

B20 海底パイプラインの洋上溶接時における 凝固割れに関する力学的検討

山本 将之 (指導教員 柴原・河原)

Investigation on solidification cracking on undersea pipeline welding joint in offshore

by Masayuki Yamamoto

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 construction of fact, full-automatic welding system of high construction efficiency which has two welding heads is used. Because of 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 cause of solidification cracking of pipe joint from the mechanical viewpoint. Finally, the authors have proposed the construction of a more efficient method.

1. 緒 言

近年、天然ガス・石油等の経済的な中・遠距離輸送インフラとして、Fig.1 に示すような海底パイプラインが多く用いられるようになってきた^{1,2)}。この海底パイプラインには、海水や石油等から受ける腐食に耐えうる高強度かつ耐腐食性の高い材料が用いられている。このような劣悪な環境での使用にも耐えることを可能とするために、日々新しい特性をもった材料が開発されている。また、熱源の高速・高エネルギー化を目的とした溶接施工技術も進歩し、時間効率の高い溶接方法が行われるようになってきた。実際の施工では、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.2 に示すような全姿勢 2 電極高速自動溶接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、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数々の研究が行われている。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。具体的に、冶金学の立場からは、1980 年代に松田ら⁴⁾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などについて、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が行なわれている。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評価が必要であると考ええる。

そこで本研究では、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解明し、最終的には、より効率的な施工を可能とするために、FEM 熱弾塑性解析を実施し、割れに及ぼす諸因子の影響について検討した。

2. 凝固割れの発生メカニズム

溶接高温割れは、大別すると、溶接金属部の凝固脆性温度範囲(solidification Brittleness Temperature Range, 以下 BTR と称す)で発生する凝固割れ、HAZ 部の粒界液化温度範囲で発生する粒界液化割れ、溶接金属部、HAZ 部の双方の延性低下温度範囲で発生する延性低下割れの 3 種類がある。

溶接金属部の BTR で発生する凝固割れの発生のメカニ



Fig. 1 Photo of undersea pipeline.



Fig. 2 Photo of tandem welding head.

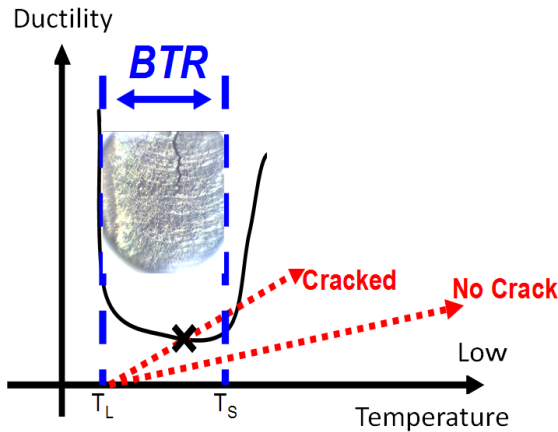


Fig. 3 Schematic illustration of relationship between high temperature ductility of material and temperature.

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、溶接金属冷却時の凝固収縮ひずみによって開口するものである。力学的な観点から考察すると、Fig. 3 に示すように液相線温度 T_L と固相線温度 T_S の間である BTR において金属の高温延性が低下し、そこに限界ひずみ以上のひずみが作用したため凝固割れが発生したと考えられる。

本研究ではこのような凝固割れの発生因子を示す値として、Fig. 4 に示すような冷却過程の BTR で発生する塑性ひずみ増分(以下、BTR 塑性ひずみ増分と称す)を考える。この増分値は、冷却過程における液相線温度時の塑性ひずみから、固相線温度時の塑性ひずみ増分の値で表される。なお、この塑性ひずみ増分値は FEM 熱弾塑性解析により算出する。

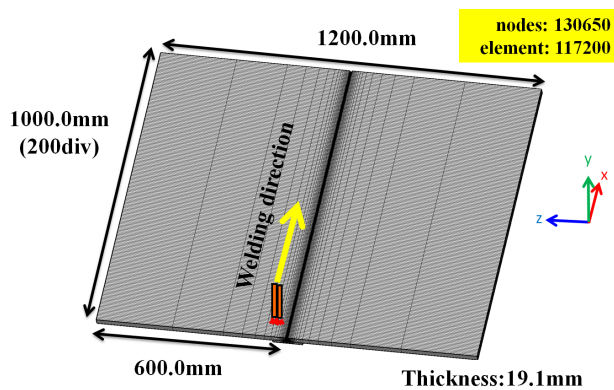


Fig. 5 Analysis model.

Table 1 Welding condition.

	current (A)	voltage (V)	speed (mm/s)	efficiency
torch1	290.0	25.0	20.0	0.8
torch2	270.0	25.0	20.0	0.8
torch3	290.0	25.0	20.0	0.8
torch4	270.0	25.0	20.0	0.8
torch5	290.0	25.0	20.0	0.8
torch6	270.0	25.0	20.0	0.8

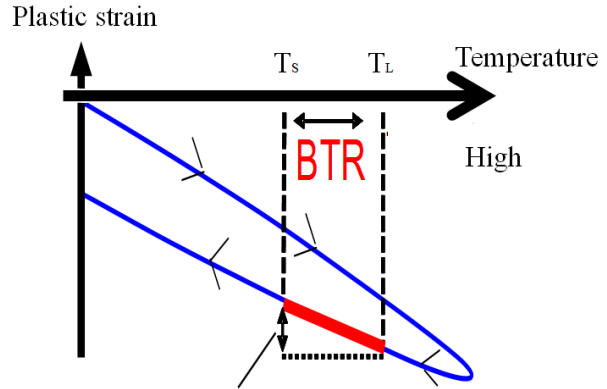


Fig. 4 Schematic illustration of plastic strain increment in BTR during cooling.

3. 平板モデルを用いた初パス溶接時における凝固割れに関する検討

初パス溶接が凝固割れにおよぼす影響について検討するために、平板モデルを用いた初パス溶接における凝固割れに関する検討を行う。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、理想化陽解法 FEM を用いた熱伝導解析および熱弾塑性解析を実施した。熱伝導解析においては、タンデム溶接における電極それぞれに対し、加熱要素が逐次実効化されるような熱源モデルを構築した。この解析手法を用いることにより、より実施工に近い肉盛りを再現し解析を実行することが可能となり、従来まではタンデム溶接の熱源を 1 つの大きな熱源としてモデル化を行っていたのに対し、本モデルにより、電極ごとの影響を評価することが可能となった。

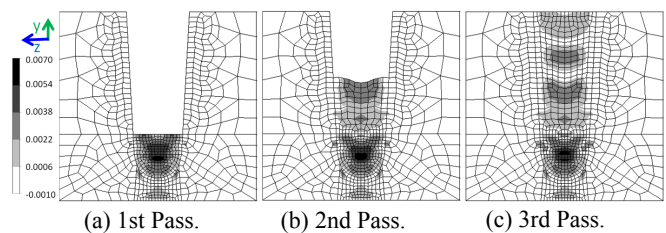


Fig. 6 Distribution of plastic strain increment in z-direction in BTR.

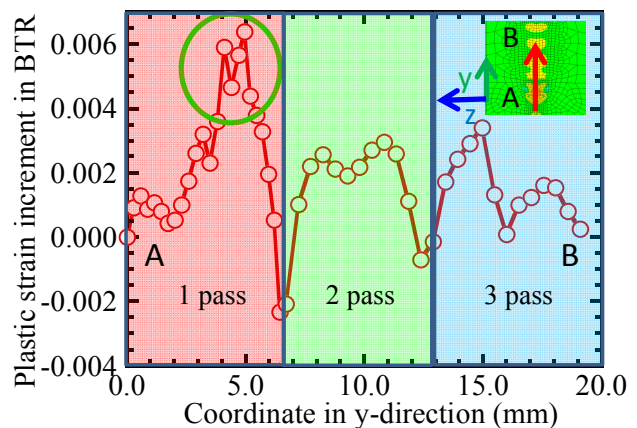


Fig. 7 Distribution of plastic strain increment in z-direction in BTR.

3.1 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを Fig.5 に示す．溶接線方向に 1000mm，溶接線直角方向に 600mm，板厚 19.1mm の板を 2 電極熱源を用いてタンデム突合せ溶接を行う．溶接は全 3 パス行うものとし，節点数，要素数はそれぞれ 130,650，117,200 とした．また，溶接の際には，裏面に幅 94mm，厚さ 9.0mm の裏あて銅板を用いて溶接を行う．この銅板は，力学的には影響を与えないと考えたため，熱伝導解析を行う際には考慮するが，熱弾塑性解析を行う際には考慮しないものとした．溶接条件は，Table 1 に示す条件を用いた．溶接方法は，1 パス，2 電極で溶接を行うタンデム溶接である．電極間隔は 65mm とする．BTR は 1350℃ から 1450℃ の 100℃ とし解析を実行した．

3.2 解析結果

Fig.6 は溶接線中央断面における z 軸方向におよぼす BTR 塑性ひずみ増分の分布を示している．(a)が 1 パス，(b)が 2 パス，(c)が 3 パス溶接時における分布を示している．図中の黒い色は凝固割れが発生する可能性がある領域を示している．Fig.7 は同図中に示す A から B の板厚方向座標を横軸にとり，縦軸に z 軸方向におよぼす BTR 塑性ひずみ増分を示している．同図より，1 パス目により発生した BTR 塑性ひずみ増分は，2 パス目と 3 パス目の値と比べて大きいことが確認できる．以上より，全パス溶接を行った結果，1 電極目と 2 電極目である初パスの影響が最も大きいことが確認できたため，ここからは初パス溶接時の諸因子が凝固割れにおよぼす影響について検討を行う．

4. 海底パイプライン洋上溶接時の凝固割れにおよぼす諸因子の影響についての検討

本章では，海底パイプラインを対象とした円筒モデルを作成し BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れの評価を行う．

4.1 解析モデルおよび解析条件

本研究に使用する材料は実際に海底パイプラインで用いられている材料として炭素鋼 SM590A 材をベースに S 量を増加させたものを用いる．この材料は海水や石油等から受ける腐食に耐える高強度かつ耐腐食性を有する材料である．Fig.8 は海底パイプライン溶接時を模擬する円筒モデルである．問題の対称性を考慮し，溶接線に対称面とする 1/2 モデルを採用した．図中の円筒モデルの寸法は，外径が 609.6mm，内径が 571.4mm，板厚が 19.1mm，長さが 600mm であり，2 電極タンデム溶接により突合せ溶接を行う．要素分割は，周方向に 360 分割しており，

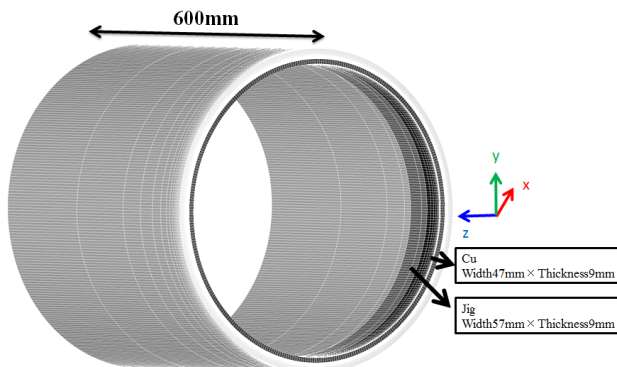


Fig. 8 Analysis model.

Table 2 Welding condition.

	current (A)	voltage (V)	speed (mm/s)	efficiency
torch1(left)	290.0	25.0	20.0	0.8
torch2(left)	270.0	25.0	20.0	0.8
torch1(right)	290.0	25.0	20.0	0.8
torch2(right)	270.0	25.0	20.0	0.8

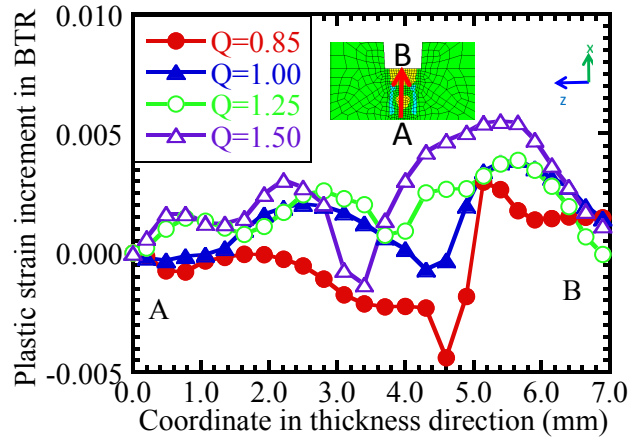


Fig. 9 Influence of heat input on distribution of plastic strain increment in z -direction in BTR.

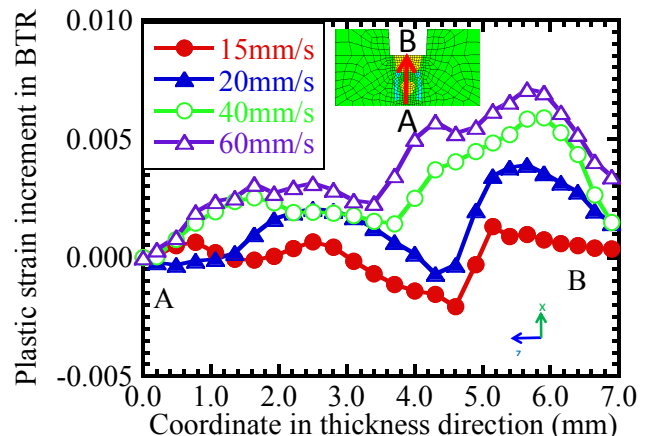


Fig. 10 Influence of welding speed on distribution of plastic strain increment in z -direction in BTR.

節点数は 177,480，要素数は 154,440 とする．溶接線内面には裏あて材である銅板に加え，鋼材を支える治具についても，モデル化を行った．銅板の寸法は幅 47mm，厚さ 9mm，治具の寸法は幅 57mm，厚さ 9mm である．電極間隔は 65mm を基本条件とする．溶接条件は Table 2 に示すとおりである．円周溶接の溶接方法は，まず 12 時から 6 時の方向に左回りに溶接し，その後右回りに 1 時から 6 時の方向に溶接を行うこととした．BTR は 1350℃ から 1450℃ の 100℃ と設定し，解析を実行した．

4.2 入熱量，溶接速度および電極間隔の影響に関する検討

Fig.9，Fig.10，Fig.11 はそれぞれ左回り溶接時の 90 度の断面における板厚方向座標を横軸にとり，縦軸に z 軸方向におよぼす BTR 塑性ひずみ増分を示す．Fig.9 は入熱量を 0.85 倍，1.00 倍，1.25 倍，1.50 倍に変化させて入熱量が BTR 塑性ひずみ増分におよぼす影響について評価している．同図より，入熱量が大きくなるにつれ，BTR 塑性ひずみ増分も大きくなり，凝固割れが発生する可能性

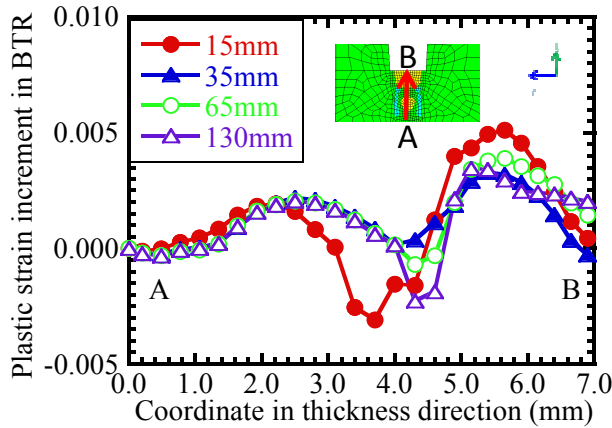


Fig. 11 Influence of torch distance on distribution of plastic strain increment in z-direction in BTR.

が大きくなっていることがわかる。Fig.10 は入熱量一定で溶接速度をそれぞれ 15mm/s, 20mm/s, 40mm/s, 60mm/s に変化させ、解析を行った。同図より、溶接速度が大きくなるにつれ、BTR 塑性ひずみ増分も大きくなることが確認できる。これは溶接速度が大きいと溶接線方向に溶融池が大きくなるため、BTR 長さが大きくなることが原因だと考えられる。Fig.11 は電極間隔をそれぞれ 15mm, 35mm, 65mm, 130mm に変化させ、解析を行った結果である。電極間隔を大きくしても、特に変化は見られないことが確認できる。電極間隔を小さくする方には、電極間隔 15mm まで近づけるとほかの 3 パターンとは異なる挙動を示し、板厚方向座標約 2.5mm のところから一度 BTR 塑性ひずみ増分が小さくなり約 5.8mm のところでピークの値をとることが確認できる。これは電極間隔を近くすると、1 電極目の溶融池と 2 電極目の溶融池が融合し、見かけ上、大きな入熱量で溶接を行っている状態になっていることが理由だと考えられる。以上より電極間隔は少しでも近づけた方が効率は上がるが、電極間隔 35mm 以下にすると凝固割れが発生する可能性が高くなることがわかる。Fig.12 は横軸に溶接速度を示し、縦軸に Fig.9 の断面における BTR 塑性ひずみ増分の最大値を示している。同図より、溶接速度が大きくなるにつれ、BTR 塑性ひずみ増分の最大値も大きくなっていき、凝固割れが発生する可能性が高くなることがわかる。Fig.13 は横軸に電極間隔を示し、縦軸に Fig.11 の断面における BTR 塑性ひずみ増分の最大値を示す。同図より電極間隔 35mm のところをもっとも BTR 塑性ひずみ増分が小さくなっていることがわかる。また、電極間隔 15mm が最も BTR 塑性ひずみ増分の最大値が大きく、凝固割れが発生する可能性が高い電極間隔であることがわかる。

5. 結 言

本研究では、海底パイプライン洋上突合せ溶接時における凝固割れの発生原因を力学的な観点から解明するために、BTR 塑性ひずみ増分を用いた凝固割れの評価を実施した結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 平板モデルを用いた初パス溶接における凝固割れに関する検討をした結果、1 電極目と 2 電極目を用いる初パスにおいて、最も割れが発生しやすいことを確認した。

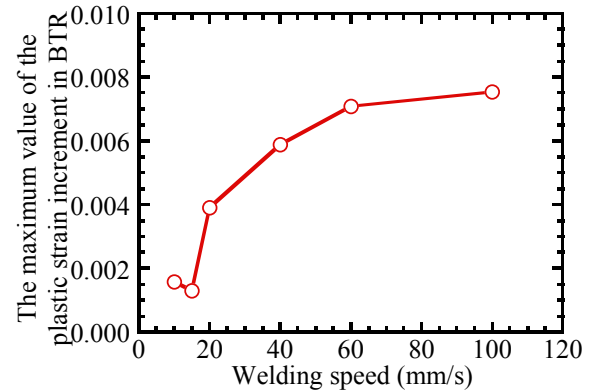


Fig. 12 The maximum value of the plastic strain increment in z-direction in BTR.

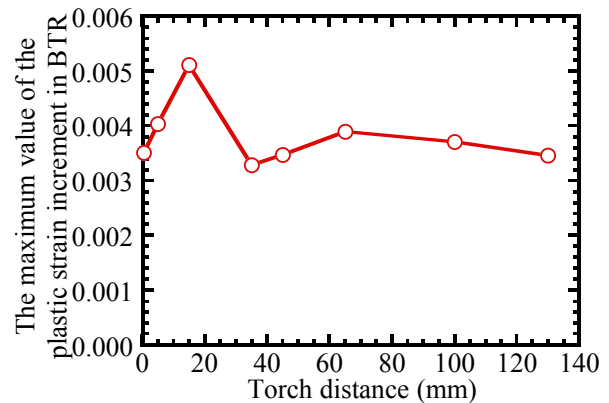


Fig. 13 The maximum value of the plastic strain increment in z-direction in BTR.

- 2) 入熱量が凝固割れにおよぼす影響について検討した結果、入熱量が大きいほど凝固割れが発生しやすいことを確認した。
- 3) 入熱量一定の条件のもとで溶接速度が凝固割れにおよぼす影響について検討した結果、溶接速度が大きいほど大きな引張の BTR 塑性ひずみ増分が発生することを確認した。
- 4) 電極間隔が凝固割れにおよぼす影響を検討した結果、電極間隔 35mm 以下にすると凝固割れが発生しやすくなることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 箱田利秀, 谷中幸司, 池崎徹: 海底パイプライン自動溶接技術開発の変遷と現在～世界最速の高エネルギー溶接を目指して, 新日鉄エンジニアリング技報 (1), 58-65, 2010-00-00
- 2) 箱田利秀, 曾我部徳久: 海底パイプライン自動溶接技術の変遷と現在, 溶接技術 58(8), 85-90, 2010-08-00
- 3) 伏田孝: 海底パイプライン用高速自動溶接システム (鉄構海洋特集), 製鉄研究(306), p14044-14046, 1981-11-00
- 1) 松田, 中川, 富田: 凝固割れ発生時の限界歪に及ぼす歪速度の影響: 動的直接観察測定法(MISO 法)による溶接凝固割れ現象の解明(第 3 報) 溶接学会論文集: quarterly journal of the Japan Welding Society 7(1), 100-105, 1989-02-05