

自然通風利用のための窓開閉と快適性に関するオフィス実態調査

実測と環境シミュレーション（CFD）との比較

Study on Window Opening and Closing for Natural Ventilation and Comfort in Office Environment

Comparison between actual measurement and environmental simulation (CFD)

○杉村 奈南^{*1}, 吉田 友紀子^{*2}, 一ノ瀬 俊明^{*3}, 平野 勇二郎^{*3}
Nanami SUGIMURA^{*1}, Yukiko YOSHIDA^{*2}, Toshiaki ICHINOSE^{*3}, Yujiro HIRANO^{*3}

*1 茨城大学 大学院理工学研究科 修士課程

Grad. Stud, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Ibaraki Univ.

*2 茨城大学 大学院理工学研究科 助教 博士（工学）

Assist. Prof, Grad. Sch. of Sci. and Eng., Ibaraki Univ, Dr. Eng.

*3 国立環境研究所社会システム領域主幹研究員 博士（工学）

Chief researcher, National Institute for Environmental Studies, Social Systems Division, Dr. Eng.

Summary

The use of natural ventilation has garnered attention following the COVID-19 pandemic; however, there are limited examples of estimating the conditions suitable for natural ventilation and its practical implementation. Therefore, this study aims to investigate the actual practices of window opening and closing for natural ventilation and comfort at Ibaraki University.

Based on indoor measurement results, it was observed that various outdoor factors significantly influence the indoor environment during natural ventilation. Consequently, it is crucial to explore multiple combinations of conditions. Furthermore, a comparison between the actual measurements and the questionnaire responses revealed greater variation in comfort temperature when relying on subjective warm and cold ratings compared to the actual measurements.

Additionally, simulation results demonstrated a distinct airflow generation pattern between the interior zone and the perimeter zone. Therefore, it is important to consider the interior zone and the perimeter zone separately when assessing natural ventilation strategies.

キーワード: 大学キャンパス; 自然通風; 温熱快適性; アンケート; シミュレーション

Keywords: University campus; Natural ventilation; Thermal comfort; Questionnaire; Simulation.

1. はじめに

近年, COVID-19 の流行により, 自然換気が用いられる機会が増加した. 自然換気を導入することにより, 換気の効果だけではなく, 省エネ効果が期待できる. しかし, 適切な運用が行われなければ, 利用者の不快感が増したり, 知的生産性が損なわれたりと, 逆効果になってしまう. 細井ら¹⁾は, 自然通風と機械換気を併用する建物において, 自然通風の制御条件および省エネルギー効果を算出した. 高須ら²⁾は, 自然換気導入オフィスにおいて, 自然換気の適応モデルの構築を目指し, 外気温と快適温度との関係を明らかにした. 既往研究において, 自然通風や窓の開閉に関する検討がいくつも行われている. しかし, 室内側の条件のみを考慮しているものや気温等の限られた条件のみで把握を行っているものがほとんどであり, 複数の条件を考慮に入れたものは数少ない. ま

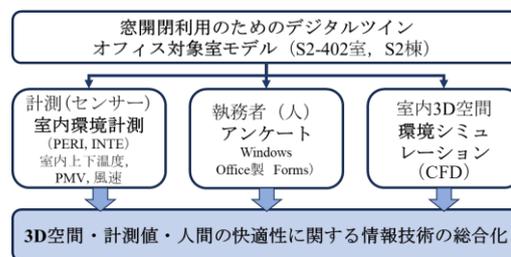


図1 研究の流れ

表1 計測項目

| 測定項目 | 計測機器 | 測定間隔 | 測定場所 (図1参照) |
|------------------|--------|-------|-------------|
| PMV 温湿度 風速 | PMV計 | 10min | 計2点 |
| 温度 | 熱電対 | 1min | 計23点 |
| 気流速度 | 超音波風速計 | 1sec | 計2点 |
| グローブ温度 | グローブ球 | 1min | 計2点 |

た、実際の居住状態における運用の適切性についてはまだあまり報告されておらず、情報の総合化が必要である。

自然通風利用の運用を考えるにあたり、同時に室内の快適性を考慮に入れる必要がある。リジャル³⁾や天野ら⁴⁾は、空調の使用条件毎に、室内の快適温度範囲の予測を行った。様々な条件で快適温度の把握が行われているものの、窓開閉を前提とした自然通風利用の条件で検討を行った事例は少なく、注目されている。

そこで本報では、以下の目的で研究を行った(図1)。

室内(INTE・PERI)の計測により、オフィスの中間期における窓の開閉と、外気条件による対流・放射の影響及び快適性を明らかにする。

次に、在室者に対し、アンケート調査を行うことで、実際の執務環境の運用が適切かどうかを明らかにする。

環境シミュレーション(CFD)により、自然通風利用時の室内環境を再現し、室内(INTE・PERI)の気流の傾向を把握する。

2. 実測調査

茨城大学日立キャンパス内の研究室をオフィス対象とし、室内の温熱環境把握のため、室内計測を実施した。

2.1 計測概要

キャンパス内S2棟402室(以下、対象室)において、表1の通り計測を実施した(図2,3)。期間は2022年10月20日～11月2日の平日9:00-20:00とし、表2の条件でデータを取得した。対象室は、南南西に窓を有しており、ここでは、窓面から3,000mmをペリメーターゾーン(以下、PERI)、その他をインテリアゾーン(以下、INTE)と定義し、データ取得を行った。加えて、S2棟304室にPMV計(INTE)のみ設置した。外気温・日照時間・外部風速・風向の外気条件については、気象庁日立観測所(HP公表:1時間値)を使用した。

2.2 熱電対計測結果

本章では、自然通風の条件で計測を行った10月20日、21日、31日～11月2日について結果を述べる。図4-7に朝、昼、夕、夜(後述のアンケート調査と同時刻)の室温(1分データを1時間平均値に変換)を示す。

図4より、10月21日を見ると、室温が約22℃と、他の日と比べてもそれほど上がっておらず、外部風速が4.2m/sと大きいことから、室内に外部風の影響が及んだとみられる。

次に、図5を見ると、10月20日、31日、11月2日と10月21日、11月1日の2つのパターンに分類することが出来る。前者では、10月20日と11月2日は外気条件が類似しており、10月31日は他の日に比べ、外気温が低いものの、風向の関係で室内への外部風の影響が小さかったとみられる。この3日間の昼の室温の傾向が同様であったことから、外部風が室温に大きく影響を及ぼす

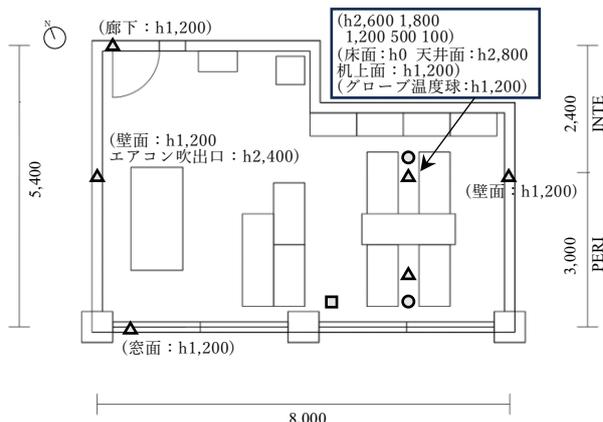


図2 S2棟402室 平面図

○ PMV計 (h:1,200) □ 風速計 (h:1,200)



ポータブルPMV計AM-101

プリード 超音波風速計

△ 熱電対

ウインドソニック

PGWS-100-1

小型・軽量・PREDEセンサー



図3 計測機器概要

表2 計測概要

| 条件 | 期間 | 窓の開閉 | 空調 | 在室人数 | 照明 |
|------|--------------|------|-----|------|----|
| 自然通風 | 10月20日～21日 | 開放 | OFF | 任意 | ON |
| なりゆき | 10月24日～28日 | 自由 | 自由 | | |
| 自然通風 | 10月31日～11月2日 | 開放 | OFF | | |

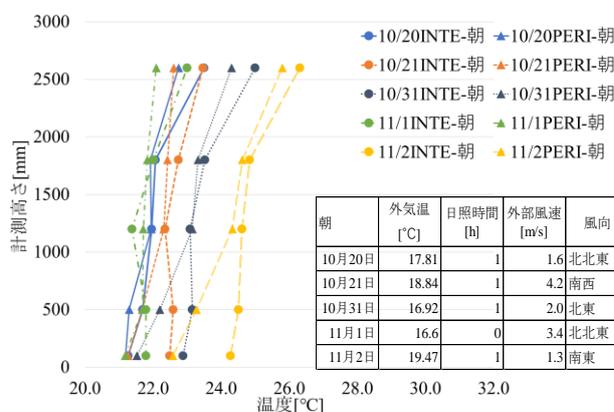


図4 室温(熱電対計測)一朝

と考えられる。また、後者では、室温はほぼ同様の傾向を示しているものの、外気温、日照時間、風速・風向はいずれも異なる値となっている。この結果から、複数の

外気条件が室温に影響を与えられ、INTE・PERIともに快適性への関連を調査する必要があると考える。

次に図6では、日照時間が0の日（10月21日、11月1日）とそれ以外の日（10月20日、31日、11月2日）で異なる傾向を示している。特に、10月21日は5日間（15.35℃～19.97℃）の内最も外気温が高いものの、室温は約22℃と最も低くなっている。これは、日照がなく、風向により、外部風が室内に侵入したと考えられ、これらの要素が室温に影響を及ぼしたと考えられる。

最後に図7では、外気温に近い10月20日と11月2日と比較すると、外部風の影響で室温に2℃近く差が生じており、外部の風向・風速による室温への影響を検討していく必要があると考える。

2.3 PMV 計測結果

室内PMVの計測結果を示す。PMVは室内の2か所（INTE, PERI）に設置されたPMV計によって計測された値を用いる。但し、着衣量0.75clo, 代謝量1.0metとした。

図8,9にPMVの計測結果を示す。横軸用いた室温は、PMV計によって計測した値を用いている。図8,9どちらも、INTE・PERIともに半数以上のPMV値が±0.5（ASHRAE55 快適域⁶⁾を外れており、快適性が低いことがわかる。図8（左）のうち、ASHRAE55 快適域内（PMV ±0.5）のデータに着目し、グローブ温度-風速の相関を図8（右）に示す。INTEではグローブ温度24.3℃から28.5℃、風速0.11m/sから0.21m/s、PERIではグローブ温度22.9℃から27.8℃、風速0.02m/sから0.25m/sを示した。同様に図9（右）を見ると、INTEではグローブ温度24.4℃から29.0℃、風速0.10m/sから0.17m/s、PERIではグローブ温度22.0℃から28.3℃、風速0.02m/sから0.18m/sを示した。また、多くが風速0.0~0.20m/sの間であるものの、それ以上の値もみられ、その他の条件も含め、より詳細な検討を行っていく必要があると考える。

次に、Griffiths法⁶⁾（式(1)）を用いて快適温度を算出した。

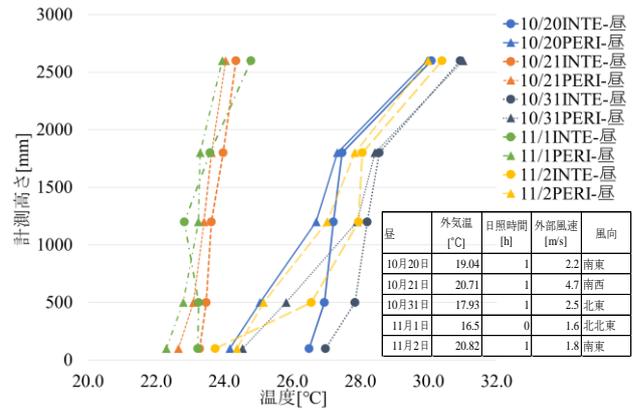


図5 室温（熱電対計測）－昼

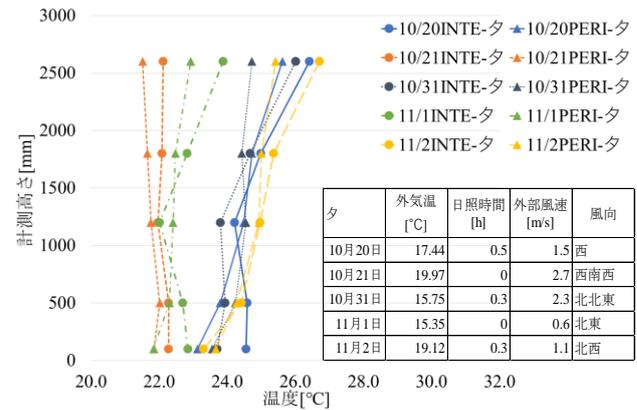


図6 室温（熱電対計測）－夕

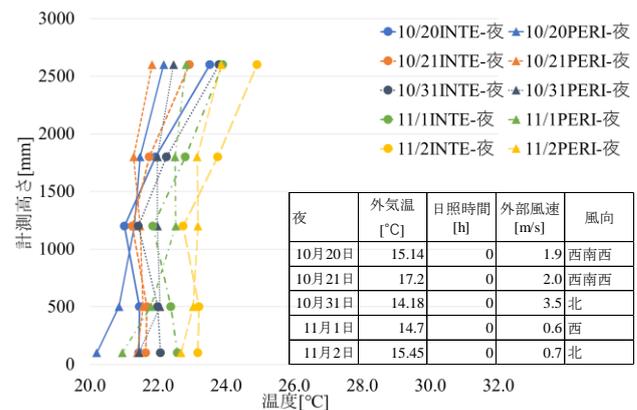


図7 室温（熱電対計測）－夜

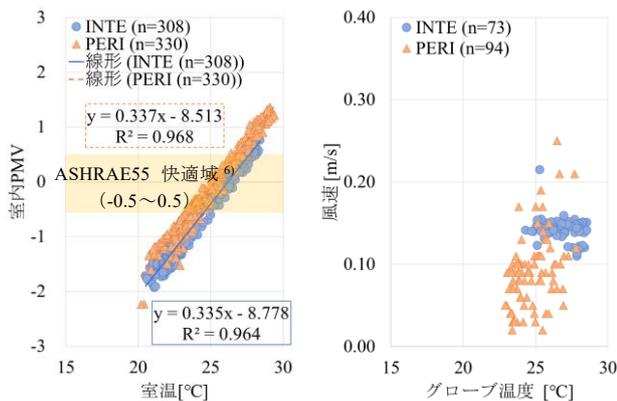


図8 (左) 室温－室内PMV (条件：自然通風)
(右) PMV快適時 (±0.5) グローブ温度－風速

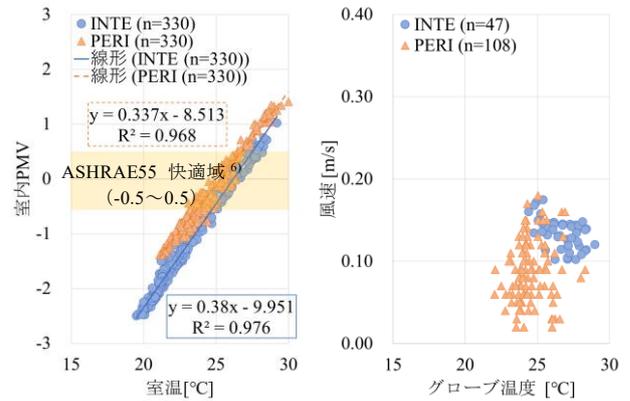


図9 (左) 室温－室内PMV (条件：なりゆき)
(右) PMV快適時 (±0.5) グローブ温度－風速

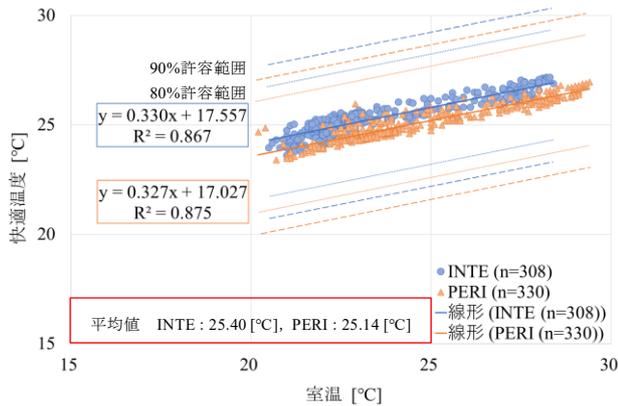


図 10 室温－快適温度（条件：自然通風）

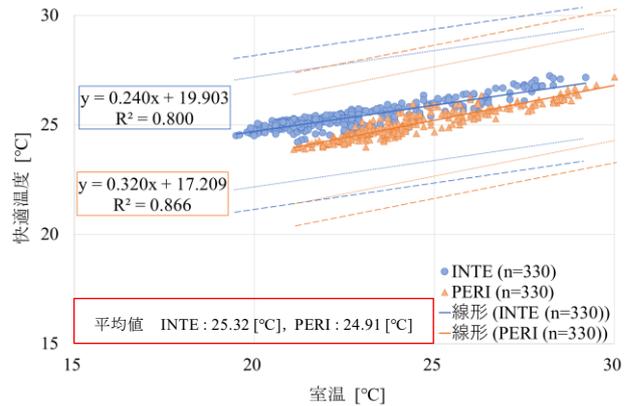


図 11 室温－快適温度（条件：なりゆき）

$$T_c = T + (4 - C) / a \quad (1)$$

ここで、 T_c ：快適温度[°C]， T ：気温[°C]， C ：温冷感申告値（ここでは PMV 値を変換して使用）， a ：回帰係数（既往研究³⁾より 0.50 と仮定）である．式(1)より算出した快適温度と外気温の相関を図 4 に示す．ここでは，回帰式から±2.5°C内を 90%許容範囲，±3.5°C内を 80%許容範囲とする²⁾．

図 10 より，快適温度は式(2),(3)で表される．

$$\text{INTE} : T_c = 0.330T + 17.557 \quad (R^2 = 0.867) \quad (2)$$

$$\text{PERI} : T_c = 0.327T + 17.027 \quad (R^2 = 0.875) \quad (3)$$

いずれの式も決定係数 R^2 が高く，予測式の精度が高いといえる．また，平均快適温度は INTE : 25.40°C，PERI : 25.14°Cであった．

同様に図 11 より，快適温度は式(4),(5)で表される．

$$\text{INTE} : T_c = 0.240T + 19.903 \quad (R^2 = 0.800) \quad (4)$$

$$\text{PERI} : T_c = 0.320T + 17.209 \quad (R^2 = 0.866) \quad (5)$$

いずれの式も決定係数 R^2 が高く，予測式の精度が高いといえる．また，平均快適温度は INTE : 25.32°C，PERI : 24.91°Cであった．

3. アンケート調査

研究室の利用者に対し，温熱感や快適感などの調査を目的とし，執務者にアンケート調査を実施した．

3.1 調査概要

建築系研究室（計 6 室）に所属する学生（計 32 人）を対象に，中間期における研究室内の温熱感・快適感などの心理量把握のため，アンケート調査（SD 尺度）を実施した（表 3）．

期間は，室内計測を行っている対象室では計測期間と同期間の 2022 年 10 月 20 日～11 月 2 日の平日とし，その他 5 つの研究室（以下，全体）では，2022 年 10 月 24 日～28 日の 5 日間とした．

期間中，各日 9:00～20:00 の間で，朝(9:00)，昼(12:00)，夕(16:00)，夜(19:00)の 4 回，メールにて forms のアンケートを送信し，1 時間以内に回答を得た．

3.2 調査結果

表 3 アンケート項目

| | |
|---------------------------|---------------------------------|
| 現在の部屋の空調の運転状況についてお答えください。 | 現在の部屋の窓及びブラインドの開閉状況についてお答えください。 |
| 項目 | 項目 |
| 空調ON（冷房運転） | 窓開放+ブラインド開放 |
| 空調ON（暖房運転） | 窓開放+ブラインド閉鎖 |
| 空調OFF | 窓閉鎖+ブラインド開放 |
| その他 | 窓閉鎖+ブラインド閉鎖 |
| | その他 |
| 現在の部屋の照明の使用状況についてお答えください。 | 現在のPC等の使用状況についてお答えください。 |
| 項目 | 項目 |
| 照明ON | ノートPC |
| 照明OFF | ノートPC+モニター1台 |
| | ノートPC+モニター2台 |
| | デスクトップPC |
| | 使用なし |
| | その他 |
| 現在座っている座席位置についてお答えください。 | |
| 項目 | |
| 窓側 | |
| 内側 | |
| 現在，気温をどのように感じていますか？ | 現在，気温をどのように感じていますか？ |
| 尺度 | 項目 |
| 1 | 非常に涼しい |
| 2 | 涼しい |
| 3 | やや涼しい |
| 4 | どちらでもない |
| 5 | やや暖かい |
| 6 | 暖かい |
| 7 | 非常に暖かい |
| 現在，気温をどのようにしたいですか？ | 現在の快適感をお答えください。 |
| 尺度 | 項目 |
| 1 | もっと暖かく |
| 2 | 少し暖かく |
| 3 | このままで良い |
| 4 | 少し涼しく |
| 5 | もっと涼しく |
| | 快適 |
| | とても快適 |
| 現在，汗をどの程度かいていますか？ | 現在から15分前までのように過ごしていましたか？ |
| 尺度 | 項目 |
| 1 | まったくない |
| 2 | 少しある |
| 3 | ある |
| 4 | 多量にある |
| | 横たわっていた |
| | 座っていた |
| | 座って作業していた |
| | 立って軽い作業をしていた |
| | 立って作業をしていた |
| | 室内で歩き回っていた |
| | 外で歩き回っていた |
| 現在，気流をどの程度感じていますか？ | |
| 尺度 | 項目 |
| 1 | まったく感じない |
| 2 | 少し感じる |
| 3 | 感じる |
| 4 | とても感じる |

アンケート調査より得られた温冷感申告値と外気温の相関を図 12～15 に示す．外気温は，気象庁日立観測所（HP 公表：1 時間平均値）を用いている．ここでは，回

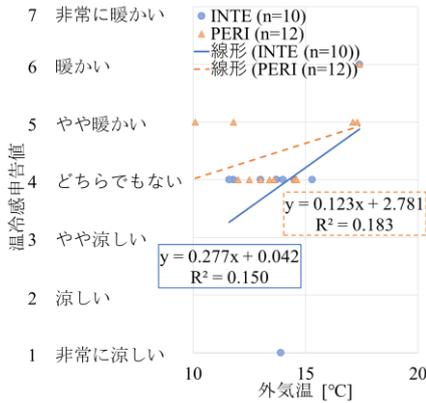


図 12 (対象室)

外気温－温冷感申告値
(空調 OFF・窓閉鎖)

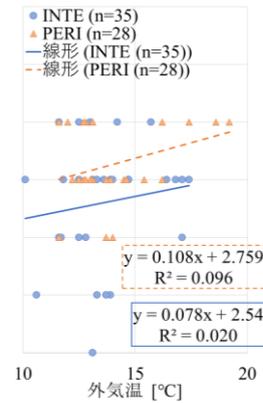


図 13 (全体)

外気温－温冷感申告値
(空調 OFF・窓閉鎖)

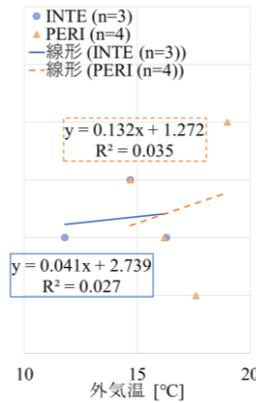


図 14 (対象室)

外気温－温冷感申告値
(自然通風)

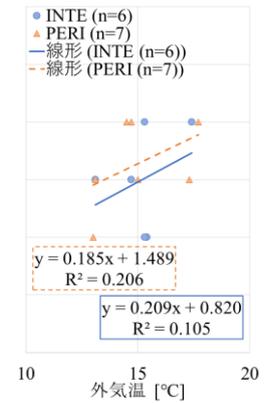


図 15 (全体)

外気温－温冷感申告値
(自然通風)

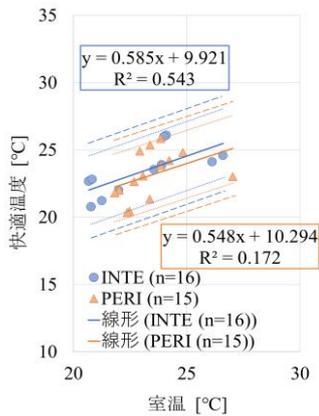


図 16 室温－快適温度
(空調 OFF・窓閉鎖)
(C: 温冷感申告値)

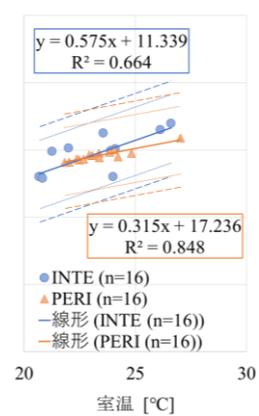


図 17 室温－快適温度
(空調 OFF・窓閉鎖)
(C: PMV 計測値)

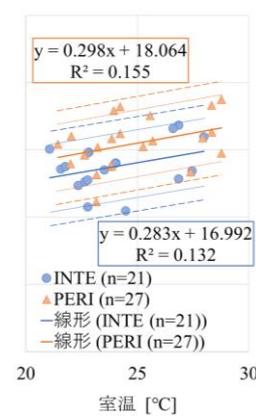


図 18 室温－快適温度
(自然通風)
(C: 温冷感申告値)

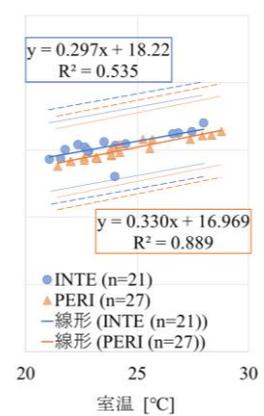


図 19 室温－快適温度
(自然通風)
(C: PMV 計測値)

平均値

INTE: 23.24, PERI: 23.13

INTE: 24.43, PERI: 24.63

INTE: 24.59, PERI: 25.52

INTE: 25.19, PERI: 25.21

答時から 15 分前までの状態について、安静及び軽作業 (代謝量 1.0met 程度)のみを対象とし、結果をまとめた。

図 12, 13 は空調 OFF・窓閉鎖運用時の結果である。図 12 は対象室、図 13 は全体のデータを用いている (回答者数 対象室: 4 人, 全体: 28 人)。図 14, 15 は自然通風運用時の結果である。図 14 は対象室、図 15 は全体のデータを用いている。全ケースにおいて決定係数が 0.2 未満と小さい値となっており、外気温に関わらず温冷感にばらつきが生じている。これは暑がり・寒がりといった個人差や着衣量の差などが原因であると考えられる。

4. 実測及びアンケート比較

実測及びアンケート調査で得られたデータから、実測とアンケートの比較を行った。対象室及び 304 室のデータを使用し、外気温は回答時の 10 分値を使用している。

4.1 快適温度比較

Griffiths 法²⁾(式(1))を用いて快適温度を算出した。

$$T_c = T + (4 - C) / a \quad (1)$$

ここで、 T_c : 快適温度[°C], T : 気温[°C], C : 温冷感申告値, a : 回帰係数 (既往研究³⁾より 0.50 と仮定) である。

式(1)より算出した快適温度と外気温の相関を図 16－19 に示す。ここでは、回帰式から±2.5K 内を 90%許容範囲、±3.5K 内を 80%許容範囲とする²⁾。図 14, 15 は空調 OFF・窓閉鎖運用時の結果である。図 16 は温冷感申告値 C にアンケートにより得られた温冷感の値を、図 17 は PMV の計測値-3 から 3 を 1 から 7 に変換した値を用いている。両者を比較すると、空調 OFF・窓閉鎖の条件では、INTE・PERI とともに PMV 計測値を用いた方が平均値が高く、申告値と計測値に差が見られた。これは、高須ら²⁾と同様の結果であった。

次に、図 18, 19 は自然通風運用時の結果である。図 16, 17 と同様に、図 18 は温冷感申告値 C にアンケートにより得られた温冷感の値を、図 19 は PMV の計測値-3 から 3 を 1 から 7 に変換した値を用いている。両者を比較すると、自然通風の条件では、アンケート申告値を用いた方がばらつきが大きいものの、平均値には大きな差は

見られなかった。

5. 環境シミュレーション (CFD) による検討

実測を行った対象室において、計測時の室内環境を詳細に把握するため、流体解析ソフト FlowDesigner を用いて、図 20 のモデルを作成し、表 4 の条件で室内の気流解析を行った。3 章で行った実測の自然通風利用時と同様に窓を開放した条件で解析を実施した。室温と外気温は、それぞれ図 18 の快適温度の平均値と外気温を用いており、窓面の外気からの熱は、熱電対で計測した窓面温度の平均値を用いている。

図 21 に結果を示す。外部風速は 3 ケース (1.0, 1.5, 2.0m/s) とし、風向は室の窓面に垂直な方向とした。切断面は X500mm,5500mm, Y1000mm(PERI) 3000mm(INTE), Z1200mm である。

INTE では室中央部付近で気流が大きくなっているのに対し、PERI では窓開口部付近で気流が大きくなっており、INTE, PERI では気流の生じ方が異なっている。

6. まとめ

本報では、室内環境の実測、在室者へのアンケート調査及び環境シミュレーション (CFD) を行うことにより、外気条件の室内 (INTE・PERI) への影響について快適性の検討を行い、以下の知見を得られた。

- (1) 外部の風速が室温に与える影響が大きいものの、外気温や日照の有無によっても大きく左右されるため、自然通風利用の可否については、室内の快適性への影響を考慮し、検討する必要がある。
- (2) 実測とアンケートの比較により、快適温度をみると、アンケートによる温冷感の申告値を用いた方がデータのばらつきが大きい。しかし、自然通風の条件では、平均値に差は見られなかった。
- (3) 環境シミュレーション (CFD) の結果から、INTE と PERI で気流の生じ方が異なっており、気流による影響を座席位置毎に考慮する必要がある。

最後に、環境シミュレーション (CFD) の精度が高くなることで、3D 可視化が可能となり、これまで困難とされてきた窓開閉時の快適性予測が可能になると考える。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (B) 課題番号 D121H01468 (代表者：一ノ瀬俊明)「リモートセンシングとビックデータにもとづく熱ストレス分析と都市計画への応用」及び課題番号 23H01546 (代表者：平野勇二郎)「再生可能エネルギー買取制度を併用した地産地消型エネルギー事業の計画・評価手法」の支援によって実施されたものである。

加えて、本研究の実験及びアンケート調査にご協力い

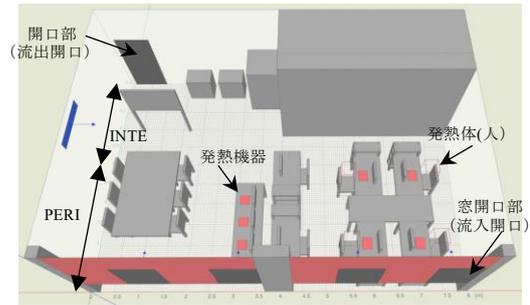


図 20 対象室概要 (Flow Designer 解析モデル)

表 4 解析条件

| | INTE | PERI |
|-------------|------------------------------|------|
| 外気温度 [°C] | 24.0 | 25.4 |
| (窓面の外気からの熱) | 30.0 | 30.0 |
| 室温 [°C] | 24.6 | 25.3 |
| 室の寸法 (解析領域) | 8m (x) × 5.4m (y) × 2.8m (z) | |
| 乱流モデル | 乱流・高レイノルズ数型/k-εモデル | |

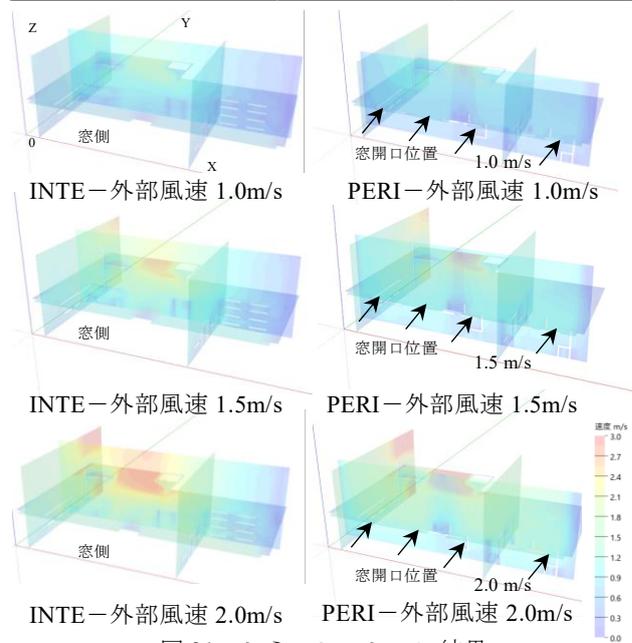


図 21 シミュレーション結果

ただいた皆様に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 細井ら：『自然通風の温熱快適性に基づく制御方法と省エネルギー効果 - 自然通風に関する実測研究 その 2 -』, 日本建築学会環境系論文集 第 577 号, 7-12, 2004 年 3 月
- 2) 高須ら：『自然換気導入オフィスの熱的適応快適性指標の構築に関する研究』, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国) 2017 年 8 月
- 3) リジャル H.B.:『オフィスビルにおける適応モデルと環境調整行動に関する研究』, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 {2017.9.13~15(高知)}
- 4) 天野ら.:『愛知県内のオフィスビルにおける各季節の適応的行動と好まれる温度に関する研究』, 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会論文集 第 24 号 2023 年 3 月
- 5) Nicol et al., Adaptive thermal comfort: principles and practice, 2012.
- 6) Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ANSI/ASHRAE Standard 55-2017