異種材溶接継手の残留応力解析

Residual Stresses in Dissimilar Metal Joint by Multi-pass Welds

新潟大学	鈴木　賢治	Kenji SUZUKI	Member
新潟大学	山岸　葵	Aoi YAMAGISHI	Non-member
発電設備技術検査協会	西川　聡	Satoru NISHIKAWA	Non-member
日本原子力研究開発機構	菖蒲　敬久	Takahisa SHOBU	Non-member

In this study, a residual stress distribution in a dissimilar plate butt-welded joint was simulated by a thermo-elastic finite element method. The base metal was the austenitic stainless steel SUS316L. The other base metal was nickel super-alloy NCF600, and the weld metal was the alloy 82 (YNiCr-3). The dimensions of the plate butt-welded joint were a width of 200 mm, a length of 250 mm and a thickness of 25 mm. The welding joint was fabricated by TIG welding with 22 passes. For comparison, the residual stress distribution for the similar butt-welded joint of SUS316L was simulated as well as the dissimilar welded joint. According to the simulated results, there was not the difference in the thermal field between the similar and the dissimilar welded joints. The residual stress distribution in the similar welded joint became symmetrical to the welding center after removal of the weld bead. For the dissimilar welded joint, the peak of the residual stresses moved to the NCF600 side a little. The residual stress level of the dissimilar welded joint was large compared with the similar welded joint. The residual stress of the welding direction was larger than that of the transverse direction.

Keywords: SUS316L, NCF600, Residual Stress, Dissimilar Welded Joint, Finite Element Method

１．緒言

近年、溶接残留応力についての数値解析の発展はめざましく、溶接時の変態による残留応力の解析[1]、多層盛り溶接の解析[2]、初期残留応力と溶接残留応力との関係[3]や確率論を取り入れて溶接パスの不確かさを含めて残留応力を評価する研究[4]もある。発電プラントでは異種溶接材継手が用いられ箇所も多く、異種材と同一材の突合わせ溶接との比較研究もされている[5]。中でもオーステナイト系ステンレスとフェライト系材料の熱膨張係数の差による熱応力を緩和するために、これらの両金属を直接溶接しないで、これらの間にニッケル基合金を夾む場合もある[6]。このように、オーステナイト系ステンレス鋼と異種材突合わせ溶接の残留応力についても実験的研究が進められている[7]。

一方、異種突合わせ溶接部の引張り残留応力を改善するために、ピーニング処理が有効とされる。ピーニングによる残留応力の変化について、基礎的研究を行う場合、ピーニングおよび残留応力の評価の利便性から平板の突合わせ試験体が適している。しかし、異種材平板突合わせ多層盛り溶接の残留応力についての研究は少ない[8]。本研究では、異種材溶接におけるピーニングによる残留応力の研究の端緒として、同一材および異種材の平板突合わせ溶接の残留応力について熱弾塑性有限要素解析を行い、両者の残留応力について比較検討を行った。

２．解析方法

2.1 溶接試験体

本研究においては、母材がオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)とニッケル基超合金(NCF600)であり、溶接金属を 82 合金(YNiCr-3)とした。平板突合わせ溶接継手試験体の形状は、板厚は 25 mm、幅 200 mm、長さ 250 ㎜ である。溶接法は TIG を用いて、溶接は 22 パスとした。なお、3 パスまでは 1 パスで 1 層盛り、4 パス

連絡先: 鈴木賢治、〒950-2181 新潟市西区五十嵐２の町 8050 番地, 新潟大学教育学部,
E-mail: suzuki@ed.niigata-u.ac.jp

以降は 2 パスで 1 層盛りである。ただし、5 パス目は NCF-600 側、6 パス目は SUS-316L 側、その後は交互に溶接パスを繰り返し、最終パス(22 パス目)は SUS-316L 側とした。そのほかの条件を Table 1 に示す。

Table 1 Conditions for TIG weld

Pass No.	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/mm)	Wire feed speed (g/s)
1	100	11	6	1.10	Non
2	150	11	6	1.65	0.08
3	150	11	6	1.65	0.10
4~22	200	11	9	1.47	0.14

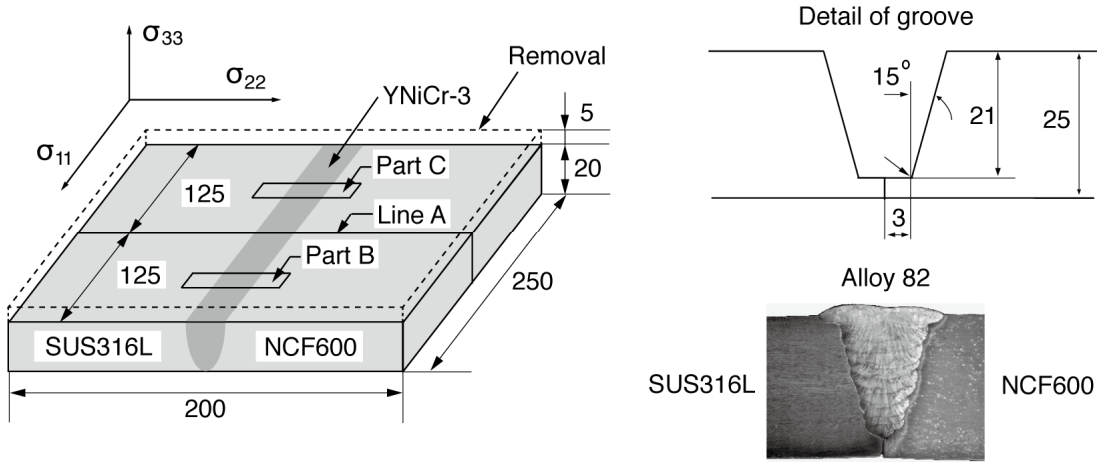


Fig. 1 Dimensions and cross section of dissimilar weld joint

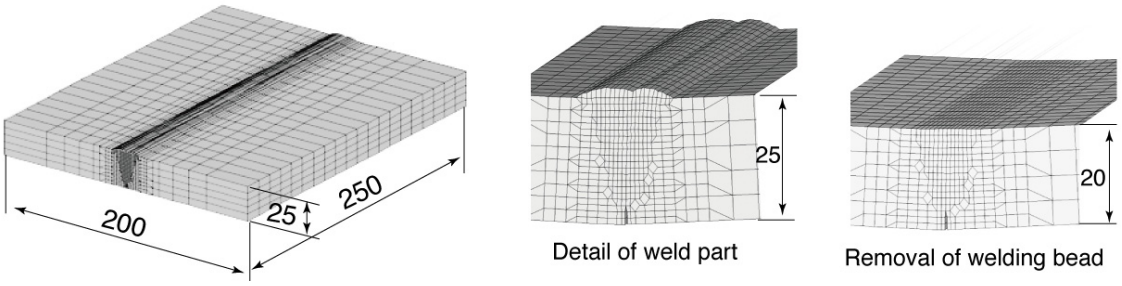


Fig. 2 Finite element meshes of dissimilar weld joint

各パス間の温度は 423 K 以下とした。

溶接後、試験体は溶接ビード面を機械加工により削除して、Fig.1 の左に示すように板厚 20 mm の平板試験体に仕上げた。また、機械加工による残留応力を電解研磨により除去した。本研究の残留応力解析においては、このところまでをシミュレーションすることとした。異種材突合わせ溶接試験体の詳細な寸法と断面は Fig.1 に示す通りである。

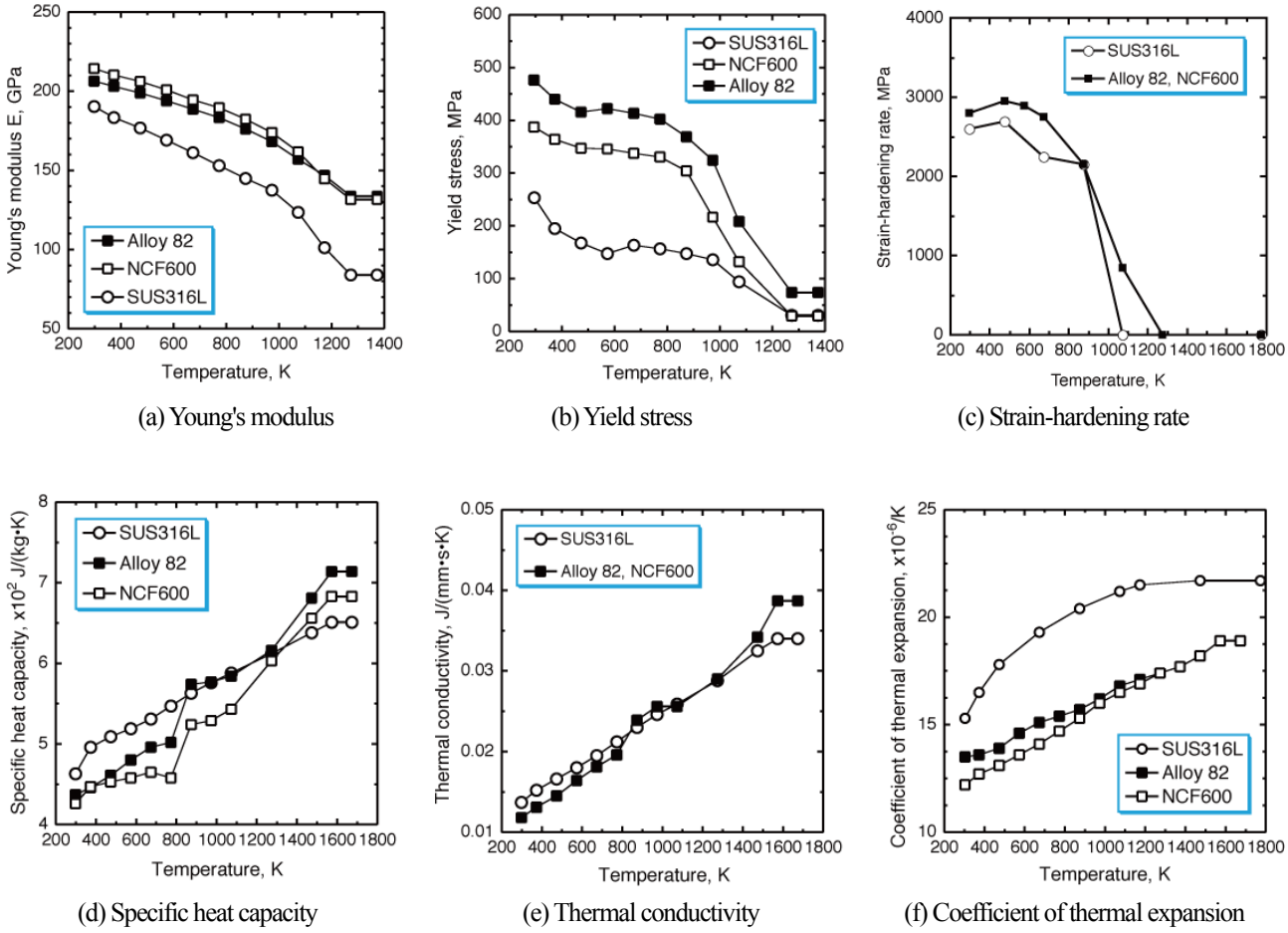
さらに、試験体の溶接面にショットピーニングを施して残留応力を改善し、残留応力評価も行った。

2.2 残留応力解析

Fig. 2 に試験体の溶接方向に対して垂直な断面の有限要素メッシュを示す。モデルは溶接方向(250㎜)に 20 分割、板厚方向に 5 分割した。溶接部および熱影響部付近については Fig. 1 に示す断面写真の形状を模擬して細分し、3D モデルを構築した。Fig. 2 に示した本研究の試験体においては、全節点数は 10,836 点、全要素数は 15,286 個である。溶接残留応力のシミュレーショ

ンを熱弾塑性有限要素解析により行った。本研究に用いた 3 次元溶接変形解析プログラムは、(株)計算力学研究センターの開発した QuickWelder である。

溶接シミュレーションにおいては、温度解析および



(a) Young's modulus (b) Yield stress (c) Strain-hardening rate

(d) Specific heat capacity (e) Thermal conductivity (f) Coefficient of thermal expansion

Fig. 3 Temperature dependency of material properties

応力解析に用いる各材料の物性値は温度依存性を持つ。一般に、熱弾塑性有限要素解析で計算される残留応力は、溶接解析入力パラメータの設定値の影響を受けやすいので、具体的な数値を示すことは、シミュレーション結果と同じように重要である。本研究で用いたヤング率、降伏応力、ひずみ硬化率、比熱容量、熱伝導率および熱膨張係数を Fig.3 に一括して示す[9]。ポアソン比については、温度依存がないものとして SUS316L、NCF600 および 82 合金に対してそれぞれ 0.262, 0.313, 0.320 とした。密度についても温度依存性は考慮せず、SUS316L、NCF600 および 82 合金に対してそれぞれ 7.91, 8.39, 8.40 g/cm^3 とした。解析に使用した材料モデルは、両材料ともミーゼス降伏条件を用いた等方硬化則モデルである。また、材料の異方性は考慮せずに解析した。

最終パスの溶接を行った後、室温まで冷却され溶接面を 5 mm 削除して、板厚 20 mm としてシミュレーションを終了した。

異種材溶接継手と比較するために、母材および溶接金属を SUS316L にした同一材の突合わせ溶接体についても 3 次元熱弾塑性有限要素解析を行った。物性値以外は、すべて異種材と同様のシミュレーションである。

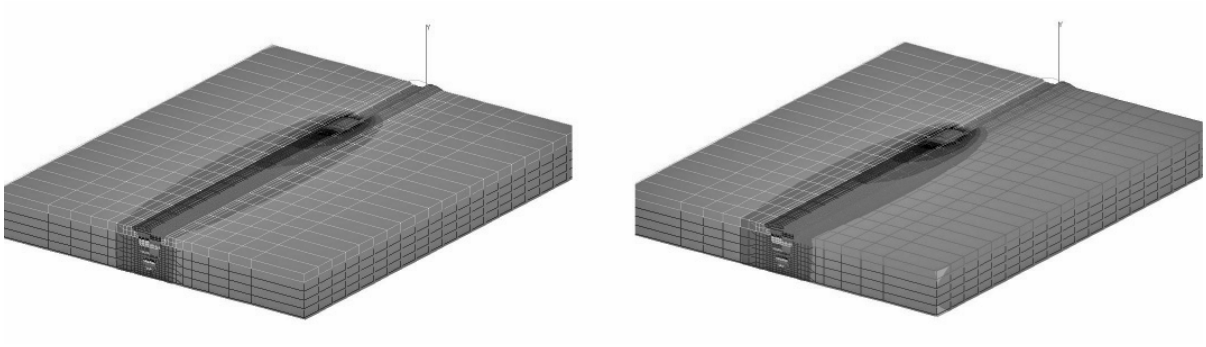
3．結果および考察

3.1 平板突合わせ溶接継手の温度解析

多層盛り溶接における残留応力は、形状、寸法および溶接条件などの影響を受ける[4]。ここでは一例として、最終パスの温度分布の様子を Fig.4 に示す。図(a)の SUS316L 同一材継手の温度分布と図(b)に示す異種材溶接継手の温度分布を比較して目立った差はない。これは、Fig.3 に示した比熱容量、熱伝導率などの温度場に関係するパラメータおよび密度などに関して、オーステナイト系ステンレス鋼とニッケル基超合金とで顕

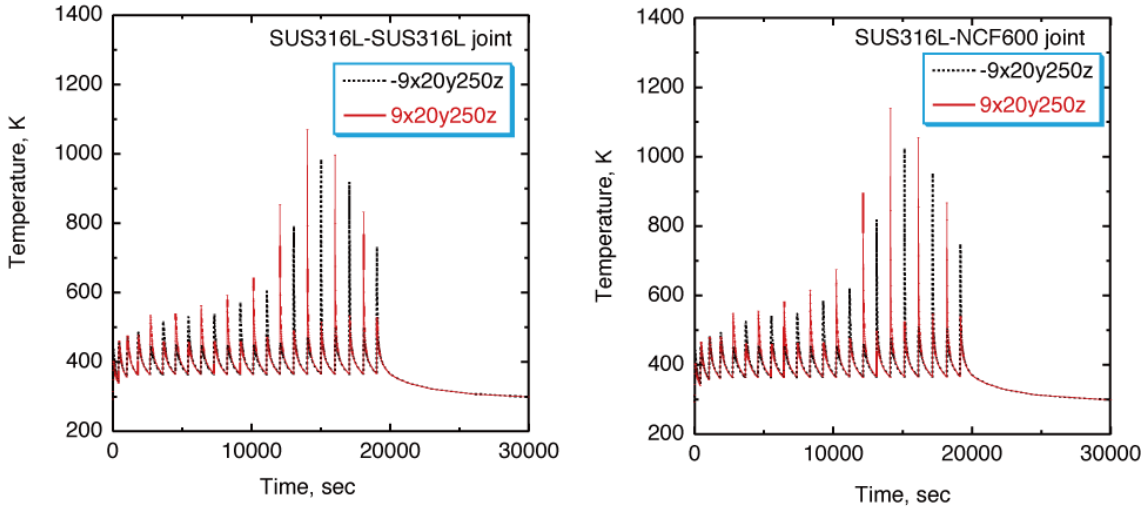
著な差がないことからも理解できる。

同一材と異種材との温度場の差異について定量的に検討するために、同一材溶接継手と異種材継手のそれぞれについて開先中心から両側±9 mm、深さ 5 mm（除去後の表面に相当する）における母材の温度履歴を Fig.5 に示す。溶接パスが近づくにつれて材料温度が高くなり、冷却された後、次の溶接パスで再び温度が上昇する。最も近い溶接パスが通過した後は、加熱温度のピークも低下する。図(a)の同一材溶接継手および図(b)の異種材溶接継手を比較すると、両者ともほぼ同じ温度履歴を示している。強いて言うならば、82 合金と NCF600 の比熱がやや小さいことから、溶接パスの近い高温の温度領域で異種材の方が温度がやや高い結果を示している。以上のことから、本溶接体においては異種材料に起因する温度場の差はみられない。



(a) Similar weld joint　　(b) Dissimilar weld joint

Fig. 4 Temperature analysis in welding process



(a) Similar weld joint　　(b) Dissimilar weld joint

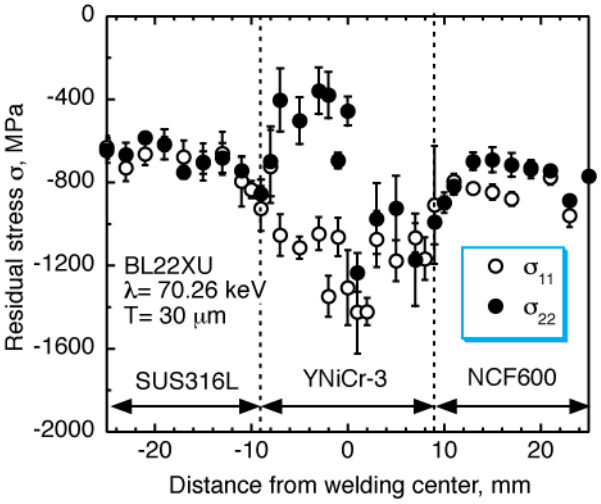
Fig. 5　Change of temperature in welding process

3.2　同一材溶接継手の残留応力

Fig.6 に本解析で得られた溶接残留応力 σ_{11}, σ_{22} および σ_{33} を示す。ここで示した断面は Fig.1 の Line A の切断面であり、応力方向については同様に Fig.1 の通りである。

Fig.6 (a)に示す溶接方向の残留応力 σ_{11} は、溶接部の表面に引張りが生じ、また開先部の切欠きによる応力集中が見られる。

最終パスが左側であるために、対称な応力分布でなく、引張り残留応力が左寄り（最終パス側）となっている。この傾向は、他の解析結果とも一致する[4]。この応力分布の様子から考えると、同一材突合わせ溶接から



(b) Dissimilar plate weld joint

Fig. 10 Residual stresses distribution in removed surface

Fig. 11 Residual stresses distribution in shot-peened surface of dissimilar weld joint measured by constant penetration depth method

び降伏応力・ヤング率などの機械的物性値の差異に起因することになる。今後、本計算結果の妥当を正確に把握するには、X線応力測定などにより実測することも必要であるが、異種材溶接継手部は、粗大粒かつ集合組織であるためにX線応力測定で正確に測定することは容易ではなく、2 次元検出器を利用した実応力評価手法の開発が望まれる。

さて、溶接部にショットピーニングを施した場合は、ピーニング面下の組織が微細化され多結晶体となるので、X線回折による応力評価が容易となる。ショットピーニング面の粗さもあることから、高エネルギー放射光を利用したX線侵入深さ一定法により残留応力を測定した[10]。X線侵入深さを 30 μm になるようにして応力測定した。測定部位は Fig. 1 の Part B となる。使用した放射光施設は、SPring-8 の日本原子力研究開発機構専用ビームライン BL22XU である。X線波長エネルギーは 70.26 keV で使用した回折面は γ-Fe の 420 回折である。

本研究で用意した異種材溶接継手試験体のピーニング面の残留応力分布を測定した結果を Fig. 11 に示す。残留応力の測定結果を見ると、ショットピーニング面の圧縮残留応力は一様になっていない。溶接方向の残留応力 σ_{11} は溶接部で大きな圧縮となり、ショットピーニング前の残留応力と対照的な変化を示す。また、溶接方向垂直の残留応力 σ_{22} は、溶接部の SUS316L 側でやや圧縮残留応力が母材より低下する分布を示す。ピーニング前の残留応力分布がピーニング後の残留応力分布にどのように関係しているかはたいへん興味深い。このような溶接部のピーニング残留応力の特異な変化の起きる機構を解明するには、結晶配向、弾塑性異方性なども含めより詳細な研究が期待される。

4．結言

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L およびニッケル基超合金 NCF600 を母材とした異種材平板の突合わせ溶接継手の残留応力について熱弾塑性有限要素解析を行った。なお、溶接金属は 82 合金(YNiCr-3)である。板厚は 25 mm の 22 パスの多層盛り TIG 溶接である。また、異種材継手の比較として、SUS316L による同一材溶接継手についても同様の有限要素解析を行った。本研究で得られた結果をまとめると以下のごとくである。

1) 温度解析の結果を比較すると、同一材および異種材溶接継手においてほぼ同様の温度変化を示した。このことから異種材の温度特性に起因する差異はなかった。

2) 同一材の溶接部では、溶接方向の残留応力が最終パスの影響で最終パス側に大きな応力が生じた。溶接方向垂直の残留応力は、溶接パスの影響はなかった。また、板厚方向の応力はほとんどない。余盛り部を除去したところ、溶接線中心に対して対称な残留応力分布となり、溶接線平行および垂直方向の表面応力は溶接線中心で引張り応力のピークを示した。

3) 異種材溶接継手においては、溶接方向の残留応力のピークが SUS316L 側にシフトした。溶接方向垂直の残留応力については、ほぼ溶接中心に対して対称な残留応力分布であった。余盛り除去後の表面、溶接方向および垂直方向の残留応力のピークが NCF600 側に近い溶接金属に移動した。表面の引張り残留応力の最大値は同一材よりも大きい結果を示した。また、引張り残留応力については、溶接線垂直よりも溶接方向が大きい結果を示した。

謝辞

本研究の熱弾塑性有限要素解析に際して、(株)計算力学研究センターの清島祥一氏のご支援をいただいた。放射光実験は日本原子力研究開発機構施設共用研究課

題 No. 2011A-E15 の援助による。なお、本研究の一部は原子力安全・保安院の平成 22 年度経年化対策強化基盤整備事業および文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C) No. 21560081 の支援を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

[1] D. Dean and H. Murakawa, "Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-weld modified 9Cr-1Mo steel pipe considering phase transformation effects", Computational Material Science, Vol. 37, 2006, pp. 209-219.

[2] D. Dean and H. Murakawa, "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements", Computational Material Science, Vol. 37, 2006, pp. 269-277.

[3] D. Dean, H. Murakawa and W. Liang, "Numerical and experimental investigations on welding residual stress in multi-pass butt-welded austenitic stainless steel pipe", Computational Material Science, Vol. 42, 2008, pp. 234-244.

[4] 勝山仁哉、伊藤裕人、飛田　徹、鬼沢邦雄、"原子炉配管溶接部における残留応力の不確かさ評価に基づく確率論的構造健全性評価"、溶接学会論文集 Vol. 28, 2010, pp. 193-202.

[5] J.A. Williams, "Residual stresses in austenitic/ferritic transition joints fabricated with austenitic weld metal", High Temperature Technology, Vol. 2, 1984, pp. 135-140.

[6] Z. Sun, "Feasiblity of producing ferritic/austenitic dissimilar metal joints by high energy density laser beam process", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 68, 1996, pp. 153-160.

[7] A. Joseph, S.K. Rai, T. Jayakumar and N. Murugan, "Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, 2005, pp. 700-705.

[8] B. Zaghloul, A-M. El-Batahgy, A. Sadek and M. El-Shenawy, "A study on residual stresses of dissimilar welding joints", Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 12, 1994, pp. 459-467.

[9] 小川和夫、中田志津雄、西川　聡、堀井行彦、村川英一、"材料物性値および FEM 要素が溶接残留応力解析へ及ぼす影響"、溶接構造シンポジウム 2006 講演論文集、Vol. 2, 2006, pp. 705-712.

[10] 秋庭義明、田中啓介、鈴木賢治、柳瀬悦也、西尾光司、楠見之博、尾角英毅、新井和夫、"放射光によるショットピーニング材の残留応力分布評価"、材料、Vol. 52, No. 7, 2003, pp. 764-769.

（平成 23 年 12 月 22 日）