

「富岳」を利用した 革新的流体性能予測技術の研究開発

課題代表者 加藤千幸 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター 教授

概要

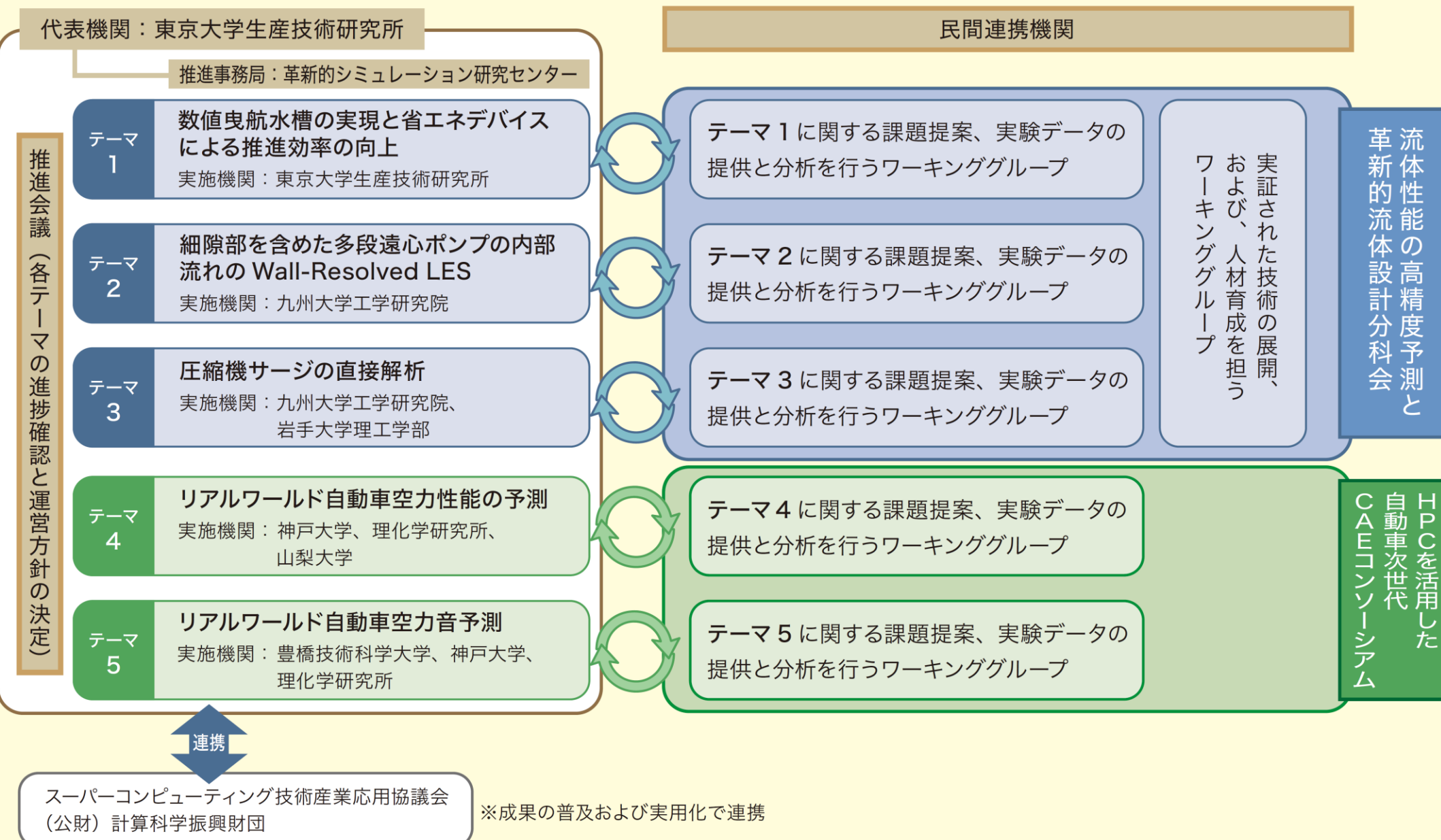
エネルギー産業の心臓部となる「ターボ機械」と輸送産業の中核となる「自動車」を対象とした、下に示す5つの実証研究テーマに対して、ポスト「京」重点課題⑧で開発した、「富岳」あるいは「富岳」の時代におけるHPCの高い計算性能を十二分に引き出すことができるアプリケーション・ソフトウェアを駆使することによって、ものづくりの在り方を抜本的に変革できることを証明することを目的とした研究開発を実施しています。

本課題はターボ機械、および自動車産業を主たる出口として、富岳を利用した大規模流体シミュレーションの産業上の効果を実証することを目的として実施するものであるため、一般社団法人ターボ機械協会、および、国立研究開発法人理化学研究所内に設置された、「流体性能の高精度予測と革新的流体設計分科会」、および「HPCを活用した自動車次世代CAEコンソーシアム」と強ちに連携をして実施しています(右図参照)。

なお、このプロジェクトで利用する、主なアプリケーションは、2019年度まで実施のポスト「京」重点課題⑧の成果であり、「富岳」における実効性能は確認済みです。

実施体制

個別課題「富岳を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発」



実施機関：東京大学、神戸大学、九州大学、岩手大学、豊橋技術科学大学、山梨大学、理化学研究所

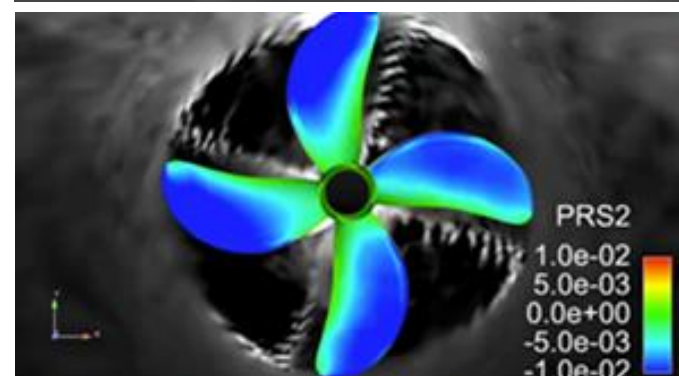
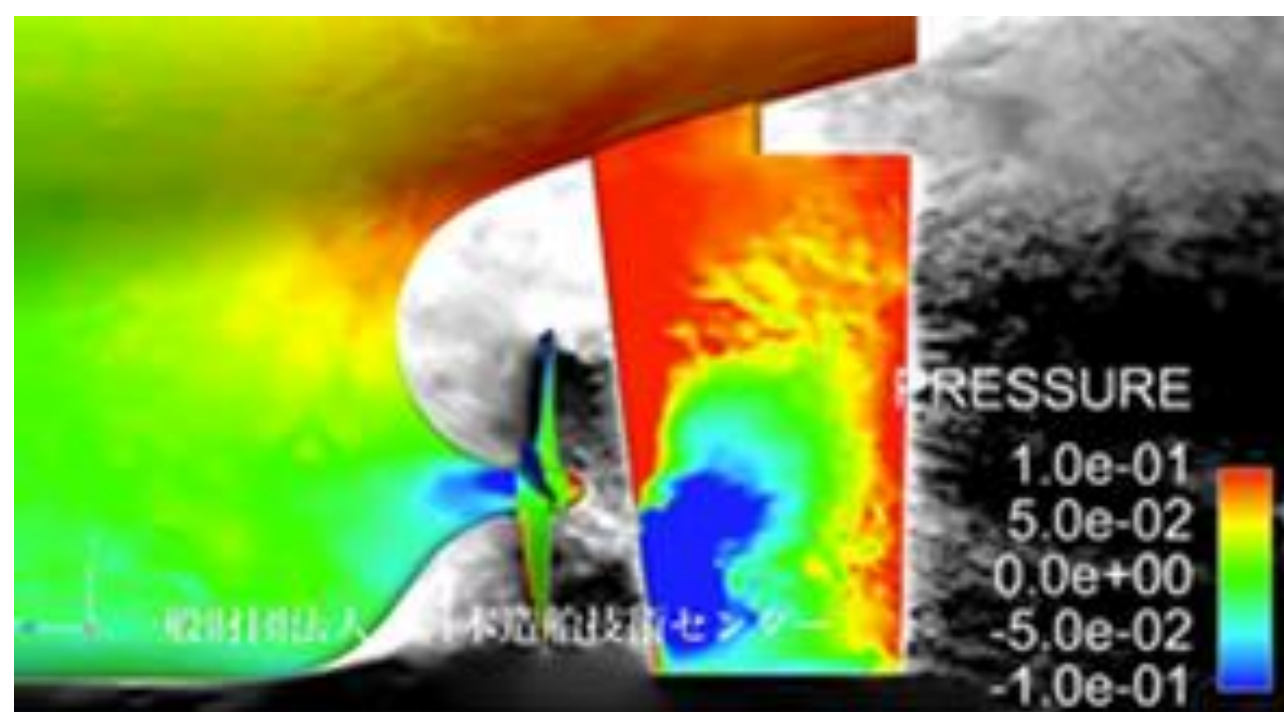
実施内容

実証研究 テーマ①

数値曳航水槽の実現と省エネデバイスによる推進効率の向上

実施機関：東京大学生産技術研究所

最大1,200億要素のWall-Resolved LES解析計算によって、船のまわりの乱流境界層を完全に解像する予測を実現し、曳航水槽試験を完全に数値シミュレーションに代替し得ることを実証するとともに、さらなる高効率な省エネデバイスの開発に貢献します。



自航試験の結果
(提供：一般財団法人日本造船技術センター)

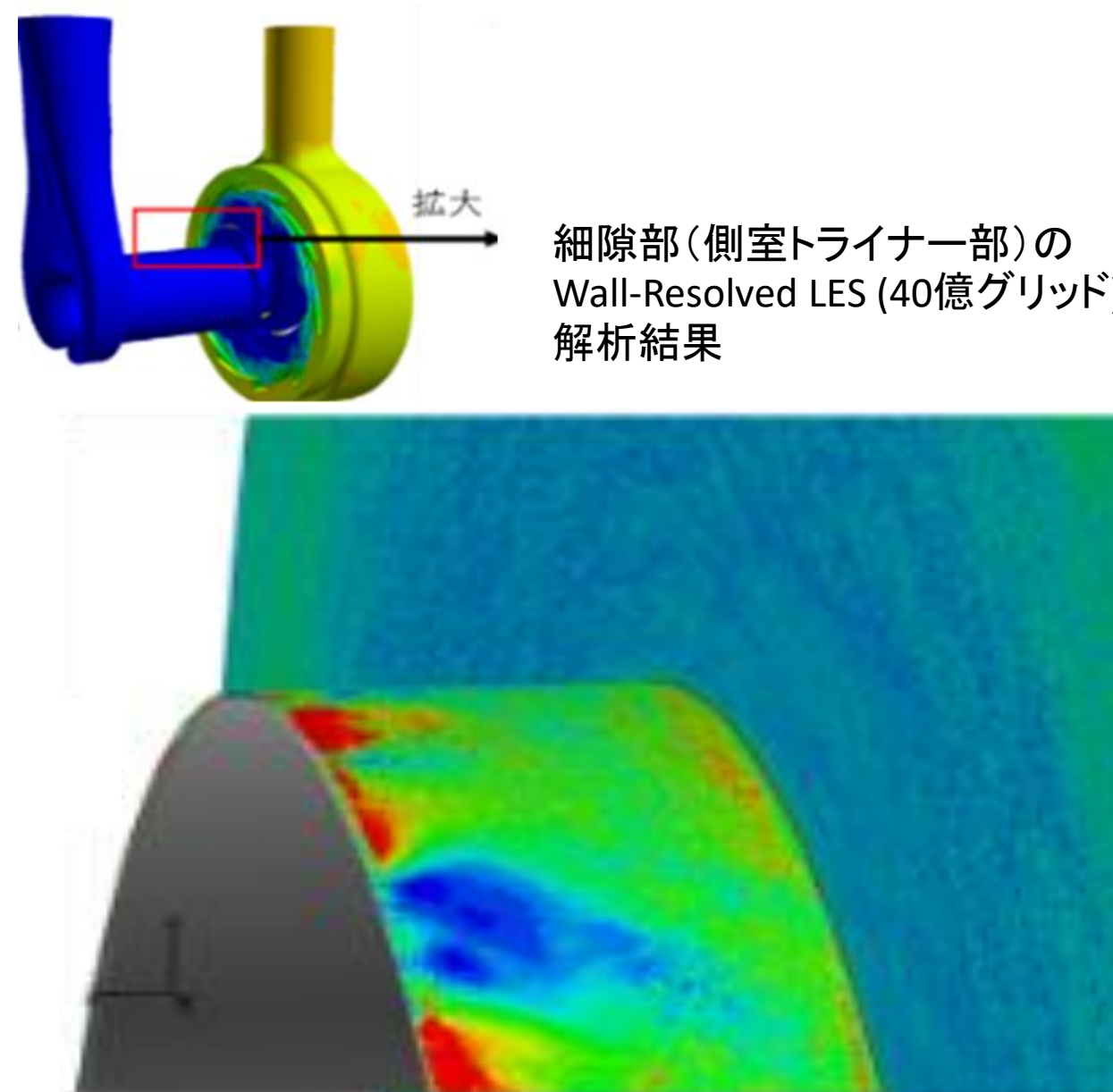
【利用アプリケーション】FrontFlow/blue (FFB)

実証研究 テーマ②

細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れのWall-Resolved LES

実施機関：九州大学工学研究院

30～100 μmの最小渦スケールまで計算格子により直接解析する、Wall-Resolved LES解析計算を実施し、内部流れやその結果として決まる水力性能の完全な予測を実現し、ポンプ設計の高度化に貢献します。



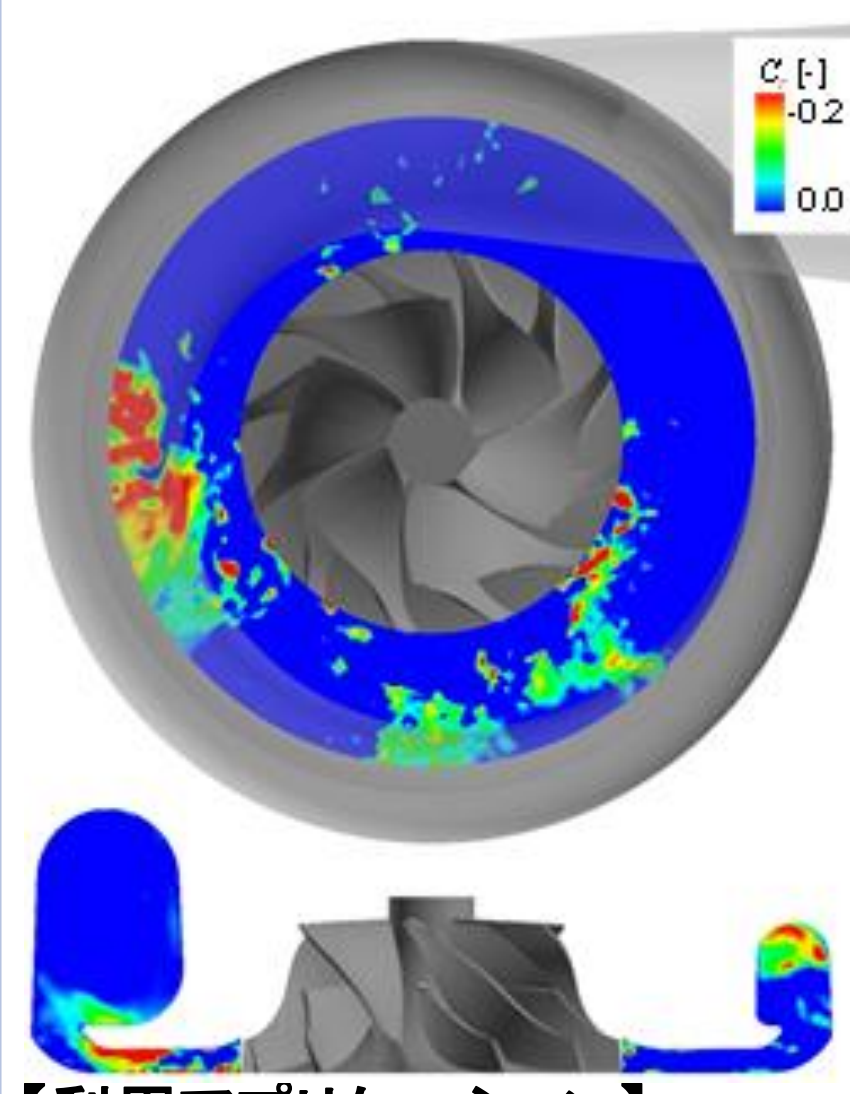
【利用アプリケーション】FrontFlow/blue (FFB)

実証研究 テーマ③

圧縮機サージの直接解析

実施機関：九州大学工学研究院
岩手大学理工学部

プラント、およびガスタービンなどの実機に用いられる遷音速圧縮機を対象として、システム全体にわたる長周期の流体振動現象を捉え得るほど膨大な時間ステップ数にわたって非定常三次元流動解析を実施し、それにより圧縮機サージの予測技術を確立します。



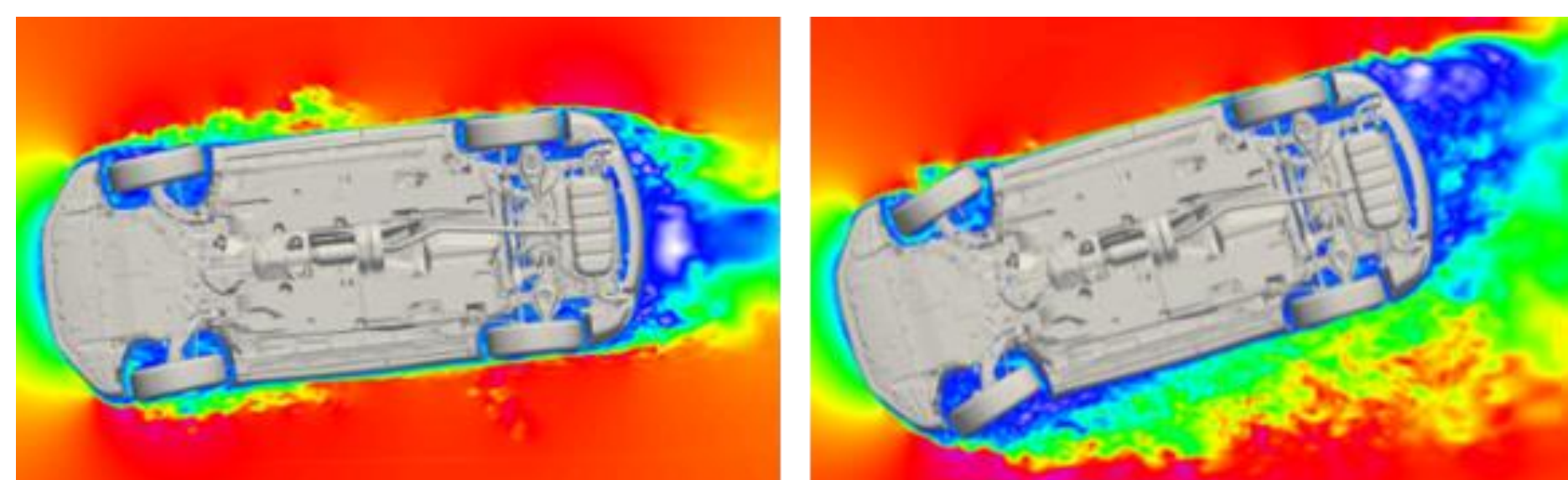
【利用アプリケーション】ターボ機械用圧縮性DES流れ解析ソフトウェア

実証研究 テーマ④

リアルワールド自動車空力性能の予測

実施機関：神戸大学、理化学研究所、山梨大学

実走行状態の自動車の空力性能(空気抵抗、操安性、横風安全性等)の、車体形状再現性を数ミリまで高めた高解像度・長時間シミュレーションによる評価を実現します。



コーナリング時のリアルワールド空力・運動連成シミュレーション

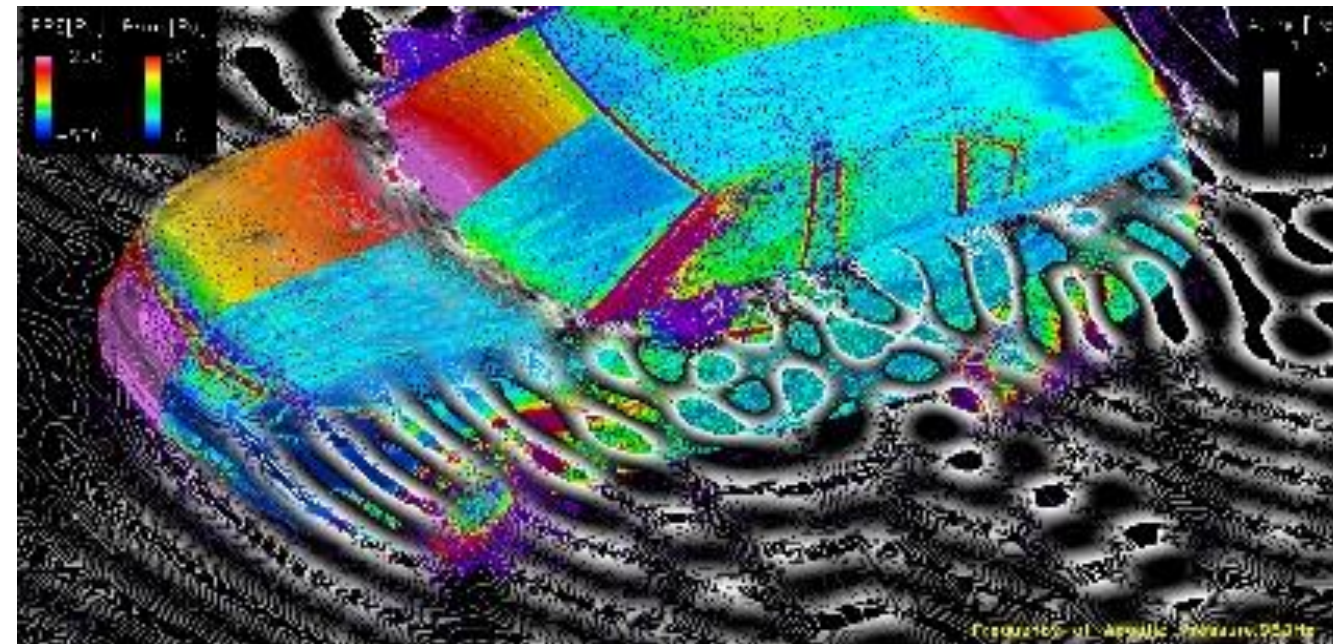
【利用アプリケーション】CUBE

実証研究 テーマ⑤

リアルワールド自動車空力音予測

実施機関：豊橋技術科学大学、神戸大学、理化学研究所

ボンネット隙間やフロントグリルから発生する狭帯域音、ピラーやドアミラーから発生する広帯域音、空力・構造振動・音響連成による車内騒音を対象に、実走行時の空力音予測を行います。



分離解法によるドアミラー周りの広帯域騒音解析結果(音場)
(飯田、宮澤他、2018年数値流体力学シンポジウム)

【利用アプリケーション】CUBE、FFX

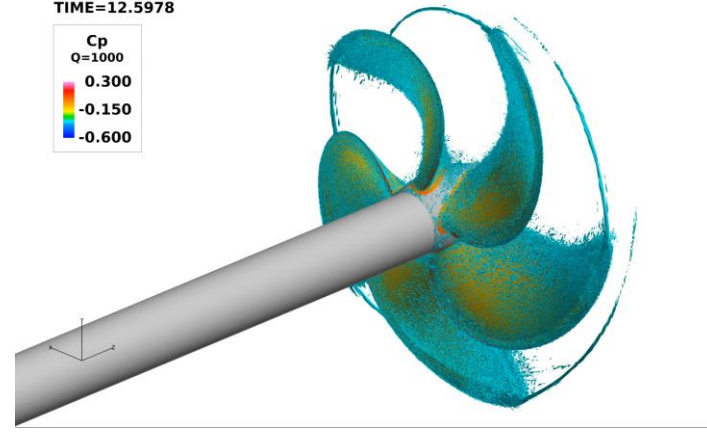
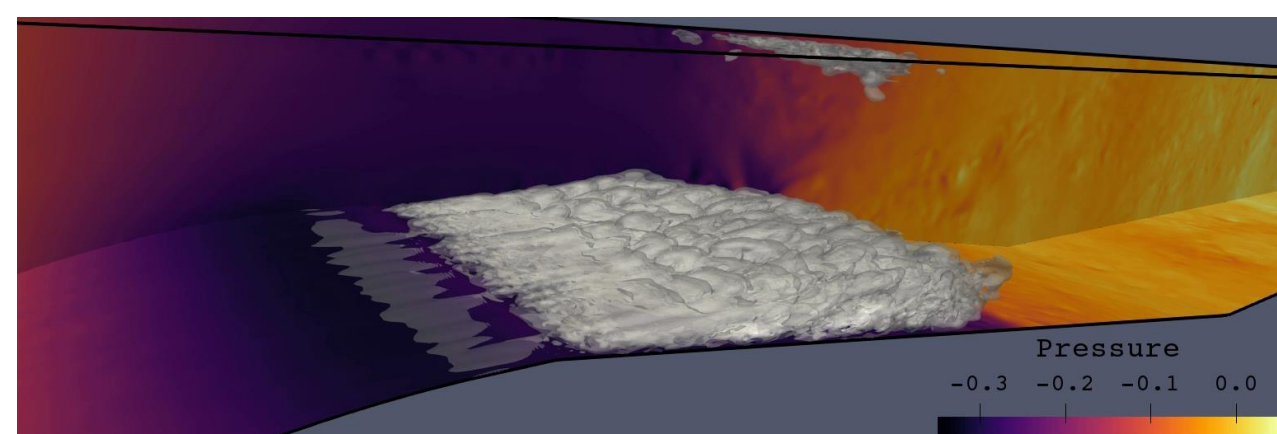
アプリケーション開発状況

FrontFlow/blue (FFB)

成果の詳細は以下を参照ください

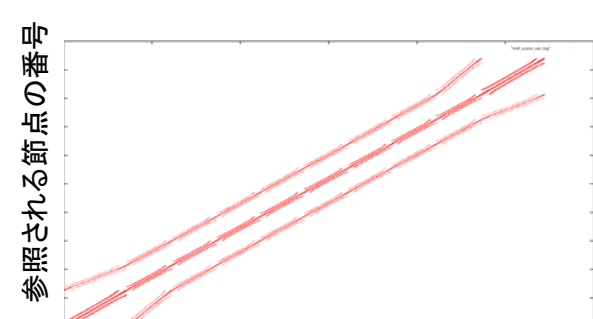
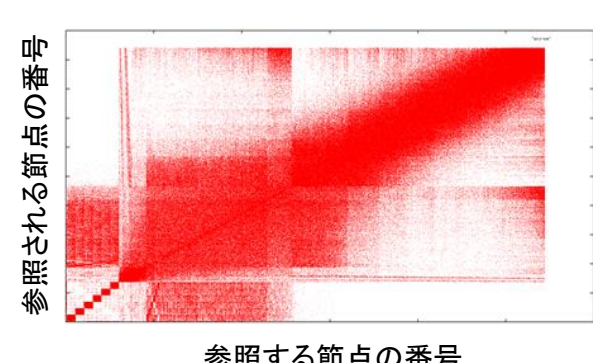
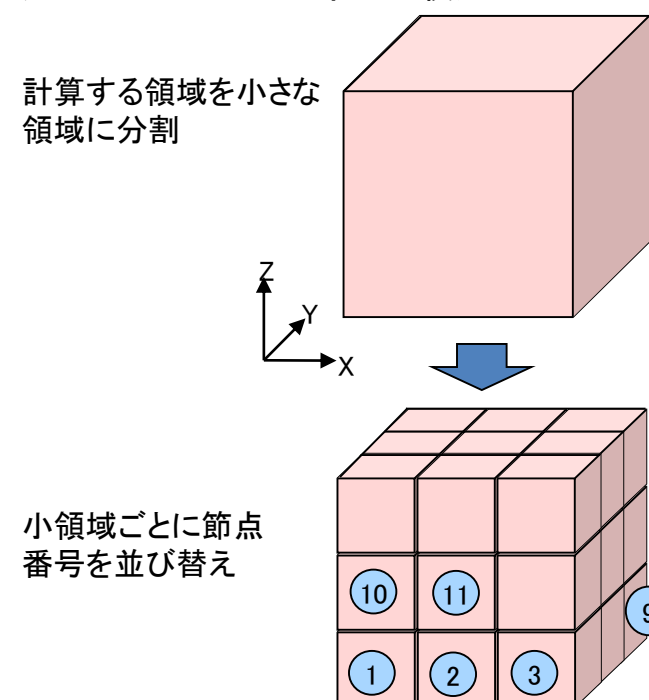
"Toward Realization of Numerical Towing-Tank Tests by Wall-Resolved Large Eddy Simulation based on 32 billion grid Finite-Element Computation", C. Kato, et al., Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, November 2020, Article No. 3

- 乱流の微細な渦まで計算する有限要素法ソフトウェア
- 大規模な流体シミュレーションを実現するための計算格子の自動分割機能を具備

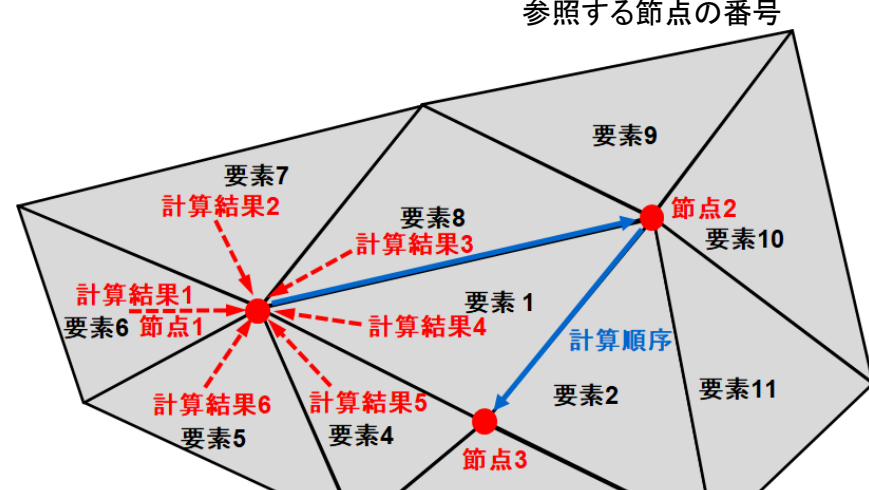
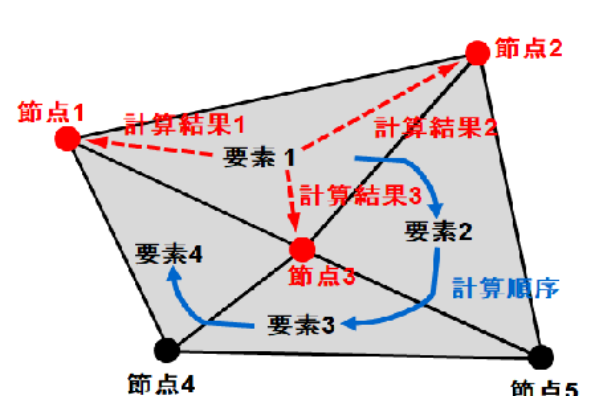


FFBのメモリー転送速度を向上させるための工夫

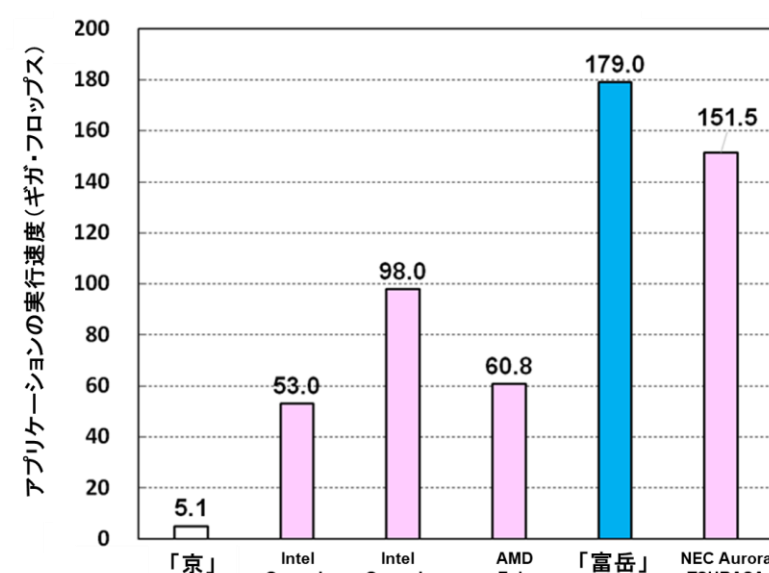
- ・メモリー内のデータ配置の最適化



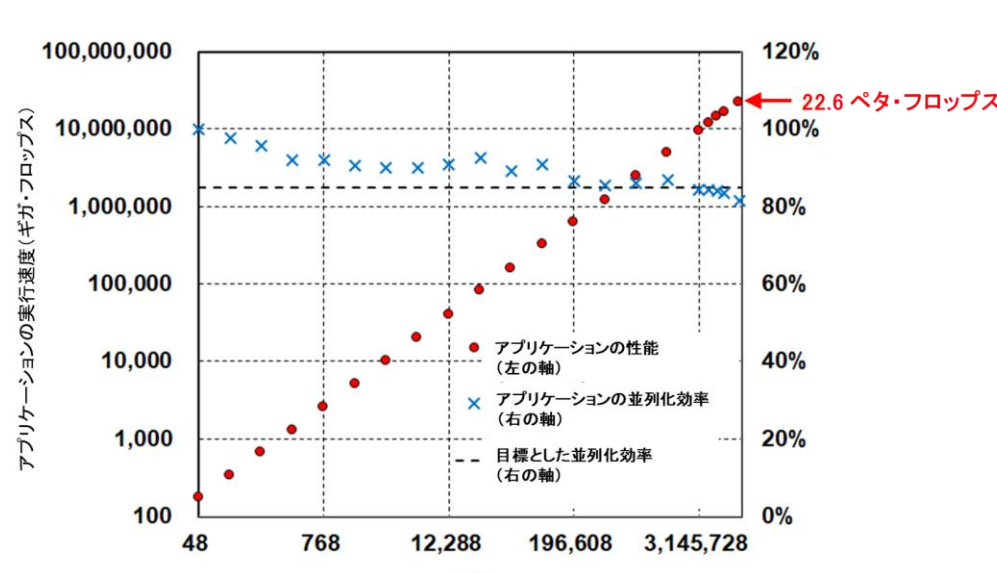
- ・有限要素法の新しい計算方法を考案



さまざまなCPU上での計算速度



「富岳」の全系を用いた計算速度



「富岳」を用いて、22.6 ペタ・フロップスという、実際のアプリケーションとしては驚異的な計算速度を実現

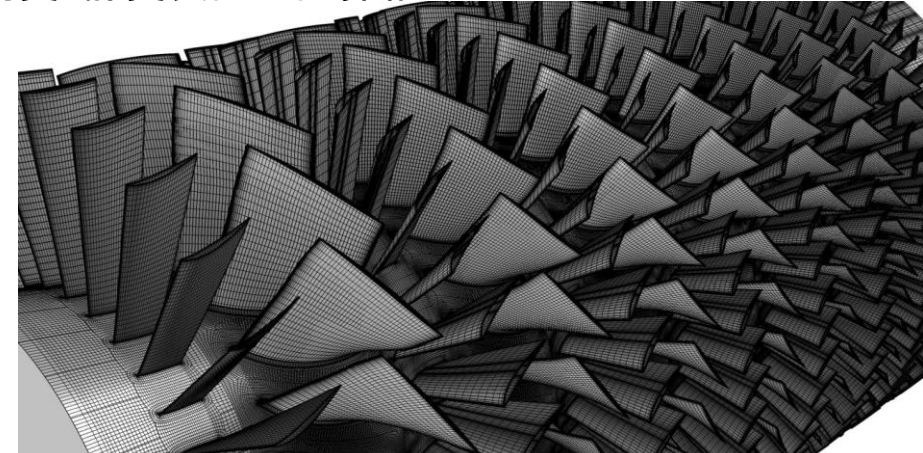
ターボ機械用圧縮性 DES流れ解析ソフトウェア

「これまでに得られた成果概要」も参照ください

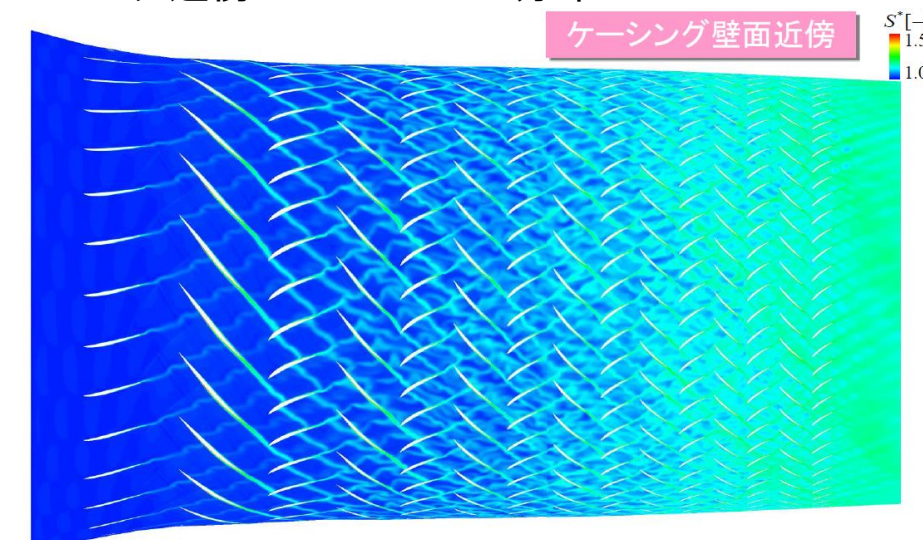
- ターボ機械用大規模高精度圧縮性乱流解析
- 緩和形陰の高解像度風上スキーム
- $k-\omega$ モデルに基づいたDES (Detached Eddy Simulation) 計算

遷音速軸流圧縮機の全段・全周解析

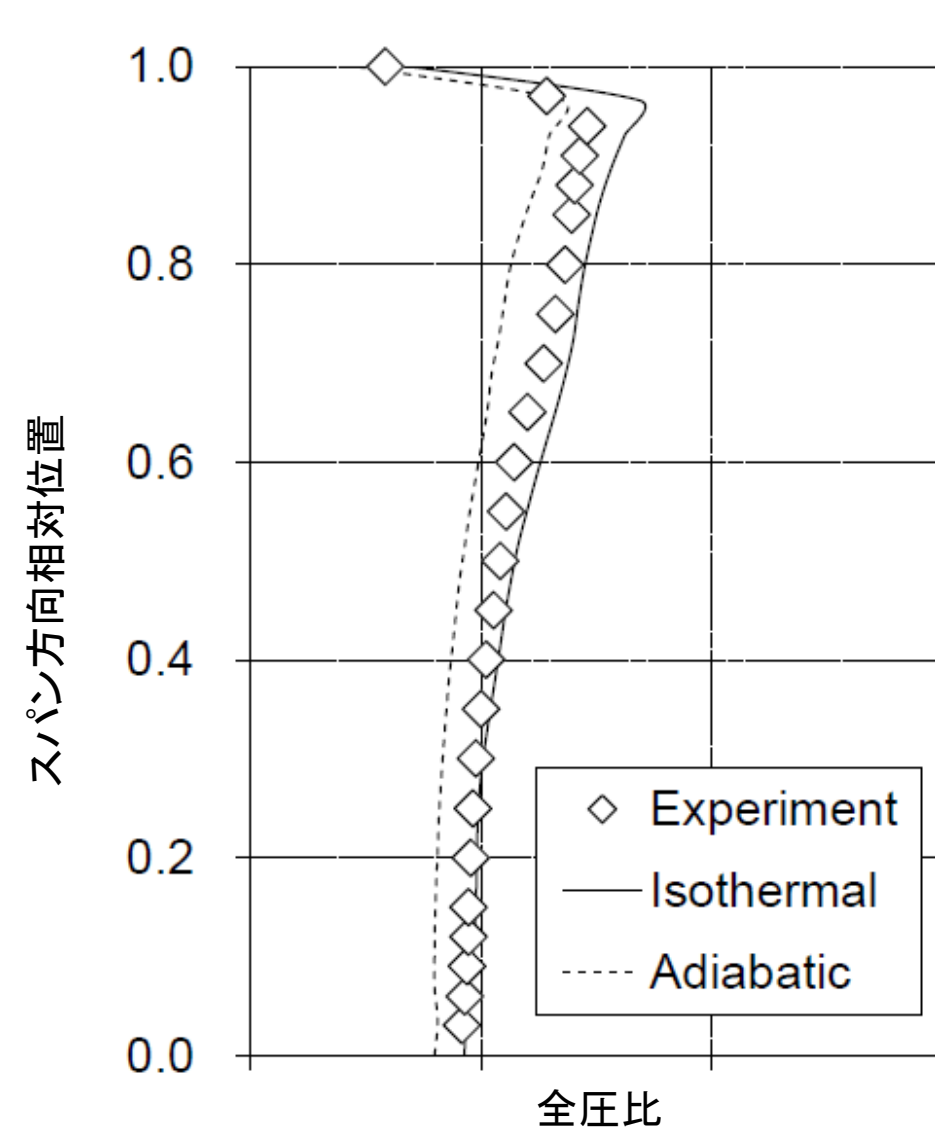
動翼・静翼表面の計算格子



ケーシング近傍のエントロピー分布



実験結果との比較

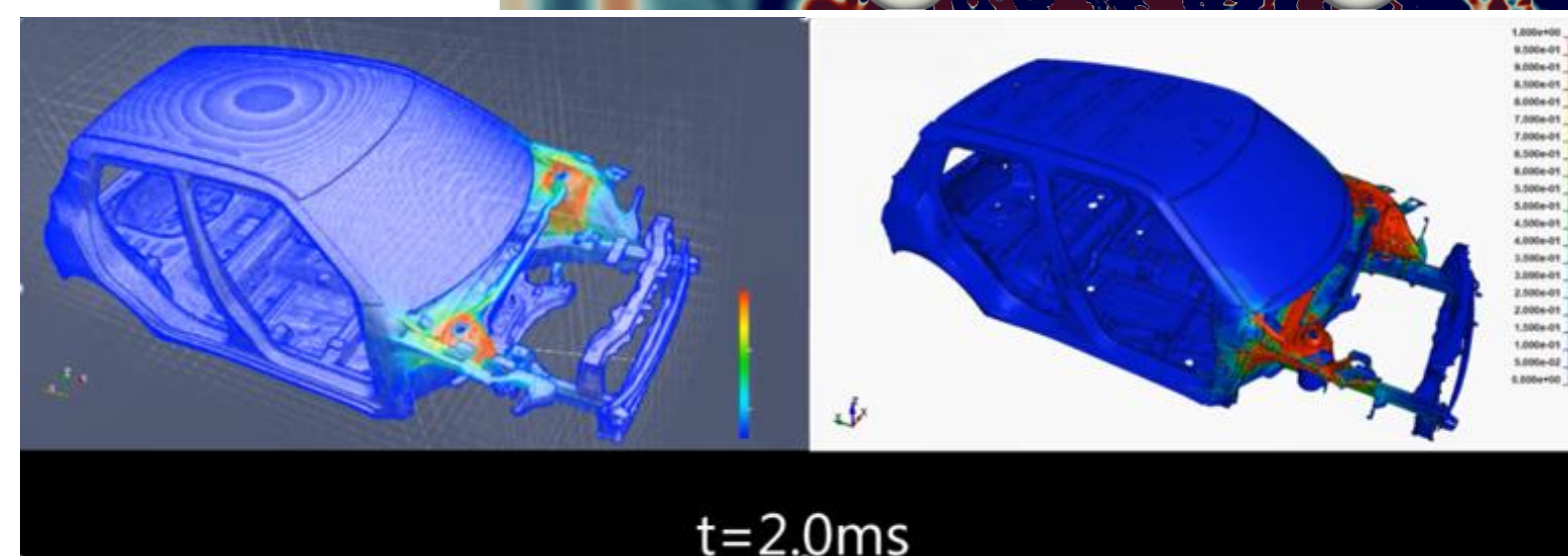
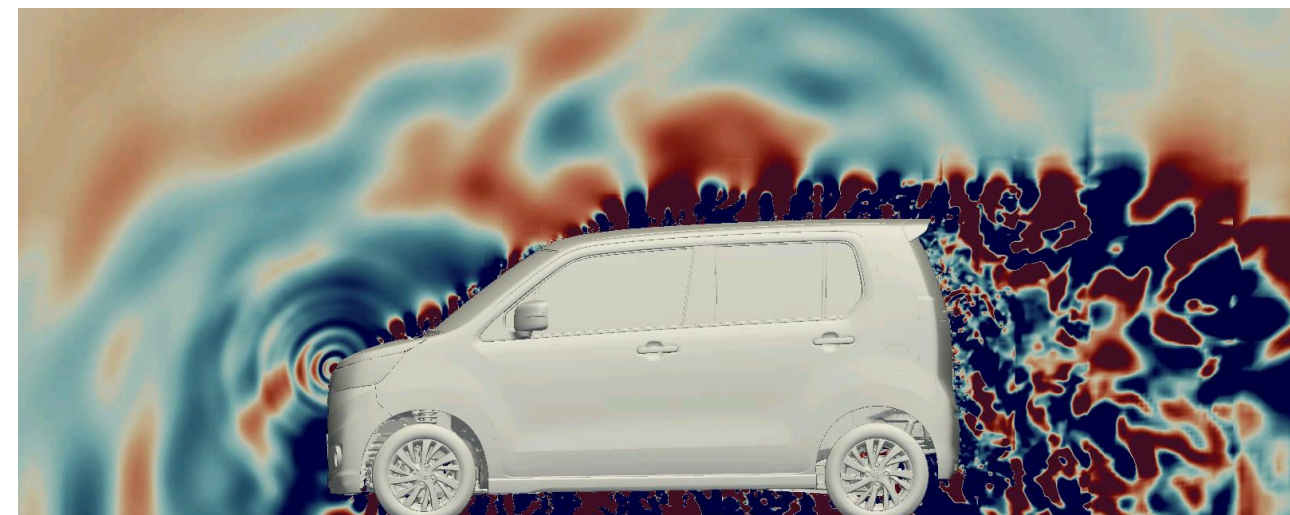
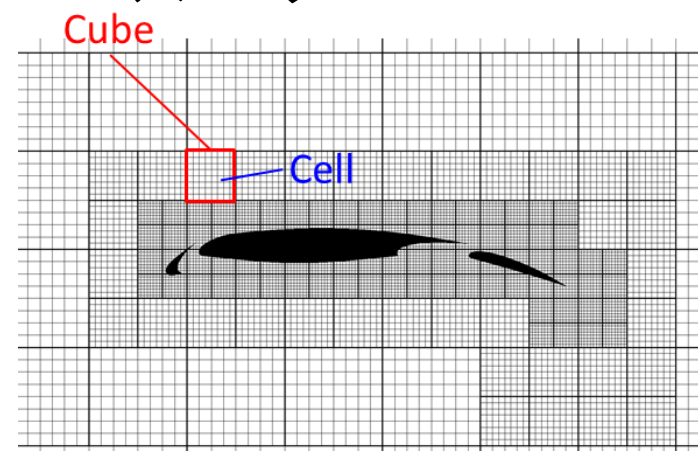


出展:「京」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 優秀成果賞 (hp140154)

3万並列による大規模解析の実績有・
トータルで約60倍の高速化を達成。更なる高速化に向けたチューニングを実施中。

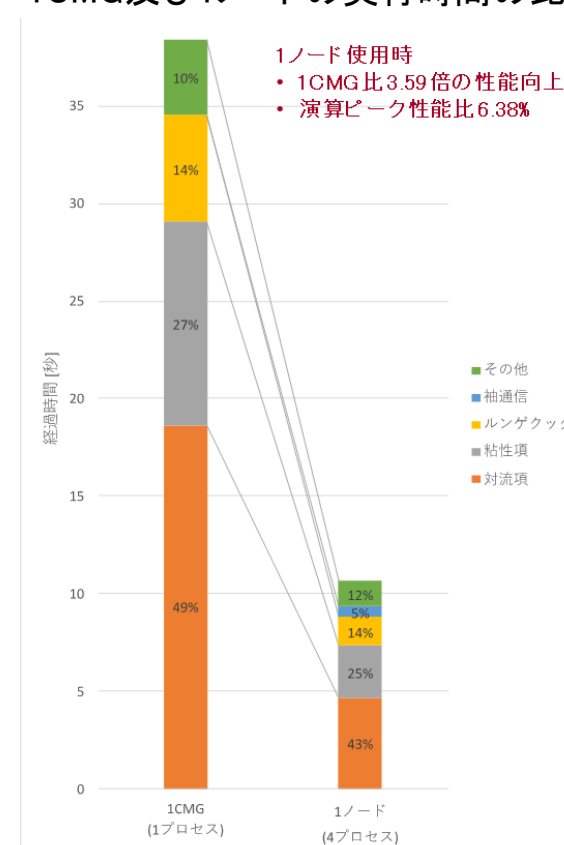
CUBE

- 複雑流体・構造現象を大規模計算するための共通基盤シミュレーションフレームワーク
- 階層直交格子有限体積分法
- 流体解析にはLESを採用した高精度解析
- 熱流体運動・構造変形・化学反応が共存する複雑現象場に対してスケーラブルな連成アルゴリズム



「富岳」チューニング状況 (単体ノード性能)

10MG及び1ノードの実行時間の比較



「富岳」チューニング状況 (並列性能)

ウィークスケーリング (経過時間)



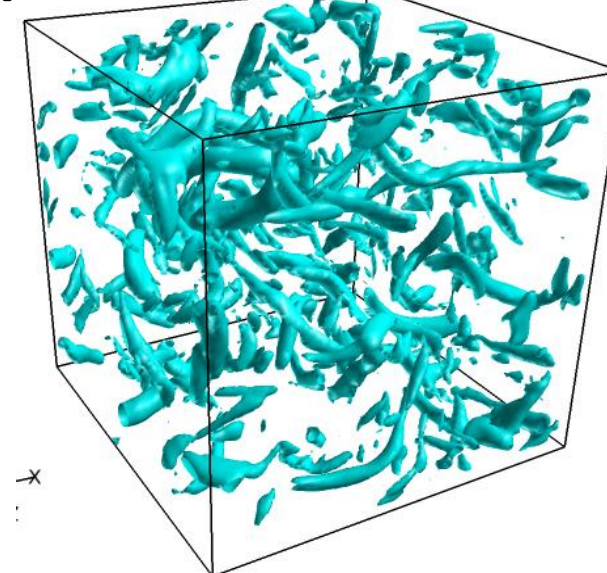
「富岳」単体234.6 GFLOPS を実現

FFX

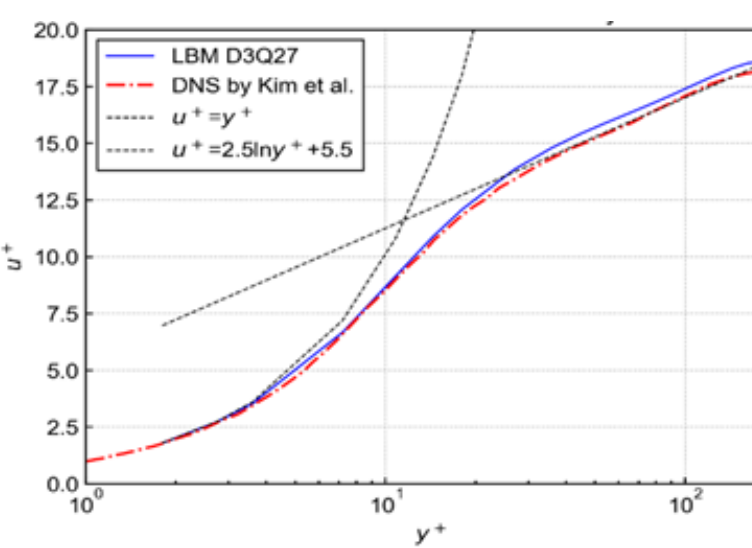
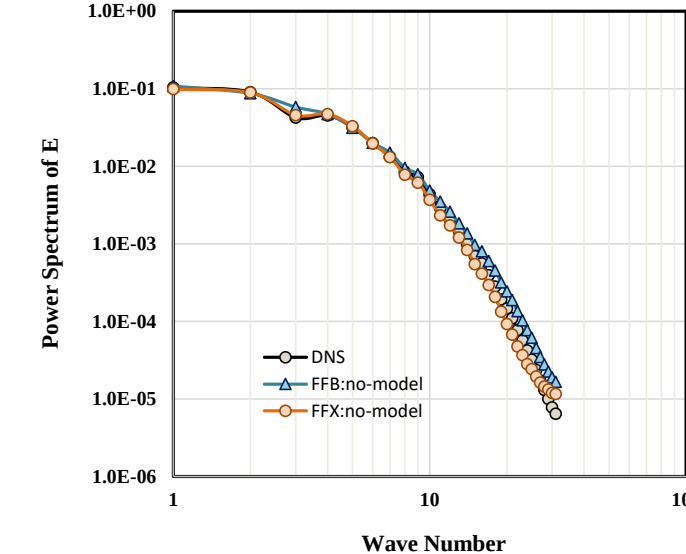
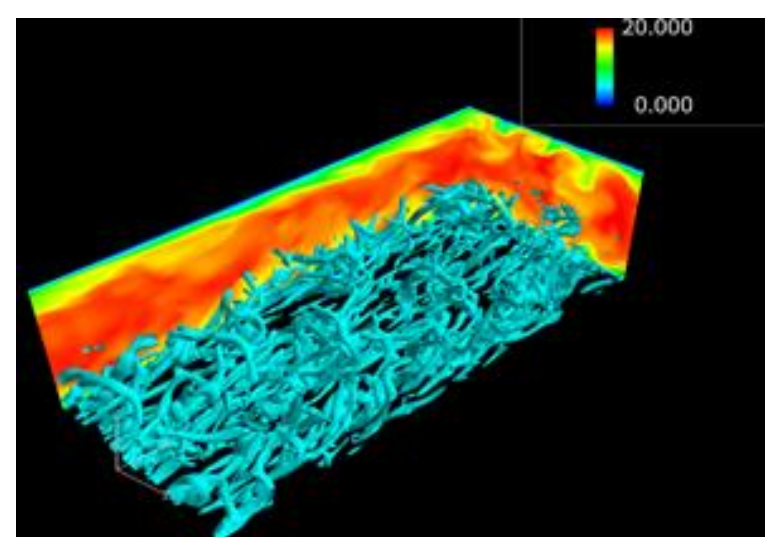
- Lattice Boltzmann法 (LBM) による超大規模乱流/空力音解析
- 階層型直交格子法 (BCM: Building Cube Method) による計算格子の自動生成
- メモリ使用量約1/20, 計算速度約20倍でFFBと同程度の解析精度

FFXの解析精度の検証例

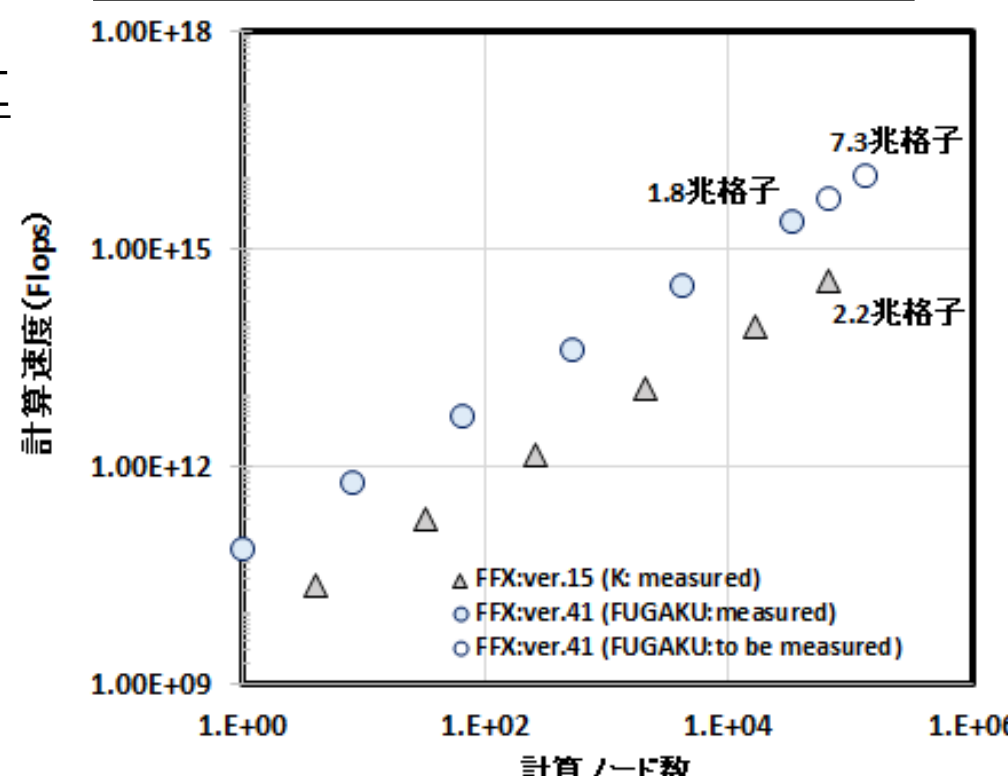
一様等方性乱流



チャンネル乱流



大規模並列性能のベンチマーク結果



「富岳」単体200.0GFLOPS を実現

「富岳」を利用した 革新的流体性能予測技術の研究開発

課題代表者 加藤千幸 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター 教授

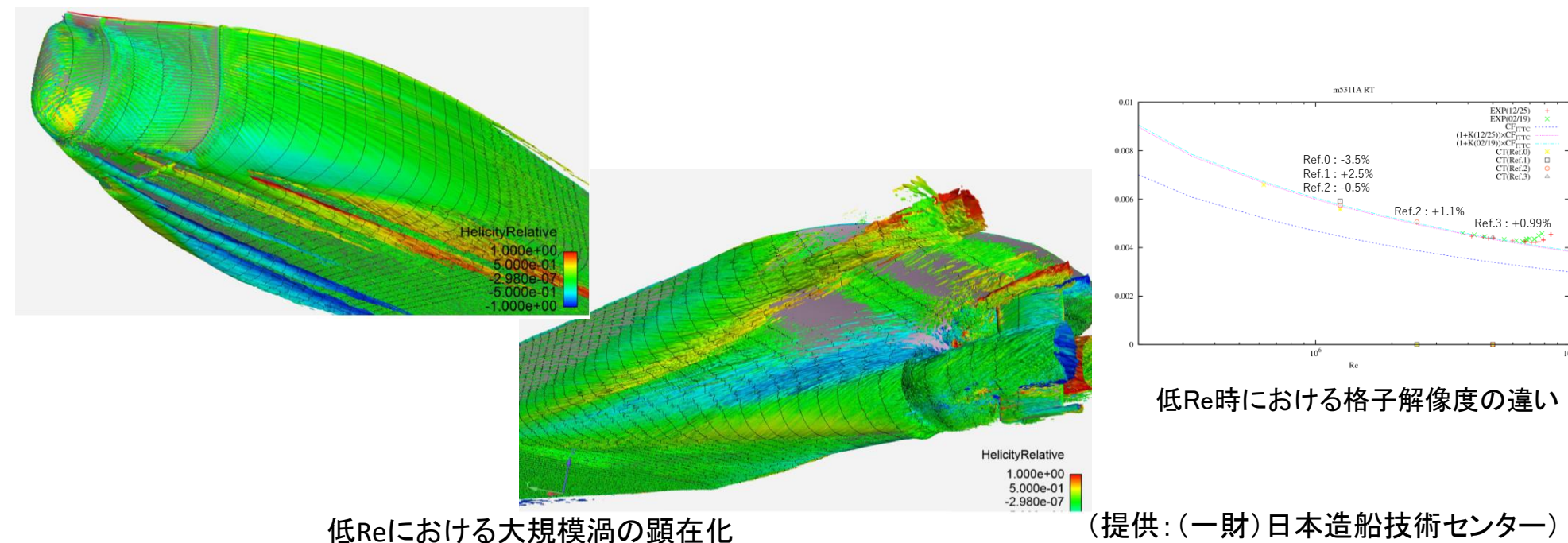
得られた成果概要

実証研究 テーマ①

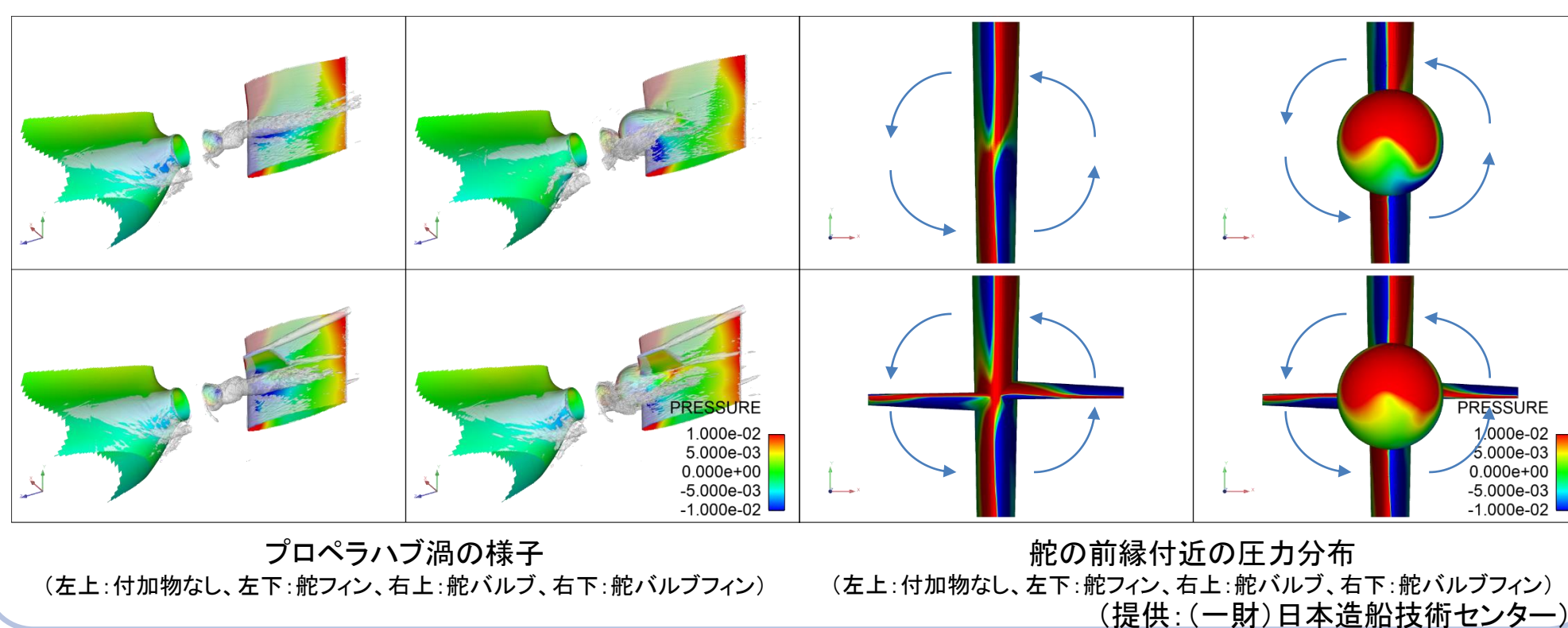
数値曳航水槽の実現と 省エネデバイスによる推進効率の向上

国内複数社の曳航水槽試験結果とWall-Resolved LES計算を直接比較して良好な一致を見ました。また、実験では把握が困難なプロペラ後方の複雑な流れ場に配置された省エネ付加物のWall-Resolved LES計算の可視化により、その動作メカニズムを完全に把握することが出来ました。

■抵抗試験に対応する数値計算例



■プロペラ後流中の複雑な流れ場で機能する省エネ付加物のメカニズム解明

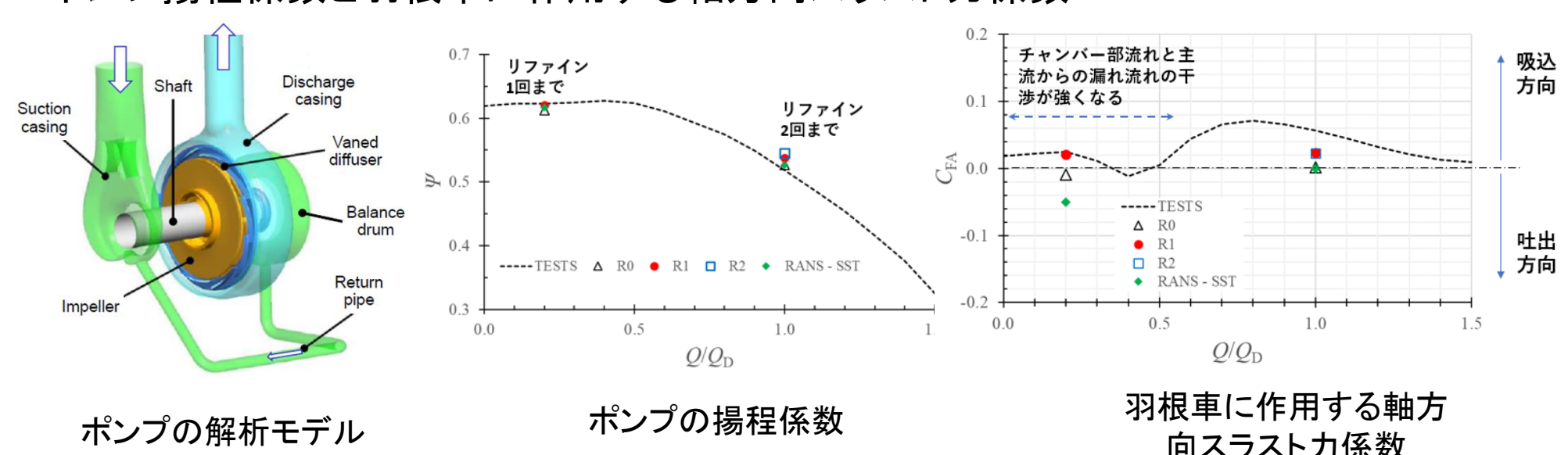


実証研究 テーマ②

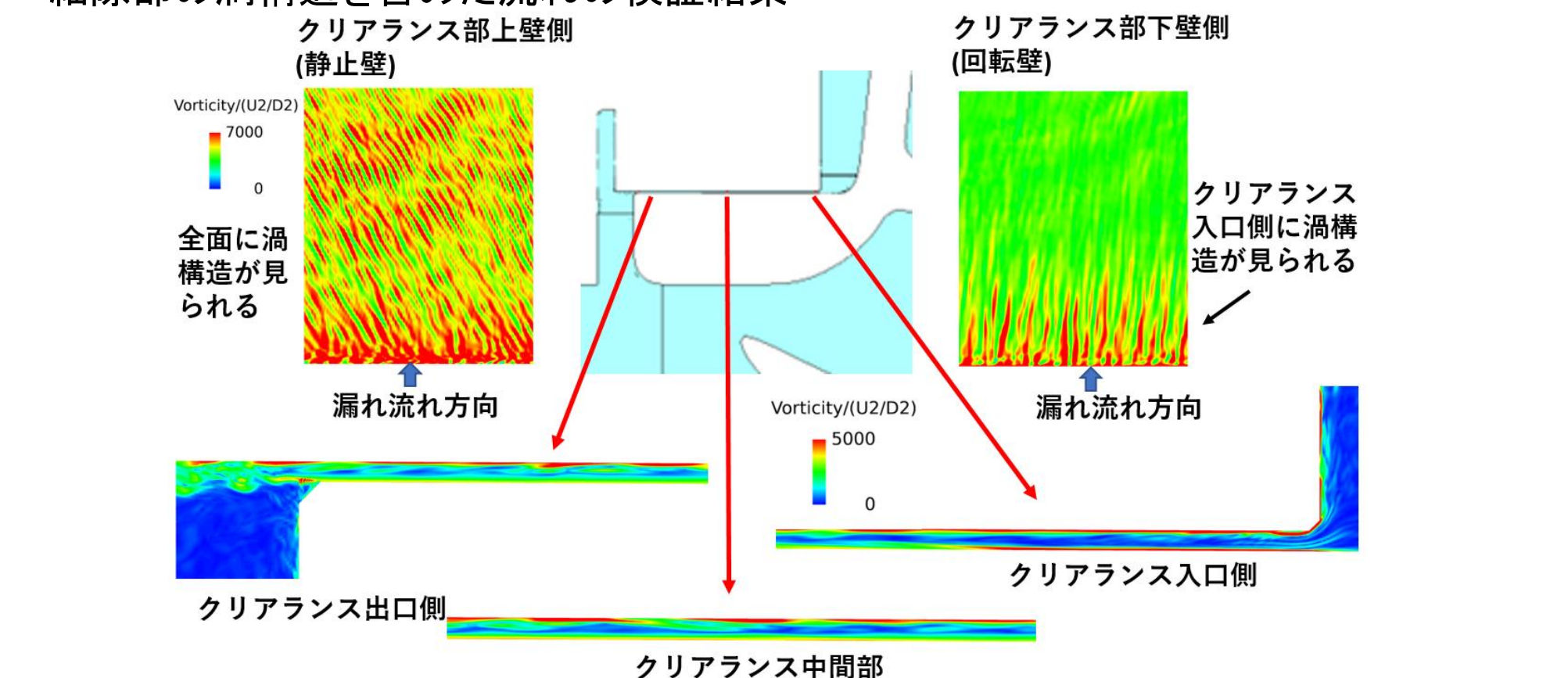
細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れの Wall-Resolved LES

ポンプの主流部に加えて隙間幅 0.18 mm 程度の細隙部における縦渦も捉えるLES解析により、遠心ポンプの性能および流体力を定量的に予測できる見込みを得ました。また、ポンプの設計流量ならびに小流量(20%設計流量)における壁面の渦構造も含め高解像度で詳細流れ場を明らかにしました。

■ポンプ揚程係数と羽根根元に作用する軸方向スラスト力係数



■細隙部の渦構造を含めた流れの検証結果

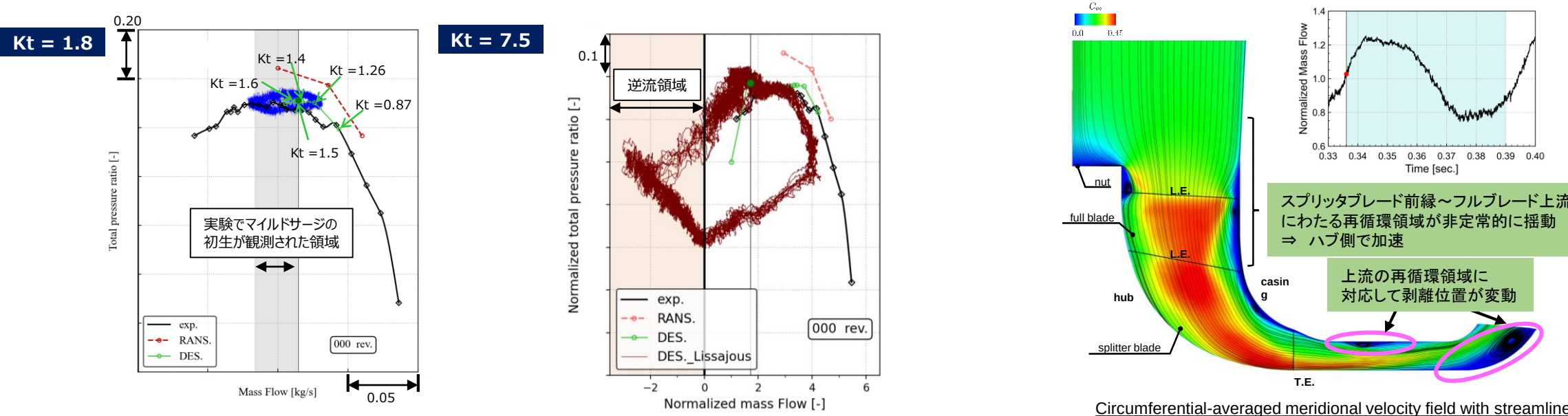


実証研究 テーマ③

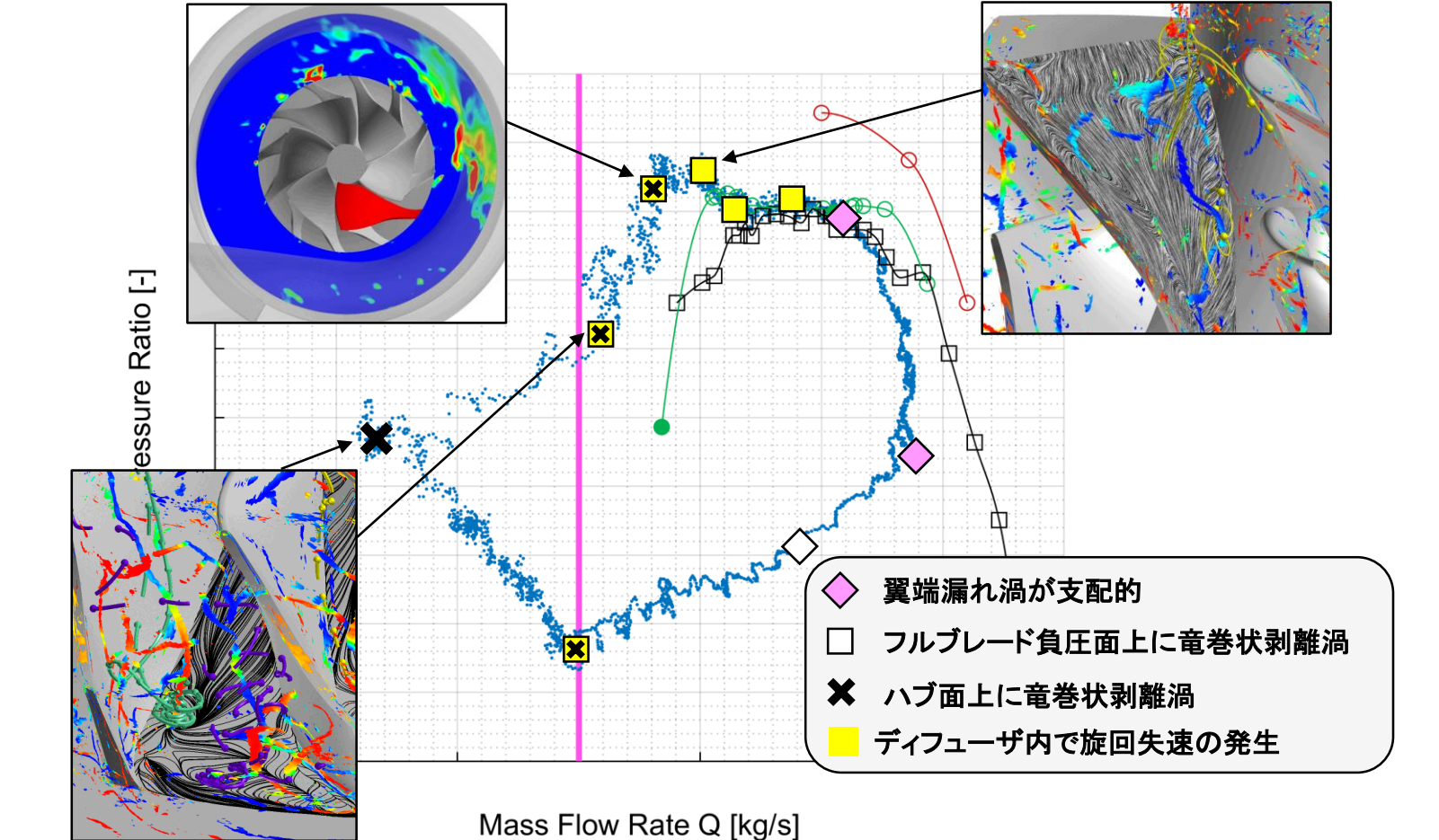
圧縮機サージの直接解析

ターボ機械用DES圧縮性流れ解析ソフトウェアのチューニングを実施し、約90倍の高速化を実現しました。さらに、遷音速遠心圧縮機サージの直接解析に適用し、世界で初めて、シミュレーションによってマイルドおよびディープサージの現象を再現しました。

■マイルドサージ(左)とディープサージ(右)の再現に成功 ■マイルドサージ1周期における内部流動変化



■ディープサージの各位相の内部流動を解明

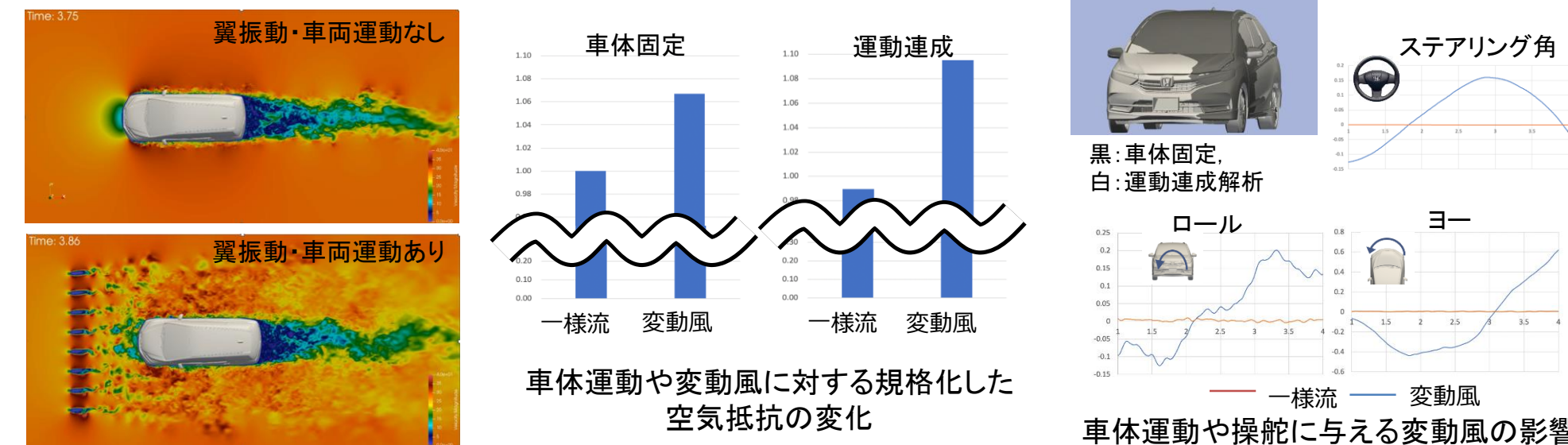


実証研究 テーマ④

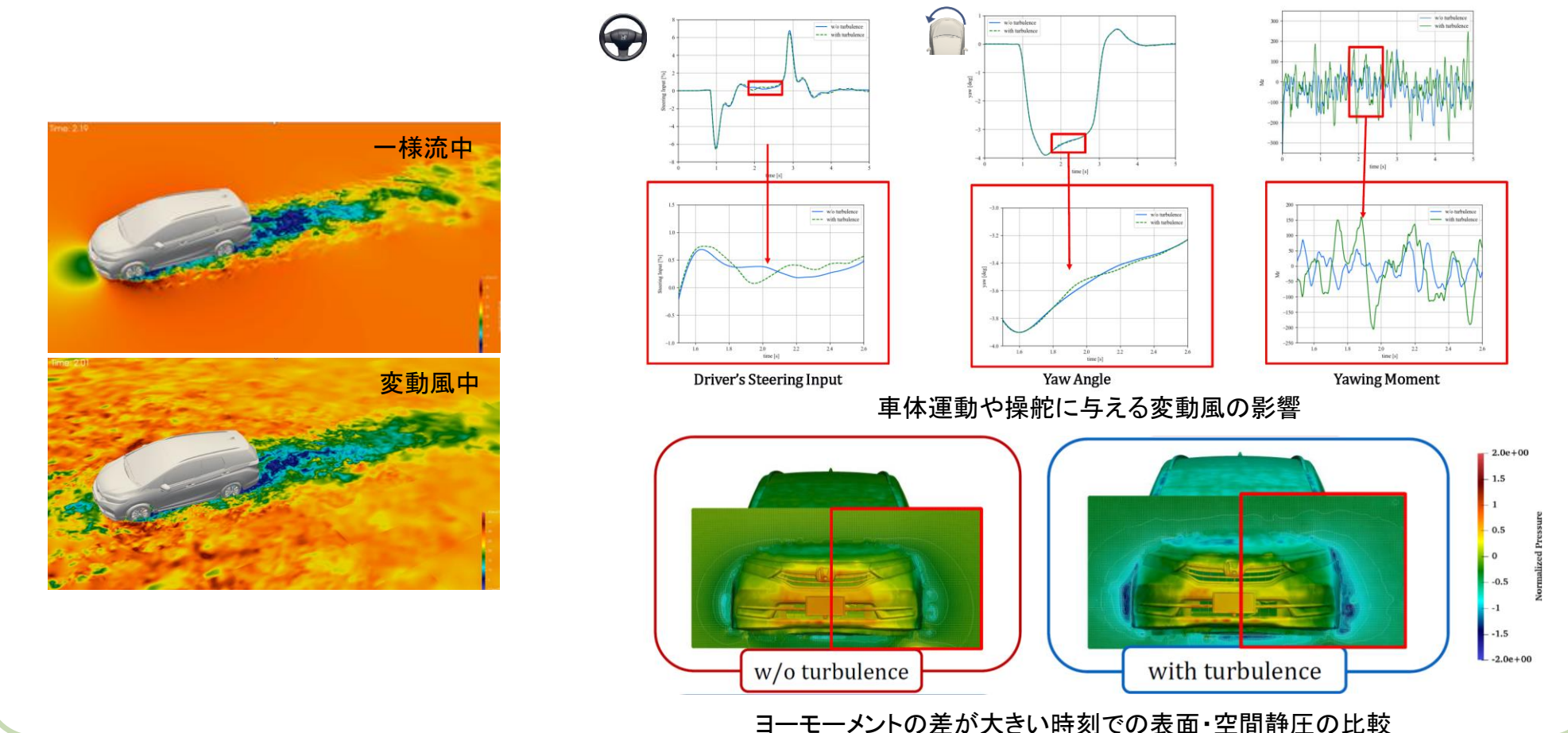
リアルワールド自動車空力性能の予測

自動車マルチボディダイナミクスと車両空力の双方向連成解析システムと大気変動風発生モジュールを開発し、実走行時の自動車の空気抵抗を評価し、車体運動や操舵、並びに変動風特性が燃費に与える影響を評価しました。また、レーンチェンジ時の自動車の操安性や安定性を評価し、変動風特性が与える影響を評価しました。

■変動風・車両運動(ドライバー操舵)が燃費に与える影響を解明



■レーンチェンジ時のドライバー操舵と変動風の影響

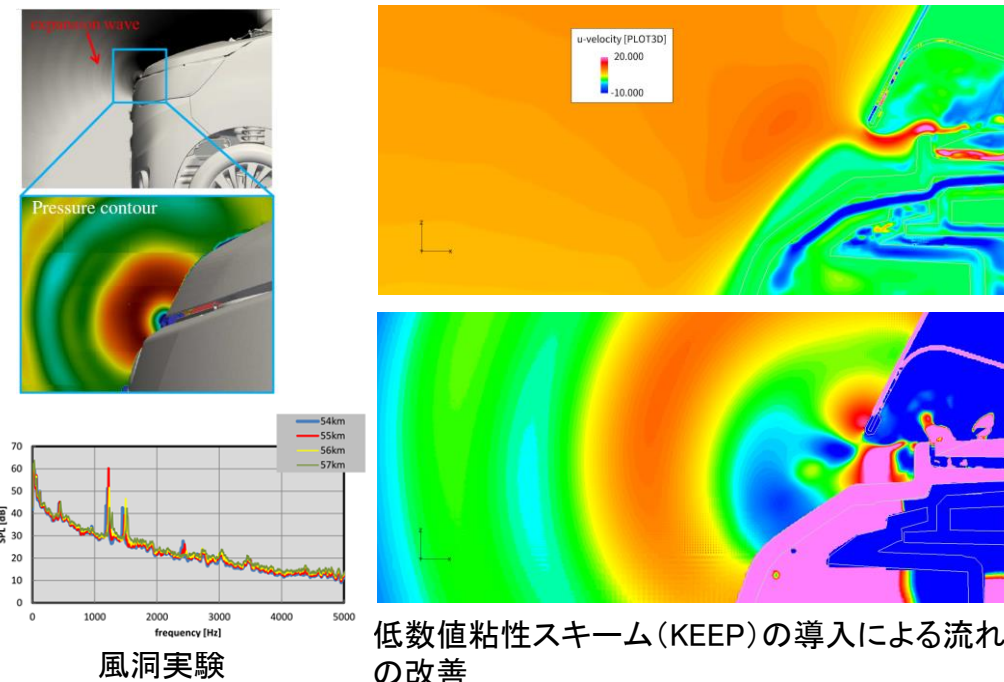


実証研究 テーマ⑤

リアルワールド自動車空力音予測

フロントグリルから発生する狭帯域音を直接計算し、音源構造に関する新たな知見を得ました。また、フロントビラーとサイドミラーから発生する広帯域音に対して変動風を与えるフレームワークを構築し、実走行時に発生するバサバサ音の発生メカニズムを解明するための指針を得ました。また、FFX(LBM法)を用いて車体周りの空力音響計算を実施し、風洞実験結果との比較し、精度検証を行いました。

■狭帯域音の直接解析



■広帯域バサバサ音解析

