

チタン合金製 40 インチ長翼ブレードの製造

谷 和人*・佐藤隆夫*・石外伸也*・石山 治*・森川裕文**

* 鑄鍛鋼工場・技術部 ** 鑄鍛鋼工場・製造部

Manufacturing of 40-inch-long Blade made of Titanium Alloy

Kazuhiro Tani・Takao Sato・Shinya Ishigai・Osamu Ishiyama・Hirofumi Morikawa

A three-step forging process flattening, twisting, and finishing forging has been developed as a near-net-shape forging process for 40-inch-long blades made of Ti-6Al-4V by estimating the loading force on dies and grain flow during forging. In this process, 40-inch-long blades made of Ti-6Al-4V were forged with high dimensional precision using a 400kN・m counterblow hammer. The mechanical properties of the resultant blades were excellent.

まえがき = 発電用蒸気タービンにおいて、低圧タービンの最終段に翼長の大きなブレードをもちいることにより、蒸気エネルギーを有効に活用し、熱効率を向上させることが可能である。しかし、従来の 12%Cr 鋼の場合、翼重量が重くなるため、翼材とそれをささえるロータ材の強度的制約から、3 600rpm 用低圧タービンの最終段の翼長は、31 インチあるいは 33.5 インチが限界である¹⁾²⁾。それに対し、12%Cr 鋼にくらべて比強度（引張強さ / 比重）の高いチタン合金（Ti-6Al-4V）製ブレードをもちいると、遠心力が軽減できるため、従来のロータ材の強度のまま 3 600rpm 用低圧タービンの最終段に 40 インチ長さのブレードが使用可能となり、熱効率も約 1.6% 向上が可能である¹⁾²⁾。

チタン合金製大形ブレードの製造上の課題は、優れた疲労強度をえるために 2 相組織（相 / 相）を微細かつ等軸組織にする組織制御とともに、最小の投入重量で鍛造時に欠肉のない鍛造形状をえるための Near Net Shape 鍛造プロセスの設計である。とくに Near Net Shape 鍛造プロセスの設計に関しては、成形荷重の検討から、鍛造品の肉厚は高砂製作所鑄鍛鋼工場の 400kN・m カウンタブローハンマの力量範囲内で成形できる薄さにした。

次に、鍛造プロセスの決定に対し、40 インチ長さのブレードをねじれ角度をもったまま鍛造（以下、仕上鍛造法と呼ぶ）した場合と、ねじれない平形状に鍛造（以下、平打鍛造と呼ぶ）した場合とで、金型に働く力と素

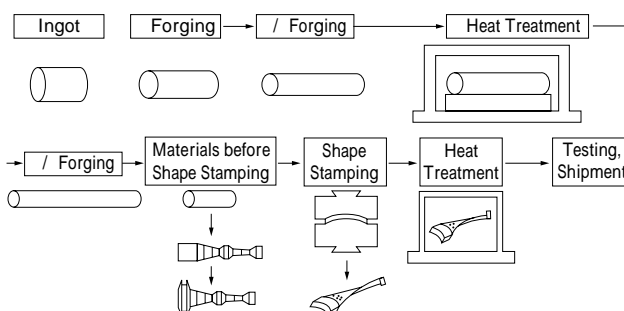
材流動を比較した結果、ハンマのエネルギーを最大限に材料変形に活用でき、欠肉の発生しない鍛造方法として、平打鍛造、ねじり曲げ工程と仕上工程からなる 3 ステップ鍛造法を開発した。このプロセスにより、40 インチ長さのチタン合金製ブレードを 400kN・m カウンタブローハンマをもちいて設計どおり鍛造でき、その鍛造品の品質も良好であることを確認した。以下に、開発した鍛造プロセスを紹介する。

1. ブレードの製造工程

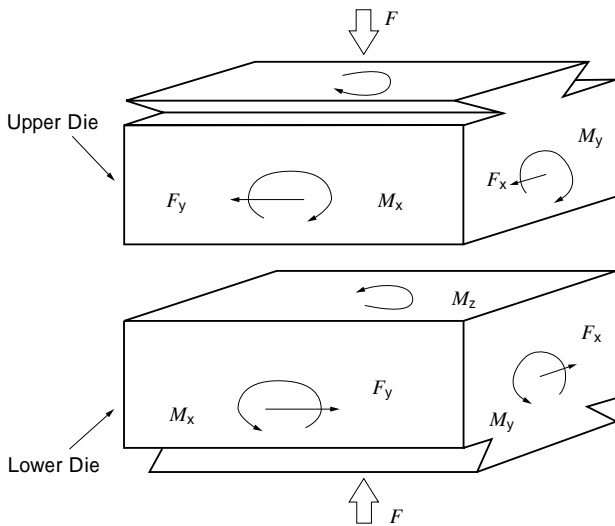
チタン合金製 40 インチ長翼ブレードの製造工程を第 1 図に示す。インゴットを 温度域で鍛造したのち、変態点以下の 温度域で鍛造し、 温度域で熱処理した。その後、すべての工程を 温度域で鍛造した。型打前素材はコンピュータ制御した GFM 鍛造機をもちいて製作した。この素材を、カウンタブローハンマで型打鍛造し、熱処理して製品とした。

2. ステップ鍛造法の開発

投入重量を低減するためには、ブレード形状に対してできるだけ機械加工代の小さい（肉厚の薄い）鍛造品をえることが重要である。肉厚を薄くすればするほど成形荷重は増大するため、当社が開発したブレード鍛造方案作成システム KForDeS-Blade (Kobe Forging Design System for Blade)³⁾ をもちいてブレード鍛造品の各肉厚に対する成形荷重を予測することにより、カウンタブローハンマの力量範囲内で肉厚を薄くした。設計どおりの肉厚を確保し、さらに欠肉のない鍛造品をえるためには、ハンマのエネルギーを有効に材料変形に活用でき、かつ欠肉の発生しない鍛造方法を検討する必要がある。ブレード鍛造時には、第 2 図³⁾に示すように、ブレードの長手方向を軸としたねじれに起因するスラスト力 (F_x, F_y)、およびモーメント (M_x, M_y, M_z) が金型に発生する。ここで、ブレードをねじれたまま鍛造する仕上鍛造法と、ねじれない形状に鍛造する平打鍛造法の 2 ケースについて、KForDeS-Blade をもちい鍛造中に金型に働く力を検討した。さらに、欠肉防止に関しては、有限要素法



第 1 図 Ti-6Al-4V 製 40 インチ長翼ブレードの製造工程
Fig. 1 Production sequence for 40-inch-long blade of Ti-6Al-4V



第2図 型打時に金型にかかるモーメント M とスラスト力 F
 Fig. 2 Moment M and thrust F loading on dies during forging

をもちい鍛造中の素材流動を検討した。

解析にもちいた仕上鍛造法と平打鍛造法のブレード形状を第3図に示す。(a)は、仕上鍛造法によりえられるねじれ角度をもった形状、(b)は、平打鍛造法によりえられるねじれのない(平らな)単純な形状を示す。

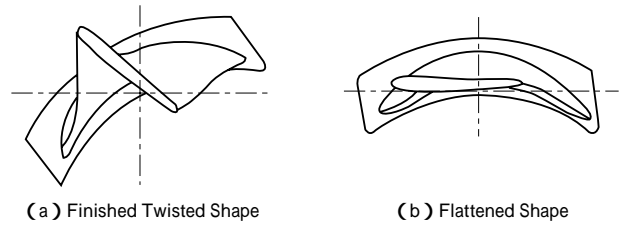
2.1 平打鍛造法と仕上鍛造法のハンマのエネルギー効率の比較

ハンマのエネルギーを材料変形に最大限に活用するには、スラスト力およびモーメントを極力発生させないことが重要である。ブレードの形状は、厚さが薄く長いから、第2図のモーメント M_z に比べて M_x と M_y は無視できると考えて、 M_z が最小になるような鍛造法を検討した。

KForDeS-Blade をもちいて計算した平打鍛造法の金型に発生するスラスト力 F_x とモーメント M_z を仕上鍛造法と比較して第4図、第5図に示す。仕上鍛造法の場合、長手方向の両端(植込部と翼端部)で、反対方向に大きなスラスト力 F_x が発生するため、大きなモーメント M_z が金型に発生する。いっぽう、平打鍛造法の場合、ほとんどスラスト力 F_x は発生しないのでモーメント M_z はほとんど発生しない。すなわち、仕上鍛造法では、ハンマのエネルギーの一部が金型に発生するモーメント M_z として消費されるため、設計した寸法まで鍛造することが困難であるのに対し、平打鍛造法の場合、ハンマのエネルギーが材料変形により有効に活用できるため、設計した肉厚に鍛造することが可能であると考えられる。平打鍛造法の場合、後工程として所定のねじれ角度を与えるねじり曲げ工程と寸法精度を確保する仕上工程が必要となり工程数は増加する。しかしながら、薄肉化による投入重量の低減を考慮すると、平打鍛造法が仕上鍛造法と比較して有効であると判断できる。

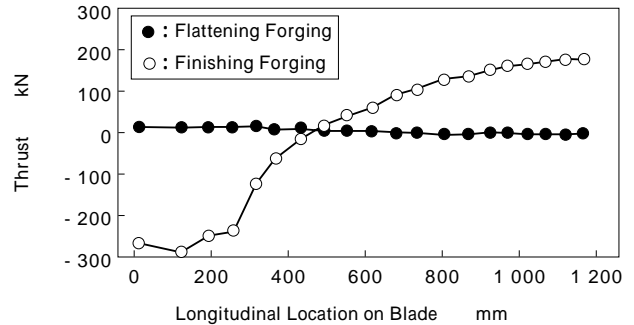
2.2 平打鍛造法と仕上鍛造法の素材流動の比較

剛塑性有限要素法(NASKA⁴⁾)をもちいて解析した平打鍛造法の場合、どの断面もほとんど一様に充填するのに対し、仕上鍛造法の場合、断面Cのa部



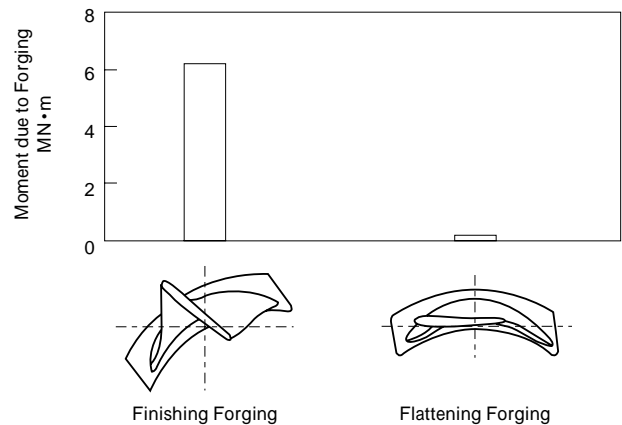
第3図 ブレードの仕上鍛造形状と平打鍛造形状

Fig. 3 Configurations of finished twisted shape and flattened shape of blade



第4図 平打鍛造法と仕上鍛造法との金型に発生するスラスト力 F_x の比較

Fig. 4 Comparison of the values of thrust F_x obtained by flattening and finishing forging processes



第5図 平打鍛造法と仕上鍛造法で金型に発生するモーメントの比較

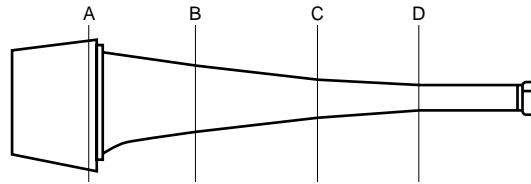
Fig. 5 Comparison of the values of moment M_z obtained by flattening and finishing processes

が充填しないことが予測された。これは、第7図に示すように、仕上鍛造法の場合、鍛造初期に断面C相当部の材料が金型面の左上に移動するため、金型面の右下(a部)が未充填になるためである。これに対して、平打鍛造法はこのような材料移動が起こらないことから、仕上鍛造法よりも欠肉が発生しにくいと考えられる。

ハンマエネルギーの最大限の活用、および材料充填の観点から、平打鍛造法は仕上鍛造法よりも設計どおりの肉厚を確保し、さらに欠肉のないブレード鍛造品を製造できる有効な鍛造方法であると考えられる。

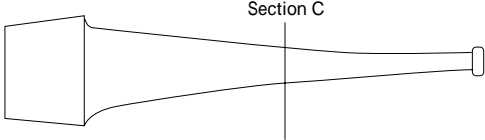
開発した平打、ねじり曲げ、仕上鍛造からなる3ステップ鍛造法を第8図に示す。

さらに、本プロセスにより鍛造した40インチ長さのチタン合金製ブレードの概観を写真1に示す。欠肉がなく設計どおりの肉厚の鍛造品がえられた。



	Flattening Forging	Finishing Forging
Section A		
Section B		
Section C		
Section D		

第 6 図 平打鍛造法と仕上鍛造法の変形解析結果
 Fig. 6 Comparison of deformation obtained at each section of the blade by flattening and finishing forging processes



	Flattening Forging	Finishing Forging

第 7 図 断面 C における平打鍛造法と仕上鍛造法のメタルフローの比較
 Fig. 7 Comparison of metal flow obtained at blade section C using two processes during forging

Flattening	
Twisting	
Finishing	

第 8 図 3 ステップ鍛造法
 Fig. 8 The three-step forging process

3. 機械的特性

上述の鍛造プロセスで鍛造したチタン合金製 40 インチ長翼ブレードを熱処理後、その品質を確認した。鍛造品の植込部と翼部の機械的性質を第 9 図に示す。ブレード全長にわたって、高い強度と靱性がえられた。翼部の引張強さ、耐力、および硬さが植込部より高いのは、

翼部が植込部よりも薄く、焼入時の冷却速度が大きいためである。

植込部と翼部のマイクロ組織を写真 2 に示す。植込部と翼部の 粒径は 10~15 μm と微細かつ等軸になっている。

回転曲げ試験による植込部の疲労試験結果を第 10 図に示す。10⁷ 回の疲労強さは 460MPa で、優れた疲労特性を示している。

むすび = 鍛造中に金型に働く力および材料流動の予測から、チタン合金 (Ti-6Al-4V) 製 40 インチ長翼ブレードの Near Net Shape 鍛造プロセスを検討した結果、鍛造中のハンマエネルギーの有効活用および材料充填の観点か



写真1 3ステップ法で鍛造したTi-6Al-4V製40インチブレード

Photo.1 40-inch-long blade forgings of Ti-6Al-4V produced using three-step forging process

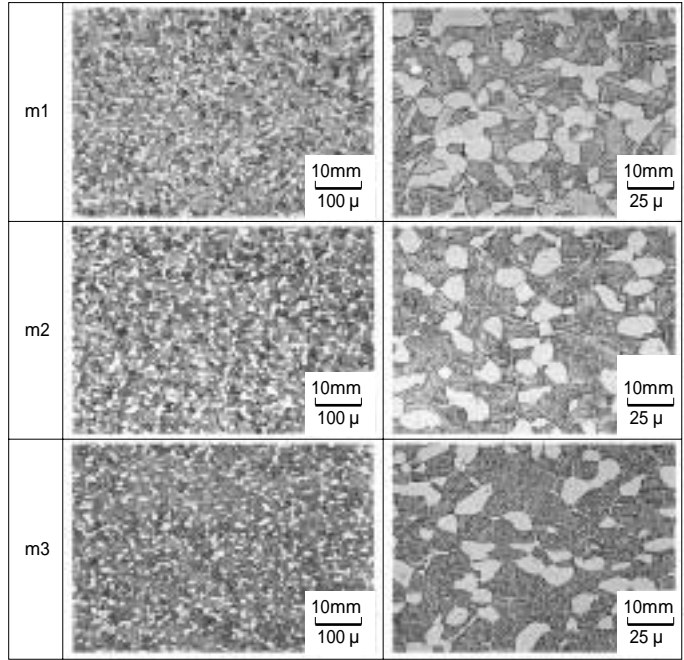
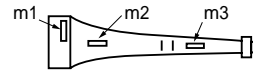
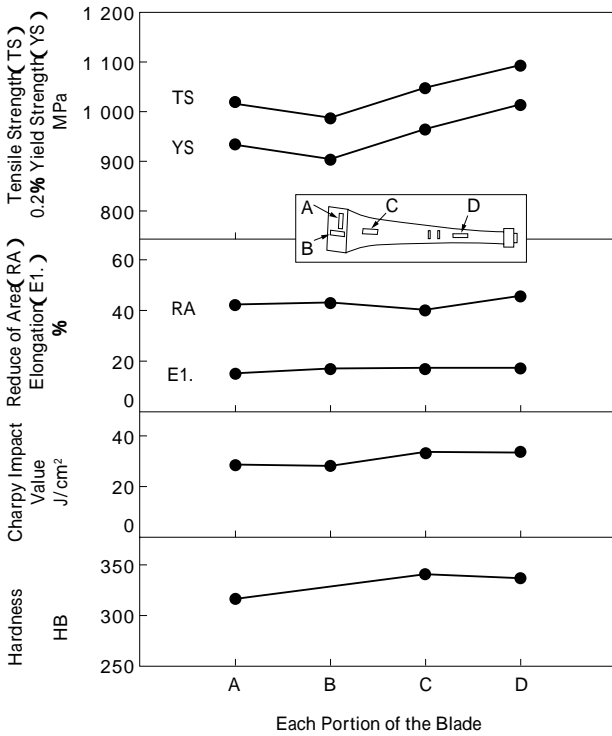
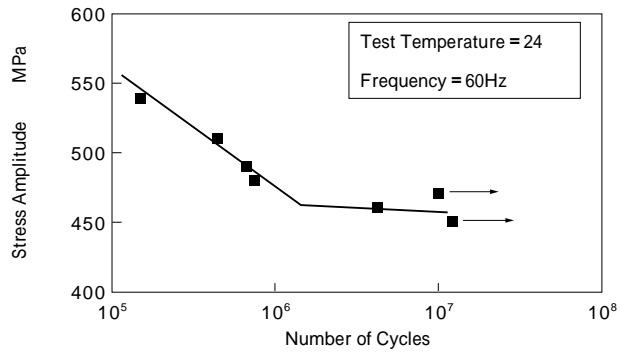


写真2 Ti-6Al-4V製40インチブレードのマイクロ組織

Photo.2 Microstructure of a 40-inch-long blade made of Ti-6Al-4V



第9図 Ti-6Al-4V製40インチブレードの機械的特性
Fig. 9 Mechanical properties of a 40-inch-long blade made of Ti-6Al-4V



第10図 40インチブレードの植込部の疲労特性
Fig. 10 High cycle fatigue strength of root portion of a 40-inch-long blade made of Ti-6Al-4V

ら、平打鍛造工程、ねじり曲げ工程、仕上鍛造工程からなる3ステップ鍛造法を開発した。

本プロセスをもちいて、400kN・mカウンタブローハンマにより40インチ長さのチタン合金(Ti-6Al-4V)製ブレードを鍛造した結果、設計どおりの肉厚に鍛造でき、かつ内部品質の優れた製品をえることができた。

参考文献

- 1) 荒木一ほか：火力原子力発電，Vol.39, No.6, (1988) p.15 .
- 2) 宮崎松生：金属，Vol.60, No.7, (1990) p.65 .
- 3) 津田 統ほか：R & D 神戸製鋼技報，Vol.37, No.4(1987) p.26 .
- 4) 豊島史郎ほか：第39回塑加連講論，(1988)，p.347 .