

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月12日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860078

研究課題名（和文） レーザー溶融現象の数値シミュレーション研究

研究課題名（英文） Numerical studies on laser welding phenomena

研究代表者

山下 晋 (YAMASHITA SUSUMU)

日本原子力研究開発機構・敦賀本部レーザー共同研究所・博士研究員

研究者番号：80586272

研究成果の概要（和文）：レーザーによる溶接時の物理現象を把握し、溶接後に生じる残留応力（溶接に伴う熱によって、溶接部・溶接部周辺に残るストレスのこと）の制御を目的としたレーザー照射から凝固までの一貫した数値シミュレーション解析手法を開発した。これにより、従来考慮されていなかった溶融池内対流（レーザー照射による金属溶融部内の流れ）による温度輸送効果を考慮した評価が可能となり、溶接の現象論的把握と残留応力制御へ向けた基盤が整備された。

研究成果の概要（英文）：In order to elucidate physical phenomena and control a residual stress, which is induced by thermal history of a welding, in laser welding, We developed the numerical simulation code which can be able to consistently evaluate laser welding processes, i.e. from laser irradiation to solidification process. As a result, thermal transport effects by the molten pool convection neglected in conventional study has been enabled. Therefore, toward the elucidation of welding phenomena and controlling a residual stress, the basis has been developed in this study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	630,000	189,000	819,000
2011年度	230,000	69,000	299,000
年度			
年度			
年度			
総計	860,000	258,000	1,118,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：数値流体力学、レーザー溶接、多相流、相変化

1. 研究開始当初の背景

溶接は産業分野（自動車、造船等）に多く見られ欠かすことのできない技術である。特にレーザー溶接は、エネルギー密度が高いため材料加工面から材料に与える熱影響が少ない、遠隔操作、出力の制御及び局部加工が可能等の特徴を有することから補修部位や補修方法に柔軟に対応できる。そのため、高速

増殖炉サイクル実用化研究開発等に積極的に導入されつつある非常に有用な溶接手法である。一方、溶接部において熱履歴に起因して生じる残留応力は、構造物の損傷や変形の要因であり、溶融後の溶接部構造と密接な関係があることから、この低減のために溶融池界面挙動及びその内部構造の詳細を明らかにする必要がある。しかしながら、レーザ

一溶融過程においてそれらの詳細な機構を定量的に示した研究はこれまで全く行われていない。この研究により残留応力の低減やその予測精度向上といった工学的側面だけでなく、レーザー溶融に関する様々な物理過程の解明が期待されることから非常に重要な研究課題であると言える。

レーザー溶融の内部流動場に関する研究は、表面に比べ観察が難しく、X線透過法を利用して行う実験的研究が主である。しかし、実験ではX線の強度が弱く時間分解能が低いため、内部の大きな流れ場のみしか計測されておらず、不鮮明な流れ場しか可視化できていない。更に、内部の詳細な温度分布といった溶融後の残留応力に対して大きく影響を及ぼすような物理量の計測は非常に困難であるため数値シミュレーションは非常に有効であると考えられる。レーザー溶融数値シミュレーションによる研究は、数 ns 程度の極めて短時間でのシミュレーションのみであり、溶融池やその内部対流の詳細な挙動を定量的に評価した研究は報告されていない。

2. 研究の目的

ナトリウム冷却高速増殖炉の実用段階では、伝熱管でのレーザー溶接補修技術の標準化が重要となる。溶接部には熱履歴に起因した残留応力が生じ、構造物の破壊や変形に対して重要な要因となるため、溶融・凝固過程と残留応力の関係を明確にする必要がある。しかしながら、溶融過程における溶融池の界面挙動やその内部の流れ場や物理量の詳細は未だ明らかになっていない。本研究は、この現象に対し、実験に比べ低コスト且つ系統的な検討が行い易い等の特徴を有する数値シミュレーションにより解明することを目指し、シミュレーションコードの開発、溶融池内部の対流やその温度分布との関係を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

従来の実験的研究では観測することが不可能な物理過程の詳細を調べるために、数値シミュレーションにより実験に替わる評価方法の確立を目指す。この確立のために、本研究では以下の項目を実施する。

- (1) レーザー溶融シミュレーション手法として、シミュレーション精度を担保するために、高精度数値計算手法である CIP 法に基づいた VSIAM3 (Volume and Surface Integrated Average based Multi Moment Method) 解法を用いて多相流相変化数値シミュレーション手法を構築する。
- (2) 流れ場の詳細な機構を解明するために、高解像度な大規模計算のための並列化を行う。

- (3) レーザー溶融・凝固過程を再現するために必要な各種物理モデル (レーザー入熱モデル、相変化モデル等) を実装する。
- (4) 簡易的な残留応力評価モデルを実装し、レーザー入熱から凝固過程までを一貫して行えるコードを開発する。
- (5) レーザー照射中の溶融池内対流場による温度輸送を調査し、残留応力制御へ向けた知見を得る。

この他に、現象理解と計算コード検証の一環として、大型放射光施設 (SPring-8) で実施された溶融池内部の対流現象その場観察結果との比較を行う。

4. 研究成果

(1) 本研究で開発された、レーザー溶接計算コードを用いてレーザーを金属に照射しそれを操作させたときの母材の挙動とその温度分布に関する 3 次元シミュレーションの結果を図 1 に示す。

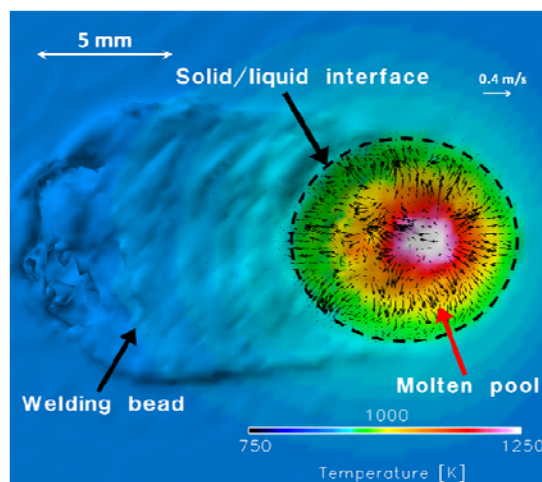


図 1 溶融池形状と温度分布

図 1 中の破線が固液界面であり、その内側が液相、外側が固相を表す。色分布は温度 (白色: 高温部, 青色: 低温部) を表している。図 1 より、レーザー照射点である白色の部分から固液界面へ向けて、マランゴニ効果により放射状に流れが発生していることが確認できた。また、走査方向に対して、溶融池下流側に溶接時に現れる溶接ビードと呼ばれる縞状のパターンが形成されていることが分かる。この結果から、本研究により開発された計算コードはレーザー溶接現象に対して概ね妥当な結果が得られることが確認された。

(2) 溶融池内対流による温度輸送効果を評価するために溶融・凝固シミュレーションを行った。問題を単純化するために、2 次元計算とし、気相は考慮せず、溶融金属と固体金属のみを扱う固・液 2 相流とする。レーザー入熱プロファイルを計算領域上壁面へ溶融池内対流場がほぼ定常状態となるまで母材

中心に入熱し、対流分布、温度分布等の物理量から対流と温度分布との関係性を調べる。また、凝固終了直後の温度分布からも対流の影響を調べる。また、乱流粘性を模擬した擬似的な粘性を拡散項に付加することにより、溶融池内対流挙動特性の違いが温度分布に与える影響を評価した。溶融池の粘性係数と熱伝導率を以下のように設定した。case 1 を純アルミの値、case 2 は粘性係数のみに 10 倍の値を加え、case 3 は粘性係数及び熱伝導率にそれぞれの値の 10 倍の値を付加する。

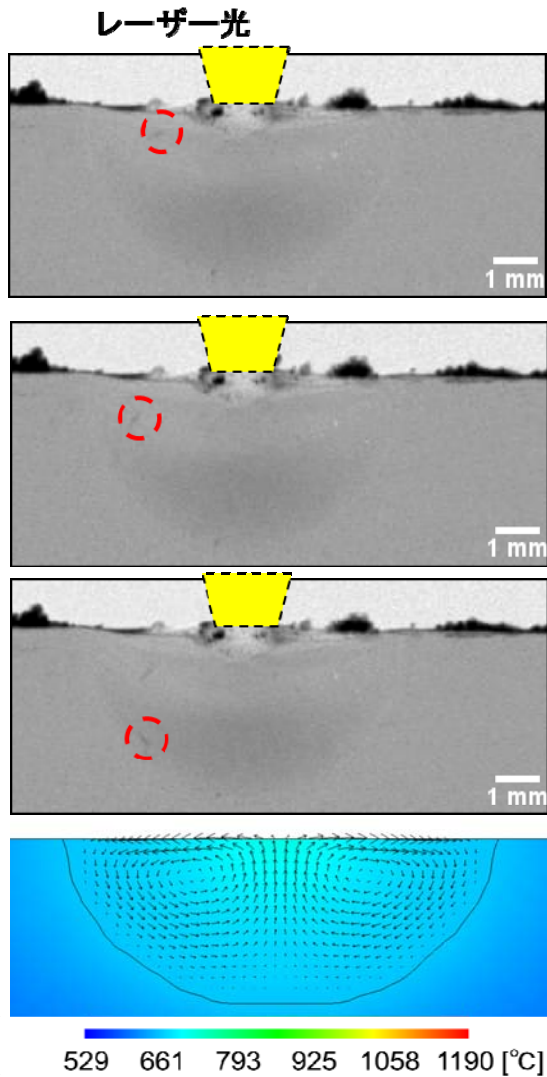
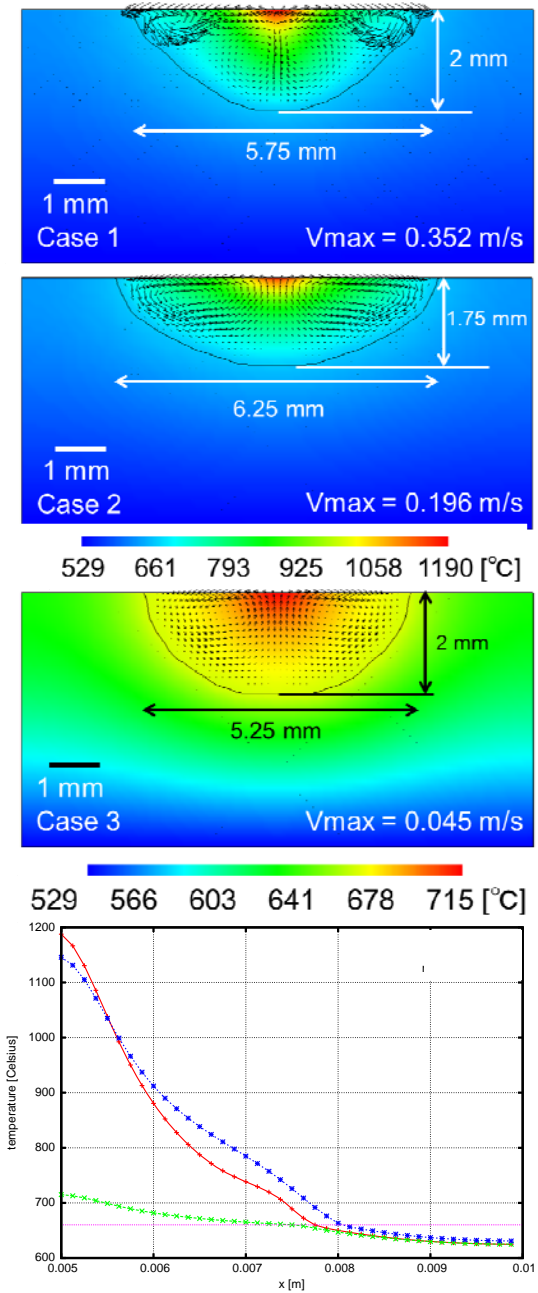


図2 実験結果との比較

まず、実験結果との比較検討結果について述べる。図2は大型放射光施設 SPring-8 で実施されたレーザー溶接時の溶融池内対流場その場観察結果と計算結果である。実験結果（上3枚）において、トレーサー粒子が照射点近傍から固液界面へ向かって加工しながら渦を巻くようにして流れている観察結果に対し、本コードによる計算結果においても同様な結果を得ることができた。これにより、

本数値計算コードは、レーザー溶接現象における溶融池内対流場を概ね再現できていることが確認された。



赤：case 1, 青：case 2, 緑：case 3
図3 各 case における溶融池形状、流れ場及び温度分布

図3に各 case における溶融池内流動特性と温度分布及び上壁面での1次元横方向温度分布を示す。case 1 と 3 を比較すると、拡散効果が卓越することにより流速が小さくなり対流が溶融池内全体に分布する傾向にある。温度場も同様に熱伝導率が大きくなることにより熱拡散が支配的となり、照射点からの温度勾配が緩やかになることで、Marangoni 対流の駆動力である温度差が緩

やかになり、対流の流速は弱まる。これに伴い、case 1 に比べ Reynolds 数は 29 にまで低下し完全な層流状態になった。case 2 では粘性係数のみ 10 倍の値を加え、粘性係数のみ水と同程度の値とした。粘性係数が case 1 に比べて大きくなるので対流場は比較的滑らかになる。Reynolds 数は 153 でほぼ層流状態となっている。また、流れ場のみが散逸されるため、case 1 で見られるマランゴニ効果による接線方向の流れとの逆向きの流れが消滅し、照射点から固液界面への流れが卓越する。従って、照射点近傍の高温流体が case 1 に比べて多く輸送されるために高温領域が左右に大きく広がるため溶融池の幅は case 1 に比べて大きくなる結果となった。

次に、凝固終了時の各 case の母材全体の温度分布及び、界面直下の x 方向度分布である。図 4 の温度分布から、凝固終了後においても溶融池形状の違いが反映されていることが分かる。図 4 の一次元温度分布図より、熱伝導率が最も大きい case 3 が各 case 中で最も x 方向に対して滑らかで高い温度分布であることが分かる。これは熱伝導率が他の case に比べて大きいため、高い温度を保持したまま比較的早く凝固点に達したためであると言える。Case 2 では、熱伝導率は case 1 と等しいが計算領域境界付近に近づくにつれて case 1 よりも温度が高くなっていることが確認出来る。これは、図 3 の溶融中の対流場によって左右に高温流体が輸送された結果凝固後においても高温部分が拡大された結果である。

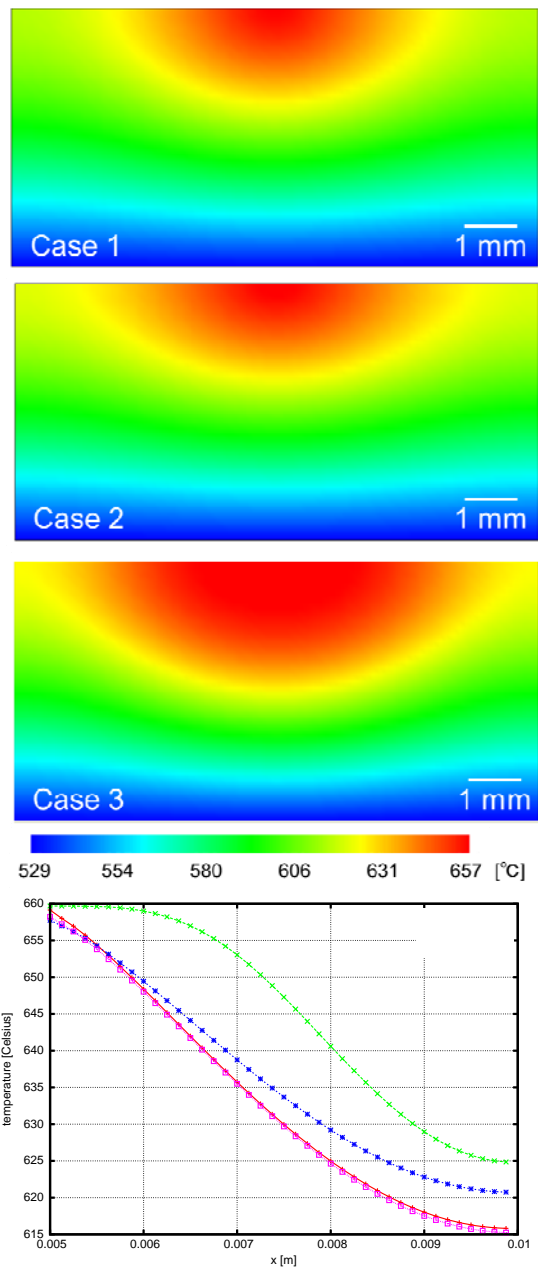
以上のように、残留応力に大きな影響を及ぼす凝固後の温度分布は、従来の溶接シミュレーションでは考慮されていなかった溶融池内対流場が大きく寄与していることが明らかになり、残留応力の適切な制御に対して溶融池内対流の制御が極めて重要であり、溶接数値計算においても、溶融池内対流場が乱流域に遷移する場合などに関しては、その適切なモデリングも非常に重要である事が明らかになった。今後は、溶融池内対流を考慮するレーザー入熱から残留応力生成までの一貫したシミュレーションコードの構築と溶融池内の流動場の詳細を明らかにするための大規模計算が必要になると考えられる。また、その大規模計算の結果を基にした乱流モデリング研究も一つの重要な研究テーマになり得ることが示唆される。

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 3 件)

① S. Yamashita, T. Yamada, Y. Yonemoto, T. Kunugi and T. Muramatsu,



赤 : case 1, 青 : case 2, 緑 : case 3
図 4 各 case における凝固後の温度分布

“Phenomenological evaluation of laser-irradiated welding processes with a combined use of higher-accuracy experiments and computational science methodologies (5) Numerical simulation of the welding processes with a multi-dimensional multi-physics analysis code SPLICE”, Proc. of ICONE19 (2011).

② S. Yamashita, Y. Yonemoto, T. Yamada, T. Kunugi and T. Muramatsu, “Development of laser welding simulation code with advanced numerical models”, Q. J. Jpn.

Weld. Soc., 29, (2011), 48s-52s.

〔学会発表〕(計11件)

① 山下 晋, 山田 知典, 高瀬 和之, 村松 壽晴, “レーザー溶接補修技術の標準化へ向けた研究開発(9) 溶融池内対流が温度場へ及ぼす影響評価”, 原子力学会 2012 年春の年会, 3月19日-21日, 福井大学文京キャンパス.

② 山下 晋, 山田 知典, 功刀 資彰, 村松 壽晴, “レーザー溶接複合プロセスにおける現象論的評価へ向けた数値シミュレーション”, 第25回数値流体力学シンポジウム, 2011年12月19日-21日, 大阪大学吹田キャンパス.

③ S. Yamashita, T. Yamada, Y. Yonemoto, T. Kunugi and T. Muramatsu, “Phenomenological Evaluation of Laser Welding Processes with a Combined Use of Higher-Accuracy Experiments and Computational Science Methodologies (4) Numerical Simulation of the Welding Processes with a Multi-Dimensional Multi-Physics Analysis code SPLICE”, Intl. Conf. Materials and Reliability, Busan, Korea, Nov.20-22, 2011.

④ 山下 晋, 山田 知典, 村松 壽晴, 高瀬 和之, “レーザー溶接補修技術の標準化に向けた研究開発(7) 残留応力評価に向けた内部応力モデリングの検討”, 日本原子力学会 2011 年秋の大会, 9月20-22日, 北九州市.

⑤ 山下 晋, 山田 知典, 功刀 資彰, 村松 壽晴, “レーザー溶接の現象論的評価へ向けた値シミュレーション”, 混相流学会年会講演会 2011, 8月6日-8日, 京都工芸繊維大学.

⑥ 山下 晋, 山田 知典, 米本 幸弘, 功刀 資彰, 村松 壽晴, “CIP 有限体積法によるレーザー溶接シミュレーションコードの開発”, 計算工学講演会論文集, vol.16 (2011), 5月25日-27日, 東京大学柏キャンパス.

⑦ S. Yamashita, Y. Yonemoto, T. Yamada, T. Kunugi and T. Muramatsu, “Numerical simulation of laser welding processes with CIP finite volume method”, Visual-JW2010, Osaka, Japan, Nov.11-12, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 晋 (YAMASHITA SUSUMU)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・敦賀本部・レーザー共同研究所・博士研究員
研究者番号: 80586272

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし