講

義

材料学シリーズ (13)

チ タ ン 材 料

西 村 孝*

Titanium and its Alloys

Takashi NISHIMURA*

1. は じ め に

1980年の現在、世界のチタン産業界はこれまで経験したことのない活況の中にある。日本も例外ではなく、昨年度のスポンジ・チタンの生産量は13,200トンに達し、生産を開始した1952年以来、約30年の歴史の中で最高を記録することとなった。

こうした状況を反映して、チタン材料に対する関心も急速に高まり、本年5月京都で開かれた第4回チタン国際会議は各分野から300編以上の論文が報告され、各方面の注目を集めた。日本においては、これまでチタン材料のすぐれた耐食性に注目して、化学工業用耐食材料として純チタンを中心に開発がすすめられ、今日、この分野における利用技術、製造技術は世界的水準にある。この発達の経過は航空機用チタン合金の開発に力を注いできた欧米の発達とは異にしているが、日本においてもチタン合金への需要と関心が急速に高まりつつある。

ここではチタン材料について、一般的材質特性、実用チタン合金の種類と特性、それらの利用について述べる。

2. チタン材料の材質特性

はじめに、チタン材料の材質特性について紹介する。チタン材料の材質は純チタンとチタン合金とでは大きな相違点があるが、ここでは両者を含めて一般的性質として他材料との比較で説明する。

2-1 物理的性質

表1に純チタンの物理的性質を他の金属材料と比較し

* (株)神戸製鋼所チタン製造部 (〒676 兵庫県高砂市荒井町新浜2-3-1)
Titanium Manf. Dept. Kobe Steel, Ltd. (3-1 Niihama, 2-chome, Arai-cho Takasago-shi, Hyogo 676)

て示した。これらの特徴は次のように整理される。

- 1) 融点が1682°Cであり、Al, Cu, Feなどに比べて高い。
- 2) 結晶構造が低温で安定な稠密六方晶(HCP(α 相))から高温で(885°C)において体心立方晶(BCC(β 相))へ変化する。
- 3) 比重(4.54g/cm³)は鋼の約60%である。
- 4) 比熱、熱伝導度及び電気抵抗はオーステナイト系ステンレス鋼とほぼ同じである。磁性はなく、透磁率は1.00である。
- 5) 熱膨張係数は 9.0×10^{-6} cm/cm/°Cで炭素鋼のそれとほとんど同等で、オーステナイト系ステンレス鋼の約60%である。

2-2 化学的性質

純チタンの化学的特性は何よりもそのすぐれた耐食性にある。純チタンの耐食性は、表面に形成される酸化チタンの不動態皮膜によるものである。この不動態皮膜の特徴はステンレスやジルコニウムなどの他金属と比べて

- ①不動態領域が広いこと。
- ②この不動態皮膜は強固であり、破壊されても酸化性環境では再生が容易に起る。
- ③この不動態皮膜は塩素イオンの皮膜破壊作用に対し強い性質をもつため、塩化物水溶液に対し、特にすぐれた耐食性をもつ。

などの点がある。従って、酸化性、中性および腐食抑制剤の共存する還元性環境での腐食、および局部腐食に対し十分な耐食性をもっている。還元性酸や錯塩には腐食されるが、弱還元性環境では腐食されない。従って、チタンは高温の塩類、水分を含んだ塩素、硝酸、錯塩のような腐食環境で広く利用される。還元性環境での腐食や局部腐食に対しては、それぞれ合金化により耐食性の改善がなされてきており、図1にそれらの耐食性チタン合

表1 チタンと他金属との物理的性質の比較

	チ タ ン	ジルコニウム	アルミニウム 合 金 75S-T 6	マグネシウム 合 金 AZ-31X	ステンレス鋼 AISI 321
融 点 ℃	1668	1852	476~638	565~632	1400~1427
結 晶 構 造	885℃以下 H.C.P. 885℃以上 B.C.C.	863℃以下 H.C.P. 863℃以上 B.C.C.	F.C.C.	H.C.P.	F.C.C.
密 度 g/cm ³	4.54	6.57	2.80	1.78	8.03
原 子 番 号	22	40	13(Al)	12(Mg)	26(Fe)
原 子 量	47.90	91.22	26.97	24.32	55.84
縦弾性係数 kg/mm ²	10.85×10 ³	9.1×10 ³	7.28×10 ³	4.55×10 ³	20.3×10 ³
ポアソン比	0.34	0.33	0.33	0.35	0.3
電気抵抗 μΩ-cm(20℃)	47~55	40~54	5.75	9.3	72
電気伝導度 (Cuに比べ%)	3.1	3.1	30.0	18.8	2.35
熱伝導度 (cal/cm ² /s/°C/cm)	0.041	0.040	0.29	0.23	0.031
熱膨張係数 cm/cm/°C(20~100℃)	9.0×10 ⁻⁶	5.8×10 ⁻⁶	23.6×10 ⁻⁶	26.0×10 ⁻⁶	16.5×10 ⁻⁶
比 熱 cal/g/°C(R.T.)	0.13	0.07	0.23	0.25	0.12

図中点線より上に行くにしたがい塩化物濃度は大きくなり、腐食性が厳しくなる。同様に横軸は酸化性および非酸化性の程度を示し、それぞれ両端に近づくにつれて腐食性が大きくなる。それぞれの合金に関する線の水平長さは耐食範囲を示している。
*Pd含有量は0.10~0.20%

図1 各種金属材料の耐食性比較

金の種類と使用可能範囲を純チタンおよび他の腐食材料との比較で示す。

2-3 機械的性質

純チタンの機械的性質は主として酸素や鉄分の添加によって調整され、高強度を目的としたチタン合金では固溶強化や析出強化が可能となる多元系合金が使用される(後述)。一方、チタン材料の機械的性質は、このような不純物元素や添加合金元素に影響を受けるだけでなく、六方晶金属特有の結晶方位の集合組織によっても大きな影響を受ける。特に純チタン圧延板に見られる異方性の

原因はこれによるものである。表2¹⁾に典型的な純チタン板の機械的性質を他材料との比較で示した。耐力やr値、n値の大きな異方性、比較的小さいn値、逆に高いr値が特徴としてみられる。

2-4 加工性

純チタンの冷間プレス加工は、他の金属材料と同様に可能であるが、加工性は化学成分、集合組織や結晶粒度などに大きく影響を受けるので、製造条件に十分な注意が払われている。例えば、図2²⁾には純チタン板の深絞り性とr値の関係が示されているが、両者の強い関係を見ることができる。純チタンの場合、通常工程でも3~5の高いr値(平均r値)が得られ、すぐれた深絞り性を有している。これは、他の面心立方、体心立方金属にはみられない六方晶純チタンの大きな特徴である。

また、チタンのヤング率は約12,000kg/mm²程度で、鋼の約半分の値を示す。この低いヤング率は冷間加工後の大きなスプリング・バックの原因となり、プレス加工の成形精度を高める点で不利になる。特に高強度を有するチタン合金では、温間・熱間加工やサイジング等の工程を必要とする。

高温の変形での特徴の一つに超塑性がある。これは特定の温度、歪速度の条件下で、数百%のを超える大きな延性を示す性質である。この性質は主としてα+β二相チタン合金において現われやすく、材料の顕微鏡組織に強く影響されることが報告されている^{3)~6)}。

2-5 低温性質

一般に鋼やMoなどの体心立方金属は低温で延性の劣下が始まるが、Alやオーステナイト鋼などの面心立方金属ではこのような現象はみられない。稠密六方晶金属で

図6 純チタンの結晶構造

図7 2 元系合金状態図の分類

α 相(HCP) から β 相(BCC) に変化する。この β 相は溶融温度まで安定である。これらの相変化と結晶構造を図6に示す。

純チタンに合金元素を添加していくと、この相変態を起す温度は変化する。添加された合金元素は α 相、あるいは β 相を安定化させるが、この安定化に対する影響の仕方は元素により異なる。 α 相に優先的に固溶し安定化させ、変態温度を上昇させる作用をもつ元素を α 安定化元素と呼ぶ。この種の作用をもつ置換型合金元素には Al, Ga, Ge などがある。このうち Al は高温性質を改善するので実用合金において最も重要な元素となっている。同様の働きをもつ侵入型元素には O, N, C などがある。図7(a)はこの種の元素とチタンとの二元状態図の例を示している。

また β 相に固溶し安定化させ、変態温度を低下させる作用をもつ元素を β 安定化元素と呼び、作用の仕方の違いにより、 β 全率固溶型と β 共析型に分類される。前者に属する元素は β 相に十分固溶し、 β 相から α 相と中間化合物への分解を起さない。Mo, V, Ta, Nb などはこの種の型の元素であり、それ自体の結晶構造も体心立方晶である。これに対し、後者の場合、平衡状態では室温で β 相は存在しない。純チタンの変態温度と室温の間で共析反応 ($\beta \rightarrow \alpha + \text{金属間化合物}$) を起すもので Fe, Mn,

Cr, Ni, Co, Cu, Si 等の元素がこれに含まれる。図7の(b), (c)にこれらの型の元素との状態図を示す。これらの β 安定化元素の添加によって β は安定化され焼入れにより非平衡的に β 相を室温まで残留させることができる。

これらの作用の他に α 相、 β 相ともに固溶し、両相を固溶強化させる中間的作用をもつ元素がある。Zr や Sn はこの型の元素である。図7(d)はこの型の状態図の例である。

3-2 擬二元系状態図

実用チタン合金は上述のような単純な二元系ではなく、三元系以上の多元系が大部分で複雑になるが、実用チタン合金の分類には、これら添加元素による β 相安定化に及ぼす全体的な作用を位置づける方法として、図8¹⁰⁾のような擬二元系状態図を用いるのが有効である。この図には、いくつかの実用合金も分類に従って示した。

この図の中に示される Ms, Mf 線図は溶体化処理によって生ずるマルテンサイトの変態開始と終了の温度を示す。室温において α 相単相からなる合金を α 合金と呼ぶ。この合金は α 単相であるため、熱処理性をもたず、 α 相の固溶強化により強度をささえる合金である。

さらに β 安定化元素が増え、室温で Ms 点が存在する添加量範囲までの合金を α - β 合金と呼んでいる。これらの合金では、通常の溶体化処理で β 相はマルテンサイト (α') への変態と一部 β 相を残留させる。このマルテンサイトは過飽和の α 相であるが、高温では不安定であり、 $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ に変態する。また残留 β 相も高温で平衡の $\alpha + \beta$ になる。 α - β 合金はこれらの変態を利用して、高強度に熱処理することができる。

また α - β 合金のなかで、near α 合金と呼ばれる合金があるが、これは α 単相合金に近くわずかの β 相が存在する合金のことで、耐熱性にすぐれている特徴がある。

β 安定化元素がさらに増加し、Ms 点が室温以下になれば、 β 域での溶体化後急冷により β 相は室温まで全量残留する。この残留 β 相は室温では安定であるが、高温で分解が起る準安定相であり、熱処理に利用することができる。この種の合金は準安定 β 合金と呼ばれるべき性質のものであるが、実用上 β 合金と呼ばれる。

β 変態点が室温以下に現われる組成になると、全く安定な β 単一相となり、安定 β 合金というべき組成となるが、熱処理性もなく、実用上利用されていない。

3-3 実用チタン合金の種類と性質

表3⁹⁾に上述の分類による実用チタン合金とその性質を示した。

1) α 合金

代表的な α 合金に Ti-5Al-2.5Sn がある。Al, Sn で α 相は固溶強化され、また α 単相のため熱的にも安定で、500°C 程度まで高温強度や耐クリープ性質がすぐれている。また単相のため熱処理性はないが、溶接性はすぐれている。この合金は高温だけでなく低温下でもすぐれた性質を有している。特に低温において、延性、靱性は劣下しない上にすぐれた物理的性質を示すので、この合金は低温材料としても適している。

2) α - β 合金

α 相と β 相の 2 相からなる合金で、合金組成や熱処理条件により α 相、 β 相の量や形状、あるいは微量な第 3 相（析出相）などの分布を調整することにより、高強度かつ高破壊靱性値が得られる。実用合金の大部分はこの合金系に属する。

合金組成として Al を数%含む Ti-Al 系合金を基本とし、第 3 元素として Mo, Fe, V, Cr などの β 安定化元素や中性元素として Zr, Sn などが添加される。Al は主として α 相を安定化し、固溶強化する作用をもち、 β 安定化元素の添加は β 相を固溶強化するとともに、 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 変態を調整し、熱処理性を与えている。また、Zr や Sn は α 相と β 相に固溶し両相を強化する。

α - β 合金の熱処理は、通常、溶体化+時効処理が行われる。この処理における強化機構の基本は、まず $\alpha + \beta$ 相の高温域から焼入れて微細なマルテンサイト (α' 相) を生成し、次いで時効処理によりこの α' 相が分解し微細な β 相を析出させることによる。しかし、この強化機構は、合金元素の種類と添加量により変化するとともに、得られる強化の程度は、またこれらの条件に影響を受ける。一般に β 安定化元素をより多く含有する α - β 合金になるほど、熱処理性は向上し、高強度と大きな熱処理深さを与えるのが特徴である。

この種の実用合金として Ti-6Al-4V, Ti-3Al-2.5V, Ti-8Mn, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, Ti-10V-2Fe-3Al, などがある。このうち Ti-6Al-4V は最も代表的な α - β 合金であり、その使用量は全チタン材料の 50% を越える量を占める。熱間の加工性、溶接性、熱処理性などの点で全体的にバランスのとれた材質をもつためである。熱処理により 100kg/mm² を越える室温、引張り強度をもつとともに焼鈍材と

しても使用される。

Ti-8Mn は β 安定化元素の Mn との二元合金として、初期に開発された中強度の合金である。熱処理性をもつが通常は焼鈍状態で使用される。溶接性は劣るが、良好な成形性をもつため板材として使われてきたが、最近の使用量は少ない。

Ti-6Al-6V-2Sn 合金は Ti-6Al-4V よりさらに β 安定化元素 V と中性元素 Sn が添加されており、より高い熱処理性と高強度が得られる。また Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo は Ti-6Al-6V-Sn に比べて β 相はさらに安定化され、熱処理性の向上がはかられているとともに、固溶強化が一層強められている。これらの合金の室温の引張り強度は約 130kg/mm² が得られ、Ti-6Al-4V に比べ約 30% 程高強度である。また熱処理性がすぐれているため、厚肉材、大型材用途に適しており、航空機部品に使用されている。これらの用途では引張り性質だけでなく破壊靱性値も一定水準が要求される傾向があり、両性質が満足されるよう熱処理条件は厳しく管理されている。

Ti-10V-2Cr-3Al はこの破壊靱性の改善を主な目的として開発されてきた。変態温度が 774°C と低く β 合金に近いので near β 合金とも呼ばれるが、 β -rich の α - β 合金の特性をもち、深熱処理性を有する。この合金も

図 8 擬二元系状態図によるチタン合金の図式表示

表3 純チタンおよびチタン合金の諸性質

合 金	状 態	機 械 的 性 質										シャルピー 衝撃値 ft-lb	硬 度
		室 温				低 高 温							
		引張強度 kg/mm ²	引張耐力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	試験 温度 ℃	引張強度 kg/mm ²	引張 耐力 kg/ mm ²	伸び %	絞り %			
工業用純チタン													
99.5Ti	焼 鈍	33.6	24.5	30	55	316	15.4	9.8	32	80	—	Bhn120	
99.2Ti	焼 鈍	44.1	35.0	28	50	316	19.6	11.9	35	75	32	Bhn200	
99.1Ti	焼 鈍	52.4	45.5	25	45	316	23.8	14.0	34	75	28	Bhn225	
99.0Ti	焼 鈍	67.2	59.5	20	40	316	31.5	17.5	25	70	15	Bhn265	
99.2Ti(0.2Pd)	焼 鈍	44.1	35.0	28	50	316	18.9	11.2	37	75	32	Bhn200	
98.9(0.8Ni, 0.3Mo)	焼 鈍	52.4	45.5	25	42	204 316	35.0 32.9	25.2 21.0	37 32	—	—	—	
α 合金													
5Al, 2.5Sn	焼 鈍	87.5	81.9	16	40	316	57.4	45.5	18	45	19	Re35	
5Al, 2.5Sn (low O ₂)	焼 鈍	81.9	75.6	16	—	—196 —253	126.0 160.3	117.6 144.2	16 15	—	20	Re35	
Near α 合金													
8Al, 1Mo, 1V	二重焼鈍	101.5	96.6	15	28	316 427 538	80.5 74.9 63.0	63.0 57.4 52.5	20 20 25	38 44 55	24	Re35	
11Sn, 1Mo, 2.25Al, 5.0Zr		112.0	100.8	15	35	316 427 538	91.0 84.0 77.0	77.0 68.6 59.5	20 22 24	44 48 50	—	Re36	
1Mo, 0.2Si						316 427 538	78.4 71.4 65.8	59.5 52.5 49.7	16 21 26	42 55 60	—	Re32	
6Al, 2Sn, 4Zr, 2Mo		99.4	91.0	15	35	316 427 538	78.4 71.4 65.8	59.5 52.5 49.7	16 21 26	42 55 60	—	Re32	
5Al, 5Sn, 2Zr, 2Mo, 0.25Si	1,785F(1/2 hr), AC+1, 100F(2hr), AC	106.4	98.0	13	—	316 427 538	80.5 79.1 70.0	57.4 53.9 51.1	15 17 19	—	—	—	
6Al, 2Cb, 1Ta, 1Mo	圧延まま (1 in plate)	86.8	77.0	13	34	316 427 538	59.5 52.5 35.0	46.9 42.0 38.5	20 20 20	—	23 (-80 F)	Re30	
6Al, 2Sn 1.5Zr, 1Mo, 0.35Bi, 0.1Si α-β 合金	β鍛造 十二重焼鈍	102.9	95.9	11	—	482	73.5	59.5	15	—	—	—	
8Mn	焼 鈍	95.9	87.5	15	32	316	72.8	57.4	18	—	—	—	
3Al, 2.5V	焼 鈍	70.0	59.5	20	—	316	49.0	35.0	25	—	—	—	
6Al, 4V	焼 鈍	100.8	93.8	14	30	316 427 538	73.5 67.9 53.9	66.5 58.1 43.4	14 18 35	35 40 50	14	Re36	
	STA	119.0	112.0	10	25	316 427 538	87.5 81.2 66.5	71.4 63.0 49.0	10 12 22	28 35 45	—	Re41	
6Al, 4V (low O ₂)	焼 鈍	91.0	84.0	15	35	—196	154.0	143.5	14	—	18	Re35	
6Al, 6V, 2Sn	焼 鈍	108.5	101.5	14	30	316	94.5	81.9	18	42	13	Re38	
	STA	129.5	119.0	10	20	316	99.4	91.0	12	28	—	Re42	
7Al, 4Mo	STA	112.0	105.0	16	22	316 427 538	88.9 86.1 85.4	75.6 72.8 66.5	18 20 19	50 55 70	13	Re38 Re42 Re42	
6Al, 2Sn, 4Zr, 6Mo	STA	128.8	119.9	10	23	316 427 538	103.6 94.5 86.1	85.4 77.0 66.5	18 19 19	55 67 70	—	—	
6Al, 2Sn, 2Zr 2Mo, 2Cr, 0.25Si	STA	129.5	115.5	11	33	316	99.4	81.9	14	27	—	—	
10V, 2Fe, 3Al β 合金	STA	129.5	121.8	10	19	204 316	113.4 112.0	106.4 99.4	13 13	33 42	—	—	
	STA	123.9	119.0	3	—	316	89.6	80.5	19	—	—	—	
13V, 11Cr, 3Al	STA	129.5	122.5	8	—	427	112.0	84.0	12	—	8	Re40	
8Mo, 8V, 2Fe 3Al	STA	133.0	126.0	8	—	316	114.8	99.4	15	—	—	Re40	
3Al, 8V, 6Cr 4Mo, 4Zr	STA	147.0	140.0	7	—	316 427	105.0 95.2	91.0 77.0	20 27	—	75	Re42	
	焼 鈍	89.6	84.7	15	—	316	73.5	66.5	22	—	—	—	
11.5Mo, 6Zr, 4.5Sn	STA	140.7	133.7	11	—	316	91.7	86.1	15	—	—	—	

130kg/mm² 程度の引張り強度が得られる。これらの合金に加え、鍛造性、熱処理性、破壊靱性などの改善を目的とした新合金が開発されており、Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti-17合金)、Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr (Corona 5合金) や Ti-6Al-5Zr-4Mo-1Cu-0.2Si (IMI 700合金) などが実用化されつつある。

3) near α 合金

熱処理で高強度が得られる β rich の α - β 合金や β 合金は400~500°Cの高温下では安定性を欠いたり、析出相を生成するので使用できない。これに対し図8の α 単相側に近い組成の α - β 合金は β 相をわずかしき含有せず、ほとんど α 単相で構成される。従って熱処理性は小さいが、高温まで安定した性質を示す。すぐれた高温強度、耐クリープ性質を有するこれらの合金を一般に near α 合金と呼んでいる。Al, Zr, Sn を主体とした合金元素添加により α 相の固溶強化がはかられているとともに、Mo, V など少量の β 安定化元素や析出物を形成する Si, Bi などの微量添加により高温強度を改善している。

Ti-8Al-1Mo-1V や Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo は代表的な near α 合金である。また、Ti-2.25Al-5Zr-11Sn-1Mo-0.2Si (IMI 679合金) や Ti-6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si (IMI 685合金) は Si 化合物の微細析出を利用して耐熱性を高めるタイプの合金である。near α 合金は高温 α + β 域における相量比の温度依存性が大きいので、熱処理温度はきびしく管理される。耐クリープ性質と引張り性質を適度に組み合わせるために溶体化温度は α + β 域のみならず、 β 域を利用する場合がある。

4) β 合金

β 合金は Mo, Cr, V などの β 安定化元素を多量に含み β 相が強く安定化されているので、溶体化後室温で β 相が残留する。 β 合金は体心立方構造をもつため α - β 合金と比較して冷間ですぐれた加工性を有するのに加え、深い熱処理ができ、高強度、高破壊靱性の特徴をもつ。一方、弾性率、延性が劣り、かつ比較的大きな密度をもつという弱点をも持つ。

この種の合金の代表的なものは、Ti-13Cr-11V-3Al, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al (Ti-8823), Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (Beta III), Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr (Beta C), Ti-15Mo-5Zr-3Al などがある。

Ti-13Cr-11V-3Al は 24% の β 安定化元素を含んでおり、強化機構は β 相からの α 相と TiCr₂ 相の析出によるものであり、TiCr₂ 化合物の析出により延性・靱性の低下が認められ、最近ではほとんど使用されていない。Ti-15Mo-5Zr-3Al 合金は α 相の析出により時効硬化できる合金で、化合物や遷移相の ω 相の析出によらないため延性靱性にすぐれ今後の利用が期待されている¹⁴⁾。

4. チタン材料の応用

表4 チタンおよびチタン合金の主たる用途

航空機用構造材	航空機、ミサイルの機体部品材料、ジェットエンジンやロケットの部品材料、磁気浮上列車クライオスタット、競争用自動車のクランク軸、コンロッド、バルブ
化学装置用および公害防止機器用耐食材	酢酸、アセトン、アセトアルデヒド、テレフタル酸、尿素、アクリロニトリル、カプロラクタム、メラミン、製紙・パルプ、硝酸、し尿処理、公害防止等のプラントの反応塔、蒸留塔、濃縮器、熱交換器、バルブ、ポンプ、配管、計器等の機器材料
海水利用産業用耐食材	火力・原子力発電用タービン復水器用復水管・管板、海水淡水化装置用蒸発管・管板、製鉄、石油製精、その他の海水冷却熱交換器材料、船用各種熱交換器材料
電解用電極材	ソーダ電解、次亜塩素酸ソーダ電解、二酸化マンガニ電解、銅電解、芒硝電解等の電極、電気めっき用治具
通信機器、光学器材、医療材料	マイクロホン、受信器、ステレオスピーカ一等の振動板、カメラのシャッター部品、医療用人工骨

チタン材料はすぐれた耐食性と比強度に加え、高低温におけるすぐれた特性を合わせもつことが理解されてくるにつれて、用途は次第に拡大している。表4¹⁰⁾にチタン材料の主な用途を示す。ここでは代表的な使用例を紹介する。

4-1 耐食性の利用 (復水器、熱交換器、淡水化装置)

近年、発電所や船舶における復水管、海水淡水化装置の伝熱管などに薄肉溶接チタン管の需要が急速に拡大している。また、伝熱管だけでなく管板とともに全チタン製の復水器も製造されるに至っている。表5¹¹⁾にはチタン管と従来の伝熱管材料との特性の比較が示される。チタン管は各タイプの腐食に対しあらゆる点ですぐれた耐食を示すことがわかる。

また船舶においては主復水器のステンレス系、あるいは銅合金系のコンデンサー・チューブのサンドエロージョン、デポジット・アタック等に対する根本的対策としてチタン管の利用が進んでいる。

海水淡水装置の分野もチタン管の有望な市場である。ここでは海水を加熱蒸発させ、真水に凝縮させる熱交換器として使用される。すでにサウジアラビアのアルジョバール地区に13.2万トン/日の淡水化装置に1,300トンのチタン管が利用されている。

そのほかに、プレート式熱交換器としてチタン板が用いられている。管、管板式より伝熱効率が高く、据付面積が小さくできる特徴をもち、船舶、発電所、製鉄所などの工業用水の二次冷却用に使用されている。

4-2 高強度、高温特性の利用 (宇宙航空機分野)

図5に示したように、チタン合金はすぐれた比強度と破壊靱性をもつとともに、500°C までは安定した耐熱性

表5 各種復水器管の特性比較

材 料	Ti管 TTH35W (KS-50)	Al黄銅管 (BsTF3)	70/30 CuNi管 (CNTF3)	汚染海水用 銅合金管
比較項目				
寸法(外径×厚さ)	mm	25.4×0.5	25.4×1.245	25.4×1.245
断面面積	mm ²	39.1	94.7	94.7
断流路面積	mm ²	467	412	412
縦弾性係数	kg/mm ²	10,850	11,700	15,400
比重		4.51	8.4	8.94
線膨張係数	°C ⁻¹	9×10 ⁻⁶	18.5×10 ⁻⁶	16.2×10 ⁻⁶
熱伝導率	cal/cm·s·°C	0.041	0.24	0.07
引張強さ	kg/mm ²	35~52	38以上	36以上
熱貫流率(注1)	kcal/m ² ·hr·°C	2,800	3,190	2,700
有効拡管長さ	mm	23	21	21
管板への把握力(注2)	kg/mm ²	0.19	0.6	0.6
管と管板の固着力(注2)	kg	350	1,010	1,010
両端自由長さ1m座屈強さ	kg	315	785	—
同上中央たわみ(水入り)	mm	0.25	0.20	0.15
海水に対する耐食性	○(清浄海水) ○(汚染海水)	○	○	○
加熱海水に対する耐食性	○	△	○	△
高流速海水に対する耐食性	○	×	×	×
海水中的の接触腐食(注3)	○(管) △(管板)	○	○	○
海水中的の耐振動デポジットアタック	○	△	×	△
海水中的の耐サンドエロージョン	○	×	△	×
耐アンモニア腐食性	○	×	×	×
支持板(鉄)との接触腐食	○(管) ○(管板)	○	○	○

(注1) HEI基準による。冷却水入口温度21°C、管内流速2m/s、清浄度100%

(注2) ネーバル黄銅管板(NBsP1)へ拡管する場合の試験最低値である

管肉厚減少率: Ti管8~10%, その他の管5~8%

(注3) 銅合金管板使用の場合である()内は陰極防食実施の場合を示す

(記号) ◎きわめて優秀, ○優秀, △やや不良, ×不良

表6 現用ジェットエンジンの構成材料

エンジン名	JT9D (P&W)	CF6-50 (GE)	F100 (P&W)	Adour (RR/Turbomeca)
部品名				
ファン・ディスク	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-6-2-4-6(1~3)	Ti-6-4
ブレード	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-8-1-1(1~3)	Ti-6-4
ベーン	AA2014T6	Al-6061-T6	Ti-8-1-1(IGV,EGV)	
ケース	AISI410	Al-6061-T6	Ti-6-4(2~3)	
コンプレッサー・ディスク	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-6-2-4-6(4.5,7.8)	Ti-6-4
	Ti-6-2-4-2	Ti-6-2-4-2	Ti-8-1-1(6)	
	Incoloy 901, Waspaloy	Inco 718	IN100(9,11,13)	IMI685
			Waspaloy(10,12)	
ブレード	Ti-6-4	Ti-6-4	Ti-8-1-1(4~6)	Ti-6-4
	Ti-8-1-1	Ti-6-2-4-2	Ti-6-2-4-6(7~8)	
	Ti-6-2-4-2	A-286	Inconel 901(9~12)	IMI685
	Incoloy 901		Waspaloy(13)	
ベーン	AISI410	Ti-6-4	Ti-6-4(IGV)	
	Greek Ascoloy	A-286, 347	Ti-6-2-4-6(4.5)	
			Inconel 718(6~11)	
ケース	Ti-6-4, Ti-5-2.5	Ti-6-2-4-2	Waspaloy(12)	
		Inco 718	Ti-6-4, Waspaloy	Ti-6-4
塔載機	B747	DC10	F15, F16	Ti-6-2-4-2
	DC10	C5A		
離昇推力	kg	21,320	24,494	7,350
重量	kg	3,978	3,962	1,730
			1,371	740

を有するので航空機用材料として重要な位置を占めるに至っている。航空機用材料はジェットエンジン材料と機体材料に分けられる。

ジェットエンジン用チタン合金に要求される性能は大別して2つに分けられる。第1はファン・コンプレッサー低圧段のように比較的低温(200°C以下)域にあるもので、これらディスク、ブレードには高強度、高靱性が要求される。第2はコンプレッサー中、高圧段では300~500°Cに達するため、高温強度、耐クリープ性などが要求される。前者では鍛造性がよく、高強度が得られやすいα-β合金が主体であり、特に形状が大きいディスクでは熱処理性の良いβ richのα-β合金が使用される。これらの合金にはTi-6Al-4V、Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo、IMI680などがあり、Ti-8Al-1Mo-1Vも見直されてきている。この部分におけるチタン合金の使用量はエンジン総重量の20~30%を占めている。表6³⁾に現用ジェットエンジンの構成材料の例を示す。また図9には代表的エンジンとしてロールス・ロイス社のRB 211エンジンの構造と使用材料を示す。

後者の場合、使用温度で安定性の欠けるα-β合金は使用できず、near α合金が選ばれている。これらの合金にはTi-8Al-1Mo-1V、IMI 679、685、Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Moなどがある。

一方、機体材料については翼の骨組、胴体、エンジンナセル、脚部などで、表7⁹⁾に示すようにほとんどTi-6Al-4Vである。その他Ti-6Al-6V-2Snやファスナー類へβ

図9 ジェットエンジンの構造と材料 (ロールスロイス社 RB211 エンジン)

表7 航空機機体構造に使用されているチタン合金

使用箇所	民間機	軍用機
翼		
骨格		Ti-6Al-4V
取付け金具		Ti-6Al-4V
外皮		Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-8Mn
スポイラー, フラップ	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V, IMI550
胴体		
骨格		Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn, IMI230
取付け金具		Ti-6Al-4V
外皮		Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-8Mn
エンジンナセル	Ti-6Al-4V, IMI230, IMI680, Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V
パイロン	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V
脚部材	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V, Ti-6Al-6V-2Sn
油圧配管	Ti-3Al-2.5V	Ti-3Al-2.5V
ファスナー類	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	Ti-13V-11Cr-3Al, Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn
その他	C.P.Ti	C.P.Ti

図10 各種チタン合金の低温引張り性質

合金などが使用されている。ボーイング747機ではチタン材料の使用量が10%弱、F15戦闘機では約25%にもなっている。

4-3 低温特性の利用

体心立方構造をもつβ相は低温で延性、靱性を劣下させるので、β相を含まないα合金、あるいはβ相の少な

いα-β合金が使用される。図10¹²⁾に各種チタン合金の低温引張り性質を示す。延性の低下がβ型のTi-13Cr-11V-3Alでは-100°C、α-β型のTi-6Al-4Vで約-200°Cで起り始めるのに対し、α型のTi-5Al-2.5Snでは-250°C以下でも低下しないことがわかる。図11¹³⁾には各チタン合金の使用温度範囲が示されている。-240°C以下では

図11 チタン合金の低温使用温度範囲

純チタン、Ti-5Al-2.5Sn ELIが適しているといえる。

この分野では磁気浮上列車のクライオスタット、超電導関係機器、ロケット燃料タンクなどへ需要が拡大しつつある。

5. お わ り に

チタン材料の特性について述べてきた。チタン資源が豊富なこと（アルミ、鉄、マグネシウムに次ぎ地殻中には4番目に多い）、軽くて強いすなわち比強度が高いこと、極低温から約500°Cと広い範囲にわたり使用可能なこと、海水をはじめ広範囲な環境での耐食性がよいことなどの理由により、チタン材料は鉄、アルミに次ぐ第3の金属に成長することが期待され、生産技術面、利用技術面での今後の発展が望まれる。

文 献

- 1) 西村孝, 長谷川淳; プレス技術, **12**, 49 (1974)
- 2) 森口康夫, 伊藤喜昌; チタニウム・ジルコニウム, **28**, 19 (1980)
- 3) 古城紀雄, 石橋博, 堀茂徳; 日本金属学会講演概要, 84回大会, p207 (1979. 4)
- 4) 古城紀雄, 石橋博, 堀茂徳; 同上, 85回大会, p148 (1979. 10)
- 5) 長谷川淳, 伊藤喜昌; 同上, 85回大会, p149 (1979. 10)
- 6) 井上総他; 三菱重工技報, **14** [6], 83 (1977)
- 7) 大谷四郎, 嶋田雅生; 神戸製鋼技報, **23** [2], 26 (1973)
- 8) 草道英武, 伊藤喜昌; 機械の研究, **29**, 184 (1977)
- 9) 神戸製鋼所; 日本航空宇宙工業会 No. 23, p1 (1979)
- 10) 草道英武, 森口康夫; 日本金属学会報, **17**, [3], 220 (1978)
- 11) 草道英武, 伊藤英男, 安井健一, 北岡一泰; 金属, **46**, [4], 35 (1976)
- 12) 福島, 後藤; 材料科学, **9**, 255 (1972)
- 13) A. Hurlich; Titanium Metallurgy Course, New York Univ. (1965)
- 14) 西村孝他; 日本金属学会誌, **40**, 219, (1976).