

狭開先 2 トーチ高速円周 MAG 溶接時における凝固割れに関する力学的検討

大阪府立大学大学院 柴原 正和, 生島 一樹

○原田 貴明

新日鉄住金エンジニアリング株式会社 木村 文映, 森本 拓世

Study on Solidification Cracking Under High-speed Narrow Gap Welding with Tandem Torches

by Masakazu SHIBAHARA, Kazuki IKUSHIMA, Takaaki HARADA,
Humiaki KIMURA and Takuya MORIMOTO

1. 緒 言

近年, 天然ガス・石油等の経済的な中距離輸送インフラとして, 海底パイプラインが多く用いられるようになってきた. 海底パイプラインの製作においては, 船上でパイプの突合せ溶接が行われるため, 施工効率が高い Fig. 1 に示すような全姿勢 2 電極高速自動溶接¹⁻³⁾が用いられている. 加えて, 海底パイプラインは, 劣悪な環境での使用にも耐える必要があるため, 高強度かつ海水や石油から受ける腐食に耐えうる耐腐食性の高い材料が用いられている. このような被溶接材や溶接方法の変化に伴い, 材料の選択や溶接条件の選定などが適切でない場合, Fig. 2 に示すような重大な溶接欠陥である凝固割れが発生する場合を想定する必要がある. 将来的な懸念事項である. この凝固割れの補修には, 時間とコストが必要となるため, 凝固割れを事前に予測し, 割れ発生防止策について検討することは重要であるといえる.

凝固割れは重大な溶接欠陥の一つであるため, これまでに数々の研究が行われている. 冶金学の立場からは, 1980 年代に松田ら^{4, 5)}によって含有元素等の冶金学的因子が割れの発生や溶け込み形状に及ぼす影響等について, 実験を中心に検討が行われた. 力学的な立場からは, 1970 年代に, 佐藤・上田ら⁶⁻⁸⁾が FEM 解析を用いて, 片面自動溶接における変形と割れに関する検討を行っている. しかし, 既往の研究においては冶金学的な立場からの研究が多く, 力学的な立場から研究が行われているものは少ないのが現状である. 本質的に凝固割れの原因を解明していくためには含有元素等の冶金学的因子だけでなく, 溶接条件や拘束状態などの様々な力学的因子も含んだ検討が必要であると考えられる.

そこで, 本研究では, FEM 熱弾塑性解析を用いて, 鋼管の突合せ溶接時に生じる凝固割れの発生原因を力学的な立場から検討し, 割れに及ぼす諸因子の影響について調べる. また, 高温割れ解析には詳細な非線形解析が必要となるため, 市販される汎用 FEM ソフトを用いた FEM 熱弾塑性解析においては, 計算時間の制約により解析規模が限られることから, 本研究においては, 理想化陽解法 FEM⁹⁾と呼ばれる手法を用いることで, 実構造物をモデル化した大規模な解析を実施する.



Fig. 1 Tandem torches used in pipe welding.



Fig. 2 Photo of solidification cracking under high-speed narrow gap welding with tandem torches.

2. 解析手法

2.1 理想化陽解法 FEM による熱弾塑性解析

理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM¹⁰⁾を基にした解析手法であり、Fig. 3 に示すように、静的陰解法の各荷重ステップにおいて、慣性項と減衰項を付加し、これらの項の影響が十分小さくなるまで仮想的な時間ステップを進め変位を計算することで、静的平衡状態を得る手法である。ここで、変位を計算する際に、慣性項と減衰項の係数マトリックスを節点集中型とすることにより、大規模な連立方程式を構築・求解する必要がなくなり、計算の高速化、省メモリ化が可能となる。

また、通常の動的陽解法 FEM ではクーラン条件¹⁰⁾と呼ばれる時間増分に対する制約により、時間ステップ数が増大し解析が困難となるが、理想化陽解法 FEM においては、クーラン条件を基にした質量マトリックスを用いることで、静的平衡状態を求める際に必要となる時間ステップを削減する⁹⁾。

加えて、理想化陽解法 FEM は動的陽解法 FEM に基づく変位の計算と等価節点力の計算が計算量の大部分を占めるため、並列化に非常に適しており、近年高速並列数値計算環境として注目されている Graphics Processing Unit(GPU)を用いた並列化を導入することで大幅な高速化が達成されている¹¹⁾。

以上のような手法を採用することで、理想化陽解法 FEM は、大規模溶接熱弾塑性解析問題において、従来手法とほぼ同等の解析精度を実現し、なおかつ、従来手法と比較し大幅に大規模な解析を達成している。本研究では、実施工モデルの解析を行うため、GPU 並列化を用いた理想化陽解法 FEM を使用した。

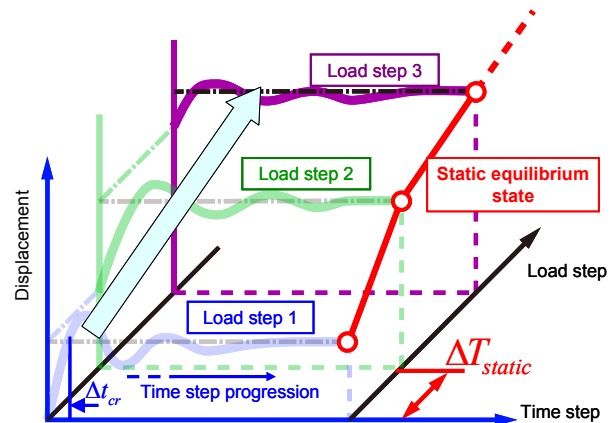


Fig. 3 Schematic illustration of Idealized Explicit FEM.

2.2 BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れの評価

溶接高温割れは、大きく分けて、溶接金属部の凝固脆性温度範囲(solidification Brittleness Temperature Range, 以下 BTR と称す)¹²⁾で発生する凝固割れ、HAZ 部の粒界液化温度範囲 GLR(Grain-boundary Liquation Temperature Range, 以下 GLR と称す)¹³⁾で発生する粒界液化割れ、溶接金属部、溶接熱影響部(Heat Affected Zone, 以下 HAZ と称す)の双方の延性低下温度範囲(Ductility Drop Temperature Range, 以下 DTR と称す)¹⁴⁾で発生する延性低下割れの3種類がある。

溶接金属で発生する凝固割れの発生メカニズムは、凝固過程において、柱状晶の境界に融点の低い液相が残留し、溶接金属冷却時引張のひずみが作用した際に開口するものである。この凝固割れは、溶接金属部で発生する割れであり、溶着金属の選定による割れの防止対策について検討されている。

仙田・松田らは、凝固割れの発生をその時の温度を用いて整理を行い、Fig. 4 に示す高温延性曲線を提案し

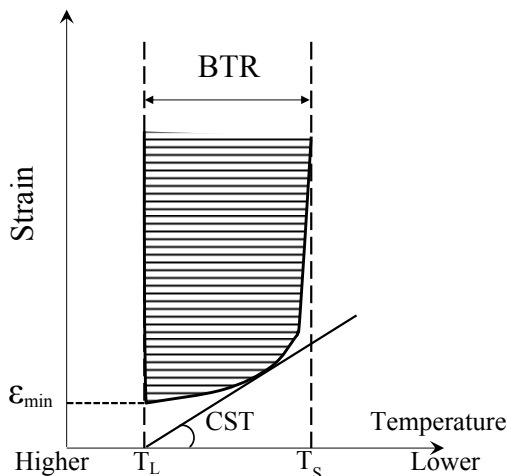


Fig. 4 Schematic illustration of ductility of material in high temperature range.

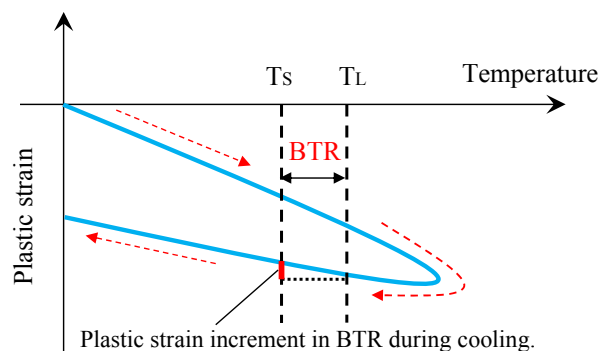


Fig. 5 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling.

た¹⁵⁾。この曲線から、高温割れ(凝固割れ)を支配するパラメータとして、BTR や限界ひずみ ε_{\min} ，それらを組み合わせた CST(Critical Strain Rate for Temperature Drop)を提案し、それらは現在においても高温割れ感受性の評価パラメータとして用いられている¹⁵⁾。凝固割れの発生は BTR で界面の結合強度が低下し、固相の成長が進み、残った液相の部分が固相の部分から応力を受けることにより発生すると考えられる。そこで、本研究ではこのような凝固割れの発生因子を表す値として、Fig. 5 に示すような冷却過程の BTR で発生する塑性ひずみ増分(以後、BTR 塑性ひずみ増分と称す)を考える。この増分値は、同図に示すように、冷却過程において液相線温度に達した時点での塑性ひずみと、固相線温度に達した時点での塑性ひずみの増分の差で表すものである。本研究では、BTR 塑性ひずみ増分を算出するために FEM 熱弾塑性解析を用いる。

3. 2 トーチ高速円周 MAG 溶接実験およびその解析

3. 1 解析モデル及び溶接条件

本章では、2 トーチ熱源モデルを考慮した熱伝導解析を実施し、実験結果との比較を通して熱伝導解析の妥当性について検討する。

本実験においては、2 トーチ高速円周 MAG 溶接を行うものとする。解析に使用した鋼管の形状およびその要素分割を Fig. 6 に示す。本モデルは、外径および内径がそれぞれ 609.6 mm および 571.4 mm であり、問題の対称性を考慮し、溶接線を対称面としてパイプの軸方向に半分のみをモデル化した。要素分割は、周方向に 360 分割、板厚方向に 48 分割しており、節点数は 302,040、要素数は 271,440 とした。溶接線内面には裏あて材である銅板もモデル化している。銅板の寸法は幅 47 mm、厚さ 9 mm である。本実験で用いる鋼管は板厚 19.1 mm、内径 571.4 mm、外径 609.6 mm である。溶接条件は、1 トーチ目の入熱が 362.5 J/mm、2 トーチ目の入熱が 337.5 J/mm である。溶接速度はともに 20 mm/s であり、トーチ間隔は 65 mm とした。パイプの材料は API 規格の X65 材である。X65 材の材料定数の温度依存性データは Fig. 7 に示すものを用いた。ただし、各定数は以下の通りである。

E : ヤング率, σ_y : 降伏応力, ν : ポアソン比, α : 線膨張係数,
 c : 比熱, ρ : 密度, λ : 熱伝導係数

3. 2 実験結果及び解析結果

Fig.8 に熱伝導解析結果により得られた温度分布を示す。同図の灰色部分は最高到達温度が 1450° C 以上の溶融領域を示している。同図より、溶融領域の形状は Fig.9 に示す実験結果と良く一致しており、各トーチにおける溶融部の形成を忠実に再現できていることが確認できる。

本解析においては、溶接トーチの進行に伴い溶接金属に対応する要素が逐次実効化されるエレメントバース法を適用し解析を実施した。すなわち、タンデム溶接におけるトーチそれぞれに対し、加熱要素が実効化されるような熱源モデルを使用した。この解析手法を用いることにより、2 トーチそれぞれの肉盛りを実施工に近い形で再現できるようになった。この解析モデルにより、トーチごとの入熱による影響を評価することが可能となった。

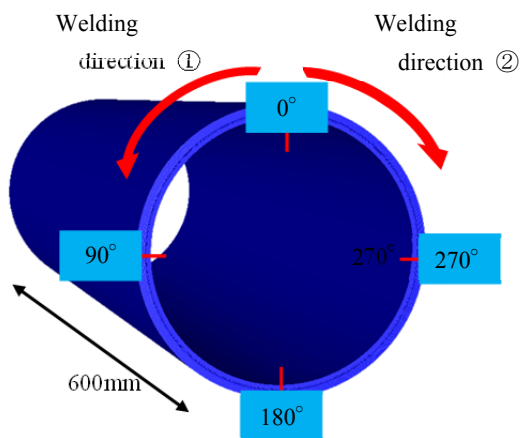


Fig. 6 Analysis model of pipe welding.

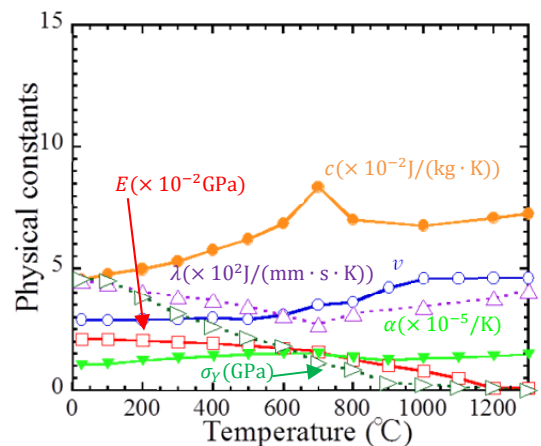


Fig. 7 Temperature dependent material constants of X65.

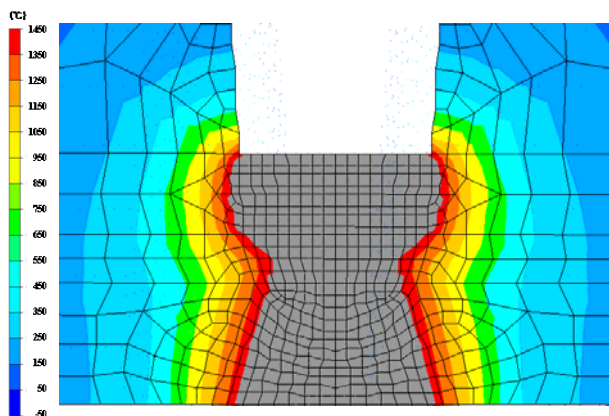


Fig. 8 Maximum temperature distribution obtained by FE analysis.



Fig. 9 Photo of penetrated shape of 2 torch MAG welding.

4. BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れの評価

前章において、エレメントバース法を用いたタンデム熱源を考慮した熱伝導解析の妥当性を示した。本章では、理想化陽解法 FEM を用いた熱弾塑性解析を実験に用いた鋼管モデルに適用し、BTR 塑性ひずみ増分を用いて、溶接ビード中心線上における凝固割れを評価し、割れ発生に及ぼす諸因子の影響について検討を行う。また、Fig. 2 に示すように初パス溶接時に割れが発生する可能性が確認されているため、本章では初パス溶接時の諸条件について詳細に検討を行う。

4. 1 解析条件

本章で解析対象とする鋼管モデルは、Fig. 4 に示す前章と同様のものを使用した。円周溶接の方法は、まず左回りに半周溶接し、その後右回りに半周溶接する。BTR は 1350°C から 1450°C の 100°C とした。溶接条件は前章と同様に 1 トーチ目の入熱を 362.5 J/mm とし、2 トーチ目の入熱を 337.5 J/mm とした。溶接速度はともに 20 mm/s である。トーチ間隔は 65 mm とした。以上の条件を標準条件とし、入熱量、溶接速度、トーチ間隔、パイプ長などの諸因子が BTR 塑性ひずみ増分に及ぼす影響について検討を行う。材料定数の温度依存性は、前章と同じ X65 材のものを使用した。

4. 2 入熱量の影響に関する検討

Fig. 10(a), (b)に、入熱量を 1 トーチ目と 2 トーチ目を合わせて 700, 875 J/mm とした 2 ケースについて、1 層目溶接時の 90°位置の断面における BTR 塑性ひずみ増分分布を示す。また、Fig. 11 に、同図中に示す 90°位置の断面のパイプ内面から外面に向かう A-B 線上の BTR 塑性ひずみ増分の分布の比較を示す。両図より、700 J/mm のケースに比べ、875 J/mm のケースにおいて、2 トーチ目の通過時に溶接金属が投入される箇所 BTR 塑性ひずみ増分が大きくなっていることが確認できる。また、その最大位置は表裏面ではなく、ビード内部であることが確認できる。また、Fig. 12 に溶接縦断面における溶接中の温度分布を示す。同図に示すよ

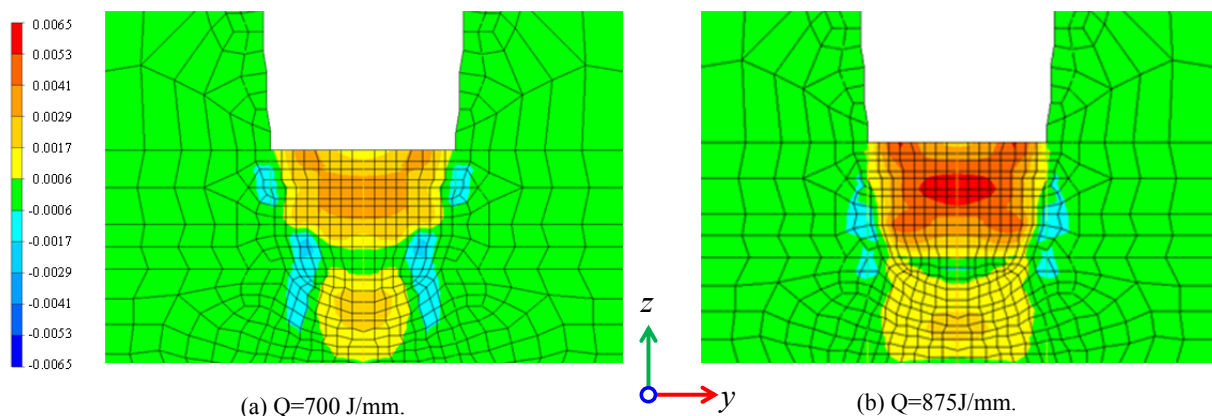


Fig. 10 Distribution of BTR plastic strain increment for x direction.

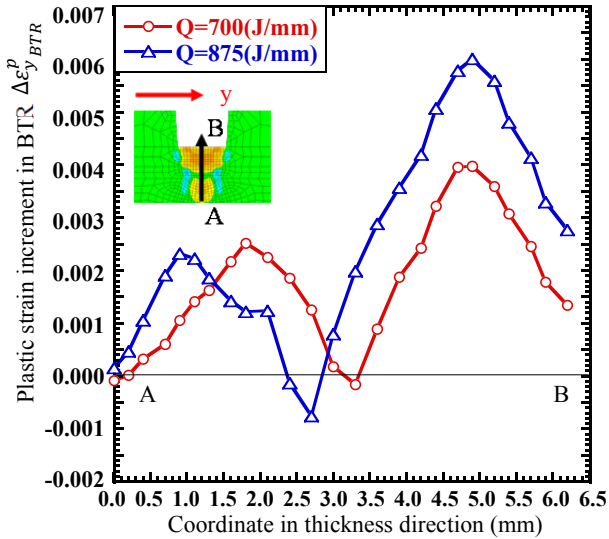


Fig. 11 Comparison of BTR strain increment in x direction along line A-B.

うに、入熱量の増加に伴い溶融池が大きくなるため、y 軸方向 BTR 塑性ひずみ増分も大きくなったと考えられる。

次に、Fig. 13 に、各入熱量における同図中の C 点の位置の y 軸方向塑性ひずみの温度履歴を示す。同図の横軸は温度であり、縦軸は塑性ひずみである。また、○印および△印は、それぞれ入熱量 $Q=700$ J/mm および 800 J/mm の場合である。なお、C 点の位置は内表面から外表面方向に 4.7 mm の位置である。同図より冷却過程における BTR 温度領域で引張りの塑性ひずみ増分が発生していることが確認できる。X65 材の液相線温度は 1450°C 、固相線温度は 1350°C であることから、冷却過程における $1350^{\circ}\text{C} \sim 1450^{\circ}\text{C}$ の温度域、すなわち BTR における塑性ひずみの履歴を整理した結果を Fig. 14 に示す。同図より、入熱量が大きいほど、BTR 塑性ひずみ増分の最大値も増加しており、また、塑性ひずみの傾きも大きくなっていることが確認できる。

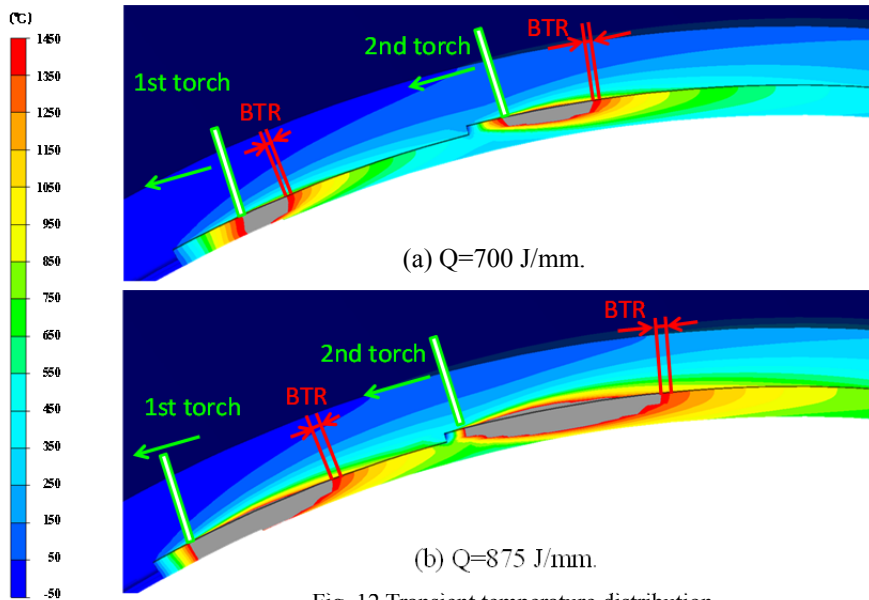


Fig. 12 Transient temperature distribution.

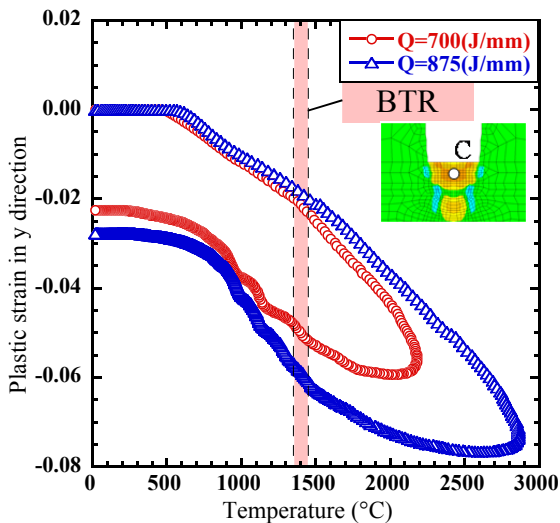


Fig. 13 History of plastic strain in x direction for temperature at point C.

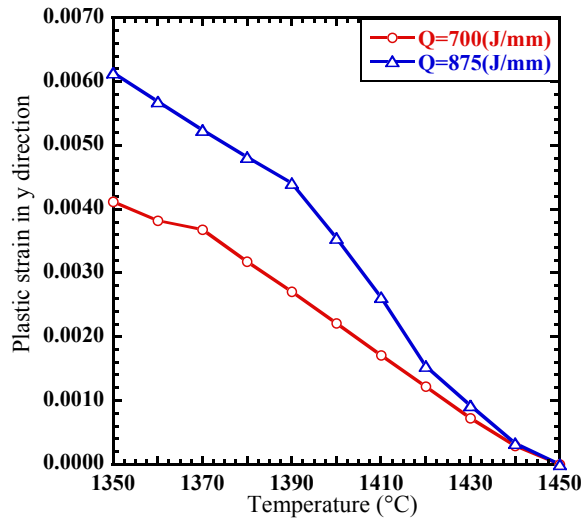


Fig. 14 Photo of solidification cracking under high-speed narrow gap welding. (Zoomed view)

このように、入熱量が大きい場合に、y 軸方向 BTR 塑性ひずみ増分が大きいことから、入熱量が大きいほど割れやすい傾向にあるものと考えられる。

4. 3 溶接速度の影響に関する検討

溶接速度の影響について議論するために、溶接速度に関して $v=20\text{ mm/s}$, 22 mm/s , 35 mm/s , 40 mm/s の 4 ケースを設定し解析を実施した。その他の溶接条件は標準条件を使用した。

Fig. 11 と同様に A-B 線上の BTR 塑性ひずみ増分分布を溶接速度について比較した結果を Fig. 15 に示す。同図より、2 トーチ目の溶接金属部において、溶接速度が大きいほど BTR 塑性ひずみ増分の最大値が大きくなっていることが分かる。これは、溶接速度が大きい場合、溶接線方向に溶融池は大きくなり、それに伴い BTR 温度領域も溶接線方向において大きくなるためであると考えられる。

4. 4 トーチ間隔の影響に関する検討

トーチ間隔が BTR 塑性ひずみ増分に及ぼす影響について検討するため、基本条件に加えてトーチ間隔が $L=35\text{ mm}$, 45 mm , 100 mm の 3 ケースの解析を実施した。Fig. 11 と同様に A-B 線上の BTR 塑性ひずみ増分の分布の影響を比較した結果を Fig. 16 に示す。同図より、トーチ間隔が短いほど C 点における BTR 塑性ひずみ増分が大きくなる傾向にあることが確認できる。また、Fig. 12 と同様に、溶接中の溶融池形状を比較した結果を Fig. 17 に示す。同図(a)は、 $L=35\text{ mm}$ のケースの溶融池形状、(b)は $L=100\text{ mm}$ のケースの溶融池形状で

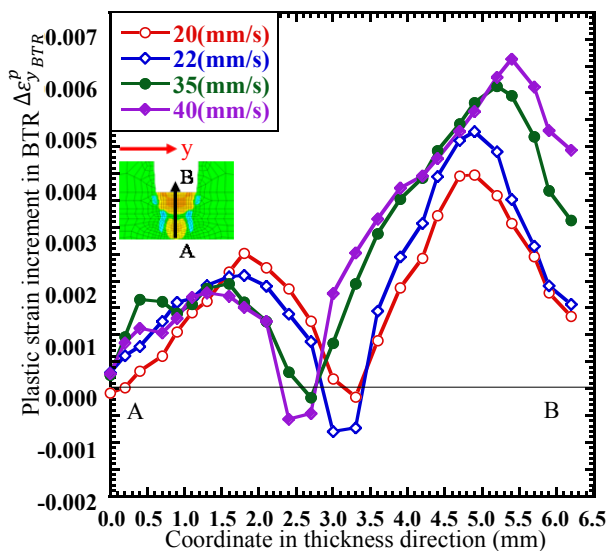


Fig. 15 Influence of welding speed on plastic strain increment in BTR. $\Delta\epsilon_{y_{BTR}}^p$

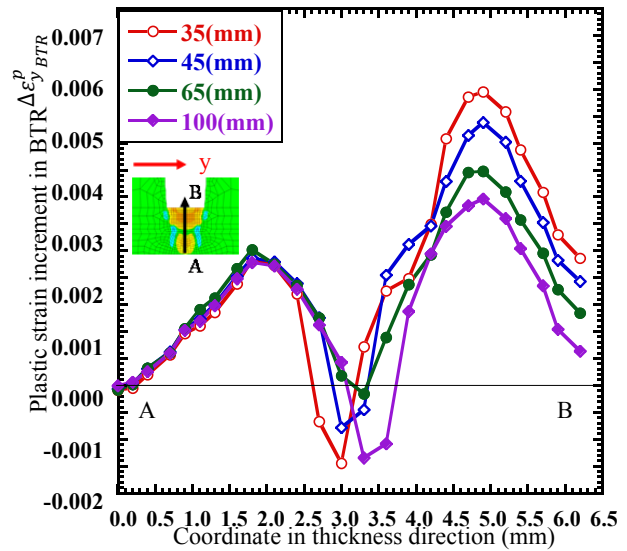


Fig. 16 Influence of torch distance on plastic strain increment in BTR. $\Delta\epsilon_{y_{BTR}}^p$

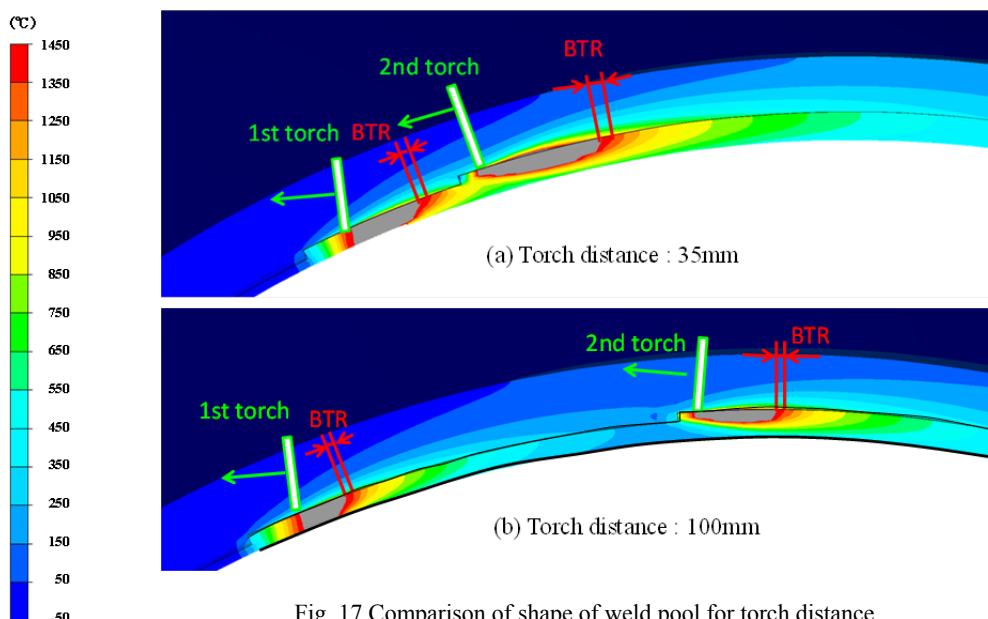


Fig. 17 Comparison of shape of weld pool for torch distance.

ある。同図から、トーチ間隔が短いほど2トーチ目通過後のBTR内にある温度の領域が長くなっていることが確認できる。これは、トーチ間距離が短いほど、2トーチ目により加熱がなされるまでに、周囲の領域への伝わる熱量が小さくなり、2トーチ目の見かけ上の入熱量が大きくなるためであると考えられる。

よって、トーチ間隔が短い場合は、凝固割れが発生しやすい傾向にあると考えられる。

4. 5 パイプ長の影響に関する検討

パイプ長が凝固割れに及ぼす影響について検討するために、パイプ長が $L=10000\text{ mm}$, 5000 mm , 2500 mm , 1200 mm , 800 mm , 600 mm , 300 mm , 150 mm の8ケースの解析を実施した。その他の条件は基本条件を使用した。Fig. 18にパイプ長と最大BTR塑性ひずみ増分の関係を示す。Fig.18より、 $L=300\text{ mm}$, 150 mm において、他のケースと比較し最大BTR塑性ひずみ増分が小さくなっていることが確認できる。これは、パイプ長が短いほど軸方向の剛性が小さくなるため、加熱部周辺の高温領域への拘束が小さくなり、BTR塑性ひずみが小さくなると考えられる。しかしながら、 $L=300\text{ mm}$ は実際の施工において使用されるパイプ長に比べてはるかに短いため、パイプ長が凝固割れに及ぼす実質的な影響はほとんどないと言える。

5. 結言

本研究では、パイプの狭開先2トーチ高速円周MAG溶接時における凝固割れについて力学的な検討を行うために、凝固脆性温度範囲(BTR)における塑性ひずみ増分に注目し、実施工を模擬した3次元非線形熱弾塑性FEM解析を実施した。また、実施工モデルの非線形FEM解析においては、解析モデルの規模の観点から計算時間が問題と予想されたため、理想化陽解法FEMを導入した。熱弾塑性解析に先立ち、溶接時の熱伝導解析結果による溶け込み形状に関する解析結果の妥当性を検討するために、実験と解析により溶け込み形状の比較を行った。熱伝導解析により得られた温度分布の履歴を基に、熱弾塑性解析を実施し、溶接条件、パイプの形状がBTR塑性ひずみ増分に及ぼす影響について検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 溶け込み形状について、実施工モデルにおいて熱伝導解析と実験結果を比較した結果、熱伝導解析により得られた溶け込み形状は、実験結果と良い一致を示すことを確認した。
- 2) 溶接条件がBTR塑性ひずみ増分に及ぼす影響について検討するために、入熱量、溶接速度ならびにトーチ間隔を変更した解析を行い、解析結果について検討した。その結果、入熱量が大きいほど溶融池が大きくなり、BTR内の温度を持つ領域が大きくなるため割れやすくなる可能性があることが分かった。また、溶接速度が大きい場合、溶接線方向に溶融池が大きくなり、それに伴ってBTR温度領域も溶接線方向において大きくなることから、凝固割れが発生しやすくなる可能性があることが分かった。トーチ間隔に関しては、トーチ間隔が小さい場合は1トーチ目による加熱の影響が小さくなり、2トーチ目通過後の温度が高くなることからBTR内にある領域が大きくなるため、BTR塑性ひずみ増分が大きくなることが分かった。
- 3) パイプの形状がBTR塑性ひずみ増分に及ぼす影響について検討するために、パイプ長を変更した解析を実施した。その結果、パイプが短い場合、軸方向の剛性が小さくなるため、BTR塑性ひずみ増分が小さくなることが分かった。しかしながら、実施工において使用されるパイプ長においては、パイプ長がBTR塑性ひずみ増分に及ぼす影響は小さいことから、パイプ長の凝固割れへの影響は小さいと考えられる。

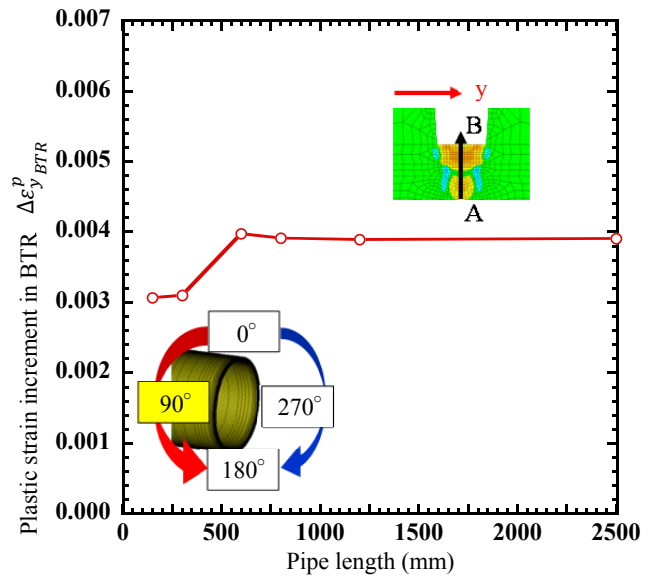


Fig. 18 Influence of pipe length on maximum plastic strain increment in BTR $\Delta \epsilon_{y,BTR}^p$ at point C and pipe length.

参考文献

- 1) Toshihide HAKODA, Koji YANAKA, Toru IKEZAKI, Hiroyuki HOSODA, Norihisa SOGABE and Tadashi TORII: Present and Transition State of Automatic Welding Technologies for Offshore Pipelines - An Approach for the Highest Production Rate Welding in the World -, 新日鉄エンジニアリング技報(1),58-65,2010-00-00
- 2) Yuji Kisaka, Fumiaki Kimura, Toshihide Hakoda, Hiroyuki Hosoda and Tadashi Torii ; A DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED GMA GIRTH WELDING SYSTEM FOR PIPELINES
- 3) Toshihide HAKODA and Norihisa SOGABE: Present and Transition State of Automatic Welding Technologies for Offshore Pipelines, 溶接技術 58(8), 85-90, 2010-08-00
- 4) Fukuhisa MATSUDA, Hiroji NAKAGAWA, Yue-Chang ZHANG, Setsuji MINEHISA, Nobuharu SAKABATA, Akio EJIMA and Kiyohiko NOHARA : Behaviors of Hot Cracking and Its Dependency on Chemical Composition : Ductility-dip Cracking in Weld Metal of Fe-36% Ni Alloy, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.3, No.3 (1985), pp.
- 5) Fukuhisa Matsuda, Hiroji Nakagawa, and Shogo Tomita : Effect of Strain Rate on Critical Strain Required for Initiation of Solidification Crack Investigation on Weld Solidification Cracking by MISO Technique (Report III), Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.7, No.1, 100-105, 1989-02-05
- 6) Kuniyuki SATOH, Yukio UEDA, Toshio YADA, Ryoichi KAMIDHIKA, Toyoo MAEDA and Yuchol KIM : Studies on Deformations and Cracking in One Sided Welding (1st Report) , Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.136, (1974) pp.441-458
- 7) Kuniyuki SATOH, Yukio UEDA, Toshio YADA, Ryoichi KAMIDHIKA and Shin KIKUSHIMA : Studies on Deformations and Cracking in One Sided Welding (2nd Report) , Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.137 (1975) pp.360-368
- 8) Kuniyuki SATOH, Yukio UEDA, Toshio YADA, Ryoichi KAMIDHIKA and Fukuhisa MATSUDA : Studies on Deformations and Cracking in One Sided Welding (3rd Report) , Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.138 (1975) pp.490-498
- 9) M. Shibahara, K. Ikushima, S. Itoh and K. Masaoka: Computational Method for Transient Welding Deformation and Stress for Large Scale Structure Based on Dynamic Explicit FEM, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 29-1(2011), pp.1-9
- 10) Peter Wriggers, Nonlinear Finite Element Methods, Springer, 2008
- 11) Kazuki IKUSHIMA, Shinsuke ITOH and Masakazu SHIBAHARA : Development of Parallelized Idealized Explicit FEM Using GPU, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.31, No.1 (2013) p23-32
- 12) Fukuhisa MATSUDA, Hiroji NAKAGAWA and Jong-Bong LEE : Numerical Analysis on Solidification Brittleness Temperature Range in Stainless Steel : Weld Crack Susceptibility of Duplex Stainless Steel (Report V), Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.9, No.1 (1991) p93-98
- 13) Ken-ichi KARIMINE, Kouichi UCHINO and Makoto OKUMURA : Susceptibility and Occurrence Condition of HAZ Liquation Cracking on Rail Steels - Study on Rail Welding with High-C Welding Materials (Report 4) -, Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.14, No.3 (1996) p578-585
- 14) Effect of Cr and S on Ductility -dip Cracking Susceptibility in Reheated Weld Metals of Ni-Cr-Fe Ternary Alloys - Study on Microcracks in Multi-pass Weld Metals of Ni-base Alloys (Part 2), Quarterly Journal of The Japan Welding Society, Vol.11, No.1 (1993) p108-113
- 15) Tomio SENDA, Fukushima MATSUDA, Genta TAKANO, Kiyoshi WATANABE, Tadaaki KOBAYASHI and Takeshi MATSUZAKA : Studies on Solidification Crack Susceptibility for Weld Metals with Trans-Varestraint Test (1)