

高温高速回転部品用TiAl鍛造合金の開発

Development of TiAl Forged Alloy
for High Temperature High Speed Rotating Components

技術本部 鉄井利光^{*1} 樋口 光^{*2}
田北勝彦^{*3}

各種タービン機関の高効率化には軽量で高温強度の高い材料をディスクに適用することが有望である。TiAl 金属間化合物をベースとする合金は新規軽量耐熱材として注目を集め、現在世界各所で実用化を目指した研究開発が進められている。この度、ディスクとしての実用化に適した新しい TiAl 鍛造合金を開発したので、本報ではこの合金の製造プロセス、材料組織などの開発合金の特徴、及びディスクとしての各種性能を評価した結果について報告する。

Light materials that are strong at high temperatures are required for disks in order to improve the efficiency of various types of turbine engines. TiAl intermetallic compound-based alloys are increasingly attracting attention as possible new light, heat-resistant materials, and research and development activities aimed at practical application is actively underway at various locations around the world. A new forged TiAl-based alloy suitable for disks has now been developed; this report outlines certain characteristics of the new alloy such as its manufacturing process and microstructure, as well as the material test results for disk performance evaluation.

1. ま え が き

各種タービン機関においてディスクを軽量化すると高回転化、過渡応答特性向上が図れるとともに、波及効果として軸受、ケーシングなどの構造の簡素化、軽量化が図れるため、機器全体としての効率向上に大きく寄与できる。この場合、ディスク材には軽量性と耐熱性が要求されるが、従来の軽量材である Ti 合金では適用可能な上限温度は 800 K 程度であった。

一方、現在注目を集めている新素材である TiAl 金属間化合物基合金⁽¹⁾は Ti 合金より軽量であり、また高温強度も高いため、次世代のディスク材として有望である。

TiAl 合金でディスクを作製する場合、その形状から、また回転体としてのバランス、無欠陥性の必要性から、現在における TiAl 合金の製造技術では精密鍛造品よりも鍛造品を用いる方が望ましい。

本報では上記観点から当社で開発した新しい TiAl 鍛造合金⁽²⁾について、その製造プロセス、材料組織などの特徴を述べるとともに、ディスクとしての各種特性を評価した結果について報告する。

表 1 本TiAl合金の化学組成の一例

Example of chemical composition of this TiAl alloy

主成分 at(%)					不純物 wt(ppm)							
Ti	Al	Nb	Cr	Mn	Cu	Fe	C	Si	O	N	H	
残	45.24	7.78	2.08	<10	<30	600	60	390	360	130	1	

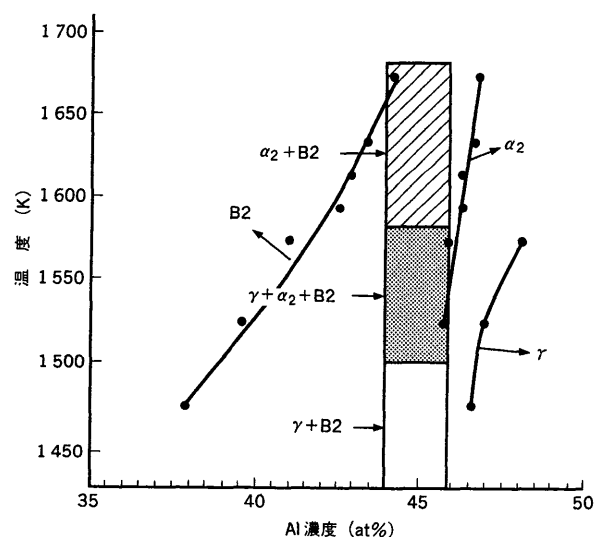


図 1 本TiAl合金の相変挙動 図中の曲線はEPMA定量分析によって求めた各相の相境界である。本TiAl合金は通常のTiAlと異なり、温度上昇によって $\gamma+B2 \rightarrow \gamma+\alpha_2+B2 \rightarrow \alpha_2+B2$ と相変化する。

Phase transformation behavior of this TiAl alloy

2. 新規開発 TiAl 合金の製造プロセスと組織

本 TiAl 合金の比重は 4.2 であり、Ti 合金より若干小さく、ステンレス鋼、Ni 基超合金などの約 1/2 と非常に軽量である。本 TiAl 合金の化学組成の一例を表 1 に示す。また製造プロセスの指針となる本合金の高温域での相変挙動⁽²⁾は図 1 に示すとおりである。この相変挙動を利用した製造プロセスは以下のとおりである。

まず不純物の混入が少ない高周波スカル溶解によって鍛造インゴットを作製する。次に図 1 での $\gamma+B2$ 域の 1473 K で熱処理を施した後、恒温鍛造を行い製品形状に成形する。最後に α_2+B2 域の 1593 K で熱処理後空冷することによって組織制御し、機械的特性を向上させる。

図 2 に本 TiAl 合金の各プロセスにおける光学顕微鏡組織を示す。(a)は鍛造後のインゴットの組織である。高温強度が高いラメ

組織が発達しており、このまま鍛造すると素材の変形抵抗が大きいため、素材に割れが生じたり、金型が塑性変形するという問題が想定される⁽²⁾。(b)は 1473 K×3 h 熱処理後の組織である。 $\gamma+B2$ 域で熱処理することによってラメラ組織は消滅しており、鍛造性は向上している。(c)は恒温鍛造後の組織である。再結晶によって非常に微細な結晶粒が生成しており、超塑性現象によって大変形量の鍛造が可能である。最後に(d)は 1593 K×50 h の熱処

*1 長崎研究所材料・溶接研究室

*2 長崎研究所ターボ機械研究室主務

*3 長崎研究所強度研究室

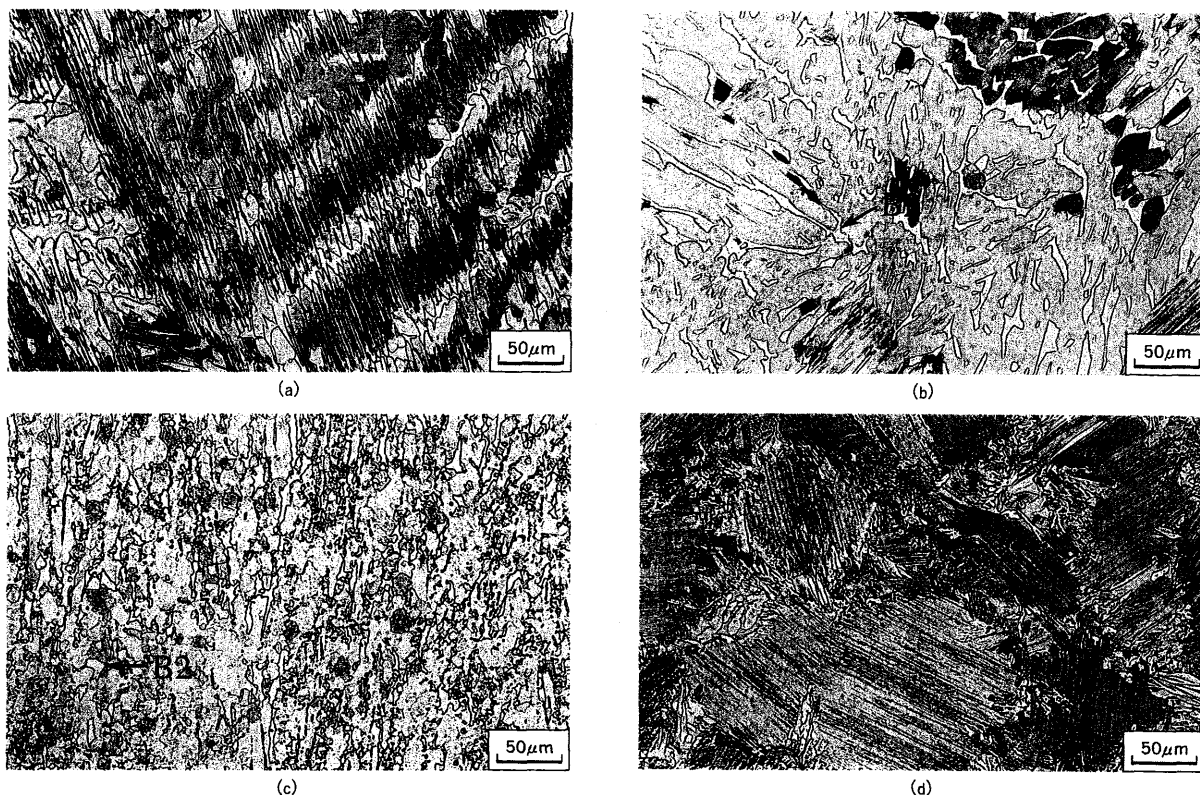


図2 本 TiAl 合金の各プロセスにおける組織変化挙動 本 TiAl 合金の製造プロセスの各段階における光学顕微鏡組織を示す。各段階で大きく変化している。
Microstructural changes of this TiAl alloy in each manufacturing processes

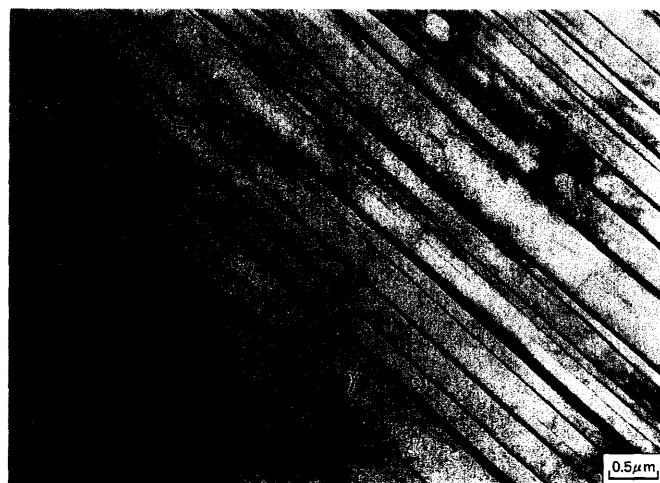


図3 本 TiAl 合金のラメラ粒の透過型電子顕微鏡組織 本合金の最終段階の組織中のラメラ粒内を拡大した写真。ラメラ間隔は非常に微細である。
Transmission electron micrograph of lamellar structure of this TiAl alloy

理後、空冷したものの組織である。ラメラ組織が再度発達しており、高温強度などの機械的特性の向上が期待できる。

図3に図2(d)の組織(最終組織)のラメラ粒内の透過型電子顕微鏡組織を示す。ラメラは γ と α_2 の二相構造であり、ラメラ間隔が約 $0.2\mu\text{m}$ と非常に狭いことが分かる。一般に TiAl 合金の場合、ラメラ間隔が狭いほど高温強度、破壊靱性が向上すると言われており⁽³⁾、本 TiAl 合金では最終熱処理後、冷却速度が大きい空冷処理を施すことによって、このラメラ間隔が微細な組織を得ている。

3. ディスクとしての材料特性評価

3.1 評価方法

本 TiAl 合金のディスクとしての材料特性を評価するため、以下の試験を行った。引張試験は平行部が $3 \times 3 \times 20\text{ mm}$ の試験片を用い、室温 $\sim 1173\text{ K}$ において初期ひずみ速度 $3.3 \times 10^{-4}/\text{s}$ の条件で行った。疲労試験は回転曲げにより室温で実施した。酸化試験は 1173 K にて大気中で 400 h 保持した後空冷し、外観状況の観察と酸化増量測定を行った。最後に中央部に固定用の穴を有する $\phi 120 \times t 15\text{ mm}$ の円盤状試験片を用い、破壊するまで回転試験を行った。この際試験片内における応力分布を FEM により計算した。

3.2 特性評価結果

3.2.1 引張り特性

図4に本 TiAl 合金の引張試験結果を示す。この図には比較のため、従来からよく用いられている高温用途のディスク材であるインコネル718鍛造材の文献データ⁽⁴⁾を載せている。ディスクなどの回転部品では負荷される応力は比重に比例するため、強度を比重(本 TiAl 合金:4.2, インコネル718:8.2)で除した比強度で評価した。

本 TiAl 合金の比強度は室温 $\sim 1173\text{ K}$ までインコネル718より良好であることが分かる。伸びは室温では 0.4% と小さいが、 873 K 以上では増加する。なお、本 TiAl 合金の引張強度は $873 \sim 973\text{ K}$ で最大となるが、これは本 TiAl 合金のこの温度域での伸びの増加と対応する。

3.2.2 疲労特性

図5に本 TiAl 合金の室温における回転曲げ疲労強度を示す。また比較のため同様にインコネル718鍛造材の文献データ⁽⁴⁾も示

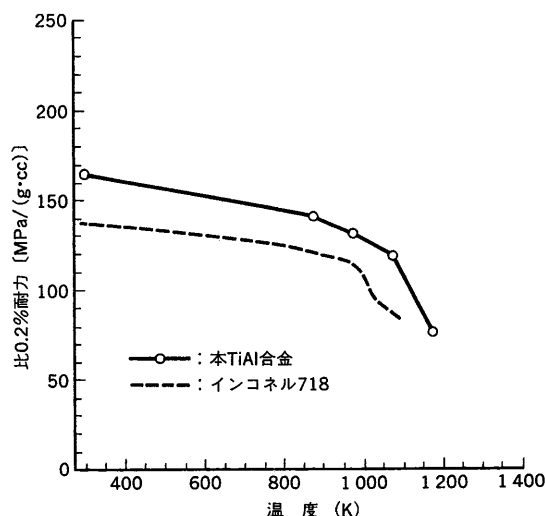


図4 引張試験結果 比強度換算した引張試験結果。本 TiAl 合金の比強度は室温～1173 K でインコネル 718 より良好である。
Results of tensile test

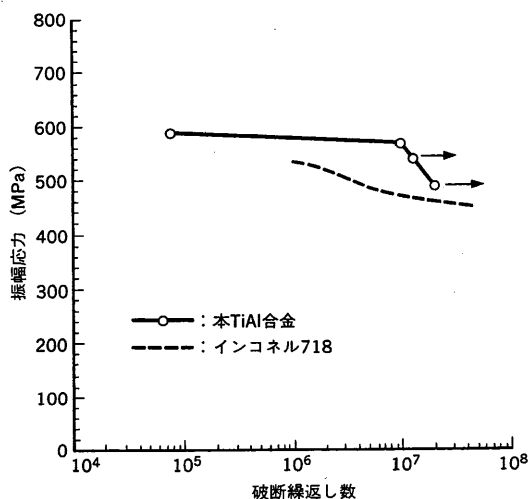
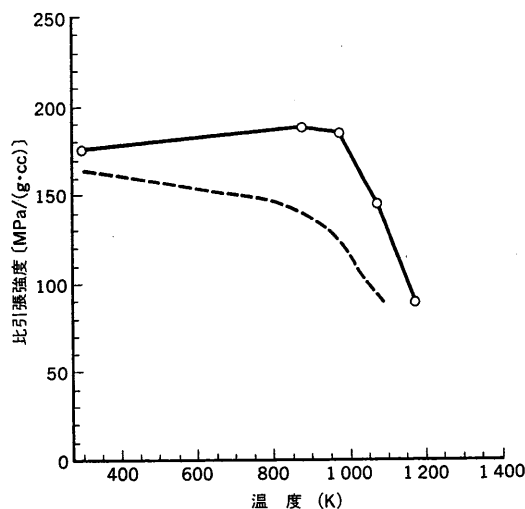
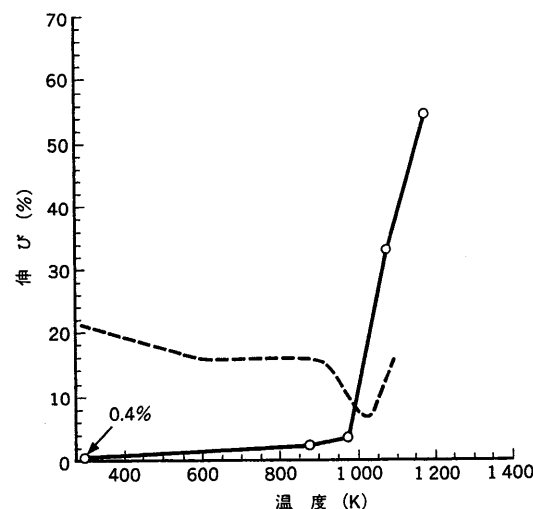


図5 回転曲げ疲労試験結果 室温の疲労強度を示す。絶対強度で比較しているのにもかかわらず、インコネル 718 より良好である。
Results of rotating beam fatigue test



す。なおここでディスクに負荷される疲労応力は単純な比強度では評価できないため絶対強度で比較した。

絶対強度で比較しているのにもかかわらず本 TiAl 合金の疲労強度はインコネル 718 より良好であり、本 TiAl 合金が優れた疲労強度を有することが分かる。

3.2.3 酸化特性

図6に本 TiAl 合金の 1173 K×400 h 酸化試験後の試験片外観を示す。試験片単位表面積当たりの酸化増量は 3.6 mg/cm²と微量である。また空冷時の熱影響により若干の酸化スケールのはく離が認められるが、試験片の表面は Al₂O₃皮膜で覆われており、1173 Kにおいても本 TiAl 合金は耐酸化性を維持していることが分かる。

3.2.4 回転破壊特性

室温での回転破壊試験の結果、本 TiAl 合金は 83 816 rpm で破壊した。一般に厚みのある回転円盤では遠心方向の応力より接線方向の応力が大きくなることから、接線応力が破壊の支配因子と

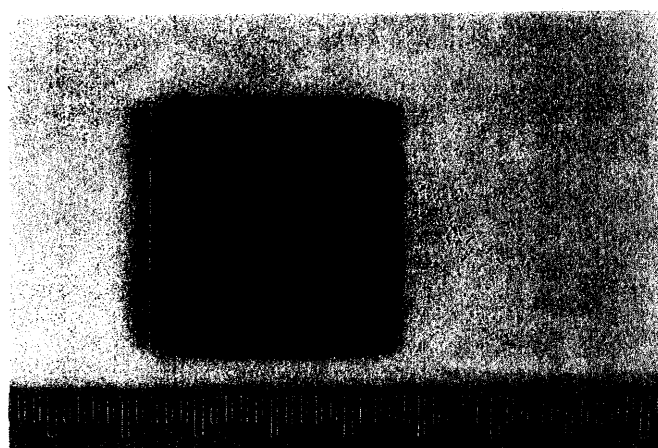


図6 酸化試験結果 1173 K で 400 h 酸化後の外観状況。酸化増量は 3.6 mg/cm²と微量である。
Results of oxidation test

されている。図7に本 TiAl 合金の回転破壊試験結果を示す。図(a)は破壊回転数における試験片中の接線応力分布であり、FEMにより計算したものである。図(b)は破壊後の試験片外観状況であり、破壊後飛散した破片を集め再構成したものである。図(a)において最大の接線応力は中心部で発生しており 957 MPa である。また試験片全体における平均の接線応力は 418 MPa である。

一般に、通常の金属材料では平均接線応力がその材料の 0.2 % 耐力に到達したら破壊することが経験的に分かっている。しかし

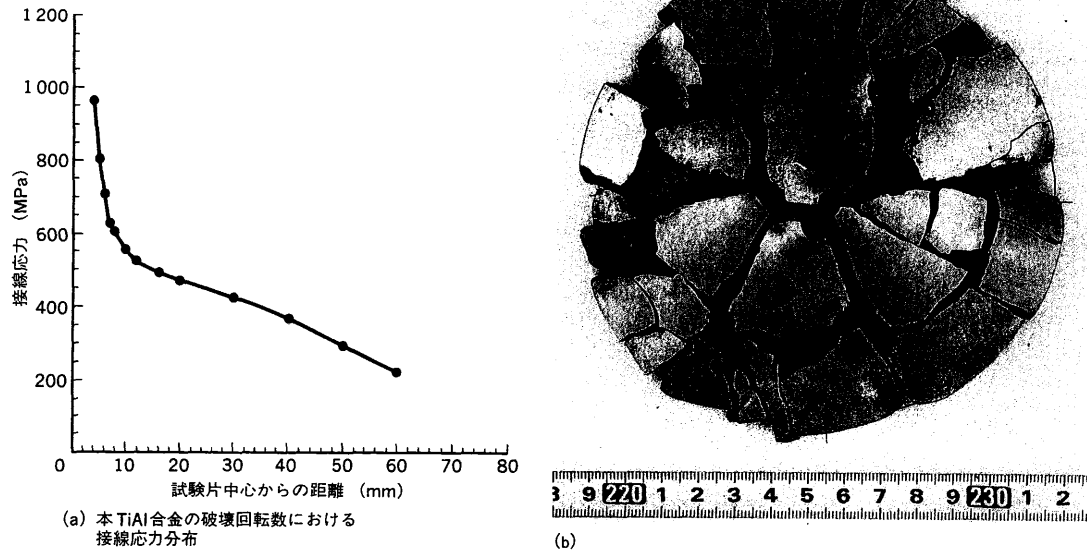


図7 本 TiAl 合金の回転破壊試験結果 (a)は FEM の計算結果であり、試験片中の接線応力分布である。(b)は破壊後飛散した破片を集め再構成したものである。
Result of rotating burst test of this TiAl alloy

ながら本 TiAl 合金では室温の 0.2% 耐力 (637 MPa) よりかなり低い平均接線応力で破壊し、通常の金属材料と異なる結果となった。この原因として本 TiAl 合金は室温の伸びが 0.4% と低いことが考えられる。つまり通常の金属材料では塑性変形能が大きいため、回転時に生じる塑性変形によって応力緩和が生じ、試験片中の応力分布が平均化されるのに対し、本 TiAl 合金では塑性変形能が小さいため、十分な応力緩和が起きず、中心部付近の接線応力が大きい所で破壊したことが考えられる。一方、逆に言えば本 TiAl 合金では使用温度域となる高温においてはかなりの塑性変形能を有しているため、平均接線応力が 0.2% 耐力に近い値となるまで破壊しないことが期待できる。

次にインコネル 718 との比較であるが、比重が異なる材料の回転強度を比較するためには接線応力を比重で除した比接線応力で評価する必要がある。図 4 の引張試験結果と本 TiAl 合金の回転破壊試験結果から室温～高温における両者の回転強度を予想すると以下のとおりである。

室温では本 TiAl 合金は 0.2% 耐力の 66% の平均接線応力で破壊した。一方、インコネル 718 は 0.2% 耐力程度の平均接線応力で破壊することが期待できるので、図 4 の比 0.2% 耐力の比較から (本 TiAl 合金の比 0.2% 耐力はインコネル 718 の 120%)、室温の回転強度はインコネル 718 の方が若干良好と予想できる。

しかしながら 1000 K 以上の高温では本 TiAl 合金の伸びはインコネル 718 より大きくなることから、これに伴い応力緩和も大きくなることが予想される。また、比 0.2% 耐力は 1000 K 以上に

おいても本 TiAl 合金の方が良好であることから、これらの重畳効果である回転強度は 1000 K 以上では本 TiAl 合金の方がインコネル 718 より良好であることが期待できる。

4. む す び

新しく開発した TiAl 鍛造合金についてディスクとしての各種材料特性を評価した結果、現用の高温用途材である超合金のインコネル 718 と同等、あるいはそれ以上の結果が得られた。今後本 TiAl 合金をディスクとして適用することによって、従来の Ti 合金などの軽量金属材料では困難な高温用途に適用でき、また同時に過渡応答特性の向上、及び軸受、ケーシングなどの軽量化が図れるなど、機器の効率向上に大きく寄与できるものと期待できる。

参 考 文 献

- (1) Kim, Y. W., Ordered Intermetallic Alloys, Part III : Gamma Titanium Aluminides, JOM Vol. 46 No. 7 (1994) p.30
- (2) 鉄井ら, B2 相を含む TiAl 合金の鍛造タービンロータ製造プロセス, 鉄と鋼 Vol. 81 No. 7 (1995) p.751
- (3) Soboyejo W.O. et al., An Investigation of the Fracture Behavior of Gamma-Based Titanium Aluminides, Metal. Trans. A, Vol. 23 (1992) p.2 039
- (4) Aerospace Structural Metals Handbook, Department of Defence (1986) Code 4103