

平成28年度地球シミュレータ利用報告会、2017/4/20、コクヨホール

研究分野：計算科学分野

高精度流体シミュレーションによる小型ファンまわりの
流体現象理解と空力騒音発生メカニズムの解析：
「騒音」という環境課題の改善にむけて

青野、高橋、浅田、関本、立川、藤井、東京理科大学

阿部、東京工業大学

村上、ミネベア株式会社

板倉、廣川、JAMSTEC

研究概要

小型ファンから発生する空力騒音を近年HPCで利用され始めた高次精度・高解像度計算手法を用いたLarge-eddy simulation(LES)計算を行い、

- ・ 小型ファン周りの詳細流れ場構造
- ・ 空力騒音発生メカニズム
- ・ 音響予測レベルの確認

の解析を行い、「騒音」という環境課題の改善を目指す。



研究背景

ファン流体騒音

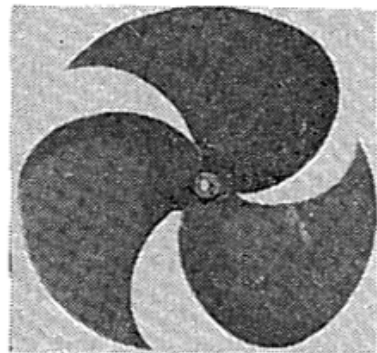
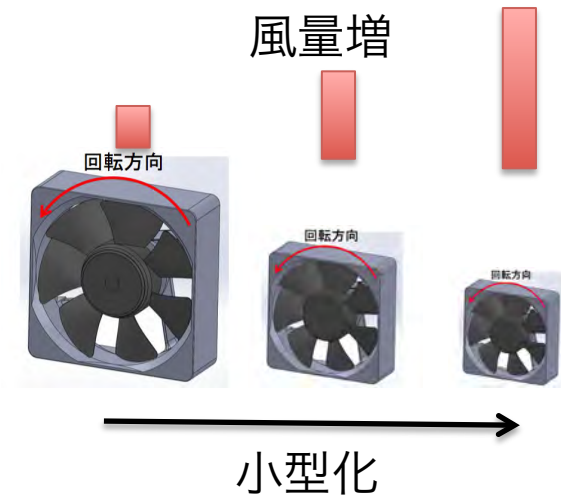
電気機器の小型化⇒発熱密度の上昇
空気冷却方式⇒送風量を増やす対策



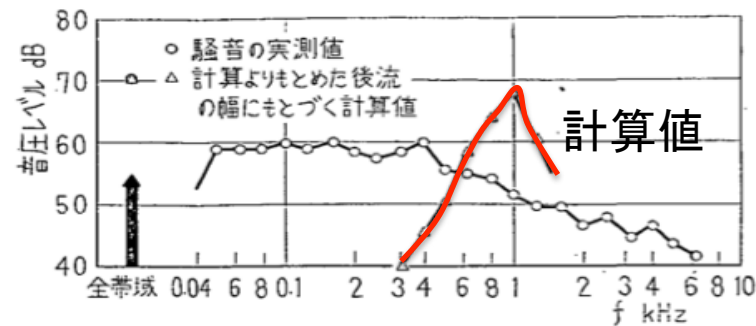
流体騒音(流れの乱れに起因する圧力変動)が増大
現象の解明や対策のために計測が必要

実測と理論による解析：

深野徹ら(1975)：実験と理論との比較. 騒音レベルを理論モデルにより予測



(a) 3枚羽根



(a) 3枚羽根送風機

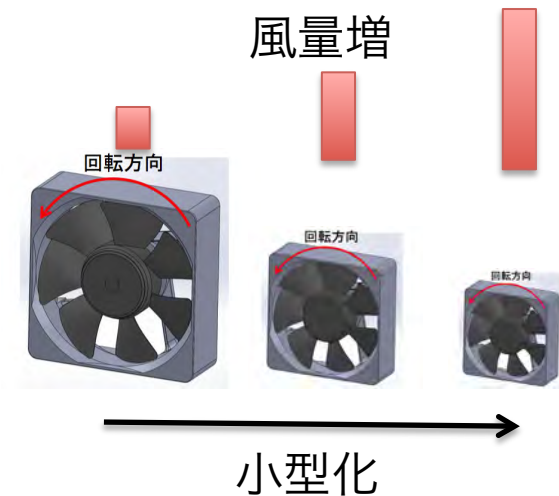
予測値の差を埋めるためには、
流れ場とメカニズム理解に基づいた理論/予測モデル構築の必要性を示唆

ファン流体騒音

電気機器の小型化⇒発熱密度の上昇
空気冷却方式⇒送風量を増やす対策



流体騒音(流れの乱れに起因する圧力変動)が増大
現象の解明や対策のために計測が必要



解決策：シミュレーション

対象空間において多くの物理情報を得ることが課題の解決に有効

*シミュレーションには非定常流れの計算、膨大な計算リソースが必要



スーパーコンピュータ（地球シミュレータや京コンピュータなど）の
発達によりそれが少しずつ可能になりつつある

騒音発生源の種類と関連製品

分野	関連	機械振動	電磁振動	流体の圧力変動
パワエレ機器	UPS,PC,電源,インバータなど	—	鉄心	冷却用ファン
	モータ	共振、軸受	鉄心・コイル	冷却用ファン、回転子
産業	受変電設備	—	鉄心	冷却用ファン
発電・社会	タービン・周辺機器	共振、軸受	—	ラビリンスシール部
	発電機	共振、軸受	鉄心・コイル	冷却用ファン、回転子
	燃料電池	—	—	冷却用ファン
食品流通	自動販売機	圧縮機振動	—	冷却用ユニットファン

金子ら(2016)*より抜粋

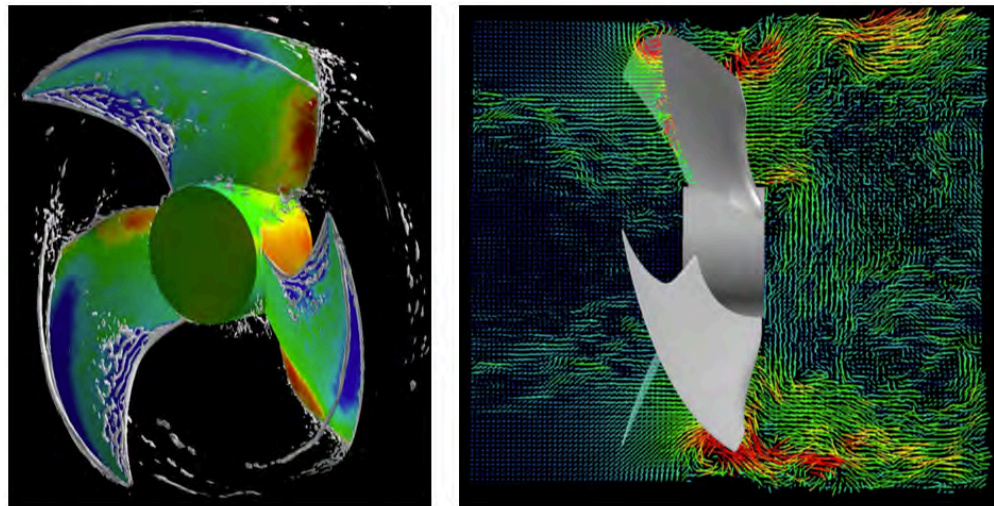
- 本研究と対象とする冷却用ファン：様々な分野で主要な騒音発生源
- 多数の電気機器設計などへの波及効果が期待

最近10年間の研究： HPCを使ったファンLESシミュレーション事例 1

流体解析：

立原ら(2008), LES解析(FFB), 地球シミュレータ, 3000万点, $Re=O(10^5)$

本間(2013), LES解析(FFB), 京コンピュータ, 5500万点, $Re=O(10^5)$



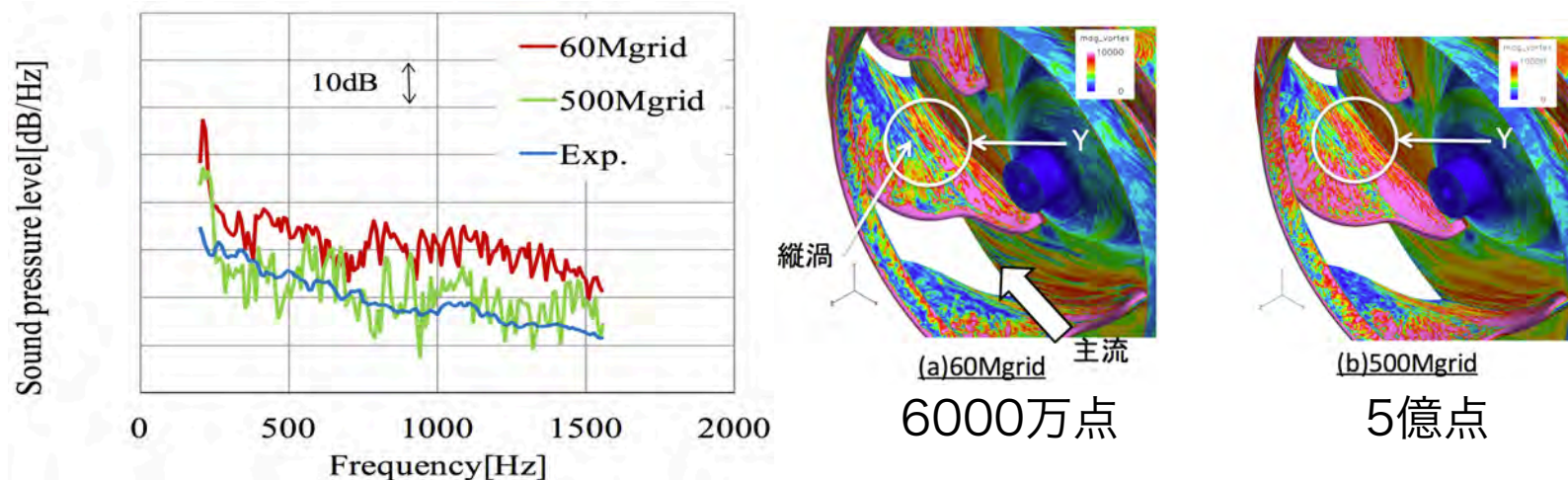
ファン周りの瞬間流れ場 (本間、2013)

FFB: FrontFlow/Blue
(<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/>)

ファン周りの複雑な流動現象が大規模LES解析により研究され流れ場理解が徐々に進み始めた。

最近10年間の研究： HPCを使ったファンLESシミュレーション事例 2

流体解析+音響予測：



米山(2013), 遠心ファン, $Re=O(10^5)$, 解析手法：LES解析(FFB)+分離解法
計算機：京コンピュータ, 総格子点数：6000万、5億点

LES解析の格子点数による音響予測への影響を調査

→翼面近傍の渦構造の解像向上が精度向上.

最近,HPC+多数格子点による計算で幾つかの形状に対して実験値と概ね一致.
定量的な予測可能性が徐々に示され始めている！

研究概要（再）と内容

小型ファンから発生する空力騒音をHPCで最近利用し始められた高次精度・高解像度計算手法を用いたLES解析により

- ・ 小型ファン周りの詳細流れ場構造の理解
- ・ 空力騒音発生メカニズムの解析
- ・ 音響予測レベルの確認

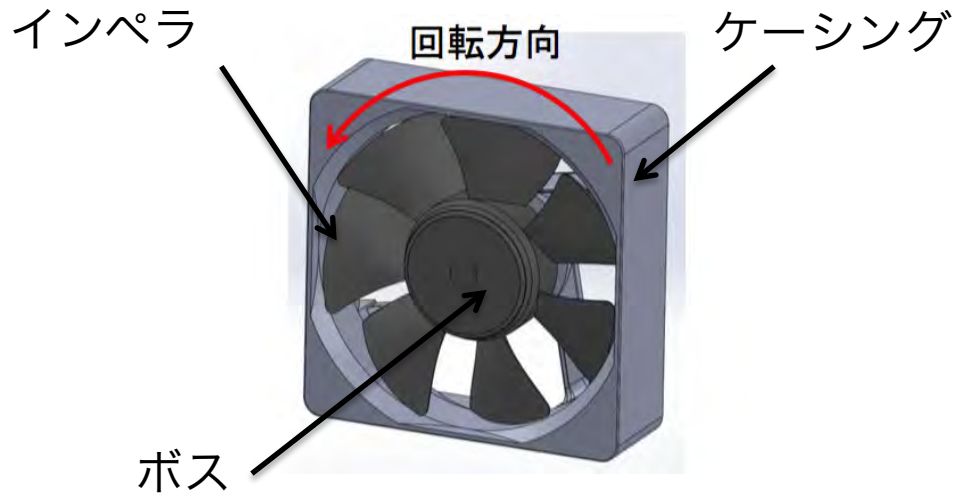
を行い、「騒音」という環境課題の改善を目指す



研究内容

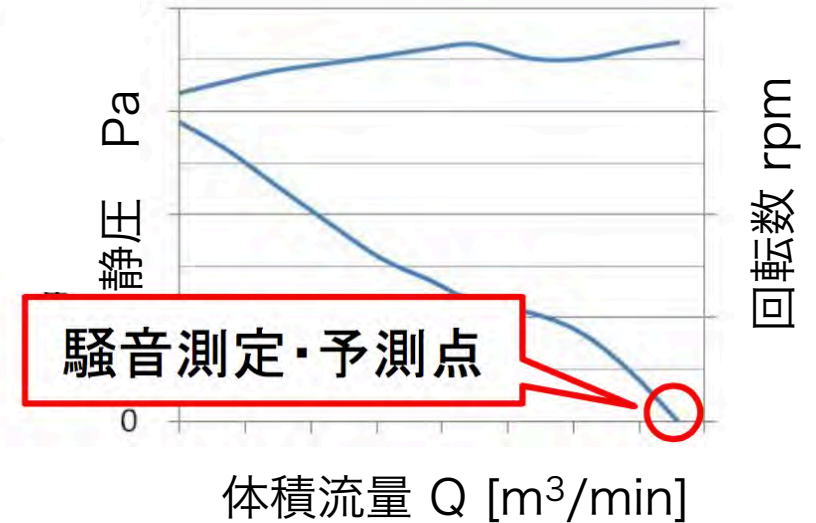
- (1) 軸流ファン周りの高精度流体解析 (ES利用)
- (2) ブレード音の予測 (広帯域の乱流騒音は対象としない)
- (3) 流れ場詳細な理解と空力騒音発生メカニズムの解析

解析対象と条件



インペラ7枚の小型軸流ファン (回転半径=数100mm)
レイノルズ数 $Re: 1.6 \times 10^5$ (インペラ先端周速, 回転直径)

P-Q特性



静圧—流量特性

解析手法

流れの計算： LANS3D ES_Tuned

支配方程式：圧縮性ナビエ・ストークス方程式

空間離散化：有限差分法(6次精度コンパクト差分)

空間フィルタ：6次精度3重対角フィルタ

サブグリットスケールモデル：特に用いない(陰的LES計算)

時間積分：2次精度3点後退差分, ADI-SGS

格子：構造格子、重合格子法

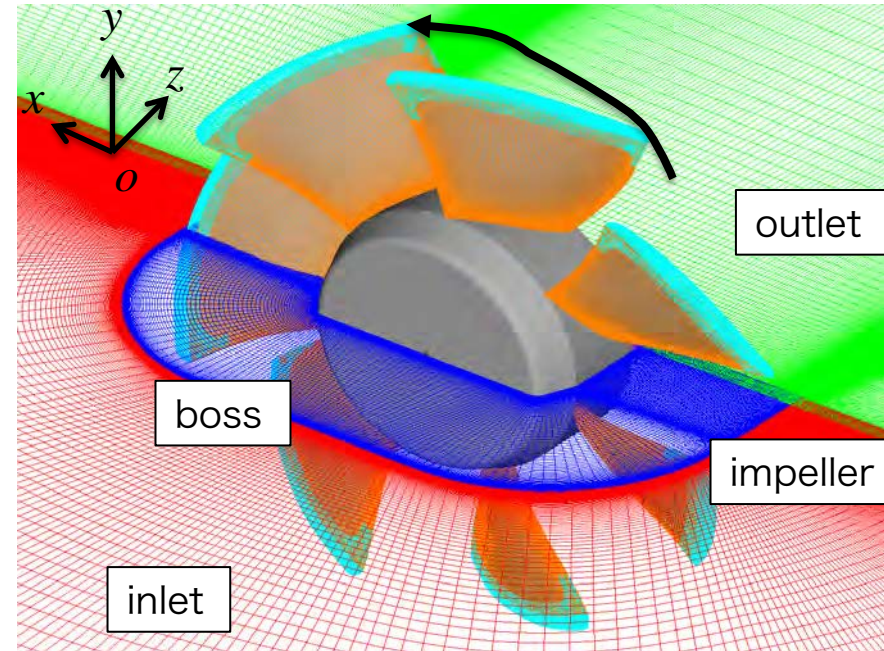
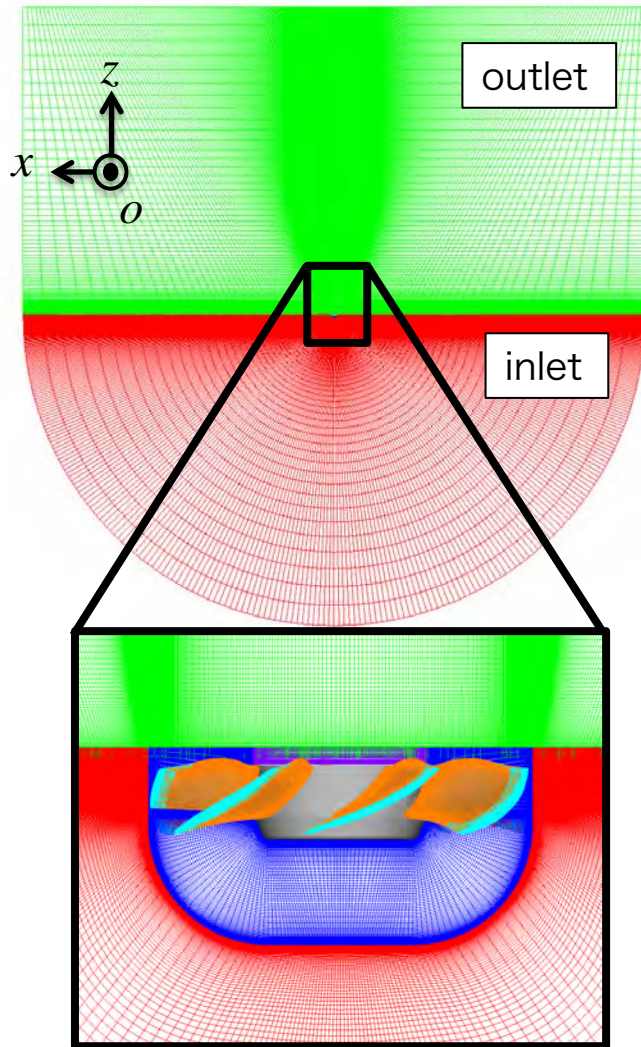
並列化：ハイブリット並列(Openmp, MPI)

*ES用にチューニング済みものを利用

音響場の計算：

分離解法 (Curleの式*)

計算格子



総格子点数：約6000万点

境界条件

- ✓ 壁条件: 滑無し
- ✓ 外部境界: 自由流出
- ✓ 外部境界近傍：スポンジ境界
- ✓ 格子全体もしくは一部を剛体回転
(重合格子+移動格子法)

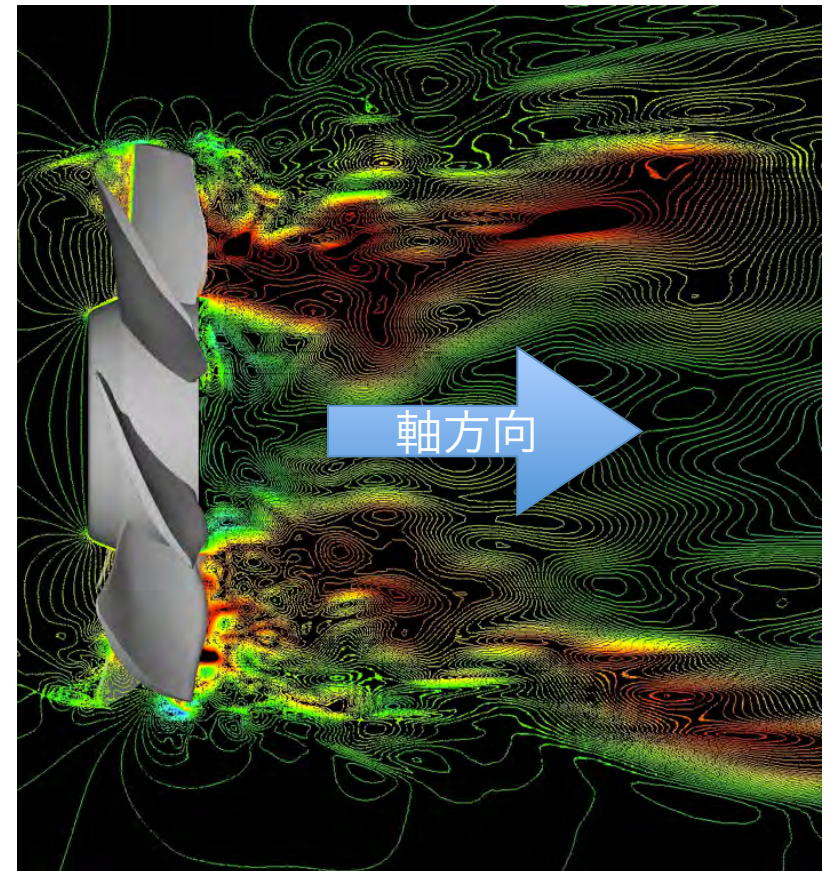
ファンの仕様と作動条件

初期流れは静止流れ場(無風)

ファンの作動条件

パラメータ	数値
レイノルズ数	1.63×10^5
マッハ数	0.0635
ストローハル数	0.3183

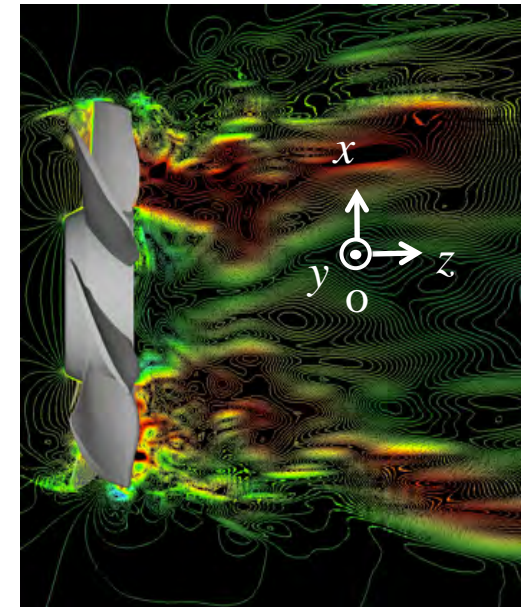
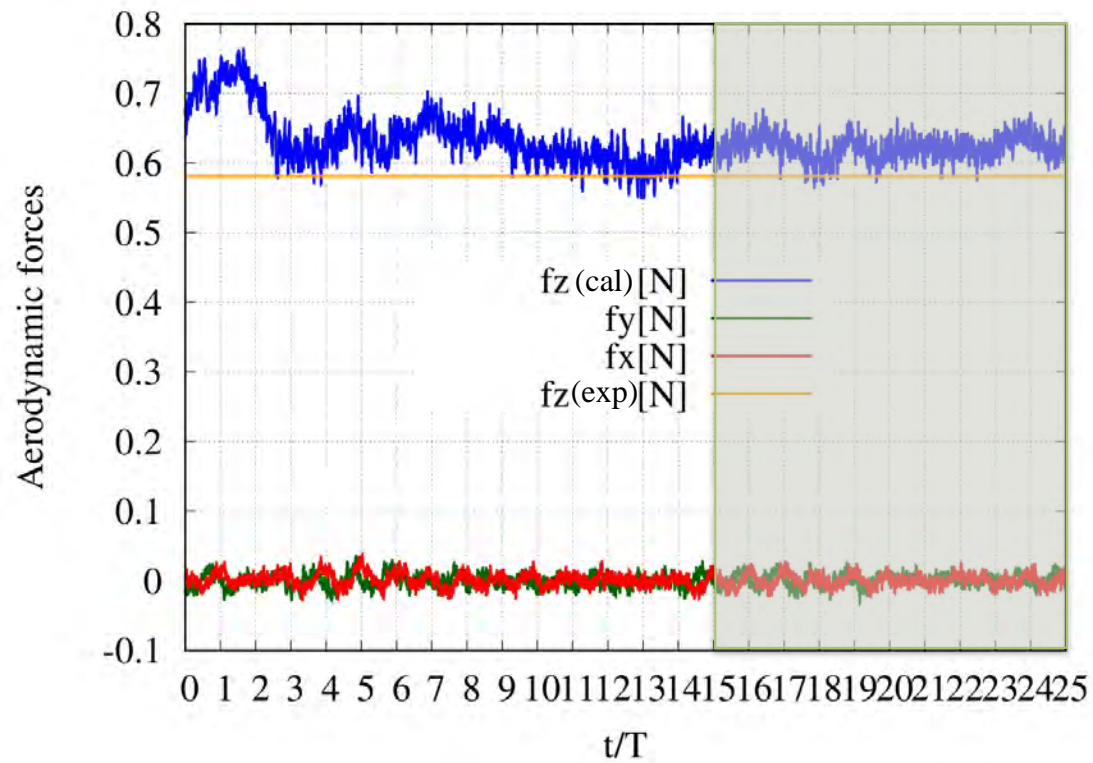
ファンの作動条件は実験に準拠
⇒最大流量となる回転数
代表速度：インペラ端周速
代表長さ：ファン直径



無次元軸流方向速度分布 25回転目

計算結果

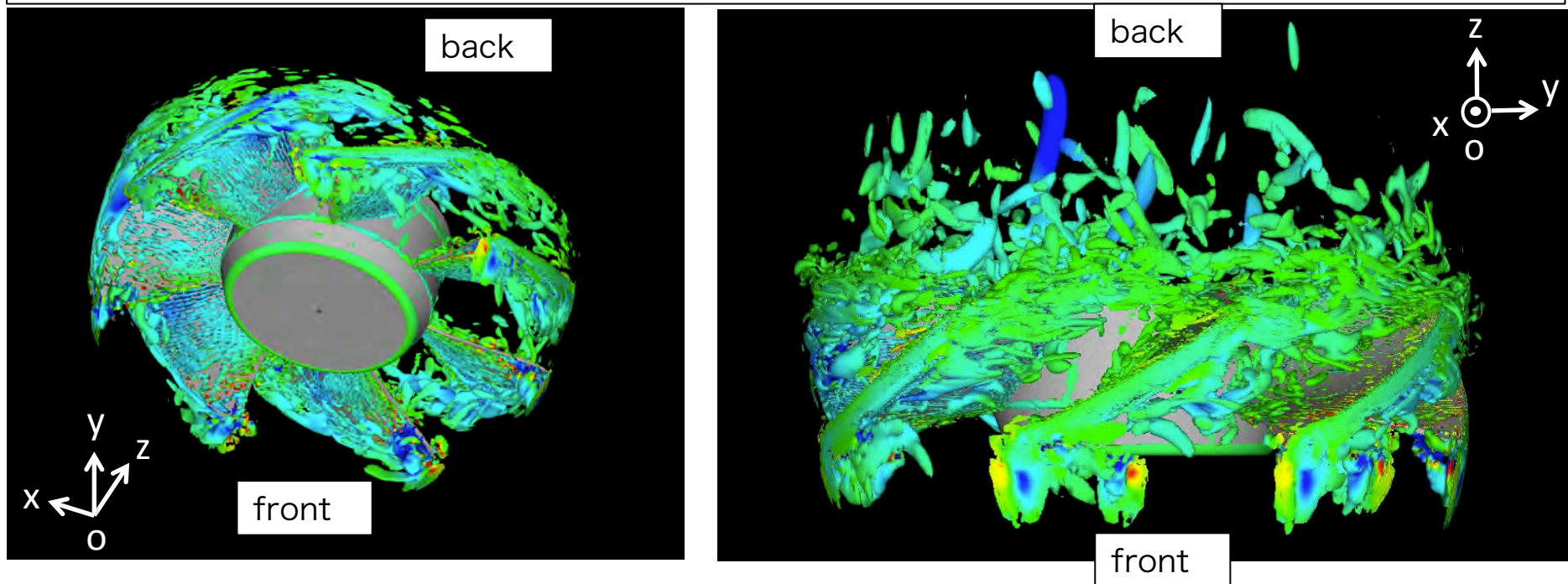
空気力の検討



- ✓ 15回転以上で力の履歴が準定常状態に
- ✓ z方向に働く力の10回転分の時間平均値0.63[N]

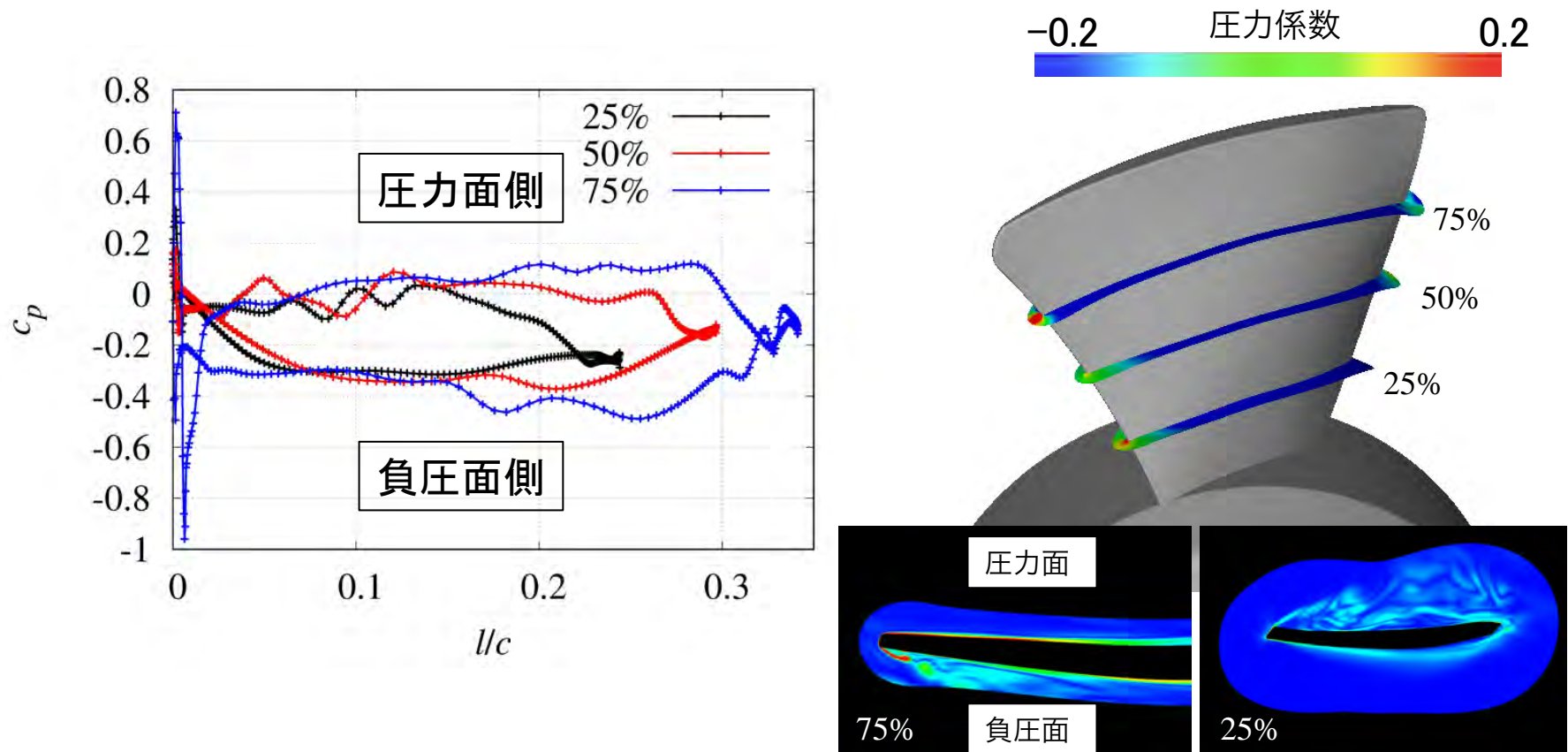
瞬間場動画

等値面 $Q(=1)$ 、圧力場(0.998-1.002)
25回転目: 100000timestep(360°回転)



- ✓ ファンのチップ側前縁で、負圧面(front)側へ剥離が見られる
- ✓ チップ中央からインペラによって巻き上げられた先端渦が見られる
- ✓ チップ側後縁から剥離が見られる

翼面上の瞬間圧力分布

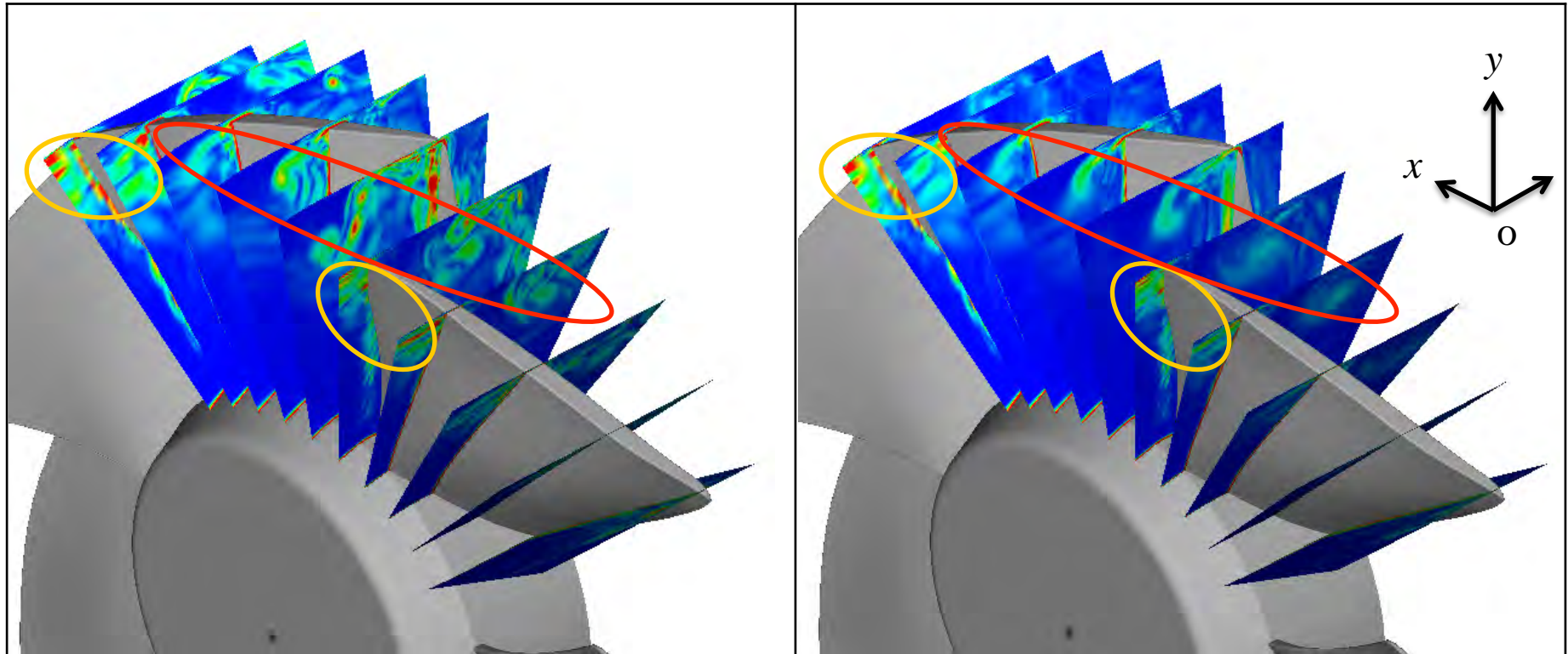



- ✓ 変動している→剥離渦の存在
- ✓ ブレード先端では負圧面側で前縁剥離、他方根元では圧力面側
(ブレードのねじれ、前縁の形状、有効気流角などの影響)

ファン周りの流れ場構造の理解

負圧面側

0 渦度 10



渦度強さ分布 25回転目の瞬間場

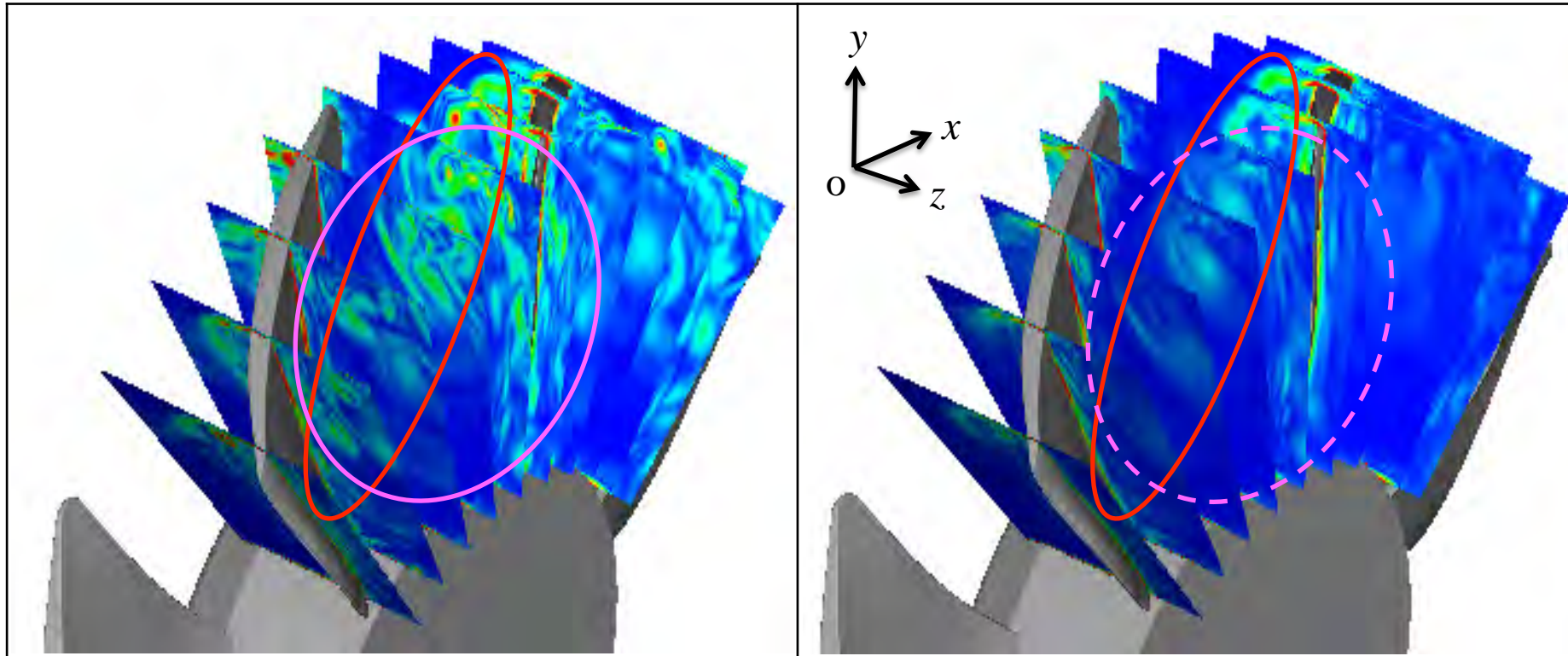
渦度強さ分布 20~25回転での位相平均場

- ✓ 前縁剥離渦及び翼端渦は瞬間場・位相平均場の両方で観測⇒周期性

ファン周りの流れ場構造の理解

圧力面側

0 渦度 10

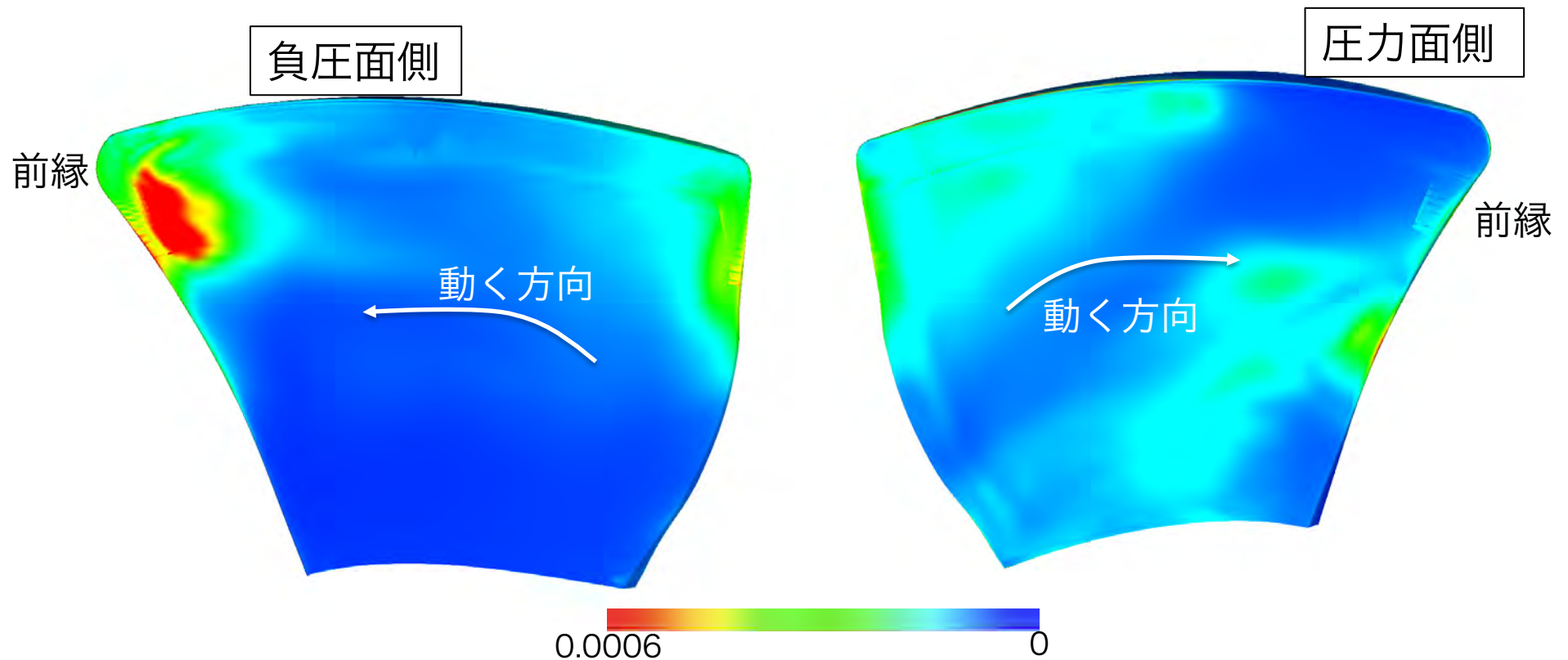


渦度強さ分布 25回転目の瞬間場

渦度強さ分布 20~25回転での位相平均場

- ✓ 前縁剥離渦及び翼端渦は瞬間場・位相平均場の両方で観測⇒周期性
- ✓ 後縁剥離渦は位相平均場では観測されない⇒非定常性

インペラ表面の圧力変動分布 (RMS値)



20-25回転における無次元圧力変動分布

これらの圧力変動が騒音源の可能性が高い！

まとめ

小型ファンから発生する空力騒音を高次精度・高解像度計算手法を用いたLES解析を実施した.

- ・ 小型ファン周りの詳細流れ場構造の理解
 - 剥離、剥離渦の挙動と特性
- ・ 空力騒音発生メカニズムの解析
 - 複数の剥離渦とその干渉が起因した圧力変動が主要な音源
- ・ 音響予測レベルの確認
 - これから検討事項

最終的に、冷却ファン騒音低減に繋がる知見を獲得したい.

謝辞

JAMSTEC 斎藤様、上原様
多大なサポートを有難うございました。