

令和 2 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18947

研究課題名(和文)放射光を利用したアーク溶接現象の可視化による凝固割れの解明

研究課題名(英文)Elucidation of solidification cracking mechanism during arc welding using synchrotron X-ray imaging

研究代表者

柳楽 知也(Nagira, Tomoya)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：00379124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：放射光の高輝度X線イメージングを利用して、従来観察が困難であったアーク溶接時に発生する凝固割れの形成過程を観察することに成功した。クレーター部およびビード部ともに凝固収縮による引張応力により、強度の低い液膜部にひずみやひずみ速度が局在化し、割れが発生することが明らかとなった。さらにクレーター部では引張応力だけでなくせん断応力も凝固割れに寄与すること、ビード部では、凝固割れの進展速度は周期性を有することを初めて見出した。つまりミクロスケールでの組織形成が凝固割れに密接に関係していることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

凝固後の組織、モデル材料、シミュレーションを用いて組織形成を予測する従来手法では、実験による妥当性の検証が必要である。本研究では、放射光X線イメージングによるその場観察により、アーク溶接時に発生する凝固割れの形成機構を明らかにすることが出来た。凝固割れの臨界のひずみ、ひずみ速度、固相率などの従来手法では得られない定量データは、新たな物理モデルの構築やシミュレーションへの応用など学術的意義がある。また、本課題で取り上げるアーク溶接時での凝固割れは、実際の生産現場で直面している問題であり、凝固割れの予測や低減のための組織制御手法の提案など、基礎的な指針を提案できるとして工業的に重要な意義がある。

研究成果の概要(英文)：The microstructural evolutions of solidification cracking at the weld crater and the weld bead were successfully observed in situ using time-resolved X-ray imaging. The local strain and strain rate in the parallel to the growth direction were highly localized and increased as the solidification progressed. The solidification cracking was linearly formed at the weld bead whereas the cracking was propagated to the different directions through the triple point at the weld crater. The shear strain contributed to the solidification cracking as well as the tensile strain. The tip velocity of the solidification cracking was periodically changed at the weld crater. Based on these findings, the microstructure was closely related to the solidification cracking.

研究分野：溶接・接合

キーワード：アーク溶接 凝固割れ その場観察 放射光

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

省資源、省エネルギーの高まりの中、割れ感受性が低く、高強度・高靱性を有した接合体を製作する溶接・接合技術の開発が望まれている。アーク溶接中に生じる凝固割れは、古くから構造物の破壊に繋がる欠陥として大きな問題となっている。一般的に凝固割れは、凝固収縮や製造プロセスによって印加される圧縮、引張、せん断などの外力が固液共存体に作用すると発生する。溶接プロセスにおいては、デンドライト間の残留液膜に対して凝固収縮による引張応力が作用すると、ビードの中央部やクレーター部において凝固割れが発生することが知られている。従来、溶接中に外場を意図的に印加するバレストレイン試験を利用して、凝固割れ感受性に関する調査が行われてきた。しかしながら、すでに凝固した試料の観察では、凝固割れの臨界のひずみ、ひずみ速度の測定や凝固割れの形成機構を明らかにするのは非常に困難である。近年、凝固割れの形成過程を明らかにするために高速度カメラや X 線イメージングを利用したその場観察による研究が行われている。しかしながら、現状のその場観察の技術では、空間分解能が低く、デンドライト成長、液膜の形成、デンドライトアーム間の流動などの凝固割れに関する組織形成に関する知見が乏しいのが現状である。凝固割れの形成機構を十分に明らかにするには、組織スケールでのその場観察が重要である。さらにその場観察は、物理モデルの構築やシミュレーションへの応用にとって極めて有効である。

2. 研究の目的

本研究では、長時間、高空間分解能でのその場観察が可能な放射光 X 線イメージングを利用して、アルミニウム合金およびステンレス鋼を対象にアーク溶接の一種である TIG 溶接中に発生する凝固割れの発生・進展過程を観察し、凝固割れの形成機構をミクロンスケールで明らかにすることを目的とした。さらにその場観察で得られた知見を基にミクロンスケールで凝固割れの形成機構の解明を行い、溶接凝固割れの予測、低減に向けた組織制御手法の提案を目指す。

2. 研究の方法

TIG 溶接過程のその場観察の実験は、SPring-8 の 20XU または 20B2 のビームラインにて行った。図 1 にその場観察装置の模式図を示す。X 線の上流側から X 線の経路上に沿って温度計測用のカメラ、試料セル、TIG 溶接用のトーチ、X 線透過像を取得する X 線検出器を配置した。トーチの電極直上の試料を透過した X 線は、X 線検出器に到達して透過像が得られる。試料ステージは、上下に駆動する Z 軸ステージと連結している。トーチは固定されており、Z 軸ステージを任意の速度と移動量で制御することにより、立向き下進で TIG 溶接を行った。試料は、ステンレス鋼の中で凝固割れが発生しやすい SUS310S (A モード) と SUS316L (AF モード) を対象とした。SPring-8 の観察条件は、X 線エネルギー 28 keV、観察領域 6.5×6.5 mm、ピクセルサイズ 6.5 μm/pixel、透過像のフレームレート 100-200 fps である。溶接条件は、溶接電流 6 A、溶接速度 5 mm/s、Ar ガス流量 8 l/min、試料厚さ 0.2 mm である。一方、凝固割れが生じやすく、イメージングによるその場観察が容易な Al-10wt.% Cu 合金も対象とした。初晶 Al は、柱状晶のデンドライトとして成長する。また、初晶 Al の形態を等軸晶のデンドライトとするために、Al-Ti-B 合金を 0.3wt.% 添加した試料も準備した。交流 20A、300Hz、溶接速度 2.5mm/s の溶接条件で実験を行った。シールドガスには Ar を用い、流量を 15l/min とした。

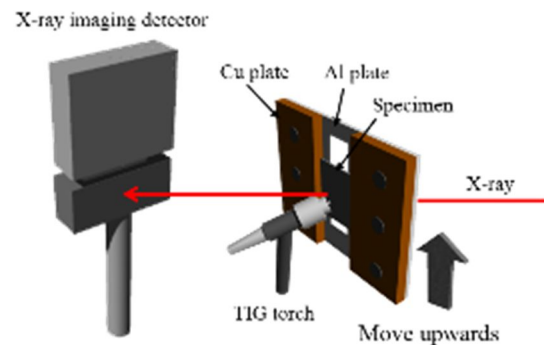


図 1 TIG 溶接中の凝固過程のその場観察装置の模式図¹⁻²⁾

4. 研究成果

4. 1 Al-Cu 合金のクレーター部の凝固割れのその場観察

図 2(a)-(f) にクレーター部での凝固割れ形成過程の X 線透過像を示す。Z 軸ステージの停止(t=0 s)後に楕円状の溶融池が形成した。t=0.08s で TIG 溶接機の電源を切ると、-Al の柱状晶のデンドライトが溶融池の周囲から中心部に向かって成長した。その後、t=16 s でデンドライトの先端が中心部で対峙した。この時、デンドライトの成長速度は、中心部に向かうにつれて増加し、15 mm/s に達した。一方、共晶界面の成長速度は、デンドライトの成長速度よりも遅く、デンドライトが中央部に達しても、溶融池に境界に達しておらず、溶融池内は固液共存状態であることが分かる。

溶融池の両端から柱状晶のデンドライトの先端がほぼ平行に対峙しているため、中央部にほぼ直線状に液膜が形成した(図 2(d))。また、デンドライトの一次アーム間にも液膜が形成されているのが観察された。凝固が進行するにつれて、液膜の間隔が 0.28s において 35 μm まで増加し

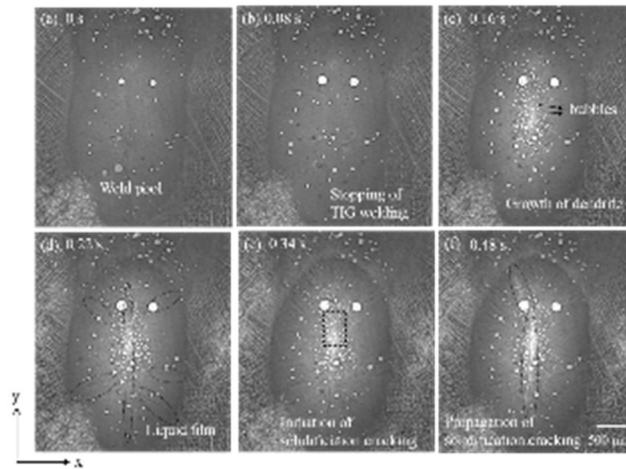


図2 クレーター部での凝固割れの X 線透過像³⁾

た。さらに液膜に沿って約 $20\mu\text{m}$ の大きさの多数の微細なポアが形成された。液膜の間隔が増加すると、発生した微細なポアがお互い連結し、最終的に直線状の凝固割れが形成された。すなわち、凝固割れの初期は、約 $20\mu\text{m}$ のポアであり、それらが連結することによって、最終的に凝固割れへと発展することがその場観察することによって明らかとなった。さらに中央部で発生した凝固割れは、三重点を経由して別の液膜部へと進展した(図 2(f))。

透過像の輝度を利用した定量評価により、凝固割れが起こる直前の液膜部の固相率を算出した。中央部の dendrite の先端同士が対峙し、凝固割れが生じた領域では、固相率は 83% であったが、 dendrite アーム間の凝固割れが発生しなかった液膜部の固相率は 90% であり、中央部より高い値を示した。一般的に、固相率が増加すると液相の量が不十分となり、流動のための透過率が低下するため、凝固割れが起こりやすくなる。しかしながら、凝固割れの臨界の固相率は、固相の形態に強く依存することが知られている。 dendrite のような樹枝状の複雑な形態の場合、中央部の dendrite の先端同士が対峙した領域よりも dendrite 一次アーム間のような樹間の方が連結されやすくなる。そのため、中央部の dendrite の先端同士が対峙した領域よりも dendrite の樹間の領域の方が固液共存体としての強度が小さい、すなわち引張応力により液膜部が開口しやすくなる。その結果、 dendrite 樹間よりも中央部の方が凝固割れの発生のための臨界の固相率が小さかったと考えられる。

図 3 にデジタル画像相関法によって評価した凝固割れの形成過程における x 方向、 y 方向、 xy 方向の局所ひずみおよび x 方向の局所ひずみ速度の分布を示す。中央部の液膜の間隔が増加するにつれて、 x 方向の局所ひずみが増加して局在化しているのが分かる。一方、 y 方向の局所ひずみは小さくほとんど変化していないことから、 x 方向の引張のひずみが生じていることが分かる。凝固割れが生じた液膜部の臨界の局所ひずみは約 1.4% であり、他の領域よりも約 10 倍大きい値であった。さらに図 3(m)-(p) に示すように液膜部において x 方向の局所ひずみ速度も同時に増加し、局在化している。臨界の局所ひずみ速度は、約 0.34 s^{-1} であった。一般的に固液共存体の変形は、固相率だけでなくひずみ速度にも強く依存する。低ひずみ速度の場合、変形によって液膜部が開口してもすぐに周囲から液相が補充されるが、ひずみ速度

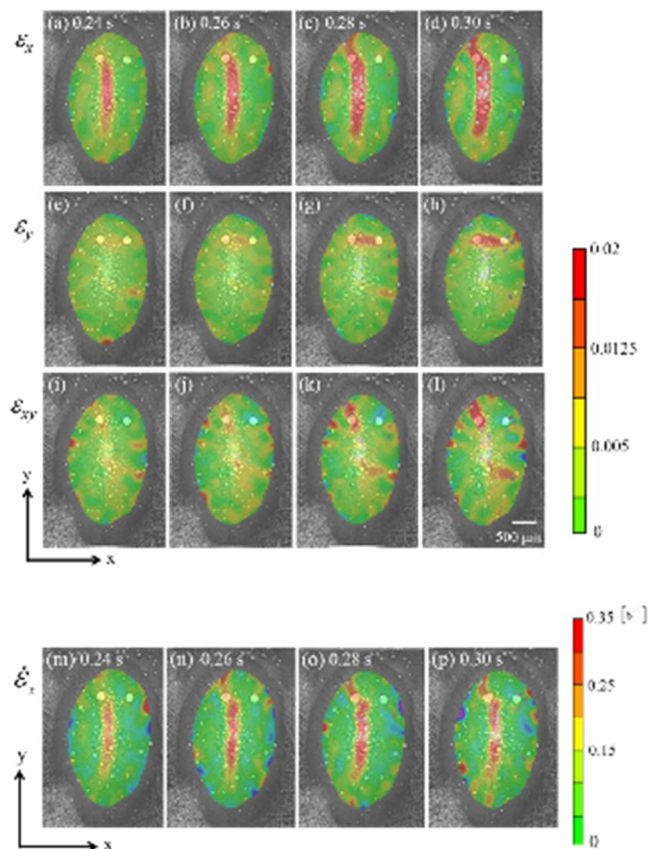


図3 クレーター部の凝固割れ形成過程における局所ひずみおよびひずみ速度の分布³⁾

が高くなると液相が補給される時間がないため、凝固割れが生じやすくなる。したがって、溶融池中央部でのひずみ速度の局在化も凝固割れの発生の要因の一つであると考えられる。

図 2 に示すように、凝固割れが三重点を経由してデンドライト一次アーム間へと伝播した領域において、xy 方向の局所ひずみが局在化していることが分かった。三重点においては、凝固収縮によって発生した引張力の方向がお互い異なるため、デンドライト同士の衝突などの固相間相互作用の結果、せん断力が生じたと考えられる。これまでの研究により、固液共存体のせん断変形によって、みかけの体積膨張が発生し、割れなどの鑄造欠陥が発生することが分かっている⁽⁴⁻⁷⁾。本研究においても同様に、三重点においてせん断力によって誘起された固相間の相互作用によって液膜部が開口し、凝固割れが進展したと考えられる。つまり、溶接のクレーター部においては、引張力だけでなくせん断力も凝固割れに寄与していることが初めて明らかとなった。

4.2 ステンレス鋼のビード部の凝固割れのその場観察

図 4(a)に SUS310S のビード部の X 線透過像を示す。ビード中央部において線状に開口した凝固割れの進展過程を観察することに成功した。図 4(b)に凝固割れの進展速度の時間変化を示す。

溶接速度は約 5 mm/s であり、ほぼ一定であった。一方、凝固割れの進展速度は急激な増加と減少を繰り返した。つまり、凝固割れの進展速度は溶融池に向かって進展するが、進展速度の変化に伴って、割れの先端と溶融池との距離が周期的に変化していることがその場観察の結果から初めて明らかとなった。これは SUS316L においても同様に観察された共通の現象である。また、デジタル画像相関法により、割れが進展する際に引張りひずみやひずみ速度が局在化した。凝固割れの進展速度の周期性は、凝固過程の固相率とひずみ速度の変化が関係していると考えられる。高固相率の場合、先に述べたように結晶が樹枝状のため、容易に連結され固液共存体の強度は高くなる。その強度を上回る臨界の引張力が作用すると、凝固割れが発生するが、ひずみ速度が非常に大きいため、大きな速度で凝固割れが溶融池側へと進展したと考えられる。凝固割れの先端が溶融池に近づくと、固相率が低下するため、凝固割れの感受性が低下し、ほぼ停止するまで速度が低下する。そのため凝固割れ先端は、溶融池から離れ、再び高固相率の領域に遷移する。これを繰り返すことにより、凝固割れの進展速度において周期性が発生したと考えられる。

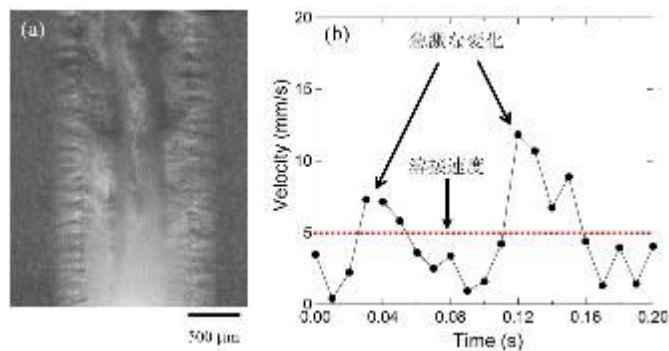


図 4 SUS310S の凝固割れの(a)X 線透過像および(b)凝固割れの進展速度の時間変化¹⁻³⁾

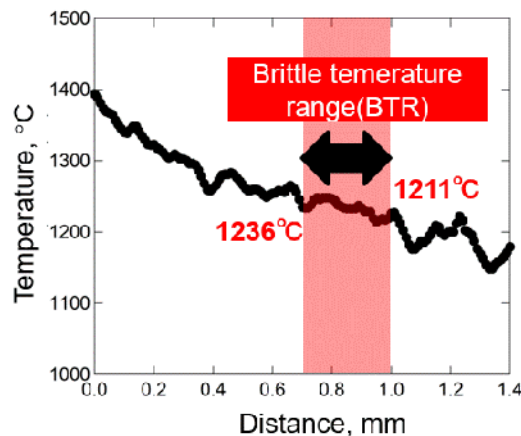


図 5 SUS310S のビード中央部の温度分布¹⁻³⁾

温度計測用のカメラを用いて溶接中のビード部の温度分布を測定した。SUS310S のビード中央部に沿った温度分布を図 5 に示す。凝固割れが発生した範囲を図中に示している。その温度範囲は、1211 から 1236 の範囲であり、この範囲は、凝固脆性温度領域(BTR)に相当する。従来、凝固割れの解明にとって重要な BTR は、接合後の試料観察から推定するしか方法がなかったが、その場観察により、直接的かつ正確に算出することができることが明らかとなった。

参考文献

- 1) T. Nagira, D. Yamashita, M. Kamai, H. Fujii, Proceedings of the Visual-JW 2019 and WSE 2019, 1(2019) 9-10.
- 2) 柳樂知也、藤井英俊、溶接学会誌 88(2019)274-278.
- 3) T. Nagira, D. Yamashita, M. Kamai, H. Liu, Y. Aoki, H. Fujii, K. Uesugi, A. Takeuchi in preparation.

- 4) T. Nagira, C.M. Gurlay, A. Sugiyama, M. Uesugi, Y. Kanazawa, M. Yoshiya, K. Uesugi, K. Umetani and H. Yasuda: *Scripta Mater.*, **64** (2011) 1129.
- 5) T. Nagira, H. Yokota, S. Morita, H. Yasuda, M. Yoshiya, C.M. Gurlay, A. Sugiyama, K. Uesugi and K. Umetani: *ISIJ Int.*, **53** (2013) 1195.
- 6) T. Nagira, S. Morita, H. Yokota, H. Yasuda, C.M. Gurlay, M. Yoshiya, A. Sugiyama, K. Uesugi, A. Takeuchi and Y. Suzuki: *Metall. Mater. Trans. A*, **45A** (2014) 5613.
- 7) T. Nagira, H. Yasuda, S. Morita, S. Yanai, A. Sugiyama, M. Yoshiya and K. Uesugi: *J. JFS*, **87** (2015) 552.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 柳樂知也、藤井英俊	4. 巻 88
2. 論文標題 放射光を利用したその場観察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 溶接学会誌	6. 最初と最後の頁 274-278
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柳樂 知也	4. 巻 11
2. 論文標題 放射光X線を利用した炭素鋼のTIG溶接における凝固割れのその場観察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 溶接技術	6. 最初と最後の頁 114-115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 柳樂知也、藤井英俊	4. 巻 71
2. 論文標題 高輝度X線(接合研～SPring-8)を利用した溶接・接合技術	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 生産と技術	6. 最初と最後の頁 18-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 D. Yamashita, T. Nagira, M. Kamai, Y. Aoki, H. Liu, H. Fujii	4. 巻 W-3
2. 論文標題 In-situ Observataion of Solidification Cracking during TIG Welding by X-ray Imaging	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 4th International Conference on Welding and Failure Analysis of Engineering Materials (WAF-2018)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山下 大輔、柳楽 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 X線イメージングを利用したAl-Cu合金のTIG溶接時に発生する凝固割れのその場観察
3. 学会等名 溶接学会平成30年度春季全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大輔、柳楽 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 高輝度X線を利用したその場観察によるAl-Cu合金のTIG溶接で生じる凝固割れの形成機構の解明
3. 学会等名 軽金属溶接協会2018年度年次講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大輔、柳楽 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 ステンレス鋼のTIG溶接時の凝固割れ
3. 学会等名 溶接学会平成30年度秋季全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山下 大輔、柳楽 知也、釜井 正善、青木 祥宏、劉 恢弘、藤井 英俊
2. 発表標題 TIG溶接時におけるステンレス鋼の凝固割れのその場観察
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Yamashita, T. Nagira, M. Kamai, Y. Aoki, H. Liu, H. Fujii
2. 発表標題 In-situ observation of solidification cracking during TIG welding by X-ray imaging
3. 学会等名 4th international conference on welding and failure analysis of engineering materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柳樂知也、藤井英俊
2. 発表標題 高輝度X線(接合研～SPring-8)を利用した溶接・接合技術
3. 学会等名 第16回産学連携シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nagira, D. Yamashita, M. Kamai, H. Fujii
2. 発表標題 In situ observation of solidification cracking for stainless steel during TIG welding using synchrotron X-ray imaging
3. 学会等名 Visual-JW 2019 and WSE 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳樂知也、山下大輔、釜井正善、藤井英俊
2. 発表標題 放射光を利用したTIG溶接中の凝固割れの進展過程のその場観察
3. 学会等名 2020年日本金属学会春期(第166回)講演大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----