

(解説)

チタン合金製大形リング品のリング圧延技術の進歩

The Evolution of Near-net-shape Ring-rolling Processes for Large Rings Made of Ti-6Al-4V



谷 和人*
Kazuhito Tani



石外伸也*
Shinya Ishigai



佐藤隆夫**
Takao Sato



津森芳勝***
Yoshikatsu Tsumori

To reduce the weight of ring rolled face case front rings made of Ti-6Al-4V for turbo V2500 fan engines, a near-net-shape (NNS) ring-rolling process was developed. This was achieved by optimizing the ring-rolling process by improving the metal flow during ring-rolling. Moreover, to create better NNS rolled rings, a forging process for manufacturing a pre-form with a complex cross section was developed. As the result, the weight of NNS rolled rings was reduced by 55%.

まえばき = ターボファンエンジン V2500 を開発する基本契約書が 1983 年 3 月、日・米・英・独・伊 5 力国で調印された。このターボファンエンジン V2500 は、推力 25 000 ~ 33 000 ポンド、150 ~ 180 座席用の民間旅客機を対象としたエンジンで、現在エアバス社 A320 シリーズの旅客機に 2 基搭載されている。1988 年の販売開始以来 2004 年 12 月末までの累計で販売台数は 2 500 台にのぼり、それ以降も順調に生産が続けられている。

この V2500 エンジンには、チタン合金製 (Ti-6Al-4V) の大形のファンケースリング部品が使用されている。

従来、複雑な断面形状をもつリング品の製造は、小型リングロールミル装置により成形した単純断面形状をもつリング品を、機械加工により削りだして製造していた。ファンケースのような大型リング品は、既存の小型リングロールミル装置では、力量面および寸法面で製造不可能であり、さらに、価格競争力をえるために、単純断面形状のリング品からの削りだしではなく、複雑な断面形状をリング圧延により直接成形する NNS (Near-net-shape) リング圧延技術の開発が不可欠であった。本技術の開発により、大幅な材料の投入重量削減と機械加工費削減が達成できる。

ファンケース部品をチタン分野における当社の主力製品とすべく、チタン本部の総力をあげて開発に着手することとした。

まず、このファンケースを製造するにあたり、1985 年 10 月に大型リングロールミルを自社開発し、1986 年から試作を開始した。1987 年よりプロジェクトチームを発足し、「素材重量の 35% 削減」を目標にファンケースの NNS リング圧延技術の開発を開始した。本プロジェクト自体は、1 年あまりで終了したが、その後メンバーの変化はあるものの現在にいたるまで継続的に技術開発を行った結果、素材重量は当初の 1/2 以下を達成している。

一方、製造数も堅調に推移し、のべ納品数は 3 000 個に達し、今や当チタン本部の主力製品へと成長している。ここでは、当社にとって NNS リング圧延技術の開発のスタートとなったファンケースフロントに関して、その技術開発の推移を説明する。さらに、この NNS リング圧延技術をベースとした、エアバス A380 搭載エンジンの TRENT900 用 IPC (Intermediate Pressure Compressor) ケースのテーバ状の NNS リング圧延技術についても述べる。

1. ファンケースリングの概要

図 1 にターボファンエンジン V2500 の断面概略を示す。このエンジンには、多くのチタン合金が使用されているが、中でもファンケースは、チタン合金 Ti-6Al-4V 製で、直径約 1 700mm、全長約 1 150mm で、ファンケースフロント (長さ約 770mm) とリア (長さ約 400mm)

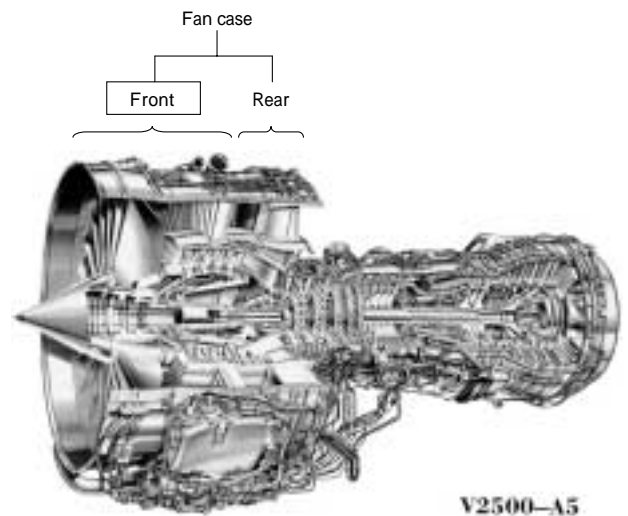


図 1 V2500 ターボファンエンジンの断面
Fig. 1 Cross section of V2500 turbo fan engine

* 鉄鋼部門 チタン本部 チタン技術部 ** ㈱コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部 応用技術部 *** ㈱コベルコ科研 高砂事業所



写真1 ファンケースフロント納品形状
Photo 1 Shipment shape of fan case front

と呼ばれる2つの部品をレーザービーム溶接で接合して組立てられる大形のリング部品である。

ファンケースフロントの納入形状を写真1に示す。最大外径約1700mm,最小肉厚約20mm,高さ約770mmの大形リング品である。さらに,外径部にはフランジ突起を有し,軸方向の内外径も一定ではなく傾きをもった複雑な断面形状を有している¹⁾。

2. チタン合金製リングの製造工程

図2にフロントの製造工程を示す。鑄塊を熱間プレスにより所定の寸法に鍛伸し丸棒(以下,ピレットと呼ぶ)に鍛造する。このピレットを所定の寸法に切断して鍛造素材とする。この鍛造素材を熱間プレスにより中心にポンチを挿入し,穴あけ素材を鍛造する。その穴あけ素材を熱間プレスにより肉厚方向に圧下し拡径することにより,リング圧延用の鍛造荒地を鍛造する。この鍛造荒地をリングロール装置でさらに肉厚方向に圧下し,周方向に伸ばすことによりリング状に圧延し,所定の径まで拡径する。このリングミル成形品を熱処理,機械加工し,製品検査および余長部試験により製品の品質を確認した後,出荷する。

3. 大型リングロールミルの新設

リングロールミルは,図3に示すように4種類のロー

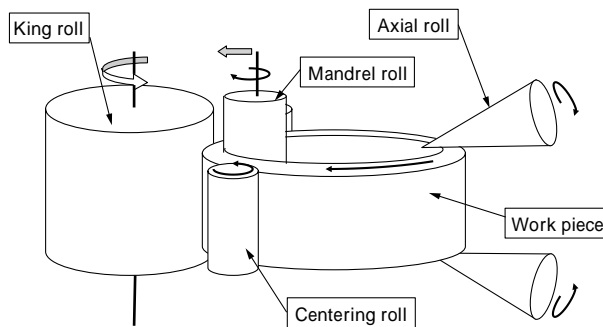


図3 リング圧延機の概略
Fig. 3 Ring rolling mill

表1 大型リングミルの設備概要
Table 1 Outline of ring rolling mill

Rolled dimension	Outside dia.	Max. 3 000mm
	Wall thickness	Min. 30mm
	Height	Max. 850mm
Weight of material		Max. 5 000kg
Pressing force		Max. 7.8MN

ルにより構成される。キングロール(以下, KR と呼ぶ)は駆動ロールでリング素材を周方向に回転させる。マンドレルロール(以下, MR と呼ぶ)は圧下ロールで KR の方向に所定の速度で移動する。リング素材は KR と MR の間にはさまれた状態で肉厚方向に圧下(圧延)され, 圧延方向(円周方向)に延ばされることにより, リングの径が広がっていく。センタリングロール(以下, CR と呼ぶ)は, 周方向に伸びた材料に曲げを与え, 真円度を確保する。また, アキシャルロール(以下, AR と呼ぶ)は, 圧延中の高さ方向の伸びを拘束する。

当社は, 大型のリングロールミルを 1985 年に設置した。この大型リングロールミルの特徴は, 大形のファンケースフロントを成形するため, 高さを 850mm と大きくしたこと, 複雑断面形状を圧延するために 800 トンという大きな加圧力を持つことにある。表1に設備仕様を示す。

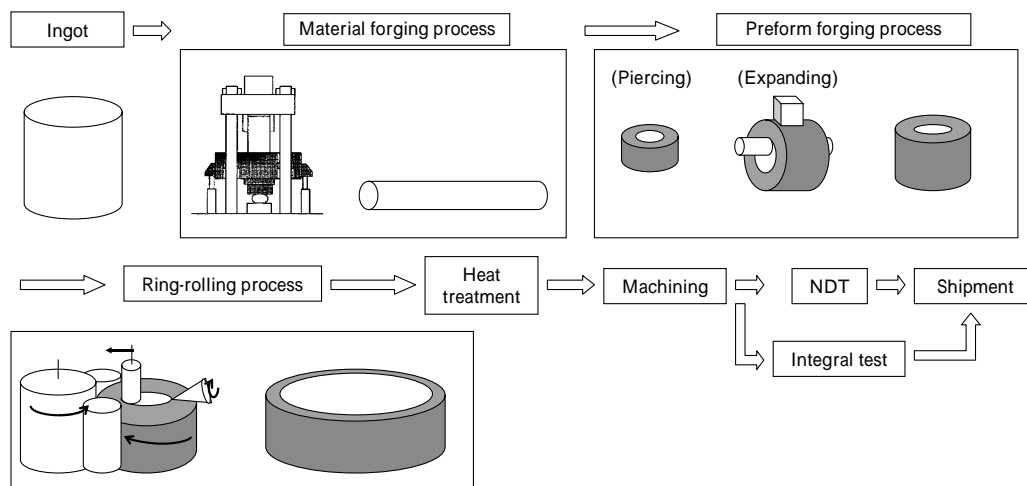


図2 リング圧延品工程概略
Fig. 2 Manufacturing process of ring rolled products

4. ファンケースフロントのリング圧延技術の変遷

大型リングロールミルを導入した当時は、複雑断面形状をもつリング製品は、単純断面のリング圧延品を機械加工により削りだして製造していた。

ファンケースフロントを量産製造するためには、従来の製造方法（矩形リング圧延品からの削りだし）では製造コストがかかりすぎてしまい、価格競争力が全くない状況であった。

そこで、製造コストの中で大きな比率を占める材料費の低減（投入重量の低減）を達成するために、技術開発本部（機械研究所，材料研究所），機械事業部（鋳鍛鋼工場，機械工場），およびチタン本部からなるプロジェクトチームを1987年に発足し，“投入重量35%削減”を目標に活動を開始した。

4.1 安定操業技術の適正化

薄肉大径のリング圧延においては、寸法が所定寸法よりも大きく拡がりすぎたり、真円度（長径と短径との差）が悪かったり、円筒度（上下内径差）が悪かったりすると、製品が確保できず廃却となるため、リング圧延の精度不良分を余肉としてリング圧延品に付加する必要がある（例えば、肉厚を0.1mm圧下しすぎると、径で約8mm拡がりすぎてしまう）。そこで、投入重量の削減を目的とした機械加工形状に近いNNS形状に成形するリング圧延技術を開発するにあたり、まず薄肉大径のリング品を精度よく圧延することが必要であり、リング圧延精度を向上する技術を開発することから始めた。

一般的にリング圧延精度には、外径寸法精度，真円度，円筒度があり，複雑形状断面のリング品の場合は，さらに突起充満性が加わる。外径寸法精度および真円度は，主にリング圧延の操業条件に影響をうけ，円筒度および突起充満性は，圧延ロール形状および鍛造荒地形状に影響をうける²⁾。

(1) 外径寸法精度

圧延中のリングは，CR や AR の圧力をうけ，若干弾性変形した状態で成形されているため，圧延中の外径測定値は真の外径を示していない。また，MR の送り速度が速いと，MR の送りを停止しても，圧延圧力の残留により，目標寸法よりも大きくなる。さらに，リングは熱間で圧延されるため，圧延終了時の材料温度が異なると，冷却後の収縮量の違いにより，冷材時の寸法も異なる。

そこで，圧延前後の変形量の低減には，CR の押付け力の適正化および圧延終了間際の AR の開放，残留圧延圧力の低減には MR 送り速度の低速化，さらに熱収縮量のばらつき低減には圧延終了温度の適性化を行った²⁾。

(2) 真円度

リングの真円度は，CR と MR での繰返し曲げによって決まる。図4は，矩形断面リングにおいて，CR の押付け力によって生じる曲げ応力と真円度の関係を示す。この図より，CR の曲げ応力が低すぎると矯正能力がないため真円度が悪くなる。一方，高すぎると圧延終了時に曲げ歪が残留し，同様に真円度は悪くなる。従って，CR の押付け力は降伏応力をやや上回る程度が最適と考えら

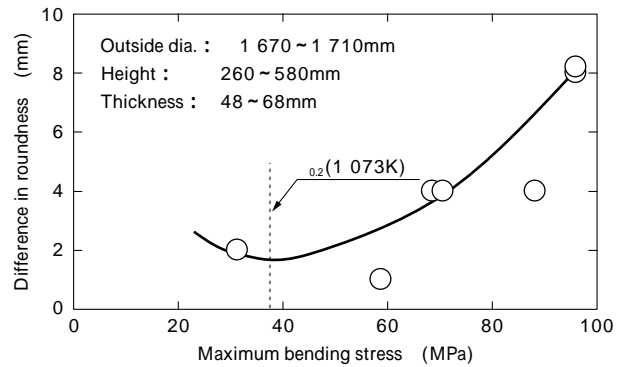


図4 センタリングロールによる曲げ応力と真円度との関係
Fig. 4 Effect of bending stress of centering roll on roundness

れる²⁾。

(3) 円筒度

円筒度は，上記で述べてきた圧延条件よりもロール形状およびリング荒地形状の影響をうける。

円筒度不良は，圧延中におけるリング材の高さ方向での圧延率が不均一になることにより生じる。矩形断面のリング品の場合，高さ方向での重量分布が均一であるため防止できるが，突起を有した複雑な断面形状を有するリング圧延の場合は，高さ方向での重量分布が不均一なため，圧延率を均一にすることは不可能である²⁾。

そのため，円筒度に関する設計基準として，リング圧延品の断面を高さ方向に上下2等分とし，上下間で材料流動がないと仮定して，上下区間の平均重量をほぼ等しくするようにし，かつ上下をできるだけ対称とすることにより，上下区間で圧延率がほぼ等しくなるようにした。

(4) 突起部の充満性

リング圧延においては，圧延とともに肉厚が薄く，突起高さも低くなるため，高さ方向の材料流動により突起部に材料が充満するという金型鍛造のような考え方は適用しにくい。すなわち，突起への充満過程とその後の突起減少過程の合算で突起高さがきまる。そこで，縮小モデル実験により，ロール形状が材料流れに及ぼす影響を検討し，適正な突起部形状を設計した。図5は，突起高さに及ぼす突起部の根元Rの影響を調べるために，鉛とアルミを用いた小型実験結果を示す。根元Rが大きいほど材料が突起部に流れやすくなり突起部の高さは高くなるが，さらに根元Rが大きくなると突起部の体積が増大し，反対に突起高さが減少していくことがわかる。この

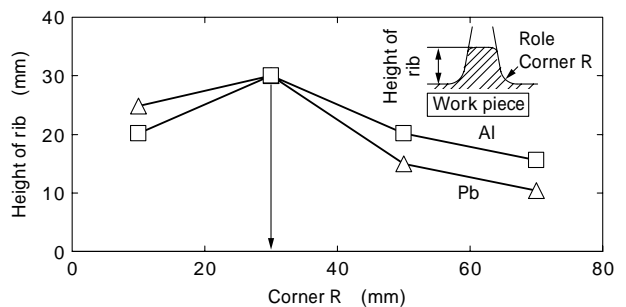


図5 突起部の根元Rと突起高さとの関係
Fig. 5 Effect of corner R on height of rib

実験結果から、根元 R は 30mm 程度が妥当と考えられる²⁾。

本プロジェクト活動の操業条件の適正化と複雑断面形状のリング圧延化により、当初の投入重量に対し、約 15%の重量低減を達成した。

4.2 NNS リング圧延技術の開発

安定操業技術を確立した後、1991 年より、NNS リング圧延技術の開発へと展開した。

NNS 化においては突起部に積極的に材料を流動させる必要がある。複雑断面形状のリング圧延では、リング圧延中の高さ方向の材料流れは一律でない。突起部は、材料流入により重量が増加するが、その近傍では、反対に重量が減少する。そこで、鍛造荒地と複雑断面形状のリング圧延品の断面を高さ方向に分割して、分割領域ごとに鍛造荒地とリング圧延品の高さ方向の材料流動量を詳細に評価した。その結果、従来以上に突起部に材料を流動させることが可能であることが推定できた。

さらに NNS 化するためには、高さ方向への材料流動をより多くおこなわせる必要がある。従来の仕上ロールだけの圧延では、材料流れに限界があるため、複数の圧延ロールを用いる圧延プロセスの開発により、従来よりも大幅な NNS 化が達成できた。

一方では、大幅な NNS 化に伴い、リング圧延品の高さ方向の重量分布差が大きくなるため、リング圧延中の高さ方向の圧下率がより不均一となり、円筒度が保てない問題が発生する。そこで安定して NNS 化するために、円筒度の設計基準の見直しを行った。

従来（上下 2 分割）のリング圧延実績より、高さ方向の材料流れは、中央部から上下部に流れ込んでいることが推定できた。したがって、円筒度の設計基準を、断面を高さ方向に 3 分割し、3 分割の重量分布をリング素材に対して中央部で少なく、反対に上下部で多くし、さらに上下部の重量をほぼ等しくし、圧延後に 3 分割領域の平均重量分布が等しくなるようにすることにより、3 分割領域の圧延率をほぼ等しくなるようにした。これにより、操業を安定させた上で円筒度を保つことができた。図 6 にリング圧延品の重量分布の比較を示す³⁾。

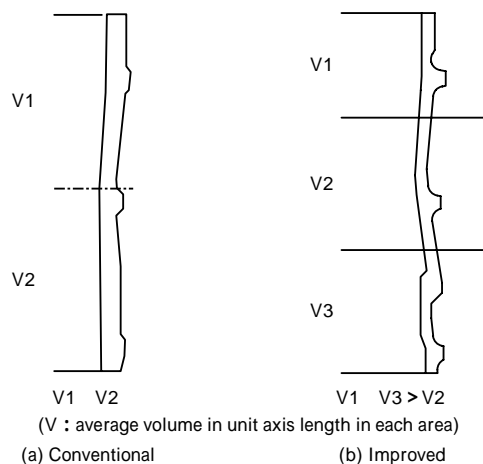


図 6 リング圧延品の体積配分法の比較

Fig. 6 Comparison of volume distribution in axis direction between conventional and improved rolled rings

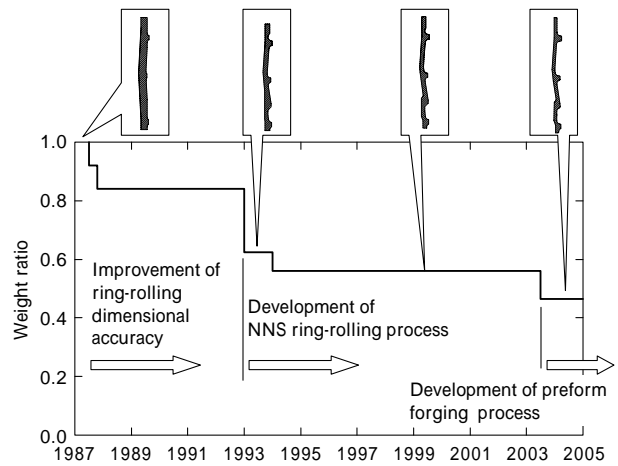


図 7 圧延重量および形状推移

Fig. 7 Transition of weight and shape of NNS ring

さらに、プレスによる鍛造素材への穴あけなど、製造プロセスの見直しによる歩留まり向上も含め、当初の投入重量に対し、45%の重量低減ができた。

4.3 荒地鍛造技術の開発

矩形断面形状の鍛造荒地を用いてのリング圧延では高さ方向への材料流動が限界に達していたことから、更なる NNS 化を展開するために、2001 年より、複雑断面形状をもつ鍛造荒地の鍛造技術の開発へと展開した。

複雑な断面形状をもつ鍛造荒地を成形するには、プレスの設備能力内で、精度よく、かつ効率よく鍛造することが必要である。金型を用いての成形では精度はよくなるが、大きなプレス力量が必要となる。一方で、通常的自由鍛造で精度よく成形するためには、大幅な鍛造時間が必要となる。当社では、変形解析手法を用い、プレス力量面および突起充満性の面から検討し、自由鍛造で精度よく、かつ効率よく鍛造できる鍛造プロセスを開発した。このプロセスにより複雑な断面形状をもつ鍛造荒地を成形し、リング圧延を行った。

その結果、投入重量は、開発当初と比較して、55%の削減を達成した。

図 7 に、開発当初からの NNS リング圧延技術の開発に伴う重量低減推移および圧延形状推移を示す。NNS リング圧延技術開発に伴い、リング圧延形状が薄肉化され複雑な断面形状に展開していることがわかる。

本製品に関しては、上記で述べてきたリング圧延品の製造技術の開発による投入重量の削減に加え、鑄塊製造技術の開発による機械加工などで発生する切粉など（スクラップ）の再使用化による鑄塊コストの低減、材料組織制御技術の開発によるピレット製造工程および荒地鍛造工程の一部省略、さらには、切削条件の適正化による機械加工時間の短縮など、コスト低減対策を徹底して行ってきた。

その結果、シェア 100%を維持し、現在では、当本部の主力製品へと成長した。

5. リング製造技術の拡張

その他の大形リング品としては、TRENT900 エンジン用 IPC ケースを 2003 年に新規に受注、製造した。

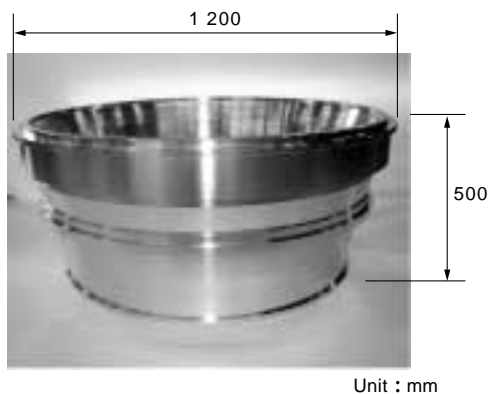


写真2 IPC ケース納品形状

Photo 2 Shipment shape of intermediate pressure compressor case

このエンジンは、大手航空機メーカーであるエアバス社が2006年の就航に向けて開発している最新超大型旅客機A380（総2階建，標準座席数555，最大800）に，4基搭載されるエンジンである。

このケースの形状の特徴は，ファンケースフロントと比較して，外径約1200mm，高さ約500mmと小さいが，内外径は円錐状に角度をもっており，かつ外径には突起をもっている（写真2）。

通常，円錐状のリング品を製造する方法としては，矩形断面形状をもつ鍛造荒地から矩形断面形状をもつリング品に圧延し，機械加工により削りだす方法，または円錐台状の鍛造荒地から円錐台状のリング品に圧延する方法がある。前者は，材料歩留まりが著しく悪くなり，後者は円錐台状のリング荒地の製造が難しいという問題がある。当社は，矩形断面形状をもつ鍛造荒地から円錐台

状のテーパリング品を圧延する新プロセス技術を開発し，円錐台状でかつ外径には突起を有するNNSリング圧延品を製造した⁴⁾。

むすび=当社は，V2500エンジン用ファンケースフロントの受注を契機として，大型リングミルを自社開発して設置し，NNSリング製造技術の開発をスタートした。以降，技術開発本部，鑄鍛鋼工場，(株)コベルコ科研など他部署の協力を得ながら，継続的に技術開発に取り組んできた。その結果として，当製品の大幅なコスト低減が図れ，シェア100%を堅持し，チタン本部の主力製品へと成長した。

先人の先見性および継続的な技術開発の賜物である。

さらには，これらの技術をベースとした更なる技術開発により，海外とのコスト競争に打勝ち，TRENT900/IPCケースへの受注にもいった。

今後も継続的に技術開発を展開し，B787用エンジンTRENT1000IPCケースなど新たな大型リング品の受注拡大に努め，大型リング品の世界的な地位を確固たるものとしていきたい。

参考文献

- 1) 西村 孝 ほか：金属，7月号（1990）p.41.
- 2) 安井 健一：金属，Vol.66, No.6（1996）p.546.
- 3) 谷 和人 ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.49, No.3（1999）p.19.
- 4) 谷 和人 ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.3（1999）p.108.