

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13938

研究課題名(和文) レーザ照射による熱ひずみ制御を用いた高温割れ対策

研究課題名(英文) Prevention of Hot Cracking by Thermal Strain Control using Laser Beam

研究代表者

山下 正太郎 (Yamashita, Shotaro)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：40805107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生産技術の一つである溶接において生じる凝固割れの防止に着目した。凝固割れは、溶接中の溶融凝固部周辺に生じるひずみと密接に関連している。そこで、レーザー熱源を別途付加する溶接システムを用いて、凝固割れ発生につながる熱ひずみを積極的に制御することで凝固割れの防止策を提案した。凝固割れ発生を予測するための数値モデルの構築、数値モデルに基づくレーザー照射条件最適化、その実験的検証から本コンセプトの妥当性が明らかとなった。補助的にレーザーを用いることで凝固割れを防止可能となったこと、ならびに溶接の主熱源として活用が期待されるレーザーに対して、レーザーの補助活用とその付加価値を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

凝固割れの対策として、レーザー補助照射による熱ひずみ制御が有効であることが示唆されたことは、材料学的対策や抜本的な施工プロセス(主熱源側など)の改善などで対策されてきた凝固割れ問題に対して、非常に有意義な課題解決策を提示したことになる。また、レーザー熱源の新たな活用方法が提案され、社会的意義は非常に大きい。凝固割れ発生の予測モデル化、そのコンセプトの妥当性を理論・実験の両面から示唆できたことは、学術的意義が大きい。生産技術の最適化に向けた数値シミュレーション活用の可能性を大きく示唆するものであり、学術に基づいて産業(ものづくり)の最適化につながる有意義な研究成果であると捉えることができる。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the prevention of solidification cracking in welding. The solidification cracking is closely related to the thermal strain generated around the molten pool during welding. Therefore, we have proposed a method of preventing the solidification cracking by actively controlling the thermal strain using a welding system with a laser beam. The validity of this concept was demonstrated through the development of a numerical model to predict the solidification cracking occurrence, an optimization of laser irradiation conditions suitable for preventing the solidification cracking based on the numerical model, and an experimental verification of the optimized conditions. The results also showed that the use of a laser as an auxiliary heat source in welding can prevent solidification cracking, and that the auxiliary use of a laser and its additional value can be clarified for the laser, which is expected to be used as the main heat source in welding.

研究分野：溶接技術，溶接冶金，金属材料

キーワード：高温割れ 凝固割れ 割れ対策 レーザ 熱ひずみ制御 予測 数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

溶接は生産技術の根幹を成す一つの技術であるため、その役割は非常に重要である。生産技術の一つである溶接において生じる高温割れは重大な防止すべき課題である。現在、ステンレス鋼、Ni 合金、Al 合金などの溶接、さらにはあらゆる構造物で使用されている鋼 (Steel) においても製造現場において問題となっている。そのため、高温割れの現象説明およびその防止策は今後の生産技術のあり方を左右するものと考えられる。

高温割れは冶金・力学の両要因が重複することで起こる。溶接凝固中に不純物元素が濃化し低融点液膜を形成し、そこに凝固収縮ひずみが作用する。その結果、溶接金属部に高温割れが発生する。高温割れ発生メカニズムは高温延性曲線を用いて説明される。溶接金属の冷却過程において延性が著しく低下する領域 (BTR) があるが、凝固収縮によるひずみ履歴が高温延性曲線と交差することで高温割れが発生する。そのため、延性低下領域 (BTR) を小さくする、もしくはひずみ履歴が延性曲線に交差しないように制御することで高温割れが抑制できると考えた。そこで本研究では、溶接中にレーザを照射することで溶接金属中に生じる熱ひずみ制御を試み、高温割れを熱ひずみ制御により防止する基礎的な研究を実施した。

## 2. 研究の目的

本研究では、溶接凝固中に生じる熱ひずみを制御することによる高温割れ防止を狙いとした。ひずみ履歴に注目して研究が行われた例はなく、溶接中にひずみを制御する方法やその効果は不明である。そのため、このアプローチにより得られる結果は、高温割れを理解する上で学術的に、高温割れ対策を行う上で産業的にも重要な研究課題となる。溶接凝固過程のひずみ履歴を制御することで高温割れを抑制することを目的とした。

## 3. 研究の方法

凝固中に生じる凝固収縮ひずみを低減する方法としてレーザ照射による直後熱を採用した(図1)。溶接中に溶融池後端を後熱し、温度履歴を緩やかにする、または得意な温度分布を生じさせることで溶接金属部に生じるひずみを抑制することを目指した。主熱源を TIG 溶接とし、レーザはあくまで温度履歴変化のために使用する副熱源とした。

凝固割れ再現試験方法には、拘束緩和式 U 型高温割れ試験を用いた。凝固割れ発生を高速度ビデオカメラで直接観察し、凝固割れに関わる高温延性曲線を実験的に取得した。

数値解析は、凝固割れの力学的挙動を熱弾塑性解析により明らかとし、冶金学的挙動については非平衡凝固に対する理論モデルを独自に構築することで明らかとした。

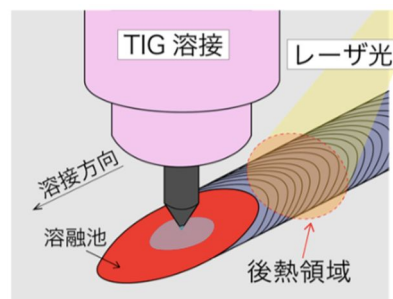


図1 レーザ直後熱方法

## 4. 研究成果

### (1) 凝固割れ発生予測モデルの構築

凝固割れ再現試験として用いた拘束緩和式 U 型高温割れ試験における凝固割れ発生に対して予測モデルを構築した。熱弾塑性解析上で、TIG 溶接、レーザ直後熱、拘束緩和式 U 型高温割れ試験をモデル化した。凝固割れの発生の境界条件として、高温延性曲線を取得する必要がある。そこで、直接観察を用いて凝固割れ発生に関わる限界ひずみを実験的に取得し、凝固割れ発生の境界条件とした。また、凝固割れ発生温度範囲である凝固脆性温度範囲 (BTR) は、バレストレイン試験により導出した。実験的に得られた高温延性曲線を境界条件に、熱弾塑性解析で得られた熱ひずみ挙動から割れ発生予測が可能となった[1]。

### (2) レーザ照射による凝固割れ抑制効果

レーザ照射条件を種々変更することで、熱ひずみを解析した。主熱源とレーザ照射位置を最適化することで、溶融凝固過程における熱ひずみの増加を抑制可能であることが示唆された。その要因としては、レーザ照射が照射位置周辺の温度分布を変化させ、溶融凝固部における拘束力 (降伏応力の温度依存性、温度変化に応じた溶融池周辺の膨張挙動など) を緩和させることが解析結果より明らかとなった[2]。

### (3) 凝固割れ抑制に及ぼす溶接金属の水冷効果

レーザ照射が凝固割れ抑制に有効であり、それが溶融池周辺の温度分布に依存した力学状態変化に依存した溶融凝固部へのひずみ緩和に起因することが示唆されたことから、溶接金属部に対して水冷を適用し、耐凝固割れ性を調査した。水冷により、溶融池周辺が冷却され剛性回復することで凝固割れが抑制された[3,4]。

#### ( 4 ) 溶接施工条件と凝固割れ発生の関係

溶融凝固部の温度分布を支配する因子として溶接速度が挙げられる。( 3 )で温度分布の影響が明らかとなったことから、これまでその現象の複雑さから考察されてこなかった溶接速度の影響について調査した。溶接速度変化が熱影響部の温度分布に影響を及ぼし、溶接速度が遅い場合に凝固割れ抑制に適した力学状態が形成されやすいことが明らかとなった。[5,6]

#### ( 5 ) 凝固割れ評価指標の明確化

本研究を遂行する上で、凝固割れの評価方法や予測に用いるべき指標を明らかにする必要がある。バレストレイン試験に対して直接観察を実施することで、バレストレイン試験における評価指標の明確化を試みた。従来、バレストレイン試験により高温延性曲線が取得可能であるとされてきたが、バレストレイン試験では溶接における凝固割れ発生ひずみを取得することができないことが明らかとなり、最大割れ長さより見積もられる凝固脆性温度範囲 (BTR) を得るための試験であることが明らかとなった。[7,8]

- [1] J.H. Lee et al., Prediction of solidification cracking during arc welding of 310S stainless steel in U-type hot cracking test, 溶接学会論文集, 38(2020), 68-75.
- [2] J.H. Lee et al., Suppression of solidification cracking via thermal strain control in multi-beam welding, Materials Today Communications, 24(2020), 101094.
- [3] J.H. Lee et al., Solidification cracking prevention by thermal strain control via water-cooled gas tungsten arc welding, Materials Today Communications, 23(2020), 101109.
- [4] J.H. Lee et al., Effect of cooling rate on solidification cracking behaviour in 310S stainless steel, Journal of Advanced Joining Processes, 3(2021), 100044.
- [5] J.H. Lee et al., Effect of welding condition on solidification cracking behaviour in austenitic stainless steel, Science and Technology of Welding and Joining, 26(2021), 84-90.
- [6] J.H. Lee et al., Effect of heat dissipation on solidification cracking behaviour of austenitic stainless steel during gas tungsten arc welding, Science and Technology of Welding and Joining, 26(2021), 455-460.
- [7] S. Yamashita et al., Quantitative Evaluation of Augmented Strain at the Weld Metal During the Trans-Varestraint Test, Welding in the World, 65(2021), 2013-2021.
- [8] S. Yamashita et al., Interpretation of Evaluation Indices Based on Solidification Cracking Behavior by In-situ Observation in Trans-Varestraint Test, Welding in the World, 66(2022), 341-349.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Jae-Hyeong Lee, Shotaro Yamashita, Tomo Ogura, Kazuyoshi Saida	4. 巻 3
2. 論文標題 Effects of cooling rate on solidification cracking behaviour in 310S stainless steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Joining Processes	6. 最初と最後の頁 100044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jajp.2021.100044	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 Lee Jae-Hyeong, Yamashita Shotaro, Ogura Tomo, Saida Kazuyoshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Effect of welding condition on solidification cracking behaviour in austenitic stainless steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science and Technology of Welding and Joining	6. 最初と最後の頁 84～90
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/13621718.2020.1837490	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 Lee Jae-Hyeong, Yamashita Shotaro, Ogura Tomo, Saida Kazuyoshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Effect of heat dissipation on solidification cracking behaviour of austenitic stainless steel during gas tungsten arc welding	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Science and Technology of Welding and Joining	6. 最初と最後の頁 455～460
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/13621718.2021.1935152	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 Yamashita Shotaro, Okano Shigetaka, Mochizuki Masahito, Saida Kazuyoshi	4. 巻 65
2. 論文標題 Quantitative evaluation of augmented strain at the weld metal during the Trans-Varestraint test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 2013～2021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40194-021-01152-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yamashita Shotaro, Saida Kazuyoshi	4. 巻 66
2. 論文標題 Interpretation of evaluation indices based on solidification cracking behavior by in situ observation in Trans-Varestraint test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 341 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40194-021-01223-y	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6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 李炯齋, 山下正太郎, 小椋智, 才田一幸
2. 発表標題 拘束緩和式U型高温割れ試験による凝固割れ発生に及ぼす固液共存領域の影響
3. 学会等名 溶接学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下正太郎, 才田一幸
2. 発表標題 トランスバレストレイン試験における凝固割れ発生挙動
3. 学会等名 溶接学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李炯齋, 板坂悠, 山下正太郎, 小椋智, 才田一幸
2. 発表標題 レーザー後熱併用TIG溶接による高温割れひずみ緩和への検討
3. 学会等名 溶接学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下正太郎, 岡野成威, 三村航太郎, 望月正人, 才田一幸
2. 発表標題 トランスバレストレイン試験による溶接金属部のひずみ挙動の定量化
3. 学会等名 溶接学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 李炯齋, 山下正太郎, 小椋智, 才田一幸
2. 発表標題 冷却工程を用いた熱ひずみ制御による凝固割れの抑制
3. 学会等名 溶接学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Yamashita, J.H. Lee, T. Ogura and K. Saida
2. 発表標題 Effect of Yield Strength on Solidification Cracking Occurrence by U-Type Hot Cracking Test
3. 学会等名 Visual-JW 2019 (招待講演)
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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------