

令和5年度高性能汎用計算機高度利用事業

「富岳」成果創出加速プログラム

「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6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・建築分野に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 5 年度（報告年度）の実施内容

#### 2-1. 当該年度（令和 5 年度）の事業実施計画

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で連携して、課題を推進する。以下、それぞれのテーマの令和 5 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5年度は、AI支援多目的最適化フレームワークの実用評価、ニューラルネットワークの「富岳」チューニング、実車を対象とした数億セル規模の縮約モデル構築技術の開発、多目的最適化解析の実施、設計変数のチューニング、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5年度は、気象モデルアンサンブルデータの評価、風・水・構造体の統一解法のためのモデル開発、データ科学に基づく分析とリスク共生のための手法の実装方法の検討、変容都市での環境・防災設計（高い換気性能とレジリエンスの確保）の評価、スーパータイフーン下での対台風設計を行う。

（協力機関：東京工業大学、横浜国立大学、近畿大学、お茶の水女子大学、名古屋大学）

#### （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5年度は、統合シミュレーション技術の開発（粘液フィルムの Break-up を再現する飛沫生成モデルの作製及び Euler-Lagrange モデルによる飛沫・飛沫核輸送解析手法の開発）、汚染物質濃度制御にロバストな室内環境設計法の開発（呼吸空気質・呼吸領域の定量評価法の確立）、多目的最適化法の統合（皮膚温制御のための人体熱モデル及び知的生産性評価モデルの統合）、最適化問題の設定と解析モデル作成、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 5 年度は、統合シミュレーションの実施（簡易形状本計算および詳細形状本計算）、フラッシュバック・燃焼振動・エミッション評価、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を行う。

（協力機関：京都大学、九州大学）

## 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」

#### (a) 研究成果の要旨

今年度は、AI 支援多目的最適化フレームワークの実用評価、ニューラルネットワークの「富岳」チューニング、実車を対象とした数億セル規模の縮約モデル構築技術の開発、多目的最適化解析の実施、設計変数のチューニング、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、複雑な形状を有する自動車の車体周辺の非定常三次元流れ場に対して、「富岳」上でニューラルネットワークによる流れ場のモード分割を実施することができ、比較的大きな渦の構造を捉えることができることを確認した。また、比較的少数の設計変数によって現実的な車体形状のバリエーションを表現しながら、印象と空力の 2 目的最適化を試行し、印象の強さが異なる車体形状に対して各々最適な空力特性を持つ車体形状を提示できる多目的設計探索の実現可能性を示した。

In this fiscal year, we conducted a practical evaluation of an AI-assisted multi-objective optimization framework, tuned the neural network on the supercomputer "Fugaku," developed a technology for constructing a reduced order model with several hundred million cells for automobile aerodynamics, conducted multi-objective optimization analysis, tuned design variables for the optimization, and improved mathematical models for design and aerodynamic performance space. As a result, it was confirmed that mode decomposition of the flow field using a neural network can be performed on "Fugaku" for unsteady three-dimensional flow fields around an automobile body with complicated geometry, and that relatively large flow structures can be captured. Moreover, while representing realistic variations of automobile geometry with a relatively small number of design variables, we attempted to perform a two-objective optimization of impression and aerodynamics, and demonstrated the feasibility of multi-objective design exploration that can suggest automobile geometry with optimal aerodynamic characteristics for each level of impression intensities.

## (b) 本年度の内容

本年度（令和 5 年）の研究成果を項目別に示す。

### (b)-1 AI 支援多目的最適化フレームワークの実用評価

前年度まで設計を進めてきた、意匠空間を考慮した自動車空力形状の AI 支援多目的最適化フレームワークの Feasibility study として、「車体外観から受ける印象」と「空力性能」を目的とした、2 目的最適化問題への適用を試みた。ここで、最適化手法には Feasibility study において評価可能なサンプル数の少なさを考慮し、初期の Pareto Front の進行速度が有利であると考えられる Efficient Global Optimization (EGO) 法の適用を検討した。同手法は、本課題で構築してきた最適化フレームワークにおいて目的関数評価のための計算コスト低減に用いるサロゲートモデルと同一の、ガウス過程回帰モデルを使用した手法であり、同フレームワークとの親和性が非常に高い。

最適化問題における設計変数については、昨年度構築した市販 SUV 車両群の形状特徴量を設計変数として対象車両形状を変形させるモーフィング技術 (Fig. 2.2.1-1) を用い、少数の設計変数を用いて車体の大局的な形状変化を与えるモーフィングを実現した。「設計変数のチューニング」として、対象車両から 113 台の市販 SUV 車両のプロポーション特性を再現する、29 のモーフィングパラメータ値の組合せの主成分を求め、累積寄与率が 8 割に達する第 12 主成分までの主成分得点を設計変数として車体形状を定義することとした。このとき、29 パラメータ値が定義域外の値を取らないように、主成分得点値の組合せに制約を掛けることとした。

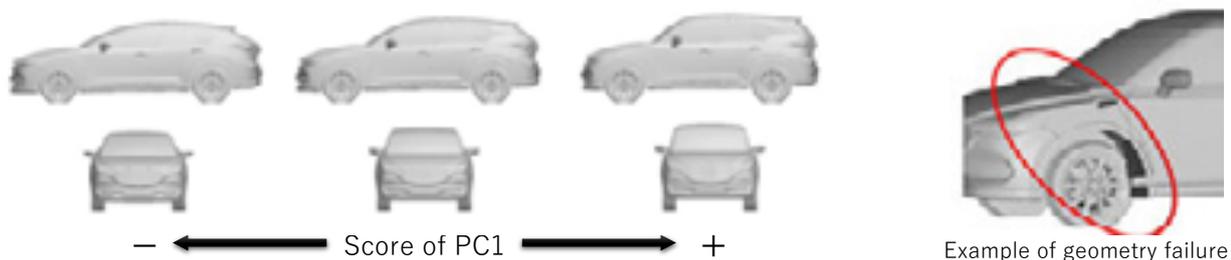


Fig. 2.2.1-1 Parametric shape change based on the developed design variable (Score of 1<sup>st</sup> principal component of the morphing parameters; left figure) and example of geometry failure avoided by the constraints (right).

一方、目的関数の設定に関しては、(b)-2 項に後述する意匠・空力性能空間の分析から互いに背反な傾向が明らかとなった『『実用的』な印象の強調』と「空気抵抗係数値 ( $C_d$  値) の低減」を 2 つの目的として設定した。前者については、昨年度『『実用的』な印象』との有意な相関が確認された車体プロポーション特性の第 1 主成分を代用指標として使用し、後者についてはこれまでと同様に統一解法フレームワーク CUBE を用いた車体周りの時系列乱流場解析を行って求めた時間平均抗力から  $C_d$  値を算出した。以上で定義した車体形状を与える 12 の設計変数と、『『実用的』な印象と相関のある車体プロポーション主成分』ならびに「空気抵抗係数値 ( $C_d$  値)」の 2 目的関数を用いて、「2 目的の最適化解析を実施」した。EGO 法の反復における追加サンプルの選定には、目的空間でパレート解が占める超体積 (Hypervolume) の改善期待値 (EHVI: Expected Hypervolume Improvement) の考え方を採用し、追

加サンプルの影響を疑似表現する影響関数 (influence function) を EHVI に掛け合わせることで同時に複数の追加サンプルを選定可能にする、疑似的な超体積の改善期待値 (PEHVI: Pseudo Expected Hypervolume Improvement) を指標として用いた。ここでは1反復あたり10サンプルを追加し、これを6反復繰り返した。その結果、Fig. 2.2.1-2に示すように「実用的」な印象と相関のあるプロポーション特性が強く (主成分得点が低く)、かつ CD 値が低い方向に進行した Pareto 解の集合が得られた。それらの Pareto 解から、k-means 法によるクラスタリングを行い、5つのクラスタから抽出した代表的な車体各1台を Fig. 2.2.1-3に示す。各々の「実用的」な印象の強さに対して、空気抵抗性能の高い (CD 値の低い) 車体を得られており、本手法の実現可能性が示された。

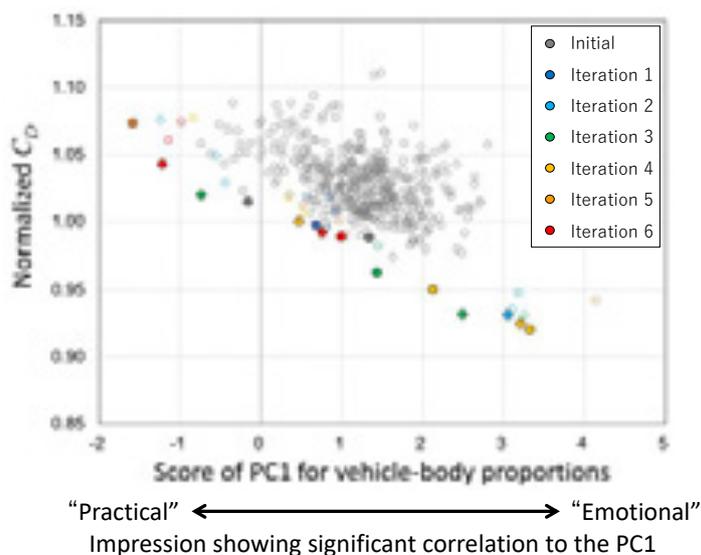


Fig. 2.2.1-2 Two-objective optimization of impression and vehicle aerodynamics using the developed optimization framework (Filled plots mean Pareto solution).

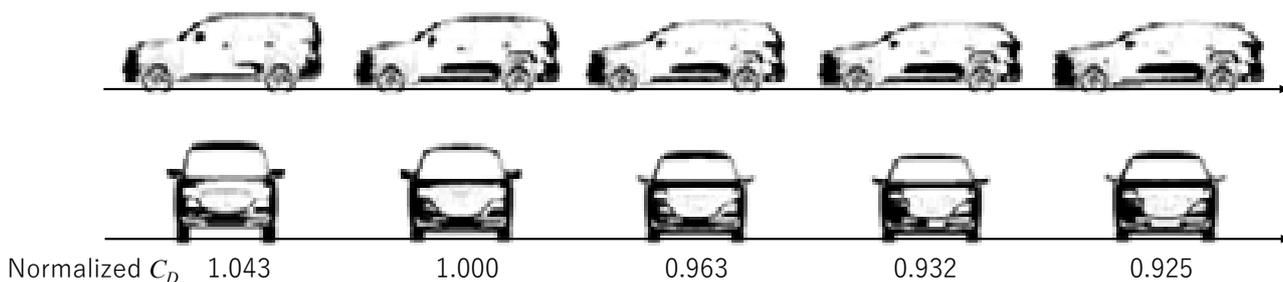


Fig. 2.2.1-3 Examples of body shape and normalized  $C_D$  value for each cluster of the Pareto solutions.

(b)-2 意匠・空力性能空間の数理モデルの改良

車体外観がヒトに与える印象の SD 法 (Semantic Differential method) による評価 (昨年度実施) と、市販 SUV 車両の 3 次元 CG(Computer Graphics)モデルの空力性能評価 (一昨年度実施) の結果を対象に、両者の関係に関する分析を進めた。その結果、「実用的 ⇔ 情緒的」「フォーマル ⇔ カジュアル」と解釈される外観の印象の主成分と、空気抵抗係数値の間には、Fig. 2.2.1-4に示すように車体形状特性を

介して一定の傾向があることが示された。



Fig. 2.2.1-4 Examples of body shape and normalized  $C_D$  value for each cluster of the Pareto solutions.

(b)-3 ニューラルネットワークの「富岳」チューニング

今年度は、これまで富岳上に実装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、単体性能を向上するための最適な実行設定のチューニングを実施した。Fig. 2.2.1-5は富岳1ノードに備わっている4つのCMG(Core memory group)と呼ばれる実行ユニットのうちの一つを使った時の単精度浮動小数点演算性能を示したものである。学習全体の性能については1 CMGあたり370.31GFLOPS(1ノード換算で約1.5PFLOPS)を示し、これはピーク性能に対して24.28%に相当する。また、主要計算カーネルとなる畳み込み演算部の性能は1 CMGあたり753.93GFLOPS(1ノード換算で約3.0PFLOPS)となり、これはピーク性能に対して49.29%の効率となり、縮約モデル構築のためのニューラルネットワークの学習を富岳上でより高効率に実行することが可能となった。

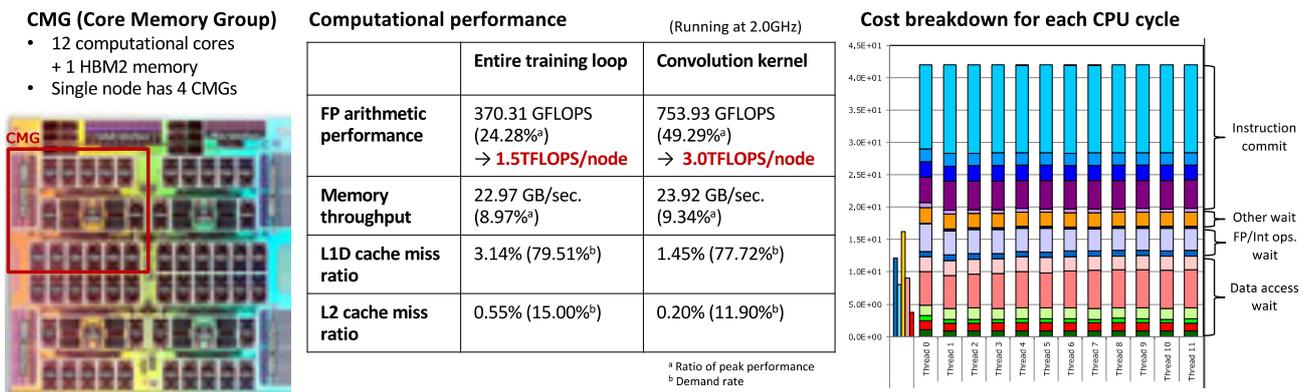


Fig. 2.2.1-5 Computational performance for neural network training on Fugaku.

(b)-4 縮約モデル構築技術の開発

これまで富岳上での実装を行ってきたニューラルネットワークによるモード分割及び縮約モデル構築手法について、2.6 億セルを使用した自動車車体周辺の乱流場(レイノルズ数=8.2×10<sup>6</sup>)の再現をターゲットとした実験を行った。学習データ生成のためのシミュレーション実施時の設定及び使用したモデルと計算メッシュを Table 2.2.1-6 に示す。

このシミュレーションによって生成された乱流の瞬時場データ(4 億セル、0.0005 秒刻み)を対象に提案手法を適用して 36 個の変数に縮約し、その後拡張して元の流れ場の再現を試みた(Fig. 2.2.1-7)。今回対象とした流れ場は複雑形状周辺の高レイノルズ数 (8.2×10<sup>6</sup>) の乱流場であったが、36 個の変数を使用してスケールの比較的大きな渦の構造を捉えることができた。ただし、車体形状周辺に発生する最も小さなスケール(典型的には 100kHz)の渦を捉えるにはさらに多くのモードへの分割が必要であることが確認できた。これにはより多くの計算資源を必要とするが、我々の並列手法を使用すれば利用ノード数の拡張により対応することが可能である。

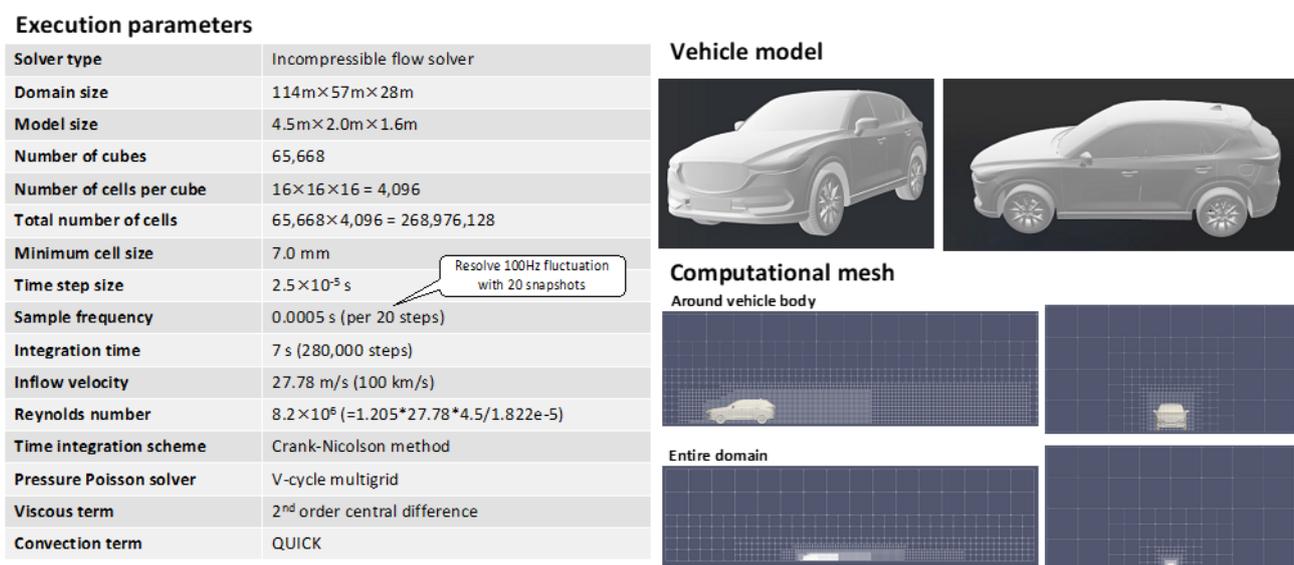
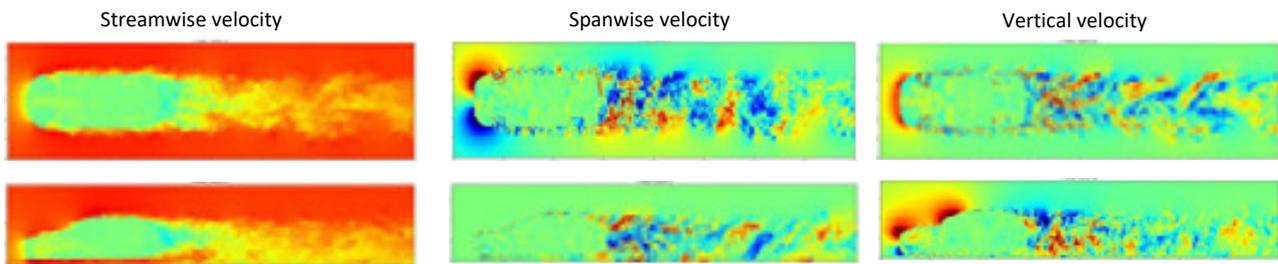


Fig. 2.2.1-6 Turbulent flow (Re=8.2×10<sup>6</sup>) simulation around vehicle body.

### Hi-precision simulation



### Reduced-order model (reproduced using 36 variables)

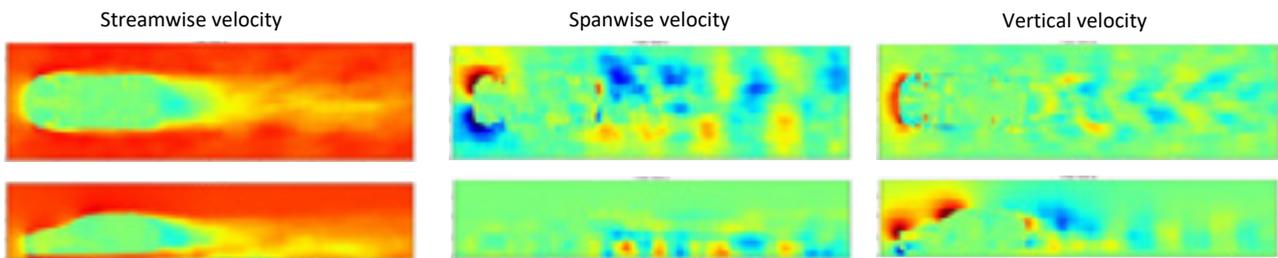


Fig. 2.2.1-7 Reconstruction of turbulent flow around vehicle bodys (upper: simulation result as reference, lower: reconstruction by neural network using 36 variables).

## (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」

### (a) 研究成果の要旨

気象モデルアンサンブルデータの評価、風・降雨・構造体の統一解法のためのモデル開発、データ科学に基づく分析とリスク共生のための手法について、自然擾乱下での環境・災害問題を解決することをねらいとする実装方法を検討した。将来の変容都市においては環境・防災設計（高い換気性能とレジリエンスの確保）の評価法を提示し、また、スーパータイフーン下での都市の対台風設計ならびに被害推定を行った。この結果、気象モデルアンサンブルデータに基づく市街地のアンサンブル CUBE 解析により、コヒーレント構造に基づく強風特性と物理機構を明らかにした。また、未来の変容した都市の環境・防災設計に対しては Breathability に基づく分析により市街地の詳細な換気メカニズムが明らかにされるとともに、低次元化モデル等のデータ科学に基づく分析により強風構造や建物の風圧力への影響が検討された。さらに、構造物の空力低減・制振や降雨被害に対してモデル構築をベースに、実際の複雑なファサード形状を有する建物や超高層建物の対台風設計のためのスマートデザインの適用が行われた。

In this fiscal year, the evaluation of data by meteorological ensemble analysis, the development of models for the unified solution of wind, rainfall and structure, and the data science-based analysis and risk management methods were examined for implementation methods aimed at solving environmental and disaster problems under natural disturbances. The evaluation methods for environmental and disaster prevention design (ensuring high ventilation performance and resilience) in future transformed cities are presented, and the design against typhoons and damage estimation of a city under super typhoon are also carried out. As a result, the ensemble CUBE analysis of the urban area based on the meteorological model ensemble data revealed the strong wind characteristics

and physical mechanism based on the coherent structure. Then, for the environmental and disaster prevention design of the future transformed city, the detailed ventilation mechanism of the urban area was clarified by the analysis based on breathability, and the effects on the strong wind structure and wind pressure of the building were examined by the analysis based on data science such as reduced order model. In addition, smart design against typhoon was applied to actual buildings with complicated façade and super high-rise buildings while numerical models were constructed for aerodynamic reduction and vibration control of structures, and rainfall damage reduction.

## (b) 本研究の内容

### (b)-1 アンサンブル・広域解析に基づく都市域流入変動風の作成

#### (b)-1-1 気象モデル(NHM)のアンサンブル解析に基づく都市域流入変動風作成

本研究では、気象研究所により作成されたメソ気象モデル解析を用いた台風の大アンサンブルデータベースから、一定の条件に基づいて小アンサンブルを抽出し、気象モデル・工学 LES ハイブリッド手法[2-1]の枠組みに則って、マイクロスケールの気象モデル解析、乱流再生成計算および市街地の LES を実施した。これにより、抽出された小アンサンブル間の強風特性を比較した。また、特に顕著な強風が発生するアンサンブルに着目して、メンバー間に生じた強風発生の不確実性を最大瞬間風速に基づいて分析した。

気象研究所では、2019年台風19号を対象として、気象庁非静力学モデルNHM[2-2]による1km解像度での1000メンバー大アンサンブルデータベースの作成を実施している。これは5kmの解像度において、ハイブリッドアンサンブル変分法を用いたデータ同化によるスピニアップを約4日間実施し得られた1000メンバーの初期場に基づいて実施したNHM解析からのダウンスケーリングにより得られたものであり、5km解像度での解析の境界条件は、気象庁全球アンサンブルモデル(26メンバー)の寄与をランダムに変えることにより与えられたものである。気象モデルによるアンサンブルデータ作成とダウンスケーリング解析の概要をFig.2.2.2-1に示す。本研究では、大アンサンブルデータベースから台風の特徴に基づいて抽出した下記の3種類の小アンサンブル(各10メンバー)に対して、250m解像度と50m解像度でのマイクロスケールのダウンスケーリングを実施した。解析領域をFig.2.2.2-2に、解析条件をTable 2.2.2-1に示す。

顕著事象抽出ケース：1km解像度データベースにおいて東京管区気象台の位置、地上10mにおける10分毎に取得された風速時刻歴の最大値が大きい順に10ケース抽出したものであり、顕著な高風速が発生した場合の強風特性を持つことが期待される。

ランダム抽出ケース：1000メンバーからランダムに10ケースを選んだものであり、顕著事象抽出ケースよりも一般的な強風の特性を持つことが期待される。

実況経路抽出ケース：東京都心への最接近時刻(2019年10月12日21時頃)の前後4時刻(15時、18時、21時、24時)の気圧分布から求めた台風中心と気象庁ベストトラックの距離の誤差の平均が小さい順に10ケースを抽出したものであり、実現象に近い強風特性を持っていることが期待される。

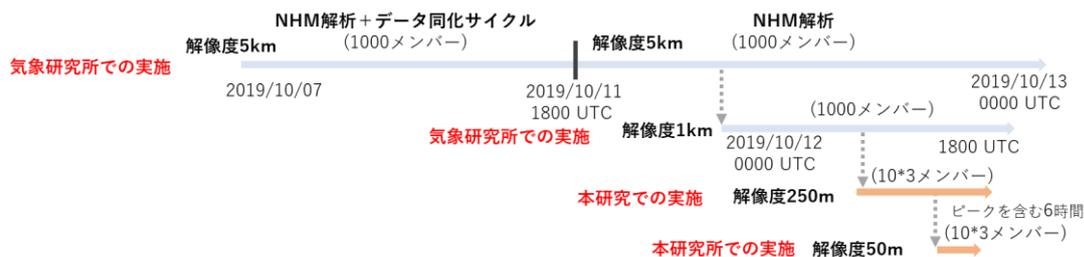


Figure 2.2.2-1 Generation of ensemble data and downscaling in the NHM

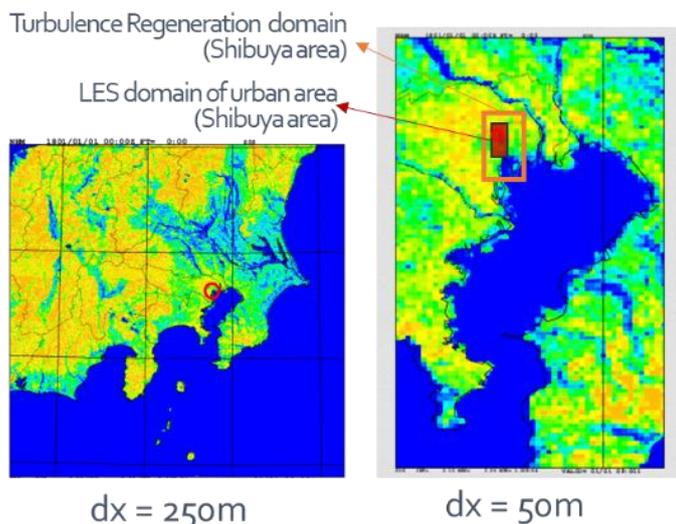
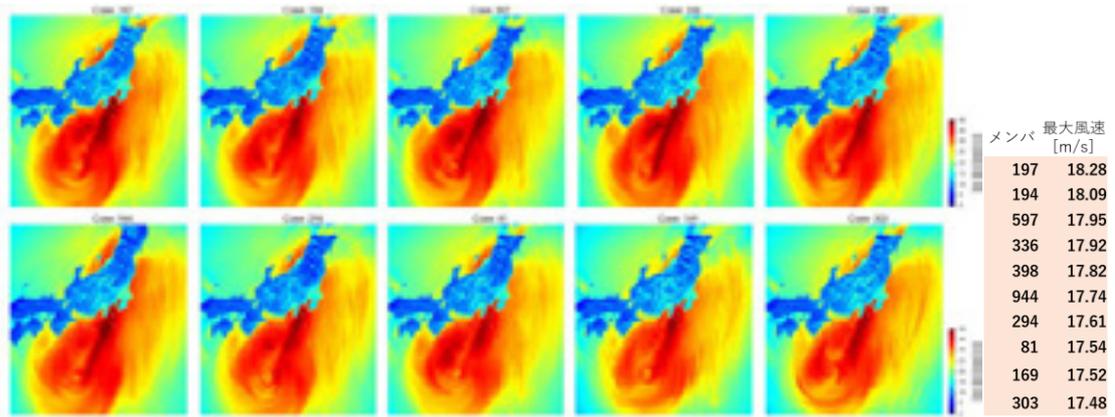


Figure 2.2.2-2 Computation domain of NHM

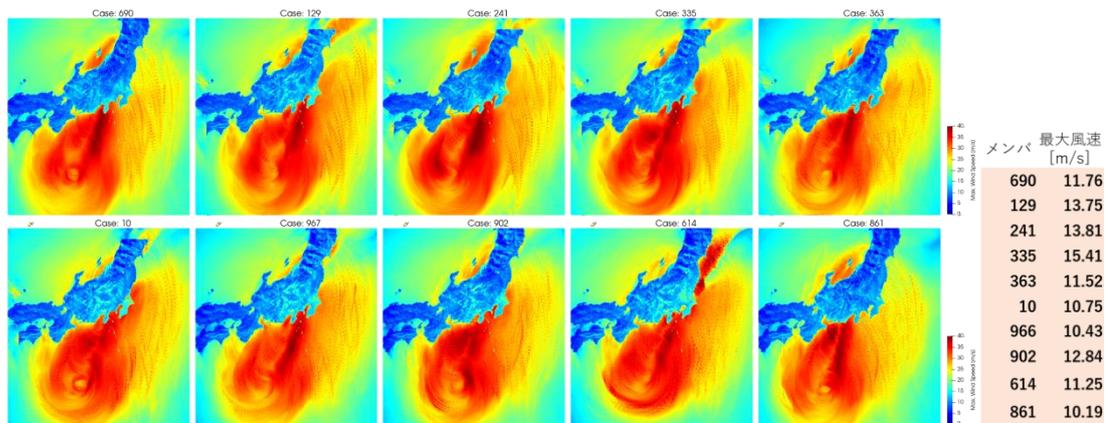
Table 2.2.2-1 Computation condition of NHM

Domain	$dx = 250\text{ m}$	$dx = 50\text{ m}$
Grid points	1371*1371*100	1101*1781*100
Horizontal resolution [m]	250	50
Range of height [m]	0 ~ 21186	0 ~ 21186
Vertical resolution [m]	20 ~ 408	20 ~ 408
Time increment[s]	1	0.25
Temporal resolution of boundary condition[min]	60	2
Turbulence model	1.5-order TKE closure	1.5-order TKE closure

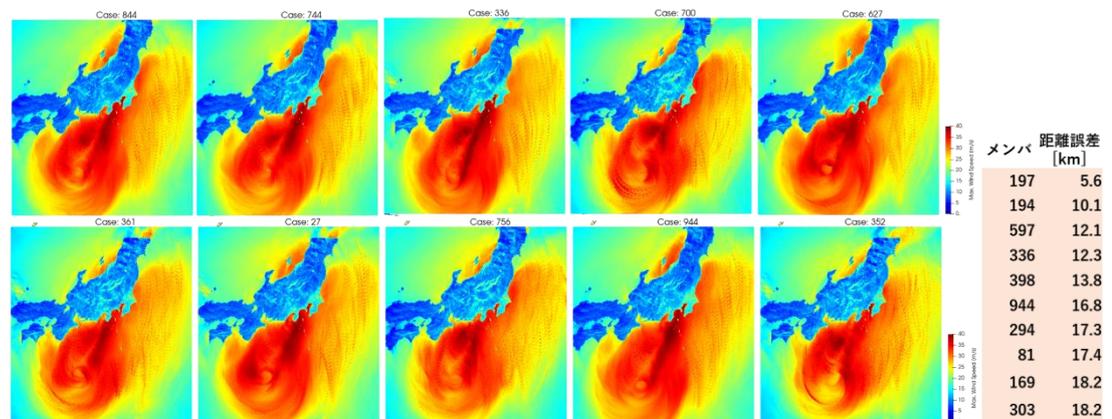
上記の条件により抽出された 1km 解像度の各メンバーの最大瞬間風速分布（地上 10m）に基づいて台風の軌跡を Fig.2.2.2-3 に示す。顕著事象抽出ケースではおおむね伊豆半島から三浦半島の高風速帯が分布し比較的直線的な進路を取っている。上陸前の台風の風速勢力が維持されており、再発達により上昇するケースも見られる。東京管区気象台位置での最大風速は 18.28m/s から 17.48m/s の比較的狭い範囲にある。ランダム抽出ケースについては、台風の進行方向のばらつきが大きく、高風速帯の上陸位置が御前崎付近から三浦半島付近まで分布している。また台風の勢力変化も大きい。実況経路抽出ケースでは、顕著事象抽出ケースと類似するが若干西側に上陸し、その後太平洋側に抜けるやや東寄りの進路を取った。勢力については比較的強いものが多いが、減衰傾向のものも含まれる。



(a) 顕著事象抽出ケース



(b) ランダム抽出ケース



(c) 実況経路抽出ケース

Figure2.2.2-3 Distribution of maximum instantaneous wind speed at 1km resolution for each member obtained based on the three extraction conditions

50m 解像度の NHM 解析から、市街地の計算に用いる流入変動風の作成を行った。本研究では次のように時間帯を選択した。

- (1)100 分間での最大瞬間風速のピークまたはほぼ同レベルのピークを含む時間帯とする。
- (2)複数の時間帯の候補が存在する場合は風速の顕著なピークがより多い時間帯を選ぶ。

(3)上の二つの条件を満たした上で、10 分間平均風速が高くなるように選ぶ。

このようにして得られた、気象モデルの解析結果に対して、気象モデル・工学 LES ハイブリッド手法に則って、乱流エネルギーのカスケード性に基づく乱流再生成計算を実施した。今回の解析では、解析領域は 10.5 km(南北方向)×7 km(東西方向)×約 3 km(鉛直方向)、水平格子解像度 25 m、時間刻み 0.02 s、気象場の実効フィルタサイズは格子解像度の 4.5 倍とした。

得られた大気乱流の構造の例として、Figure 2.2.2-4 に顕著事象抽出ケースの全 10 メンバーの高さ 300m 水平面および流入面位置のクロス鉛直断面内の風速瞬間場を示す。ロール渦に基づくとみられる幅数 km の高風速の帯が確認され、その内部の高波数の変動構造が乱流再生成計算により重層されより明瞭となった。鉛直断面内には数百メートルから 2km 程度のスケールの循環構造が形成されており、地表に近い高度において風速が極大となっている。

Figure 2.2.2-5 は、各抽出条件で得られた小アンサンブルごとの平均風速の鉛直プロファイルの比較である。ケースによる差異が見られており、極端事象抽出ケースでは多くのメンバーで高さ 500m 付近に比較的鋭い極大が存在し、上空での風速は明瞭に低下している。台風中心の壁雲に非常に近い位置でのプロファイルであると考えられる。ランダム抽出ケースでは、中心からの距離が遠くプロファイルの概形としてより通常のべき指数型に近づいていると考えられるが、多様な鉛直方向の変化が含まれている。中心からの距離や方位、また台風の構造としての違いにより生じているものと推察される。実経路抽出ケースでは極大事象と同様に、極大があるメンバーが多いが、上空側の低下はなだらかであり、より低高度で極大値となる傾向が見られた。

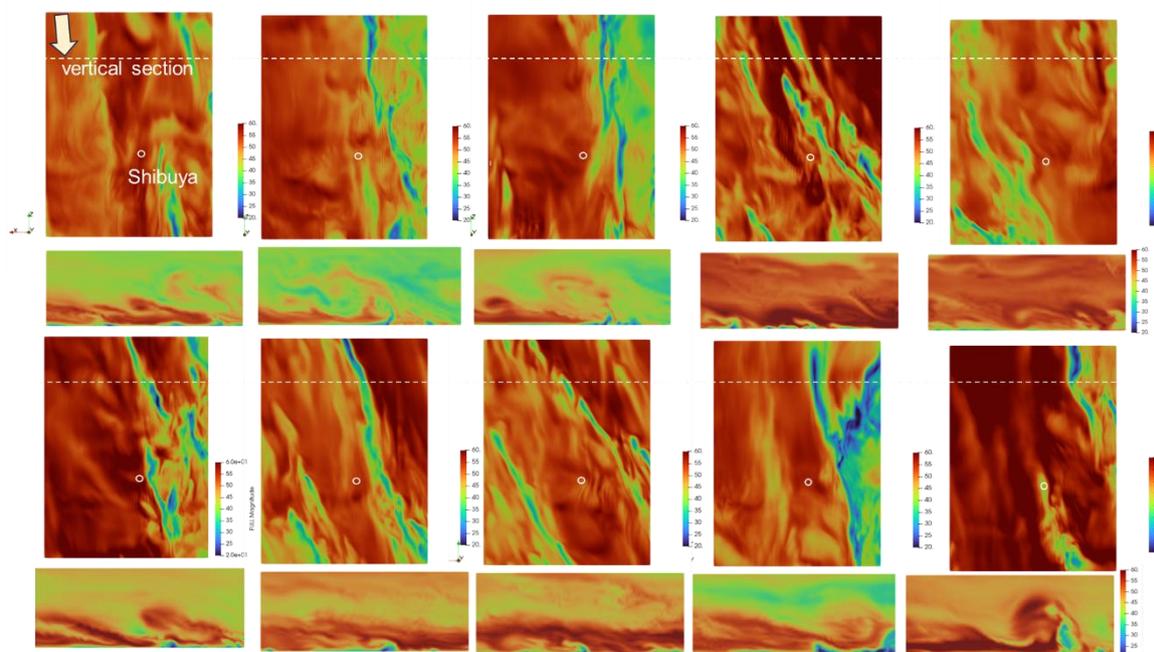


Figure2.2.2-4 Instantaneous wind velocity field after turbulence regeneration for the 10 members in the extraction case of extreme event (Top: Horizontal plane at 300 m height、 bottom: cross vertical section at inflow surface location)

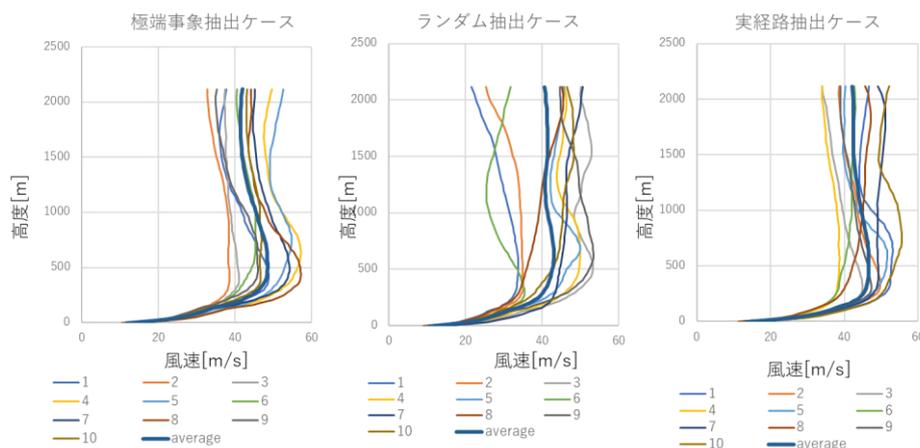


Figure 2.2.2-5 Vertical profiles of the mean wind speed of the inflow for the 10 members of each extraction conditions

### (b)-1-2 市街地のアンサンブル CUBE 解析 -コヒーレント構造に基づく都市域の強風特性解析-

顕著台風の風速変動特性を再現した流入風を用いた、都市域における強風被害リスクの推定を実現するためには、気象場の構造に由来する風速の不確実性の定量化が重要である。3種類の条件により抽出された小アンサンブル（各 10 メンバー）の特性を分析するため広域市街地の計算を、理研 R-CCS により開発された CUBE[2-3]を用いて実施した。今回は、顕著な強風が発生する状況の解析として、顕著事象抽出ケースの小アンサンブルについての分析結果を報告する。CUBE による実市街地の解析条件を表 2 に示す。気象場は初期条件と境界条件（流出面以外の 3 面）を通して与えた。解析領域はほとんどのケースで近似的な主流方向となる南北方向 6 km、東西方向 3 km とした。鉛直方向は地表から 1.5 km までとした。Fig. 2.2.2-6 に地形と建物を再現した地表モデルを示す。

Fig 2.2.2-7 に顕著事象抽出ケースの 10 メンバーの最大瞬間風速の分布を示す。上空のロール渦構造の位置や一定範囲内の風向変化、乱流現象の不確実性により、ケース間で最大瞬間風速の分布に差異が生じている。Fig 2.2.2-8 に不確実性の高いまれな強風発生パターンを抽出するため、異なる高さでの 10 メンバー中で最も大きい最大瞬間風速と、10 メンバー中の上位 5 位が超過する中位の最大瞬間風速（最大瞬間風速のアンサンブル中央値）を並べて示す。瞬間風速の 10 メンバー中で最も大きい最大瞬間風速においては、各メンバーで発生した直線的な筋状の強風の軌跡が現れた。上空 100m では、100-50m 程度の限られた幅で風向に沿った非常に長く伸びた軌跡が確認される。地表近くでは、建物配置との干渉が発生し、上空の風向と大きく異なる向きにも長い距離流下した。また高層建物の間や下流の剥離流の流下する場所で風速が顕著に上昇した。最大瞬間風速値の不確実性の大きさを検討するため、Fig 2.2.2-9 に顕著事象抽出ケースの各高さにおける最大瞬間風速値のばらつきの空間分布を 10 ケースの中での最大値と中央値の差により表現して示す。中高層建物の屋根高さに相当する高度（地上 25-50m）では特にばらつきが大きく、最大瞬間風速のアンサンブル中央値を 25%以上上回る最大瞬間風速が計算領域の広い範囲に散発的に分布する。また最大瞬間風速のアンサンブル中央値を 40%以上上回る強風領域も市街地内で局所的に確認される。Fig.2.2.2-10 には地上 10m における 10 メンバー中で最も大きい最大瞬間風速の分布とばらつきの大きい領域の空間分布を示す。地上近傍では高層建物の周辺の狭小空間や後流側のストリ

ートにおいて風速が高く、ばらつきも比較的大きい傾向が確認された。

今後、ランダムケースと極大ケースの小アンサンブル間での比較、実況経路抽出ケースでの東京管区気象台との実観測との比較を実施し、市街地空間での強風発生の不確実性について確率的な知見として整理する適切な方法の検討を進める。

Table 2.2.2-2 Computation condition for LES of urban area

数値解析ソルバー	CUBE (非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づく定式化)
物理変数	速度、圧力
計算領域	6 km * 3 km*1.5 km(鉛直)
空間解像度	1.5 m (対象街区中心部)、3km (周辺街区)
計算時間	スピニングアップ(2分)+解析用計算(10分) ( $\Delta t=0.005$ s)
計算格子	約3億 直交型格子のマルチブロック格子系(BCM)を採用
空間離散化	2次中心差分(移流項のみ:5% 風上付加)
時間積分	2次 Crank-Nicolson 法
圧力計算	Red-Black SOR 法
乱流モデル	Dynamic Smagorinsky
地表・建物	Immersed boundary 法

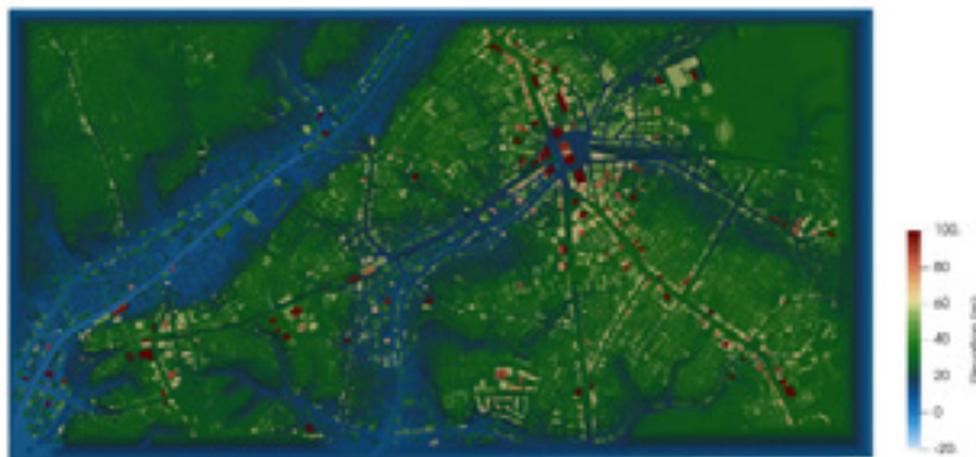


Figure 2.2.2-6 Ground surface model of the buildings and topography of the Shibuya district

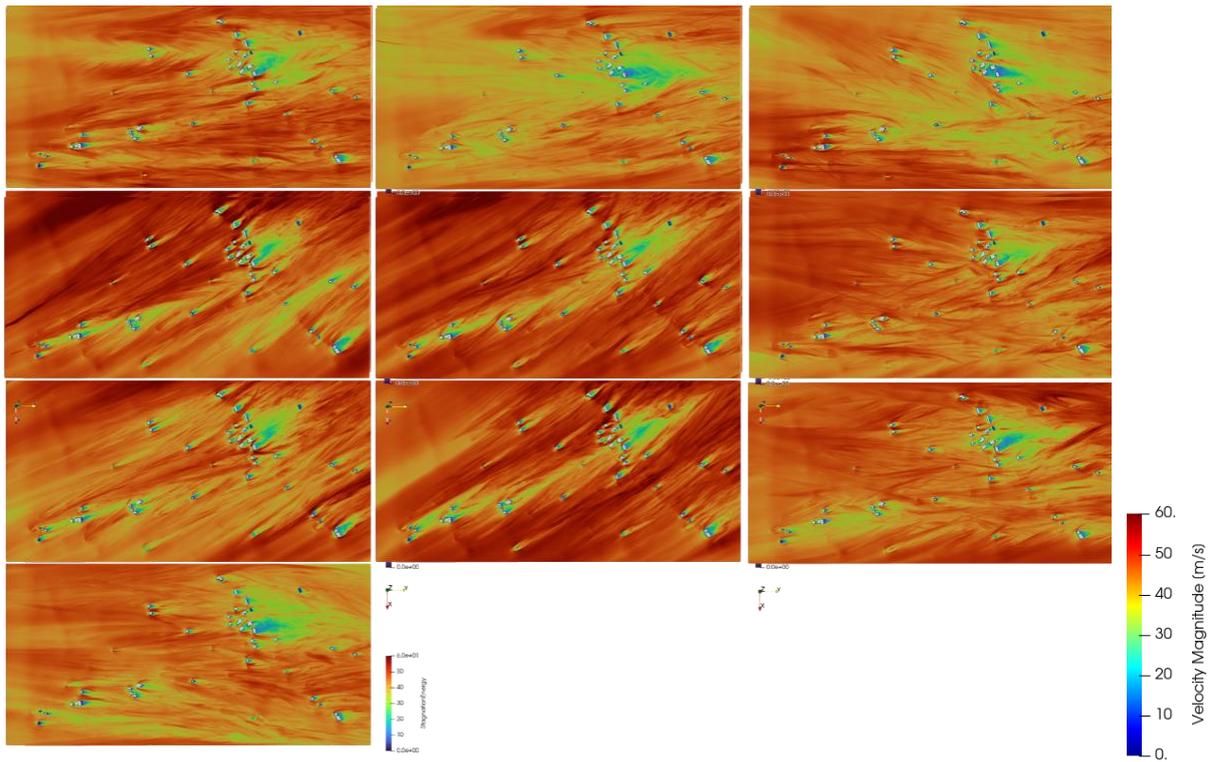


Figure 2.2.2-7 Distribution of maximum wind speed in Shibuya district for extracted cases of extreme events (approx. 100 m above ground, 10 min.)

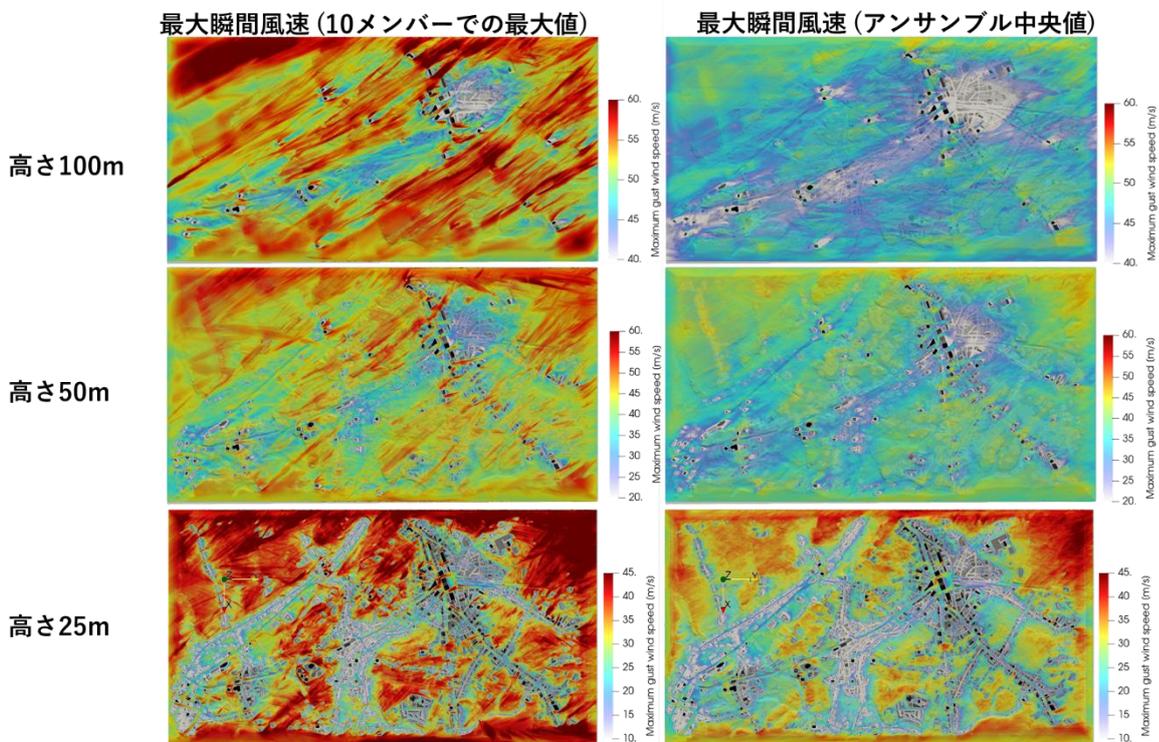


Figure 2.2.2-8 Extraction of patterns of strong wind occurrence with high uncertainty in Shibuya district (Extraction cases of extreme events, in 10 members)

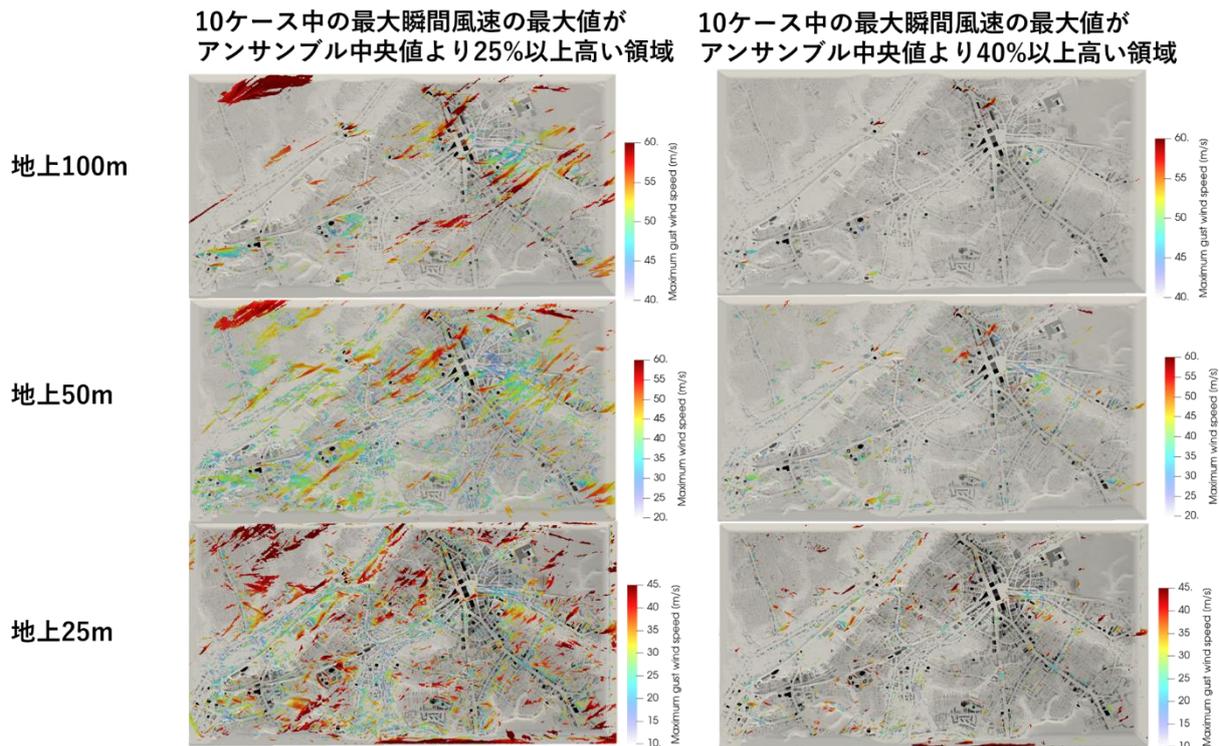


Figure2.2.2-9 Variability of maximum wind speed at each height  
(Extraction cases of extreme events, in 10 members)

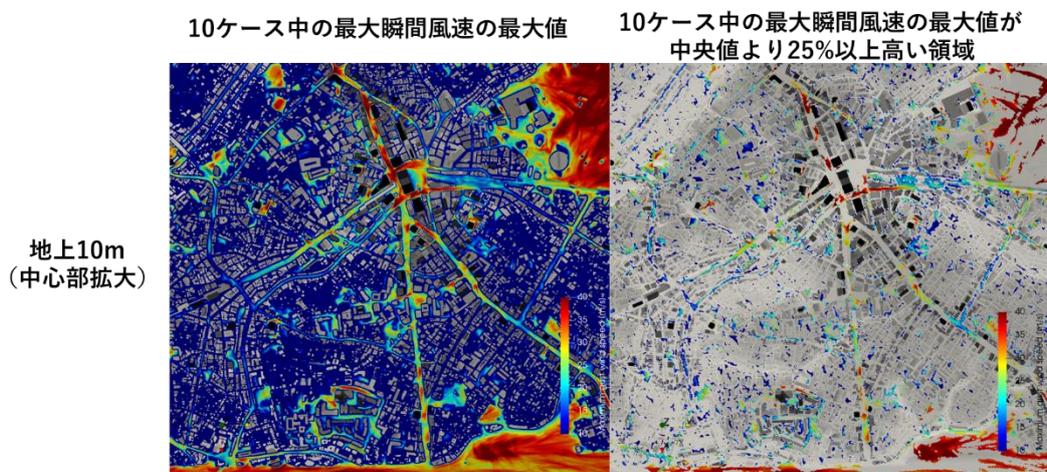


Figure2.2.2-10 Variability of maximum wind speed near ground (Extraction cases of extreme events, in 10 members)

(b)-1-3 WRF-LESに基づく都市域流入変動風の妥当性確認 -ライダー観測データとの比較-

本研究では風向変化を伴う台風の気象場に対して河合・田村が開発した空間フィルタリング・リスケーリング手法[2-4]を適用し、高周波変動成分が付加された気象場を作成したうえで、鉛直方向に風向の分布がある流入条件を BCM (Building Cube Method) による広域市街地解析に接続することによって台風下の都市境界層に関する LES を実施する。得られた解析結果についてはドップラーライダーの観測での

平均風速の鉛直プロファイルとの比較を行い、妥当性の検討を行った。

Fig. 2.2.2-11 に本研究での台風下の都市境界層の解析方法の流れを示す。本研究では中島ら[2-5]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、河合・田村が提案した空間フィルタリング・リスケーリング手法を適用することで、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 (Driver region)。台風の気象場への適用を試みる本研究では、境界層高さ付近の主風向 (南) に基づいて境界層が発達すると仮定し、主流成分については摩擦速度比に基づくリスケーリングに基づく準周期境界が適用される。なお、側面からのスパン方向成分については周期境界を適用し、リスケーリングは行わない。さらに、得られた時空間データを流入境界条件として地形と建物を解像した広域市街地 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 (Main region)。ただし、既報[2-4]と異なり、対象となる気象場には鉛直方向に風向の分布を有することが想定され、高度によっては側面からの流入が発生するため、広域市街地 LES では主流方向と側面から風速の時空間データを流入境界条件として接続する。

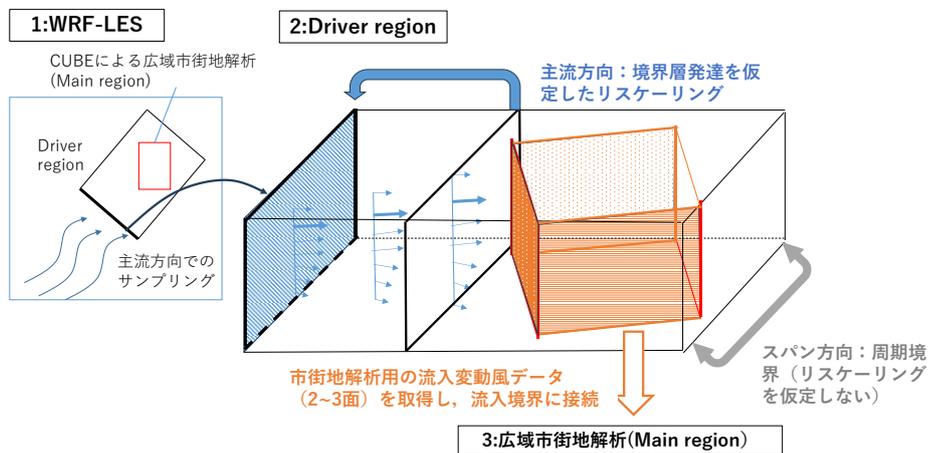


Figure 2.2.2-11 Driver region calculation for adding high-frequency fluctuation to spatial-filtered inflow

Fig. 2.2.2-12 に示すように、各成分の平均風速は WRF-LES の鉛直プロファイルをはほぼ維持している。風向についても 500m 以下において若干の風向の変化が発生しているが、風向の差は最大でも 10 度未満となる。また、乱流強度の各成分に着目すると WRF-LES では 500m 以下の乱れが過小に予測されているが、Driver region のプロファイルは乱流境界層 (表面粗度区分 III) 相当の乱れが再現されていることが確認できる。

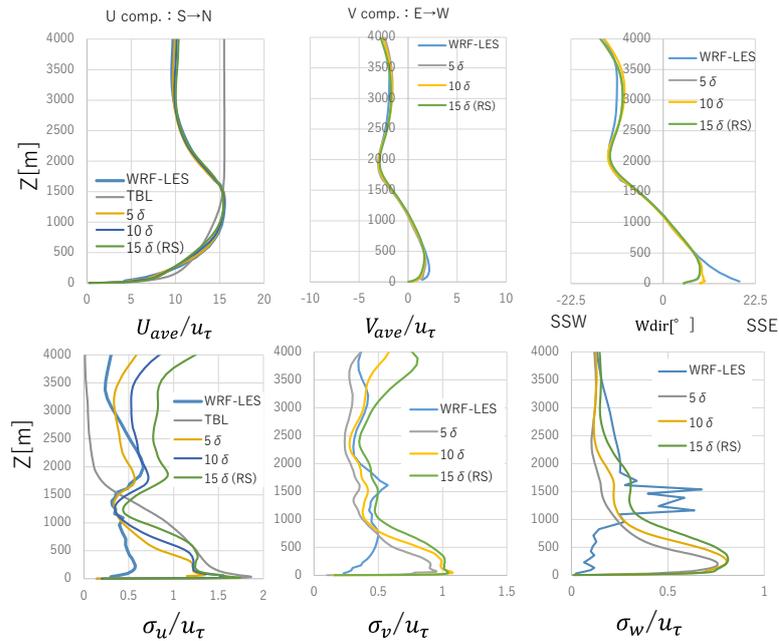


Figure 2.2.2-12 Comparison of vertical profile  
(WRF-LES,  $x=5\delta, 10\delta, 15\delta$  from inlet plane in Driver region)

本研究では、空間フィルタリング・リスケーリング手法に基づいて作成された気象場の風速の時空間データを境界条件として、地形・建物を解像した広域市街地解析を実施する。本解析では GIS データと国土地理院の標高データにより、東京中心部  $10.5\text{km} \times 9\text{km}$  の解析領域内にある建物形状と地形の起伏を再現している。計算格子は階層型直交格子に基づいて生成されており、解析コードは理化学研究所 R-CCS によって開発された CUBE[2-3]である。支配方程式は非圧縮性 Navier-Stokes 方程式であるが、コリオリ力・浮力に基づく風向の分布が気象場より導入されると仮定し、現時点ではこれらを支配方程式の外力項として陽に導入していない。

解析ケースは Fig.2.2.2-13 の 4 ケースであり、①ドライバ解析によって得られた流入条件の接続方法を吟味する (Case1、Case2)、②地表近傍の都市形状が流れの構造に及ぼす影響を示すこと (Case2、Case3)、③空間解像度の影響を確認すること (Case3、Case4)を目的としている。

広域市街地解析における流入境界の接続方法、地表面の建物形状の解像が都市境界層内の乱流場に及ぼす影響を確認するために、Fig.2.2.2-15 に Case1~Case4、WRF-LES、山中らのドップラーライダーによる観測結果[2-6]における水平風速の鉛直プロファイルと風向を示した。広域解析において地表面の建物形状を再現していない Case1 と Case2 では、y 方向の側の境界条件が異なっている。Case1 では流速勾配を 0 とした流出境界、Case2 では流入変動風の流速をディリクレで与えているが、Fig.2.2.2-15 に示す水平流速の大きさはほぼ一致しており、風向については地表近傍で最大 2 度程度のわずかなずれがあるものの、上空では一致している。

また、広域市街地において建物形状を再現することについては、建物形状を含まない Case 1、Case2 では地表面の速度回復により風速が増速しているが、建物形状を再現した Case3、Case4 では地表の建物群によって生じる乱流場が再現されており、Fig.2.2.2-15 の風速の鉛直プロファイルにおいても高さ 200m 以下の速度欠損が再現されている。

最後に空間解像度の異なる2ケース(Case3, 4)を比較すると、空間解像度が粗いCase3では建物建物形状が十分に再現されていないことから (Fig.2.2.2-14)、Fig.2.2.2-15の平均風速の鉛直プロファイルでは地表近傍の速度欠損が過大となっている。よって、Fig.2.2.2-15のCase4のプロファイルではFig.2.2.2-14に示すように実市街地の建物形状が十分に再現され、建築物等の地表の境界条件による速度欠損が適切に表現されたことにより、高さ200m以下の水平流速とドップラーライダーによる観測[2-6]が十分に対応した結果となっている。以上の考察により、本広域解析を用いて都市域を再現した流入変動風を作成することの妥当性が確認された。

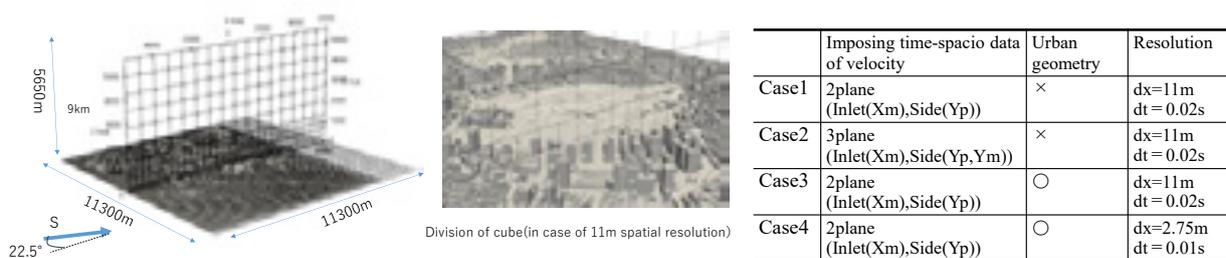


Fig.2.2.2-13 Calculation domain by CUBE (Main region) and division of cube

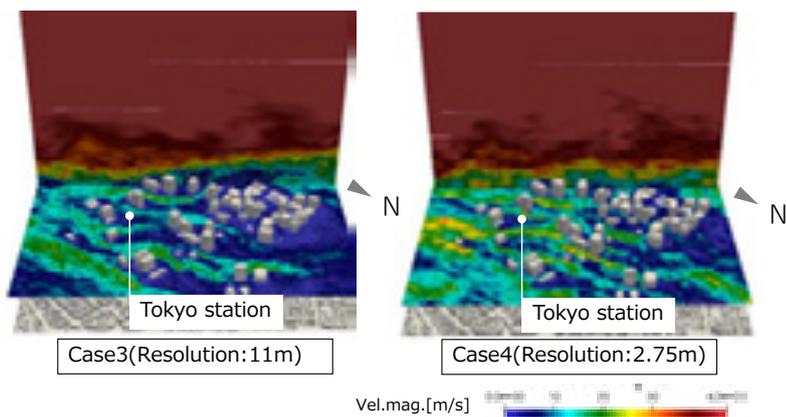


Fig.2.2.2-14 Distribution of velocity magnitude in urban area (plane of z=100m and plane of y=250m, Main region)

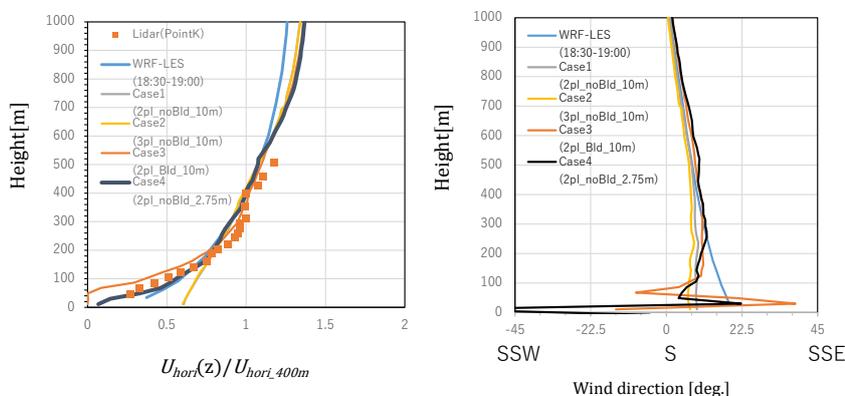


Fig.2.2.2-15 Vertical profile of horizontal velocity (Average value) and wind direction (in Main region)

## (b)-2 未来の変容した都市を対象とする環境・防災設計の提案

### (b)-2-1 Breathabilityに基づく評価

市街地における暑熱リスクの増大や空気質に関連する健康問題の増加への対策として、換気性能の向上は今後の望ましい都市空間変容を考える上で重要な観点の一つである。換気性能の指標としては上空との風速比[2-7]、水平方向や鉛直方向の流量[2-8]、局所的な空気齢と障害物がない場合の空気齢の差で定義される Air delay[2-9]など様々なものが提案されているが、市街地内外の空気の交換に関わる換気性能として、鉛直方向の流体交換に着目した都市の breathability という概念が提唱されている[2-10]。鉛直方向の流体交換は様々な物理量により表現することが可能であるが、既往研究[2-11]では鉛直方向の運動エネルギー流束を用いることにより、運動エネルギー方程式の各輸送項に基づいて換気メカニズムと関連付けた解析を行えることが報告されている。しかし、実都市における換気性能や街区の変容に関する評価、換気メカニズムに関する分析例は依然少ない状況である。本研究では、東京都心の渋谷地区を対象に実高密度街区の変容を想定し、鉛直運動エネルギー流束により表わされる breathability に基づく換気性能と特性の分析を実施した。運動エネルギー $\langle u_i u_i \rangle$ は、平均運動エネルギー $\langle u_i \rangle \langle u_i \rangle$ と乱流運動エネルギー $\langle u_i'' u_i'' \rangle$ の和に等しく、方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \langle u_i u_i \rangle = & -\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{2} \langle u_i \rangle \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle + \frac{1}{2} \langle u_i'' u_i'' \rangle \langle u_j \rangle + \langle u_i \rangle \langle u_i'' u_j'' \rangle + \frac{1}{2} \langle u_i'' u_i'' u_j'' \rangle \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (-\langle u_i \rangle \langle P \rangle \delta_{ij} - \langle P'' u_j'' \rangle) + 2v \langle u_i \rangle \langle S_{ij} \rangle + 2v \langle S_{ij}'' u_i'' \rangle \right) - 2v \langle S_{ij}'' S_{ij}'' \rangle - 2v \langle S_{ij} \rangle \langle S_{ij} \rangle = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

右辺項のうち本研究では移流と乱流拡散に着目して分析を行う。上式は収支式であり、空間微分内側の各項が各軸方向の流束の輸送を表している。したがって鉛直方向 ( $j=3$ ) の流束については、平均運動エネルギーの移流項 (MA)  $\frac{1}{2} \langle u_i \rangle \langle u_i \rangle \langle u_3 \rangle$ と拡散項 (MD)  $\langle u_i \rangle \langle u_i'' u_3'' \rangle$ 、および乱流運動エネルギーの移流項 (TA)  $\frac{1}{2} \langle u_i'' u_i'' \rangle \langle u_3 \rangle$ と拡散項 (TD)  $\frac{1}{2} \langle u_i'' u_i'' u_3'' \rangle$ と表すことができる。各輸送項と輸送を担う流れ場としては次のように関連付けることができる。

- MA  $\frac{1}{2} \langle u_i \rangle \langle u_i \rangle \langle u_3 \rangle$  平均流に基づく平均運動エネルギーの移流輸送
- MD  $\langle u_i \rangle \langle u_i'' u_3'' \rangle$  定在する渦やせん断層におけるレイノルズ応力による拡散輸送
- TA  $\frac{1}{2} \langle u_i'' u_i'' \rangle \langle u_3 \rangle$  風速の変動分が持つ運動エネルギーの平均的な移流輸送
- TD  $\frac{1}{2} \langle u_i'' u_i'' u_3'' \rangle$  非定常な乱流渦によるエネルギーの拡散輸送

### (b)-2-2 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

本研究は周辺を複数の高層建物に囲まれた高集中度層街区という特徴を持つ渋谷・桜坂地区を対象として実施した。変容街区形状としては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を意図して新たに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、現状(C0)を含む4ケースでの計算結果の比較を行った。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個々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して、1/400 のスケールで作成した。渋谷中心部の半径 600m の範囲の建物が再現されている。

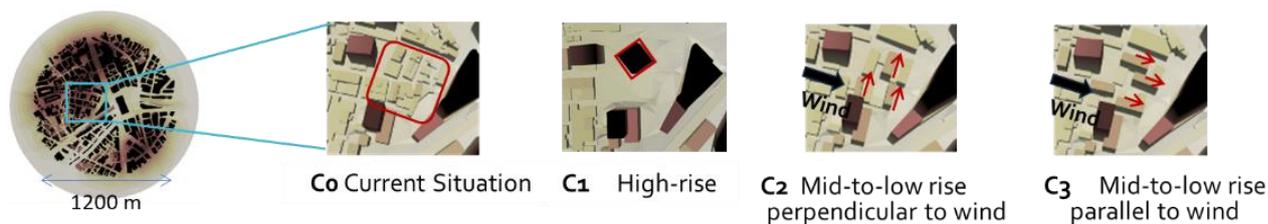


Figure 2.2.2-16 Urban area models

流体計算は理研 R-CCS により開発された CUBE を用いて実施した。マルチグリッド型階層直交格子を採用し大規模計算時のロードバランスに優れており、また immersed boundary 法の採用により地形や建物等の複雑境界を持つ流れ場にも適用可能である特長を持つ。市街地内の格子解像度は実スケールで約 90cm とし、総格子数は各ケースとも 3 億から 4 億程度である。空間離散化は 2 次中心差分とし、移流項のみ 1 次風上差分を 5% 付加した。時間積分には Crank-Nicolson 法を用いた。時間刻みは Courant 数が 1 以下になるように設定し実時間で 10 分間の計算を行った。流入条件は、野澤・田村[2-12]の準周期境界条件を用いたドライバ領域での解析で作成された地表面粗度区分Ⅲの乱流境界層流を用いた。

今回、都市キャノピー内外での流体交換および都市キャノピー内のより生活空間に近い高さでの鉛直流体交換の両方を考慮するため 2 つの高さの評価を行った。今回検討した密集市街地の高層タワーを除く建物の平均的な高さに基づいて、キャノピー上部の評価高さを海拔 50m、キャノピー下部の評価高さを海拔 20m とした。なお対象街区の標高は約 5m である。

Fig. 2.2.2-17 にキャノピー上部、下部における運動エネルギーの鉛直流束の分析結果を示す。C1 では、キャノピー上部において、建物風上面で吹き降ろしにより下向きのエネルギー流束が 7.5 倍に顕著に増加した。キャノピー高さにおいて上空風の運動エネルギーが取り込まれていることを明確に示した。キャノピー下部においては、C1 では、上下方向のエネルギー流束がそれぞれ 14.2 倍、7.4 倍まで顕著に上昇し、両方向に換気が促進されていることを示した。下向きの流束は主に風上面の吹き降ろしにより発生し、上向きの流束は、高層建物の後流渦、また隣接建物がないために周辺の高層建物配置に基づく気流構造が顕著になったことで発生している。

C2 と C3 では、キャノピー上部において、エネルギー流束の大きさは上下方向ともに C0 とおおむね同程度であり、鉛直方向の流体交換の促進は確認されなかった。やや減少傾向であるのは街区内の建物高さが上昇し、街区内部側での評価となったことの影響であると考えられる。また、建物風上面上部での吹き上げの影響で、C1 とは異なり、正味のエネルギー流束は上向きとなった。これらのケースでは風上面での吹き降ろしはキャノピー内部のより低い高さでの気流形成に寄与していると推察される。一方キャノピー下部においては、いずれのケースでも流束の増加が見られた。特に下向き流束はそれぞれ 2.7 倍、2.1 倍となった。これらはブロック形状による鉛直流形成の効果、キャノピー内での吹き降ろしや乱流拡散の効果であることが推察される。この高さでの正味の流束は下向きであり、鉛直流体交換の結果、街区内部で地表近傍への運動エネルギーが増加したことが示された。

以上の結果から、C1 では街区形状の変更により上空のエネルギーの取り込みが増加し、キャノピー内部の流体交換も大幅に促進された。C2、C3 では、キャノピー上部でのエネルギーを取り込む能力は向上しなかったが、キャノピー内部での換気性能については吹き降ろしや鉛直流形成により改善したことが確認された。キャノピー高さでの運動エネルギーの取り込みの向上については、今後 3 次元的に形状変更

したさらに多くの街区形状に基づく検討が必要であると考えられる。また建物単位ではなく街区全体の建物配置に基づいて鉛直方向の換気の最適化を行う方策も有効である可能性が推察される。

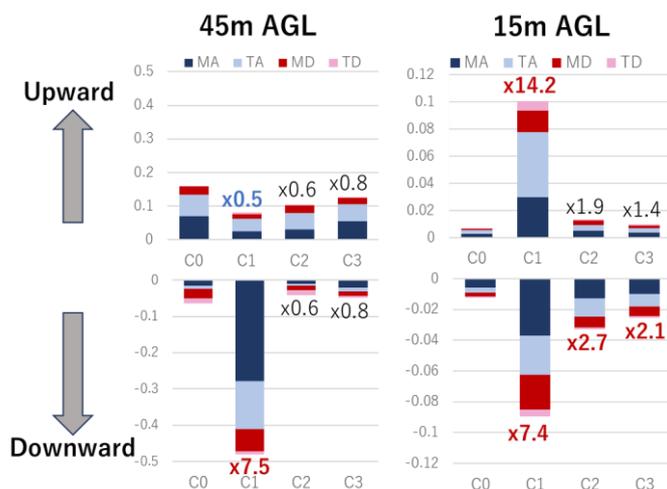


Figure 2.2.2-17 Total vertical flux of kinetic energy at the top of the canopy (45 m above ground) and inside (15 m above ground)

運動量の成分に基づいて換気メカニズムの分析を行った。Fig. 2.2.2-18 にキャノピー上部、下部それぞれにおける運動エネルギー各成分の鉛直流束の空間分布を示す。概括的には、鉛直流束の構成要素と流れの構造の間には次のような関連が確認された。

- ・ 建物風上面での定常的な吹き上げと吹き降ろし (MA と TA)
- ・ 高層建物の後流渦による吹き上げ (TA)
- ・ 吹き降ろしを伴った建物側面のせん断層や屋根面から後方に生じる縦渦 (MD)
- ・ 建物間など主流方向が明確でない場所での乱流渦 (TD)

これらのうち、吹き上げと吹き降ろしは、平均流と乱れの両方のエネルギーを輸送するが、接近流の持つ乱れの強度によって MA と TA による輸送の比率が変化していることが推察された。また高層建物の後流渦による吹き上げは、水平風向が比較的变化する一方、鉛直成分は比較的定常的に存在し移流が発生する場所であることから、TA による輸送が卓越することが推察された。また吹き降ろしを伴った建物側面のせん断層や屋根面から後方に生じる縦渦については、比較的主流が大きい場所において、渦構造の定在によりレイノルズ応力による輸送が平均的に発生しているため MD による輸送が卓越することが推察された。

Fig.2.2.2-19 は Fig. 2.2.2-17 に示した総鉛直流束量を各成分の比率に直して示したものである。キャノピー高さでの上向きの流束の形成には、中層建物の風上面での吹き上げ、高層建物の後流渦の効果による移流効果が卓越している。上空からのエネルギー取り込みを表すキャノピー上部での下向きの流束は、C1 と C3 では移流効果、C0 と C2 では拡散効果が卓越し、ケースによる差がもっとも顕著に表れた。C1 は高層建物の吹き降ろしによる平均流のもつ運動エネルギーの移流輸送 (MA) が大半を占めており、変

動エネルギーの輸送も移流により行われたことが示された。C2は移流が小さく、主流方向の変化が大きいためTDが卓越し、乱流渦の拡散効果が強いことが示される。特に建物間や剥離せん断層の周囲など、主流方向の明確でない位置で大きくなる傾向が見られた。C3は移流性の高い流れ場であるが、乱流効果としてはMDが大きいことが確認される。主流に沿った建物から縦渦が伸びる構造が形成され比較的主流が大きい場所において、渦構造の定在が発生しているためと考えられる。キャノピー下部での流束の成分構成については、両方向共にケース間で大きな差異は見られず、ブロック形状に基づいて作られる平均的な流れ場の影響が大きいことが確認される。

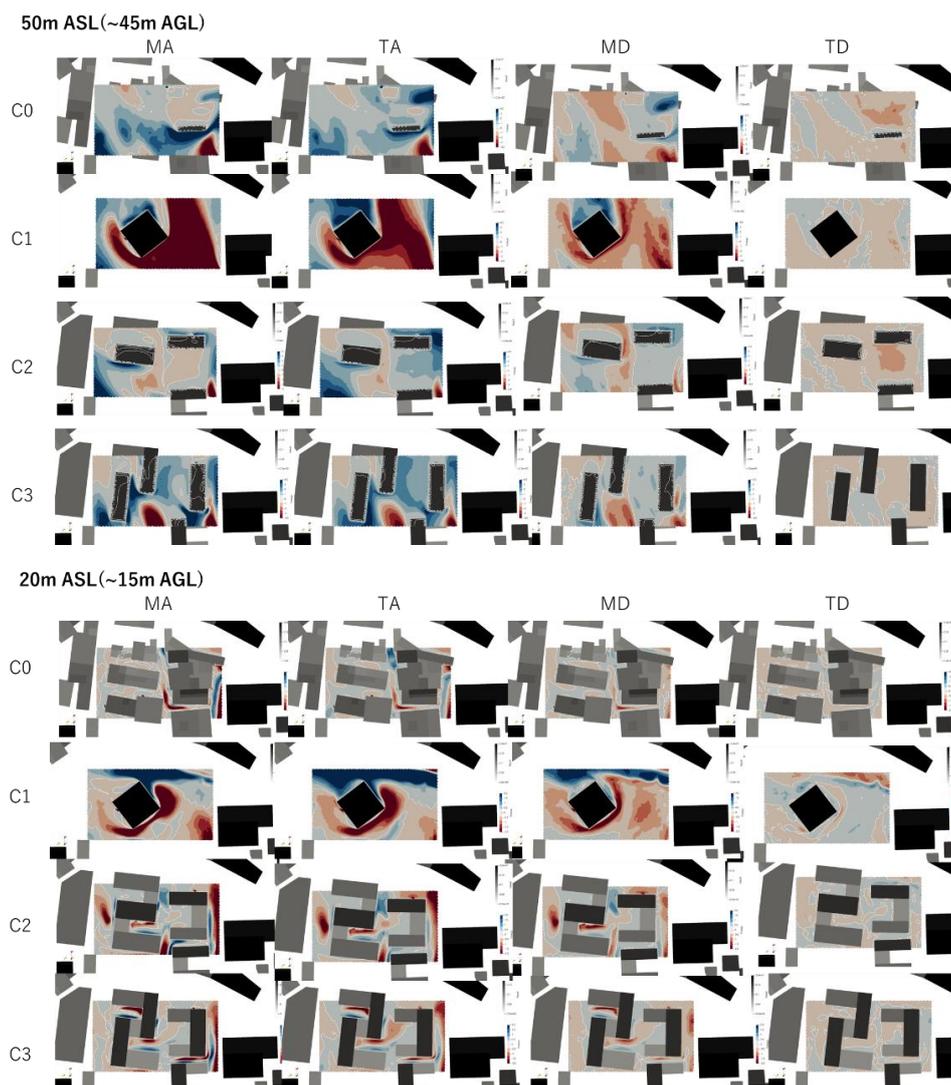


Figure 2.2.2-18 Spatial distribution on vertical flux of each component of kinetic energy (45 m and 15m above ground)

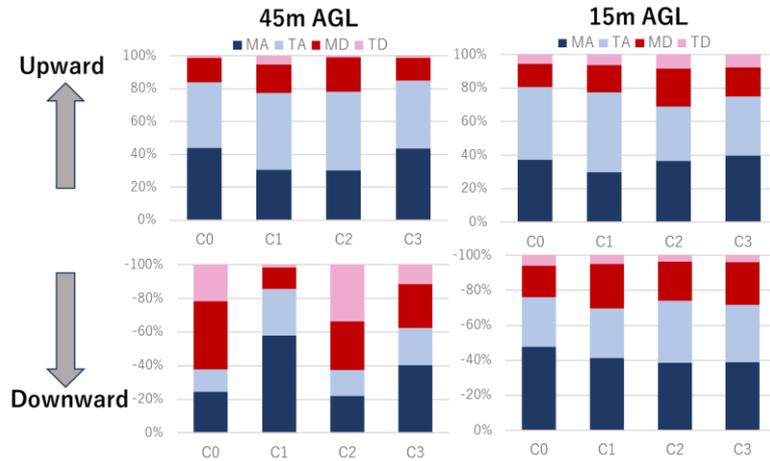


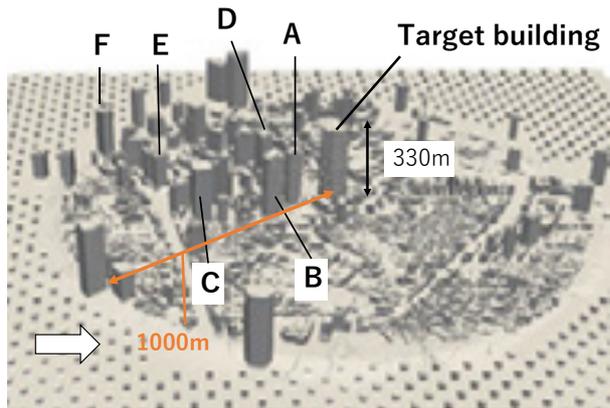
Figure 2.2.2-19 Ratio of the components of kinetic energy flux at the top of the canopy (45 m above the ground) and inside the canopy (15 m above the ground)

### (b)-2-3 ROM (Reduced Order Model)に基づく Building Cluster 内の強風構造の把握

CFD 耐風設計の実用化が進み、建築物の風圧力を CFD により予測することが可能になりつつあるが、風圧力は都市における広域の乱流構造から数十 cm スケールの個々の建物のファサードの凹凸の周りに発生する乱流構造の影響を複合的に受ける。また、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。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明らかにする。

解析対象領域では都心部において個々の建築物から発生する渦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 (Fig. 2.2.2-20)。対象建物の高さは約 330m であり、150m を超える高層ビルが点在している。計算条件は Fig. 2.2.2-20 に示す。

Fig. 2.2.2-21 には Building Cluster 内の乱流場を示す。前方に建築物のない高さ 300m の断面では対象建築物の後流構造が明瞭に出現しているのに対し、高さ 200m の断面では、Building A、B、D 等の後流に発生する渦が混在した流れ場となっている。また平均場に注目すると高さ 300m では隅角部前方から剥離が発生しているのに対し、高さ 200m では前方の乱流場によって、剥離せん断層の向きが変わっており、隅角部後方から剥離している様子が確認できる。また、Fig. 2.2.2-22 には対象建物の層風力 (高さ 200m、300m、いずれも風直交成分) のスペクトル分布を示す。高さ 300m の層風力では、通常の単体建物と同様に、無次元周波数 (ストローハル数) が 0.1 の近傍にて層風力のエネルギーのピークがみられるが、高さ 200m では 0.1 近傍にピークがみられず、0.1 以下の低周波な周波数と 0.1 よりも高周波な周波数の双方にピークが存在している。本研究ではこれらの周波数の層風力の変動の発生要因をモード分析に基づき考察する。



Mesh number	0.4 billion
Resolution	$\Delta t=0.025[s]$ , 1.37[m] (Minimum)
Spatial discretization	2 <sup>nd</sup> order Central+ 5% Upwind
Inflow condition	Inflow turbulence based on semi-periodic condition (assuming roughness category III)

Fig. 2.2.2-20 Target area and calculation condition

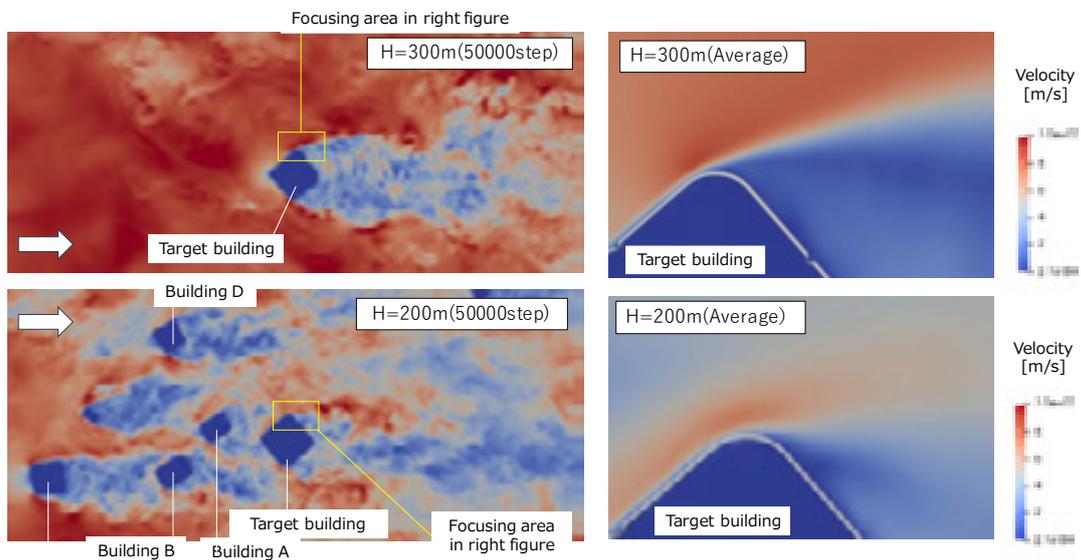


Fig. 2.2.2-21 Turbulent field in building Cluster  
(Left : instantaneouse value, Right ; Time-averaged value)

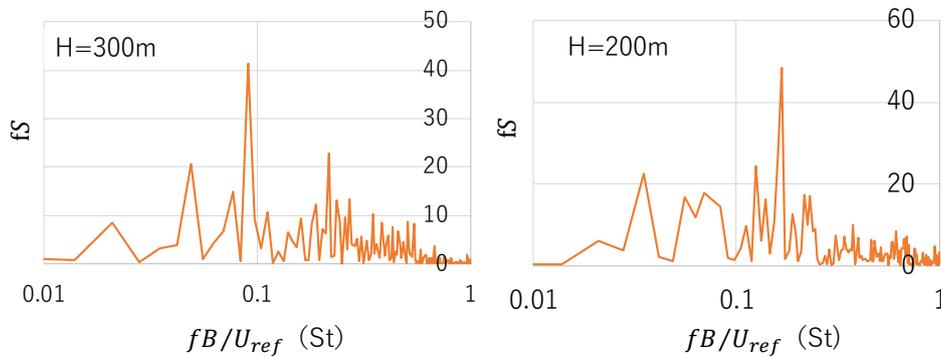


Fig. 2.2.2-22 Spectral distribution of sectional wind forces on cross-wind components of the subject building (height 200m, 300m)

モード分析においては、解析結果の二次元の領域を対象とした POD 解析を実施した。入力データは 1400 Snapshot、約 2400 万点(500x400)の 2 次元データ (空間解像度 2m、1000m x 800m の領域) で風速 (3 成分) と圧力をベクトルとして入力している。POD 解析に基づく対象市街地の圧力の基底は低次モードでは主流方向に延びるスケールの大きな構造が支配的であり、建物の後流に基づく構造はあまり明瞭でない。(図示省略) 一方で Fig. 2.2.2-23 に示すように、高次のモードを可視化すると、これらの高次モードの基底の変動特性や空間的な構造はモードによりさまざまであり、特定の high-order モードの基底と建物周辺の乱流構造が対応していることを示すことは困難であるものの、建物の後流の構造に基づくと考えられる基底が出現している。そこで本研究では高次モードを含んだ縮約モデルに基づいて層風力を算出し、層風力に影響を及ぼす支配的な構造の抽出を試みる。

Fig. 2.2.2-24 は縮約モデル (Reduced Order Model) の構築による対象建物の層風力スペクトルと乱流場 (流速 y 成分) を示している。高さ 200m の層風力に着目すると、Mode6 から Mode20 付近において低周波の層風力のエネルギーが大きくなっていること、Mode20 以降の周波数において高周波な変動のエネルギーが大きくなることが確認できる。よって本研究では、Mode6-10、Mode21-80 を合成した縮約モデルを作成し、構造を分析した。その結果、Mode6-10 では複数の建物がまとまったスケールの大きな構造が確認できることから、Mode6-10 の ROM の中に含まれる乱流構造が対象建物の層風力において低周波な変動を生じさせることを示唆している。また同様に Mode21-80 の縮約モデルから、幅の小さな個々の建物から発生する細かな構造が確認でき、このような乱流場が対象建物の St よりも高い周波数の変動を生じさせることが示唆された。

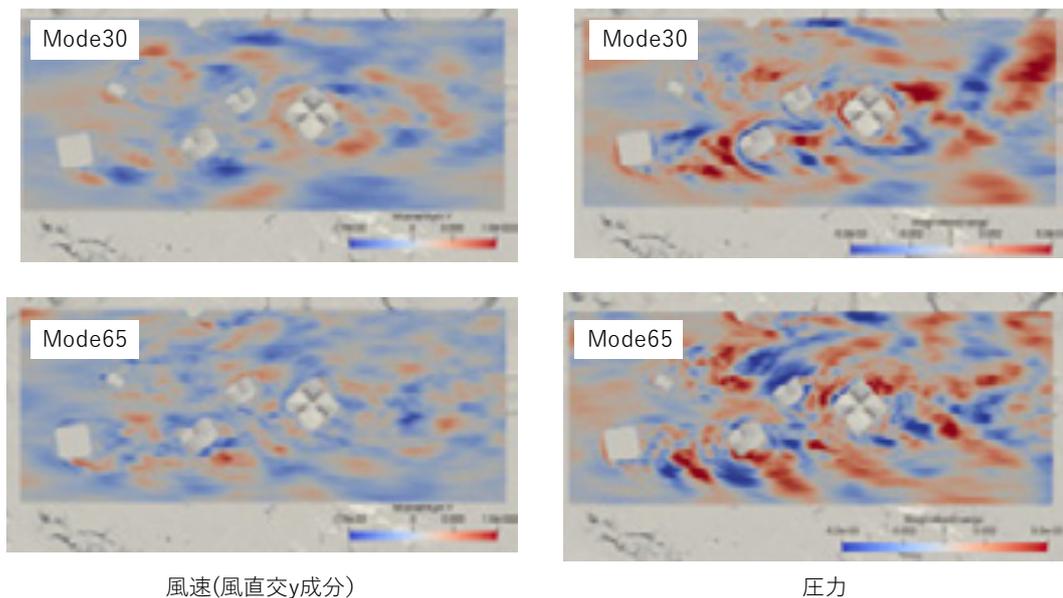


Fig. 2.2.2-23 Eigenvector of mode analysis by proper orthogonal decomposition (POD) (Mode30、 Mode65)

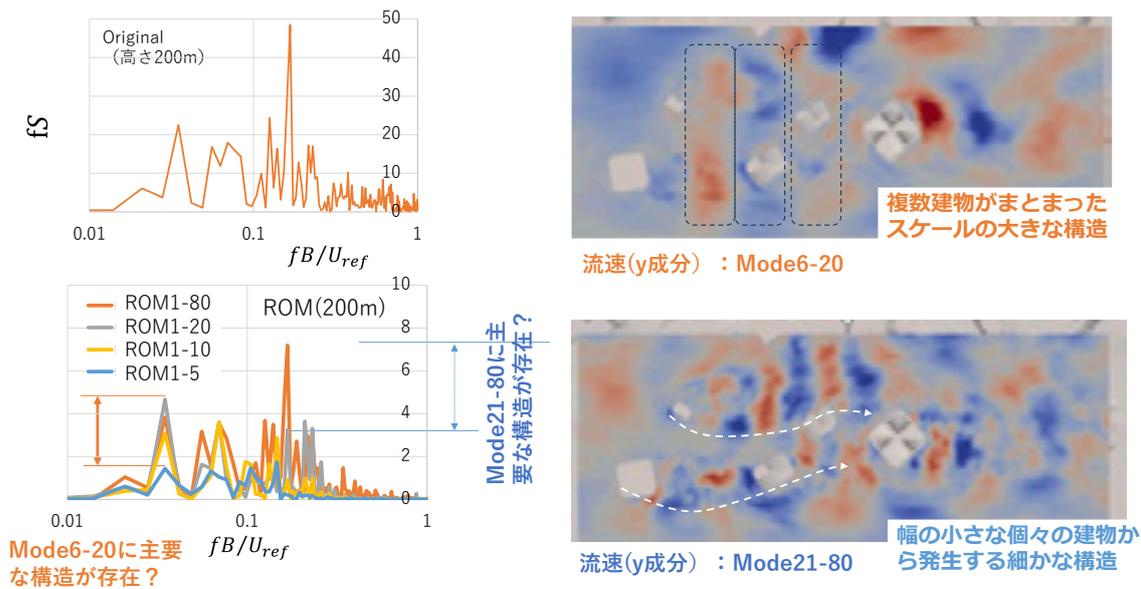


Fig. 2.2.2-24 Power spectrum of sectional wind forces obtained from reduced order model

### (b)-3 実建物の対台風設計のためのスマートデザイン

#### (b)-3-1 複雑なファサード形状の周りの風圧力の時系列変動（赤坂地区）

実験モデルの縮尺や解像度の制限から再現が困難なファサードの詳細形状周辺の乱流構造を明らかにし、建物の風圧に与える影響について考察する。Fig.2.2.2-25 に示す対象領域では 2 つの建物(a)、(b)を含む東京都心部の半径 600m の範囲を再現している。建物(a)は、外壁から離れた位置に複数の柱や梁で構成された複雑なファサード形状を有している。(b)の建物では、下部の壁面に凹凸のある日射遮蔽用のルーバーが設置されている。いずれの建物においても 20cm 程度の部材の幅や凹凸がある。解析は CUBE に基づく BCM[2-3]で実施し、最小空間解像度は建物ファサードの近傍で 0.25m、総メッシュ数は約 5 億である。

本研究ではファサード部材に作用する風圧力を推定することを目的として細密サンプリングに基づく風圧係数の算出を行った。Fig.2.2.2-26 は細密サンプリングに基づくファサード部材表面の風圧係数である。サンプリングは極大なピーク風圧が発生しやすい建物の隅角部にプローブを設定している。Fig.2.2.2-26 では約 200s 間での風圧係数の最大値と最小値を示している。Fig.2.2.2-26 の分布ではアウターフレーム間を流れこむ流れ場の付近で最大風圧係数に 0.2 程度の差が生じること、アウターフレームの柱付近に極大な負圧が発生することが示されている。Fig.2.2.2-27 はアウターフレーム付近に発生する渦構造と風圧係数の分布であり、アウターフレームの柱から剥離する微細な渦に対応して隅角部に局所的で極大な低圧の発生が発生することが示唆されている。

Fig.2.2.2-28 はルーバー上 (Building(b)) の最小風圧係数と建物周辺の渦度 (z 成分) を示している。Fig.2.2.2-28 では左側の Fig.2.2.2-28(a)においてルーバーのない高さ 150m では隅角部付近で最小風圧係数の絶対値が最も大きくなるのに対し、ルーバーの存在する高さ 120m では後流側の pt378 付近で最大となっている。これは Fig.2.2.2-28(b)に示すように前方隅角部から剥離した流れが pt378 付近に再付着する様子と Fig.2.2.2-28(c)の時系列より近隣の点でもほぼ同時に極大な負圧が発生している様子から、

隅角部からの流れが壁面に再付着する時にルーバーの付近で逆方向の副次的な渦が発生することによって生じる極大負圧であることが示唆される。また、pt400等の同一壁面の風圧係数と比較すると最小風圧係数の絶対値で0.5程度大きいことがわかる。

従来、外装材の風圧力の評価についてはTVL法で一様な圧力の空間的な広がりを仮定しているが、本解析の結果は複雑なファサード形状において局所的な圧力が発生することを示唆するものである。また、本解析では空間解像度25cmであり、柱の部材を3セル程度で解像しているため、付属物や部材に作用する風力を陽に算出する場合の解像度の妥当性については今後も検討が必要である。

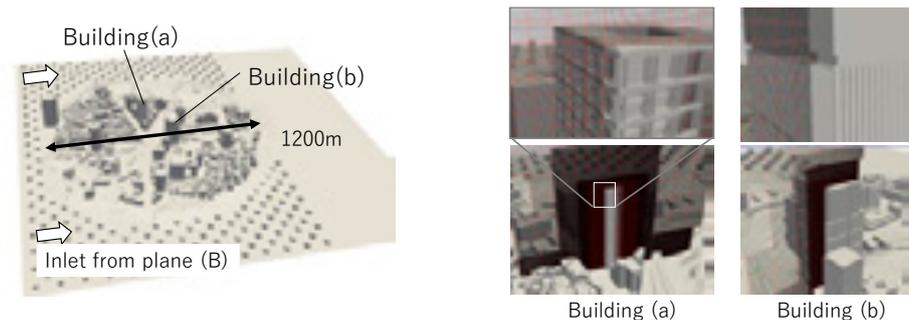


Fig. 2.2.2-25 Target area

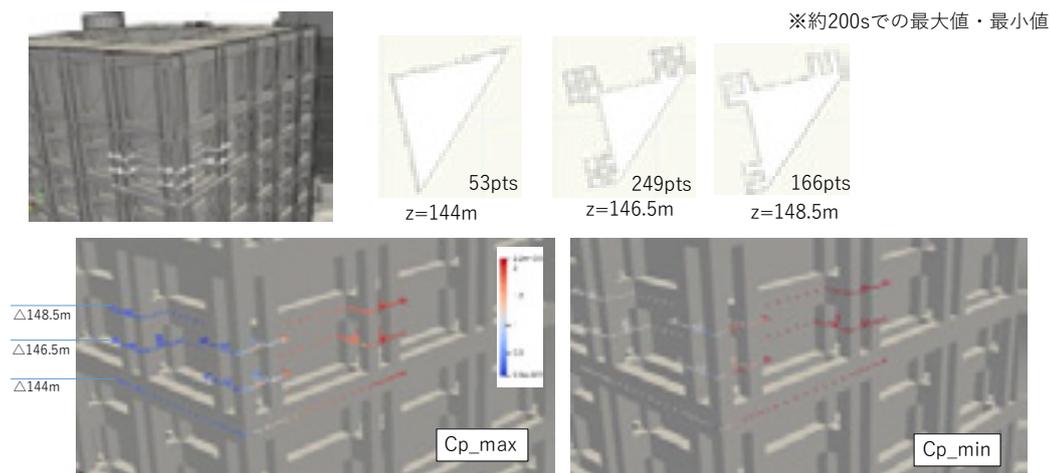


Fig. 2.2.2-26 Wind pressure coefficient on the surface of facade based on high-resolution sampling

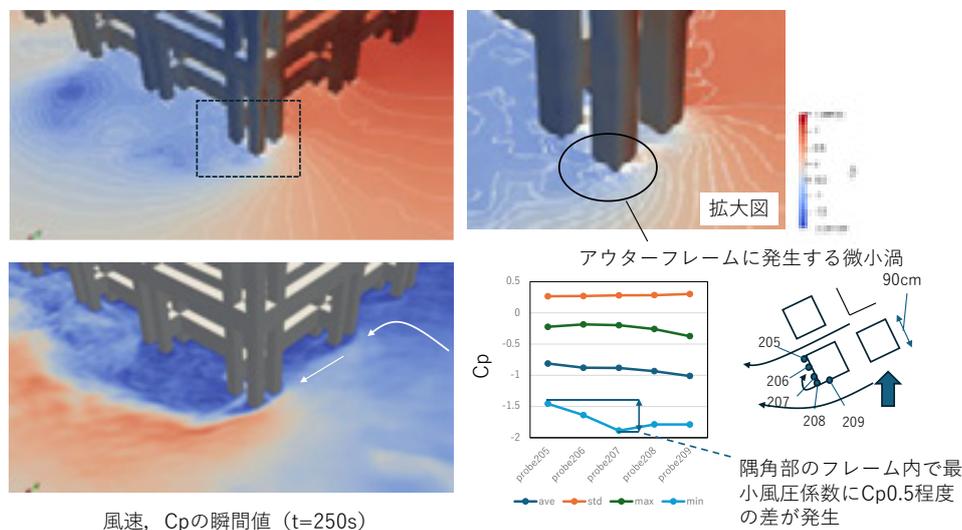


Fig. 2.2.2-27 Vortex structure near the outer-frame facade and distribution of wind pressure coefficient

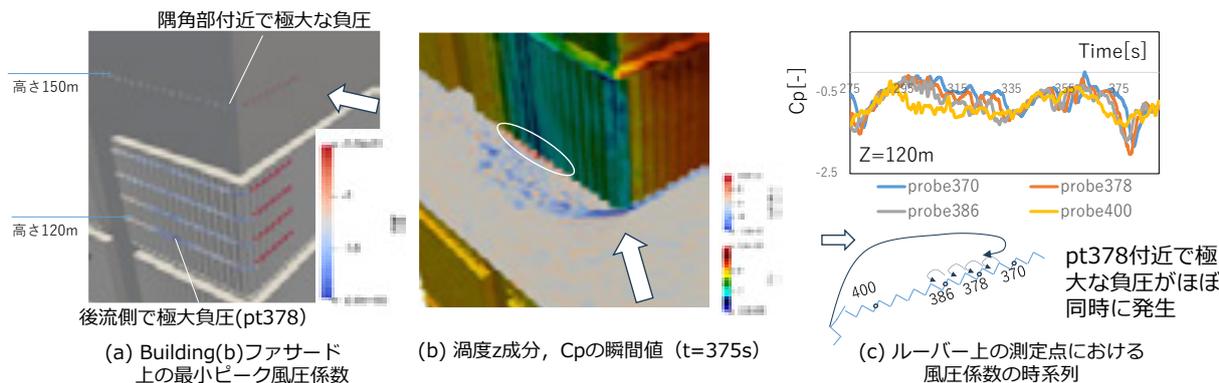


Fig. 2.2.2-28 Occurrence of large negative pressure on louver (Building(b))

(b)-3-2 超高層建物の周辺気流性状と風圧分布特性 (麻布台地区)

実建物を対象とした大規模数値流体計算の展開事例として、東京都の麻布台地区を対象とし、流体解析コード CUBE による数値解析を進めている。解析対象地区は、超高層建築が密集する地域で高さ 200m を越える建物が林立しており、その 1 つが高さ 330m の麻布台ヒルズ A 街区である。本解析では半径 1000m 程度の範囲の建物と半径 1200m 内にある超高層建物を再現した。風向は SSE と NNW を想定しており、SSE は中低層の上空を流れてきて A 街区に到達し、NNW は高層建物群を抜けて A 街区に到達する (Fig.2.2.2-29)。解析領域は、Case1 (SSE) は 5km×2.5km×2.5km で、Case2 (NNW) は 5.6km×2.8km×2.8km である。Case1 の最小空間解像度は 0.61m、要素数は約 6.4 億である。Case2 の最小空間解像度は 1.37m、要素数は約 4 億である。流入境界には、Case1 では乱流境界層に基づく広域の LES から得られた風速変動を、Case2 では準周期境界条件に基づくドライバ解析により得られた風速変動をそれぞれ与えた (Table 2.2.2-3)。

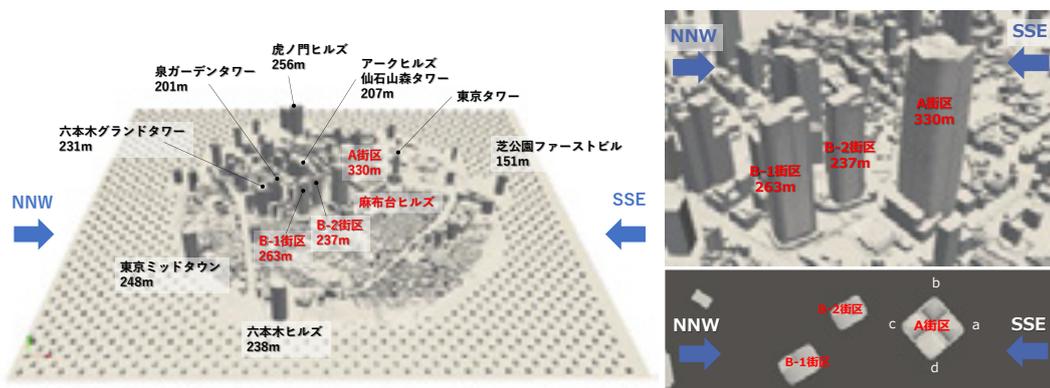


Fig.2.2.2-29 Wind direction and high-rise buildings in target area

Table 2.2.2-3 Computation cases

ケース	風向	流入風	格子サイズ 第一段階	格子サイズ 第二階	格子数	備考
case1	南南東(SSE)	TBL (広域解析)	1.22m	0.61m	6億4千万	TBLと台風と比較
case2	北北西(NNW)	TBL	1.37m		4億	ターゲット建物の風上側 高層建物群の影響

A 街区の風上側に高層建物群が位置する Case2 (風向 NNW) の解析結果について圧力場および流れ場の分析を行った。Fig.2.2.2-30 に、高さ  $z/H=0.956$ 、 $0.521$ 、 $0.279$  ( $H$ : A 街区建物高さ 330m)における A 街区周辺の平均圧力分布、平均流速分布を示す。A 街区上層部の  $z/H=0.956$  では、A 街区風上面で正圧となり、サイドのコーナー付近で大きな負圧が発生し、建物後方の wake 領域が広範囲に及んでいる。一方、中低層部の  $z/H=0.521$ 、 $0.279$  では A 街区サイドのコーナーからの剥離せん断層が、建物後方で、高層部に比べ強く巻き込んでいる。A 街区風上面は概ね負圧となり、A 街区風上にある B-1 街区、B-2 街区の wake 領域内に入っていると考えられる。

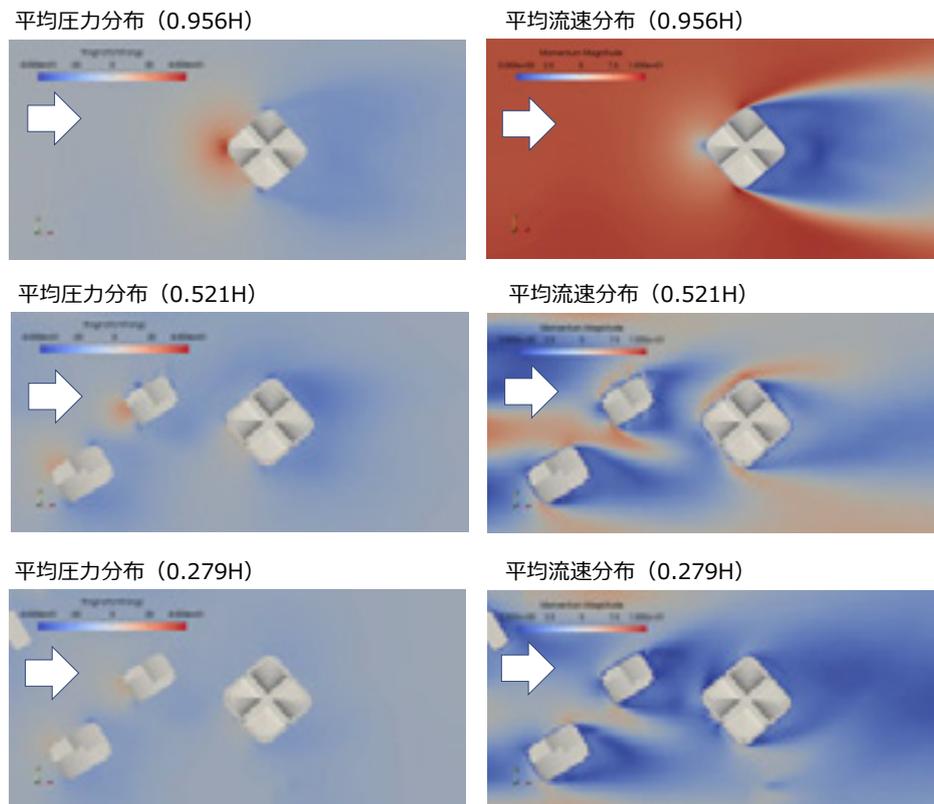


Fig.2.2.2-30 Mean pressure and velocity distributions for Case 2 (wind direction NNW) ( $z/H=0.956$ 、 $0.521$ 、 $0.279$ )

A 街区壁面にプローブ点を設け、圧力の時系列データを取得し、各種外圧係数值 (平均値、標準偏差、最大ピーク値、最小ピーク値) を算出した。外装材用風荷重評価を想定した設計風速  $58.4\text{m/s}$  (基準風速  $34\text{m/s}$  を A 街区代表高さの 100 年再現期待値に換算) に基づいて、実時間に対する数値解析の時間縮尺を求め、変動圧力波形に対して実時間  $0.5$  秒相当の移動平均を施した。外圧係数の統計値は、圧力値の急

激な変化がみられる計算リスタート直後の 2000 ステップ分を排除したうえで、実時間 10 分相当 1 波分で評価した。

A 街区壁面  $z/H=0.956$ 、 $0.521$ 、 $0.279$  における外圧係数の平均値、標準偏差、最大ピーク値、最小ピーク値を Fig.2.2.2-31 に示す。図 A 街区上層部の  $z/H=0.956$  では、平均外圧係数は風上面のコーナー c 付近で正值、サイドのコーナー b、d の少し風上側では大きな負値となる。最大ピーク値はコーナー c 付近、最小ピーク値はコーナー b、d の少し風上側でそれぞれ絶対値が大きくなり、各種外圧係数は中心軸 (c-a) に対して概ね対称な分布となっている。一方、A 街区中層部の  $z/H=0.521$  では、流れ場の対称性が崩れ、c-b 面、c-d 面で各種外圧係数の分布性状が異なることが確認される。これは Fig.2.2.2-30 で示したように、A 街区風上側に位置する B-1、B-2 街区の影響を受けたことによるものである。特に、コーナー b の少し風上側の壁面の最小ピーク値は、上層部と比べて約 1.5 倍の強い負値が発生している。これはコーナー b の風上側に位置する B-2 街区から生じる剥離せん断層が、A 街区の壁面に干渉することで発生するものと考えられる。

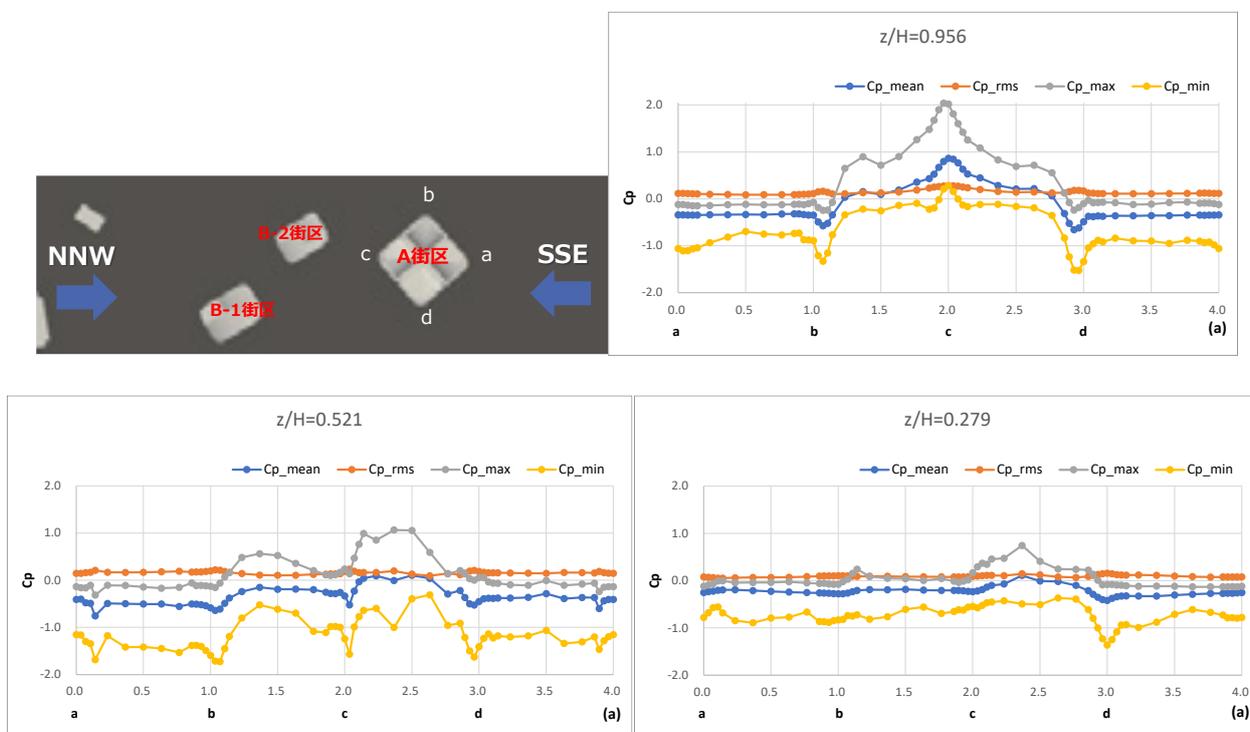


Fig.2.2.2-31 External pressure coefficients ( $z/H = 0.956$ 、 $0.521$ 、 $0.279$ ) for the walls of A city block in Case 2 (wind direction NNW)

#### (b)-4 風・降雨・構造体の統一解法のモデル開発

本年度は風に関連して発生する都市・建築の風力（空力）、熱（温度）、降雨の諸問題に対する統一解法モデル開発のために、構造体の周りに発生する渦発生複雑さに伴う空気力の変動に関する解析、昨年度開発を実施した風・熱放射の連成解析への樹木モデルの実装と検証、豪雨時の建物に発生する降雨被害の低減化に関する解析を以下の通り実施した。

##### (b)-4-1 テーパー構造体の渦の発生機構による空力低減・制振

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。計算モデル及び計算格子の概要を Fig.2.2.2-32、流入変動風の鉛直プロファイル及び測定点の配置図を Fig.2.2.2-33 に示す。モデルは上部で平面が3段階変化し、2層目以降が一方向に寄った偏心を有するものとなっている（縮尺 1/400）。計算格子については、モデル周辺に各高さで一様な高解像度格子を配置し、後流渦構造を詳細に捉えられるよう、高解像度領域を後方に引き伸ばしている。格子解像度は低層部のモデル幅に対し 1/140 分割、高層部のモデル幅に対し 1/34 分割としている。流入条件は一樣流と粗度区分Ⅲを想定した乱流境界層中での計算を行った。鉛直分布図は流入境界付近に設置した測定点より作成したものであり、地表面粗度区分Ⅲ( $\alpha=0.2$ )の鉛直分布と概ね対応していることを確認した。各層中心高さでの風速を基準とした相関係数の鉛直分布図では、各層で鉛直方向の相関長さが異なり、上部で幅が広がっていることから、各層で異なるスケールの渦構造が発生し、上部ほど大きなスケールの渦が作用していることが考えられる。また、各高さにおける後流渦放出周期を明らかにするため、モデル後流に新たに設けた測定点より取得した風速の時系列データを用いてスペクトル解析を行い、各層でのスペクトル分布図の作成及び分析を行った。後流の測定点は各層中心高さに設置し、各層の横幅 B に対しそれぞれ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 倍の距離に設置している。

Fig.2.2.2-34 に、一樣流中・乱流境界層中における各層での圧力等値面の瞬間値を示す。一樣流中・乱流境界層中の両ケースにおいて、各層で周期の異なる渦構造が交互に放出される様子が確認された。一樣流中においては代表風速が一定であると考えられ、ストローハル数は各高さのモデル幅に依存すると考えられる。そのため、モデル幅の大きい低層部では渦放出周期が長くなり、モデル幅の狭い高層部では短い周期となる。乱流境界層中においても同様の傾向が確認されたが、流入変動風による乱れの影響を受けて風速が減速するため、一樣流中の場合と比較して後方の渦構造がモデル背面からの距離によって変化し、全体的に渦放出周期が長くなっていることを確認した。また、地表面付近ほど流入変動風による減速の影響を強く受けることが考えられる為、Layer1 後方の渦構造が一樣流中のケースと比較して極端に小さくなっており、高さ方向の渦スケールの違いにより、一樣流中での結果と異なる分布となっていることが考えられる。

次に、モデル周辺及び後流側での三次元渦構造の確認を行った。Fig.2.2.2-35 は、一樣流中・乱流境界層中におけるモデル周辺の第二不変量(Q 値)の瞬間値分布で可視化を行ったものである。一樣流のケースでは各高さ前縁で剥離した流れにより、チューブ状の渦構造が発生している様子を確認した。また、Side1、Side2 の両側面で、平面形状が変化する段違い部分がある高さから後方に伸びるような渦構造が確認された。これは各高さ前面において衝突、降下した流れが段違い部より後方に放出された渦構造と考えられる。この渦構造は、側面にも段違いがある Side2 において顕著に発生している様子が確認された。Side1 は側面に段違い部がなく、側面位置が各高さで一致しているため、各層で縦に一貫した軸を持つ渦構造が発生しているように見えるが、反対の Side2 では段違い部を境に異なる渦構造が発生しているように見える。乱流境界層中でも一樣流と同様の傾向が確認されたが、流入変動風による減速の影響を受け、後方の渦構造の伸びが一樣流のケースと比較して小さくなり、特に地表面付近の渦構造が消失していることが確認された。両ケースにおいて、高さ方向に軸を持ったチューブ状の水平渦と、流れ方向に軸を持った縦渦が発生しており、後流で両者が干渉し合うことによって複雑な圧力変動を生じている可能性がある。

次に、風速のスペクトル解析結果について述べる。Fig.2.2.2-36、Fig.2.2.2-37 に、一樣流中・乱流境界層中における各層中心高さのスペクトル解析の結果を示す。サンプル数は 32768、サンプリング周波数

5000Hz とし、横軸は 1 層目のモデル幅を基準とした無次元周波数、縦軸は風速の無次元パワースペクトル密度としている。なお、無次元パワースペクトル密度分布図は、各層のモデル幅に対して 4 倍の距離だけ離して設置した測定点で取得した値を代表的に示している。Layer1 のモデル幅を基準としているため、一様流中でのケースにおける Layer1 の分布では、角柱のストローハル数の値として一般的によく知られている 0.1 付近でピークが現れることを確認した。全体としては、低層部から高層部に向かってピークが高周波数帯にずれることが確認された。これは前述のように、ストローハル数がモデル幅のみに依存しているためであると考えられる。また、Layer2 及び Layer3 における分布のピークが不明瞭であるが、これは Layer2 および Layer3 が上下の段違い部による平面変化が著しい部分の近くに位置しており、平面変化部分より放出される流れ方向に軸を持った縦渦の変動特性の影響を強く受けているため、縦渦と水平渦の持つ周波数成分が混合して現れていることが考えられる。乱流境界層中でのケースにおいては、流入変動風による減速の影響で、各高さにおいて一様流のケースでのピーク周波数帯(Fig.2.2.2-37 中に赤線で表示)と比較して低周波数側にずれることを確認した。また、Side1 と Side2 で分布の差が大きくなっており、これは段違い部から放出される縦渦が、流入変動風による乱れによって変動成分が大きくなり、両側面での差が大きくなっているものと考えられる。

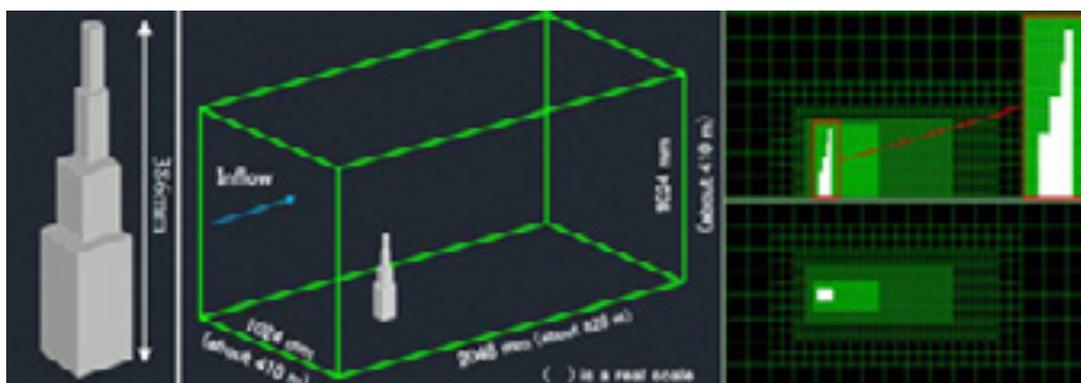


Fig.2.2.2-32 Target model and grid generation

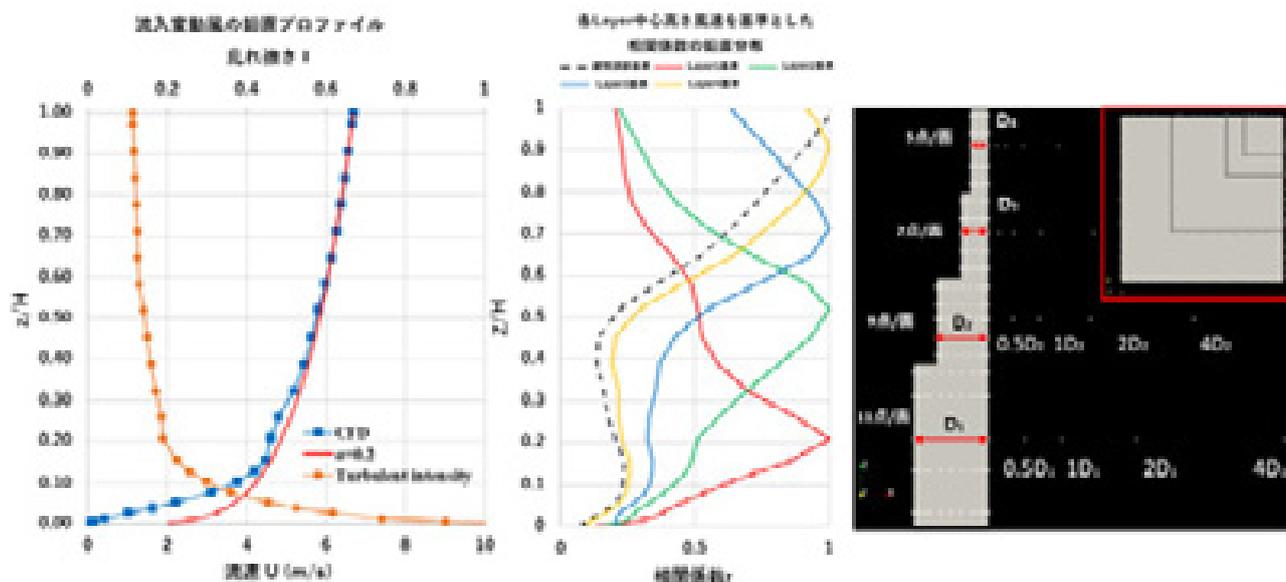


Fig.2.2.2-33 Profile of turbulent boundary layer and location of measurement point

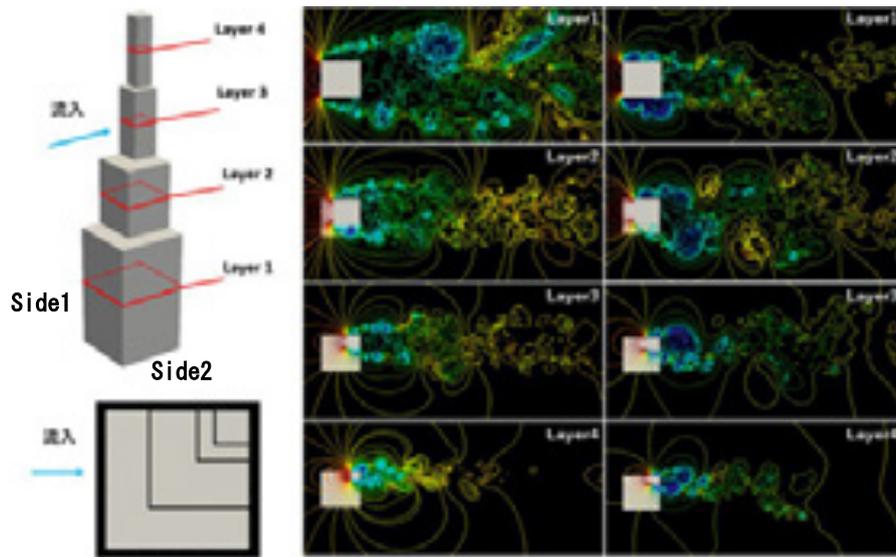


Fig.2.2.2-34 Instantaneous pressure contour at the height of each layer (left: in uniform flow, right: in turbulent boundary layer)

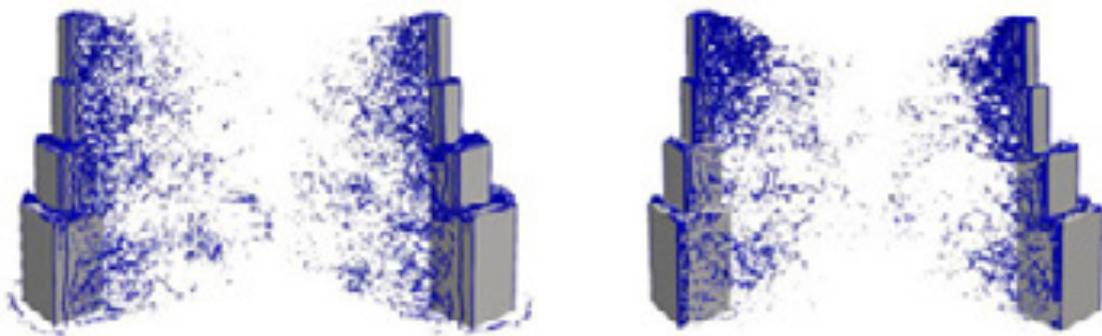


Fig.2.2.2-35 Instantaneous values of the second invariant (Q-criterion) around the model (left: in uniform flow, right: turbulent boundary layer)

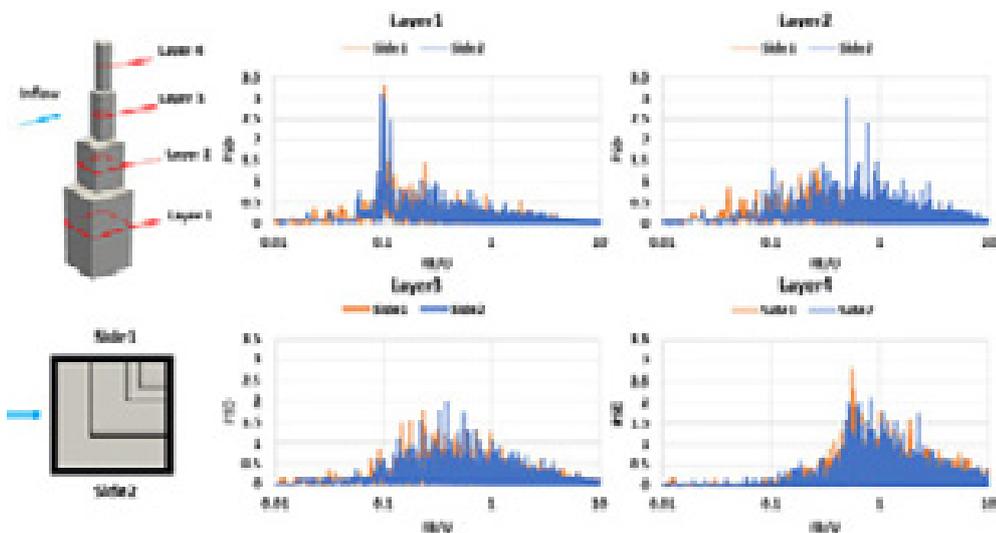


Fig.2.2.2-36 Power spectral density distribution of wind velocity at each layer in uniform flow

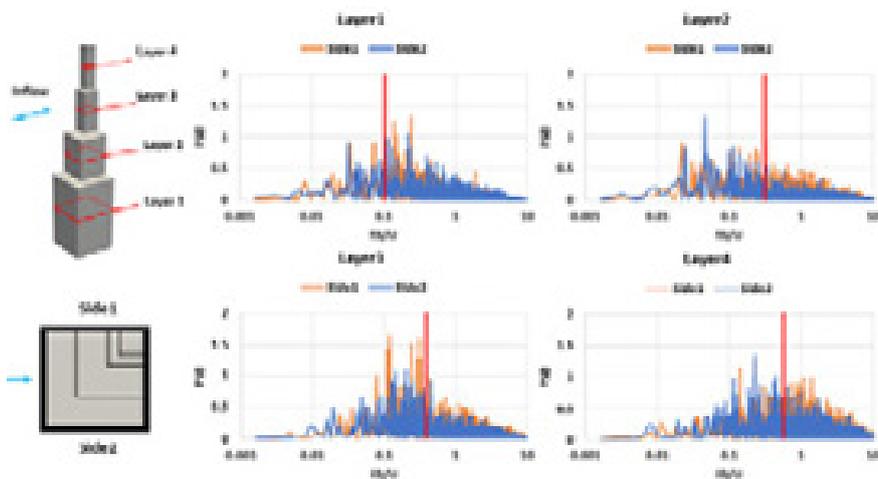


Fig.2.2.2-37 Power spectral density distribution of wind velocity at each layer in turbulent boundary layer

#### (b)-4-2 風・熱放射の連成解析への樹木モデルの実装と検証

夏季の都市の暑熱環境における適用策の一つとして、樹木による日射遮蔽や蒸散による効果が期待されている。本研究で解析対象としている東京管区気象台の観測サイト周辺に存在する樹木群の影響を考慮するため、植生モデル[2-13]、[2-14]の適用を検討した。今回適用した植生モデルでは日射と長波放射の遮蔽とこれらに伴う熱交換、植栽からの長波放射、空気との伝熱、蒸発散に伴う植栽と空気との熱交換、風速の低減効果等を考慮できる。

本年度はテスト解析として、佐々木らの論文[2-15]を参考にしたモデルを用いて解析を行った。助走計算（日射・放射・熱伝導計算）として、解析対象の前 37 時間分を解くことで表面温度を求め、その表面温度を境界条件として本解析（乱流場・放射場・熱伝導の連成計算）を実施した。ここでは、樹木の条件は全て同じ条件とした。高さ 25m の建物 2 棟の間に歩道（幅 9m）と車道（幅 30m、中央分離帯を省略し、2 車線分の幅を想定）があり、植生モデルは樹冠中心を歩道の端として空中に浮かせて配置した。なお、植生領域下端は地面 +1.7m、植生領域の上端は地面 +12m とした。植生表面のテトラメッシュの最大値は全ケース 1m とした。

本計算の解析結果について、日射量等は樹冠に吸収され、葉表面温度は上昇しているため、今回の計算条件では外気温(30℃)と比べて気温の低下が過剰に見積もられている可能性があるものの、表面温度分布をみると、樹冠下の地表面温度の低下がみられ、植生による日射遮蔽効果の再現が確認できた。また、風速分布を見ると、植生領域に流入した風が弱まっており、植生による風速低減効果も再現されている。一方、気温分布を見ると、樹冠内部で気温が低下している様子が見られる。

#### (b)-4-3 豪雨時の建物に発生する降雨被害の低減化に関する解析 (Wind-driven rain)

近年、地球温暖化に伴う豪雨の増加により、雨水排水設計の重要度が高まっている。本研究では、強風による降雨の挙動を LES で予測し、①単独高層建物の降雨性状を明らかにすると同時に、既往の実測結果を用いた精度検証を行い、②中高層市街地中での降雨挙動の調査を行った。

風の影響を受けた降雨の解析にあたり, 商用版 OpenFOAM の Helyx v3.4 の decoupledEularianSpray のモジュールを用いた。空気の解析には非圧縮粘性流体の支配方程式を用い, PIMPLE 法に基づく LES を実施した。雨の挙動に関し Lagrange 法と Euler 法の解法が知られているが, 本研究では Euler 法を用い, 雨滴の直径毎に, 計算セル毎の水の体積分率に関する質量保存則と運動量保存則 (雨が受ける外力は重力および雨と風の相対速度により生じる抗力のみである) を時々刻々解く [2-16]。降雨解析で得られた雨滴の直径毎 (0.3mm, 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm) の雨の移動速度 (雨ベクトルと呼ぶ) および体積分率を元に, 面の法線方向の雨ベクトルの大きさに体積分率を乗じ, 降雨強度および雨滴直径の頻度分布 [2-17] に基づいて積算することで, 面に付着する単位時間・単位面積あたりの雨の量を求めた。降雨解析にあたり, 異なる雨滴直径の間での雨粒の合体・分裂, 雨滴に作用する空気力 (抗力) を空気の NS 式に体積分力としての影響は無視している。

最初の解析対象として, 2007 年 9 月 25 日に, オランダの Hubertus ビル (Fig.2.2.2-38) での実測結果を設定した [2-18]。実測時の気象条件を, Fig.2.2.2-39 に示す。実測時の風速は時々刻々変化するものの, 一番降水量の多い時間帯 (15:05~15:15) の風速を対象とした。地上高さ 10m 高さでは 3m/s (Fig.2.2.2-39 中の赤線部) を設定した。建物高さ 34.5m では地表面粗度区分Ⅲの気流と考え 4.47m/s を設定した。解析対象とする風向は, 実測の条件にあわせて, 対象建物に正対する方向とした。実測点は高さ 28m 高さの周囲および風向に正対する塔の高さを変えた点とする。

計算格子分布の概要を Fig.2.2.2-40 に示す。建物のまわりに実測点のある高さ 28m を対象として平面図の計算格子分布を Fig.2.2.2-41 に示す。対象建物の見付幅を D とした場合に, D に対する分割数を変更した解析モデルを設定した。建物壁面近くの細分化された計算格子幅が段階的に小さくなるような 3 種類の計算格子を用いた。

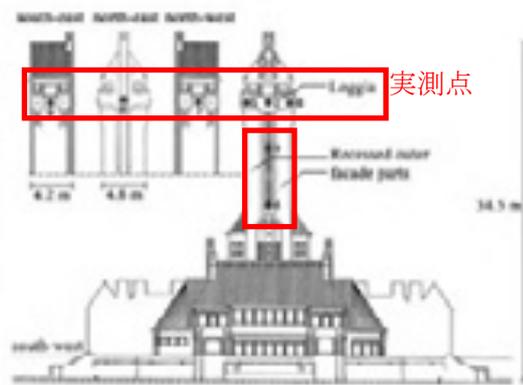


Fig. 2.1. Hubertus building. Building dimensions and position of wind-tunnel site groups on the tower! (from Nijssen et al. [18])

Fig.2.2.2-38 Target building [2-18]

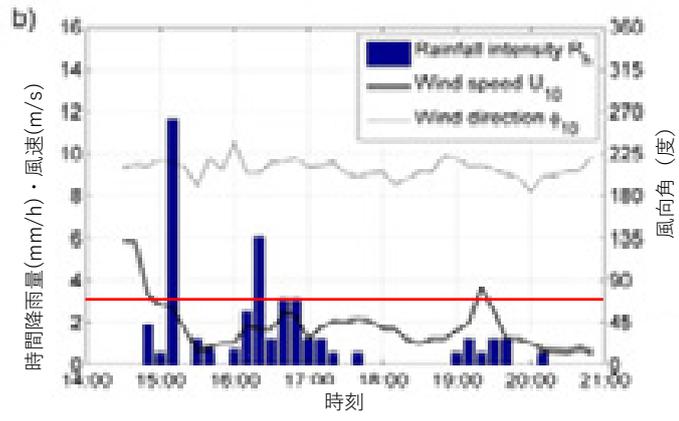


Fig.2.2.2-39 Meteorological condition[2-18]

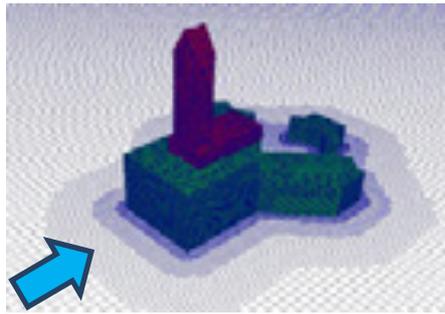
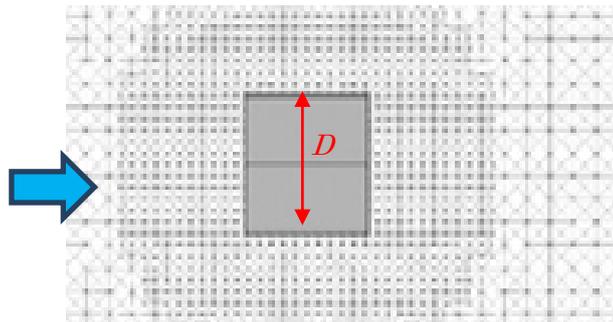
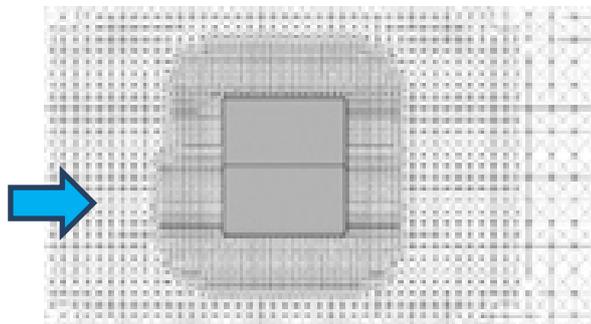


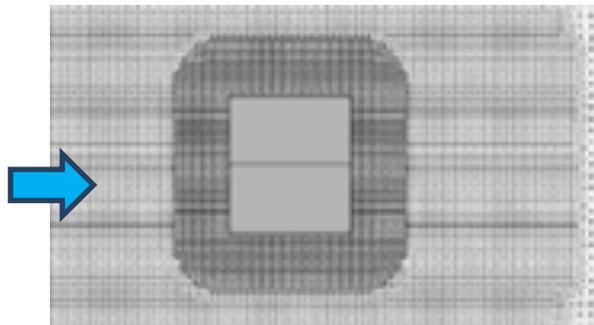
Fig.2.2.2-40 Grid division (Resolution :  $D/24$ )



(a) 最小格子幅 :  $D/12$  (総格子点数 550 万セル)



(b) 最小格子幅 :  $D/24$  (総格子点数 740 万セル)



(c) 最小格子幅 :  $D/48$  (総格子点数 550 万セル)

Fig.2.2.2-41 Plan of computational grid (height of target building 28 m , height at which the actual measurement point was placed)

最初に、雨滴直径が異なることによる雨ベクトルの挙動の差を把握するために、実測高さの28mでの主流方向風速および主流方向雨ベクトルの等高線を Fig.2.2.2-42 に示す。主流方向風速が減るにつれて、赤色⇒オレンジ色⇒黄色⇒黄緑色⇒青色に変化する。主流方向の雨ベクトルの等高線は減るにつれて、白色⇒薄い青色⇒濃い青色⇒濃紺へと変化させる。

雨滴直径が小さい0.3mmの場合に対象建物まわりの風速分布の等高線は風速の等高線とほぼ一致しているもの、雨滴直径が大きくなるほど雨滴の慣性力が大きくなることで、対象建物の風上壁面に近づいたとしても雨ベクトルの主流方向成分が減少しない性状が確認される。対象建物の側面や背面の領域も、雨ベクトルの雨滴直径が大きいほど、減速する領域が小さいことが確認できる。

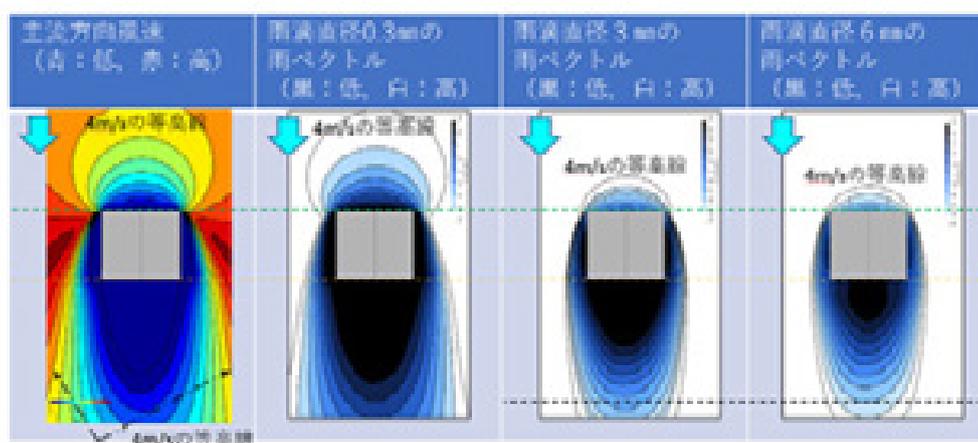


Fig.2.2.2-42 Contours of wind velocity and rain vector(along-wind component)(plan view, height of target building 28 m, height at which the actual measurement point was placed)

続いて、風上壁面における Catch ratio（風の影響を受けない地表面で観測される降水量に対する壁面に付着する雨量の比）に関して、計算格子幅を変更した降雨解析結果と実測結果を比較したものを、 Fig.2.2.2-43 に示す。実測値に着目すると、建物の中心付近と隅角部付近では、隅角部付近の方が大きい。これは隅角部付近では風の剥離に伴って風速が増加するため、風上壁面に衝突する雨量も増えるからである。一方、建物の中心付近で高い場所と低い場所を比較すると、高い場所の方が壁面に衝突する風速が高いため Catch ratio が大きくなると考えられる。

計算格子幅が小さいほど、Catch ratio の値は小さめとなり、実測に近づく性状が確認された。D/24 と D/48 を比較すると、ほぼ Catch ratio は同じとなり、格子幅に伴う誤差が減少し解が収束していることが確認された。

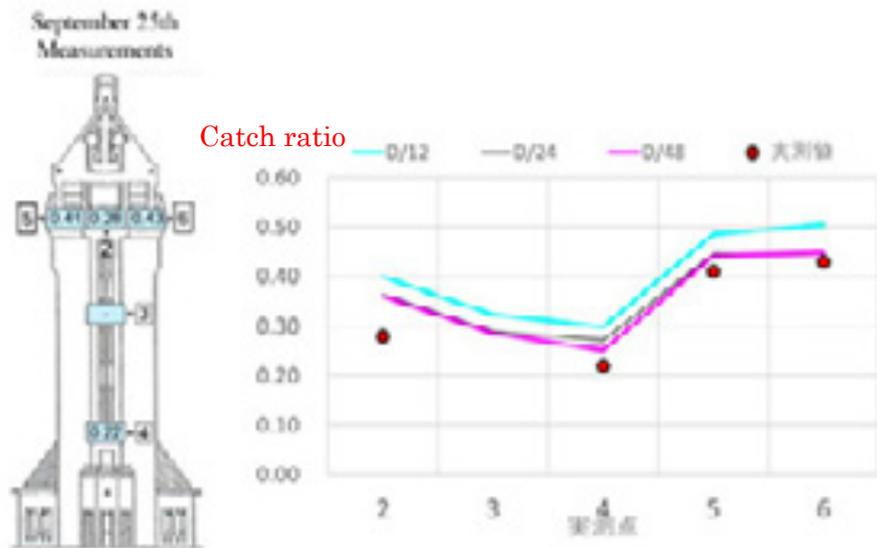


Fig.2.2.2-43 Comparison of catch ratio of measured points on windward wall with rainfall analysis results

続いて、高層建物が林立する市街地モデルとして、Fig.2.2.2-44のような市街地を対象に、周辺の高層建物の谷間風が作用するような風向を選定し、降雨解析を実施した。解析条件として、過去の気象データを参考に、1時間降雨量165mmで、対象建物の200m高さで平均風速8.6m/sを設定した。

降雨解析によって得られた雨滴直径毎の雨ベクトルの時間平均値をFig.2.2.2-45に示す。雨滴直径0.3mmでは比較的水平に流下しているのに対して、雨滴直径が3mmと6mmでは鉛直に落下している。これは、雨滴直径が大きいほど、雨滴の終局落下速度は大きくなる傾向があるためである。高層建物の後流に着目すると、雨滴直径3mmの流線は、雨滴直径6mmの流線に比べて、高層建物風下壁面（背面）に近づいており、雨滴直径3mmの場合の方が、逆流の影響を受けていることが確認できる。

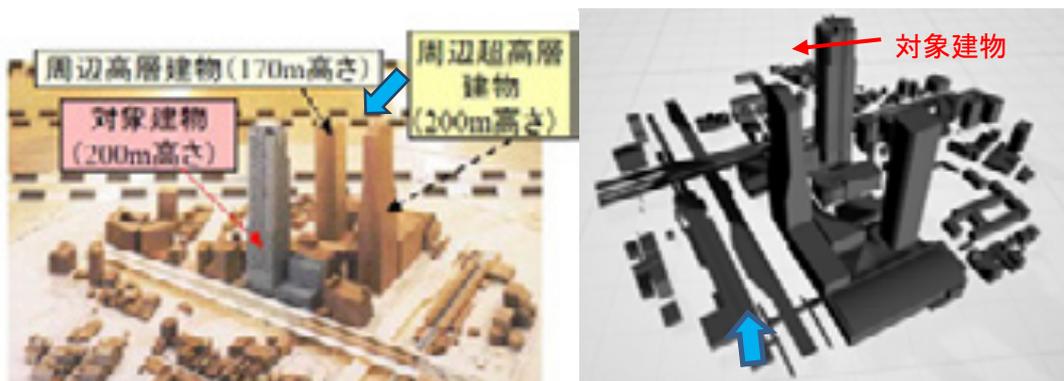


Fig. 2. 2. 2-44 Target area

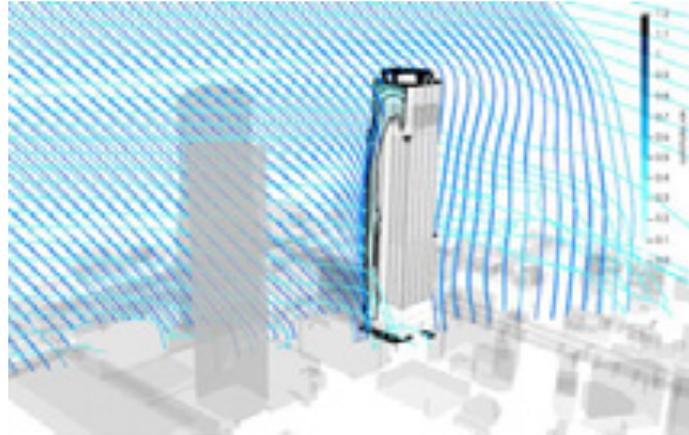


Fig.2.2.2-45 Time-averaged streamlines of rain vectors around a high-rise urban model (raindrop diameter 0.3 (light blue), 3 (blue), 6 (dark blue) mm)

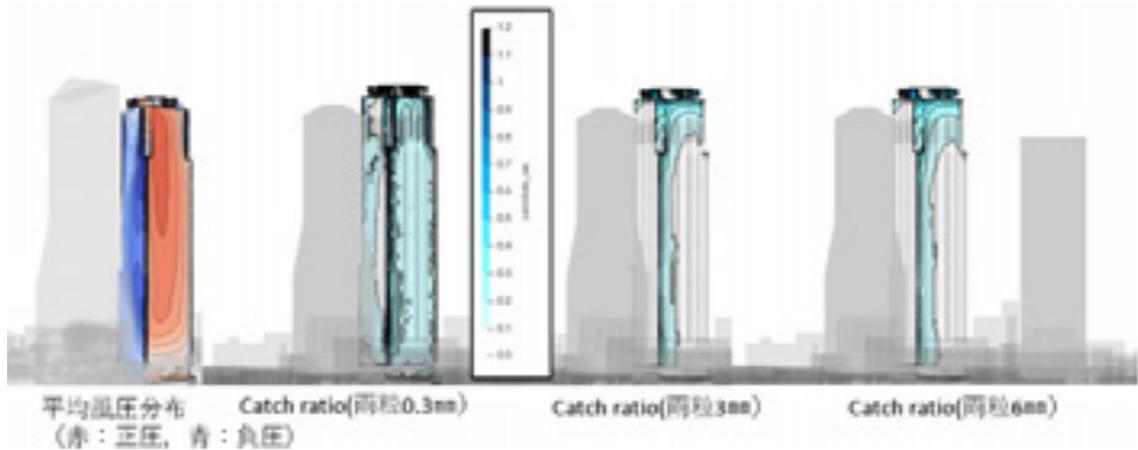


Fig.2.2.2-46 Average wind pressure on the front (windward) and side surfaces of the target building and catch ratios for cases using raindrop with diameters of 0.3 (light blue), 3 (blue), and 6 (dark blue) mm

対象建物の風上壁面の Catch ratio を Fig.2.2.2-46 に示す。対象建物まわりの風の性状を把握するために、対象建物の平均風圧係数の分布も同時に示す。対象建物の風上にある高層建物の影響を受け平均風圧分布の最も高圧部分が前面の左上になっている。前面全体が正圧となっているが、左の壁面全体は負圧となっている。

雨滴直径 0.3 mm の場合には、対象建物前面の全体で Catch ratio が 0.1 以上になっていること、対象建物の左壁面の風上隅角部付近では Catch ratio が 0.1 未満になっているものの、風下端部付近で Catch ratio が 0.1 以上になっており、風上隅角部で剥離した流れの側面への再付着に伴って、雨滴が壁面に付着していると考えられる。一方、雨滴直径 3,6mm の場合には、対象建物前面の左側で高さ方向に Catch ratio 0.1 以上の付着が見られるが、それ以外の壁面では Catch ratio 0.1 未満となっており、雨滴直径 0.3 mm の場合とは分布が大きく異なる。

解析条件の降雨時の頻度分布 ([2-17], 時間降雨量 100 mm を参照) を用いて、Catch ratio を求めた (Fig.2.2.2-47)。対象建物の側面および背面の Catch ratio は 0.1 未満であった。雨滴直径 3 mm, 6mm

の分布とほぼ同様に、風上壁面の左側を中心に降雨の付着が確認された。このように、市街地中では対象建物の壁面に付着する降雨分布は、上流の建物の影響を大きく受けることが確認された。

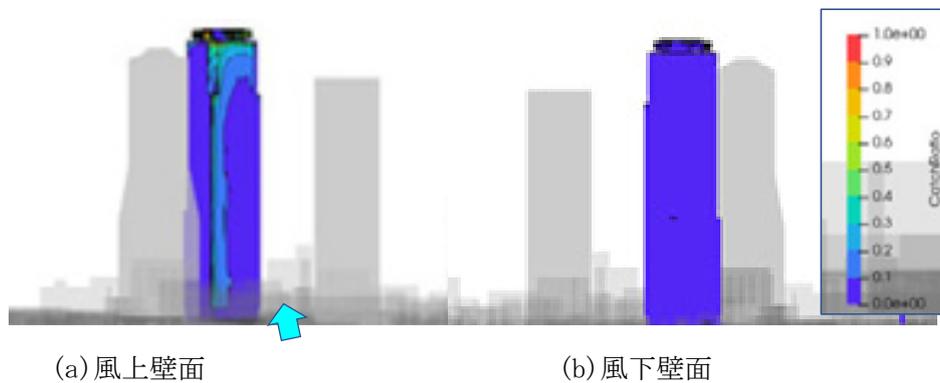


Fig.2.2.2-47 Catch ratio of the front (windward) and rear of the target building

#### 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] Kazuo Saito, Tsukasa Fujita, Yoshinori Yamada, Jun-ichi Ishida, Yukihiro Kumagai, Kohei Aranami, Shiro Ohmori, Ryoji Nagasawa, Saori Kumagai, Chiashi Muroi, Teruyuki Kato, Hisaki Eito, Yosuke Yamazaki: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model, Monthly Weather Review, Vol. 134, pp. 1266-1298, 2006
- [2-3] J Jansson, N., Bale, R., Onishi, K., Tsubokura, M., 2018. CUBE: A scalable framework for large-scale industrial simulations. The International Journal of High Performance Computing Applications, 1094342018816377.
- [2-4] 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.
- [2-5] Keigo Nakajima, Hidenori Kawai, Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura, Koji Kondo, Yoshiaki Itoh, Kenji Takagi, WRF-LES Simulation of Wind Flow over Rough Urban Surface during Typhoon Lan (2017) , WCCM-APCOM, 2022.8
- [2-6] 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
- [2-7] Weiwen Wang, Edward Ng, Chao Yuan, Siegfried Raasch: Large-eddy simulations of ventilation for thermal comfort – A parametric study of generic urban configurations with perpendicular approaching winds, Urban Climate, Vo. 20, pp 202-227, 2017
- [2-8] Jian Hang, Yuguo Li: Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact, Building and Environment, Vol. 45, pp. 2754-2767, 2010
- [2-9] Nestoras Antoniou, Hamid Montazeri, Hans Wigo, Marina Neophytou, Bert Blocken,

Mats Sandberg: CFD and wind-tunnel analysis of outdoor ventilation in a real compact heterogeneous urban area: Evaluation using “air delay”, *Building and Environment*, Vol. 126, pp. 355–372, 2017

[2-10] 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

[2-11] 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

[2-12] 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

[2-13] 道岡武信、佐藤歩、後藤文之、瀧本浩史、庄子和博：植物工場の温熱空気環境評価(その3) —植物栽培条件下での数値シミュレーション—、*電力中央研究所研究報告書*、2013.4

[2-14] 吉田伸治、大岡龍三、持田灯、富永禎秀、村上周三：樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討、*日本建築学会計画系論文集*、第 536 号、87-94、2000

[2-15] 佐々木澄、岩田達明、持田灯、渡辺浩文、吉野博：街路樹がストリートキャニオン内の温熱空気環境に及ぼす影響に関する数値解析、*日本建築学会環境系論文集*、第 605 号、pp.139-146、2006.7

[2-16] A. Kubilay, D. Derome b, J. Carmeliet, Analysis of time-resolved wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings using large eddy simulation and an Eulerian multiphase model, *Building and Environment*, Vol. 114, 2017.

[2-17] Best AC, The size distribution of raindrops, *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, Vol. 76, ssure 327, 1950.

[2-18] P.M. Brigger, B. Blocken, H.L. Schellen, Wind-driven rain on the facade of a monumental tower: Numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis , *Building and Environment*, Vol. 44, Issue 8, August 2009

### (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」

#### (a) 研究成果の要旨

令和 5 年度は、統合シミュレーション技術の開発(粘液フィルムの Break-up を再現する飛沫生成モデルの作製及び Euler-Lagrange モデルによる飛沫・飛沫核輸送解析手法の開発)、汚染物質濃度制御にロバストな環境設計法の開発(呼吸空気質・呼吸領域の定量評価法の確立)、多目的最適化法の統合(皮膚温制御のための人体熱モデル及び知的生産性評価モデルの統合)、最適化問題の設定と解析モデル作成、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改良を行った。

具体的には、令和 4 年度に作成した数値気道モデル、粘液輸送モデル、液膜からの液滴形成を再現する Eulerian Wall Film モデルを用いた気道内飛沫飛沫核生成に関する大規模解析技術を基に、口腔形状が変化した場合、ならびに咳が連続する条件を再現した場合の気道内での飛沫・飛沫核生成に関する数値解析を実施した。また、人体形状と代謝発熱、呼吸を再現した数値人体モデルを環境解析モデルに実装し、時

間逆転場を利用した呼吸空気質・呼吸領域の同定法を確立し、屋根面のみを再現した簡易建物モデル(半屋外環境)に複数人が集合した条件での呼吸域形成に関して大規模な数値解析を実施した。また、室内での飛沫感染リスクの低減と室内快適性の向上や空調電力消費の低減を実現する室内環境環境の多目的設計に向けて、数値人体モデルの構築、最適化を行う空調モデルの検証およびサブ課題Aで開発した多目的最適化フレームワークの室内空調への改良を行った。

In the FY 2023, we developed integrated simulation technologies, including the creation of a droplet generation model to reproduce the break-up of mucus films and the development of droplet and droplet nuclei transport analysis methods using the Euler-Lagrange model. We also developed robust indoor environmental design methods for controlling pollutant concentrations, established quantitative evaluation methods for respiratory air quality, integrated multi-objective optimization methods (integrating thermo-regulation models for skin surface temperature control), set up and created analysis models for optimization problems, performed optimization simulations, and improved the multi-objective optimization framework.

Specifically, based on the numerical analysis techniques developed in FY 2022, which utilized numerical airway models, mucus transport models, and the Eulerian Wall Film (EWF) model to reproduce droplet/droplet nuclei formation from liquid mucus films, we performed seamless numerical analyses on droplet/droplet nuclei generation in airways under conditions where the oral cavity shape changes and continuous coughing occurs. Additionally, we implemented a computer simulated person (virtual manikin) that reproduces human body shape, metabolic heat generation, and respiration into the indoor environmental analysis method, established a method for identifying respiratory air quality and breathing zones using reverse simulation, and conducted numerical analyses on the formation of breathing zones under conditions where multiple people gather in a simplified building model (semi-outdoor environment) that only reproduces the roof surface.

Furthermore, with the aim of reducing the risk of indoor droplet infection, improving indoor thermal comfort and reducing the energy consumption of air conditioning system, we implemented computer simulated persons into CUBE, verified HVAC models, and improved the multi-objective optimization framework developed in Subtask A for the application of indoor HVAC design.

#### (b) 本年度の内容

##### (b)-1 Eulerian Wall Filmモデルを用いた気道内飛沫飛沫核生成に関する大規模解析技術の開発

令和4年度に開発実装した Eulerian Wall Film モデルとラグランジュ分散相モデルを連成した気道内の数値解析技術を発展させ、気道モデルの口腔形状(サイズ)が変化した場合、ならびに咳が連続した場合の EWF モデルによる気道粘膜上皮上の粘液フィルムの Break-up に伴う飛沫飛沫核生成、気道内沈着と室内環境中への呼出までをシームレスに解析する技術を確立した。

Fig. 2.2.3-1 に飛沫飛沫核生成解析のために作成した気道モデル2種を示す。令和4年度に作成したモデ

ル A の他， 口腔サイズを変化させたモデル B を作成した。

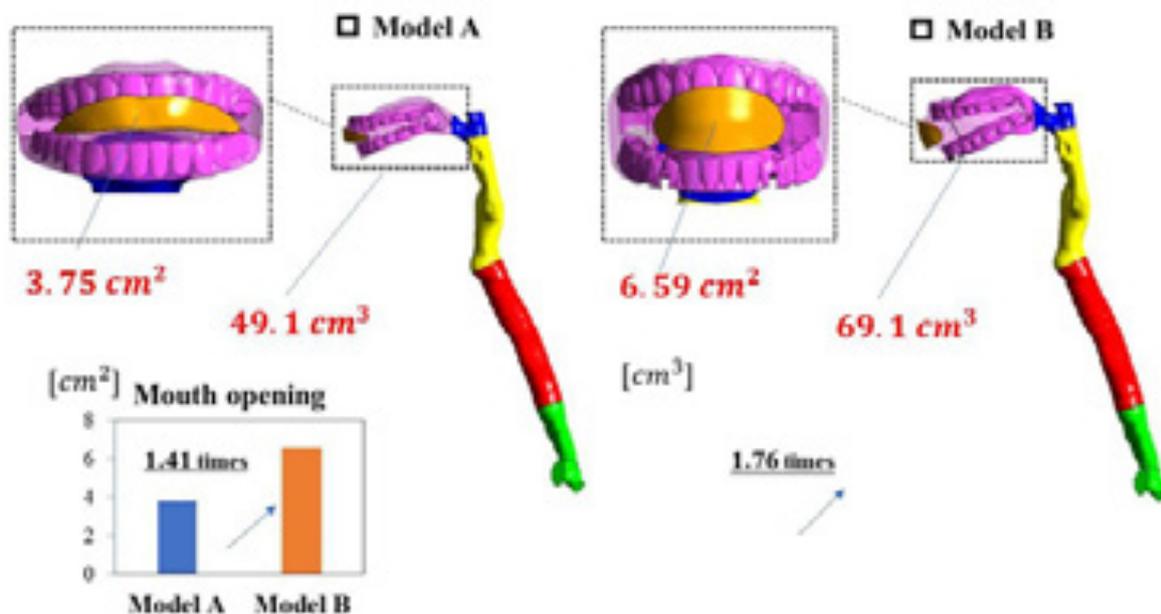


Fig. 2.2.3-1 Numerical respiratory tract (Airway) model from oral cavity to bronchial tube (Model A and Model B)

咳プロファイルとして Cough Peak Flow Rate(CPFR): $5.75 \text{ [L/s]}$ ならびに Peak Velocity Time(PVT): $76.5 \text{ [ms]}$ の条件で非定常流れ場解析を実施した結果を Fig. 2.2.3-2 に示す。乱流モデルならびに数値解法は令和 4 年度の解析条件と同一である。口腔形状を変かさせることで，口腔内流れ場が変化すると共に，口(mouth)開口面での速度分布にも大きな変化が確認される。

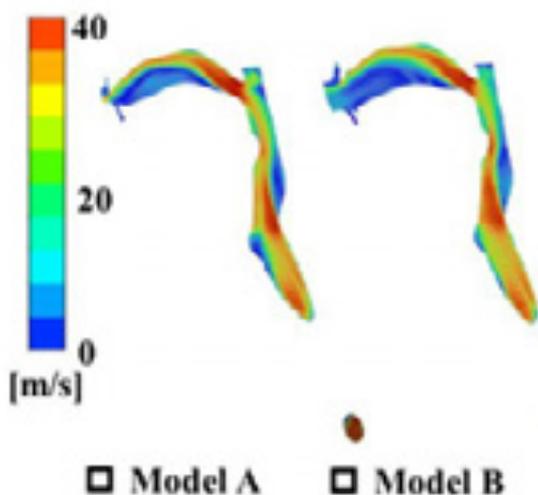


Fig. 2.2.3-2 Velocity distribution( $t=0.075 \text{ s}$ ) inside the airway (Model A and Model B)

Fig. 2.2.3-3 に気道内の壁面摩擦応力分布の解析結果を示す。口腔形状以外の気道幾何形状は Model A な

らびに Model B で同一であることから下気道から口頭に向けた流れ，ならびに摩擦応力分布はほぼ同一であるのに対して，口腔内では摩擦応力分布に若干の差異が見られる．特に歯列端部での値に差が生じている．

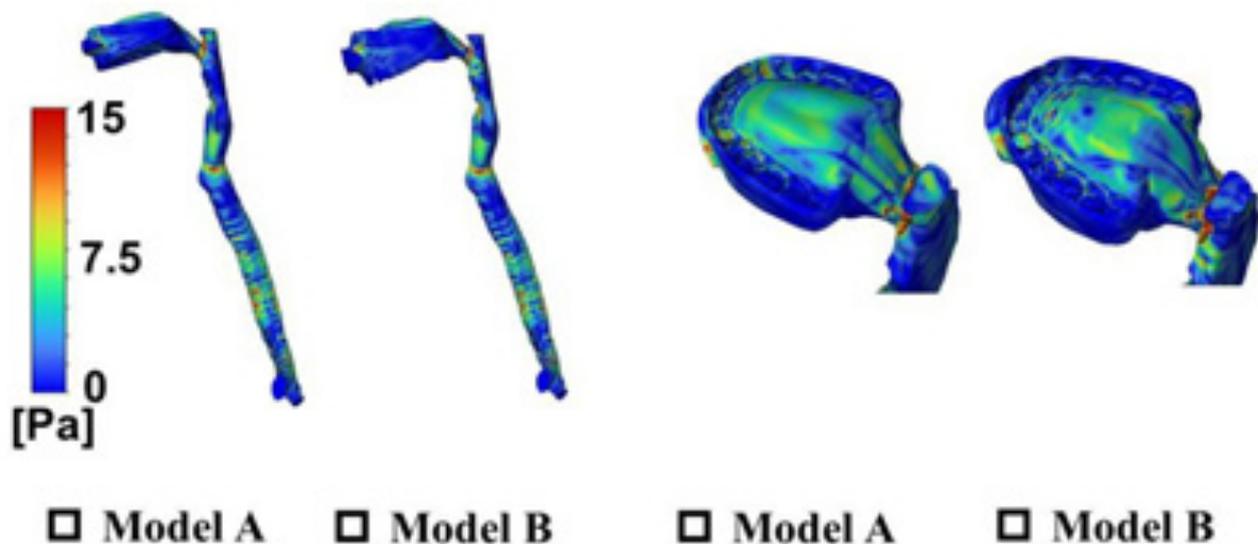


Fig. 2.2.3-3 Shear stress distribution (0.075s) inside the airway (Model A and Model B)

Fig. 2.2.3-4 に Model A ならびに Model B の口腔から口(mouth)開口面を介して室内空間側に呼出される飛沫・飛沫核の粒度分布(粒子径分布)を示す．口腔サイズならびに口(mouth)開口面積を相対的に大きくした Model B において，呼出飛沫量が有意に低下している．これは，口腔体積増加に伴う(口腔内)平均風速の低下，対応する壁面摩擦応力の低下が理由である．

Table. 2.2.3-1 には Model A ならびに Model B の両モデルを対象として，咳に伴い気道内で生成した飛沫・飛沫核の粒径別の粒子数，ならびに気道内への再付着粒子を除外して口(mouth)開口面から室内側に呼出された粒径別の粒子数の一覧を整理して示す．

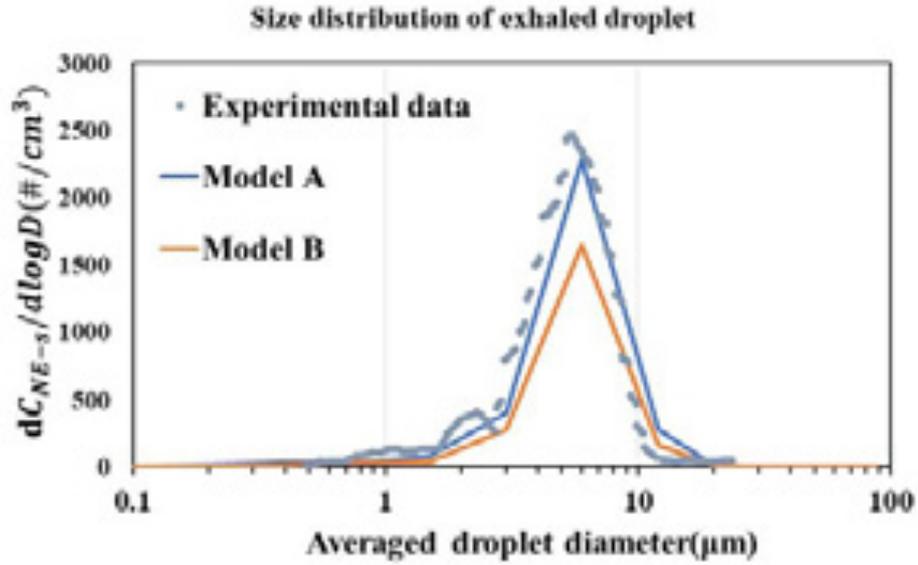


Fig. 2.2.3-4 Validation with experimental data after optimizing the parameters for the EWF model (Model A and Model B)

Table. 2.2.3-1 Size distribution of droplets/droplet nuclei generated in airway(Model A and Model B)

Diameter bin (mm)	Number of droplet/droplet nuclei	
	Model A	Model B
<0.1	995	0
0.1-0.25	9,062	0
0.25-0.5	15,375	5,488
0.5-0.75	16,668	10,886
0.75-1	17,973	10,393
1-2	202,041	121,982
2-4	1,306,945	1,062,737
<b>4-8</b>	<b>8,833,188</b>	<b>7,828,667</b>
8-16	867,018	810,676
16-24	16,814	18,710
24-32	260	371
32-40	1	12
40-50	0	0
50-75	0	0
75-100	0	0
Total	11,286,340	<b>9,869,922</b>

Table. 2.2.3-2 Size distribution of droplets/droplet nuclei exhaled from mouth opening (Model A and Model B)

Diameter bin (mm)	Number of droplet	
	ModelA	ModelB
<0.1	0	0
0.1-0.25	4681	0
0.25-0.5	7426	3151
0.5-0.75	6111	5180
0.75-1	4721	3016
1-2	24367	10588
2-4	120314	83636
<b>4-8</b>	<b>685441</b>	<b>494750</b>
8-16	83740	49562
16-24	1378	2561
24-32	27	59
32-40	0	0
40-50	0	0
50-75	0	0
75-100	0	0
<b>Total</b>	<b>938206</b>	<b>652,503</b>

Table. 2.2.3-3 には気道内部位別の飛沫・飛沫核生成量を一覧表に整理した結果を示す。また Table. 2.2.3-4 には気道内生成飛沫・飛沫核の中で気道内に再付着せずに口(mouth)開口面から室内側に呼出された粒子量を気道内部位別に整理した結果を示す。

Table. 2.2.3-3 Origin of stripped droplet/droplet nuclei in airway (Model A and Model B)

Region	ModelA		ModelB	
	Number droplet	of Percentage (%)	Number droplet	of Percentage (%)
Oral	2,711,389	24.0	2,291,311	23.2
<b>Teeth</b>	<b>2,717,486</b>	<b>24.1</b>	<b>1,729,907</b>	<b>17.5</b>
Throat	1,643,403	14.6	1,653,643	16.8
Larynx	1,658,625	14.7	1,644,657	16.7
Trachea	1,486,291	13.2	1,486,516	15.1
Bifurcation	1,069,146	9.47	1,063,888	10.8
<b>Total</b>	<b>11,286,340</b>	<b>100</b>	<b>9,869,922</b>	<b>100</b>

Table. 2.2.3-4 Origin of exhaled droplet/droplet nuclei from mouth opening (Model A and Model B)

ModelA	ModelB
--------	--------

Region	Number droplet	of Percentage (%)	Number droplet	of Percentage (%)
Oral	325,650	34.7	144,511	22.2
Teeth	376,892	40.2	226,275	34.7
Throat	115,423	12.3	140,024	21.5
Larynx	77,795	8.30	90,952	13.9
Trachea	20,894	2.23	25,773	3.95
Bifurcation	21,552	2.30	24,978	3.82
<b>Total</b>	<b>938,206</b>	<b>100</b>	<b>652503</b>	<b>100</b>

またこれらの表に対応する結果を整理した図を Fig. 2.2.3-5 に示す。気道内での飛沫・飛沫核生成は、気道内で広く分布するが、主に口腔内での生成が過半となる。そのため、口腔形状が変化することで飛沫・飛沫核生成量も敏感に変化する。

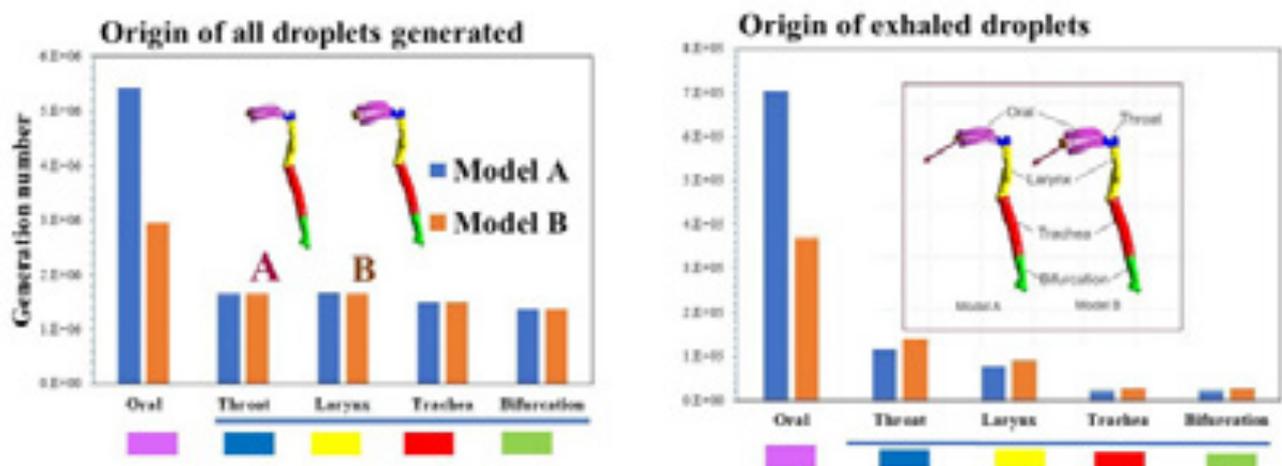


Fig. 2.2.3-5 Comparison of droplet/droplet nuclei generated or exhaled (Model A and Model B)

続いて、咳が連続した条件(2回)での解析結果を示す。本解析では、一回目の咳は(前述の解析条件と同一で)Cough Peak Flow Rate(CPFR):5.75[L/s]ならびに Peak Velocity Time(PVT):76.5[ms]に設定し、連続する2回目の咳を一回目と同一の CPFR ならびに PVT の咳が連続する条件の他、二回目の咳のみ CPFR: 3.4615, PVT): 73.1953 (一回目の咳と比較して若干弱めの咳)に変更した条件の 2 条件で解析を実施した。

Table. 2.2.3-5 には Model A ならびに Model B の両モデルを対象として、連続する咳に伴い気道内で生成した飛沫・飛沫核の粒径別の粒子数を示す。Fig. 2.2.3-6 として、Table. 2.2.3-5 の結果を比較した図を示す。

また、Table. 2.2.3-6 には気道内への再付着粒子を除外して口(mouth)開口面から室内側に呼出された粒径別の粒子数の一覧を整理して示す。

一回目の咳により気道粘膜上皮上の粘液フィルムが剥離して粒子生成することから、粘液フィルム厚が

変化し、粒子生成分に相当する粘液分のフィルム厚さが現象する。そのため、連続して 2 回目の咳を再現した場合には、粘液フィルム厚が初期条件と異なる厚さになっていることから、飛沫生成量に変化し、有意に低下する。

連続する 2 回目の咳として相対的に弱い速度プロファイルを与えた場合には、咳ピーク流量 CPFR が 5.75 [L/s]から 3.46[L/s]に 38%程度低下することで、飛沫粒子生成量は劇的に減少した。Fig. 2.2.3-7 に表中に整理された結果を図示している。

Table. 2.2.3-5 Size distribution of droplets/droplet nuclei generated in airway(Model A and Model B)

Diameter bin (mm)	Number of droplet/droplet nuclei					
	1 <sup>st</sup> (CPFR:5.75, PVT:76.5)		2 <sup>nd</sup> ((CPFR:5.75, PVT:76.5), Same profile of 1 <sup>st</sup> )		2 <sup>nd</sup> (CPFR: 3.46, PVT: 73.20, relatively weak cough)	
	Model A	Model B	Model A	Model B	Model A	Model B
<0.1	995	0	500	0	500	0
0.1-0.25	9062	0	2,762	0	1,500	0
0.25-0.5	15375	5,488	9,184	4,971	2,018	35
0.5-0.75	16,668	10,886	8,779	9,938	2,174	72
0.75-1	17,973	10,393	10,632	9,746	3,031	305
1-2	202,041	121,982	43,288	120,455	3,580	789
2-4	1,306,945	1,062,737	292,271	1,014,080	7,556	19,117
<b>4-8</b>	<b>8,833,188</b>	<b>7,828,667</b>	<b>8,770,737</b>	<b>7,236,128</b>	<b>1,051,660</b>	<b>787,937</b>
8-16	867,018	810,676	33,625	114,480	1,332	3,697
16-24	16,814	18,710	10073	919	397	0
24-32	260	371	197	1	2	0
32-40	1	12	0	0	1	0
40-50	0	0	0	0	0	0
50-75	0	0	0	0	0	0
75-100	0	0	0	0	0	0
Total	<b>11,286,340</b>	<b>9,869,922</b>	<b>9,182,048</b>	<b>8,510,718</b>	<b>1,073,751</b>	<b>811,952</b>

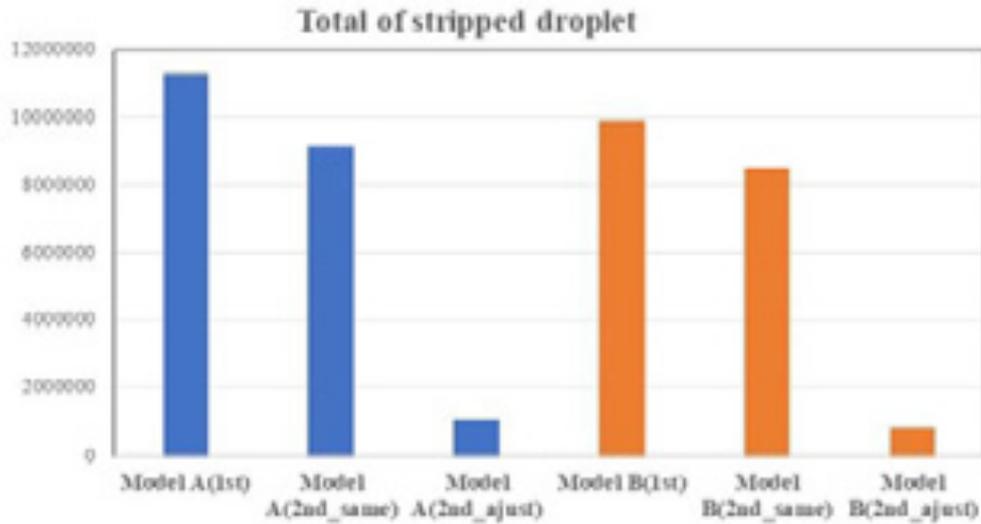


Fig. 2.2.3-6 Comparison of droplet/droplet nuclei generated in airway (Model A and Model B)

Table. 2.2.3-6 Size distribution of droplets/droplet nuclei exhaled from mouth opening(Model A and Model B)

Diameter bin (mm)	Number of droplet/droplet nuclei					
	1 <sup>st</sup> (CPFR:5.75, PVT:76.5)		2 <sup>nd</sup> ((CPFR:5.75, PVT:76.5), Same profile of 1 <sup>st</sup> )		2 <sup>nd</sup> (CPFR: 3.46, PVT: 73.20, relatively weak cough)	
	Model A	Model B	Model A	Model B	Model A	Model B
<0.1	0	0	0	0	0	0
0.1-0.25	4681	0	1076	0	0	0
0.25-0.5	7426	3151	4772	2,791	7	35
0.5-0.75	6111	5180	4315	4,590	1243	64
0.75-1	4721	3016	4340	2,906	855	168
1-2	24367	10588	11423	11,626	1466	207
2-4	120314	83636	32611	66,142	1544	1,996
<b>4-8</b>	<b>685441</b>	<b>494750</b>	<b>609944</b>	<b>398,309</b>	<b>89738</b>	<b>51,230</b>
8-16	83740	49562	2276	9,341	121	543
16-24	1378	2561	935	684	27	0
24-32	27	59	26	0	2	0
32-40	0	0	0	0	1	0
40-50	0	0	0	0	0	0
50-75	0	0	0	0	0	0
75-100	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>938206</b>	<b>652,503</b>	<b>671718</b>	<b>496,389</b>	<b>95004</b>	<b>54,243</b>

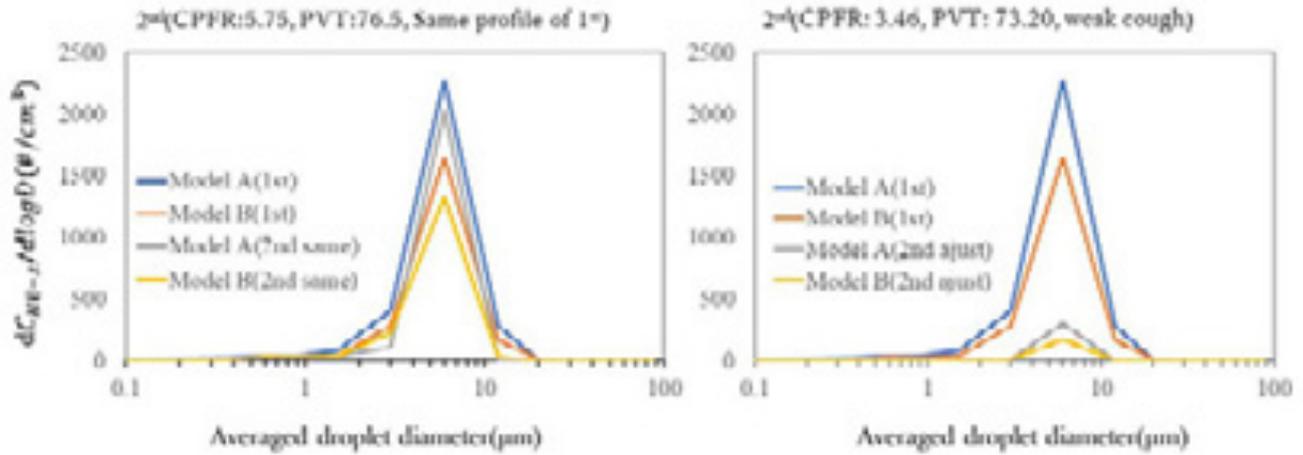


Fig. 2.2.3-7 Size distribution of exhaled droplet /droplet nuclei (Model A and Model B)

(b)-2 呼吸空気質・呼吸領域の定量評価法の確立

通常の順解析(Forward Simulation)によって解析した気流ベクトルを反転させた時間逆転解析(Reverse Simulation)結果を基に、Passive Scalar 解析を行うことで、呼吸空気とその分布を同定する数値解析手法を確立し、屋根のみが存在する半屋外空間に複数の人体モデルが設置された条件で、呼吸域の同定のための大規模解析を実施した。Fig. 2.2.3-8 に半屋外空間を想定した解析空間の概要を示す。大気境界層を再現した流れ場解析を実施した上で、ダウンスケーリングすることで人体モデルを含む半屋外空間を高解像度に解析した。

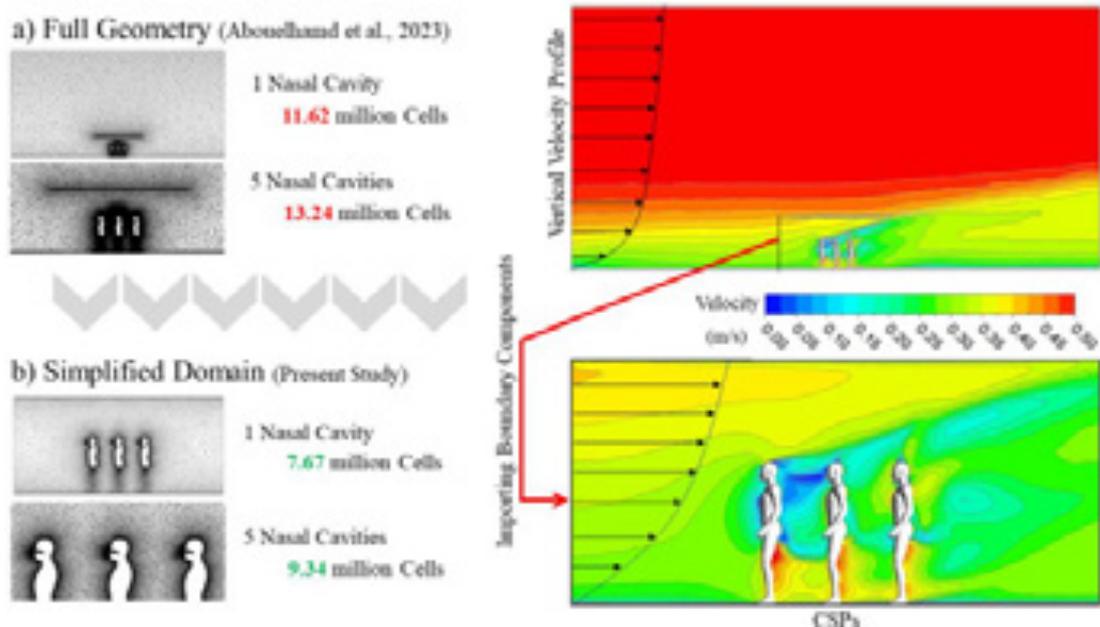


Fig. 2.2.3-8 The conducted process to minimize the computational domain. (a) is the full geometry applied to conduct

Fig. 2.2.3-9 には人員密度が呼吸域形成に与える影響を検討する目的で設定した解析ケース一覧を示す。人体間距離を均等に变化させることで全5ケースの解析ケースを設定している。

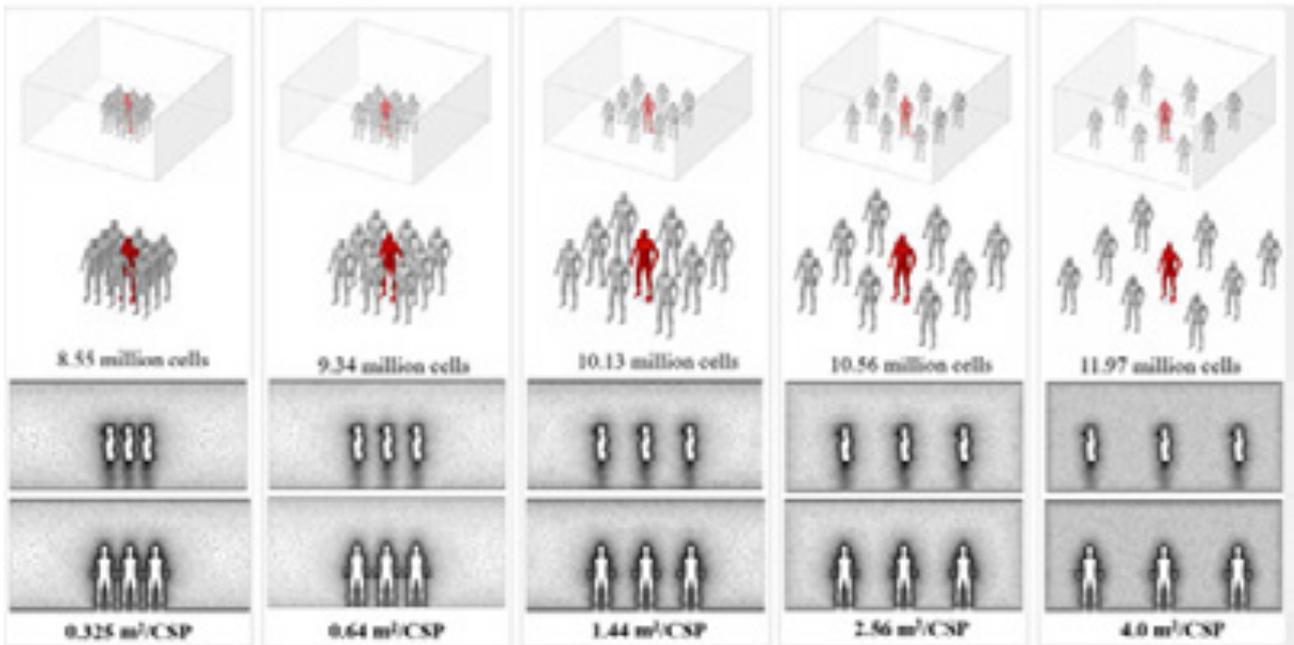


Fig. 2.2.3-9 Geometries and meshing designs for the case studies in different human densities inside the semi-outdoor developed model.

また、Fig. 2.2.3-10 には後述する各人体位置での呼吸域形成を議論するための人体識別番号の他、流入風向を変化させた解析条件設定と人体配置がランダム条件の場合の解析条件を整理している。

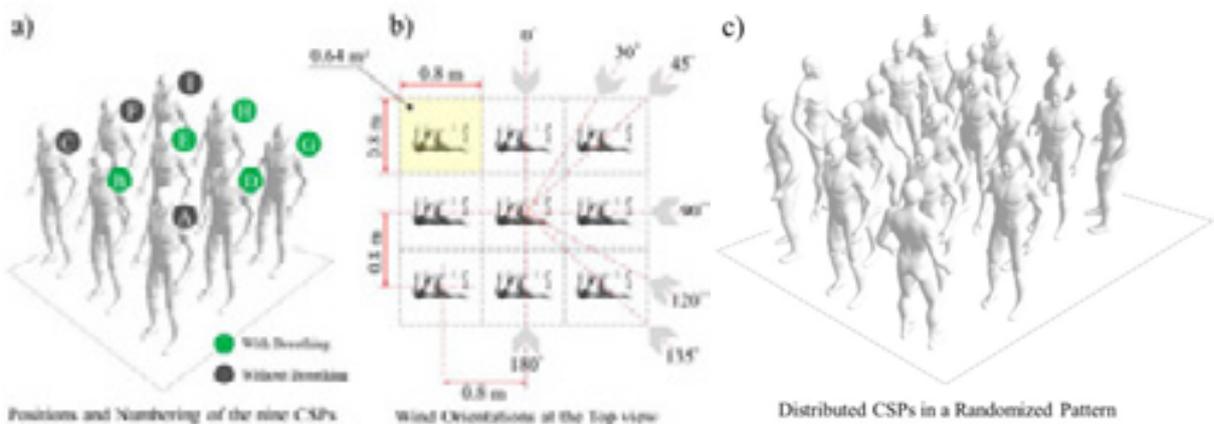


Fig. 2.2.3-10 Clarifications of the models and CSP positions. (a) shows the human arrays position and selected CSPs to produce breathing airflow, (b) illustrates the examined wind orientations in the case of density of  $0.64\text{m}^2/\text{CSP}$ , and (c) is the created model with randomized human allocations and orientations as a case study.

各人体モデルは定常呼吸を仮定している。また、代謝に伴う人体発熱と皮膚温制御を再現するため、FangerのOne-nodeモデルを適用した。

Fig. 2.2.3-11 には人体モデル正面方向から平均風速  $0.3\text{m/s}$  にて流入する条件における人体モデル周辺のスカラ風速解析結果を示す。人体モデルが最も密集した条件( $0.325\text{m}^2/\text{CSP}$ )と最も人体間距離を確保した粗条件( $4.0\text{m}^2/\text{CSP}$ )では、各人体モデル周辺に形成される流れ場の様相は大きく異なり、特に風上側最前

列の人体モデルによって形成された後流(ウエイク)が大きく異なる様相が確認できる。これは Fig. 2.2.3-12 に示した流線図からも確認できる。

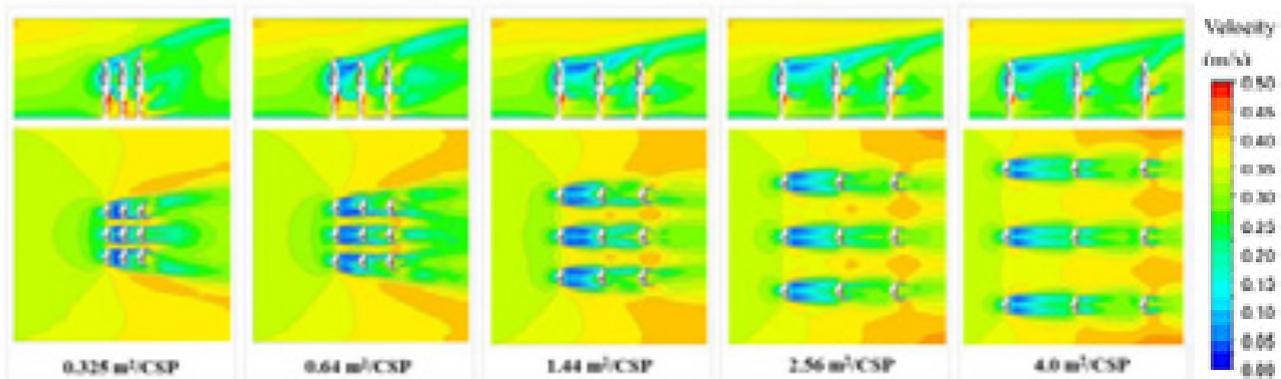
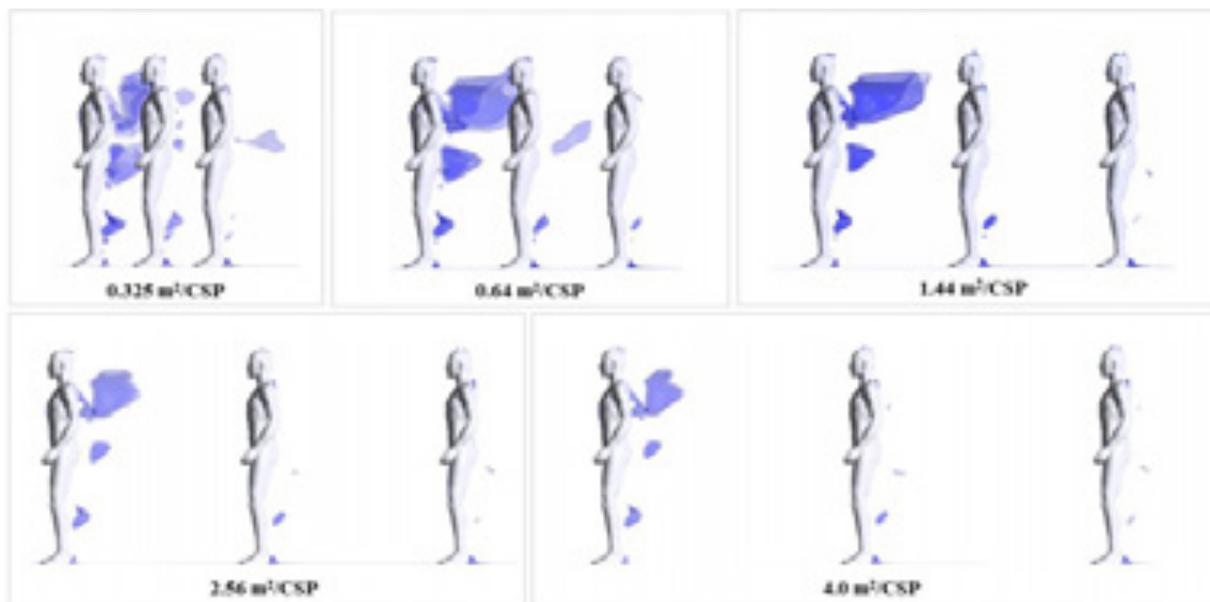
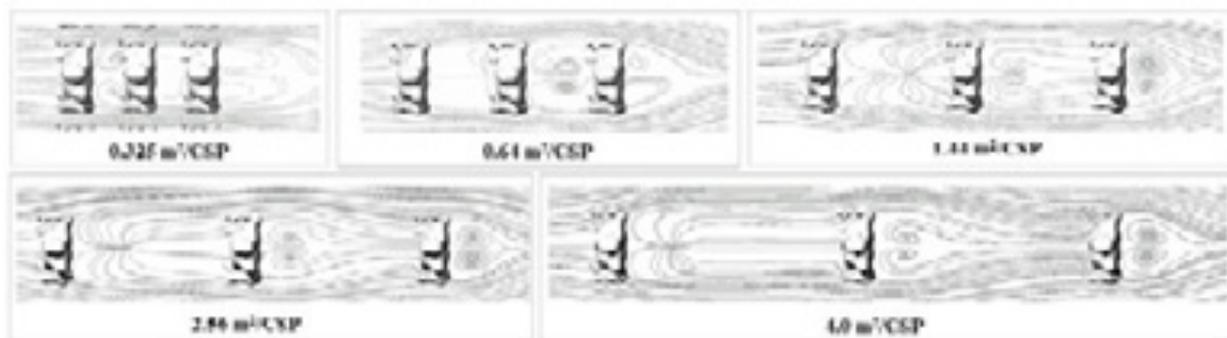


Fig. 2.2.3-11 Airflow velocity contours in the vertical plane ( $x=0$ ) and horizontal plane ( $z=1.4\text{m}$ ) for different examined cases



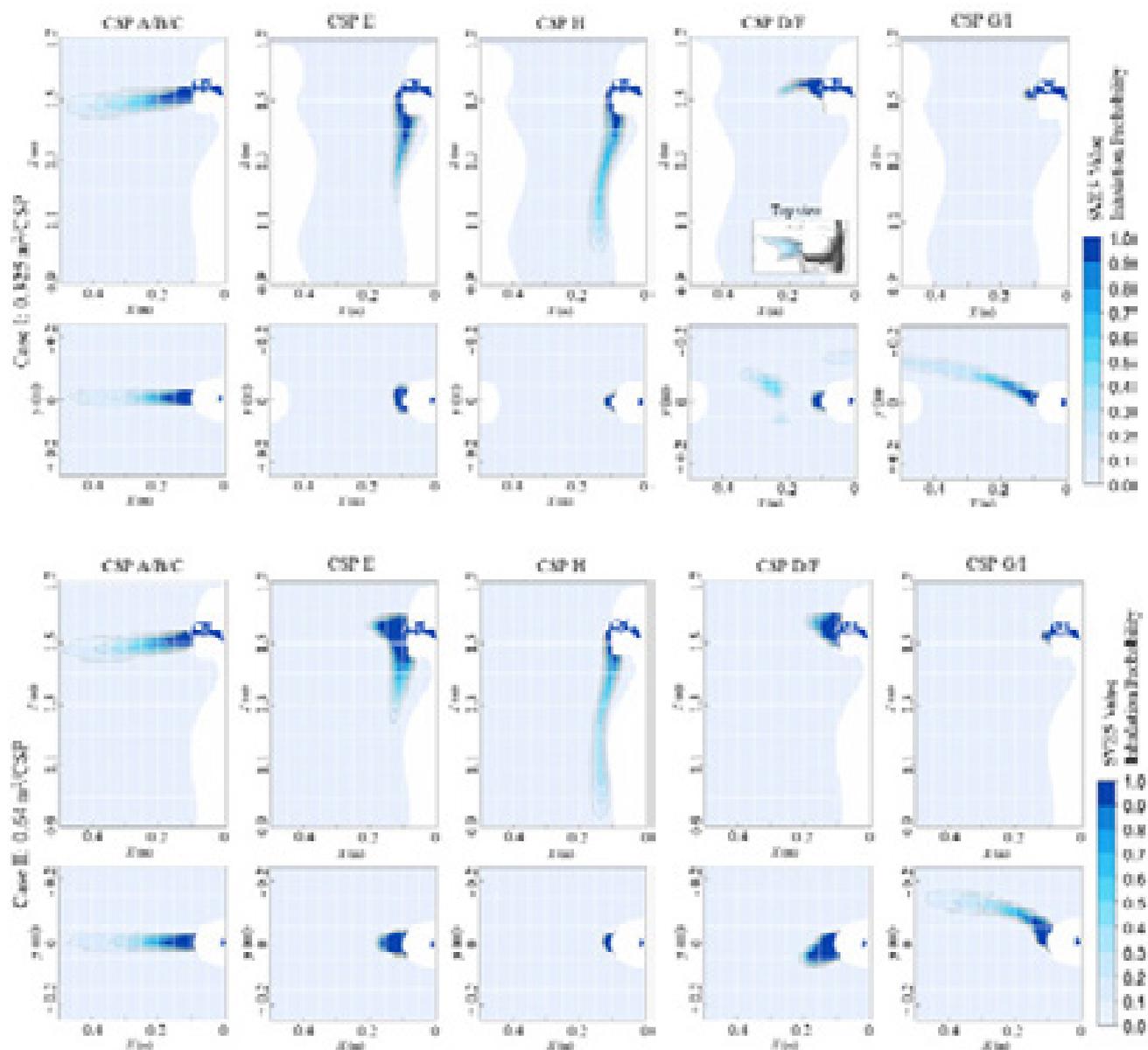
(a) Stagnant regions distribution in between the CSPs (regions with less than  $0.05\text{m/s}$  velocity).



(b) Airflow streamlines in the central positioned CSPs.

Fig. 2.2.3-12 Airflow characteristics associated with different social densities/distances. (a) shows the distribution of the stagnant air between the CSPs, and (b) shows the airflow vortices associated with the body-air interactions.

Fig. 2.2.3-13 には等温条件での各人体モデルの呼吸域解析結果を人体モデル鼻孔位置を含む垂直断面、水平断面で示す。図中の SVE5 は呼吸に伴い鼻孔から吸入する空気の割合を示しており、SVE5=1 がその点の空気を 100%吸入することを示し、SVE5=0 はその点での空気は吸入しないことを示す。人体モデルの相対的な設置位置、人員密度によって呼吸域の形状やサイズが大きく変化する。特に風上側最前列の人体モデルの呼吸域が水平方向に長く伸びているの対し、二列目以降では自身の発熱に伴う熱上昇流と後流(ウェイク)による滞留のため、胸元から頭部に向けて上下方向に分布する傾向が観察される。



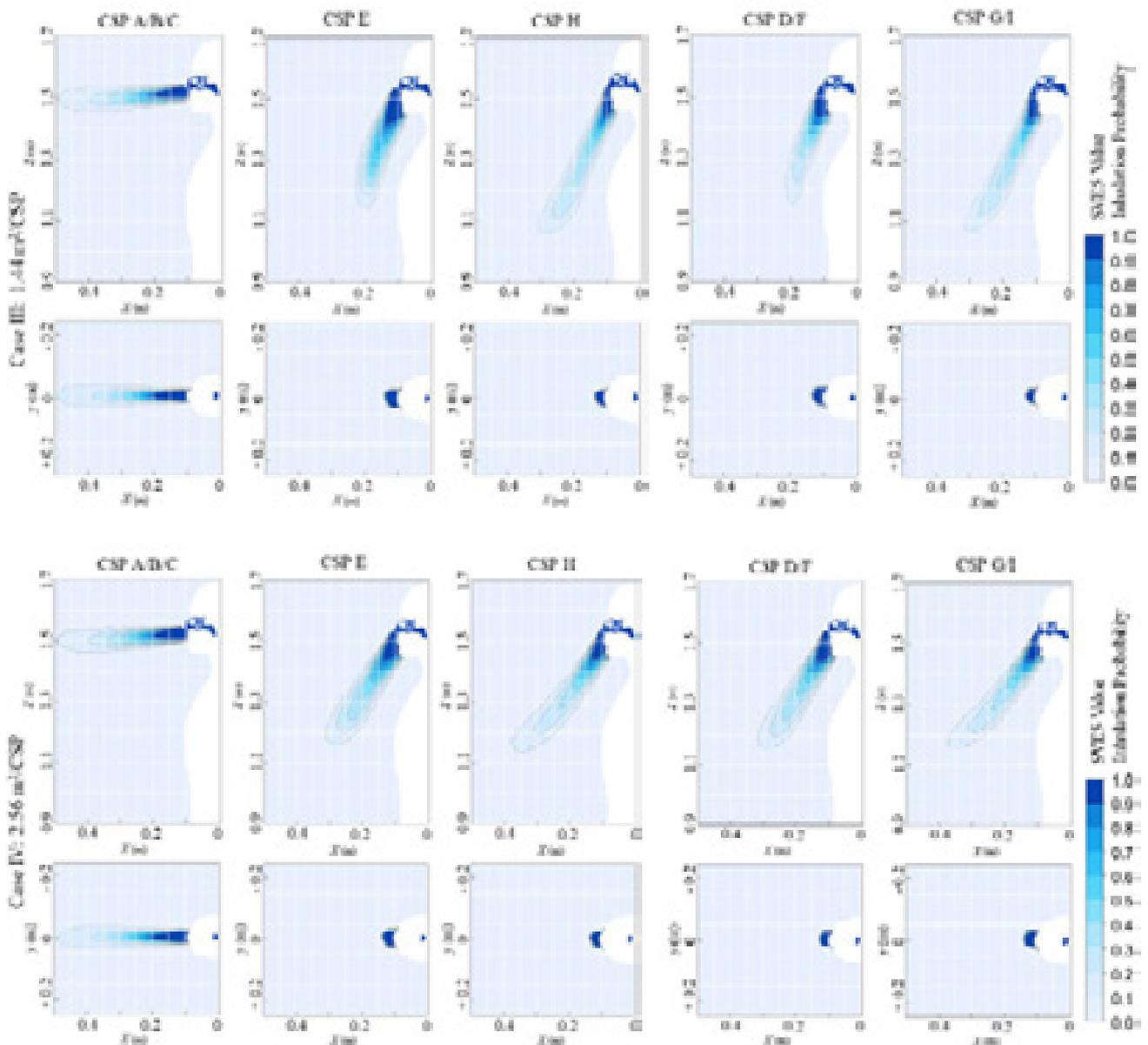


Fig. 2.2.3-13 The vertical, horizontal, and lateral distribution of human breathing zones (inhalation probability in different CSPs positions and crowding level.

Fig. 2.2.3-14 には流入空気温度を 10℃から 31℃に段階的に変化させた場合の流れ場解析結果を基に呼吸域同定を実施した結果を示す。流入平均風速が 0.3m/s の条件では、人体皮膚表面温度(34℃前後)とほぼ等温条件となる 31℃条件において、風上側最前列の人体モデルの呼吸域が水平方向に長く形成されるのに対し、皮膚温度と空気温度の温度差が大きくなる条件で、代謝に伴う人体熱上昇流の影響が確認できるようになり、対応して呼吸域が上下方向分布に変化する。

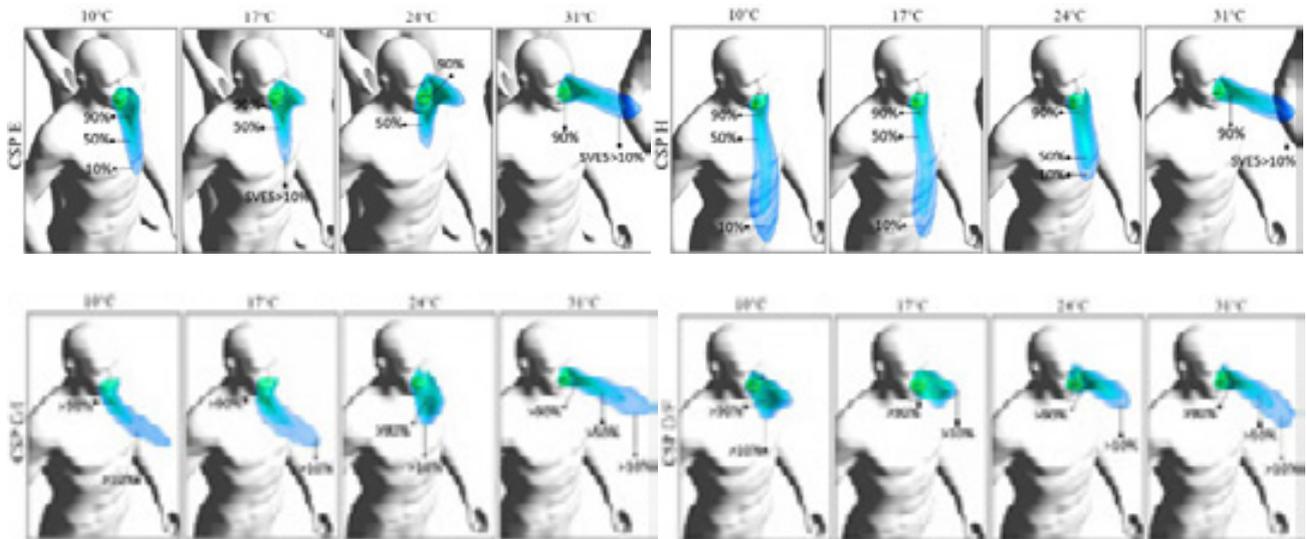
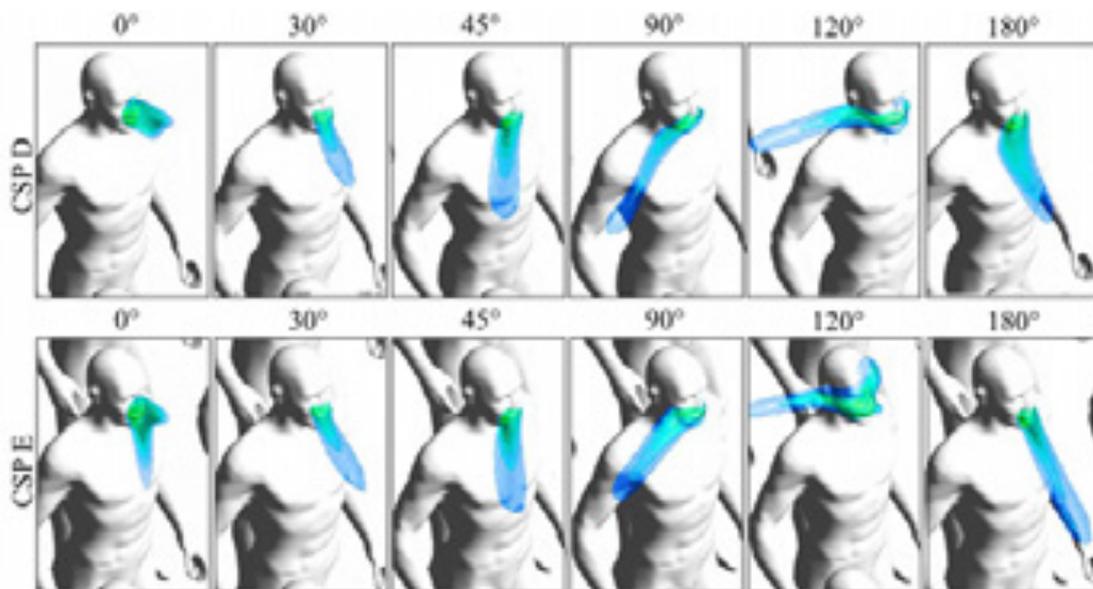


Fig. 2.2.3-14 Three-dimensional (3D) visualization of breathing zones for different CSPs position associated with different air temperatures.

Fig. 2.2.3-15 には流入風向を段階的変化させた結果を示す。0° 条件は人体モデル正面から流入する条件であり、90° は人体モデルの横側から流入する条件、180° は人体モデルの後側から流入する条件である。風向が変化することで、各人体モデルの呼吸域が大きく変化する。



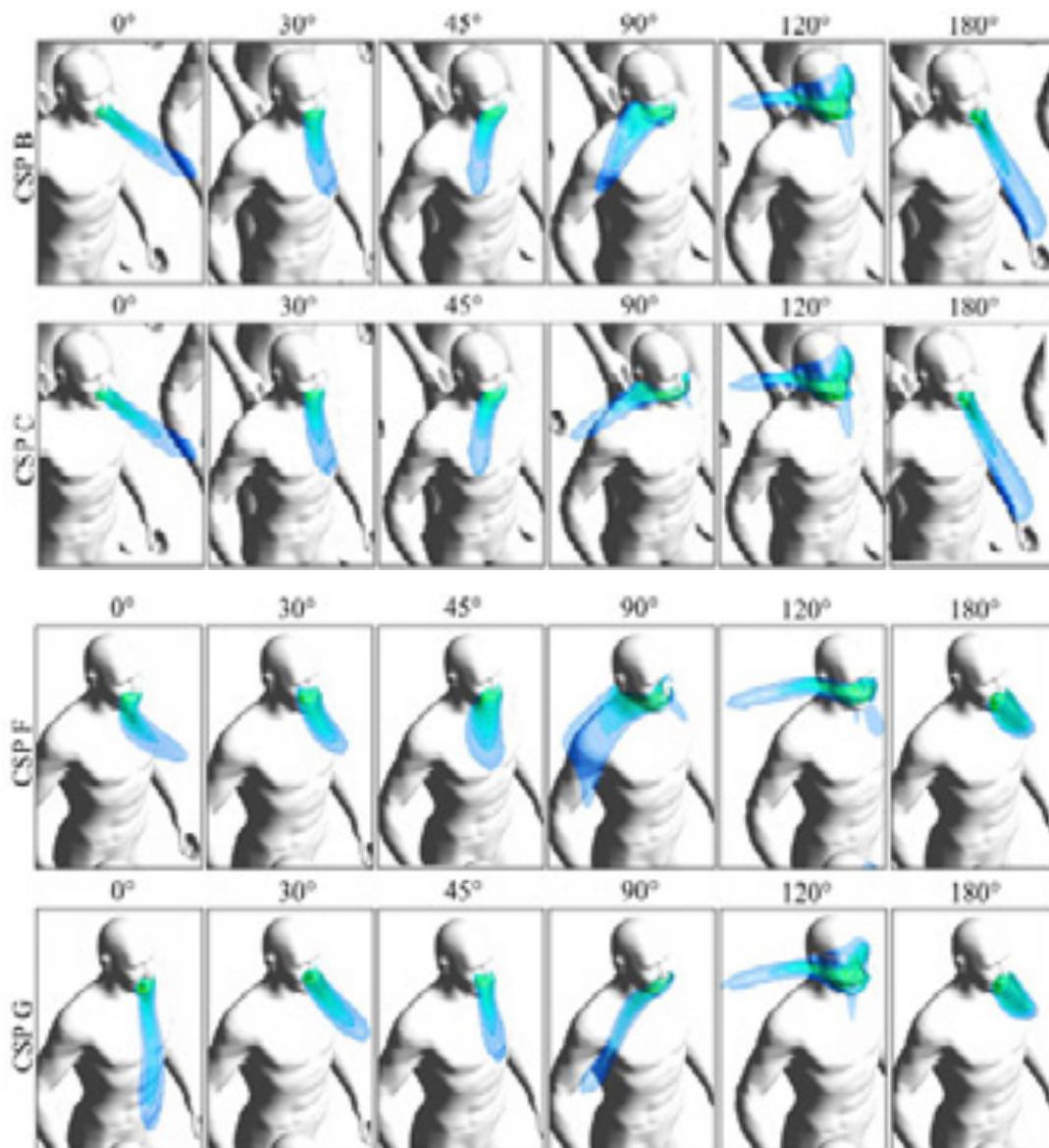


Fig. 2.2.3-15 Three-dimensional (3D) visualization of breathing zones for different CSPs positions associated with different angles of the approaching wind (0 = facing the wind, and 180 is the opposite direction).

Fig. 2.2.3-16 には人体モデルをランダム配置した場合の呼吸域解析結果を示す。人体モデル設置位置によってその周辺流れ場が変化することから、呼吸域の形状やサイズも対応して大きく変化している。呼吸域は吸引する空気の確率分布を示していることから、空気感染リスクを評価する場合の着目すべき制御領域となる。風向や風速、温度差などの環境条件に加え、人体モデルの設置密度も呼吸域形成に大きな影響を与え、その形成メカニズムには普遍的な傾向が観察されないことから、想定した設計条件のもとで数値解析を個別に実施することで呼吸域同定を行うことが重要となろう。

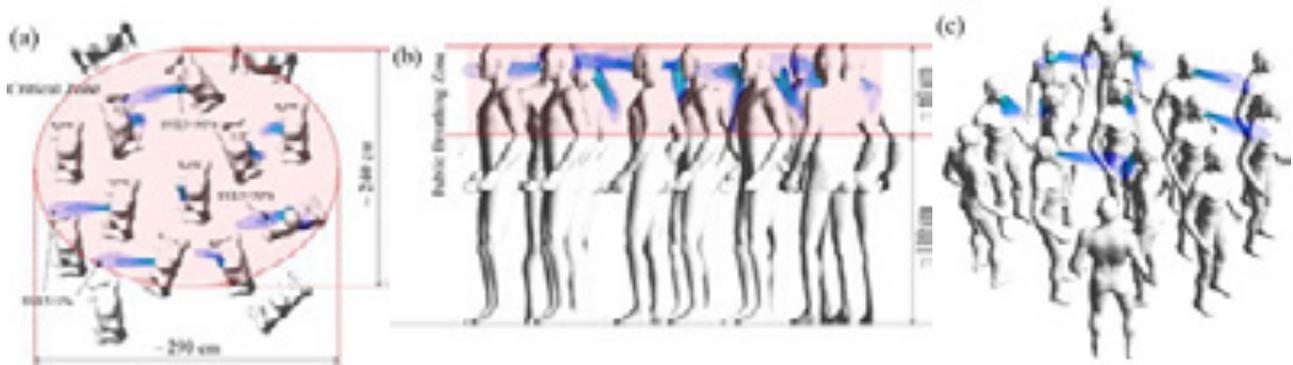


Fig. 2.2.3-16 Public breathing zone associated with randomized case for prediction the critical zone in crowded semi-outdoor environment. (a) top view, (b) side-view, and (c) 3D view.

### (b)-3 多目的最適化にむけたモデルの統合と最適化問題の設定および解析モデルの作成

ここでは、室内の快適性と飛沫による感染リスクの低減を両立する室内環境を構築するための多目的最適化に向けた、人体モデルの統合と解析モデルの構築、ならびに具体的な最適化問題の設定の検討を行う。

まず、感染者と被感染者を想定して両者が相互作用し、さらに会話や呼吸等の自律的な生理活動を持つバーチャルマネキンを開発した（図 2.2.3-17）。感染者は大声で英語で 1 から 10 までを繰り返し発話しながら飛沫を飛散する様子を想定し、モデル化を行った。一方、被感染者については、昨年度までに開発した数値気道モデルを用いて、鼻前庭から気管支の第 7 世代までの気道を再現し、鼻孔で接続した。被感染者は感染者の前で静かに呼吸している状態を想定し、呼吸（吸入と呼出）時の流量変化を正弦波モデルを使用して再現した。

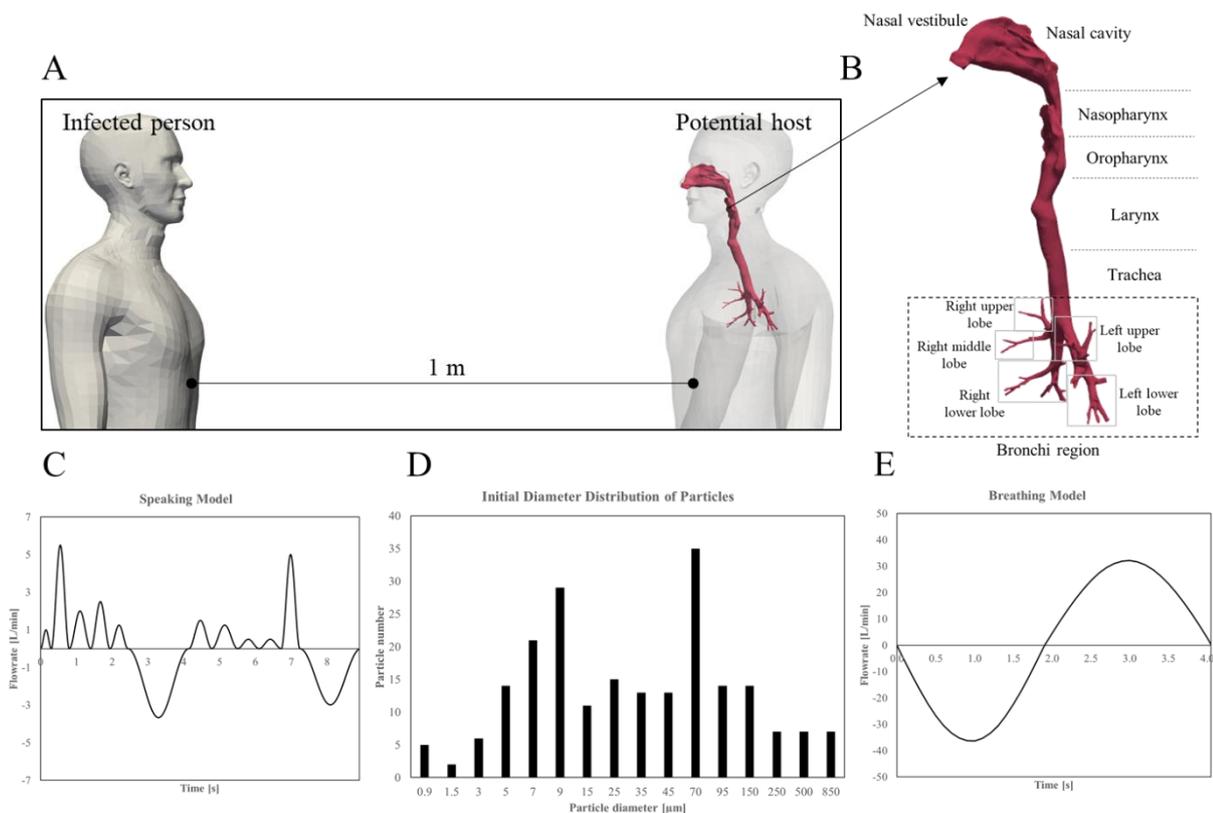


Fig. 2.2.3-17 Two interacting virtual mannequins (left: infected person, right: person to be infected)(A), Modeled respiratory tract to evaluate infection risk(B), Flowrate imposed at the mouth of infected person (speaking model)(C), Droplet particle number against the particle diameter for the speaking model (D), Flowrate of the infected person breathing.

次に具体的な最適化問題の設定、特に感染リスクを低減すると共に居室者の快適性も満足する換気システムの検討を行った。具体的には、バーチャルマネキンを 5 つの異なる機械換気システムを備えた部屋に導入し、室内流れの分布によって引き起こされる室内の飛沫粒子の分散と人体への粒子吸入を定量化した。図 2.2.3-18 に示すように、主要な 5 つの換気システム (“Mixing”, “Displacement”, “Underfloor air”, “Impinging jet”, “Stratum”) に加えて、室内への新鮮空気の供給位置と排気位置に対して、感染者と被感染者の位置を変化させた場合の検討も行った。可視化結果から、“Mixing”および“Underfloor air”換気は、マネキンの近くに飛沫が長時間滞留し、粒子吸入を増加させることが分かった。また、“Impinging jet”と“Stratum”換気は、飛沫を呼吸領域から上方に輸送し、飛沫の吸入を低減するが、流れの非対称性によりマネキンの位置に依存して結果が大きく変動することがわかった。5 つの換気システムの中では、“Displacement”は、空中粒子を呼吸空間の上に運び、感染者から遠ざけるため、感染リスク低減効果として最良の結果を示した。

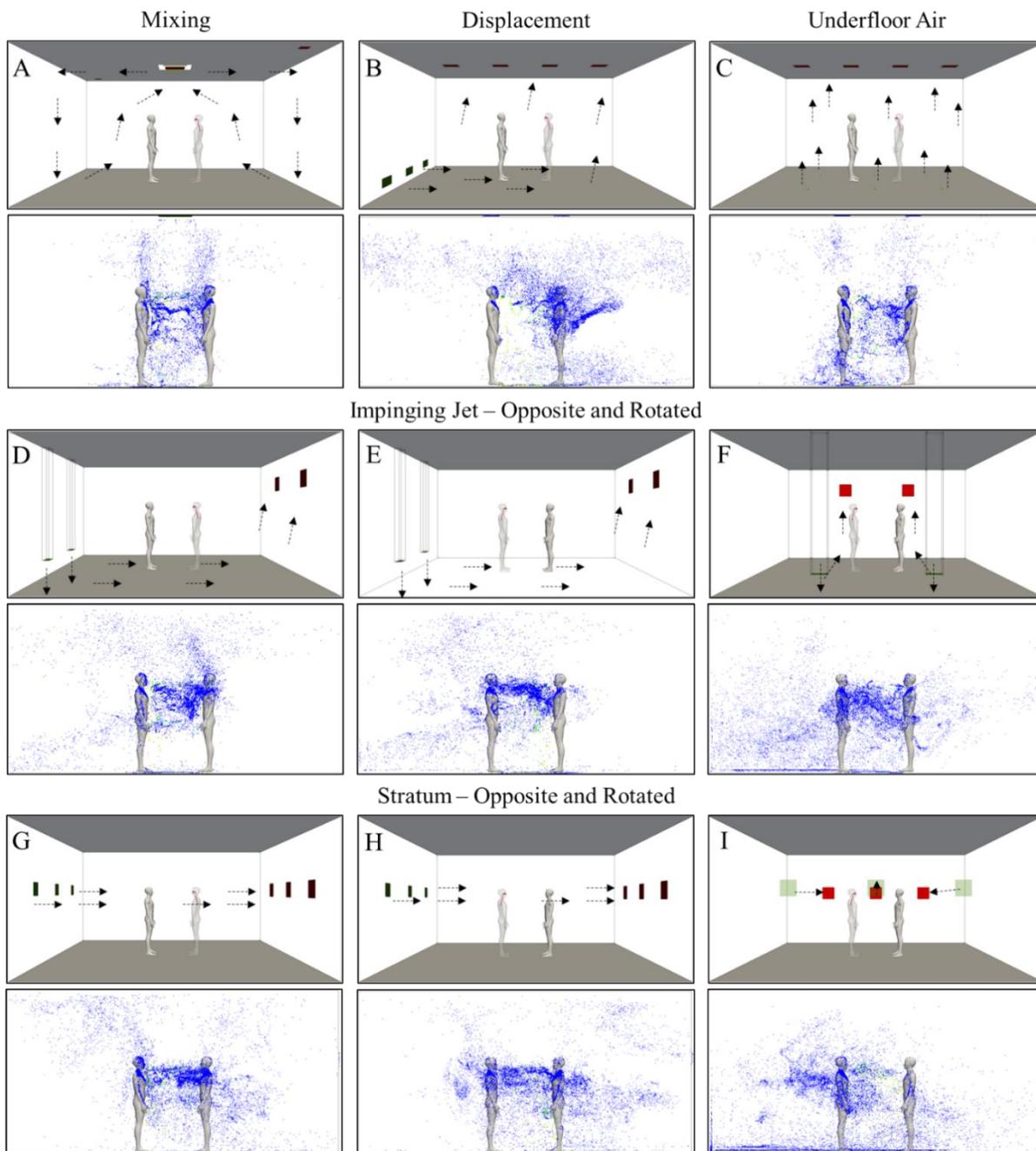


Figure 2.2.3-18 すべての換気戦略の代表的な流れの方向と 110 秒後の最終粒子分布：Mixing (A)、Displacement (B)、Underfloor Air (C)、Impinging Jet (D)、反対位置 (E)、回転位置 (F)、Stratum (G)、反対位置 (H)、回転位置 (I)

これらの傾向をより定量的に評価するために、図 2.2.3-19(A)に示すように、一定時間の後に気道内に付着する飛沫粒子数の粒径分布を、それぞれの換気システムに対して示す。“Underfloor Air”および“Impinging jet”換気では、比較的遅い空気の流れにより呼吸領域で飛沫が長時間滞留するため、粒子吸入が多くなることがわかる。人体の位置を変化させることで“Impinging jet”換気は飛沫吸入を減少させることができるが、位置に大きく依存する。ここでテストした換気システムの中では、“Displacement”換気が飛沫吸入を最小限に抑えた。

さらに換気システムの性能を確認するために、次の指標を計算した。一つは、室内空気の滞留時間を測定する無次元値の一般指標「空気齢 (AoA)」であり、0.0 が新鮮な空気で 1.0 が停滞した汚染空気を表す。もう一つは、放出された総粒子数に対する吸入粒子の割合として定義される詳細指標「移動確率 (TB)」である。これらの関係を図 2.2.3-19(B)に示す。”Displacement”、”Impinging Jet”、”Stratum”換気の AoA は相対的に低いが、TB の最小値は Displacement”換気であったため、今回検討を行った換気システムの中では、”Displacement”換気が飛沫感染リスク低減の観点で一番期待できると考え、最適化を行うモデルの候補として選定した。

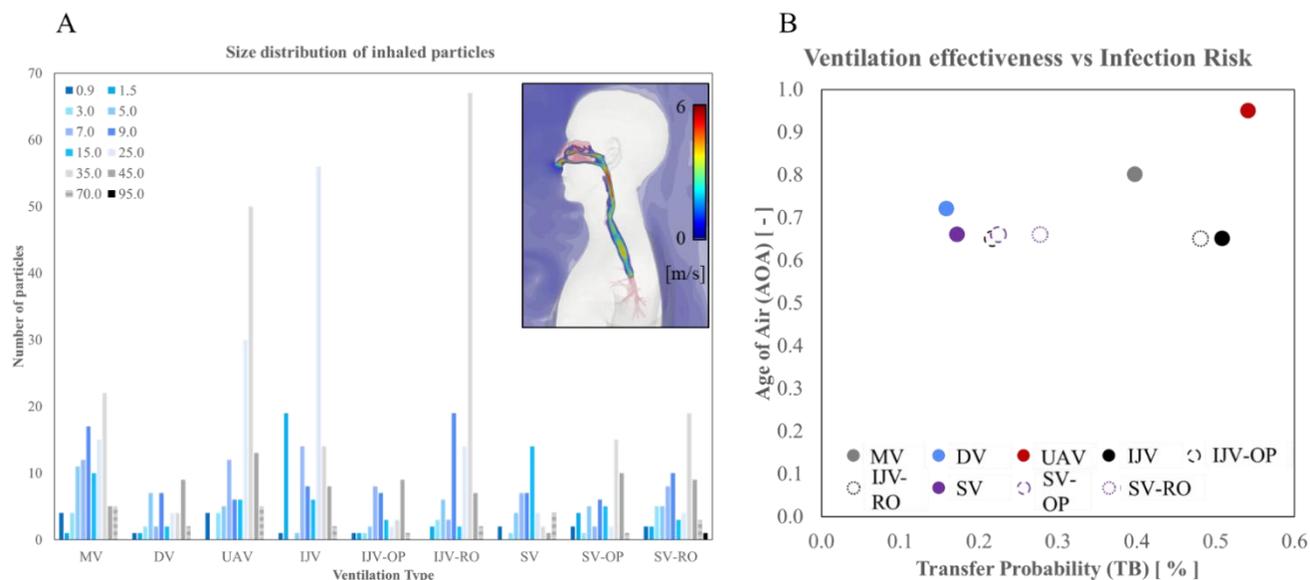


Figure 2.2.3-19 Inhaled particle number distribution against particle diameter(A), and “Age of air”(AOA) against “Transfer Probability (TB)(B) for different ventilation system and two persons’ location.

#### (b)-4 最適化シミュレーションの実施と多目的最適化フレームワークの改良

前節で選定した Displacement 換気に対して、サブ課題(A)で開発した多目的関数と遺伝的アルゴリズムを用いて、その換気設計の最適化を行った。ここでは簡略化された部屋に 1 つのマネキンのみを使用し、次のパラメータを最適化した：i) 供給入口のサイズ ii) 排気出口のサイズ iii) 両方の位置 (図 2.2.3-20 に示す)。

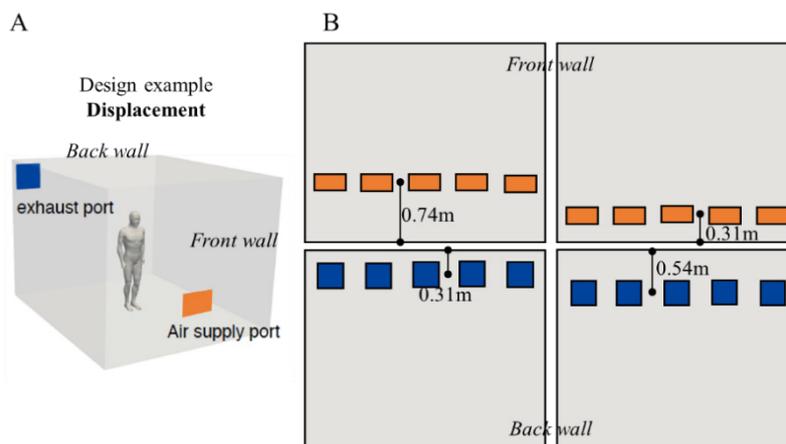


Figure 2.2.3-20 簡略化された Displacement 換気された部屋の設計 (A)、供給/排気口の位置 (B)

本年度は、来年度以降の本格的最適化に向けた実施可能評価として、基礎検証を行った。目的関数の一つは室内の飛沫感染リスクとする。ここでは簡易なリスク評価手法として、床から高さ 1.5~1.8 メートルの室内空気吸入空間内の時間平均ウイルス密度を飛沫感染リスクの指標とする。もう一つの目的関数は、空調のエネルギー電力消費とする。結果のハイパーボリュームが 2 世代連続で変わらなかったときに収束と見なし、6 世代までの進化計算を進めた。この場合の様々な換気位置に対する消費電力と感染リスクの比較を図 2.2.3-21(A)に示す。

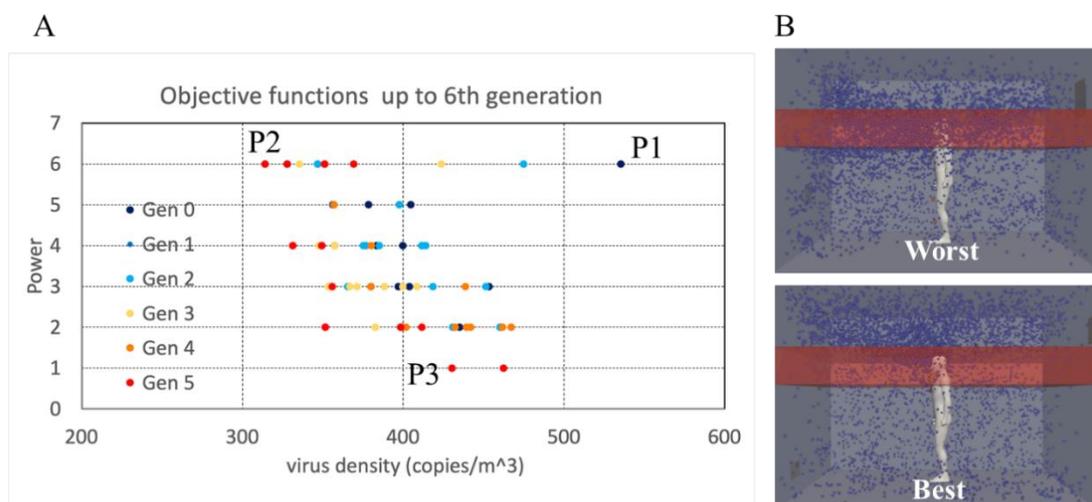


Figure 2.2.3-21 (A) 6 世代にわたる電力消費とウイルス密度 (コピー/m<sup>3</sup>) のトレードオフを表すパレートフロント。(B)最適化前の感染リスクが最も高い (上) 場合とパレート曲面上の最も低い (下) 場合の飛沫分布の比較。

この中で、初期個体で一番感染リスクの高かった P1 と、6 世代まで進化計算を進めて得られたパレート曲面上で一番感染リスクの低かった P2 において、室内での飛沫の飛散の様子を示す。P2 では P1 と同じ消費電力で、ウイルス密度を 50%減少させることを実現している。

参考文献

[3-1] Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, Kenji Tani, Kiao Inthavong, Kazuhide Ito, In silico

- decongested trial effects on the impaired breathing function of a bulldog suffering from severe brachycephalic obstructive airway syndrome, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 228 (2023) 107243  
(doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107243)
- [3-2] Cong Li, Sung-Jun Yoo, and Kazuhide Ito, Impact of Indoor Ventilation Efficiency on Acetone Inhalation Exposure Concentration in Respiratory Tract, *Building Simulation*, 16, 427–441 (2023)  
(doi.org/10.1007/s12273-022-0954-4)
- [3-3] Sung-Jun Yoo, Akira Kurokawa, Kazuhiko Matsunaga, and Kazuhide Ito. Spatial distributions of airborne transmission risk on commuter buses: Numerical case study using computational fluid and particle dynamics with computer-simulated persons, *Experimental and Computational Multiphase Flow*, Volume5, pp304-318 (2023)  
(doi.org/10.1007/s42757-022-0146-6)
- [3-4] Kazuki Kuga, Ryusei Kizuka, Nguyen Dang Khoa, Kazuhide Ito, Effect of transient breathing cycle on micro and nanoparticles depositions on respiratory walls, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 236 (2023) 107501  
(doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107501)
- [3-5] Nguyen Dang Khoa, Sixiao Li, Nguyen Lu Phuong, Kazuki Kuga, Hidetake Yabuuchi, Keiko Kan-o, Koichiro Matsumoto, Kazuhide Ito. Computational Fluid-Particle Dynamics modeling of ultrafine to coarse particles deposition in the human respiratory system, down to the terminal bronchiole, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 237 (2023) 107589  
(doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107589)
- [3-6] Hanyu Li, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito. Visual prediction and parameter optimization of viral dynamics in mucus milieu of upper airway based on CFPD-HCD analysis, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 238 (2023) 107622  
(doi.org/10.1016/j.cmpb.2023.107622)
- [3-7] Islam Abouelhamd, Kazuki Kuga, Sung-jun Yoo, Kazuhide Ito. Identification of Probabilistic Size of Breathing Zone during Single Inhalation Phase in Semi-Outdoor Environmental Scenarios, *Building and Environment*, 243 (2023) 110672  
(doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110672)
- [3-8] Takumi Nishihara, Hanyu Li, Kazuki Kuga, and Kazuhide Ito. Seamless numerical analysis of transient infectious droplets dispersion and inhalation exposure - in silico study, *Building and Environment*, 244 (2023) 110748  
(doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110748)
- [3-9] Sung-jun Yoo, Shori Yamauchi, Hyun-Gyu Park, Kazuhide Ito. Computational Fluid and Particle Dynamics Analyses for Prediction of Airborne Infection/Spread Risks in Highway Buses: A Parametric Study, *Fluids* 2023, 8(9), 253  
(doi.org/10.3390/fluids8090253)
- [3-10] Yukun Wang, Jingnan Sun, Meng Zhao, Alicia Murga, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito, Zhengwei

Long. Numerical study of indoor oil-mist particle concentration distribution in industrial factory using the Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian methods, *Fluids* 2023, 8(10), 264  
(doi.org/10.3390/fluids8100264)

[3-11] Kazuki Kuga, Sara Hoshiyama, Pawel Wargocki, and Kazuhide Ito. A pilot numerical study of odourant transport from an indoor environment to the olfactory region during sensory evaluations following ISO 16000-28, *Building and Environment*, 245 (2023) 110868  
(doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110868)

[3-12] Nguyen Dang Khoa, Kazuki Kuga, Kiao, Inthavong, Kazuhide Ito. Coupled Eulerian Wall Film-Discrete Phase model for predicting the respiratory droplets generation during the coughing event, *Physics of Fluids*, 35, 112103 (2023)  
(doi.org/10.1063/5.0174014)

#### (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」

##### (a) 研究成果の要旨

令和 5 年度は、圧縮機、燃焼器、タービンの統合シミュレーション (LES、簡易形状本計算および詳細形状本計算) を継続して実施するとともに、そのフラッシュバック、燃焼振動、エミッションの予測可能性評価を行った。また、3次元直接数値計算 (DNS) により、水素、アンモニア乱流燃焼機構の調査および乱流燃焼モデルの精度検証を行った。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示した。また、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。

In this fiscal year, LES based integrated simulations of a compressor/combustor/turbine assembly of a gas turbine was performed using both simplified (coarse grids) and detailed (fine grids) configurations, and the validities for predicting flashback, combustion instabilities and emissions were examined. In addition, the turbulent combustion mechanism and its modelling for hydrogen and ammonia was 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 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.

##### (b) 本研究の内容

###### (b)-1 ガスタービンシミュレーション

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]。

###### 1. 計算対象

図 2.2.4-1 に、対象とした川崎重工業株式会社の産業用ガスタービンエンジンを示す。これまで、ガスタ

ービンエンジンを構成する圧縮機、燃焼器、タービンをそれぞれ単独で解析した後、圧縮機、燃焼器、タービンを統合した解析を進めてきた。2023年度はこれまでの解析に基づいて、NOx エミッションおよび将来のカーボンフリー燃焼の検討のため、天然ガスと水素の混焼解析を実施した。また、詳細解析として、30億要素の解析を実施した。簡易形状解析で用いたメッシュの節点数は約0.9億、要素数は約4.1億であり、詳細解析で用いたメッシュの節点数は約7.0億、要素数は33億である。

## 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た Flamelet Generated Manifold (FGM)法[4-3]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：

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_j) = 0 \quad (2.2.4-1)$$

運動量保存方程式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.2.4-2)$$

混合分率輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{z}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{z} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \widetilde{D_z} \frac{\partial \tilde{z}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{zj}}{\partial x_j} \quad (2.2.4-3)$$

反応進行度変数輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{c} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \widetilde{D_c} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{cj}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \widetilde{W_c} \quad (2.2.4-4)$$

エンタルピー輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \frac{\lambda}{c_p} + \frac{v_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) \quad (2.2.4-5)$$

NO 輸送式：

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{NO} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \widetilde{D_{Y_{NO}}} \frac{\partial \tilde{Y}_{NO}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial q_{Y_{NO}j}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \widetilde{W_{NO}} \quad (2.2.4-6)$$

ここで、上付きの $\bar{\cdot}$ は LES フィルタを表し、 $\tilde{\cdot}$ 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[4-4]。産業用ガスタービンエンジンの解析条件を表 2.2.4-1 に示す。

## 3. 計算成果

本章では簡易形状解析（4億要素）の結果を3-1、3-2、3-3節に示し、詳細形状解析（33億要素）の結果を3-4節に示す。3-1節には流れ場、燃焼場の結果を、3-2節はNOxエミッションを、3-3節は水素、天然ガスの混焼解析の結果を示す。なお、3-1節、3-2節で用いた燃料は天然ガスである。

Table 2.2.4-1 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次オイラ陰解法
時間刻み	$1.0 \times 10^{-6}$ 秒
壁面の条件	速度：対数則 温度：断熱
流入条件	圧力固定(全圧 0.1MPa)
流出条件	圧力(全圧 0.1MPa)、流量固定(8.2kg/秒)
回転数	22,000rpm
燃料	都市ガス 13A
酸化剤	空気
流入ガス	酸化剤：15°C、0.1MPa、8.0kg/s 燃料：25°C、1MPa パイロット： $1.1 \times 10^{-3}$ kg/s メイン：0.1kg/s 追焚き： $2.8 \times 10^{-2}$ kg/s

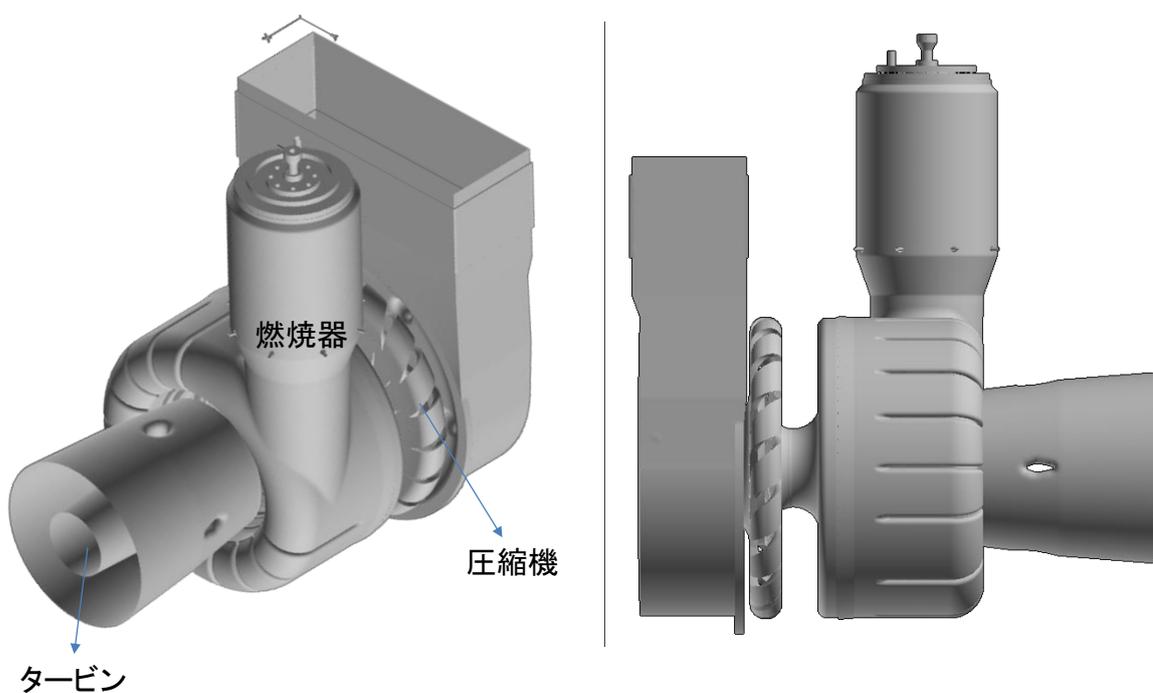


Fig. 2.2.4-1 Industrial gas turbine.

### 3-1 流れ場および燃焼場

図 2.2.4-2 に圧縮機 1 段目の流れ場、図 2.2.4-3 に圧縮機 2 段目の流れ場、図 2.2.4-4 に燃焼器内の流れ場、燃焼場、図 2.2.4-5 にタービンの流れ場を示す。圧縮機 1 段目の様子から、圧縮機 1 段目は正しく解けていると考えられる。一方、圧縮機 2 段目の様子から、一部マッハ数が 1 に近いところが出ており、引き続き解析を進める上で、注意しながら解析を進める必要があると考えられる。また、燃焼器内の燃焼場の様子から、燃焼器下部の領域に燃焼ガスが充満している状況ではないことがわかる。さらに、タービン内の温度、圧力が周方向に均一になっていない原因は燃焼ガスがタービンに到達していないことが挙げられる。本解析のタービン部の初期条件は圧力、温度ともに燃焼ガスの温度、圧力に基づき定めているが、成分(混合分率および反応進行度で定義)は空気とした。従って、燃焼計算開始後のガスの流入により、周方向に不均一な分布となったと考えられる。以上から、燃焼ガスがエンジン出口に到達するまでは引き続き解析を継続する必要がある。

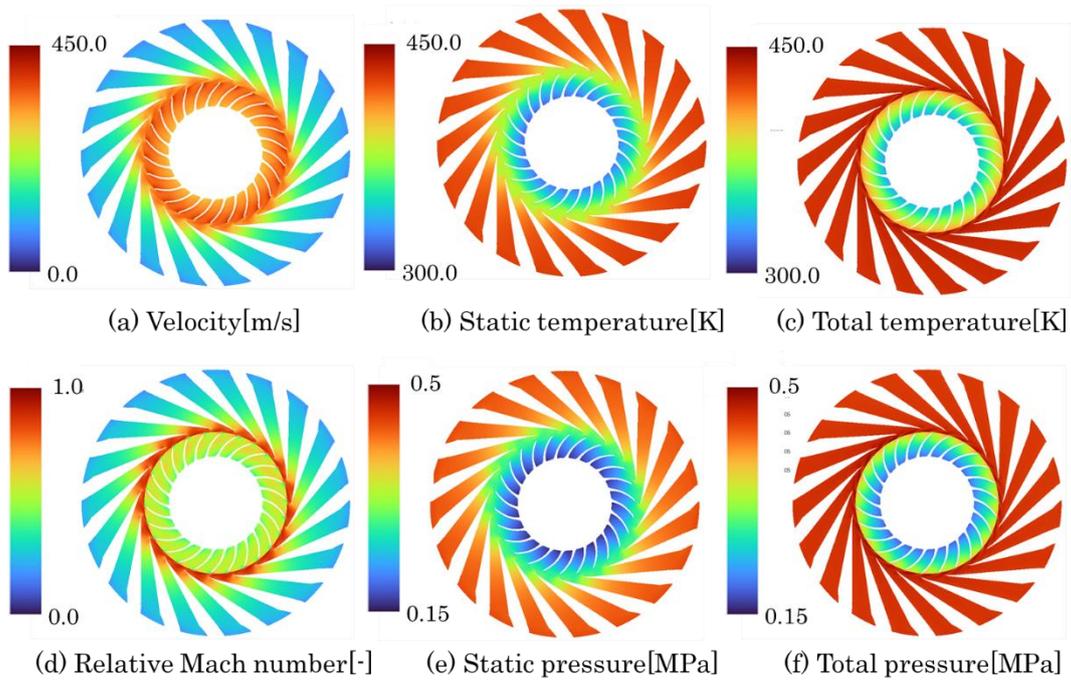


Fig. 2.2.4-2 Instantaneous distributions of velocity, temperature, Mach number, pressure in 1st stage of compressor.

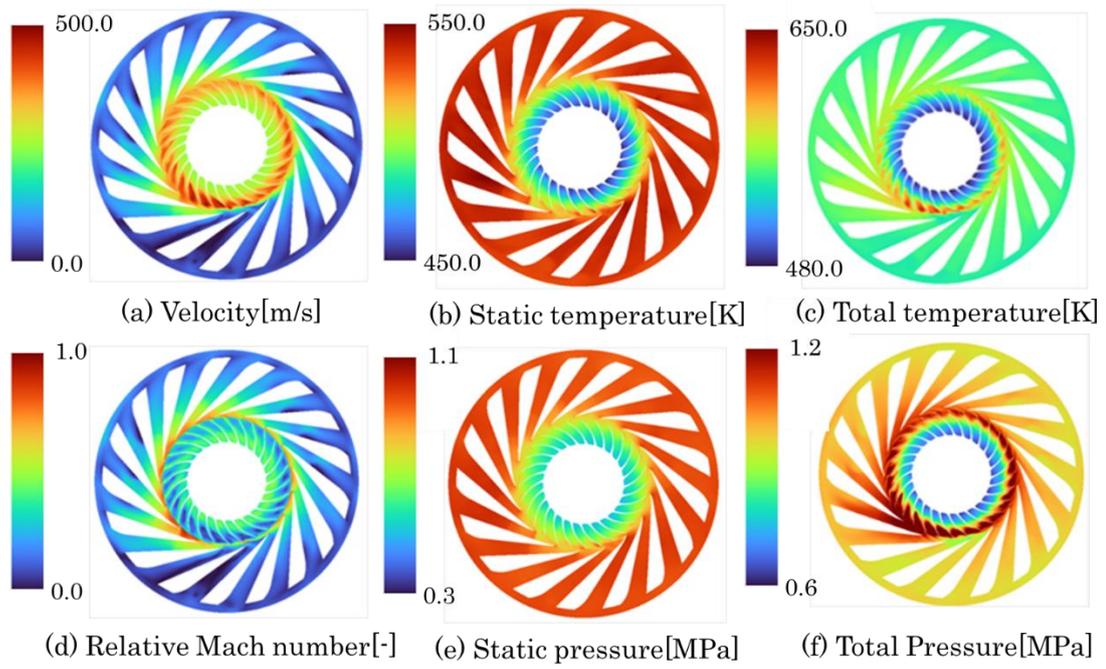


Fig. 2.2.4-3 Instantaneous distributions of velocity, temperature, Mach number, pressure in 2nd stage of compressor.

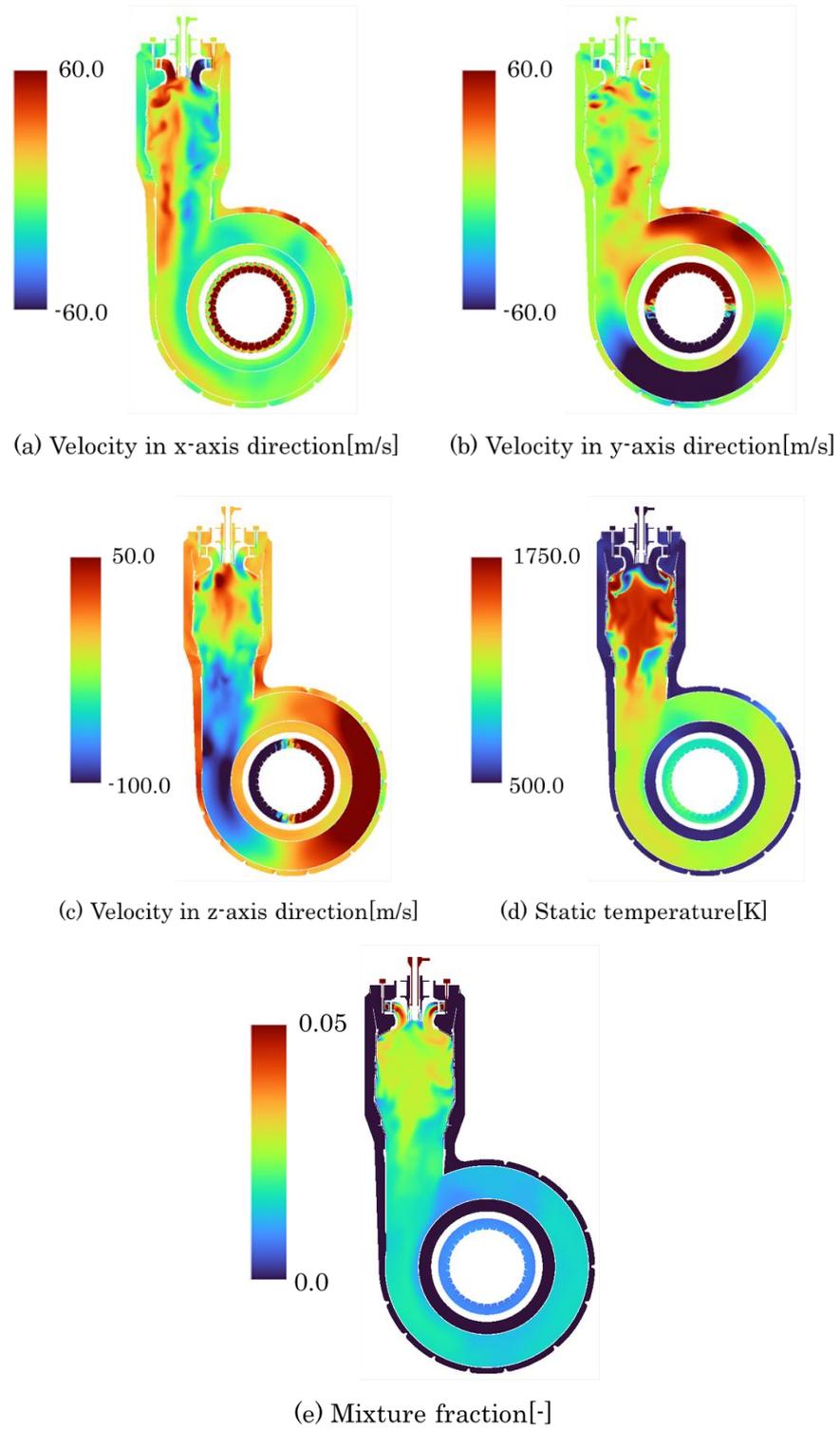


Fig. 2.2.4-4 Instantaneous distributions of velocity, temperature, mixture fraction on a cross section of combustor.

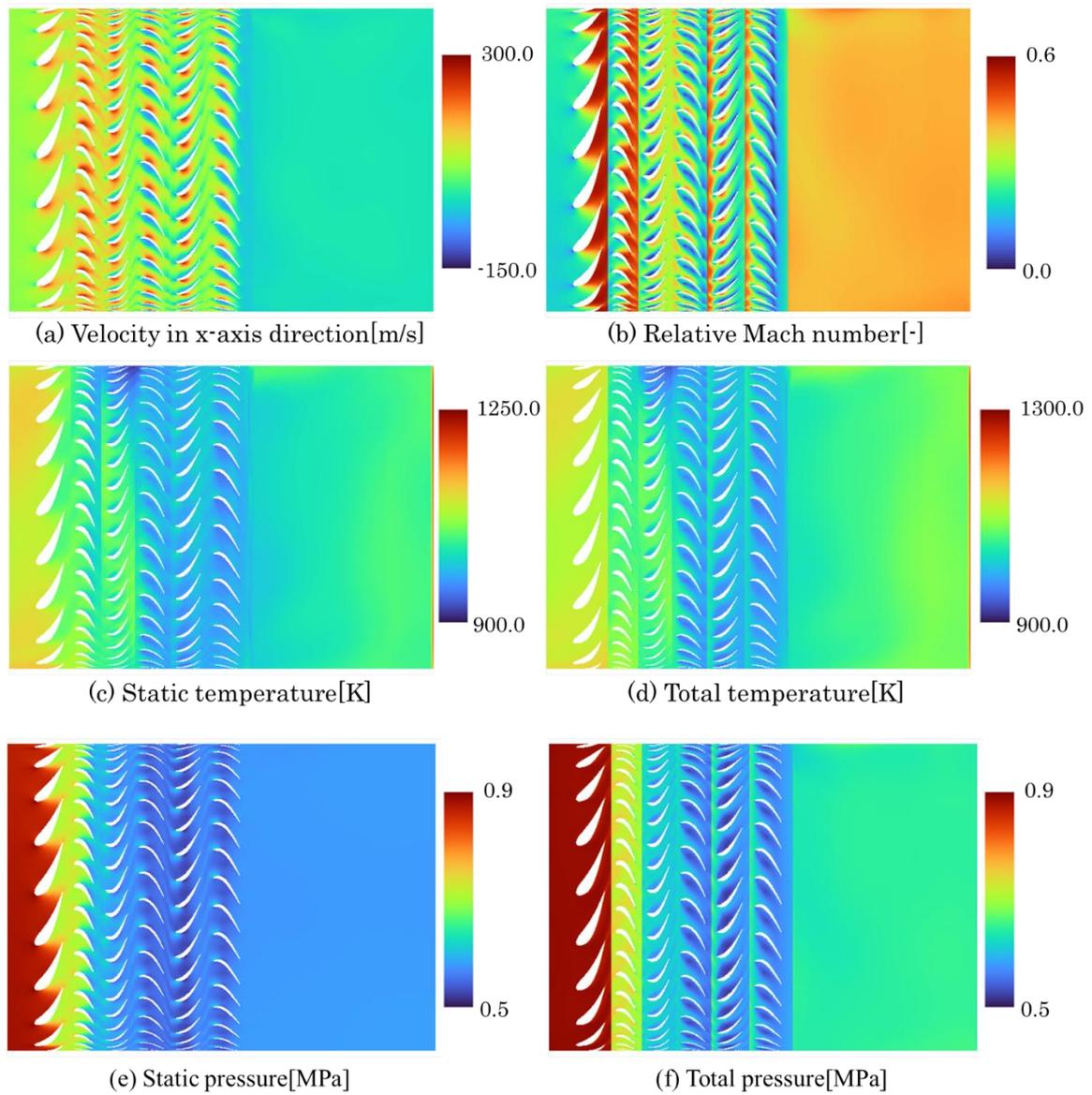


Fig. 2.2.4-5 Instantaneous distributions of velocity, pressure, temperature on a cross section of rotational axis of turbine.

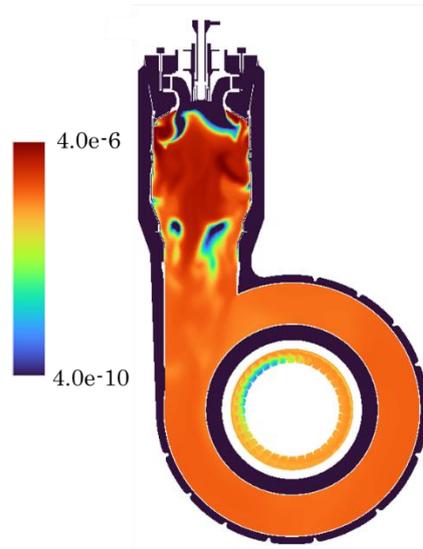


Fig. 2.2.4-6 Instantaneous distributions of mass fraction of NO on a cross section of combustor.

### 3-2 NO<sub>x</sub> エミッション

本章では式(2.2.4-6)に基づく NO 生成および輸送式に基づき、予想される NO 生成を評価する。ここでは出口面での値は評価せず、燃焼器中心軸を通る断面の瞬時の NO の質量分率で NO 生成を評価する。図 2.2.4-6 に燃焼器中心軸断面の NO の質量分率を示す。温度の上昇に伴って、NO 濃度も急激に上昇し、その値はわずかに低下しながら下流へと進むことがわかる。

### 3-3 カーボンフリー燃料（水素）の導入

ここでは、カーボンフリー燃料に向けた、水素混焼ガスを燃料とする定格条件での統合シミュレーションの結果、および燃焼器単体格子を用いたフラッシュバックや燃焼振動の検証結果を示す。表 2.2.4-2 に、解析条件を示す。燃料は、水素 30%、都市ガス 13A 70%とする水素混焼燃料である。

図 2.2.4-7 に、定格条件での統合シミュレーションで得られた、燃焼器の中心を通る断面の速度、混合分率、温度、およびガス質量分率の瞬間分布を示す。この図から、圧縮機からの空気と燃料の混合と混合ガスが燃焼器内に流入し、燃焼する様子が確認できる。都市ガス専焼に比べて、水素混焼では、より燃焼速度の速い水素が含まれていることから、火炎が安定していることがわかる。また、生成ガスの CO<sub>2</sub> 濃度が低下し、H<sub>2</sub>O 濃度が増加することも確認できる。

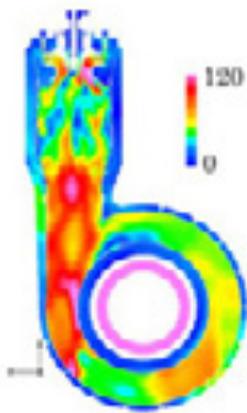
図 2.2.4-8 ~ 2.2.4-10 に、燃焼器単体シミュレーションで得られた、燃焼器の中心を通る断面の温度、混合分率、および速度の時間変化を示す。本計算では、疑似的に、定格条件からメイン燃料流量を倍増させ、追い炊き燃料を 1/10 に減少させることにより、フラッシュバックの予測可能性について検討した。時間経過とともに、燃焼器上流部の燃料濃度（混合分率）が上昇することがわかる。燃料濃度の上昇に伴い火炎温度が上昇、また、火炎長さが短くなり、計算開始から 9msec 後には、火炎の先端が予混合管内に遡上することがわかる。火炎の遡上に伴い、予混合管へ流れる空気の流入が閉塞され、予混合管上流まで火炎が逆流することがわかる。フラッシュバックが起こることにより、一時的に、予混合管への空気流入量が低下し、上流での燃料濃度が非常に高くなっていたが、その後、予混合管への空気流量が回復し、次第に燃料濃度が下がることがわかる。一方で、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。この状態は、予混合管を焼損する可能性があり危険であると考えられる。

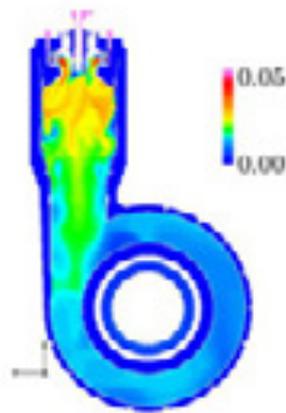
今後の解析では、ガスタービン全体解析で、フラッシュバックおよび燃焼振動解析を行い、それら物理現象がガスタービン全体に及ぼす影響を予測する予定である。

Table 2.2.4-2 Numerical conditions for combustor.

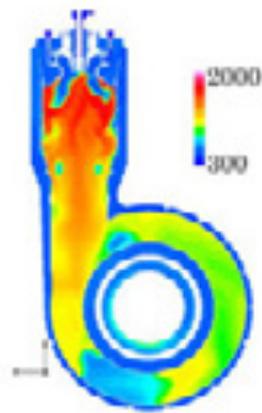
乱流モデル	LES(標準スマゴリンスキモデル)
移流項の補間法	2次精度風上
時間積分法	1次オイラ陰解法
時間刻み	$1.0 \times 10^{-6}$ 秒
壁面の条件	速度：対数則 温度：断熱
燃料	水素混焼ガス：水素 30% 都市ガス 13A 70%
酸化剤	空気
流入条件	定格解析（統合シミュレーション）： 酸化剤：348°C、1MPa、7.4kg/s 燃料：25°C、1MPa パイロット： $1.1 \times 10^{-3}$ kg/s メイン：0.1kg/s 追焚き： $2.8 \times 10^{-2}$ kg/s フラッシュバック解析（燃焼器単体解析）： 酸化剤：348°C、1MPa、7.4kg/s 燃料：25°C、1MPa パイロット： $1.1 \times 10^{-3}$ kg/s メイン：0.1⇒0.2kg/s 追焚き： $2.8 \times 10^{-2}$ ⇒ $2.8 \times 10^{-3}$ kg/s



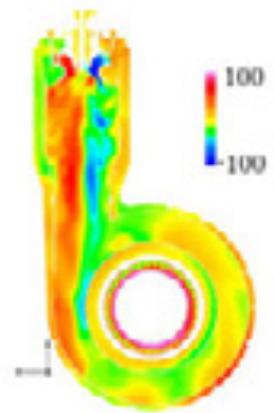
(a) Velocity [m/s]



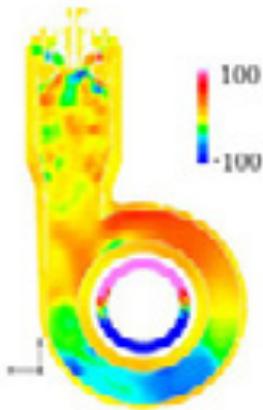
(b) Mixture fraction [-]



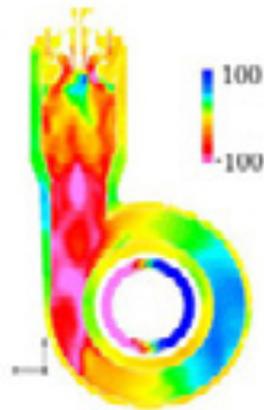
(c) Temperature [K]



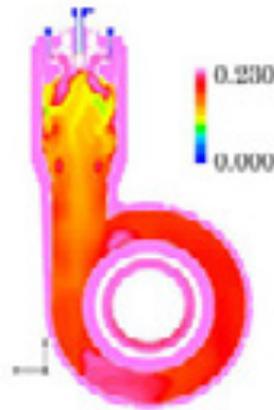
(d) Velocity, U [m/s]



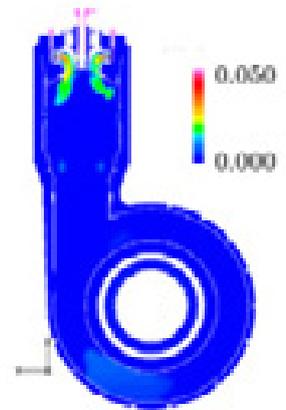
(e) Velocity, V [m/s]



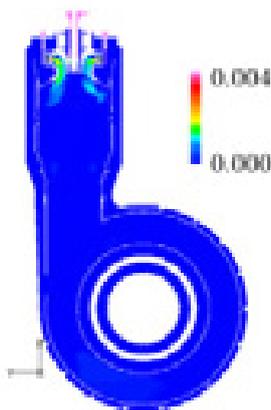
(f) Velocity, W [m/s]



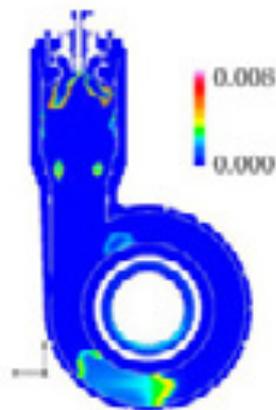
(g) Y O<sub>2</sub> [-]



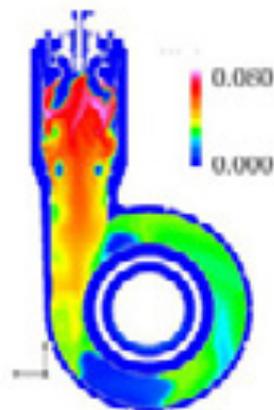
(h) Y CH<sub>4</sub> [-]



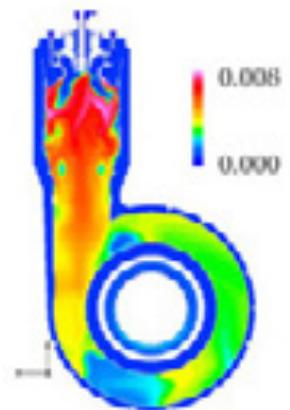
(i) Y H<sub>2</sub> [-]



(j) Y CO [-]



(k) Y CO<sub>2</sub> [-]



(l) Y H<sub>2</sub>O [-]

Fig. 2.2.4-7 Instantaneous distributions of velocity, density, temperature mixture fraction, species mass fractions on a cross section of combustor.

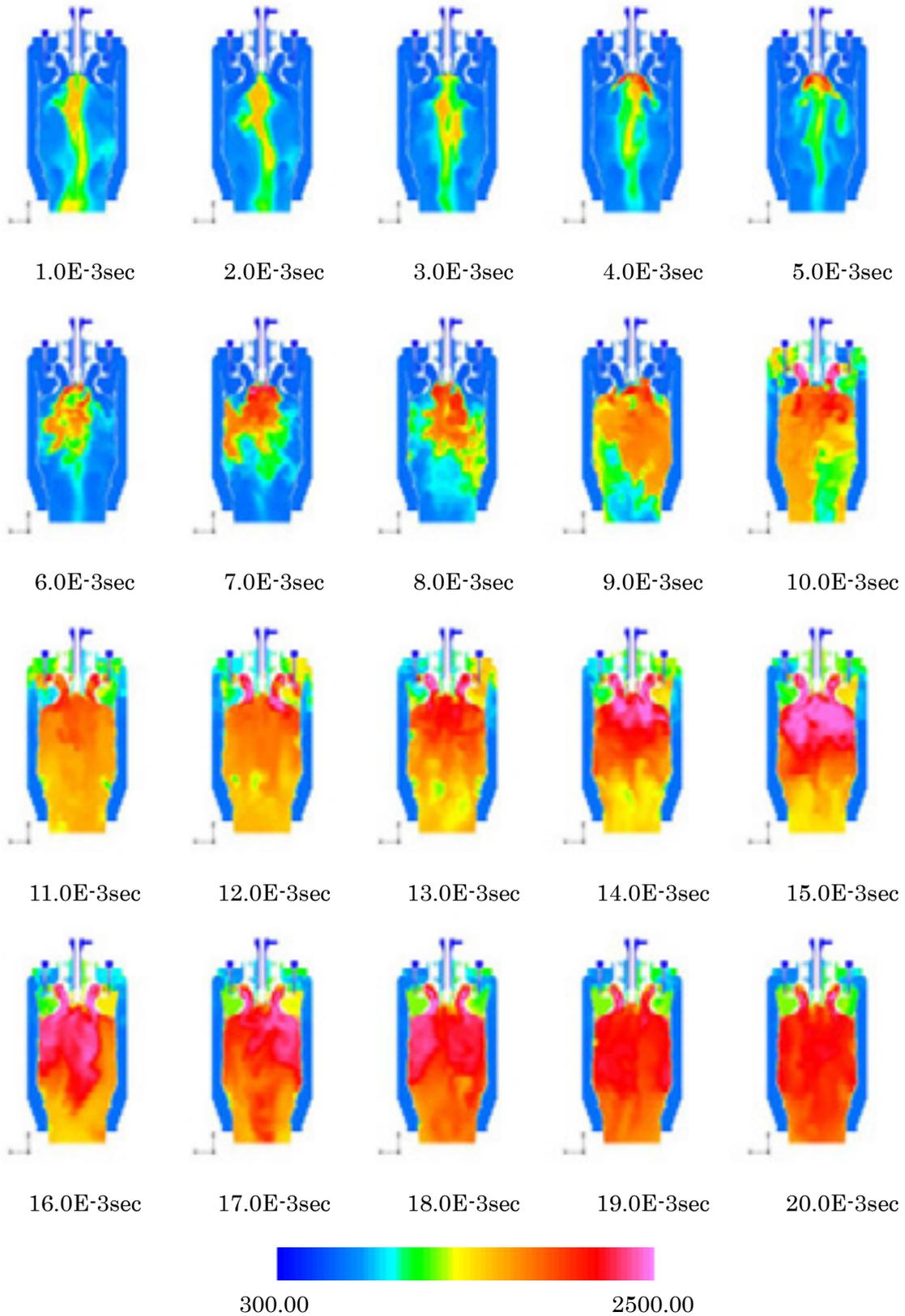


Fig. 2.2.4-8 Time elapse of temperature distribution on a cross section of combustor for a flashback simulation.

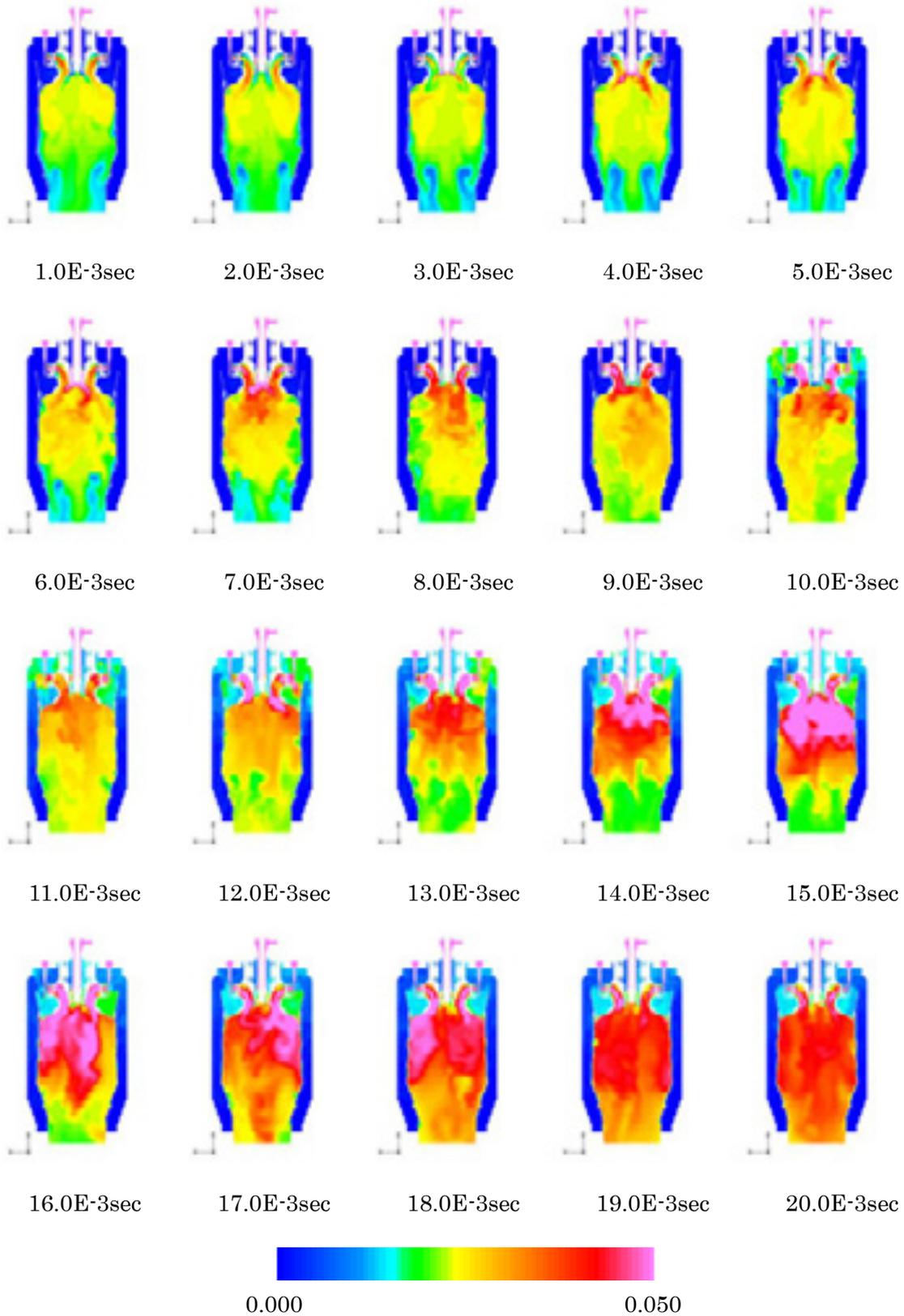


Fig. 2.2.4-9 Time elapse of mixture fraction distribution on a cross section of combustor for a flashback simulation.

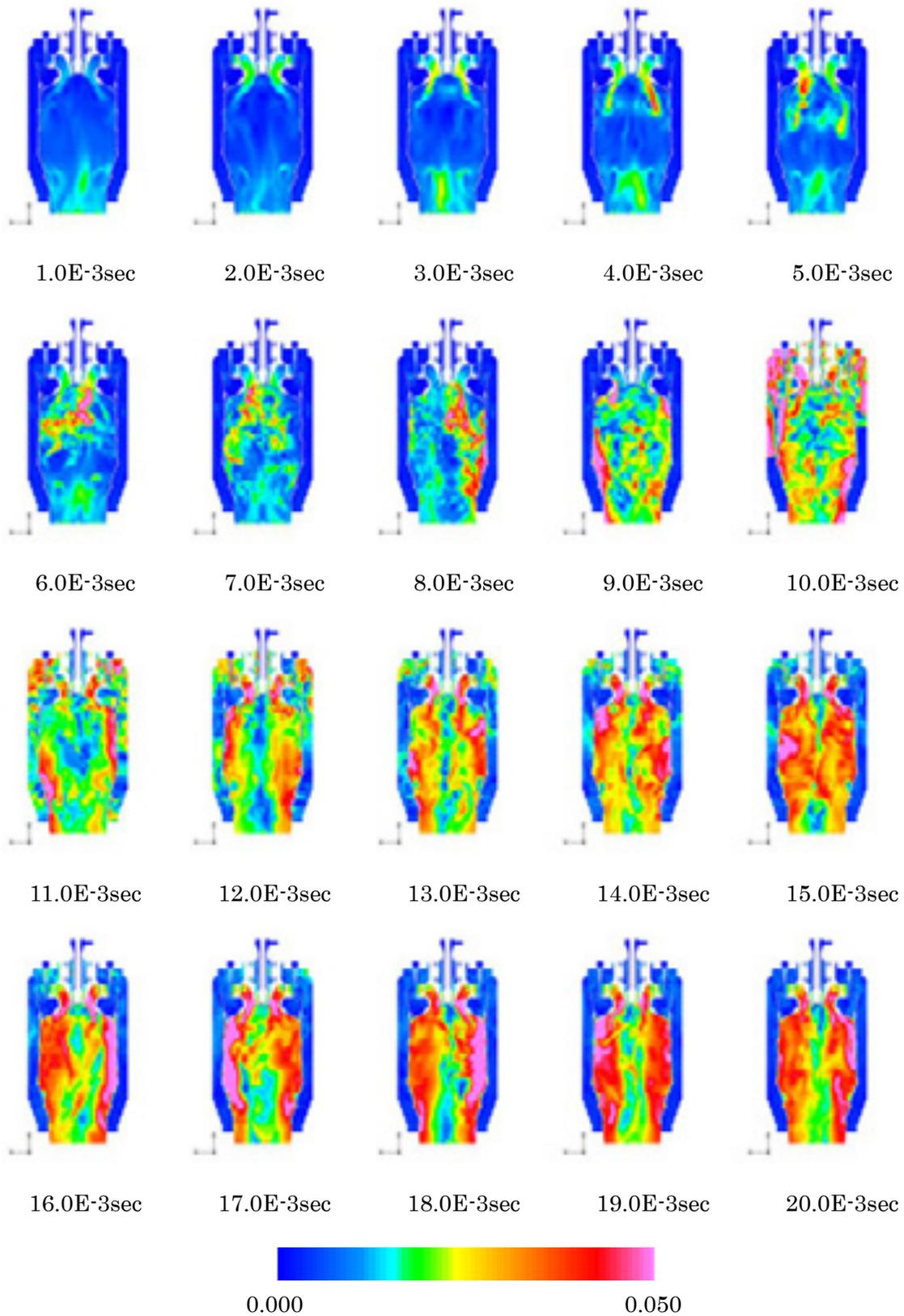


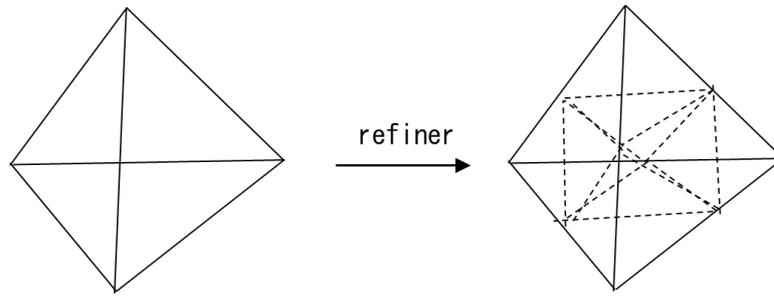
Fig. 2.2.4-10 Time elapse of velocity distribution on a cross section of combustor for a flashback simulation.

### 3-4 詳細形状の計算

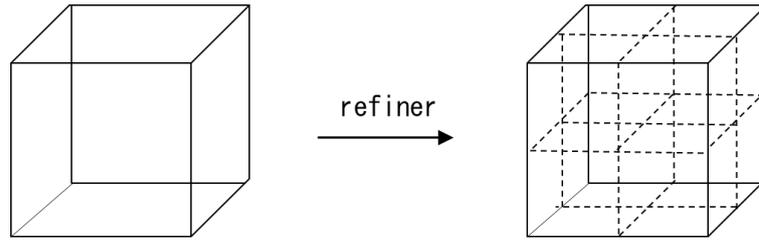
詳細形状のメッシュ生成、計算結果について整理する。詳細形状の計算のためのメッシュはメッシュャーで作ることはせず、3-3 節までの簡易形状解析で用いたメッシュをリファインすることで構築する。四面体要素および六面体要素のリファインの様子を図 2.2.4-11 に示す。具体的な方法を以下に示す。四面体では、各要素の頂点と各要素の辺の中点と重心とから、8 個の四面体にリファインされる。すなわち、リファイン前の頂点とこの頂点を通る 3 本の辺に定義される中点から成り立つ 4 個とこれらと同じ組み合わせの中点とリファイン前の重心とで頂点を構成する四面体 4 個とにリファインされる。六面体ではリファイン前の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。メッシュリファイン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。詳細形状解析の解析条件を表 2.2.4-3 に示す。詳細形状の解析条件と簡易形状解析の解析条件の違いは時間刻みのみであり、詳細形状解析の時間刻みはメッシュサイズを鑑み、簡易形状解析の 1/2 とした。

この条件のもと解析を行った圧縮機およびタービンの回転軸を通る断面の静温、全温、静圧、全圧を図 2.2.4-12 に示す。本解析は簡易形状解析も含め、流れ場が準定常状態に至るまで多大な時間を要することが分かっている。詳細形状解析では、設定した時間刻みから、1 並列領域あたりの要素数が同等でも 2 倍の計算時間を要する。すなわち、要素数が 8 倍となっていることから、同じ実時間で詳細形状解析と簡易形状解析の結果を比較しようとした場合、詳細形状解析で必要となるノード時間は単純計算で簡易形状解析に対して 16 倍のノード時間を要する。また、簡易解析(0.9 億節点/19200 並列)では 1 領域あたりの最大節点数は 7000 程度である。FFR では現状 100,000 並列が上限となっており、簡易解析と同等の計算速度を実現するためには、300,000 並列程度の計算の実現が求められる。

以上から、計算資源の節約、1 ステップあたりの計算速度の観点から、詳細形状解析を効率的に進めるための方法の導入が今後の課題となる。なお、計算資源を抑制する方法として、**mapping** の適用が検討される。すなわち、十分解析の進んだ簡易形状解析の結果を⑤の **postfflow** により、④で生成された **fine mesh**(=リファインされたメッシュ)のデータに埋め込む。リファインされたメッシュは、リファイン前のメッシュと図 2.2.4-11 からわかるように、関連付けられる。⑤の **postfflow** はあるメッシュの計算結果をそのメッシュからリファインされた 8 個のメッシュにリスタートデータとして当てはめる。



(a) Split a tetrahedral mesh by refiner.



(b) Split a hexahedral mesh by refiner.

Fig. 2.2.4-11 Refined tetrahedral or hexahedral mesh with refiner included FrontFlow/red.

Table 2.2.4-3 Numerical conditions for industrial gas turbine engine with refinement mesh.

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次オイラ陰解法
時間刻み	$5.0 \times 10^{-7}$ 秒
壁面の条件	速度：対数則 温度：断熱
流入条件	圧力固定(全圧 0.1MPa)
流出条件	圧力(全圧 0.1MPa)、流量固定(8.2kg/秒)
回転数	22,000rpm
燃料	都市ガス 13A
酸化剤	空気
流入ガス	酸化剤：15°C、0.1MPa、8.0kg/s 燃料：25°C、1MPa パイロット： $1.1 \times 10^{-3}$ kg/s メイン：0.1kg/s 追焚き： $2.8 \times 10^{-2}$ kg/s

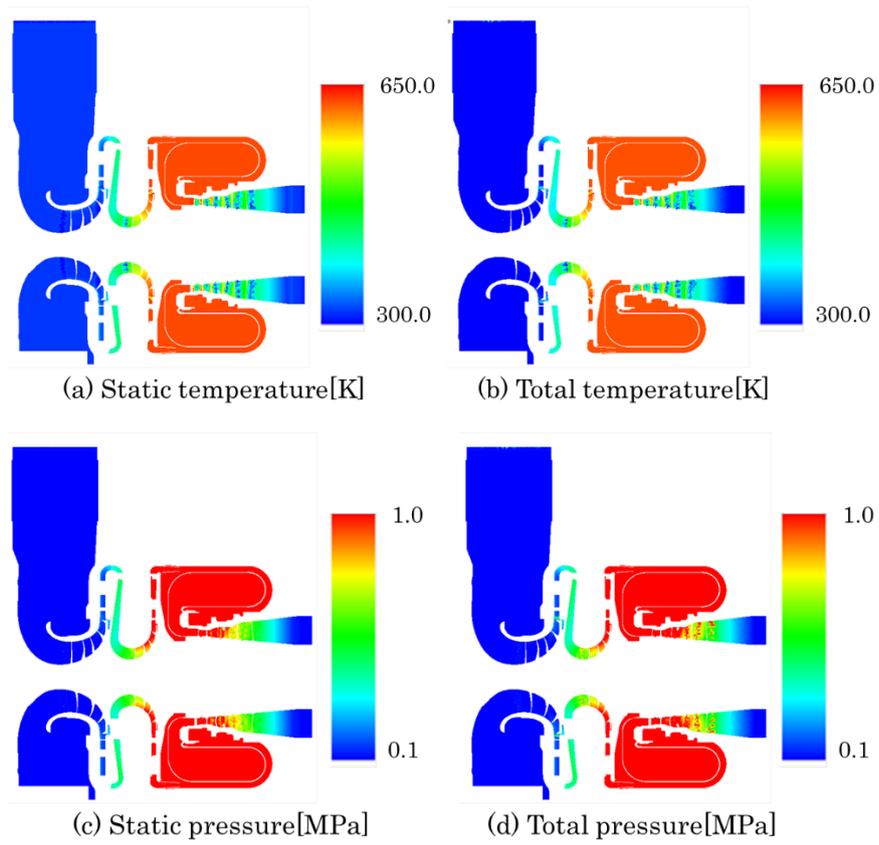


Fig. 2.2.4-12 Instantaneous distributions of temperature, pressure on a cross section of rotation axis.

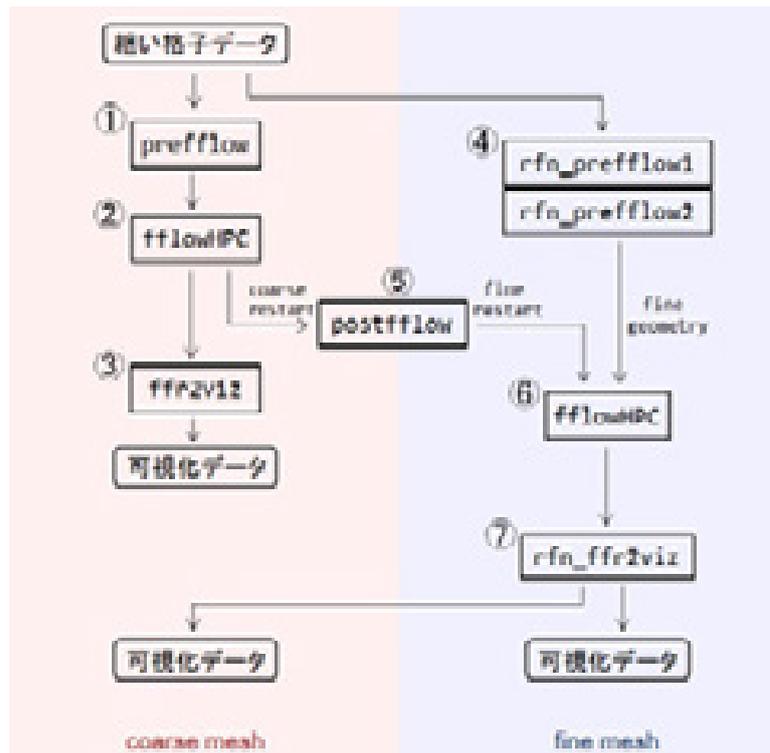


Fig. 2.2.4-13 Flow chart of mapping coarse mesh data to fine mesh data.

#### 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を対象に、約 0.9 億節点、約 4.1 億要素の簡易形状メッシュ、および約 7.0 億節点、約 33 億要素の詳細形状メッシュにより、LES を実施した。燃焼モデルには、対象の燃焼形態を考慮し、Flamelet Generated Manifold (FGM)法を採用した。この結果、簡易形状解析については、圧縮機内の流れ場、燃焼器内の流れ場と燃焼場、およびタービン内の流れ場の様子を確認するとともに、NO 生成および将来のカーボンフリー社会への寄与を目的に水素と天然ガスとの混焼解析が可能であることを実証した。しかし、現状では、燃焼ガスが出口まで到達しておらず、解析を継続して実施中である。また、今後、統合シミュレーションにおける燃焼器内でのフラッシュバックおよび燃焼振動の影響を確認するために、燃焼器単体を対象に、フラッシュバックが起こり得る条件での模擬解析を実施し、条件を疑似的に調整すればフラッシュバックが起こりうることを確認した。

#### (b-2) 水素、アンモニア乱流燃焼の 3 次元シミュレーション

水素-アンモニア混焼条件において、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 次元乱流混合層を対象に直接数値計算 (DNS) による検討を行った。本解析では、京都大学開発のインハウスコード FK<sup>3</sup> を用いて行った[4-5]。

##### 1. 計算対象

アンモニアは輸送や貯蔵の観点から水素よりもハンドリングが容易であり、水素エネルギーキャリアとして期待される一方、低い着火性及発熱量が課題として挙げられている。そこで本研究では、アンモニア利用技術の形態として、燃焼前アンモニア改質水素の利用を想定し、水素-アンモニア混焼燃焼を対象と

した。アンモニア改質後のガス組成が体積分率で水素：窒素が 3：1 になることを想定し、燃料組成を体積分率で、水素：アンモニア：窒素が 0.45：0.40：0.15 と設定した。計算領域は、基礎的な燃焼特性を分析するのに適する 3 次元乱流混合層とした。図 2.2.4-14 に、計算領域を示す。

## 2. 計算方法、モデル、条件

本研究では、3 次元直接数値計算 (DNS) により計算を行う。支配方程式は、質量、運動量、エネルギー、および化学種質量分率の各保存式、状態方程式、Lewis 数 1 近似から導かれる混合分率輸送方程式、および反応進行変数輸送方程式から構成される[4-6]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.4-7)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} \quad (2.2.4-8)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \alpha \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} - \sum_k \left( h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) \right) - \rho \sum_k (h_k Y_k V_{k,j}) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (2.2.4-9)$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_k}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_{k,j} Y_k) + \rho \dot{\omega}_k \quad (2.2.4-10)$$

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Z}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_Z \frac{\partial Z}{\partial x_j} \right) \quad (2.2.4-11)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_C \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \rho \dot{\omega}_C \quad (2.2.4-12)$$

$$p = \rho RT \quad (2.2.4-13)$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $u$ は流速、 $t$ は時間、 $p$ は圧力、 $\tau$ は粘性応力テンソル、 $h$ は比エンタルピー、 $\alpha$ は熱拡散率、 $Y$ は化学種質量分率、 $V$ は拡散速度、 $\dot{\omega}$ は生成速度、 $Z$ は混合分率、 $C$ は反応進行変数、 $k$ は化学種を表す。ただし、反応進行変数の定義は  $\text{H}_2$  と  $\text{H}_2\text{O}$  の質量分率の合計とした。

化学種  $k$  の拡散速度については、次式に基づいて計算する。

$$\nabla X_i = \sum_{j=1}^N \left( \frac{X_i X_j}{D_{i,j}} \right) (V_j - V_i) \quad (2.2.4-14)$$

ここで、 $X_k$ は化学種  $k$  の体積分率、 $D_{i,j}$ は  $i$  化学種と  $j$  化学種の 2 成分系拡散係数である。本研究では、まず式(2.2.4-14)の詳細拡散を考慮するケースと、Lewis 数 1 の近似を施すケースを比較する。Lewis 数の定義は次式による。

$$Le_k = \frac{\alpha}{D_k} \quad (2.2.4-15)$$

計算領域は、前述の通り  $0.0216 \text{ m} \times 0.0252 \text{ m} \times 0.0128 \text{ m}$  の矩形領域を  $864 \times 1,008 \times 512$  の均一な正方格子（格子幅  $25\mu\text{m}$ ）で分割した。初期条件として、鉛直方向に3分割し、中層に燃料（幅  $0.0018 \text{ m}$ ）を、上層と下層に空気を配置し、燃料層には平均的に水平方向に  $80 \text{ m/s}$  を、空気層には  $-80 \text{ m/s}$  を与え、乱流混合層が形成されるようにした。また、初期流速には3次元空間に一様等方性乱流場を作成し[4-6,4-7]、計算領域へインポートした。乱流の条件としては、乱れ強さ  $u' = 4.0 \text{ m/s}$ 、乱流渦の積分スケール  $L_{11} = 0.6 \text{ mm}$  とした。着火のため、燃料層と空気層の間に Flamelet library における既燃条件のごく薄い層（幅  $0.0005 \text{ m}$ ）を配置した。用いる化学反応メカニズムには、Jiang らの 19 化学種 60 素反応で構成されるものを採用した[4-8]。

計算条件は前述の通り、式(2.2.4-14)の詳細拡散を考慮するケース（DD）と、Lewis 数 1 の近似を施すケース（ULN）の2ケースを比較する。これにより、詳細な拡散流束を考慮する DD と Lewis 数 1 近似を用いる ULN の差異を確認した上で、DD について燃焼特性の詳細を調べる。

DNS には、圧力ベースの半陰解法コード FK<sup>3</sup>[4-5]を用いた。運動量保存式の対流項には保存型 4 次精度中心差分を、スカラー保存式のそれには WENO5 スキームを、各拡散項には 4 次精度中心差分を用いた。時間積分には 3 次精度陽的 TVD Runge-Kutta 法を用いた。化学反応計算の常微分方程式には VODE 法を用いた。計算は 9,216 コア並列計算により実施し、時間刻み  $1.0 \times 10^{-8} \text{ s}$  にて 5,400 ステップまで計算した。

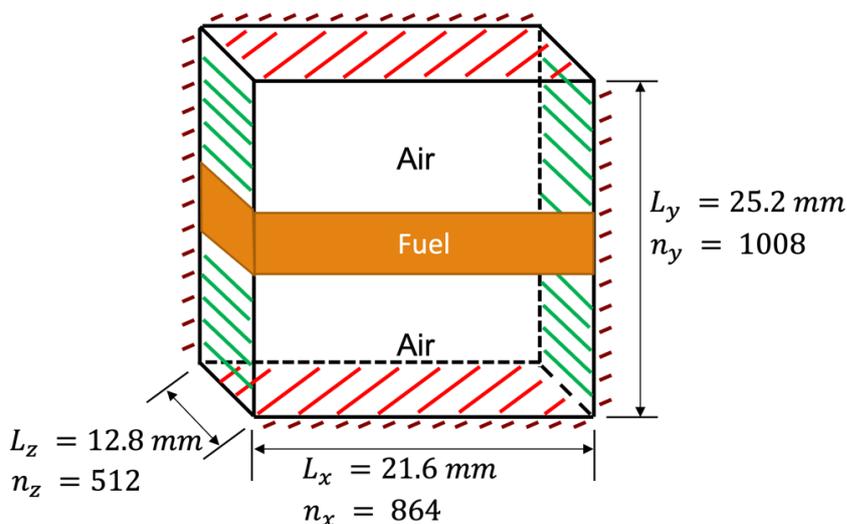


Fig. 2.2.4-14 Computational domain of 3D DNS .

### 3. 計算成果

図 2.2.4-15 に、DD と ULN のガス温度の瞬間分布を示す。図より、DD のガス温度は ULN のそれに比べて高いことがわかる。計算を続けていくと、ULN は消炎に至ることがわかった。図 2.2.4-16 に火炎面の曲率とスカラー消散率について、DD と ULN のスキャタープロットを示す。ただし、曲率は次式で定義する。

$$\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n} \quad (2.2.4-16)$$

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla Z}{|\nabla Z|} \quad (2.2.4-17)$$

ULN は混合分率の勾配が大幅に大きく、スカラー消散率が高くなる傾向にある。ULN では、水素の拡散は熱拡散率に比べてはるかに低いオーダーで発生すると考えられることから、水素拡散の非効率性が全体の拡散プロセスを妨げることにより、混合分率の勾配が大きくなるものと考えられる。この Lewis 数 1 近似がガス温度を過小評価する可能性があることは、例えば Han らの検討[4-12]でも報告されている。

ここからは火炎が維持される DD について、火炎面形状と選択拡散の関係について調べる。図 2.2.4-17 に DD における水素とアンモニアの火炎面における曲率と拡散角度の関係について示す。図中の黒線は平均値である。なお、拡散角度は次式に従って計算した。

$$\theta_J = \cos^{-1}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}) \quad (2.2.4-18)$$

$$\mathbf{j} = \frac{J_i \hat{i} + J_j \hat{j} + J_k \hat{k}}{|J|} \quad (2.2.4-19)$$

図より、曲率がゼロの付近に拡散角度の大きな箇所が存在するが、曲率が正や負の領域においてもある程度の拡散角度をもつものが存在することがわかる。また、最も頻出するものは若干正側に現れることがわかる。

図 2.2.4-18 に DD における水素とアンモニアの火炎面における曲率と質量分率の勾配角度の関係について示す。図中の黒線は平均値である。なお、勾配角度は次式に従って計算した。

$$\theta_Y = \cos^{-1} \left( \mathbf{n} \cdot \frac{\nabla Y}{|\nabla Y|} \right) \quad (2.2.4-20)$$

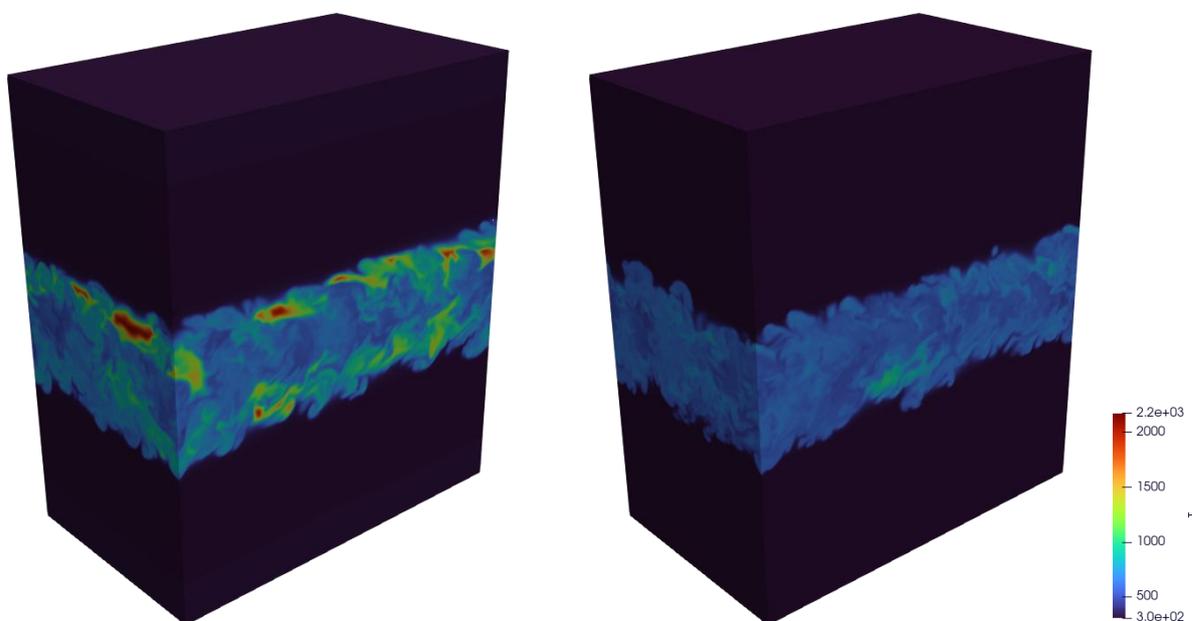
図より、曲率がゼロの付近に勾配の角度の大きな箇所が存在することがわかる。特に水素では、曲率が正や負の領域においてもある程度の勾配の角度をもつものが存在することがわかる。また、最も頻出するものは若干正側に現れることがわかる。

図 2.2.4-19 に DD における水素とアンモニアの火炎面における質量分率の勾配角度と拡散流束の角度との関係について示す。図中の黒線は平均値である。図より、いずれの化学種においても正の相関が見られるが、その傾向は水素の方がより顕著であることがわかる。また、いずれの化学種においても、若干拡散流束の角度の方が質量分率の勾配の角度よりも大きな値を取ることがわかる。

図 2.2.4-20 に DD における水素とアンモニアの火炎面におけるスカラー消散率と火炎面に垂直方向と接線方向の拡散流束の比との関係について示す。図中の黒線は平均値である。図より、いずれの化学種においても、垂直方向と接線方向の拡散流束の比は正の値をもつことがわかる。また、スカラー消散率の小さな領域においてより大きな比をもつこと、頻度が高いのはゼロから 20 程度であることがわかる。

本研究において、DD に比べて ULN はガス温度を過小評価し消炎に至るなど、顕著に異なる燃焼特性を

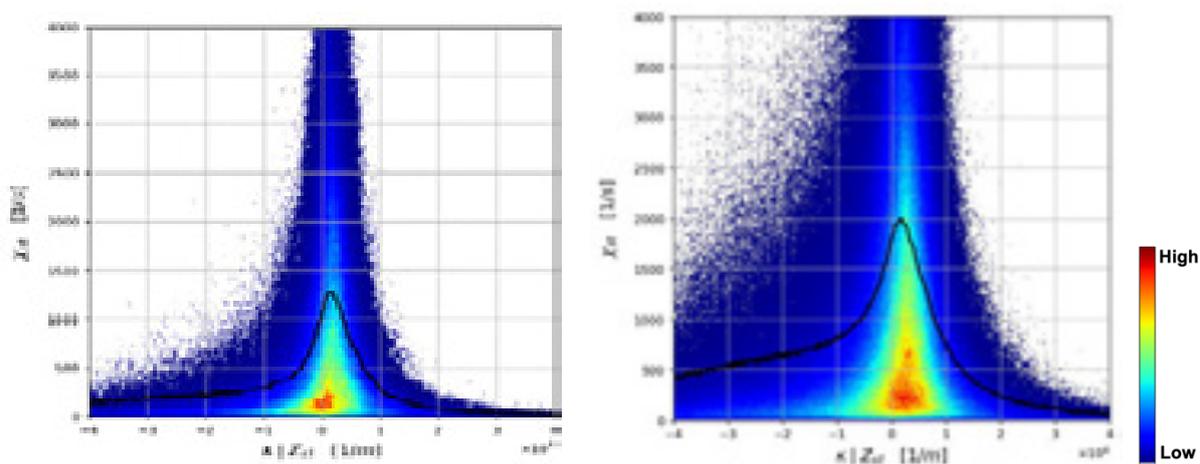
示すことが明らかとなった。また、DDにおいて、火炎面の形状と拡散流束の関係について詳細に分析を行ったところ、水素およびアンモニアの双方の化学種において、混合分率の勾配に対する接線方向が作用している様子が観察された。こうした挙動を正確に捉えるため、今後はより高精度な手法について、その適用性を検討していく必要がある。



(a) Detailed diffusion

(b) Unity Lewis number

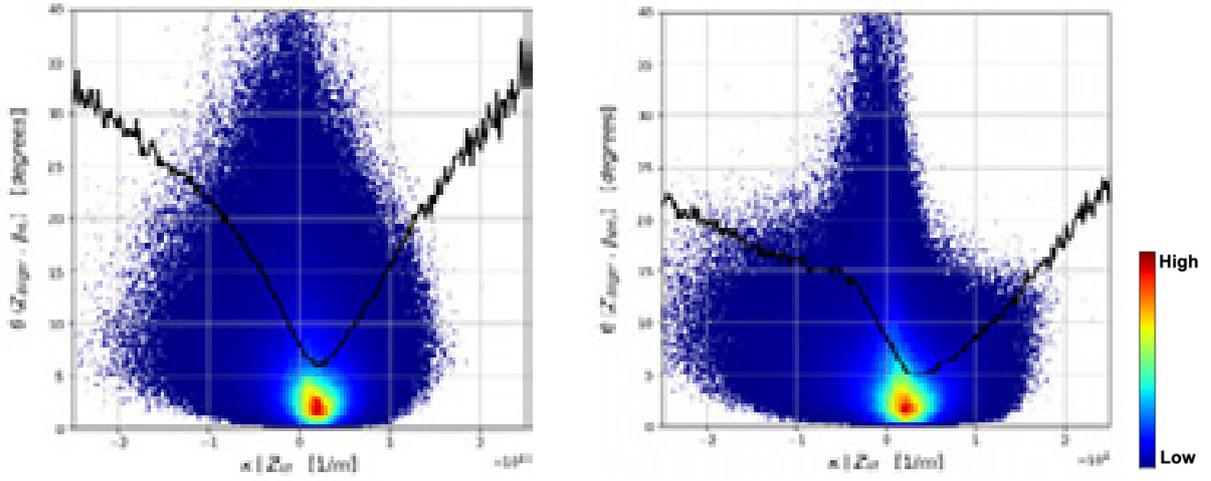
Fig. 2.2.4-15 Instantaneous temperature distributions for (a) detailed diffusion case and (b) unity Lewis number case



(a) Detailed diffusion

(b) Unity Lewis number

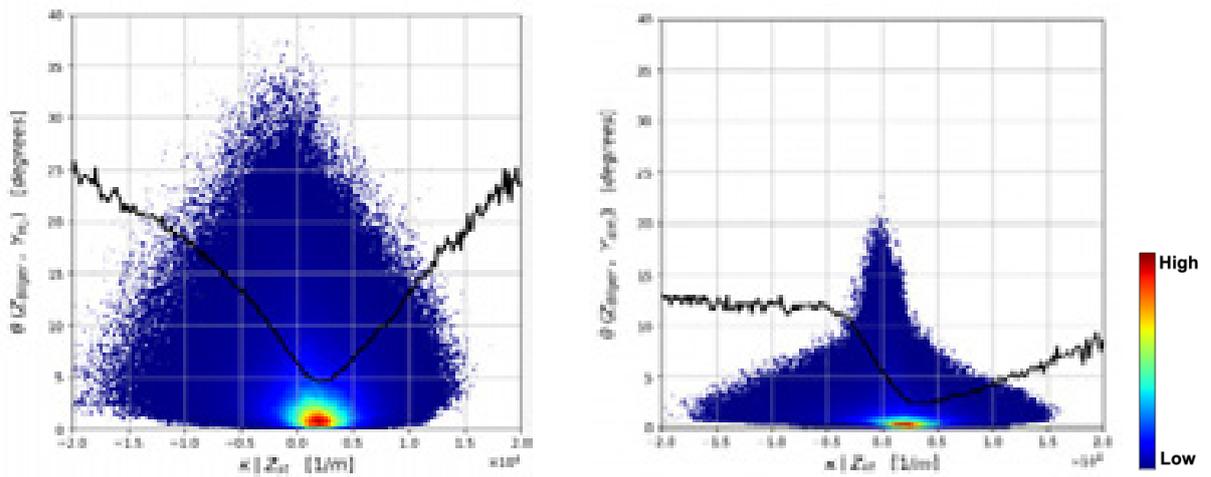
Fig. 2.2.4-16 Scatter plots of scalar dissipation rate vs curvature on flame surface for (a) detailed diffusion case and (b) unity Lewis number case.



(a) Hydrogen

(b) Ammonia

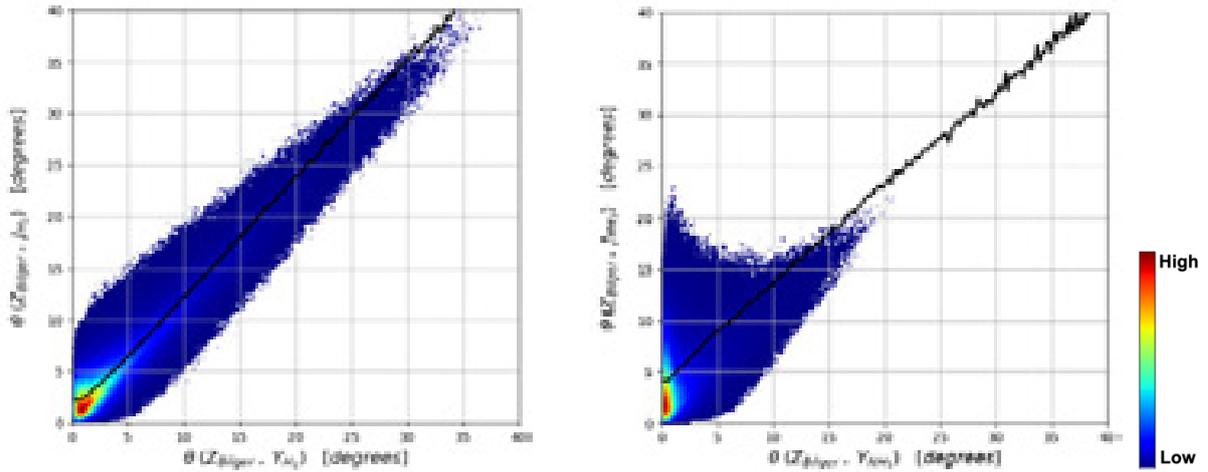
Fig. 2.2.4-17 Scatter plots of correlation between curvature and diffusion angles for (a) hydrogen and (b) ammonia.



(a) Hydrogen

(b) Ammonia

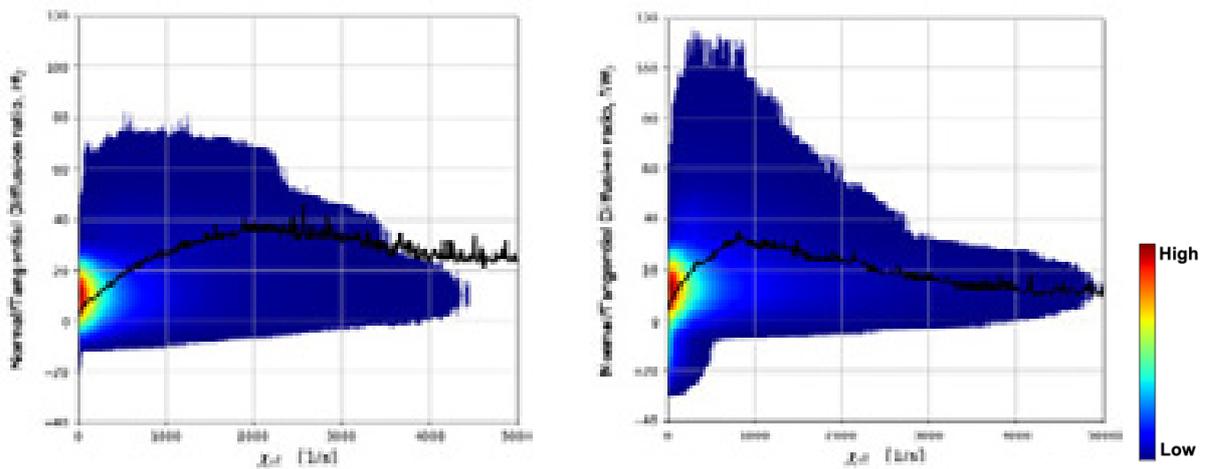
Fig. 2.2.4-18 Scatter plots of correlation between curvature and gradient angles of mass fractions for (a) hydrogen and (b) ammonia.



(a) Hydrogen

(b) Ammonia

Fig. 2.2.4-19 Scatter plots of correlation between gradient angles of mass fraction and diffusion flux for (a) hydrogen and (b) ammonia.



(a) Hydrogen

(b) Ammonia

Fig. 2.2.4-20 Scatter plots of correlation between scalar dissipation rate and normal/tangential diffusion flux ratio for (a) hydrogen and (b) ammonia.

#### 4. まとめ

水素、アンモニア乱流燃焼の厳密な 3 次元数値シミュレーションを行った。この結果、燃焼特性の一端を明らかにし、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] J.A. van Oij, and L.P.H. de Goey, *Combust. Sci. Tech.*, 161, 113-137, (2000).

[4-4] M. M. Rai and N. K. Madavant, *AIAA paper*, No. 88-0361, (1988).

[4-5] About in-house code FK<sup>3</sup>, <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link.php>

[4-6] H. Shehab et al., *Combust. Flame*, 238, 111888, (2022).

[4-7] T. Passot, A. Pouquet, *J. Fluid Mech.*, 181, 441-446, (1987).

[4-8] Y. Jiang et al., *Int. J. Energy Res.*, 44 795-810, (2020).

#### (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 5 年 5 月、8 月、10 月、12 月、令和 6 年 3 月の 5 回開催した。また年度末の令和 6 年 3 月 19 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 5 年 9 月 29 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 5 年 12 月 5 日に開催した。

## 2-3. 活動（研究会の活動等）

令和5年度に実施した研究会やシンポジウム等の開催実績について概要を一覧で記載。

### (1) アウトリーチ活動

年月日	行事
R5.12.5	「富岳」成果創出加速プログラム第7回 HPC ものづくり統合ワークショップ
R5.9.29	第2回スマートデザインプロジェクトワークショップ
R6.2.8	第4回「富岳」高性能シミュレーション技術交流会
R6.3.19	第2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
R5.5.11	第8回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議
R5.8.2	第9回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@京大
R5.10.26	第10回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@九大
R5.12.26	第11回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@理研東京オフィス
R6.3.19	第12回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議@理研 R-CCS

### (3) コンソーシアム活動

年月日	行事
R6.3.29	都市・建築 CFD コンソーシアム 総会
R5.6.23 R5.11.9	HPC を活用した自動車用次世代 CAE コンソーシアム総会
R5.4.28 R5.10.20	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
R5.11.27	サブ課題A サブ課題全体研究打合せ（全1回）
R5.4.20 R5.5.18 R5.5.25 R5.6.1 R5.6.8	サブ課題A 最適化打ち合わせ（全29回）

R5.6.22 R5.6.29 R5.7.6 R5.7.13 R5.7.20 R5.7.27 R5.9.14 R5.9.21 R5.9.28 R5.10.12 R5.10.27 R5.11.2 R5.11.16 R5.11.30 R5.12.07 R5.12.14 R5.12.21 R6.1.11 R6.1.25 R6.2.1 R6.2.22 R6.3.6 R6.3.21 R6.3.28	
R5.4.19 R5.5.10 R5.5.18 R5.5.25 R5.6.1 R5.6.8 R5.6.22 R5.6.29 R5.7.13 R5.7.20 R5.7.27 R5.10.12 R5.11.2 R5.11.8	サブ課題A デザイン・空力モデル化打ち合わせ（全27回）

R5.11.16 R5.11.30 R5.12.7 R5.12.14 R5.12.21 R6.1.11 R6.1.18 R6.2.1 R6.2.8 R6.2.22 R6.3.6 R6.3.21 R6.3.28	
R5.7.13 R5.9.25 R5.11.16 R5.1.17	サブ課題 B サブ課題全体研究打合せ（研究連絡会）（全 4 回）
R5.5.29 R5.7.3 R5.8.4 R5.9.7 R5.10.12 R5.11.17 R5.12.20 R6.1.23 R6.2.27 R6.3.22	サブ課題 B 極端気象下の流入条件 WG（全 10 回）
R5.6.22 R5.8.3 R5.9.7 R5.10.10 R5.11.14 R5.12.19 R6.1.25 R6.2.27	サブ課題 B 極端気象下の高層建築物の被災推定 WG（全 9 回）
R5.7.7 R5.8.9 R5.9.22	サブ課題 B 降雨・洪水解析 WG（全 8 回）

R5.10.23 R5.11.27 R6.1.11 R6.2.16 R6.3.27	
R5.6.23 R5.7.28 R4.8.22 R4.9.25 R4.10.25 R4.11.28 R4.12.25 R6.1.30 R6.2.28	サブ課題 B 猛暑時の暑熱リスク WG (全 9 回)
R5.6.6 R5.7.4 R5.8.8 R5.9.7 R5.10.10 R5.11.14 R5.12.18 R6.1.22 R6.2.20 R6.3.26	サブ課題 B 実建物モデルの CFD 耐風設計 WG (全 10 回)
R5.5.17 R5.12.6 R6.1.16 R6.3.13	サブ課題 C サブ課題全体研究打合せ (全 2 4 回)
R5.3.13 R5.4.13 R5.6.21 R5.7.19 R5.8.4 R5.9.6 R5.10.15 R5.11.1 R5.12.20 R6.1.23	サブ課題 D サブ課題全体研究打合せ (全 10 回)

R6.2.19 R.6.3.21	
---------------------	--

#### 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 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 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 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 横浜国立大学大学院	教授 山田貴博 客員教授 田村哲郎
	大阪府東大阪市小若江3-4 -1 近畿大学	教授 道岡武信
	東京都文京区大塚2-1-1 お茶の水女子大学	准教授 河合英徳

	愛知県名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科 土木工学専攻	講師 西口浩司
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 九州大学総合理工学研究院	教授 伊藤一秀
	兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26 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 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 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 九州大学総合理工学研究院	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 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	In silico decongested trial effects on the impaired breathing function of a bulldog suffering from severe brachycephalic obstructive airway syndrome,	Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, Kenji Tani, Kiao Inthavong, <b>Kazuhide Ito</b> ,	Computer Methods and Programs in Biomedicine, 228 (2023) 107243 (doi.org/10.1016/j.cmpb.2022.107243)	2023年
2	The effects of irregular roughness with different surface power spectrums on the heat transfer of natural convection in enclosures	Boqi Ren, Chung-Gang Li, <b>Makoto Tsubokura</b>	International Communications in Heat and Mass Transfer, vol.141, 106581	2023年
3	Direct numerical simulation of vertically heated natural convection over 3D irregular roughness	Boqi Ren, Chung-Gang Li, <b>Makoto Tsubokura</b>	Computers & Fluids, vol. 257, 105866,	2023年
4	A sharp interface immersed boundary method for thin-walled geometries in visous compressible flows	Chung-Gang Li, Rahul Bale, WeiHsiang Wang, Makoto Tsubokura	Internationla journal of mechanical sciences, vol 253(1),108401	2023年
5	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	2023年
6	Nonlinear Reduced-	Kazuto Ando, Keiji	Computers and Fluids, 106047	2023

	Order Modeling for Three-Dimensional Turbulent Flow by Large-Scale Machine Learning	Onishi, Rahul Bale, Akiyoshi Kuroda, Makoto Tsubokura		年
7	Characterizing infection risk in a restaurant environment due to airborne diseases using discrete droplet dispersion simulation	Rahul Bale, ChungGang Li, Hajime Fukudome, Saori Yumino, Akiyoshi Iida, Makoto Tsubokura	Heliyon, 9(10), e20540	2023年
8	LES application to wind pressure prediction for tall building on complex terrain	Mingyu Meng, Tetsuro Tamura, Akira Katsumura, Yoshiyuki Fugo	Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 242, 105582	2023年
9	Impact of Indoor Ventilation Efficiency on Acetone Inhalation Exposure Concentration in Respiratory Tract	Cong Li, Sung-Jun Yoo, and <b>Kazuhide Ito</b>	Building Simulation, 16, 427-441	2023年
10	Spatial distributions of airborne transmission risk on commuter buses: Numerical case study using computational fluid and particle dynamics with computer-simulated persons,	Sung-Jun Yoo, Akira Kurokawa, Kazuhiko Matsunaga, and <b>Kazuhide Ito</b>	Experimental and Computational Multiphase Flow, 2023, 1-15	2023年
11	Effect of transient breathing cycle on micro and nanoparticles depositions on respiratory walls	Kazuki Kuga, Ryusei Kizuka, Nguyen Dang Khoa, <b>Kazuhide Ito</b>	Computer Methods and Programs in Biomedicine, 236(2023) 107501	2023年
12	Computational Fluid-Particle Dynamics modeling of ultrafine	Nguyen Dang Khoa, Sixiao Li, Nguyen Lu Phuong, Kazuki	Computer Methods and Programs in Biomedicine, 237 (2023) 107589	2023年

	to coarse particles deposition in the human respiratory system, down to the terminal bronchiole	Kuga, Hidetake Yabuuchi, Keiko Kan-o, Koichiro Matsumoto, <b>Kazuhide Ito</b>		
13	Visual prediction and parameter optimization of viral dynamics in mucus milieu of upper airway based on CFPD-HCD analysis	Hanyu Li, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	Computer Methods and Programs in Biomedicine, 238 (2023) 107622	2023年
14	Identification of Probabilistic Size of Breathing Zone during Single Inhalation Phase in Semi-Outdoor Environmental Scenarios	Islam Abouelhamd, Kazuki Kuga, Sung-jun Yoo, <b>Kazuhide Ito</b>	Building and Environment, 243 (2023) 110672	2023年
15	Seamless numerical analysis of transient infectious droplets dispersion and inhalation exposure - in silico study	Takumi Nishihara, Hanyu Li, Kazuki Kuga, and <b>Kazuhide Ito</b>	Building and Environment, 244 (2023) 110748	2023年
16	Computational Fluid and Particle Dynamics Analyses for Prediction of Airborne Infection/Spread Risks in Highway Buses	Sung-jun Yoo, Shori Yamauchi, Hyun-Gyu Park, <b>Kazuhide Ito</b>	A Parametric Study, Fluids 2023, 8(9), 253	2023年
17	Numerical study of indoor oil-mist particle concentration distribution in industrial factory using the Eulerian-Eulerian and Eulerian-Lagrangian methods	Yukun Wang, Jingnan Sun, Meng Zhao, Alicia Murga, Sung-Jun Yoo, <b>Kazuhide Ito</b> , Zhengwei Long	Fluids 2023, 8(10), 264	2023年

18	A pilot numerical study of odourant transport from an indoor environment to the olfactory region during sensory evaluations following ISO 16000-28,	Kazuki Kuga, Sara Hoshiyama, Pawel Wargocki, and <b>Kazuhide Ito</b>	Building and Environment, 245 (2023) 110868	2023 年
19	Coupled Eulerian Wall Film-Discrete Phase model for predicting the respiratory droplets generation during the coughing event	Nguyen Dang Khoa, Kazuki Kuga, Kiao, Inthavong, <b>Kazuhide Ito</b>	Physics of Fluids, 35, 112103	2023 年
20	Large-eddy simulation of a lean-premixed hydrogen flame in a low-swirl combustor under combustion instability	J. Nagao, A. L. Pillai, T. Shoji, S. Tachibana, T. Yokomori, R. Kurose	Physics of Fluids, 35, 105124	2023 年
21	Data-driven simulation of ammonia combustion using Neural Ordinary Differential Equations (NODE)	M. Saito, J. Xing, J. Nagao, R. Kurose	Applications in Energy and Combustion Science, 16, 100196	2023 年
22	Heat release rate surrogate for ammonia-hydrogen premixed flames under various conditions	J. Xing, A. L. Pillai, R. Kurose	Applications in Energy and Combustion Science, 15, 100193	2023 年
23	Direct numerical simulation of detonation-turbulence interaction in hydrogen/oxygen/argon mixtures with a detailed chemistry	K. Iwata, S. Suzuki, R. Kai, R. Kurose	Physics of Fluids, 35, 046107	2023 年
24	LES flamelet modeling	R. Kai, T. Tokuoka,	International Journal of	2023

	of hydrogen combustion considering preferential diffusion effect	J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose	Hydrogen Energy, 48, 11086-11101	年
25	Flame self interaction during turbulent boundary layer flashback of hydrogen-rich premixed combustion	U. Ahmed, S. P. Malkeson, A. L. Pillai, N. Chakraborty, R. Kurose	Physical Review Fluids, 8, 023202	2023年
26	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, <b>Kazuhide Ito</b>	Building and Environment, 248 (2024) 111105 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111105)	2023年
27	Aspiration efficiency and respiratory tract deposition of indoor suspended micro-particles during steady and transient breathings	Kazuki Kuga, Ryusei Kizuka, Islam Abouelhamd, <b>Kazuhide Ito</b>	Building and Environment, (2024) 111114 (doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111114)	2023年
28	Numerical study on spherical flame propagation in dispersed liquid ammonia droplets	Z. An, J. Xing, A. L. Pillai, R. Kurose	Fuel, 357, 129660	2023年
29	Large-eddy simulation of a lean-premixed hydrogen flame in a low-swirl combustor under combustion instability	J. Nagao, A. L. Pillai, T. Shoji, S. Tachibana, T. Yokomori, R. Kurose	Physics of Fluids, 35, 105124	2023年
30	飛沫・エアロゾル感染リ	坪倉誠	Precision Medicine, vol.6,	2023

	スク評価の DX		No. 2 (2023)	年
31	データ科学との融合による新たな自動車 CAE の創出	坪倉誠, 中島卓司	自動車技術, vol. 77, No. 10, pp. 4-10 (2023)	2023年
32	燃焼数値シミュレーションの高度化を目指して	黒瀬良一	日本ガスタービン学会誌, 41, 336-339 (2023)	2023年
33	先端技術フォーラム「ガスタービンにおけるデータ活用技術の最前線と今後の展望」	黒瀬良一, 富永純一, 藤沢信道, 菊池亮太, 古川雅人, 伊東正雄, 澤 芳幸, 桜井 旭	日本ガスタービン学会誌, 51, 92-97 (2023)	2023年
34	燃焼シミュレーションの現状と今後の展望,	黒瀬良一	化学工学, 87, 135-137 (2023)	2023年
35	Turning flight simulation with fluid-rigid body interaction for flying car with contra-rotating propellers	Ayato Takii, Ritsuka Gomi, Masashi Yamakawa, Makoto Tsubokura	International Conference on Computational Science (ICCS 2023), pp. 566-577, <a href="https://doi.org/10.1007/978-3-031-35995-8_40">https://doi.org/10.1007/978-3-031-35995-8_40</a> , Lecture notes in computer science, vol. 14073, Springer, Cham. (2023)	2023年
36	Towards improvement of wind resistance and ventilation for layout of buildings using urban LES data	Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura, Masaru Yoshikawa	ICWE16 (2023)	2023年
37	Wind pressure on a building located in high-rise building cluster - Broad region LES for actual building model -	Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura	ICWE16 (2023)	2023年
38	DNS study on the effect of skin friction of over millimeter-sized bubbles in horizontal channel flow	Sangwon Kim, Nobuyuki Oshima, Makoto Tsubokura	14 <sup>th</sup> Ercoftac Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements (ETMM 14)	2023年9月
39	Large-eddy simulation on golf-ball	Makoto Tsubokura, Yuma Matsuki,	14 <sup>th</sup> Ercoftac Symposium on Engineering Turbulence	2023年9月

	aerodynamics with different flight conditions	Ryosuke Ueda, Shota Nishinakagawa, Masahide Onuki, Takahiro Sajima	Modelling and Measurements (ETMM 14)	
40	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, accepted for publication (2024)	2024年
41	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
42	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 (16 pages)	2024年
43	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
44	A semi-implicit pressure-based solver considering real gas effect	S. Wada, R. Kai, R. Kurose	Journal of Computational Physics, 501, 112782	2024年
45	Aeroacoustic investigation of multi-	Chenguang Lai, Yujie Zhu, Liangkui	Physics of Fluids, vol.36, 014118	2024年1月

	directional wings aligned in tandem under wing-in-ground effect	Tan, Zeyu Zhen, Makoto Tsubokura		
46	Droplet dispersion simulation to evaluate airborne virus infection risk in outdoor sports stadiums	Sangwon Kim, Onishi Junya, Bale Rahul, and Makoto Tsubokura	vol. 19(2), JFST0008, Journal of Fluid Science and Technology	2024年3月

2. 国際会議・シンポジウムにおける口頭・ポスター発表

No.	発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名（所属機関）	発表した場所（学会名等）	発表した時期
1	International Standardization of Testing Perceived Air Quality and the supporting information from in silico model for transport efficiency of acetone from indoor to olfactory epithelium cells	<b>Kazuhide Ito (九州大学)</b>	AIVC Tokyo 2023	2023年5月
2	A novel method to compute forced and induced motion of rigid body based on monolithic Eulerian fluid-structure interaction scheme and immersed boundary method 口頭	Tokimasa Shimada ( KobeUni ) , Koji Nishiguch (NagoyaUni) , Rahul Bale ( <b>Riken/ KobeUni</b> ) , Shigenobu Okazaw (YamanashiUni) , Makoto Tsubokura ( <b>Riken/ KobeUni</b> )	X International Conference of Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED 2023)	2023年6月
3	Real-world vehicle aerodynamics simulation on the supercomputer “Fugaku” towards	Makoto Tsubokura ( <b>Riken/ KobeUni</b> )	Fahrzeug- Aerodynamik - Neue Chancen und Herausforderungen	2023年6月

	digital twins 口頭		durch Elektromobilität und CO2- Gesetzgebung	
4	Multi-Objective aerodynamic shape optimization for an SUV car considering the properties of proportion and silhouette 口頭	Takuji Nakashima, Gentaro Hamada, Keigo Shimizu, Yusuke Nakamura, Akira Oyama, Kohei Seo, Takenori Hiraoka, Takahide Nouzawa, Makoto Tsubokura	ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division(AJKFED 2023)	2023 年 7 月
5	Optimization of air conditioning system of railway coach 口頭	Naveen Kumar Chahel, Nobuyuki Oshima, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division (AJKFED 2023)	2023 年 7 月
6	Droplet dispersion simulation for evaluating the risk of airborne virus infection in an outdoor sport stadium environment 口頭	Sangwon Kim, Junya Onishi, Rahul Bale, Makoto Tsubokura	ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division (AJKFED 2023)	2023 年 7 月
7	Investigating the efficacy of displacement ventilation in removing indoor air contaminants: The role of ventilation flow rate and inlet-outlet arrangement, 口頭	Rahul Bale, Haruhito Yamamoto, Alicia Murga Aquino, Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura	ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division (AJKFED 2023)	2023 年 7 月
8	A study of suitable takeoff motion of a ski jumper using principal component analysis and computational fluid dynamics	Shin Ikeda, Keizo Yamamoto, Makoto Tsubokura	XXIX Congress of International Society of Biomechanics (ISB)	2023 年 8 月

	口頭			
9	Rethinking different ventilation strategies in a post-pandemic era: a CFD assessment 口頭	Alicia Murga Aquino, Kazuhide Ito, Makoto Tsubokura	43 <sup>rd</sup> Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC)	2023年10月
10	「燃焼数値シミュレーションの現状と展望 ～スーパーコンピュータ「富岳」を如何に使うか～」	黒瀬良一 (京都大学)	第60回石炭科学会議, 京都リサーチパーク	2023年10月
11	Smart Design in the Society 5.0 Era by Combining HPC and AI, Wissensaustausch-Workshop 口頭	<b>Makoto Tsubokura</b> (Riken/ KobeUni)	Machine Learning 9	2023年11月
12	Ventilation Efficiency and Infection Control - in silico Human Modelling Study	Kazuhide Ito (九州大学)	International Symposium on Urban Sustainability (ISUS), University of Gävle, Sweden	2023年11月
13	極端気象下の都市・建築減災をめざしたDXの展開	田村哲郎	第16回スーパーコンピューティング技術産業応用シンポジウム	2023年12月
14	Predicting Wind Damage in a City During a Typhoon: A Meteorological Model/LES Approach 口頭	Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura	76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, APS	2023年
15	Digital Twin for biosafety cabinet to reproduce performance and filed certification test specified by NSF/ANSI 49-2019 口頭	Ryota Muta, <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023年

16	Investigation of ultrafine particle deposition in human airway to the 9th generation of bronchial tubes using computational fluid and particle dynamics 口頭	Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
17	Transfer and escape probabilities of outdoor pollutants into an indoor space sheltered by urban-like block arrays using large-eddy simulations 口頭	Ken Bryan Fernandez, Naoki Ikegaya, <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
18	Parameter Optimization of a Viral Dynamics Model in the Mucus Layer of the Human Nasal Cavity-Nasopharynx Based on Computational Fluid-Particle and Host-Cell Dynamics 口頭	Hanyu Li, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
19	Computational fluid and particle dynamics simulation of airborne transmission in indoor environment - Effect of physical distance from infected person 口頭	Takumi Nishihara, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
20	Numerical Thermal Comfort Analysis Using Combined Computer-Simulated Person with	Park Hyun-Gyu, Yoo Sung-Jun, Sumiyoshi Eisaku, Harashima Hiroshi, <b>Ito Kazuhide</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年

	Clothing and Multi-Node Thermoregulation Model 口頭			
21	Exploratory computational fluid and particle dynamics analyses in multilayered vertical duct-type ventilation system for heat exchange and air purification 口頭	Wang Qi, Yoo Sung-Jun, Wang Xin, <b>Ito Kazuhide</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
22	In Silico airway model study for developing artificial lung ventilator using endotracheal tube 口頭	Sixiao Li, Nguyen Dang Khoa, <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
23	Large Eddy Simulation of Airflow Patterns in the Human Upper and Lower Airway Up To the 16th Generation: A Comparison Study 口頭	Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023 年
24	Host Cell Dynamics model development and specific parameterization for 3D upper respiratory tract model coupled with CFPD analysis 口頭	Hanyu Li, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023 年
25	Instantaneous formation of scalar concentration and ventilation characteristics of an indoor space surrounded by urban-like block	Ken Bryan Fernandez, Naoki Ikegaya, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023 年

	arrays using LES 口頭			
26	Effect of turbulent inlet boundary conditions on pollutant emissions and dispersion in an indoor environment 口頭	Teruaki Hirayma, Haruna Yamasawa, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023年
27	Numerical visualization of particle dispersion in a biological safety cabinet under the prescribed experimental conditions by NSF/ANSI 49 口頭	Ryota Muta, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023年
28	Investigation of the impact of the detailed clothing modelling on the human thermal comfort based on multi-node thermoregulatory analyses using computer-simulated person 口頭	Hyun-Gyu Park, Sung-Jun Yoo, Eisaku Sumiyoshi, Hiroshi Harashima, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023年
29	Aspiration probability and resulting airway deposition of indoor particles during steady and transient breathings 口頭	Kazuki Kuga and <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023年
30	Effects of air temperature and thermal comfort on human carbon dioxide emission rate in the case of a step change in the physical activity levels	Jiayi Zhu, Ken Bryan Fernandez, Kazuki Kuga, Pawel Wargocki, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023年

	口頭			
31	Influence of Exhaust Opening Height on Indoor Environment in Impinging Jet Ventilated Room 口頭	Haruna Yamasawa, Mathias Cehlin, Arman Ameen, Tomohiro Kobayashi, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023 年
32	In Silico Investigation of Drug Delivery in Human Lower Respiratory Tract via mechanical respirator 口頭	Sixiao Li, Nguyen Dang Khoa, <b>Kazuhide Ito</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023 年
33	Air Change and Transfer Efficiencies within a Cross-Ventilation Room Model Sheltered by Urban-Like Block Arrays using RANS simulations 口頭	Ryu Itokazu, Ken Bryan Fernandez <b>Kazuhide Ito</b>	IAQVEC 2023, Tokyo	2023 年
34	Numerical Prediction of Respiratory Droplet Generation from Coughing Using Discrete phase-coupled Eulerian Wall Film Model 口頭	Nguyen Dang Khoa, Kazuki Kuga, <b>Kazuhide Ito</b>	ICNAA 2023, Brisbane, Australia	2023 年
35	Numerical prediction of particle breathing zone in a semi-outdoor environment 口頭	Islam Abouelhamd, Sung-jun Yoo, Kazuki Kuga, and <b>Kazuhide Ito</b>	ICNAA 2023, Brisbane, Australia	2023 年
36	A numerical investigation of the acetone exposure concentration and local tissue dosimetry under various ventilation modes	Li, Cong; Zhang, Kun; Yoo, Sung Jun; <b>Ito, Kazuhide</b>	Healthy Building 2023 Asia Pacific, China	2023 年

	口頭			
37	Computational Fluid Dynamics Modeling for Repeated Inhalation Exposure Assessment with OpenFOAM 口頭	K. Yokoo, S. Tanaka, M. Niwano, Y. Matoba, K. Kuga, S. Yoo, <b>Kazuhide Ito</b>	SETAC North America 44th Annual Meeting	2023年
38	Numerical study on auto-ignition of oxygen-enriched ammonia non-premixed flames under gas turbine relevant conditions 口頭	J. Xing, Z. An, R. Kurose	International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (IGTC2023)	2023年11月
39	Numerical investigation of combustion instability and flashback of lean-premixed low-swirl hydrogen jet flame 口頭	M. Kawai, J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose	76th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (APS DFD)	2023年11月
40	Application of FGM method considering preferential diffusion and flame stretch to a cylindrical propagating hydrogen flame 口頭	K. Kinuta, R. Kai, R. Kurose	The 29th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive systems (ICDERS2023)	2023年7月
41	Effect of Linearly Increased Equivalence Ratio on Combustion Instability of Lean-Premixed Low-Swirl Hydrogen Jet Flame 口頭	M. Kawai, J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose	The 29th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive systems (ICDERS2023)	2023年7月
42	A direct numerical simulation study on spherically expanding	Z. An, J. Xing, R. kurose	14th Asia-Pacific Conference on Combustion (ASPACC)	2023年5月

	liquid ammonia flames 口頭			
43	“複雑形状周辺の三次元乱流を対象とした非線形縮約モデリング 口頭	安藤和人, バレラフル, 坪倉誠	日本流体力学会年会 2023 東京	2023 年 9 月
44	自動車の形状特性が意匠性と空力性能に与える影響に関する研究 口頭	溝口亮太, 中島卓司, 清水圭吾, 農澤隆秀, 小泉巖, 平岡武宜, 中村優佑, 坪倉誠	第 25 回日本感性工学学会大会 東京	2023 年 11 月
45	実建物のファサード形状再現モデルに基づく風圧力推定 口頭	河合英徳, 田村哲郎	2023 年度日本風工学学会年次研究発表会	2023 年
46	広範囲・高解像度 LES に基づく高層建築物の風圧力推定 口頭	河合英徳, 田村哲郎	第 28 回計算工学講演会	2023 年
47	BCM を用いた複雑形状を有する構造物の耐風設計のための流れ場解析 口頭	長尾悠生, 田村哲郎, 河合英徳, 丸山勇祐	第 28 回計算工学講演会	2023 年
48	実建物のファサード形状を再現した大規模 LES に基づく高層建築物の風圧力推定 口頭	河合英徳, 田村哲郎	日本建築学会大会, 構造 I	2023 年
49	直交格子系 LES を用いた強制振動する角柱の非定常風圧解析 振動モード形状の影響 口頭	川口真晴, 田村哲郎	日本建築学会大会, 構造 I	2023 年
50	2018 年猛暑日の東京都市域における市街地スケールの暑熱環境解析 口頭	新井舞子, 田村哲郎, 河合英徳	日本建築学会大会, 環境工学	2023 年
51	LES 実用モデルに基づく乱流境界層中の三次元角柱	河合英徳, 田村哲郎, 呉嘉瑞, 長尾悠生	日本流体力学会年会 2023	2023 年

	の風圧力の予測 -境界条件に関する影響の分析- 口頭			
52	空間フィルタリング・リスキューリング手法を用いた台風下の都市境界層に関するLES 口頭	河合英徳, 田村哲郎	第 27 回数値流体力学シンポジウム	2023 年
53	乱流境界層中の偏心を有するテーパー角柱構造物の空力特性に関する数値解析 口頭	長尾悠生, 田村哲郎, 河合英徳, 丸山勇祐	第 27 回数値流体力学シンポジウム	2023 年
54	Assessment of flamelet-based models for liquid ammonia combustion in a temporally evolving mixing layer 口頭	J. Xing, Z. An, A. L. Pillai, R. Kurose	第 61 回燃焼シンポジウム, 秋田アトリオン	2023 年 11 月
55	Carrier-phase direct numerical simulation of a laboratory-scale liquid ammonia jet flame 口頭	Z. An, J. Xing, M. Zhang, A. L. Pillai, R. Kurose	第 61 回燃焼シンポジウム, 秋田アトリオン	2023 年 11 月
56	Effect of different equivalence ratios of acetone droplets on methane/air laminar flame speed 口頭	K. Kim, K. Tanno, A. L. Pillai, R. Kurose	第 61 回燃焼シンポジウム, 秋田アトリオン	2023 年 11 月
57	層流境界層における水素-空気予混合火炎フラッシュバックの数値解析 -流路形状が及ぼす影響- 口頭	矢田晃太郎, 甲斐玲央, 黒瀬良一	第 61 回燃焼シンポジウム, 秋田アトリオン	2023 年 11 月
58	AMR 法を用いた弱旋回乱流希薄水素火炎の LES: 細分化手法の検討, 矢田晃太	和田拓海, 長尾 順, 河合真穂, 黒瀬良一	第 61 回燃焼シンポジウム, 秋田アトリオン	2023 年 11 月

	郎, 甲斐玲央, 黒瀬 良一, 「層流境界層における水素-空気予混合火炎フラッシュバックの数値解析-流路形状が及ぼす影響-」 口頭			
59	実在流体効果を考慮した圧力ベース半陰解法:非物理的な圧力振動の抑制 口頭	和田祥, 甲斐玲央, 黒瀬 良一	日本流体力学学会年会 2023	2023 年 9 月
60	一様等方性乱流場を伝播するデトネーションの直接数値計算:乱流強度の影響 口頭	鈴木颯, 岩田和也, 甲斐玲央, 黒瀬良一	日本流体力学学会年会 2023	2023 年 9 月
61	水素-空気燃焼の数値シミュレーション:選択拡散・火炎伸長・熱損失効果を考慮可能な FGM 法の開発 口頭	衣田和弘, 甲斐玲央, 黒瀬良一	第 51 回日本ガスタービン学会定期講演会 講演論文集、福井県国際交流会館	2023 年 10 月
62	NO 生成を高精度に予測可能な FGM 法の提案 -水素およびアンモニア予混合火炎を対象とした数値解析- 口頭	甲斐玲央, 杉村直紀, 衣田和弘, 黒瀬良一	日本機械学会熱工学コンファレンス 2023 講演論文集, 神戸大学	2023 年 10 月
63	クロスフロー型液体燃料噴流の微粒化・蒸発現象に関する数値解析 口頭	北田絢也, 黒瀬良一	第 60 回日本伝熱シンポジウム, 福岡国際会議場, 福岡	2023 年 5 月
64	燃焼数値シミュレーションの基礎と現状 口頭	黒瀬良一	POWTEX 2023-国際粉体工業展大阪 2023 粉じん爆発情報セミナー, インテックス大阪	2023 年 10 月
65	「富岳」による新型コロナウイルス感染リスク評価 口頭	坪倉誠	Sponsored Seminar 7, 第 70 回日本ウイルス学会学術集会	2023 年 9 月
66	HPC シミュレーションと AI	坪倉誠	VINAS Online Users	2023 年

	によるスマートデザイン 口頭		Conference	10月
67	大規模CFDが拓く新たなものづくり ～自動車CAEを例に～ 口頭	坪倉誠	日本機械学会関西支部第388回講演会	2023年 11月
68	経済活動と感染拡大防止の両立のための「飛沫シミュレーション」の実施（政策対応利用課題） 口頭	坪倉誠	第3回富岳百景シンポジウム	2023年 12月
69	Digital transformation of the Airborne Infection Risk Assessment and AI Supported Smart Desing Realized on the Supercomputer “Fugaku” toward Society 5.0 口頭	Makoto Tsubokura (Riken/KobeUni)	The international conference on high performance computing in Asia-Pacific region (HPC Asia 2024)	2024年1 月
70	A study on efficient training of physics-informed neural networks for unsteady flows 口頭	Junya Onishi, Makoto Tsubokura	ERCOTAC Workshop on Machine Learning for Fluid Dynamics	2024年3 月