平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「アルミニウムを主体とする難接合材の新プラズマ溶接技術の開発」

成果報告書 (概要版)

平成21年 3月

委託者 関東経済産業局 委託先 財団法人 千葉県産業振興センター 目 次

- 第1章 研究開発の概要
 - 1 1 研究開発の背景・研究目的及び目標
 - 1-2 研究体制
 - 1-3 成果概要
 - 1-4 当該プロジェクト連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 アルミニウムのプラズマ溶接における最適電流波形の解明
 - 2-1-1 各種電流波形の効果把握
 - 2-1-2 エネルギー密度の最適化シミュレーション
- 2-2 中~厚板アルミニウム用プラズマトーチの開発
 - 2-2-1 シミュレーション解析によるノズル形状の最適化
 - 2-2-2 新プラズマトーチの試作・開発、評価
- 2-3 厚板用新プラズマ溶接システムの確立と限界板厚の把握
 - 2-3-1 限界板厚の把握
 - 2-3-2 溶接条件と接合部の冶金的性質、歪量の関係把握
 - 2-3-3 溶接システム全体の最適化
- 2-4 アルミニウム以外の難接合材に対する溶接性確認
 - 2-4-1 ステンレス鋼およびチタン等での溶接性の確認

第1章 研究開発の概要

1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標

アルミニウムはその耐腐食性・軽量性などの利点により、船舶・鉄道 車両などの物流機器、電力設備や化学プラントなどの産業プラント、および各種構造物などで大 きな市場を維持している。この内、中~厚板と呼ばれる製品分野の代表例として、電力関係の各 種アルミ容器類、LNG貯蔵設備がある。

これらの材料の接合方法には幾つかの方法があるが、通常工業的にはティグ・ミグと呼ばれ る手動・半自動溶接により溶接加工される場合が一般的である。これらの溶接方法では接合す る板同士を >> 型あるいは >> 型形状に切削(開先加工)し、この切削部をアーク放電により溶融 させ、そこに更に溶融させた溶接棒を加えながら凹部を充填して接合が行われる。従って、材 料の板厚が厚くなるほど凹部を充填するための溶接回数が急激に増加して経済性が著しく低下 するほか、数次に亘る溶接熱の影響により熱歪が大きくなるという品質上の問題を抱えている。

上記問題を解決するため、一部では電子ビーム溶接、レーザー溶接などのエネルギー密度が 高く、V型あるいはX型の開先加工が不要となる溶接方法が実用化され始めている。しかし、 両方法ともに設備が非常に高額であり、更には予め溶接する板の端部を極めて高精度で前処理 して隙間無く密着するように位置合わせしておく必要がある。従って、一般産業プラントや造 船など国際的な価格競争が激しい分野では設備導入と並んで加工コスト面でも大きな障害と なってしまっている。

このような現状の中で、溶接装置が比較的安価で、かつ汎用性が高く(大気中での溶接が可能・精度の良い前処理が不要・一工程での接合が可能 等々)、プラズマ溶接が最も有望である。しかし現在市販されている一般的なプラズマ溶接機は電流300Aまでで、溶接可能板厚は通常5mm程度までである。

15~25mmまでのアルミ等の非鉄金属厚板を1パスで溶接可能とする、安価で汎用性のあ る高電流新プラズマ溶接技術の開発を行う。そのためにエネルギー密度集中化を目指した最適電 流波形制御方法の確立、プラズマ高速流のシミュレーションによるトーチ形状の最適化、ロボッ ト等利用の溶接システム全体の制御と溶接施工法の最適化を行う。応用範囲として受変電設備向 け各種容器類、LNG 貯槽設備、建築構造物や化学プラント機器等のアルミ製品等が考えられる。

本研究では単なる溶接機の電源容量の増大のみではなく、中~厚板溶接に最適な新型プラズマ 溶接システムの開発と、それを活用した溶接施工手法の確立を目標としている。 研究体制全体図を下図に示す。



共同研究体の各機関で下記の開発委員会を構成し事業推進した。

氏名	所属·役職	備考
伊藤 広一	赤星工業株式会社 常務取締役	PL 委
田中 学	国立大学法人 大阪大学 接合科学研究 所 教授	SL 委
坂巻 健次	赤星工業株式会社 取締役工場長	委
笹倉 隆親	赤星工業株式会社 技術部長	委
上山 智之	株式会社ダイヘン 溶接機事業部 部長	委
三田 常夫	ダイヘン溶接メカトロシステム(株) 理事	委
大久保 通則	学校法人 日本大学 生産工学部 教授	委
嶋田博	イ 千葉県産業支援技術研究所 プロジェクト推進部長	委
榎本 正敏	社団法人 軽金属溶接構造協会 専務理事	アドバイザー
野本 敏治	国立大学法人 東京大学 名誉教授	アドバイザー
永洞 孝昭	株式会社 東芝 開閉装置部 参事	アドバイザー
大賀進	石川島播磨重工業株式会社 愛知事業所長 理事	アドバイザー
間野 純一	財団法人 千葉県産業振興センター 企業振興部 チーフプロジェクトコーディネーター	アドバイザー
長谷川 利之	財団法人 千葉県産業振興センター 東葛テクノプラザ 参事	委

1-3 成果概要

エネルギー密度の集中化を目的とした実験とシミュレーションによる最適な電流波形制御方法の確立。 プラズマ高速流のシミュレーションによるトーチ形状の最適化。 ロボットなどを利用した溶接システム全体の制御方法ならびに溶接施工方法の最適化を実施した。

その結果、板厚15mmまでの1パス溶接が可能な溶接ロボットを含む溶接システムの試作と 最適溶接施工方法を把握することが出来た。

板厚15mmまでのアルミニウムについて、1パスでのプラズマ溶接技術を確立する ことにより、従来のティグ溶接またはミグ溶接と比較して生産性が高く(開先加工不要、 溶接時間の50%短縮)、かつ安定的に溶接歪が少なく、溶接欠陥が発生しにくい高品 質な製品の製造技術を確立できた。

本技術によるアルミニウム溶接方法については、高圧ガス保安協会(経済産業省)な らびに日本ボイラー協会(厚生労働省)において溶接施工法試験の申請を行い、各機関 における試験の結果、施工法の認定を得ることができた。

本研究開発を発展させ、次段階の製品化・事業化に向けた活動を展開する予定である。

電力プラント向は約1年後、船舶プラント向は約3年後の実用化を目指している。具体的 な課題を下記に示す。

変電所等で使用されるガス絶縁開閉装置(GIS)の中でも、アルミニウム製GISについ て新型プラズマ溶接技術の適用を目指す。本システム適用の手順としては、本開発で試作した新 型プラズマ溶接システムを用いて安定的な生産方式を構築した後には国内重電メーカーに対し試 験運転評価を依頼して、中長期的な溶接部の信頼性について確認を行い、これらの確認が出来次 第、電力会社に対して施工法認定の申請手続きを行う。

LNG貯蔵用アルミ製タンクなどの構造物へ新型プラズマ溶接技術を適用するには、大型製品に適したハンドリングや自動化などの溶接施工全体に関するシステム化された技術の構築が重要となる。また、構造物においては接合部の強度に対する信頼性も重要な要素となるため、施工方法構築にあたっては機械的強度の確認を十分に行いながら実用化を図ってゆく。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人 千葉県産業振興センター 東葛テクノプラザ 担当者 長谷川 利之 所在地 〒277-0882 千葉県柏市柏の葉 5 - 4 - 6 連絡先 TEL 04 - 7133 - 0139 FAX 04 - 7133 - 0162

第2章 本論

2-1 アルミニウムのプラズマ溶接における最適電流波形の解明

2-1-1 各種電流波形の効果把握

現行機を用いて板厚6 mm、8 mm 及び 10 mm の Al-Mg 合金(A5052)における I 型突き合わせ溶 接(ルートギャップ無し)を下向き姿勢にて行った。板厚が厚くなるに従って重力の影響により、 表側ビードが窪み、裏ビードが凸になる傾向があることが分かる。とくに、板厚 10 mm ではキー ホール形成までに溶融金属のボリュームが大きくなり重力ヘッドが増して溶落する結果、溶融池 後方での縫合が不可能となり良好な裏波形成ができない。

また、本実験においては、同一溶接条件での繰り返し試験において良好な溶接が得られる場合 もあれば、全く良好な結果が得られなくなるといった再現性に乏しく、現行溶接機による板厚6 mm以上のキーホール溶接において安定した溶接結果を得ることはできなかった。

この要因としては、溶接電源の EN 比率設定範囲は 50~100%であるが、安定したクリーニング 幅を維持するための EN 比率の上限が 65%であった。このため、EP 極性時にタングステン電極が 過熱され先端が変形する。その結果、溶接中にプラズマアーク状態が変化しやすいと考えられ、 キーホールが安定して形成できず、良好な溶接結果が得られなかったものと推測された。

上記の知見とシミュレーション結果に基づき、下記に示す3項目を満たす溶接電流波形を造り 出す事でキーホールを容易に形成し、且つ安定したプラズマアークが得られると考えられる。

No.	必要な項目	実現方法
	中厚板母材への溶融効率の向上	・高電流の出力が必要 ・高 EN 比率が必要
	キーホール形成のためのアーク力、 アークの指向性および集中性の確保	・交流の高周波化 ・中周波パルスの重畳 ・非平衡短形波の採用
	プラズマアーク発生による電極変形の防 止および軽減	・高 EN 比率が必要

2 - 1 - 2 エネルギー密度の最適化シミュレーション

図1はプラズマアークの構造を模擬した、軸方向座標z及び径方向座標rで定義される2次元円 筒座標系の軸対称なシミュレーション領域である。陰極には酸化トリウム入りタングステンを用 い、陰極径4.8mm,先端角60度とした。プラズマガスノズル及びシールドガスノズルは銅とし、 それぞれの内径を2.8~4.0mm、13mmとする。また、先端から6mm以上の領域は水冷されている ものと考え300K一定とした。プラズマガス、シールドガス共に純アルゴンとし、それぞれ流量2. 5L/min、10L/min.で導入した。陰極先端-母材間距離7.0mm、陰極先端-ノズル先端距離3mmとし た。入力電流は波高値240A、周波数60Hzの交流パルスとし、正極率は45%または65%とした。 陽極は銅またはアルミとした。ここでは、局所熱平衡(LTE)状態が成立するものとし、層流及び非 圧縮性を仮定した電磁流体方程式及び補助方程式(1)~(6)をSIMPLEC法を用いて解く事により、 定常状態におけるアークプラズマ特性を求める。但し、アークプラズマは光学的に薄く、準中性 条件を満たすものとする。

(1) 質量保存則

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rj_r) + \frac{\partial}{\partial z}(j_z) = 0$$

(6) オームの法則 $j_r = -\sigma E_r, j_z = -\sigma E_z$

ここで、 ρ は質量密度、P は圧力、 v_z 及び v_r は軸方向及び径方向の流速、 η は粘性、h はエンタルピー、 j_z 及び j_r は軸方向及び径方向の電流密度、g は重力加速度、 κ は熱伝導度、 C_p は比熱、 σ は電気伝導度、R は放射係数(放射損失)、 E_z 及び E_r は $E_z = -\partial V / \partial z$ 及び $E_r = -\partial V / \partial r$ で定義される軸方向及び径方向の電界強度、但しV は電位である。アーク電流により生じる磁界強度は以下のマクスウェルの方程式により求められる。

 $\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rB_{\theta}) = \mu_0 j_z$

但し、μ₀は真空中の透磁率である。

式(1)~(6)に加えて、電極表面でのみ生じる熱流束については特別な扱いが必要である。陰極 表面における熱流束 H_kとしては、放射冷却、熱電子放出による冷却、陰極表面へのイオン衝突に よる加熱を考慮し、

 $H_{K} = -\varepsilon \alpha T^{4} - |j_{e}|\phi_{K} + |j_{i}|V_{i}$

と定義する。ここで、 ϵ は陰極の表面放射係数、 α はステファンボルツマン係数、 ϕ_k は陰極材料の 仕事関数、Vi はシールドガスの電離電圧、j_eは電子電流密度、j_iはイオン電流密度である。 また、 j_eは下式で与えられる Richardson の式により決定される熱電子電流密度 J_R¹²⁾以下となる。

$$\left| j_{R} \right| = AT^{2} \exp \left(-\frac{e\phi_{Ke}}{k_{B}T} \right)$$

ここで、A は陰極材料に依存する定数、 ϕ_{Ke} は陰極材料の実効仕事関数、 k_B はボルツマン定数である。|j|が $|j_R|$ より大きい時、イオン電流密度 j_i は $|j|-|j_R|$ と仮定する。但し、 $|j|=|j_e|+|j_i|$ は式(5)より得られる陰極表面における全電流密度である。同様に、陽極表面に対する熱流束 H_A としては、放射冷却及び熱電子の流入による加熱を考慮し、

 $H_A = -\varepsilon \alpha T^4 + |j|\phi_A$

を定義する。ここで、 ϕ_{A} は陽極の仕事関数、|j|は式(5)より得られる陽極表面における電流密度である。



図1 プラズマアーク溶接の一体化モデル

2-2 中~厚板アルミニウム用プラズマトーチの開発

2-2-1 シミュレーション解析によるノズル形状の最適化

図2 に正極率 65%における、プラズマ最高温度、電極温度最高値、電流値、アーク電圧、プラ ズマ流の軸方向最高速度の時間変化、及び各位相での温度分布を示す。プラズマ最高温度は波高 値においては 30000K 近くに達し、極性変化時には 23000K にまで低下する。電極最高温度は負極 性時には熱電子放出による冷却作用により 4000K 近くまで低下するが、正極性時には電子凝縮の 加熱作用により徐々に昇温し、最高 7000K 近くまで達した。アーク電圧は 23V から-23V の範囲で 変化した。プラズマ流の軸方向最高速度は最大 1200m/s に達した。 図3にプラズマ特性の時間変化に与える正極率の影響を示す。ここでは図2に示した正極率65%における結果と正極率45%の結果を比較した。プラズマ最高温度、アーク電圧、プラズマ流の軸方向最高速度については、正極率への依存性が少ない事がわかる。一方、タングステン電極の 温度は正極率が小さくなるにつれ著しく上昇する。これにより電極損耗が大きくなる事が推察される。



図 2 交流 (AC 60Hz) プラズマアーク特性の時間変化



図3 交流(AC 60Hz)プラズマアーク特性の時間変化に与える正極幅の影響

図4にプラズマアーク特性に与えるノズル径の影響を示す。ノズル径4.0mm ではプラズマ温度 は最高26000K 程度となるが、ノズル径2.8mm ではノズルによるアークの緊縮効果が大きくなり、 最高30000K にまで達する事がわかる。同時に、ノズル径が小さくなるほどアークからノズルへの 入熱が増すためノズル温度も上昇する。



図4 プラズマアーク特性に与えるノズル径の影響

続いて、陽極中心部にキーホールを設けた場合のプラズマアーク特性につていも計算を行い、 キーホールを拡大しようとするキーホール内のプラズマ圧力と、縮小しようとする溶融池表面張 力のバランスから適正なキーホール径を推定する。図6にプラズマ圧力及び表面張力のキーホー ル径依存性を示す。ノズル内径が小さい程、キーホール内のプラズマ圧力は増加する。溶融池(ア ルミニウム溶液)の表面張力とプラズマ圧力との圧力バランスからキーホール径は約4.5mmと推定 された。



図5 プラズマ圧力特性及びキーホール径推定

2-2-2 新プラズマトーチの試作・開発、評価

(1) システム構成

図6に本研究で試作したプラズマ溶接システムの構成を示す。試作システムはプラズマ溶接電源、プラズマガス及びシールドガスを制御するガスフローメータ、水冷式プラズマ溶接トーチ及び冷却ユニットからなる。



図6 試作プラズマ溶接システムの構成

(2) 試作プラズマ溶接電源

表1は本研究において試作したプラズマ溶接電源の仕様を示したものである。

出力電流波形は、表2に示す平衡方形波、非平衡方形波、正弦波の基本交流波形にそれぞれ低 周波パルス及び中周波パルスを重畳した9モードの溶接電流波形ならびに基本交流波形を出力す る期間と EN 極性の直流期間を20 Hz までの低周波で切り換えた3モードの AC/DC ハイブリッド 溶接電流波形を設定できる。なお、AC/DC ハイブリッド溶接電流波形は外部信号によって交流期 間と直流期間を任意のタイミングで切り換えることも可能である。

プラズマガスおよびシールドガスの流量を制御するマスフローメータはデジタル制御方式であ り、外部信号により流量をコントロールする事が可能である。

制御方式	インバータ制御式交直両用溶接電源
定格出力電流	500A
定格入力電圧	200/220V
定格使用率	60% (500A)
最高無負荷電圧	80V
定格負荷電圧	26V(交流)、24V(直流)
出力範囲	20-500A(交流)、5-500A(直流)
パルス周波数	0 ~ 500Hz
EN 比率	0 ~ 100%
交流波形制御機能	12 モード 平衡方形波(パルス無し、低周波パルス、中周波パルス) 非平衡方形波(パルス無し、低周波パルス、中周波パルス) 正弦波(パルス無し、低周波パルス、中周波パルス) AC/DC ハイブリッド波形(平衡方形波、非平衡方形波、正 弦波)

表1	試作プ	゚ラズマ	'溶接電源の	け仕様



表2 各種溶接電流波形モデル

(3) 試作プラズマ溶接トーチ

図 7 及び図 8 は試作プラズマトーチの外観/仕様ならびにトーチ構成について示したものである。 試作トーチはトーチボディ、タングステン電極(3.2 mm 径~4.8 mm 径)をクランプするクラン プアセンブリ、トーチ内部でのアーキングを防止するための絶縁スリーブ、プラズマを形成する ためのノズル及び水冷式のガスシールドノズルから構成されている。

ノズルとガスシールドノズルは、それぞれ別経路にて冷却水を循環させて水令するシステムを 採用し、冷却能力を向上させることによって、最大溶接電流 400A (使用率 100%)を実現した。

図9に試作プラズマトーチの先端断面図を示す。本試作においてはプラズマ拘束のためのオリフィス径は1.5 mm、2.5 mm、3 mm および4 mm の4種設定し、以後に述べる溶接実験を行った。 図10はプラズマノズルの構造を示したものである。大きな特徴として、3 穴構造となっている。 センターにあるアーク噴出口から出たアークを両脇にある小さな穴から出るプラズマガスがアー クを偏平、拘束する事によって溶接進行方向に対して垂直方向への余分な熱量を抑えることが期 待出来る。









板厚: 8 mm未満 → オリフィス径: 3 mm 板厚: 8 mm以上 → オリフィス径: 4 mm

図 9 試作プラズマトーチの断面



形成されるプラズマアーク

図8 試作プラズマトーチの構成



図 10 プラズマノズルの構造

2-3 厚板用新プラズマ溶接システムの確立と限界板厚の把握

2-3-1 限界板厚の把握

(1) 新開発溶接電流波形の妥当性確認

1.3での検討に基づき、非平衡方形波の EN 極性に中周波パルスを重畳した新開発の溶接電 流波形による中板 Al-Mg 合金 I 型突き合わせキーホール溶接性能の検討を立向き上進溶接にて 行った。なお、溶接姿勢で立向き上進姿勢としたのは、1.2の結果から下向き溶接では溶融金 属の重力ヘッドの影響を大きくうけ、溶接が困難になるためである。図 11 に溶接電流波形の模式 図と実電流波形を示す。





図 12 中周波パルス重畳周波数の影響

図 12 は板厚 6mm の Al-Mg 合金(A5052)のI型突き合わせ継ぎ手において立向き上進溶接を 行い、重畳したパルス周波数の影響を調べたものである。また、パルス周波数以外の試験条件を 表 3 に示す。

周波数においては、100Hzの中周波パルス重畳が最もキーホール溶接に適していた。パルス重 畳しない非平衡方形波の溶接ではアークの指向性、集中性が劣るためビード幅方向へ熱が入り過 ぎ、キーホール形成が困難であり溶接にならなった。50Hzでは、集中性が100Hzに比べ若干劣る ため裏ビードの出が不均一となった。500Hzについては、本来であれば、最も集中性、指向性が 高くなるはずであるが実際の溶接波形を測定しところ、ベース電流が下がり切らず入熱過多でキ ーホール溶接にならなった。

溶接電流	180A
パルスピーク電流	220A
ベース電流	140A
溶接速度	22cm/min
溶接波形	非平衡方形波
プラズマガス	Ar ガス、1.7L/min
シールドガス	Ar ガス、10L/min
母材	A5052 材、板厚 6mm

表 3 溶接試験条件

図 13 は EN 比率の影響について検討した結果を示したものである。EN 比率は 80%において、 最も良い結果が得られた。ただし、パルス周波数ほど大きな差が出るわけではなく、EN 比率につ いては、一定以上の高 EN 比率であれば良いと考えられる。

以上の結果により、新開発の溶接電流波形制御は6 mmのAl-Mg合金の突き合わせ溶接において、良好なキーホール溶接が行え、中周波パルス重畳周波数については100Hz以上、EN比率については80%が最適であることが確認できた。



図 13 EN 比率の影響

(2)キーホール溶接可否のシミュレーション結果

プラズマアークモデルの解析結果に基づき、溶金供給量判定モデル及び溶金溶け落ち判定モデ ルを用いて、キーホール溶接可否の判定を試みる。

溶金供給量判定モデルでは、キーホール近傍から溶融池下流側に供給される溶金量と、下流側 に生じる空隙体積との関係を比較する。図14に溶融池後方へと輸送される溶融金属量の推定プロ セスを示す。マランゴニカ、シアーカ、電磁力等の影響により、キーホール側面では下向きの強 い溶融池対流が発生する。この対流により溶融池後方へと溶金が供給されるものと考え、同対流 による溶金輸送量(単位時間当たりの溶金体積)を求めた結果、1.07E-7m3/sと求まった。また、 図15にキーホールにより単位時間あたりに下流側に生じる空隙体積(ビード断面積×単位時間あ たりの溶接距離と仮定)の算出プロセスを示す。結果として空隙堆積は9.3E-8m3/sとなり溶金供 給量とほぼ一致し、溶接可能条件を満たすことが判明した。

溶金溶け落ち判定モデルでは、ビード幅の計算結果から求めた単位長あたりの溶融金属重量と、 これを支える表面張力により上向きに支持される力2.8Nを比較し、溶金の溶け落ちが生じるかを 判定する。図16は裏面溶融池表面における力学バランスを示す。図17に溶融金属重量の板厚及 び溶接姿勢に対する依存性を示す。ただし、ビード幅は12mmとした。溶接姿勢が垂直に近くなる 程(小さくなる程)、また板厚が増す程、裏面溶融池に加わる重力が大きくなることがわかる。こ の重力が表面張力により上向きに支持される力2.8N以下となる条件において溶接が可能となるも のと考えられる。実験結果において溶接可能と確認された条件をで、不安定な条件を、不可 であった条件を×で示した。で示した実験的に溶接可能であった条件は、計算により得られた 溶接可能条件とよく一致することが明らかとなった。図18に溶融金属重量の板厚及び溶接姿勢に 対する依存性を示す。ただし、ビード幅は8mmとした。ビード幅を絞ることにより、より垂直に 近い溶接姿勢にて溶接が可能となるものと推測される。

実験結果との比較により、プラズマアークモデルの妥当性を検討するとともに、プラズマアー クモデルの解析結果に基づき、溶金供給量判定モデル及び溶金溶け落ち判定モデルを用いて、キ ーホール溶接可否の判定を試みた。



図 14 溶融池後方へと輸送される溶融金属量の推定



図 15 キーホールにより、単位時間あたりに下流側に生じる空隙体積



図 16 裏面溶融池表面における力学バランス

ビード幅 = 12mm



似序[m]





図 18 溶融金属重量の板厚及び溶接姿勢に対する依存性(ビード幅 8mm)

新開発の溶接電源と溶接トーチを使用して、板厚 8 mm ~ 15 mm の AI-Mg 合金(A5052) 板で、最適な溶接条件を探りつつ、傾斜角度を段階的に変化させて約40 mm のビードオン溶 接を行なった。板厚 15 mm と 12 mm では、プラズマアークの浸透性と集中性を高めるため、 シールドガスは Ar 30/He 70%の混合ガスを使用し、100Hz のパルス電流を重畳した。 板厚 8 mm ではシールドガスは Ar 100%でベース電流のみとした。また、EN 比は何れも 80 %とした。試験片は 300 x 400 mm、溶接はロボットを使用した。

判定は、スタート後約50mm以内で安定した溶接部が形成され、以後最終まで安定したキー ホール溶接が継続し、更に表ビードに極端な凹みがなく、裏ビードも裏波が安定したものを

とした。キーホール溶接は出来たが表または裏ビードが良好でないものは、キーホール溶 接自体が出来なかったものは×とした。この溶接結果の概要を表4に、溶接条件詳細と溶接 部断面写真及び断面形状詳細を表2に示す。

板厚	傾斜角度	ベース電流	パルフ重法	シールドガフ	溶接速度	ぎり
(mm)	(deg)	(A)	ハルス电加	<i>></i> = <i>N</i> F/JX	(mm/分)	
	10	220			220	
	30	220			220	
	40	220			220	
8	60	220	-	Ar100%	220	
	70	240			200	
	80	250			170	
	90	240			170	
	10	250	有	Ar30/He70%	130	×
	30	240			170	×
	40	220			190	
12	60	220			170	
1~	70	240			170	
	75	250			170	
	80	250			170	
	90	250			170	
	40	260			150	×
	60	280			130	
15	70	260	右	Ar30/He70%	150	
10	75	280		7.100/110/0/0	130	
	80	280			130	
	90	280			130	

表4 アルミニウム(A5052)での溶接姿勢と溶接部断面形状

板厚 8 mm は略水平から傾斜角度70°までは良好なキーホール溶接が得られたが、これを 超えた傾斜では裏ビードに十分な裏波が出来ず、溝状の凹みや部分的な凹みが発生し、不安 定となった。板厚12mm は傾斜60°~75°で、15mm では70°~90°でそれぞれ良 好なキーホール溶接が得られたが、この範囲より傾斜が小さいとキーホール溶接は出来ても 表ビードの凹みが大となり、傾斜が大さいと裏ビードの形状が不安定となった。

以上より、板厚が大となる程、良好なキーホール溶接可能範囲は傾斜角度が大きい方向に移行 し、この範囲より傾斜が小さいと溶融金属の重力作用により表面の凹みが大きくなり過ぎ、傾斜 が大き過ぎると裏ビード形状が不安定となることがわかった。また、この良好なキーホール溶接 可能範囲の領域は別項で述べる「溶金溶け落ち判定モデル」の数値シミュレーション結果ともよ く一致している。

- 2-3-2 溶接条件と接合部の冶金的性質、歪量の関係把握
- (1) プラズマ溶接と従来溶接工法との溶接部の機械的特性比較

本研究で開発した溶接機の溶接品質をティグ及びミグの従来溶接工法と比較評価するため、板厚 10mmのAI-Mg合金(A5052)板で溶接部の機械試験と断面観察を行なった。 溶接方法は以下とした。

プラズマ:プラズマキーホール自動溶接(I 型突合せ)

+プラズマアークへの溶加棒手差し(化粧盛)

ミグ : ミグ自動溶接(70°V開先突合せ)+ミグ自動溶接(化粧盛)

ティグ : ティグ手動溶接(70°∨開先突合せ)+ティグ手動溶接(化粧盛)

機械試験結果の比較を表 5、及び曲げ試験結果を写真1に、溶接部の断面を写真2示す。

		プラズマ	ミグ	ティグ	JIS H4000 規格値
引張試験	平均引張強さ [N/mm ²]	193	205	206	A5052P-0 170 ~ 215
	破断部	熱影響部	熱影響部	熱影響部	
曲げ試験	表曲げ	割れなし	割れなし	割れなし	割れのないこと
(2tR)	裏曲げ	割れなし	割れなし	割れなし	割れのないこと
硬さ [Hv]	溶接金属部	54.3	65.0	64.9	
	熱影響部	50.4	53.6	55.2	
	母材部	52.3	57.0	55.2	

表 5 機械試験結果

写真1 曲げ試験結果

プラ	ラズマ		ミグ	テ	ィグ
表曲げ	裏曲げ	表曲げ	裏曲げ	表曲げ	裏曲げ
6 7 8F1031B) 1	2 3 - ² 1031-823 7 8 In the datum in distance in the second seco	7 <u>{A10M 0888 01 E 12</u>		6 7 Δ ^{1007050[51} 2	

写真2 溶接部の断面



引張強さは若干の差はあるが、何れも規格値を満足している。引張試験では何れも熱影響部で破断しており、硬度測定でも熱影響部の硬度が最も小さく出ていることと一致する。ミグ、ティグ溶接において、引張強さがプラズマ溶接に比べて若干高く、また、溶接金属部の硬度が高くなっているのは溶加棒の影響によるものではないかと推定する。

また、溶接部断面写真ではプラズマ溶接が表、裏のビード形状が最も小さく、アークエネルギーの 集中性が高いことがわかる。

以上より、本研究で開発した溶接機による溶接品質は従来工法であるミグ、ティグ溶接と比べて 少なくとも同等であると判断できる。

(2) プラズマ溶接と従来溶接工法との溶接変形比較

本研究で開発した新プラズマ溶接システム、及び従来溶接工法のミグ溶接を用いて突合せ溶接 を行ない、溶接による角変形と横収縮について測定・比較した。横収縮量の測定方法は溶接線を またいだ標点を取り、溶接前・後の標点間距離を測定して差を求めた。 溶接方法は以下とした。

> プラズマ: プラズマキーホール溶接(I 型突合せ) + ミグ溶接(化粧盛) ミグ : ミグ溶接(70°V開先突合せ) + ミグ溶接(化粧盛)

溶接装置の概観を写真3に、標点位置を図19に、溶接条件を表6に示す。

トーチ 試験材

260

30.5

0.77

ゲ

化粧盛

写真3 溶接装置の概観

図 19 標点位置



27

試験材 A 5 0 5 2 板厚 8 mm W200×L400(溶接後寸法 W400×400L) 標点間距離: 30mm 60mm 200mm

			衣 0	浴按余竹	÷				
		電流 (A)	電圧 (V)	溶接時間 (min)	溶接速度 (mm/min)	交流周波数 (Hz)	PG 流量 (L/min)	SG 流量 (L/min)	開先形状
プラ	1 層目	238	27.0	1.81	210	75	2.8	10	Ⅰ型
ズマ	化粧盛	260	30.5	0.68	560			27	
1	1 層目	290	31.5	0.53	720			27	70°V型

表 6 溶接条件

490

衣/ 用友形里点正临未[lau]						
プラズマ ミグ						
一層目	0.0075	0.010				
化粧盛	0.0150	0.020				

± -



図 20 収縮量測定結果



以上より、角変形について見ると、一層目ではプラズマ溶接はミグ溶接に比べ約30%変形が 小さく、また、プラズマ溶接にミグ溶接の化粧盛を追加した時のトータルの縮み量もミグの2 層溶接に比べ約30%変形が小さい結果となった。

横収縮量について見ると、一層目及び化粧盛を行なったもの、いずれもプラズマの方が僅か ではあるが小さいという結果が得られた。また、スタート部、中間部、エンド部を比較すると、 全て中間部で最大横収縮が発生していることが分かる。

上記より、プラズマ溶接の角変形及び横収縮は、ミグ溶接と比較して同等、若しくは若干少 ないという結果であった。

また、ミグ溶接は突合せ面の開先加工(V開先)を行なうのに対し、プラズマ溶接は開先加 工なしで溶接することが出来、作業効率も良い。これらの事を総合的に判断すると、ミグ溶接 と比較した場合、プラズマ溶接に優位性があると言える。

2-3-3 溶接システム全体の最適化

(1)溶接ロボットシステムの構成と外観

長距離突き合わせ溶接及び円周溶接等を可能とするため、今回開発したプラズマ溶接機及びト ーチを搭載する溶接ロボットシステムを構成した。 図 21 に溶接ロボットシステムの概観を示す。



図 21 溶接ロボットシステム概観図

(2)長距離溶接と電極消耗の確認

本研究で開発した新プラズマ溶接システムの実用化に向け、長距離溶接における電極の消耗 確認実験を行なった。本実験は電極消耗確認のため、完全なキーホールは発生させずに材料表 面をビードオン溶接で行なった。使用した電極は、予め2%酸化セリウム入りタングステン、 2%ランタン入りタングステン及び2%トリウム入りタングステンを比較評価し、消耗が最も 少ないことが確認された2%酸化セリウム入りタングステンとした。溶接電流は表8に示す1 90Aと250Aの2種類とし、溶接長が3mと10mの時点で電極の消耗度合いを外観で観 察した。各段階の電極消耗状態を表9に示す。

電流 (A)	EN 比 (%)	周波数 (Hz)	溶接速度 (mm/min)	PG 流量 (L/min)	SG 流量 (L/min)	傾斜 (deq)	電極径 (mm)
190 1	80	75	210	2.6	10	0	4
250 2	80	75	190	2.8	10	0	4

表8 電極消耗実験の溶接条件

1:t6mm AI 板溶接時相当の電流、 2:t10mm AI 板溶接時相当の電流

表9 各段階の電極消耗状態



結果は、190A及び250Aとも溶接の比較的初期段階で先端が球状となり、それ以降は 変化が少なく、10mの溶接終了時点でもアークの乱れは全くなく、実用的に十分な長距離連 続溶接が出来ることが確認できた。 (3) 模擬タンク製作に向けたパイプ溶接実験

本研究で想定した川下分野である、受変電設備で使用されるガス絶縁スイッチ(GIS)用の アルミタンクへの本技術の適用に向け、従来の平板での試験から一歩進めてパイプの長手溶接、 並びに周継手溶接実験を行なった。

シーム溶接はJetLine社製のクランプシーマを使用し、ベンディングロール成形した 板厚8mm、OD780xL1800のパイプにロール成形時に発生した0.4mmのV字型の隙間は 修正せずに行なった。

周溶接はロボットシステムとポジショナーを使用して、板厚8mm、10mm、15mmの0D65 0xL300のパイプを2本仮付けした状態で回転させ、その溶接部のトーチ角度を段階的に変 化させ、溶接可能な角度範囲を求めるとともに最適角度を求めた。周溶接の溶接可能角度範囲 と溶接条件は平板での実験で得られたものとほぼ同等であった。表10にパイプ溶接の最適溶 接条件を、写真4にパイプ溶接の実験装置概観と溶接終了パイプ外観を示す。

	板 原 傾斜角		電济	電流(A)		EN ガス量(I/min)		溶接速
	1次/字 (mm)	度 (deg)	ペース	パルス	比 (%)	プラスマ	シールド	度 (mm/min)
シーム溶接	8	0	230		80	Ar 2.7	Ar 10	230
	8	30	220		80	Ar 2.7	Ar 10	230
国家按	10	50	270		80	Ar 2.8	Ar 10	170
周浴接	15	60	260	360	80	Ar 2.3	Ar/He 1 5	130

表 10 パイプ溶接の最適溶接条件

写真4 パイプ溶接の実験装置概観と溶接パイプ外観







(4) プラズマ溶接部への余盛付与実験

本研究の新プラズマ溶接システムの実製品への導入を想定し、表面の凹み部への化粧盛を確 立するため、余盛付与の溶接実験を行なった。板厚10mmのAI-Mg合金(A5052)板3組 に1層目としてプラズマキーホール溶接を行ない、その表ビードの凹み部に、プラズマアーク に溶加棒を手差し溶接、ティグ自動溶接、ミグ自動溶接の3種類の2層目化粧盛溶接を行 なった。

併せて、溶接施工法承認試験を想定して、PT 及び RT の非破壊試験、及び機械試験を行なった。 表 11 に化粧盛溶接の条件、外観・断面の写真、及び評価試験結果を示す。

化粧盛	PAWに溶接棒を手差し 270A 190mm/分 A5356-BY 3.2を手差し	TIG溶接にワイヤーを自動送給 260A 100mm/分 A5356-BY 1.6 を自動送給	自動MIG溶接 250A 550mm/分 A5356-BY 1.6を使用		
外観	Discontinuity (1977) and (1971) and (1972)		cue s s		
断面					
PT/RT	無欠陥	無欠陥	無欠陥		
	引張:185-204 N/mm ²	引張:186-202 N/mm ²	引張:187-192 N/mm ²		
機械		(1/2 溶接部)			
試験	表曲:欠陥無し	表曲:欠陥無し	表曲:欠陥無し		
	裏曲∶欠陥無し	裏曲∶欠陥無し	裏曲∶欠陥無し		

表 11 化粧盛溶接の条件、外観・断面写真及び評価試験結果

i試験材:A5052 t10×200×400 1層目プラズマ溶接(250 A、75Hz、パルス無し、下向、190 mm/分)

~ の何れの方法でも十分な化粧盛が出来ることが確認できた。また、何れの方法でも溶接部の品質はほぼ同等であることも確認できた。

以上より、本技術の実用化においては、溶接の部位・形状と姿勢、工程手順と作業性、設備の状況等 に応じて適宜選択してゆけばよいことがわかった。

(5)従来溶接工法との作業性比較

本研究の溶接システムの実効性を評価するため、ティグ及びミグの従来溶接工法と、溶接に付帯する諸作業も含むトータル作業時間の比較試験を行なった。板厚10mm及び15mmのAI-Mg合金(A5052)板の突合せ溶接とし、プラズマ溶接はロボットシステムを使用したプラズマキーホール溶接と手動ティグ溶接による化粧盛の組み合わせ、従来溶接工法は妥当な余盛を得るまでの多層盛りとし、ティグは手動、ミグは自動とした。結果の比較を表12に示す。

板厚	家拉计	作業時間 (min)									
(mm)	<i>冶技法</i>	開先	前処理	仮付け	1パス	2パス	3パス	4パス	合計	しぞ(%)	
10	プラズマ		5.0	7.0	1.67	2.17			15.84	48.8	61.9
	ティグ	10.0	5.0	7.0	4.33	2.33	3.83		32.49	100	127. 0
	ミグ	10.0	5.0	7.0	1.33	1.17	1.08		25.58	78.7	100
15	プラズマ		5.0	7.0	2.17	2.33			16.50	47.1	62.1
	ティグ	10.0	5.0	7.0	3.83	2.67	2.83	3.67	35.00	100	131. 8
	ミグ	10.0	5.0	7.0	1.33	1.25	1.08	0.92	26.55	75.9	100

表 12 プラズマ溶接と従来溶接工法との作業時間比較

試験材:A5052、W300 (150 x 2 突合せ) x L400 プラズマの「2パス」は手動ティグ溶接の化粧盛

上記より、手動ティグ溶接に比べて約50%、自動ミグ溶接に比べて約40%トータル作業時間 が削減され、本研究で開発した溶接システムが実用化されれば大きな作業性改善が図れる可能性 があることが確認された。 2-4 アルミニウム以外の難接合材に対する溶接性確認

2-4-1 ステンレス鋼およびチタン等での溶接性の確認

(1) ステンレス鋼での溶接性の確認

アルミニウム以外の金属材料についてプラズマ溶接での接合性を把握するため、t6mmのSUS 304について、まず、市販のプラズマ溶接機による溶接試験を行い、機械的特性の評価も行った. 溶接性と機械的特性評価結果を表13に示す.

	プラズ マ 溶接	化粧盛	溶接 欠陥	機械的特性					
材質				引張試験					
				引張強 さ (N/mm²)	伸び (%)	破断 位置	曲げ	硬度(HV)	
S U S 3 0 4 (t6)		TIG	無し	645 643	70 74	母材 母材	表裏	母材∶139-145 HAZ∶130-162 溶金∶172-181	
	JIS G4305規格値 (曲げはJIS Z6421-1)			520 以 上	40 以 上		3mm 越える きずがないこ と	200 以下	

表 13 ステンレス鋼の溶接性と機械的特性評価結果

アルミニウムに比べて、表面張力が大きく裏面の溶融金属が融合しやすいため、裏波も安定している.

10mmを超える板厚の場合は市販の溶接機では能力が不足し、本研究で開発した溶接機の使用 が不可欠となるため、アルミニウムに引き続いて実験を継続してゆく.

(2) チタンでの溶接性の確認

現状は、溶接条件の絞込み、酸化防止シールド冶具等の検討を進めている段階で、今後ステン レス鋼に引き続いて実験を継続してゆく.