

最適反動翼を採用した高効率蒸気タービン

韓国K Power社KwangYang Combined Cycle Power Plantの事例

High-performance Steam Turbine with Optimized Reaction Blades

藤井 秀敏 Hidetoshi Fujii
木村 哲晃 Tetsuaki Kimura

瀬川 清 Kiyoshi Segawa



図1 韓国K Power社KwangYang Combined Cycle Power Plant向け200 MW蒸気タービンの高圧タービン部
高圧タービンロータをケーシング下半部に組み込んでおり、高圧タービンには日立製作所が新規開発した最適反動翼が全段落に採用されている。

1.はじめに

近年、火力発電プラントにおいては、環境保全の観点から燃料消費量およびCO₂排出量の低減を実現するため、プラントの高効率化へのニーズが全世界的に高まっており、蒸気タービンにも、熱効率の向上が強く要求されている。

日立製作所は、火力発電向け蒸気タービン用として、高効率化をめざして動翼の開発を続けてきた。特に、中小容量蒸気タービンの高圧タービン部に適用される翼長が相対的に短い動翼においては、翼長方向に占める境界層や二次流れ領域といった空気力学的損失の割合が大きくなるため、このような流れ場の特徴を考慮した高性能翼形の開発が必要となる。

そこで、スチームパス設計において反動度の最適化を行い、さらに高圧タービン用動翼の翼形設計に実験計画法を導入し、流入角変化に対して損失特性が緩慢（ロバスト）な新しい

動翼を開発した。

この動翼はコンバインドサイクル用200～300 MWクラス蒸気タービンの高圧部に適用され、実機性能試験で大幅な効率向上を確認した。

ここでは、韓国K Power社のKwangYang Combined Cycle Power Plant向けタービンを中心に、新開発した高圧タービン向け最適反動翼について述べる（図1参照）。

2.最適反動翼の開発

2.1 開発方針

高圧タービンの内部効率を向上するには、小径・多段落化が効果的であることから、スチームパス設計では各種内部効率向上策を取り入れたタービンに対して、段落数、根元径および根元反動度などをパラメータとした最適化計算を実施し、

近年、新規火力発電プラントは海外向けが主体で、かつCO₂排出量の低減をめざすため、蒸気タービンにおいても熱効率の向上が強く要求されている。しかしながら、翼長が相対的に短い動翼においては、翼長方向に占める境界層や二次流れ領域といった空気力学的損失の割合が大きくなるため、このような流れ場の特徴を考慮し、新しい設計思想に基づいた最適反動翼を開発した。これまで50 Hz用コンバインドサイクル発電設備向け蒸気タービン2機の高压タービン部に適用し、大幅な高压タービンの高効率化を達成してきた。今回、韓国K Power社KwangYang Combined Cycle Power Plant（蒸気タービン出力200 MW）向け高压タービンに、この最適反動翼を適用して、納入した。この機は最適反動翼を適用した初の60 Hz機であり、これまでの50 Hz向け実績機と同様に、大幅な効率向上を達成することを実機性能試験で確認した。

最適点を求める（図2参照）。また、このスチームパス設計では、流れ解析および実験結果を基にした各種損失モデル（翼形損失や二次流れ損失など）が組み込まれている。今回開発した動翼は、タービン効率が最も高くなる段落数・根元反動度の組み合わせを求め、開発翼の設計条件としている。

スチームパスの最適化を実施したタービンは、従来日立製作所において採用されてきた高压・中圧タービンと比較して、より高い反動度を有しており、このタービンに適用される新しい動翼の設計について以下に述べる。

新規開発した最適反動翼は、高压タービン部への適用を目的とし、翼長に応じて適用プロフィール（断面形状）を区分することにより、タービンの各段落について性能面でさらに最適な翼プロフィールを適用可能とした点に特徴がある。

ここでは、各翼プロフィール適用範囲は、流れ場の特徴から下記2種類に区分している。

Region1: 翼長が短く、側壁損失が支配的となる領域

Region2: 翼長が比較的長く、側壁損失の影響が少ない領域

各領域における流れ場に適した翼として、計2種類の最適反動翼「HX翼」を開発した。

Region2向けのHX翼は、これまで日立製作所が開発し、多数の実機に適用してきた高負荷動翼をベースにして、高性

能化の観点から根元反動度の向上を図り、改良されたものである。

ここでは、Region1向けに適用されるHX翼の開発概要について述べる。

2.2 HX翼の開発概要

前節で述べたように、翼長が短く、側壁損失が支配的となる段落においては、Region1向けのHX翼（以下、HX翼とのみ記す。）を適用する。

動翼入口の速度三角形を図3に示す。静翼出口の絶対速度は回転する動翼の周速度により、図に示すような相対速度で動翼に流入する（流入角 α_1 ）。この相対速度の方向が動翼の幾何学的入口角（ β_m ）から離れるほど翼形損失は大きくなる傾向を示す（図4参照）。従来翼形の場合、特にこの流入角 α_1 に対する損失特性が敏感であるという問題があり、流入角 α_1 と動翼入口角 β_m の偏差を極力低減させる設計が必要であった。しかし、実際には境界層や二次流れの影響を考慮しなければならず、設計時に動翼への相対流入角を精度よく

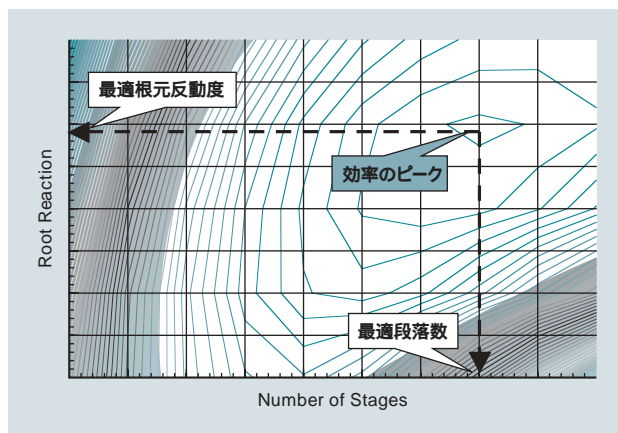


図2 スチームパス設計の最適化例

横軸は段落数、縦軸は根元反動度を示す。等高線がタービン効率の分布であり、ある段落数と根元反動度の組み合わせにおいて効率のピークが存在することを示している。

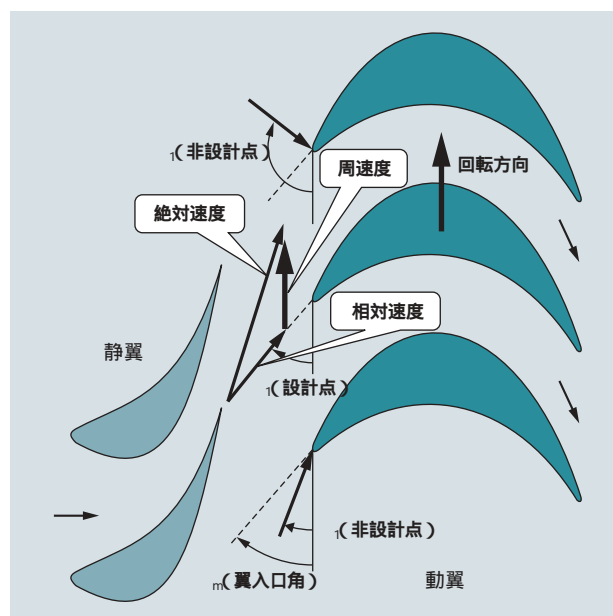


図3 速度三角形

従来動翼では、設計点と翼入口角を極力一致させる設計が必要であった。

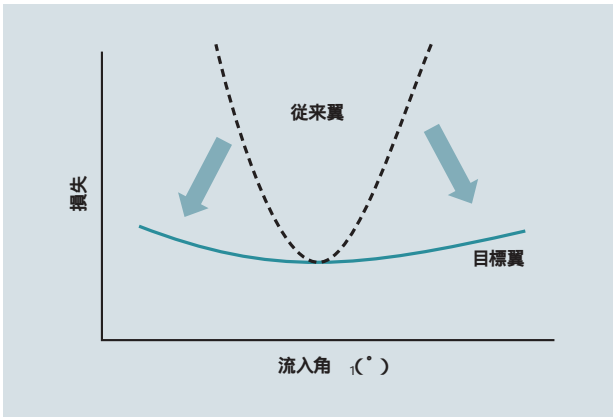


図4 翼形損失特性
翼長の短い動翼においては、広範囲の流入角において損失が大きく変化しない特性を持つ翼を開発する必要がある。

予想することは困難である。

特に、Region1の領域においては、境界層や二次流れ領域が翼高さ方向に支配的となるため、実際の流れにおいて流入角 α は広範囲の分布となる。従来の翼形では流入角に対する損失特性が敏感であるため、広範囲の流入角においても損失があまり変化しない特性を持つ新たな動翼プロファイルの開発が必要となる。

そこでHX翼の開発においては、実験計画法を導入し、流入角変化に対して損失特性が緩慢な新しい動翼を開発することを目的とした。

新規設計したHX翼の形状を、従来翼の形状とともに図5に示す。HX翼は実験計画法とCFD(Computational Fluid Dynamics)を用いて最適設計され、従来翼と比較して入口部が大幅に鈍頭化される結果となった。

二次元翼形性能を検証するため、二次元翼列風洞を利用し5孔ピトー管トラバース計測により、エネルギー損失係数を算出した。エネルギー損失係数 λ と流入角 α の関係を図6に示す。

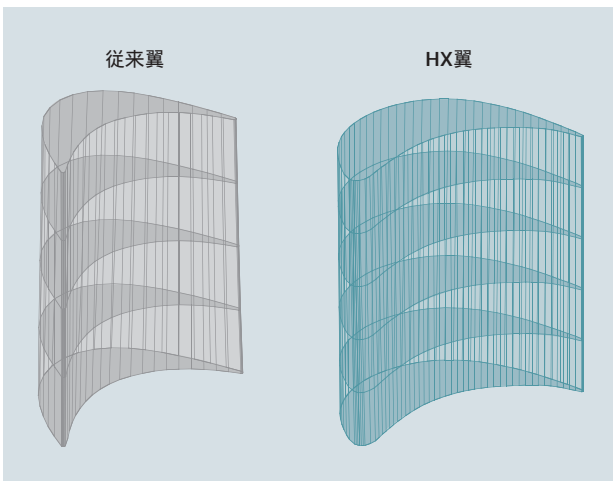


図5 従来翼とHX翼の翼形比較
HX翼は、従来翼と比較して、入口部が鈍頭化されている。

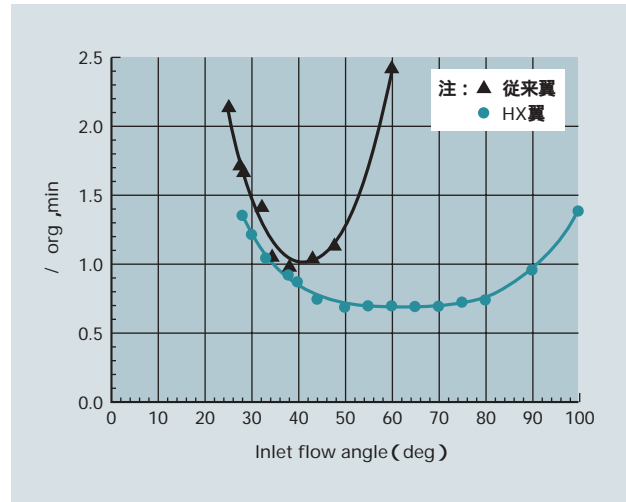


図6 従来翼とHX翼の流入角特性比較
HX翼は、広範囲の入口角においてほぼ一定の損失係数となり、かつ従来翼より低いレベルの損失係数を実現している。

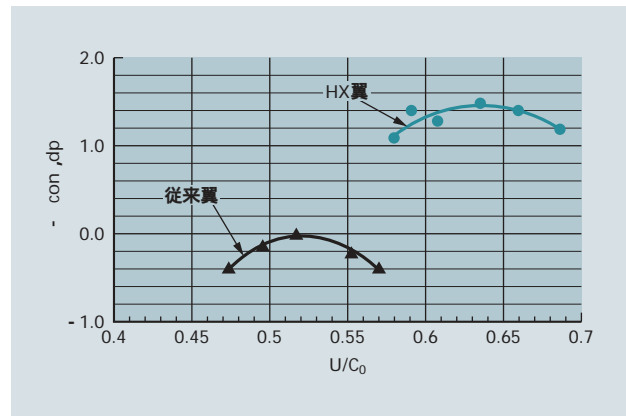


図7 従来翼とHX翼との段落効率比較
横軸に根元速度比、縦軸に従来翼の設計点での段落効率との偏差(%)を示す。HX翼は従来翼と比較して1%以上の効率向上を達成している。

HX翼は40~80程度の広範囲の入口角において損失係数がほぼ一定の値となり、かつ損失係数のレベルも従来翼より低いレベルを実現している。

最終的に、タービン段落に適用した場合の段落性能を評価するため、モデルタービン試験を実施した。

単段空気タービン試験で得られたHX翼と従来翼との段落効率の比較を図7に示す。HX翼は従来翼に比べて設計点において1.5%程度の効率向上を達成している。ただし、動翼先端部反動度とシール構造の違いによる流れの影響を考慮すると、翼単体では3%の効率向上を確認している。

3.実機への適用

3.1 最適反動翼の実機への適用

今回開発した最適反動翼は、これまで、英国Spalding Energy社納め(出力381 MW×1台)、エジプトEEHC社(Egyptian Electricity Holding Company)納め(出力250 MW×1台)、および韓国K Power社納め(出力200 MW×2台)

の計3案件,4台のコンバインドサイクル向け蒸気タービン実機に適用され,いずれもすでに商用運転を開始しており,順調に運転を継続している。実機への適用例として,最適反動翼初の60 Hz機である韓国K Power社KwangYang Combined Cycle Power Plant向け200 MW蒸気タービンについて次に述べる。

3.2 KwangYang Combined Cycle Power Plant

韓国K Power社のKwangYang Combined Cycle Power Plant向け蒸気タービン(定格出力200 MW)は,日立製最適反動翼採用タービン初の60 Hz機として,2006年2月に1号機,5月には2号機の商用運転を開始した。

高圧タービンロータの外観を図8に示す。このタービンは高圧・中圧タービンが別車室で構成されており,高圧タービンは計16の段落で構成されている。

高圧タービンは,前述したように,流れ場の特徴に応じて最適設計されたHX翼を採用することにより,タービン全体として高性能化を図っている。

顧客引き渡し前に行われた保証性能試験においては,保証性能(タービン効率)を0.8%上回る,良好な結果を得た。

4 .おわりに

ここでは,韓国K Power社KwangYang Combined Cycle Power Plant向けのタービンを中心に,新開発の高圧タービン向け最適反動翼(HX翼)について述べた。

この翼は,特に短い翼長の段落向けに,従来翼と異なるアプローチから翼の最適形状を求めることで,従来翼と比較して大幅な効率向上を達成したもので,市場で要求されるタービンの高効率化に応えるものである。

日立製作所は,今後も,この最適反動翼を採用したタービンを,国内外問わず広く実機に適用していく考えである。

執筆者紹介



藤井 秀敏
1997年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所タービン設計部 所属
現在,蒸気タービンの設計業務に従事



木村 哲晃
1996年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所タービン設計部 所属
現在,蒸気タービンの設計業務に従事

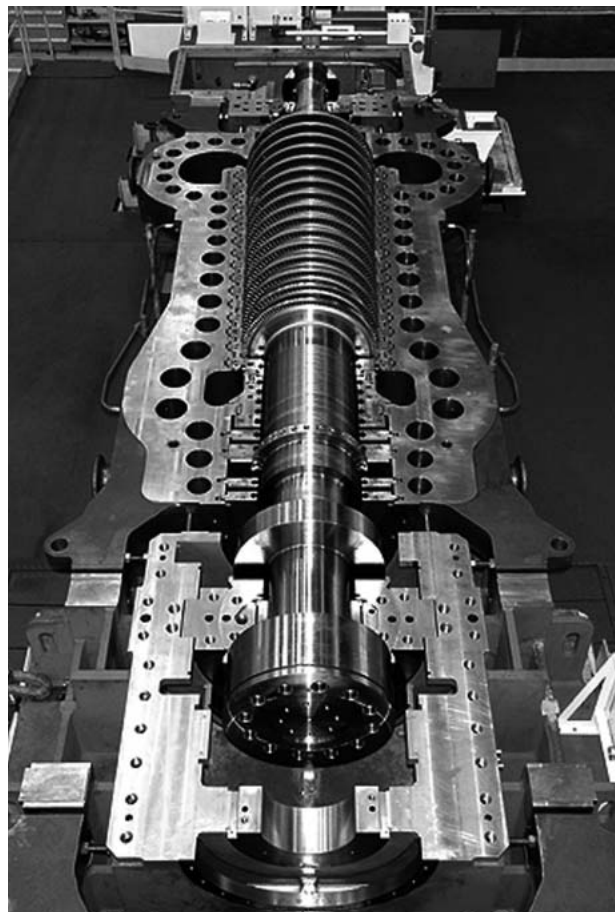


図8 コンバインド発電設備用蒸気タービンにおける高圧タービンロータの外観
KwangYang Combined Cycle Power Plant向け蒸気タービンの高圧タービンは16の段落で構成されている。

参考文献

- 1) K.Segawa, et al.:Development of a Highly Loaded Rotor Blade for Steam Turbines(2nd Report, Performance Verification),JSME International Journal, Series B, 45, No.4(2002)
- 2) K.Segawa, et al.:A High Performance Optimized Reaction Blade for High Pressure Steam Turbines, ASME POWER 2004(2004.3)



瀬川 清
1990年日立製作所入社,電力グループ 電力・電機開発研究所 ターボ機械プロジェクト 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