

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760601

研究課題名(和文) その場観察法とシミュレーションの併用による溶接凝固解析と割れ発生防止技術の開発

研究課題名(英文) Evaluation of solidification during welding by in-situ observation and simulation and development of prevention technique for solidification cracking

研究代表者

門井 浩太 (KADOI, KOTA)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40454029

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、溶接凝固割れの定量的かつ詳細な調査と凝固割れ発生防止法の検討を目的とした。高速度ビデオカメラを用いたその場観察法を用いた凝固割れ感受性評価試験により、レーザ溶接の高速凝固下においても、凝固割れ発生時のひずみ及び温度を高精度に測定でき、高延性曲線を取得できた。高倍率その観察によって、溶融池後端部での液相の残留形態を直接観察することが可能であり、観察された形態の傾向は、凝固割れ感受性の傾向と同様で合ったため割れ感受性評価・予測に対して有用な技術・指標になりうる可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The aim of this work is for quantitative evaluation of solidification cracking susceptibility during and for investigation of prevention the crack initiation. Evaluation test for hot cracking susceptibility by In-situ observation using high speed camera enabled quantitative measurement the strain and temperature with high accuracy under rapid solidification during laser welding. It was possible to observe distribution morphology of residual liquid at the end of molten pool directly by high magnification in-situ observation technique. In addition, the tendency of the morphology had good agreement with the tendency of the solidification cracking susceptibility.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：溶接接合 凝固工学 その場観察 高温割れ 凝固割れ

1. 研究開始当初の背景

鋼, SUS 鋼, Ni 基合金, Al 合金やそれらの異材溶接では, 溶接時に溶接金属部で凝固割れが発生しやすく, 実溶接施工での割れ発生防止が重要となる. さらに, 近年構造物の高品質化や生産性向上に伴い, 適用材料の多様化や異材継手部の増加, 溶接の高速度化により凝固割れはより発生しやすくなるとされている. 割れ発生防止には, 溶接材料の開発, 溶接条件や溶接継手設計の最適化などの取り組みがなされているが, 割れ発生現象に対する統一的な理解や定量的な指標は得られておらず, 抜本的な防止法は明らかとなっていない. そのため, 溶接条件や材料種に応じた溶接中の凝固現象やひずみ負荷状態を詳細に理解し, それに基づいて割れ発生機構を明確にし, 割れ発生の防止法を確立することが求められている.

凝固割れは, 固液共存領域で残留した液相に対して, 凝固収縮により割れ発生限界ひずみを越えるひずみが負荷されれば, 割れが発生するとされている. そのため, 割れ発生防止を検討するには, 高温かつ急峻な温度変化の過程での割れ発生時のひずみや温度を詳細に把握しなければならない.

しかしながら, 割れ発生限界ひずみの定量的な計測は行われた例はほとんどない. 加えて, 凝固脆性温度領域 (BTR) 内における割れ発生ひずみの変化傾向などは, 材料種や凝固条件 (溶接条件) によって大きく変化するとされ, 割れ発生現象を把握する上で重要な因子となるにもかかわらず, その変化現象は不明確である. また, 凝固割れ発生に大きく関わる BTR 内での残留液相の形成は, 凝固過程での含有元素の偏析現象に強く依存し, 特に硫黄やリンは数 ppm 程度の含有でも各割れ感受性に大きく影響を与える. しかし, 凝固速度が著しく早い溶接凝固中でのこれらの元素の割れ現象に対する影響を実験的に計測することは困難であり, 組成分布等は高精度な計算によって求めるしかない.

本研究では, 凝固割れ現象の解明とその発生防止技術の開発を目的とした. 高速度ビデオカメラを用いたその場観察法による凝固割れ発生ひずみの直接測定及び高倍率観察, 熱力学データベースを用いた凝固解析計算を併用することで, 種々の材種や溶接条件における凝固現象と割れ感受性の関係などを調査し, 凝固割れ発生機構を明らかにする. 得られた知見を基に, 凝固割れ発生防止に有用な材料及び溶接条件を導出可能な予測法を検討した.

2. 研究の目的

本研究では, 溶接凝固割れの定量的かつ詳細な調査と凝固割れ発生防止技術の開発を目的とした. 凝固割れ感受性が特に高いとされている SUS 鋼や Ni 基合金などの材料に対して, レーザ溶接の種々の条件下で溶接を実施した. これまでに取組んできた高速度ビデ

オカメラを用いたその場観察技術を応用し, 溶接凝固中の割れ発生ひずみの直接計測による高温延性曲線の導出 (割れ発生限界ひずみと温度の関係) と凝固現象の詳細な観察を行った. 加えて, 熱力学データベースに基づいた凝固解析により, 種々の組成での詳細に凝固現象を検討した. 得られた結果を基に凝固現象, 材料及び力学因子と高温延性曲線変化の関係を調査し, その支配因子を調査し, 凝固割れ発生防止予測法を検討した.

3. 研究の方法

本研究は, 実験と解析計算に大別して実施する.

実験においては, 凝固現象及び割れ発生に対する溶接条件の影響を調査するため, 供試材料には, 凝固割れ感受性が高いとされている γ 単相凝固する SUS310 や Inconel 600 を用い, 溶接条件, 特に溶接速度を 0.2~2.0 m/min と変化させ検討を行い, 組成変化に伴う凝固割れ感受性および凝固現象を調査した.

凝固割れ感受性評価試験には, 拘束緩和型 U 型高温割れ試験 (図 1), トランスバレストレイン試験を採用した. いずれの試験においても溶接中にひずみを負荷する (拘束緩和型 U 型試験では引張のひずみ, トランスバレストレイン試験では曲げひずみ) ことによって, 強制的に凝固割れを発生させる. 割れ発生時の, 凝固割れ発生ひずみや凝固脆性温度領域 (BTR) を計測し, 高温延性曲線を導出した.

ひずみ計測には, 高速度ビデオカメラを用いたその場観察法を適用し, 溶融池後端部の凝固組織や表面凹凸を評点として追尾することによって割れ発生時の負荷ひずみを実測した. 温度計測は, レーザ溶接中の急峻な冷却速度下での測定を考慮し, 応答性の極めて高い浸漬型光ファイバ温度計を用いることで, 高精度な定量値の取得を行った.

また, 凝固割れ評価試験と同一の溶接条件で溶接を実施し, 固液界面近傍を顕微鏡用ズームレンズにより高倍率で撮影し, デンドライトの成長や液相の残留形態を高倍率その場観察した. また, 液体 Sn 急冷によって凝固凍結を行い, 光学顕微鏡や SEM 等を用いた組織解析により溶接金属部の凝固組織や残留液相の形態調査や撮影画像の検証を行った.

解析計算においては, 実験により得られた知見を基に凝固現象を計算し, 実験結果との比較を行うことで解析モデルの検討を行った. 凝固現象の解析計算には, フェーズフィールド法を採用し, 汎用ソフトウェアである MICRESS を用いた. また, 熱力学データベースとの連成のため ThermoCalc (データベースは TCFE-7) を用いた.

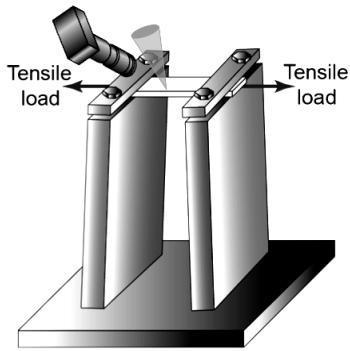


図1 拘束緩和型U型高温割れ試験

4. 研究成果

溶接条件が凝固割れ感受性に及ぼす影響を調査するため、SUS310Sを用い、レーザ溶接速度を0.4~1.6 m/minと変化させて、拘束緩和型U型高温割れ試験を実施した。

いずれの溶接速度においても凝固割れ発生までのひずみ履歴や割れ発生時のひずみが測定でき、また、各溶接速度での温度履歴は、浸漬型光ファイバ温度計を用いることによって、各溶接速度における液相線温度や急峻な温度勾配（(最大約 800K/s)の計測ができた。この温度履歴を基に、各溶接速度のひずみ履歴の横軸を温度に変換して得られた高延性曲線を作成した結果（図2）、0.8および1.6 m/minの凝固割れ発生ひずみ値は、ほぼ同一直線上に存在するのに対し、0.4 m/minで得られたひずみ値は他の条件に比べて極めて大きな値を示すことがわかった。したがって、溶接速度の増大は、凝固割れ感受性を低下させると考えられる。

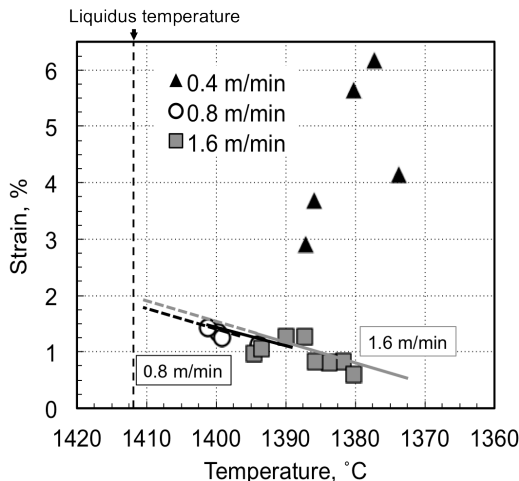


図2 高温延性曲線 (SUS310S, 評点間距離 0.5 mm)

高倍率その場観察によって溶接中の溶融池後端部を観察したところ（図3）、1.6 m/minの条件では、溶接線垂直方向に成長した柱状 dendrait が溶接ビード中央で会合・架橋し、凝固が概ね完了した様子が確認できる、しかし、架橋した後に、 dendrait の先端やそれらの間で融液が残留する様子が確認された。

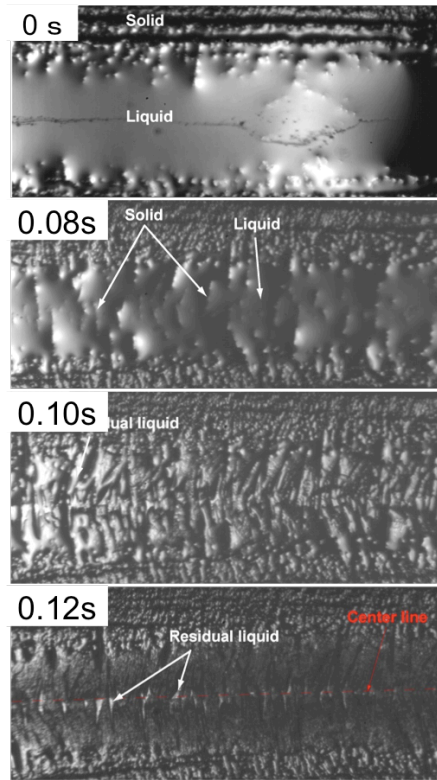


図3 高倍率その場観察 (SUS310S, 溶接速度 1.6 m/min)

溶融池後端部の融液の残留形態は、凝固組織形態に依存すると考えられる。溶接速度が速いと微細な柱状 dendrait、平滑な会合部界面を呈するため、残留融液は凝固末期まで液膜状に存在すると考えられる。一方、溶接速度が遅くなると、粗大な柱状 dendrait が粗い会合部界面を呈するため、残留融液は島状に存在する。したがって、溶接速度の増大に伴い、凝固組織や柱状晶会合部の界面形態が変化し、融液の残留形態が遷移するため、凝固割れが発生するひずみ値が低下すると考えられる。

続いて、化学組成の影響を調査するため、いずれもγ相単相凝固する SUS310 鋼と Inconel600 を用い拘束緩和型U型高温割れ試験を実施した。いずれの材料の高温延性曲線は、液相線温度直下から割れが発生し、温度の減少とともに割れ発生ひずみが低下していく傾向が確認された。また、割れ発生ひずみ値は、Inconel600 に比して SUS310S の方が低かったため、凝固割れ感受性が低いことが示唆された。

SUS310S および Inconel600 の溶接速度 0.8 m/min における溶融池後端部の高倍率その場観察像を図4に示す。SUS310S は全体的に太い網目状に融液が残っており、低温側では、液相の残存量は少ない。これに対し、Inconel 600 は、溶融池近傍で小さな網目状に融液が残留し、SUS310S と同様に低温側では液相が残留しにくい傾向が確認できる。これらの材料の液体 Sn 急冷組織を観察したと

ころ、いずれも高温側での2次枝の成長が著しく、低温側では液相の残留はあまり確認されなかった。これは同一の γ 相单相凝固剤であっても、化学組成が異なることによって、液相線勾配等が異なるため、二次枝の成長形態等の凝固現象が異なる、PやSなどの不純物元素の含有量の違いによるためと考えられる。したがって、いずれの材料においても高温側では熔融池からのヒーリング効果によって割れ感受性が低いものに対して、低温側では残留液相は液膜上に残留しやすいために割れ感受性が高くなると考えられる。

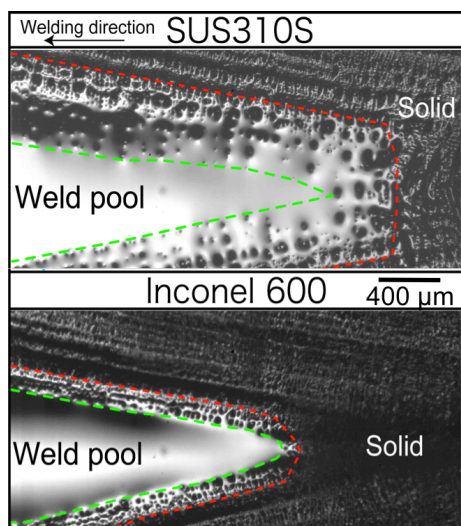


図4 高倍率その場観察
(溶接速度 0.8 m/min)

以上の結果より、拘束緩和型U型高温割れ試験などを用いた凝固割れ感受性評価試験を実施し、レーザ溶接などの高速な冷却過程においても高温延性曲線の導出など高精度かつ定量的に凝固割れ感受性の評価ができた。また、高倍率その場観察では、熔融池後端部での液相の残留形態が直接観察可能となり、この液相の残留形態が割れ感受性評価試験における割れ発生と残留融液の分布形態が同様の傾向を示していた。その場観察法のすることによって、凝固割れ発生に影響を及ぼす残留液相の分布形態やその変化現象が明らかとなり、凝固割れ感受性と組織形態の関係を評価することができた。

続いて、溶接条件や材種が凝固現象におよぼす影響を調査するため、熱力学データベース汎用の熱力学計算ソフト「Thermo-calc」とPhase-field法による組織予測ソフト「Micress」をカップリングさせ、熱力学データベースに基づいて凝固形態の解析計算を実施した。上記までの実験で得られたそれぞれの凝固速度や材種における冷却速度を基に、計算を実施した結果の一例を図4に示す。二次枝の成長が確認でき、溶接速度の増大とともにこれらのデンドライト成長形態が変化することがわかった。しかしながら、液体 Sn 急冷組織と同様の形態は得られな

った。特に溶接速度が大きいほどその傾向は大きかった。加えて、溶接速度が大きいほど、平衡状態に比して極めて大きな分配係数を示す場合があり、データベースの信頼性が低下する場合があった。そのため、今後データベースや計算条件の改善によって、計算モデルの高精度化を図っていく必要がある、また、より広範囲かつ相の成長方位を考慮した実現象により近い条件下での解析計算を行い、さらなる高精度化を行うことによって、より詳細に凝固現象の評価、凝固割れ発生予測ができる可能性が示唆された。



図5 凝固解析計算結果

本研究では、溶接凝固割れの定量的かつ詳細な調査と凝固割れ発生防止法の検討を目的とした。種々の材料や溶接条件における凝固現象と割れ感受性の関係などを調査し、凝固割れ発生機構を明らかにするとともに、凝固解析計算による検討を行った。以下に成果の概要を示す。

- ✓ 拘束緩和型U型高温割れ試験において、高速度ビデオカメラを用いたその場観察法及び浸漬型光ファイバ放射温度計を用いることで、レーザ溶接の高速条件下においても、凝固割れ発生時のひずみ及び温度を高精度かつ定量的に測定することができ、高延性曲線を取得できた。
- ✓ 凝固割れは、熔融池後端部で熔融池が長く伸びた部分で発生し、溶接速度が速いほど、凝固割れ発生ひずみは大きくなる。また、SUS310SとInconel600では、いずれも低温側で割れやすくなる傾向があり、割れ発生ひずみ値はSUS310Sのほうが低かった。
- ✓ 高倍率その場観察によって、熔融池後端部での液相の残留形態を直接観察することが可能であった。また、撮影された液相分布形態は、急冷組織と同様の傾向を示していた。さらに、凝固割れ感受性評価試験における割れ発生の傾向とその場観察で観察された液相の残留形態の傾向が一致していたため、割れ感受性評

価・予測に対して有用な技術・指標になりうる可能性が示唆された。

- ✓ 熱力学データベースを連成させた凝固解析計算では、溶接速度が大きいほどデータベースの信頼性が低下する場合があります、今後データベースや計算条件の改善によって、計算モデルの高精度化を図っていく必要があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. K. Kadoi, A. Fujinaga, M. Yamamoto, 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, *Welding in the World*, 57 巻, 査読有, 2013, pp 383-390

[学会発表] (計 3 件)

1. K. Kadoi, A. Fujinaga, M. Yamamoto, 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, 65th IIW Annual Assembly, 2012 年 7 月 10 日
2. 門井, 藤永, 山下, 山本, 篠崎: SUS310S ステンレス鋼のレーザ溶接における凝固割れ感受性に及ぼす溶接条件の影響, 溶接学会平成 24 年度秋季全国大会, 2012 年 9 月 28 日
3. K. Kadoi, A. Fujinaga, M. Yamamoto, K. Shinozaki; Effect of welding conditions on solidification cracking susceptibility of type 310S stainless steel during laser welding, *Visual-JW2012*, 2012 年 11 月 29 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

門井 浩太 (KADOI KOTA)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 40454029