特集

溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発

溶融状態の物性測定*

野城 清^{**}, 永田 和宏^{***}

野城 清

永田 和宏

Physical Property Measurement of Liquid Metal*

by NOGI Kiyoshi^{**} and NAGATA Kazuhiro^{***}

キーワード 表面張力, 熱伝導率, シミュレーション, 熱物性, アーク溶接

1. はじめに

アーク溶接をはじめとする溶融溶接において溶融池の形状は溶接部の特性に大きく影響する。したがって、溶融池形状の予測・制御は健全な溶接部を得るために必要不可欠である。溶融池の形状は溶接金属の表面張力、熱伝導率、粘性、密度等の物性値に依存しており、溶融池形状の予測・制御のためにはこれら物性値を精密に測定する必要がある。

溶融金属の物性値測定は高温での測定であるのみならず、物性値によっては微量の不純物の影響が大きいために正確な測定は非常に困難であり、報告されている値に大きな相違がみられる。また、シミュレーションに必要な物性値は理想的な条件で測定された真の値ではなく、溶接環境における値である。したがって、本プロジェクトではアーク溶接時に必要な物性値の一部についてはプラズマの影響を受けることが予想されるため、プラズマ環境下での物性測定も視野に入れる必要がある。

本研究ではNEDOプロジェクト“溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発”において必要とされる溶融金属の表面張力、密度、熱伝導率、粘性の測定を行った。

ここでは通常の測定方法ではなく、本プロジェクトで特徴的な溶融金属の表面張力および熱伝導率の測定方法およびその結果について概説する。

2. 測定

2.1 溶融金属の表面張力

溶融金属の表面張力、特にその温度係数は溶融池の溶

け込み深さに大きく影響することは古くから知られているが、プラズマ環境下の表面張力に関する正確な測定は行われていない。本研究においてはプラズマ環境下における溶融 SUS304 ステンレス鋼の表面張力およびその温度依存性を図1に示すような高温炉を用い、静滴法によって測定した。

一般に報告されている静滴法による測定に比し、本測定の特筆すべき点は①プラズマ環境下での測定であること、②測定精度向上のため直行する2方向から液滴形状が観察可能なこと、③液滴の輪郭を高精度で撮影するために液滴後方から He-Ne レーザーを照射し、バンドパス

図1 静滴法装置概略

*原稿受付 平成15年7月1日

**正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, JWRI, Osaka University
*** 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology Dept. of chemistry and Materials Science

フィルターを用いることによって液滴の自発光による影響を除去したことが挙げられる。また、プラズマの発生は実際の溶接現象を模擬できるように液滴を保持する基板に導電性セラミックスを使用し、Ar 低温プラズマを発生させた。

金属材料としては表面活性元素である S をそれぞれ 10 ppm, 100 ppm 含有する SUS 304 ステンレス鋼を、基板材料としては導電性の LaCrO_3 を用いた。測定時の雰囲気は 1 Tor. の Ar ガスで、プラズマ電流は 75 mA である。

2.2 溶融金属の熱伝導率

溶融金属の熱伝導率測定はいずれの方法も原理的に温度差（溶融金属の密度差）による対流の影響を受けるため、信頼性の高い測定値を得るためには対流の影響を如何に除去するかがキーとなる。本研究では密度差による対流の抑制には理想的な無重力（ 10^{-6}G ）環境で測定を実施した。無重力環境は図 2 に示す北海道の地下無重力実験センターの落下塔を使用することによって得た。

熱伝導率は図 3 に示すような非定常細線加熱法を採用した。熱伝導率の測定方法は定常法と非定常法に大別されるが、前者は熱対流の影響を受けやすく、溶融金属の

図2 地下無重力実験センターの施設および落下カプセル

図3 溶融鉄合金の測定セル

測定には適さない。非定常法にはレーザー加熱等を利用したステップ加熱法やパルス加熱法があるが、対流の影響の有無を評価できない。非定常細線加熱法は試料中に設置したヒーター細線から一定の熱流束を発生させ、その細線の温度上昇から熱伝導率を直接求めることができ、解析解から逸脱することで測定時の対流の発生を検出することができる。

溶融金属内に生じる対流は前述の密度差によるもの以外に、溶融金属表面の表面張力差に起因するマランゴニ対流が知られており、本研究では図 3 から明らかなようにセラミックス円板を溶融金属表面に配置することによってマランゴニ対流を抑制し、さらには気相の対流を防ぐため金属板を配置するなど、対流の抑制に最大限の注意を払ったセル形状となっている。さらに、金属板は輻射熱による放熱を抑制し、均熱帯を広く取ることも貢献している。

測定は純鉄、SUS 304 および SM 490 について行った。

3. 結果および考察

図 4 に表面張力の測定結果を示す。図から明らかなように硫黄をそれぞれ 10 ppm, 100 ppm 含む SUS 304 ステンレス鋼の表面張力はプラズマの影響はみられず、10 ppmS ステンレス鋼の表面張力は温度の上昇とともに減少、100 ppmS ステンレス鋼の場合には逆に増加の傾向を示す。このように表面活性元素である硫黄や酸素の存在により、表面張力の温度係数が逆転する傾向はこれまでも報告^{1),2)}されており、従来の報告と矛盾しない。表面張力の測定結果で注目すべき点はプラズマの影響がみられなかったことである。プラズマは材料の表面改質の際に広く用いられており、表面張力の値にも何らかの影響のあることが予想されたが、結果的には影響はみられなかった。これは対象材料が溶融金属であり、プラズマが溶融金属表面の構造あるいは組成に影響を与えても表面構造・組成が極めて短時間で平衡状態に到達したかあるいは本研究におけるプラズマ密度が小さかったことによるものと考えられるが、今後、更に検討する必要がある。

図 5 に熱伝導率測定結果の一例として、溶融純鉄における細線の温度上昇と通電時間の関係を示す。

熱伝導率、 λ 、は (1) 式で与えられる。

$$\lambda = (Q/4\pi)/(d\Delta T/d\ln t) \quad (1)$$

図4 溶融 SUS 304 合金の表面張力の温度依存性

図5 純鉄における細線の温度上昇と通电時間の関係

図6 純鉄, SUS 304 および SM 490 熱伝導度

ここで、 Q は熱流束、 ΔT は細線の温度上昇、 t は通电時間である。

したがって、熱伝導率は図5 (a) の勾配に対応し、図5 (b) から0.4秒から4秒まで一定の熱伝導率が得られていることが分かる。

図6に本研究で得られた純鉄、SUS304、SM490の熱伝導率をこれまで報告されている溶融純鉄の結果およびWiedemann-Franz則に基づき電気伝導率から計算した結果と共に示す。本研究で得られた結果はこれまでの報告値、計算値に比してかなり小さい値となっている。特に、多くの溶融金属に対して成立するとされているWiedemann-Franz則に合致しない理由については詳細な検討を要する。

溶融金属の熱伝導率測定において測定精度あるいは測定誤差にもっとも影響を与える因子は対流である。測定時における対流の影響は見掛けの熱伝導率を大きくする方向に作用する。本研究結果は従来の報告値よりも小さく、少なくとも図6における相違は対流の影響によるものではない。測定時の問題として熱伝導率の小さい値が得られる可能性は加熱用細線からの電流の漏れである。本研究においては加熱用モリブデン細線に電気泳動法によってアルミナ皮膜を100 μ mの厚みで皮覆した。図7に

図7 コーティング層の断面

皮膜の断面の観察結果を示す。図7からあきらかなように、モリブデン表面には緻密なアルミナ皮膜が形成されていることがわかる。溶融純鉄とアルミナとの接触角は90°以上であることが知られており³⁾、仮に微小な空隙があっても自発的に溶融純鉄がアルミナ中に浸入することは考えられず、電流の漏れの可能性も非常に低い。

溶融金属の熱伝導率と電気伝導率との関係について本研究の対象である遷移金属は複雑な電子構造をとるため、鉄系合金については成り立たない可能性があることが明らかにされている⁹⁾。

これらのことを考慮すると、微小重力環境を利用して対流の影響を除去した本研究結果は十分に信頼できるものであると考えられる。

4. ま と め

本研究では溶接のシミュレーションに必要とされる溶融金属の物性値を測定した。物性値の測定に際し、本プロジェクトの目的に合致するよう装置に様々な改良を加え、測定した結果、信頼性の高い物性値を得ることができた。

参 考 文 献

- 1) K. Nogi and K. Ogino: Can. Met. Q., 22 (1983), 19-28
- 2) 野城清, 泰松斉, 荻野和己: 高温学会誌, 18 (1992), 14-19
- 3) 荻野和己, 野城清, 越田幸男: 鉄と鋼 59 (1973), 1380-1386
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構平成14年度成果報告書“溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発”, 378-385