

ビードオンプレート溶接の溶接残留応力解析

－ 国際ラウンドロビンプロジェクト NeT Task Group1 による検証 －

Numerical Modelling of Weld Residual Stress of Single Bead on Plate Benchmark Problem

津 乗 充 良 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主査 博士（工学）
高 倉 大 典 株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部解析技術部 次長

当社は、欧州で実施されている溶接残留応力の計測・解析に関する国際ラウンドロビンプロジェクト NeT に参加している。溶接残留応力は、溶接構造物の寿命評価や製造工程を検討するために重要であり、シミュレーションによる評価が望まれている。本稿では、ビードオンプレート溶接を取り上げ、有限要素法によるシミュレーションに必要な熱源モデルや熱弾塑性構成則について検討し、試験結果と比較することで溶接残留応力解析手法を構築したので報告する。

The measurement and numerical modelling of weld residual stress in the nuclear industry is intensively studied in European countries and a round project called NeT has been organized by European researchers. IHI has participated in this project by conducting research into numerical modelling. In this study, the effect of the heat source model and constitutive equation on the predicted residual stress for a single bead on plate was investigated by comparing the measurement results.

1. 緒 言

溶接構造物の製作では、溶接施工時に生じる溶接変形が製作精度に影響を与えると同時に、生じた変形を矯正するために新たな工程が必要になるため、溶接変形を適切に管理することが重要である。また、溶接残留応力は、供用中の機器のぜい性破壊、座屈、応力腐食割れ、疲労強度などに大きな影響を与えることが知られている。これらの理由から溶接現象を理解し、残留応力・変形を精度良く予測することが機器の製作・運用の両面から強く求められている。

溶接残留応力・変形を予測するためには、溶接プロセスを理解することが必要である。これは、材料の凝固履歴、相変化、再溶融などの現象と広範な温度範囲における鋼材の熱弾塑性挙動を理解することを意味しており、極めて非線形性が強く、モデル化が困難な現象として知られている。溶接残留応力・変形を予測する手法の研究は、理論的な研究が 1930 年代後半から始められた⁽¹⁾。1970 年代には計算機を援用した有限要素法によるモデル化方法⁽²⁾が開発され、予測精度が飛躍的に向上した。有限要素法によるモデル化は、極めて強力であり、今日では、汎用有限要素法コードを用いた溶接残留応力・変形解析も実施されるに至っている。

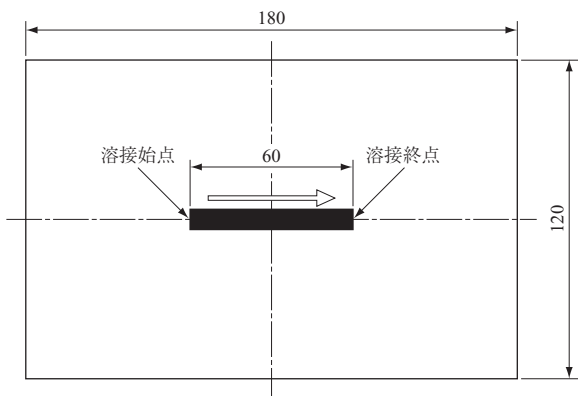
しかし、溶接プロセスは、その性質上、溶接部の要素分割を十分に細かくする必要があるため多大な計算時間を消費することや、溶接現象をモデル化するための熱源モデルや弾塑性構成則の選定が解析結果に大きく影響するなど、この解析手法については、現在でも未知な部分が多く、研究が必要な技術として位置づけられている。

当社は、欧州で実施されている溶接残留応力計測・解析の標準化を目的とした国際ラウンドロビンプロジェクト（The European Network on Neutron Techniques Standardization for Structural Integrity：以下、NeT プロジェクトと呼ぶ）⁽³⁾に参加している。本稿では、この NeT プロジェクトで取り上げられている問題から、ビードオンプレート溶接（NeT Task Group 1）を取り上げ、有限要素法による数値解析に必要な熱源モデルや熱弾塑性構成則について検討した。また、異なるモデル化方法によって得られた解析結果を実験結果と比較し、適切なモデル化手法について考察した。

2. 溶 接 試 験

溶接施工や温度計測、溶接残留応力は、NeT プロジェクトで実施された。実施された溶接試験に関しては、文献（4）、（5）、（6）に詳しく記載があるため、ここでは、概略を述べる。

溶接試験体の概略を第 1 図に示す。試験体は、長さ



第 1 図 溶接試験体 (単位: mm)

Fig. 1 Schematic illustration of weld sample (unit: mm)

180 mm, 幅 120 mm, 厚さ 17 mm の 316L ステンレス鋼の開先のない板であり, 中央部 60 mm に第 1 表に示す溶接条件による TIG 溶接で 1 パスビードオン溶接し製作した. 同様の試験体を合計 4 体製作し, 熱電対による溶接中の温度計測やひずみ計測が実施された. また, これらの試験体を用い, ① 中性子回折法 ② X 線回折法 ③ DHD (Deep Hole Drilling) 法 ④ Contour 法, などによる溶接残留応力計測が複数研究機関で実施されている.

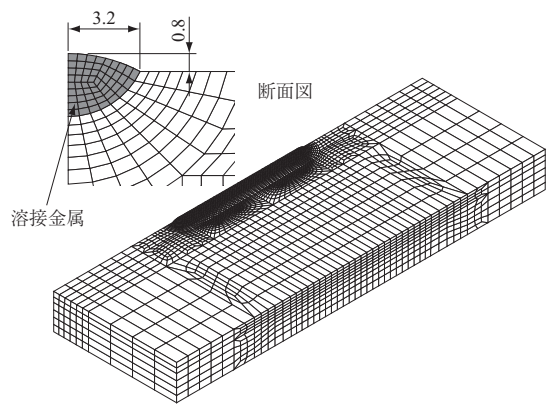
本稿では, 試験で製作された 4 体から主に NeT プロジェクトで推奨されている 1 体 (試験体名: A11) について, これらの計測結果と解析結果を比較し, 解析手法の妥当性を検討した.

3. 解析方法

ビードオン溶接は, 溶接トーチの移動を考慮すると三次元問題となる. そこで, 本稿では, 三次元モデルを用いて解析を実施した. 溶接ビードの形状計測結果や断面観察結果を基に構築された三次元有限要素モデルを第 2 図に示す. 第 2 図の断面図における灰色部分を溶接金属とし, そのほかの部分は母材として解析した. 解析は, 試験体の対称性を考慮し, 溶接ビード中央を通る 1/2 対称モデルとした. 溶接残留応力解析は一般的に非定常熱伝導解析と非定常熱弾塑性解析による弱連成解析としてモデル化される. 本稿においても, この弱連成解析によって, 溶接残留応力解析を実施した. なお, 解析は, 汎用有限要素法コー

第 1 表 溶接条件
Table 1 Welding parameters

入熱 (J/mm)	溶接時間 (s)	溶接長 (mm)	速度 (mm/s)
633	26.4	60	2.27



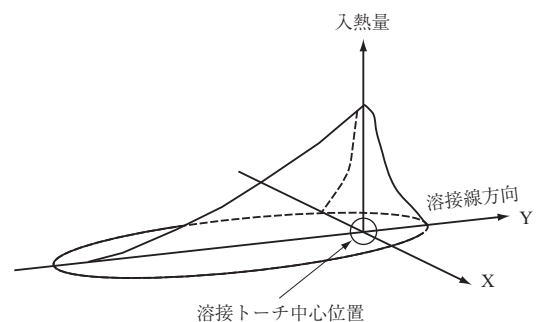
第 2 図 有限要素モデル (単位: mm)

Fig. 2 Finite element model (unit: mm)

ド ABAQUS を用いて実施した.

非定常熱伝導解析では, 溶接トーチからの入熱分布をモデル化した熱源モデルを用いる必要がある. 本稿では, 溶接トーチの前後で異なるだ円形状の入熱分布を用いた二重だ円モデル (Goldak モデル)⁽⁷⁾ と溶接金属部分 (第 2 図の断面図に示す灰色部分の要素) に一様な熱流束を入熱した一様入熱モデルの 2 種類の熱源モデルを用い, これらの結果が温度履歴や溶接残留応力に及ぼす影響を検討することにした. Goldak モデルによる入熱分布の概念図を第 3 図に示す. ここで, 二つのモデルにおける総入熱量は同じになるように設定した. なお, 溶接熱効率が解析結果に与える影響を低減させることを目的とし, NeT プロジェクトでは, 溶接熱効率を 75% として検討している.

溶接残留応力解析では, 溶接による入熱で狭い領域に, 急激な温度上昇/降下があるため, 特に高温下において, 大きな塑性変形が生じることが分かっている. このため, 非定常熱弾塑性解析では, 弾塑性構成則を適切に選定することや, 塑性変形による体積ロッキングを防止する有限要素の選択が重要になる. また, 非線形性が強くなるため, 収束計算に多大な計算コストを要することも考えられる.



第 3 図 Goldak 溶接入熱モデル

Fig. 3 Goldak heat source model

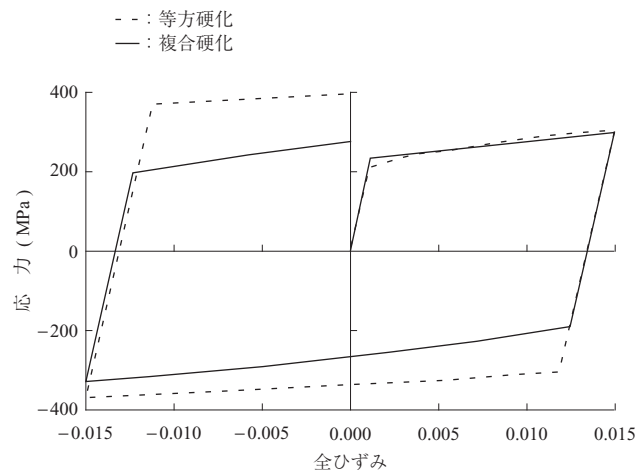
これらの影響を検討する目的で、異なる要素タイプや弾塑性構成則を用いた解析を実施し、比較検討することにした。

塑性変形が卓越する場合の体積ロッキングを防ぐ目的では、低減積分ハイブリッド二次要素 (C3D20RH) を使用することが良いと考えられる。しかし、この要素は、計算コストが高く、多層溶接では、現実的な時間で計算することができない可能性も考えられる。そこで、計算コストの低い低減積分一次要素 (C3D8R) を用いた解析を行い、計算時間と解析精度を比較することにした。

弾塑性構成則として、通常良く使われる等方硬化則と等方硬化と移動硬化の両者を考慮できる複合硬化則を用いた解析を実施し、解析結果に与える影響について検討した。等方硬化則では引張試験によって得られた応力ひずみ関係を多直線近似したデータを用いた⁽⁴⁾。複合硬化則には、Lemaitre-Chaboche モデル⁽⁸⁾、⁽⁹⁾を用い、必要になる材料パラメタについては、低サイクル疲労試験で得られた繰返し応力ひずみ関係から推定された値を用いた⁽⁸⁾。

母材での等方硬化則と複合硬化則の常温における応力ひずみ線図の比較を第4図に示す。単軸引張条件では同等の応答を示すが、引張りから圧縮に応力が反転した後でBauschinger効果⁽⁹⁾の影響によって、違いが現れることが分かる。低サイクル疲労試験結果が公表されていないため、試験結果と直接比較することはできないが、常温/高温の両者において、繰返し荷重が負荷されるラチェット問題などで複合硬化則の方が良い結果を与えることが知られている⁽⁹⁾。

溶接問題では、加熱/冷却のプロセスを繰り返すことになり、1パス溶接においても応力が反転することが考えら



第4図 等方硬化則と複合硬化則の比較

Fig. 4 Comparison of isotropic and combined hardening model

れる。さらに、多層溶接では、繰返し熱負荷状態になるため、繰返し負荷を考慮した応力ひずみ関係を用いることが効果的と考えられる。

以上、2種類の熱源モデル、2種類の有限要素タイプ、2種類の弾塑性構成則による解析を第2表に示す4種類のケースとして組み合わせて解析を実施した。これらの解析では、温度依存性を考慮した材料データを用いる必要がある。この材料データとして、文献(8)のデータを使用した。文献(8)では、溶接金属の材料データとして、ほかのプロジェクトで採取されたデータを利用している。本稿においても、同データを仮定して解析を実施した。また、高温場におけるアニーリング効果を模擬する目的で、累積塑性ひずみをゼロにするアニーリング温度を1050℃として設定した。なお、本解析では、クリープは考慮していない。

4. 結 果

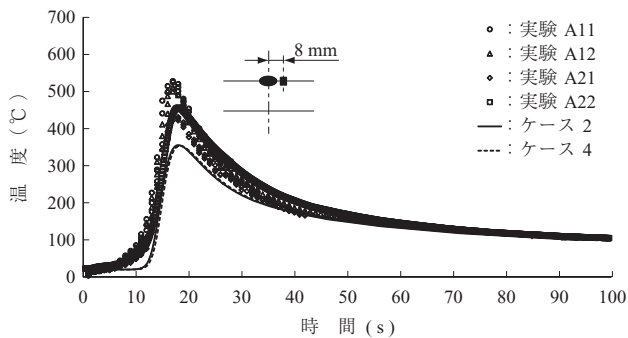
4.1 非定常熱伝導解析結果

第5図、第6図に2種類の熱源モデルによる計算結果と溶接試験で測定した四つの試験体(試験体名:A11, A12, A21, A22)の温度履歴を示す。第5図に示す8mm位置では、計測結果にばらつきがあることが分かった。これは、溶接部近傍では温度勾配が極めて大きいため、熱電対の位置や溶接トーチ位置のばらつきによって、温度分布が大きく変わるためと考えられる。このような影響によって、解析結果も試験との比較では良い一致が得られていないことが分かる。

一方、第6図に示す11.5mm位置では試験と解析結果がほぼ一致していることが分かった。よって、解析で用いている入熱量が試験と一致していたと考えられ、妥当な解析結果であると考えられる。以上の結果から、溶接部近傍で熱電対による温度履歴を比較することには注意が必要であり、溶接部から一定の距離を離れた場所における熱電対と比較の方が良いことが分かった。

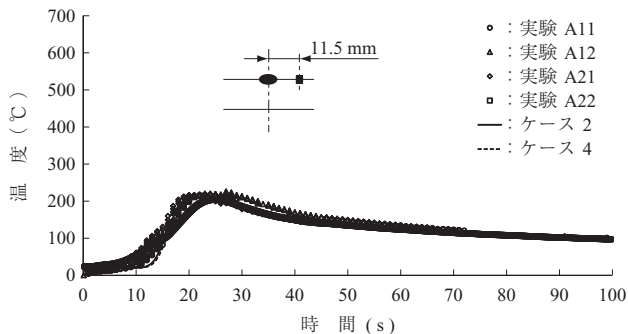
第2表 熱弾塑性解析 解析条件
Table 2 Analysis conditions for mechanical model

ケース	熱源モデル	硬化則	要素タイプ	計算時間 (h)
1	一様	等方	低減積分一次	4.5
2	一様	複合	低減積分一次	2.9
3	一様	複合	低減積分二次ハイブリッド	112.5
4	Goldak	複合	低減積分一次	3.4



第 5 図 8 mm 位置の温度解析結果と計測結果の比較

Fig. 5 Comparison of predicted temperature at 8 mm from weld centre



第 6 図 11.5 mm 位置の温度解析結果と計測結果の比較

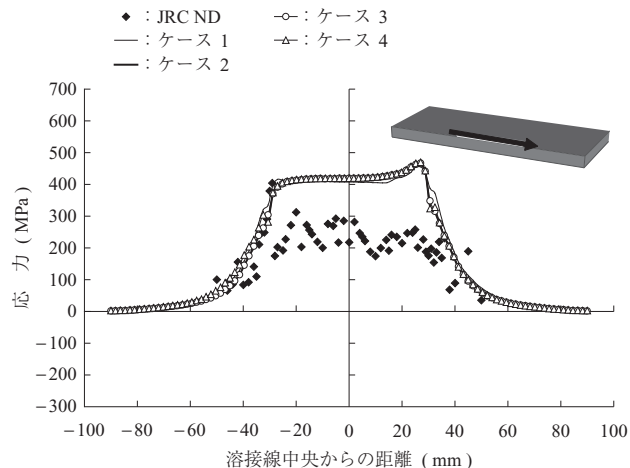
Fig. 6 Comparison of predicted temperature at 11.5 mm from weld centre

第 5 図、第 6 図において、解析結果同士を比較すると、8 mm 以上離れた位置では、熱源モデルによらず同等の温度履歴を得られることが分かった。Goldak モデルでは、複雑な熱源分布を表現し得る要素分割が必要であるため、多層溶接の解析では多大な計算コストが必要になる。

本結果から、断面マクロなどによって入熱分布が試験から分かり、溶接部近傍における詳細な応力分布を評価しない場合、比較的粗い要素分割が可能で一様入熱モデルでも、良い温度解析結果を得られると考えられる。そこで、熱弾塑性解析では、一様入熱モデルを基本として検討することにした。

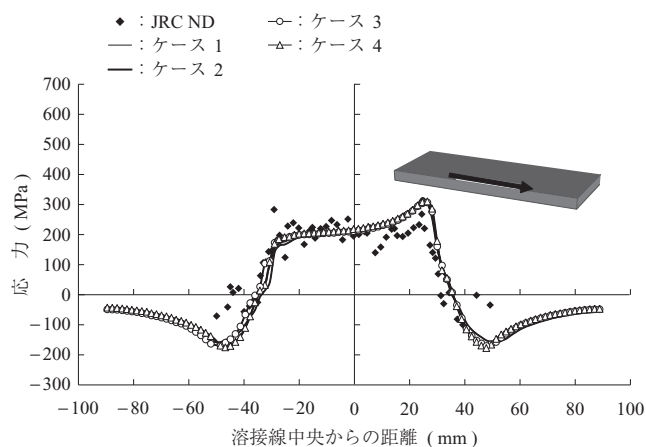
4.2 非定常熱弾塑性解析結果

試験体の板表面と板厚内部について、NeT プロジェクトでは、複数機関で溶接残留応力計測が実施されている。ここでは、第 7 図～第 10 図に第 2 表の 4 ケースによる解析結果を示すとともに、オランダ JRC (Joint Research Centre) で実施された中性子回折法とイギリス Bristol 大学で実施された DHD (Deep Hole Drilling) 法の 2 種類の計測結果を示す。第 7 図、第 9 図から、溶接部における溶接線方向残留応力分布で解析結果と計測結果に差異が見られる。これは、仮定した溶接金属の降伏応力が実際の降伏応力よりも高かったためと考えられる。よって、当該



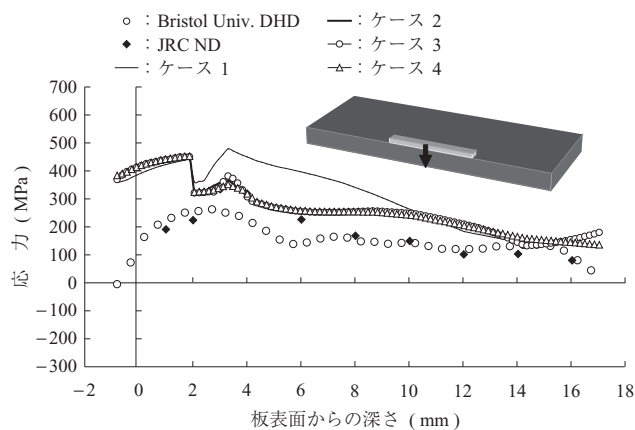
第 7 図 溶接線方向残留応力解析結果 (板表面)

Fig. 7 Predicted longitudinal residual stresses along weld centre line



第 8 図 溶接線垂直方向残留応力解析結果 (板表面)

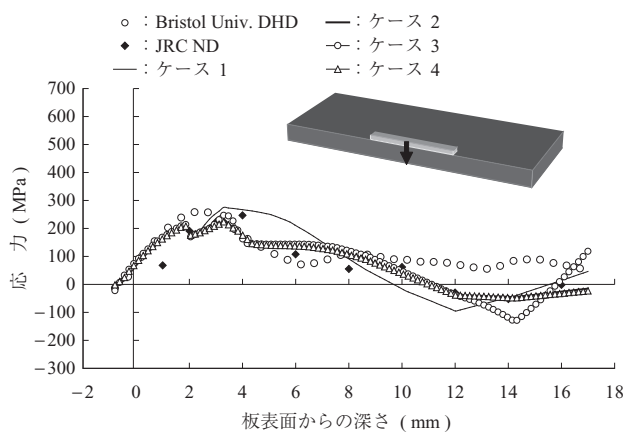
Fig. 8 Predicted transverse residual stresses along weld centre line



第 9 図 溶接線方向残留応力解析結果 (板厚内部)

Fig. 9 Predicted longitudinal residual stresses on mid-length through-wall line

データを取得することによって、解析精度を向上させることができると考えられる。溶接残留応力は計測結果にもばらつきが多いことが知られており、すべての計測点において定量的に一致した解析結果を得ることは難しいが、全体



第10図 溶接線垂直方向残留応力解析結果（板厚内部）
 Fig. 10 Predicted transverse residual stresses on mid-length through-wall line

的な傾向は解析結果と試験結果で定性的に良く一致したと考えられる。また、母材部分については、定量的にも良く一致した結果であると考えられる。なお、第9図の2 mm付近で応力が急激に下がっている理由は、この位置で溶接金属と母材の境界面があることに起因している。また、3～4 mm位置での応力の不連続な変化はアニーリング温度である1050℃を超え、塑性ひずみをいったんゼロにした領域との境界があるためである。

熱源モデルの影響について検討する。ケース2とケース4の解析結果から熱源モデルの違いによる残留応力への影響が小さいことが分かった。よって、今回のように断面観察を実施し、入熱領域を推定可能な場合は熱源モデルを簡略化できることが分かった。

次にケース2とケース3から要素タイプが与える解析結果への影響について検討する。体積ロッキングに対して効果が高いと考えられる低減積分ハイブリッド二次要素の解析結果と同等の解析結果を低減積分一次要素でも得られることが分かった。よって、第2表に示すように、計算コストの低い低減積分一次要素でも十分な精度で解析可能であることが分かった。

最後に、弾塑性構成則の違いが解析結果に与える影響について検討する。第9図、第10図のケース1とケース2の比較によって、等方硬化則を用いて計算した残留応力は、複合硬化則のものに比べて高い応力を与えることが分かった。溶接金属部近傍は、溶接トーチが近づき、高温になると圧縮の塑性ひずみが発生する。その後、冷却時には、周囲からの拘束の影響で引張応力場に応力が反転する。このような応力反転が発生する場合、等方硬化則は降伏応力を大きく見積もることが知られている。溶接残留応

力解析においても同様の傾向があり、等方硬化則を用いた解析では、高い残留応力を予測したと考えられる。また、複合硬化則の解析結果は、計測結果に近い結果になっており、溶接残留応力解析では、1パス溶接においてもBauschinger効果を模擬できる複合硬化則を用いた方が良いことが分かった。

5. 結 言

欧州で実施されている溶接残留応力計測・解析の標準化を目的とした国際ラウンドロビンプロジェクトからビードオン溶接 (NeT Task Group 1) を取り上げ、①2種類の熱源モデル ②2種類の有限要素タイプ ③2種類の弾塑性構成則を用いた解析、を実施し、モデル化方法の違いによる溶接残留応力解析結果の違いについて検討した。この結果、今回のように、断面マクロ観察によって、入熱分布が推定できる場合、溶接金属部に一様な熱流束を与えた簡易的なモデルでも精度良く解析できることが分かった。また、体積ロッキングに効果的である低減積分ハイブリッド二次要素と同等の解析精度を低減積分一次要素でも得られることが分かった。

さらに、弾塑性構成則として、通常良く用いられる等方硬化則よりも複合硬化則を用いることで解析精度を向上させられる可能性があることが分かった。これらの結果を利用することで、三次元熱弾塑性解析を用いた溶接残留応力解析手法を構築することができた。今後の課題として、特に高温での弾塑性構成則の材料データ取得方法や材料定数の同定方法の高度化、多層溶接時の計算時間の短縮が課題としてあげられる。

溶接残留応力の計測や解析は、計測方法や解析者によって、異なることがあると言われている。それぞれの手法による特性があるため、一つの手法に限定する事は難しいと考えられるが、このようなラウンドロビンによって、ばらつきを少なくする取組みの意義は大きいと考える。今後、同プロジェクトで取り上げられている多層溶接 (NeT Task Group 4) や材料が相変態する問題 (NeT Task Group 5) についても検討を行い、溶接残留応力解析手法をさらに高度化するとともに、手法の標準化に貢献していく所存である。

— 謝 辞 —

NeT プロジェクトにおいては、Joint Research Centre, C. Ohms 氏, British Energy, M. Smith 氏, Imperial

College, K. M. Nikbin 氏, C. M. Davies 氏にご協力をいただきました。また, 解析の実施に当たっては, 株式会社 IHI エスキューブ 寺田克之氏にご協力をいただきました。ここに記し, 深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) D. E. Rodgers and P. R. Fletcher : The Determination of Internal Stresses from the Temperature History of a Butt Welded Pipe Welding Journal Research Supplement (1938) pp. 4 - 7
- (2) R. Kamichika, T. Yada and A. Okamoto : Internal Stresses in Thick Plates Weld-Overlaid with Austenitic Stainless Steel (Report 2) Transactions of the Japan Welding Society Vol. 5 No. 1 (1974. 4) pp. 22 - 31
- (3) C. Ohms, R. V. Martins, O. Uca, A. G. Youtsos, P. J. Bouchard, M. C. Smith, M. Keavey, S. K. Bate, P. Gilles, R. C. Wimpory and L. E. Edwards : The European Network on Neutron Techniques Standardization for Structural Integrity -NeT- Proceedings of ASME PVP2008-61913 : ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference 2008 Chicago Illinois USA
- (4) M. C. Smith and A. C. Smith : NeT Task Group 1 Single Bead Weld on Plate : Review of Phase 1 Weld Simulation Round Robin British Energy Generation Ltd. Report E/REP/BDBB/0089/GEN/05 2006
- (5) M. C. Smith and A. C. Smith : NeT bead-on-plate Round Robin : Comparison of Transient Thermal Predictions and Measurements International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol. 86 (2009) pp. 96 - 109
- (6) M. C. Smith, A. C. Smith, R. C. Wimpory, C. Ohms, B. Nadri and P. J. Bouchard : Optimising Residual Stress Measurements and Predictions in a Welded Benchmark Specimen : A Review of Phase Two of the NeT Task Group 1 Single Bead on Plate Round Robin ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference 2009 Prague Czech
- (7) L. E. Lindgren : Computational Welding Mechanics : Thermomechanical and Microstructural Simulations CRC Press ; Woodhead Boca Raton FL Cambridge England (2007)
- (8) R. J. Dennis and N. A. Leggatt : Optimisation of Weld Modelling Techniques - Bead-on-Plate Analysis Proceedings of ASME PVP2006-ICPVT11- 93907 : ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference 2006 Vancouver BC Canada
- (9) J. Lemaitre and J.- L. Chaboche : Mechanics of Solid Materials : Cambridge University Press (1990)