

エネルギー自立型サステナブル研究施設 —二次側空調機器の性能評価および執務者の環境満足度—

木村 健太郎・相澤 直樹・平原 美博
羽鳥 大輔^{*1}・武藤 友香^{*1}・竹原 大暉^{*2}
渡邊 円^{*2}・鵜飼 真成^{*2}・田辺 新一^{*2}

Energy Self-Sufficient and Sustainable Innovation Center

Evaluation of Secondary Air Conditioner Performance
and its Influence on Environmental Satisfaction of Workers

Kentaro Kimura・Naoki Aizawa・Yoshihiro Hirahara
Daisuke Hatori^{*1}・Yuka Mutoh^{*1}・Daiki Takehara^{*2}
Tsubura Watanabe^{*2}・Masanari Ukai^{*2}・Shin-iti Tanabe^{*2}

高砂熱学イノベーションセンターの執務室では、外皮や照明などのベース負荷に対しては外調機と放射空調で処理し、個人の行動や好みで随時変化する人体負荷に対してはパーソナル空調機で顕熱処理を行うタスクアンドアンビエント空調システムを採用している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。本報では、間仕切りの少ない吹抜け空間に導入した置換空調やパーソナル空調機、OAフロア床暖房、カウンター空調など二次側空調機器の性能評価結果、並びにアンビエント環境の運用条件とパーソナル空調の使用状況の関係やアンケート調査による執務者の熱的快適性と作業効率の評価結果を示す。また、自然換気を実施した中間期におけるオフィスの物理環境評価と執務者満足度について報告する。

1. 置換空調の性能評価

1.1 設備概要

図1に、置換空調の測定概要を示す。図中黒枠で囲まれたエリアが置換空調エリアとなっており、給気は旋回流誘引型の置換空調用給気ユニット（SWIT）を大会議室とカフェにそれぞれ三台設置し、エントランスホールの階段部では、階段側面（0.7mH）から低速給気を行い、二階天井部（FL+8m）より還気することで置換空調を行っている。吹抜け部の垂直温度測定は、吹抜けほぼ中央部に熱電対を1mピッチで設置し、1分間隔でデータロガーに保存した。

平面温度分布の測定は、赤外線により表面温度を測定するサーモパイル（日本セラミック株式会社製・TSUP-A3A01S-au-50-60・視野角22度）を採用した。図2にサーモパイルの測定概要を示す。天井高3mの天井面にサーモパイルを設置した場合、センサ直下を中心とする直径2.4mの平均床表面温度に加え、センサ周囲の空気温度が測定できる。大空間の温度分布を詳細に把握するため、天井面に1.8mグリッド（システム天井3枚ピッチ）でサーモパイルを設置し（オフィス棟内で計550点）1分間隔でサーバに保存した。なお、吹抜け部では、45度傾斜した両壁面からセンサの設置角度を変えることで床表面温度を測定した。

※本論文は、2021年度空気調和・衛生工学会大会講演論文^{1,2,3)}を加筆修正したものである。

*1 株式会社三菱地所設計 *2 早稲田大学

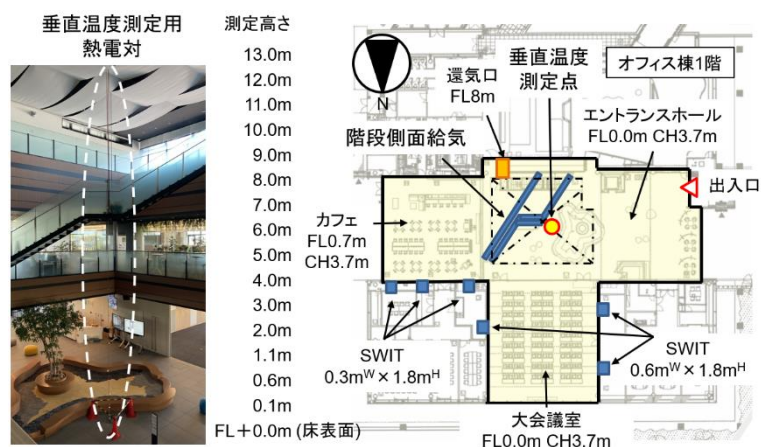


図1 置換空調の測定概要

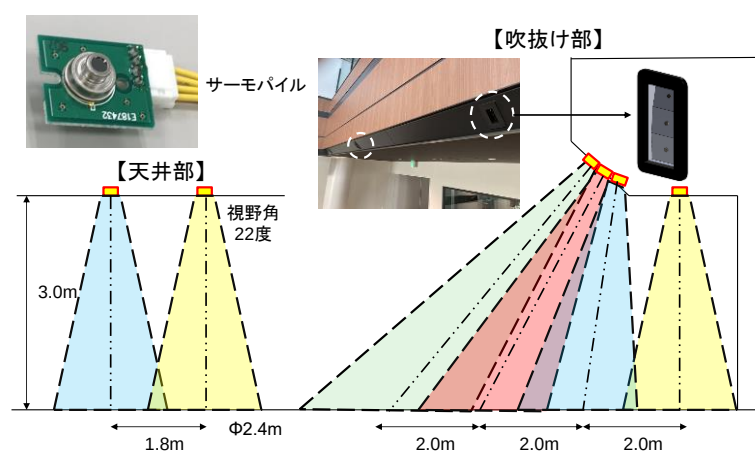


図2 サーマパイルの測定概要

1.2 測定結果

図3に夏期代表日(2020年8月27日)における吹抜け部垂直温度分布を時刻別(10分平均値)に示す。外気温が25~34℃程度で推移する中、外皮負荷などに応じて9mより上部の室温が変動するものの居住域温度は各時刻とも26℃程度で安定し、置換空調により室下部が効率よく冷却されていることを確認した。

図4、5に夏期代表日15時(10分平均値)の床表面と天井高さの平面温度分布をフロア別に示す。一階では、置換空調により部屋の隅々までばらつきの少ない温度分布を確認した。一方、二階では、執務者が好みの温度域に合わせて執務するABW(Activity Based Working)のコンセプト通り、執務室2-1の放射空調エリアは25~26℃、執務室2-2、2-3の在来天井エリアは26~27℃、ワイガヤの直天エリアは27~28℃と異なる環境のアンビエント空間を創ることができた。直天エリアは、西日の影響に加え、躯体蓄熱が室内へ直接放射されるため温度が高くなる一方、放射空調エリアは、蓄熱負荷を放射パネルで除去する効果もあり快適な室内環境であることを確認した。

図6に冬期代表日(2021年1月28日)の吹抜け部垂直温度分布を時刻別に示す。外気温が0~6℃程度で推移する中、空調立ち上りの8時以降から徐々に室温が上昇している。室温より高い温度で給気される冬期は、浮力により室上部へ熱が搬送されるため置換空調での暖房は不向きとされているが、本建物では周囲空気の誘引を強化した吹出口(SWIT)の採用に加え、年間を通して17℃程度で安定している床下の井水貯留層による効果もあり、極端な温度低下は見られない結果となった。

図7、8に冬期代表日15時の床表面と天井高さの平面温度分布をフロア別に示す。一階では、床下に井水貯留層のあるエントランスホールと外壁に面する床表面エリアで温度低下が見られる。快適性を更に向

上させるには、大会議室北面のペリメータ対策が必要になることがわかる。一方、二階北面の主執務室は後述する OA フロア床暖房の効果により、部屋全域で 22℃以上の室内環境を確認した。なお、天井温度で散見される局所的な温度偏差は、外調機からの給気の影響である。

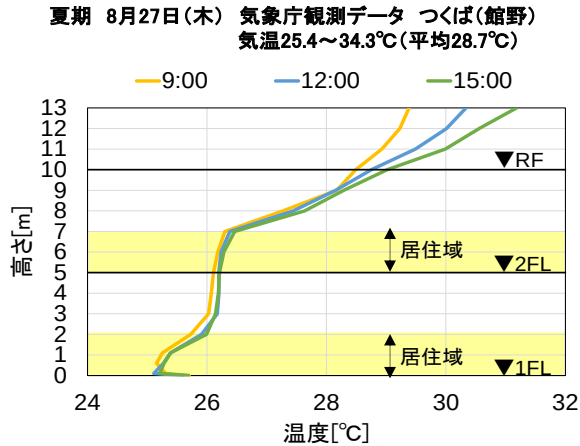


図 3 吹抜け部垂直温度分布(8月27日)

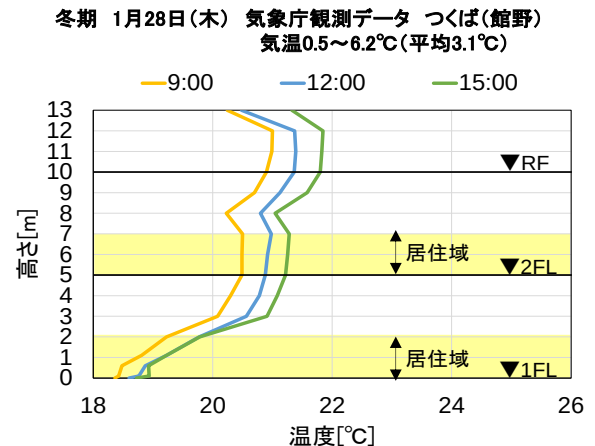


図 6 吹抜け部垂直温度分布(1月28日)

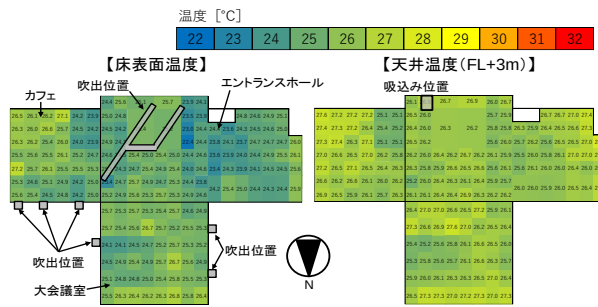


図 4 1階平面温度分布(8月27日15時)

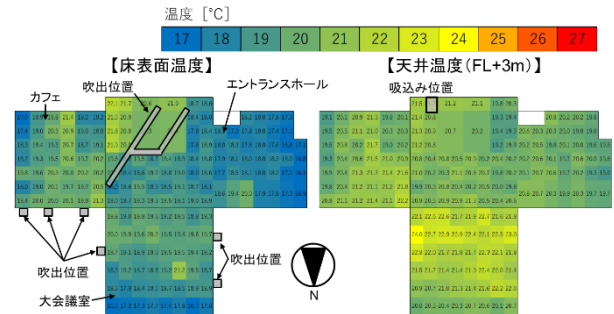


図 7 1階平面温度分布(1月28日15時)

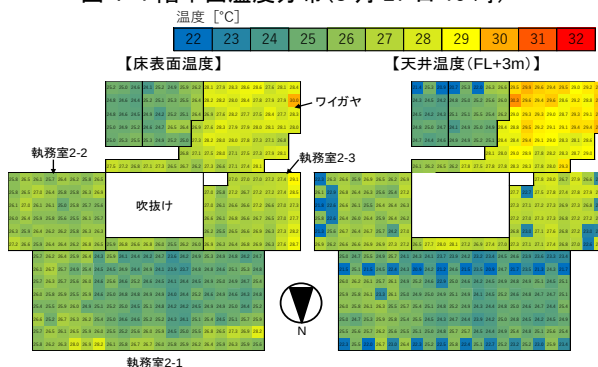


図 5 二階平面温度分布(8月27日15時)

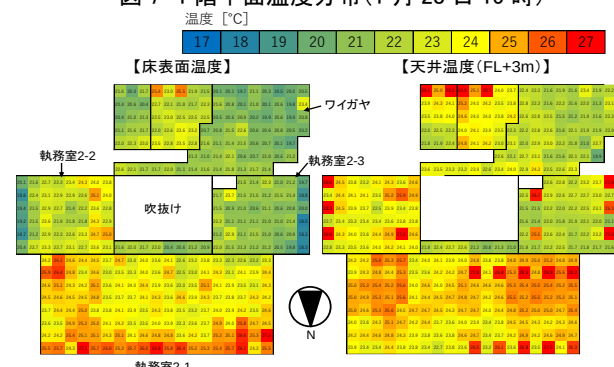


図 8 二階平面温度分布(1月28日15時)

2. 二次側空調機器の性能評価

2.1 OA フロア床暖房

日射負荷の削減と自然採光を考慮して北面配置された執務室 2-1 では、外壁面が全面ガラスとなっており冬期のコールドドラフトによる室内環境の悪化が懸念された。そこで、OA フロアに対応した床暖房パネルを外壁ガラスの室内側に一列配置し、冬期には終日排温水 (60℃程度) を供給した。図 9 に、20 時の空調停止から 8 時間経過した OA フロア床暖房の稼働時と非稼働時の床表面温度分布を比較して示す。床暖

房を行った2月25日は、外気温が高い24日同時刻よりも執務室2-1の室内温度が上昇する結果となった。これは、暖房負荷の過半を占める外壁ガラスからのコールドドラフトを防止した影響である。なお、執務室2-1以外での温度上昇は、床下で断熱されていない排温水配管からの放熱による影響である。

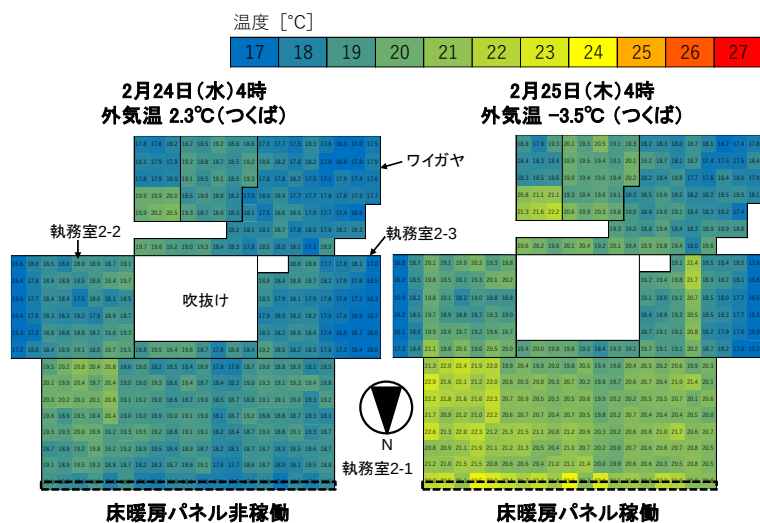


図9 OAフロア床暖房稼働・非稼働時の比較

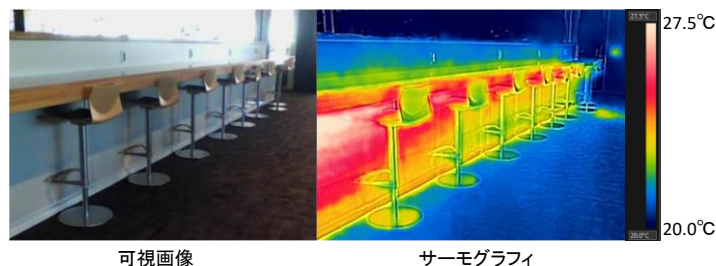


図10 カウンター空調(加熱)のサーモグラフィ

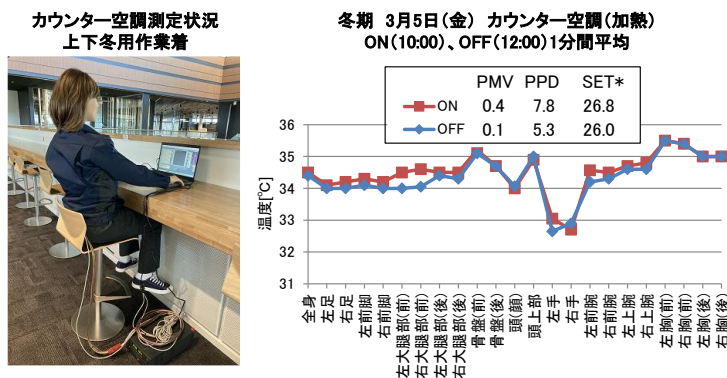


図11 カウンター空調の部位別温度分布と環境評価

2.2 カウンター空調

二階吹抜けに面し、アルミ三層管で構成したカウンター空調について、加熱性能の定量評価を行った。図10にカウンター空調のサーモグラフィ、図11にサーマルマネキンの部位別温度分布と環境評価を示す。サーマルマネキン(P.T.Teknik社製TM3-22)は、女性形状で22部位毎の温熱環境を定量評価できる。同日のほぼ同じ環境下において、カウンター空調を稼働した場合、主に下半身温度が上昇し、全身の予想平均温冷感申告(PMV)は0.3上昇した。なお、22~23°C程度の還水をカスケード熱利用した冷却運転時は、アンビエント温度(24°C程度)との温度差が小さいため、PMV値に明確な差は見られなかった。

2.3 DCFCU(天井吹出型)

天井吹出型パーソナル空調機である DCFCU について、サーマルマネキンにより冷却性能の定量評価を行った。図 12 に、DCFCU 稼働・非稼働時の部位別温度分布と温熱環境評価を比較して示す。同日のほぼ同じ環境下において、DCFCU を稼働した場合、ほぼ全部位の温度が低下し、全身の PMV は 0.7 低下した。なお、DCFCU の加熱運転は、浮力の影響で座位まで給気が到達せず、PMV 値に明確な差は見られなかった。

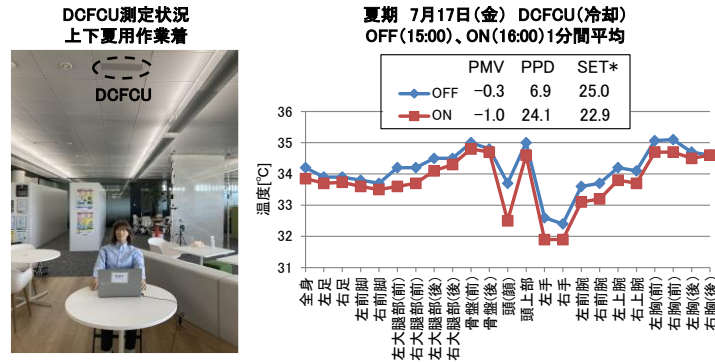


図 12 DCFCU の部位別温度分布と環境評価

2.4 前面吹出型デスク空調機

前面吹出型デスク空調機について、サーマルマネキンにより冷却性能の定量評価を行った。図 13 に前面吹出型デスク周囲のサーモグラフィ、図 14 に部位別温度分布と環境評価を示す。同日のほぼ同じ環境下において、デスク空調機を稼働することで全身の温度が低下し、全身の PMV は 0.9 低下した。図 15 に前面吹出型デスク空調の送風量と PMV の関係を示す。送風量を増やすほど PMV が下がり、個人の好みに合わせ手元のボリュームスイッチで快適性を安易に調整できることを確認した。

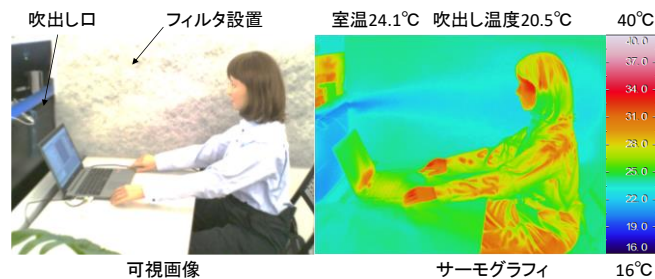


図 13 前面吹出型デスク空調のサーモグラフィ

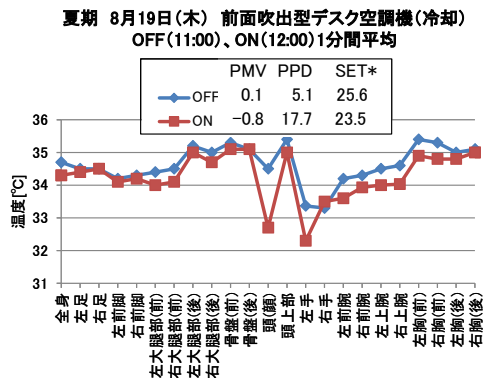


図 14 前面吹出型デスク空調機の部位別温度分布と環境評価

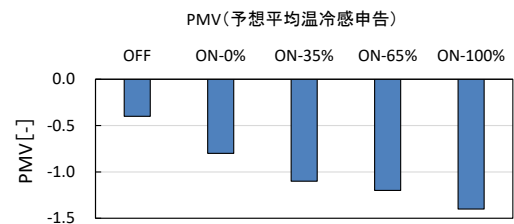


図 15 前面吹出型デスク空調機送風量と PMV の関係

腹部吹出型デスク空調機について、サーマルマネキンにより加熱性能の定量評価を行った。図 16 に腹部吹出型デスク周囲のサーモグラフィ、図 17 に部位別温度分布と環境評価を示す。同日ではほぼ同じ環境下において、デスク空調機を稼働することで下半身や腕の温度が上昇し、全身の PMV が 0.3 上昇した。

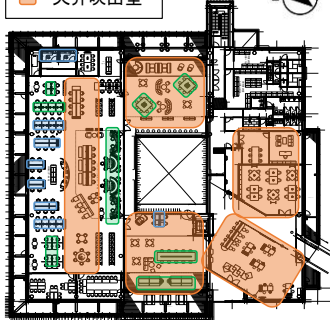
パーソナル空調機は、夏期には冷涼感、冬期には温かさを個別に与えられることを確認した。今回の夏期検証では、アンビエント温度が 24℃程度と低温の環境下であったが、アンビエント温度を 26℃程度と高めに設定し、パーソナル空調機と併用することで、個人の快適性を確保しながら、さらなる省エネルギー運転が可能なが示された。



3～5 章では、実運用時におけるアンビエント環境の運用条件とパーソナル空調の使用状況の関係、並びにアンケート調査による執務者の熱的快適性と作業効率の評価結果について報告する。

表 1 にパーソナル空調設置状況を示す。オフィス棟二階は、執務者が自由に席を選択することが可能な Activity Based Working を導入した執務空間となっている。二階の執務空間では、個人操作可能な、前面吹出型デスク空調機（以下前面吹出型）・腹部吹出型デスク空調機（以下腹部吹出型）・DCFCU（以下天井吹出型）のパーソナル空調を全座席付近に導入している。各パーソナル空調設置状況に関して、前面吹出型が 22 台、腹部吹出型が 54 台、天井吹出型が 198 台と、天井吹出型の設置数が最も多い。

表 1 パーソナル空調設置状況

パーソナル空調		
種類	設置台数	執務フロア
前面吹出型 	22台	■ 前面吹出型 ■ 腹部吹出型 ■ 天井吹出型 
腹部吹出型 	54台	
天井吹出型 	198台	

3.2 運用条件概要

夏季測定の間は、2020 年 7 月 27 日（月）～9 月 4 日（金）の夏季休業を除く 5 週間で実施し、対象エリアはオフィス棟二階の執務室 2-1 とした。

表 2 に空調運用条件の概要を示す。運用条件は 1 週間毎に条件を変更した五条件のうち、パーソナル空調の快適性評価のため、三条件に焦点を当てた。運用 A（2020 年 8 月 3 日（月）～8 月 7 日（金））は、「アンビエント域の目標作用温度を 28℃、パーソナル空調を使用許可」とする条件とした。運用 B（2020 年 8 月 17 日（月）～8 月 21 日（金））は、「アンビエント域の目標作用温度を 26℃、パーソナル空調を使用許可」とする条件とした。運用 C（2020 年 7 月 27 日（月）～7 月 31 日（金））は、「アンビエント域の目標作用温度を 26℃、パーソナル空調を使用禁止」とする条件とした。各運用のアンビエント域は、外調機のみで空調を行い、一定風量で吹出温度を変更した。

運用 A と運用 C の比較により「アンビエント環境緩和時におけるパーソナル空調使用効果」を、運用 A と運用 B の比較により「異なるアンビエント環境のパーソナル空調使用効果」を、運用 B と運用 C の比較により「類似したアンビエント環境のパーソナル空調使用効果」を検証した。

表 2 空調運用条件の概要

条件		運用A	運用B	運用C
目 標	パーソナル空調	ON	ON	OFF
	放射空調	OFF	OFF	OFF
	作用温度（アンビエント域）	28℃	26℃	26℃
設 定	相対湿度（アンビエント域）	45%	50%	50%
	外調機吹出露点温度	14℃	11℃	11℃
	外調機吹出温度	23℃	21℃	21℃
	パーソナル空調送水温度	18℃	18℃	18℃
比 較 検 証	異なるアンビエント環境の パーソナル空調使用効果	●	●	
	類似したアンビエント環境の パーソナル空調使用効果		●	●
	アンビエント環境緩和時における パーソナル空調使用効果	●		●

3.3 物理環境測定概要

表 3 に測定項目、**図 18** に測定点を示す。測定項目は、空気温度、グローブ温度、相対湿度とし、いずれも 10 分間隔で測定した。

表 3 測定項目

測定項目	凡例	測定点数	測定機器	測定間隔
空気温度	●	6点 (机上面600mm)	TR-5X (ティアンドデイ)	10min
グローブ温度	◆	4点 (机上面600mm)	RTR-502 (ティアンドデイ)	10min
相対湿度	▲	2点 (机上面600mm)	TR-74Ui (ティアンドデイ)	10min

表 4 アンケート調査項目

評価項目	調査項目
室内温熱環境の印象	温冷感、快不快感、 温熱環境満足度、不満要因
作業効率	仕事効率 主観作業能力
パーソナル空調の印象	使用の有無、 満足度、不満の要因

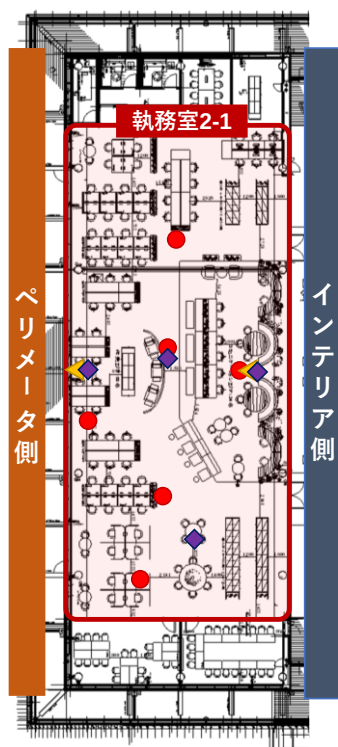


図 18 測定点

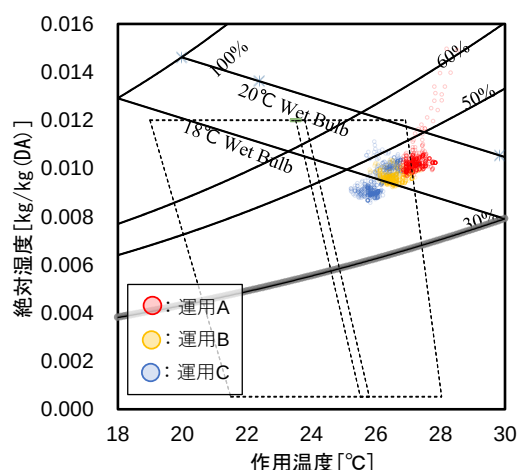


図 19 執務時間中の温熱環境分布

3.4 アンケート調査概要

表 4 にアンケート調査項目を示す。本研究では、2020 年 7 月 27 日（月）～8 月 21 日（金）の夏季休業を除く 3 週間、99 名の執務者を対象に各運用間で各一回アンケート調査を実施した。回収率は運用 A、B、C の各条件において 40%、61%、58%であった。調査内容は、室内温熱環境の印象、作業効率、パーソナル空調の印象とし、空調運用変更による温熱環境およびパーソナル空調に関する執務者の心理量の変化の把握を目的とした。

3.5 パーソナル空調使用調査概要

パーソナル空調の使用調査は、三種類のパーソナル空調を操作するスマートフォン端末内のアプリの履歴を用いて行った。調査項目は、使用者、使用日時、使用場所および使用したパーソナル空調の種類の計四項目とした。

4. 夏期実測結果

4.1 物理環境測定結果

図 19 に執務時間中の温熱環境分布を示す。図 19 は、実測期間中の執務時間（8：45～17：30）における各運用時の温熱環境を 10 分間隔でプロットしたものであり、点線で囲まれた範囲は ASHRAE55⁹基準の熱的快適域である。執務時間中のインテリア側の作用温度に関して、平均作用温度は運用 A、B、C の各条件

において 27.3℃、26.6℃、26.1℃であった。また、運用 A、B、C の各条件において 25.9%、92.3%、99.8% が熱的快適域内に分布していた。運用 B、C はほとんどの時間において熱的快適域内であった。一方、運用 A は作用温度が高く、熱的快適域外に分布する時間が多い傾向であった。運用 B と運用 C の目標作用温度は 26℃としたが、運用 B と比較して運用 C の方が各期間中の平均作用温度が 0.5℃低い結果となった。運用 B と比較して運用 C の期間における平均外気温が 6.7℃低かったことが影響したと考えられる。

4.2 温熱環境評価

図 20 に温冷感、図 21 に快不快感、図 22 に温熱環境満足度の各運用比較を示す。運用 A、B、C の順に、温冷感に関して「やや暖かい」「暖かい」「暑い」申告が減少、快不快感に関して「不快ではなく気持ちよい」申告が増加、温熱環境満足度に関して「不満」「非常に不満」申告が減少した。アンビエント環境が運用 A、B、C の順に涼しくなったことで、暑い温熱環境に不満を訴える執務者が減少したことが要因として考えられる。

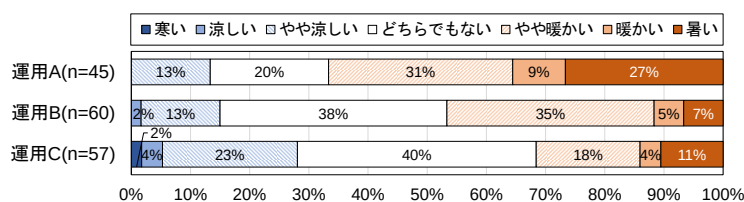


図 20 温冷感の各運用比較

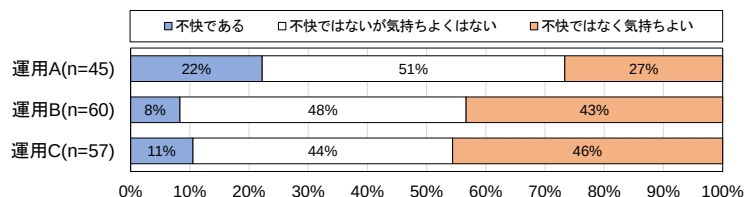


図 21 快不快感の各運用比較

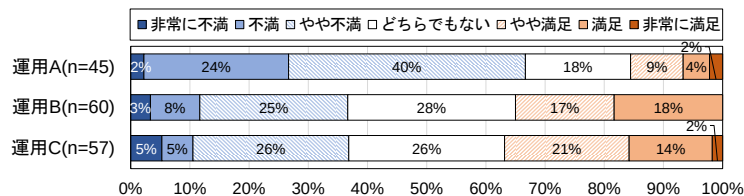


図 22 温熱環境満足度の各運用比較

4.3 知的生産性評価

図 23 に仕事効率への影響の各運用比較を示す。運用 A と比較して、運用 B および C の条件で「やや低下させている」「低下させている」「非常に低下させている」（以下低下させている側）申告が減少した。温熱環境満足度の不満側が減少したことが影響している可能性が考えられる。

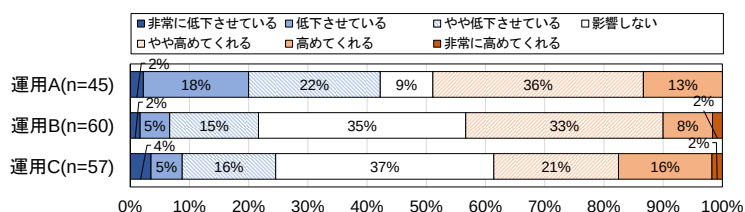


図 23 仕事効率への影響の各運用比較

4.4 パーソナル空調評価

図 24 に各パーソナル空調の満足度を示す。全運用におけるパーソナル空調の満足度に関して、前面吹出型では 35%、腹部吹出型では 40%、天井吹出型では 50%が「やや不満」「不満」「非常に不満」（以下不満側）と回答した。特に天井吹出型では、気流の弱さの項目に不満を訴える執務者が多く、操作性や性能を改善することで、パーソナル空調の満足度が向上する可能性があると考えられる。

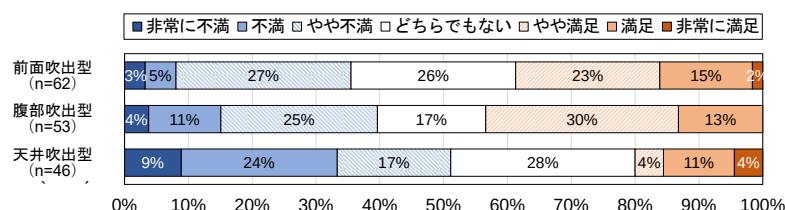


図 24 各パーソナル空調の満足度

4.5 パーソナル空調機使用調査結果

図 25 にパーソナル空調使用状況を示す。一週間のうち一人当たりのパーソナル空調全体の使用回数は、運用 A では 6.2 回、運用 B では 4.5 回となった。前面吹出型、腹部吹出型、天井吹出型に関して、運用 A では 1.7 回、1.6 回、2.9 回、運用 B では 1.2 回、1.5 回、1.9 回であった。いずれのパーソナル空調もアンビエント環境の涼しい運用 B で使用回数が減少した。また、各運用ともに天井吹出型の使用回数が最も多い結果になった。設置台数の多さや設置範囲の広さが影響していると考えられる。

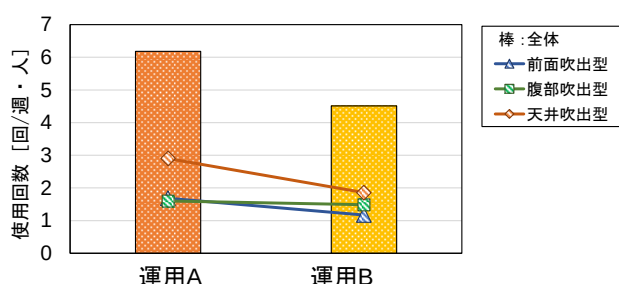


図 25 パーソナル空調使用状況

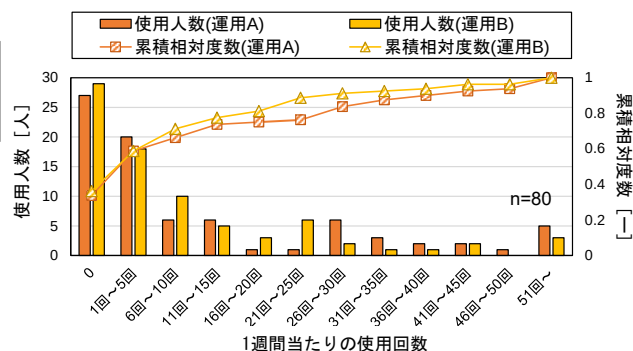


図 26 パーソナル空調の使用頻度と累積相対度数

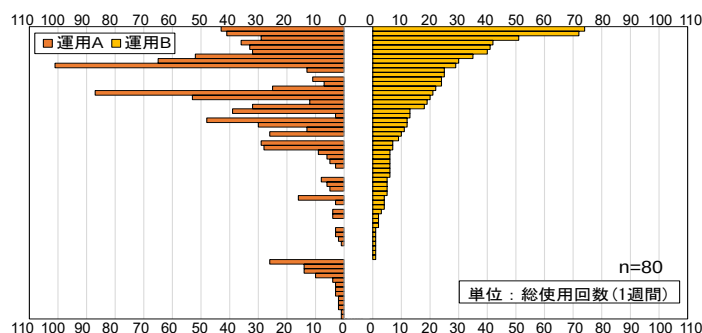


図 27 個人別パーソナル空調の使用頻度

図 26 にパーソナル空調の使用頻度と累積相対度数、図 27 に個人別パーソナル空調の使用頻度を示す。

図 26 よりいずれの運用も使用回数が 10 回以下である執務者は 7 割程度であった。図 27 よりアンビエント環境の涼しい運用 B において、使用回数が 10 回以上の執務者は、アンビエント環境の暖かい運用 A においても、概ね使用回数が 10 回以上であった。また、アンビエント環境の暖かい運用 A において、使用回数が 10 回未満の執務者は、アンビエント環境の涼しい運用 B においても、概ね使用回数が 10 回未満であった。アンビエント環境に影響されずに使用頻度が高い執務者や低い執務者がいることが分かった。

5. パーソナル空調の使用頻度別分析

パーソナル空調の使用回数の個人データを用いて、パーソナル空調の使用頻度による分類を行い、アンケートの回答と紐づけることで、各運用におけるパーソナル空調使用頻度別の温熱環境満足度・知的生産性の比較を行った。アンビエント環境作用温度が 27.3℃の運用 A において、1 週間当たりの使用回数が 10 回未満の執務者を「パーソナル空調の使用少群」（以下使用少群）とした。一方、アンビエント環境作用温度が 26.6℃の運用 B において、1 週間当たりの使用回数が 10 回以上の執務者を「パーソナル空調の使用多群」（以下使用多群）に分類した。

5.1 パーソナル空調の使用と熱的快適性

図 28 に使用頻度別の温熱環境満足度の比較を示す。使用少群における不満側申告の割合は運用 A、B、C の各条件において 56%、39%、25%であり、アンビエント環境の条件が涼しくなるに従い不満側申告が減少した。使用少群は、運用期間によらずパーソナル空調の使用頻度が低い傾向にあるため、アンビエント環境の涼しさが温熱環境満足度に大きく影響を及ぼしていると考えられる。一方、使用多群における不満側申告の割合は運用 A、B、C の各条件で 88%、18%、66%であった。使用少群と比較し使用多群では、運用 A、C において多くの不満が発生した。運用 A ではアンビエント環境緩和に対する本パーソナル空調の冷却効果が十分でなかったことが考えられる。運用 C の結果から、一般的な快適環境であってもパーソナル空調による温熱環境満足度への影響が非常に大きいことが分かった。一方、運用 B において使用多群の方が使用少群より不満側申告が少ない結果となった。運用 B のアンビエント環境においてパーソナル空調を使用することで十分な冷却効果が得られた可能性が示唆された。

運用 A と比較し運用 C において、パーソナル空調の使用頻度によらず、不満側申告が少ない結果となった。パーソナル空調の使用頻度よりアンビエント環境条件の方が温熱環境満足度に大きく影響したと考えられる。

運用 A と比較し運用 B ではパーソナル空調の使用頻度によらず、不満側申告が少ない結果となったが、使用多群では満足側申告も多く発生した。作用温度が 27.3℃から 0.7℃低下したアンビエント環境において、使用多群がパーソナル空調を使用することでさらに温熱環境の不満を解消したと考えられる。

運用 C と比較し運用 B では使用少群では不満側申告が多い一方、使用多群では少ない結果となった。使用多群がパーソナル空調を使用することで、温熱環境満足度の低下を抑制した可能性が考えられる。

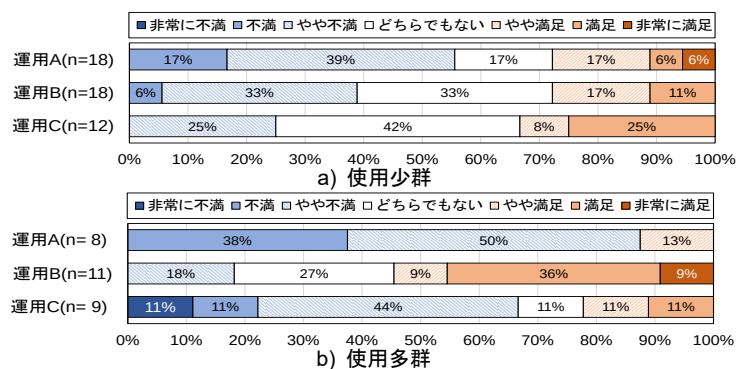


図 28 使用頻度別の温熱環境満足度の比較

5.2 パーソナル空調の使用と作業効率

図 29 に使用頻度別の仕事効率への影響の比較を示す。低下させている側申告の割合は運用 A、B、C の各条件において使用少群では 28%、23%、17%であり、使用多群では 75%、9%、33%であった。使用少群は、温熱環境満足度の向上に従い、低下させている側申告が減少した。使用少群と比較し使用多群では、温熱環境に関する不満が多い運用 A、C において低下させている側申告が多く発生した。温熱環境満足度が作業効率に影響した可能性が考えられる。一方、運用 B において使用多群の方が使用少群よりも低下させている側申告が少ない結果となった。運用 B のアンビエント環境においてパーソナル空調を使用することで作業効率が向上する可能性が示唆された。

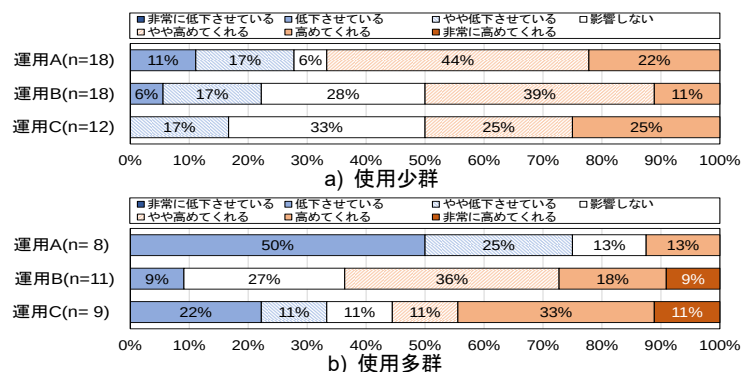


図 29 使用頻度別の仕事効率への影響の比較

運用 A と比較し運用 C において、パーソナル空調の使用頻度によらず、低下させている側申告が少ない結果となった。作用温度が 27.3℃から 1.2℃低下したアンビエント環境では、仕事効率の低下を抑制する可能性があると考えられる。使用多群では高めてくれる側申告が多い一方で、使用少群では少ない結果となった。使用多群に暑がり、使用少群に寒がりの執務者が多いことが影響した可能性が考えられる。

運用 A と運用 B の比較において、パーソナル空調の使用頻度によらず、低下させている側申告が少ない結果となったが、特に使用多群では、高めてくれる側申告が非常に多く発生した。作用温度が 27.3℃から 0.7℃低下したアンビエント環境において、使用多群がパーソナル空調を使用することで仕事効率が向上する可能性が示された。

運用 C と比較し運用 B において、使用少群では低下させている側申告がやや多い一方で、使用多群では、少ない結果となった。使用多群がパーソナル空調を使用することで、仕事効率の低下を抑制する可能性が示唆された。

6. 中間期の実測調査

6～7 章では、本施設で自然換気を実施した中間期における、実測調査、アンケート調査および BEMS データから、オフィスの物理環境と執務者満足度について報告する。

6.1 実測調査概要

ISO7730:2005⁷⁾では熱的快適性の推奨値が三段階に分類されており、カテゴリ A では $0.2 < PMV < +0.2$ (不満足者率 6%未満)、カテゴリ B では $0.5 < PMV < +0.5$ (不満足者率 10%未満)、カテゴリ C では $0.7 < PMV < +0.7$ (不満足者率 15%未満) をそれぞれ快適環境としている。ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.)のスタンダード 55-2013⁸⁾では、空調設備の導入された室内環境について不満足者率の観点から定められた Graphic Comfort Zone Method および Analytical Comfort Zone Method の 2 つの手法から熱的快適性の選択が可能である。このように、ISO と ASHRAE による熱的快適性の基準がいずれも不満足者率で定義されている理由には「最大多数の最大幸福」の視点が

存在しており、従来のオフィス等の空気調和は複数の居住者を普遍的集団として捉えることで、その包括的特性を満足させる均一かつ一定の環境提供を目指してきた。

一方で、近年より自由に働き方を選ぶことができるワークスタイルが重視され、Activity Based Working（以下、ABW）が普及している。また、実際のオフィスの居住者は普遍的な集団ではなく、各個人が持つ体質により、知的生産性が向上しやすい温熱環境は異なることが示されてきた⁹⁾。作業内容に合わせた場所選びに加えて、自身が快適性を向上させやすい場所選びができるオフィスが求められている。そのため、これまでの包括的特性を満足させる均一かつ一定の環境提供よりも、温熱環境の不均一性がより知的生産性を向上させる可能性がある¹⁰⁾。

表 5 自然換気運用条件

条件		条件A (10/12~10/16)	条件B (10/19~10/23)	条件C (10/26~10/30)
外調機	パーソナル空調			
	放射空調	ON	ON	ON
	外調機			
	外調機風量	CO2制御	CO2制御	CO2制御
	執務室2-1	在室人数制御	CO2制御	CO2制御
	執務室2-2・2-3・ワイガヤ	在室人数制御	在室人数制御	在室人数制御
	外調機給気温度SP	23℃	22℃（暖房）	23℃
目標値	外調機露点温度SP	11℃	11℃	11℃
	作用温度（アンビエント域）	24~25℃	なりゆき	なりゆき
	相対湿度（アンビエント域）	50%	なりゆき	なりゆき
自然換気運用	執務室2-1		自然換気(上窓のみ)	通常（自然換気なし）
	執務室2-2・2-3・ワイガヤ	OFF	自然換気(上窓のみ)	自然換気(上窓のみ)
	エリア			

6.2 運用変更概要

表 5 に自然換気運用条件を示す。2020 年 10 月 12 日（月）～2020 年 10 月 30 日（金）の計三週間で自然換気の運用変更を行った。運用条件は、自然換気を行わない条件 A、共創執務室（図 30 参照）を除く二階全執務室で自然換気を行う条件 B、共創執務室および執務室 2-1 を除く全執務室で自然換気を行う条件 C の三条件行った。

自然換気の自動開閉条件は、外気露点温度 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ かつ、室温 $\geq$ 外気温 $\geq 16^{\circ}\text{C}$ かつ、室内エンタルピー $\geq$ 外気エンタルピーとなる範囲である。なお、外気粉塵濃度、外気風速がそれぞれ 0.03 mg/m^3 、 3.0 m/s を超えた場合や雨天時は、その他の外気条件が自然換気有効範囲であっても自然換気を行わない設定とした。

6.3 物理環境測定概要

表 6 に物理環境測定項目、図 30 に物理環境測定ポイントを示す。測定項目は、温湿度、グローブ温度、放射温度とした。また、二階全執務室でサーモパイルを用いた床表面温度および天井付近の空気温度の計測を行った。

表 6 物理環境測定項目

測定項目	凡例	測定点数・測定高さ				測定 間隔	測定機器
		執務室2-1	執務室2-2	執務室2-3	ワイガヤ エリア		
温湿度	●	2点	1点	2点	-	10min	RTR-574 (ティアンドデ イ)
		700mm					
グローブ 温度	●	8点	2点	2点	1点	10min	RTR-502 (ティアンドデ イ)
		700mm×5 600mm×3	700mm×1 600mm×1	700mm×1 600mm×1	600mm		
放射温度	●	1点	-	-	-	10min	輻射センサー RFシリーズ (CAPTEC)
		700mm					

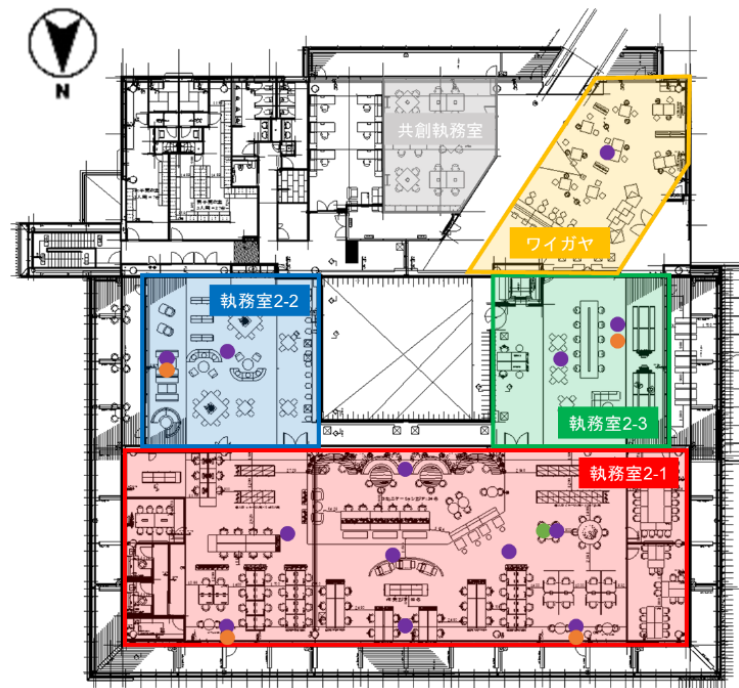


図 30 物理環境測定ポイント

6.4 アンケート調査概要

表 7 に 1 週間アンケートの質問項目、表 8 に毎日アンケートの質問項目を示す。アンケートは、1 週間アンケートと毎日アンケートの二種類行った。1 週間アンケートは基本項目（着座時間/場所・現在の業務内容・着衣量）、室内環境の印象（快不快感・温冷感・各種環境満足度など）、知的生産性評価（主観作業能力・作業効率へ与える影響）、パーソナル空調の評価（使用の有無・満足度・不満の要因）を質問項目とし、実測期間中週に一回回答するアンケート（毎週木曜日配信）である。毎日アンケートは基本項目（着座場所）、室内環境の印象（快不快感・温冷感・温熱環境満足度・空気質・温熱環境の不満の要素）を質問項目とし、実測期間中金曜日を除き毎日回答する簡易的なアンケートである。1 週間アンケートは条件ごとの心理量評価、毎日アンケートは日ごとの心理量評価が主な目的である。自然換気は外気条件に左右されるため、簡易的なアンケートを毎日行った。

表 7 1 週間アンケートの質問項目

項目	項目
基本項目	着座時間/場所、現在の業務内容、着衣量
室内環境の印象	快不快感、机上面の明るさ、室全体の明るさ 室内のうるささ、温冷感、乾湿感、気流感 各種環境満足度（温熱・光・空気質・音・IT・空間・総合） 不満の要因
知的生産性評価	作業効率へ与える影響、主観作業能力
自然換気に関する項目	自然換気は快適性を向上させると思うかどうか 自然換気を知覚したかどうか、気流感、足元の冷え 換気窓を開めたことがあるか、不満を感じたか 満足/不満足の原因、自然換気によって行動を変えたか
パーソナル空調の評価	使用の有無、満足度、期間中使用しなかった理由

表 8 毎日アンケートの質問項目

項目	項目
基本項目	着座場所
室内環境の印象	快不快感、温冷感、温熱環境満足度/不満の要素、空気質

7 実測調査結果

7.1 物理環境

図 31 に各代表日の自然換気実施前後の床表面温度を示す。条件 B および C における代表日は、各条件

の自然換気実施時間が最も長い日である 10 月 20 日（火）および 10 月 29 日（木）とした。自然換気開始時刻は、それぞれ 10 時 30 分と 10 時 37 分であった。サーモパイルの測定データのうち、より居住域に近い床表面温度を用いた。全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、自然換気実施開始 10 分程度で全執務室における床表面温度が 1.0～2.0℃程度急激に低下した。一方で、執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、執務室 2-1 以外における床表面温度が 0.5～1.5℃程度急激に低下した。条件 B より条件 C の床表面温度の低下幅が小さいのは、外気温が高かったことが要因と考えられる。

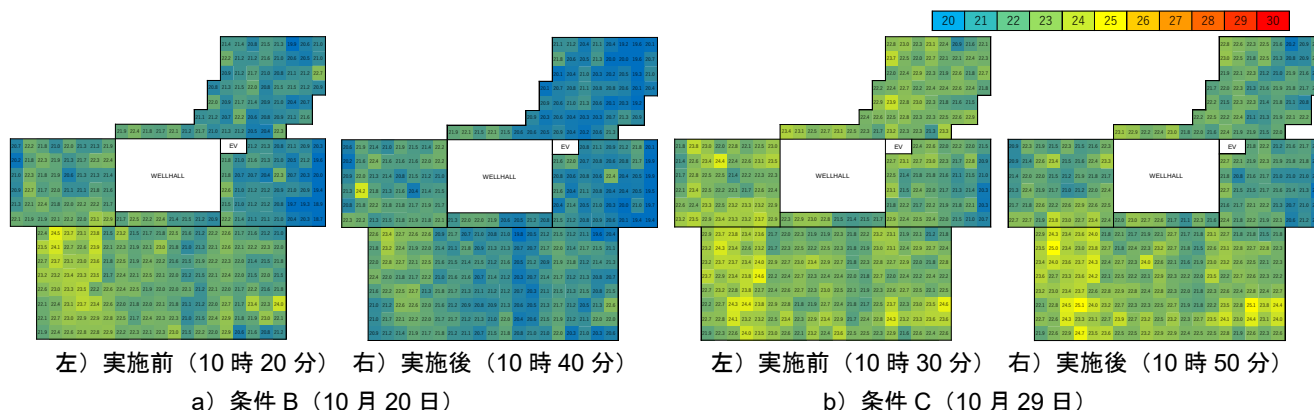


図 31 各代表日の自然換気実施前後の床表面温度

図 32 に各条件の執務時間におけるエリアごとの温熱環境を示す。各条件 1 週間の 9:00～18:00 における各執務室の温熱環境を空気線図上に示した。破線で示す領域は着衣量 0.5[clo]の条件における SET*基準の熱的受容域である。自然換気を行わない条件 A に関して、全執務室における温熱環境が安定していた。ワイガヤエリアでは、他の執務室に比べて絶対湿度が高い傾向にあった。執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、自然換気を行わない執務室 2-1 のみが安定した温熱環境であった。一方で、全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、全ての時間帯において熱的受容領域内にあるものの、温熱環境が広く分布していることがわかった。自然換気を行うことにより各室内で様々な温熱環境が存在していた。

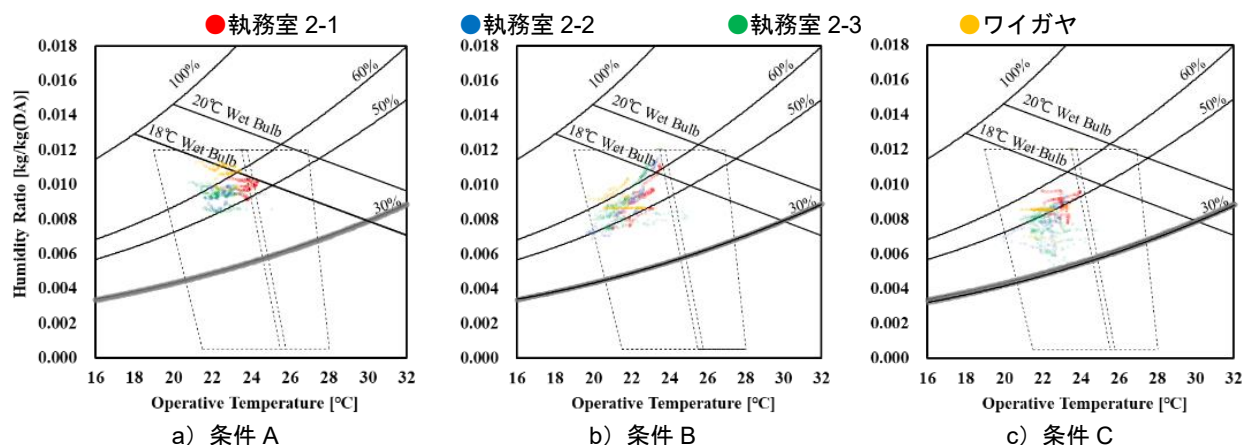


図 32 各条件の執務時間におけるエリアごとの温熱環境

図 33 に各代表日のエリアごとの平均床表面温度を示す。執務空間の温熱環境をより平面的に確認するため、測定点の多い床表面温度を用いた。条件 A における代表日は、外気温が 1 週間を通しての平均に最も近い 10 月 14 日（水）とした。自然換気を行わない条件 A に関して、1 日を通して急激な温度変化はなく、日中に 1.0℃程度緩やかに上昇した。全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、始業時刻より床表

面温度が 1.0℃程度緩やかに上昇したが、自然換気開始と同時に全執務室において 1.0℃程度急激に低下した。執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、執務室 2-1 以外で条件 B と同様の傾向が見られた。執務室 2-1 と他の執務室においては、床表面温度が 0.5℃～1.0℃程度の差があり、二階の執務エリア全体で不均一な温熱環境が形成されていたと言える。

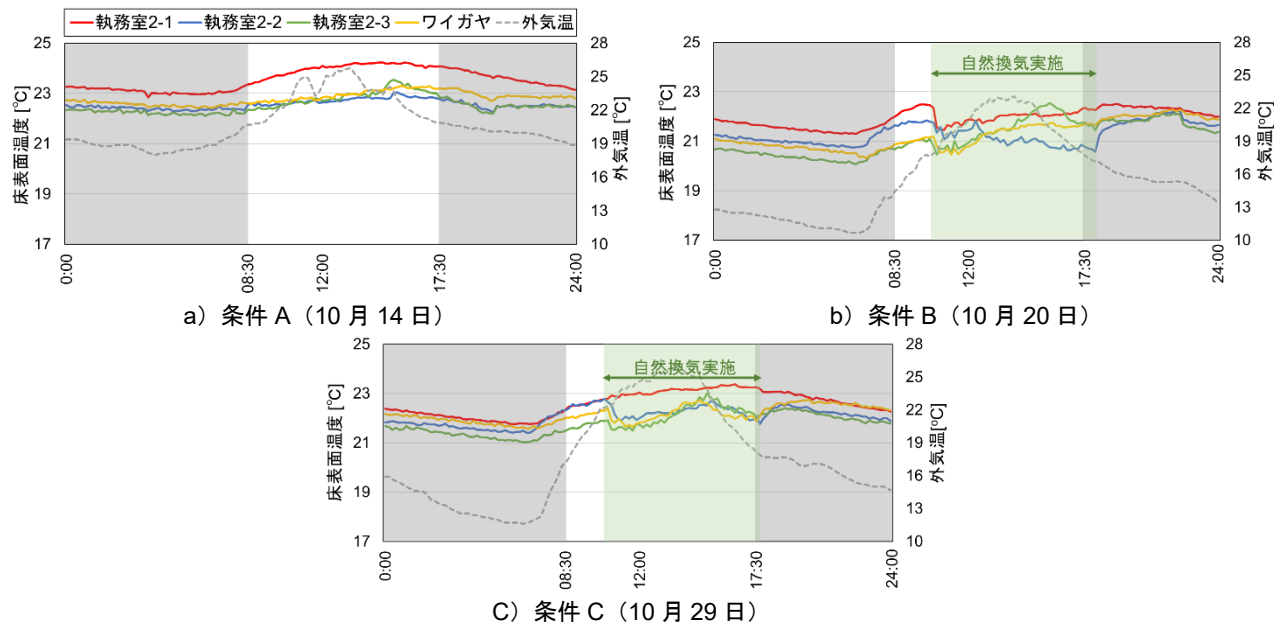


図 33 各代表日のエリアごとの平均床表面温度

図 34 に各代表日の執務室 2-1 における温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化を示す。横軸に 9:00～18:00 の床平均温度と実温度の乖離、縦軸に床表面温度の標準偏差を示している。プロットは 10 分間隔で行った。自然換気を行わない条件 A および執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、9:00～18:00 には時間的変動が少ない安定した温熱環境であった。一方で、全執務室で自然換気を行う条件 B に関して、条件 A および C と比較して、平均値との乖離の幅（左右の振れ幅）が大きく、時間的変動が大きい温熱環境であったことがわかった。

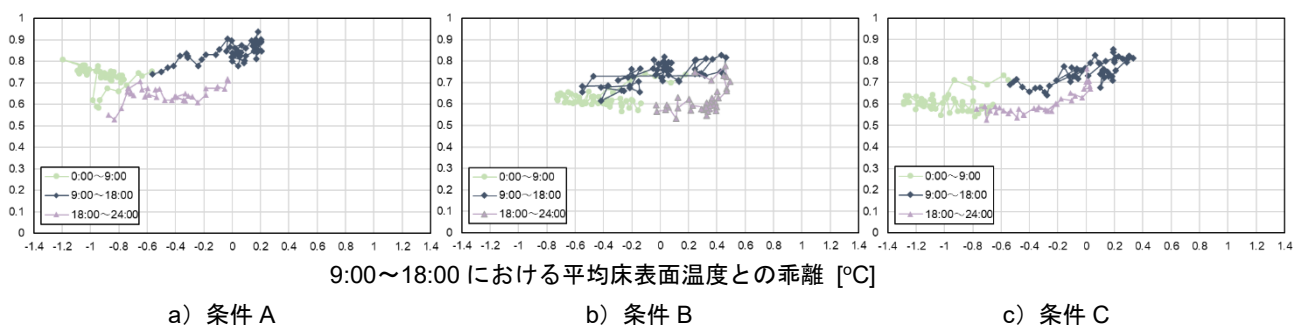


図 34 各代表日の執務室 2-1 における温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化

7.2 アンケート結果

図 35 に各条件の温熱環境満足度、図 36 に各条件の主観作業能力、図 37 に各条件の温冷感を示す。一週間アンケートの結果より作成した。温熱環境満足度に関して、全執務室で自然換気を行う条件 B で不満側が 6 割弱と最も多く、主観作業能力に関して、条件 B を除いていずれの条件でも主観作業能力 7 以上の執務者が 8～9 割と高い値を示していた。また、温冷感申告に関して、全執務室で自然換気を行う条件 B

で寒い側が 8 割以上を占めた。自然換気によって形成された寒い温熱環境が不満要因となり、温熱環境満足度の不満側増加および主観作業能力が低下したと考えられる。

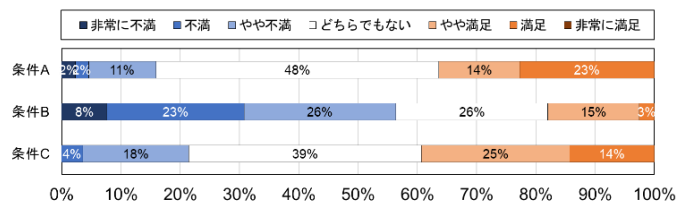


図 35 各条件の温熱環境満足度

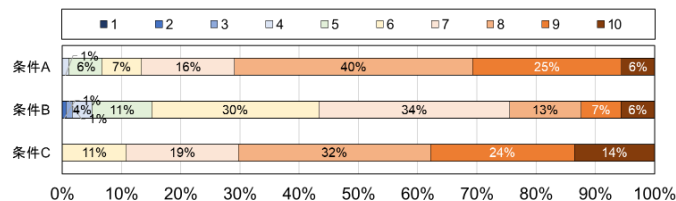


図 36 各条件の主観作業能力

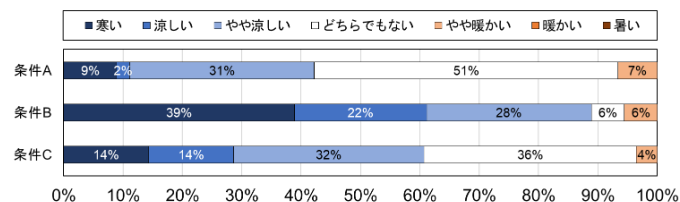


図 37 各条件の温冷感

図 38 に自然換気実施下における座席選択位置を示す。条件 B および C の 1 週間のうち、実際に自然換気が行われた日のみで、毎日アンケートの結果より作成した。外気温および執務室 2-1 の空気温度は 9:00～18:00 の平均値を示している。外気温に関して、条件 B では比較的低かったことがわかった。執務室 2-1 以外で自然換気を行う条件 C に関して、外気温が比較的高い日に自然換気を行っていない執務室 2-1 の選択率が低下した。執務者は比較的温暖な外気温で自然換気が行われた時に、自然換気実施の執務室を選ぶ傾向にあることがわかった。

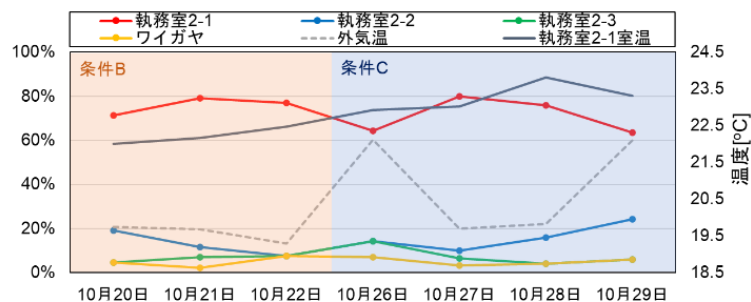


図 38 自然換気実施下における座席選択位置

アンケート結果より、比較的外気温が低く温冷感申告で寒い側が 8 割を占めた条件 B に関して、温熱環境への不満側増加および主観作業能力が低下したことから、外気条件を考慮せずに自然換気を行うことが、執務者満足度の低下要因となることがわかった。外気条件を考慮しながら自然換気を行うことで、執務者満足度や知的生産性向上に寄与する可能性が示された。

8 まとめ

本報では、オフィス棟吹抜け部に導入した置換空調や執務室に導入したパーソナル空調機などの二次側空調システムについて、物理環境測定やアンケートおよびパーソナル空調使用調査を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 夏期には、置換空調により室下部が隅々まで効率よく冷却されていることを確認した。
- 2) 冬期には、誘引を強めた給気ユニットと床下井水貯留槽の影響により、極端な温度低下は見られなかった。
- 3) OAフロア床暖房は、外壁ガラスからのコールドドラフトを防止でき、快適な温熱環境を構築できることを確認した。
- 4) 前面吹出型デスク空調機は、送風量を増すほどPMVが低下し、個人の好みで安易に快適性を調整できることを確認した。
- 5) アンビエント環境条件が28℃の運用Aと比較し26℃の運用B、Cは温熱環境満足度が高い結果となった。
- 6) アンビエント環境の作用温度が27.3℃から26.6℃になるとパーソナル空調の使用回数が減少するが、作用温度に影響されずパーソナル空調の使用頻度が高い執務者や低い執務者がいることが分かった。
- 7) パーソナル空調の使用が多い執務者は、一般的にいわれる快適環境であっても、パーソナル空調による温熱環境満足度への影響がとて大きいことが分かった。
- 8) パーソナル空調の使用が多い執務者は、作用温度が27.3℃から0.7℃低下したアンビエント環境において、パーソナル空調を使用することで、作業効率が向上し、さらに温熱環境の不満を解消する可能性が示唆された。
- 9) パーソナル空調の使用が多い執務者は、パーソナル空調を使用することで、温熱環境満足度および仕事効率の低下を抑制する可能性が示された。
- 10) 中間期における自然換気の実施で、即時的に床表面温度が1.0～2.0℃程度低下した。外気温により床表面温度の低下幅は変動した。
- 11) 自然換気を行ったエリアで、平面的に不均一な温熱環境が形成された。自然換気により時間的変動が大きくなり、1日を通して温熱環境が変動しやすくなった。
- 12) 外気条件を考慮しながら自然換気を行うことで、執務者の温熱環境満足度や知的生産性向上に寄与する可能性が示された。

今後は、今回の性能検証やアンケート結果などで抽出された課題を精査し、快適性や省エネルギー性を高めるためにさらなる機器の改良や運用改善を図っていきたい。

文 献

- 1) 木村ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第11報)置換空調とパーソナル空調機の性能評価，2021年度空衛学会大会（オンライン），J-50，pp.201~204，(2021)
- 2) 竹原ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第12報)夏期におけるパーソナル空調の使用状況と温熱環境満足度，2021年度空衛学会大会（オンライン），J-51，pp.205~208，(2021)
- 3) 渡邊ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設の計画と実証評価(第13報)中間期の自然換気実施下における物理環境および執務者満足度，2021年度空衛学会大会（オンライン），J-52，pp.209~212，(2021)
- 4) 清水ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設 全体概要およびZEBに向けた建築・設備計画と環境評価，高砂熱学イノベーションセンター報，N0.34，pp.5~16，(2021)
- 5) 木村ら，エネルギー自立型サステナブル研究施設 二次側空調システム及びセンシングシステムの概要，高砂熱学イノベーションセンター報，N0.34，pp.25~36，(2021)
- 6) P.O. Fanger: Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, (1982)
- 7) ISO7730, Moderate thermal environments, Determination of the PMV and PPD indices and specification of

the conditions for thermal comfort, ISO, (2005)

- 8) ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy, ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, (2013)
- 9) P. O. Fanger, Thermal Comfort, Robert E. Krieger Publishing Company, (1982)
- 10) 鶴飼ら, 事務所ビルにおける温熱環境の不均一性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 738 号, pp. 739~746, (2017)

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the performance of a personal comfort system (PCS) and its influence on thermal comfort of workers and workplace productivity in different ambient environments. The performance of a displacement ventilation system installed in an atrium space was evaluated both in summer and winter. The system included few partitions on the first floor and a personal air conditioner, floor heater, and counter air conditioner on the second floor. Frequent use of the PCS mitigated decreased thermal comfort levels and workplace productivity associated with increase in ambient temperature. Workers who frequently used the PCS reported high levels of thermal comfort and workplace productivity, especially at an interior operating temperature of 26.6°C. Finally, an actual measurement survey was performed in an energy-independent sustainable research facility equipped with natural ventilation systems to verify operational methods that contribute to improved intellectual productivity. Operational changes related to natural ventilation systems were made during the intermediate period, and each operation was evaluated. The room was found to be rapidly cooled by natural ventilation in proportion to the outside temperature, creating an uneven thermal environment. It was confirmed that natural ventilation needs to be implemented under appropriate outdoor air conditions.
