

令和6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
「「富岳」が拓く Society 5.0 時代のスマートデザイン」
成果報告書

令和7年5月30日
国立研究開発法人理化学研究所

坪倉 誠

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

「富岳」が拓く Society 5.0 時代のスマートデザイン

体系的番号： JPMXP1020210316

1. 補助事業の目的

少子高齢化に伴う労働生産性の低下、確実に来襲する新興ウイルスによるパンデミックや予期せぬ自然災害への対応、さらにはカーボンニュートラル社会の実現等、激変する社会に対応して今後も我が国がものづくり大国としてその国際競争力を維持していくためには、単なる性能試験の代替としてのシミュレーションを脱却し、新たなデジタルエンジニアリング技術を創生することが急務である。ここでは、「富岳」の性能を十二分に活用できるアプリケーションソフトウェアによる高性能大規模シミュレーションと、多目的最適化、機械学習、データ同化等のデータ科学を融合させることで、サイバー空間とフィジカル空間を高度に結合させた次世代デジタル設計システムを構築する。即ち、深層学習を用いたビッグデータ解析とは異なり、限定されたデータ群に物理シミュレーション技術を効率的に統合することで、演繹的なシミュレーション技術と帰納的な機械学習技術を高度に融合した最適設計システムを開発する。開発したシステムは、我が国の基幹産業分野を構成する自動車・機械・土木・建築分野対して以下の四つの課題を選定し、その有用性を実証することで成果創出を狙う。構築したシステムは、我が国の基幹産業分野を構成する自動車・機械・土木・建築分野の応用課題への展開を目指し、自動車空力設計、都市・建築性能設計、室内環境設計、カーボンフリーガスタービン設計に適用することで、その有用性を実証する。研究開発はそれぞれのターゲットに対応した産学コンソーシアム（既に設置済み）を活用し、産業界での実用化を想定したシステムの設計から実証、さらには産業界メンバーへの技術教育を通じた HPC 人材育成を経て、社会実装までを連携して行う。これにより、我が国を代表する基幹産業分野において、Society 5.0 時代のスマートデザインを実現する。

2. 令和6年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和6年度）の事業実施計画

我が国の基盤産業を構成する機械・材料・土木・建築分野の実用的な課題より、特に経済波及効果の大きい四つの実証テーマを設定し、大学等の研究者と産業界のエンジニアが強力に連携して、課題を推進する。以下、それぞれのテーマの令和6年度の実施内容の詳細を示す。

(1) サブ課題A「意匠空間を考慮したAI支援多目的最適化による自動車空力デザイン」

性能設計空間と意匠デザイン空間を融合させた新たな空力多目的最適化システムを構築し、実際の自動車空力設計に適用することで、その有用性を実証する。多次元設計空間での最適化を実現するために、遺伝的アルゴリズムに基づく多目的最適化を自動車設計で実用化するフレームワークを構築する。キャパシティコンピューティングによる多目的最適化で問題となる計算負荷低減技術として、機械学習によ

りサロゲート（代理）モデルやリダクション（縮約）モデルを構築し、多目的設計の大幅な時間短縮を目指す。

令和6年度は、AI支援多目的最適化フレームワークの実用評価と社会実装、社会実装に向けた最適化フレームワークの実用化、多目的最適化解析の実施、意匠・空力性能空間の数理モデルの改良を行う。

（協力機関：神戸大学、広島大学）

(2) サブ課題B「変容する都市・建築の自然擾乱対応の性能設計」

データサイエンスに基づきメタボリズム（新陳代謝）的に変容する都市・建築モデルをサイバー空間上に再現し、都市・建築の離散的空間での換気性能、グリーンインフラに基づく気温調整機能を定量化する。気象モデルと乱流シミュレーションを融合した広範囲の周波数帯の乱流変動を再現し、極端気象（スーパータイフーン、竜巻、豪雨）下での都市・建築の挙動を把握することで防災性能を予測する。Society 5.0の理念を踏襲しながら、自然起源の擾乱の都市・建築へのインパクト推定技術の社会貢献をめざし、コンソーシアムを基本として、産業界を巻き込んで実務的展開と不確定性に基づく性能設計の理念と方法を構築する。

令和6年度は、耐風設計実務モデルでの流入条件の妥当性検討、対洪水設計のためのモデルの適用法の検討、超弾性構造物の振動制御設計への適用方法の検討、Data Scienceに基づく分析とリスク共生のための手法に関するモデル開発、ボイドによる離散空間・グリーンインフラを統合した余裕空間での環境的物理事象（高い換気性能・省エネ）の解明、市街地・建築物の対洪水設計を行う。

（協力機関：横浜国立大学、近畿大学、お茶の水女子大学）

(3) サブ課題C「新興ウイルス感染症にロバストで健康・快適・サステイナブルなポストコロナ時代の室内環境設計」

各種の空気感染性汚染物質の生成から室内空気中での輸送動態、さらに体内動態と免疫システム応答・生理反応までを包括的に解析し、可視化する統合的システムを開発し、「富岳」に実装する。室内の快適性と感染症に対するロバストネスを両立させる多目的最適化による設計手法を提案する。

令和6年度は、サステイナブル室内環境設計手法の開発（気道内粘膜上皮層に適用する宿主反応モデル、ウイルス増殖モデルの開発）、汚染物質濃度制御にロバストな室内環境設計法の開発（室内環境スケールから人体モデル、上気道、下気道までを統合した力学的ダウンスケーリング解析技術の確立）、多目的最適化法の統合（空調システムシミュレーション(Energy Plus)とCUBEの統合解析手法の開発）、最適化シミュレーションの実施、多目的最適化フレームワークの実用化に向けた改良を行う。

（協力機関：九州大学、神戸大学）。

(4) サブ課題D「マルチコンポーネント統合シミュレーションによるカーボンフリーガスタービン設計」

ガスタービンを構成する圧縮機、燃焼器、タービンを完全に統合してLES で一気に解く、世界初、真のマルチコンポーネント統合シミュレーション技術の開発を行う。本統合シミュレーションが、フラッシュバックや燃焼振動等の異常燃焼、さらには、窒素酸化物 (NOx)、一酸化炭素 (CO)、およびすす等の様々なエミッションの正確な予測に有用であることを示す。本統合シミュレーション（サイバー空

間) 結果から、異常燃焼発生時の物理メカニズムを解明し、さらに異常燃焼の兆候を自動で探知するための AI センシング技術を開発することによって、これらの知見、技術が実機 (フィジカル空間) の設計や最適操作条件選定に貢献しうることを実証する。

令和6年度は、統合シミュレーションの実施 (詳細形状本計算) (継続)、フラッシュバック、燃焼振動、エミッション評価 (継続)、異常兆候自動検知データセンシング技術の構築、3次元数値シミュレーションによる水素、アンモニア乱流燃焼機構の解明および乱流燃焼モデルの精度検証 (当量比の影響) を行う。

(協力機関: 京都大学、九州大学)

(5) プロジェクトの総合的推進

以上のサブ課題 A~D の進捗を管理し、課題間の連携を促進するために、各課題の代表者を集めて統括する推進委員会を、3か月に一度程度の頻度で理研が主催して開催する。また、年に一度の成果報告シンポジウムや、他の「産業競争力の強化」課題と連携した統合ワークショップを企画・開催する。

2-2. 実施内容 (成果)

(1) サブ課題A「意匠空間を考慮したAI支援多目的最適化による自動車空力デザイン」 (協力機関: 神戸大学、広島大学)

(a) 研究成果の要旨

令和6年度は、AI支援多目的最適化フレームワークの実用評価と社会実装、社会実装に向けた最適化フレームワークの実用化、多目的最適化解析の実施、意匠・空力性能空間の数理モデルの改良を行った。この結果、これまでに構築したAI支援多目的最適化フレームワークを用いて、市販車プロポーション特性に基づく空力3目的最適化、ならびに空力、意匠性、視認・居住性の各性能向上を目的とする車体形状の3目的最適化を実施し、それらの実用性を示した。また、Webベースの最適化プラットフォームを構築し、実装した。車体形状の特性パラメータから印象を直接予測評価するニューラルネットワーク、ならびに車体形状パラメータの値が異なる車体周り流れを予測可能なAI縮約モデルを構築し、意匠・空力性能空間の数理モデルを高度化した。尚、ここでの解析には(b)-2を除いて全て「富岳」を活用した。

In this fiscal year, we conducted practical evaluation and social implementation of an AI-assisted multi-objective optimization framework, practical application of the optimization framework for social implementation, applications of multi-objective optimization analysis, and improvement of mathematical models for design and aerodynamic performance space. We demonstrated the practicality of the AI-supported multi-objective optimization framework developed in this study by conducting three-objective aerodynamic optimization based on the proportional characteristics of production vehicles' body and three-objective vehicle shape optimization with the aim of improving aerodynamics, design preferences, and visibility/comfort. Also, we developed and implemented a web-based optimization platform as part of efforts toward social implementation. We developed a neural network to directly predict and evaluate the impression from vehicle body shape characteristics, as well as an AI-based reduced order model to predict the flow around a new vehicle body with different vehicle body shape parameters. These advancements further refined the mathematical model of the design and aerodynamic performance space. All

simulations in this study were performed on the supercomputer "Fugaku", except for the social implementation theme shown in (b)-2.

(b) 本年度の内容

(b)-1 多目的最適化解析の実施 および AI支援多目的最適化フレームワークの実用評価と社会実装

本年度は、AI 支援多目的最適化フレームワークの実用評価として、市販車プロポーション特性に基づく空力3目的最適化、ならびに空力性能、意匠性、視認・居住性の各性能向上を目的とする車体形状の3目的最適化という2つの多目的最適化解析を実施した。それぞれの成果について述べる。

(b)-1-1 対象車両形状と設計変数

いずれの最適化解析においても、原型となる車両形状をパラメトリックにモーフィングすることで車両形状を最適化することとし、原型車両形状と設計変数は共通とした。対象車両形状には、概ね平均的な車体の形状特性と空力特性を有する市販 SUV 車両の3次元モデルを使用した。設計変数には、昨年度までの取り組みで構築した170台の市販 SUV 車両群が持つ車両形状の特徴量を基に、対象車両形状を変形させるモーフィング技術 (Figure 2.2.1-1) を用いて、少数の設計変数を用いて車体形状のバランスを保ちながら大局的な形状変化を与えた。具体的には、あらかじめ設定されたモーフィング設定を用いて、対象車両を市販 SUV 車両群の各車両形状を再現するようにモーフィングし、そのパラメータセットの主成分得点を設計変数とした。このとき、累積寄与率が80%を超える第13主成分までの13の主成分得点を設計変数とし、以降の主成分が表すパラメータ変動量については、原型車両形状が持つ成分を定数値として加算した。

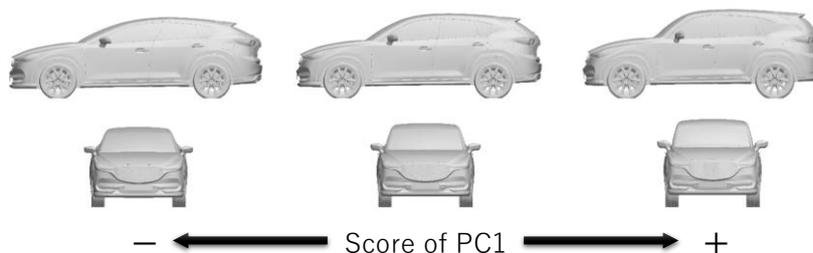


Figure 2.2.1-1 Parametric shape change given by one of the design variables.

(b)-1-2 最適化手法

最適化解析では、これまでに設計開発を進めてきた、意匠空間を考慮した自動車空力形状の多目的最適化問題のためのAI支援多目的最適化フレームワーク (Figure 2.2.1-2) を適用した。前項(b)-1-1でも述べたように市販 SUV 車両群が持つ形状特徴量の重み (主成分得点) を設計変数とし、その主成分得点を基に再構築されたモーフィングパラメータセットによって、対象車両をモーフィングすることで新規車両形状を生成しながら最適な車両形状を探索した (パラメトリック最適化)。最適化手法にはチェビシェフ距離と選好領域と呼ばれる考え方を用いた多目的進化アルゴリズム CHEETAH/R (CHEbyshev-Epsilon optimizer AlgoritHm) を使用し、基準車体形状のモーフィングは市販 CAE ソフトウェア (DEP MeshWorks) の形状モーフィング機能によって実施した。そして、形状変更に伴う解析格子の再生成作

業を必要としない複雑現象統一解析コード CUBE を用いた数値解析によって目的関数とする各車両の空力係数を評価した。また、機械学習技術による最適解探索の効率化として、進化計算の過程で実施した数値解析結果を基にガウス過程回帰モデルによるサロゲートモデルを構築し、目的関数の評価に要する計算コストの低減を図った。

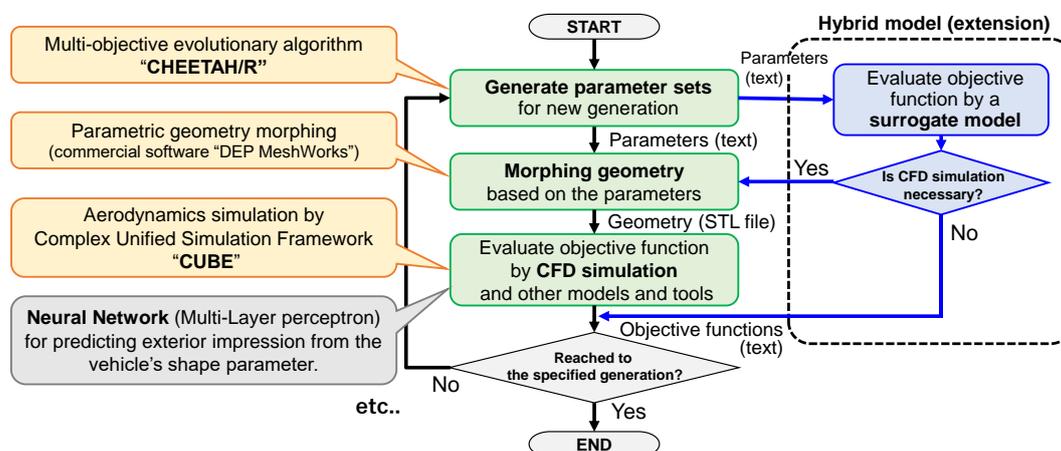


Figure 2.2.1-2 Framework of AI supported multi objective optimization for vehicle aerodynamics considering the aesthetic design space.

(b)-1-3 市販車プロポーション特性に基づく空力3目的最適化

項目 (b)-1-1 で述べたように市販 SUV 車両群が持つ形状特徴量の重み（主成分得点）を設計変数とすることで、市販車の車体各部の寸法バランス、すなわちプロポーション特性に基づいた空力多目的最適化を実現した。ここでは、空気抵抗低減、横風作用時（相対風向 3 度）の空気抵抗増加量の低減、および空気揚力の低減を目的とする空力 3 目的最適化を実施した。横風作用時の空力特性変化を評価するため、正対風と横風 3 度の 2 条件で空力解析を実施し、各車両の抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、および横風抗力係数増加 $\Delta C_D (=C_{D,\beta=0^\circ} - C_{D,\beta=3^\circ})$ を算出した。最適化解析における 1 世代あたりの個体数は 16 個体とした。また、目的関数評価時のサロゲートモデルのハイブリッド率を 50% とし、評価指標 EHVI に基づき選出された 8 個体/世代のみ実際に CUBE による CFD 解析を実施して、各空力係数値を算出、評価した。第 6 世代までの解析結果を目的関数値の散布図と、代表的なパレート解 2 台の車両側面視形状を Figure 2.2.1-3 に示す。なお、グラフ中の各空力係数値は原型車両モデルの C_D 値を用いて規格化した値を示している。図中に示した代表的パレート解の車体形状は、Figure 2.2.1-1 中央の車体に対して大きく車体形状が変化しながらも、車体全体の形状のバランスが取れており、本最適化において現実的な車体形状を保ちながらも幅広い空力形状探索が実現されていることが確認された。このことから、構築した最適化フレームワークの実用性を確認した。

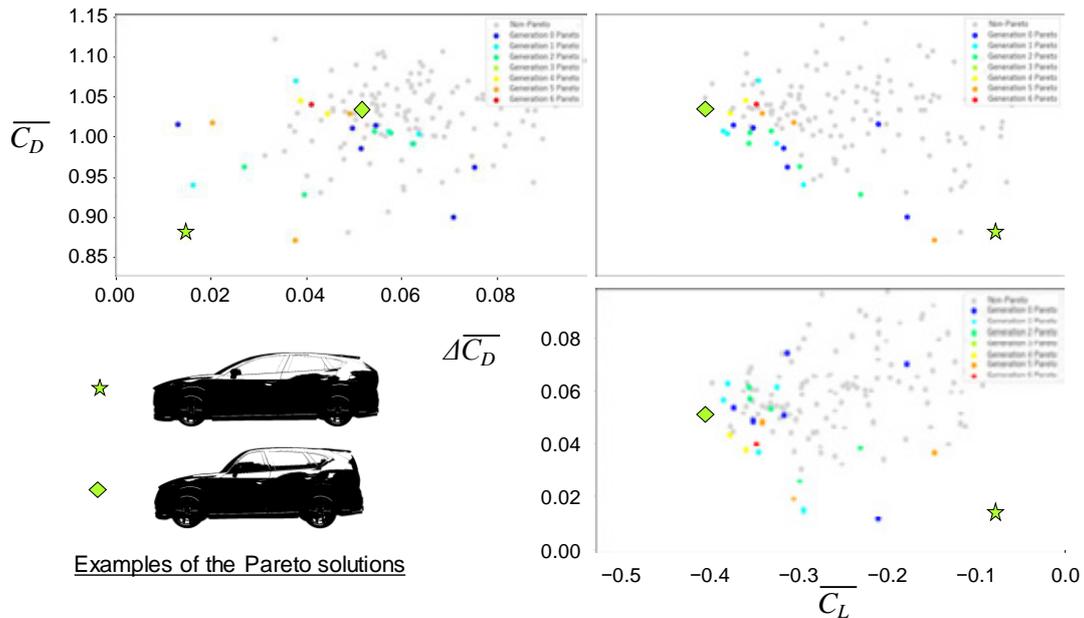


Figure 2.2.1-3 Scatter matrix of the objective functions and examples of Pareto solutions, obtained by aerodynamic 3-objective optimization.

(b)-1-4 空力性能、意匠性および視認・居住性の向上を目的とする車体形状の3目的最適化

また、意匠性を目的関数として空力性能と併せて多目的最適化を行う場合の実用的事例として、空力性能の向上として空気抵抗の低減を、意匠性の向上として好みの印象の強調を、視認・居住性の向上として運転席の着座位置における車室内高さの増大を、それぞれ目的として設定した、3目的の車体形状最適化も実施した。

ここで、意匠性に関しては、(b)-3項で後述する市販車両形状についてのアンケート調査の結果を基に、車両外観から受ける印象の第1、第2主成分の主成分得点を用いて2次元の印象空間 (Figure 2.2.1-4) を定義した。また、形容詞に関する設問と好みに関する設問の回答の相関係数に基づく階層的クラスタリングを実施し、被験者を3つのグループに分類したうえで、そのうち1つのグループの被験者が好む傾向にある印象 (概ね「フォーマルな」印象) を最適値として定義した (Figure 2.2.1-4のグラフ中のプロットは、選定したグループの被験者が回答した各車両外観の好みの水準の平均値で色付けしてあり、最適値とした印象を同グラフ中に赤色四角でプロットしている)。そして、最適値とした印象からの印象空間上でのユークリッド距離を意匠性に関する目的関数として設定した。また、視認性と居住性に関わる運転席の着座位置における車室内高さについては、モーフィング後の車体形状データを用いて計測した。

最適化解析における1世代あたりの個体数は16個体とし、目的関数評価時にはすべての個体の目的関数値をCFD解析等によって評価することとし、本課題では目的関数評価のためのサロゲートモデルは用いなかった。5世代の進化計算を実施した結果、Hyper Volume Indicatorの増大から、最適化の進行を確認した。5世代の進化計算により得られた各個体の目的関数値の散布図を Figure 2.2.1-5に、各目的関数もしくはそれらのバランスが特徴的な代表的パレート解の車体の側面視をまとめた図を Figure 2.2.1-6に、それぞれ示す。代表的なパレート解を示した図より、低抵抗な車体、視認性・居住性の高い車体、フォーマルな印象の強い車体と、それらが様々にバランスした車体が見られ、本最適化フレームワークの実用性を確認した。

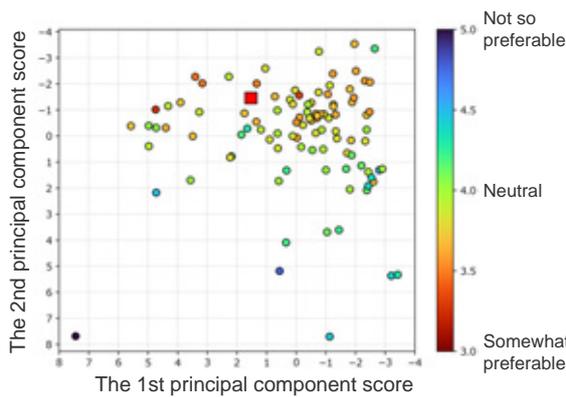


Figure 2.2.1-4 Impression space reduced to two dimensions using principal component analysis, and preferences of a group of respondents (color of plots).

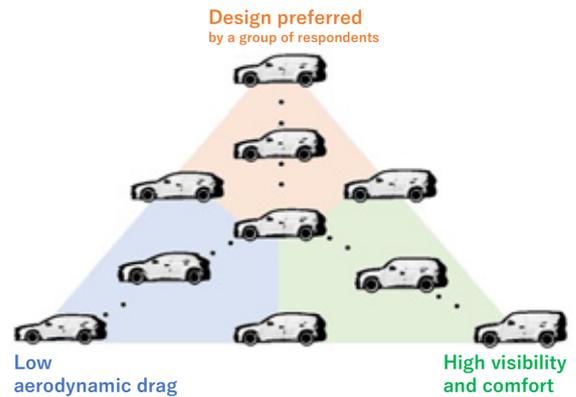


Figure 2.2.1-6 Examples of Pareto solutions obtained by 3-objective vehicle shape optimization.

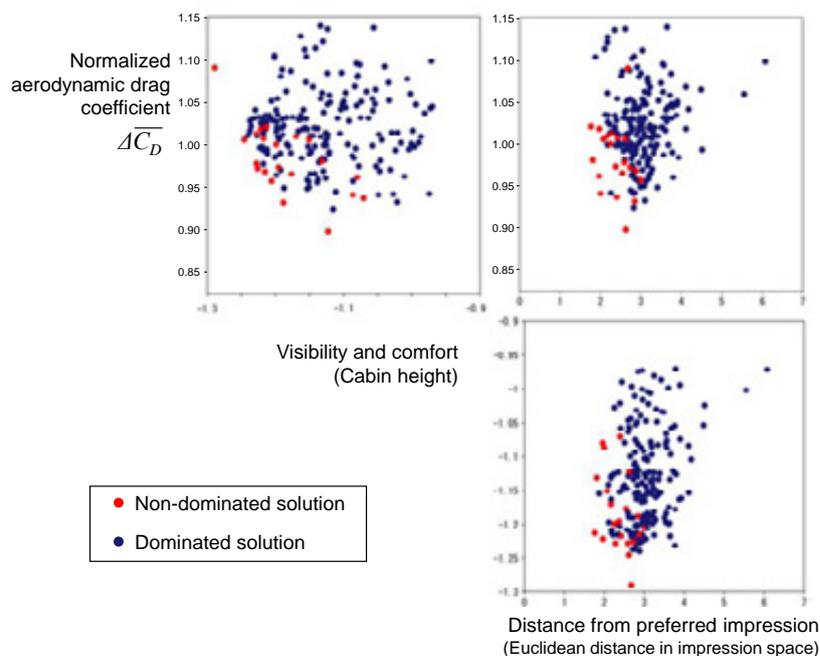


Figure 2.2.1-5 Scatter matrix of objective functions of the solutions obtained by 3-objective vehicle shape optimization.

(b)-2 社会実装に向けた最適化フレームワークの実用化

社会実装に向けた AI 支援多目的最適化フレームワークの実用化については、コンソーシアム会員の富士通が担当し、神戸大学と連携してフレームワークを構築した。Figure 2.2.1-7 に示す通りウェブベースでシステムは構築されている。車体形状 CAD データの入力と形状最適化をする部分を画面上で選択し、多目的最適化のパラメータを入力することで最適化エンジンとモーフィングソフトが自動で立ち上がり、CUBE を実行する。システムは AWS での実行を確認しており、今後、「富岳」にも移植する予定である。

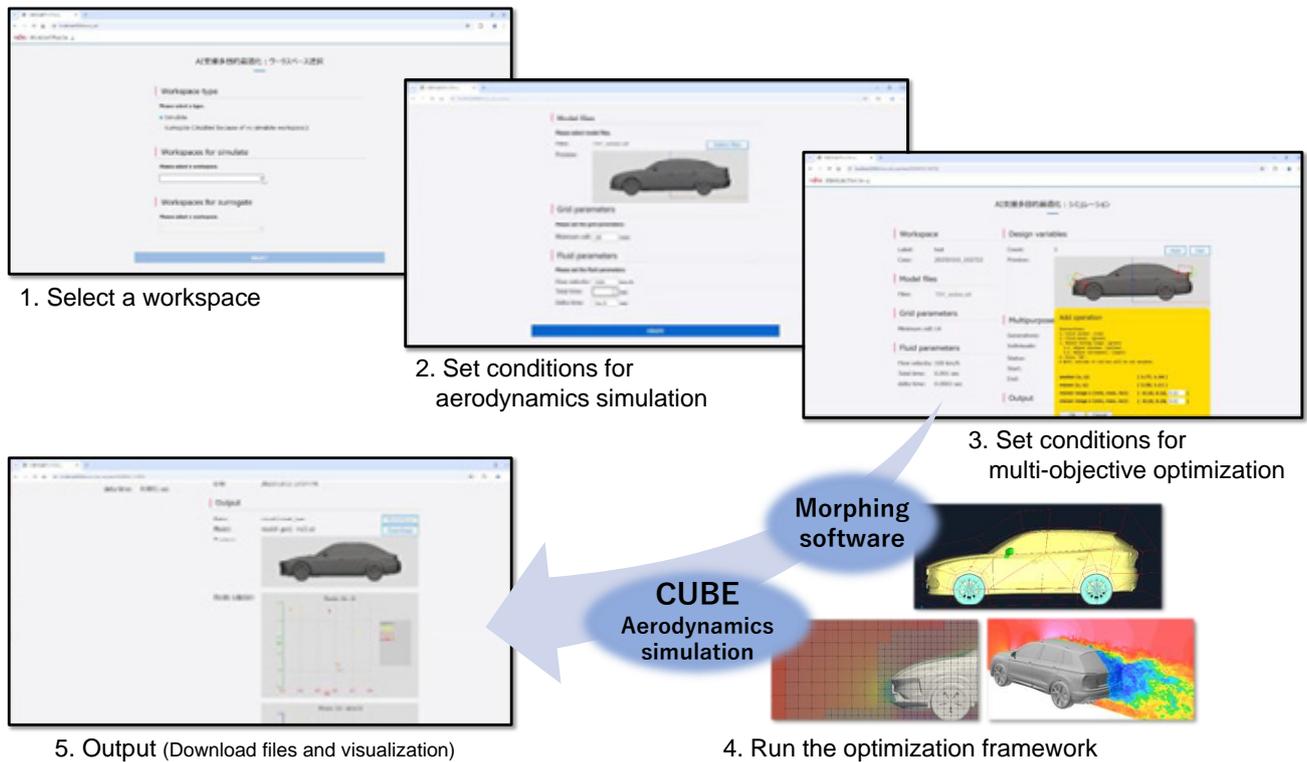


Figure 2.2.1-7 The developed web-based optimization platform.

(b)-3 意匠・空力性能空間の数理モデルの改良

(b)-3-1 意匠性空間の数理モデルの高度化

本年度は、アンケート調査の規模を拡大し、被験者数を 2400 名、評価対象車両を 100 台として、被験者 1 名あたり 10 台の車両外観の印象を評価する調査を行うことで、印象の主成分で構成される意匠性空間の信頼性向上を図った。このとき、SD 法において感性評価値の分布特性を再現するために必要とされる回答者数[1-1]を参考に、1 台あたりの各セグメントの評価者の概数を設定した。また、12 の印象形容詞について受けた印象の水準を問う設問に加え、「好み」の水準を問う設問を設定し、各被験者が持つ印象と選好特性の関係も調査可能とした。さらに、意匠性と関連性がある車体形状の特徴パラメータの値から、直接印象の定量評価値（アンケート調査結果における印象の主成分得点）を予測評価可能なニューラルネットワーク（多層パーセプトロン）による機械学習モデルを構築した。ここでは、学習モデルへの入力として、市販車両群の車体形状特性分析や多目的最適化における車体定義に用いた 33 個の車体のプロポーショナル項目（車体部位の寸法比や角度）へ新たに 8 項目を追加し、さらに車体寸法の絶対値を表すための車長を追加した、計 42 パラメータを入力として設定した。構築した機械学習モデルの予測精度について、Leave-One-Out 交差検証法による予測精度検証結果と、同モデルによりアンケート対象外の市販車両の印象評価結果を Figure 2.2.1-8 に示す。

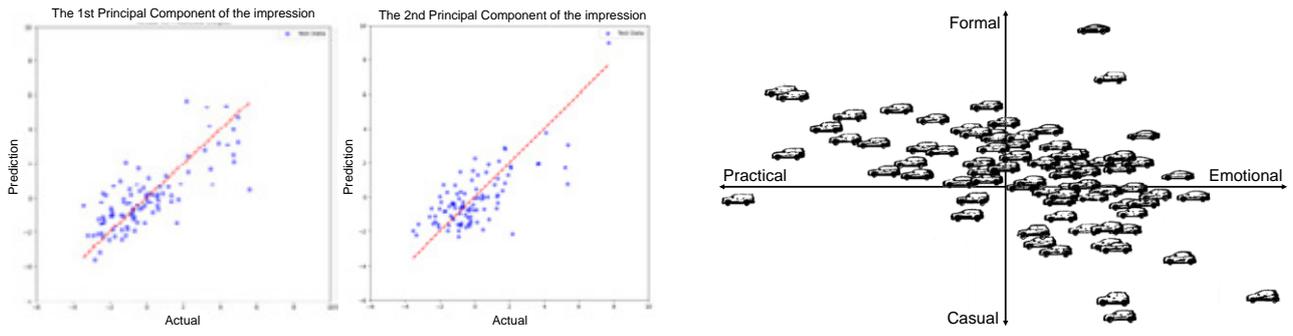


Figure 2.2.1-8 Prediction accuracy validation using the Leave-One-Out cross-validation for a machine learning model for evaluating the exterior impression from vehicle's body shape characteristics (left) and predicted impression of the vehicles not included in the survey (right).

(b)-3-2 空力性能空間の数理モデルのロバスト性評価

これまで「富岳」上での実装と性能最適化を行ってきたニューラルネットワークによる流れの縮約モデルについて、11台分の自動車車体形状データを使用し、形状変更時の流れ場予測に対するロバスト性を評価した。使用した車体形状データは、本年度実施した多目的最適化解析において設計変数とした、市販SUV車両群が持つ車体のプロポーション特性の主成分のうち、第1主成分の主成分得点のみを変更して生成したものである。これらの車両周囲に発生する乱流場の高精度シミュレーションを事前に実施し、うち6台分の周囲流れ場を学習させた縮約モデル（実験1）と2台分の周囲流れ場のみを学習させたモデル（実験2）を構築した。それぞれ学習時に使用していない車両の周囲流れ場に対し、各モデルを使って32個の変数に縮約したのちの流れ場の再現精度を評価した。例として、特定の形状（PC1_0.0）について縮約モデルにより32個の変数で再現した流速場及び渦度場をFigure 2.2.1-9に示す。結果として、6台分の周囲流れ場を学習させた実験1の方が2台分の周囲流れ場を学習したモデルよりも高い流れ場縮約性能を示すことが確認された。

Reconstructed Flow Fields for PC1_0.0

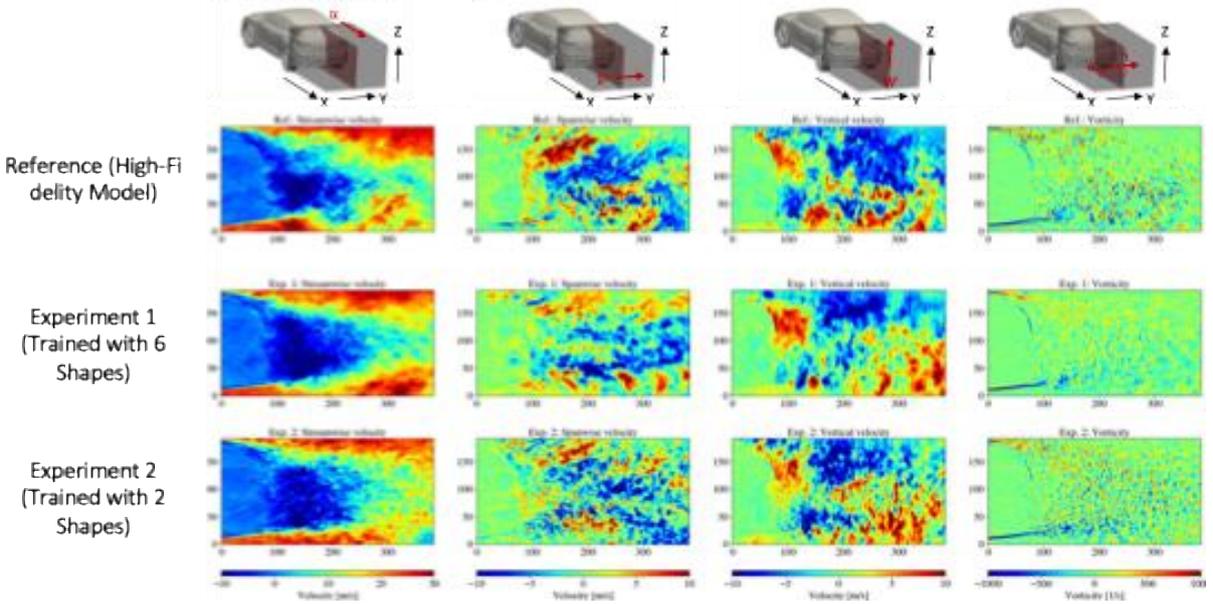


Figure 2.2.1-9 Reconstruction results of flow velocity and vorticity (Upper: Simulation results as reference, Middle: Experiment 1 (trained with 6 shapes), Lower: Experiment 2 (trained with 2 shapes)).

参考文献

[1-1] 高橋勝美ら, 日本機械学会論文集C編、79 (803), 2329-2337, (2013).

(2) サブ課題B「変容する都市・建築の自然擾乱対応の性能設計」 (協力機関: 横浜国立大学、近畿大学、お茶の水女子大学)

(a) 研究成果の要旨

データ科学に基づく分析とリスク共生のための手法に関するモデル開発について、アンサンブル評価や縮約モデルに基づき、自然擾乱下の実市街地・実建物に対するインパクト推定を行った。さらに、自然擾乱下の実市街地・実建物に対する防災設計への展開のために、耐風設計実務モデルでの流入条件の妥当性検討を行ったうえで、対洪水設計のためのモデルの適用法の検討、構造物の振動制御設計への適用方法の検討を行った。その結果、建築物の空力不安定振動現象が再現されるとともに、降雨モデルや二相流解析の実市街地への適用上の課題が明らかにされた。

また、都市における環境物理事象に対しては、気象擾乱を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法により暑熱リスク指標評価の高度化が行われるとともに、Breathabilityに基づく渋谷地区の変容市街地における換気のプロセスが明らかにされた。尚、ここでの解析には全て「富岳」を活用した。

For the development of models based on data science and methods for risk coexistence, impact estimation for actual urban areas buildings under natural disturbances was conducted based on ensemble evaluation and reduced order models. Furthermore, in order to develop the model for disaster prevention design for actual urban areas and buildings under natural disturbances, the validity of inflow conditions for the practical model of wind-resistant design was examined, and then the application method of the model for anti-flood design was studied and the application method for vibration control design of structures was examined. As a result, aerodynamically unstable vibration phenomena of buildings were reproduced, and issues in applying the rainfall model and two-phase flow analysis to real urban areas were clarified.

Furthermore, for the environmental physical phenomena in urban areas, a coupled analysis method of turbulent and radiative fields considering meteorological disturbances was used to improve the evaluation of heat risk indices, and the ventilation process in the transformed urban area of the Shibuya district was clarified based on the breathability of urban area. All simulations in this study were performed on the supercomputer "Fugaku."

(b) 本年度の内容

(b)-1 Data Scienceに基づく分析とリスク共生を実現するためのモデル開発

(b)-1-1 アンサンブルに基づいた台風構造特性の統計評価

近年、顕著な勢力を維持して上陸する台風が増加し、建築物の被害が広範に発生する事例が頻発しており、気象現象の影響下で都市域の上空に形成される気流構造や市街地空間内の風速変動に対する知見の重要性が高まっている。本研究では、東京都心に非常に接近した台風を再現した気象モデルによる大規模

アンサンブルデータセットから台風の性質等によって抽出された、特性の異なる解析アンサンブルを基に、気象擾乱構造を再現した流入変動風の作成と市街地の LES を気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法(Figure 2.2.2-1)[2-1]により実施した。今年度は、メンバー数の不足から十分に全体の特性を捉えられていなかったランダム抽出ケースについて、18 メンバー分の解析を追加実施してアンサンブルを拡充し、再度整理した結果に基づいて各アンサンブルの詳細な境界層構造特性、および市街地における非定常な風速・風圧変動特性の分析を行った。

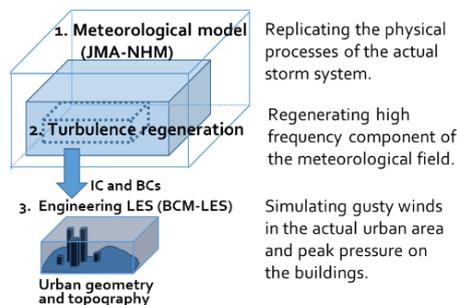


Figure 2.2.2-1 Framework of the hybrid meteorological/engineering LES method

本研究の解析アンサンブルは、気象研究所から提供を受けた 2019 年台風 19 号(T1919)の気象庁非静力学モデル(NHM)による 1km 解像度 1000 メンバーの大アンサンブルデータ[2-2]から、下記の条件でメンバー抽出を実施されたものである。

- (1) ランダム抽出ケース：1000 メンバーから無作為に選んだもの (28 メンバー)
- (2) 顕著事象ケース：東京都心の代表点として気象庁観測点「東京」の位置における 10 分毎の地上 10 m 風速の最大値が最も大きいもの (10 メンバー)
- (3) 実経路再現ケース：東京都心への最接近前後の 4 時刻(06:00, 09:00, 12:00, 15:00 UTC)における台風中心位置と気象庁ベストトラックデータの平均誤差が最も小さいもの (10 メンバー)

これらの解析アンサンブルは抽出条件の特性を反映し、以下のような境界層の構造を表現する。顕著事象ケースは、T1919 号のメソスケール構造により再現される範囲での特に顕著な強風事象が発生する場合であり、最大風速半径付近における境界層特性が再現されている。ランダム抽出に基づくアンサンブルは、台風が市街地のほぼ直下にある場合から 80km 以上離れた場合までの多様なメンバーを含むため多様なメンバーを含むが全体としては元のアンサンブルの確率分布特性を維持した上で、より一般的な台風時の強風特性を表すと考えられる。

さらに経路に基づいて抽出した実経路再現ケースは、顕著事象ケースよりも台風中心が市街地の近くを通過するケースである。境界層構造と関連していると考えられる台風中心から市街地までの距離、また方位や進行方向・速度を再現していることから、境界層構造や地上での風速変動特性も、実現象により近いものが再現されていることが期待される。

本研究では、抽出されたアンサンブル各メンバーについて、解像度 1 km のデータセットから、気象モデル気象庁非静力学モデル (NHM) を用いた解像度 250m、50m の高詳細な格子ダウンスケーリング解析を最接近時刻前後の時間帯に対して実施し、気象場の構造に基づく変動生成を行った。続いて、解像度 50 m の NHM 解析での対象市街地における風速時刻歴に基づいて、気象場の構造に基づいて対象市街地において最も顕著と判断される高風速の変動ピークを含む 10 分間を選択し、気象モデル・工学 LES ハイブ

リッド解析手法⁵⁾気象場の高波数成分の再生成を Table 2.2.2-1 に示した条件により実施した。

Table 2.2.2-1 Calculation conditions for the regeneration of high-wavenumber components of the meteorological field

Calculation domain	9.5 km (N-S) × 7 km (E-W) × 2.7 km Vertical range: 102 m - 2858 m
Horizontal resolution	25 m
Spatial discretization	4 th -order central difference scheme (velocity) 2 nd -order central difference scheme (temperature)
Time integration	2 nd -order Adams-Bashforth scheme
Duration for analysis	14 min (starting 2 min before the LES simulation)
Time step	0.02 s

高波数成分の再生成により得られた、気象擾乱構造を再現した流入変動風に基づく、台風境界層における風速場の構造特性に関するアンサンブル分析を行った。Figure 2.2.2-2 に解析アンサンブルケースごとの平均風速・乱流強度・平均風向の鉛直プロファイルを示す。

はじめに平均風速について述べる。ランダム抽出ケースでは台風から対象市街地の距離に分布があるため、様々な形状のプロファイルが混在しているが、多くは高度が上がるにつれて風速も上昇し、ベキ指数に近い傾向を示している。一方、顕著事象ケースと実経路再現ケースでは大半のメンバーで 500 m より低い位置に顕著な風速の極大が存在してシアが強まっている。これは台風壁雲付近における観測結果 [2-3] と類似した結果である。両ケースを比較すると、顕著事象ケースとして抽出されたメンバーは高さ 500 m 付近に明確なピークを持つ一方、実経路再現ケースでは風速の上昇する高度の範囲が広く、より低高度においても強風となる傾向が確認された。

平均風向のプロファイルについては、ランダム抽出ケースではおおむね高度 700 m 以上で風向が一定となるのに対し、顕著事象ケースでは上空 1400 m 付近、実経路再現ケースも上空 1000 m 付近まで風向に基づくシアも存在しており、ロール渦等のコヒーレントな構造の形成の要因となっている可能性がある。

最後に乱流強度について比較をすると、ランダム抽出ケースと実経路再現ケースでは高度 600 m 以上の乱流強度は小さくなっているが、顕著事象ケースのみ 1200 m 付近の高度まで比較的高い乱流強度が維持されている。顕著事象ケースとして抽出したメンバーではより大きなスケールのコヒーレント構造があることを示唆している。

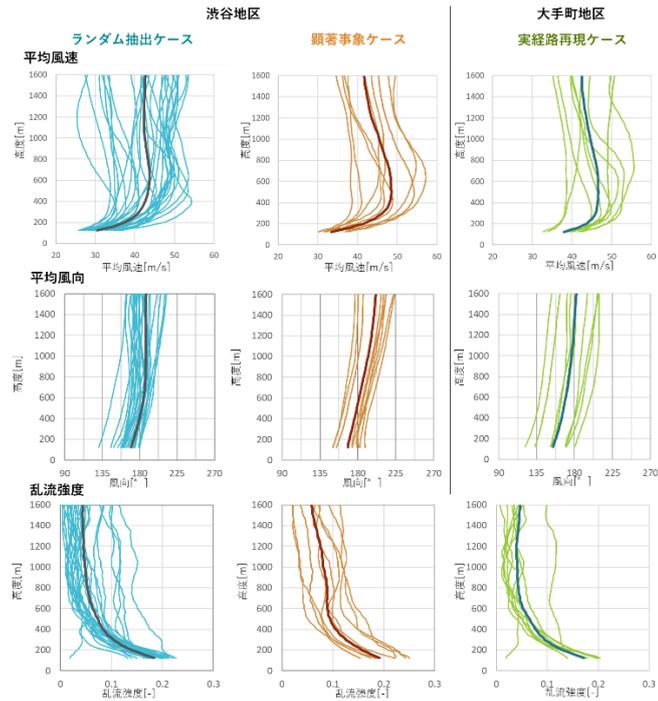


Figure 2.2.2-2 Vertical profiles of mean wind speed, mean wind direction and turbulence intensity for each ensemble case. (The thick line denotes the ensemble mean.)

上記の特性を持つ境界層内の風速場構造の例として、Figure 2.2.2-3 に各解析アンサンブルケースの典型的なメンバーでの東西方向の鉛直断面（スパン方向におおむね相当）における速度絶対値の分布と高度400m以下の領域における強風構造のボリュームレンダリングを示す。ランダム抽出では地表近傍に細かな渦が形成し、比較的計算領域全体に細かな強風の変動が発生する一方、顕著事象および実経路再現ケースでは境界層内の極大に対応する顕著な強風が主流方向に伸びる渦によって一定の範囲で継続的に吹き下ろされ、顕著事象ケースではより大きなスケールの縦渦が境界層内に見られた。

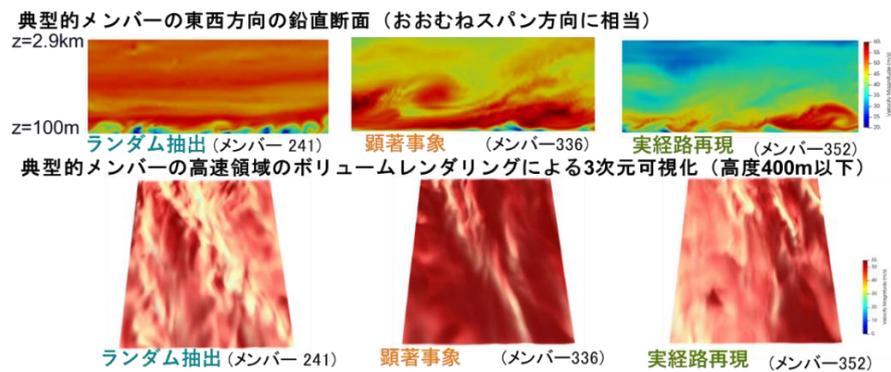


Figure 2.2.2-3 Visualization of fine-scale flow structures in the typhoon boundary layer of a typical member from each ensemble case.

(b)-1-2 顕著台風における実都市の乱流構造とピーク風速・風圧のアンサンブル推定

前節で分析結果を示した、台風の気象擾乱構造に基づく流入風を用いて、実市街地空間の LES 解析を実施した。実経路再現ケースについては、気象庁の観測点「東京」を含む大手町地区を対象に、実現象の強風特性の再現性やアンサンブルの持つ不確実性について分析を行った。一方、顕著事象ケースとランダム抽出ケースについては、高層から低層まで混在した密集実市街地である渋谷地区を対象に、気象場の影響を受けた都市空間における風速変動特性の評価、ピーク風圧特性についての解析を行った。

計算ソルバーには理研 R-CCS により開発された CUBE[2-4]を用いた。計算領域の寸法は南北 6 km、東西 3 km、鉛直方向 1.5 km である。計算格子幅は対象市街地の中心部では 1.5 m、周辺領域は 3m である。総格子数は約 2.5 億である。気象擾乱流入風は主な流入面および隣接する両側の計 3 面の側方境界（多くのケースでは南および東・西）から与えた。地表モデルは国土地理院の基盤地図による地形データと人工衛星測量から得られた建物形状データを組み合わせ作成した。Figure 2.2.2-4 に各対象市街地の地表モデルを示す。

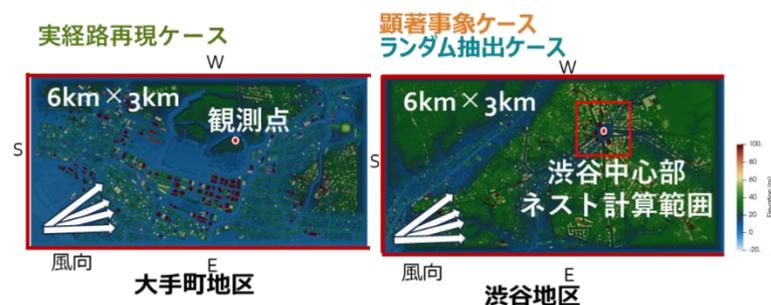


Figure 2.2.2-4 Surface models of the target areas for the urban LES

(b)-1-2-1 実事象の強風再現性と推定値の不確実性

はじめに、T1919 号の経路を再現し、風速変動特性についても再現性がより高いことが期待される実経路再現アンサンブルを用いて実事象の強風再現性と推定値の不確実性について評価を行った。

Figure 2.2.2-5 に、気象庁観測点「東京」の位置（地上 35 m）における、実経路再現ケース（10 メンバー）の 10 分間の風速統計値として、平均風速、最大瞬間風速、これらの比であるガストファクター、および平均風向、風向の時間変動の標準偏差を示す。

今回抽出された実経路再現ケースのアンサンブルは、各変数に対して色付きの帯により示された標準偏差の範囲内で観測値をほぼ捉えられており、アンサンブル平均値は観測値の比較的の精度よい推定値となっていることが確認される。観測値の情報不足やモデルの不完全性等によって台風の進路や強度にバイアスが生じることもあるが、データ同化手法が適切に機能している気象モデル解析においては、経路の再現性が良いメンバーに基づきアンサンブルを構築することで、本手法によって地表近傍での妥当な風速統計量の定量的推定が可能であることを示唆していると考えられる。

なお、平均風向のアンサンブル平均値は実現象より約 16°西側寄りのシフトが生じた。これは今回の再現対象の台風は市街地の非常に近くを通過する経路であったため、台風の眼が対象市街地を通過するケースでは、対象市街地を通過する比較的手前にある段階でピーク風速となり、風向が大きく西寄りとなったメンバーが含まれたことが原因と考えられる。

次に今回のアンサンブルの推定値のばらつきに着目すると、10 分間平均風速と最大瞬間風速の 10 メンバーの標準偏差はそれぞれのアンサンブル平均値の±20%程度、±10%程度に収まった一方、平均風向については前述の理由のため、ばらつきも大きくなった。これらのばらつきは、台風経路以外の気象場から生じる微細構造や乱流現象に由来する偶然的な不確定性と共に、メンバー抽出に使用したベストトラックデータ経路の精度（0.1 度単位）やアンサンブルサイズに依存するベストトラックとのずれなどの手法の制約に由来する情報の不足、すなわち認識論的不確定性が重なっているものと考えられる。

特定の建物の工学的な評価に用いる流入風の取得や、より厳密な実事象の再現を行う場合には、ピーク時刻の中心位置や中心気圧なども基準として用いながら、アンサンブル構築方法を精緻化することが望ましいと考えられる。

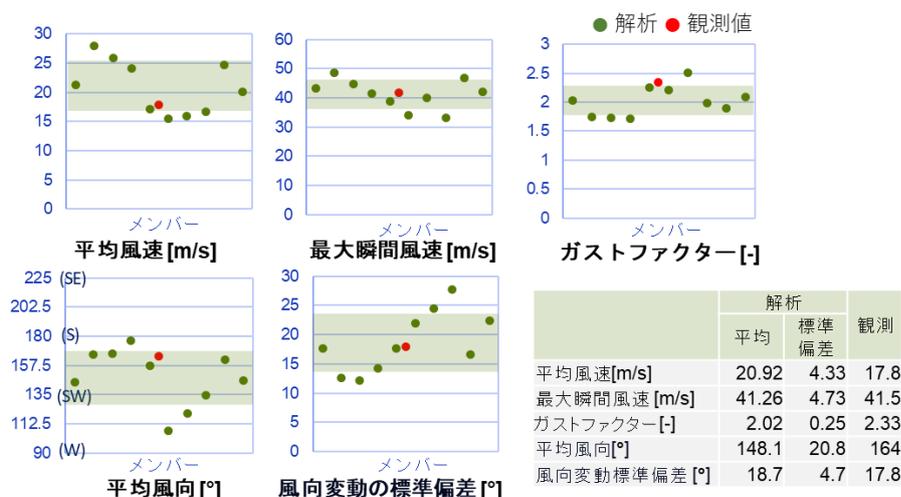


Figure 2.2.2-5 Evaluation of estimated turbulence statistics compared to the observations at the JMA Tokyo observation point. (The colored bands represent the ensemble standard deviation of the 10 members in the Actual Track Case.)

(b)-1-2-2 実市街地内部での風速変動のアンサンブル評価

次に、実市街地空間における気象擾乱下の強風特性についての評価を、ランダム抽出ケースと顕著事象の2 ケースを比較して渋谷地区を対象として行った。

Figure 2.2.2-6 に両ケースでの地上 100 m における評価時間 10 分間での平均風速と最大瞬間風速の空間分布の例として 1 つのメンバーの結果を示す。最大瞬間風速の空間分布を見ると、解析全体にわたって数百メートル程度の幅で細長く帯状に顕著に風速が上昇する複数の領域が両ケースで確認される。このことは市街地内の高層建物に作用する強風特性が、市街地の建物配置だけではなく、台風境界層の微細構造など流入変動風に含まれる上空の風速場の構造的特性により影響を受けていることを示唆している。

Figure 2.2.2-7 に各ケース 10 メンバーの渋谷地区、地上 100 m における 10 分の風速統計値として、平均風速・最大瞬間風速の空間平均値、ガストファクターの空間平均値と空間変動の標準偏差を示す。色付きの帯は、各ケースのアンサンブル平均値の 80%信頼区間を示す。なお、気象擾乱による強風発生 の位置には不確定性があるため街区内部 4 km×2 km の範囲で空間的に評価した。10 分平均値と最大瞬間風速は、抽出方法により期待される通り、顕著事象ケースでランダム抽出ケースに対して上記の信頼区間に基

づいて有意に上昇していることが確認される。(上昇率はそれぞれ 7%, 10%。)次に、風速変動特性の違いをガストファクターの統計値から分析した。ガストファクターの空間平均値は、統計的に有意ではない水準での上昇にとどまったが、ガストファクターの空間変動の標準偏差は有意に上昇した。このことは、より大きな瞬発的な強風変動が局所的に発生する傾向が強まったことを示しており、顕著事象時には局所的により最大瞬間風速が上昇する可能性があることがアンサンブルより示唆される。なお、今回の解析は局所的な変化が及ぼす影響を空間全体の統計値として見ているため、局所的な変化量はより大きいと考えられる。

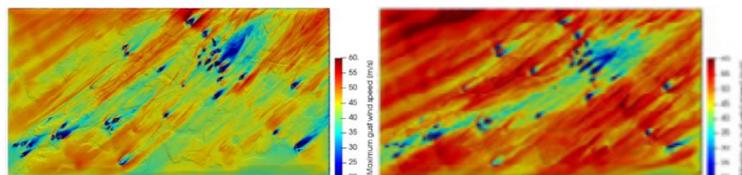


Figure 2.2.2-6 Example of the spatial distributions of mean wind speed and peak gust speed at an altitude of 100 m AGL in the Random Sampling Case (left) and the Significant Event Case (right).

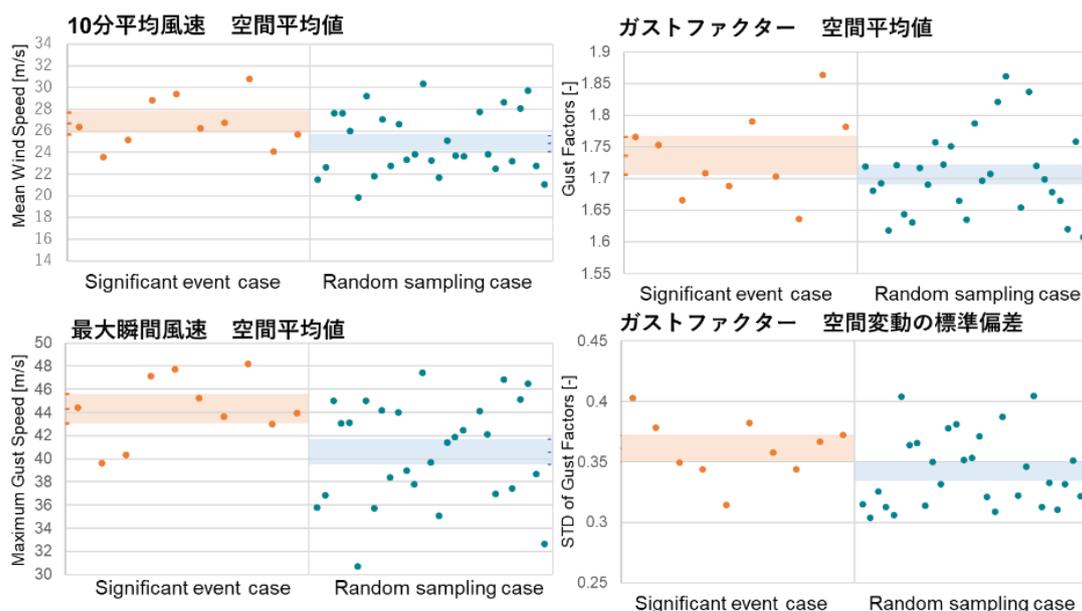


Figure 2.2.2-7 Spatial wind statistics (4 km × 2 km) at 100 m AGL in the Shibuya area for each member of the Significant Event Case and the Random Sampling Case

(b)-1-2-3 気象擾乱に基づいた市街地の強風構造の抽出

続いて、台風の微細構造に基づく市街地内の強風構造と発生事例の特徴を捉え、直接的に構造を抽出した上での定量評価を行う試行として、顕著事象ケースの中でも特に渋谷中心地で風速が上昇した事象の発生したメンバー（メンバー197）についてのケーススタディを行った。Figure 2.2.2-8 は渋谷中心部、高さ 240m における風速の時刻歴である。細かな乱れによる風速変動に対して、上空の気象場の構造に基づいた 10 分に近い長周期の大きな変動が重層していることが確認される。Figure 2.2.2-9 は渋谷中心部にお

いて顕著な強風が発生し、さらに対象建物でピーク風圧が発生した時刻（478 s）における風速場を水平断面（海拔 195m）とスパン方向の鉛直断面により可視化したものである。台風境界層内の風速と風向の大きなシアにより様々なスケールの循環が形成されており、境界層の中ほどで顕著に上昇している強風領域が渋谷中心部の高層建物周辺に局所的に吹き下ろしされる様子が確認された。

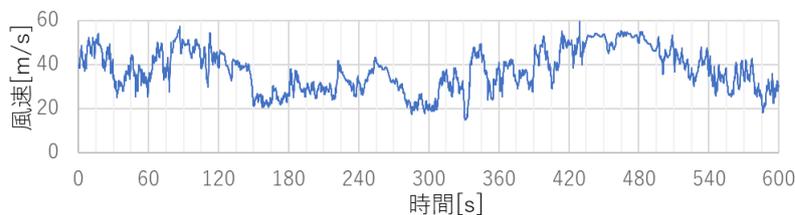


Figure 2.2.2-8 Time history of wind speed at an elevation of 240 m in central Shibuya

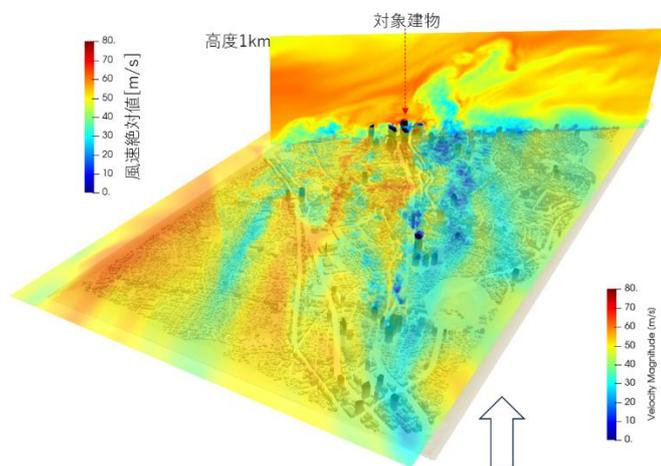


Figure 2.2.2-9 Vertical cross-section of instantaneous wind speed at 478 s during a strong wind event in central Shibuya

実都市における強風抽出の試行として、渋谷中心部で顕著な強風が発生したメンバー197における渋谷市街地上空の強風構造の固有値直交分解(POD)を用いた分析を行った。都市上空の気流構造に基づき高層建築物に作用する強風を分析する目的で、計算範囲全体（6km×3km）の高度 187.5m から 1500m の範囲の 2 秒間隔の 301 枚（600s 秒間）の速度場のスナップショットに基づき、15 次までのモード抽出を行った。

POD モード係数の時刻歴から、顕著な風速と風圧が発生した上記の時刻において、値が大きいものをピーク風速の発生に寄与の大きなモードとして選択した。Figure 2.2.2-10 にモード係数の大きい順に選択した 1 次、2 次、6 次および 9 次モードの南北方向の風速変動（おおむね主流方向に相当）の空間分布を示す。1 次モードはロール渦自体の構造、2 次モードは渦のスパン方向の並進移動、6 次と 9 次のモードは主流方向の非定常性や渦の角度変化を表現するものであることが推察される。また Figure 2.2.2-11 にはこれらの 4 モードの重ね合わせにより作成した低次元化モデルの上記の時刻における速度場の可視化結果を示す。対象建物上空付近に幅 700m 程度のロール渦が存在しており、これらの重ね合わせの結果±10-15m/s 程度の風速変動が局所的に生じていることが見積られる。

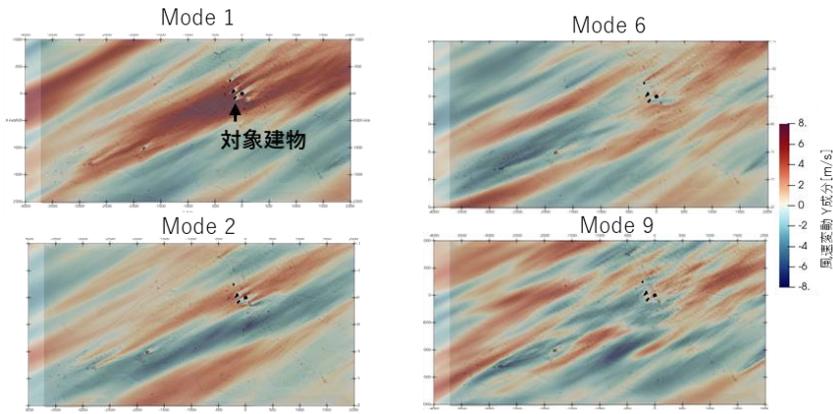


Figure 2.2.2-10 Spatial distribution of dominant modes contributing to peak wind in central Shibuya.

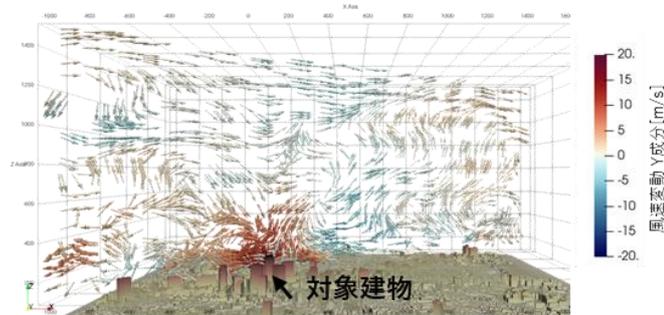


Figure 2.2.2-11 Visualization of vortex structures in the boundary layer using a reduced-order model based on the four extracted modes.

(b)-1-2-4 渋谷中心部における顕著な負圧の発生メカニズム解析

顕著事象ケースの10メンバーについて、市街地中心部に建つ高層建築物を対象に風圧のアンサンブル解析を行うため、詳細格子を用いたネスト計算領域において実施した。Figure 2.2.2-12 に計算領域内の建物配置と格子解像度分布を示す。計算領域の寸法は900m×900m×900m、最小解像度は88cm、総格子数は約2.4億である。初期・境界条件は外側の広域市街地解析の値とし、南、西、東の3面を流入面として接続した。

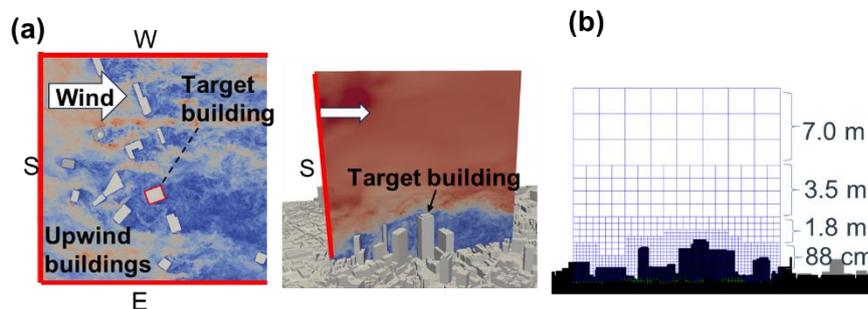


Figure 2.2.2-12 Nested domains for wind pressure analysis (a) building layout, (b) grid resolution distribution.

初めに建物表面のプローブ点に基づく風圧係数分布の分析を行った。Figure 2.2.2-13 には各メンバーの

ピーク負圧係数 \check{C}_p (平均化時間 0.3 s) のうち対象建物において特に強い負圧が発生したものの分布を示す。わずかな風向特性の違いによってメンバー間で分布に大きなばらつきが見られたが、 $\check{C}_p < -2$ を超える強い負圧は3例において高層棟の中間部の側面前縁に、1例において低層部と接続部付近の側面前縁に見られた。

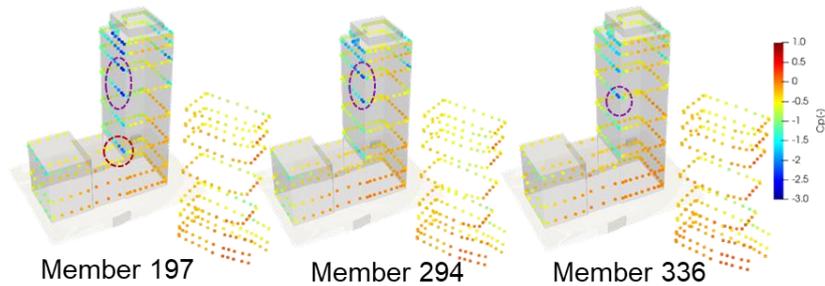


Figure 2.2.2-13 Peak negative pressure distribution around the target building (cases with significant peak values where $\check{C}_p < -2$)

続いて、顕著な負圧の発生を示したメンバー197 について、ピーク負圧の発生状況の分析を行った。Figure 2.2.2-9 にピーク風圧発生時の顕著な強風の瞬間場(478s)の可視化を示したが、Figure 2.2.2-14 には同時刻の建物近傍での流線と圧力の空間分布を示す。対象建物高層棟の正面で吹き下ろした流れが、中間高さにおいて側面に流下し、その際に顕著な負圧を持つ円錐状渦を形成していることが分かる。また低層棟の接続部付近においても、顕著な吹上流による剥離渦が形成していることが確認される。

これらの結果はピーク風圧の分布には、建物正面での下降流が関与しており、気象擾乱による吹き降ろしによる鉛直方向の風向変動の影響を受ける可能性が推察される。

さらに、ピーク負圧に寄与した気流構造を POD モード分解により詳細に分析するため、ピーク時間帯の 15s 間の対象建物と前方建物周辺、地上 309m までの速度場の空間データに基づいて 15 次までのモードを抽出した。15 次までのモードにより低次元化モデルにおいて、対象建物正面での吹き降ろしや側方への流下気流などの建物周辺のおおまかな非定常な気流挙動を再現された。このことから、風速場と同様に風圧ピーク時刻における寄与の大きいモードの抽出をモード係数の時刻歴に基づいて行った。Figure 2.2.2-15 には抽出したモードのうち、ピーク時刻の前後でモード係数の絶対値が大きくなったモード 8 の渦構造を渦度絶対値の等値面を示す。高層棟中間部付近から上部にかけてピークを発生させたとみられる円錐状の渦構造とともに、その根本付近の高さには建物に前方から接近する縦渦構造が存在することが示された。

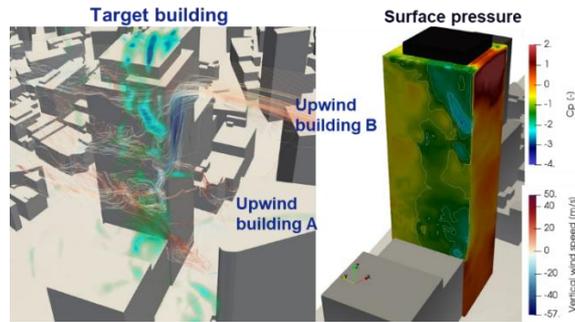


Figure 2.2.2-14 Streamlines and pressure field (volume rendering and surface pressure) at the time of peak negative pressure in Member 197.

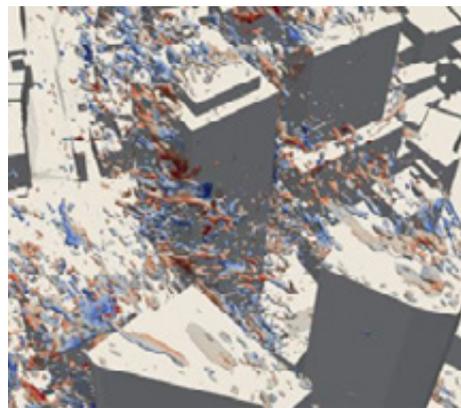


Figure 2.2.2-15 POD mode of the flow field around the buildings contributing flow structure at the time of peak pressure (8th mode, vorticity isosurface, color indicates vertical wind fluctuation)

(b)-1-3 複雑平面形状を有する建物における局所付属物の影響を考慮した後流の乱流構造の分析

高層建築物隅角部の形状を隅切り、隅欠き、隅丸などに変更することによる、空力特性の制御および風環境改善に対する有効性が知られている。特に、隅丸平面形状では、レイノルズ数や風向角などわずかな条件の変化によって非常に鋭敏に空力特性が変化する[2-5][2-6]ことに加え、建物表面の微細な凹凸形状も空力特性に影響を及ぼすと考えられる。しかし、高層建築物を対象とした隅丸平面形状に関する研究は限られており、都市乱流場における実建物の研究については殆ど例がない。

本研究では、実建物のファサード形状再現モデルに基づく LES により、曲面形状や表面の微細な凹凸形状を含む、実建物の極めて複雑な形状が空力特性に及ぼす影響を分析した。分析対象とした建物は高さ 330m、アスペクト比 4 の隅丸平面形状を有する高層建物である。隅丸半径は建物幅の約 15%で、建物表面に水平方向のリブ状付属物を有する。解析対象領域では広域の周辺建築物に起因する乱流構造の影響を受けるケースを想定し、風洞実験で再現が困難な広範囲な市街地領域（対象地から半径 1.2km 以内）の建物と地形を再現している。数値解析は風向 NNW および SSE を想定したケースを実施した。

Figure 2.2.2-16 に対象建物の中層部 $z/h=0.52$ (h : 建物高さ 330m) における平均風速分布を示す。風向 NNW では気流が風上側建物の影響を受け、対象建物の剥離せん断層は非対称となり、風上側建物の影響を受けない風向 SSE に比べて建物後方で強く巻き込んでいる。Figure 2.2.2-17 に対象建物の平均層抗力係数、変動層揚力係数を示す。風向 SSE の平均層抗力係数の分布は、単体の隅丸平面高層建築物を対象と

した既往の風洞実験結果[2-6]と類似した結果となっており、単体の角柱の風洞実験結果と比べ、平均層抗力係数は全体的に小さく、隅丸平面形状による抗力低減効果が本 LES でも再現されたものと確認できる。一方、風向 NNW では、平均層抗力係数は SSE に比べて小さく、変動層揚力係数は SSE に比べて大きくなった。これは、風上にある建物群による風速低減に加え、乱れの生成による乱流の影響により、剥離せん断層の乱流への遷移が促進されたためと考えられる。また、対象建物表面におけるリブ状の凹凸も、曲面形状表面の粗度として剥離せん断層の乱流化に寄与し、空力特性に影響を及ぼしている可能性がある。今後はこれらの効果を、隅丸角部での剥離や再付着位置、後流域の範囲など、流れパターンと併せて詳細に分析する予定である。

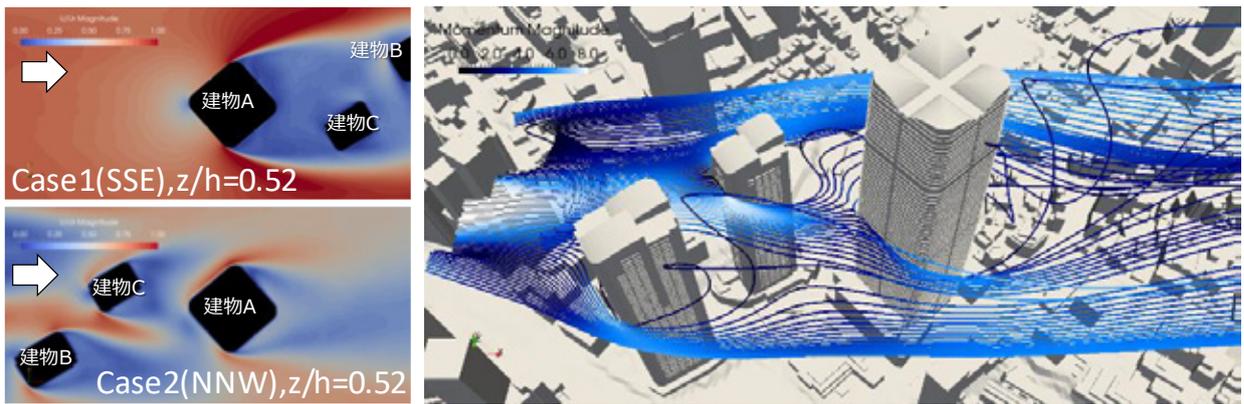


Figure 2.2.2-16 Horizontal distributions of mean wind velocity (NNW and SSE) and mean streamline (NNW)

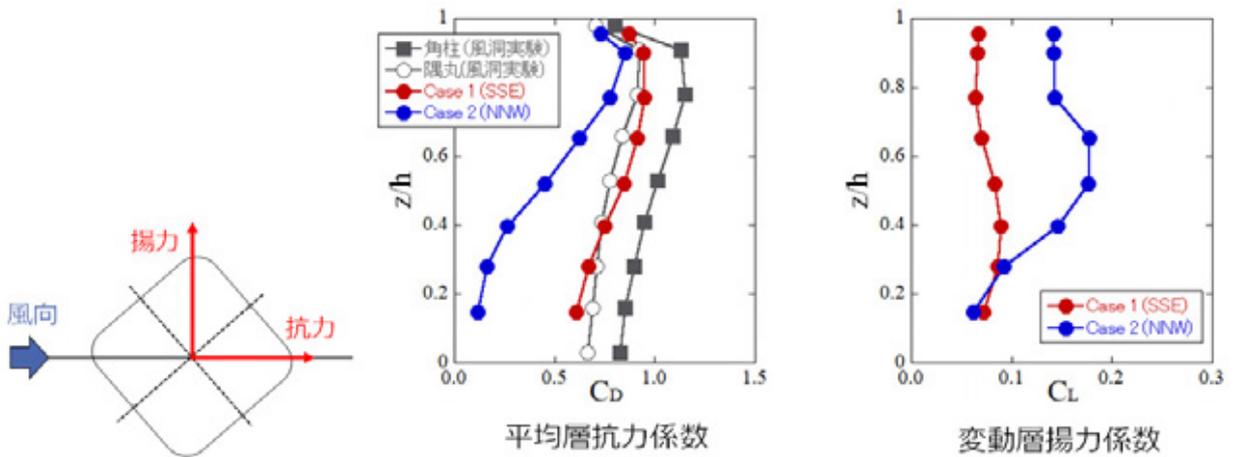


Figure 2.2.2-17 Vertical distributions of drag and lift coefficients

(b)-1-4 建物密集域における渦構造に関する縮約モデル (Reduced-order model) の作成 (POD、DMD)

都心部では再開発が進み、オープンスペースを有しながら複数の高層建築物が散在しつつあり、高層建築物群 (Building Cluster) を形成しつつあるが、Building Cluster 内の建物の風圧力の変動特性は複数の建物から発生する渦構造により影響を受ける。本研究では広範囲 LES により Building Cluster 内の乱流構造を明らかにしたうえで、その乱流構造が建物の風圧力の変動に及ぼす影響を固有直交分解 (POD) や動的モード分解 (DMD) に基づく縮約モデルにより明らかにする。対象市街地は高さ 330m の高層建築物を

中心とする半径 1.2km 以内の市街地で 150m を超える高層建築物が散在している。

Figure 2.2.2-18(a)には Building Cluster 内の乱流場と POD によって得られた縮約モデルを示す。POD では高さ 200m における 1000mx400m の領域の 1400 枚のデータを入力としている。Figure 2.2.2-18(b)では縮約モデルによって作成された対象建物の高さ 200m における層風力のパワースペクトルを示している。1 モードから 20 モードまでの縮約モデル (ROM1-20) では入力するデータの変動に占める対象建物後流の風速・圧力の変動の割合が小さく、建物の後流に基づく構造はあまり明瞭でない。一方で 1 モードから 80 モードまでの縮約モデル (ROM1-80) ではより細かな変動成分が再現されており、層風力のスペクトル性状でも、元の入力データにみられるピーク周波数が出現していることが確認できる。そこで本研究では 21 モードから 80 モードを合成した縮約モデルから、層風力のピーク周波数に対応する変動場を抽出した。その結果、幅の小さな建物から発生する風速の変動の構造が対象建物に接近する様子が確認されている。しかしながら、POD に基づく縮約モデルでは、モードと周波数の関係が明瞭ではないことが課題として挙げられる。

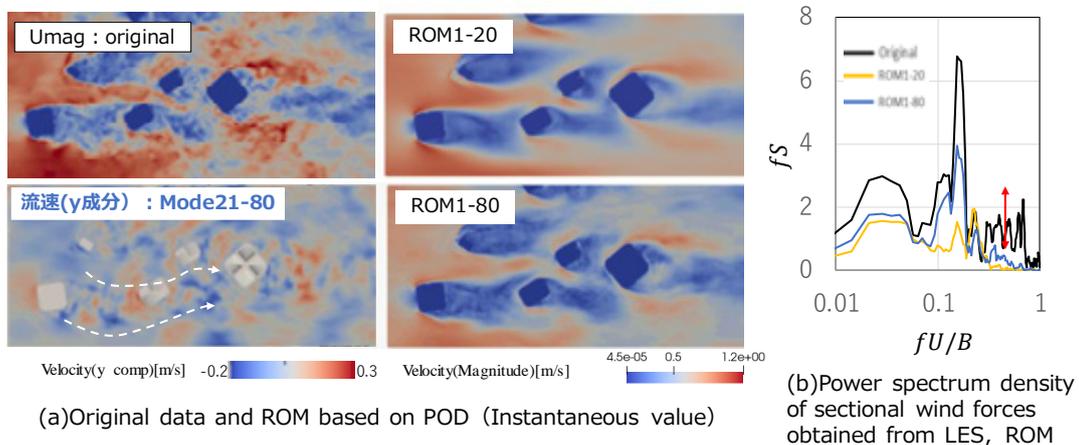


Figure 2.2.2-18 Turbulent flow field and reduced order model by POD in building cluster

そこで本研究では、流れ場に対し DMD (Dynamic Mode Decomposition) を適用することによって、層風力のピーク周波数に対応するモードの抽出を試みた。DMD は時間進行を $x_{n+1} = Ax_n$ という線形の dynamics において得られる行列 A について特異値分解を行うことにより、モード分解を行う手法である。また、特異値分解により得られる固有値が複素数となり、その虚部が周波数に対応することから、POD のような空間次元削減方法と時間のフーリエ解析を理想的に組み合わせる方法とされている。

今回の解析では、Figure 2.2.2-18 に示す高さ 200m の水平面の入力データの内、801-1200step の 400 ステップを入力として、DMD 解析を実施している。Figure 2.2.2-19 に固有値の分布を示す。

Figure 2.2.2-19 の固有値の分布の横軸 (実部) はモードの増幅率、縦軸 (虚部) はモードの角速度 (周波数) を示しており、ちょうど 76 モード目と 77 モード目が層風力のピーク周波数に相当する $St=0.167$ に対応しており、2 つのモードの固有値は共役複素数の関係にある。今回は、この 2 つのモードに基づき縮約モデルを作成した。

Figure 2.2.2-20 は DMD に基づく縮約モデル (ROM、76 モード目+77 モード目) である。構築された縮約モデルでは、対象建物の左上側と右下側に高風速の構造が周期的に出現している様子が確認された。

また建物前方の点の時系列を追跡すると、風直交方向の変動成分が、 $St=0.176$ に対応して変動している様子が確認できる。この高風速の構造が層風力の支配的な変動に寄与していることが示唆されるが、前方建物からの剥離の影響といった、発生要因などは現状では明瞭ではないことからその解釈についてはさらなる吟味が必要である。また今回の DMD 解析では入力データは風速のみであったことから、風速、圧力の物理量を入力した場合、圧力のみ入力した場合などのデータの入力方法の検討や風速の乱流構造と圧力の関係の分析などが課題である。

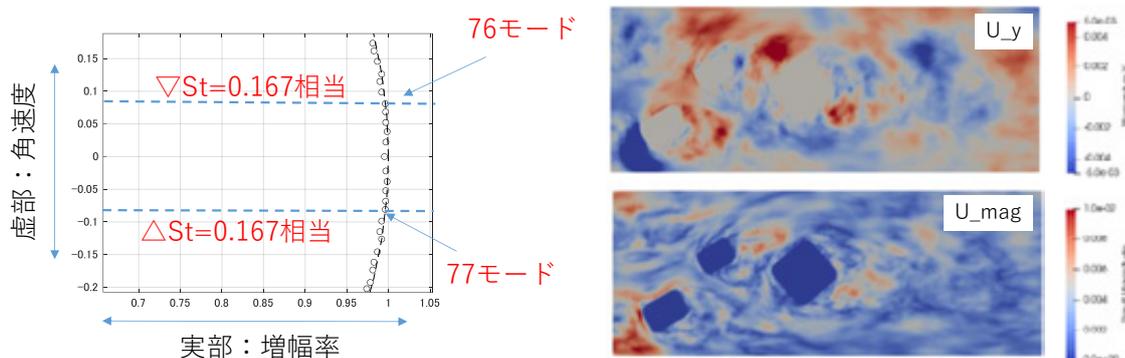


Figure 2.2.2-19 Distribution of eigenvalue and eigenvector (Mode 76) in DMD

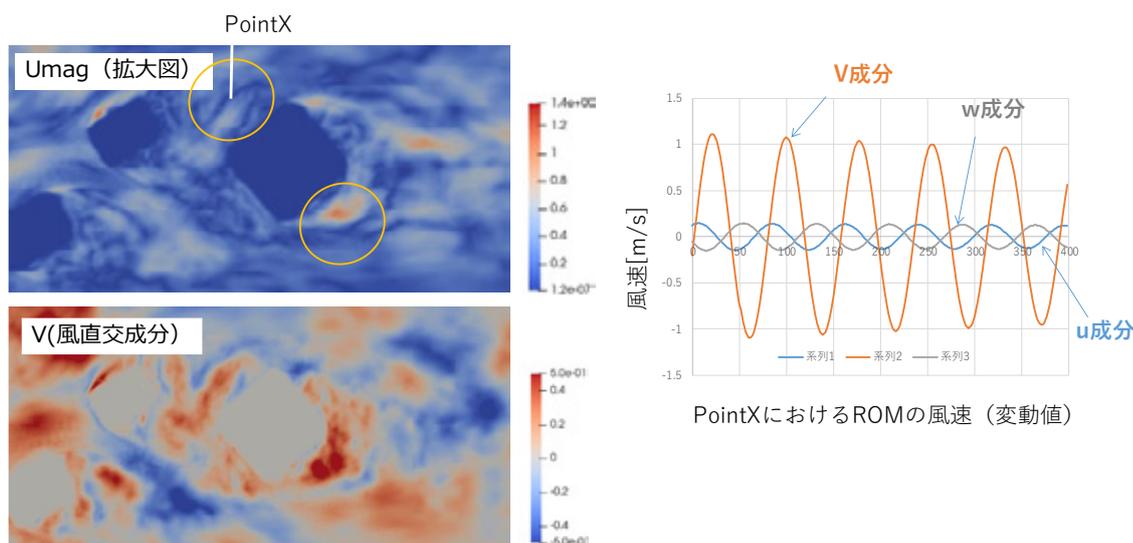


Figure 2.2.2-20 Reduced order model by DMD (Mode76 + Mode77)
(Horizontal distribution of velocity and time series of velocity)

(b)-2 耐風設計実務モデルでの流入条件の構築

(b)-2-1 フィルタリング・リスキューリング手法による流入条件の実務への適用

実建物の耐風性能については数値流体解析での風圧力の推定が実用化されているが、乱流境界層に基づく流入条件を用いた性能評価が一般的となっているが、実台風下での風圧力や実都市における風圧力については明らかにされていない部分が多い。Nakajima ら[2-7]によって解析されたメソ気象モデル (WRF-LES) によって得られた台風の気象場に対し、筆者らが提案した空間フィルタリング・リスキュー

リング手法[2-8]を適用することで、気象場に基づく風速の低周波な変動に高周波変動が付加された風速の時空間データを作成する。さらに、得られた時空間データを流入境界条件として理化学研究所 R-CCS が開発した CUBE を用いた広域市街地 LES を実施することにより、実市街地における粗度条件を再現し、台風下の都市境界層を再現する。再現された都市境界層の妥当性を実測結果との比較により明らかにしたうえで広域の LES 結果から流入変動風のデータベースを構築する。

Figure 2.2.2-21 は都市境界層内の風速について、広域市街地 LES、既往の観測データ（地点 K におけるドップラーライダーの観測結果[2-9]、東京都環境局の測定点、管区气象台、基地局観測点）との比較結果を示す。LES によって得られた風速と風向の鉛直プロファイルでは、気象場が持つ風速・風向の分布を維持しながらも、接地境界層の領域では、実市街地の粗度条件に対応した風速分布を再現していることが確認された。また、Figure 2.2.2-21 ではペントハウスや周辺建物などの影響を受ける低風速の観測結果には 20% を超える平均風速の差があるものの、東京タワーでの観測結果など高風速の地点では観測値と良い対応が得られている。

本解析によって得られた解析結果は東京都心部において高層建築の建設が想定される地区の耐風設計時の流入条件として利用される。Figure 2.2.2-22 では地区 B、地区 C の流入条件のサンプリング位置を示している。それぞれの位置において南南東に正対する面と西南西に正対する面の風速の時系列データをサンプリングしている。Figure 2.2.2-22 に点 K における風速のスペクトル分布を示す。本解析では数秒スケールに十分な変動が生成されていなかった WRF-LES の解析結果に数秒スケールの変動が空間フィルタリング・リスケーリング手法により付加されたうえで、実市街地を対象とした CUBE によって高解像度化された乱流場が作成されたことによりさらに 2 秒程度の変動まで乱流のカスケードが再現されている。

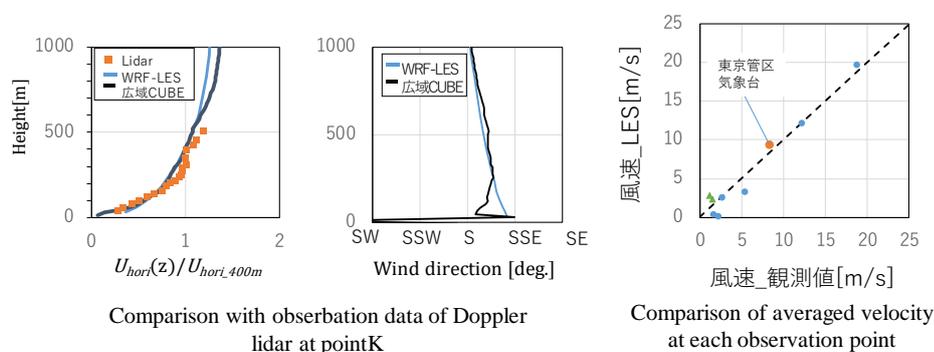


Figure 2.2.2-21 Comparison with observation data

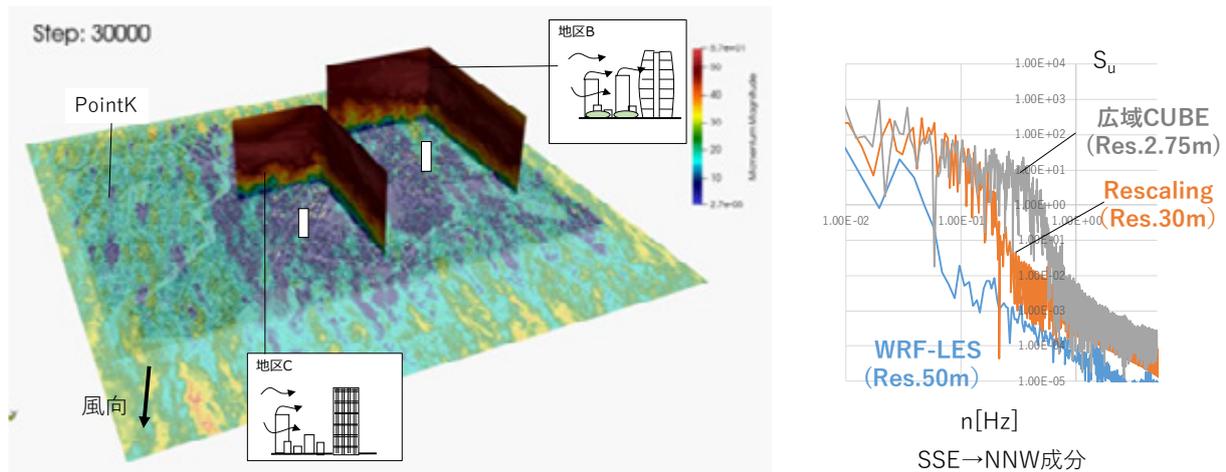


Figure 2.2.2-22 Database of inflow turbulence for each urban area(left) and comparison of power spectrum density at point K (Right)

(b)-2-2 気象モデル・LESの融合モデルによる流入変動風の高波数成分再現

従来、風工学分野において建築物の風荷重評価や都市の風環境評価は、一般に定常な乱流境界層中での風洞実験や数値解析によって行われている[2-10][2-11]。またその気流特性は、地表面粗度に応じて定められた平均風速と乱流強度の鉛直プロファイルにより表現される。通常時、気象場の変動のスケールは乱流スケールよりも著しく大きいこと、また気象場の影響を考慮する計算は、解析手法や結果の分析方法が一般的なものとして十分に確立しておらず、気象擾乱の構造と市街地の粗度に由来するコヒーレント構造との相互作用、市街地空間内における変動特性への影響などはほとんど明らかにされていない。

一方、気象分野では、台風やハリケーンなどの tropical cyclone の強風について、観測・数値解析を用いた先行研究によって、tropical cyclone 境界層中の直径数 km から数百 m の水平なロール渦[2-12][2-13]や、壁雲内の鉛直渦[2-14]などの tropical cyclone に特有の比較的微細なコヒーレント構造の存在が知られている。これらは強風を局所的に強め、地表での被害発生 の要因となっている可能性が指摘されてきた。さらに渦中心付近での鉛直プロファイルには、低層において鉛直プロファイルに顕著な風速の極大が発生し、一般に仮定されるべき指数型とは異なることが知られている[2-15]。近年、顕著な勢力を維持して上陸する台風の増加によって、建築物の強風被害が広範に発生する事例が頻発していることから、実在市街地に対する正確な強風リスク評価を行うため、気象現象の影響下で都市上空に形成される気流構造や市街地空間内の風速変動に対する知見の重要性が高まっている。

本節では、気象擾乱を考慮した評価を実現する方法の一つである、気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法 [2-1] を、気象モデルに適用し得られた台風境界層の結果を示し、その後、都市 LES により市街地内で吹走し得られた解析対象建物の接近流について、気象擾乱流入風と通常の定常乱流流入風での比較を示す。

気象モデル・工学 LES ハイブリッド解析手法では Figure 2.2.2-1 (b)-1 節) に示される計算の枠組みの通り、気象現象に基づく微細構造の再現と市街地気流や風圧の解析には、それぞれの物理過程の再現に必要な方程式系やスキームを備えた高解像度な気象モデルと LES 計算コードにより実施し、気象モデルの

時空間データを LES の流入条件として接続する際、乱流エネルギーのカスケード性に基づき、気象場で減衰しやすい乱流を再生成させる方法を用いている。

高波数成分の再生成は、気象モデル解析により表現される風速 \tilde{U} と、相当温位 $\tilde{\theta}$ （水蒸気の飽和した状態における断熱膨張と水の凝結熱を考慮したポテンシャル温度変数）を用いながら、同領域をより細かい格子で解いたときの風速 $\bar{U}(=\tilde{U}+\bar{u})$ と、相当温位 $\bar{\theta}(=\tilde{\theta}+\bar{\theta})$ が持つべき高波数成分 \bar{u} 、 $\bar{\theta}$ を、次式により解き実施している。

$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j - \tilde{U}_i \tilde{U}_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{P} - \tilde{P}) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \tilde{\tau}_{ij}) + \beta_v \bar{\theta} g \delta_{i3} + f_i$	
$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\theta} \bar{U}_j - \tilde{\theta} \tilde{U}_j) = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{h}_j - \tilde{h}_j)$	

ここで \bar{P} 、 \tilde{P} はそれぞれ元の気象場および高周波復元後の気象場の圧力である。Subgrid scale (SGS)項である $\bar{\tau}$ 、 \tilde{h} には標準 Smagorinsky モデルを、また $\tilde{\tau}$ 、 \tilde{h} はスケール相似則を用いた。風速場における浮力効果は Boussinesq 近似により与えており、 β_v は空気の体積膨張率、 g は重力加速度、 δ_{i3} は Kronecker のデルタである。さらに、高周波変動 \bar{u} については、 \bar{u} に気象場スケールのフィルタリングを施した \tilde{u} の時間平均が0に収束するよう、低波数成分をカットするための feed-back forcing のための項 f を付加している。

都市 LES 計算のための流入変動風は、再生成計算領域内で都市 LES 計算領域に合わせて主な流入面となる南面と東、西面の位置を設定し、計算開始2分後から14分間分の流入風データ取得した。

気象モデルでは地表の粗度は陽に再現されておらず、都市上空のコヒーレント構造や乱流特性を適切に表現することは困難である。このため、概ね地上100mより低い地表ごく近傍の領域は、本モデルによる再生成の計算の対象とせず、鉛直方向最下層点(102m)の瞬間値に基づいて、気象擾乱の構造をべき指数に基づいた内挿を行い、実際の市街地の粗度形状を再現した領域を都市 LES により十分吹走させることで気象擾乱に基づいた実市街地の変動を再現させた。

気象庁非静力学モデル(NHM)を用いて気象庁メソ解析を初期値として確定論的に1km,250m,50mの解像度により3段階のダウンスケーリングによって再現された2019年台風19号(T1919号)の気象解析データに対して、Table 2.2.2-2に示した条件により渋谷地区を対象とする高波数成分再生成を実施した。

Figure 2.2.2-23は、高さ300mにおける水平断面の高波数成分再生成前後の瞬間の風速場である。再生成前の流れ場には流れに沿って伸びた風速変動の中に構造の揺らぎや様々なスケールの渦状の変動が不鮮明に現れているが、再生成後、それらの構造が明確になり、さらに細かな乱れが付加されている様子が確認される。また時刻歴から高波数の変動が非定常に生成され、特にピーク風速がより鋭くなるような傾向を示している。

Table 2.2.2-2 Calculation conditions for turbulence regeneration.

Domain dimensions [grid points]	480 (N-S) *280 (E-W) *60 (vertical)
Horizontal grid spacing [m]	25
Vertical grid spacing [m]	18.1-70.5
Calculation period [min]	20:48:00 - 21:00:00 (JST)

Time step [s]	0.02s
Time integration	2 nd order Adams-Bashforth scheme (advection term) 1 st order Euler explicit (other terms)
Spatial discretization	4 th order central difference (velocity) 2 nd order central difference (temperature)
Pressure solver	SOR

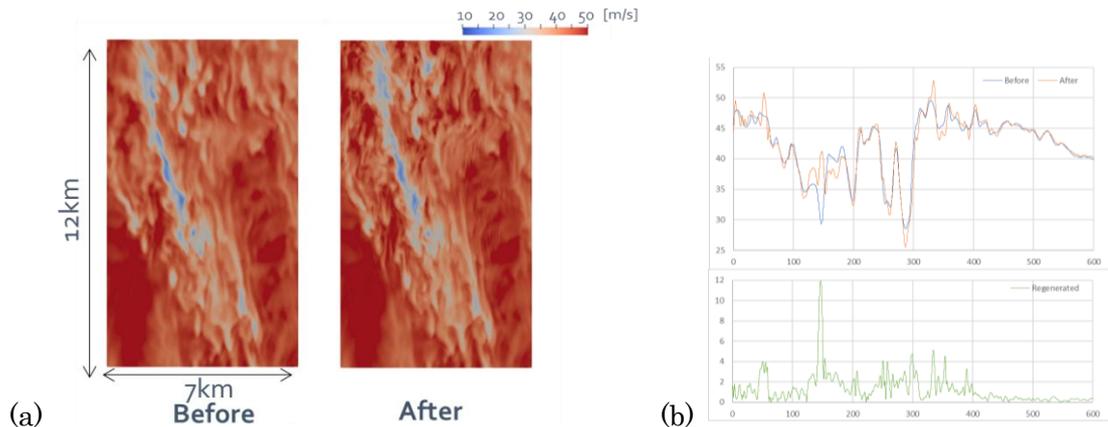


Figure 2.2.2-23 Regeneration of high-wavenumber components (a) Velocity magnitude in the horizontal section at an altitude of 300 m before and after regeneration (b) Time series of velocity magnitude before and after regeneration and magnitude of regenerated fluctuation components at 340 m

続いて、上記で得られた気象擾乱流入変動風を用いた LES 計算を Figure 2.2.2-24 に示す 6 km (N-S) × 3 km (E-W) × 1.5 km の計算領域で渋谷地区を対象に実施した(5.9 億格子、1.5m 解像度)。また本ケースについても渋谷の中心部については 1.9 km×1.9 km×0.95 km の範囲で細密格子によるネスト計算を行った (3.5 億格子、0.9 m 解像度)。また、これと比較する粗度区分 III 相当の定常乱流流入風 (べき指数 $\alpha=0.2$) による計算を行った。こちらの解析は一般的な風圧評価で行われる解析条件を再現し、Figure 2.2.2-24 に示した対象建物から半径 600 m 以内の地形と建物 (オレンジ色の線で囲まれたもの) が再現されたターンテーブル状の地形モデルを使用してほぼ同程度の 0.9 m の解像度の格子を用いて解析を実施した。また気象擾乱流入風ケースは実スケールでの解析を行っているのに対して、定常乱流流入ケースは 1:400 スケールでの解析である。このためため、両ケースでの風速比較は建物高さ(228m)での平均風速を合わせることで行う。

Figure 2.2.2-25 は対象建物から約 300m 風上側の対象建物高さ (228 m) における、気象擾乱流入風と通常の定常乱流流入風での風速・風向波形の比較を示す。30 秒平均の風速・風向の波形からは、1 分以上の明瞭な長周期変動成分が気象擾乱流入のケースでは存在していること、また 3 秒平均の風速波形からは、いずれのケースでも確認される数秒から数十秒周期の短い周期変動が、気象擾乱流入ケースでは水平・鉛直成分共に顕著に大きくなっていることが確認される。

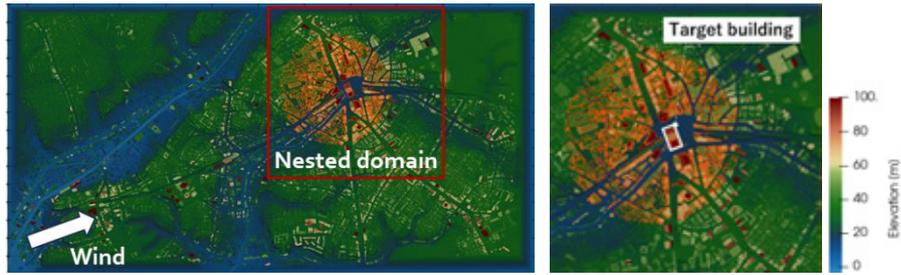


Figure 2.2.2-24 Surface model with buildings and topography: Outer computational domain (left) and nested inner domain (right)

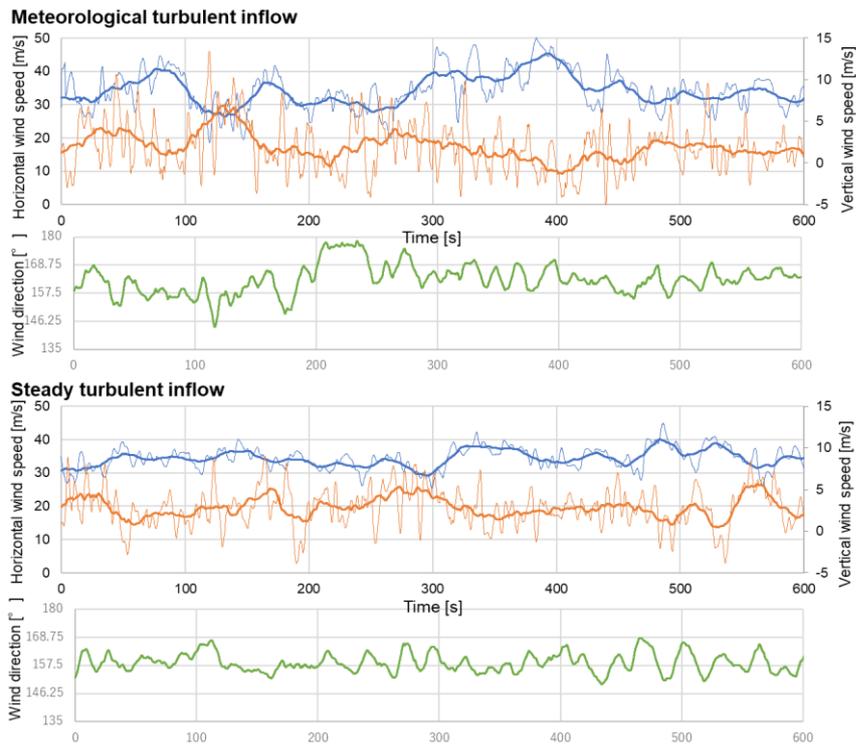


Figure 2.2.2-25 Time series of horizontal wind speed (blue), vertical wind speed (orange), and wind direction (green). The thick lines indicate the 30-s moving average, while the thin lines indicate the 3-s moving average.

(b)-3 建造物の空力振動制御設計への適用方法の検討

(b)-3-1 建築物を想定した流体-構造連成解析（三次元長方形柱、曲げ・捩れモード）

近年、建築物の高層化や形状の複雑化が進み、高次モードや捩れなどを含む複合的な空力不安定振動現象の予測やメカニズム解明、制御の重要性が増している。このような振動現象を再現可能な精緻な実験模型を用いた研究もこれまでに行われているが、研究や実務での検討がより広く行われるようになるためには、流体-構造連成シミュレーションは有効な手法として期待される。また数値解析による空力不安定解析は、これまでほとんどの場合境界適合格子を用いて行われてきたが[2-16]、近年、大規模数値流体計算での利用事例が増えている直交系格子と Immersed Boundary Method (IBM)を用いた連成により、複雑な実建物形状や実都市環境を想定した解析が可能になると考えられる。

本研究では、最も基本的な建物形状でありこれまでに様々な検討が行われている 3次元長方形角柱を

対象とし、丸川ら[2-17]が多質点系弾性模型による風洞実験を行ったアスペクト比 $H/\sqrt{BD}=5$ 、辺長比 $D/B=1/2$ および 2 (B :見附幅, D :奥行長, H :高さ) の条件において、構造-流体連成解析により、乱流境界層中での無次元風速と減衰定数による振動挙動の再現性を検証した。

解析方法として、理研 R-CCS が開発した CUBE に、多質点モデルによるディスクリットモデル (DM) による流体-構造連成計算を組み込んだ DM-CUBE を用いた。CUBE は階層直交型マルチブロック格子および Immersed Boundary Method (IBM) を採用し、大並列計算時にも高い計算性能を維持することができる。本手法では Figure 2.2.2-26 に示す解析手順により、初期時刻に、物体領域を表現するラグランジュマーカー粒子を流体計算格子ごとに 1 点配置し、流体計算と構造側の応答計算の結果に基づいて、各計算ステップで粒子の位置と速度を更新しながら、IBM に基づく境界条件を適用する。

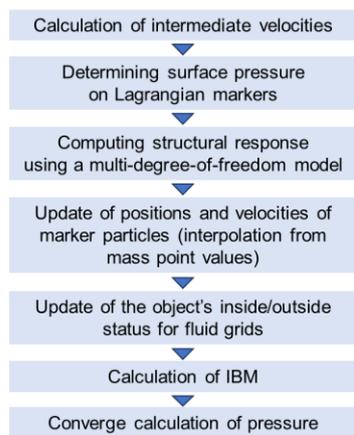


Figure 2.2.2-26 FSI algorithm of DM-CUBE

連成解析の構造応答計算は実験の多質点系模型(縮尺 1:500, $H=1$ m) に対応した長方形角柱を鉛直 6 質点でモデル化し、Newmark- β 法を用いたモーダル解析によって行った。考慮した振動モードとその固有振動数 f は、長辺方向の 1 次(5.25 Hz)と 2 次(13.152 Hz)、短辺方向の 1 次 (4.6 Hz) と 2 次 (11.75 Hz)、捩れ方向の 1 次(6.072 Hz)の 5 モードである。主流方向(x)と主流直交方向(y)、捩れ方向(θ)の振動を同時に計算した。無次元風速を変更する際には、各方向の振動数を一律に定数倍し変化させた。減衰定数は全モード 0.5 %を基本とし、変更時はこれらも全モードの値を一律に変化させた。Figure 2.2.2-27 に解析の計算格子分布を示す。格子解像度は長辺を 1/150 分割する程度とし、総格子数は辺長比 0.5 と 2 のケースでそれぞれ 5369 万格子、6378 万格子である。時間刻みは 2.5×10^{-5} s、時間積分は Adams-Bashforth 法とした。空間離散化には 2 次中心差分スキームを用いた。ただし対流項には安定化のため 1 次風上差分を 5%加えた。解析の流入変動風は、地表面粗度区分III (べき指数 $\alpha=0.20$) とした。実験気流 ($\alpha=0.17$) に比べてべき指数はやや大きい、Figure 2.2.2-28 の流入プロファイルが示す通り、高さ 100 mm (角柱高さの 10%) 以上では、平均風速、乱流強度ともに概ね一致している。

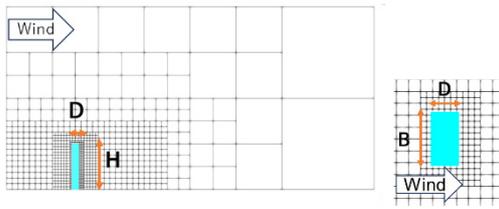


Figure 2.2.2-27 Example of grid resolution distribution. (Side ratio 0.5, showing only external calculation blocks which contain 16^3 grid points each.)

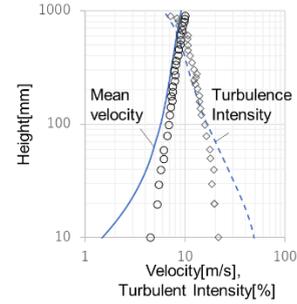


Figure 2.2.2-28 Comparison of the inflow wind vertical profile with the experiment [2-17] (Solid lines: analysis, markers: experiment; top mean wind speed $U_H = 9.2$ m/s.)

無次元風速・構造減衰に対する応答変化について実験との比較を行った。なお今回の条件では、2次モードの振幅が1次モードに比べて非常に小さかったため、以下では1次モードに着目して分析と考察を行う。

Figure 2.2.2-29は、辺長比1/2および2のケースにおける各卓越振動方向の最上層質点の無次元風速に対する変位標準偏差の関係を示す。なお図中の無次元風速は各振動方向（短辺、長辺、振れ）の固有周波数 f に基づいて定義されている。辺長比1/2では、風速上昇に伴い主流直交(y)方向に卓越した振動が発生した。解析結果は実験とよく対応し、減衰定数0.5%では無次元風速 $U_H/f_y\sqrt{BD} = 7$ ($U_H/f_yB = 5$)付近のカルマン渦励振の発生風速よりも低い領域で、実験と同様に低速ギャロッピングによるとみられる発散的な振動が確認された。また、減衰が増加すると発散振動の開始がより高風速側に移動し、振幅も実験と整合する形で小さくなった。そのほかの方向についても、各無次元風速における実験での振幅変化が定量的に精度よく再現された。Figure 2.2.2-30 (a)に示した無次元風速 $U_H/f_y\sqrt{BD} = 8.2$ ($U_H/f_yB = 5.8$)では、前縁から発生した剥離せん断層が振動方向の側面において角柱により近づき負圧が強まっていることが確認される。

辺長比2のケースについて、初めに丸川らの実験結果を確認すると、振れ振動が減衰定数により異なる変化をしながら無次元風速の上昇と共に卓越することが分かる。0.5%の条件では、無次元風速 $U_H/f_\theta\sqrt{BD} = 4$ ($U_H/f_yB = 7.5$)付近で渦励振による振れ振動が発生する。無次元風速が上昇と共に振幅がばらつくようになり、さらに、無次元風速 $U_H/f_\theta\sqrt{A} = 7$ ($U_H/f_yB = 13.1$)付近から発散振動が発生する。一方、減衰比が1%を越えるケースでは、渦振動は発生せず、無次元風速 $U_H/f_\theta\sqrt{A} = 8$ ($U_H/f_yB = 15.0$)付近から振れフラッターのみが発生する。

今回の実験結果を見ると、減衰定数0.5%の条件では、無次元風速 $U_H/f_\theta\sqrt{A} = 4$ ($U_H/f_yB = 7.5$)付近から渦励振が発生し実験と一致した。一方、無次元風速 $U_H/f_\theta\sqrt{A} = 7$ ($U_H/f_yB = 13.1$)付近での不安定な振幅変化は見られず、発散的に振幅拡大した。挟間ら[2-18]の検証解析でも同様の傾向が確認されているほか、片桐ら[2-19]は固有振動数比の小さな違いによって発散挙動の変化があることを報告しており、この振幅変化が非常に敏感かつ不安定な現象であることが示唆される。減衰定数1.2%の条件では、 $U_H/f_\theta\sqrt{A} = 8$ ($U_H/f_yB = 15.0$)付近から振れフラッターによる発散振動が生じ、実験と同様の傾向を示した。その他の振動方向については、実験の振幅をほぼ定量的に再現した。Figure 2.2.2-30 (b)に無次元風速 $U_H/f_y\sqrt{BD} = 6.2$

($U_H/f_y B = 11.6$)の結果を示す。剥離渦の再付着が振動方向側の前縁付近のみで発生しており、これによりねじれの渦励振が継続的に発生していることが推察される。これらの結果から、辺長比 2 のケースにおいて渦励振と捩れフラッターの 2 種類の捩れ振動が再現されたことを確認した。ただし定量性や発生条件が厳格かつ不安定な現象の再現性には課題が残る。定常状態への到達やより厳密な実験条件の再現が今後の課題と考えられる。

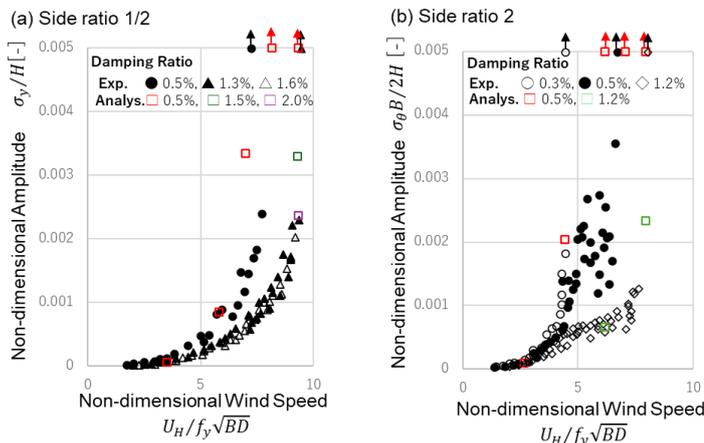


Figure 2.2.2-29 Comparison of non-dimensional amplitudes of the top mass point with experiment [2-17]. (Left) Side ratio 1/2, crosswind direction; (Right) Side ratio 2, torsional direction

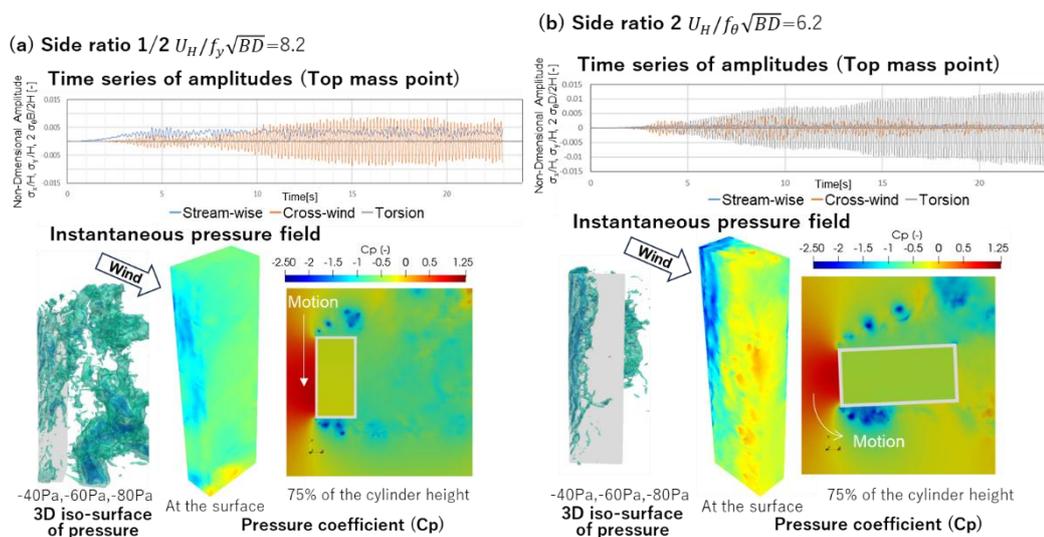


Figure 2.2.2-30 Time series of non-dimensional amplitudes and visualization of instantaneous pressure field

(b)-3-2 偏心を持つテーパ角柱：平面が変化する場所に発生する縦渦構造

本節では、上部に偏心及び段付き形状を有する高層建築物モデルの解析について報告する。計算モデルは、上部に異なる幅を持った角柱が、偏心しながら積層した形状となっている。Figure 2.2.2-31 に、モデル概要図を示す。昨年度は、各高さで周期の異なる渦構造が後流に放出されることで、上下で一貫したカルマン渦構造が形成されないこと、モデル上部が偏心を有することで段差部を有する側面とフラットな側面が生

じ、両側面で異なる渦構造が生成されること、段差を有する側面において、流れ方向に回転軸を持った特異な渦構造が発生し、風速のスペクトル分析において、各層の角柱幅に基づくストローハル数成分とは別の高周波数帯にピークを有する、あるいは各高さ側面より発生するカルマン渦と混合して周波数帯にずれが生じることなどを確認した。Figure 2.2.2-32 に、各層中心高さに設置した測定点より取得した時刻歴データを元に、各測定点を基準とした相関の鉛直分布を示す。各鉛直分布において、偏心により段付き部を有する側面(side1)の相関が、フラットな側面(Side2)と比較して明らかに下がっていることが確認できる。これは、各層で生成されたカルマン渦成分が、段差部より放出される流れ方向に回転軸を持った縦渦構造の干渉を受け、その構造が崩されたためであると考えられる。今期は、この段付き部から放出される、流れ方向に回転軸を持った渦構造の可視化・分析を詳細に行う為、角柱回りを一段階高解像度化した計算を実施した。格子解像度は角柱近傍で1層目の角柱幅に対してB/280、頂部の角柱幅に対してB/68とし、地表面粗度区分IIIを想定した乱流境界層中での計算を実施した。Figure 2.2.2-33 に、段差部に着目した流れ方向軸周りの渦構造の可視化図を示す。段差部を有する側面より、後方に伸びるような構造を持った、流れ方向に回転軸を持った渦構造が確認できる。これは、段差上部の正面にぶつかって下降した流れが、側面で縦渦として放出されたものであると考えられる。この渦は馬蹄渦(Horseshoe Vortex)のように見えるが、この渦と同様に段差前縁部で生成されると考えられる、自由端渦(Tip Vortex)は明瞭には確認されない。この渦は、アスペクト比が比較的大きい(4~6程度)角柱において、角柱上面の前縁から剥離した流れが後方で降下し、角柱背面の上部で局所的な負圧を発生させ、側面上部から剥離した流れがこの領域に引き込まれることで発生すると考えられているが、本計算モデルの1層目のアスペクト比は2.14程度と比較的小さいことに加え、上部に別の幅を持った角柱が積層する構造であるため、上部前縁で剥離した流れが背面に回り込みにくい形状であり、左右の剥離流が背面に引き込まれる可能性が低いことから、自由端渦は発生しにくい条件であると考えられる。しかし、これらの渦構造は同じ回転軸に同じ回転方向を持った渦構造であるため、両者が合成された形として、段差部より後方に存在することも考えられるため、今後はこの点をより詳細に分析する必要がある。

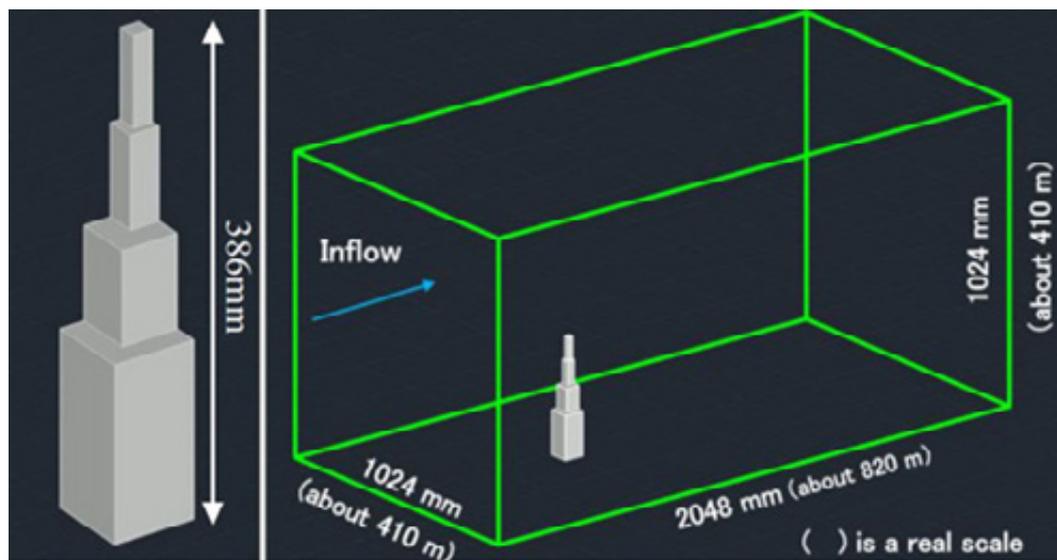


Figure 2.2.2-31 The outline of calculation model and calculation domain

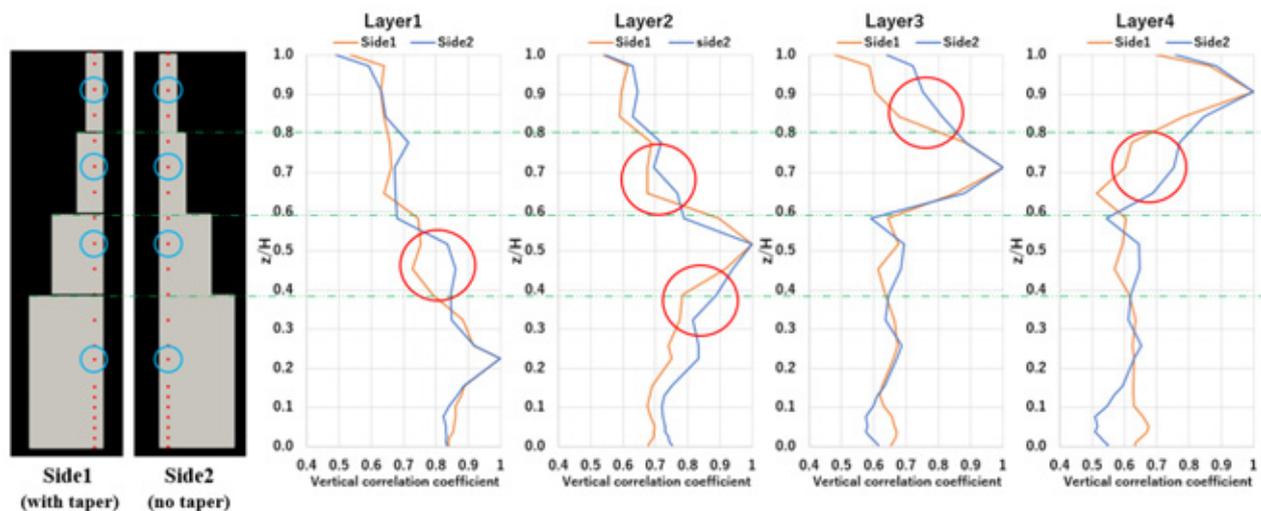


Figure 2.2.2-32 Vertical correlation of wind pressure at each height

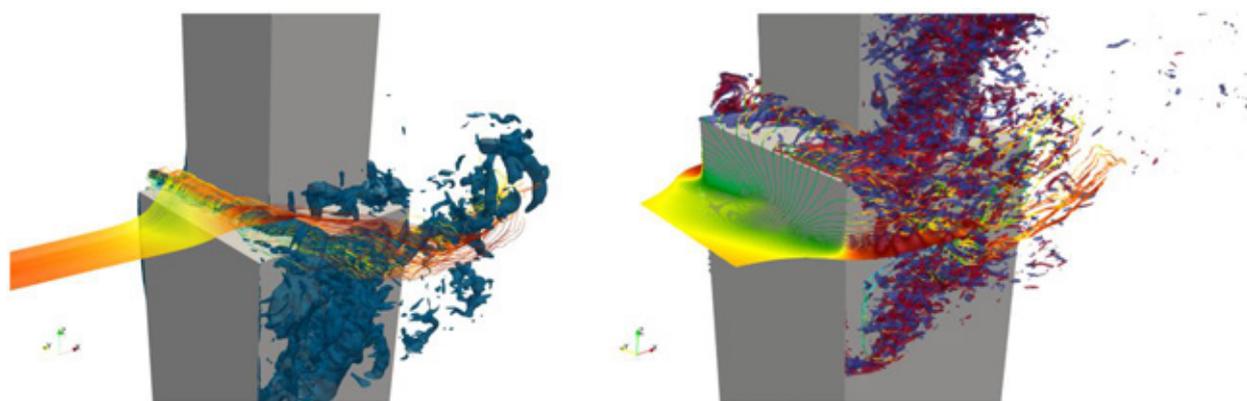


Figure 2.2.2-33 Three-dimensional vortex structure in tapered section
(Left: Pressure contour with streamline, Right: ω_x with stream line)

(b)-4 対豪雨・洪水設計のための数理モデルの適用法の検討

(b)-4-1 対豪雨設計のための降雨モデル (WDR) の適用性検証

風で流される降雨は、建築物の壁面に付着し、地表面に不均一に到達するなるなど、無風時の降雨とは全く異なる性状を示す。本節では、近年の極端気象による豪雨の頻発に鑑み、風の影響を受けた降雨 (Wind-driven rain、以下 WDR と示す) を CFD により予測できれば、建築物の雨水排水設備設計に有用であると考え、実際の低層市街地における WDR を気流の CFD と連成させて解析し、建物壁面に付着する降雨性状を実測結果と比較して予測精度を調査した結果を示す[2-20] [2-21]。

風の解析は、非圧縮粘性流体の支配方程式を PIMPLE 法により解く LES を行い、SGS モデルには WALE を用いた。雨滴の直径 (直径 0.3,1,2,3,4,5,6,7 mm) 毎に気流中の水の質量保存則と雨滴に作用する重力と抗力を導入した運動量保存則を時々刻々解いた。雨滴群の解析には Euler 法を用い、計算セルは風の解析と同一である。地表面や建築物の屋根面・壁面に付着する降雨量は、無風時の地表面に付着する降雨量を 1 とした基準化降雨量として示す。

解析対象は、鹿島建設技術研究所の西調布実験場を中心とした半径 500m の範囲の市街地とした。精度

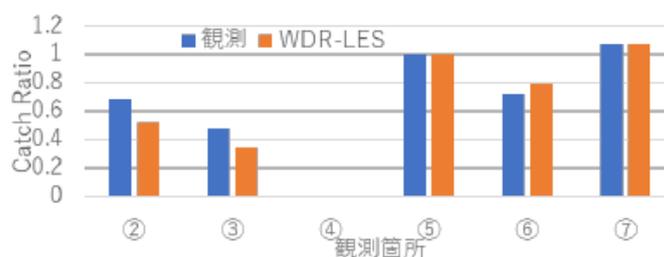
検証用の実測に合わせて、高さ 25m で風速 3.1m/s、東北東の風向きを与えた。降雨解析結果として雨滴直径 3 mm の場合の西調布実験場内の建物群に付着する降雨量を Figure 2.2.2-34 に示す。青矢印が風向を示すが、屋根面では塔屋の風下側で塔屋を剥離した流れが再付着する領域で降雨量が増えていることがわかる。また、風上壁面の上部で降雨が下面に比べて多く降雨が付着する性状が確認できる。

実測地点の①～⑦に関して、⑤は実験場内で一番高い場所であり他の建物の風の影響を受けにくいために実測および降雨解析ともに⑤の降雨量を 1 として他の測定点の降雨量（基準化降雨量）を求めている。④は屋外であるがガラス屋根の下であり降雨は実測・解析ともに降雨は観測されていない。22 号館の風上壁面で観測した⑦では、22 号館の風上壁面に当たった風が下降してくる場所なので鉛直方向の風が強められることで基準化降雨量は 1 を超えている。②③⑥はそれぞれ建物の風の影響を受けている。各地点の降雨量の相違を降雨解析はよく予測できていることが確認できた。



(a) Standardized rainfall distribution on roof and wall surfaces (Raindrop diameter of 3 mm)

(b) Observation points



(c) Comparison of catch ratio (Standardized by rainfall at ⑤)

Figure 2.2.2-34 Validation of rainfall analysis by comparison with observation data

(b)-4-2 CUBEを用いた気液二相流解析での解法の高度化

CUBE 気液二相流ソルバーにおいては、非圧縮を仮定した物質の運動に関する支配方程式(連続の式・運動量保存則)を空間平均化(混合化)することで得られる単一の質量保存式と運動量保存式に基づいて、気液の挙動について解析を行う。また、気体と液体の空間分布については、体積率を用いて表現を行う。なお、体積率とは、任意の空間領域(数値計算を行う際は計算セル内)を物質が占める体積の割合を示す物理量であり、この値は体積率に関する移流方程式を解くことによって求めることができる。

本年度は、この体積率に関する移流方程式の計算に関する高精度化のため、Piecewise Linear Interface Reconstruction 法(以下、PLIC 法)を文献[2-22]における 2.1 節並びに 3.1 節の内容をもとに導入し、その実

装の妥当性と有効性を確認した。実装した手法の妥当性、並びに、有効性を検証するため、3次元球の体積率移流計算を行なった。扱う問題としては、4[m]×4[m]×4[m]の立方体領域において、中心を(1.0,0,0)とし、半径が0.4mの剛体球が立方体領域の中心の周り(y軸周り)を剛体回転(x軸からz軸に向かう方向)する問題である。なお、剛体球については、体積率によってその形状と移動を表現する。以下のFigure 2.2.2-35に計算領域とそのcube分割の様子、加えて、初期の剛体球配置(体積率0.5の等値面)を示す。

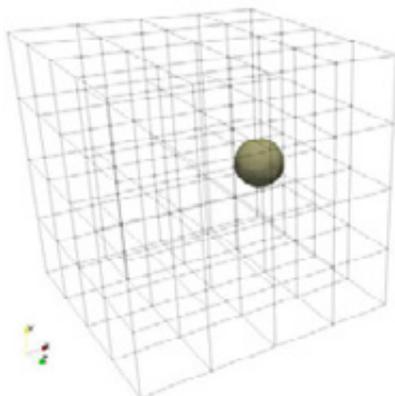


Figure 2.2.2-35 Division of cube and initial position of rigid sphere

格子サイズは62.5mmで均一であり、時間刻みは 1.0×10^{-4} sを用い、1.0 sを解析の終了時刻とした。なお、剛体回転を行う速度については解析初期に与え、その速度は時間によって変化しない、つまり、本解析においては流れ場(流速・圧力)の計算は行わない。また、体積率に関する境界条件としては、全領域に対してノイマン境界を与えた。

上記に示した解析条件での解析結果をFigure 2.2.2-36に示す。また、PLIC法との比較のため、従来のCUBEにおける解析で用いていた方法である、時間積分を2次精度アダムスバッシュフォース法、移流流束計算を5次精度WENOスキームによって同問題を解析した結果(以下、WENOスキームの結果と記載)をFigure 2.2.2-37に示す。

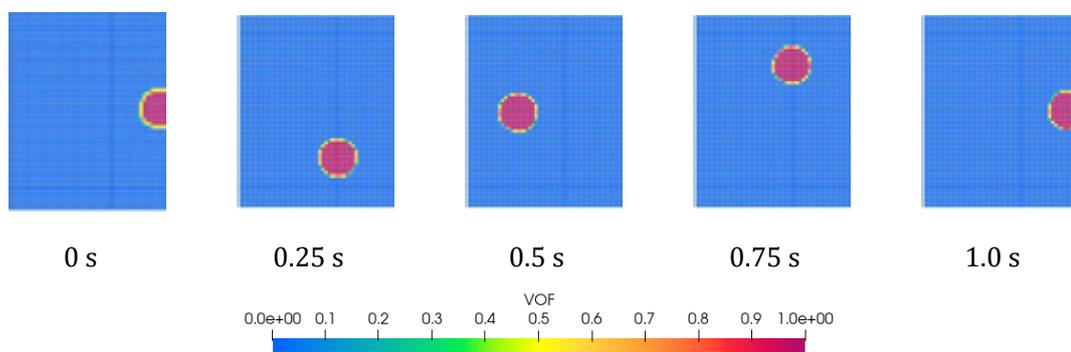


Figure 2.2.2-36 Variation of volume ratio distribution of rigid sphere by PLIC method: distribution in xz plane (y=0)

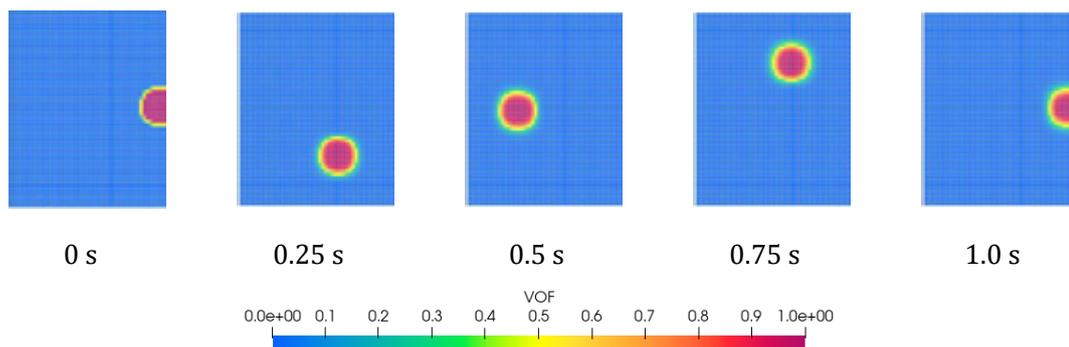


Figure 2.2.2-37 Variation of volume ratio distribution of rigid sphere by WENO scheme: distribution in xz plane ($y=0$)

Figure 2.2.2-37 より、WENO スキームを用いた場合、時間の経過に伴い数値拡散によって、剛体球中心から外部に向かって VOF 値(球の体積率)の分布が発生し、剛体球内部であっても VOF 値が 1 を下回ることが確認できる。一方、Figure 2.2.2-36 を確認すると、PLIC 法を用いることで、WENO スキームのような VOF 値の分布は発生せず、界面付近のセルのみ VOF 値(体積率)が 1 を下回り、剛体球内部の VOF 値は 1 となることが確認できる。

以上より、体積率移流計算に対する PLIC 法の実装の妥当性・有効性について、検証問題を用いて確認を行った。PLIC 法を導入することで、体積率の移流による数値拡散が抑えられ、高精度に計算が可能であることが確認できた。今後は、PLIC 法を実際の応用的な問題に適用することが考えられるが、複雑形状を Immersed Boundary 法によって与えた場合の適用性などについては、今後の検証・検討が必要であると考えられる。

(b)-4-3 FFR に基づく洪水解析の展開 (ダムブレイク・市街地)

非構造格子ソルバー Frontflow/Red に基づく浸水解析の展開例として、ダムブレイク問題の解析と武蔵小杉地区の解析を示す。ダムブレイク問題は実測に基づく圧力値との比較に基づく検証を実施している。また、浸水解析の実市街地への展開として武蔵小杉地区における解析例を提示し、適用性を検討する。VOF(volume of fluid)関数を用いることにより気液二相流を 1 流体モデルとして扱う。

本研究では単純な建物周りの浸水解析の検証として、ダム崩壊問題を取り上げる。また、初期の水位は 300mm とした。なお、本解析では等温場を仮定し、エネルギー方程式は解いていない。計算ステップ 20,000 は実時間で 2 秒となり、重力加速度と初期水位から見積もられる代表時間で無次元化すると、無次元時間 11.43 となる。

Lobovskýan らの実験[2-23]を対象とした VOF の分布と圧力センサーの時系列を Figure 2.2.2-38 に示す。ダムが崩壊し、液相の先端が-x 側の壁に到達し、上昇するところまでは実験を再現しているが、862.2ms 以降の上昇した液相が再び崩れるところからは再現ができていない。実験では 862.2ms 以降、気相が泡状になり、液相の中に入っている様子が確認できるが、CFD はこの現象を捉えるメッシュ、計算スキームだけでなく、物理モデルを考慮していないため、泡状の状態の再現ができなかったと考えられる。Sensor1 ~3 および 2L について、無次元時間で 2.5 付近での圧力の立ち上がりは再現できているが、ピーク値は低い値となっている。この原因として、メッシュの粗さが挙げられる。また、速度の移流項の離散スキーマ

ムに 2 次精度風上差分を採用しており、これが解を鈍らせたと考えられる。計算スキームについては、気相と液相の密度比が 1000 であり、計算を安定に進めつつ、現象をシャープに捉える方法を選択するには検討の余地がある。

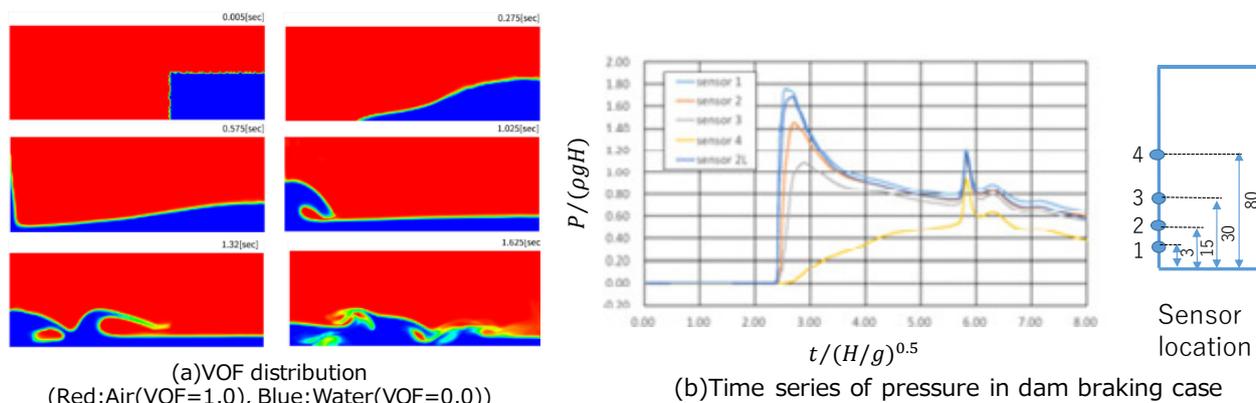


Figure 2.2.2-38 VOF distribution and time series of pressure in dam braking case

次に、浸水解析の実市街地への展開として武蔵小杉地区における解析例を提示し、適用性を検討する。対象は、武蔵小杉駅新南口および駅前広場周辺の 250m×200m 程度の小領域、武蔵小杉駅周辺の 800m×800m 程度の広領域とした。小領域においては武蔵小杉駅新南口の改札内部の一部を内部空間として再現する。水は解析領域に設置したマンホール相当の面から噴出するものとし、小領域では 2 箇所、広領域では 4 箇所とした。また、メッシュ分割については浸水が想定される地表近傍においては地面近傍については厚さ 10cm～約 14cm の境界層レイヤメッシュとし、地上 1.2m 以下を 10 層に分割している。水の噴出はマンホール 1 箇所あたり 1m³/s とした。空気の流入速度は 5m/s、積分時間は 10 分とし、時間刻みは 0.01 秒とした。Figure 2.2.2-39(a)に小領域での VOF 関数の等値面と内部領域への浸水の様子を示す。地形や構造物の標高の差異によりマンホールから噴出した水による浸水解析の実施が可能であることが示された。また、開放領域から内部領域への浸水の様子も再現可能であることが確認された。広領域の流れ場の様子として、高さ 10m における主流方向の速度と浸水の様子を Figure 2.2.2-39(b)(c)に示す。浸水解析では 2019 年の台風 19 号における浸水域と同様の浸水が再現されていることが確認された。一方で、高さ 10m の流速分布では流出側に振動のような非物理的な構造が確認されている。特に本解析では地表近傍の浸水領域において界面を解像する格子分割を行う必要があることから地表面に格子を寄せていることから、上空の格子サイズが通常の風解析と比較して粗くなっており、浸水面を改造する解像度と計算負荷に配慮した格子分割が今後の課題である。

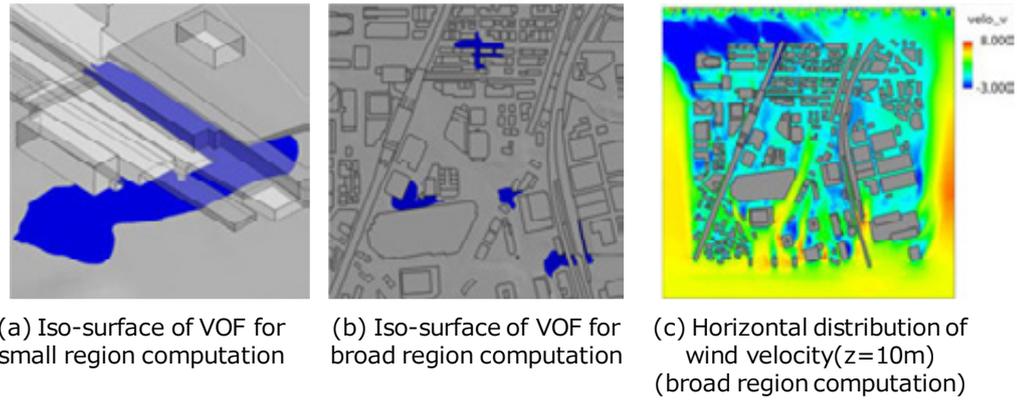


Figure 2.2.2-39 Iso-surface of VOF (0.8) and horizontal distribution of wind velocity(z=10m)

(b)-5 都市における環境的物理事象の解明

(b)-5-1 都市域における気象擾乱を考慮した乱流場・放射場の連成解析手法による暑熱リスク指標評価の高度化

猛暑時における実都市の温熱環境を精査することを目的とし、2018年7月23日に記録的猛暑が観測された東京都神田・北の丸エリアを対象として熱放射を考慮した LES[2-24]を実施し、MRT (平均放射温度) や WBGT (湿球黒球温度) を含む暑熱環境評価を行った。比較的風向が安定し(NNW)且つ気温が上昇過程にある 11:32~12:00 を解析時間帯とした。流入条件は昨年度までに実施した WRF-LES における風速・温位のデータに基づいて中立を仮定した河合・田村のフィルタリング・リスキューリング手法[2-8]の解析と非等温 LES に基づくドライバ解析を実施[2-25]し、流入風を接続している。解析モデルと解析領域を Figure 2.2.2-40 に示す。

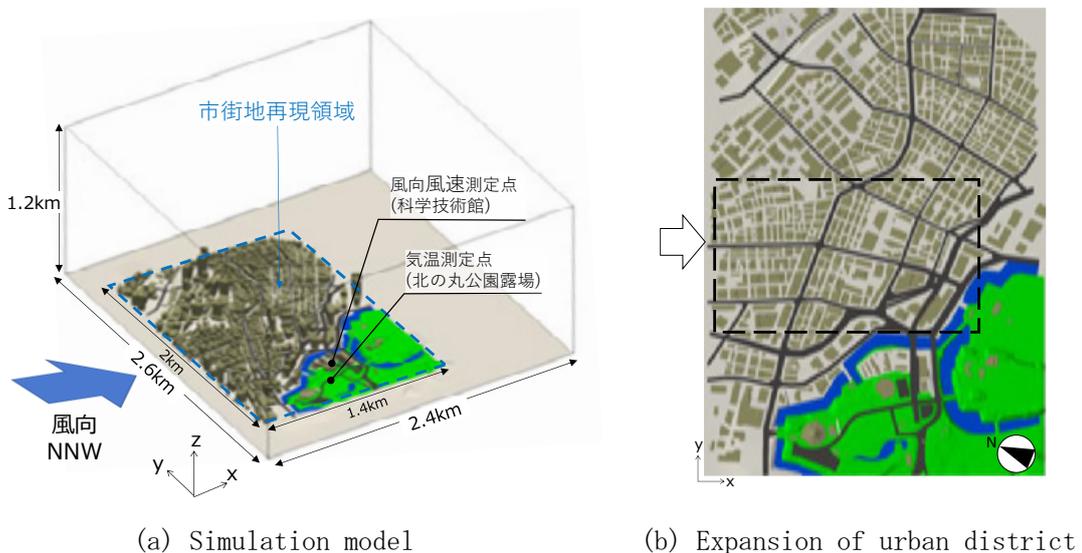


Figure 2.2.2-40 Simulation area, simulation model

猛暑時の都市域における暑熱環境を確認するため、市街地内の高さ 1.5m における風速、気温、平均放射温度 (MRT) と、風速・気温・MRT の瞬間値から換算した WBGT (以降、非定常 WBGT) の瞬間場を

確認した。屋外の日射がある場合、WBGTは湿球温度 T_w [°C]、黒球温度 T_g [°C]、気温 T_a [°C]の関数として、次式で示される[2-26]。本研究では非定常 WBGT の算出にも下記の式を用いた。ここでは数値解析結果から得られた気温 T_a 、風速 V 、MRT T_{MRT} と、気象観測値の相対湿度より、 T_g と T_w を求めた。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a$$

$z=1.5\text{m}$ （解析領域中央の市街地内 $GL+1.5\text{m}$ ）における風速、気温、平均放射温度 MRT と非定常 WBGT の瞬間場の例を Figure 2.2.2-41(a)~(d)に示す。図示した範囲は Figure 2.2.2-40(b)の点線枠内とする。気温分布（Figure 2.2.2-41(b)）を見ると、主要道路や高層建物後流域の低風速域で網目状に高温が分布している様子が見られる。これは弱風域において地面近傍で加熱された空気が浮力によって上昇していると考えられる。MRT 分布（Figure 2.2.2-41(d)）は直達日射の影響を強く受けており、主要道路や高層建物付近の開けた場所で日向の部分は $60\sim 65^\circ\text{C}$ 、図中央部の高層建物の日陰部分や図左側~中央の低層市街地の建物の陰となる部分、図右側の高架道路下は低い値となっている。一方、WBGT（Figure 2.2.2-41(d)）は日本生気象学会が定める日常生活に関する指針[2-26]の中で「嚴重警戒： 28°C 以上 31°C 未満」や「危険： 31°C 以上」の領域が、主要道路沿いや高層建物後流域のような弱風域で気温が高く MRT が高い場所（日向）に見られる。MRT の値が高いエリアの中でも非定常 WBGT の分布に差が見られ、非定常 WBGT は気温と同じような網目状の分布となっている。これは今回使用した非定常 WBGT の算出式の中で寄与率の高い湿球温度について、気温を関数としたモデル式を使用したため、非定常 WBGT は MRT 分布よりも気温分布の影響を強く受けていると考えられる。以上より、過去の猛暑日の市街地内の暑熱環境の詳細な時空間データを把握することができた。

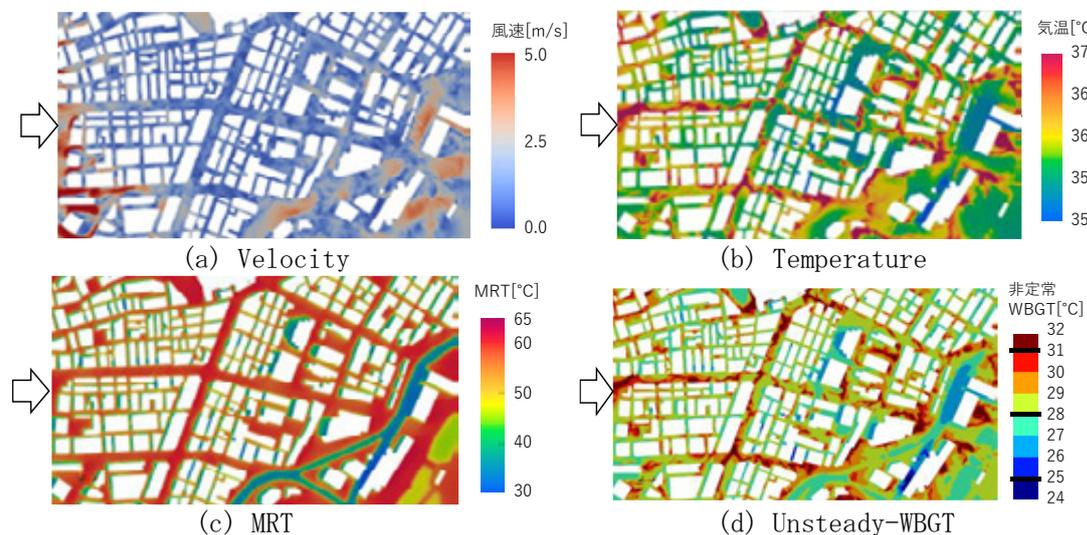


Figure 2.2.2-41 Velocity, temperature, MRT, and unsteady-WBGT in an urban district
(horizontal distribution at $z=1.5\text{ m}$, instantaneous fields at around 11:47)

また、植生モデルを北の丸公園を抜粋したモデルに適用したテスト解析を実施した（Figure 2.2.2-42 参照）。樹冠下の表面温度の低下（日影効果）等が再現されたことを確認した。市街地の複雑な乱流場・放射場の影響に加えて植生による効果も考慮することで都市の暑熱環境の再現精度向上を試みるとともに、

今後暑熱環境対策効果の評価を行う予定である。

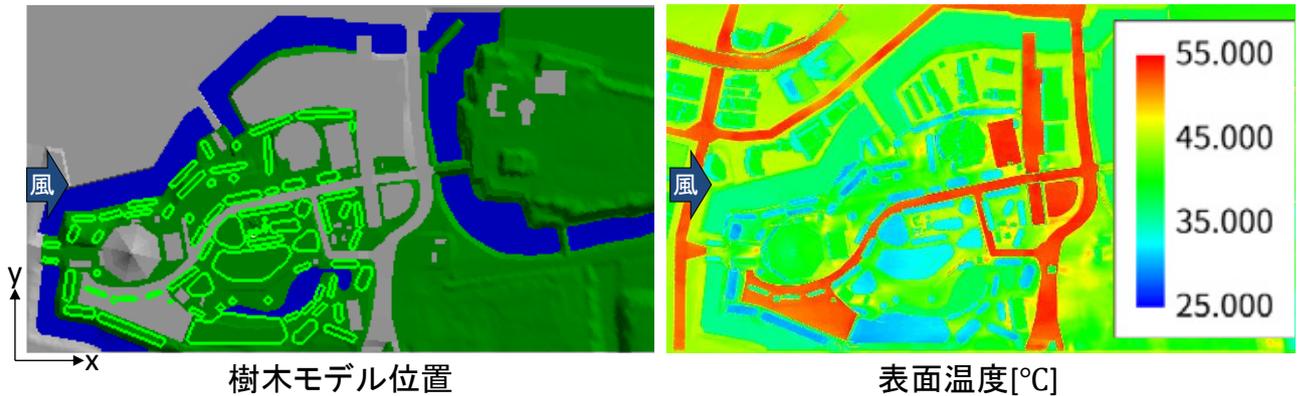


Figure 2.2.2-42 Location of plant model and test simulation result of surface temperature (plant canopy model in the Kitanomaru Park)

(b)-5-2 Breathabilityに基づく渋谷地区の変容市街地における換気性能の分析

暑熱リスクの低減や空気を介する健康問題の抑制は現代の都市が直面する重要な課題であり、市街地の換気性能の向上は、極端気象時の安全性確保などと両立が望まれる都市空間の変容の重要な方向性の一つである。特に面的に広がる大都市における換気性能指標として、都市キャノピー内外の流体交換や、地表近傍で発生する汚染質の除去と密接に関係する、鉛直方向の流体交換の促進に着目した都市の **breathability** という概念が提唱されている[2-27][2-28]。昨年度までに、本研究では東京都心の渋谷の実街区における換気性能や街区の変容に関する評価や換気メカニズムに関する分析を実施したが、街区の換気特性や全体的な改善を評価するためには、**breathability** として表現される鉛直流束と運動エネルギーの全輸送との関連を明確にすることが必要である。本年度は、同変容街区での換気性能について、水平輸送も含めた3次元のエネルギー収支と **breathability** の関連性について評価し、**breathability** を4成分に分解し、それらの空間分布の分析を行った。

解析は、高層建物に囲まれた高密中層街区としての特徴を持つ渋谷・桜坂地区の街区空間を対象に実時間で10分間分のデータに基づいて行った。計算には理研 R-CCS により開発された大規模並列計算用の流体解析ソルバーCUBEを用いた。市街地内部の格子解像度は実スケールで約88cm、総格子数は各ケース約3億から約4億である。空間離散化は2次中心差分により行い、移流項にのみ1次風上差分を5%付加した。時間積分にはCrank-Nicolson法を用い、時間刻みはCourant数が1以下になるように設定した。流入条件は野澤・田村[2-29]の準周期境界条件によりドライバ領域での解析で作成された地表粗度区分IIIの乱流境界層流を用いた。

Figure 2.2.2-43 に変容街区のモデルを示す。各街区モデルの建物容積は同等であり、衛星測量に基づく市街地の建物データと国土地理院による5m解像度の基盤地図に基づく地形を統合することにより1/400スケールで作成した。C0は現状街区のモデルであり、これと比較する変容街区形状として、従来の都市再開発で一般的な高層集約ケース(C1)と、鉛直方向の流体交換促進を意図して考案された、異なる高さの建物を組み合わせた中層街区を主流に直交する方向に配置したケース(C2)、および主流と平行に配置したケース(C3)を想定した。変容街区内部には、図中に赤色で示した、換気性能の評価領域(350m×200m)

を設定した。

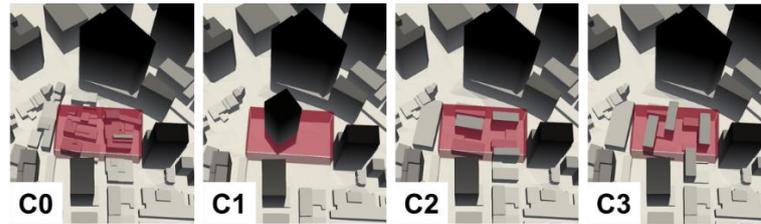


Figure 2.2.2-43 Cases of urban block configuration and region for evaluation of ventilation performance (350 m × 200 m)

本研究での換気性能の評価は、既往研究の文献を参考に、運動エネルギー $\langle u_i u_i \rangle$ に基づいて行った。j 方向の運動エネルギー流束は次式で表される。j=3 のとき鉛直方向の輸送を表し、breathability に相当する。

$$\left\langle \left(\frac{1}{2} u_i u_i \right) u_j \right\rangle = \frac{1}{2} \langle u_i \rangle \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle + \langle u_i \rangle \langle u_i u_j \rangle + \frac{1}{2} \langle u_i u_i \rangle \langle u_j \rangle + \frac{1}{2} \langle u_i u_i u_j \rangle$$

また運動エネルギーの流束は右辺の 4 項に分解することが可能である。これらは次のような意味を持つ。

MA $\frac{1}{2} \langle u_i \rangle \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle$: 平均流による運動エネルギーの移流

MD $\langle u_i \rangle \langle u_i u_j \rangle$: 平均流に伴って生じるレイノルズ応力による運動エネルギーの拡散

TA $\frac{1}{2} \langle u_i u_i \rangle \langle u_j \rangle$: 変動風速による運動エネルギーの移流

TD $\frac{1}{2} \langle u_i u_i u_j \rangle$: 変動風速に伴って生じるレイノルズ応力による運動エネルギーの拡散

はじめに、全方向の運動エネルギー流束を考慮した換気性能評価を行った。Figure 2.2.2-44 に、各変容街区の評価範囲に設定したコントロールボリュームにおける、運動エネルギーの全方向の収支を運動エネルギーの流入量と流出量の比較を示す。グラフは、側方境界を通した水平方向、上方境界を通した鉛直方向の成分に分けて示し、breathability は上方境界を通したエネルギー流入・流出と対応している。Figure 2.2.2-45 には各境界面で流入・流出する運動エネルギー流束の分布を示す。各面においてエネルギーの流入（正值）となる部分を、流出（負値）となる部分を赤色で示した。

上方境界を海拔 24m（地上約 9m）に設定し、地表近傍に限定したコントロールボリュームについて確認すると、C1 から C3 の全ての変容街区で、鉛直方向の流入、水平方向の流出が現状 C0 に比べて増加している一方、水平方向の流入量と鉛直方向の流出量は概ね現状と同程度か増加している。このことから地上近傍では、より上方からのエネルギー流入による鉛直方向の換気が促進されており、その結果、水平方向の通風換気性能が向上したと判断される。境界面での運動エネルギー流束の分布を見ると、変容街区では上方境界で、細かい路地を含めて流入・流出を担う流束の絶対値が全体的に上昇しており、多くの場所でエネルギーの流入と流出が対として現れ、主に循環流によって促進されていることが確認される。

また海拔 60m（地上約 45m）を上方境界として設定した、都市キャノピー全体に対するコントロールボリュームを確認すると、高層建物 C1 においては顕著に鉛直・水平共に流入が増え、流出も大きく増加しており、市街地内部でのエネルギー流量が増加したことが確認される。一方、中低層建物で構成された C2, C3 では鉛直方向、水平方向共に流入の増加は確認できず、流出量はやや減少傾向を示した。収支全

体としてもキャノピーとしての換気性能の改善は確認されなかった。

建物が密集して建つ現状の C0 ではスキミングフロー様の気流が形成され、市街地内部への流体の侵入は限定的であった一方、C2 および C3 は小規模な中低層建物のみで構成された結果、流れがキャノピー内部にまで到達しやすくなった一方、抗力が増加し、それに伴いエネルギー散逸も増加したと推察される。また地上近傍に加えてキャノピー上空からのエネルギーの取り込みを効果的に行うためには、より大規模な気流構造を形成させる必要があることを示唆していると考えられる。

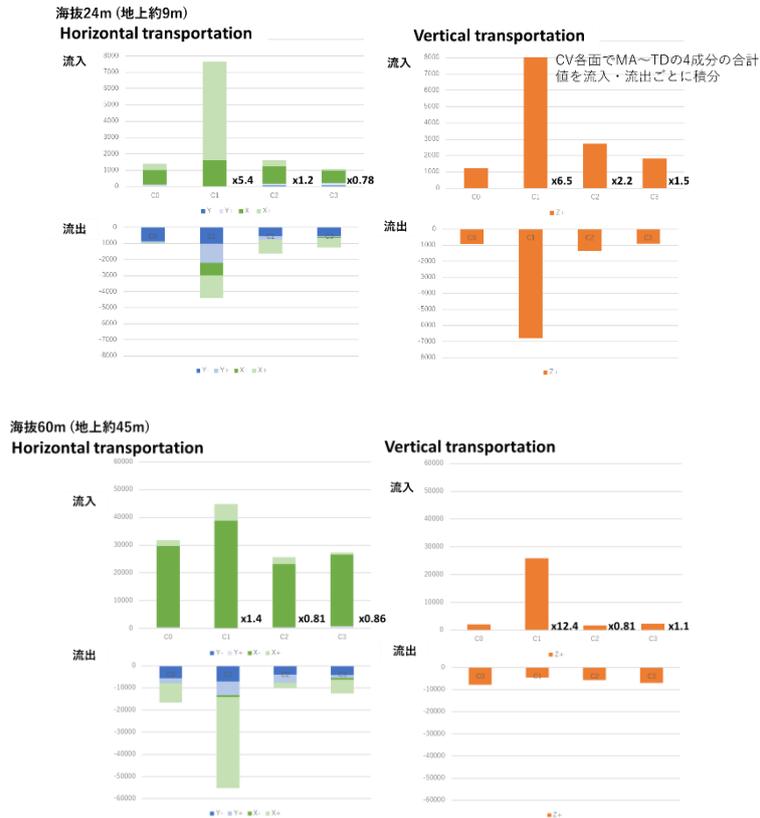


Figure 2.2.2-44 Kinetic energy transportation for each urban block configuration, based on control volumes for the entire urban canopy and near-ground region

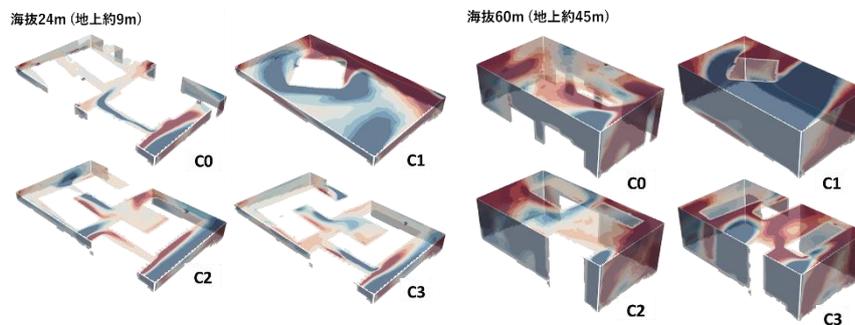


Figure 2.2.2-45 Distribution of kinetic energy flux on the boundaries of the control volume for each urban block configuration

続いて、鉛直方向の流束である **Breathability** について空間構造の分析を行った。Figure 2.2.2-46 に各成分のキャノピー内での3次元的な分布をボリュームレンダリングにより示す。鉛直方向のエネルギー供給を示す赤色で示された下向きの流束に着目すると、C2においては建物の屋上面や側面から生じる剥離せん断層による MD や、建物間の乱流渦などによって生成された TD の拡散効果が市街地内の換気に大きく寄与したことが確認される。一方 C3 においては、市街地内部まで周辺の高層建築物による定常的な吹き降ろしによる移流である MA、剥離せん断や屋上側面付近の定在渦によるとみられる拡散輸送 MD の寄与が大きく、街区形状に基づく特性と分布傾向の違いが確認された。

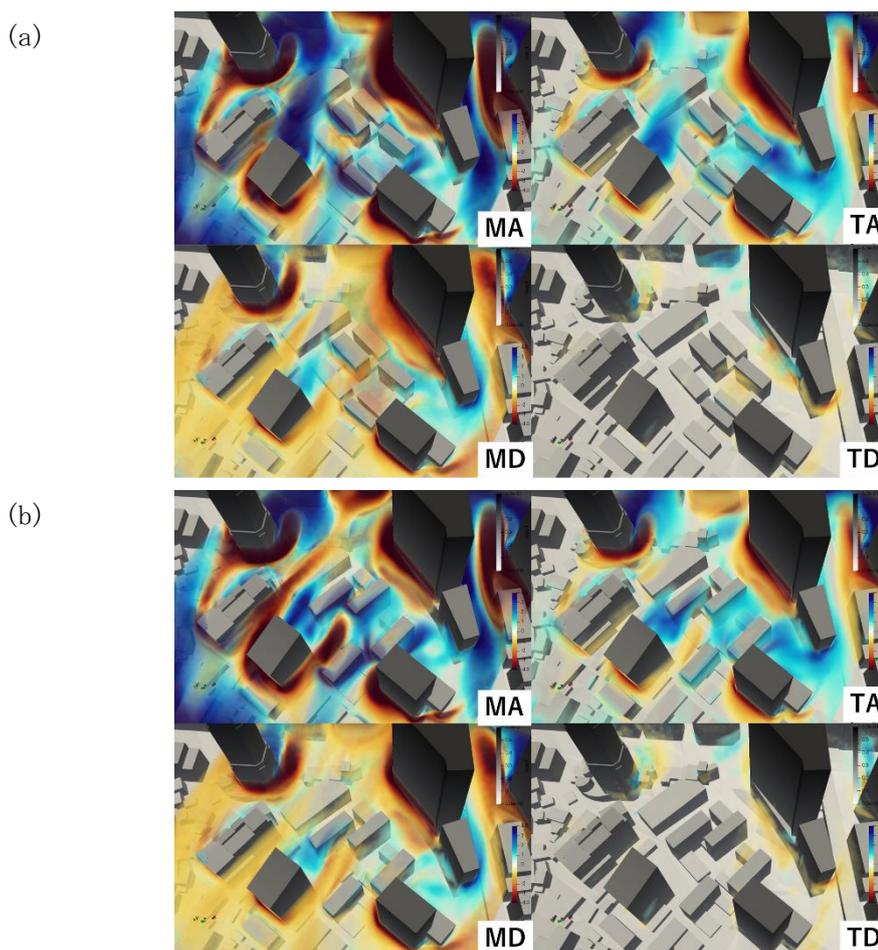


Figure 2.2.2-46 Volume rendering of the spatial distribution of each component of breathability: (a) C2, (b) C3

参考文献

- [2-1] Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura, Hidenori Kawai: Analysis of tornado and near-ground turbulence using a hybrid meteorological model/engineering LES method, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.80, 108464, 2019.
- [2-2] Pin-Ying Wu, Takuya Kawabata, Le Duc, The importance of perturbation rank in ensemble simulations, *Monthly Weather Review*, Vol.153, pp.247-261, 2025.

- [2-3] James Franklin, Michael Black, and Krystal Valde: GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications, *Weather and forecasting*, Vol.18, pp.32-44, 2003.
- [2-4] Niclas Jansson, Rahul Bale, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura: CUBE: A scalable framework for large-scale industrial simulations, *The international journal of high performance computing applications*, Vol.33, pp.678-698, 2019.
- [2-5] 田村哲郎、宮城哲矢：正方形角柱の空力特性に与える隅角部形状効果の物理的機構に関する系統的研究、*日本建築学会構造系論文集*, Vol. 63, No. 514, pp. 51-58, 1998.12
- [2-6]大坪和広、勝村章：隅丸平面建物の平均風力特性に関する研究、第25回風工学シンポジウム論文集, pp. 295-300, 2018.12
- [2-7] K. Nakajima, H. Kawai, M. Kawaguchi, T. Tamura, K. Kondo, Y. Itoh, K. Takagi, WRF-LES Simulation of Wind Flow over Rough Urban Surface during Typhoon Lan (2017), *WCCM-APCOM*, 2022.8
- [2-8] 河合英徳、田村哲郎:メソ気象モデルにより再現された風速場への高周波変動成分付加方法の提案 空間フィルタリング・リスケーリング手法の適用、*日本建築学会構造系論文集* Vol.85, pp.19-27, 2020.
- [2-9] 山中徹、中島慶悟、大岡龍三、菊本英紀、菅原広史：領域気象モデルにより再現した2017年台風21号の大気安定度分析、*日本建築学会大会学術講演梗概集（構造I）*, pp.183-184, 2019
- [2-10] 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説2015, 2015.
- [2-11] 日本建築学会：建築物荷重指針を生かす設計資料2—建築物の風応答・風荷重評価/CFD適用ガイド—建築物の風応答、2017.
- [2-12] Josua Wurman, Jennifer Winslow: Intense Sub-Kilometer-Scale Boundary Layer Rolls Observed in Hurricane Fran, *Science*, Vol.280, pp.555-557, 1998.
- [2-13] Junshi Ito, Tsutao Oizumi, Hiroshi Niino: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones, *Scientific reports*, Vol.7, 3798, 2017.
- [2-14] Mashiko, Wataru, Udai Shimada: Observed near-surface wind structure in the inner core of Typhoon Goni (2015), *Monthly Weather Review*, Vol.149, pp.1785-1800, 2021.
- [2-15] James Franklin, Michael Black, and Krystal Valde: GPS dropwindsonde wind profiles in hurricanes and their operational implications, *Weather and forecasting*, Vol.18, pp.32-44, 2003.
- [2-16] Tetsuro Tamura, Yoshiyuki Ono: LES analysis on aeroelastic instability of prisms in turbulent flow, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol.91, pp.1827-1846, 2003.
- [2-17] 丸川比佐夫、片桐純治、勝村章、藤井邦雄：多質点弾性模型の開発と高層建築物の風応答評価についての検討、*日本建築学会構造系論文集*、Vol.484, pp.39-48, 1996.
- [2-18] 挟間貴雅、坂敏秀、伊藤嘉晃、近藤宏二、山本学、田村哲郎、横川三津夫：多質点構造モデルを用いた流体-構造連成解析システム、*鹿島技術研究所年報*、Vol.65, pp.135-140, 2017.
- [2-19] 片桐純治、丸川比佐夫、藤井邦雄、大熊武司：高層建築物の風応答における風直角方向と振れの固有振動数比の影響に関する研究、*日本建築学会構造系論文集*、Vol.63, pp.21-27, 1998.
- [2-20] 伊藤 嘉晃、高木 賢二、近藤 宏二、田村 哲郎：低層街区を対象としたLESに基づく降雨解析（その1）降雨の特徴、*日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）*、2024.8.
- [2-21] 高木 賢二、伊藤 嘉晃、近藤 宏二、田村 哲郎：低層街区を対象としたLESに基づく降雨解析（その

2) 降雨観測と解析結果との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、2024.8.

[2-22] A. Kawano : A simple volume-of-fluid reconstruction method for three-dimensional two-phase flows, Computers and Fluids, Vol. 134-135, pp. 130–145, 2016.5.

[2-23] L. Lobovský a,n , E. Botia-Vera b , F. Castellana c , J. Mas-Soler b , A. Souto-Iglesias, Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break, Journal of Fluids and Structures 48 (2014) 407–434.

[2-24] 新井舞子、河合英徳、田村哲郎：熱放射を考慮した市街地の LES に基づく気流・熱環境解析、第 25 回風工学シンポジウム、pp.217-222、2018.

[2-25] 新井舞子、田村哲郎、河合英徳：熱放射を考慮した LES の検証と実市街地への適用性、日本建築学会環境系論文集、第 89 巻、第 819 号、pp.258-269、2024.

[2-26] 環境省ホームページ、熱中症予防情報サイト、暑さ指数（WBGT）について、
<https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>.

[2-27] Marina Neophytou, Rex Britter: Modelling the wind flow in complex urban topographies: A computational-fluid-dynamics simulation of the central London area, 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics,2005.

[2-28] 大野陽太、荻野隆太郎、石田泰之、持田灯：市街地形態が市街地内の通風性能及び強風発生に与える影響(その 3) 実在市街地における高層建物及び建物高さの非一様性が市街地内の流れ場に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)、40780、2022.

[2-29] 野澤剛二郎、田村哲郎：ラフネス上に空間発達する乱流境界層の LES と変動風の評価、日本建築学会構造系論文集、Vol.541, pp.87-94, 2001.

(3) サブ課題C「新興ウイルス感染症にロバストで健康・快適・サステイナブルなポストコロナ時代の室内環境設計」（協力機関：九州大学、神戸大学）

(a) 研究成果の要旨

令和6年度は、サステイナブル室内環境設計手法の開発（気道内粘膜上皮層に適用する宿主反応モデル、ウイルス増殖モデルの開発）、汚染物質濃度制御にロバストな室内環境設計法の開発（室内環境スケールから人体モデル、上気道、下気道までを統合した力学的ダウンスケーリング解析技術の確立）、多目的最適化法の統合（空調システムシミュレーション(Energy Plus)とCUBEの統合解析手法の開発）、最適化シミュレーションの実施、多目的最適化フレームワークの実用化に向けた改良を行った。

具体的には、令和5年度に作成した数値気道モデルを統合した数値人体モデルと室内環境解析技術をCUBEに実装した大規模解析技術を基に、室内環境スケールから気道内の粘膜上皮細胞に至るウイルス含有飛沫輸送モデルを統合したダウンスケーリング解析技術を整備し、飛沫・飛沫核感染シミュレーションを実施した。この一連の解析モデルに気道内粘膜上皮層に適用する宿主反応モデル、ウイルス増殖モデルを開発統合することで、気道粘膜上皮細胞に対するウイルスのonsetからその後の増殖現象、感染リスクを定量評価する数値解析手法を整理し、モデル空間を対象とした解析を実施した。尚、ここでの解析には「富岳」を主に活用しているが、(b)-1の宿主反応モデルやウイルス増殖モデルの開発においては一部、汎用スパコンを活用している。得られた成果をCUBEに実装後は「富岳」を用いている。また、(b)-4-1のエージェントベースシミュレーションについても汎用計算機を用いている。

In fiscal year 2024, we advanced the development of sustainable indoor environmental design methodologies through several key initiatives: (1) development of a host response model and a virus proliferation model applicable to the airway mucosal epithelium, (2) establishment of a robust indoor environmental design method for pollutant concentration control using a dynamical downscaling analysis framework that integrates models from indoor environment scales to the human body, upper airways, and lower airways, and (3) integration of multi-objective optimization methods, including the development of a coupled analysis method using HVAC system simulation software (EnergyPlus) and CUBE. We also conducted optimization simulations and refined the multi-objective optimization framework for practical application.

Specifically, building on the large-scale analysis framework implemented in CUBE—incorporating the numerical airway model developed in fiscal year 2023 and indoor environmental analysis techniques—we established a downscaling analysis technology that integrates virus-laden droplet transport from the room scale to the mucosal epithelial cells within the airways, and performed droplet and droplet nuclei infection simulations. By further developing and integrating a host response model and a virus proliferation model applicable to the mucosal epithelial layer, we constructed a numerical evaluation method capable of quantifying viral onset, proliferation, and infection risk at the level of epithelial cells, and conducted analyses on model indoor environments.

As a practical evaluation of the multi-objective optimization, we performed optimization of the supply and exhaust vent positions and flow rates for displacement ventilation in a model room, targeting three objectives: indoor comfort, infection risk reduction, and HVAC energy consumption. Furthermore, toward practical deployment of the framework, we integrated the results of the coupled simulation into an agent-based model to establish a system for assessing the societal impact of infection risk mitigation strategies.

While the analyses presented here are primarily conducted on the supercomputer Fugaku, some portions—specifically the development of the host response model and the virus proliferation model in section (b)-1—were carried out using general-purpose supercomputers. Once the models were implemented into CUBE, subsequent simulations were performed on Fugaku. Agent-based model in (b)-4-1 was also executed on a conventional supercomputer.

(b) 本年度の内容

(b)-1 サステイナブル室内環境設計手法の開発（気道内粘膜上皮層に適用する宿主反応モデル、ウイルス増殖モデルの開発）

令和 5 年度までに開発実装した数値気道モデルを統合した数値人体モデルを基盤とした一連の数値解析技術を発展させ、質点系を前提とした宿主反応モデル(Host Cell Dynamics Model, TIV モデル)を複雑形状の 3 次元気道モデルの内腔に適用できるよう改良することで、SARS-CoV-2 ウイルスを対象とした Human Challenge データ(in vivo)を十分な精度で予測する HCD モデルを作製した。特に、気道粘膜上皮上の粘液層に 2 層モデルを適用した上で、HCD モデルのモデルパラメータを 20 領域分割モデルを適用することで高精度に同定する方法を確立した。

Figure 2.2.3-1 には粘液輸送と気道粘膜上皮層の概要を、Figure 2.2.3-2 には HCD モデルの概要を示す。粘液層は上層の高粘度 Gel 層と下層の低粘度 Sol 層の 2 層に分割してモデル化している。飛沫中のウイル

スが粘液中に放出されると、粘液輸送と共に移流拡散すると仮定する。ウイルスが標的細胞表面のレセプターに結合すると、感染、複製、再放出、クリアランス、アポトーシスを開始する。

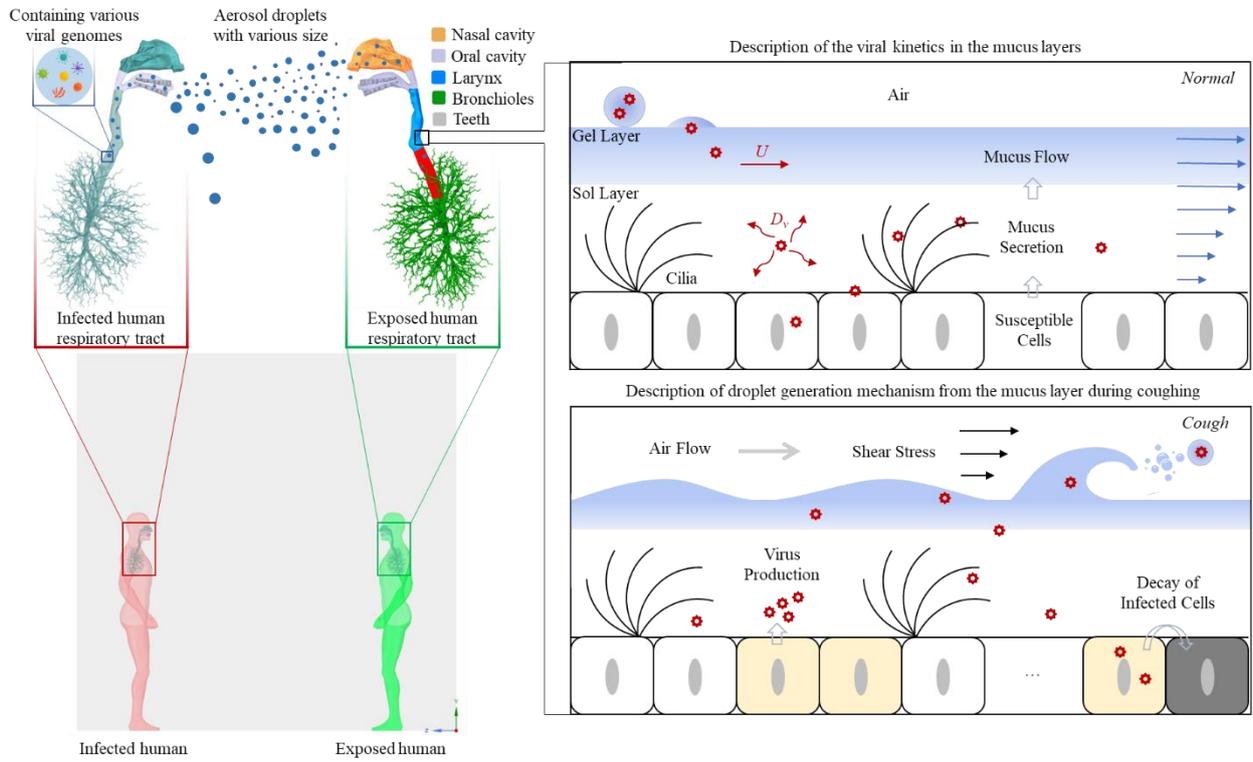


Figure 2.2.3-1 Overview of droplet nuclei infection, mucus transport in the respiratory tract and the epithelial layer of the airway mucosa

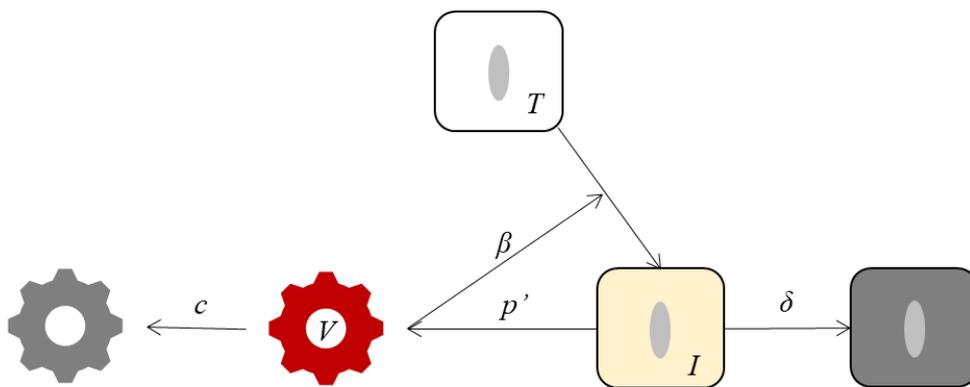


Figure 2.2.3-2 Overview of the HCD model

HCD モデルの支配方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \bar{V}_L}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{V}_L}{\partial x_i} = D_v \frac{\partial^2 \bar{V}_L}{\partial x_i^2} + \frac{p'}{V_m} I_i - c \bar{V}_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = -\beta T_i V_L \quad (2)$$

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} = \beta T_i V_L - \delta I_i \quad (3)$$

ここで、 T 、 I 、 V_L はそれぞれ標的細胞数、感染細胞数、ウイルス量を表す。本研究では SARS-CoV-2 による感染を想定し、対象有為リスは β (copy/mL/day) の速度で感受性標的細胞に感染すると仮定する。感染した細胞は細胞障害性ウイルスの影響と免疫反応により、 δ (day⁻¹) の割合で排除される。一方、 c (day⁻¹) と p' (copy/day/cell) は、それぞれウイルスの排除速度と感染細胞のウイルス産生・放出速度を表す。 V_m (mL) は粘液の表面積と厚さを掛け合わせた粘液体積を表す、また、 \bar{U} (m/s) は鼻腔-上咽頭における粘液の平均流速を示す。鼻咽頭出口流速は 0.000167m/s (10mm/min) と設定した。 Dv (m²/s) は SARS-CoV-2 の粘液層への拡散係数を示す。

本解析では、初期ウイルス濃度 $V_L(0)$ を鼻腔-鼻咽頭に沈着した飛沫分布に基づいて推定した。Figure 2.2.3-3 に示す単純化したモデル室内に 2 体の数値人体モデル(Computer Simulated Person)を設置し、咳による飛沫・飛沫核の室内拡散と非感染者の呼吸に伴う経気道曝露をシームレスに解析することで、非感染者の気道内飛沫・飛沫核沈着分布を解析し、その上で、各飛沫サイズに応じた含有するウイルス濃度を設定することで、HCD モデル解析の初期条件とした。モデル空間は 3×3×3 m³ の置換換気を想定した空間となっており、Worst Case Scenario を想定して物理距離 1m で向かい合う条件を設定している。数値人体モデルは、昨年度までに被験者の CT データより作成した上気道から下気道(細分岐 16G)まで再現した数値気道モデルを統合している。一度の咳によってサイズ範囲 1~10 μm の飛沫粒子が全 45,000 個、感染者である CSP の口から室内環境側に放出され、CFPD(Computational Fluid and Particle Dynamics)解析にて飛沫粒子のラグランジュ解析を実施した。その結果、非感染者の上気道、特に鼻腔-鼻咽頭領域に吸入飛沫粒子の過半が沈着する様子を確認した。

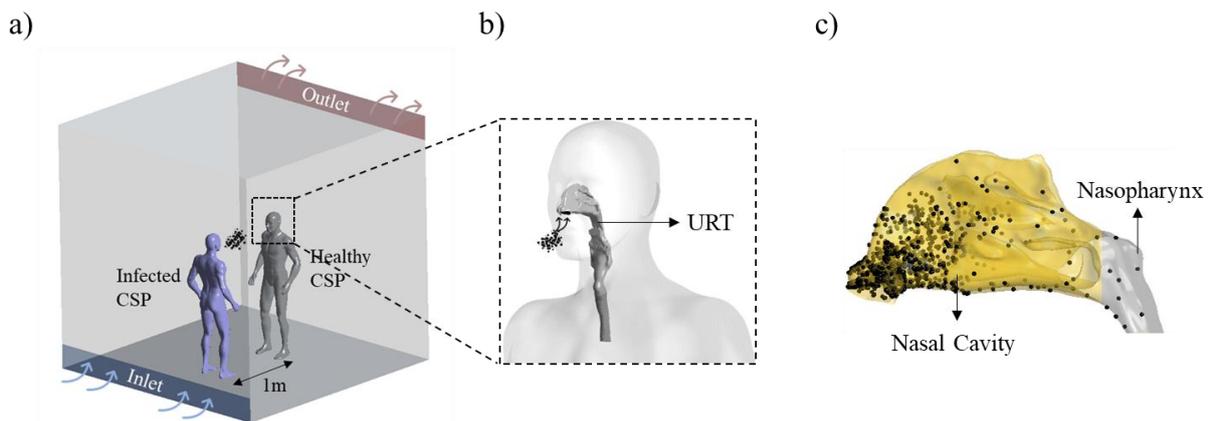


Figure 2.2.3-3 Numerical conditions used to set the initial viral load $V_L(0)$. a) Simulation of infection in a simple room, b) Integrated numerical airways and human body model, c) Deposition distribution of inhaled droplets in the nasal cavity

HCD モデルのモデルパラメータは *Monolix* を用いて同定した。SARS-CoV-2 の Human Challenge データより、未治療被験者 12 名の鼻咽頭スワブから採取した 20 日間のウイルス量データが先行研究にて報告

されており、このデータに本研究で新たに作成した粘液輸送を考慮した HCD モデル (2L20C)を適用することでパラメータ同定した。その結果を Figure 2.2.3-4 に示す。図中の赤色の曲線は 12 名の被験者全員を対象とした集団適合の結果を示しており、青色の曲線は個々の被験者を個別に対象とした最適パラメータを用いた適合結果を示す。

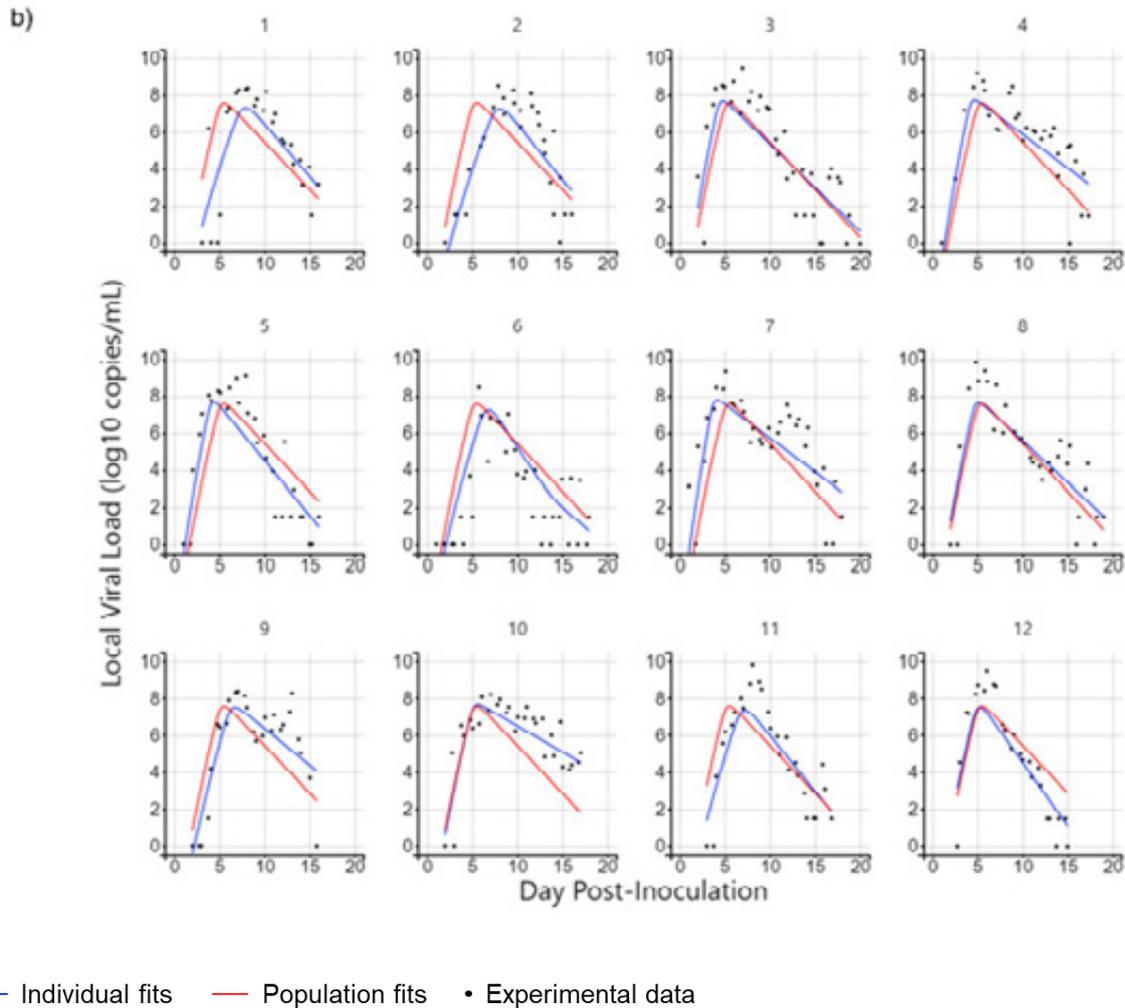


Figure 2.2.3-4 Parameter fitting results using *Monolix* (2L20C)

気道内に沈着した飛沫飛沫核粒子と含有ウイルスは、第一の生体防御反応(クリアランス)として気道粘膜上皮上の粘液輸送に伴い喉頭領域方向へ輸送される。すなわち、粘液輸送に伴うクリアランスを再現するためには鼻孔から咽頭に向けた粘液輸送を再現する必要があり、その解析例を Figure 2.2.3-5 に示す。粘液平均流速の設定を 3 段階に変化させた予備解析を実施し、in vivo 結果との整合性が高い均流速 10mm/min 条件を採用した。

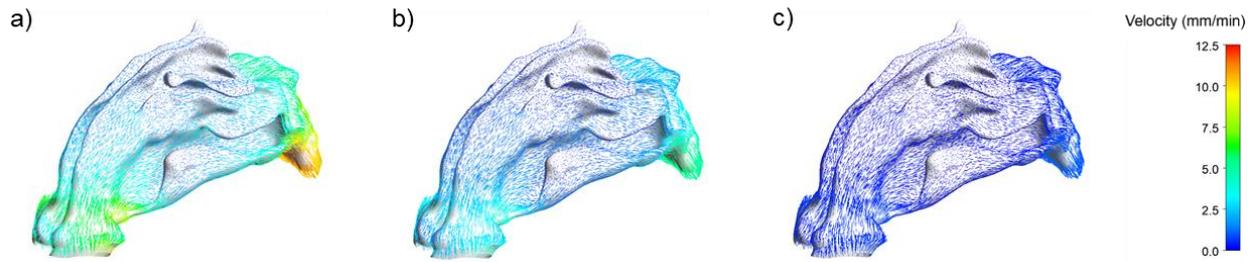


Figure 2.2.3-5 Results of mucus transport in the upper respiratory tract (nasal cavity) in terms of a) 10 mm/min average flow velocity, b) 5 mm/min average flow velocity and c) 1 mm/min average flow velocity

Figure 2.2.3-3 で決定したウイルス初期沈着量分布と Figure 2.2.3-4 で同定したモデルパラメータを適用することで、上気道におけるウイルス増殖ダイナミクス解析を実施した結果を Figure 2.2.3-6 に示す。HCD モデルを上気道内腔に 3 次元的に適用する技術を確立し、その時空間変化を解析する手法を確立したことで、ウイルス増殖の Hot Spot を定量的に評価することが可能となったと云える。

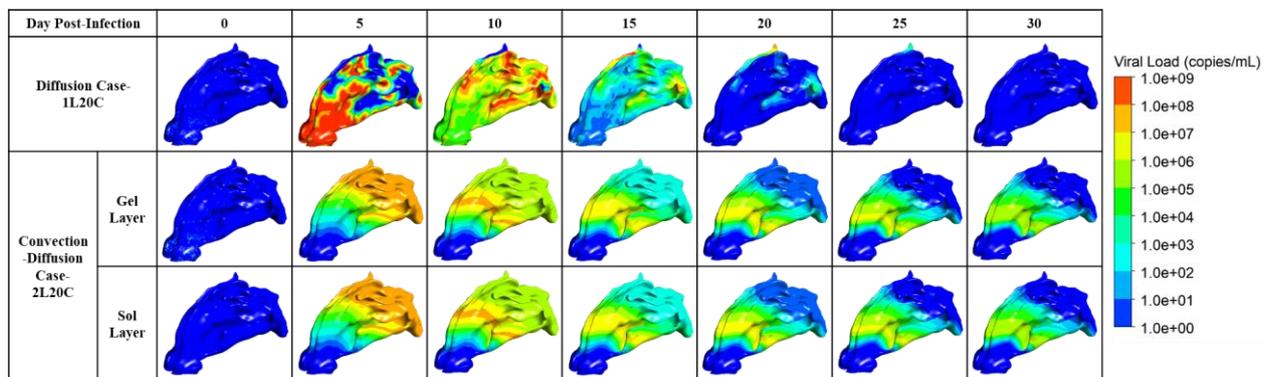


Figure 2.2.3-6 HCD results in the upper respiratory tract (nasal cavity)

上気道に適用した粘液輸送解析ならびに HCD 解析を下気道に適用した結果を Figure 2.2.3-7 ならびに Figure 2.2.3-8 に示す。下気道では粘液輸送は下気道から喉頭部に向かう下から上への流れとなり、また非常に不均一性の強い流れ分布となる。HCD 解析結果より、ウイルス濃度分布は時間経過と共に変化するが、その時間分布は粘液輸送によって強く支配されている様子が確認できる。

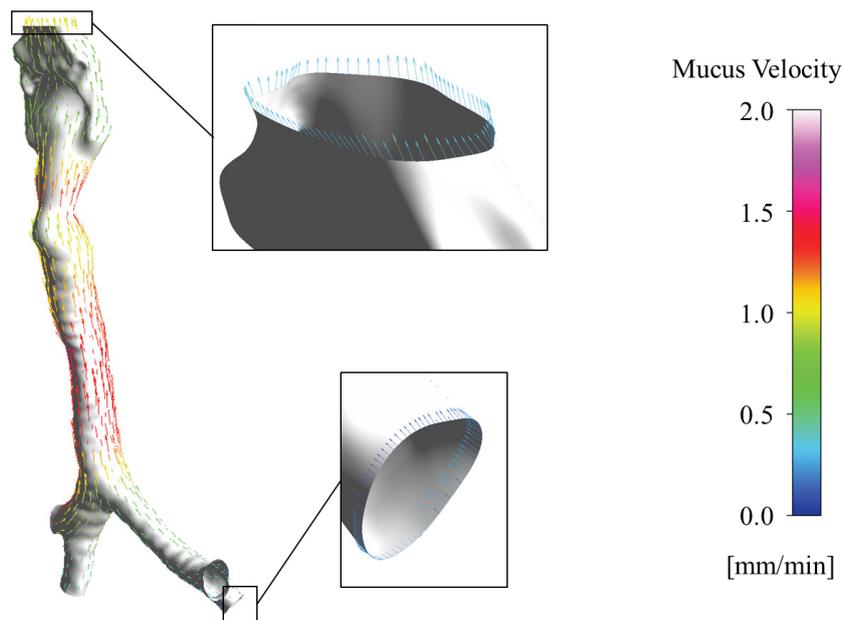


Figure 2.2.3-7 Mucus transport results in the lower respiratory tract

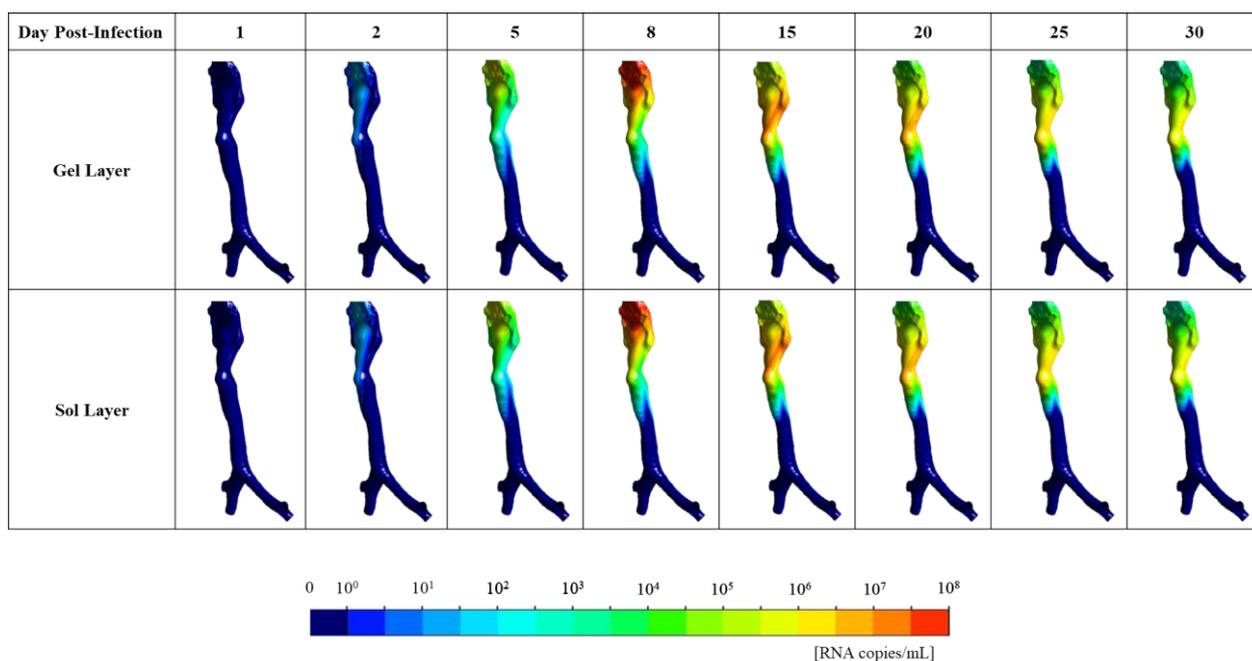


Figure 2.2.3-8 HCD results in the lower respiratory tract. Time evolution of virus concentration V (RNA copies/mL) in the Gel and Sol layers of the airway lumen

ここで開発した HCD モデルを CUBE に実装し、より精緻化した気道モデルを対象として解析を実施した解析結果を次に示す。

Figure 2.2.3-9 は、CUBE の実装に用いられた統合フレームワークを示している。流体の流れは、オイラー法を用いた LES アプローチによるナビエ-ストークス方程式で解かれており、粒子の追跡は CUBE ソルバーを使用したラグランジュ法により実施された。この方法により、呼吸中の被感染者からの粒子追跡

が過渡解析において行われた。1回の咳を想定した過渡ケースと、会話を想定した過渡ケースの2種類を解析対象とし、異なる呼吸活動による呼吸器内での粒子沈着の詳細な違いを確認した。

その後、気道内での粒子沈着の詳細な結果は別のフレームワークに統合され、式(1)~(3)に基づく In-host モデルが45日間にわたって解かれた。これにより、感受性細胞および感染細胞、ならびにウイルスの増殖および減衰を考慮しながら、ヒト組織内におけるウイルス拡散のより精密な情報を得ることが可能となった。

本フレームワークへの CUBE の統合は、現実世界のシナリオを解析する上で極めて重要。これは、呼吸現象が従来の定常状態を前提とした研究とは異なり、時間依存的な事象によって支配されるため。

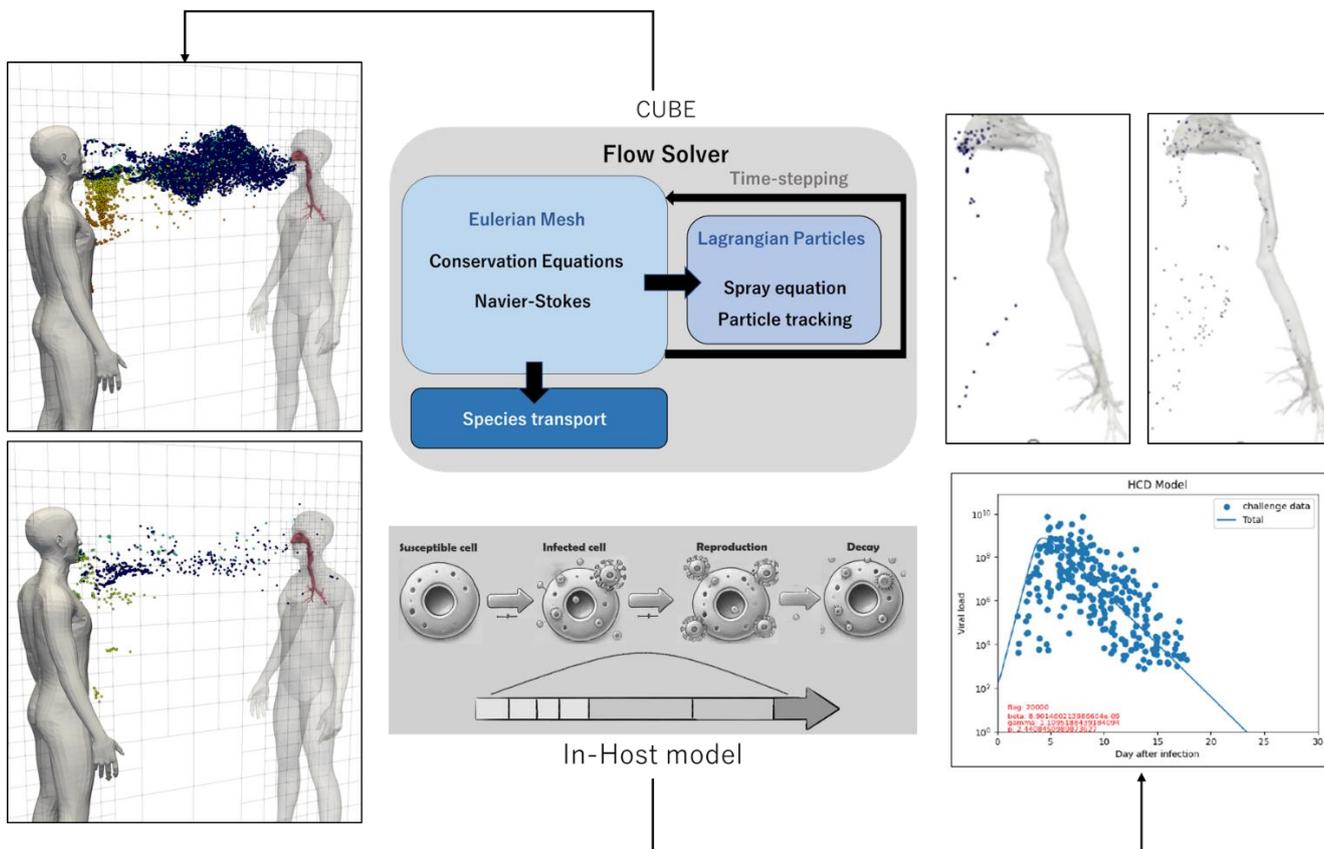


Figure 2.2.3-9 Integrated CUBE-HCD model to analyze transient particle tracking and deposition in the lower respiratory tract with subsequent viral spread within the body

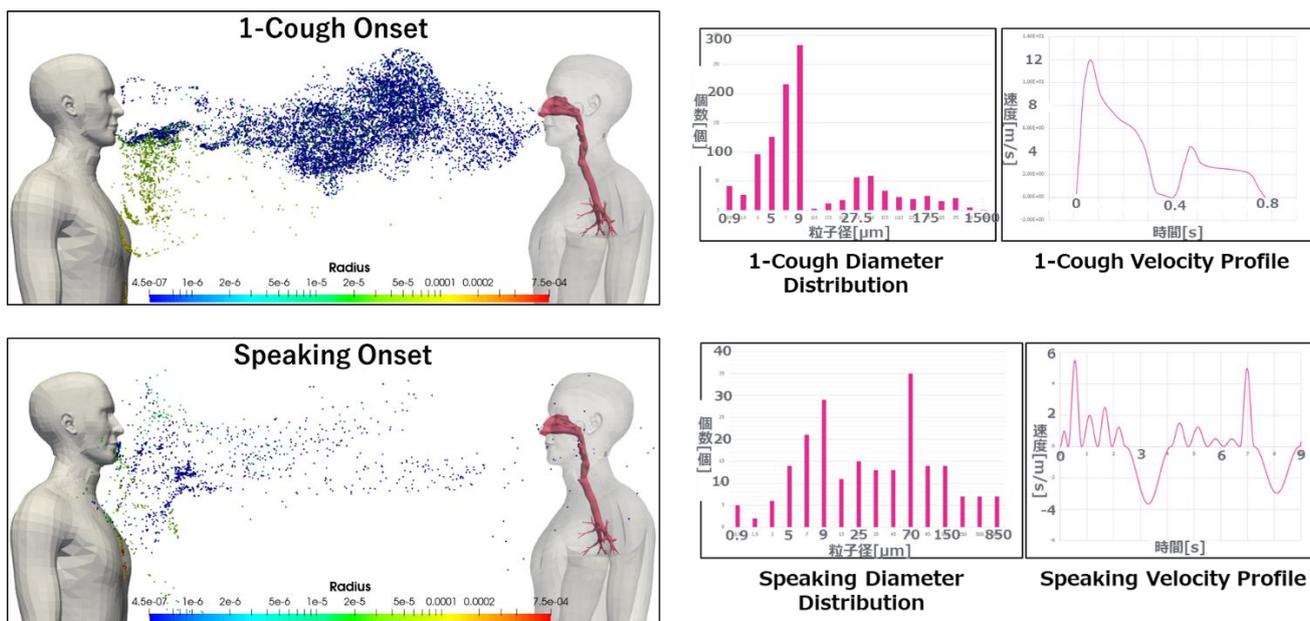
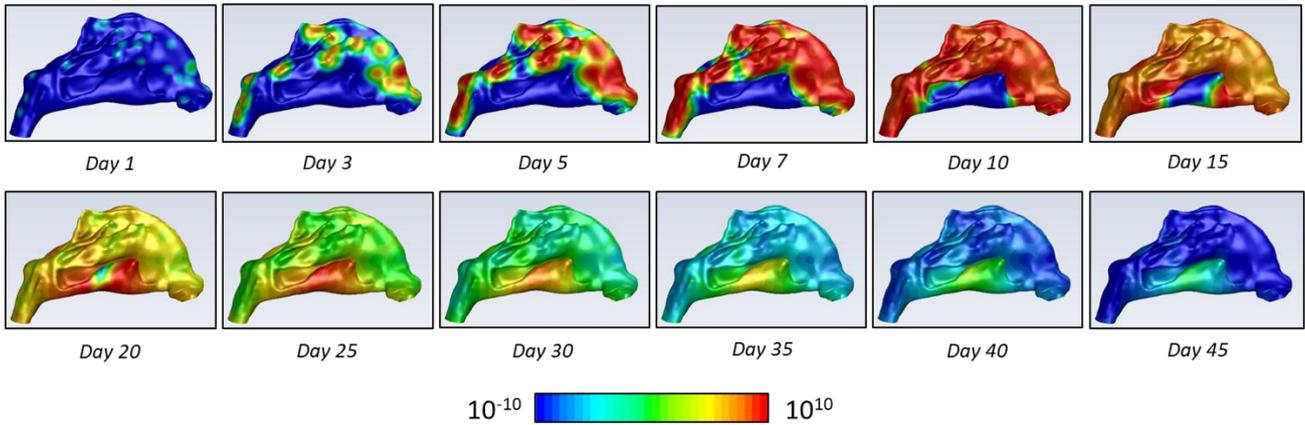


Figure 2.2.3-10 Comparison of initial conditions and onset of particle dispersion between a single cough and continuous speaking

Figure 2.2.3-10 は、感染者から呼吸器系を介して宿主へとウイルスが伝播し始める過程を示している。ここでは2つのケースが提示されている。a) 咳1回のケースでは、咳によって生じるジェットパフの速度により、開始直後から大量の粒子が放出されます。b) 一方、会話のケースでは、速度プロファイルがはるかに弱く、より長時間にわたって粒子が持続的に放出されますが、粒子数は著しく少なくなっている。したがって、呼吸活動の性質の違いにより、粒子の挙動やその人体への侵入・沈着の仕方も異なることが、前図からも確認できる。

両ケースにおいて、口から発生する速度プロファイルおよび初期の粒子径分布が比較のために示されており、会話時の速度は咳によるジェットと比較して著しく低いことが確認される。

Evolution of Post-Infection in the Upper Respiratory Tract, 1-Cough Case



Evolution of Post-Infection in the Upper Respiratory Tract, Speaking Case

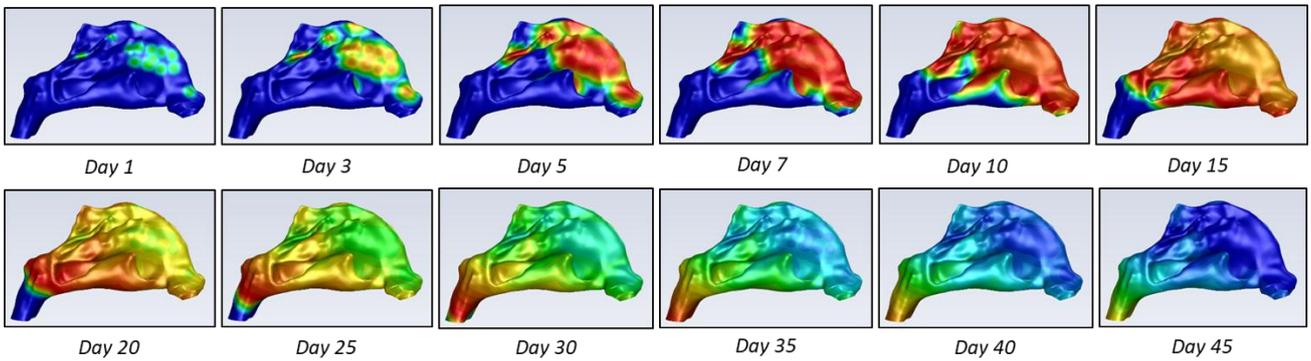
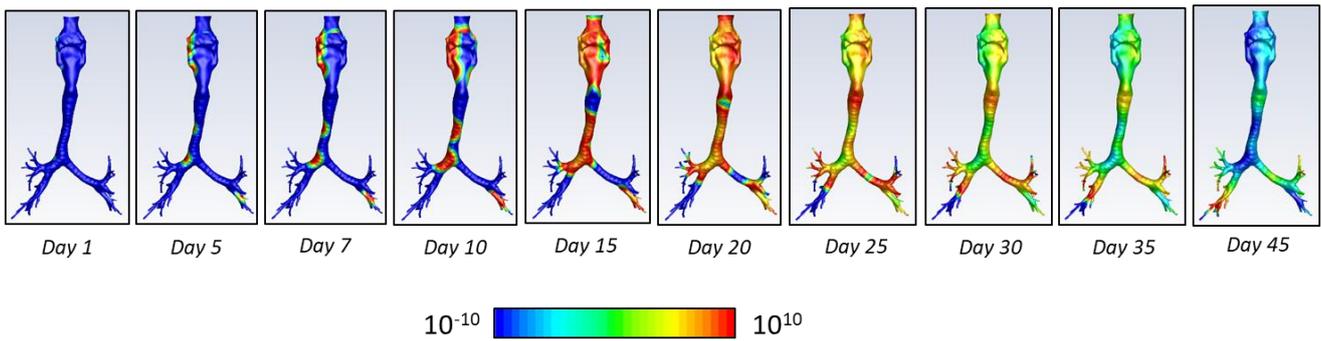


Figure 2.2.3-11 Comparison of viral kinetics after infection in the upper respiratory tract between coughing and speaking

Figure 2.2.3-11 は、感染後における上気道（鼻腔から気管の起始部まで）内でのウイルスの動態を、1回の咳ケースおよび会話ケースについて示している。咳と会話による初期沈着の違いは、1日目から顕著に見られる。この初期沈着の違いにより、鼻腔内でのウイルスの拡散方向も異なる傾向を示した。咳の場合、ウイルスは前部および鼻腔領域に拡散し、10日目から15日目の間にウイルス量が最大となった。その後、ウイルスは徐々に拡散・減衰し、45日目には鼻腔の下部領域にごく少量が残るのみとなった。一方、会話ケースにおける初期の粒子沈着およびウイルス拡散は、鼻腔の右側に集中していた。ウイルス拡散のピークは咳の場合と同様に10日目から15日目の間に発生しましたが、減衰段階ではウイルスは気管へ向かって下方に拡散していた。この拡散方向の違いは、粒子径や初期沈着位置によるものと考えられ、より正確な予測のためには詳細な解析が重要であることを示している。

Evolution of Post-Infection in the Lower Respiratory Tract, 1-Cough Case



Evolution of Post-Infection in the Lower Respiratory Tract, Speaking Case

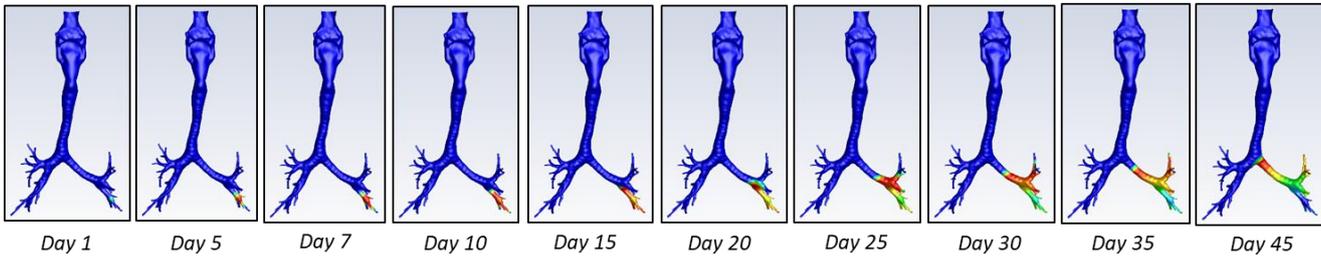


Figure 2.2.3-12 Comparison of viral kinetics after infection in the lower respiratory tract between coughing and speaking

Figure 2.2.3-12 は、咳および会話の各ケースにおける下気道内での感染後のウイルス動態を示している。ここでは、ウイルス拡散の開始時における粒子の位置の違いにより、両ケースの間に顕著な差異が見られます。咳の場合、咳のジェット流が十分に強く、より多くの粒子が気道の深部まで到達し、気管から気管支にかけて拡散が確認された。一方、会話ケースでは、初期に沈着する粒子数が少なく、粒子は気管支まで到達したものの、気管に沿ったさらなる拡散は確認されなかった。このような現象は、感染の強度やタイプを評価し、治療法や薬剤送達システムを検討する上で重要な要素となった。

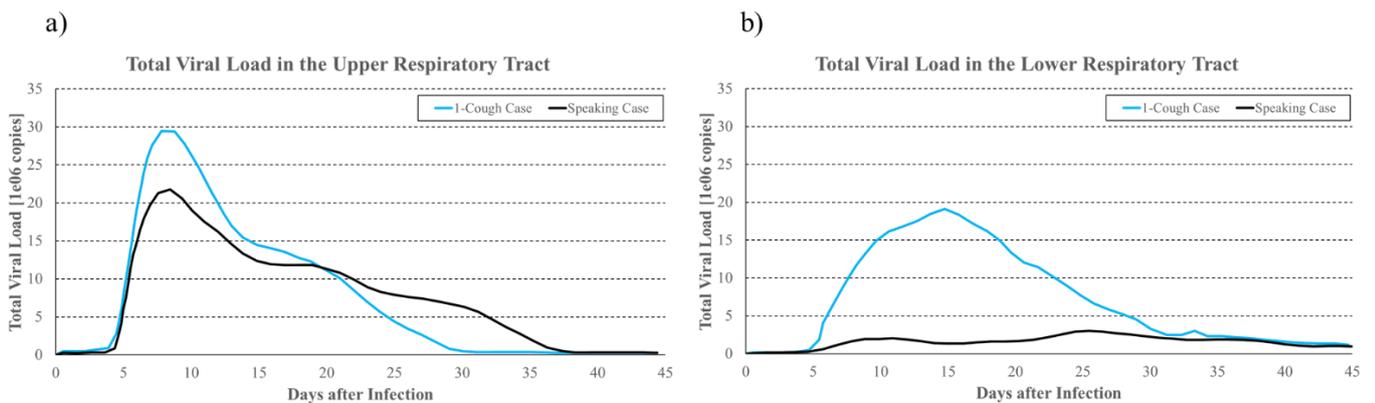


Figure 2.2.3-13 Total respiratory viral load in both coughing and speaking cases for a) upper and b) lower respiratory tract

Figure 2.2.3-13 は、感染後 45 日間における咳および会話による上気道および下気道内の総ウイルス量の違いを示している。感染が咳によって引き起こされた場合、ウイルス量のピークは常に高くなりますが、その後の減少も比較的速く進行する傾向があり。一方、会話による感染ではウイルス量は全体的に少ないものの、上気道における拡散はより長期間にわたって見られ、下気道での拡散はほとんど確認されなかった。

(b)-2 汚染物質濃度制御にロバストな室内環境設計法の開発(室内環境スケールから人体モデル、上気道、下気道までを統合した力学的ダウンスケーリング解析技術の確立)

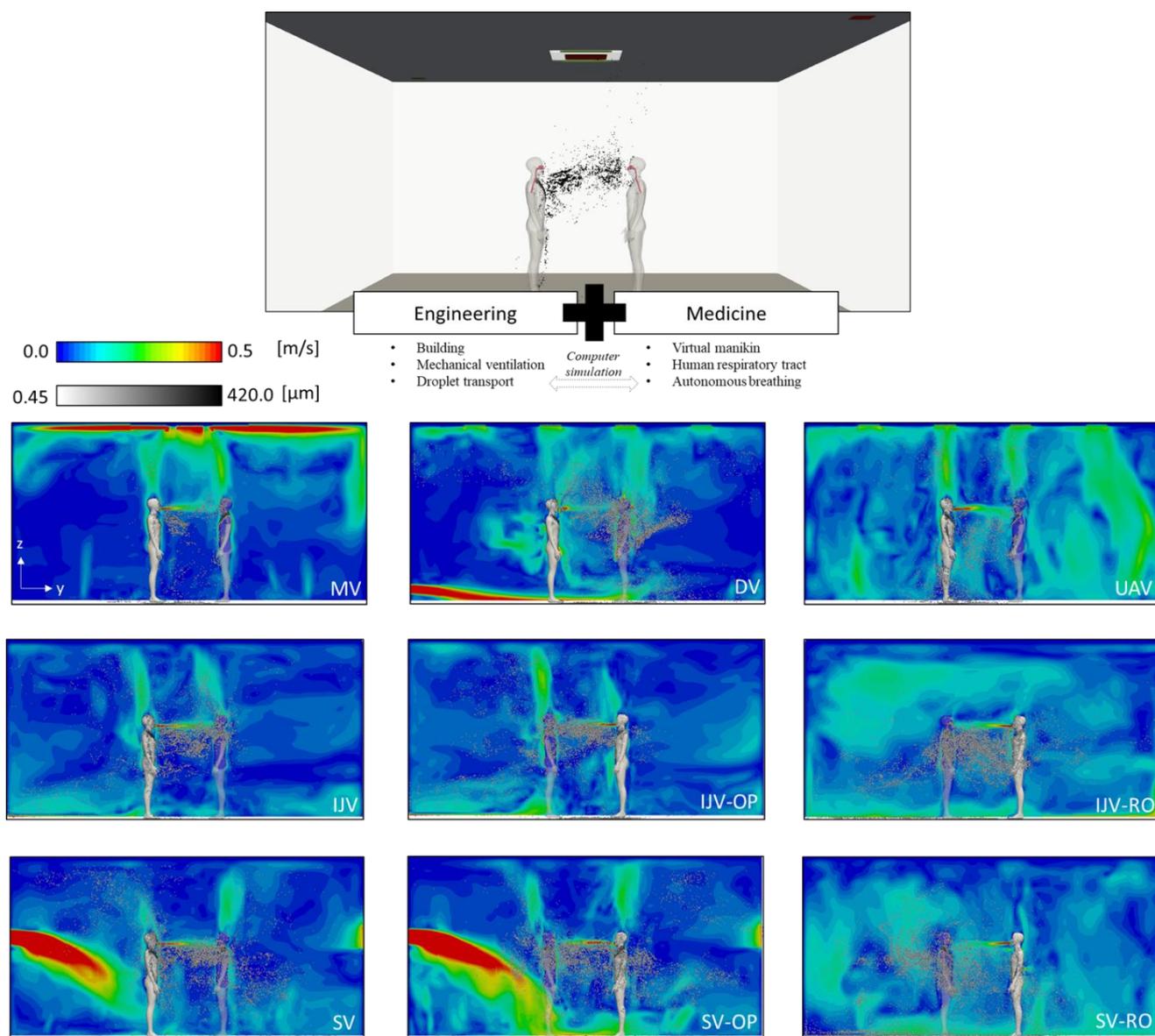


Figure 2.2.3-14 Analysis of indoor viral transmission under varied ventilation methods (MV, DV, UAV, IJV, SV) by integrating virtual manikins and a respiratory tract model in indoor environments: consideration of changes in human location (IJV-OP, IJV-RO, SV-OP and SV-RO)

持続可能な室内環境のさらなる開発を目的として、呼吸器系を備えた 2 体の仮想マネキンを室内に配置し、5 種類の換気方式（MV：混合換気、DV：置換換気、UAV：床下空調換気、IJV：衝突噴流換気、SV：成層換気）の下で解析を行った。各ケースにおいて、室内の気流パターンおよび感染者から感染可能な宿主への粒子伝播が検討され、Figure 2.2.3-14 にその結果が示されている。さらに、居住者の位置と粒子挙動の変化を比較するために、4 つの追加ケースが検討された。IJV-OP および SV-OP では、感染者と感染対象者の位置を従来のケースと反対に配置し、IJV-RO および SV-RO では、2 体の仮想マネキンを元の位置から 90 度回転させた配置とした。

その結果、換気方式に応じて室内の気流パターンが大きく変化し、それに伴い粒子の移動経路や方向も直接的に影響を受けることが確認された。したがって、建物内の換気方式が変化すれば、ウイルス伝播の確率や粒子の滞留時間も変化する可能性がある。

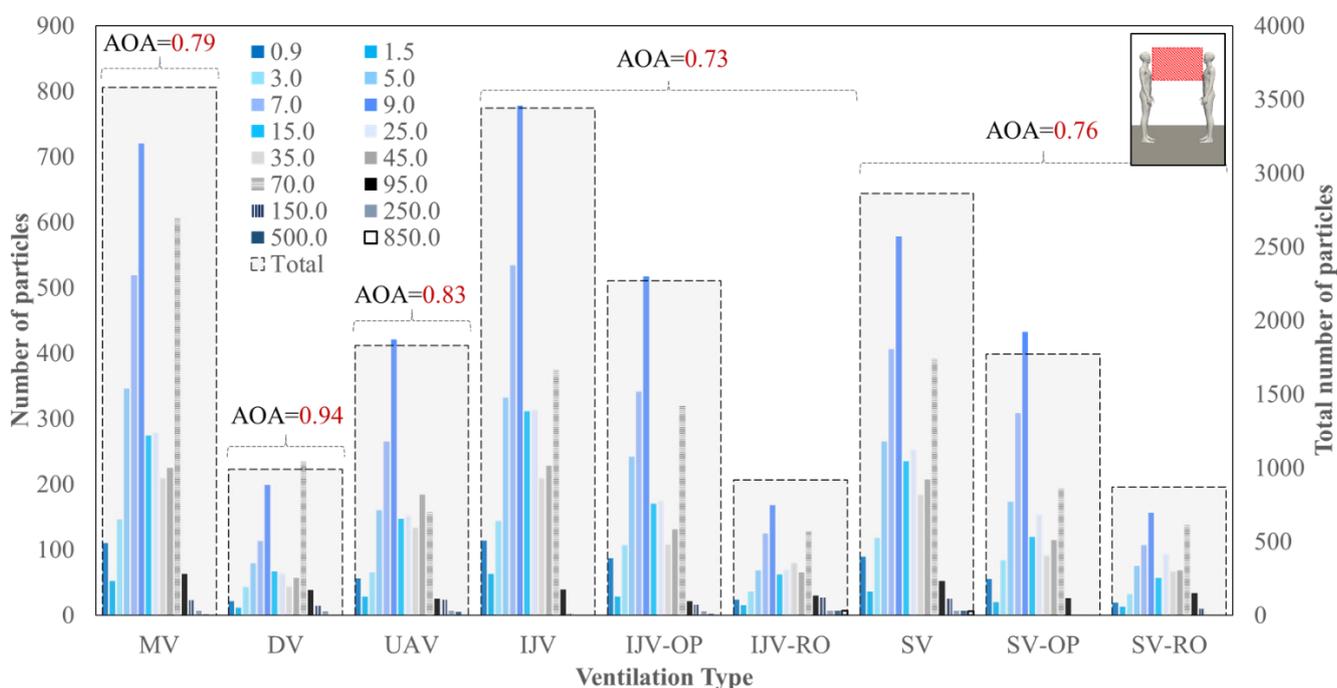


Figure 2.2.3-15 Comparison of particle number and age of air the local breathing zone under varied ventilation methods

この内容はFigure 2.2.3-15に示されており、2体のマネキン間の赤色で示された局所呼吸域における、計算開始から3分後の空気中粒子数を表している。空気中の粒子は粒径ごとに色分けされており、灰色のバーは平均粒径を示している。平均バーの上に示されている「AOA」は空気齢（Age of Air）を表す指標であり、これは空気の質を評価するための一般的な値。AOAの値が0.0に近いほど清浄な空気を、1.0に近いほど汚染された空気を示す。

本研究では、置換換気方式（DV）が最も少ない粒子数を示し、混合換気方式（MV）が最も多くの粒子を示した。これは、置換換気では床面から吹き出すジェット気流が小さな粒子を室内上部へと押し上げ、局所呼吸域を通過させる一方、大きな粒子は床付近を沿うように移動するため。一方、混合換気ではすべての粒径の粒子が室内に広く拡散し、感染リスクが高まる。

一方で、空気齢（AOA）はすべてのケースで高く、特に置換換気において顕著だった。このことから、AOAは気体状汚染物質の予測には有効であるものの、粒子経路に依存するウイルス伝播の予測には適さないことが示された。粒子の動きは異なる物理現象によって支配されており、異なる指標の検討が必要とされる。

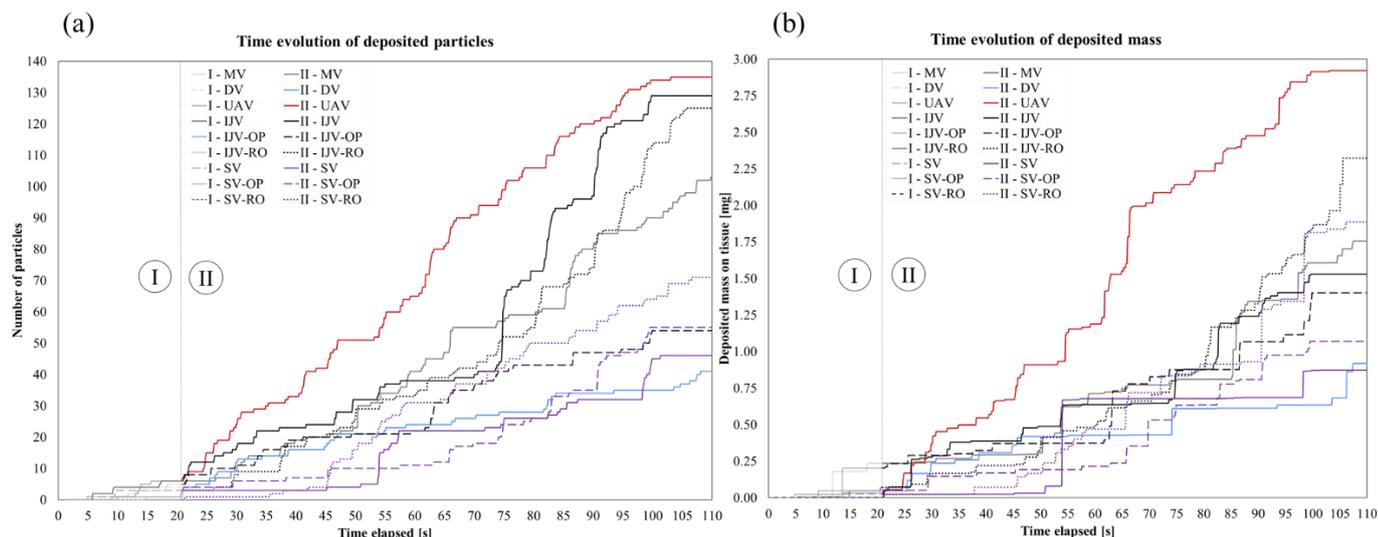


Figure 2.2.3-16 Time evolution of deposited a) mass and b) particle number in the respiratory tract

これらの結果は、Figure 2.2.3-16によってさらに裏付けられている。同図は、呼吸器内における (a) 粒子の沈着数および (b) 沈着質量の時間変化を示している。粒子の沈着数は、換気方び仮想マネキン配置によって異なり。温度成層を伴う換気方式では、一般的に良好な結果が得られており、これは成層化された高温空気が粒子を室内上部へと運ぶため。

しかしながら、強いジェット気流は局所呼吸域における粒子の混合を促進し、吸入の可能性を高めることも示された。

まとめとして、置換換気は呼吸器内への粒子吸入および質量沈着を最小限に抑える効果があれば次に成層換気も良好な結果を示した。これら2つの成層型換気方式は、局所呼吸域から粒子を効率的に除去する点で有効。一方、混合換気や、局所呼吸域におけるジェット気流が強すぎる、または弱すぎることによる粒子の滞留は、粒子吸入リスクを高めるため避ける必要がある。

このような詳細な解析は、ウイルス吸入リスクを評価する上で極めて重要な情報を提供し、持続可能な室内環境の実現に不可欠であると言える。

(b)-3 多目的最適化法の統合と最適化シミュレーションの実施（空調システムシミュレーション (Energy Plus) とCUBEの統合解析手法の開発）

屋内換気最適化は、特に高密度な居住空間や換気の不十分な空間において、熱的快適性と健全な空気環境の両方を確保するために極めて重要です。従来の設計手法は主に温度調整に焦点を当ててきましたが、近年の公衆衛生上の危機により、汚染物質の制御に重点を置いた換気戦略の再評価が求められて

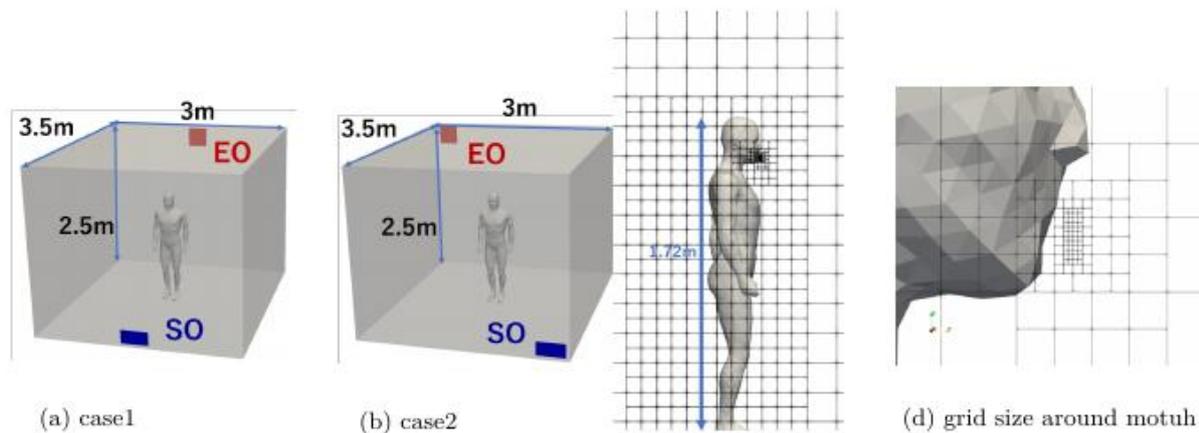


Figure 2.2.3-17 Indoor setup of a displacement-ventilated room: a) Configurations of inlets and outlets arranged in a straight line, b) Configuration of inlets and outlets arranged alternatively and c-d) Grid design for numerical calculation around the human body

います。数ある換気方式の中でも、置換換気は垂直方向の成層を生み出すことで、呼吸域における空気中病原体の拡散を抑制できる可能性があり、特に注目されています。しかし、置換換気の有効性は、風量や給気・排気口の配置といった設計パラメータに非常に敏感であるため、最適化を意味のある形で進めるには、まずその流れの力学を深く理解する必要があります。本研究では、熱源かつ発話中の人間型マネキンを実験的な熱、二酸化炭素、呼気エアロゾルの発生源として用いた置換換気シナリオを対象に、大規模渦シミュレーション（LES）によってこうした流動現象を解析しています。熱プルーム、風量、汚染物質拡散の相互作用を解析することで、本研究はCO₂を感染リスクの指標とすることの妥当性を検討し、風量の増加が置換換気の挙動を変化させ、その本来の利点を損なう可能性について評価を行っています。

本研究では、3.0×3.5×2.5 m の室内における置換換気を対象とし、従来の温度制御に基づく設計ではなく、室内空気質（IAQ）制御に焦点を当てて解析を行った。置換換気は、垂直方向の成層を促進し、下部の居住域に清浄な空気を供給し、上部の汚染された空気層と分離することで、効果的な換気を実現する手法である。室内中央には、熱および汚染物質の発生源として仮定の直立マネキンを配置した（Figure 2.2.3-17 参照）。

本研究では、2つの配置条件を検討している。ケース1では、給気口（SO）および排気口（EO）が中央に整列された構成であり、ケース2ではこれらが偏って配置された構成である。給気および排気口の面積は、それぞれ 0.08 m² および 0.09 m² である。

全ての固体形状は、ラグランジュマーカーをオイラー格子内に埋め込むイメージドバウンダリ法（IB法）によりモデリングされ、流体との相互作用が高精度に再現される。数値拡散の制御には Roeスキームを適用した。計算格子は Building Cube Method（BCM）により生成され、領域を均一な構造ブロックに細分化し、マネキンや口部などの重要領域では局所的な解像度の向上が図られている。この手法により、並列計算における負荷分散と効率が確保されている。

初期条件として、室内温度は 22 °C、相対湿度は 60% に設定された。風量は 0.01、0.02、0.04、0.06 m³/s の4通りで変化させ、合計8ケースのシミュレーションを実施し、呼気由来の汚染物質の拡散お

よびCO₂濃度に対する換気効果を評価した。

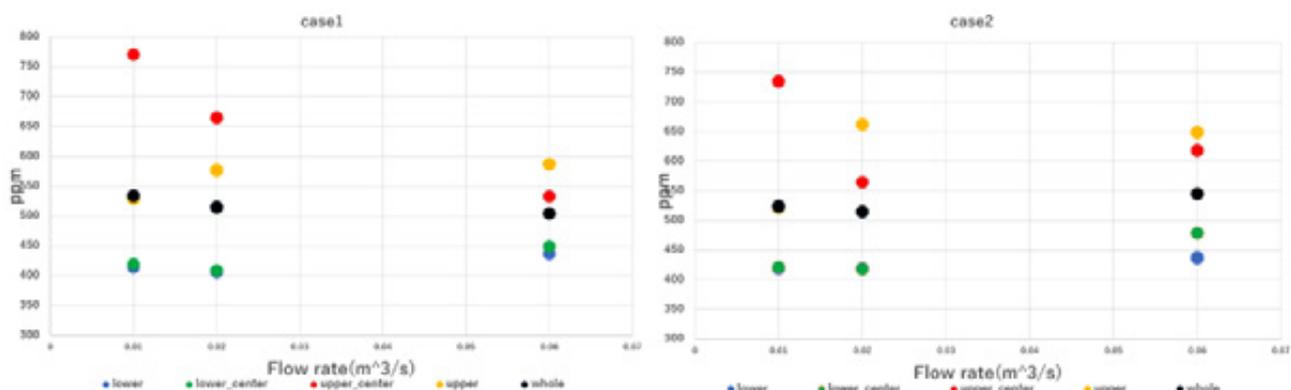


Figure 2.2.3-18 Comparison of volume-averaged CO₂ concentration under full-flow conditions in Case 1 (left) and Case 2 (right)

Figure 2.2.3-18は、ケース1 (Figure 2.2.3-18 (a)) およびケース2 (Figure 2.2.3-18 (b)) において、各風量条件下で400秒後に得られたCO₂の体積平均濃度を示しており、以下の5つの代表領域における濃度が算出されている：下層域、着座占有域、起立占有域、上層域、室内全体の平均濃度。

風量が0.01 m³/sから0.02 m³/sに増加すると、上層域を除くすべての領域で濃度が減少する傾向がみられ、特に起立占有域において顕著である。着座占有域および下層域では、CO₂濃度がほぼ外気レベル (400 ppm) に近づいた。対照的に、上層域では成層上層の汚染物質増加に伴い濃度が上昇し、置換換気の目的に適った挙動が確認された。

風量が0.04 m³/sに達すると、起立占有域および室内全体の濃度はさらに低下したが、両者の濃度差は縮小し、下層域や起立域の値に近づいた。風量が0.06 m³/sの場合、すべての領域においてCO₂濃度が上昇し始め、特にケース1では均一化が進み、混合換気への移行と、換気挙動の変化に伴うショートサーキットの存在が確認された。

ケース2では、給気口 (SO) および排気口 (EO) の偏った配置により、空気の循環が促進され、濃度の急激な減少とゆるやかな均一化が見られた。この結果は、偏位配置の方が、給気が排気へ直進する中央配置と比べて、成層層内の呼気由来汚染物質の低減により効果的である可能性を示唆している。

(b)-3-1 換気の最適化

高精度な大規模渦シミュレーション (LES) により、置換換気における基本的な気流特性および汚染物質輸送挙動を明らかにしたうえで、本節ではその性能を体系的に向上させるための手法について検討する。置換換気システムの有効性は、エネルギー消費量、感染リスクの低減、ならびに熱的快適性といった複数の要素のバランスに依存しており、これらの要素は相互に関連し、かつディフューザーのサイズ、配置、風量などの設計選択に対して高い感度を持つ。こうした設計空間を包括的に探索するために、本研究では遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化フレームワークを導入した。

本手法では、基準ケースに対するエネルギー消費量の相対評価、呼吸域におけるウイルス性エアロゾル濃度の評価、さらにFangerのPMV指標による熱的快適性の評価を通じて、競合する設計目標間のトレードオフを明確にするパレート最適構成を導出する。これにより、個別の設計判断がシステム全体の性

能に与える影響を深く理解でき、どの目的も犠牲にすることなく実行可能な実践的換気戦略の構築が可能となる。

(b)-3-2 モデル構成

本研究では、エネルギー消費と感染リスクを最小化しつつ、熱的快適性を維持することを目的に、代表的な室内空間における置換換気システムの配置最適化を行った。Figure 2.2.3-24aに示すように、解析対象となるモデル領域は、長さ3.0 m × 幅3.5 m × 高さ2.5 mの直方体室内である。室内の壁面は、代表的な屋内熱境界条件を模擬するために、25 °Cまたは27 °Cの一定温度に維持されている。

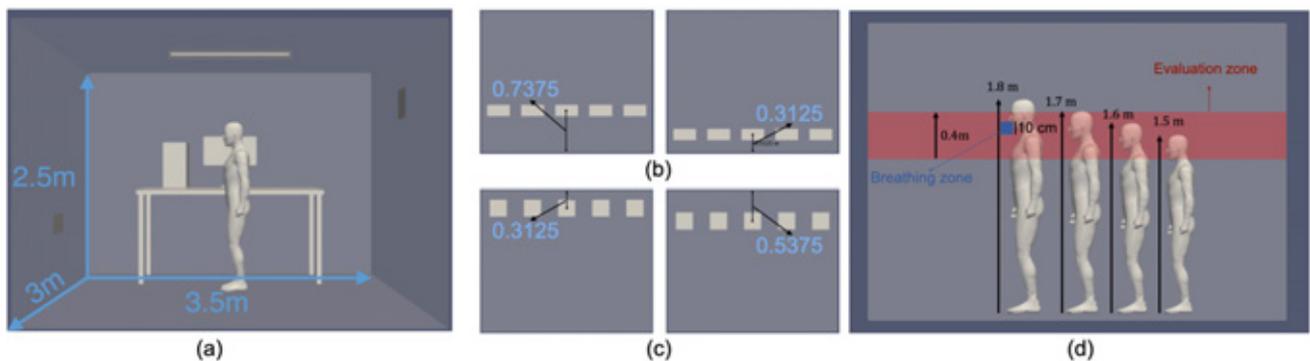


Figure 2.2.3-19 a) Layout of room with representative supply and exhaust ports, b) possible location of inlets, c) exhaust ports, and d) location of evaluation volume (including the breathing zone of a person with height between 1.5 and 1.8 m)

室内中央には、熱、CO₂、および呼吸由来のエアロゾルの現実的な発生源として、直立姿勢のマネキンを配置しており、発話中の人間を模擬している。室内の気流および汚染物質の輸送現象は、大規模渦シミュレーション (LES) により解析されており、時間的に変動する乱流構造を解像し、置換換気特有の成層構造を適切に再現する。計算領域は約1,300万セルに離散化されており、最小格子間隔は4.88 mmで、熱ブルームおよびエアロゾルの近傍拡散を高精度に解像している。

換気は、複数の離散的な給気・排気開口から導入・排出される。最適化フレームワークでは、Figure 2.2.3-19bおよび3cに示すように、10か所の候補位置からなる給気および排気の組み合わせを考慮している。各開口は、給気口としては0.04 m²または0.08 m²、排気口としては0.05 m²または0.09 m²の2種類の開口面積を持つ。さらに、給気風量は0.01 m³/sから0.06 m³/sまでの連続変数として設定されており、低換気から高換気までの広い換気条件をカバーしている。

Figure 2.2.3-19aに設計構成の一例を示しており、代表的なレイアウトにおける給気口および排気口の配置およびサイズ指定の統合的な設計を視覚的に示している。各候補設計について、400秒間の大規模渦シミュレーション (LES) を実施し、最終の100秒間を評価に用いる時間平均量の算出に使用している。エアロゾルの発生源は、マネキン頭部の口部開口としてモデル化されており、吐出された粒子は局所的な気流場によって輸送される。これにより、呼吸域 (床面から1.5~1.8 mの高さ) における汚染物質の成層挙動を解析可能としている。

(b)-3-3 目的関数

各換気設計の性能を定量的に評価するため、エネルギー使用量、感染リスク、熱的快適性という三つ

の要素間の主要なトレードオフを反映した目的関数を定義している。これらの関数は、屋内環境制御における現実的な評価基準を適切に表現するよう慎重に構築されている。

1. エネルギー消費量

換気に関わるエネルギーコストは、必要な風量に比例してファンエネルギーが増加すると仮定し、無次元化された風量ベースの指標としてモデル化されている。具体的には、エネルギー消費量 EEE は以下の式で定義される：

$$E = \frac{Q}{Q_{min}}$$

ここで Q は給気口の体積流量、 $Q_{min}=0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ は設計空間における最小風量である。この正規化により、最小のエネルギー使用量が $E=1$ に対応し、他のケースとの比較が容易になる。このモデル化は実際のファン出力（圧力損失やダクト形状に依存）を単純化してはいるが、風量増加に伴う相対的なエネルギー負荷を適切に捉えている。

2. 感染リスク（エアロゾル濃度）

空気感染リスクの定量化に向けて、床面から1.5～1.8mの高さに定義された呼吸域におけるウイルスを含むエアロゾルの濃度を追跡している。発話を模擬してマネキンの口部開口からエアロゾルスカラーを導入し、それをオイラー的スカラー場として扱い、LESで解かれた気流場により受動的に輸送され、乱流拡散の影響も受ける。

感染リスクに関する目的関数 C_{bz} は、シミュレーションの最終100秒（300～400秒）における呼吸域内のスカラー濃度の時間平均として定義される：

$$C_{bz} = \frac{1}{T} \int \bar{c}(z_{bz}, t) dt$$

ここで $\bar{c}(z_{bz}, t)$ は時刻 t における呼吸域内の空間平均濃度、 $T=100\text{s}$ である。本指標は、長時間暴露リスクの代理変数として機能し、居住者の鼻・口周辺における汚染空気の除去効率を反映する。呼吸域の概略図はFigure 2.2.3-19dに示されており、評価対象領域が強調されている。低い C_{bz} 値は、排出されたエアロゾルの効果的な隔離および除去を示す。

3. 熱的快適性（PMV）

熱的快適性の指標には、Fangerの予測平均申告（PMV）モデルを使用しており、これは居住者の平均的な温冷感を-3（寒い）から+3（暑い）の7段階で評価するモデルである。PMVは、人体と周囲空気との間の熱収支から計算され、生理的および環境的パラメータを考慮に入れている。

本研究で使用したモデルでは以下の条件を考慮している：

- 代謝量 =1.1 met
- 衣服断熱量 $I_{cl}=0.5 \text{ clo}$
- CFD解析結果から得られる空気温度および風速
- 相対湿度（60%に固定）
- 平均放射温度（空気温度と等しいと仮定）

熱伝達成分（対流・放射・蒸発）は、マネキン周囲の温度および速度場に基づいて計算される。PMVは以下のASHRAE標準式に基づいて算出される：

$$PMV = f(M, I_{cl}, T_a, v_a, RH)$$

ここで T_a および v_a は局所的な空気温度および風速である。各ケースにおけるPMVは、マネキン表面上で空間平均し、定常状態となる時間窓（300～400秒）で時間平均することで、スカラー量として得られる。PMVがゼロ付近（熱的中立）に近い設計は、快適性の観点から最適とみなされる。

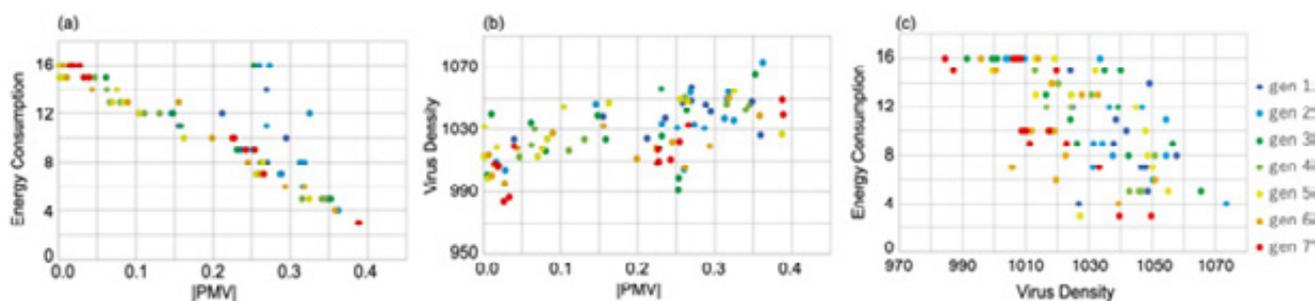


Figure 2.2.3-20 Variations in energy consumption, PMV and virus concentration per generation during the optimization process

(b)-3-4 結果

最適化プロセスにより、エネルギー消費量、感染リスク、熱的快適性のトレードオフを反映した多様な換気設計が得られた。支配されない解（non-dominated solutions）は、各目的関数の組み合わせに対してパレート前線（Pareto front）を形成しており、Figure 2.2.3-20にその例を示す。ここでは、（a）エネルギー消費量 vs. PMV、（b）熱的快適性（PMV） vs. ウイルス濃度、（c）エネルギー消費量 vs. ウイルス濃度の各関係を示している。

1. エネルギー vs. PMV

Figure 2.2.3-20(a)では、エネルギー消費量とPMVの絶対値（|PMV|）の関係を示しており、これは熱的中立状態からの逸脱度を表す。特に第5世代～第7世代において、エネルギー消費量の増加に伴い |PMV| が減少する強い負の相関が確認されている。これは直感的な結果であり、風量の増加により温度制御が改善され、局所的な温度勾配が緩和されることで、PMVがゼロに近づく傾向を示している。

興味深いのは、各世代の点が細長い直線状の帯状に分布していることであり、エネルギーと快適性との間に一貫したトレードオフが存在していることを示唆している。ただし、これは伝統的な意味でのパレート前線とはやや異なる。多目的最適化においてパレート前線とは、一方の目的関数を改善すると他方が悪化するため、支配されない解から構成される。本ケースでは、各点がエネルギーと快適性の間で一貫したバランスを示しており、両者を同時に改善できる点は存在しないことから、この細長い構造もパレート最適であると解釈できる。

また注目すべき点として、第1世代から第2世代間を除き、世代が進むにつれて原点（最小エネルギーかつ最大快適）に向かう明確な傾向は見られない。第3世代から第7世代の設計解は、ほぼ同一のトレードオフ曲線上に位置しており、最適化は早期に収束したことが示唆される。これは、ディフューザー配置や空間形状など、物理的制約によりそれ以上の改善が困難である可能性も示している。

2. PMV vs. ウイルス濃度

Figure 2.2.3-20(b)は、呼吸域におけるウイルス濃度と絶対PMV（|PMV|）の関係を示しており、感染制御と熱的快適性という競合する要求の関係性を表している。エネルギー vs. |PMV| の図に見られる明瞭な傾向とは異なり、本図ではばらつきが大きく非線形であり、両目的が密接に結びついていないこと、または異なる気流構造やディフューザー配置の影響を受けていることが示唆される。

|PMV| が小さい、すなわち熱的に中立な状態においても、ウイルス濃度は990未満から1070近くまで

広範に分布しており、熱的快適性の達成が必ずしも感染リスクの低減を保証しないことを示している。逆に、ウイルス濃度が低くても、必ずしも快適なPMVが得られるわけではない。この広がり、熱的制御と汚染物質制御を独立に最適化可能な設計解が存在することを示しており、設計上の柔軟性の観点から有望である。

進化的最適化の視点では、本図においては明確なトレードオフ前線や世代ごとの集約傾向は見られない。例えば第6世代、第7世代の一部は比較的低いウイルス濃度かつ中程度の |PMV| を達成しているが、それらは初期世代の点と混在している。このことは、ウイルスの除去挙動が風量などの全体的な換気条件よりも、局所的な気流構造に強く依存している可能性を示している。

この図において顕著なパレート前線が形成されていないことは、感染制御と快適性の同時最適化が極めて複雑であることを意味し、性能を両立させるためには、ディフューザー配置、プルームの巻き込み制御、室内レイアウトの工夫といった多次元的戦略が必要であることを強調している。

3. エネルギー消費量 vs. ウイルス濃度

Figure 2.2.3-20(c)では、エネルギー消費量とウイルス濃度の間に明確なパレート前線構造が見られ、換気による労力と空気感染リスクとの間のトレードオフを明瞭に捉えている。図中の左下領域は、エネルギー使用量および呼吸域におけるウイルス濃度の両方が低い最適な設計解を表している。

本図で最も顕著なのは、世代ごとの改善傾向である。最適化の進行に伴い、設計解が原点に向かって収束しており、第1～第3世代は広くばらついた領域に分布している一方、第6世代および第7世代の点は、左下のパレート前線上に高密度に集中している。これは遺伝的アルゴリズムが時間とともに設計解を効果的に洗練し、両目的の同時最小化に向けて収束していることを示している。

このような文脈におけるパレート前線の存在は重要である。エネルギー消費量とウイルス濃度は常に逆相関とは限らず、一部にばらつきはあるものの、この前線は支配されない解から構成されており、一方の目的関数を改善するには他方の犠牲が伴う。例えば、ウイルス濃度をさらに下げるには、より高い換気エネルギーコストを受け入れる必要があり、その逆もまた然りである。

(b)-4 多目的最適化フレームワークの実用化に向けた改良

空気感染症のモデリングは、従来、疫学モデル、宿主細胞内のウイルス動態モデル、ならびに空気力学的伝播モデルという、三つの独立したが相補的な系統で発展してきた (Figure 2.2.3.21)。疫学モデル、特にエージェントベースモデル (ABM) は、人間の行動、移動、社会的相互作用、マスク着用やロックダウンといった介入戦略を取り入れて、集団内での感染拡大を模擬する。これらのモデルは、感受性者、感染者、回復者といった健康状態間の遷移を記述する区分モデルや非区分モデルの構造を採用し、経験的データに基づくキャリブレーションに大きく依存している。

一方、宿主細胞動態（HCD）モデルは、感染者の体内におけるウイルスの増殖と消失の過程を詳細に記述し、感染症経過中のウイルス量（viral load）の時間変化を予測する。これにより、感染性の持続時間や時間依存的な伝播能力に関する重要な知見が得られるが、大規模な人口モデルに統合されることは稀である。

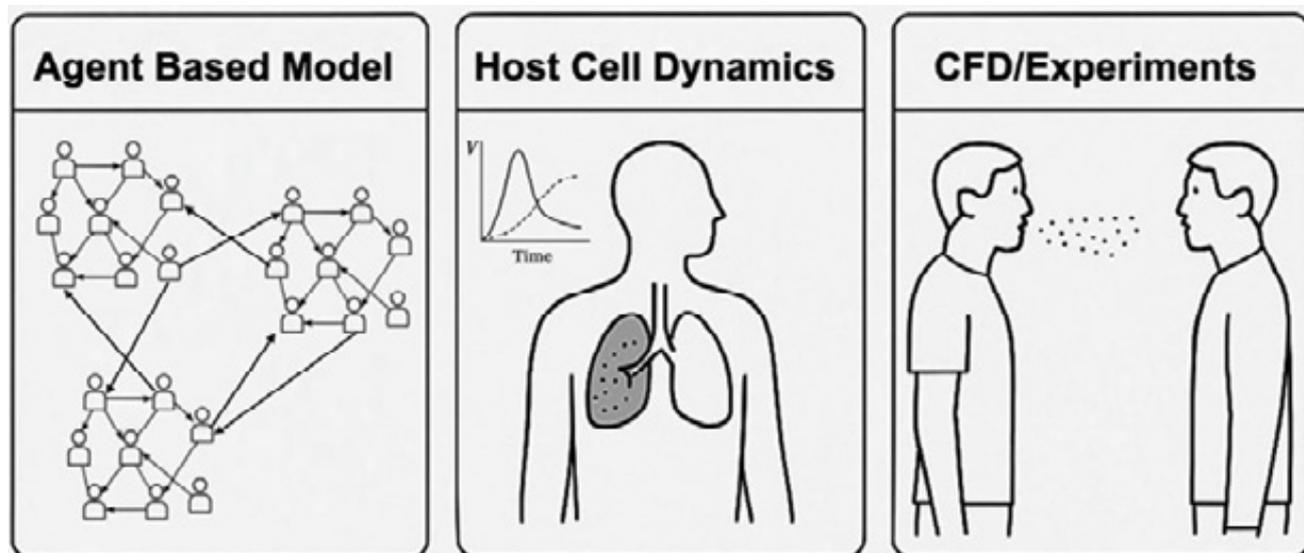


Figure 2.2.3-21 Three independent but complementary modeling approaches for airborne transmission: left) agent-based modeling, center) host-cell dynamics modeling, and right) computational fluid dynamics (CFD)

さらに別の側面として、数値流体力学（CFD）および実験的エアロゾル研究は、飛沫の放出、輸送、沈着、および吸入といった物理的伝播メカニズムの理解を深めてきた。CFDは、教室やオフィスのような屋内環境における気流と飛沫拡散を詳細にシミュレーションし、換気、人の動き、環境要因の影響を考慮することが可能である。

このように、それぞれのアプローチは独自の強みを持ちながらも、これまで別個に発展してきた。しかし、近年のパンデミックのように迅速かつ信頼性の高い感染リスク予測が求められる状況において、これらを統合する必要性が高まっている。物理学に基づく疫学モデリング（Physics-Informed Epidemiological Modeling）は、HCD や CFD から得られる知見を ABM のパラメータに反映させることにより、三者を統合した枠組みを構築することを目指している。これにより、経験的な後付けキャリブレーションに依存せず、将来の感染拡大に備えたメカニズムベースの ABM の開発が可能となる。

この統合により、疫学モデルは社会的・行動的要因のみならず、感染の生物学的メカニズムや物理的伝播メカニズムを反映できるようになる。例えば、HCD から得られるウイルス量の時系列データは、ABM における感染期間や感染力の時間変化を定義する際に利用される。一方、CFD により屋内環境での吸入飛沫量が推定され、それを用いて環境別の感染確率を設定することができる。

(b)-4-1 物理情報を活用した疫学モデルの統合フレームワーク

空気感染症のメカニズムに基づいた予測モデルを構築するため、本研究では CFD、HCD、ABM とい

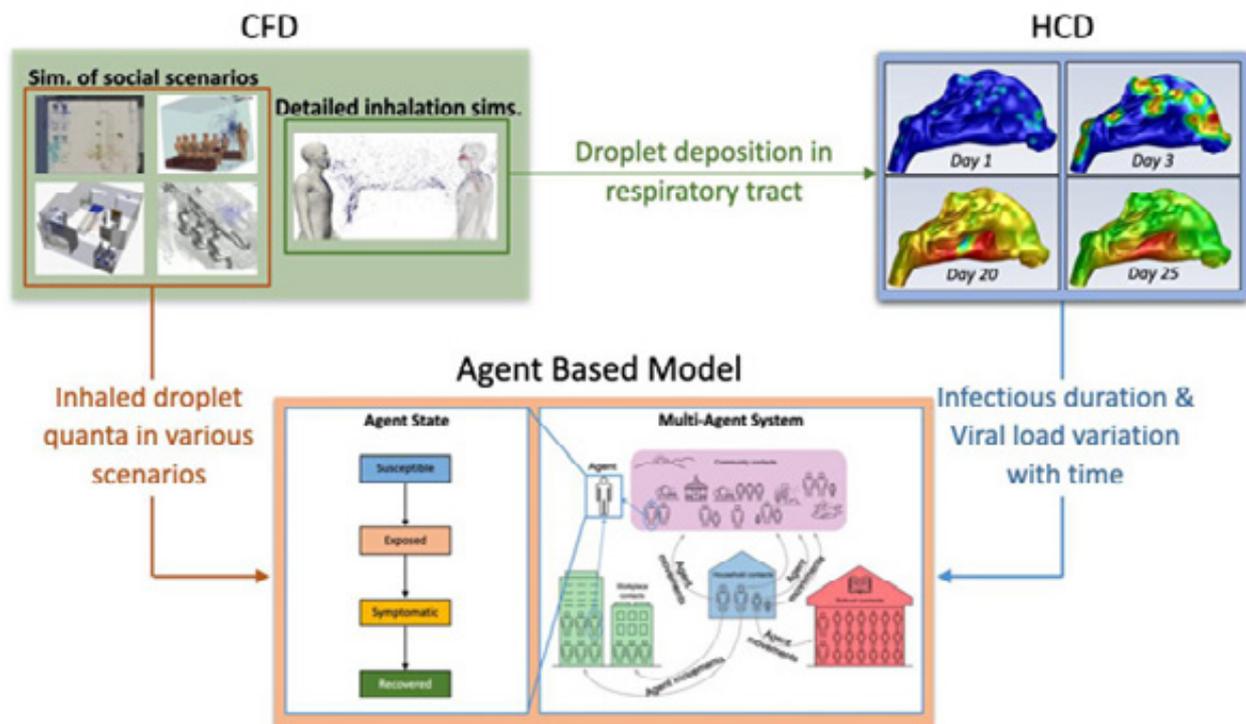


Figure 2.2.3-22 A unified epidemiological modeling framework based on physics through the integration of computational fluid dynamics (CFD), host-cell dynamics (HCD) and agent-based models

う三つの補完的なモデル体系を統合したフレームワークを提案する (Figure 2.2.3.22)。このフレームワークは双方向的な情報連携を可能とし、集団レベルの感染拡大シミュレーションを、感染の生物学的進行と飛沫伝播の物理に基づいて実行できるようにするものである。

1. HCD → ABM

HCD モデルは、感染者の体内におけるウイルス量の時間変化をシミュレーションにより予測する。例えば、感染初日から 25 日目までのウイルス量フィールドに示されるように、ウイルス濃度の増減を定量的に把握することが可能である。この時間プロファイルは、感染持続期間および時間依存的な感染力の決定において重要な役割を果たす。

これにより ABM に次の情報を提供する：

- 各エージェントの感染期間
- ウイルス量の時間変化に応じた感染力の変動

この統合により、ABM は生物学的に正確な、時間的に不均一な感染力のパターンを反映することが可能となる。

2. CFD → ABM

CFD シミュレーションは以下を対象とする：

- 各種屋内空間（学校、オフィス等）における飛沫の拡散
- 対人距離での吸入過程と気道内への沈着

この CFD 出力により、各環境条件における吸入飛沫クオンタ (quanta) が定量化される。これらの値は以下の要因に依存する：

- 室内形状および換気条件

- エージェント間の距離
- 気流パターンおよび占有状況

これらの条件別に得られた吸入量に基づき、ABM における対話ごとの感染確率を設定する。すなわち、従来の ABM において用いられてきた経験的感染確率に代わり、CFD に基づく物理的な感染リスクが適用される。

3. CFD → HCD

CFD と HCD 間には第二のリンクが存在する。CFD によって得られる、時間・空間的に解像された飛沫沈着の情報は、HCD モデルにおける初期条件や応答関数の精緻化に利用可能であり、環境曝露と体内感染過程のループを閉じる形となる。

本研究では、空気感染症の伝播を模擬するために、物理ベースの簡略化 COVASIM モデルを用いている。COVASIM は、人口構成、確率過程、介入政策など多様な要素を取り扱える高度な ABM であるが、メカニズムモデルとの統合を容易にするため、家庭、学校、職場、地域といった主要な相互作用環境に焦点を当てた簡略版を採用している。

健康状態は「感受性者」「曝露者」「症状有り」「回復者」の4段階で構成され、それぞれの遷移は疫学パラメータによって制御される。エージェントは、あらかじめ定義された接触ネットワークに従って日々相互作用を行い、その接触を通じて感染の時系列的な広がりシミュレーションされる。

現在のモデルでは、HCD のウイルス量プロファイルが ABM に統合されており、各エージェントの感染力はウイルス排出の時間変化に基づいて動的に調整される。これにより、従来の静的な感染期間仮定よりも生物学的に現実的な感染リスクの変化が再現可能となっている。

なお、CFD データの完全な統合は将来の課題であるが、現時点では CFD の結果を用いて、ABM の感

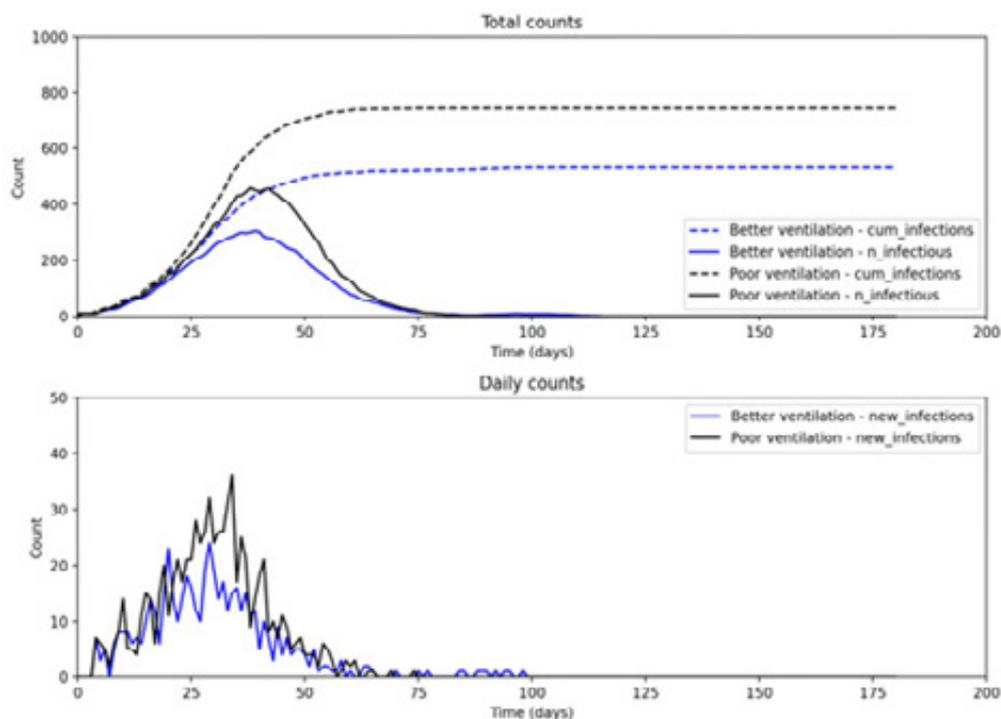


Figure 2.2.3-23 Comparison of the impact of ventilation systems on COVID-19 transmission: top) cumulative and daily case count, and bottom) new daily case count

染 確率層 (β 層) に修正を加える形で実装している。例えば、異なる換気条件下での CFD シミュレーションにより得られる飛沫曝露量の相対的变化に基づき、学校や職場での β 値をスケーリングする。この手法により、物理メカニズムを簡易的に取り入れたモデル構築が可能となっている。

このアプローチは、将来的に CFD によって得られる吸入量がエージェント間の感染イベントを直接制御するような完全連成モデルへの基盤を提供するものである。現在の実装は、HCD を通じて主要な生物学的メカニズムを捉え、CFD による β 修正を通じて一次的な物理補正を導入したハイブリッドモデルである。

(b)-4-2 結果

換気条件が空気感染症の伝播に与える影響を評価するため、上述の簡略 COVASIM フレームワークを用いてシミュレーションを行った。本モデルには、宿主細胞動態および換気条件に応じた感染確率のスケーリングが組み込まれている。1000人の合成人口を初期化し、うち10人を初期感染者として設定した。家庭（3人接触）、学校（10人）、職場（10人）、地域社会（10人）の4つの主要な環境において日々の接触が発生する。家庭は換気済み、地域社会は屋外環境と仮定され、換気改善の影響は学校と職場に限定して評価した。

感染期間は25日とし、その間のウイルス排出量の時間変化は HCD に基づく。飛沫クオンタは最良・最悪の換気条件に基づいて設定され、各環境の β 層を調整するために使用した。

シミュレーション結果 (Figure 2.2.3.23 上段) は、良好な換気 (青) と不十分な換気 (黒) の2条件を比較している。感染者総数および現在の感染者数は、良好な換気によって感染ピークが大幅に抑制され、累積感染者数も低減されることを示している。

下段に示す1日あたりの新規感染者数も、同様の傾向を示しており、不十分な換気では早期に急峻なピークが発生し、新規感染率が高い一方で、良好な換気ではピークが遅れ、緩やかかつ感染者数が少ないことが分かる。

これらの結果は、室内換気が空気感染リスクの低減において極めて重要な役割を果たすことを示しており、物理情報を取り入れた感染モデルの有用性を裏付けている。また、将来的な完全連成モデルに向けた基盤として、本研究のアプローチが有効であることを示している。

- [3-1] Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Janghoo Seo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Integration of computer-simulated persons with multi-node thermoregulation model that considers the effect of clothing for skin surface temperature distribution analysis, *Building and Environment*, 248 (2024) 111105. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111105)
- [3-2] Kazuki Kuga, Ryusei Kizuka, Islam Abouelhamd, Kazuhide Ito. Aspiration efficiency and respiratory tract deposition of indoor suspended micro-particles during steady and transient breathings, *Building and Environment*, 249 (2024) 111114. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111114)
- [3-3] Hanyu Li, Nguyen Dang Khoa, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. In silico identification of virus loads in cough-generated droplets - Seamless integrated analysis of CFPD-HCD-EWF, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 246 (2024) 108073. (doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108073)
- [3-4] Islam Abouelhamd, Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito. Effect of Crowd Density, Wind Direction, and

Air Temperature on the Formation of Individual Human Breathing Zones in a Semi-outdoor Environment, *Sustainable Cities and Society*, 103 (2024) 105274. (doi.org/10.1016/j.scs.2024.105274)

- [3-5] Ryu Itokazu, Ken Bryan Fernandez Kazuki Kuga, Naoki Ikegaya, Kazuhide Ito. Net Escape Velocity, Transfer Probability and Travel Time Distributions within a Cross-Ventilated Room Model Sheltered by Urban-Like Block Array, *Building and Environment*, 259 (2024) 111668. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111668)
- [3-6] Xin Wang, Qi Wang, Sung-Jun Yoo, Juyeon Chung, Taisaku Gomyo, Hajime Sotokawa, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Multi-layered ventilation duct system for heat exchange with air purification, *Building and Environment*, 262 (2024) 111773. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111773)
- [3-7] Ken Bryan Fernandez, Sung-Jun Yoo, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Toward occupant-centric system: multicriteria optimization of hybrid displacement–personalized ventilation system using computational fluid dynamics with computer-simulated person, *Building and Environment*, 262 (2024) 111837. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111837)
- [3-8] Hanyu Li, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Allometric Comparison of Viral Dynamics in the Nasal Cavity–Nasopharyngeal Mucus Layer of Human and Rhesus Monkey by CFD-HCD Approach, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 255 (2024) 108354. (doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108354)
- [3-9] Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Impact of human micro-movements on breathing zone and thermal plume formation, *Building and Environment*, 264 (2024) 111916. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111916)
- [3-10] Islam Abouelhamd, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Convective Heat Transfer and Drag Coefficients of Human Body in Multiple Crowd Densities and Configurations in Semi-outdoor Scenarios, *Building and Environment*, 265 (2024) 111983. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111983)
- [3-11] Onkangi Ruth, Kazuki Kuga, Pawel Wargocki, Kazuhide Ito. Observational study of close contact behaviors in a multinational graduate student office, *Building and Environment*, 265 (2024) 112015. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112015)
- [3-12] Xin Wang, Taisaku Gomyo, Hajime Sotokawa, Sung-Jun Yoo, Juyeon Chung, Kazuhide Ito. Mathematical Modeling of Gas-phase Mass Transfer Model in Hydrous Materials for a Total Heat Exchange Ventilator, *Building and Environment*, 267 Part B (2024) 112291. (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112291)

(4) サブ課題D「マルチコンポーネント統合シミュレーションによるカーボンフリーガスタービン設計」 (協力機関：京都大学、九州大学)

(a) 研究成果の要旨

令和6年度は、統合シミュレーションの実施（詳細形状本計算）（継続）、フラッシュバック、燃焼振動、エミッション評価（継続）、異常兆候自動検知データセンシング技術の構築、3次元数値シミュレーションによる水素、アンモニア乱流燃焼機構の解明および乱流燃焼モデルの精度検証（当量比の影響）を行った。その結果、本統合シミュレーションが、フラッシュバック、燃焼振動、エミッションの予測に有効な手段となりうることを確認した。また、異常燃焼（フラッシュバック）の兆候を検知するうえで、機械学習の利用は効果的であることを示した。さらに、当量比の違いによらず乱流燃焼モデルには選択拡散や火炎伸長の効果を考慮することが燃焼器内乱流燃焼場の高精度予測に不可欠であることを明らかにし

た。尚、ここでの解析には全て「富岳」を活用した。

In this fiscal year, LESs based integrated simulations of a compressor/combustor/turbine assembly of a gas turbine were performed using detailed configurations, and the validities for predicting flashback, combustion instabilities and emissions continued to be examined. In addition, the development of data sensing technology for automatic abnormal sign detection was discussed. Further, the turbulent combustion mechanism and its modelling for hydrogen and ammonia, especially in terms of equivalence ratio, were investigated by three-dimensional direct numerical simulation (DNS). The results showed that the integrated simulation was capable of capturing combustion characteristics including flashback, combustion instabilities and NO emissions, and that the utilization of machine learning is effective to detect a sign of abnormal combustion (flashback). It was also found that regardless of the equivalence ratio, considering the effects of preferential diffusion and flame stretch in the turbulent combustion model was quite important for the high-accuracy prediction of the combusting fields of combustors. All simulations in this study were performed on the supercomputer "Fugaku."

(b) 本年度の内容

(b)-1 ガスタービン統合シミュレーション

本解析では、非構造格子に適用可能な FrontFlow /red large-eddy simulation (LES)を、京都大学と（株）数値フローデザインにより改良したものをを用いた[4-1,4-2]。

(b)-1-1 計算対象

(b)-1-1-1 産業用ガスタービンエンジン

2024年度は Figure 2.2.4-A1 に示す川崎重工業製発電用ガスタービンエンジンの 32 億要素のメッシュに対する解析を行った。32 億要素のメッシュによる解析は、2023 年度で得られた 4 億要素の川崎重工業製発電用ガスタービンエンジンの解析結果を用いて 32 億要素の詳細メッシュによる解析を実施した。32 億要素の解析は事前の検討から 4 億要素の解析と同様の手順で解析を行うと計算コストが膨大となると判断されたため、4 億要素のメッシュデータをメッシュリファイナーにより作成された 32 億要素のメッシュに適合するリスタートデータを作成することにより、計算コストの大幅な削減を目指した。

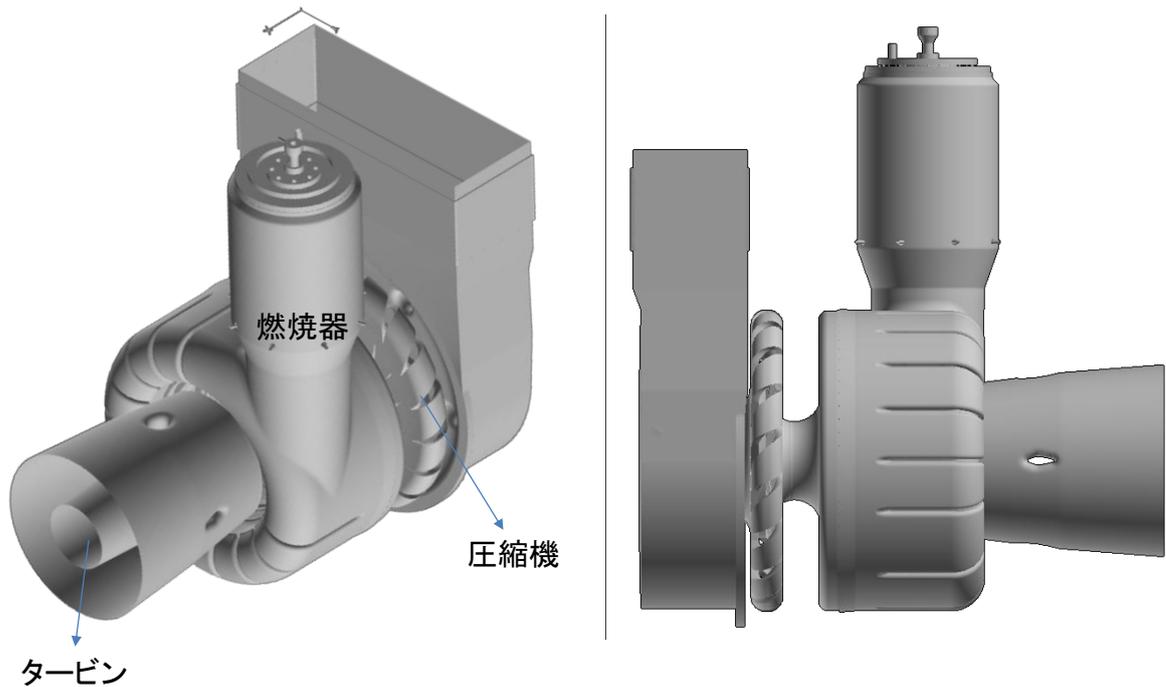


Figure 2.2.4-A1 Industrial gas turbine.

(b)-1-1-2 航空機用ガスタービンエンジン

Figure 2.2.4-A2 に、対象とした宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)が設計検討を行った航空機用水素燃料ガスタービンエンジンを示す。対象とした航空機用ガスタービンエンジンにおいて、高圧圧縮機、燃焼器、高圧タービンを対象とし、節点数は約 1.0 億、要素数は約 3.2 億のメッシュで再現した。

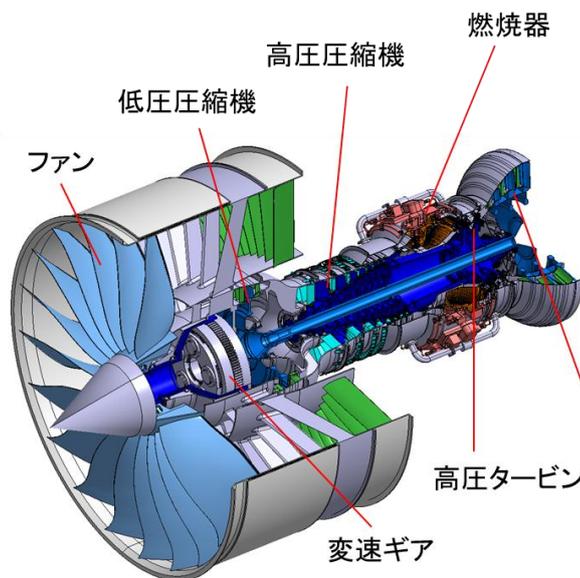


Figure 2.2.4-A2 Aircraft gas turbine [4-1]

(b)-1-2 計算方法、モデル、条件

(b)-1-2-1 計算方法

本解析では、予混合燃焼をベースとした Flamelet Generated Manifold (FGM)法[4-4]を用いた LES を実施する。FGM 法の支配方程式は、以下の連続の式、運動量の保存式、混合分率の保存式、反応進行変数の保存式、エンタルピーの保存式、および NO の生成予測のための輸送方程式で構成される。

質量保存式：

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (\text{A1})$$

運動量保存方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{A2})$$

混合分率輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \widetilde{D_Z} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{Zj}}{\partial x_j} \quad (\text{A3})$$

反応進行度変数輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{c} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \widetilde{D_C} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{Cj}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \widetilde{W_C} \quad (\text{A4})$$

エンタルピー輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) \quad (\text{A5})$$

NO 輸送式：

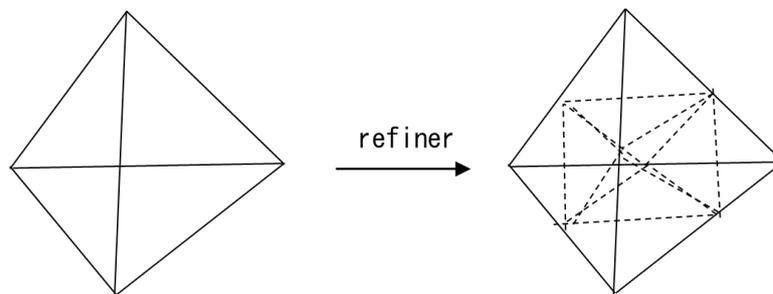
$$\frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{Y_{NO}}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \widetilde{Y_{NO}} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \widetilde{D_{Y_{NO}}} \frac{\partial \widetilde{Y_{NO}}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{Y_{NO}j}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \widetilde{W_{NO}} \quad (\text{A6})$$

ここで、上付きの \sim は LES フィルタを表し、 \sim はファールブル平均を意味する。上記輸送方程式より求めた流れ場の混合分率および反応進行度変数を元に、1次元予混合燃焼解析から得られた flamelet データベースを参照し、温度や、反応速度、化学種組成を求めることで乱流燃焼場の予測を行う。圧縮機およびタービンの動翼を含む領域は非慣性系として扱い、運動量保存式にはコリオリ力および遠心力を含む。慣性系と非慣性系との境界は sliding 境界を設け、sliding 面で慣性系と非慣性系の物理量の交換を各ステップで計算し直す[4-5]。

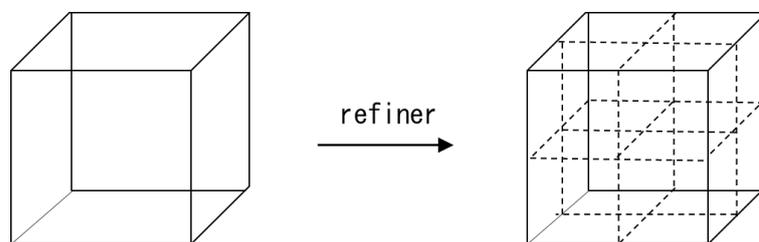
(b)-1-2-2 詳細解析用メッシュの作成法

詳細形状のメッシュ生成、計算結果について整理する。詳細形状の計算のためのメッシュはメッシュャーで作ることはせず、3-3 節までの簡易形状解析で用いたメッシュをリファインすることで構築する。四面体要素および六面体要素のリファインの様子を Figure 2.2.4-A3 に示す。具体的な方法を以下に示す。四面体では、各要素の頂点と各要素の辺の中点と重心とから、8 個の四面体にリファインされる。すなわち、リファイン前の頂点とこの頂点を通る 3 本の辺に定義される中点から成り立つ 4 個とこれらと同じ組み合わせの中点とリファイン前の重心とで頂点を構成する四面体 4 個とにリファインされる。六面体ではリファイン前の頂点と各辺の中点と各面の重心と要素の重心を頂点とし、リファインされる。すなわち、リファイン前の頂点およびこの頂点で交わる 3 面の重心、3 面のうち、着目するリファイン前の頂点で交

わる 3 本の辺の中点と要素の重心とでリファイン後の要素が再定義される。従って、六面体要素もリファインにより 8 個の要素が定義される。メッシュリファイナーにより作成された詳細解析用メッシュは約 7.0 億節点、約 33 億要素となる。



(a) Split a tetrahedral mesh by refiner.



(b) Split a hexahedral mesh by refiner.

Figure 2.2.4-A3 Refined tetrahedral or hexahedral mesh with refiner included FrontFlow/red.

(b)-1-2-3 産業用ガスタービンエンジンの解析条件

32 億要素の統合解析のための産業用ガスタービンエンジンの解析条件を Table 2.2.4-A1 に示す。32 億要素の解析は 4 億要素の 330,000 ステップの結果を、2-2 節で示したメッシュリファイナーにより作成した格子データに合致するようにリスタートデータを作成し、これをリスタート計算することで計算コストの削減を図った。

Table 2.2.4-A1 Numerical conditions for industrial gas turbine engine.

乱流モデル	LES(標準スマゴリンスキモデル)
移流項の補間法	1 次精度風上
時間積分法	1 次オイラー陰解法
時間刻み	1.0×10^{-6} 秒
壁面の条件	速度：対数則 温度：断熱
燃料	都市ガス 13A
酸化剤	空気
流入条件	酸化剤：288K、0.11MPa 燃料：298K、1MPa

(b)-1-2-4 航空機用ガスタービンエンジンの解析条件

航空機用ガスタービンエンジンの解析条件を Table 2.2.4-A2 に示す。回転数は JAXA から提示された本対象のガスタービンエンジンの定格回転数[4-6]を与えている。また、計算開始時は JAXA から提示された低圧圧縮機、高圧圧縮機、高圧タービンの圧縮比から高圧圧縮機、高圧タービンの入口と出口圧力を算出し、主流方向で線形補間し、これを初期圧力とした。また、温度についても高圧圧縮機、高圧タービンの入口と出口圧力からファンの入口条件から断熱変化を仮定して温度を算出し、高圧圧縮機と高圧タービン内を主流方向に線形補間し、これを初期温度とした。燃焼は燃焼室内に圧縮機からの空気が十分流入したと判断したステップから燃料の流入を開始した。

Table 2.2.4-A2 1 Numerical conditions for aircraft gas turbine engine.

乱流モデル	LES(標準スマゴリンスキモデル)
移流項の補間法	1次精度風上
時間積分法	1次オイラー陰解法
時間刻み	1.0×10^{-6} 秒
壁面の条件	速度：滑りなし壁則 温度：断熱
流入条件	圧力固定(全圧 0.1MPa)
流出条件	圧力(全圧 0.6MPa)
回転数	18,000rpm
燃料	水素
酸化剤	空気
流入ガス	酸化剤：322K、0.15MPa、28.4kg/s 燃料：300K、3.48MPa、0.21kg/s

(b)-1-3 計算成果

(b)-1-3-1 KHI ガスタービン

32億要素の解析結果を示す。Figure 2.2.4-A4 に圧縮機1段目の速度、圧力、温度を、Figure 2.2.4-A5 に圧縮機2段目の速度、圧力、温度を、Figure 2.2.4-A6 に燃焼器内の速度、温度、混合分率、化学種の分布を、Figure 2.2.4-A7 にタービンの速度、圧力、温度をそれぞれ示す。32億要素の解析は「富岳」で4096ノードを用い、24時間で1200ステップ要することを確認した。したがって、リファイナーの利用により、「富岳」で $(330,000/1200) \times 24 \times 4096 =$ およそ27,000,000ノード時間分の節約に寄与することが可能となる。

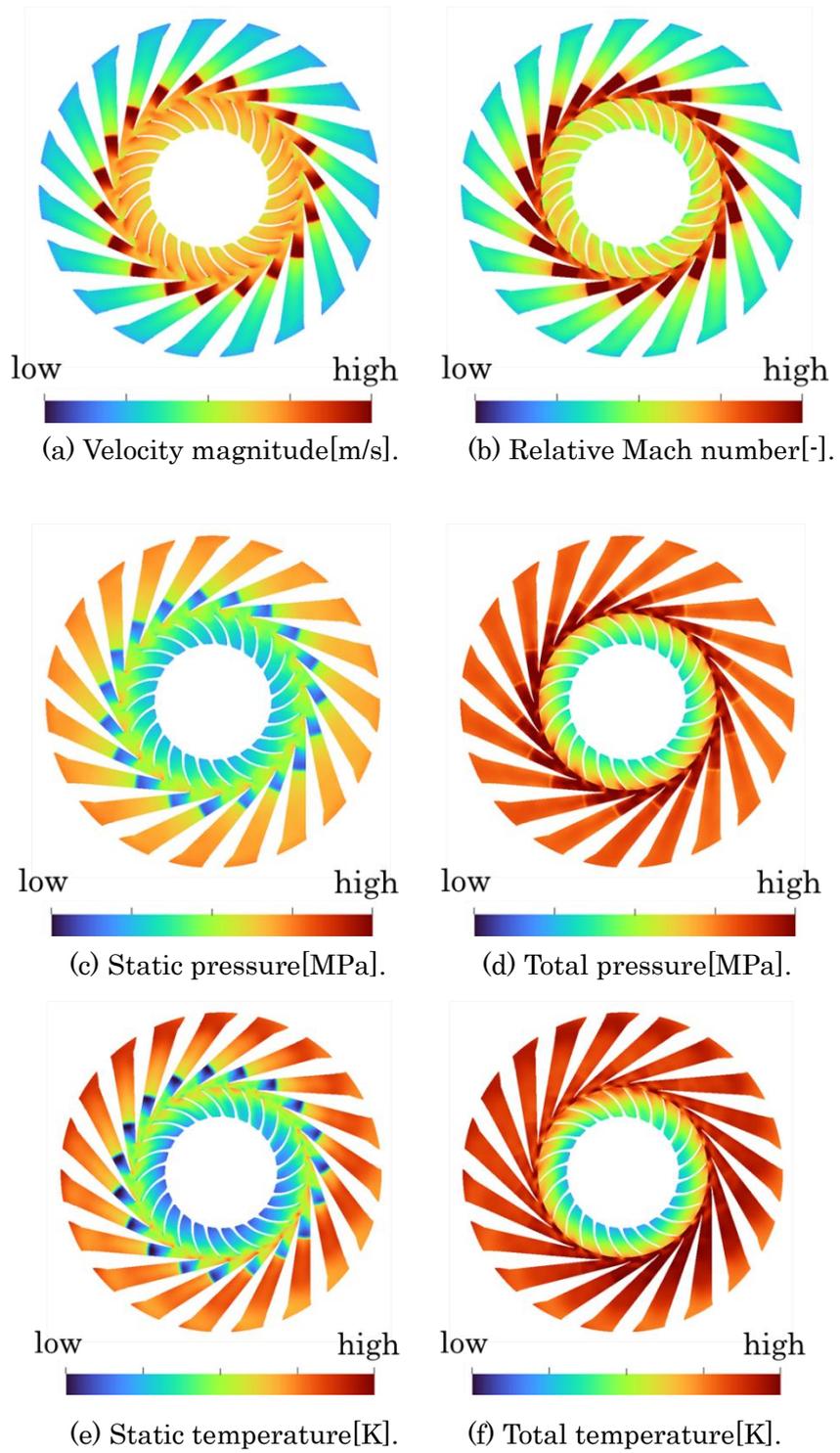


Figure 2.2.4-A4 Instantaneous distributions of velocity, Mach number, pressure and temperature in 1st stage of compressor.

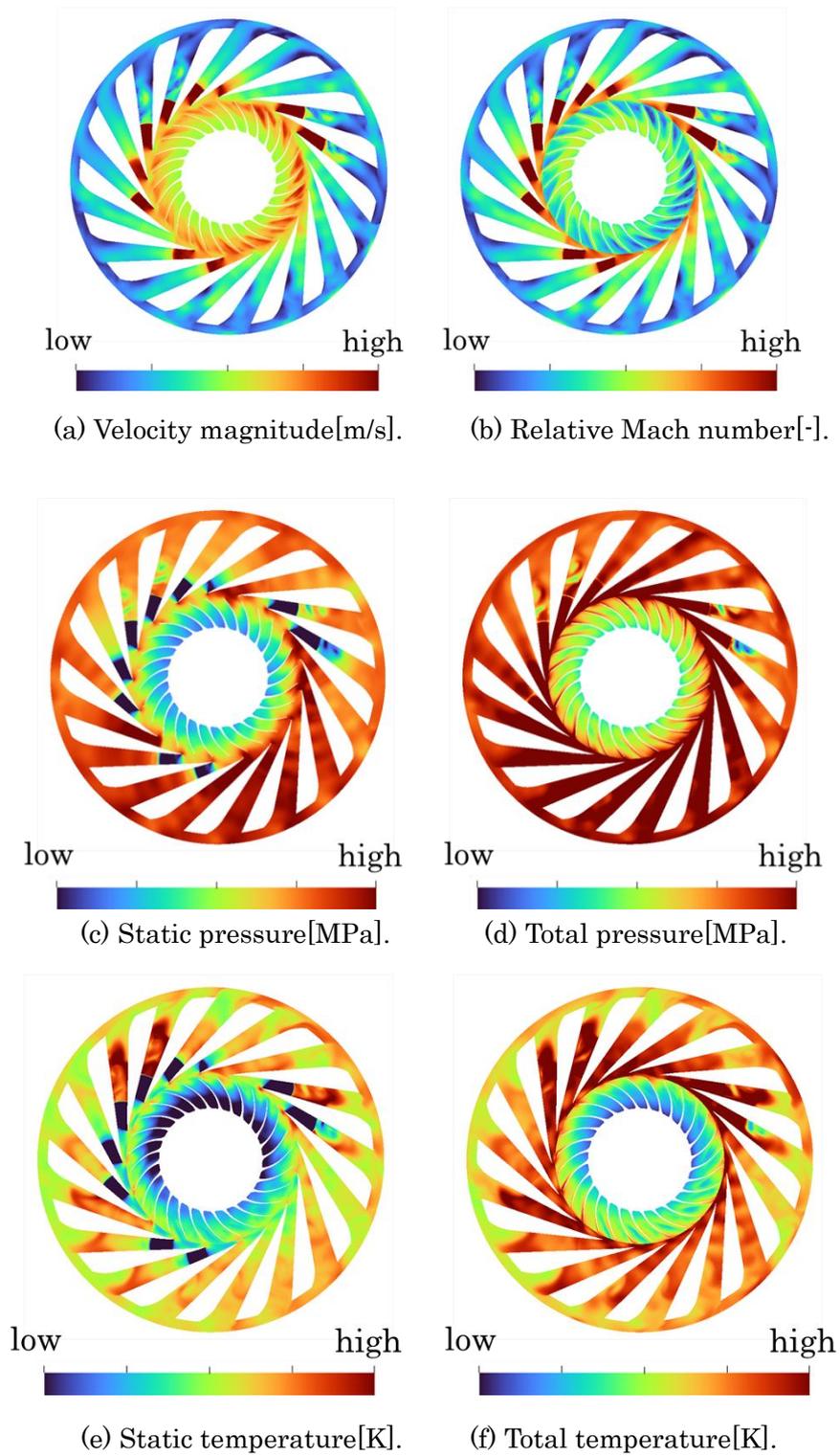
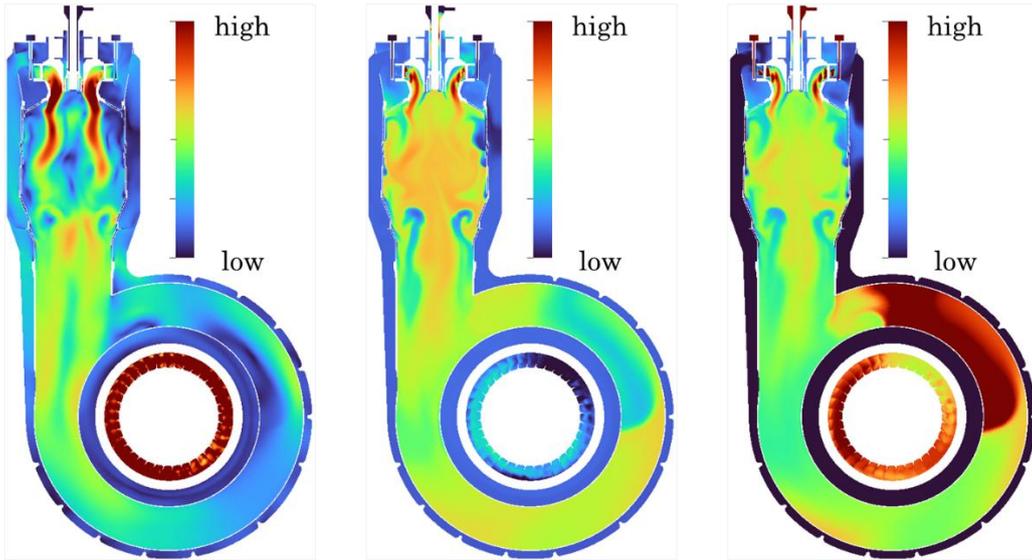
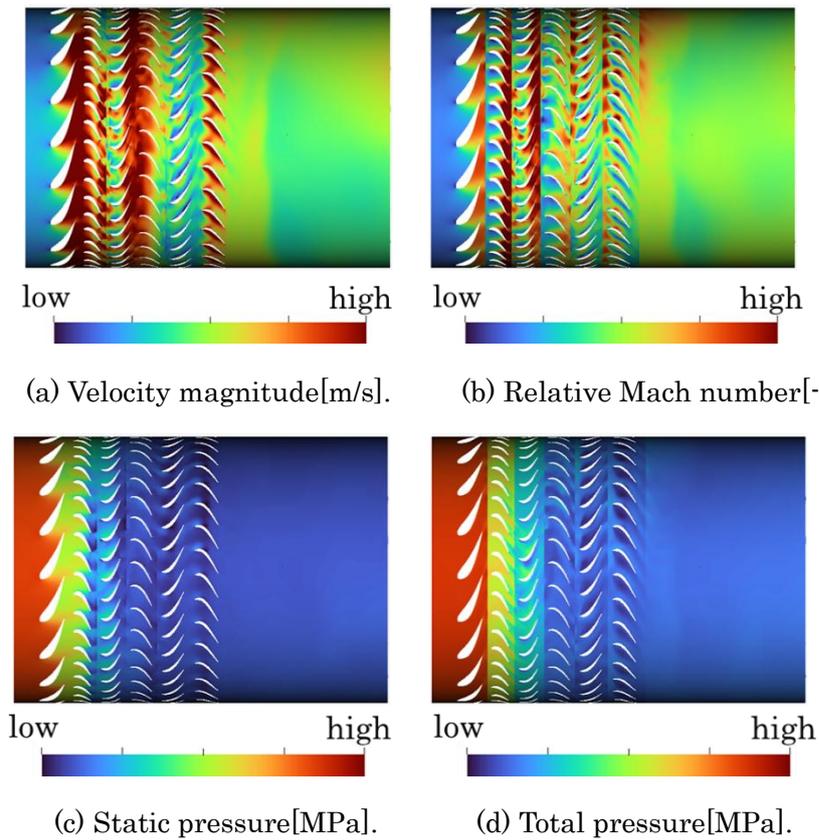


Figure 2.2.4-A5 Instantaneous distributions of velocity, Mach number, pressure and temperature in 2nd stage of compressor.



(a) Velocity magnitude[m/s]. (b) Static temperature[K]. (c) Mixture fraction[-].

Figure 2.2.4-A6 Instantaneous distributions of velocity, temperature and mixture fraction in combustor.



(a) Velocity magnitude[m/s].

(b) Relative Mach number[-].

(c) Static pressure[MPa].

(d) Total pressure[MPa].

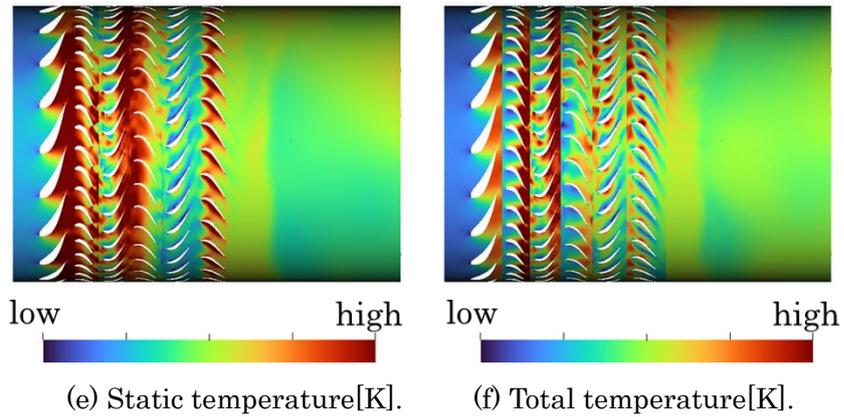
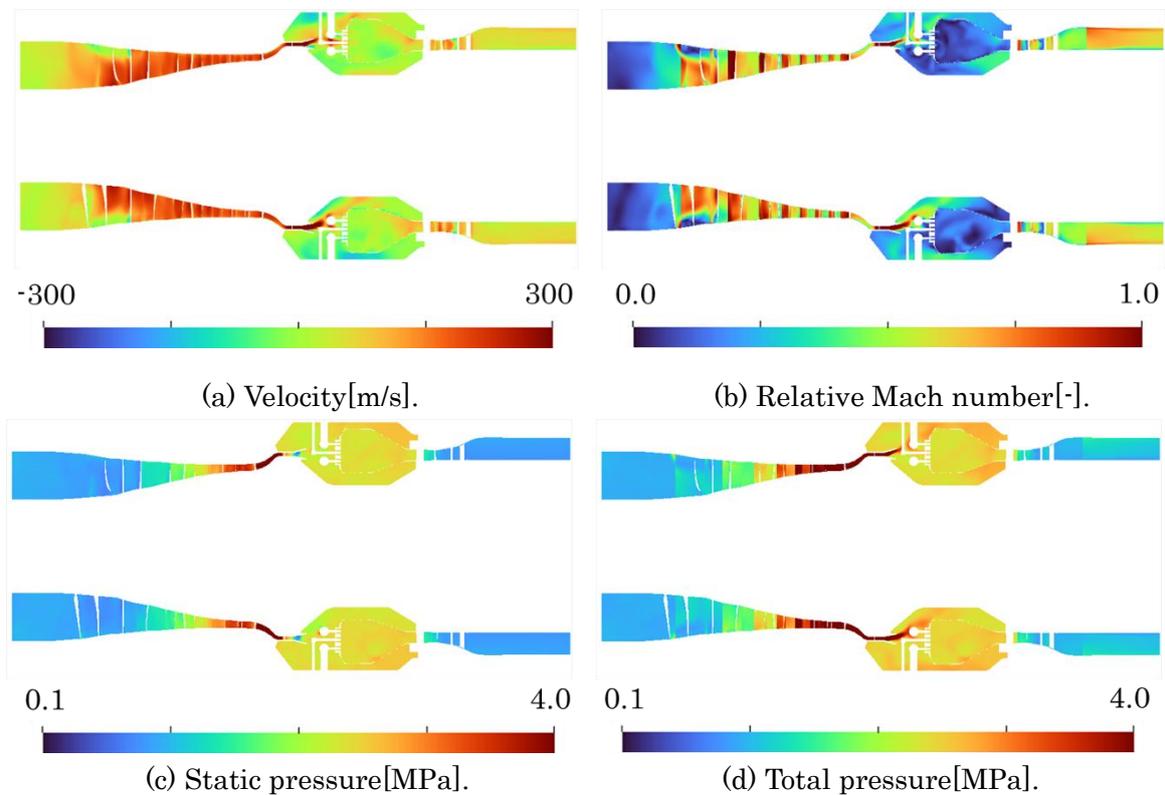


Figure 2.2.4-A7 Instantaneous distributions of velocity, Mach number, pressure and temperature in turbine on a surface of 0.18m from rotating axis.

(b)-1-3-2 JAXA ガスタービン

2節で示した解析方法、解析条件にもとづき、解析を行った結果を Figure 2.2.4-A8 に示す。可視化した断面は圧縮機、タービンの回転軸上の断面であり、主流方向の速度、相対マッハ数、静圧、全圧、静温、全温を示す。圧縮機による空気の吸い込み、燃焼器内での燃焼およびタービンから解析領域出口まで一体的に解析が行えていることを確認した。



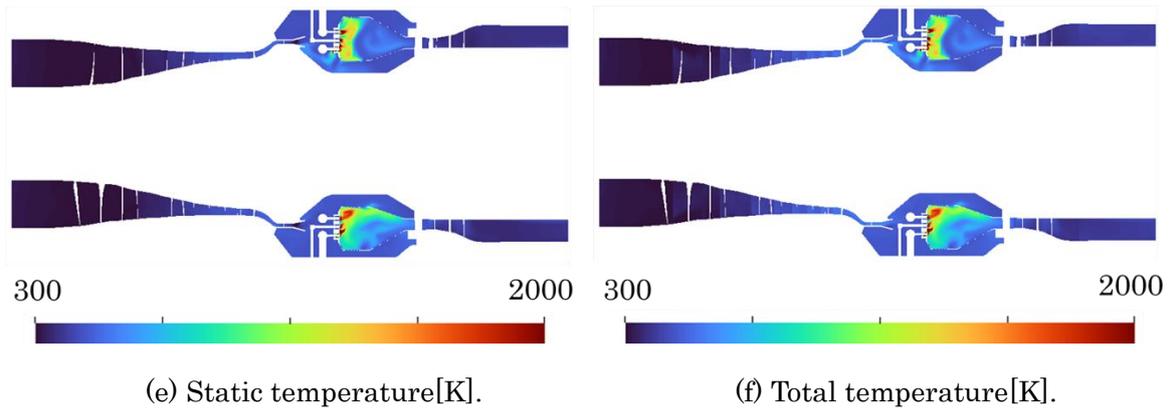


Figure 2.2.4-A8 Instantaneous distributions of velocity, Mach number, temperature, and pressure.

(b)-1-4 まとめ

4億要素の産業用ガスタービンエンジンから33億要素のメッシュおよびリスタートデータを削減することで計算コストを大幅に削減することに成功した。また、作成した32億要素のリスタートデータによる計算の継続も安定に行うことができることを確認した。また、リスタートにより、「富岳」の計算資源の2700万ノード時間程度節約可能であることを確認した。

(b)-2 フラッシュバック、燃焼振動、エミッション (NOx) 評価 (燃焼器)

本解析では、非構造格子に適用可能な FrontFlow/red large-eddy simulation (LES) を、京都大学と (株) 数値フローデザインにより改良したものをを用いた[4-1,4-2]。

(b)-2-1 計算対象

対象は、川崎重工業株式会社の産業用ガスタービンエンジンの燃焼器単体である。ガスタービン燃焼器燃焼解析を行い、フラッシュバック、燃焼振動、エミッション (NOx) 評価を実施した。解析で用いたメッシュは、統合シミュレーションで用いた格子のうち燃焼器部分のみを取り出してきたもので、節点数は約0.23億、要素数は約1.31億である。

(b)-2-2 計算方法、モデル、条件

本解析では、予混合燃焼をベースとし、2つの燃料種の混合を考慮可能な3種吹込みガス燃焼の Flamelet Generated Manifold (FGM) [4-4]法を用いた LES を実施する。本手法は、2つの燃料種及び酸化剤の混合を考慮可能とするために、2つの混合分率の輸送方程式 (Z1:都市ガス由来成分、Z2:水素由来成分) を解く。FGM法の支配方程式は、以下の連続の式、運動量の保存式、混合分率の保存式、反応進行変数の保存式、エンタルピーの保存式、およびNOの生成予測のための輸送方程式で構成される。

質量保存式：

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_j) = 0 \quad (\text{B1})$$

運動量保存方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (\text{B2})$$

混合分率1輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{z}_1}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{z}_1 \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \bar{D}_Z \frac{\partial \bar{z}_1}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{z_j}}{\partial x_j} \quad (\text{B3})$$

混合分率 2 輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{z}_2}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{z}_2 \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \bar{D}_Z \frac{\partial \bar{z}_2}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{z_j}}{\partial x_j} \quad (\text{B4})$$

反応進行度変数輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{c} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \bar{D}_C \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{c_j}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \bar{W}_C \quad (\text{B5})$$

エンタルピー輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{h} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{h}}{\partial x_j} \right) \quad (\text{B6})$$

NO 輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{Y}_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{Y}_{NO} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \bar{D}_{Y_{NO}} \frac{\partial \bar{Y}_{NO}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{Y_{NO}j}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \bar{W}_{NO} \quad (\text{B7})$$

ここで、上付きの—は LES フィルタを表し、～はファールブル平均を意味する。

燃料種 1 と 2 の総和の混合分率は、

$$Z_{Fuel} = Z_1 + Z_2 \quad (\text{B8})$$

であり、燃料に含まれる水素の割合 W は、

$$W = \frac{Z_2}{Z_{Fuel}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (\text{B9})$$

とおける。上記輸送方程式より求めた流れ場の混合分率および反応進行度変数に加えて W を元に、1 次元予混合燃焼解析から得られた 3 種吹込みガス燃焼の flamelet データベースを参照し、温度や、反応速度、化学種組成を求めることで乱流燃焼場の予測を行う。産業用ガスタービンエンジンの解析条件を Table 2.2.4-B1 に示す。解析ケースを Table 2.2.4-B2 に示す。水素混焼率を発熱量ベースで 10~80%まで変更させた 5 つの条件での解析を行った。解析の初期は都市ガス専焼の安定火炎として、各混焼率の流量に変更した計算を行い、20msec 分計算を行った。

Table 2.2.4-B1 Numerical conditions.

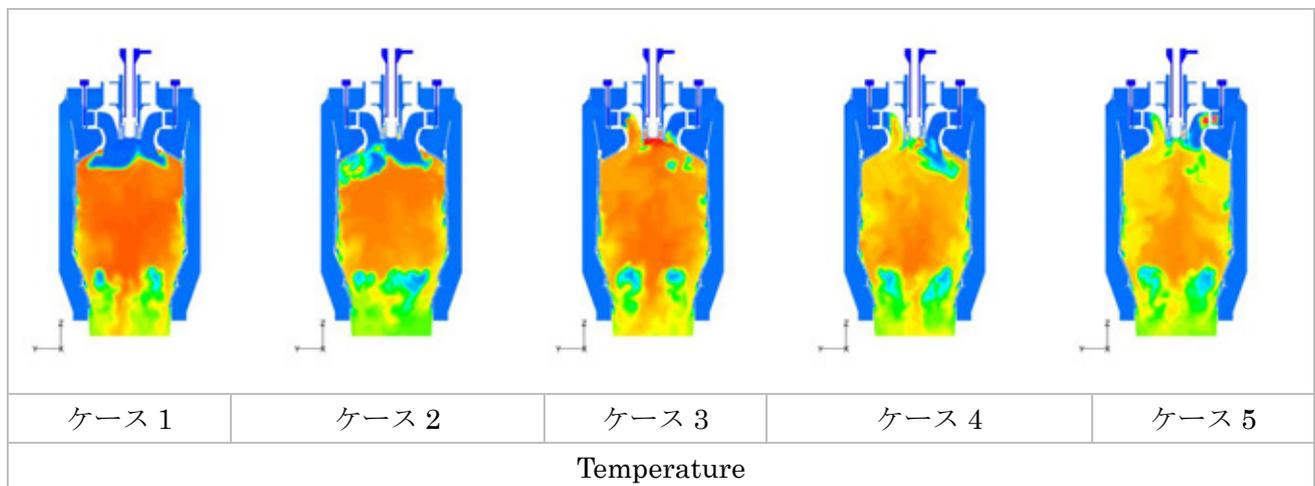
乱流モデル	LES(標準スマゴリンスキモデル)
移流項の補間法	2 次精度風上
時間積分法	1 次オイラー陰解法
時間刻み	1.0×10 ⁻⁶ 秒
壁面の条件	速度：対数則 温度：断熱
燃料	水素混焼ガス：水素 都市ガス 13A
酸化剤	空気
流入条件	酸化剤：612K、1MPa 燃料：298K、1MPa

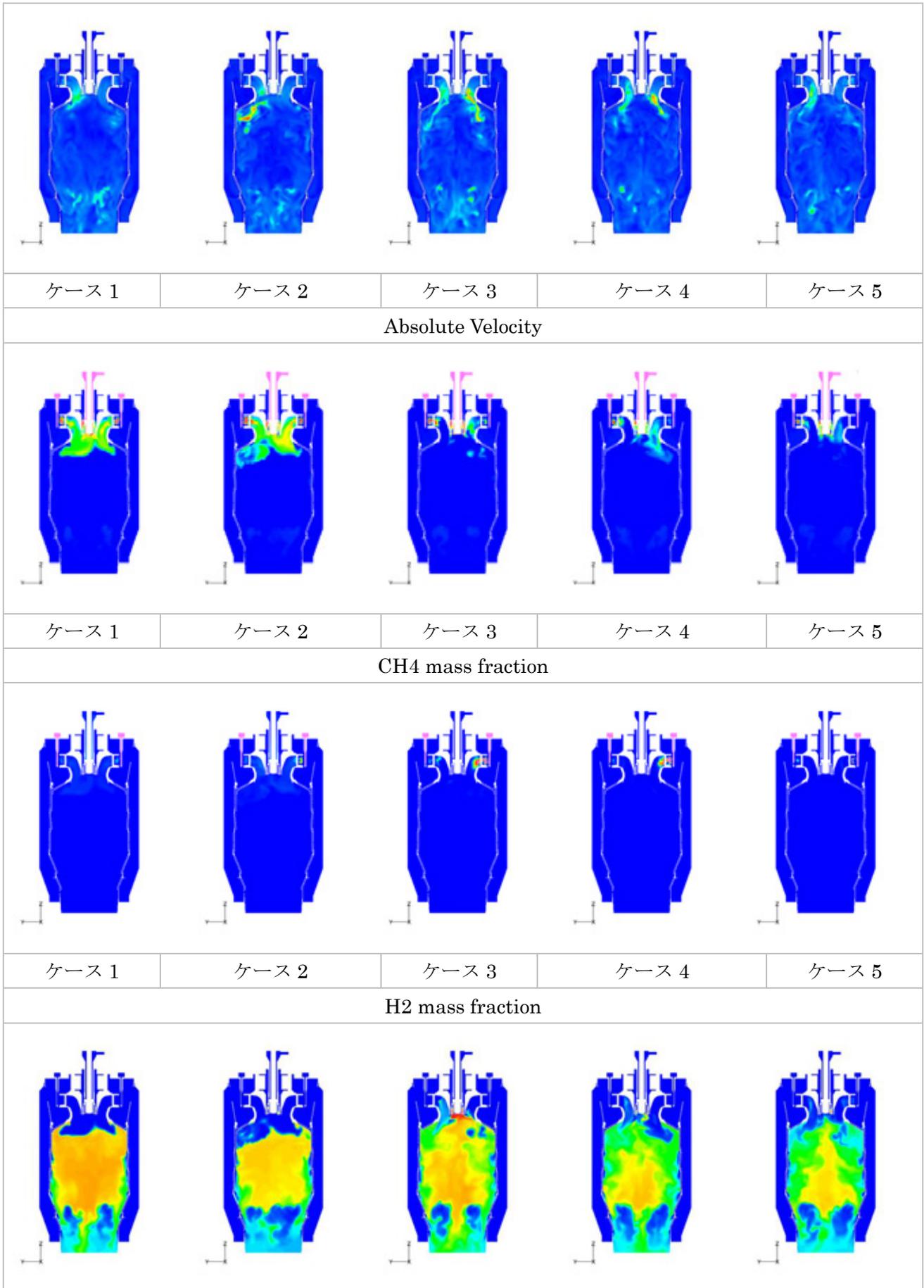
Table 2.2.4-B2 Simulation cases.

ケース	条件
1	低水素混焼率
2	↓
3	↓
4	↓
5	高水素混焼率

(b)-2-3 解析結果

Figure 2.2.4-B1 に、異なる水素混焼率の解析で得られた、燃焼器の中心を通る断面の温度、流速絶対値及び化学種濃度(CH₄, H₂, CO₂, H₂O, NO)を示す。ケース 1→5 で徐々に水素混焼率を増加させており、それにより燃焼速度が上昇し、火炎の先端が予混合管内に遡上する結果がみられた。一度遡上した火炎の先端は、燃料ノズル下流で保炎してしまい、予混合管内が常に高温ガスで満たされた状態を維持していることがわかる。現状、ケース 2 の水素混焼率までは、安定火炎が形成されているのに対して、ケース 3 の水素混焼率以上では、フラッシュバックが起こっていることが結果からわかる。また、Figure 2.2.4-B2 に、低水素混焼率のケース 1 での燃焼器内の圧力の時間変化を示す。本条件においては、圧力の変動の振幅は最大でも 1%程度と明確な燃焼振動はみられなかった。NO_x 生成については、NO 輸送方程式を別途解くことで予測を行った。ケース 1~2 のフラッシュバックが起こっていない条件においては、より予混合燃焼的な燃焼場となっており、NO_x 生成量が低く保たれているのに対して、フラッシュバックが起こっているケース 3~5 では、予混合管内に火炎が入り込んでおり、ここで拡散燃焼的な燃焼場となっており、より大きな NO_x 生成量が見られた。また、水素混焼率が高いほど NO_x 量が増加している傾向がみられる。今後は、フラッシュバック限界の水素混焼率を探るために、安定火炎とフラッシュバックの起こった条件の間の混焼率での計算を複数ケース行う予定である。また、フラッシュバックの起こっていない条件において、混焼率や当量比の調整を行い燃焼振動の起こる条件を探し、燃焼振動の検証を継続する予定である。





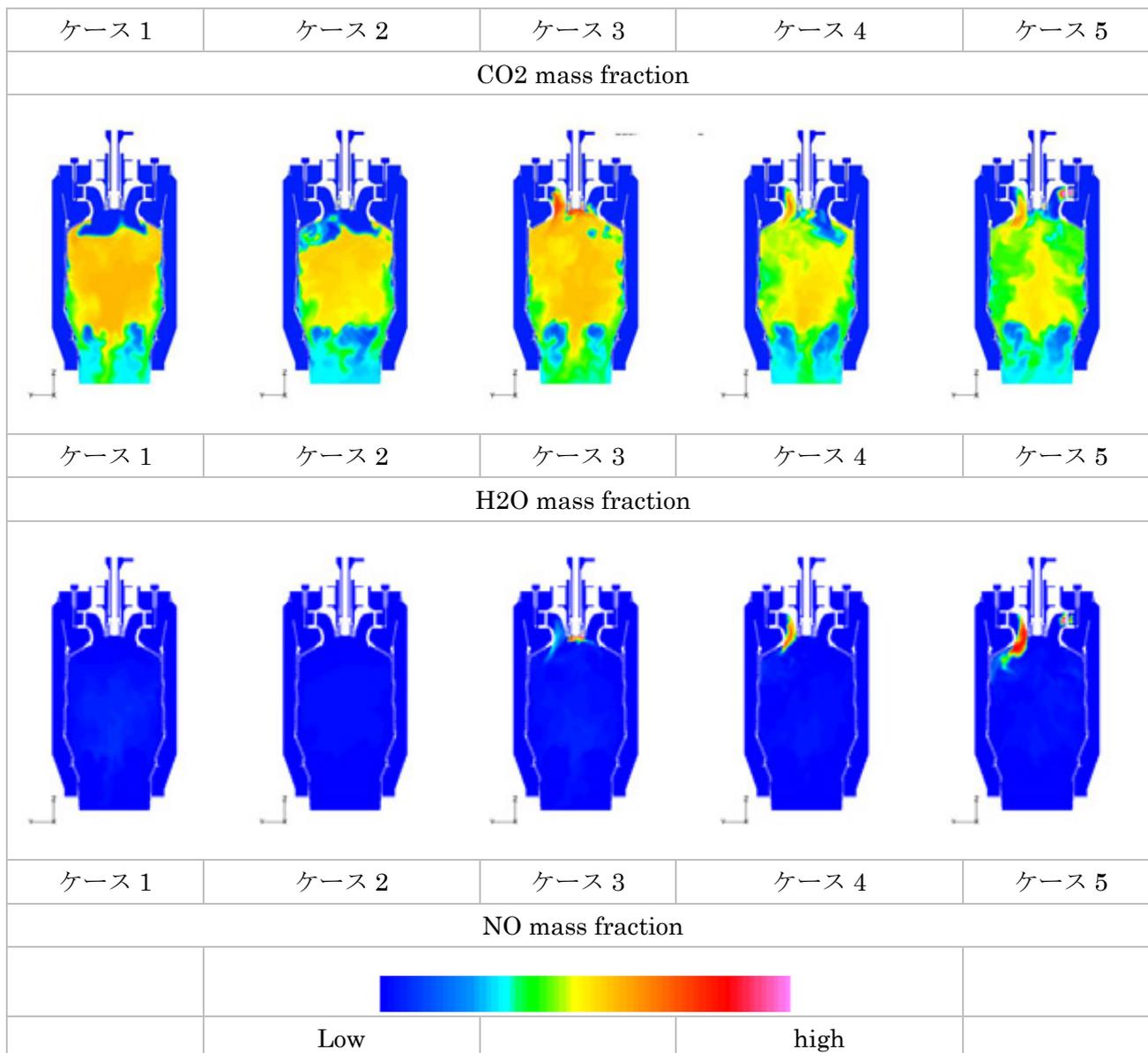


Figure 2.2.4-B1 Instantaneous distributions of temperature, velocity, and species mass fractions on a cross section of combustor for a flashback simulation at different Hydrogen ratio in fuel.

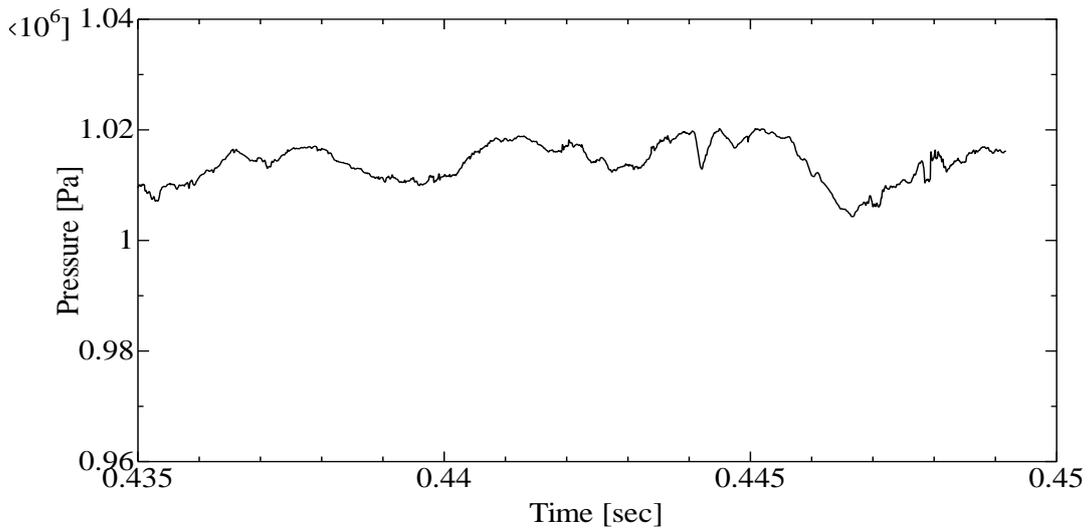


Figure 2.2.4-B2 Pressure time history inside the combustor for case 1.

(b)-2-4 まとめ

川崎重工業株式会社製産業用ガスタービンエンジンの燃焼器を対象とした LES により、本数値解析手が、燃焼器内のフラッシュバック、燃焼振動、エミッション (NO_x) の予測、評価に有効なツールになりうることを示した。

(b)-3 異常兆候自動検知データセンシング技術の構築

予混合水素弱旋回燃焼場について、フラッシュバック発生時の火炎挙動を予測する機械学習モデルを構築し、精度検証を行った。本解析では、京都大学開発のインハウスコード FK³ を用いて行った[4-7]。

(b)-3-1 計算対象

本研究では、予混合水素弱旋回燃焼場の高精度 LES データ[4-8]に機械学習を適用することにより、フラッシュバック発生時の火炎挙動を予測するモデルを構築する。Figure 2.2.4-C1 に LES によって得られた火炎形状を示す。本研究では、火炎先端がインジェクタ出口プレートに到達してからスワラに到達する直前までの 335 スナップショットの LES データを使用する。

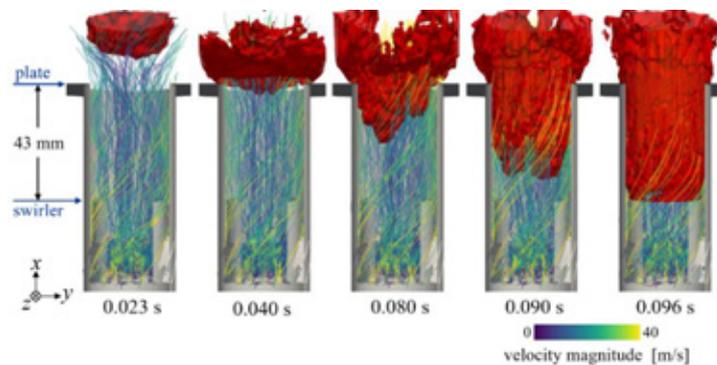


Figure 2.2.4-C1 Temporal evolution of the flame surface (in red) and streamline. [1]

(b)-3-2 計算方法、モデル、条件

学習に用いる 2 次元データは、Figure 2.2.4-C2 のように、火炎面近傍の物理量の 3 次元分布を y - z 平面に投影することにより抽出する。説明変数として用いる物理量は、火炎表面から 0、0.5、1.0、2.0mm 上流における流速の x 成分、等量比、圧力、密度、温度、熱発生率、周方向流速、渦度、流速の y 成分、 z 成分、火炎表面の単位法線ベクトルの x 成分、 y 成分、 z 成分である。目的変数である火炎面位置の変動値 Δx_{jk}^t は、 $\Delta x_{jk}^t = x_{jk}^{t+\Delta t} - \bar{x}^t$ のように定義される。ここで、 x は主流方向の火炎表面位置、上付き文字は時間、下付き文字は y - z 平面上の位置を表し、 $\bar{\quad}$ は空間平均を表す。

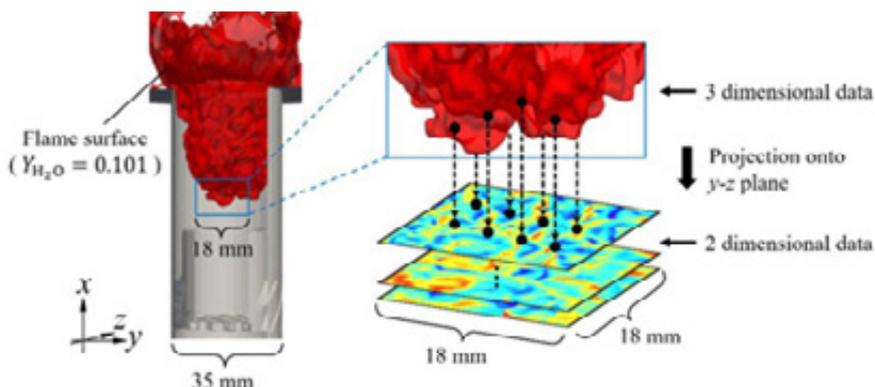


Figure 2.2.4-C2 Schematic diagram of the data extraction method.

本研究で用いたモデルの構造を Figure 2.2.4-C3 に示す。モデル構造は、U-net モデル [4-9] から着想を得ている。標準的な U-net モデルは主に分類タスク用に設計されているが、本研究の回帰目的に対応するために出力構造を変更している。

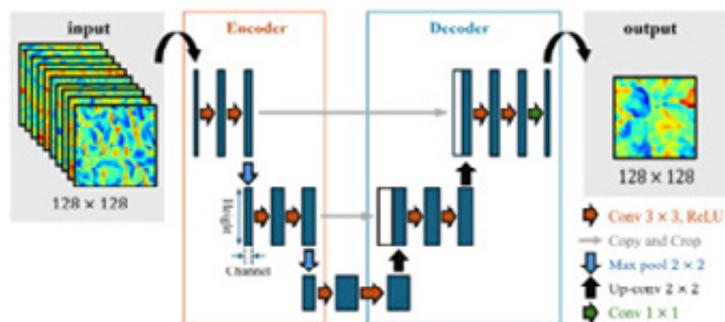


Figure 2.2.4-C3 Schematic diagram of model architecture.

(b)-3-3 計算成果

提案モデルの予測精度を評価するために、Figure 2.2.4-C4 に火炎面位置の変動値の真値およびモデルによって得られた予測値の空間分布を示す。図より、提案モデルは、真値と比較して境界領域が不鮮明ではあるものの、火炎面位置の変動値をほぼ再現していることがわかる。さらに、決定係数は $R^2 = 0.80$ であり、提案モデルが定量的に高い予測精度を達成していると言える。

また、微小時間後の火炎面位置の変動値を予測するのに必要な時間は、LES では 972 秒であるのに対し、提案モデルでは 0.93 秒である。これは、機械学習モデルによる予測時間が数値シミュレーションの約 1/1000 であり、計算コストの大幅な削減につながることを示すものである。

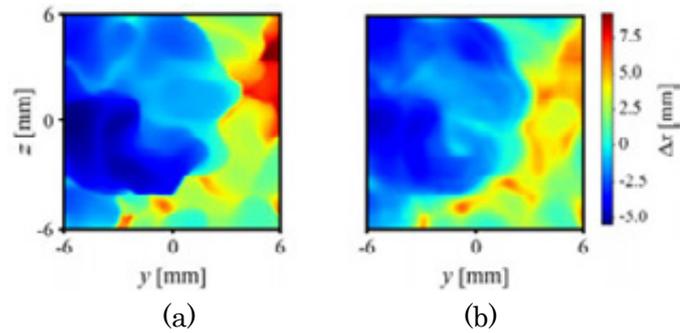


Figure 2.2.4-C4 Comparison of distributions of the flashback propensity Δx . (a) Ture. (b) Predicted.

(b)-3-4 まとめ

本研究では、予混合水素弱旋回燃焼場の高精度 LES データに機械学習を適用することにより、フラッシュバック発生時の火炎挙動を予測するモデルを構築した。提案モデルは、火炎挙動を高精度から低コストで予測できることがわかった。

(b)-4 水素、アンモニア乱流燃焼機構の解明および乱流燃焼モデルの精度検証（当量比の影響）

水素予混合火炎について、Flamelet モデリングの観点から重要と考えられる選択拡散の影響について、3次元乱流球状伝播火炎を対象に直接数値計算（DNS）による検討を行った。本年度は特に当量比の影響について検討を実施した。本解析では、京都大学開発のインハウスコード FK³ を用いて行った[4-7]。

(b)-4-1 計算対象

水素燃焼場は選択拡散の影響が顕著に現れることが知られており、Flamelet モデリングの観点からは高精度化が難しい。また、当量比が異なると Le 数が異なるため、当量比毎に選択拡散の影響も異なることが予想される。そこで本研究では、選択拡散を含む燃焼特性に対して、特に当量比の影響を調べるため、水素予混合乱流球状伝播火炎を対象とした DNS を実施した。

(b)-4-2 計算方法、モデル、条件

支配方程式は以下の質量、運動量、エネルギー、各化学種の質量の保存式、および状態方程式である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (D1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (D2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i h}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial t} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho D_h \left(\frac{\partial h}{\partial x_i} - \sum_k \left(h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \right) \right) - \rho \sum_k \left(h_k Y_k V_{k,i} \right) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (D3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i Y_k}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho Y_k V_{k,i}) + \rho \dot{\omega}_k \quad (D4)$$

$$P = \rho RT \quad (D5)$$

ここで ρ は密度、 u_i は速度ベクトル、 P は圧力、 τ_{ij} はせん断応力テンソル、 h は混合ガスの比エンタルピー、

D_h は熱拡散係数、 h_k は化学種 k の比エンタルピー、 Y_k 化学種 k の質量分率、 V_k は化学種 k の拡散速度、 ω_k は化学種 k の化学反応率、 R は混合気の気体定数、 T は温度である。熱拡散係数 D_h は、熱伝導率 λ_{th} 、定圧比熱容量 C_p を用いて以下の式で表せる。

$$D_h = \frac{\lambda_{th}}{\rho C_p} \quad (D6)$$

また、化学種 k の拡散速度 V_k は以下に示す Maxwell-Stefan 式から求められる。

$$\nabla X_k = \sum_k \left[\frac{X_j X_k}{D_{jk}} (V_j - V_k) \right] \quad (D7)$$

ここで、 D_{jk} は化学種 k の化学種 j に対する二次拡散係数である。なお、Soret 効果、および Dufour 効果は考慮しない。

初期乱流場は、以下に示すエネルギースペクトル式を逆フーリエ変換し、一様等方性乱流場を生成し、与える。

$$E(k) = 16 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{u'^2}{k_e} \left(\frac{k}{k_e}\right)^4 \exp\left[-2\left(\frac{k}{k_e}\right)^2\right] \quad (D8)$$

ここで、 E はエネルギースペクトル、 k は波数、 u' は乱れ強さである。 k_e は積分長さスケール l_E に対応する波数であり、 $k_e = 2\pi/l_E$ で与えられる。本研究では、乱れ強さを $u' = 8$ m/s、積分長さスケールを $l_E = 0.8$ mm とする。

水素の燃焼反応は Hong et al.[4-10]の化学反応メカニズム (10 化学種、20 素反応) により考慮する。エネルギーと質量分率に関する輸送方程式の移流項の離散化には、五次精度の WENO スキーム[4-11]を、質量の保存式と運動量の保存式の移流項の離散化は六次精度の中心差分法を用いる。時間積分は三次の Runge-Kutta 法によって計算される。化学反応率の積分には VODE ソルバー[4-12]を用いる。熱力学的特性の導入には CHEMKIN データベース⁽¹³⁾を元にする。

計算領域は、1 辺 3 cm の立方体である。格子幅は火炎厚さを 10 点以上で解像することが可能な 0.025 mm であり、それぞれの方向のグリッド数は 1200 点である。水素と空気の当量比 ϕ について、活発な燃焼反応がみられる化学量論条件($\phi = 1$)と、燃料希薄条件の $\phi = 0.5$ の 2 条件を計算し比較する。領域内は初期圧力 0.1 MPa、初期温度は 300 K の標準状態である。なお本条件における火炎厚さは、 $\phi = 1$ では 0.35 mm、 $\phi = 0.5$ では 0.43 mm である。初期条件として、領域の中心に直径 3 mm の高温領域が火炎核として設定され、火炎は外側に伝播する。高温領域は Kitagawa et al.⁽³⁾の実験装置の点火プラグの幅と同じ直径 2 mm が 1500 K であり、その外側の直径 3 mm までは均一な温度勾配である。また初期流速分布として 2.2 節の手法で生成された一様等方性乱流場が与えられる。また境界条件は、全ての物理量について勾配 0 のノイマン境界条件である。

(b)-4-3 計算成果

本研究では、反応進行変数 C を、 H_2 の質量分率 Y_{H_2} を用いて、

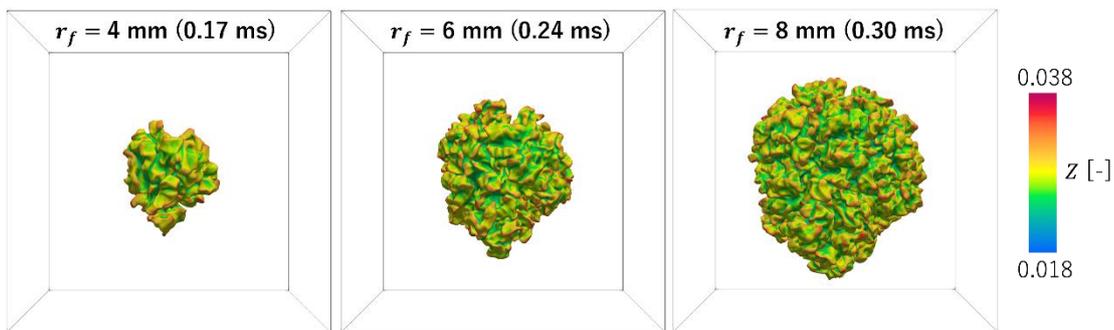
$$C = \frac{Y_{H_2,u} - Y_{H_2}}{Y_{H_2,u} - Y_{H_2,b}} = 1 - \frac{Y_{H_2}}{Y_{H_2,u}}$$

で定義する。下付きの u,b はそれぞれ、未燃ガス、既燃ガスにおける値であり、 $Y_{H_2,b} = 0$ である。異なる

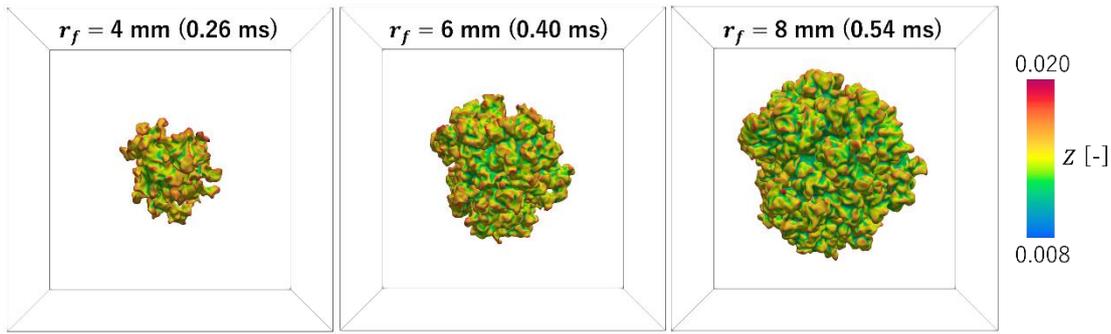
当量比間で比較を行うため、火炎面を $C = 0.5$ の等値面と定義する。

Figure 2.2.4-D1 にそれぞれの当量比における火炎面の時間変化の様子を示す。図中の r_f は相当直径であり、火炎面の内側の体積を球とみなした場合の半径である。また、火炎面において、燃料と酸化剤の混合割合であり局所当量比に相当する、混合分率 Z の分布も示す。なお、当量比 1、0.5 はそれぞれ $Z = 0.028$ 、 0.014 に相当する。図より、いずれの当量比においても、乱流の影響を受けて歪んだ火炎面が、外側に伝播する様子が確認できる。また、化学種間の拡散性の違いの影響である選択拡散効果により、未燃ガス側に凸な火炎面において Z は高い値を示し、反対に凹な火炎面において低い値を示す。なお、化学種の拡散速度について、Lewis 数 $Le = 1$ の仮定を用いた場合、選択拡散効果が表れないため、計算領域全体で混合分率 Z および当量比 ϕ は一樣となる。すなわち、図に示す火炎面上で Z の分布は再現できない。そのため、 H_2 火炎の数値解析においては、昨年度の報告書でも述べたとおり、選択拡散効果の考慮が重要である。

次に当量比が火炎挙動に及ぼす影響を調査するため、相当半径が 6 mm となる瞬間における、火炎面形状が燃焼反応に及ぼす影響を当量比間で比較する。Figure 2.2.4-D2 に、火炎面における発熱率の分布の比較を示す。図より、当量比 1 では、火炎面の凸部で発熱率が低く、凹部で高いことが分かる。当量比 0.5 でも、同様の傾向は概してみられるものの、その傾向は計算領域の中心に近づくにつれて明確ではなくなる。当量比により発熱率のレンジは異なるが、当量比 1.0 においては、領域中心付近の火炎面の凹部でも赤色の高発熱領域が確認できる一方で、当量比 0.5 においては、火炎面の凹部において青色の低発熱率領域も確認できる。より詳細に調査するため、Figure 2.2.4-D3 に、火炎面曲率に対する、発熱率の結合確率密度分布を比較して示す。なお、火炎面曲率が正であれば、火炎面は未燃側に凸であり、負であれば凹であることを示す。図より、当量比 1 では、曲率の減少に伴い発熱率が増加するという明確な相関がみられるが、当量比 0.5 では、曲率に対する発熱率の変化が比較的小さいことが分かる。さらに、当量比 0.5 においては、曲率が $-10,000 \text{ m}^{-1}$ より小さい領域において、曲率の減少に伴い発熱率が減少する傾向にある。曲率の減少に伴う発熱率の増加は、曲率が負となる火炎面の凹部における熱流束の集中が原因である。一方で、火炎面の凹部では、Figure 2.2.4-D1 で確認したように、選択拡散効果により局所当量比が小さくなり、本計算では、いずれの当量比条件においても、局所当量比は化学量論比から遠ざかる。この影響は、発熱率を減少する方向に働くが、もともとの燃料が少ない当量比 0.5 の条件下において、より顕著となる。そのため当量比 0.5 においては、熱流束が集中する影響より、局所当量比の減少の影響が支配的となり、負の曲率において、曲率の減少に伴う発熱率の減少が起こると考えられる。

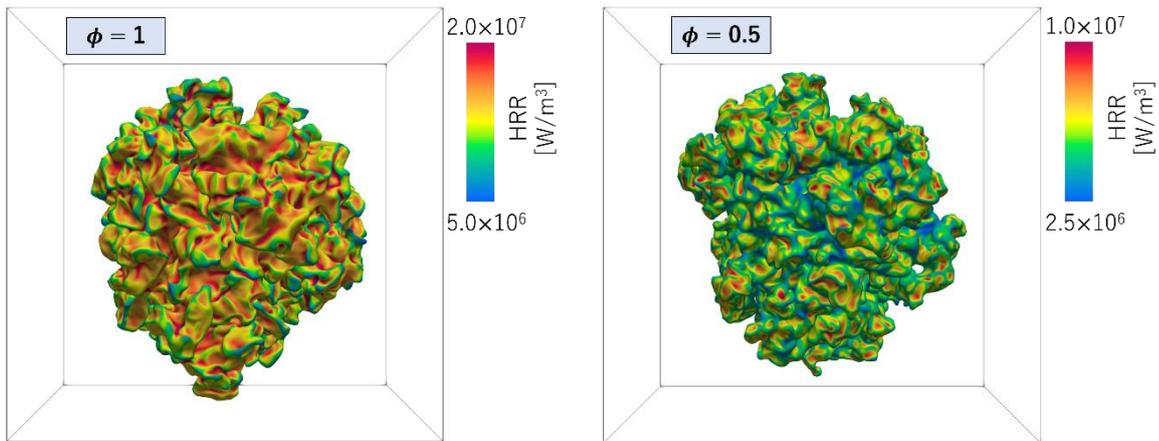


(a) $\phi = 1$



(b) $\phi = 0.5$

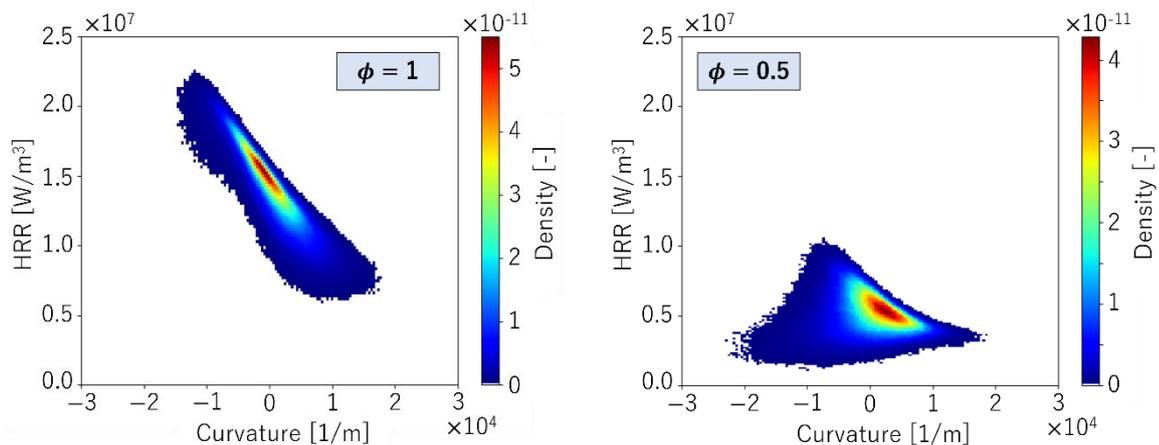
Figure 2.2.4-D1 Comparison of evolution of flame front between equivalence ratios $\phi = 1$ and 0.5.



(a) $\phi = 1$

(b) $\phi = 0.5$

Figure 2.2.4-D2 Comparison of instantaneous distributions of heat release rate on flame front between equivalence ratios $\phi = 1$ and 0.5 at flame radius = 6 mm.



(a) $\phi = 1$

(b) $\phi = 0.5$

Figure 2.2.4-D3: Comparison of joint probability density function of flame curvature and heat release rate (HRR) between equivalence ratios $\phi = 1$ and 0.5 at flame radius = 6 mm.

(b)-4-4 まとめ

水素予混合乱流球状伝播火炎の厳密な 3 次元数値シミュレーションを行った。この結果、燃焼特性に対する当量比の影響を明らかにするとともに、いずれの当量比においても燃焼モデルには選択拡散や火炎伸長の効果を考慮することが燃焼器内乱流燃焼場の高精度予測に不可欠であることを明らかにした。

参考文献

- [4-1] H. Moriai *et al.*, *J. Eng. Gas Turb. Pow.*, 135, 091503, (2013).
- [4-2] S. Tachibana *et al.*, *Combust. Flame*, 162, 2621-2637, (2015).
- [4-3] 田口秀之ら, 第 61 回航空原動機・宇宙推進講演会, (2022).
- [4-4] J.A. van Oij, and L.P.H. de Goey, *Combust. Sci. Tech.*, 161, 113-137, (2000).
- [4-5] M. M. Rai and N. K. Madavant, *AIAA paper*, No. 88-0361, (1988).
- [4-6] 田口秀之ら, 日本ガスタービン学会誌, 49, (2021).
- [4-7] About in-house code FK³, <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link.php>
- [4-8] M. Kawai *et al.*, *19th International Conference on Numerical Combustion*, 1134, (2024).
- [4-9] O. Ronneberger *et al.*, 18th international conference, part III 18, 234-241, (2015).
- [4-10] Z. Hong, *et al.*, *Combust. Flame*, 158, 633644, (2011).
- [4-11] G.S. Jiang, C.W. Shu, *J. Comp. Phys.*, 126, 202228 (1996).
- [4-12] P.N. Brown, G.D. Byrne, A.C. Hindmarsh, *SIAM J. Sci. Stat. Comp.*, 10, 10381051(1989).

(5) プロジェクトの総合的推進

以上のサブ課題 A～D の進捗を管理し、課題間の連携を促進するために、各課題の代表者が集う推進会議を令和 6 年 5 月、8 月、10 月、令和 7 年 3 月の 4 回開催した。また年度末の令和 7 年 3 月 14 日にプロジェクト成果を一般に報告・公開するための「スマートデザインプロジェクト成果報告シンポジウム」を開催した。その他、令和 6 年 10 月 16 日、サブ課題間の連携を促進するための「ワークショップ」を、さらに成果創出プログラムの産業課題間の連携を促進するための「ものづくり統合ワークショップ」を令和 6 年 12 月 3 日に開催した。

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
R6.10.16	第 3 回スマートデザインプロジェクトワークショップ
R6.11.12	第 5 回「富岳」高性能シミュレーション技術交流会
R6.12.3	「富岳」成果創出加速プログラム第 8 回 HPC ものづくり統合ワークショップ
R7.3.14	第 3 回スマートデザインプロジェクト成果報告シンポジウム

(2) プロジェクト推進会議

年月日	行事
R6.5.29	第13回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議
R6.8.19	第14回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@京大
R6.10.16	第15回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@九大
R7.3.14	第16回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@理研

(3) コンソーシアム活動

年月日	行事
R6.5.16 R6.12.26	HPCを活用した自動車用次世代CAEコンソーシアム総会
R7.3.27	都市・建築CFDコンソーシアム 総会
R6.4.26 R6.11.22	燃焼システム用次世代CAEコンソーシアム総会

(4) ワーキンググループ活動

年月日	行事
R7.1.21	サブ課題A サブ課題全体研究打合せ(全1回)
R6.4.11 R6.4.18 R6.4.25 R6.5.9 R6.6.20 R6.7.11 R6.7.25 R6.8.1 R6.8.30 R6.9.17 R6.9.24 R6.9.30 R6.10.21 R6.10.28 R6.11.11 R6.11.18 R6.11.25	サブ課題A 最適化打ち合わせ(全24回)

R6.12.2 R6.12.16 R6.12.23 R7.1.6 R7.1.20 R7.1.27 R7.2.4	
R6.4.11 R6.4.18 R6.4.25 R6.5.8 R6.6.20 R6.6.27 R6.7.4 R6.7.11 R6.8.1 R6.8.22 R6.8.29 R6.9.26 R6.10.9 R6.10.17 R6.11.6 R6.11.13 R6.11.20 R6.11.27 R6.12.6 R6.12.18 R6.12.25 R7.1.8 R7.1.15 R7.1.29 R7.2.5 R7.2.12 R7.2.19 R7.3.5 R7.3.12 R7.3.26	サブ課題A デザイン・空力モデル化打ち合わせ（全30回）
R6.5.23	サブ課題B サブ課題全体研究打合せ（研究連絡会）（全5回）

R6.7.22 R6.10.7 R6.11.26 R7.1.31	
R6.4.4 R6.5.9 R6.6.13 R6.7.17 R6.8.20 R6.10.1 R6.11.7 R6.12.26 R7.1.27 R7.3.5	サブ課題 B 極端気象下の流入条件 WG (全 10 回)
R6.4.4 R6.5.16 R6.6.20 R6.8.5 R6.9.13 R6.10.17 R6.11.22 R6.12.25 R7.1.29 R7.3.6	サブ課題 B 極端気象下の高層建築物の被災推定 WG (全 10 回)
R6.4.25 R6.5.31 R6.7.3 R6.8.20 R6.9.30 R6.10.30 R6.11.29 R7.1.20 R7.2.21	サブ課題 B 降雨・洪水解析 WG (全 9 回)
R6.4.24 R6.5.29 R6.7.4 R6.8.5 R6.9.5	サブ課題 B 猛暑時の暑熱リスク WG (全 9 回)

R6.10.18 R6.11.14 R7.2.14 R7.3.10	
R6.4.22 R6.5.29 R6.6.13 R6.7.16 R6.8.22 R6.10.1 R6.11.7 R6.12.20 R7.1.24 R7.3.6	サブ課題 B 実建物モデルの CFD 耐風設計 WG (全 10 回)
R6.5.9 R6.6.19 R6.6.21 R6.8.6 R6.10.15 R6.12.18 R7.2.20	サブ課題 C 定例打合せ (全 7 回)
R6.4.26 R6.11.22	サブ課題 D 定例打合せ (全 2 回)

2-4. 実施体制

実施項目	実施場所	担当責任者
サブ課題 A「意匠空間を考慮した AI 支援多目的最適化による自動車空力デザイン」	兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	チームリーダー 坪倉誠
	兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 国立大学法人神戸大学大学院	教授 坪倉誠

	広島県東広島市鏡山1丁目3-2 国立大学法人広島大学大学院	准教授 中島卓司
サブ課題B「変容する都市・建築の自然擾乱対応の性能設計」	神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1 国立大学法人横浜国立大学大学院	教授 山田貴博 研究員 田村哲郎
	大阪府東大阪市小若江3-4-1 学校法人近畿大学	教授 道岡武信
	東京都文京区大塚2-1-1 国立大学法人お茶の水女子大学	准教授 河合英徳
サブ課題C「新興ウイルス感染症にロバストで健康・快適・サステイナブルなポストコロナ時代の室内環境設計」	福岡県春日市春日公園6-1 国立大学法人九州大学大学院総合理工学研究院	教授 伊藤一秀
	兵庫県神戸市中央区港島南町7-1-26 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	チームリーダー 坪倉誠
	兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 国立大学法人神戸大学大学院	教授 坪倉誠

サブ課題 D「マルチコンポーネント統合シミュレーションによるカーボンフリーガスタービン設計」	京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京都大学大学院	教授 黒瀬良一
	福岡県春日市春日公園6-1 国立大学法人九州大学大学院総 合理工学研究院	教授 渡邊裕章
プロジェクトの総合的推進	兵庫県神戸市中央区港島南町7 -1-26 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	チームリーダー 坪倉誠

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	Billion-design-variable-scale topology optimization of vehicle frame structure in multiple-load case	Yuji Wada, Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura	Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part D: journal of automotive engineering, 238(12), 3863-3874 (doi.org/10.1177/09544070231184309)	2024 年
2	Droplet dispersion simulation to evaluate airborne virus infection risk in outdoor sports stadiums	Sangwon Kim, Onishi Junya, Bale Rahul, and Tsubokura Makoto	Journal of Fluid Science and Technology, vol. 19(2), JFST0008 (doi.org/10.1299/jfst.2024jfst0008)	2024 年
3	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 (https://doi.org/10.1063/5.0185398)	2024 年
4	Robustness evaluation of large-scale machine learning-based reduced order models for reproducing flow fields	Aito Higashida, Mario Ruttgers, Andreas Lintermann, Makoto Tsubokura	Future Generation Computer Systems, vol.159, pp.243-254 (https://doi.org/10.1016/j.future.2024.05.005)	2024 年
5	Numerical study on spherical flame propagation in dispersed liquid ammonia droplets	Z. An, J. Xing, A. L. Pillai, R. Kurose	Fuel, 357, 129660	2024 年
6	A study on precise estimation of laminar burning velocity of lean hydrogen-air premixed flame (Effect of species diffusion models)	R. Kai, H. Watanabe, R. Kurose	Mechanical Engineering Journal, 11, 23-00400	2024 年
7	Effects of preferential diffusion and flame stretch on FGM method for numerical simulations of ammonia/air premixed combustion	R. Kai, S. Ayukawa, K. Kinuta, R. Kurose	Applications in Energy and Combustion Science, 17, 100253	2024 年
8	High-fidelity numerical simulations in Eulerian/Lagrangian framework for liquid fuel jets in crossflow with atomization and evaporation: Effect of aerodynamic Weber number	K. Kitada, R. Kurose	International Journal of Multiphase Flow, 174, 104762	2024 年
9	A semi-implicit pressure-based solver considering real gas effect	S. Wada, R. Kai, R. Kurose	Journal of Computational Physics, 501, 112782	2024 年

10	On the choice of physical constraints in artificial neural networks for predicting flow fields	Rishabh Puri, Junya Onishi, Mario Ruttgers, Rakesh Sarma, Makoto Tsubokura, Andreas Linterman	Future Generation Computer Systems, 161, 361-375 (doi.org/10.1016/j.future.2024.07.009)	2024 年
11	Numerical study on noise reduction of ground-effect wing with serrated trailing edge	Chenguang Lai, Yujie Zhu, Makoto Tsubokura	Aerospace Science and Technology, 109510 (doi.org/10.1016/j.ast.2024.109510)	2024 年
12	Ventilation strategies for inhalation exposure risk mitigation: Eulerian-Lagrangian LES analysis of particle-laden turbulent flow applying virtual manikins	Alicia Murga, Rahul Bale, Kazuhide Ito, Makoto Tsubokura	Building and Environment, 266, 112149 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112149)	2024 年
13	Integration of computer-simulated persons with multi-node thermoregulation model that considers the effect of clothing for skin surface temperature distribution analysis	Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Janghoo Seo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Building and Environment, 248, 111105 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111105)	2024 年
14	Aspiration efficiency and respiratory tract deposition of indoor suspended micro-particles during steady and transient breathings	Kazuki Kuga, Ryusei Kizuka, Islam Abouelhamd, Kazuhide Ito	Building and Environment, 249, 111114 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111114)	2024 年
15	In silico identification of virus loads in cough-generated droplets - Seamless integrated analysis of CFPD-HCD-EWF	Hanyu Li, Nguyen Dang Khoa, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Computer Methods and Programs in Biomedicine, 246, 108073 (doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108073)	2024 年
16	Effect of Crowd Density, Wind Direction, and Air Temperature on the Formation of Individual Human Breathing Zones in a Semi-outdoor Environment	Islam Abouelhamd, Kazuki Kuga, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito	Sustainable Cities and Society, 103, 105274 (doi.org/10.1016/j.scs.2024.105274)	2024 年
17	Net Escape Velocity, Transfer Probability and Travel Time Distributions within a Cross-Ventilated Room Model Sheltered by Urban-Like Block Array	Ryu Itokazu, Ken Bryan Fernandez, Kazuki Kuga, Naoki Ikegaya, Kazuhide Ito	Building and Environment, 259, 111668 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111668)	2024 年
18	Multi-layered ventilation duct system for heat exchange with air purification	Xin Wang, Qi Wang, Sung-Jun Yoo, Juyeon Chung, Taisaku Gomyo, Hajime Sotokawa,	Building and Environment, 262, 111773 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111773)	2024 年

		Kazuki Kuga, Kazuhide Ito		
19	Toward occupant-centric system: multicriteria optimization of hybrid displacement–personalized ventilation system using computational fluid dynamics with computer-simulated person	Ken Bryan Fernandez, Sung-Jun Yoo, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Building and Environment, 262, 111837 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111837)	2024 年
20	Allometric Comparison of Viral Dynamics in the Nasal Cavity-Nasopharyngeal Mucus Layer of Human and Rhesus Monkey by CFD-HCD Approach	Hanyu Li, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Computer Methods and Programs in Biomedicine, 255, 108354 (doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108354)	2024 年
21	Impact of human micro-movements on breathing zone and thermal plume formation	Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Building and Environment, 264, 111916 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111916)	2024 年
22	Convective Heat Transfer and Drag Coefficients of Human Body in Multiple Crowd Densities and Configurations in Semi-outdoor Scenarios	Islam Abouelhamd, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Building and Environment, 265, 111983 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111983)	2024 年
23	Observational study of close contact behaviors in a multinational graduate student office	Onkangi Ruth, Kazuki Kuga, Pawel Wargoeki, Kazuhide Ito	Building and Environment, 265, 112015 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112015)	2024 年
24	Mathematical Modeling of Gas-phase Mass Transfer Model in Hydrous Materials for a Total Heat Exchange Ventilator	Xin Wang, Taisaku Gomyo, Hajime Sotokawa, Sung-Jun Yoo, Juyeon Chung, Kazuhide Ito	Building and Environment, 267 Part B, 112291 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112291)	2024 年
25	Effects of considering preferential diffusion and flame stretch in FGM method for numerical simulations of hydrogen/air flames	K. Kinuta, R. Kai, R. Kurose	Journal of Thermal Science and Technology, 19, 24-00087	2024 年
26	Effect of temporal increase in equivalence ratio on combustion instability of a lean-premixed low-swirl hydrogen jet flame: An LES study	M. Kawai, J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose	Physics of Fluids, 36, 044119	2024 年
27	Experimental and numerical investigation on combustion	Z. An, W. Zhang, M. Zhang, J. Xing, R.	Energy & Fuels, 38, 7412–7430	2024 年

	characteristics of cracked ammonia flames	Kai, W. Lin, R. Wang, J. Wang, Z. Huang, R. Kurose		
28	Dynamic behavior and driving region of spray combustion instability in a backward facing step combustor	K. Kato, H. Hashiba, J. Nagao, H. Gotoda, Y. Nabaе, R. Kurose	Physical Review E, 110, 0242024	2024 年
29	FGM modeling considering preferential diffusion, flame stretch and non-adiabatic effects for hydrogen-air premixed flame wall flashback	K. Kinuta, R. Kai, R. Kurose	Combustion and Flame, 269, 113718	2024 年
30	Recent progresses in research on liquid ammonia spray and combustion: A review	Z. An, J. Xing, R. Kurose	Applications in Energy and Combustion Science, 20, 100293	2024 年
31	Analysis and flamelet modeling of preferential evaporation in SAF/Jet A spray flames	J. Xing, Z. An, R. Kurose	Proceedings of the Combustion Institute, 40, 105707	2024 年
32	Extended flamelet-based models for liquid ammonia combustion and their evaluation in a temporally evolving mixing layer	Z. An, J. Xing, A. L. Pillai, R. Kurose	Fuel, 371, 131964	2024 年
33	Experimental and numerical investigation on combustion characteristics of cracked ammonia flames	Z. An, W. Zhang, M. Zhang, J. Xing, R. Kai, W. Lin, R. Wang, J. Wang, Z. Huang, R. Kurose	Energy & Fuels, 38, 7412–7430	2024 年
34	A study on precise estimation of laminar burning velocity of lean hydrogen-air premixed flame (Effect of species diffusion models)	R. Kai, H. Watanabe, R. Kurose	Mechanical Engineering Journal, 11, 23-00400	2024 年
35	都市気象擾乱に基づく温度不安定性を考慮した流入変動風に関する研究	新井舞子、田村哲郎、河合英徳	日本建築学会環境系論文集、Vol.90, No.827	2025 年 1 月
36	Building Cluster 内の乱流場が建築物の層風力に及ぼす影響	河合英徳、田村哲郎	風工学研究論文集、No.28、J19	2024 年 12 月
37	熱放射を考慮した都市乱流場の LES の検証と実市街地への適用性	新井 舞子、田村哲郎、河合 英徳	日本建築学会環境系論文集、Vol. 89, No. 819, 258-269	2024 年
38	Plate manufacturing constraint in topology optimization using anisotropic filter	Yuji Wada, Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura	Computer-Aided Desing, volume 180, 103823 (doi.org/10.1016/j.cad.2024.103823)	2025 年

39	Gradient-enhanced Kriging based Parallel Efficient Global Optimization Algorithm and Its Application in Aerodynamic Shape Optimization	Hang Fu, Qingyu Wang, Takuji Nakashima, Asahi Kawasaki, Chenguang Lai, Keigo Shimizu, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	IEEE Access, 13, 73848-73869 (10.1109/ACCESS.2025.3560292)	2025 年
40	An experimental and numerical investigation of a liquid ammonia jet flame: spray characteristics close to nozzle and flame structure	Z. An, R. Wang, J. Xing, M. Zhang, R. Kurose	The Journal of Ammonia Energy, 03, 042-053	2025 年
41	Leveraging the supercomputer Fugaku for the assessment of droplet/aerosol transmission risks in COVID-19 mitigation efforts	Rahul Bale, Makoto Tsubokura	IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 19(7), 1118-1131 (10.1002/tee.24091)	2024 年
42	燃焼数値シミュレーションの現状と展望	黒瀬良一	工業加熱、61, 12-18	2024 年
43	シミュレーション技術による耐風設計へ風荷重評価の变革	田村哲郎	建築技術, no. 890, 101-103	2024 年 3 月
44	自動車分野における CFD と風洞技術の連携	中島卓司、坪倉誠	可視化情報、45 (172), 11-14	2025 年
45	Airborne transmission simulation by unifying indoor and respiratory-tract flows toward indoor environment optimization	Makoto Tsubokura	8 th International Conference on Computational & Mathematical Biomedical Engineering (CMBE24) (24-26, June, Arlington, USA), 132-135 (ISSN:2227-9385)	2024 年
46	Using virtual manikins to tackle particle transport and inhalation risk assessment under different advanced air distribution methods	Alicia Murga, Rahul Bale, Kazuhide Ito, Makoto Tsubokura	Proc. on 18th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate, Indoor Air (July 7-11, Honolulu, Hawaii USA), 761-762	2024 年
47	Simulation of droplet dispersion from coughing with consideration of face mask motion	Ayato Takii, Tatsuya Miyoshi, Masahiro Yamakawa, Yusei Kobayashi, Shinichi Asao, Seiichi Takeuchi, Makoto Tsubokura	International Conference on Computational Science, pp.70-84, Springer Nature Switzerland	2024 年
48	A study on the effect of the number of collocation points in the training of physics-informed neural networks for unsteady flows	Junya Onishi and Makoto Tsubokura	Proceedings of the 35th Parallel CFD International Conference 2024, Schriften des Forschungszentrums Jülich IAS Series 69, 72-75	2025 年

			(doi.org/10.34734/FZJ-2025-02458)	
49	Performance study of gradient-enhanced Kriging based parallel efficient global optimization	Hang Fu, Qingyu Wang, Takuji Nakashima, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	4th Digital Society and Intelligent Systems (DSInS) conference (20-22, Nov., 2024, Australia, Sydney) (Hang Fu, Best Student Paper Award)	2024 年
50	Characteristics on fluctuation of sectional wind forces for high-rise building in building cluster	Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura	9th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, O10.2	2024 年
51	Numerical Analysis of Aerodynamic Properties of Tapered Square Cylinder with Eccentricity	Yuki Nagao, Tetsuro Tamura, Hidenori Kawai, Yusuke Maruyama	9th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, O4.28	2024 年

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	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	The international conference on high performance computing in Asia-Pacific region (HPC Asia 2024)(Jan 25-27, 2024, Nagoya, Japan)	2024 年 1 月
6	水素燃焼の数値シミュレーション - 燃焼振動、フラッシュバック、及び騒音の予測に向けて -	黒瀬良一	日本燃焼学会 第62 回燃焼シンポジウム、大阪国際会議場（グランキューブ大阪）	2024 年 11 月
7	HPC シミュレーションと機械学習の融合による流れ場予測と自動車空力解析への適用 (基調講演)	坪倉誠	自動車技術会フォーラム2024 年度 冬季（オンライン）	2025 年 1 月
8	A study on efficient training of physics-informed neural networks for unsteady flows	Junya Onishi, Makoto Tsubokura	ERCOFTAC Workshop on Machine Learning for Fluid Dynamics (Paris)	2024 年 3 月
9	Application of physics-informed deep operator networks to solving unsteady flow problems	Junya Onishi, Shoki Mori, Makoto Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144A	2024 年 6 月

10	An Efficient Immersed Boundary Method for Conjugate Heat Transfer Based on a Fully Compressible Solver	ChungGang Li, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144B	2024 年 6 月
11	Direct Numerical Simulation of Millimeter-sized Bubble Dynamic on Horizontal Channel flow with Riblet Surfaces	Sangwon Kim, Makoto Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144B	2024 年 6 月
12	High Performance Computational Fluid Dynamics and Optimization Algorithms for Indoor Environment Design	Alicia Murga, Haruki Nakagawa, Rahul Bale, Kazuhide Ito, Makoto Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144C	2024 年 6 月
13	Prediction of Airborne Virus Transmission: Integrating Computational Fluid Dynamics with Host Cell Dynamics	Rahul Bale, S. Ohashi, A. Murga, M. Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144C	2024 年 6 月
14	Two-Objective Design Exploration of Body Proportions and Aerodynamics of an Automobile	Takuji Nakashima, Ryota Mizoguchi, Takenori Hiraoka, Iwao Koizumi, Takahide Nouzawa, Kohei Seo, Keigo Shimizu, Yusuke Nakamura, Akira Oyama, Makoto Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144C	2024 年 6 月
15	Nonlinear Reduced-Order Modeling for Three-Dimensional Turbulent Flow Around Vehicle Body Using Distributed Parallel Machine Learning	Kazuto Ando, Rahul Bale, Akiyoshi Kuroda, Makoto Tsubokura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144B	2024 年 6 月
16	Numerical Simulation of Flying Car with Fluid-Body Interaction using Hierarchical Cartesian Mesh	Ayato Takii, Rahul Bale, Chung-Gang Li, Masashi Yamakawa, Makoto Tsubokura	The 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD12) conference(Kobe, Japan)	2024 年 7 月
17	Large-Eddy Simulation on Golf-Ball at Supercritical Reynolds Number and its Comparison with Smooth-Sphere	Shota Nishinakagawa, Shushi Nakaoka, Masahide Onuki, Takahiro Sajima, Makoto Tsubokura	The 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD12) conference(Kobe, Japan)	2024 年 7 月
18	Assessment of Immersed Boundary Method Suitable for	Yutaro Ishida, Junya Onishi, ChungGang	The 12th International Conference on Computational	2024 年 7 月

	Kinetic Energy and Entropy Preserving Scheme	Li, Sangwon Kim, Younghwa Cho, and Makoto Tsubokura	Fluid Dynamics (ICCFD12) conference(Kobe, Japan)	
19	Towards a unified formulation for rigid, deformable and elastic fluid-structure interactions	Rahul Bale, Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura	4th International Workshops on Advances in Computational Mechanics (Kitakyushu, Japan)	2024 年 9 月
20	Plate manufacturing constraint in topology optimization under the building cube method framework	Yuji Wada, Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura	4th International Workshops on Advances in Computational Mechanics (Kitakyushu, Japan)	2024 年 9 月
21	Robustness evaluation for neural-network-based reduced-order model for predicting turbulent flows	Kazuto Ando, Rahul Bale, Akiyoshi Kuroda, Makoto Tsubokura	4th International Workshops on Advances in Computational Mechanics (Kitakyushu, Japan)	2024 年 9 月
22	Development of a Conjugate Heat Transfer (CHT) Framework for a Compressible Solver in a Supercomputing Environment	ChungGang Li, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	4th International Workshops on Advances in Computational Mechanics (Kitakyushu, Japan)	2024 年 9 月
23	15 th International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM2024)	Makoto Tsubokura, Rahul Bale, Alicia Murga, Kazuhide Ito, Andreas Lintermann, Mario Ruttgers	Workshop on Advancements of Global Challenges Applications (AGCA) (Ostrava, Czech Republic)	2024 年 9 月
24	Optimization of airflow rate in a displacement-ventilated room to minimize particle inhalation risk and control energy consumption	Alicia Murga Aquino, Haruki Nakagawa, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	44th Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) conference(Dublin, Denmark)	2024 年 10 月
25	Point-to-Point Scalar Transfer Efficiencies within a Cross-Ventilated Room Model Sheltered by Urban-Like Block Arrays	Ryu Itokazu, Ken Bryan Fernandez Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	ROOMVENT 2024 (Sweden)	2024 年 4 月
26	Effects on respiratory droplet generation and virus concentration of changes in oral opening geometry	Nguyen Dang Khoa, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024, Hawaii, June, 2024	2024 年 6 月
27	Optimization of coupled displacement-personalized ventilation using CRITIC-	Ken Bryan Fernandez, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024 (Hawaii)	2024 年 6 月

	TOPSIS method based on Taguchi design			
28	The Change in Convective Heat Transfer Coefficient Distributions of Human Bodies in a Crowded Event	Islam Abouelhamd, Junya Urashi, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024 (Hawaii)	2024 年 6 月
29	Human Close Contact Behaviour in a Non-Homogenous Indoor Population	Ruth Onkangi, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024 (Hawaii)	2024 年 6 月
30	Human physiological responses to indoor CO2 concentrations and the resulting reduction in CO2 emission rates	Kazuki Kuga, Jiayi, Zhu, Pawel Wargocki, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024 (Hawaii)	2024 年 6 月
31	In silico 3D ocular model integrating tear evaporation and physiologically based pharmacokinetic modelling	Teruaki Hirayma, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024 (Hawaii)	2024 年 6 月
32	The effect of micro-movement of a computer-simulated person on the formation of breathing zones	Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Indoor Air 2024 (Hawaii)	2024 年 6 月
33	The 9th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering	Kazuki Kuga and Kazuhide Ito. Numerical Investigation of Inhalation Exposure to Droplets Generated by Speaking	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon)	2024 年 6 月
34	Numerical Study of Respiratory Droplets/Droplet Nuclei Generation via a Coughing Event Using Eulerian Wall Film model and Lagrangian Discrete Phase Model	Kazuma Nita, Nguyen Dang Khoa, Kasuki Kuga, Kazuhide Ito	ASIM 2024 (Osaka)	2024 年 12 月
35	Determination of optimum settings for a hybrid ventilation system using TOPSIS score considering IEQ and energy requirements	Ken Bryan Fernandez, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	ASIM 2024 (Osaka)	2024 年 12 月
36	Determination of inhaled carbon dioxide concentration using pseudo-steady-state analysis with computer-simulated parsons	Ryu Itokazu1, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	ASIM 2024 (Osaka)	2024 年 12 月
37	A numerical study of a liquid ammonia jet flame with detailed reaction mechanism	Z. An, J. Xing, M. Zhang, R. Kurose	The 3rd Symposium on Ammonia Energy (SoAE)(Shanghai, China)	2024 年 9 月

38	A direct numerical simulation study on a laboratory-scale turbulent cracked ammonia flame	J. Xing, Z. An, R. Kurose	The 3rd Symposium on Ammonia Energy (SoAE)(Shanghai, China)	2024 年 9 月
39	Numerical study on preferential evaporation characteristics of ATJ-SPK/Jet A spray flames in laminar counter-flow	Y. Zhang, Z. An, J. Xing, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
40	Numerical simulation of heat transfer and evaporation of a sessile droplet on a hot wall	K. Kitada, T. Wei, A. L. Pillai, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
41	Large-eddy Simulation of flashback of lean-premixed low-swirl hydrogen jet flame	M. Kawai, J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
42	An efficient numerical algorithm for solving multi-component real fluid flows in rocket engines	S. Wada, R. Kai, A. L. Pillai, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
43	Development of High-fidelity numerical simulations for aviation and powerplant gasturbine combustors	N. Oshima, R. Kurose, T. Oda, T. Tsuru	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
44	Numerical investigation of effects of pressure and equivalence ratio on laminar hydrogen flame flashback behavior	K. Kinuta, T. Yasuda, K. Yada, N. Sugimura, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
45	High-fidelity modelling of liquid ammonia spray and combustion	J. Xing, Z. An, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
46	Numerical investigation of liquid ammonia combustion in MILD conditions	Z. An, J. Xing, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
47	A Hybrid CFD/CAA Solver for Simulating Noise Generation in Real Fluid Flows under Transcritical and Supercritical Conditions	A. L. Pillai, T. Yamada, S. Wada, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
48	Direct Numerical Simulation of a Lean-Premixed Turbulent Swirling Hydrogen Flame	A. L. Pillai, U. Ahmed, N. Chakraborty, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
49	DNS study of turbulent boundary layer flashback in parallel channel for lean hydrogen-air premixed flame	R. Kai, K. Yada, K. Kinuta, H. Watanabe, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月
50	Synchronized state and formation mechanism of spray	K. Kato, H. Hashiba, J. Nagao, H. Gotoda, Y. Nabae, R. Kurose	9th International Conference on Numerical Combustion (ICNC2024)(Kyoto, Japan)	2024 年 5 月

	combustion oscillations in a back-stepped combustor			
51	Ensemble LES Analysis of Gust Occurrence in an Urban Area During Typhoon Hagibis	Masaharu Kawaguchi, Tetsuro TAMURA	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144C	2024 年 6 月
52	Application of POD to turbulent flow field induced by building cluster	Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura	9 th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS) (Lisbon), MS144C	2024 年 6 月
53	非定常流れ解析に向けた Physics-informed DeepONet の基礎的特性に関する検討	大西 順也, 坪倉 誠	日本流体力学会年会 2024 (仙台)	2024 年 9 月
54	潜水泳法の動作とその推進力に関する流体シミュレーション	藤原僚太郎, 林勇樹, バレラフル, 嶋田宗将, 山本敬三, 坪倉誠	日本流体力学会年会 2024 (仙台)	2024 年 9 月
55	DF-PINNs の訓練過程におけるコロケーション点配置の影響	大西順也, 坪倉誠	第 56 回流体力学講演会第 42 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (鹿児島)	2024 年 7 月
56	潜水泳法の動作とその推進力に関する自己推進型流体シミュレーション	藤原僚太郎, 林勇樹, バレラフル, 嶋田宗将, 山本敬三, 坪倉誠	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
57	階層型直交格子におけるドローン空中制御の 6 軸運動-空力連成シミュレーション	平井雄大, 滝井郁人, 嶋田宗将, Bale Rahul, 浦久保孝光, 坪倉誠	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
58	自動車の意匠性を考慮した進化計算による多目的空力設計探査	川崎朝陽, 溝口亮太, 中島卓司, 清水圭吾, 瀬尾晃平, 大山聖, 嶋田宗将, Rahul Bale, 坪倉誠	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
59	ニューラルネットワークを使用した乱流予測モデルのロバストネス評価	安藤和人, バレラフル, 黒田明義, 坪倉誠	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
60	非定常流れに向けた DF-PINNs の訓練における KAN の導入に関する検討	大西順也, 上月圭裕, 坪倉誠	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
61	行列積状態を用いて実装した流体解析コードの性能評価	大西順也, 滝井郁人, Kim Sangwon, Cho Yonghwa, 坪倉誠	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
62	追い抜かれる車両に作用する空気力学の発生メカニズム	菅尾紫央, バレラフル, 嶋田宗将, 吉竹邦彦, ヌチェ	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月

	ム解明に向けた車両運動-空力連成シミュレーション	ラフォル、吉野崇、坪倉誠		
63	Hamiltonian simulation for solving Linear PDE via Schrödingerisation	Sangwon Kim, Junya Onishi, Ayato Takii, Younghwa Cho, Makoto Tsubokura	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
64	水素弱旋回燃焼器内フラッシュバックの LES	河合真穂, Abhishek Lakshman Pillai, 黒瀬良一	第 62 回 燃焼シンポジウム(大阪国際会議場)	2024 年 11 月
65	水素弱旋回燃焼器内フラッシュバック挙動に及ぼす当量比の影響	河合真穂, Abhishek Lakshman Pillai, 黒瀬良一	第 52 回日本ガスタービン学会定期講演会(サンポートホール高松)	2024 年 10 月
66	超臨界圧力条件下の酸素-水素拡散火炎から生じる間接燃焼騒音の数値解析	山田拓叶, Abhishek L. Pillai, 和田祥, 黒瀬良一	日本流体力学学会年会 2024 (仙台)	2024 年 9 月
67	風の影響を受けた高層建物まわりの降雨の LES	伊藤嘉晃、近藤宏二、田村哲郎	第 29 回計算工学講演会 (神戸)	2024 年 6 月
68	Building cluster 内に存在する高層建築物の層風力の変動 特性	河合英徳、田村哲郎	2024 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 113-114 (東京都千代田区)	2024 年 9 月
69	台風構造に基づく強風特性に関するアンサンブル LES 解析	川口真晴、田村哲郎	2024 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 115-116 (東京都千代田区)	2024 年 9 月
70	市街地における熱放射を考慮した乱流場の LES 解析 樹木の影響を考慮した解析手法の検討	新井舞子、田村哲郎、河合英徳	2024 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1969-1970, (東京都千代田区)	2024 年 9 月
71	低層街区を対象とした LES に基づく降雨解析 その 1 降雨の特徴	伊藤嘉晃、高木賢二、近藤宏二、田村哲郎	2024 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1957-1958 (東京都千代田区)	2024 年 9 月
72	低層街区を対象とした LES に基づく降雨解析 その 2 降雨観測と解析結果との比較	高木賢二、伊藤嘉晃、近藤宏二、田村哲郎	2024 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, 1959-1960 (東京都千代田区)	2024 年 9 月
73	顕著台風における実都市の乱流構造とピーク風速・風圧のアンサンブル推定	川口真晴、田村哲郎	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
74	台風時の都市境界層の LES に基づく風速・風向の鉛直分布の特性	河合英徳、田村哲郎	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
75	外装材破壊時における基準階モデルの室内圧変動に関する解析	長尾悠生、田村哲郎、河合英徳、丸山勇祐	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
76	実市街地における超高層建築物の隅丸形状効果に関する研究	小野梓、野津剛、河合英徳、田村哲郎	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月
77	中低層建物まわりの風の影響を受けた降雨解析	伊藤嘉晃、近藤宏二、田村哲郎	第 38 回数値流体力学シンポジウム(東京都目黒区駒場)	2024 年 12 月

78	Designing a healthy and sustainable indoor environment in the post-pandemic era against viral infections (Alicia Murga, 次世代研究者賞)	Alicia Murga, Rahul Bale, Kazuhide Ito, Makoto Tsubokura	第3回「富岳」成果創出加速シンポジウム研究交流会（東京都中央区）	2024年 3月
79	スパコン「富岳」によるスマートデザインと感染リスク評価のDX	坪倉誠	日本低温工学会関西支部総会（神戸）	2024年 5月
80	HPC シミュレーションと AI によるスマートデザイン	坪倉誠	VINAS Online Users Conference 2024（オンライン）	2024年 10月
81	「富岳」が拓く Society 5.0 時代のスマートデザイン ～自動車 CAE を例に～	坪倉誠	日本機械学会関西支部第 394 回講習会「実務者のための流体解析技術の基礎と応用」（オンライン）	2024年 11月