

令和5年度高性能汎用計算機高度利用事業
「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」
成果報告書

令和6年5月30日
国立大学法人東京大学 生産技術研究所

長谷川 洋介

目次

補助事業の名称.....	- 1 -
1. 補助事業の目的	- 1 -
2. 令和5年度（報告年度）の実施内容	- 1 -
2-1. 当該年度（令和5年度）の事業実施計画.....	- 1 -
2-2. 実施内容（成果）	- 3 -
(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.....	- 3 -
(2) 研究テーマ②：スマート in-situ 可視化基盤の構築.....	- 12 -
(3) 研究テーマ③：実船の推進性能の予測.....	- 22 -
(4) 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.....	- 29 -
(5) 研究テーマ⑤：ヒートポンプ用ファンの性能向上	- 30 -
(6) 研究テーマ⑥：次世代計算基盤の構築.....	- 60 -
(7) プロジェクトの総合的推進.....	- 66 -
2-3. 活動（研究会の活動等）	- 67 -
2-4. 実施体制.....	- 68 -
別添1 学会等発表実績.....	- 69 -

補助事業の名称

「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

1. 補助事業の目的

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、その効果を実証する。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する。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する。

2. 令和 5 年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和 5 年度）の事業実施計画

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。以下に具体的な事業内容について記す。

(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

本研究テーマでは、「富岳」上で実行する HPC シミュレーションによって生成された膨大なデータを深層学習させ、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、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する。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する。これら 2 つの研究成果を組み合わせることで、HPC を用いた新たな設計論を提案する。

令和 5 年度は、乱流境界層の Wall-resolved LES データベースの作成・学習用ネットワークの構築、および、サロゲートモデル構築用の教師用データの作成・ネットワークの構築を実施する。

（協力機関：学校法人日本大学、学校法人明治大学、国立大学法人豊橋技術科学大学、国立大学法人神戸大学）

(2) 研究テーマ②：スマート in-situ 可視化基盤の構築

本研究テーマでは、これまで自動車などの輸送機器の空力・騒音問題を主たる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フレームワーク 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する。

令和 5 年度は、in-situ 可視化基盤の構築と最適視点推定技術の実装を実施する。

（協力機関：国立大学法人神戸大学、国立研究開発法人理化学研究所）

(3) 研究テーマ③：実船の推進性能の予測

本研究テーマでは、「(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」において開発する壁面挙動予測モデルを、有限要素法による LES 解析アプリケーションである FrontFlow/blue (FFB) に実装し、10 億程度の計算格子によって、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。その予測結果を Wall-Resolved LES の計算結果と比較することによって予測精度を検証する。さらに、600 億程度の計算格子を用いて、実船スケールの流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、予測精度を検証する。

令和 5 年度は、壁面挙動予測モデルの実装準備を実施する。

(協力機関：学校法人日本大学)

(4) 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

本研究テーマでは、「(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」において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、数億格子から 10 億格子程度の LES によって空力騒音を精度良く予測する技術を構築し、上記の研究成果の実用化を加速する。さらに、「(2) 研究テーマ②：スマート in-situ 可視化基盤の構築」において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確度に特定する技術を開発する。

令和 5 年度は、CUBE および FFX に対する壁面挙動予測モデルの実装準備を実施する。

(協力機関：国立大学法人神戸大学、国立研究開発法人理化学研究所、国立大学法人豊橋技術科学大学)

(5) 研究テーマ⑤：ヒートポンプ用ファンの性能向上

本研究テーマでは、「(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」において開発するサロゲートモデルを活用し、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って、従来性能を大幅に凌駕するプロペラファンを設計する。

令和 5 年度は、ヒートポンプ用ファンの設計パラメータの抜本的な見直しを実施する。

(協力機関：学校法人日本大学)

(6) 研究テーマ⑥：次世代計算基盤の構築

本研究テーマでは、「(3) 研究テーマ③：実船の推進性能の予測」、「(4) 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」、および「(5) 研究テーマ⑤：ヒートポンプ用ファンの性能向上」によって産業上の利用効果が実証された HPC アプリケーション FrontFlow/blue (FFB)、FFX、および CUBE を、今後のハードウェアの主流になるものと考えられる 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する。また、ハードウェア性能の今後の進展予測に鑑み、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する。

令和5年度は、アプリケーションを試験的に GPGPU へ移植する。さらに、「富岳」の通信性能を向上させるために、ランクマップの最適化アルゴリズムの開発を実施する。

(7) プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、プロジェクトの推進や研究テーマ間の連携のための会議等を適宜開催し、参画の協力機関・連携機関との連携・調整にあたる。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認し、計画の合理化の検討等を行うなど、プロジェクトの効果的・効率的推進に資する取組みを実施する。プロジェクトで得られた成果については、可能な限り積極的に公開して今後の展開に資するとともに、ものづくり産業での早期戦力化を支援する。また、一般社団法人ターボ機械協会「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」等に対して、研究成果の展開を実施する。

令和5年度は、上記を順次実施しながら、本課題の有効な研究活動のための支援を実施し、研究開発全体を円滑に実施するための調整を行う。得られた成果については、シンポジウム等を開催し、公開する。また、実証研究の成果を広い産業分野に展開するため、FFX へ回転系解析機能を実装する。

2-2. 実施内容（成果）

(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

(a) 研究成果の要旨

本研究テーマでは、「富岳」上で実行する HPC シミュレーションによって生成された膨大なデータを深層学習させ、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、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する。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する。これら2つの研究成果を組み合わせる、HPC を用いた新たな設計論を提案する。

令和5年度は、乱流境界層の Wall-resolved LES データベースの作成・学習用ネットワークの構築、および、サロゲートモデル構築用の教師用データの作成・ネットワークの構築を実施した。前者の壁面挙動予測モデルの開発については、ネットワーク構造を提案し、その中に含まれる二つの主要なネットワーク、すなわち、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、生成器（壁面挙動予測モデル）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、各ネットワークの動作検証を通じて、各ネットワークが正常に動作していることを確認した。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、その動作検証により、正常に動作していることを確認した。

In this research, we will train deep neural networks to extract features and patterns contained in big data obtained by high performance computing (HPC) with FUGAKU, and develop a novel

strategy for modeling wall turbulence to significantly reduce the computational cost, while maintaining the prediction accuracy. In addition, based on the performance data under various combinations of design parameters predicted by HPC possibly, we will build high-accuracy surrogate models that relates the design variables and the resulting performances. By combining the above two achievements, we will eventually propose and validate a novel framework for optimal design of thermos-fluids systems.

In this fiscal year, we have established databases of wall turbulence for training neural networks, proposed and developed fundamental structures of neural networks for both wall turbulence model and surrogate model. As for the former, we proposed network structures consisting of a generator and a discriminator, and confirmed that each network worked properly. As for the latter, we obtained databases for developing a novel surrogate model, determined its networks structure, and obtained preliminary results, showing the effectiveness of the proposed surrogate model.

(b) 本研究の内容

1) 研究成果

(1) 壁面挙動予測モデルの方法論の検討

工学において、壁に沿う乱流は最も重要な流れの一つであり、壁面に働くせん断応力や壁面の熱流束は、流体と物体の間の運動量および熱の輸送を支配しているため、それらの正確な予測が必要不可欠となる。一般に、壁面近傍には微細な乱流構造が存在し、その時空間スケールはレイノルズ数の増加とともに小さくなる。実機の高レイノルズ数の乱流において、これらの壁近傍の微細構造を解像するためには、膨大な計算コストを要する。そこで、工学設計の現場では、壁近傍の微細な乱流構造を直接解像することなく、それらに伴う運動量輸送の効果を壁面挙動予測モデルで表現することにより、壁近傍の計算格子解像度を大幅に低減し、計算コストを抑えるアプローチが広く採用されている。既存の壁面挙動予測モデルは、壁面近傍に対数速度分布を仮定するものが殆どであるが、このような速度分布は圧力勾配の無い平板上においては普遍的に成立することが確認されているものの、工学で見られるような曲率を有する壁面や圧力勾配を伴う流れにおいてはその限りではない。また、平板上の流れであったとしても、対数速度分布は平均速度分布を記述するものであり、瞬時の流れ場において局所的に成立するものではない。そこで、本研究では、HPCにより再現された高解像度乱流シミュレーションのデータベースからその特徴を抽出することにより、壁近傍の格子解像度を大幅に低減しつつ、精度の高い非定常計算を可能とする革新的な壁面挙動予測モデルを構築することを目的としている。

令和5年度は、上述の壁面挙動予測モデルを実現するための深層学習ネットワークの全体的な構成を決定し、そこに含まれる生成器と判別器それぞれのネットワークの開発、学習のためのデータベースの構築、各ネットワークの動作確認までを実施した。本研究で開発する壁面挙動予測モデルで用いるネットワーク構成の概念図を Fig. 2.2.1-1 に示す。

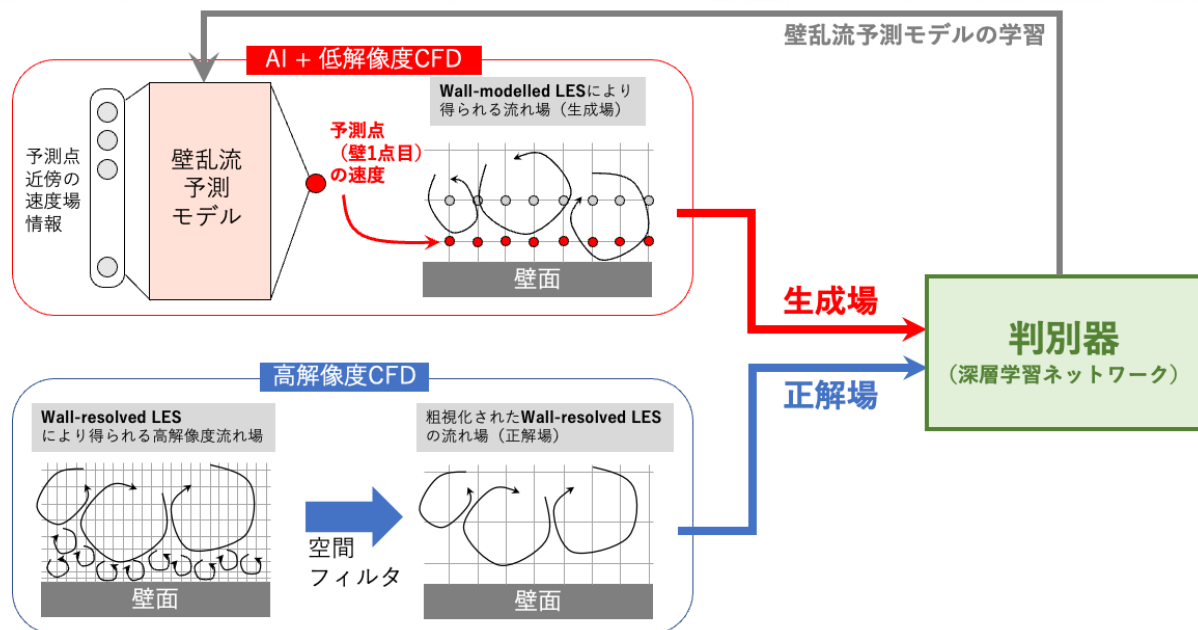


Fig. 2.2.1-1 Conceptual diagram of the wall-behavior prediction model developed in this study.

本研究で提案する壁面挙動予測モデルは、壁面近傍の微細な乱流による運動量輸送を表現するための生成器とそれを組み入れた流体計算の予測精度を評価するための判別器から構成される。生成器では、低解像度の流体計算から得られた壁近傍の速度場を入力として、壁から第1点目の計算セルに加える体積力、もしくは壁面せん断応力を出力する。これにより、本来、壁近傍に存在する微細な乱流による運動量輸送の効果を模擬する。したがって、生成器が本研究で開発する壁面挙動予測モデルに他ならない。生成器の学習は、生成器を組み込んだ低解像度計算結果と別途用意した高解像度計算から得た学習データを比較することにより、両者の差が出来るだけ小さくなるように行われる。しかし、ここで問題となることは、生成器を組み込んだ低解像度計算に対応する正解となる瞬時場は存在しないことである。これは乱流場がそもそもカオスの性質を有しており、仮に同じ初期場から低解像度計算と高解像度計算を行ったとしても、両者は全く異なる流れ場へと時間発展するためである。そのため両者は統計的観点から比較する必要がある。

そこで、本研究では、生成器を組み込んだ低解像度計算から得られる流れ場と高解像度計算で得られる流れ場を判別する別のネットワーク（判別器）を導入する。判別器には、低解像度または高解像度計算から得られる流れ場が入力され、それが高解像度計算から得られたものか、そうでないかが判別器から出力される。判別器の学習は、予め準備した高解像度計算で得られた流れ場のデータベースと、低解像度計算で得られる流れ場のデータをランダムに入力することで、より高い確率で両者が判別できるように進められる。この過程を通じて、判別器は正解場（高解像度計算で得られる流れ場）に特有の特徴を学習し、これに基づき判別することが可能となる。生成器は判別器の判別性能がより悪くなるように、一方で、判別器は正しい判別ができるように、互いに敵対的に学習を進めることによって、最終的には、低解像度計算によって得られる流れ場が、高解像度計算で得られる流れ場と判別できなくなるまで生成器を学習させる。上記の学習が上手く行われれば、最終的に得られる生成器が組み込まれた低解像度計算の結果は、高解像度計算の結果と判別ができな

いものとなり、低解像度計算によって高解像度計算を置き換えることが可能となることが期待できる。すなわち、計算コストの飛躍的な削減が可能となる。

(2) 壁面挙動予測モデルのための学習データの構築とネットワークの学習結果

令和5年度は、生成器と判別器のそれぞれのネットワークの基本構造を決定し、コードを開発するとともに、各ネットワークの学習を進めた。

判別器の学習においては、低解像度と高解像度の流れ場を入力として、両者の判別が可能かを検証した。判別器には画像処理で広く用いられている畳み込みニューラルネットワーク（CNN: Convolutional Neural Network）を採用し、判別結果として、入力データが高解像度計算の結果である確率を0から1の値として出力する（Fig. 2.2.1-2 参照）。

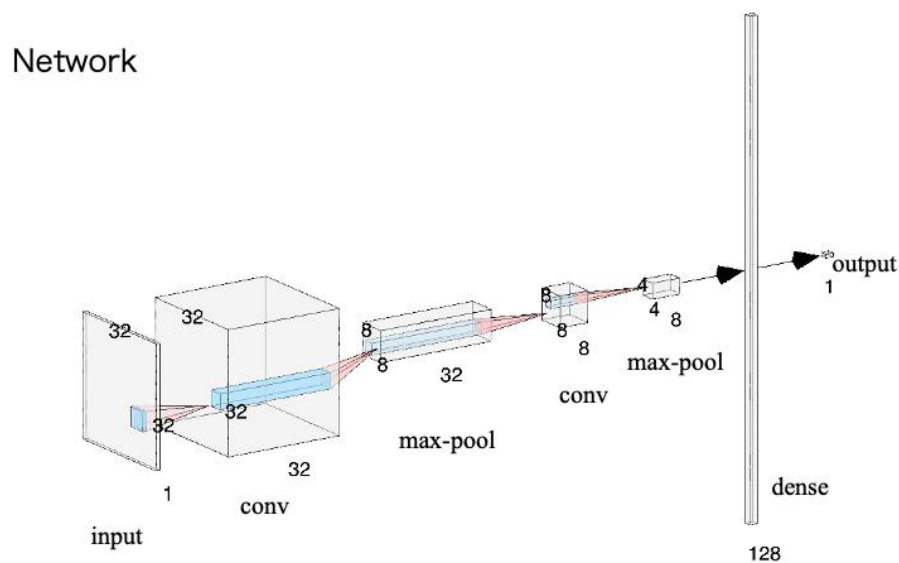


Fig. 2.2.1-2 Network structure of the developed discriminator.

平行平板間の完全に発達した乱流を対象として、低解像度計算（Under-resolved calculation）と高解像度計算（Wall-resolved calculation）をそれぞれ実施し、壁面からある距離離れた面内の速度分布の比較を Fig. 2.2.1-3 に示す。ここで、高解像度計算の流れ場は、低解像度計算と同じ解像度の計算格子に粗視化したものを示しており、判別器に入力する画像の解像度についても、流体計算で用いる解像度に依らず、同じ低解像度のものとしている。人間の目で見ると、両者に明確な差は確認できず、両者の判別は容易ではないことが想像できる。

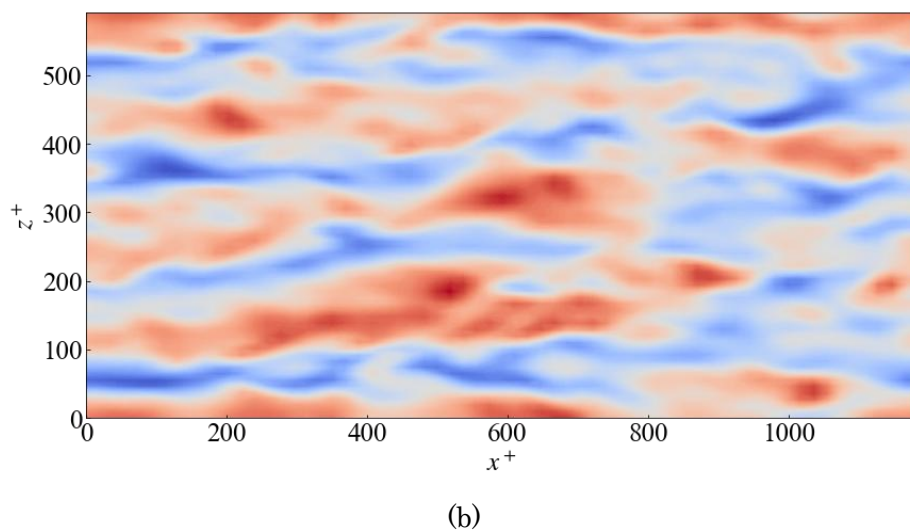
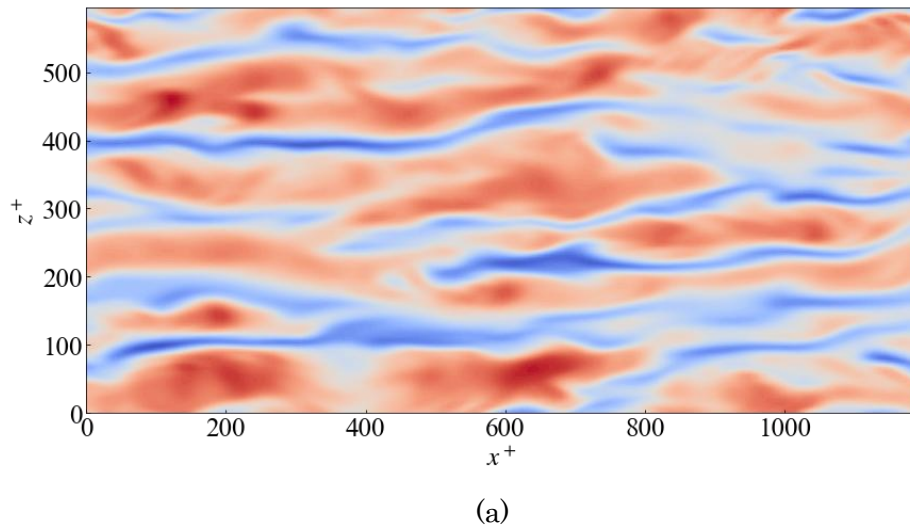


Fig. 2.2.1-3 Comparison of velocity distribution obtained by (a) wall-resolved calculation with (b) under-resolved calculation.

上述の低解像度計算と高解像度計算で得られた多数の流れ場の学習データをランダムに判別器に入力し、学習した結果得られた判別性能を Fig. 2.2.1-4 に示す。なお、ここでは学習に用いていない検証用データ（テストデータ）を用いた際の判別結果を示す。良い判別結果が確認されており、判別器が正常に動作していることが確認できる。

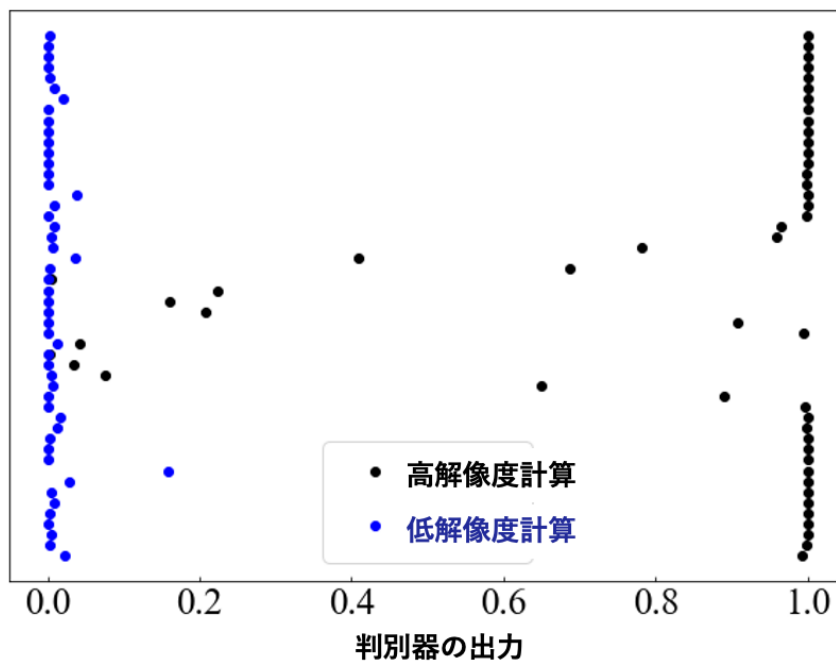


Fig. 2.2.1-4 Discriminant performance of discriminator using test data.

次に、生成器については、低解像度計算で得られた流れ場を判別器に入力し、その出力が高解像度計算であると誤判別されるような仮想的な体積力を逆伝播で求め、これを低解像度計算へフィードバックするネットワークの開発を行った。低解像度計算で得られた流れ場、それに対して高解像度計算であると判別器に誤判定されるよう付与された仮想的な体積力の分布をそれぞれ Fig. 2.2.1-5(a)、(b)に示す。このような判別器の判別結果を逆伝播させることにより、低解像度計算の結果を修正することによって、判別器が高解像度の計算結果であると誤判定するような流れ場が生成されることを確認した。

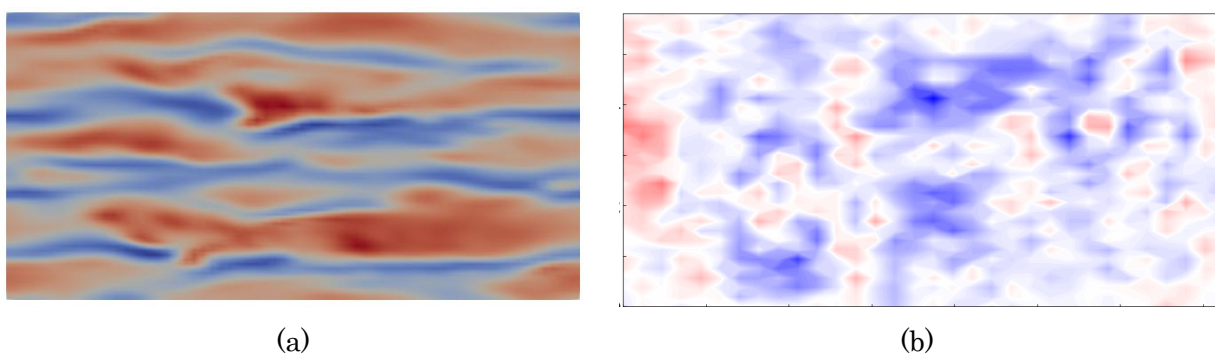


Fig. 2.2.1-5 (a) Instantaneous flow field obtained from an under-resolved calculation, which is input to the generator and (b) virtual volume-force distribution obtained by back propagating the output of the discriminator.

(3) サロゲートモデルの基本概念の検討

従来の多くのサロゲートモデルでは、Fig. 2.2.1-6(a)に示すように設計変数から性能を直接予測する。しかし、同じような性能が得られるケースにおいても、その物理的なメカニズムや流れの様子は大きく異なるケースも多く存在する。そのため、単に設計変数と性能を直接結び付けるだけでは、その背後にある物理を考慮することが難しく、得られるサロゲートモデルは学習データの内挿に留まる可能性が極めて高い。そこで、本研究では Fig. 2.2.1-6(b)に示すように、形状を記述する設計変数のみならず、その時の流れ場もサロゲートモデルの入力とすることにより、より精度の高いサロゲートモデルの構築を目的とする。

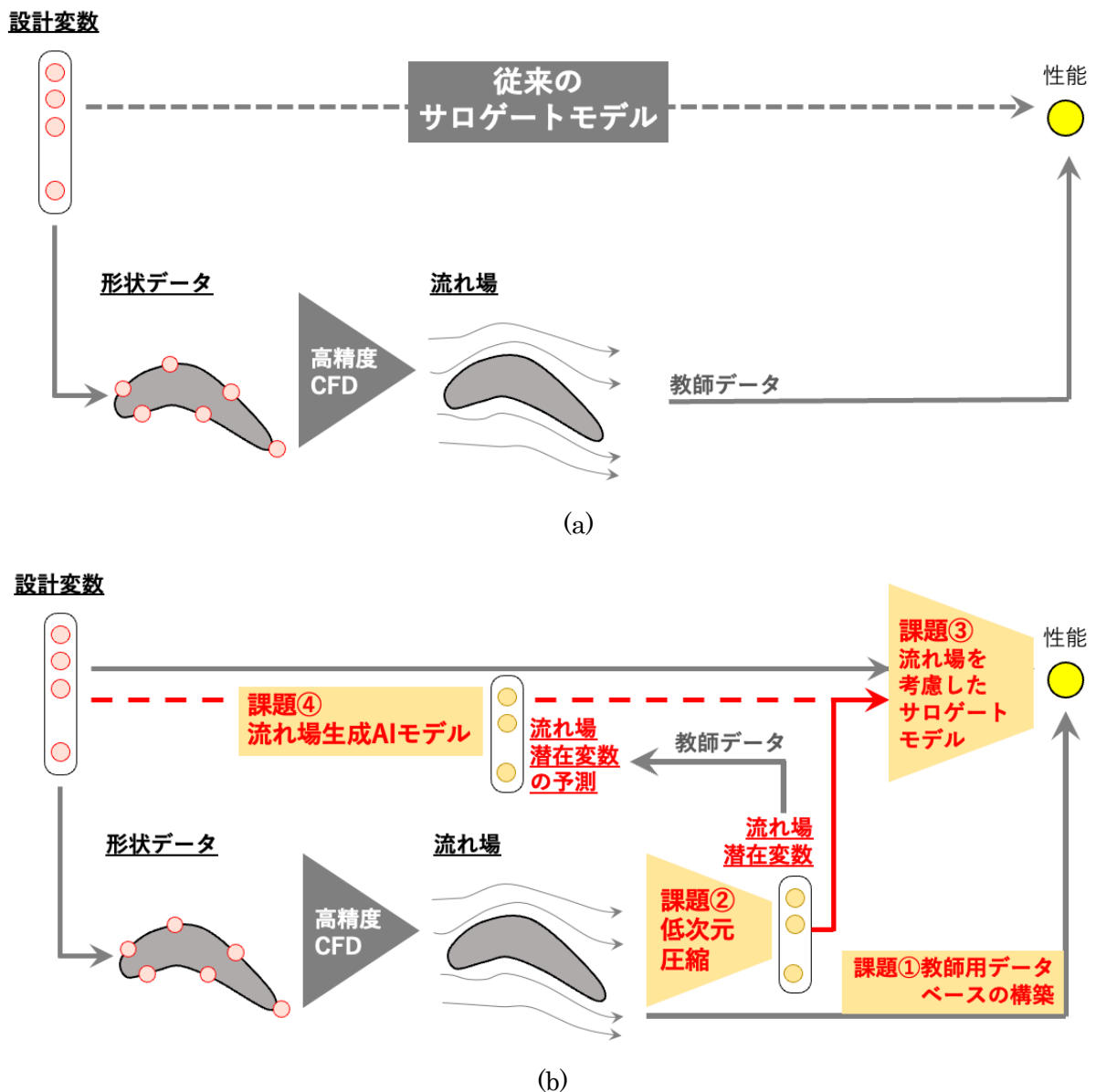


Fig. 2.2.1-6 Comparison of (a) the conventional surrogate model with (b) the surrogate model proposed in this study.

ここで、流れ場の情報をサロゲートモデルに入力する際、流れ場の持つ大きな自由度が問題となる。HPCで得られる流れ場の自由度は億、もしくはそれ以上のオーダーであり、これを直接深層学習ネットワークの入力とすることは非現実的である。そのため、流れ場の自由度を低次元化するためのネットワーク（自己符号化器）を開発し、超多自由度を有する流れ場を低次元の潜在変数へ写像し、これをサロゲートモデルに入力することを考える。

令和5年度は、まず流れ場を次元圧縮するための自己符号化器を開発し、多自由度の流れ場を高々百程度の自由度の潜在変数で表現することを試みた。また、得られた潜在変数を用いて、ファン形状とファンの静圧ヘッドを関連づけるサロゲートモデルを構築し、従来型の設計変数のみの場合に対して、本研究で提案するサロゲートモデルの優位性を示した。

(4) サロゲートモデル構築のための学習データの構築、およびネットワークの学習結果

本研究では、まず学習用データとして、異なる幾何形状を有するファンのデータを414個生成し、各形状に対してその周囲の流れを高解像度流体計算により再現し、性能として静圧ヘッドのデータセットを取得した。また、各ケースにおいて流れ場の情報として、動翼表面の、平均圧力分布、変動圧力分布に加えて、瞬時の圧力分布情報を出力してデータベースを構築した。

次に、本研究ではファン性能に影響を与える重要な因子である動翼表面の圧力分布に注目し、これに自己符号化器を適用することにより次元数を大きく削減することを試みた。その結果を Fig. 2.2.1-7 に示す。これにより、オリジナルの画像（4万自由度）を8個程度の潜在変数によって高い精度で表現できることがわかる。

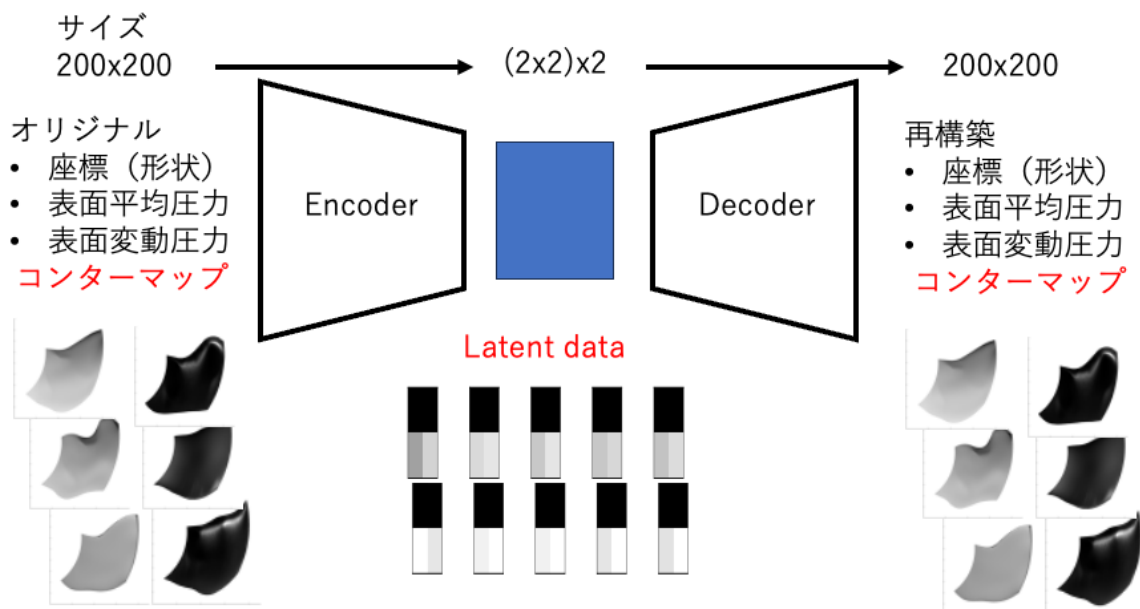


Fig. 2.2.1-7 Low-dimensionalization of the mean pressure field on the positive and negative pressure surfaces of a fan using autoencoder.

次に、上記の自己符号化器により低次元潜在空間で表現される流れ場情報を本研究で提案するサロゲートモデルの入力とすることで、静圧ヘッドの予測を試みた結果を Fig. 2.2.1-8 に示す。ここ

で、縦軸は正解値であり、横軸がサロゲートモデルの予測値であり、また、図中の×および○は、それぞれ学習に用いたデータ、および、学習に用いていない検証用データ（テストデータ）を表す。潜在変数の自由度（圧縮次元）やそれを取り込むネットワークのサイズには、最適値が存在すると思われる。具体的には、潜在変数の次元やネットワークサイズを大きくするほどモデルの自由度が上がりより複雑なデータにフィットできるようになる。一方で、これをやり過ぎると過学習となり、検証用データの予測が悪くなる。したがって、データの背後にある普遍性を学習するためには、単に学習データに過剰にフィッティングさせるのではなく、多少、学習データにおいても予測誤差がある状況において、検証用データに対しても学習データと同等の予測精度を保証することが重要である。Fig. 2.2.1-8 より、流れ場情報を入力情報に含めない従来のサロゲートモデルの結果（Fig. 2.2.1-8(a)）に対して、流れ場の潜在変数をサロゲートモデルに加えた場合の結果（Fig. 2.2.1-8(b)）では、学習データのみならず、検証用データについても予測値が正解値に近づいている様子が確認できる。また、潜在変数の自由度を64まで増やすことにより予測精度が向上しており、潜在変数の自由度を高く設定することによって、サロゲートモデルの高精度化が実現できる可能性を示唆している。

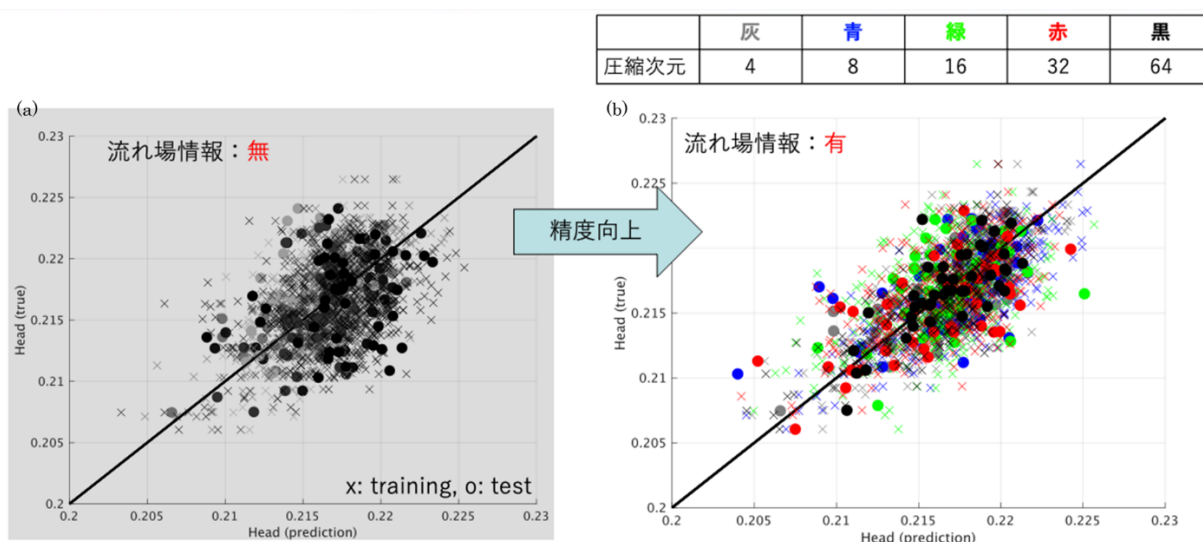


Fig. 2.2.1-8 Comparison of fan-head prediction results between the conventional surrogate model and the surrogate model proposed in this study. (a) Prediction by conventional model. (b) Prediction of the surrogate model proposed in this study, which takes into account the flow field information.

2) まとめ

本研究テーマでは、HPCで得られる膨大な熱流体データとAI技術を組み合わせることによって、(1) 高解像度流体計算を低解像度計算で置き換えるための壁面挙動予測モデルの開発、および(2) 熱流体シミュレーションを実行することなく設計変数から高精度で直接性能を予測するサロゲートモデルの開発を行うことで、最終的にはHPCの産業応用をより一層拡大することに大きく貢献することを目的としている。

前者の壁面挙動予測モデルにおいては、生成器と判別器から構成され両者が敵対的に学習を行うことによりお互いの性能を向上させるネットワークを提案し、生成器と判別器のそれぞれの深層学習ネットワークを構築し、平行平板間完全発達乱流を対象として、学習が正常に行われることを確認した。今後は、両者を組み合わせることにより、敵対的に学習を進めることによって、どこまで壁面挙動予測モデルの精度が向上するかを明らかにする必要がある。また、令和5年度は開発段階であるために、低レイノルズ数、かつ比較的単純な完全発達乱流場を対象としたが、今後は、より高レイノルズ数、かつ空間発達を有する乱流場への適用可能性を検証する必要がある。

後者のサロゲートモデルについては、令和5年度においては、壁面上の平均圧力場の低次元圧縮、およびそこから得られる潜在変数をサロゲートモデルの入力に加えることにより、サロゲートモデルの高精度が実現できることを示した。今後は、流れ場の変動や瞬時場などの情報を同様に低次元化し、これらをサロゲートモデルの入力に加えることにより、更なる性能向上を目指す。また、入力する潜在変数の次元についても、最適値が存在すると考えられるため、これを明らかにする必要がある。

(2) 研究テーマ②：スマート in-situ 可視化基盤の構築

(a) 研究成果の要旨

本研究テーマでは、これまで自動車などの輸送機器の空力・騒音問題を主たる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フレームワーク 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する。

令和5年度は、in-situ 可視化基盤の構築と最適視点推定技術の実装を実施した。具体的には、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。本フレームワークは C++ で実装されており、CUBE、および、OpenFOAM や独自のテスト用 Fortran ソルバー向けの接続機能を開発し、動作検証と性能評価を行い、正常に動作していることを確認した。また、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。

In this research, we will conduct research and development for building a smart in-situ visualization framework to expand the functionality of Complex Phenomena Unified Simulation Framework, "CUBE", which has been applied for investigations mainly on aerodynamics and noise problems in vehicles and other transport equipment, and thereby, substantially expanding the application field of HPC.

In this fiscal year, we carried out the development of an in-situ visualization framework and the implementation of an optimal viewpoint estimation technique. Specifically, we built a basic framework for enabling in-situ visualization by using the visualization framework, named KVS (Kyoto Visualization System) and developed by ourselves, separately. The framework was implemented in C++, and we developed a binding functionality to integrate the developed

visualization framework with CUBE, OpenFOAM and our own testing solver written in Fortran. By carrying out some execution tests and performance evaluations, we confirmed that the developed framework properly works. In addition, we developed a technique for estimating the optimal viewpoint and a module for implementing this optimal viewpoint estimation functionality to the visualization framework. We also confirmed that this module designed for our in-situ visualization framework properly works.

(b) 本研究の内容

1) 計算モデル

令和 5 年度は、スマート in-situ 可視化向け最適視点推定技術として、視点移動経路推定機能と注視点推定機能を実装した。以下に各機能について順に説明する。

1-1) 視点移動経路推定機能

本機能では、in-situ 可視化において、可視化対象となるシミュレーションデータの周囲に配置された候補視点の中から重要な現象を捉えていると期待される視点を推定する。そして、一定の時間間隔で推定される視点同士を接続するような経路を推定してその経路上で中間画像を出力することで、シミュレーション中の重要な現象を捉えた動画を生成する機能を開発した (Fig. 2.2.2-1)。

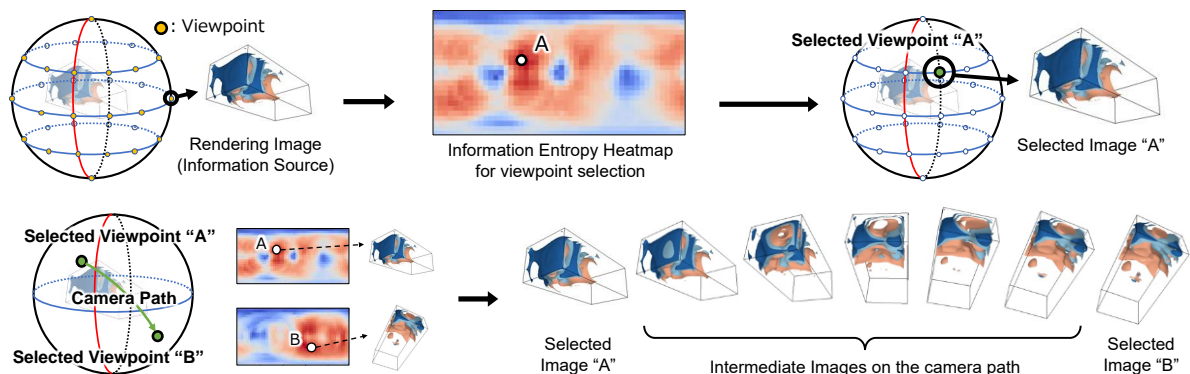


Fig. 2.2.2-1 Overview of information entropy-based viewpoint selection and camera path estimation for generating a smooth video.

具体的には、以下の 2 つのサブ機能を実装した。

A: 情報エントロピーに基づく視点選択

シミュレーションデータの周囲に配置された候補視点それぞれに対して、レンダリングされる画像を情報源とみなして情報エントロピーによって評価することで、重要な現象を捉えていると期待される視点を推定する。本実装では、情報源である画像が持つ情報は、各ピクセルが持つ深度値と輝度値である。それぞれの情報に対する情報エントロピーである、深度値エントロピーと輝度値エントロピーを計算して、それぞれを重み付きで加算した混合エントロピーを視点の評価に用いる。

深度値エントロピー H_d は、画像の各ピクセルが持つ深度値を用いて計算される情報エントロピーであり、深度値の分布のばらつきが大きい画像ほど値が高くなる。そのため、深度値エントロピー

を用いて視点の評価を行った場合、起伏の大きな物体を写している視点ほど高く評価される。Fig. 2.2.2-2(a)は同じデータを可視化した際に、深度値エントロピーが最小および最大となる画像と、中間程度の値になる画像の深度値をグレースケールで画像化したものを示している。

一方、輝度値エントロピー H_l は、可視化される画像の色情報を評価するエントロピーであり、輝度値の分布のばらつきが大きい画像ほど値が高くなる。そのため、輝度値エントロピーを用いて視点の評価を行った場合、シミュレーションデータを色鮮やかに可視化している視点ほど高く評価される。Fig. 2.2.2-2(b)は同じデータを可視化した際に、輝度値エントロピーが最小および最大となる画像と、中間程度の値になる画像を示している。

混合エントロピー H_m は、深度値エントロピー H_d と輝度値エントロピー H_l の重み付き平均 $H_m = \alpha H_l + (1 - \alpha)H_d$ として計算される。ここで、 α は0から1の値をもち、それぞれのエントロピーの重みを調整するパラメータであり、 $\alpha=0$ のときは深度値エントロピーと同値となり、 $\alpha=1$ のときは輝度値エントロピーと同値となる。Fig. 2.2.2-3に α の値を変化させたときの混合エントロピーを使って選択された画像を示す。

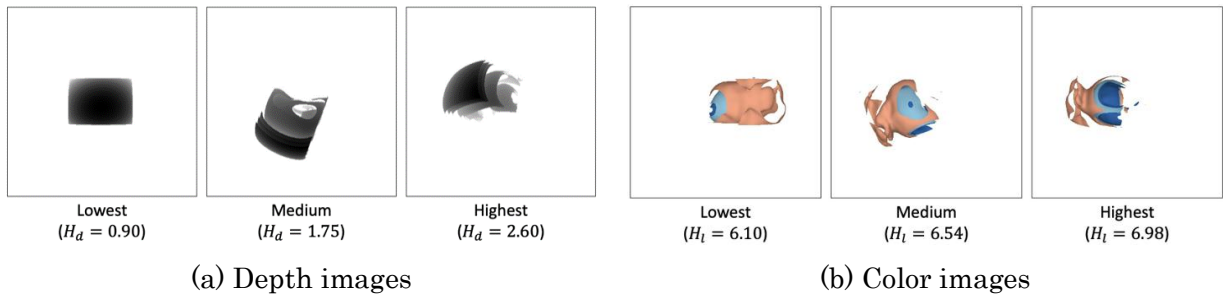


Fig. 2.2.2-2 Image changes with different entropy values; (a) depth entropy (H_d) and (b) lightness entropy (H_l).

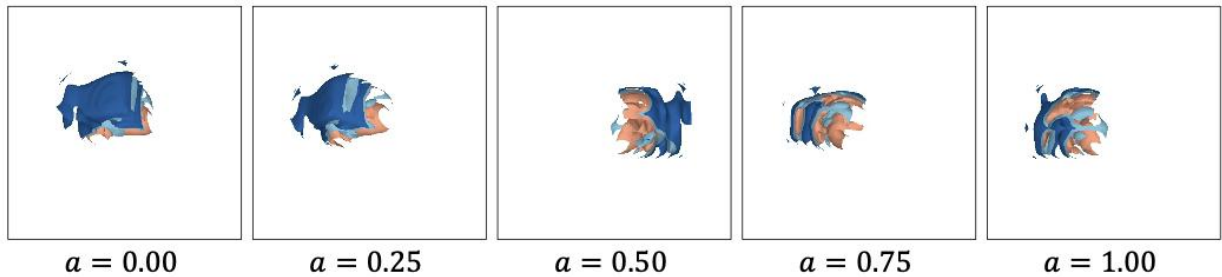


Fig. 2.2.2-3 Selected images with different weighting factors α of mixed entropy.

本機能では、シミュレーションデータを内包する球体を仮想的に設定し、球面上に複数の候補視点を配置してエントロピー評価を行う。候補視点は球面を余緯度方向と経度方向にそれぞれ等分割した格子点上に配置されている。計算された各視点でのエントロピー値を余緯度と経度を軸にして2次元平面上に並べて分布図（エントロピーヒートマップ）を作成する（Fig. 2.2.2-4）。このヒートマップでは、エントロピー値の大きさは青から赤の色で表現され、青い領域はエントロピー値が小さい領域であり、赤い領域はエントロピー値が大きい領域である。このヒートマップ上の最大エントロピー値を持つ位置を最適視点とみなす。

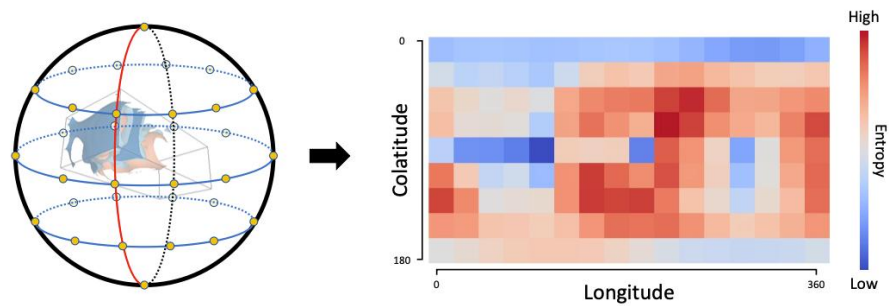


Fig. 2.2.2-4 Entropy map showing entropy values at each viewpoint.

B：クォータニオンを用いた経路推定

シミュレーション実行中に、一定の間隔でエントロピーヒートマップを作成し、最適視点間を接続することで視点移動を実現する。このとき、視点は設定した仮想球上を移動することとし、四元数を使って移動経路を計算する。この計算には、最適視点上で C0 連続性を満たす球面線形補間（SLERP、Spherical Linear Interpolation）と C1 連続性を満たす球面曲線補間（SQUAD、Spherical Quadrangle Interpolation）の2つの方法を実装した（Fig. 2.2.2-5）。球面曲線補間によって計算された移動経路は、球面線形補間に比べて滑らかな移動経路を計算することができるが、経路計算に3つの最適視点の情報が必要となるため、それらのデータを一時格納しておくメモリー領域が要求される。そのため、シミュレーション実行中に可視化処理用のメモリー領域を十分に確保できない場合には、球面線形補間によって移動経路を計算する。最後に、計算した経路上を等間隔に仮想視点を設定し、その視点で可視化した画像を中間画像として出力することで、一連の動画像を生成することができる。

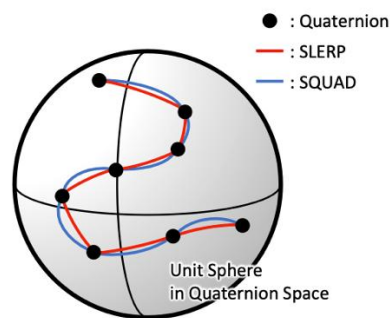


Fig. 2.2.2-5 Spherical linear interpolation (SLERP) and spherical quadrangle interpolation (SQUAD).

1-2)注視点推定機能

本機能は、in-situ 可視化によって生成される画像に対して、重要な変化が起きていると推測される部分領域を推定し、その領域にフォーカスした可視化画像を自動生成する機能である（Fig. 2.2.2-6）。本機能は、視点移動経路推定機能と組み合わせて利用することで、興味領域に着目し続けた動画像を生成することができ、重要現象の見逃しを防ぐ効果が期待できる。本機能は、最適視

点から可視化された画像に対して、画像上の興味領域推定、空間上の注視点推定と空間上の興味領域拡大の3つのサブ機能から構成される。

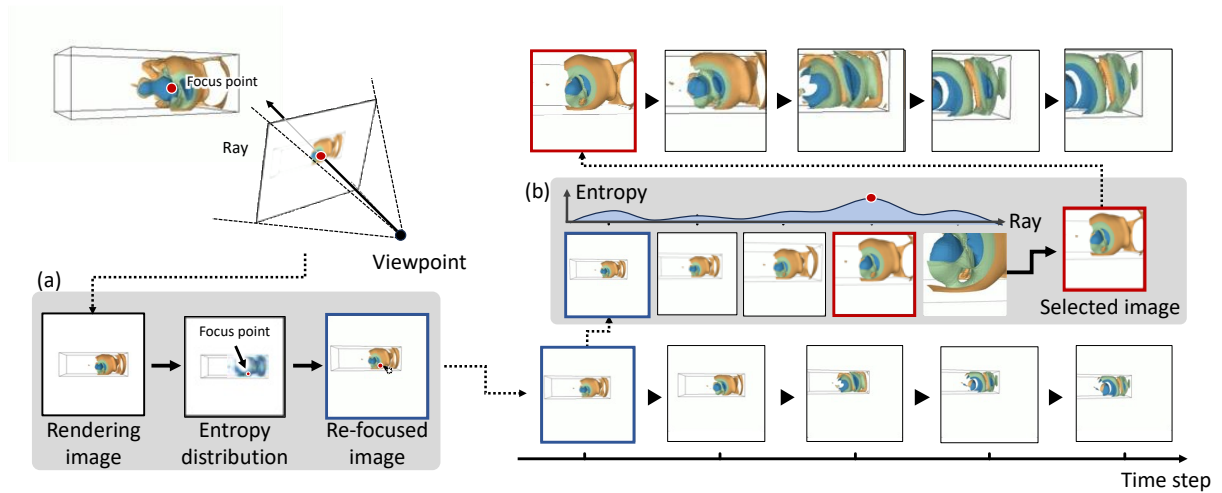


Fig. 2.2.2-6 Overview of the proposed camera-focus point and zoom-level adjustment method, which is composed of (a) camera focus point adjustment; and (b) camera zoom level adjustment based on the entropy distribution within the rendered image.

A：画像上の興味領域推定

最適視点から可視化された画像に対して、注目すべき画像上の部分領域を推定する。この推定のために、可視化画像を $M \times N$ 個の小領域に分割し、その小領域ごとに情報エントロピーを計算することで重要度を評価する。情報エントロピーの計算には、最適視点推定時と同様に、深度値エントロピーと輝度値エントロピーの混合エントロピーを利用する。そして、このエントロピー値が最大となる小領域を興味領域とする (Fig. 2.2.2-7)。

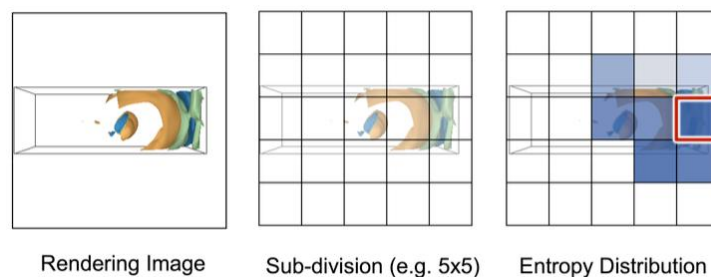


Fig. 2.2.2-7 Image subdivision and region-of-interest (red box) determination process (using 5×5 subdivision in this example).

B：空間上の注視点推定

推定された可視化画像上の興味領域をもとに注視点を決定する。まず、興味領域の中心位置を仮の注視点とみなし、シミュレーション空間に逆投影する (Fig. 2.2.2-8)。一般に、この逆投影では、視線方向に対して一意に投影点を計算することはできないが、興味領域内の深度値を参照することで、空間上の注視点を計算することができる (Fig. 2.2.2-9)。ただし、画像上の仮の注視点の位置

に深度値が存在しない場合、つまり、その位置が画像の背景となっていた場合には、興味領域内の深度値の最小値を使って空間上の注視点を計算する。

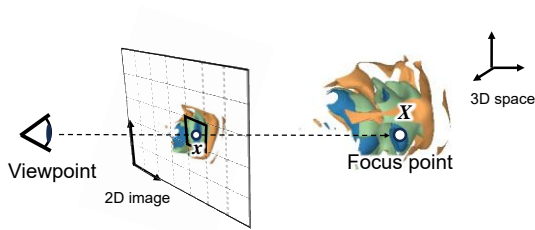


Fig. 2.2.2-8 Un-projection of focus point.

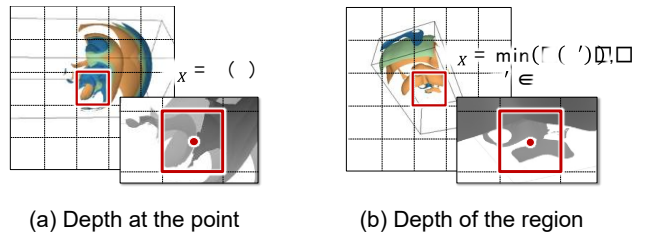


Fig. 2.2.2-9 Depth value D_x for the ROI (Region of Interest).

C：空間上の興味領域拡大

シミュレーション空間上の注視点を計算した後、その注視点が可視化画像の中心に位置するようにカメラパラメータを再設定する。このとき、視点と注視点を結ぶ線分上を、カメラを移動させながら可視化し、その可視化画像に対する情報エントロピーを計算することで、視線上のエントロピー分布を計算する (Fig. 2.2.2-10)。そして、エントロピー値が最大となる視線上の位置から可視化された画像を最終的な可視化画像とすることで、効果的な興味領域拡大を実現する。

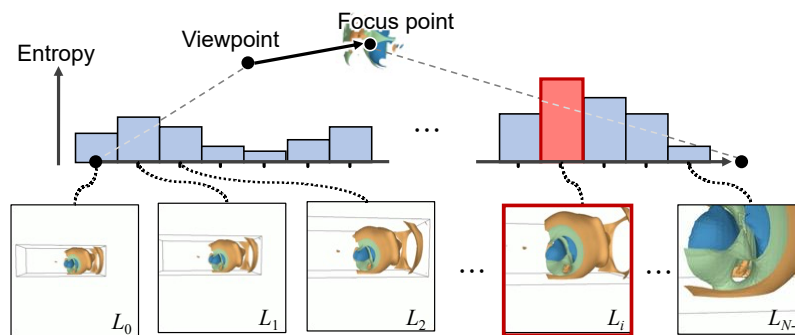


Fig. 2.2.2-10 Determination of the zoom level based on the information entropy from the images along the viewing ray.

2) 並列計算の方法と効果 (性能)

提案するスマート in-situ 可視化基盤システムの可視化機能は、KVS (Kyoto Visualization System) を用いて実装した。KVS では、領域分割されたシミュレーションデータに対して、領域ごとに可視化された部分画像を効率よく合成するため画像重畳技術が実装されている。令和 5 年度開発した in-situ 可視化基盤システムでは、シミュレーションコードから出力されるデータをメモリー上で可視化コードに直接受け渡し、画像重畳機能による並列可視化処理を組み込んだ。また、GPU を搭載しない計算環境向けに、CPU での高速なレンダリングを実現するための Mesa が内包されており、x86 システムでは、LLVM をもとにして Intel によって開発された OpenSWR が選択

され、「富岳」では LLVM と JIT (Just-in-Time) をもとにした高速ラスタライザーである、LLVMpipe が選択される。

令和5年度は、シミュレーションコードと可視化コードを効率よく接続するためのアダプターモジュールを実装した。最適視点推定などのスマート in-situ 可視化基本機能は、このアダプターモジュールを介して実装している。本基盤は C++言語を使って実装されているが、Fortran 言語で実装されたシミュレーションコード向けのインターフェースモジュールを提供することで、C++コードおよび Fortran コードの両方に対応している。アダプターモジュールとして実装されたスマート in-situ 可視化基本機能では、部分領域データに対して並列可視化処理を行い、最終画像が事前に指定した特定のノードに集約される。視点推定等に必要のエントロピー計算は、可視化画像を対象にして適用されるため、すべての推定処理はこのノード上で実行される。

本 in-situ 可視化基盤システムを「富岳」上に実装し、CUBE、OpenFOAM および独自のテスト用 Fortran ソルバー（詳細は「3) 研究成果」で説明する）向けに適用して評価実験を行った結果、シミュレーション処理を含むすべての計算処理時間に対して、推定処理に係る計算時間は約 5 %程度であった。また、可視化処理に係る計算時間は、約 2~30 %程度となりパフォーマンス差が確認された。ただし、各ノード上で部分領域データに対するレンダリング処理は高速に処理されており、処理コストの多くが画像重畳処理にかかっていることも確認された。令和5年度は、スマート in-situ 可視化の基本機能の実装に注力したが、令和6年度は、シミュレーション処理と可視化処理の非同期実行機能 (in-transit 可視化機能) の実装も含めたパフォーマンスチューニングを実施する予定である。

3) 研究成果

令和5年度の研究成果として、開発したスマート in-situ 可視化基盤を、3つの数値シミュレーションに適用して正常動作の確認と有効性の検証を行った。

A : 渦輪シミュレーション

渦輪シミュレーションは、力を与えられた小円筒領域内の流体の流れによって、渦輪が形成される様子を研究するためのシミュレーションである。Fortran によって実装された CFD シミュレーションコードを用いて流体計算は実施し、シミュレーションデータは構造格子データである。本検証では、エンストロフィー密度に対して等値面可視化を適用した。結果を Fig. 2.2.2-11 に示す。

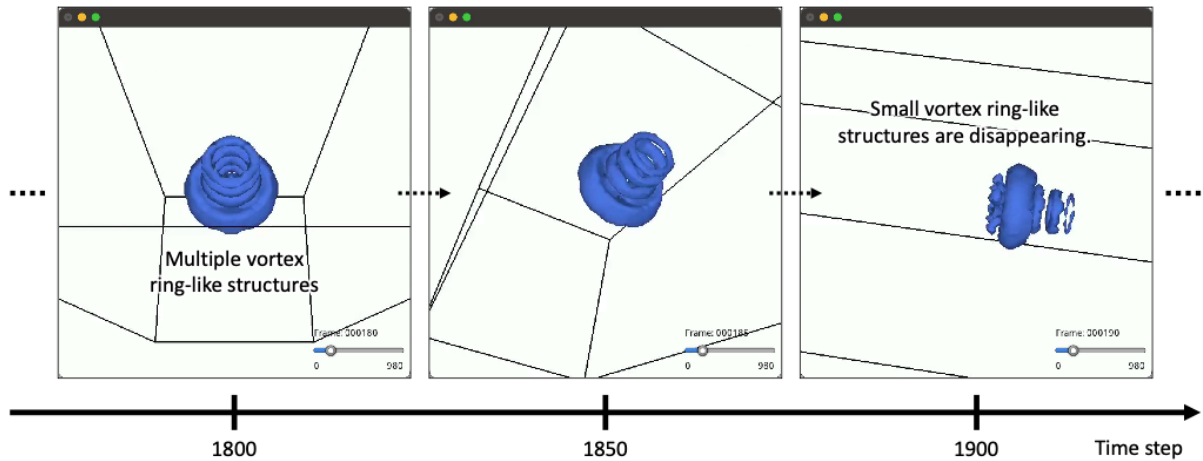


Fig. 2.2.2-11 A case study for analyzing multiple vortex ring-like structure.

このシミュレーションでは、渦輪という局所的な流れ構造が形成され、その渦輪構造が一定速度で動いていくような速度場ができる。エンストロフィー密度の等値面を可視化することで、自己組織化とよばれる、渦輪が自然に形成される過程を確認することができる。提案手法によって生成された動画では、渦輪形成の初期に渦輪のような構造が複数存在し、それが自己組織化の過程において、最終的には1つだけが生き残るという現象が確認できた。時間ステップ $T=1,800$ において、大小4つの渦輪のような構造が存在する。3つの小さい渦輪のような構造が等間隔に並んでいることに注目し、このことは何らかの波または不安定性がこの時刻での流れ場に存在していることを強く示唆していると考えられる。それに加えて、渦輪の自己組織化過程におけるこのような波構造はこれまであまり調べられておらず、提案手法によって生成された動画はシミュレーション中の潜在的に重要な現象を捉えていることが分かる。

B：歯茎摩擦音発生シミュレーション

歯茎摩擦音発生シミュレーションは歯茎摩擦音 ($/s/$) の発生メカニズムを研究するためのシミュレーションである。計算には OpenFOAM によって実装されたシミュレーションコードを用い、シミュレーションデータは四面体、六面体、プリズム、ピラミッドの4つの要素から構成される非構造格子データである。本検証では、圧力場に対して3つの閾値を設定して複数の等値面可視化を適用した。結果を Fig. 2.2.2-12 に示す。

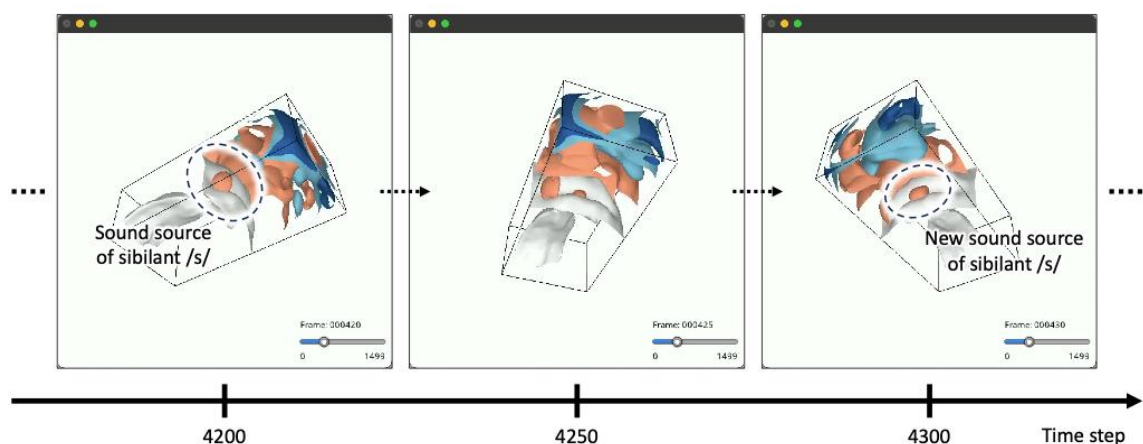


Fig. 2.2.2-12 A case study for analyzing the sound source of sibilant /s/.

このシミュレーションによる評価では、提案手法によって生成された動画によって、従来の固定カメラによる映像と比べて、より多くの特徴的な構造が可視化されていることが示された。また、シミュレーション対象である歯茎摩擦音 (/s/) は高音であり、発音時に発生する乱流によって高周波の僅かな振動が生じる。そのため、音波に関する圧力場も同じような振動を示し、音源の近傍で小さな乱流が発生して風船のような形状が確認できると考えられる。Fig. 2.2.2-12 の左および右の画像は情報エントロピーに基づいて選択された画像であり、風船のような形状を確認することができる。そのため、提案手法によって自動的に選択された視点はシミュレーションの注目すべき現象を捉えていることが分かる。提案手法によって生成された動画像による解析は、従来の固定カメラでの動画像による解析とは異なり、手動での視点変更をする必要がなく、音の発生箇所を容易に確認することができる。特に、長時間のシミュレーションにおいては、手動での視点変更に伴うユーザーの負担を低減することが期待できる。

C：自動車空力特性シミュレーション

自動車空力特性シミュレーションは対象車両が空気の流れから受ける影響を研究するためのシミュレーションである。CUBE によって実装されたシミュレーションコードであり、シミュレーションデータは BCM (Building Cube Method) によって生成される階層型構造格子データである。本検証では、Q 値に対して 1 つの閾値を設定して、その等値面に速度の絶対値によって色を付けて可視化した。結果を Fig. 2.2.2-13 に示す。

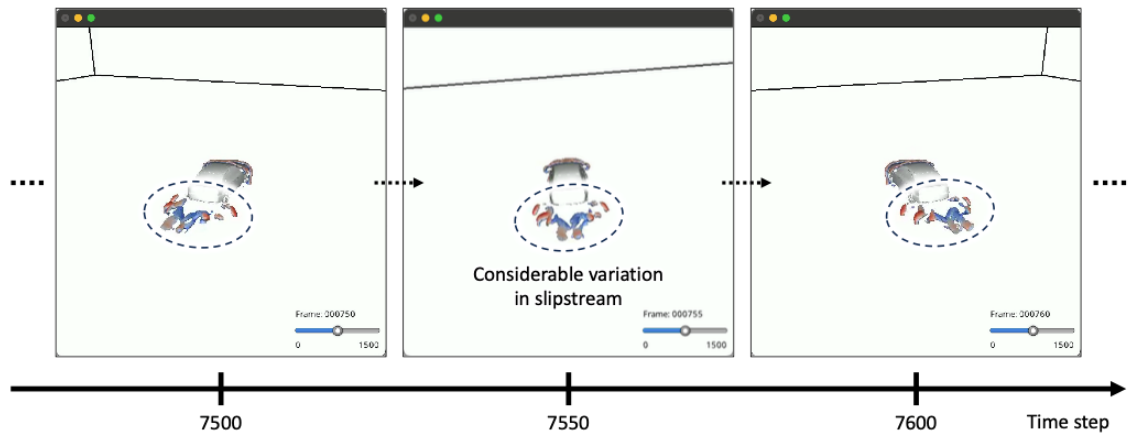


Fig. 2.2.2-13 A case study for analyzing aerodynamic and noise problems in vehicles.

シミュレーション初期には、自動車のフロントバンパー前端、ルーフ先端、サイドミラー周辺に Q 値の等値面を確認することができ、シミュレーションが進むにつれて、自動車後方に後引き渦の等値面が発展していく様子を確認することができる。この後引き渦の発展は自動車まわりに大規模な渦を伴った流れ場が形成されていることを示唆する。自動車のフロントバンパー前端、ルーフ先端、サイドミラー周辺にできた等値面は変動がほとんどなかったことから、これらの領域には定在する渦が形成されていることが分かる。後引き渦の等値面は大きく変動していることが確認でき、この後引き渦の挙動に対する圧力抵抗の影響が示唆される。生成動画には後引き渦が発展していく様子が捉えられており、提案手法は変動が大きい空間領域を自動で推定することができた。このような変動が大きい空間領域は重要な現象が起こっている可能性があり、解析において注目すべき現象であると考えられる。

令和 5 年度に開発したソフトウェア基盤は、以下に示す github リポジトリで公開している。令和 6 年度は、本基盤を使ってさらに有効性の検証を進めるとともに、汎用性と利便性を高め広く一般に公開する予定である。

- ・ スマート in-situ 基盤ソフトウェア
<https://github.com/vizlab-kobe/InSituVis>
- ・ 渦輪シミュレーションコード
<https://github.com/vizlab-kobe/SmokeRingVis>
- ・ 歯茎摩擦音発生シミュレーション
<https://github.com/vizlab-kobe/OralAirFlowVis>
- ・ 自動車空力特性シミュレーション ※公開準備中
<https://github.com/vizlab-kobe/CUBEVis>

4) まとめ

令和 5 年度は、スマート in-situ 可視化向け基本機能の実装に注力し、最適視点推定機能の実装に加え、in-situ 可視化フレームワークを開発した。本フレームワークでは、シミュレーションコード

と可視化コードを効率よく接続するためのアダプターモジュールを適用しており、C++と Fortran 向けのインターフェースを使って効率よくスマート in-situ 可視化機能を組み込むことを可能にしている。実験では、CUBE、OpenFOAM および独自のテスト用 Fortran ソルバー向けに、スマート in-situ 可視化機能を組み込み、本フレームワークの有効性を確認した。また、開発した基盤ソフトウェア（初期バージョン）を、github リポジトリを介して一般に公開した。

今後は、シミュレーション処理と可視化処理の接続方式の改善（in-transit 可視化機能の実装）に加えて、「富岳」上での各機能のパフォーマンスチューニングを行う予定である。さらに、CUBE を使ったより大規模な空力騒音解析シミュレーションに適用して、その効果を検証する予定である。

(3) 研究テーマ③：実船の推進性能の予測

(a) 研究成果の要旨

本研究テーマでは、「(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」において開発する壁面挙動予測モデルを、有限要素法による LES 解析アプリケーションである FrontFlow/blue (FFB) に実装し、10億要素程度の計算格子によって、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。その予測結果を Wall-Resolved LES の計算結果と比較することによって予測精度を検証する。さらに、600億程度の計算格子を用いて、実船スケールの流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、予測精度を検証する。

令和5年度は、壁面挙動予測モデルの実装を準備した。FFB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（Under-resolved LES）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。また、研究テーマ①で開発した判別器を用いて、船底など船体表面の曲率半径が大きい領域では、違う船型の数種類のレイノルズ数でも同一の判別器で Wall-resolved LES と Under-resolved LES の計算結果が判別できることが確認された。アプリケーション開発としては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変更を行った。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、壁面挙動予測モデルを実用化する上で重要な知見が得られた。

In this research, the wall model to be developed in Research theme 1 will be implemented in LES solver using the finite element method, FrontFlow/blue (FFB). About one-billion-element computational grid will be used to predict the flow field and the propulsive performance of a model ship on a model-test scale. Furthermore, the ship-scale flow field and the propulsive performance of the actual ship will be predicted by 60-billion-elements computational grid, and the accuracy of such predictions will be verified by referencing the test results and other related data.

In this fiscal year, in preparation for the new wall-model implementation to FFB, we analyzed the differences between the results of a coarse grid without the wall model (Under-resolved LES) and the results of Wall-resolved LES on a ship shape, for which the new wall model will actually

be used. In addition, using the discriminator developed in Research theme 1, it was confirmed that one discriminator can discriminate results obtained by the Wall-resolved LES from those obtained by the Under-resolved LES calculation, for different Reynolds numbers with different hull forms. As for development of the application solver, the code was modified to efficiently extract the input data necessary for the wall model. Under-resolved LES calculations usually fail to reproduce small eddies near the wall and underestimate the wall shear stresses, but in some particular case, they overestimate the wall shear stresses, which is an important finding for the practical application of this research.

(b) 本研究の内容

1) 計算モデル

研究テーマ①で開発した壁面挙動予測モデルを適用する前に判別器、生成器をそれぞれ個別に検証した。対象船型としては CFD ベンチマーク船型である超肥大船 JBC (Japan Bulk Carrier) と通常の肥大船 1 船型、合計 2 船型を対象とした。

2) 並列計算の方法と効果 (性能)

判別機および生成器の学習に使用する船体まわりの流れ場データを計算するため、流体解析コード FrontFlow/blue (FFB) を使用した。FFB は非圧縮性流体、および圧縮性流体を計算対象とする汎用流体解析コードであり、乱流中の渦のダイナミクスを直接計算することにより乱流現象を高精度に予測できることが最大の特長である。FFB の主要計算部分は、以下に示す 4 つのコアカーネルで構成されている。

- ▶ VEL3D1 : Navier-Stokes 方程式の左辺の係数行列と右辺の強制力ベクトルを計算する。
- ▶ CAL3DX : Navier-Stokes 方程式を解くためのマトリックスソルバー (BCGSTAB 法) における行列ベクトル演算 (以下、AX 計算)。マトリックスの係数は CRS 形式で格納されており連続参照される。
- ▶ GRAD3DX : Poisson 方程式を解くためのマトリックスソルバー (残差切除法) における AX 計算の一環として、要素における圧力および幾何情報 (形状関数の微分の積分値) を用いて節点における圧力勾配を計算する。幾何情報は節点ベースに並べ替えられており、連続参照される。
- ▶ FLD3X2 : Poisson 方程式を解くためのマトリックスソルバー (残差切除法) における AX 計算の一環として、節点における圧力勾配および幾何情報 (形状関数の微分) を用いて、圧力勾配の発散を計算する。幾何情報は要素で定義され、連続参照される。

上記のコアカーネルは、ストア処理の連続アクセス化、ロード処理の局所化などにより高速化されている。この結果、4 つ中の 3 つのコアカーネルの「富岳」におけるメモリスループット (メモリーからのデータ転送レート [GB/s]) は、「富岳」の実効最大スループット (820 GB/s) の 90% 以上の性能を達成している (Fig. 2.2.3-1(a))。なお、運動方程式左辺の計算のコアカーネル (VEL3D1) のメモリスループットが低い理由は、このコアカーネルだけメモリーからのロード回

数に対する演算数が多いためである。それ以外のコアカーネルが「富岳」の実効最大メモリスループットをほぼ使い切るところまで高速化した結果、「富岳」における単体性能（1 ノード、4 CMG を使用）として 179 GFLOPS を達成している（Fig. 2.2.3-1(b)）。

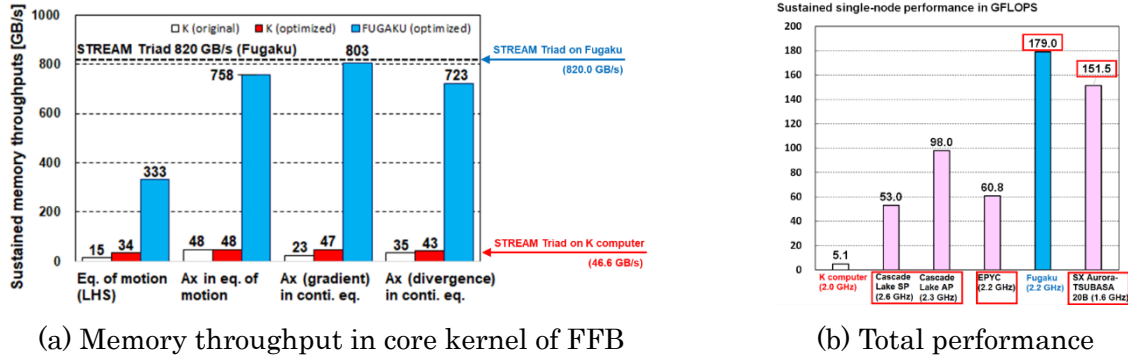


Fig. 2.2.3-1 Sustained performance of FFB on a single compute node of Fugaku.

並列計算性能に関しては、単純形状（長い直方体領域であり、各領域は左右 2 領域としか隣接していない）であれば、「富岳」の全系（約 15 万ノード）を用いた weak-scale ベンチマークにおいて、約 80% の並列化効率を達成している（Fig. 2.2.3-2(a)）。しかしながら、立方体領域を RGB（Recursive Graph Bisection）法により領域分割した weak-scale ベンチマークテストでは、「富岳」の約 1 万ノードを用いたベンチマークテストで並列化効率が 50% 程度まで低下することが確認されており（Fig. 2.2.3-2(b)）、並列計算性能を向上させる必要がある。並列計算性能を向上については研究テーマ⑥で取り組んでいる。

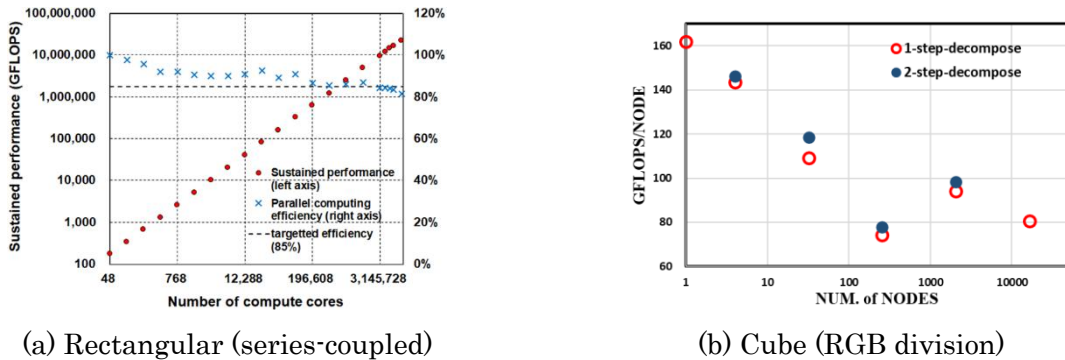


Fig. 2.2.3-2 Parallel computing efficiency of FFB on Fugaku in weak-scale benchmark tests.

判別器および生成器の検証にあたっては、判別器および生成器を FrontFlow/blue（FFB）に組み込む準備として、当初は計算結果をファイルに書き出した後に、判別器および生成器の学習を行う計画であったが、全データを出力するためには膨大なファイル保存領域が必要なるため、計算実行中に必要なデータを補間計算して、これらを出力できるようにコード（FFB）を改変した。この機能を利用して、 $y^+ = 100, 200, 300$ (y^+ は粘性長さスケールで無次元化した壁面からの距離) の 3 断面で 10,000 steps の流場をサンプリングした。各断面の流場情報は $(dx^+, dy^+) = (120, 40)$ (dx^+

および dy^+ は粘性長さスケールで無次元化した出カインターバル)の矩形格子に補間し、 28×28 点の流速と圧力の情報 u, v, w, p を抽出した。6億要素を用いたLES計算の実行中に、1つの断面をサンプリングするのに432ノード2.5時間を要した。それぞれのデータはUnder-resolvedとWall-resolvedで同一レイノルズ数、同一時間刻み幅で抽出した。

3) 研究成果

Fig. 2.2.3-3 にサンプリングしたデータを可視化したものを示す。人間の目では、Under-resolvedとWall-resolvedの結果は識別できないが、これを判別器が判別できるか検証を行う。

判別器の検証の前に、流場の特徴を確認するために、Fig. 2.2.3-4 に船体中央部の船底に接する $(dx^+, dy^+, dz^+) = (3360, 300, 1120)$ の領域の渦の様子を可視化した。左は船底の壁から見た様子であるが、壁に近いところではUnder-resolvedよりWall-resolvedの方が小さな渦構造が見られたが、右図の境界層外縁から見た流れでは $y^+ = 300$ 付近では違いは見られないことがわかった。Fig. 2.2.3-5 に 28×28 点の断面の1点について、10,000 stepsの (v, w) の頻度分布を示したが、全ての断面で特徴的な分布は見られなかった。Fig. 2.2.3-6 に圧力 p の時刻歴と (v, w) の軌跡を示す。Under-resolvedよりWall-resolvedの方が細かな構造が見られた。また、 (v, w) の軌跡には何らかの構造が見られるため、壁面挙動予測モデルには何らかの時間方向の概念の導入が必要になると考えられる。

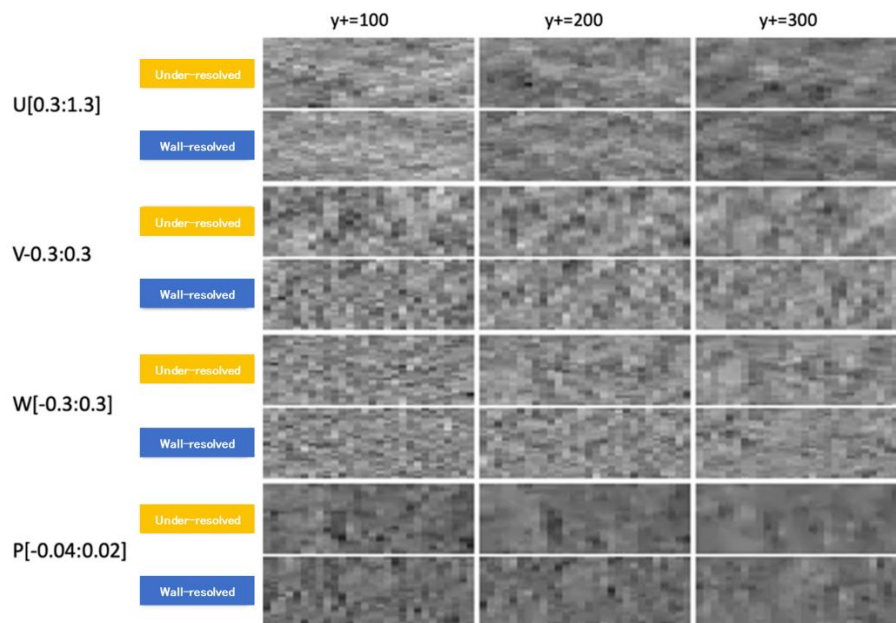


Fig. 2.2.3-3 Sampling data.

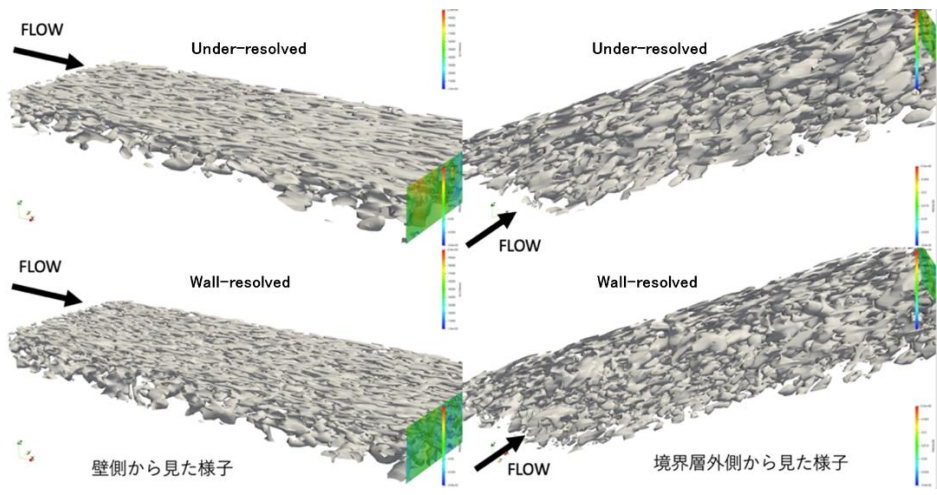


Fig. 2.2.3-4 Vortices structures at ship bottom (left: view from wall side, right: view from main-stream side).

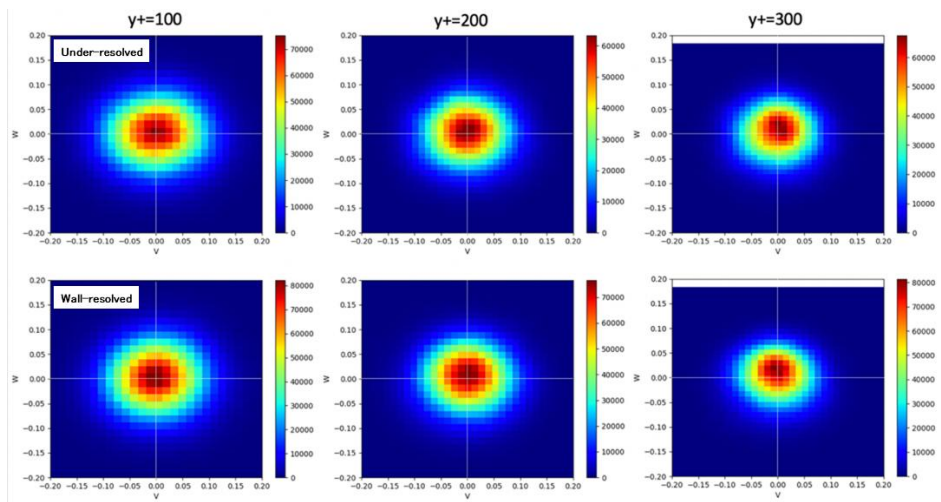


Fig. 2.2.3-5 Probability density function of velocity components v and w.

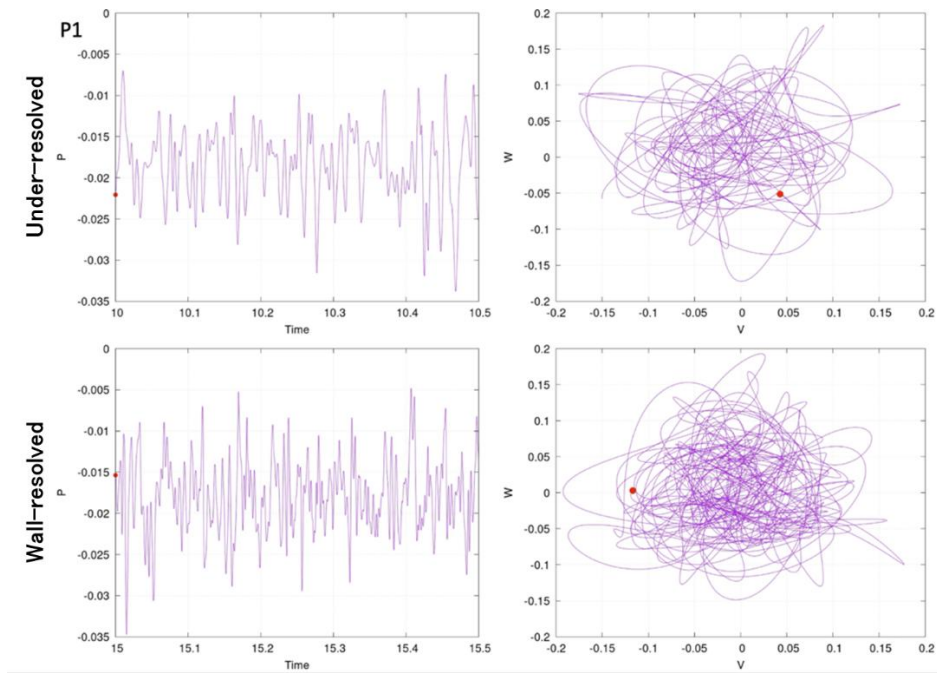


Fig. 2.2.3-6 Time series of pressure (left) and trajectory of velocity components v and w (right).

次に判別器の検証結果について記す。2つの船型に対し、境界層が十分発達した後、時間的に十分離れた3つの時間帯の10,000 stepsのデータを用いた。データ総数は5.6億程度になるがこれをUnder-resolvedとWall-resolvedの2セット用意し、学習データとテストデータに分けて判別機を学習させ、テストを行った結果、ほぼ100%のaccuracyで判別できることがわかった。なお、この判別器には時間方向の認識機能は導入されていないことを付記する。また、レイノルズ数が違うデータも抽出して同じ判別器でテストしたところ、accuracyは約99%であった。

Fig. 2.2.3-7に生成器の試行結果を示す。上述のWall-resolvedのサンプリングデータを用いて $y^+ = 200$ の (u, v, w) から $y^+ = 100$ の (u, v, w) の生成を試みた。Fig. 2.2.3-7において上段は入力 $y^+ = 200$ のデータ、中段は正解の $y^+ = 100$ のデータ、下段は生成器が生成した $y^+ = 100$ の出力データである。定量的な検証が必要であるが、定性的には流れのパターンが学習（再現）できていることがわかった。定量的な分析は今後の課題とする。

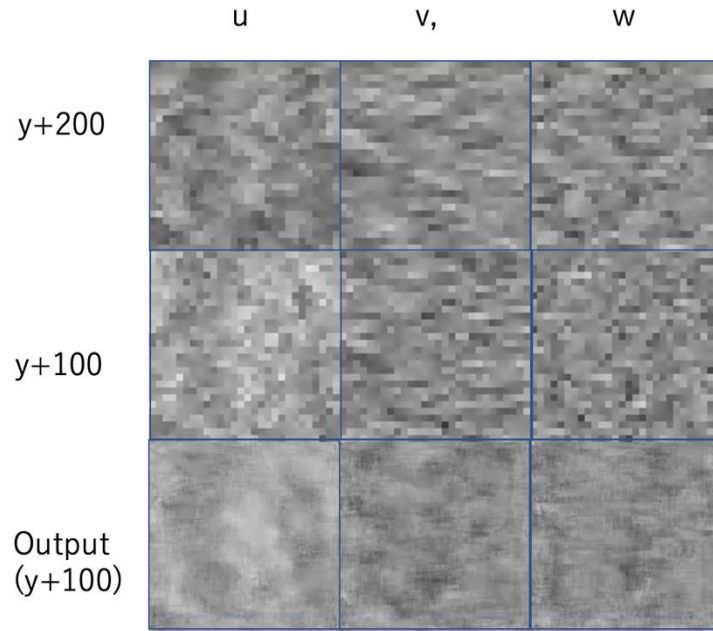


Fig. 2.2.3-7 Generator trial results (top: input data, middle: teaching data, bottom: output data).

最後に Wall-resolved に必要な格子サイズについて言及する。これまでの研究で様々な船型に対してレイノルズ数 $Re > 5.0 \times 10^6$ では $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (30, 3, 10)$ の格子を用いて実験と抵抗値が 1 % 以内で一致していたので Wall-resolved の格子サイズは $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (30, 3, 10)$ としていた。一方で、本研究で用いた Under-resolved の格子サイズは $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (60, 6, 20)$ であり、これまでの研究の知見から、この格子サイズでは摩擦を過小評価することがわかっている。これは、Under-resolved の格子では壁付近の渦が生成されなくなり、壁付近の運動量交換が少なくなり、摩擦を過小評価すると考えられている。

本研究でサンプリングした計算条件は、 $Re = 1.25 \times 10^6$ であったが、別の計算結果では、 $Re = 3.0 \times 10^6$ で $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (30, 3, 10)$ の格子で実験より 3 % 程度過大となった例があった。この計算例では $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (20, 3, 7)$ の格子で実験と 1 % 以内で一致したため、レイノルズ数が小さい、乱流遷移の影響が広範囲の境界層に残るような場合には、より解像度が高い計算格子が必要なが示唆される。この例において、 $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (30, 3, 10)$ の格子で摩擦抵抗が過大となる原因としては格子解像度がわずかに不足している場合には、本研究で用いた Under-resolved の格子と違って壁付近の渦が生成されるが、実際より大きな渦となり、結果的に壁付近の運動量交換が大きくなり、摩擦抵抗を過大評価すると考えられる。本研究では最終的には $Re > 5.0 \times 10^6$ をターゲットとしているため、Wall-resolved の格子サイズは $(\Delta x^+, \Delta y^+, \Delta z^+) = (30, 3, 10)$ で十分であると考えられるが、前段階で低いレイノルズ数で検証するときには注意が必要であることが知見として得られた。また、このような知見も壁面挙動予測モデルの開発に活かしていきたい。

4) まとめ

研究テーマ①で開発した壁面挙動予測モデルを適用する前段階として、判別器および生成器をそれぞれ個別に検証した。対象船型としては実用的な肥大船 2 船型を用いた。

FFB 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が入っていない粗い計算格子を使った計算結果 (Under-resolved LES) と Wall-resolved LES の計算結果について境界層内部の流場の性質の違いについて分析した。学習に使用したデータについて、空間的には見分けがつかないデータであったが、時間方向の特徴の違いは見られた。研究テーマ①で開発している判別器では時間方向の特徴抽出機能は実装していないにもかかわらず、ほぼ 100 % の accuracy で判別できることがわかった。また、レイノルズ数が違うデータについても同じ判別器で約 99 % で判別できることがわかった。生成器の試行については $y^+ = 200$ の (u, v, w) から $y^+ = 100$ の (u, v, w) が生成できることを確認した。定量的な検証は今後の課題とする。

(4) 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

(a) 研究成果の要旨

本研究テーマでは、「(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」において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、数億格子から 10 億格子程度の LES によって空力騒音を精度良く予測する技術を構築し、上記の研究成果の実用化を加速する。さらに、「(2) 研究テーマ②：スマート in-situ 可視化基盤の構築」において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開発する。

令和 5 年度は、CUBE および FFX に対する壁面挙動予測モデルの実装準備を実施した。CUBE に対する壁面挙動予測モデルの実装準備として、エントロピーのバランスを考慮した 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サ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、バサバサ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、自動車のような複雑形状を安定的に計算するには、バウンスバック法の処理の改良が必要なことを明らかにし、質量の保存性を保つための改善を行い、安定な解析を行えるようにした。その結果、格子数 10 億格子程度でも空力騒音が精度良く解析できることを確認した。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。

In this research, by utilizing the near-wall-turbulence prediction model to be developed in Research theme 1, we will establish a technology to accurately predict aerodynamic noise by an LES with several hundred million to one billion grids, which can be applied in the automotive-development field. This will accelerate the practical applications of the results of this research. In addition, by utilizing the research results to be developed in Research theme 2, we will develop a technology to accurately identify major aerodynamic noise sources around vehicles.

In this fiscal year, we have done preparatory studies to implement the near-wall-turbulence prediction model to CUBE and FFX. As for CUBE, we have implemented the KEEP scheme (Kinetic Energy and Entropy Preserving scheme), which preserves the entropy, taken measures to prevent the divergence of the computation near the wall, selected benchmark problems and reviewed necessary spatial grid resolution for the prediction of broadband noise subjected to the incoming turbulence of an on-road vehicle, and developed a variable wind module for its prediction. As for FFX, we have reviewed the wall boundary condition of the lattice Boltzmann method and clarified the need for an improvement of the bounce-back method is necessary. We have implemented a wall-treatment method that conserves mass and thereby enabled a stable computation for complex geometries such real vehicles. As a result, we have confirmed that the aerodynamic noise can accurately be predicted only with 1 billion lattices. Furthermore, we have applied the wavenumber-frequency Fourier analysis to decompose the computed pressure into acoustical component and hydrodynamical component, which has turned out to be utilized to identify the noise source.

(b) 本研究の内容

I. CUBE に関する成果

1) 計算モデル

ここでは、従来用いられてきた圧縮性 CUBE の計算スキームについて示す。密度 ρ 、運動量 ρu_i 、全エネルギー ρe に対する保存式は以下の圧縮性 Navier-Stokes (NS) 方程式で表される。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial x_1} + \frac{\partial F_2}{\partial x_2} + \frac{\partial F_3}{\partial x_3} = 0$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho e \end{pmatrix}, \quad F_i = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i u_1 + p \delta_{i1} - \mu A_{i1} \\ \rho u_i u_2 + p \delta_{i2} - \mu A_{i2} \\ \rho u_i u_3 + p \delta_{i3} - \mu A_{i3} \\ (\rho e + p) u_i - \mu A_{ij} u_j - k \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix}$$

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} u_i u_i, \quad p = \rho R T$$

ここで、 p は圧力、 γ は比熱比、 T は温度、 R は気体定数、 $A_{ij} = \partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i - 2/3(\partial u_k / \partial x_k) \delta_{ij}$ は粘性応力テンソルを粘性係数で割ったテンソル、 μ は粘性係数、 k は熱伝導率である。粘性項および温度拡散項の離散化は二次精度の中心差分で行い、対流項フラックスは ROE スキームを用いて離散化される。

$$F_{inviscid, i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (F_R + F_L) - F_d$$

F_L 、 F_R はセル界面において5次精度のMUSCL補間によって再構築された中心差分フラックスであり、 F_d はROEスキームに付加される人口粘性項であり、以下の式で示される。

$$F_d = -\frac{1}{2} \left\{ |U_{IC}| \begin{bmatrix} \Delta\rho \\ \Delta(\rho u_1) \\ \Delta(\rho u_2) \\ \Delta(\rho u_3) \\ \Delta(\rho E) \end{bmatrix} \right\} + \Delta U \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho H \end{bmatrix} + \Delta p \begin{bmatrix} 0 \\ n_x \\ n_y \\ n_z \\ U \end{bmatrix}$$

U_{IC} はROE平均されたセル界面での絶対速度、 $\Delta()$ は F_R および F_L の位置における差を表す。自動車の空力音響問題は通常低マッハ数流れであるが、低マッハ数で上記の人工粘性は過大となる。そこで、自動車の空力音響解析では、局所マッハ数 M_{local} を用いて以下の補正を行った ROE スキーム (LMRoe: Low Mach ROE) [1] を用いる。

$$\Delta U \rightarrow \min(M_{local}, 1) \Delta U$$

2) 研究成果

2-1) KEEP スキームの実装と不安定性の改善

2-1-1) KEEP スキームの壁面近傍での不安定性

これまでに、解像度が低い計算格子でも高精度に乱流を解像し、空力騒音の高精度予測を行うため、対流項フラックスに KEEP (Kinetic Energy and Entropy Preserving) スキームを実装してきた。KEEP スキームは運動エネルギーとエントロピーのバランスを満たすようフラックスの離散化を行うことで、人工粘性を付加すること無く、乱流の長時間安定計算が可能なスキームであり、近年、航空機全機の LES 解析においてその有効性が示されている [2]。

一方、KEEP スキームによって運動エネルギーとエントロピーのバランスが保証されるのは流体領域のみであるため、壁面境界においては別途これらのバランスを考慮する必要がある。特に、壁面境界における非物理的な質量の生成/消滅がある場合、KEEP スキームでは流体領域の運動エネルギーのバランスから、質量変動に伴い壁面近傍の流速が大きく変動し、非物理的な流れの発生や流れ場の発散につながりやすい。そのため、壁面境界の取り扱いも十分に検討する必要がある。

2-1-2) 壁面境界モデルの実装と効果検証

圧縮性 CUBE における従来の壁面境界の取り扱いは Immersed boundary method (IBM) が用いられている [3]。これは、壁面境界からの第一セル (IC : Interface Cell) の値を直接補間する方法であり、以下では Direct interpolation IBM とよぶ。IC の値を補間する具体的な手順は以下のとおりである。

- ① Image Point(IP)とよばれる、壁面から IC のセル中心について対称となる点を作成する。
- ② IP の値を周囲の流体セルの値を用いて線形補間する。
- ③ IP の値と壁面における値(境界条件)を線形補間して IC の値を定める。

IC と IP の位置関係を Fig. 2.2.4-1 に示す。Direct interpolation IBM は計算負荷が低く、複雑形状においても簡単に適用できる利点がある。しかし、自動車のボンネットから発生する狭帯域音の解析において、KEEP スキームの境界条件に Direct interpolation IBM を適用すると、エンジンルーム内部のような固体壁に囲まれた空間で非物理的な流れが発生してしまい、これを抑制するためには過大な数値粘性を利用せざるを得なかった。Direct interpolation IBM は IC における値を直接

定義しているため、IC においては NS 方程式が解かれず、壁面における境界フラックスが適切に評価されない。そこで、基本的には Direct interpolation IBM と同様な考え方に基づき、壁面における境界フラックスを改良するため、Ghost cell 型の IBM (Ghost cell IBM) [4] を新たに実装した (Fig. 2.2.4-1)。Ghost cell IBM では、IC 上では壁から見て同じ側にある流体としての値と、壁を挟んだ反対側の流体のための値、すなわち Ghost Cell (GC) としての値の 2 つの値を保持する。GC としての値は、Direct interpolation IBM と同様に IP を作成し、IP と壁面における値を用いて線形補間することで求められる。ただし、Direct interpolation IBM と異なり、IP の位置は GC のセル中心から壁面と対称となる位置に作成される。Ghost cell IBM では、IC 上の値は壁を挟んだ反対側の GC の値を用いて NS を解くことで求められるため、系全体で NS 方程式が解かれることとなり、保存性が改善すると予想した。

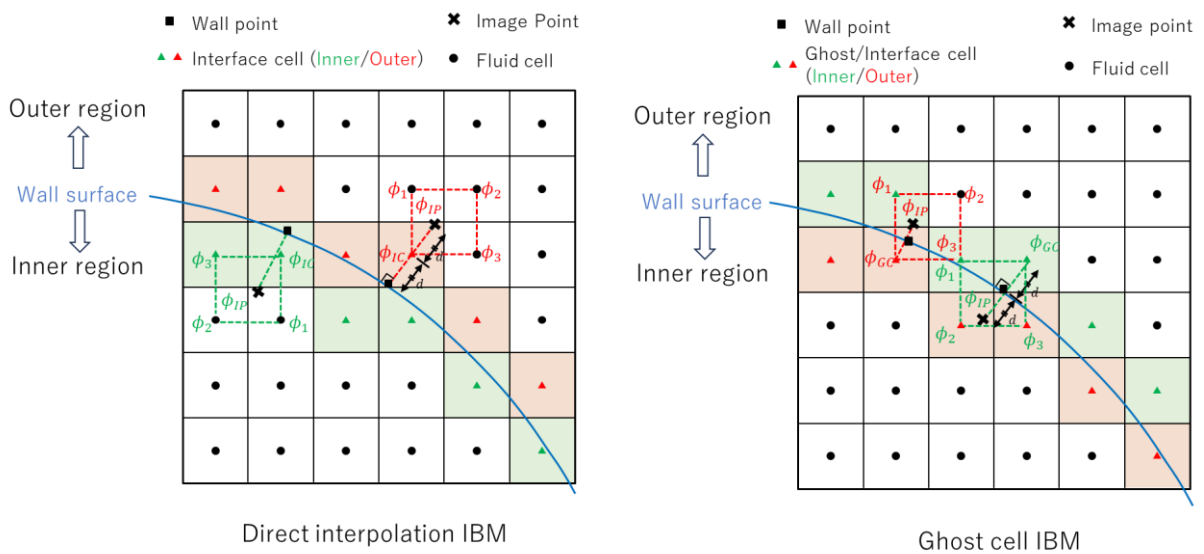


Fig. 2.2.4-1 The schematic diagram of direct interpolation IBM and ghost cell IBM.

2 つの IBM の保存性を比較するため、KEEP スキームを用いて Wall-bounded Taylor-Green vortex (WTGV) [5] による検証を行った。これは乱流のテストケースとしてよく用いられる Taylor-Green vortex (TGV) において、流速が 0 となる境界の境界条件を周期境界条件から滑り無し条件に変更したものである。TGV と WTGV における質量、全エネルギー、運動エネルギーの時間進展を Fig. 2.2.4-2 に示す。TGV においては、KEEP スキームは質量、運動エネルギー、全エネルギーを保存する。しかし、Direct interpolation IBM を用いた WTGV では、時刻が経過するにつれ系内の質量、全エネルギーが 10 %以上減少し、運動エネルギーは 60 %以上増加している。一方、Ghost cell IBM では、TGV と同レベルで各保存量が保存しており、Direct interpolation IBM に比べて壁面境界における保存性が大きく改良することが分かった。

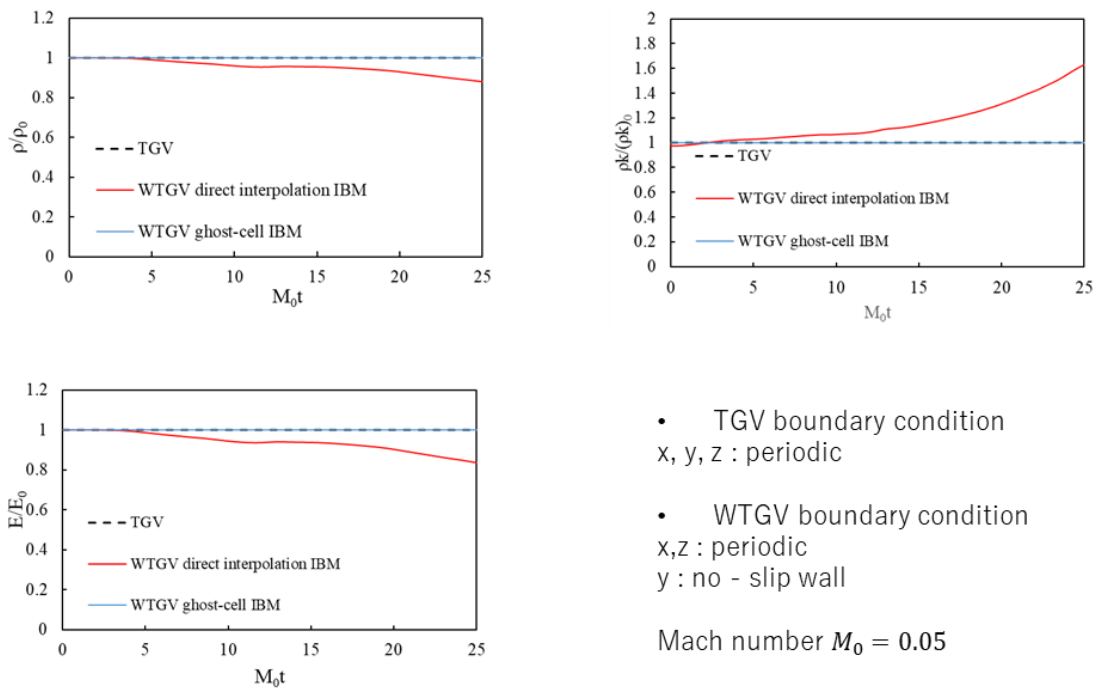


Fig. 2.2.4-2 The time evolution of mass, kinetic energy and total energy in TGV and WTGV.

続いて、壁面まわり流れの基礎検証として、KEEP スキームを用いて Fig. 2.2.4-3 に示す平板まわり流れの解析を行った。平板の境界条件として Direct interpolation IBM および Ghost cell IBM を用いた絶対速度の分布を Fig. 2.2.4-4 に示す。Direct interpolation IBM では、平板まわりで発生した流れが振動しながら増幅し、流れ場全体が解像できなくなっているが、Ghost cell IBM では数値振動が大きく抑制され、下流でのカルマン渦の形成が見られるレベルとなる。Ghost cell IBM でも平板前面での数値振動は残るが、これは KEEP スキームが二次中心差分で離散化されているため完全な回避は困難であり、これまでに実装した数値散逸フィルタを用いることで低い散逸強度（フィルタ係数 $\alpha = 0.01$ ）で抑制することが可能である。

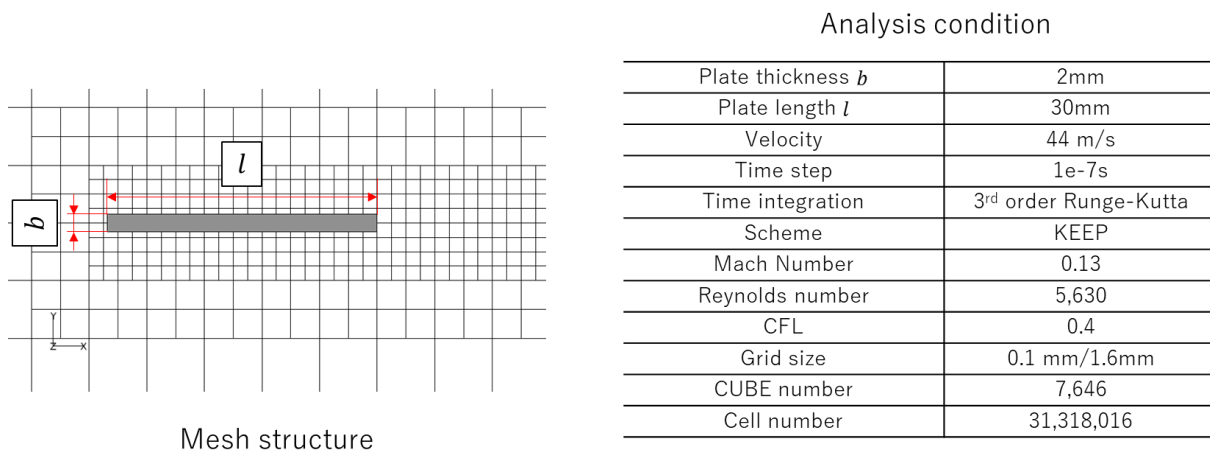


Fig. 2.2.4-3 Flat plate analysis.

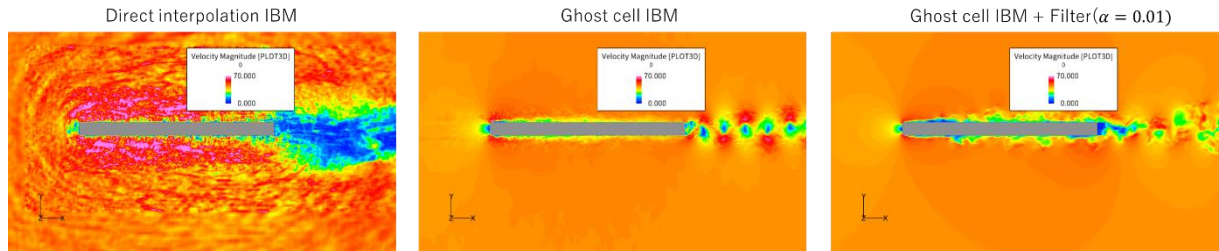


Fig. 2.2.4-4 Velocity-magnitude profiles around the plate.

2-2) 広帯域バサバサ音予測（ベンチマークの選定と空間解像度の検討、変動風モジュールの開発）

2-2-1) 自動車広帯域空力音の予測に対する格子解像度の検証（風洞試験結果との比較）

自動車の A ピラーやサイドミラーまわりで発生する空力騒音が主要因となる周波数帯域は 1~5 kHz である。その周波数帯域における音響学的な圧力変動を精度良く予測するには、圧縮性流体解析の計算スキーム、および格子解像度を検討し、車両まわりの流れで発生する乱流渦を正確に予測することが重要である。本研究では流体変動の周波数に対する渦スケールを目安に、剥離を伴う自動車まわりの流体騒音解析に必要な格子解像度を推定した。サイドウィンドウ付近における渦の対流速度は主流速度の 0.5~0.9 倍と仮定した。これより、5 kHz の変動の周波数がつくる渦スケールは、0.8 mm 程度になると考えられる。その渦を正確に解くには一つの渦に対して 4 メッシュ ($4^3=64$ セル) 程度の解像度が必要であると考え、0.2 mm 以下の空間格子解像度が必要になると考えられる。なお、本課題は計算機リソースの制約があったため、空力騒音の主要な要因である剥離渦の発生と移流を捉える上で、特に重要となると考えられる A ピラーとサイドミラー周辺、およびサイドウィンドウ近傍に対し、最小空間格子幅 0.8 mm を設定し、そこから八分木状に車両外側に向かうにつれて格子幅を大きくした (Fig. 2.2.4-5)。この格子解像度で議論できる音の高周波数側の限界は、車体表面近傍に限定されて高くても 1~2 kHz 程度であると推測する。この検証は、サイドウィンドウ表面の圧力変動を風洞試験の結果と比較することで確認する。

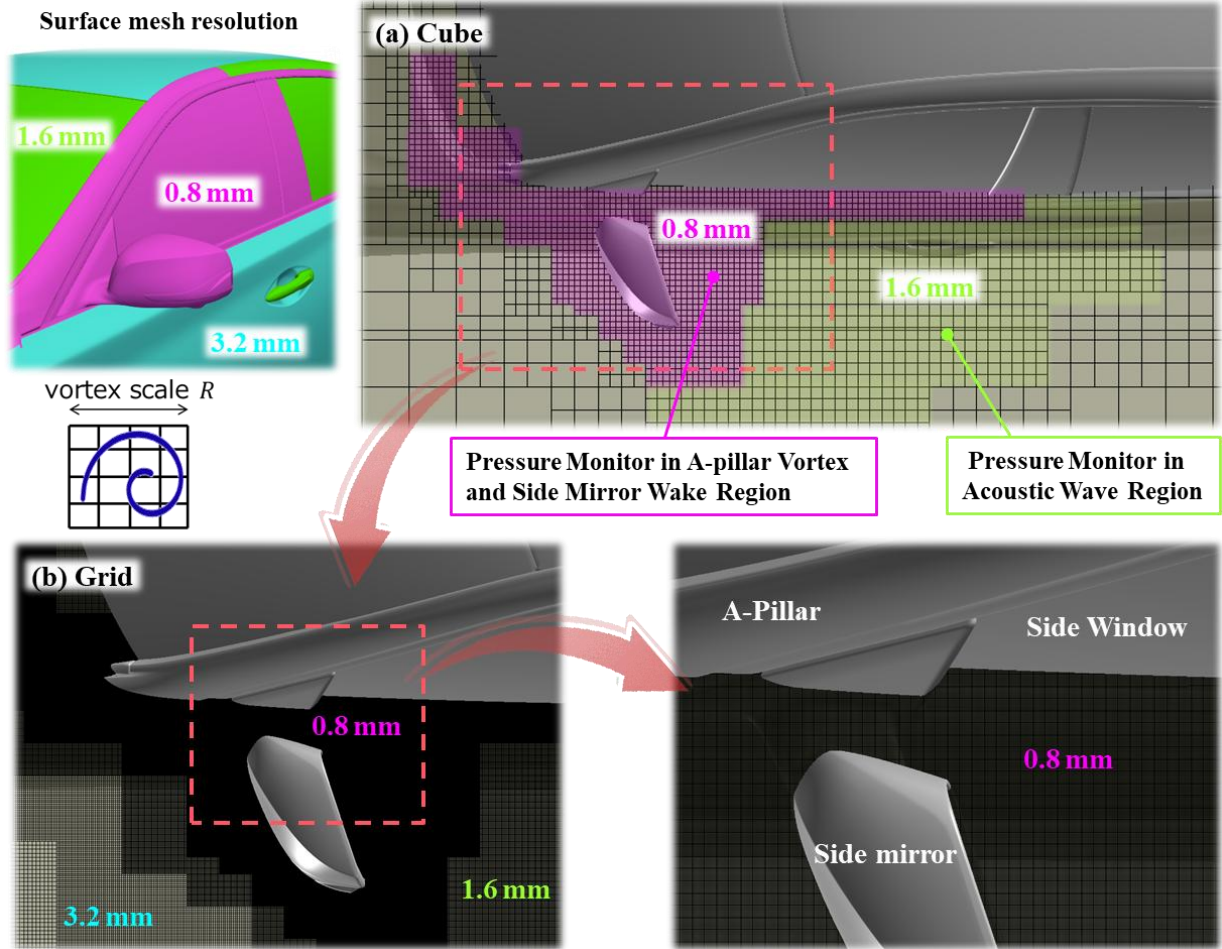


Fig. 2.2.4-5 Grid resolution and structure to capture the vortex flow and sound propagation that is generated around the vehicle.

定常風下における自動車風切り音解析（広帯域空力音予測）の妥当性を検証するために、サイドウィンドウ表面の圧力変動を風洞試験の結果と比較した（Fig. 2.2.4-6）。Medium 格子（最小格子 0.8 mm、約 6 億セル）のメッシュ解像度では、議論できる最大周波数は 1 kHz から 2 kHz までと予測される。図には慣性小領域における圧力変動の理論解析結果である $-7/3$ 乗の勾配に従った直線も破線で示した。CFD シミュレーション（CUBE による直接空力音解析）の結果は、物理時間で 0.2 秒間の圧力変動を周波数解析したスペクトルである。これを見ると、Medium 格子では約 2 kHz まで、Fine 格子（最小格子 0.4 mm、約 22 億セル）では約 4 kHz まで、圧力変動スペクトルの傾向を捉えているのを確認できる。したがって、車速 100 km/h 走行の条件下でサイドガラス表面の圧力変動を 2 kHz 程度まで正確に予測するには、0.4 mm 以下の空間格子解像度が必要である可能性がある。なお、風洞試験と CFD 解析の両方において、100 Hz～1 kHz の範囲でエネルギースペクトルが $-7/3$ 乗則に比例する慣性小領域があることを確認できている。

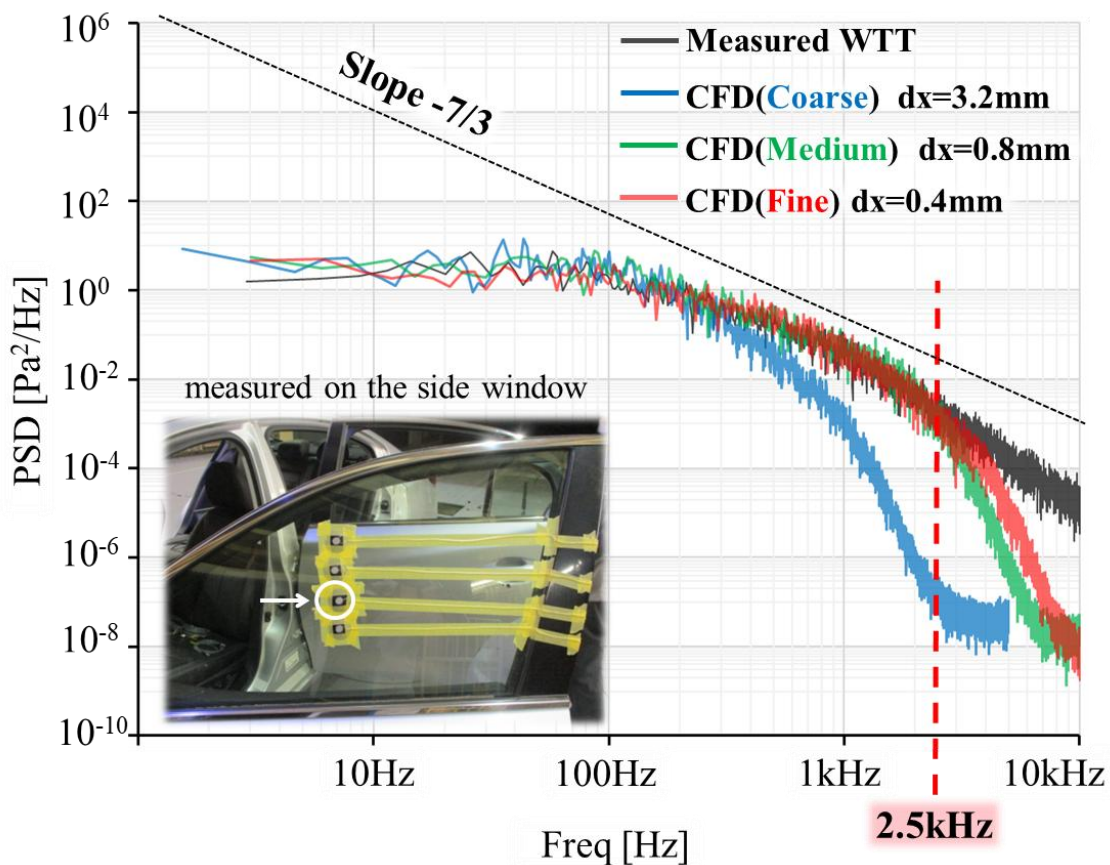


Fig. 2.2.4-6 Comparison of surface-pressure fluctuations on the side window.

定常風下における自動車風切り音解析（広帯域空力音予測）の結果から、Aピラー、サイドミラーまわりの流れ場を確認した。流れ場の3次元的な渦構造を可視化するため、Fig. 2.2.4-7にλ2（渦中心）の等値面を示す。Aピラー近傍およびサイドミラー周辺で乱れが特に大きく、圧力変動が発生しやすい領域が確認できる。また、Aピラー根元付近で発生した乱れが、車両側面に対流し、サイドミラー前方に衝突している様子も確認できる。さらに、矢印で示すように、Aピラー近傍およびサイドミラー周辺で見られる波長が短い流体力学的な圧力変動とサイドミラー前方に見られる波長が長い音響的な圧力変動が確認できる。

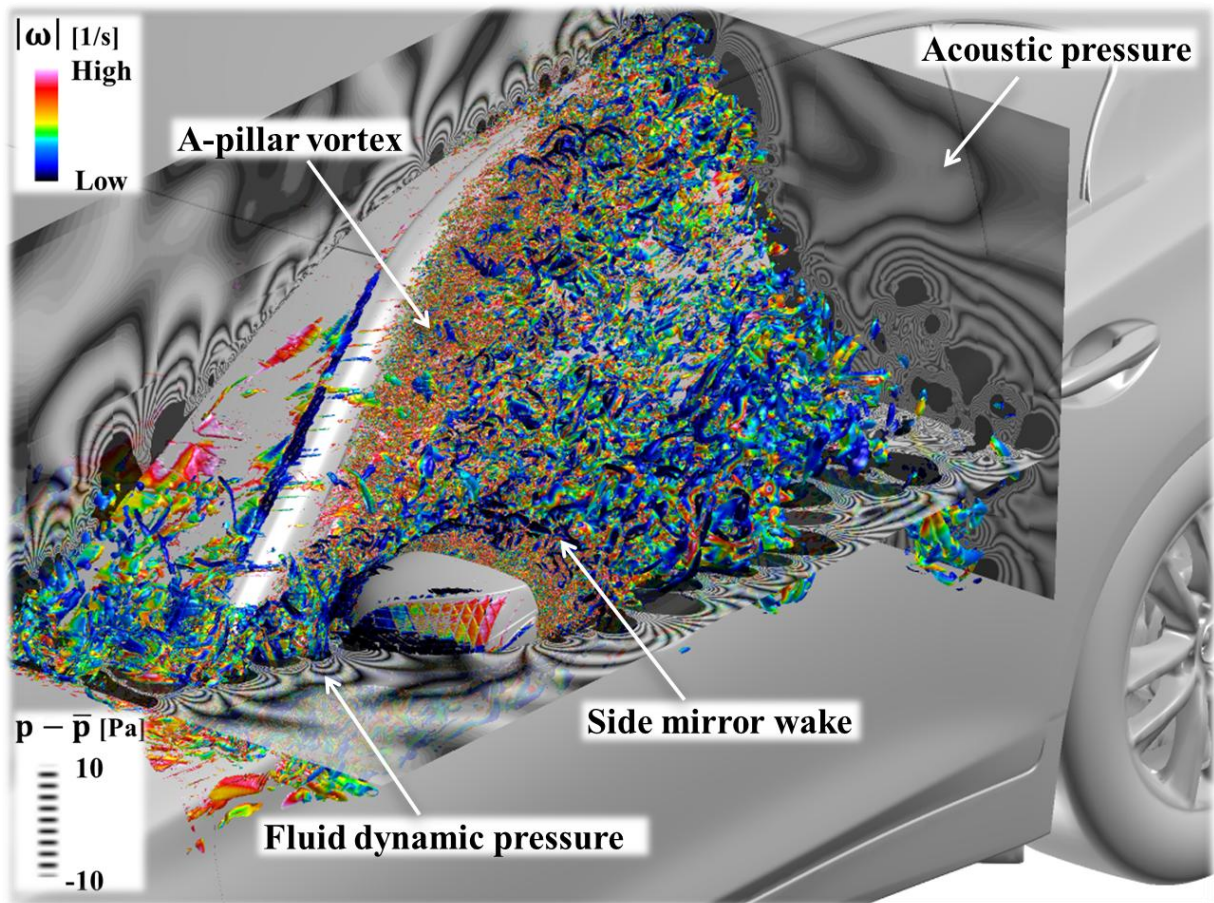


Fig. 2.2.4-7 Instantaneous iso-surface of λ^2 around the A-pillar and side mirror of the vehicle (iso-surface value: $-5.0 \times 10^3 \text{ 1/s}^2$).

バンドパス・フィルター処理をして得られた車体表面の圧力変動分布（表面 dB マップ）を Fig. 2.2.4-8 に示す。A ピラー根元、サイドミラー前方、サイドミラーとサイドウィンドウの隙間にあるステー部段差付近で圧力変動が大きくなっているのが確認できる。また、車内に空力騒音が透過しやすいサイドウィンドウ表面を見ると、A ピラーから発生する縦渦の影響によって圧力変動が大きくなっている箇所が見られる。このように、車体まわりの流れが剥離して渦が発生する箇所は、空間および時間における圧力勾配や速度勾配が大きい領域であることが予想され、空力騒音の主要な音源となる可能性が高い箇所であると推測される。

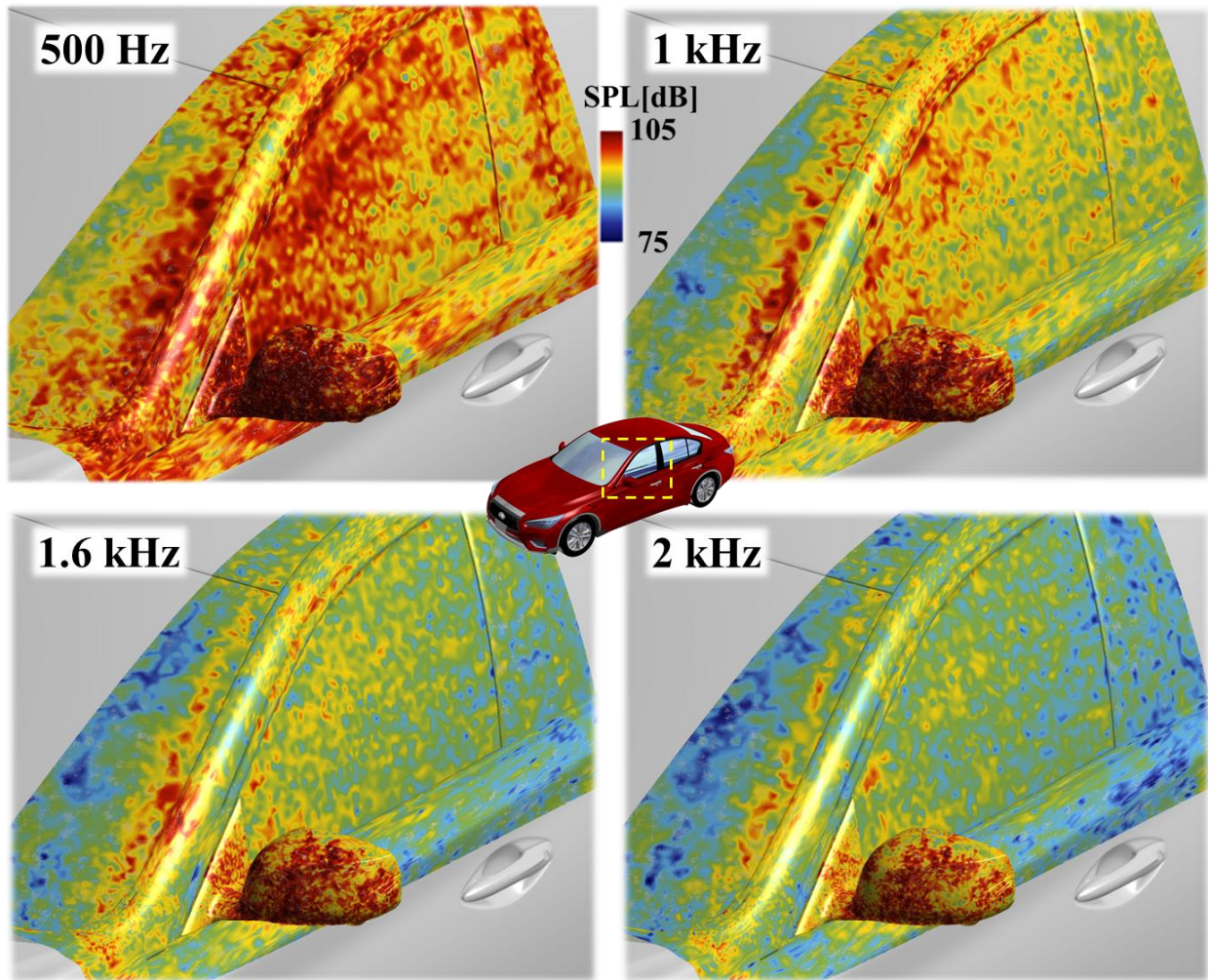


Fig. 2.2.4-8 Surface pressure fluctuations (dB maps) around the A-pillar and side mirror of the vehicles.

2-2 -2) バサバサ音予測に向けた変動風モジュールの開発

CFD シミュレーションで変動風を再現するために、入口境界で変動風成分を与える手法を開発した。自然風が持つ乱流強度と乱流長さスケールを再現するために、オンロード風の条件に特徴的な変動風成分を与える。具体的には、オンロード風の主流/横風方向の風速時刻歴データを 3 次のスプライン補間を使って近似し、入口境界条件として一樣流速（車速）に重ね合わせた (Fig. 2.2.4-9)。オンロード風の風速データを高次多項式で近似する Lagrange 補間では解析的に滑らかな曲線は得られるが、与えられた測定データによっては低次多項式に比べ大きく波打つルンゲ振動が発生する。隣り合うデータ区間を低次の多項式で近似するスプライン補間であれば、乱流強度の大きさに影響を与える細かい速度変動まで連続性を保ちながら滑らかに近似でき (Fig. 2.2.4-10)、オンロード環境で車両が経験する変動風の乱流強度と積分長さスケールの関係を広範囲にカバーできる。

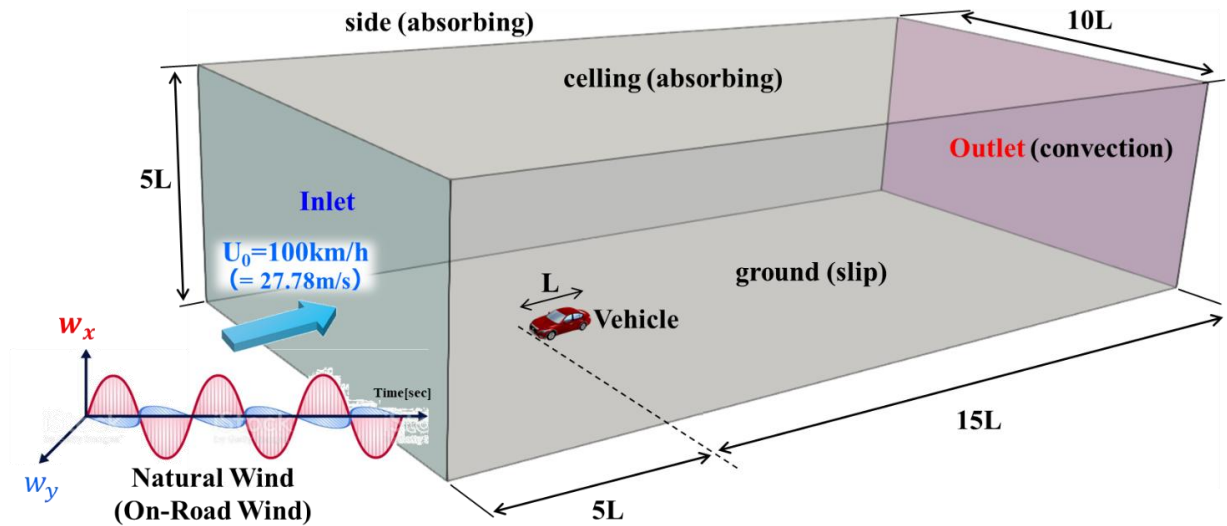


Fig. 2.2.4-9 Calculation domain and boundary conditions.

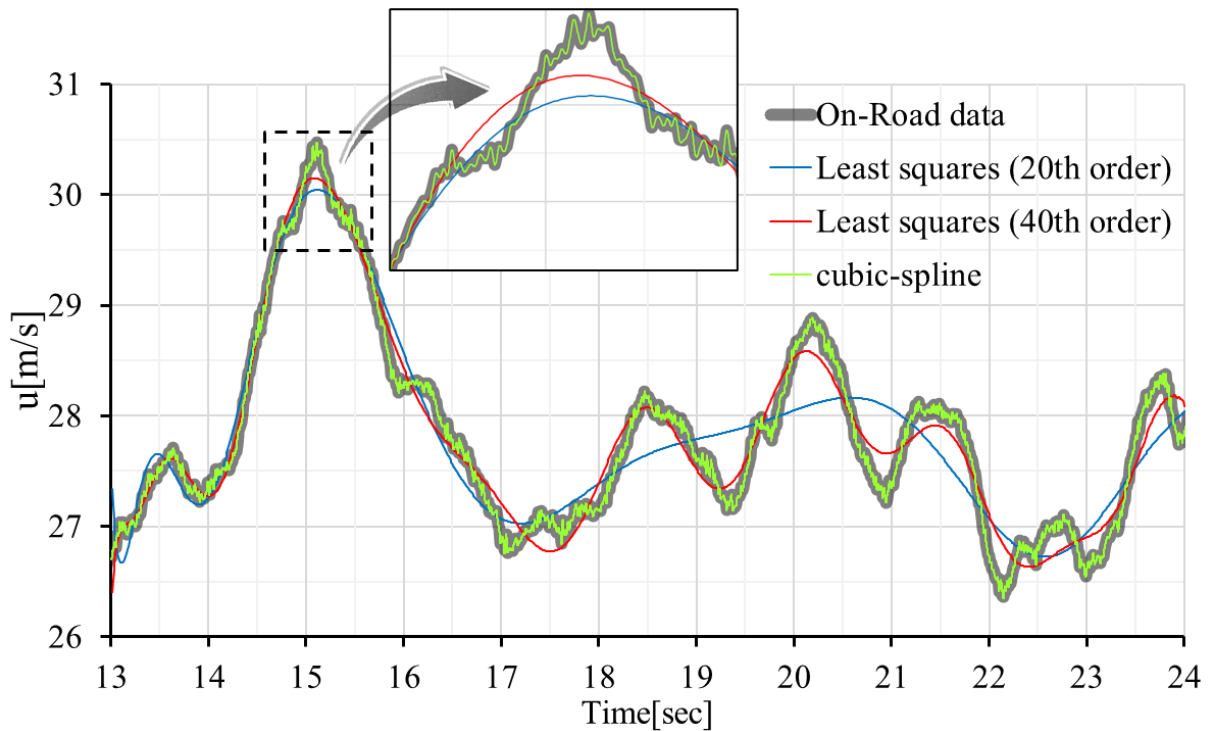


Fig. 2.2.4-10 Comparison of interpolation methods for the mainstream-velocity time history.

実車走行で測定したオンロード風に対して、変動風モジュールで再現した主流方向速度と流れ方向角（ヨー角）の時刻歴を Fig. 2.2.4-11 に示す。主流方向速度は時間平均した速度との差分である。いずれのデータも車両のルーフ上で10秒間計測したものである。これを見ると、風速とヨー角の両方の変動について、良好な一致が見られる。また、Table 2.2.4-1 に示した乱流統計量を見ると、変動風の乱流強度と積分長さスケールについてもオンロード風の乱流特性を概ね再現できている。特に変動風音（バサバサ音）が聞こえるオンロード風は、一般的な自然風と比べ、積分長さスケールが大きいのが特徴である。

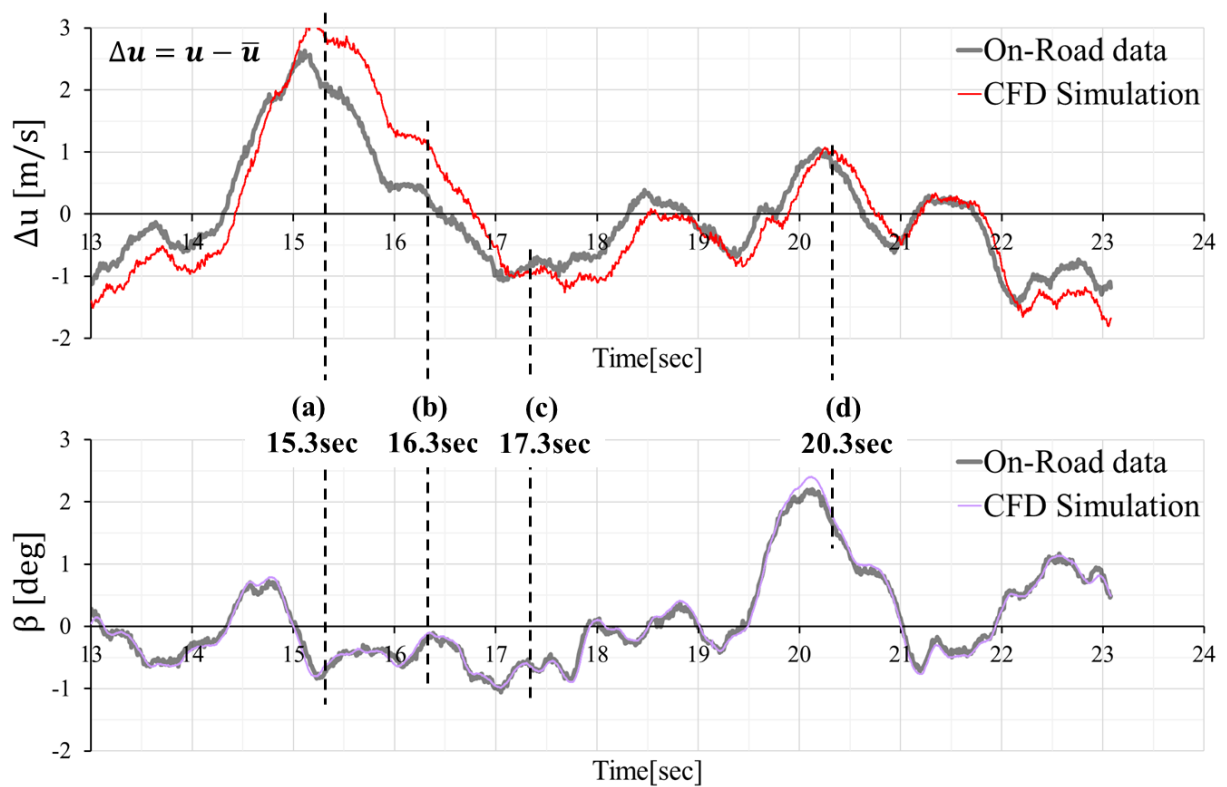


Fig. 2.2.4-11 Mainstream velocity and yaw angle of the on-road wind measured and on-road flow reproduced by CFD simulation.

Table 2.2.4-1 Reproduced on-road turbulence statistics.

	Average of wind speeds				Turbulence intensity				Integral length scale		
	\bar{u} [m/s]	\bar{v} [m/s]	\bar{w} [m/s]	σ_{yaw} [deg.]	TI_{total} [%]	TI_u [%]	TI_v [%]	TI_w [%]	L_u [m]	L_v [m]	L_w [m]
On-Road	29.915	-0.043	2.134	0.742	1.902	2.963	1.306	0.609	15.779	13.929	31.487
CUBE	29.922	-0.032	3.236	0.777	2.274	3.673	1.365	0.402	20.304	14.237	17.909

Fig. 2.2.4-12は、4つの時刻セグメント（a、b、c、d）における瞬時の流れ場を比較したもので、サイドミラー水平断面における主流方向速度分布と空間流線を示している。主流速度の大きさとヨー角の両方が異なる時間セグメントで変化し、Aピラーおよびサイドミラーまわりの剥離流れに影響を及ぼしているのが確認できる。

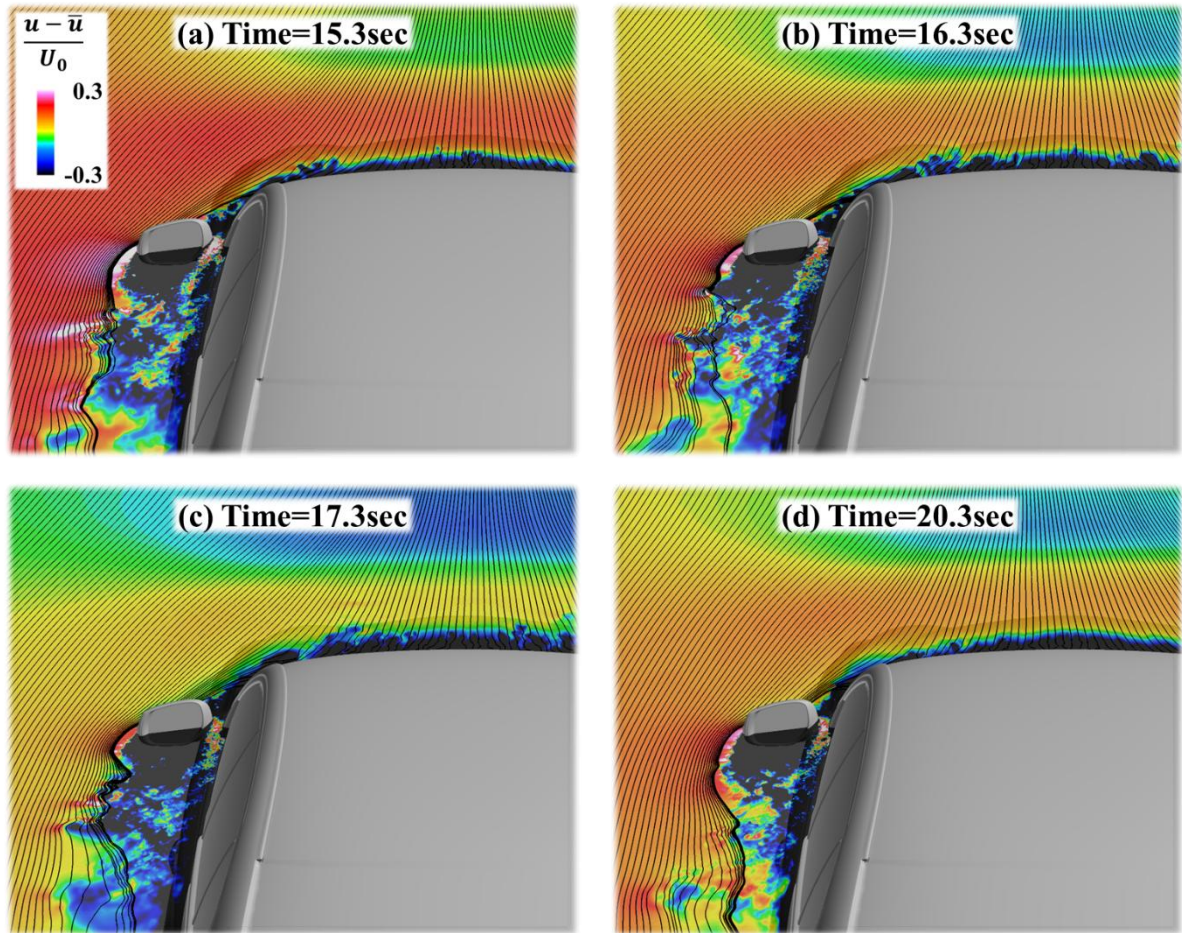


Fig. 2.2.4-12 Mainstream velocity distribution and spatial streamlines in the side mirror horizontal cross-section for different time segments (a,b,c,d).

- [1] F. Rieper, "A low-Mach number fix for Roe's approximate Riemann solver", *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, 13, (2011) 5263-5287.
- [2] H. Asada, Y. Tamaki, R. Takaki, T. Yumitori, S. Tamura, K. Hatanaka, K. Imai, H. Maeyama and S. Kawai, "FFVHC-ACE: fully automated Cartesian-grid-based solver for compressible large-eddy simulation", *AIAA Journal*, Vol. 61, 8, (2023) 3466-3484.
- [3] C.G. Li, M. Tsubokura and R. Bale, "Framework for simulation of natural convection in practical applications", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 75, (2016) 52-58.
- [4] R. Ghias, R. Mittal and H. Dong, "A sharp interface immersed boundary method for compressible viscous flows", *Journal of Computational Physics*, Vol. 225, 1, (2007) 528-553.
- [5] L. Engelmann, J. Hasslberger, S. J. Baik, M. Klein and A. Kempf, "Direct numerical simulation of an unsteady wall-bounded turbulent flow configuration for the assessment of large-eddy simulation models", *Scientific Reports*, Vol. 13, (2023) 11202.

II. FFXに関する成果

1) 計算モデル

解析には格子ボルツマン法 (LBM) に基づく LES 解析ソルバー、FrontFlow/X (FFX) を使用した。速度モデルとして 3 次元 27 速度成分 (D3Q27)、衝突モデルとして SRT (単一緩和時間モデル) および MRT (多緩和時間モデル)、乱流モデルとして Smagorinsky モデルおよび WALE モデルを用いている。また、解析規模は、自動車解析は 16 億格子 (500 ノード) から 996 億格子 (4,000 ノード)、基礎解析 (角柱等) は数億から数 10 億規模で実施した。

2) 並列計算の方法と効果 (性能)

格子点数約 2 億のモデルに対して、ノード数、領域分割数、ノードあたりの領域分割数を変えて解析を実施し、並列計算性能の比較を行った (Table 2.2.4-2)。ノードあたりの要素数を大きくしたケースが最も計算速度が速い。ノードあたりの領域分割数が 4 の場合は高い性能が得られるが、1 ノードあたり 8 領域、16 領域とした場合は実効性能が低下する。このため、1 CMG 当たり 1 領域として、できるだけ 1 領域に多くの要素を与えたほうが計算速度としては速くなることを確認した。この分析結果から strong-scale の並列計算性能は良好であることも確認することができた。ただし、ノード数が少ない場合、ノードあたりの計算速度としては速くなるが計算時間自体は長くなるため、パラメータサーベイを行う場合は、ノード数を多くして計算の実時間を短くする必要がある。特にサロゲートモデル構築用のデータを作成する場合、100 ケース以上の解析が必要となるため、ノード数を適切に配置する必要がある。

Table 2.2.4-2 Assessment of FFX computing speed with various numbers of compute nodes.

Number of nodes [node]	10	30	100	125	250	500
Number of domain partitioning /NODE	4	4	4	16	8	4
Number of regions	40	120	400	2000	2000	2000
Computing speed (GFLOPS)	42	40	36	27	21	33
Number of elements per node [millions].	23.4	7.8	2.34	1.872	0.936	0.468
ELAPSE/STEP [s].	0.545	0.191	0.064	0.067	0.043	0.014

3) 研究成果

LBM 解析では直交格子を用いているため、曲面を持った形状や自動車などの複雑形状物体を解析する場合、物体壁面を再現するための処理が必要となる。LBM 解析で広く使用されているバウンズバック法は安定した手法であるが、複雑形状を精密に再現できない欠点がある。Interpolated Bounce-Back 法 (IBB) は、物体表面の位置と解析格子の位置関係をもとに、平衡分布関数に重み付けを行い、物体形状をより詳細に再現することが可能な手法である。IBB は自動車の形状等を再現するのに適しているが、ワイパーの取り付け部やエンジンルーム内の配線などの部位において計算が不安定になることが確認されている。全体では数千億の格子を用いた LBM の計算において、

これらの物体近傍の数か所の格子点で計算が発散することがあった。FFX の解析では 3 次元 27 方向の粒子速度モデルを使用しているが、複雑物体近傍では粒子方向の多く（たとえば半数程度の 14 粒子方向）が物体とのインターセクト処理をしているため、この部位で密度、運動量の保存族が成り立たなくなることがあり、これが発散の原因となっていた。そこで物体とのインターセクトが指定した数以上になった場合に、その格子を物体と認識させて計算を安定化させる対策を行った。実際にこれらの安定化対策を必要とする格子点数は全格子の 1 % 以下であり、計算結果には大きな影響を与えずに計算の安定化を図ることができた。

Table 2.2.4-3 に球まわりの解析に対して開発した手法を適用した結果の一例を示す。NBCMAX は物体付近において一定数以上のインターセクトが発生した場合に、その格子を物体と認識させる閾値である。NBCMAX が 13 の場合、計算は安定となるが、流体力を過大評価する傾向が見られた。NBCMAX=20、23 のケースでは流体力は NBCMAX を使用しない場合とほぼ一致し、計算が安定化することを確認した。本手法を自動車解析（格子点数約 1,000 億）に適用した結果、安定に解析ができることを確認した。

Table 2.2.4-3 Effect of improved wall treatment on computational stability.

Case	NBCMAX	Number of intersect	Number of modified wall	Cd	Stability
Case A	0	634,964	0	Baseline	×
Case B	13	634,964	1,537 (0.24 %)	Overestimation	○
Case C	20	634,964	639 (0.10 %)	Almost equal to case A	○
Case D	23	634,964	338 (0.05 %)		○

Fig. 2.2.4-13 に FFX を用いて自動車まわりの音場解析（平均密度からの変動成分）を行った結果を示す。車両先端部やサイドミラー周囲から強い音波が発生し、空間中に伝播していることがわかる。解析格子数は最小格子解像度 0.5 mm、格子点数は 996 億である。

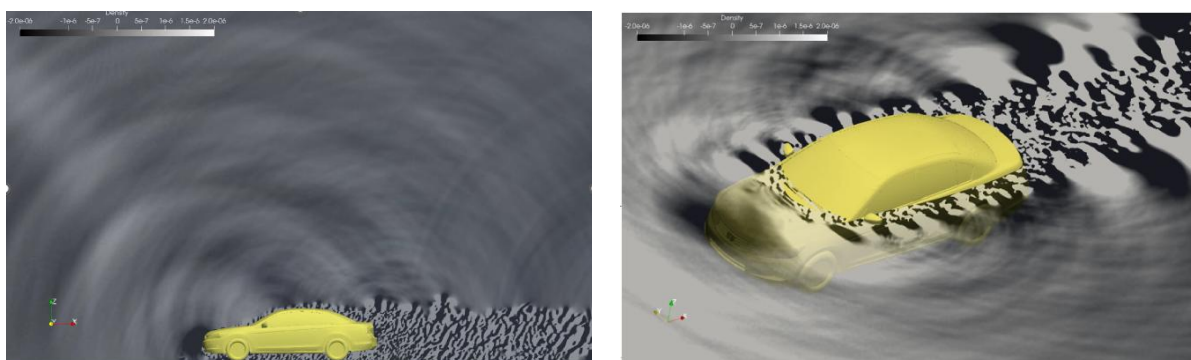
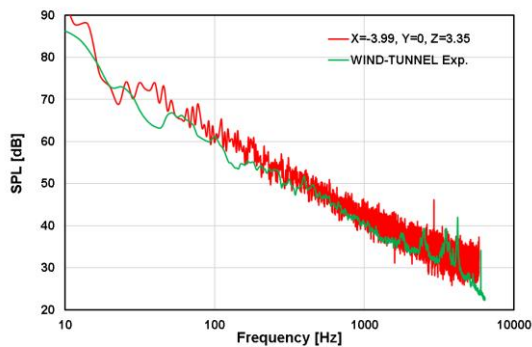
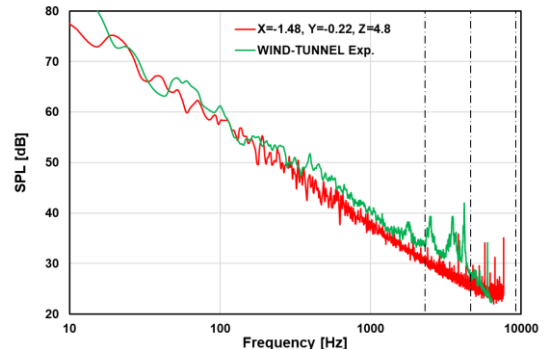


Fig. 2.2.4-13 Visualized aeroacoustic field around a vehicle computed by 99.6 billion grids.

Fig. 2.2.4-14 に車両前縁から 1.48 m 上流、地面板から 4.8 m の位置における音圧スペクトルを風洞実験と比較した結果を示す。(a) は格子解像度 0.5 mm、996 億格子の解析結果であり、LBM による計算結果は周波数 10 kHz 程度まで風洞実験結果と良く一致することがわかる。(b) は格子解像度 2 mm、16 億格子の解析結果である。格子解像度 0.5 mm の結果と比較すると 200 Hz 以上の周波数において実験結果を過小評価する傾向が見られるが、全体的には実験結果と良く一致している。(b) に示した破線は格子解像をもとに解像可能な渦の周波数を推定した結果である。格子解像度 0.5 mm の解析では 8 kHz 程度まで精度良く音圧スペクトルを求めることができる。解像度 1 mm では 4 kHz、解像度 2 mm では 2 kHz 程度まで解析することが可能であることを確認した。ここで渦スケールを $L=U/(2\pi f)$ とし、2 格子で L を解像できると仮定した。一般に Navier-Stokes (NS) 方程式を用いた解析では、渦スケールを再現するのに 5 格子程度を必要としていたが、LBM では対流現象の予測には原理的に誤差が生じないため、少ない格子数で渦を再現できることが確認できた。NS 方程式ベースの分離解法を用いた解析では、格子解像度 0.5 mm の解析で周波数解像度は 2 kHz 程度であったことから、空力音響解析における LBM の優位性を確認することができた。ただし、LBM で、高レイノルズ数の乱流場を解析する場合、計算を安定化させるために、多緩和時間モデル (MRT) やキムラントモデルを使用する。これらのモデルは、密度や運動量等の粘性運動に関連した時間スケールの運動と音のように非粘性の運動に関連した時間スケールを分けることにより計算を安定化させているが、この処理は、粘性係数に対して、体積粘性率を実際の値より大きくすることに相当し、音波の減衰に大きな影響を与えることがわかった。自動車解析に使用している格子サイズをもとに、SRT (単一緩和時間モデル)、MRT、キムラントモデルの体積粘性率を評価すると、SRT は NS 方程式の 3 倍、MRT は 75 倍、キムラントモデルでは 240 倍となる。



(a) Grid resolution: 0.5 mm, 99.6 billion



(b) Grid resolution: 2 mm, 1.6 billion

Fig. 2.2.4-14 Comparison of aerodynamic sound pressure spectra outside the vehicle obtained from wind tunnel experiments and the lattice Boltzmann method.

Fig. 2.2.4-15 に NS 方程式による解析結果を基準とした場合に、LBM による音響解析結果の距離減衰をまとめた結果を示す。5 kHz の周波数では、自動車空力騒音実験の評価点である車両から 5 m 程度離れた位置では、どの衝突モデルを用いても減衰の影響は小さいが、10 kHz 以上の周波数の場合、MRT やキムラントモデルは減衰が大きくなる。MRT やキムラントを使用することにより、高レイノルズ数の流れ場を安定して解析することができ、(解析可能なレイノルズ数におけ

る) SRT 解析結果と流れ場の結果はほぼ一致することが知られているが、音場の解析においては衝突モデルの影響が大きいことがわかる。

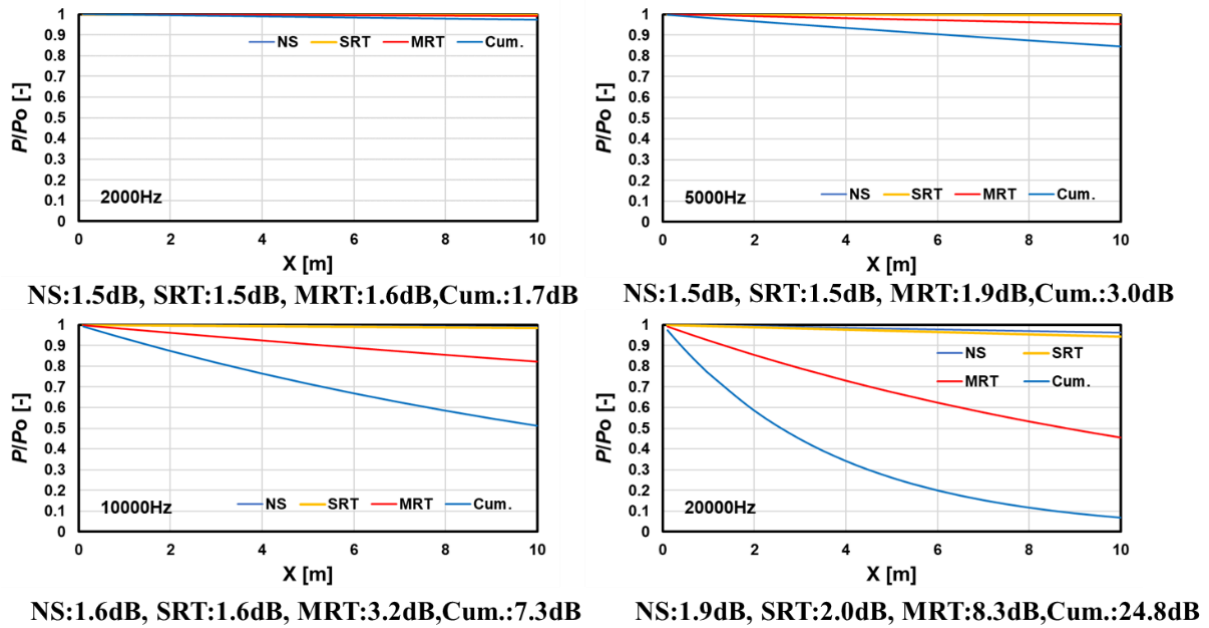


Fig. 2.2.4-15 Effect of collision model of the lattice Boltzmann method on acoustic attenuation (with reference to the results of the NS equation analysis).

Fig. 2.2.4-16 は周波数スペクトル分布に減衰の効果を重ねて表記した結果である。衝突モデルには MRT を使用した。本解析では、10 kHz における体積粘性率の影響が 0.1 dB 程度になるように解析条件を設定したため、体積粘性率の影響はほとんど無視できる程度であるが、格子サイズ、衝突モデルのモデル定数の選び方によっては高周波数におけるスペクトルに影響がでる場合があるため、注意が必要である。

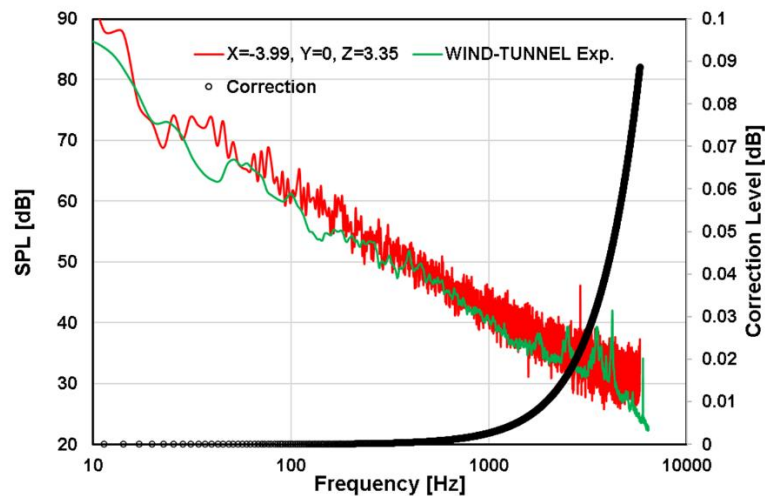


Fig. 2.2.4-16 Influence of bulk viscosity on different frequencies on aeroacoustic analysis using the lattice Boltzmann method.

本解析結果より、格子解像度 0.5 mm、格子点数 996 億の LBM 解析を行うことにより自動車まわりの空力騒音を精度良く解析できることを確認するとともに、解像度を落とした格子点数 16 億の解析でも空力騒音のスペクトルを精度良く求めることができることを確認した。16 億の計算は「富岳」500 ノードを使用した場合、10 万ステップの解析に約 6 時間を要した。996 億格子の解析の場合、「富岳」4,000 ノードを使用し、1 万ステップの解析に約 12 時間を要した。設計に活用する場合、解析時間とノード数から 16 億格子程度の解析で精度良く空力音を求めることが可能であることが重要であり、ベースラインとして 1,000 億程度の解析を実施し、風洞実験との整合性を確認した上で小規模解析によって設計パラメータを振った解析を実施していくことが設計現場での活用方法となると考えられる。

流れに起因する車内騒音を分析するには車体表面の圧力変動を音響成分と流体成分に分離する必要がある。波数・周波数スペクトル解析は圧力場の分離に適した手法であるが、多点計測を必要とするため、実験による検証が不十分であった。別途、Fig. 2.2.4-17 に示すようなマイクアレイを作成し、風洞実験を行い、「富岳」を用いた解析結果との比較を行った。Fig. 2.2.4-18 に実験結果および解析結果を示す。車内音の主たる伝達経路であるサイドシールド表面の波数周波数スペクトルの分布は実験と解析で同様の傾向を示していることを確認した。これらのデータを元に今後、車内音への寄与の大きな成分を抽出する方法について検討を進めていく予定である。

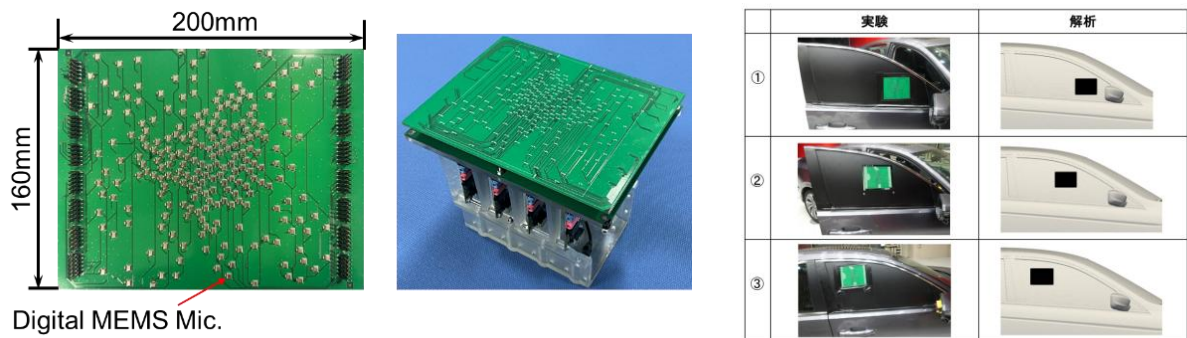


Fig. 2.2.4-17 Microphone array with MEMS microphones for 224-channel wavenumber frequency spectrum analysis and schematics of experimental setup.

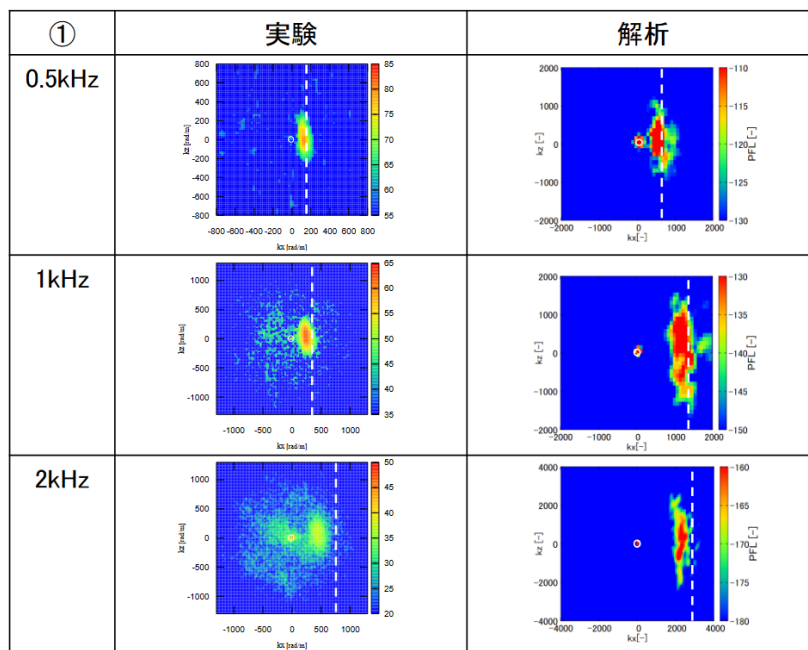


Fig. 2.2.4-18 Wave frequency spectral distribution obtained by experiment and analysis (side seal surface).

(5) 研究テーマ⑤：ヒートポンプ用ファンの性能向上

(a) 研究成果の要旨

本研究テーマでは、「(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」において開発するサロゲートモデルを活用し、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って、従来性能を大幅に凌駕するプロペラファンを設計する。

令和5年度は、ヒートポンプ用ファンの設計パラメータの抜本的な見直しを実施した。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。プロペラファン単体の数値解析を行い、ファン単体の性能を評価し、設計パラメータ（形状）の範囲を大幅に拡大したファンの概念設計を行った。さらに、このファンを既存のヒートポンプ用室外機流路に組み込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、本研究テーマで開発するファンの概念設計の有効性を確認した。

In this research, we will utilize the surrogate model to be developed in Research theme 1 and will explore a wide range of design parameters that have not been considered in the past. By doing so, we will design a propeller fan that will substantially exceed the performance of conventional propeller fans.

In this fiscal year, we conducted a fundamental review of the design parameters of heat-pump fans. In particular, by referencing various axial fans such as automobile radiator fans, we investigated the relationship between the main shape parameters and the resulting single-fan performance, which is important in the upstream design of propeller fans. For this investigation,

we constructed an environment for designing and modeling a propeller fan, on the basis of three-dimensional shape measurements of actual fans. To evaluate its standalone performance, we performed numerical analysis of a single propeller fan, and carried out a conceptual design for a propeller fan that greatly expands the range of the design parameters of conventional propeller fans. Numerical analysis was also carried out by installing the designed fan in the flow path of an existing outdoor unit of a heat pump. The obtained results exceeded the performance of conventional fans, confirming the effectiveness of the conceptual design of the propeller fan developed under this research theme.

(b) 本研究の内容

1) 計算モデル

本研究では、羽根車外径 400 mm 程度のヒートポンプ用プロペラファンを対象に、ファン性能と流れ場の予測を目的として、RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation) と LES (Large Eddy Simulation) による流体解析を実施した。ファン単体の性能評価によって、設計パラメータ (形状) の範囲を大幅に拡大したファンの概念設計を行い、現行ファンと比較し、その性能を評価した。さらに、この概念設計で得られたファンを室外機流路に組み込んだ条件における流体解析を実施し、実装状態における性能の評価と流れ場の予測を行った。

流体解析のソルバーとして、有限要素法による非圧縮性流れの LES 解析ソルバーである FrontFlow/blue (FFB) [1]を使用した。乱流モデルとして Dynamic Smagorinsky モデルを用いた。また、回転領域である羽根車領域とその他の静止領域の接合にはオーバーセット法を用いて解析した。FFBは「富岳」の計算ノード (CPU) 上で高速な計算が実施できるように最適化されている。また、FFBによる LES 解析に加えて、比較のために商用アプリケーション・ソルバ scFLOW を用いた RANS 解析と LES 解析も実施した。scFLOW は連続の式と非圧縮性流れの NS (Navier-Stokes) 方程式を基礎方程式として、有限体積法によって離散化する汎用熱流体解析ソルバーであり、計算格子にはポリヘラルドメッシュを用いた。scFLOW による RANS 解析には Realizable $k-\epsilon$ モデルを使用し、同 LES 解析には WALE モデル (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity model) を使用した。いずれの解析においても、羽根車領域のみを回転座標系で解析し、その他の領域は静止座標系で解析し、回転領域と静止領域は不連続接合した。

解析領域を Fig. 2.2.5-1 に示す。ファンに流入する流れの静圧降下とファンから流出する流れの静圧回復を評価するために、羽根車外径の 10 倍の直径を有する解析領域を設定した。また、羽根車外径と同じ内径の円形ダクト内にファンを実装した条件の解析も実施した (Fig. 2.2.5-2)。この解析モデルでは、羽根車に半径方向からの流入する流れや羽根車から流出した流れが半径方向に拡大することが無いため、ファンに流入する流れの静圧降下や羽根車を流出した流れの静圧回復は評価できないが、Fig. 2.2.5-1 の計算モデルと比較して、羽根車自体の性能を短時間に評価できるため、様々な形状パラメータの検討に適している。FFB による LES 解析に用いた、動翼表面の解析格子を Fig. 2.2.5-3 に示す。格子は 4 面体である。FFB による解析では、流入部と流出部にそれぞれ流速規定条件とトラクションフリー条件を設定し、壁面には No slip 条件を設定した。scFLOW によ

る解析では流入部と流出部にそれぞれ体積流量規定条件と圧力規定条件を設定し、壁面には No slip 条件を設定した。

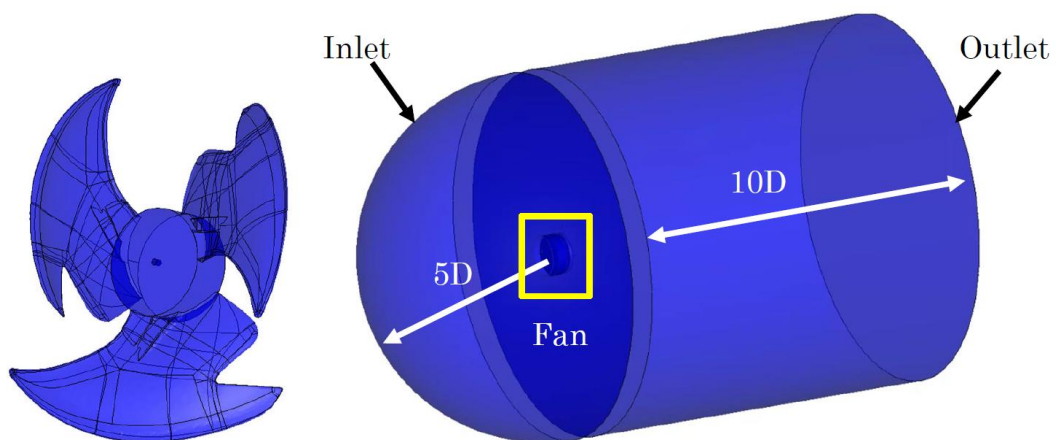


Fig. 2.2.5-1 Conventional propeller fan (left) and computational domain and boundary conditions for performance prediction of a single conventional propeller fan (right).

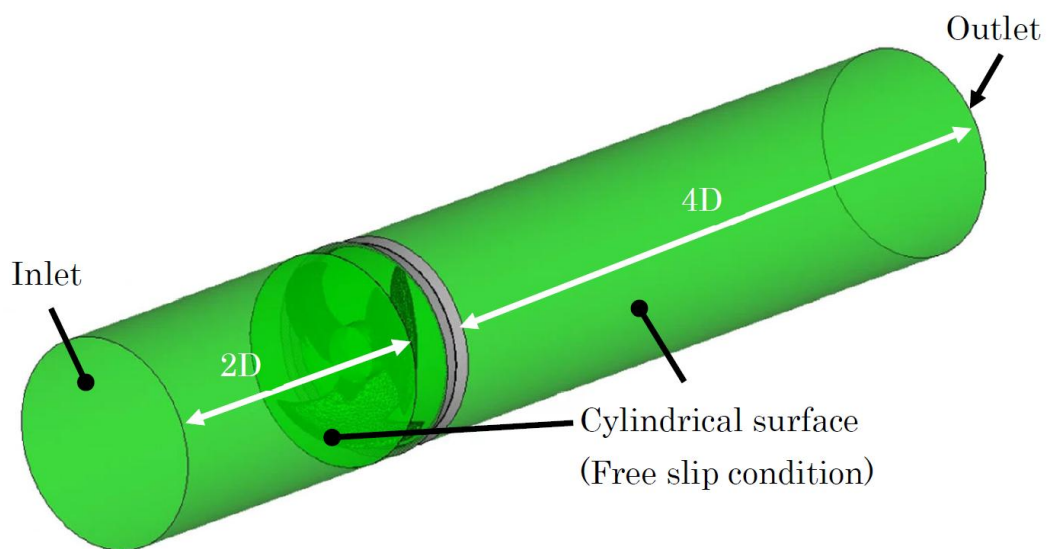


Fig. 2.2.5-2 Computational domain and boundary conditions for performance prediction of a single conventional propeller fan installed in circular duct.

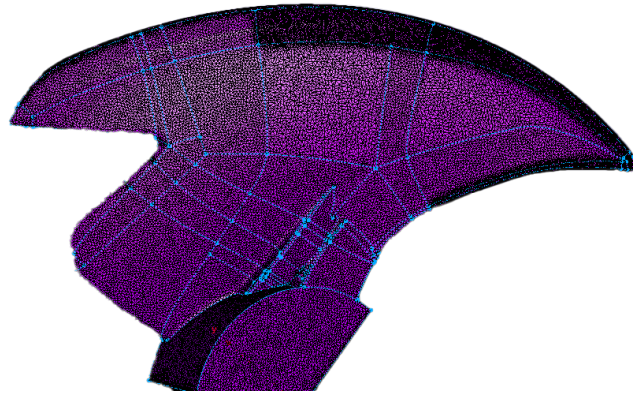


Fig. 2.2.5-3 Computational grid on blade surface of conventional propeller fan for LES using FrontFlow/blue.

羽根車外径約 400 mm のヒートポンプ用プロペラファンをベースライン形状（現行ファン）とし、流量係数 0.05～0.40 の範囲においてファン単体の性能を評価した。設計流量係数は 0.25 である。また、設計パラメータを拡大して概念設計した、同一羽根車外径のファン（改良ファン）の性能を評価し、現行ファンと比較した。さらに、これらのファンを既存の室外機流路（筐体）に組み込んだ条件における解析も実施し、実装状態における性能を比較した。この場合の解析領域を Fig. 2.2.5-4 に示す。筐体組み込み時の解析では、熱交換器部分を多孔質材として扱い、ファンガード部は部材の抗力を見積り、それらの圧力損失を与えて解析を実施した。

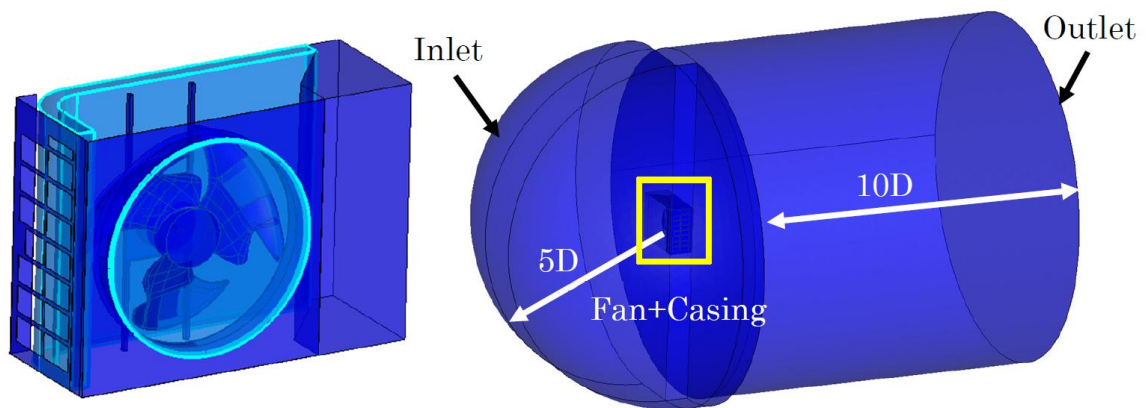


Fig. 2.2.5-4 Conventional propeller fan installed in an outdoor unit of air-conditioning system (left) and computatoinal domain for whole outdoor unit (right).

2) 並列計算の方法と効果（性能）

FFB による LES 解析は、領域分割を用いることによる MPI 並列計算、OpenMP とコンパイラの自動並列機能を併用したスレッド並列計算の両方を用いたハイブリッド並列計算により実施した。前述のとおり、FFB は「富岳」向けに限界までチューニングされており [2]、Weak Scale ベンチマークテストにおける並列化効率は 85 % 程度である。また、scFLOW による RANS と LES の解析は領域ごとにコアを割り付けるフラット MPI 並列計算を実施したが、市販のアプリケーション・ソルバであるため、実効性能や並列化効率は公表されていない。

3) 研究成果

(1) ヒートポンプの現状と課題

従来の空気熱源ヒートポンプや空調機は伝熱面積を増大させることによる高性能化に依存しており、高コスト化と設置上の制約が課題となっていた。伝熱面積を変えずにファンの高速回転化による風量増加で性能向上を行う方法もあるが、この場合はファン動力と騒音がともに大きくなる問題がある。室外機に用いられる空調用プロペラファンは半開放型換気扇をベースとして長年にわたる改良の積み重ねにより性能向上が図られているものの、ピーク静圧効率は 40 %～50 %程度であり、一般的な軸流送風機のピーク静圧効率 70 %～80 %程度と比べて非常に低い。また、羽根（動翼）枚数が少なく外周部の翼弦が長い為、筐体内での実装自由度も小さい。さらに、現行のファン形状は局所最適解に陥っている可能性がある。すなわち、従来設計では広範な設計パラメータを探索できておらず、従来検討されてきた設計パラメータの範囲外により良い解が存在する可能性がある。岩瀬ら [3] は、200 mm 角ボックスファンを対象に、リーン角 4 種類、翼弦長 5 種類、翼のキャンバ 20 種類を設計変数とし、静圧上昇と騒音を目的関数とした動翼形状の最適化を実施した。目的関数は FFB を用いた LES 解析によって評価し、20 世代、合計 411 個体の進化計算を実施し、動翼形状を最適化した。その結果、最大約 11 % の静圧上昇が得られる動翼形状と、最大約 2 dB の騒音が低減できる動翼形状（個体）を見出すことができた。しかしながら、多くの個体の静圧上昇は 4 % から 8 %、騒音低減量は 0 dB から 1 dB の範囲に留まり、大幅な、性能向上や騒音低減は難しいことがわかった。金子 [4] も、同じボックスファンを対象に、同じ目的関数と同じ設計変数で進化計算による設計最適化を実施した。ファンの性能は RANS 解析によって評価し、騒音（放射音のパワー）は RANS 計算の壁面摩擦応力から予測した。その結果、最大 3 % 程度の静圧上昇が得られる個体と約 1.3 dB 騒音が低減できる個体を見出した。さらに、RANS による計算結果を学習することによって、性能と騒音を予測するサロゲートモデルを構築し、サロゲートモデルによる評価によって動翼形状の最適化を実施した。その結果、最大 4 % 程度の静圧上昇が得られる個体と約 2.3 dB 騒音が低減できる個体を見出した。ただし、サロゲートモデルを用いて最適化された動翼形状は RANS 解析を用いて最適化された動翼形状とは大きく異なり、サロゲートモデルを構築するための学習データの設定の仕方に課題が残った。これらの結果から、従来設計パラメータの最適化だけでは大幅な性能向上は難しいことがわかる。そこで、本研究では従来のプロペラファンのみならず他の用途でも用いられる軸流ファンの形状と性能をもとに設計パラメータの探索範囲を大幅に拡大し、同一回転数でのファンの風量の増加によるファンの性能向上を目指す。これにより、従来と同等の風量を維持しながら、ファンの回転数の低減、および低騒音化が期待できる。

(2) 主要な形状パラメータと性能との関係の調査

ヒートポンプ用プロペラファンは、1980 年代の有圧換気扇の羽根形状 [5] を踏襲し、デルタ翼の縦渦による離防効果を狙って、ハブとチップの中間で前進翼となるようにした羽根の平面形状によって設計されている。現行のプロペラファンの羽根枚数は 2 枚から 4 枚程度であり、少羽根枚数化により、動翼通過周波数を下げることによって、聴感補正した騒音の低減と翼端渦と隣接翼

との距離を離すことによる低騒音化を実現している [6]。しかしながら、翼端渦や翼端流れの損失によって効率が低下し、また、軸方向高さが増大するため実装自由度が低いという課題がある。

一方、自動車用リングファンや建設機械用ファンでは、外周リングを用いて翼端からの流れを制御して効率を改善しつつ、ファン全体の薄型化が実現されている。佐々木ら [7] は、羽根枚数 14 枚、羽根車外径 613 mm、羽根車回転数 1,200 rpm の軸流ファンの外周にリングを設置することによって、設計流量付近で静圧効率が約 0.3 から約 0.4 に向上し、静圧係数も約 0.2 から約 0.27 に向上し、リングファンは幅広い流量域でリングなしのファンの性能を上回ることを報告している。騒音についても、リングファンにより設計流量で 3 dB 程度の低騒音化を達成したと報告している。したがって、羽根車を多翼化し、かつ、動翼外周にリングを設置することによって、従来のヒートポンプ用プロペラファンの翼端流れを制御し、これに伴う損失を低減するとともに、薄型化を実現できる可能性がある。また、薄型化によって捻出した空間にディフューザを配置することにより羽根車出口流れの静圧回収を行い、さらなる性能向上を達成することが可能であると考えられる。このようなディフューザについては、類似の技術としてガスタービンにおける排気ディフューザの要素技術 [8] がある。本研究では、多翼薄型リングファンを開発する第一ステップとして、既存のファンの形状の変更や流体解析のための形状データの作成のために、リングファンとヒートポンプ用室外機の 3 次元形状計測と流体解析用モデリングデータの作成を行った (Fig. 2.2.5-5、Fig. 2.2.5-6)。

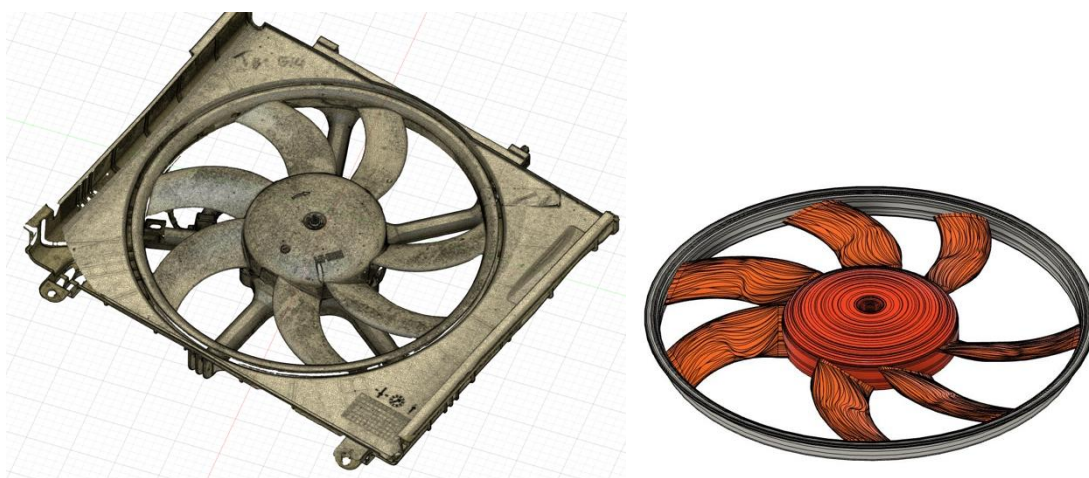


Fig. 2.2.5-5 Measured geometry of a ring fan (left) and surface modeling for flow analysis (right).

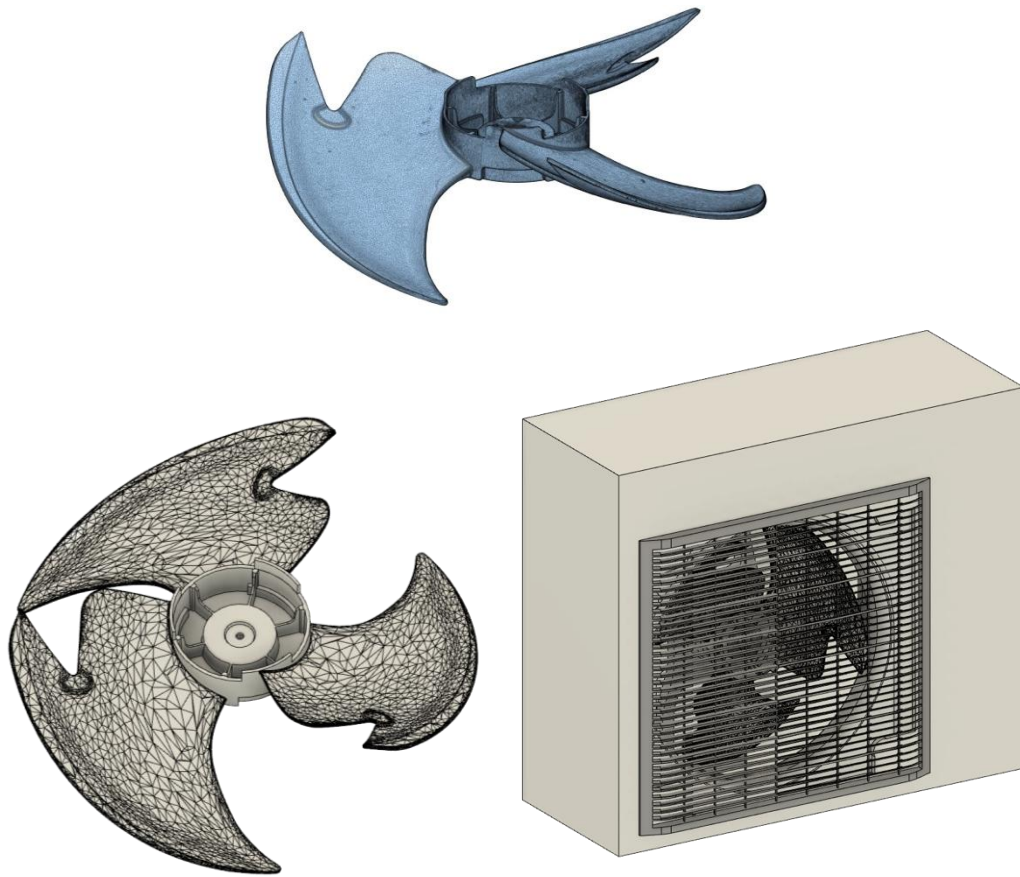


Fig. 2.2.5-6 Measured geometry of a conventional propeller fan (upper), surface modeling for flow analysis (lower left) and propeller fan installed in outdoor unit of an air-conditioning system (lower right).

従来の室外機では、ファンの軸方向高さが高いため筐体における設計自由度が小さく、ファンガードが全体の圧力損失の20%~30%程度を占める (Fig. 2.2.5-7)。ファンの薄型化により筐体内に捻出した空間とファンガード部をあわせてディフューザ流路として設計すれば、上記圧力損失を低減して静圧上昇の増大が見込まれる。また、筐体内に捻出した空間にファンを斜めに配置することによって、羽根車外径を大きくすることも可能であり、これによる性能向上も見込まれる。

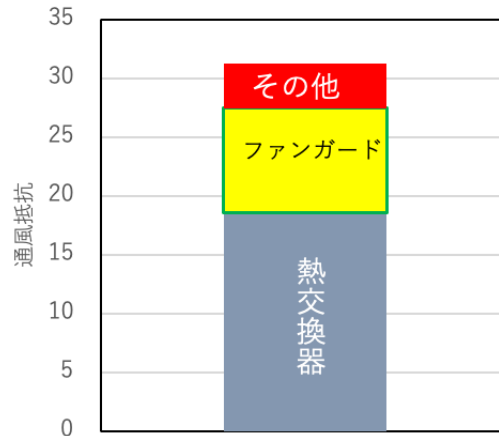


Fig. 2.2.5-7 Airflow resistance of conventional outdoor unit for heat pump.

以上のような検討のもとに実施した概念設計による、ヒートポンプ用改良ファンの設計パラメータの一例と、現行のプロペラファンの設計パラメータの比較を Table 2.2.5-1 に示す。改良ファンの羽根車外径は、現行ファンと同一とし、羽根枚数を多翼化して大幅に増加させた。翼端部には、漏れ流れの制御のためにリングを設置し、通常のベルマウスとあわせて二重の構造となっている。ファンを薄型化して、羽根車の下流に拡大流路によるディフューザを設置した。この薄型化により、羽根高さそのものは現行ファンに比べて大幅に低くすることができ、ディフューザを含めても、現行ファンの羽根高さ以下である。

Table 2.2.5-1 Principal design parameters.

パラメータ	現行ファン	改良ファン
羽根車外径 D	約 400 mm	約 400 mm
羽根枚数 Z	3 枚	16 枚
翼端部形状	リングなし	リングあり
ディフューザ	なし	あり
羽根高さ	羽根車直径の約 38 %	羽根車直径の約 10 % (※ディフューザを含むと羽根車直径の約 34 %)

(3) ファンの空力性能予測結果

まず、現行ファン単体の性能と流れ場を予測して分析した。一方、改良ファンは、最終的には研究テーマ②において開発が進められているサロゲートモデルを利用して、形状最適化を実施する予定である。しかし、現状ではサロゲートモデルは利用できないため、翼素運動量理論に基づき、動翼の翼形状、そりや弦節比、食違い角、スタッキングなどを基本パラメータとして、基本設計を行った。ただし、翼素運動量理論は羽根車内部に半径方向の流れが生じないことを仮定しているが、動翼の負荷が高い場合は、実際の羽根車内には半径方向の流れが生じる。また、比較的レイノルズ数が高い翼列データは公表されているが、本研究で対象としているファンでは、相対流れ速度と翼

弦長を基準にしたレイノルズ数は 8.0×10^4 程度であり、動翼負圧面の境界層は遷移境界層であると推定され、公表されている翼列データと翼素運動量理論を用いた設計には限界がある。そこで、ボックスファンのような低圧の軸流ファンの空力性能や騒音の予測に対して多くの実績を有する FFB を用いて高格子解像度の LES 解析を行い、設計したファンの空力性能を評価するとともに、ファンの内部流れの分析を進めながら、動翼形状の基本設計を実施した。多くの主要パラメータに対して FFB を用いた LES 解析を実施したが、解析結果の一例を Fig. 2.2.5-8 に示す。なお、翼素運動量理論による予測結果と LES 解析による予測結果の差異と主要な形状パラメータとの関係を学習することによって、研究テーマ①で開発しているサロゲートモデルをさらに高度化できるものと期待される。

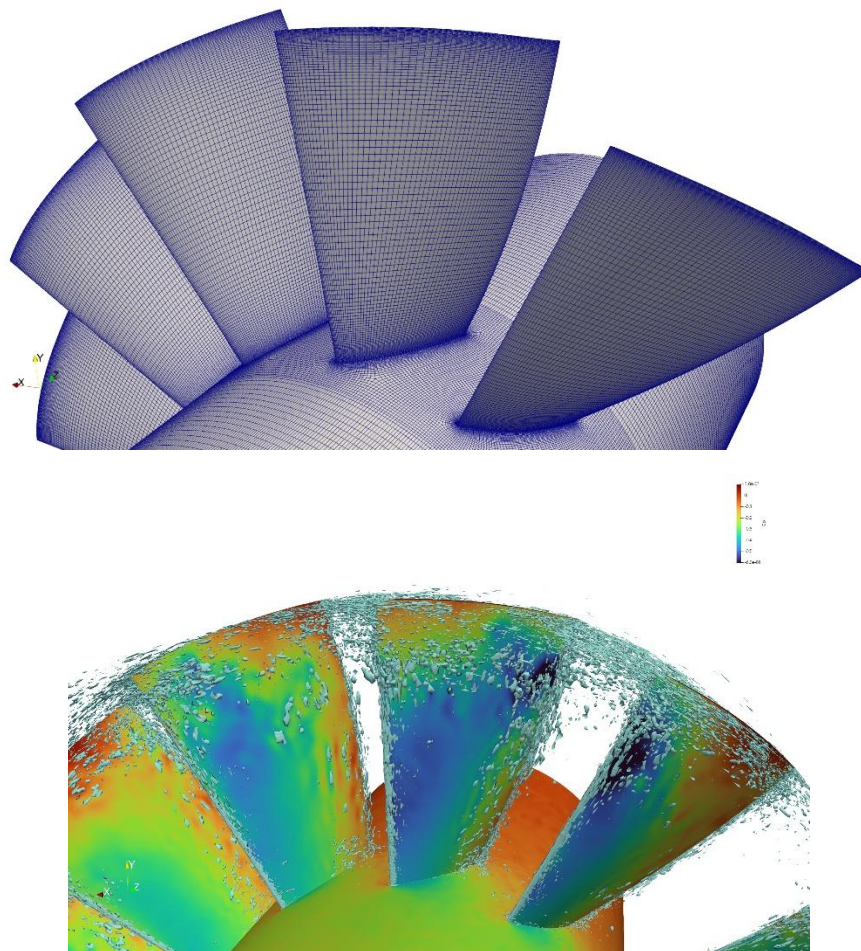


Fig. 2.2.5-8 Surface grid for non-refined LES (upper) and instantaneous distribution of static-pressure coefficients computed on suction surface of blades and vortical structures visualized by iso-surfaces of second invariant of velocity-gradient tensor (lower), computed by high-resolution LES with FFB for single axial fan designed in this study.

以上により得られた改良ファンと現行ファンのファン単体の性能と流れ場を比較した。現行ファンの流量係数 0.25 の静圧係数を基準とした性能曲線を Fig. 2.2.5-9 に示す。流量係数 0.25 では、現行ファンと比較して改良ファンの静圧係数は約 0.1 向上しており、その他の流量域でも改良ファンの静圧係数が現行ファンのそれを上回る予測結果が得られた。なお、流量係数 ϕ と静圧係数 ψ の定義を以下に示す。

$$\phi = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot u_2}, \quad \psi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho u_2^2}{2}}$$

ただし、 Q [m³/s]は体積流量、 D [m]は羽根車直径、 u_2 [m/s]は羽根出口周速度、 ρ [kg/m³]は空気密度、 Δp [Pa]はファンの静圧上昇である。

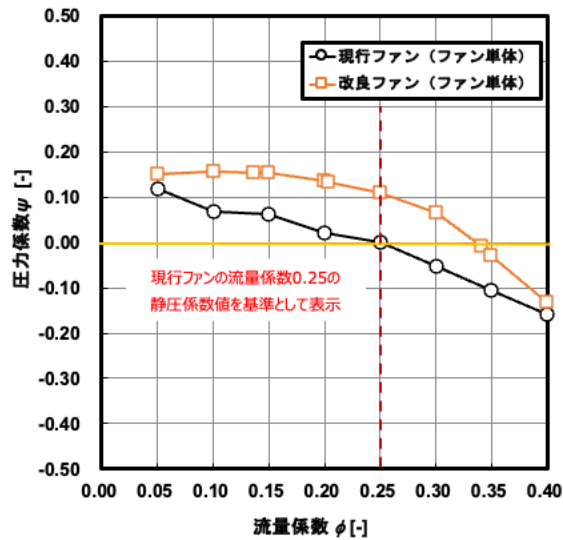


Fig. 2.2.5-9 Predicted performance curve of single conventional propeller fan and single axial fan designed in this study.

次に、解析領域の中心断面における圧力分布と渦構造の比較を Fig. 2.2.5-10 に示す。現行ファンでは翼端漏れ渦が明確にみられるが、改良ファンではそれがみられずに微小な渦構造になっているのがわかる。改良ファンでは、翼端漏れ渦を抑制し、それによって損失を低減できているものと考えられる。

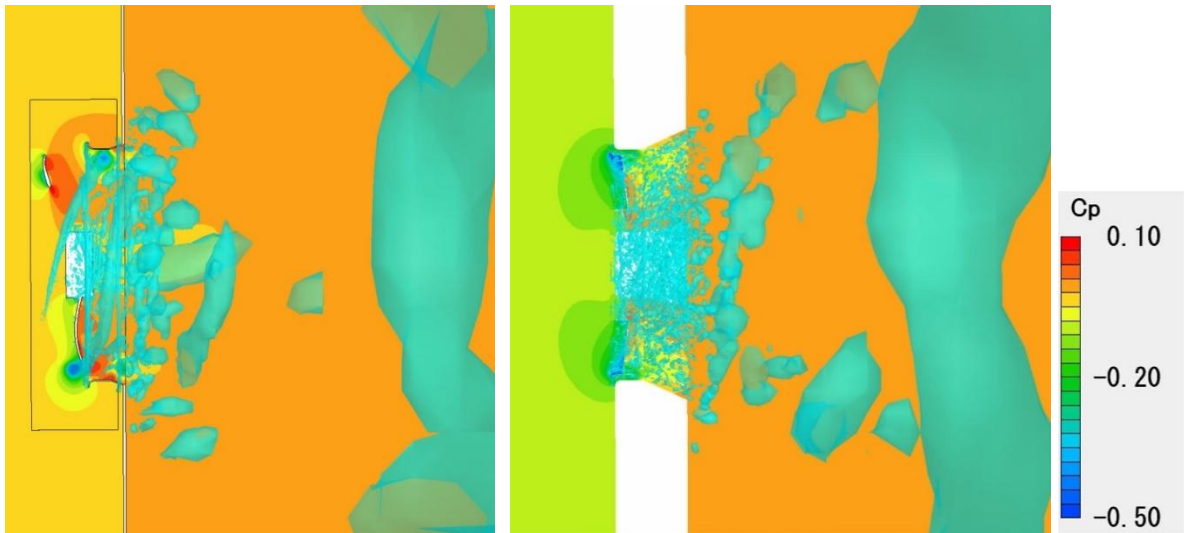


Fig. 2.2.5-10 Pressure distributions on center plane and vortex structure visualized by iso-surfaces of second invariant of velocity-gradient tensor of internal flow of single conventional propeller fan (left) and single axial fan designed in this study (right).

Fig. 2.2.5-11 に、90 %半径位置の円筒面における羽根まわりの速度ベクトルおよび圧力分布を示す。現行ファンでは負圧面側に翼端もれ渦による影響がみられるが、改良ファンではそれはみられずに流れは羽根に沿っており、翼弦中央部に十分な翼負荷がかかっているのがわかる。

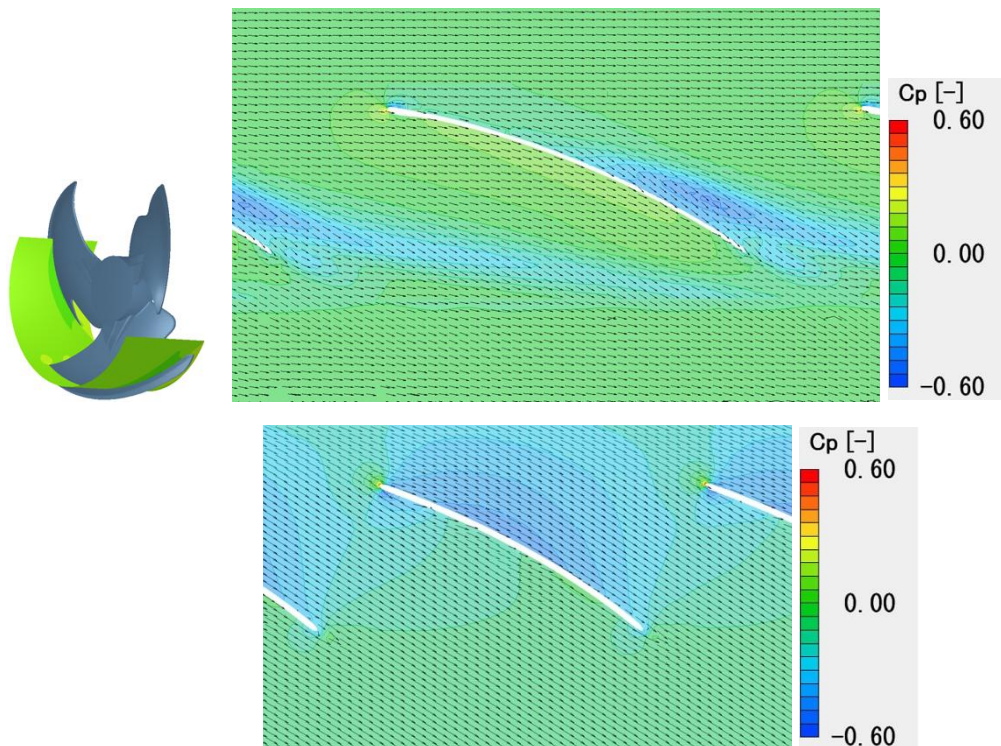


Fig. 2.2.5-11 Pressure and velocity-vector distributions around blade on 90 % radial position of single conventional propeller fan (upper) and single axial fan designed in this study (lower).

Fig. 2.2.5-12に、羽根まわりの渦構造の比較を示す。現行ファンでは、翼端で生じた漏れ渦が強く残り隣接翼近傍に到達しているが、改良ファンでは、この漏れ渦の発生が抑制されているのがわかる。

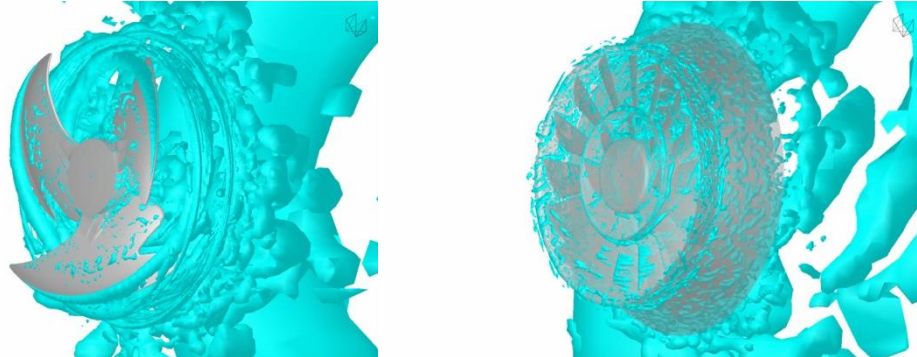


Fig. 2.2.5-12 Vortex structure in internal flow of single conventional propeller fan (left) and single axial fan designed in this study (right), visualized by iso-surfaces of second invariant of velocity-gradient tensor.

続いて、現行ファンと同一の筐体にファンを組み込んだ状態の解析を行った。改良ファンについては、羽根車の軸を主流方向に対して傾斜させることで、10%程度羽根車直径を大型化したファンを、同一の室外機流路内の空間に設置することができるため、その解析も行った。これらの性能曲線の比較を Fig. 2.2.5-13 に示す。その結果、改良ファンは現行ファンに対して幅広い流量域で静圧係数が約 0.1 向上する予測結果を得た。改良ファンの軸方向傾斜設置による大型化による解析では、さらに圧力係数が向上する予測結果が得られた。

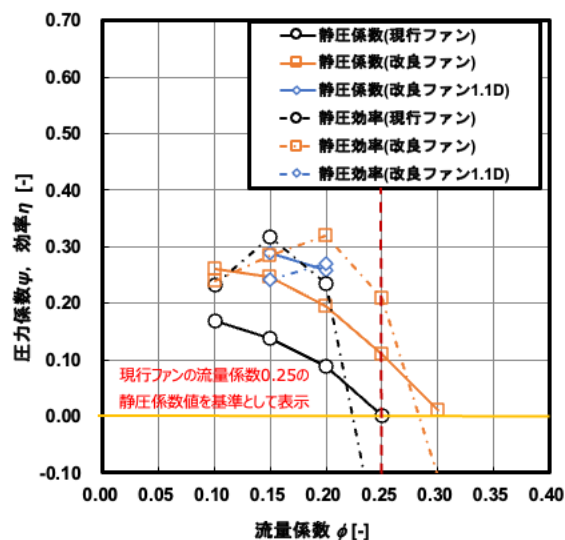


Fig. 2.2.5-13 Predicted performance curve of single axial fan designed in this study installed in outdoor unit of an air-conditioning system.

次に、解析領域の中心断面における圧力分布と渦構造の比較を Fig. 2.2.5-14 に示す。図より、筐体周囲の上流部と筐体の下流部の圧力差が現行ファンに比べて改良ファンの方が高く、羽根車直径を大型化したファンの方がさらに高いことが示唆されている。また、羽根車内部で生じた渦構造の、筐体内での挙動を明らかにできた。

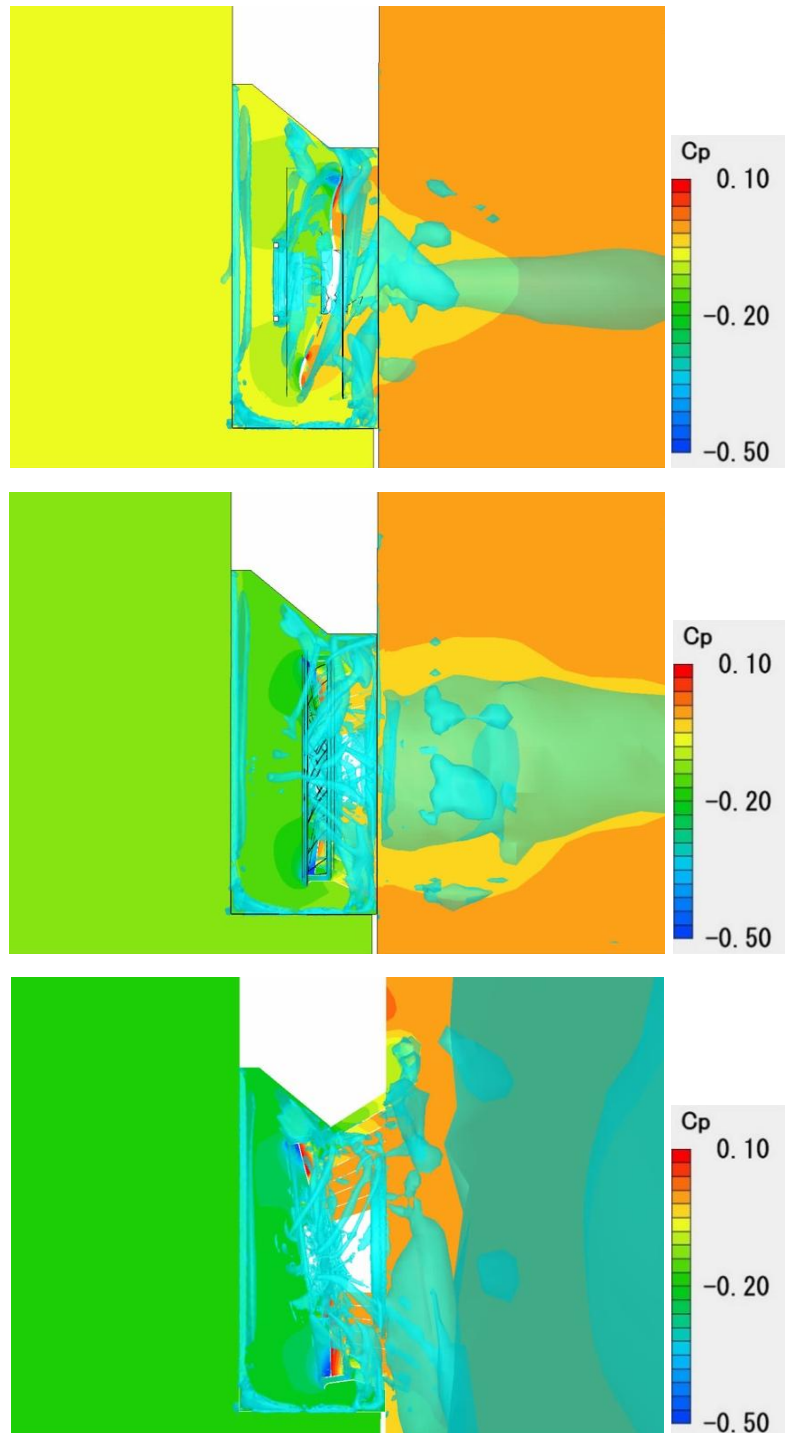


Fig. 2.2.5-14 Pressure distributions on center plane and vortex structure visualized by iso-surfaces of second invariant of velocity-gradient tensor of internal flow of single conventional propeller fan (top) and single axial fan designed in this study (middle) and single axial fan designed in this study with enlarged impeller diameter (bottom).

4) まとめ

本研究では、自動車ラジエータ用ファンなどの軸流ファンを参考に、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、ヒートポンプ用プロペラファンの設計パラメータの抜本的な見直しを実施した。また、ファン性能と流れ場の予測を目的として、RANS と LES による流体解析を実施した。ファン単体での性能評価により、設計パラメータ（形状）の範囲を大幅に拡大したファンの概念設計を行い、現行ファンと比較してその性能を評価した。さらに、この概念設計で得られたファンを室外機流路に組み込んだ数値解析を実施し、性能評価と流れ場予測を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- (1) 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。
- (2) ヒートポンプ用プロペラファンの設計パラメータ範囲を大幅に拡大し、薄型化とディフューザを備えた改良ファンの概念設計ができた。
- (3) 改良ファンは、各部の形状の最適化は未実施であるものの、現時点の予測ではファン単体と筐体に組み込んだ状態でのいずれの性能評価においても、現行ファンの性能を上回る結果が得られており、概念設計の有効性を確認することができた。

[1] C. Kato, M. Kaiho, A. Manabe, An Overset Finite-Element Large-Eddy Simulation Method with Applications to Turbomachinery and Aeroacoustics, Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, Vol. 70, pp. 32–43 (2003).

[2] C. Kato, Y. Yamade, K. Nagano, K. Kumahata, K. Minami and T. Nishikawa, “Toward Realization of Numerical Towing-Tank Tests by Wall-Resolved Large Eddy Simulation based on 32 Billion Grid Finite-Element Computation”, Proceeding SC20 (2020).

[3] 岩瀬拓他、スーパーコンピュータを利用したボックスファン設計最適化ワークフローシステムに関する研究、ターボ機械、Vol 50、No. 12、pp. 728-741 (2022)。

[4] 金子公寿、スーパーコンピュータを利用したボックスファン設計最適化ワークフローシステムに関する研究、第1回HPC産業応用拡大プロジェクトシンポジウム予稿集、pp. 109-120 (2024)。

[5] 藤田 肇、小形ファンの騒音と特性、ターボ機械、Vol. 11、No. 8、pp. 482-487 (1983)。

[6] 岩瀬 拓、半開放形軸流ファンの高効率・低騒音化に関する研究、九州大学博士論文 (2011)。

[7] 佐々木壮一他、リングファンの空力特性と騒音に関する研究、長崎大学大学院工学研究科報告、Vol. 39、No. 73 (2011)。

[8] 石坂浩一他、1700℃級超高温ガスタービンの要素技術の開発、三菱重工技報、Vol. 54、No. 3 (2017)。

(6) 研究テーマ⑥：次世代計算基盤の構築

(a) 研究成果の要旨

本研究テーマでは、「(3) 研究テーマ③：実船の推進性能の予測」、「(4) 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」、および「(5) 研究テーマ⑤：ヒートポンプ用ファンの性能向上」によって産業上の利用効果が実証された HPC アプリケーション FrontFlow/blue (FFB)、

FrontFlow/X (FFX)、および CUBE を、今後のハードウェアの主流になるものと考えられる 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する。また、ハードウェア性能の今後の進展予測に鑑み、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する。

令和 5 年度は、課題内の代表的なアプリケーション FFB を NVIDIA 社製 GPU A100 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。また、FFB の「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、48 ノード (192 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最大 6.8 % 短縮した。さらに、最適化アルゴリズムの改良によって、192 ノード (768 プロセス) 間の最適通信ランクマップの作成時間を 70 時間から 6.36 秒に大幅に短縮した。

In this research, HPC applications, such as FrontFlow/blue (FFB), FrontFlow/X (FFX), and CUBE, which have proven their industrial effectiveness through Research theme 3, Research theme 4 and Research theme 5, will be ported to GPGPU, which is expected to become the mainstream hardware for a supercomputer in the future and will expand the use of HPC simulations to a wide range of industrial fields. In addition, since hardware performance improvements are expected to slow down in the future, we will research into and develop analysis algorithms, with which the sustained performance of the application would not be memory-throughput bounded. We will also conduct fundamental research to reduce the communication overhead of the HPC application run on "Fugaku."

In this fiscal year, we have ported FFB, that is one of the representative applications in this project, to GPGPU A100 of NVIDIA. As a result, we have achieved a sustained standalone performance of 257 GFLOPS. We have also achieved a sustained parallel-computing performance of 12,963 GFLOPS and a parallel-computing efficiency of 78.8 % when 64 of A100 are used. In addition, to reduce the inter-process communication overhead and hence to improve the parallel-computing efficiency of FFB run on "Fugaku", an algorithm to optimize the rank map have been developed. As a result, the communication time have been shortened by 24.0 % and the overall computation time including the communication time has been shortened by 6.8 % for a parallel computation of FFB run on 48 nodes (192 processes). Furthermore, by improving the optimization algorithm, the time to produce an optimum rank map for 192 nodes (768 processes) have been significantly shortened from 70 hours to 6.36 seconds.

(b) 本研究の内容

1) 研究成果

a) GPU への移植

NVIDIA 社製 GPGPU A100 (理論ピーク性能 19.5 TFLOPS、理論最大メモリスループット 1.555 TB/s、メモリー容量 40 GB) を搭載した東京大学情報基盤センターの計算機システム Wisteria-A に

FrontFlow/blue (FFB) 流れソルバーを移植し、257 GFLOPSの単体実効性能を達成した。この性能は、FFBのロード演算比 B/F を4 (1 演算あたり 4 Byte=1 word ロードする) と仮定し、理論最大メモリスループットから算出される性能の 66 %である。さらに、Wisteria-A において最大 8 ノード (64 基の A100) を用いた FFB の weak-scale ベンチマークテストを実施し、FFB の並列計算性能を評価した。GPU (領域) あたりに割当てた要素数は 400 万である。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 を使用した。Table 2.2.6-1 および Fig. 2.2.6-1 に演算性能を示す。8 ノード (64 基の A100) を用いた場合の並列化効率は 78.8 % (ompi-cuda)、および、74.3 % (Nvmpi) であった。GPU への FFB の移植に関する研究開発は、東京大学情報基盤センターおよび NVIDIA 社と連携して実施した。

Table 2.2.6-1 Results of weak-scale benchmark tests of FFB on Wisteria-A.

MPI ライブラリ	ノード数	領域数	計算時間 [sec/STEP]	総演算性能 [GFLOPS]
ompi-cuda	2	16	0.341	3,754
	8	64	0.393	12,963
Nvmpi	2	16	0.350	3,657
	8	64	0.417	12,217

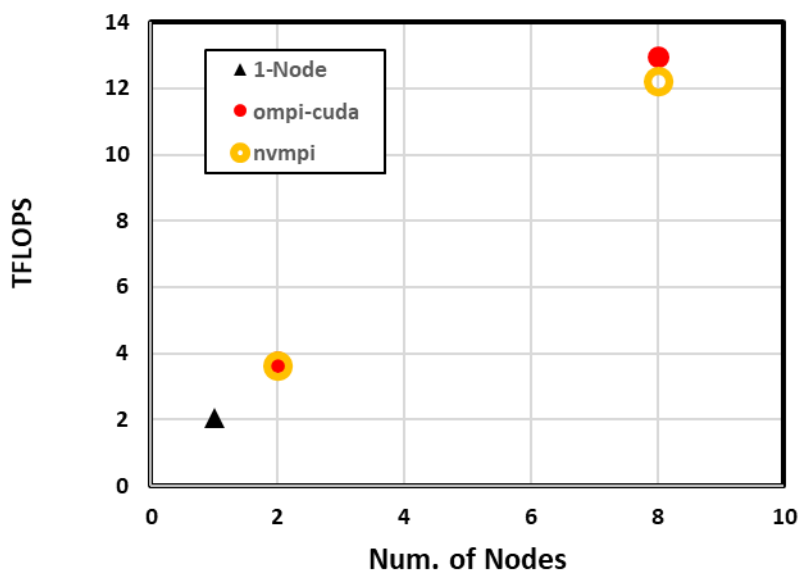


Fig. 2.2.6-1 Results of weak-scale benchmark tests of FFB on Wisteria-A.

本プロジェクトで研究開発した成果を種々の計算機アーキテクチャに展開するため、GPGPUに加え、SX-Aurora TSUBASA シリーズである Vector Engine Type30A (VE30A、理論ピーク性能 4.91 TFLOPS、理論メモリスループット 2.45 TB/sec、メモリー容量 96 GB) を搭載した東北大学サイ

バーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ AOBA-S に FFB を移植し、単体性能および並列性能を評価した。移植にあたってはベクトルエンジン (VE) の性能を最大限に生かすため、FFB の変数配列の最内側の変数の数を長くするなど的高速化を図った。VE あたりの性能は 341 GFLOPS であり、これはメモリバンド幅から推定される演算性能の 56 %に相当し、FFB が、SX-Aurora TSUBASA の高いメモリバンド幅を十分に生かした実効性能を実現していることが確認された。また、最大 2,048 VE まで使用した weak-scale ベンチマークテストを実施し、並列化効率 61.7 %、総演算性能 301 TFLOPS を達成した。この結果により、120 億要素規模の計算を 1 時間ステップあたり 0.82 秒で実施できるため、AOBA-S 上での実用問題を対象とした大規模 LES 解析が可能であることを確認した。AOBA-S への FFB の移植に関する研究開発は、東北大学サイバーサイエンスセンターおよび日本電気株式会社と連携して実施した。

b) ランクマップ最適化による並列化効率の向上

b-1) 概要

研究テーマ③の成果に関して、FFB の実用計算をした際に、「富岳」1 万ノードを用いた weak-scale ベンチマークテストにおいて、並列化効率が 50 %程度まで低下する課題があることを述べた。本研究テーマではこの課題を解決するため、理化学研究所計算科学研究センター運用技術部門と連携し、ランクマップの最適化によって高い並列計算性能を実現するツールを研究開発している。令和 5 年度は最適化ツール的高速化をするとともに、「富岳」の各計算ノードの通信リンク上の通信量を平滑化するために、新たな評価関数として情報エントロピーを導入しその効果を評価した。

b-2) 手法

「富岳」では TofuD インターコネクとよばれる機構により、計算ノードが接続されている。各計算ノードには 10 本の Tofu Network Router (TNR) が備えられており、それぞれ 10 方向のリンクが割り当てられ、計算ノード間が接続されている。TNR を用いた通信のコストを評価するには、計算実行時に各ランク (mpi プロセス) の TNR における座標 (X, Y, Z, a, b, c) 情報に基づき、TNR における通信経路を考慮し、ランク間の全ての通信を各通信リンクに割当て積算する必要がある。ランク間の通信量は計算実行時に、オープンソフトである Structural Simulation Toolkit (SST) を用いて取得することができる。SST による通信量に関する出力例とそれを用いた通信量テーブル作成例を Fig. 2.2.6-2 に示す。SST を用いて取得した通信テーブルより、通信のホップ数や TNR の各リンクに割り当てられる通信量を算出し、それらの情報から定義する評価関数を最適化することによって、通信コストを低減し、並列計算性能の向上を図る。このような組合せ最適化問題は多くは NP 困難な問題であり、現実的な時間内で正確に解くことは困難である。ここでは、スピン系物理シミュレーションで一般的に用いられるモンテカルロ法のメトロポリスアルゴリズムを用いて、TofuD ネットワーク上の 6 次元物理座標空間におけるランク配置を交換するシミュレーテッドアニーリングによる最適化エンジンを実装した。FFB による 192 プロセスの並列計算において、ホップ数の積算値を評価関数としてアニーリングした結果を Fig. 2.2.6-3 に示す。アニーリング前 (Fig. 2.2.6-3 左) と比較し、アニーリング後 (Fig. 2.2.6-3 右) では通信量が低減されていることがわかる。また、FFB の 768 プロセスの並列計算に対し、アニーリングによりランクマップを作成するこ

とにより、通信時間が約 24.0 %削減される効果があることが確認できた。なお、開発した手法をより大規模な問題に適用するためには、ランクマップの最適化自体に要する時間の短縮が必須となる。本研究では、事前に作成した距離空間テーブルを利用し、かつ、評価関数の評価に必要な箇所のみ評価関数を計算するなどの最適化アルゴリズムの改良を実施し、96 ノード (384 プロセス) のランクマップの最適化を 30.4 倍高速化した。さらに、Tofu ユニット単位 (12 ノード、48 プロセス) でフリップする「グローバルフリップ」と組み合わせることによって、192 ノード (768 プロセス) 間の最適通信ランクマップの作成時間を 70 時間から 6.36 秒 (約 4 万分の 1) に大幅に短縮した。ただし、グローバルフリップを併用した場合の FFB の通信時間や通信時間を含めた計算時間の短縮効果に関しては今後の検証が必要であることを付記する。

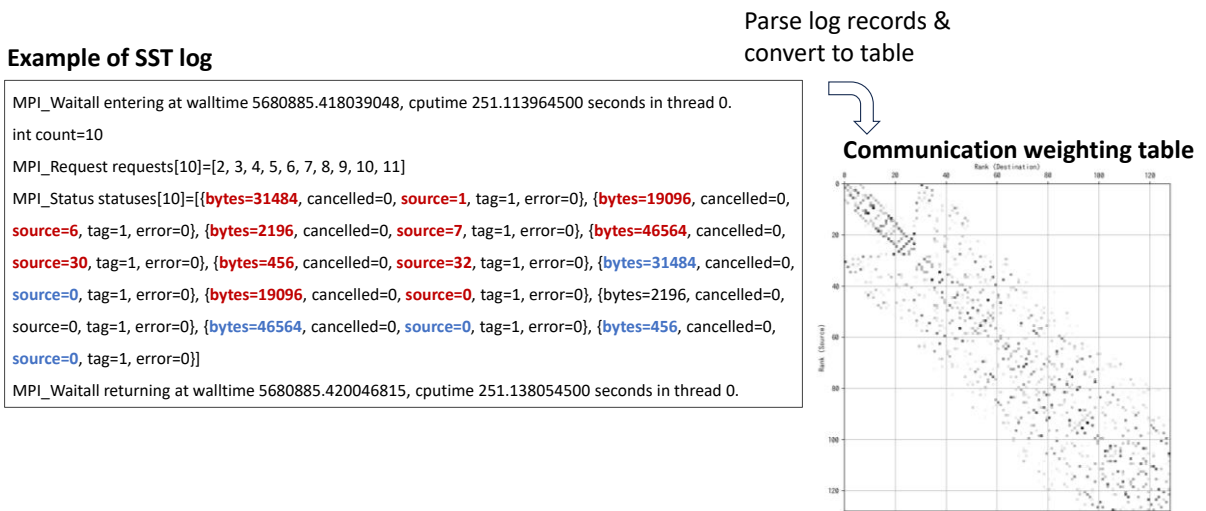


Fig. 2.2.6-2 Communication table generated from data output by SST.

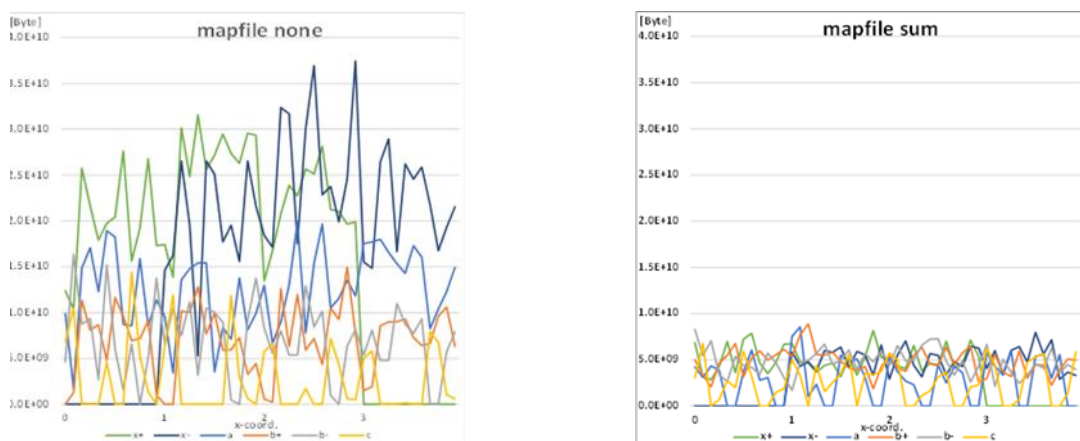


Fig. 2.2.6-3 Optimization results based on total number of communications (left: without optimization, right: optimization).

b-3) 情報エントロピーを用いたリンク上の通信量の平滑化

ホップ数を評価関数とした最適化することに加えて、情報エントロピーを用いた通信量の平滑化も試行した。通信リンク i の通信量 c_i より情報エントロピー S を以下のように定義する。

$$S = - \sum_{i \in TNR} p_i \log p_i$$

$$p_i = c_i / \sum_{i \in TNR} c_i$$

ホップ数の積算値を評価関数とする狙いはホップ数の多い（遠くの TofuD ユニット間の）通信を極力減らすことにあるが、情報エントロピーを評価関数にする狙いは、通信量を平滑化することによって、「富岳」が提供する通信資源を最大限活用することにある。Fig. 2.2.6-4 左に情報エントロピーを用いた最適化結果を示す。計算条件は Fig. 2.2.6-3 と同じである。情報エントロピーを用いることにより通信量が平滑化されていることが確認できる。Fig. 2.2.6-4 左のランク配置を基に、さらにホップ数積算値を評価関数とするアニーリングをした結果を Fig. 2.2.6-4 右に示す。これにより、通信量の絶対値が低減することを確認することができた。Fig. 2.2.6-3 および Fig. 2.2.6-4 に示す 4 ケースで、FFB の時間ステップあたりの計算時間を測定したところ、アニーリングなしが 0.398 秒であったの対し、ホップ数によるアニーリングでは 0.374 秒（アニーリング無しの場合よりも 6.1%短縮）、情報エントロピーによるアニーリングでは 0.371 秒（アニーリング無しの場合よりも 6.8%短縮）であり、情報エントロピーを評価関数として用いても、ホップ数を評価関数として用いた場合と同等あるいはそれ以上の並列化効率の向上効果があることが確認できた。本ベンチマーク計算は 48 計算ノード（192 プロセス）を用いて実施したものであるが情報エントロピーによるアニーリングはアニーリング自体の計算負荷が大きいため、この手法をより大規模な問題に適用するためにはアニーリング自体に要する計算時間を短縮する必要がある。なお、計算時間の測定は各ケース 3 回実施し、その最小値を採用したが、各回の計算時間の差異は小さかった。また、情報エントロピーとホップ数積算値を組合わせたアニーリングをした場合の計算時間は 0.373 秒で組合わせた効果は確認できなかった。

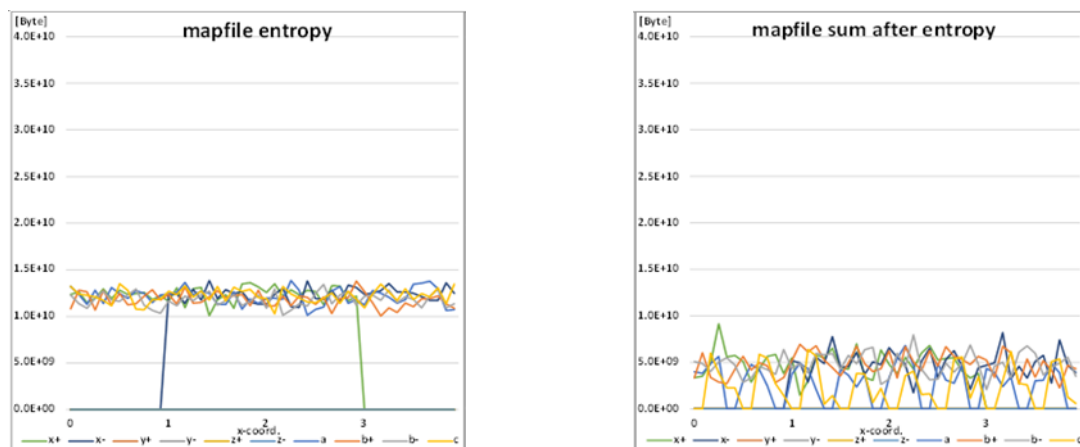


Fig. 2.2.6-4 Optimization results based on information entropy (left: information entropy, right: information entropy and communication hops).

2) まとめ

本研究テーマでは研究テーマ①～研究テーマ⑤において産業上の利用効果を実証されたアプリケーションを種々の計算機アーキテクチャ上で効率的に活用するため、a) GPGPU への移植、b) ランクマップ最適化による並列化効率の向上に関する研究開発を実施した。

a) GPGPU への移植に関しては、NDIVIA 社製 GPGPU A100 を搭載した東京大学情報基盤センター-Wisteria-A に FFB を移植し、単体実効性能 257 GFLOPS を達成した。また、最大 64 GPU を用いて、12,963 G FLOPS（並列化効率 78.8 %）を達成した。さらに、FFB を種々の計算機アーキテクチャへ展開し、産業利用の拡大を図ることを目的に、Aurora-TSUBASA を搭載した東北大学 AOBAS システムに FFB を移植し、単体実効性能 341 GFLOPS（メモリスループットから計算される最大性能の 56 %）、並列化効率 61.7 %（2,048 VE 使用時）を達成した。

b) ランクマップ最適化による並列化効率の向上に関して、ランクマップを最適化ツールを開発し、その高速化を実現するとともに、通信量の平滑化のために情報エントロピーを評価関数としたアニーリング機能を実装し、ホップ数積算値を評価関数とするアニーリングと同等の効果があることを確認した。今後は、これらのアニーリング機能をさらに高速化し、大規模計算並列計算の並列効率の向上に資するツールを開発する。

(7) プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、プロジェクトの推進や研究テーマ間の連携のための会議等を適宜開催し、参画の協力機関・連携機関との連携・調整にあたる。特に、プロジェクト全体の進捗状況を確認し、計画の合理化の検討等を行うなど、プロジェクトの効率的・効率的推進に資する取組みを実施する。また、プロジェクトで得られた成果については、可能な限り積極的に公開して今後の展開に資するとともに、ものづくり産業での早期戦力化を支援する。また、一般社団法人ターボ機械協会「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」等に対して、研究成果の展開を実施する。

令和 5 年度は、上記を順次実施しながら、本課題の有効な研究活動のための支援を実施し、研究開発全体を円滑に実施するための調整を行った。得られた成果については、シンポジウム等を開催し、公開した。以下に、シンポジウム等の開催実績を示す。

1) 第 7 回 HPC ものづくり統合ワークショップ

日時：令和 5 年 12 月 8 日

場所：東京大学生産技術研究所大会議室、および、Webex Webinars

参加者：132 名（含、現地参加 26 名）

2) 第 4 回「富岳」高性能シミュレーション技術交流会

日時：令和 6 年 2 月 8 日

場所：東京大学生産技術研究所大会議室、および、Webex Webinars

参加者：57 名（含、現地参加 17 名）

3) 第 1 回 HPC 産業応用拡大プロジェクトシンポジウム

日時：令和 6 年 3 月 21 日

場所：東京大学生産技術研究所コンベンションホール、および、Webex Webinars

参加者：251名（含、現地参加46名）

また、実証研究の成果を広い産業分野に展開するため、FFXへ回転系解析機能を実装し、一般社団法人ターボ機械協会「流体性能の高精度予測と革新的流体設計分科会」に展開した。

2-3. 活動（研究会の活動等）

(1) アウトリーチ活動

年月日	行事
R5.6.9~10	東京大学生産技術研究所キャンパス公開
R5.9.7~8	国際フロンティア産業メッセ 2023
R5.11.14~17	SC23
R5.12.1	第3回シンポジウム富岳百景
R5.12.5	第7回HPCものづくり統合ワークショップ
R6.3.12	第3回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会
R6.3.21	第1回HPC産業応用拡大プロジェクトシンポジウム

(2) HPC産業応用拡大プロジェクト推進会議

年月日	行事
R5.5.24	第1回HPC産業応用拡大プロジェクト推進会議
R5.7.25	第2回HPC産業応用拡大プロジェクト推進会議
R5.10.11	第3回HPC産業応用拡大プロジェクト推進会議
R6.1.12	第4回HPC産業応用拡大プロジェクト推進会議
R6.3.27	第5回HPC産業応用拡大プロジェクト推進会議

(3) 「富岳」高性能シミュレーション技術交流会

年月日	行事
R6.2.8	第4回「富岳」高性能シミュレーション技術交流会

(4) 次世代アルゴリズム研究会

年月日	行事
R5.6.30	第1回次世代アルゴリズム研究会
R5.9.7	第2回次世代アルゴリズム研究会
R5.11.10	第3回次世代アルゴリズム研究会

R5.12.27	第4回次世代アルゴリズム研究会
R6.2.14	第5回次世代アルゴリズム研究会

2-4. 実施体制

実施項目	担当機関	担当責任者
(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	国立大学法人東京大学 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 長谷川洋介
	学校法人明治大学 理工学部	専任講師 亀谷幸憲
	学校法人日本大学 理工学部	教授 鈴木康方
	国立大学法人豊橋技術科学大学 大学院工学研究科	教授 飯田明由
	国立大学法人神戸大学 大学院システム情報学研究科	教授 坪倉誠
(2) 研究テーマ②：スマートin-situ可視化基盤の構築	国立大学法人神戸大学 大学院システム情報学研究科	准教授 坂本尚久
	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	研究員 Rahul Bale
(3) 研究テーマ③：実船の推進性能の予測	国立大学法人東京大学 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 加藤千幸
	学校法人日本大学 理工学部	教授 鈴木康方
(4) 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	国立大学法人神戸大学 大学院システム情報学研究科	教授 坪倉誠
	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	研究員 Rahul Bale
	国立大学法人豊橋技術科学大学 大学院工学研究科	教授 飯田明由
	国立大学法人東京大学 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 加藤千幸
(5) 研究テーマ⑤：ヒートポンプ用ファンの性能向上	学校法人日本大学 理工学部	教授 鈴木康方
	国立大学法人東京大学 生産技術研究所	持続型材料エネルギーインテグレーション研究センター センター長/教授 鹿園直毅
(6) 研究テーマ⑥：次世代計算基盤の構築	国立大学法人東京大学 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 加藤千幸
(7) プロジェクトの総合的推進	国立大学法人東京大学 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 加藤千幸

別添 1 学会等発表実績

1. 学会誌・雑誌等における論文掲載

No.	掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌名等）	発表した時期
1	Experimental study on aerodynamic sound generated from flow around a forward facing step	Yoshihiro SHIRASU, Yasumasa SUZUKI, Chisachi KATO	Journal of Fluid Science and Technology, Vol.18, No.1, 2023, DOI: 10.1299/jfst.2023jfst0020	2023年 4月
2	変調パワースペクトルを用いた変動感を伴う空力騒音評価手法の開発	瀧本裕仁、吉永司、飯田明由	自動車技術会論文集 54(4)、692-697	2023年 6月
3	A sharp interface immersed boundary method for thin-walled geometries in visous compressible flows	Chung-Gang Li, Rahul Bale, WeiHsiang Wang, Makoto Tsubokura	International journal of mechanical sciences, 253, 108401	2023年 9月
4	Aeroacoustic investigation of multi-directional wings aligned in tandem under wing-in-ground effect	Chenguang Lai, Yujie Zhu, Liangkui Tan, Zeyu Zhen, Makoto Tsubokura	Physics of Fluids, vol.36, 014118	2024年 1月

2. 国際会議・シンポジウムにおける口頭・ポスター発表

No.	発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名（所属機関）	発表した場所（学会名等）	発表した時期
1	マーカー粒子とオイラー型有限体積法を用いた圧縮性構造解析スキームの提案（キーノート）	嶋田宗将（理化学研究所）、西口浩司（名古屋大学）、岡澤重信（山梨大学）、坪倉誠（神戸大学/理化学研究所）	第28回計算工学講演会	2023年 5月
2	Smart design of road vehicle realized on the supercomputer “Fugaku” (Plenary talk)	Makoto Tsubokura (Kobe Univ./RIKEN)	The first international conference on aerodynamic intelligent optimization and heat flow control	2023年 6月
3	A novel method to compute forced and induced motion of rigid body based on monolithic Eulerian fluid-structure interaction scheme and immersed boundary method	Tokimasa Shimada (RIKEN), Koji Nishiguchi (Nagoya Univ.), Rahul Bale (RIKEN), Shigenobu Okazawa (Yamanashi Univ.), Makoto Tsubokura (Kobe Univ./RIKEN)	X International Conference of Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2023)	2023年 6月

4	Real-world vehicle aerodynamics simulation on the supercomputer “Fugaku” towards digital twins	Makoto Tsubokura (Kobe Univ./RIKEN)	Fahrzeug-Aerodynamik - Neue Chancen und Herausforderungen durch Elektromobilität und CO2-Gesetzgebung (Vehicle Aerodynamics - New opportunities and challenges due to electromobility and CO2 regulation)	2023 年 6 月
5	Effect of Sound Source Predicted by LES on Aerodynamic Sound Prediction of a Box Fan (論文発表)	Shunya UDA (Nihon University), Yasumasa SUZUKI (Nihon University), Yuya MIKI (Nihon University), Chisachi KATO (University of Tokyo)	ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2023 (AJK FED2023) , July 9-13, Osaka, JAPAN, No.1-07-3-04	2023 年 7 月
6	Turning flight simulation with fluid-rigid body interaction for flying car with contra-rotating propellers	Ayato Takii (RIKEN/Kyoto Institute of Technology), Ritsuka Gomi, Masashi Yamakawa (Kyoto Institute of Technology), Makoto Tsubokura (RIKEN/Kobe Univ.)	International Conference on Computational Science (ICCS 2023), Lecture notes in computer science, vol. 14073	2023 年 7 月
7	Decomposition of hydrodynamic and acoustic pressure fluctuations in the near field of rearview mirror with wavenumber frequency spectrum analysis (口頭発表)	Akiyoshi Iida (Toyohashi University of Technology), Masashi Miyazawa (Honda R&D Co. Ltd.), Tsukasa Yoshinaga (Osaka University), Chisachi Kato (The University of Tokyo), Yoshinobu Yamade (Mizuho Research & Technologies)	International workshop on Environmental Engineering 2023	2023 年 7 月
8	Wavenumber frequency spectrum analysis around automobiles by using random arrays (口頭発表)	Akiyoshi Iida (Toyohashi University of Technology), Katsuya Ogawa (Toyohashi University of Technology), Tsukasa Yoshinaga (Osaka University)	International workshop on Environmental Engineering 2023	2023 年 7 月

9	生成ネットワークを用いたファン騒音低減手法の開発（口頭発表）	宇野晟生（豊橋技術科学大学）、吉永司（大阪大学）、飯田明由（豊橋技術科学大学）、宅野秀和（テラル（株））、松本武士（テラル（株））	第 33 回環境工学総合シンポジウム	2023 年 7 月
10	任意視点可視化画像生成のための画像ベースサロゲートモデルの構築（口頭発表）	田中祐希（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）	第 51 回可視化情報シンポジウム（可視化情報学会主催）	2023 年 8 月
11	情報エントロピーを用いた in-situ 可視化向けカメラ注視点推定（口頭発表）	松島大晟（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）、野中丈士（理化学研究所）、畢重科（天津大学）	第 51 回可視化情報シンポジウム（可視化情報学会主催）	2023 年 8 月
12	粒子ベースレンダリングの高速化のための多重カーネルノイズ除去オートエンコーダ（口頭発表）	森井雅大（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）、河村拓馬（日本原子力研究開発機構）	第 51 回可視化情報シンポジウム（可視化情報学会主催）	2023 年 8 月
13	Experimental investigation of aerodynamic sound radiated from flow around an airfoil placed in the turbulent flow generated by active turbulence generator（論文発表）	Noriaki Kobayashi (Osaka University), Yasumasa Suzuki (Nihon University), Chisachi Kato (University of Tokyo)	Internoise2023, August 20-23, Chiba, JAPAN, No.1-P-3	2023 年 8 月
14	流入風のヨー角変動を受ける車両の非定常空力特性（論文発表）	山下太郎（トヨタ自動車）、加藤千幸（東京大学）、山出吉伸（みずほリサーチ&テクノロジーズ）、今野彰（みずほリサーチ&テクノロジーズ）	自動車技術会 2023 年春季大会、2023.5.3-5、パシフィコ横浜、自動車技術会論文集 2023 年 54 巻 5 号 915-920	2023 年 8 月
15	The Present Status of Large-scale Industrial Simulations and its Future（基調講演）	Chisachi Kato (University of Tokyo)	IAHR 2023 Asia, The 4th IAHR Asian Working Group Symposium on Hydraulic Machinery and Systems 2023.8.12-16, Kashgar, China	2023 年 8 月

16	Optimization of microphone array arrangements for wavenumber-frequency spectral measurements (口頭発表)	Katsuya Ogawa (Toyohashi University of Technology), Tsukasa Yoshinaga (Osaka University), Akiyoshi Iida (Toyohashi University of Technology)	INTERNOISE2023	2023年 9月
17	Industrial Applications of Wall-Resolved Large Eddy Simulations - The Present Status and their Perspectives (基調講演)	Chisachi Kato (University of Tokyo)	AICFM2023: The 17th Asian International Conference on Fluid Machinery (AICFM17), 20-23, October 2023, Zhenjiang, China	2023年 10月
18	HPC シミュレーションと AI によるスマートデザイン (特別講演)	坪倉誠 (神戸大学)	VINAS Online Users Conference	2023年 10月
19	Information Entropy-Based Camera Focus Point and Zoom Level Adjustment for Smart In-Situ Visualization (口頭発表)	Taisei Matsushima (Kobe University), Ken Iwata (Kobe University), Naohisa Sakamoto (Kobe University), Jorji Nonaka (RIKEN R-CCS), Chongke Bi (Tianjin University)	International Workshop on In Situ Infrastructures for Enabling Extreme-scale Analysis and Visualization 2023 (ISAV2023)	2023年 11月
20	2023年11月 Guideline for Large-Scale Analysis of Centrifugal Blower Using Wall Resolved Large Eddy Simulation	Kazuhiro Tsukamoto (Hitachi, Ltd.), Chisachi Kato (University of Tokyo)	ASME 2024 Turbomachinery Technical Conference & Exposition (GT2024)	2023年 11月
21	Smart Design in the Society 5.0 Era by Combining HPC and AI (Keynote talk)	Makoto Tsubokura (Kobe Univ./RIKEN)	Wissensaustauschworkshop on Machine Learning (WAW)(DLR)	2023年 11月
22	大規模 CFD が拓く新たなものづくり ~自動車 CAE を例に~	坪倉誠 (神戸大学/理化学研究所)	日本機械学会関西支部第388回講演会 実務者のための流体解析技術の基礎と応用	2023年 11月
23	効率的な知見獲得を目指した大規模数値計算向けスマート in-situ 可視化 (口頭発表)	坂本尚久 (神戸大学)	第13回計算力学シンポジウム (日本学術会議 総合工学委員会主催)	2023年 12月

24	ピクセルシャッフルを使った画像ベースサロゲートモデルの学習時間の高速化（口頭発表）	三宅智也（神戸大学）、田中祐希（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）	先進的可視化技術とデータ科学の融合による可視化解析の研究会（核融合科学研究所）	2023年 12月
25	適応的時間サンプリングを使ったin-situ可視化向けカメラ移動経路推定の効率化（口頭発表）	足立和也（神戸大学）、岩田憲（神戸大学）、松島大晟（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）	先進的可視化技術とデータ科学の融合による可視化解析の研究会（核融合科学研究所）	2023年 12月
26	in-situ可視化向けカメラ自動制御（口頭発表）	岩田憲（神戸大学）、松島大晟（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）、野中丈士（理化学研究所）、畢重科（天津大学）	第37回数値流体力学シンポジウム（日本流体力学会主催）	2023年 12月
27	多重カーネルノイズ除去オートエンコーダを使った粒子ベースレンダリングの画質改善（口頭発表）	森井雅大（神戸大学）、坂本尚久（神戸大学）、河村拓馬（日本原子力研究開発機構）	第37回数値流体力学シンポジウム（日本流体力学会主催）	2023年 12月
28	Information Entropy-based Camera Focus Point and Zoom Level Adjustment for Smart In-Situ Visualization（口頭発表）	Taisei Matsushima (Kobe University), Ken Iwata (Kobe University), Naohisa Sakamoto (Kobe University), Jorji Nonaka (RIKEN R-CCS), Chongke Bi (Tianjin University)	International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia 2024)	2024年 1月
29	Analysis Towards Energy-Aware Image-based In Situ Visualization on the Fugaku（口頭発表）	Razil Tahir (RIKEN R-CCS), Jorji Nonaka (RIKEN R-CCS), Ken Iwata (Kobe University), Taisei Matsushima (Kobe University), Naohisa Sakamoto (Kobe University), Chongke Bi (Tianjin University), Masahiro Nakao (RIKEN R-CCS), Hitoshi Murai (RIKEN R-CCS)	International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region (HPCAsia 2024)	2024年 1月

30	Digital transformation of the Airborne Infection Risk Assessment and AI Supported Smart Desing Realized on the Supercomputer “Fugaku” toward Society 5.0 (Opening Plenary talk)	Makoto Tsubokura (Kobe Univ./RIKEN)	The international conference on high performance computing in Asia-Pacific region (HPC Asia 2024)	2024 年 1 月
31	Multi-kernel Denoising Autoencoder for Particle-based Rendering (口頭発表)	Masahiro Morii (Kobe University), Amirul Haziq bin Azman (Accenture Technology), Naohisa Sakamoto (Kobe University), Takuma Kawamura (Japan Atomic Energy Agency)	The 8th IEEEJ International Conference on Image Electronics and Visual Computing (IEVC 2024)	2024 年 3 月