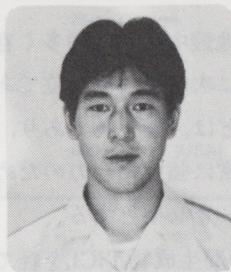


「材料技術における最近の話題(V)」チタン材料編



技術本部第1研究部材料研究課 高橋尚久

安達修平

(工博)

1. はじめに

チタン材料は、大きな比強度（強度／密度）とすぐれた耐食性のため、宇宙・航空機器はもとより、化学プラントや発電設備のような陸上施設にも欠かせない材料となっている。構造用材料としてのチタン合金は、1953年以来要求に応じてその種類も増え、現在では、代表的なものだけで約30を数えるに至っている。素材となるスポンジチタンの生産量は、世界的に見て漸増を続けているが、新規の需要開拓の方は、業界の思うように進んでいないように見える。特に国内市场では、欧米に見られるような大きな航空機産業を欠如しているため、一般機器にその用途を見い出さねばなら

ず、量的にも、価格的にも厳しい制約をかけられている。

自動車やモーターサイクル部品への応用は、レース用として、20数年前からすでにチタン合金の使用が試みられているが、量産モデルへの応用例は、きわめて少ない。しかしながら、汎用チタン合金の価格は、年々減少してきており（図1）、高性能化に伴なって材料への要求が厳しくなりつつあることを考えると、市販モデルへの導入は、そう遠い日のことではないと思われる。

本稿では、チタン材料の基礎的な性質について概説したのち、最近の応用例のいくつかを紹介する。

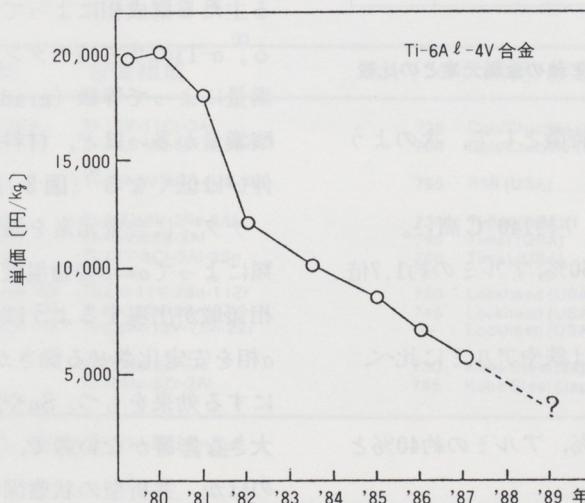


図1 チタン合金の国内における市場価格の変化

2. 金属チタンの物理的性質

元素としてのチタンは、地殻中に比較的多く存在し、クラーク数では、Mgに次いで、第9位である。⁽¹⁾しかし、鉱石のほとんどは、酸化物であり、チタンと酸素原子の間の非常に強い結合力のため、還元には、大きなエネルギーを必要とする。

チタン鉱石は、一般に、中間生成物 $TiCl_4$ を経て、クロール法 (Mg還元) あるいはハンター法 (Na還元) により、スポンジチタンと呼ばれる多孔質の金属チタン塊となる。このスポンジチタンが、工業材料となるには、さらに、二重真空アーク溶解による高純度インゴット化が必要であり、所定の製品形状を得るために、圧延又は鍛造および熱処理のプロセスを経なければならない。

表1に、純チタンの物理的性質を、他の代表的な金属材料と比較して示す。

	Ti	Al	Fe	Cu
融点 (°C)	1668	660	1530	1083
密度 (g/cm³)	4.51	2.70	7.86	8.93
電気抵抗 (μΩ·cm)	51	2.7	9.7	1.7
電気伝導度 (Cuを100として)	3.1	64.0	18.0	100
熱膨張係数 (1/°C, 0-100°C)	8.4×10^{-6}	23.0×10^{-6}	12.0×10^{-6}	16.8×10^{-6}
透磁率	1.001	—	—	—

表1 金属チタンの物理的性質と他の金属元素との比較

上表からわかるチタンの特徴として、次のようなものが挙げられる。⁽²⁾

- 1) 融点は1668°Cで、鉄より約140°C高い。
- 2) 比重は4.51で、鉄の約60%，アルミの約1.7倍である。
- 3) 電気伝導度、熱伝導度は鉄やアルミに比べ、かなり小さい。
- 4) 熱膨張係数は、鉄の70%，アルミの約40%と小さい。
- 5) 非磁性である。

なお、純チタンの結晶構造は、882°C以下で図2-a)に示すようなhcp(稠密六方格子)構造であり、それ以上の温度では、bcc(体心立方格子)構造(図2-b)となる。チタンでは、hcp構造のものを α 相、bcc構造のものを β 相と呼ぶ。こうした特徴的な結晶構造は、チタンの変形挙動を考えるのに、きわめて重要な意味をもつ。

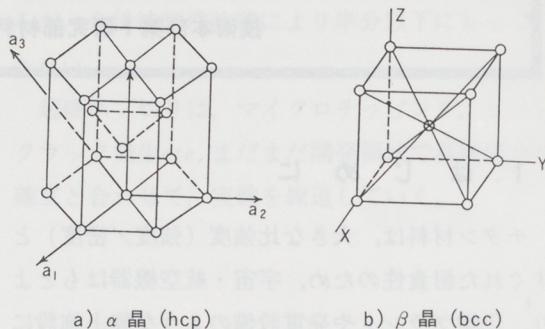


図2 Tiの結晶構造のタイプ

3. チタンおよびチタン合金の分類と機械的性質

工業材料としてのチタン材は、室温付近における主たる構成相によって、表2のように分類される。⁽³⁾ α -Tiのうち純チタン系のものは、含有する酸素量によって等級(grade)がつけられている。酸素量が多いほど、材料の耐力、引張強さは高く、伸びは低くなる⁽⁴⁾(図3)。

チタンに合金元素を添加してゆくと、元素の種類によって $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 変態温度が変化し、また $(\alpha + \beta)$ 2相領域が出現するようになる。例えば、Alは、 α 相を安定化させる働きがあり、Vは、 β 相を安定にする効果をもつ。SnやZrは、添加してもあまり大きな影響がないので、中性元素と呼ばれる。このほか、共析型の状態図を生じる元素を含め、4種類のグループに分類することができる(図4)。

呼称	合金組成	β_T [°C]	開発/製造	年
Grade 1	Pure-Ti (0,2 Fe; 0,18 O ₂)	890	Diverse	—
Grade 2	Pure-Ti (0,3 Fe; 0,25 O ₂)	915	Diverse	—
Grade 3	Pure-Ti (0,3 Fe; 0,35 O ₂)	920	Diverse	—
Grade 4	Pure-Ti (0,5 Fe; 0,40 O ₂)	950	Diverse	—
Grade 6	Ti-5Al-2,5Sn	1040	Diverse	1953
Grade 7	Ti-0,2 Pd	915	Diverse	1959
Grade 12 (TiCode-12)	Ti-0,3Mo-0,8Ni	880	Timet (USA)	1974

a) α -Ti合金

呼称	合金組成	β_T [°C]	開発/製造	年
Ti-8-1-1	Ti-8Al-1V-1Mo	1040	Timet (USA)	1960
Ti-6-2-4-2	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	995	Timet (USA)	1966
Ti-11	Ti-6Al-2Sn-1,5Zr-1Mo-0,35Bi-0,1Si	1015	Timet (USA)	1971
IMI 679	Ti-2,5Al-11Sn-5Zr-1Mo-0,2Si	945	IMI (GB)	1961
IMI 685	Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si	1020	IMI (GB)	1969
IMI 829	Ti-5,5Al-3,5Sn-3Zr-1Nb-0,25Mo-0,3Si	1015	IMI (GB)	1980
Ti-5621S	Ti-5Al-6Sn-2Zr-0,8Mo-0,25Si	1005	RMI (USA)	1969
Ti-6-2-4-2-S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,1Si	995	RMI (USA)	1970
Ti-5522S	Ti-5Al-5Sn-2Zr-2Mo-0,25Si	980	RMI (USA)	1970

b) 準安定 α -Ti合金

呼称	合金組成	β_T [°C]	開発/製造	年
Ti-6-4	Ti-6Al-4V	995	Diverse	1954
Ti-6-6-2	Ti-6Al-6V-2Sn	945	Diverse	—
IMI 550	Ti-4Al-2Sn-4Mo-0,5Si	975	IMI (GB)	1956
Ti-5524S	Ti-5Al-5Sn-2Zr-4Mo-0,25Si	960	RMI (USA)	1970
Ti-62222S	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0,25Si	970	RMI (USA)	1970
Ti-6-2-4-6	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	935	Timet (USA)	—
—	Ti-6Al-4V-2Fe	—	Timet/Rockwell (USA)	Exp.
CORONA 5	Ti-4,5Al-5Mo-1,5Cr	935	Colt/Rockwell (USA)	1974
Ti-17	Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	890	General Electric (USA)	1972

c) $(\alpha + \beta)$ -Ti合金

呼称	合金組成	β_T [°C]	開発/製造	年
B 120 VCA	Ti-13V-11Cr-3Al	720	Colt/Crucible (USA)	1960
Beta III	Ti-11,5 Mo-6Zr-4,5Sn	760	Colt/Crucible (USA)	1969
Beta C	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	795	RMI (USA)	1969
Ti-88-23	Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al	775	Timet (USA)	1965
Ti-10-2-3	Ti-10V-2Fe-3Al	795	Timet (USA)	1976
Ti-15-3	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	760	Timet (USA)	1981
Transage 129	Ti-2Al-11V-2Sn-11Zr	720	Lockheed (USA)	1970
Transage 134	Ti-2Al-12V-2Sn-6Zr	745	Lockheed (USA)	—
Transage 175	Ti-2,5Al-13V-7Sn-2Zr	—	Lockheed (USA)	—
—	Ti-15Mo-5Zr	730	Kobe Steel (Japan)	1972
—	Ti-15Mo-5Zr-3Al	785	Kobe Steel (Japan)	1972

d) 準安定 β -Ti合金

(3)
表2 チタンおよびチタン合金の分類

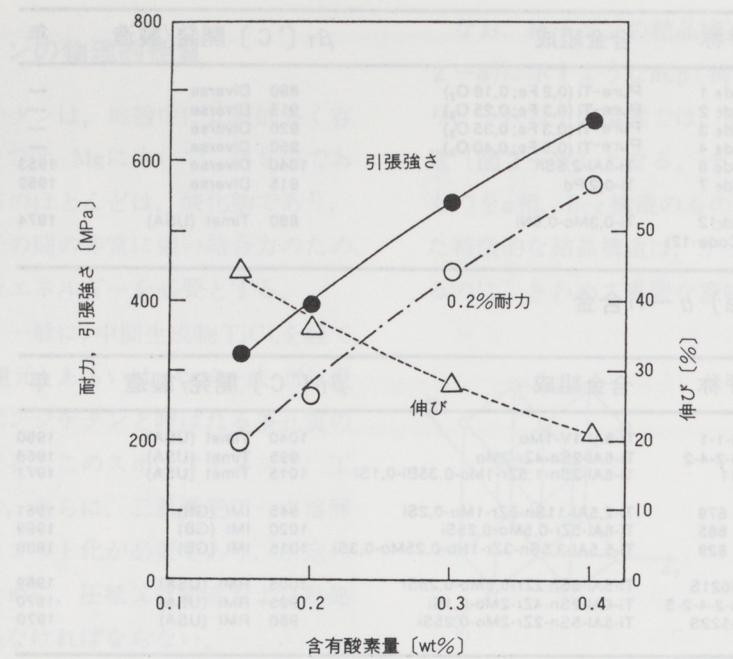


図3 工業用純Ti材の引張強さ, 0.2%耐力および伸びに及ぼす含有酸素量の影響

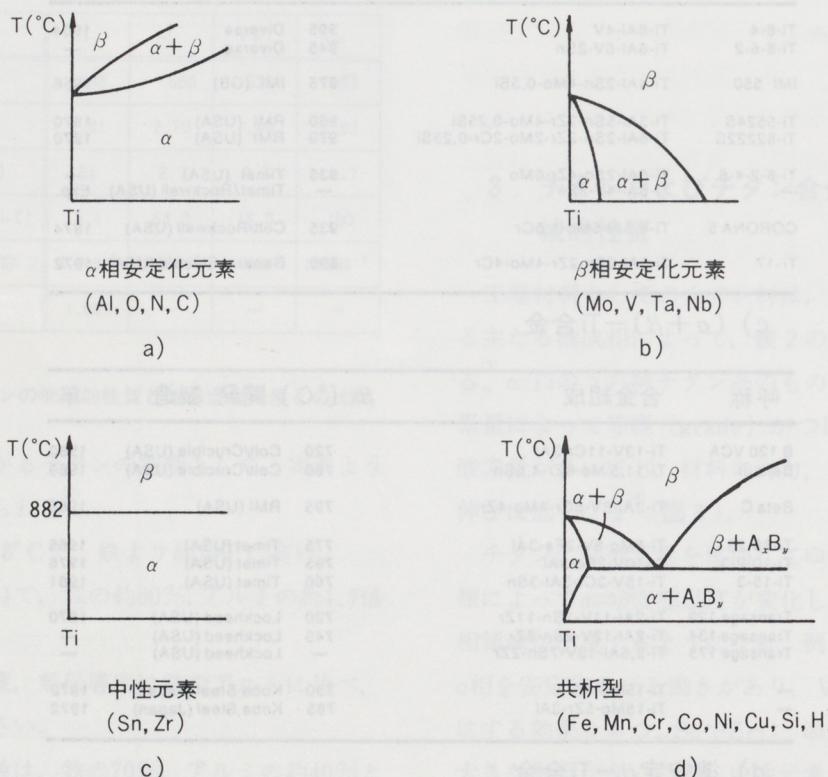


図4 Ti合金の状態図に及ぼす合金元素の影響

準 α -Ti合金の機械的性質の特徴は、高温クリープに対する抵抗が大きいことで、耐熱性を要求される部材に使用される。 $(\alpha + \beta)$ -Ti合金は、加工や熱処理によって微細組織が様々に変化し、機械的性質もそれに伴ない大きく変わるが、一般に強度、靭性、及び加工性の点で、バランスのとれた特性を示す材料である。中でもTi-6Al-4V合金は、最も広く使われる構造用チタン合金である。準安定 β -Ti合金は、比較的新しい材料で、高強度が得られ、加工性もすぐれているが、比重がやや大きいことが難点の1つである。

4. Ti-6Al-4V合金の微細組織

Ti合金の中で、世界的に最も多く使われているTi-6Al-4V合金をとり上げ、その微細組織の特徴について述べる。この合金がこれほどポピュラーな理由としては、その強度と靭性を広い範囲で設定でき、溶接、鋳造から超塑性に至る多様な加工法が可能であることが考えられる。こうした汎用性は、量産効果として管理の行き届いた品質と圧倒的な価格的優位性を生み出している。

ところで、この合金の強度と靭性は、その微細

組織に負うところが大きい。図5に示したTi-6Al-4V準二元系状態図からわかるように、この合金では、990°C以下で α 相と β 相の両方が存在する。良好な靭性は、この β 相の存在によるものである。この合金の特徴のもう一つは、微細組織の多様性である。図6に、Ti-6Al-4V合金の代表的な微細組織を示す。これらは、相の形態から、層状晶(lamellar)、等軸晶(equiaxed)および混合晶(bi-modal)の3つに大別される。層状晶は、材料を β 相領域(900°C以上)に加熱したのち、徐冷するか、又は急冷後、 $(\alpha + \beta)$ 相領域の中間温度(例えば800°C)に保持することで得られる。徐冷によって得られた組織は、粗大層状晶(coarse lamellar)(図6-a)と呼ばれ、急冷後恒温変態によってできた組織は、微細層状晶(fine lamellar)(図6-b)と呼ばれる。また、加工熱処理といって、材料に圧延などの塑性加工を施した後、 $(\alpha + \beta)$ 相領域の適当な温度に保持すると、回復、再結晶の過程を経て、図6-cに示すような等軸晶を得ることができる。bi-modal(図6-d)は、層状組織と等軸晶組織が合成されたもので、特殊な加工熱処理により生成される。

さらに、Ti-6Al-4V合金は、時効処理を施すこ

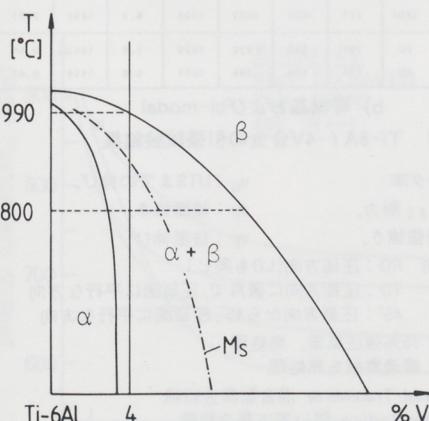


図5 Ti-6Al-4V準二元系状態図

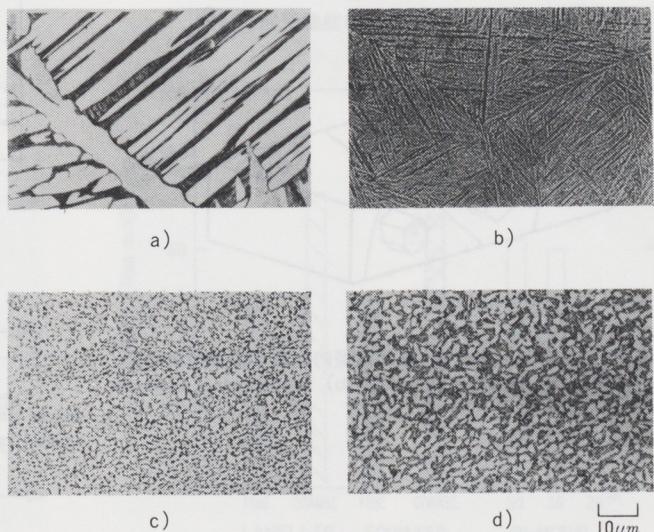


図6 Ti-6Al-4V合金の代表面な微細組織

とにより α , β 両相を強化することが可能である。

加工熱処理を受けた Ti-6Al-4V 合金は、特徴的な集合組織を持つことが知られている。集合組織とは、多結晶材料において、多くの結晶粒がある特定の方位を持っている状態を示し、機械的性質に異方性を与える。図 7 に、圧延集合組織の生成過程を、また図 8 に、圧延材の典型的な集合組織を模式的に示した。

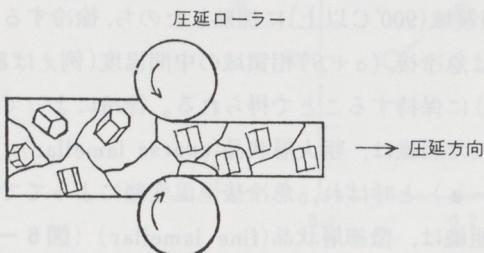


図 7 圧延集合組織の生成

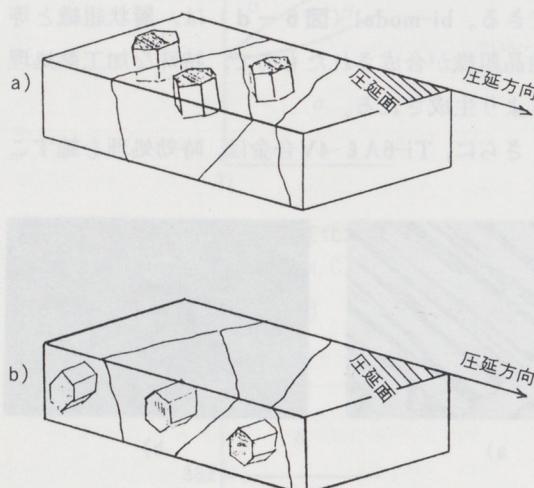


図 8 Ti-6Al-4V 合金 α 晶の典型的な集合組織の模式図
a) Basal texture b) Transverse texture

5. Ti-6Al-4V 合金の機械的性質

表 3 に、Ti-6Al-4V 合金の様々な微細組織、集合組織について行なった、引張試験結果を示す。⁽⁶⁾

ヤング率 E は、微細組織や集合組織には、あまり影響されず、110~120 GPa 程度である。ただ、同じ組織での比較では、圧延方向に直角方向 (TD) で最も大きな値が得られる。同様の傾向は、耐力や引張強さについても言える。破断伸び ϵ_F は、微細組織に大きく依存し、層状晶では約 0.2 と低いのに対し、等軸晶を含む組織では、0.5~0.7 と大きな韌性を示す。また、合金の場合、時効条件や含有酸素量によっても、機械的性質は影響を受ける。

Microstructure/ Loading direction	E [GPa]	$\sigma_{0.02}$ [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	UTS [MPa]	ϵ_u [%]	σ_F [MPa]	ϵ_F -
fine lamellar RD	116	936	1006	1090	5.4	1302	0.20
TD	119	-	1042	1141	6.4	1327	0.16
coarse lamellar 1 TD	120	861	976	1039	2.3	1210	0.20
coarse lamellar 2 LD	116	844	965	1001	2.1	1122	0.14

a) 層状晶

Microstructure/ Loading direction	E [GPa]	$\sigma_{0.02}$ [MPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	UTS [MPa]	ϵ_u [%]	σ_F [MPa]	ϵ_F -	
equiaxed B/T RD	110	1026	1058	1074	7.0	1422	0.56	
TD	119	-	1066	1088	7.3	1516	0.49	
bi-modal B/T-2 RD	113	1030	1073	1118	7.6	1615	0.60	
45°	113	972	1050	1079	4.5	1597	0.72	
TD	123	-	1109	1158	9.8	1598	0.55	
bi-modal B/T-4 RD	117	999	1068	1135	6.0	1539	0.51	
45°	115	974	1047	1110	5.1	1621	0.62	
TD	121	1007	1082	1151	7.2	1645	0.57	
bi-modal B/T-5 RD	115	1000	1062	1123	7.3	1564	0.51	
TD	118	989	1073	1151	8.3	1594	0.45	
bi-modal B/T-6 RD	114	1018	1061	1106	6.8	1521	0.53	
TD	119	1038	1085	1129	7.7	1743	0.70	
bi-modal WT (RD)	117	1022	1093	1126	6.3	1834	0.83	
bar stock	LD	109	880	926	1029	7.9	1501	0.54
	TD	120	909	986	1051	6.6	1414	0.43

b) 等軸晶および bi-modal

表 3 Ti-6Al-4V 合金の引張試験結果⁽⁶⁾

E : ヤング率

ϵ_u : UTS までの伸び,

$\sigma_{0.02}, \sigma_{0.2}$: 耐力,

σ_F : 破断強さ,

UTS : 引張強さ,

ϵ_F : 破断伸び

荷重方向 RD : 圧延方向 (LD も同じ)

TD : 圧延方向に直角で、圧延面に平行な方向

45° : 圧延方向から 45°、圧延面に平行な方向

coarse lamellar 1 : 75%強圧延後、熱処理

coarse lamellar 2 : 鍛造素材を熱処理

B/T : Basal/Transverse 混合型集合組織

WT : Weak texture 弱い等方集合組織

B/T-2 : 初析 α 晶粒径 6 μm , 体積分率 40%, 75% 強圧延素材,

B/T-4 : 初析 α 晶粒径 25 μm , 体積分率 15%, 75% 強圧延素材,

B/T-5 : 初析 α 晶粒径 25 μm , 体積分率 40%, 75% 強圧延素材,

B/T-6 : 初析 α 晶粒径 6 μm , 体積分率 40%, 50% 強圧延素材,

bar stock : 鍛造素材

疲労強度も、微細組織によって大きく変化する。図10は、様々な微細組織について行なった回転曲げ疲労試験の結果である。⁽⁷⁾一般の金属材料と同様、組織が微細なほど、疲労強度は高いが、bi-modalの場合には、比較的大きな初析 α 晶があるにも拘らず、高い疲労強度を示す。図11は、層状組織の材料について、時効条件が疲労強度に及ぼす影響を調べた結果であり、800°Cという比較的高温からの急冷が時効の前処理として重要であることを示したものである。また、集合組織をもつものでは、図12に示すように、圧延方向に応力軸をとった場合に、高い疲労強度が得られる。⁽¹⁰⁾

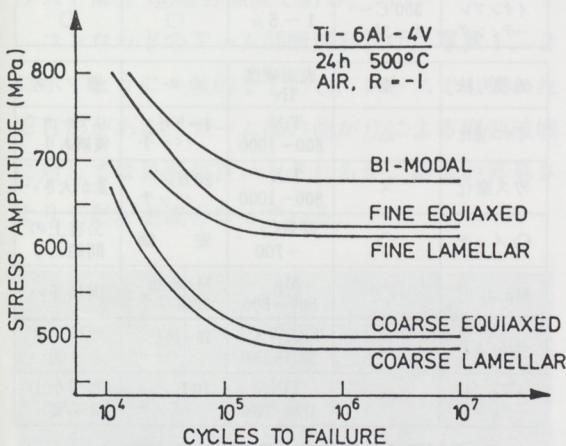


図10 疲労強度に及ぼす微細組織の影響⁽⁸⁾

次に、破壊靶性値に及ぼす微細組織の影響について述べる。破壊靶性値は、鋭い切欠の先端で、不安定破壊が起こる臨界の応力拡大係数で表わされ、この値が大きい程、破壊に対する抵抗力が大きいと考えてよい。図13の結果から、層状晶、等軸晶のいずれについても、組織が粗大なほど破壊靶性値は高いこと、bi-modalについては、初析 α 晶の体積率が大きいほど、破壊靶性値が高いことがわかる。こうした破壊靶性の微細組織依存性は、Ti合金の特有のものであり、鋼などでは、異なる傾向が見られる。⁽¹²⁾⁽¹³⁾

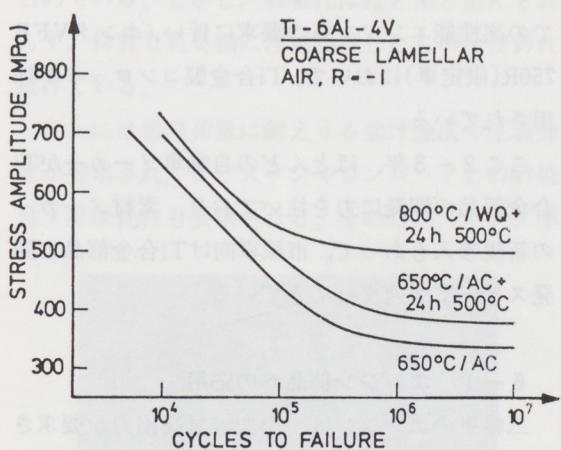


図11 疲労強度に及ぼす時効条件の影響⁽⁹⁾

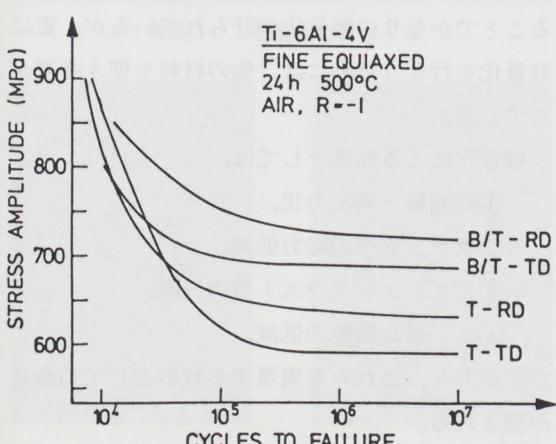


図12 疲労強度に及ぼす集合組織と荷重方向の影響⁽⁸⁾

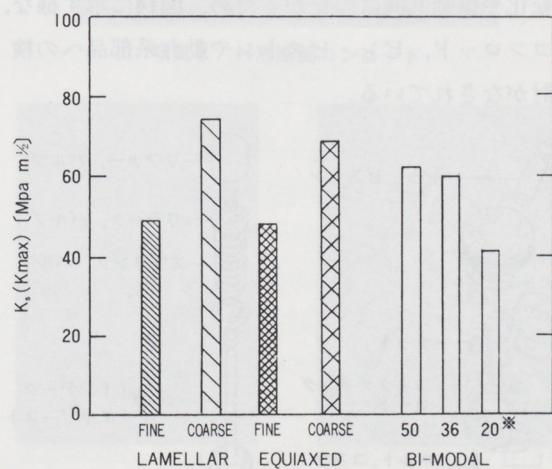


図13 Ti-6Al-4V合金の各微細組織の破壊じん性値 K_s ($K_s < K_{max}$ の場合は K_{max})。※初析 α 晶の体積分率。⁽¹¹⁾

6. 二輪車部品への応用

Ti合金は部品の軽量化による性能アップを生じさせるため、古くからレース用部品に用いられている。国内では1965年頃より、一部のレーシングカーのコンロッドでTi合金が採用され、米国では、1981年頃より実用的な部品（コンロッド、バルブ、スプリング、etc）が製造販売されている。Del West社、Trick Titanium社及びJet Engineering社がその主なメーカーである。

量産車へのTi合金の適用は、部品のコストが大巾にアップするため、従来あまり行なわれなかつた。しかし、最近材料価格の急速な低下や、市場での高性能エンジン車の要求に伴い、ホンダVFR750R（限定車）において、Ti合金製コンロッドが採用されている。

ここ2～3年、ほとんどの自動車メーカーがTi合金部品の開発に力を注いでおり、素材メーカーの新規参入もあって、市販車向けTi合金部品の開発スピードが速まつてきている。

6-1 エンジン部品への応用

二輪車のエンジンは、小型軽量高出力が要求されるため、Ti合金の使用は有効である。とりわけ4サイクルエンジンでは、往復重量の低減が高回転化や振動低減につながるため、図14に示す様な、コンロッド、ピン・ピストンや動弁系部品への検討がなされている。

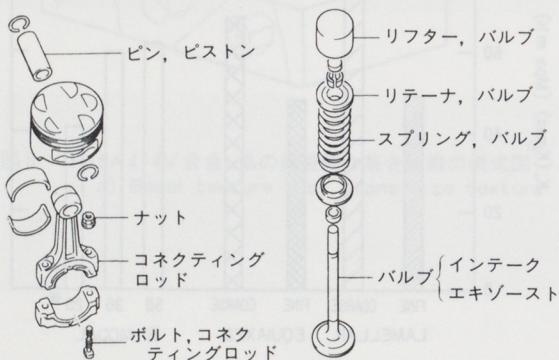


図14 Ti合金の応用部品

一般的なTi-6Al-4V合金でも、引張強度は炭素鋼や合金鋼を上回るため、形状設計は易しいが、比較的焼付き易い材料であるため、表面処理にはかなりの工夫が必要である。表4に各種表面処理の比較を示す。

処理方法	温度	膜厚	密着性	耐摩耗
イオン窒化	350~600°C 3~4 hr	2 μ (+拡散層)	◎	○
ガス窒化	850°C 20hr	3 μ (+拡散層)	◎	○
Crメッキ	低温	5~50 μ	△	摺動○ 衝撃×
Mo溶射	~300°C	50~300 μ	△	摺動○ 衝撃×
低温CVD	300°C~	5~15 μ	○	○
イオンプレーティング	350°C~ 1~3 hr	1~5 μ	○	○

処理方法	歪	表面硬度Hv	コスト	備考
イオン窒化	△	TiN 800~1000	4~5万/バッチ	リテーナで実績あり
ガス窒化	×	TiN 800~1000	20万/バッチ	歪が大きい
Crメッキ	○	硬質Cr ~700	安価	公害上の問題あり
Mo溶射	○	Mo 500~600	Mo高価 分留り小	実績多い
低温CVD	◎	TiC, W, C 2000~2500	20~30万/バッチ	厚膜にすると弱い
イオンプレーティング	◎	TiN 1700~2000	10万/バッチ	潤滑が十分必要

表4 Ti合金への表面処理比較

(I)コンロッド

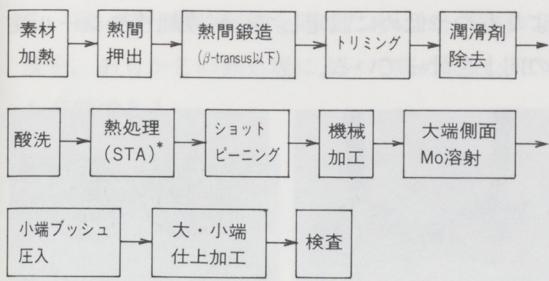
市販車のコンロッドは、炭素鋼を合金鋼に替えることでかなりの軽量化が計られているが、更に軽量化を行なうためには、他の材料を使う必要がでてくる。

軽量化による効果としては、

- ①高回転・高出力化、
- ②クランクへの応力低減、
- ③ピストン・スラスト力の低減、
- ④エンジン振動の低減、

などがあり、これらを実現する材料としてTi合金が望まれる。

一般的な材質はTi-6Al-4V合金であり、図15に製造工程を示す。



*) STA: 溶体化+時効処理
例: 950°C × 1 hr 水冷 → 540°C × 6 hr 空冷

図15 コンロッド製造工程

設計の配慮点としては、①変形（ボルト疲労、メタル損傷、バルブ突上げ等）、②耐摩耗（大端スラスト面）、③疲労強度である。

コンロッドのアーム部断面形状は、写真1、2に示すように一般的なI形と、レースでも使われるH形がある。アーム部の曲がりによる疲労破壊に対してはH形が良いとされるが、鍛造の容易さよりI形が主流となっている。

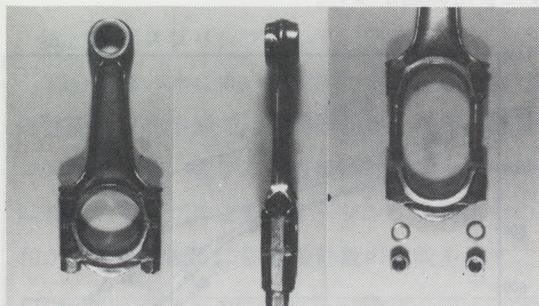


写真1 I形断面コンロッド

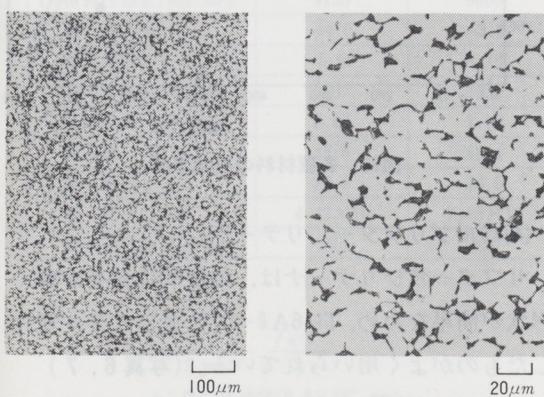


写真3 ルノー製コンロッド微細組織

微細組織と疲労強度とは密接な関係にあるが、組織を制御することは、鍛造性・コスト及び実用化レベルにより各社いろいろである。写真3、4にルノー製及びケン・マツウラレーシング製コンロッドの微細組織を示す。材質はどちらもTi-6Al-4V合金だが、ルノー製は $\alpha + \beta$ 域鍛造(995°C以下)であり、強度や靭性が重視されている。ケン・マツウラ製は β 域鍛造(995°C以上)であり、変形抵抗が小さいため、製造上有利である。

(2) ピン・ピストン

ピストン、ピン・ピストン及びコンロッド往復部を合わせた総往復重量のうち、ピンは約20%を占めている。しかし、軽量化はほとんど進んでおらず、材質も肌焼鋼に浸炭処理したものが使われ続けている。

ピンには爆発荷重に耐えうる曲げ強度や圧壊強度が要求され、又ピストンやコンロッドとの耐焼付・耐摩耗性も要求される。そのため、ヤング率

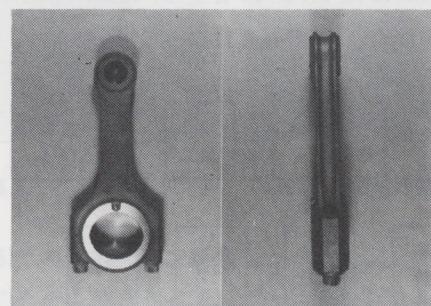


写真2 H形断面コンロッド

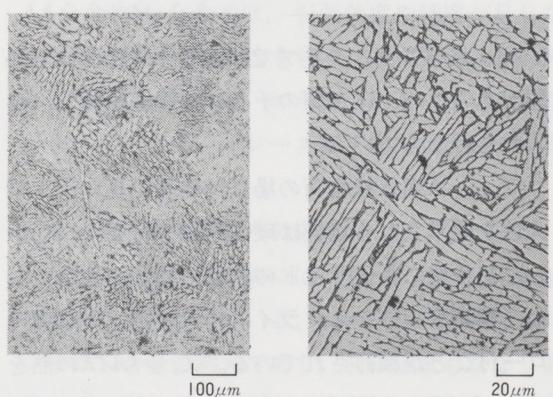


写真4 ケン・マツウラ製コンロッド微細組織

が鋼の約 $\frac{1}{2}$ であるTi合金では、肉厚や断面形状を工夫しなければならない(図16)。耐焼付性向上のため、ピンの表面は窒化により硬化させ、コンロッド小端には、銅ブッシュを圧入している。

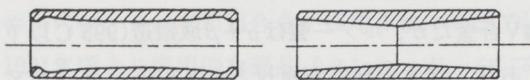


図16 ピン・ピストン

(3)バルブ

ホンダのレーシングキットパーツにある様に、インテークバルブにはTi合金がよく用いられるが、エキゾーストは使用条件が厳しいためあまり使われていない。

設計の配慮点としては、①軸部のかじり・焼付き、②軸端面の耐摩耗性、③フェース面の耐摩耗性、④高温強度、⑤熱伝導性などである。

製造工程を図17に示したが、インテークの材質は一般的にTi-6Al-4V合金で、軸部には耐摩耗性向上のため、Mo溶射を行なっている。

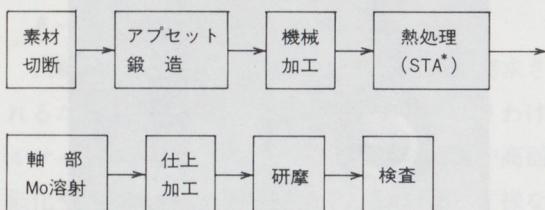


図17 バルブの製造工程

ロッカーアームタイプでは軸端を硬化させる必要があるため、SCM鋼のチップを摩擦圧接し、焼入れを行なっている。

フェース面は軽負荷の場合無処理で良いが、耐久性を要求される場合は硬化処理を行なう。しかし、Ti合金にステライトの内盛溶接ができないため、写真5の様なステライトの溶射や、耐摩環のローラーなどが検討されている。又、バルブの熱をフェース面より逃がしやすくするため、バルブシートにCu系を用い、硬度をバルブ(HRC33~)

よりもやや低めに設定して、耐摩耗性やシール性の向上を計っている。

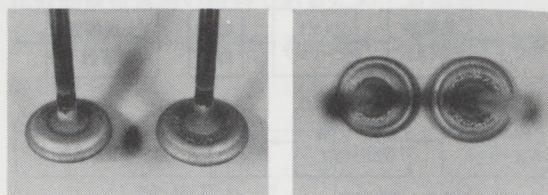


写真5 ステライト粉末をプラズマ溶射したTi合金バルブ(溶射後)

エキゾーストバルブは、高温強度の高いTi合金(Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo・Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo)を用いており、軸やフェース面には表面処理が必要である。図18に各種材料の高温強度を示したが、600°C以上ではTi合金の強度が急に下がるため、バルブにかかる熱をいかに多くシート・ガイドへ逃がすかが実用化へのポイントとなる。

米国のDel West社は、バルブの製造販売を行なっているが、耐久性を要する市販車への採用にはまだまだ課題が多い。

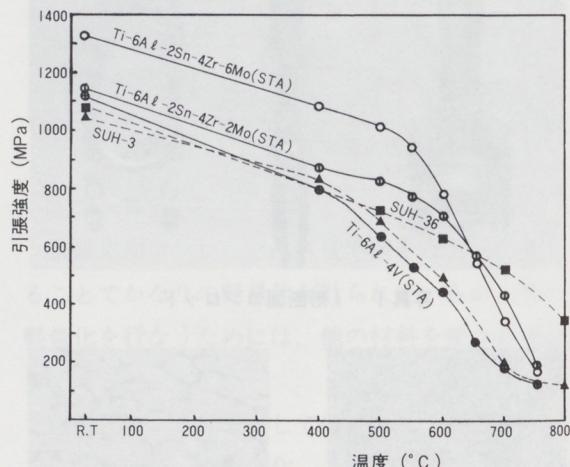


図18 各種材料の高温強度

(4)バルブリフター、リテーナ

リフター及びリテーナは、強度的に負荷が軽く形状が簡単なため、Ti-6Al-4V合金にイオン窒化したもののがよく用いられている。(写真6, 7)

製造工程を図19に示したが、厳しい摩擦条件下で使用されるため、表面処理には十分注意を要す

る。硬い窒化層の剥離を防ぐためには、母材の硬度を、あらかじめ熱処理によって高めておくことも有効である。

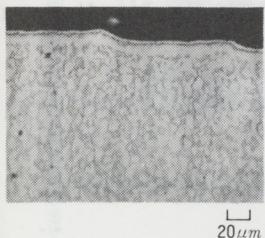


写真6 リテーナ表面イオン窒化

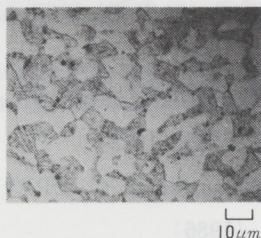


写真7 内部微細組織(STA処理)

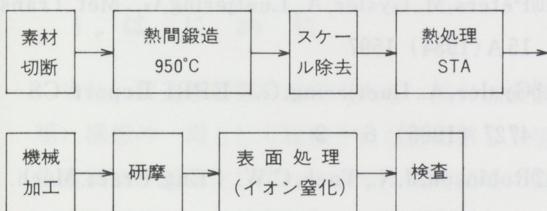


図19 バルブリフター及びリテーナの製造工程

(5)バルブスプリング

Ti合金はバネに向いた材料である。鋼に対し横弾性係数が約半分で、強度が同等なため、軽量化、コンパクト化、並びに固有振動数のアップや対数減衰率のアップによる、サージング負荷応力の緩和ができる。表5に固有振動数の比較を示す。¹⁵⁾

材料	Ti-6Al-4V(STA)	SWOSC-V
引張強さ(kgf/mm ²)	120	180~200
G:横弾性係数(kgf/mm ²)	4150	8000
d:線径(mm)	φ4.0	φ3.0
n:有効巻数	5.0	5.75
D:コイル中心径(mm)	φ21	φ21
K:ばね定数(kg/mm ²)	2.87	1.52
自由長(mm)	43.6	45.4
重量(g)	23.2	28.9
:密度(kg/mm ³)	4.42×10 ⁻⁶	7.85×10 ⁻⁶
f:固有振動数(CPS)	995	580

$$K = \frac{Gd^4}{8nD^3}$$

$$f = \frac{d}{2\pi n D^2} \sqrt{\frac{gG}{2\gamma}}$$

g:重力加速度(9.8×10³ mm/sec²)

表5 弁バネの設計例

設計の配慮点としては、①疲労強度（特に介在物や加工上の傷による低下）、②加工性、③寸法（線径・巻数等）が挙げられる（図20）。

材質は、(α+β)型合金(Ti-6Al-4V)の他に、引張強度が高く冷間加工性に優れたβ型合金(Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn等)がある。（写真8、9）

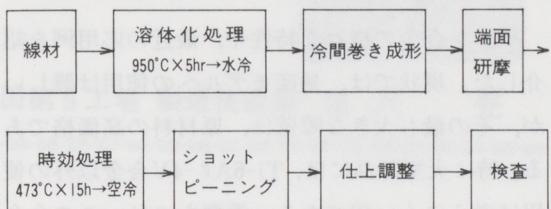


図20 スプリングの製造工程

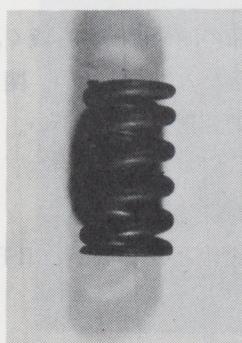


写真8 バルブスプリング



写真9 β合金の微細組織

(6)その他エンジン部品

Ti合金を使う利点としては軽量化が主となる為、効果の少ない部品に高価な材料を使う必要は無い。Al合金やMg合金では、引張強度や硬度が足りない部品についてTi合金を使うべきである。その例としては、ボルト類、エキゾーストパイプ、クラッチプレートなどがレースにて実用化されている。

6-2 車体部品への応用

車体を軽量化する為には、Ti合金よりもAl合金の方が多く使われている。しかし、Al合金のヤング率はTi合金の約%であり、引張強度もかなり低いため、形状の制約がある場合にはTi合金が有利である。

応用例としては、ボルト・ナット類、プラケット類、サスペンションスプリング、ホイールハブ、燃料タンクなどがあり、材質はTi-6Al-4Vあるいは純Tiが用いられている。

7. おわりに

チタン合金の様々な特性や、最近の応用例を紹介した。現状では、量産モデルへの使用は難しいが、その最も大きな障壁は、原材料の高価格である。特に大型部品には、Ti-6Al-4V合金以外の使用は考えにくい程である。重要なのは、この合金の性能を充分引き出せるような工程設計であろう（表6）。

当社におけるチタン製部品の開発は、日も浅く、必ずしも体系的になされてきたとは言えない。関心を持たれた方には、是否、御意見を賜わりたい。

【参考文献】

- (1)草道英武 他編「金属チタンとその応用」、日刊工業新聞社（1982）2
- (2)神戸製鋼所 カタログデータ
- (3)Peters,M. : Metall Heft 6, 37 (1983) 584
- (4)日本ステンレス カタログデータ
- (5)Peters,M. : Ph.D.Thesis, Ruhr Univ. Bochum (1980)
- (6)Adachi,S. : Ph.D.Thesis, TU Hamburg-Harburg, (1987)
- (7)Peters,M., Luetjering,G. : EPRI Report CS-2933(1983)
- (8)Luetjering, G. : EPRI Report, CS-4727 (1986)
- (9)Daeubler,M. : Ph.D. Thesis, Ruhr Univ. Bochum (1980)
- (10)Peters,M., Gysler,A., Luetjering,G. : Met. Trans. 15A (1984) 1597
- (11)Gysler,A., Luetjering,G. : EPRI Report CS-4727 (1986) 6-3
- (12)Robinson,J.N., Tuck,C.W. : Eng. Fract. Mech. 4 (1972) 377
- (13)Gysler,A., Bachmann,V., Luetjering,G. : Proc. 3 th ECF, Leoben (1982) 155
- (14)住友金属工業 カタログデータ
- (15)中央発条 カタログデータ
- (16)萩原、高橋：チタニウム・ジルコニウム 35, 2 (1987), 69

コスト目標		コントローラ	バルブ	リテナー
トータルコスト				
・現状でのチタン/鉄部品のコスト比	6~10	7~10	7~9	
・適用可能なコスト比	1.2~2	1.5~2	2~3	
区別別コスト目標（鉄に対する）				
・材料費（単価×仕込み）	*8倍以下	3倍以下	5倍以下	
・熱間鍛造費：2倍以下	Must	Want	←	
・機械加工費：1.4倍以下	*Must	*←	*←	
・表面処理費：現行処理の2倍以内	*Must	*Must	窒化OK	
課題				
材 料	◎低コスト材料：2000円/kg以下 ・快削チタン材：切削速度鉄の2/3以内	Must Must	Want Want	← ←
製造法	◎材料歩留まりの向上目標（現状）% 検討すべき製造技術（及び設計）	60(40) 精密鍛造	90(60) ←	80(65) 冷鍛
熱間鍛造	・材料歩留まり向上（目標）% ・工数の短縮：鉄の2倍以内	70(62) Must	90 ←	90 —
機械加工	◎チタン用長寿命工具の開発 ・加工スピードアップ：鉄の2/3以内	Must	←	←
表面処理	◎安価な耐摩耗処理	Must	←	Want

*、◎：重要ポイント

表6 コスト目標と課題

(16)