

令和4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5年5月30日  
国立研究開発法人理化学研究所

坪倉 誠

## 目次

1. 補助事業の目的.....	- 1 -
2. 令和4年度（報告年度）の実施内容 .....	- 1 -
2-1. 当該年度（令和4年度）の事業実施計画 .....	- 1 -
2-2. 実施内容（成果） .....	- 3 -
2-3. 活動（研究会の活動等） .....	- 64 -
2-4. 実施体制 .....	- 69 -

## 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

### 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4年度（報告年度）の実施内容

#### 2-1. 当該年度（令和4年度）の事業実施計画

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

本年度は、AI支援多目的最適化フレームワークの設計、ニューラルネットワークの「富岳」チューニ

ング、基礎流れを対象とした数億セル規模の縮約モデルと実車を対象とした数千万セル規模の縮約モデルの構築技術の開発、多目的最適化実用モデルの構築と解析の実施、及び意匠空間の数理モデル化と空力性能空間との融合技術開発を行う。

(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。

本年度は、広域市街地解析に基づく流入条件データベースの大サンプルデータ作成、風・水・構造体の統一解法のためのモデル開発、風・熱・湿度の連成解法の基礎的なモデルの検証、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)の提案、実市街地を対象とした換気性能評価を行う。

(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)

## (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。

本年度は、統合シミュレーション技術の開発(気道内流体解析と粘膜上皮細胞上の粘液輸送解析の連成解析手法の開発)、汚染物質濃度制御にロバストな室内環境設計法の開発(室内に形成される不均一混合場の定量的評価指標の開発)、実証問題の設定と解析モデル作成、統合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構築、ニューラルネットワークの「富岳」チューニングを行う。

(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( $\text{NO}_x$ )、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。

本年度は、圧縮機、燃焼器、タービン、各コンポーネントの解析実施(本計算)、統合シミュレーショ

ンの実施（簡易形状試計算）、2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モデルの精度検証を行う。

（協力機関：京都大学、九州大学）

#### (5) プロジェクトの総合的推進

以上のサブ課題A～Dの進捗を管理し、課題間の連携を促進するために、各課題の代表者を集めて統括する推進委員会を設置する。推進委員会は、3か月に一度程度の頻度で理研が主催して委員会を開催する。また、年に一度の成果報告会や、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）

以下の実施内容では、明言しない限り、全て「富岳」を用いて計算している。

#### (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

AI支援多目的最適化フレームワークの設計、ニューラルネットワークの「富岳」チューニング、基礎流れを対象とした数億セル規模の縮約モデルと実車を対象とした数千万セル規模の縮約モデルの構築技術の開発、多目的最適化実用モデルの構築と解析の実施、及び意匠空間の数理モデル化と空力性能空間との融合技術開発を行った。この結果、「富岳」上で非定常三次元流れ場に対してニューラルネットワークによるモード分解のフレームワークの実装と性能評価を円柱周りの基礎流れでさらに進めることで、自動車の車体形状周辺の流れ場に対するモード分割を実施することができた。これにより、複雑形状周辺の乱流に対する本手法の適用可能性を確認することができた。また、最適化実用モデル構築のため、前年度定義した市販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を確立することができた。さらに、車体外観がヒトに与える印象の特徴量を抽出し、車体形状の特徴量との相関を明らかにすることで意匠空間の数理モデル化を進めることができた。

In this fiscal year, we designed an AI-assisted multi-objective optimization framework, tuned the neural network application on the supercomputer "Fugaku", developed a technology for constructing reduced models with hundreds of millions of cells for fundamental flow and with tens of millions of cells for real car aerodynamics, constructed and analyzed a multi-objective optimization practical model, mathematically modeled the aesthetic design space, and developed a fusion technology between the features of aesthetics design and aerodynamic performance. As a result, implementation and performance evaluation of mode decomposition framework using neural network for unsteady three-dimensional flow fields on "Fugaku" was further proceeded with the basic flow around a circular cylinder, and the mode decomposition for flow fields around automobile body was realized. The results confirmed the applicability of the method to turbulent flow around complex geometries. In addition, for the purpose of constructing a practical multi-optimization problem, we established a morphing technique to deform the body shape of target vehicle using the geometric features involved in a group of production SUVs as design variables. Furthermore, we extracted the feature of impression that the exterior view of vehicle gave to humans. Clarifying the correlation with the geometric feature of vehicle body, we proceeded the mathematical modeling of the design space.

## (b) 本研究の内容

本年度(2022年度令和4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設計

前年度に引き続き、意匠空間を考慮した自動車空力形状の多目的最適化問題への適用を想定して、Fig. 2.2.1-1 に示す AI 支援多目的最適化フレームワークを設計した。車体形状を表現する複数のパラメータを設計変数とし（パラメトリック最適化）、最適化手法にはチェビシェフ距離と選好領域と呼ばれる考え方をを用いた多目的進化アルゴリズム CHEETAH/R (CHEbyshev-Epsilon optimizer AlgoritHm)を使用する。設計変数に応じた車体形状は、基準車体形状を市販 CAE ソフトウェア（DEP MeshWorks）の形状モーフィング機能によって変形させることで生成し、形状変更に伴う解析格子の再生成作業を必要としない複雑現象統一解析コード CUBE を用いた数値解析によって目的関数を評価する。そして、設計変数とする車体形状パラメータを、デザイン的な意図と相関のある形状特性とすることで、意匠特性を考慮した形状最適化の実現を目指す。また、機械学習技術による最適解探索の効率化として、進化計算の過程で実施した数値解析結果を基にガウス過程回帰モデルによるサロゲートモデルを構築し、目的関数の評価に要する計算コストの低減を図る。

本年度は、多目的進化アルゴリズムのパラメータチューニング、目的関数のハイブリッド評価において数値解析の適用を判定する指標を選定した。そして、既往の多目的最適化課題（「富岳」一般課題 hp210106 において課題設定）を対象に、サロゲートモデルを併用した目的関数のハイブリッド評価による多目的進化計算を実施した。同課題は、車体のプロポーシオンを構成する部位寸法を変化させる 29 の設計変数によりパラメトリックに車体形状を変形させ、正対風時の空気抵抗、空気揚力、および横風 3°時の空気抵抗増加量についていずれも最小化を目的とする 3 目的の多目的最適化課題である。進化計算の世代サイズは 32 個体/世代とし、各世代中の個体の目的関数（各空力係数）の評価に CFD 解析を適用する割合を 50%とした。CFD 解析を適用する個体選定の指標はハイパーボリュームの改善期待値（EHVI）の上位個体とした。目的関数のハイブリッド評価に用いたサロゲートモデルの予測精度評価と、第 3 世代までの計算で得られたパレート解の散布図を Fig. 2.2.1-2 に示す。また、昨年度分析した市販車両の形状特性の主成分を基に、車体形状をパラメトリックに変形させる形状変形技術を構築した（項目(b-4)で後述）。

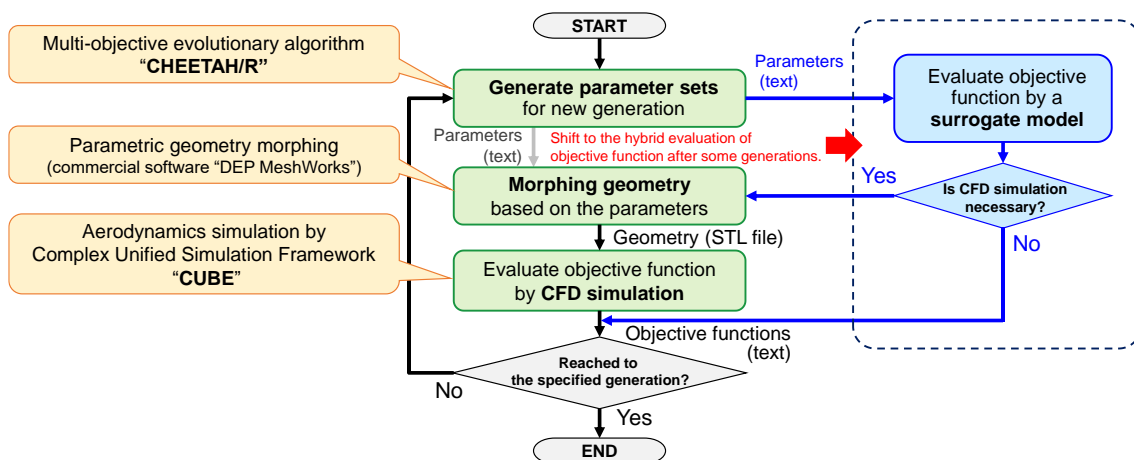


Fig. 2.2.1-1 Framework of AI supported multi objective optimization.

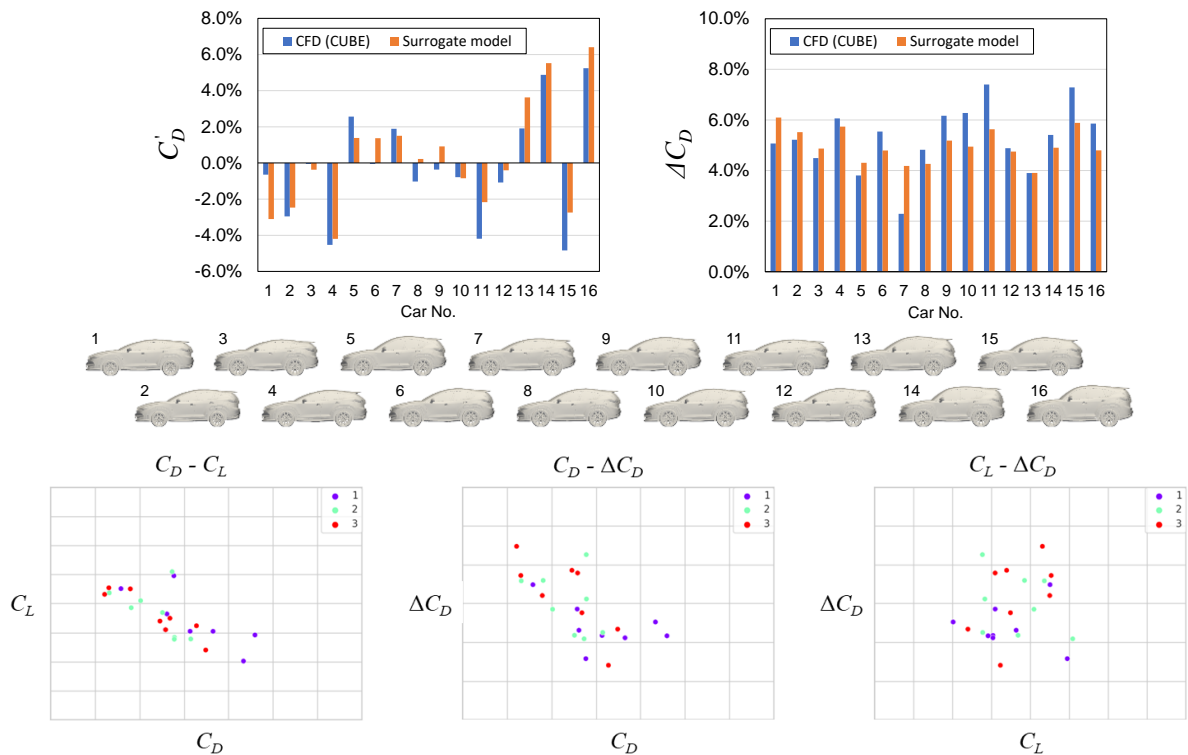


Fig. 2.2.1-2 Multi objective optimization of vehicle aerodynamics using the developed optimization framework.  
 (Top: Accuracy evaluation of the surrogate model, bottom: Scatter plots of the Pareto solutions.)

### (b)-2 ニューラルネットワークの「富岳」チューニング

「富岳」上で実装した分散深層学習の並列計算性能を示す。Fig. 2.2.1-3 は学習全体及びそれに含まれる各処理のウィークスケーリングを示したものである。順伝搬及び逆伝搬の主要処理 (図中のオレンジ及び赤のプロット) について良好なスケーリングを示すことが確認でき、また学習全体の性能 (青のプロット) についても、ネットワークパラメータ全体のリダクション通信を含むが全体の性能として十分にスケールすることが確認できた。Table 2.2.1-1 は学習全体の演算性能を示している。25,250 CPU (ノード) を使用した場合の学習全体の演算性能は 7.80PFLOPS を示すことが確認できた。

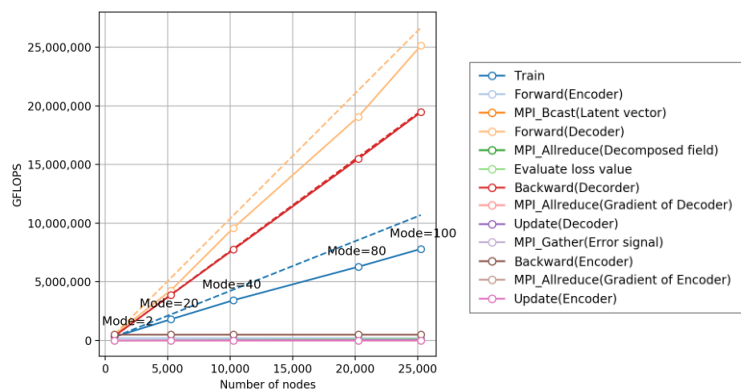


Fig. 2.2.1-3 Weak scaling performance of distributed deep learning on "Fugaku"

(dashed line shows ideal scaling).

Table 2.2.1-1 Computational performance of distributed deep learning on "Fugaku".

Number of CPUs	PetaFLOPS
750	0.31
5,250	1.81
10,250	3.43
20,250	6.28
25,250	7.80

### (b)-3 縮約モデル構築技術の開発

これまで円柱周辺のレイノルズ数 1000 の 3 次元流れ場に対して適用し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、縮約された空間において流れ場を代表する変数 (Latent vector) の生成部分を拡張し、これまで固定値として生成していたものを、正規分布に従う乱数として生成するための変更を行った (Fig.2.2.1-4)。また下記の通り、損失関数  $L$  に対し、ネットワークの前半部 (Encoder) を標準正規分布に近づけるための項  $D_{KL}$  (KL ダイバージェンス) を追加した。

$$L(\mathbf{X}, \tilde{\mathbf{X}}) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \tilde{X}_i)^2}{n} + D_{KL}(q_\phi(\mathbf{z}|\mathbf{X}) \| p_\theta(\mathbf{z}))$$

$$D_{KL}(q_\phi(\mathbf{z}|\mathbf{X}) \| p_\theta(\mathbf{z})) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^D (1 + \ln \sigma_j^2 - \mu_j^2 - \sigma_j^2)$$

ここで、 $\mathbf{X}$  は学習データ、つまり流れ場 (流速) のデータをベクトル化したものであり、また、 $\tilde{\mathbf{X}}$  はネットワークが出力したデータ、つまり学習データとなる流れ場データを一旦縮約した後に拡張して再現した流れ場データである。また、 $\mathbf{z}$  は縮約された空間での変数をまとめたベクトル (Latent vector) であり、 $q_\phi$  及び  $p_\theta$  はネットワークの前半部 (Encoder) 及び後半部 (Decoder) に相当する。 $\mu$  及び  $\sigma^2$  は正規分布の平均及び分散を表す。

既存の手法及び上記の新手法を使用し、高精度シミュレーション結果を縮約された変数によって再現した結果を Fig.2.2.1-5 に示す。ここで、POD 及びニューラルネットワークによる手法 (MD-CNN-AE、MD-CNN-AE+VAE) はいずれも 64 個の変数に縮約した後に再現した流れ場である。高精度シミュレーションの結果 (Full-order model) に比べて、POD によって再現した流れ場は、円柱後流の複雑な構造が十分に再現できていないが、一方でニューラルネットワークを使用した手法 (MD-CNN-AE) ではより複雑な構造が見えている。更に、上記で説明した新手法 (MD-CNN-AE+VAE) についてはより高精度シミュレーション結果に近い複雑な構造を捉えることができている。また鉛直方向 (円柱のスパン方向) の流れ (図の最下段) も再現できていることが確認できる。



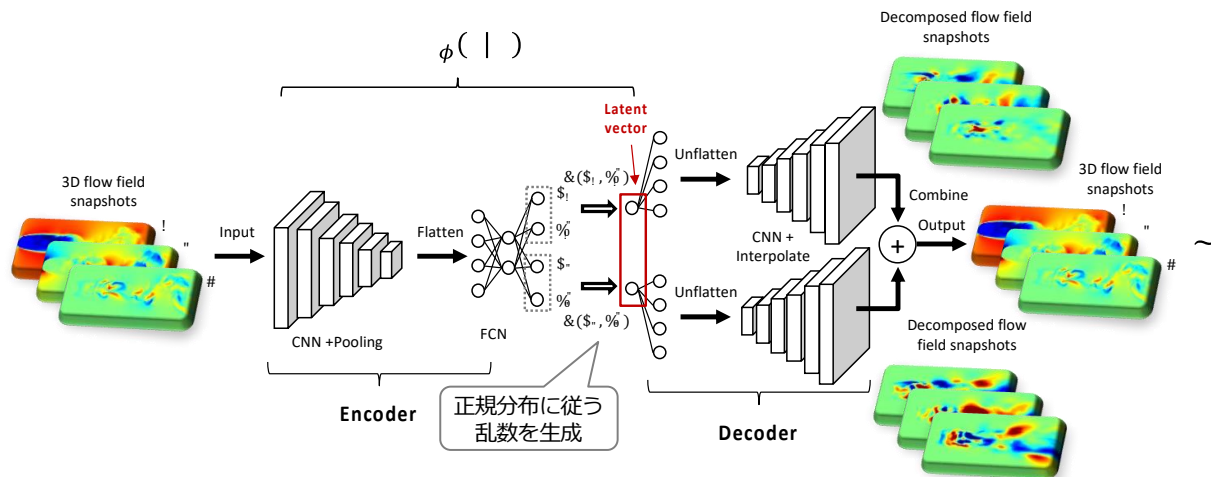


Fig. 2.2.1-4 Application of variational auto-encoder on network for mode decomposition of flow field.

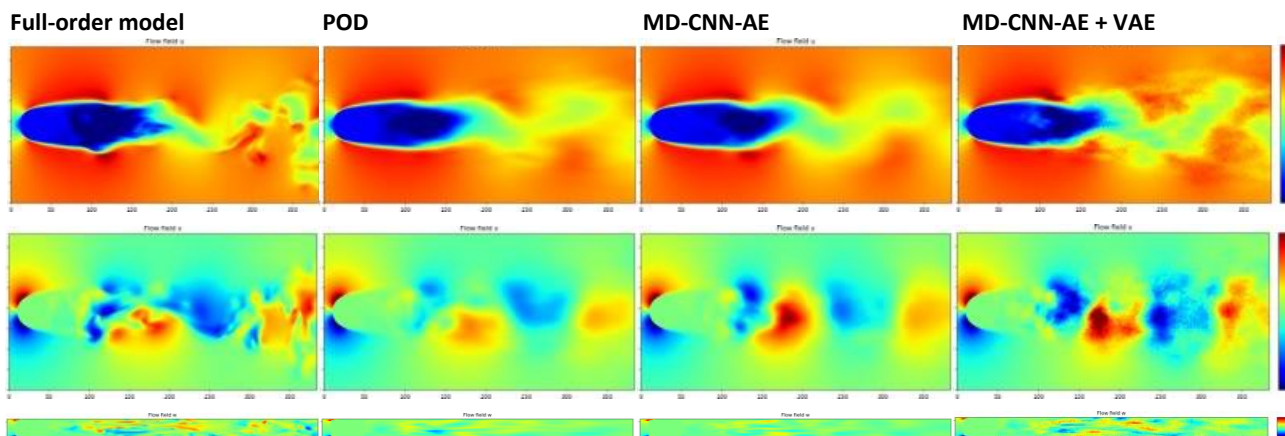


Fig. 2.2.1-5 Comparison of flow fields after reduction and reconstruction by the conventional and present methods.

更に、提案手法について、複雑形状周辺の流れ場への適用性を検討すべく、自動車の車体形状周辺の流れ場を対象とした実験を行った(Fig.2.2.1-6)。高精度シミュレーション実施時の設定を Table 2.2.1-2 に示す。

高精度シミュレーション結果に対し、提案手法を適用して 16 個の変数まで縮約し、その後拡張して元の流れ場の再現を試みた(Fig. 2.2.1-7)。元の流れ場はレイノルズ数  $6.5 \times 10^4$  の乱流場であり、16 個の変数を使用して渦の詳細な構造を再現することはできなかったが、大域的な構造は捉えることができた。複雑な流れ場に対し 5 桁ほど計算量を下げた上で最低限の再現精度が担保されることを確認でき、提案手法によって精度と計算量のトレードオフの意味で有効な縮約モデルが構築できる可能性が示された。

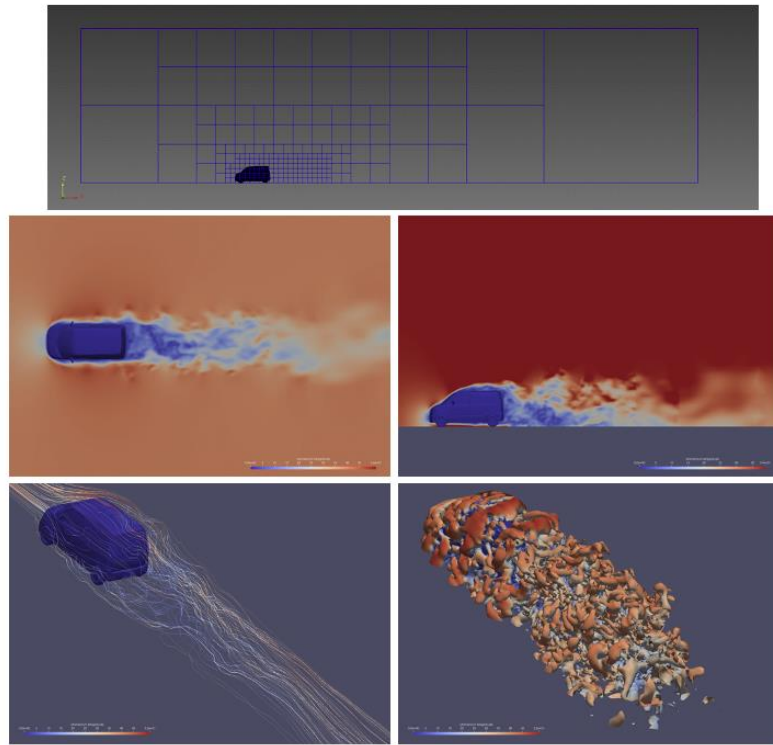


Fig. 2.2.1-6 Numerical simulation of flow around automobile with high accuracy.

Table 2.2.1-2 Numerical conditions for the simulation.

<b>Solver type</b>	Incompressible
<b>Domain size</b>	20m × 10m × 5m
<b>Number of cubes</b>	1,800
<b>Number of cells per cube</b>	8 × 8 × 8 = 512
<b>Total number of cells</b>	1,800 × 512 = 921,600
<b>Minimum cell size</b>	19.5 mm
<b>Time step size</b>	1.0 × 10 <sup>-4</sup> sec
<b>Integration time</b>	120 sec (1,200,000 steps)
<b>Reynolds number</b>	6.5 × 10 <sup>4</sup>
<b>Time integration</b>	Crank-Nicolson method
<b>Pressure Poisson</b>	Red-Black SOR
<b>Viscous term</b>	2 <sup>nd</sup> order central difference
<b>Convection term</b>	QUICK

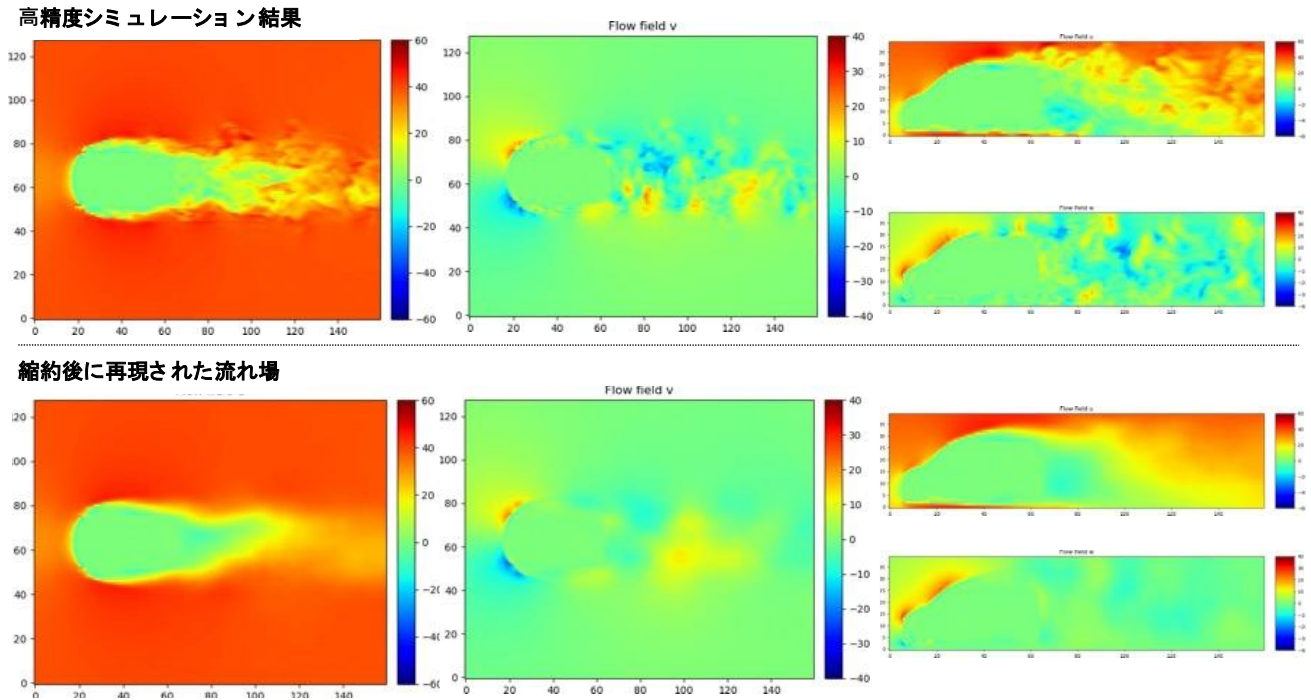


Fig. 2.2.1-7 Reconstructed flow field around automobile from the 16 reduced variables.

#### (b)-4 多目的最適化実用モデルの構築と解析

最適化実用モデル構築のため、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を確立した。このため、前年度実施した市販 SUV 車両群の形状特徴量を、車体形状のモーフィングに用いるパラメータとして再表現することとした。まず、多目的最適化のターゲット車体に対して、既往のモーフィングパラメータ（「富岳」一般課題 hp210106 における空力多目的最適化課題で設定）を調整し、各市販 SUV 車両のシルエットやプロポーションを再現して（Fig.2.2.1-8）、その際の各モーフィングパラメータ値を記録した。次に、得られた各市販車両に対応するモーフィングパラメータ値群に対して主成分分析を行い、その主成分に基づいて全モーフィングパラメータ値を変化させることとした。これは、その主成分得点をモーフィングによって車体形状を決定するための設計変数として使用することに相当する。結果として、第 1 主成分得点に相当する設計変数値を変化させることで得られる車体形状の変化と、を Fig.2.2.1-9 に示す。図に示されているように、少数の設計変数で車体の大局的な形状変化を与えるモーフィング技術を構築することができた。



Fig. 2.2.1-8 Comparison of sideview of production cars (top) and the target vehicle morphed to have similar proportions and silhouette (bottom)

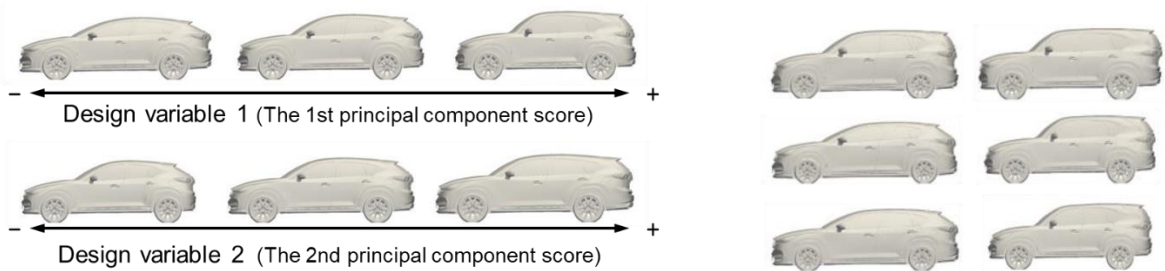


Fig. 2.2.1-9 Parametric shape change based on the developed design variables 1 and 2 (left) and example of body shape variation based on 10 design variables.

(b-4) 意匠空間の数理モデル化に向けた車体外観がヒトに与える印象の特徴量抽出

意匠空間の数理モデル化のため、車体外観がヒトに与える印象を SD 法 (Semantic Differential method) により評価した。SUV 車体が 360 度回転する動画を被験者に提示し、その動画から受ける印象を 14 の形容詞対に対する 7 水準で評価回答するアンケート調査を行った。調査には Web 上のアンケートフォームを使用し、輸送工学系の大学生・大学院生および自動車産業界の会社員を対象に 100 名規模の調査とした。評価対象は Fig.2.2.1-10 上図に示す 65 車両とし、被験者 1 名あたりランダムに抽出した 13 車体を評価することとした。また、ある評価対象車両について、被験者に提示した回転動画から代表的フレームを抽出した画像を Fig.2.2.1-10 下図に示す。

主成分分析の結果、車両の外観から受ける印象の第 1、第 2 主成分として、それぞれ「実用的 ⇄ 情緒的」、「フォーマル ⇄ カジュアル」と解釈される主成分が抽出された。さらに、これらの印象の主成分と、前年度抽出した車体プロポーション特性の主成分との主成分得点の関係性を調査したところ、Fig.2.2.1-11 のように両者間には有意な相関がみられた。このように、アンケート調査で得られた印象の主成分と車体形状の特徴量との相関を明らかにすることにより、意匠空間の数理モデル化を進めた。

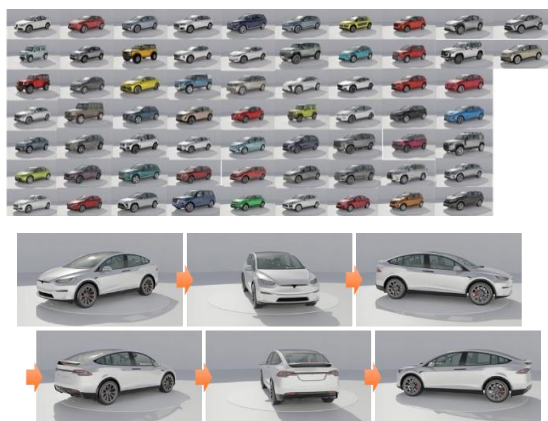


Fig.2.2.1-10 Evaluated vehicle models(top) and typical frames in the rotating movie (bottom) for the impression survey.

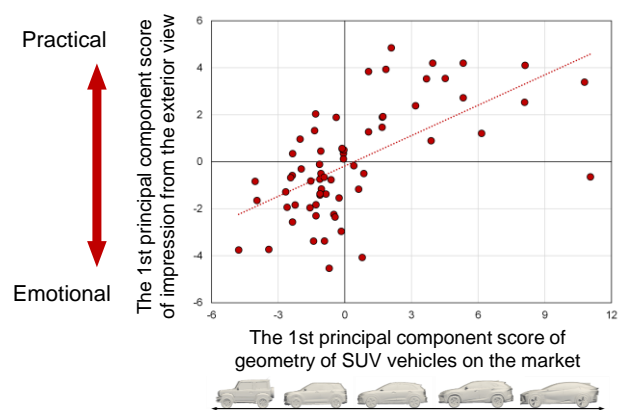


Fig.2.2.1-11 Correlation between the first principal components of impression from the external view and geometry of SUV vehicles on the market.

(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

広域市街地解析に基づく流入条件データベースの大サンプルデータ作成、風・水・構造体の統一解法のためのモデル開発、風・熱・湿度の連成解法の基礎的なモデルの検証、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）の提案、実市街地を対象とした換気性能評価を行った。この結果、大サンプルデータに基づく評価モデルを提案し、風・水・熱との都市・建築連成問題を解明するモデルの妥当性を示し、変容都市の環境、防災のための具体的な建物配置を提示するとともに、換気性能を明らかにした。

In this fiscal year, this study carried out generation of large sampling data for set up of database of inflow condition based on analytical results in broad region, development of the coupled simulation for unified solution of wind, water, and structure, validation of fundamental model for coupled solution of wind, heat, and humidity, proposal of environmental and disaster prevention design (ensuring high ventilation performance and resilience) in a transformed city, and the evaluation of ventilation performance in an actual urban area. As a result, we proposed an evaluation model based on large sampling data, demonstrated the validity of the model to reveal the coupled problem of wind, water, and heat for cities and buildings, presented specific building layouts for environment and disaster mitigation in transformed cities, and clarified ventilation performance for the transformation of a city.

## (b) 本研究の内容

### (b)-1 広域市街地解析に基づく流入条件データベースの大サンプルデータ作成

#### (b)-1-1 NHM アンサンブルによる強風の極値の評価と極大ケースの解析とサンプルの選択

本研究では、気象擾乱と都市域の乱流構造による不確実性を考慮した実市街地における強風リスクの推定を行うため、東京都心で 42.5m/s の顕著な最大瞬間風速を観測した ~~2019~~ 令和 1 年台風 19 号を対象に、気象モデルによる都市レベルのローカルスケール解析、気象場に基づく乱流再生成、および市街地における強風に関する微細構造解析を連続的に継続することでそれぞれアンサンブル解析を実施し、極端台風下の都市を対象とする大サンプルデータの作成を実施した。

台風気象場の気象モデルによる作成は、「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」と協力して実施した。我々の課題では前述の課題において、作成された台風の進路や強度、環境場がそれぞれ異なる 1km 解像度 1000 メンバーの大アンサンブルデータで表現されたメソスケール気象場の特性に基づき、着目市街地での台風通過時の最大風速に基づいて最頻値・最大値に相当するメンバー、台風経路・強度の再現性の高いメンバー、全体の確率分布を保持するランダム抽出などいくつかの防災上の観点において不確実性の評価が重要となる特徴を持つメンバーを抽出して、ローカルスケールのダウンスケール解析を実施した。

大サンプルのデータに対し、発生する強風の特徴として、平均風速、瞬間風速、最頻風速などを考慮し、最終的に全体で 50 程度のメンバーを選定してデータベース作成を行うことをめざす。ここでは、まず顕著な強風が発生する可能性の高い状況についての知見を蓄積するため、着目市街地での台風通過時の風速が最も大きい 5 ケースを対象に解析を実施した。

Fig. 2.2.2-1 に気象庁非静力学モデル (NHM) による 1km 解像度 1000 メンバーのアンサンブルデータについて、東京管区気象台・風速観測点地上 10m 高さにおける、10 分ごとの瞬時値から求めた最大風速のヒストグラムと超過確率分布を示す。台風通過時の最大風速は 18.2m/s から 8.4m/s の間で分布してお

り、1m/s ごとに 10 程度の階級に区分し、なめらかに分布が表現されることを確認した。確率分布は、高風速側にテールが伸びる傾向が顕著であり、最頻値は 11m/s から 12m/s の間である一方、約 10%のメンバーが 15m/s を、約 5%のメンバーが 16m/s を超過した。抽出した 5 ケースについては、風速は 18m/s 付近の狭い範囲（17.8 m/s から 18.3m/s、相対誤差 3%以内）に収まっており、風速の確率分布の極値付近を見た場合についても一定の稠密性があることが確認された。

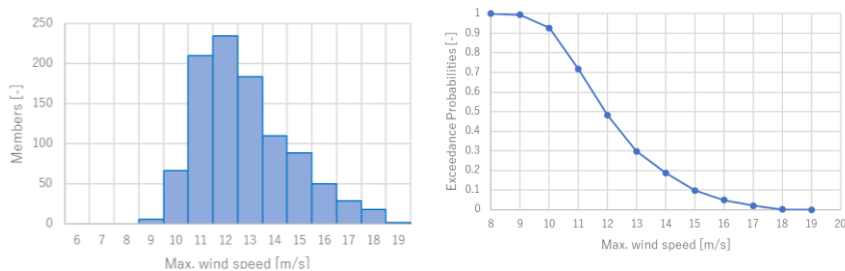


Fig. 2.2.2-1 Histogram and exceedance probability distribution of maximum wind speed at Tokyo ( $z = 10$  m) of the 1000-member NHM ensemble data at 1-km resolution.

Fig. 2.2.2-2 には、今回抽出した東京管区気象台における風速上位 5 ケースについて各地点での最大風速を示す。上位 5 ケースでは、伊豆半島の東岸から三浦半島の間相模湾内に接線風速最大域があり、大半のケースで東京湾の浦賀水道で縮流が発生していることが確認された。台風の高さや中心付近の対流構造により、高風速帯の幅が異なっている様子も確認された。

Fig. 2.2.2-3 に、抽出した風速上位 5 ケースと風速最頻値（11.5m/s）1 ケースの時刻歴を示す。上位 5 ケースのピーク時刻については、台風進路や環境場の違いにより、ケース間で 1 時間以上の開きが発生していることが確認された。また中心付近の構造と経路の違いによりピーク付近で急激な立ち上がりを示すケース（メンバー398）も見られた。

風速最頻値付近のケースについては、台風の進路や環境場のより大きな不確実性を含んでおり、ピーク時刻のずれが顕著に大きくなる傾向が見られた。今後の抽出したダウンスケーリングでは、分析対象の現象等によりターゲットを絞った評価の必要性が示唆された。

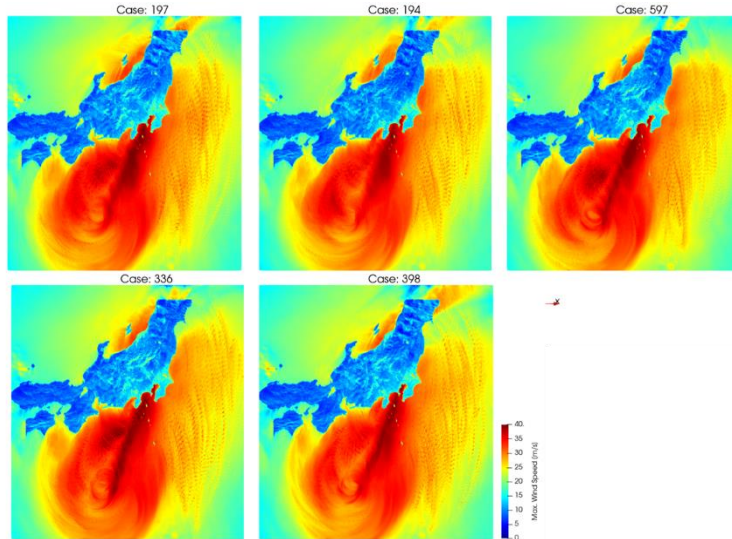


Fig. 2.2.2-2 Distribution maps of maximum wind speed for the top 5 members with the highest wind speeds (1-km NHM)

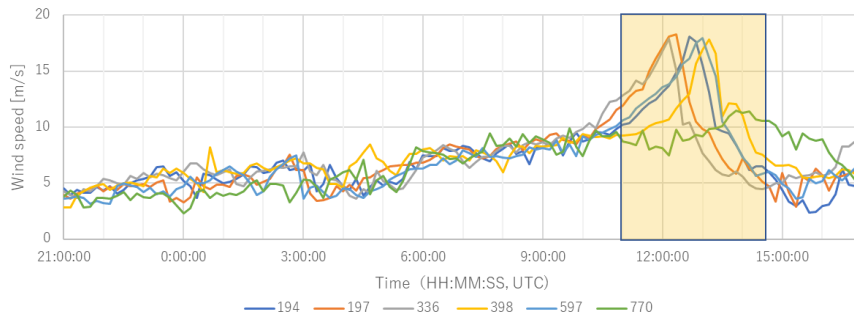


Fig. 2.2.2-3 Time history of the top 5 members with the highest wind speeds and one member near the wind speed mode.

気象モデル NHM によるローカルスケールのシミュレーションは、前述の解像度 1km でのアンサンブルデータ(D1)に基づき、解像度 250m (D2) および解像度 50m (D3)でのダウンスケーリング計算を実行した。Fig. 2.2.2-4 に計算領域を示す。計算時間範囲は、D2 は 2019 年 10 月 12 日 9:00 UTC からの 6 時間、および D3 は Fig. 2.2.2-2 に示した D1 における各メンバーのピーク時刻の前後 50 分である計 100 分間である。Fig. 2.2.2-5 に気象モデル解析により得られた D2 における気圧と降雨領域、および D3 の高さ約 315m と 30m における風速分布を示す。メンバー194・197・398 は、上空に接線風速が最も大きい領域が対象市街地である東京・大手町のほぼ上空にある時刻にピーク風速を生じているのに対し、メンバー336・597 は接線風速最大域が通過後、より台風中心に近い位置で発生したものであることが確認できる。

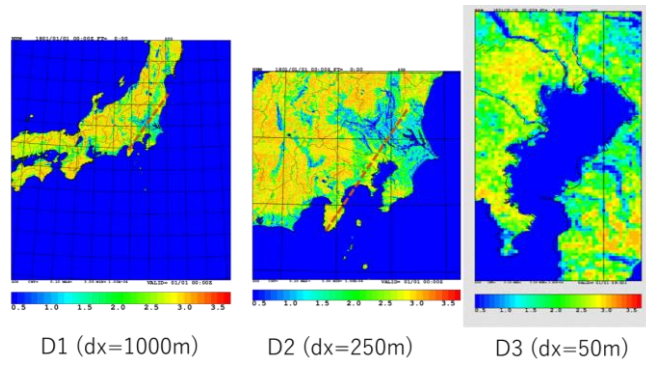


Fig. 2.2.2-4 Calculation domains of meteorological model simulation (NHM)

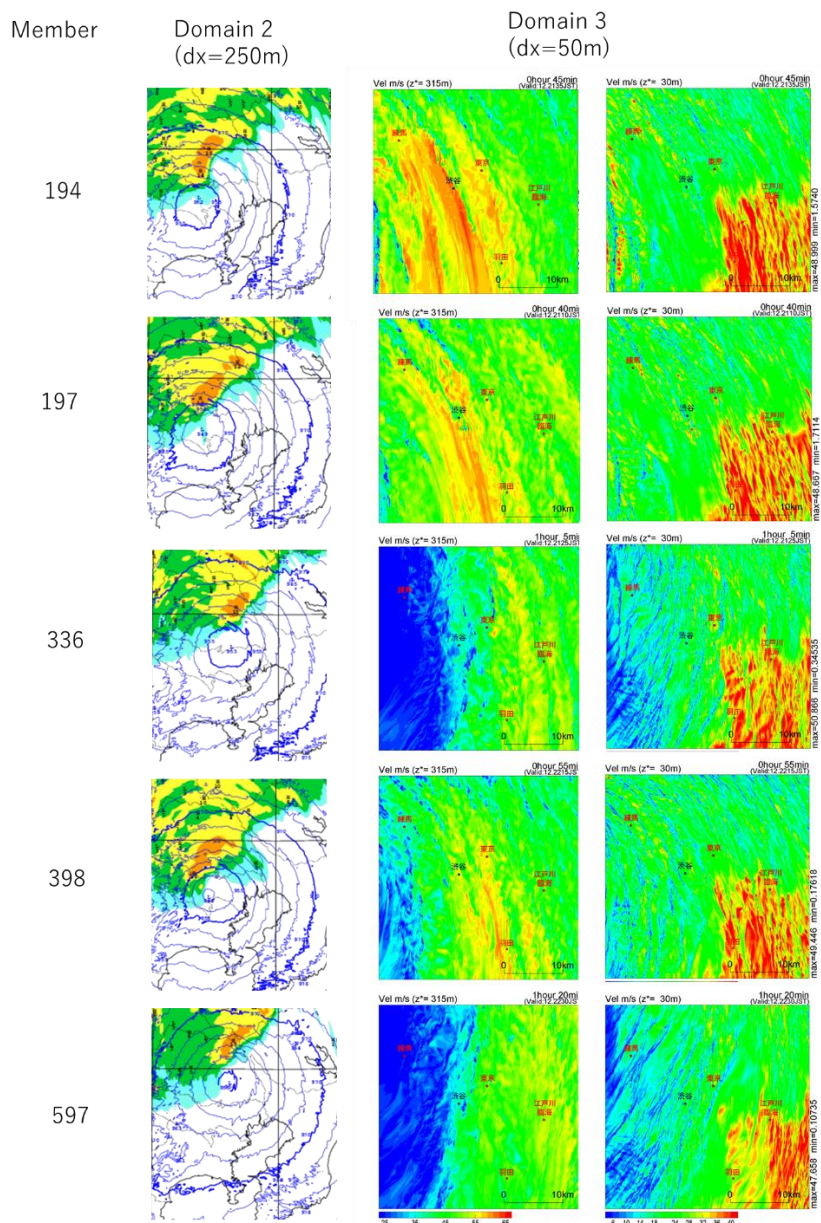


Fig. 2.2.2-5 Simulation results of meteorological model NHM during the peak time. Pressure and precipitation in D2 (left). Velocity field at  $z=315$  m and 30 m.



### (b)-1-2 NHM アンサンブルに基づく気象モデル・工学 LES 融合解析

気象モデルによる解析結果を市街地 LES の流入条件として利用するためには気象モデルで減衰しやすい高周波変動成分を再生成させることが重要である。気象モデル・工学 LES 融合解析手法[2-1]に基づき、気象場に対する乱流再生成計算を実施した。東京管区気象台のある大手町地区を含む 12km×7km の領域を対象に、水平解像度 25m で計算し、メンバー197・597については20分間、残りのメンバーについては5分間の流入風を取得した。

Fig. 2.2.2-6 に乱流再生成後のスパン方向鉛直断面、高さ 300m 水平断面における流れ場を示す。各ケースで 1km ないし 1.5km 程度までの地表近傍において最も高いピーク風速が発生していること、その上では風速が小さくなったのちに上空で再び上昇に転じる傾向が確認された。メンバー194・197・398 は 2km から 3km 程度の間隔で並ぶ、流れ方向に軸を持つロール渦構造とそこから生じた乱流構造が確認された。より台風中心に近い位置の流れ場であるメンバー336・597 では、流速の変化がより大きいロール渦構造が再現され、風向の揺らぎも大きい傾向が確認される。既往文献において報告された台風中心の距離により異なる構造のロール渦[2-2] が発生する状況を再現している可能性があると考えられ、更なる分析が必要である。また鉛直断面を確認すると、後者では、地表近傍のピーク風速が発生する領域の高度が前者よりも低く、上空では風速が大きく低下し、シアが強い状態が発生している。以上より台風の通過時に起こるピーク時の異なる特徴を持つ乱流構造を再現できたことを確認した。

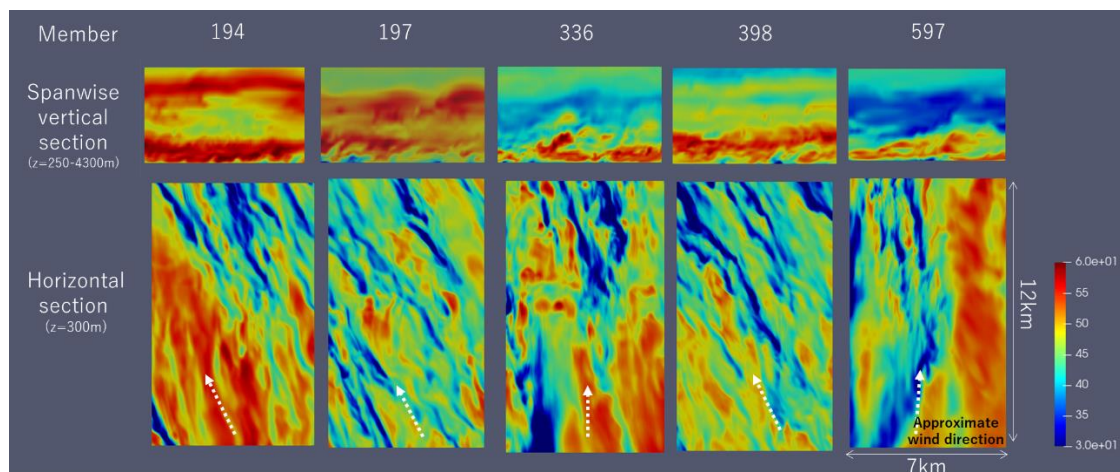


Fig. 2.2.2-6 Result of the turbulence regeneration calculation for meteorological field. Velocity in the horizontal and spanwise section [unit: m/s].

Fig. 2.2.2-7 に、メンバー197・597 の融合解析前後での高さ 300m での流れ場および、領域の中央位置、高さ 361m での乱流エネルギースペクトルと時刻歴を示す。メンバー197では、元の流れ場の構造に基づいてより微細な乱流構造が生成されており、スペクトルについても $-5/3$ 乗則に従う風速変動が 0.1Hz 以上の領域まで拡大され、乱流としての適切な性質を持つ風速変動の再生成が確認された。なお、流出境界付近では非物理的な振動の発達を確認された。一方、メンバー597では、高周波数域での乱流エネルギーが若干増加したが、顕著な向上は見られなかった。気象場の風速変動のスケールに基づいてフィルタースケールを更に調整することで改善を図ることが有効である可能性が示唆された。

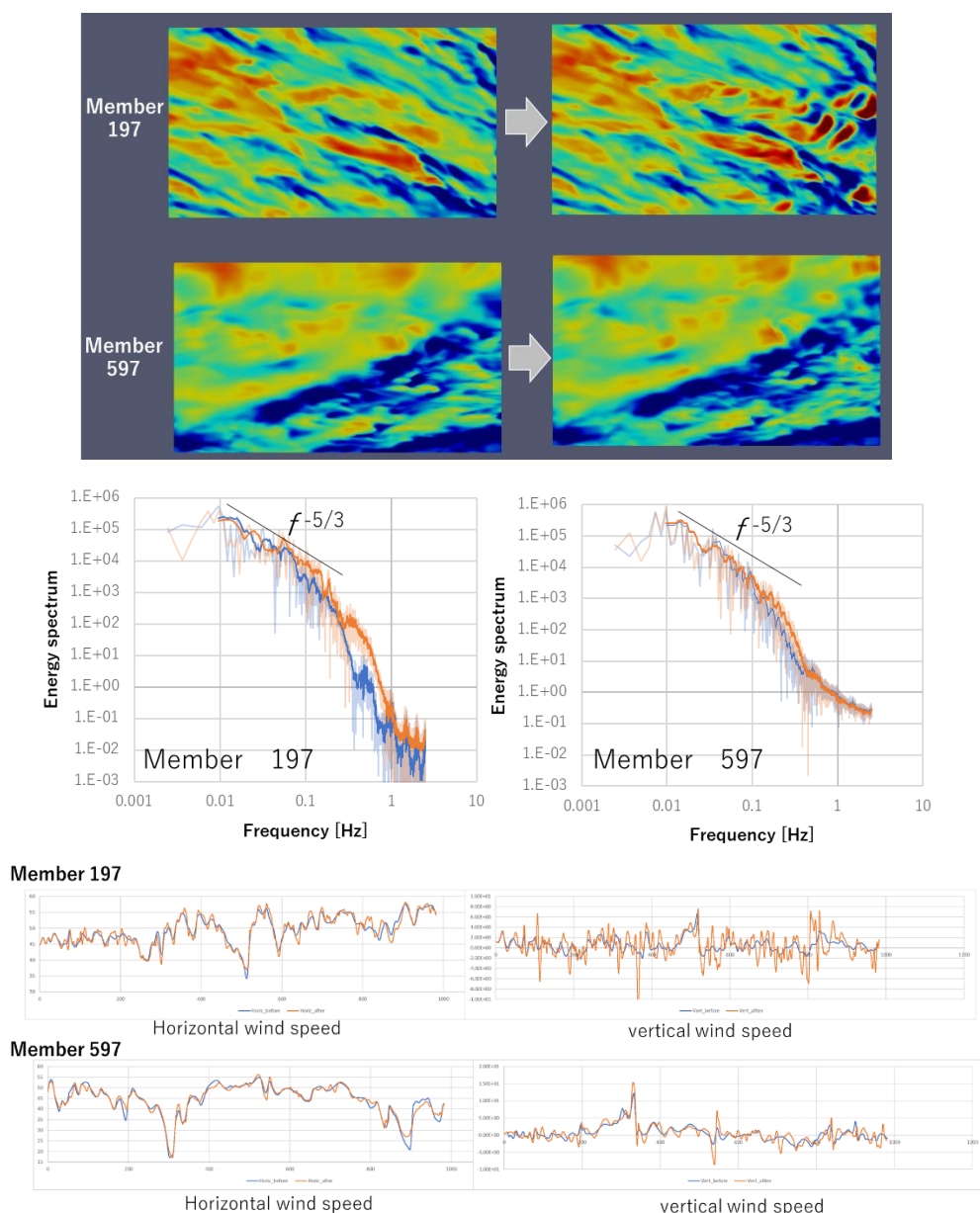


Fig. 2.2.2-7 The velocity fields at horizontal section  $z = 300\text{m}$  and turbulent energy spectra before and after the turbulence regeneration calculation in the cases of Members 197 and 597.

### (b)-1-3 広域市街地解析に基づく大サンプルデータの作成

市街地で発生するピーク風速や風圧を解析するための気象擾乱を流入条件とする BCM-LES のアンサンブル解析は、理研 R-CCS により開発された CUBE[3]を用いて広域解析(3 km × 6 km × 1.5km、解像度約 1.5 m)の領域において、前項にて作成した流入風を東・南・西の3面から与え解析を行った。現時点では全領域の5分間のデータを0.5s間隔の高頻度で取得した。Fig. 2.2.2-8にメンバー197と597の大手町地区の瞬間の風速場(高さ  $z=100\text{m}$  水平面および E-W 鉛直断面)を示す。風向はおおむねメンバー197ではSE、メンバー597ではSであるが、細かな揺らぎを含んでいることが確認される。また鉛直断面からは、実市街地の不均一な地表面粗度に基づく乱流と台風境界層内の風速変動の重層が確認される。

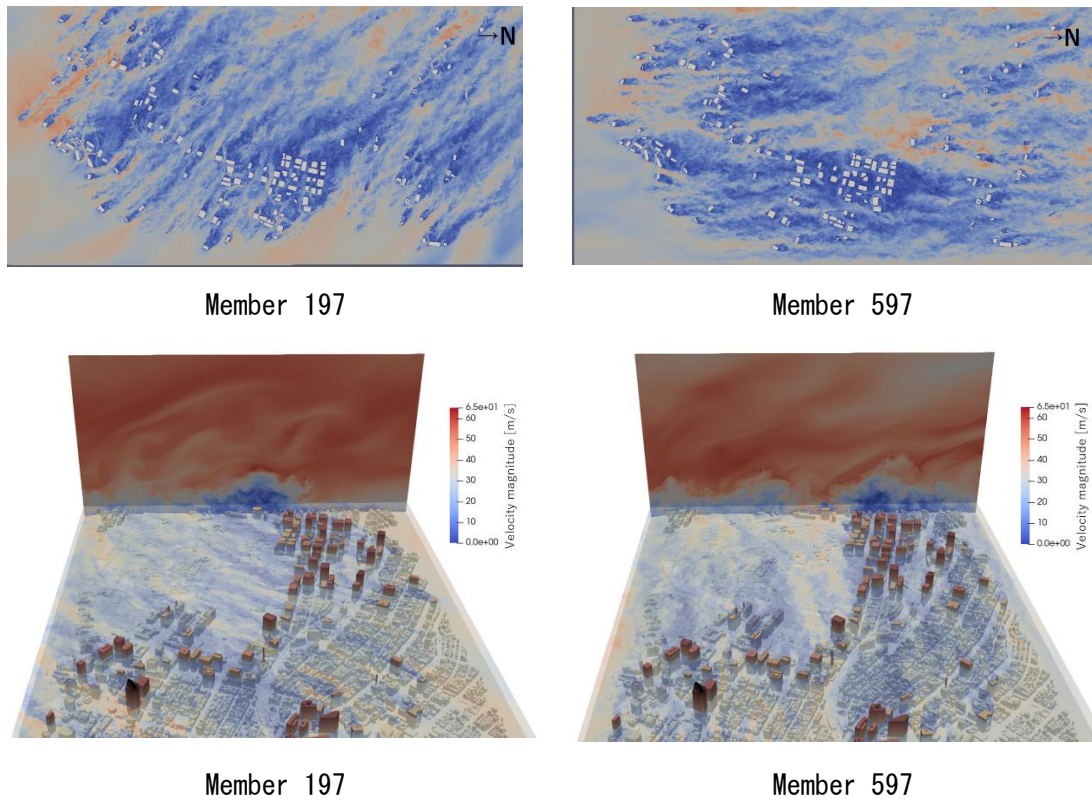


Fig. 2.2.2-8 Instantaneous velocity fields of Otemachi area (horizontal section at  $z=100\text{m}$  and E-W cross section) obtained in the urban LES analysis

Fig. 2.2.2-9 に、計算開始後から 2 分間の 5 秒間隔データに基づいた E-W 鉛直断面における平均風速と最大瞬間風の分布を示す。Member597 は、Member197 に比べて台風中心に近い位置での境界層構造であり、低高度に風速プロファイルのピークが存在する。気象場の風速変動および鉛直シアと建築物に基づく地表近傍の乱流の相互作用がより顕著に発生し、上空の高風速な流体が地表近傍により頻繁に輸送される結果、地表近くの平均風速・最大瞬間風速がともに高くなる傾向が確認された。

Fig. 2.2.2-10 に東京管区気象台風速観測点の位置(高さ 35m) における時間平均操作を行っていない瞬時値と 3s 平均の風速時刻歴を示す。台風アンサンブル解析の流入風に基づき平均化時間以下の極めて微細な風速変動を有するデータが得られたことが確認された。

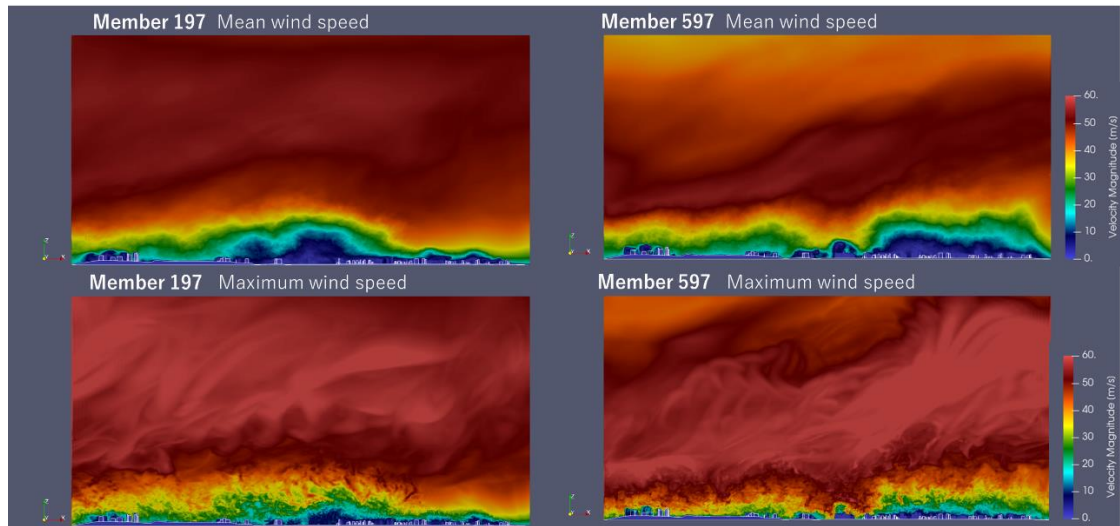


Fig. 2.2.2-9 Mean and maximum wind speed in E-W cross section calculated from the data for 120 s in 5-s intervals.

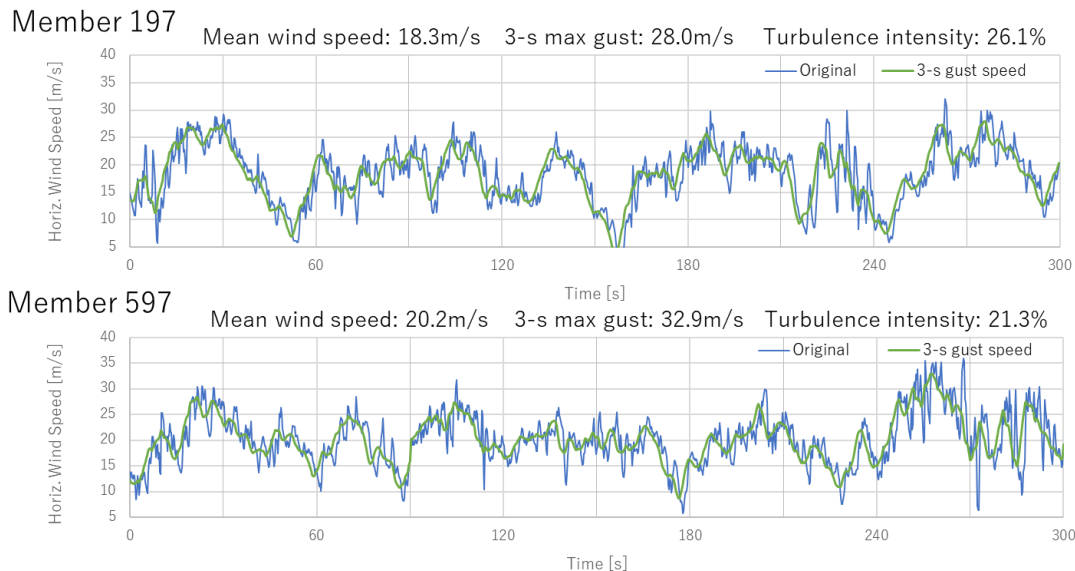


Fig. 2.2.2-10 Time histories of wind speed at the location of the observational point of Tokyo Headquarters ( $z = 35$  m).

## (b)-2 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

### (b)-2-1 複雑な形状のファサード周りに形成される圧力場（赤坂）

実建物のファサード形状が複雑化している中で、建築物形状の凹凸については風洞実験では 1/300～1/600 程度の縮尺に照らし合わせた凹凸サイズが想定されているが、建物表面の部材における局所的なピーク風圧を予測する際には、風洞実験モデルでは再現できない微細な凹凸形状に基づく風圧力の影響については検討事例が少ない。

本研究では BCM による広範囲・高解像度 LES により、複雑形状を有する実建物のファサードの周りに発生する微細な渦構造を明らかにしたうえで高層建築物の風圧力への影響を明らかにした<sup>24)</sup>。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。対象領域ではFig.2.2.2-11に示される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り、最小空間分解能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。なお、流入条件については筆者らが実施した東京都心部9kmx9kmの広域解析（流入条件：乱流境界層）によってサンプリングされた流入変動風の時空間データ<sup>2-5)</sup>を接続している。

Fig.2.2.2-11に建物(a)の隅角部付近の流速の大きさと渦度(z成分)の拡大図を示す。空間解像度25cmの解析結果では空間解像度50cmの結果<sup>2-6)</sup>で再現されていなかったファサードを構成する柱の間を流れる流れが再現されている。また、Fig.2.2.2-12には建物(a)のファサードを構成する柱や梁の表面の風圧係数分布を示している。Fig.2.2.2-12に示す風圧係数分布が柱や梁などを再現しない分布と異なる点として、建物(a)では柱や梁などの部材を再現することで建物隅角部付近のはく離の発生位置が変化しており、その周囲に存在する柱や梁などの部材の表面に作用する風圧力が変化していることが明瞭な差であると考えられる。Fig.2.2.2-12の分布において風上面の周縁部の柱の部材の風圧係数はこのはく離の影響を受け、ほかの風上面の風圧係数より小さく、0付近の値となっている。

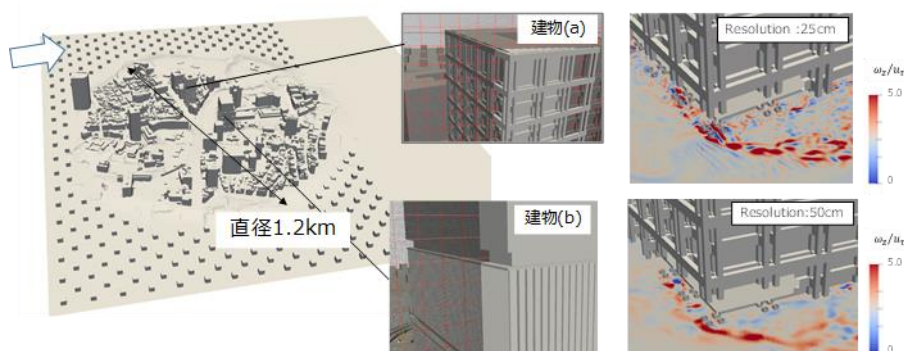


Fig.2.2.2-11 Target model (Left) and comparison of spatial resolution (horizontal distribution of vorticity  $\omega_z/|u_r|$ )(Right)

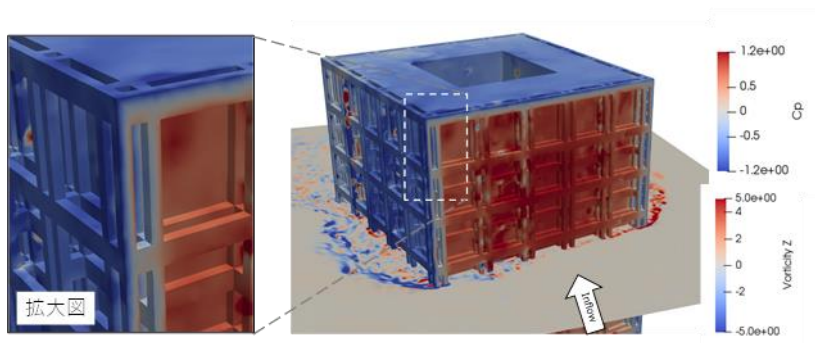


Fig.2.2.2-12 Distribution of wind pressure coefficient on façade (building (a))

Fig.2.2.2-13 には、鉛直のルーバーを有する建物(b)の渦構造と風圧係数の分布を示す。建物(b)ではルーバーのない上部では直角の隅角部に対応して二次元性の高い渦構造が出ているが、ルーバーのある中層部から下では、隅切状の平面形状に付随して、より 3 次元性の高い細かな渦が発生している。また、風圧係数分布に着目すると、局所的に低圧の構造がルーバー表面に確認される。これは隅角部から剥離した流れが再付着時にルーバーの間に流れ込むことで副次的な細かな渦が形成されるためであると考えられる。

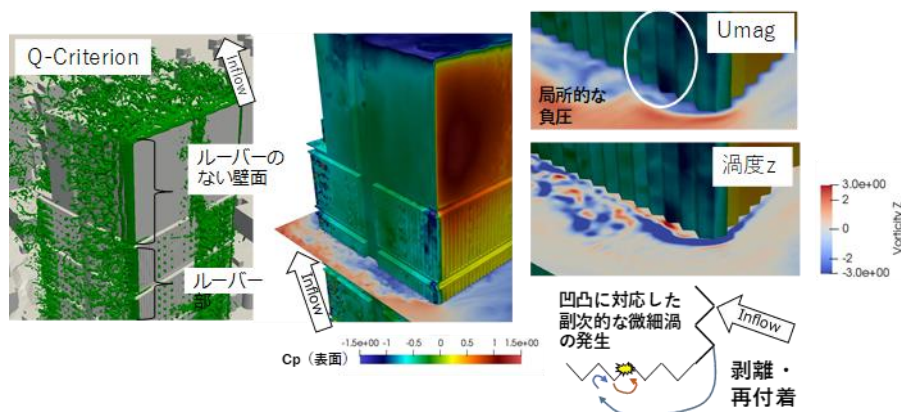


Fig.2.2.2-13 Occurrence of extreme negative pressure generated on the uneven surface of the louver (building (b))

#### (b)-2-2 広域市街地における乱流構造が風圧力に及ぼす影響（麻布台）

本研究では実建物のファサード形状再現モデルに基づく LES により、実市街地・実建物に存在する様々なスケールの乱流構造が風圧力に及ぼす影響を明らかにした<sup>2-4)</sup>。実市街地に存在する乱流場の影響として、市街地に点在する複数の高層建築物から後流の乱流構造が発生する事例について解析を進める。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。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おり、流入面には NNW の風向を想定した乱流境界層（地表面粗度区分 III）を接続している。

まず、Fig.2.2.2-14 に断面 A、B の乱流強度（ $u$  成分）に着目すると、断面 A では建物 F のせん断層の影響が約 800m 下流まで残存し、断面 B では前方建物の剥離せん断層が対象建物の風上面に接近し、正面での高い風圧が確認される。さらに Fig.2.2.2-14 に示すように、対象建物の隅角部において極大な負圧が高さ 250m~300m において出現しており、Fig.2.2.2-15 の時系列に示すように極大な負圧が同時に発生している。Fig.2.2.2-15 に示すように前方にある建物頂部から剥離したせん断層によって対象建物前方の流速が大きくなったことに加えて、隅丸形状の隅角部の前方から発生した剥離せん断層に付随して発生する鉛直の渦によって負圧が発生したと考えられる。一方で、高さ 200m の地点では、250m~300m の負圧と異なる時刻において極大な風圧が発生しているがこれは、風上建物頂部からのせん断層の影響が小さく、前方建物の後流の影響を受け、隅角部の周辺に断続的に高風速が出現するためであると考えられる。

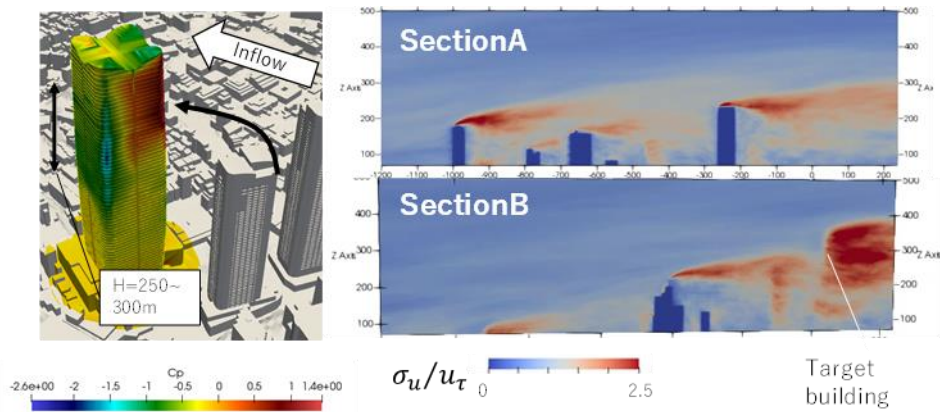


Fig.2.2.2-14 解析対象建物の表面風圧分布と乱流強度

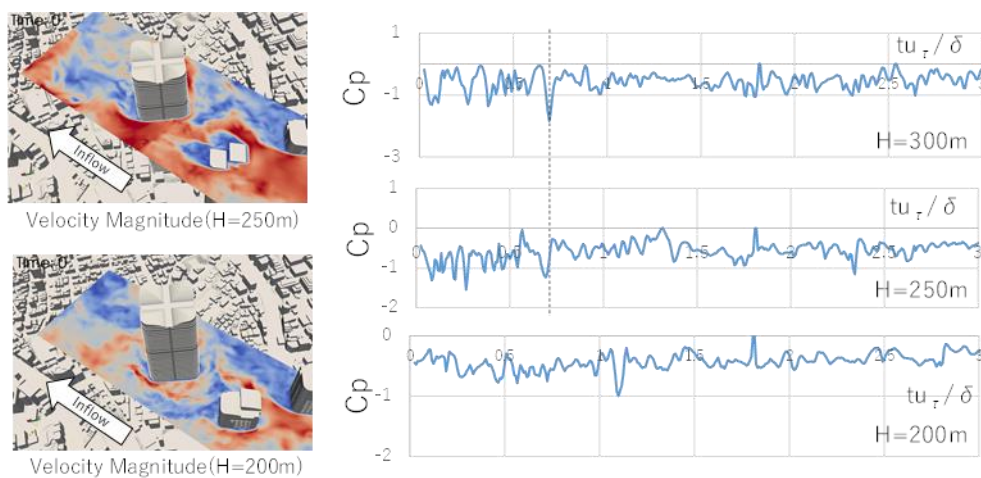


Fig.2.2.2-15 対象建物の隅角部における風圧係数の時系列データ

以上のように、実建物のファサード形状を再現した解析を実施することにより、建物隅角部付近における複雑ファサード形状の再現性やファサードの凹凸に伴って発生する副次的な渦によってファサードの複雑形状に由来する風圧力の分布が発生することを示した。ファサード実形状から発生する圧力分布の局所性・非定常性は外装部材の荷重評価を正確に進める上で把握する必要がある。特に剥離直後の荷重が大きくなる場所での影響は大きくなることから、特性の系統的吟味は不可欠である。

### (b)-3 風・水・構造体の統一解法のためのモデル開発

#### (b)-3-1 マーカー粒子 IB 法により 1 次梁モードで強制振動する角柱の非定常風圧解析

近年、市街地の高層化はますます進行し、国内外で高さ 300m を大きく超える高層建築物が多数建設されている。このような建築物には地震力よりも風力が大きく作用することが知られている。また、空力不安定性についても、アスペクト比が大きいため線形モードだけでなく曲げモードなどを含めてより精密に検討する必要がある。本研究では CUBE<sup>2-3), 2-7)</sup> のフレームワークを用いて、直交格子系での constraint IB 法を利用した数値流体解法により、強制振動する剛体角柱周りに生じる空気力の解析を実施した。ロッキングモードと 1 次梁モード振動による振動での負減衰力発生と比較を行った。併せて、振幅の変化に対する変化の検討と、解析時の格子解像度の結果への影響について確認を実施した。なお、CUBE では IB

法を適用する領域をラグランジュマーカー粒子により定義する。この粒子の移動を制御することで、物体の変形を表現することができる。特に今回用いた移動境界問題用の CUBE では様々な物理モデルや変形モードに基づいて、ラグランジュマーカー粒子の位置と速度を容易に更新可能である<sup>2-8),2-9)</sup>。

解析対象の角柱は、振動周波数を 3.4Hz に固定した 1:1:6 正方角柱である。標準ケースでは角柱頂部の振幅を角柱幅の 9.6%とした。解析の格子解像度は 1/50D とし、時間刻みは 1/25D のケースで  $6.13 \times 10^{-5}$  s (1/4800 周期)とした。流入風は空気の物性を想定した一様流である。時間積分には Crank Nicolson スキーム、空間離散化には QUICK スキームを用いた。

まず各無次元風速にともなうロッキングモードと梁 1 次曲げモードでの振動時の非定常空気力の正減衰から負減衰力への遷移過程の比較を行った。正・負減衰力の判断は、20 周期以上の風外力の時刻歴データから、三角関数の直交性を利用し、変位に対する風外力の位相を算出した。強制振動による変位に対して、同じ方向の風外力の時刻歴の位相が先行する時、負減衰力が発生する可能性がある。Fig.2.2.2-16 に、ロッキングモードおよび梁 1 次曲げモードでの振動時の圧力位相分布を示す。いずれの風速においても角柱低層部での位相が早く、特に前縁から 1/3 程度の位置で最も早くなった。風速の上昇に伴って角柱低層部を中心に位相が大きく前進し正となり、負減衰力を生じる領域が拡大することが確認された。

各時刻の渦構造を可視化した結果、Fig.2.2.2-17 のように無次元風速が小さい場合には、前縁頂部からの渦がより下方まで伸長してより長い時間側面に定在し、下層で先行する渦の剥離による圧力回復が遅れる様子が見られた。

Fig.2.2.2-18 に、ロッキング振動時の、角柱振幅変化に対する圧力位相分布の推移を示す。既往文献<sup>2-10)</sup>と同様に、振幅が小さくなるほど位相の前進が確認された。また、本解析では、低風速時に中間部で見られたピークの位置が下がる傾向が見られた。各時刻の渦構造を可視化した結果、振幅が大きい場合には無次元風速が小さいときと同様に、渦の下方への伸長と下層での剥離の遅延が見られた。Fig.2.2.2-19 に、ロッキングモードと梁 1 次曲げモードでの角柱全体でのモーメントに基づく正減衰・負減衰の評価を示す。同じ頂部振幅で比較した場合、梁 1 次曲げモードの方が一貫して位相が進んでおりより低い風速で負減衰が発生すること、より大振幅まで成長する可能性があることが確認された。Fig.2.2.2-20 はいくつかの無次元風速における各振動モードでの位相分布の比較を示す。梁 1 次曲げモード振動時の方が常に全体的な位相が前進していることに加え、負減衰力が大きく働く領域がより高い位置に現れる特徴が見られた。Fig.2.2.2-21 のモード模式図が示すように、梁 1 次曲げモードでは、ロッキングモードよりも低層部での変位が小さくなるが、Fig.2.2.2-17 に示した小振幅で位相が前進する結果と符合する結果となった。

Fig.2.2.2-22 に振動による変位 0、速度が負方向に最大となる瞬間の 20 周期分のアンサンブル平均場による角柱振動方向面の圧力等値面による渦構造の比較を示す。ロッキングモードの方が前縁の不安定により繰り返し発生する渦が側面の底部の方まで直線的に伸びる渦構造である一方、梁 1 次曲げモードは底部までは伸びず、中層からやや後方に持ち上げられるように伸びている。その結果、梁 1 次曲げモードでは角柱の下層部で、負圧がロッキングモードより早いタイミングで角柱の後方に到達し、位相が前進していると考えられる。また異なる時間の可視化から、下層での位相の前進は下方で渦の剥離のプロセスが先行して起こることが要因であることが推察されたが、下方まで渦が伸長した場合にはより長い時間側面付近に定在し剥離が遅れる傾向が確認された。また後流渦の形成の位置やタイミングにも違いが見られ、梁 1 次曲げモードの方が地表近傍の負圧が若干強い傾向が確認された。



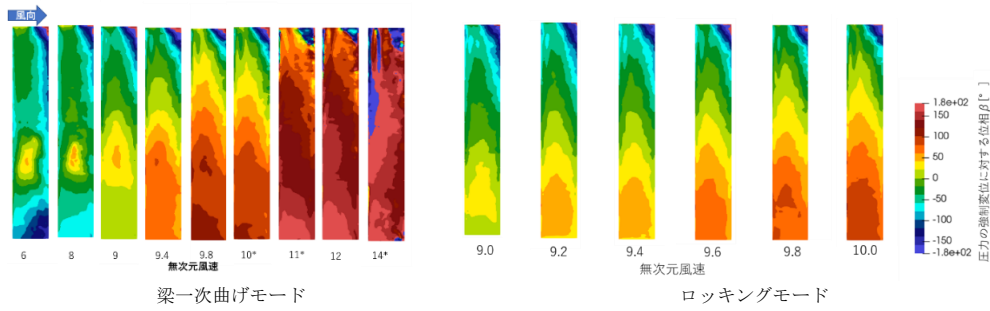


Fig.2.2.2-16 Vibration at first-order beam bending and locking mode and lateral pressure phase distribution at non-dimensional wind speed

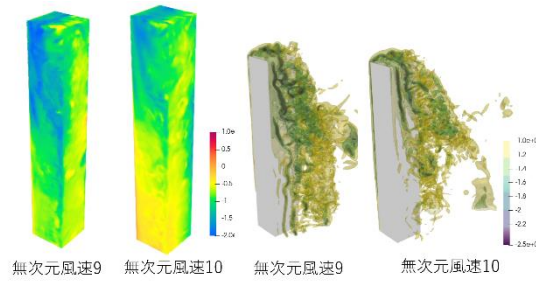


Fig.2.2.2-17 Surface contours and 3D isosurfaces of instantaneous pressure during pressure recovery (first-order bending mode of beam)

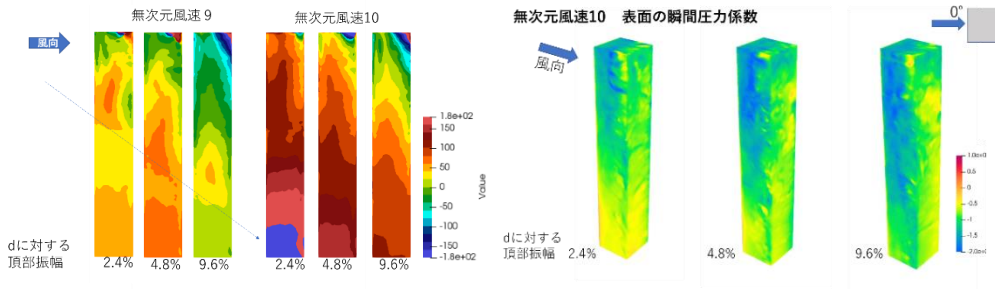


Fig.2.2.2-18 Pressure phase distribution on lateral surface of square cylinder at each amplitude (left) and surface contours of instantaneous pressure during pressure recovery (first-order bending mode of beam) (Right)

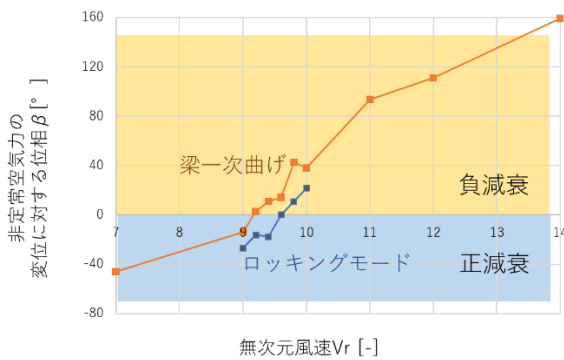


Fig.2.2.2-19 Evaluation of positive and negative damping based on moments of the entire square cylinder

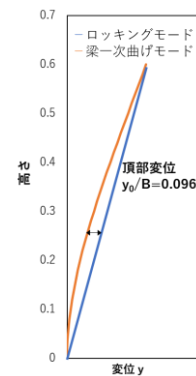


Fig.2.2.2-20 Profile of displacement for each

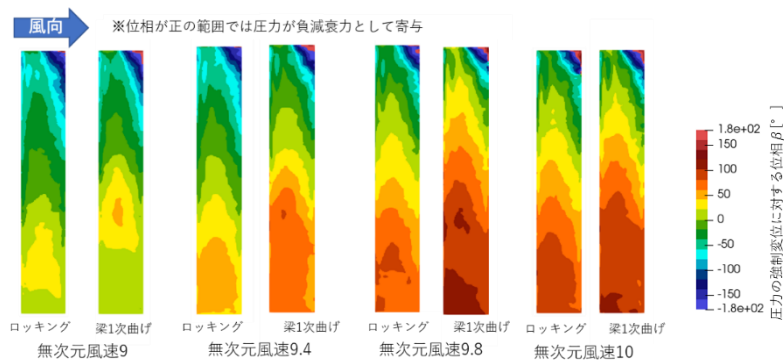


Fig.2.2.2-21 Comparison of lateral pressure phase distribution during rocking mode vibration and first-order mode vibration of beam

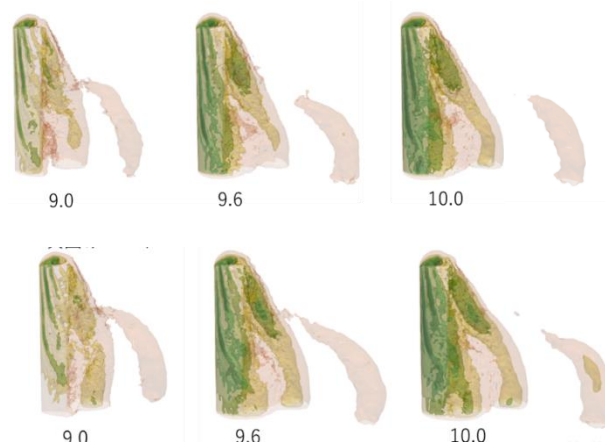


Fig.2.2.2-22 Comparison of vortex structures by pressure isosurfaces

### (b)-3-2 渋谷実建物を対象としたガラス破壊による内外圧の連成解析

強風時、局所的な風圧力や飛散物等によりガラスが破壊された場合、室内の圧力が急速に上昇することによって、他のガラスや外装材において連鎖的な破壊が進行することが予想される。本研究では、ガラスの破壊が発生した状況を想定した際に他の部材に作用する風圧力の評価を実施することを目的として渋谷地区の実建物を対象とした内外圧連成解析を実施した。

本研究では室内流れの流出入を発生させるため、流出入方向それぞれに開口部を設けた。当初は工場で作られる1枚当たり最大サイズのガラス板を想定した一辺3m程度の開口部1つを流入開口として中央に設置し、流出部については住宅の気密性を表す指標から算出した面積の開口部を等間隔に分散させて配置したが、解析上の問題として、流量バランスの再現性の問題から内部に不自然な分布が生じる問題が確認された。そこで本年度は、モデル前面は全て開口とし、流出開口についても気密性に関わらず、十分大きい寸法を確保したモデルにおける内部流れの再現性を確認することとした。その結果、Fig.2.2.2-23、Fig.2.2.2-24に示すように、得られた流速、圧力分布においては基準階内部におけるコア部や柱周りの流れ場の構造が再現された。一方で、モデル躯体からの流れ場の漏れ出しの発生、閉塞した空間の後方開口部における空気の流出に対する流量バランスの再現性に対する課題が抽出された。

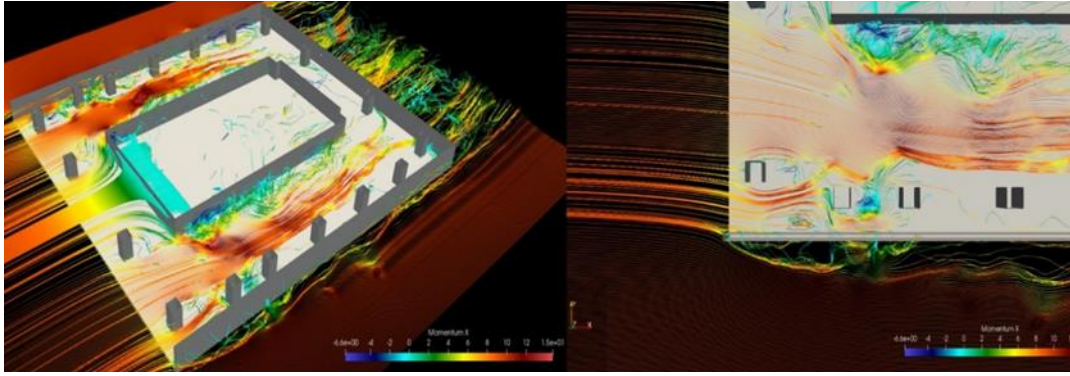


Fig.2.2.2-23 Streamline in indoor space of actual building

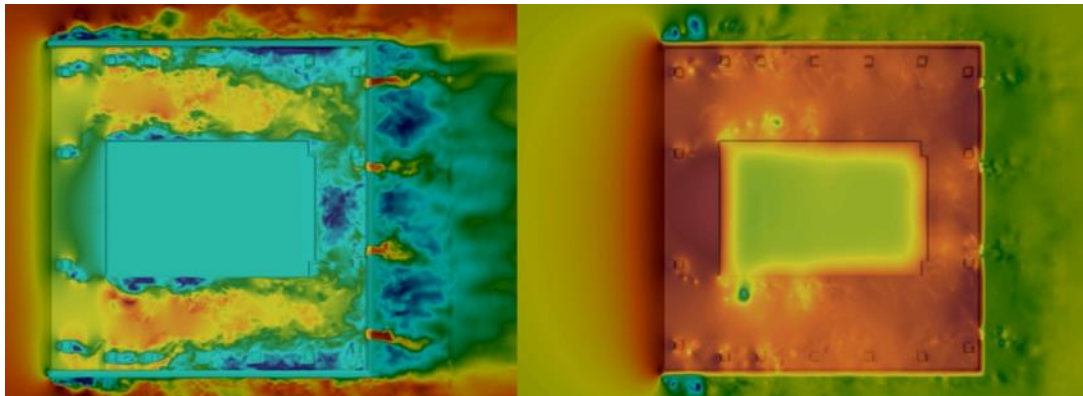
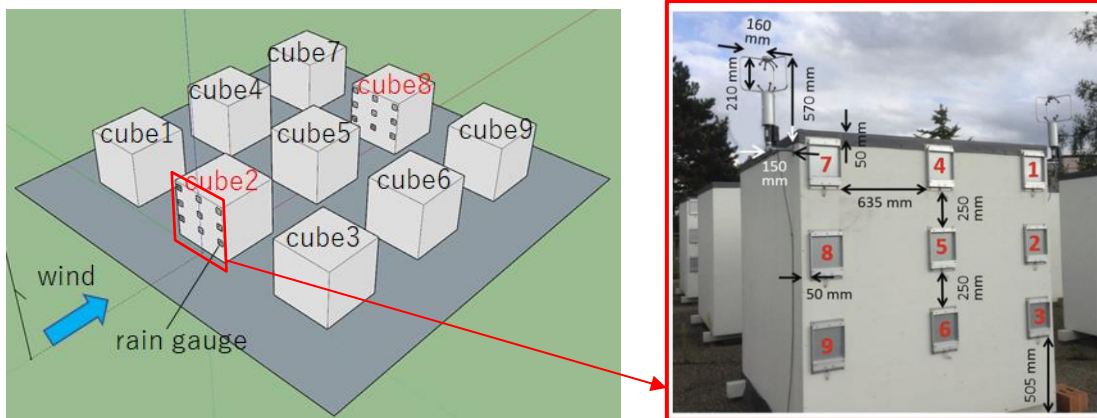


Fig.2.2.2-24 Flow and pressure distribution in indoor space of actual building

### (b)-3-3 LESによる強風の影響を受けた降雨の解析

降雨に対する建物の設計では、洪水に対する設計と建物や敷地内の降雨に対する雨水排水設計が行われる。前者では浸水深に応じて敷地のかさ上げ、止水壁や防水扉の設置等の対策を行う。後者では建物や敷地内の雨水の流れを考慮して排水設計を行うが、強風時は雨滴が風で流されるため、壁面・屋根面や地表面への降雨の状況が無風時とは異なる。このため(社)空気調和衛生工学会給排水衛生設備規準・同解説<sup>2-11)</sup>では、屋根、庇、ドライエリア等の設計において、壁面積の 1/2 を屋根面積に加算して雨水排水設計を行うよう求めている。また、中高層建物が林立する市街地では、強風による降雨の偏在が下水管路の排水に影響を及ぼすとの報告もある<sup>2-12)</sup>。このように強風による降雨の挙動を予測し、雨水排水設計に反映することは重要であるが、その性状を精緻に予測して設計に反映している事例は見られない。

そこで本論文では、強風による降雨の挙動を LES で予測し、Fig 2.2.2-25 の実測結果<sup>2-13)</sup>と比較検証を実施した。



(a)全体設置図（1辺 2m の立方体（地面から 0.17m 浮いている）を 9 個配置）

(b)CUBE 2 の風上壁面の雨量計

Fig. 2.2.2-25 Condition of measurement<sup>2-13)</sup>

計算には、商用版 OpenFOAM の Helyx v3.4 の decoupledEularianSpray のモジュールを用いた。空気は非圧縮粘性流体の支配方程式を PIMPLE 法により解く。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を時々刻々解くことで雨滴の直径毎の雨滴ベクトルを得る<sup>2-14)</sup>。雨滴に作用する空気力の反力に関する空気の NS 式の体積力はここでは無視している。

Fig 2.2.2-26 に計算格子と格子解像度を示す。流入境界には、地表面粗度区分III相当の統計量を持つ流入変動風を与えた。実測結果に基づき、立方体頂部での平均風速は 1.7m/s (0:00~0:40)、1m/s (0:40~7:10) とした。降雨量は直径 0.3mm、1mm、2mm、3mm、4mm、5mm の雨滴それぞれについて雨ベクトルを計算し、体積分率に掛合せて壁面への付着雨量を算出し、降雨強度および雨滴直径の頻度分布<sup>2-15)</sup>に基づいて積算して求めた。

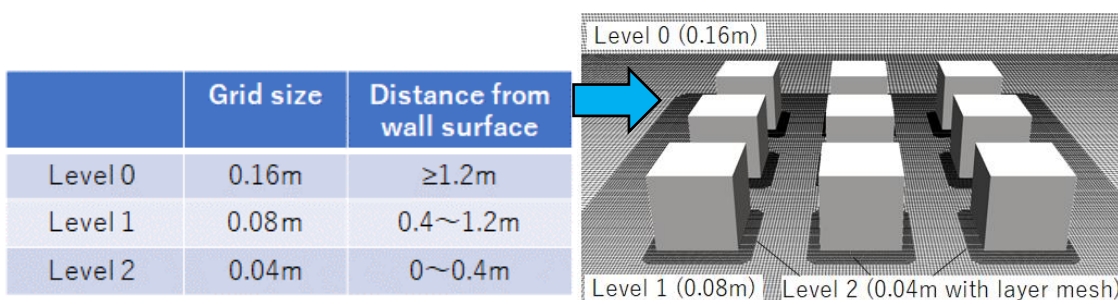


Fig 2.2.2-26 Grid division and spatial resolution.

Fig 2.2.2-27 に平均風速コンターと平均雨滴ベクトルを、Fig 2.2.2-3(c)、(d)に立方体 2、8 の風上壁面第 1 セルの雨滴ベクトル  $u_x$  成分の高さ方向分布を示す。Fig 2.2.2-3 の雨滴ベクトルを見ると、直径 0.3mm では風の影響が強く、風上壁面の上部で雨ベクトル  $u_x$  が急に大きくなる。一方、直径 5mm では、上段から下段に向けて線形に減少している。

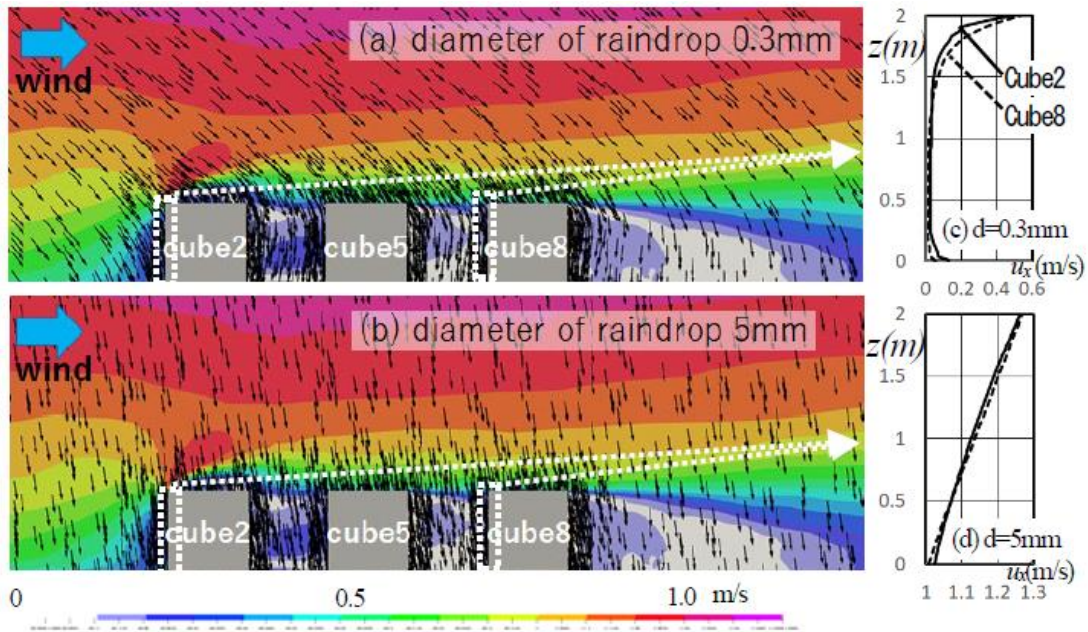


Fig 2.2.2-27 Average wind speed contour and average raindrop vector

Fig 2.2.2-28 に立方体 2、8 の風上壁面の catch ratio（壁面の降水量／地面の降水量）を実測と計算で比較して示す。上段で地表面の 20%程度、下段で 13%程度であり、給排水衛生設備規準の 50%より小さい。また、上段から下段に向けて線形に減少する傾向は、Fig 2.2.2-27 (d)と同様であり、直径が大きな雨滴の影響が支配的であると考えられる。総じて LES と実測の Catch ratio は概ね対応しており、LES の解析手法の妥当性が確認された。

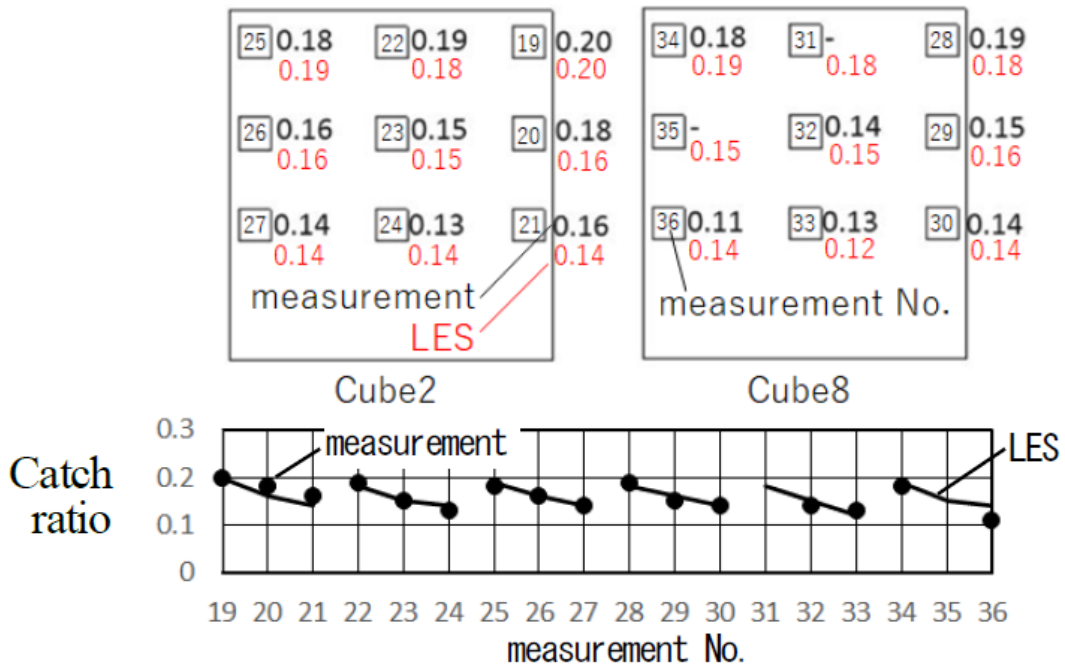


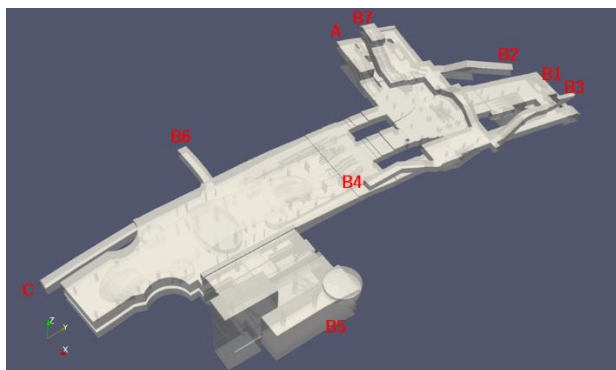
Fig 2.2.2-28 Comparison of catch ratio between field measurement and LES

### (b)-3-4 CUBE に基づく渋谷地下街の浸水解析

本年度は風・水・構造体の統一解法の豪雨時の被災推定への適用に向け、階層型直交格子 CUBE に基づく渋谷地下街を対象とした浸水解析を実施した。

CUBE 数は 5,145、セル数は 21,073,920、最小セルサイズは 0.19513m である。境界条件は全面滑り壁境界で、剛体部分は IB 粒子により表現している。Δt は 0.001 秒で 20000 ステップの計算（実時間 20 秒）である。計算はスーパーコンピュータ「富岳」により実行した。各出入口での流入条件は、雨水が出入口の止水板を越えてくると想定し、全幅堰の式を使用し流量を推定した。流入水の水深はハザードマップにより決定し、これと出入口の幅から断面積を求め、流入速度を設定した。Fig.2.2.2-29 に解析モデル、地下鉄出入口の境界条件を示す。

本研究では、止水と避難誘導を連動させた避難計画や迅速な復旧に向けた排水計画の策定に向けた浸水経路、浸水深・流速、時間経過の分析を実施した。Fig.2.2.2-30 に 20s における地下街における浸水状況（水面）を示す。主に 20 秒後には B7、C、B6 各出入口で流入が始まってから、人の集まる改札口や駅構内の吹抜部分に到達し、Fig.2.2.2-30 に示す範囲で浸水が生じることが観察された。



出入口	C2,3	B6	B7	A3,4,5,6,7
流量 Q	14.35	14.35	14.35	14.35
地上の流入口の数	2	1	1	7
通路幅	3	3	4	13
水深	2	2	2	2
流入速度	4.78376073	2.39188037	1.79391028	3.863806747

Fig.2.2.2-29 Analytical model and boundary conditions at subway entrances

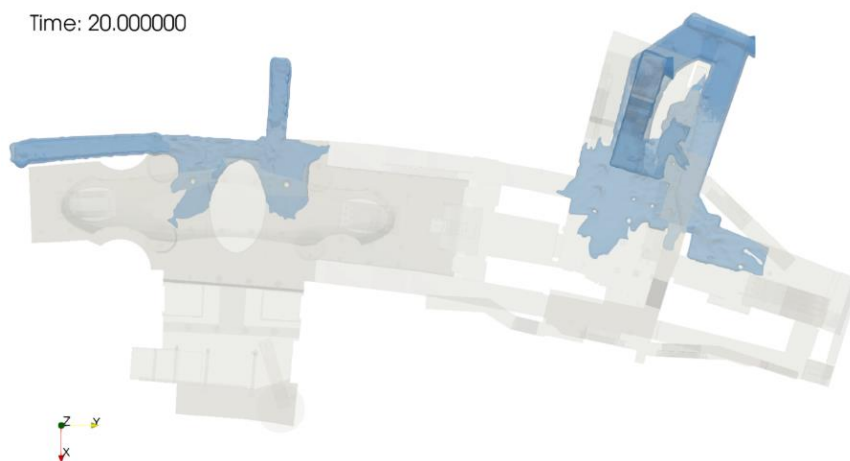


Fig.2.2.2-30 Isosurface of water based on flooding analysis

### (b)-4 都市の暑熱環境連成解法の基礎的なモデルの検証

#### (b)-4-1 東京・北の丸モデルを対象とした解析と観測値との比較

夏期の猛暑時における都市の暑熱環境連成解法の基礎的なモデルの適用性を精査することを目的とし、~~2018年~~平成30年7月23日に記録的猛暑が観測された東京・北の丸エリア (Fig. 2.2.2-1) を対象として LES を実施した。同エリアには東京管区気象台 (風向風速計、温度計) および一般環境大気測定局 (千代田区神田司町) が含まれている。比較的風向が安定し (NNW) 且つ気温が上昇過程にある 11:30~12:00 を解析時間帯とした。流入条件は昨年度実施した WRF-LES における風速・温位のデータに基づいて中立を仮定した河合・田村のフィルタリング・リスケーリング手法<sup>2-16)</sup>の解析と非等温 LES に基づくドライバ解析を実施<sup>2-17)</sup>し、流入風を接続している。

東京・北の丸モデルの詳細を Fig. 2.2.2-31 に示す。都市形状の再現範囲は約 2km×1.4km、解析領域は幅 2.6km×奥行 2.4km×高さ 1.2km を含む広域モデルとし、汎用数値地図「AW3D」に基づく建物・街区形状を反映した大規模計算を実施する。計算格子はテトラ要素を主とする非構造格子系であり、総要素数は約 6000 万である。ここでは、壁面温度境界条件を求めるために、対象時刻より前の 24.5 時間 (7/22 11:00 ~7/23 11:30) について太陽位置の移動を考慮した熱放射・熱伝導解析を実施し、得られた表面温度 (同図右下) を初期条件とし、乱流場・放射場の連成解析<sup>2-18)</sup>を実施した。

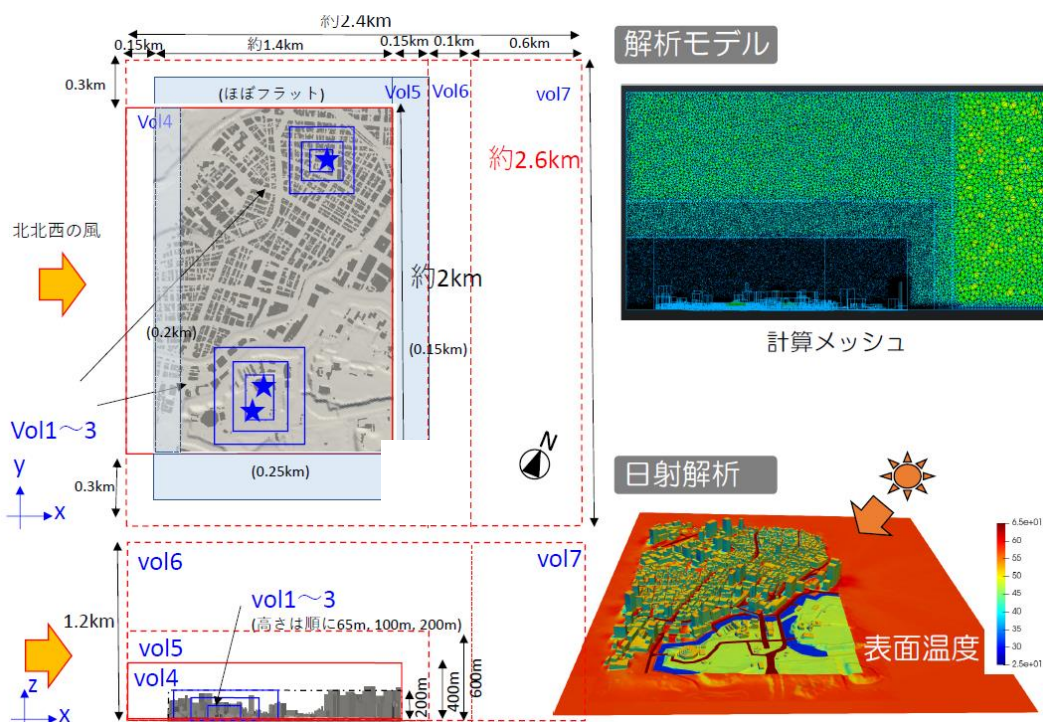


Fig. 2.2.2-31 Detail of target model for Kitanomaru area.

北の丸モデルの解析において、東京管区気象台観測点における風速・温度をサンプリングし、対象日時における観測値との比較を行う。解析結果に基づく平均流れ場において、風速計および温度計の各サイト (図中★) を通過する流線図を Fig. 2.2.2-32 に示す。本計算風向 (NNW) 下においては、風速計 (科学技術館屋上) に関しては流入直後から数百 m に渡り中高層街区が存在しており (当該建物も含め) それらの影響を受けていることが推察される。温度計 (北の丸公園露場) は周囲に建物群は存在しないものの、実際の観測サイト周囲に存在する樹木群が解析モデルには反映されていないため、その影響については別途検討を要する。

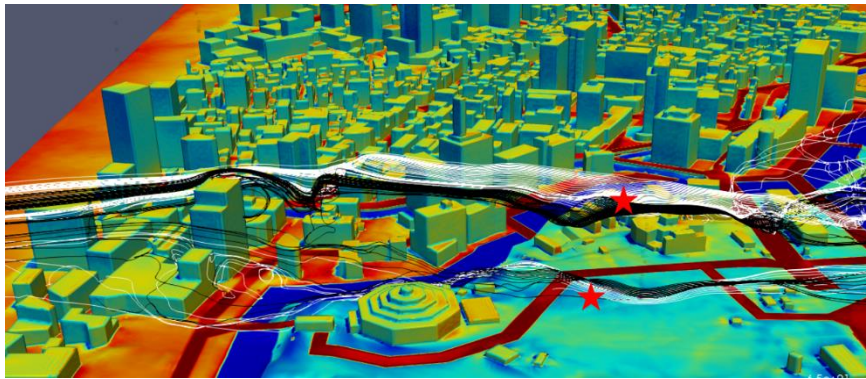


Fig. 2.2.2-32 Streamlines through observation points for wind speed and temperature

風速および気温について、計算値と観測値を比較した結果を Fig.2.2.2-33 および Fig.2.2.2-34 に示す。解析値は観測値の統計処理方法と可能な範囲で合わせた「10 秒ごとの平均値」とした。風速変動については計算値が若干過大となっているが、これは本解析では北の丸公園の植栽を再現していない影響だと考えられる。温度変動については、計算値・実測値ともに上昇トレンドは確認されるものの、絶対値が解析の方が若干過小評価となった。要因として、WRF-LES の地表面近傍温度が若干過小評価されていることや、市街地スケールでの計算時の温度境界条件の影響だと考えられる。

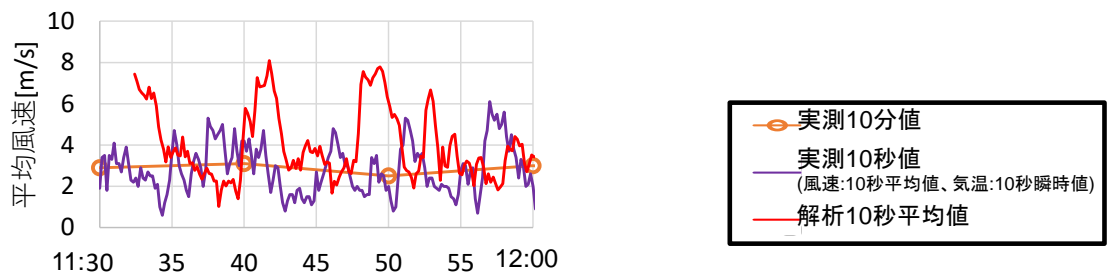


Fig. 2.2.2-33 Comparison of simulation and observed values for wind velocity

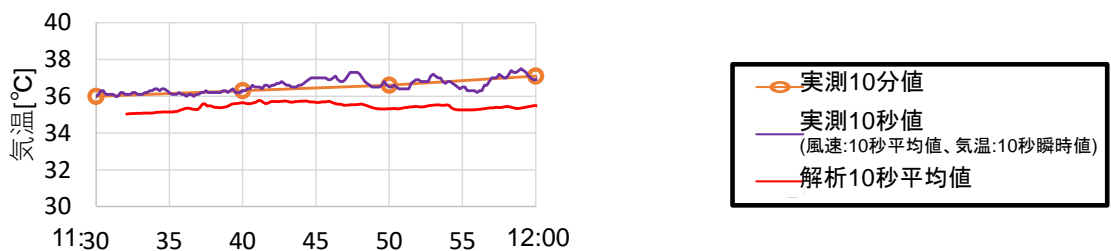


Fig. 2.2.2-34 Comparison of simulation and observed values for air temperature.

## (b)-5 変容都市における高い換気性能とレジリエンスを確保した市街地の提案と換気性能評価

### (b)-5-1 最大瞬間風速に基づく耐風性能の評価

渋谷駅周囲における地域特性を考慮した変容エリアとして、同駅南側に位置する、旧来からの桜並木の名所「さくら坂」と、広域再開発が進む「桜丘エリア」に挟まれた街区を対象として、中低層建物群によ



る構成も含め提案された変容パターンを示す (Fig. 2.2.2-35) とともに、各計画概要を以下に述べる。

【C-1：高層集約モデル】対象エリア内の既存建物群を同体積の高層（角柱）建物に置換する。建物寸法は、平面 38m×38m、高さ 150m であり、渋谷エリアの超高層建築物と概ね同程度の規模である。周囲は大規模なオープンスペースが設けられる。

【C-2、3：中低層建物群（コの字型プラン）】中庭空間をコの字平面の建物で囲むプランを基本とし、建物の高低差を設ける。相対的に高い建物について、主風向（南北）方向に直交（壁状に）配置する C-2、平行に配置する C-3 を計画した。

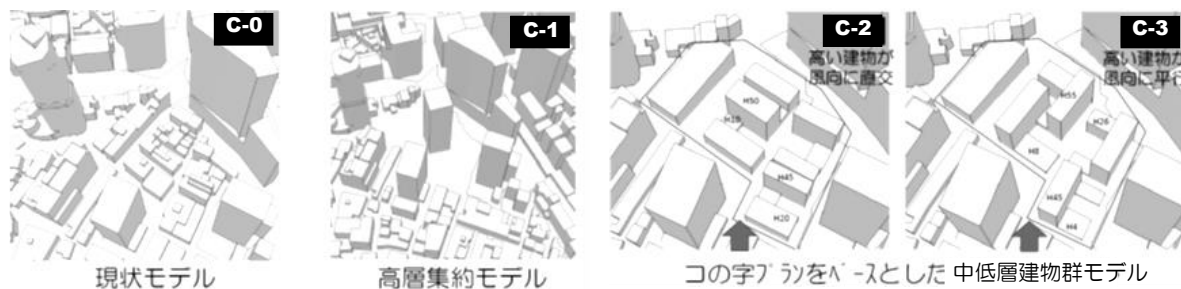


Fig. 2.2.2-35 Various transformation patterns for Sakurazaka area

本年度は大型台風等による強風・暴風に対する都市の防災（耐風）性能を評価するため、対象エリア内における最大瞬間風速分布について検討した<sup>2-19)~2-21)</sup>。Fig. 2.2.2-36 に各ケースにおける最大瞬間風速（3秒ガスト、基準風速：高さ 220m で 35.9m/s）の空間分布を、Fig. 2.2.2-37 に風速レベルに対する面積比率および超過確率を示す。本 4 ケース中、高層建物に集約された C1 において強い最大瞬間風速分布が顕在化しており、エリア内のほぼ全域において 20m/s 以上（平均値は現況 C0 の約 2 倍）となっている。C1 は一般的な再開発形態と位置付けられるものの、瞬間的な強風が広範囲に発生することが懸念されることから、都市防災（耐風）性能としては適切でない。一方、中低層建物群で構成されるケースのうち、C3 は他ケースに比べ最大瞬間風速が抑制されている。

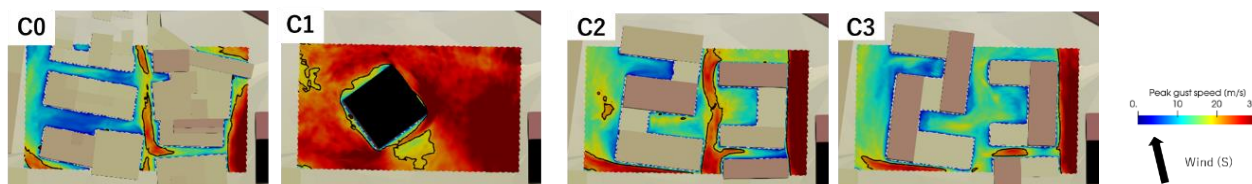


Fig. 2.2.2-36 Spatial distribution for peak gust speed

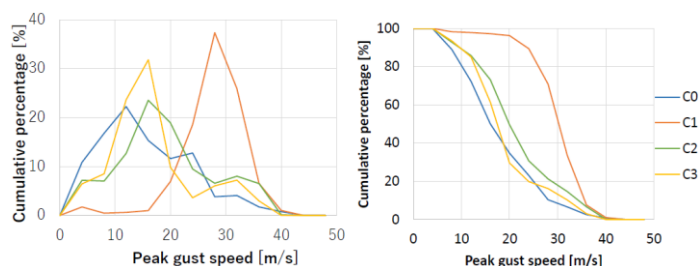


Fig. 2.2.2-37 Area ratio and cumulative percentage for peak gust speed

(b)-5-2 平均風速および Breathability に基づく換気性能の評価

今後の都市の環境性能として、大気中の汚染物質や空気感染性ウイルス等に対する換気性能が要請される。ここでは、平均風速分布および運動エネルギー輸送量に基づいて、対象エリアの換気性能評価を行った<sup>2-20), 2-21)</sup>。Fig. 2.2.2-38 に各ケースにおける平均風速（基準風速：高さ 220m で 5.6m/s）の空間分布を、Fig. 2.2.2-39 に風速レベルに対する面積比率および累積頻度を示す。現状ケース C0 はエリア内に広く低速域がみられ、空気が滞留しやすいものと考えられる。C0 において累積頻度 50%に相当する風速（0.8m/s）を基準とすると、中低層建物群によるケース C2、C3 は換気性能が大幅に改善されており、当該風速の頻度が 20%まで低減されている。特に C3 は比較的増速域の一様性が高いため、高い換気性能を見込むことができる。高層ケース C1 は広範囲に渡り高い風速レベルとなっているが、前頁の結果より防災（耐風）性能が不十分でないことから変容都市形態としては必ずしも適切でない。

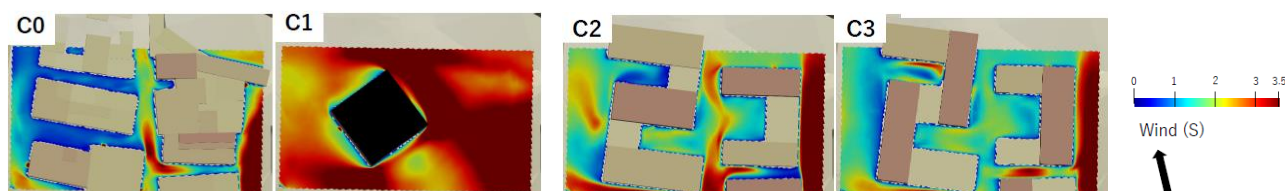


Fig. 2.2.2-38 Spatial distribution for mean wind velocity

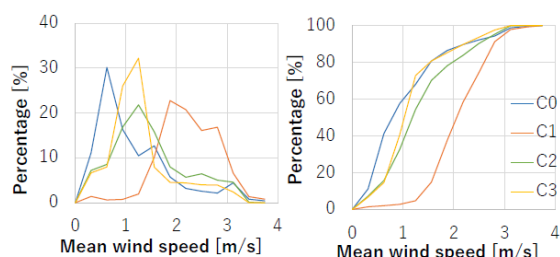


Fig. 2.2.2-39 Area ratio and cumulative percentage for mean wind speed

次に、鉛直方向の運動エネルギー輸送量に基づく **Breathability**<sup>2-22)~2-24)</sup> により、対象エリアの換気性能評価を行う。鉛直方向の運動エネルギー輸送量  $E_{vt}$  および各コンポーネントを Fig. 2.2.2-40 に示す。

上記の各コンポーネントは、平均運動エネルギー および 乱れの運動エネルギーに関する輸送方程式において、①②は移流項、③④は拡散項（乱流応力成分）について鉛直成分を抽出したものに相当する。なお、エネルギー輸送量評価面（水平断面）において算出される各コンポーネントおよび合算値  $E_{vt}$  に関し、正值は上向きの輸送すなわち汚染空気の排出性能、負値は下向きの輸送すなわち上空新鮮空気の導入性能と位置づけられる。

ここでは、各変容モデルケースごとに換気性能を定量評価するため、評価面高さ（45m、15m）において水平方向の検査範囲を定め、評価領域内の鉛直方向エネルギー輸送量を算出する。Fig. 2.2.2-40 に、上記各コンポーネント別および合算値についてケース間の比較結果を示す。高さ 45m における新鮮空気導入量（負値）に関しては、C1 が顕著に大きく、他 3 ケースの差はわずかである。全ケースにおいて運動

エネルギー輸送の寄与は①成分が主であり、続いて C1・C2 では②、C0・C3 では③であった。同高さにおける汚染空気の排出性能（正值）については、ケース間の差は小さく、①②の寄与が主であった。高さ 15m においては、正值・負値ともに現状ケース C0 に比べケース C1～C3 で運動エネルギー輸送量が顕著に改善されている。正味の運動エネルギー輸送量については、ケース C1 を除き、高さ 45m では上向き、高さ 15m では下向きであることが確認された。

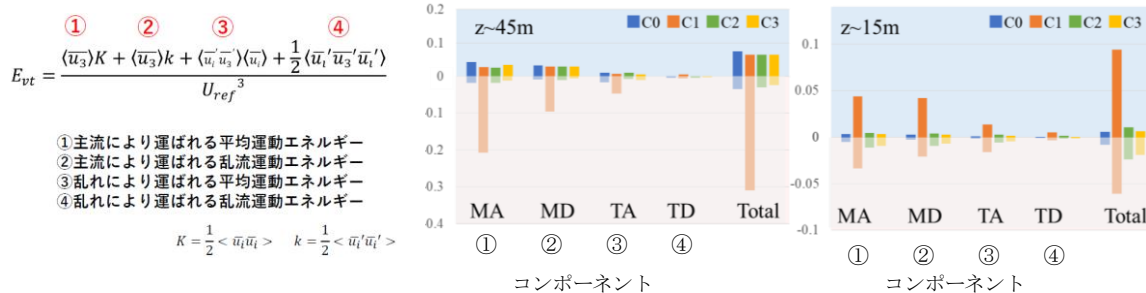


Fig. 2.2.2-40 Case comparison for each component related to vertical kinetic energy transport

Fig. 2.2.2-41 は、breathability について絶対値が大きい領域（青：+1.6m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>、赤：-1.6m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>）を等値面で描画したものである。現状ケース C0 では対象エリア内に等値面が確認されない一方、高層ケース C1 では吹下しに伴う負領域が広く発生している。中低層ケースについては、C2 では主流方向に直交する中層建物まわりの渦構造に起因した局所的な等値面が、C3 では風上側の超高層建物群の影響を受けた流れが縦溝状の空間に作用している様子が確認される。

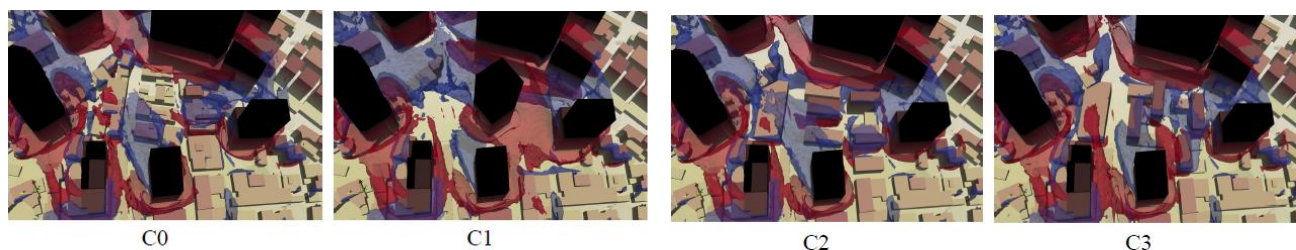


Fig. 2.2.2-41 Isosurfaces for regions with large absolute values of breathability

都市の換気性能に関しては、評価手法・検査空間・物理量等について今後も引き続き検討を行うとともに、防災（耐風）性能、さらには温熱環境等も加味し、多角的視点から最適な都市形態を模索してゆく。

#### 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. Int. J. Heat Fluid Fl., Vol. 80, No. 108464, 2019.
- [2-2] Junshi Ito, Tsutao Oizumi, Hiroshi Niino: Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. Scientific reports, Vol 7.1, pp.1-10, 2017.
- [2-3] Niclas Jansson, Rahul Bale, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura: CUBE: A scalable framework for large-scale

industrial simulation Int J High Perform Comput Appl, Vol 33, pp.678–98, 2018.

- [2-4] 河合英徳, 田村哲郎: 実建物モデルを対象とする広範囲・高解像度 LES -壁面風圧変動を引き起こす乱流構造の抽出, 日本流体力学学会年会, 2022.9
- [2-5] 河合英徳, 田村哲郎: 東京都心部の流入変動風データベースを用いた超高層建築物の風圧力に関する LES, 計算工学講演会論文集, Vol.27, 2022. 6
- [2-6] Kondo K., Kawai H., Tamura T. Nakajima K. Wind Pressure Characteristics of High-rise buildings in Middle and High-height Urban Areas Spread over Local Terrain, WCCM-APCOM, 2022.
- [2-7] Rahul Bale, Neelesh A. Patankar, Niclas Jansson, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura: Stencil Penalty approach based constraint immersed boundary method, Computers and Fluids, Vol 200, 104457, 2020.
- [2-8] Koji Nishiguchi, Rahule Bale, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura: Full Eulerian deformable solid-fluid interaction scheme based on building-cube method for large-scale parallel computing, Int J Numer Methods Eng. Vol 117, pp.221–248, 2019.
- [2-9] Tokimasa Shimada, Koji Nishiguchi, Rahule Bale, Shigenobu Okazawa, Makoto Tsubokura: Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid–structure interaction problems, Int J Numer Methods Eng. Vol 123, pp.1294–1328, 2022.
- [2-10] 丸山勇祐: 高層建物周りの流れ場と空力不安定振動に関する研究, 学位論文, 2000.
- [2-11] (社)空気調和衛生工学会, 給排水衛生設備規準・同解説 SHASE-S-206, 2009.
- [2-12] 永野雄一, 伊藤一教, ビル風による地上雨量分布変化が浸水解析に及ぼす影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 75, No.2, I\_1273-I\_1278, 2019.
- [2-13] Kubilay, Aytaç, Numerical simulations and field experiments of wetting of building facades due to wind-driven rain in urban areas, A thesis submitted to attain the degree of DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH AYTAÇ, 2014.
- [2-14] 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.

### (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 4 年度は、統合シミュレーション技術の開発（気道内流体解析と粘膜上皮細胞上の粘液輸送解析の連成解析手法の開発）、汚染物質濃度制御にロバストな室内環境設計法の開発（室内に形成される不均一混合場の定量的評価指標の開発）、実証問題の設定と解析モデル作成、統合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構築、ニューラルネットワークの「富岳」チューニングを行った。

具体的には、鼻腔・口腔から気管支までの上気道モデルと気管から気管支第 16 分岐（終末細気管支）までの下気道モデルを統合した数値気道モデルの界面境界モデルとして粘液輸送モデルを統合し、気道内気流解析に液膜から液滴形成を再現する Eulerian Wall Film モデルを実装し、気道内 Lagrange 粒子解析と連成解析することで、咳に伴う気道内での飛沫・飛沫核生成と室内環境中への呼出を連続して解析する技術を確立した。また、室内に形成されるスカラー不均一混合場を定量的に評価する指標として新たな換気効

率指標(Net Escape Velocity, Net Escape probability)を考案し、その厳密な数学的定義を示すと共に、換気設計への実装可能性を簡易室内モデルを対象とした感度解析にて確認した。

In this fiscal year, we have developed (i) integrated simulation methods for airflow in lumen and mucus transport on epithelial tissue surfaces, (ii) robust indoor environmental design method for controlling pollutant concentrations using newly developed ventilation index for directly evaluating heterogeneity of mixing, (iii) multi-objective optimization framework for "Fugaku" based on neural network.

Specifically, we have integrated a mucus transport model as an interface boundary model for a numerical airway model that includes an upper airway model from the nasal and oral cavities to the bronchi and a lower airway model from the trachea to the 16th bronchus (terminal bronchus). We also implemented an Eulerian wall film model that reproduces droplet/droplet nuclei formations from a mucus liquid film for airflow analysis in the lumen and coupled with Lagrangian particle tracking analysis in the airways. Finally, we have established a series of numerical technique for continuous analysis of droplet/droplet nuclei in the airways associated with coughing and expiration into the indoor environment.

In addition, a new ventilation efficiency index (Net Escape Velocity, Net Escape Probability) was developed as an index to quantitatively evaluate the scalar heterogeneous mixing field formed in an indoor environment, and its rigorous mathematical definition was presented.

## (b) 本研究の内容

本年度(~~2022年度~~令和4年度)の研究成果を項目別に示す。

### (b-1) 細気管支(16分岐)を含む上気道から下気道までを再現した数値気道モデルの改良

2021年度に作製した鼻腔・口腔から気管支第16分岐(各lobe毎に一流路を再現)までを含む上気道・下気道統合型の *in silico* 肺モデルを改良し、(ボランティア被験者のCTデータより忠実に抽出した気管支第8分岐までの生体モデルを基に)気管支第8分岐以降の全ての流路に対して分岐アルゴリズムを適用して気管支16分岐まで拡張した改良型の *in silico* 肺モデルを作製した。概要を Fig. 2.2.3-1 に示す。

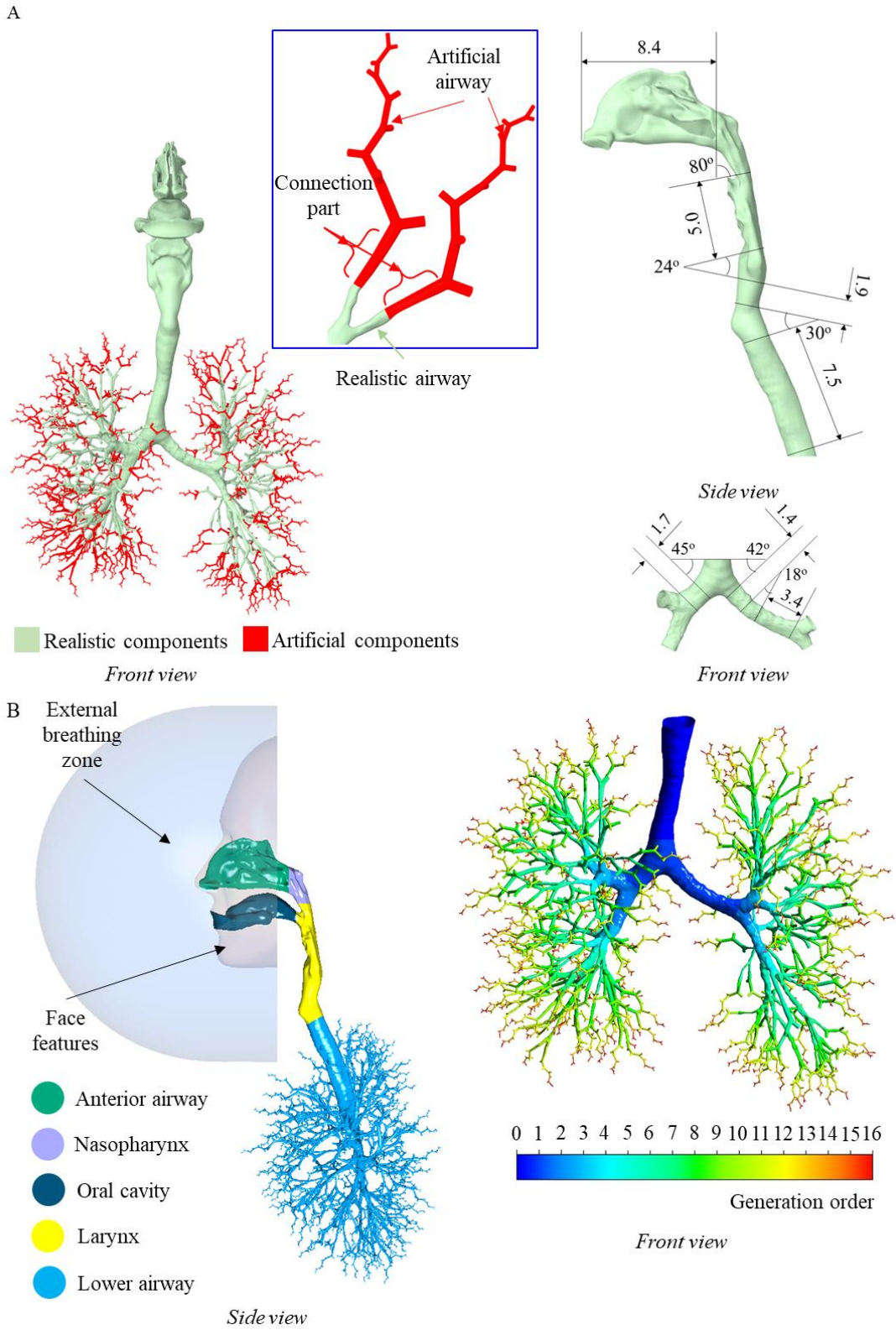


Fig. 2.2.3-1 (A) in silico airway from nostrils to 16<sup>th</sup> generation. (B) The computational interested domain includes the human respiratory tract, facial features, and external breathing zone.

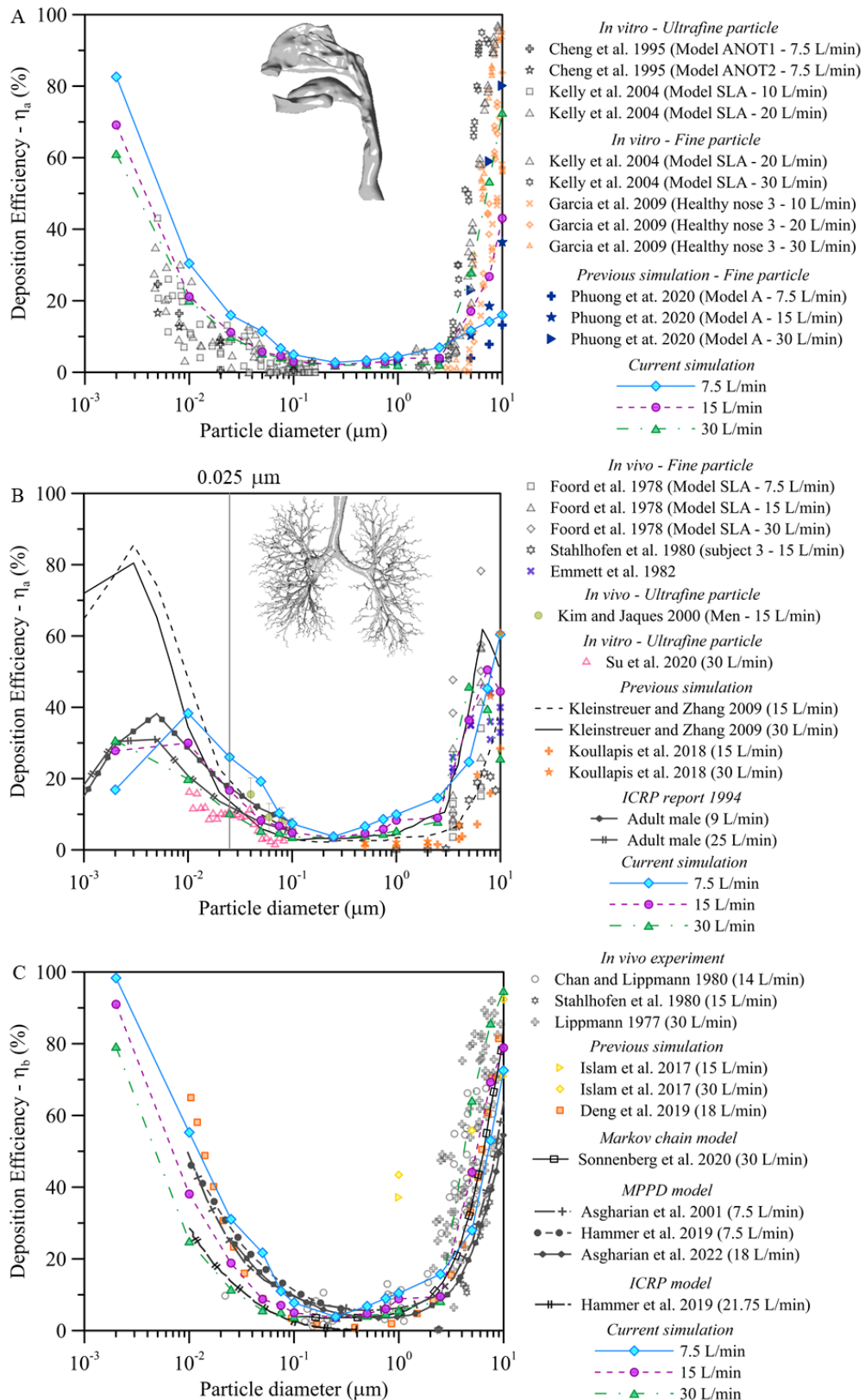


Fig. 2.2.3-2 Comparison of deposition efficiency in the upper airway (A) and the lower airway (B) and (C) with previous and experimental data at the three investigated breathing flow rates

上気道から下気道気管支第 16 分岐まで再現した改良型 in silico 肺モデルを対象として定常呼吸を仮定

した条件で気道内流れ場解析を実施した上で、鼻孔経由で流入した粒子の気道内粒子沈着確率を解析した結果を Fig. 2.2.3-2 に示す。In vivo ならびに in vitro 結果と十分に一致する結果が得られている。

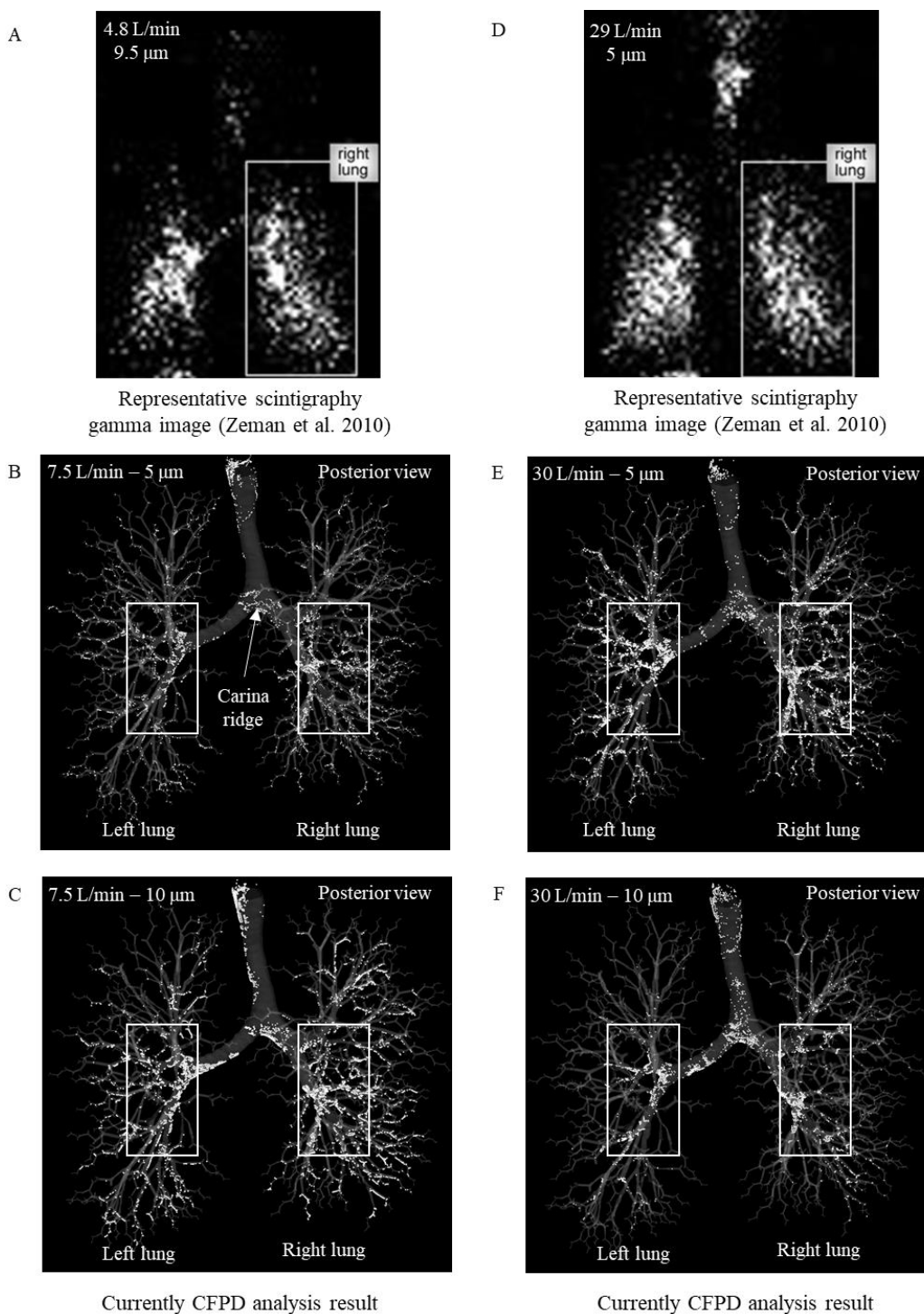


Fig. 2.2.3-3 Comparison of local deposition distribution for the coarse particles (5, 10  $\mu\text{m}$ ) at the low breathing flow rate between the scintigraphy image (A) and CFPD analysis (B, C); at the high breathing flow rate between the scintigraphy image (D) and CFPD analysis (E, F).



Fig. 2.2.3-3 は下気道で粒子沈着分布の解析結果の一例を in vivo (シンチグラフィによる可視化画像) 結果を比較した図を示す。定量的な比較は容易では無いが、分岐位置での粒子沈着の傾向、右肺下葉への粒子流入の傾向などは in silico 肺モデルによる解析結果は in vivo 結果と良く一致しており、一定程度の予測精度が確保されていると判断できる。

### (b-2) 数値気道モデル界面境界条件としての Eulerian Wall Film モデルの実装

COVID-19 に代表される経気道感染は、咳や発話に伴う呼吸器系での飛沫・飛沫核が汚染発生源であることから、この飛沫・飛沫核発生量の正確な予測は経気道感染予測の基幹である。気道内のウイルス増殖のホットスポットは不均一に分布することも良く知られた事実であることから、飛沫・飛沫核中のウイルス含有量は、その発生部位・メカニズムに強く依存する。気道内での飛沫・飛沫核発生の物理的メカニズムに関しては、(i) 気管支収縮に伴う薄膜分裂、(ii) 喉頭領域での粘液剥離、(iii) 口腔内振動、が主要な要因とされている。本研究では、数値気道モデルに Eulerian Wall Film モデルとラグランジュ分散相モデルを連成した数値解析を実施することで、特に咳による気道内での飛沫・飛沫核の発生位置、発生量の定量予測に取り組んだ。

計算負荷を軽減するために、(b-1)で作製した in silico 肺モデルの鼻腔部分と気管支第3分岐よりも下流部分を削除することで、口腔から気管支第2分岐までの形状を再現した数値気道モデルを作成した。咳による飛沫の生成は口腔形状および口の開き具合によって変動する口腔内の気流に大きく依存していると考えられるため、このモデルでは歯列形状や口腔開口をより詳細に再現している。

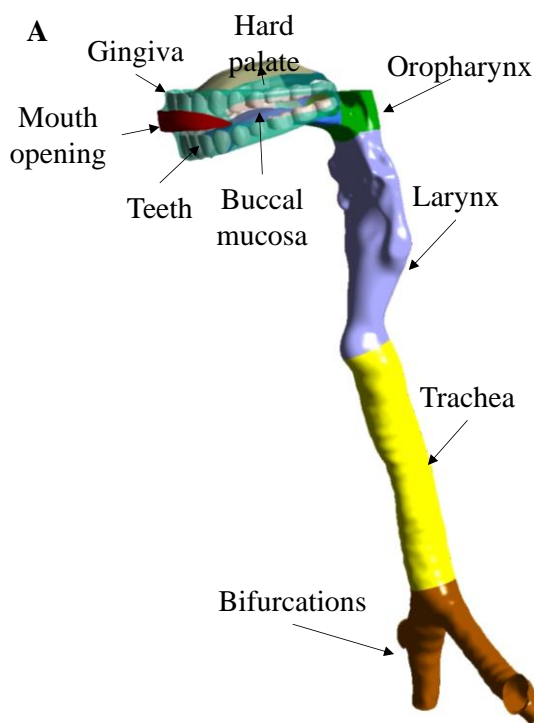


Fig. 2.2.3-4 Numerical respiratory tract (Airway) model from oral cavity to bronchial tube

この数値気道モデルの粘膜界面条件として、Eulerian Wall Film モデルを実装し、咳を想定した気流プロ

ファイルを与えた流れ場解析を実施することで、ラグランジュ分散相モデルを連成させた気道内の飛沫拡散解析を行った。粘膜フィルムの初期条件として、気道壁面には  $0.33\mu\text{m}$ 、口腔部分には厚さ  $68.9\mu\text{m}$  のフィルム厚を設定した。

Table 2.2.3-1 Model Parameters for EWF model.

Film material	Water
Film thickness (m)	$3.3\text{E-}07 - 6.89\text{E-}05$ ( $0.33 \mu\text{m} - 68.9 \mu\text{m}$ )
Critical shear stress-CSS (Pa)	10
Diameter coefficient	0.14
Mass coefficient	0.5
Surface tension (N/m)	0.072
Maximum thickness control (mm)	68.9
Time step size (s)	0.0001

咳に相当する速度プロファイルを気道モデル境界条件として与えた場合の初期 0.1 秒間での気道内での飛沫発生量の時間変化を Fig.2.2.3-5 に示す。粘液フィルムが剥離して粒子生成する部位には明確な特徴があり、口腔内でも特に歯列位置からの粒子生成が過半となる結果が得られている。

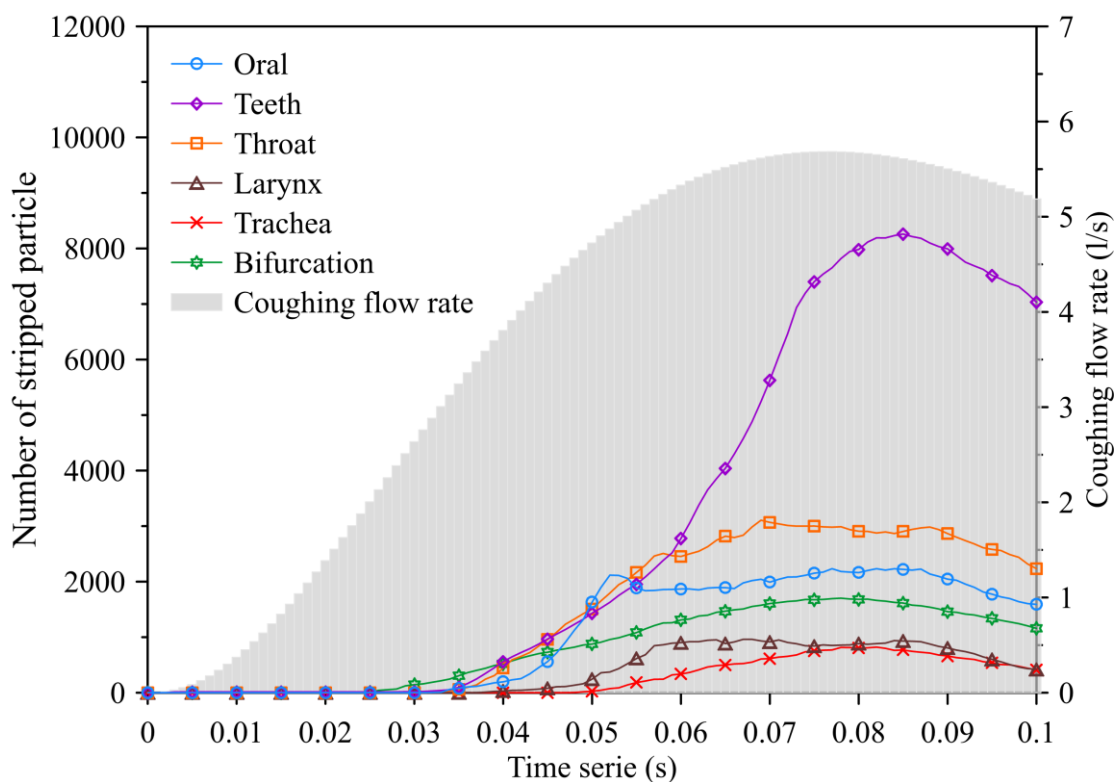


Fig. 2.2.3-5 Origin of stripped particles during coughing

Fig. 2.2.3-6 には咳を再現した風速プロファイルを与えた解析の時間進行に伴う特に下気道における剪断応力分布解析結果を示す。また、下気道での粒子生成位置も併せて示す。

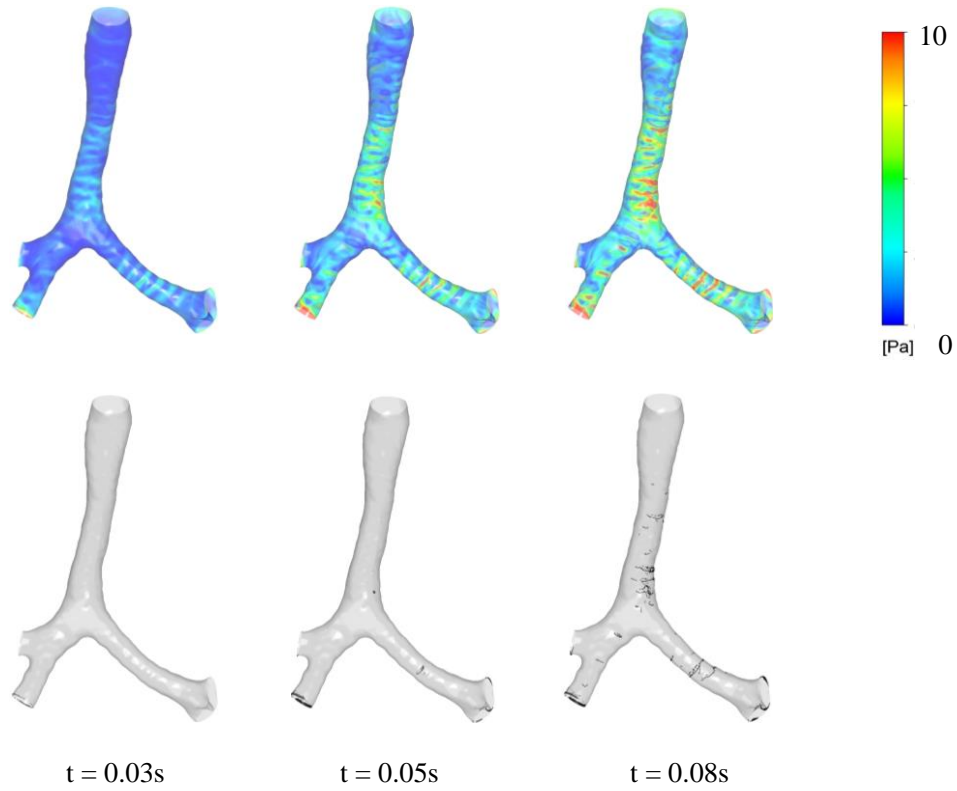


Fig. 2.2.3-6 Visualization of stripped particles

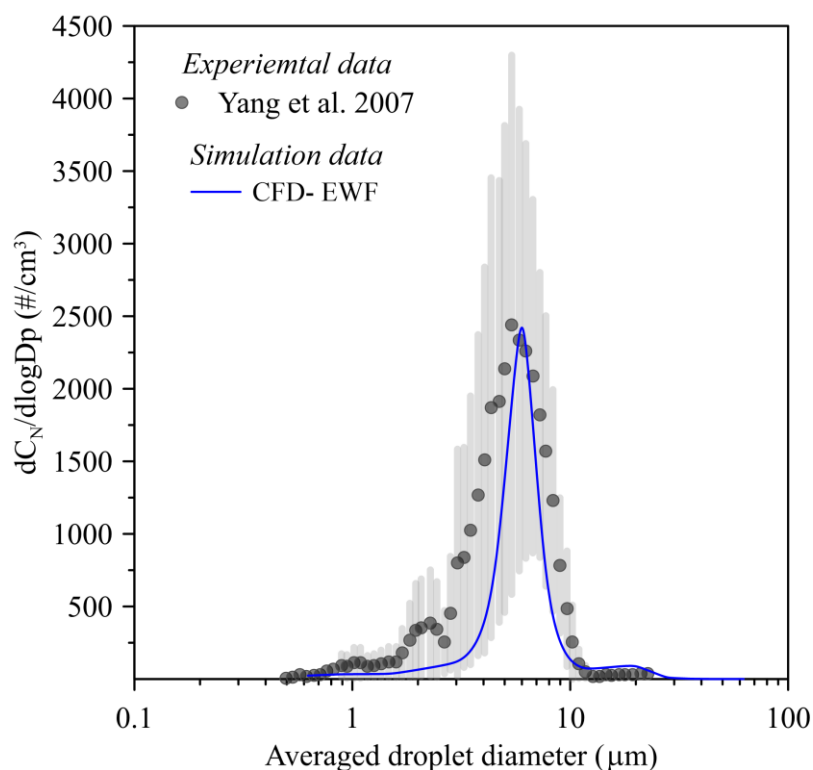


Fig. 2.2.3-7 Validation with experimental data after optimizing the parameters for the EWF model.

Fig. 2.2.3-7 には EWF モデルのパラメータ調整を行った上で、気管支第二分岐から上流側の上気道モデルを対象として解析した気道内発生粒子の粒径分布を示す。Yang らの被験者を対象とした実測結果を精度良く再現する結果が得られており、気道モデル内に EWF モデルを実装することで、飛沫飛沫核生成量の予測が可能となることを確認した。

### (b-3) 不完全混合場を定量評価するための新たな換気効率指標の開発と簡易室内モデルを対象とした換気効率指標の感度解析

室内に形成される不均一濃度場の情報を基に算出した空間平均濃度は、質点系の質量保存則より導かれる完全混合濃度とは異なる値となる。そのため、質点系の質量保存則の完全混合濃度を、空間平均濃度に入れ替えた場合の換気量は、外気導入量とは異なる値となり、この流量は **Purging Flow Rate** と定義される。また **PFR** は室空間の全領域から、局所領域の平均濃度を決定する実質的な換気流量という概念へと展開されており、更に、この **Local Purging Flow Rate** の概念を基に、局所領域への汚染物質の再帰回数 **Visitation Frequency** や局所領域内の平均滞在時間という新たな換気効率指標も提案され、詳細な数値解析結果も報告されている。

居住域や呼吸域といった室内の局所領域の平均濃度を環境制御の対象とする場合、対象となる局所領域のサイズは非常に大きな幅を有する。この局所領域を徐々に小さくした場合に、極限として、局所点の濃度を議論することになり、この点の濃度を決定する速度スケールが定義できる。本研究では、この速度スケールを **Net Escape Velocity (NEV)** と称することとし、NEV が有する物理的なメカニズムと明快な数学的定義を導出した。

室内に形成される不均一流れ場によって、室内に不均一濃度場(スカラー濃度場)が定常的に形成されて

いる条件を前提とすれば、このスカラー濃度  $C$  [kg/m<sup>3</sup>]と濃度場について、スカラーソース  $S_\phi$  [kg/m<sup>3</sup>s] を内部に含む検査体積を  $V$ 、 $V$ の作る閉曲面ベクトルを  $\mathbf{S}$ として、その表面におけるスカラーフラックス放出面を  $S_o$ 、流入面を  $S_i$ 、 $\mathbf{S} = \mathbf{S}_o - \mathbf{S}_i$ と定義する。Net Escape Velocity (NEV)をベクトル表記すれば、次式となる。

$$C_o \int_{S_o} \mathbf{u}_{NEV} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \int_V S_\phi dV = \dot{m} = C_o q_{PRF} \quad (2.2.3-1)$$

$$C_o = \frac{1}{V} \int_V C(\mathbf{x}) dV \quad (2.2.3-2)$$

$$\dot{m} = \int_V S_\phi dV \quad (2.2.3-3)$$

$$\mathbf{F} = C\mathbf{u} - D\nabla C \quad (2.2.3-4)$$

ここで、 $\dot{m}$  [kg/s]はスカラー発生量、 $C_o$  [kg/m<sup>3</sup>]は平均濃度、 $\mathbf{u}_{NEV}$  [m/s]は Net Escape Velocity ベクトル、 $q_{PRF}$  [m<sup>3</sup>/s] は Purging Flow Rate、 $\mathbf{F}$  [kg/m<sup>2</sup>s]はスカラーフラックスベクトル、 $D$  [m<sup>2</sup>/s]は拡散係数、を示す。

NEV は閉曲面ベクトル  $\mathbf{S}$ で定義される正味のフラックスである。同様に、スカラーフラックス放出面である  $S_o$ のみで定義される NEV\*をベクトル表記すれば次式となる。

$$C_o \int_{S_o} \mathbf{u}_{NEV}^* \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \int_V S_\phi dV + \int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \dot{m} + \Delta\dot{m} \quad (2.2.3-5)$$

$$\Delta\dot{m} = \int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.2.3-6)$$

$$\mathbf{u}_{NEV}^* = \frac{\mathbf{F}}{C_o} \quad (2.2.3-7)$$

また、検査体積に対するスカラーフラックスの全体の収支式は、

$$\text{div}\mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F} = S_\phi \quad (2.2.3-8)$$

であるから、これを検査体積で積分すれば次式となる。

$$\int_V \text{div}\mathbf{F} dV = \int_S \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \int_{S_o} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} - \int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \int_V S_\phi dV = \dot{m} \quad (2.2.3-9)$$

この検査体積 CV 内だけにスカラーソースがある場合は、検査体積に対する流入フラックス(Influx)はすべて CV に戻ってくる成分だと考えられることから、この再帰確率 (CV に戻ってくる確率)を  $\alpha$ とすると次式が成立する。

$$\int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \dot{m} \sum \alpha^n = \frac{\alpha}{1-\alpha} \dot{m}. \quad (2.2.3-10)$$

一方で、全体のバランスを考慮することで再帰確率  $\alpha$ が定義できる。

$$(1-\alpha) \int_{S_o} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \dot{m}. \quad (2.2.3-11)$$

$$\alpha = \frac{\int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}}{\int_{S_o} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}} = \frac{\int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}}{\dot{m} + \int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S}} \quad (2.2.3-12)$$

また、検査体積 CV から流出するスカラーフラックスは、I 項の再帰無し(戻ってこない)成分と、II 項

の再帰(戻ってくる)成分に分離することができる。結果として、直接排出確率 Net Escape Probability (NEP) が定義できる。

$$\int_{S_o} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \dot{m} + \int_{S_i} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = (1 - \alpha) \int_{S_o} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} + \alpha \int_{S_o} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.2.3-13)$$

$$NEP = 1 - \alpha \quad (2.2.3-14)$$

NEV は、局所フラックス  $\mathbf{F}$  と、その点の脱出確率 NEP で定義されることから、一部開口を有する閉鎖空間である室内条件において、NEV が物理的には正味の脱出速度 (“Net” Escape Velocity) を意味すると解釈できる。

スカラーフラックス放出面である  $S_o$  のみで定義される NEV\*ベクトルである  $\mathbf{u}_{NEV}^*$  は、物理的にはスカラー放出面  $S_o$  上での濃度  $C_o$  を持つ空気塊(パーセル)の平均速度を示しており、NEV は、再帰分を取り除いた速度成分となる。

本研究では、自然換気される単純室内モデルを対象として、室内での NEV 分布を解析した。対象とした建物ブロック群と自然換気を想定した建物モデルを Fig. 2.2.3-8 に示す。本解析では主流方向に対して流れ方向に開口部を設置した STR 条件と流れ方向に対して側面側に開口部を設置した LAT 条件の 2 ケースで解析を行った。

自然換気される室内の空気齢(Age of Air ; AoA)分布解析結果を Fig. 2.2.3-9 に、2.2.3-7 式に定義された NEV の室内分布の解析結果を移流ベクトル分布と共に Fig. 2.2.3-10 に示す。空気齢分布は名目換気時間スケールで無次元化しているため、上流側の自然換気流入口近傍では AoA=0.0 となっており、排気口近傍では AoA=1.0 の値となっているが、室内には不均一分布の形成が確認できる。流入新鮮空気の室内分配は均一ではなく、局所領域によって非常に大きなバラツキがあり、この不均一分布を考慮した環境制御の重要性が示唆される。

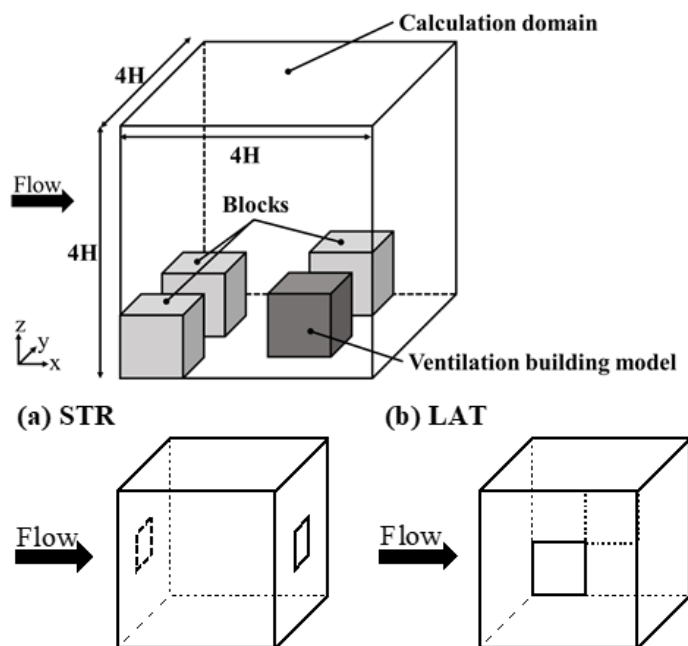


Fig. 2.2.3-8 Schematic diagrams of computational domain. Ventilation building models with (a) streamwise (STR)

and (b) lateral (LAT) openings.

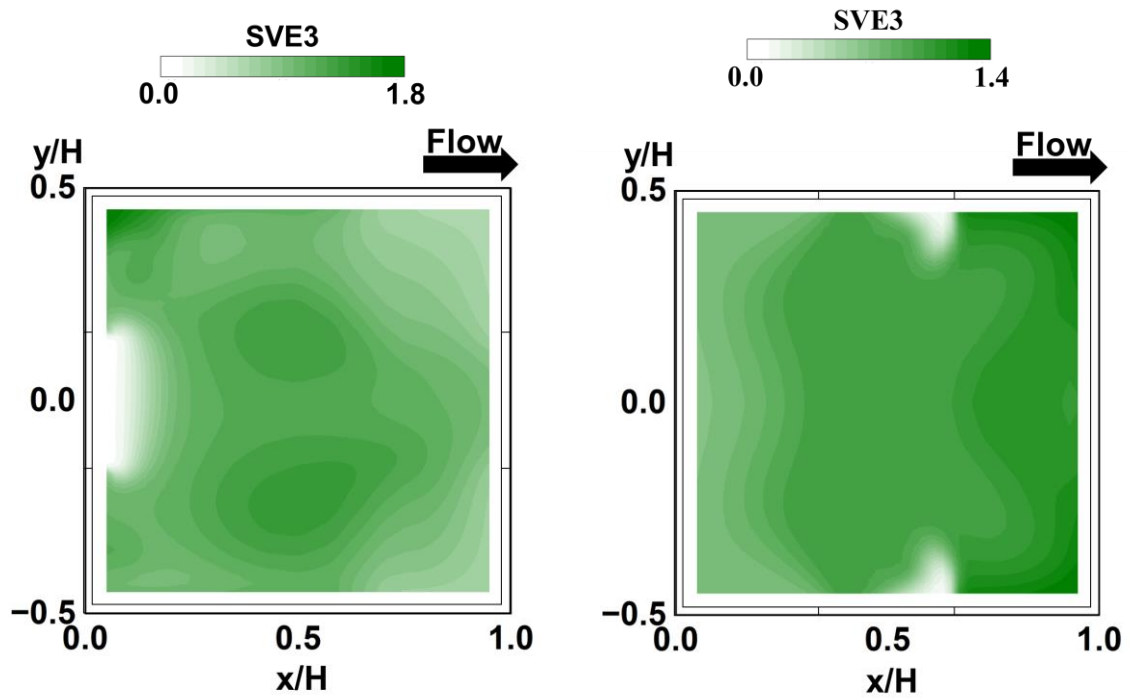


Fig. 2.2.3-9 Age of air of (a) STR and (b) LAT cases.

NEV 分布は、移流ベクトルの分布とは異なる分布を示していることから、汚染物質(スカラー)の実質的な排出方向と移流風速の向きは必ずしも一致せず、乱流拡散の影響が相対的に有意となる局所領域では、移流風速のみによる濃度制御には限界があり、NEV 分布の確認が重要となることが理解できる。

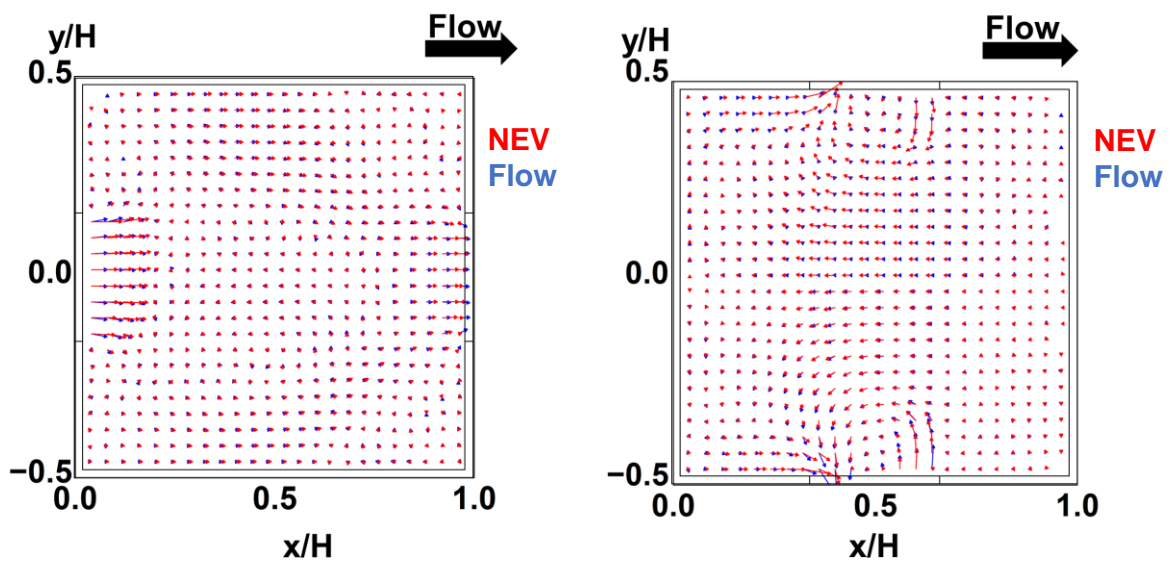


Fig. 2.2.3-10 Net Escape Velocity (NEV) of (a) STR and (b) LAT cases.

## 参考文献

- [3-1] Naoki Ikegaya, Mats Sandberg and Kazuhide Ito, Rigorous mathematical formulation of net escape velocity and net escape probability determining a macroscopic concentration, *Indoor Air*. 2022;32 (7): e13072
- [3-2] Hana Salati, Mehrdad Khamooshi, Jingliang Dong, Kazuhide Ito, David Fletcher, Sara Vahaji, Kiao Inthavong. Exhaled Aerosol and Jet Flow Characterization During Nasal Sneezing, *Aerosol and Air Quality Research*, 22 (4),2022, 210338
- [3-3] Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, Ken Takahashi and Kazuhide Ito. Transport and deposition of inhaled man-made vitreous and asbestos fibers in realistic human respiratory tract models: An in-silico study, *Japan Architectural Review* 2022, Vol.5, no.4, pp 592–608
- [3-4] Haruna Yamasawa, Teruaki Hirayama, Ryota Muta, Kazuki Kuga, Tomohiro Kobayashi, and Kazuhide Ito. Influence of inlet turbulent condition on the formation mechanism of local scalar concentrations, *Japan Architectural Review*, 2022, Vol.5, no.4, pp 691–701
- [3-5] Sung-Jun Yoo, and Kazuhide Ito, Validation, verification, and quality control of computational fluid dynamics analysis for indoor environments using a computer-simulated person with respiratory tract, *Japan Architectural Review*, 2022, Vol.5, no.4, pp 714–727.
- [3-6] Ken Bryan Fernandez, Naoki Ikegaya, Qingyan Chen, and Kazuhide Ito, Determination of age of air, purging flow rate, and net escape velocity within a cross ventilation model sheltered by urban-like block arrays using large-eddy simulations, *Building and Environment*, 226 (2022), 109759.

## (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4年度は、圧縮機、燃焼器、タービン、各コンポーネントの解析実施（本計算）、統合シミュレーションの実施（簡易形状試算）、2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モデルの精度検証を行った。この結果、川崎重工業製ガスタービンを対象に、圧縮機、燃焼器、タービンの簡易形状を対象にした統合シミュレーションを実現した。また、本計算のため、各コンポーネントの形状およびメッシュの再確認・修正を行った。さらに、燃焼モデルとして利用するフレームレット法には非断熱性、選択拡散、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有効であることがわかった。

In this fiscal year, a trial integrated simulation of a compressor/combustor/turbine assembly of a gas turbine was performed, and the validity of flamelet model as a combustion model for hydrogen and ammonia combustion was examined by two-dimensional (2D) numerical simulations. The trial numerical simulation based on large-eddy simulations (LES) was successfully carried out, and the 2D numerical simulation showed that the consideration of the effects of nonadiabaticity, differential diffusion and stretch in the flamelet model is useful for the high-fidelity simulations.

### (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]。

### (b)-1-1 統合シミュレーション（簡易形状試計算）

#### (b)-1-1-1 計算対象

Fig. 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。~~2021~~年度令和3年度は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。~~2022~~令和4年度は ~~2021~~令和3年度の成果に基づき、圧縮機、燃焼器、タービンを統合した解析を行った。本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 億である。

#### (b)-1-1-2 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 NOx の生成予測のための輸送方程式で構成される。

質量保存式：

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

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：

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

反応進行度変数輸送式：

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

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：

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

ここで、上付きの $\sim$ は LES フィルタを表し、 $\tilde{\sim}$ はファールブル平均を意味する。上記輸送方程式より求めた流れ場の混合分率及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 Table 2.2.4-1 に示す。

### (b)-1-1-3 計算成果

産業用ガスタービンエンジンの統合シミュレーションの結果を示す。なお、計算はまだ定常に達しておらず、引き続き継続中である点に注意いただきたい。Fig. 2.2.4-2 と Fig. 2.2.4-3 に、それぞれ、圧縮機およびタービンの回転軸を通る断面の速度、圧力、温度の瞬間分布、および燃焼器の中心を通る断面の速度、混合分率（燃料と酸化剤の比）、速度の瞬間分布を示す。Fig. 2.2.4-2 で見られる断面は空気の取り入れ口、圧縮機 2 段、燃焼器からのガスがタービンに至り、排気口に至る流路である。図から 2 段ある遠心圧縮機のそれぞれで流れが加速され、圧縮される様子が確認できる。また、圧縮に伴う温度上昇も確認できる。さらに、既燃ガスがタービンの各段を経由することにより降圧していること、圧力の降下に伴い温度が下がっていることが確認できる。一方、Fig. 2.2.4-3 は、圧縮機から出た空気が燃料と混合し、燃焼を経てタービンに向かう過程を示す断面である。圧縮機からの空気と燃料の混合ガスが燃焼器内に流入し、燃焼する様子を確認することができる。

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

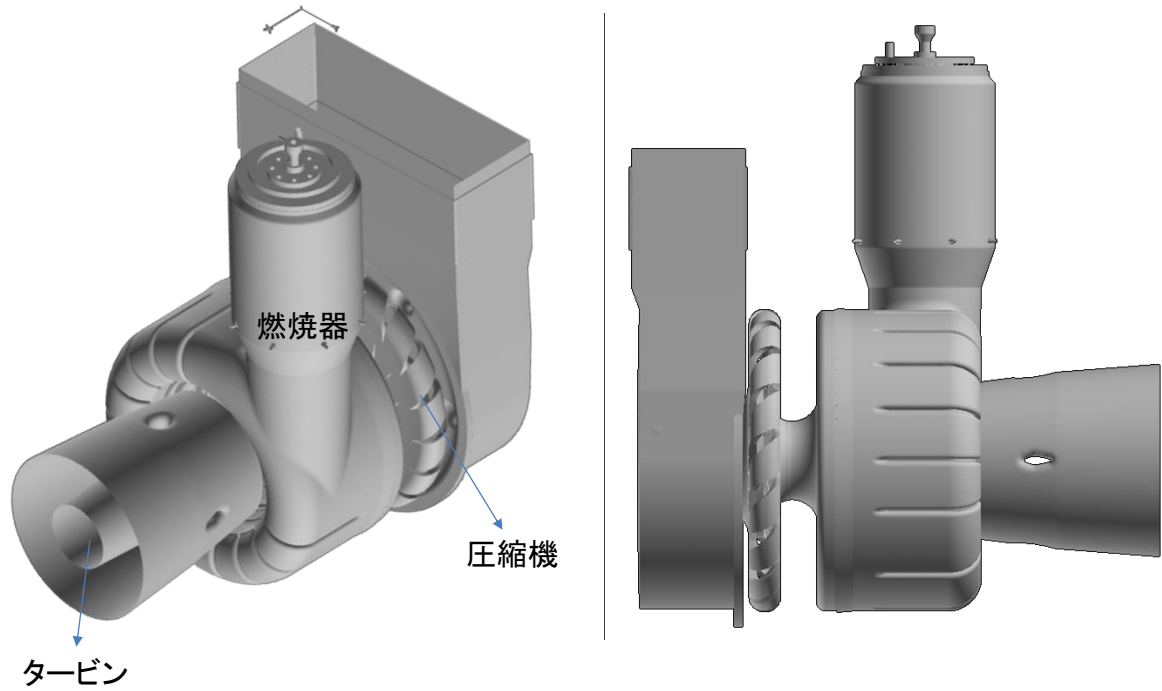


Fig. 2.2.4-1 Industrial gas turbine.

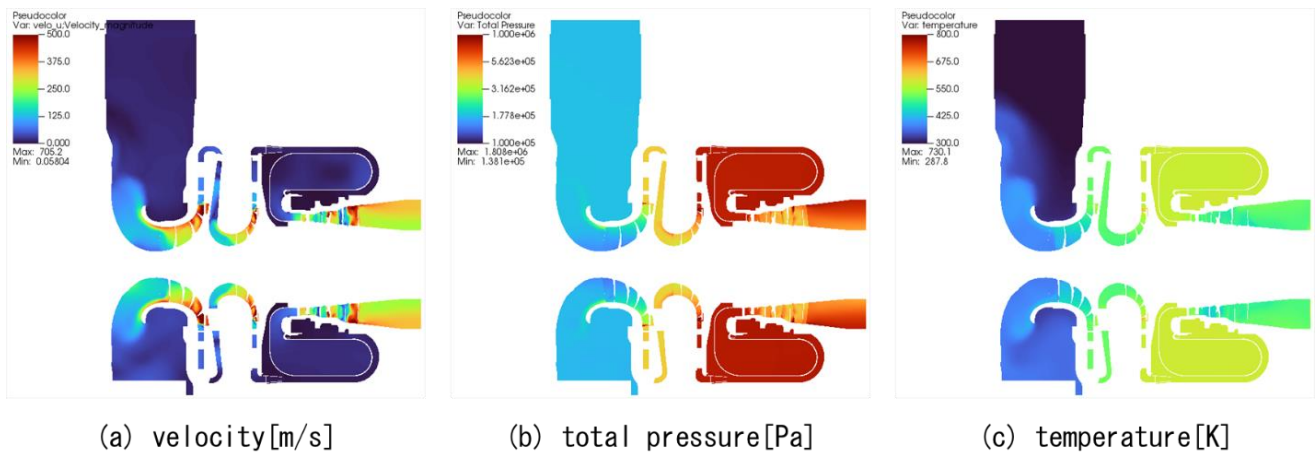


Fig. 2.2.4-2 Instantaneous distributions of velocity, total pressure and temperature on a cross section with respect to the axis of rotation of compressor and turbine.

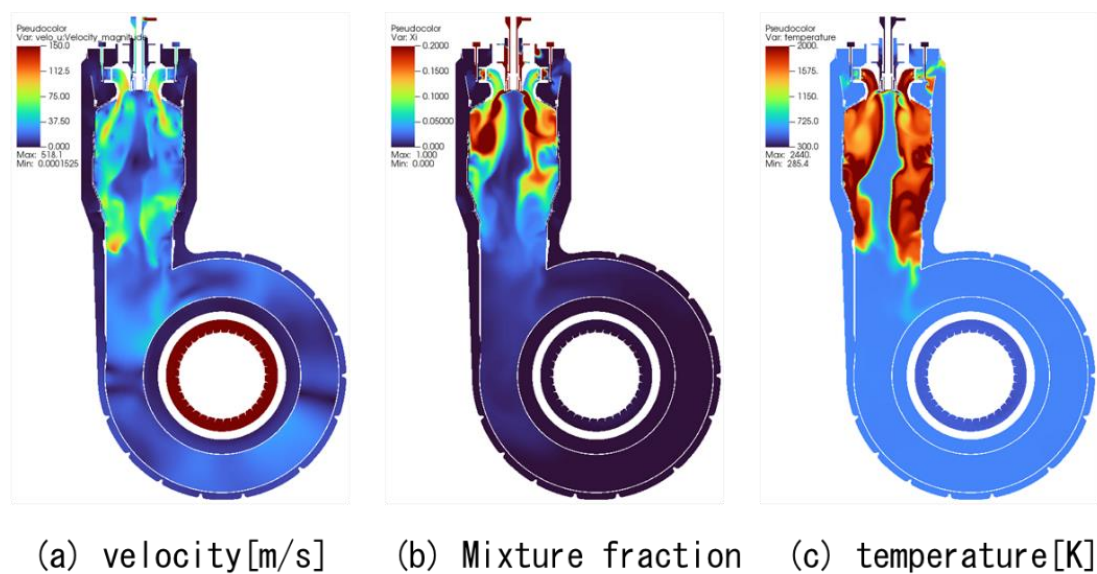


Fig. 2.2.4-3 Instantaneous distributions of velocity, mixture fraction and temperature on a cross section of combustor.

(b)-1-2 コンポーネントシミュレーション（本計算）

(b)-1-2-1 計算対象

本計算は上述の川崎重工業株式会社の産業用ガスタービンエンジンに対して、メッシュ数を 8 倍としている。メッシュ密度は FrontFlow/red の機能の一つである refiner を用いた（次節）。

(b)-1-2-2 計算方法、モデル、条件

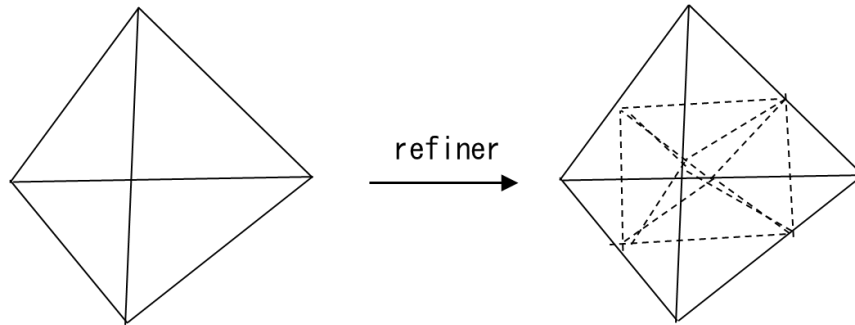
Refiner により作成したメッシュの生成方法を示す。FrontFlow/red の refiner は前処理として読み込むメッシュの辺要素の長さを 1/2 倍することにより空間のメッシュ密度を上げるものである。AMR(Adaptive mesh refinement, [4-5])法は空間の物理量の変化等でメッシュの粗密を調整するが、ここで用いる refiner はメッシュで作成した各セルの辺の中間で分割し、セルの密度を 8 倍にする方法である。四面体要素および六面体要素を代表として refine の前後の様子を Fig. 2.2.4-4 に示す。Refiner を用いて生成されたメッシュにより作成された産業用ガスタービンエンジンの燃焼器のメッシュ数は約 1.8 億節点、約 11 億要素である。本計算の計算条件を Table 2.2.4-2 に示す。

(b)-1-2-3 計算成果

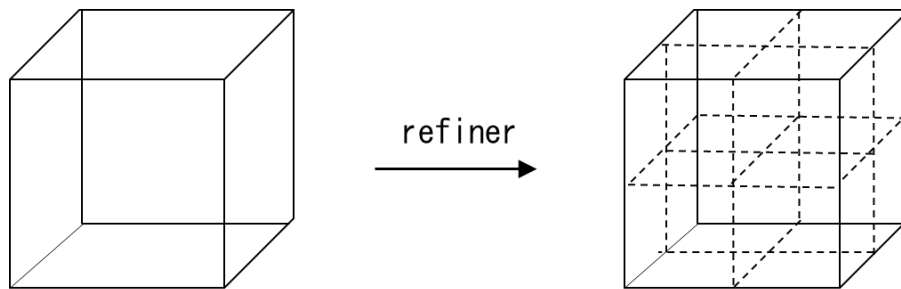
Fig. 2.2.4-5 に、燃焼器の中心を通る断面の速度、密度、温度、および混合分率（燃料と酸化剤の比）の瞬間分布を示す。図から、圧縮機からの空気と燃料の混合と混合ガスが燃焼器内に流入し、燃焼する様子を確認することができる。本計算は十分なステップの計算が出来ていると考えられる一方、移流項のスキームにより、解が鈍っていると判断される。今後、移流項のスキームに 2 次中心を用いることにより、詳細な渦構造と燃焼の様子を調査していく予定である。

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	都市ガス 13A
酸化剤	空気
流入条件	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



(a) Split a tetrahedral mesh by refiner.



(b) Split a hexahedral mesh by refiner.

Fig. 2.2.4-4 Refined tetrahedral or hexahedral mesh with refiner included FrontFlow/red.

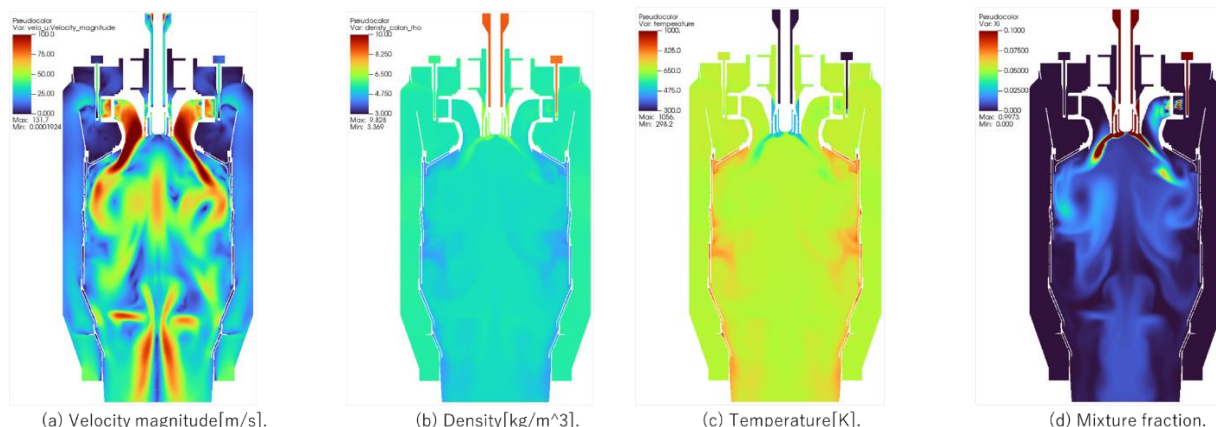


Fig. 2.2.4-5 Instantaneous distributions of velocity, density, temperature and mixture fraction on a cross section of combustor with a refined mesh.

### (b)-1-3 まとめと今後の課題

川崎重工業株式会社の産業用ガスタービンエンジンを対象に、圧縮機、燃焼器、タービンを統合したメッシュ節点数約 0.9 億、要素数約 4.1 億の簡易形状を用いて試計算を実施し、妥当な結果を得ることができた。また、refiner を用いて 8 倍の詳細形状を作成して、そのコンポーネントシミュレーションを実施し、詳細形状を用いた統合シミュレーションへの見通しを得た。引き続き定常に達するまで計算を継続した後、今後は、移流項に対するスキームの高精度化を試みつつ、詳細形状を用いた統合シミュレーションへと取り掛かる。

### (b)-2 燃焼モデル（フレイムレット法）の適用性検討（2次元解析）

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[4-6]。

#### (b)-2-1 水素燃焼およびアンモニア燃焼

##### (b)-2-1-1 計算対象

予混合燃焼を対象としたフレイムレット法である Flamelet-generated manifold (FGM) 法 [4-3]に、選択拡散効果と火炎伸長の影響を考慮した手法である SPF-PD 法 (Strained Premixed Flamelet method considering Preferential Diffusion effect)について、その水素燃焼、およびアンモニア燃焼への適用妥当性を検証するため、円状予混合伝播火炎の2次元数値シミュレーションを行う。Fig. 2.2.4-6 に計算領域の概略を示す。

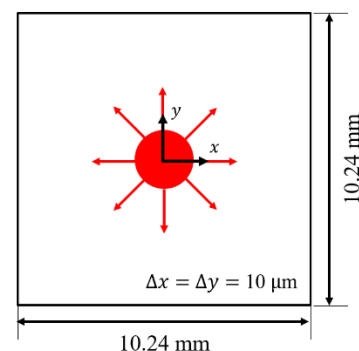


Fig. 2.2.4-6 Schematic of computational domain

##### (b)-2-1-2 計算方法、モデル、条件

本研究では、SPF-PD 法を用いた計算に加えて、比較対象として、燃焼モデルを用いない詳細計算法、従来 FGM 法、選択拡散効果のみを考慮した FGM 法である FGM-PD 法、火炎伸長のみを考慮した FGM 法である SPF 法を用いた計算を行う。

### (b)-2-1-2-1 詳細計算法

詳細計算法では、燃焼モデルを用いず、詳細反応機構に含まれる数百の素反応を直接解く。本研究では、詳細計算法を用いて得られた結果を真値として取り扱う。詳細計算法では、支配方程式として、以下に示す質量、運動量、エネルギー、および化学種の質量の保存式を、理想気体の状態方程式とともに解く。

$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$	(2.2.4-7)
$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$	(2.2.4-8)
$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{\partial P}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla P + \nabla \cdot \left[ \rho D_h \left( \nabla h - \sum_k h_k \nabla Y_k \right) - \sum_k \rho h_k Y_k \mathbf{V}_k \right] + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{u}$	(2.2.4-9)
$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_k \mathbf{u}) = -\nabla \cdot (\rho Y_k \mathbf{V}_k) + \rho \dot{\omega}_k$	(2.2.4-10)

ここで、 $\rho$ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 $p$ は圧力、 $\boldsymbol{\tau}$ は粘性応力、 $h$ はエンタルピー、 $h_k$ は各化学種 $k$ のエンタルピー、 $D_h$ は熱拡散率、 $Y_k$ は化学種 $k$ の質量分率、 $\mathbf{V}_k$ は化学種 $k$ の拡散速度、 $\dot{\omega}_k$ は化学種 $k$ の反応率である。 $\mathbf{V}_k$ は、以下に示す Maxwell-Stefan diffusion により考慮し、温度勾配、圧力勾配、および外力による物質拡散は考慮しない。

$\nabla X_k = \sum_n \left( \frac{X_j X_k}{D_{jk}} \right) (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_k)$	(2.2.4-11)
---	------------

ここで、 $X_k$ は化学種 $k$ のモル分率、 $D_{jk}$ は化学種 $j$ の化学種 $k$ に対する二成分拡散係数である。詳細計算法においては、式(2.2.4-11)により、化学種ごとの拡散性の違い、すなわち選択拡散効果を考慮する。また、燃焼反応を考慮するため、水素燃焼においては、AramcoMech3.0 [4-7]から C 原子を含む反応を除き、Glarborg ら [4-8]による N 原子に関連した反応を考慮した 33 化学種、214 素反応から成る詳細反応機構を用いる。アンモニア燃焼においては、32 化学種、204 素反応から成る Otomo 詳細反応機構 [4-9]を用いる。

### (b)-2-1-2-2 従来 FGM 法

従来 FGM 法では、燃焼反応を考慮するため、詳細反応機構を直接解く代わりに、事前に作成したデータベースを参照する。このデータベースを作成する際には、火炎伸長のない 1 次元予混合自由伝播火炎の計算を行い、得られた火炎特性を、Control variable と呼ばれるパラメータについてまとめる。本研究では、FlameMaster コード [4-10]を用いて 1 次元予混合自由伝播火炎の計算を行う。この際、詳細計算法と同様の詳細反応機構を用いる。また、従来 FGM 法においては、Control variable として反応進行変数 $C$ を用いる。 $C$ は主に燃焼生成物の質量分率で定義され、水素燃焼では $C = Y_{H_2O}$ 、アンモニア燃焼では $C = Y_{N_2} + Y_{H_2O} + Y_{H_2}$ により定義する。

2次元数値シミュレーションにおいては、式(2.2.4-7), (2.2.4-8)に加え、式(2.2.4-9), (2.2.4-10)を解く代わりに以下に示す $C$ の保存式を解く。

$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_c \nabla C) + \rho \dot{\omega}_c$	(2.2.4-12)
--	------------

ここで、 $D_c$ は $C$ の拡散係数であり、 $\dot{\omega}_c$ は $C$ の反応率である。従来 FGM 法においては、2次元数値シミュレ

ーションにおいては、選択拡散効果は考慮されず、Lewis 数 ( $Le$ ) は 1 と仮定され、 $D_c$  は  $D_c = D_h$  で定義される。

#### (b)-2-1-2-3 FGM-PD 法

従来 FGM 法では、 $Le = 1$  を仮定し、選択拡散効果を考慮できないのに対し、FGM-PD 法 [4-11, 4-12] では選択拡散効果を考慮する。FGM-PD 法における  $C$  の保存式は以下の式で与えられる。

$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_{cc} \nabla C) + \rho \dot{\omega}_c$	(2.2.4-13)
---	------------

ただし、拡散係数  $D_{cc}$  は以下の式で定義される。

$D_{cc} = \frac{\lambda}{W \rho c_p} \sum \frac{c_k}{Le_k} \frac{\partial W Y_k}{\partial C}$	(2.2.4-14)
---	------------

ここで、 $\lambda$  は熱伝導率、 $W$  は混合気の平均モル質量、 $c_p$  は定圧比熱である。 $c_k$  は化学種ごとに異なる定数であり、水素燃焼では  $H_2O$  のみ 1、アンモニア燃焼では  $N_2$   $H_2O$ ,  $H_2$  のみ 1 であり、その他の化学種は 0 である。また、各化学種の Lewis 数  $Le_k$  は以下の式で定義される。

$Le_k = \frac{\lambda}{\rho c_p D_{km}}$	(2.2.4-15)
$D_{km} = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k} X_j / D_{jk}}$	(2.2.4-16)

ここで、 $D_{km}$  は化学種  $k$  の混合気に対する拡散係数であり、これにより、選択拡散効果を考慮できる。

なお、FGM-PD 法において、データベース作成時に行う 1 次元計算は従来 FGM 法と同様であり、従来 FGM 法のデータベースに加え、 $D_{cc}$  をデータベースにまとめる。

#### (b)-2-1-2-4 SPF 法

従来 FGM 法では、火炎伸長のない 1 次元予混合自由伝播火炎をもとにデータベースを作成するため、火炎伸長の影響を考慮することができない。一方、SPF 法 [4-13] では、火炎伸長のない 1 次元予混合自由伝播火炎に加え、火炎伸長のある 1 次元対向流予混合火炎の計算を行い、それらの結果をデータベースにまとめる。この際、従来 FGM 法で用いた  $C$  に加え、火炎伸長に対応する Control variable が必要になる。本研究では、水素燃焼、アンモニア燃焼いずれにおいても、 $C$  に加え、混合分率  $Z$  を Control variable とする。なお、 $Z$  は Bilger の定義 [4-14] により定義される。そのため、2 次元数値シミュレーションにおいては、式(2.2.4-7), (2.2.4-8), (2.2.4-12)に加え、以下に示す  $Z$  の保存式を解く。

$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_Z \nabla Z)$	(2.2.4-17)
--	------------

ここで、 $D_Z$  は  $Z$  の拡散係数であり、 $Le = 1$  を仮定し  $D_Z = D_h$  により与える。

#### (b)-2-1-2-5 SPF-PD 法

SPF-PD 法では、SPF 法と同様、火炎伸長のない 1 次元予混合自由伝播火炎、および火炎伸長のある 1 次元対向流予混合火炎の計算を行い、 $C$ ,  $Z$  についてデータベースをまとめる。2 次元数値シミュレーションにおいては、式(2.2.4-7), (2.2.4-8)に加え、以下に示す  $C$ ,  $Z$  の保存式を解く。

$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_{cc} \nabla C) + \nabla \cdot (\rho D_{cZ} \nabla Z) + \rho \dot{\omega}_c$	(2.2.4-18)
---	------------



$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Z \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_{ZC} \nabla C) + \nabla \cdot (\rho D_{ZZ} \nabla Z)$	(2.2.4-19)
---	------------

ただし、拡散係数 $D_{CZ}$ ,  $D_{ZC}$ ,  $D_{ZZ}$ は以下の式で定義される。

$D_{CZ} = \frac{\lambda}{W \rho c_p} \sum \frac{c_k}{Le_k} \frac{\partial WY_k}{\partial Z}$	(2.2.4-20)
--	------------

$D_{ZC} = \frac{\lambda}{W \rho c_p} \sum \frac{z_k}{Le_k} \frac{\partial WY_k}{\partial C}$	(2.2.4-21)
--	------------

$D_{ZZ} = \frac{\lambda}{W \rho c_p} \sum \frac{z_k}{Le_k} \frac{\partial WY_k}{\partial Z}$	(2.2.4-22)
--	------------

ここで、 $z_k$ は化学種ごとに異なる定数であり、Bilger の定義 [4-14]から決定される。

### (b)-2-1-2-6 計算条件および数値解法

水素燃焼については、当量比 0.45、未燃予混合気温度 300 K、雰囲気圧力 1 atm の条件下において、詳細計算法、従来 FGM 法、FGM-PD 法、SPF 法、SPF-PD 法の 5 種類の計算手法を用いて数値シミュレーションを行う。計算領域は Fig. 2.2.4-6 に示すような正方形領域であり、1 辺は 20.48 mm である。境界条件として x 方向、y 方向いずれも自由流出境界とする。計算格子は格子間隔 40 μm の等間隔直交スタガード格子であり、火炎厚みを 10 点以上で解像可能である。計算開始時には、中心の着火領域を除いて未燃予混合気で満たす。中心の着火領域は半径 1 mm であり、火炎伸長なしの 1 次元計算で得られた既燃ガスの温度および組成を与え、火炎を円状に伝播させる。

アンモニア燃焼については、当量比 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2、未燃予混合気温度 673 K、雰囲気圧力 2 MPa の条件下において、詳細計算法、従来 FGM 法、FGM-PD 法、SPF 法、SPF-PD 法の 5 種類の計算手法を用いて数値シミュレーションを行う。計算領域、および境界条件については、1 辺 10.24 mm、格子間隔 10 μm、初期着火半径 0.2 mm という点を除いて、水素燃焼と同様である。

いずれの数値シミュレーションもインハウスコード FK<sup>3</sup>[4-6]を用いて行った。

### (b)-2-1-3 計算成果

#### (b)-2-1-3-1 水素燃焼

Fig. 2.2.4-7 に、火炎半径の時間変化を、5 種類の計算手法について比較して示す。ここで、火炎半径は、火炎面の位置を反応進行変数 $C = 0.1$ の等値線として、中心から火炎面までの距離として定義する。図より、火炎伸長の影響を考慮しない従来 FGM 法、および FGM-PD 法においては、詳細計算法の結果を過小評価することが分かる。これは、希薄水素/空気予混合燃焼において、火炎伸長を受けると燃焼速度が増加するという傾向[4-15]を、火炎伸長の影響を考慮しない従来 FGM 法、および FGM-PD 法が捉えられないためと考えられる。一方で、選択拡散効果と火炎伸長の影響を考慮した SPF-PD 法は、詳細計算法の結果と良好に一致することが確認できる。しかしながら、火炎伸長の影響のみを考慮した SPF 法は詳細計算法の火炎伝播速度を過大評価する。この原因を調査するため、Fig. 2.2.4-8 に、火炎半径 4 mm の時刻における混合分率 $Z$ の半径方向分布を計算手法について比較して示す。図より、詳細計算法では、火炎面 ( $r = 4$  mm) 近傍において、混合分率が減少し、極小値をとることが確認できる。これは選択拡散効果によるものである。また図より、SPF-PD 法、従来 FGM 法、および FGM-PD 法は、この火炎面での混合分率の減少を捉えることが出来るが、SPF 法はこの火炎面近傍での混合分率の減少を再現できず、過大評価することが分かる。ここで、混合分率は当量比に相当する物理量である。そのため、燃料希薄条件

において、火炎面での混合分率を過大評価することにより、火炎伝播速度も過小評価すると考えられる。

以上の結果から、火炎伸長を伴う希薄水素/空気予混合燃焼においては、燃焼モデルとして、選択拡散効果と火炎伸長の影響を考慮した SPF-PD 法を用いる必要があることが明らかとなった。

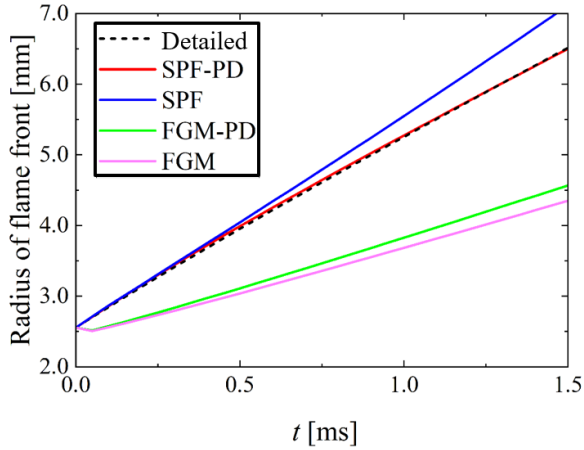


Fig. 2.2.4-7 Comparison of time variations of flame radius among detailed, conventional FGM, FGM-PD, SPF, SPF-PD methods.

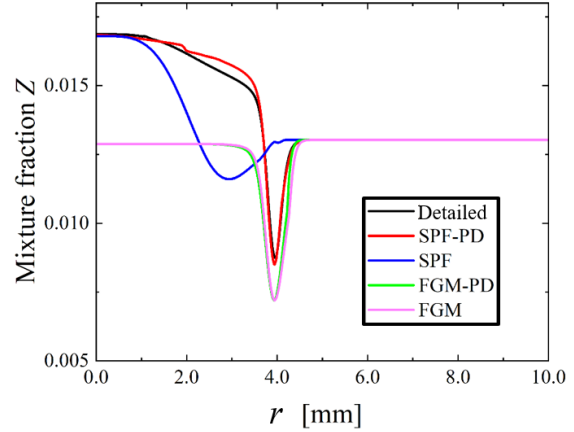
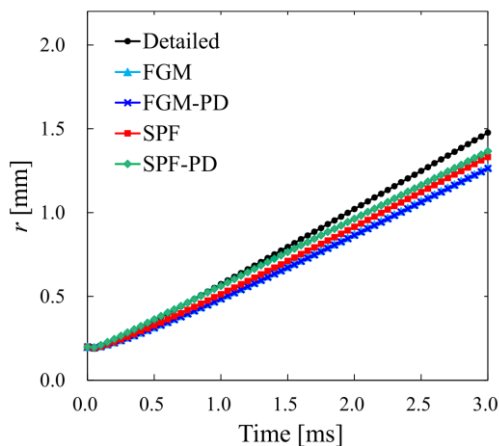


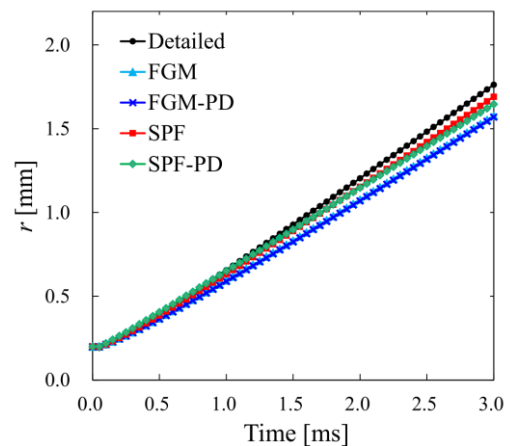
Fig. 2.2.4-8 Comparison of radial profiles of mixture fraction among detailed, conventional FGM, FGM-PD, SPF, SPF-PD methods.

(b)-2-1-3-2 アンモニア燃焼

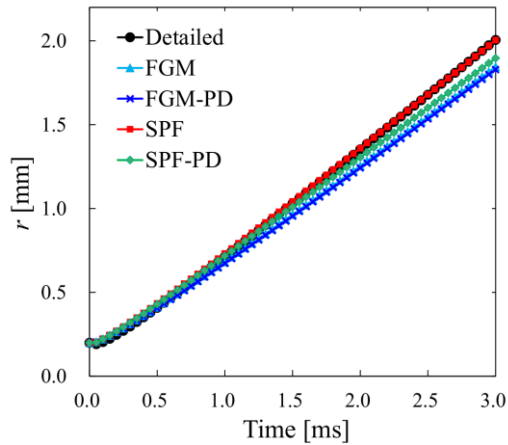
Fig. 2.2.4-9 に、当量比 0.8 から 1.2 の各条件において、5 種類の計算手法を用いて得られた火炎半径の時間変化を比較して示す。図より、水素火炎と比較するといずれの手法の間にも大きな差が無いが、火炎伸長の影響を考慮しない従来 FGM 法、FGM-PD 法に比べ、火炎伸長の影響を考慮した SPF 法、SPF-PD 法の方が詳細計算法に近い結果を示すことが分かる。また、選択拡散効果の考慮の影響は小さく、これは  $\text{NH}_3$  の Lewis 数が 1 に近いとためと考えられる。



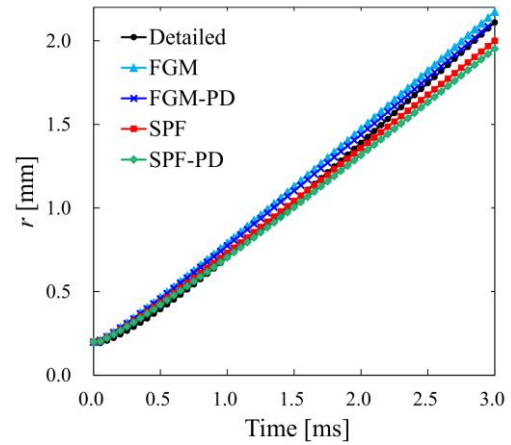
(a) 0.8



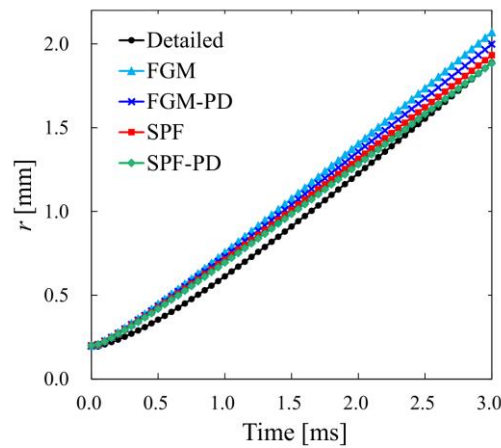
(b) 0.9



(c) 1.0



(d) 1.1



(e) 1.2

Fig. 2.2.4-9 Comparisons of time variation of flame radius among detailed, conventional FGM, FGM-PD, SPF, SPF-PD methods at equivalence ratios of (a) 0.8, (b) 0.9, (c) 1.0, (d) 1.1, and (e) 1.2.

### (b)-2-2 水素-アンモニア混焼

本研究では、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、2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。

#### (b)-2-2-1 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、低い着火性や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2次元乱流混合層とした。Fig. 2.2.4-10に、計算領域を示す。

#### (b)-2-2-2 計算方法、モデル、条件

本研究では、2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[4-16]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2.4-23)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} \quad (2.2.4-24)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \alpha \left( \frac{\partial h}{\partial x_j} - \sum_k \left( h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) \right) - \rho \sum_k (h_k Y_k V_{k,j}) \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (2.2.4-25)$$

$$\frac{\partial \rho Y_k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_k}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_{k,j} Y_k) + \rho \dot{\omega}_k \quad (2.2.4-26)$$

$$\frac{\partial \rho Z}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Z}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_Z \frac{\partial Z}{\partial x_j} \right) \quad (2.2.4-27)$$

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D_C \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \rho \dot{\omega}_C \quad (2.2.4-28)$$

$$p = \rho RT \quad (2.2.4-29)$$

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。

$$V_{k,j} = -\frac{D_k}{X_k} \nabla X_k \quad (2.2.4-30)$$

$$D_k = \frac{1 - Y_k}{\sum_{j \neq k} X_j / D_{jk}} \quad (2.2.4-31)$$

ここで、 $X_k$ は化学種  $k$  の体積分率、 $D_{jk}$ は  $j$  化学種と  $k$  化学種の 2 成分系拡散係数である。本研究では、式(2.2.4-23)～(2.2.4-26)の支配方程式の解と、Lewis 数 1 近似のもとで Flamelet progress-variable (FPV) 法 [4-17, 4-18]に基づいて作成された Flamelet library を式(2.2.4-27)および(2.2.4-28)から求められる検索パラメータにより決定されるモデルデータとの比較を行う。Lewis 数の定義は次式による。

$$Le_k = \frac{\alpha}{D_k} \quad (2.2.4-32)$$

計算領域は、前述の通り 0.02 m x 0.0288 m の矩形領域を 792 x 1,152 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 0.005 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 m/s を、空気層には -2 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、Fig. 2.2.4-11 に示す 3 次元空間に一様等方性乱流場を作成し[4-16,4-19]、2 次元空間へのプロジェクションを行った。乱流の条件としては、乱れ強さ  $u' = 4.0$  m/s、乱流渦の積分スケール  $L_{11} = 0.6$  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 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[4-20]。Fig. 2.2.4-12 に、作成した Flamelet library を構成するガス温度の混合分率-反応進行変数空間における分布を示す。

計算条件は前述の通り、式(2.2.4-23)～(2.2.4-26)を対象に化学反応をアレニウス型式を解いて得られた解（ARF）と、式(2.2.4-27)および(2.2.4-28)の解をもとに Flamelet library を検索した結果（FLM）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 ARF と Lewis 数 1 近似を用いる FLM の差異を議論する。

DNS には、圧力ベースの半陰解法コード FK<sup>3</sup>[4-6]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 576 コア並列計算により実施し、時間刻み  $1.0 \times 10^{-8}$  s にて 100,000 ステップまで約 8 時間の計算時間を要した。

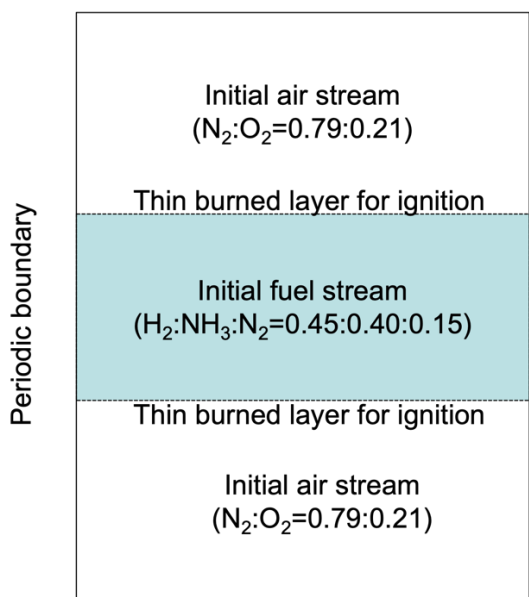


Fig. 2.2.4-10 Initial condition of 2D DNS.

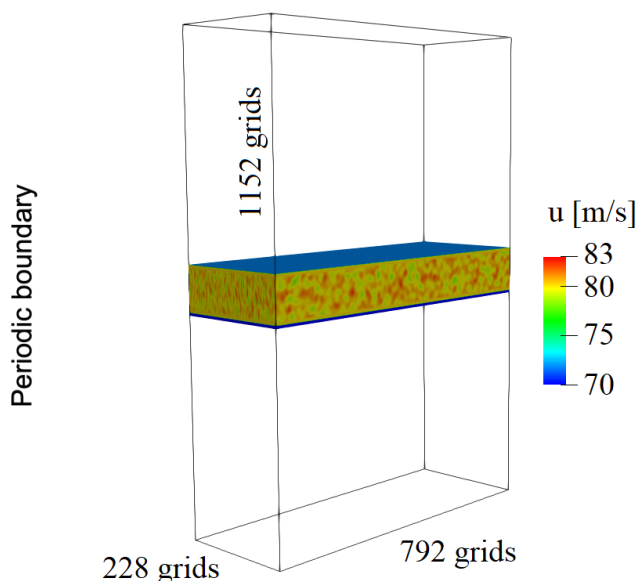


Fig. 2.2.4-11 3D domain for generating isotropic turbulence.

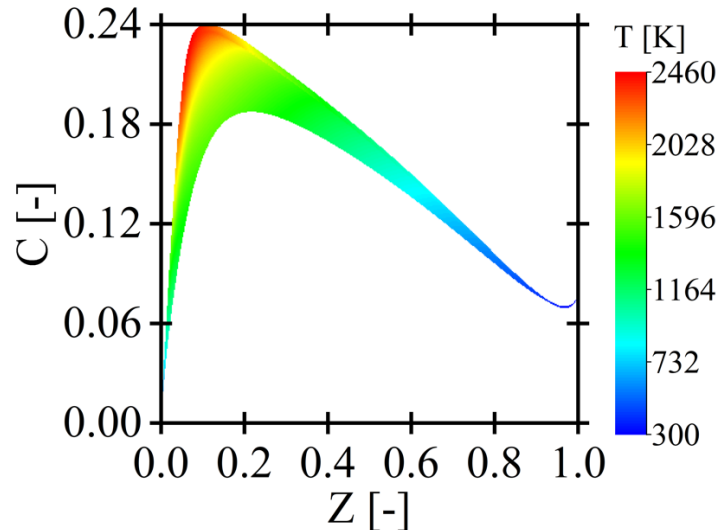


Fig. 2.2.4-12 Temperature distribution in mixture fraction and progress variable space in Flamelet library.

### (b)-2-2-3 計算成果

Fig. 2.2.4-13 に、ARF と FLM のガス温度の瞬間分布を示す。図より、FLM のガス温度は、その分布形状は ARF のそれにおよそ一致するものの、温度レベルが低く捉えられていることがわかる。Lewis 数 1 近似は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[4-21]でも報告されており、本研究でも改めて確認された。

Fig. 2.2.4-14 に、ARF と FLM の NO 質量分率の瞬間分布を示す。図より、FLM の NO 質量分率は、その分布形状は ARF のそれにおよそ一致するものの、濃度レベルが低く捉えられていることがわかる。通常、FPV 法に基づく燃焼計算において定常 Flamelet 法を用いる場合、NO 濃度は過大に予測される傾向があることが知られている[4-22]。これは、NO 生成反応よりもはるかに短い時間スケールをもつ燃料の酸化反応に関する反応進行変数に基づき Flamelet library が作成されるためであるが、翻って Fig. 2.2.4-14 を見てみると、FLM は ARF の予測値を過小評価していることから、上述の FPV 法の特徴を Fig. 2.2.4-13 に見られた過小評価された温度レベルが凌駕する結果となっていると考えることができる。

Fig. 2.2.4-15 に、ARF と FLM のガス温度と NO 質量分率について、混合分率空間の散布図を示す。図より、ガス温度のピーク値に 200 K 以上の差異があることがわかる。特に、希薄側に顕著な差異が見られる。希薄側には拡散速度の速い H<sub>2</sub> の影響は大きくないものと思われるが、着火やそれに続く連鎖反応において、OH ラジカルや H ラジカル等は重要な役割を果たしていると考えられる。

本研究において明らかとなったガス温度や NO 質量分率の予測値における ARF と FLM の差異は極めて大きく、水素-アンモニアの混焼燃焼場において、Lewis 数 1 近似を用いることの危険性が確認された。今後は、例えば Yu らの Constant Lewis 数近似[4-23]等、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と思われる。

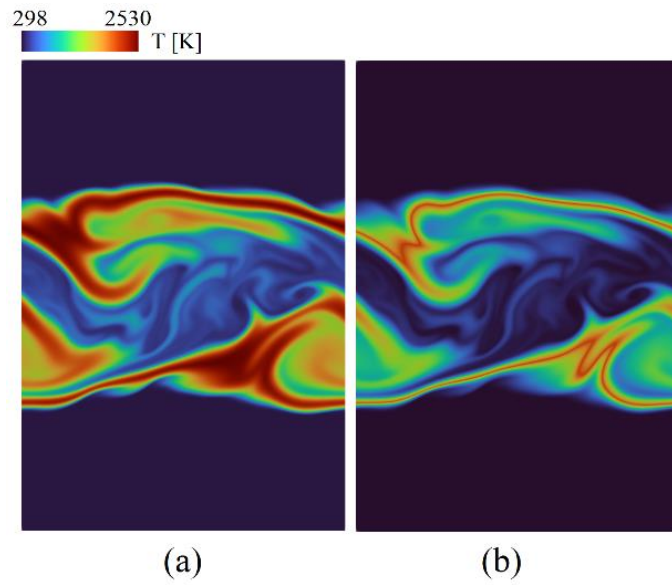


Fig. 2.2.4-13 Instantaneous temperature distribution, (a) ARF, (b) FLM.

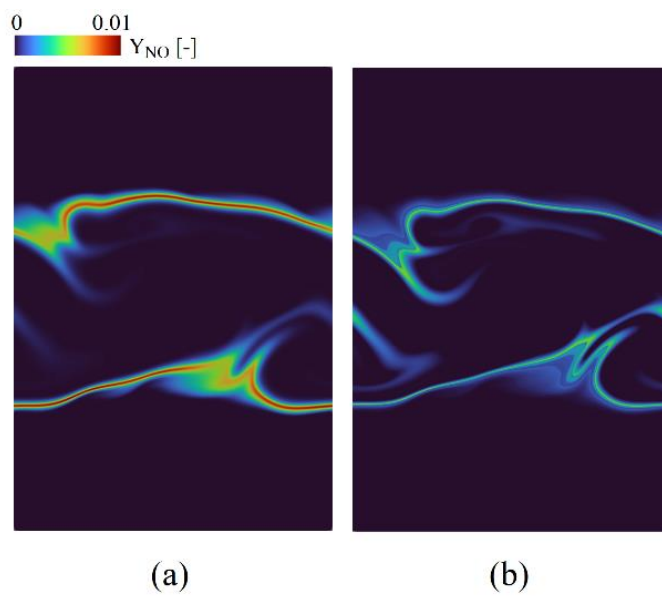


Fig. 2.2.4-14 Instantaneous distribution of NO mass fraction, (a) ARF, (b) FLM.

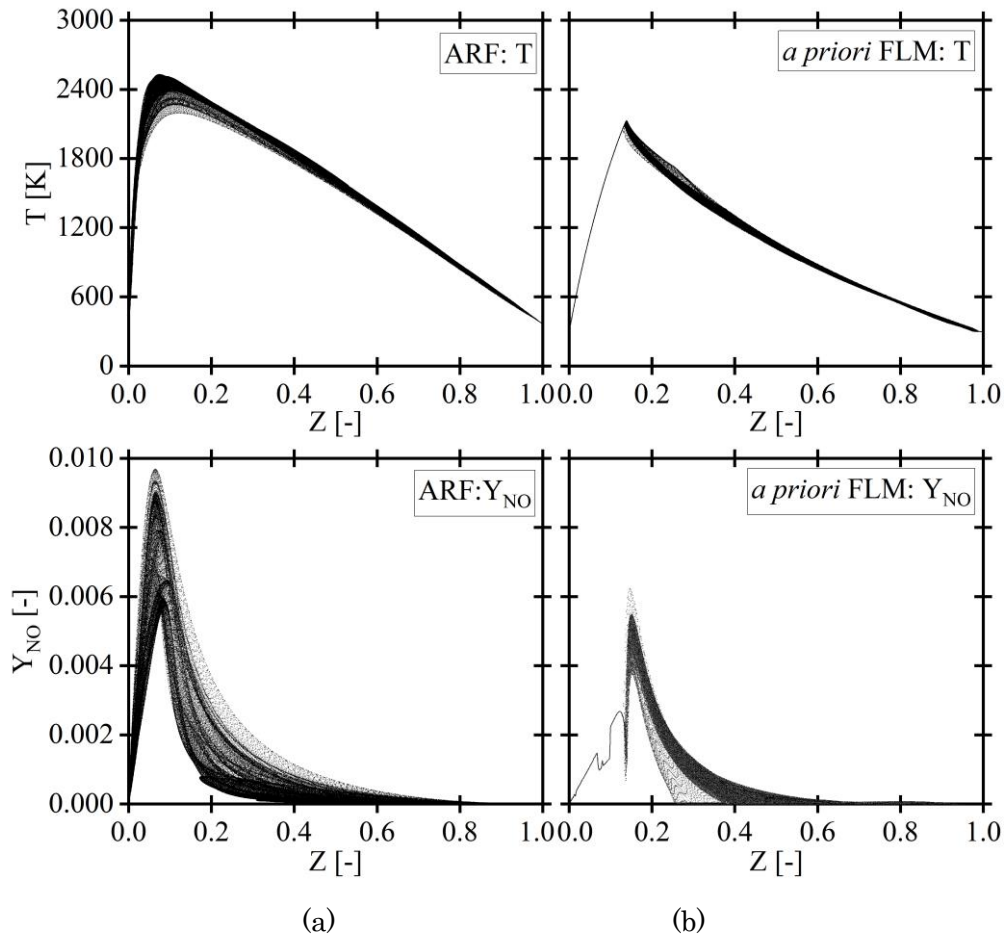


Fig. 2.2.4-15 Scatter plots of temperature and NO mass fraction, (a) ARF, (b) FLM.

### (b)-2-3 まとめと今後の課題

2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モデルの精度検証を行い、燃焼モデルとして利用するフレームレット法には非断熱性、選択拡散、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有効であることを明らかにした。今後は、NO濃度予測の更なる高精度化を検討するとともに、3次元数値シミュレーションによる乱流燃焼モデルの妥当性および精度の検証を行う。

### 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] M. J. Berger and J. Olinger, *J. Comp. Physics*, 53, 484-512, (1984).
- [4-6] About in-house code FK<sup>3</sup>, <http://www.tse.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/link.php>
- [4-7] C. W, Zhou *et al.*, *Combust. Flame*, 197, 423-438 (2018).
- [4-8] P. Glarborg *et al.*, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 67, 31-68 (2018).
- [4-9] A. Otomo *et al.*, *Int. J. Hydrog. Energy*, 43, 3004-3014, (2018).



- [4-10] H. Pitsch, FlameMaster, a C++ computer program for 0D combustion and 1D laminar flame calculations.
- [4-11] R. Bastiaans *et al.*, *CTR Annual Research Briefs 2007*, 195, (2007).
- [4-12] J. A. de Swart *et al.*, *Combust. Sci. Technol.*, 161, 113-137 (2010).
- [4-13] E. Knudsen *et al.*, *Combust. Flame*, 160, 2911-2927 (2013).
- [4-14] R. W. Bilger, *Proc. Combust. Inst.*, 22, 475-488, (1989).
- [4-15] C. K. Law, *Proc. Combust. Inst.* 22, 1381-1402, (1989).
- [4-16] H. Shehab *et al.*, *Combust. Flame*, 238, 111888, (2022).
- [4-17] C. D. Pierce, P. Moin, *J. Fluid Mech.*, 504, 73-97, (2004).
- [4-18] P. Yu, R. Kurose, H. Watanabe, *Phys. Fluids*, 35, 015116, (2023).
- [4-19] T. Passot, A. Pouquet, *J. Fluid Mech.*, 181, 441-446, (1987).
- [4-20] Y. Jiang *et al.*, *Int. J. Energy Res.*, 44 795-810, (2020).
- [4-21] W. Han *et al.*, *Proc. Combust. Inst.*, 38, 2627-2634 (2021).
- [4-22] M. Ihme, H. Pitsch, *Phys. Fluids*, 20, 055110, (2008).
- [4-23] P. Yu, H. Watanabe, Proc. JSME FED Conf., Kumamoto (2022).

#### (5) プロジェクトの総合的推進

以上のサブ課題A～Dの進捗を管理し、課題間の連携を促進するために、各課題の代表者を集めて統括する推進委員会を令和4年5月、9月、12月、3月の計4回、実施した。また、年度末の令和5年3月3日に、プロジェクトの成果を報告するための「スマートデザインシンポジウム」を実施した他、令和4年9月30日に、サブ課題間の連携を促進するための「スマートデザインワークショップ」を、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令和4年9月27日に開催した。

## 2-3. 活動（研究会の活動等）

### (1) アウトリーチ活動

年月日	行事
R4.9.27	「富岳」成果創出加速プログラム第6回 HPC ものづくり統合ワークショップ
R4.9.30	第1回スマートデザインプロジェクトワークショップ
R5.3.3	第1回スマートデザインプロジェクトシンポジウム
R6.3.7	「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会

### (2) プロジェクト推進会議

年月日	行事
R4.5.31	第4回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議
R4.9.12	第5回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議
R4.12.14	第6回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議
R5.3.3	第7回「富岳」スマートデザインプロジェクト推進会議

### (3) コンソーシアム活動

年月日	行事
R4.10.14 R5.3.22	都市・建築 CFD コンソーシアム 総会
R4.5.18 R4.12.12	HPC を活用した自動車用次世代 CAE コンソーシアム総会
R4.4.22 R4.11.25	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

年月日	行事
R4.5.20 R4.8.8 R4.9.22 R4.11.1 R4.12.26 R5.1.27 R5.3.16	サブ課題A サブ課題全体研究打合せ（全7回）
R4.4.8 R4.4.15	サブ課題A 最適化打ち合わせ（全27回）

R4.4.22 R4.5.12 R4.6.3 R4.6.10 R4.6.17 R4.6.24 R4.7.22 R4.8.5 R4.8.17 R4.9.9 R4.9.16 R4.10.7 R4.10.14 R4.10.21 R4.10.28 R4.11.11 R4.11.18 R4.12.2 R4.12.13 R4.12.20 R5.1.10 R5.1.17 R5.1.24 R5.1.31 R5.2.7	
R4.4.15 R4.4.22 R4.5.13 R4.5.30 R4.6.3 R4.6.10 R4.6.17 R4.6.24 R4.6.27 R4.7.8 R4.7.15 R4.7.29 R4.8.5	サブ課題A デザイン・空力モデル化打ち合わせ（全27回）

R4.9.9 R4.9.16 R4.10.7 R4.10.14 R4.10.21 R4.11.11 R4.11.29 R4.12.6 R4.12.13 R4.12.20 R4.12.27 R5.1.12 R5.1.24 R5.2.7	
R4.4.13 R4.5.20 R4.6.27 R4.8.10 R4.9.14 R4.10.26 R4.12.8 R5.1.11 R5.2.22 R5.3.24	サブ課題 B サブ課題全体研究打合せ（研究連絡会）（全 10 回）
R4.5.9 R4.6.6 R4.7.26 R4.9.2 R4.10.14 R4.11.22 R4.12.2 R5.1.10 R5.2.3 R5.3.21	サブ課題 B 極端気象流入変動風整備 WG（全 10 回）
R4.5.10 R4.6.10 R4.7.15 R4.9.9	サブ課題 B 台風時の都市・建築における機能性・安全性 WG（全 9 回）

R4.10.21 R4.11.22 R4.12.23 R5.1.30 R5.3.10	
R4.4.27 R4.5.27 R4.6.24 R4.7.22 R4.8.26 R4.10.7 R4.11.11 R4.12.23 R5.1.27 R5.3.10	サブ課題 B 猛暑時の熱環境推定・安全性指標 WG (全 10 回)
R4.4.8 R4.5.17 R4.6.17 R4.7.25 R4.8.24 R4.9.21 R4.10.21 R4.11.22 R4.12.23 R5.2.3 R5.3.10	サブ課題 B 早期発展 WG (全 11 回)
R4.4.7 R4.4.20 R4.5.10 R4.5.25 R4.6.2 R4.6.14 R4.6.29 R4.7.19 R4.8.3 R4.8.26 R4.9.9 R4.9.22	サブ課題 C サブ課題全体研究打合せ (全 2 4 回)

R4.10.6 R4.10.20 R4.11.4 R4.11.22 R4.12.7 R4.12.28 R5.1.13 R5.1.30 R5.2.16 R5.2.27 R5.3.15 R5.3.28	
R4.4.11 R4.5.30 R4.9.9 R4.10.7 R4.11.10 R5.1.20	サブ課題D サブ課題全体研究打合せ（全6回）

## 2-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
(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」	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
	神戸大学大学院	教授 坪倉誠
	広島大学大学院	助教 中島卓司
(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」	東京工業大学大学院	教授 坂田弘安 研究員 田村哲郎
	横浜国立大学大学院	教授 山田貴博
	近畿大学	教授 道岡武信
	お茶の水女子大学	准教授 河合英徳
(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」	九州大学総合理工学研究院	教授 伊藤一秀
	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
	神戸大学大学院	教授 坪倉誠
(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」	京都大学大学院	教授 黒瀬良一
	九州大学総合理工学研究院	教授 渡邊裕章

## 別添1 学会等発表実績

### 1. 学会等における口頭・ポスター発表

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	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
「燃焼の数値シミュレーション：Society 5.0 時代のスマートデザインを目指して」口頭	黒瀬良一	日本応用数理学会 ものづくり企業に役立つ応用数理手法の研究会 第44回技術セミナー	2022年6月	国内
「Data-driven ammonia combustion simulation using Neural Ordinary Differential Equations」口頭	M. Saito, J. Nagao, J. Xing, R. Kurose	75th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (APS DFD)	2022年11月	国外
「A study on FGM method considering preferential diffusion for numerical simulation of hydrogen/air premixed flame」口頭	K. Reo, K. Kinuta, R. Kurose	The 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJCPP2023)	2023年3月	国外
スパコン「富岳」による飛沫・エアロゾル感染リスク評価のデジタルトランスフォーメーション ～我々はどうのようにマスクの感染リスク低減効果をシミュレーションで評価したか？～，口頭（記念講演）	坪倉 誠	エッサム神田ホール1号館（国際呼吸保護学会日本支部2022年度記念講演会）	2022年5月	国内
Digital transformation of droplet/aerosol infection riskassessment and evaluation of countermeasures realized on the supercomputer “Fugaku”，口頭	坪倉 誠	20th Conference on The International Society for Respiratory Protection (ISRP2022)	2022年5月	国外
スパコン「富岳」による飛沫・飛沫核感染リスク評価のデジタルトランスフォーメーション，	坪倉 誠	パシフィコ横浜パシフィコ（横浜第37回日本環境感染学会総会・学術集会シ	2022年6月	国内



口頭		ンポジウム「COVID-19の 効果的な予防策をめぐ り」)		
Evaluation of Infection Risk due to Airborne Virus Transmission in a Restaurant Environment, 口頭	Rahul Bale, Chong- Gang Li, Hajime Fukudome, Saori Yumino, Akiyoshi Iida, and Makoto Tsubokura (Keynote Lecture)	Oslo, Norway (Interdisciplinary challenges towards exascale fluid dynamics (MS154), 8 <sup>th</sup> European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering)	2022年6 月	国外
Digital transformation and smart design in manufacturing process realized on the supercomputer “Fugaku”, 口頭	坪倉 誠	Royal Lahaina Resort, Maui, Hawaii (The 11 <sup>th</sup> International Conference of Computational Fluid Dynamics (ICCFD11))	2022年7 月	国外
Engineering Turbulence Simulation on Massively Parallel Environments toward Next-Generation Computer-Aided Engineering, 口頭	坪倉 誠	Osaka, Japan, (The twelfth international symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP12))	2022年7 月	国内
『富岳』による新型コロナ 感染リスク評価のデジタル トランスフォーメーション とウイズコロナ時代の室内 環境デザイン, 口頭	坪倉 誠	神戸, (令和4年度空気調和・衛 生工学会大会)	2022年9 月	国内
飛沫・エアロゾル拡散シミ ュレーションによる新型コ ロナ感染リスク評価, 口頭	坪倉 誠	ITフォーラム2023 (主 催：情報処理学会)	2023年2 月	国内
スパコン「富岳」による飛 沫感染リスク評価のDXと 統合的感染リスク評価シス	坪倉 誠	芝浦工業大学大宮キャン パス, (2023年電子情報通信学	2023年3 月	国内

テムの構築, 口頭		会総合大会, 公開講座「次のパンデミック被害を抑えるには?」)		
Multi-Objective Aerodynamic Shape Optimization of Simplified Automobile Using HPC, 口頭	Takuji NAKASHIMA, Taichi INUI, Yusuke NAKAMURA, Keigo Shimizu, Takenori Hiraoka, Hiroaki Fukumoto, Akira Oyama, Takahide Nouzawa, Makoto Tsubokura	Fahrzeug-Aerodynamik - Neue Chancen und Herausforderungen durch Elektromobilität und CO2-Gesetzgebung (Vehicle Aerodynamics - New opportunities and challenges due to electromobility and CO2 legislation)	2022年1月	国外
Real-World Aerodynamics Assessment for Road Vehicle Development Realized on the Supercomputer "Fugaku", 口頭	Ryo Miyazaki, Akinori Yoshikawa, Rahul Bale, Kunihiro Yoshitake, Fortunato Nucera, Takashi Yoshino, Makoto Tsubokura	横浜 (WCCM-APCOM 2022)	2022年7月31日-8月5日	国内
“Nonlinear Dimensionality Reduction for Three-dimensional Flow Field Around Circular Cylinder with Distributed Parallel Machine Learning on Fugaku,”, 口頭	Kazuto Ando, Keiji Onishi, Rahul Bale, Akiyoshi Kuroda, and Makoto Tsubokura	Oslo, Norway, The 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS Congress 2022)	2022年6月	国外
Investigation of different irregular roughness effects on laminar natural convection flows in cuboid cavity., 口頭	Boqi Ren, Chung-Gang Li, Makoto Tsubokura	13th Asian Computational 東北大学 (Fluid Dynamics Conference(ACFD))	2022年11月	国内

Numerical simulation of velopharyngeal closure and tongue elevation during the sound production of [s] in /usui/.	HsuehJui Lu, Tsukasa Yoshinaga, ChungGang Li, Kazunori Nozaki, Akiyoshi Iida, and Makoto Tsubokura	13th Asian Computational Fluid Dynamics Conference. (ACFD 2022)	2022年 10月	国外
Principal Component Analysis of Flow Field around Automobile Models under a Crosswind Condition, 口頭	Takuji Nakashima, Kohei Seo, Takenori Hiraoka, Takahide Nouzawa, Keigo Shimizu, Yusuke Nakamura, Akira Oyama, Gentaro Hamada and Makoto Tsubokura	Jeju, Korea. (The 13th Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD2022))	2022年 10月	国外
Flow Field Data Mining of Automobile Models with Pareto-Optimal Aerodynamic Shape Using Proper Orthogonal Decomposition, 口頭	Takuji Nakashima, Yusuke Nakamura, Keigo Shimizu, Takenori Hiraoka, Gentaro Hamada, Takahide Nouzawa, Akira Oyama and Makoto Tsubokura	Yokohama, Japan. (15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII))	2022年7 月,	国内
"Three-dimensional Flow Field Decomposition with Massively Parallel Distributed Learning on Fugaku," , 口頭	Kazuto Ando, Keiji Onishi, Rahul Bale, Akiyoshi Kuroda, and Makoto Tsubokura	15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV)	2022年7 月	国外
"Voxel topology optimization of vehicle frame structure subject to multiple loading using building cube method framework," ,	Y.Wada, T.Shimada, K.Nishiguchi, S.Okazawa, and M.Tsubokura	横浜 (WCCM XV & APCOM VIII Book of Abstracts,)	2022年7 月	国内

口頭				
“Improvement of Reduction Performance of Mode Decomposition for 3-Dimensional Flow Field by Fugaku,” , 口頭	Kazuto Ando, Keiji Onishi, Rahul Bale, Akiyoshi Kuroda, and Makoto Tsubokura	33rd International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (ParCFD2022)	2022年5月	国外
“富岳での分散並列機械学習による円柱周り3次元流れ場の非線形次元縮約,” 口頭	安藤和人, 大西慶治, バレラフル, 黒田明義, 坪倉誠,	計算工学講演会論文集, Vol.27, (2022)	2022年	国内
"車体構造のトポロジー最適化における板金形成の促進",口頭	和田有司, 嶋田宗将, 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠	計算工学講演会論文集, vol. 27, F-03-06	2022年6月	国内
“ニューラルネットワークを使用した非線形縮約モデルの適用性の検討,” 口頭,	安藤和人, 大西慶治, 黒田明義, バレラフル, 坪倉誠	京都 (日本流体力学学会年会 2022)	2022年9月	国内
“分散深層学習を用いた非線形モード分割及び縮約モデル構築,” , 口頭	安藤和人, 大西慶治, バレラフル, 黒田明義, 坪倉誠	2022年度統計関連学会連合大会	2022年9月	国内
Large eddy simulation of droplet transport and inhalation exposure between interacting virtual humans.	Alicia Murga, ChungGang Li, Rahul Bale, Kazuhide Ito, Makoto Tsubokura	神戸大学 (空気調和衛生工学会) 講演論文 IS-4	2022年9月	国内
Evaluation of indoor environment safety through simulation of CO2 exhalation and ventilation, 口頭	RahulBale, ChungGangLi,CG.,Kazuhide Ito,Makoto Tsubokura	Proceedings of the 36th Computational Fluid Dynamics Symposium, E02-1	2022年12月	国内
実走行状態における空気抵抗の予測シミュレーション, 口頭	吉川暁典, Rahul Bale, Kim Sangwon, 吉武 邦彦, Fortunato Nucera, 吉野 崇, 坪倉 誠	第 36 回数値流体力学シンポジウム, C02-3	2022年12月	国内
自然風を考慮した自動車レ	相本 翔太, Rahul	第 36 回数値流体力学シン	2022年	国内

ーンチェンジ運動空 双方 向連成解析, 口頭	Bale, Kim Sangwon, 吉武邦 彦, Fortunato Nucera, 吉野 崇, 坪倉 誠	ポジウム, C02-2	12 月	
スパコン「富岳」による新 型コロナとの闘いと「アフ ターコロナ」時代のものづ くり, 口頭	坪倉誠	葺合高等学校高校生国際 会議	2022 年 7 月	国内
「富岳」が拓く Society 5.0 時代のスマートデザインと 感染リスク評価のDX, 口頭	坪倉誠	第 37 回経営に貢献する CAE セミナー（富士通主 催）	2022 年 7 月	国内
「富岳」による飛沫・エア ロゾル感染デジタルラン スフォーメーション, 口頭	坪倉誠	RIKEN の世界 計算科学 研究センター ～計算の 計算による計算のための 科学～, 神戸市医療センタ ー	2022 年 8 月	国内
「富岳」が拓く Society 5.0 時代のスマートデザイン ～自動車CAE/CFDを例に ～, 口頭	坪倉 誠	第 9 回 荏原オープンイ ノベーションシンポジウ ム	2022 年 10 月	国内
「富岳」が拓く Society 5.0 時代のスマートデザイン 2, 口頭	坪倉 誠	VINAS Online Users Conference 2022	2022 年 10 月	国内
スパコン「富岳」によるホ テル宴会場の感染リスク評 価と安心・安全な宴会に向 けた対策提案, 口頭	坪倉 誠	帝国ホテル（東京）、リー ガロイヤルホテル（大 阪） 安心・安全な立食宴会の 体験会（ホテル協会主 催）	2022 年 10 月	国内
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 382 回講演会 実務者のた めの流体解析技術の基礎 と応用(日本機械学会関西 支部主催)	2022 年 11 月	国内

第八波にむけた感染拡大抑止のための「富岳」飛沫シミュレーション, 口頭	坪倉 誠	東京都モニタリング会議	2022年 12月	国内
Inflow turbulent database for urban area based on large-scaled LES including meteorological disturbance (口頭)	Hidenori Kawai, Tetruro Tamura	EACWE	2022.9	国外
A Study of LES Coupling with Thermal Radiation for Actual Urban District	Maiko Arai, Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura	WCCM-APCOM	2022.8	国内
Local Peak Pressure on Super High-rise Building in Actual Urban Area	Azusa Ono, Tsuyoshi Nozu, Tetsuro Tamura, Hidenori Kawai	WCCM-APCOM	2022.8	国内
Study of Aerodynamic Characteristics of Eccentric Tapered Square Cylinder – Analysis of Flow field using BCM	Yuki Nagao, Naohiro Nakagawa, Yusuke Maruyama, Tetsuro Tamura, Hidenori Kawai, Masaharu Kawaguchi,	WCCM-APCOM	2022.8	国内
Large-scale two-phase flow simulation using building-cube method for urban flooding,	Koji Nishiguchi, Masashi Morishita, Tokimasa Shimada, Tetsuro Tamura	WCCM-APCOM	2022.8	国内
LES Analysis of Ventilation Performance and Wind Gust Occurrence for Strategic Urban Transformation,	Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura	WCCM-APCOM	2022.8	国内
WRF-LES Simulation of Wind Flow over Rough Urban Surface during	Keigo Nakajima, Hidenori Kawai, Masaharu	WCCM-APCOM	2022.8	国内

Typhoon Lan (2017)	Kawaguchi, Tetsuro Tamura, Koji Kondo, Yoshiaki Itoh, Kenji Takagi			
LES around a Realistic City Block Designed Based on a Future City Concept	Tsuyoshi Nozu, Azusa Ono, Tetsuro Tamura and Hidenori Kawai	WCCM-APCOM	2022.8	国内
Wind Pressure Characteristics of High-rise buildings in Middle and High-height Urban Areas Spread over Local Terrain,	Koji Kondo, Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura, Keigo Nakajima	WCCM-APCOM	2022.8	国内
LES on wind pressure acting on high-rise building under strong wind events of Typhoon,	Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura, Masaharu Kawaguchi	WCCM-APCOM	2022.8	国内
LES for urban boundary layer using inflow condition including meteorological disturbance of typhoon	Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura, Keigo Nakajima,	12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena	2022.7	国内
LES-based generation of time sequential data of instantaneous urban wind in typhoon -comparison with observational data,	Masaharu Kawaguchi, Tetsuro Tamura	12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena	2022.7	国内
LES coupling with thermal radiation for actual urban district - unsteadiness of turbulent and thermal field around high-rise buildings-	Maiko Arai, Hidenori Kawai, Tetsuro Tamura	14th Americas Conference on Wind Engineering	2022.5	国外
解析条件の異なるLES実用モデルに基づく乱流境界層中の三次元角柱の風圧力の	河合英徳 , 田村哲郎, 畔見徳真, 呉嘉瑞, 長尾悠生:	第 26 回数値流体力学シンポジウム	2022.12	国内

検証				
地下空間浸水時の流体力評価における三次元乱流解析の有用性,	永野雄一, 西口浩司, 田村哲郎	第 26 回数値流体力学シンポジウム	2022.12	国内
偏心を持つテーパ角柱構造物周辺の空力特性に関する研究—BCMを用いた流れ場の解析	長尾悠生, 丸山勇祐, 田村哲郎, 河合英徳, 川口真晴	第 26 回数値流体力学シンポジウム	2022.12	国内
市街地における台風時最大瞬間風速の発生に関する物理機構	田村哲郎, 川口真晴	第 26 回数値流体力学シンポジウム	2022.12	国内
実建物モデルを対象とする広範囲・高解像度LES・壁面風圧変動を引き起こす乱流構造の抽出	河合英徳, 田村哲郎	日本流体力学会年会	2022.9	国内
変容する実市街地のキャノピー上部・内部に着目した換気性能評価,	川口真晴, 田村哲郎	日本流体力学会年会	2022.9	国内
台風時の気象擾乱を考慮した都市広域解析に基づく流入変動風データベースの作成	河合英徳, 田村哲郎	日本建築学会	2022.9	国内
台風下の高層建築物に作用するピーク風圧の LES 解析	川口真晴, 田村哲郎	日本建築学会	2022.9	国内
2018 年猛暑日の東京都市域における気象擾乱を考慮した流入変動風に関する研究	新井舞子, 河合英徳, 田村哲郎	日本建築学会	2022.9	国内
東京都心部の流入変動風データベースを用いた超高層建築物の風圧力に関する LES	河合英徳, 田村哲郎	第 27 回計算工学講演会	2022.6	国内
LESによる実在都市の超高層建築物の周辺気流性状と風圧分布特性の検討	小野 梓, 野津剛, 田村哲郎, 河合英徳	第 27 回計算工学講演会	2022.6	国内
都市変容Strategyに向けた換気性能と突風発生に関する	川口真晴, 田村哲郎	第 27 回計算工学講演会	2022.6	国内



るLES解析				
Building-cube法を用いた大規模浸水解析	西口浩司, 森下将吏, 嶋田宗将, 田村哲郎	第27回計算工学講演会	2022.6	国内

## 2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所 (学会誌・雑誌等名)	発表した時期	国内・ 外の別
LES flamelet modeling of hydrogen combustion considering preferential diffusion effect	R. Kai, T. Tokuoka, J. Nagao, A. L. Pillai, R. Kurose	International Journal of Hydrogen Energy, 48, 11086-11101 (2023)	2022年 12月	国外
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)	2023年 2月	国外
Pollutant capture efficiencies in and around the opening-surface of a fume hood under realistic conditions	Ryota Muta, Juyeon Chung, Cong Li, Sung-Jun Yoo, Kazuhide Ito	Indoor and Built Environment, Volume 31, Issue 6, July 2022, Pages 1636-1653.	2022年 7月	国外
Breathing zone and exhaled air re-inhalation rate under transient conditions assessed with a computer-simulated person	Kazuki Kuga, Pawel Wargocki, Kazuhide Ito	Indoor Air, 2022, 32, e13003	2022年	国外
The effects of ventilation and temperature on sleep quality and next-day work performance: pilot measurements in a climate chamber	Xiaojun Fan, Huiqi Shao, Mitsuharu Sakamoto, Kazuki Kuga, Li Lan, David P. Wyon, Kazuhide Ito, Mariya P. Bivolarova, Chenxi	Building and Environment, 209 (2022) 108666	2022年	国外

	Liao, and Pawel Wargocki			
CO2 Emission rates from sedentary subjects under controlled laboratory conditions	Mitsuharu Sakamoto, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito, Gabriel Beko, Mengze Li, Jonathan Williams and Pawel Wargocki	Building and Environment, 211 (2022) 108735	2022年	国外
Dispersion characteristics of oral microbial communities in a built environment	U Yanagi, Shinsuke Kato, Hideaki Nagano, Kazuhide Ito, Toshio Yamanaka, Yoshihisa Momoi, Hikaru Kobayashi, Hirofumi Hayama	Japan Architectural Review, 2022, 5 (2), 225-232	2022年	国外
Exhaled Aerosol and Jet Flow Characterization During Nasal Sneezing	Hana Salati, Mehrdad Khamooshi, Jingliang Dong, Kazuhide Ito, David Fletcher, Sara Vahaji, Kiao Inthavong	Aerosol and Air Quality Research, 22 (4),2022, 210338	2022年	国外
SARS-CoV-2 Dynamics in the Mucus Layer of the Human Upper Respiratory Tract Based on Host-Cell Dynamics	Hanyu Li, Kazuki Kuga, Kazuhide Ito	Sustainability, 2022, 14 (7), 3896	2022年	国外
Multiscale analysis of material flow and computational fluid dynamics for predicting individual DEHP exposure concentration in indoors	Ryota Muta, Sung-Jun Yoo, Hyuntae Kim, Toru Matsumoto, Kazuhide Ito	Indoor and Built Environment, Volume 31, Issue 9, November 2022, Pages 2291-2311	2022年	国外
Rigorous mathematical	Naoki Ikegaya,	Indoor Air. 2022;32 (7):	2022年	国外

formulation of net escape velocity and net escape probability determining a macroscopic concentration	Mats Sandberg and Kazuhide Ito	e13072		
Prediction of exhaled carbon dioxide concentration using a computer-simulated person that included alveolar gas exchange	Kazuki Kuga, Mitsuharu Sakamoto, Pawel Wargocki, Kazuhide Ito	Indoor Air, 2022;32 (8) e13079	2022 年	国外
Numerical models for seamlessly predicting internal diffusion and re-emission of leaked liquid toluene from indoor mortar materials	Hiroshi Harashima, Eisaku Sumiyoshi, and Kazuhide Ito	Journal of Building Engineering, 57 (2022) 104976	2022 年	国外
Transport and deposition of inhaled man-made vitreous and asbestos fibers in realistic human respiratory tract models: An in-silico study	Nguyen Dang Khoa, Nguyen Lu Phuong, Ken Takahashi and Kazuhide Ito	Japan Architectural Review 2022, Vol.5, no.4, pp 592–608	2022 年	国外
Error analysis of human inhalation exposure simulation in industrial workshop	Yukun Wang, Xiong Shen, Sung-Jun Yoo, Zhengwei Long, Kazuhide Ito	Building and Environment, 224 (2022) 109573	2022 年	国外
Internal diffusion and re-emission of leaked liquid ethyl acetate from mortar materials	Hiroshi Harashima, Eisaku Sumiyoshi, and Kazuhide Ito	Japan Architectural Review, 2022, Vol.5, no.4, pp 672–681	2022 年	国外
Microplastics / Microfibers in settled indoor house dust- Exploratory case study for 10 residential houses in the Kanto area of Japan	Eunsu Lim, Hirofumi Tanaka, Gen Ni, Yuen Bai, Kazuhide Ito	Japan Architectural Review, 2022, Vol.5, no.4, pp 682–690	2022 年	国外
Influence of inlet turbulent condition on the	Haruna Yamasawa, Teruaki Hirayama,	Japan Architectural Review, 2022, Vol.5, no.4,	2022 年	国外

formation mechanism of local scalar concentrations	Ryota Muta, Kazuki Kuga, Tomohiro Kobayashi, and Kazuhide Ito	pp 691–701		
Impact of heat generation and use of experimental instruments in a fume hood on pollutant capture efficiency	Ryota Muta and Kazuhide Ito	Japan Architectural Review, 2022, Vol.5, no.4, pp 702–713	2022 年	国外
Validation, verification, and quality control of computational fluid dynamics analysis for indoor environments using a computer-simulated person with respiratory tract	Sung-Jun Yoo, and Kazuhide Ito	Japan Architectural Review, 2022, Vol.5, no.4, pp 714–727	2022 年	国外
Determination of age of air, purging flow rate, and net escape velocity within a cross ventilation model sheltered by urban-like block arrays using large-eddy simulations	Ken Bryan Fernandez, Naoki Ikegaya, Qingyan Chen, and Kazuhide Ito	Building and Environment, 226 (2022), 109759	2022 年	国外
Coupled analysis of transient aerodynamic and dynamic response of articulated heavy vehicles under crosswind	Qianwen Zhang, Chuqqi Su, Makoto Tsubokura, Zhen Hu, Yiping Wang	Physics of Fluids, vol. 34, No. 1, pp.212013, <a href="https://doi.org/10.1063/5.0077988">DOI: 10.1063/5.0077988</a>	2022 年	国外
Numerical analysis of the efficiency of face masks for preventing droplet airborne infections	Keiji Onishi, Akiyoshi Iida, Masashi Yamakawa, Makoto Tsubokura	Physics of Fluids, vol.34, No. 3, pp. 033309, <a href="https://doi.org/10.1063/5.0083250">DOI: 10.1063/5.0083250</a>	2022 年	国外
Reference map 法を用いたマーカー粒子によるオイラー型流体-構造連成解析	嶋田宗将, 西口浩司, Peco Christian, 岡澤重信, 坪倉誠	日本計算工学会論文集, No. 20220002, <a href="https://doi.org/10.11421/jscs.2022.2022">DOI: 10.11421/jscs.2022.2022</a>	2022 年	国外

		<a href="#">0002</a> (2022)		
Adaptively switched time stepping scheme for direct acoustics computations,	HsuehJui Lu, ChungGang Li, Makoto Tsubokura	AIP Advances, vol.12, 035340, DOI: 10.1063/5.0076657 (2022)	2022 年	国外
Numerical study of natural-convection from horizontal cylinder at eccentric positions with charge in aspect ratio of a cooled square enclosure	Deboprasad Talkdar, Makoto Tsubokura	International journal of heat and mass transfer, vol. 58, No. 2, pp.849-871, DOI: 10.1007/s00231-021-03145-3 (2022)	2022 年	国外
Digital Transformation of Droplet/Aerosol Infection Risk Assessment Realized on “Fukuga” for the Fight against COVID-19, (2022),	Kazuto Ando, Rahul Bale, ChungGang Li, Satoshi Matsuoka, Keiji Onishi, Makoto Tsubokura (alphabetical order by surname)	International Journal of High Performance Computing Applications, vol.36, No.5-6, pp.568-586, DOI: 10.1177/1094320221116056 (2022)	2022 年	国外
Quantifying the COVID 19 infection risk due to droplet/aerosol inhalation	Rahul Bale, Akiyoshi Iida, Masashi Yamakawa, ChungGang Li, Makoto Tsubokura	Scientific Reports, Vol.12, 11186, DOI: 10.1038/s41598-022-14862-y (2022)	2022 年	国外
Numerical Simulation of Air Age in Dental Offices,	Eriko Nambu, Kazunori Nozaki, Makoto Tsubokura, Mikako Hayashi	Scientific Reports, vol.12, 14120, DOI: 10.1038/s41598-022-18588-9 (2022)	2022 年	国外
Numerical investigation of effects of tongue articulation and velopharyngeal closure on the production of sibilant [s],	H s u e h J u i L u, Tsukasa Yoshinaga, ChungGang Li, Kazunori Nozaki, Akiyoshi Iida, Makoto Tsubokura	Scientific Reports, vol.12, 15361, DOI: 10.1038/s41598-022-18784-7 (2022).	2022 年	国外
スパコン「富岳」を用いた室内環境におけるウイルス飛沫・エアロゾル感染リス	坪倉誠	ファルマシア（日本薬学会機関紙）, vol.58, No.5, pp.435-439, DOI:	2022 年 5 月	国内

クとリスク低減対策の定量評価		10.14894/faruawpsj.58.5_435		
コロナ禍から生まれたイノベーション	石川文博, 坪倉誠, 熊本卓哉	ファルマシア (日本薬学会機関紙), vol.58, No.5, pp.401-404, DOI: 10.14894/faruawpsj.58.5_401	2022年5月	国内
ACM ゴードン・ベル賞と新型コロナ飛沫・エアロゾル感染リスク評価のデジタルトランスフォーメーション	松岡聡, 坪倉誠	情報処理 (情報処理学会誌), Vol.63, No.7, pp.328-333 (2022)	2022年	国内
複雑現象統一的解法フレームワーク CUBE による自動車エンジンシミュレーション,	坪倉誠, ラフルバレ, 李崇綱	特集: 燃焼科学における大規模数値シミュレーションの最前線, 燃焼学会	2022年	国内
スパコン「富岳」による飛沫飛散シミュレーションとマスクの感染拡大防止効果	坪倉誠	粉体技術, vol.14, No.6, pp.119-25 (2022)	2022年	国内
スパコン「富岳」による室内環境における新型コロナウイルス飛沫感染の予測とその対策	坪倉誠	病院設備 (日本医療福祉設備協会), vol.64, No.4, (2022)	2022年	国内
Numerical simulation of the sibilant /s/ sound articulation process.	HsuehJui Lu, Sakuya Sugimoto, Tsukasa Yoshinaga, ChungGang Li, Kazunori Nozaki, Akiyoshi Iida, and Makoto Tsubokura:	Twelfth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. (TSFP12 2022)	2022年	国内
Infection risk in a restaurant environment due to airborne diseases.	Rahul Bale, Chung-Gang Li, Hajime Fukudome, Saori Yumino, Akiyoshi Iida, Makoto Tsubokura	5 <sup>TH</sup> international conference on building energy and environment. (2022)	2022年	国内
Nonlinear mode	Kazuto Ando, K	Proceedings of	2022年	国内

decomposition and reduced-order modeling for three-dimensional cylinder flow by distributed learning on Fugaku,	eiji Onishi, Rahul Bale, Makoto Tsubokura, Akiyoshi Kuroda, and Kazuo Minami	International Conference on High Performance Computing (ISC2021) (Jun 24-July 2, Online), Springer, Cham, pp.122–137 (2021)	6 月	
Transient flow and particle deposition in the respiratory tract	Alicia Murga, Seigo Ohashi, Chung-Gang Li, Rahul Bale, Makoto Tsubokura,	RANS versus LES comparison. Proceedings of Indoor Air 2022, 17 <sup>th</sup> International Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate.	2022 年 6 月	国内