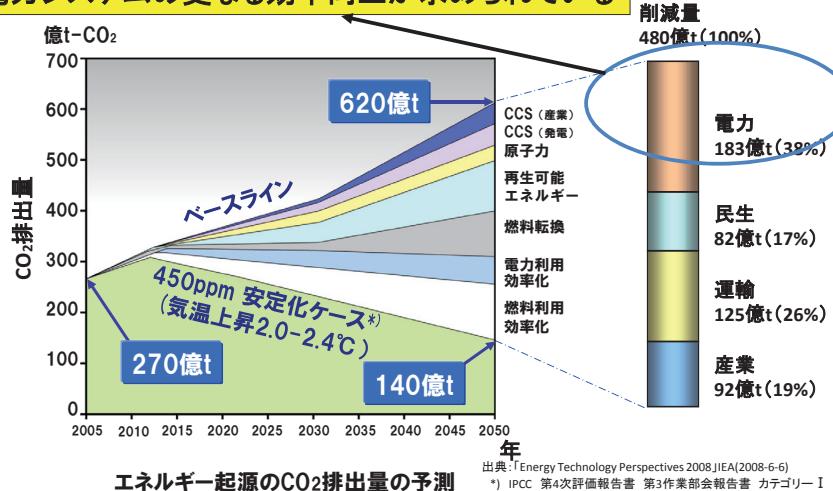


## 流体構造大規模連成解析を用いた高性能 ターボ機械翼等の設計法の開発

佐伯 祐志  
株式会社東芝

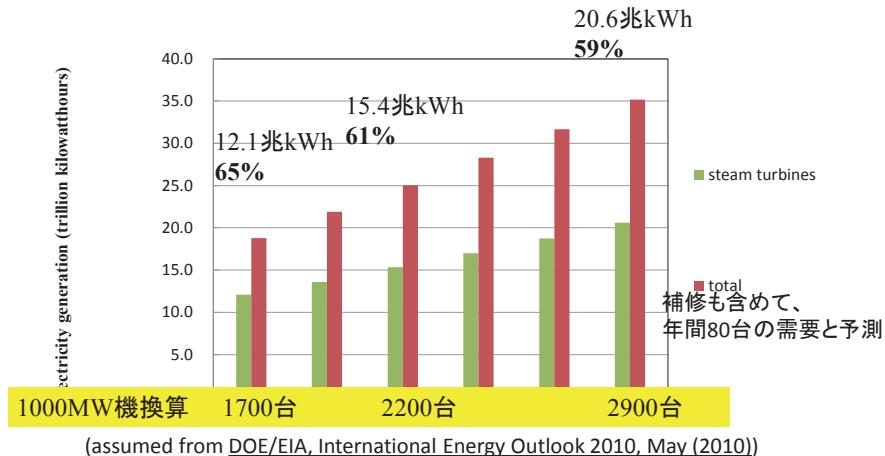
本研究の必要性: CO<sub>2</sub>排出量削減施策(IEA)における  
電力システムの目標

電力システムの更なる効率向上が求められている



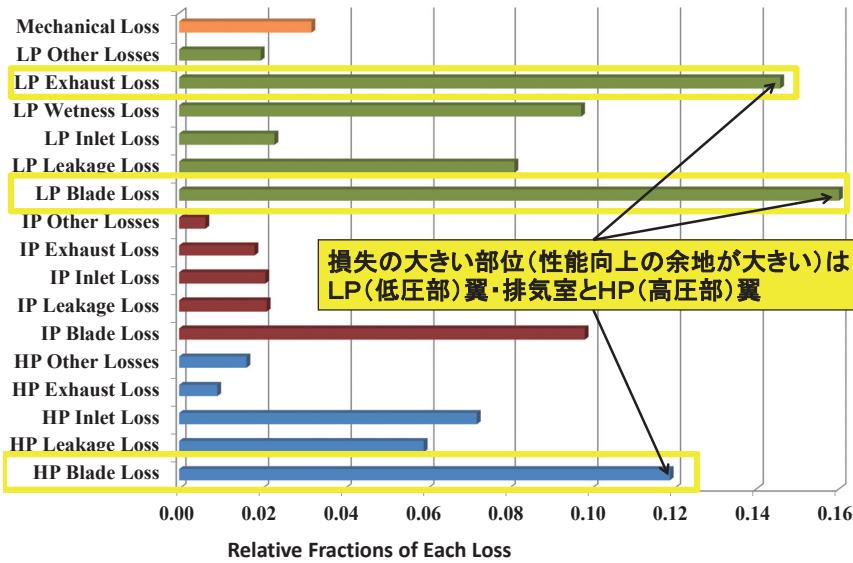
2

### 本研究の必要性: 発電用蒸気タービンの需要動向



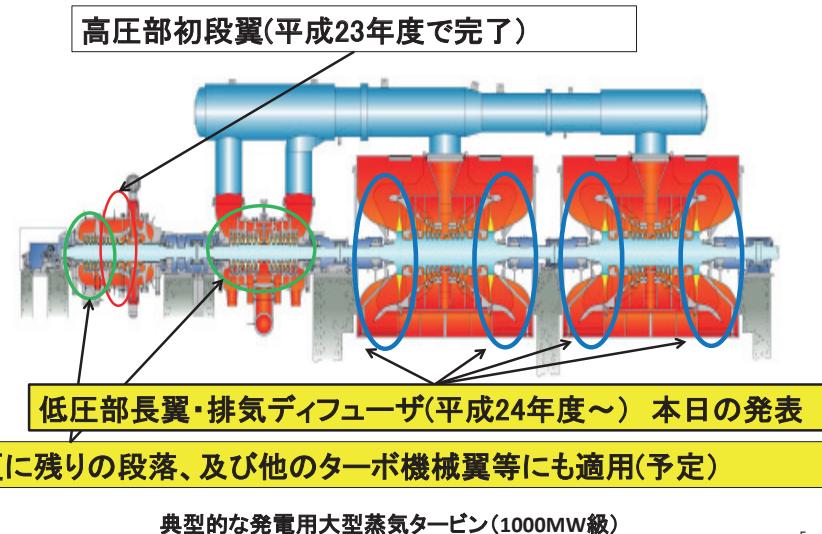
3

### 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>



4

## 本研究のスコープ



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

材料強度学的評価

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26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ボ機械翼等の設計法の開発

### 目的

1. 火力・原子力・地熱及び再生可能エネルギー発電用機器等の性能向上及び稼働率向上
2. 発電由来及び機器使用によるCO<sub>2</sub>削減

7

## 平成26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ボ機械翼等の設計法の開発

### 概要

- ① 平成25年度地球シミュレータ産業戦略利用プログラム「流体構造大規模連成解析を用いた高性能ターボ機械翼等の設計法の開発」を発展的に継続
- ② 今年度は設計条件に加えて、構造強度上最も厳しい運転条件が含まれる部分負荷における動翼の非定常応力等の予測精度の向上を目指す。同時に他のターボ機械への適用も試行する。

8

## プロジェクト人員体制

### プロジェクト責任者

佐伯 祐志（東芝 電力社会システム技術開発センター）  
渋川 直紀（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） FEM

### プログラム移植・最適化・計算実行

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）  
田沼 唯士（帝京大学 ジョイントプログラムセンター）  
南雲 佳子（帝京大学 ジョイントプログラムセンター）

### 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）

### ブリノ/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）  
小林 孝雄（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

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

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

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

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

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

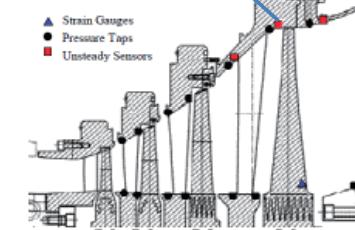
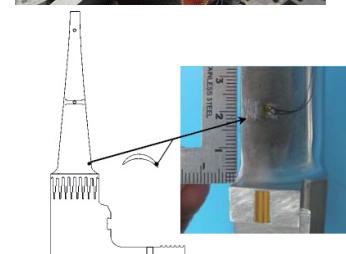
10

## 蒸気タービン湿り蒸気流れの数理モデルと数値計算スキーム

- Turbulence Model: The Shear Stress Transport (SST) Turbulence Model
- 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 Scheme
- Wet Steam Flow: Mathematical Models for None-equilibrium Condensation

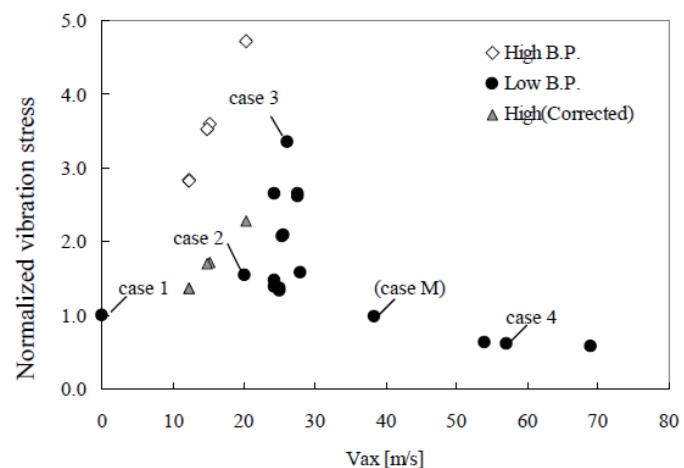
11

## 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

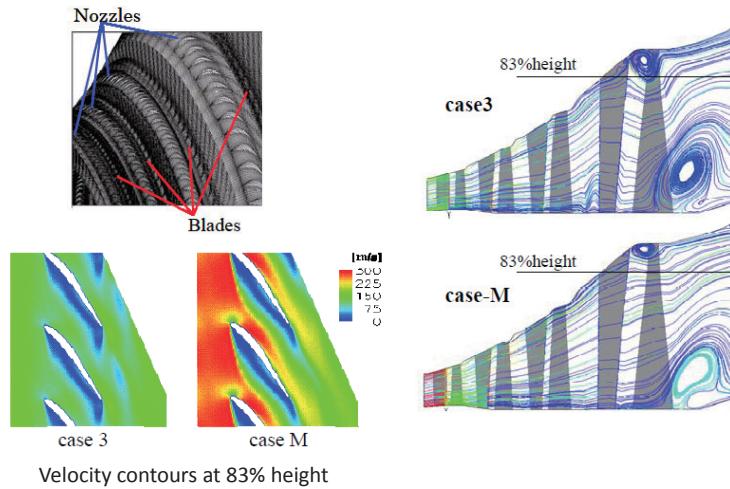
## モデルタービン計測結果例：最終段動翼の振動応力



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

13

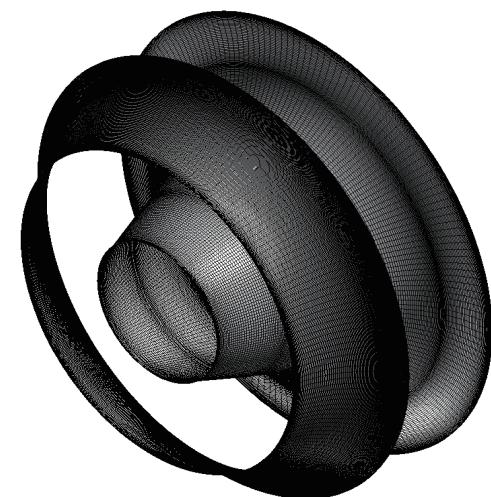
## 流体解析例: 解析格子と定常解析例



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

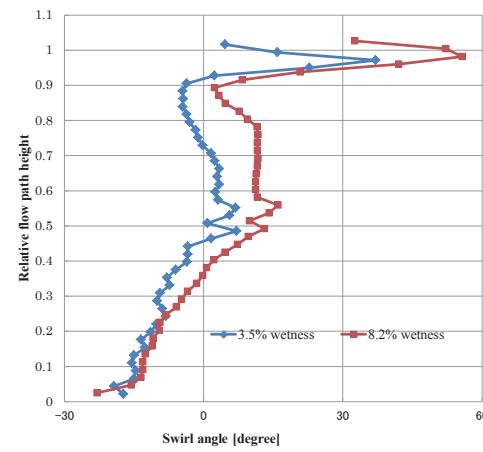
14

## 排気ディフューザー表面解析格子(全周領域)



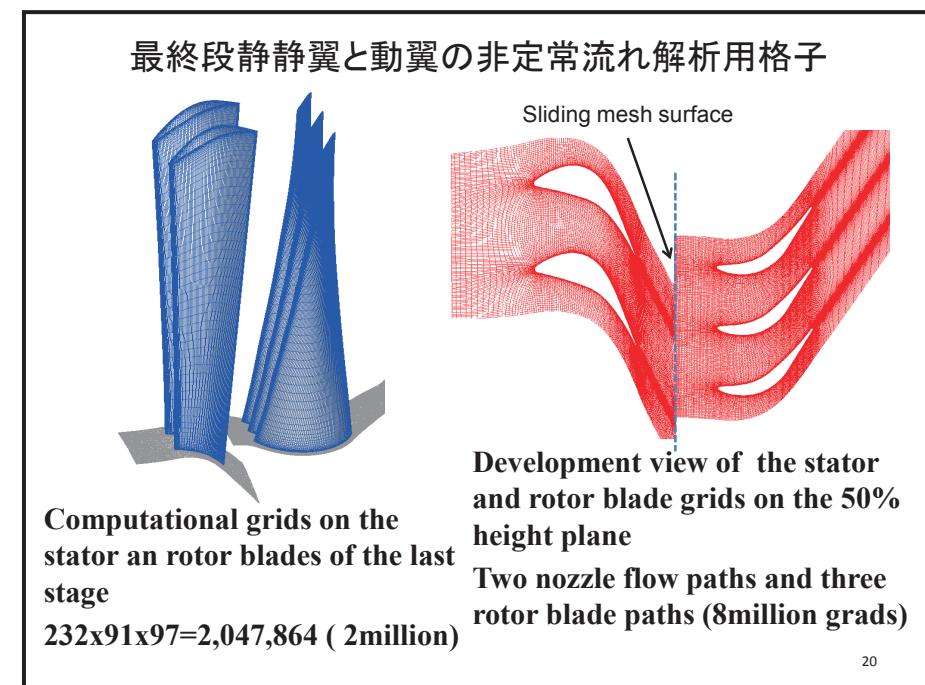
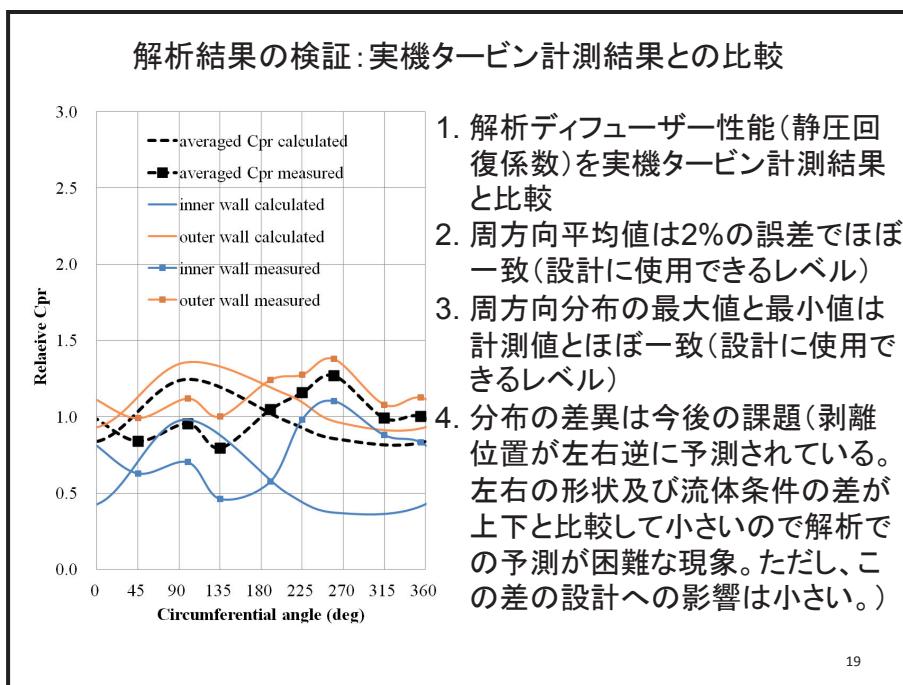
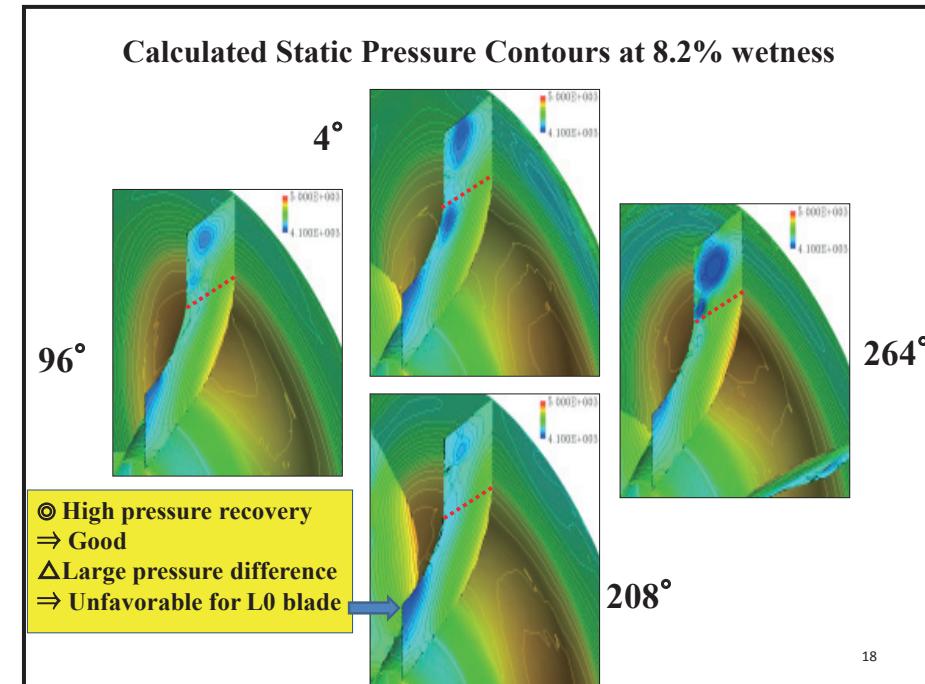
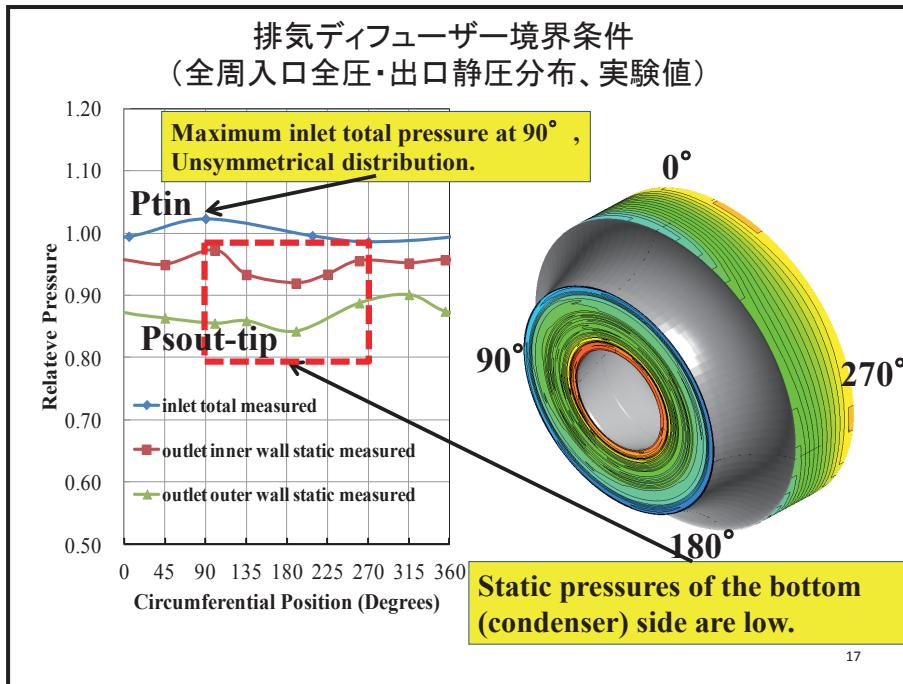
15

## 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)

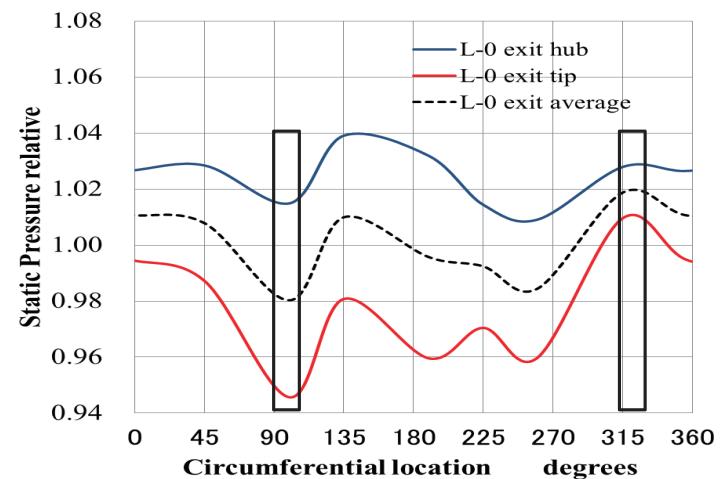


Measured swirl angle distributions at the last stage rotating blade exit plane

16



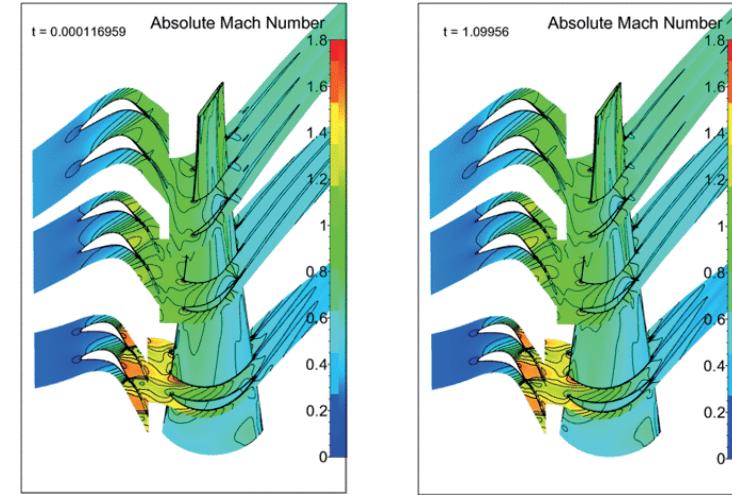
### 最終段静動翼列非定常解析に用いる下流静圧境界条件



最終段動翼出口(排気ディフューザー入口)における静圧分布実機計測値(青及び赤実線)を用いて、平均静圧最小値付近(左枠内)と最大値付近(右枠内)の2ケースで最終段性能の違いを評価

21

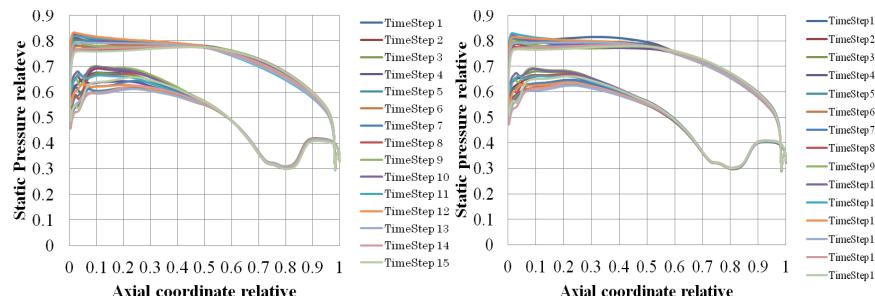
### 最終段静動翼列非定常解析結果: 瞬間Mach数分布



下流静圧最少位置付近(左図)と下流静圧最大位置付近(右図)  
翼根本近くで静翼後縁衝撃波が動翼まで到達

22

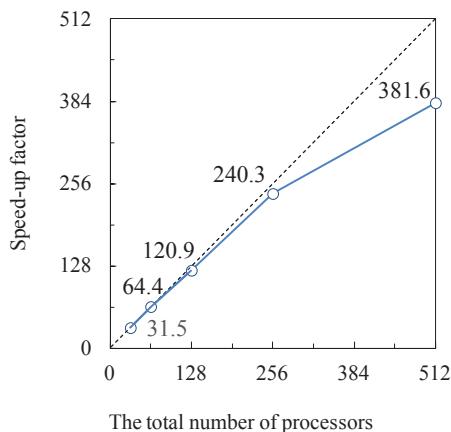
### 50%高さ断面における動翼表面静圧の時間変化



下流静圧最少位置付近(左図)と下流静圧最大位置付近(右図)で  
腹側分布に差があるが、性能への影響は少ないことが分かる。

23

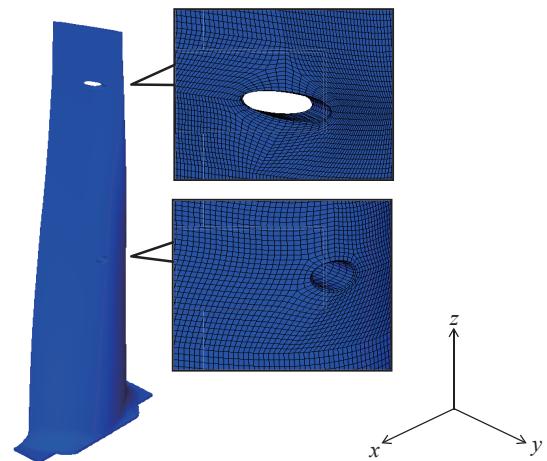
### CPU数と加速率の実績値



構造解析に用いたFrontISTRの地球シミュレータ上で計算した  
際のプロセッサー数と計算速度比の実績値  
ベクトル演算率96.7 %, 並列化率99.86%

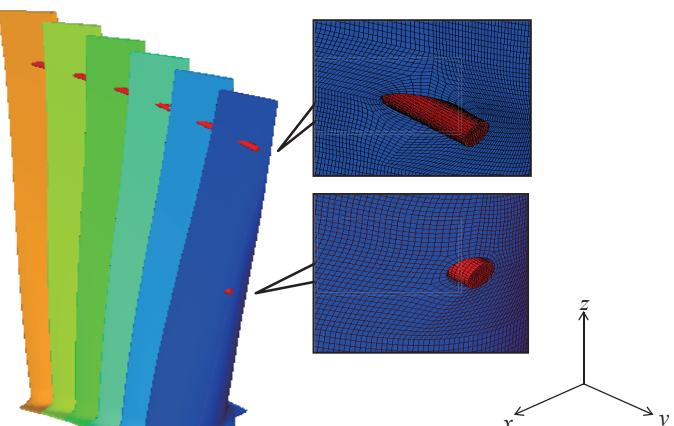
24

動翼とレーシングワイヤ穴周辺の構造解析格子



25

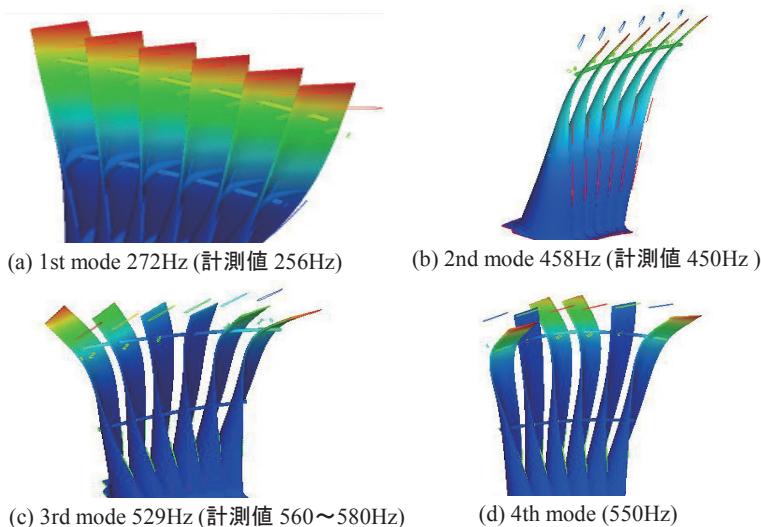
動翼6枚綴り解析に用いた解析格子



26

レーシングワイヤは動翼6枚をルーズに綴っている

構造動解析結果と計測値との比較



27

### 結論と波及効果

- 本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る見通しを得た。
- 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。
- 流体解析結果をFrontISTRに渡して非定常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、設計負荷条件での解析を実施。

28

## 地球シミュレータ(ES)の共用促進事業に関して

1. 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。

29

## 本研究成果に関する主な論文・講演発表

1. Tanuma, T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N., Saeki, H. and Takada, S., 2011, "Numerical Investigation of Exhaust Diffuser Performances in Low Pressure Turbine Casings", Proc. ASME Turbo Expo., Paper GT2011-45677.
2. Tanuma, T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N. and Saeki, H., 2012, "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", Proc. ASME Turbo Expo., Paper GT2012-69496.
3. Tanuma, T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N. and Saeki, H., 2013, "Aerodynamic Interaction Effects from Upstream and Downstream on The Down-Flow Type Exhaust Diffuser Performance in a Low Pressure Steam Turbine", Proc. ASME Turbo Expo., Paper GT2013-95901.
4. Tanuma, T., Sasao, Y., Yamamoto, S., Niizeki, Y., Shibukawa, N., Saeki, H., 2014, "Numerical Investigation of Steam Turbine Exhaust Diffuser Flows and Their Three Dimensional Interaction Effects on Last Stage Efficiencies," Proceedings of ASME Turbo Expo., GT2014-26665, 2014.
5. 橋本学、奥田洋司、田沼唯士、福井義成、渋川直紀、奥野研一、高性能タービン翼設計のための大規模構造解析、日本機械学会計算力学講演会講演論文集、2013.

30