流体構造大規模連成解析を用いた 高性能タービン翼設計法の開発

プロジェクト責任者

川崎 栄 株式会社 東芝 京浜事業所

著者

川崎 栄^{*1}、渋川 直紀^{*2}、新関 良樹^{*2}、野村 大輔^{*2}、田沼 唯士^{*3}、笹尾 泰洋^{*4}、高田 真司^{*5}、 山本 悟^{*5}、奥田 洋司^{*6}、橋本 学^{*6}、渡邉 諭^{*7}、小林 孝雄^{*7}、末光 啓二^{*8}、袁 熙^{*8}、 福井 義成^{*9}、廣川 雄一^{*9}、西川 憲明^{*9}

- *1 株式会社 東芝 京浜事業所
- *2 株式会社 東芝 電力・社会システム技術開発センター
- *3 帝京大学 ジョイントプログラムセンター
- *4 帝京大学大学院 理工学研究科
- *5 国立大学法人東北大学大学院 情報科学研究科
- *6 国立大学法人東京大学大学院 新領域創成科学研究科
- *7 東芝インフォメーションシステムズ株式会社
- *8 アドバンスソフト株式会社
- *9 独立行政法人海洋研究開発機構
- 利用施設: 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間: 平成 23 年 4 月 1 日~平成 24 年 3 月 31 日

アブストラクト

発電由来の CO₂ 排出量を削減するために、火力、地熱及び原子力発電用大型蒸気タービンの性能向 上及び稼働率向上に有効な流体構造大規模連成解析を用いた高性能タービン翼設計法の開発を行って いる。タービンメーカー単独では困難な大規模非定常解析が必要となるので、海洋研究開発機構の地 球シミュレータを用いて大規模解析の高精度化を図った。

蒸気タービンを構成する重要部品である動翼は、静翼から流入する高速の蒸気流れを受けて回転し て動力を生じる。動翼の最適設計は性能向上と遠心力低減、引いては機器のコンパクト化に効果があ るが、材料強度の余裕を高精度で予測する必要があり、動翼に加わる流体励振力を精度良く予測する 必要がある。このため、最終段の静翼と動翼を一括して解析する大規模で長時間を要する非定常 CFD (Computational Fluid Dynamics)解析と、最終段動翼の出口条件に大きな影響を及ぼす排気ディフュ ーザの 360°全周非定常 CFD 解析を実施した。更に CFD によって求まった流体条件を用いて、有限 要素法構造解析を実施した。今年度の解析は、蒸気タービンの設計運転条件において実施し、大規模 CFD 解析を実施して、動翼に加わる非定常流体力を求め、非定常流体力発生のメカニズムを明らかに して、非定常流体力低減のための検討を行った。更に、実機タービンの実測値を用いて、長翼下流の ディフューザ流れを対象に解析法の精度検証を行い、湿り蒸気の条件で解析結果と実験結果が良好に 一致することを確認した。構造解析においては、計測データのあるモデルタービン動翼の解析を行い、 精度の検証を実施した。

キーワード: 大規模シミュレーション、蒸気タービン、発電、性能、動翼、非定常流体力

1. 本プロジェクトの目的と概要

地球温暖化対策を具体的に進めるための、産業部門別の削減量の試算(Energy Technology Perspectives 2008, IEA, 2008)によると、電力発電時の CO₂ 削減量は全施策中で最大の 38% となって いる。また、火力発電、原子力発電など全ての種類の発電システムにおける全世界の総発電量の 6 割 以上 (DOE/EIA, International Energy Outlook 2011, September 2011 のデータから推定)が蒸気タービンによっていることから、蒸気タービンの効率向上は、環境負荷低減を推進する上で大きな効果が期 待できる研究課題である。

蒸気タービンの損失分析¹⁾によると、蒸気タービンの損失の大半は静翼と動翼の損失であり、翼損 失の中でも低圧タービンの長翼と高圧タービン初段の短翼の損失が大きい。また、低圧最終段動翼の すぐ下流の排気室損失も大きく、これらの損失低減技術の開発に注力する必要がある。静翼に関しては、 構造強度上の制約が比較的小さいので、形状の最適化により、損失低減が図られてきたが、動翼に関 しては、大きな遠心力や変動する流れを受けて生じる非定常流体力により、従来は形状を最適化する ことが難しかった。また、排気室性能に大きな影響を及ぼす排気ディフューザは蒸気と水分とが流入 する二相流の状態にあり、従来は解析が困難で、実験的な研究が主に行われていた。

蒸気タービンを構成する重要部品である動翼は、静翼から流入する高速の蒸気流れを受けて回転し て動力を生じる。動翼の最適設計は性能向上と遠心力低減、引いては機器のコンパクト化に効果があ るが、材料強度の余裕を高精度で予測する必要があり、動翼に加わる流体励振力を精度良く予測する 必要がある。このため、最終段の静翼と動翼を一括して解析する大規模で長時間を要する非定常 CFD (Computational Fluid Dynamics)解析と、最終段動翼の出口条件に大きな影響を及ぼす排気ディフュー ザの 360°全周非定常 CFD 解析を実施した。更に CFD によって求まった流体条件を用いて、有限要素 法構造解析を実施した。今年度の解析は、蒸気タービンの設計運転条件において実施し、大規模 CFD 解析を実施して、動翼に加わる非定常流体力を求め、非定常流体力発生のメカニズムを明らかにして、 非定常流体力低減のための検討を行った。更に、実機タービンの実測値を用いて、長翼下流のディフュー ザ流れを対象に解析法の精度検証を行い、湿り蒸気の条件で解析結果と実験結果が良好に一致するこ とを確認した。構造解析においては、計測データのあるモデルタービン動翼の解析を行い、精度の検 証を実施した。

流体解析プログラムとして、東北大山本教授により開発された数値タービン¹⁾²⁾⁷⁾¹⁵⁾を、地球シミュレー タ向けに最適化して使用した。数値タービンは、発電用大型蒸気タービン翼の高性能設計に用いられ た実績があり、非定常解析の機能も有しており、地球シミュレータ上で、従来実行できなかった全周 全ての静動翼を対象とした非定常解析を実行することで、非定常流体力発生のメカニズムを解明でき ると考えられる。

構造解析プログラムとして、大規模並列計算に適した有限要素法コードである FrontISTR¹⁶ を用い て動翼の構造解析を行った。FrontISTR では大規模問題への対応のために、反復法ソルバーを前処理 法と組み合わせて使用するが、反復法では収束が困難な場合や収束に長時間を要する場合には、直接 法を選択できる。並列解析は領域分割の考え方に基づいている。並列計算に先だって、メッシュに分 割された解析領域はメモリの分散に応じて局所化された複数の部分領域のデータに分割される。各部 分領域で局所化されている独立な演算部分は並列に実行される。

従来は別々に実施していた流体解析と構造解析を連成させることで、解析精度を向上させ、性能向 上(設計最適化)、設計期間短縮を図る。

図 1.1 に本プロジェクトで解析対象とする、発電用大型蒸気タービンの断面図を示す。長翼は青色の 楕円で囲まれた部分、初段短翼は緑色の楕円にかこまれた部分にある。短翼の解析と性能向上に関す る研究は昨年度の報告書にて報告済みであり、今回の報告には含めない。長翼段落、特に最下流に位 置する最終段動翼の流れは、下流の排気ディフューザ(図 1.1 の青色楕円内にあり)と双方向に影響を 及ぼし合っているので、この部分の解析精度向上が非常に重要である。



図 1.1 典型的な発電用大型蒸気タービン(1000MW 級)¹⁾

2. 本プロジェクトの内容と得られた成果の概要

2.1 凝縮を考慮できる三次元圧縮性流れの基礎方程式および数値解法

2.1.1 基礎方程式

本研究では、三次元圧縮性 N-S 式に蒸気の相変化を考慮した蒸気の質量保存則、運動量保存則、エ ネルギー保存則、液滴の質量保存則、液滴の数密度保存則、乱流運動エネルギーおよびその比散逸率 からなる次式を解く。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} + S + H = 0 \tag{1}$$

ここで、*Q*は未知変数ベクトル、*F*は流東ベクトル、*S*は粘性項、そして*H*は生成項であり、次のように表される。

$$Q = J \begin{bmatrix} \rho \\ \rho W_{1} \\ \rho W_{2} \\ \rho W_{3} \\ e \\ \rho W_{3} \\ e \\ \rho M_{3} \\ \rho M_{3} \\ \rho M_{3} \\ \rho M_{3} \\ \rho M_{i} \\ \rho M_$$

本研究で取り扱う気液二相流は液滴の質量分率が十分に小さい均質流を仮定する (β<0.1)。湿り蒸気の状態方程式および音速の式は石坂ら²により定式化された下式より算出する。

$$p = \rho RT(1 - \beta) \tag{3}$$

$$c^{2} = \frac{C_{pm}}{C_{pm} - (1 - \beta)R} \frac{p}{\rho}$$

$$\tag{4}$$

ただし、

$$C_{pm} = \beta C_{pl} + (1 - \beta) C_{pv}$$

*Cpl、Cpv*は水および蒸気の定圧比熱であり、それぞれ 4.184、1.882kJ/(kg·K)とした。

2.1.2 凝縮モデル

凝縮による液滴の質量生成率 Γ は古典凝縮論に基づき、凝縮核生成と液滴の成長による質量増加の 和で表される。本研究ではさらに、液滴の成長を液滴の数密度を関数にした式で近似した次式を用い る²⁾。

$$\Gamma = \frac{4}{3} \pi \rho_l \left(I r_*^3 + 3 \rho n r^2 \frac{dr}{dt} \right)$$
(5)

凝縮核生成率1は大気中の塵などを凝縮核とする不均一核生成を仮定する場合には常にゼロである。 一方、均一核生成の場合には、Frenkel³によって定式化された次式を用いて算出する。

$$I = q_c \left(\frac{2\sigma}{\pi m^3}\right)^{1/2} \frac{\rho^2}{\rho_l} \exp\left(-\frac{4\pi r_*^2 \sigma}{3kT}\right)$$
(6)

ここでm、kは水の分子量およびボルツマン定数である。 q_c は凝縮係数であり、通常 0.1 から 1.0 までの値を取る。 r_* は Kelvin-Helmholtzの凝縮核臨界半径であり、次式より求める。

$$r_* = \frac{2\sigma(T)}{\rho_1 RT \ln(s)} \tag{7}$$

ここで、 $s = p/p_s(T)$ は過飽和蒸気圧率であり、 $p_s(T)$ は飽和蒸気圧である。

蒸気中における液滴の表面張力σは Young⁴ によって次式のような温度の多項式より算出する。

$$\sigma(T) = \left(82.27 + 75.612T_R - 256.889T_R^2 + 95.928T_R^3\right) \times 10^{-3}$$

ただし、

$$T_R = \frac{T}{647.286}$$

1個の液滴の成長率 dr /dt は蒸気凝縮に最適化された Gyarmathy⁵⁾ モデルより算出した。

$$(h_{\nu} - h_{l})\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_{\nu}(T_{l} - T_{\nu})}{r\rho_{l}\left(\frac{1}{1 + 4Kn_{l}} + 3.78(1 - \nu)\frac{Kn_{l}}{Pr_{\nu}}\right)}$$
(9)

ここで、v は次式で定義される。

$$v = \frac{R_v T_s(p)}{h_{fv}} \left[\alpha - \frac{1}{2} - \frac{2 - q_c}{2q_c} \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right) C_p \frac{T_s(p)}{h_{fv}} \right]$$

 h_{fr} は蒸発の比エンタルピ、 α は液滴の成長パラメータであり 5.0 とした。気液界面近傍での二相間の 温度差は過飽和温度 ΔT を用いて次式で与えた ⁵⁾。

$$\left(T_{i}-T_{g}\right) = \left(1-\frac{r_{*}}{r}\right)\Delta T \tag{10}$$

ただし、

 $\Delta T = T_s(p) - T$

2.1.3 数值解法

数値解法として、空間差分にはRoeの流束差分離法⁶⁾および4次精度コンパクトMUSCL TVD スキー ム⁷⁾を用いた。粘性項には2次精度中心差分を用い、乱流モデルにはSST モデル⁸⁾を用いた。時間積 分にはLU-SGS 法⁹⁾を用いた。

2.1.4 3次元遷音速静動翼列の非定常流れ解析

発電用大型蒸気タービン低圧最終段の静翼列と動翼列においては、蒸気流れは微小水滴を含む二相 流となっている。更に翼長が1mを越えるため、翼ルート部(根元部)と先端部の半径比(ボス比)が2.0 を超える設計となり設計負荷条件では、翼ルート部近くの静翼絶対流出速度と翼先端近くの動翼相対 流出速度は共に Mach 数1.8 前後の超音速流れとなる。このため、流路中央からルート側に近い動翼入 口側翼面には静翼後縁から生じる斜め衝撃波が衝突して反射する。衝突位置は動翼の回転に伴って刻々 と変化するので、動翼が静翼の1ピッチ(一つの静翼から隣接静翼の間隔)を通過する周期で表面圧 力の変動が生じる。同時に、静翼後縁から流出する速度欠損部分(後流)も動翼翼列に流入すると動 翼表面圧力の変動を引き起こすので、動翼表面には衝撃波の衝突と静翼後流の流入の2種類の外乱に よる表面圧力変動が生じる。図 2.1 に最終段静動翼列の解析領域全体と中間断面における解析格子を示 す。図 2.2 には中間断面の解析格子の展開図を示す。動翼はこの図の下側方向に回転しているので、赤 で示した動翼領域格子は解析の時間刻み毎に下方向に移動して行く。



図 2.1 静動翼列の解析領域



図 2.2 中間断面における解析領域



図 2.3 瞬間静圧分布

図 2.4 瞬間渦粘性係数分布

図 2.5 瞬間湿り度分布



図 2.6 動翼表面静圧の周期変動例

図 2.3 から 2.5 に解析がほぼ収束したと思われる段階の中間断面における代表的な瞬間の解析結果を 示す。図 2.3 は静圧分布であり、静翼後縁付近から発生している衝撃波が動翼入口近くの背側まで到達 している様子が分かる。図 2.4 は渦粘性係数分布で静翼後縁から流出している速度欠損部分が可視化されている。この速度欠損領域が動翼に流入して、動翼の流れに影響を及ぼしていることが分かる。図 2.5 は湿り度分布である。下流に行くに従って湿り度が増加している。

図 2.3 から 2.5 は代表的な瞬間における流動状況の可視化であったが、図 2.6 には動翼が回転して 静翼1ピッチ(ある静翼から隣接する静翼までの間隔)分を回転する間の動翼表面の静圧分布の周期 変動を示している。灰色の部分が静圧の変動範囲を示している。前述した衝撃波と静翼後流の速度欠 損領域が動翼に流入することにより主に動翼腹側静圧が大きく変動していることが分かる。本解析結 果より動翼の性能に静翼の特性が大きく影響していることが分かった。

2.1.5 排気ディフューザ流れの解析

低圧タービンを通過した湿り蒸気は、外部ケーシングとディフューザから構成される排気室を経て 復水器へと流入する。ディフューザの役割は、低圧タービンを通過した高速の蒸気流れを十分に減速し、 その運動エネルギーを圧力へと変換することである。復水器には海水を通すためのパイプが多数設置さ れており、蒸気は冷却されて水へと戻る。復水器内部の圧力(復水圧)は海水温や地域によって異なる が、日本の蒸気タービン発電システムで採用している標準的な圧力は5kPa(0.05気圧)前後と真空に近 い低圧である。ディフューザの静圧回復性能が高いほど、低圧タービンの出口静圧を更に低下するこ とができ、タービン出力を増加することができる。このように、ディフューザの静圧回復性能は低圧ター ビンの性能を大きく左右する。更に、最終段動翼の流れは下流側のディフューザ流れと相互に影響し あっているので、湿り蒸気の特性を考慮できる、精度の良いディフューザ解析が必要とされている。

本年度研究では、実機での計測データを有する発電用大型蒸気タービン低圧排気ディフューザを解 析対象として全周360°の解析を行った。図2.7aはディフューザ壁面上のディフューザ解析格子、図2.7b は子午面における解析格子を示す。

境界条件として、ディフューザの入口全圧、出口静圧を計測値に合わせて全周 360°の分布を与えた。 本解析の大きな特徴は、入口境界における蒸気の流入角度と全圧分布を、実機での計測値に基づいて 与えている点である。更に上流翼列後流の影響を考慮するために、多段翼列解析で求めた乱流量を上 流境界条件として与えた。



図 2.7a ディフューザ壁面の解析格子



図 2.7b ディフューザ子午面解析格子

図 2.8a-d は解析結果のマッハ数を周方向 4 個所(全圧計測点に対応した位置)の子午面において示 している。境界条件として与えた入口全圧分布と出口静圧分布に対応して周方向に大きな分布が付い ており、上部(4°)から上流から見て右側水平部(264°)に比較的大きな剥離部が形成されていること が分かる。図2.9及び2.10はそれぞれ静圧分布と流線分布を周方向4個所の子午面上で可視化している。 ディフューザ上流の静圧は境界条件と独立の変数で解析の結果求まったものであるが、周方向に大き な分布が付いており、動翼の最適設計を行うために重要なデータである。図 2.11、2.12 は流線を 3 次 元的に可視化したものであり、前述した剥離部分が周方向に軸を有する渦になっていることが分かる。

紙面の制約で図を省略したが、解析静圧回復係数は計測された静圧回復係数と周方向の平均値とし てはほぼ一致している。このことより、本解析はディフューザ性能を設計に適用できる精度で予測で きることが分かる。更に、ディフューザ出口における解析全圧分布は計測値の範囲内にほぼ入っており、 本解析は剥離の発生に起因するディフューザ損失を精度良くとらえていることが分かる。

以上の結果より、地球シミュレータ上で最適化された「数値タービン」はディフューザ内部の様な 気液二相流において逆圧力勾配を持つ剥離のある流れ場においても、精度良く流れ場を解析できるこ とが確認できた。



分布 周方向 4°の位置 布 周方向 96°の位置



図 2.8a 解析 Mach 数 図 2.8b 解析 Mach 数分 図 2.8c 解析 Mach 数分 図 2.8d 解析 Mach 数分



布 周方向 208°の位置



布 周方向 264°の位置



周方向 4°の位置



周方向 96°の位置



周方向 208°の位置



図 2.9a 解析静圧分布 図 2.9b 解析静圧分布 図 2.9c 解析静圧分布 図 2.9d 解析静圧分布 周方向 264°の位置



図 2.10a 解析流線 周方向 4°の位置



図 2.10b 解析流線 図 周方向 96°の位置 周5





図 2.10c 解析流線 周方向 208°の位置

図 2.10d 解析流線 周方向 264°の位置



図 2.11 解析流線 (上流より見る)

図 2.12 解析流線 (264°付近の拡大図)

2.2 動翼の構造解析

2.2.1 並列有限要素法構造解析プログラム FrontISTR

大規模並列計算に適した有限要素法コードである FrontISTR¹⁶⁾を用いて動翼の構造解析を行った。 FrontISTR では大規模問題への対応のために、反復法ソルバーを前処理法と組み合わせて使用するが、 反復法では収束が困難な場合や収束に長時間を要する場合には、直接法を選択できる。並列解析は領 域分割の考え方に基づいている。並列計算に先だって、メッシュに分割された解析領域はメモリの分 散に応じて局所化された複数の部分領域のデータに分割される。各部分領域で局所化されている独立 な演算部分は並列に実行される。

本プログラムは今回の研究プロジェクトに際して、地球シミュレータ上でのチューニングを行い、ベ クトル化と並列化の最適化を実施した。

2.2.2 構造解析結果

前述した流体解析と同じ条件を用いて有限要素法構造解析を行った。

図 2.13 に回転している動翼 6 本と 2 個所の中間連結構造(レーシングワイア)を含む大規模解析結 果を示す。青が最少応力、赤が最大応力を示す。図 2.14 には中間連結構造周辺の拡大図を示す。事前 に実施された商用コードでの解析結果と良く一致していることを確認した。



図 2.13 応力解析結果

図 2.14 中間連結構造周辺の応力解析結果

3. 社会的・経済への波及効果の見通し

- 平成23年度の研究成果を用いることにより、設計負荷運転時の上流翼列後流及び上流周方向不均一 流れによる非定常流体力の計算予測精度の向上を図ることができ、流動現象のメカニズムの解明に より設計改善に有効な知見を得ることができる。
- 部分負荷運転時の周方向不均一流れによる非定常流体力の計算予測精度の向上、メカニズムの解明
 については、引き続き地球シミュレータを用いた研究を平成24年度も継続する。
- 3. 上記1、2の成果を用いて、高性能蒸気タービンの開発、実用化を行うために必要な実機データを用いた解析法の検証を行う。ディフューザ流れに関しては流体力学的な検証を完了した。

従来のタービン動翼設計においては、流体力学的な損失を最小化できる理想的な形状に対して、運転中に想定される非定常流体力を運転実績や実機計測結果から予測して、剛性を増すために翼厚増加などの余裕を持った設計を採用していることが多い。非定常流体力の計算精度を向上できれば、剛性の制約条件を緩和させて、より流体損失を低減した最適設計が可能になる。その結果、蒸気タービンの効率を向上させることができる。

日本のメーカーで製造される蒸気タービンは北米、東南アジアなど広く世界各国に輸出されており、 中国においても、技術提携により日本の技術で中国メーカーが高性能の蒸気タービンを生産するフォー メーションを構築している。従って、今回のプロジェクトで開発した技術は日本国内だけでなく、世 界各国における発電効率向上と発電由来の CO₂ 削減に貢献できる。

FrontISTR(フロントアイスター)は、文部科学省「イノベーション基盤シミュレーションソフト ウエアの研究開発」プロジェクトにおいて開発されています。FrontISTR は東京大学生産技術研究所 革新的シミュレーション研究センター(CISS)の登録商標です。

参考文献

1) Tanuma., T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Takada, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N. and Saeki, H.,

"Numerical Investigation of Exhaust Diffuser Performances in Low Pressure Turbine Casings", Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45677, 2011.

- Ishizaka, K., Ikohagi, T. and Daiguji, H., "A High-Resolution Numerical Method for Transonic Non-Equilibrium Condensation Flow through a Steam Turbine Cascade", Proc. of the 6th ISCFD, 1, pp. 479-484, 1995.
- 3) Frenkel, J., "Kinetic Theory of Liquids", Dover, 1955.
- Young, J. B., An Equation of State for Steam for Turbomachinery and Other Flow Calculations, Trans. ASME, J. Eng. Gas Turbines Power, 110, pp. 1-7, 1998.
- Gyarmathy G,. "Zur Wachstumsgeschwindigkeit kleiner Flussigkeitstropfen in einer ubersattigten Atmosphare ", Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik, 14-3, pp. 280-293, 1963.
- Roe, P.L., "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, Journal of Computational Physics", 43, pp. 357-372, 1981.
- Yamamoto, S. and Daiguji H., "Higher-Order-Accurate Upwind Schemes for Solving the Compressible Euler and Navier-Stokes Equations", Computers and Fluids, 22-2/3, pp. 259-270, 1993.
- Menter, F.R., "Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications", AIAA Journal, 32-8, pp. 1598-1605, 1994.
- Yoon, S. and Jameson, A. "Lower-upper Symmetric-Gauss-Seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations", AIAA Journal, 26, pp. 1025-1026, 1988.
- He, L., Computation of unsteady flow through steam turbine blade rows at partial admission, 1997 Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, 211, Part A, 197-205, 1997.
- Sakai, N., Harada, T. and Imai, Y., Numerical Study of Partial Admission Stages in Steam Turbine, 2006 JSME International Journal, Series B, 49, 2, 212-217, 2006.
- 12) Gao, L., Dai, Y., Rotor dynamic analysis on partial admission control stage in a large power steam turbine, Proceedings of ASME Turbo Expo 2010, GT2010-22608, CD-ROM, 2010.
- 13) Hushmandi, N., B., Fridh, Jens E., Fransson, T., H., Unsteady Forces of Rotor Blades in Full and Partial Admission Turbines, Journal of Turbomachinery, 133, 041017-1-041017-12, 2011.
- 14) 田沼唯士、佐々木隆、新関良樹、"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, pp. 22 29, 2007.
- 15) Tanuma, T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N., Saeki, H., "Numerical Investigation of Three-Dimensional Wet Steam flows in an Exhaust Diffuser with Non-Uniform Inlet Flows from the Turbine Stages in a Steam Turbine," Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, GT2012-69496, 2012.
- (16) 奥田洋司編著、"有限要素法解析【II】 並列構造解析ソフトウエア FrontSTR を使いこなす"、培 風館, 2008.