

© 1987 ISIJ

高強度チタン合金 (Ti-17) 型打鍛造品の
機械的性質

論 文

松 本 年 男*・西 村 孝*

The Evaluation of the Mechanical Properties of a High-strength Ti-17
Alloy Die-forging

Toshio MATSUMOTO and Takashi NISHIMURA

Synopsis :

The objective of this study is to manufacture a near actual-size die-forged Ti-17 (Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo) disk in consideration of its jet engine applications, and to evaluate its mechanical properties, comparing with those of other high strength titanium alloys.

The major results obtained are as follows :

(1) High tensile strengths, ranging 122 to 126 kgf/mm², were attained, and elongations were over 8 per cent at widely sampled locations.

(2) Fracture toughness values were 160 and 210 kgf/mm²·√mm for radial and tangential cracking directions, respectively, which were proved excellent in comparison with those of other high strength titanium alloys.

(3) High cycle fatigue strengths and fatigue crack growth rate, especially at high stress intensity range, had a great advantage over such a high strength alloy as Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. Strain controlled low cycle fatigue properties were equivalent to other widely available titanium alloys.

(4) Creep strengths studied at relatively lower temperatures than 500°C were equivalent or superior to Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo with high temperature applications.

Key words : titanium alloy ; Ti-17 ; Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo ; Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo ; fracture toughness ; fatigue ; fatigue crack growth rate ; creep.

1. 緒 言

Ti-17 (Ti-5 Al-2Sn-2 Zr-4 Cr-4 Mo) は、高強度、高靱性材として米国で開発された Near β 合金であり、最新型ジェットエンジンのファンおよびコンプレッサーディスクとして使用されており、評価が高く¹⁾、今後多用されるチタン合金であると考えられる。しかし、この合金についての研究例は少ないので、今回、航空機ジェットエンジン用ディスク製造を考えた型打鍛造を実施し、諸機械的性質を調査した。そして、本材の諸機械的性質を他のチタン合金のそれと比較し、評価した。

2. 実 験 方 法

真空アーク 2 重溶解にて、直径 480 mm, 1 t の鋳塊を溶製した。 β 変態点は 865°C $\pm$ 5 であった²⁾。 β 域 920°C で分塊鍛造、 $\alpha + \beta$ 域 820°C で 25% の加工率を与え、910°C, 1 h, 水冷の β 処理を施し、820°C で 50%

鍛伸し、ピレットを製造した。820°C 加熱で外径 470 mm のディスクを型打鍛造し、837°C, 4 h, WQ, ついで 810°C, 4 h, WQ の 2 重溶体化後、610°C, 8 h の時効処理を行つた。鍛造、熱処理条件については、前報²⁾を参考にして、強度と延性、靱性と疲労の各性質の兼ね合いを考慮して決めた。鍛造、熱処理したディスクの全景写真を Photo. 1 に示す。熱処理後、マクロ、ミクロ組織観察、および各種の機械的性質評価試験を行つた。室温、高温引張試験片は、ともに平行部直径 6.25 mm の JIS 3 号試験片であり、後者はつば付きである。破壊靱性試験片および疲労き裂進展試験片は、それぞれ 25.4 mm, 12.7 mm 厚さの CT 試験片を ASTM E 399 および E 647 に従つて製作、試験した。平滑材の高サイクル疲労 (以下 HCF) 試験片は平行部 25 mm, 直径 6.25 mm の試験片を切り出し、鏡面バフ仕上げした。これら疲労試験片は、室温、応力比 $R=0.1$, 正弦波、定荷重であり、繰返し速度は前者が 20 Hz, 後者が 25 Hz である。低サ

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 12 月 22 日受付 (Received Dec. 22, 1986)

* (株)神戸製鋼所チタン本部 工博 (Titanium Metals Division, Kobe Steel, Ltd., 2-3-1 Shinhamma Arai-cho Takasago 676)

イクル疲労 (以下 LCF) 試験は, 上記平滑疲労試験片と同一の平行部, 直径を有するものを同様にバフ仕上げした試験片を使用し, 繰返し速度 10 cpm で大気中での歪み制御試験を室温および 427°C で実施した. クリープ試験は, 直径 6.25 mm, つば間距離 30 mm のつば付試験片を用い, 大気中で 200°C から 500°C までの 100°C 間隔の各温度で最長 150 h 荷重をかけ, 0.1% クリープ歪みを生ずる温度-応力-時間の関係を求めた.

3. 実験結果と考察

3.1 化学成分

Table 1 に示すように, 化学成分は規格³⁾を十分満足しており, 主要元素は規格の中央値であり, 不純物元素

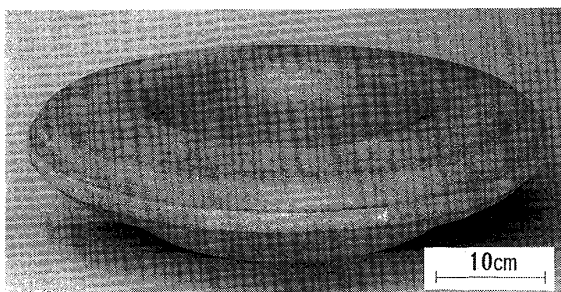


Photo. 1. Die-forged disk made from Ti-17.

は十分低かった²⁾. 鍛造, 熱処理後の水素値は低く, 0.0010 重量%であつた.

3.2 マクロおよびミクロ組織

ディスクの中心を通つて半径方向に切断した全断面のマクロ組織を観察したが, 微細, 均一であつた. ミクロ組織をディスクの広範囲の位置で 1000 倍の光学顕微鏡で観察したが, Photo. 2 に示すように, ディスク肉厚中央部では若干伸長しているものの, 全体的には微細な等軸初析 α 粒を形成している. 本ディスクは, $\alpha+\beta$ 域で 50% の仕上加工率でビレットを作り, 型打鍛造したものであつて比較的少ない $\alpha+\beta$ 域加工で製造したものであるが, 初析 α 粒が微細, 等軸であることから, 本材の特徴として初析 α 粒が等軸化しやすいことが挙げられる. 本材の初析 α 粒が微細であることは, 後出の Photo. 3 中の Ti-6 Al-4 V (以下 Ti-6-4) 等の $\alpha+\beta$ 合金のミクロ組織写真と比較すれば理解される.

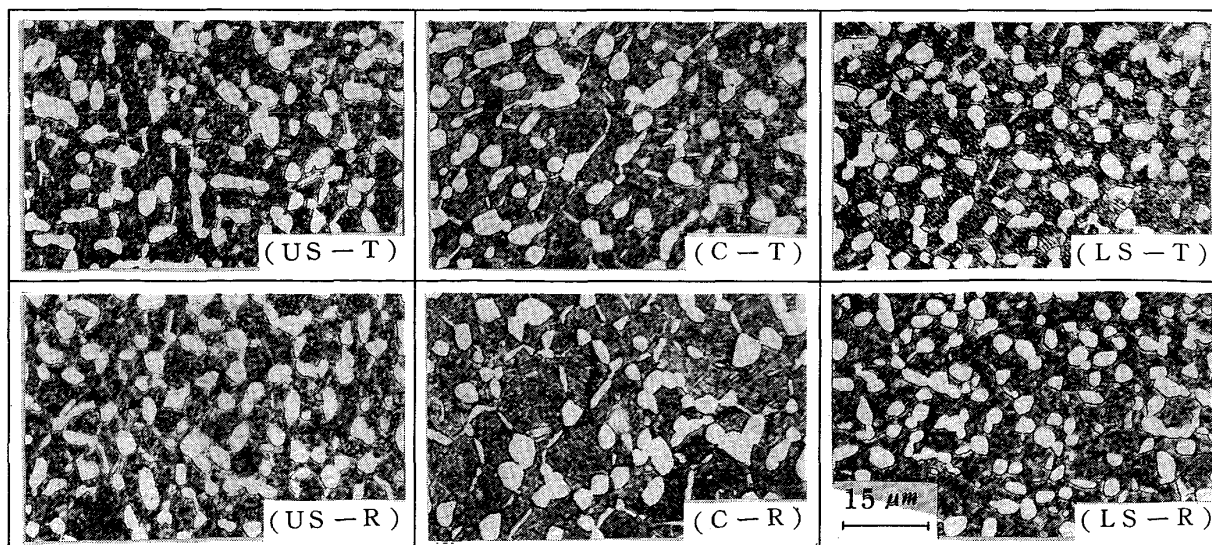
3.3 引張性質

ディスクの広範な位置での半径および円周方向での室温と 427°C における引張性質を Table 2 に示す. 室温での耐力は 116~119 kgf/mm², 引張強さは 122~126 kgf/mm² と高強度であり, 伸びは 8% 以上と高い. この強度は, 別途直径 25 mm 丸棒について同一熱処理したものと同等であり²⁾, またディスク表面層と肉厚中央

Table 1. Chemical compositions of Ti-17 tested.

(wt%)

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	Y	Cu	Mn	O	C	N	H
4.98	1.98	1.96	3.96	4.00	0.059	<0.0010	<0.005	<0.005	0.081	<0.005	0.0036	0.0010



Location code : US=Upper Surface C=Center LS=Lower Surface

Plane code : T=Perpendicular to tangential direction R=Perpendicular to radial direction

Photo. 2. Microstructures of Ti-17 disk die-forged.

Table 2. Tensile properties of Ti-17 disk die-forged.

Orientation & Location	0.2% YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EL (%)	RA (%)
Room temperature				
T-US	119	126	11	21
T-C	116	123	12	23
T-LS	119	126	12	25
R-US	116	122	12	24
R-C	116	123	8	14
R-LS	118	124	8	21
427°C				
T-C	86	101	15	44
R-C	86	100	14	44

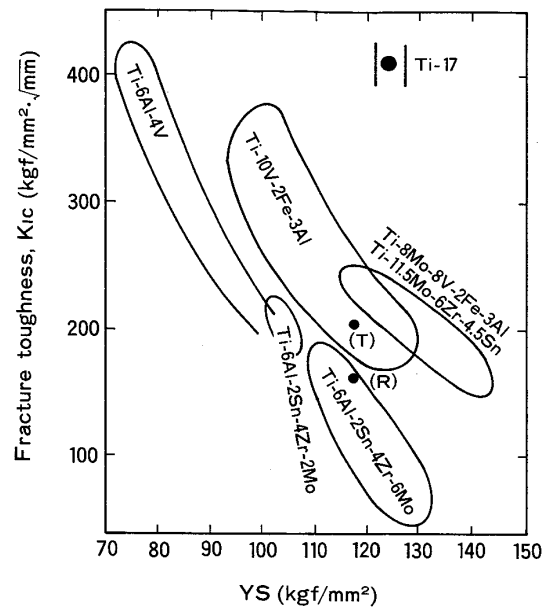
Location code : US=Upper Surface C=Center LS=Lower Surface
Direction code : T=Tangential R=Radial

部での強度差も 3～4 kgf/mm² と小さく、本材は焼入性が非常に優れていることが実証された。既報²⁾で、高強度、高靱性であるべき本材の特性を発揮するために、できるだけ高温で溶体化して強度、靱性を確保しておき、時効温度で延性を調整するという考え方と具体的熱処理条件を提案していたが、今回、予期どおりの強度、延性が得られた。なお、本合金についての規格³⁾では、引張強さ 114.6～128.6 kgf/mm²、耐力 107.6 kgf/mm² 以上、伸び 5% 以上、絞り 10% 以上となっており、ここで得られた引張性質は規格を十分に満足している。

3.4 破壊靱性

Fig. 1 に示すように、破壊靱性値も高く、き裂進行方向が半径および接線方向で、160 および 210 kgf/mm²・√mm であった。き裂は、ディスクの肉厚中央部を通るように試験片を採取した。破壊靱性値は、 $\alpha+\beta$ 域での仕上げ加工率が少ないほど高くなる傾向があることが知られている²⁾。今回、既述のような仕上加工率でビレット鍛造し、型打鍛造したのは、破壊靱性値が優れている β 合金 Ti-10V-2Fe-3Al (以下 Ti-10-2-3) についての規格値⁴⁾下限 141.6 kgf/mm²・√mm を満足するように前報²⁾のデータを参考にして決めたものである。熱処理については、破壊靱性値が上がることを確かめた前報²⁾の結果に基づいて溶体化処理として 2 重溶体化法を採用した。なお、Ti-17 材の破壊靱性については公的規格はない。

ここで得られた Ti-17 ディスクの破壊靱性値を他チタン合金についてのデータと比較して Fig. 1 に示したが、 β 合金 Ti-10-2-3 と β 合金に近い $\alpha+\beta$ 合金 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (以下 Ti-6-2-4-6) の中間の値を示している。Near β 合金としては、強度、延性は、これらの特性の優れた β 合金にできるだけ近づける工程設計が必要であると推定する。強度、延性については既述の



Code : T=Cracking to radial direction
R=Cracking to tangential direction

Fig. 1. Fracture toughness values of Ti-17 disk die-forged, comparing with those of other titanium alloys.

ように目標どおりの結果を得た。破壊靱性値を上げるために採った方策としては、要求される延性を確保するのに必要な程度にかなり少ない仕上加工率を採用したこと、熱処理条件としては高温で溶体化し、かつ 2 重溶体化法を採用しているため、ここで得られた破壊靱性値は本合金で達成できる相当高い値であると考えられる。

3.5 疲労性質

室温での平滑材についての HCF 試験結果を Fig. 2 の曲線①に示す。試験片は、表層部 10 mm 以上を除いた内部でディスクの円周方向に採取した。Fig. 2 中、②、③は同じく Ti-17 材であり、本ディスク製造と同じ仕上温度でそれぞれ加工率 50% および 70% 鍛造した 100 mm 角材について、ともに溶体化 810°C、4 h、WQ 後、593°C、8 h 時効したものである。②、③に比べて本ディスクの S-N 曲線は低寿命側では優れているが、高寿命側では疲労強度が低下した。本ディスクの疲労限が低下した理由として、初析 α 粒径の違いに着目したい。前報²⁾の結果によると、仕上加工率 50% および 70% の 100 mm 角材について本ディスクの場合と同一条件で溶体化処理したものの初析 α 粒の大きさは、本ディスクのそれより小さく、約 1/2 である。鍛造、熱処理条件がかなりの範囲で異なっても、 α 粒径が小さいほど高サイクル疲労限が優れるという LUCAS⁵⁾ の Ti-6-4 についての精力的な研究結果が本材の場合についても成立するとすれ

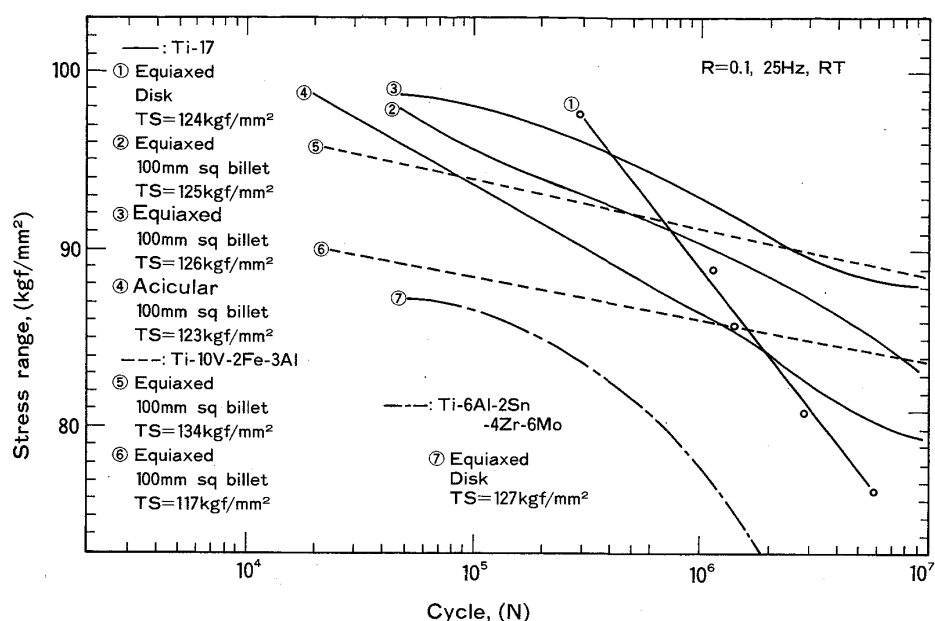


Fig. 2. HCF data at room temperature on Ti-17 disk die-forged, comparing with those on other competing materials and differently processed Ti-17.

Table 3. Tensile properties and heat treatments of titanium alloys other than Ti-17, used in LCF and creep tests.

Ti-alloys	0.2%YS (kgf/mm ²)	TS (kgf/mm ²)	EL (%)	RA (%)	Heat treatment
Ti-10V-2Fe-3Al	120	130	4	8	740°C, 2h, WQ+482°C, 8h, AC
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	115	127	16	28	930°C, 1h, WQ+830°C, 2h, WQ+593°C, 6h, AC
Ti-6Al-4V	90	97	20	48	955°C, 1h, AC+538°C, 8h, AC
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	101	108	18	45	970°C, 1h, AC+593°C, 8h, AC

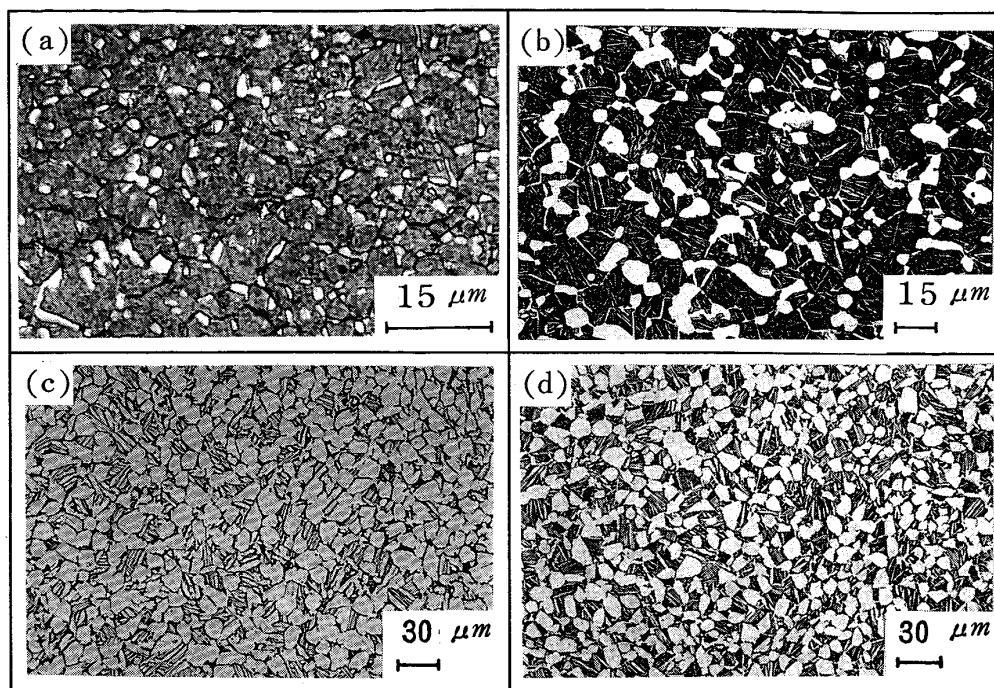
ば、本ディスクの場合に疲労限が低下した理由が定性的には理解される。なお、時効温度については、上記角材では 593°C、本ディスクでは 610°C と差はあるが、これが α 粒径の大きさにおよぼす影響は少ないものと考えられる。本ディスクと上記 100 mm 角材で初析 α 粒の大きさに差が認められたのは、鍛造温度、溶体化処理温度と時間および冷却方法が同じであっても、材料の寸法の違いを通してマイクロ組織の差として表れたものと考えられる。なお、Fig. 2 の定荷重疲労試験結果において、低寿命側では本ディスク材の方が 100 mm 角材より疲労強度が優れているが、低寿命域では α 粒径以外の因子が大きく作用しているものと考えられる。しかし、後記するように歪み制御 LCF 試験では、かなり広い範囲の合金系について全歪み範囲対破断繰返し数図上の狭い帯の中に実験値がプロットできることから、本ディスクと 100 mm 角材についてもこのグラフ上の狭い帯の上に載る可能性は高い。

なお、以下さらに比較材として示すが、Fig. 2 中の④は Ti-17, 100 mm 角材の針状組織、⑤および⑥は

Ti-10-2-3, 100 mm 角材の等軸 α 組織、⑦は Ti-6-2-4-6 であり、本 Ti-17 ディスクとほぼ同一工程で製造されたほぼ同一寸法ディスクであつて等軸 α 組織材についてである。この Ti-6-2-4-6 の熱処理条件と引張性質およびマイクロ組織を Table 3 および Photo. 3 に示す。厳密に比較するためにはさらに詳細な実験を要するが、高強度チタン合金として競合する Ti-17 と Ti-6-2-4-6 を実製品レベルで比較すれば、室温 HCF 強度では前者が優るといえる。

本 Ti-17 ディスクの疲労き裂成長速度曲線を Fig. 3 中の①に示す。試験片は本ディスクの肉厚中央部から切り出したものであり、き裂はディスクの半径方向に成長するように採取した。

Fig. 3 に、本ディスク Ti-17 の他に、Fig. 2 の⑤と同一材である $\alpha+\beta$ 域で 70% 加工後熱処理した等軸 α 組織の Ti-10-2-3 について②に、 $\alpha+\beta$ 域で 70% 圧縮加工後 β 変態点の上および下で熱処理した針状および等軸 α 組織の厚さ 50 mm の Ti-6-2-4-6 パンケーキについて③および④²⁾に、さらに等軸 α および針状 α 組織に



(a) Ti-10V-2Fe-3Al (b) Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo
(c) Ti-6Al-4V (d) Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo

Photo. 3. Microstructures of materials in Table 2.

ついて従来の多くのデータを整理した Ti-6-4 についての結果⁶⁾を同一グラフ上にプロットした。一般に疲労き裂進展速度は針状組織の方が遅く、好ましいことが知られており、この傾向は Ti-6-4 についての Fig. 3 のデータにも表れている。この特性は、等軸 α 組織の方が平滑材の HCF では優れているという一般的知見とは相反する性質であつて、現在、これら疲労性質の双方をとともに向上させる製造法は無い。等軸 α 組織である本ディスク Ti-17 についての Fig. 3 中の曲線①は、応力拡大係数範囲が約 $50 \text{ kgf/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ 以下の低疲労き裂進展速度域では、他の高強度チタン合金 Ti-10-2-3, Ti-6-2-4-6 と比較してより優れた特性を示さないが、高応力拡大係数範囲では本 Ti-17 は等軸 α 組織であつても Ti-6-2-4-6 の針状組織と同等であつて優れた特性を示している。高応力拡大係数範囲まで疲労により部材が急速破断しにくいことは、測定可能な裂長さから破断までの疲労き裂進展特性を考慮する損傷許容設計にとって有利な材料であるといえる。

次に、本 Ti-17 ディスクの LCF 特性とクリープ特性の比較、評価試験を行つた。比較材として、高強度 β 合金 Ti-10-2-3, β に近い高強度 $\alpha + \beta$ 合金 Ti-6-2-4-6, 最も多く用いられている比較的高強度の $\alpha + \beta$ 合金 Ti-6-4, および α に近い高温強度特性に優れた $\alpha + \beta$ 合

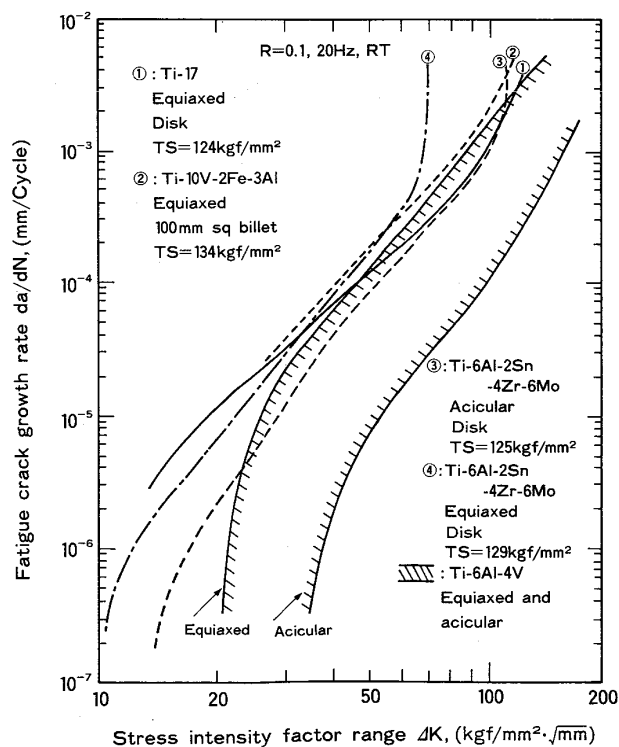


Fig. 3. FCG characteristics at room temperature of Ti-17 disk die-forged, comparing with those of other titanium alloys.

金 Ti-6 Al-2 Sn-4 Zr-2 Mo (以下 Ti-6-2-4-2) を選定した。Ti-10-2-3 は Fig. 2 の⑤や Fig. 3 の②と同材, Ti-6-2-4-6 は Fig. 2 の⑦と同材であり, Ti-6-4 と Ti-6-2-4-2 は $\alpha+\beta$ 域で仕上圧延されたものに直径 50 mm の丸棒である。熱処理条件と室温引張特性を Table 3 に, ミクロ組織を Photo. 3 に示す。組織はともに等軸 α 組織であり, 引張性質はこれら合金の典型的な値を示している。引張試験, LCF, およびクリープ試験片採取方向はディスクではその半径方向, 丸棒では圧延方向であり, ミクロ組織観察はこれら機械的性質試験片に直角な面である。

室温および 427°C での歪み制御 LCF 試験結果を全歪み範囲と破断繰返し数との関係でそれぞれ Fig. 4 および 5 に示す。全歪み範囲対破断繰返し数表示すると, 実験した 4 種類の合金ともプロット点は狭い帯の中に入り, 本 Ti-17 もこの範ちゅうに入ることが明らかになった。なお, 1 種類の $\alpha+\beta$ 合金についてであるが, 熱間加工, 熱処理条件を変えて, ともに典型的な等軸組織材, 針状組織材各 2 種類について高温で LCF 試験した結果が報告⁷⁾されている。この結果によると, 全歪み範囲対破断繰返し数図において, 等軸材と針状材とはそれぞれ 1 本の別の線上に載り, 等軸材の方が高寿命側に位置するという結果が示されている。しかし, すべて等軸

組織材ではあるが, 本実験のように広い合金系について上記の実験結果が成り立つことを確かめた例は見当たらないようである。本実験では典型的な等軸組織について実験したのであるが, 初析 α 粒の等軸化が不十分な場合, あるいは α 粒が針状マトリックス中に占める割合が少なくなつた場合等について LCF 試験すれば, 全歪み範囲対破断繰返し数図上で典型的な等軸組織材のデータ線上から典型的な針状組織材のそれに移行するデータ点が現れる可能性があると考えるが, これについては将来実験し, 組織と LCF 特性の関係を十分把握する必要があると考える。

Fig. 6 に, 歪みの繰返し数に対する全応力範囲の変化の一例として, 室温で歪み範囲 0 ~ 2 % の場合を示すが, 全応力範囲値は Ti-17, Ti-6-2-4-6 が最も高く, 最も低いのは Ti-6-4 であり, Ti-6-2-4-2 はそれらの中間に位置した。他の歪み範囲, 高温 427°C でもこの傾向は変わらない。引張強度が高いほど全応力範囲が高い傾向を示しているので, LCF 領域を応力で評価すれば高強度材の方が有利であるといえる。

クリープ試験を 0.1% クリープ歪みが得られる条件で応力対 Larson-Miller 変数表示した結果を Fig. 7 に示す。図中に示す 5 種類のチタン合金の中では, 実験した 200°C から 500°C の範囲内で Ti-17 と Ti-6-2-4-6

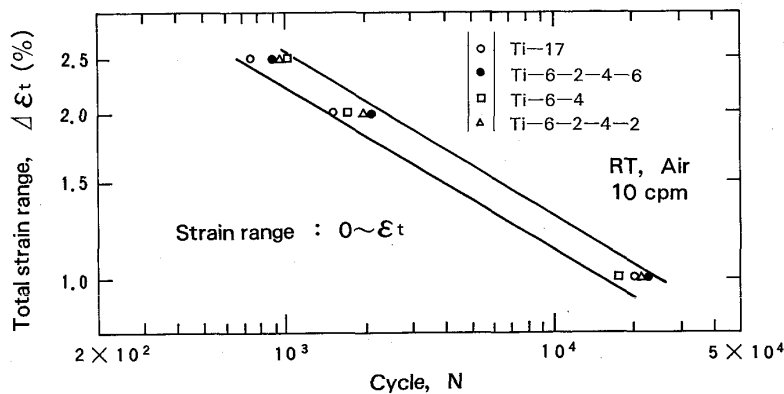


Fig. 4. LCF data at room temperature on Ti-17 disk die-forged, comparing with those of other titanium alloys tested.

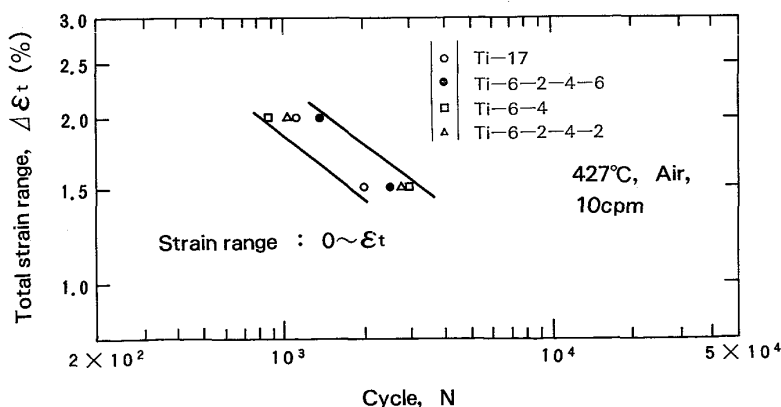


Fig. 5. LCF data at 427°C on Ti-17 disk die-forged, comparing with those of other titanium alloys tested.

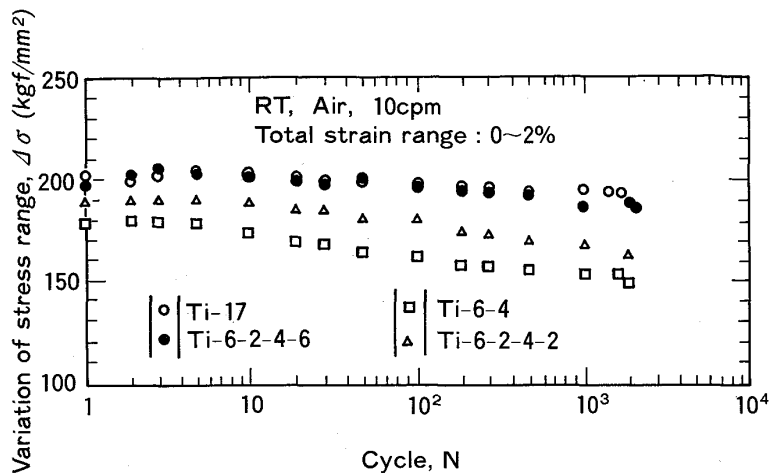


Fig. 6. Stress amplitude response in LCF at room temperature for Ti-17 disk die-forged, comparing with those of other titanium alloys tested.

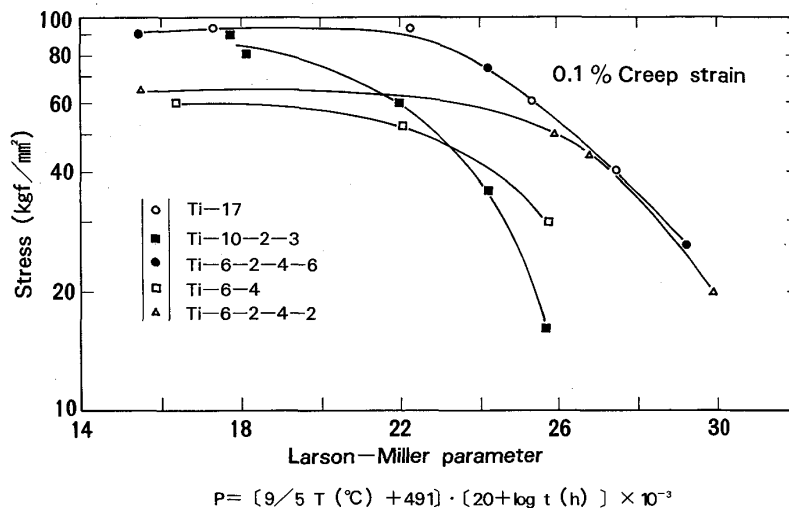


Fig. 7. Comparison of creep characteristics of Ti-17 disk die-forged with those of other titanium alloys tested.

が最も耐クリープ性が優れている。Ti-6-2-4-2の耐クリープ性は高温では上記二つの合金と同等になる。 α 型に近いTi-6-2-4-2は高温でのクリープ特性が優れた合金であるといわれている⁷⁾ので、さらに高温で試験すれば上記Ti-17等より耐クリープ性が高くなるものと考ええるが、ここで実験した比較的低温では、同じLarson-Miller値に対してTi-17、Ti-6-2-4-6の方が高い応力レベルに耐え得ることに注目したい。 β 合金Ti-10-2-3は実験した温度範囲でも高温では急激に耐クリープ性が低下し、Ti-6-4はこれより若干良好である。以上のクリープ試験により、 β 型に近いのでクリープ特性が劣るのではないかと懸念されたNear β 合金Ti-17が、500°C以下という比較的低い温度では、クリープ強度の優れた合金といわれている α 型に近いTi-6-2-4-2と同等以上の耐クリープ性を有することが明らかになった。使用温度条件を考慮すれば、クリープ性質を考えると、Ti-17は高い設計応力を採れるので有利になる場合があることが実証できた。

Near β 合金Ti-17が500°C以下という比較的低温でクリープ特性が優れていた根拠として、Ti-17やTi-6-2-4-6に見られるマトリックス中の微細変態 β 組織が大きく影響していたためと考える。500°C以下では、マトリックスの変態 β 組織中の薄い α 板が3次元的にからみあっているため、この針状 α 粒界のすべりが抑制されるためクリープ特性が優れると考えられている⁷⁾が、これらNear β 合金でこのような組織が実現されたためにクリープ特性が優れたものと考ええる。 β 合金Ti-10-2-3では、 β 相がより安定になり、マトリックス中にすべりを抑制する微細 α 板からなる変態 β 組織が形成されにくくなるためクリープ特性が劣ったものと考ええる。

4. 結 論

Ti-17の大型ディスク鍛造品を試作し、諸機械的性質を調査した結果、次のことが明らかになった。

1) 引張強さ 122~126 kgf/mm²、伸び 8%以上という

高強度，高延性が達成できた。

2)破壊靱性値も高く，き裂進行方向がディスク半径方向および接線方向でそれぞれ 160 および $210 \text{ kgf/mm}^2 \cdot \sqrt{\text{mm}}$ であった。

3)平滑材高サイクル疲労限は，小型鍛造材の場合より若干低下したが，比較した他の競合高強度合金 Ti-6-2-4-6 より優れていた。

4)疲労き裂進展特性は，低応力拡大係数領域では他の高強度チタン合金に比べて特に優位性はないが，高応力拡大係数領域では優れていた。

5)500°C 以下の比較的低い温度での耐クリープ性はクリープ特性の優れた合金といわれる Ti-6-2-4-2 と同等

かそれ以上であった。

文 献

- 1) T. K. REDDON: Beta Titanium Alloys in the 1980's, ed. by R. R. BOYER and H. W. ROSENBERG (1984), p. 239 [Metall. Soc. AIME]
- 2) 松本年男，西村 孝: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 138
- 3) AMS 4995 (1977)
- 4) AMS 4983 (1984)
- 5) J. J. LUCAS: Titanium Science and Technology, ed. by R. I. JAFFEE and H. M. BURTE (1973), p. 2081
- 6) S. FUJISHIRO and T. MATSUMOTO: AIME Fall Meeting, Louisville, Kentucky (1981)
- 7) S. FUJISHIRO: チタニウム協会創立 30 周年記念シンポジウム (チタニウム協会編) (1982), p. 161