

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：80122

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15157

研究課題名（和文）温度差換気を採用する高層建物の自然換気口開閉制御法 - 新たな開放率制御の構築 -

研究課題名（英文）The Method of Opening and Closing of the Natural Ventilation Opening in High Rise Building with Buoyancy Driven Ventilation -The Construction of Opening Ratio Control-

研究代表者

下ノ菌 慧 (SHIMONOSONO, KEI)

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・建築研究本部 北方建築総合研究所・研究職員

研究者番号：10781453

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多様な自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法を構築した。本計算法は、自然換気口の開放回数や開放時間（以降、開放率）を調整して、自然換気時の低温環境の発生を抑制するための制御（以降、下限室温制御）も評価可能である。本計算法を用いて、自然換気時の低温環境の発生を抑制するためには、開放率調整が有効であることを示した。また、構築した計算法から得られる開放率の値は低温環境の発生を抑制するための自然換気口有効開口面積の設定に利用できる可能性があることに着眼した。外気温と開放率の値には正の相関があることを明らかにし、本関係から自然換気口有効開口面積の設定法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多様な自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法が構築されたことにより、現在広く普及されている自然換気制御の効果を推定することが可能になる。本計算法を用いることで、自然換気制御の設定値の決定にも利用できる。

また、自然換気は中間期の冷房負荷削減や熱的快適性の向上に寄与するものの、低温環境の発生や、室内気流の上昇など執務者の苦情を招く可能性もあり、自然換気が利用されなくなることもある。本研究で提案した自然換気口有効開口面積の設定法を利用することで、室内環境にも配慮された自然換気の運用が可能となり、自然換気導入時間が増加する。

研究成果の概要（英文）：A new air flow balance simulation that can evaluate various natural ventilation controls was developed. This simulation tool can also evaluate the control for suppressing the occurrence of a low temperature environment during natural ventilation (lower limit of room temperature control) by adjusting the number of opening or the opening duration (opening ratio). It was shown that the opening rate adjustment is effective in suppressing the occurrence of a low temperature environment during natural ventilation due to adjusting the opening ratio. Furthermore, It was found that there is a positive correlation between the value of the outdoor temperature and the opening ratio, and from this relationship, a method for setting the effective opening area of the natural ventilation opening was proposed.

研究分野：建築環境 / 建築設備

キーワード：自然換気 中性帯 開放率 自然換気許可条件

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、建物運用時の自然エネルギー利用の一つとして、“自然換気”を導入する手法がオフィス、学校、公共施設など広く普及しつつある。自然換気の目的は冷房使用量の削減や快適性向上に留まらず、知的生産性向上につながるという報告もあるが、これらを達成するためには取り入れる自然換気量が適切でなければならない。時々刻々と変動する外気条件下において、自然換気量が過大になる場合や自然換気をすることで室内環境に不利にはたらく場合がある。そのため、自然換気口を開放するときの室内外条件（以降、自然換気許可条件）の設定や自然換気口の開度、開放回数、開放時間（以降、開放率）の操作などの開口面積を調整するための制御を行う必要があり、建物設計・運用のために自然換気制御を評価できるシミュレーションツールの開発が求められている。

### 2. 研究の目的

研究の最終目的は熱・換気平衡計算により自然換気制御を評価でき、かつ、比較の実用可能な計算法を提案し、自然換気制御を導入するオフィスビルの性能評価を行うことである。本研究では、自然換気時の低温環境の発生に主眼をおき、多様な自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法を構築し、省エネルギーならびに室内環境に配慮した自然換気口有効開口面積の設定法を提案することを目的とする。本目的を達成するために、以下の3点を実施する。

#### 1) 自然換気導入建物の実態調査

数値解析条件を設定することを目的に、実在する自然換気導入建物の実態調査を行う。自然換気量に影響する自然換気口有効開口面積、自然換気経路、自然換気許可条件を調査する。

#### 2) 開放率操作を組込んだ熱・換気平衡計算法の構築

従来の自然換気口の開閉は「全開」若しくは「全閉」を想定しているが、本研究では、自然換気口の開放率を操作して低温環境の発生を抑制するための制御（以降、下限室温制御）を組込んだ熱・換気平衡計算法を構築する。

#### 3) 自然換気口の開放率特性を用いた温度差換気設計法の検討

2) で構築した計算法は開放率を時々刻々と操作することで低温環境の発生を抑制するものであるが、自然換気口の開閉が手動である場合に現実的な運用方法とならない可能性がある。そこで、下限室温制御を組込んだ計算法から得られる自然換気口の開放率の値を用いて、開放率を時々刻々と操作しなくても低温環境の発生を抑制するための自然換気口有効開口面積を設定する方法を提案する。

### 3. 研究の方法

#### 1) 自然換気導入建物の実態調査

自然換気導入建物の実態把握を行う。調査は研究論文を中心に実施する。1985年から2020年に発行された日本建築学会大会学術講演会、環境系論文集、計画系論文集並びに空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集の中から、実在する建物について調査した。調査項目は建物概要として所在地、竣工年、建物用途、階数若しくは軒高および基準階床面積若しくは延床面積を調査した。自然換気の項目として、自然換気駆動力、自然換気口有効開口面積、文献中に記載されている自然換気効果に関する事項をまとめた。

#### 2) 開放率操作を組込んだ熱・換気平衡計算法の構築

自然換気制御を評価できる換気平衡計算法を構築し、既存の熱負荷計算に付加するだけで自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法を構築する。開放率の計算方法、計算時間間隔の検討を行い、下限室温設定値以下となる時間数や自然換気口の開閉ハンチング（開閉を繰り返すこと）の観点から現実的な運用につながる手法を検討する。

#### 3) 自然換気口の開放率特性を用いた温度差換気設計法の検討

2) で構築した計算法を用いて、下限室温制御の特徴を示しつつ、自然換気口の開放率の値を用いて低温環境の発生を抑制するための自然換気口有効開口面積の設定法を検討する。また、内部発熱量、下限室温設定値、建物階数等をパラメータとして解析を行い、低温環境の発生を抑制するための自然換気口有効開口面積の設定法を多くの建物で活用できることを目指した。

### 4. 研究成果

#### 1) 自然換気導入建物の実態調査

調査した建物の属性を図1に示す。調査した89件のうち33件(37%)が東京に立地している。建物用途はオフィス、建物階数は6~10階、基準階床面積は2001~3000m<sup>2</sup>が多い。自然換気口有効開口面積の調査結果を図2に示す。基準階床面積に対する自然換気口有効開口面積は0.1~0.5%程度とする建物が多く、建物高さとの相関は見られなかった。自然換気口の流量係数の調査結果を図3に示す。基準階床面積と流量係数の相関はほとんど見られなかったものの、流量係数は0.3~0.6に分布していた。竣工年数と建物階数の調査結果を図4、換気駆動

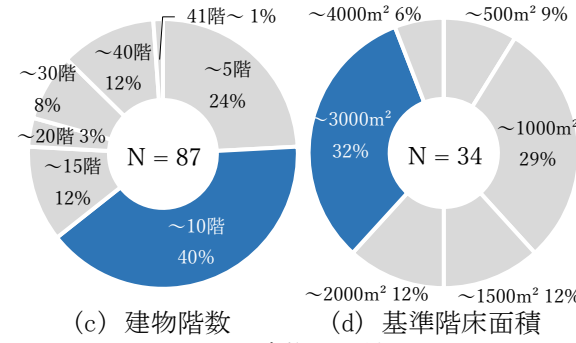
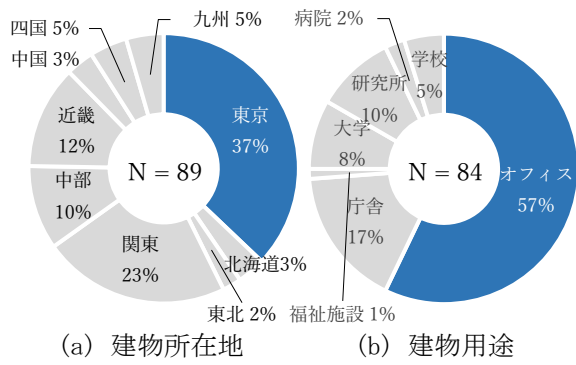


図1 建物の属性

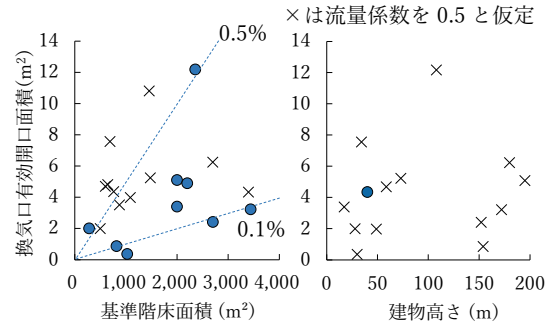


図2 自然換気口有効開口面積

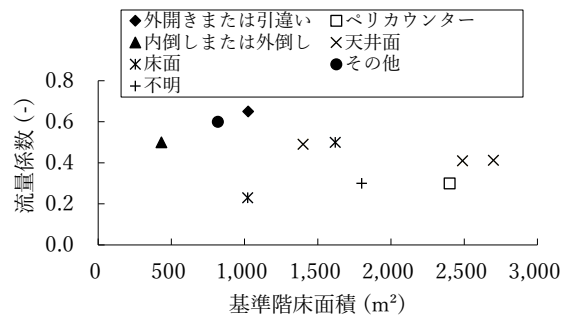


図3 自然換気口の流量係数

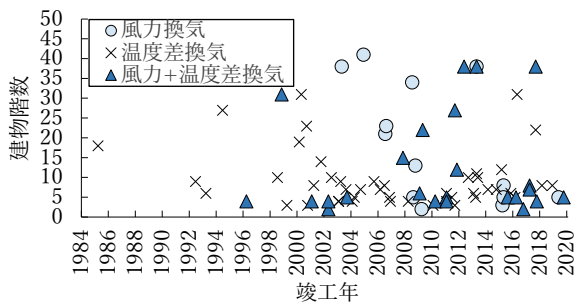


図4 竣工年数と建物階数

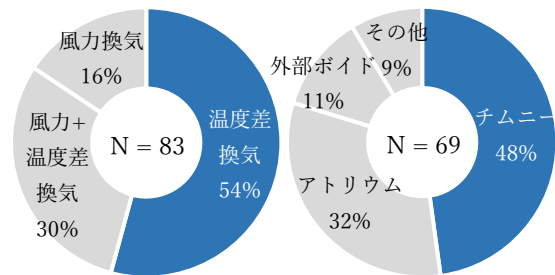


図5 換気駆動力と温度差換気経路

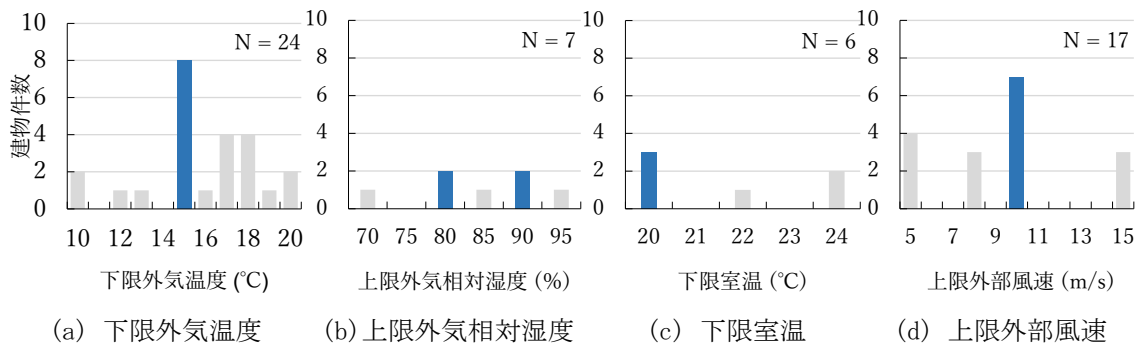


図6 自然換気許可条件の設定値

力と温度差換気経路の調査結果を図5に示す。83件のうち風力換気との併用も含めて70件(84%)が温度差換気を採用していた。自然換気許可条件の設定値の調査結果を図6に示す。下限外気温度を採用する建物が24件と多く、その設定値は15°Cが最多であった。次に多い項目は上限外部風速であり、その設定値は5、10、15m/sとする建物が多。下限室温を採用する建物は多くないものの、その設定値は20、22、24°Cであった。

## 2) 開放率操作を組込んだ熱・換気平衡計算法の構築

自然換気制御とその熱・換気平衡計算法を図7(左)に示す。本研究では下限外気温度、上限外気相対湿度、上限外部風速、「(外気温度)×(室内温度)」、「(外気エンタルピ)×(室内エンタルピ)」などの自然換気許可条件のほか、下限室温制御も組込んだ熱・換気平衡計算法を構築した。現実の下限室温制御はON-OFF制御または段階的に自然換気口有効開口面積を調整する方法がとられるが、数値計算上は計算時間間隔の影響をなるべく受けない結果を得るために、開放率を時々刻々と自由な値に調整できることとした。

一般に自然換気計算を行う場合には熱・換気平衡の反復計算が必要であり、既存の熱負荷計算を大幅に更新する必要がある。そこで本研究では、熱・換気平衡の反復計算は行わず、換気計算では現時間ステップの室内温湿度は前時間ステップの値と等しい既知数と仮定して、自然換気許可判定および室内圧計算を行う。下限室温制御時の換気平衡計算には PID 制御理論を応用して、開放率を既知と扱えるようにした。この方法を採用することで、既存の熱負荷計算を僅かに更新することで自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法を構築した。

- ①制御パラメータの検討：下限室温制御に対する制御パラメータの感度解析結果を図7(右)に示す。制御パラメータを各3水準設定し、「下限室温設定値以下となる時間数」と「自然換気口の開閉ハンチング回数」から最適な制御パラメータを明らかにした。
- ②計算時間間隔の検討：計算時間間隔による下限室温設定値以下となる時間数と開閉ハンチング回数を表1に示す。計算時間間隔が10分以下であれば、両者の値を小さくできることを明らかにした。

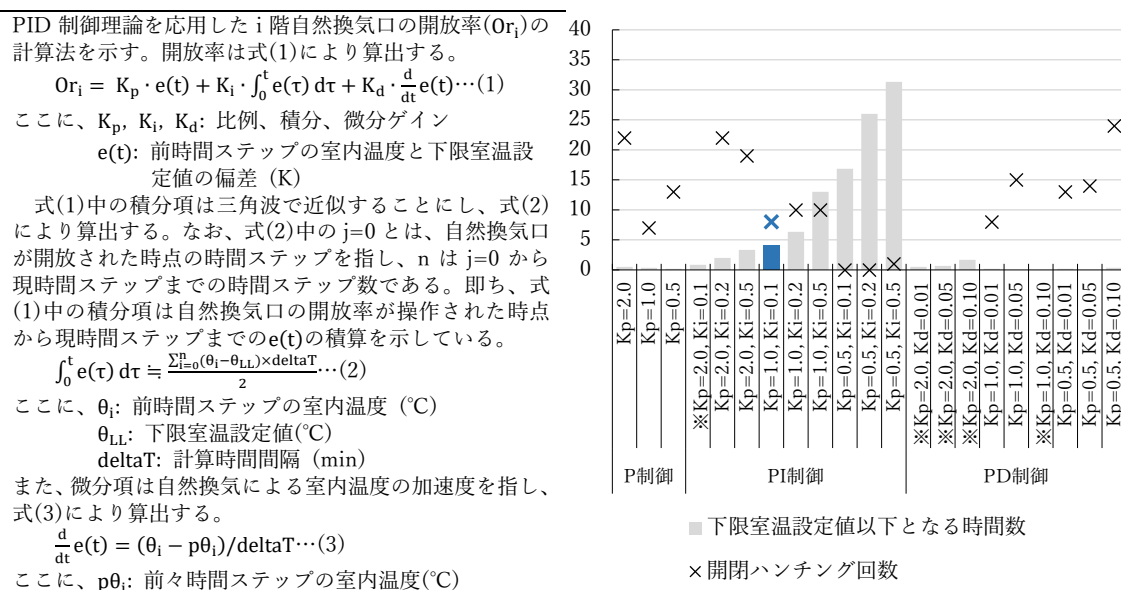


図7 PID 制御理論を応用した自然換気口の開放率計算法と制御パラメータの感度解析

表1 計算時間間隔による下限室温設定値以下となる時間数と開閉ハンチング回数

計算時間間隔	5分	10分	15分	20分	30分	60分
下限室温設定値以下となる時間数	1.7	1.7	1.8	2.0	2.5	4.0
開閉ハンチング回数	0	1	2	3	4	14

### 3) 自然換気口の開放率特性を用いた温度差換気設計法の検討

1) の自然換気導入建物の調査結果から表2に示す計算条件を設定した。本計算条件のもと中間期・夏期の期間解析を行った結果を図8~10に示す。温度差換気は内外温度差が大きいほど換気回数が多くなるが、開放率を操作する場合は換気回数が減少する(図9)。その結果、開放率を操作しない場合は20°C以下となる時間が約18%あるが、開放率を操作する場合は予め設定した下限室温設定値以下となる時間を大幅に抑制することができている。

外気温度と開放率の関係を図11に示す。外気温度と開放率には正の相関があり、この関係から直線近似式を導出する。次にこの近似式からある外気温度に対応する開放率を算出する。最後に選定した外気温度を下限外気温度、算出された開放率を元の自然換気口有効開口面積に乗じた値を自然換気口有効開口面積に設定する。例えば、外気温度20°Cを選定すると開放率は0.44と算出され、自然換気口有効開口面積は0.66m<sup>2</sup> (=1.5×0.44)となる。ここで設定された自然換気口有効開口面積と下限外気温度に基づき、開放率を操作しない条件での室内温度ヒストグラムを図12に示す。本図より、開放率を時々刻々と操作しなくても予め設定した下限室温設定値以下となる時間を大幅に抑制できていることを示した。

ここで提案した設定法を多くの建物で利用できるように、表3に示す20条件において同様の検討を行い、同表右列に示す直線近似式を得た。本直線近似式を用いて、上記と同様に自然換気口有効開口面積と下限外気温度を設定することで、開放率を時々刻々と操作しなくても下限室温設定値以下となる時間を大幅に抑制できることも示した。

表2 計算条件

<p>【計算】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・気象データ EA 気象データ(2010年版、東京・標準年) ・計算時間間隔 10分</li> </ul>
<p>【建物、自然換気】</p> <p>■建物</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高さ: 10階建て(軒高40m), 階高: 4m, 基準階床面積: 504m<sup>2</sup></li> <li>・チムニー 最高高さ: 49m 大きき: 6m(南東面)×5m(北東面または南西面)</li> <li>・窓: 日射遮蔽型 Low-E+透明 窓面積率: 70%</li> <li>・発熱 照明 10W/m<sup>2</sup> 機器 10W/m<sup>2</sup> 人員 18W/m<sup>2</sup>(0.15人/m<sup>2</sup>)</li> </ul> <p>■自然換気</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自然換気許可条件(以下の番号順に許可判定を行う)             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 下限外気温度: 15°C</li> <li>2. 上限外気相対湿度: 90%RH</li> <li>3. 上限外気露点温度: 19°C DP</li> <li>4. 下限外気露点温度: 5°C DP</li> <li>4. 上限外部風速: 10m/s</li> <li>5. 下限室温: 22°C(平日8~22時)、20°C(その他) 下限室温は開放率操作により制御する。開放率操作量はPI制御により決定する。</li> <li>6. (室温)&gt;(外気温)</li> <li>7. (室内エンタルピー)&gt;(外気エンタルピー)</li> </ol> </li> <li>・自然換気期間 4~11月 ・自然換気対象階 1~10階</li> <li>・自然換気口 自然換気口有効開口面積(αA<sub>i</sub>): 1.5m<sup>2</sup> チムニー頂部有効開口面積(αA<sub>c</sub>): 20.0m<sup>2</sup></li> </ul>
<p>【空調】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・設定温度: 夏期(6~9月) 28°C60% 冷却除湿 中間期(4~5月、10~11月) 26°C 冷却のみ</li> <li>・運転時間: 平日8~22時</li> </ul>

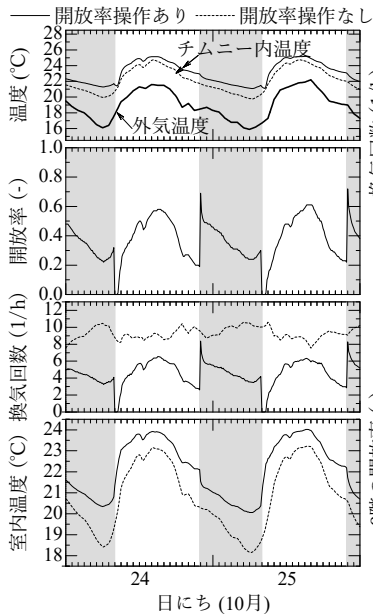


図8 代表日時刻変動図

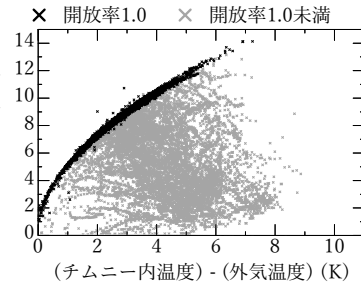


図9 内外温度差と換気回数

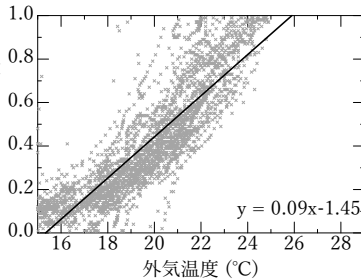


図11 外気温度と開放率(2階)

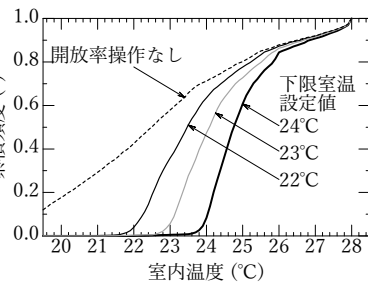


図10 室内温度ヒストグラム

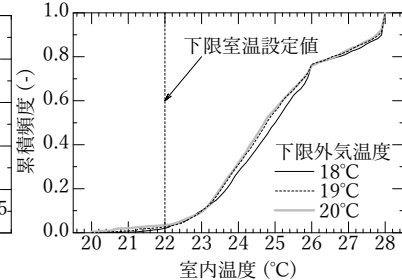


図12 室内温度ヒストグラム

表3 内部発熱量、下限室温設定値、建物階数の設定値

Case	照明・機器発熱量			下限室温設定値(平日8-22時)			建物階数			直線近似式	
	5 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>	15 W/m <sup>2</sup>	22°C	23°C	24°C	5	10	20	a	b
A	○	-	-	○	-	-	-	○	-	0.09	-1.47
B	○	-	-	-	○	-	-	○	-	0.07	-1.25
C	○	-	-	-	-	○	○	-	-	0.07	-1.14
D	○	-	-	-	-	○	-	-	○	0.06	-1.03
E	-	-	○	○	-	-	-	○	-	0.09	-1.34
F	-	-	○	-	○	-	-	○	-	0.08	-1.17
G	-	-	○	-	-	○	○	-	-	0.06	-0.89
H	-	-	○	-	-	○	-	-	○	0.06	-0.98
I	-	○	-	○	-	-	-	-	-	0.09	-1.38
J	-	○	-	○	-	-	-	-	○	0.09	-1.46
K	-	○	-	-	○	-	○	-	-	0.08	-1.22
L	-	○	-	-	○	-	-	-	○	0.08	-1.27
M	○	-	-	○	-	-	○	-	-	0.09	-1.42
N	○	-	-	○	-	-	-	-	○	0.09	-1.47
O	○	-	-	-	○	-	○	-	-	0.08	-1.25
P	○	-	-	-	○	-	-	-	○	0.07	-1.27
Q	-	-	○	○	-	-	○	-	-	0.09	-1.24
R	-	-	○	-	-	-	-	-	○	0.09	-1.44
S	-	-	○	-	○	-	○	-	-	0.08	-1.16
T	-	-	○	-	○	-	-	-	○	0.08	-1.26

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 下ノ園慧、郡公子、石野久彌	4. 巻 86
2. 論文標題 自然換気口の開放率特性を利用した温度差換気設計法の検討 オフィスビルを対象とした自然換気制御の性能評価に関する研究（第3報）	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 608～618
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.86.608	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 下ノ園慧、郡公子、石野久彌	4. 巻 85
2. 論文標題 温度差換気を採用する高層建物の自然換気制御効果の推定法 オフィスビルを対象とした自然換気制御の性能評価に関する研究（第2報）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 331～339
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aije.85.331	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 下ノ園慧、郡公子、石野久彌
2. 発表標題 オフィスビルにおける自然換気制御の性能評価に関する研究 - 下限室温制御解析に基づく自然換気口有効開口面積と下限外気温度の設定法 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei SHIMONOSONO, Kimiko KOHRI and Hisaya ISHINO
2. 発表標題 A New Calculating Method of the Effect of Natural Ventilation Control in Office Buildings with Buoyancy Driven Ventilation
3. 学会等名 Building Performance Analysis Conference and SimBuild（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下ノ園慧、郡公子、石野久彌
2. 発表標題 オフィスビルにおける自然換気制御の性能評価に関する研究 - チムニーに関する各種感度解析 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020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