

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：87107

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14305

研究課題名（和文）都市域に在る建物に対する時空間変動を加味した換気量推定手法の構築

研究課題名（英文）Development of a prediction method for unsteady ventilation rate within urban buildings

研究代表者

廣瀬 智陽子 (Hirose, Chiyoko)

福岡県保健環境研究所・その他部局等・主任技師

研究者番号：10897656

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：建物運用における省エネルギー化の気運が高まる現代社会において、そのパッシブ性から注目を集める自然換気・通風の導入促進を図る上で、換気量推定手法の高精度化に対する社会要請は極めて高い。本研究においては、微視的かつ静的に取り扱われてきた自然換気現象を都市空間の連続性や空気流体の連動性を考慮したスケール横断的流体現象と捉え直し、縮小都市模型群内を対象とした数値流体解析や風洞実験、屋外観測を実施することで、周辺建物群や大気擾乱によって励起される都市気流場の非正常性とこれに呼応する換気現象の相関関係を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、都市幾何形状に依存した様相を呈するとされる都市気流場が建物換気の時空間動特性の形成に寄与しているのではないかといった学術的「問い」を主題とすることで、換気研究において慣習的に援用されてきた微視的で静的な現象理解からの脱却を志向するものある。研究分野間の橋渡しとなる境界領域での知見整備を志向している点において学術的独自性を有するだけでなく、建物運用における省エネルギー化の観点から換気量推定手法の高精度化に対する社会要請が極めて高いことを鑑みると、社会的インパクトもが期待される。

研究成果の概要（英文）：In our modern society accelerating the trend for energy conservation in building operations, there is a significant social demand for improving the accuracy of ventilation estimation methods to promote the introduction of natural ventilation system, which is gaining attention due to its passive nature. Although natural ventilation phenomena have used to be treated in a microscopic and static manner, this study reexamines it as cross-scale fluid phenomena within the continuity of urban spaces. By conducting numerical simulations and wind tunnel experiments targeting airflow fields around reduced-scale urban building models, and outdoor observations in a real city area, we investigated the relationship between the spatial and temporal distributions of urban airflow excited by surrounding buildings and atmospheric disturbances and the corresponding ventilation phenomena.

研究分野：建築環境工学

キーワード：通風換気量 非正常都市気流場 非正常流体解析 PIV計測 屋外観測

### 1. 研究開始当初の背景

建物運用における省エネルギー化の気運が高まる現代社会において、近年、自然換気・通風のパッシブ性が注目されており、その導入促進を図る上で、換気量推定手法の高精度化に対する社会要請は極めて高い。夏季の高温多湿な気候に適応するため、漏気すらも想定した開放的な木造住宅を慣用してきた日本は元より、未だ堅調な人口増加に伴う電力供給不足や貧困に苦しむ暑熱地域の国々においては、居室内の熱・湿気・汚染物質等の除去手段としての「自然換気・通風」は、極めて有用な室内環境調整手法であると言える。

その一方、流体力学的見地から自然換気を捉えようと、上空大気から街区空間、建物開口部を経て室内へとダウンスケーリングする空気流動である点において、非常に複雑な物理現象である。図1に示すように、こうした広範に及ぶ空間スケールは気象学や都市気候学、建築環境工学といった多数の学術分野の対象とするスケールを包含している。学術研究においては、こういった物理現象を研究分野が対象とするスケールで分断し、そのスケール外からの影響を境界条件として系に与えることが研究遂行上の定石となっており、換気研究もその例外ではない。空気交換による居室内の熱や汚染物質の希釈といった換気本来の機能が汚染物質の室内濃度や換気量といった指標により評価されることに所以し、換気研究は、建物あるいは室内スケールを対象とする建築環境工学分野において独自に発展を遂げてきたと言えよう。

一方、建物よりも大きなスケールを取り扱う都市気候学分野に目を向けると、非定常性や非一様性により特徴付けられてきた都市乱流境界層内の気流場の性状解明を試みる研究が進められており、都市幾何条件に応じて形成される秩序的な大規模乱流組織構造やこれに付随して発生すると考えられる都市上空と建物周辺とを往き来する気流構造の存在が明らかにされている。上述の通り、建物スケールでの換気現象が上空大気から続く空気流動現象の一端であることを考えると、こういった近年の研究報告は、自然換気現象に対する都市気流場のカスケード的な波及効果を示唆するものであると考えられる。

しかしながら研究分野間のスケール分離の理念からの脱却は依然として図られておらず、然して換気現象における空気運動を鑑みれば当然考慮されるべき周辺建物による気流の遮蔽効果の影響や上空大気や周辺建物により生成される気流の乱れの影響は換気量の予測評価を行う上で十分に考慮されているとは言えない。

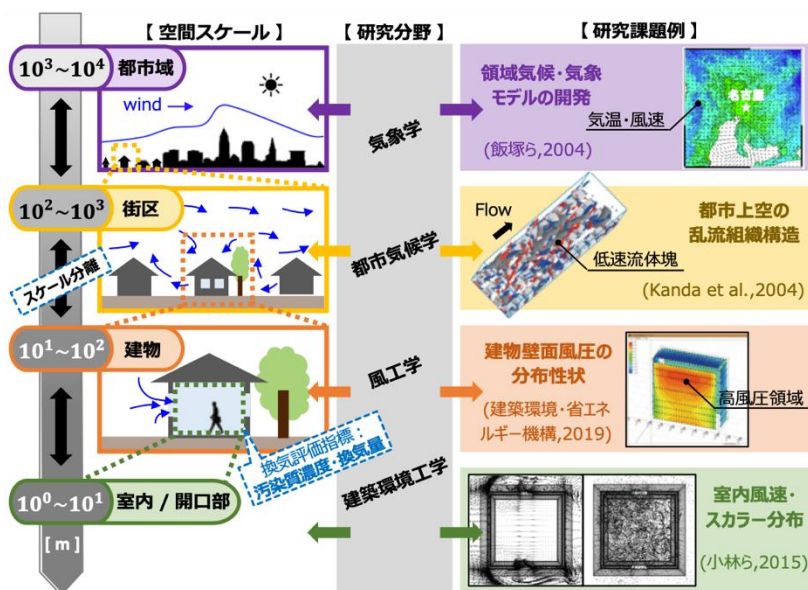


図1. 都市域の空気流動に係る研究課題とその空間スケール

### 2. 研究の目的

以上の研究背景を勘案するに、都市幾何形状に依存した様相を呈するとされる都市気流場が建物換気の時空間動特性の形成に寄与しているのではないかとといった摂理的に生じる学術的「問い」は、換気研究において慣習的に援用されてきた微視的で静的な現象理解からの脱却の糸口となりうるものと考えられる。

そこで本研究では、都市域に存する建物内外の気流場を対象として、自然換気における流体現象を包括的に取り扱うことが可能な複合スケールでの数値流体解析や風洞実験、屋外観測を相互補完的に活用し、従来換気量推定手法の課題点の精査を行うと共に、実現象に根ざしたより高精度な換気量推定手法を提案することを研究目的に掲げる。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下に示す具体目標 (A) (B) を設定し、上述の研究目的の実現を目指した。

(A) 建物周辺気流場の時空間分布性状と従来換気量推定手法の推定精度の把握

都市気流場に関する信頼性の高いデータ蓄積が豊富な立方体粗度模型を用いた風洞実験系を対象とし、単体建物条件と建物密度や配列の異なる群内建物条件での Large-eddy Simulation

(LES) による非定常計算と風洞実験を実施した。まず、気流場に関する計算結果の妥当性を実験結果との比較により検証した後、LES による時空間高解像なデータを用いて建物周辺気流場の時空間偏在性を定量的に評価した。さらに、これまで系統的なデータ整備が行われてこなかった様々な都市幾何形状条件下での換気量データベースの構築に注力した。加えて、従来換気量推定手法に基づく単体・群内建物条件下での換気量比較を行うことで、都市域のように気流場の定常仮定が成立しにくく、周辺建物による遮蔽効果が支配的な気流場に暴露された建物における従来換気量推定手法の予測精度を把握した上で、精度向上を目指す上で考慮すべき物理パラメータの同定を試みた。

#### (B) 大気変動が与える建物換気への影響評価と非定常性の把握

数値流体解析や風洞実験では、設定する実験系の領域の大きさに応じて気流場の内在する渦スケールが必然的に決まる上、風向風速といった暴露気流の条件に対して多数の条件設定を行うことは研究負荷の観点から現実的ではない。一方、屋外観測においてはこういった研究手法上の制約が排除される為、実建物と同等の環境下での風速データを比較的容易に取得できるといった利点がある。そこで、都市気流場を対象として屋外観測を実施し、目標 (A) との比較から換気現象における大気条件由来の非定常性を定量把握することを試みた。実大気条件下に特有の風向風速変動と気象スケールでの気流変動が建物周辺風速に与える影響の定量評価を行うことで、従来換気量推定手法が前提とする理想大気条件下と実大気環境下での換気量の差異を検証した。

以上、具体目標 (A) (B) に注力することにより、都市域を対象とした包括的スケールでの定量評価に基づく都市境界層内の建物換気に関するデータセットの構築、従来の定常型換気量推定手法の課題点・適用可能範囲の明確化、そして都市気流場の時空間変動を加味することで高精度化を図った非定常型換気推定手法の提案を目指した。

## 4. 研究成果

上述の具体目標 (A) (B) に対する研究成果の概要を以下に示す。

#### (A) 建物周辺気流場の時空間分布性状と従来換気量推定手法の推定精度の把握

都市域を模した単純建物模型群を対象とした数値流体解析 (図 2) や風洞実験 (図 3) を実施し、様々な都市幾何条件下での気流場の時空間分布性状を調査した。とりわけ本研究では、これまで精力的に知見の整備が進められてきた空間分布に加え、風速の確率密度分布やパーセントイル風速、GF (Gast factor; 突風率) といった風環境指標を丹念に評価することで、建物周辺気流の時空間分布性状の把握に取り組んだ。これにより、平均水平風速が大きくなると GF の値は低くなる傾向にあること、また、水平風速の高速域ほど正規分布に近く、低速域では正規分布から乖離する傾向にあること、風環境アセスメントでは一定値が与えられる GF にも空間偏在性があること等を明らかにした。

加えて、本研究で風洞実験を実施するに当たり、都市域を想定した模型群内の水平面気流分布を捉えることが可能な PIV (Particle Image Velocimetry; 粒子画像流速測定法) 計測システムを構築した。模型後流や前方での剥離流れに伴う非定常かつ非一様な気流場を捉えることができる実験系の開発に対する学術的意義は大きい。

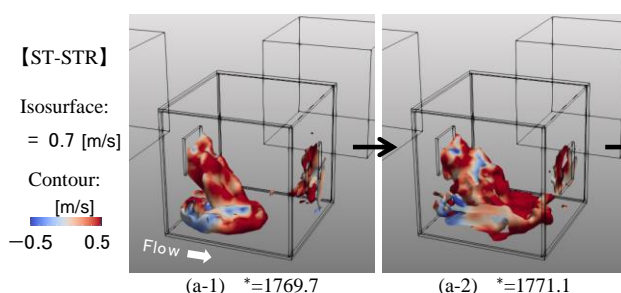


図 2. 単純建物模型群を対象とした数値流体解析 (LES) の一例<sup>1)</sup>



図 3. 単純建物模型群を対象とした風洞実験 (PIV 計測) の一例<sup>2)</sup>

さらに、建物配列や開口位置の異なる条件における室内外気流場や換気性能を RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) シミュレーション、LES、風洞実験の 3 つの手法により評価し、その評価結果の比較を行うことで、各条件下での換気量に加え、通風換気現象に対する RANS シミュレーションの適用性、延いては、定常仮定のもと従来換気量推定手法の推定精度を調査した。なお建物配列は、建物群が整列し、建物間と通風路で気流分布の偏在性が大きい整形配列 (SQ) と、建物が入れ違いに配列され、整形配列よりもより複雑な気流場を呈する千鳥配列 (ST) の 2 条件とし、開口位置は主流方向に並行 (LAT) と垂直 (STR) の 2 条件として、組み合わせにより合計 4 条件を対象とした。比較結果により、建物配列-開口位置が ST-STR の組み合わせの場合に最も大きな換気量が期待できること、RANS シミュレーションは、室内外気流場の主要な気流構造を捉えることが可能ではあるものの、整形配列時の室内風速や千鳥配

列時の室内主流方向風速の予測精度に乏しいこと等が確認された。また換気量推定精度については、整形配列時に RANS シミュレーションの特定の乱流モデルを用いる場合は LES と同等の換気量が認められたものの、千鳥配列時には大きな偏差が生じ、最高換気量が LES に比べ 40% 過小評価となる場合もあることを示した。このように換気量推定精度は、都市や建物の幾何形状条件にも影響されており、とりわけ乱流が支配的な複雑気流場になる程に定常仮定での従来換気量推定手法が過小評価となりやすいことを定量的に明らかにした。

#### (B) 大気変動が与える建物換気への影響評価と非定常性の把握

市街地（東京工業大学附属科学技術高等学校敷地内）で取得した屋外風速の多点同時観測データを用いて、実街区での建物周辺気流の時空間変動に関する調査を行った。取得した風速の時系列データを用いて、Gaussian 分布や Weibull 分布、Gram-Charlier series (GCS) による確率密度関数の推定精度の検証を行い、各推定モデルの市街地風速の予測手法としての適用範囲の検討を行った。これにより、数値流体解析や風洞実験により再現される理想流体条件下のみならず、実環境下の都市気流においても、高次のモーメントを用いることで高パーセントイル風速の推定精度が向上することを確認した。

一方、従来換気量推定手法が前提とする理想大気条件下と実大気環境下での換気量の差異については継続して検証を行っていく予定である。

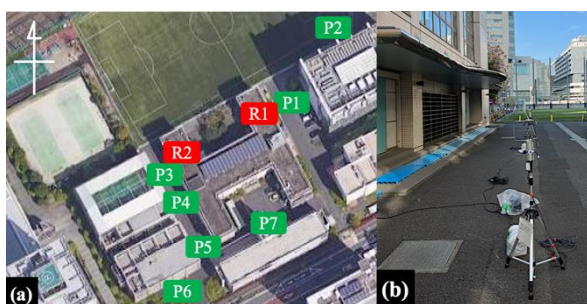


図 4. 市街地での屋外観測の様子<sup>3)</sup>

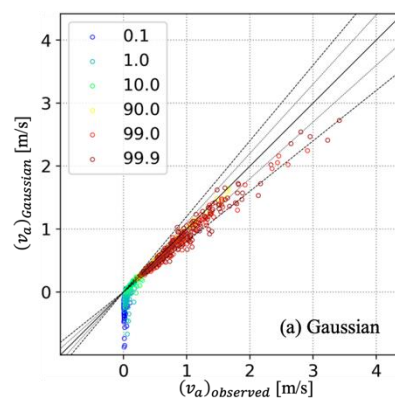


図 5. 実環境で取得したスカラー風速と Gaussian 分布で推定したスカラー風速の比較例<sup>3)</sup>

参考文献：

- 1) 廣瀬, 池谷, 萩島, 谷本, 通風換気時における都市内建物の室内気流性状把握のための数値流体解析, 日本建築学会環境系論文集 第 87 巻 第 791 号, 19-28, 2022 年.
- 2) Hirose C., Nomichi T., Ikegaya N., Distributions of gust and peak factors at a pedestrian level in a simplified urban canopy obtained by particle image velocimetry, Building and Environment Volume 222, 109350, 2022.
- 3) Seta K., Hirose C., Ikegaya N., Prediction of pedestrian-level wind velocity obtained by outdoor measurement in an urban area, 16th International Conference on Wind Engineering, 2023.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wan Ismail Wan Hazwatiamani, Mohamad Mohd Faizal, Ikegaya Naoki, Chung Jaeyong, Hirose Chiyoko, Abd Razak Azli, Mohd Azmi Azlin	4. 巻 254
2. 論文標題 Comprehensive comparisons of RANS, LES, and experiments over cross-ventilated building under sheltered conditions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 111402 ~ 111402
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2024.111402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Li Fei, Hirose Chiyoko, Wang Wei, Liu Chun-Ho, Ikegaya Naoki	4. 巻 247
2. 論文標題 Correlations among high-order statistics and low-occurrence wind speeds within a simplified urban canopy based on particle image velocimetry datasets	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 111050 ~ 111050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.111050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang W., Ikegaya N., Hirose C., Mohamad M.F.	4. 巻 52
2. 論文標題 Indoor flow datasets of two-layered cross-ventilation models by particle image velocimetry and hot wire anemometry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Data in Brief	6. 最初と最後の頁 109856 ~ 109856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dib.2023.109856	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Ali N.M., Mohamad M.F., Wang W., Hirose C., Yoshie R., Ikegaya N.	4. 巻 244
2. 論文標題 Quantifying natural cross-ventilation flow of a two-layered model used for terraced houses in tropical zones by particle image velocimetry	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 110829 ~ 110829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2023.110829	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hirose C., Nomichi T., Ikegaya N.	4. 巻 222
2. 論文標題 Distributions of gust and peak factors at a pedestrian level in a simplified urban canopy obtained by particle image velocimetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 109350-109350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2022.109350	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirose Chiyoko, Ikegaya Naoki, Hagishima Aya, Tanimoto Jun	4. 巻 6
2. 論文標題 Computational fluid dynamics for cross ventilated airflow in an urban building	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SANEMITSU Toshiki, IKEGAYA Naoki, HIROSE Chiyoko, TANIMOTO Jun, HAGISHIMA Aya	4. 巻 87
2. 論文標題 EFFECT OF MOMENTUM PROVISION IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ON TURBULENT STATISTICS IN URBAN BOUNDARY LAYER	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 145 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 HIROSE Chiyoko, IKEGAYA Naoki, HAGISHIMA Aya, TANIMOTO Jun	4. 巻 87
2. 論文標題 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR CROSS-VENTILATED AIRFLOW IN AN URBAN BUILDING	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 19 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.87.19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirose C., Ikegaya N., Hagishima A., Tanimoto J.	4. 巻 196
2. 論文標題 Indoor airflow and thermal comfort in a cross-ventilated building within an urban-like block array using large-eddy simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Building and Environment	6. 最初と最後の頁 107811 ~ 107811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.buildenv.2021.107811	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 廣瀬 智陽子, Ali Nor Merlisa, Mohamad Mohd Faizal, 池谷 直樹
2. 発表標題 二階建縮小模型における通風気流を対象としたPIV計測
3. 学会等名 2023年度日本風工学会年次研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hirose, C., Ikegaya, N
2. 発表標題 Pedestrian-level strong wind distribution within a simplified block array determined by particle image velocimetry
3. 学会等名 International Conference on Wind Engineering 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Seta, K., Hirose, C., Ikegaya, N
2. 発表標題 Prediction of pedestrian-level wind velocity obtained by outdoor measurement in an urban area
3. 学会等名 International Conference on Wind Engineering 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池谷 直樹, 王 偉, 廣瀬 智陽子
2. 発表標題 都市キャノピー空間の強風予測のための確率モデルと高次統計量の関係
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 廣瀬 智陽子, 野道 武志, 池谷 直樹
2. 発表標題 都市キャノピー層における歩行者高さ風速のPIV 計測
3. 学会等名 第27回風工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関