

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04107

研究課題名(和文) 外部磁場を用いた高品質・高効率GMA溶接の研究

研究課題名(英文) Study on high quality and high efficiency GMA welding utilizing external magnetic field

研究代表者

松田 昇一 (Matsuda, Shoichi)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：90390567

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)：ガスマタルアーク(GMA)溶接は高効率な溶接法であるが、溶接ワイヤが熱源(電極)を兼ねていることから、熱源が時間的・空間的に変動し、アークが不安定である。そのためハンピングビード等の溶接欠陥が生じやすい。本研究では磁場の付加により、アークや溶融池内に生じる電磁力を用いて、アークを安定させることで溶接欠陥の低減を試みた。

その結果、磁場を付加してもアークは溶接方向前後または回転するように変動するが、極端なアークの偏向は抑制され、溶接欠陥は減少した。なお高周波の交流磁場を付加した場合、さらにアークや溶融池の振動が抑制され、適用範囲が狭いが深い溶け込みを保ちつつ、溶接欠陥の少ない溶接が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガスマタルアーク(GMA)溶接は、入熱が大きく高効率な溶接法であるが熱源が変動するためアークが不安定で溶接欠陥が生じやすい欠点がある。これまでに、アークを安定させるために、一般的には溶接電流のパルス化や特殊なワイヤや混合ガス等が使われているが、どれも高価であるため、使用範囲が限られていた。

本研究では磁場の付加により、アークや溶融池内に生じる電磁力を用いてアークや溶融池流れを安定化することにより溶接欠陥の低減を試みた。その結果、高周波の交流磁場をGMA溶接に付加した場合、極端なアークの偏向や溶接欠陥が大幅に抑制され、まだ適用範囲が狭いが高い溶接効率を保ちつつ、溶接欠陥の少ない溶接が可能になった。

研究成果の概要(英文)：Gas metal arc (GMA) welding is a highly efficient welding method, but since the welding wire also serves as an electrode (heat source), the heat source fluctuates temporally and spatially, so the arc is unstable. Therefore, it has the disadvantage that welding defects such as humping beads are likely to occur.

In this study, we tried to reduce welding defects by stabilizing the arc and molten metal flow by using the electromagnetic force generated in the arc and the molten pool by adding an external magnetic field.

Even when a DC magnetic field was applied to GMA welding, the arc fluctuated back and forth in the welding direction, but extreme arc deflection and welding defects were suppressed. Furthermore, when a high-frequency AC magnetic field was applied to GMA welding, the fluctuation of arc and molten pool was further suppressed, and although the range of application was still narrow, welding with few welding defects has become possible while maintaining a high welding efficiency.

研究分野：熱工学、材料加工

キーワード：ガスマタルアーク溶接 外部磁場 電磁力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) アーク溶接は施工の利便性等から、製造分野で広く利用されている接合法である。その中でも被覆アーク溶接は簡便な機器で比較的信頼度の高い溶接が手軽に行えることから最も広く利用されているアーク溶接法であるが、溶接の出来栄が溶接作業者の技量に大きく左右されることと、溶着速度が遅い欠点がある。そのため近年、比較的大電流を通電することができ、溶着速度が速く、溶込みが深い高効率な溶接法である、マグ溶接や炭酸ガス溶接などのガスマタルアーク (GMA) 溶接の適用比率が増加している。しかしながら GMA 溶接は、溶接ワイヤが電極を兼ねており、電極が溶融することから、熱源が時間的・空間的に変動し、アークが不安定になる。そのためスパッタが発生しやすくなり、溶接欠陥が生じやすい。特に溶接電流が大きく溶接速度が速い場合は、アンダーカットやハンピングビード等の溶接欠陥が発生しやすくなる。また磁気吹き現象が生じやすくなりアークが乱れる場合がある。なお、これらの欠点は、溶接電源のパルス化や適正な溶接条件の設定、ワイヤ等の選定およびアース位置の検討により軽減されるが、大幅にコストが増大し、また実際の施工現場では対処が難しい場合がある。特に、近年問題となっている老朽化した大型構造物の補修溶接では、磁気吹きが起きやすい端部の溶接や板厚違いの溶接、すみ肉溶接が必要となる。そのため現場での溶接の品質および効率は溶接技術者の技能に大きく依存する。

本研究では、外部磁場を GMA 溶接に付加することにより、アークおよび溶融池内に生じる電磁力を用いて、アークの挙動および溶融池の流れの制御し、溶接欠陥の低減を試みた。

このように磁場を付加することにより、GMA 溶接の欠点である溶接欠陥の低減ができれば、産業的に大きな価値があると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、ガスマタルアーク (GMA) 溶接に外部磁場を付加する高効率新溶接法の研究である。GMA 溶接法は、一般的な被覆アーク溶接や TIG 溶接と比較して、溶接 (溶着) 速度が 5 倍～10 倍、溶接電流は 2 倍～3 倍の高効率な溶接法である。しかしながら、GMA 溶接は溶接ワイヤが電極 (熱源) を兼ねていることから、熱源が時間的・空間的に変動する。そのためアークが不安定で、スパッタが発生しやすくなり、ハンピングビード等の溶接欠陥が生じやすくなる。これまで一般的に、アークを安定させるために溶接電流のパルス化、特殊な溶接ワイヤおよびシールドガスとして特殊な混合ガス等が使われているが、どれも高価でコストが大幅に増加するため、使用範囲が限られていた。

本研究の主目的は、比較的安価で比較的簡単に取り付けることが出来る、外部磁場 (電磁石) による GMA 溶接の溶接欠陥の低減である。GMA 溶接に外部磁場を付加した場合、アークおよび溶融池内にはフレミングの法則に基づき電磁力が生じる。この電磁力によりアークの挙動および溶融池の流れの制御ができれば、高効率な溶接を保ちつつ溶接欠陥の大幅な低減が期待できる。また、本研究では溶接施工現場で初心または中堅溶接技術者でも簡単に使用できる、磁石を用いた新たな高効率・高品質溶接法の実用化を目指す。

3. 研究の方法

(1) 令和元年度は、初めに既存の装置の一部を改良した。既存の装置とは、ティグ(TIG)溶接に磁場を付加する電磁石を取り付けた装置であり、TIG トーチ固定治具を GMA 用トーチが固定できるように改造した。なお、前述したように GMA 溶接は、溶接ワイヤが電極を兼ねていることから熱源が時間的・空間的に変動し、溶接が不安定になる。これを抑制 (制御) するために、一般的には、交流が使える高価な溶接電源や特殊なワイヤまたは特殊なシールドガスが用いられる。しかしながら我々は、外部磁場による溶接欠陥の低減効果を明らかにするために、溶接電源として比較的安価な直流電源とし、またシールドガスには一般的に良く用いられ、比較的安価なアルゴンガス、溶接ワイヤには一般的なステンレス用のソリッドワイヤ (JISYS308) を使用した。溶接電源を直流とした場合、アークは大きく変動し、溶込みが浅くなり、多くのスパッタやハンピングビード等の溶接欠陥が発生する。そのような条件下において、初めに外部からアークおよび溶融池に直流磁場を付加した。その結果、アークの変動と溶融池の急激な流動の変化を一部抑制できたが、限定的であり、任意に制御することは出来なかった。その成果の一部は令和 2 年の溶接学会秋季全国大会にて発表した。これらの実験において磁場の効果が限定的であったのは、これまで磁場を付与していた TIG 溶接と比較して GMA 溶接の溶接速度が 5 倍～10 倍程度大きいためと考えられる。既存の実験装置では磁場を付与し溶接が安定するまで少々時間を要するが、溶接速度が速いため、実際に磁場を付与できる区間が短くなり、磁場を適正に調整するのが難しかった。

(2) 1 年目 (令和元年度) の実験結果では、磁場の付与によるアーク振動の抑制効果は限定的であった。適正な磁場を付加することによりさらなる改善およびその適用範囲の拡大が期待できるが、既存の装置では溶接区間が短く、磁場を調整する時間が限られていた。そこで 2 年目 (令和 2 年度) は、溶接区間が従来と比較して約 1.5 倍になるように実験装置を大幅に改修した (移動台車および試験片固定治具)。なお急激に大きな磁場 (磁束密度) を付加した場合、溶接が大きく

乱れ、溶接不可になる場合が生じた。そのため磁場の付与に関しても、付与する磁束密度をスムーズに大きくするようにプログラム化（自動化）した。その装置を用いて直流磁場がアークの挙動に与える影響を詳細に調べた。その結果、磁場によるアークの変動と熔融池の急激な流動の変化を抑制効果の得られる範囲が広がった。なお直流磁場のみでは、急激なアークの偏向や熔融池の流動変化に対応出来ない場合が生じたので、一部交流磁場を付加した。交流磁場を付加した場合でも、アークは溶接方向前後または回転するように時間的・空間的に変動をするが、磁場無しと比較すると大幅にスパッタ等の溶接欠陥を低減することができた。その結果は令和 3 年の溶接学会秋季全国大会にて発表した。

(3) 最終年度(令和 3 年度)は、主に交流磁場を付加した場合のアークおよび熔融池流れの振動の抑制効果を調べた。なお交流磁場にはプラスとマイナスの値が同じ矩形波を基本とし、プラス側にシフトまたはマイナス側にシフトした波形を使用した。またアークの可視化結果よりアークの振動は平均して 10Hz~20Hz 程度であったため、付加する交流の周波数を 10 Hz~100 Hz とした。その結果、アークおよび熔融池の振動を大幅に低減し、本手法の適用範囲が広がった。その結果は令和 4 年の溶接学会秋季全国大会または鉄鋼協会秋季講演大会発表予定である。

4. 研究成果

(1) 外部磁場（直流）がアークおよびビード形状に及ぼす影響

GMA 溶接は高入熱で溶接効率が高い溶接法であるが、溶接ワイヤが電極を兼ねており、電極が熔融することから、熱源が時間的・空間的に変動するため、アークが不安定になり、スパッタが発生しやすく、溶接欠陥が生じやすい。本研究では GMA 溶接に外部磁場を付与し、アーク中および熔融池内に生じる電磁力を用いて、溶接欠陥の低減を試みた。

図 1 に GMA 溶接に磁化コイルを設置した実験装置構成図を示す。実験装置は主にトーチ、2つの磁化コイルおよび母材で構成されている。トーチはプラス極、母材はマイナス極に接続した。なお外部磁場を発生させる 2 つの磁化コイルは、アークの形状変化や熔融池を観測しやすいように母材の下側（トーチの反対側）にビードを跨ぐように設置した（図 1 参照）。これによりアークおよび熔融池に、溶接方向（Y 方向）に対して垂直方向（X 方向）の磁場を付加することができる。付加する直流磁場の磁束密度は $B_x = 1 \text{ mT} \sim 6 \text{ mT}$ である。なおプラスの磁束密度を付加した場合、アークには溶接方向前方への電磁力が生じ、マイナスの場合は後方への電磁力が生じる。その他主な溶接条件は、アーク電流 $I_A = 120 \sim 220 \text{ A}$ 、アーク電圧 $E = 12 \sim 25 \text{ V}$ および溶接速度 $V = 5 \sim 20 \text{ mm/s}$ である。またシールドおよびバックシールドガスはアルゴン、ワイヤは直径 1.2 mm の JISSY308、母材は板厚 3 mm の SUS304 を使用した。

図 2(a)、(b)に磁場を付加していない通常の GMA 溶接のアークおよび熔融池の様子を示す。なお磁場を付加していない場合、アークは不安定で溶接方向前後に大きく変動する。図(a)はアークが溶接方向前方に偏向した場合、図(b)はアークが後方に偏向した瞬間の画像である。また両図共にワイヤ先端の明るい部分が溶滴またはアーク、図の右方向が溶接方向であり、撮影速度は 1,000 fps である。図(a)では、熔融池前方の母材表面に多くの陰極点が見られる。図(b)はアークが僅かに後方に偏向している様子が見られる。図 2(c)は溶滴が成長し熔融池と接触、短絡した様子であり、図 2(d)は短絡後、大量のスパッタが発生した瞬間の画像である。このようにアークが前方に偏向し、溶滴が大きく成長するため、溶滴が熔融池と接触する際に熔融池が大きく乱れ大量のスパッタが発生する。

図 3 に通常の GMA 溶接のビード断面形状を示す、図中上側がアーク側、下側が裏波側を示し、白い箇所が熔融部分を示す。図より本条件の GMA 溶接では、溶込みが裏波側まで到達しておらず、母材表面を僅かに溶かして、ビードが試験片（母材）に載っかっているだけに見える。これはアークおよび熔融池の観測結果から、アークが溶接方向に大きく振動するため、ア

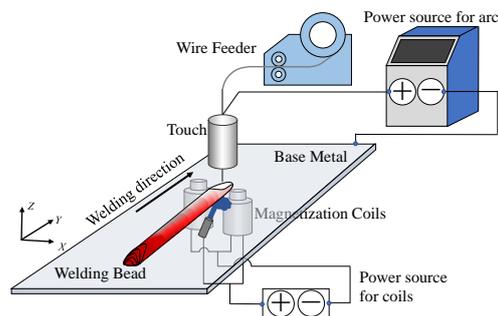
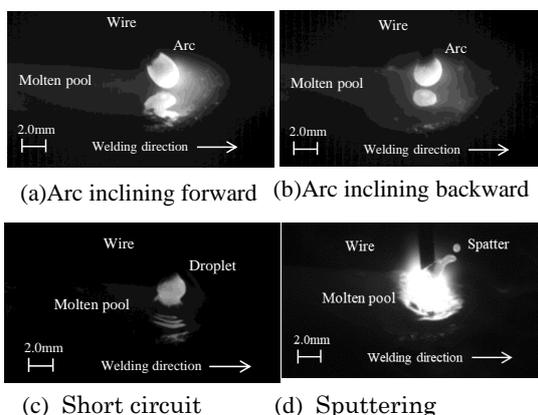


Fig.1 Experimental setup of GMA welding added with magnetization coils.



(a) Arc inclining forward (b) Arc inclining backward
(c) Short circuit (d) Sputtering

Fig.2 Appearance of arc shape and molten pool during GMA welding ($I_A = 135 \text{ A}$, $E = 20 \text{ V}$, $V = 5 \text{ mm/s}$, Frame rate 1,000 fps).

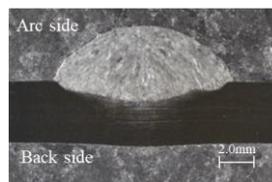


Fig.3 Bead shape ($I_A = 135 \text{ A}$, $E = 20 \text{ V}$, $V = 5 \text{ mm/s}$).

ークから母材への入熱が減少し、溶け込みが極端に浅くなったと考えられる。

図4に $B_x = 2 \text{ mT}$ の直流の磁束密度を付加したときのGMA溶接のビード断面形状を示す。磁束密度を付加した以外は、図3と同じ溶接条件ではあるが、明らかに図4の溶け込みが増加し、裏波側まで到達している様子が見られる。プラスの磁束密度を付加した場合、前述したようにアークは前方への大きく振れる頻度が高くなり、アークは熔融池前縁部または母材に直接照射する。さらに前方に偏向したアークにより形成される前方へのプラズマ気流により熔融池の流れが促進され溶け込みが増加したと考えられる。しかしながら、その溶接は不安定であり溶接ビード全体としては、ハンピングビード等の溶接欠陥が多々見られた。なおマイナスの磁場を付加した場合の溶け込みは、磁場を付加していない図3同程度または溶け込みが逆に浅くなる傾向を示した。マイナスの磁束密度を付加した場合は、アークは後方へ振れる頻度が大きくなり、すでに形成されたビード上にアークが照射されるため、入熱が低下し溶け込みが浅くなったと考えられる。なおアークはすでに形成されたビード上に照射されるため、熔融池の振動は減少し、スパッタ等の溶接欠陥は減少した。

(2) 外部磁場(交流)がアークおよびビード形状に及ぼす影響

直流磁場をGMA溶接に付加した場合の実験結果より、プラスの磁場を付加させたときの方が、溶け込みは深くなるが、溶接が不安定となり、溶接欠陥が発生しやすくなった。そこで溶接欠陥の低減と深い溶け込みを両立させるために、マイナス側にオフセットした交流磁場を用いた。図5(a)、(b)に磁束密度 $B_x = 0 \sim -1 \text{ mT}$ 、磁化周波数 $f = 10 \text{ Hz}$ の交流磁場を付加したGMA溶接のアークおよび熔融池の様子を示す。図(a)ではアークが前方に偏向しており、熔融池前方に多くの陰極点が見られるが、磁場を付加していない場合と比較して、偏向の大きさが小さくなり、陰極点の数も大幅に減少している。図(b)は図(a)の約100/1000秒後のアークの様子であり、アークおよび溶滴はほぼ母材に対して垂直に発生している。図(b)はアークおよび溶滴中に後方への電磁力($B_x = -1 \text{ mT}$, $f = 10 \text{ Hz}$)が発生するタイミングであり、その電磁力によりアークおよび溶滴の極度な前方への偏向が抑制出来たと考えられる。その結果、溶接が安定しスパッタ等の発生量が減少した。図6(a)、(b)に図5と同条件におけるビード断面形状を示す。両図共に、ほぼ左右対称の溶け込み形状であり、その溶け込みは裏波側まで到達している。なお図4の直流磁場を付加したときビード断面と比較すると、その溶け込み量は減少している。直流磁場を付加したときと交流磁場を付加したときのアーク側および裏波側のビード高さを比較した図を図7(a)、(b)に示す。なお測定範囲は磁場付加溶接が十分に安定した後の60mmの区間である。図(a)よりアーク側のビード高さは、直流および交流共に大きな変化は見られない。図(b)の裏波側のビード高さは、交流磁場はほぼ一定の値を示しているが、直流磁場では大きく変化していることが明らかである。これらの結果より、適切な交流磁場を付加することにより、溶け込みを確保しつつ、溶接欠陥の抑制ができることが明らかになった。

なお本研究期間の最終年度(昨年度)には、本手法のさらなる適用拡大を目指し高周波の交流磁場を用いた実験を行った。その結果を現在まとめており、本年度の溶接学会秋季全国大会または鉄鋼協会秋季講演大会発表予定である。

<引用文献>

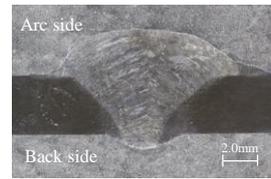
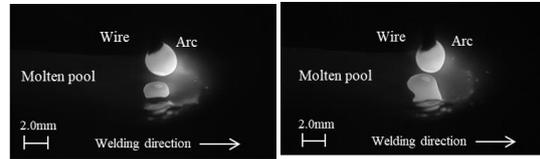
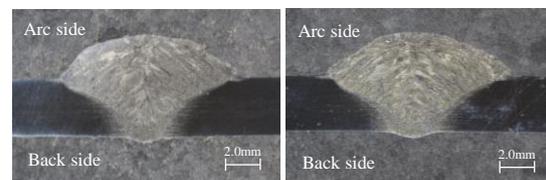


Fig.4 Bead shape (DC $B_x = 2 \text{ mT}$, $I_A = 135 \text{ A}$, $E = 20 \text{ V}$, $V = 5 \text{ mm/s}$).



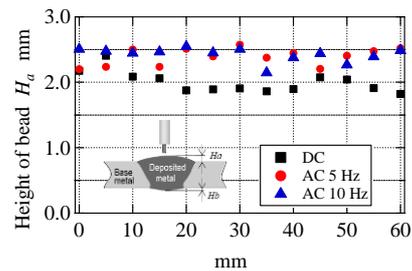
(a) Arc inclining forward (b) Arc inclining backward

Fig.5 Appearance of arc shape and molten pool during GMA welding ($I_A = 135 \text{ A}$, $E = 0 \text{ V}$, $V = 5 \text{ mm/s}$, Frame rate 1,000 fps).

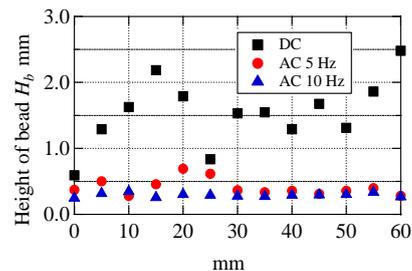


(a) $B_x = 0 \sim -1 \text{ mT}$, $f = 5 \text{ Hz}$ (b) $B_x = 0 \sim -1 \text{ mT}$, $f = 10 \text{ Hz}$

Fig.6 Effect of magnetic field on bead shape ($I_A = 135 \text{ A}$, $E = 20 \text{ V}$, $V = 5 \text{ mm/s}$).



(a) Arc side



(b) Penetration bead

Fig.7 Change of a height of bead.

- ① Y.Manabe, Y.Hiromoto, S.Zenitani, Y.Kobayashi and Y.Watanabe, Basic Concept and Viability of Electromagnetically Controlled Molten Pool Welding Process, WeldingGuide Book by Japan Welding Socirty, 2004, pp.II-194-II-202
- ② 田中学、溶接アーク物理、溶接学会誌、第 87 卷、第 8 号、2018、pp.555-574

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松田昇一、棚原靖、田中学
2. 発表標題 外部磁場を用いた高品質・高効率GMA溶接の研究-外部磁場がアークの形状およびビード形状に及ぼす影響-
3. 学会等名 秋季全国大会（溶接学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田昇一、棚原靖、田中学
2. 発表標題 外部磁場を用いた高品質・高効率GMA溶接の研究 - 交流磁場がアークおよびビード形状に及ぼす影響 -
3. 学会等名 秋季全国大会（溶接学会）
4. 発表年 2021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
---------	---------