

## ニア合金(Ti-17)鍛造品の機械的特性に及ぼす加工熱処理の影響

大山英人(工博)・石外伸也・木田貴之

鉄鋼カンパニー・チタン技術部

### Effects of Deformation and Heat Treatment on The Mechanical Properties of $\alpha$ -Processed Forging for Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti-17)

Takayuki Kida · Dr. Hideto Oyama · Shinya Ishigai

The effects of  $\alpha$ -processed forging and solution heat treatment and aging on the tensile properties, and the fracture toughness of the rich  $\alpha$ -alloy, Ti-17, were investigated. Blocks were forged with a compression ratio of 66%. The ductility depended upon the local strain which was estimated by  $\alpha$ -grain deformation. The strength in the direction of compression is lower compared to the radial and tangential directions. This is thought to be due to the texture formed during forging.

まえがき = Ti-17 合金(Ti-5Al-2Zr-2Sn-4Mo-4Cr)は、高強度で高破壊靱性を持つニア型チタン合金として1970年代に米国で開発された<sup>1)</sup>。近年、ジェットエンジンのファンおよびコンプレッサディスクの材料として利用されているこの合金に関しては、様々な報告がされている<sup>2)3)</sup>。しかし、高強度、高破壊靱性をえるために有用なプロセスという加工熱処理法を実製造に適用した報告例はきわめて少ない。そこで、当社はプロセスによるTi-17合金の機械的性質に及ぼす加工条件、熱処理条件の影響について実製造の観点から検討した。

#### 1. 実験方法

真空アーク溶解により直径570mmの鋳塊を製造した。第1表に鋳塊の成分分析値を示す。この鋳塊の変態点は880である。実験素材は、鋳塊から $\alpha$ 域加熱および $\beta$ 域加熱による分塊鍛造を経て製造した。実験は、一方向の単純圧縮により、従来鍛造法、および恒温鍛造法にて実施した。鍛造時の加熱温度は910~920で、加工温度は850、歪み速度は0.02/s、加工量は圧縮率66%で実施した。また、加熱温度から鍛造温度までは空冷とした。空冷時の平均冷却速度は0.1~0.9/sであり、J. Bechtらの報告<sup>4)</sup>によれば $\beta$ 相の析出は、鍛造後に起きるものと判断される。熱処理は電気炉にて実施した。試験位置は、半径方向において中心、半径の1/2、外周と、それぞれに対応する鍛造表面側、肉厚中心部の計6個所である。半径方向の外周、および鍛造表面側は、鍛造材の最外表面からは10mm内側の位置にある。引張試験は、ASTM E8にしたがって半径方向、円周方向、鍛造方向の3方向で実施した。また、破壊靱性試験は、ASTM E399にしたがって実施した。集合組織の観察は、Moターゲットをもちい反射法で実施した。

#### 2. 実験結果と考察

##### 2.1 従来鍛造材の変形量と機械的性質の関係

第1図に従来鍛造後、溶体化時効を実施したTi-17の引張特性を示す。引張試験は鍛造品の円周方向で実施した。横軸は半径方向の引張試験の採取位置を示し、縦軸

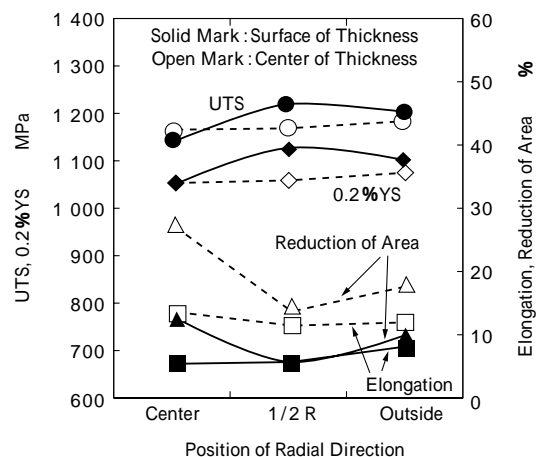
は対応する引張特性を示す。絞り15~28%、伸び12~14%の肉厚中心部に比較し、鍛造表面側はそれより低い値になっている。

そこで、以上のような現象が起きる理由を明らかにするため、引張試験を実施した部位の変形歪み量と延性と

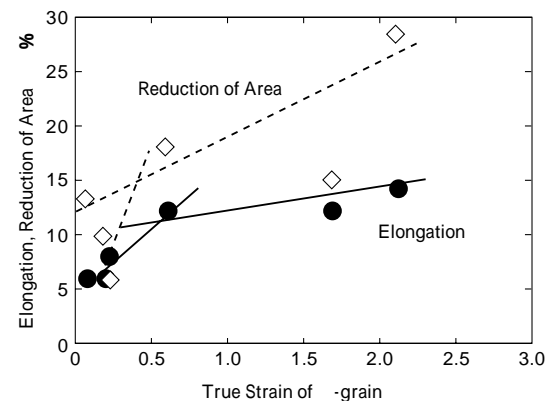
第1表 Ti-17の化学成分値

Table 1 Chemical composition of Ti-17

Al	Sn	Zr	Mo	Cr	Fe	O	Ti
5.09	2.04	2.01	3.88	3.83	0.48	0.105	Bal.



第1図 通常鍛造Ti-17の引張特性  
(380×h100mm, ST 800 4h + Aging 620 8h)  
Fig. 1 Tensile properties of conventional forged Ti-17



第2図 Ti-17鍛造材の結晶粒の真歪みと延性の関係  
(ST 800 4h + Aging 610 8h)  
Fig. 2 Relationship between true strain of  $\alpha$ -grain and ductility of Ti-17

の相関を調査した。第2図に、旧結晶粒の歪量と延性の関係について示す。旧結晶粒の形態はミクロ観察で明瞭に判別できる。変形前の結晶粒径を半径 $r$ の球体、変形後の旧結晶粒の形状を短径 $a$ 、長径 $b$ とする楕円体で近似すれば、変形前後で体積は一定であるので、

$$\frac{4}{3} r^3 = \frac{4}{3} ab^2 \dots\dots\dots (1)$$

鍛造によって圧縮方向の半径が $r$ から $a$ に変形したとすれば、その部位での真歪みは $\ln(a/r)$ で、

$$\ln(a/r) = 2/3 \ln(a/b) \dots\dots\dots (2)$$

$$(a/r) = (a/b)^{3/2}, \text{式(1)より}$$

そこで、ミクロ観察により引張試験片採取位置での旧結晶粒の長径、短径を測定し、(2)式から真歪みを見積り、伸び、絞りとの相関を求めた。歪み量が増加するとともに、伸び、絞り値も増加する。とくに、歪みの加わり始めほど延性の増加は大きい。この結果より、十分な延性を確保するためには最低でも真歪みが0.5以上必要であると考えられる。

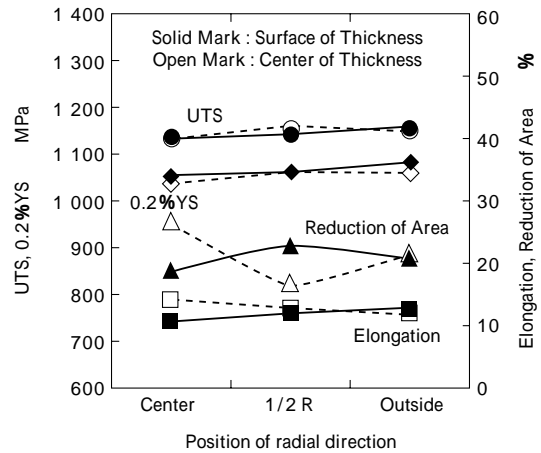
## 2.2 恒温鍛造材の熱処理条件と機械的性質の関係

前述したとおり、材料全体が均一な延性を持つためには、鍛造時に、真歪み0.5以上を一様に与えることが必要であることが明らかとなった。そこで、従来鍛造と比較し、材料全体が均一に変形する恒温鍛造をおこない、引張特性を評価した。加工率が66%のとき、材料が一様に変形した場合の計算上の真歪みは1.08と見積られる。第3図に、恒温鍛造の引張特性結果を示す。従来鍛造の場合に顕著であった伸び、絞り値の肉厚の中心部と鍛造表面側での差はほぼ解消され、延性は材料全体で均質になった。

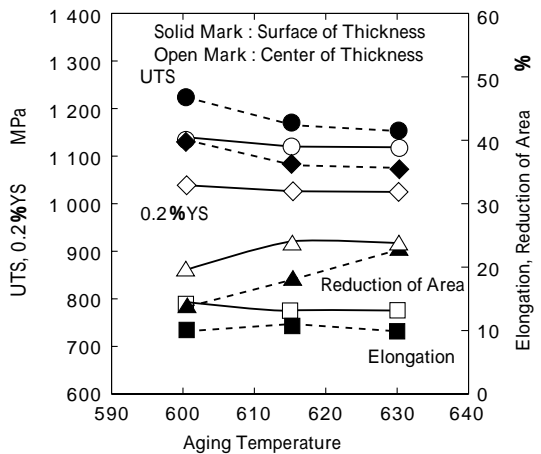
写真1にミクロ組織を示す。従来鍛造では、鍛造表面側において延性に乏しい粒界相が連続的に形成している部分がある。これに対し恒温鍛造では、粒界相の形成は断続的かつ不明瞭である。これは、恒温鍛造により材料全体が均一に歪みを受けることにより、結晶粒界への相の優先析出が抑制された結果と考えられ、延性が改善された主要因と推察される。

続いて、機械的性質に及ぼす時効条件の影響を調査した。第4図に恒温鍛造での引張試験値、および第5図に

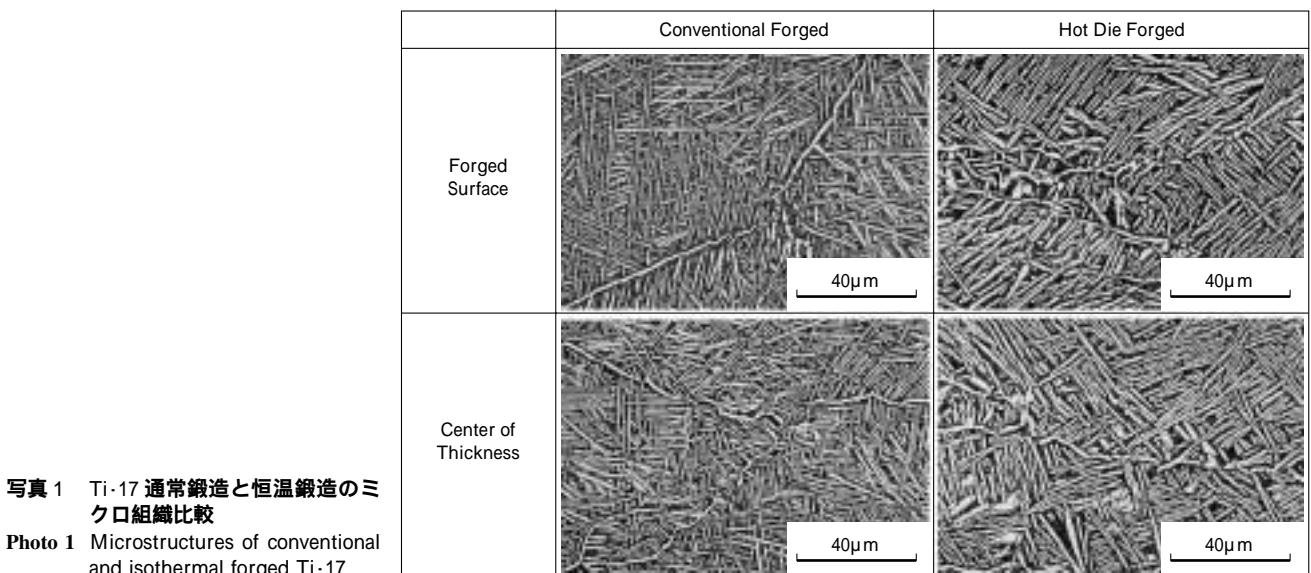
破壊靱性値 $K_{IC}$ を示す。第4図より、時効温度の上昇とともに、とくに鍛造表面側で強度が低下する傾向にある。しかし、時効温度615から630にかけて、強度の低下はきわめて少ない。これに対し、 $K_{IC}$ は、時効温度の上昇とともに直線的に増加している。したがって、本実験の範囲で強度と靱性のバランスに優れた時効熱処理温度

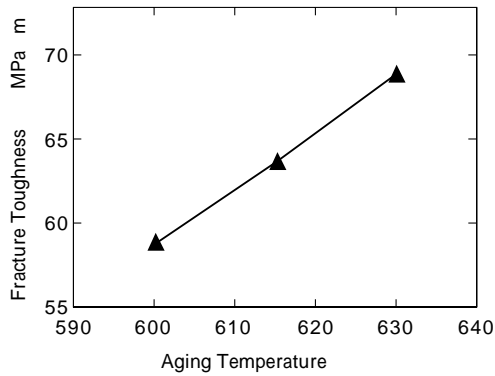


第3図 恒温鍛造 Ti-17 の引張特性  
(155 × h46mm, ST 800 4h + Aging 620 8h)  
Fig. 3 Tensile properties of isothermal forged Ti-17



第4図 恒温鍛造 Ti-17 の引張特性に及ぼす時効温度の影響  
(230 × h80mm, ST 800 4h + Aging 8h)  
Fig. 4 The effect of aging temperature on tensile properties of isothermal forged Ti-17





第5図 恒温鍛造 Ti-17 の破壊靱性に及ぼす時効温度の影響 (ST 800 4h + Aging 8h)

Fig. 5 The effect of aging temperature on fracture toughness of isothermal forged Ti-17

は 630 である。

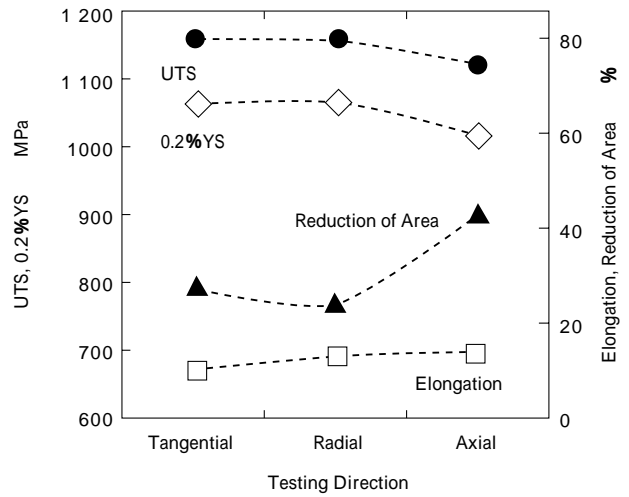
### 2.3 鍛造後の引張特性の異方性

第6図に、恒温鍛造材での鍛造後の引張試験方向と引張強度の関係について示す。円周方向、半径方向に比較し、軸方向の引張強度の低下が認められる。第7図に、反射法による溶体化時効材の(0002)極点図を示す。測定面は、半径方向に垂直な面である。(0002)面の強度は特定方向に集積し、相の集合組織が確認される。この集積は、第8図に示すように、鍛造により(111)面が鍛造平面に平行で、かつ[110]方向が鍛造材の半径方向と平行になるように相の集合組織が形成され、その後の溶体化および時効処理で、パーガスの関係( $\{110\} // (0002)$ )にしたがい相が析出したと考えることができる。したがって、軸方向の強度低下、延性向上は、鍛造による集合組織の形成によるものと考えられる。

むすび= 以上の実験結果をまとめると以下ようになる。

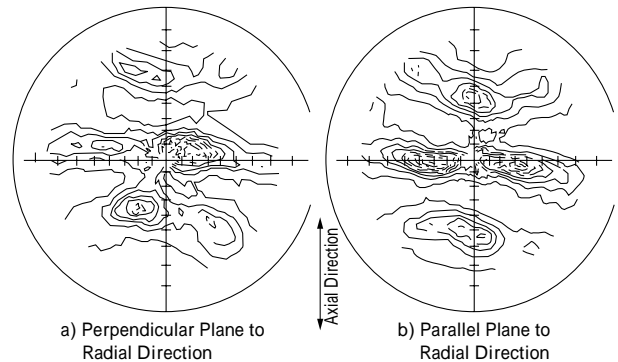
- 1) 単純圧縮における従来鍛造では、延性が部位によりばらつく。これは鍛造時の変形量と大きく関係しており、変形量が少ない部位は延性が低下する。十分な延性を付与するためには、真歪み0.5以上が必要と考えられる。また、材料全体に均一な変形を加えられる恒温鍛造により、延性の低下は回避される。
- 2) 恒温鍛造材により、機械的特性に及ぼす時効条件の影響を調べた。時効温度の上昇とともに強度は低下するが、時効温度615 から630にかけては、強度の低下はきわめて少ない。いっぽう、 $K_{IC}$ は、時効温度600から630にかけて直線的に上昇しており、時効温度630での強度靱性バランスが優れる。
- 3) 恒温鍛造材により、引張特性の異方性を調べた結果、軸方向での強度低下と、延性向上が認められた。これは、鍛造時、(111)が鍛造平面と平行で、かつ[110]が鍛造材の半径方向と平行となる相の集合組織形成によるものと考えられる。

以上の知見に基づき、良好な特性を有するエンジン用ディスク鍛造品の製造が可能となった。現時点では、まだ、開発エンジン用ディスクへの適用化検討段階であるが、今後、欧米でプロセスの適用が拡がりつつある航空機エンジンディスク材の生産へとつなげていきたい。



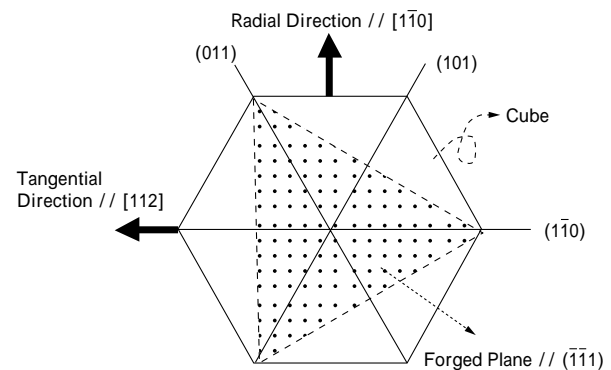
第6図 恒温鍛造材の引張特性における引張方向依存性 (230 x h80mm ST 800 4h + Aging 615 8h)

Fig. 6 Dependence of tensile properties on tensile direction in isothermal forged Ti-17 after STA



第7図 恒温鍛造材の(0002)極点図  
a) 半径方向に垂直な面  
b) 半径方向に平行な面

Fig. 7 (0002) pole figure of isothermal forged Ti-17



第8図 恒温鍛造時の集合組織形成模式図

Fig. 8 Schematic drawing of texture formation during isothermal forging

### 参考文献

- 1) T. K. Redden: Beta Titanium Alloys in the 1980's, TMS/AIME, Warrendale, PA, (1984) p.239.
- 2) R. G. Rowe et al.: The Institute of Materials, Birmingham, (1995) p.2250.
- 3) A. Suzuki et al.: Electronic Furnace Steel, Vol. 63, No.4, (1992) p.297.
- 4) J. Bechet et al.: Titanium Science and Technology, Proceedings 5th International Conference on Titanium, Edited by G. Lutjering, U. Zwicker et al., Germany, (1984) p.1613.