

ステンレス鋼とチタンの異材重ね継手形成に及ぼす
レーザブレイジング条件の検討

Effects of Laser Brazing Condition on Dissimilar Lap Joint Formation of
Stainless Steel and Titanium

秦野雅夫・村井康生・小橋泰三・上野邦香

菅野克紀・中田一博・菅 哲男

Masao HADANO, Yasuo MURAI, Taizo KOBASHI, Kunika UENO,
Katsunori KANNO, Kazuhiro NAKATA and Tetsuo SUGA

ステンレス鋼とチタンの異材重ね継手形成に及ぼす レーザーブレイジング条件の検討

Effects of Laser Brazing Condition on Dissimilar Lap Joint Formation of Stainless Steel and Titanium

秦野雅夫*・村井康生*・小橋泰三**・上野邦香***

菅野克紀***・中田一博****・菅 哲男****

Masao HADANO, Yasuo MURAI, Taizo KOBASHI, Kunika UENO,
Katsunori KANNO, Kazuhiro NAKATA and Tetsuo SUGA

(Received October 14, 2016)

Stainless steel features high corrosion resistance but may undergo intergranular corrosion in some specific environments especially in seawater. To cope with this problem, it can be considered a useful technique to apply titanium material selectively to the part exposed to such specific environments. However, if austenitic stainless steel and titanium are fused together, Fe and Ti create brittle intermetallic compounds, which makes it difficult to configure suitable welding parameters. The authors have studied the laser brazing process to minimize the fusing of the base metal to join the lap joint of stainless steel and titanium.

As the results of examining the base metal arrangement for a lap joint in the use of Cu-Si filler metal, the lap joint with a top plate of stainless steel and a bottom plate of titanium was clarified to be suitable to obtain a crack-free weld joint. The optimum combination of laser brazing parameters with a Cu-Si filler metal was clarified as follows for the present study: 2 kW laser power, 70 degree beam angle, 0.2 mm beam shift, 0.70 m/min brazing speed, and 1.1 m/min filler-metal feed speed by using a semiconductor laser. The examination of several kinds of filler metals verified that the Ni-Cu type and Ni type filler metals increased the formation ratio of Ni-Ti intermetallic compound, thereby causing the occurrence of cracking. In contrast with the filler metals of Cu-Si type, Cu type, and Cu-Ni type, the rupture load fulfilled the JIS standard for titanium clad steel with no cracking in the optimized brazing condition.

Key Words: Stainless Steel, Titanium, Dissimilar Material, Laser Brazing, Filler Metal

1. 緒言

ステンレス鋼は高い耐腐食性を有しており、様々な分野で使用されている。しかし、海中など一部の環境下においては粒界腐食が発生することがある。チタンはステンレス鋼より高い耐腐食性を有しているが、チタン自体が高価であり、チタンを全体に使用することは費用面から難しい。そこで、腐食しやすい部分にのみチタンを使用し、耐腐食性を向上させることは海洋構造物、重電、自動車、橋梁などの分野にとって有用であると考えられる。ステンレス鋼とチタンの異材接合はレーザー溶接¹⁾、電子ビーム溶接²⁾、ミグ接合³⁾などの例があるが、オーステナイト系ステンレ

ス鋼とチタンの双方を溶融した場合は、鉄とチタンが脆弱な化合物を生成するため、溶接条件の設定が難しくなる。このため、母材を溶かさないう固相接合法は有効であり、真空中での拡散接合⁴⁾や摩擦接合⁵⁾の検討もされているが、これらは継手に対する形状制約が厳しくなる。

一方、近年レーザー発振器の開発が進み、ファイバーレーザーなどの高出力レーザーが出現し溶接分野での適用も広がってきている。その中で半導体レーザーは集光性に劣り、エネルギー密度も比較的低いものの、逆に大きい集光サイズにしやすいことや、赤外レーザーの中では波長が小さく材料へのレーザー吸収率も良好な特長がある。そのため、その特性を活かして自動車などの分野でブレイジングの用途で使わ

* 神鋼溶接サービス株式会社 (〒 251-8551 神奈川県藤沢市宮前 100-1)

Shinko Welding Service Co., Ltd. (100-1 Miyamae, Fujisawa, KANAGAWA 251-8551 Japan)

** 株式会社神戸製鋼所 (〒 251-8551 神奈川県藤沢市宮前 100-1)

Kobe Steel, Ltd. (100-1 Miyamae, Fujisawa, KANAGAWA 251-8551 Japan)

*** 東成エレクトロビーム株式会社 (〒 190-1203 東京都西多摩郡瑞穂町 651-6)

Tosei Electrobeam Co., Ltd. (651-6 Mizuhomachi, Nishitamagun, Tokyo 190-1203 Japan)

**** 大阪大学 接合科学研究所 (〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11-1)

Joining and welding research Institute, Osaka University (11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047 Japan)

Table 1 Brazing test conditions.

Filler metal		Chemical composition (wt.%)					
Type	JIS	Cu	Si	Mn	P	Fe	Ni
Cu-Si	YCuSiA	96.2	2.37	1.2	< 0.01	-	-
Cu	YCu	98.8	0.29	0.38	< 0.01	-	-
Cu-Ni	YCuNi-1	bal.	0.03	0.92	0.002	1.01	10.1
Ni-Cu	YNiCu-7	bal.	0.22	2.79	0.007	0.24	65.6
Ni	YNi-1	0.01	0.01	0.15	0.001	0.06	96.3

れてきている⁸⁾。

そこで、本研究では比較的高エネルギーで入熱の制御が容易な半導体レーザーを熱源として、割れなどの欠陥防止の観点から、溶加材を使用するレーザーブレイジング法を用いて、オーステナイト系ステンレス鋼とチタンの重ねすみ肉継手形成に関する検討を行い、接合部の組織および継手強度特性に及ぼす施工条件および溶加材成分について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試板はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 (JIS G 4305)、2 mm 厚さ× 80 mm 幅× 200 mm 長さのものおよび工業用純チタン TP340 (JIS H 4600)、2 mm 厚さ× 80 mm 幅× 200 mm 長さのものを用いた。溶加材は Cu-Si 系、Cu 系、Cu-Ni 系、Ni-Cu 系および Ni 系の 5 種類であり、いずれも市販材であり、ワイヤ径は 1.2 mm である。Table 1 に溶加材の代表成分を示す。なお、Ni 系はブレイジング溶加材としては一般的には用いられていないが、比較材料として用いた。

2.2 レーザーブレイジング法

レーザーの種類は波長 910、940、980 および 1030 nm の 4 種類混合タイプの半導体レーザーであり、最大出力 4 kW、プロセスファイバー径 1 mm である。なお、ビームスポット径は 3.0 mm 一定とした。6 軸ロボットにレーザー Torch とワイヤ送給装置を搭載し、溶加材は進行方向前方から重ね隅肉部に供給した。シールドガスは、溶加材と同軸にアルゴンを 20 L/min で供給した。まず、①ステンレス鋼を上板とし、チタンを下板とした継手（以下、ステンレス鋼/チタンと記す）と、②チタンを上板とし、ステンレス鋼を下板とした継手の 2 種類の継手を予備試験で比較した。その結果、①の方が②より割れが発生しにくい傾向にあり、これは、下板に比べ上板の方が溶けやすく、チタンを下板に重ねた方がチタン側の溶込みを浅くでき、チタン化合物の生成量を抑えることができるためと考えられた。このことから、本研究では割れ防止の観点から①の材料組み合わせの重ねすみ肉継手を採用した。

ブレイジング条件の検討として、市販の Cu-Si 系溶加材を用い、レーザー出力 2 kW と一定として、レーザー照射角度、レーザー照射位置シフト、ブレイジング速度および溶加材送

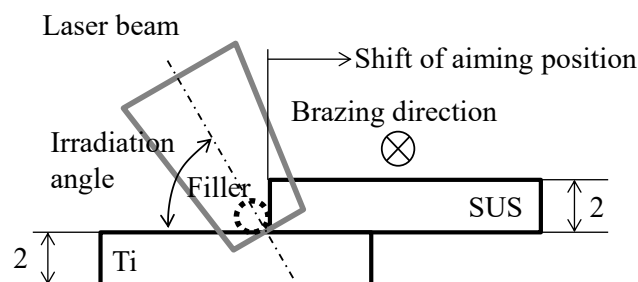


Fig.1 Laser irradiation condition.

Table 2 Brazing test conditions.

No.	Joint geometry	Filler metal		Irradiation angle (°)	Brazing speed (m/min)	Filler metal feed speed (m/min)	Torch shift (mm)	
		Type	JIS					
1	Up SUS / Under Ti	Cu-Si	YCuSiA	80	0.7	1.1	0.2	
2				70				
3				60				
4				80	0.8			
5					0.6			
6					0.7			1.3
7								0.9
8								1.1
9					0.4			

給速度をそれぞれ変化させて試験を行った。Fig.1 にレーザー照射条件を、Table 2 にブレイジング条件を示す。

次に、Cu-Si 系溶加材により、割れの無い良好な継手が得られたステンレス鋼/チタンを用いて、溶加材の種類を変えて、ブレイズ継手の形成および継手特性に及ぼす影響を検討した。融点などが異なる 5 種類の溶加材に対してレーザー出力 2 kW、レーザースポット径 3.0 mm、レーザー照射角度 80°の一定条件で、ブレイジング速度を変化させて割れの無いブレイジング速度を選定した。溶加材送給速度はブレイジング速度と同じ比率で変化させ、単位接合長あたりの溶着金属量はいずれの条件においても同じとなるように設定した。

2.3 試験方法

2.3.1 マクロ試験

ブレイズ部形状や溶込み状態を確認するためブレイズ部横断面のマクロ試験を、研磨面のままで投影機 (×10) を用いて行った。

2.3.2 引張せん断試験

継手強度の評価試験として、幅 20 mm の短冊形試験片を接合方向に垂直に採取し、n = 2 で引張せん断試験を行った (Fig.2)。引張速度 10 mm/min で行い、継手強度は、試験片幅 1 mm あたりの破断荷重 (N/mm) で評価し、割れなどの無い良好な継手に対しては引張せん断強度を求めた。目標

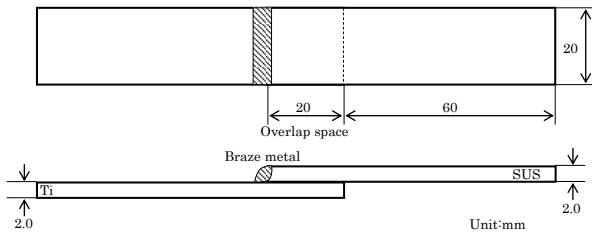


Fig.2 Schematic diagram of tensile shear test specimen.

とする引張せん断強度は、チタンクラッド鋼の JIS 規格 (JIS G 3603) に定められた値 (140 MPa) 以上とした。

2.3.3 破面観察および化合物同定試験

ブレイズ部の組成を調べるため、電子線マイクロアナライザ (EPMA) を用いたブレイズ部の WDS 面分析および破断面の X 線回折装置 (CuK α , 18 kW) を用いた形成相の同定を行った。

3. 結果および考察

3.1 施工条件の検討

ステンレス鋼/チタンの重ね継手で Cu-Si 系溶加材を用いてブレイジング施工試験を実施した。ブレイジング条件は基本条件である、レーザー出力 2 kW、レーザースポット径 3.0 mm、レーザー照射角度 80°、レーザー照射位置シフト 0.2 mm、ブレイジング速度 0.70 m/min および溶加材送給速度 1.1 m/min とした。Fig.3 に破断荷重に及ぼす各パラメータの影響を示す。レーザー照射角度 (Fig.3(a)) の増大で破断荷重は増加する傾向が得られた。ブレイジング速度 (Fig.3(b)) の増大で破断荷重は多少増加するが破断荷重に与える影響は少ないことがわかった。溶加材送給量 (Fig.3(c)) は減少すると破断荷重は高くなるが、0.9 m/min の溶加材送給量では割れが観測された。これは、溶加材送給量の減少に伴い、チタン母材側へレーザービームが直接当たるようになり、チタン側の溶込みが増加し Ti-Cu 系化合物の生成量も増加するため、割れが発生したと考えられる。

照射位置シフト (Fig.3(d)) に関しては、シフト量が小さくチタン母材側に近い位置を狙うと割れが観測されるが、ステンレス鋼母材側にシフトする (シフト量の増加) と割れが観測されなくなり、破断荷重が低下する傾向が得られた。チタン母材付近を狙うと割れが発生するのは、チタン側の溶込みが増加し、Ti-Cu 系化合物の生成量が増加するためと考えられる。

Fig.4 に、本項で得られたチタン下板母材部における接合幅と破断荷重の関係を示す。ここで接合幅とは図中に示すように、ブレイズ部とチタン母材が接触している幅のことである。Fig.4 からは破断荷重と接合幅の間に明確な相関性は観測されなかった。また、接合幅 2.0 mm を超えるとブレイズ部で破断し、接合幅 2.0 mm 以下ではブレイズ部のチタ

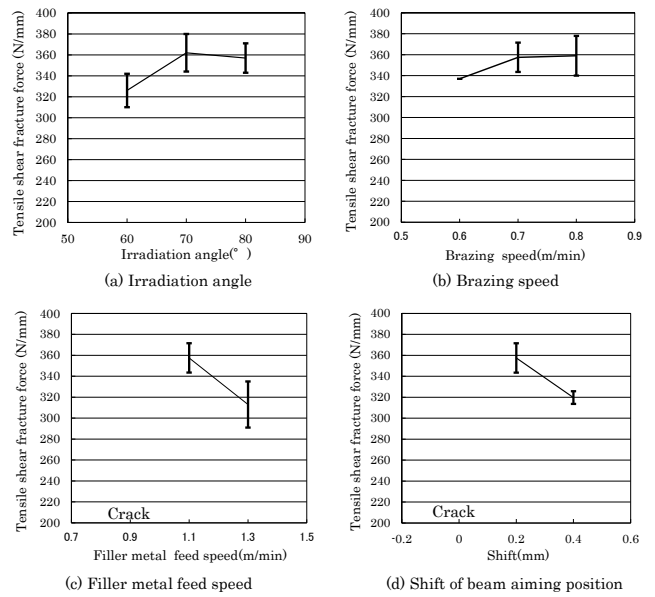


Fig.3 Effects of brazing parameters on the tensile shear fracture force.

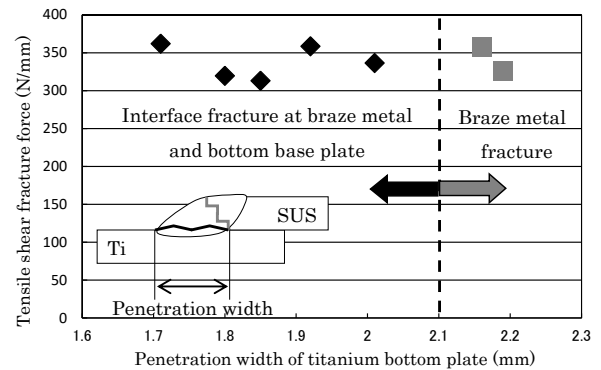


Fig.4 Relation between penetration width at lap joint interface and tensile shear fracture force.

ン側界面付近で破断する傾向にあった。既報のステンレス鋼と銅のレーザーブレイジング試験⁷⁾においては、接合幅の増加とともに破断荷重も増加する傾向を報告した。そこで、接合幅以外の影響を検討するため、チタン側界面付近で破断したせん断試験後の試験片 (Table 2-No.1) を使用して、破面の X 線回折を行った。Fig.5 に X 線回折測定結果を示す。破面には、TiCu、Ti₂Cu および Ti₃Cu₄ などの Cu-Ti 系化合物が同定され、これらの Ti-Cu 系化合物が生成している部分で破断していることが明らかになった。このことから、Ti-Cu 系化合物の生成によりチタン側界面付近のブレイズ部が脆化し、引張せん断強度が低下したと考えられる。

Ti-Cu 系化合物が引張せん断強度に影響を与えていると推察された。そこで、Ti-Cu 系化合物の分散状況を調べるため、試験片 (Table 2-No.1) の EPMA 観察を実施した。

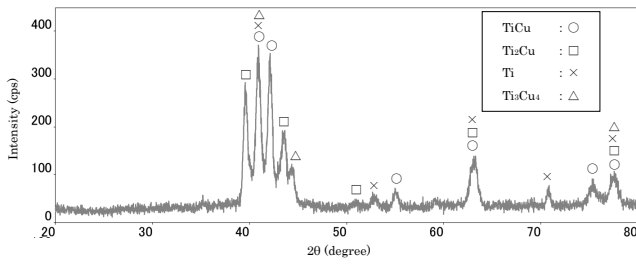


Fig.5 Results of X-ray diffraction analysis on the fractured surface.

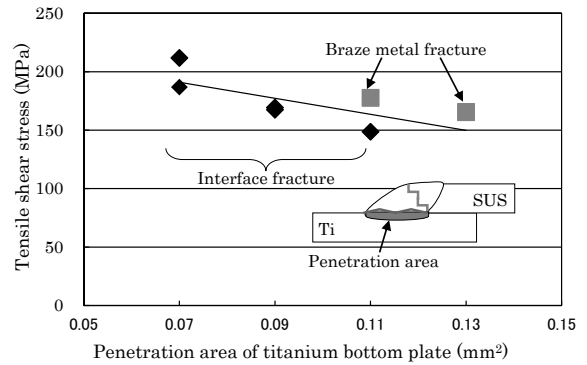


Fig.7 Relation between penetration area and tensile shear stress.

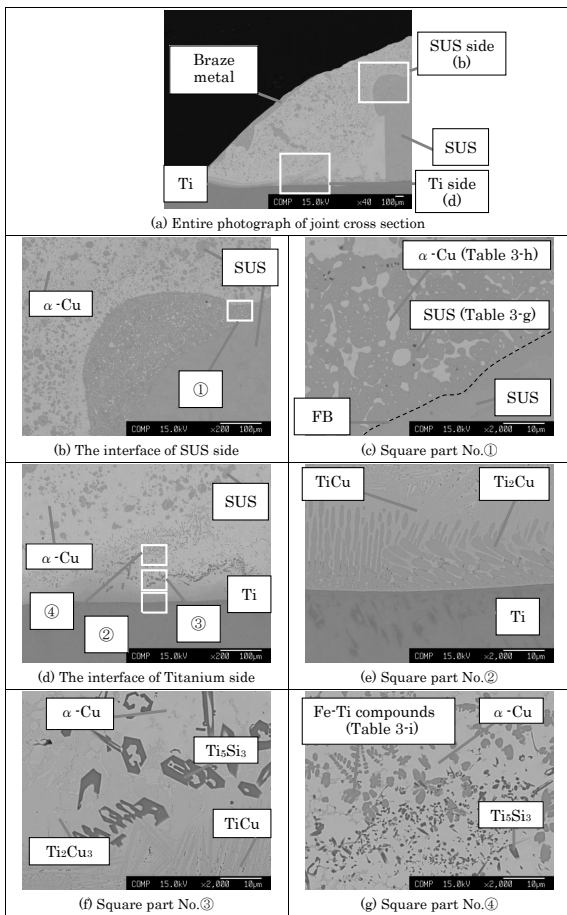


Fig.6 SEM microstructure showing the detected compounds in the joint cross-section (No.1).

Fig.6に結果を示す。半定量分析結果から溶加材である銅合金のマトリックス中にステンレス鋼が塊状組織としてブレイズ部全体にほぼ均一に分布していることがわかった。状態図⁶⁾からも、鉄と銅は化合物を形成せず、かつ、ほとんど相互に固溶しないため、ブレイズ部はステンレス鋼と銅合金の混合組織となったことがわかる。また、Fig.6(b)に示すステンレス鋼側界面付近では、Fig.6(c)に示すように、ステンレス鋼溶融部と、そのステンレス鋼マトリックス中に銅合金が塊状組織として混在している箇所も観測さ

れた。一方、チタン側界面付近 (Fig.6(d)~(f)) では、チタン/ステンレス鋼の条件と同様に、チタン界面近傍からブレイズ部金属中に向かって順に Ti_2Cu 、 $TiCu$ 、 Ti_3Cu_4 の化合物相が幅約 $50 \mu m$ にわたって生成していることが認められた。また、チタン界面から少し離れた位置 (Fig.6(g)) では Ti_5Si_3 相、Fe-Ti 系化合物相などが観測され、複数のチタン化合物が生成していることがわかった。このような化合物相の存在している領域はチタン界面から幅約 $100 \mu m$ であった。

EPMA 観察結果からもわかるように、界面近傍の化合物層の厚さが不均一で、かつ、単一成分ではないため、ブレイズ部へのチタンの混入量を化合物層厚さから定量的に示すことは難しい。そこで、チタン側の溶込み面積を測定することにより、ブレイズ部へのチタンの混入量を推定することとした。Fig.7に引張せん断強さとチタン側溶込み面積の関係を示す。ここでの引張せん断強さとは、破断荷重を接合幅で割った値のことである。チタン側溶込み面積の増加に伴い、引張せん断強さは低下する傾向が得られた。チタン側溶込み面積の増加に伴い、ブレイズ部へのチタンの混入量も増加し、Ti-Cu 系化合物の生成量も増加していると推察できる。すなわち、Ti-Cu 系化合物の生成量の増加によりブレイズ部の強度が低下したと考えられる。

次に、Fig.8に、引張せん断強さに及ぼす各ブレイジングパラメータの影響を示す。各パラメータと引張せん断強さとの関係はFig.3に示した破断荷重とは異なる傾向を示した。すなわち、レーザー照射角度との関係を見ると、 $70^\circ \sim 80^\circ$ の範囲で引張せん断強さは大きく変化したのに対して、破断荷重はほとんど変化していなかった。この理由としては、接合幅が破断荷重に影響しているためと考えられる。すなわち、レーザー照射角度が増加すると、レーザー吸収率が増加するため、チタン母材側への入熱が増加し、ブレイズ部へのチタン混入量が増加することにより、引張せん断強さは低下する。しかし、その一方では、チタン母材側へのブレイズ金属のぬれ性が改善し、その結果として接合幅

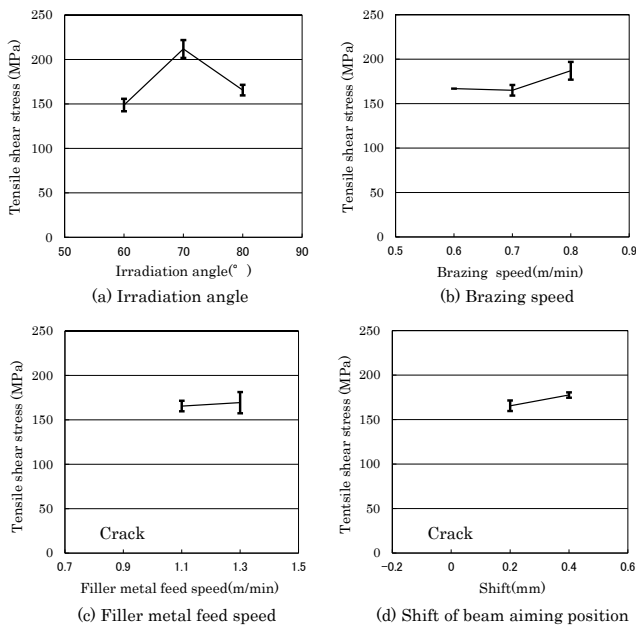


Fig.8 Effects of brazing parameters on the tensile shear stress.

が広がることにより、継手破断荷重はほとんど変化してなかったと考えられる。このことから、破断荷重は接合幅および Ti-Cu 系化合物の生成量の影響を受けており、接合幅を広くし、かつ、チタン側溶込み面積を小さくすることが高い継手破断荷重を得るために重要であると考えられる。

以上の結果より、本研究で高い継手破断荷重が得られたレーザブレイジングの好適条件として、ステンレス鋼を上板としチタンを下板とした継手配置で、Cu-Si 系溶加材を用いた条件において、レーザ出力 2 kW、レーザ照射角度 70°~80°、レーザ照射位置シフト 0.2 mm、ブレイジング速度 0.70 ~ 0.80 m/min および溶加材送給速度 1.1 m/min の組み合わせが選定された。

3.2 溶加材の検討

Fig.9 に、ステンレス鋼/チタン継手において、溶加材ごとにブレイジング速度に対する割れの有無を調べた結果を示す。この時、溶加材送給速度は、単位接合長あたりの溶着量が一定となるようにブレイジング速度に合わせて変化させ、その他の条件は、レーザ出力 2 kW、レーザスポット径 3.0 mm、レーザ照射角度 80°およびレーザ位置照射シフト 0.2 mm の一定条件とした。Cu 系および Cu-Ni 系溶加材は Cu-Si 系溶加材の基本条件と同じ条件で割れの無い継手が得られたのに対して、Ni-Cu 系および Ni 系溶加材はブレイジング速度を変化させても、いずれの条件でも割れが発生し、割れの無い継手は得られなかった。

3.1 項で示した好適条件も溶加材ごとに異なると推察されるため、Cu-Si 系溶加材の基本条件と同じ接合条件で溶加

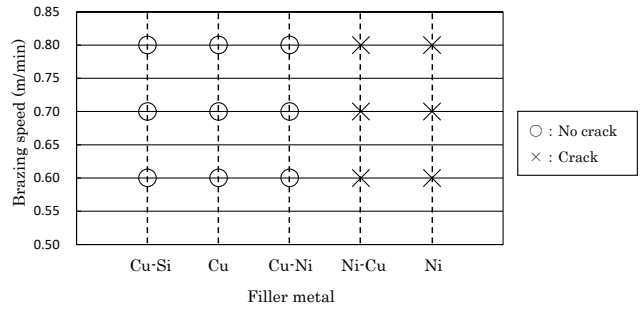


Fig.9 Results of Titanium/SUS brazing experiment for different filler metals.

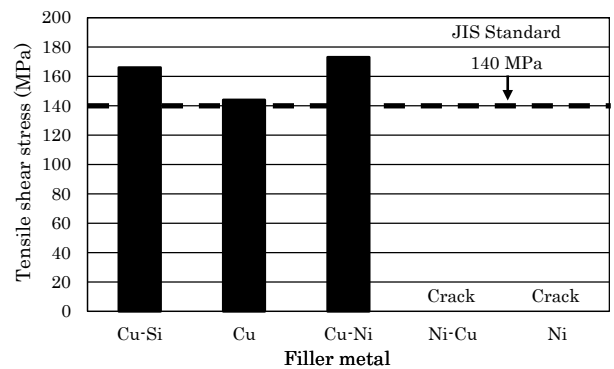


Fig.10 Tensile shear stress of SUS/Titanium brazed joint for different filler metals.

材を変化させ、各種溶加材の影響のみを比較した。

Fig.10 に、作製した試験体の引張せん断試験結果を示す。Cu-Si 系、Cu 系および Cu-Ni 系の溶加材を使用した継手の引張せん断強さは、それぞれ 166 MPa、144 MPa および 173 MPa であり、割れの無いチタンクラッド鋼の JIS 規格 (JIS G 3603) である 140 MPa を超える引張せん断強さが得られた。しかし、Cu 系の溶加材を使用した継手の引張せん断強さは他の 2 種類の溶加材を使用した場合に比べて低い値となった。また、Cu-Si 系、Cu 系および Cu-Ni 系の溶加材を使用した継手の引張せん断試験片における破断経路は全てブレイズ部であった。使用した Cu-Si 系および Cu-Ni 系溶加材の引張強さは約 350 MPa であるのに対して、Cu 系溶加材の引張強さは 240 MPa 程度と低い値であることを考慮すると、Cu 系溶加材を使用した継手の引張せん断強さが低下した理由は、溶加材本来の引張強さがブレイズ部の引張せん断強さに大きく影響したためと考えられる。また、Ni-Cu 系および Ni 系溶加材を使用した継手ではいずれも割れの発生が認められ、引張せん断試験を行うことはできなかった。

各溶加材で得られたブレイズ部の横断面マクロ観察を実施し、下板チタン側の溶込み面積の測定を行った。Fig.11

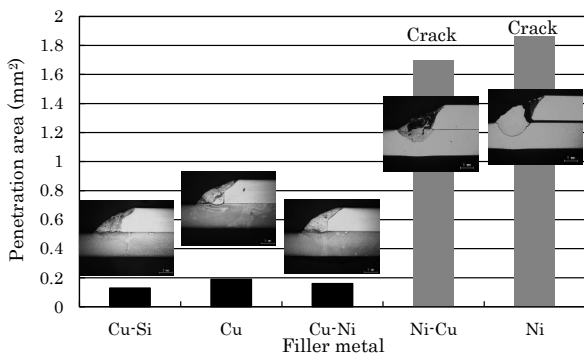


Fig.11 Penetration area of Titanium bottom plate of Titanium/SUS brazing joints for different filler metals.

にチタン側の溶込み面積の測定結果を示す。Ni-Cu系およびNi系溶添加材を使用した継手のチタン側溶込み面積はCu-Si系、Cu系およびCu-Ni系溶添加材を使用した継手よりも著しく増加した。これは、銅のレーザー吸収率が約10%であるのに対し、ニッケルのレーザー吸収率が約25%と高いことから、Ni-Cu系およびNi系溶添加材を使用した場合はチタン側への入熱量が上昇して、チタン側の溶込みが増加したためと考えられる。このため、Ni-Ti系化合物の生成量が増加して割れが発生したと推察される。

なお、Ni系溶添加材に対してブレイジング速度の高速化により入熱量を減少してチタン側の溶込みを浅くし、割れの無い良好な継手を得ることが期待されたが、Niの融点(1455℃)が高いため、ブレイジング速度を増加させると溶添加材が溶け残り、良好なブレイジング条件を選定することはできなかった。

Fig.12に、Ni系溶添加材を使用したEPMA観察結果を示す。チタン界面側の観察結果を見ると、チタン界面付近にTi₂Niが主成分の相が観測される。Ti₂Niが主成分の相中には色調の異なる網目状の組織が観察され、Ti相と推察された。また、Ti₂Niの周辺にはTiNiが主成分の相が観測され、Ti界面から離れるに従いTiの濃度が減少していることがわかった。一方、ステンレス鋼界面付近にも色調の異なる複数の相が観測され、これらはニッケルと鉄の割合が高いが、チタンも含んでおり、複数の化合物の混合物相であると考えられる。

Cu-Si系の溶添加材を使用した場合、ブレイズ部の成分は3.1項に示した通り溶添加材および上板の成分の影響を受けるが、Ni系溶添加材を使用した場合は下板の成分の影響も受けていることがわかった。これは、溶融したNi系溶添加材の保有熱量が高いため、下板側の溶込みが深くなり、下板成分の影響をより強く受けるようになったためと考えられる。

なお、Ni系溶添加材を使用した場合において、継手配置を変えてステンレス鋼を下板にすることによりチタンのブレイズ部への溶込み量を減少させることができるが、チタ

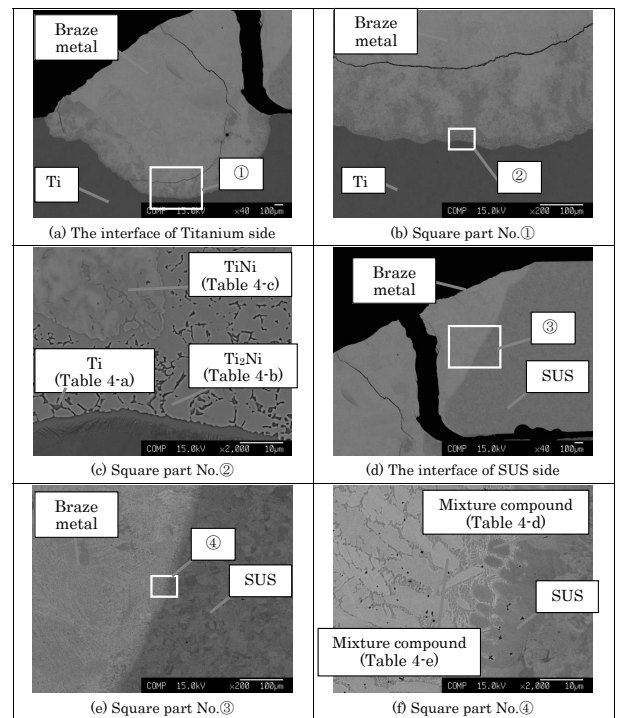


Fig.12 SEM microstructure showing the detected compounds in the joint cross-section of Ni filler metal.

ン上板側の溶込みもCu-Si系溶添加材の場合に比べて増加するため、結果的にブレイズ部にはTi-Ni化合物が生成し、割れの無い継手を得ることはできなかった。

本研究の結果より、比較的高い引張せん断強さが得られたCu-Si系またはCu-Ni系の溶添加材が、オーステナイト系ステンレス鋼と純チタンの異材重ねレーザーブレイジングに適していることが明らかになった。この2種類の溶添加材を使用して作製した継手の機械的性能はチタンクラッド鋼のJIS規格(JIS G 3603、引張せん断強さ:140MP以上)を満たしていることから、メガフロートの浮体部分等のチタンクラッド鋼が使用されている箇所への適用が期待される。

4. 結言

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)と工業用純チタン(TP340)の重ねすみ肉レーザーブレイジング継手形成に及ぼす施工条件と溶添加材の影響について検討し、本研究の範囲において、以下の知見を得た。

- (1) 下板チタンおよび上板オーステナイト系ステンレス鋼の継手配置におけるCu-Si系溶添加材による重ねすみ肉継手において、割れの無い条件では、継手引張せん断破断荷重は、レーザー照射角度の増大、ワイヤ送給速度の減少、レーザー照射位置シフトの減少によりいずれも増加するが、ブレイジング速度の影響は小さい。レーザー出力2kW、照射レーザー角度70°~80°、レーザー照射位置

シフト 0.2 mm、ブレード速度 0.70 ~ 0.80 m/min および溶加材送給速度 1.1 m/min の条件において最も高い破断荷重が得られる。

- (2) 各種溶加材について検討した結果、Ni-Cu 系および Ni 系溶加材では、Ni-Ti 系金属間化合物 (Ti_2Ni , $TiNi$) の形成割合が増加するためにブレード部で割れが発生する。一方、Cu-Si 系、Cu 系および Cu-Ni 系では、ブレード条件の最適化によりいずれも割れ発生がなく、チタンクラッド鋼の JIS 規格をみたく引張せん断強さが得られる。しかし、Cu 系溶加材は他の 2 種類と比較して破断荷重が低いため、Cu-Si 系または Cu-Ni 系溶加材が適している。

参考文献

- 1) Z.Hiraga, K.Fukastu, K.Ogawa, M.Nakayama, Y.Mutoh and Y.Miyashita: Preprints of the National Meeting of Japan Welding Society, **67** (2000) 250-251.
- 2) Tomashchuk I, Sallamand P, Pilloz M and Belyavina N: Mater Sci Eng A Struct Mater Prop Microstruct Process, **585** (2013) 114-122.
- 3) H.Terashi, T.Yashiki, N.Mastukura, S.Sakashita, Y.Murai, H.Hamada and Y.Miyata: Materials and Processes, **18-3** (2005) 534.
- 4) M.Seki, H.Yamamoto, K.Uenishi and K.Kobayashi: Preprints of the National Meeting of Japan Welding Society, **67** (2000) 228-229.
- 5) Kim Y C, Horikawa K, Fuji A and North T H: Trans Join Weld Res Inst Osaka Univ, **25-1** (1996) 63-68.
- 6) The Japan Institute of Metals and Materials: The Metal Datebook (Revision 4), Maruzen Co., Ltd. (2014) 502. 508. 527. 535. 541.
- 7) T.Suga, Y.Murai, T.Kobashi, K.Ueno, M.Shindo, K.Kanno and K.Nakata: Quarterly Journal of the Japan Welding Society, **32-1** (2014) 38-46.
- 8) K.Saida: Welding Technology, **61-2** (2013) 48-56.