

# 蒸気タービンの戦略的開発設計

Steam Turbine Development and Design Using Strategic Processes

佐々木 隆      鈴木 孝史      田沼 唯士

■ SASAKI Takashi

■ SUZUKI Takashi

■ TANUMA Tadashi

発電用蒸気タービンの設備導入から運転、定期点検、補修、解体リサイクルまでスルーしたライフサイクルコストを低減することが、最上位の顧客要求になってきており、同時に、顧客固有の要求に応える設計も重要である。

これに対応して東芝は、ライフサイクルをスルーしたデザインプロセスによる戦略的開発設計を指向している。デザインプロセスには継続的な変革が必要であり、他社とのアライアンスによるコア要素の共有化や、設計から製造までのプロセスをデジタルデータストリーム上で融合するデジタルマニュファクチャリングなどを推進している。

The most important customer requirement in steam turbine design is the reduction of life-cycle costs from the introduction of a new unit, construction, business operation, overhauling, and retrofitting through to its decommissioning. In addition, the specific requirements of each customer are also important.

Toshiba is introducing strategic processes of development and design for the life-cycle optimization of steam turbines. Joint development and manufacturing of a core component with General Electric Co. of the United States has been successfully completed. Toshiba is also introducing digital manufacturing systems for steam turbines in a digital data stream from the design process to manufacturing.

## 1 まえがき

発電用蒸気タービンに対する顧客の要求は、エネルギー変換効率（性能）が高いこと、価格が安いこと、契約から完成・引渡しまでの納期が短いことである。ガスタービンの排熱で蒸気を発生させるコンバインドサイクルや、原子炉で蒸気を発生させる原子力発電の蒸気タービンに対しては、供給される蒸気量でどれだけ出力を出せるかが顧客の重要課題（CTQ：Critical To Quality）となる。更に最近では、初期費用（建物・付帯設備を含む費用、輸送費、据付け・調整・試運転費用）、運転費用（燃料、運転員費用）、保守費用、解体リサイクルに要する費用、及び金利を合計したライフサイクルコストとして、性能と価格を合わせて評価されるようになってきている<sup>(1)</sup>。

発電用蒸気タービンは、顧客や設置場所によって排気蒸気条件、抽気・送気条件などが異なり、同じ設計での大量生産が難しい。したがって、性能や出力及びコストへの寄与度が大きな低圧最終段シリーズ翼などの主要部品を極力共通化して、開発、設計、調達、製造の各コストを下げつつ、研究開発資源を選択的に集中するなどの取組みが必要になる。同時に、製品のライフサイクルコストを全体最適の観点で最小化することが、設計最適化の判断基準になる。しかも、設計を含めた納期短縮も製品差異化の重要な項目なので、設計情報のデジタル化の徹底と自動化推進も重要である。このような背景に基いて最近の蒸気タービン設計に適用して

いる、戦略的な開発設計への取組みの事例を以下に述べる。

## 2 ライフサイクル デザインプロセス

典型的な発電用蒸気タービン（火力発電所用500 MW級機）の断面を図1に示す。ボイラーから供給される高温高圧（石炭火力用では600℃、30 MPa前後）の蒸気が高圧タービンに供給され、車室側に支持された静翼で旋回流れを形成して、回転軸に固定された動翼に回転方向の流体力を与える。静翼と動翼で構成される段落のグループが、高中圧部と低圧部に分かれて配置されている。蒸気タービン設計の中心課題は、流入蒸気の熱エネルギーを蒸気流の速度のエネル

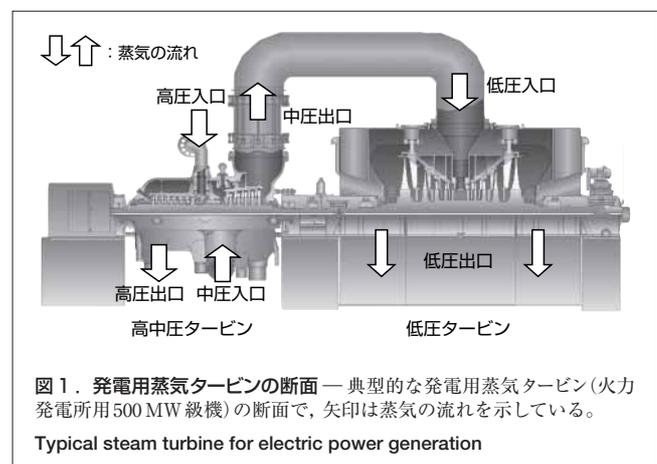


図1. 発電用蒸気タービンの断面 — 典型的な発電用蒸気タービン（火力発電所用500 MW級機）の断面で、矢印は蒸気の流れを示している。

Typical steam turbine for electric power generation

ギーから回転軸の回転エネルギーに変換する過程で、いかにエネルギー損失を最小にするかである。そのための手段として、蒸気の高温化、タービンの大容量化、及び静動翼と周囲の壁面から構成される通路部形状の流体力学的最適化がある。これらの手段を実現するためには、構造強度設計と材料開発に関しても常に限界に迫るチャレンジがされてきた。例えば、600～1,000 MW級の大容量蒸気タービンにおいては、大容量化を実現するために40インチ級の長翼が採用され、動翼の最大外周径が4m近くまで大型化している。その結果、1本の動翼に加わる遠心力は数百tになり、適切な材料の選定又は開発、各断面の重心位置の最適オフセットや植込み部形状の工夫などにより、空力的な最適形状と両立させながら構造強度設計の最適化を行って課題を解決している。同時に、動翼先端の回転速度が700 m/s程度と高速になり、低圧部下流で発生する蒸気中の水滴の衝突によって動翼先端が浸食されることがあるので、これを予測して低減する設計が必要になる。また、ボイラ運転条件が高温になると、ボイラチューブで発生するスケールが蒸気に運ばれてタービンに流入し、高圧タービン初段や、ボイラで再熱された蒸気が流入する中圧タービン初段で、静翼や動翼に衝突して浸食を起こす。これらの浸食現象は、運転を開始して10年以上経過するころから、性能低下や振動発生などの運転リスク要因となる可能性があり、補修や部品交換などの検討が必要な場合がある。水滴やスケールによる浸食の低減は設計の段階で要求仕様に入れているが、浸食低減設計は多くの場合に性能向上設計とは異なる形状を要求するので、蒸気タービンのライフサイクルをスルーした最適化を指向する設計が必要となる。このときの最重要設計パラメータは、顧客のCTQであるライフサイクルコストになる。もちろん、浸食量を低減しながら性能も向上できる技術の選択肢はあるが、

その場合でも、製品初期コストの考慮も含まれるライフサイクルコストでの評価が有効である。同様の設計検討は、許容運転条件範囲（回転速度の許容変動範囲、排気真空度の許容変動範囲、ボイラ供給水の化学的純粋度許容範囲など）の設定、起動・停止時間の設定などの際にも重要である。

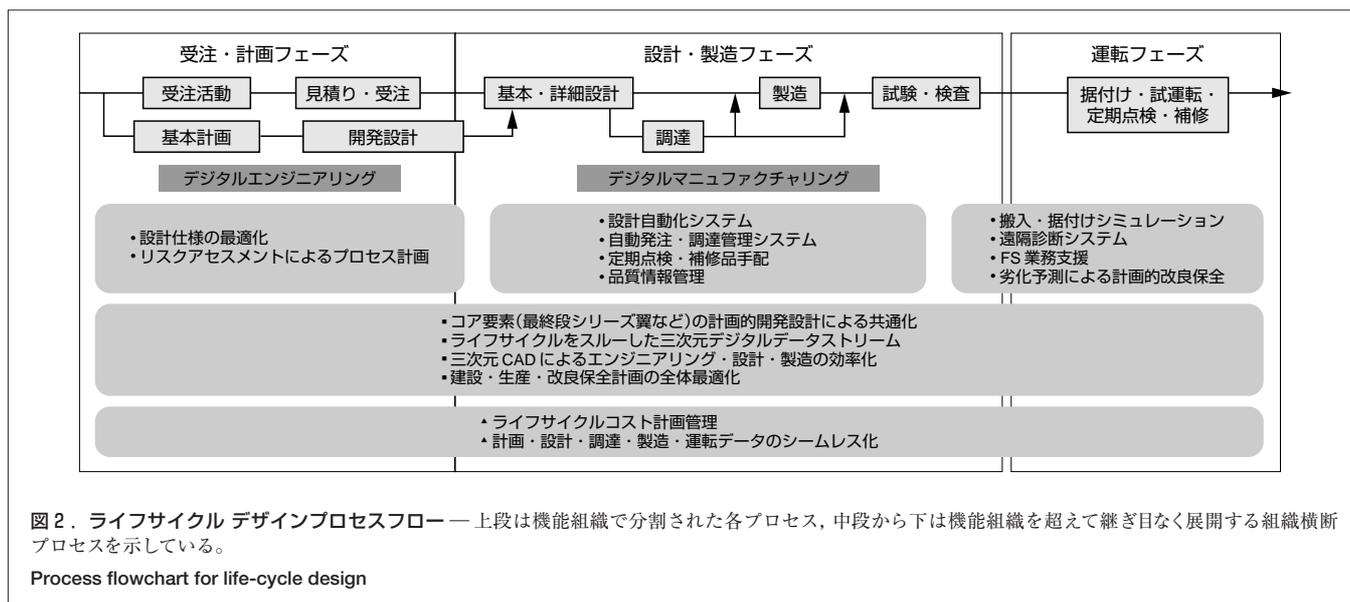
蒸気タービンのライフサイクル デザインプロセスフローの概要を図2に示す。上段は営業、設計、製造、フィールドサービス (FS) などの機能組織で分割された各プロセス、中段から下は機能組織を超えて継ぎ目なく展開する組織横断プロセスを示している。

前述した設計要求は共通して重要な項目であるが、蒸気タービンの製品サイクルの進展のなかでとらえると、顧客ビジネスの進展と環境の変化、技術の進歩、及びビジネスカテゴリーの異なる他製品との競合などを反映し、個々の顧客の要求事項と合わせて、常に見直しと確認により最適化を続けるべきものである。設計の開始点である基本計画の段階で重要なプロセスは、顧客の重要課題を理解して設計仕様の確認と最適化を行うことである。戦略的な新機種や長翼などのキーコンポーネントの開発においては、特に重要なプロセスである。

個々のプロセスは既定の固定したタスクの集合ととらえるべきでなく、開発設計対象のライフサイクルをスルーしたリスクアセスメントを実施して、毎回見直すべきものである。例えば、性能と信頼性の要求の特に厳しい部位については、検証された共通部品を使用することで、該当部位の開発設計と検証を省略することができる。

### 3 コア要素の共通化

前述したように、タービンの性能、信頼性、及び価格に与



える影響度が大きいコア要素については、設計の共通化やモジュール化がライフサイクルコストの低減に非常に有効である。ここでは、東芝の製品内での共通化の枠を超えて、他社と協力してコア要素の開発を行い、共通化を図った例として、GE社と共同開発したスチール製40/48インチ最終段シリーズ(低圧部最下流の大型部品である最終段とその上流2段落、合計3段落の静動翼2種類：60 Hz (3,600 rpm) 機用40インチ翼シリーズと50 Hz (3,000 rpm) 機用48インチ翼シリーズ)の開発について述べる<sup>(3), (4)</sup>。

2種類の開発スチール翼(最終段動翼)を図3(a)に示す。また、図3(b)は、この開発スチール翼を植え込んで、50Hz 48インチシリーズ3段落の回転振動試験(信頼性検証試験)に用いた実スケールの試験ロータである。60Hz 40インチシリーズの実スケール試験ロータも製作して同様の試験を完了している。60 Hz機用と50 Hz機用のそれぞれのシリーズ静動翼は、100 MW前後から1,200 MW前後の出力の火力用蒸気タービンに適用できる。

図4は最終段の設計条件を表すグラフで、横軸は蒸気の質量流量の相対値で、翼に加わる定常及び非定常流体力の大きさに対応し、主に構造強度設計にかかわるパラメータである。一方、縦軸は体積流量の相対値で、蒸気の数値に対応し、流体性能にもっとも影響を与えるパラメータである。設計に影響を与える重要な条件として排気室圧力(BP)があるが、質量流量と体積流量に従属するので、直線群で表している。また、図中には△印で、従来機に対応する設計点を示している。図示していないが、これに両社の計画機の設計点群を加え、更に今後の開発計画を勘案して、両社が合意できるひし形の主設計点を決定した。この選択の大きな特徴は、従来設計が適用出力範囲を広げるために比較的大きな体積流量を設計点として選んでいたのに対して、性能向上を最優先として、設計体積流量を低めに設定していることである。

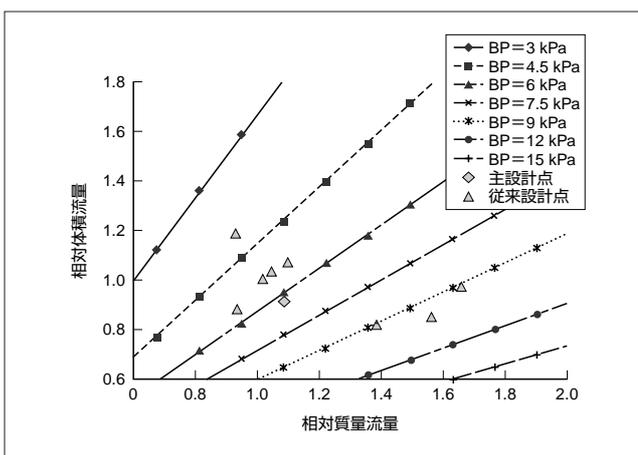
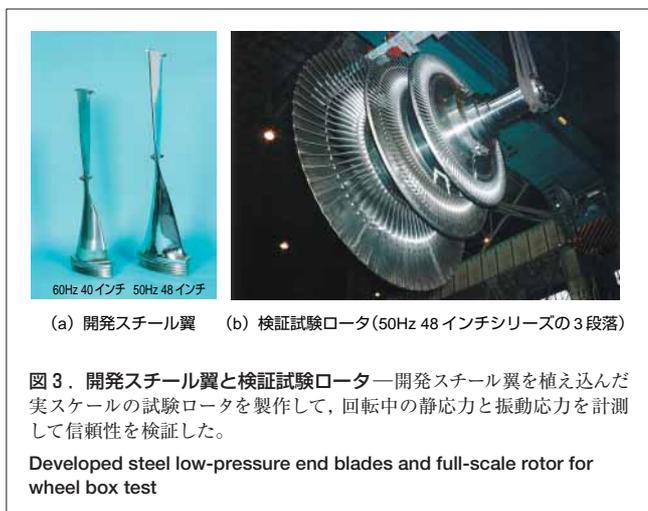
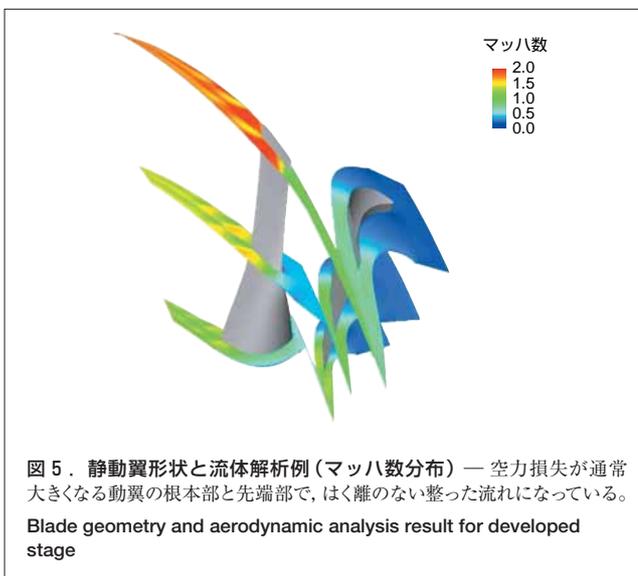


図4. 蒸気タービン最終段の設計条件—スチール製40/48インチ翼は、性能向上を最優先として設計体積流量を従来設計と比較して低めに設定されている。

Last-stage design conditions



開発した最終段静動翼の三次元形状と三次元流体解析結果の一例(マッハ数分布)を図5に示す。二次元と三次元の流体解析を繰り返して形状の最適化した結果、空力損失が通常大きくなる動翼の根本部と先端部で、はく離のない整った流れになっていることが確認できる。

コア要素の共通化は、当社単独では、ケーシングなどの長納期の大型部品についても実施しており、納期の短縮とコストの低減に貢献している。

#### 4 デジタル マニュファクチャリング

長翼段落以外の静動翼は、構造強度設計の難易度は比較的低いものの、段落数が多いので全体としては性能に対する寄与度が大きく、最適空力設計が求められる。そこで、設計

自動化システムを用いて、流出角、ボス比、根本部直径などのパラメータを変化させてあらかじめ設計しておいた翼型から選択する方法と、設計条件に完全に一致する形状をそのつど自動設計する方法を併用している。自動設計された動翼形状の例を図6(a)に示す。目的関数には流体性能に対応する複数の空力パラメータの合成関数を用い、断面積、コード長、断面二次モーメントなどの構造設計パラメータは制約関数として自動最適化設計を行っている。図6(b)は完成して動翼に植え込まれた高中圧段落の実機動翼の例である。このような、半径方向に自由に傾斜や湾曲を付ける最新の三次元形状を、従来の手動による方法で設計すると非常に時間がかかるが、自動最適化設計を用いることで、大幅な時間の短縮が可能になる。

図2で示したライフサイクル デザインプロセスのなかで、設計から製造までをスルーした重要なプロセスがデジタルマニュファクチャリングである<sup>(2)</sup>。タービン動翼製造に関するこの部分のプロセスを図7を用いて説明する。各プロセスに対応する情報管理システムは、個別のデータベース(DB)群をコントロールする。管理システム間でデジタルデータの形式を統一しているの、プロセスをスルーして三次元翼型

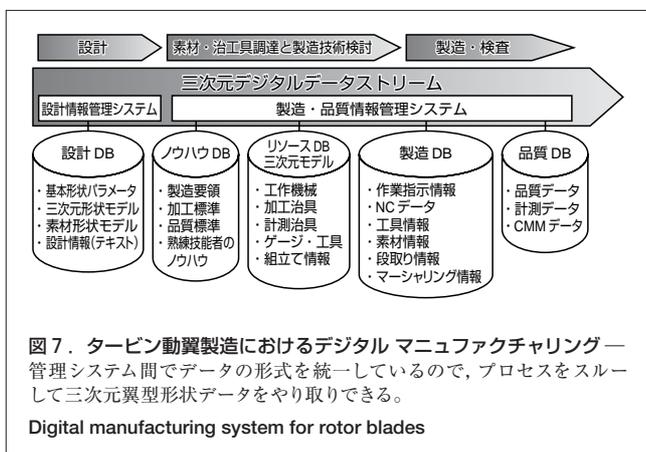
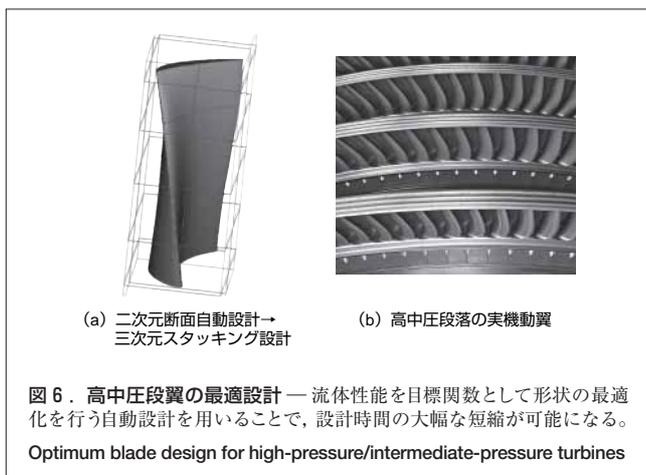
形状データをやり取りできる。このデータの流れを三次元デジタルデータストリームと呼んでいる。動翼の形状データは個々の設計ですべて新しく決められるわけではなく、ロータに植え込まれる部分の形状などの標準形状は、形状を決定する基本形状パラメータで表現している。現状は、システムの適用範囲に柔軟性を持たせるために要所に人間系のプロセスを残しているが、デジタルマニュファクチャリングの目指す姿は、ソフトウェアロボットによる自動設計とNC(数値制御)マシンによる無人機械加工、及び三次元計測機(CMM)による自動計測の融合である。

## 5 あとがき

製品の差異化により強い競争力を維持し続けるために、設計は進化を続けていく必要がある。そのためには、顧客要求を常にアップデートして全体最適化を継続していくことが、重要である。国際的なアライアンスの活用を含む大きなスケールの取組みから、自動最適化設計プロセスのキーとなる詳細な最適化アルゴリズム開発に至るまで、広範囲の取組みを続けており、顧客満足度の高い蒸気タービンの提供という形で常に成果を出していく所存である。

## 文 献

- (1) 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, (掲載予定).
- (2) 鈴木孝史. “蒸気タービンにおけるCAD/CAM適用”. ターボ機械協会 第59回セミナー資料. 2003-07. p.16-24.
- (3) Mujezinovic, A.; Kaneko, J., et al. “Introduction of 40/48 Inch Steel Steam Turbine Low Pressure Section Stages”. Power-GEN Asia 2002. Singapore, 2002. (CD-ROM).
- (4) Hofer, D.; Tanuma, T., et al. “Aerodynamic Design and Development of Steel 48/40 Inch Steam Turbine LP End Bucket Series”. International Conference on Power Engineering - 03. Kobe, 2003. p.2-217 - 222.



佐々木 隆 SASAKI Takashi

電力・社会システム社 京浜事業所 原動機部グループ長。蒸気タービンの開発、設計に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、ASME会員。  
Keihin Product Operations



鈴木 孝史 SUZUKI Takashi

電力・社会システム社 京浜事業所 原動機部経営変革エキスパート。蒸気タービンの開発、設計に従事。日本機械学会会員。  
Keihin Product Operations



田沼 唯士 TANUMA Tadashi, D.Eng.

電力・社会システム社 京浜事業所 企画部経営変革エキスパート、工博。工場経営に関する戦略立案、プロジェクト推進業務に従事。日本機械学会、日本ガスタービン学会、ターボ機械協会会員。  
Keihin Product Operations