

チタンの鋼板への直接ライニング技術

村井康生・斉藤賢司

技術開発本部・材料研究所

Direct Thin Titanium Plate Lining Technology for Steel Plate

Yasuo Murai・Kenji Saito

Titanium is widely used in chemical plants, electric power generating plants, marine structures and so on because of its excellent corrosion-resistance. In this paper, a MIG welding method that uses attenuated copper alloy wire to weld titanium board directly to steel plates is described.

まえがき = チタンは優れた耐食性を有することから、化学プラント、発電プラントなどに適用されてきたが、最近これらに加えて、チタンのもっとも期待できる用途分野の一つである海洋構造物への適用が試みられており、東京湾横断橋の橋脚や、超大型浮体式海洋構造物(メガフロート)防食用ライニングなどがその例としてあげられる^{1)~3)}。これらのライニング工法はチタンと鋼材とを直接溶接することが難しいことから、ほとんどがチタンクラッド鋼を利用した方式となっている。ここでは、細径銅合金ワイヤをもちいた MIG 溶接法により、チタン板を鋼板に直接溶接する新しいライニング技術を開発したので報告する。

1. チタンと鋼の接合技術

チタンと鋼の接合方法に関わる従来技術を第1表に示す。接合方法としてチタンクラッド鋼をえることを目的とした大断面の板状部材の接合技術と、異種金属の接

第1表 チタンと鋼の接合方法

Table 1 Joining method for titanium to steel

	Joining Method	Possibility	Contents	Usability
Big Section Joining	Explosive Welding	Possible	Direct Joining	×
	Roll Cladding	Possible	Insert Metal	
	Resistance Welding	Possible	Insert Metal	
Different Kind Metal Joining	Brazing	Possible	Ag filler Metal	
	Diffusion Bonding	Possible	Direct Bonding	×
	Friction Welding	Possible	Direct Bonding	×
	Fusion Welding	Impossible	—	

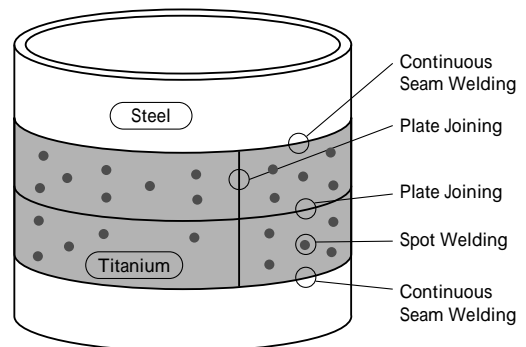
合部品をえることを目的とした接合技術に大別できる。

前者の例として、古くから実績をもつ爆発圧接や、最近適用が広まりつつある圧延によるクラッド鋼、あるいは抵抗シーム溶接によるクラディング法が挙げられる。後者の例として、拡散接合や摩擦圧接によってもチタンと鋼を直接接合することが可能である。また、メガフロートの実験用浮体に、チタンクラッド鋼による防食用ライニングが施工されたが、鋼材とチタンの直接接合が避けられないシール部に、銀ろうをもちいた TIG ろう付方法が適用されている。しかしながら、これらの接合方

法はいずれも汎用性の面では高いとはいえず、もっとも汎用性の高い溶融溶接(アーク溶接)については、チタンと鋼を直接溶接すると、脆弱な金属間化合物の生成に起因する割れが発生するため難しいとされている。

2. チタンの鋼板への直接ライニングについて

構造部材である鋼材にチタン材を直接ライニングする技術を開発する上で必要となる接合技術は、第1図の例に示すように、チタン材同士の接合技術(チタン材の板継ぎ溶接)と、鋼材とチタン材の接合技術(連続シーム溶接と中間部固着溶接)が考えられる。前者のチタン材同士の接合については、従来の溶接技術あるいはその延長技術、たとえば TIG 溶接、プラズマ溶接、レーザ溶接などで対応できる可能性が大きいため、ここでは後者に対する溶接技術について探索し、割れ発生の主因であるチタンと鋼の相互溶融の抑制が期待される、細径 Cu 合金をもちいた MIG 溶接法の適用性を調べた。



第1図 チタンライニングにおける接合技術

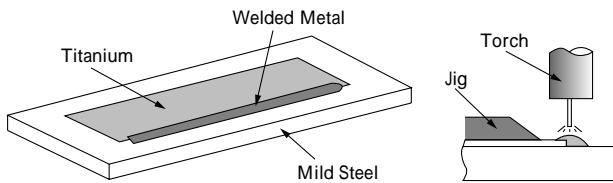
Fig. 1 Joining technology for titanium lining

3. 実験方法

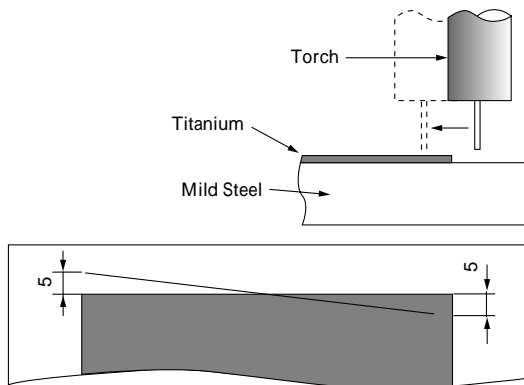
3.1 連続シーム溶接

第2図に示すように、SS400 の 12 × 75 × 400mm 鋼板に、1mm または 0.5 × 50 × 250mm の純チタン板を治具で押さえた状態で、チタン板側端部を MIG 溶接して供試した。

溶接ワイヤには 0.8mm の Cu-3%Si-1%Mn 系ワイヤ



第2図 連続シーム溶接試験状況
Fig. 2 Test situation for continuous seam welding



第3図 連続シーム溶接試験状況
Fig. 3 Test situation for continuous seam welding

をもちいた。第2表に溶接条件を示す。溶接の際のワイヤの狙い位置はチタン板側端部より鋼板側に2mmシフトさせておこなった。

また、ワイヤの狙い位置の影響を調べるため、第3図に示すように、チタン板側端部に対して鋼板側に5mmシフトした位置から、溶接線に沿ってチタン板側5mmに至るように傾斜的に狙い位置を変化させながら溶接する試験をおこなった。溶接後、浸透探傷により溶接部における割れの有無を調べるとともに、第4図に示す形状の引張試験片を作製し、継手引張試験をおこなった。また、溶接部断面における溶込み状況およびマイクロ組織を観察した。

3.2 MIG スポット溶接

ライニング材の中間部固着を目的として、MIG スポット溶接をおこなった。試験片は連続シーム溶接での実験と同様の材料組合せとし、板厚1mmのチタン板については、第5図に示すように、あらかじめ7mmの孔を加工して試験に供した。第3表に溶接条件を示す。

溶接後、連続シーム溶接と同様、浸透探傷および断面におけるマイクロ組織観察をおこなった。

4. 実験結果

4.1 連続シーム溶接

第6図a)、同b)に連続シーム溶接における溶接条件と溶接ビードの割れの関連を示す。図に示すように、チタン材板厚1mmおよび0.5mmとも、溶接電流が60Aの場合、溶接速度20~50cm/minの範囲で割れない溶接ビードがえられた。溶接電流が80A、100Aと高くなるにしたがって、割れが発生しない領域が低速側に移行する傾向がみられた。

写真1a)、同b)にチタン材板厚1mmおよび0.5mmの連続シーム溶接部(溶接条件:80A-40cm/min)のビード外観ならびに浸透探傷試験外観例を示す。ビード外観

第2表 連続シーム溶接条件

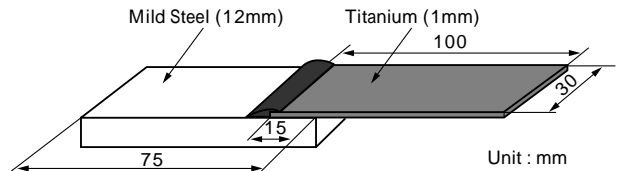
Table 2 Continuous seam welding conditions

Welding Current	Welding Voltage	Welding Speed	Extension	Shielding Gas
60~100A	18~23V	20~50cm/min	15mm	Ar

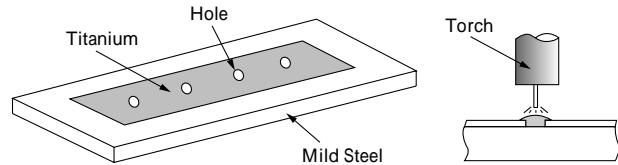
第3表 MIG スポット溶接条件

Table 3 MIG spot welding conditions

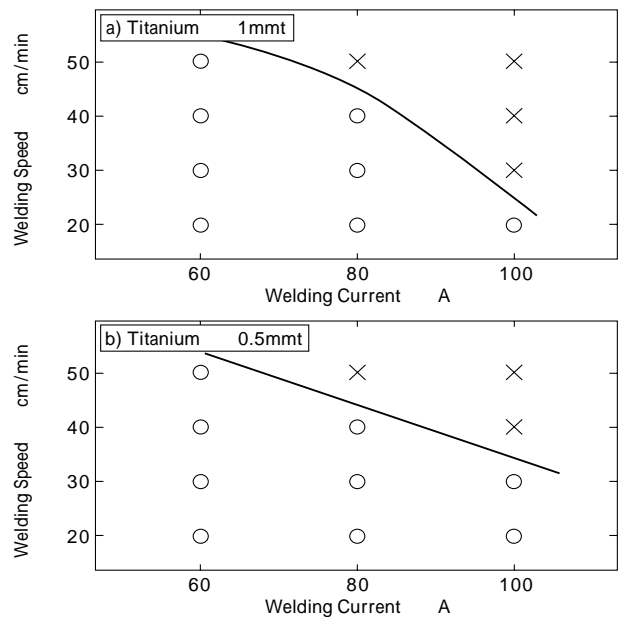
Welding Current	Welding Voltage	Arc Time	Extension	Shielding Gas
80~100A	20~23V	2~3s	15mm	Ar



第4図 引張試験片形状
Fig. 4 Shape of tensile test specimen



第5図 MIG スポット溶接試験状況
Fig. 5 Test situation for MIG spot welding



第6図 連続シーム溶接における溶接条件とビード割れの関連
Fig. 6 Relations between welding condition and bead crack in continuous seam welding

および浸透探傷試験のいずれにおいても溶接部における割れ状の欠陥はみとめられない。写真2は写真1に示した溶接ビードの断面マクロを示すものである。写真2a)より、溶接時にワイヤ狙い位置を鋼側にシフトしたことにより、溶込みの先端部がチタン材側端部からずれていることがわかる。また、本MIG溶接による溶込み深さは、通常のアーク溶接にくらべてきわめて浅いことがうかがえる。しかしながら、鋼材に対しては溶込みおよび熱影響部が形成されているとともに、チタン材に対しても、溶融接合されていることが確認される。

写真2b)に示す板厚0.5mmチタン材についても同様

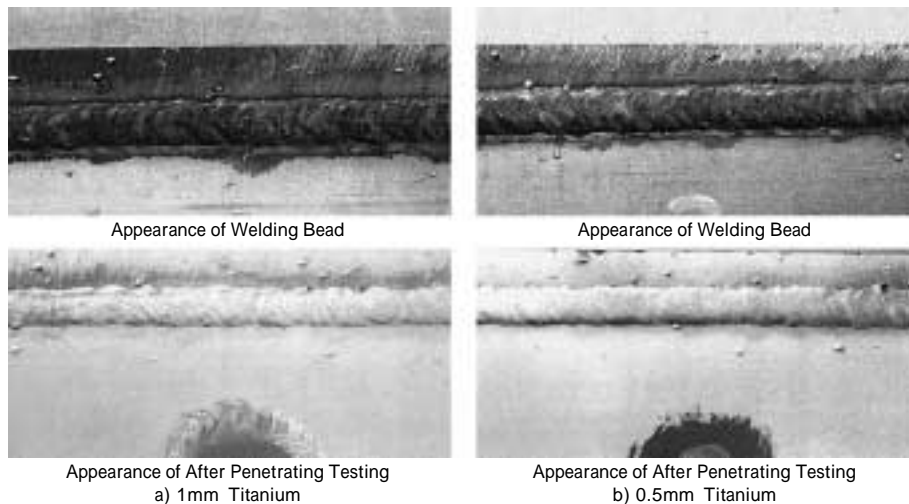


写真1 連続シーム溶接ビード外観
Photo 1 Appearance of continuous seam welding bead

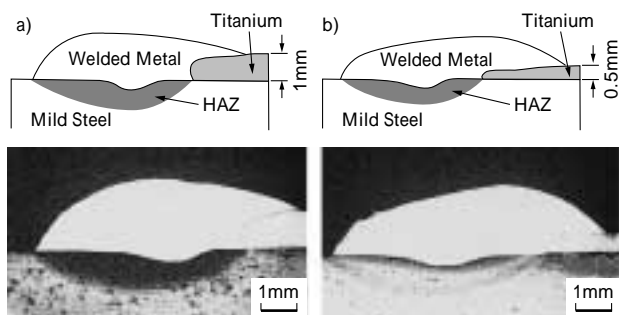


写真2 連続シーム溶接部の断面マクロ組織
Photo 2 Cross-section macrostructures of continuous seam welding area

の溶込み形状を呈しており、チタンと鋼の相互溶解を抑制された状態で溶接されていることが確認される。

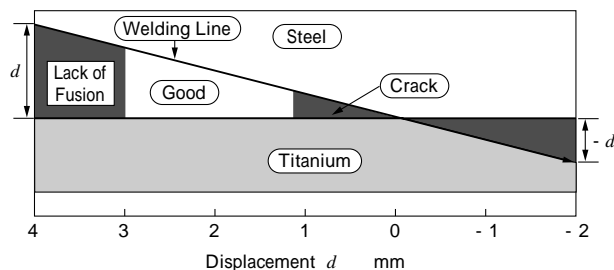
第7図は、溶接電流 60A・溶接速度 40cm/min で一定とし、ワイヤの狙い位置を連続的に変化させて溶接した場合の、狙い位置と溶接ビードの割れの関連を図示した例である。

ワイヤの狙い位置がチタン材側端部から 3mm を超えてシフトした場合は、溶融金属がチタン材に至らず融合不良が発生した。いっぽう、狙い位置がチタン材側端部に 1mm 以上接近もしくはチタン材上になると、ビード割れが発生した。狙い位置がチタン材側端部から 1.2 mm から 3mm の間では割れのない良好な溶接ビードがえられた。写真3に浸透探傷後の溶接ビード外観を示す。

第8図に板厚 1mm チタン材に対する連続シーム溶接継手の引張試験結果を示す。破断応力は破断荷重をチタン材断面積で除した値を示した。いずれの溶接条件とも 300MPa を超える破断応力を示した。なお、破断箇所は銅合金溶接金属部であった。

4.2 MIG スポット溶接

チタン材板厚 1mm に 7mm の孔を加工した試験片に対して、第3表に示した範囲の条件で、MIG スポット溶接をおこなった。また、チタン材板厚 0.5mm については、あらかじめ孔を加工せずに、チタン材の表面に直接アークを発生させてスポット溶接することを試みた。写真4にそれぞれのビード外観および浸透探傷後の外観を、また、写真5に断面マクロ組織を示す。いずれの板厚とも割れなどの欠陥はみとめられず、鋼板にスポット溶接されている。ただし、チタン材表面に直接アークを



第7図 ワイヤ狙い位置とビード割れの関連
Fig. 7 Relations between aimed wire position and bead crack

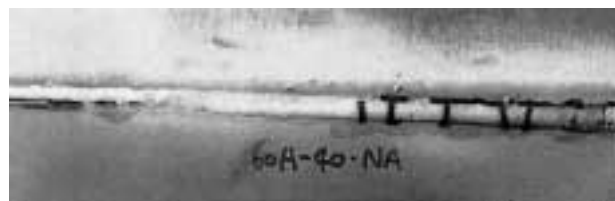
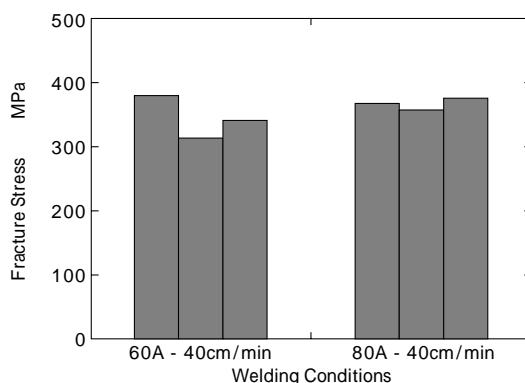


写真3 浸透探傷後の溶接ビード外観
Photo 3 Appearance of bead after penetrant testing



第8図 連続シーム溶接継手の引張試験結果
Fig. 8 Tensile test results of continuous seam welding joint

発生させたものは、鋼板との接合面積が狭くなっていること、また溶接金属側にチタンが島状に残留していることが確認される。

4.3 断面ミクロ組織観察

連続シーム溶接部および MIG スポット溶接部について、EPMA による組織観察ならびに組成分析をおこなった。写真6に連続シーム溶接部におけるチタン材側端部近傍の組成像を示す。銅合金溶接金属と接するチタン材の側端部および上面には、きわめて薄い反応層が生成し

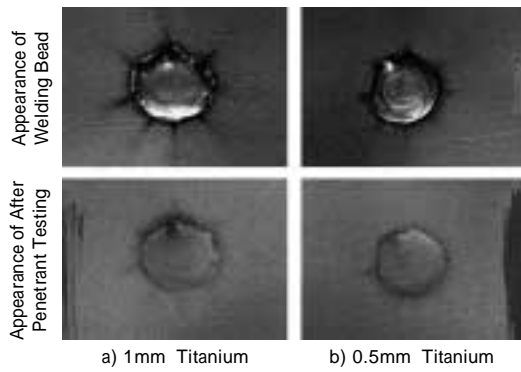


写真4 スポット溶接ビード外観
Photo 4 Appearance of MIG spot welding bead

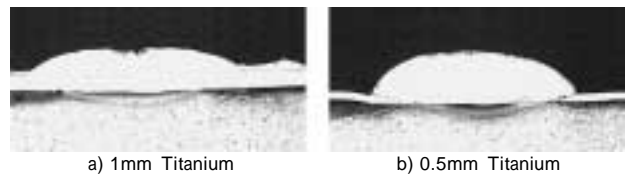


写真5 スポット溶接部の断面マクロ組織
Photo 5 Cross-section macrostructures of MIG spot welding bead

固着方法として、MIG スポット溶接を試みたところ、連続シーム溶接と同様、割れない溶接部がえられた。ミクロ組織において、チタン材端部の溶接金属界面近傍に、高チタンの中間層が形成されていることが確認されたが、遷移層を含めて層の厚さが小さいこと、および傾

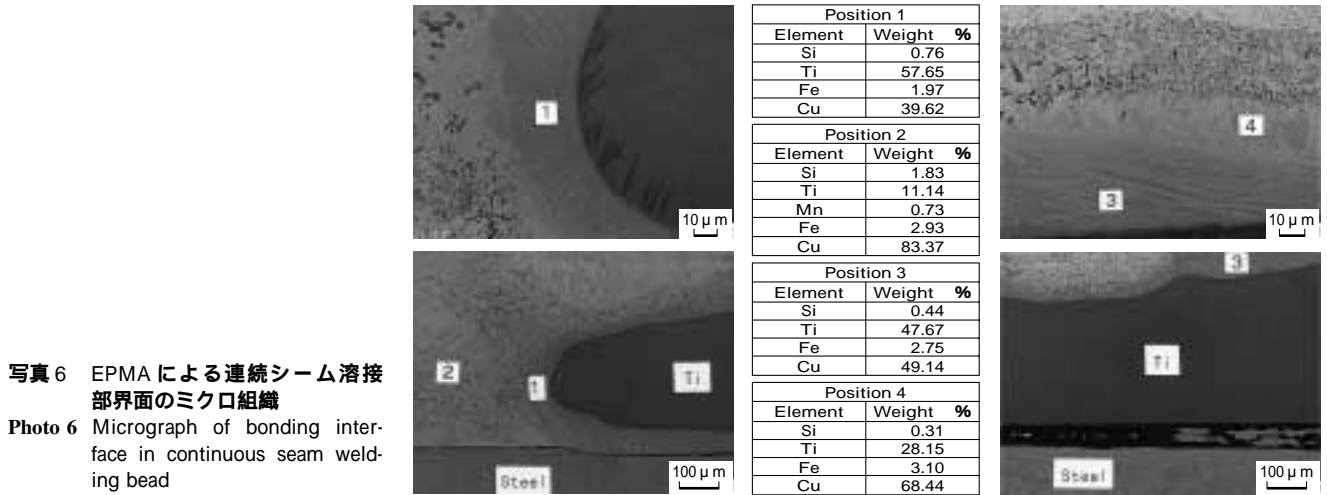


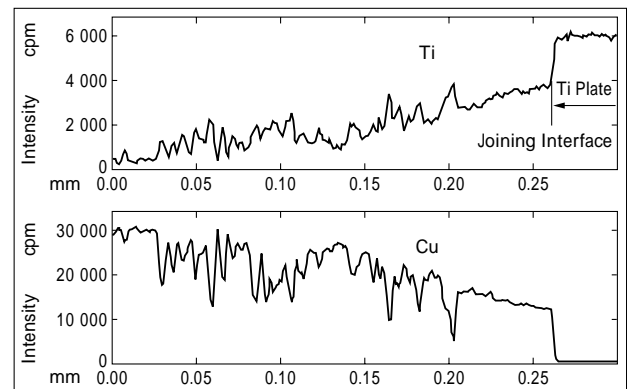
写真6 EPMAによる連続シーム溶接部界面のミクロ組織
Photo 6 Micrograph of bonding interface in continuous seam welding bead

ていることが確認される。この領域の組成は、側端部におけるもっともチタン材に近い部分(1)で、58%Ti-40%Cuと、溶接金属側(2)の11%Ti-83%Cuにくらべて高チタンの層が生成されている。チタン材上面(3)(4)においても、チタン材に近くなるにしたがって、高チタンの層が生成されていることが確認された。

第9図は、連続シーム溶接部におけるチタン材側端部を中心として、水平方向にTi, Cuを線分析した結果を示すものである。図に示すように、チタン材側端部から銅合金溶接金属側にかけて約200μmの遷移領域がみとめられ、チタン先端部約50μmに前記高チタン層が形成されていることがわかる。

MIG スポット溶接部についても、同様のEPMAによる分析をおこなったところ、チタン材における孔内側面には約20μm厚さの45%Ti-50%Cuといった高チタン層が生成されていることが確認された。

むすび=チタン板を鋼板に直接ライニングする技術を開発するうえで必要となる、チタン板側端部の連続シーム溶接に、細径銅合金ワイヤをもちいたMIG溶接を適用し、その可能性を調査した。その結果、ワイヤ狙い位置を適切な範囲で施工することにより、チタンおよび鋼母材からの成分希釈を極度に抑制できる効果により、割れない健全な溶接ビードが形成されることが確認された。また、連続シーム溶接部の継手強度は、300MPa以上の引張強度を示した。直接ライニングにおける中間部の



第9図 連続シーム溶接部界面におけるEPMA線分析結果
Fig. 9 Line analysis of joining interface in continuous seam welding

斜組成となっていることで割れ発生を回避できたものと考えられる。

以上の結果、細径銅合金ワイヤをもちいたMIG溶接技術を主体とした、チタン板を鋼板に直接ライニングすることは可能と判断された。今後、実機で必要となる姿勢溶接を含めた、実用化に関する検討をおこなう予定である。

参考文献

- 1) 山田 真ほか：チタン, Vol.44, No.4 (1996), p.246.
- 2) 高橋康雄ほか：チタン, Vol.44, No.4 (1996), p.235.
- 3) 上瀧洋明ほか：チタン, Vol.46, No.3 (1998), p.237.