



「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

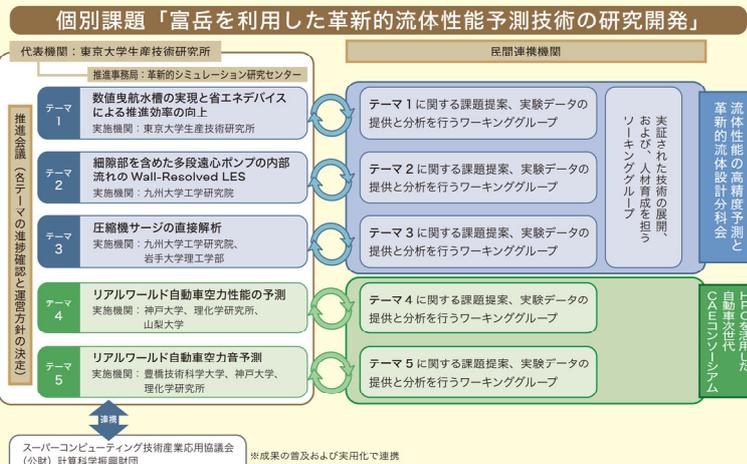
概要

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」と強力的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

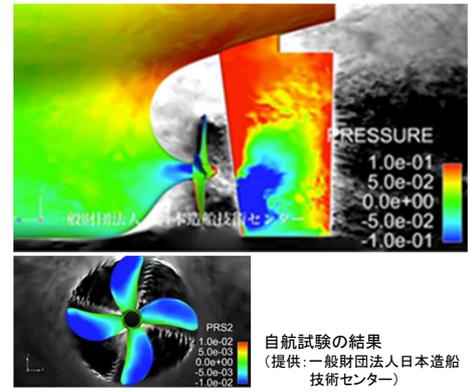


実施機関: 東京大学、神戸大学、九州大学、岩手大学、豊橋技術科学大学、山梨大学、理化学研究所

実施内容

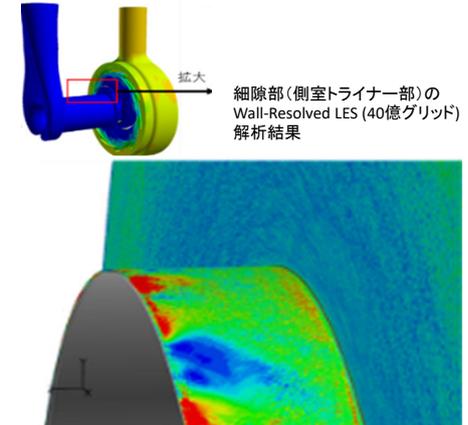
実証研究 テーマ① 数値曳航水槽の実現と省エネデバイスによる推進効率の向上
実施機関: 東京大学生産技術研究所

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。



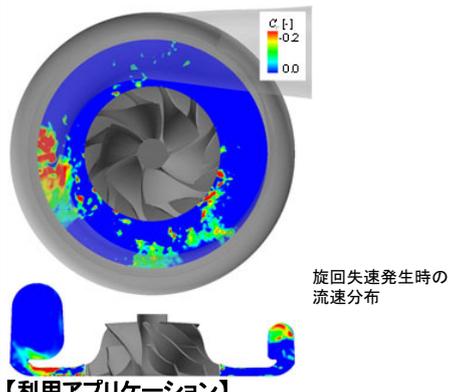
実証研究 テーマ② 細隙部を含めた多段遠心ポンプの内部流れのWall-Resolved LES
実施機関: 九州大学工学研究院

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。



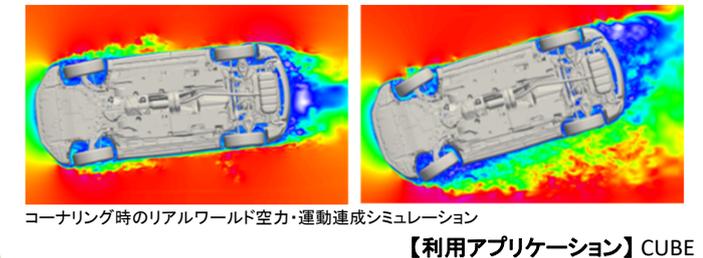
実証研究 テーマ③ 圧縮機サージの直接解析
実施機関: 九州大学工学研究院, 岩手大学理工学部

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。



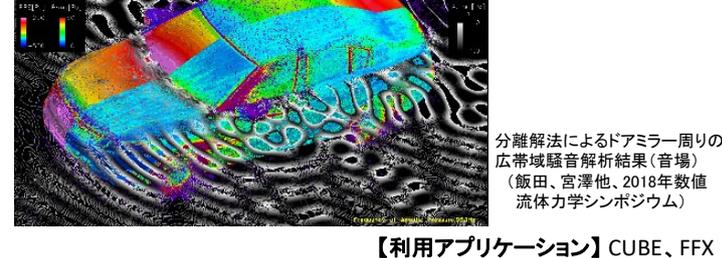
実証研究 テーマ④ リアルワールド自動車空力性能の予測
実施機関: 神戸大学、理化学研究所、山梨大学

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。



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。



「富岳」を利用した 革新的流体性能予測技術の研究開発

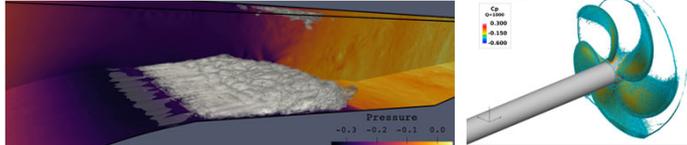
課題代表者 加藤千幸 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター センター長・教授

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

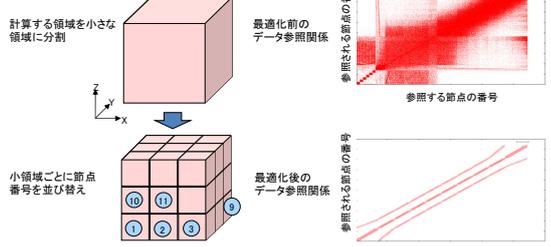
- 乱流の微細な渦まで計算する有限要素法ソフトウェア
- 大規模な流体シミュレーションを実現するための計算格子の自動分割機能を具備



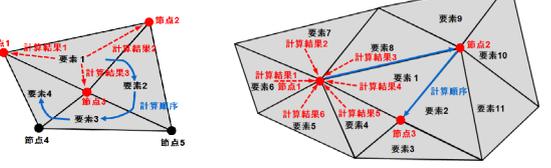
翼まわりのキャビテーション流れのシミュレーション 船舶のプロペラまわりの流れのシミュレーション

FFBのメモリ転送速度を向上させるための工夫

・メモリ内のデータ配置の最適化

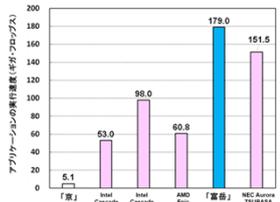


・有限要素法の新しい計算方法を考案

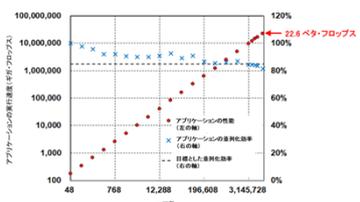


従来の有限要素法の計算方法 本研究で考案した計算方法

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



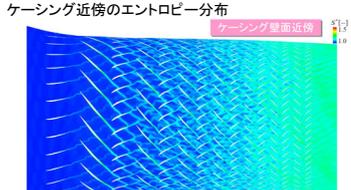
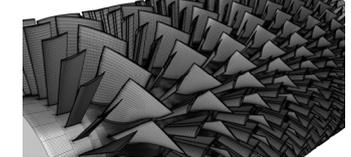
「富岳」を用いて、22.6 ペタ・フロップスという、実際のアプリケーションとしては驚異的な計算速度を実現

ターボ機械用圧縮性 DES流れ解析ソフトウェア

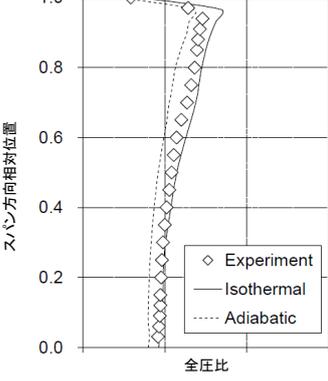
「これまでに得られた成果概要」も参照ください

- ターボ機械用大規模高精度圧縮性乱流解析
- 緩和形陰の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

選音速軸流圧縮機的全段・全周解析



実験結果との比較

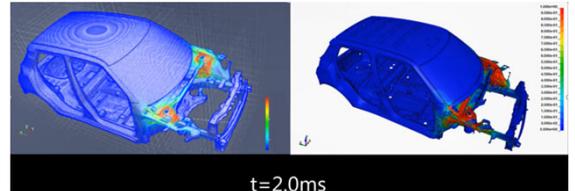


出展:「京」を中核とするHPCシステム利用研究課題 優秀成果賞 (hp140154)

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。

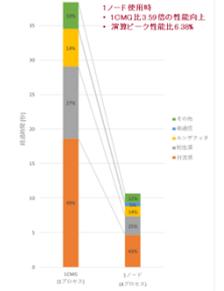
CUBE

- 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



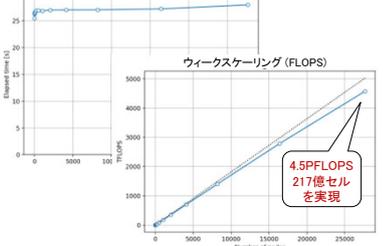
「富岳」チューニング状況 (単体ノード性能)

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)

ウィークスケーリング (経過時間)



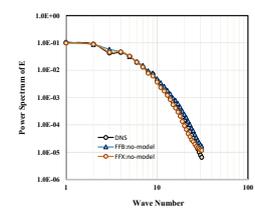
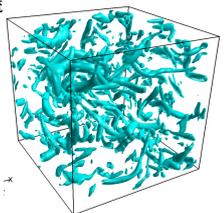
「富岳」単体234.6 GFLOPSを実現

FFX

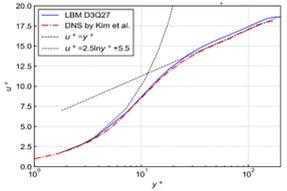
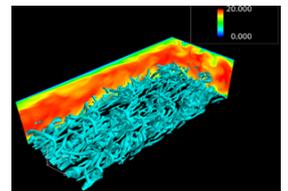
- Lattice Boltzmann法 (LBM) による超大規模乱流/空力音解析
- 階層型直交格子法 (BCM: Building Cube Method) による計算格子の自動生成
- メモリ使用量約1/20, 計算速度約20倍でFFBと同程度の解析精度

FFXの解析精度の検証例

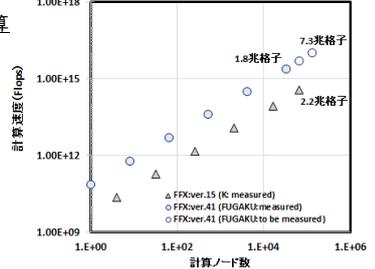
一様等方位乱流



チャンネル乱流

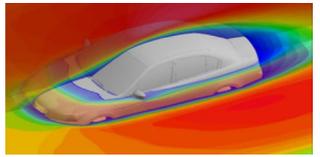


大規模並列性能のベンチマーク結果



「富岳」単体200.0GFLOPSを実現

実車の空力・音響解析に向けたテスト計算



「富岳」を利用した 革新的流体性能予測技術の研究開発

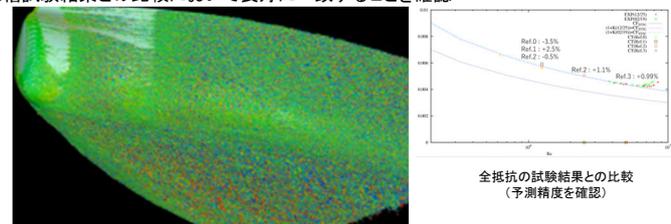
課題代表者 加藤千幸 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター センター長・教授

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

船を対象としたWall-Modeled LESによる予測精度が高いことを確認するとともに、数値曳航試験のための予備計算を実施し、今後の課題を明確にした。また、省エネデバイスのメカニズム解明のための重要な知見を得た。

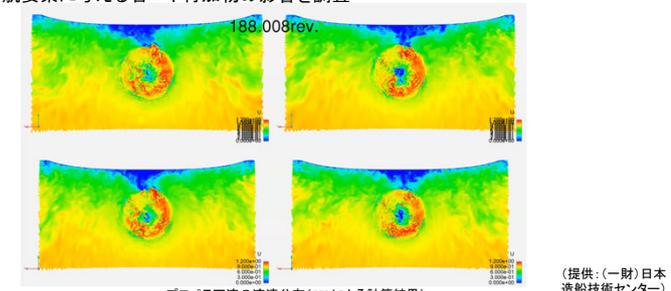
■水槽試験結果との比較において良好に一致することを確認



全抵抗の試験結果との比較 (予測精度を確認)

船首近傍の境界層 (大規模な渦構造を確認)

■自航要素に与える省エネ付加物の影響を調査



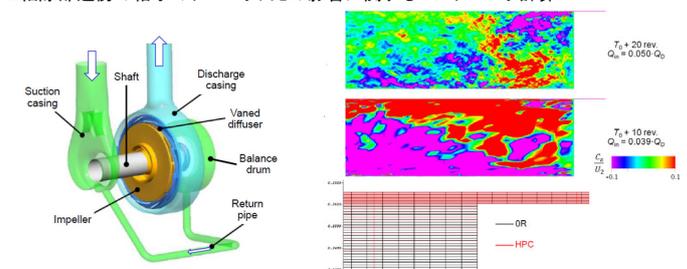
プロペラ下流の流速分布 (FFBによる計算結果)

(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

解析格子の改善により、幅0.17mm程度の細隙部近傍で発生する流れの不安定性を解消し、最大400億格子規模のWall-resolved LESの準備が完了した。約6億要素の1回リファインの計算を行い、試験結果と比較し予測精度を検証した。

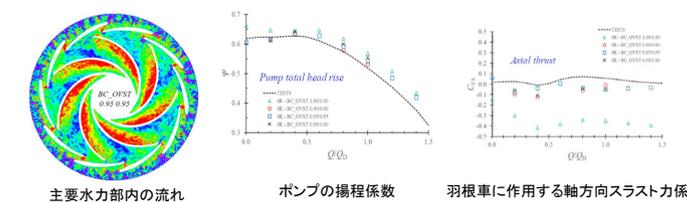
■細隙部近傍の格子のアスペクト比の影響に関するベンチマーク計算



ポンプの解析モデル

格子のアスペクト比の改善効果の検証 (上段:改善後、下段:改善前)

■調整後のメッシュによる計算結果

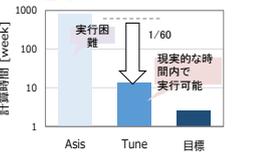


主要水力部内の流れ ポンプの揚程係数 羽根車に作用する軸方向スラスト力係数

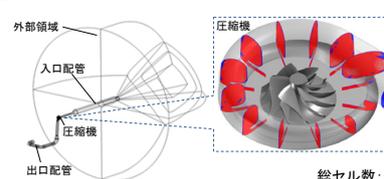
実証研究 テーマ③ 圧縮機サージの直接解析

DES解析ソフトのチューニングを実施し、60倍の高速化を実現した。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サージの現象を再現した。

■圧縮機サージの直接計算の実行時間を 1/60に短縮



■サージ初生予測のための計算格子の調整

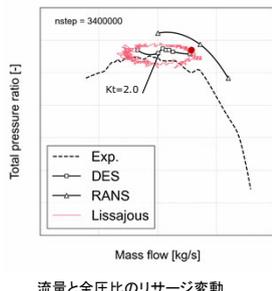


外部領域 入口配管 圧縮機 出口配管

総セル数:約9億

「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

■世界で初めてマイルドサージの直接計算に成功



Total pressure ratio [-] Mass flow [kg/s]

Exp. DES RANS Lissajous

流量と全圧比のリサージュ変動

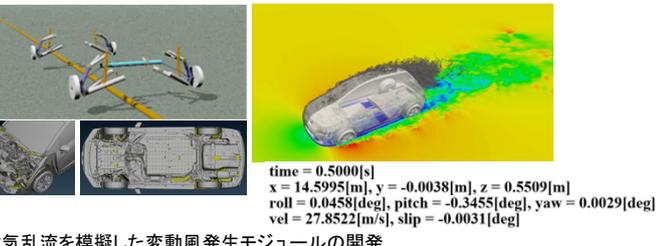


配管も含めた圧力変動分布

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

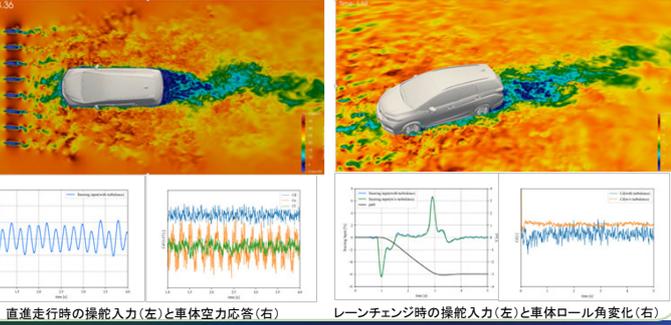
自動車マルチボディダイナミクスと車両空力の双方向連成解析システム及び大気変動風発生モジュールを開発し、実走行時の燃費及び操安性評価のためのテスト計算を実施し、定性的な妥当性を確認した。

■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



time = 0.5000[s]
x = 14.5995[m], y = -0.0038[m], z = 0.5509[m]
roll = 0.0458[deg], pitch = -0.3455[deg], yaw = 0.0029[deg]
vel = 27.8522[m/s], slip = -0.0031[deg]

■大気乱流を模擬した変動風発生モジュールの開発

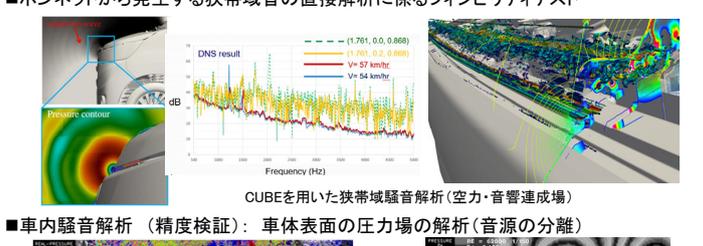


直進走行時の操舵入力(左)と車体空力応答(右) レーンチェンジ時の操舵入力(左)と車体ロール角変化(右)

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フィードバック音の直接解析を実施し、音源構造に関する新たな知見を得た。また、FFX(LBM法)を用いて車体周りの空力音響計算を実施し、FFB+FFB-ACOUSTICSによる結果と比較し、妥当性を検証した。

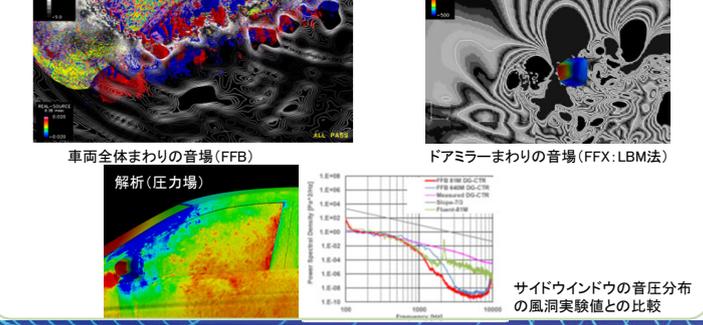
■ボンネットから発生する狭帯域音の直接解析に係るフィジビリティテスト



DNS result Pressure contour Frequency [Hz]

CUBEを用いた狭帯域騒音解析(空力・音響連成場)

■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)



車両全体まわりの音場(FFB) ドアミラーまわりの音場(FFX: LBM法)

解析(圧力場) サイドウィンドウの音圧分布の風洞実験値との比較