

メガ構造体からミクロ組織に至る溶接残留応力の革新的解析技術

Innovative Computational Simulation of Weld Residual Stress from Mega- to Micro-Structures

大阪大学大学院工学研究科	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI Member
大阪大学大学院工学研究科	三上 欣希	Yoshiki MIKAMI
大阪大学大学院工学研究科	岡野 成威	Shigetaka OKANO
大阪大学大学院工学研究科	伊藤 真介	Shinsuke ITOH

Weld residual stress and distortion affect to fatigue, SCC, static tensile strength, brittle fracture, or other failures in various components. Computational method is useful for evaluating weld residual stress and distortion as well as direct measuring method. Recently developed methods by the authors for innovative numerical simulation of weld residual stress in various scales and fields are introduced. A lot of applications of the computational approach to weld residual stress evaluation are expected in the near future.

Keywords: Residual Stress, Welded Structures, Multi-Scale Computation, Macro-Micro Analysis

1. 緒言

溶接による残留応力が構造物や材料に及ぼす種々の影響については、疲労強度や応力腐食割れ、脆性破壊の専門書に詳しい。一方で、このような損傷の駆動力となる残留応力を正確に把握する手法については、先人の弛まぬ継続的な努力にも関わらず、計測手法、解析の手法のいずれについても、まだ確実にこれと言った手段が確立されておらず、諸々の研究開発が今も進行しているところである。

この内、数値解析的手法としては、構造解析の分野で急速な進歩を遂げた有限要素法が約 40 年前に熱弾塑性解析に適用されてから、溶接残留応力に関する解析的研究が急速に前進したといえる。すなわち、材料特性の温度依存性を考慮した弾塑性有限要素法の定式化 [1]-[7] がなされ、また、溶接による残留応力発生機構の解明などへの応用も徐々に図られてきた。一方で、その後の計算機環境の進歩に伴い相当大規模な数値解析が可能になってはいるものの、現象の複雑さや、力学部分だけを見ても強非線形が極めて強く収束性に特別の配慮が必要なためか、こと溶接残留応力に限っては、他分野に比べて数値シミュレーションの適用範囲があまり広がっていないのが実情である。

本報告では、そのような状況を少しでも打破すべく、最近研究室内で取り組んでいる種々のスケールの問題について、今後各種産業分野においていろいろな場合に役立ててもらえば嬉しいと思っている数値解析法ならびにそれを用いた解析例について紹介したい。もちろん、研究室内では今回紹介する詳細な解析手法だけでなく、より簡便な解析の手法や、新しい計測手法の開発にも取り組んでいるので、適材適所が重要、いつでも大規模で詳細な数値シミュレーション、と言う訳ではなく、多種多様なラインナップを揃えております。

2. 溶接部モデリングの深化

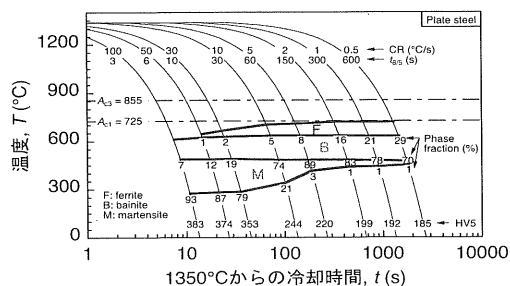
溶接残留応力を解析的に求めるには、従来は、直交等方性連続体力学に基づいた熱応力問題として、応力とひずみの関係を純粋な構造解析問題として解いていた。一方で、溶接プロセスでは相変態などの材質変化やプラズマからの熱輸送など、本来は残留応力分布に大きく影響する、溶接シミュレーションに考慮することが望ましい、未解決のパラメータが多い。ここでは、それらの重要パラメータを構造解析と連成させた例について紹介する。

2.1 材料と力学の連成モデリング

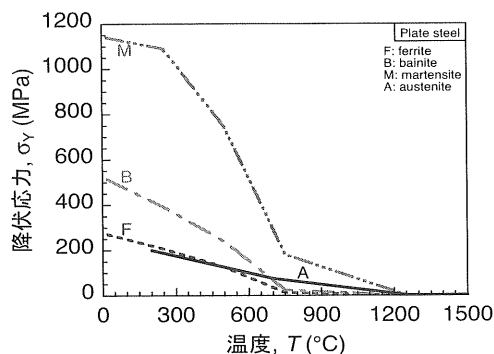
低合金鋼などの溶接では、加熱冷却中に材料の相変態が生じ、オーステナイトとフェライトやマルテンサイトの熱膨張率差や強度差により残留応力の分布が冷却速度などに左右されることになる。このような場合、残留応力解析の際に相変態などの材質変化を考慮した

連絡先: 望月正人, 〒565-0871 吹田市山田丘 2-1, 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻, TEL: 06-6879-7560, E-mail: mmochi@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

シミュレーションを行うことが望ましい。すなわち、図1に示すように、温度解析の際に連続冷却変態特性線図を用いて各時刻、各位置における組織分率を求め、応力解析の際に各マイクロ組織の分率に応じた材料特性を用いることにより、溶接中の温度変化に伴うマイクロ



(a) 材質変化を考慮可能な連続冷却変態特性



(b) 各マイクロ組織における降伏応力の温度依存性

図1 溶接中の相変態を考慮した数値解析のためのマイクロ組織依存材料特性の一例

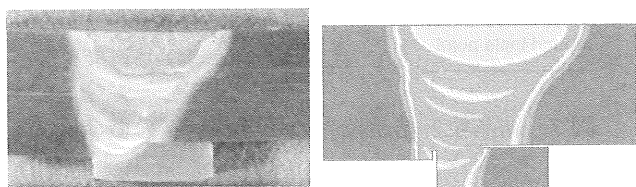


図2 相変態特性を考慮した硬さ分布の予測

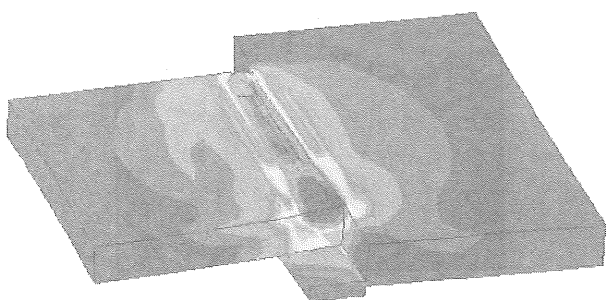


図3 相変態特性を考慮した溶接中の熱応力分布

組織の変化挙動に応じた硬さ分布 (図2) や応力履歴 (図3), 残留応力を求めることが可能となる [8]. このような解析は, PWHT 後の異材接合部などにおける残留応力を求める場合にも大いに有効である.

2.2 溶接プロセスのプラズマ物理モデリング

プラズマ物理に基づく溶接アークを考慮した熱伝送の数値解析により, 熔融池や熔融線近傍における温度分布を詳細に求めることができるようになる. すなわち, 従来の母材および溶接金属の内部における温度分布のみならず, 図4のように溶接トーチからの熱伝送を考慮し, 系全体での温度分布を解析することにより, 溶接部の溶込み形状や多層溶接時における熱影響部での詳細な挙動を求めることができるようになる [9].

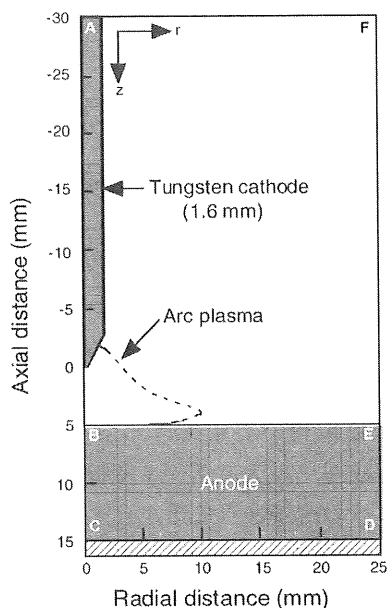


図4 溶接トーチからの熱伝送のモデリング

2.3 熱弾塑性問題の高速解析

溶接による残留応力の解析は強非線形問題であり, 通常の構造解析では極めて多大な計算時間が必要となる. 一方で, 強非線形性を示す高温域や塑性域は熔融池近傍の限られた範囲であり, 温度の上昇していない母材の大部分は弾性挙動を示している. この特性を利用し, 図5に示すように溶接部近傍とそれ以外の領域を分割して解析することにより, 移動熱源の場合であっても計算時間の大幅な短縮化を図ることが可能となる [10]. さらに, 解析時間ステップを無次元化することにより, 陽解法を用いて従来の陰解法に比べてさらに計算時間を短縮する試みもなされている.

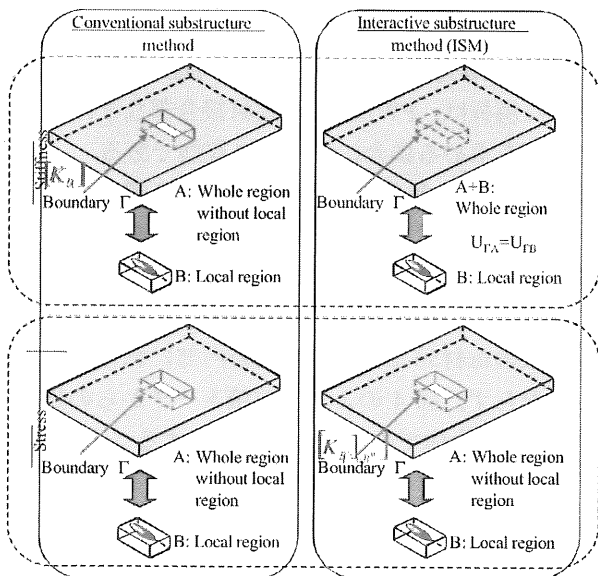


図5 溶接熱弾塑性解析における高速化の概念図

3. 溶接残留応力のマルチスケール解析

溶接残留応力は構造物や材料に種々の影響を及ぼすため、必要に応じて压力容器のような大型構造物から、SCCを議論するための結晶粒オーダーまで、各種スケールにおける数値シミュレーション技術が必要となる。また、それぞれの解析領域を考える際に境界条件の設定が極めて重要である。これらを解決し、現実的な境界条件を数値解析で表現できるようにするために、熱・応力連成型マルチスケール解析手法を開発した。ミリオーダーの溶接継手モデルとミクロンオーダーの結晶粒モデルを結合した一例を図6に示す。同様のマルチスケール解析は、メガオーダーの大規模構造物を対象としても同様の手順で可能となる。

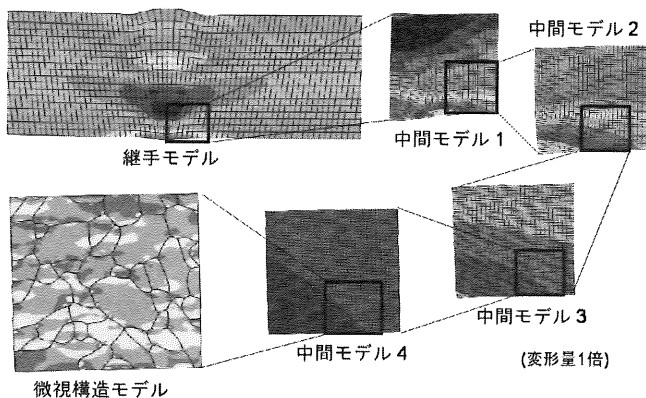


図6 溶接残留応力のマルチスケール解析の一例

4. 溶接残留応力の数値解析例

4.1 粒界での不均質挙動と結晶塑性を考慮した応力腐食割れ発生予測シミュレーション

SCC発生などのミクロな現象は、結晶粒レベルでの残留応力を把握し、その影響を検討することが重要となる。そこで、結晶粒ごとの結晶方位をEBSP-OIM法により計測し、その値を各結晶粒に入力することにより、結晶塑性を考慮した微視的残留応力を求めることができる解析手法を開発した。さらに、図7に示すように有限要素法と分子動力学を組み合わせることにより、粒界近傍の不連続な変形をシミュレートすることが可能になる。

解析結果の一例として、インコネル600合金のSCC発生挙動を予測した結果を示す。まず、EBSP-OIM法を用いて図8のように結晶粒ごとの結晶方位を計測する。この計測値を入力データとし、多結晶体としての結晶塑性を考慮した数値計算を行うと、図9に示すよ

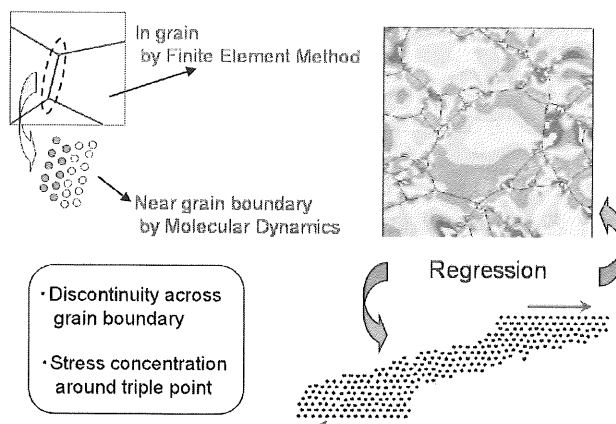


図7 結晶粒と結晶粒界のモデリングの概念図

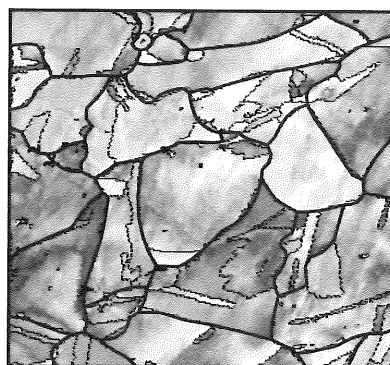
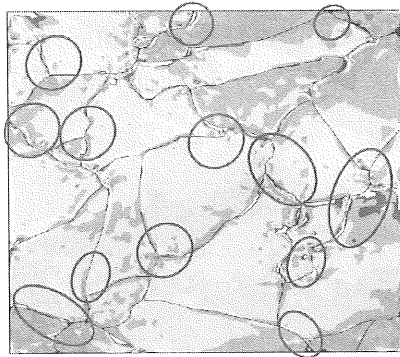


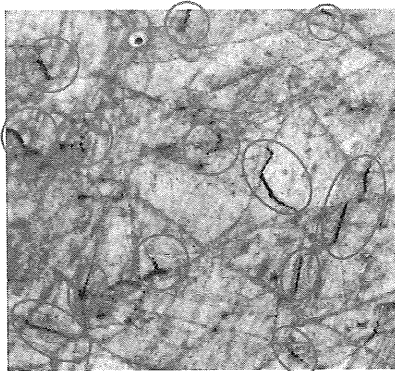
図8 EBSP-OIM法により計測した結晶方位

うに、マクロな主応力方向とは無関係に発生した粒界近傍の応力値が高い箇所が、実際の SCC 試験においても割れが発生した位置とよく一致した結果が得られた。

このような解析手法を用いることにより、マイクロ残留応力が SCC 発生に及ぼす影響や、さらには進展挙動との関係などを考察することが可能となる。



(a) 数値解析結果による高応力域発生箇所



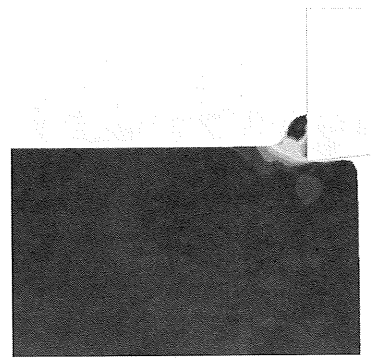
(b) 実機環境模擬試験による SCC 発生箇所

図9 結晶塑性を考慮した SCC 発生予測数値解析

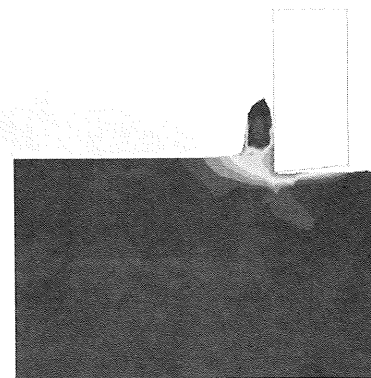
4.2 溶接部の表面切削加工による残留応力の再分布シミュレーション

実際の構造体では溶接後に表面の機械切削加工が施されることが多く、特に配管内表面などの場合では強研削加工により表面近傍の材質に影響を及ぼすのみならず、残留応力が再分布する場合がある。低炭素ステンレス鋼において、溶接部の強機械加工面から SCC が発生したような事例もあり、このような切削加工時の残留応力を求める手法の開発が重要となる。

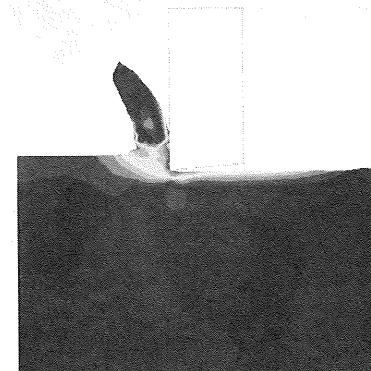
そこで、機械加工時の大変形熱弾塑性解析手法を開発した。数値シミュレーション結果の一例として、表面切削加工中の熱応力履歴の解析結果を図9に示す。切削の進行とともに、表面形状が変化し、応力も再分布していく挙動が理解できる。



(a) 切削開始直後



(b) 約 1/3 まで切削

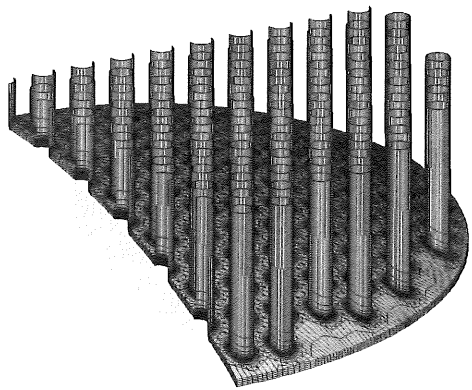


(c) 約 2/3 まで切削

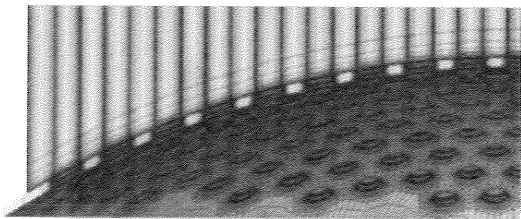
図10 機械加工中の熱応力シミュレーション例

4.3 多数の溶接部を有する炉内支持構造物の溶接変形・残留応力シミュレーション

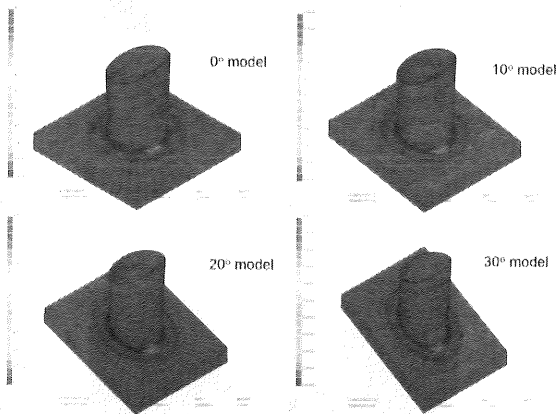
溶接構造物の中には近接部に多数の溶接部を有する複雑な形状の構造体も多く、炉内構造物などでは残留応力はもちろん取付精度などの面から溶接変形についても細心の配慮が必要である。このような複雑形状を有する機器については、従来は熟練技能者の勘と経験により製作がなされてきたが、高速解析の現実化とともに数値計算を援用することが可能になりつつある。



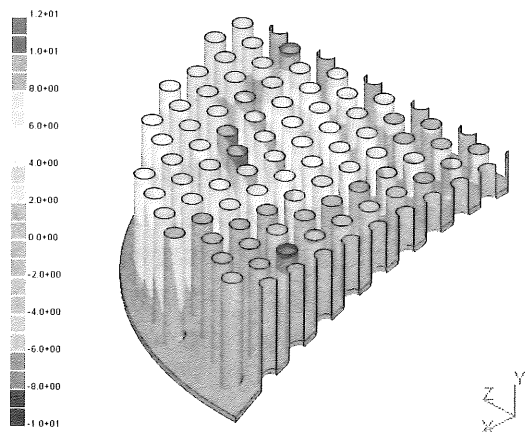
(a) 鏡板と多数のパイプのすみ肉溶接構造体



(b) すみ肉溶接構造体の断面図



(c) 各傾斜角モデルにおける数値解析例

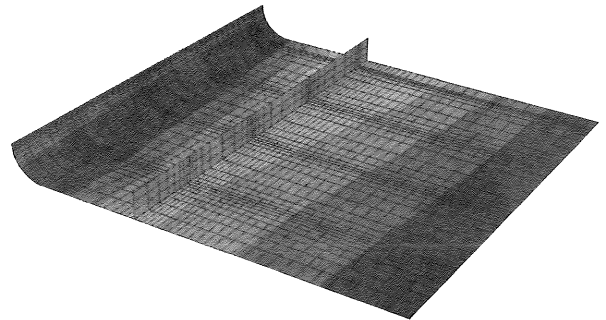


(d) パイプ軸方向残留応力の解析結果例

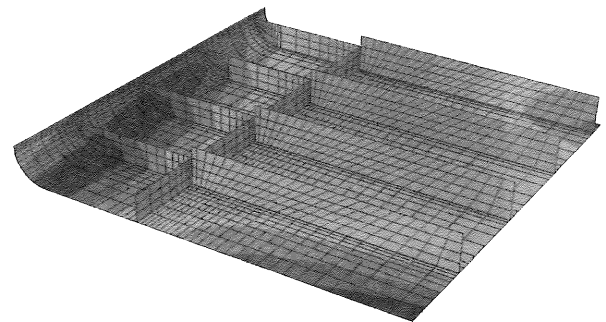
図 11 多数の溶接部を有する構造体の残留応力解析

4.4 大型構造物の組立・搭載シミュレーション

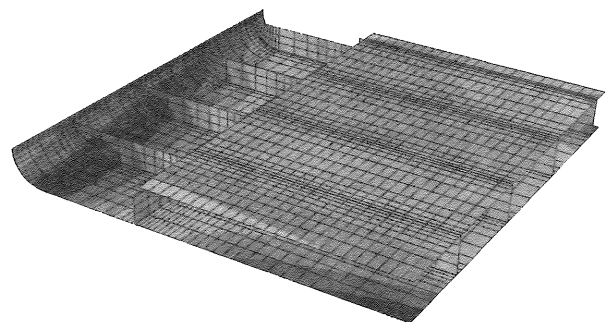
さらに大きな数十メートルオーダーの溶接構造物に対しても、溶接変形や残留応力の数値シミュレーションが可能になりつつある。一辺が約 20 メートルの大型構造物の組立を数値シミュレーションした例を図 12 に示す。工場での組立や、現地での据付、搭載といった際には溶接順序の選定や拘束治具の取り付け方が極めて重要であるが、このような数値解析手法を用いれば、適正な溶接施工条件を解析的に求めることが可能



(a) 組立順序 その 1



(b) 組立順序 その 2



(c) 組立順序 その 3

図 12 大型構造物の溶接残留応力解析例

になる。すなわち、製作の事前検討により、高精度な製品製作が可能となるのみならず、低残留応力構造などの検討による高信頼性化にも寄与することができるようになると考えられる。

5. 結言

研究室で開発中のメガ構造体からマイクロ組織に至る溶接残留応力の革新的解析技術について紹介した。以前と比べると、力学・構造モデルのみならず、材料モデル、プロセス物理モデルと合わせて相当に詳細なモデリングも可能になってきており、種々の分野への適用が可能であると考えています。

また、今回は紙面および時間の都合で紹介できなかった残留応力の簡略化解析手法 [11] や新しい計測手法 [12]-[13]、疲労や SCC との相関評価 [14]、地震時の影響評価 [15] などについても種々レポーターを拡げていますので、少しでもご関心を持たれた方は遠慮なく著者(mmochi@mapse.eng.osaka-u.ac.jp)までご連絡下さいようお願い申し上げます。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「構造・機能先進材料デザイン教育研究拠点」事業推進担当者研究経費および科学研究費補助金「基盤研究 (B) No. 20360393」、また、経済産業省原子力安全・保安院高経年化対策強化基盤整備事業により実施したものである。

参考文献

- [1] Y. Ueda and T. Yamakawa, "Analysis of Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain during Welding by Finite Element Analysis," *Trans. Japan Welding Society*, Vol. 2, pp. 90-100 (1971).
- [2] 山田嘉昭, 岩田耕司, "熱弾塑性問題の有限要素法解析", 日本鋼構造協会 第 5 回大会研究集会 マトリックス構造解析法研究発表論文集, pp. 561-169 (1971).
- [3] 藤田譲, 野本敏治, "熱弾塑性問題に関する研究", 日本造船学会論文集, 第 130 号, pp. 183-191 (1971).
- [4] 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, Vol. 42, pp. 567-577 (1973).
- [5] T. Muraki, J. J. Bryan and K. Masubuchi, "Analysis of Thermal Stresses and Metal Movement During Welding," *Trans. ASME, J. Engineering Materials and Technology*, Vol. 97, pp. 81-84 (1975).
- [6] E. Friedman, "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method," *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 97, pp. 206-212 (1975).
- [7] E. F. Rybicki, D. W. Schmueser, R. W. Stonesifer, J. J. Groom and H. W. Mishler, "A Finite-Element Model for Residual Stresses and Deformations in Girth-Butt Welded Pipes," *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 100, pp. 256-262 (1978).
- [8] M. Mochizuki and M. Toyoda, "Strategy of Considering Microstructure Effect on Weld Residual Stress Analysis," *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 129, pp. 619-629 (2007).
- [9] S. Okano, M. Mochizuki, K. Yamamoto and M. Tanaka, "Approach to Link between Arc Physics and Weld Distortion through Heat Transport Phenomenon," *Annual Assembly of International Institute of Welding*, Singapore, IIW Doc. 212-1154-09 (2009).
- [10] S. Itoh, M. Shibahara, M. Mochizuki and H. Murakawa, "Prediction of Welding Deformation of Shell and Multiple-Pipe Components," *Proc. 12th Int. Conf. on Pressure Vessel Technology*, Jeju, ICPVT12-0275 (2009).
- [11] M. Mochizuki, Y. Mikami, H. Yamasaki and M. Toyoda, "Elastic Predicting Method of Weld Distortion of Large Structures Using Numerical Simulation Results by Thermal-Elastic-Plastic Analysis of Small Components", *Welding in the World*, Vol. 51, No. 11/12, pp. 60-64 (2007).
- [12] M. Mochizuki, "Evaluation of Through-Thickness Residual Stress in Multi-Pass Butt-Welded Joint by Using Inherent Strain," *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, pp. 496-501 (2006).
- [13] K. Mitani, M. Mochizuki and M. Toyoda, "Investigation of Wall Thinning and Residual Stress Measurement in Steel Plates by Electromagnetic Acoustic Resonance," *Materials Science Forum*, Vols. 580-582, pp. 113-116 (2008).
- [14] M. Mochizuki, "Control of Welding Residual Stress for Ensuring Integrity against Fatigue and Stress-Corrosion Cracking," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 237, pp. 107-123 (2007).
- [15] M. Mochizuki, G. B. An and M. Toyoda, "Thermal Elastic-Plastic Analysis Considering Temperature Rise by Rapid Plastic Deformation in Undermatched Joints," *Trans. ASME, J. Pressure Vessel Technology*, Vol. 131, DOI: 10.1115/1.3027477, 031202-1-11 (2009).

