

環境配慮型オフィスに採用した温冷感空調システムに関する研究

2022年夏季における執務者の温冷感と省エネ効果の実証結果

Research on Thermal Sensation Vote Air Conditioning System Employed in Environmentally Conscious Office
Results of the Office Worker's Thermal Sensation and Energy Efficiency Effects in Summer, 2022

御厨 雅文*¹, 上柳 燎平*²

Masafumi MIKURIYA, Ryouhei UEYANAGI

A study was conducted in an office building with the Thermal Air Conditioning System installed in the summer of 2022 under 3 conditions, with and without the use of the Thermal Air Conditioning System and with different temperature settings. There was no significant difference in the evaluation of the indoor thermal environment in any of the operation modes.

- (1) When this system was used, temperatures other than the standard temperature setting appeared more frequently than in the conventional operation method.
- (2) The rate of occurrence of thermal sensation vote decreased when the inlet temperature was above 25.5°C and below 26.0°C. This temperature is close to the temperature at which the worker feels comfortable, and the rate of occurrence of reports of feeling hot or cold decreased at this temperature.
- (3) Compared to conventional air conditioning operation in which the temperature setting was 26°C and the temperature setting was changed by a wall-mounted remote-control, air-conditioning power consumption was reduced by 2.6 kWh/day (2.4%) when this system was used, and by 17.7 kWh/day (16%) when the temperature setting was 28°C. The system was used at a temperature setting of 28°C.

Keywords: Thermal Sensation Vote Air Conditioning System, Setting/Inlet Temperature, Thermal Sensation, Energy Conservation

温冷感空調システム, 設定温度 / 吸込温度, 温冷感, 省エネルギー

1. はじめに

温冷感空調システム¹⁾ (以下「当システム」) は、使用者にカード型端末を配布することで、簡易に個人の温冷感に応じた空調制御ができるシステムである。これにより使用者は壁掛リモコンまでの移動、スマートフォンのアプリやPC上でソフトウェアを立ち上げるなどの操作手順を省略でき、思い立った時にすぐにボタンを押下することで、申告を空調機温度設定にリアルタイムで反映できる。当システムを導入したT社の自社ビル(以降「当ビル」、外観写真を写真1に示す)において2022年夏季に、3種類の運用方法について執務者の温冷感や省エネ性などの比較検証を実施した。本報ではその結果を報告する。

2. 建物概要

建物概要を表1に示す。当ビルは、4階から8階までを基準オフィスフロアとし、1階はエントランス、2階は会議室、3階は会議室と執務室、9階はカフェスペースと執務室となっている。空調方式にはビル用マルチエアコンを採用している。また、換気システムとして直膨コイル組込式の全熱交換機を採用している。



写真1 当ビル外観写真

* 1 戸田建設(株)特定プロジェクト室

* 2 戸田建設(株)技術研究所 修士(工学)

Specific Project Division, TODA CORPORATION

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.

表 1 当ビルの建物概要

所在	東京都
建物用途	中央区事務所
構造階数	制震構造, S造地下なし, 地上9階, PH1階
延床面積	6,135m ²
竣工年月	2019年12月
空調概要	
方式	空冷 HP パッケージビル用マルチ方式
換気	空冷 HP 直膨コイル組込全熱交換機方式

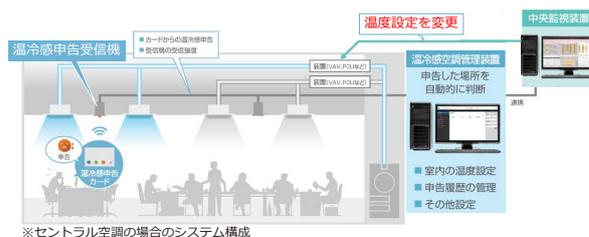


図 2 温冷感空調システムのシステム概要²⁾

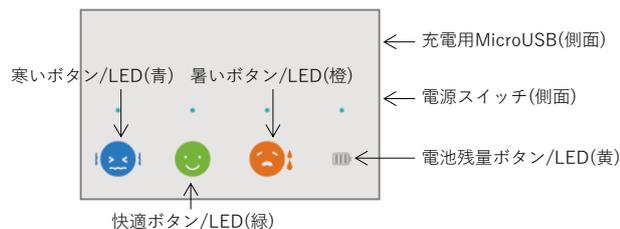


図 1 申告カード

3. システム概要

当システムは、室内における使用者個々の「暑い」「寒い」といった温冷感を「申告」という形で空調の設定温度に反映させるものである。申告には図1に示す無線式の「申告カード」を使用する。図2に当システムのシステム概要²⁾を示す。執務者は申告カードを用いて、自身が暑いと感じた際には暑いボタンを押すことにより、空調温度設定を変更することができる。この際、申告した場所の最寄りの申告受信機が申告を受信し執務者付近の空調機の設定温度を変更し、執務者の温冷感を満足させる。当システムの特徴は、室内温度設定を申告状況に応じた最適値とすることによって、執務者の温冷感の不満を解消しつつ、ウェルネス向上に貢献することである。また、当システムには申告を一時的な要求と判断した場合に、一時的に温度設定を変化させ、一定時間経過後、徐々に温度を変化前に戻すことで申告者の快適性を保ったまま、冷え過ぎや暖め過ぎを防止することができる機能も搭載されている。温冷感申告を行った執務者以外の執務者の快適性も損なうことなく室温調整をすることが可能となる仕組みである。

4. 実証実験概要

4.1 実証範囲

当ビルの執務者数は約500名で、全執務者を調査対象とした。実証範囲は1階エントランス等を除く、主な執務エリアの2階～9階とした。また、フロアのゾーニングは空調機の室内機毎に各フロア13エリア（最上階9階は10エリア）に分けて申告受信機を設け、空調制御を実施した。

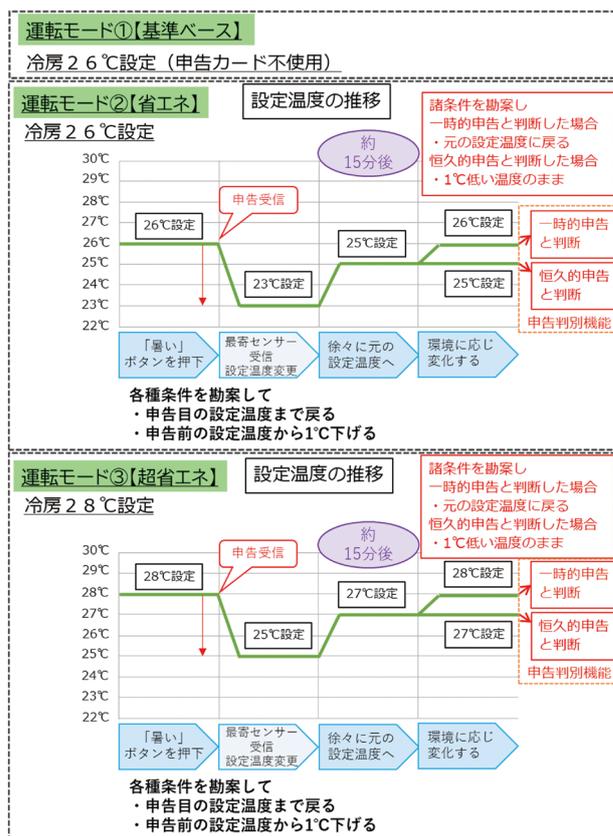


図 3 夏季運転モードの動作

4.2 運転モード

2022年夏季実証実験では、運転モードを3条件に分けて実施した。図3に夏季運転モードの動作を示す。

当システムの執務者へ与える影響の調査および、空調機運用に対する当システムの省エネ性を検証するために、3条件の運転モードで検証を実施した。運転モード①は当システムを使用せず基準設定温度を冷房26℃とし、設定温度を変更する際には、壁掛けリモコンで操作を行う既存システム通りの運用とした。運転モード②は当システムを使用し、基準設定温度を冷房26℃設定し、「暑い」申告時に下げた温度設定を申告前と比べて1℃下げた状態に保つか、申告前の温度設定に戻すかを環境温度等の各諸条件を勘案する「申告判別機能」を設ける設定とした。運転モード③は②と同様に、当システムを使用し、「申告判別機能」を設ける設定で基準設定温度を

運転モード	期間	フロア	期間	フロア	期間	フロア
①	7/19～7/22	2, 5, 8階	8/1～8/5	3, 6, 9階	7/25～7/29	4, 7階
	8/8～8/12		8/22～8/26		8/15～8/19	
	8/29～9/2		9/12～9/16		9/5～9/9	
②	7/19～7/22	3, 6, 9階	8/1～8/5	4, 7階	7/25～7/29	2, 5, 8階
	8/8～8/12		8/22～8/26		8/15～8/19	
	8/29～9/2		9/12～9/16		9/5～9/9	
③	7/19～7/22	4, 7階	8/1～8/5	2, 5, 8階	7/25～7/29	3, 6, 9階
	8/8～8/12		8/22～8/26		8/15～8/19	
	8/29～9/2		9/12～9/16		9/5～9/9	

※①は壁掛けリモコンにて設定温度を手動で変更。手動で電源オン/オフ
 ②～③は申告カードを用いて設定温度を変更。タイマーで電源オン/オフ

図4 実施スケジュール

基本データ：

- ・在館者に該当するか
 週2日以上勤務予定
 週1日以下勤務予定
- ・体質について
 暑がり 暑がりであり、且つ寒がりでもある
 寒がり 暑がりでも、寒がりでもなく普通

アンケート設問：

- ・室内温度はいかがでしたか？(複数回答)
 暑すぎると感じるが多かった
 寒すぎると感じるが多かった
 暑いと感じることも寒いと感じることもあまりなかった(許容範囲内)
- ・室内環境での作業効率は、どうだと感じましたか？
 +(向上した)
 0(変わらない)
 -(低下した)

図5 実施アンケートの項目例

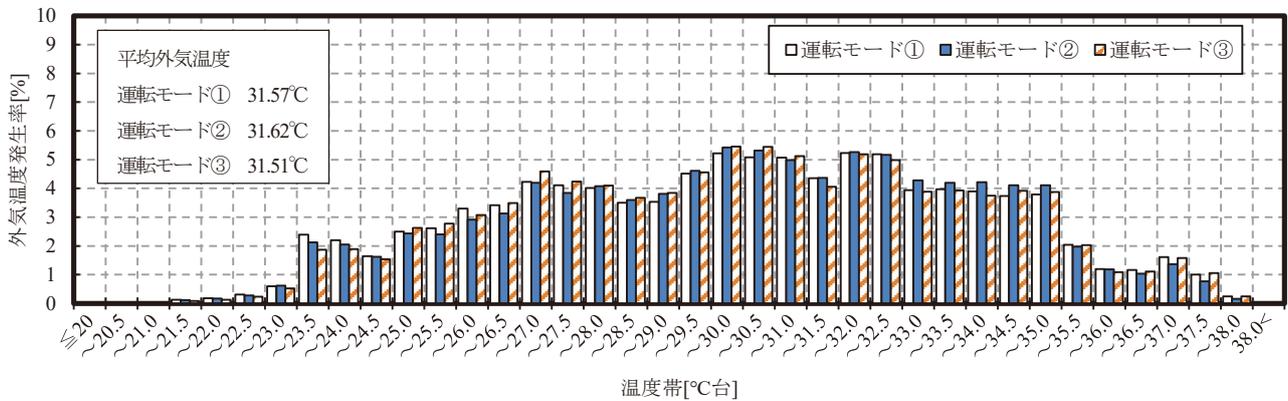


図6 外気温度のヒストグラム

冷房28℃設定にした。

なお、運転モード②と③はともに壁掛けリモコンでは設定温度を操作できないように壁掛けリモコン盤を施錠して実施した。

4.3 スケジュール

図4に実施スケジュールを示す。2022年7月19日から9月16日までの9週間とした。調査期間中はフロアごとに図4に示す運転モード①、②、③を週替わりで変更して実施した。執務者にはどの週にどの運転モードを実施するかは伝達せずにブラインドで実証実験を実施した。

4.4 アンケート

図5に実施したアンケートの項目例を示す。原則週1回のアンケート実施として、毎週木曜日の15:00にアンケートを調査対象者全員にEメールで送付し、当該週に対する回答を得た。新型コロナウイルスの影響で、オフィスへ出社せず在宅勤務をする職員も多くいたため、当該週の当ビルへの出社回数が2回未満の執務者の回答は分析の対象外とした。また、アンケートでは「温冷感」や「生産性」、「気流感」、「満足感」などについての回答を得たほか、執務者の体質(暑がり、寒がり等)についても回答を得た。

5. 空調設定温度と吸込温度に関する分析

5.1 設定温度と吸込温度の発生頻度

図6に執務時間内(6:00～20:00)における外気温度を0.5℃毎に集計したヒストグラムを運転モード別に示す。なお、調査期間中かつ執務時間内での各運転モードにおける外気温度の平均値も同図中に示す。調査期間中の外気温度は21.5℃～38.0℃の範囲となった。外気温度の頻度としては、29.5℃を超えて30.0℃以下が最も多かった。また、運転モード②が平均で31.62℃と最も外気温が高く、運転モード③が平均31.51℃と最も低かったがほとんど差はなかった。そのため、全ての運転モードで外気温としては同条件で実証実験を実施することができたと考えられる。

調査期間の執務時間内(6:00～20:00)における設定温度と吸込温度について、図7にモード別の設定温度のヒストグラム、図8にモード別の吸込温度のヒストグラムをそれぞれ0.5℃毎に集計した発生頻度を示す。図7より、設定温度の発生頻度は運転モード①および②は25.5℃を超えて26.0℃以下、運転モード③は27.5℃を超えて28℃以下が80%以上と突出して高かった。これらの温度帯は、それぞれの運転モードの基準設定温度と一致

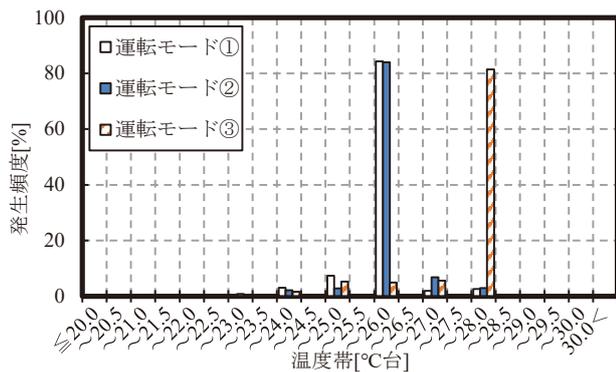


図7 モード別の設定温度ヒストグラム

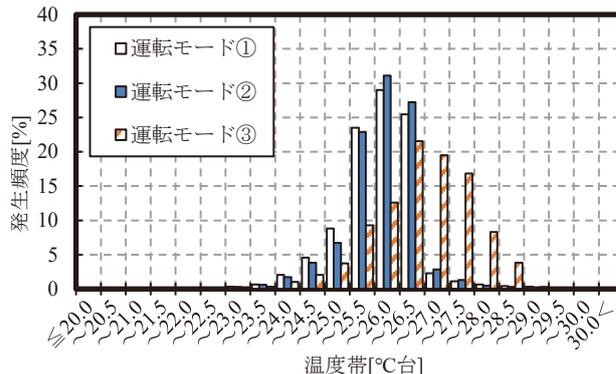


図8 モード別の吸込温度ヒストグラム

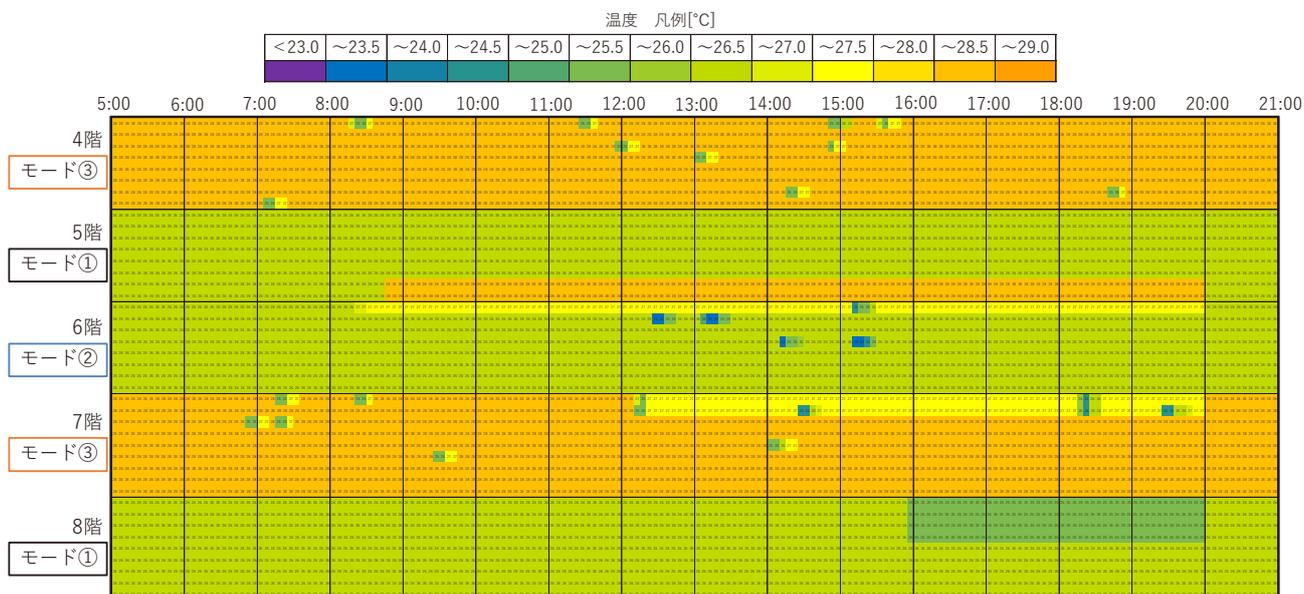


図9 エリア別の設定温度ヒートマップ

しているため、設定温度が基準からあまり変化しなかったと考えられる。ただし、運転モード①と当システムを使用する運転モード②、③を比較すると、運転モード②では基準設定温度より低い温度帯や高い温度帯、運転モード③では低い温度帯でも出現しており、申告カードの使用により執務者の温冷感に合わせて設定温度が変化していたことが伺える。運転モード②で、基準設定温度26.0°Cよりも高い設定温度が出現している理由は、申告カードで寒い申告をした場合には、設定温度が1°C上昇する制御としているためである。

図8より、吸込温度の発生頻度は、運転モード①、②では25.5°Cを超えて26.0°C以下、運転モード③では26.0°Cを超えて27.0°C以下の範囲でそれぞれ発生頻度が高い。運転モード①および②では、それぞれの基準設定温度に近い温度であり、おおむね設定温度に近い吸込温度であったと示された。運転モード③では、吸込温度は基準設定温よりもおよそ1°C低い温度で発生頻度が高くなっ

た。これは、室内の温度制御が空調機のみではなく、直膨コイル組込式の全熱交換機も併用した制御を行っているためである。また、吸込温度は、運転モード①、②では24.0°C未満、運転モード③では28.0°C以上も出現しており、設定温度から逸脱した吸込温度になる場合もあった。

5.2 吸込温度と設定温度のヒートマップ

図9に4～8階のインテリアゾーン（各階で13の空調エリアの内、9の空調エリア）に設置した空調機の5分毎の設定温度、図10に吸込温度の変化を表した、ヒートマップを示す。なお、図9、10は実証期間中に最も外気温が高くなった2022年7月20日の執務時間内（6:00～20:00）を含む5:00～21:00の変化を示す。なお、当日の各階の運転モードは図4に示す通りではあるが、5、8階が運転モード①、6階が運転モード②、4、7階が運転モード③であった。

図9より、当システムを使用できる4、6、7階では

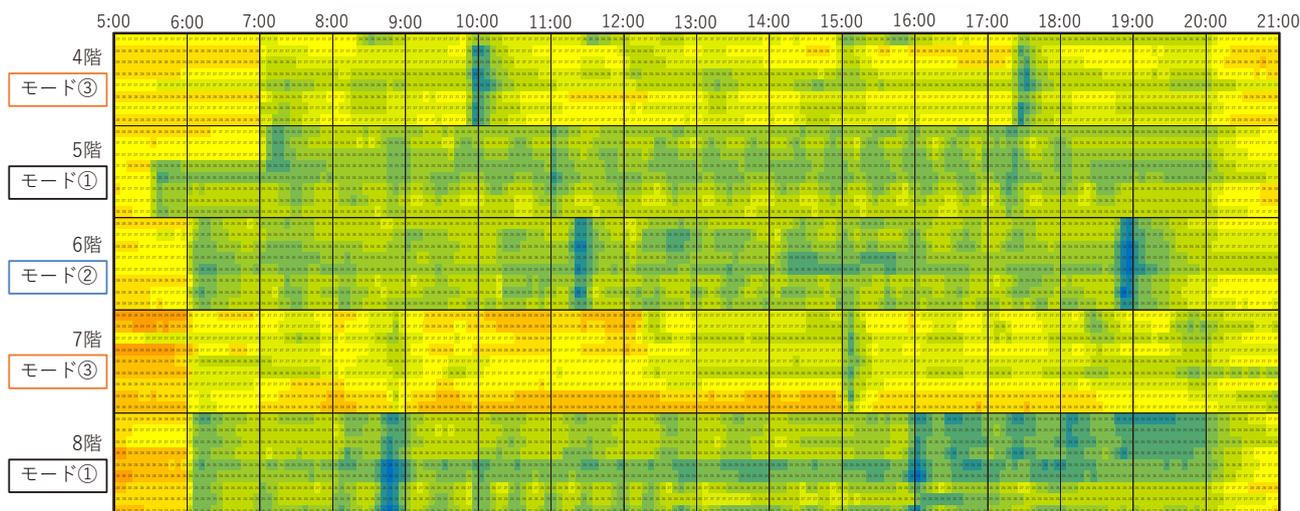


図 10 エリア別の吸込温度ヒートマップ

一時的に設定温度が低下しているタイミングが散見される。これは申告カードによる温冷感申告がなされて、設定温度が変化したためである。そのエリアにいる執務者が自身の温冷感に合わせて申告を行っていたと考えられる。ただし、当システムの申告による設定温度の変化は一時的なものであるため、当システムを使用できる運転モードであってもほとんどの時間は基準設定温度であった。この結果は調査期間を合算した図7の設定温度のヒストグラムの結果と矛盾しない結果である。

図10より基準設定温度が28℃の運転モード③で運用した4、7階では他のフロアと比較して吸込温度は高く、おおむね27～28℃で推移した。一方、基準設定温度を26℃とした運転モード①の5、8階、運転モード②の6階では吸込温度は25～27℃で推移した。図8で示した各運転モードの吸込温度の頻度と、おおむね一致する結果である。

図9、10より設定温度と吸込温度の変動を比較すると、空調エリアの設定温度が変更されているにもかかわらずそのエリアの吸込温度が変化していない箇所が見受けられる。申告が行われた際に、設定温度は変更され給気温度は低下するが、室内温度としては周囲の空気と混合するために、室内温度は想定よりも低下していない可能性が考えられる。

図10において、設定温度が変更していないにも関わらず一時的に吸込温度が23℃以上24℃未満となっている時間帯(例えば4階の10:00付近)がどの階でも確認された。これはパッケージエアコンの特性で、空調機内の冷媒を回すための油戻し運転の際に起こる一時的な給気温度の低下に起因して、吸込温度が低下したと考えられる。この一時的に温度が低下した際に、寒い申告が発生している可能性も考えられる。

5.3 吸込温度と申告発生率

0.5℃毎に集計した吸込温度に対する申告発生率を運転モード別に図11～13、全運転モードを合算した結果を図14に示す。なお、申告発生率とは特定の吸込温度帯の際に申告カードにより押下された申告の回数を特定の吸込温度帯の総出現時間で除したものである。例えば、運転モード①において26.0℃を超えて26.5℃以下の吸込温度となった時間は4,732時間あったが、暑い申告は1,305回あったため、26.0℃を超えて26.5℃以下の吸込温度に対する暑い申告発生率は0.0275回/時間となる。なお、吸込温度帯の総出現時間および温冷感申告の積算は調査期間の執務時間内(6:00～20:00)を対象とした。さらに、図8より吸込温度の発生頻度が1%未満となった温度帯は出現頻度として稀であると判断して、23.5℃以下と28.5℃を超えた温度帯を除いた、23.5℃を超えて28.5℃以下の吸込温度範囲を分析対象とした。

図11～13より運転モード別で共通する傾向として、吸込温度帯が高くなるほど暑い申告発生率は増加し、寒い申告発生率は減少、吸込温度帯が低くなるほど暑い申告発生率は減少、寒い申告発生率が増加した。これは、執務者の室温に対する温冷感に起因するものだと考えられる。一方で、図12に示す運転モード②の23.5℃を超えて24.0℃以下の温度帯においては、寒いと同時に暑い申告発生率も高い。これは、暑い申告を行ったことにより室内温度が下がっている状況にあるが、更なる冷房効果を求めて暑い申告を続けている執務者がいるためだと推測される。図13に示す運転モード③の24.5℃を超えて25.0℃以下の温度帯で暑い申告発生率が高い理由も、同様の理由であると考えられる。

全体を通して基準設定温度とは異なる温度帯でも申告が多い傾向にあり、設定温度と実際の室内温度には乖離があることが推測される。加えて、暑いおよび寒い申

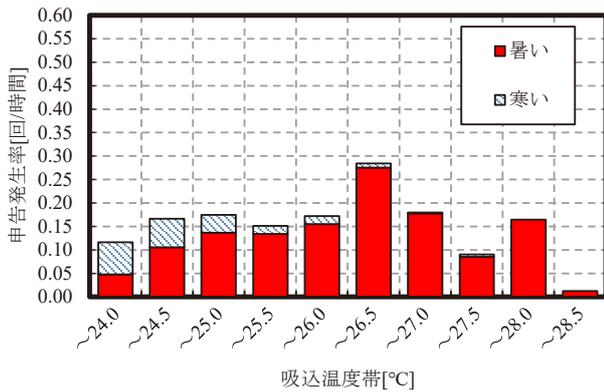


図 11 吸込温度に対する申告発生率 (運転モード①)

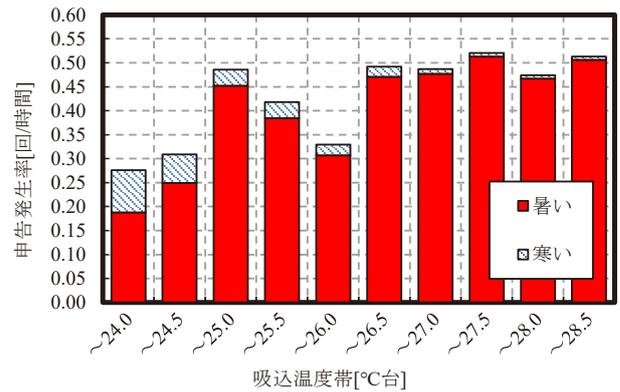


図 13 吸込温度に対する申告発生率 (運転モード③)

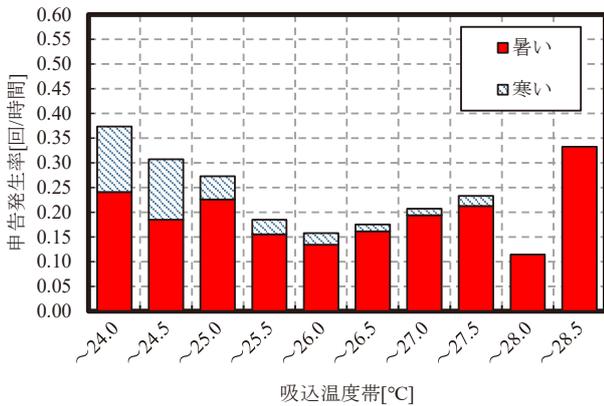


図 12 吸込温度に対する申告発生率 (運転モード②)

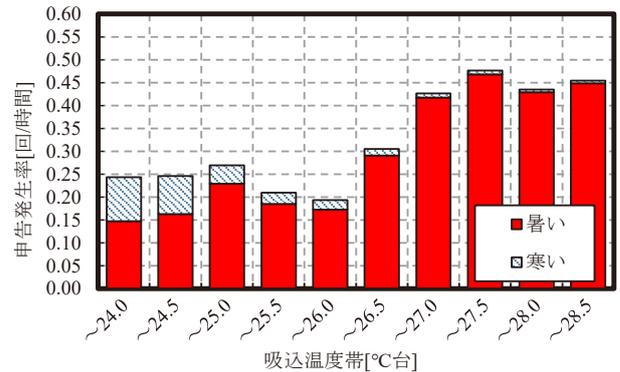


図 14 吸込温度に対する申告発生率 (全体合計)

告をその空間の非受容申告とすると、申告発生率は吸込温度での非受容申告率と考えることもできる。図14より、25.5℃を超えて26.0℃以下で申告発生率が最も小さくなっている。これはこの温度では寒い申告が少なくなり、暑い申告が増え始める温度であるため、非受容申告としては一時的に小さくなる温度帯であると推測される。既往研究³⁾では、室内空気温度が25.5~26.5℃の範囲で多くの人が快適と感じていると結果が示されており、図14で申告発生率が小さくなっている温度と類似する結果である。つまり、快適温度に近い温度帯であったため非受容申告の申告発生率が低くなっていると考えられる。

図11に示す運転モード①では、前述した快適とされる空気温度範囲内の26.0℃を超えて26.5℃以下の温度帯で暑い申告発生率が高くなっている。運転モード①は申告カードで温冷感申告をしても、設定温度が変更しない運用としたため、他の運転モードと比較して設定温度の変更が少なく、それに起因して室温が変動しない、すなわち吸込温度の変化も少ない運用方法である。そのため、当該温度の際に暑い申告をしても設定温度が変わらず、室温も変化しないことで環境に不満を持ち、暑い申告を連続して行うことで、申告発生率が高くなった可能性が考えられる。

6. 体質別のアンケートの分析

アンケートは調査期間全体で取得数916件、申告カードによる温冷感申告は申告回数16,776回のデータを取得した。

6.1 温冷感と体質別回答比率

図15に温冷感の運転モード別回答比率を示す。回答者全体に着目すると、運転モード③が「暑すぎると感じる」の回答が多かった。夏季において冷房の空調設定温度を28℃に変更した場合には「暑すぎると感じる」の回答が増加し、許容範囲内の回答が減少した。なお、「寒すぎる」の回答は、運転モード①、②と比較して少なかった。空調の設定温度としては暑くもなく、寒くもない許容範囲が多くなるように設定することが望ましいと考えられるため、実運用では考慮が必要である。

「寒がり限定」に着目すると、運転モード③が「許容範囲内」の回答が61%と一番多くなった。また、全ての運転モードで「寒すぎるが多かった」の回答が「暑すぎると感じる」を上回った。特に運転モード①では、「寒すぎると感じるが多かった」の回答が50%と他の運転モードと比較して顕著に多い。これは、壁掛けリモコン操作によって設定温度が下げられてしまい、当人の体感的な暑さが解消された後も設定温度が低いままになっていたことに起因すると考えられる。

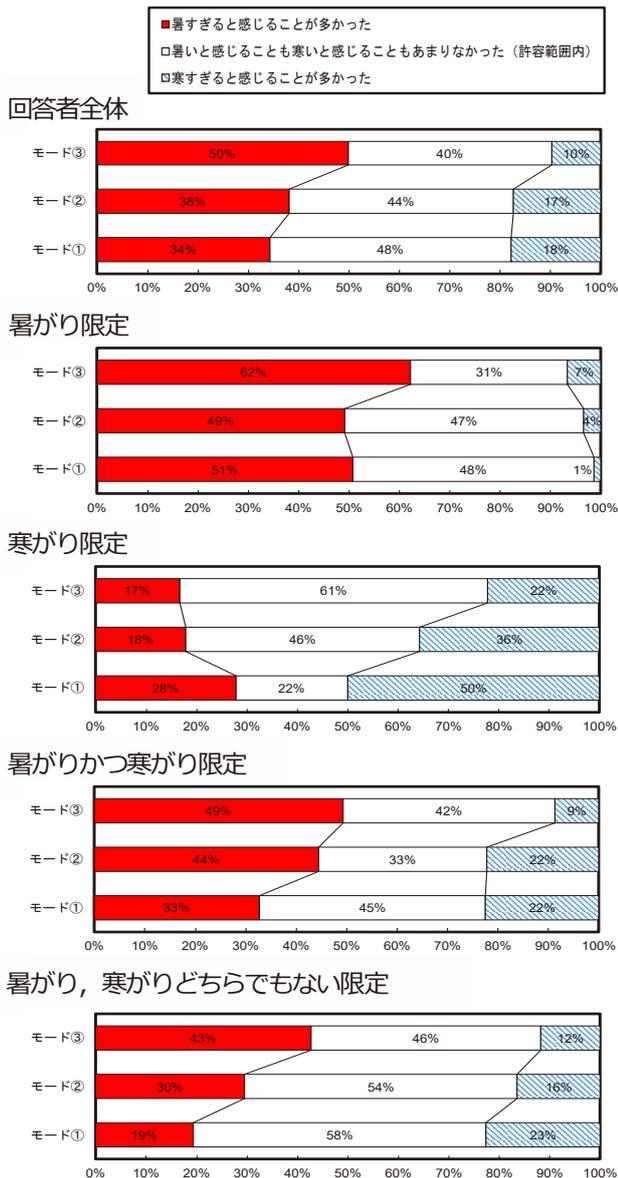


図 15 体質別・運転モード別 温冷感回答比率

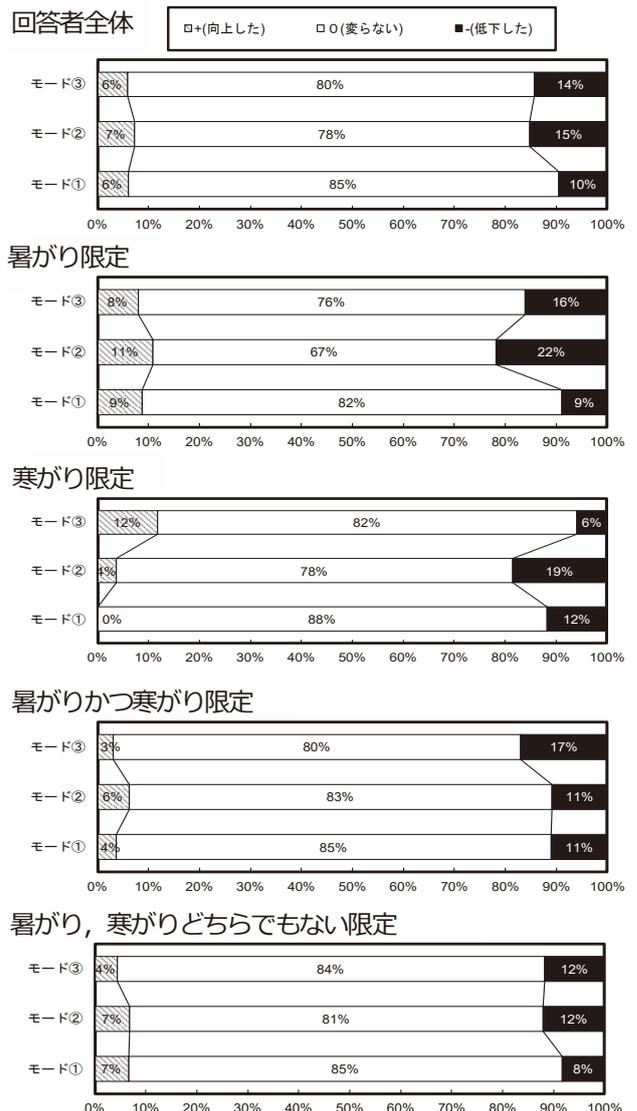


図 16 体質別・運転モード別 生産性回答比率

6.2 生産性と体質別回答比率

図16に生産性の運転モード別回答比率を示す。回答者全体に着目すると、どの運転モードでも「向上した」の回答が6～7%と同等程度であった。「低下した」の回答は運転モード①が10%と最も低く、運転モード②が15%と最も高くなった。運転モード③の基準設定温度は28℃であり、他のモードと比較して2℃高いが、アンケート回答はほとんど差がなかった。また、寒がり限定に着目すると、運転モード③は「向上した」の回答が12%と最も高く、「低下した」についても6%と最も低くなった。寒がりの執務者には設定温度を高くすることで、生産性が向上した可能性がある。

「暑がり限定」に着目すると「向上した」は運転モード②で最も多いが、「低下した」も同モードで最も多い。

執務者は室内温度に影響されて、生産性が変化すると考えられたが、基準設定温度が28℃と最も高い運転モード③よりも26℃とした運転モード②の方が「低下した」の割合が高いのは、想定と矛盾する結果である。温冷感や吸込温度以外の要素が影響したことが考えられ、今後さらなる検討が必要である。

7. 当システムの省エネ性

以下、空調機の消費電力量について述べる。図17に運転モード別の1フロア当たりの日平均消費電力量を示す。なお、同図のひげは標準偏差(1SD)を示す。同図より運転モード③が1日当たりの平均消費電力量が最も少なくなった。また、運転モード①と③、②と③で統計分析を試みた結果、運転モード③の消費電力量が有意に

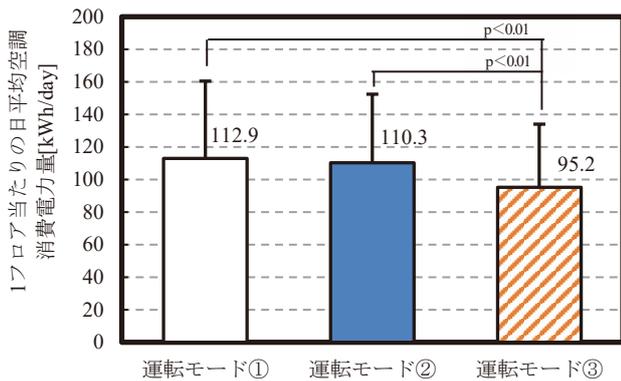


図 17 1日当たりの平均空調消費電力量

少なかった。

運転モード①は、当システムを活用しない条件で、消費電力量としては最も大きくなった。図 7 に示す通り、設定温度が 24℃ や 25℃ でも出現しており、壁掛けリモコンの操作で、設定温度を恒常的に低くしていたことにより、空調の負荷が大きくなって電力を消費したと考えられる。

運転モード②は、運転モード①と比較して消費電力量が 2.6kWh/day (2.4%) 小さくなり、運転モード①よりも空調消費電力量を削減できた。これは、図 7 に示す通り運転モード②は①と比較して、空調設定温度が 26℃ 以上の出現が多く、執務者の温冷感に併せて頻繁に高い設定温度となったために、一時的に空調負荷が低減したためだと考えられる。

運転モード③は、運転モード②と同様に当システムを活用し、基準設定温度を 28℃ と他の運転モードよりも 2℃ 高くし運用した。その結果、省エネ効果としては最も高く、運転モード①と比較すると 17.7kWh/day (16%) の消費電力量を削減できた。しかし、図 7, 8 に示す温冷感における「暑すぎる」や生産性における「低下した」の回答が多いことを考慮して、バランスをとって空調温度設定を選択し最適なオフィス環境にすることが必要だと考える。

8. まとめ

2022年夏季実証実験では、3つの運転モードに分けて温冷感、生産性、省エネ性について比較したが、どの運転モードにおいても室内温熱環境に対する評価に大きな差は見られなかった。これは執務者に申告カードという物理的な変更権限を付与したことにより、自己効力感^{4, 5)}の向上をもたらしたことが理由だと考えられる。当システムは執務者一人一人に設定温度を変更できる選択権を与えて、温冷感に合わせて設定温度を変更させることにより、「室温を変更することができた」とする満足感を充足することが可能である。これにより、設定温度が高い条件であっても、環境選択権による満足感を充足するこ

とで、室内温熱環境への満足感が得られたと推測できる。これは実際の温湿度環境と同様に重要な要素である。

- 1) 当システムを使用した場合には、従来の運用方法と比較して基準設定温度よりも高い設定温度や低い設定温度の出現頻度が高かった。執務者の温冷感に応じて変化したためと考えられる。
- 2) 25.5℃を超えて 26.0℃以下の吸込温度時に、温冷感申告の発生率が低下した。この温度は快適に感じる温度に近く、執務者が快適と感じたために温冷感申告の発生率が低下したと考えられる。
- 3) 空調設定温度 26℃ で壁掛けリモコンにより設定温度変更とした従来の空調運用と比較して、当システムを使用した場合に空調消費電力量は 2.6kWh/day (2.4%)、設定温度を 28℃ として当システムを使用した場合には 17.7kWh/day (16%) の削減を実現した。

ただし、本報では温冷感・快適感等について温度のみを取り上げて論じたため、湿度や気流感について考慮しきれていない点は注意が必要である。

謝辞

本研究は、当ビル執務者の皆様には執務時間中にも関わらずアンケートにご協力いただいた。工学院大学野部教授と研究室学生の皆様方には調査分析のご助力をいただいた。村田製作所およびアズビルの関係者ならびに社内エコワーキングのメンバーにも貴重なご意見をいただいた。ここに記し、すべての方々に謝意を表す。

参考文献

- 1) 神谷 他, 在籍者の気持ちを理解する空調制御「温冷感リクエスト空調」, 建築設備士, 2018.10
- 2) アズビル株式会社, 「温冷感空調システム」パンフレット, <https://www.azbil.com/jp/product/building/document/catalog/AC-983.pdf>
- 3) 平野 他, 環境の質と負荷の削減を志向したオフィスビルの温熱環境 (第 1 報) 夏期の温熱環境に関する測定と執務者へのアンケート調査, 空気調和衛生工学会大会学術講演会 (長野), 2006.9
- 4) 三浦真由美 他, 実オフィスにおける室内環境と温熱快適性・満足度に関する研究 (その 2), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (札幌), 2019.9
- 5) 野部 他, 次世代空調システム実現に向けた「8つトライ」-8つのトライとヒューマンファクター, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (鹿児島), 2016.9