

(論文)

# 航空機エンジン用Ti-6246合金ディスク鍛造品の製造技術

## Manufacturing Technologies for Ti-6246 Alloy Aero Engine Disk Forging



石外伸也\*  
Shinya Ishigai



百田悠介\*  
Yusuke Momota



村上章吾\*\*  
Shogo Murakami



前田恭志\*\*  
Yasushi Maeda



長田 卓\*\*  
Takashi Choda

In order to achieve optimum high strength and fracture toughness in Ti-6246 processed forging disks, proper control of the final forging conditions is very important. The influence of forging temperature and strain on microstructure and mechanical properties were investigated. FEM analysis technique was used to simulate processed hammer forging. Then the mechanical properties of large forged disks manufactured by using a counterblow hammer were investigated. Results were used to improve the overall forging process.

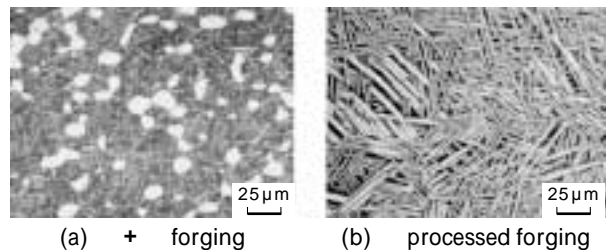
まえがき = 航空機用ガスタービンエンジンの圧縮機には軽量高強度材としてチタン合金が多く用いられている。中でも外周部に動翼の付く回転体ディスク材には、高度な信頼性が要求されるため鍛造品が使われている。ディスクに要求される材料特性は高疲労強度と優れた靱性であり、450 以下の温度域まで使われる材料としてTi-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (以下、Ti-6246) 合金がある。

従来、当社で実績のある本合金製ディスク鍛造品の製造方法は、変態点以下の温度域( + 域)で鍛造加工する方法であった。 + 域鍛造で得られる組織は、写真1(a)のように等軸粒とマトリックスが微細な針状を含む変態 + の2相組織となるが、この組織材は破壊靱性値が低い特性上の課題があった。

それを改善する製造法として、域加熱による鍛造法(以下、プロセス鍛造法)がある。このプロセスで得られる組織は、写真1(b)のように全面針状組織となり、高い破壊靱性値が得られる。従来の + 域鍛造ディスクの室温での破壊靱性値が  $30\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  レベルである<sup>1),2)</sup>のに対し、プロセス鍛造材は  $50\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  以上の値が得られる<sup>3),4)</sup>。

一方、プロセス鍛造材の特性は、鍛造加工前の域加熱により組織が変態するため、最終鍛造時の温度および加工歪に大きく影響される。そのため、適正な材料特性を得るためには、プロセス鍛造加工条件の高度な制御が必要となる。特に、加工速度の速いハンマ鍛造では加工発熱量が大きいため、それを考慮した温度制御が必要であり、加工時の変形と温度を予測する解析技術が重要となる。ハンマ鍛造の解析技術を構築し、適正なハンマ打撃エネルギーと打撃間隔を設定したプロセス制御により、特性が良好で品質の安定した鍛造品が得られる。

本研究では、Ti-6246合金製プロセス鍛造ディスクを、型打ハンマで製造する技術の確立を目標として、高



(a) + forging (b) processed forging

写真1 Ti-6246鍛造材のマイクロ組織  
Photo 1 Microstructure of Ti-6246 forging

疲労強度かつ高靱性値が得られる適正な鍛造条件を検討した。また、その鍛造条件を実現するプロセス設計を行うため、ハンマ鍛造のシミュレーション解析技術の確立を目指した。その技術を適用して実際にハンマで型打鍛造品を製造し、材料特性の確認と検証を行った。

### 1. プロセス鍛造法の適正条件

#### 1.1 組織観察による温度と加工歪の適正範囲

適正な全面針状組織を得る条件を把握する基礎試験として、 $8 \times 12\text{mm}$ の試験片を用い、図1に示す条件で温度と加工量を変えて圧縮加工し、溶体化時効熟処理後、組織観察を行った。

図1に組織面からのプロセスウインドウ範囲を示す。図1の縦軸は加工温度を、横軸は圧縮率とし、上部の横軸はFEM解析により求めた組織観察部(厚さ中心、半径の1/2R部)の相当歪を示す。写真2に各領域のマイクロ組織を示す。温度が高い領域(b)は再結晶粗大粒が生成し、連続粒界の残留により、延性および疲労強度が低下すると考えられる。加工歪の少ない領域(c)は直線状粒界の残留する組織となり、同様に延性と疲労強度の低下が予測される。温度が低く、加工歪の大きい領域(d)は針状が短く、粒界が等軸化する。これより低温側で加工歪を加えると粒内の組織も等軸化し、

\*鉄鋼部門 チタン本部 チタン技術部 \*\*技術開発本部 材料研究所

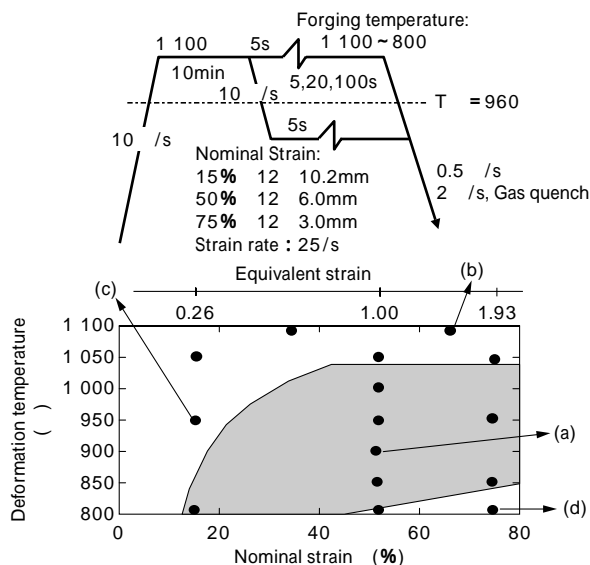


図1 Ti-6246 の プロセス鍛造組織の温度と歪の関係  
Fig. 1 Influence of temperature and strain on microstructure of Ti-6246 processed forging

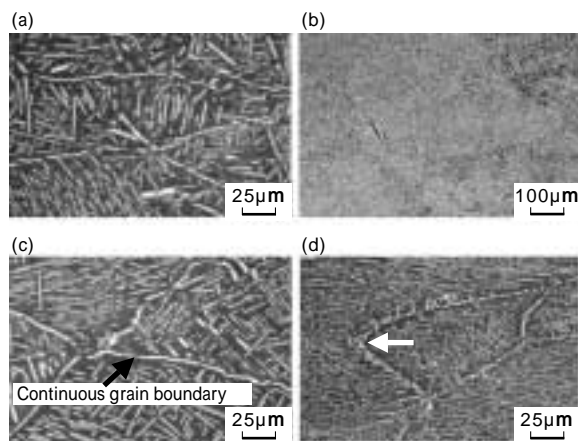


写真2 Ti-6246 プロセス鍛造試験材のマイクロ組織  
Photo 2 Microstructure of Ti-6246 processed forging

+ 域鍛造材の組織と同様になるため破壊靱性値が低下し、亀裂伝播速度が速くなることになる。

以上から、適切な全面針状組織が得られる条件範囲は、写真2(a)のように粒界が加工歪により不連続であり、かつ粒内は細長い針状組織が得られる領域となり、加工温度範囲が800以上1050未満の領域で、さらに一定以上の加工歪が必要なことがわかる。

## 1.2 パンケーキ鍛造材による特性の影響調査

次に鍛造加工歪の材料特性に及ぼす影響を調査するために、加熱温度1000、金型温度850の条件で、圧縮率を33%と67%に変えた外径230×厚さ80mmのパンケーキ圧縮鍛造材を製作し、機械的特性試験を実施した。引張試験片は鍛造材の厚さ中心(1/2t), 1/4t, 表面10mmの各位置から引張軸が接線方向となるように切出した後、930×1hの溶体化および595×8hの時効処理を施し、試験を実施した。

図2に、圧縮率33%と67%のパンケーキ鍛造材の各試験片位置について、FEM解析により求めた相当歪に対する室温引張特性を示す。引張強度には加工歪の影響は見られないが、延性、特に絞り値は加工歪が0.5まで向上し、それ以上で一定の値となっている。したがっ

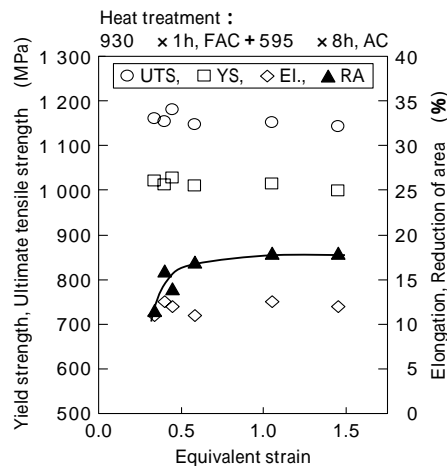


図2 Ti-6246 プロセス鍛造材の引張特性と加工歪の関係  
Fig. 2 Influence of forging strain on tensile properties of Ti-6246 processed forging

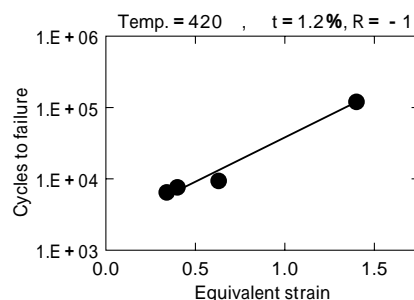


図3 Ti-6246 プロセス鍛造材のLCF寿命と加工歪の関係  
Fig. 3 Influence of forging strain on LCF life of Ti-6246 processed forging

表1 プロセス鍛造材の破壊靱性値(室温)

Table 1 Fracture toughness of processed forging (at RT)

Upset ratio (%)	33	67
Fracture toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> )	69.9	64.5

て、十分な延性を確保するためには、少なくとも0.5以上の加工歪を加える必要があることがわかる。

図3に低サイクル疲労試験(LCF)の破断寿命に対する加工歪の影響を示す。疲労寿命は加工歪が大きくなると向上する傾向が認められる。加工歪が少ない場合は延性が低いこと、および鍛造加工歪の少ない直線状粒界を持つ組織では、負荷応力による転位が粒界に堆積し易いために疲労亀裂の発生が粒界に沿って起こることで、疲労寿命が短くなると考えられる。高い疲労強度を得るためにも、より加工歪を加えた方が良いことがわかる。

表1にR-T方向の室温での破壊靱性値を示す。加工歪の少ない33%圧縮材の方がやや破壊靱性値が高い値を示している。これは、粒界に沿って亀裂が進展する際に、加工歪の少ない方が、より折曲がった経路を通ることにより亀裂の進展抵抗が高くなることが考えられる。

## 2. プロセス鍛造解析技術の構築

### 2.1 ハンマ鍛造による変形と温度の解析

型打ハンマによるTi-6246合金のプロセス鍛造を実現するためには、特に加工速度が速いことによる大きな加工発熱量を考慮した鍛造中の温度制御が重要になり、ハンマ鍛造により材料の変形や温度がどのようなか

を把握する必要がある。そこで、小型ハンマを用いた単純圧縮鍛造実験により、鍛造中の温度と変形の測定を行い、FEM 解析に必要な境界条件を求め、実測値と解析結果を比較した。

鍛造実験の供試材は 100×150 mm の Ti-6246 素材ピレットを用い、940 で加熱保持した後、表面温度 900 で鍛造を開始した。打撃ごとの素材高さや打撃時の金型速度を高速度カメラで測定し、温度はピレット内部に熱電対を挿入して測定した。

ハンマ鍛造のシミュレーション解析では、通常のプレス成形の境界条件として与えられるプレスストロークやプレス荷重を与えることはできず、ハンマエネルギーを与える必要がある。ハンマエネルギーを求める方法として、金型の落下速度  $V$  を直接測定することにより金型の質量  $M$  を用いて運動エネルギー  $1/2MV^2$  を計算した。さらに、金型は素材ピレットと衝突して、この金型の初期運動エネルギーが素材の塑性変形に用いられるとともに、その一部は弾性エネルギーに蓄えられた後、金型の反発エネルギーとして消費される。つまり、実際の塑性変形に用いられたエネルギーは、この初期運動エネルギーから反発エネルギーとして消費されたものを差引いた値となる。このハンマエネルギーの測定結果を境界条件として FEM 解析に適用した。本解析では、汎用 FEM コードである DEFORM 3D を用いて、温度連成の剛塑性解析を行った。

図 4 は打撃ごとの鍛造材高さの変化（圧下量）の測定結果と FEM 解析結果の比較を示す。実測値と計算値は良好な一致を示している。図 5 は打撃ごとの鍛造材中心部の温度推移と、FEM 解析により求めた温度変化の推

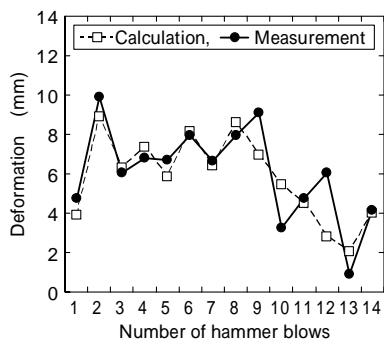


図 4 素材高さ変形量の実測値と解析の比較

Fig. 4 Comparison of deformation of material height between actual measurement and calculation

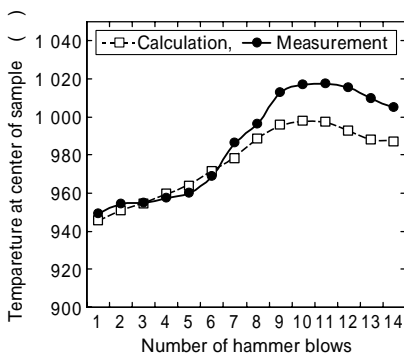


図 5 素材温度変化の実測値と解析の比較

Fig. 5 Comparison of material temperature change between actual measurement and calculation

移を示す。ピレット中心部は初期温度の 940 から、鍛造による加工発熱により 80 程度の温度上昇を示した。数値解析の結果は、打撃回数前半までは非常に良好な一致を示したが、後半では 20 程度の差が認められる。しかし、全体の温度上昇の傾向は良好一致を示している。

## 2.2 ハンマの鍛造エネルギー

Ti-6246 材のハンマによるプロセス鍛造において重要な変形と温度を制御するには、ハンマの打撃エネルギーと打撃間隔を制御することが必要になる。適正な制御条件を決めるハンマ鍛造の解析で重要な点は、実際の塑性変形に消費される鍛造エネルギーの見積もりである。金型に与えられる初期運動エネルギーは機械的な条件で決まるが、反発エネルギーは金型の弾性エネルギーや素材の弾性エネルギーとして蓄えられるため、鍛造条件に大きく依存する。

塑性変形により消費される鍛造エネルギー  $E_{pl}$  は、初期運動エネルギー（打撃エネルギー） $E_{TOT}$  から素材の弾性エネルギーに消費される  $E_e(M)$  と金型弾性エネルギーに消費される  $E_e(D)$  を引いたものとなり、(1) 式で表される。

$$E_{pl} = E_{TOT} - E_e(M) - E_e(D) \dots\dots\dots(1)$$

このとき、初期運動エネルギーに対する塑性変形に働く効率をエネルギー効率として(2)式のように定義する。

$$= \frac{E_{pl}}{E_{TOT}} = \frac{E_{TOT} - E_e(M) - E_e(D)}{E_{TOT}} \dots\dots\dots(2)$$

ハンマ鍛造の解析では、打撃エネルギーとこのエネルギー効率および打撃間隔を境界条件として与えて計算している。エネルギー効率は、実際のハンマ鍛造時の打撃速度と反発速度を測定することにより求めている。

直径 700 mm のディスク形状品を鍛造した場合の実測結果では、初期段階のエネルギー効率は 93% であったが、外周部が金型と接触して拘束鍛造状態になると急激にエネルギー効率は低下し、30% レベルになった。

ハンマの打撃エネルギーの制御例として、ハンマ鍛造による温度上昇量をハンマの打撃エネルギーにより整理することができる。図 6 は、直径 450×高さ 150 mm の Ti-6246 素材を外径 700 mm のディスク形状に鍛造した場合の、ハンマエネルギーに対する鍛造材中心温度の解析結果例である。この例では、100 kJ 程度のエネルギーを与えることにより表面からの抜熱と加工発熱がバランスし、中心部は温度上昇無しに鍛造することが可能である。素材表面部は金型への接触や放熱によって温度低下し、全体では温度分布を生じるため、全体が適正な温度範囲内で鍛造できるように、ハンマの打撃エネルギーを制御することになる。

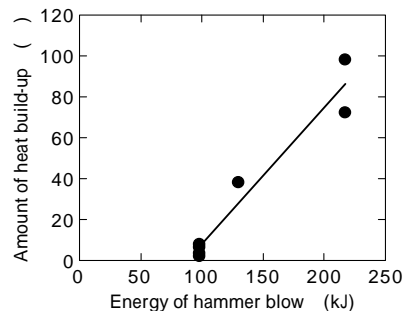


図 6 ハンマの打撃エネルギーによる素材温度上昇の計算結果

Fig. 6 Influence of hammer blow energies on calculated amount of heat build-up

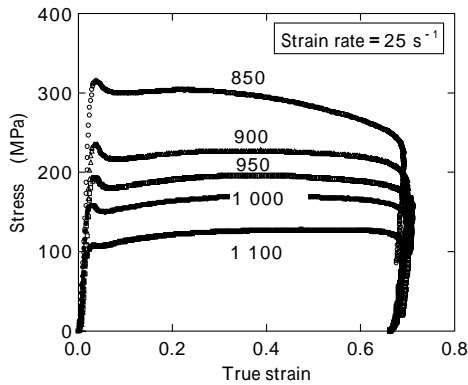


図7 Ti-6246 の圧縮応力歪線図  
Fig. 7 Stress-strain curves of Ti-6246

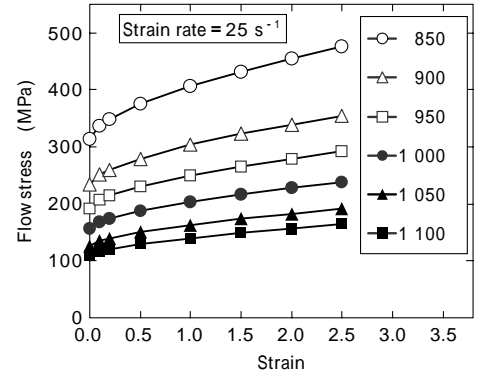


図8 Ti-6246 の恒温変形抵抗  
Fig. 8 Isothermal flow stress of Ti-6246

解析精度を向上させ、種々の鍛造品形状に対して適用するためには、エネルギー効率の実測データを蓄積して評価すること、理論的に素材と金型の弾性エネルギーを計算することなど、エネルギー効率を求める手法の開発が今後の課題となっている。

### 2.3 変形抵抗値

円柱圧縮試験により、従来手法での Ti-6246 の応力歪線図を作成すると図7のようになり、特に低温では加工軟化の様相を示している。これは、実際には加工発熱による試験片素材の温度上昇があるため、温度変化の影響を受けた結果である。一方、解析に用いる変形抵抗値としては温度一定条件での値が必要であり、これを求めることを検討した。

まず、応力と歪の関係式を(3)式のように仮定した。

$$\sigma = A(T) \times (1.0 + F \cdot \epsilon^n) \quad (3)$$

ここに、 $A(T)$ : 初期変形抵抗値(温度  $T$  と歪速度の関数)、 $n$ : 加工硬化指数、 $F$ : 係数である。

低歪域であれば加工発熱の影響が少ないため、従来の応力歪線図の降伏点から変形抵抗の温度と歪速度依存性データを構築し、(3)式の  $A(T)$  を決定する。次に、圧縮試験のストローク・荷重線図(または応力・歪線図)と一致するように、変形・温度連成解析を行って、加工硬化指数  $n$  を合わせ込み計算した。得られた  $n$  を基にして、(3)式

より各温度、歪速度、歪における変形抵抗値を算出した。

以上の計算により、図8に示す応力歪線図を得た。従来手法では、高歪域では加工発熱により温度上昇したために変形抵抗が初期加熱温度より高温での値となり、Ti-6246 のように温度依存性の高い材料ではあたかも加工軟化の様相を示していた。それに対して、温度一定条件に換算した変形抵抗値は加工硬化の傾向を示している。

求められた変形抵抗値を実鍛造品の変形・温度連成解析に適用する。解析では、温度、歪速度、歪と変形抵抗値の関係を表形式のデータとして解析ソフトに入力して用い、解析中の加工発熱は変形で加わったエネルギーを熱エネルギーに変換して温度を計算する。

### 3. 実鍛造ディスクの試作評価

以上の知見を基にして、直径約 700mm、最大厚さ 90 mm の実鍛造ディスク品を対象にしてプロセス設計し、ハンマにより鍛造試作を行った。305 × 330mm のピレット素材を使用し、一旦高さを 278 mm まで圧縮鍛造後、域の 990 に再加熱し、最終仕上鍛造を行った。鍛造材は、930 × 1 h / FAC (ファン空冷) の溶体化処理および 595 × 8 h / AC (空冷) の時効熱処理を施し、材料試験を行い評価した。

図9に対象品の形状とプロセスに対する温度と加工歪

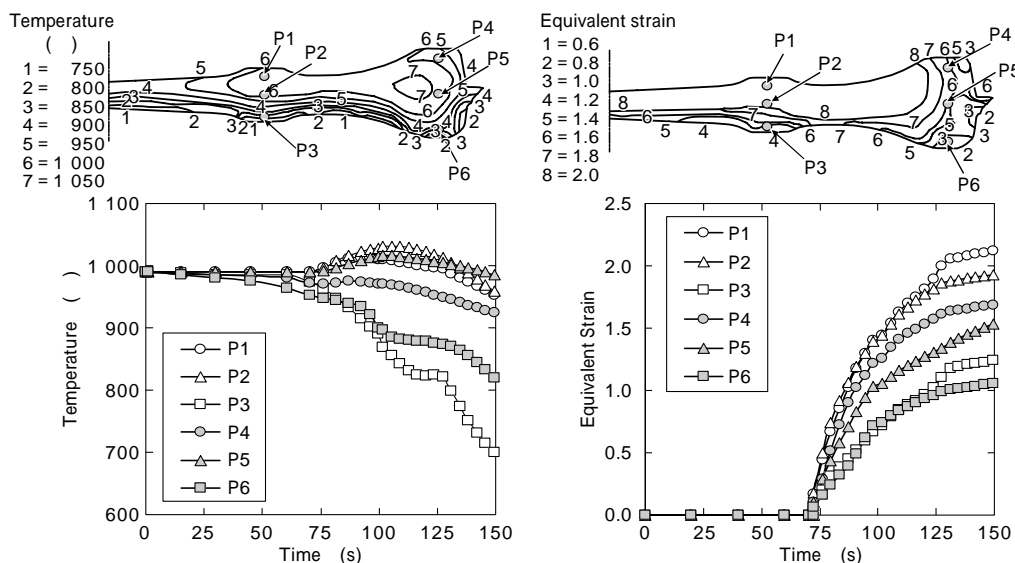


図9 ディスク鍛造の温度および歪解析結果  
Fig. 9 Results of calculation of temperature and strain during disk forging



写真3 Ti-6246 プロセス鍛造ディスクのマクロ組織  
Photo 3 Macrostructure of processed disk forging

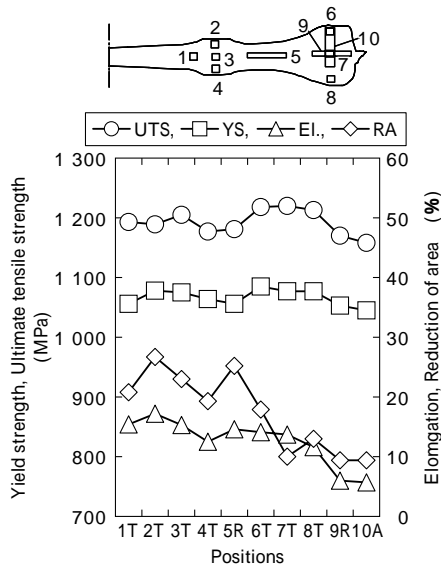


図10 ディスクの引張試験結果  
Fig.10 Results of tensile test of disk forging

の解析結果を示す。解析条件は、実測した打撃エネルギーとエネルギー効率、および打撃間隔(平均1.8秒/回)を使用した。実施した鍛造プロセスでは、下金型に接触することにより素材下面が相対的に低温になるが、温度範囲としては適正な範囲に収まっている。また加工歪も最低相当歪で0.7以上の十分な値となっている。

鍛造品の断面マクロ組織を写真3に示す。粗大再結晶粒や過度の低温鍛造部のない、良好な組織と材料流れを示していることが確認された。

図10に鍛造品の室温引張試験結果を、図11に低サイクル疲労試験結果を示す。伸び、絞り値は加工歪の大きい内部位置で高く、歪の少ない外周部位置で相対的に低くなっているものの、最低伸びとしては5%以上の値を確保している。低サイクル疲労強度は、鍛造ディスク材の部位による差の少ない良好な値が得られた。表2に破壊靱性値を示す。破壊靱性値は、加工歪の大きい内部の肉厚中心部が最も低い値となっているが、全体としては高い破壊靱性値が得られた。以上の評価結果により、実施した鍛造プロセス条件は適切なものであることが確認された。

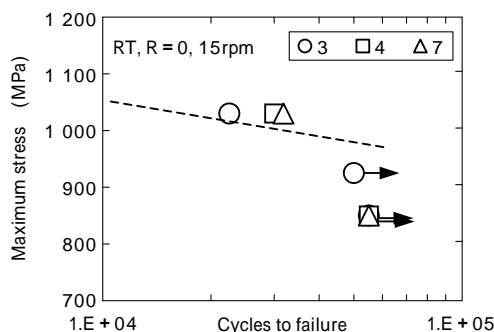


図11 ディスクのLCF試験結果  
Fig.11 Results of LCF test of disk forging

表2 破壊靱性試験結果  
Table 2 Results of fracture toughness test

Position	Fracture toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> )
3	58.6
4	65.4
7	68.1

むすび=エンジンの圧縮機ディスク用Ti-6246材について、高疲労強度かつ高破壊靱性値を得るプロセス鍛造品の製造技術を確認するための開発を行った。

- 1) 目標とする良好な材料組織および特性を得る鍛造条件は、加工温度が800~1050の範囲で、相当歪が0.5以上の十分な加工歪を付加することである。
- 2) ハンマ鍛造の解析技術に関し、境界条件と変形抵抗値の適正化により、温度および変形の連成解析結果において精度の良い予測ができることを検証した。
- 3) 開発した技術に基づき、実鍛造ディスクを試作した結果、良好な特性が得られることを確認した。

最近の解析ソフトの進歩により、プレス鍛造と比較して制御が難しいハンマ鍛造に対しても解析予測が可能となってきている。最も厳しい品質を要求されるエンジンディスク鍛造品に対して、より高度な製造技術を持つことは、当社の技術力の高さを示すのみならず、競争力の向上に大きく寄与するものと期待される。Ti-6246鍛造ディスクの量産製造を目指して、一層の技術力向上に努めたい。

参考文献

- 1) 西村 孝ほか：R&D神戸製鋼技報, Vol.34, No.2(1984) p.89.
- 2) H. Yano et al.: Titanium Science and Technology (1984) p.507.
- 3) T. Krull et al.: Ti-2003 Science and Technology, Vol. (2003) p.1871.
- 4) G. Terlinde et al.: Ti-2003 Science and Technology, Vol. (2003) p.2891.