

令和元年6月13日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06747

研究課題名(和文) 溶融池磁気制御アーク溶接法による溶込み制御に関する研究

研究課題名(英文) Study on penetration control of the arc welding using external 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：TIG溶接はアーク溶接の中でも継ぎ手の信頼性が高く、スパッタの発生量が少なく、施工の利便性が高いことから工業的に広く利用されているが、他のアーク溶接法と比較した場合、溶け込みが浅い欠点がある。そこで我々は外部磁場を溶融池に付加することで、溶融池内に発生する電磁力を利用して、溶融金属の流れを制御し、溶け込み増大を図る、新しい溶接法を提案した。

その結果、磁場がアークおよび母材への入熱に及ぼす影響を明らかにした。また溶融池の流れ、表面温度および最終的なビード形状を詳細に観測した結果、磁場が溶融池の流れに及ぼす影響を明らかにし、適正な磁場の付加により、溶け込みを増大させることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般的にTIG溶接は、溶接面の清浄性が高く、溶接品質に優れているが、溶込みが浅い欠点があるため、溶接施工現場での利用は制限されている。本研究では溶融池に外部磁場を付加し、溶融池内に発生する電磁力を用いて溶け込み増大を図った。本研究では、外部磁場がアークの形状および母材への入熱に及ぼす影響を調べた。また溶融池の流動および温度分布詳細に観測および解析を行い、外部磁場が溶融池の流動および温度分布に及ぼす影響を明らかにした。これらの結果より、TIG溶接に外部磁場の付加することにより、溶込みが増大することが明らかになった。これにより、溶接品質に優れているTIG溶接の適用拡大が期待できる。

研究成果の概要(英文)：TIG welding is one of the welding methods widely used in industries for high reliability of joints, little occurrence of spattering and high convenience of construction. However, compared with other arc welding methods, there is a disadvantage that depth of penetration is shallow. To solve this problem, we proposed a new ECMP (Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process) method which controls the molten metal flow by using electromagnetic forces generated in the molten pool by applying a magnetic field. In this study, we investigated in detail the influence of the electromagnetic forces generated by the external magnetic field on the arc, the flow of the molten pool and surface temperature of molten pool. From these results, the influence of the external magnetic field on the arc shape and the heat input to the base material was clarified. It was also found that the downward and upward electromagnetic forces in the molten pool contribute to penetration increase.

研究分野：熱工学、材料加工

キーワード：アーク溶接 磁気制御 溶け込み制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 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。

我々はその対策として、熔融池内を流れる電流に対して外部磁場を付加することにより、熔融池内に電磁力を発生させ、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ている（引用文献①、②）。これまでに本手法をホットワイヤーTIG溶接に適用し、外部磁場（電磁力）で熔融金属の流動を制御することで、下向および上向姿勢等の難姿勢溶接の高効率化を達成している。

なおECMP法を適用しているTIG溶接は、一般的に溶接表面の清浄性および継手の信頼性が高く、施工の利便性が良いが、溶込みが浅い欠点がある。そのため厚板の鉄鋼材等の溶接には、作業能率やコストの観点から、溶着速度が速く、溶込みが深い高能率な溶接法であるマグ溶接や炭酸ガス溶接などのガスマタルアーク（GMA）溶接が主流である。しかしながら、TIG溶接と比較して、スパッタが発生しやすく、溶接欠陥が生じやすい。

そこで、外部磁場を用いて、溶接表面の清浄性および継手の信頼性が高いTIG溶接の溶け込み増大ができれば、産業的に大きな価値があると考えられる。

### 2. 研究の目的

(1) アーク溶接の中でもTIG溶接は、溶接表面の清浄性および継手の信頼性が高く、施工の利便性が良いが、溶込みが浅い欠点がある。TIG溶接で、溶込みを増大させる方法として、酸素や硫黄、ハロゲンなどのフラックス成分を母材に添付するA-TIG法などがあるが、フラックス添付によるコスト増加や作業前後のフラックスの添付および除去など作業工程が増える欠点がある。我々はその対策として、電磁力（ECMP法）の利用を提案している。これまでのECMP溶接は、強い反重力方向の電磁力を熔融池内に発生させることにより、高入熱の条件でも、ビードの垂れ落ちを防止し、高能率の溶接をすることが主目的であった。ところで、熔融池に付加する磁場の向きを制御すれば、熔融池内に反重力方向だけではなく重力方向の電磁力も任意に発生させることができる。この熔融池内に発生させた重力方向の電磁力を積極的に利用すれば、溶込みが増大し、高品質なTIG溶接を厚板溶接への適用拡大が期待できる。本研究の目的は「熔融池磁気制御アーク溶接法（ECMP法）の高機能化」であり、熔融池内に発生させた、重力方向および反重力方向の電磁力を用いて熔融金属の流れを制御し、溶け込み増大（制御）を図った。

### 3. 研究の方法

(1) 平成28年度は、始めに重力方向の電磁力を発生させる電磁石の磁極先端形状の選定および磁極設置位置の最適化をおこなった。熔融池内に発生させる電磁力を大きくするために外部磁場を大きくした場合、アークも電流の流れであるため、アークにも電磁力が生じる。本実験条件では、アークには溶接方向への電磁力が発生し、アークは溶接方向に大きく偏向する。その結果、母材への入熱が減少し溶接が不安定となる場合が生じる。そこでアークに極力影響を与えず、熔融池に局所的に磁場を付加するような磁極の検討が必要となった。そこで数値解析ソフトCOMSOL Multiphysicsを用いて電流および磁場解析を行い、磁極の先端が先細のモデル案を作成した。その結果より、比較的局所的に磁場を付加できる形状3つのモデルに絞り込んだ。その後、実際に磁極先端モデルを製作し磁場測定の結果から、最終的に1つに絞り込んだ。次にSUS304の薄板（板厚3mm）の試験片を用いて、磁束密度（外部磁場）、溶接電流およびワイヤ加熱電流を変化させた場合の重力方向電磁力が溶込み深さへ与える影響を調べた。なお本研究の本来の目的は厚板溶接の溶け込み増大であるため、厚板を用いた溶接実験を行うべきだが、電磁力が溶込み深さへ与える影響およびそのメカニズムに不明な点が多いため、比較の実験が行いやすい薄板（板厚3mm）の試験片を用いた溶接実験を始めに行った。

(2) 平成28年度後半から平成29年度にかけて、本来の目的である厚板（板厚6mm）の試験片を用いて、磁場を使った溶接実験を行った。始めに当初の研究計画に示したように、1ワイヤ（Hot wire）方式から、重力方向の電磁力の増大および熔融池全体の流動の制御ために、2ワイヤ方式に変更した。なお加熱した2つのワイヤをアーク前方および後方の熔融池に挿入した。しかしながら、顕著な溶け込み増大効果は得られなかった。そこで実験装置の配置および実験条件を大幅に変更した。主な変更点は、①添加ワイヤの廃止および②磁極位置、③トーチ角度の変更である。

(3) 平成29年度後半から平成30年度にかけて、大幅に変更した実験装置の配置および実験条件で、厚板（板厚6mm）の試験片を用いて、溶接実験を行った。なお磁場（磁束密度）が熔融池の流動および溶け込み深さに及ぼす影響を明らかにするために、熔融池表面の流れを複数のNDフィルターとバンドパスフィルター（810nm）を取り付けた高速度カメラとパルスレーザ（500W, 810nm）を用いて詳細に観察した。また熔融池表面の流れを定量的に評価するために、観察結果より得られた時系列的な画像を用いてPIV解析（粒子画像流速測定法）を行った。さ

らに熔融池表面の温度分布を2色温度計測法により詳細に測定した。これらの実験結果より、磁場が熔融池の流動、温度分布および溶け込み深さに与える影響を詳細に調べた。またアークも電流の流れであるため、外部磁場を付加するとアーク内に電磁力が発生し、本実験の条件では、アークは溶接方向に大きく偏向する。我々は、溶け込み増大のために、磁場を付加しているのにもかかわらず、このアークの偏向によりアークから母材への入熱が低下し、溶け込みが浅くなる可能性がある。そこで外部磁場を付加したときに生じるアークの傾きが母材への入熱に及ぼす影響を、分割母板法（引用文献③、④）を用いて調べた。

#### 4. 研究成果

(1)薄板(板厚 3 mm)に新 ECMP 法を適用したときの重力方向電磁力が溶け込み及ぼす影響

本研究の本来の目的は厚板溶接の溶け込み増大であるが、重力方向の電磁力が溶け込み深さへ与える影響およびそのメカニズムに不明な点が多いため、始めに比較的实验が行いやすい薄板(板厚 3 mm)の試験片を用いて、溶け込み増大のメカニズムを詳細に調べた。

図 1 に Hot wire TIG 溶接に新 ECMP 法を適用した場合の実験装置配置図を示す。従来の ECMP 法が熔融池内に発生させた反重力方向の電磁力を用いて、入熱過大の溶接条件でもビードの垂れ落ちを防止し、健全なビード形状を得ることが目的だが、新 ECMP 法は重力方向の電磁力も積極的に利用して溶け込み増大を試みる。実験装置は大別して TIG 溶接トーチ、移動台車、添加ワイヤおよび磁化コイルにより構成されている。また TIG トーチを一極、添加ワイヤは + 極に接続し、それぞれの電源は独立して設置した。なお試験片は板厚 3 mm のオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 を使用した。

Hot wire TIG 溶接および Hot wire TIG 溶接に ECMP 法を適用した場合(新 ECMP 溶接)の溶接中の熔融池およびアークの様子を図 2(a)および(b)にそれぞれ示す。なお溶接電流は  $I_A=130$  A、ワイヤ加熱電流は  $I_A=80$  A である。図中の白く発光する部分がアーク、中央部の楕円形が熔融池、左上から熔融池に挿入しているものが加熱された添加ワイヤである。図(b)は図(a)に比べワイヤ挿入点近傍で熔融池表面が下がっている様子が確認される。これはワイヤ挿入点とアークの間の熔融金属に働く重力方向の電磁力が熔融池内の熔融金属を押し下げたためであると考えられる。図(a)では、アークが溶接方向へわずかに偏向している様子が確認される。これは互いに逆方向に流れるワイヤの加熱電流とアーク電流の間に生じる斥力の影響を受けたためであると考えられる。図(b)では、さらにアークが溶接方向に大きく偏向している様子が確認できる。これは外部磁場により、アーク中に発生した溶接方向への強い電磁力の影響である。Hot wire TIG 溶接および ECMP 溶接のビード断面形状を図 3(a)および(b)にそれぞれ示す。なお両図共に上側がアーク側、下側が裏波側である。図(a)ではアーク側にアンダーカットが確認される。図(b)ではアーク側がわずかに盛り上がり、裏波側(裏側)ではビードが大きく垂れ下がる様子が確認される。図(b)は図(a)と比べビードが大きく下に垂れ下がっている。ビードの垂れ下がり高さを図 4 に示す。図より ECMP 溶接の場合が最もビードの垂れ下がり高さが大きく、その値は通常の TIG 溶接と比較すると 1.8 倍であった。Hot wire TIG 溶接および ECMP 溶接ともに図 3 上側から下方へワイヤが挿入され、熔融池を下に押し下げる効果はあるものの、ECMP 溶接の方がよりビードの垂れ下がり高さが大きい。これは熔融池内に発生させた重力方向の電磁力により熔融金属が押し下げられたためであると考えられる。

これらの熔融池の可視化結果、ビード断面形状の

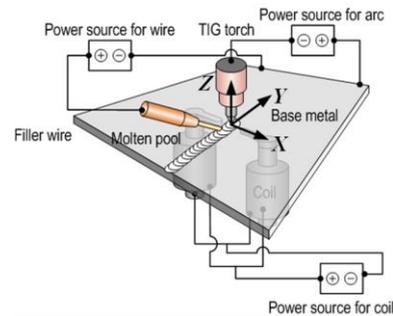
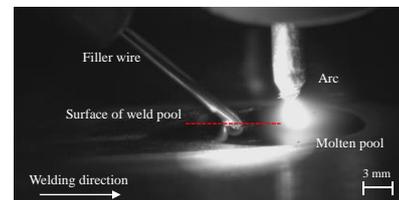
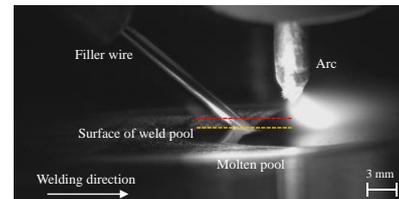


図 1 実験装置概略図



(a) Hot-wire TIG 溶接

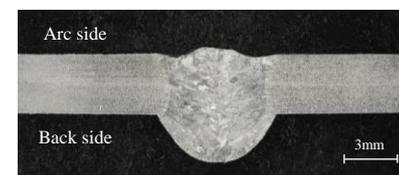


(b) 新 ECMP 溶接

図 2 熔融池とアークの様子



(a) Hot-wire TIG 溶接



(b) 新 ECMP 溶接

図 3 ビード断面形状

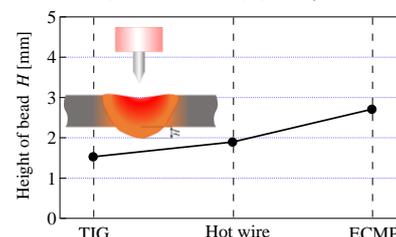


図 4 ビード高さ

比較およびビード高さの分布より、重力方向の電磁力を積極的に利用した新 ECMP 法が溶け込みに増大に寄与することが明らかになった。なお詳細は 5 節の学会発表⑤と⑥を参照。

## (2) 厚板(板厚 6 mm)に新 ECMP 法を適用したときの重力方向電磁力が溶け込み及ぼす影響

母材の厚さが 3 mm の薄板の TIG 溶接に、新 ECMP 法を適用した場合、前述のように、特定の条件に限られるが、重力方向の電磁力が溶け込みの増大に寄与することが明らかになった。しかし、母材の厚さが 6 mm の厚板の TIG 溶接に新 ECMP 法を適用したところ、重力方向の電磁力による溶け込み増大の効果を十分に得られなかった。そこで厚板に新 ECMP を適用するに当たり主に次の点を変更した。加熱した添加ワイヤを溶融池に挿入しているにもかかわらず、その溶け込み深さは、通常の TIG 溶接と同等または逆に小さくなる傾向が見られた。これは添加ワイヤの温度が溶融池の温度と比較して相対的に温度が低い影響だと考えられる。そのため添加ワイヤを廃止した。また溶融池内に局所的に強い電磁力を得るために、磁極の位置を電極直下から前後方向に移動させた。ところで、より強い電磁力を得るために磁場を大きくした場合、アーク自身も電流であるためアークにも電磁力が生じる。本条件ではアークには前方に電磁力が生じ、アークが前方に大きく偏向する。このアークの偏向によりアークから母材への入熱が低下し、溶け込みが浅くなる。またアーキングが起きやすくなり、溶接が不安定となる。そこでアークの前方への偏向を抑制するために、トーチ角度を  $10^\circ$  の後退角とした。なおアークの偏向が母材への入熱に及ぼす影響に関しては分割母板法を用いて詳細に調べた(5 節の学会発表②を参照)。図 5 に磁場(磁束密度)と母材への入熱の関係を示す。図より磁束密度の増加に伴い、入熱が小さくなり、最大 10% 減少する。これは付加する磁束密度が大きくなるにつれて、アークが偏向し、外気と接触するアーク表面積が増加することで、アークから外気へのふく射による熱損失が増えた影響と考えられる。

図 6 に厚板の TIG 溶接に新 ECMP 法を適用した場合の実験装置配置図を示す。実験装置は大別して TIG トーチ、移動台車および磁化コイルより構成されている。

TIG 溶接および新 ECMP 溶接の溶接中の溶融池およびアークの様子を図 7(a)および(b)にそれぞれ示す。両図共に後退角  $10^\circ$ 、溶接電流は  $I_A = 220$  A である。また、図右上の黒い箇所が電極、中央部の楕円形が溶融池である。なお両図共に電極直下にアークがあるものの、強い光の影響が抑えられ、溶接中の溶融池表面の様子が観測できている。また図中の溶融池内にある白い点はトレーサ粒子(ジルコニア:  $\phi 0.1$ )である。図(a)では、溶融池が後方に大きく広がっている様子が見られる。トーチ角度を  $10^\circ$  の後退角としているためアークが電極から後方に発生する。そのため後方に発生したアークのアーク圧によって溶融池が後方に大きく広がったと考えられる。図(b)は図(a)と比較して溶融池の後方への広がりが小さい。磁場を付加することでアークには前方への電磁力が発生する。図(b)もトーチ角度が  $10^\circ$  の後退角であるが前方への電磁力のために、アークは溶融池に対してほぼ垂直に発生する。そのため溶融池は図(a)と比べて後方への広がりが小さくなったと考えられる。また図(a)の TIG 溶接の溶融金属はアークを中心に溶融池表面を放射状に流れている。前方への流れは溶融池前縁にぶつかり、その後、凝固線に沿って後方に流れる。そして溶融金属は前方から後方に流れた後、アーク後方で後流渦を形成し、アーク後方に留まる。図(b)では、溶融金属は前方から後方に流れた後、図(a)とは異なり、アーク中心部(アーク直下)へ流入する強い流れが確認できた。また溶融池前縁部で溶融金属が湧き上がるような流れも確認できた。アーク中心部への強い流れは溶融池内に発生させた重力方向の電磁力とアーク圧によって溶融金属が押し下げられたためだと考えられる。アーク前方の溶融池の広がりは図(a)より(b)の方が大きい。これは溶融池前方の溶融池に発生する反重力方向の電磁力により、溶融池前縁部で溶融金属が湧き上がるため、図(b)の溶融池が前方に大きく広がったと

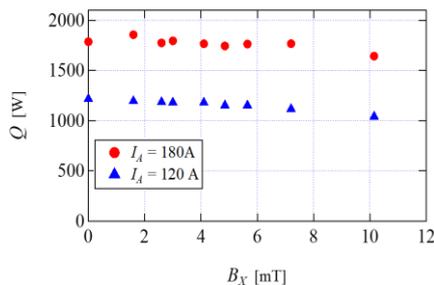


図 5 磁場が入熱に及ぼす影響

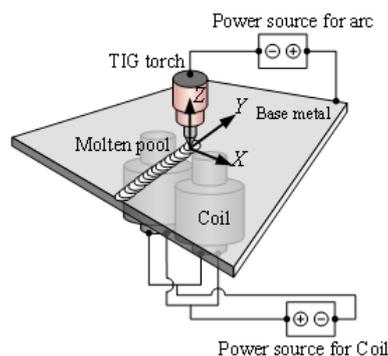
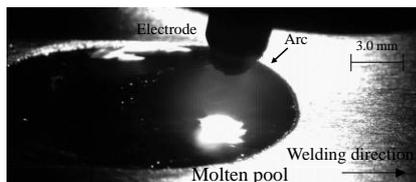
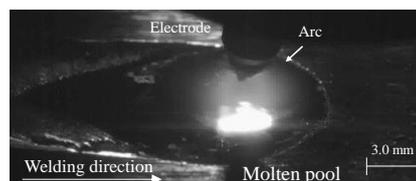


図 6 実験装置概略図



(a) TIG 溶接



(b) 新 ECMP 溶接

図 7 溶融池とアークの様子

考えられる。

図8(a)および(b)に溶接電流  $I_A=210$  A の場合の TIG 溶接および新 ECMP 溶接のビード断面形状をそれぞれ示す。図(a)のビードの溶け込みはお椀型の形状を示し、裏波側まで達していないが、磁場を付加した図(b)では、僅かながら裏波側まで達している様子が見られる。

図9に溶接電流  $I_A=210$  および  $I_A=220$  A における裏波側ビード高さの変化を示す。図より  $I_A=220$  A の場合、新 ECMP 溶接の裏波側のビード高さは、TIG 溶接より約8倍大きい。これらの結果より、新 ECMP 法が溶け込み増大に寄与することが明らかである。なお詳細は5節の学会発表①、③および④を参照。

<引用文献>

- ① Y.Manabe, Y.Hiromoto, S.Zenitani, Y.Kobayashi and Y.Watanabe, Basic Concept and Viability of Electromagnetically Controlled Molten Pool Welding Process, WeldingGuide Book by Japan Welding Socirty, 2004, pp.II-194-II-202
- ② 松田昇一, 真鍋幸男, 玉城光輝, 棚原靖, 松本幸礼, 又吉勇介, 溶融池磁気制御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—, 溶接学会論文集, 第30巻, 第2号, 2012, pp.116-124
- ③ 田中学, 寺崎秀紀, 成田竜一, 小林和行, 藤井英俊, 牛尾誠夫, “ティグ溶接における陽極熱輸送とその溶込み断面積に与える影響”, 溶接学会誌, 第23巻, No.3, (2005), pp. 398-404
- ④ 三木聡史, 小西恭平, 茂田正哉, 田中学, 村田彰久, 村田唯介, “狭窄ノズルを用いたティグ溶接におけるシールド性の実験的検討”, 溶接学会誌, 第36巻, No.1, (2018), pp. 21-25

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 7 件)

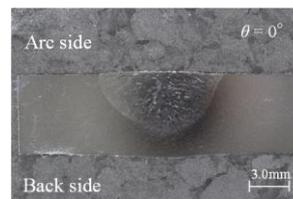
- ① 中山友裕, 松田昇一, 棚原靖, 溶融池磁気制御アーク溶接による溶け込み制御に関する研究, 日本機械学会九州支部北九州講演会, 査読無し, No198-1, F22, 6 pages, 2019
- ② 石川貴章, 松田昇一, 棚原靖, 外部磁場がアークの挙動および入熱に及ぼす影響, 日本機械学会九州支部九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会, 査読無し, 517, 4 pages, 2019
- ③ Shoichi Matsuda, Manabu Tanaka, Yasushi Tanahara and Tomohiro Nakayama, Study on penetration control of the arc welding using external magnetic field, The Symposium of Thailand Welding and Inspection Technology 2018 (TWIT 2018), 査読有り, 2 pages, 2018
- ④ 松田昇一, 棚原靖, 田中学, 中山友裕, 外部磁場を用いた溶け込み制御の研究, 溶接学会秋季全国大会講演論文集, 査読無し, 2 pages, 2018
- ⑤ Shoichi Matsuda, Yasushi Tanahara and Manabu Tanaka, Penetration Control of Arc Welding utilizing Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding Process, 7th International Conference on Welding Science and Engineering (WSE 2017), 査読有り, 2017
- ⑥ 安里利祥, 松田昇一, 棚原靖, 斧田有平, 溶融池磁気制御アーク溶接による溶け込み制御に関する研究, 日本機械学会年次大会講演論文集, 査読無し, No.17-1, G0400303, 5 pages, 2017
- ⑦ Yuhei ONODA, Shoichi MATSUDA, Yasushi TANAHARA, Toshinaga ASATO, Study on the Molten Metal Flow and Temperature Characteristics of Electromagnetic Controlled Molten Pool Welding using an Unsymmetrical Alternative Magnetic Field, Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, 査読有り, 2017

〔図書〕(計 0 件)

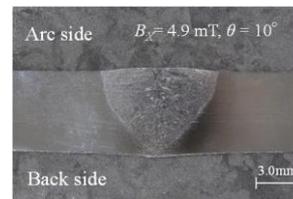
〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:



(a) TIG 溶接



(b) 新 ECMP 溶接

図8 ビード断面形状

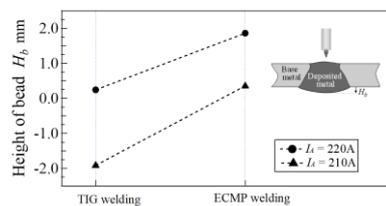


図9 ビード高さ

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

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究分担者     なし

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

(2)研究協力者     なし

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。