



AIの活用によるHPCの産業応用の 飛躍的な拡大と次世代計算基盤の構築

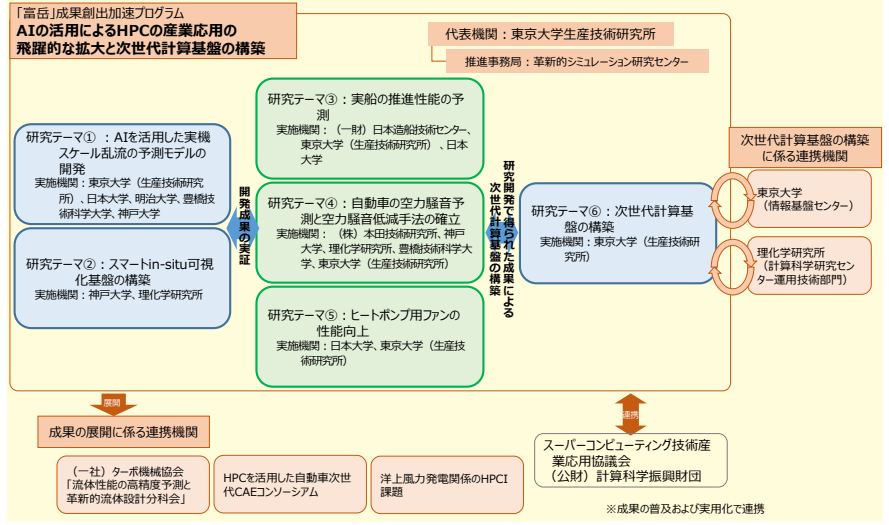


課題代表者 長谷川洋介 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター 教授

概要

AIを活用することによってHPCの適用範囲を飛躍的に拡大するための研究開発を実施し、強力な産学連携体制の下、その効果を実証します。さらに、大規模な産学連携コンソーシアム組織等と連携することによって、実証研究の成果を幅広い産業分野に展開します。また、研究成果の社会実装、すなわち、研究成果の実用化を加速するために次世代計算基盤を構築します。

本課題は、HPCの産業応用を飛躍的に拡大し、産業界におけるHPCの実用化を加速するための基盤的な研究、基盤研究の産業上の効果を検証するための、カーボンニュートラル時代のものづくりを代表する実証研究、および、実証された基盤研究の成果を幅広い産業分野に展開するための次世代計算基盤の構築に係る6つの研究テーマを実施することによって補助事業の目的を達成することとしています。



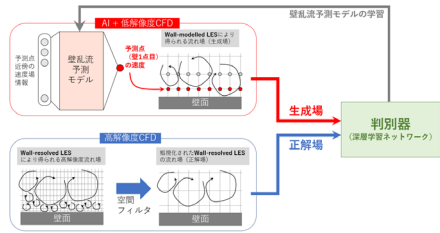
実施機関：東京大学、神戸大学、豊橋技術科学大学、日本大学、明治大学、理化学研究所、(一財)日本造船技術センター、(株)本田技術研究所

実施内容

研究テーマ① AIを活用した実機スケール乱流の予測モデルの開発

実施機関：東京大学、日本大学、明治大学、豊橋技術科学大学、神戸大学

データの中に潜在する特徴量やパターンを抽出することによって、計算コストを飛躍的に軽減できる壁面挙動予測モデルを開発します。さらに、多数の計算結果を集約することにより設計空間を短時間に探索できる高精度なサロゲートモデルを構築します。

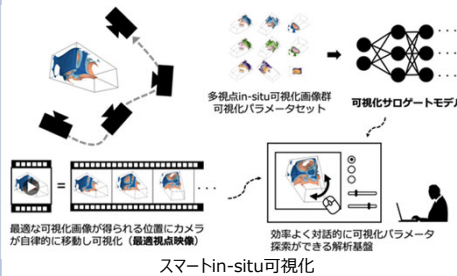


開発する壁乱流予測モデルの概念図

研究テーマ② スマートin-situ可視化基盤の構築

実施機関：神戸大学、理化学研究所

自動車などの輸送機器の空力・騒音問題を主な対象として実証研究に用いられてきた複雑現象統合シミュレーションプラットフォームCUBEの機能を拡充してHPCの適用分野を飛躍的に拡大するために、スマートin-situ可視化基盤の構築に係る研究開発を実施します。

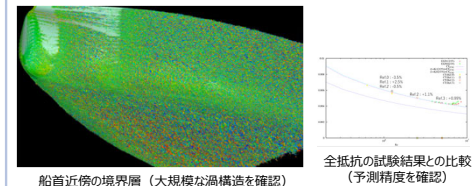


スマートin-situ可視化

研究テーマ③ 実船の推進性能の予測

実施機関：(一財)日本造船技術センター、東京大学、日本大学

研究テーマ①で開発する壁面挙動予測モデルを活用して、模型試験スケールの流場と模型船の推進性能を予測する技術を研究開発します。さらに、実船スケールの流れ場と実船の推進性能を予測し、試験結果等と比較することによって、予測精度を検証します。

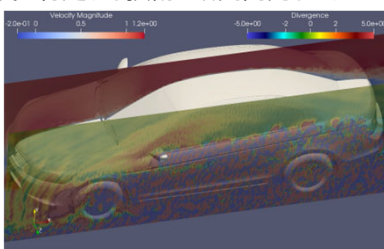


FrontFlow/blue!による船体抵抗の予測結果

研究テーマ④ 自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立

実施機関：(株)本田技術研究所、神戸大学、理化学研究所、豊橋技術科学大学、東京大学

研究テーマ①で開発する壁面挙動予測モデルを活用して、自動車の開発現場で実施可能な、空力騒音を精度良く予測する技術を構築します。さらに、研究テーマ②で開発する研究成果を活用して、車両まわりの主要な空力音源を高精度に特定する技術を研究開発します。



車両まわりの音場

研究テーマ⑤ ヒートポンプ用ファンの性能向上

実施機関：日本大学、東京大学

研究テーマ①で開発する、高速かつ高精度な性能・騒音予測のためのサロゲートモデルを活用して、従来は検討されていなかった広範な設計パラメータを探索することによって、従来性能を大幅に上回るプロペラファンを設計する技術を研究開発します。

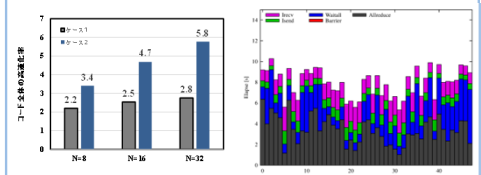


プロペラファン

研究テーマ⑥ 次世代計算基盤の構築

実施機関：東京大学

HPCアプリケーションを、GPGPUに移植し、HPCシミュレーションを幅広い産業分野に展開します。また、アプリケーションの実効性能がメモリー性能律速にならない解析アルゴリズムを研究開発するとともに、「富岳」の実効通信性能を向上させるための基盤研究を実施します。



高F/B比アルゴリズムの効果の検証例

通信テーブルの最適化例



AIの活用によるHPCの産業応用の 飛躍的な拡大と次世代計算基盤の構築



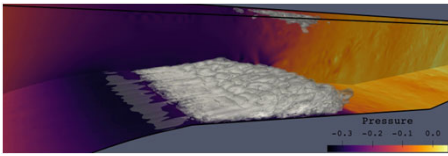
課題代表者 長谷川洋介 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター 教授

利用するアプリケーション

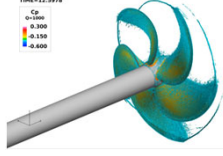
FrontFlow/blue (FFB)

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



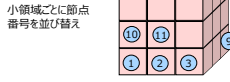
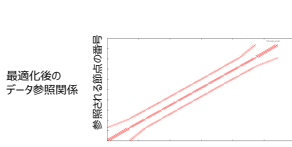
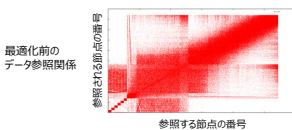
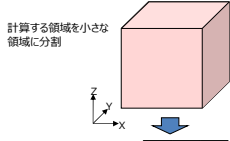
翼まわりのキャビテーション流れのシミュレーション



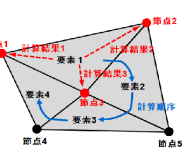
船舶のプロペラまわりの流れのシミュレーション

FFBのメモリー転送速度を向上させるための工夫

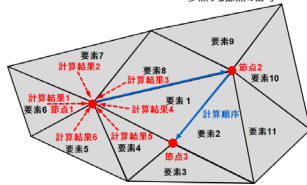
・メモリー内のデータ配置の最適化



・有限要素法の新しい計算方法を考案

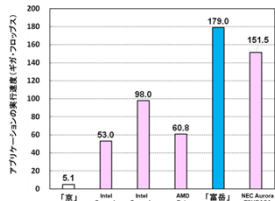


従来の有限要素法の計算方法

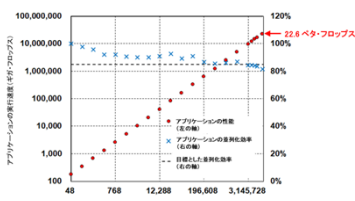


本研究で考案した計算方法

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



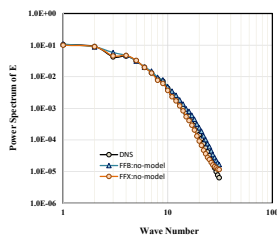
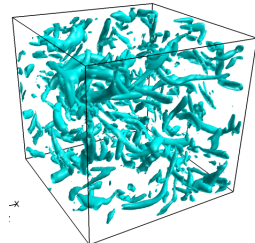
「富岳」を用いて、22.6 ペタ・フロップスという、実際のアプリケーションとしては驚異的な計算速度を実現

FFX

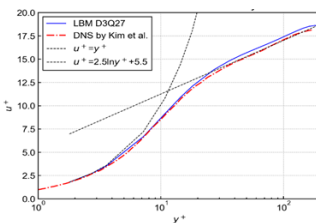
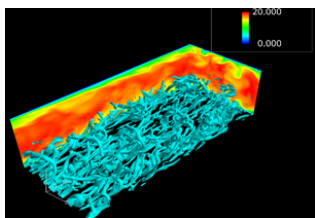
- Lattice Boltzmann法 (LBM) による超大規模乱流/空力音解析
- 階層型直交格子法 (BCM: Building Cube Method) による計算格子の自動生成
- メモリ使用量約1/20, 計算速度約20倍でFFBと同程度の解析精度

FFXの解析精度の検証例

一様等方性乱流

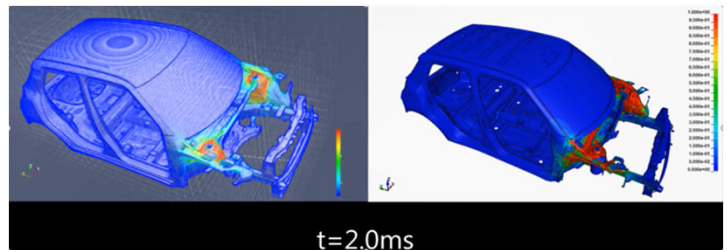
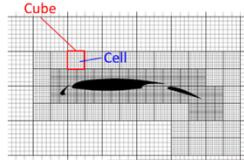


チャンネル乱流



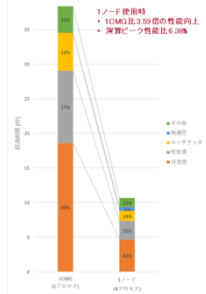
CUBE

- 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



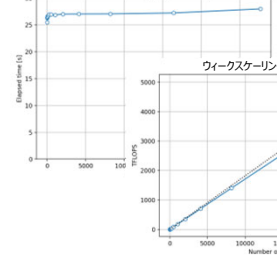
「富岳」チューニング状況 (単体ノード性能)

1CMG及び1ノードの実行時間の比較

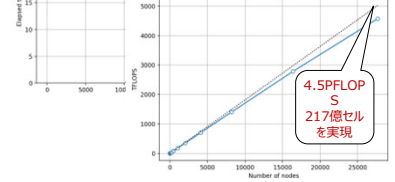


「富岳」チューニング状況 (並列性能)

ワークスケーリング (経過時間)

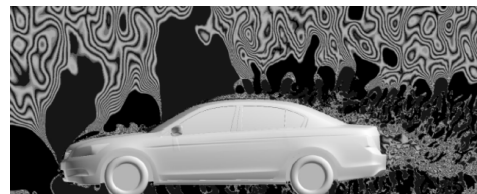


ワークスケーリング (FLOPS)

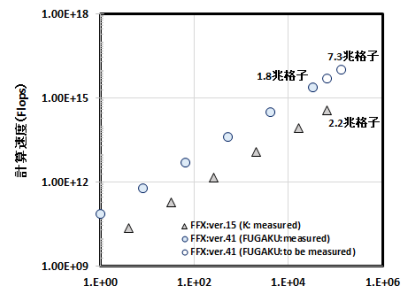


「富岳」単体234.6 GFLOPS を実現

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

AIの活用によるHPCの産業応用の 飛躍的な拡大と次世代計算基盤の構築

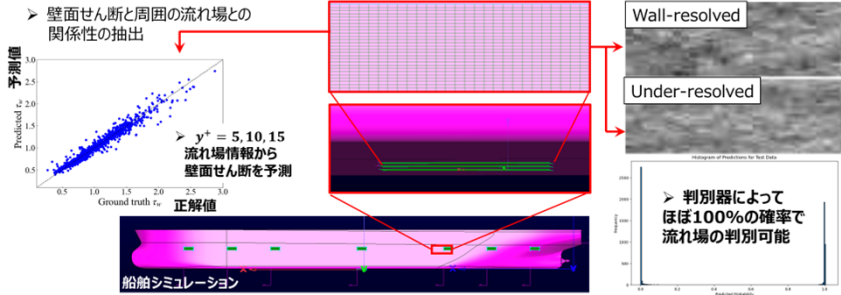
課題代表者 長谷川洋介 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター 教授

これまでに得られた成果概要 (その1)

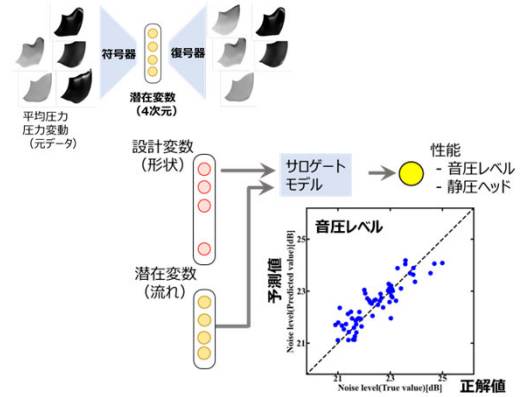
研究テーマ① AIを活用した実機スケール乱流の予測モデルの開発

- ✓ 壁面モデルの開発について、ネットワーク構造を提案し、壁面近傍の情報から壁面せん断応力を出力するネットワーク(生成器)、および、壁モデルを用いて計算された流れ場とWall-resolved LESで得られた流れ場を判別するネットワーク(判別器)の基盤コードを開発した。
- ✓ サロゲートモデルについては、ネットワークの基本構造を検討し、従来の設計変数に加えて、流れ場の空間構造を組み込んだネットワーク、および、流れ場の空間情報を自己符号化器により低次元に圧縮するネットワークを開発した。

壁乱流予測モデルの開発



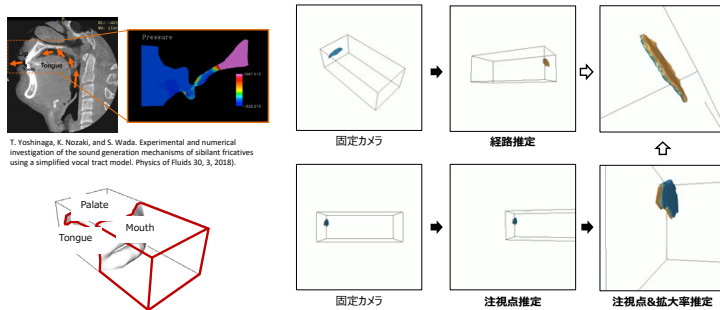
流れ場を考慮したサロゲートモデルの開発



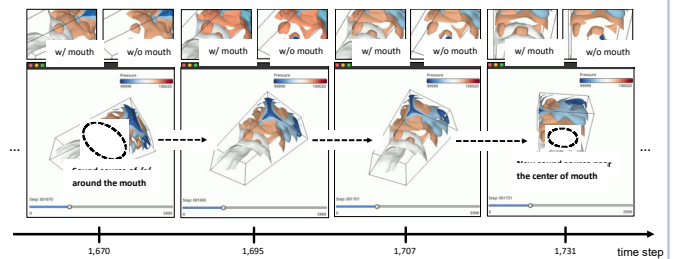
研究テーマ② スマートin-situ可視化基盤の構築

- ✓ 独自に開発を進める可視化基盤ソフトウェア (Kyoto Visualization System (KVS)) を使ってin-situ可視化を実現するための基本フレームワークを開発した。そして、CUBE、および、OpenFOAM等向けの接続機能を開発し、動作検証と性能評価を行った。
- ✓ 最適視点推定機能を実装したモジュールや最適な注視点を推定する技術を開発し、基本フレームワーク向けのモジュールとして実装し、正常に動作していることを確認した。

可視化事例 (歯茎摩擦音発生シミュレーション)



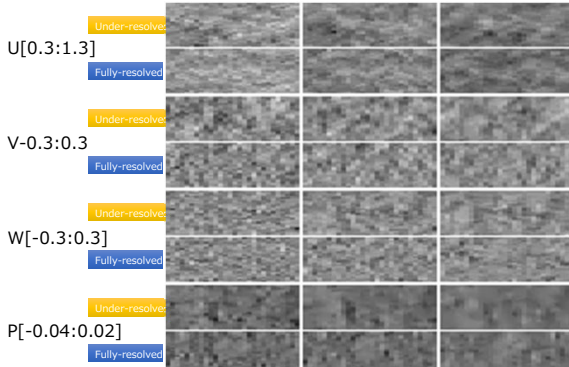
音源位置と推測される口元付近の圧力変動の様子を自動撮影



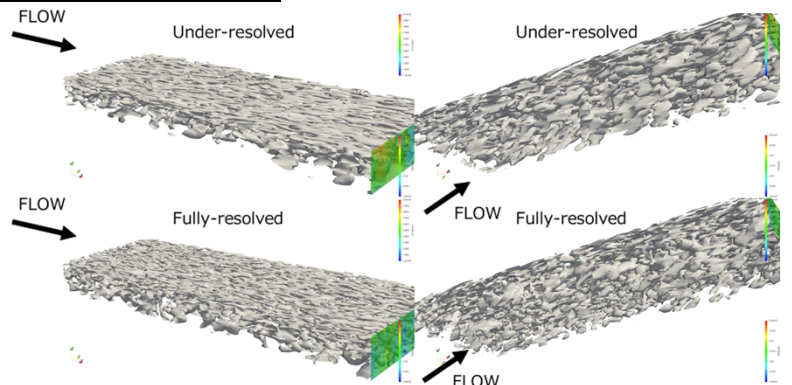
研究テーマ③ 実船の推進性能の予測

- ✓ FrontFlow/blueに対する壁面挙動予測モデルの実装準備として、実際に壁面挙動予測モデルの使用が想定される船の形状で、壁面挙動予測モデルの入っていない粗い計算格子を使った計算結果とWall-resolved LESの結果について統計的性質の違いについて分析した。
- ✓ 壁面挙動予測モデルの入力に必要なデータの抽出を効率的に行えるようなコードの改変を行った。Under-resolved LESの計算結果は、壁付近の小さな渦が再現できず、摩擦応力を過大評価する場合と過小評価する場合があることなどの重要な知見が得られた。

壁乱流予測モデルの入力に必要なデータの例



船底付近の壁付近の渦の様子



AIの活用によるHPCの産業応用の 飛躍的な拡大と次世代計算基盤の構築

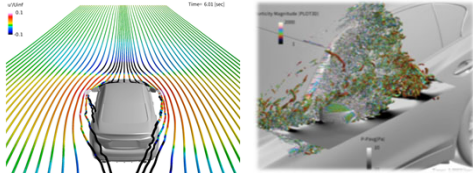
課題代表者 長谷川洋介 東京大学生産技術研究所革新的シミュレーション研究センター 教授

これまでに得られた成果概要 (その2)

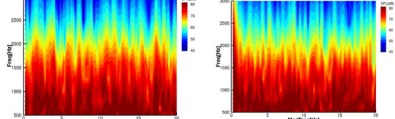
研究テーマ④ 自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立

- ✓ CUBEに対する壁面挙動予測モデルの実装準備として、KEEPスキームの実装と壁面近傍における計算の不安定性の改善、実車を対象とした広帯域バサバ音予測のためのベンチマーク問題の選定と空間解像度の検討、バサバ音予測のための変動風モジュールの開発を実施した。
- ✓ FFXに対する壁面挙動予測モデルの実装準備として、格子ボルツマン法の壁面処理について検討し、安定な解析を行えるようにした。解析結果に関して、波数周波数スペクトル解析を用いて音場と流れ場に分離し、音源を解析できることを確認した。

CUBEを用いた空力騒音予測

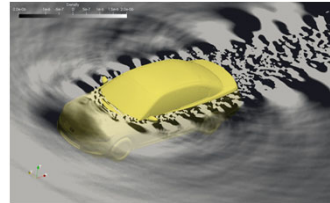


変動風再現下での車体近傍の流線の時間変化 (左) と音源近傍の流れ構造 (右)

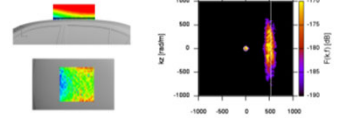


サイドミラーでの圧力変動の変調パースペクトログラムの比較 (左: 定常流, 右: 変動風)。特に低変動周波数で大きな差異が観察されている

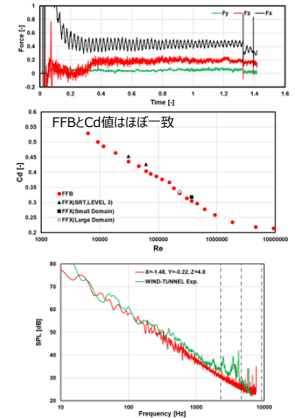
FFXを用いた空力騒音予測



実車を対象とした計算例



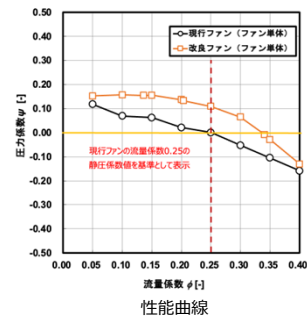
乱流境界層中の波数・周波数スペクトル



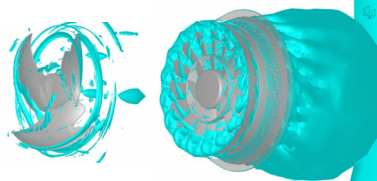
研究テーマ⑤ ヒートポンプ用ファンの性能向上

- ✓ 自動車ラジエータ用ファンなどの軸流ファンを参考にして、ファンの上流設計で重要となる、主要な形状パラメータと性能との関係を調査した。この調査にあたり、実機ファンの3次元形状測定に基づく設計とモデリングを行う環境を構築した。
- ✓ ファン単体での性能評価によるプロペラファンの数値解析を行い、従来ファンと比較して設計パラメータ (形状) の範囲を大幅に拡大した概念設計を実施してその有効性を確認した。概念設計した開発したファンをエアコン室外機流路に組み込んだ数値解析を実施し、従来ファンの性能を上回る結果を得ることができた。

ファン単体の性能

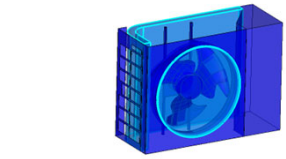
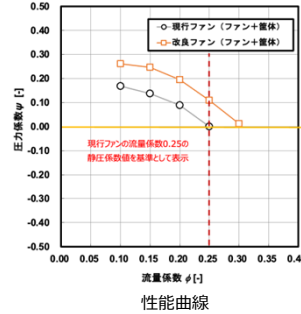


自動車用ラジエータファンの3次元形状測定に基づくモデリング

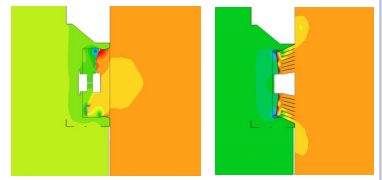


現行ファン
ファン単体の内部流れの流動予測結果
改良ファン

ファン+筐体の性能



熱交換器の圧力損失を考慮したファンと筐体流路のモデリング



現行ファン
筐体に組み込んだファンの流れの予測結果 (圧力カウンター図)

特許出願済み: ファン装置、空調用室外機及び給湯ヒートポンプ用室外機、鈴木康方、三木悠也、鹿園直毅

研究テーマ⑥ 次世代計算基盤の構築

- ✓ 課題内の代表的なアプリケーションFrontFlow/blueをNVIDIA社製GPU A1に移植し、GPU単体実効性能257 GFLOPS、64 GPUの並列実効性能12,963 GFLOPS、並列化効率78.8 %を達成した。
- ✓ 「富岳」におけるプロセス間通信に要する時間を短縮し、並列化効率を向上させるために、ランクマップを最適化するアルゴリズムを開発し、192ノード・384プロセスの並列計算において、通信時間を24.0 %短縮し、通信時間を含めた計算時間を5.4 %短縮した。

中核アプリケーションのGPGPUへの移植

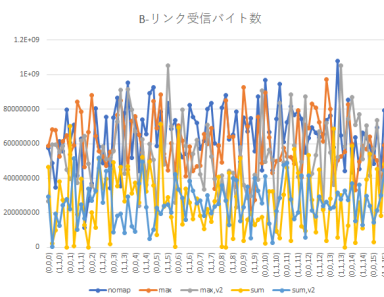
要素数 [million]	演算性能 [GFLOPS]	ピーク性能比 [%]
1	186.9	0.96
2	228.6	1.17
4	257.2	1.32

A100の単機性能の計測結果

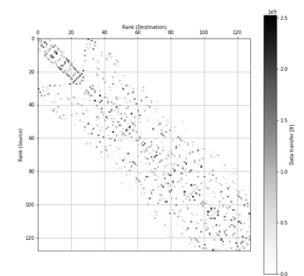
GPU数	要素数 [million]	演算性能 [GFLOPS]	並列化効率 [%]
1	4	257	-
16	64	3,754	91.3
64	256	12,963	78.8

並列性能の計測結果 (weak-scale, mpi+ompi-cuda)

中核アプリケーションの並列化効率の向上



FrontFlow/blueの「富岳」上のランクマップの最適化



転送データ量で重み付けられた通信ペアの可視化 (128プロセス、100時間ステップ)