

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02311

研究課題名（和文）LES領域分割法による自然換気・通風時の高度室内気流予測法の構築とその実用化

研究課題名（英文）Advanced Prediction Method of Indoor Natural Ventilation Flow using LES-based Domain Decomposition Technique

研究代表者

小林 知広（Kobayashi, Tomohiro）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90580952

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年我が国の非住宅建築の設計時には省エネルギーを目的として自然換気が導入されることが増えている。建物内の気流性状や温熱環境は自然換気のため外界条件に応じて様々な分布を形成するが、それを高い精度で予測することは容易ではない。本研究では、屋外ではLarge Eddy Simulation (LES)による屋外気流解析の結果から、自然換気時の屋内気流分布を予測する領域分割法を提案した。検討対象は比較的簡易的な開口部形状を持つ単室モデルとしたが、等温条件に加えて非等温条件でも検討を行い、開口部位置が地面に近いなど特殊な条件を除いて室内気流を高い精度で予測可能なことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では比較的高い精度で気流を予測するLESを用いて、屋外気流場の予測結果から通風時の室内気流を予測する手法を提案した。同様の目的で屋外に仮想的な面を設けて結果を取得して解析領域を狭めた計算の境界条件に用いるネスティング技術も考えうるが、それでは取得する境界条件が膨大になりLES計算に適用するのは現実的に容易ではない。当該手法は各開口部につき一点のみで室内解析用の境界条件を取得することから、ビル風解析や構造解析等他の目的で設計初期段階に実施される屋外気流解析の実施時に容易にデータを取得することができる。そのため、実用的な簡便さをもって比較的高精度で室内気流が予測可能な手法の提案と考える。

研究成果の概要（英文）：In recent years, natural ventilation has been increasingly introduced in the design of non-residential buildings in Japan for the purpose of energy conservation. The airflow properties and thermal environment inside a building could show various distributions depending on external conditions due to natural ventilation. However, it is not easy to predict this with high accuracy. In this study, the Domain Decomposition Technique (DDT) is proposed, which predicts indoor airflow distribution during natural ventilation based on the results of outdoor airflow analysis using Large Eddy Simulation (LES). The target of the study was a single-room model with a relatively simple opening shape. In addition to isothermal conditions, it was also studied under non-isothermal conditions. Finally, it was confirmed that the indoor airflow could be well predicted except some special conditions such as the opening position being close to the ground.

研究分野：建築環境工学

キーワード：通風 自然換気 CFD LES 領域分割法 風洞実験

## 1. 研究開始当初の背景

近年で ZEB の実現や BCP のため非住宅建物への自然換気導入例も多く見られ、社会的にも重要性が認知されている。実際の設計段階における自然換気予測は、慣例的に換気回路網計算に基づく換気量予測をベースとすることが多い。数値流体力学 (CFD) が実用化され、Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) を用いた室内 CFD 解析の例も多く見られるようになったが、境界条件の自然換気量は換気回路網計算に基づき一般に定常解析が採用することが一般的であり、予測結果も実際の自然換気時と十分に一致しないことが多い。風環境分野においては RANS ではなく計算負荷は高いものの比較的精度の高い Large Eddy Simulation (LES) を用いる検討が進み現実的になっており、建物内の気流解析予測と進展に差が見られるように思われる。これらに鑑みると、設計段階での室内気流予測においても LES を用いた高精度な予測が可能な技術的に可能と思われ、実際の建物の設計プロセスを勘案すると、屋外気流解析の結果を効率的に利用して屋内気流解析を行うことを可能とする検討が有用と思われ本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

前述の通り、本研究では今後利用増加が期待される CFD 技術の LES を前提とし、室内気流解析での自然換気・通風時の境界条件設定の難しさを克服し、室内のみを解析領域とした LES で実際の環境を高精度かつ適切に再現し得る実用的な室内気流予測法としての「領域分割法」を確立し、学術的・技術的なブレイクスルーを目指すものである。当該手法の概念は倉瀬ら<sup>1)</sup>により RANS で提案されたが、本研究ではこれを LES に適用する。具体的には、屋外気流解析で計算される壁面静圧と風速を想定される開口部付近であらかじめ取得し、これを用いて換気量と流入風向を非定常で予測することで、屋内のみの気流場を適切に予測する手法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 風洞実験による真値取得

本研究は LES を用いた領域分割法を提案している。これは室内外を LES で同時に解析すること (以降、全域解析) が計算負荷の観点から現実的ではないため、屋外気流解析の結果を利用して屋内解析を行うことを意図している。つまり、本質的には全域解析を正解値と位置付けて、本研究で提案する領域分割法と室内気流場の比較を行うことで検証することになる。この正解値と位置付ける全域解析についても LES による数値解析であるため、あらかじめ実験を行うことで精度の検証を行う必要があると言える。そこで、研究の第 1 ステップとしては風洞実験を行うことで精度検証用の実験値を取得する。

### (2) LES を用いた室内外同時解析 (全域解析) とその精度検証

前述の通り、領域分割法は全域解析を正解値として検証を行うため、よってまずは全域解析を実施する必要がある、その解析精度はあらかじめ検証しておく必要がある。したがって、あらかじめ取得した風洞実験を LES で再現した全域解析を実施し、解析精度の検証 (Validation) を行うことが研究全体のプロセスとして必要となるため、ここではその比較検証を行う。

### (3) LES による全域解析を真値とした領域分割法の提案と等温場での検証

精度検証が行われた全域計算を対象として、領域分割法の検証を行う。まずは風力換気主体の自然換気設計を想定して、等温場での計算を行う。検討対象は単室建物モデルとして 3 風向とするが、領域分割法では屋外解析結果から瞬時の換気量を予測する必要がある。提案する方法として、i) この際流入風向をいかに与えるか、と ii) 換気量予測の精度の向上の 2 点に着目した。1 点目については屋外解析時の開口想定面近傍風速と換気量を開口面積で除した法線風速を合成することの流入風向の考慮の有無をパラメータとする。換気量予測にあたっては、一般的なオリフィス式に基づく計算をベースとするが、開口部の抵抗 (流量係数) を流入風向によって補正することで換気量予測の精度向上が見込まれる。そのため、流入風向による流量係数補正として局所相似モデル (Local Dynamic Similarity Model, LDSM)<sup>2)</sup> の組み込みの有無をパラメータとする。i) 流入風向、ii) LDSM の両者を組み込んだ領域分割法を Method 1, i) のみ組み込んだ手法を Method 2, 両者を組み込まずに法線方向流入とした手法を Method 3 として検証を行う。

### (4) 非等温場における領域分割法の手法検討とその検証

非住宅建物の自然換気設計においては、風力換気を主体とすることもあるが、多くの場合内外温度差を考慮した温度差換気も期待して設計が行われる。これは温度差に起因する内外密度差による圧力差を風圧差とともに換気駆動力として見込むということを意味する。本研究では対面 2 開口の条件を対象として、床面付近と屋根面付近に配置された対面開口条件と、床面と屋根面から多少鉛直方向に距離のある位置に設置した条件において、床面から発熱をさせることで風力と温度差の両者が換気駆動力として働く状況で領域分割法の検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) CFD 解析の精度検証

実験と全域解析の結果を比較して精度検証を行った。風洞実験は図1に示す風洞では図2の境界層流下で行った。LESは計算時間間隔0.0005秒で5秒の助走計算の後に11秒の本計算を実施した。図3に解析領域を示し、図4にシールドモデル周辺の風速ベクトルの分布を示す。気流パターンとしては、LESは実験をよく再現した。

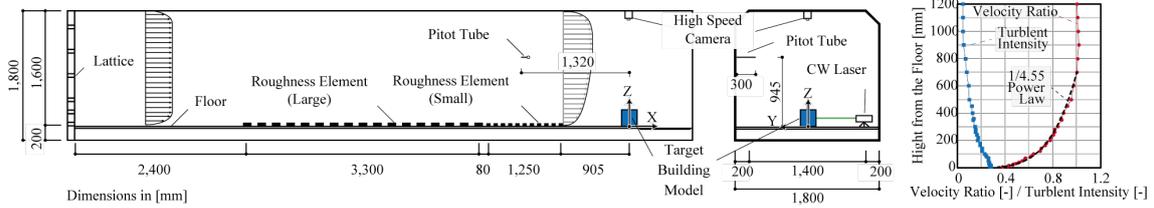


図1 風洞断面図

図2 境界層流

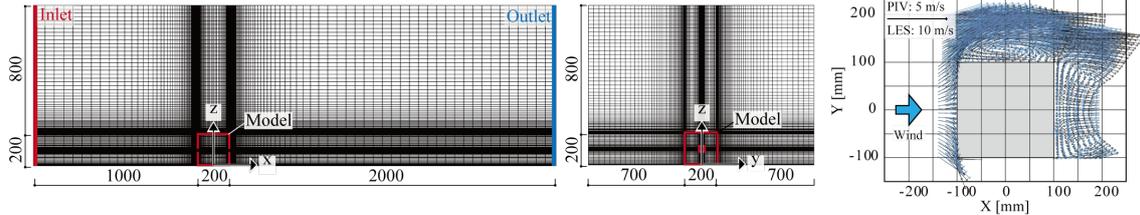
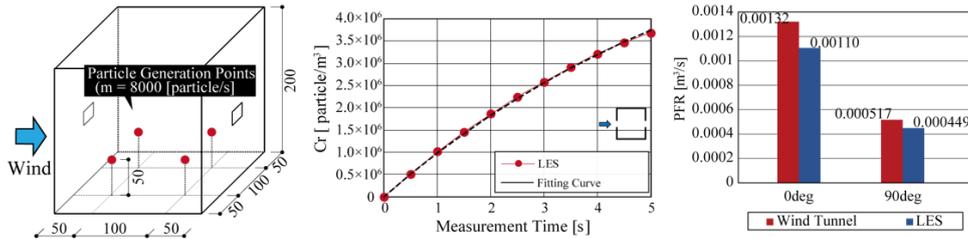


図3 CFDの解析領域及び計算格子配置

図4 周辺気流の比較

通風状態での検証として、換気量の精度検証を行う。実験では前述の通りトレーサガス法を用いたCFDでは実験のガス発生点4点から粒子を発生させ、室内個数濃度の上昇過程から完全混合を仮定したSeidel式により換気量を求めた。図5にその手法及び比較結果を示すが、概ね精度よく換気量も再現できているものとみなし、これを持って解析精度検証とした。



(1) 換気量算出のための粒子発生点

(2) 個数濃度の推移

(3) 換気量 (PFR) の比較

図5 CFDの解析領域及び計算格子配置

### (2) 等温場を対象としたLESによる領域分割法の提案と検証

本研究ではまず等温場を対象としてMethod 1, 2, 3の三種類の領域分割法の検討を行う。図6に示すのは流量係数補正と流入風向の考慮の両者を組み込んだMethod 1のフローである。

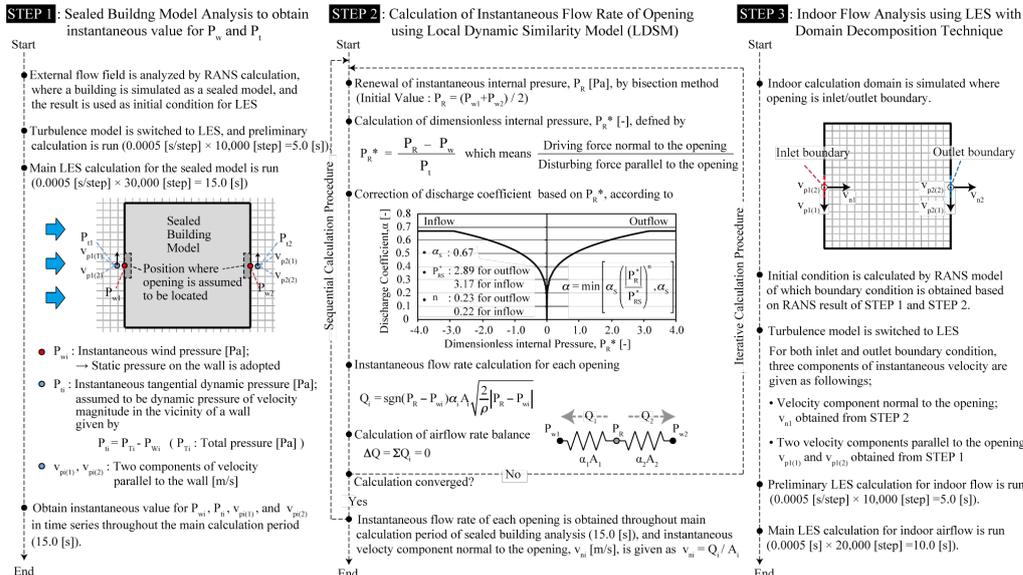


図6 本研究で提案する等温場を対象とした領域分割法 (Method 1)

上記で概説した領域分割法の検証を行う。対象は対面開口の単室モデルで、**図 7** に示す 3 風向で実施した。領域分割法の実施手順を**図 8** に示す。

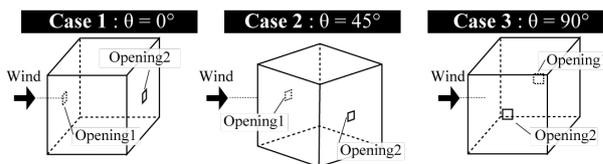


図 7 等温での領域分割法の検証

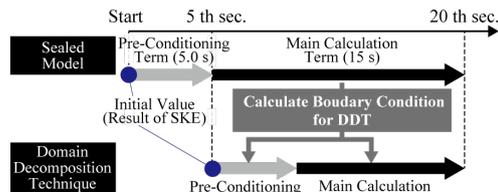


図 8 領域分割法の計算手順

**図 9** に 3 つの風向条件に対して全域計算を行った結果と、前述の Method 1, 2, 3 で予測した結果における室内スカラー風速の時間平均値を示す。概して Method 3 では室内気流場の予測としては全域計算とは一致していないが、Method 1, 2 では傾向をよく再現し、Method 1 ではより精度が高い。よって少なくとも流入風向は考慮し、求める精度によって流量係数補正を行う Method 1 か Method 2 を使い分けることが推奨される。なお、ここでは時間平均のスカラー風速の比較結果を掲載したが、Method 1, 2 では室内で風速変動のパワースペクトル密度も全域計算と概ね一致していることも確認しており、この結果については別途公表論文<sup>4)</sup>を参照されたい。

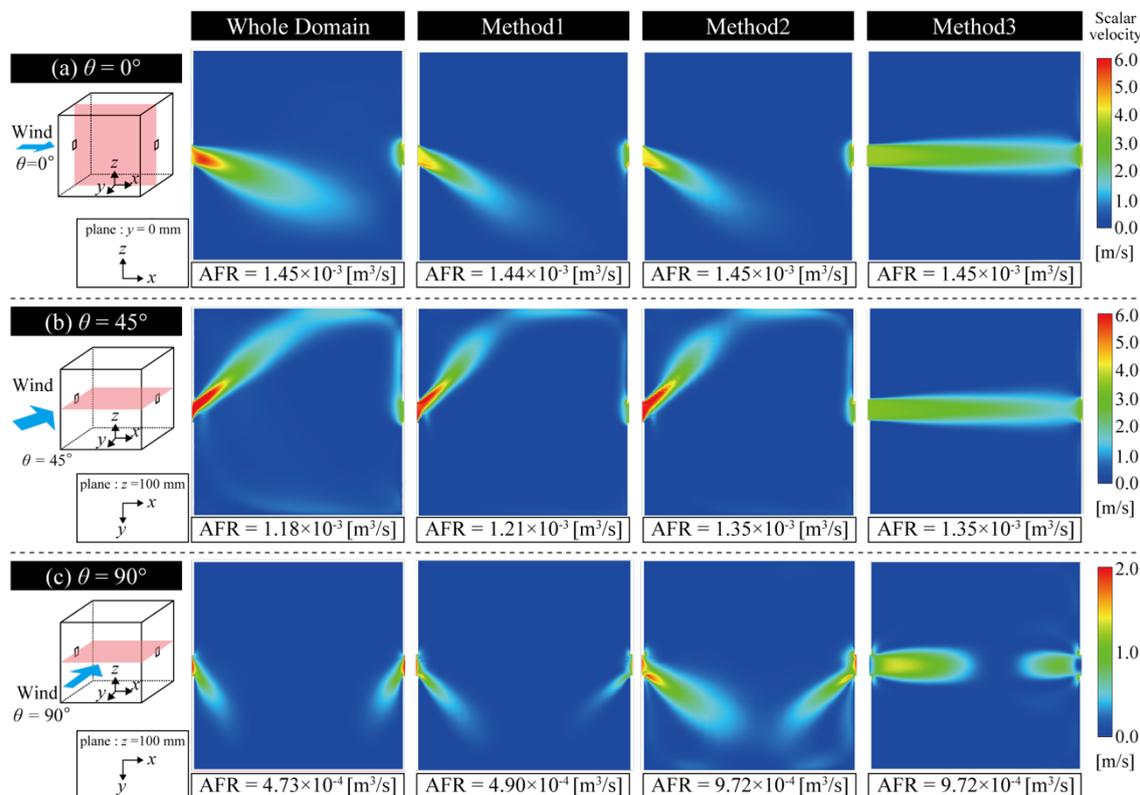


図 9 等温場を対象とした全域計算と領域分割法 (Method 1, 2, 3) の比較

### (3) 非等温場を対象とした LES による領域分割法の提案と検証

本研究の目的は LES を使用して実用的に自然換気時の室内気流場を高精度に予測することであり、前述の通り風力と温度差の両者を期待して設計される自然換気建物が多いことから、実務への領域分割法の適用には非等温場を対象とした検証が必要と言える。そこで、同様に単室建物を対象としながら床面から発熱をさせて内外温度差が発生する条件下で、高低差のある対面開口条件で全域解析と領域分割法の解析を行うことで当該手法の応用性の確認を行う。

対象建物は**図 10** に示す  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  のフルスケールの単室モデルとした。**図 11** に全域計算の解析領域と計算格子配置を示す。これを**図 12** の境界層流下にて検討した。ここでは内外温度差がある状況を考える必要があるため、室温が  $25^\circ\text{C}$  になるような条件を想定して室内の床面から一様発熱をさせることで内外温度差をつけた。その発熱密度 2 条件と外部風向 2 条件の計 4 条件で検討を行った。**表 1** に解析条件をまとめて示す。

表 1 解析条件

Case ID	Indoor Temperature [°C]	Outdoor Temperature [°C]	Wind Direction [°]	Heat Flux from the Floor [W/m²]
Case 1	25.0	20.0	0	281.8
Case 2		15.0	0	700.3
Case 3		20.0	180	52.98
Case 4		15.0	180	422.7

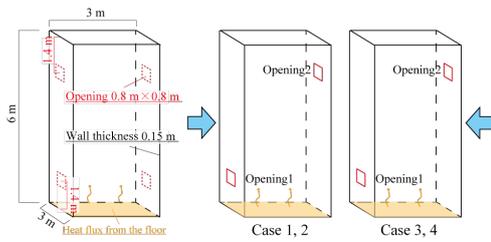


図 10 対象とした室モデル

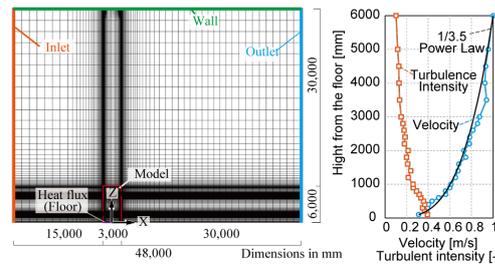


図 11 解析領域と計算格子配置

図 12 境界層流

非等温場での領域分割法は図 6 の Method 1 を基本としたが、内外密度差による圧力差を風圧差に加算した。ここではこの換気量計算時の室温は一樣と仮定して密度を計算して検討を行い、室温は瞬時定常を仮定せず熱容量と計算時間間隔から計算し、等温場同様に流量係数補正の有無 (Method 1,2) で検討を行った。ここでは実物大の検討を行なったが、縮小模型実験での精度検証とこの縮尺での領域分割法の検討も別途行なっている<sup>5,6)</sup>。図 13 に領域分割法での計算格子配置とともに全域解析と領域分割法 (Method 1, 2) の結果を示す。

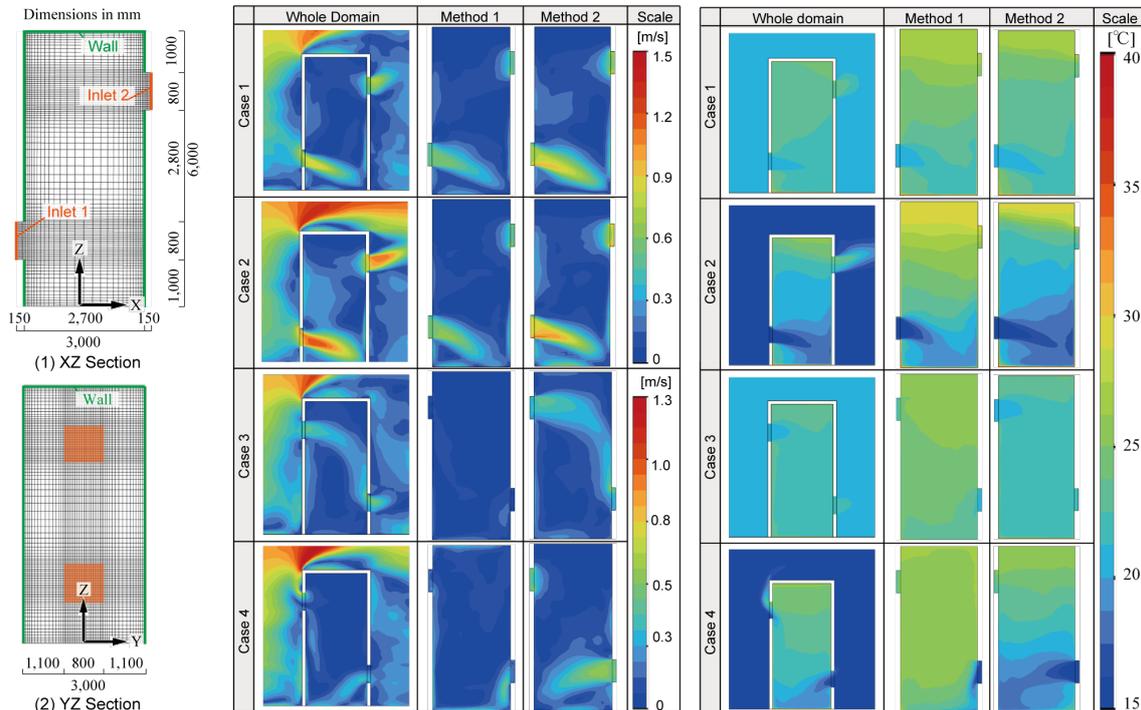


図 13 全域計算と領域分割法の比較 (左: スカラー風速、右: 室温)

温度差が風圧差をアシストする Case 1, 2 においては Method 1, 2 では定性的な室内気流場は再現されたが、Method 1 で若干風速が過小評価される傾向が得られた。この一要因と考え得るのは、STEP 2 で換気量計算を行う際に室温を一樣と仮定した点が挙げられる。風圧差と温度差が逆方向に作用する Case 3, 4 では風速の過大評価が一層明確になっている。これらの条件では同程度の風圧差と温度差が逆方向に働くが、このために開口法線面風速が小さくなり流量係数が大きくダンピングされたと思われる。今後の課題と展望としては、このような条件を想定して領域分割法の理論部分のさらなる改善を行うことで適用範囲を広げることができるとと思われる。

#### 引用文献

- 1) T. Kurabuchi, M. Ohba, T. Nonaka : Domain Decomposition Technique Applied to the Evaluation of Cross-Ventilation Performance of Opening Positions of a Building, *International Journal of Ventilation*, Vol.8, No.3, pp.207-217, 2009
- 2) T. Kurabuchi, M. Ohba : Local Dynamic Similarity Model of Cross-Ventilation Part 1 - Theoretical Framework, *International Journal of Ventilation*, Vol. 2, No.4, pp.371-382, 2004
- 3) 佐野, 小林, 山中ら: LES を用いた領域分割法による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その 3) シールドモデルを対象とした LES の精度検証 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-6, 2022.3
- 4) 田中, 小林, 山中ら: 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その 5) 単室モデルを対象とした外部風向条件毎の各種領域分割法の解析精度検証, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-6, 2022.3
- 5) 宮澤, 小林, 山中ら: 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する研究 (その 8) 風洞実験による風力と浮力が作用する場での換気量及び室内通風気流測定, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, G-1, 2023.9
- 6) 松原, 小林, 山中ら: 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する研究 (その 9) LES を用いた非等温条件での解析精度検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, G-2, 2023.9

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 宮澤昇平, 小林知広, 山中俊夫, 小林典彰, 崔ナレ, 松原暢, Jiang Zitao, 丹原千里
2. 発表標題 領域分割法を用いたLESによる室内通風気流の非定常解析手法に関する研究（その6）風洞実験による風力と浮力が作用する場での室内気流及び換気量の測定
3. 学会等名 令和4年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松原暢, 小林知広, 山中俊夫, 小林典彰, 崔ナレ, 宮澤昇平, Jiang Zitao, 丹原千里
2. 発表標題 領域分割法を用いたLESによる室内通風気流の非定常解析手法に関する研究（その7）：RANSを用いた非等温条件での基礎的検討
3. 学会等名 令和4年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐野香之、小林知広、山中俊夫、小林典彰、崔ナレ、田中佑亮
2. 発表標題 LESを用いた領域分割法による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究（その1）単室モデルを対象とした風洞実験
3. 学会等名 日本建築学会2021年度近畿支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑亮、小林知広、山中俊夫、小林典彰、崔ナレ、佐野香之
2. 発表標題 LESを用いた領域分割法による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究（その2）単室モデルを対象としたLESの解析精度検証
3. 学会等名 日本建築学会2021年度近畿支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野香之、小林知広、山中俊夫、丹原千里、小林典彰、崔ナレ、田中佑亮
2. 発表標題 LESを用いた領域分割法による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その3) シールドモデルを対象としたLESの精度検証
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑亮、小林知広、山中俊夫、丹原千里、小林典彰、崔ナレ、佐野香之
2. 発表標題 LESを用いた領域分割法による室内通風気流の非定常解析手法に関する基礎的研究 (その4) 単室モデルを対象とした開口に直交する風向条件での領域分割法の基礎検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐野香之、小林知広、山中俊夫、丹原千里、小林典彰、崔ナレ、田中佑亮
2. 発表標題 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する 基礎的研究 (その3) 単室モデルを対象とした風洞実験及び LES の精度検証
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会学術講演会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑亮、小林知広、山中俊夫、丹原千里、小林典彰、崔ナレ、佐野香之
2. 発表標題 領域分割法を用いた LES による室内通風気流の非定常解析手法に関する 基礎的研究 (その4) 単室モデルを対象とした境界条件に関する基礎検討
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会学術講演会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑亮、小林知広、山中俊夫、小林典彰、崔ナレ
2. 発表標題 領域分割法を用いたLESによる室内通風気流の非定常解析手法に関する研究 (その5) 単室モデルを対象とした外部風向条件毎の各種領域分割法の解析精度検証
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野香之、小林知広、山中俊夫、小林典彰、崔ナレ、蔣子韜
2. 発表標題 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その14) 片側二開口の単室を対象とした流入出風速及び換気量測定
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 蔣子韜、小林知広、山中俊夫、小林典彰、崔ナレ、佐野香之
2. 発表標題 複数開口を有する室を対象とした風の乱れによる換気効果に関する研究 (その15) 片側及び対面二開口の単室の換気量測定とその影響要素の検討
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐野香之、小林知広、山中俊夫、丹原千里、小林典彰、崔ナレ、田中佑亮
2. 発表標題 領域分割法を用いたLESによる室内通風気流の非定常解析法に関する基礎的研究 (その1) 単室モデルを対象とした風洞実験
3. 学会等名 2020年度 (第50回) 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中佑亮、小林知広、山中俊夫、丹原千里、小林典彰、崔ナレ、佐野香之
2. 発表標題 領域分割法を用いたLESによる室内通風気流の非定常解析法に関する基礎的研究(その2) 単室モデルを対象としたLESの解析精度検証
3. 学会等名 2020年度(第50回) 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Kobayashi, Toshio Yamanaka, Narae Choi, Toru Matsubara, Shohei Miyazawa, Zitao Jiang, Chisato Tambara
2. 発表標題 Unsteady indoor airflow analysis of non-isothermal natural ventilation using domain decomposition technique with LES
3. 学会等名 Roomvent 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024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
研究分担者	山中 俊夫  (Yamanaka Toshio)  (80182575)	大阪大学・大学院工学研究科・教授   (14401)	
研究分担者	山澤 春菜  (Yamasawa Haruna)  (80982305)	大阪大学・大学院工学研究科・助教   (14401)	
研究分担者	小林 典彰  (Kobayashi Noriaki)  (60880656)	大阪大学・大学院工学研究科・技術職員   (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	崔 ナレ  (Choi Narae)  (10826481)	東洋大学・理工学部・助教    (32663)	

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