

CFDを活用した高性能蒸気タービンの開発設計

Performance Enhancement of Large-Scale Steam Turbines Using CFD

田沼 唯士 佐々木 隆 新関 良樹

■ TANUMA Tadashi ■ SASAKI Takashi ■ NIIZEKI Yoshiki

発電用大型蒸気タービンの競争力強化を図るうえで、性能向上のための開発の加速が重要性を増している。

東芝は、構造上の制約の範囲で最大の性能を引き出すために、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) を活用した設計を進めている。従来は、翼型設計などの限られた範囲にCFDを用いていたが、現在では、蒸気弁、タービン入口部、蒸気通路部、タービン排気部など、性能に影響を与えるほとんどすべての部位の設計最適化に適用しており、CFD解析と検証試験を組み合わせた設計最適化に取り組むことで、高性能機開発の加速と従来の形状にとらわれないイノベーション技術の創出を推進している。

Accelerating the speed of performance enhancement is critical to the competitive design of large-scale steam turbines for power generation.

Toshiba has successfully introduced computational fluid dynamics (CFD) into steam turbine design in order to optimize the design within the structural limitations. This approach is playing a key role in the creation of innovative designs for both stationary and rotating blades as well as other flow paths including steam valves, inlets, and outlets of high-pressure (HP), intermediate-pressure (IP), and low-pressure (LP) turbines.

1 まえがき

発電用大型蒸気タービンに対する顧客からの要求は、仕様で設定された発電量を、より安価なライフサイクルコスト^{(1), (2)}で安定して供給できることである。そのためには、より高い性能(エネルギー変換効率)の蒸気タービンを継続的に開発設計していく必要がある。

一方で、比較的大容量の火力発電所向けに限っても、ガスタービンと組み合わせて使用されるコンバインドサイクル発電用200 MW級蒸気タービンから、最近海外での需要が伸びている石炭火力発電用1,000 MW級蒸気タービンまで、数種類の機種構成があり、更に、回転数(3,000/3,600 rpm)によっても設計が異なる。したがって、競争力のある高性能の機種を、短い期間で開発設計することが求められている。

CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) は、非線形偏微分方程式で記述される流れの場の基礎方程式を、与えられた境界条件の下で近似的に解くことを目指して研究、開発されてきたが、東芝においては、1970年代後半からタービン翼列の設計に適用されるようになり、その後、スキーム(基礎偏微分方程式の離散化近似理論)とモデル化の両分野における複数のイノベーションを経て、開発設計の加速に欠かせないツールになっている⁽³⁾。

ここでは、高性能蒸気タービンの開発設計にCFDを活用して、設計のフロントローディングと最適化を推進する取組みについて述べる。

2 設計プロセスとCFDの活用

近年需要が増えている石炭火力発電用の大型超臨界圧蒸気タービンの断面を図1に示す。高圧タービンには24 ~ 31 MPa, 560 ~ 600 °Cの高温高圧蒸気が供給される。高圧タービンを出た蒸気はボイラに戻って加熱されて中圧タービンに供給され、エネルギー変換して5 kPa, 33 °C前後の湿り蒸気となって低圧タービンを出る。高・中・低圧の各タービンは、蒸気の旋回流れを作り出すノズル(タービン静翼、以下、静翼と略記)、これを保持する車室(ケーシング)、旋回流れを受けて回転する動翼とこれを保持して回転トルクを発電機に伝達する軸(ロータ)によって構成されている。

タービンの信頼性と性能を確保するうえで重要で、設計に時間が掛かる部分は、高温高圧で使用される高・中圧タービン上流の段落(静翼と動翼一組で構成されるタービンの構成単位)及び、翼長と外周径が最大となって大きな遠心力が作用し、流れの速度が部分的に音速を超える低圧下流部(もっとも翼長が長い低圧最終段及びその上流の2段落)である。更に、各ケーシングを結ぶ配管と蒸気弁もタービンの重要な構成要素である。これらの部位は、CFD解析と検証試験を繰り返して先行設計され、主要な機種ごとに標準化されている。

蒸気タービンの主要な設計プロセスを図2に示す。中央に示す主設計プロセスにおいて、高・中・低圧各部の蒸気条件、段落数、平均径、及び翼長などの主要パラメータを最適化(基本計画)する。更に、主要部位の空力設計と構造設計を並行

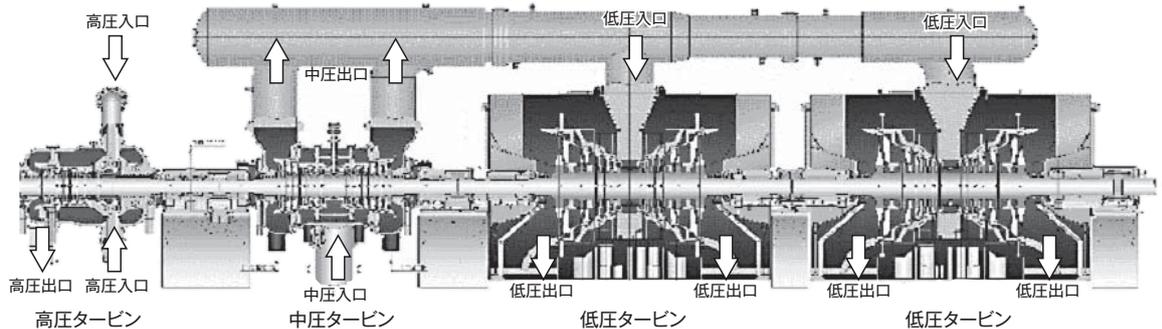


図1. 発電用大容量蒸気タービンの断面 (1,000 MW級機) — 矢印は蒸気の流れを示している。高圧タービンを出た蒸気はボイラに戻って加熱されて中圧タービンに供給され、エネルギー変換して低圧タービンを出る。

Typical large-scale steam turbine for power generation (1,000 MW class)

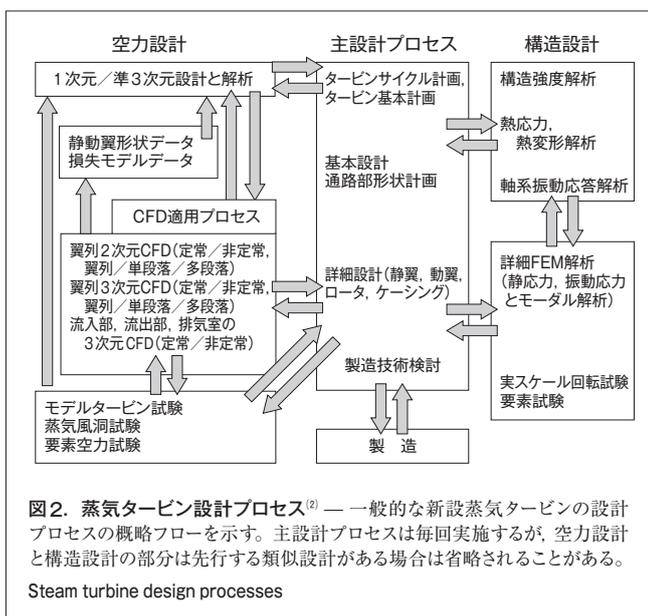


図2. 蒸気タービン設計プロセス⁽²⁾ — 一般的な新設蒸気タービンの設計プロセスの概略フローを示す。主設計プロセスは毎回実施するが、空力設計と構造設計の部分は先行する類似設計がある場合は省略されることがある。

Steam turbine design processes

して進めながら基本計画を進め、静翼と動翼、ロータとケーシングの基本設計及び詳細設計を進めていく。

空力設計の部分の中央にあるCFD適用プロセスにおいては、静翼及び動翼の翼列形状やタービン入口と出口の通路部形状の最適化を行って、詳細設計に設計パラメータや形状データを渡す。モデルタービン試験や実スケール回転試験などは準備と試験に長期間を要するので、あらかじめ設定した機種別主要要素（最終段翼、初段翼など）の先行設計時に完了させておく。モデルタービン試験に際しては、3次元翼列段落規模の試験再現CFD解析を同時に行って試験結果の確認と現象の分析を行うとともに、結果を設計にフィードバックして、小規模な設計変更はCFDだけで最適化を完了させている。更に、CFD解析の精度の確認も同時に行う。

タービンの流入部、流出部、排気室、及び蒸気弁の先行設計に際しても、要素試験とCFD解析を同時に実施して設計の最適化を進めている。

3 高性能最終段動翼シリーズの開発設計

蒸気タービンの主要要素の先行設計事例として、スチール製50 Hz 48インチ最終段動翼シリーズ（最終段翼と上流2段落の翼）（以下、スチール48インチ最終段動翼シリーズと略記）の開発設計について述べる。図3は欧州向け300 MW機の低圧ロータで、両端の排気側にスチール48インチ最終段動翼シリーズが採用されている。流体及び構造設計の相似則を用いてスチール製60 Hz 40インチ最終段動翼シリーズ（以下、スチール40インチ最終段動翼シリーズと略記）も同時に開発された。両者は静翼も含めて翼型を完全相似としたので、モデルタービン試験は共通化して実施した。

このスチール48インチ及び40インチ最終段動翼シリーズ開発プロジェクトは、羽根工場を共有する米国General Electric社（GE社）と共同で実施した⁽⁴⁾。実翼回転試験は48インチ試験を当社の、40インチ試験をGE社の大型回転試験装置を用い



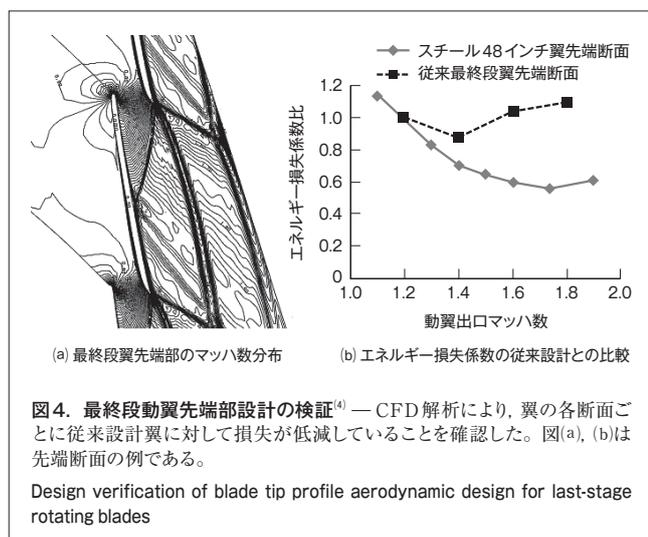
図3. 蒸気タービン低圧ロータ (スチール48インチ最終段動翼シリーズ⁽²⁾ 適用300 MW機) — 実機ロータに組み立てられたスチール48インチ高性能最終段動翼シリーズの外観である。

LP turbine rotor for 300 MW-class steam turbine with steel 48-inch last-stage bucket series

て完了し、モデルタービン性能試験、低負荷振動試験、及び羽根材料の耐エロージョン試験^(注1)などは両社が持つ試験装置の特長を生かせるように分担して、開発期間の短縮だけでなく検証精度の向上を図った。

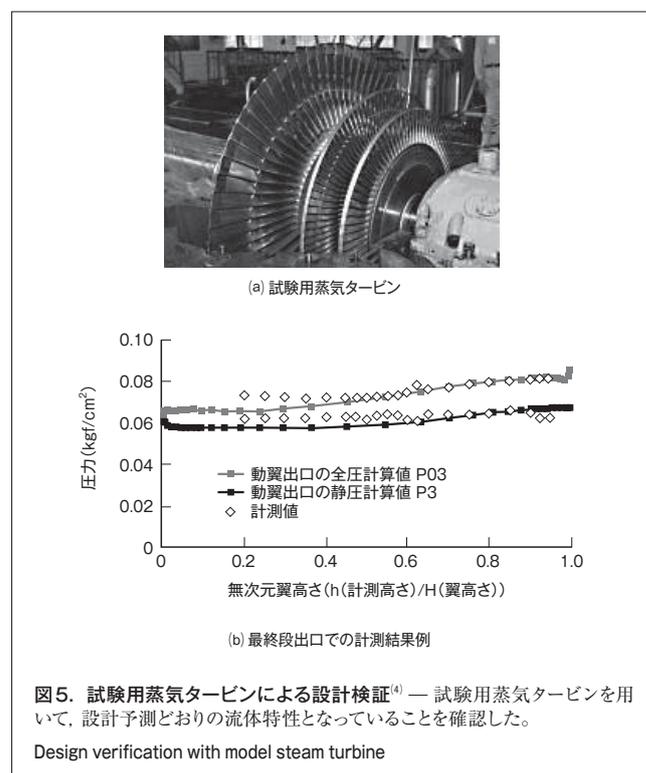
最終段動翼先端部は出口マッハ数^(注2)が1.8近くになり、衝撃波が発生しても損失が増加しない翼型を開発する必要がある。従来は2次元遷音速風洞を用いて、候補翼型の試験を繰り返して損失の小さい翼型を選定していたが、翼列風洞試験データが蓄積されたこととCFDの解析精度の向上に伴い、風洞試験の省略が可能となり、今回の開発においてはCFDを用いた最適化により翼列設計を行った。

CFD解析結果の一例として、最終形状に近い動翼先端部の設計条件におけるマッハ数分布を図4(a)に示す⁽⁴⁾。隣接翼間に形成されるオーバーラップ領域は、構造設計の制約により必要最小限としているが、設計マッハ数付近で最適な縮小拡大流路を形成したので、滑らかに加速され、後縁から発生する斜め衝撃波の反射部分を含めても、境界層の大きなはく離は見られない。図4(b)は、オフデザインマッハ数範囲を含めて従来翼とエネルギー損失を比較したCFD解析結果である。設計条件(マッハ数1.8付近)で、エネルギー損失は従来翼の半分近くまで減少している。



静翼と動翼の組合せ及び3次元流体設計の最適化は、準3次元設計プログラム(周方向の流体特性変化をモデル化)で設計を繰り返し、最終形状に近くなってから、3次元CFD解析で壁面形状も含めた詳細形状の最適設計を行った。

(注1) 高速回転する試験片にスプレー噴射で水滴を衝突させ、実機に近い水滴エロージョン(浸食)を再現して、タービン羽根材料の耐エロージョン特性を計測する実験。
(注2) マッハ数は、流体の圧縮性の影響の度合いを表す尺度。ここでは、流速と蒸気の局所音速の比。



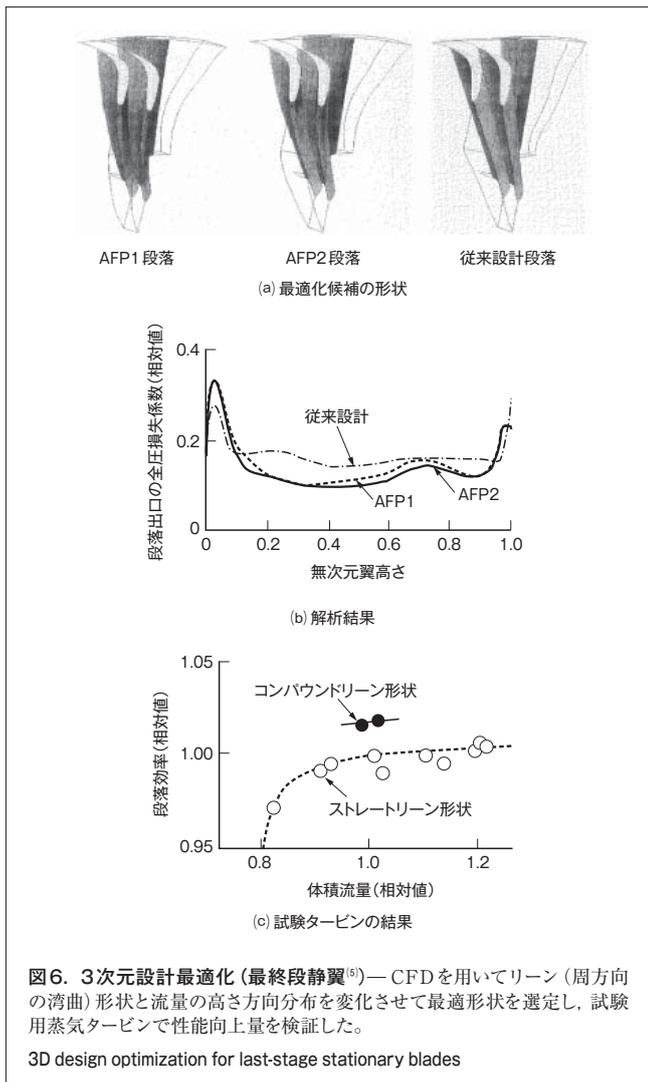
設計が完了した最終段翼シリーズ3段落の検証試験に用いた試験用蒸気タービンを図5(a)に示す。動翼の連結構造も含めて相似縮小しており、実機と同じ蒸気条件で、性能を含む流体特性と静応力、振動応力の計測を行った。図5(b)は、計測結果の一例として、最終段出口の全圧及び静圧の半径方向分布をCFD解析と比較したものである。計測結果とCFD計算値は、分布を含めて比較的よく一致している。この計測から求めた最終段段落効率も設計効率にほぼ一致し、準3次元設計法と2次元及び3次元CFD解析による設計の妥当性が検証された。

同様の最適化手法は、火力及び原子力タービン用の新最終段翼シリーズに適用されて、上流設計での設計最適化拡大による大きな性能向上と開発の加速に結びついている。

4 3次元設計の最適化

タービン通路部の3次元形状の最適化においても、高性能最終段動翼の開発と同様に、個々のタービンの設計に先行して最適化されたプロトタイプを準備しておく必要がある。

最終段静翼の3次元設計において、CFD解析を用いて形状の最適化を行い、モデルタービン試験で効果を検証した例を図6に示す。図6(a)は、従来設計のストレートリーン形状と、新しく開発したコンパウンドリーン形状の2候補(AFP(Advanced Flow Pattern)1, AFP2)につき、形状の比較を示す。ストレートリーン形状は、内周壁近くの損失低減を図って開発された



古典的な3次元設計静翼であり、コンパウンドリーン形状は、外周側も含む全体のフローパタンの改善を加えた形状になっている。

図6(b)に示す解析結果では、両候補が従来型に対してほぼ全領域で損失が低減されており、改善がより大きなAFP2型を採用した。図6(c)は、試験用蒸気タービンで注目する静翼だけを交換して2種類の性能試験を行った結果であり、コンパウンドリーン静翼の性能向上効果が検証された。ここで開発されたコンパウンドリーン静翼は、前章で述べたスチール48/40インチ最終段落にも採用されている。同様の手法で、高・中圧タービン用高性能静翼も実用化されている⁽⁵⁾。

前述した3次元設計の最適化においては、事前に流体力学的な考察により立案した方針に沿って絞り込んだ、10ケース程度の比較的小規模なCFD解析の繰返して設計したが、最近では、従来の先入観にとらわれないより大域的な最適解を求めるために、実験計画法(DOE)とCFD解析を組み合わせた最適設計法の導入を進めている⁽⁶⁾。

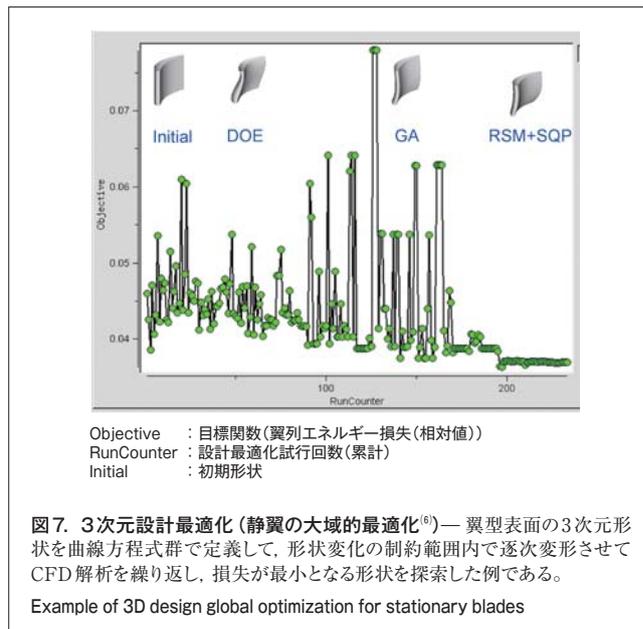
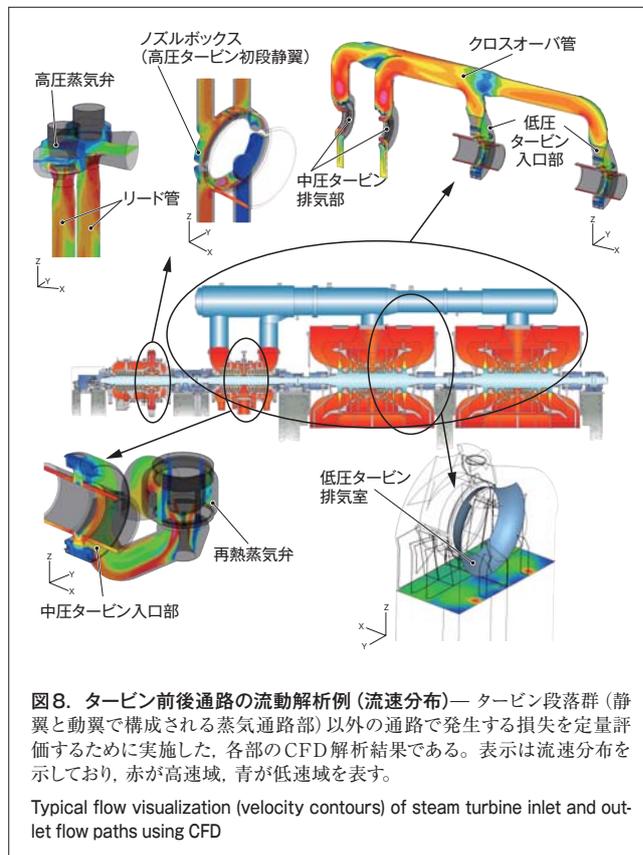


図7は、翼長の短い段落用の静翼について大域的な設計最適化の試行例を示している。リーン(周方向への傾斜や湾曲)のないストレート翼を初期形状として、DOE、遺伝的アルゴリズム(GA)、応答曲面探索法(RSM)による2次方程式逐次近似最適化(RSM + SQP (Sequential Quadratic Programming))を段階的に用い、個々のステップで実行されるCFD



解析で求まるエネルギー損失の最小化を目標として、自動的に形状の変更を繰り返して最終形状を求めている。

翼列以外の部分においても、CFDを用いたエネルギー損失の低減を進めている。蒸気タービンの翼列以外の蒸気通路部のCFD解析結果を図8に示す。上流から、高圧蒸気弁、リード管、ノズルボックス、再熱蒸気弁、中圧タービン入口部、中圧タービン排気部、クロスオーバ管、低圧タービン入口部、低圧タービン排気室の各部の流速分布を示す。

各部の分布から明らかなように、配管であっても流速分布があるので、境界条件の設定方法の違いによる解析誤差を少なくするために、可能なかぎり継ぎ目のない大規模解析を実施している。更に、性能試験時に実機の主要な部分の圧力分布を計測してCFD解析結果と比較することにより、実測値で補正された正確な予測を可能にしている。

5 あとがき

蒸気タービン設計のイノベーションを推進するうえで、設計のフロントローディングの拡大は不可欠であり、このための手段としてCFDの適用拡大を進めている。ここでは、既に実機に適用済みの技術として、高性能最終段動翼と長翼向け3次元設計静翼の開発事例を述べた。また、新しく適用中の事例として、より広範囲な3次元設計最適化の事例と高圧、中圧、及び低圧タービン前後の通路部の大規模CFD解析の事例を述べた。

CFD解析の精度を検証するためにはモデルタービンと実機での計測が必要であり、CFDと試験計測の両方を活用して、より付加価値の高い蒸気タービンの開発設計を進めていく。

文 献

(1) 佐々木隆, ほか. 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, ほか. 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. CFDを用いた高性能蒸気タービンの設計. ターボ機械. 32, 5, 2004, p.291-297.
 (4) Hofer, D., Tanuma, T., et al. "Aerodynamic Design and Development of Steel 48/40 inch Steam Turbine LP End Bucket Series". Proc. of International Conference on Power Engineering, Kobe, Japan, 2003-11, JSME/ASME/CSPE (The Chinese Society of Power Engineering). Tokyo, JSME, 2003, p.2-217-2-222.
 (5) Tanuma, T., et al. The development of three-dimensional aerodynamic design blades for turbines. JSME International Journal, B. 41, 4, 1998, p.1042-1049.
 (6) Yuan, X., Tanuma, T., et al. "Applications of Higher-Order Accurate Computational Fluid Dynamic Method to Steam Turbine Blade Designs. Proc. of International Conference on Power Engineering, Kobe, Japan, 2003-11, JSME/ASME/CSPE (The Chinese Society of Power Engineering). Tokyo, JSME, 2003, p.2-205-2-210.



田沼 唯士 TANUMA Tadashi, D.Eng.

電力システム社 京浜事業所 原動機部主幹, 工博。
 蒸気タービンの開発, 設計に従事。日本機械学会, ターボ機械協会, 日本ガスタービン学会, 日本流体力学会会員。
 Keihin Product Operations



佐々木 隆 SASAKI Takashi

電力システム社 京浜事業所 原動機部長。
 蒸気タービン, ガスタービンの開発, 設計に従事。日本機械学会, ASME会員, 日本ガスタービン学会評議員。
 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 回転機器開発部グループ長, 工博。ターボ機械の開発に従事。
 日本機械学会, ターボ機械協会会員。技術士(機械部門)。
 Power and Industrial Systems Research and Development Center