〔WS-7〕

微小重力環境を用いた溶融池内の対流駆動力の解析

Analysis of Convection Driving Forces in Molten Pool using Microgravity Environment

○藤井英俊, 森川恭行, 松本大平, 野城 清 (阪大)

Hidetoshi FUJII, Yasuyuki MORIKAWA, Taihei MATSUMOTO, Kiyoshi NOGI

Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

In order to investigate the effects of the gravity, surface tension electromagnetic force and plasma stream on convection in a molten pool, electron beam (EB) welding and gas tungsten arc (GTA) welding were performed under both terrestrial and microgravity conditions. For iron alloys, pure iron, an iron-tungsten alloy (SKD4), and for aluminum alloys, pure aluminum and an aluminum-copper alloy (A2219), were used for the specimens. The cross sections of the specimens were analyzed by EPMA after the welding. During the EB welding, the surface tension and the buoyancy determine the convection. Under microgravity, only the surface tension causes the convection because the buoyancy is considered to be negligible. As a result, it is found that the convection due to the surface tension is dominant for iron alloys but it is very weak for aluminum alloys. Accordingly, when aluminum alloys are welded by arc welding under microgravity, only the electromagnetic force and plasma stream are the dominant effects on the convection. Therefore, the convection can be controlled by changing the arc length to break the balance between the electromagnetic force and the plasma stream.

Key Words: Microgravity, Surface Tension, Buoyancy, Plasma Stream, Electromagnetic Force, Al alloy, Fe Alloy

1. 緒言

アーク溶接では, Fig. 1 に示すプラズマ気流, 電磁気力, 表面張力, 密度差の 4 つの駆動力が溶融池内の対流現象を決定するとされている. 溶融池内の対流は溶融池形状や溶込み深さに大きな影響を及ぼすため, これまでにも, その方向や速度を調べるために, スラッグの挙動を観察したり¹⁾, 溶融池に Al_2O_3 を添加し, その挙動を観察する²⁾などの様々な実験が行われてきた. しかし, 実際にはこれら 4 つの駆動力が複雑に影響を及ぼすため, それぞれの影響はシミュレーションによる予測は可能であっても, 実験的に測定することは容易ではなかった. そこで本研究では, 微小重力環境を用いることで, 対流現象を単純化し, これらの影響を実験的に検討した.

2. 実験方法

実験試料 ($100mm^1 \times 25mm^w \times 3mm^t$) には, Al 系合金として純 Al (4N), Al-6%Cu 合金 (A2219) を, Fe 系合金として純 Fe (3N), Fe-6%W 合金 (SKD4) を使用した. これらの試料を, 地上および微小重力環境で横向き突合せ溶接を行った後, 試料断面の EPMA 分析を行うことにより対流の度合いを測定した. Fig.2 に示す地下無重力実験センターの落下塔を用いて, $10^{-5}G$ の高品質の微小重力環境を 10 秒間得た.

まず, 電磁気力による対流とプラズマ気流による対流を無

Fig.2 Drop shaft facility at JAMIC.

視することができる電子ビーム溶接法を地上および微小重力環境下で用いて, 溶融池の対流現象に及ぼす表面張力および密度差の影響について検討した. 次に, 表面張力による対流を無視できる Al 系合金を微小重力環境で TIG 溶接することにより, 電磁気力およびプラズマ気流による影響を検討した.

3. 実験結果

3.1 表面張力および密度差の影響

Fig.3 に純 Fe と Fe-6%W 合金を突合せ溶接した場合の試料断面に W の分布を, Fig.4 に純 Al と Al-6%Cu を突合せ溶接した場合の試料断面における Cu の分布を示す. このとき, 地上では表面張力と密度差が, 微小重力環境では表面張力のみが対流の駆動力となる. Fe 系合金の場合には, 表面張力対流だけが作用する微小重力環境でも溶融は十分攪拌されていることから, 表面張力対流が十分に大きいことがわ

Fig.1 Four driving forces for convection.

Fig.3 W distribution in Fe/SKD4. (EB welding)

Fig.4 Cu distribution in Al/2219. (EB welding)

かる．一方，Al 系合金の場合には，微小重力環境では界面が不連続で攪拌が十分に進んでいないが，密度差および表面張力が作用する地上では十分に攪拌が進んでいることから，表面張力による対流は密度差による対流に比べて影響が小さいことがわかる．これは，これまでシミュレーションによって計算された，表面張力の効果が支配的であるという結果^{3),4)}と全く異なる．シミュレーションでは，Al 表面の酸化皮膜の影響が考慮されていないことが原因であると考えられる．

3.2 電磁気力およびプラズマ気流の影響

電磁気力による対流とプラズマ気流による対流は，Fig.2 に示すように，逆向きの駆動力をもっているため，両者の

Fig.5 Cu Distribution of in the cross section of pure Al/A2219 alloy at 100A. (TIG Welding)

Fig.6 Effect of arc length on Cu distribution in Al/ A2219 under microgravity. (TIG welding)

大きさが同じであれば，相殺することが可能である．そこで種々の条件で溶接を行い，Fig.5(c)に示すように 100A，アーク長 3mm，Ar シールドガス 5l/min がこの条件にあてはまることを確認した．Fig.5 は上記の条件で Al-A2219 の横向き突合せ溶接を地上および微小重力環境で行った結果で Cu の分布を示している．図中の直線は溶融池の大きさを示しており，試料の右側が溶接面の表側である．(a)，(b)が地上での結果で，(c)が微小重力環境の結果である．このように，電磁気力とプラズマ気流が完全に相殺されるような条件では，通常は影響の小さい密度差による対流の効果が顕著になる．

Fig.6 はすべて微小重力環境で得られた結果で，アーク長の影響を示している．これまでと同様に Cu の分布である．アーク長が 3mm の時，プラズマ気流による対流と電磁気力による対流が互いに阻害し合い，ほとんど攪拌が進行していないが，アーク長が 6mm，9mm の場合には十分に攪拌していることがわかる．これは，アーク長が 2 倍になるとルート面積が 2 倍になり⁵⁾，電流密度が 1/2 倍になるため，プラズマ気流による対流が電磁気力による対流よりも相対的に大きくなり，双方のバランスが崩れたためである．

一方，電流値を 100A から 150A に増加させても，界面が不連続になっており，溶融池が均一に混ざらない結果が得られた．これは，溶接電流が 150A のときのアーク圧は 100A のときのアーク圧と比べて約 2.5 倍大きくなるのに対して⁶⁾，電磁気力による対流も，約 1.6 倍になっていることから説明できる．この際，ルート面積が約 1.4 倍⁵⁾になることを考慮すると，プラズマ気流および電磁気力による対流の両方が約 1.6 倍大きくなることが推定でき，互いに相殺しあい，十分な攪拌が起らなかったと考えられる．

参考文献

- 1) T.Ohji, H.Inoue and K.Nishiguchi: Q. J. Jpn Weld. Soc., 19 (1991) 501.
- 2) C.Limmaneevichitr and S.Kou: Weld. J. 79 (2000) 126s.
- 3) S.Kou and D.K.Sun: Metall. Trans. A, 16 (1985) 203.
- 4) A.Matsunawa: Proc. Int. Conf. Int. Trends in Welding Science and Technology, ASM Int. Gatlingburg, TN, USA June 1-5 (1992) 3.
- 5) H.Terasaki, M.Tanaka, H.Fujii and M.Ushio: 6th Int. Trends in Welding Resarch Conf. Proc., 2002, Pine Mountain, USA, 15-19 April, 142-146.
- 6) H.Fujii, Y.Sumii, M.Tanaka, M.Kamai and K.Nogi: 6th Int. Trends in Welding Resarch Conf. Proc., 2002, Pine Mountain, USA, 15-19 April, 404-407.