

チタンのパルス MIG 溶接

Pulsed MIG Welding for Titanium

西川 和一* , 上山 智之* , 大縄登史男*
 近藤 穆** , 永田 雅** , 伊藤 龍太***
 横田 武平*** , 牛尾 誠夫**** , 中田 一博****

Waichi Nishikawa* , Tomoyuki Ueyama* , Toshio Ohnawa* ,
 Atsushi Kondo** , Masaru Nagata** , Ryuta Itoh*** ,
 Buhei Yokota*** , Masao Ushio**** and Kazuhiro Nakata****

1. はじめに

チタン材料は、その高い比強度や優れた耐食性から、近年色々な構造物に用途が拡大しており、チタン溶接の需要が高まっている。一般にチタン材料の溶接には TIG 溶接法が適用されているが、能率面で問題がある。MIG 溶接法を適用すれば、能率面上は改善されるが、純 Ar シールドガス雰囲気下では、母材上のアークの陰極点が安定せず、いわゆるワンダリング現象が生じる。このアークの不安定現象が問題となるため、特に薄板の溶接には専ら TIG 溶接法が適用されている。本報告では、不安定現象抑制の方法について検討し、その方法を用いた薄板チタン材料への MIG 溶接法適用の可能性について検討した。

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

実験に用いたチタン母材、ワイヤの化学成分を Table 1 に示す。母材、ワイヤ共に JIS H 4600 に規定される 1 種のチタン材料である。ワイヤ径は 1.0 mmφ であり、送給性を改善するため、その表面に研磨処理を行っている。前項でも述べたように、薄板チタンの MIG 溶接では、アークのワンダリング、すなわち不安定現象が問題となる。これは、低電流のアークを純度の高い不活性ガスでシールドを行うため、母材上に陰極点が安定して形

Table 1 供試材の化学成分

	N(mass%)	O(mass%)	Ti(mass%)
ワイヤ	0.01	0.09	Bal.
母材	0.005	0.053	Bal.

成され難いためと考えられる。そこで、本研究ではトーチに流すシールドガスである Ar に微量の酸化性ガスを加えることで、アークを安定させる試みを行った。酸化性ガスは酸素と二酸化炭素とし、酸素添加の場合は、シールドガス中の酸素濃度が 1~5% の間で 5 種類用意し、二酸化炭素添加の場合は、その濃度が 2~10% の間で 4 種類用意した。実験は溶滴移行の観察と溶接部の機械的性質の評価であり、機械的性質評価用試片の作成の場合は純 Ar でアフターシールドと母材裏面からバックシールドを施した。溶滴移行の観察の場合はアフターシールドとバックシールドは行っていない。

2.2 溶接機

実験に用いた溶接電源は、インバータ制御式パルス MIG 溶接電源である。溶接電源は、基本的には平均電圧が一定となるように、パルス周波数変調による制御がなされている。溶接条件を Table 2 にまとめた。実験に用いたパルス電流波形の模式図を Fig. 1 に示す。溶接機に付属したパルス設定ユニットを用いて、Fig. 1 中に示されるパルス電流波形パラメータを任意の値に設定することができる。実験に用いたパルス波形は 2 種類であり、パルスピーク電流 I_p 、ピーク時間 T_p 、ベース電流 I_b を一定とし、パルス立ち上がり時間 T_u と立ち下り時間 T_d を変化させた。2 つのパルス条件を台形波と矩

* 例ダイヘン Daihen Corp.

** 大同特殊鋼㈱ Daido Steel Co., Ltd.

*** 例本田技術研究所 Honda R&D Co., Ltd.

**** 大阪大学接合科学研究所 Osaka Univ. Joining & Welding Research Institute

原稿受付 1999年9月13日

Table 2 溶接実験条件

平均溶接電流	110A
ワイヤ送給量	5.4 m/min.
アーク電圧	20 V
溶接速度	55 cm/min.
ガス流量 (トーチ)	15 l/min.
ガス流量 (アフターシールド: 純 Ar)	50 l/min.
ガス流量 (バックシールド: 純 Ar)	10 l/min.

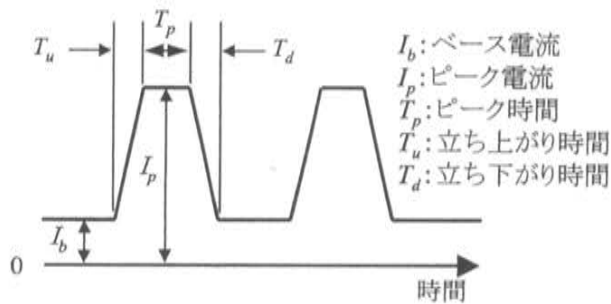


Fig. 1 パルス電流波形

形波と呼ぶことにする。これらの条件を Table 3 にまとめた。台形波は T_u , T_d が 3 ms であり、いわゆるソフトなアークが得られる条件である。矩形波は T_u , T_d が 1 ms で、いわゆるハードなアークであり、ソフトなアークに対する比較のために用意した。

2.3 溶滴移行と陰極点の観察

2つのパルス条件と数種のシールドガスを用いてチタン板上にビードオンプレート溶接を施し、その際の溶滴移行現象とアーク現象を、ハイスピードビデオを用いて観察した。観察に用いたハイスピードカメラは2種類あり、一つは1秒間に1000コマ撮影できるタイプであり、他方のハイスピードカメラは1秒間に13500コマ撮影できるタイプである。それらのアーク観察実験時の構成をそれぞれ Fig. 2 と Fig. 3 に示す。前者はアーク現象と溶滴移行の観察に用い、後者は陰極点の挙動の観察に用いた。

2.4 機械的性質の評価

これらの条件で、1.5 mm 厚さのチタン板に2.1項で述べた数種のシールドガスを用いて突き合わせ溶接を実施し、余盛り削除後に引張および、曲げ試験を行い、機械的強度を測定した。これらの試片の作成は、JIS Z 3805 と JIS Z 3121 に厳密ではないが準拠するように行った。また、突き合わせ溶接部のビッカース硬度分布の測定も行った。

Table 3 パルス電流波形条件

	I_b (A)	I_p (A)	T_u (ms)	T_p (ms)	T_d (ms)
台形波	30	290	3	1	3
矩形波	30	290	1	1	1

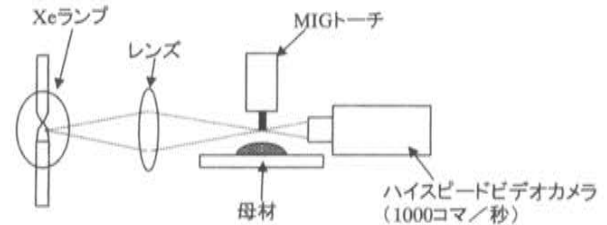


Fig. 2 溶滴移行観察装置

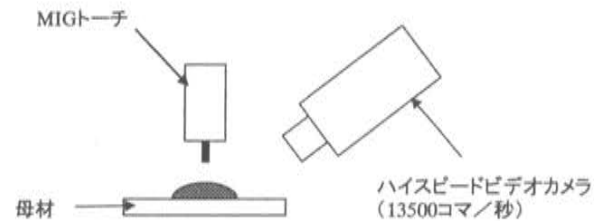


Fig. 3 陰極点観察装置

3. ハイスピードビデオ観察結果

3.1 台形波の場合の溶滴移行現象

Fig. 4 に撮影された高速ビデオ映像を示す。これらの映像は毎秒13500コマで撮影されたものから抽出したもので、パルスピーク期間とその近傍のものである。各図とも、左側に溶接ビードが形成されている。Fig. 4 の上段はシールドガスが純 Ar で、台形波の場合のハイスピードビデオ画像である。純 Ar シールドの場合、アークに不安定現象が生じている。それらの4つの映像において母材上にアーク柱を中心として円状に輝く部分があり、時間の経過に伴い同心円状に広がって行く。これはクリーニング域であると考えられる。母材上に陰極点が安定に形成されないために、クリーニング域が広がり、これに伴いアークが不安定になると考えられる。

純 Ar シールドの場合に見られたアークの不安定現象は、アルミニウムのクリーニング作用で見られるような、陰極点が金属酸化物を求めて這い回ることが原因であると考えられる。そこで、不安定現象の抑制を目的として、安定な陰極点が形成され易い酸化物を積極的に生

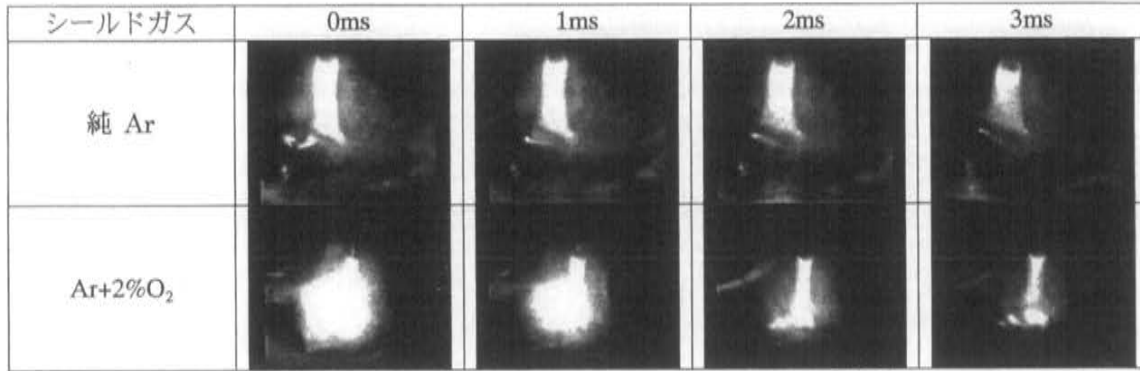


Fig. 4 高速ビデオ撮影映像 (台形波; 13500コマ/秒)

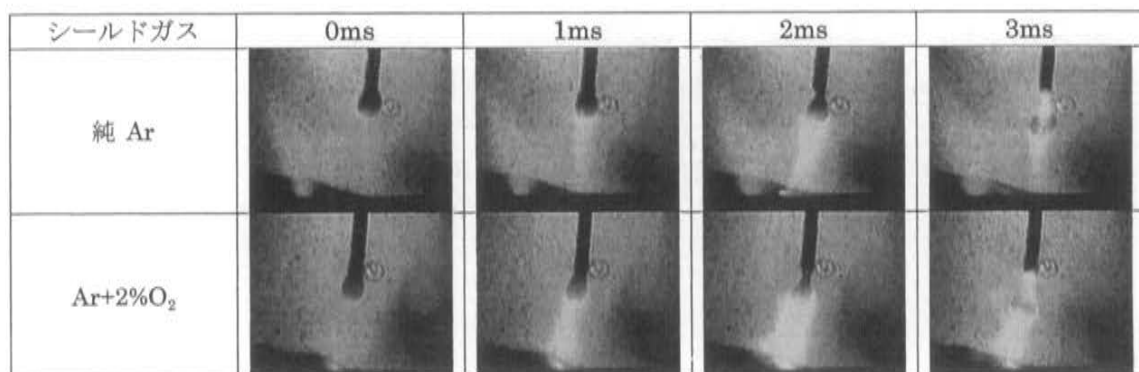


Fig. 5 高速ビデオ撮影映像 (台形波; 1000コマ/秒)

成させるために、シールドガスに微量の酸化性ガスを添加することを試みた。Fig. 4 の映像の下段は、上段と同じパルス条件でシールドガスを Ar+2%O₂ とした場合のビデオ映像である。この場合は、クリーニング域はほとんど認められず、アークの広がりも抑えられている。

Fig. 5 に溶滴移行を観察した結果を示す。これらの映像は Xe ランプを背光として毎秒1000コマで撮影したものである。シールドガスが純 Ar と Ar+2%O₂ のいずれの場合でも、パルス波形が台形波で1パルス1溶滴移行となる。Fig. 5 の画像からもアークの状態を観察できる。純 Ar でシールドを行うとアークに不安定現象が生じていることがわかる。パルスのピークとなる直前 (0 ms)、陰極点である輝点は溶接方向の後方 (左) の熔融池側にある。パルスのピーク (1,2 ms) になるとワイヤ先端から鉛直下方に向かってピーク電流による輝度の高いアークが発生するが、熔融池側にあった陰極点にもアークの電流パスが生じている。これは、ベース期間中の低電流アーク時に陰極点が熔融池側に迷走するためであり、このような現象が生じるとアークの入熱が分散さ

れ、アークは不安定な熱源となる。シールドガスが Ar+2%O₂ の場合は、陰極点はワイヤの鉛直下方に存在し、パルス電流発生中も1点の陰極点に向かってアークが発生する。シールドガスへの酸素の添加がアークを安定させていることが、ここでも確認できる。

Fig. 6 に、以上のパルス設定と2つのシールドガスをそれぞれ用いて、1.5 mm 厚さの Ti 平板突き合わせ溶接を行った場合のビード外観を示す。純 Ar の場合は、アークの不安定現象のためビードが蛇行し、両止端部が不揃いになる。酸化性ガスの添加によりアークの不安定現象を抑えられる Ar+2%O₂ の場合は、ビードの蛇行が生じず、両止端部もほぼ揃っている。

酸化性ガス添加によるアーク安定化の効果をさらに調べるため、シールドガス中の酸素濃度を1~5%の間で5種類用意し、ハイスピードビデオ撮影によって、どのような割合で不安定現象が生じるかを観察した。具体的には1秒間 (1000コマ) の画像から、印加されたパルス総数をカウントし、その内で Fig. 5 で見られたようなアークの不安定現象が生じたパルス数の比を求めた。添

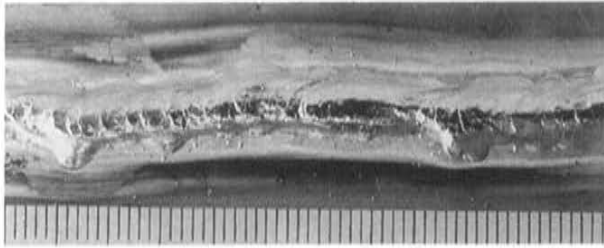


Fig. 6(a) 純 Ar シールドの場合のビード外観
(台形波, 平均電圧20 V, 平均電流110 A)

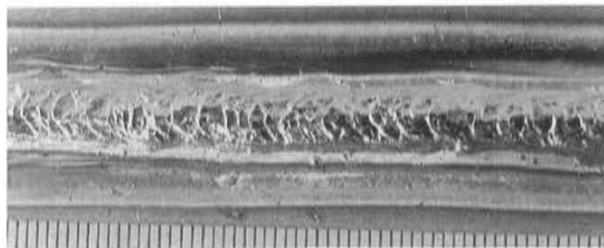


Fig. 6(b) Ar+2%O₂ シールドの場合のビード外観
(台形波, 平均電圧20 V, 平均電流110 A)

加ガスを炭酸ガスとした場合も同様に調べた。炭酸ガスの濃度は2~10%まで4種類用意した。それらの結果を Fig. 7 に示す。酸化性ガスの添加量を増加させると、アークは安定する傾向にある。また、純 Ar の場合は、1

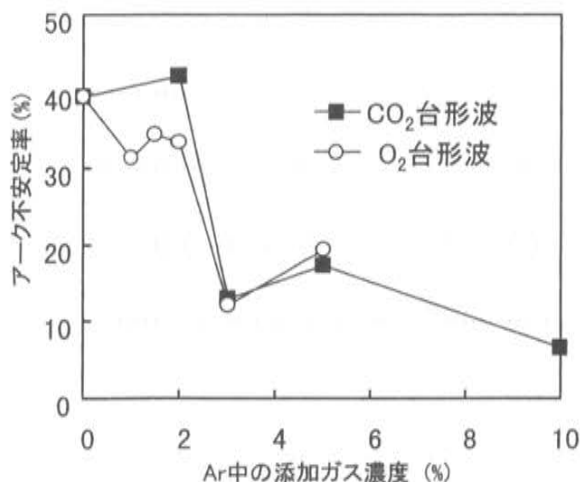


Fig. 7 アーク不安定率に及ぼす添加ガス濃度の影響 (台形波)

パルスで1溶滴離脱であるが、酸化性ガス濃度の増加に伴い、1パルス2溶滴離脱する現象が生じる。これを、先ほどと同様に1秒間のパルス総数に対し、1パルス当たりの平均溶滴離脱数を求め Fig. 8 にまとめた。酸化性ガス添加によって熔融金属の表面張力が変化し、溶滴離脱が容易になることが、1パルス当たりの平均溶滴離脱数の増加の原因と考えられる。

3.2 矩形波の場合の溶滴移行

Fig. 9 は、パルス条件を矩形波とした場合のハイスピードビデオ映像である。これらの映像はXeランプを背光として毎秒1000コマで撮影したものである。上段側2段に渡って、シールドガスが純 Ar の場合である。最下段はシールドガスが Ar+2%O₂ の場合である。シールドガスが純 Ar の場合、1パルスでは溶滴は移行せず、2パルス目で溶滴は熔融池に落下する。また、1パルス目のときに陰極点と思われる輝点が熔融池の後方部(写真左下方)に認められる。シールドガスが Ar+2%O₂ の場合は硬直性のある、コアのはっきりしたアークが見られ、1パルス1溶滴移行が生じるようになる。3.1項と同様に添加ガス濃度の効果をまとめた。Fig. 10 にアークの不安定率を示す。また、1パルス当たりの平均溶滴離脱数を Fig. 11 に示す。

矩形波のアーク不安定率は、添加ガス濃度が3%未満の条件の場合は、台形波と比べて値が低くなっているが、添加ガス濃度が3%以上となると、台形波と矩形波の場合で値はほぼ同じである。添加ガス濃度が低い場合に、アーク不安定率が矩形波で低いのは、矩形波のパルス周波数が約77 Hzであるのに対し、台形波はパルス周

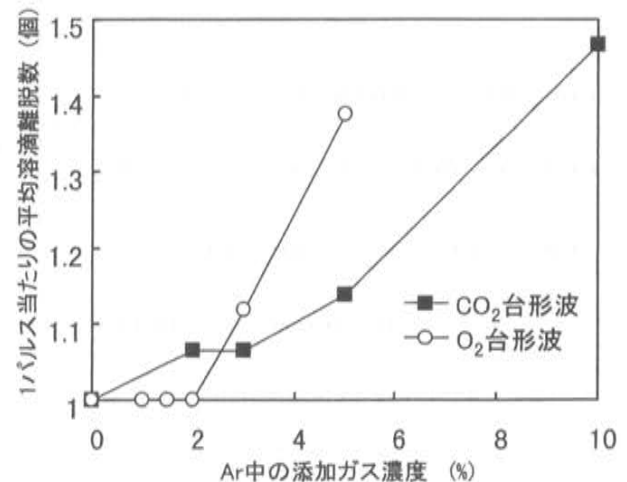


Fig. 8 溶滴離脱に及ぼす添加ガス濃度の影響 (台形波)

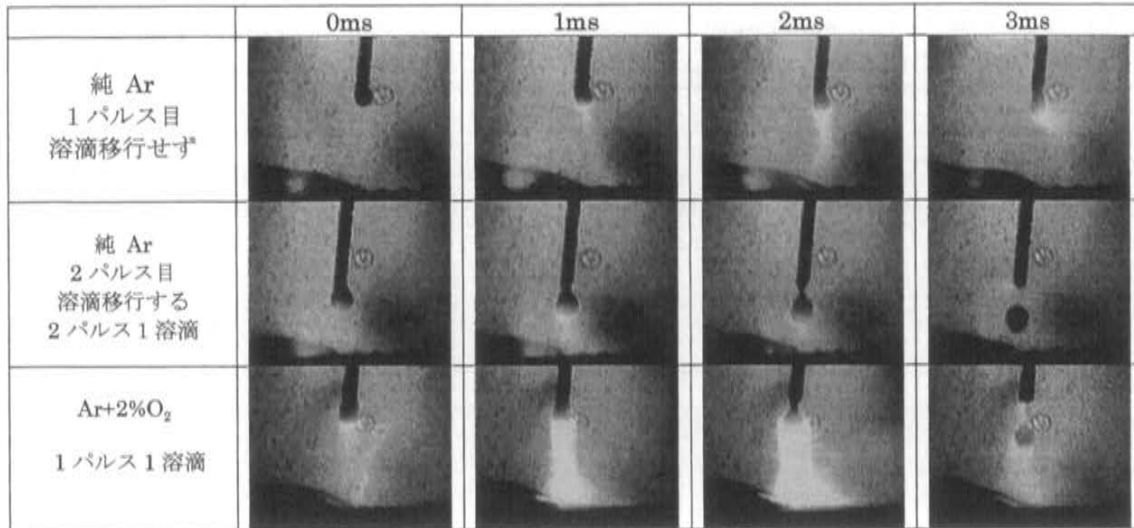


Fig. 9 ハイスピードビデオ撮影画像 (矩形波; 1000コマ/秒)

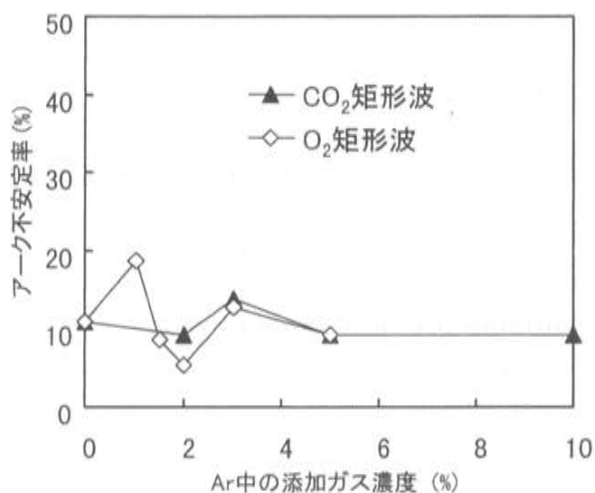


Fig. 10 アーク不安定率に及ぼす添加ガス濃度の影響 (矩形波)

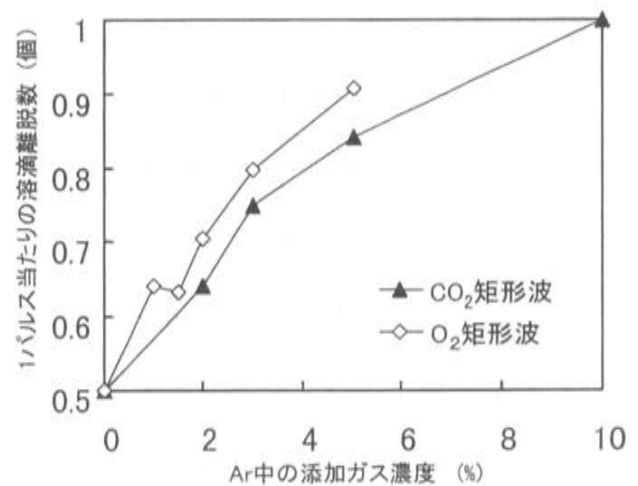


Fig. 11 溶滴離脱に及ぼす添加ガス濃度の影響 (矩形波)

波数が30 Hz程度であり、低電流のベース期間が矩形波の方が短いことに起因すると考えられる。台形波の場合、長いベース期間中に陰極点がワイヤ直下から熔融池の後方に向かって移動するため、次のパルスが印加された時に、ワイヤ直下と移動した陰極点の2つのパスにアークが生じることになり、アークの不安定となる。添加ガス濃度が増加すると、ベース期間中の陰極点の移動が抑えられる傾向にはあるが、添加ガスの効果はアーク不安定率が10%程度となるところで飽和する。

溶滴離脱力は電流の2乗に比例し、溶滴が得る運動量は溶滴離脱力とその力が加わる時間との積である力積で

決まる。パルス期間中の溶滴離脱を考えた場合、溶滴離脱力をパルス期間中の時間で積分すると1パルス中で溶滴に加わる力積が求められる。矩形波のパルス期間($T_a + T_p + T_d$)は3msであり、台形波のパルス期間である7msより短い。つまり矩形波の場合、ベース電流以上の電流が流れる時間が台形波の場合より短く、溶滴離脱力が働く時間が短いために1パルス当たりの力積が小さくなる。矩形波では溶滴離脱が台形波ほど容易ではなくなるため、シールドガスが純Arの場合、矩形波では完全に2パルス1溶滴の移行となった。この場合、Fig. 11に示すように、1パルス当たりの平均溶滴離脱

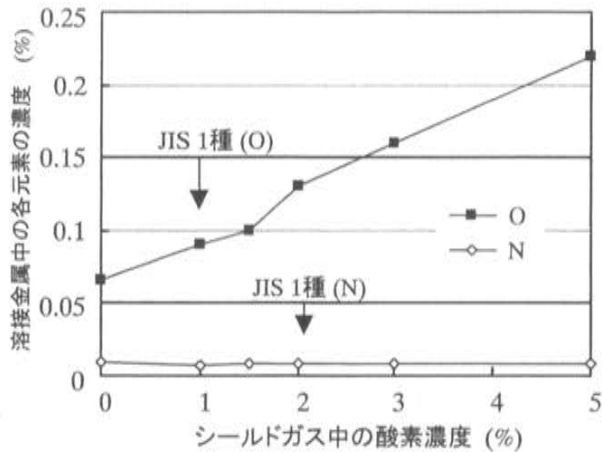


Fig. 12 溶接金属の化学成分

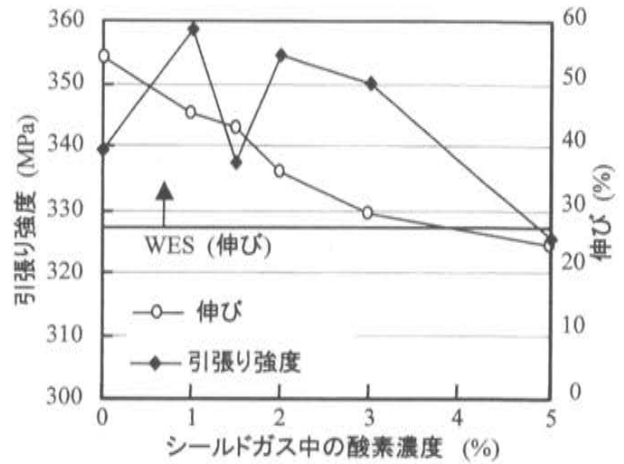


Fig. 13 引張り試験結果

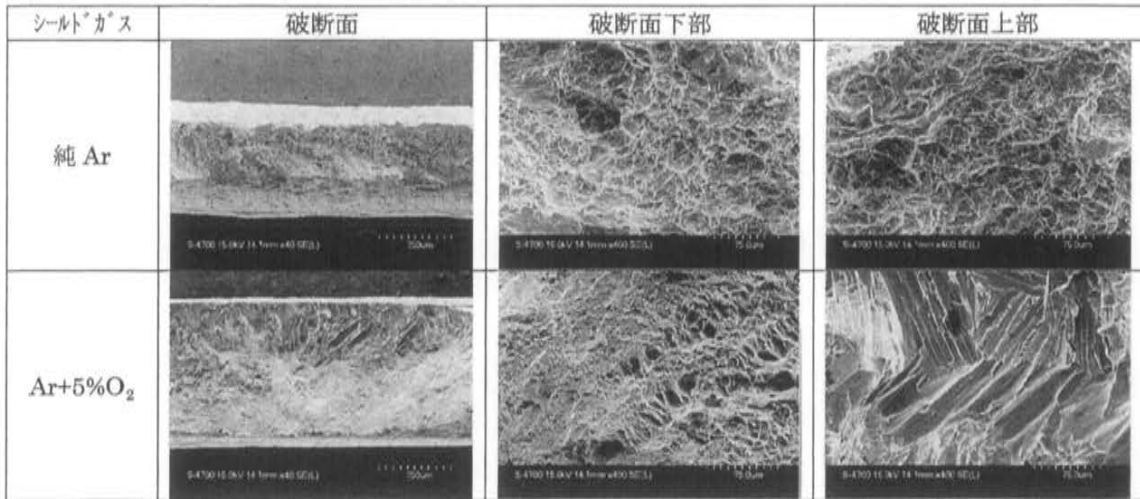


Fig. 14 破断面の SEM 写真

数は0.5となる。

また、純 Ar シールドで2パルス1溶滴移行だったものが、添加ガスの増加に従い、表面張力の変化により溶滴離脱が容易になるため、1パルス1溶滴移行に近づいて行く。

4. 機械的強度試験結果

厚さ1.5 mm の Ti 平板突き合わせ溶接を行い、溶接部の評価を行った。溶接金属の化学成分分析結果を Fig. 12 に示す。Fig. 12 から、シールドガスの酸素濃度の増加に従い溶接金属中の酸素濃度が増加するが、窒素濃度はほとんど変化しない。従ってシールドは良好である。JIS H 4600 に規定される1種純チタンの化学成分は、酸素が0.15%以下、窒素が0.05%以下である。Fig.

12より、シールドガス中の O₂ 濃度が2%以下であれば、溶接金属はチタン1種のレベルに収まることが分かる。

Fig. 13 に溶接部の引張試験による引張強さと、伸びを示す。引張試験には2つの試片を用い、Fig. 13 中にプロットした点はそれらの平均値である。WES 7102 によれば、溶接継手の引張強さは母材と同等でなければならないとされている。JIS H 4600 が定める1種チタン板の引張強さは270~410 MPa であり、伸びは27%以上である。引張試験の結果より、シールドガスの酸素濃度が2%以下であれば、Ti-MIG 溶接部は引張試験における WES 7102 の要求を満たしていることが分かった。

Fig. 14 に引張試験後の破断面の SEM 写真を示す。溶接試片の破断箇所はいずれの場合においてもポンド部である。シールドガスが純 Ar の場合は、破断面上部

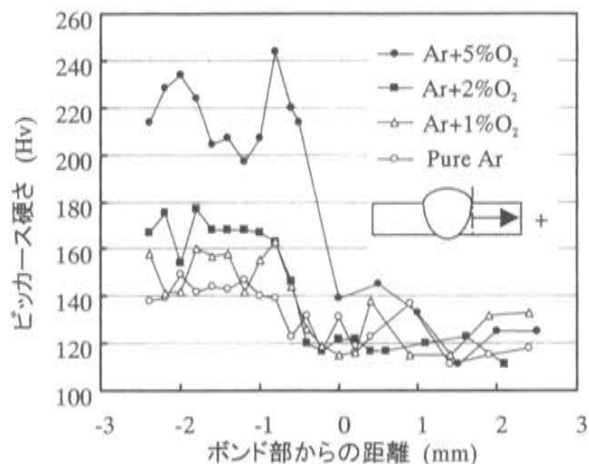


Fig. 15 溶接部の硬度分布（水平方向）

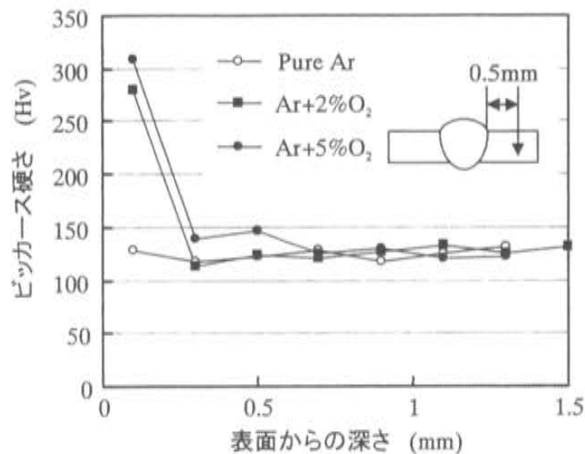


Fig. 16 溶接部の硬度分布（垂直方向）

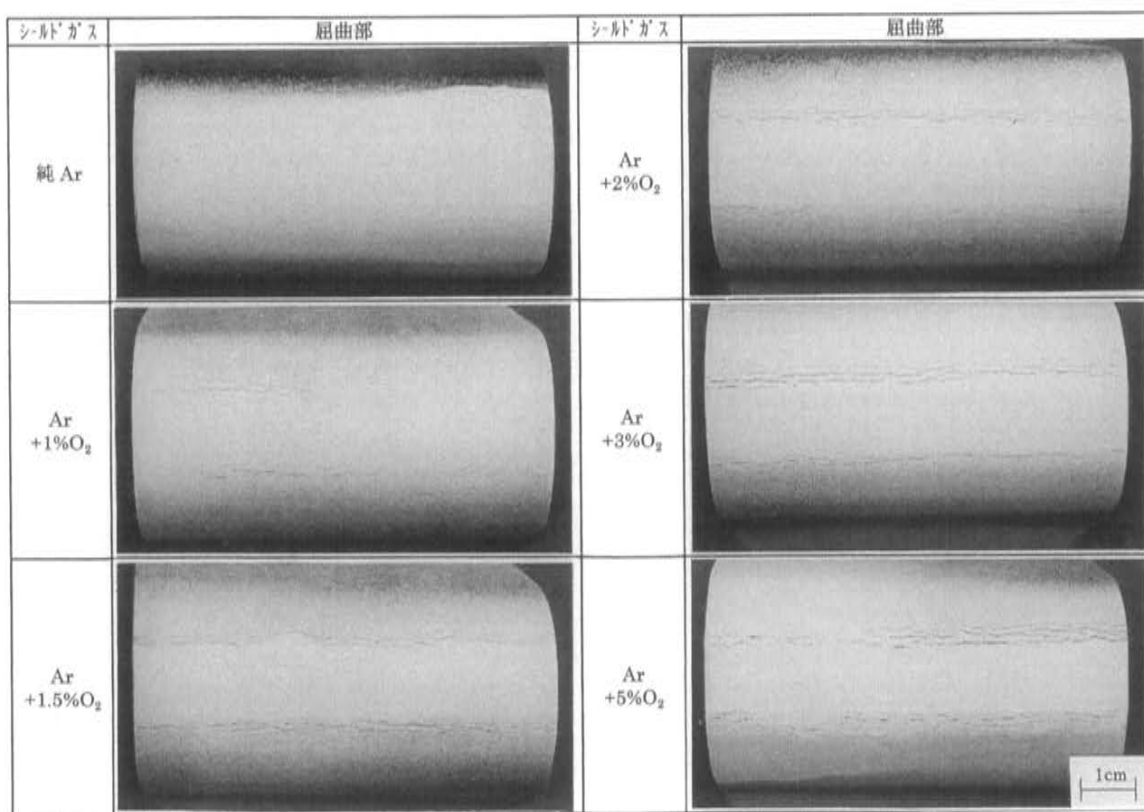


Fig. 17 浸透探傷法による曲げ試験の評価

(母材表面側)、下部ともに延性破面に通常見られるディンプル破面である。しかし、シールドガスが Ar+5% O₂ の場合は、破断面下部はディンプル破面であるが、酸化性ガスと接触する母材表面側の破断面上部はディンプル破面ではなく、粗粒な脆性破面である。

Fig. 15, Fig. 16に溶接部のビッカース硬度分布を示

す。Fig. 15は板厚中央のボンド部を原点とし、溶接部横断面の横方向の硬度分布である。Fig. 16はボンド部から母材側0.5mmのところを表面から深さ方向への硬度分布である。WES 7102によれば、ビッカース硬度で溶接部の硬さが母材のそれよりも40を越えない範囲であれば健全な溶接部とみなすことができる。Fig. 15にお

いて溶接金属の硬さは、シールドガス中の O_2 濃度が1%でも約160 Hvに増加しており、WES 7102の基準を満たさない。さらに、Fig. 16において、熱影響部の表面近傍が非常に硬化していることが確認できる。

次に溶接部の表曲げ試験を行い、浸透探傷試験によって亀裂の有無を調査することにより、表面の硬化が継手性能に及ぼす影響について評価を行った。曲げ試験はJIS Z 3805に厳密ではないが準拠するように行った。それらの結果をFig. 17に示す。曲げ試験は3点曲げで、雄型の半径は8 mmである。シールドガスが純Arの試片では、亀裂の発生は確認できないが、その他の純Arに酸素を添加した全ての試片において、亀裂の発生が確認できる。JIS Z 3805によれば、3.0 mm以下の割れの長さの合計長さが7.0 mmを越える場合は、曲げ試験に不合格となる。酸素を添加した全ての試片の亀裂の合計長さは7.0 mmを越えており、酸素を添加すれば曲げ試験で不合格となる。亀裂はボンド部から熱影響部に発生しており、溶接金属には亀裂は生じない。これは、溶接中に高温に熱せられた母材に酸素が触れたため、酸素が侵入固溶し熱影響部が硬化し、脆くなったものと考えられる。溶接金属があまり硬化しないのは、熔融池内で溶接金属が対流するために、酸素が溶け込んでも攪拌、希釈されるためと考えられる。

裏曲げ試験も同時に行ったが、裏曲げ試験では、酸素を添加した試片の溶接部においても亀裂の発生は確認できなかった。

5. まとめ

チタン薄板のパルスMIG溶接の基礎的検討として以

上の検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ① シールドガスの純度が高いほど、また、パルス電流波形のベース期間が長いほどアークの不安定現象が発生しやすい。
- ② シールドガスに微量の酸化性ガスを添加すると、アークの不安定現象を抑えることができ、蛇行の無いビードを得ることができる。
- ③ シールドガス中に酸化性ガスを添加すると、その濃度増加に従い、溶滴離脱が容易になる。
- ④ パルス条件と添加ガス成分を検討することにより、1パルス1溶滴でアーク不安定を抑えた理想的なパルス溶滴移行が得られる可能性を示した。
- ⑤ シールドガスの酸素濃度が増加すると溶接金属中の酸素濃度も増加するが、シールドガスの酸素濃度が2%以内であれば溶接金属はJIS H 4600のチタン1種レベルである。
- ⑥ 引張試験の結果、シールドガス中の酸素濃度が2%以下であれば、伸びと引張強度はWES 7102の基準を満たす。しかし、その破断面には、シールドガスと接触する母材表面側において脆性破面が認められた。
- ⑦ ビッカース硬度分布測定の結果、シールドガス中の酸素濃度が1%でも溶接金属と熱影響部表層に硬化が見られWES 7102の基準を満たさない。
- ⑧ 曲げ試験の結果、シールドガス中の酸素濃度が1%でも溶接熱影響部に亀裂の発生が認められ、JIS Z 3805の基準を満たさない。
- ⑨ シールドガスへの酸化性ガスの添加はビード形状を改善するが、溶接部が硬化する問題がある。