

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15323

研究課題名（和文）シミュレーション技術とモニタリング技術の融合による品質保証型溶接システムの開発

研究課題名（英文）Development of a quality-assured welding system by fusing the numerical simulation and the in-process monitoring techniques

研究代表者

荻野 陽輔 (Ogino, Yosuke)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30778262

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、数値シミュレーション技術によりガスマタルアーク溶接プロセスにおける熱源・溶込み形成現象についてメカニズムを考察し、プロセス条件と溶接結果ならびにプロセス中に観察される溶融部外観の関係性について明らかにした。また、溶接プロセス中に明瞭に溶融部を観察する手法を構築し、シミュレーション技術によって示されたプロセス中の状況と溶接結果の関係性に基づいたインプロセスモニタリング技術としてまとめた。以上より、溶接プロセス中の現象の物理に基づきプリポストプロセスフリーな「品質保証型溶接システム」に必要な一連の技術の構築を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において構築した数値シミュレーション技術による溶接プロセス中の現象を可視化した結果は世界に先駆けて得られたものであり、これに基づくインプロセスモニタリング技術は世界的にも例のないものである。本研究で構築した技術による品質保証型溶接システムの実用化が達成されれば、ものづくりの高効率・高品質化が大きく進む可能性がある。今後、本研究の根幹を担う数値シミュレーション技術の高度化を達成し現象をより高いレベルで明確化することが、インプロセスモニタリング技術の高度化にも直結するものと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, the heat source and the molten pool phenomena during the gas metal arc welding process are discussed by using numerical simulation. Relationship between the process parameter and the welding results and molten region appearance are investigated. In addition, a method to clearly observe the molten region is constructed, and in-process monitoring technique based on the relationship between the molten region behavior and the welding result shown by simulation results are constructed. Consequently, a series of technique for quality assured welding system without pre-process and post-process is constructed based on the welding phenomena during the process.

研究分野：溶接・接合加工物理学

キーワード：ガスマタルアーク溶接 数値シミュレーション インプロセスモニタリング 電磁熱流体 画像処理

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ものづくりの現場において、材料は切断や接合などといった加工プロセスを経て構造物となり製品となる。ものづくり分野の国際的競争が激しさを増す中、加工プロセスの高品質・高効率化に対する要求が非常に高まっている。本研究では、金属材料を接合する技術のひとつであるガスマタルアーク（GMA: Gas Metal Arc）溶接プロセスを対象とする。溶接施工時には、要求される溶接品質を確保できる最適な溶接条件を試験により決定する。しかしながら、溶接条件の選定は溶接技術者・技能者のノウハウを頼りに試行錯誤的に行われているため、溶接施工前の試験・検査には多くのコストがかかっている。一方で、実際の生産現場においては事前に選定した溶接プロセス条件を用いても種々の外乱の影響により、溶接品質が要求を満たさなくなることがあるため、溶接後には非破壊検査によって溶接品質を確認する。つまり、溶接施工後の試験・検査においても、多くのコストがかかっている。以上のような背景から、本研究では、高品質・高効率な溶接プロセスを「プリポストプロセスフリーな品質保証型溶接プロセス」と考える。これを達成するためには、科学的な観点から溶接現象を解明し、ノウハウに頼らず溶接条件を決定すること、加えて、インプロセスで想定通りの溶接が実施されているかモニタリングし、溶接品質に影響を及ぼすような外乱・異常を検知、溶接後品質を可視化することが必要である。

本研究では、現象解明の手段として数値シミュレーション技術に注目する。近年では、電極ワイヤ・アークプラズマ・母材の相互作用を考慮した熱源モデルが報告されつつある。しかしながら、溶接条件から熱源特性・溶込み形成現象を一貫して捉えるものは現状において報告されておらず、溶接熱源の特性、ひいては溶接条件と溶込み形成現象の関係性は明確になっていない。他方、溶接後の品質をインプロセスで可視化する手法として、視覚センサによって溶融池近傍の画像をモニタリングし、溶融池形状や溶融池輝度などの特徴を分析し、品質を可視化する手法に注目する。この手法においてキーポイントとなるのは、溶接品質と関係性の深い画像特徴量を選定し、これを高い精度で抽出することであるが、現状においてはこの画像特徴量を試行錯誤的に選定しており、インプロセスで得られる溶融池画像と溶接後の品質の関係性は明確にはなっていない。

2. 研究の目的

本研究においては数値シミュレーション技術により、溶接プロセス中の熱源や溶融池現象のメカニズムを明らかにし、溶接プロセス条件と溶接結果の関係性を明らかにし、溶接結果を予測する技術を確立する。加えて、溶接品質に影響を及ぼす外乱・異常を視覚センサによりインプロセスで検知・モニタリングし、溶接後の品質を可視化する。これらの技術を融合し、溶接前後の試験・検査を低減した品質保証型溶接システムとしてまとめ提示することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

申請者が独自に開発している数値シミュレーションモデル（溶接熱源モデル・溶融池モデル）を用いて、GMA 溶接プロセスにおけるアークプラズマならびに金属材料の溶融・流動・変形・凝固のダイナミックな挙動を記述する。これらを用いて溶接熱源から溶込み形成までの一貫したシミュレーションを行い、溶接条件と溶込み形成現象の関係性を明確化する。また、視覚センサによるモニタリングにおいて直接得られる情報は溶融池表面の情報に限られるが、溶融池表面情報と内部挙動の関係性について溶融池モデルを活用して考察することで、溶接物理に基づいて視覚センサによって捉えるべき溶融池表面情報を明確化する。その結果に基づいて、モニタリング指針を策定し、溶接プロセスにおける外乱の検知、溶接後の品質のインプロセスでの可視化について検討する。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーション技術

本研究においては、広範な溶接現象に対して適用可能であるアークプラズマと電極ワイヤを連成して計算する 3 次元電磁熱流体シミュレーションモデルを構築した。図 1 にそのシミュレーション結果の一例を示すが、これまで可視化することのできなかった非対称的で不安定な溶融電極ワイヤ（溶滴）およびアークプラズマの現象もシミュレートすることが可能である。ここでは、不安定な溶滴の離脱に伴う小滴（スパッタ）の発生をシミュレートしたものを示しているが、この時の溶滴内部における速度分布を可視化すると、くびれ部分における速度が非常に大きくなっており、これはくびれ部に集中した電流に起因する電磁気力の作用によるものであるといえる。このようにして、構築したシミュレーションモデルによって、不安定な溶滴移行現象も含めた GMA 溶接プロセス中の現象のメカニズムについて可視化することが可能となった。加えて、熱源モデルと溶融池モデルの統合化についても検討し、溶接熱源特性が溶込みの形成に及ぼす影響について詳細に検討した。その結果、アークプラズマの特性は溶込みの幅に対して強く影響を及ぼしており、一方で溶滴の特性は溶込みの深さに対して強く影響を及ぼしていることが

明確になった。すなわち、アークプラズマおよび溶滴のいずれの特性も適切に把握しコントロールすることが所望の溶込み形状ひいては溶接品質を得るために重要であるといえ、これらを同時にシミュレートする申請者が構築した熱源モデルは、溶込み形成メカニズムを解明し結果を予測することを達成するうえでも有益であるといえる。熱源モデルと溶融池モデルを融合して得られたシミュレーション結果は、実験結果とよく一致しており、溶接結果の予測が可能であるといえる。結果に強く影響を及ぼすアークプラズマや溶滴の特性は溶接プロセスに用いる電流波形の影響を強く受けていることも明確になった。

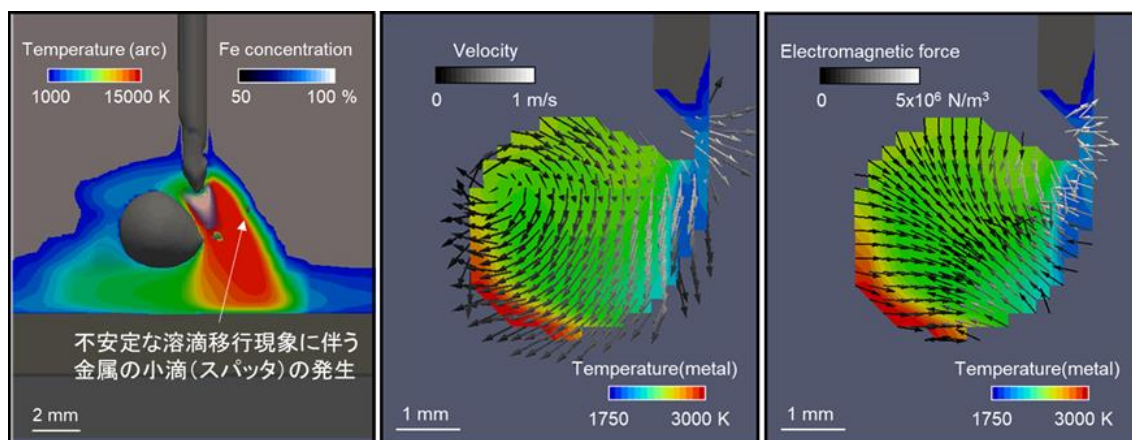


図1 3次元熱源モデルによるシミュレーション結果

(左：アークプラズマ温度分布およびスパッタの発生現象、

中：溶滴離脱直前の溶滴内部速度分布、右：溶滴離脱直前の溶滴内部電磁気力分布)

(2) インプロセスモニタリング技術

視覚センサを用いたインプロセスモニタリング技術の開発に関しては、モニタリングに用いる光学フィルタの選定など、モニタリング条件の選定を行い、明瞭に溶融池の形状などといった情報をモニタリングすることが可能となった。また、画像処理プログラムの開発により、溶融池形状の特徴量を取得することが可能となった。図2に示しているのは、インプロセスモニタリングの一例として、重ねすみ肉溶接時の溶融池形状の撮影結果より画像処理によって溶融池形状を取得したものである。重ねすみ肉溶接においては、ギャップの変動や狙い位置のずれといった外乱が溶込み形状に対して強く影響を及ぼす。ここでは、溶融池形状の特徴量として溶融池後方の左右領域において外接する長方形に対して溶融池領域が占める割合を特徴量とすることで、外乱の検知および溶込み形状を可視化できることが明らかとなった。

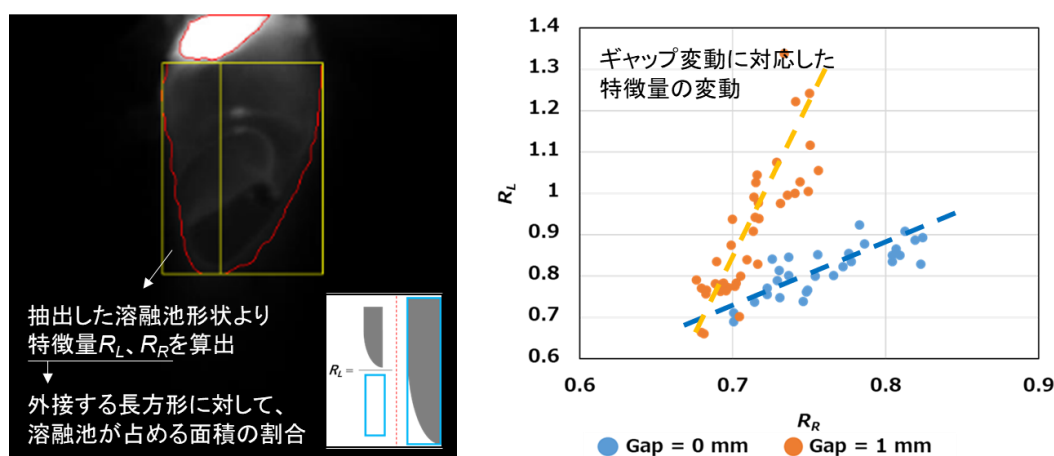


図2 重ねすみ肉溶接における溶融池形状モニタリングおよび特徴量抽出とギャップ変動の検知

(3) 数値シミュレーション技術とインプロセスモニタリング技術の融合

(1) および (2) のシミュレーション技術とインプロセスモニタリング技術をT字すみ肉溶接プロセスに適用し、これらを融合した検討を実施した。図3に示しているのは、溶込みシミュ

レーション結果と溶融池外観および溶込み形状を比較したものである。溶融池表面の外観形状や表面の流動分布、溶接後の溶込み断面形状を本研究で開発したシミュレーション技術により再現できている。図4に示しているのは、シミュレーション技術により溶融池内部の現象を可視化したものである。溶融池内部に溶込みの深さは狙い位置の直後において最大となっており、溶込みの深さは狙い位置の影響を強く受けるものといえる。トーチより後方においては溶融池後方に向かう流動が生じており、この流動と熱伝導のバランスによって最終凝固部は狙い位置の変動にかかわらずルート直上であることが示された。以上のことから溶込み形状をモニタリングするためには狙い位置の変動を捉えることが有効であり、その基準として狙い位置に関わらず変動しない溶融池後方の最終凝固部を用いることができるといえる。以上のことを踏まえて、画像処理プログラムによって狙い位置のずれを検知したものが図5であり、トーチの位置と溶融池後端部の位置の溶接方向からのずれを角度であらわしている。この特徴量は溶込み形状（溶込み深さ）と良い相関を示していた。

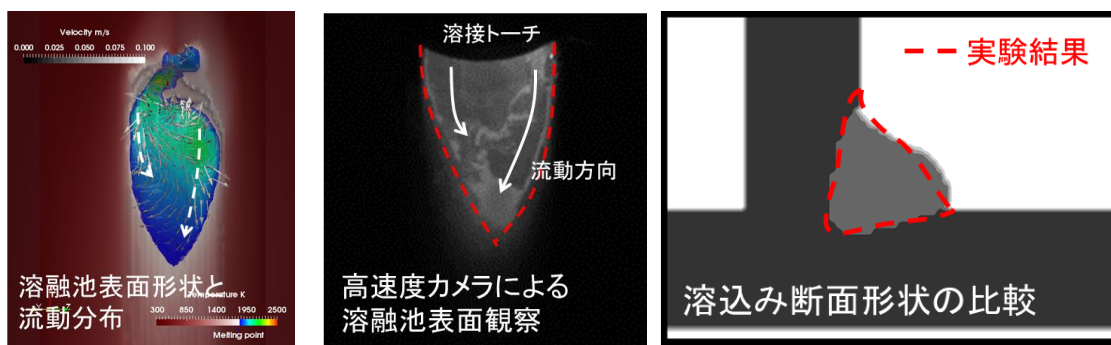


図3 T字すみ肉溶接の溶込み形成シミュレーションと溶融池・溶込み観察結果の比較

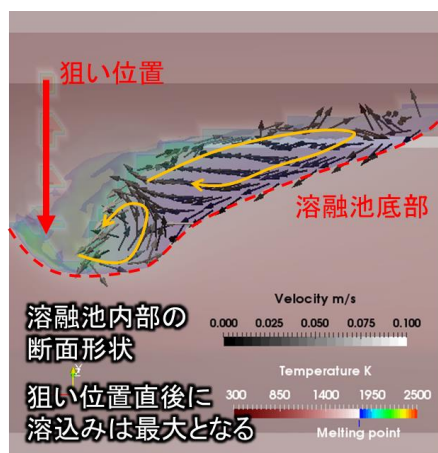


図4 溶融池内部における形状と流動分布

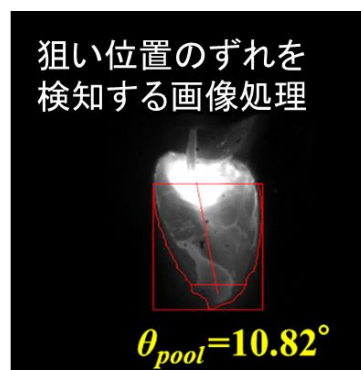


図5 溶融池形状の特徴量抽出結果

(4) まとめ

数値シミュレーション技術により溶接プロセスにおける熱源・溶込み形成現象についてそのメカニズムを考察し、溶接プロセス条件と溶接結果ならびにプロセス中に観察される溶融部外観の関係性について明らかにした。また、溶接プロセス中に明瞭に溶融部を観察する手法を構築し、シミュレーション技術によって示されたプロセス中の状況と溶接結果の関係性に基づいたインプロセスモニタリング技術としてまとめた。以上より、溶接プロセス中の現象の物理に基づいたプリポストプロセスフリーな「品質保証型溶接システム」に必要な一連の技術の構築を達成した。

本研究における数値シミュレーション技術による溶接プロセス中の現象を可視化した結果は世界に先駆けて得られたものであり、これに基づくインプロセスモニタリング技術は世界的にも例のないものとなった。今後、本研究の根幹を担う数値シミュレーション技術の高度化を達成し現象をより高いレベルで明確化することが、インプロセスモニタリング技術の高度化にも直結するものと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 新田 誠也、荻野 陽輔、浅井 知	4. 巻 38
2. 論文標題 画像センシングによる薄板重ねすみ肉溶接のインプロセス溶接品質モニタリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 溶接学会論文集	6. 最初と最後の頁 114 ~ 124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2207/qjws.38.114	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 Ogino Y., Asai S., Hirata Y.	4. 巻 64
2. 論文標題 Visualization of arc plasma and molten wire behavior in CO2 arc welding process by three-dimensional numerical simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 1789 ~ 1797
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40194-020-00958-4	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 3件）

1. 発表者名 Yosuke Ogino, Seiya Nitta, Satoru Asai, Tomokazu Sano
2. 発表標題 Development of weld quality monitoring technique by using a visual sensor and numerical simulation
3. 学会等名 Joint Intermediate Meeting of IIW Comm. I, IV, XII and SG212（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ogino, S. Asai, Y. Hirata
2. 発表標題 Visualization of arc plasma and molten wire behavior in CO2 arc welding process by three-dimensional numerical simulation
3. 学会等名 72nd Annual Assembly of IIW（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荻野陽輔, 竹内大貴, 浅井知
2. 発表標題 初層片面裏波溶接における溶融池挙動とその裏波品質モニタリング
3. 学会等名 溶接学会2019年度秋季全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Ogino, Satoru Asai, Tomokazu Sano
2. 発表標題 Numerical simulation of the pulsed-MAG welding process from the heat source properties to the weld pool formation
3. 学会等名 74th Annual Assembly of IIW (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻野陽輔, 浅井知, 佐野智一
2. 発表標題 パルスマグ溶接プロセスの熱源および溶込み形成シミュレーション
3. 学会等名 スマートプロセス学会2021年度学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻野陽輔
2. 発表標題 ガスマタルアーク溶接のエネルギー源および溶込み形成現象の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本溶接協会電気溶接機部会2021年度溶接技術講演会 (招待講演)
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
---------	---------