

チタン溶接技術

Titanium Welding Technology

大 谷 忠 幸^{*(1)}
Tadayuki OTANI

抄 録

チタンの溶接技術としてTIGアーク溶接性とMIGアーク溶接性について調査した。TIGアーク溶接では、溶接条件適正範囲に与えるアーク長の影響と板厚の影響について明らかにした。さらにチタンの溶接へのMIGアーク溶接の適用を検討し、ワンダリング現象を抑止する方法を開発した。

Abstract

In order to establish titanium welding technology TIG arc weldability and MIG arc weldability were surveyed. For TIG arc weldability influence of arc length and thickness to proper region of welding condition became obvious. For MIG arc weldability a new method to defend wandering phenomenon was developed.

1. 諸 言

チタンは耐食性に優れ、比強度が高く、良好な加工性を有することから、自動車部品や熱交換器のプレート等幅広い分野で使用されている。ただし、加工性の中でも特に溶接性については、留意する点が多い。それはチタンが溶接中に高温状態で空気に曝されると空気中の酸素や窒素と容易に結合し、機械的特性が劣化するからである。したがって、チタンは溶接中空気に曝される恐れのあるアーク溶接においてはシールドを十分に行う必要がある¹⁾。それに対し、溶接中空気に曝される恐れのない抵抗溶接(スポット溶接、シーム溶接)においては溶接施工上の制約はほとんどなく、鋼と比較して固有抵抗が高い分だけ低電流で溶接可能であり、溶接装置上の制約もない²⁾。そこでここではアーク溶接の中でも、最も多用されているTIGアーク溶接と現在開発段階にあるMIGアーク溶接について述べる。

2. TIGアーク溶接

チタンのアーク溶接の中で最も多用されているのがTIGアーク溶接である。TIGアーク溶接は、融点の高いタングステンと被溶接物との間にアルゴン等の不活性ガスを供給し、空気から両者の間を遮断した状態で、両者の間にアーク放電を発生せしめ、そのとき発生する熱で溶接するものである。タングステン電極をマイナス、被溶接物をプラスにするように直流電源に接続する。これは電子の流出するタングステンを冷却し、電子の流入する被溶接物の発熱を促進するためである。これによりタングステン電極のダメージを抑制し、効率よく被溶接物を溶融することができる。

2.1 TIGアーク溶接適正範囲

図1に代表的なチタンのTIGアーク溶接の配置を示す。鋼のTIGアーク溶接と異なる点はシールド装置にある。トーチに軸流に流れるトーチシールドだけでは十分なシールド効果が得られず、トーチ後方にチタンの高温の溶接部をシールドするアフターシールド装置が必要となる。さらには溶接部裏面をシールドするバックシールド装置が必要となる。たとえばチタンの連続造管ラインでは、良好なシールド効果を確保するために溶接部全体を簡易チャンバー内に封入する態様もある。

図2は板厚0.5mmのチタン板のTIGアーク溶接における溶接速度と溶接電流の適正溶接条件範囲を示す。ここではアーク長2mm、前進角40°、直径3.2mmのランタン入りタングステンを先端角40°で用いている。シールドガスはトーチシールドガスとして20 l/min、アフターシールドガスとして37.5 l/min、バックシールドガスとして7.5 l/minのアルゴンを供給して溶接を実行した。適正溶接条件は裏波ビード幅を測定し、裏波ビード幅が1mmを適正溶接電流の下限

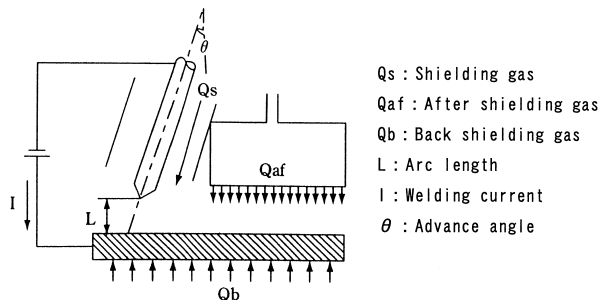


図1 チタンTIGアーク溶接装置の概略図
Schematic diagram of TIG arc welding device of titanium

^{*(1)} 鉄鋼研究所 接合研究センター 主任研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2304

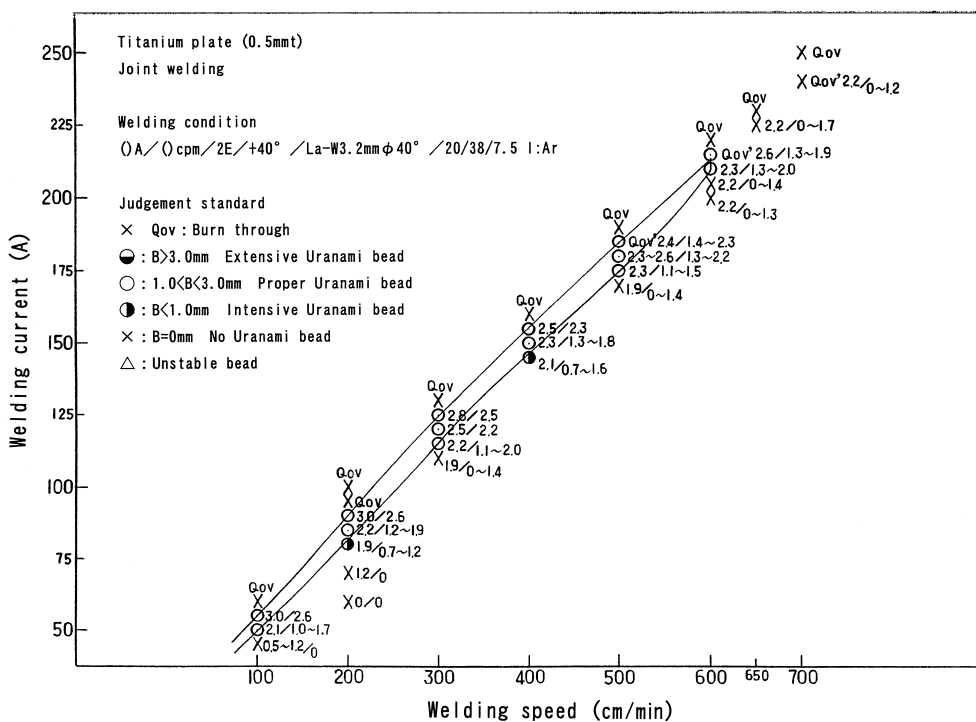


図2 チタンTIGアーク溶接条件適正範囲(板厚0.5mm, アーク長2mm)
Proper region of TIG arc welding condition (thickness 0.5mm, arc length 2mm)

とした。さらに溶け落ち限界を適正溶接電流の上限とした。これは表ビード幅がおよそ3mmに相当する。溶接速度と溶接電流の間には正の相関があり、溶接速度を増大すると、溶接電流適正範囲も高電流側にシフトする。溶接速度6m/minを超えると熔融池を保持することができなくなり、適正範囲が無くなる。

2.2 アーク長の影響

図3も板厚0.5mmのチタン板のTIGアーク溶接における溶接速度と溶接電流の適正溶接条件範囲を示す。ただし、アーク長は1mmとしその他の条件は図2と同様にした。溶接速度を増大させると溶接電流適正範囲も高電流側にシフトする。ただし溶接速度の上限は7.5m/minであり、図2と比較すると約1.5m/minほど高速側にシフト

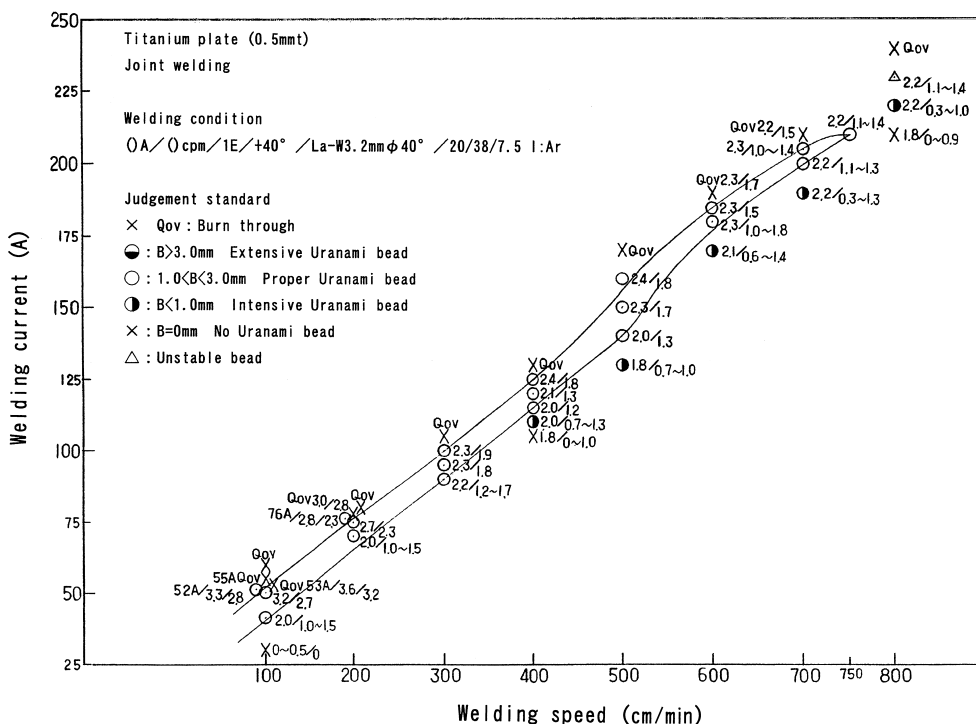


図3 チタンTIGアーク溶接条件適正範囲(板厚0.5mm, アーク長1mm)
Proper region of TIG arc welding condition (thickness 0.5mm, arc length 1mm)

している。これは、アーク長を2mmから1mmに減少させることにより、アークが集中し同一溶接電流でも裏波ビードが増大していることによるものである。あわせて表ビード幅も減少し、溶け落ちにくくなることにも起因する。

そこでアーク長はどこまで減ずることができるかということになるが、アーク長0.1mmでTIGアーク溶接を実行したことがある。そのとき極めて安定な溶接ビードが得られた。ただし、何らかの外乱により溶融池に異常が発生したとき、タングステン電極先端と溶融池が接触し、タングステン電極先端にダメージを受けてアークが不安定になる危険性が高くなる。そこで実用的にはアーク長0.5mm程度が下限と考えられる。以上述べたように、TIGアーク溶接においてアーク長の管理は極めて重要で溶接結果に大きな影響を及ぼす。

2.3 板厚の影響

図4は板厚1mmの溶接条件適正範囲を示す。適正溶接条件の判定基準は裏波ビード幅1mmまでが溶接電流条件範囲の下限であり、裏波ビード幅3mmまでが溶接電流条件範囲の上限である。板厚0.5mmのときと同様に溶接速度と溶接電流の間には正の相関があり、溶接速度の上限は4.0m/minである。合わせて図5に板厚2mmの溶接条件適正範囲を示す。溶接速度と溶接電流の間には正の相関があり、溶接速度の上限は1.0m/minである。このように板厚が厚く

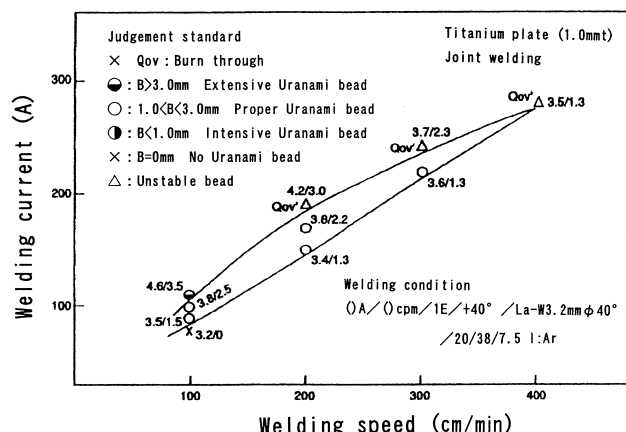


図4 チタンTIGアーク溶接条件適正範囲(板厚1mm, アーク長1mm)
Proper region of TIG arc welding condition (thickness 1mm, arc length 1mm)

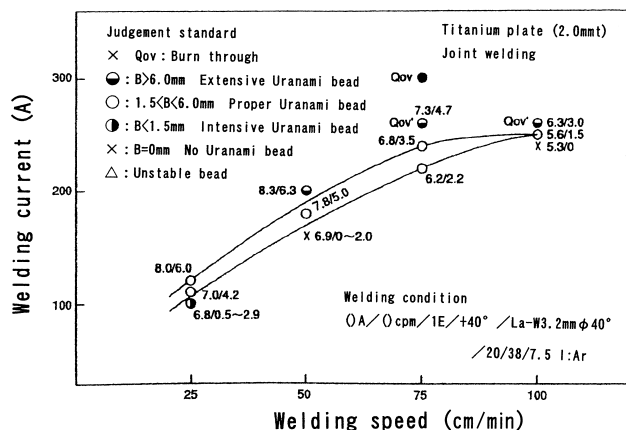


図5 チタンTIGアーク溶接条件適正範囲(板厚2mm, アーク長1mm)
Proper region of TIG arc welding condition (thickness 2mm, arc length 1mm)

なると溶接条件適正範囲は大きく異なり、最高溶接速度が低くなる。チタンの板厚が2mmを超えると1パスでTIGアーク溶接を実行することが困難となり、あらかじめ溶接部に開先加工を施しファイラーワイヤを送給する多層盛のTIGアーク溶接となる。チタンのTIGアーク溶接は高品質溶接が容易に実現できるが、2mmを超える厚板において溶接効率が低いため溶接コストがかかる。

2.4 プラズマアーク溶接の適用

これを回避するためにTIGアーク溶接のエネルギー密度を高めることが有効である。図6に示すように、タングステン電極と被溶接物との間に銅製の水冷ノズルを配置して、その中央部の孔を通じてアークを発生することで、エネルギー密度を高めたプラズマアークを得ることができる。このプラズマアークを用いると板厚2mmを超える中厚板でも1パスで溶接することが可能である。ただし、TIGアーク溶接と比較して溶接パラメータ(ノズルの孔径, センターガスの流量, ノズルと被溶接物との距離等)が追加される。

図7は、板厚3mmのチタン板に対し、ノズル孔径2.8mmで溶接電流210Aを用いたときのノズルと被溶接物との距離2mm, 溶接速度1m/minでのセンターガスの流量と溶接ビードの関係を示したものである。センターガス0.5 l/minでは裏波ビードが形成されないが、センターガスを増加させると裏波ビードが形成されはじめ、センターガス流量1.5 l/minで裏波ビード幅がほぼ同等になっている。このようにエネルギー密度の高いプラズマアークを用いることで、TIGアークで実現できなかった板厚10mm程度までのチタン中厚板の1パス溶接が可能となる。しかし、溶接パラメータ設定が煩雑であること、高い開先精度が要求されること等により広く普及しているとは言い難い。

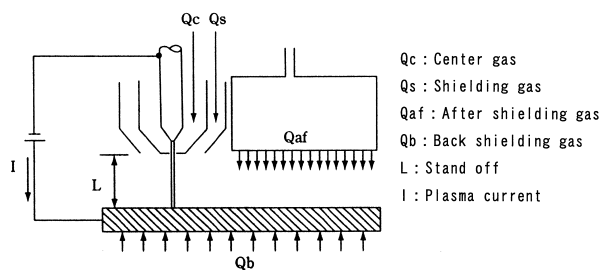


図6 チタンプラズマアーク溶接装置の概略図
Schematic diagram of plasma arc welding device of titanium

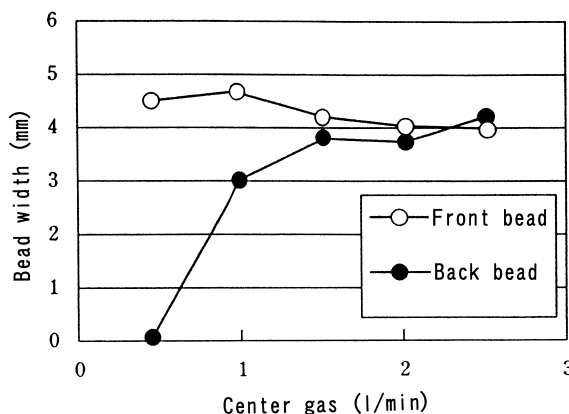


図7 チタンプラズマアーク溶接におけるセンターガスとビード幅の関係
Relation between center gas and bead width of plasma arc welding of titanium

3. MIGアーク溶接

チタンの構造物となる中厚板を良好な作業効率を確保しつつ、容易に溶接できるアーク溶接方法が求められている。ここでその可能性をMIGアーク溶接に求めた。MIGアーク溶接は、消耗電極としてチタンワイヤを連続的に供給して、この消耗電極先端と被溶接物であるチタンとの間を不活性ガスで満たし、両者の間にアーク放電を発生せしめ、そのとき発生する熱で被溶接物を溶融させる方法である。先に述べたTIGアーク溶接の場合は、タングステン電極の損耗を防ぐためこれをマイナスとするが、MIGアーク溶接の場合は、チタンワイヤを発熱の大きいプラスとするため、多大な溶着量を稼ぐ高能率溶接を実現できる。

このMIGアーク溶接をチタンの溶接に適用するとき、一般にシールド用の不活性ガスとしてヘリウムが用いられる。しかし、ヘリウムが高価なため比較的廉価なアルゴンをシールドガスに用いたいとの要望が強い。しかし、アルゴンをシールドガスに用いると溶接中アークが不安定になる問題がある。これを解消するためにシールドガスのアルゴンに2%程度の酸素を混入させることが有効である。しかしシールドガスに酸素を混入させると溶接金属の機械的特性が劣化する^{3,4)}。しかもアルゴンと2%酸素の混合ガスは、アルゴンガスの2倍以上のコストとなるため、一般に普及しているとはいえない。以上述べてきたようにチタンの高能率溶接が期待されるMIGアーク溶接ではあるが、アークの安定性に問題がある。

3.1 ワンダリング現象の発生

さきにも述べたが、チタンをMIGアーク溶接する場合、チタンワイヤをプラス、被溶接物であるチタンをマイナスの電源配置を採用。チタンの表面にはチタンより電子を放出しやすいチタン酸化物で覆われており、被溶接物のいたるところで電子放出されるため、アークが迷走するワンダリング現象が発生する。図8は、ワンダリング現象の一例を示す(溶接電流280A、アーク電圧26V、溶接速度0.6m/min)。このワンダリング現象を如何にして抑止するかが開発のポイントとなる。

3.2 高速微小振動によるMIGアーク溶接特性の改善

通常のチタンワイヤを使用し、アルゴンをシールドガスに用いたときに良好なMIGアーク溶接を実行可能とする方法を模索した。さまざまな探索実験の結果、MIGアーク溶接中、溶接トーチ系に打撃を加えると数秒間だけワンダリング現象を抑止できる事象を見出した。溶接トーチ系に打撃を加える物理的な意味について考察した結

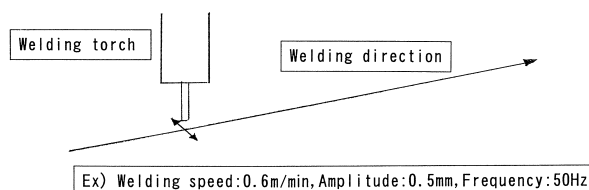


図9 高速微小振動方法の概略図

Schematic diagram of high speed oscillation method of MIG arc welding of titanium

果、このことは溶接トーチ系に減衰振動を与えたものと解釈した。そこで、オシレータにMIGアーク溶接トーチを保持させて、連続的に振動を付与できる装置を構成した。

それをもとにして図9に示すように、溶接方向と直交する方向に微小な振動を連続的に付与することを可能にした。しかもこの振動は一般に溶接の分野で用いられる振幅が数mm、振動数が数Hzのウィービングではなく、振幅がたとえば1mm、振動数が数十Hzの高速微小振動で効果があることも明らかになった。図10に本実験で用いた高速微小振動装置の外観を示す。本装置は、MIGアーク溶接トーチ先端の振幅が0.5mm、1.0mm、1.5mmを選択できる。振動数は0~50Hzまで設定可能である。図11にMIGアーク溶接トーチ先端を振幅0.5mm、振動数50Hzの振動条件で、溶接電流280A、アーク電圧26V、溶接速度0.6m/minの溶接条件で、チタンにMIGアーク溶接を実行したときの溶接ビード外観を示す。図に見るようにワンダリング現象が抑制された極めて流麗な溶接ビードが得られている。

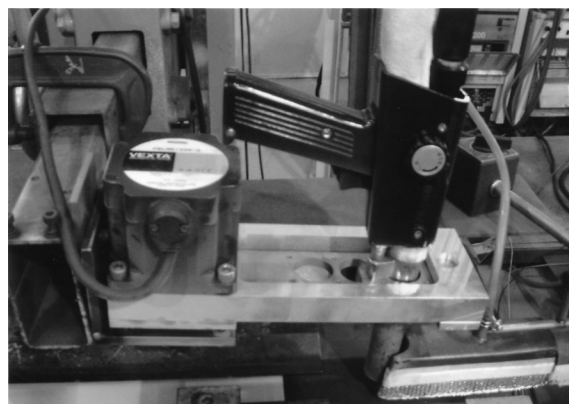


図10 高速微小振動装置
High speed oscillation device

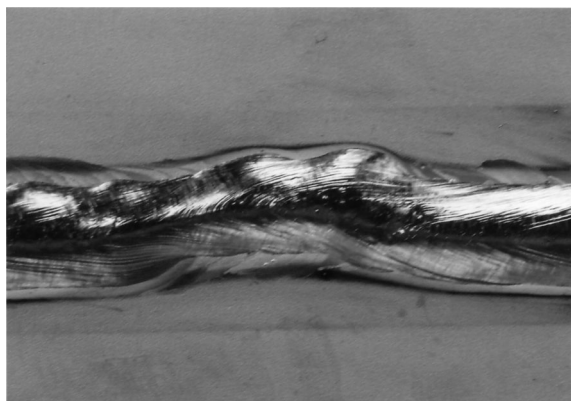


図8 チタンMIGアーク溶接におけるワンダリングビード
Wandering bead of MIG arc welding of titanium

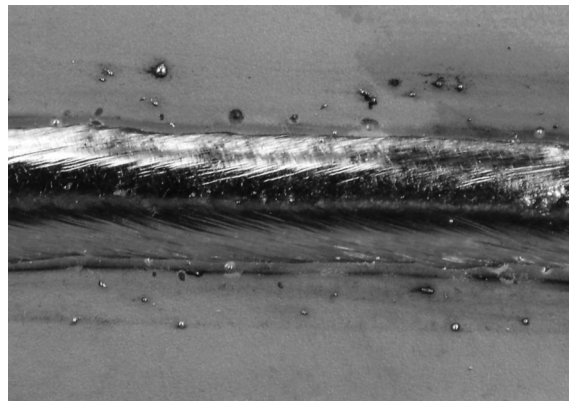


図11 高速微小振動方法によるストレートビード
Straight bead by high speed oscillation method

3.3 高速微小振動の意味

前項でMIGアーク溶接トーチ先端を高速微小振動させることで、再現性よく良好な溶接ビードが得られることを明らかにした。本項では、高速微小振動がMIGアーク溶接性を改善する意味について考察する。当初、高速微小振動はウィーピングの延長にあるとの見方もあった。しかし振幅が0.5mm程度で十分な効果が得られることから、明らかに通常のウィーピングとは異なることがわかる。そこでチタンワイヤの送給性に着眼し、高速微小振動がチタンワイヤの送給性に与える影響について検討した。図12にチタンワイヤ送給速度測定実験配置を示す。溶接電源から高速微小振動装置に伸びるコンジットケーブルを途中で切断し、ここにロータリーエンコーダで構成されるワイヤ送給速度測定装置を配置した。

通常のチタンワイヤを用いて高速微小振動無しのときのチタンワイヤ送給速度の時間変化を図13に示す。一方振幅1mm、振動数15Hzの高速微小振動有りのときのチタンワイヤ送給速度の時間変化を図14に示す。図に見るように、高速微小振動が無いときには、ワイヤ送給速度に顕著な変動が観察される。一方で高速微小振動が有るときには、ワイヤ送給速度の変動が抑制されている。このようにMIGアーク溶接トーチの先端を高速微小振動させることにより、チタンワイヤの送給性が大幅に改善されることが明らかになった。このことから、コンジットケーブル終端に配置されるコンタクトチップにおける摺動抵抗がチタンワイヤの送給性を支配するものと考えられる。MIGアーク溶接トーチ先端のチタンワイヤ径より若干大きい孔を有するコンタクトチップを高速微小振動させることにより、上記の摺動抵抗が低減され、ワイヤ送給性が改善されてアークの安定化に寄与したものと考えている。

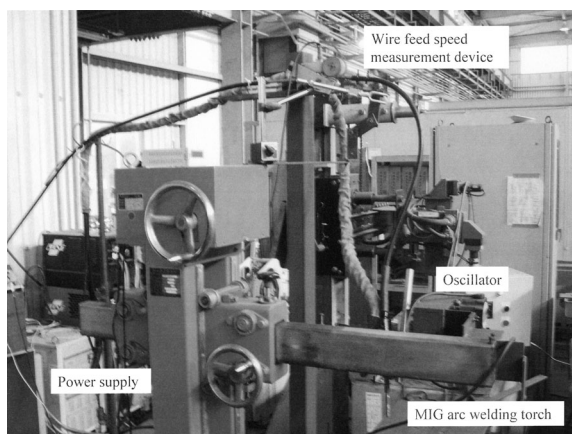


図12 高速微小振動方法を用いたMIGアーク溶接実験装置
Experimental apparatus of MIG arc welding with high speed oscillation method

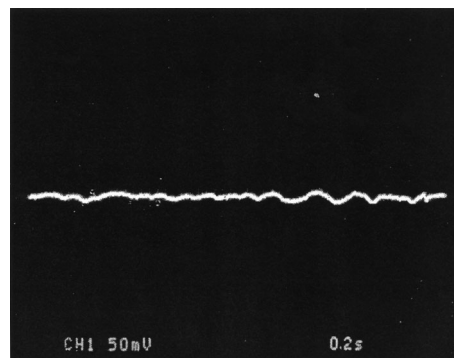


図13 通常のMIGアーク溶接におけるワイヤ送給速度変動
Wire feed speed fluctuation of conventional MIG arc welding

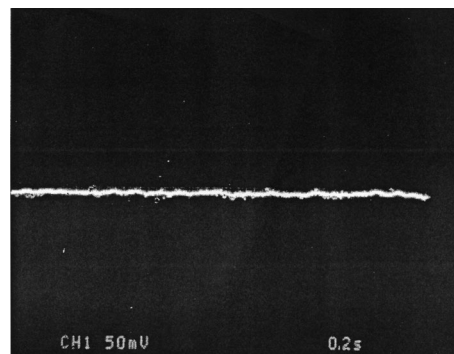


図14 高速微小振動方法を用いたときのワイヤ送給速度変動
Wire feed speed fluctuation of MIG arc welding with high speed oscillation method

4. 結 言

チタンの利用加工技術としてTIGアーク溶接とMIGアーク溶接について述べた。TIGアーク溶接では、溶接条件適正範囲に与えるアーク長の影響、板厚の影響について明らかにした。TIGアーク溶接では板厚2mmを超える場合、多層盛となるため溶接効率が劣化する。そこで板厚2mmを超えるチタンの中厚板を1パスで溶接できる高能率溶接として、MIGアーク溶接の適用を検討した。通常のチタンのMIGアーク溶接においては、溶接ビードが蛇行するワンダリング現象が発生するが、溶接トーチ先端を高速で微小振動させることにより、ワンダリング現象の発生を抑制できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 大谷:溶接技術. 54. 87(2006)
- 2) 大谷:チタン溶接データシート. Ver.2, 2005
- 3) 西川 ほか:溶接学会全国大会概要. Vol.65. 1999, p.276
- 4) 西川 ほか:溶接学会全国大会概要. Vol.65. 1999, p.278