

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 18 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420733

研究課題名(和文)非対称交流磁場を用いた溶融池磁気制御アーク溶接法の適用拡大に関する研究

研究課題名(英文)Study of Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process using an Unsymmetrical Alternative 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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ECMP法は、溶融池内に発生させた反重力方向の電磁力により、高入熱、高速条件でも良好な溶接が行えるが、制御パラメータが多く、その適用範囲は限定されている。特に磁場が溶融池の流動および温度分布におよぼす影響は不明な点が多い。

そこで本研究では、磁場等を加えた場合の溶融池表面の流れ場をPIV解析により定量的に解析、温度分布は2色温度計測法で測定し、溶融池表面の流れが温度分布におよぼす影響を明らかにした。また非対称交流磁場を用いたECMP法の有効性を示した。さらに非対称交流磁場による溶融池内の電磁振動により、結晶粒径が小さくなることを示し、本手法が機械的強度の面でも有効であることが示された。

研究成果の概要(英文)：We can conduct a welding with a high-heat input by the ECMP (Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process) method which controls the molten metal flow by using upward electromagnetic forces. However, for the phenomenon of ECMP welding is complicated, the effect of a magnetic field on a molten metal flow and a temperature distribution of a molten pool is still unclear. To solve this problem, the molten metal flow was visualized by using the Pulse Laser (500W). Also, two-color temperature radiometry utilizing a color high-speed camera was used to obtain the surface temperature of the molten metal. As a result, the effect of ECMP parameters on the flow and temperature of molten metal could be recognized. In addition, by the ECMP method using an unsymmetrical alternative magnetic field, it became clear that an averaged grain size becomes small by electromagnetic vibration which generated in a molten pool.

研究分野：熱流体工学、溶接工学

キーワード：アーク溶接 溶融池磁気制御 非対称交流磁場 結晶粒径

1. 研究開始当初の背景

アークを用いた熔融溶接は工業的に最も広く利用されている溶接法であるが、横向・上向および立向の難姿勢溶接では、重力により熔融金属が垂れ下がり、アンダーカットおよび止端形状不良等の形状欠陥が発生し易く、継手品質や溶接能率の低下の原因となっている。

これに対し片面溶接においては、裏当材を使用するなど機械的に熔融金属を保持する方法が実用化されているが適用姿勢や範囲が限定される問題がある。

そこで、我々は熔融池内の電流に外部磁場を付加することにより、熔融池内に反重力方向の電磁力を発生させ、熔融金属の流れとビード形状を制御する「熔融池磁気制御アーク溶接法: Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process」(ECMP 法) の基本概念を提案した。本概念を基に、既に LNG タンクの横向、立向姿勢等の厚板多層溶接等に実用化されており、従来法の 2~3 倍の高溶着速度化を達成している。また一般的な下向姿勢溶接および最も難しいとされている上向姿勢溶接に関しても、適用範囲は狭いものの、反重力方向の電磁力により熔融金属の流動を制御することができ、一定の成果が得られている。しかしながら、特に上向姿勢溶接では、元々本手法の制御パラメータが多いことと、熔融金属がアーク側に垂れ下がりアークによる母材の熔融を阻害する等、上向特有の要素が加わるため、さらに良好な溶接が困難になる。そのため、その適正範囲は極めて狭く、その効果も必ずしも満足のいく結果では無かった。

2. 研究の目的

熔融池磁気制御アーク溶接法 (ECMP 法) は、熔融池内に発生する反重力方向の電磁力により、入熱過大の条件においてもビードの垂れ落ちが抑制され、高速で高品質な溶接が可能である溶接法であるが、制御パラメータが多く溶接現象が複雑なため適正範囲が狭く、その範囲外では溶接が極めて不安定になる場合が生じた。例えば磁場を大きくすると反重力方向の電磁力は増加するが、アークも電流の流れであるため電磁力が発生し、下向姿勢溶接の場合は前方へ、上向姿勢溶接の場合は後方へアークが大きく傾く。そのため、母材への入熱が大幅に減少しハンピングビードも発生しやすくなりため、溶接品質および効率が大幅に低下する。

本研究は、非対称交流磁場を用いた新しい ECMP 法の適用拡大が目的である。非対称交流磁場の場合、周期的に磁場の方向が入れ替わるため、熔融池には上下方向、アークには前後方向への電磁力が周期的に発生する。この周期的に向きを変える電磁力により、熔融金属の垂れ落ちとアークの振れが同時に抑制され溶接効率の向上が期待できる。さらに副次的効果として熔融池内に電磁力振動が

発生するため凝固組織の改善が期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、非対称交流磁場を用いた熔融池磁気制御アーク溶接を最終的に最も困難とされている上向姿勢溶接に適用し、高効率および高品質の溶接をすることが目的であるが、これまでの直流磁場を用いた熔融池磁気制御アーク溶接において、磁場は熔融池だけでなくアークにも大きな影響を及ぼし、そのアークの挙動が熔融池磁気制御アーク溶接の制御限界に大きな影響を及ぼした。

そこで平成 25 年度は、まず制御が比較的簡単な直流磁場で、アークへの影響が少なくなるような磁極先端形状 (集中磁極) を検討し製作した。次に比較的熔融池とアークの観察が容易な、下向姿勢溶接において磁気制御溶接パラメータが溶接結果に及ぼす影響を詳細に調べた。平成 26、27 年度は、新しい磁極と非対称交流磁場を用いて、まず下向姿勢溶接実験を行った。最終的に非対称交流磁場を用いた上向姿勢溶接を行い、電磁力がビード形成に及ぼす影響・問題点を検討することで、集中磁極と非対称交流を用いた新たな熔融池磁気制御アーク溶接法の適用拡大を目指した。

4. 研究成果

(1) 磁極先端形状の設計・製作 (平成 25 年度)

熔融池磁気制御アーク溶接は、熔融池内の電流に外部磁場を付加することにより、熔融池内に反重力方向の電磁力を発生させ、大入熱の溶接条件においてもビードの垂れ落ちを防止することができる。しかしながら、これまで使用した外部磁場を発生させる電磁石は熔融池と比較して大きいため、磁場は熔融池だけでなくアークにも大きな影響を及ぼし、そのアークの挙動が本溶接法の制御限界に大きな影響を与える。そのため本研究テーマである熔融池磁気制御アーク溶接の適用拡大のためには、磁化装置の小型化が必須である。そこで平成 25 年度は、熔融金属の制御が十分に可能な起磁力を維持しつつ、磁化コイルサイズを約 1/3 に小型化した。また磁場がアークに及ぼす影響を小さくするために、磁束が熔融池に局所的に働く集中磁極を製作した。図 1 に今回製作した集中磁極 (Concentration Type) と旧磁極 (Wide Type)

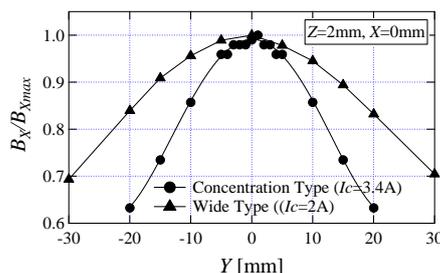


図 1 磁場分布の比較

との磁場分布の比較を示す（溶接学会全国大会、平成 25 年 4 月発表）。図より集中磁極は旧磁極と比較して磁場の広がりをおよそ 10% 程度抑制することができた。その結果、新しい集中磁極を用いることで、磁場がアークにおよぼす影響が小さくなり、より磁束密度を大きくした場合においても安定してビード制御効果が得られることが期待できる。

(2) 集中磁極、直流磁場を用いた下向姿勢溶接実験（平成 25 年度）

溶融池とアークの観察が容易な下向姿勢溶接において、新しい磁極を使用した場合の磁気制御溶接パラメータが溶接結果に及ぼす影響を詳細に調べた。なお磁束密度およびワイヤ加熱電流を大きく変化させた場合、高温溶融金属の流動が大きく変化し溶接が不安定となり、条件によってはハンピングビードが発生しやすくなり、穴空き等の溶接欠陥が生じやすくなる。そこで本溶接法特有の各種パラメータを変化させた場合の溶融池の温度変化および流動変化を詳細に観測した。溶融池の温度は 2 色温度計法を用いて測定し、添加ワイヤ挿入および磁場を付加したときの温度変化の様子が明らかにした。溶融池の流動は本科学研究費で新規購入した可視化用レーザー光源（パルスレーザー、最大出力：500 W、出力波長：810 nm）と高速ビデオカメラを用いて詳細に観測した。溶融池の観測結果の一例として 16th International Symposium on Flow Visualization（平成 26 年 6 月）にて発表した溶融池およびアークの観察結果を図 2 に示す。図(a)は入熱過大で行った TIG 溶接の場合の溶融池の様子を示しており、重力の影響により溶融池表面が凝固線より大きく垂れ下がっている様子がみられる。また図(d)は ECMP 法を適用した場合の溶融池の様子であり、溶融池表面が溶融池内に発生した反重力方向の電磁力により大きく上に持ち上がっている様子がみられ、磁場による溶融池およびアークの変化の様子が詳細に観察できた。図 2 は本研究で得られた溶融池の観測結果の一部であるが、本可視化手法により、アーク点弧時においても溶融金属の流動の変化を詳細に観測でき、溶融金属の流動メカニズムの一部を明らかにすることができた。その他、本成果は 79 回溶接研究会（平

成 25 年 11 月）にて報告した。

(3) 集中磁極、直流磁場を用いた下向姿勢溶接実験（平成 26 年度）

前年度（平成 25 年度）までに、新しい集中磁極と直流磁場を用いた下向姿勢溶接の溶融池の流れ場の可視化実験において、定性的な流れの様子は明らかになったが、定量的な溶融池の流れ場の解析が不十分であった。そこで、溶融池表面の詳細な流動を定量的に評価するため、溶融金属中にトレーサ粒子を混入させ、得られた画像に PIV（粒子画像流速計測法、Particle Image Velocimetry）処理を行った。始めに溶融池に挿入するトレーサ粒子の選定およびその最適な粒径、数（量）を実験的に検討した。トレーサ粒子の材質は、溶融金属に浮遊し、溶融池の高温に耐えられる高融点(2973 K)のジルコニア粒子を使用した。なお、その粒径に関して詳細な検討が必要となる。粒径が大きい場合は流動の観察がしやすいが、溶融池表面ではアーク圧およびシールドガスの影響を顕著に受け、実際の溶融金属の流動とは異なる挙動を示す。粒径が小さい場合は、アーク圧やシールドガスの影響は小さく、溶融金属の流動との追従性は良くなるが、観察しづらくなる。図 3 に、粒径 0.5、0.3、0.1 および 0.05 mm のジルコニア粒子を溶融池に混入させた場合のトレーサ粒子の平均速度分布を示す（溶接学会誌、84(4)、2015、244-250）。図よりトレーサ粒径が小さくなるにつれて平均流速が大きくなる。粒径 $\phi 0.1$ mm では 0.550 m/s、 $\phi 0.05$ mm では 0.556 m/s とほぼ同等の値となっていることから、トレーサ粒子径は 0.05mm または 0.1 mm を使用することにした。図 4(a)、(b) に一般的な TIG 溶接と ECMP 溶接の場合の溶融池表面の流れ場の PIV 処理結果をそれぞれ示す。図中の白い線は溶融金属の流線を示しており、トレーサ粒子の流跡である。また矢印は溶融金属の速度の大きさと方向（ベクトル）を示す。図(a)の TIG 溶接において溶融池中央部に直径 2.0 mm 程度のスケールの二つの渦が見られる。その速度は 0.02 m/s 程度で小さいが、凝固線に沿う溶融池後方への流れが溶融池中央付近ではく離することにより形成されるはく離渦である。図(b) ECMP 溶接の場合、ワイヤを挿入したことによりワイヤ後方に 8.0~9.0 mm 径の大きなスケールの後流渦が二つ見られ、流線の間隔が狭いことより、溶融池が激しく流動していることを示唆している。図 5(a)、(b) に 2 色法により測定した、一般的な TIG 溶接と ECMP 溶接の場合の溶融池表面の温度測定結果をそれぞれ示す。図中、右上の黒い箇所が電極、その直下から図の左方向に広がる楕円形の赤または黄色の領域が高温領域を示し溶融池に対応する。図より僅かではあるが TIG 溶接の場合が ECMP 溶接の場合より高い値を示している。ECMP 溶接では加熱したワイヤを挿入しているにもかかわらず、溶融池の温度が下がっ

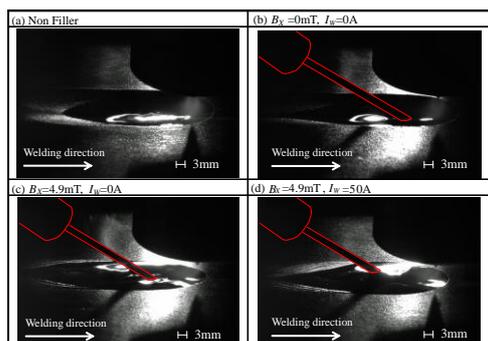


図 2 溶融池表面とアークの観察結果

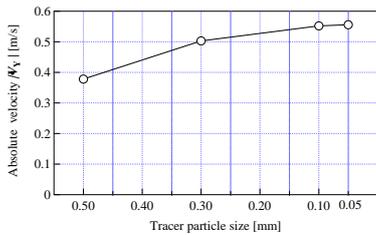
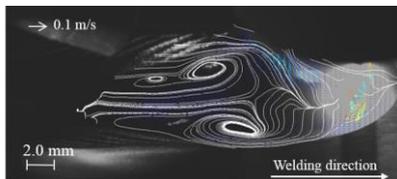
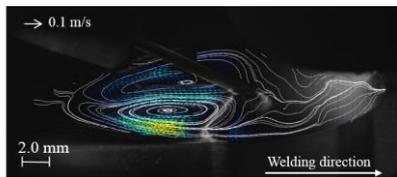


図3 溶融池表面流れのPIV解析結果

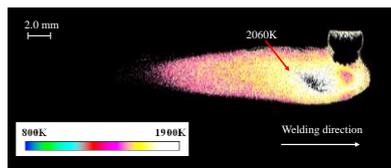


(a) TIG 溶接

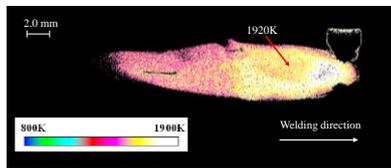


(b) ECMP 溶接

図4 溶融池表面流れのPIV解析結果



(a) TIG 溶接



(b) ECMP 溶接

図5 溶融池表面温度測定結果

ている。これはワイヤの温度が溶融池の温度と比較すると低いため、相対的に小さくなったと考えられる。詳細に図4(a)、(b)と図5(a)、(b)をそれぞれ比較すると、特にECMP溶接の場合、融池表面流れが早い領域と高温度領域が対応する。これはアーク直下の高温の溶融金属が、後方へ激しく流動していることを示唆している。その他、本成果は The 4th East Asia Symposium on Technology of Welding & Joining(平成26年10月)にて発表した。

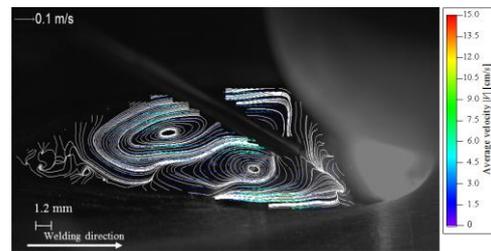
(4) 非対称交流磁場を用いた上向姿勢溶接実験 (平成26、27年度)

集中磁極および非対称交流磁場を用いて、最も難しい溶接法の一つである上向姿勢溶接実験を行った。当初予測したように、上向姿勢溶接は下向姿勢の場合と比較して、溶融金属がアーク側に垂れ下がり、アークが母材を溶融するのを阻害したり、磁場を付加した場合、アークが大きく前後に傾き、溶接が不安

定となったため、安定した実験が困難であった。そのため本件は、現在も引き続き行っている。

(5) 非対称交流磁場を用いた ECMP 溶接実験 (平成27年度)

平成27年度は、主に非対称交流磁場を用いた場合のECMP溶接実験を行った。始めに実験パラメータの最適化を行い、非対称交流磁場を用いたECMP溶接の有効性を示した。次に前年度から用いているPIV解析手法と2色温度計測法を用いて、周期的に磁場の向きが変わる非対称交流磁場が溶融金属の流動および温度場におよぼす影響を詳細に調べた。磁化周波数 $f=5\text{ Hz}$ の非対称交流磁場をECMP溶接に適用し、アークが前方および後方に偏向した場合の流れ場のPIV処理結果を図6(a)、(b)にそれぞれ示す(溶接学会全国大会、平成28年4月発表)。図6(a)において、アークが後方へ偏向し、溶融金属が後方へ激しく流動する中に添加ワイヤを挿入するため、ワイヤ後方に比較的大きな二つの後流渦が見られる。アークが前方へ偏向した場合の図6(b)では溶融池中央部に前方への激しい流れが観測され、アークの前方への偏向に対応している。なお磁化周波数が $f=5\text{ Hz}$ 場合は、磁化周波数に対応して溶融池表面の流れが大きく変化し、その追従性も良いが、 $f=10\text{ Hz}$



(a) アークが後方に偏向した場合



(b) アークが前方に偏向した場合

図6 溶融池表面流れのPIV解析結果 (非対称交流磁場)

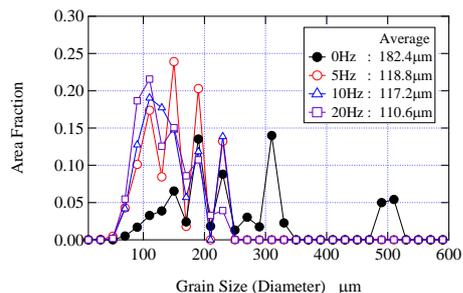


図7 溶融池の流動

以上では磁化周波数との追従性が悪くなり、流動変化が緩慢となる。一般的に凝固組織の機械的強度は Hall-Petch の式より、結晶粒径の 0.5 乗に反比例するため、機械的強度の向上において結晶の微細化は重要となる。磁化周波数 $f=0, 5, 10, 20$ Hz の場合の結晶粒径分布と平均結晶粒径を図 7 に示す。図より直流磁場 ($f=0$ Hz) と比較して非対称交流磁場 ($f=5, 10, 20$ Hz) の場合は粒径が小さい箇所ではピークを持ち、平均粒径は約 0.6 倍小さい。なお平均粒径は僅かに $f=20$ Hz が最も小さいが $f=5$ Hz 以上では大きな差異は見られない。前述の流れの解析結果より非対称交流磁場を付加することにより溶融池が激しく流動し、その攪拌効果により結晶粒径が小さくなったと考えられる。本結果より非対称交流磁場を用いた ECMP 法溶接は、機械的強度の面でも有効であることが示された。なお、これらの成果は平成 28 年度中に学会誌に論文投稿予定である。

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 1 件)

- ① 松田 昇一、棚原 靖、溶融池磁気制御溶接法における磁場が溶融池の流動と温度場に及ぼす影響、溶接学会誌、査読有り、84(4)、2015、244-250

[学会発表] (計 6 件)

- ① 松田 昇一、棚原 靖、寺崎 秀紀、斧田 有平、非対称交流磁場を用いた溶融池磁気制御アーク溶接法の研究-溶融池の流動変化と凝固組織-、溶接学会全国大会講演概要、2016 年 4 月、アジア太平洋トレードセンター (大阪府大阪市)、378-379
- ② 松田 昇一、棚原 靖、溶融池磁気制御溶接法の溶融池の流動と温度場、溶接学会全国大会講演概要、2015 年 9 月、北海道科学大学 (北海道札幌市)、378-379
- ③ S. MATSUDA、Y. TANAHARA、M. TANAKA、S. KATO、Study of the flow and temperature distribution of molten pool in Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process、The 4th East Asia Symposium on Technology of Welding & Joining、査読有り、2014 年 10 月、西安 (中国)、1pages
- ④ J. YAMASHITA、S. MATSUDA、Y. TANAHARA、S. KATO、16th International Symposium on Flow Visualization、査読有り、2014 年 6 月、沖縄コンベンションセンター (沖縄県宜野湾市)、10pages
- ⑤ 松田 昇一、溶融池磁気制御溶接法の現状と課題、第 79 回溶接研究会、2013 年 10 月、名古屋市工業研究所 (愛知県名古屋市)、19 pages
- ⑥ 松田 昇一、棚原 靖、松本 幸礼、羽

地 龍志、真鍋 幸男、溶融池磁気制御アーク溶接法に関する研究-溶融池の流動と温度分布-、溶接学会全国大会講演概要、2013 年 4 月、学術総合センター (東京都千代田区)、110-111

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

松田 昇一 (Shoichi, Matsuda)
 琉球大学・工学部・機械システム工学科・
 准教授
 研究者番号：90390567