

電磁力を用いた溶込み制御に関する研究

—溶融池磁気制御アーク溶接法の適用拡大に関する研究—

棚原靖、羽地龍志、松本幸礼

TIG溶接は継手の信頼性、施工の利便性などから幅広い分野で最も多用されている溶接法であるが、溶込みが浅いという欠点がある。これに対し酸素や硫黄、ハロゲンなどのフラックス成分を母材に塗布して、溶込みを増大させるA-TIG法などが利用されているが、フラックス塗布の必要性からコスト面で不利であると同時に、施工後のフラックス除去など作業上煩雑な面も見られる。そこで、本研究では溶融池磁気制御アーク溶接法を応用して溶込みを増大させる条件を見出すため、実験装置を設計・製作し、同装置を用いた溶接実験を行った。

1 はじめに

県内におけるTIG溶接は、反応容器や圧力容器、飲料水用タンクなど主としてステンレス鋼の溶接に利用されている。

また、継ぎ手の信頼性の高さから、炭素鋼溶接の際に重要となる一層目の溶接にも利用されている。

しかしながら、他の溶接法に比べて溶込みが浅いことから、肉厚の厚い材料を溶接する際には、多層溶接となり溶込み不良や溶接変形などが課題となっている。

本研究は、溶接ビード形状の改善法として沖縄工業高等専門学校（以下、沖縄高専）との共同研究で行ってきた溶融池磁気制御法（以下、ECMP法）を溶込み制御に適用して、深い溶込みを形成するための条件を見出すことを目的としている。

これまで沖縄高専の実験装置を借用して、実験を行ってきたが、同様な実験装置を新たに当センターにも設置することとなったことから、本報では実験装置の設計および製作と同装置を用いた溶接実験を行った結果を報告する。

2 溶融池磁気制御アーク溶接法

2-1 溶融池磁気制御アーク溶接法の基本概念

ECMP法は、溶接時の電流と電磁石による磁界を利用して電磁力を発生させ、溶融金属の持ち上げ等の制御を行う方法であり、横向姿勢の溶接施工時における溶融金属の垂れ下りを防止するために真鍋らによって発案されたものである。¹⁾³⁾

横向き溶接時におけるECMP法の基本原理は、溶接トーチと同軸方向の磁場を与えることで母材と平行な電磁力を発生させ、重力による溶融金属の垂れ下りを抑制するというものである。

本研究で用いる手法では、溶接トーチおよび溶接進行方向に垂直な磁場を与えることで母材に垂直な電磁力を発生させることができる。

これまで、母材に垂直な電磁力を上向きに発生させる

ことによって、上向きならびに下向き溶接時において発生する垂れ下りを抑制する研究を行い、その効果を実証してきた。⁴⁾⁵⁾

そこで、本研究では母材に対して下向きの電磁力を発生させることで、溶け込み深さの制御が可能か検討した。

図1に模式図を示す。電極をマイナス極、母材をプラス極とすると、母材からアークに向かうように電流が形成される。ここに、磁化コイルによって（図示略）溶融池をまたぎ溶接方向に直行する磁場を、紙面表から裏に向かって付与すると、フレミングの左手の法則によりアークは溶接方向に対して後方に偏向すると同時に、溶融池後方では上向きの電磁力が、溶融池前方では下向きの電磁力が発生する。この下向きの電磁力を利用して溶込み深さを制御することが本研究のねらいである。

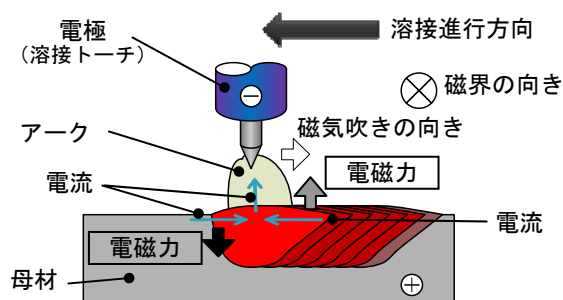


図1 ECMP法による溶接現象の模式図

2-2 実験装置

2-1で説明した溶接現象を把握するために実験装置を製作した。装置構成図を図2に示す。

装置は、溶接トーチを固定し、試験片を電動スライダにより移動する方式とし、ホットワイヤ溶接も行えるような構造とした。また、溶接トーチには、アーク長を一定に保つようAVC装置（アークセンサ）を接続している。

磁化コイルの電源は、直流のみならず交流磁場も付与できるように交流安定化電源とファンクションジェネレーターを組み合わせている。

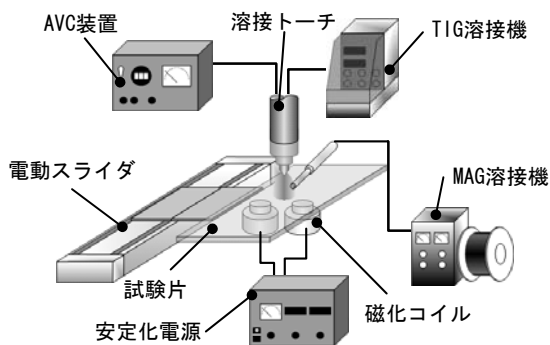
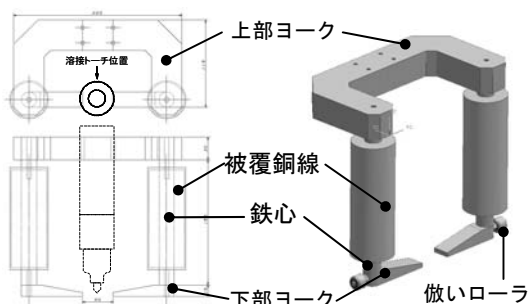


図2 実験装置の構成図

2-2-1 磁化コイル

磁化コイルは、鉄心、被覆銅線、上部ヨークならびに下部ヨークから構成されている。図3に詳細図を示す。上部ヨークの形状は溶接トーチと同軸に配置できるようにコの字型とした。下部ヨーク両端には、試験片と一定の隙間を保持したまま溶接が行えるよう倣いローラを取り付けてある。



コイル巻き数	160
鉄芯直径	20[mm]
総経路長	940[mm]

図3 磁化コイルの詳細図

2-2-2 実験装置の設計と製作

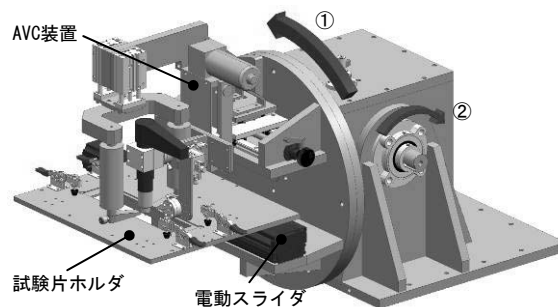
図2で示した構成図をもとに、実験装置を設計した。図4に3DCADによる詳細図を示す。

実験装置の基本構造は、全溶接姿勢に対応できるように2軸型とし、①の回転で上下、縦向き溶接が行える。また、②の回転により横向き溶接が可能である。各溶接姿勢は、手動ハンドルにて各々の位置で固定することで実現する。

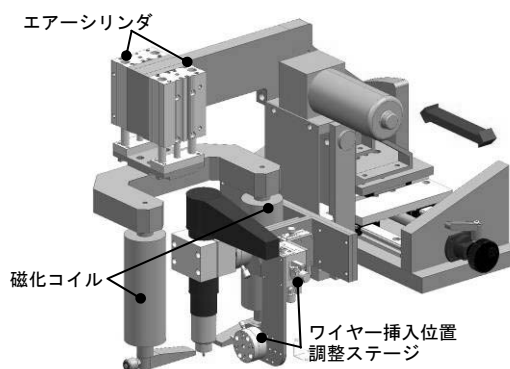
磁化コイルは、上述したように溶接中試験片と一定の隙間を保持できるようエアシリンダにて押しつける構造とし、倣いローラの取り付け位置により隙間を調整することができる。

溶接トーチは、磁化コイルの軸中心との距離を可変でき、ホットワイヤ溶接時のワイヤ挿入位置を細かく調整できるように、XYステージならびに回転ステージを設けた。図5には、製作した実験装置の写真を示す。実機に

ついては、写真のとおり作業性を考慮して地面より1200mmの高さに設置した。

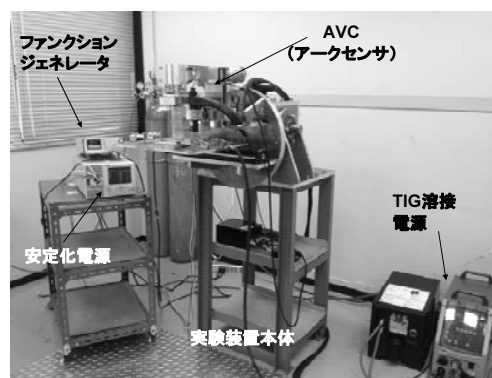


a) 実験装置本体

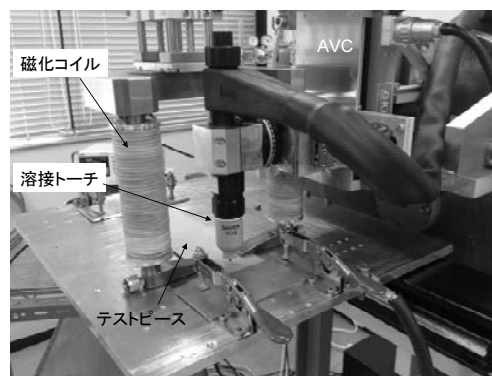


b) 磁化コイルおよび溶接トーチ部

図4 実験装置の詳細図(3DCAD図)



a) 装置概観



b) 溶接部

図5 製作した実験装置

3 実験方法

3-1 磁束密度および磁場（磁束密度）分布の測定

試作した磁化コイルの磁場発生特性を把握するため、磁化コイルに印加する電流（以下、磁化電流）に対する発生磁束密度および磁場（磁束密度）分布の測定を行った。磁束密度の測定には、カネテック株式会社製テスラメータ（TM-701）を用いた。

3-2 実験条件

深溶込みを形成する条件を探索するため、製作した実験装置の性能評価も兼ねて、溶接実験を行った。

試験片(母材)は板厚6mmのオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を使用した。

その他詳細な実験条件を表1に示す。溶接電流 $I_w=180A\sim 250A$ 、磁化電流 $I_c=0\sim 6[A]$ とし、溶接電流及び磁束密度が溶込み深さに与える影響を調べた。

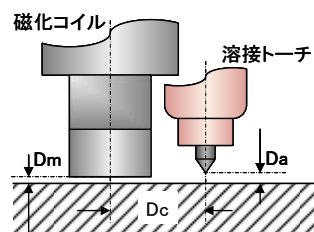
なお、実験に際しては、溶込み形成の解析を容易にするため、平板上でのビードプレート溶接を行った。

また、アークと溶融池の挙動を観察するため、赤外線領域を撮影できるよう改良した一眼レフカメラにバンドパスフィルター（970nm）とNDフィルターを装着し、溶接中の撮影を行った。

表1 実験条件

溶接姿勢	下向き
ルート間隔	0[mm] (ビードオン)
溶接電流 (I_w)	180-250[A]
溶接速度	2[mm/sec]
シールドガス	Ar: 30[l/min]
バックシールドガス	Ar: 40[l/min]
アーク長 (D_a)	2[mm]
磁化電流 (I_c)	0-6[A]
試験片と磁化コイルの間隔 (D_m)	0.5[mm]
電極と磁化コイルの間隔 (D_c)	0[mm]
溶接材料	SUS304
試験片寸法	70×300×6 ^t [mm]

図6 磁化コイルと溶接トーチの配置図



4 実験結果および考察

4-1 磁束密度および磁場（磁束密度）分布の測定

4-1-1 磁化電流を変化させたときの磁束密度の測定

試作した磁化コイルの磁場発生特性を把握するため、磁化コイルに印加する電流（磁化電流）と発生する磁場

（磁束密度）の関係を調べた。

なお、測定方法は図7に示すとおり、空気中にて行った。測定位置は、ヨーク間中心 ($x=0$)、ヨーク軸中心 ($y=0$)、ヨーク高さ中心 ($z=0$) である。

測定結果を図8に示す。結果より、磁化電流の増加に伴い、磁束密度もほぼ直線的に増加しているのがわかる。

溶接実験中に磁束密度を測定することは困難であるため、磁束密度を変化させる実験に際しては、本結果を基に、磁化電流によって制御を行うことが可能である。

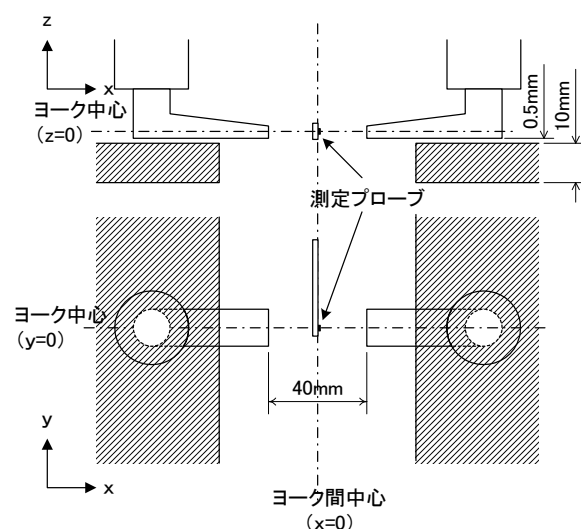


図7 磁束密度測定位置

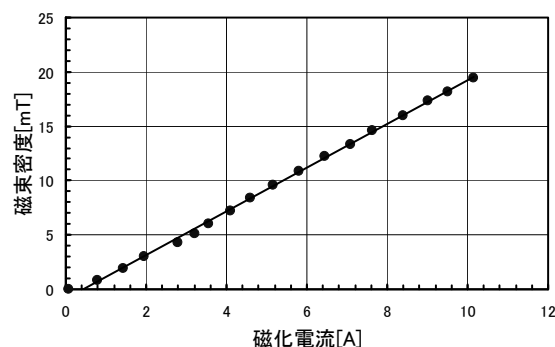


図8 磁化電流と磁束密度の関係 ($x=y=z=0$)

4-1-2 磁場分布の測定

次に、磁化電流 $I_c=2[A]$ 印加時における磁場分布を測定した（測定方法は図7を参照）。その結果を図9～10に示す。X軸方向の磁束密度は、 $x=0$ で最も低くなっており、下部ヨーク両端に近づくにつれて上昇している。

Y軸方向では、 $y=0$ 近傍で最も高い値を示し、 $\pm 5mm$ 程度までは平坦な分布となっているが、それ以降は減少し始め、 $\pm 20mm$ では、ピーク値の70%程度になっている。

Z方向では、 $z=0$ より1～2mm程度下部において最も高

い磁束密度となっている。これは、下部ヨークの形状が $z=0$ に対して上下異形となっていることに起因しているものと考えられる。

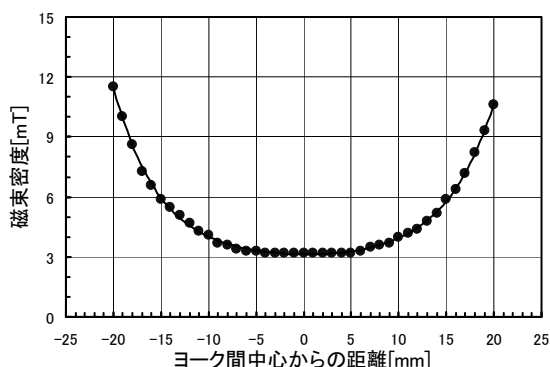


図9 x方向の磁場分布 ($y=z=0$)

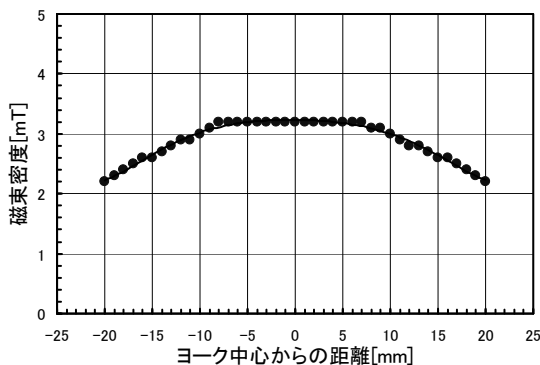


図10 y方向の磁場分布 ($x=z=0$)

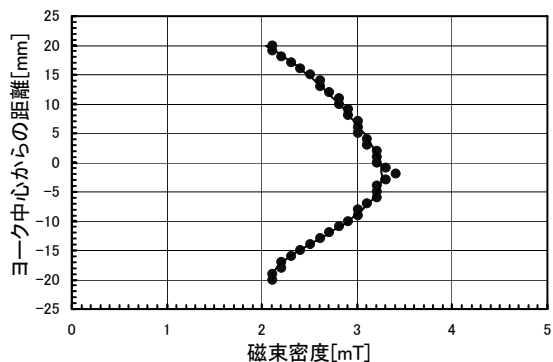


図11 z方向の磁場分布 ($x=y=0$)

4-2 溶接実験

4-2-1 ビード形状

溶接電流および磁化電流を変化させて、溶け込みに及ぼす影響を調べた。溶接電流180[A]における表ビードの概観、アークの挙動ならびに断面マクロ写真を図12に示す。

溶接初期は磁化電流 $I_c=0$ [A]とし、順次 $I_c=2$ [A]、 4 [A]、 6 [A]と変化させた。表ビードの写真より、磁化電流の増加に伴いビード幅が減少していることがわかる。アーク

も磁化電流の増加に伴い溶接方向に対して後方に大きく偏向していることから、ビード幅の減少は、アークの偏向に伴い熱源幅が減少するとともに溶接方向に細長く分布することに起因していると考えられる。

一方、断面マクロは、磁化電流 $I_c=2$ [A]において最も溶込み深さが大きくなっており、それ以上の磁化電流では、溶込み深さおよびビード幅も減少しているのがわかる。

図13に溶接電流を変化させたときの断面マクロ写真を示す。当然ながら溶接電流の増加に伴い溶込み深さも増えているが、溶接電流 $I_w=220$ [A]までは、いずれも磁化電流 $I_c=2$ [A]において、溶込み深さが大きくなっていることがわかる。

一方、溶接電流 $I_w=250$ [A]では、磁化電流 $I_c=4$ [A]印加時において最も溶込み深さが大きくなっている。これは、溶接電流の増加に伴う電磁力の増加とアークの硬直性により、アークの偏向も抑制され、熱源が維持されたことによるものと推測される。

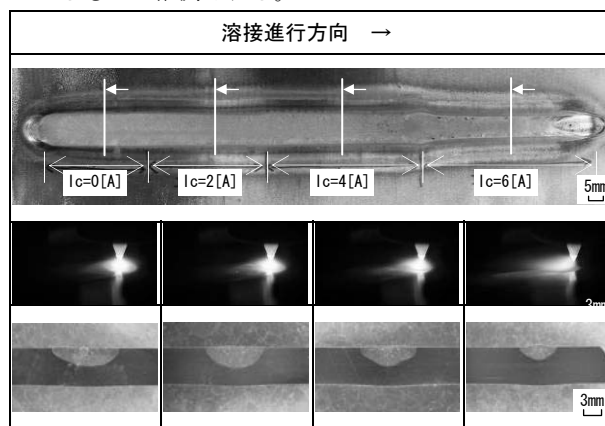


図12 磁化電流 $I_c=180$ [A]におけるビード概観、アーク挙動ならびに断面マクロ

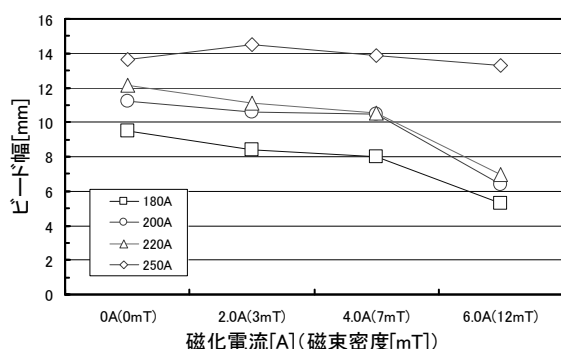
	$I_c=0$ (0mT)	$I_c=2$ (3mT)	$I_c=4$ (7mT)	$I_c=6$ (12mT)
$I_w=180$ [A]				
$I_w=200$ [A]				
$I_w=220$ [A]				
$I_w=250$ [A]				

図13 溶接電流および磁化電流を変化させた場合の断面マクロ写真

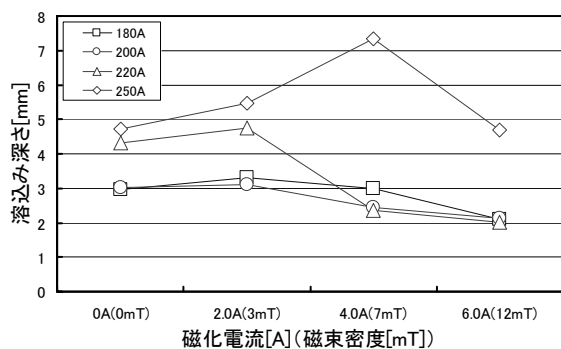
4-2-2 ビード幅および溶込み深さ

図14に磁化電流によるビード幅および溶込み深さの測定結果を示す。a)のビード幅の変化より、磁化電流の増加に伴いビード幅が減少しているのがわかる。溶接電流で比較すると、溶接電流 $I_w=250[A]$ は溶接電流 $I_w=220[A]$ 以下よりも減少幅が小さくなっている。

また、b)の溶込み深さの変化では、溶接電流によって違いが見られ、溶接電流 $I_w=220[A]$ 以下においては、磁化電流 $I_c=2[A]$ 印加時にピーク増となり、磁化電流 $I_c=4[A]$ 以上では減少に転じている。溶接電流 $I_w=250[A]$ では、磁化電流 $I_c=4[A]$ 印加時において最大値を示し、板厚を超えるような深い溶込みを形成している。これは、4-2-1で述べた要因のほかに、本実験装置はAVC装置を取り付けているため、アークの偏向に伴い、アーク長を一定に保つよう溶接トーチが試験片へ近づくことで、熱源がさらに板厚方向へ作用しやすくなったことも一因として考えられる。



a) ビード幅



b) 溶込み深さ

図14 磁化電流による
ビード幅と溶込み深さの変化

5 まとめ

本研究では、TIG溶接における溶込み深さを増大させる方法として、ECMP法を適用しその可能性について、実験装置の製作と同装置を用いた実験により検討した結果以下の結論を得た。

- 1) ECMP法を実現するために製作した実験装置は、磁化コイルの性能も含め、十分に機能することがわかった。
- 2) 溶接実験において、溶接電流 $I_w=220[A]$ 以下の条件では、磁化電流 $I_c=2[A]$ 印加時に最も溶込みが深く、その後は、減少に転じた。
- 3) 溶接電流 $I_w=250[A]$ においては、磁化電流 $I_c=4[A]$ 印加時に板厚を超えるような最も深い溶込みを形成し、電磁力による溶込みを増大させる効果が確認された。

今後は、本実験結果の再現性の確認と未着手のホットワイヤ溶接における効果についても継続して実験を行う予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、前沖縄工業高等専門学校機械システム工学科真鍋幸男教授ならびに琉球大学機械システム工学科松田昇一助教には多大なるご協力とご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

本研究は、沖縄県産業振興重点研究推進事業により実施した「電磁力を用いた溶込み制御に関する研究 (2010 技007)」である。

参考文献

- 1) 真鍋幸男, 和田宏一, 銭谷哲, 広本悦己, 小林泰幸: “溶融池磁気制御溶接法の基本概念と可能性の検討”, 高温学会誌, Vol. 25(1999), No. 1, 38-45.
- 2) 真鍋幸男, 和田宏一, 銭谷哲, 若元郁夫, 小林泰幸: “溶融池磁気制御横向TIG溶接法の研究”, 高温学会誌, Vol. 25(1999), No. 5, 211-218.
- 3) 真鍋幸男, 和田宏一, 銭谷哲, 広本悦己, 橋本安之: “溶融池磁気制御手法を用いた2ワイヤ式横向姿勢TIG溶接法の研究”, 溶接学会論文集, Vol. 18(2000), No. 1, 40-50
- 4) 真鍋幸男, 松田昇一, 羽地龍志, 棚原靖, 松本幸礼, 銭谷哲, “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, Vol. 77(2005), pp. 132-133.
- 5) 真鍋幸男, 眞喜志隆, 松田昇一, 羽地龍志, 松本幸礼, 棚原靖: “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), pp. 132-133.

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。