工業用純チタンのアルゴン雰囲気銀ろう付*

渡辺 健彦**, 江本 和高***, 柳沢 敦**, 小沼 静代**

Brazing of Commercially Pure Titanium Using Ag-based Filler Metal in Argon Atmosphere*

by Takehiko WATANABE**, Kazutaka EMOTO***, Atushi YANAGISAWA** and Shizuyo KONUMA**

We tried to braze commercially pure titanium (CPTi) at the temperature below its transformation temperature of 882°C using Ag-based filler metal in argon atmosphere. The effect of brazing temperature, isothermally holding time and brazing pressure on the strength and the microstructure of brazement was examined. In addition, ultrasonic vibration was applied during brazing in order to improve the performance of the brazement. The following results were obtained in this study.

By using BAg-7 filler metal, CPTi could be successfully brazed below its transformation temperature, and the brazement had the strength equivalent to the base metal.

The strength of the brazement increased with brazing temperature and isothermally holding time at that temperature. This was because brittle intermetallic compounds disappeared from the brazed region. The disappearance of the intermetallic compounds accelerated with the increase of brazing pressure because extra molten filler metal could be more effectively expelled from the brazed region.

Application of ultrasonic vibration during brazing was capable of increasing the strength of the brazement at lower temperature and lower brazing pressure for shorter holding time than when no ultrasonic vibration was applied.

Key Words: Commercially pure titanium, Brazing, Ag-based filler metal, Tensile strength of brazement, Ultrasonic vibration

1. 緒 言

チタンは化学プラントや発電機器、航空機、自動車などに、あるいは、身近なものでは時計、メガネ、ゴルフクラブなどに広く用いられ、最近では、民生品を中心にその用途が拡大している。

チタンの特性を生かした製品の作製には、その接合技術が重要となる。チタンの接合方法としては、溶融溶接をはじめ圧接や拡散接合などの固相接合やろう付などがある。このうち、ろう付は異種材料との接合が容易、複雑かつ精密な接合が可能であることなどからチタンの接合にも多用されており、これまでに、チタンのろう付に関する解説や研究がかなり報告されている¹⁻¹⁰⁾。

純チタンは882°Cに α - β 変態点があり、変態点以上に加熱すると、結晶粒が粗大化し、機械的性質の劣化を招くことが知られている。したがって、チタンのろう付は、 α - β 変態点よりも低い温度で行われることが要求される。用いられるろう材としては、銀基ろうおよびチタン基ろうが主であるが、多用されているTi-Cu-Niのチタン基ろうの融点

は α - β 変態点よりもかなり高く、約950°Cである。融点が約820°C前後のアモルファスチタン基ろうも開発されているが、製造コストが高いことから、汎用されていない。

そこで本研究では、多くの材料のろう付に用いられているBAg-7およびBAg-8の銀ろうをチタンのろう付に適用して、ろう付継手の強さや接合部組織を検討した。検討した接合パラメーターはろう付温度、保持時間およびろう付圧力で、さらに、ろう付中に超音波振動を付加することによる継手の強さ向上の可能性についても検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材およびろう材

供試材には、直径6mmの工業用純チタンの丸棒(Fe: 0.07%, N: 0.01%, O: 0.13%, H: 0.0005%, Ti: Bal. (mass%))を用い、長さ30mmに切り出して接合用試験片とした。試験片の接合端面をエメリー紙で#1500まで湿式研磨した後、アセトン中で超音波洗浄して接合に供した。接合面の表面粗さは $Ry \approx 1.0 \mu m$ である。

ろう材として、市販のBAg-7とBAg-8の銀ろうを用いた。それぞれの化学組成、液相線および固相線温度をTable 1に示す。ろう材は厚さ約160 μm の薄板状であり、使用量は約30mgである。

*原稿受付 平成12年7月25日 平成11年度秋季全国大会で発表

**正 員 新潟大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Niigata University

***学 生 員 新潟大学大学院 Student Member, Graduate School, Niigata University

Table 1 Chemical composition, liquidus and solidus of filler metal.

	Composition(mass%)				Temperature(°C)	
	Ag	Cu	Zn	Sn	Liquidus	Solidus
BAG-7	56.3	20.8	17.8	5.1	653	621
BAG-8	72.0	28.0	-	-	780	-

Fig. 1 Schematic representation of the apparatus for brauing.

2.2 接合方法

用いた接合装置の模式図を Fig. 1 に示す。一方の試験片を上部のホルダーに固定し、他方を下部のエクスポネンシャルホーンに固定し突き合わせ、その間にろう材を挿入した。上部試験片の接合端面から約 1 mm の箇所に K 熱電対を取り付けて温度を測定した。上部ホルダーに荷重をかけることにより、接合部に所定の圧力を加えた。これをろう付圧力とする。また、アルゴンを接合部の四方より直接吹き付けることにより簡易的にアルゴン雰囲気を形成した。加熱は高周波誘導により行った。超音波振動は、超音波発振器からエクスポネンシャルホーンを介して下部試験片に付加した。試験片接合面における振動振幅は室温においてピークからピーク値で 5 μm とした。

25°C/s の加熱速度でろう付温度まで加熱した後、所定時間等温保持を行い冷却し、ろう付した。超音波振動を付加する場合は等温保持中に行った。

本研究では、アルゴン雰囲気を形成させるために、アルゴンを接合部に直接吹き付ける方式を採用したが、その場合、試験片外周部と内部とで温度差が生じる。そこで、上部試験片の中心部に直径 2 mm の貫通孔を設け、K 熱電対を通し、下部試験片の接合面に溶着して内部の温度を測定し、外周部との温度差を調べた。その結果、加熱速度 25°C/s で、800°C まで加熱した場合、アルゴン流量が 3 L/min の場合に内部の温度が約 30°C 高くなることが判明した。

アルゴン流量が 3 L/min であれば、チタン接合面の酸化

防止には十分であること、また、接合表面にある程度の酸化皮膜が形成されていても、ろう付性や接合強さにあまり影響しないことが分っている⁹⁾ことから、本研究では、アルゴン流量を 3 L/min とした。また、本研究において、ろう付温度とは外周部の温度のことを指す。

2.3 継手の評価

各ろう付条件における継手強さは引張試験で評価した。引張試験用片は、接合部が中央にくるように直径 4 mm で平行部長さ 20 mm にろう付継手を旋盤加工した。

接合部組織の評価を行うために、SEM による組織観察と EPMA による元素分析を行った。EPMA による元素定量分析は、加速電圧 20 kV で行い、電子ビーム径は約 1 μm である。

3. 実験結果および考察

3.1 BAG-8 および BAG-7 銀ろうによる予備実験

最初に、BAG-8 および BAG-7 銀ろうによるろう付継手の引張強さを Fig. 2 に示す。ろう付温度は 840°C、等温保持時間は 10 min でろう付圧力は 2 MPa とした。BAG-7 を用いた場合に母材破断した。一方、BAG-8 を用いた場合の引張強さは小さく、BAG-7 を用いた場合の約 64% であった。

以上の結果から、本研究では、汎用されている銀ろうである BAG-7 をろう材として用いて、等温保持時間、ろう付

温度およびろう付圧力が継手強さ及び接合部組織に与える影響を検討した。

3.2 等温保持時間の影響

ろう付温度840℃、ろう付圧力2 MPaとし、等温保持時間を変化させた時の継手の引張強さをFig. 3に示す。なお、図中の「No-app」は超音波振動を付加していないことを意味する。以後、同じである。等温保持時間が1 min から3 min までは引張強さは小さいが、5 min の時に約50 MPa 程度上昇し約300 MPa となった。その後、漸増して10

min の時に母材破断する強さとなった。

3.2.1 ろう付部の組織観察および元素分析

ろう付温度840℃、ろう付圧力2 MPaとして等温保持時間を1, 3, 5, 7, 10 min と変化した時の接合部組織をFig. 4の(a)~(e)に示す。(a)は等温保持時間が1 min の組織であり、矢印T, TC, T2CとEで示す相が見られる。EPMAによって各相を定量分析すると、T相の組成は、Ti: 70.3%, Ag: 2.0%, Cu: 21.0%, Zn: 6.0%, Sn: 0.6% (いずれも, mass%である。又、5箇所)の平均値であ

Fig. 2 Tensile strength of the joint brazed with BAg-8 and BAg-7 filler metal.

Fig. 3 Relation between holding time at 840℃ and the tensile strength of joints brazed with BAg-7 filler metal.

Fig. 4 SEM microphotographs of the brazed region performed for various holding time. (a): 1 min, (b): 3 min, (c): 5 min, (d): 7 min, (e): 10 min

る、以後、同じ)であり、Tiがリッチな相である。TC相の組成は、Ti:44.0%, Ag:8.2%, Cu:42.6%, Zn:5.1%, Sn:0.2%であり、Ti-Cu二元平衡状態図から判断して、Agが固溶したTiCu金属間化合物相と考えられる。T2C相の組成は、Ti:56.3%, Ag:5.5%, Cu:29.8%, Zn:8.4%, Sn:0.0%であり、Agが固溶したTi₂Cuと考えられる。E相の組成は、Ti:87.1%, Ag:2.0%, Cu:7.7%, Zn:3.2%, Sn:0.0%である。CuがTi中に拡散してβTiになった後、αTiとTi₂Cuから成る共析組織と考えられる。なお、BMは母材を示す。

接合部組織の分析で注目すべき点は、用いたろう材のBAG-7の組成に比して、AgとSn量が低く、特に、Sn量はほぼ0%に減少していることである。

等温保持時間が3 minの場合の接合部組織は、(b)のようになり、TC相は消失して、T2C相とT相とE相で構成されている。5 minになると、(c)に示すように、T2C相が消失し始めている。等温保持時間が3 minから5 minになると引張強さが約50 MPa上昇したが、これはT2C相の消失開始と関連していると思われる。7 minになると、(d)に示す

ようにT2C相はさらに消失し、T相も消失している。10 minになると、(e)に示すように、Eで示す共析組織のみとなった。EPMAの線分析及び定量分析の結果では共析組織内において、ろう材の元素はほぼ一様に分布していた。

等温保持時間1 minにおける各相のビッカース硬さ測定の結果をFig. 5に示す。荷重は0.00078 N、負荷速度は0.00007 N/sで保持時間10 sで測定した。TC相は微小すぎるため測定不可であった。T2C相(Ti₂Cu)の硬さは約550 HVで硬いことがわかる。

引張試験後の破断部を観察すると、保持時間が1 minと3 minの場合には、破断経路はT相(Tiリッチ相)とT2C相(Ti₂Cu)であり、硬いT相やT2C相の存在が1 minおよび3 minの場合に引張強さが低い理由と考えられる。また、10 minにおいて母材破断強さになったが、これはT2C相が消滅したためと考えられる。

3.3 ろう付温度の影響

ろう付温度と継手の引張強さの関係をFig. 6に示す。等温保持時間は10 min、ろう付圧力は2 MPaとした。図から

Fig. 5 Dynamic hardness of various phases in brazed region.

Fig. 6 Relation between brazing temperature and the tensile strength of joints brazed with BAG-7 filler metal.

Fig. 7 SEM microphotographs of the brazed region performed at 800°C and 820°C.
(a): 800°C, (b): 820°C

わかるように、ろう付温度820℃までは引張強さは小さいが、840℃では引張強さが約62%上昇して母材破断した。

3.3.1 ろう付部の組織観察および元素分析

ろう付温度800℃と820℃における接合部組織を Fig. 7 の(a)と(b)に示す。840℃における接合部組織はすでに Fig. 4 (e)に示してある。

800℃の場合には、Ti リッチな T 相と Ti_2Cu から成る T2C 相と共析組織 E 相が見られる。

820℃の場合は(b)に示すように、やはり、T 相と T2C 相と E 相が見られるが、T2C 相は一部消失して共析組織 E 相と同化している。また、共析組織 E 相の幅が約 2 倍に拡大している。

840℃になると、Fig. 4(e)に示したように T2C 相は消失して E 相のみとなり、その幅はさらに拡大している。

引張試験後の破断部を観察すると、800℃と820℃のいずれの場合も、破断経路は接合部中央の T 相および T2C 相であった。

Fig. 8 Relation between applied brazing pressure and the tensile strength of joints performed at 820°C and 840°C.

3.4 ろう付圧力の影響

ろう付圧力と継手の引張強さの関係を Fig. 8 に示す。ろう付温度は820℃および840℃とし、等温保持時間は10 min とした。ろう付温度840℃の場合、ろう付圧力 2 MPa の時に母材破断した。

ろう付時に加圧すると継手の引張強さが向上することが報告されている^{9,11)}。本研究においても、ろう付温度840℃で 2 MPa の場合に引張強さは大きく上昇しており、ろう付圧力の増加は引張強さの向上に寄与することが分かった。

3.4.1 ろう付部の組織観察および元素分析

ろう付圧力 0 MPa および 1 MPa の場合の接合部組織を Fig. 9 の(a)と(b)にそれぞれ示す。2 MPa の場合の接合部組織は、既に Fig. 4 (e)に示した。

0 MPa の場合、接合部中央には A で示す白く見える相がある。定量分析すると、Ti : 0.6%, Ag : 86.4%, Cu : 2.3%, Zn : 10.7%, Sn : 0.0%であり、Ag リッチな相である。また、その Ti 側に矢印 TAC で示す相がある。その定量分析値は、Ti : 53.7%, Ag : 21.7%, Cu : 15.6%, Zn : 8.9%, Sn : 0.2%であり、Ag と Cu の固溶体と Ti からなる金属間化合物 $Ti_2(Ag, Cu)$ と考えられるが、同定できないので、ここでは、この相を TAC 相とする。さらに、E で示す共析組織が見られる。

1 MPa の場合、(b)に示すように接合部組織は、Ti リッチな T 相と TAC 相と TAC 相内に白く点在する矢印 TA で示す相 (組成は、Ti : 35.2%, Ag : 59.6%, Cu : 11.8%, Zn : 3.0%, Sn : 0.0%) が見られ、Ag リッチ相である。そして、E で示す共析組織が見られる。

0 MPa の場合に存在する幅広い Ag リッチの A 相は 1 MPa の接合部では確認されず、接合部から Ag 量が減少していることが分かる。また、共析組織を含む接合部組織の幅が約半分に縮小している。

次に、ろう付圧力の増加によって接合部から Ag 量が減少して A 相や TAC 相などが消失し、接合部組織の幅が縮小するのは余分なろうの排出に起因していると考え、検討

Fig. 9 SEM microphotographs of the brazed region performed for 10 min holding time at 840°C under applied brazing pressure of 0 MPa and 1 MPa. (a): 0 MPa, (b): 1 MPa

Fig. 10 SEM microphotographs of the brazed region performed for 0 min holding time at 840°C under applied brazing pressure of 0 MPa and 1 MPa. (a): 0 MPa, (b): 1 MPa

を行った。

ろう付温度を840°C、等温保持時間を0 minとし、ろう付圧力を変化させた場合の接合部組織を観察した。等温保持時間を0 minとしたのは、母材Ti中へのろう材元素の拡散を極力抑えるためである。0 MPaと1 MPaの場合の接合部組織をFig. 10の(a)と(b)に示す。接合部中央には、Aで示す相(Ti: 2.7%, Ag: 72.2%, Cu: 6.7%, Zn: 18.0%, Sn: 0.5%)が見られAgリッチな相である。このA相中に、黒く見える相(矢印Sで示す)が点在するが、その組成は、Ti: 33.2%, Ag: 23.0%, Cu: 16.9%, Zn: 13.5%, Sn: 13.4%であり、Snが比較的多い相である。TCで示す相の組成は、Ti: 40.8%, Ag: 8.3%, Cu: 45.2%, Zn: 5.7%, Sn: 0.1%であり、Agを固溶したTiCu金属間化合物と考えられる。T2Cで示す相の組成は、Ti: 60.0%, Ag: 8.8%, Cu: 21.9%, Zn: 9.2%, Sn: 0.1%であり、Agを固溶したAg₂Cu金属間化合物と考えられる。1 MPaになると、(b)に示すようにA相は激減してTC相が増加している。さらに、2 MPaになると、ろう層の幅は0 MPaと1 MPaの場合の約半分に縮小し、A相は中央部にわずかに点在する程度となり、ほとんどがTC相とT2C相からなっていた。すなわち、ろう付圧力の増加とともに、ろう層部は縮小してAgが減少していることから、ろう付圧力の増加によって、接合部から液相ろうが排出されていることが示唆された。

そこで、ろう付圧力0 MPa(等温保持時間: 10 min, ろう付温度: 840°C)の場合に形成されたフィレット部をEPMA分析した。フィレットの組織をFig. 11に示す。主に三つの相が見られ、Aの白い相の組成は、Ti: 0.0%, Ag: 78.2%, Cu: 7.4%, Zn: 14.4%, Sn: 0.0%であり、Agリッチな相である。矢印TSの粒状相の組成は、Ti: 51.8%, Ag: 1.2%, Cu: 3.2%, Zn: 1.4%, Sn: 42.5%で、Ti-Sn二元状態図から判断してTi₃Sn金属間化合物であると考えられる。TC相の組成は、Ti: 38.4%, Ag: 8.3%, Cu: 46.0%, Zn: 7.1%, Sn: 0.3%であり、Agが固溶したTiCu金属間化合物相と考えられる。特に、Aの白い相の占める割合が大きく、TS相も広範囲に分布してい

Fig. 11 SEM microphotograph around the fillet of a joint brazed with Bag-7 filler metal for 10 min holding time at 840°C under applied brazing pressure of 0 MPa.

た。1 MPaと2 MPaの場合についても同様にフィレットを観察したが、どれも類似した組織であった。

以上のことから、ろう付圧力によって、液相ろうが接合部から排出され、特に、AgやZnやSnの排出量が多くなることが明らかにされた。Cuの排出量が少ない理由として、Cuが母材Ti中へ優先拡散するためであると考えられる。

そこで、Ti中のAgとCuの拡散係数を比較した。

870°C (1143 K)における α Ti中のCuとAgの拡散係数(D)を計算すると、Cuの拡散係数 $D = 4.7 \times 10^{-14} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、Agの拡散係数 $D = 7.0 \times 10^{-17} \text{ (m}^2/\text{s)}$ であり、Cuの拡散係数がAgのそれよりも約670倍も大きい。なお、拡散係数の計算には、 $D = D_0 \times \exp(-RT/Q)$ において、CuとAgに対してそれぞれ振動数因子 $D_0 = 3.80 \times 10^{-5}$ と $6.50 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、および、活性化エネルギー $Q = 195$ と 240 (kJ/mol) を用いた¹²⁾。ここで、Rは気体定数でTは絶対温度である。

Agの α Ti中の拡散係数はCuに比べて非常に小さいことから、もし、接合部に多量のAgがあれば母材中に拡散されずに、0 MPaの場合のようにAgリッチのA相として

接合部に残留する。また、これまでの分析結果から、Sn も共析組織中にほとんど存在しないことから、母材 Ti 中に拡散しにくいと考えられる。このような事実から、接合部から Ag が減少することが、T2C 相や A 相の消失と相俟って強さが向上するための重要な条件であることが分かる。

3.5 継手の強さと組織に及ぼす超音波振動の効果

次に、等温保持中に超音波振動を付加する事による、継手の引張強さや接合部の組織への影響を調べた。

3.5.1 継手の引張強さに及ぼす超音波振動の有無

種々条件でろう付を行い、超音波振動付加の有無による

継手の引張強さの変化を Fig. 12 の(a)~(c)に示す。(a)は、ろう付温度が840℃、ろう付圧力が2 MPa で等温保持時間を変化させた時の結果である。(b)は、等温保持時間が10 min、ろう付圧力が2 MPa でろう付温度を変えた時の結果である。また、(c)は、等温保持時間を10 min、ろう付温度を820℃と840℃にして、ろう付圧力を変えた時の結果を示す。

超音波振動を付加することによって、(a)の場合は等温保持時間が7 min で、(b)の場合はろう付温度が820℃で、また、(c)の場合はろう付圧力が1 MPa で母材破断する継手を得られた。

すなわち、ろう付中に超音波振動を付加することによって、より短い時間でより低温でより低いろう付圧力で母材

Fig. 12 The effect of ultrasonic vibration on the tensile strength of brazement when the brazing parameters of holding time, temperature and pressure are variously changed.
(a): Holding time is changed. (b): Temperature is changed. (c): Pressure is changed at 820°C and 840°C.

Fig. 13 SEM microphotographs of the brazed region in the case that ultrasonic vibration was applied or not. Brazing was performed for 1 min or 5 min holding time at 840°C under applied pressure of 1 MPa.
(a) and (b): Holding time of 1 min, when non-applied and applied, respectively.
(c) and (d): Holding time of 5 min, when non-applied and applied, respectively.

破断する継手が得られることが明らかとなった。

3.5.2 接合部組織の観察および分析

超音波振動を付加することにより母材破断した継手の接合部組織は、すべて Fig. 4 の(e)とほぼ同様であり、共析組織一層となっていた。

次に、超音波振動が接合部におよぼす作用を確かめるために、ろう付温度840℃、ろう付圧力1 MPaで等温保持時間を1 minと5 minとし、超音波振動付加有りとし、無しの場合について接合部の組織を調べた。接合部組織を Fig. 13 に示す。(a)は等温保持時間1 minで超音波振動付加無し、(b)は1 minで付加有り、(c)は5 minで付加無し、(d)は5 minで付加有りの組織である。等温保持時間1 minの場合、超音波振動付加無しの時は(a)に示すように、中央部には Ag リッチな A 相(Ti: 27.6%, Ag: 51.2%, Cu: 12.8%, Zn: 7.8%, Sn: 0.6%) と、黒く見える T2C1 で示す相(組成は, Ti: 58.7%, Ag: 17.6%, Cu: 15.5%, Zn: 7.7%, Sn: 0.4%であり, Ti_2Cu 金属間化合物と考えられる)が混在する領域と TC で示す相 (Ti: 43.9%, Ag: 13.8%, Cu: 37.2%, Zn: 5.1%, Sn: 0.0%) で $TiCu$ 金属間化合物と考えられる相と T2C で示す相 (Ti: 56.5%, Ag: 7.5%, Cu: 29.4%, Zn: 6.4%, Sn: 0.2%) と共析組織 E 相から成っている。一方、超音波振動を付加した場合は、(b)に示すように、Ag リッチな A 相は消失し、中央の黒く見える T2C 相(Ti: 53.8%, Ag: 7.4%, Cu: 33.0%, Zn: 5.2%, Sn: 0.6%) と TC 相 (Ti: 44.7%, Ag: 10.5%, Cu: 40.2%, Zn: 4.5%, Sn: 0.1%) とその外側の T2C 相 (Ti: 58.1%, Ag: 6.9%, Cu: 28.1%, Zn: 6.6%, Sn: 0.3%) と E 相から成っている。双方を比較すると、超音波振動付加によって共析組織 E 相を除く各相の幅が幾分縮小しており、Ti と Cu 量が増加して Ag 量が減少する傾向にある。

等温保持時間5 minになると、(c)と(d)に示すように、超音波振動付加無しと有りの場合の接合部組織は大きく異なる。超音波振動付加有りの場合、中央に島状に存在する T2C 相(Ti: 66.4%, Ag: 3.6%, Cu: 25.6%, Zn: 4.3%, Sn: 0.0%)と共析組織 E 相が見られる。一方、付加無しの場合は、接合部中央に Ti リッチな T 相(Ti: 77.8%, Ag: 9%, Cu: 6.6%, Zn: 2.7%, Sn: 3.9%)と幅広く存在する T2C 相(Ti: 52.8%, Ag: 25.7%, Cu: 15.3%, Zn: 6.3%, Sn: 0.0%)と、その相中に点在する TA 相 (Ti: 35.9%, Ag: 57.2%, Cu: 3.1%, Zn: 3.8%, Sn: 0.0%) および E 相が見られる。超音波振動付加有りの場合は、接合部の中央に金属間化合物がわずかに残留する程度だが、付加無しの場合は幅広い層が存在して Ag 量が多い傾向となっている。

以上のような組織観察等から、超音波振動の付加によって、ろうの排出が促進されていると判断される。また、ろう中への Ti の溶解が促進されて、Ti と Cu の金属間化合

Fig. 14 SEM photographs and EPMA line analyses of brazed region in the case that ultrasonic vibration was applied or not. Brazing was performed for 1 min holding time at 840℃, keeping the clearance constant 0.1 mm. (a): Non-applied, (b): Applied

物相の消失が促進されることが考えられる。そこで、ろう中への Ti の溶解が促進されるか否かを調べるべく、次の実験を行った。

タングステン線を用いて接合間隙を100 μmと一定にしてろう層の幅を十分に確保してろう付を行い、組織観察した。ろう付温度は840℃、等温保持時間は1 minとした。

接合部組織及び線分析結果を Fig. 14 に示す。(a)は超音波振動付加無し、(b)は付加有りである。超音波振動付加無しの場合は、母材とろう層の界面近傍にのみ反応相が形成されている。主な反応相は、共析組織の E 相と TC 相(Ti: 46.6%, Ag: 3.1%, Cu: 40.5%, Zn: 4.4%, Sn: 5.4%)と矢印 TS で示す球状相から成っている。この球状相の組成は, Ti: 34.3%, Ag: 6.1%, Cu: 11.4%, Zn: 2.7%, Sn: 45.5%であり, Ti_2Sn 金属間化合物と考えられる。EPMA 線分析から、ろう層内部には Ti がほとんど拡散していないことがわかる。一方、超音波振動付加有りの場合、付加無しの場合と比して、大きく異なる組織を呈している。TC 相 ($TiCu$ 金属間化合物) はろう層内部へと成長しており、TS 相も細くなり内部にまで散在している。また、Ti がかなりろう層内部まで拡散していることが線分析からわかる。

このような観察から、超音波振動付加によって液相ろう中へ母材 Ti の溶解が促進されていることが示唆された。

4. 結 言

本研究は、BAg-7 銀ろうを用いて工業用純チタンをその α - β 変態点 (882℃) より低い温度でアルゴン雰囲気下でろう

付を行い、等温保持時間、ろう付温度とろう付圧力が継手の強さおよび接合部組織に与える影響について検討した。さらに、より低温、短時間、低ろう付圧力で継手の強さを向上させるべく、超音波振動の付加の影響を検討した。得られた結論は次のようである。

1) BAg-7 銀ろうを用いた場合、ろう付温度840℃、等温保持時間10 min、ろう付圧力 2 MPa の条件で母材破断する継手が得られる。

2) ろう付温度の上昇や等温保持時間が長くなると、母材 Ti 中へのろう材元素の拡散量が増加し、接合部から Ti と Cu の金属間化合物相が消失すると継手の強さは向上して母材破断する継手が得られる。

3) ろう付圧力の増加とともに、接合部からの液相ろうの排出が促進され、それに伴って接合部における Ag の減少が顕著になる。その結果、Ti と Cu の金属間化合物相の消失が促進されて継手の強さが向上する。

4) ろう付最中に超音波振動を付加することによって、低温、短時間、低ろう付圧力で継手の強さが向上する。

参 考 文 献

- 1) 例えば、渡辺健彦：溶接技術，40（1992）7，78-86.
- 2) 渡辺健彦：溶接技術，46（1998）5，76-85.
- 3) 溶接学会界面接合研究委員会編：最近のろう接・拡散接合技術，溶接学会，（1989）38-42.
- 4) 渡辺健彦他：溶接学会論文集，9（1991）3，372-359.
- 5) 渡辺健彦他：溶接学会論文集，12（1994）4，502-508.
- 6) 渡辺健彦他：溶接学会論文集，15（1997）1，51-57.
- 7) 恩沢忠男他：溶接学会論文集，5（1987）2，477.
- 8) 恩沢忠男他：溶接学会論文集，5（1987）2，205-211.
- 9) 雀部 謙他：溶接学会論文集，8（1990）3，354-359.
- 10) 竹下晋正他：日本金属学会誌，55（1991）3，330-336.
- 11) M.S. Yeh, T.H. Chuang: Metallurgical and Materials Transaction A, 28A（1997）1367-1376.
- 12) JST 拡散データベース.