

流体コードFrontFlow/Blueの 成果と研究・開発計画

東京大学生産技術研究所
加藤 千幸



RSS 21
Revolutionary Simulation Software

講演内容

- プログラム開発の動機
- 開発中のプログラムの特徴
- 製品開発への適用事例
- 今後の予定

プログラム開発の動機

計算機シミュレーションによる設計 の高度化

複数の問題を同時に解決する設計技術



複雑現象を精度良くかつ高速に予測する技術

従来の手法の限界

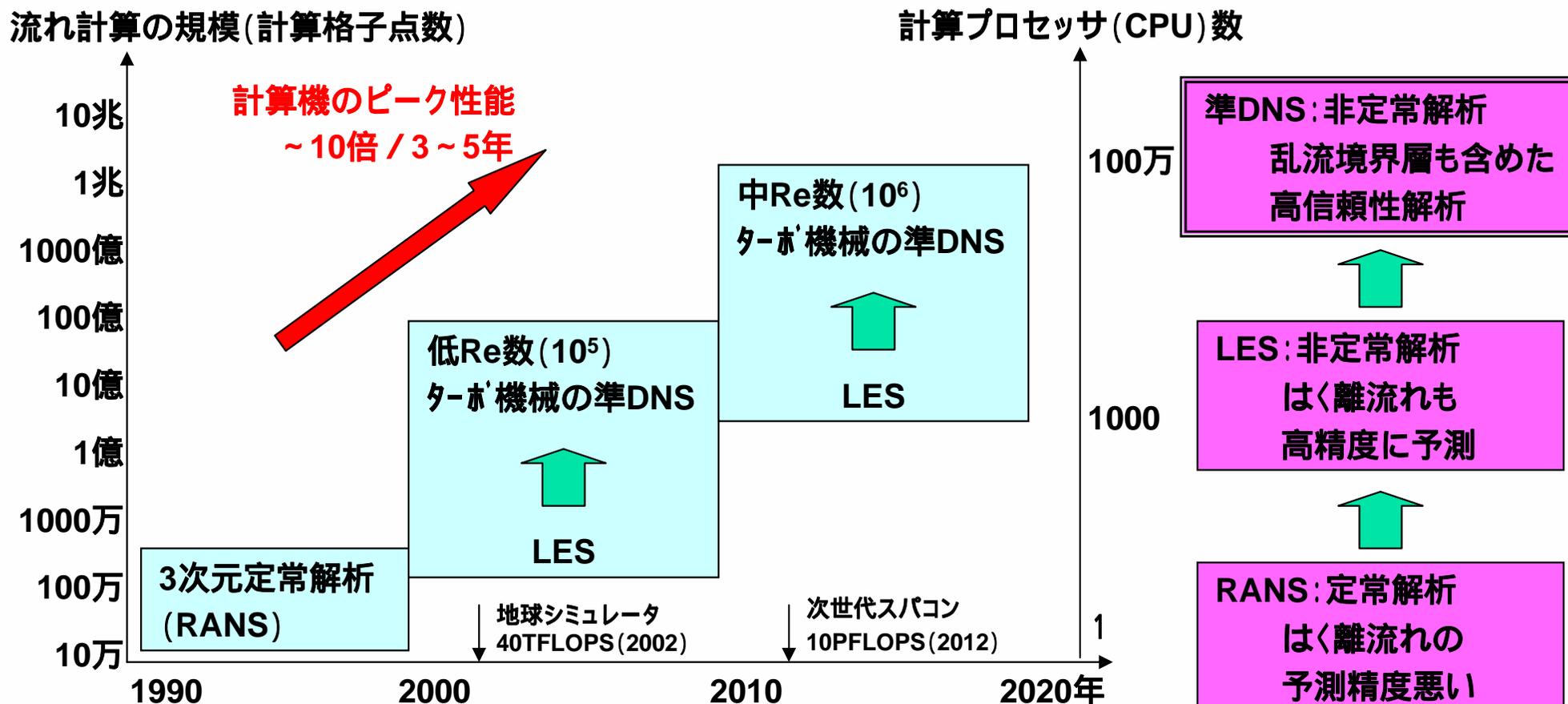
- 時間平均に基づくRANSが乱流解析手法の主流
- 複雑現象の大規模解析が困難

本研究開発の革新性

- [予測精度] LESによる高精度な乱流解析
- [高速な大規模解析] スカラー/ベクトルマシンにおいて高速に動作
- [マルチフィジックス解析] 騒音・振動・反応・混相流等の解析機能

乱流の数値解析の動向と将来展望

■ 5～10年後には予測精度が飛躍的に向上



- ・ 燃焼 / 混相流 / 構造振動などの本格的マルチフィジックス連成解析も実現
- ・ 並列計算のパラダイムシフト
- ・ 超大規模データ処理方法の開発

開発中プログラムの特徴

開発プログラム FrontFlow/Blue

特徴:

LESに基づく非定常流れ場の高精度

解析対象:

ターボ機械内部流れ, 空力騒音, 他

解析手法および機能:

空間離間化: 有限要素法 (六面体, 四面体)

乱流モデル: LES(SSM, DSM), DES

圧力解法: Fractional-Step法

運動方程式: 陽解法/陰解法 (ともに時間2次精度)

オーバーセット法によるマルチフレーム機能

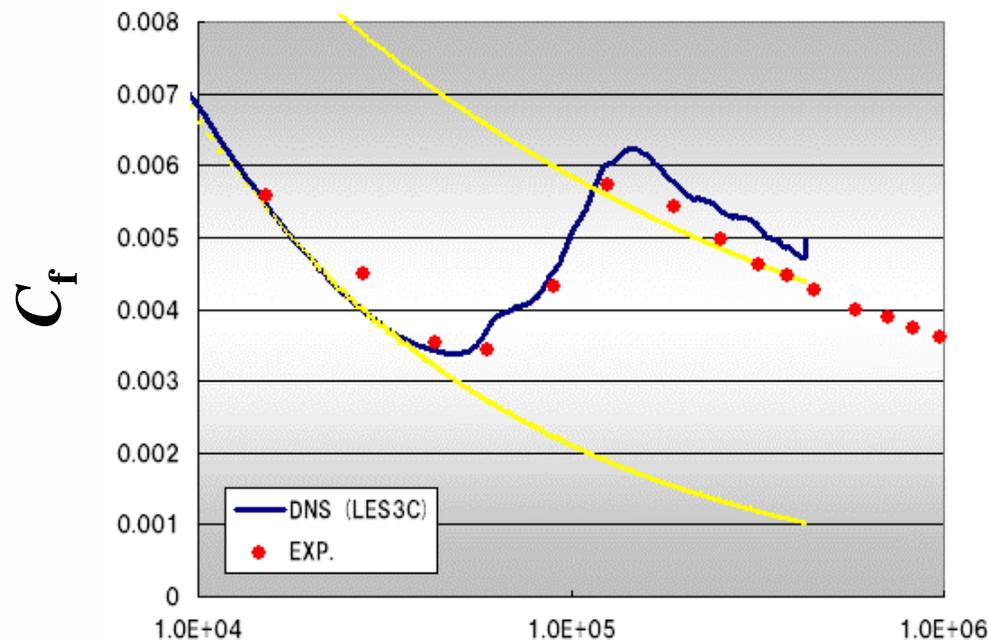
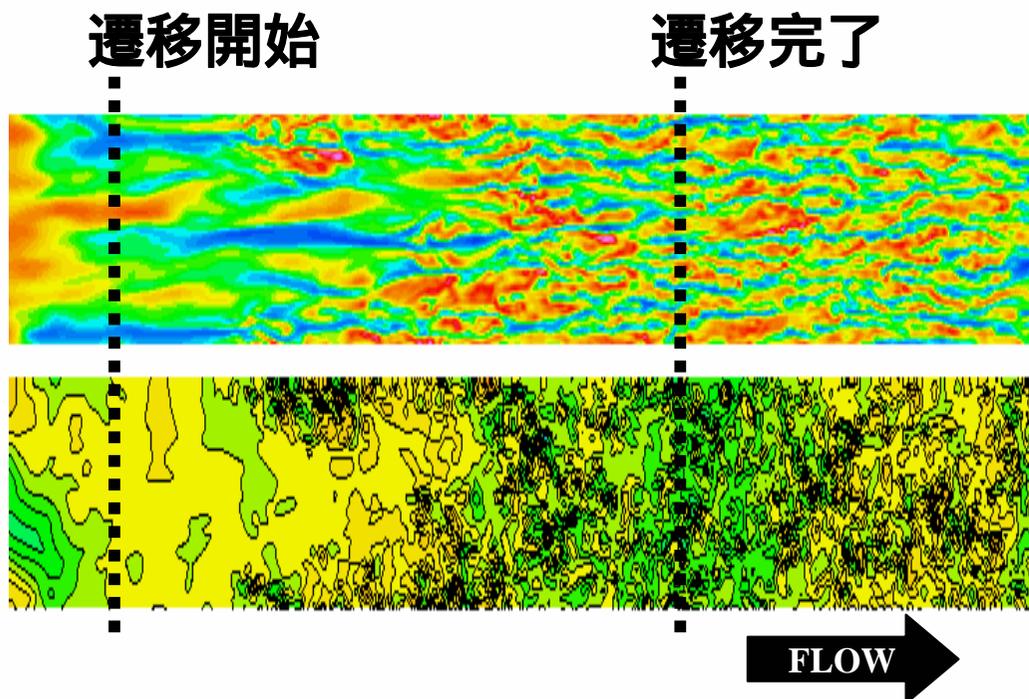
並列解析機能

従来の市販コードとの差別化

1. 乱流現象の高精度予測
2. 乱流騒音の高精度予測
3. 非定常キャビテーション流れ解析
4. 高速・大規模計算の実現

乱流現象の高精度予測

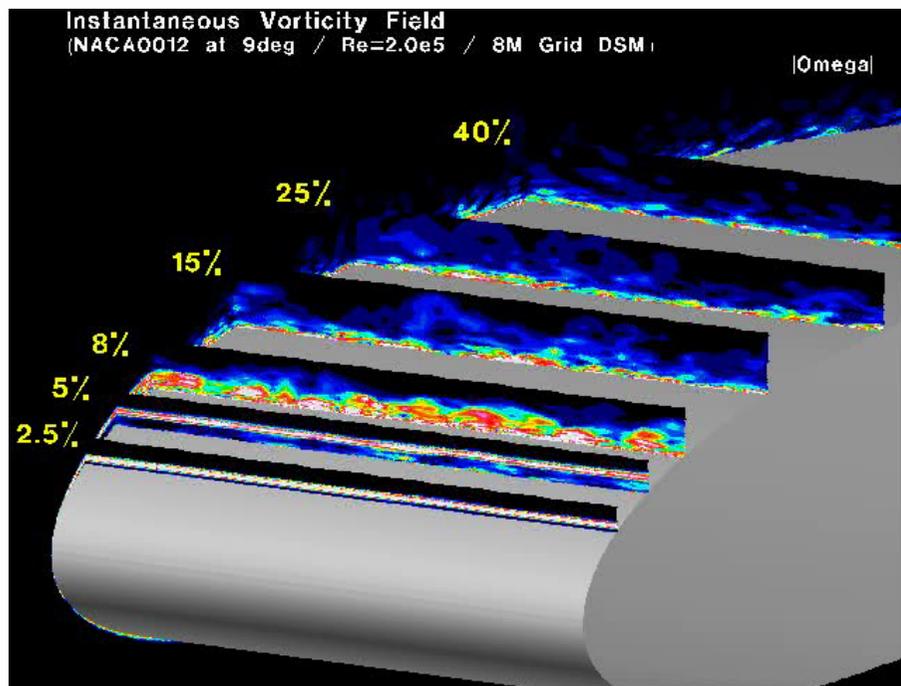
■ 平板境界層のバイパス遷移の予測



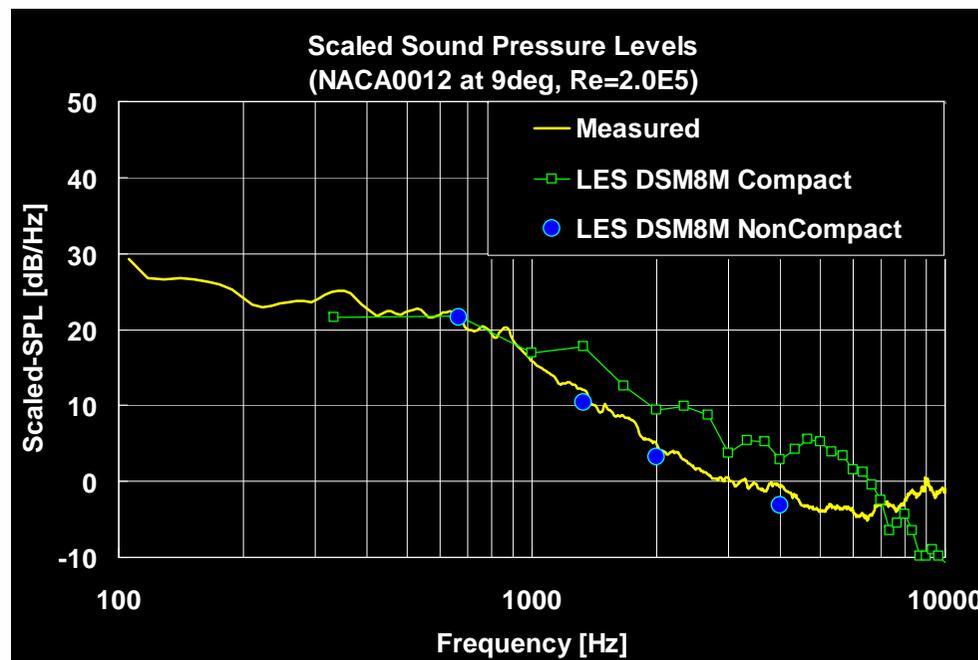
($R_{ex}=1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^5$, 流入乱流強度6%)

乱流騒音の高精度予測

■乱流境界層騒音の定量的予測を実現



翼前縁近傍における渦の変動

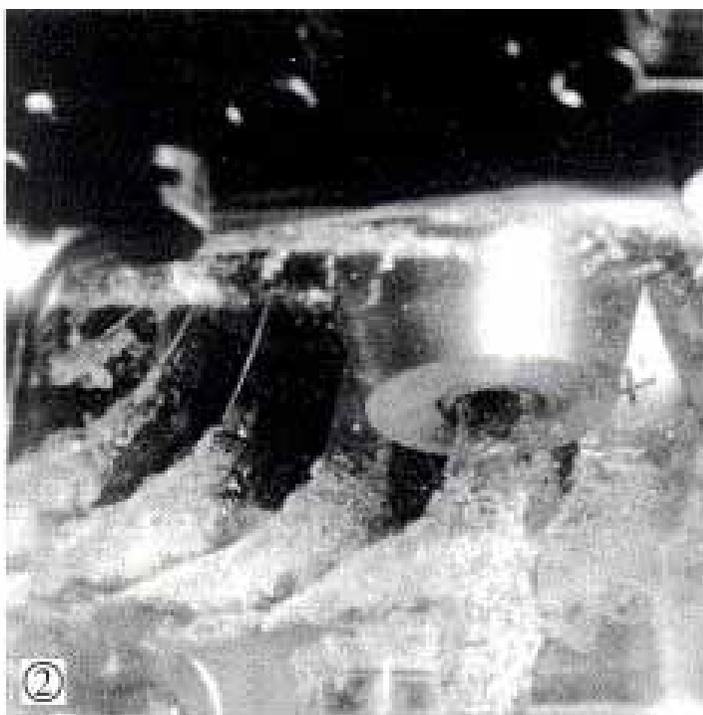


音圧レベルの比較

(NACA0012, 迎角9度, $R_e=2.0 \times 10^5$)

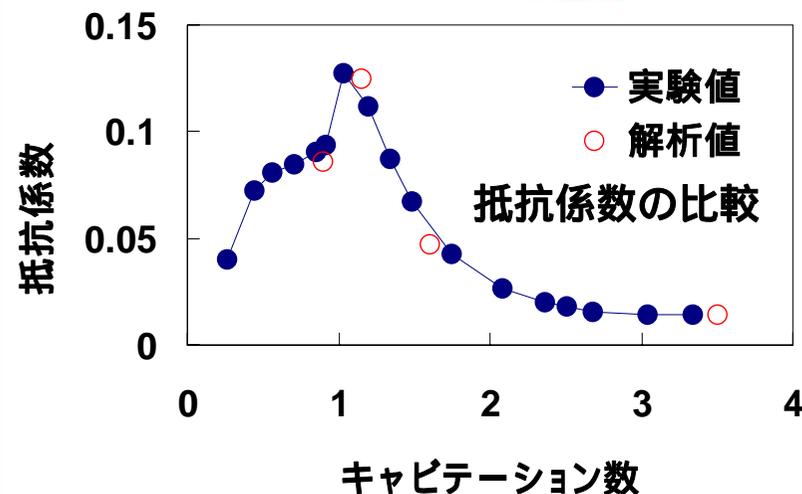
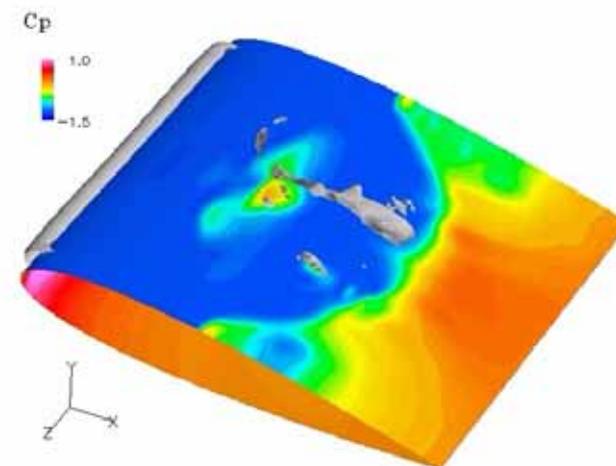
非定常キャビテーション流れ解析

■ターボ機械内部の非定常キャビテーション現象の高精度な予測を実現



ターボ機械内部のキャビテーションの例

Processing, Volume 20, Issue 4, May 2006, Pages 983-1007

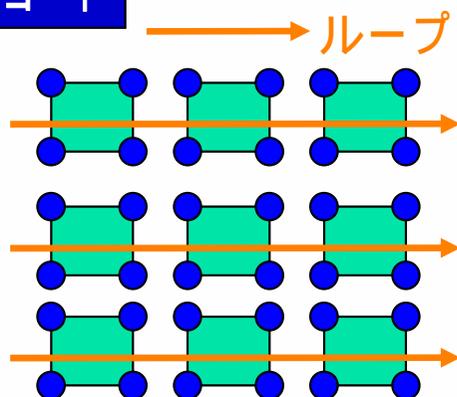


非定常キャビテーション流れの解析例

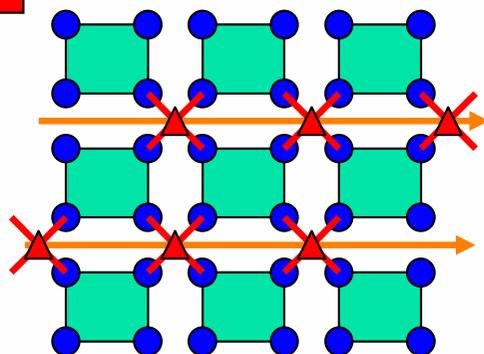
高速・大規模計算の実現 - 1/2

- ロード/ストアアルゴリズムの改良(スカラー機)
- バンク競合の低減(ベクトル機)

オリジナルコード



改良コード



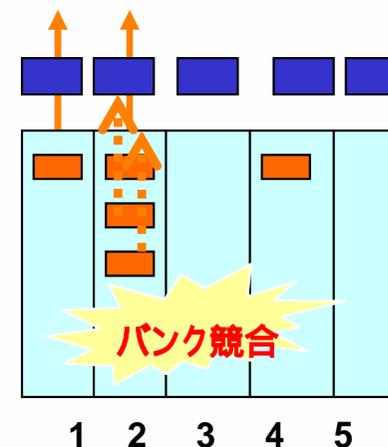
ストア発生回数を半減

オリジナルコード

インターリーブ

メモリー

バンク番号

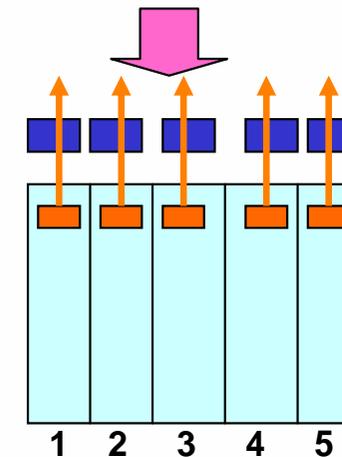


改良コード

インターリーブ

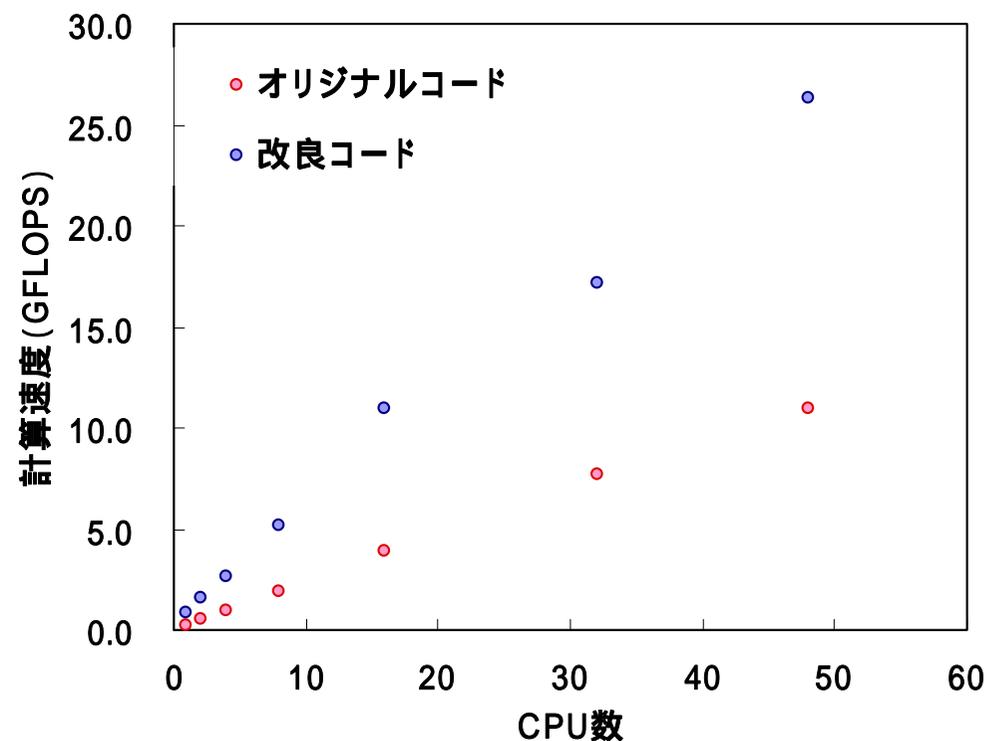
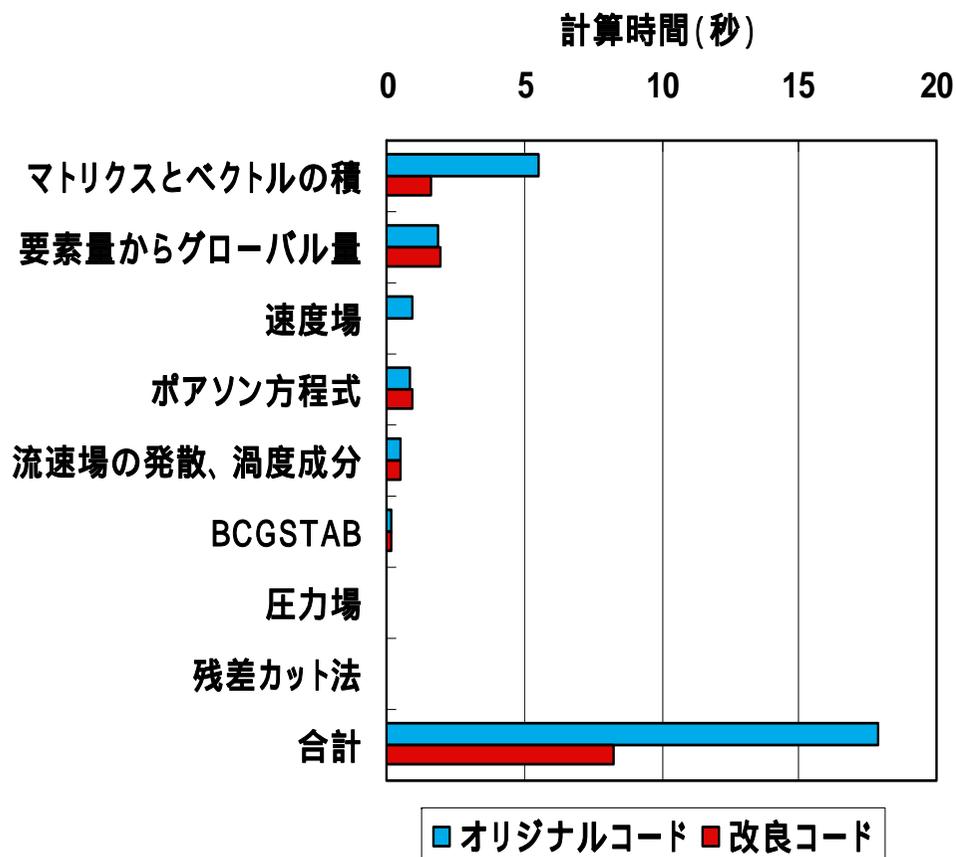
メモリー

バンク番号



配列宣言の最適化によりバンク競合を回避¹²

高速・大規模計算の実現 - 2/2



スカラー機上の計算速度の向上

並列計算性能

PCクラスターで10%の実効性能を実現

地球シミュレータでも2TFLOPSを実現見通し(128ノード, 対ピーク性能比20%)

製品開発への適用事例

乱流境界層騒音

- 新幹線車間部の空力音源解析
- 軸流ファンの空力音響解析
- プロペラファンの空力音響解析

流体・構造振動騒音

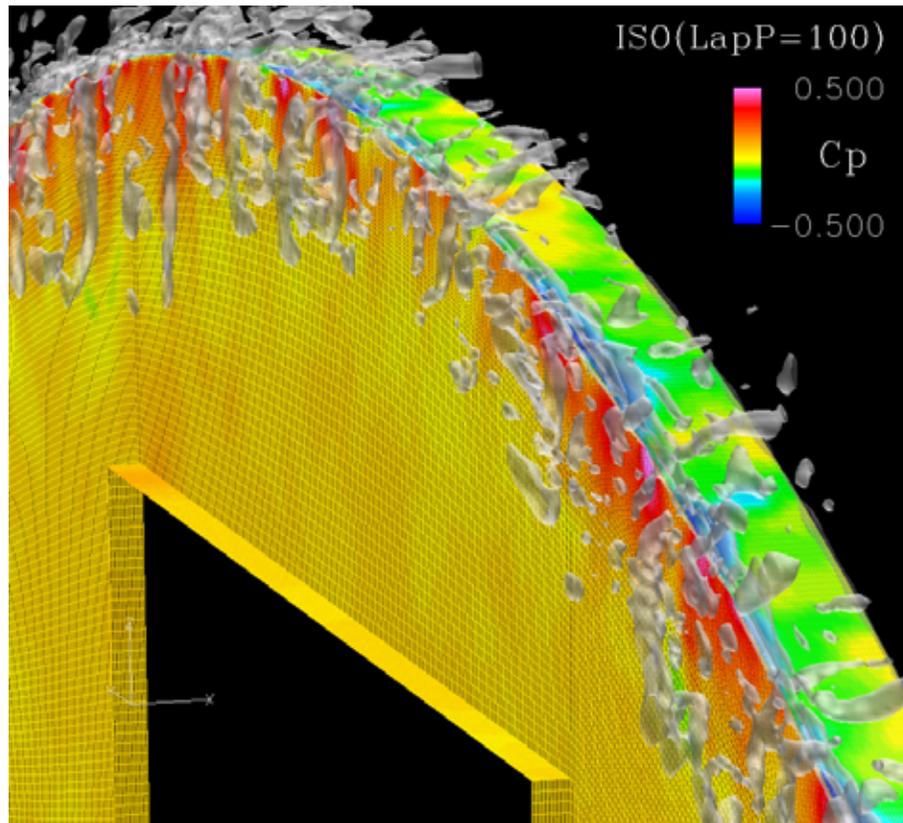
- ポリゴンミラーの流体・振動騒音解析

非定常キャビテーション流れ

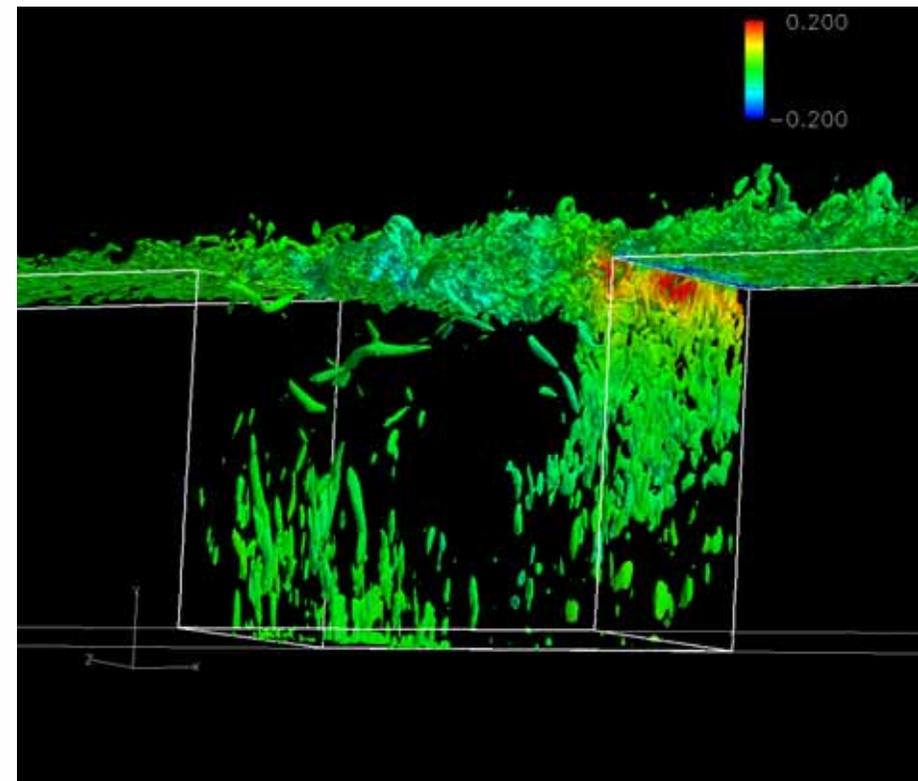
- インデューサポンプのキャビテーション流れ解析
- ドラフトチューブ内部のキャビテーション流れ解析

新幹線車間部の空力音源解析 - 1/2

■ 数値解析による騒音発生メカニズムの解明



車間全体モデル

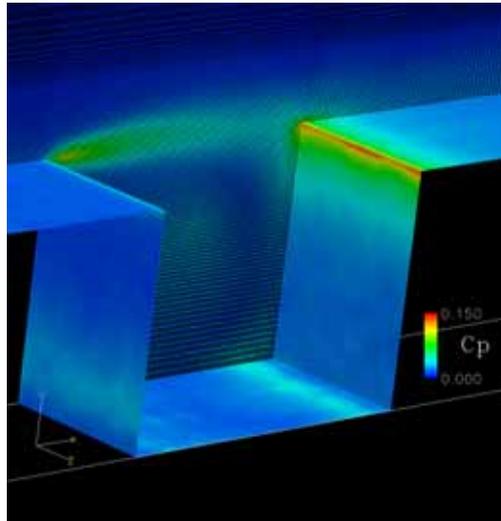


車間要素モデル

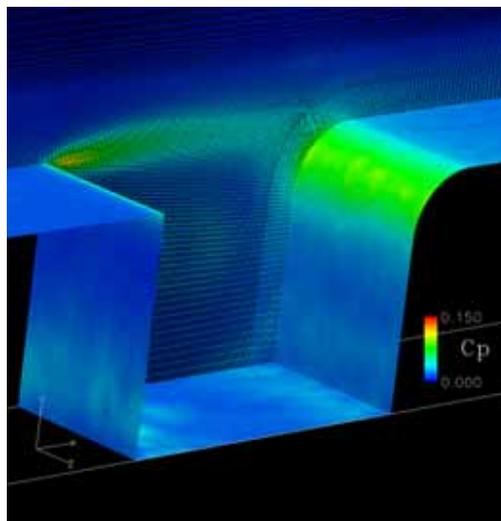
主要音源: 後方エッジへの乱流渦の衝突

新幹線車間部の空力音源解析 - 2/2

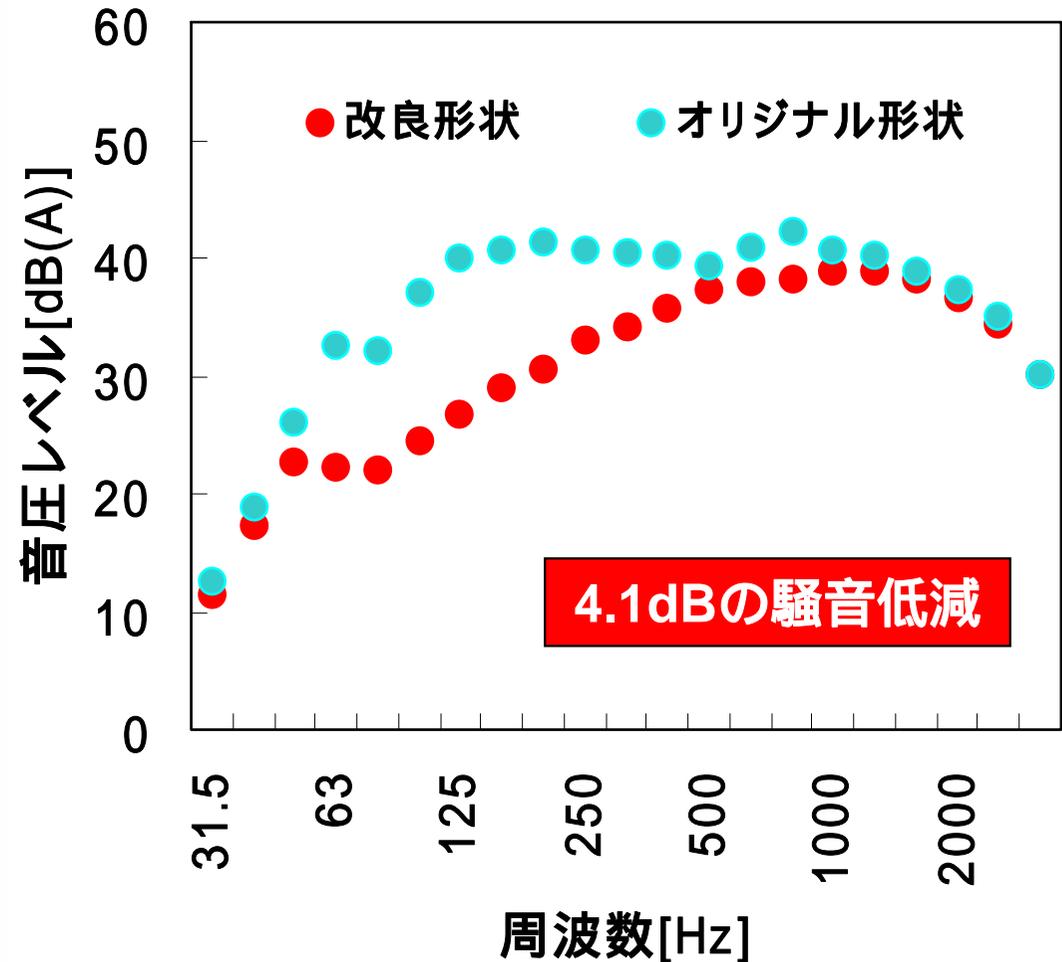
オリジナル形状



改良形状



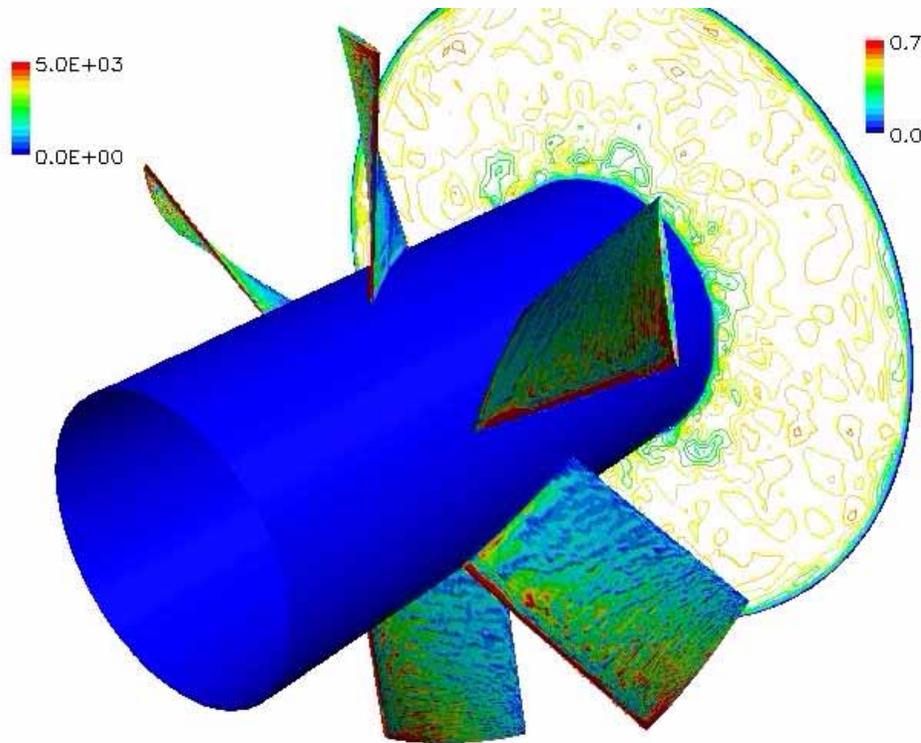
形状改良による音源の低減



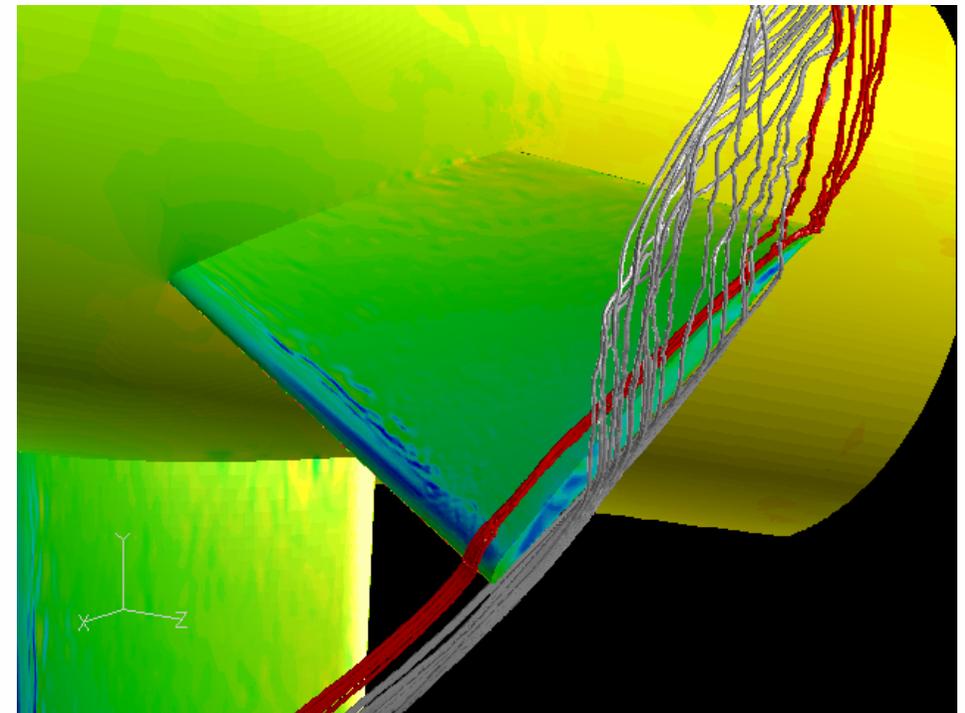
騒音低減効果 (現車換算推定値)

軸流ファンの空力音響解析 - 1/2

■ターボ機械の乱流境界層騒音の予測を実現

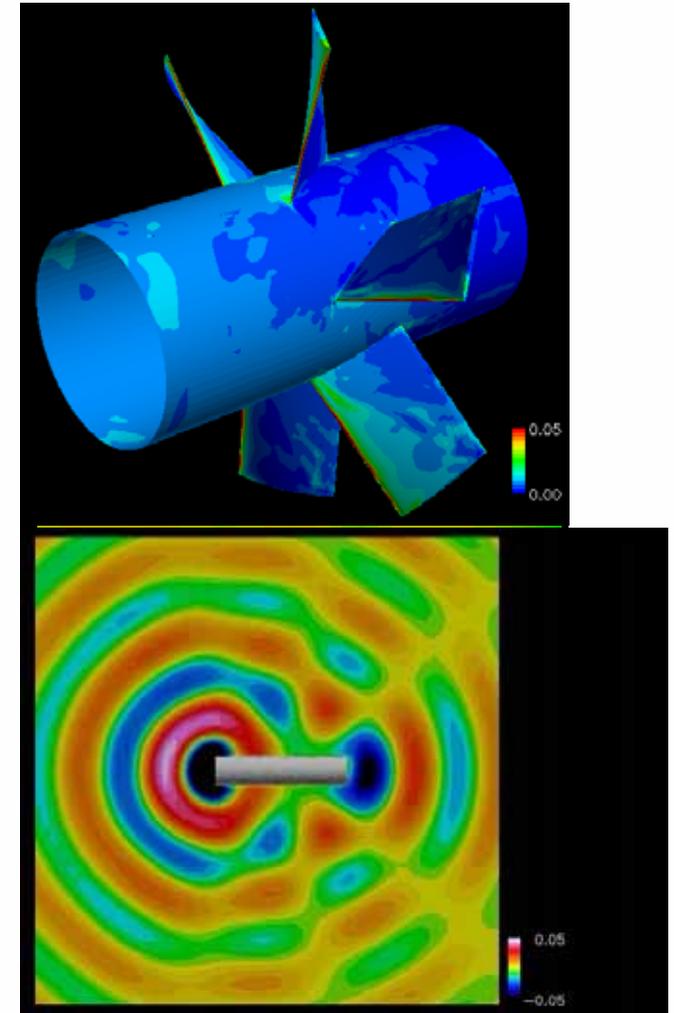
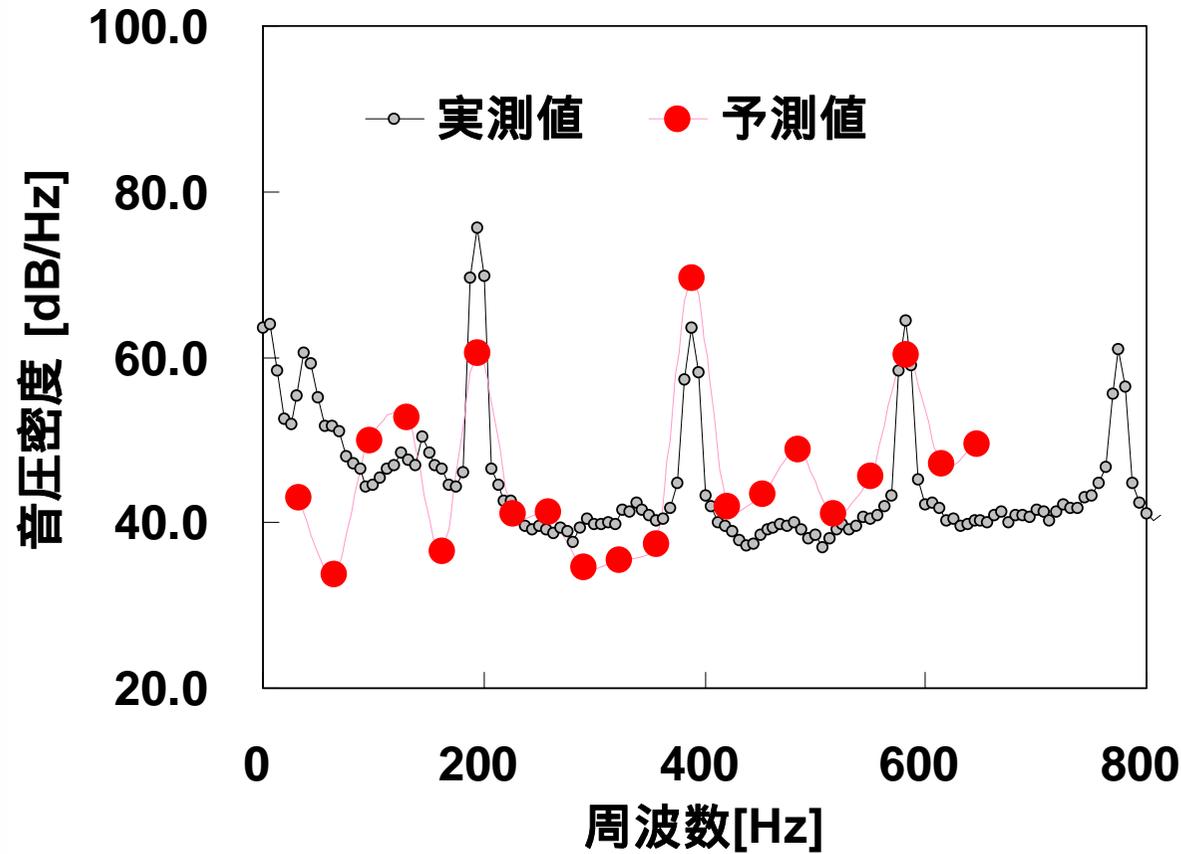


動翼表面の乱流境界層



動翼先端のもれ渦

軸流ファンの空力音響解析 - 2/2



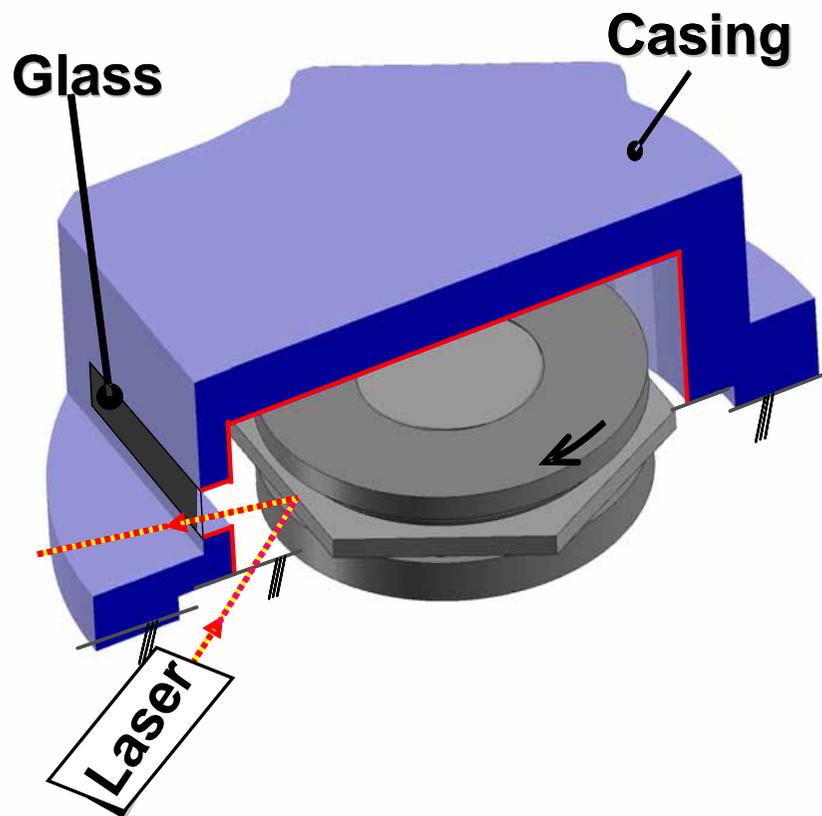
騒音スペクトルの実測値との比較

194Hzの音源と音場

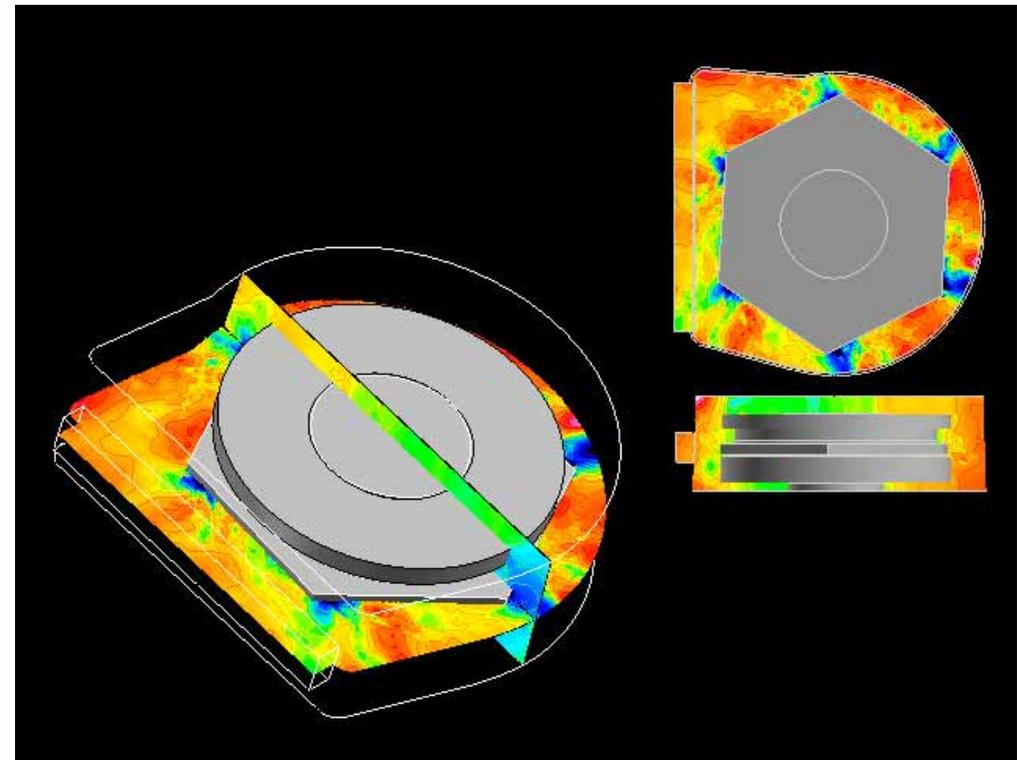
騒音スペクトルの定量的予測を実現・各周波数の音源を解明

ポリゴンミラーの流体・振動騒音解析 – 1/2

- 流体・構造振動・音響解析により騒音発生メカニズムを解明

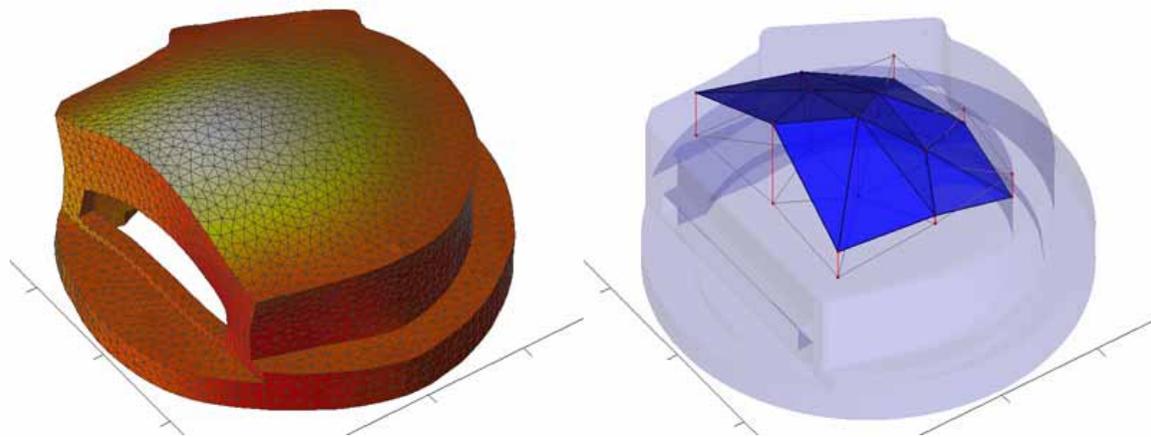


計算モデル



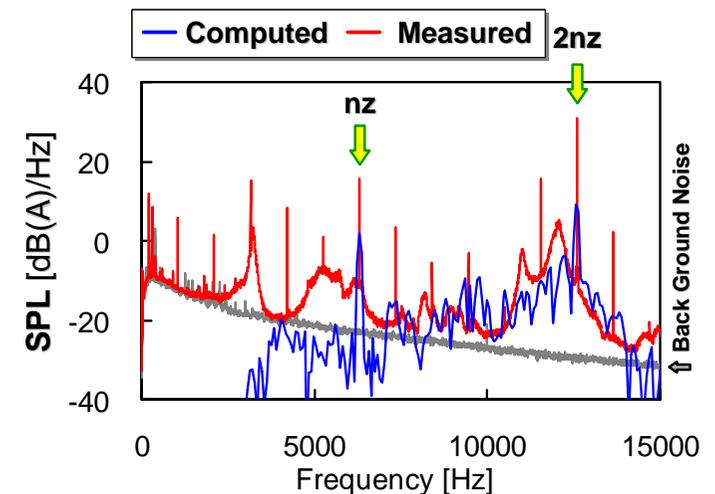
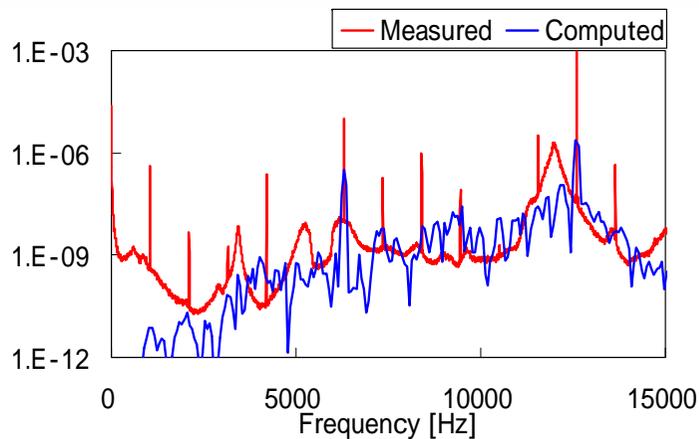
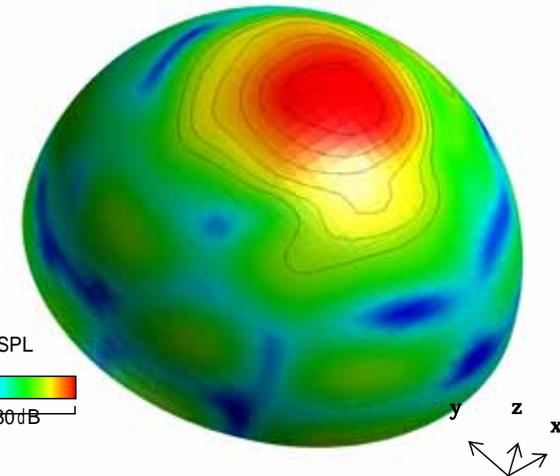
圧力変動の解析結果

ポリゴンミラーの流体・振動騒音解析 – 2/2



計算

実験



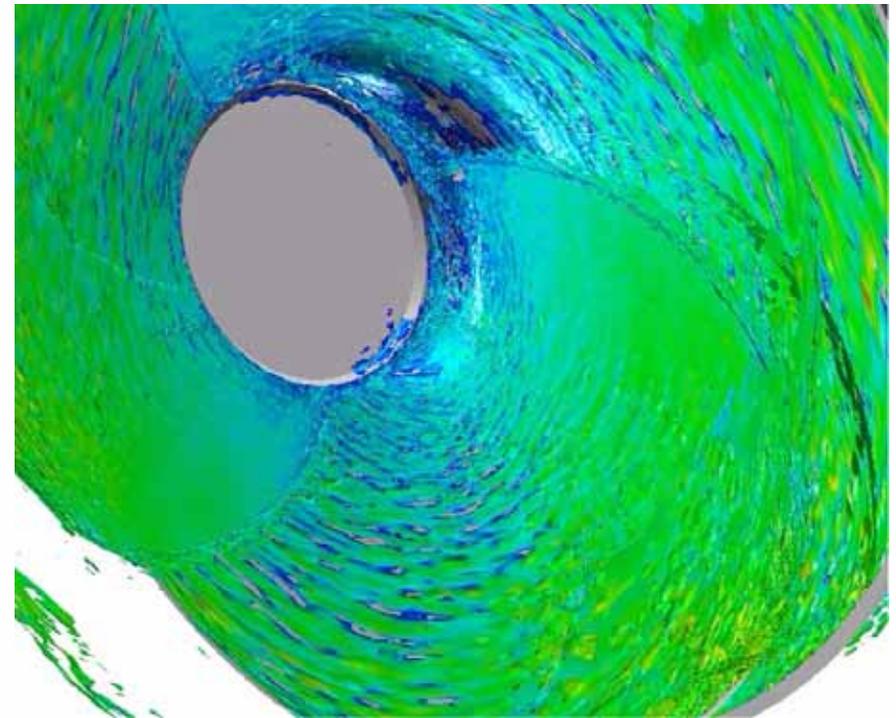
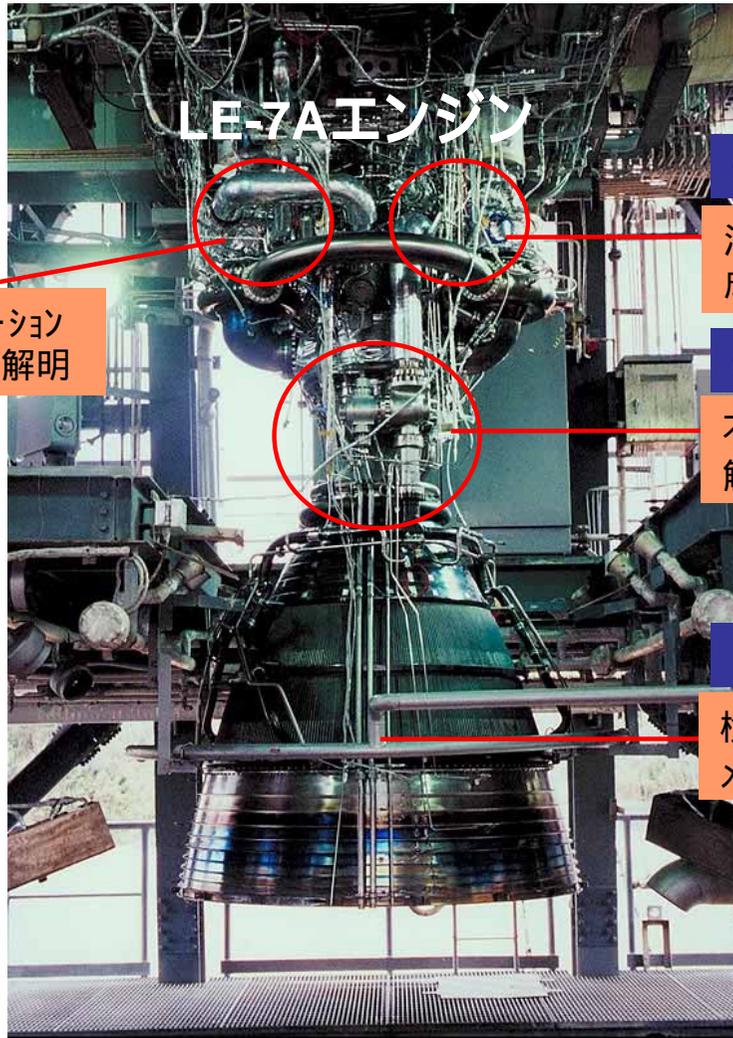
固体部を伝播する弾性波の解析

周辺の音響場の解析

主要音源: ケーシング上面の膜振動 騒音低減形状の特許出願中

インデューサポンプのキャビテーション流れ解 - 1/2

■非定常キャビテーション現象の予測・解明によりロケットエンジンの信頼性向上に貢献

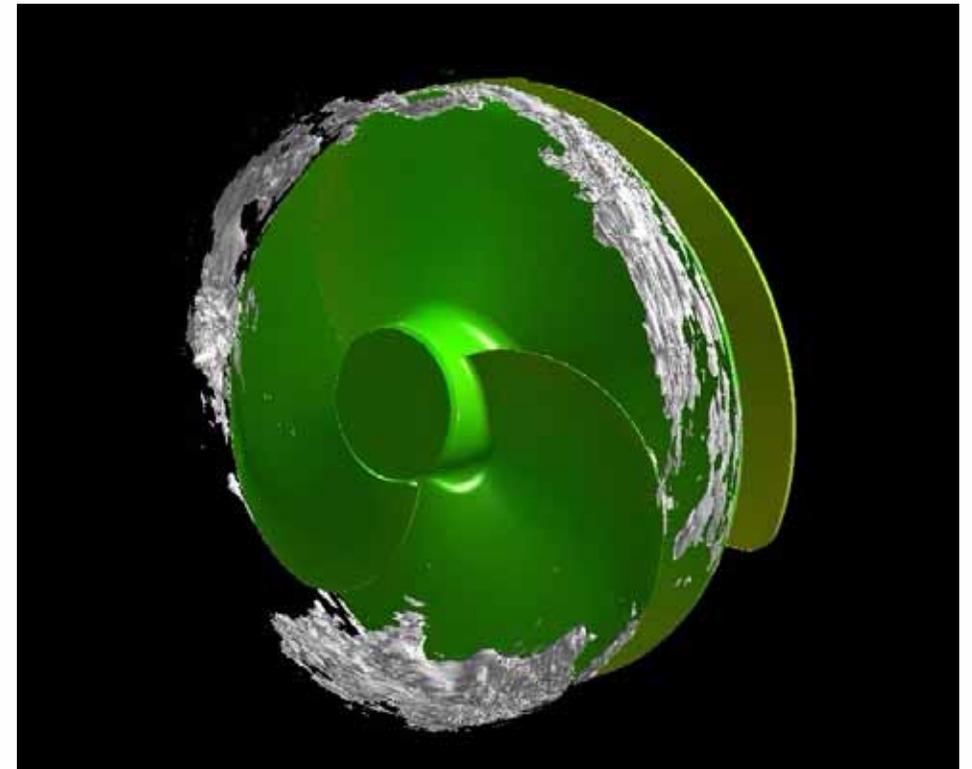
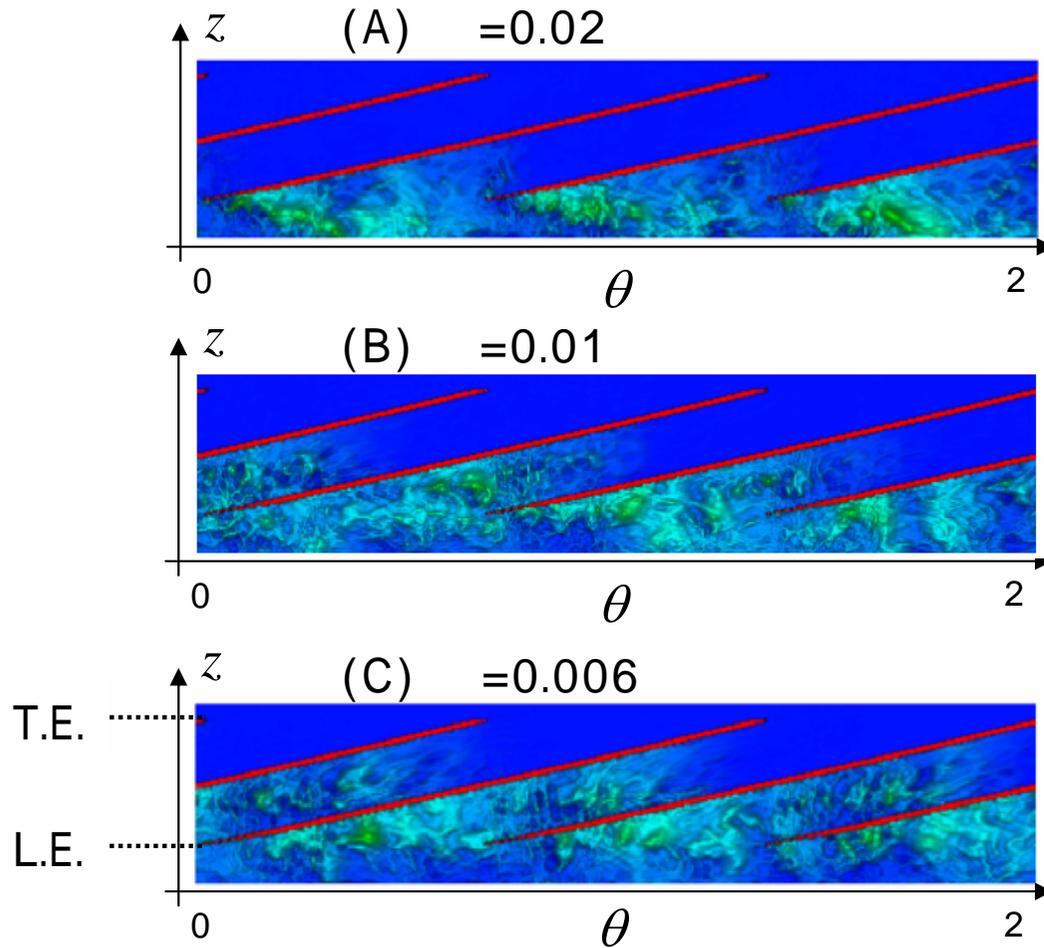


動翼表面の乱流境界層も含めた
キャビテーション解析

ロケットエンジンの開発課題

インデューサポンプのキャビテーション流れ解 - 2/2

■非定常キャビテーション現象の予測・解明によりロケットエンジンの信頼性向上に貢献

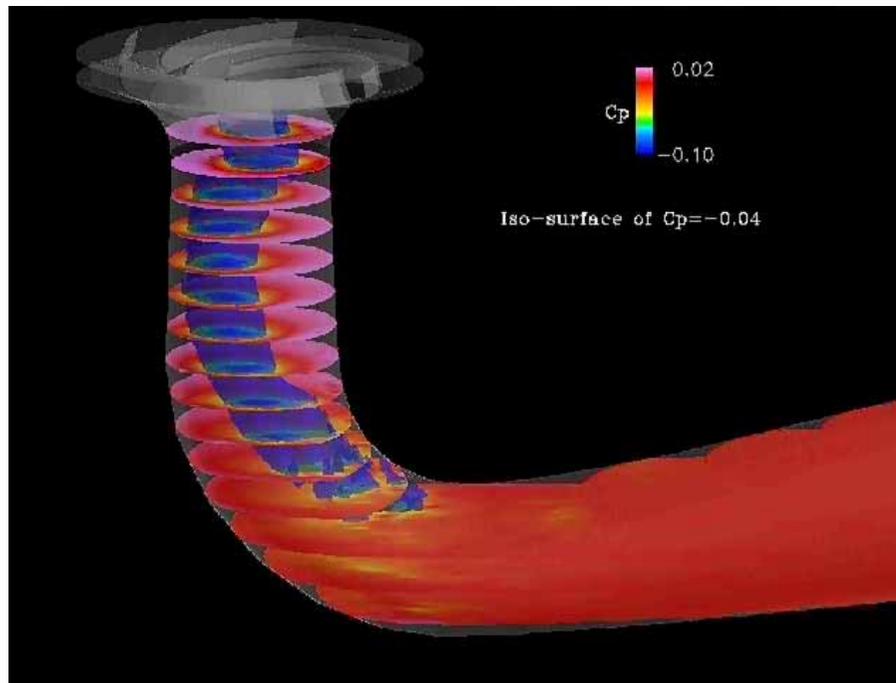


吸込み圧力によるキャビテーションの変化

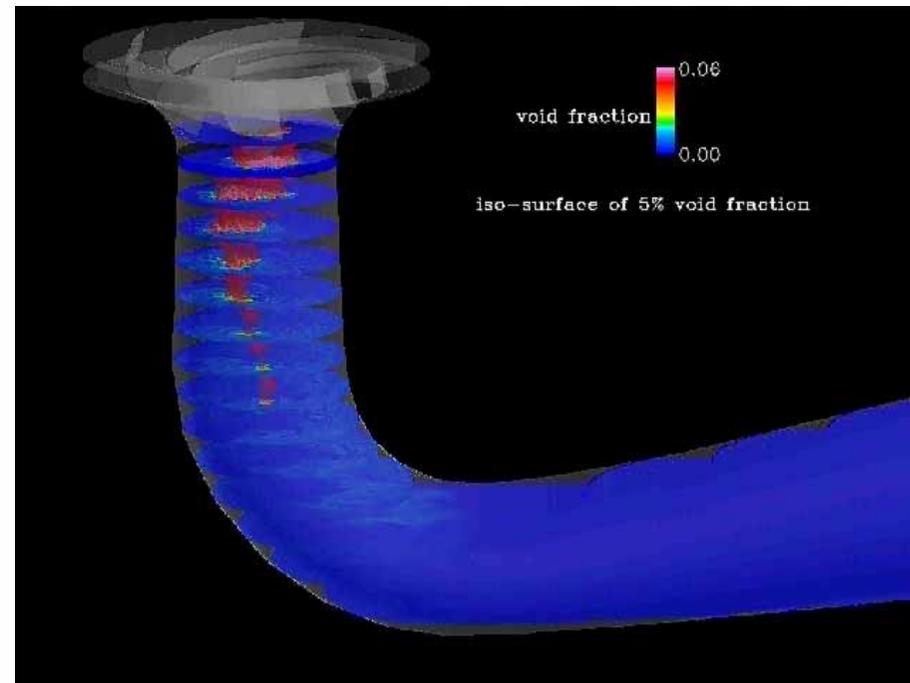
キャビテーションの非定常変動

ドラフトチューブ内部のキャビテーション流れ解析-1/2

- 非定常キャビテーション現象の予測・解明
ドラフトチューブの運転範囲拡大や安全性の向上に貢献



圧力分布



キャビテーション分布

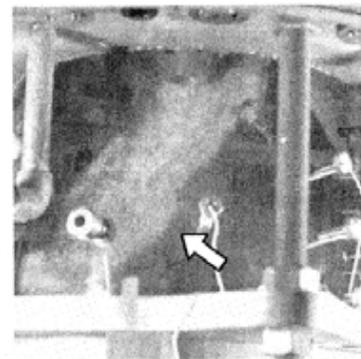
ドラフトチューブ内部のキャビテーション流れ解析-2/2

- 非定常キャビテーション現象の予測・解明
ドラフトチューブの運転範囲拡大や安全性の向上に貢献

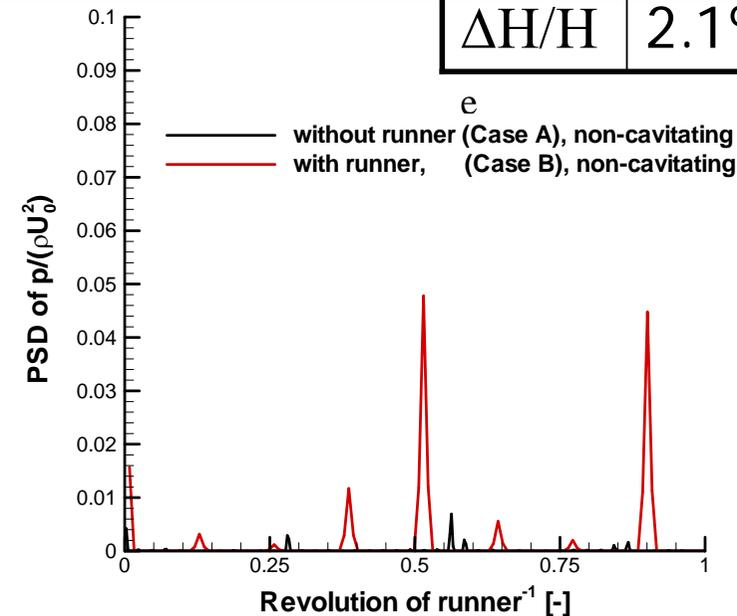
	Exp.	LES
f/f_n	0.48	0.52
$\Delta H/H$	2.1%	1.9%



計算



実験

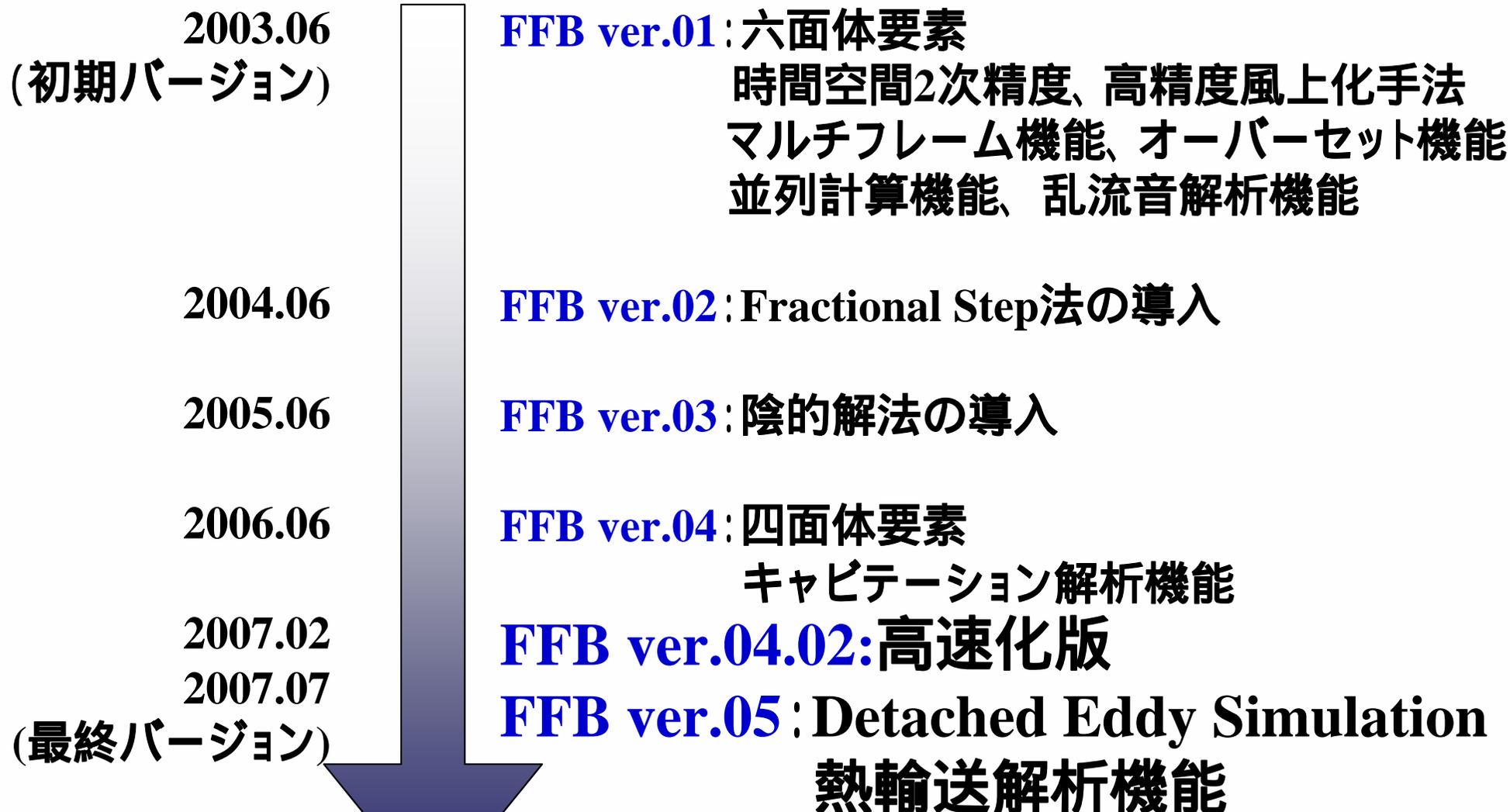


圧力変動スペクトル

キャビテーションの可視化結果

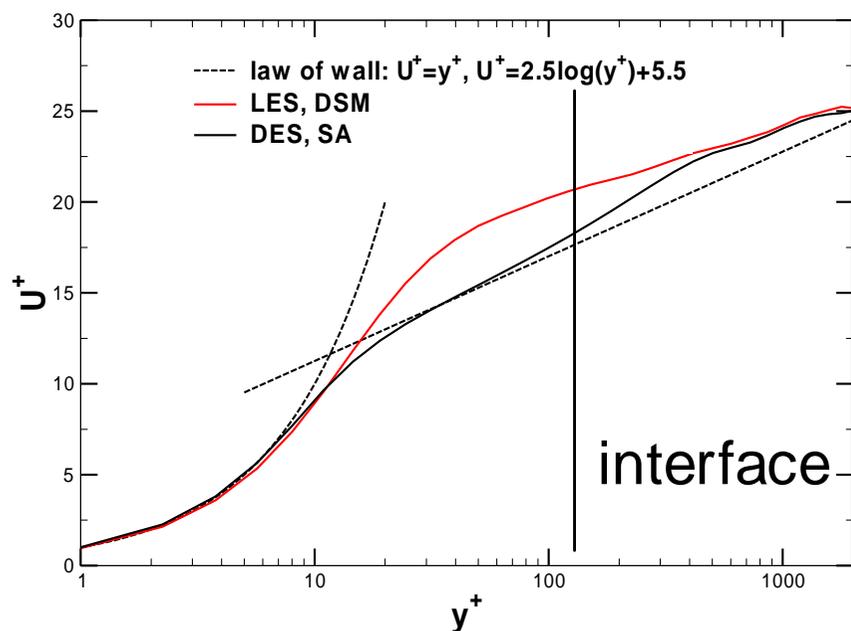
今後の予定

開発スケジュール

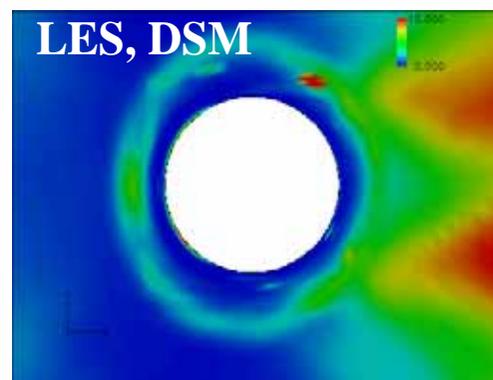


Detached Eddy Simulation

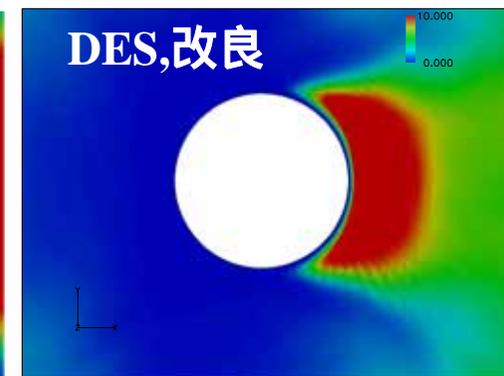
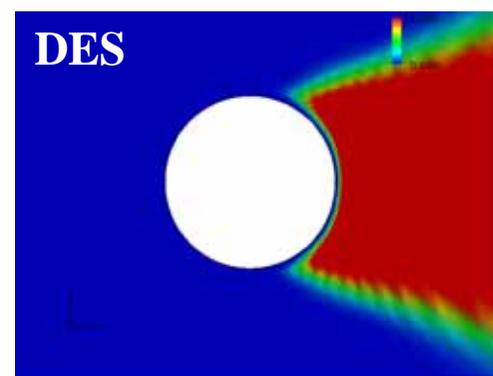
- RANS/LESのハイブリッドに基づく乱流解析手法
- 実装・基礎検証が終了し、現在実用問題での検証中



主流方向平均速度分布の比較



渦粘性係数の比較

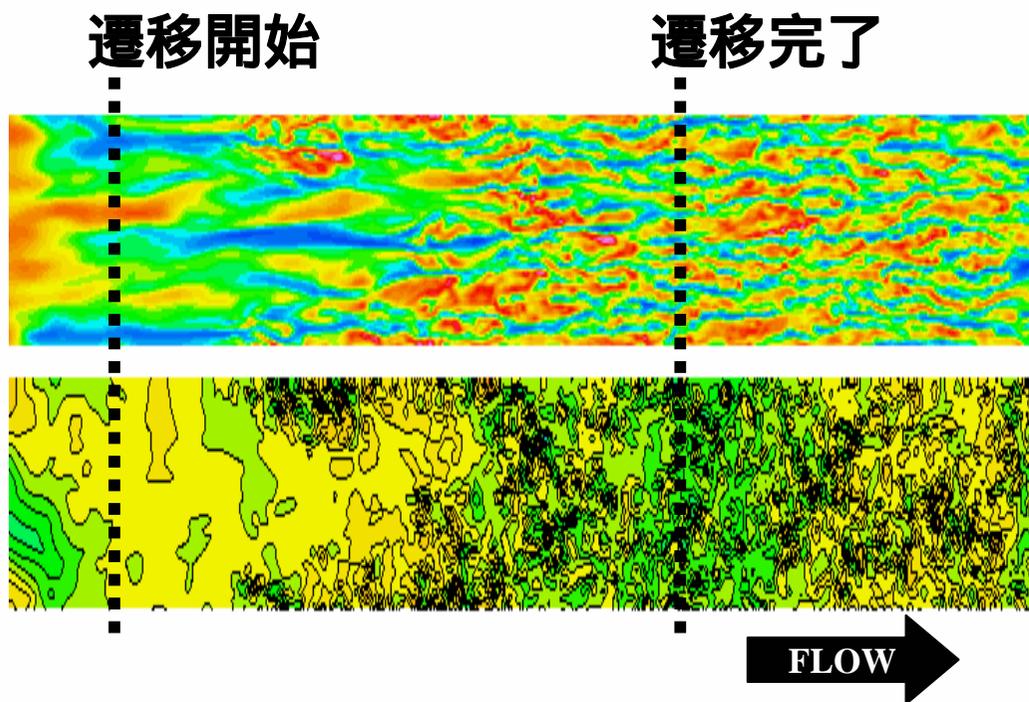


チャンネル内乱流($R_e = 2000$)への適用例
(グリッド数 64^3)

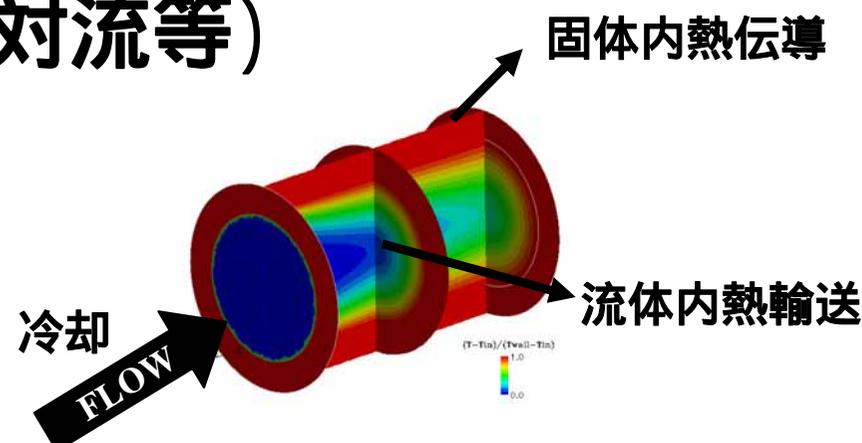
円柱周り流れ($R_e = 10^4$)への適用例
オリジナルモデル(SA)の改良を検討

熱輸送解析機能

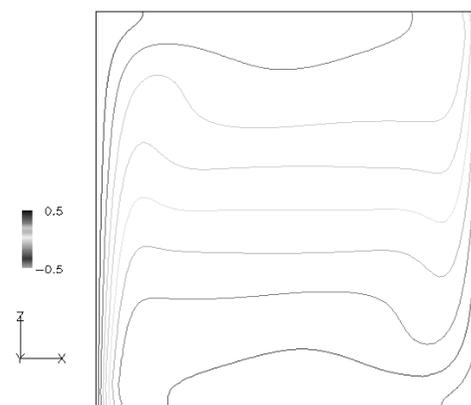
- 乱流境界層を解像した熱伝達係数の直接的予測
- 多機能性 (固体熱伝導、自由対流等)



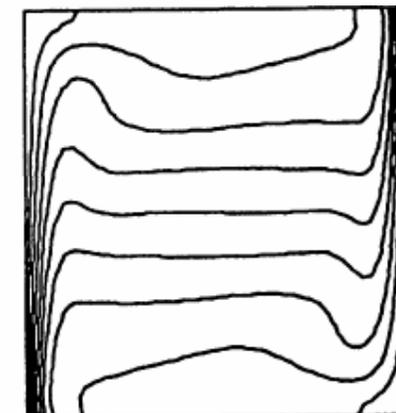
平板乱流遷移の解析例
($R_{ex}=1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^5$, 流入乱流強度6%)
今後、熱輸送解析も実施する。



固体・流体熱輸送解析例 (円管内の温度分布)



FFB



Davis(1983)

自由対流解析例
($R_a=10^6$ のサーマルキャビティ - 流れ)

開発メンバー

ソルバー・周辺ソフトウェアの開発

加藤千幸	東京大学生産技術研究所
山出吉伸	みずほ情報総研(株)
郭陽	東京大学生産技術研究所
西村香純	アドバンスソフト(株)

ソルバーの高速化

高度情報科学技術研究機構