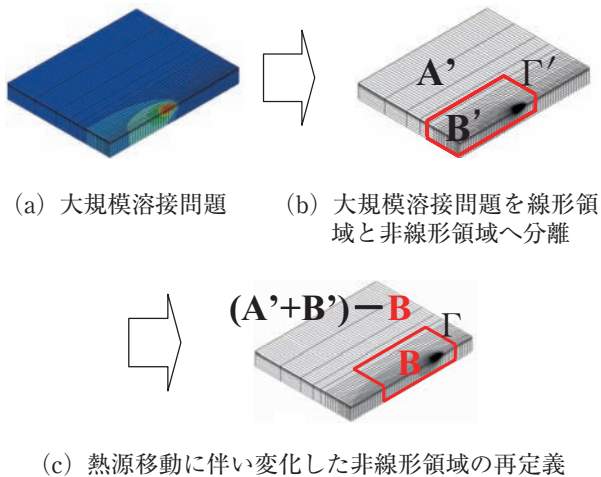


図 1 反復サブストラクチャー法の概念

析コード ABAQUS⁽⁴⁹⁾ の結果と比較した。

3. 解析モデル

3.1 配管溶接継手供試体の製作

解析モデルの参考とした配管溶接継手供試体の写真と寸法を図 2 に示す。供試体にはオーステナイト系ステンレス鋼管 SUS316TPS を用いた。外径は 165.2mm、内径は 128.8mm で、肉厚 18.2mm の 6B Sch160 配管の突合せ溶接継手である。初層は自動ガスタングステンアーク (GTA) 溶接 (下向き姿勢) により、残層は被覆アーク (SMAW) 溶接 (下向き姿勢) を用いて 5 層 5 パス溶接を行った。溶接は 0° から 360° へ周方向溶接を行った。溶接条件の施工時測定値を表 1 にまとめる。

2 つの長さ 200mm の円管を溶接後、全長 100mm の長さに切断して供試体を製作した。溶接前の開先形状寸法と溶接後の溶金部断面マクロ写真を図 3 および図 4 に示す。解析モデルでは、図 3 に示す溶接施工前の開先形状や寸法を参考にしながら、図 4 に示す溶金部の断面マクロ写真に基づいて溶金部のモデル化を行った。

熱伝導解析に供するため、溶接中および約 100℃ までの冷却過程における管材の外面および内面の表

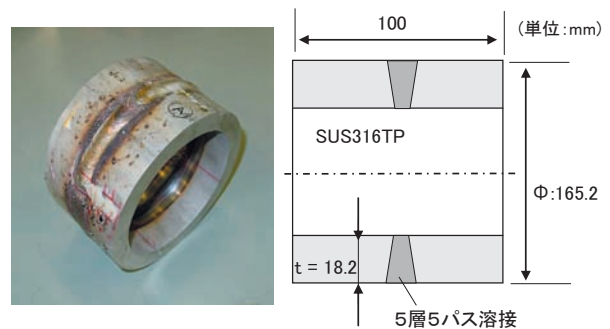


図 2 配管溶接継手供試体

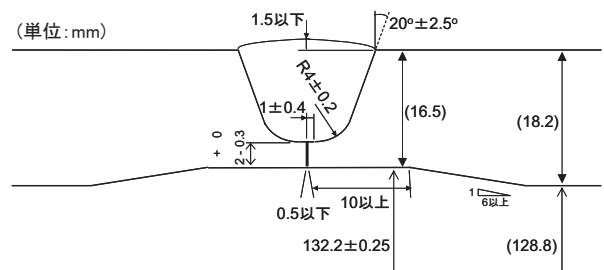


図 3 開先寸法

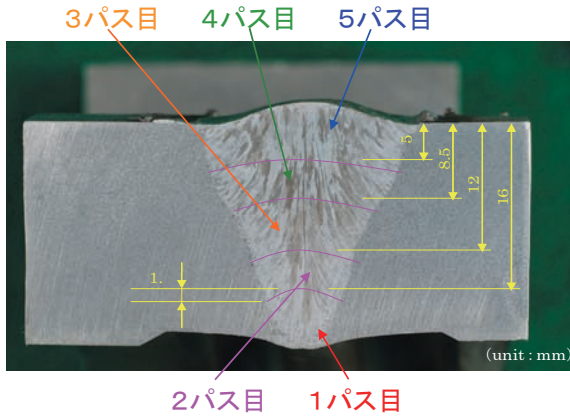


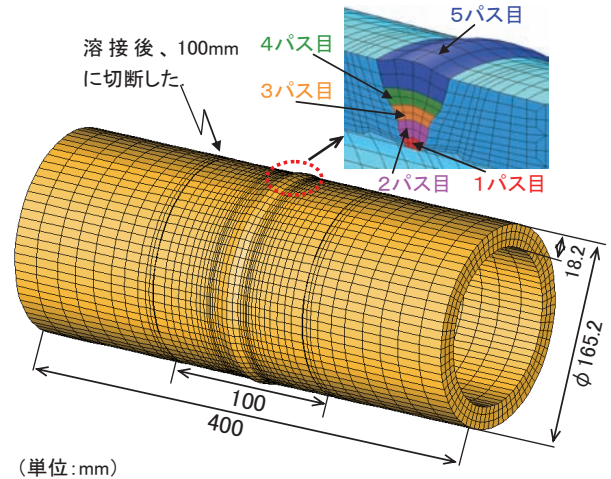
図4 溶接部断面マクロ写真

面温度を熱電対により測定した。0°と180°位置については、溶接止端部から5mm離れた位置を測定し、90°と270°位置では溶接止端部から10mmと20mm離れた位置を測定した。

3.2 解析モデル作成と使用した材料定数

作成した解析モデルを図5に示す。残留応力や溶接変形の解析精度向上を図るため、8節点ソリッド要素を用いて3次元モデル化し、図2の供試体の寸法を反映したモデルを作成した。実際の溶接施工と同じように、片端で完全拘束とし、反対側の端部は無拘束とした。初期全長は400mmとし、溶接後に要素消去をすることで、全長100mmになるようにした。この要素消去時に弾性解析を行って応力を再配分させることにより、切断時の端部における応力解放を模擬した。さらに、溶接シミュレーションでは、移動熱源モデルを用いて、溶接トーチによる3次元的な熱源移動を再現することで、溶接時の熱弾塑性挙動を高精度に模擬した。

解析モデルの要素数は25,344であり、節点数は29,592である。周方向に72分割(5°ピッチ)した。図には突合せ溶接部断面のモデル形状を拡大して示



(単位:mm)

図5 解析モデル

している。このモデル化は図4のマクロ断面写真を参考にして作成した。

図6と図7に解析に用いた物性値を示す。図6に供試体から採取した試験片によるSUS316の母材部および溶金部の応力-ひずみ関係を示す。汎用有限要素法解析コードABAQUSではこの関係をそのまま用いたが、反復サブストラクチャー法を利用した

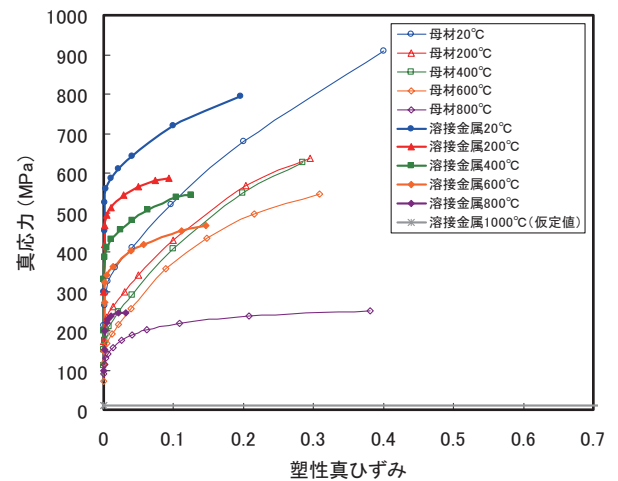
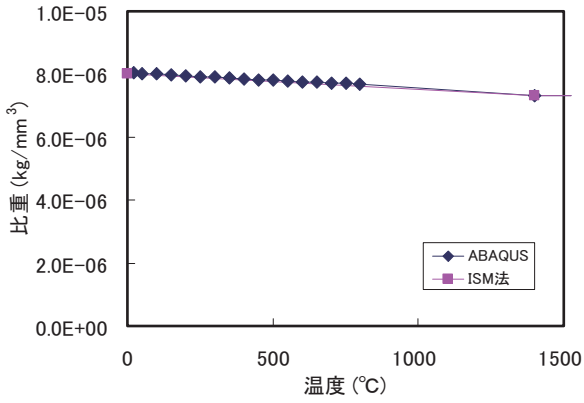


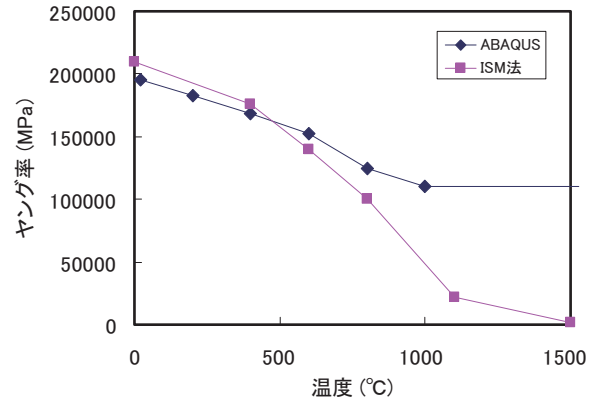
図6 ABAQUSで用いた真応力-塑性真ひずみ関係

表1 溶接条件

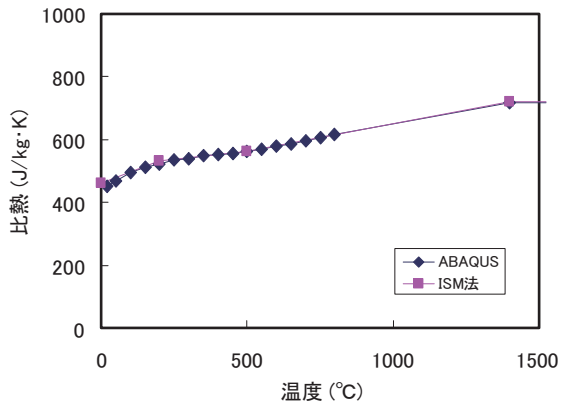
層	温度(°C)	溶接法	ワイヤー径(mm)	電流(A)	電圧(V)	溶接速度(mm/min)	入熱量(kJ/cm)
1	室温	GTA 溶接	1.2	123	10.5	111	7.0
2	≥100	被覆アーク溶接	3.2	105	25	80	19.7
3			4.0	150	27	65	37.4
4			4.0	150	27	60	40.5
5			4.0	150	27	65	37.4



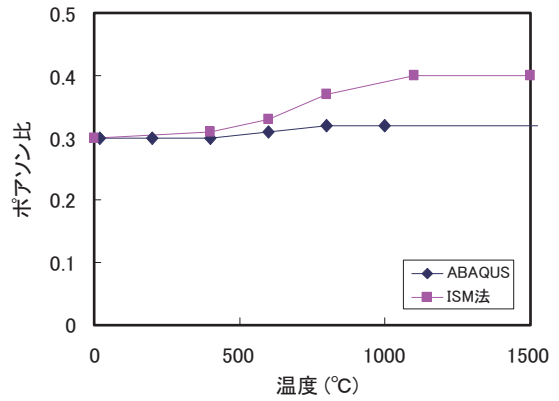
(a) 比重



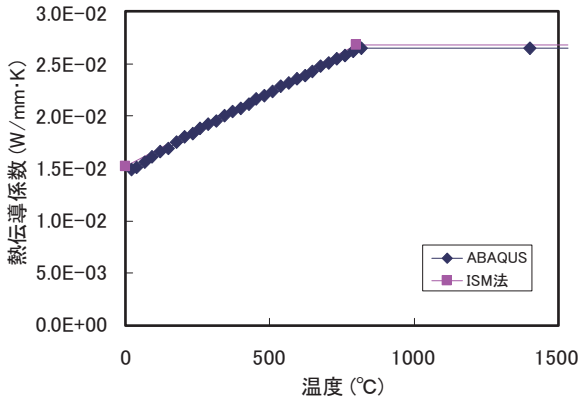
(e) ヤング率



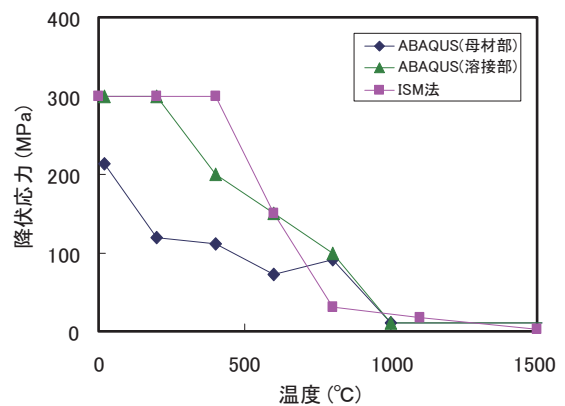
(b) 比熱



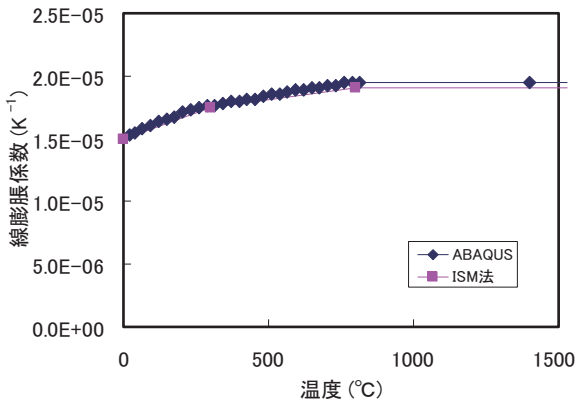
(f) ポアソン比



(c) 熱伝導係数



(g) 降伏応力



(d) 線膨脹係数

図7 使用した材料定数の温度依存性

有限要素法解析コード（以下、ISM 法と呼ぶ）では、入力上の制約から母材部のデータを2直線近似して用いた。ISM 法では上層の溶接時における下層へのアニーリング効果を考慮したため、母材部のデータを溶金部へ適用した。その他の材料定数の温度依存性を図7に示す。比重、比熱、熱膨張係数、線膨張係数は同じであるが、熱弾塑性解析に用いる材料定数（ヤング率とポアソン比）についてはABAQUSとISM法で若干異なっているものを使用した。ただし、ヤング率とポアソン比は高温側（800℃以上）で異なっているだけである。また、降伏応力について、ABAQUSでは母材部と溶金部とで異なる応力-ひずみ関係を用いたため、降伏応力についても異なるデータを用いた。ISM法では応力-ひずみ関係を2直線近似したことから、各温度における近似線の折れ曲がり点の値を降伏応力値として用いた。図7(e)および(f)に示すように、ヤング率とポアソン比は高温部（800℃以上）で明らかに差があり、高温時の力学的な解析結果に影響を与えるように見える。しかしながら、溶接の高温時には、材料が力学的溶融温度を超えているため荷重を受け持てることができない状態にあり、この現象を解析的に表現する方法として、高温時のヤング率あるいは降伏応力をゼロとすることが考えられる。ここでは、降伏応力の温度依存性において溶融点付近で降伏応力をゼロとして、溶融点以降は荷重ゼロで塑性が進むという現象を表現した。したがって、高温でのヤング率の差による影響は少ないと考えられる。ポアソン比についても同じ理由で高温におけるポアソン比の影響は小さくなるので、差による影響はほとんどないと考えられる。

4. 解析

4.1 熱伝導解析

熱伝導解析はISM法および汎用有限要素法解析コードABAQUSとも同条件で実施した。解析では、初期温度を20℃とし、パス間温度を100℃として計算した。モデル表面からの熱伝達は $20 \times 10^{-6} \text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$ とした。解析に用いた溶接効率と入熱速度は表2に示すものを使用した。

表2 溶接効率と入熱速度

層	溶接効率(%)	入熱速度(J/s)
1	65	839
2	75	1969
3	75	3038
4	75	3038
5	75	3038

4.2 ISM法による残留応力解析

ISM法による熱弾塑性解析を3.2章で示した解析モデルと材料定数を用いて実施し、残留応力を計算した。ISM法は反復サブストラクチャー法を利用して熱弾塑性解析を実施する有限要素法プログラムであり、計算アルゴリズムやOS・ハードとのインターフェイスについて十分に最適化してはいないことが今後の課題として残っている。この点により市販の解析コードに比べて、解析速度が劣ると考えられるが、本論文でこの点を考慮することなく、現行のISM法の解析性能と市販の解析コードの性能とを比較した。

ISM法は今後更なる改良を加える予定であるが、現在のISM法では、剛性行列の計算にスカイライン法を使用した。応力計算では安定的に解析を行うために、後退オイラー法を用いた。硬化則には等方硬化則を用いた。さらに、溶接時には溶接部下層が上層の溶接熱により熱影響を受ける、いわゆるアニーリング効果が生じるが、アニーリング効果を模擬するために、850℃以上の温度上昇があった時には、その領域の累積ひずみをゼロのようにプログラム化することで、熱弾塑性解析の精緻化を行い、残留応力解析精度の向上を図った。

4.3 ABAQUSコードによる残留応力解析

市販の汎用有限要素法解析コードのうち、代表的な解析コードとしてABAQUS⁽⁴⁹⁾を用いた。3.2章で示した解析モデルと材料定数を用いて熱弾塑性解析を行い、残留応力を求めた。硬化則には等方硬化則を用いた。

本論文では、ISM法による解析結果の精度検証や解析速度の比較をするために、ABAQUS Version 6.4⁽⁴⁹⁾を使用した。

5. ひずみゲージ法による残留応力測定

本論文では、ISM法と汎用有限要素法解析コードとの比較が主目的であるが、両者の解析結果の妥当性を確認するために、ひずみゲージを用いて残留応力測定（以下、ひずみゲージ法と呼ぶ）を実施した。

内外表面の残留応力については、ひずみゲージを用いた切断法のひとつである応力弛緩法⁽⁵⁰⁾によって直接測定した。内部の残留応力測定については、三次元軸対称を仮定して、ひずみゲージを用いた簡易測定法^{(50)~(52)}により行った。これら使用した2つの方法の詳細について以下に説明する。

まず、内外表面の残留応力測定では、配管の内外面にひずみゲージを貼り、表面近傍の周方向応力および軸方向応力の2成分を測定した。分割したときの小片の大きさは10mm×10mm×4mmを目安とした。分割時の溶接線方向と溶接線に直角方向のひずみ変化 $\Delta\varepsilon_x$ 、 $\Delta\varepsilon_y$ から次式で残留応力 σ_x と σ_y を求めた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\Delta\varepsilon_x + \nu\Delta\varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\Delta\varepsilon_y + \nu\Delta\varepsilon_x) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで E はヤング率で、195GPa（室温）である。ポアソン比 ν は0.3（室温）を用いた。

さらに、供試体内部の板厚方向（ z 方向）に発生する残留応力を次のようにして測定した。溶接線方向（ x 方向）と溶接線直角方向（ y 方向）に x 片、 y 片を切り出し、切り出し時に生じる直ひずみ変化 $\Delta\varepsilon$ を測定する。この時、表面（記号Tで表す）と裏面（記号Bで表す）の直ひずみ変化（ x 片の場合は $\Delta\varepsilon_{xT}$ および $\Delta\varepsilon_{xB}$ 、 y 片の場合は $\Delta\varepsilon_{yT}$ および $\Delta\varepsilon_{yB}$ ）を測定する。さらに、切り出した小片をさらに分割して、小片に残留する直応力（ x 片の x 方向の直応力を σ_{xR} 、 z 方向の直応力を σ'_{zR} とし、 y 片の y 方向の直応力を σ_{yR} 、 z 方向の直応力を σ_{zR} とする）を求めた。

求めた直ひずみ変化を用いて板厚内部のひずみ変化 $\Delta\varepsilon_x$ と $\Delta\varepsilon_y$ を次式で求める。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= \frac{\Delta\varepsilon_{xT} - \left(\frac{a}{b}\right)^2 \Delta\varepsilon_{xB}}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} + \frac{\Delta\varepsilon_{xB} - \Delta\varepsilon_{xT} \left(\frac{a}{z}\right)^2}{1 - \left(\frac{a}{b}\right)^2} \\ \Delta\varepsilon_y &= (\Delta\varepsilon_{yT} - \Delta\varepsilon_{yB}) \frac{z}{h} + \Delta\varepsilon_{yB} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 a は配管の内径、 b は外径であり、 h は板厚、 z は中心からの半径方向（板厚方向）の距離を示す。

x 方向応力 σ_x 、 y 方向応力 σ_y および z 方向応力 σ_z は次式から求める。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\Delta\varepsilon_x + \nu\Delta\varepsilon_y) + \frac{1}{1-\nu^2} \{ \sigma_{xR} + \nu(\sigma_{yR} + \sigma_{zR} - \sigma'_{zR}) \} \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\Delta\varepsilon_y + \nu\Delta\varepsilon_x) + \frac{1}{1-\nu^2} \{ \sigma_{yR} + \nu\sigma_{zR} + \nu^2(\sigma_{zR} - \sigma'_{zR}) \} \\ \sigma_z &= \sigma_{zR} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

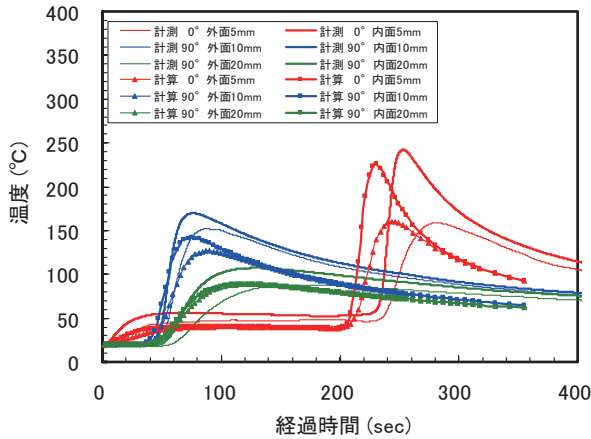
式(2)および(3)は、溶接線方向に残留応力分布が一様であると仮定して、直応力成分のみから板厚方向の残留応力分布を推定する簡易手法である。配管の突合せ溶接継手のように軸対称円筒突合せ継手では、 $\Delta\varepsilon_x$ は板厚方向に2次関数で分布をしていると仮定し、 $\Delta\varepsilon_y$ は板厚方向に線形分布していると仮定し直線近似する。なお、 y 片切り出し時に z 方向の応力変化（ $\Delta\sigma_z$ ）が生じると考えられるが、 $\Delta\sigma_z$ は、 σ_x や σ_y に比較して小さく無視できるとして、 $\Delta\sigma_z=0$ と近似している。

配管溶接継手の場合、 x 方向が周方向、 y 方向が軸方向、 z 方向が板厚方向を示す。

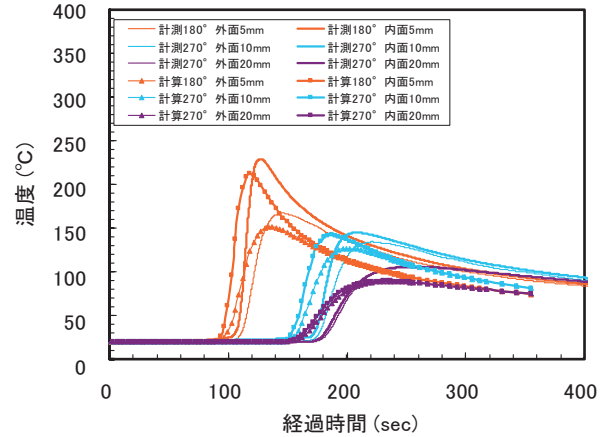
6. 解析精度

6.1 熱伝導解析における比較

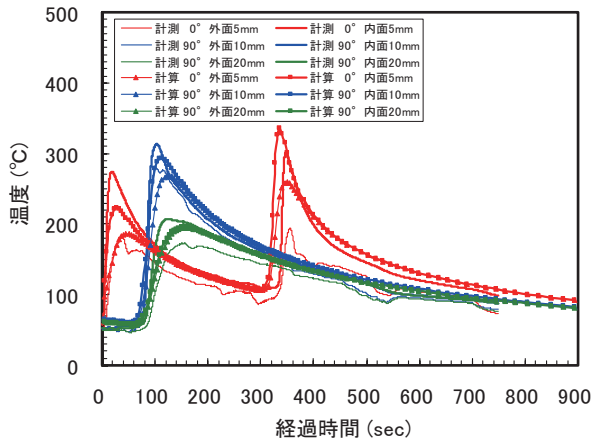
解析と比較するために、供試体の溶接時に熱電対を用いて温度測定を行った。0°および180°位置に対して溶接止端部から5mm離れた管の外表面と内面の温度変化を連続的に測定し、90°および270°位置に対しては溶接止端部から10mmおよび20mm離れた管の外表面と内面の温度変化を連続的に測定した。ここで、溶接止端は溶接中心から9.59mmの位置になる。図8に解析結果と測定結果を示す。図8には代表例として、1パス目と2パス目の比較結果を示す。1パス目ではピーク温度の値およびピークが現れる時間に若干の差があるが、発熱過程から冷却過程に至る時刻歴挙動はよく似ており、精度の良い熱伝導解析ができたことがわかる。2パス目では、被覆アーク溶接が手溶接であることから開先内の幅方向の溶接トーチの動きが一定にならず、アークと熱電対との距離が一定でないことによる影響が測定温度に



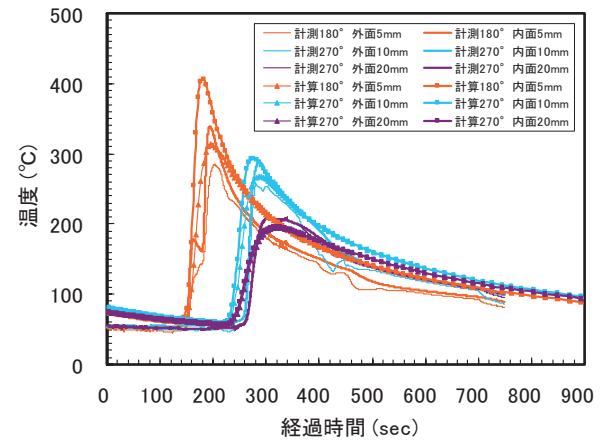
(a) 1パス目 (0°および90°側)



(b) 1パス目 (180°および270°側)



(c) 2パス目 (0°および90°側)



(d) 2パス目 (180°および270°側)

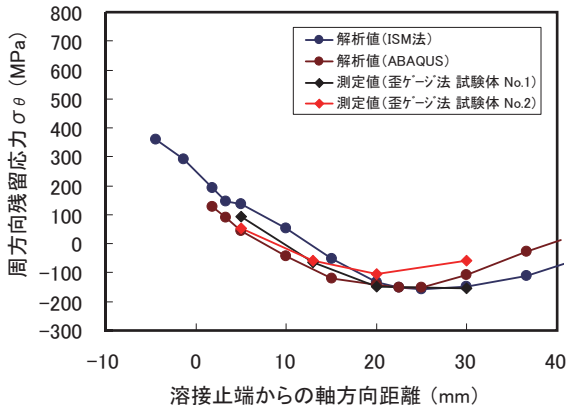
図8 熱伝導解析結果と測定結果との比較

顕著に見られるが、温度ピーク時の時間や発熱過程から冷却過程に至る時刻歴挙動はよく似ており、解析が妥当な結果を与えることがわかる。

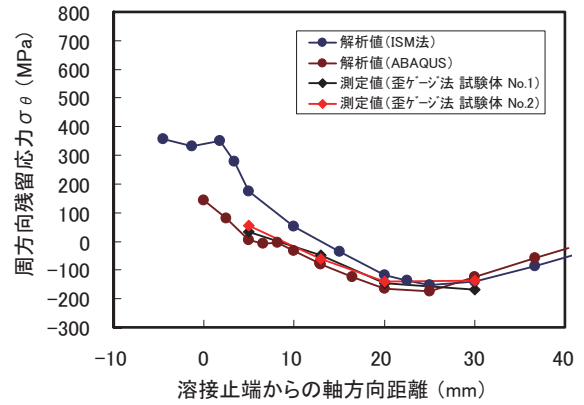
6.2 ISM法およびABAQUSによる解析とひずみゲージ法による測定の比較

ISM法による残留応力解析結果をABAQUSによる解析結果およびひずみゲージ法による測定結果と比較し、残留応力解析精度の検証を行った。ISM法は残留応力的高速解析をするために開発中の解析コードであり、高速解析性能の向上を優先的な開発目標として、今後もいろいろな改良を行う予定としている。ここでは、開発途上の現在のISM法について、その解析精度が今までの改良により低下せず、むしろABAQUSと同等にまで近づいたことの確認を目的として実施した。

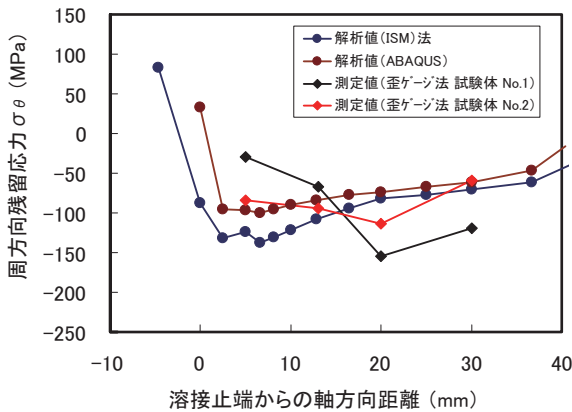
図9に周方向応力の管軸方向分布の比較を示す。図の横軸は溶接止端を原点として軸方向距離で示した。溶接止端は溶接中心から9.59mmの位置になる。(a)は0°位置の内表面、(b)は180°位置の内表面、(c)は0°位置の外表面、(d)は180°位置の外表面の結果を示す。ひずみゲージ法については2つの測定値を記載しているが、3.1章に示す供試体は2体製作して、それぞれについて残留応力測定を行っており、それらの結果を試験体No.1と試験体No.2として図に示している。図9の(a)および(b)の内表面側の解析値および測定値はよく一致した。外表面側については(c)および(d)ともにISM法とABAQUSが予測する残留応力の変化の傾向はよく一致した。(c)では測定値のデータがばらついているが、解析値は試験体No.2の測定値と概ねよく一致した。(d)では解析値は測定値に対して多少のずれはあるものの、残留応力の変化の傾向を



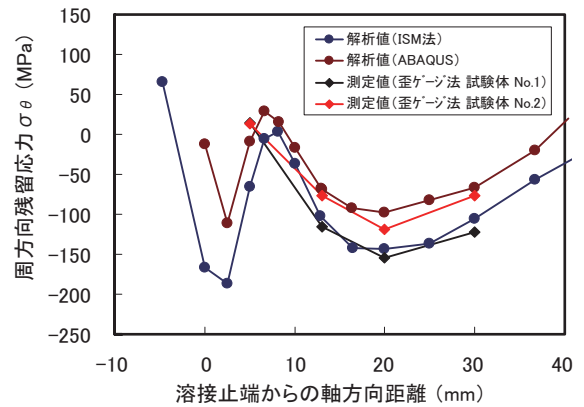
(a) 内表面 0° 位置の周方向応力



(b) 内表面 180° 位置の周方向応力



(c) 外表面 0° 位置の周方向応力



(d) 外表面 180° 位置の周方向応力

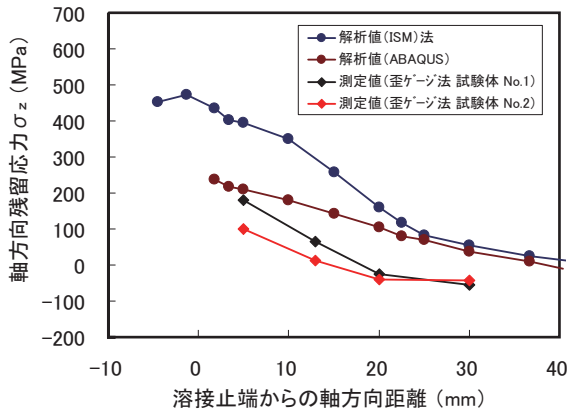
図9 周方向残留応力の管軸方向分布

よく再現している。0mm から5mm の間の残留応力について測定データはないものの、ISM 法および ABAQUS は定量的に多少のずれがあるが、複雑な変化の様子を同様に予測している。

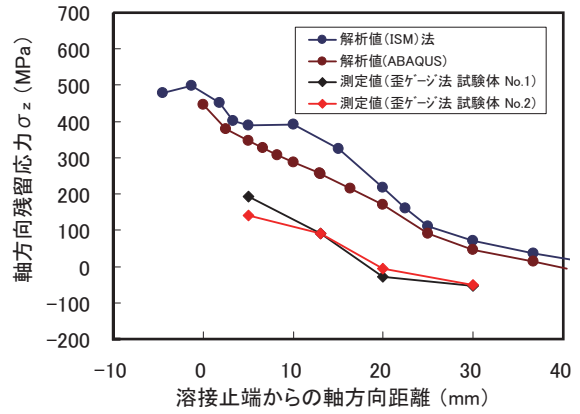
図 10 は、軸方向応力の管軸方向分布の比較を示す。(a) の 0° 位置の 0mm から 20mm の間において ISM 法と ABAQUS とで差が見られるが、その他については、ISM 法と ABAQUS はよく一致した。しかし、ひずみゲージ法による測定値と解析値との間で差が生じた。この差は解析法自体ではなく、解析モデルに起因したものと考えられた。すなわち、軸方向応力は溶接時の曲げ変形の大きさに顕著に影響を受けると考えられ、今回の解析ではモデルの要素分割が若干粗いためモデルが比較的に変形しにくく、溶接変形による曲げ変位が実際よりも小さくなり、そのために溶接残留応力の解析値が測定値よりも大きくなったと考えられる。したがって、解析方法の

差が要因ではなく、モデルの精緻度合いや溶接シミュレーションの境界条件等に関する実際の溶接条件とのわずかな違いにより、測定値との差が引き起こされたと考えられる。

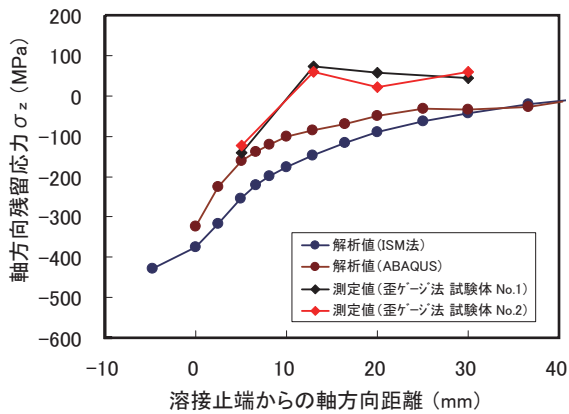
図 11 および図 12 は、0° および 180° 位置における周方向応力の板厚方向分布の比較を示す。図には、溶接止端から 5mm および 20mm 位置における比較結果を示す。残留応力が穏やかな変化を示す 20mm 位置の周方向応力では ISM 法と ABAQUS はよく一致した。また、ひずみゲージ法による測定値の分布傾向ともよく一致した。なお、測定値は簡易法にて評価したことから、値に有意な誤差が含まれると考えられるため、ここでは定性的な比較のみとした。一方、5mm 位置といった溶接止端近傍での比較において、ISM 法と ABAQUS は、0° 位置では一致したが、180° 位置で差が見られた。図 9 (b) や図 9 (d) に示すように、180° 位置の溶接止端近傍では周方向



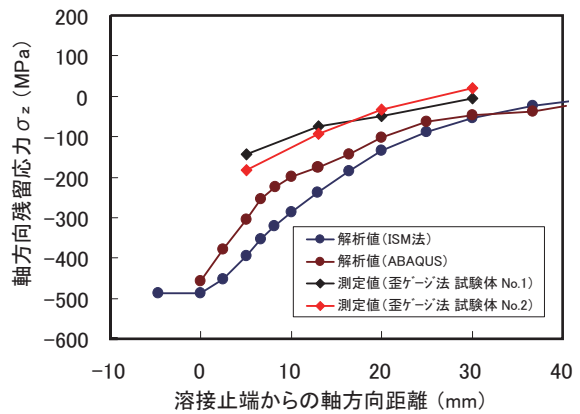
(a) 内表面 0° 位置の軸方向応力



(b) 内表面 180° 位置の軸方向応力

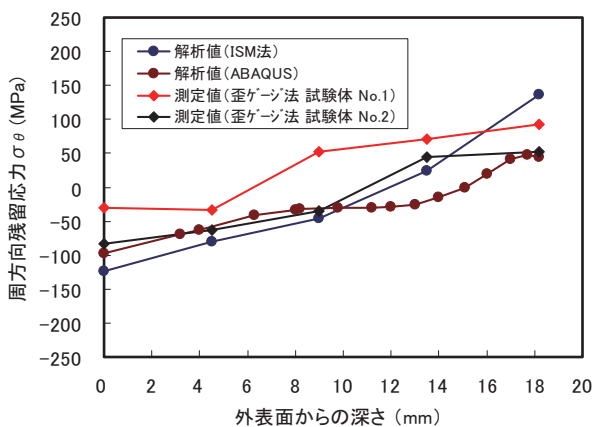


(c) 外表面 0° 位置の軸方向応力

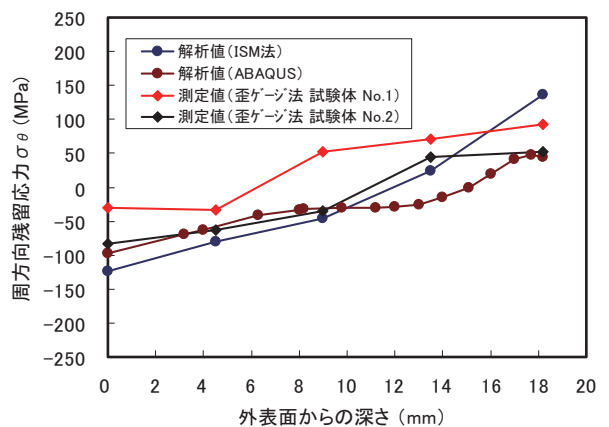


(d) 外表面 180° 位置の軸方向応力

図 10 軸方向残留応力の管軸方向分布



(a) 溶接止端から 5mm 位置



(b) 溶接止端から 20mm 位置

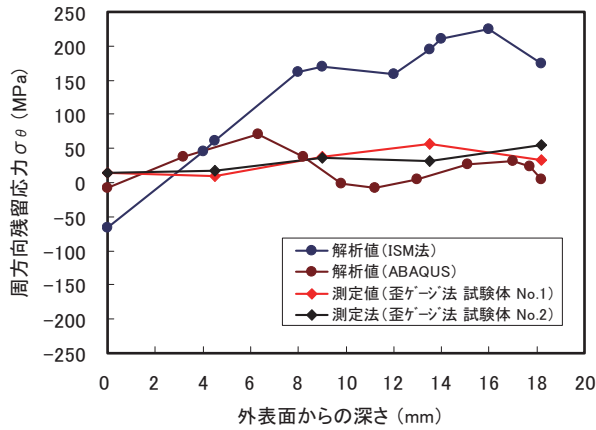
図 11 0° 位置の周方向残留応力の板厚方向分布

残留応力分布に大きな変化があり、しかも、ふたつの解析値の間で定量的に多少のずれが生じているため、このことが影響を与えたものと考えられる。

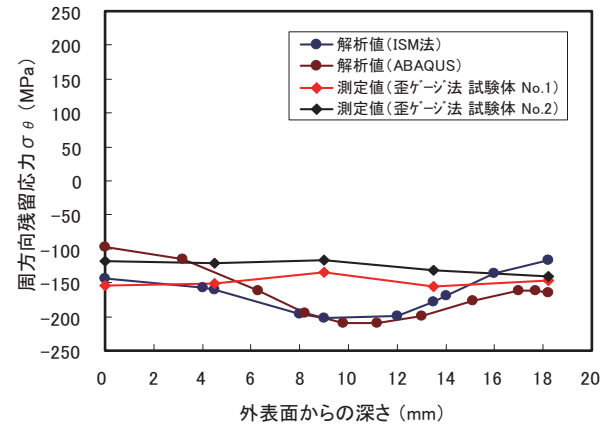
図13および図14は、 0° および 180° 位置における軸方向応力の板厚方向分布の比較を示す。図には、溶接止端から5mmおよび20mm位置における比較結果を示す。図13(a)を除いて、ISM法とABAQUSの結果はよく一致した。図13(a)では内表面側で差が見られるが、図10(a)に見られるように、溶接止端近傍ではふたつの解析値の間に定量的には差が生じる場合があるようであり、このことが影響したと考えられる。しかしながら、残留応力の分布傾向は一致している。また、これらの解析値は内部での測定値とよく一致したが、内外表面の測定値と差があった。上述したように、解析モデルの精緻度

合や実際の溶接条件と解析条件との差が影響を与えたと考えられる。このことを考慮すれば、ISM法とABAQUSの解析値は測定値の分布傾向と比較的一致していると言える。また、2つの解析値は、ほぼ一致しており、ISM法がABAQUSと同等の解析精度を有していることが確認できた。

以上の結果から、3次元モデル化や移動熱源モデル、アニーリング効果の考慮によって、ISM法による残留応力解析は十分な解析精度を有することが示され、ABAQUS解析値やひずみゲージを用いた測定値と比較した結果から、同等な解析精度で残留応力評価がISM法を用いて可能であることが明らかになった。

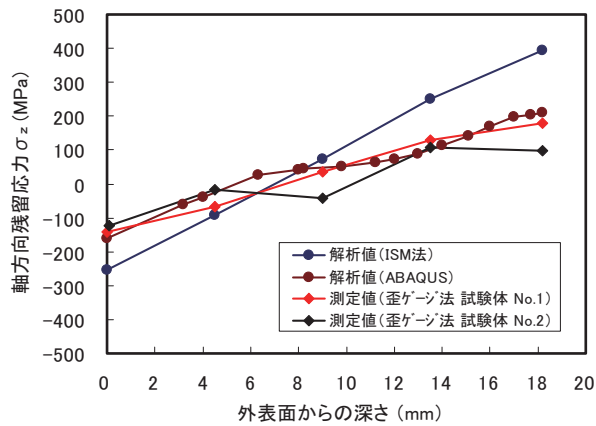


(a) 溶接止端から5mm位置

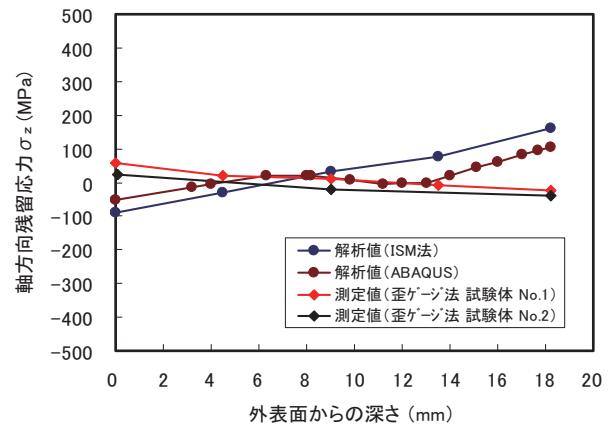


(b) 溶接止端から20mm位置

図12 180° 位置の周方向残留応力の板厚方向分布

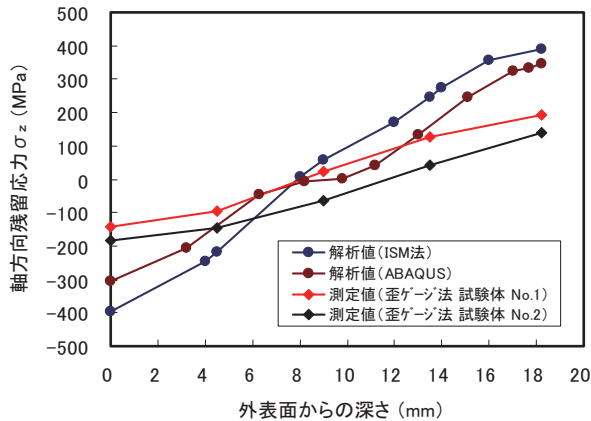


(a) 溶接止端から5mm位置

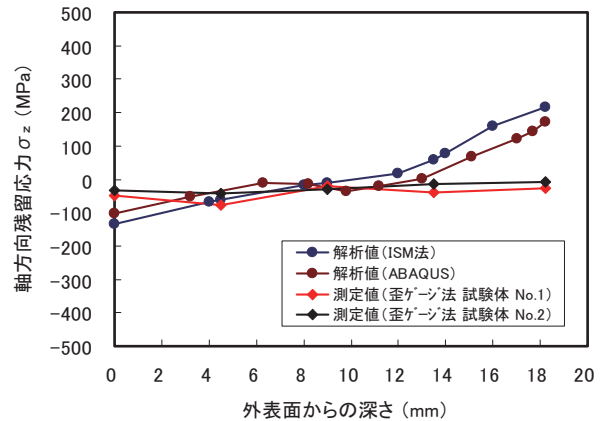


(b) 溶接止端から20mm位置

図13 0° 位置の軸方向残留応力の板厚方向分布



(a) 溶接止端から5mm位置



(b) 溶接止端から20mm位置

図14 180°位置の軸方向残留応力の板厚方向分布

表3 解析コードの仕様と使用環境

解析コード	CPU	メモリ	OS
ISM法	Intel Xeon X5272 (3.4GHz)	64GB	SuSE Linux 9.3 (x86-64)
ABAQUS Ver.6.4	Intel Xeon (2.8GHz)	2G	RedHat 8.0 Kernel 2-4-18-14

表4 熱弾塑性解析速度

解析コード	CPU数	解析時間(Hr)	速度比
ISM法	1	40.7	5.26
ABAQUS Ver.6.4	1	214	1

7. 解析速度

ISM法とABAQUSの解析速度を比較した。コードの仕様や使用環境について、表3にまとめる。比較結果を表4に示す。表4の解析速度比が示すように、ISM法による解析時間は、ABAQUS Version 6.4⁽⁴⁹⁾に対して5.26倍の速さで高速解析できるという結果になった。このことから、ISM法を用いれば、市販の解析コードに比べて、残留応力解析を高速で実施できることを実際に確認することができた。また、ISM法が現在のところ計算アルゴリズムやOS・ハードに対する最適化を十分に実施していないことを考慮すると、更なる高速化が可能と期待される。

解析速度の比較例に関しては、西川⁽⁴⁸⁾が市販の解析コードに比べISM法による解析速度が16.8倍速いことを確認しているが、本論文のケースでは5倍

程度であった。これは本論文では節点数が30,000程度の中規模モデルで溶接シミュレーションを行ったため、溶接熱源近傍の非線形領域の全体に対する割合が大きく、ISM法の長所が大きく発揮されなかったためと考えられる。非線形領域の全体に対する割合がより小さくなる大規模溶接問題になればなるほどISM法の長所が発揮され、市販の解析コードよりも高速解析可能と考えられる。今後、より大規模な多層多パス溶接継手を対象に残留応力解析を実施し、市販解析コードと解析速度について比較する予定である。

8. 結言

反復サブストラクチャー法を利用して6B Sch160のオーステナイト系ステンレス鋼製配管溶接継手に対して残留応力解析を実施した。解析結果の精度や高速解析性能について汎用有限要素法解析コードと比較し、以下の結論を得た。

- (1) 反復サブストラクチャー法による残留応力解析結果は汎用解析コードによる解析結果とほぼ一致し、汎用解析コードと同等の解析精度を持つことを示した。
- (2) 上記2つの解析結果をひずみゲージ法による測定結果と比較し、残留応力分布の傾向がほぼ一致していることを確認した。これは、3次元モデル化や移動熱源モデルを使用して反復サブストラクチャー法を適用した残留応力解析が実際の溶接残留応力分布を精度良く評価できることを示す。
- (3) 反復サブストラクチャー法による残留応力解析速

度は汎用解析コードに比べ、本論文で扱った節点数 30,000 の中規模溶接問題では、5 倍となった。既存の研究成果を考慮すれば、反復サブストラクチャー法の長所が活かせる大規模溶接問題では、汎用解析コードに比べてさらに高速解析できるものと期待できる。

謝辞

反復サブストラクチャー法を用いた残留応力解析において、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) 出町和之, “5 章 機器・構造物の保守経験と高経年化対策,” 原子力保全工学, オーム社, (2010).
- (2) 日本鋼構造協会, 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 指針・解説/設計例/資料/資料編, 技報堂出版, (1993).
- (3) 渡辺修, 松本重人, 中野善文, 齊藤良行, “高強度鋼溶接継手の疲労強度とその支配因子—応力集中係数と溶接残留応力の効果—,” 溶接学会論文集, 第 13 巻, 第 3 号, pp.438-443 (1995).
- (4) 沖村浩司, 堀展之, 向井正行, 増本光一郎, 鴨和彦, 黒川正秋, “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).
- (5) 越石正人, 岡田昌哉, 藤森治男, 平野明彦, “応力腐食割れに対する材料・溶接技術の開発,” 日立評論, Vol. 91, No. 2, pp. 66-69 (2009).
- (6) 佐藤邦彦, “第 II 編 第 1 章 溶接残留応力,” 溶接構造要覧, 黒木出版社, pp. 95-113 (1988).
- (7) 望月正人, “溶接変形と残留応力の基礎,” 保全学, Vol. 5, No. 2, pp. 24-30 (2006).
- (8) 望月正人, “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).
- (9) Hayashi, M., Ishiwata, M., Morii, Y., Minakawa, N. Root, J. H., “Residual Stress Distribution in Carbon Steel Pipe Welded Joint Measured by Neutron Diffraction,” Materials Science Research International. Vol. 6, No. 4, pp. 287-294 (2000).
- (10) 鈴木裕士, T. M. Holden, 盛合敦, 皆川宣明, 森井幸生, “中性子回折法による高張力鋼突合せ溶接材の残留応力評価,” 材料, Vol. 54, No. 7, pp. 685-691 (2005).
- (11) Kingston, E., Smith, D. and Watson, “Measurement of Residual Stress in Tube Penetration Welds for Ferritic Steel Hemispherical Pressure Vessel Heads,” Transactions of SMiRT 19, Paper # D04/3, (2007).
- (12) 中長啓治, 大田高裕, 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. 581-599 (2007).
- (13) 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).
- (14) 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, p. 62, (2009).
- (15) 前川晃, 野田満靖, 大厩徹, 高橋茂, “中性子回折法による冷間加工曲がり配管の残留応力評価,” 日本機械学会 2009 年年次大会, S0304-1-1, (2009).
- (16) Maekawa, A., Oumaya, T., Noda, M., Takahashi, S. and Saito, T., “Residual Stress Distribution in Austenitic Stainless Steel Pipe Butt-Welded Joint Measured by Neutron Diffraction Technique,” Materials Science Forum, Vol. 652, pp. 116-122 (2010).
- (17) 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,” 日本機械学会材料力学カンファレンス, OS-1031, (2010).

- (18) Tekriwal, P. and Mazumder, J., "Transient and Residual Thermal Strain-Stress Analysis of GMAW," ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 113, pp. 336-343 (1991).
- (19) 袁敏剛, 汪建華, 村川英一, 上田幸雄, "三次元熱弾塑性解析プログラムの開発と圧縮機溶接組立への応用," 溶接学会論文集, 第13巻, 第4号, pp. 628-634 (1995).
- (20) Lindgren, L. E., Haggblom, 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).
- (21) Mochizuki, M. and Toyoda, M., "Numerical Simulation of Welding Heat Cycles During Multi-pass Welding and Their Effects on Joint Performance," Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6, H. Cerjak ed., Maney Publishing, London, pp. 671-683 (2002).
- (22) Boellinghaus, T., Kannengiesser, T. and Neuhaus, M., "Effects of Structural Restraint Intensity on the Stress Strain Build Up in Butt Joints," Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7, H. Cerjak ed., Graz University of Technology Publishing, Austria, pp. 651-669 (2005).
- (23) Semmler, U., Alaluss, K. and Matthes, K. J., "Distortion and Stress Assessment and Optimization of PTA-Welded Tools and Cutting Blades Using the E. F. Method," Mathematical Modelling of Weld Phenomena 7, H. Cerjak ed., Graz University of Technology Publishing, Austria, pp. 731-746 (2005).
- (24) 山本剛史, 山崎洋輔, 辻陽子, 宮坂史和, 黄地尚義, "突合せ MAG 溶接のシミュレーションソフトウェアの開発," 溶接学会論文集, 第23巻, 第1号, pp. 71-76 (2005).
- (25) Khajepour, S. and Yetisir, M., "Residual Stress Modelling of Pipe Bends," Transactions of SMiRT 19, Paper # B05/3, (2007).
- (26) Rudland, D., Zhang, T., Wilkowski, G. and Csontos, A., "Welding Residual Stress Solutions for Dissimilar Metal Surge Line Nozzles Welds," Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61285, (2008).
- (27) Leggatt, N. A., Dennis, R. J., Smith, M. C. and Bouchard, P. J., "Numerical Methods for Welding Simulation -The Next Technical Step," Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61498, (2008).
- (28) 望月正人, 林眞琴, 服部敏雄, "溶接残留応力の固有ひずみ解析および熱弾塑性解析とその中性子回折測定による検証," 日本機械学会論文集(A編), 63巻, 612号, pp. 1675-1680 (1997).
- (29) Ando, M., Nakata, K., Sumiya, R., Itow, M. and Tanaka, N., "Analytical Evaluation of Weld Residual Stress Distribution for BWR Pipings," Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61416, (2008).
- (30) 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).
- (31) 望月正人, 豊田政男, 樋口良太, 三上欣希, 小川和博, 竹田貴代子, "溶接部の残留応力に着目した SCC への力学的影響に関する研究," 平成18年度原子力安全基盤調査研究報告書, (2007).
- (32) Bate, S. K. and Watson, C., "New UK Research Programme on Residual Stresses," Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2006-ICPVT-11-93567, (2006).
- (33) Bate, S. K., Warren, A. P., Watson, C. T., Hurrell, P. and Francis, J. A., "UK Research Programme on Residual Stresses -Progress to Date," Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2007-26337, (2007).
- (34) 原子力安全基盤機構, 平成19年度複雑形状部機器配管健全性実証に関する事業報告書, (2008).
- (35) Ogawa, K., Yanagida, N. and Saitou, K.,

- “Residual Stress Prediction for Non-Axisymmetric Vessel Penetration Welds,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61321, (2008).
- (36) Muroya, I., Iwamoto, Y., Ogawa, N., Hojo, K. and Ogawa, K., “Residual Stress Evaluation of Dissimilar Weld Joint Using Reactor Vessel Outlet Nozzle Mock-Up Model (Report-1),” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2008-61829, (2008).
- (37) Ogawa, N., Muroya, I., Iwamoto, Y., Hojo, K., Ogawa, K. and Kingston, E., “Residual Stress Evaluation of Dissimilar Weld Joint Using Reactor Vessel Outlet Nozzle Mock-Up Model (Report-2),” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77269, (2009).
- (38) Smith, M. C., Smith, A. C., Wimpory, R. C., Ohms, C., Nadri, B. and Bouchard, P. J., “Optimising Residual Stress Measurement and Predictions in a Welded Benchmark Specimen: A Review of Phase 2 of the Net Task Group 1 Single Bead on Plate Round Robin,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77157, (2009).
- (39) Hurrell, P., Watson, C., Bouchard, J., Smith, M., Dennis, R., Leggatt, N., Bate, S. and Warren, A., “Development of Weld Modeling Guidelines in the UK,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77540, (2009).
- (40) Ogawa, K., Chidwick, L. O., Kingston, E. J., Muroya, I., Iwamoto, Y. and Smith, D., “Measurement of Residual Stresses in the Dissimilar Metal Weld Joint of a Safe-end Nozzle Component,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2009-77830, (2009).
- (41) 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).
- (42) 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).
- (43) Nishikawa, H., Oda, I., Shibahara, M., Serizawa, H. and Murakawa, H., “Three-dimensional Thermal-elastic-plastic FEM Analysis for Predicting Residual Stress and Deformation under Multi-pass Welding,” Proceedings of ISOPE '04, (2004).
- (44) 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).
- (45) 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).
- (46) 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).
- (47) 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).
- (48) 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).
- (49) ABAQUS User's Manual, Version 6.4, ABAQUS Inc., (2003).
- (50) 佐藤邦彦, “第II編 第2章 溶接残留応力測定法,” 溶接構造要覧, 黒木出版社, pp. 114-121 (1988).
- (51) 岩井健治, 高橋英司, 佐藤邦彦, “厚板の新しい軸対称残留応力測定法,” 溶接学会論文集, 第3巻, 第1号, pp. 196-203 (1985).
- (52) 岩井健治, 高橋英司, “厚肉円筒の新しい軸対称残留応力測定法,” 溶接学会論文集, 第4巻, 第1号, pp. 143-147 (1986).