

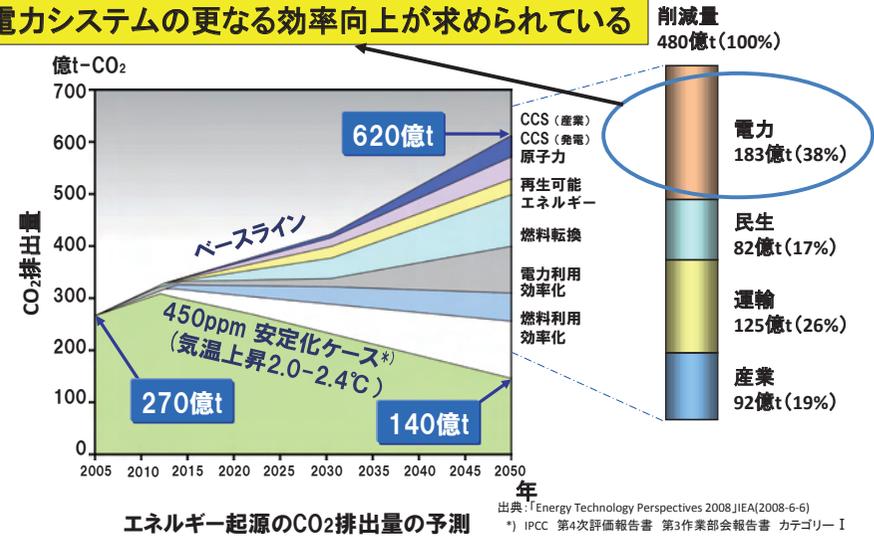
地球シミュレータ産業利用シンポジウム 2012
2012年10月11日

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

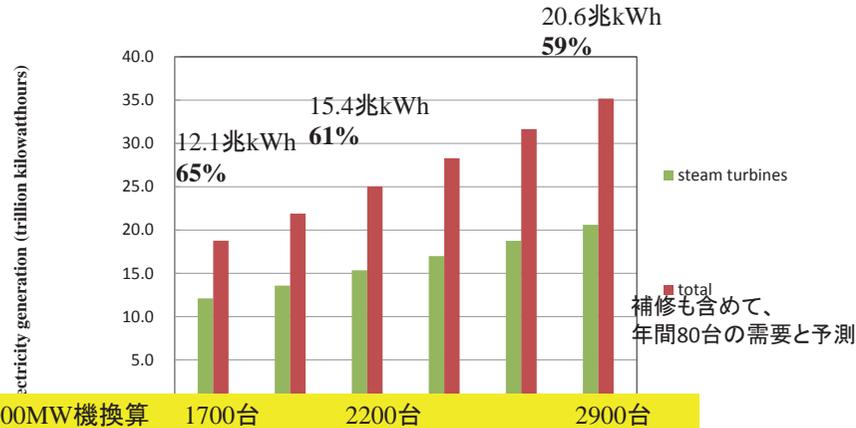
川崎 榮
株式会社東芝
京浜事業所

本研究の必要性: CO₂排出量削減施策(IEA)における 電力システムの目標

電力システムの更なる効率向上が求められている



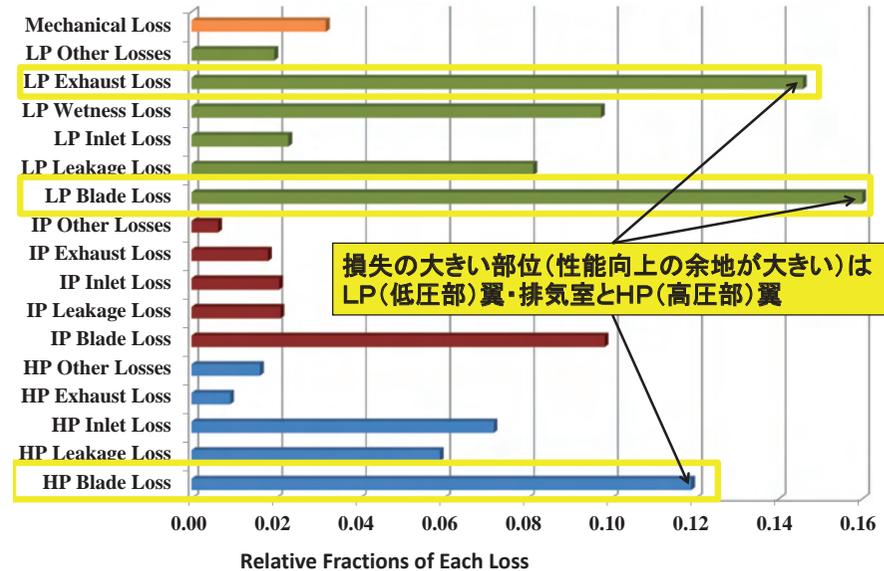
本研究の必要性: 発電用蒸気タービンの需要動向



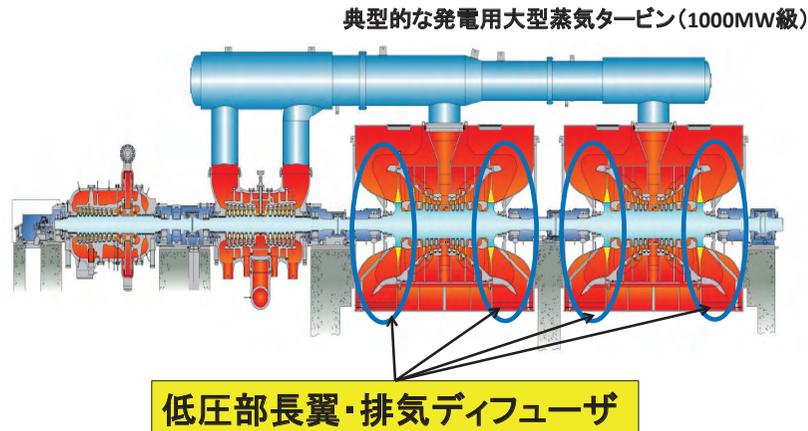
(assumed from DOE/EIA, International Energy Outlook 2010, May (2010))

世界の全電力需要の半分以上は蒸気タービンが担っている。
⇒ 蒸気タービンの性能向上は今後も重要な課題

本研究の必要性: 発電用大型蒸気タービンの損失分析¹⁾

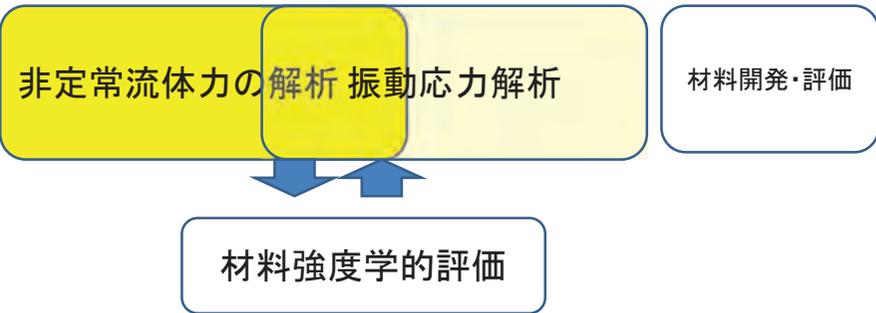


本研究の対象



5

本研究の方法



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、解析精度の向上を図る

6

平成23年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム概要

戦略分野 環境負荷を低減する技術開発

テーマ 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

目的

1. 火力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
2. 発電由来のCO2削減の推進

概要

- ① 蒸気タービンの部分負荷から設計負荷の範囲の条件で、大規模CFD解析を実施して、動翼に負荷される非定常流体力を評価
- ② 非定常流体力発生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実施
- ③ 非定常流体力予測精度向上と動翼形状改良の性能向上効果を評価
- ④ 動翼の構造解析と連成することにより、構造上の制約を高精度で反映しながら空力損失を低減する設計法を開発

7

プロジェクト人員体制

プロジェクト責任者

川崎 栄 (東芝 蒸気タービン設計部門)
新関 良樹 (東芝 電力社会システム技術開発センター)

現場責任者

小林 孝雄 (東芝インフォメーションシステムズ)

プログラム作成

山本 悟 (東北大学大学院 情報科学研究科 教授)
奥田 洋司 (東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授)

プログラム移植・最適化・計算実行

笹尾 泰洋 (東北大学大学院 情報科学研究科 助教)
高田 真司 (東北大学大学院 情報科学研究科 山本研)
橋本 学 (東京大学大学院 工学系研究科)
末光 啓二、袁 熙 (アドバンスソフト株式会社)

計算条件設定、計算実行、計算結果と試験結果の比較、結果の評価と考察、開発設計への反映

田沼 唯士 (帝京大学 ジョイントプログラムセンター)
渋谷 直紀、他 (東芝 電力社会システム技術開発センター)

プリ/ポスト処理、計算結果と試験結果の比較

田沼 唯士 (帝京大学 ジョイントプログラムセンター)
渡邊 諭 (東芝インフォメーションシステムズ)

8

湿り蒸気流体解析基礎式

1. Three Dimensional Unsteady Compressible Navier-Stokes equations
2. The fundamental equations :conservation laws of total density, momentum, total energy, water vapor density, liquid water density, and the number density of water droplets.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} = \frac{1}{Re} S + H \quad (i=1,2,3)$$

$$Q = J \begin{bmatrix} \rho_v \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ e \\ \rho\beta \\ \rho n \\ \rho k \\ \rho\omega \end{bmatrix}, \quad F = J \begin{bmatrix} \rho_v U_i \\ \rho u_1 U_i + \partial \xi_i / \partial x_1 p \\ \rho u_2 U_i + \partial \xi_i / \partial x_2 p \\ \rho u_3 U_i + \partial \xi_i / \partial x_3 p \\ (e+p)U_i \\ \rho\beta U_i \\ \rho n U_i \\ \rho k U_i \\ \rho\omega U_i \end{bmatrix}, \quad S = J \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ \tau_{3j} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{ij} \\ \sigma_{oj} \end{bmatrix}, \quad H = J \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Gamma \\ \rho l \\ S_k \\ S_{\omega} \end{bmatrix}$$

Q: vectors of unknown variables F: vectors of flux S: the viscous terms H: the source terms of condensation, evaporation and turbulence S_w, S_{ω} : the source terms of SST

Wet Steam Flow Terms (低圧部の湿り蒸気流れ解析に必要)

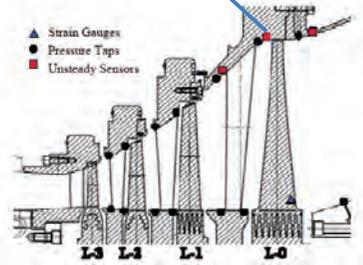
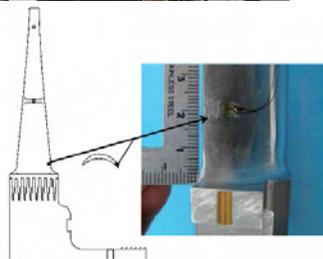
9

Flow Modeling and CFD Scheme

1. Turbulence Model: The Shear Stress Transport (SST) Turbulence Model⁸⁾
2. CDF Scheme: High-order High-resolution Finite-difference Method Based on the Fourth-order Compact MUSCL TVD Scheme, Roe's Approximate Riemann Solver, and the LU-SGS Scheme⁹⁾.
3. Wet Steam Flow: Mathematical Models for Nonequilibrium Condensation

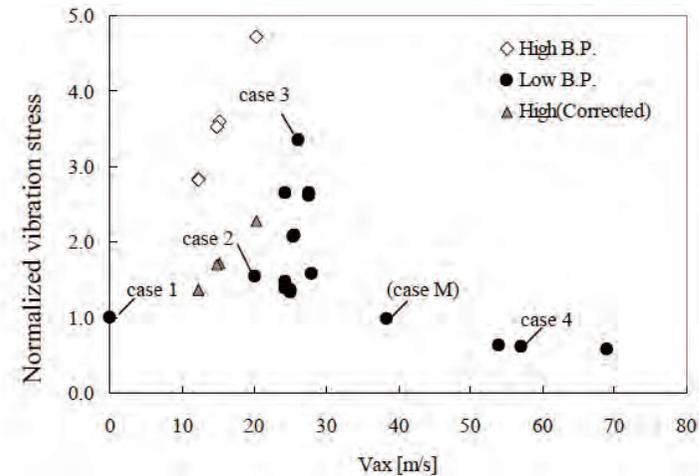
10

試験用蒸気タービンを用いた翼振動応力と変動圧力の計測



11

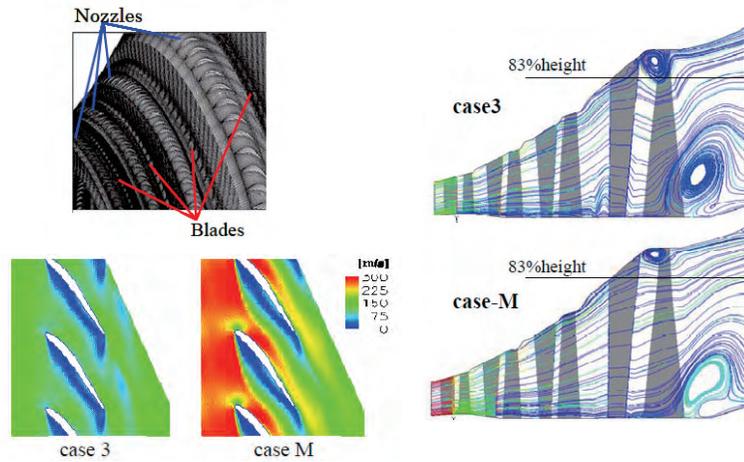
モデルタービン計測結果例 : 最終段動翼の振動応力



計測された現象を流体構造連成解析にて詳細に検討する

12

流体解析例：解析格子と定常解析例



定常流体解析にて低負荷時の流体励振力の発生原因を定性的に把握した

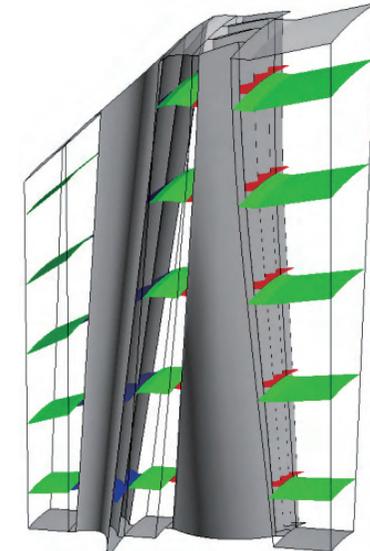
13

大型蒸気タービン最終動翼3次元非定常流体解析

境界条件

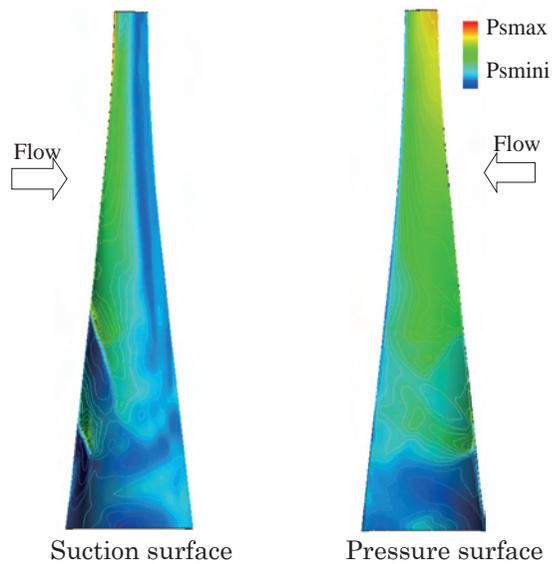
入口全圧 [Pa]	43000.0
入口全温 [K]	343.0
入口湿度 [%]	3.0
出口静圧 [Pa]	10750.0
(圧力比) [-]	4.0

流路当りの格子点数: 61x61x181
解析流路数: 静翼2、動翼3



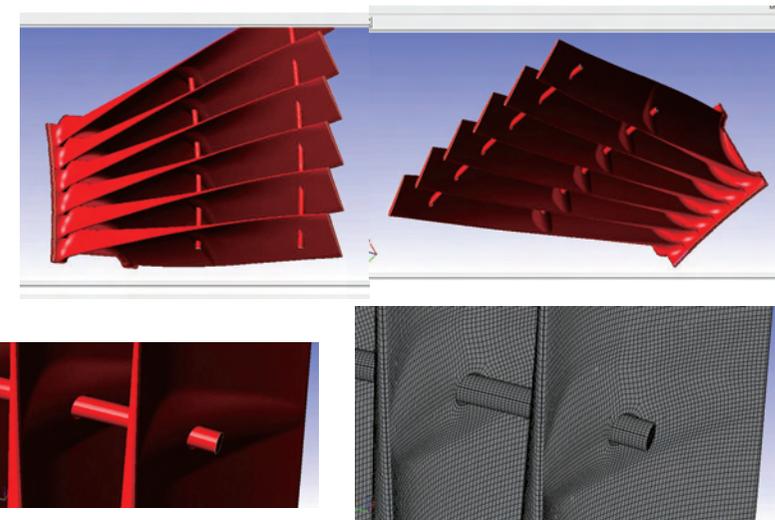
解析領域と代表流面

動翼表面の瞬間静圧分布解析例



15

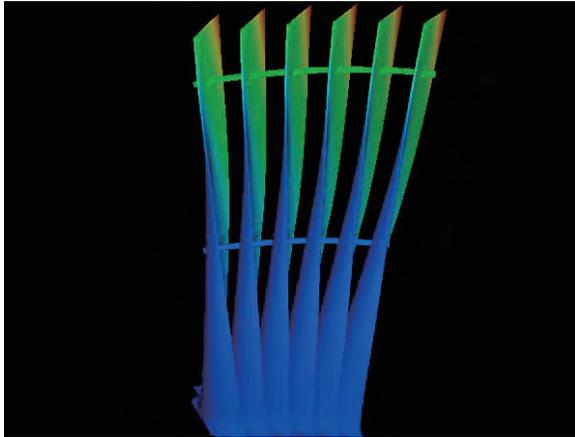
翼群構造解析モデルと解析格子



振動減衰用の翼連結構造を正確にモデル化して、綴られた翼群を解析

16

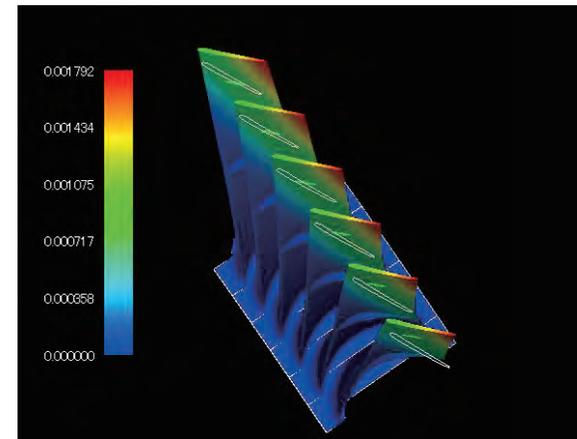
構造解析例 変形量



動翼回転中の強い遠心力で先端近くは大きく変形する

17

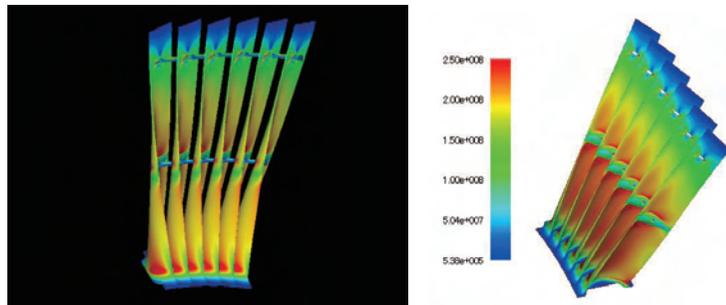
構造解析例 変形量



動翼回転中の強い遠心力で先端近くは大きく変形する
⇒ 厳密な形状モデル化で運転中の形状を精度良く解析

18

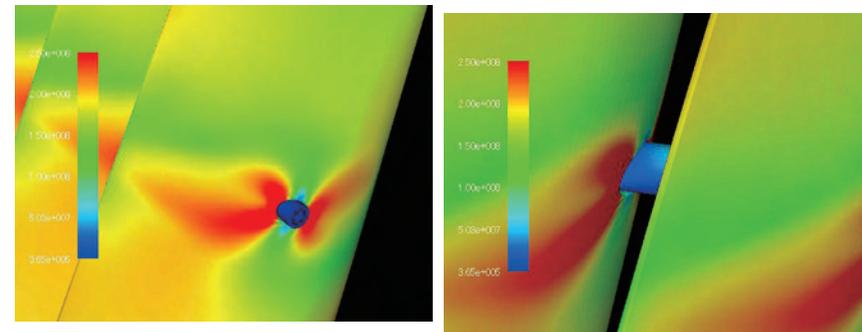
遠心応力解析例



厳密な形状モデル化で連結構造周辺の応力分布を詳細に把握できた

19

遠心応力分布: 連結構造周辺



厳密な形状モデル化で連結構造周辺の応力分布を詳細に把握できた

20

結論と波及効果

1. 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見通しを得た。
2. 並列計算用構造解析ソフトウェアFrontISTRを地球シミュレータ用にチューニングし、単独翼での検証解析を完了。連結構造を含む翼群での解析を実施中。
3. 流体解析結果をFrontISTRに渡して構造解析を行うためのデータ受け渡しモジュールを作成中

21

ESの共用促進事業に関して

1. 平成23年度の地球シミュレータ産業戦略利用プログラムの実施に際して、流体解析及び構造解析ソフトウェアの地球シミュレータ上でのチューニングに関して、地球シミュレータセンターより多大なご支援を頂きましたことに、感謝申し上げます。
2. ESの共用促進事業により、ESを当初は無料で、それ以降も安価に利用でき、ESの活用によって蒸気タービンの性能向上に関する解析的研究を加速することができました。

22