

# 世界最大環帯面積の 48インチ鋼製タービン最終段動翼

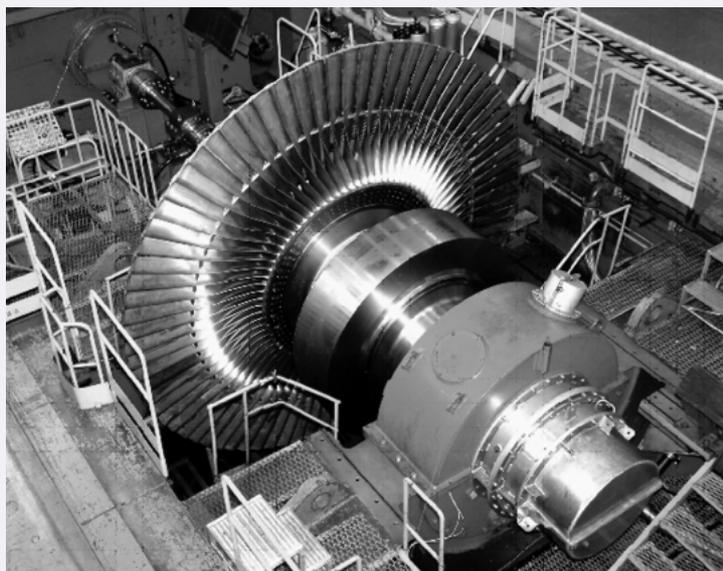
## 48-Inch Steel Last-Stage Blade with the World's Largest Annulus Area

工藤 健 Takeshi Kudo  
依田 秀夫 Hideo Yoda

齊藤 英治 Eiji Saito  
浅井 邦夫 Kunio Asai



(a)



(b)

### 48インチ鋼製タービン最終段動翼(a)とロータの実物大回転試験の様子(b)

日立製作所は、世界最大の環帯面積を持つ鋼製の48インチ(122 cm)最終段動翼を開発した。最新の開発技術を適用し、高効率化・高信頼性を図り、工場での実物大回転試験で良好な結果を得た。

国際エネルギー機関(IEA)の予測によれば、2030年の世界のエネルギー需要は、2000年比で66%増に達するとされている。今後も世界的な経済成長とともに電力需要が着実に増加し続ける中で、大型火力・原子力発電が担うエネルギー基盤の役割は大きく、発電プラントの主機である蒸気タービンに対しては、以前にも増して高効率化・高信頼性の要求が高まっている。

とりわけ、蒸気タービンの最終段長翼は、タービンの効率、出力およびタービンプラント全体の大きさにかかわ

る重要な構成部品の一つである。日立製作所は、翼構造にCCB構造を採用し、最新の解析技術と長年蓄積してきた実験データを基に翼構造の新設計を行い、高効率・高信頼性のニーズに応えた各種鋼製タービン最終段長翼のラインアップを進めてきた。さらに今回、新開発の世界最大環帯面積(翼の先端径と根元径で形成される環の面積)を持つ48インチ(122 cm)最終段長翼をそのラインアップに加えた。

## 1 はじめに

日立製作所は、火力発電用蒸気タービン用として、50

Hz、3,000 r/min機では43インチ(109 cm)、60 Hz、3,600 r/min機では46インチ(117 cm)までのCCB(Continuous Cover Blade)鋼製タービン最終段長翼

を、最新の解析技術と長年にわたって蓄積した実験データを基に開発、設計し、ラインアップしている<sup>1)</sup>。さらに、世界最大の環帯面積を持つ50 Hz、3,000 r/min機用48インチ(122 cm)鋼製タービン最終段長翼(60 Hz、3,600 r/min機用40インチ(102 cm)翼)を開発した。開発した48インチ鋼製タービン最終段長翼を近年ニーズが高まっている600 MW級の大型石炭火力発電用蒸気タービンへ適用した場合、低圧車室数を2車室から1車室へ低減することが可能となり、機器本体だけでなく、プラント建屋のコンパクト化が図れるという利点がある。

この翼の開発に際しては、15年以上の運転実績を継続している3,600 r/min用40インチチタン翼の高効率・高信頼性技術を継承し、12Cr高強度材を開発して翼の軽量化を図り、性能・強度・振動特性の設計条件を満足する最適設計を行った。この結果、世界最大の環帯面積(12.0 m<sup>2</sup>)を有する50 Hz、3,000 r/min用48インチ鋼製タービン最終段動翼を開発できた。また、フルスケールの回転試験や翼溝の引張試験を実施し、信頼性の検証を実施した。

ここでは、48インチ鋼製タービン最終段動翼の開発技術の概要と、各種試験結果について述べる。

## 2 開発翼の特徴

### 2.1 翼仕様

48インチ鋼製タービン最終段動翼の仕様を表1に示す。環帯面積は12.0 m<sup>2</sup>であり、3,000 r/min用鋼製翼では世界最大である。タービン翼の連結構造には、カバーやタイボスによって全周の翼を接触連結させるCCB構造<sup>2)</sup>を採用した(図1参照)。CCB構造は、接触連結による振動減衰効果が大きいこと、共振応力が低減され、非定常流れによって励起されるランダム(不規則)振動やフラッタの抑制効果が大きいなどの利点がある。1986年に開発した26インチ(66 cm)翼以降、このCCB構造による翼構造の基本コンセプトを踏襲しており、信頼性の面で高い評価を得てきている。

### 2.2 翼材の開発

48インチ最終段動翼材は、数多くの使用実績を持つ従来の高強度12Cr鋼を基にしたもので、化学組成の最適化、熱処理方法の改善により、材料の靱性を落とすことなく高強度を実現している。また、実機大の素材をあらかじめ製造し、鍛造性や熱処理の検証を行い、各部位で強度の偏差がないことを確認した。

### 2.3 タービン長翼設計技術

蒸気タービンの高効率化では、最終段長翼の環帯面

表1 48インチ鋼製タービン最終段動翼の仕様  
開発した3,000 r/min 48インチ翼の環帯面積は、鋼製で世界最大である(3,600 r/min 40インチ翼は比例縮小設計)

主要仕様		3,000 r/min 48インチ翼	3,600 r/min 40インチ翼
翼長	インチ	48	40
	mm	1,219	1,016
環帯面積	m <sup>2</sup>	12.0	8.3
平均直径	mm	3,124	2,604
材質		12Cr鋼	12Cr鋼

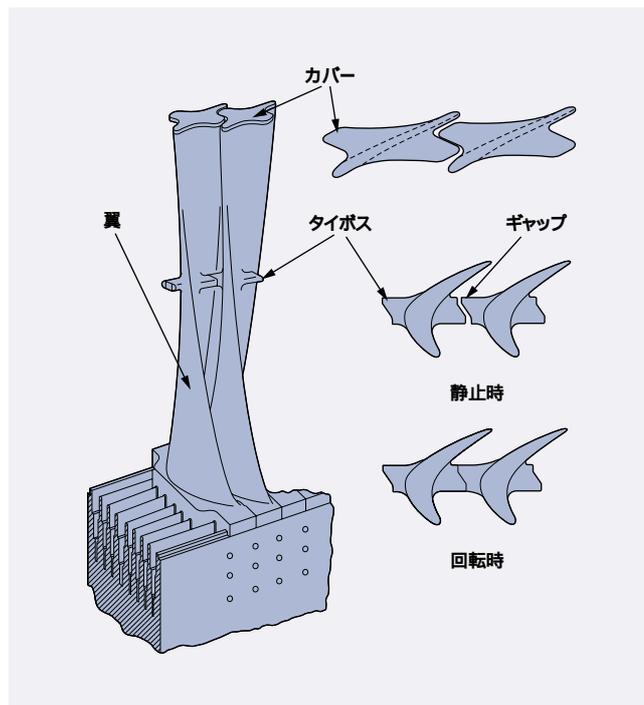


図1 CCB(Continuous Cover Blade)の構造  
連結部としてカバーとタイボスを持ち、カバーは回転開始と同時に接触連結し、タイボスは回転上昇の途中で接触連結する。

積の増加は大きく寄与する。鋼製48インチ最終段長翼の開発では、以下に述べる最新の技術を適用し、高効率化を図っている。

蒸気タービンの低圧段では、最終段に近づくにつれて環帯面積が急拡大し、蒸気流れの三次元性が大きくなる特徴があるため、性能設計に際しては、静動翼の三次元フローパターンの最適化が重要である。近年の流れ解析技術の向上により、性能設計に湿り条件や相変化も加味した静動翼の三次元乱流解析を活用し、蒸気流量、段落負荷、損失を精度よく予測した<sup>3)</sup>(図2参照)。

さらに、翼型の設計には実験計画法を導入することで、設計パラメータを効率よく調査し、広範囲の流入角に対する損失特性のロバスト(堅ろう)性を確保している。

CCBは、カバーやタイボスの接触面で遠心力によって発生するアンツイスト(ねじり戻り)を拘束することにより、隣り合う翼を連結する構造である。そのため、構造設計に関しては、カバー・タイボス部の接触を考慮した非線形

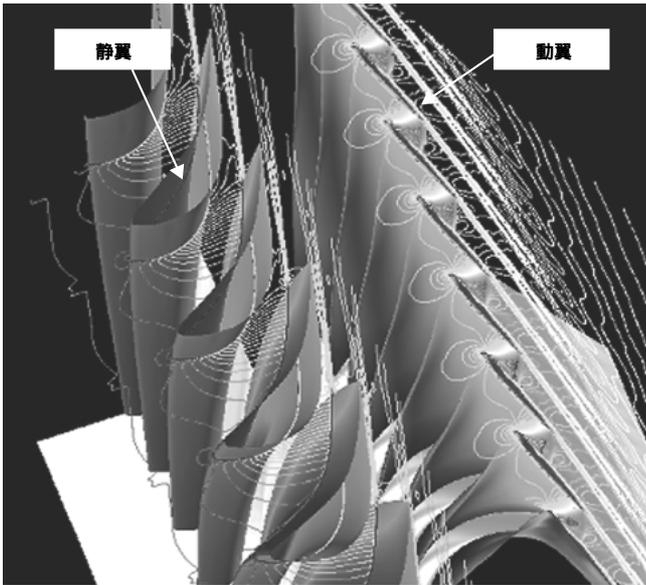


図2 静動翼三次元湿り乱流解析例  
湿りを考慮した乱流解析により、実際に即した静動翼間の流れを把握し、最適化設計を図る。

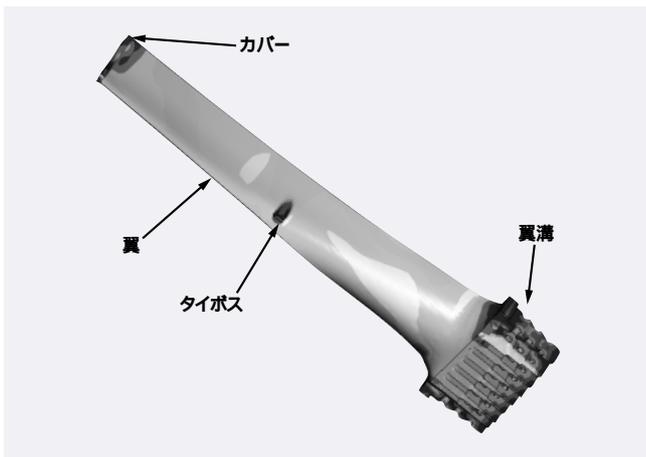


図3 低圧最終段長翼構造解析例  
接触を考慮した構造解析により、応力分布や回転による翼の変形状況が精度よく予測できる。

接触解析を適用することで、回転時の翼型変形量を考慮した性能評価を実施している。同時に、回転中の翼に発生する応力が材料の許容応力以下となるように、翼形状の最適化を図っている(図3参照)。

また、ロータに翼を固定する溝部についても、フォーク形溝のピンと穴部の接触を考慮した非線形接触解析による応力評価を行った。フォーク幅やピン径などの形状パラメータの調査により、翼とロータの断面平均応力と局所応力を低減する溝構造の最適化を図った(図4参照)。

## 3 信頼性確保技術

### 3.1 フルスケール回転試験による振動特性確認

回転中の振動特性を把握するため、実物大の翼を製

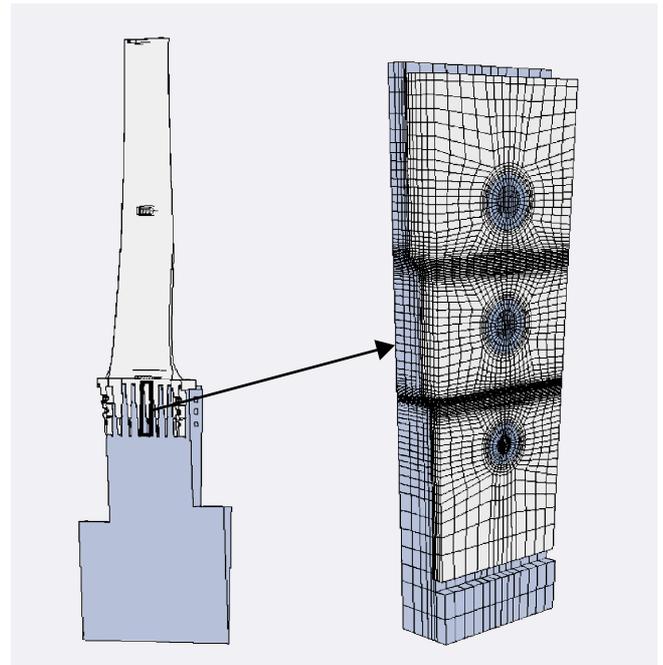


図4 翼溝の構造解析例  
接触を考慮した構造解析により、形状パラメータの最適化を図った。

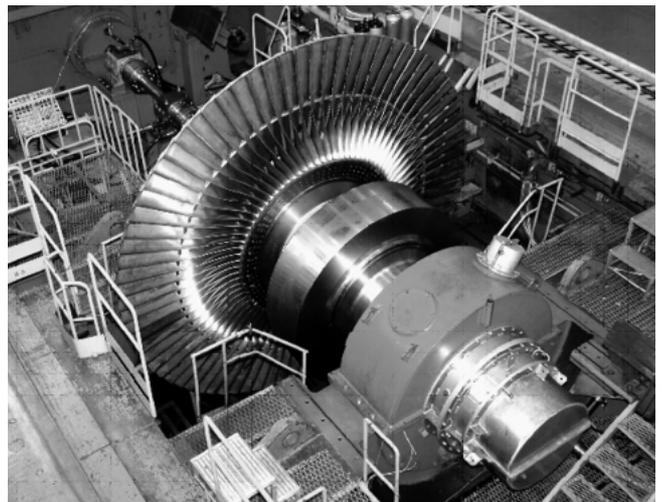


図5 実物大回転試験でのロータの外観  
実物大の試験翼により、回転試験を実施した。

作し、試験ロータに植え込み、回転試験を実施した(図5参照)。これにより、運転回転速度で共振点から十分離調した振動特性を持つことを確認した(図6参照)。また、回転時の翼溝部の応力を測定し、得られた応力が材料の許容応力に比べて十分低いことを確認した。

### 3.2 実物大溝モデルの引張破壊試験

運転中に翼溝に発生する応力の分布と、破断強度の予測結果を検証するために、実物大の翼溝モデルを作成し、引張破壊試験を実施した。その結果、翼溝の延性強度は、120%以上の超過速度負荷荷重に対しても十分な余裕があることを確認した(図7参照)。

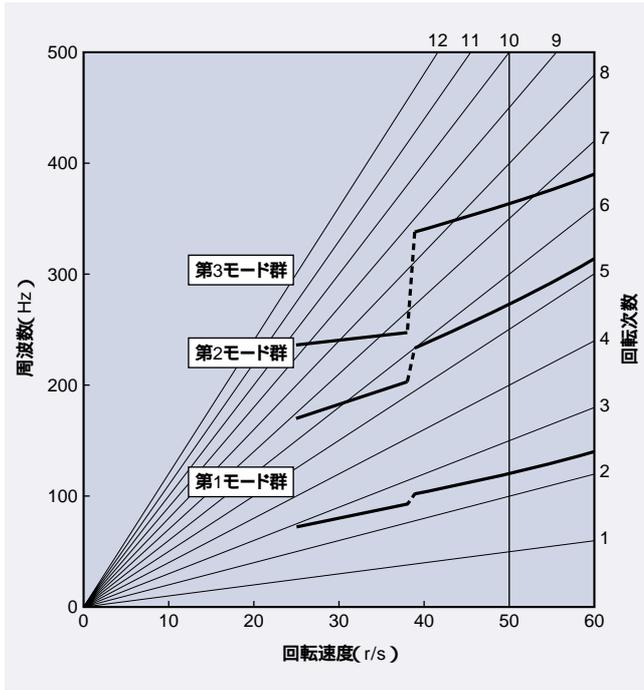


図6 キャンベル線図  
運転回転速度において、共振点からの十分な離調を確認した。

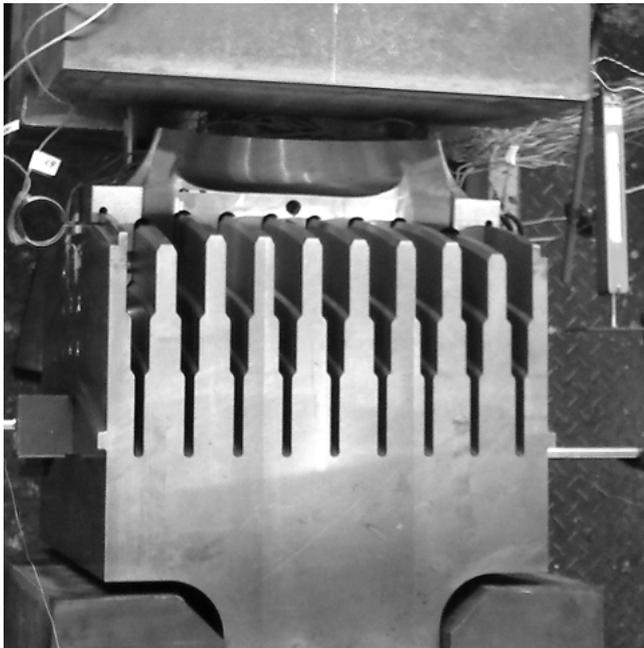


図7 引張試験用翼溝モデルの外観  
実物大のフォーク溝の引張破壊試験により、破断強度と各フォークの応力分布を確認した。

## 4 おわりに

ここでは、世界最大の環帯面積を持つ新開発の48インチ鋼製タービン最終段動翼について述べた。

この翼は、日立製作所が長年蓄積した実験データや、最新の解析技術を最大限活用して開発したもので、高効率・高信頼性により、顧客のニーズと環境への負荷低減に応えるものである。

日立製作所は、今後も、高効率・高信頼性タービン長翼のラインアップ化を進めていく考えである。

### 参考文献

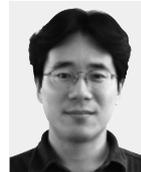
- 1) 町田, 外: 蒸気タービン用CCB長翼, 日立評論, 84, 2, 169 - 172 (2002.2)
- 2) 齊藤, 外: 3000 rpm用43インチ最終段翼の開発, ターボ機械, 27, 8, 485 - 501(1999.8)
- 3) Senoo, et al.: Three-Dimensional Turbulent Flow Analysis through Turbine Blades, Proc. of the 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., 197 - 200(1998.10)

### 執筆者紹介



工藤 健

1990年日立製作所入社, 電力グループ 火力・水力事業部タービン設計部 所属  
現在, 蒸気タービンの開発・設計に従事  
E-mail: takeshi.kudo.fn@hitachi.com



依田 秀夫

1998年日立製作所入社, 電力グループ 火力・水力事業部タービン設計部 所属  
現在, 蒸気タービンの開発・設計に従事  
E-mail: hideo.yoda.xq@hitachi.com



齊藤 英治

1987年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 所属  
現在, 蒸気タービンの研究開発に従事  
日本機械学会会員  
E-mail: eiji.saito.vd@hitachi.com



浅井 邦夫

1997年日立製作所入社, 日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在, 蒸気タービンの研究・開発に従事  
日本機械学会会員, 日本材料学会会員  
E-mail: asai@gm.hrl.hitachi.co.jp