

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14512

研究課題名（和文）凝固割れ現象の実験的解析と発生理論モデルに基づいた溶接施工対策の定量評価

研究課題名（英文）Experimental Analysis of Solidification Cracking Phenomena and Quantitative Evaluation of Welding Procedure Countermeasures Based on Generation Theory Model

研究代表者

山下 正太郎（Yamashita, Shotaro）

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40805107

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：溶接における凝固割れ挙動をより正確に理解するため、実溶接施工にできる限り近似された状態で凝固割れを発生させ、その割れ発生を直接観察し、割れ発生ひずみを評価した。凝固割れ発生の境界条件を明確にし、その発生クライテリアを数値計算から算出するに至った。また、凝固割れが、溶接施工条件と凝固組織形成の仕方に依存するため、溶接施工条件に依存した溶接金属組織形成の再現を試み、その情報に基づき溶接金属凝固組織の形態を数値計算上で再現した。数値計算のみならず実溶接施工における溶接金属組織形態変化を実験的に捉え、これらの実験と解析の両結果の比較から施工条件 凝固組織が予測可能であることを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

凝固割れ発生のクライテリアについては様々な指標が提案されているが、ひずみを正確に評価された例が少ない中で、本研究において割れ発生ひずみを理論モデル化し、数値計算結果として導出することが可能となった。加えて、溶接施工時の溶接金属形状予測に対して熱弾塑性解析や熱流体解析を駆使する検討がなされている中で、その溶接金属内の組織形成を熱流体解析と結晶成長モデルを連成させることで溶接金属組織形成予測が可能となった。これらの凝固割れ発生に強く影響を与える因子を解析的アプローチにより導出可能となったことは溶接凝固割れ現象の体系化に向けて有意義であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：To understand the solidification cracking behavior in welding, the initiation of the cracks was directly observed, and the strain at crack initiation was evaluated. The boundary conditions for the solidification cracking occurrence were clarified, and the criteria for its occurrence were derived through numerical calculations. Furthermore, since solidification cracking depends on the welding procedure conditions and the formation of the solidification microstructure, an attempt was made to replicate the weld metal microstructure dependent on the welding procedure conditions. The morphology of the weld metal microstructure was reproduced through numerical calculations. In addition to numerical calculations, the changes in the morphology of the weld metal microstructure in actual were experimentally captured. By comparing these experimental results with the analytical results, it was demonstrated that the solidification structure related to the welding conditions can be predicted.

研究分野：溶接

キーワード：溶接 凝固割れ 限界ひずみ 数値計算 凝固組織予測

## 1. 研究開始当初の背景

カーボンニュートラルに向けて液化天然ガス、水素などの低温貯蔵資源の活用が検討されている。どのようにエネルギーを創成するかの問題だけでなく、貯蔵方法をいかに構築するかについては喫緊の課題である。安全・安心な極低温貯蔵を達成するため「溶接部の割れ」を解決する必要がある。本研究では、「溶接部が割れる」現象を正しく理解し、「割れ」に対して正しく対処し、防止することを目的とした、安全・安心な低炭素社会の実現に向けた取り組みである。

溶接は、生産技術の根幹を成す一つの技術であるため、その役割は重要である。溶接で生じる重大欠陥として「凝固割れ」が挙げられる。この割れは、あらゆる構造物で使用される鋼、ステンレス鋼、Ni 基合金、アルミニウム合金などの溶接で問題となり、ものづくりのありとあらゆる箇所で見られている。しかしながら、その対策、制御指針のみならず、発生機構について必ずしも明確であるとは言えず、未だ経験則に頼った工学的評価によって対策されるに過ぎない。溶接部の「割れ」の発生が問題視される背景には、溶接部が組織学的な構造物の弱点となることと、溶接が液体・気体など気密性が要求される構造物に適用されることにある。水素、液化天然ガスのケースでは、溶接部にとってより過酷な極低温環境での貯蔵が要求されることに加えて、それらが爆発性を有することが重畳して、これまで以上に安全性が求められる。低炭素社会実現のための貯蔵タンクには、構造部材として溶接時に「割れが発生しやすい材料」が用いられることなどからも、割れに注意する必要がある。

## 2. 研究の目的

溶接時の割れは 1950 年頃より問題視されており、その度に研究されてきたが未だ普遍的な解釈を導くことができていない。割れ問題を防止するためにも、より詳細なメカニズム解明が求められている。本研究では、これまでに定性的に現象が整理されてきた凝固割れの発生メカニズムをより詳細化することで、凝固割れ問題の本質的解決に繋げることを目的とする。本研究は 凝固割れ現象統一化に向けた実験的検討と その理論モデルの構築、溶接施工中の割れ発生に大きく影響を与える凝固組織形態予測

に大別される。実験方法には、溶融凝固現象を直接観察可能とし、凝固組織成長、残留液膜の形成機構などと合わせて論じることで、非常にミクロな領域で生じる凝固割れ現象の体系化を試みる。その結果に基づいて、より普遍的かつ定量的に説明する。

## 3. 研究の方法

凝固割れ発生を評価するにあたって、凝固割れ評価方法として提案されているパレストレイン試験ならびに拘束緩和式 U 型高温割れ試験を活用した。本研究における凝固割れ発生挙動の観察ならびに割れ発生ひずみの計測には高速度ビデオカメラを用いた直接観察を適用した。その実験状況を図 1 に示す。直接観察動画より、割れ発生の挙動ならびに割れ発生時のひずみの時系列変化を評価した。溶接施工条件と凝固組織形態予測の検証には、TIG 溶接ならびにレーザー溶接により行った。

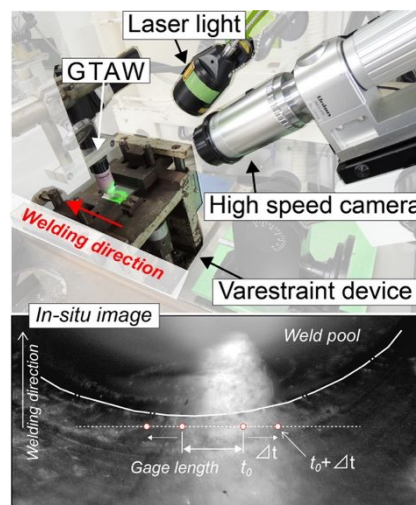


図1 凝固割れ発生の直接観察方法

#### 4. 研究成果

##### (1) 凝固割れ発生に関するひずみの傾向と理論モデル化

直接観察から得られた実験結果を図2に示す。溶接時の凝固割れ発生時のひずみ値は、高温時(凝固率0)に最も高く、そこから温度の低下(凝固が進行する)につれて低下していき、凝固完了直前(凝固率<1.0)において最低値となることわかる。

図2に示した実験的に明らかとなった割れ発生と凝固率の関係の理論モデル化を試みた。凝固開始温度の導出が可能なK-G-Tモデル、凝固偏析挙動を算出可能なデンドライト六角形モデル、溶融金属の液膜の破断限界値を導出可能なR-D-Gモデルをそれぞれ連成した。その結果を図3に示す。連成解析結果は、図2の割れ発生ひずみと凝固率の関係をよく再現しており、凝固割れ発生ひずみの理論モデル化に成功した。

##### (2) 溶接施工条件に基づく溶接金属凝固組織形態予測

熱流体解析とモンテカルロ法を連成させることで溶接金属凝固組織形態の予測を試みた。その一例を図4に示す。溶接熱源に追従する凝固組織の形成が解析的に得られていることがわかる。この解析に基づき、TIG溶接、レーザー溶接の各条件に対してその形態予測を実施し、実溶接金属組織と比較したところ、全ての条件で組織形態が一致していることが明らかとなった。よって、凝固割れ発生に影響を及ぼす溶接金属組織の予測が可能となった。

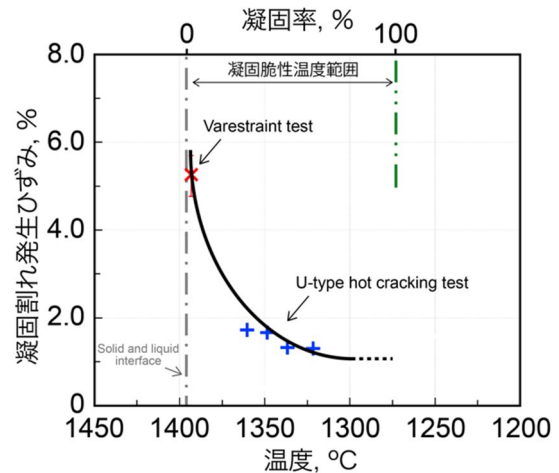


図2 凝固割れ発生のクライテリア(実験)

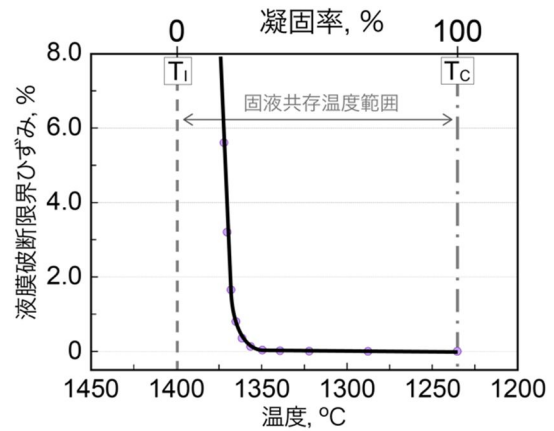


図3 凝固割れ発生クライテリアの理論解

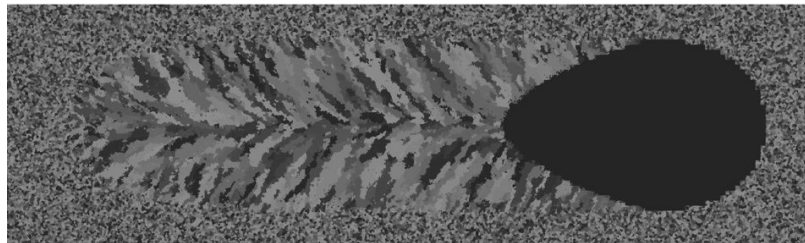


図4 熱流体解析とモンテカルロ法の連成による凝固組織予測結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Yamashita, and K. Saida
2. 発表標題 Evaluation of Hot Ductility Curve for Solidification Cracking
3. 学会等名 IIW2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashita, and K. Saida
2. 発表標題 Applicability of Metallurgical Model for Solidification Cracking Susceptibility
3. 学会等名 Visual-JW 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Yamashita, and K. Saida
2. 発表標題 Experimental Evaluation of Hot Ductility Curve for Solidification Cracking by In-situ Observation
3. 学会等名 IWJC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------