

CFDを用いた蒸気タービン通路部の最適化と実設計への適用

Flowpath Optimization for Steam Turbines Employing CFD Analysis and Application to Actual Blade Design

袁 新 手島 智博 新関 良樹
 ■YUAN Xin ■TEJIMA Tomohiro ■NIIZEKI Yoshiki

蒸気タービンのいっそうの高性能化を図るため、CFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体解析) を用いた蒸気通路部 (以下、通路部と略記) 形状の最適化ツールを開発した。

このツールは翼型の最適化だけでなく、高精度で大規模なCFDを活用し、漏れ流れや非軸対称通路部壁面形状など、様々な要素を考慮できる特長を持っている。このツールを適用することにより、設計者が従来行ってきた手法では得られない3次元的な翼列形状の最適化により、蒸気タービンの性能を向上させることができるようになった。

Toshiba and Tsinghua University have developed an advanced aerodynamic design optimization tool for steam turbine stages employing computational fluid dynamics (CFD) analysis. This tool consists of highly accurate and highly adaptive CFD programs for various parametric modeling tasks, not only for the design of simple blade shapes but also for the optimization of more complicated models such as those including the effect of a rotating blade with tip leakage, the configuration of nonaxisymmetric endwall contouring, and so on. This tool is expected to enhance the performance of steam turbines by providing completely three-dimensional optimized steam-path design that has not be attainable by human designers up to now.

1 まえがき

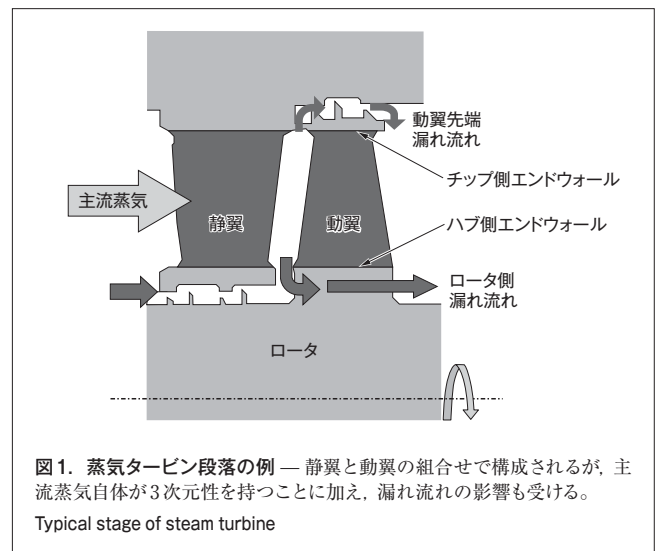
蒸気タービンは、大容量のエネルギー変換機器として今後も重要な位置を占めるものと考えられるが、より安価なライフサイクルコスト^{(1), (2)}で、要求された発電量を安定して提供することが求められている。このためには、蒸気タービンの性能向上が必要であり、様々な努力が続けられている。

特に、蒸気タービン翼列の開発にあたっては、各種のモデル試験が活用されるとともに、高精度・大規模化が著しいCFD (Computational Fluid Dynamics : 数値流体解析) を活用することにより、現象の解明や性能の予測精度の大幅な向上が得られている⁽³⁾。また、CFDと最適化手法を組み合わせることによって、これまでの方法では得られなかった蒸気タービン翼列などの形状を、より少ない開発時間で得ることも試みられている⁽⁴⁾。

大容量蒸気タービンの翼列は、**図1**に示すように静翼と動翼の組合せで構成された軸流型であるが、翼列内の流れは、2次元流れの発達などの他、漏れ流れなどによって複雑な3次元流れとなる。したがって、高い性能を得るためには、翼列そのものも高度な3次元形状とすることが必要になり、翼列形状を定義するための設計パラメータ数は膨大となる。

そこで、より高性能な蒸気タービン翼列を実現するためには、効率の良い形状モデリングシステム、高精度のCFD解析システム、及び効率的な最適化システムを組み合わせた自動最適化が必要になる。

このような背景から、高機能な蒸気タービン通路部最適化

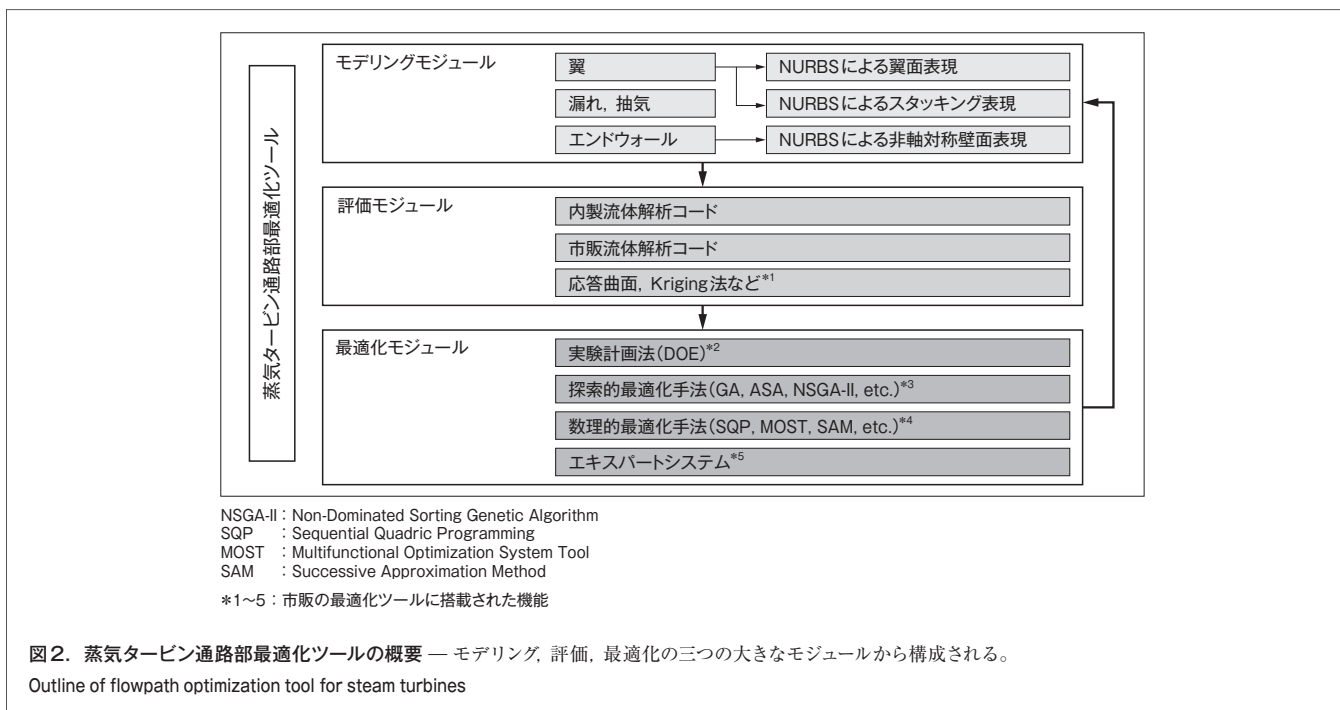


ツールを開発したので、ツールの概要と適用結果について述べる。

2 最適化ツール

今回開発した最適化ツールの概要を**図2**に示す。このツールはモデリング、評価、及び最適化の三つのモジュールから構成されている。

評価モジュールでは、モデリングモジュールからの情報に基づき自動的に生成された解析メッシュによってCFD解析を行う。解析ツールは内製の解析ツールの他、市販のツールも選



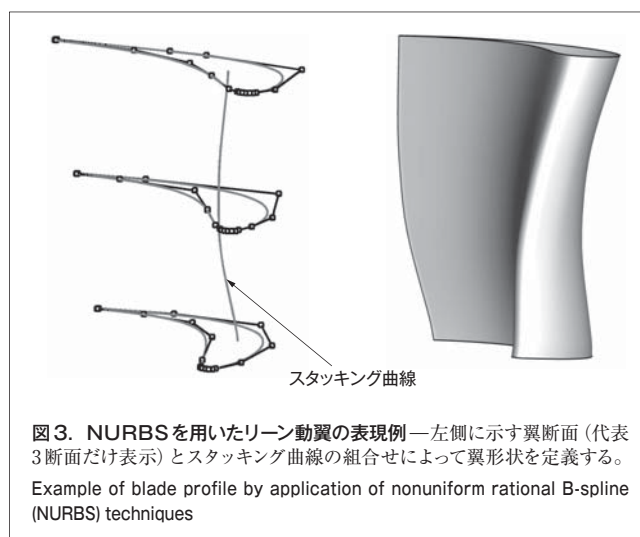
択することができ、ツールによる差異も評価できるようにしている。

最適化モジュールには、市販の最適化システムを利用しており、実験計画法(DOE: Design of Experiment)で作成した応答曲面を用いてCFDの実施回数を削減することもできるが、ここでは遺伝的アルゴリズム(GA: Generic Algorithm)や焼きなまし法(ASA: Adaptive Simulated Annealing)などを用いてCFDを多数回繰り返すことで最適化することもでき、次章でその例を示す。

モデリングモジュールは、翼型及びその積重ね方(スタッキング)といった翼自体の形状や、非軸対称エンドウォール(内外壁面)形状をパラメトリックに表現するもので、このツールでもっとも重要な部分である。

3次元的な通路部形状を表現するため、非一様有理Bスプライン(NURBS: Non-Uniform Rational B-Splines)を用いた。NURBSは、複雑な曲線や曲面形状を少数のパラメータで表現できる手法であり、通路部形状を定義する設計パラメータ数を大幅に削減している。この最適化ツールでは、翼プロファイルやスタッキング曲線の他、エンドウォール曲面をNURBSによってモデル化しており、従来よりも複雑な3次元の通路部形状を表現できる。翼断面とスタッキング曲線にNURBSを用いて動翼形状を3次元的に表現した例を図3に示す。図には3断面だけを表示している。

この他に、この最適化ツールでは、静・動翼間の外周壁から動翼下流の外周へと流出するCFDモデルを設けることにより、図1のような動翼先端からの漏れ流れを考慮した解析ができる。この方法により、翼先端部の複雑な3次元流れが解



析でき、より実機に近い条件で最適化を行うことができる。

3 蒸気タービン段落の最適化

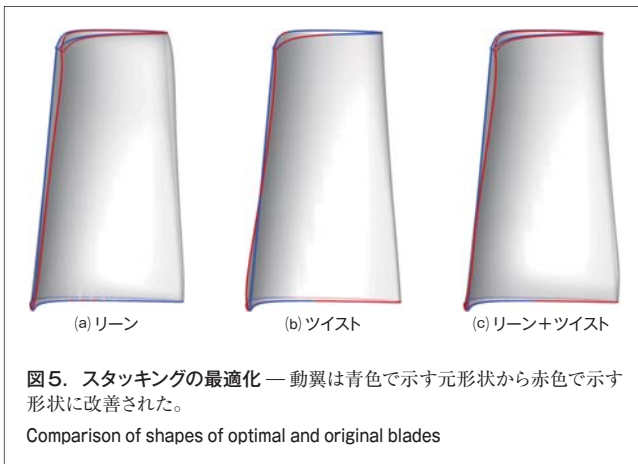
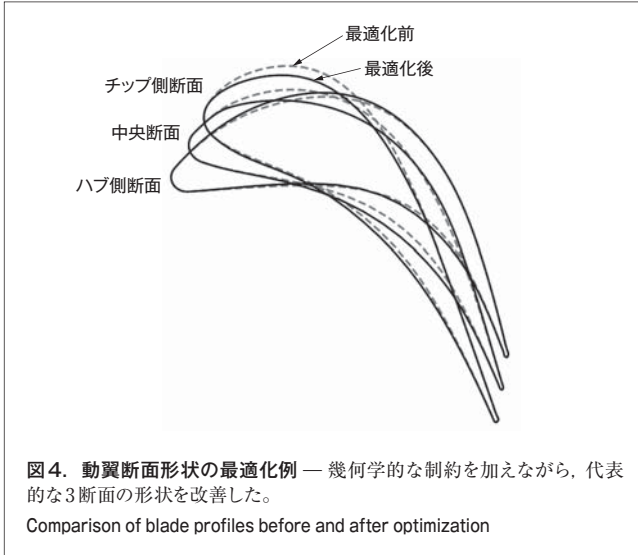
3.1 翼断面形状の最適化

表1に示す蒸気タービンの代表的な高圧段落を対象として、翼断面形状の最適化を行った結果を以下に述べる。

動翼の根元(ハブ側)、中央、先端(チップ側)の3断面を代表断面として翼形状を最適化した例を図4に示す。最適化にあたっては、翼後縁厚さや最大厚さが最小値を下回らないなどの構造的な制約を考慮している。GAによって流量誤差と効率が目的関数とした多目的最適化を行った結果、段落効率が

表 1. このツールを適用した段落の仕様
Specifications of investigated turbine stage

項目	静翼	動翼
ハブ側半径 (m)	0.4575	0.4575
チップ側半径 (m)	0.5325	0.5325
翼枚数	42	70

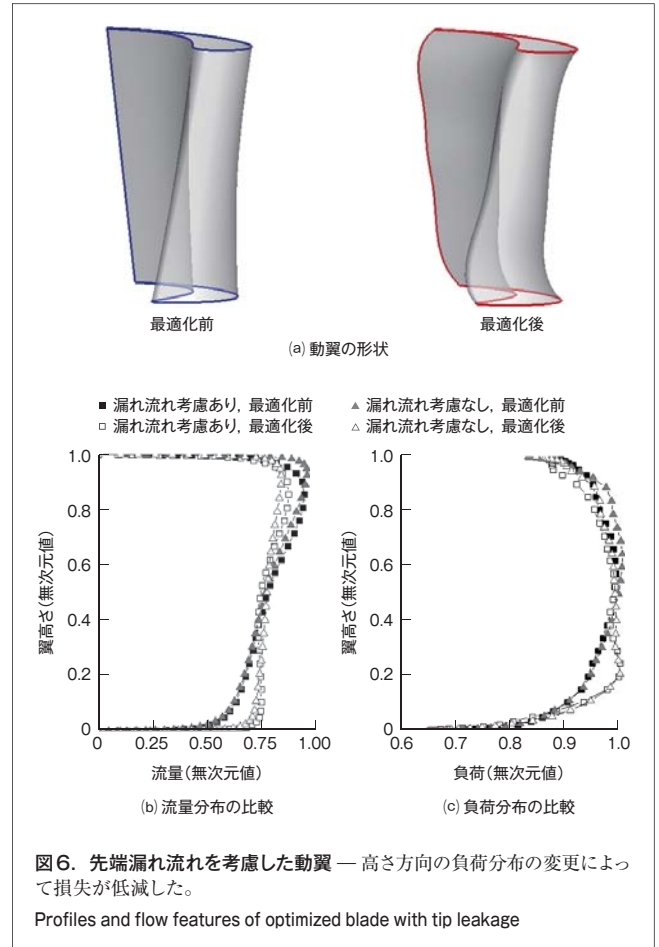


0.1%向上することがわかった。

更にスタッキングの最適化を実施した結果を図5に示す。ここでは、リーンの最適化（周方向の倒れ）とツイスト（翼型の取付け角）を制御して最適化を検討したが、リーンの最適化とツイストを組み合わせることで段落性能を約0.2%向上させることができた（図5(c)）。

3.2 翼先端漏れ流れを考慮した最適化

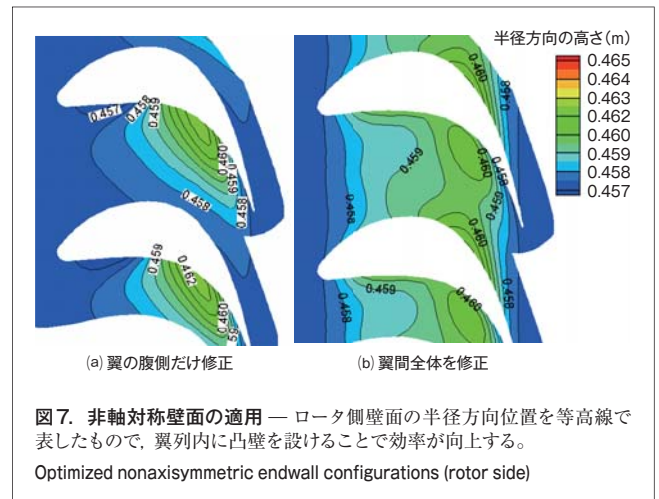
図1に示した先端漏れ流れを考慮して最適化した動翼形状と、翼高さ方向の流量分布及び負荷分布を、最適化前の翼と比較して図6に示す。それぞれ、▲△は漏れ流れを考慮しない



場合の最適化前後を、□■は漏れ流れを考慮した場合の最適化前後を比較して示しているが、漏れ流れを考慮した場合には翼高さ方向の負荷分布を翼先端部分が小さくなるように修正することで損失が低減され、性能が改善された。

3.3 壁面形状の最適化

ハブ側壁面形状を非軸対称条件で最適化した結果を、壁面形状の等高線（壁面の半径位置）で図7に示す。(a)は翼の腹



側だけを、(b)は翼間全体を対象に最適化した例であるが、前者では0.06%、後者では0.1%の効率改善が得られた。

3.4 静翼と動翼の組合せ最適化

このツールを実機の中圧タービン排気段の設計に適用し、静翼と動翼を同時に形状最適化して性能向上を図った。ここでは計算時間の短縮のため、翼型はあらかじめ固定して与え、翼高さ方向のツイスト量とリーン量分布を設計パラメータとした。排気段であることから、流出蒸気の排気損失と翼列損失の合算値を目的関数とし、従来設計による形状を開始点としてASAで最適化を進めた結果、図8に示すように従来とは異なる静翼ツイスト量に、リーン量を付加した分布にすることで、相対的に5%の損失低減が得られた。図9の半径方向の損失分布を見ると、排気損失を同等に抑制したままで、翼列損失が低減されていることがわかる。

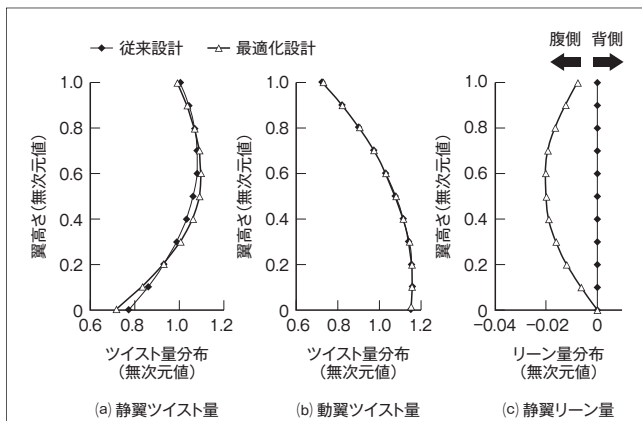


図8. ツイスト量とリーン量の半径方向分布 — 設計者による従来設計の結果と、このツールによる最適化結果を比較すると、静翼形状の差異が大きい。

Radial distributions of twist angle and lean displacement

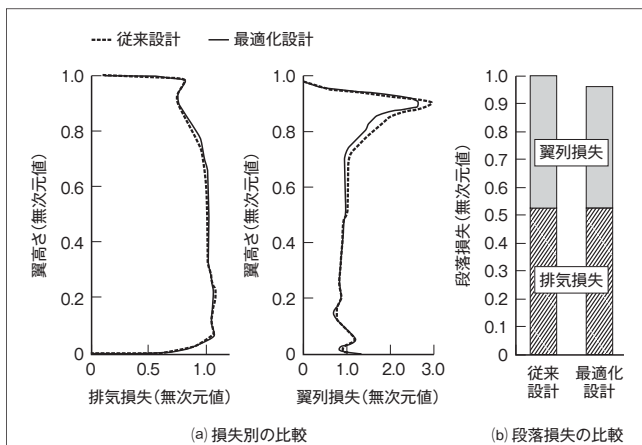


図9. 半径方向の損失分布の比較 — 翼列損失が静翼のチップ側ピーク部分で低減されている。

Comparison of radial loss distributions before and after optimization

4 あとがき

高精度のCFDを用い、翼先端の漏れ流れや非軸対象通路部壁面など、様々な影響を考慮できる特長を持った最適化ツールを開発し、この手法を蒸気タービン翼列に適用した例によって有効性を示した。

このツールを用いることで、複雑な流れ場を合理的に翼形状に反映することができる。このため、試験結果などから得られたノウハウを基に行ってきた従来手法では困難であった3次元的な翼形状の実現によって、蒸気タービンのいっそうの性能向上に寄与できるものと考えられる。

今後も、CFDと最適化技術を活用した蒸気タービンの開発を進めていく。

文献

- (1) 佐々木隆 他. 蒸気タービンの戦略的開発設計. 東芝レビュー. 60, 1, 2005, p.52-55.
- (2) 田沼唯士 他. 特集, デザインと設計の新展開: 蒸気タービン設計の戦略的展開. 日本機械学会誌. 108, 1034, 2005, p.27-28.
- (3) 田沼唯士 他. CFDを活用した高性能蒸気タービンの開発設計. 東芝レビュー. 62, 9, 2007, p.25-29.
- (4) Yuan X. et al. "A CFD Approach to Fluid Dynamic Optimum Design of Steam Turbine Stages with Stator and Rotor Blades". Proc. of ASME Turbo Expo 2010. Glasgow, UK, 2010-06, ASME. 2010, GT2010-22477.



袁 新 YUAN Xin, D.Eng.

清華大学 熱工学科教授, 工博。
熱流体数値解析技術の開発に従事。中国工程熱物理学会理事。

Tsinghua University



手島 智博 TEJIMA Tomohiro

電力システム社 京浜事業所 原動機部。
蒸気タービンの開発に従事。

Keihin Product Operations



新関 良樹 NIIZEKI Yoshiki, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部長, 工博。ターボ機械の開発に従事。日本機械学会, 可視化情報学会, ターボ機械協会会員。技術士(機械部門)。
Power and Industrial Systems Research and Development Center