

## 蒸気タービン翼の高性能化技術

### 300 tの遠心力に耐える翼

蒸気タービン翼は、固定されている静翼と回転する動翼があり、それらが対となって機能することで所定の電気出力や性能を達成できる極めて重要な部品です。典型的な高速回転機械である蒸気タービンでは、動翼に大きな遠心力が掛かるとともに、翼が長くなるほど複雑な振動形態を持つため、設計や開発に多大な労力が必要になります。このため、タービンの最後方にありもっとも長い翼である最終段動翼の設計・開発能力は、タービンメーカーの技術力のバロメータとさえ言われています。

東芝は、開発実績に裏打ちされたデータベース、最新の解析技術、及び試験設備をすべて駆使して蒸気タービン翼の開発を行っています。

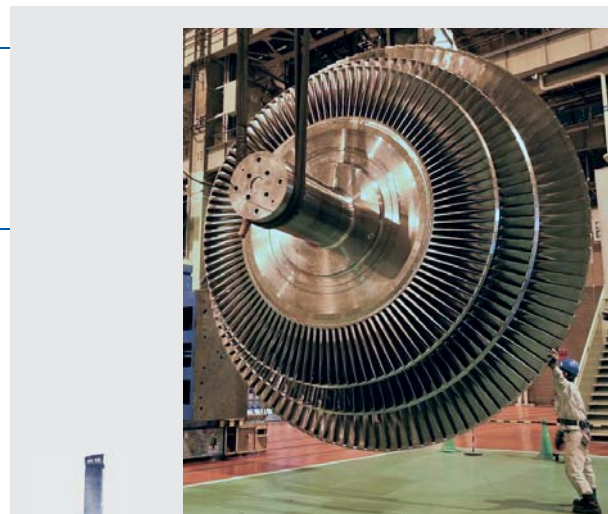


図1. 52 in翼を装着した回転試験ローター — 蒸気タービンにとって重要な最終段動翼は、前の2段落を含む3段落を実サイズで製作し、実際に回転させて最終検証を行います。



図2. 52 in翼 (単体) — この翼は、将来の主力機種となるAP1000™用として最新の流体設計や構造解析を駆使して開発されたものです。

表1. 52 in翼の主要諸元

項目	諸元
回転数	1,800 rpm
翼長	約1,320 mm
最外径	約5 m
最外径での周速	約480 m/s
重量 (1本当たり)	約56 kg
遠心力 (1本当たり)	約300 t
本数 (1段当たり)	約100本

の蒸気のエネルギー(主に運動エネルギー)は発電には使うことができません。この運動エネルギーの損失を小さくするには、流出する蒸気の流れを小さくすることが有効です。より長い翼にすると、蒸気が通過できる面積が大きくなって蒸気の流れが小さくなるため、効率の高い蒸気タービンが設計できます。

しかし最終段動翼を長くすれば、翼には当然大きな遠心力が加わることになります。東芝が米国向け原子炉AP1000™用に開発した大型の52インチ (in) 翼をその2段落前の翼とともに組み立てた回転試験ロータを図1に示します。ロータに装着する前の単体の翼を図2に、主要諸元を表1に示します。52 in翼は、今後60 Hz地域の当社主力機種のAP1000™に適用し、回転数は1,800 rpm、最大外径は約5 m

に達します。最大外径での周速度は約480 m/sとなることから、翼1本当たりの遠心力は約300 tです。AP1000™の最終段動翼としては600本以上使うことから、その総遠心力は187,000 tにも達します。

#### 振動への配慮と構造上の特徴

最終段動翼では、過大な遠心力に耐えることはもちろんのこと、その開発にあたり更に難しいのは振動特性を把握することです。複雑な振動形態をもたらす主な原因を次に挙げます。

- (1) 長翼であるため多くの振動モードが存在
- (2) 過大な遠心力が掛かるため、回転上昇に伴い固有振動数が変化
- (3) 隣の翼やロータとの間に締結部が存在するため、トライボロジー

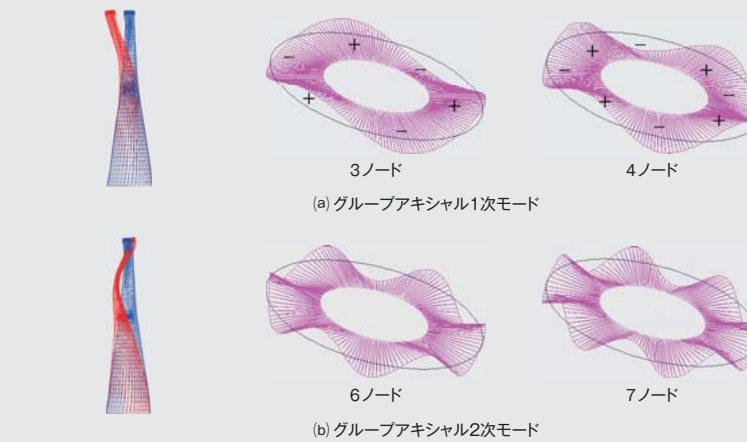


図3. 翼の振動モード — 翼長が長い複雑な振動形態となることから、単一の翼としてではなく、すべての翼が接続された状態での振動モードを把握する必要があります。

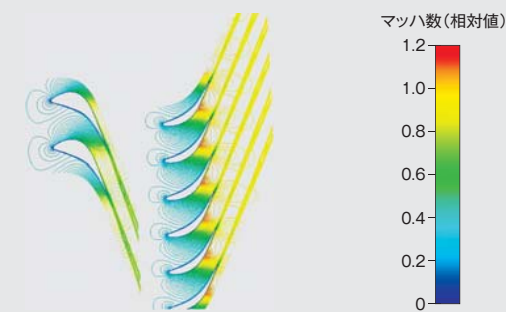


図4. 流体解析結果 — 翼型の決定には最新のCFDを駆使した解析が不可欠であり、高マッハ数の流れ場を考慮した流体解析が行われます。

を考慮した設計が必要

(2)について、身近なギターの調律を例にすると、弦の張力を調整することで音の高さ(固有振動数)を調整するように、蒸気タービン翼でも回転による遠心力が加わることで同様に固有振動数が変化します。

近年、コンピュータによるシミュレーション技術が発達し、開発の初期段階で固有振動数を高い精度で予測できるようになりました。翼の基本的な振動形態(振動モード)の一例を図3に示します。この翼の場合、すべての翼が連結されている(全周一群)ため、単一の翼としての振動モードだけでなく、すべての翼が連結された状態での振動モードを考える必要があります。これらのシミュレーションで使用するデータベースは既存の翼の特性データで構築されて

おり、このデータベースの豊富さが当社の技術力を支えています。こうして設計した翼は、最終的には実寸大の翼を製作し、図1のような回転試験ロータを使って回転状態での振動数や遠心応力を確認することになります。

#### 流体設計

最終段動翼の開発でもう一つ重要なポイントが流体設計です。流体面での最終段動翼の特徴は、次のとおりです。

- (1) 翼の外周の周速が非常に速く、高マッハ数(音速との比)の流れ場になっている
- (2) 翼長が長いので、翼根部と外周部では流れの状態が非常に異なり、3次元性が強い
- (3) 負荷により流れの状態が変化しやすく、逆流する可能性さえある

このため、流体も最新のCFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) を駆使して解析を行います。その一例として、翼外周部での流れの状態を3次元的に解きマッハ数分布で表わした結果を図4に示します。急激な衝撃波やはく離がなく、流れがスムーズであることがわかります。このような解析を通じた性能予測から翼型(翼の形)の設計を行い、半径方向に最適な翼型を積み重ねていきます。

#### 湿り蒸気に対する配慮

原子力タービンは多くの段落が湿り蒸気内で運転されており、特に最終段動翼はこの湿り度をもっとも高くなります。湿り蒸気は、蒸気の中に水滴が混在し、極めて流体の抵抗が大きい状態です。高速で回転している翼に水滴が衝突することによって、性能低下やエロージョン(水滴による侵食)が起きる可能性があります。この現象に対処するため、翼に溝を切り遠心力で水滴を吹き飛ばしたり、フレームハードニング(火炎焼入れ)によって最終段動翼自体の硬さを増したりしています。

#### 今後の展望

代表的な蒸気タービン翼である最終段動翼の開発では、従来の実績に裏打ちされたデータベース、最新の解析技術、及び試験設備のすべてが不可欠になっています。今後も当社は、これらすべてを兼ね備えたメーカーとして、高性能で信頼性の高い製品を提供していきます。

野本 秀雄

電力システム社  
首席技監