文部科学省『「富岳」成果創出加速プログラム』

「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 センター長・教授

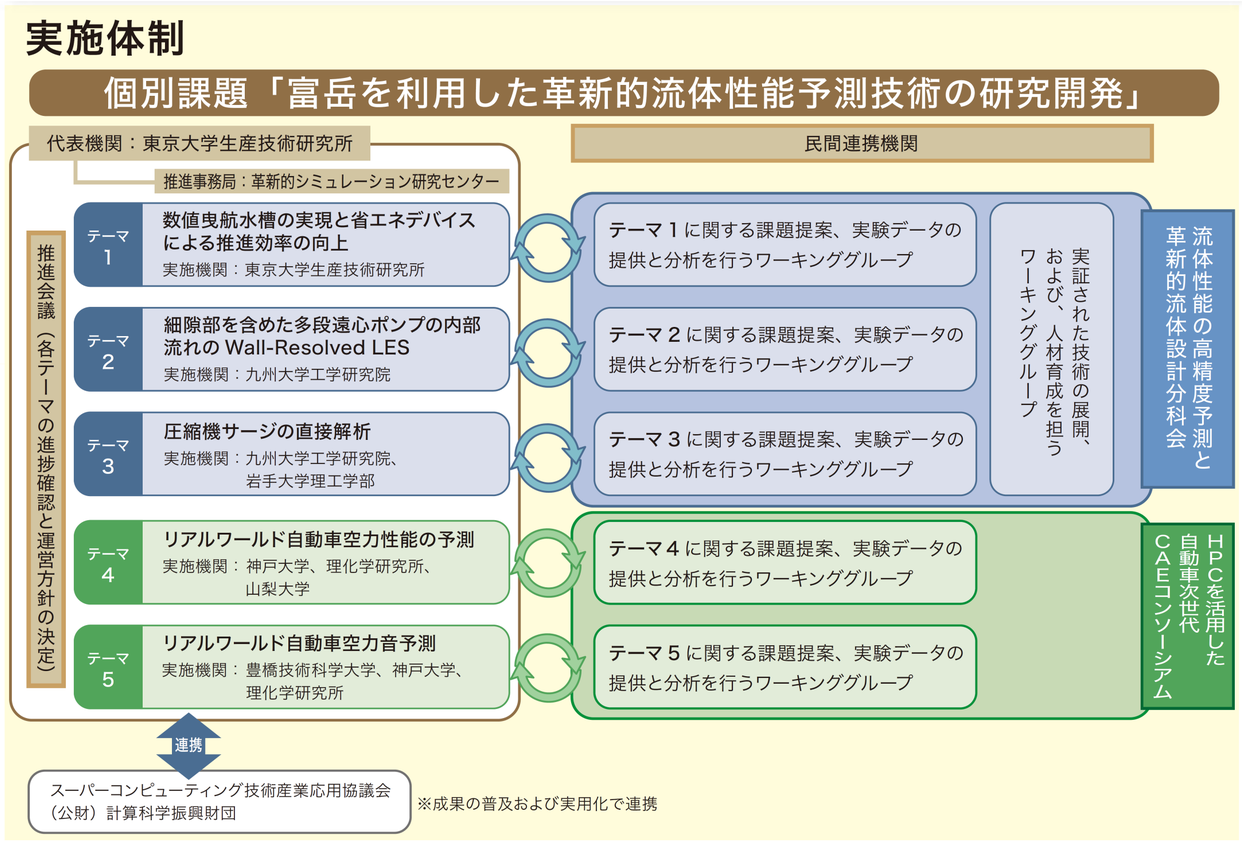
概　要

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」と強力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



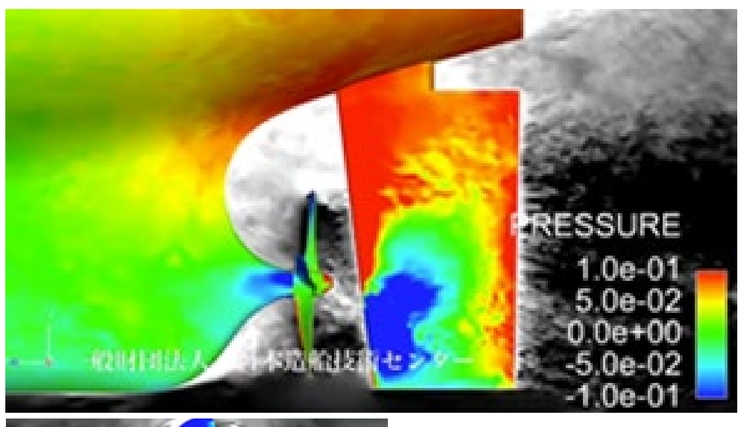
実施機関：東京大学、神戸大学、九州大学、岩手大学、豊橋技術科学大学、山梨大学、理化学研究所

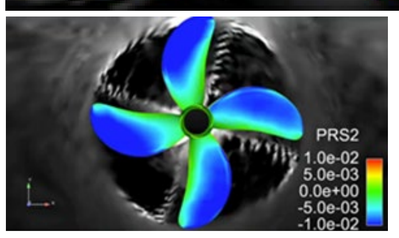
実施内容

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え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。





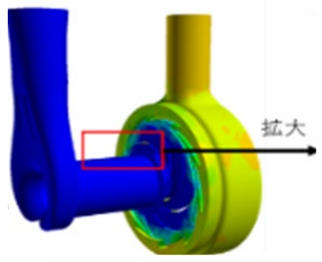
自航試験の結果
（提供：一般財団法人日本造船技術センター）

【利用アプリケーション】 FrontFlow/blue (FFB)

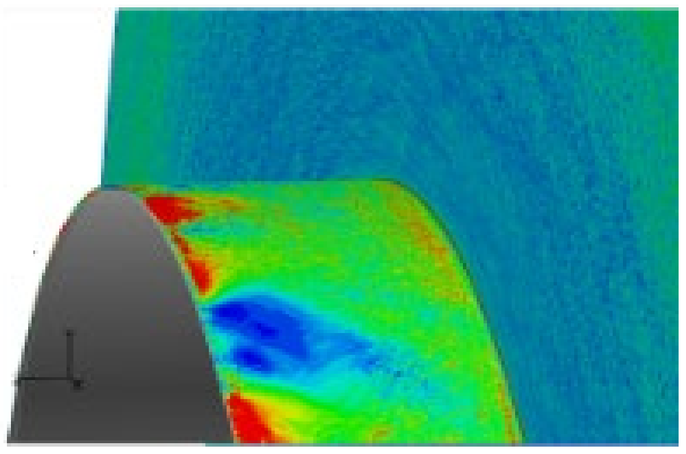
実証研究テーマ② 細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れのWall-Resolved LES

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。



細隙部（側室トライナー部）の Wall-Resolved LES (40億グリッド) 解析結果

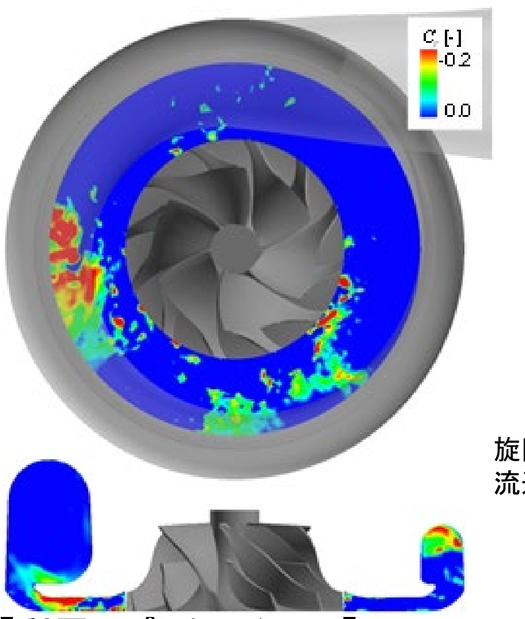


【利用アプリケーション】 FrontFlow/blue (FFB)

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。



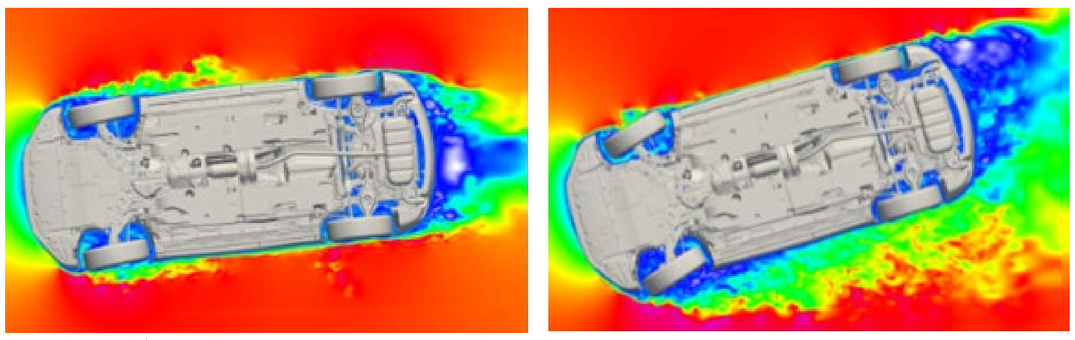
旋回失速発生時の流速分布

【利用アプリケーション】
ターボ機械用DES圧縮性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。



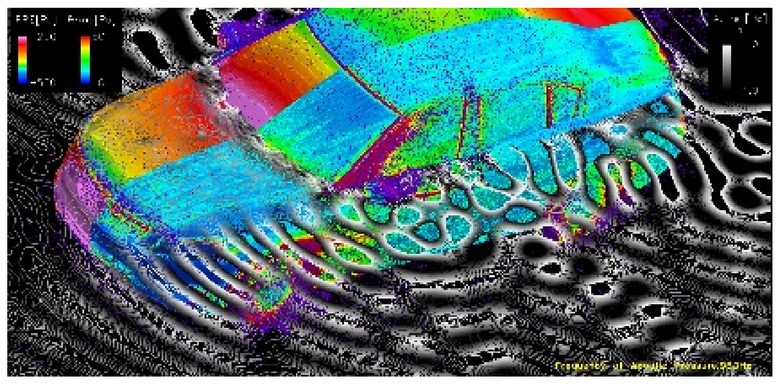
コーナリング時のリアルワールド空力・運動連成シミュレーション

【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

文部科学省『「富岳」成果創出加速プログラム』

「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発

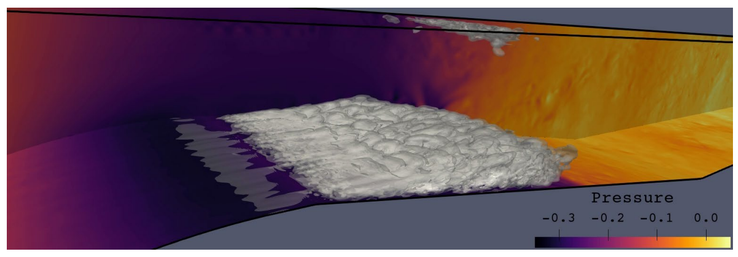
課題代表者　加藤千幸 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター センター長・教授

アプリケーション開発状況

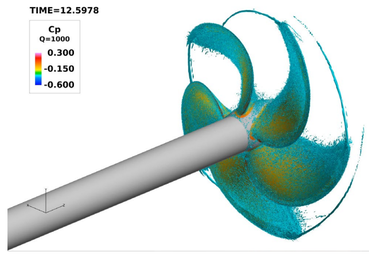
FrontFlow/blue (FFB)

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



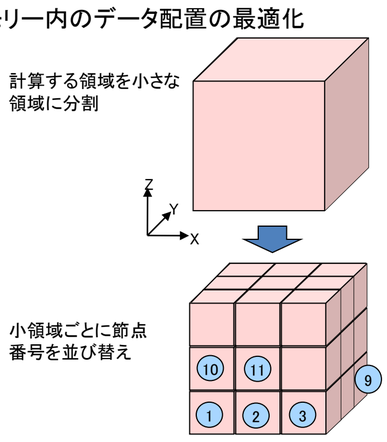
翼まわりのキャビテーション流れのシミュレーション

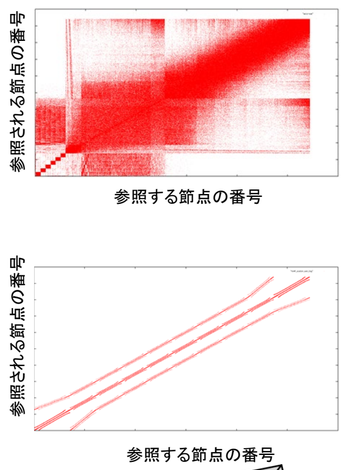


船舶のプロペラまわりの流れのシミュレーション

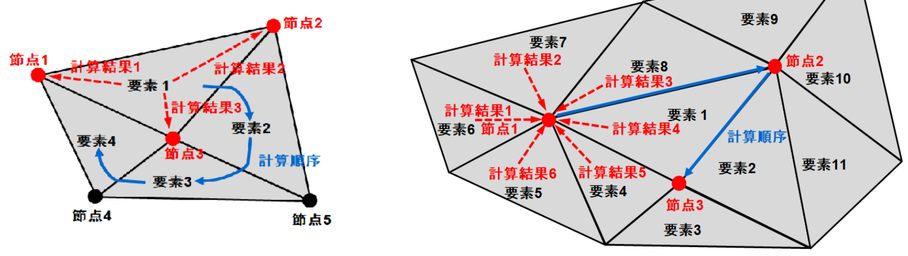
FFBのメモリー転送速度を向上させるための工夫

・メモリー内のデータ配置の最適化



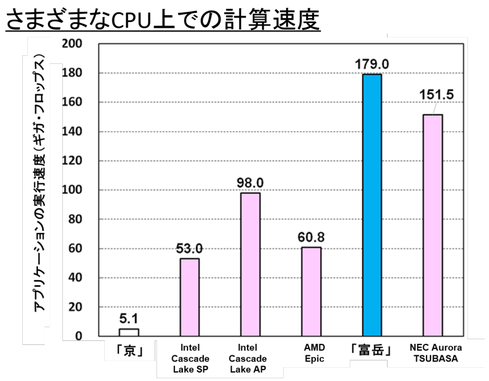


・有限要素法の新しい計算方法を考案

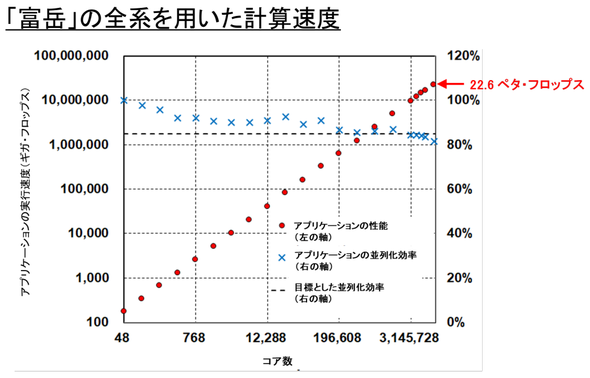


従来の有限要素法の計算方法　　本研究で考案した計算方法

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

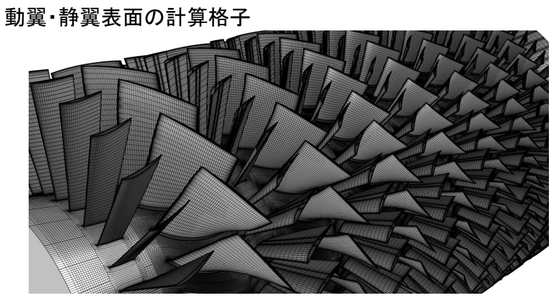
ターボ機械用圧縮性DES流れ解析ソフトウェア

「これまでに得られた成果概要」も参照ください

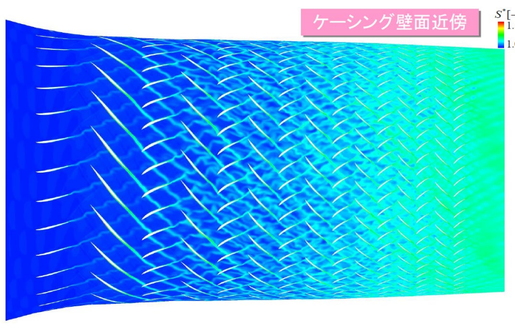
- ターボ機械用大規模高精度圧縮性乱流解析
- 緩和形陰的高解像度風上スキーム
- k-ωモデルに基づいたDES（Detached Eddy Simulation）計算

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

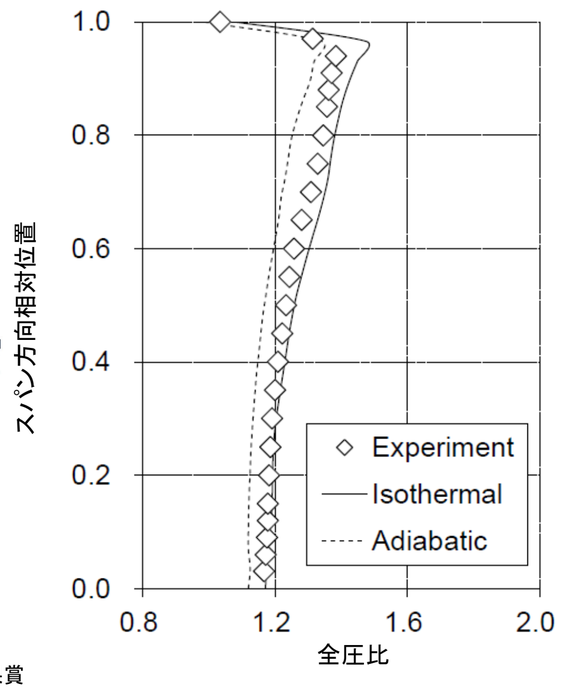


ケーシング近傍のエントロピー分布



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）

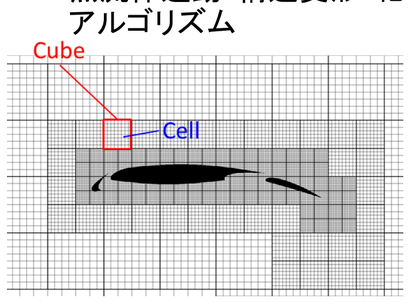
実験結果との比較

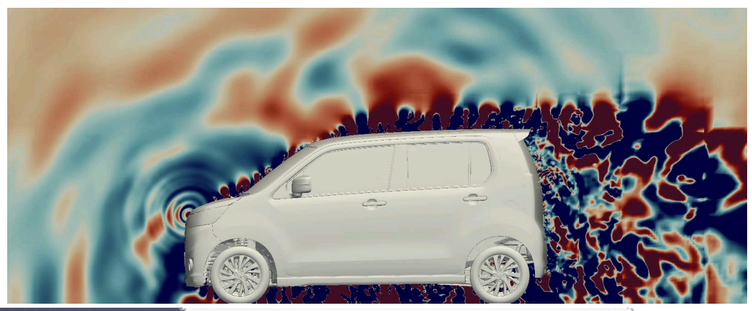


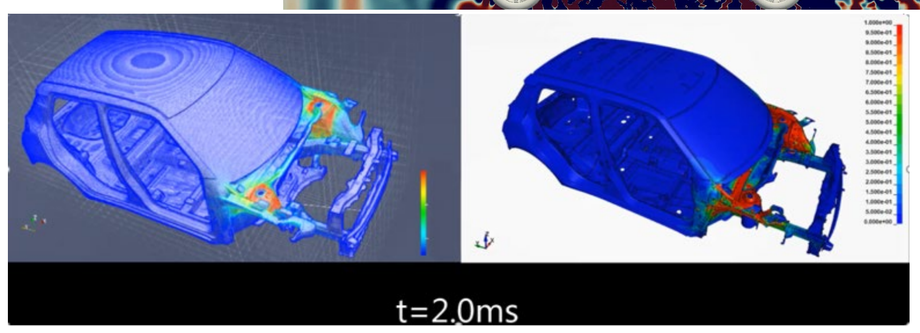
3万並列による大規模解析の実績有・「富岳」で並列性能最適化中

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

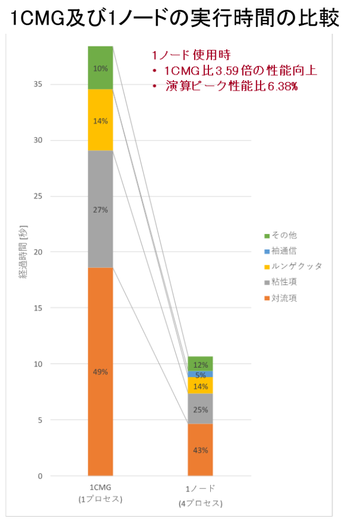




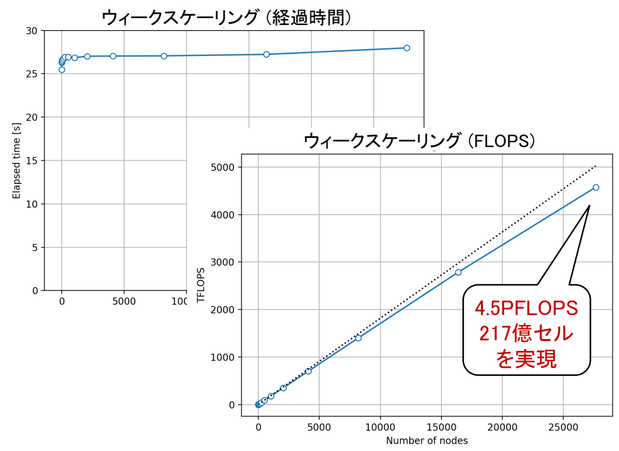


「富岳」チューニング状況（単体ノード性能）

1CMG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）



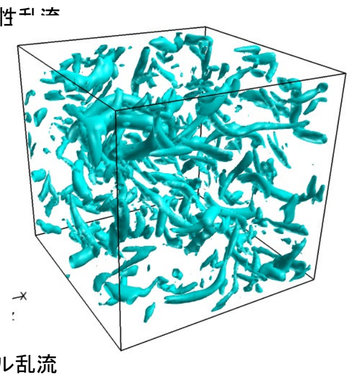
「富岳」単体234.6 GFLOPS を実現

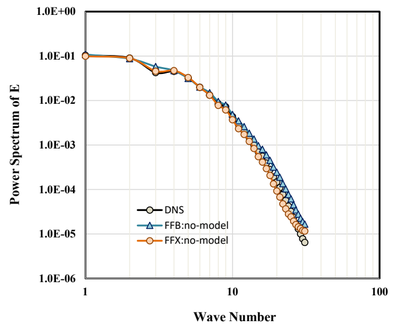
FFX

- 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

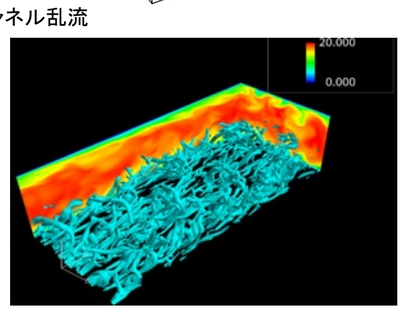
FFXの解析精度の検証例

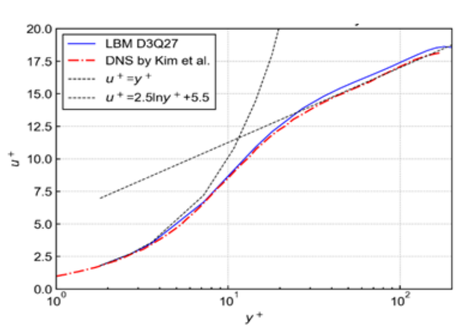
一様等方性乱流



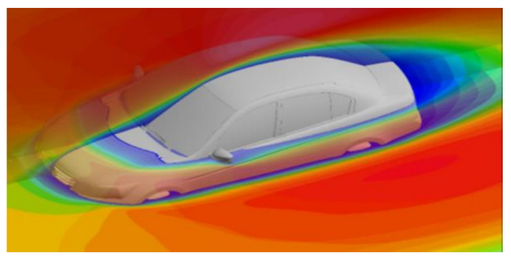


チャネル乱流

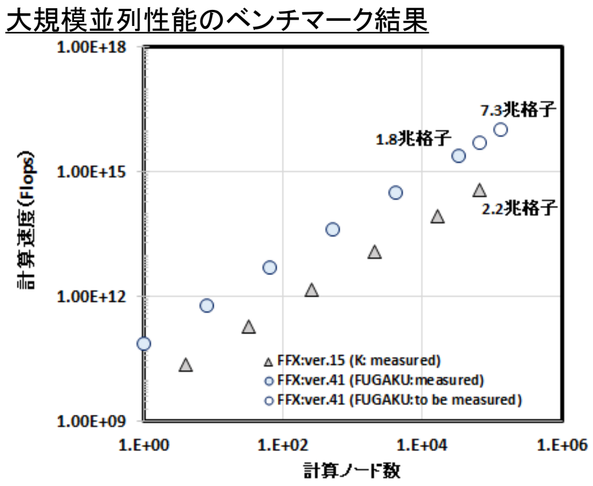




実車の空力・音響解析に向けたテスト計算



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

文部科学省『「富岳」成果創出加速プログラム』

「富岳」を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発

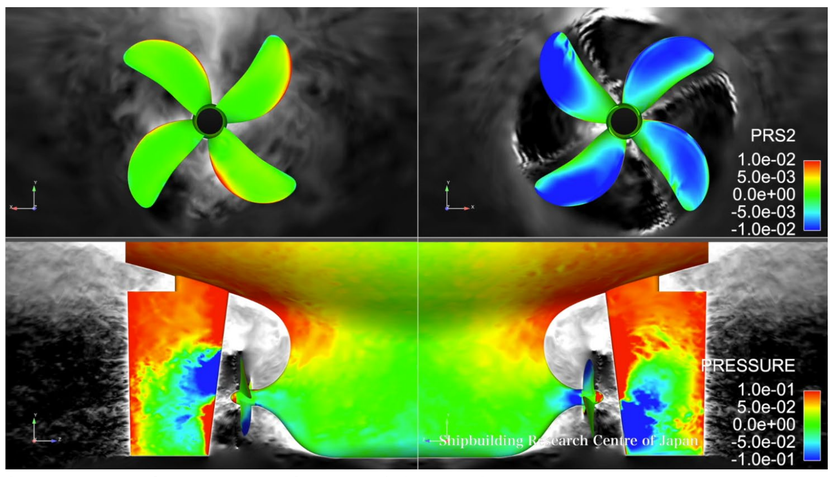
課題代表者　加藤千幸 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター センター長・教授

これまでに得られた成果概要

実証研究テーマ①

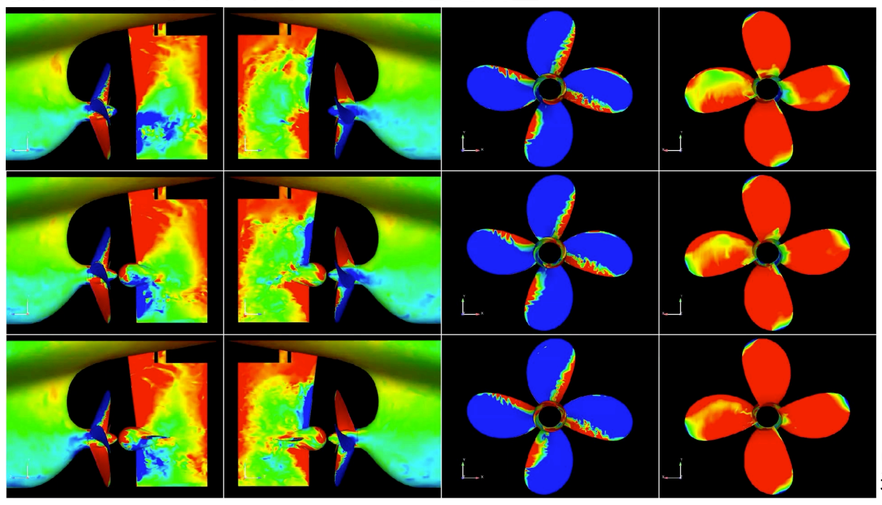
数値曳航水槽の実現と省エネデバイスによる推進効率の向上

■水槽試験結果との比較において良好に一致することを確認



（提供：（一財）日本造船技術センター）

■自航要素に与える省エネ付加物の影響を調査

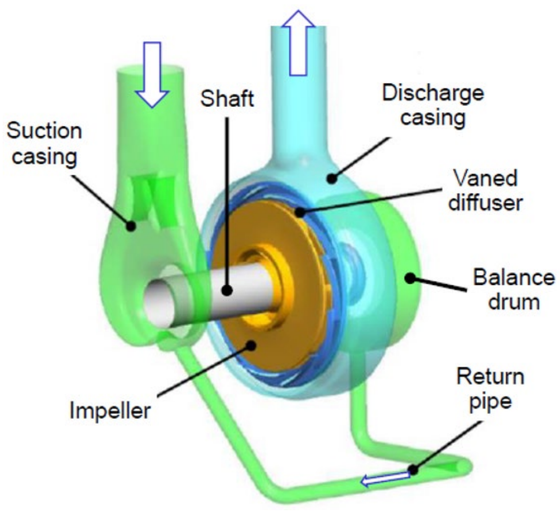


（提供：（一財）日本造船技術センター）

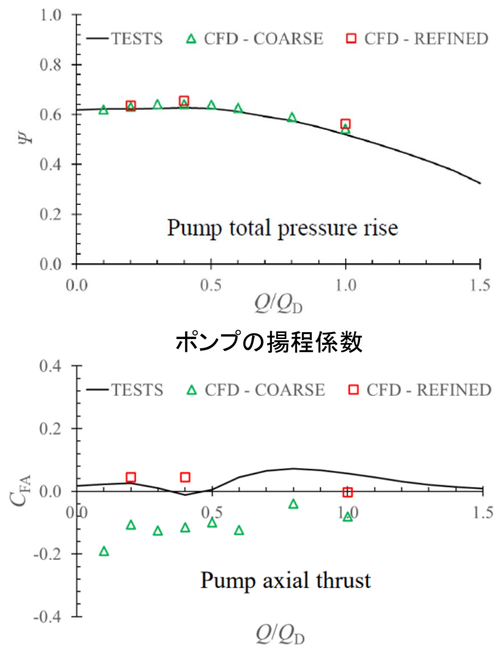
実証研究テーマ②

細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れのWall-Resolved LES

■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通しを得た

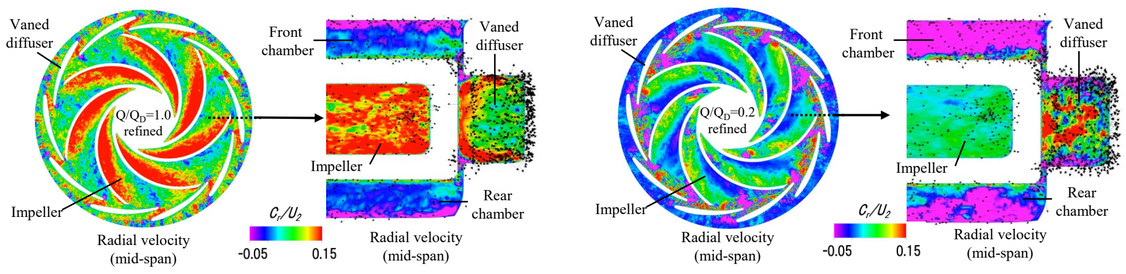


ポンプの解析モデル



羽根車に作用する軸方向スラスト力係数

■ポンプの設計流量ならびに小流量における流れ場の違いを解析

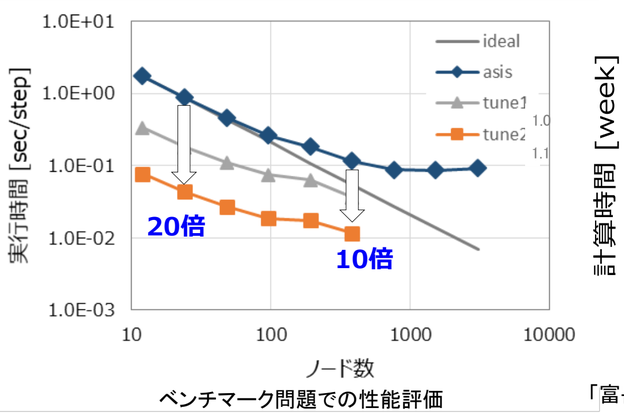


(a) 設計流量　(b) 20%流量

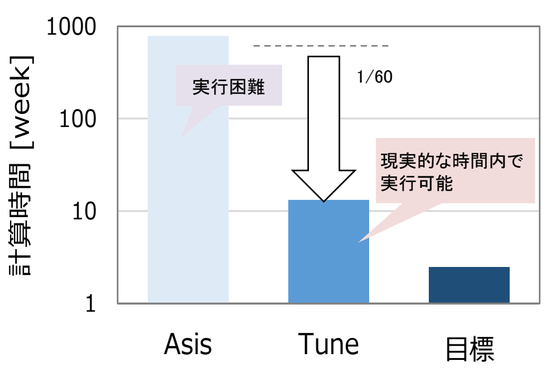
実証研究テーマ③

圧縮機サージの直接解析

■圧縮機サージの直接計算の実行時間を1/60に短縮

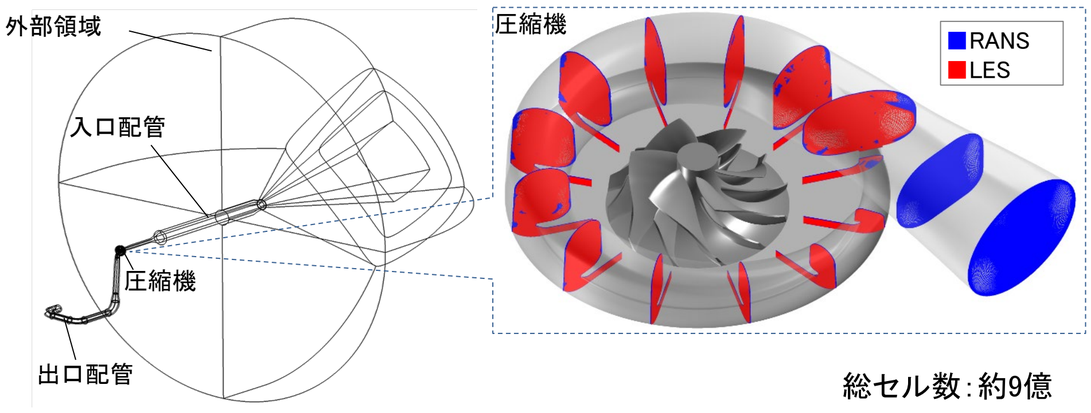


ベンチマーク問題での性能評価



「富岳」による圧縮機サージのマルチスケール解析での性能評価

■サージ初生予測のための計算格子の調整

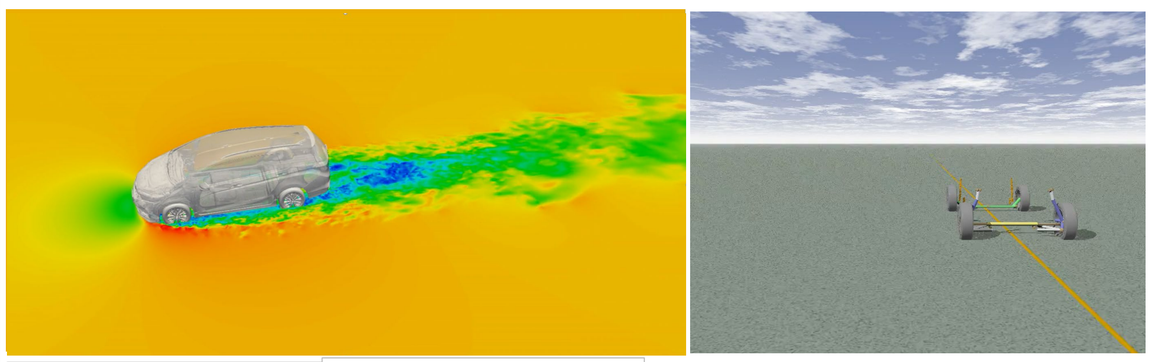


総セル数：約9億

実証研究テーマ④

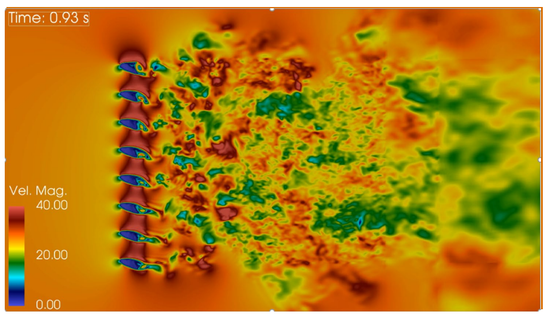
リアルワールド自動車空力性能の予測

■自動車マルチボディダイナミクスと車両空力の連成解析システムを開発

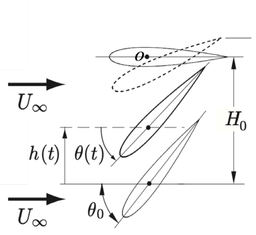


時速100キロで3m右方向にレーンチェンジをした場合の流れ場、サスペンションシステムの運動と空気力変化の様子

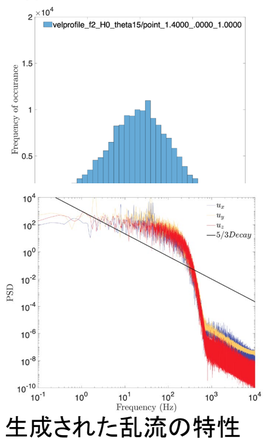
■大気乱流を模擬した変動風発生モジュールの開発



変動風発生モジュールにより生成された流れ場の様子



翼のヒービング・ピッチング運動

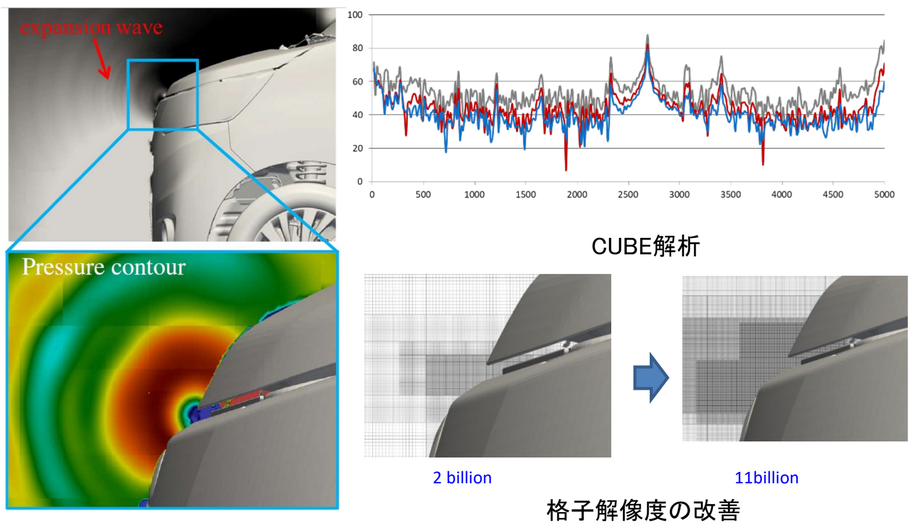


生成された乱流の特性

実証研究テーマ⑤

リアルワールド自動車空力音予測

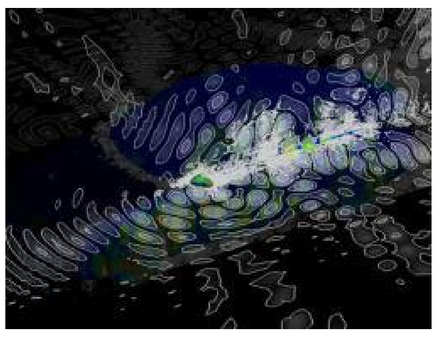
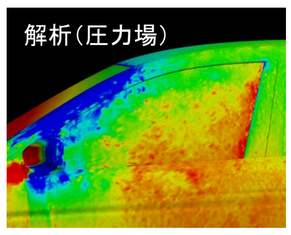
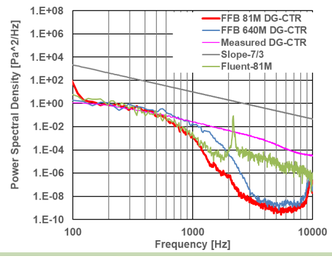
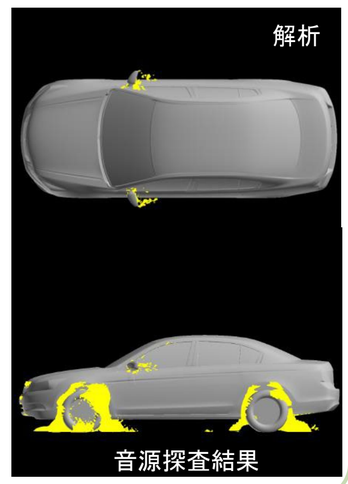
■ボンネットから発生する狭帯域音の直接解析に係るフィジビリティテスト



CUBE解析

格子解像度の改善

■車内騒音解析　（精度検証）：車体表面の圧力場の解析（音源の分離）



車両周りの音響解析結果