電磁力を用いた溶接現象の解析*

松田昇一**

Analysis of Welding Phenomenon by Means of Electromagnetic Controlled Molten Pool Method*

by MATSUDA Shoichi**

キーワード 溶融池, 電磁力, アーク溶接, 上向溶接, 高機能溶接, 非対称交流磁場, 磁気制御溶接

1. 緒言

アーク溶接では重力の影響で溶融金属が垂れ下がり、溶接品質・施工能率に悪影響を及ぼす。これに対し比較的新しい溶融金属の流動を制御する方法として、真鍋¹⁻³⁾らは溶融池を電磁力で制御する磁気制御溶接法「Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process」(以下、ECMP法)を提案している。横向姿勢でのTIG溶接において、ワイヤを+極、トーチを-極に接続して、溶融池内に一方向電流を流し、同軸コイルによって溶融池に垂直な磁場を発生させ、溶融池内に上向きの電磁力(ローレンツ力)を発生させている。この電磁力によりビードの垂れ落ちが防止され、従来の2~3倍の溶着速度を実現している。なお、本手法はすでにLNGタンクの溶接等に実用化^{4,5)}されている。このように、ECMP法は高能率のため上向・下向姿勢への適用ニーズが大きい。しかしながら、同軸コイル方式では、電磁力は溶融池(板)に対し平行に働くため、上向・下向姿勢への適用はできない。そこで著者らは、直流磁場の付与方法を改善し、上向姿勢等の難姿勢溶接への適用拡大の検討を行った。さらに、非対称交流磁場を用いる事によりアークとビード形態の制御、及び凝固組織の微細化を同時に可能とする新しい多機能溶接法を提案し、その可能性を実験的に示した。本稿ではその研究結果を報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 直流磁場

上向姿勢におけるECMP法の実験装置配置図を図1に示す。実験装置はTIG溶接トーチと移動台車(図示略)、添加ワイヤ及び磁化コイル(各500回巻き)より構成されている。下向姿勢においては、それぞれ上下が入れ替わる。溶接試験片は板厚3.0mmのSUS304(非磁性体)とSS400(磁性体)を使用する。図2に直流磁場中の溶

図1 実験装置配置図(上向姿勢溶接)

図2 溶融池詳細図(直流磁場, 上向)

*原稿受付 平成19年3月13日

**正員 沖縄工業高等専門学校 Member, Okinawa National College of Technology

融池部の詳細図を示す。図中、 F は電磁力、 I は電流、 B は磁場を示す。 $\otimes$ は磁場の方向が紙面の表から裏であることを示す。なお、 $\odot$ の場合、磁場の方向は前者と逆である。トーチを－極、添加ワイヤを＋極とすることで、アークとワイヤ間に一方向電流（図中右方向）を形成している。また磁極は溶融池をまたぐように配置し、一方向電流に対し直交する磁場（紙面の表から裏の方向）を付与している。その結果、フレミングの左手の法則により電磁力は、溶融池（板）に対し垂直上向（図中上方向）に発生する。図中下向きの点矢印は、アーク中の電流の流れを示している。その結果、アークには図中右向きの電磁力が働く。磁場の強さは励磁コイルに流す電流（ I_c ：以下、磁化電流）によりコントロールされる。

実験はSS400の場合、I開先で開先間隙は2mm、SUS304の場合はI開先で密着とし、上向および下向姿勢にて裏波溶接を行った。

2.2 非対称交流磁場

実験は直流磁場を非対称交流磁場に切り替え、試験片は板厚3mmのSUS304を使用し、下向溶接を行った。磁化コイルは図3示すように正極と負極の時間比が異なる非対称交流を発生できる磁化電源に結線した。なお図3に示すデューティ比 Dr の比率は任意に調整可能である。図4(a)、(b)にアークと溶融池部の詳細図を示す。直流磁場の実験と同様に、アークとワイヤ間に一方向電流を形成し、一方向電流に対し直交する非対称交流磁場を付与している。これらの相互作用により、アーク及び溶融池に対し、交流的な電磁力による振動と特定方向に優勢な電磁力を同時に発生させることができる。磁場の方向が紙面の表から裏の場合（図4(a)）、溶融池には上向きの電磁力が働き、アークには後ろ向きの電磁力が働く。磁場の方向が紙面の裏から表の場合（図4(b)）は、溶融池およびアークには前者と逆方向の電磁力が働く。

3. 実験結果

3.1 直流磁場⁶⁾

図5(a)、(b)に非磁性体のSUS304を用いて下向、上向溶接を行った場合の断面写真をそれぞれ示す。

下向溶接において、溶接条件は溶接電流 $I=140$ A、ワイヤ加熱電流 $I_w=57$ A、溶接速度 $V=2$ mm/sec. とし、磁化電流を $I_c=0$ A、 $I_c=1.0$ A、 $I_c=1.2$ Aへと段階的に変化させた。磁化電流を付与しない $I_c=0$ Aの状態では、ビードが重力の影響で大きく垂れ下がり、アンダーカットと過大な裏波ビードを形成している。磁化電流が $I_c=1.2$ Aになると過大だった裏波ビードは上向きの電磁力によって持ち上がり、適度な余盛が上面に形成されると同時に裏波ビードは幅・高さ共に大幅に減少し、ビード形状が改善している。

上向溶接の $I_c=0$ Aの場合、下向溶接と同様に、ビードは重力の影響で過大に垂れ下がっているが、磁化電流が大きくなり $I_c=0.5$ Aになるとビードに上向きの電磁力が働き、垂れ下がっていたビードが持ち上がり、凹んでいた裏波ビードがほぼフラットな状態となる。

以上のことから、非磁性体のSUS304では、上向・下

図3 デューティ比 Dr の定義

(a) 電磁力が上向に働く場合

(b) 電磁力が下向に働く場合

図4 実験装置配置図（下向姿勢溶接）

(a) 下向溶接（溶接電流： $I=140$ A、ワイヤ加熱電流： $I_w=57$ A、溶接速度： $V=2$ mm/sec.）

(b) 上向溶接（溶接電流： $I=140$ A、ワイヤ加熱電流： $I_w=60$ A、溶接速度： $V=2$ mm/sec.）

図5 溶接断面写真（SUS304）

図6 溶融池と裏波写真 (SS400, 上向) (溶接電流: $I=150\text{ A}$, ワイヤ加熱電流: $I_w=56\text{ A}$, 溶接速度: $V=2\text{ mm/sec.}$)

向いずれの姿勢の溶接においてもビード形状の改善に本手法が有効であることが確認された。

図6に磁性体のSS400を用いて上向姿勢溶接を行った場合の溶融池と裏波の写真を示す。溶接条件は、溶接電流 $I=150\text{ A}$, ワイヤ加熱電流 $I_w=56\text{ A}$, 溶接速度 $V=2\text{ mm/sec.}$ とし、磁化電流 $I_c=0\text{ A}$, 0.5 A , 1.0 A と段階的に変化させた。表面 (Arc-side) の溶融池は磁化電流が大きくなるにつれて溶融池の長さが減少し、裏面 (Back-side molten pool) の溶融池は長さが長くなっている。これは、上向きの電磁力によって、表面の溶融金属が裏側へ強制的に持ち上げられたためだと考えられる。なお、アークはアーク自身に働く電磁力により、磁化電流の増加と共に前方へ吹かれる傾向が強くなるが、 $I_c=1.0\text{ A}$ まで安定した溶接が可能であった。

図7に表ビード、裏波ビードおよび断面写真を示す (図6と同条件)。ビード幅は表、裏面共に磁化電流の増加とともに小さくなる。断面形状については、 $I_c=0\text{ A}$ において裏波部にアンダーカットが発生し過大ビードとなっているが、 $I_c=1.0\text{ A}$ では適切な余盛が形成されビード形状が改善されている。溶込み形態は $I_c=0\text{ A}$ でビードの下面側が上面側より幅広となり熱伝導型の溶込みとなっているが、 $I_c=1.0\text{ A}$ ではほぼ垂直な溶け込み形態となっている。これらの現象は、溶融池内に発生した上向きの電磁力が溶融金属を下面から上面へと強制流動させたことが主要因であると考えられる。

以上のことから、磁性体であるSS400においても非磁性体のSUS304と同様に本手法が有効であることが確認された。

3.2 非対称交流磁場の

直流磁場を交流磁場に切り替えることで交流的な振動力が得られる。さらに非対称交流とすることで特定方向

図7 表・裏ビード写真と断面写真 (SS400, 上向) (溶接電流: $I=150\text{ A}$, ワイヤ加熱電流: $I_w=56\text{ A}$, 溶接速度: $V=2\text{ mm/sec.}$)

(重力と反対方向) に優勢な電磁力を得ることが出来る。これらを用いてアークとビード形態の制御、及び凝固組織の微細化を同時に可能とする新しい多機能溶接法を試みた。

図8にデューティ比 $Dr=0.8$ (紙面の表から裏へ向かう磁束の発生時間が交流磁化サイクルの80%)、周波数 5 Hz で実験を行ったときのアークの挙動と裏波の挙動を示す。なお $Dr=0.8$ では溶融池には上向きの電磁力が働く時間が長くなり、アークには後ろ向きの電磁力が長く働く。磁化電流は $I_c=0\text{ A}$ で溶接を開始し、順次 $I_c=0.25\text{ A}$, $I_c=0.5\text{ A}$ へと段階的に変化させている。

正面 (溶接線方向) から観察するとアークの足部が2/3程度に収縮する状況が認められ、熱源幅が減少し細長く分布する現象が見られる。側面から観察するとアークは磁化電流の正負の変化に対応して、前後にオシレーションする。特にデューティ比に対応して後方への偏向が著しい。溶融池の表面・裏面は磁化電流周期に同期して上下に振動している現象が認められた。これらのアークの挙動や溶融池の挙動は磁化電流の増大に伴い顕著になる傾向がある。磁化周波数に対しては、アークおよび溶融池は、共に最大 20 Hz まで同期して振動する。

図9に表ビード、裏ビード概観と断面マクロ写真を示す (図8と同条件)。表・裏ビード共に、直流磁場と同様に磁化電流の増加にともないビード幅が小さくなる。特に表ビードの幅が小さくなっている。非対称交流磁場では、アークの脚部が収縮するため、熱源が細長く分布したこと、及び電磁力による溶融金属の上下方向の強制流動効果により、表・裏面ともビード幅の差が少ない特徴的な形状となっている。そのため、溶込み形態は、つづみ型となり、裏面での溶融金属の活発な流動を示唆している。

一方、余盛制御の点では、磁化電流 I_c の増大に伴い上向電磁力による溶融金属の持ち上げ効果が増加し、 $I_c=0.5\text{ A}$ では表ビードのアンダーカットが消失し、上部に良

図8 アークと溶融池の挙動（非対称交流磁場，SUS304，下向）（溶接電流： $I=155\text{ A}$ ，ワイヤ加熱電流： $I_w=55\text{ A}$ ，溶接速度： $V=2\text{ mm/sec.}$ ）

図9 表・裏ビードと断面写真（非対称交流磁場，SUS304，下向）（溶接電流： $I=155\text{ A}$ ，ワイヤ加熱電流： $I_w=55\text{ A}$ ，溶接速度： $V=2\text{ mm/sec.}$ ）

好な余盛が形成され、裏波ビードでも過大な余盛が減少している。

また、磁化電流の変化に伴う裏波ビードの変化を観察すると、安定して連続的に制御されていることが認められ、非対称交流磁場を用いることで裏波施工の安定性も向上する副次的効果が発生している。（直流磁場では裏波形成が不安定になる場合もあった）

断面写真より、 $I_c=0\text{ A}$ の溶接部では粗大化した柱状晶

が発達し、ビード表面近傍ではこれらが直線的な会合部を形成している。これに対し $I_c=0.5\text{ A}$ の溶接部では柱状晶は約1/3の長さに微細化され、さらにビード中央部では微細な等軸晶状の結晶が多数発生している。このことより溶融池面に垂直方向の電磁力振動が凝固組織の微細化に対し有効であることが示された。

以上のことから、非対称交流磁場はアークとビード形態の制御、及び凝固組織の改善に有望である事が示唆された。

4. さいごに

横向き姿勢で実用化されている「溶融池磁気制御アーク溶接法」を，上向，下向姿勢へ適用した結果，非磁性体の SUS304，磁性体である SS400 において，ビード形状の改善に効果的であることを示した。

非対称交流磁場においては，ビード形状の制御，それと同時に凝固組織の微細化を可能とする溶接法を提案し，定性的ではあるが良好な結果を得た。

今後は，アーク現象および溶融池振動の定量的な評価や溶接断面の成分分析を行い，「溶融池磁気制御アーク溶接法」の適用拡大を行いたい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり，多くの助言を沖縄工業高等専門学校真鍋幸男教授にいただきました。また，実験や解析については沖縄県工業技術センター羽地龍志氏，松本幸礼氏に多くの助力をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 真鍋，広本，銭谷，小林，渡部：溶融池磁気制御の概念と溶接施工の高能率化，溶接学会溶接法ガイドブック 5－溶接プロセスの高能率化－，黒木出版（2003），pp.II-202-II-209.
- 2) Y. MANABE, S. ZENITANI, Y. HIROMOTO, Y. KOBAYASHI and Y. WATANABE, Basic Concept and Viability of Electromagnetically Controlled Molten Pool Welding Process, Welding Guide Book by Japan Welding Society (2004), pp.II-194-II-194.
- 3) 真鍋：溶融池磁気制御手法に関する研究，大阪大学 接合科学研究所 共同研究報告書（2003），pp66-67.
- 4) 銭谷，広本，真鍋，江藤，熊倉：溶融池磁気制御法を用いた立向 TIG 溶接法の開発，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.75（2004），pp244-245.
- 5) H. Morii, A. Eto, H. Hiromoto, Development of High efficiency Control TIG Welding Process, Proceeding of the IIW International Conference on Technical Trends and Future Prospectives of Welding Technology for Transportation, Land, Sea, Air and Space. Program 26. (2004), pp1-7.
- 6) 真鍋，松田，羽地，棚原，松本，銭谷：溶融池磁気制御アーク溶接法の適用拡大に関する研究 - 上向，下向姿勢での裏波溶接の磁気制御 -，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.77（2005），pp132-133.
- 7) 真鍋，眞喜志，松田，羽地，松本：溶融池磁気制御アーク溶接法の適用拡大に関する研究 - 非対称交流磁場による多機能化 -，溶接学会全国大会講演概要集，Vol.79（2006），pp132-133.