

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04677

研究課題名(和文) 被溶接体振動によるガスマタルアーク溶接溶込み形状鍋底化への改善とその機構解明

研究課題名(英文) Penetration Shape Improvement and Investigation of its Mechanism in Workpiece Vibration Assisted Gas Metal Arc Welding

研究代表者

伊藤 和博 (Ito, Kazuhiro)

大阪大学・接合科学研究所・教授

研究者番号：60303856

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)：高効率な溶接であるダンデムガスマタルアーク溶接での溶込み形状が、アーク直下が深い異方的なフィンガー形状から、被溶接体を正弦波振動させることでなべ底型に変化させられることを初めて見出した。その機構を熱力学データを用いた数値流体力学から説明した。特に、マランゴニ対流がこの溶け込み形状に大きな影響を及ぼすことを示唆し、それには最適な振動周波数があること、その最適な振動周波数にて実効入熱が低くなったこと、それにより表面張力の温度依存性の2階微分の変曲点(温度)を溶融池温度の範囲内に存在させたことがこの現象発現の主要因であることを示したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶融池内のマランゴニ対流により、ダンデムガスマタルアーク溶接の特徴であるアーク直下が深い異方的なフィンガー形状の溶け込み形状を、なべ底型に変化させられることを初めて見出したことが、学術的、産業的に大きなインパクトを与えた。解明した機構からも明らかのように、ある特異な条件下で発現する現象であったためこれまで知られていなかったと思われる。特異な条件下であるが、主なポイントはこのような振動が実効入熱を下げられることと、その溶融池温度中に表面張力の温度依存性の2階微分の変曲点が存在することであり、施工のにおいて調整可能である。

研究成果の概要(英文)：It was discovered that a workpiece sine-mode vibration transposed the finger-shape into pan-bottom penetration in tandem-pulsed gas metal arc welding. The competition between the heat distribution beneath the surface and the physical movement caused by the workpiece sine-mode vibration are traced. It is found that applying the vibration extends the heat distribution along the welding direction beneath the weld pool surface, and this trend increases with increasing vibration frequency and effective heat input. In contrast, the heat extending is minimum in the sample without vibration having the highest heat input. This inconsistency can be explained by the physical movement of material in a molten pool due to the workpiece vibration. The vibration also changes the material flow from the surface to the depth in the central rear areas, although it follows an opposite direction in the sample without vibration. Thus, the material flow is vital in improving the penetration shape.

研究分野：接合・溶接

キーワード：ガスマタルアーク溶接 ダンデムトーチ 溶込み形状 被溶接体正弦波振動 溶融池流体計算 マランゴニ対流 実効入熱

1. 研究開始当初の背景

タンデムガスメタルアーク溶接(GMAW)は、シングルトーチと比較して溶着速度が高く非常に効率的な溶接手法である。通常、シールドガスは Ar+CO₂ ガスが用いられ、深くくびれたフィンガー形状と呼ばれる溶け込み形状となる。この溶け込み形状では、ボンド部(溶融部と母材との境界)が湾状となり、湾内部に硬化した熱影響部(HAZ)と軟化したHAZが厚く形成し、溶接金属、HAZ、母材とそれらの機械特性が連続でない不均一部が厚く生じ、応力下ではこの不均一部での塑性変形も不均一になり、表面に出ている部分に割れが発生することが多く、破壊の起点となることが多い。

その溶け込み形状は、溶接手法やシールドガスの種類などで必然的に決まるため、何らかの外場により改善する手法が考えられる。その試み中の一つに溶融池を振動させる手法がある。例えば、電流値制御やトーチ振動、本提案の被溶接体振動を含め種々の手法により溶融池内を振動させることで、溶融池内の物質や熱の流れを制御し、溶接部特性改善が試みられてきた。しかし、組織微細化やブローホール軽減効果は報告されていても、溶け込み形状の改善報告は皆無である。これら試みと異なり、被溶接体を振動させる試みも少ないながら存在する。その中で、このタンデム GMAW の被溶接体にある特定周波数の正弦波振動を付加すると、振動の振幅が 0.5 μ m と小さいながら、溶け込み形状がフィンガー形状から鍋底形状にと、ミリメートル単位のマクロな大きさに劇的に変化する振動周波数があることを偶然発見した。他の振動支援 GMAW ではこのような変化は報告されていない。これは、被溶接体の振動と溶融池の振動との共鳴で起こっているのかと考え、当然、溶融池体積を変えるなどすれば、溶け込み形状が鍋底形状になる被溶接体振動周波数も変わると考え、トーチをシングルに変更や溶接条件を変えるなどの実験と溶融池内の熱や物質移動の再現シミュレーションにより振動周波数が与える影響を理解しようとしていた。

その試みの中で、特にシミュレーションでは、市販 Flow3D ソフトを使用するが、アークが安定する時間まで計算できるようにこのシミュレーションに特化したワークステーションも独自に構築し、特に表面表力の温度依存性を独自に組み込んだサブルーチンにて入力する仕様に改善した。これにより、それまでの関連報告のように短い計算時間でなくアーク溶接が安定する時間まで計算でき、電子ビーム溶接やレーザ溶接のような入熱効率を使わずに GMAW の一般的な入熱効率でもフィンガー形状の溶け込みが得られるシミュレーションを出来る環境を整備した。この環境にて、マランゴニ効果が溶融池内の対流に与える影響が大きい溶融池温度となる溶接条件で実験している時に、被溶接体のサブミクロンな振幅の被溶接体正弦波振動によりマクロな溶け込み形状がフィンガー形状から鍋底形状に変化することを再現でき、このような機構にて変化が起こっていると確信した。

本研究では、このような背景の下、溶け込みを鍋底形状にする正弦波振動に最適周波数範囲があることを理解するべく種々の振動数での振動下タンデム GMAW を再現し、溶融池内での熱および物質の移動、またボンド直下の HAZ の溶接時の温度履歴などの計算結果を取得し、それらを解析することで、この溶け込み形状を変化させる振動支援 GMAW の現象理解を目的とした。

2. 研究の目的

被溶接体の正弦波振動にてマクロな溶け込み形状を化させられたのは、振動により実効入熱が低くなった(実験事実)ことと、それにより表面張力の温度依存性の 2 階微分の変曲点(温度)を溶融池温度の範囲内に存在させたことでマランゴニ対流による溶融池内の物質と熱の流動がアーク直下方向のみに集中することなく、止端方向や一度アークより後ろに流れた後に前に戻ってくる対流などのバランスによる(シミュレーションからの示唆)と考えられることを、これまでに示せた。

本研究では、このシミュレーションを他の周波数に拡張して、振動周波数がマクロな溶け込み形状の変化に与える影響を明らかにすることを主な目的とした。

その他に、タンデムトーチ位置やその位置と溶接方向を変えると、この被溶接体振動が溶け込み形状に与える影響が変わると予想され、それら条件での溶け込み形状の周波数依存性を調べることがサブの目的とした。

3. 研究の方法

・正弦波振動の周波数依存性

タンデム GMAW の再現シミュレーションを、複数周波数、50、250、450 Hz にて行い、得られた結果より溶融池内での熱と物質の流動を解析する。各振動周波数下では、周波数が増加すると振動変位と最大速度は減少し、周波数と最大速度の振動変位に対する増減は逆の傾向を示す。Flow3D ソフトを用いた再現シミュレーションでは、これら物理的な振動と、実効入熱に与える影響からマランゴニ対流の影響が変わる影響を再現する。

・タンデムトーチ配置と溶接方向との関係が与える影響

タンデムトーチ配置と溶接方向に対して平行と垂直、振動方向も溶接方向に対して平行と垂直とした計 4 つの組合せにて、溶け込み形状の振動数依存性を観察した。

4. 研究成果

まず、振動変位と最大速度の周波数依存性を図 1(a) に示す。周波数が 50Hz の時はどちらも大きい値を示したが、周波数が増加すると減少し、周波数と最大速度の振動変位に対する増減は逆の傾向を示した。また、各周波数を被溶接体に付与したことにより溶接電流の実効値も変化した。図 1(b) に示すように、バックグラウンド(最小)電流値、最大電流値のそれぞれの平均値は周波数の増加にほぼ比例して増加した。ただ、振動無し時の実効電流値は、振動ありの時と比較して高い値を示した。溶け込み形状をマクロに変化させる周波数域では、被溶接体を振動させると振動無しの時と比較して実効入熱が減少した。

図 2 に再現シミュレーションで得られた溶融池表層の温度分布の溶接時間依存性を示す。まず、温度の高い緑から赤の範囲は周波数が高くなるに伴い増加し、振動無しでの溶接では最も大きかった。さらに、被溶接体を振動させると温度の高い範囲は溶接方向に引き伸ばされるように変化していた。振動が無い溶接では、タンデムトーチの後ろ側のトーチからの溶滴が溶融池へ移行する場所(図中央)から後方の溶融池では温度の高い部分が溶接方向に平行に後方へ広がらないことも明らかとなり、溶融池の広がりとその温度分布にて被溶接体振動有無により顕著な違いが生じた一因と理解できる。その溶融池後方の変化は周波数の増加に伴い、より顕著となり、その範囲は溶接方向に長く、溶接方向と垂直な方向では短くなる傾向が見られた。振動変位や最大速度が最も大きい 50Hz ではなく、最も小さい 450Hz で振動の影響が最も大きかった。

この影響を、溶接方向に平行な断面での温度分布と物質流動の周波数依存性としてみた結果を図 3 に示す。溶融池表層の温度の高い赤い領域は後方トーチからの溶滴移行より後方に広がるのが周波数の増加により顕著になっているのが確認できる。それより前方では、前方トーチからの溶滴移行もあり、温度分布や物質流動に少々の違いはあるが大きな変化は見られなかった。振動の有無による大きな違いは、後方トーチからの溶滴移行より後方の溶融池での物質流動である。振動有り試料では、溶融池表層より後方トーチ位置の溶融池底に向かう右斜め下方向の流動が見られるのに対し、振動無し試料では溶融池底から表層へ向かう流動となり、劇的に変化した。

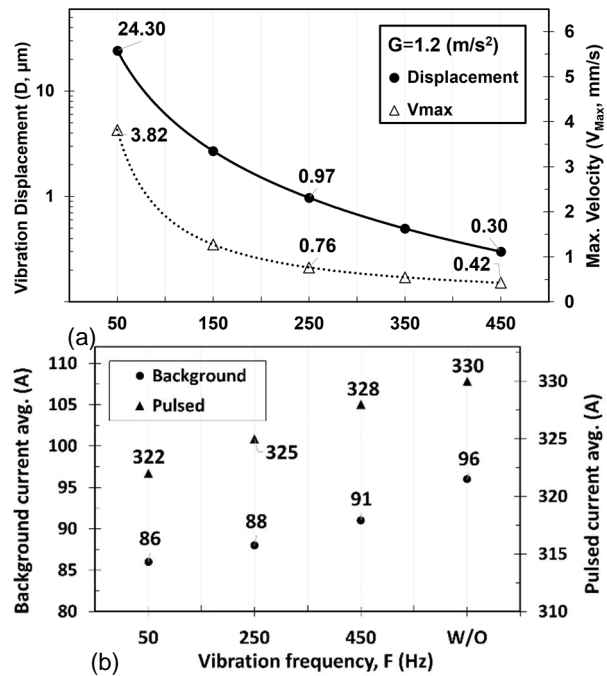


図 1 (a)振動変位と最大速度の, (b)パルス溶接電流の最大値と最小値の平均値の周波数依存性。

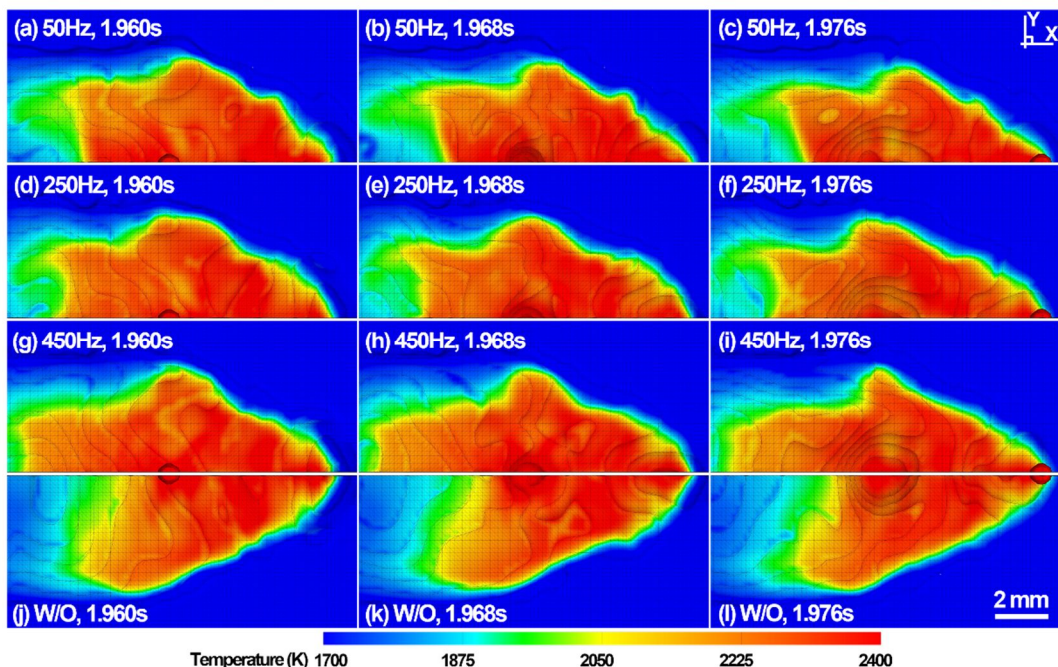


図 2 (a)-(c)50 Hz, (d)-(f)250 Hz, (g)-(i)450 Hz, (j)-(l)振動無しで再現計算した溶融池表層の温度分布の溶接時間依存性。

てしまった。その結果が、溶融池底である白い境界線の最も底部分の長さは振動有り試料が振動無し試料と比較して広がった。この長さは振動数の増加に従い単調に増加するのではなく、250Hzで最も短くなっているようである。これら溶融池内での物質の流動が表層での温度分布の違いももたらしていると考えられる。更に、後方溶融池表層において、振動有り試料では前方溶融池表層から物質を供給されているのに対し、振動無し試料では溶融池底から物質を供給され、異なる物質移動機構になっていると考えられる。この機構変化が溶接止端部への物質流動と、後方溶融池への物質流動とのバランスとなり、溶け込みをフィンガー形状から鍋底形状へ変える物質流動になっていると考えられる。

それでは、これら温度分布と物質流動が溶け込み形状にどのような影響を及ぼしたか特定時間(計算時間 1.96s)での、後方トーチ位置から後方へ順に移動した地点(43.43mm, 41.78mm, 39.08mm)の断面での温度分布と物質流動を、それら位置での固液境界を各地点の色にて重ね合わせて記載、最後に実際得られた溶接ビード断面の光顕像を図4に示す。後方トーチに近い位置(43.43mm)では、トーチ直下と表層での物質流動によりフィンガー形状の溶け込みとなっている。しかしながら、振動あり試料では、後方トーチ直下の溶融池底と止端部付近に物質流動の渦が形成され、それら渦が母材を溶解してフィンガー形状の湾曲部をなだらかに変化させている。後方トーチ直下の溶融が収まり凝固が進んで固液界面が表層へ上昇してくるが振動有り試料ではそれが振動無し試料と比較して遅くなり、かつ止端部表層の温度低下や物質流動の収まりも遅いようである。各位置での固液境界、液表面を重ねあわせたものが図4(d),(i),(n),(s)となる。振動無し試料では、後方トーチ直下と止端部下方向に局所的に溶融池が深くなる一方、振動あり試料では止端部下方向での溶融池の広がりが無く、湾曲部がなくなる方向に溶融池が成長しているように見える。ここで得られた再現シミュレーションの結果は、溶接ビードの断面実験時の溶け込み形状と良く一致していた。

最後に、この被溶接体振動が、実効入熱、溶融池形状(温度分布と物質流動)に変化を与え、それが溶接部下側のHAZにどのような影響を及ぼしたかを明らかにするために、2つの位置(Probe A, B)での再現シミュレーション中の温度変化をモニターした結果を図5に示す。実効入熱は振

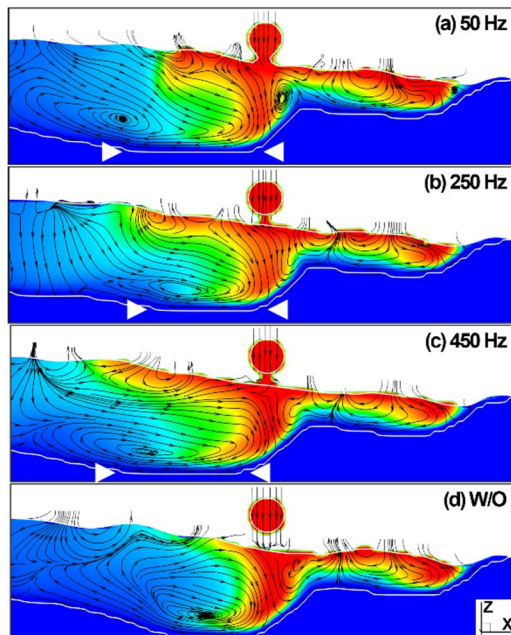


図3 溶接方向に平行な断面での被溶接体振動有無による溶融池内の温度分布と物質流動の周波数依存性。

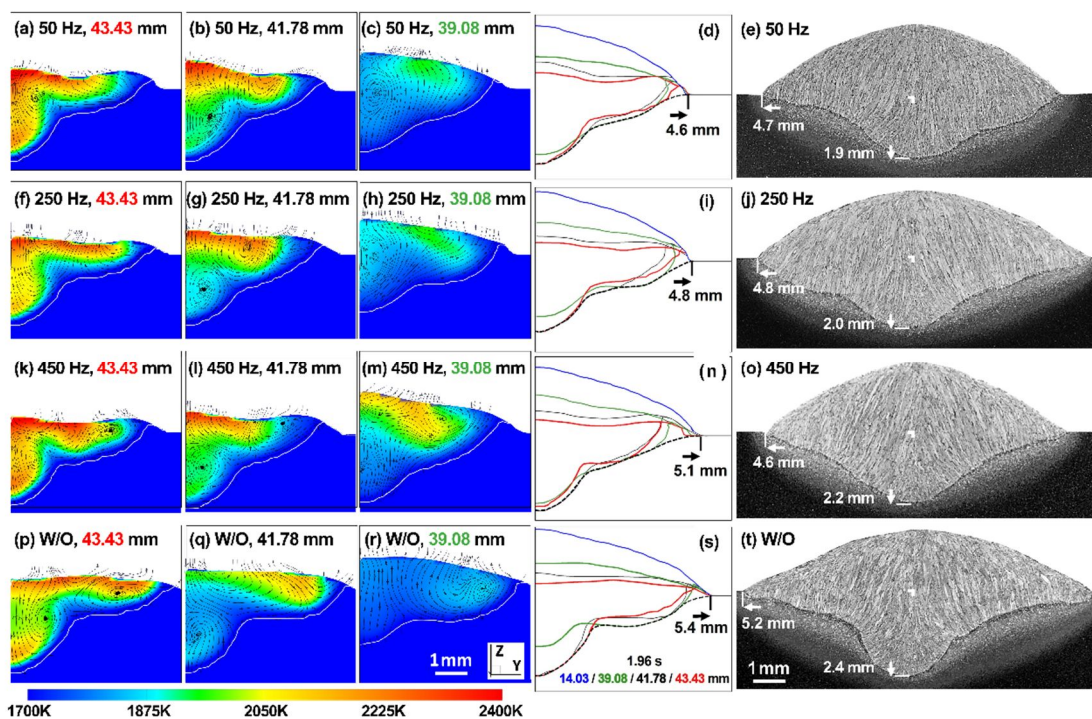


図4 (a)-(c),(f)-(h),(k)-(m),(p)-(r)各特定位置断面での温度分布と物質流動。(d),(i),(n),(s)各振動周波数および振動無しで計算時間1.96s時の各特定位置での固液界面。(e),(j),(o),(t)各振動周波数および振動無しの溶接後試料断面の光顕像。

動周波数が増加するに伴い増加し、振動無し試料で最も大きかった。しかしながら、図5をみると、温度モニターの Probe 位置によらず、各周波数および振動無し試料での温度変化はほぼ同様であった。特に、250Hz 振動では他のどの試料より溶接時間の最初から最後まで温度が最も低くなっていた。溶け込みが鍋底形状に最も近いのは 250Hz と考えられたが、この結果より溶融池の温度分布と物質流動を総合的に考慮して、HAZ 位置にて入熱の最も低い溶接と、溶け込みが鍋底形状に最も近い溶接が同じであるという結論に至った。

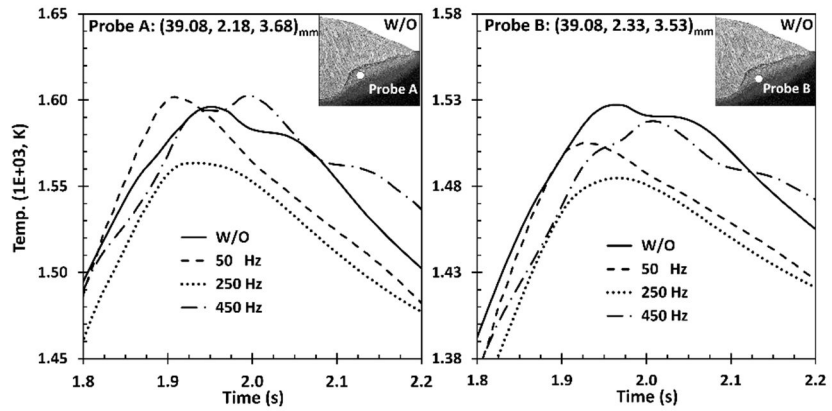


図 5 被溶接体振動有り(50, 250, 450 Hz)と無し試料の溶接再現シミュレーション中の Probe A, B 位置における温度の時間変化。

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 0件）

1. 著者名 Hamed Zargari Habib, Ito Kazuhiro, Sharma Abhay	4. 巻 129
2. 論文標題 Effect of workpiece vibration frequency on heat distribution and material flow in the molten pool in tandem-pulsed gas metal arc welding	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 2507-2522
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00170-023-12424-8	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤 和博
2. 発表標題 溶融池の温度分布と溶湯流動に及ぼす被溶接体振動の影響
3. 学会等名 日本金属学会
4. 発表年 2023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			
イラン	Sahand University of Technology			
ベルギー	KU Leuven			