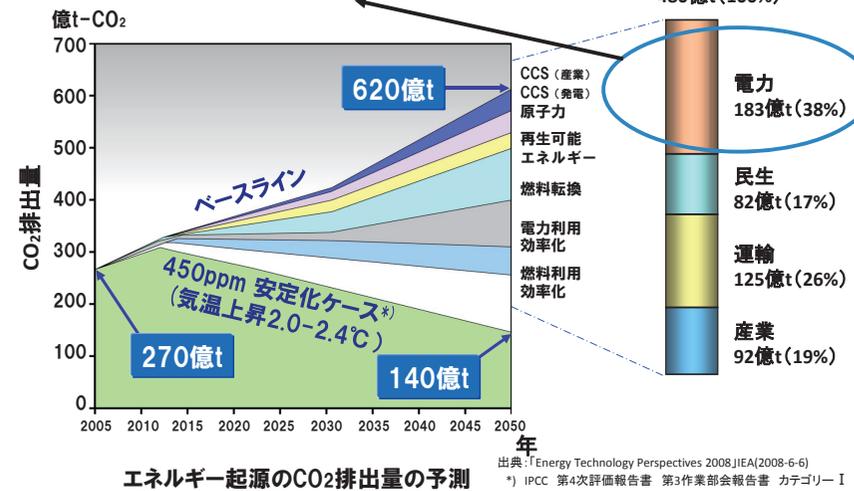


# 流体構造大規模連成解析を用いた高性能タービン翼及び排気室設計法の開発

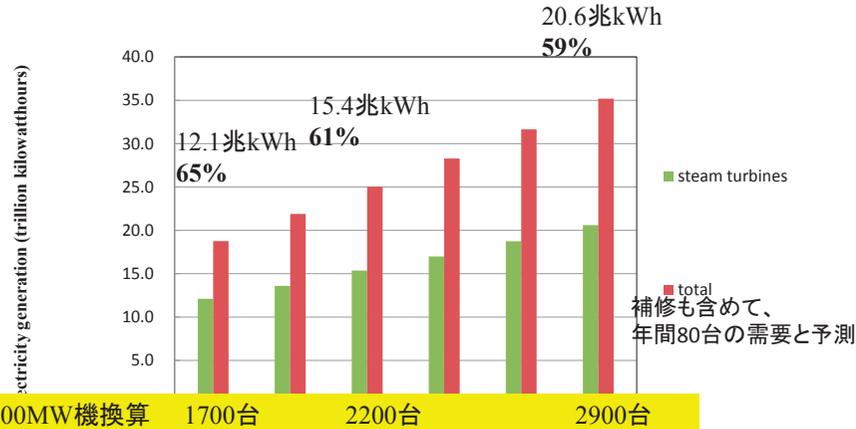
川崎 榮  
株式会社東芝

## 本研究の必要性: CO<sub>2</sub>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



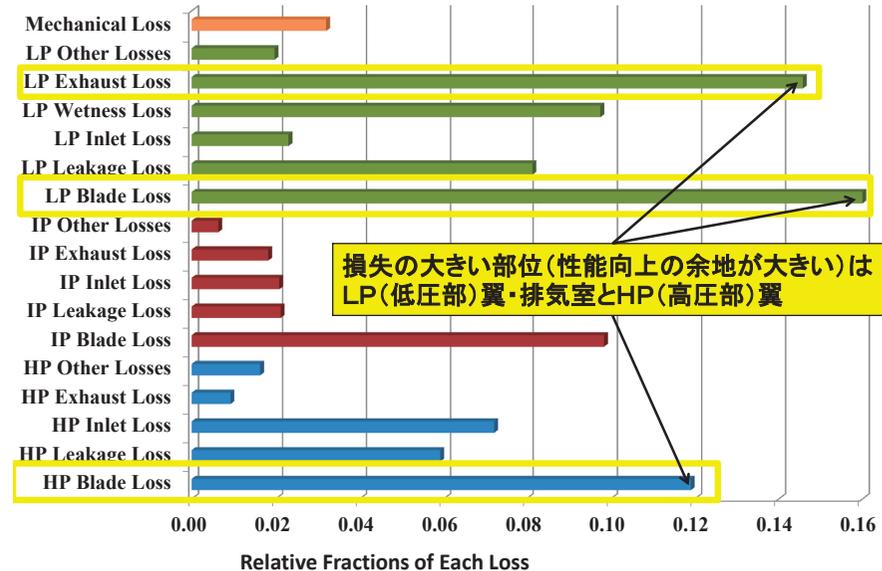
## 本研究の必要性: 発電用蒸気タービンの需要動向



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

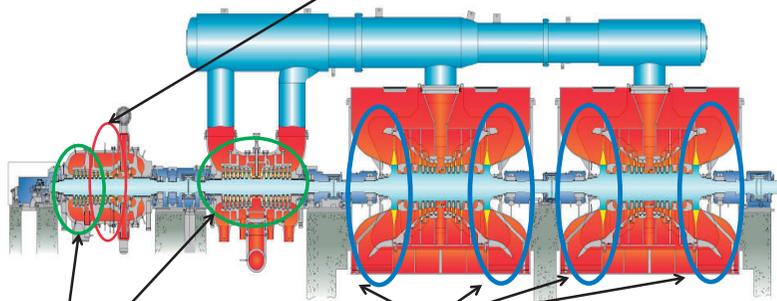
世界の全電力需要の半分以上は蒸気タービンが担っている。  
⇒ 蒸気タービンの性能向上は今後も重要な課題

## 本研究の必要性: 発電用大型蒸気タービンの損失分析<sup>1)</sup>



## 本研究のスコープ

高圧部初段翼(平成23年度で完了)



低圧部長翼・排気ディフューザ(平成24年度～) 本日の発表  
残りの段落、更に他のターボ機械翼等にも適用(平成25年度～)

典型的な発電用大型蒸気タービン(1000MW級)

5

## 本研究の方法

非定常流体力の解析 振動応力解析

材料開発・評価

材料強度的評価

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24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及び排気室設計法の開発

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

7

## 平成24年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム概要2

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及び排気室設計法の開発

概要

- ① 平成23年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム「タービン動翼非定常流体力の高精度大規模CFD解析法の開発」を発展
- ② 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
- ③ 最終段静翼・動翼の流体解析を排気ディフューザーを含めた大規模領域で実施することで、解析精度を向上する。特に部分負荷時の逆流流れの解析を可能にする。

8

## プロジェクト人員体制

### プロジェクト責任者

川崎 栄 (東芝 原動機部蒸気タービン設計担当)  
 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) CFD  
 奥田 洋司 (東京大学 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 教授) FEA

### プログラム移植・最適化・計算実行

笹尾 泰洋 (帝京大学 工学部航空宇宙工学科 助教)  
 高田 真司 (東北大学大学院 情報科学研究科 山本研M1)  
 橋本 学 (東京大学 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻)  
 北山 健 (東京大学 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 特任研究員)

### 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)  
 新関 良樹、渋川 直紀、岩井 保憲、大石 勉、小野田 昭博、野村 大輔、  
 手島 智弘、野口 太郎 (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)

9

## 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.

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

$$O = \begin{bmatrix} \rho_v \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ e \\ \rho\beta \\ \rho n \\ \rho k \\ \rho\omega \end{bmatrix}, \quad F_i = \begin{bmatrix} \rho_v U_i \\ \rho u_1 U_i + \partial \xi_i / \partial x_1 p \\ \rho u_2 U_i + \partial \xi_i / \partial x_2 p \\ \rho u_3 U_i + \partial \xi_i / \partial x_3 p \\ (e+p)U_i \\ \rho\beta U_i \\ \rho n U_i \\ \rho k U_i \\ \rho\omega U_i \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ \tau_{3j} \\ \tau_{i,u_i} + (\kappa + \kappa') \partial T / \partial x_i \\ 0 \\ 0 \\ \sigma_{kj} \\ \sigma_{\omega j} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Gamma \\ \rho l \\ S_k \\ S_\omega \end{bmatrix}$$

Q: vectors of unknown variables F: vectors of flux S: the viscous terms H: the source terms of condensation, evaporation and turbulence  $S_\nu, S_\omega$ : the source terms of SST

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

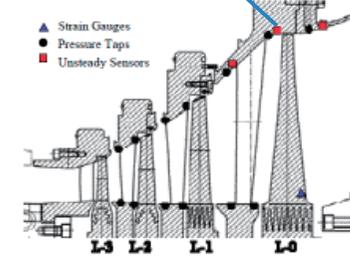
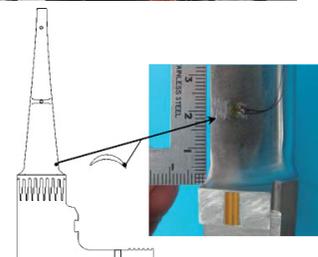
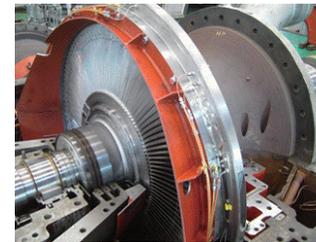
10

## Flow Modeling and CFD Scheme

1. Turbulence Model: The Shear Stress Transport (SST) Turbulence Model<sup>8)</sup>
2. CFD 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 Scheme<sup>9)</sup>.
3. Wet Steam Flow: Mathematical Models for None-equilibrium Condensation

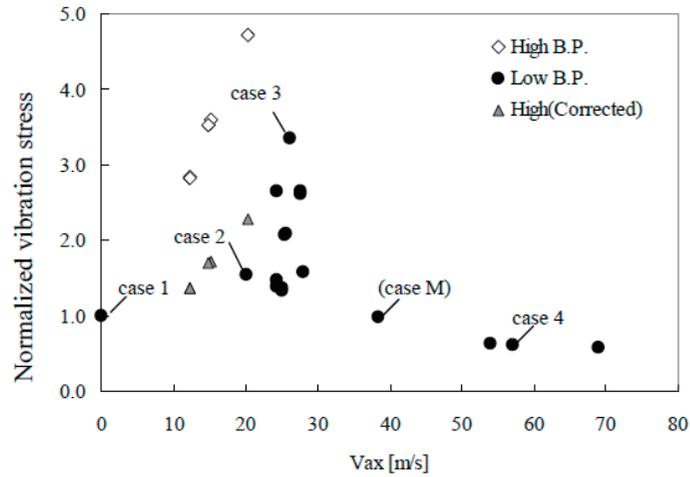
11

## 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



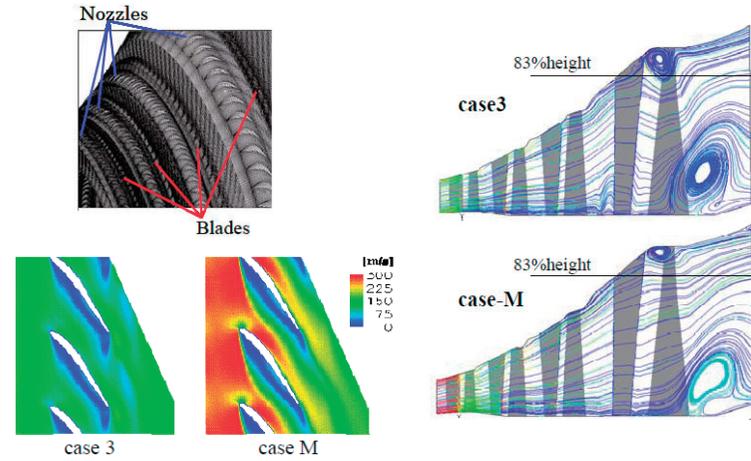
12

### モデルタービン計測結果例 : 最終段動翼の振動応力



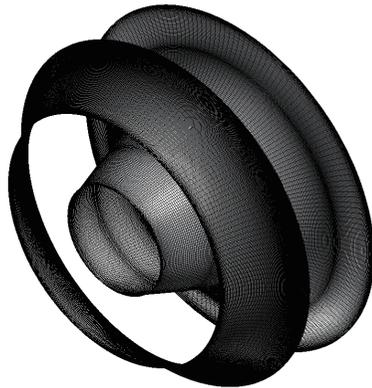
計測された現象を流体構造連成解析にて詳細に検討する

### 流体解析例: 解析格子と定常解析例

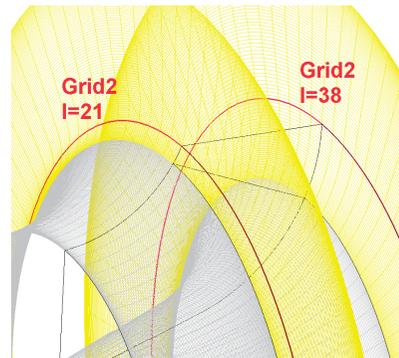


定常流体解析にて低負荷時の流体励振力の発生原因を定性的に把握した

### 排気ディフューザー流体解析領域(全周領域)

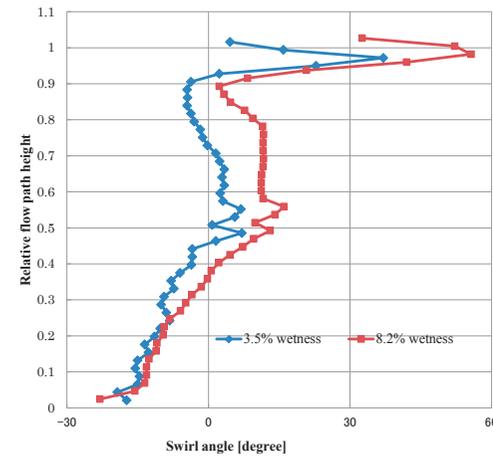


All Circumference Computational Domain on the Lp Exhaust Diffuser Walls

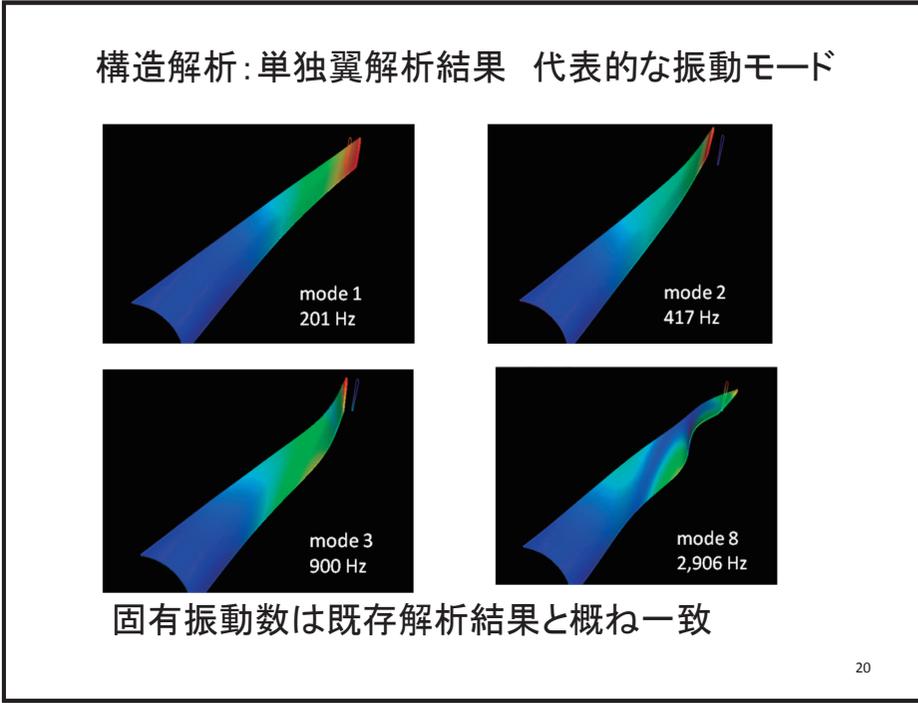
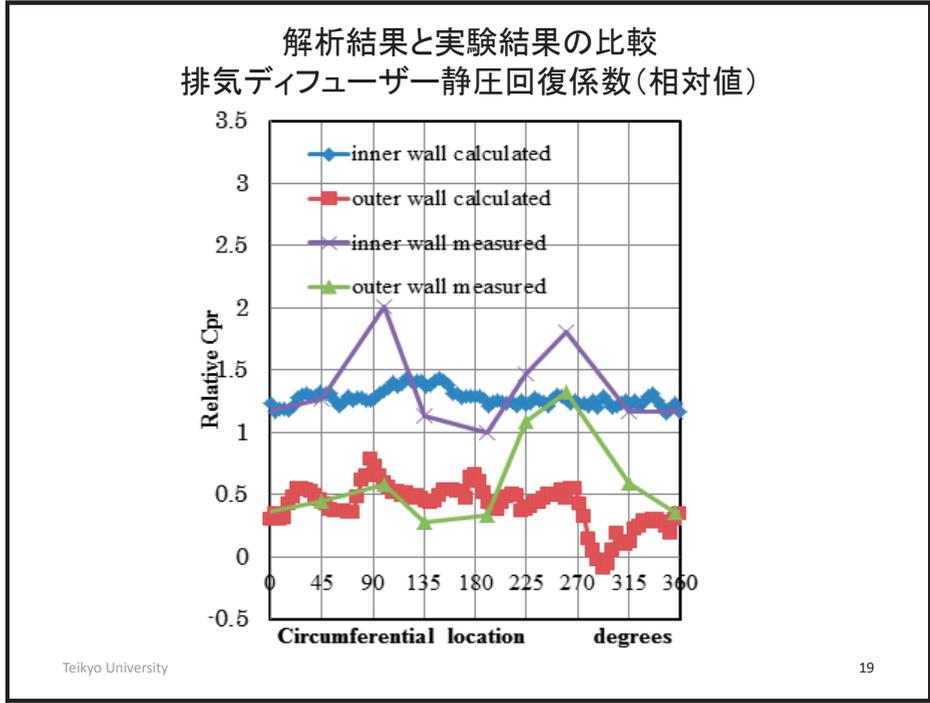
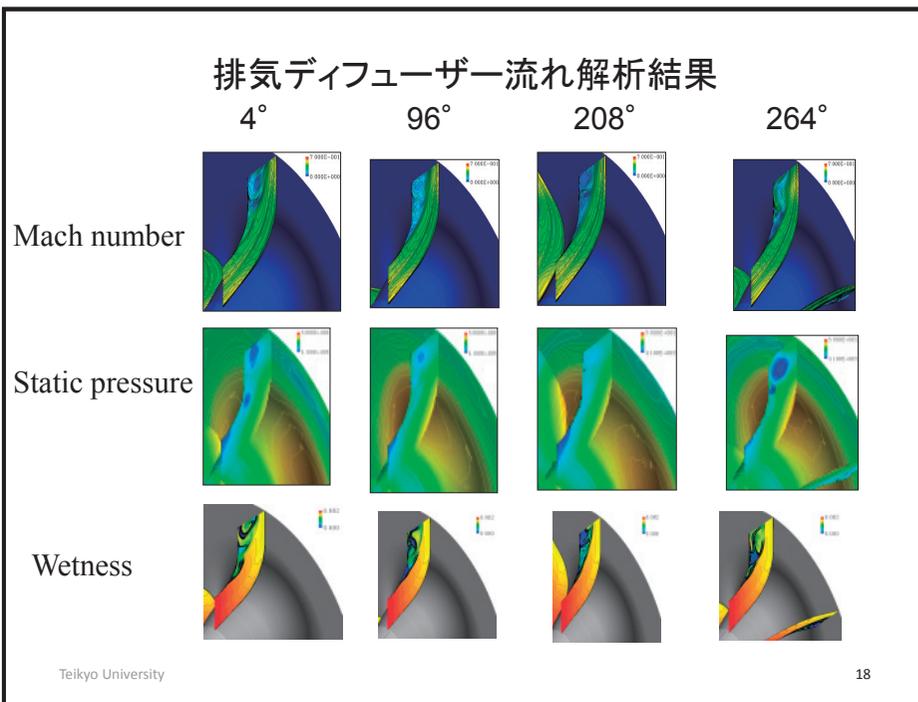
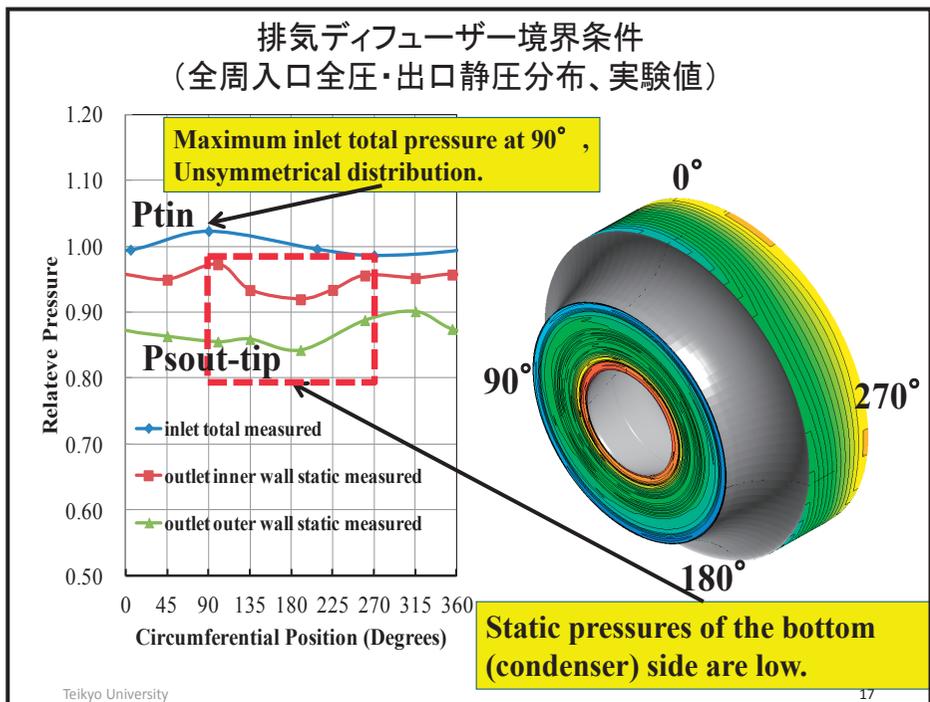


Isometrics View of the Computational Grid System for the Diffuser and Its Down Stream Flow Path

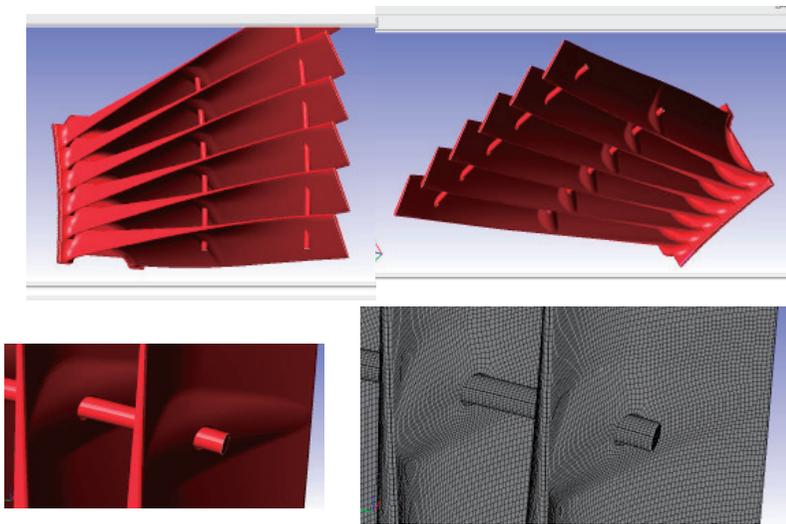
### 排気ディフューザー入口境界条件(半径方向スワール角度分布)



Measured swirl angle distributions at the last stage rotating blade exit plane

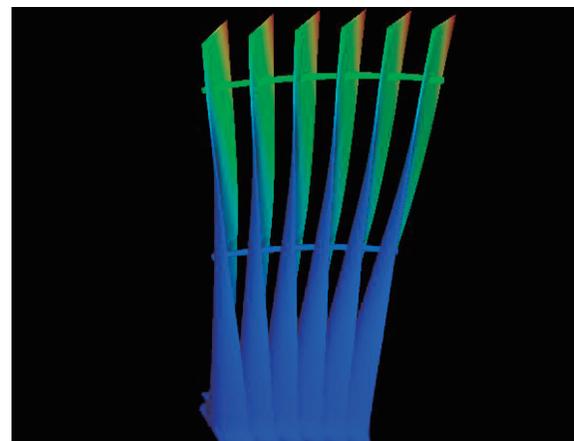


### 翼群構造解析モデルと解析格子



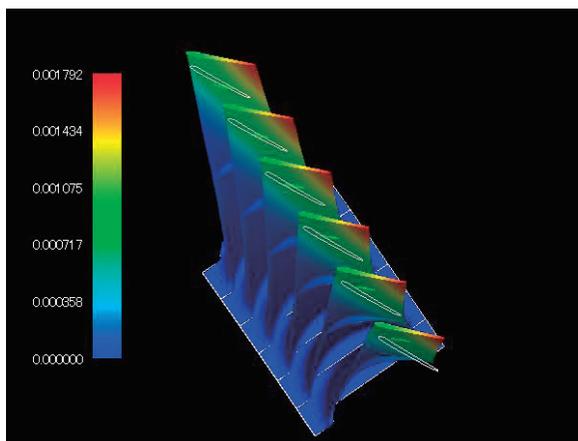
振動減衰用の翼連結構造を正確にモデル化して、緩られた翼群を解析 21

### 構造解析例 変形量



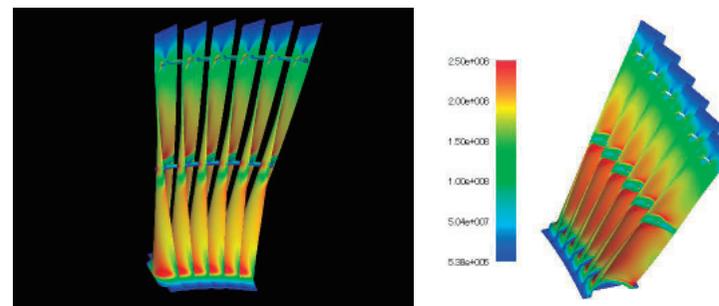
動翼回転中の強い遠心力で先端近くは大きく変形する 22

### 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 23

### 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 24

### 結論と波及効果

1. 平成24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し、連結構造を含む翼群での解析を実施した。
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が完成した。

25

### ESの共用促進事業に関して

1. 平成24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。

26