

V2500 エンジン用ファンケースのリング圧延技術

谷 和人*・石外伸也*・武村 厚*・豊島史郎**・佐藤隆夫***・金丸信夫***

*鉄鋼カンパニー・チタン技術部 **技術開発本部・機械研究所 ***鋼コベルコ科研

Profile Ring-rolling Process of Fan Case Front for V2500 Turbo Engine

Kazuhito Tani・Shinya Ishigai・Atsushi Takemura・Shiro Toyoshima・Takao Sato・Nobuo Kanamaru

To form a near-net-shaped ring, a profile ring-rolling process was developed with an optimum ring-rolling operation, improved volume distribution in the axial direction, and metal flow estimation using 2.5D FEM . Moreover ,to prevent the formation of defects during ring-rolling, a microstructural control process was developed to enhance ductility at elevated temperatures .Using these processes ,Ti-6Al-4V fan case front rings for V2500 engine were manufactured . These rings had extremely high dimensional precision , and had no defects .

まえがき = リング圧延とは、製品径よりも小さなリング状の素材を駆動ロールのキングロールと圧下ロールのマンドレルロール間で圧延し、リング素材の肉厚を減少させながら所定の径まで拡径していく成形方法である。

突起を有するリング製品の場合、素材重量を低減するためには、目標とする断面プロファイルに近い Near Net なリング形状に成形することが必要であり、外径寸法精度、真円度、円筒度、および突起部の充満性からなる寸法精度の確保が重要となる。

また、素材重量の低減にともないリング圧延品の肉厚が薄くなり、リング圧延中の材料温度が低下しやすくなることから、リング圧延中にわれが発生しやすくなるため、材料の高温延性を向上する必要がある。

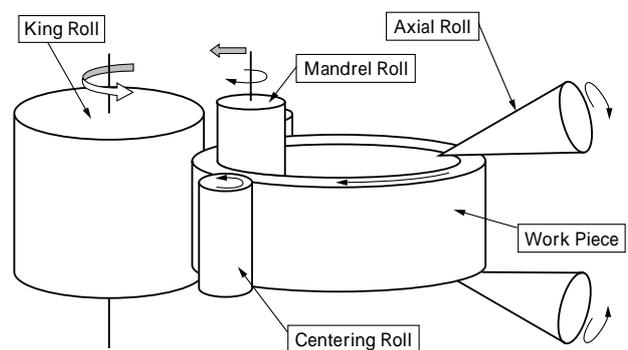
寸法精度の確保に関しては、まずアキシャルロールおよびセンターリングロールの圧下力、およびマンドレルロールの送り速度の適性化による外径寸法精度および真円度の確保が重要である。また、軸方向の体積配分を適正化し上下非対称変形を防止することによる円筒度の確保、さらに、圧延中の材料流れを予測する変形解析技術を活用した充満性の確保が重要である。

材料の高温延性の向上に関しては、モデル実験により加工熱処理条件と組織および高温延性との関係を調査し、温度域に加熱し変態前後にかけて連続して鍛造するプロセスをリング圧延素材の製造に適用した。

本稿では、プロファイルリング圧延技術の現状までの成果と、この圧延技術およびプロセスを適用して V2500 ターボファンエンジン用ファンケースリングフロントを製造した結果について報告する。

1. リング圧延機の概略

一般的なリング圧延機は、第 1 図に示すように 4 種類のロー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、マンドレルロール(以下、MR と呼ぶ)は圧下ロールで KR に向かって所定の速度で移動する。リング素材は KR と MR との間にはさまれ、KR により強制的に周方向に回転され、KR と MR 間で圧下されることにより、肉厚を減少しながら、拡径されてい



第 1 図 リング圧延機の概略
Fig. 1 Ring-rolling mill

く。

材料の真円度はセンターリングロール(以下、CR と呼ぶ)により確保され、肉厚減少による軸方向への材料流れは、アキシャルロール(以下、AR と呼ぶ)により拘束される。

2. プロファイルリング圧延技術の開発

リング製品の断面形状に対して Near Net に成形するプロファイルリング圧延は、寸法精度の確保が重要である。寸法精度には、おもに外径寸法精度、真円度(同一断面内の最大外径と最小外径の差)、円筒度(リング両端の外径差)、突起部の充満性がある¹⁾。

2.1 外径寸法精度

圧延中のリングは、真円ではなく、CR や AR の圧下により変形した状態で成形され、終了直後に弾性変形分だけもどるため、外径値は圧延終了前後で異なる。また、MR の送り速度が速いと送りを停止しても圧延は若干継続されるため、目標の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、圧延終了温度により冷却後の収縮量も異なる。

圧延終了前後の変形量の低減には、CR の押付け力によって生じる弾性変形量の予測、圧延終了間際の AR の開放と送り速度の低速化、さらに各圧延品ごとの熱収縮量のばらつき低減には、送り速度や圧延時間の適性化をおこなう¹⁾。

2.2 真円度

リングの真円度は、CR と MR での繰り返し曲げによって形成される。CR の圧下力が低すぎると真円度の矯正能力がなく、また高すぎると圧延終了時に曲げ歪みが残留する。第2図は、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測定結果である。この結果から、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れる¹⁾。

2.3 円筒度

円筒度不良は、圧延中におけるリング材の軸方向での圧下率が不均一になることにより生じる¹⁾。矩形断面のリング品の場合、軸方向での体積配分を均一にすることにより防止できるが、突起をもったプロファイル圧延の場合は、軸方向の体積配分を均一にすることは不可能である。そのため、従来はリング圧延品の断面を軸方向に2等分し、上下区間で軸方向の平均体積配分をほぼ等しくなるようなロール形状を設計していた。しかしながら、実際はリング圧延中に上下区間で材料の流出入があるために、上下の圧下率が異なり、より Near Net な形状を目指す際には良好な円筒度を確保することに問題が生じた。

プロファイルリング圧延の場合、軸方向の材料流れは一樣でなく、位置により材料流れの方向は異なるため、圧延中に軸方向で体積が増加したりあるいは減少したりする領域が発生する。そこで、材料流れから断面を軸方向に複数個に分割し、各分割領域ごとに体積増減量を考慮した体積配分をあたえることにより、圧延終了時に各領域間の平均体積配分がほぼ等しくなるようなロール形状の設計方法を採用した。

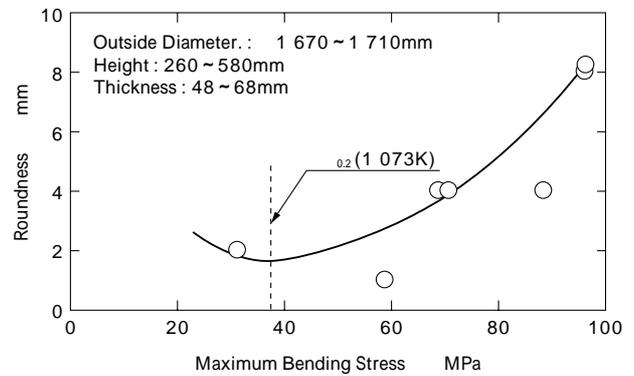
2.4 突起部の充満性

突起部は、リング圧延中における突起部への軸方向の材料流入により形成される。軸方向の材料流れは、リング素材形状およびロール形状により大きく影響を受ける。したがって、ロール形状およびリング素材形状が材料流れに及ぼす影響を検討することにより、適性なロール形状、リング素材形状を設計する必要がある。そのために、以下の変形解析手法を開発した。

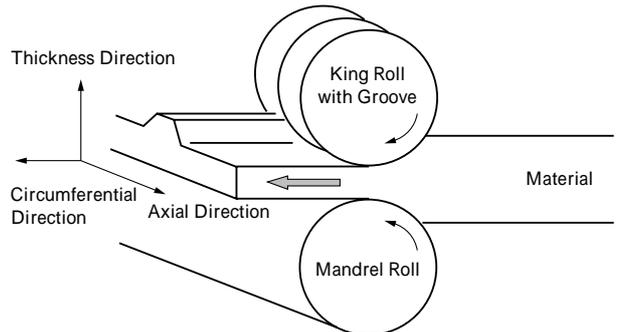
リング圧延中の材料は、KR と MR とにはさまれ圧下されることにより肉厚方向、軸方向、周方向の3方向の変形を受ける。リング圧延の材料流れを精度よく予測するためには、三次元の変形解析手法をもちいなければならないが、膨大な解析時間が必要となり現状では実用的ではない。

いっぽう、平面歪みモデルなどの二次元の変形解析手法では突起の形成に大きな影響をあたえる周方向の材料流れをまったく考慮できないため、変形予測の精度に問題がある。そのため、解析時間および解析精度の面で、平面歪みモデルに周方向の材料速度を考慮した拡張一般化平面歪みモデルをもちいたリング圧延用の変形解析技術を開発した。

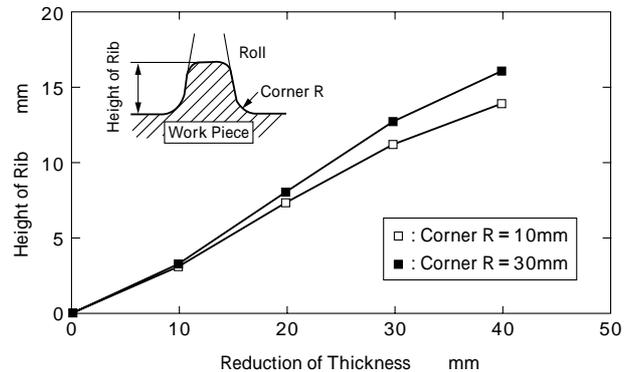
第3図に開発中の変形解析モデルの概略を示す。第4図は、ロール孔型の根元Rを変化させた場合の突起部形状への影響を示す計算結果の例で、この解析により、ロール孔型形状の設計指針がえられる。なお、この解析



第2図 センターリングロールによる曲げ応力と真円度との関係
Fig. 2 Effect of bending stress of centering roll on roundness



第3図 リング圧延変形解析モデル
Fig. 3 Modeling for ring-rolling process by finite element method



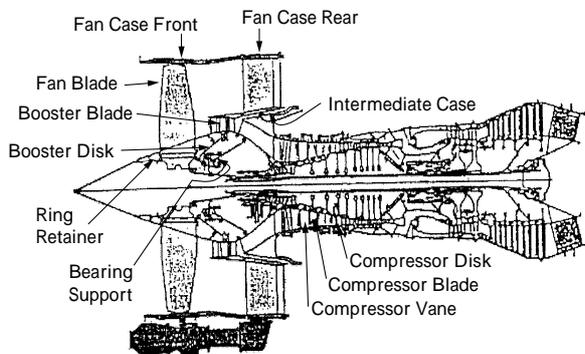
第4図 突起部の根元Rと突起高さとの関係
Fig. 4 Effect of corner R on height of the rib

手法では、周方向の材料速度を実機材の変形挙動にあうように設定するため、周方向の材料速度の予測方法が今後の課題である。

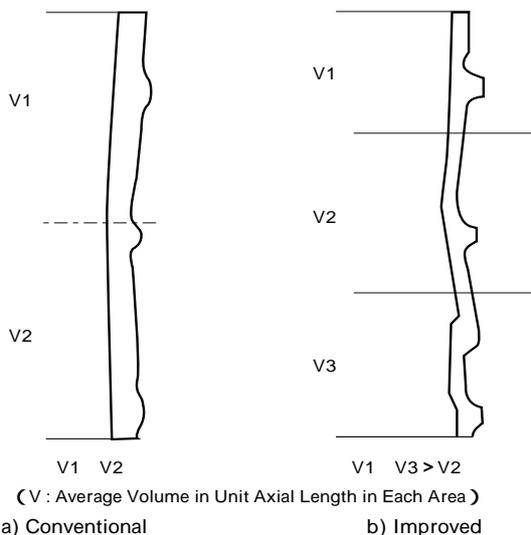
3. チタン合金製ファンケースリングの製造

3.1 ファンケースリングの概要

第5図にV2500ターボファンエンジン断面の概略を示す²⁾。ファンケースは、チタン合金製(Ti-6Al-4V)で、フロントとリアと呼ばれる2個のリングを接合することにより構成されている。フロントの納入形状は、最大外径約1700mm、高さ約770mmでチタン合金製のリング品では大型である上に、外径部にはフランジ突起を有し、内外径も一定ではなく軸方向に傾きをもった複雑な断面形状を有している¹⁾。



第5図 V2500 ターボファンエンジンの断面
Fig. 5 Cross section of the V2500 turbo fan engine



第6図 リング圧延品の体積配分法の比較
Fig. 6 Comparison of volume distribution in axial direction between conventional and improved rolled ring

3.2 フロントの製造工程設計

3.2.1 ロール形状の設計

ロール形状は、円筒度に大きく影響するため、軸方向の体積配分が重要である。従来の設計方法(上下2分割)による圧延実績より、軸方向の材料流れは、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、断面を軸方向に3分割し、3分割の体積分布をリング素材に対して中央部で若干少なく、上下部で若干多くし、さらに上下部の重量をほぼ等しくすることにより、圧後に3分割領域の平均体積配分が等しくなるようなロール形状を設計した。第6図にリング圧延品の体積配分法の比較、第7図に今回のリング圧延形状の概略を示す。

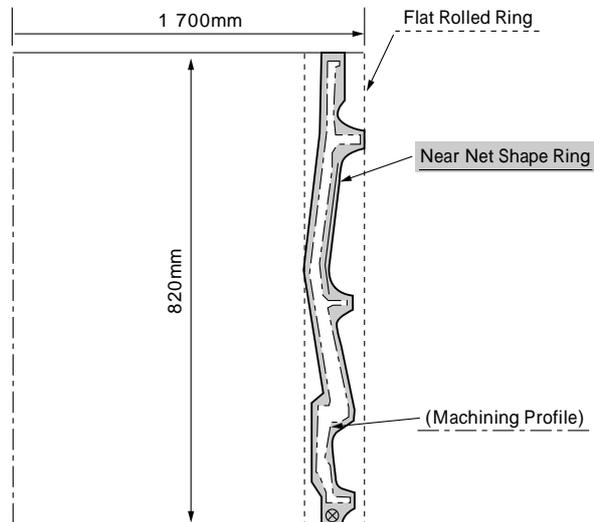
3.2.2 リング素材の製作

フロントに要求されている機械的特性をえるには、少なくとも熱間の最終工程であるリング圧延を + 温度領域でおこない、等軸な + 組織をえる必要がある。

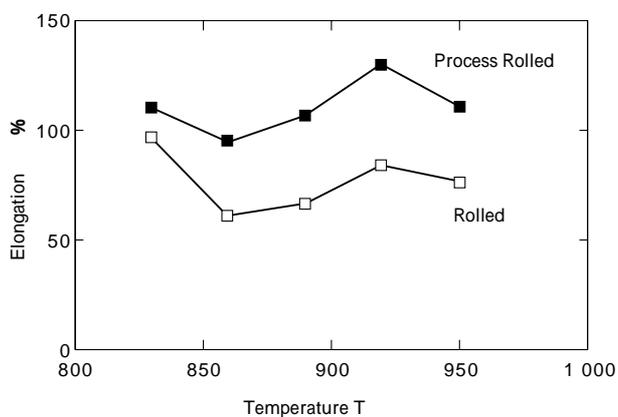
いっぽう、旧 粒界に沿って連続的に析出した広幅の相(粒界相)が存在する場合、+ 温度領域の熱間成形でわれを引き起こしやすい^{3),4)}。

そのため、リング圧延の前工程であるリング素材を製造する工程で、粒界相を抑制する製造方法について検討した。

加工熱処理条件と組織および高温延性との関係を調査



第7図 リング圧延形状
Fig. 7 Cross section of rolled ring for the fan case front



第8図 圧延材とプロセス圧延材との高温伸び比較(L方向)
Fig. 8 Comparison of the elongation at elevated temperature between as rolled and process rolled materials in L direction

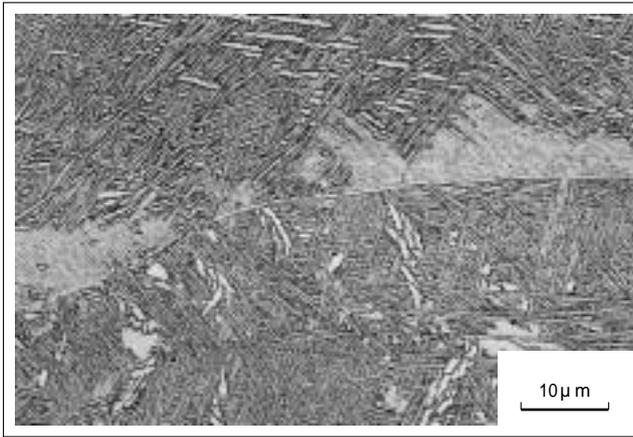
するために、均一な変形および再現性の面から圧延実験をおこなった。

第8図に高温引張試験における破断伸びを示す。写真1には 温度域に加熱し 組織のまま圧延を終了した 圧延材と、 温度域に加熱し 組織から + 組織への変態途中で圧延した プロセスを模した圧延材(以下、プロセス圧延材と呼ぶ)のミクロ組織を示す。ミクロ組織に関しては、 圧延材には広幅で連続した粒界が存在しているのに対して、 プロセス圧延材には認められない。高温破断伸びに関しては、 プロセス圧延材のほうが 圧延材よりも40%以上も改善されている。

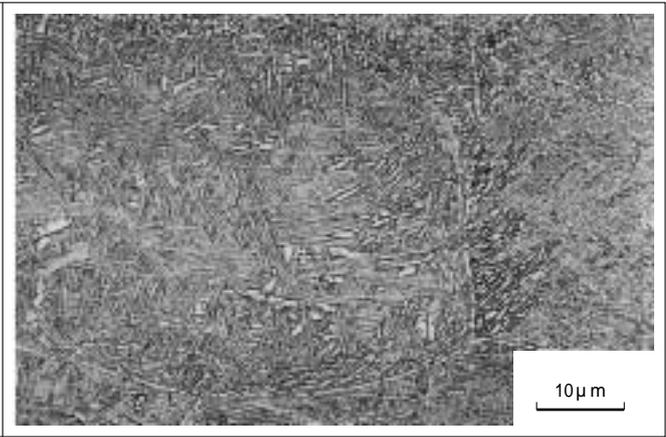
このように、 温度領域に加熱し、材料が 組織から + 組織に変態するまで連続して成形する プロセスは粒界の生成を抑制し、高温での延性を改善できる非常に有効な加工熱処理方法である^{3),4)}ことを確認し、リング圧延素材の製造工程に適用した。

4. 製造結果

写真2は、プロファイルリング圧延技術をもちいて圧延したフロントの外観を示す。一つの突起部(写真2のa部)にロール孔型への未充填が発生したが、外径寸法精度、真円度、円筒度あわせて5mm以内で成形でき、



As Rolled Material



As Process Rolled Material

写真1 圧延材と プロセス圧延材とのマイクロ組織比較
Photo 1 Comparison of microstructure between as rolled and as process rolled materials



写真2 フロントのリング圧延形状の外観
Photo 2 Appearance of Ti-6Al-4V front ring

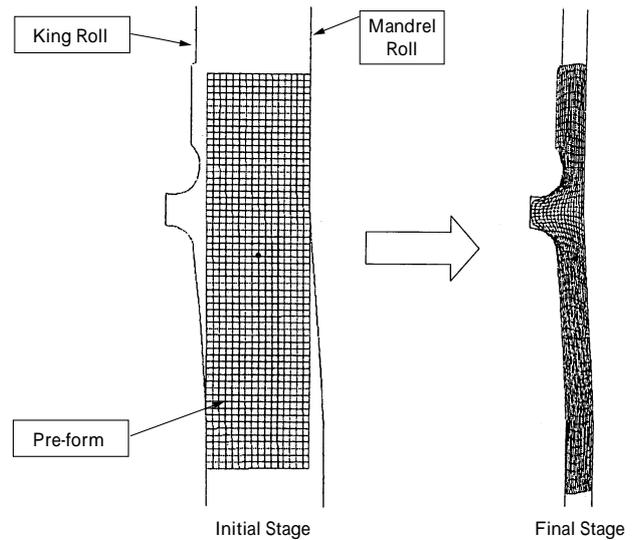
機械加工後の製品は十分に確保できた。その結果、矩形断面のリング圧延品と比較して、約50% 素材重量を削減することができた。突起部の未充填については、変形解析でも予測できており、第9図に未充填の発生した突起部近傍におけるリング圧延の変形予測を、また第10図には、突起部の形成挙動の予測と実績との比較を示す。圧延中材料は突起部に向かって軸方向に流れ込んでいくが、突起部全体には充填しない。これは、ロール形状またはリング素材形状が適正でないためであり、今後の変形解析技術の改善を含めて適正化を図っていきたい。

さらに、リング鍛造工程に プロセスを適用したことにより、機械加工後の超音波探傷検査で内部欠陥のないことが確認できた。

むすび = Near Net なリング圧延品を成形するために、圧延条件の適性化、軸方向の体積配分の適正化、さらに軸方向への材料変形挙動を予測するための変形解析技術の開発により、寸法精度に優れたプロファイルリング圧延技術を開発した。

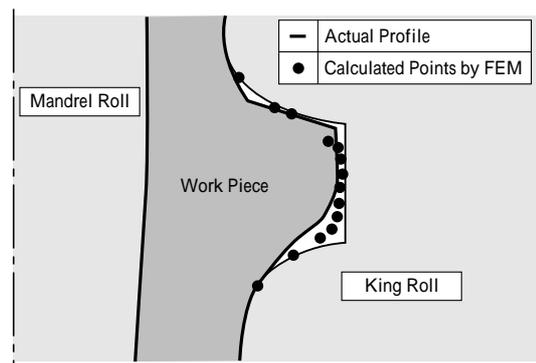
このプロファイルリング圧延技術および プロセスをフロントの製造に適用した結果、寸法精度に優れ、内部欠陥のないリング圧延品を製造できた。

変形解析技術に関しては、すべてのリング形状に適用



第9図 フロント突起部周辺におけるリング圧延前後の断面変形図

Fig. 9 Deformation at cross section in rib area for fan case front during ring-rolling



第10図 リング圧延中の突起部の変形挙動

Fig. 10 Deformation at cross section on the rib during rolling

できるように引き続き改善を図り、プロファイルリング圧延技術を向上させていく。

参考文献

- 1) 安井健一：金属，Vol.66，No.6（1996），p.546.
- 2) 安井健一ほか：チタニウム・ジルコニウム，No.34，（1986），p.87.
- 3) 武村 厚ほか：CAMP-ISIJ，Vol.5，No.5（1992），p.1801.
- 4) 武村 厚ほか：CAMP-ISIJ，Vol.6，No.5（1993），p.1595.