

B17 高温割れ解析モデルの構築および鋼管溶接時における 高速 MAG 溶接への適用

原田 貴明 (指導教員 柴原・生島)

Numerical Modelling of hot cracking and its application to high-speed MAG welding of steel pipe

by Takaaki Harada,

Abstract

In recent years, undersea pipelines are widely utilized ways to transport natural gas or oil economically and effectively in middle or long distance. In undersea pipeline, high strength and corrosion resistant material are employed. This is to resist corrosion from sea water and oil. In order to be able to use in harsh environments, new materials have been developed. On the other hand, welding technology has also advanced. In the practical construction, full-automatic welding system with high construction efficiency which has two welding heads is used. Due to the change of the welding materials and methods, if the appropriate welding conditions are not chosen, it is a serious problem there is a possibility that solidification cracking occurs. It is important to predict the solidification cracking, because a lot of money and time is required for the repair of solidification cracking. Then, in this study, using Idealized Explicit FEM, the authors have solved the problem of solidification cracking of pipe joint from the mechanical viewpoint.

1. 結 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、海底鋼管ラインが多く用いられるようになってきている。海底鋼管ラインの製作においては、船上で鋼管の突合せ溶接が行われるため、施工効率が高い全姿勢 2 電極高速自動溶接が用いられている。加えて、海底鋼管ラインは、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、重大な溶接欠陥である凝固割れの発生を想定する必要がある。そのため、溶接の施工後に凝固割れを検出するために X 線や超音波を用いた検査が実施され、更に、割れが検出された場合、補修作業が必要となる。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、1952 年に Pellini らによって、高温領域で凝固収縮によって蓄積したひずみが、ある臨界値に達した時に起こるひずみによる現象であるという凝固割れ発生理論が提唱された。そのため、凝固割れ発生の最も重要な支配因子は高温領域で加えられるひずみ量であると考えられている。また、Singer らをさがしに、凝固割れ発生に関して凝固の段階を分け、各区分において割れ発生を評価することが妥当であると主張されている。材料の凝固割れの感受性に関しては、1962 年に Prokhorov によって、高温延性曲線と BTR (Brittle Temperature Range : 高温脆化温度域)を用いて説明されている。BTR において、割れが発生する最小のひずみを限界ひずみと言い、BTR 中で溶接金属部に作用する変位またはひずみと高温延性直線によって割れの発生を評価できることが

提案されている。このように、様々な研究において BTR や限界ひずみが凝固割れ発生の評価指標であると提案されている。

このように、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なされているが、本質的に凝固割れの原因を解明していくためには、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する。また、冶金学的な観点からも凝固割れ発生に関して検討を行うことが必要であるため、新たに高温割れ解析モデルを構築する。以上に述べたように、力学的および冶金学的な観点から、溶接条件や鋼管の形状が凝固割れに及ぼす影響について検討するために、種々の条件において、溶接継手に生じる BTR 中の塑性ひずみ増分の分布および溶融部における凝固過程の結晶成長方向に関して議論する。以上の検討を通して、鋼管溶接時における凝固割れの発生に関する諸因子の影響について明らかにする。

2. 解析手法

2.1 BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れの評価

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、柱状晶の会合部に融点の低い液相が残留し、冷却時において溶接金属に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、1970 年代に、Fig. 1 に示す高温延性曲線を提案した。この曲線

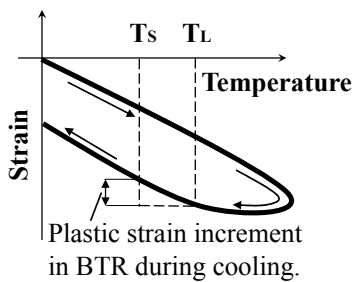


Fig. 1 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling.

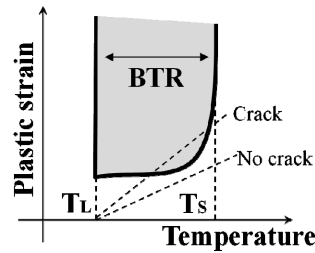


Fig. 2 Schematic illustration of ductility of material in high-temperature range.

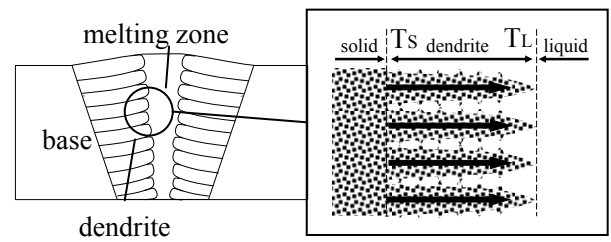


Fig. 3 Schematic illustration of dendrite growth direction in melting pool.

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 $\varepsilon_{\min}$ ，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。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ひずみ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. 2 に示すような冷却過程の BTR で発生する塑性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{BTR}^p$ (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 塑性ひずみ増分を凝固割れ評価の指標の一つとし、FEM 熱弾塑性解析を用いた解析を実施した。

2.2 結晶成長方向を考慮した凝固割れの評価

冶金学分野では、凝固割れの評価に関して、凝固時における溶融金属の結晶成長方向が凝固割れに及ぼす影響について研究がされている。本研究で取り上げている溶融金属の中心部で発生する凝固割れ、すなわちセンターラインクラックに関しては、この結晶成長方向の影響を考慮することで、より実現象を再現した解析が可能になると考えられる。

本研究では、Fig. 3 に示す様に、溶融部において、冷却過程で液相線温度 T_L を下回った瞬間の温度勾配ベクトル(単位ベクトル)の方向が、結晶成長方向であると仮定し、その y 軸方向成分 θ_{center}^y と BTR 塑性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{BTR}^p$ を乗じた指標を結晶方向ひずみ(Plastic strain increment of dendrite direction in BTR)とし、新たな割れ評価指標として提案する。

3. 高速 MAG 溶接実験およびその解析

3.1 解析モデルおよび溶接条件

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. 4 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鋼管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。

3.2 実験結果および解析結果

3.2.1 熱伝導解析結果と実験結果

Fig. 5(a)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℃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. 5(b)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ベース法を

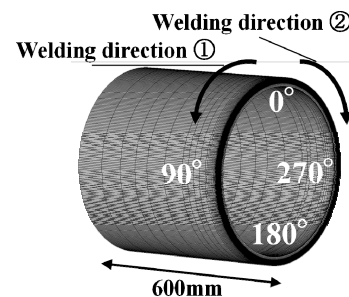


Fig. 4 Analysis model.

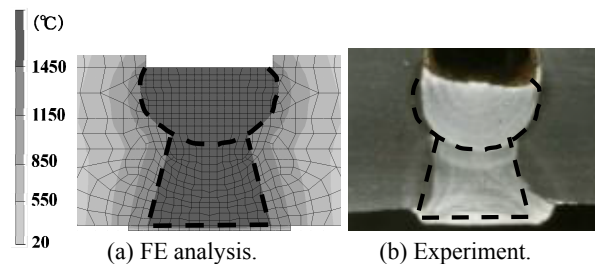


Fig. 5 Maximum temperature distribution obtained by FE analysis and experiment result.

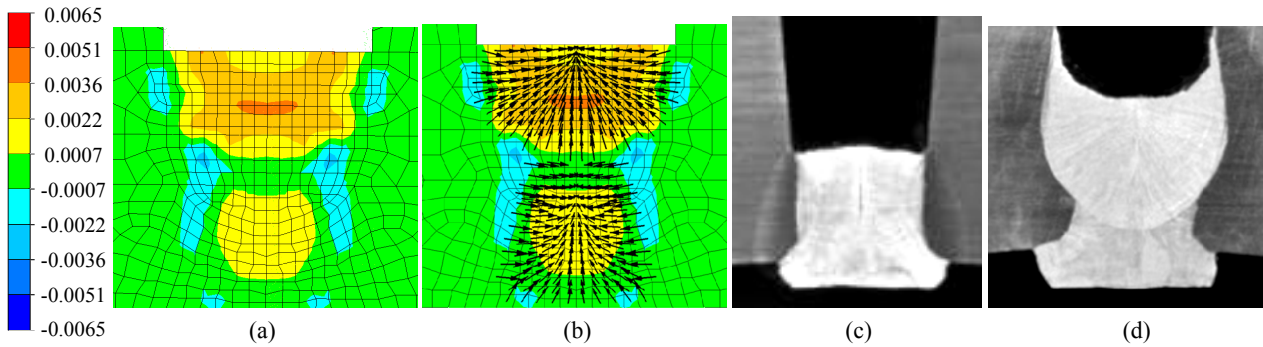


Fig. 6 Distribution of BTR plastic strain increment for y direction (a), temperature gradient (b), experiment result of 1st torch welding (c) and tandem torch welding (d).

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。BTR は 1350℃から 1450℃の 100℃とした。

3.2.2 熱弾塑性解析結果と実験結果

Fig. 6(a)に、90° 位置における y 軸方向 BTR 塑性ひずみ増分の断面分布図を、(b)に温度勾配ベクトル（単位ベクトル）を表記したもの、(c)に 1st トーチのみ溶接した実験結果、(d)に 2 電極タンデムした実験結果を示す。同図から、溶融部中心において BTR 塑性ひずみ増分の大きな値を示す位置と割れ発生位置が定性的に一致していることが確認できる。さらに、解析結果の温度勾配ベクトルと実験結果の結晶成長方向を比較すると両者が非常によく一致していることを確認できる。割れが発生している部分は、y 軸方向に温度勾配ベクトルが会合している箇所が実験では割れていることが言える。以上より、BTR 塑性ひずみ増分に加え、温度勾配ベクトルを考慮することで凝固割れ発生の評価ができるといえる。

3.3 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。同様に、A-B 線上の BTR 塑性ひずみ増分分布に関して溶接速度に整理した結果を Fig. 7 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。また、Fig. 8 に溶融部中央において温度勾配ベクトルの y 軸方向成分の値の分布を示す。さらに、Fig. 9 に溶融部中央の y 軸方向成分 θ_{center}^y と BTR 塑性ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{BTR}^p$ を乗じたものを示す。この図より、結晶成長方向を考慮した凝固割れ指標に関しても、溶接速度が大きくなると凝固割れが発生する可能性が高くなる傾向にあるこ

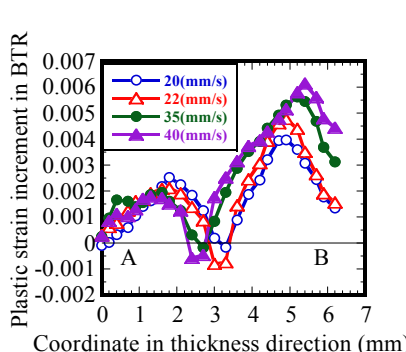


Fig. 7 Influence of welding speed on plastic strain increment in BTR $\Delta \varepsilon_{BTR}^p$.

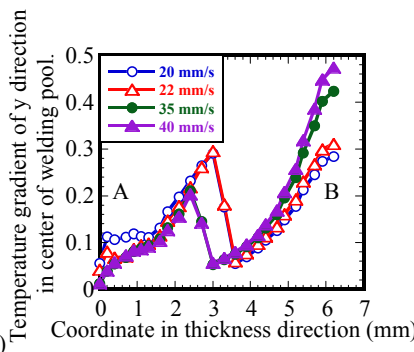


Fig. 8 Influence of welding speed on temperature gradient.

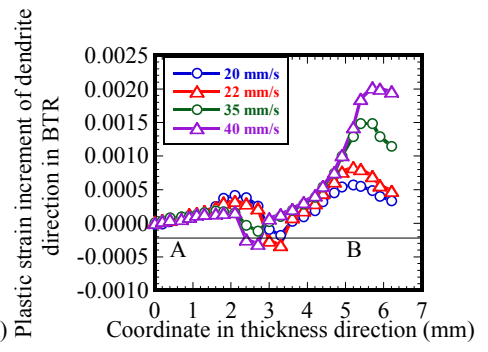


Fig. 9 Influence of welding speed on plastic strain increment of dendrite direction in BTR.

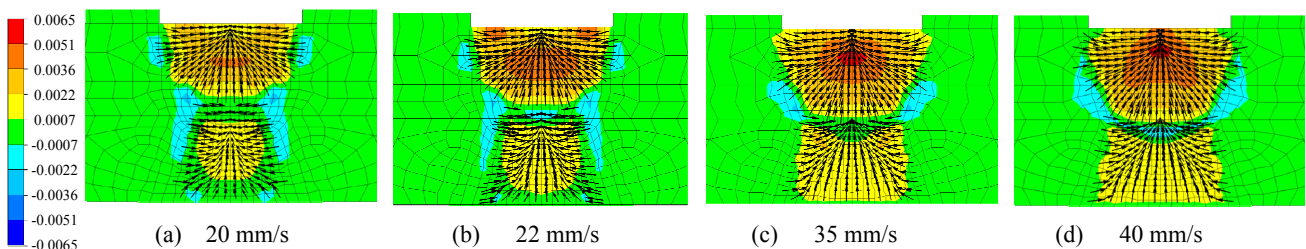


Fig. 10 Distribution of BTR plastic strain increment for y direction and temperature gradient.

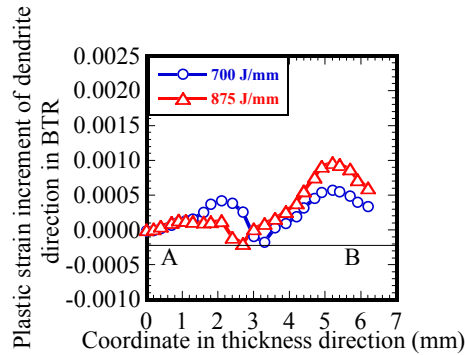


Fig. 11 Influence of heat input on plastic strain increment of dendrite direction in BTR.

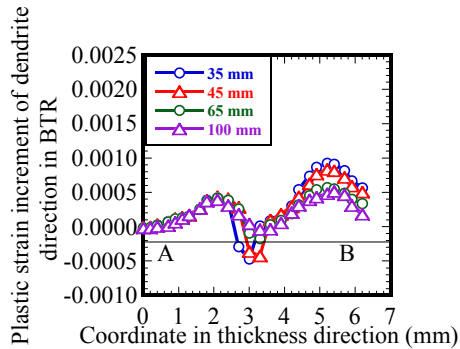


Fig. 13 Influence of torch distance on plastic strain increment of dendrite direction in BTR.

とを示している。

Fig. 10 に y 軸方向 BTR 塑性ひずみ増分の断面分布に、各要素の温度勾配ベクトルを表示している。同図結晶成長方向から、溶接速度が大きくなると特に 1st トーチ溶融部に関して、z 軸方向の結晶成長が大きいたことが確認できる。これは、溶接速度が大きくなると、溶接線方向に対して、細長くなるためであると考えられる。

3.4 入熱量の影響に関する検討

Fig. 11 に、同図中に示す 90° 位置の断面の鋼管内面から外面に向かう A-B 線上の結晶成長方向ひずみの比較を示す。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の結晶成長方向ひずみが大きくなっていることが確認できる。また、その最大位置は表表面ではなく、ビード内部であることが確認できる。また、Fig. 12 に y 軸方向 BTR 塑性ひずみ増分の断面分布図と温度勾配ベクトルを示す。同図より、入熱量が大きくなると BTR 塑性ひずみ増分の最大値は大きくなる。さらに、入熱量が大きくなると溶け込み形状が大きくなっていることが確認でき、さらに銅板の吸熱より下部から結晶が多く成長している様子を再現している。

以上で示すように、入熱量が大きい場合に、割れやす傾向にあるものと考えられる。

3.5 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=35mm, 45mm, 100mm の 3 ケースの解析を実施した。

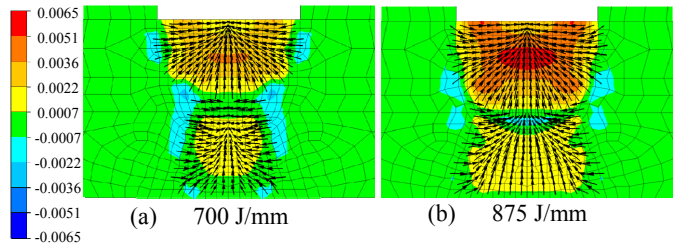


Fig. 12 Influence of heat input on plastic strain increment in BTR and temperature gradient.

溶け込み形状からは、1st トーチによる溶け込み形状は、トーチ間隔を変化させても同様の形状を有する。これは、1st トーチは、2nd トーチ温度分布の影響をほとんど受けていないことを確認した。高速溶接であることが、最大の要因であるといえる。また、トーチ間隔が小さくなると、2nd トーチによる溶け込みは大きくなっていることが確認できる。これは、1st トーチによって、2nd トーチ下部が高温状態になっているため、それにより、1st トーチの温度分布が重畳するため、見かけの入熱量が大きくなったものと考えられることができる。Fig. 13 に、結晶成長方向ひずみの分布を示す。同図から、トーチ間隔が小さくなると、結晶成長方向ひずみの最大値が大きくなるといえる。また、最大値の位置はトーチ間隔によらず一定であることが確認できる。

以上より、トーチ間隔が小さくなると、割れ発生可能性が高くなる傾向にあるといえる。

結 言

本研究では、高温割れ解析モデルの構築し鋼管の高速溶接に適用することで凝固割れの評価を実施した結果、以下のような結言が得られた。

- 1) 冷却過程において、液相線温度を通過した際の温度勾配ベクトルを結晶成長ベクトルとして評価した結果、実験結果と結晶成長方向および最終凝固位置が定性的に一致し、実現現象を再現していることを確認した。
- 2) 溶接速度が凝固割れに及ぼす影響を検討した結果、溶接速度が大きくなると、割れ発生可能性が高くなることが確認できた。
- 3) 入熱量が凝固割れに及ぼす影響を検討した結果、溶接速度が大きくなると、割れ発生可能性が高くなることが確認できた。
- 4) トーチ間隔が凝固割れに及ぼす影響を検討した結果、トーチ間隔が小さくなると、割れ発生可能性が高くなることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 稲垣道夫, 西川淳, 河野六郎: Vrestraint 試験法による高張力鋼の高温割れ感受性の評価をその検討, 溶接学会誌, 第 42 巻, 1973, pp.29-39.
- 2) 才田一幸, 西本和俊: 単結晶合金溶接補充への凝固偏析の適用, 溶接学会誌, 第 4 号, 2007, pp.30-39.
- 3) 西本和俊, 森裕章: レーザ溶融凝固部の凝固割れに関する理論解析(2), 溶接学会論文集, 第 74 集, 2004, pp.68-69