

日本大学 理工学部 〇正 末 沢 芳 文
 “ “ “ 正 出 井 裕
 日立日進エレクトロニクス(株) 正 野 口 祥 一

1. 緒言

チタンおよびチタン合金はその比強度が大きくかつ耐蝕性の良いこと等の優れた特性を有するため、ジェットエンジン、ロケットエンジン等の航空宇宙機器はじめ、原子力機器、各種化学装置等に広く活用されており、今後一層需要拡大の方向にある。しかしこれら航空宇宙用エンジン等の作動流体は益々高温高压の傾向にあり、したがってエンジン構成材料に高耐熱性、高温強度が要求されることはもとより、それ等の溶接、ろう接等冶金学的接合部についても母材同等あるいはそれ以上の耐熱性と強度が要求されるようになってくる。

本研究はこれらの要求に対応するため、純チタンおよび Ti-6Al-4V について、Ag-Al-Mn 系および Ag-Pd 系のろう材を用いて真空ろう接を行い、主としてその接合部組織、硬さ、常温引張強度、高温引張強度およびろう接部の X 線応力測定法による残留応力の測定等を行いろう接部の諸性質を明らかにしたものである。

2. 実験

上記のごとき研究目的により大要次のごとき要領で実験を行なった。

2.1. 実験材料

この実験に使用した母材は商業用純チタンと Ti-6Al-4V の 2 種類、ろう材は Ag-4Al-0.5Mn と Ag-5Pd (BPd-7) の 2 種類で、これらの化学成分は Table. 1、および Table. 2 の如くである。

Table 1 Chemical compositions of base metals (wt%)

	C	Fe	H	N	O	Al	V	Ti
Pure Ti	—	0.04	0.0014	0.008	0.089	—	—	Bal.
Ti-6Al-4V	0.01	0.15	0.0012	0.01	0.16	5.84	3.96	Bal.

Table 2 Chemical compositions of filler metals (wt%)

	Al	Mn	Pd	Ag
Ag-4Al-0.5Mn	4.23	0.51	—	95.2
BPd 7	—	—	4.96	95.04

母材は各材質ともに 30×10×5 mm に機械加工し、各母材ろう接面は No. 80、240 および 400 mesh のエメリー紙で一方向に研磨し、各表面粗さの

各ろう材の拡がり性、引張強度およびろう接部の残留応力に与える影響について検討した。Table. 3 は各母材の機械的諸性質、また Fig. 1 は母材ろう接面に与えた表面粗さ曲線である。これは Ti-6Al-4V を母材とした場合で、

Table 3 Mechanical properties of base metals

Material	Crystal structure	Tensile strength (Kg/mm ²)	Yield strength (Kg/mm ²)	Elongation (%)
Ti > 99.7	alpha phase	35	22	32
Ti-6Al-4V	alpha-beta phase	94	84	11



(a) Roughness 11.2 μm Rmax (Emery No. 80)



(b) Roughness 3.9 μm Rmax (Emery No. 240)



(c) Roughness 1.1 μm Rmax (Emery No. 400)

Fig. 1. Various roughness of base metals

Rmax で示した各表面粗さは 11.2 μm, 3.9 μm および 1.1 μm である。純チタンの場合も畧々同じ値を示した。

各ろう材はそれぞれ真空溶解した後、板厚を 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 mm の厚みに圧延したものである。

ろう接時にはこれらのろう材を約 6×11 mm の大きさに切断して使用した。またこれらの試料はそれぞれトリクレン-アセトン洗滌し、ろう接時に異物が混入することを防止した。

2.2. ろう材の広がり性について

母材のろう接実験を行う前に各ろう材の母材表面上での広がり試験を行い各ろう材の広がり性を検討した。即ち、30×30×3.2 mm の純チタンおよび Ti-6Al-4V の表面をろう接試料と同じ 80, 240, 400 mesh のエメリー紙で一方向に研磨し、Fig. 1 と同様の粗さを設定し、その上に重量 0.1 gr の球状のろう材を 1 個置き、容量 7 KW の真空抵抗炉中で温度をそれぞれ 930°C (Ag-4Al-0.5Mn)、975°C (BPd7) で加熱し、昇温後 30 sec 保持した後、徐冷し

それぞれのろうの広がり面積を測定した。その結果はFig. 2のごとくである。これから分かる

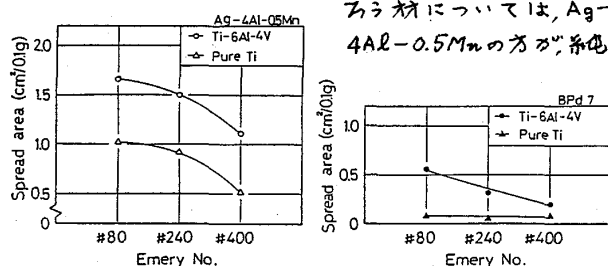


Fig. 2. Relation between wettability and various roughness

チタンおよびTi-6Al-4VのいずれにおいてもBPd7の方より各粗さともに広がり面積が大きく良好な広がり性を示した。また両ろう材ともに母材の表面粗さの粗い方が広がり性が良く、母材についてはTi-6Al-4Vの方が純チタンより良いことが分った。これは両母材の熱伝導率の差による影響が大きいと思われる。

2.3 ろう接方法

ろう接試料の作成は前記純チタンおよびTi-6Al-4Vそれぞれ同じ材質で同一表面粗さをもつ母材2個を長手方向に突合せ、その間に前記ろう材を挟んだ状態でろう接治具にセットし、そのまゝ容量7KWの真空炉に入れろう接を行った。なお治具には同時に5試料ろう接出来るようにし、均質の試験片を作成した。ろう接はTable. 4に示すろう接条件のもとで行った。

Table 4. Brazing conditions

Filler metal	Ag-4Al-0.5Mn	BPd 7
Brazing temperature (°C)	930	975
Keeping time (min)	10	10
Vacuum (Torr)	5×10^{-5}	5×10^{-5}

なおろう接間隙の設定はろう材の厚さによって調節した。

3. 実験結果と考察

3.1 ろう接部の接合組織

ろう接された試料は接合部の余剰ろう材の除去、表面の洗浄、その他の整形を行った後、光学顕微鏡でまずろう接間隙を測定し、次に各試料のろう接部の接合組織を調べた。Photo. 1は母材が純チタンの場合、Photo. 2は母材がTi-6Al-4Vの場合で、いずれの場合もろう材はAg-4Al-0.5Mnと、Ag-5Pd (BPd-7)の2種類のろう材でろう接を行った。なお240 mesh エメリー紙の場合も同様な実験を行ったがろう接部の

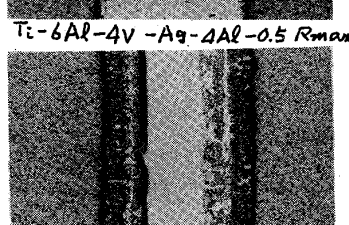
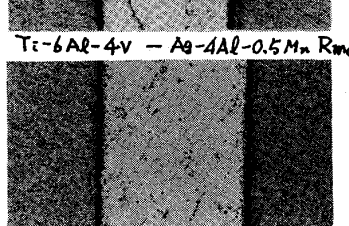
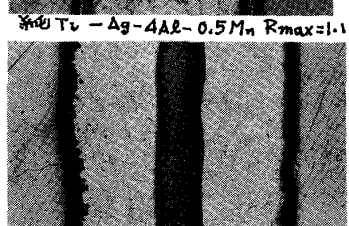
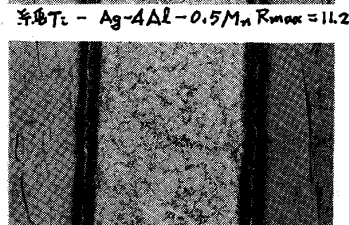
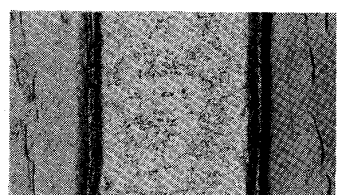


Photo. 2 (Ti-6Al-4V)

顕微鏡組織は、いずれの場合もPhoto. 1, Photo. 2に示すRmax=11.2 μm (80 mesh エメリー紙研磨の場合) およびRmax=1.1 μm (400 mesh エメリー紙研磨の場合) のほぼ中間状態の組織を示した。

これらPhoto. 1, およびPhoto. 2の寫真から分るごとく、いずれの組合せにおいてもボイド、割れ、異物の混入等のろう接部に顕著な欠陥は見られなかった。また欠陥とは云えないが、Photo. 1の純チタン-Ag-5Pdの場合、ろう接部中央部にPd成分の偏析が見られた。しかし引張強さには大きな影響を

与えていないことが認められた。またいずれの場合にも表面粗さの粗い場合には界面での各成分の拡散層の幅が大きくっており、Ag-4Al-0.5Mnの場合にはAl成分が界面付近に析出して、特に顕著であった。このことが界面での硬軟上昇の大きな要因を以て、強硬に大きな影響を与えていると思われる。

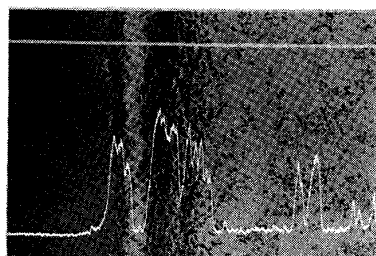


Photo. 3 EPMA at brazed joint

ろう材中のAl成分が界面に多く析出していることが認められる。图中白く見える部分は殆どAgである。

3.2 ろう接部の硬さ分布

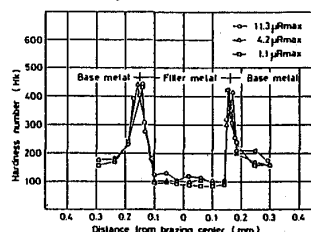


Fig. 3 Hardness distribution of Pure Ti brazed joint with Ag-4Al-0.5Mn

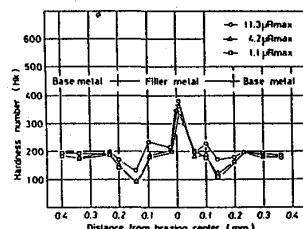


Fig. 4 Hardness distribution of Pure Ti brazed joint with BPd-7

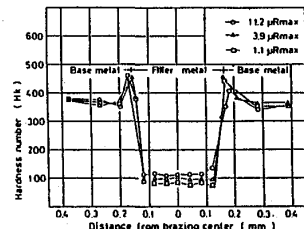


Fig. 5 Hardness distribution of Ti-6Al-4V brazed joint with Ag-4Al-0.5Mn

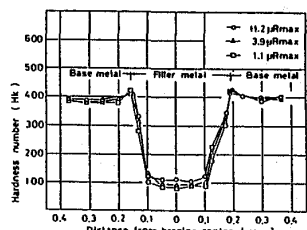


Fig. 6 Hardness distribution of Ti-6Al-4V brazed joint with BPd-7

分についてはAgが界面に、またTi成分がろう材中に拡散していることが認められた。

3.3 ろう接部の残留応力の測定

前述のごとくチタンおよびチタン合金をろう接した場合、AlおよびAg成分の析出が界面に多く見られた。そのため界面付近の硬さが上昇する現象が認められ、X線応力測定法によりろう接部のうちろう材部に発生している応力を測定した。これまでにろう接部の応力は測定された例が1例しか

Photo. 3は純チタンとAg-4Al-0.5Mnでろう接した場合、接合部のEPMAの結果の一例で、Al成分の析出を示したものである。

これから分る如く

各ろう接試料のろう接部周辺の硬さ分布をマイクロ硬さ計で測定した結果をFig. 3 ~ Fig. 6 に示した。

Fig. 3から分る如く純チタンとAg-4Al-0.5Mnでろう接した場合、前述のごとくAl成分が界面に多く析出し、著しい硬さの上昇が見られる。またFig. 4からBPd-7中のPd成分がろう接部中央部に析出し著しい硬さの上昇が見られる。Ti-6Al-4Vの場合も両ろう材ともにAl成分の析出が界面に見られ若干の硬さ上昇が見られた。その他の成分についてはAgが界面に、またTi成分がろう材中に拡散していることが認められた。

なく¹⁾、チタンおよびチタン合金については全く行われていない。測定結果はFig. 7(純チタンの場合)、Fig. 8(Ti-6Al-4Vの場合)のごとくである。この図から分るごとく、純チタンおよび

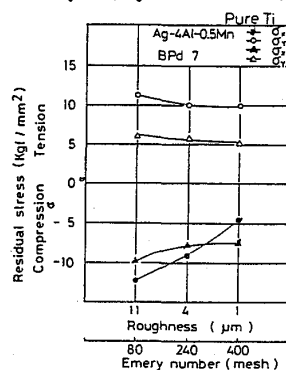


Fig. 7 Residual stress distribution of pure Ti brazed joint polished by emery papers

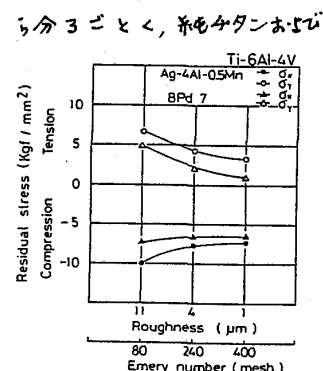


Fig. 8 Residual stress distribution of Ti-6Al-4V brazed joint polished by emery papers

Ti-6Al-4Vときにろう接面粗さの粗い方が残留応力が大きく、系送りの長さ方向(Ox)に圧縮、直角方向(Oy)に引張応力が(最大約12.94 kgf/mm²)発生していることが測定された。

3.4 ろう接部の引張強度

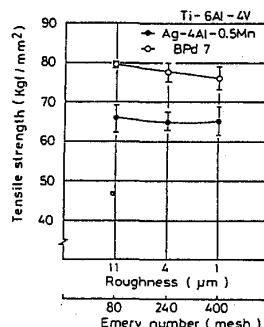


Fig. 9 Relation between tensile strength and Roughness

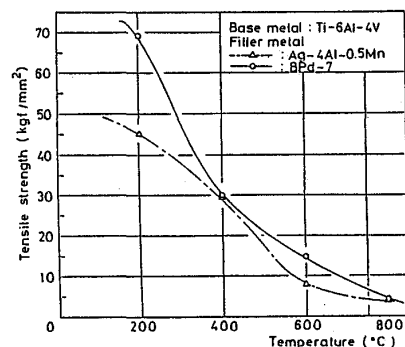


Fig. 10 Relation between tensile strength and temperature

Fig. 9, Fig. 10(高温、各ろう接試験片は常温および高温における引張強度をインストロン試験機を用いて求めた。その結果、ろう材ではBPd-7でTi-6Al-4Vをろう接した場合が最も強く、最大約

80 kgf/mm²の引張強度を示した。純チタンは母材強度が低く、約35 kgf/mm²の引張強度にすぎなかった。また表面粗さの粗い方が僅

がながら強い引張強度を示した。高温引張強度は600℃で約15 kgf/mm²の値を示した(Ti-6Al-4V-BPd-7)。

4. 結 言

- (1) チタン、チタン合金のろう接にはBPd-7が最適である。
- (2) ろう接面粗さは $R_{max}=1.2 \mu m$ 程度の場合がろう材がり、引張強度とともにすぐれていた。
- (3) ろう接部には最大約12.94 kgf/mm²の残留応力が存在する。

引用文献(1) 木沢、溶接学会誌 Vol. 42, No. 4, P. 23~31, (1993)