

HPC による遠心式ターボ機械の開発高度化への道のり

塚本 和寛 日立製作所 研究開発グループ 主任研究員



略歴

2007年3月	北海道大学工学部機械工学科卒業
2009年3月	北海道大学大学院工学研究科 機械宇宙工学専攻修士課程修了
2009年4月	株式会社日立製作所入社
2023年9月	東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 博士課程修了 博士(工学)取得
現在に至る	

講演の概要

遠心式ターボ機械は、各種プラントで用いる大型のものから空調機向けの小型のものまで、様々な用途で用いられている。遠心式ターボ機械の製品競争力強化のためには、設計段階におけるその性能予測精度の向上が必須である。また、近年の燃料費・電力代高騰に伴い、電力消費量の大きいターボ機械にはその高効率化による省エネ性能向上が顧客より強く求められている。本講演では、遠心式ターボ機械の性能向上のために、LES を用いた大規模圧縮性解析、特に、壁面近傍の縦渦を解像する Wall-resolved LES による設計点及び非設計点の高精度予測手法の開発について、その結果のみでなく、開発に至る背景とその実現までの道のりを紹介する。

HITACHI

第8回HPCIコンソーシアムシンポジウム

HPCによる遠心式ターボ機械の開発高度化への道のり

2025年10月23日

日立製作所

塚本 和寛

1. 背景と目的

日立で取り扱っているターボ機械製品

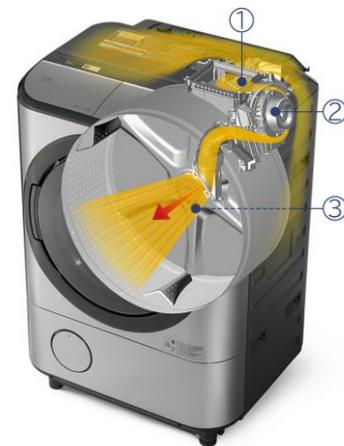
HITACHI



エネルギー分野



公共分野

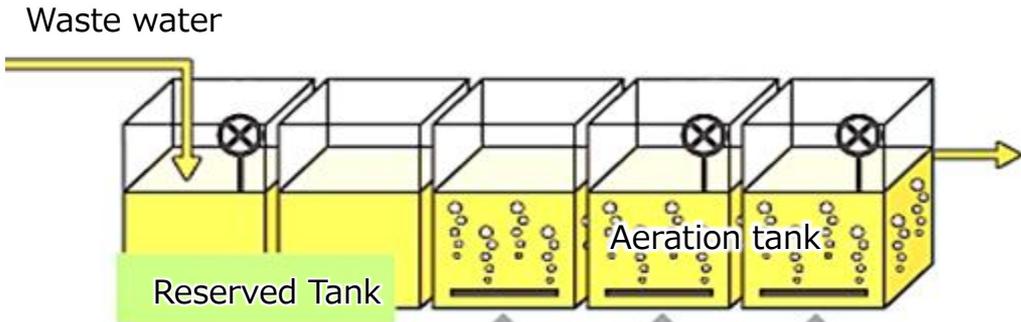


家電分野

1. 背景と目的

研究対象例：下水曝気用単段遠心ブロワ

プラントの消費電力低減のために、高効率化と広作動範囲化が求められている

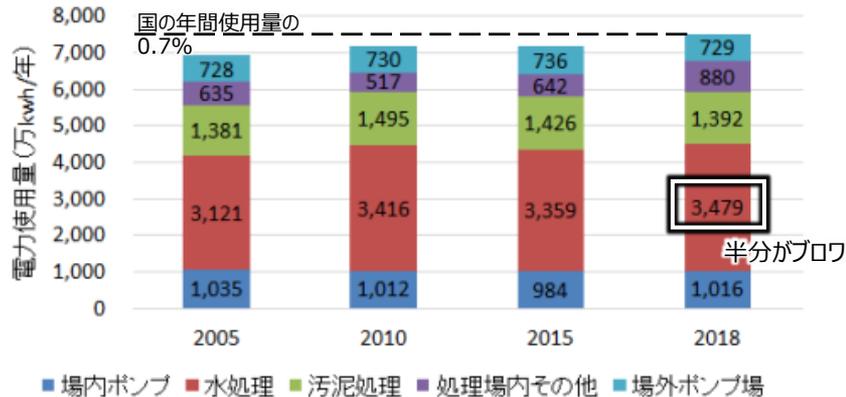


空気を送り込み、
バクテリアの活動を促進



単段遠心ブロワ

- 消費電力大・・・**高効率化**が必要
(水処理の約半分がブロワ起因)
- 昼夜で異なる処理水量への対応
(**広い作動範囲**が必要)
- 小型省スペース化 (多段→単段)



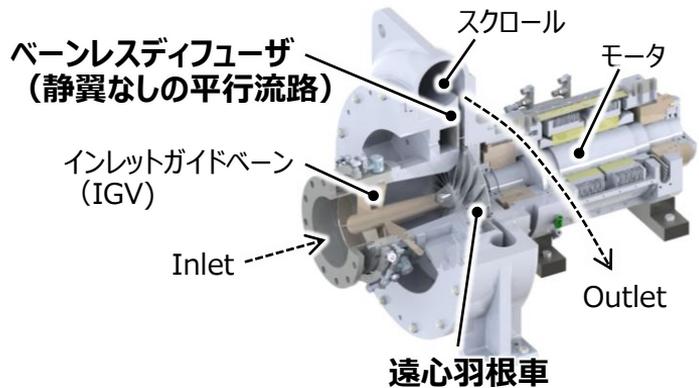
下水道における電力消費

©Hitachi, Ltd. 2025. All rights reserved

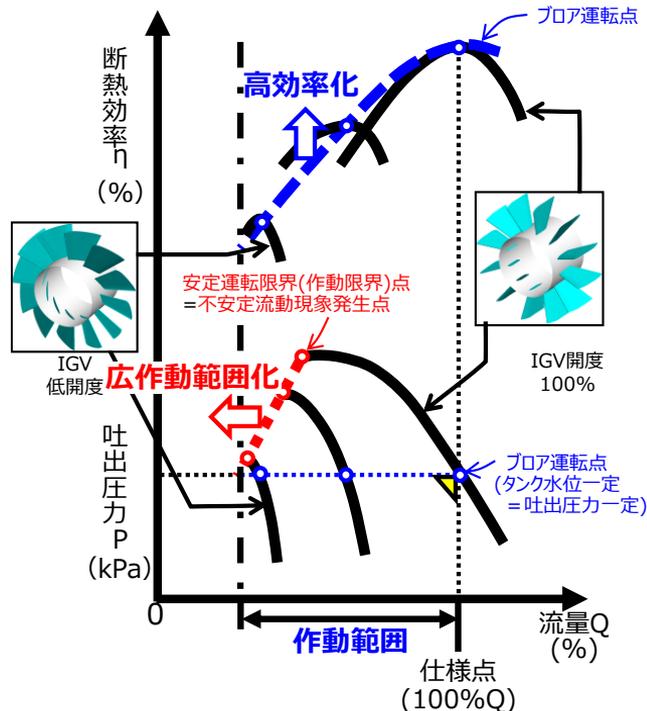
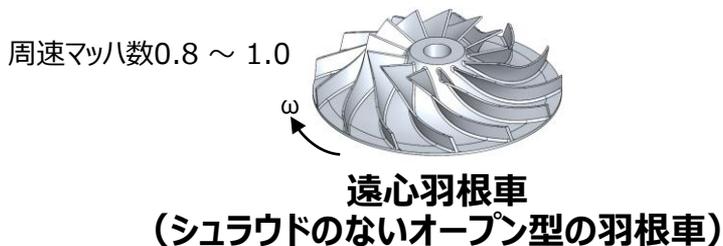
1. 背景と目的

遠心ブロワの構造と要求性能特性

プラントの消費電力低減のために、高効率化と広作動範囲化が求められている



単段ブロワ断面図

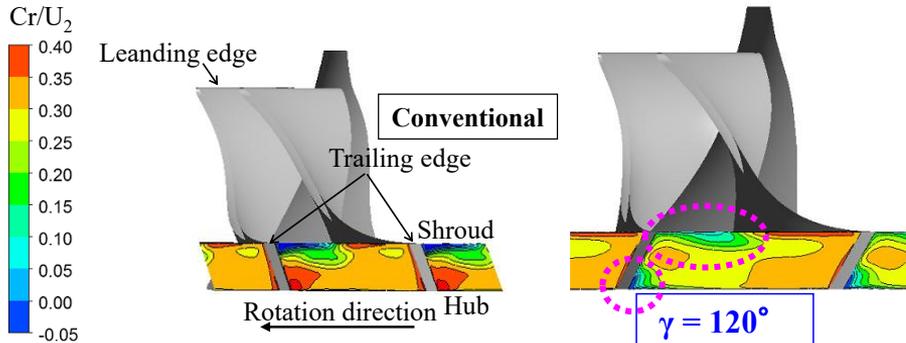
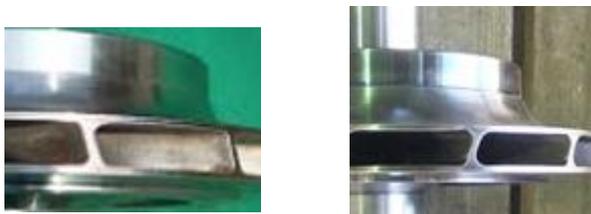


性能特性曲線模式図

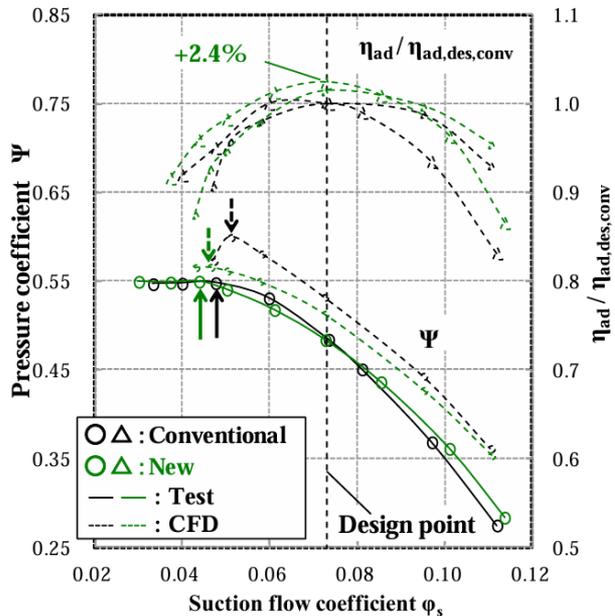
1. 背景と目的

社内研究開発事例（1）

羽根車翼面の曲線要素化によって出口流れを均一化し、効率を向上



Radial velocity distributions at impeller outlet (design point)

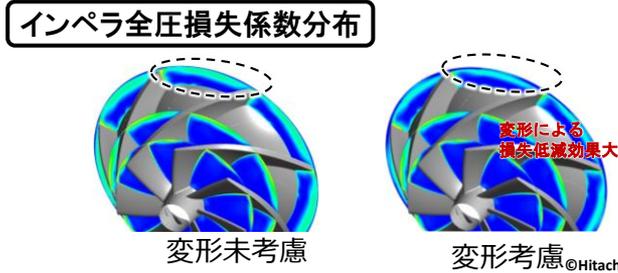
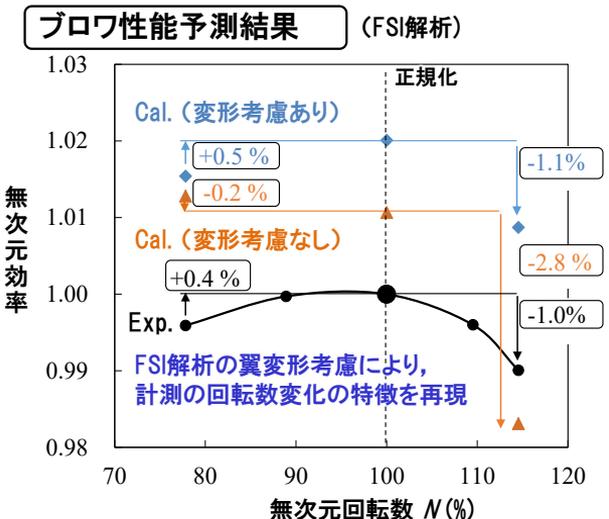
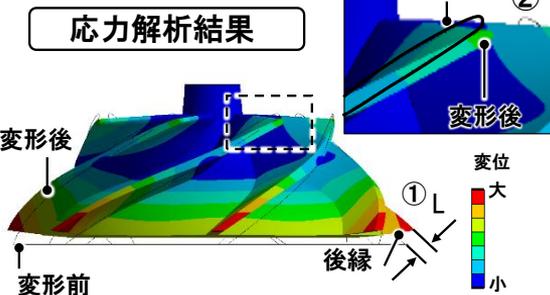
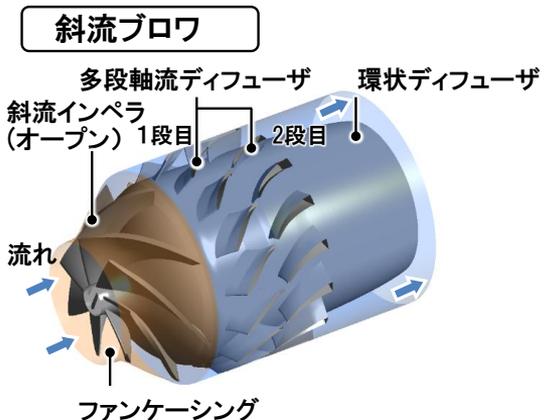


性能評価結果

1. 背景と目的

社内研究開発事例（2）

樹脂製羽根車の遠心力によるインペラ変形が効率と流れ場に及ぼす影響を調査



解析の目的

□ 従来研究の課題

- ターボ機械の性能予測，高効率化に必須である損失発生・低減のメカニズム分析が十分できていない
- 詳細な現象を議論するために解析精度をもっと上げたい
(相対比較が主，誤差が大きいものと小さいものがある， etc.)

□ 本研究の目的

- より忠実に壁面近傍の現象を考慮した解析を行うWall-resolved Large Eddy Simulation (WR-LES) に着目し，解析ソルバを開発する
- 遠心ブローアを対象にWR-LES解析を行い，解析精度への影響を調査する。
- 高効率化に必須となる詳細な損失メカニズム，非定常現象の変動メカニズムを分析把握し，現象を理解する。

2. 解析手法

解析ソルバ：FrontFlow/blue

大規模解析に実績のあるFrontFlow/blue(FFB)を用い、LES (Large Eddy Simulation) を行った
FFBに圧縮性流体解析機能を新たに追加した(圧力ベース)

- 代表速度を u_0 、代表長さを l_0 として無次元化
- 状態量を基準状態の密度、圧力、温度を ρ_0 、 p_0 、 T_0 とし、基準状態との偏差に対して無次元化

➤ 無次元変数

$$x_i^* \equiv \frac{x_i}{l_0} \quad t^* \equiv \frac{u_0 t}{l_0} \quad u_i^* \equiv \frac{u_i}{u_0} \quad \rho^* \equiv \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad p^* \equiv \frac{p - p_0}{\rho_0 u_0^2} \quad T^* \equiv \frac{T - T_0}{T_0}$$

➤ 連続の式

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x_i^*} (1 + \rho^*) u_i^* = 0$$

➤ Navier Stokes方程式

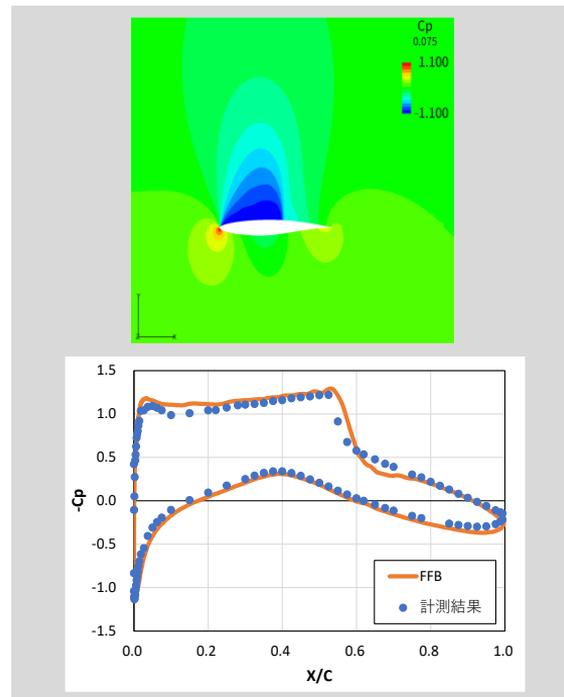
$$(1 + \rho^*) \frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + (1 + \rho^*) u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \left(\frac{1}{Re} + \nu_{SGS}^* \right) \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i^*} \right) \right\} \quad \nu_{SGS}^* \equiv \frac{\nu_{SGS}}{u_0 l_0}$$

➤ 内部エネルギーの輸送方程式

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial T^*}{\partial x_j^*} = -(\gamma - 1)(1 + T^*) \frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} + \frac{\gamma - 1}{R_0(1 + \rho^*)} \left(\frac{1}{Re_{eff}} + \nu_{SGS}^* \right) \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i^*} \right) + \frac{\gamma}{1 + \rho^*} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left\{ \left(\frac{1}{Pr_{eff}} + \frac{\nu_{SGS}^*}{Pr_{SGS}} \right) \frac{\partial T^*}{\partial x_j^*} \right\}$$

➤ 状態方程式

$$p^* = R_0(\rho^* + T^* + \rho^* T^*) \quad R_0 \equiv \frac{RT_0}{u_0^2} = \frac{c_0^2}{\gamma u_0^2} = \frac{1}{\gamma M_0^2}$$



ベンチマーク解析結果例

(RAE2822, Ma=0.72, 格子数900万)

©Hitachi, Ltd. 2025. All rights reserved

空間離散化 Galerkin有限要素法 (二次精度)

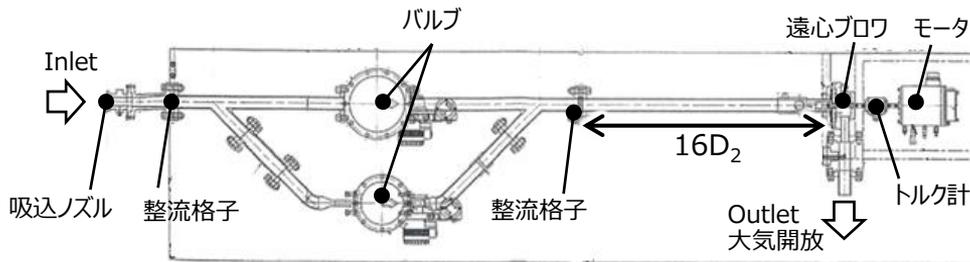
時間積分 Crank-Nicolson法 (二次精度)

乱流モデル Dynamic Smagorinsky モデル

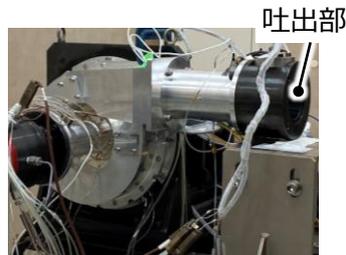
2. 解析条件

解析対象：実機小型スケールモデル遠心ブロワ

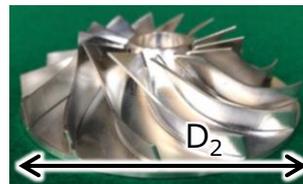
解析対象として製品1/4スケールのモデル機を試作し、比較データを取得した



試験装置



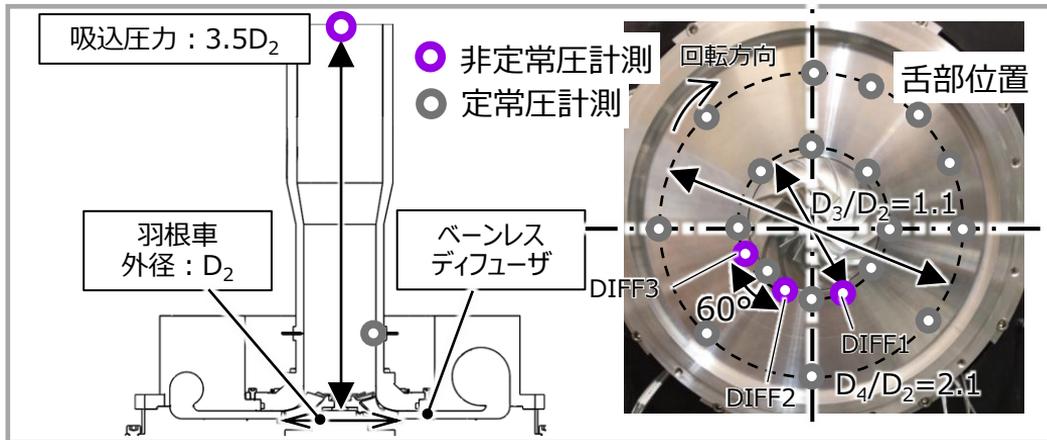
遠心ブロワ外観



遠心羽根車

試験条件

羽根車羽根枚数	N_b	13
羽根出口羽根高さ比	b_2/r_2	0.08
シュラウド側入口羽根角	β_{1s}	32°
出口羽根角	β_2	40°
周速マッハ数	M_{u2}	0.48
圧力比	-	1.2
レイノルズ数	Re_D	9.9×10^5



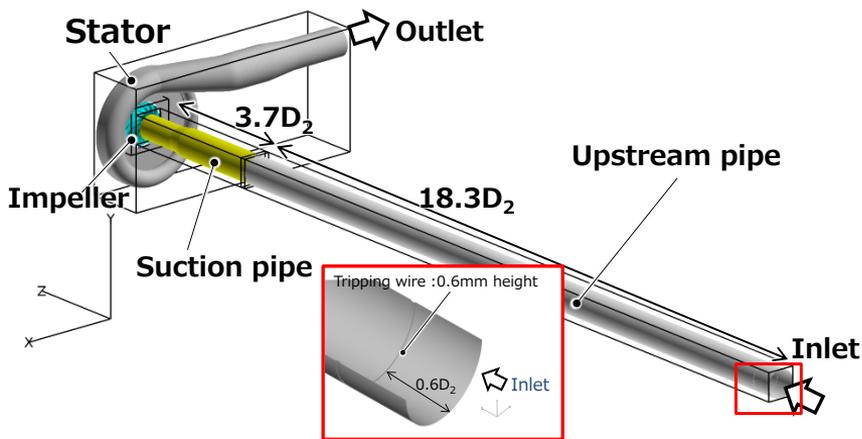
羽根車背面漏れ流れは一次元計算による補正により考慮

2. 解析条件

解析条件

初期メッシュを2回リファイン（細分化）でWall-resolved LESとなるように解析を実施した

- 解析領域：試験条件の配管系を考慮して解析領域を設定



解析格子条件

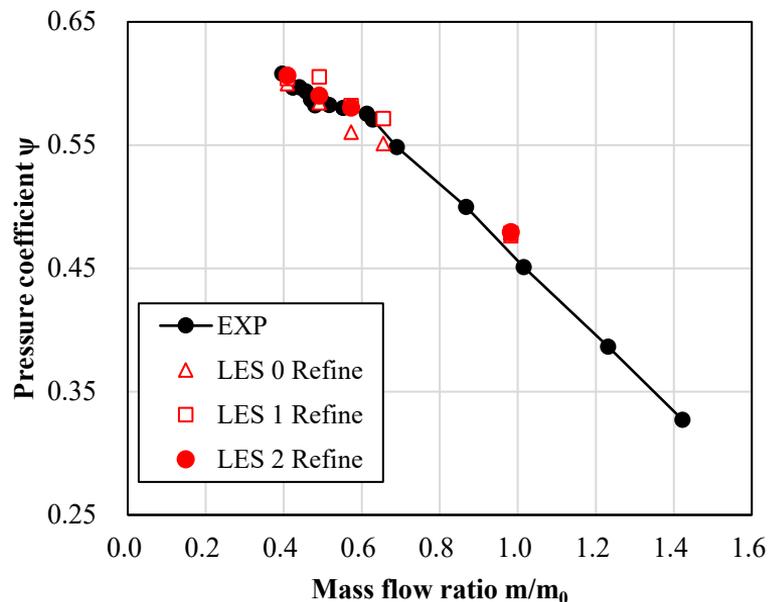
グリッドリファイン回数	0	1	2
呼称	0 refine	1 refine	2 refine
Upstream pipe	34M	271M	2,171M
Suction pipe	42M	335M	2,679M
Impeller	87M	699M	5,594M
Stator (ベーンレスディフューザ+スクロール)	65M	517M	4,139M
合計(億点)	2.3	18.2	145.8
主流方向 Δx^+	64	32	16
翼高さ方向 Δy^+	8	4	2
翼ピッチ方向 Δz^+	32	16	8

□ 境界条件

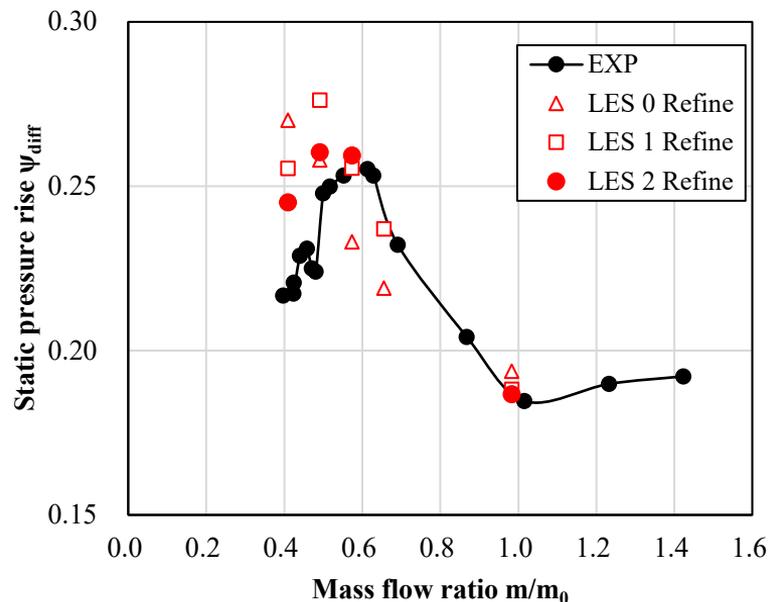
- 基準条件：大気圧，外気温20℃
- 入口境界：流量 ρU ，温度 T を実験値で付与
- 出口境界：トラクションフリー（大気圧）
- 羽根車回転数：実験と同値
- 羽根車背面漏れ流れは未考慮

性能予測結果

低流量側の予測精度に差。格子解像度が高いほど定量的に一致し、勾配の変化を捉えられる。

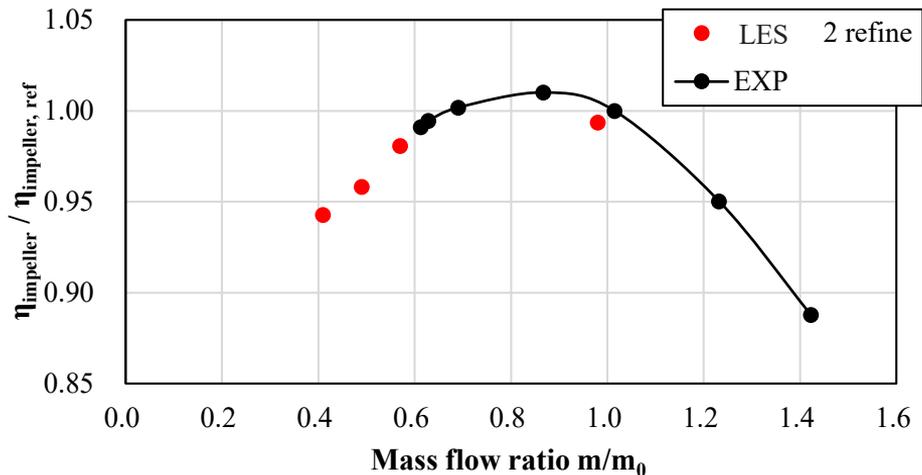


遠心ブロウ圧力係数 ψ の比較
(ブロウ入口-出口間の全圧上昇)

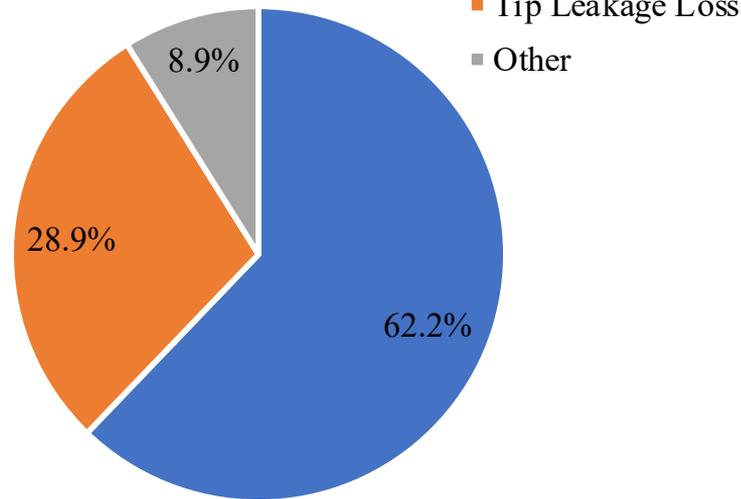


ディフューザ静圧上昇係数 ψ_{diff} の比較
(バーレスディフューザの静圧上昇)

羽根車損失の分析



羽根車の断熱効率の比較



羽根車内の損失内訳
(流量比 m/m_0 0.98)

➤ 羽根車の損失評価方法：エントロピー生成率を体積積分

エントロピー生成率

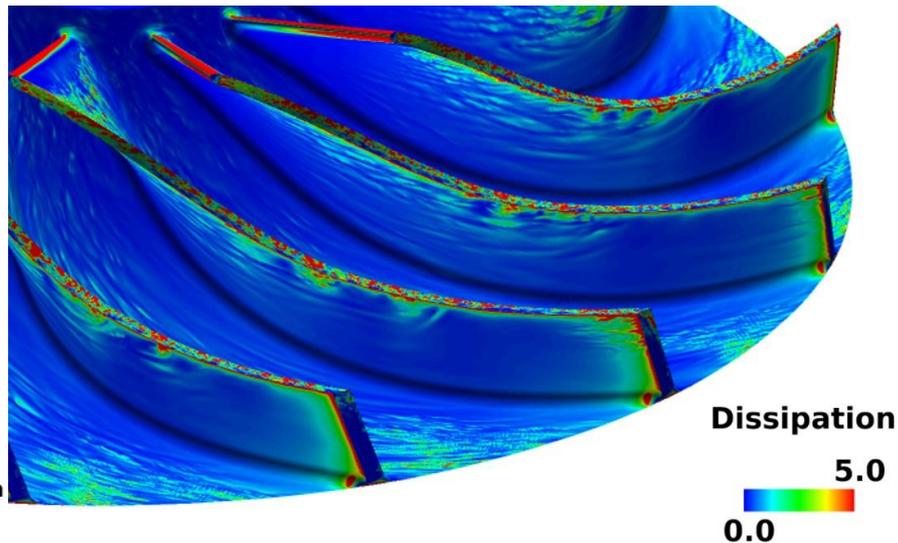
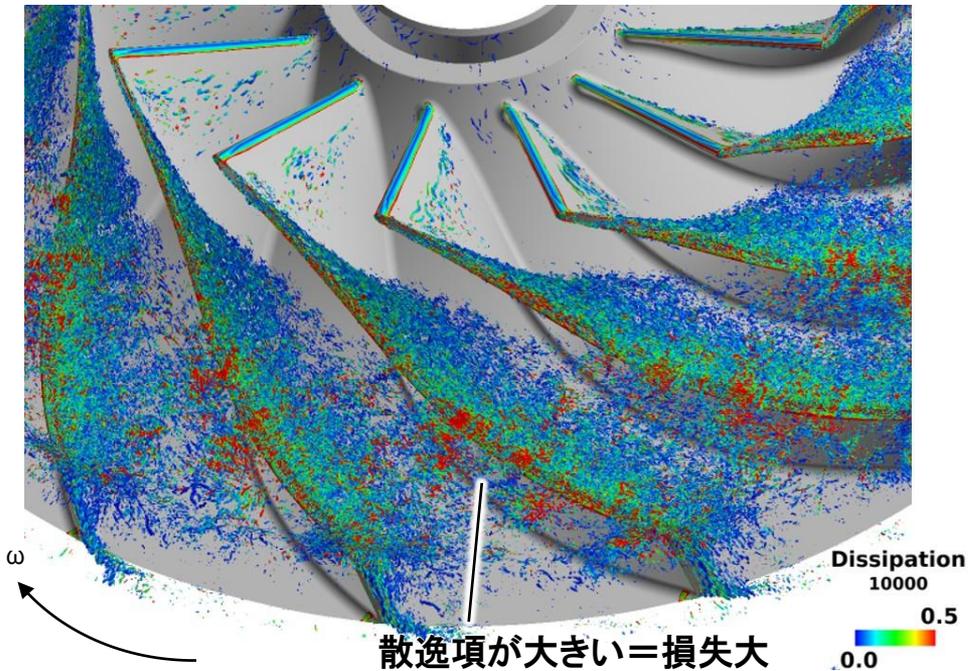
$$s_{pro} = \frac{\varphi}{T_s} + \frac{Q_c}{T_s}$$

φ : 粘性散逸項 Q_c : 熱消散項 エネルギー散逸を直接評価

3. 解析結果

羽根車翼間の渦構造と損失

損失の大きい領域は翼端部に集中するが、その要因は圧力面上で生じる渦構造に起因

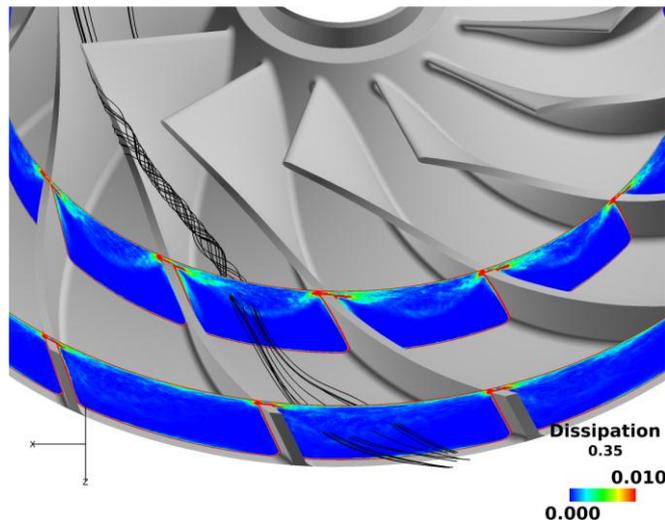


渦構造等値面上の散逸項分布 (2 refine, m/m_0 0.98)

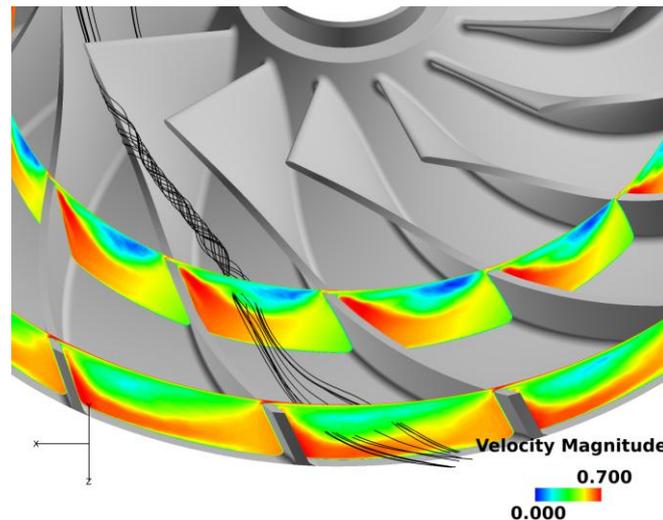
翼圧力面上の散逸項分布 (2 refine, m/m_0 0.98)

損失を生じる流れ場の分析

翼間流路内では壁近傍を除いて損失が小さい。漏れ流れはブロックージとして作用し、摩擦損失の増加に寄与。



翼間流路内の散逸項分布 (2 refine, m/m_0 0.98)



翼間流路内の相対速度分布 (2 refine, m/m_0 0.98)

本検討のまとめ

遠心式ターボ機械の性能予測精度を向上させること、および内部流動現象を詳細に把握することを目的に、実験および数値解析によって検討を行った。特に、流体設計へのフィードバックと設計の高度化を達成するために数値解析に関して、流れ場のより詳細な情報を入手でき、性能予測精度の向上が期待できる大規模流体解析技術に着目し、検討を行った。

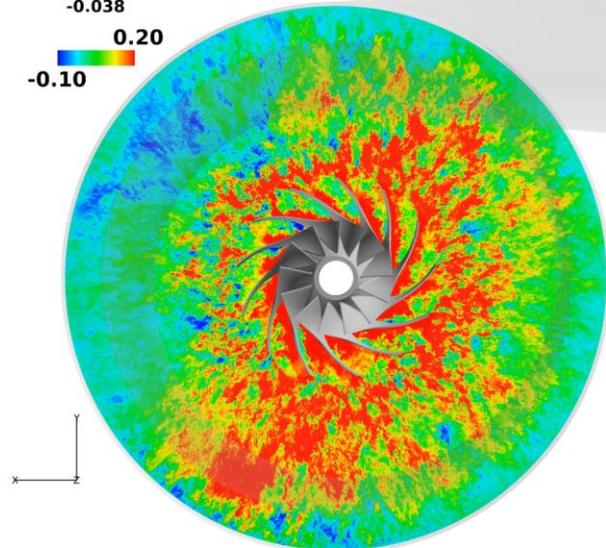
- 遠心ブロアの小型スケールモデル機（モデルブロア）を対象として圧縮性LES解析を行うために、圧縮性流体解析機能を大規模流体解析に実績のあるFrontFlow/blueに追加実装した。
- Wall-Resolved LES解析（WR-LES）により、モデルブロアの性能を定量的に予測できることを確認した。格子解像度は低流量側の予測精度に効く。格子解像度が高いほど定量的に一致し、勾配の変化を捉えられる。
- 設計点の近傍流量において羽根車に発生する主要な損失は、動翼表面に発達する摩擦損失である。動翼の前縁および翼端から発生する翼端渦および漏れ流れは、損失の発生には直接的に寄与しないが、翼間二次流れを誘起し、境界層の主流を加速することによって、摩擦損失の増加に寄与する。

継続検討中の課題：非定常現象のメカニズム分析

継続課題にて低流量側の非定常現象分析を実施中・・・失速メカニズムを分析し、失速抑制技術に繋げる

動画

Radial Velocity
-0.038
0.20
-0.10

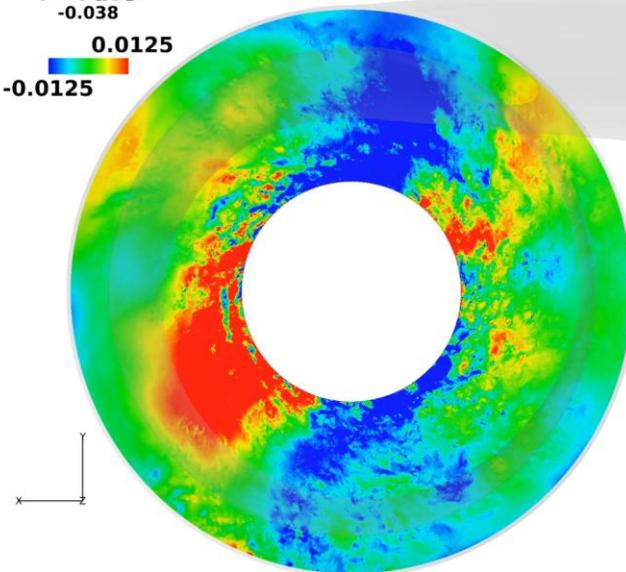


T*=405.326

径方向流速分布（スパン中央断面）

動画

P - Pave
-0.038
0.0125
-0.0125



FILE = 53

静圧差分布（スパン中央断面）

謝辞

- 本研究は、理化学研究所計算科学研究機構が提供するスーパーコンピュータ「富岳」の計算資源を利用した（ID：hp230120）。ここに記して謝意を表す。