

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05154

研究課題名（和文）温度分布と微視組織に起因するひずみ集中を考慮した溶接割れ感受性評価手法の構築

研究課題名（英文）Development of Weld Cracking Susceptibility Evaluation Method Considering Strain Concentration Caused by Temperature Distribution and Microstructure

研究代表者

岡野 成威 (okano, shigetaka)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00467531

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：プロセス-力学統合溶接シミュレーション技術やその場観察技術を駆使して、トランスバレストレイン試験における溶融凝固過程でのひずみ挙動を定量化することに成功した他、フェーズフィールド法による数値シミュレーションを活用して微視組織レベルでのひずみ挙動についても評価した。割れ発生に寄与すると考えられるひずみ集中挙動が示唆され、前者についてはその場観察技術による結果との良好な対応関係も確認できた。加えて、ひずみ集中挙動に対する溶接諸条件の影響を系統的に評価することで、ひずみ集中を支配する溶接条件因子を解明し、ひずみ集中の程度を統一的に評価し得る手法を提案し、その有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、溶接中の温度分布や微視組織の影響で従来考えられていなかったひずみ集中が生じることが明らかになったことは、溶接時に生じ得る割れの発生防止に向けた材料や施工条件の選定のための評価試験方法に対する理解をより一層深化させるものであり、学術的に有意義である。一方で、溶接・接合技術はものづくりにおいて欠かせない重要な基盤技術の一つであり、本研究で得られた知見により今後のものづくり高度化や溶接構造物の信頼性・安全性向上に繋がると考えられるため、社会的にも有意義といえる。

研究成果の概要（英文）：Using process-mechanics integrated welding simulation and in-situ observation techniques, we have successfully quantified the strain behavior during the melting and solidification process in the trans-varestraint test, and also evaluated strain behavior at the microstructural level using numerical simulations based on the phase-field method. Strain concentration behavior that may contribute to crack initiation was suggested in these investigations, and a good correspondence with the results of in-situ observation technique was confirmed for the former. In addition, by systematically evaluating the effects of welding conditions on strain concentration behavior, we clarified the welding condition factors that dominate strain concentration and proposed a method to evaluate the degree of strain concentration in a unified manner, and demonstrated the usefulness of this method.

研究分野：溶接力学

キーワード：プロセス-力学統合シミュレーション ひずみ挙動 その場観察技術 温度分布 微視組織 割れ感受性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

溶接・接合技術は、ものづくりにおける重要な基盤技術の一つであり、溶接において生じ得る割れなどの欠陥を適切に防止し、溶接・接合部の信頼性を確保することは極めて重要な技術課題である。溶接割れ感受性評価試験に関する学術的研究は古くからなされており、材料や施工条件の選定に必要な有益な知見や指針を数多く与えている。一方で、溶接割れ感受性評価試験に対する理解の深化に向けては、試験における力学的挙動に関してさらに検討を進めていくことが重要であると考えられる。従来より、トランスバレストレイン試験¹⁾では、溶接中に強制的に曲げ負荷を与えて溶融凝固部にひずみを与え、生じた割れの数や長さを評価し、最大割れ長さを割れ発生温度範囲に換算して高温延性曲線を求めることで、材料の割れ感受性を相対的に評価してきた。なお、この際に用いられる負荷ひずみの大きさは、試験片の板厚 t とベンディングブロックの曲率半径 R から材料力学に基づいて $t/(2R+t)$ より算出されている。しかし、溶接時には温度分布が生じており、温度が高いと剛性が低下することなどから、剛性の不均一な分布に起因してひずみが集中して生じることも考えられ、割れに寄与するひずみが材料力学的に求まるひずみとは必ずしも一致していないことが懸念される。

そこで本研究では、溶接割れ感受性評価試験の一つであるトランスバレストレイン試験を想定し、割れ感受性評価試験・手法に関する理解を深化させ、高度化していくために、数値シミュレーション技術や実験観察技術などを駆使して力学的挙動に関して詳細に検討することとした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、実験観察技術および数値シミュレーション技術により溶接割れに関わる力学的挙動を可視化できる技術を構築すること、および溶接割れ現象に関わる力学的挙動メカニズムを詳細化することで、材料の割れ感受性評価試験・手法に関する理解を深化し、高度化させることである。これまでの研究において必ずしも十分に検討がなされてこなかった「溶接中の温度分布や微視組織に起因するひずみ集中を考慮した」評価方法の高度化を目指す。特に、前者の温度分布に起因したひずみ集中について、溶接条件因子に着目した統一的な評価方法の構築も試みる。

3. 研究の方法

(1) 実験観察技術および数値シミュレーション技術を活用した溶接割れに関わる力学的挙動の可視化

はじめに、トランスバレストレイン試験を想定したプロセス-力学統合溶接シミュレーションモデルを構築する。溶接入熱条件に応じた熱源モデリング手法²⁾によって溶接中の温度分布を高精度にシミュレーションできる手法を活用して、トランスバレストレイン試験時の曲げ負荷に伴って溶融凝固過程で生じるひずみ挙動を高精度に評価する。一方で、その場観察技術³⁾を活用して、トランスバレストレイン試験における溶融凝固部でのひずみ挙動を計測し、数値シミュレーション結果と比較することで、トランスバレストレイン試験における溶融凝固部のひずみ挙動の定量化を試みる。なお、本検討には、トランスバレストレイン試験時のひずみ挙動を捉えるために、割れが生じない純鉄を供試材料として用いる。

また、フェーズフィールド法による数値シミュレーションを活用して、溶融凝固過程での微視組織スケールでの力学的挙動の評価を試みる他、結晶の弾性および塑性の異方性を考慮した数値シミュレーションによる微視組織スケールでの力学的状態の評価技術に関して検討を加える。

(2) 溶接割れ現象に関わる力学的挙動メカニズムの詳細化

続いて、上述のように構築した各種技術を活用して、溶接割れ現象に関わる力学的挙動メカニズムの詳細化を図る。溶接電流や溶接速度などを種々に変化させて、トランスバレストレイン試験における溶融凝固部でのひずみ挙動を定量化するとともに、溶接諸条件の影響について系統的に検討する。それらの結果に基づいて、トランスバレストレイン試験における溶融凝固部でのひずみ挙動を支配する溶接条件因子を解明し、この溶接条件因子に基づくトランスバレストレイン試験における溶融凝固部でのひずみ挙動の統一的評価手法の提案を試みる。

4. 研究成果

(1) 実験観察技術および数値シミュレーション技術を活用した溶接割れに関わる力学的挙動の可視化

トランスバレストレイン試験を想定したプロセス-力学統合シミュレーション手法を構築した。使用した数値シミュレーションモデルを図 1 に示す。純鉄を想定した材料物性を与えた上で、溶接電流 150A、溶接速度 0.1cm/min の条件で溶接を施し、図 2 に示すように、溶融部後端が試験片中央に達した瞬間に、曲げ負荷を与えることでトランスバレストレイン試験を模擬した。

ベンディングブロックの曲率半径を種々に変化させて負荷ひずみの大きさを変化させた際の溶融凝固部で生じるひずみ量の数値シミュレーション結果を材料力学に基づく負荷ひずみの大きさとの関係でまとめて図 3(a)に示す。本図に示すように、溶接中に生じている温度分布、言い換えれば、温度分布に起因した剛性の不均一分布によって、材料力学に基づいて算出されるひずみ量よりも明らかに大きなひずみが溶融凝固部に生じることが示唆されている。なお、その場観察技術を活用して、トランスバレストレイン試験における溶融凝固部のひずみ挙動を計測した結果を図 3(b)に示す。本図から分かるように、実験計測結果と数値シミュレーション結果は定量的にも良好に対応する傾向を示しており、材料力学に基づいて算出されるひずみ量よりも明らかに大きなひずみが溶融凝固部に生じることが、実験観察技術と数値シミュレーション技術から共に確認することができた。また、本研究で構築・実施したトランスバレストレイン試験を想定したプロセス-力学統合シミュレーション手法が良好な精度を有していることも併せて字検証することができた⁴⁾。

オーステナイト系ステンレス鋼の溶融凝固過程を想定して、凝固組織の形成に関する数値シミュレーションを実施した。数値シミュレーションモデルの模式図と数値シミュレーション結果の一例を図 4 に示す。時間の経過に伴って凝固組織（薄黄色）が形成されていく過程で、固層（薄黄色）と液相（赤色）の境界において応力（ひずみと同様の傾向を示すものとして利用）が大きく生じる挙動が確認された。凝固組織形態に応じて複雑に変化すると考えられるため系統的に整理することは必ずしも容易ではないが、ミクロスケールでも割れに寄与すると考えられるひずみが大きく生じる可能性が見出された。

オーステナイト系ステンレス鋼を想定して、結晶の弾性および塑性の異方性を考慮した数値シミュレーションを活用して、微視組織スケールでの力学的特性の評価についても検討を実施した。結晶の弾性および塑性の異方性を考慮することで、微視組織スケールで力学的挙動が不均一に生じることが確認でき⁵⁾、溶融凝固過程での状態を厳密に模擬することは必ずしも容易ではないが、凝固組織の形成においても結晶の弾性および塑性の異方性を考慮した取り組みも有用となること示唆された。

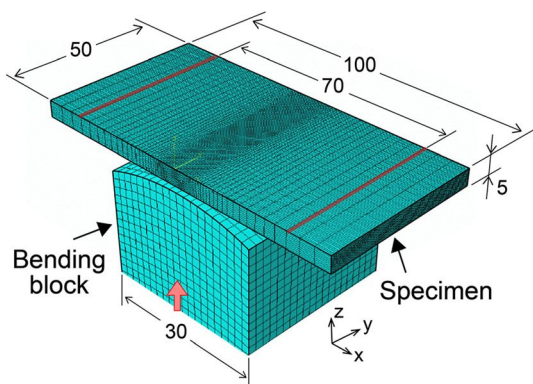


図 1 数値シミュレーションモデル

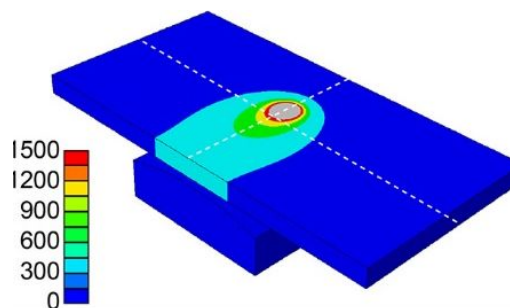
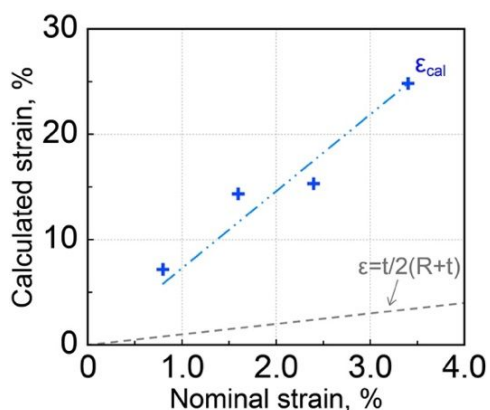
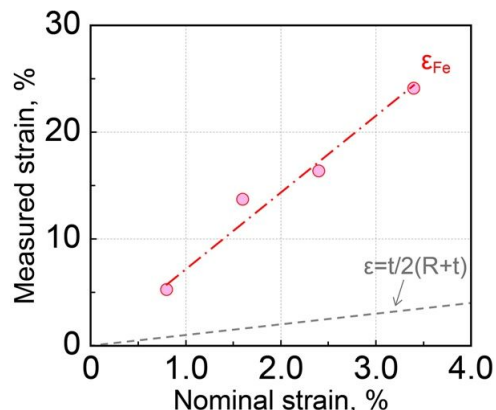


図 2 溶接中の温度分布の計算結果



(a) 数値シミュレーション結果



(b) 計測結果

図 3 溶融凝固部でのひずみ挙動のシミュレーション結果と計測結果

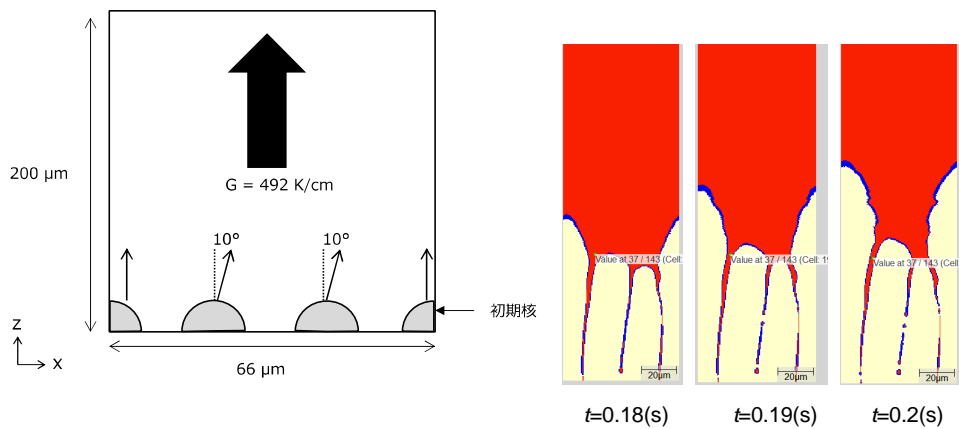
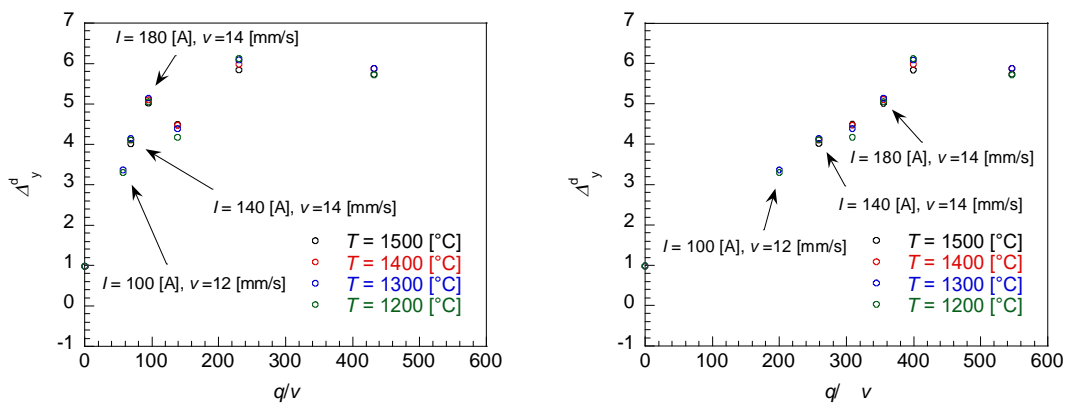


図4 凝固組織形成の数値シミュレーションモデルと結果の一例

(2) 溶接割れ現象に関わる力学的挙動メカニズムの詳細化

上述したプロセス-力学統合溶接シミュレーションを活用することで、トランスバレストレイン試験において溶融凝固部で大きく生じるひずみ挙動を支配する溶接条件因子について検討した。ここでは、オーステナイト系ステンレス鋼を想定した上で、溶接電流や溶接速度を変化させて溶融凝固部のひずみ挙動を評価した。トランスバレストレイン試験を模擬した数値解析を実施し、溶融凝固部のひずみ挙動を評価し、溶接条件因子として単位時間当りの入熱 q と溶接速度 v からなる指標 q/v と指標 q/\sqrt{v} によってひずみの増大傾向 Δd_y を整理した結果を図6に示す。前者は単位溶接長当りの入熱であり、後者は溶接部周辺の高温度範囲の温度分布を支配する指標であるが、トランスバレストレイン試験における溶融凝固部のひずみ挙動は後者によってより統一的に評価できることが明らかになった。これは、曲げ負荷に対する剛性に起因するものと考えられ、剛性が小さくなる高温度範囲の温度分布の広がりが板厚内部でどの程度に達しているかに依存するためであると考えられる。トランスバレストレイン試験において溶接条件の設定に応じて、溶融凝固部で実際に生じているひずみが変化することが示唆され、言い換えれば、本指標による関係性を把握しておけば、意図的にひずみ量をコントロールすることも可能であると考えられる。従来までの冶金現象の考慮に加えて、力学的挙動も詳細に考慮した上で溶接割れ感受性のより適切な評価に繋がると考えられる。



(a) 単位溶接長当りの入熱量 (b) 溶接部周辺の高温度域を支配する指標

図5 溶融凝固部のひずみ量を支配する溶接条件因子に関する評価結果

以上のように、本研究では、溶接割れ感受性評価試験の一つであるトランスバレストレイン試験を対象として、従来では材料力学に基づいて求められていたひずみよりも大きなひずみを実際の試験時に生じること、ならびにそれが溶接条件によって種々に変化し得ることを初めて見出すとともに、その統一的评价のための指標を導出することで試験条件選定にも利用できる指針を提案した。本研究成果で初めて定量的に明らかにされたひずみ挙動をひとつの契機として、トランスバレストレイン試験による割れ感受性評価手法に対する新しい解釈や評価手法の高度化に向けた学術的研究⁶⁾にも繋がっており、材料特性の影響評価や微視組織スケールの評価手法の高度化を継続して推進していくことで、本研究の更なる発展も期待できる。また、本研究で実施した取り組みは、その他の割れ感受性評価試験への応用も可能であり、将来的には結晶の弾性や塑性の異方性を考慮した数値シミュレーションとの統合化も考えられる。今後も継続的に展開を図っていくことで、溶接構造物の長期的な安全性・健全性を確保するための材料評価研究に

も貢献できると考えられる。

1. W. F. Savage and C. D. Lundin: The Vareststraint Test, *Welding Journal*, 44(1965), p. 433s-442s.
2. S. Okano, M. Tanaka, and M. Mochizuki: Arc Physics Based Heat Source Modeling for Numerical Simulation of Weld Residual Stress and Distortion, *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(2011), p. 209-214.
3. K. Kadoi, A. Fujinaga, M. Yamamoto, and K. Shinozaki: The Effect of Welding Conditions on Solidification Cracking Susceptibility of Type 310S Stainless Steel during Laser Welding using an In-situ Observation Technique, *Weld World*, 57(2013), p. 383-390.
4. S. Yamashita, S. Okano, M. Mochizuki and K. Saida, Quantitative Evaluation of Augmented Strain at the Weld Metal During the Trans-Vareststraint Test, *Weld World*, 65(2021), 2013-2021.
5. 岡野他, オーステナイト系ステンレス鋼の加工硬化と回復・再結晶を考慮した配管多層溶接部硬さの数値解析, 日本保全学会第 18 回学術講演会 講演予稿集 (2022), pp. 549-552.
6. S. Yamashita and K. Saida, Interpretation of Evaluation Indices based on Solidification Cracking Behavior by In Situ Observation in trans-Vareststraint Test, *Weld World*, 66(2022), pp. 341-349.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 S. Yamashita , S. Okano , M. Mochizuki , K. Saida	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野原 健吾, 寺田 恭介, 岡野 成威, 望月 正人
2. 発表標題 オーステナイト系ステンレス鋼の加工硬化と回復・再結晶を考慮した溶接力学解析と検証
3. 学会等名 溶接学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下正太郎、岡野成威、望月正人、才田一幸
2. 発表標題 バレストレイン試験における高温割れ評価指標の明確化 -公称ひずみと実ひずみの関係-
3. 学会等名 一般社団法人溶接学会 溶接構造研究委員会 第234回研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡野成威, 野原健吾, 三上欣希, 望月正人
2. 発表標題 オーステナイト系ステンレス鋼の加工硬化と回復・再結晶を考慮した配管多層溶接部硬さの数値解析
3. 学会等名 日本保全学会
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
---------	---------