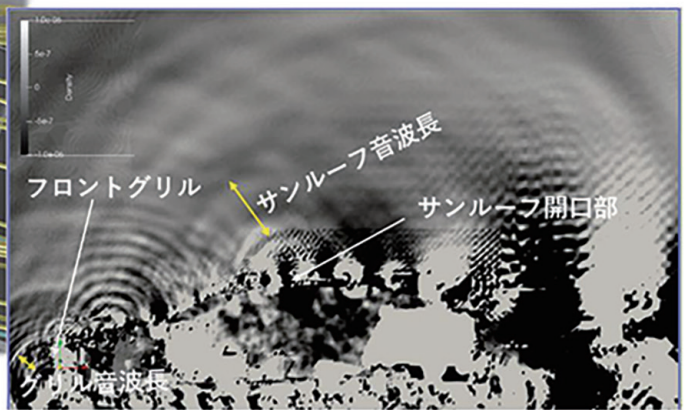
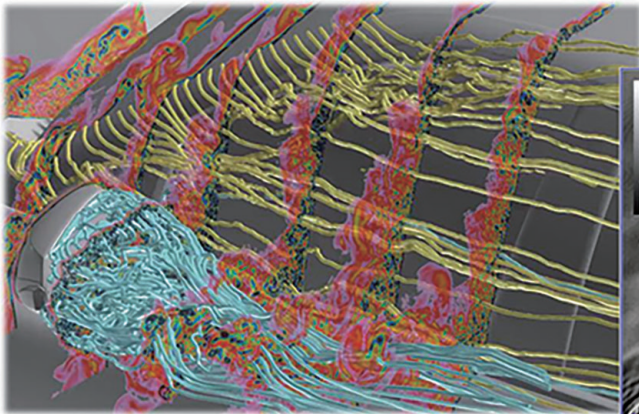
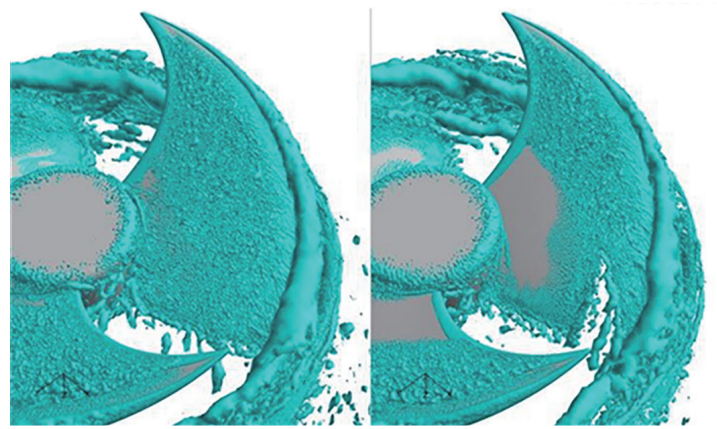
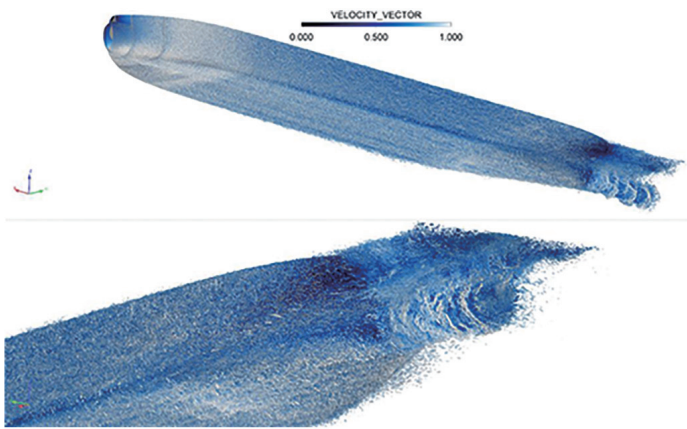


計 算 工 学 ナ ビ

計算工学ナビ・ニュースレター2026年春号



■計算工学ナビ・特集

「富岳」成果創出加速プログラム 「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」プロジェクトの概要と進捗について 東京大学生産技術研究所 長谷川 洋介
各テーマの研究開発と成果の概要

東京大学生産技術研究所 長谷川 洋介 明治大学 亀谷 幸憲 神戸大学 坂本 尚久 日本造船技術センター 西川 達雄
神戸大学/理化学研究所計算科学研究センター 坪倉 誠 豊橋技術科学大学 飯田 明由 日本大学 鈴木 康方 日本大学 加藤 千幸

文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム 領域③「産業競争力の強化」 「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」

プロジェクトの概要と進捗について



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
長谷川 洋介 センター長・教授

文部科学省は2020年度から「富岳」成果創出加速プログラムを実施し、2023年度からは、「AI(人工知能)・データ科学との融合・連携」、「社会実装に向けた産業界との連携」、「次世代を見据えたアプリケーションに繋がる取り組み」、「基礎科学の新たな展開」などにおいて、これまででない新規成果の創出が期待される研究課題への取り組みを進めてきました。その課題の一つが、領域③「産業競争力の強化」の大規模連携課題である「AIの活用によるHPC(High Performance Computing)の産業応用の飛躍的な拡大と次世代計算基盤の構築」です。AIの活用によってHPCの産業応用を飛躍的に拡大できることを実証するとともに、産学連携コンソーシアムなどを組織して研究成果を幅広いものづくり分野に展開することをめざし、さらに、次世代の計算基盤となる解析アルゴリズムの開発にも取り組んできました。

今号では、研究開発課題責任者である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の長谷川洋介センター長・教授に、プロジェクトの概要と成果についてお話しいただきました。

AIの活用によりHPCの産業応用を 拡大し実用化を加速

2023年4月に開始した文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム」の「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」が2025年度末で終了します。まずは、どのようなプロジェクトで、何をめざして研究開発が行われてきたのか、ご説明ください。

わが国のフラッグシップシステムであるスーパーコンピュータ「富岳」では、Society 5.0の実現に貢献するために、大規模シミュレーションとAI・データ科学の融合・連携による計算科学技術の活用を推進するための研究開発が盛んに行われています。熱流体工学などにおいてもAI・データ科学の活用は加速し、欠くことのできないツールとして産業界での研究開発や製品開発においても積極的に活用されることが期待されています。このプロジェクトは、2020年度から2022年度に実施された「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」において示すことができたHPCシミュレーション技術の適用範囲を、AI・データ科学を用いることによって飛躍的に拡大させ、得られた効果を強力な産学連携体制のもとで実証し、その成果を幅広い産業分野に展開することをめざし、さらには次世代計算基盤を構築することも目的の一つとして掲げています。

具体的には、産業界においてHPCの実用化を加速するための「基盤的な研究」、基盤的研究の産業界での効果を検証するための「実証研究」、そして、実証された基盤研究の成果を次世代の計算基盤に展開するための「次世代計算基盤の構築」について、以下に示す6つの研究テーマを実施してきました。

「基盤研究」としては、HPCの計算コストを飛躍的に削減できる壁面挙動予測モデルの開発と、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するための「AIを活用した実機スケール乱流の予測モデルの開発」(研究テーマ

①)、複雑現象統一解法フレームワークCUBEの機能を拡充し、利用者が計算環境やデータの規模を意識することなく、シミュレーションパラメータや可視化パラメータを探索し、調整することを可能にする「スマートin-situ可視化基盤の構築」(研究テーマ②)を実施しました。

「実証研究」としては、「基盤研究」で得られた成果の産業上の効果を実証し、カーボンニュートラル時代に求められるものづくりの在り方を象徴するテーマとして、研究テーマ①の成果を活用した「実船の推進性能の予測」(研究テーマ③)、研究テーマ①と②の成果を活用した「自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立」(研究テーマ④)、および、研究テーマ①の成果を活用した「ヒートポンプ用ファンの性能向上」(研究テーマ⑤)の3つを実施してきました。

「次世代計算基盤の構築」では、HPCアプリケーションを極めて高い並列計算能力を有するGPU(Graphics Processing Units)に移植したり、「富岳」の実効通信性能を向上させるなど、今後の計算機ハードウェアの進展を視野に入れつつ、産業界におけるHPCの実用化を加速するための研究

開発に取り組んできました。

2つの基礎的な研究

6つの研究テーマについて、3年間でどのような取り組みが行われ、成果が得られたのかご説明ください。

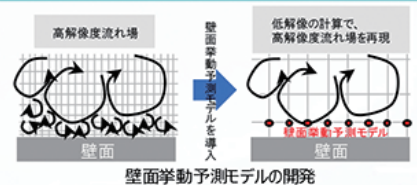
各研究テーマについては、担当者からの詳しい説明がありますので(P.4~7)、ここでは、できるだけ分かりやすく紹介しましょう。

研究テーマ①の背景として、流体の計算には膨大な計算コストがかかるという問題があります。ある空間内の流れを解くには、その空間を多数の格子状に切り分けて各点における流体の速度を計算します。このとき、壁の近くにはとても小さな渦が多数生成され、それが壁から離れたより大きな渦に影響を及ぼすため、大きな渦と小さな渦を同時に解かなければ正確な予測ができません。これを実現するためには、壁の近くに多数の計算格子が必要となり、膨大な計

1 AIを活用した実機スケール乱流の予測モデルの開発

計算コストを飛躍的に軽減できる壁面挙動予測モデルの開発と、高精度なサロゲートモデルの構築を実施しています。

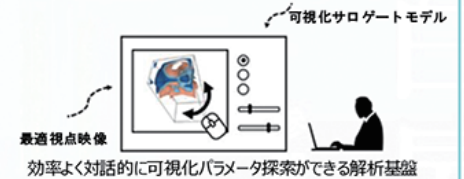
実施機関：東大、日大、明大、豊橋技科大、神戸大



2 スマートin-situ可視化基盤の構築

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ています。

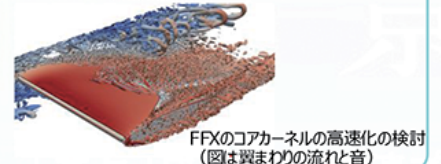
実施機関：神戸大、理研



6 次世代計算基盤の構築

HPCアプリケーションを、GPGPUに移植し、また、「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ています。

実施・連携機関：東大、理研



▲図1 「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」の6つの研究テーマ

開発成果の実証

算コストを要します。もちろん、ある特定のケースのみを解くなら可能な場合もありますが、現実の製品開発では、多数の候補となる形状の性能を予測しなければならず、その計算量は「富岳」が10倍、100倍速くなるといった次元では到底解決できない問題なのです。その計算負荷を下げるためにAIを活用しようというのが研究テーマ①です。具体的には、AIに小さな渦までを再現した高解像度計算と粗い格子を用いた低解像度計算のそれぞれで得られた流れ場を読み込ませると、両者の違いを学習させることができます。このように、計算解像度の違いが流れ場に与える影響を学習できれば、低解像度計算の結果をどのように修正すれば高解像度計算の結果に近づくかも、AIが教えてくれるようになります。そうすることによって、粗い計算格子を用いた計算により、高解像度HPCシミュレーションと同等の精度を維持しつつ、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ています。

研究テーマ②の「in-site可視化」では、大規模シミュレーションの実施後に保存された数値データを可視化するのではなく、シミュレーション計算を実施しながら、時々刻々得られる流れ場をリアルタイムで可視化処理を行う手法のことです。例えば、大規模な流体シミュレーションでは数百億点といった膨大な計算格子点で計算が行われ、その結果が計算機のなかにデータとして蓄積されます。しかし、その計算結果を私たちは直接「見る」ことはできません。可視化ソフトなどを使って人に見えるように「絵」をつくることはできますが、数百億のデータには、その「絵」に表しきれない流れや情報が山のように含まれているのです。計算規模が大きくなるほど、見えにくくなってしまいます。それを、計算しながらどこを見ればいいのかをAIが自動的に見つけ出し、見たいものを見たい方向から抽出する、そんな手法をつくり出しているのが研究テーマ②です。AIの活用という意味では、6つの研究テーマのなかで、私はこの②が非常に重要であると思っています。AIといっても、特別にすごいことをやっているわけではありません。データを

見て特徴的なものを抽出するのは人間でもできなくはありませんが、数百億のデータのなかから瞬時に正確にそれを見つけ出すのは至難の技能です。AIを活用することで、多数の人間が時間をかけなければできない処理を自動的に短時間で実行できる点が重要なポイントだと思えます。

3つの実証研究

研究テーマ③、④、⑤は、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ための『富岳』を利用した革新的流体性能予測技術の研究開発（2020～2022年度）で実証化に向けたプロジェクトで、さらにAIの活用によって予測の高度化を図ろうとするものです。

それぞれの研究テーマに①と②の成果を活用して、ものづくりに生かすための研究開発を進めていくことをめざしています。例えば研究テーマ③は、①で開発した壁面挙動予測モデルを、FrontFlow/blue (FFB) という Large Eddy Simulation (LES) に基づいた流体解析アプリケーションに実装して、模型および実船スケールの流れと推進性能を予測し、試験データなどと比較することで予測精度を検証しています。船の流体シミュレーションでは、先ほど説明した大きな渦から小さな渦までのスケール比がとても大きいので、計算負荷が非常に大きく、実船レベルですべての渦を解像した計算は困難です。そこで、これまで小さな模型船で予測しなければならませんでした。しかし、研究テーマ①の成果を取り入れることで格子点が減らせるので、実際の船に近い条件で予測計算ができるようになることが期待されます。

研究テーマ④でも、①で開発した壁面挙動予測モデルを活用し、自動車の開発に必要な格子規模の流体解析シミュレーションによって空力騒音を精度良く予測する技術を構築しています。流線型の船と違い、自動車は形状が入り組んでいるため、流れ場はより複雑になります。②のス

マート in-situ 可視化の活用により、HPCシミュレーションによる膨大なデータを基に、車体表面の圧力変動を可視化したり、車両まわりの空力音源などを特定する技術などが開発されています。

研究テーマ⑤は、①の研究成果を活用し、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り、従来性能を大幅に上回るプロペラファンを設計することをめざしています。先ほどは説明しませんでした。研究テーマ①では、高精度なサロゲートモデルの構築にも取り組んでいます。サロゲートモデルとは、代理モデルとも呼ばれ、膨大な計算コストを要する数値シミュレーションを一切行うことなく、機械学習を活用して流れ場を近似的に予測する技術です。⑤では、サロゲートモデルによる高性能なプロペラファンの設計を行おうとしています。

一方で、このプロジェクトでは、次世代計算機「富岳NEXT」に向けた研究開発も実施しています。それが研究テーマ⑥です。これまではCPU (Central Processing Unit) ベースで流体力学計算は行われてきましたが、今日では並列処理を得意とするGPUが科学計算やデータ解析、AIの学習処理など幅広い分野で利用されています。「富岳」に続く次世代計算機「富岳NEXT」の計算ノードでもGPUを主体とすることが決まっています。そうした新しい構造になったとき、高い成果を得るためには、新しいシステムのもとでこれまでの流体力学計算とAIを一体化したシミュレーションに最適化し直していかなければなりません。⑥では、こうした「富岳NEXT」に向けた技術開発とともに、高速に稼働するアプリケーション開発の基盤となる技術の研究を進めています。

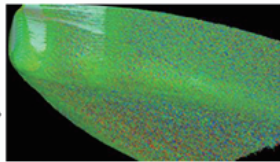
2025年度末で、このプロジェクトは終了となりますが、当初の目的は達せられたといえるでしょう。

現時点ではプロジェクトの終了までまだ時間が残されており、やるべきことが多少残っていますが、終了時には目的は120%達成できたといえると思います。プロジェクトが動き出した当初は、私自身AIの可能性について懐疑的な部分もありました。しかし、今は思っていた以上に使えることを実感しています。例えばAIと大規模計算を組み合わせることによって、さらに計算性能を高めることができたり、サロゲートモデルのように計算を実行せずに瞬時に近似的な結果が得られるなど、これまでのシミュレーションではできなかったことが、このプロジェクトを通して確かな成果として得られ、「富岳」のなかでもAIとシミュレーションが一体となり価値を生み出すためのフレームワークが提案できました。「富岳」のような最先端の大規模計算機のなかでAIを組み合わせた流体計算ができることを示したのは、私たち大学の研究者はもちろん、産業界の開発者の方々にとっても大きな意味があると思います。実証研究の成果を社会実装に向けて進めることで、HPCとAIを活用し、産業応用を推進するための基盤構築が、この3年間で達成できたと思います。

3 実船の推進性能の予測

研究テーマ①の成果を活用して、模型試験スケールと実船スケールの流れ、そして、模型船と実船の推進性能を予測する技術の開発を実施しています。

実施機関：日本造船技術センター、東大、日大

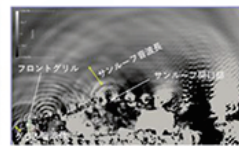


水槽試験の様子 (日本造船技術センター提供)
船首近傍の境界層 (大規模な渦構造を確認)

4 自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立

研究テーマ①と②の成果を活用して、空力騒音の予測技術や車両まわりの主要な空力音源を特定する技術の開発を実施しています。

実施機関：本田技研、神戸大、豊橋技科大、東大、理研



CUBE (左) と FFX (右) を利用した空力騒音予測

5 ヒートポンプ用ファンの性能向上

研究テーマ①の成果を活用して、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に係る研究開発を実施しています。

実施機関：日大、東大



負圧面側の動翼まわりの流れ構造



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

革新的壁乱流予測モデルの開発

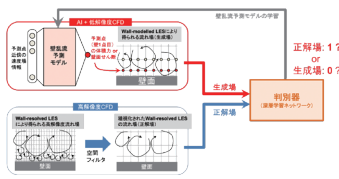
東京大学生産技術研究所
革新的シミュレーション研究センター
センター長・教授

長谷川 洋介

工学で見られる多くの流れは乱流であり、それらが壁面と相互作用する際に、固体壁面と流体との間で運動量・熱・物質の輸送が生じます。自動車、列車、航空機、船舶などの高速移動物体に働く流動抵抗は、物体表面と周囲流体との間の運動量交換に起因するものであり、その正確な予測および制御は、これらの輸送機器の省エネルギー化、高効率化に向けて、極めて重要です。流れの数値シミュレーション (CFD: Computational Fluid Dynamics) は、複雑な流れ場の時空間分布を計算機上で再現できるため、工学設計において必要不可欠なツールとなっています。

しかし、一般に壁面近傍に生じる渦構造はその時空間スケールが小さく、その解像には膨大な計算コストを要します。特に、物体の長さスケールや流速のスケールが大きくなると (すなわち、流れのレイノルズ数が増加すると) 壁面遠方に存在するスケールの大きな渦構造と壁近傍の微細構造のスケール比がより顕著となるため、工学流れを忠実に再現することは、現代のスーパーコンピュータを持ってしても困難となります。さらに、ものづくりの現場では、候補となるさまざまな形状の性能評価が必要となり、飛躍的な計算コストの低減が求められます。

本研究では、スーパーコンピュータ「富岳」により再現された壁近傍の微細な乱流構造の時空間データベースに基づき機械学習モデルを構築し、これを低解像度流体シミュレーション (CFD) に



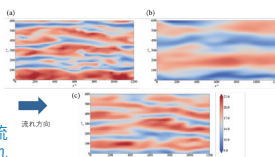
▲図1 本研究で考える壁乱流予測モデルの概念図

組み込むことによって、解像できない微細な乱流構造の効果をモデル化することで、計算コストを大きく削減する新しい計算手法を提案し、その有効性を示すことを目的としています。

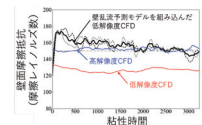
本研究で提案する壁乱流予測モデルの概念図を図1に示します。本研究では、まず、同一の流動条件下において、高解像度計算と低解像度計算の双方を実行し、両者の多数の瞬時の流れ場を学習データベースとして蓄積します。例として、平滑な壁面に沿って流れる乱流を対象として、壁から粘性長さで15程度離れた平面における、高解像度CFDと低解像度CFDにより得られる瞬時の流れ場の比較を図2(a) (b)に示します。これより高解像度CFDにおいては、より細かい乱流構造が再現されているのに対して、低解像度CFDにおいてはスケールの大きな構造のみ再現されていることが分かります。これは計算解像度が不足するために、本来、存在する微細な渦構造が再現できないためです。本研究では、まずこの異なる解像度の流れ場のデータベースを用いて、両者を判別する判別器を開発しました。具体的には、瞬時場の画像データを深層ネットワークに入力し、判定結果を0 (低解像度データ) から1 (高解像度データ) で出力します。判別器の学習が適切に行われると、

▶図2 壁面に沿って流れる乱流の瞬時場の例

(a) 高解像度CFD結果、
(b) 低解像度CFD結果、
(c) 本研究で提案する壁乱流予測モデルにより修正された低解像度CFD結果。



▶図3 計算解像度が壁面摩擦の予測に与える影響



判別器は学習データにない未知の流れ場の空間分布が入力された際、それが高解像度CFDから得られた結果か、それとも低解像度CFDの結果かを判断できるようになります。次に、判別器が解像度の違いを判別できるようになると、低解像度CFDで得られた流れ場に対して、それが高解像度CFDの結果と判別できなくなるように修正することも可能となります。そこで、本研究では低解像度CFDを実施し、時々刻々、得られる瞬時の流れ場を判別器に入力し、それが高解像度CFDの結果と見分けがつかなくなるように、各瞬間で流れ場を修正するを行いました (図2(c)参照)。その結果、図3に示すように、高解像度CFDに比べると計算時間が100倍以上短縮された低解像度CFDにおいて、通常であれば、壁面に働く流動抵抗の予測において20%程度の誤差が生じるどころ、本研究で開発した判別器に基づく壁乱流予測モデルを組み込むことで、その誤差が5%程度に抑えられることを確認しました。

本研究成果は、ハイパフォーマンス・コンピューティング (HPC) により得られる膨大なデータを機械学習モデルにより学習することにより、従来のCFDを飛躍的に加速できる可能性を示唆しており、AIとHPCの融合技術として今後の発展が大いに期待されます。



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

高精度 CFD 解析による流れ場情報を用いたサロゲートモデル開発

明治大学理工学部機械情報工学科
専任講師

尾谷 幸恵

●流体機器の性能

物体周りの流れにおける流体抵抗や熱交換器などの流体機器の性能は、複雑な対流現象の結果として現れます。コンピュータの性能や、数値解析技術の発達により、流れ場の時空間予測精度は著しく向上しており、機器設計において大きな役割を果たしています。

一方で、一般に乱流場の高精度数値解析には依然として莫大な計算コストが必要であり、最適設計などの計算負荷の高い問題に対して高精度解析を利用することは、スーパーコンピュータを用いた場合であっても現実的ではありません。高性能な熱流体機器の設計需要の高まりを背景に、時空間情報の自由度を低減し、低コスト解析から性能を推定するサロゲートモデルの需要が高まっています。

●深層学習を用いたサロゲートモデル

設計変数のみから性能を予測する関数として、従来は計測データや数値解析結果に基づく近似

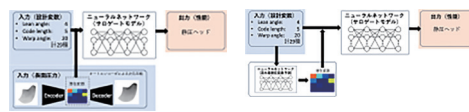
式、すなわち経験式が用いられてきました。複雑な流動現象の結果として得られる性能に対して、このような限られた条件下で導かれた経験式を利用するには限界があることは容易に想像できます。そこで、深層学習を用いた非線形サロゲートモデルに注目が集まり、一定の成果が報告されています。しかし、これらのモデルは設計変数から性能指標を直接予測するものであり、本来考慮されるべき「流れ場」の情報が含まれていません (図1)。本研究では、設計変数に流れ場情報を付加することで、性能予測モデルの精度向上を図ります。

●流れ場情報を予測し、学習材料とする

本研究では、遺伝的アルゴリズムの過程で得られたボックスファンのLES (Large Eddy Simulation) 解析データ [T. Iwase et al., ターボ機械, Vol. 50 (12), 2022, pp. 728-741] を用い、合計29種の設計変数から静圧を予測する問題を対象とします。流れ場情報として、翼表面の平均圧力および圧力変動強度を与えます。この際、オートエンコーダによりデータを圧縮し、潜在次元として取り込むことで、学習コストと安定性の向上を図ります。比較のため、従来の「設



▲図1 従来型サロゲートモデル例 (モデルA)



▲図2 流れ場情報 (圧力統計) を入力に追加 (左: モデルB, 右: モデルC)

A (流れ場情報無)	B (流れ場情報有)	C (流れ場を予測して利用)
2.34×10^{-3}	1.93×10^{-3}	2.02×10^{-3}

▲表1 Root-mean-square errorの比較

計変数→性能」とする予測モデルAと、「設計変数+流れ場情報→性能」(図2)とする予測モデルBを構築したところ、後者 (B) の方が静圧予測精度は向上が確認されました。

流れ場情報を加えることの有効性は確認できたものの、入力に数値解析結果を用いるため、計算コストの問題は依然として残ります。そこで、設計変数から潜在次元の圧力場を予測し、静圧予測の入力として用いる新たな機械学習モデルを構築します (図2)。この場合、入力は29種の設計変数のみであるため、予測モデルの実用上の利便性が高くなります。モデルA~Cの予測精度

を真値からのRMSE (Root-mean-square error) で評価すると (表1)、流れ場を含まないモデルAと比べて、モデルBほどではないものの、モデル

Cでも高精度に予測できることが分かります。本結果では、流れ場情報として翼表面上の圧力統計量を対象としましたが、周囲の圧力場や速度

場へ拡張できる可能性があります。また、サロゲートモデルを利用した設計変数の最適化、すなわち最適設計や流体制御設計への応用が期待されます。



研究テーマ② スマート in-situ 可視化基盤の構築

神戸大学大学院システム情報学研究科
准教授

坂本 尚久

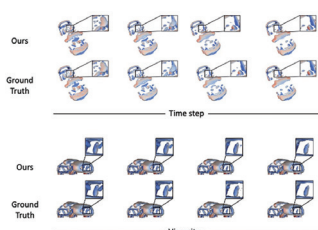
●はじめに

HPC (High Performance Computing) 性能の向上で高精度・大規模シミュレーションが進む一方、出力される数値データが爆発的に増加し、計算後にそのすべてを保存し可視化・分析することが難しくなっています。特に保存に伴うストレージ/I/Oがボトルネックとなり、従来型の後処理解析だけでは運用が立ち行かない場面も増えています。in-situ可視化は数値データを保存せずに可視化結果を出力できますが、生成される膨大な画像から設計に有用な知見を抽出するには依然として手間と時間がかかります。そこで、計算環境やデータ規模を意識せず、計算終了後も探索的・対話的に可視化と分析を行えるスマート in-situ可視化基盤を開発しています。本稿では、その基盤を支える2つの要素技術を紹介します。

●in-situ可視化向け自律移動カメラ

シミュレーション空間に複数の仮想カメラを配置する多視点可視化により、実行後に利用者が視点を選んで効率的に映像を確認できます。しかし、膨大な候補のなかから解析上重要な画像を見つけるのは難しく、重要現象の見逃しや確認作業の冗長化がおり得ます。そこで本研

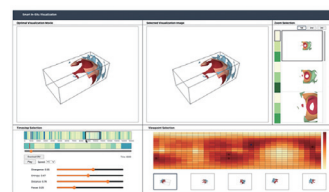
▶図1 可視化サロゲートモデルを使った可視化結果



究では、可視化画像の情報エントロピーに基づいて重要視点を推定し、重要現象を捉えた動画を自動生成する自律移動カメラを開発しました [1]。さらに、画像中で変化が大きい部分領域 (注視点) を推定してフォーカスする機能、ならびに視点・注視点の重要度に重みを与え、時空間上の最短経路として滑らかな視点移動を計算し、利用者の興味に応じた重要映像を対話的に生成する機能を備えています [2]。

●可視化サロゲートモデル

多視点可視化で得られるデータを活用し、指定したシミュレーション/可視化パラメータに対して、任意視点の可視化映像を対話的に生成できる機械学習モデル (可視化サロゲートモデル) を開発しました [3]。敵対的生成モデル (GAN: Generative adversarial networks) を基盤に、識別器に加えて特徴比較器でも生成画像を評価して学習を安定化させ、生成器・識別器双方へ自己注意機構を導入することで、ピクセルシャッフルによる高速な局所生成と大域特徴学習を両立し、視点変化に伴う形状崩れやノイズを抑制しました。近年は3次元ガウシアンブラッキング



▶図2 スマート in-situ 可視化システム

を拡張し、高画質化とモデル軽量化も達成しています。実験では、格子数に依存せず約30 MB程度のモデルでシミュレーション結果を表現でき、指定パラメータに対する任意視点可視化の対話的生成を可能にしました (図1)。

●おわりに

本稿では、スマート in-situ可視化基盤の要素技術として、自律移動カメラと可視化サロゲートモデルを紹介しました。現在は両者を統合し、数値データや大量画像を保持せずに、軽量の学習モデルと最適視点情報を手掛かりとして、大規模シミュレーションを対話的に分析できるスマート in-situ可視化システムの開発を進めています (図2)。

[1] Ken Iwata, Kazuya Adachi, Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka, Chongke Bi, Smart In-Situ Visualization using Information Entropy-based Viewpoint Selection and Smooth Camera Path Determination, SupercomputingAsia 2025 (SCA 2025), pp. 52-59, 2025.3
 [2] Taisei Matsushima, Kazuya Adachi, Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka, A Multi-ROI Camera Motion Exploration Approach for Enhancing Image-based Smart In-Situ Visualization, Proceedings of the Supercomputing Asia and International Conference on High Performance Computing in Asia Pacific Region (SCA/HPCAsia 2026), pp. 340-350, 2026.1
 [3] Yuta Nakasaki, Tomoya Miyake, Naohisa Sakamoto, Development of a Surrogate Model for Generating Visualization Images based on GAN with Self-attention Mechanism, The 44th International Conference on Simulation Technology (JSST2025), pp. 1-8, 2025.9



研究テーマ③ 実船の推進性能の予測

一般財団法人日本造船技術センター
技術開発部 部長代理

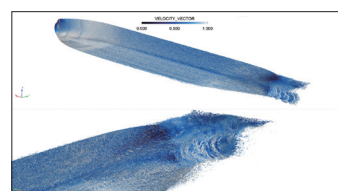
西川 達雄

●背景

一般財団法人日本造船技術センターでは、船舶の曳航水槽試験 (図1) を主な業務としています。国際連合の専門機関である国際海事機関IMO (International Maritime Organization) では国際海運における地球温暖化ガス排出規制を強化しており、国際航海に従事する新造船の設計段階で適用される燃費効率であるEEDI (Energy Efficiency Design Index: エネルギー効率設計指標) を取得するために曳航水槽試験が用いられます。自動車であればカタログ燃費に相当しますが、船舶の場合、一品受注生産であるため、仕様がすべて異なりEEDIは個船ごとに取得する必要があります。このEEDI規制ではその値が一定の基準値以下であることを義務付けていて、さらには段階的に厳しくなるように設定されています。今後、国際海運の需要増加に伴い、曳航水槽業務の需要はますます増え続けていくと予想されています。一方で、曳航水槽試験を数値計算で



▶図1 曳航水槽の様子



▶図2 船尾の渦の様子

置き換えることは、姉妹船など特殊なケースを除いて認められていません。一般財団法人日本造船技術センターでは、2011年から曳航水槽試験を数値計算で置き換えるための研究開発を行ってきました。また、2025年からは、一般財団法人日本海事協会との共同研究を通じて、2030年までに関連ガイドラインを整備し、数値計算を活用した世界初のEEDI認証の実現をめざしています。

●研究内容

これまでRANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 法を使った数値計算では曳航水槽の精度を保証することはできませんでしたが、スーパーコンピュータ「富岳」を使ったLES (Large Eddy Simulation) では水槽試験を超える高精度な計算ができることが分かってきました。2025年11月17日から19日にオランダのワーゲンゲンで開催されたCFD (Computational Fluid Dynamics) ワークショップにおいて、私たちは

500億要素を用いた船体周りの大規模LES解析結果を提出し、その高い精度が評価されました。特に、抵抗値や流場の予測は水槽試験の計測誤差に匹敵する精度を示し、一部の解析結果については水槽試験よりも信頼性が高い可能性が指摘されました (図2)。

本研究では研究テーマ①で開発された技術を使って1/10から1/100の要素数で同程度の精度の計算ができるような開発と検証を行っています。画像認識の分野でよく使われているCNN (Convolutional Neural Network) をベースとしたネットワークでは船体周りの乱流の特徴をよく捉えることができますが、時間的依存関係を把握するために用いられるRNN (Recurrent Neural Network) やLSTM (Long Short-Term Memory) をベースとしたネットワーク、大規模言語モデルで用いられるTransformerなどでは、現状では十分な効果が得られていません。



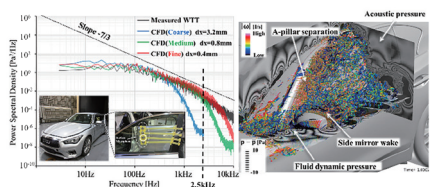
研究テーマ④ 自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立
富岳とCUBEを用いた自動車バサバサ音解析とスマートな音源探索

神戸大学大学院システム情報学研究所 /
 理化学研究所計算科学研究センター
 教授 / チームプリンシパル

坪倉 誠

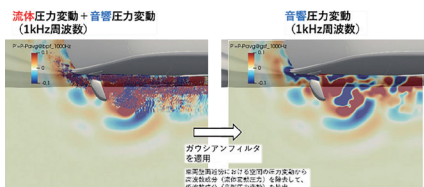
「自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立」では、自動車空力騒音の予測に関する研究開発を進めています。そのなかで「バサバサ音解析」に関する本課題は、産学連携「HPC (High Performance Computing) を活用した自動車用次世代CAE (Computer Aided Engineering) コンソーシアム」の活動の一環として行われています。ソフトウェアとしては、理化学研究所計算科学研究センターで開発が進められている複雑現象統合的解法シミュレーションフレームワークCUBEを使用しています。

自動車開発において問題となる空力騒音とし



▲図1 CUBEを用いた自動車広帯域空力音の検証

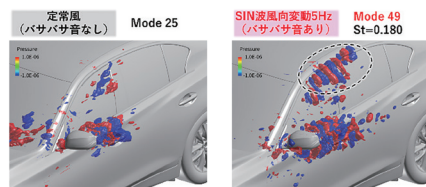
て、ドアミラーやAピラーから発生する広帯域音が挙げられます。特に自動車が気流乱流(自然風)のなかを走行した場合、風洞実験では確認することが難しい「バサバサ音」と呼ばれる変調を伴った風切り音が発生することが知られています。バサバサ音は数Hz程度の間欠的な周期で発生する騒音で、特に乗員の快適性を大きく損なうことが知られており、自動車の品質問題として解決すべき課題の一つです。しかしながら、従来のシミュレーションはもとより、風洞実験でも予測・再現することが難しい空力音であり、リアルワールドシミュレーションによる解決が期待されるターゲットです。私たちのグループは、CUBEの圧縮性流体解析コードを使って、広帯域音の主要な音源の特定に必要な車体周りの格子解像度に関する検証を行いました。ここ



▲図2 ガウシアンフィルタによる音響圧力場の抽出

に実車走行データを考慮した変動風モジュールを組み合わせて、数Hz程度の低周波数乱れを含んだ変動風を作成することで、バサバサ音の再現に取り組みました。ここでは、変調パワースペクトル解析を用いることで、FFT(高速フーリエ変換)やSTFT(短時間フーリエ変換)のような一般的な騒音評価方法と比較して、バサバサ音を定量的に評価することに成功しました。

さらに、自動車が変動風環境下を走行するときのサイドウィンドウ周辺で発生するAピラー剥離流れ(縦渦)に着目し、バサバサ音を発生させる流れ場の特徴構造抽出や、流体変動と音の圧力変動を切り分けることができる空間フィルタの開発に取り組みました。また、CUBEの機能を拡充してシミュレーションパラメータや可視化パラメータを探索することができる研究テーマ②のin-situ可視化を活用することで、主要な空力音源の特定に繋がる時空間領域を効率よく可視化し、バサバサ音の発生メカニズム解明に繋げる試みも行いました。



▲図3 モード分解によるバサバサ音の特徴構造抽出



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
FFX (FrontFlow/X) を用いた空力騒音解析

豊橋技術科学大学工学部機械工学科
 教授

飯田 明由

「自動車の空力騒音予測と空力騒音低減手法の確立」のもう一つのアプリケーションであるFFX (FrontFlow/X) を用いて、空力騒音を精度よく予測する技術の構築を進めています。

FFXは、自動車の空力・音響解析、ファンから発生する空力音、複雑な電子機器まわりの流れなどの予測などが可能な、格子ボルツマン法に基づく汎用流体解析システムです。さまざまな工学問題に適用でき、複雑な実機形状まわりの乱流や乱流から発生する音を短時間に高精度に予測することが可能で、この研究テーマではウインドスロップ音の予測に適用して、その有効性を確認しています。

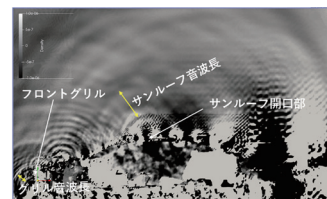
FFXの開発状況は、『計算工学ナビ』Vol. 28でも紹介していますが、さらに、壁近傍で壁面と直交する方向の速度勾配に比例したスリップ速度を壁面と与える壁面モデルを導入しました。これにより、従来、鈍頭形状物体において解像度の足りない場合に発生していた、上面の流れが付着しない、および、下面側のはく離が過大評価されるという問題が改善され、自動車周り

の空力および空力音を従来よりも高精度に計算できることを確認しています。現在は、車内のシート等の吸音材の取り扱い方法の検討を進めており、その内容をFFXに実装して、テスト計算を実施している段階です。

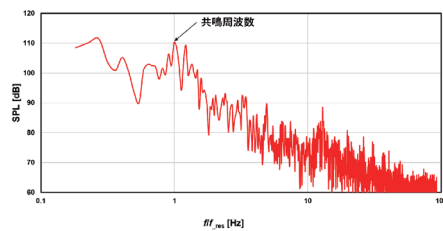
適用例として、図1に、サンルーフを備えた車両周りの音場計算を示します。最小格子サイズ2mmの場合、格子数は39億に達します。図1に示すようにサンルーフの開口部分から強い音波が放射されていることに加えて、フロントグリル周りからも強い音波が放射されている様子が確認できます。サンルーフ開口部からの空力音の波長と比較して、フロントグリルから放射される空力音の波長が短いことも読み取れます。

図2に、サンルーフ開口部で発生した音を後部座席付近で測定した結果を示します。横軸は風洞実験で得られたピーク周波数(共鳴周波数)で無次元化した周波数です。無次元周波数1、すなわち実験で観測された共鳴周波数と同じ周波数のピークの音が予測されています。この解析では、シート等による吸音効果を考慮していないので、ピーク音圧レベルを実験と直接比較することは難しいものの、共鳴周波数を捉えることができることは確認できました。

以上のように、FFXにより流れと音の干渉を



▲図1 FFXによる、実車を対象とした空力騒音解析



▲図2 予測される後部座席部の空力音スペクトル

含めた解析が可能となることが分かりました。FFXで利用している格子ボルツマン法には、並列化が容易であり、ナビエストックス法と比較してメモリ容量が小さく、エンジンルーム内や車室内等の複雑な形状であってもCAD (Computer Aided Design) データを修正せずに解析することが可能である、といった利点があります。上記の壁モデルを用いれば格子点数を少なくすることから、FFXによる空力音の解析技術は、自動車の開発現場でも適用可能であり、高精度な空力騒音予測の実現に貢献できるものです。



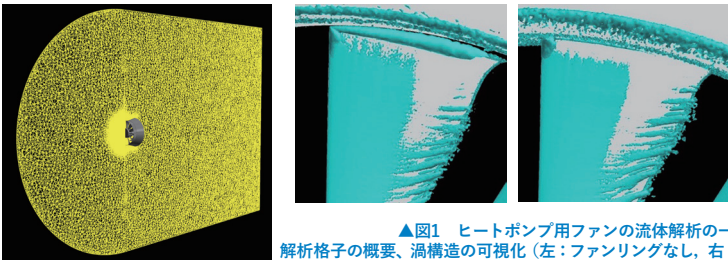
研究テーマ⑤ ヒートポンプ用ファンの性能向上

日本大学理工学部機械工学科
 教授

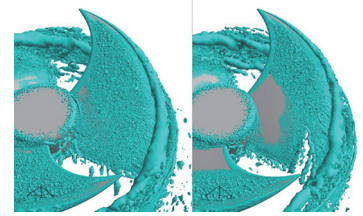
鈴木 康方

地球温暖化対策の一環としての温室効果ガス排出規制や、代替フロン生産・消費に及ぶ世界的な規制強化に伴い、冷凍・空調業界はこれ

らに適合した製品開発を求められる状況にあります。この課題は新冷媒の開発のみで解決することは容易ではなく、あらゆる要素技術の底上げが必要となります。本研究では、空調用室外機に搭載されるヒートポンプ用ファンの性能向上を



▲図1 ヒートポンプ用ファンの流体解析の一例
解析格子の概要、渦構造の可視化(左:ファンリングなし, 右:ファンリングあり)



▲図2 現行ファンの流体解析による渦構造の可視化
左:切り欠きなし, 右:切り欠きあり

目的としています。従来検討されていなかった広範な設計パラメータの探索と、スーパーコンピュータ「富岳」やAIを活用した高度な流体解析技術を組み合わせて、新たなファンの開発に取り組んでいます。本研究の成果が、新型ファンの開発にとどまらず、流体機械分野における設計手法の一助となることをめざしています。

本研究では、空調機の室外機などに使われるファンの形状を検討するため、圧縮機などで用いられる翼形をベースとした設計最適化を試みました。羽根枚数や羽根まわりの流速分布に基づく多岐にわたる設計パラメータを組み合わせ、数学的手法(ラテン超方格法)を用いて抽出した、400ケース以上にのぼる流体解析を実施しました。解析には、大規模計算に最適化された

流体解析ソルバFrontFlow/blueを中心に、複数の商用コードを併用することで、複雑な設計における精緻な流れ場の予測を行っています。解析の結果、羽根単体の形状だけでなく、それを取り巻く周辺パーツを含めた全体最適化の重要性が示唆されました。例えば、羽根の先端に流れ渦の発生を抑制する「ファンリング」とケーシング側の「マウスリング」を組み合わせることや、羽根車下流の流路形状を最適化することにより、効率が改善する傾向が得られています。

また、現行のファンに採用されている「V字型の切り欠き(V字カット)」が果たす役割についても調査を行いました。解析の結果、この切り欠きによって生じる特有の縦渦が、羽根先端付近の流れ渦を抑制している様子が確認されまし

た。性能面への影響を詳しく見ると、この切り欠きにより圧力上昇はわずかに低下するものの、効率は向上するという結果が得られました。これは、単に羽根表面の摩擦を減らすというよりも、羽根にかかる圧力分布に作用することで、ファンの動力を低減できているためと考えられます。今回の調査で得られた知見は、圧力上昇と効率のバランスを考慮するうえでの一つの指標になることが期待されます。

以上の通り、これまでに得られた解析手法や設計に関する知見は、次世代のファン開発における一つの基準となり得るものです。今後はこれらの知見をさらに精査し、環境規制への対応と製品性能の向上を両立させる技術開発に寄与することをめざします。



研究テーマ⑥ 次世代計算基盤の構築

日本大学理工学部機械工学科
研究特命教授・上席研究員

加藤 千幸

今年度からスーパーコンピュータ「富岳」(以下、「富岳」)の次世代機(以下、「富岳NEXT」)の開発が本格的にスタートしました。「富岳NEXT」は早ければ2030年度中に運用を開始する予定であり、HPCやAIの重要な計算基盤として活躍することが期待されています。「富岳」の計算ノードはCPUから構成されていますが、「富岳NEXT」の計算ノードはGPUを主体とすることが決まっています。「富岳NEXT」の計算ノードの倍精度浮動小数点演算性能(以下、演算性能)は「富岳」の計算ノードの100倍以上になる計画ですが、計算ノードの性能に加えてアプリケーションの性能に大きな影響を及ぼすインターコネクトの性能は検討中です。このような状況のなかで、「次世代計算基盤の構築」と題するこの研究テーマでは、理化学研究所、東京大学情報基盤センター、NVIDIA、および日本電気株式会社の協力を得て、5年後の計算機で高速に稼働するアプリケーション開発の基盤となる技術の研究を進めています。本稿では、これまでに得られている成果の一部をご紹介します。

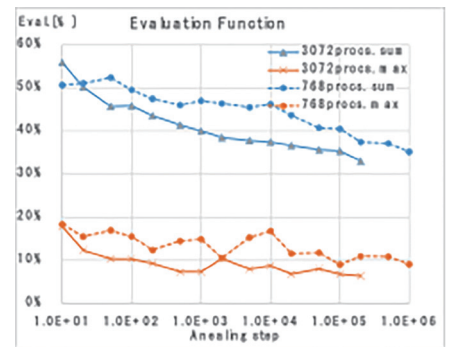
表1は「富岳」や「富岳NEXT」の基本設計のためのベンチマークコードとしても活用されている、流体解析アプリケーションFrontFlow/blue(以下、FFB)を東京大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ「Wisteria-A」に移植し、FFBの並列計算性能を計測した結果です。「Wisteria-A」の計算ノードはNVIDIA製GPU A100を8基搭載していますが、OpenACCによってFFBをA100

に移植しました。A100単基の理論演算性能は19.5 TFLOPS、理論メモリスループットは1.555 TB/sec、メモリ容量は40 GBです。表には示していませんが、FFBのA100単基の演算性能は257.2 GFLOPSであり、A100の理論メモリスループットの約7割という高いメモリスループットを達成しています。MPI通信にはWisteria-Aがサポートする2種類のMPIライブラリompi-cudaおよびNvmpiを使用しました。64基のA100を使用した計算では、79%(ompi-cuda)と74%(Nvmpi)という高い並列化効率が得られています。

FFBはDOループのスレッド並列化と領域分割によるmpi並列化に対応しています。「富岳」の計算ノードは48個の計算コアを搭載していますが、メモリを物理的に共有する4つのCMG(Core Memory Group)から構成されています。FFBを「富岳」で実行する場合、通常、計算ノード数の4倍の数の領域に分割し、各領域の計算に1つのmpiプロセス(mpiのランク)を割り当て、mpi並列計算を実行します。さらに、それぞれのmpiプロセスは12スレッドで実行します。利用できる計算ノードが確保されると、システムはmpiランクを計算ノードに順番に割り付けていきます。FFBの計算で通信が発生する領域、すなわち、mpiランクのペアは領域分割時に決まります。したがって、各mpiランクが実行される計算ノードが決まると、計算ノードのインターコネクト・ルーターによって通信経路が決まられ、全体の通信量が決まります。この研究では、通信量をできるだけ少なくし、FFBの実行時間を短くすることを目的として、mpiランクを計算ノードに割り付けるマップ、つまり、ランクマップの最適化を実施しています。これは組合せ最適化問題に帰着しますが、通信量が最も少なくなるランクマップ

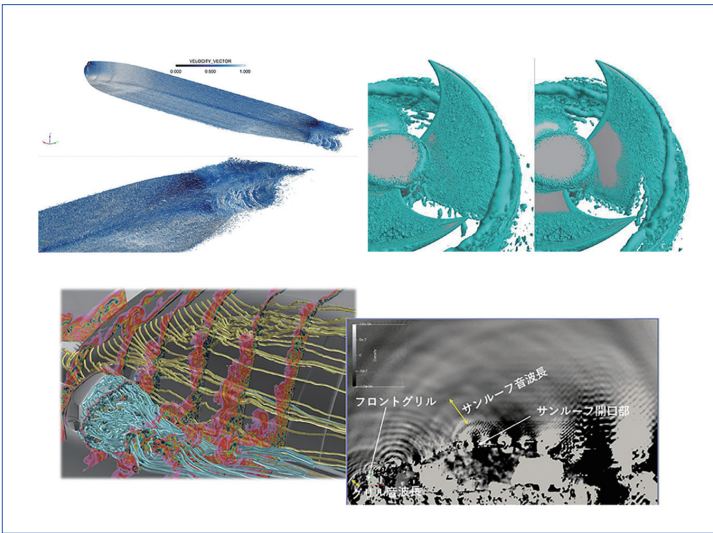
MPI ライブラリ	GPU 数	計算時間 (sec/step)	総演算性能 (GFLOPS)
ompi-cuda	16	0.341	3,754
	64	0.393	12,963
Nvmpi	16	0.350	3,657
	64	0.417	12,217

▲表1 最大64 GPU (NVIDIA製A100) を用いた場合のFFBの並列計算性能



▲図1 モンテカルロ法によるランクマップの最適化過程

を現実的な時間内で得ることは困難です。ここでは、モンテカルロ法を用いてランクペアを交換しながら評価関数を小さくしていく、シミュレテッドアニーリング法によって最適化を実施しました。最適化過程の一例を図1に示します。横軸は反復回数を示し、縦軸は最適化に用いた評価関数(積算した通信量)の値を示します。この方法は最大12,288プロセスを用いた並列計算にも適用可能であり、FFBの計算時間が約30%短縮されることを確認しています。なお、この成果の詳細は令和8年1月に開催されたHPC-Asiaで論文発表されていますので、興味のある方はその論文をご覧ください。



今号の表紙

「富岳」成果創出加速プログラム 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

AI・データ科学は、熱流体工学等の学術研究において欠くことのできないツールとなっており、産業界での研究開発や製品開発においても積極的に活用されることが期待されています。「富岳」成果創出加速プログラム「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」では、産業界におけるHPCの実用化を加速するための乱流の予測モデルや可視化基盤といった基盤的な技術を開発し、その基盤技術を、産業上の効果を検証するために、実船の性能予測（左上図）、自動車の空力騒音予測（下図）、および、ヒートポンプ用ファンの性能や騒音の予測（右上図）に適用しています。

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
長谷川 洋介

編集後記

「富岳」成果創出加速プログラム「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」は、令和7年度で終了します。この課題では、AIの活用によってHPC（High Performance Computing）の産業応用を飛躍的に拡大できることを実証するとともに、研究成果を幅広いものづくり分野に展開することをめざし、さらに、次世代の計算基盤となる解析アルゴリズムの開発にも取り組んできました。令和5年度から3年間に及ぶ研究開発によって、AI・データ科学との融合・連携、社会実装に向けた産業界との連携などに対して、さまざまな成果が得られています。今号ではその成果について紹介しています。国の次期フラッグシップマシンであるポスト「富岳」（「富岳NEXT」）の開発が始まっていますが、その時代に向けて、この課題の成果である、AIを応用することで価値を高めたHPCシミュレーションが、幅広い産業分野に展開されていくことが期待されます。



計算工学ナビ オフィシャルサイト

本誌のPDF版やソフトウェアライブラリ、ニュースなどのコンテンツを提供しているWebサイトは下記のURLからアクセスできます

<http://www.cenav.org/>



計算工学ナビ Vol.29

発行日：2026年3月16日

発行：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

〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

office@ciss.iis.u-tokyo.ac.jp