

海洋研究開発機構 地球シミュレータ産業利用報告会
2016年3月7日(月曜日)

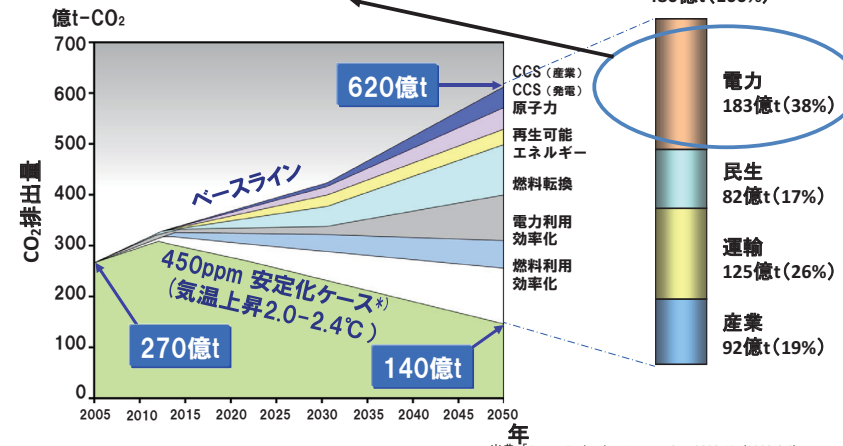
流体構造大規模連成解析を用いた 高性能ターボ機械翼等の部分負荷特性を考慮した 設計法の開発

佐伯 祐志

株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター
東京大学
東北大学
帝京大学

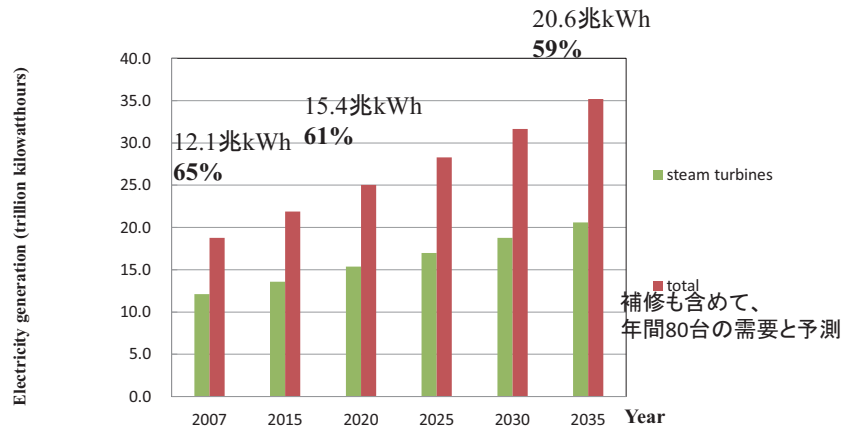
本研究の必要性: CO₂排出量削減施策(IEA)における 電力システムの目標

電力システムの更なる効率向上が求められている



出典:「Energy Technology Perspectives 2008」IEA(2008-6-6)
*) IPCC 第4次評価報告書 第3作業部会報告書 カテゴリー I

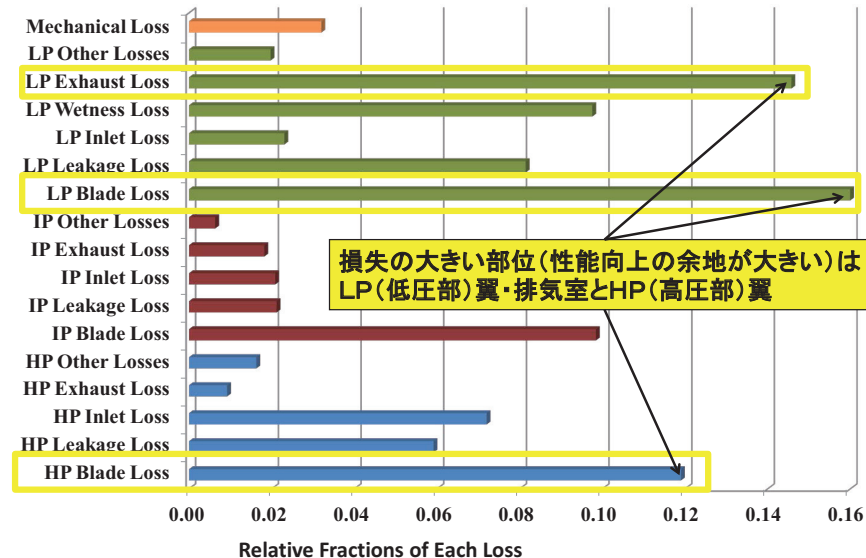
本研究の必要性: 発電用蒸気タービンの需要動向



1000MW機換算 1700台 2200台 2900台

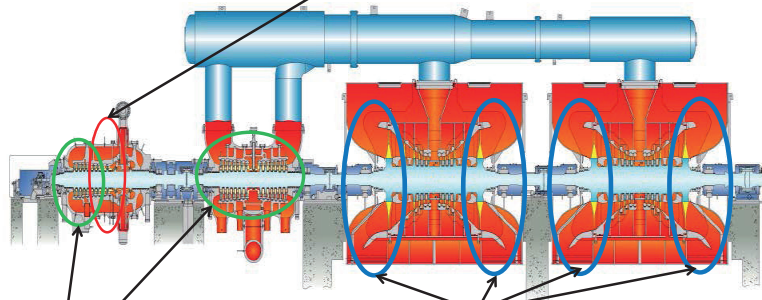
世界の全電力需要の約6割は蒸気タービンが担っている。
⇒ 蒸気タービンの性能向上は今後も重要な課題

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～27年度)

残りの段落にも適用(平成26年度～27年度)

典型的な発電用大型蒸気タービン(1000MW級)

5

本研究のアプローチ

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、解析精度を向上させ、性能向上(設計最適化)、設計期間短縮を図る。

6

平成27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CO2削減

7

平成27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

概要

- ① 平成26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 今年度は昨年を引き続き、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。本格的な大規模シミュレーションを用いた設計法を確立し、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)

現場責任者

田沼 唯士 (帝京大学 ジョイントプログラムセンター)

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

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)

小林 孝雄 (東芝インフォメーションシステムズ)

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)

奥野 研一、岩井 保憲、大石 勉、小野田 昭博、野村 大輔、

手島 智弘、野口 太郎、佃 知彦 (東芝 電力社会システム技術開発センター)

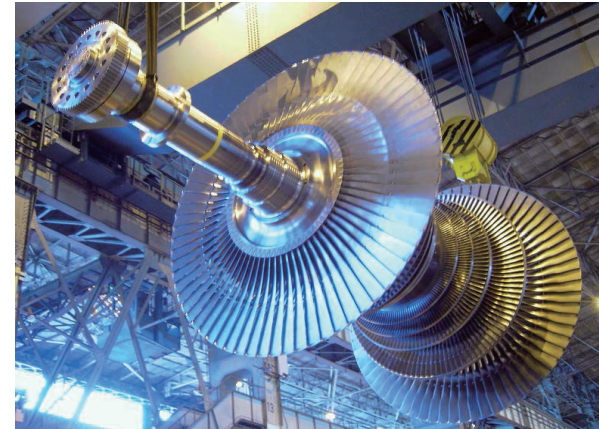
プリ/ポスト処理、計算結果と試験結果の比較

田沼 唯士、秋山 久実 (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

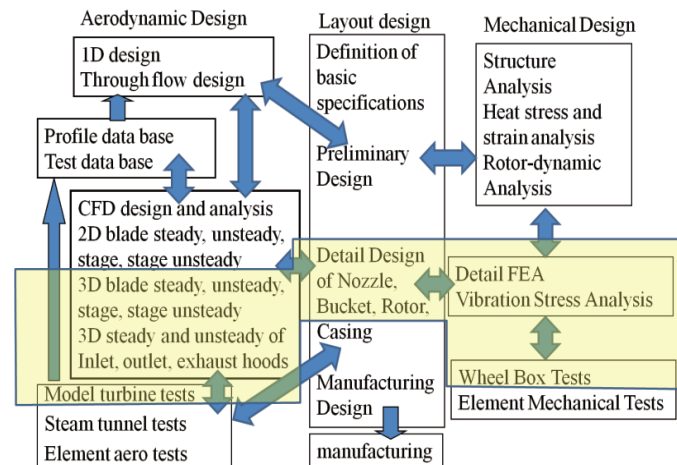
研究対象とする蒸気タービン低圧段ロータと動翼



動翼3枚分の領域での流体解析、動翼6枚分の領域での構造解析 ⇒ 全周領域での解析

10

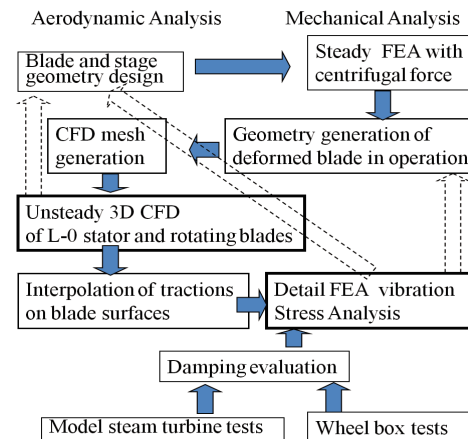
高性能ターボ機械翼設計法の開発 対象設計プロセス



空力設計・レイアウト設計・構造設計の主要解析群をスパコン上で連成実行する設計法を開発(全周非定常解析を含む)

11

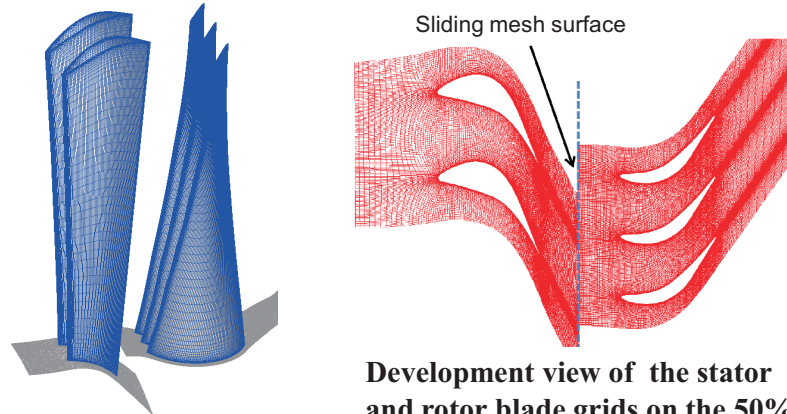
高性能ターボ機械翼設計法の開発 対象プロセス詳細



空力設計・レイアウト設計・構造設計の主要解析群間でデータを変換(3次元内挿)するモジュールを開発、モデルタービン、実機翼の検証データと比較を実施

12

最終段静翼と動翼の非定常流れ解析用格子



Computational grids on the stator and rotor blades of the last stage

$232 \times 91 \times 97 = 2,047,864$ (2million)

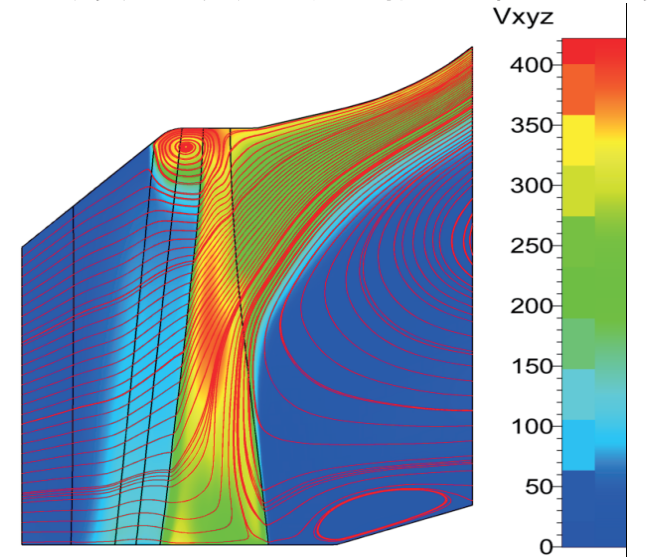
Development view of the stator and rotor blade grids on the 50% height plane

Two nozzle flow paths and three rotor blade paths (8million grads)

⇒ all around calculation

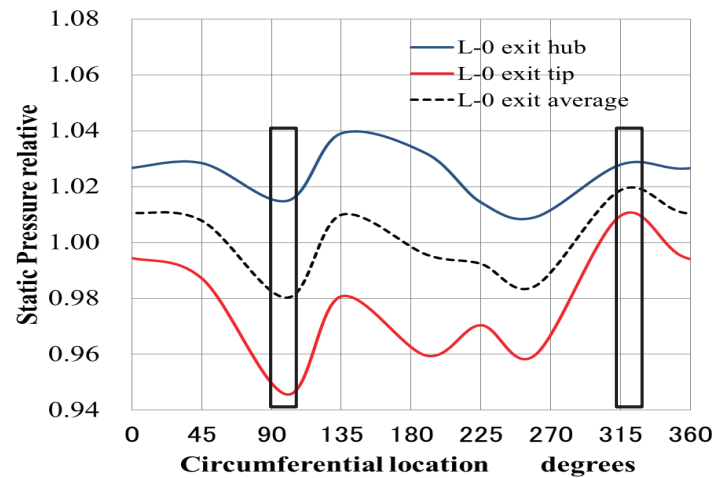
13

最終段静動翼列の非定常流れ解析結果例：極低負荷条件



子午面平均値の瞬間流線と速度コンター図

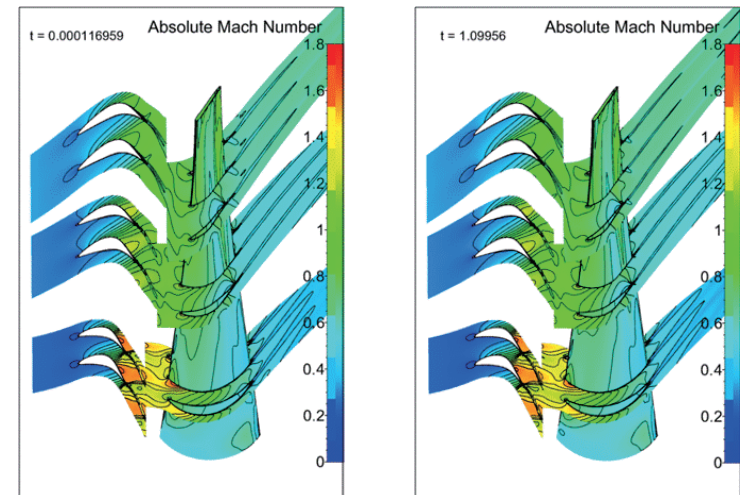
最終段静動翼列非定常解析に用いる下流静圧境界条件



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

15

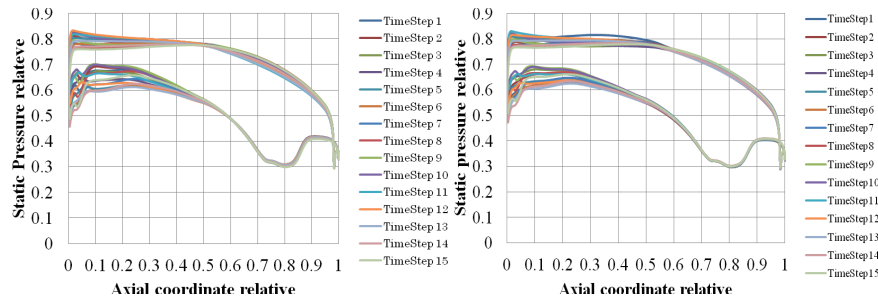
最終段静動翼列非定常解析結果：瞬間Mach数分布



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

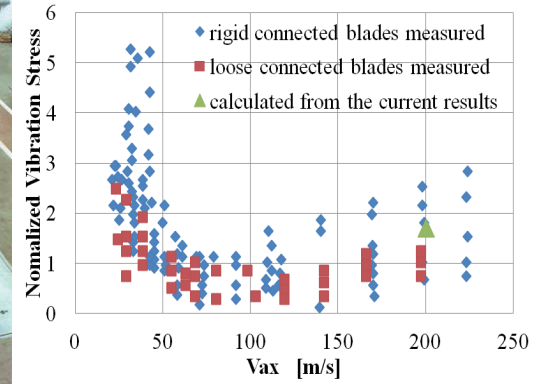
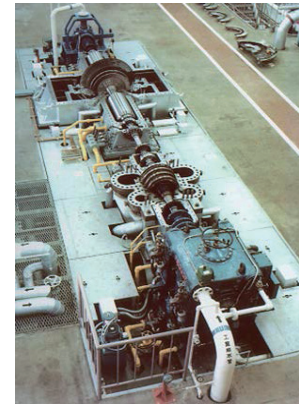
16

50%高さ断面における動翼表面静圧の時間変化



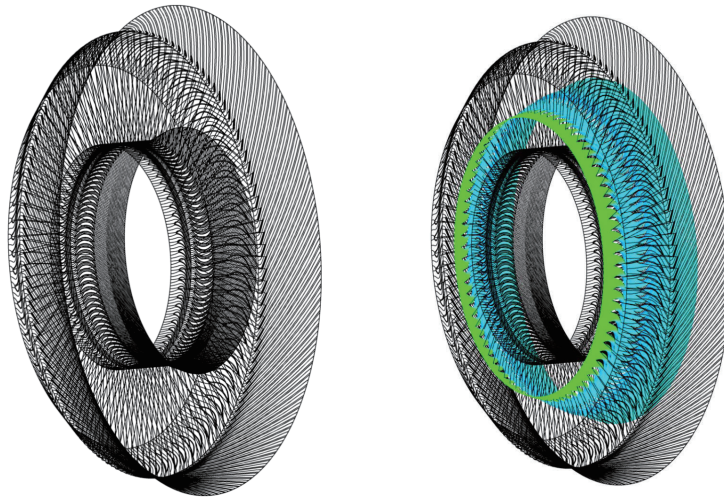
下流静圧最少位置付近(左図)と下流静圧最大位置付近(右図)で腹側分布に差があるが、性能への影響は少ないことが分かる。

モデル蒸気タービン実測データでの検証



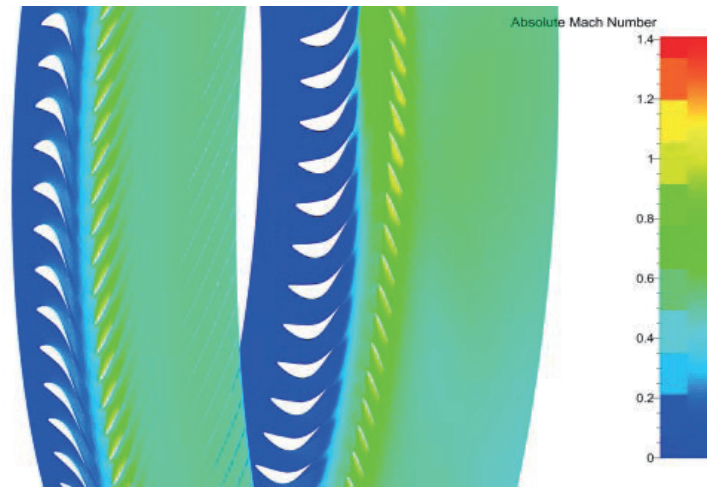
試験用モデル低圧蒸気タービンで計測した結果で検証を完了

全周解析格子と定常解結果の例：静圧分布



解析格子規模 約2億点 静圧分布 50%高さ断面

最終段静動翼列全周非定常流れ解析結果例



部分負荷時の瞬間絶対マッハ数分布(90%高さ断面)

流体解析から構造解析へのデータ受け渡し方法

動翼表面の応力ベクトル成分を構造解析格子点上に
内挿して構造解析に渡す

応力ベクトル成分は $P_i = T_{ik} n_k$

ここで、 n_k は表面幾何ベクトル

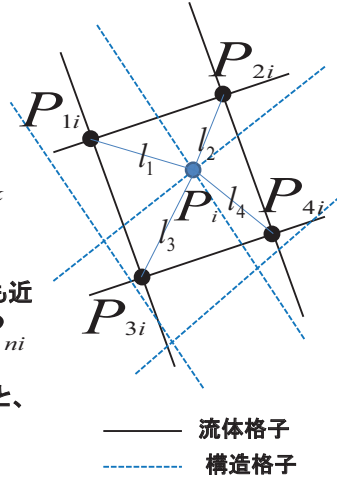
T_{ik} は応力テンソル、 $T_{ik} = -p \delta_{ik} + \tau_{ik}$

p は静圧、 τ_{ik} は粘性応力テンソル

応力ベクトル成分 P_i を求める構造格子点に最も近い4点の流体格子点上の応力ベクトル成分を P_{ni}

各流体格子点と構造格子点間距離を l_n とすると、

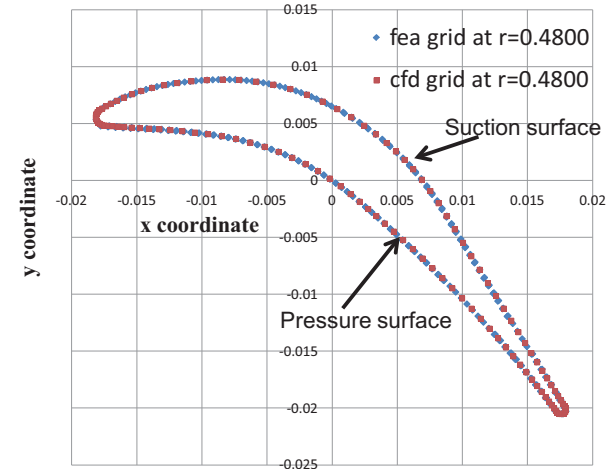
$$P_i = \left(\sum_{n=1}^4 \frac{1}{l_n} \right)^{-1} \frac{P_{ni}}{l_n} \Rightarrow \text{Fortran program "cfdtofea" を作成}$$



21

流体解析格子データと構造格子データ

CFD to FEA data transformation: mesh geometry

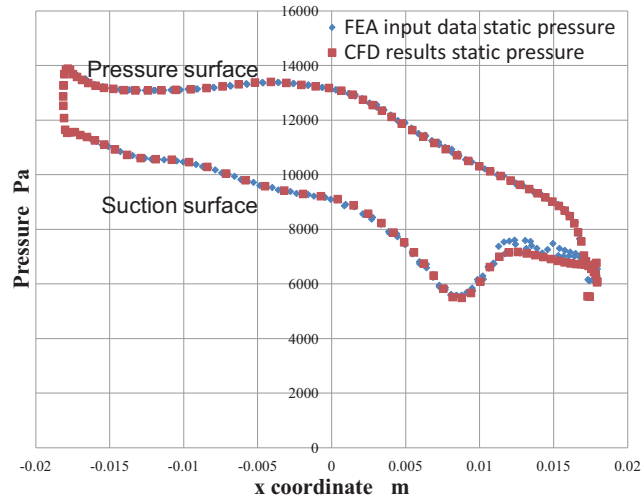


動翼の背腹反転後、X方向及び θ (回転)方向に移動して構造格子と一致させた。
図は中央付近の両格子点を作図して確認したもの。

22

流体解析結果を構造格子位置に内挿
: 中央断面付近静圧分布の内挿結果

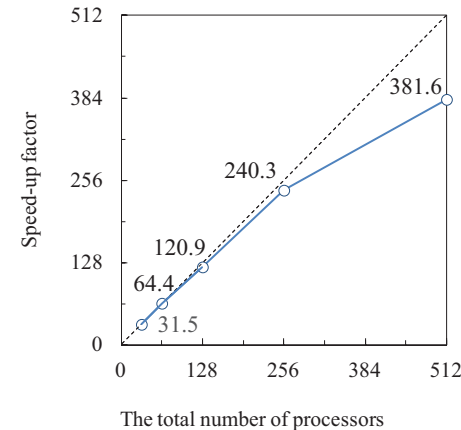
CFD to FEA data transformation: static pressure



動翼背後後縁近くで内挿結果に若干の差異があるが構造解析の
精度上影響が少ないことを確認

23

構想解析ソフトの並列化: CPU数と加速率の実績値

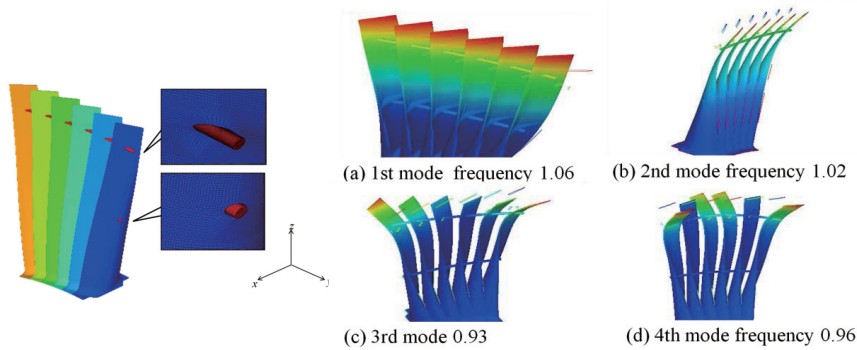


構想解析に用いたFrontISTRの地球シミュレータ上で計算した
際のプロセッサ数と計算速度比の実績値

ベクトル演算率96.7%, 並列化率99.86%

24

高性能ターボ機械翼設計法の開発: 構造解析結果1



構造設計の主要解析の検証を実施
 モデルタービンの計測結果と比較し、設計に適用可能な精度を有することを確認

構造解析モデルとモニタリング位置

遠心力あり

$$E = 2.18590 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$\nu = 0.26$$

$$\rho = 7.76000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

節点数: 218,129

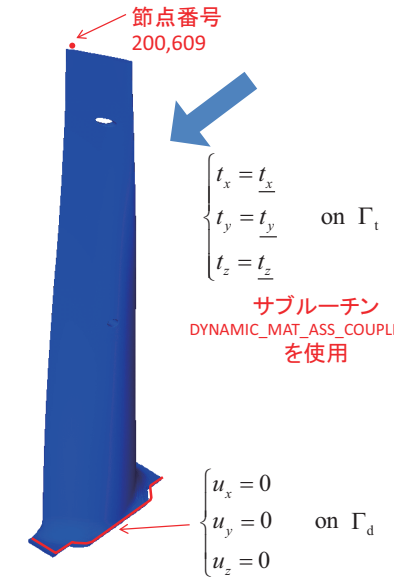
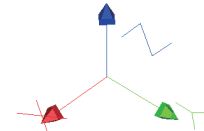
要素数: 190,892

要素の種類: 六面体1次要素

時間進行法: Newmark- β 法

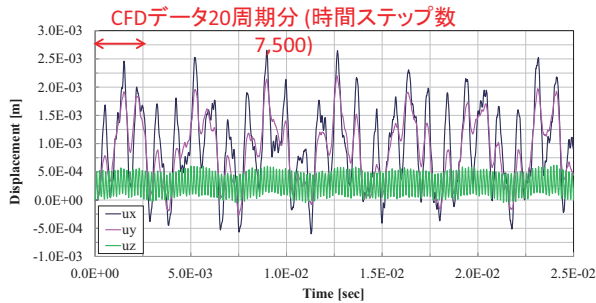
時間刻み幅:

$$\Delta t = 3.3417 \times 10^{-7} \text{ sec}$$

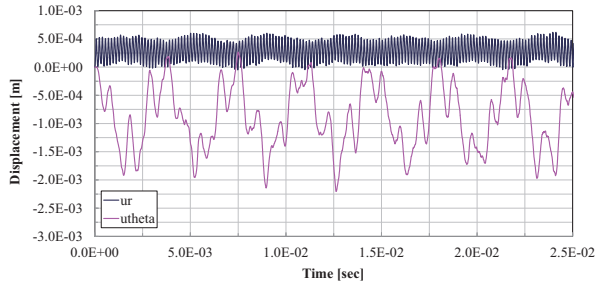


サブルーチン
 DYNAMIC_MAT_ASS_COUPLE_TEST
 を使用

変位の時刻歴 (非線形静解析+初期応力マトリックスありの線形動解析)



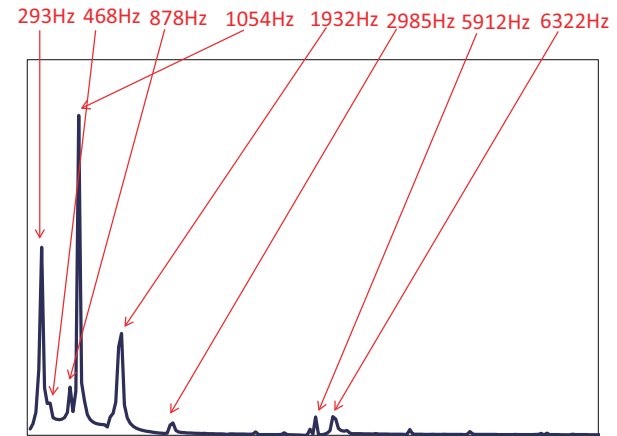
計算時間
 24日16時間



Time histories of the acceleration components at Node #200609

x方向変位のFFT (非線形静解析+初期応力マトリックスありの線形動解析)

遠心力ありの固有値解析では277Hz, 466Hz, 875Hz, 1120Hz, ...



FFT (u_x -displacement at Node #200609)

結論と波及効果

1. 設計負荷及び部分負荷運転時に動翼に加わ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た。
2. 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た。
3. 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、計測データで精度の検証を行い、設計に必要な大規模構造解析を短時間で実施することが可能になった。
4. 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、流体及び構造大規模シミュレーションを設計に適用する基盤技術を確立した。

29

「地球シミュレータ産業戦略利用プログラム」を利用して

1. 「地球シミュレータ産業戦略利用プログラム」により、企業内では実現が難しい大規模解析を、製品の研究開発に活用することができました。更に、実際の設計に適用できる設計システムを構築することができ、製品設計の高度化と迅速化を進めることができます。特に、蒸気タービンの性能向上に関する解析的アプローチを加速することができました。
2. 流体解析ソフトウェア、構造解析ソフトウェアの地球シミュレータ上で並列化のためのチューニングに関して、また、企業内で多用されている代表的な流体解析パッケージソフトFine/Turboの大規模共有メモリシステムへのインストールと効率的な利用のために、地球情報基盤センター（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。

30

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. 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.
5. 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.
6. Gaku Hashimoto, Hiroshi Okuda, Tadashi Tanuma, Yoshinari Fukui, Kenichi Okuno, Tomohiko Tsukuda and Naoki Shibukawa, 2014, Large-Scale One-Way FSI Analysis for High-Performance Blade Design, JSME Computational Mechanics Division Conference paper No.7, 2014.
7. Tanuma, T., Okuda, H., Hashimoto, G., Yamamoto, S., Shibukawa, Okuno, K., Saeki, H., Tsukuda, T., 2015, "Aerodynamic and Structural Numerical Investigation of Unsteady Flow Effects on Last Stage Blades," Proc. of ASME Turbo Expo 2015, GT2015-43848

31