

博士学位論文

氏名(本籍)	花園 新太郎(兵庫県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲 第184号
学位授与年月日	令和6年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位論文題目	採涼採暖椅子の温熱快適性と アンビエント空調との協調に 関する研究
論文審査委員	主査 野部 達夫 教授
	副査 柳 宇 教授
	〃 富樫 英介 教授
	〃 中野 淳太 教授(法政大学)

工学院大学大学院

目次

1章 序論	1~13
1.1 研究の背景	1
1.2 既往のパーソナル空調	2
1.3 パーソナル空調の効果	6
1.3.1 ヒューマンファクターへの対応	6
1.3.2 消極的快適と積極的快適	7
1.3.3 Resilient cooling への対応	9
1.4 研究目的	9
1.5 各章の位置づけ	9
2章 要求性能に関する検討	14~24
2.1 はじめに	14
2.2 採涼採暖椅子のコンセプト	14
2.3 冷却機能の要求性能	16
2.4 加熱機能の要求性能	20
2.5 まとめ	22
3章 試作機における温熱環境調整能力の評価	25~42
3.1 はじめに	25
3.2 試作機の概要	25
3.3 冷却効果および加熱効果の定量化	27
3.3.1 人体到達風速	27
3.3.2 加熱による座面温度の変化	28
3.3.3 サーマルマネキンによる評価検証	29
3.3.4 被験者実験による温冷感評価	35
3.3.4.1 実験概要	35
3.3.4.2 実験結果	36
3.4 実地での試用評価	39
3.4.1 満足度	39
3.4.2 不快さ・心地よさ	39
3.4.3 要改善項目	39
3.4.4 採涼採暖椅子の要件	41
3.5 まとめ	41

4章 実用化	43~60
4.1 はじめに	43
4.2 実用化の課題整理	43
4.3 実用機の開発	44
4.3.1 各機の位置づけ	44
4.3.2 プロトタイプ機	45
4.3.3 実用初号機	46
4.3.4 実用二号機	49
4.4 実用二号機への変動風の実装	51
4.4.1 変動風のサンプリング	51
4.4.2 変動風の数理的な生成	55
4.4.3 被験者実験	57
4.4.4 1/f ゆらぎの実装	58
4.5 利用者からの反応	59
4.6 まとめ	60
5章 オフィスにおける実運用状況の解析	61~86
5.1 はじめに	61
5.2 分析対象	62
5.3 各拠点における運用状況	62
5.3.1 拠点 TM における運用状況	62
5.3.2 拠点 SP における運用状況	66
5.3.3 拠点 KZ における運用状況	68
5.4. 使用時の室内温湿度	71
5.5. 主観評価	75
5.5.1. 採涼採暖椅子利用者と一般椅子利用者の温冷感申告	75
5.5.2. 採涼採暖椅子の満足度	76
5.6 運用状況の整理	77
5.6.1 使用率	77
5.6.2 出力強度	77
5.7 環境条件の影響	79
5.7.1 室内空気温度	79
5.7.2 室内湿度	81
5.7.3 季節差	82
5.8 ヒューマンファクターによる影響	83
5.8.1 性差	83

5.8.2 個人差	84
5.9 まとめ	86
6章 運用状況の数理モデル化	87~94
6.1 はじめに	87
6.2 分布の検討	87
6.3 階層ベイズモデルによる統計解析	87
6.4 パラメータ推定	89
6.4.1 計算結果に基づくモデル選択	90
6.4.2 モデルの解釈	92
6.5 まとめ	94
7章 アンビエント空調との協調に基づくエネルギーシミュレーション	95~111
7.1 はじめに	95
7.2 使用状況のシミュレーション	95
7.3 再生可能エネルギーによる充電	99
7.3.1 採涼採暖椅子のエネルギー消費量	99
7.3.2 太陽光発電量の試算	101
7.3.3 電源自給の条件	101
7.4 アンビエント空調の最適化	103
7.5 まとめ	111
8章 総括	112~119
8.1 各章のまとめ	112
8.2 今後の展望	114
8.3 注記	119

1 章 序論

1.1 研究の背景

パーソナル空調は、個人に環境調整手段を付することで温熱的不満の解消を図るものであり、これまで様々な方式が研究開発されている。その嚆矢となるのは、1970年代の床吹き出し空調が挙げられる(図 1.1)。天井に比べて、人体により近い床面から吹き出すことから、パーソナル空調としての可能性に着目されて、多くの研究がなされた。例えば、Task Air Module (TAM)⁵⁾は、床に設置されたディフューザから各個人に温調空気を供給する。

その次に、床よりも人体に近い仕器が注目され、1980年代に机に温調機能を付したものが開発された。Personal Environment Module (PEM)⁶⁾および Climadesk⁷⁾(図 1.2)は、机に温調機能を搭載し、冷却時は床下チャンバーの温調空気を執務者に供給する。加熱時には、足元の電気ヒーターを加温する。Tsuzuki⁸⁾は、これら既存の3種類の非等温気流型のパーソナル空調について、サーマルマネキンを用いて等価温度を評価しており、3Kから9Kの温熱調整幅を有することを示した。Zhangら⁹⁾は、様々なパーソナル空調方式の温熱調整効果に関する報告を広くレビューし、それぞれの冷却機能により、-1Kから-6K、加熱機能により+2Kから+10Kの効果が発見されていることを整理した。

こうした冷却および加熱による物理的な効果以外に、パーソナル空調には、自らの行動によって環境調整を可能とすることで、心理的な効果である自己効力感の向上が期待できる。たとえば、Hawighorst および Schweiker ら¹⁰⁾は、執務者への10項目の質問調査から、温熱的な自己効力感の高低をグループ分けし、温冷感や、温熱的満足度、生理学的な影響の有無を分析した。その結果、温熱的自己効力感の高いグループは、低いグループに比べて、温熱的満足度が有意に高いことを示した。李ら¹¹⁾の研究によれば、等温気流吹き出し機能を搭載した机型のパーソナル空調を用いた被験者実験から、使用者による任意の風量調整が快適感を向上させることを示した。柳井ら¹²⁾は、実用オフィスにパーティションを利用したパーソナル空調を導入し、その利用状況を観察・分析したところ、多くの執務者が代謝量の変化に応じて自発的に風量調整をしており、任意の調整機能が不可欠であることを指摘している。これら既往研究によれば、パーソナル空調によって、執務者自身の自己裁量に基づいた積極的な環境調整を行うことで、自己効力感が向上し、結果的に温熱的な満足度も向上することを示す。

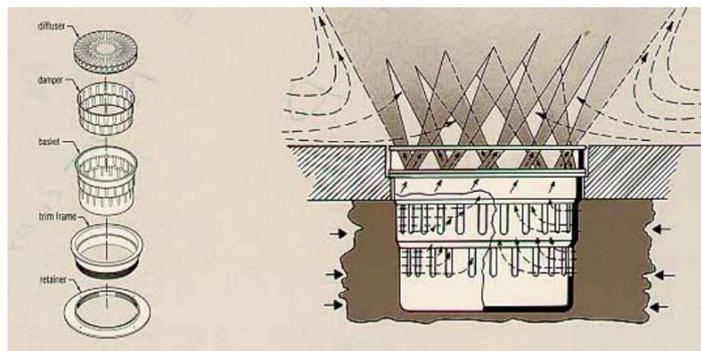


図 1.1 床吹出口 (KB-200 Floor Diffuser/Krantz)

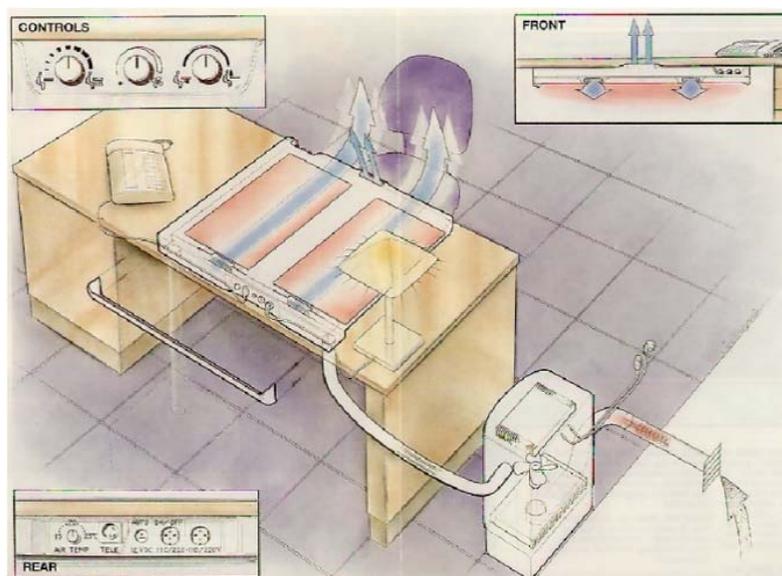


図 1.2 Climadesk (Mikroklimat)

1.2 既往のパーソナル空調

パーソナル空調には、種々の方式が提案されている。大別すると、床や天井等の建築に付帯させるものと、机や椅子、パーティション等の仕器を活用するものに分けられる(図 1.3)。

身体との距離が遠い側から見ていくと、最も遠い位置に天井から給気する方式が挙げられている。指向性の高いノズル型、もしくは、パンカールバー型の吹出し口を活用して、執務者に向けて温調空気を供する方式が多い(例えば、08/T-Personal Air, 18/読売新聞社ビル導入事例, 27/クールスポット等)。予め向きを調整する必要があるものの、温調された新鮮外気の供給が可能なシステムである。

中間距離には、床(15/パーソナル床吹出し口等)やパーティション(04/パーティションを利用したパーソナル空調等)、机(24/個別冷暖房付オフィスデスク等)を活用する例が挙げられており、

執務者が直接吹出し口の開閉や風向の調整が可能な方式である。空調空気の提供が可能かつ、個人の調整も容易となる利点を有したシステムである。

最も近い位置には、椅子を活用した例が挙げられる(12/クールチェア, 16/教室用空調椅子, 28/競技場用空調椅子等)。固定式の椅子であれば、空調空気の提供が可能で、最も人体に近いことから効果を即時に感じやすい利点を有している。個人の裁量に基づいた温冷感調整という観点では、操作しやすく、効果を感じやすいという利点を有しており、最大の長所といえる。

事務用椅子の場合、キャスターによる自由な移動が前提となる。そのため、空調空気を椅子から供給することは難しくなるが、実際の執務状況にパーソナル空調を適用することを考えれば、多くの執務者に理想的なパーソナル空調を提供するために最も適するツールとなりうる。

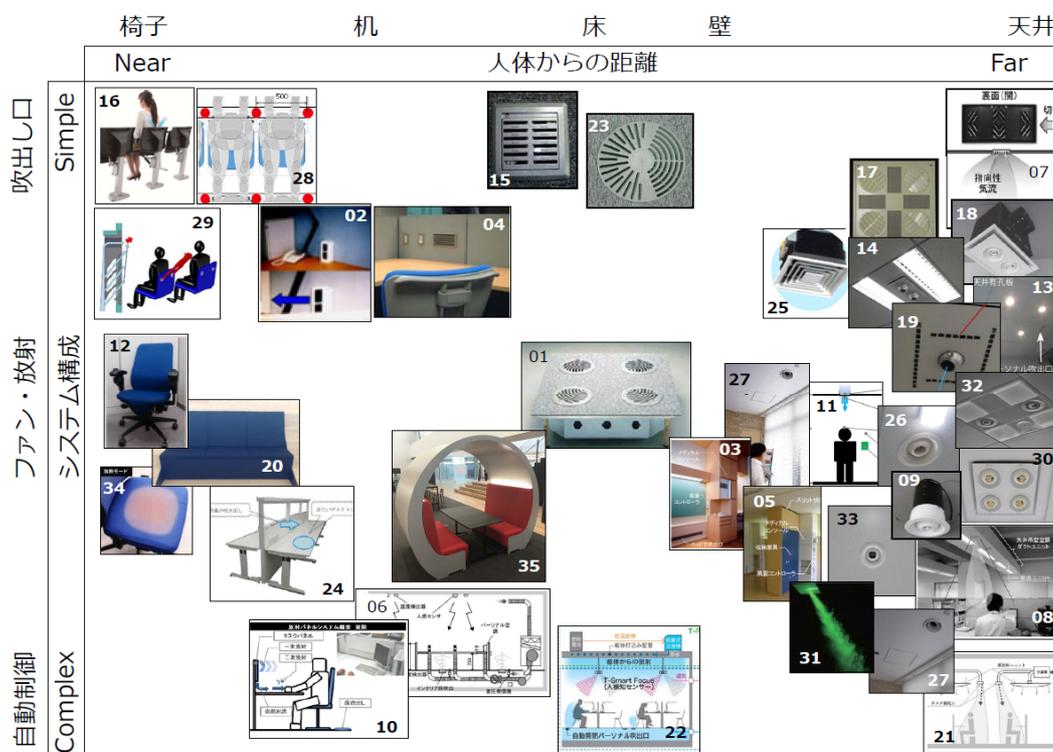


図 1.3 パーソナル空調事例⁵⁾

各方式を整理すると、表 1.1 の通りである。建築付帯型の利点として、空調空気を供給することで非等温気流を利用しやすいこと、電源供給が容易なことが挙げられる。一方で、パーソナル空調デバイスの配置と執務者の座席配置が必ずしも一致せず、パーソナル空調の効果が低減しうること、執務者とデバイス間の距離が遠くなりがちで調整操作がしにくいことといった難点がある。

表 1.1 パーソナル空調各方式の特徴

		建築設備との接続	効果の感じ易さ	調整操作のし易さ
建築付帯型	天井	○	△	×
	床	○	△	△
什器設置型	机	△	○	○
	パーティション	△	○	○
	固定式椅子	△	●	●
	事務用椅子	×	●	●

【凡例】 ×：不可能，△：難しい，○：容易，●最も容易

什器設置型の内、パーティションや机等を利用する方式では、建築設備と接続させて、非等温気流を供給する、もしくは、冷温水を送水して放射伝熱、熱伝導を活用する方式が見られる。建築付帯型に比べれば、執務者とデバイスとの距離が近いため、効果を感じやすく、調整操作しやすい。とはいえ、気流、放射、伝導いずれの方式においても、デバイスと正対する身体前面のみに効果を及ぼす。椅子と接する背面および座面は、身体と環境間の熱抵抗になるが、そこからの放熱を調整することは難しい。

その点、椅子を利用する方式は、身体の前面・裏面共に効果を及ぼしやすく、距離が近いことから調整操作も行いやすい。パーソナル空調による積極的な快適性の獲得には、温冷感の調整操作を容易に行えることが必要で、かつ操作の効果を即時に体感できることが望まれることから、什器設置型の内、椅子が理に適うものと考えられる。反面、事務用椅子の場合は、他の方式に比べて、空調空気の供給および電源供給が困難である。

これまで、椅子設置型のパーソナル空調の代表的なものとして、国内ではクールチェア⁶⁾、国外では Hyper chair⁷⁾が研究されてきた。クールチェアは、等温気流により身体と環境間の熱抵抗を下げるもので、サーマルマネキンにより等価温度を評価したところ、最大 1.5°C の冷却効果を得ることができるとのことである。なお、加熱機能は搭載しない。Hyper chair は、座面と背面にファンとヒーターを配したもので、冷却には等温気流を用いて、加熱には接触加熱を用いる。

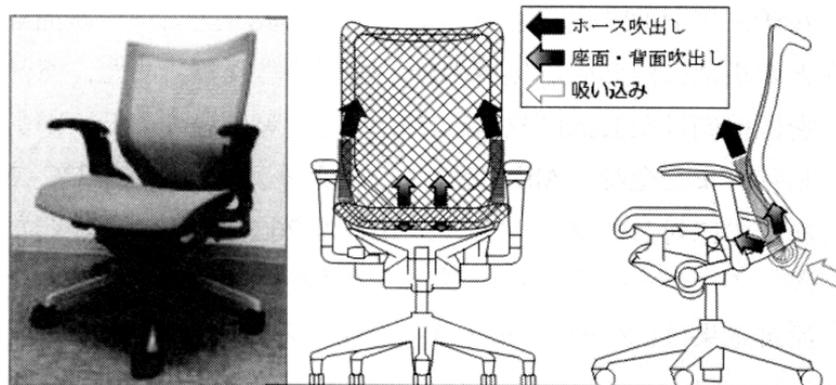


図 1.4 クールチェア (B型 ; ボルトオン型)



図 1.5 Hyper chair

これらは積極的に研究されてきたものの、実用化には至っていない。背景には、電装部品を事務用椅子に組み込むことを、什器業界が容易に受け入れないことがあると思われる。一般的な事務用椅子に比べて、コストが高く、製造、保証、保守の面で相当な煩雑さを伴うためである。パーソナル空調を実用化して、普及を図ることは、至適温熱環境の提供と省エネルギーの観点から急務といえる。

1.3 パーソナル空調の効果

1.3.1 ヒューマンファクターへの対応

このように様々なパーソナル空調が開発される中で、その効果について多くの研究がなされている。例えば、ヒューマンファクターへの対応がその一つである。

建築環境におけるヒューマンファクターとは、人の温冷感に影響を及ぼす人体側の着衣量や代謝量、個人の温熱履歴等を指す。ヒューマンファクターのポジティブな面として、人体外側の温熱環境が快適とされる範囲を逸脱したとしても、人が着衣量や適応行動をとるような調整を行うことで、不満の発生が抑制される可能性がある。逆に、ネガティブな面として、人体の外側の温熱環境を一定の環境に制御した場合にも、着衣量の調整や適応行動を取れないような場合には、不満足が表明されうる。

図 1.6 にヒューマンファクターの代表的な指標である着衣量および代謝量と不満足率(PPD)の関係を示す。図 a より、着衣量を増加させると、人体と環境間の熱抵抗が増すことになるため、産熱と放熱の収支が釣り合う熱的中立温度は低温側に推移する。0.4clo での熱的中立温度は 28°C、1.0clo では 24°C を示しており、4°C の幅がある。図 b より、代謝量が高じると熱的中立温度は低下する。

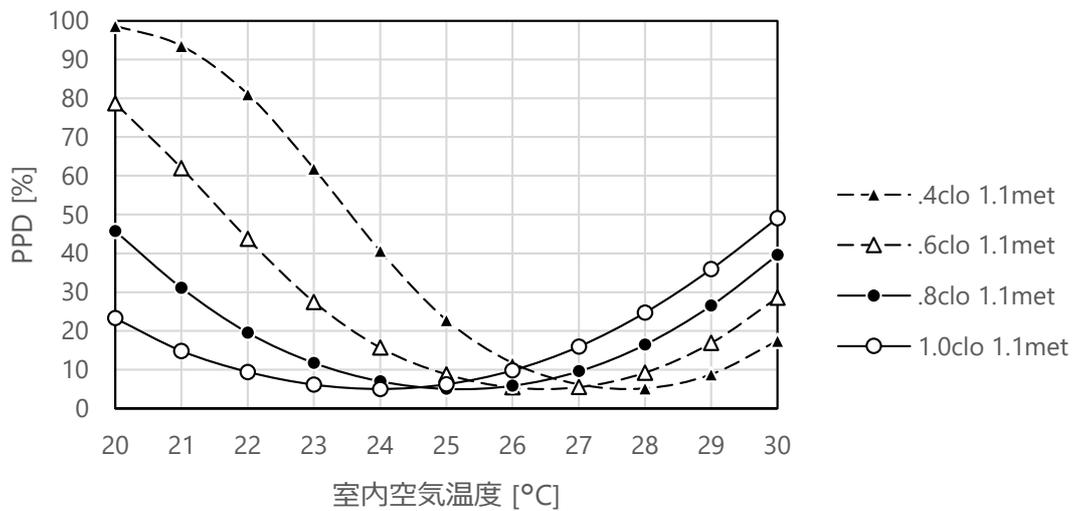
ここで、鵜飼¹⁾の研究を参照すると、男女により傾向が異なるものの、着衣量は 0.4clo から 1.0clo の値をとり、代謝量は 0.8met から 1.5met の値をとることを示している。このように、通常の執務空間において、着衣量および代謝量が一律に同じ値を取ることはないため、熱的中立温度は個人によって異なる。また、クールビズを励行しても、着衣量の下限值には限界があり、会社によっては、服装に制限が加わる場合も十分想定される。そのため、各個人の適応行動による温冷感の調整が重要になる。

熱的適応(thermal adaptation)について、Brager と de Dear²⁾は、以下の分類を提案している。

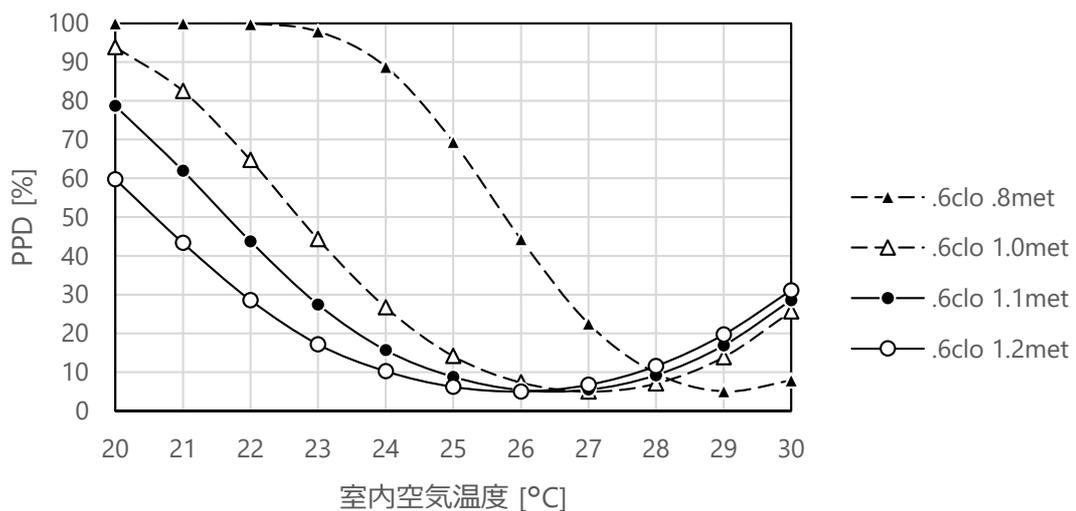
1. 行動性適応：着衣の調節、環境調整具の使用等の行動を伴うもののこと。
2. 生理的適応：季節に応じた順化等、生理的な体温調節機能の気候順化のこと。
3. 心理的適応：温熱環境に対する期待を緩和するような、心情の変化のこと。

これらの適応によって、温熱 6 要素(温度、湿度、放射、気流、代謝量、着衣量)から求められる熱的中立環境と異なる温熱環境を受け入れることができるとされる。ただし、3 分類の内、最も影響の大きい行動性適応が行われる前提である。温熱環境の調整機会が制限されている場合には、熱的適応は期待できない。

これらのヒューマンファクターに対応するには、各個人に温冷感の調整手段を与えるパーソナル空調の適用が有効とされる。その理由として、各個人の着衣量および代謝量が異なる場合にも、各自が温冷感を調整可能なことから、悉く執務者が熱的中立状態を獲得可能であることが挙げられる。また、行動性適応の手段を供することになるため、熱的適応を生じさせることが期待でき、アンビエント空間の温熱環境の期待を下げて、空調の基準を緩和させうる。



a) 着衣量を変化させた時



b) 代謝量を変化させた時

図 1.6 各着衣量および代謝量の条件下における PPD

1.3.2 積極的快適性の獲得

温熱快適は、消極的快適と積極的快適に分類できる。この内、積極的快適を実現するには、個人裁量による環境選択が必要であり、パーソナル空調がその一助になりうる。このことは、図 1.7 に示す久野の二次元モデル³⁾によって説明できる。この図の縦軸は周囲温度を表し、横軸は身体の熱さ・冷たさの状態を表す。四象限に大別でき、第一象限は、身体が熱く、周囲温度が高い状態を指す。第二象限は、身体が冷たく、周囲温度が高い状態である。第三象限は、身体が冷たく、周囲温度が低い状態、第四象限は、身体が熱く、周囲温度が低い状態を示す。第一象限では「暑」

く、第二象限は「暖」かく、第三象限は「寒」く、第四象限は「涼」しく感じる。

人体が生理的な定常状態のときの温冷感は、寒暑を結ぶ対角線上にある。周囲温度と身体の熱さ・冷たさの状態が原点付近に位置する時、「暑くも寒くもない」熱的中立状態となる。これを消極的な快適という。

温熱生理的な過渡状態(非定常状態)を考えると、例えば夏期の屋外から屋内への移動は、第一象限(身体は熱く、周囲温度が高い状態)から、第四象限(身体は熱く、周囲温度は低い状態)に移ることになる。このように、不快(寒・暑)な状態から快適(涼・暖)な状態に遷移する際に、積極的な快適(Pleasantness)を得ることができるとされる。究極の Pleasantness は、原点から離れた左上、もしくは右下に存在し、一般的な熱的中立から外れることになる。

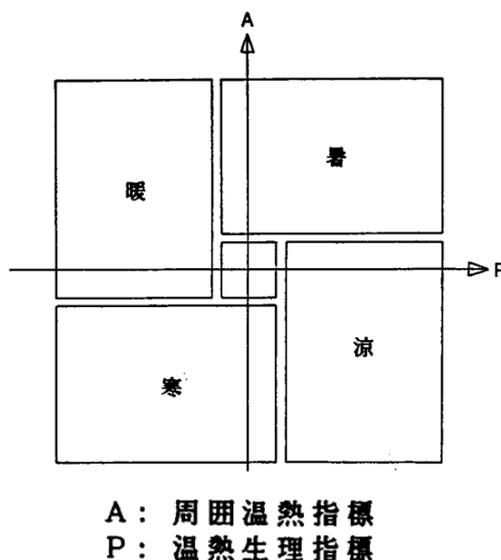


図 1.7 温冷感の二次元モデル (久野)

de Dear³⁾は、Alliesthesia を用いて、積極的な快適性を説明する。Alliesthesia とは、Cabanac が提唱した理論であり、同一の刺激であっても、その人の内的状態によって、快感・不快感のどちらをも惹起しうる心理生理的反応のことである。不快な状態を解消するような刺激を快感に思ふ性質のことを指す。温熱環境で言えば、暑いと感じる場合には、熱的中立を超えてより涼しい状態を、寒いと感じる場合には、より暖かい状態を求める。この要求が満たされるとき、Pleasantness が得られる。

パーソナル空調は、個人裁量に基づいて使用されるものであり、各人の求めに応じて涼暖を得ることができる。そのため、積極的な快適性の獲得に寄与する。

1.3.3 Resilient cooling への対応

気候変動に起因する熱波や停電の対策として、Resilient cooling⁴⁾なる考えがある。緊急事態

に対する吸収能力(事象の影響を最小限に抑制する能力), 適応能力(望ましくない状況を調整する能力), 修復能力(平時の性能に戻る能力), 回復速度(回復プロセスの速さ)を高めることが重要とされる。この内, パーソナル空調は, 熱波到来時の適応能力の向上に期待されている。

1.4 研究目的

上記の通り, パーソナル空調の効果を訴求した既往研究は数多くあるものの, 実用化した例は少ない。そのため, 実建物に適用された例も少なく, パーソナル空調の使用状況やエネルギー消費量の実態には, 不明な点が多い。

そこで, 本研究では, 事務用椅子にパーソナル空調機能を付加した「採涼採暖椅子」を提案し, その実用化を行う。実用化した採涼採暖椅子を実建物に適用して, 運用及びエネルギー消費量の実態を計測して, その効果を評価することを目的とする。

1.5 各章の位置づけ

図 1.8 に本論の構成を示す。

第 1 章 序論

研究の背景と各章の位置づけを示した。空調により温熱環境をいくら精緻に制御しても, 各個人の温冷感は, ヒューマンファクターが影響を及ぼすことから, 一様とならない。各個人に最適な温熱環境を実現するには, 各自で温冷感を調節可能なパーソナル空調が有効であり, これまで数多くの研究がなされてきた。設置形態として, 建築付帯型と什器設置型に分けられるが, 本論文では, 事務用椅子に着目して, パーソナル空調の実装を試みた。これは, 身体に最も近接した什器であることから, 操作が容易であり, 効果を即時に体感し易いためである。椅子設置型には, これらの利点があるものの, 実用化された例はほとんどなく, 実建物に適用した場合の運用実態やエネルギー消費量は不明である。こうした背景を元に, 本研究の目的と位置づけを整理した。

第 2 章 要求性能に関する検討

本章において, パーソナル空調機能を付加した事務用椅子「採涼採暖椅子」のコンセプトを示し, 要求性能を整理した。電池駆動を前提とするため, 冷却機能には等温気流, 加熱機能には座面内のヒーターによる加温を用いることとした。冷却モード時において, 既往研究を参考に, 身体近傍の風速と SET* の関係を整理し, -1°C の調整効果を得るには, 胸および上腕の近傍風速を 0.7m/s に促進して, 対流熱伝達率を $1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 向上させることが必要であることを示した。加熱モードにおいては, 座面との接触部(約 0.03m^2 , 全身の 2%)の放熱をなくすことで, 他の部分の皮膚温が 0.2°C 程度上昇し, 全身の SET* は 1°C 上がることを示した。

第3章 試作機における温熱環境調整能力の評価

前章において述べた要求性能を満たすべく、採涼採暖椅子を試作して、冷却モードおよび加熱モードにおける物理的な熱性能および被験者実験による心理的な効果について検証した。その結果、冷却モード時の送風により身体近傍の風速が 0.7m/s を計測した。加熱モードでは、加熱開始から 5 分程度で 34°C に達して、体表面温度以上となった。サーマルマネキンの計測により、人体外表面における総合熱伝達率を計測すると、冷却モード時には、 $1.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 向上し、加熱モード時では、 $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 抑制することを示した。これは、等価温度で $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の効果であり、既往研究で示された目安を満たした。

被験者実験では、冷房環境下(28°C)および暖房環境下(20°C)において、自由に採涼採暖椅子を使用した際の温冷感(TSV)を申告させた。その結果、冷却モードにより TSV が 0.7 ポイント涼しい側に、加熱モードによって TSV が 0.8 ポイント暖かい側に推移した。

第4章 実用化

本章では、研究段階における試作機のプロトタイプ機から、準実用機となる実用初号機、実用機となる実用二号機と仕様を改訂したプロセスを示し、採涼採暖椅子の実用化に際して直面した課題を整理し、その対策を述べた。その後、実用二号機への変動風機能を実装した。風を含めた自然現象はゆらぎを有しており、快適性の向上に寄与していることから、更なる機能向上を意図して、数式により $1/f$ ゆらぎを生成し、変動風モードとして試験的に実装した。

課題として、座り心地、使い勝手、安全性、耐久性、製造性、保守の観点を挙げた。解決策として、座り心地の観点で言えば、座面をウレタンとしながら、座面内部に通気素材を挿入することで座面の熱抵抗を低下させることで採涼採暖機能との両立を図った。使い勝手の向上のために、座面内に着座センサを配して、離着席時に自動停止・自動復旧させるようにした。安全性のために、ヒーターの安全回路を設け、耐久性の確保のために、各部とも簡単には壊れない構造とした。製造性のために、すべての採涼採暖機能を座面に集約することで解決した。保守の面では、部品交換が容易となるようにした。機能向上のための変動風の実装により、4名の限られた調査ではあるが好評を得た。

第5章 オフィスにおける実運用状況の解析

ここでは、採涼採暖椅子を適用した実用事務所 3 拠点における採涼採暖椅子の使用状況と温熱環境の観測データを用いて、執務者の温熱的要求に及ぼす環境因子および個人差の影響を把握した。その結果、採涼採暖椅子の使用は、こまめに発停が繰り返されることはあまりなく、使用するか否かの悉無律が存することを示した。使用率は、室内気温に応じて変化しており、冷却モードおよび加熱モード共に熱的中立状態(22°C 乃至 24°C)で使用される割合が高くなることから、中立状態においても、より涼しい状態もしくは暖かい状態を好む傾向を示した。夏には冷却モードがより使用され、冬には加熱モードがより使用されたことから、季節によって好まれるモードが変化することを示した。冷却モードの使用確率は、各個人で異なる閾値を超えると高じる

傾向を示し、加熱モードの使用確率は、個人内の変化に応じて高じる傾向を示した。

第6章 運用状況の数理モデル化

本章では、前章でも用いた運用データを元に、統計モデルを用いて、採涼採暖椅子の使用状況を表した。統計モデルには、階層ベイズモデルを用いて、使用するか否かの2値を従属変数としたベルヌーイ分布に従うものとした。説明変数には、室内気温、季節、個人差を採用して、これらの線形結合をロジスティック関数で変換して用いた。その結果、予測値が観測値に概ね一致することを示した。この数理モデルによって、採涼採暖椅子の使用状況に顕れる温熱環境条件および個人差の影響を把握した。

第7章 アンビエント空調との協調に基づくエネルギーシミュレーション

前章で導いた数理モデルを用いて、採涼採暖椅子とアンビエント空調のエネルギーシミュレーションを行った。その結果、採涼採暖椅子自体のエネルギー消費量は、年間一人当たり100MJ程度とわずかであることを確認し、太陽光発電の容量が一人当たり20W程度あれば、再生可能エネルギーのみで運用することが可能であることを示した。アンビエント空調を含めたエネルギー消費量は、標準的な運用下(夏期26°C/冬期22°C)では、一次エネルギー消費量は、夏期1,650MJ/人、冬期1,353MJ/人となると試算した。採涼採暖椅子の適用によって、夏期は+1°C、冬期は-1°Cとしても不満足率が悪化することなく、夏期は-78MJ/人(-5%)、冬期は-71MJ/人(-5%)の省エネルギー効果を発揮しうると試算した。

第8章 総括

本章では、これまで述べた採涼採暖椅子の実用化に際して直面した課題と解決策、および実用時の効果について、総括として示した。マズローの欲求階層によれば、最上位の自己実現欲求を満足させるには、自己の能力を十分発揮して自己のなりたい姿を具現化できることが必要とすることである。各個人の自己裁量によって自らの温熱環境を獲得する行為は、温熱環境における自己実現欲求に応えるものであり、より高次元の満足を実現するものである。採涼採暖椅子の適用によって、温熱快適性を向上させ、エネルギー消費量も抑制可能となることを示すことができたと考えられる。

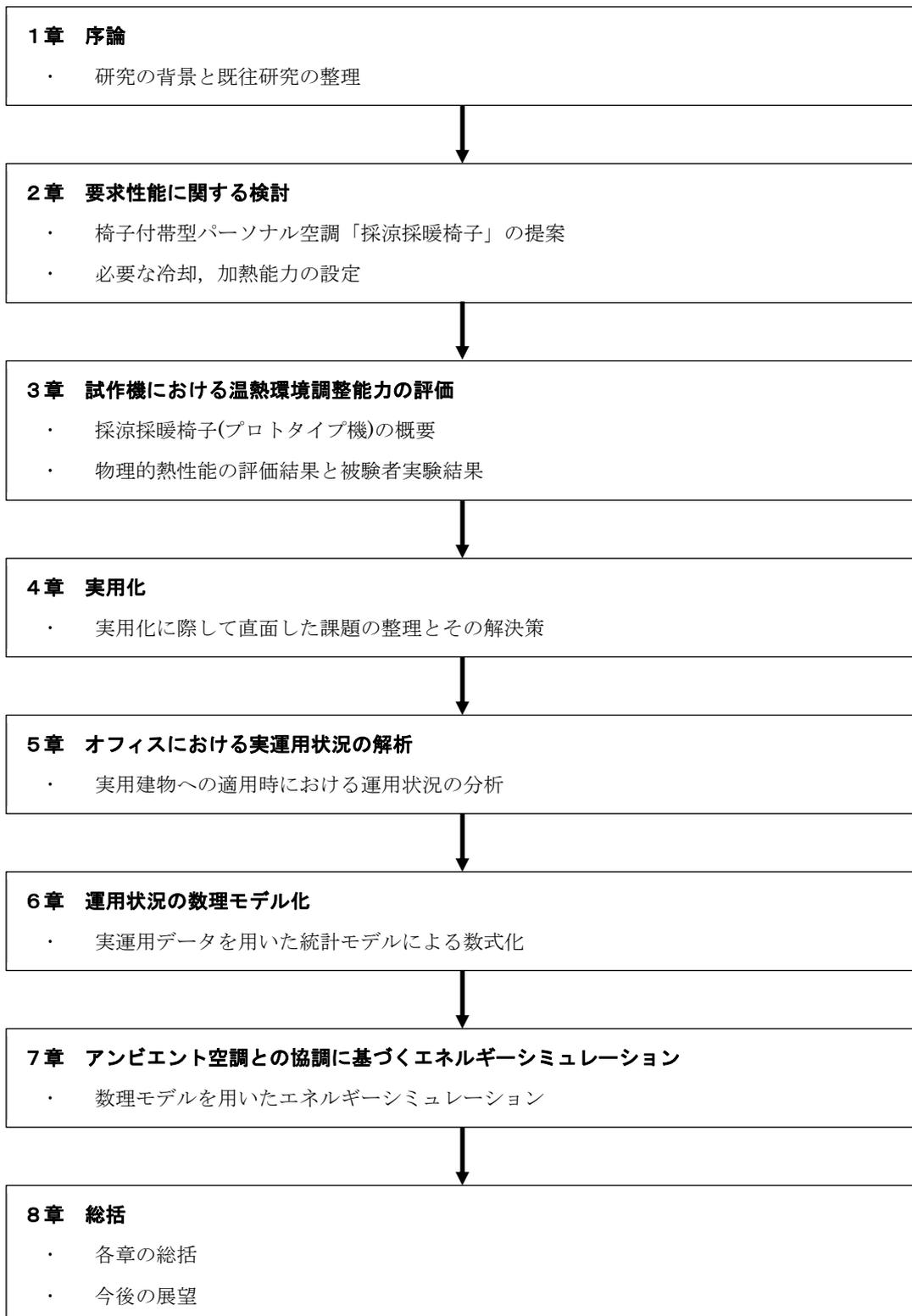


図 1.8 本論の構成

参考文献

- 1) Masanari Ukai, Tatsuo Nobe : Required temperature distribution based on clothing insulation and metabolic rate survey in Japan, Indoor and Built Env., Volume 29, Issue 6(2019), pp.775-782 , <https://doi.org/10.1177/1420326X19870232>
- 2) G. S. Brager, R. de Dear : Thermal adaptation in the built environment: a literature review, Energy and Build. 27(1998), pp.83-96,
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)
- 3) 久野 覚, 大野 秀夫, 中原 信生 : 非定常時の温冷感を表現する拡張二次元モデル, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 (1987), pp.561-564,
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.1987.0_561
- 4) R. de Dear: Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia, Build. Research & Info., Vol.39, Issue 2(2011), pp.108-117
- 5) Chen Zhang et al. : Resilient cooling strategies – A critical review and qualitative assessment, Energy and Build., vol.251(2021),
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>
- 6) パーソナル空調から考えるカーボンニュートラル時代の居住域環境のあり方(空気調和・衛生工学会編), 2023/03
- 7) 鵜飼 真成, 村松 一貴, 野部 達夫 : 等温気流発生装置を具備した事務椅子の冷却効果, 空気調和・衛生工学会論文集, 40 巻 223 号, pp.37-44(2015),
https://doi.org/10.18948/shase.40.223_37
- 8) 環境のヒューマンファクターデザイン –健康で快適な次世代省エネ建築へ(日本建築学会編), 2020/09

2章 要求性能に関する検討

2.1 はじめに

多数が執務するオフィスでは、各自の着衣量と代謝量、温熱環境の履歴が異なることから、最適な温熱環境条件が一意に決定されない。そのため、各自に温熱環境の調整手段を付することが理想である。

執務者の温熱的不満、および、その発生要因を調査した事例は複数ある。Brager¹⁾らは、実際の不満足率は、予想不満足率に比べて高いこと、温熱生理的な中立温度が必ずしも好まれないことを示した。Parkinson および de Dear²⁾らは、至適温度が異なる複数人が、一空間に共存することによる空調設定のジレンマを指摘した。鶴飼ら³⁾は、オストラコンなる調査手法を用いた分析により、実環境における温熱的不満の表出要因として、熱的な履歴を挙げた。これらから、室内全体の温熱環境を精緻に調整しても、各個人の至適温度は異なるため、すべての温熱的不満を解消できないことが指摘されている。

こうした背景の下、個人に環境調整手段を供することで、温熱的不満の解消を図るパーソナル空調について、様々な方式が研究開発されている。調整操作がし易く、効果を体感し易いことから、身体に近い什器を利用するものが注目されている。例えば、Task Air Module (TAM)⁴⁾は、床に設置されたディフューザから、各個人に温調空気を供給する。Personal Environment Module (PEM)⁵⁾および Climadesk⁶⁾は、机に温調機能を搭載し、床下チャンバーの温調空気を執務者に供給する。事務用椅子にパーソナル空調の機能を付したものとして、クールチェア⁷⁾および Hyper chair⁸⁾が研究されている。

このように、什器設置型のパーソナル空調について活発に研究されているものの、汎用製品として市場に流通する製品はほとんどない。筆者は、パーソナル空調には、最も身体に近接する事務用椅子を活用することが、使用者が調整操作を行い易く、かつ効果を体感し易いという観点から、最適であると考えており、この実用化が急務と捉えている。

事務用椅子にパーソナル空調機能を追加する上で、デザイン性、製造性、座り心地、コスト、電池駆動への対応、使い勝手の課題が挙げられる。まず、これら課題を解決する、事務用椅子型のパーソナル空調のコンセプトを定めて、これを採涼採暖椅子と名付けた。

本章では、この採涼採暖椅子のコンセプトを示し、実用化する上で求められる冷却機能および加熱機能の能力を整理した。

2.2 採涼採暖椅子のコンセプト

表 2.1 に、採涼採暖椅子のコンセプトを示す。実用化の課題の一つであるデザインの面でいえば、什器メーカーの意見として、背面にデザインの特徴が顕れるため、機械類が背面に見えることは望ましくないとされた。そこで、空調機能を供する機械は、座面に集約配置することとした。座面の素材については、当初はクールチェアの研究を参照して、メッシュ素材とすることが冷却効果の最大化の観点から理想的であると考えた。しかしながら、什器メーカー曰くメッシュ素材の座り心地はウレタン素材に比べて劣るとのことから、椅子の基本性能として確保すべき座り

心地座面を優先して、ウレタン素材とした。製造性を確保しつつ、コストを抑制するため、座面と脚部を分離できる一般製品をベースにして、座面の一部を改造することでパーソナル空調を追加することとした。

事務用椅子に電源を常時接続することは、コードの断線が起りえることから非現実的であるため、電池駆動が必須となる。そこで、冷却機能には等温気流を用いて、加熱機能には座面の加温を用いることで、小出力として電池駆動が可能となるようにした。

離着席の度に装置を発停させる煩わしさを解消して、使い勝手を良化させるために、装置の動作を着座センサと連動させた。離席時には自動停止して、再度着席した際は、離席前の状態に自動復帰する。

表 2.1 採涼採暖椅子のコンセプト

対応課題	コンセプト
デザイン性、製造性	座面に空調機能を集約する。
座り心地	ウレタン素材の座面。
コスト	既製品の座面のみを改造する。
電池駆動への対応	冷却機能には等温気流・加熱機能には座面の加温を用いる。
使い勝手	着座センサーにより離席時には自動停止・復帰時には自動復帰する。

ここで、上記のコンセプト・制約を元に目標性能を考える。Zhang の既往研究⁹⁾によれば、椅子に等温気流装置を付加した方式について、サーマルマネキンにより等価温度 (Equivalent Homogeneous Temperature; EHT) をレビューしたところ、約 -1°C の効果を示したとある。

Zhang は同論文⁹⁾において、サーマルマネキンによる EHT の効果は、被験者実験から推定される温度調整能力 (Corrective Power; CP) より小となることを指摘している。例えば、PCS Chair による被験者実験の結果とサーマルマネキンによる評価結果を比較すると、被験者実験では -4°C (Pasut¹⁸⁾、サーマルマネキンでは -2°C (Luo¹⁷⁾ の効果を示した。これは、部位別温冷感の影響および蒸発潜熱の影響が挙げられる。そのため、実際の温冷感に与える影響は、サーマルマネキンによる等価温度の約 2 倍から数倍になるといえる。

以上を踏まえて、採涼採暖椅子の冷却能力の目標値は、Zheng⁹⁾のレビューを目安に、サーマルマネキンによる評価で -1°C とすることとした。これは、実際の温冷感でいえば、 -2°C 以上の効果を示すものと考えられる。

加熱については、椅子の座面と背面の両方を加熱する PCS Chair を見ると、サーマルマネキンによる等価温度は $+1.3^{\circ}\text{C}$ とのことである (Luo¹⁷⁾。本研究では、同性能を確保することを目指して、目標値を $+1^{\circ}\text{C}$ とした。

2.3 冷却機能の要件整理

冷却機能には、充電機駆動の実現を可能とすべく、低出力で動作可能な等温気流を用いる。ここで、等温気流による対流促進に伴う人体の冷却効果を試算する。着衣外表面から環境との間の各対流熱伝達率における SET*および顕熱放熱量、潜熱放熱量を計算した結果を図 2.1 に示す。計算条件は、気温 26°C、相対湿度 50%、着衣量 0.6clo.、代謝量 1.1met.とした。対流熱伝達率の向上により、顕熱放熱量と潜熱放熱量の合計は 59 W/m²で概ね一定であるが、潜熱の割合が減少して、顕熱の割合が増加する。同時に、表面血流が減じて、体表面温度が下がることから、SET*も低下する。

SET*の低下幅を見ると、対流熱伝達率 3W/(m²K)の時に 26.4°C を示し、4W/(m²K)の時に 25.3°C、5W/(m²K)の時に 24.5°C を示すことから、対流熱伝達率が 1W/(m²K)向上すると SET*は 1.1°C 低下し、2W/(m²K)向上すると 1.9°C 低下する。ここに、様々なパーソナル空調方式の温熱調整効果に関する報告を整理した Zhang らによるレビュー⁹⁾を参照すると、既存のパーソナル空調の CP(Corrective Power)なる環境調整能力を整理しており、サーマルマネキンによる評価結果を見ると、等温気流によって-1K 前後の冷却能力を発揮する事例が多い。これを踏まえると、パーソナル空調による冷却能力は-1°C 以上必要であり、その効果を得るには、全身の対流熱伝達率を約 1 W/(m²K)向上させることが必要といえる。

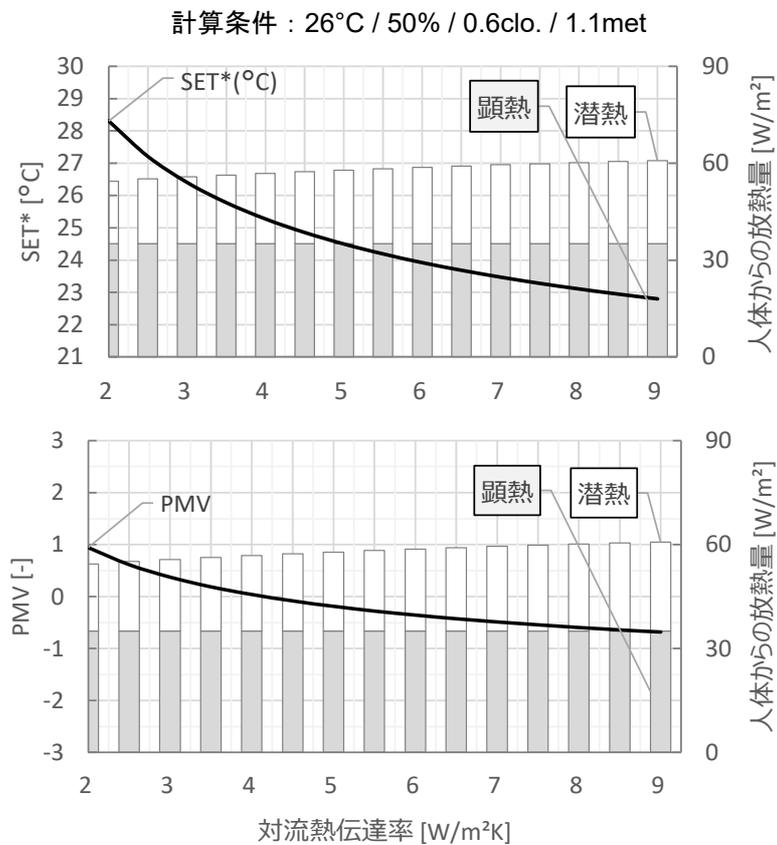


図 2.1 対流熱伝達率と SET*・PMV

次に、図 2.2 に対流熱伝達率と PMV と PPD の関係を示す。PPD は、対流熱伝達率 $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ で 5% と最低となり、SET* は 25.3°C を示す。 $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以下では、暑い側の不満が高じて PPD が増加し、 $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 以上では、寒い側の不満が高じて PPD が増加する。このことから、対流熱伝達率を各自の至適状態となるように調整することによって、熱的な不満が減じ、快適感が向上することがわかる。

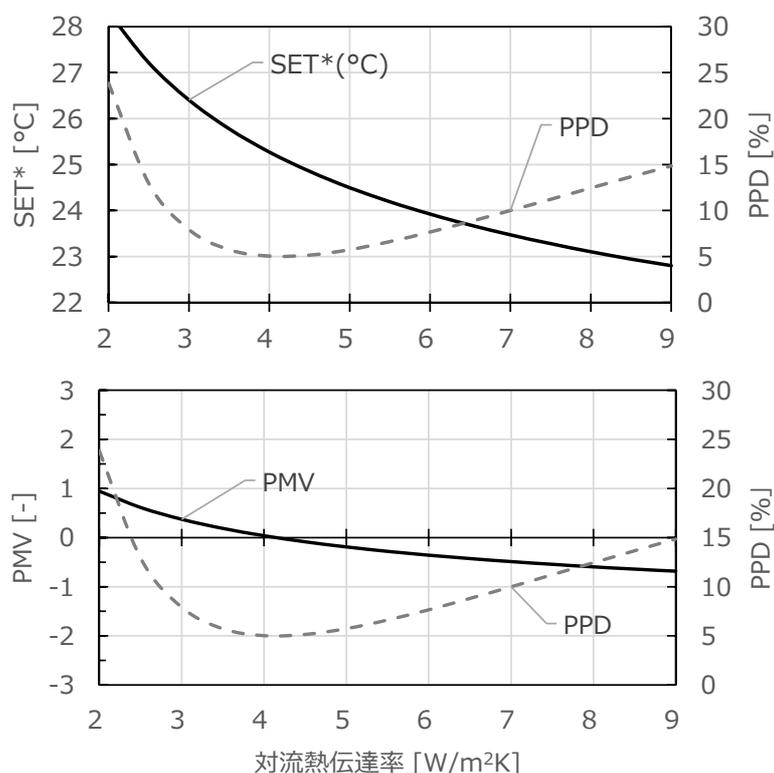


図 2.2 対流熱伝達率と SET*・PPD および PMV

対流熱伝達率は、人体近傍の風速で説明することができる。古くは Seppanen¹⁰が立位姿勢における全身での風速と対流熱伝達率の関係を整理し、下式(2.1)を提案している。他に、石垣および堀越¹¹は、同様の式を用いて、座位姿勢の関係を明らかにしている。

$$h_c = \alpha V^\beta \dots (2.1)$$

ここに、

h_c	: 対流熱伝達率	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
V	: 風速	$[\text{m}/\text{s}]$
α	: 係数 (14.8)	$[-]$
β	: 係数 (0.69)	$[-]$

人体の部位別の対流熱伝達率については、Nishi および Gagge¹²が人体発熱による自然対流条件下（風速 $0.15 \sim 0.20 \text{ m}/\text{s}$ ）における実験を基に整理している。強制対流条件下については、市原¹³がサーマルマネキンを用いた実験により、立位と座位共に整理している。表 2.2 に座位姿

勢の係数 (α および β) と体表面積を示す。

表 2.2 各部位の係数 (市原)

Body Parts	coefficient		area [m ²]	Body Parts	Constant		area [m ²]
	α	β			α	β	
head	13.0	1.10	0.12	waist	-	-	0.13
chest	21.0	0.55	0.12	hand	8.4	0.25	0.06
upper arm	16.0	0.52	0.10	thigh	9.9	0.32	0.23
back	17.0	0.44	0.13	leg	7.1	0.13	0.25
abdomen	12.0	0.36	0.09	foot	5.2	0.15	0.11
forearm	13.0	0.38	0.10	whole body	12.1	0.40	1.44

この知見を基に、表 2.3 に示す自然対流条件および上半身の気流促進を想定した強制対流条件における各部位の対流熱伝達率を計算した。その結果を図 2.3 に示す。自然対流時では、既往研究¹²⁾を参考に、全身の風速を 0.15m/s として計算した。強制対流時には、条件 1 では胸と上腕、条件 2 では胸、上腕、背中中の風速を 0.7m/s として計算した。これは、ASHRAE Standard 55-2020 に示されるドラフトの目安を超える値であるものの、自ら調整できることから、不快感を引き起こさないものとする。なお、図 2.3 に示す全身 (whole body) の対流熱伝達率は、各部位 (head から foot) の熱伝達率を表面積により加重平均して計算した値をプロットしている。

表 2.3 対流熱伝達率の計算条件

自然対流	強制対流(条件1)	強制対流(条件2)
全身の風速 0.15m/s	胸、上腕の風速 0.7m/s	胸、背中、上腕の風速 0.7m/s

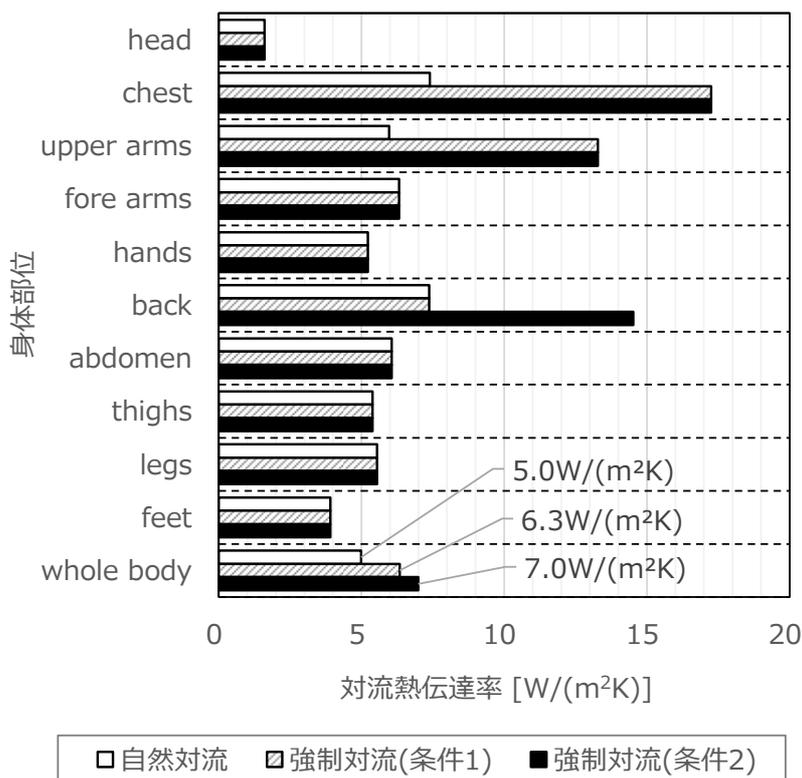


図 2.3 各身体部位の風速と対流熱伝達率の関係

上半身を想定した理由は、太腿や下腿に比べて汗腺密度が高く¹⁴⁾、全体表面に占める面積の広い胸部(9%)と背中(9%)、クールビズ相当の着衣条件時に体表面上に直接気流を到達させることが可能な上腕と腋の放熱を促進することが、温冷感調整に有効と考えるためである。

図 2.3 より、自然対流時の対流熱伝達率は、頭を除く各部位で、3.9 から 7.4W/(m²K)を示し、全身では、5.0W/(m²K)を示す。強制対流の条件 1 の対流熱伝達率は、胸で 14.3W/(m²K)、上腕で 11.2W/(m²K)を示す。全身では、6.3W/(m²K)となり、1.3W/(m²K)高い値である。強制対流の条件 2 では、背中での対流熱伝達率が、12.5W/(m²K)に高じるため、全身で 7.0W/(m²K)となる。これは、自然対流時に比べて、2.5W/(m²K)高い値である。以上より、パーソナル空調により-1°C以上の冷却効果を得るためには、対流熱伝達率を 1W/(m²K)以上高める必要があることから、胸と上腕に 0.7m/s 以上の等温気流を供する必要がある。

2.4 加熱機能の要件整理

加熱機能については、接触部である座面を加熱する方式が、温風を吹出す方式に比べて、対流による顕熱及び潜熱の放熱の増加が生じないことから、投入エネルギーを有効に活用可能な点で有利と考える。

座面を局所的に加熱する場合でも、温感は全身に及ぶと考えられる。例えば、温湿度が 22°C 、50%の状況で、代謝量 1.1met. 、着衣量 0.6clo. 、全身の対流熱伝達率が $4\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ の場合、皮膚温は 32.6°C となる。この状態で、外部から人体を加熱すると、熱収支を並行させるために、皮膚表面の血流が増加して皮膚温度が上昇する。ここで、図 2.4 に加熱量と皮膚温度の関係を示す。4W 加熱すると皮膚温度が 0.5°C 上がり、7W で 1.0°C 上昇する。座面の加熱により、臀部や大腿部からの放熱が減ずることで、その他の部位からの放熱を促進させるべく血流量が増加し、結果的に全身の皮膚温が上昇するためである。

ここで、図 2.5 に皮膚温度と SET*の関係を示す。皮膚温度が 32.6°C から 33.1°C となると、SET*が 21.2°C から 22.2°C に高じる。このことから、SET*を 1°C 上昇させるためには、人体側に 4W 程度の加熱が必要なことがわかる。

一方で、低温火傷のおそれがある。永村¹⁵⁾は、床暖房に関する文献調査から、接触時間と接触面の温度による火傷が生じる閾値を整理している。これによれば、 45°C 以上の加熱面に 1 時間接触する場合、低温火傷となるおそれが指摘されている。オフィスにおいて継続される着座時間は、30 分以下がほとんどである¹⁶⁾。このことから、加熱機能には、なるべく短時間で温感を感じられ、かつ低温火傷の閾値を超えないことが求められる。

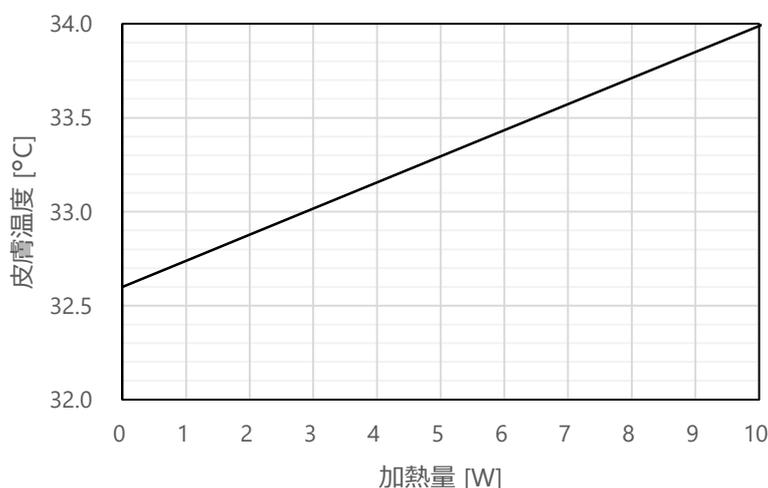


図 2.4 加熱量と皮膚温度

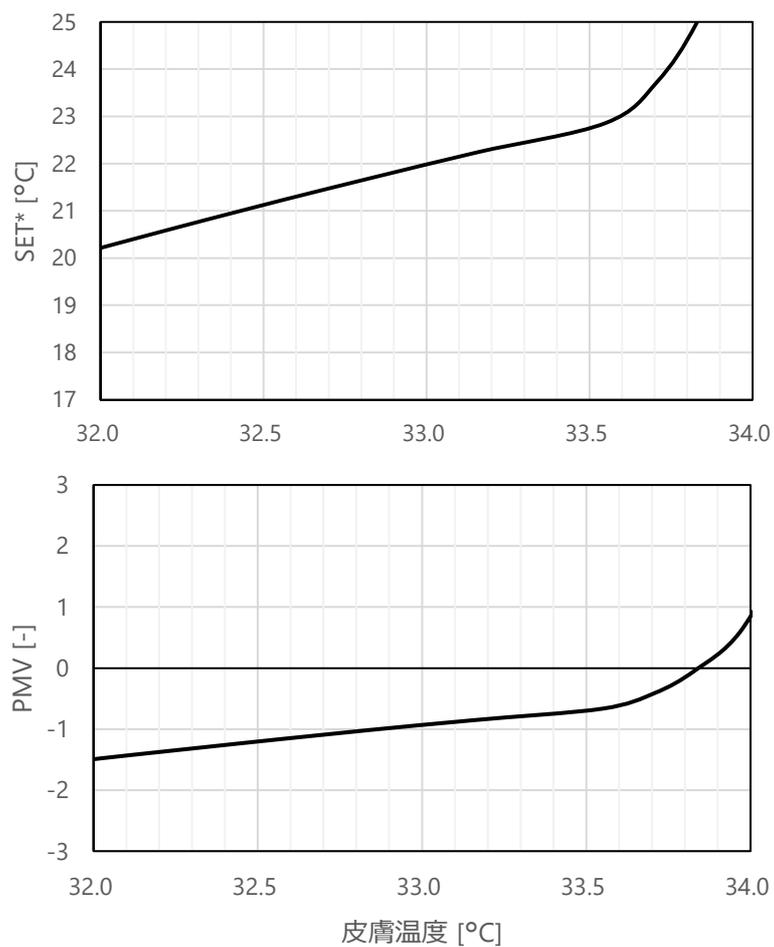


図 2.5 皮膚温度と SET*

2.5 まとめ

本章では、パーソナル空調機能を有する採涼採暖椅子のコンセプトを示し、求められる冷却機能および加熱機能の能力を整理した。以下に列挙する。

- (1) パーソナル空調による冷却能力は -1°C 以上必要であり、その効果を得るには、全身の対流熱伝達率を約 $1\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 向上させることが必要である。そのためには、胸と上腕に 0.7 m/s 以上の等温気流を供する必要がある。
- (2) 座面を局所的に加熱する場合でも、皮膚表面血流が増加して全身の皮膚温度が上がることから、温感は全身に及ぶ。全身平均の SET^* を $+1^{\circ}\text{C}$ 向上させるには、皮膚温度を 0.5°C 上げる必要があり、人体側に 4 W の加熱が必要となる。
- (3) 低温火傷を回避するために、 45°C 以上としないようにする必要がある。

表 2.4 要求性能の整理

	温冷感の調整能力 (目標値)	要件
冷却モード	-1°C	<ul style="list-style-type: none"> ・ 等温気流を用いる。 ・ 対流熱伝達率$1\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$の向上が必要。 ・ 胸部と上腕に0.7 m/s以上の気流到達が必要。
加熱モード	$+1^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> ・ 座面の加熱を用いる。 ・ 皮膚温度0.5°Cの向上が必要。 ・ 人体側に4 Wの熱移動が必要。

参考文献

- 1) G. S. Brager, M. E. Fountain, C. C. Benton, E. A. Arens and F. S. Bauman: A Comparison of Methods for Assessing Thermal Sensation and Acceptability in The Field, Thermal Comfort Past, Present and Future(1993), pp.17-39
- 2) T. Parkinson and R. de Dear: Thermal Pleasure in Built Environments: Spatial Alliesthesia from Contact Heating, Building Research and Information, Vol.44, No.3(2016), pp.248-262, <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1082334>
- 3) M. Ukai, M. Takahashi, K. Murakami, S. Amemiya and T. Nobe: Investigation of Indoor Thermal Environment and Consideration on Thermal Environmental Acceptability at Offices, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, Issue 724(2016), pp. 535-543
 鵜飼真成, 高橋満博, 村上宏次, 雨宮沙耶, 野部達夫: S ビルにおける室内温熱環境調査と執務者の受容性に関する考察, 日本建築学会環境系論文集, 81 巻, 724 号(2016), pp. 535-543, <https://doi.org/10.3130/aije.81.535>

- 4) F. S. Bauman, E. A. Arens, S. Tanabe, H. Zhang and A. Baharlo: Testing and Optimizing the Performance of a Floor-based task Conditioning System, *Energy and Buildings*, Vol. 22, No.3, 1995, pp.173-186, [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(95\)91161-J](https://doi.org/10.1016/0378-7788(95)91161-J)
- 5) F. S. Bauman, T. G. Carter and A. V. Baughman: Field Study of the Impact of a Desktop Task/Ambient Conditioning System in Office Buildings, *ASHRAE Trans.*, Vol.104, Part1, 1998
- 6) D. P. Wyon: Thermal Manikin Experiments on Climadesk. Proc. From the Workshop on Task/Ambient Conditioning Systems in Commercial Buildings, ed., (1995)
- 7) M. Ukai, T. Muramatsu and T. Nobe; Cooling Effect by Chair-Mounted Isothermal Airflow Generator, *Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol. 40, Issue 223(2015), pp.37-44
鵜飼真成, 村松一貴, 野部達夫: 等温気流発生装置を具備した事務椅子の冷却効果, *空気調和・衛生工学会論文集*, 40 巻, 223 号(2015), pp. 37-44, <https://doi.org/10.18948/shase.40.223.37>
- 8) W. Pasut, H. Zhang, S. Kaam, E. Arens, Y. Zhai: Effect of a heated and cooled office chair on thermal comfort, *HVAC&R Research*, 19(5) (2013)
- 9) H. Zhang, E. Arens, Y. Zhai: A Review of The Corrective Power of Personal Comfort Systems in Non-neutral Ambient Environments, *Building and Environment*, vol.91(2015), pp.15-41,
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.013>
- 10) O. Seppanen, P. E. McNall, D. M. Munson and C. H. Sprague: Thermal Insulating Values for Typical Indoor Clothing Ensembles, *ASHRAE TRANSACTIONS*, Vol. 78(1972), pp.120-130
- 11) H. Ishigaki, T. Horikoshi, T. Uematsu, M. Sahashi, T. Tsuchikawa, T. Mochida, T. Hieda, N. Isoda and H. Kubo: Experimental Study on Convective Heat Transfer Coefficient of the Human Body, *International Conference On Human-Environment(1991)*, pp.279-282
石垣秀圭, 堀越哲美, 植松智樹, 佐橋政人, 土川忠浩, 持田徹, 稗田哲也, 磯田憲生, 久保博子: 人体の対流熱伝達率に関する実験的研究, *人間-熱環境系シンポジウム報告集(1991)*, pp.279-282
- 12) Y. Nishi and A. P. Gagge: Direct Evaluation of Convective Heat Transfer Coefficient by Naphthalene Sublimation, *Journal of Applied Physiology*, Vol.29, No.6, (1970), pp.830-838,
<https://doi.org/10.1152/jappl.1970.29.6.830>
- 13) M. Ichihara, M. Saitou, M. Nishimura and S. Tanabe: Measurement of Convective and Radiative Heat Transfer Coefficients of Standing and Sitting Human Body by Using a Thermal Manikin, *ournal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)*, Vol.62,

Issue 501(1997), pp. 45-51

市原真希, 斎藤正文, 西村美加, 田辺新一:サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, 日本建築学会計画系論文集(1997),第 501 号, pp.45-51,

https://doi.org/10.3130/aija.62.45_5

- 14) N. A. S. Taylor and C. A. Machado-Moreira: Regional variations in transepidermal water loss, eccrine sweat gland density, sweat secretion rates and electrolyte composition in resting and exercising humans, *Extreme Physiology & Medicine* (2013), 2:4,
<https://doi.org/10.1186%2F2046-7648-2-4>
- 15) K. Emura: A Study on Thermal Sensation and Comfort under the Floor Heating System : Part 1: Permissible Surface Temperatures for Floor Heating-Survey, Technical Papers of Annual Meeting the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, (1990), pp.1237-1240
永村一雄: 床暖房時の人体生理・心理反応に関する研究 その1 文献調査による床表面温度の許容値について, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集(1990), pp.1237-1240,
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.1990.0_1237
- 16) T. Nobe, S. Tanabe, S.J. Lee, Y. Tomioka: Investigation of seat occupancy rate in office, *Room Vent*(2002), pp 289-292
- 17) M. Luo, E. Arens, H. Zhang, A. Ghahramani, Z. Wang: Thermal comfort evaluated for combinations of energy – efficient personal heating and cooling devices, *Build. And Env.*, 143(2018), pp.206-216, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.008>
- 18) W. Pasut, H. Zhang, E. Arens, Y. Zhai: Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair: Results from human subject tests, *Build. And Env.*, 84(2015), pp.10-21

3章 試作機における温熱環境能力の評価

3.1 はじめに

前章で示した必要能力を満足する採涼採暖椅子を試作した。本章では、その試作機の概要を示し、冷却能力および加熱能力を検証した結果を示す。

3.2 採涼採暖椅子の試作機の概要

写真 3.1 に採涼採暖椅子のプロトタイプ機を示す。冷却モードおよび加熱モードを有し、両モードとも出力を 5 段階で調整可能とした。モード切り替えおよび出力調整は、使用者が自由に行うことができる。これは、使用者に冷暖自在の温調裁量権を与えることで、自己効力感を高めることを意図したものである。



写真 3.1 採涼採暖椅子

図 3.1 に座面内の部材構成の断面図を示す。座面の底部には、荷重を支持するためのシェル、ウレタンおよび着座検知のためのセンサがある。その上部には、通気層、ヒーターを設置している。シェルにファンと一体となった吹出口を設置し、座面側部から吹出す。

同図の矢印に、冷却モード時のエアフローを併記する。座面から空気を吸い込むことで、腿部や臀部からの放熱を促進し、側部からの噴流により、上半身を冷却する。また、着座によって、吸込み面である座面を塞ぐことで風量が減少することを防ぐために、吹出口の裏側からも吸い

込むこととした。

加熱モード時には、座面内部のヒーターが作動することで大腿裏および臀部を加熱する。温度検知により、過加熱時には、通電遮断される安全回路を設けた。

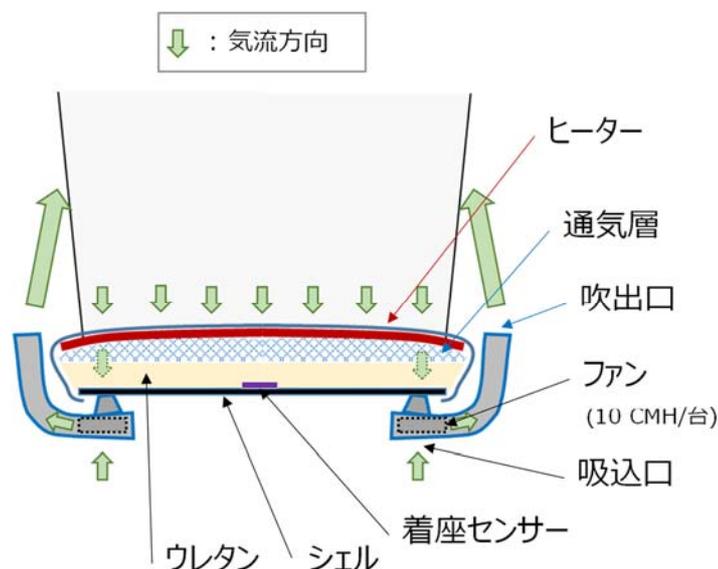


図 3.1 座面内の部材構成

装置の構成部品であるスイッチやバッテリー、吹出口の設置個所は、椅子の動作機構や座面高さおよびクライニングの調整レバーと干渉しないよう配置した。その他に、検討当初は、背面の冷却のために、座面と背もたれの間にも吹出口を設けていたものの、座面が前後にスライドする機構に干渉することから、取りやめとした。

吹出口からの到達風速が、前記条件 1（胸、上腕で 0.7m/s 以上）を満足するような吹出口および風量の設計を行った。吹出口からの気流の到達距離と風速の関係を、下式 3.1¹⁾より計算した。その結果を図 3.2 に示す。

$$V_x = K D_0 V_0 / x \dots (3.1)$$

ここに、

V_x	: 吹出中心軸上の風速	[m/s]
K	: 吹出口定数(5.5)	[-]
D_0	: 相当直径(10.6×10^{-3})	[m]
V_0	: 吹出し風速	[m/s]
x	: 吹出口からの距離	[m]

人体各部位での到達風速が、腋(吹出口からの距離 400~500mm)で 1m/s, 胸(500~600mm)で 0.7m/s 程度となり、前記条件を計算上満足することを確認した。

表 3.1 に採涼採暖椅子のプロトタイプ機の仕様を示す。送風モードでは、風量 10~19m³/h, 加熱モードでは、1~10W の範囲で出力調整が可能である。電源には、容量 48Wh, 電圧 12V の

充電式リチウムイオン電池を用いている。最大出力での運転における満充電状態からの運転可能時間は、送風モードで9時間、加熱モードで6時間である。概ね1日の連続稼働が可能な電池容量である。

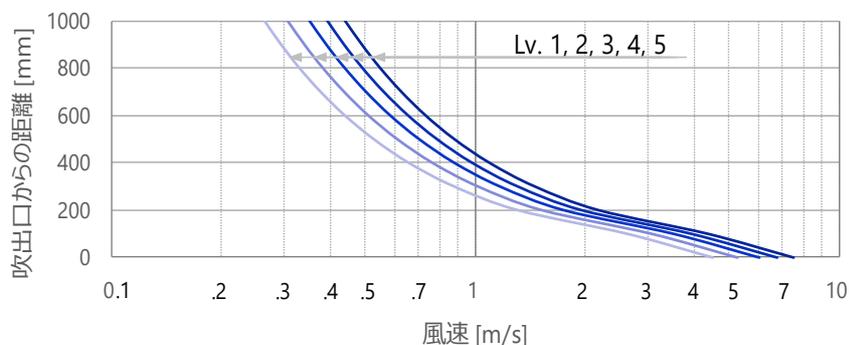


図 3.2 吹出中心軸の風速

表 3.1 仕様

冷却モード	風量) 10~19m ³ /h, 電力) 1~5W, ※5段階での調整が可能
加熱モード	電力) 1~7W, ※5段階での調整が可能
駆動源	電池種類) リチウムイオン電池, 容量) 48Wh, 出力電圧) 12V
充電方法	椅子背側に固定するバッテリー収容筐体とACアダプターを接続し、プラグに挿す
操作方法	①着座する
	②スイッチにより、モードと強さを調整する

3.3 冷却効果および加熱効果

3.3.1 人体到達風速

送風モードにおける人体近傍]の風向風速を、3次元超音波風速計(株式会社カイジョー製 WA-590)により測定した。その結果を図 3.3 に示す。

吹出口直近の風速は約 10m/s^{注1}であった。腋下の上腕近傍で上向きに 1.7m/s の気流が見られた。胸部前面では風速 0.7m/s であった。この風速から、再度式 2.1 に基づき、全身の対流熱伝達率を求めると、6.9W/m²K となる。これは、図 2.3 に示した通り、自然対流時の対流熱伝達率 5.0W/(m²K)に比べて、1.9 W/(m²K)高い値であり、必要能力を有すると考えられる。

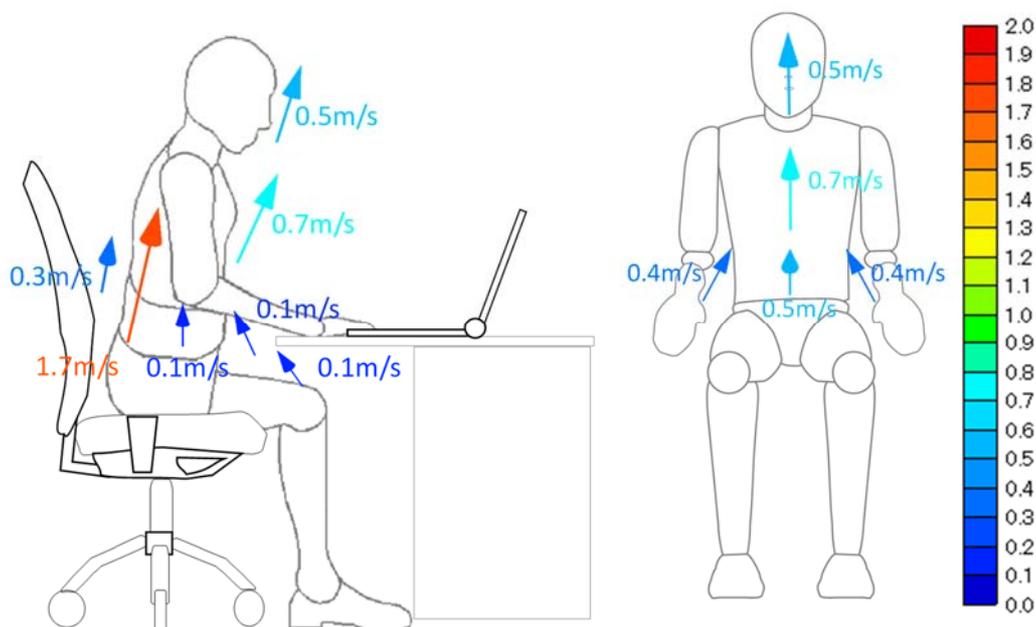


図 3.3 人体近傍の風速分布

3.3.2 加熱による座面温度の変化

図 3.4 に加熱時の座面温度の推移を示す。着座と同時に加熱モードを最大出力で作動させ、腿と座面との接触部分で測定した。開始から 5 分で 34°C 、10 分で 35°C に達した。これは、体表面温度以上であることから、5~10 分程度で座面から人体に加熱されることを確認した。その後、60 分時点で 39°C となり、85 分から 90 分にかけて、安全回路による低下が見られるものの、以降は $39\sim 40^{\circ}\text{C}$ 程度と低温火傷の閾値以下で推移した。

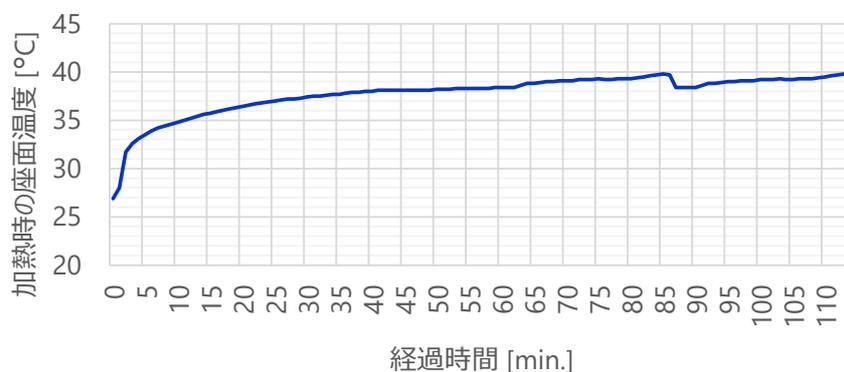


図 3.4 加熱時の座面と腿との接触部における温度の推移

3.3.3 サーマルマネキンによる評価

サーマルマネキン(写真 3.2)を用いて、熱性能を評価した。実験条件は表 3.2 に示す通りである。実験場所は D 社技術研究所内の実験室である。実験室の大きさは幅 5m×奥行 8m×天井高さ 2.6mh である。冷却モードおよび加熱モードの両モードとも、稼働時および非稼働時(標準状態)の 2 条件で測定した。冷却モードの検証時には、室内を 28°C とし、マネキンの着衣量を 0.5clo.に設定した。加熱モードの検証時は、室内 20°C, 着衣量 1.0clo.とした。マネキンの制御モードは、Comfort mode とした。



写真 3.2 サーマルマネキン

表 3.2 実験概要

		冷却実験	加熱実験
場所		D社技術研究所実験室	
空調方式		天井吹出し、天井吸込み	
室内温度		28°C	20°C
室内気流		静穏気流	
サーマルマネキン	着衣量	0.5clo	1.0clo
	姿勢	椅子座	
	制御	Comfort mode	



写真 3.3 実験室の外観

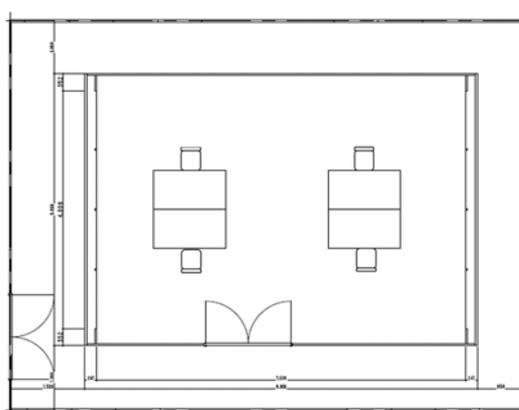


図 3.5 実験室の概要

図 3.6 に冷却モード稼働時の総合熱伝達率を示す。非稼働時である標準状態を見ると，上半身 (Side back から Head まで) は $7\sim 9\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を示す。下半身の Back side, Pelvis, Back thigh は座面に接するため，熱伝達率は小さく， $4\sim 5\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を示す。他の部位は $7\sim 10\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を示し，全身では $7.1\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を示す。

冷却モード稼働時では，Side chest や Upper arm, Head, Crown において $12\sim 17\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を示しており，気流到達によって熱伝達率が向上する。座面内部に通気させるため，Pelvis や Back thigh の熱伝達率も， $7\sim 16\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ と標準状態に比べて高い。全身の熱伝達率は $8.7\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ を示し，標準状態に比べて， $1.6\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 高い。

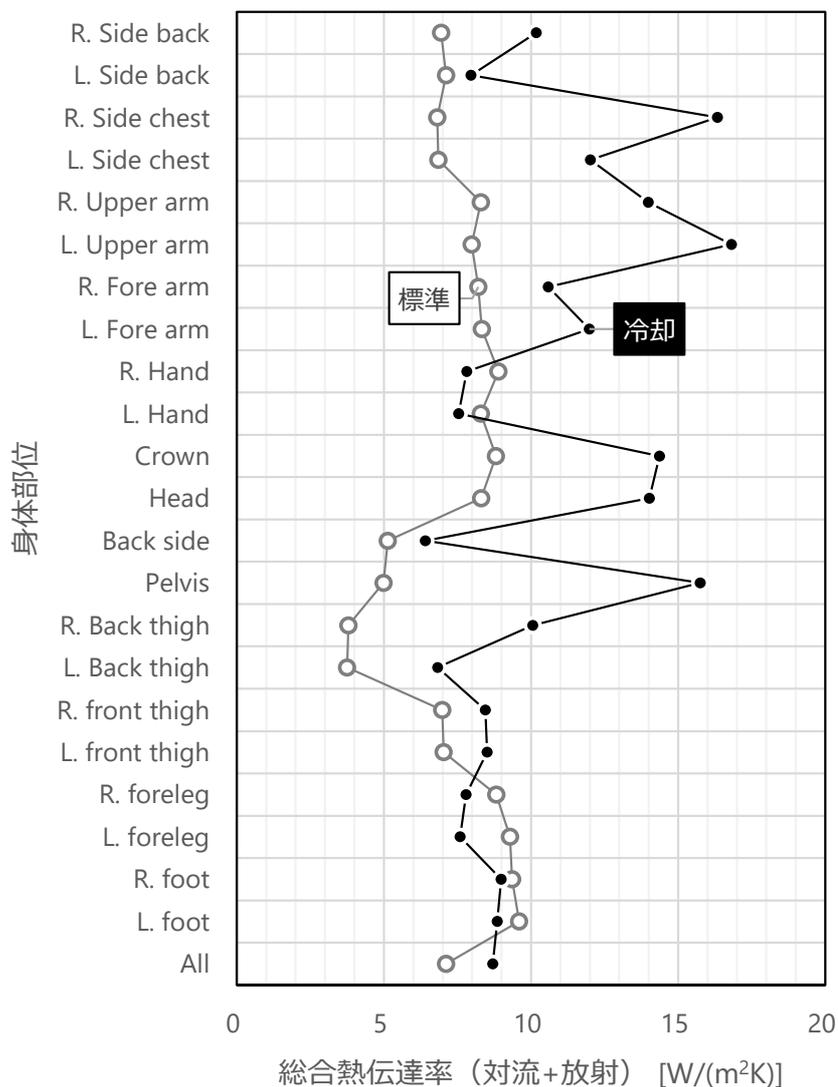


図 3.6 冷却モード稼働時の総合熱伝達率

次に、図 3.7 に加熱モード稼働時の総合熱伝達率を示す。サーマルマネキンには、皮膚温度の設定値を保つべくマネキン内部の加熱量を制御するが、座面の加熱により少ない熱量で皮膚温度の設定値を満足するようになる。これは、見かけ上、座面接触部位の熱伝達率が低下することと同義であることから、冷却モードの稼働時と同様に、熱伝達率によって評価することとする。

標準状態では、上半身および座面に接しない下半身の熱伝達率は、7~10 W/(m²K)を示し、座面に接する Back side, Pelvis, Back thigh は 4~7 W/(m²K)を示す。全身では、7.9 W/(m²K)を示す。加熱モード稼働状態では、座面に接する箇所の熱伝達率が、1~4 W/(m²K)を示し、全身では 6.0 W/(m²K)となる。標準状態に比べて、1.9 W/(m²K)低い値である。

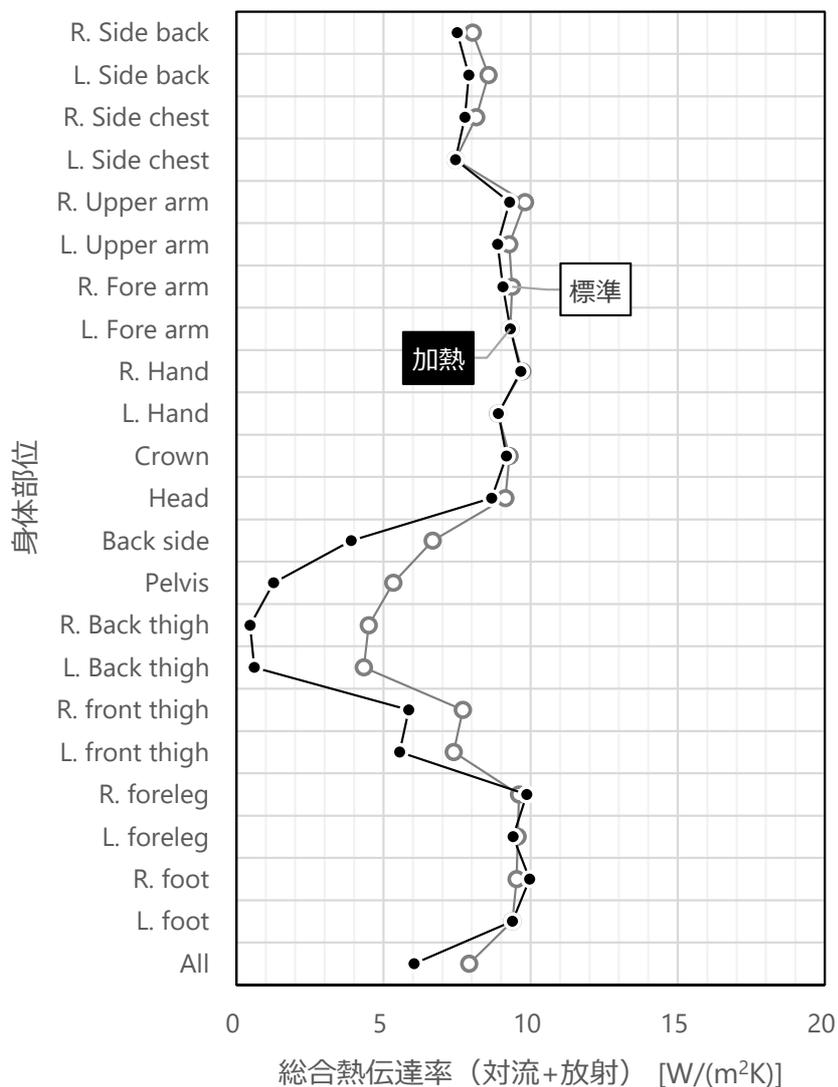


図 3.7 加熱モード稼働時の総合熱伝達率

ここで、表 3.4 に式 3.2 に基づいて求めた等価温度を示す。冷却モードでは、27.3°C を示し、加熱モードでは、21.2°C を示す。これは、標準状態に比べて、冷却時には-0.7°C、加熱時には+1.2°C の効果を有するといえる。

$$T_{eq} = T_s - 0.155 \left(I_{clo} + \frac{I_a}{f_{cl}} \right) q \quad \dots (3.2)$$

ここに,

T_{eq}	: 等価温度	[°C]
T_s	: マネキン皮膚温度	[°C]
I_{clo}	: 着衣熱抵抗	[clo]
I_a	: 着衣外表面と環境間の熱抵抗	[clo]
f_{cl}	: 着衣面積比	[-]
q	: マネキン放熱量	[W/m ²]

表 3.3 等価温度計算条件および結果

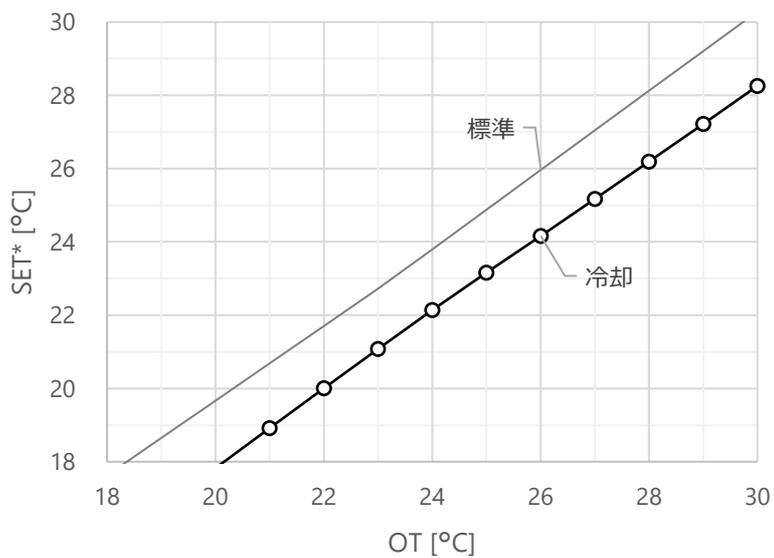
	室内空気温度	マネキン皮膚温度	着衣熱抵抗	着衣面積比	着衣外表面と環境間の熱抵抗	マネキン放熱量	等価温度
	(T_a)	(T_s)	(I_{clo})	(f_{cl})	(I_a)	(q)	(T_{eq})
	°C	°C	clo	-	clo	W/m ²	°C
冷却モード	28.0	34.7	0.8	1.2	0.9	31.6	27.3
加熱モード	20.0	34.0	1.3	1.4	0.8	44.3	21.2

次に、図 3.8 に熱伝達率が SET*に及ぼす影響を示す。計算条件を表 3.4 に示す。図 a より、冷却モードの稼働によって SET*が約 2°C 低下する。図 b を見ると、加熱モードの稼働により SET*は 2~3°C 向上する。このことから、物理的な温熱環境の調整効果は、冷却モードで最大 2°C、加熱モードで最大 3°C の効果を有するといえる。

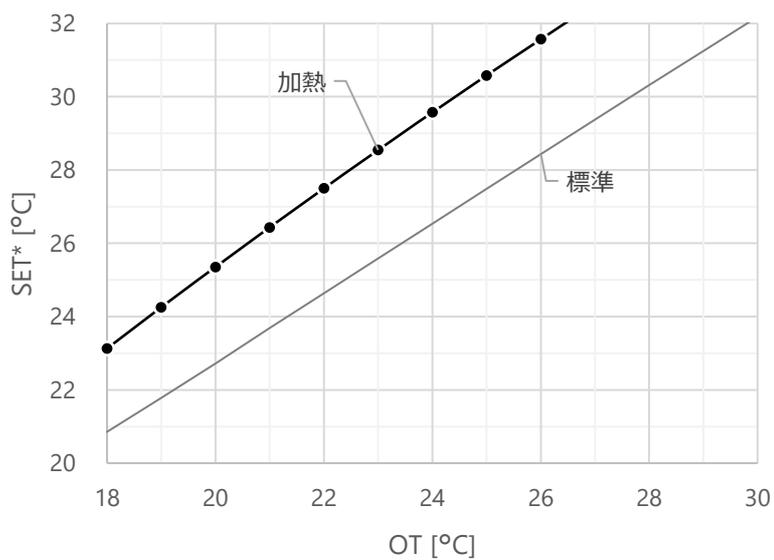
以上より、前章で示した環境調整幅±1°C の目安は、等価温度の評価では冷却モードにおいて、不足するものの、SET*の評価からは冷却モードおよび加熱モード共に満足させることができた。

表 3.4 SET*計算条件

	着衣量	総合熱伝達率		放射熱伝達率	対流熱伝達率	
	-	標準状態	冷却モード 加熱モード	-	標準状態	冷却モード 加熱モード
	clo.	W/(m ² K)				
a	0.5	7.1	8.7	4.3	2.8	4.4
b	1.0	7.9	6.0	4.3	3.6	1.7



a) 冷却モード



b) 加熱モード

図 3.8 採涼採暖椅子使用時の SET*

3.3.4 被験者実験による温冷感評価

3.3.4.1 実験概要

前出の実験室にて被験者実験を行った。実験条件を表 3.5 に示す。被験者は学生もしくは会社員である。冷房条件（室温 28°C）および暖房条件（20°C）の 2 条件を設定した。冷房条件の被験者数は、男性 10 名、女性 6 名であり、暖房条件では、男性 11 名、女性 9 名であった。被験者の着衣状況を写真 3.4 に示す。男女で着衣量が異なるのは、スラックスとスカートの違いやネクタイの有無による差である。

表 3.5 被験者実験の概要

実験期間	(冷房条件) 8月27日～8月31日 / (暖房条件) 8月21日～8月24日
室内環境	(冷房条件) 室温: 28°C±0.5°C, MRT: 28°C±0.5°C, 相対湿度: 50%±10%, 気流速: 0.1m/s以下
	(暖房条件) 室温: 20°C±0.5°C, MRT: 20°C±0.5°C, 相対湿度: 60%±10%, 気流速: 0.1m/s以下
着衣量	(冷房条件) 男性: 0.5clo想定, 女性: 0.4clo想定
	(暖房条件) 男性: 1.0clo想定, 女性: 1.0clo想定
代謝量	(冷房条件・暖房条件) 男女とも: 1.2met想定 (ジグソーパズル等)
比較対象	①採涼採暖椅子 / ②通常椅子 (各30分)
備考	冷房条件時のみ、実験前に2.6met相当の運動 (踏台昇降) を行った。



写真 3.4 被験者の着衣状況

図 3.9 に実験手順を示す。被験者には、実験前に 60 分間温熱環境に順応させつつ、事前のアンケート (表 3.6) に回答させた。なお、冷房条件の実験開始前に、外部環境での歩行を想定して、代謝量 2.6 met に調整した踏み台昇降運動を課した。その後、採涼採暖椅子を用いた実験① (も

しくは、一般的な事務椅子を用いた実験②)を30分間実施した。20分の休憩の後、再度踏み台昇降運動および実験②(もしくは、実験①)を実施する手順とした。採涼採暖椅子の風向調整、出力変更等の操作は各被験者に一任し、実験後のアンケートによって操作状況を回答させた。なお、暖房条件時には、踏み台昇降運動を課していない。

実験開始後は、表3.5の通り、被験者には、15分経過までは3分毎、以降は5分毎に7段階の温冷感(TSV、非常に暖かい～非常に涼しい)および不快感の有無、快感の有無等を申告させた。申告時以外は事務作業相当の作業負荷(PC作業、ジグソーパズル等)を課した。

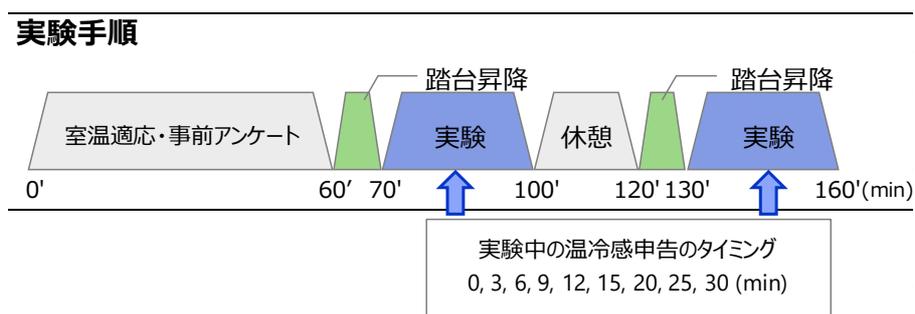


図 3.9 被験者実験の手順

表 3.6 温冷感調査内容

事前アンケート内容	属性	性別、暑がり/寒がり等
実験中定時アンケート内容	温冷感	非常に涼しい - 非常に暖かい (7段階評価)
	不快感	不快/不快でない
	快感	気持ち良い/気持ちよくない等
事後アンケート内容	操作履歴	実験中の運転モード 実験中に動作を停止させたか等

3.3.4.2 実験結果

表3.7に実験中の採涼採暖椅子の操作状況を示す。冷房条件では、男女ともに全員冷却モードのみを使用した。暖房条件では、女性は加熱モードのみを使用するが、男性は冷却と加熱モードの両方を使用することを確認した。両モードを使用した被験者は、事前アンケートにおいて、汗をかきやすいと答えている。これは、暖房条件においても、個人の基礎代謝や体質によっては、冷却の需要が生じることを示す結果である。逆に、冷房条件時に、個人の体調や代謝量次第では、加熱の需要が生じることもあり得ると考える。

表 3.7 実験中の操作状況

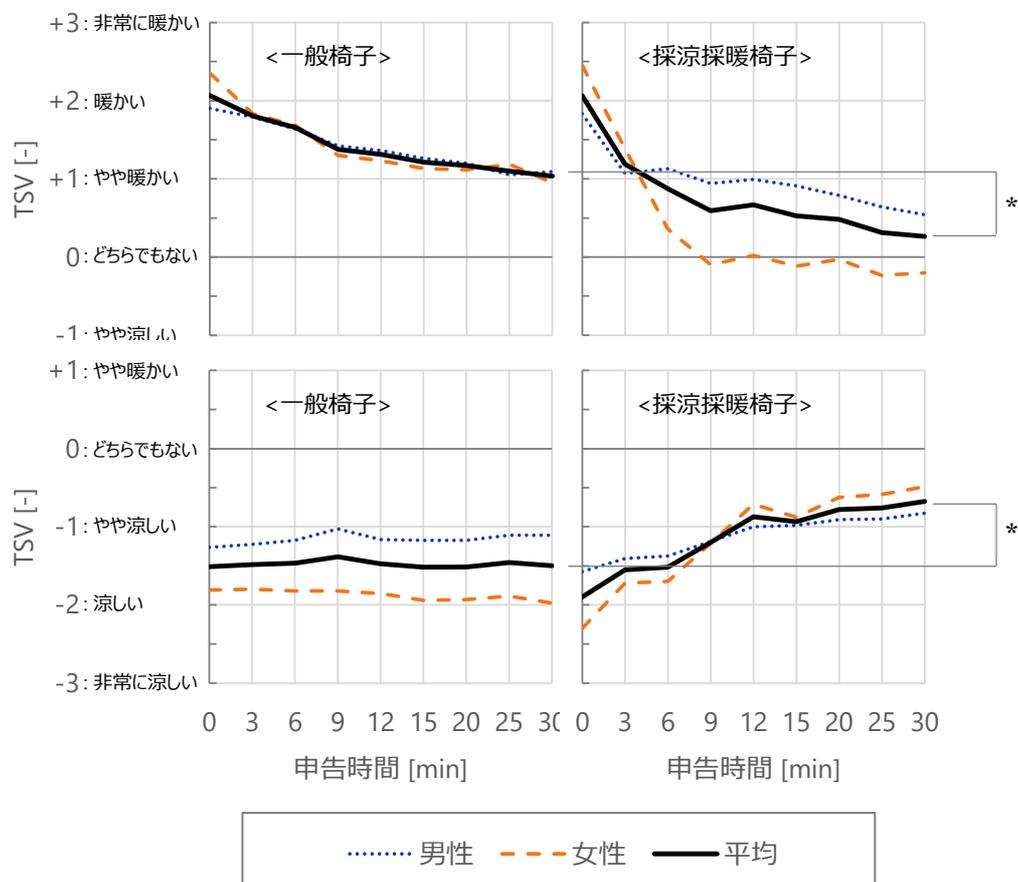
		冷房条件		暖房条件	
		男性	女性	男性	女性
人数	人	10	6	11	9
冷却モードのみを使用	%	100	100		
冷却と加熱の両方を使用	%			36	
加熱モードのみを使用	%			64	100

図 3.10 に実験中の温冷感申告の推移を示す。各性別および全員の平均値を算出した。冷房条件の結果を示す上図を見ると、実験開始直後は、一般の事務椅子を用いた場合と採涼採暖椅子を用いた場合とで、差は見られず、両者とも TSV は 2 (暖かい) 程度を示す。一般椅子を用いた場合では、その後、男女ともに、次第に中立側に推移し、30 分経過時点では 1 (やや暖かい) 程度を示した。

一方、採涼採暖椅子を用いた場合では、男性は 3 分後に 1 (やや暖かい) 程度を示し、一般椅子を用いた場合に比べて、早く中立側に推移した。これは、気流による顕熱伝達量の向上および踏み台昇降時の発汗により皮膚表面および衣服に蓄積した水分の蒸発促進の効果と考える。その後、漸減し、30 分経過時点で 0.5 程度を示した。女性は、男性よりも、中立側への推移が顕著であり、9 分後には、0 (どちらでもない) を示し、以降、同程度で推移した。このように、男女間で変化の傾向の違いが認められるものの、最終的な TSV における男女間での有意な差は見られなかった。これは、サンプル数が少なく、かつ対応のない t 検定となったことが影響しているものと推測される。平均値で見れば、採涼採暖椅子を用いた場合には、一般椅子を用いた場合に比べて、0.7 ポイント低い値となった。

暖房条件の結果を下図に示す。実験開始直後を見ると、一般椅子を用いた場合、TSV は男性-1.3、女性-1.8 を示す。採涼採暖椅子を用いる場合では、男性-1.6、女性-2.3 を示し、一般椅子を用いた場合に比べて低く、より涼しい側を示した。両椅子とも、背面がメッシュ素材であることは同様であるが、採涼採暖椅子は、座面に通気層を設けていることから、熱抵抗が、一般椅子に比べて小さい。この熱抵抗の差を、被験者が感知したため、TSV に差が生じたものと考えられる。一般椅子を用いた場合では、開始から終了まで、TSV は男女ともに変化せず、男性は-1 程度 (やや涼しい)、女性は-2 程度 (涼しい) で推移した。女性は、男性に比べて、着衣量が小さいため、より涼しい側の評価がされたものと考えられる。

採涼採暖椅子を用いた場合、男女ともに時間経過に伴い中立に漸近し、30 分経過時点では-1 (やや涼しい) 以上に推移した。女性は、前述の通り、男性に比べて着衣量が小さいにもかかわらず、30 分経過時点の TSV が男性より高くなった。このことから、採涼採暖椅子の加熱機能によって、女性の着衣量を同等程度に補うことができ、温冷感の男女間の不均衡を解消しうることが示唆された。30 分経過時点の平均 TSV を見ると、採涼採暖椅子は、一般椅子に比べて、0.8 ポイント高い値となった。



* : 5%以下の有意差を確認した。

図 3.10 被験者の温冷感申告
(上段：冷房条件／下段：暖房条件)

3.4 実地での試用評価

当プロトタイプ機を複数台製作し、表 3.8 の通り、実オフィスの執務者を対象に試用評価を行った。

表 3.8 試用評価の概要

	所在地	評価時期	男性	女性	計
N1社	神奈川県	'20年5月-6月	5	2	7
N2社	大阪府	'20年8月-'21年1月	2	1	3
M社	東京都	'20年1月-9月	7	0	7
P社	大阪府	'20年8月-11月	2	3	5
N3社	東京都	'21年2月	0	5	5
D社	タイ・シンガポール	'20年5月-6月	10	4	14
		計	26	15	41

3.4.1 満足度

図 3.11 に各モードおよび総合的な満足度を示す。総合的な満足度について、男性 1 名が「やや不満足」と回答した。これは、充電のしにくさ、動作不良を感じたことが原因である。それ以外の申告は、「満足でも不満足でもない」ないし「満足」側の回答であった。

3.4.2 不快さ・心地よさ

図 3.12 に各モードの不快さに関する申告結果を示す。送風モードでは 7 名、加熱モードでは 3 名が「やや不快」の申告をした。これらの個別理由を見ると、送風モード時に髪が揺れたこと、加熱モード時に熱過ぎると感じたこと、貸与品にひじ掛けが付されてなかったこと、充電のしにくさ等が挙げられていた。

次に「不快ではない」と申告したものを対象に、心地よさを申告させた。送風モードでは 2 件、加熱モードで 1 件「心地よくはない」との申告があった。この申告者らの他の項目には否定的な意見が見られないことから、採涼採暖椅子に関して興味関心を示していないことが示唆される。

3.4.3 要改善項目

図 3.13 に充電のしやすさ、振動、音、座り心地などの使用感を示す。充電は、約半数から「しにくい」との意見が挙げられ、座り心地は、男女計 9 名から「気になる」と申告された。総合的な満足度において、非満足側の意見を挙げた回答者の使用感を抽出したところ（図 3.14）、充電および座り心地に不満が見られた。

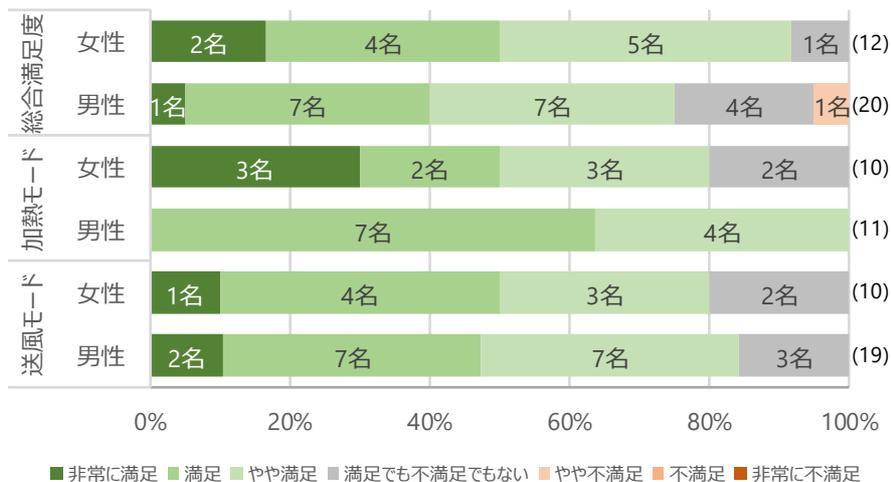


図 3.11 各モードおよび総合的な満足度

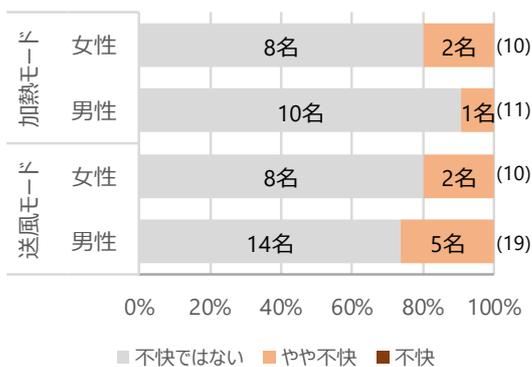


図 3.12 各モードの不快さ

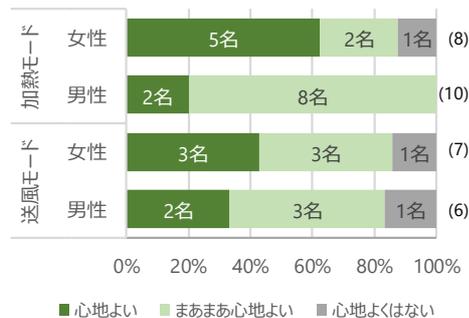


図 3.13 各モードの心地よさ

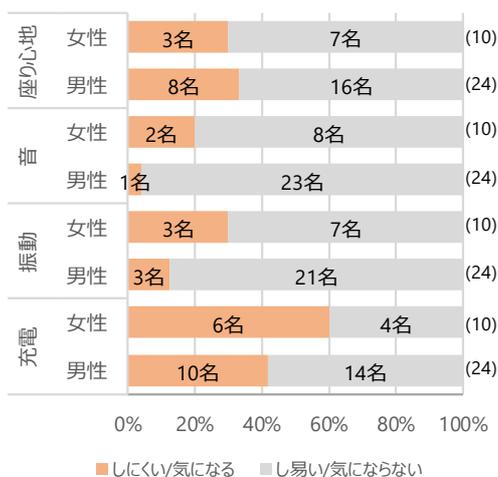


図 3.14 使用感

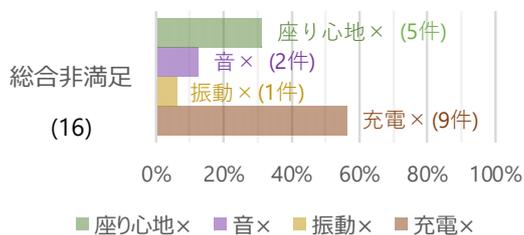


図 3.15 非満足者の改善要求

3.4.4 採涼採暖椅子の要件

表 3.9 に自由意見を抜粋した。良い点として、冷房時にも加熱機能による調整が可能であること、椅子自体の座り心地が良いこと等が挙げられた。一方で、充電コードを踏む、バッテリーの充電のしやすさ、スイッチが足に当たる、座面の凹凸に違和感がある等の要改善項目が挙げられた。

表 3.9 試用評価の結果

	良い点	要改善点
機能	加熱モードはおなかの冷えが気になる人に良い / 加熱モードを夏の冷房時に使用してみたい / 外から帰ってきたときのクールダウンに良かった	足元・腰・ふくらはぎ・背もたれの加熱 / 外出戻り時の急冷モードが欲しい / 風向きの変更幅が狭い / 連続使用が短い
着座センサー・充電	着座センサーは切り忘れがなく良い / 席から離れた際に自動でオフになり安心	充電コードをキャスターで踏む / 充電がしづらい / 残量表示がない / カセット式にすると良い / 充電コードの保管場所が欲しい
座り心地	椅子自体の座り心地が良い / リクライニングの角度が豊富でとても使いやすい	全体的に大きい / 座面の凹凸に違和感あり
音	音は気にならない / 送風音および座面の凹凸は座っていると気にならなくなった	風の音が気になる
使い勝手	使いやすい / 操作がシンプル / リモコン一体化でリモコンがなくなることがない	スイッチが当たり少々痛いときがあった / リモコンの強度不足
その他	スイッチが通常時隠れていることが良い / 見た目が一般の事務椅子と変わらず、機能も損なわれない	1人1台欲しい / 洗えないことが心配 / デザインバリエーションに乏しい

3.5. まとめ

本章では、事務用椅子に冷却機能および加熱機能を搭載した採涼採暖椅子を試作して、評価試験を行った結果を述べた。以降に要約する。

- 1) 採涼採暖椅子からの送風時における人体周辺の気流分布から、胸や上腕への上半身への気流が到達することを確認した。
- 2) 加熱機能により、オフィスの継続着座時間とされる 30 分以内（5～10 分）で座面温度が人体皮膚表面温度を上回り、人体に加熱され、かつ 100 分以上継続して使用しても、40°C 程度で推移し、低温火傷の閾値を超えないことを確認した。
- 3) サーマルマネキンによる評価によって、等価温度を冷却モード時には-0.7°C、加熱モード時には+1.2°C とすることを確認した。計測した総合熱伝達率より、SET*を計算すると、冷却モード時には-2°C、加熱モード時には+3°C とすることを示した。
- 4) 被験者実験より、暖房条件であっても、人によっては冷却需要が生じていたことから、個人の温冷感が異なることを示した。このことから、室内暖房時の冷却機能の使用、もしくは、室

内冷房時の加熱機能の使用が起こりうることを示した。

- 5) 被験者実験により、冷却機能によって温冷感申告値を7段階の評価で0.7ポイント低下させ、加熱機能によって0.8ポイント増加させることを示した。SET*に換算すると、-2.1Kと+3.0Kの効果であった。
- 6) 暖房条件の被験者実験より、女性の着衣量は、男性に比べて低いにもかかわらず、実験終了時の温冷感は男性よりも高くなった。このことから、加熱機能により、女性の着衣量の不足を補うことで、温冷感の男女間の不均衡を解消しうることを示唆した。
- 7) 実使用に当たっては、試用評価から充電方式やスイッチが足に当たる、座面の違和感などが要改善項目として挙げられたことから、それぞれ仕様修正を行い、実用化した。

注

- 注1) 吹出風速が10m/sとなり、騒音の問題が危惧される。実地での試用評価の際に、音が気になるか質問したところ、41名中3名と多数ではないものの、音が気になると回答した。39.7db(A)の暗騒音があるオフィス内で送風時における機器から1.5m離れた位置での騒音レベルは41.2dB(A)となり、顕著な騒音の増加はないと考えているが、未解消の課題である。
- 注2) 本研究は工学院大学の「ヒトを対象とする研究計画倫理審査」による承認を得ている（承認番号：2021-A-14）。

参考文献

- 1) The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan : Handbook of Air-conditioning and Sanitary Engineering, Vol. 14, Part 3 Air Conditioning, p.167, table.4.4
空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧（第14版）-3 空気調和設備編, p.167, 表4・4
- 2) The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan : Handbook of Air-conditioning and Sanitary Engineering, Vol. 14, Part1 Basis, p.337, table.13.5
空気調和・衛生工学会編：空気調和・衛生工学便覧（第14版）-1 基礎編, p.337, 表13・5

4章 実用化

4.1 はじめに

パーソナル空調の効果は認知されるものの、実用化された例というと、ほとんどなく、特に什器を活用したものは少ない。そもそも、什器は建築設備の所掌範疇を超えるため、空調・温調機能の付加には、什器メーカーとの協業が必須となる。しかしながら、一品生産が主の建築設備業界と大量生産が主の什器業界では、製品に求める要求項目・水準および想定する生産台数が異なることから、簡単には両者の折り合いがつかない。この両者の擦り合わせが十分に行われていないことが、実用化に至っていない理由と推察する。

我々はこれまで、什器メーカーの協力を得ながら、事務用椅子にパーソナル空調機能を有する採涼採暖椅子を研究・開発してきた。事務用椅子を選択した理由は、身体に最も近接していることから、各自で異なる温冷感に応じて自由自在に操作を行うのに適すると考えるためである。

本章の前半では、研究段階における試作機のプロトタイプ機から、準実用機となる実用初号機、実用機となる実用二号機と仕様を改訂したプロセスを示し、採涼採暖椅子の実用化に際して直面した課題を整理し、その対策を述べる。

後半部では、実用二号機への変動風機能の実装について述べる。風を含めた自然現象には、安久ら¹⁾が指摘する通り、ゆらぎがあり、スペクトル解析から $1/f$ 等の特性を有することが明らかとなっている。このゆらぎが、人に快適感を与えることが、例えば、徐ら²⁾の研究により示唆される。そこで、採涼採暖椅子の更なる機能向上を意図して、数式により $1/f$ ゆらぎを生成し、変動風モードとして試験的に実装した。

4.2 実用化の課題整理

採涼採暖椅子の実用化のためには、椅子本来の機能と温調機能を両立させる必要がある。そのため、次の課題が挙げられた。

- 1) 座り心地：椅子の性能を評価する上で、座り心地が重視される。良い座り心地のためには、体重を支えるための反発を確保すること、表面に座り心地に影響する凹凸が生じないことが求められる。
- 2) 使い勝手：使用者が煩わしさを感じないことは、装置を使いこなし、性能を引き出すために重要である。
- 3) 安全性：採涼採暖機能を付加することで、安全性を損なうことは、許されない。
- 4) 耐久性：事務用椅子の法定耐用期間は、8年ないし15年である。このような、長期間の使用が可能な耐久性を有する必要がある。
- 5) 製作性：妥当なコスト・納期を担保するには、製作のし易さや安定供給が可能な部品・部材の使用に留意する必要がある。
- 6) 保守：使用中に万が一故障が発生した場合には、保守対応の必要が生じる。長期間の保守・交換部品の確保、保守体制の構築・維持が求められる。

4.3. 実用機の開発

4.3.1 各機の位置づけ

図 4.1 に採涼採暖椅子の概要を示す。基本コンセプトは、温調機能を座面に集約することにある。これは、椅子の改造範囲を座面のみ限定することで、既存の椅子に若干の加工を加えることで実用化が容易となり、製作性を向上させることを意図している。椅子本体には、背面がメッシュ、座面がウレタンであり、かつ座面とその他部分を分離することが可能な事務用椅子をベース機として選定した。

	プロトタイプ機	実用初号機	実用二号機
外観			
諸元	製作年:2016年 送風時出力:11 W 最大合計風量:47 m ³ /h 加熱機能なし 送風時稼働時間:2.7時間 加熱時稼働時間:—	製作年:2019年 送風時出力:5 W 最大合計風量:19 m ³ /h 加熱時出力:10 W 送風時稼働時間:9.6時間 加熱時稼働時間:4.8時間	製作年:2020年 送風時出力:5 W 最大合計風量:19 m ³ /h 加熱時出力:7 W 送風時稼働時間:9.6時間 加熱時稼働時間:6.8時間

図 4.1 採涼採暖椅子の概要

冷却機能の最大化の観点で言えば、熱抵抗が小さいため、背面、座面ともにメッシュの椅子が有効なことが既往研究³⁾で報告されている。しかしながら、什器メーカーの意見によると、座り心地の観点でメッシュはウレタンに劣るとのことである。ここでは、椅子本来の性能を落とさないことを優先し、座面をウレタンとした。

各機の経緯(表 4.1)について述べると、まず研究・開発段階の2016年にプロトタイプ機を製作した。鶉飼らの既往の知見³⁾を踏襲しつつ、上記の基本コンセプトを実現することを目指した。この時点では、冷却機能のみを実装している。

次に、実用に耐えることを念頭に置いた実用初号機を製作した。通年での個人温冷感の調整を可能とするべく、加熱機能を追加した。

実用初号機を用いた実際のオフィスでの使用者からの意見や耐久性に関する問題に対応すべく改良を施し、最終的な実用機となる実用二号機を製作した。

表 4.1 実用化に至る経緯

年号	内容
2015	基本コンセプト(座面)の策定
2016	●プロトタイプ機製作 福岡市某オフィスにおいて1ヵ月間の試用評価
…	実用化に向けた仕様検証
2019	●実用初号機製作 高松市某オフィスに導入(10台)
2020	●実用二号機製作・実用機としての仕様策定
2021	札幌市某オフィスに導入(10台)
2022	金沢市某オフィスに導入(24台)

4.3.2 プロトタイプ機

プロトタイプ機を図 4.1 左に示す。送風機能を有し、加熱機能はない。座面前方の左右にファンを1台ずつ、背面側に1台の計3台のファンを有する。出力は11Wであり、最大風量は47m³/hである。これは、鶴飼ら³⁾のクールチェア(A型)の最大風量(39 m³/h)を参考にした。

図 4.2 に吹出しおよび吸込みのフローを示す。3ヵ所に吹出口を設置しており、座面前方の左右側面に位置する吹出口からは、胸や顔、腕に気流を到達させることが可能である。写真 4.1(a)に示す通り、吹出口はフレキシブルダクトの形状であり、自由に気流方向を調整できる。背面の吹出口からは、背中への気流到達が可能である。人体部位の中で、面積が大きく、汗腺数が多い背面からの放熱を促進し、冷却効果を得ることを意図した。

座面内部には、ファンおよび通気性素材を挿入している(写真 4.1(b))。座面から通気性素材を通して空気を吸い込むことで、着座者の腿の裏や臀部の熱籠りを解消することを意図したものである。送風時には、座面自体の熱抵抗を低下させ、冷却効果を生じさせる。

操作部分には、写真 4.1(c)に示す通り、ボリュームスイッチが2個配されており、左右のファンおよび背面のファンの発停と風量を、4~40m³/hの範囲で自由に調整できる。使い勝手の向上を意図して、座面の裏側に付したマイクロスイッチによる着座検知を可能としており、離席すれば自動停止し、着座時には自動復帰する。

電池には、ニッケル水素電池(電圧1.2V、容量2.5Ah、写真 4.1(d))を10本直列に連結し、12Vで給電する。最大出力での連続稼働時間は、2.7時間である。

このプロトタイプ機を用いて、福岡市某オフィスの執務者に対して1ヵ月程度の試用評価を行った。その結果、冷却能力には満足しつつも、座り心地に違和感があることや加熱機能がないこと等に不満が挙げられた。

さらに、製作協力先の什器メーカーのレビューを受けたところ、ウレタン部分を切り欠いてファンを内蔵することに、座り心地、安全性、保守の面で難色が示された。

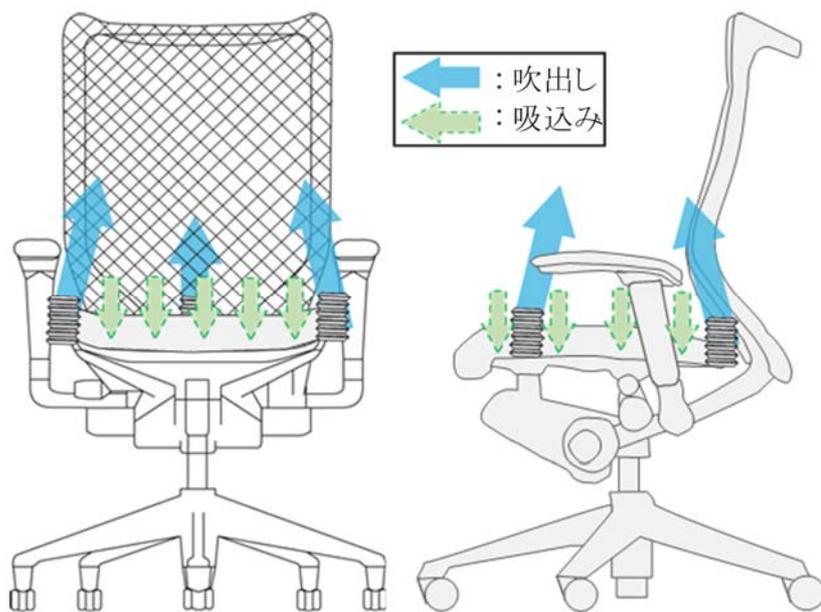


図 4.2 プロトタイプ機の吹出し・吸込みのフロー



(a) プロトタイプ機の吹出口



(b) プロトタイプ機の座面構成



(c) プロトタイプ機の操作部



(d) プロトタイプ機の電池

写真 4.1 プロトタイプ機

4.3.3 実用初号機

実用初号機を図 4.1 中央に示す。送風機能および加熱機能を有する。図 4.3 に示す通り、プロトタイプ機と同様に、座面から吸込み、左右の吹出口から上半身に気流を与える。

座面内部の構造で、プロトタイプ機と異なる点として、①背面に吹出口を有していないこと、②ファンを座面の裏側に設置したこと、③ヒーターを内蔵したこと、が挙げられる。

①は、座面を前後するスライド機構に背面の吹出口が干渉したため、椅子本来の機能を損なう恐れがあったことから、断念した。

②については、ウレタンを切り欠く範囲を減少させ、反発を確保し、座り心地を向上させるための変更である。これに加えて、保守の面で、ファンの交換が容易となったことの利点が生じた。

ただし、座面の裏側には、各種の操作レバー（上下昇降、前後のスライド、リクライニング等）が存在し、余剰スペースは限定的である。そのため、ファンおよび吹出口の設置箇所を座面後方に移動させた。

③は、使用者の要望を反映して、有孔シート状のヒーターを通気素材の上部に敷いた。これにより、座面からの通気性を阻害せずに、加熱機能を付加した。

吹出口には風向板を設けており、風向を前側に 30°、後ろ側に 30°調整することができる（写真 4.2(a)）。送風時の出力は 5W、加熱時の出力は 10W である。電源には、写真 4.2(b) に示す電源部内蔵のリチウムイオン電池（電圧 14.4V、容量 3.3Ah、48Wh）を用いている。最大出力下における連続稼働時間は、送風時で 9.6 時間、加熱時で 4.8 時間である。

操作部として、座面の側面にスイッチ（写真 4.2(c)）を有している。涼暖の切替えとボリュームによる 5 段階での出力強度の調整が可能である。充電時には、電源部に AC アダプターを接続し、コンセントから給電する（写真 4.2(d)）。座面内部に設置した感圧センサにより着座を検知し、離着席によるファンやヒーターへの給電の自動停止・自動復帰が可能である。

高松市に所在する某オフィスに、実用初号機を 8 台導入して、常用の事務用椅子として使用状況を観察し、かつ使用者からの意見を収集した。その結果、年間通じて加熱機能を稼働させる例が見られるなど、各個人の温冷感に合わせて積極的に使用されることを確認した。

一方で、使用時に充電コードを椅子のキャスターで踏むことや、操作スイッチが机やキャビネットに接触して破損する事象が頻発した。他には、長期間の使用で、ヒーターが動作不良を起こす事象が散見された。また、使用者からは、座面生地にヒーターの跡が生じる、稼働時間が短いという指摘があった。

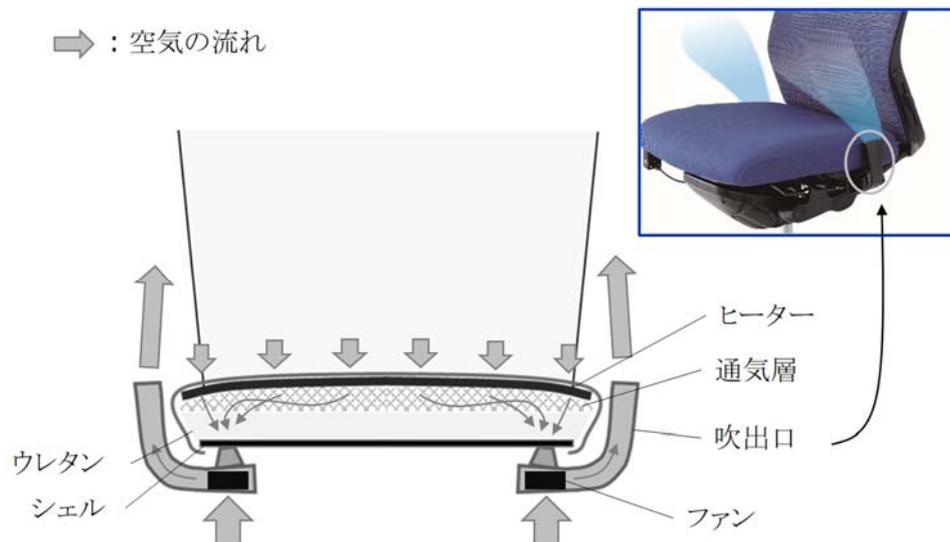


図 4.3 実用初号機の座面内部



(a) 実用初号機の吹出口



(b) 実用初号機の電源部



(c) 実用初号機の操作部



(d) 実用初号機の充電方法

写真 4.2 実用初号機

4.3.4 実用二号機

実用二号機を図 4.1 右に示す。風量, 吹出口, エアフローは実用初号機と同様である。ただし, ヒーターの仕様および位置を変更している (図 4.4, 写真 4.3(d))。

実用初号機で用いたヒーターは, 特殊な製品を使用していたため, 安定供給が難しく, また, 動作不良を起こしたこと等品質の面でも難があった。そこで, 採涼採暖椅子専用のヒーターを設計し, 仕様変更した。安全性確保のために, 55°C 以上で自動的に給電を遮断するサーモスタット付きとした。

座面の凹凸軽減による座り心地の向上と生地跡付き防止を意図して, ヒーターの位置を通気層の下側に移動している。これにより, ヒーターと使用者の間の熱抵抗が増加し, 採暖効果が低下する恐れがある。そこで, 実用初号機と実用二号機において, 着座状態において加熱時の座面温度を計測した。その結果, 着座から 10 分経過した時点での座面温度が, 実用初号機では 38°C に達し, 実用二号機では 35°C となった。実用二号機の座面温度は, 実用初号機に劣るものの, 人体表面温度が 30°C 前後であることを考えれば, 実用二号機でも採暖は可能と判断した。

電源には, 実用初号機と同様のリチウムイオン電池を用いているが, 電池自体を取り外して, 充電する方式に変更した。充電時には, 電池自体を AC アダプターに接続する (写真 4.3(a), (b))。これにより, 充電コードを踏む危険性を解消した。

送風時の消費電力は 5W, 加熱時の消費電力は 7W である。送風時の連続稼働時間は 9.6 時間と, 実用初号機と同じであるが, 加熱時の消費電力が減じたため, 加熱時の連続稼働時間は 6.8 時間に伸びた。オフィスでの実際の着席状況を調査した既往研究^{10, 11)}より, 平均着席時間が勤務時間の 50%程度と想定されることから, 送風時および加熱時共に, 一日中無充電での使用が可能であり, 使い勝手が向上したものとする。

操作部として, スイッチ (写真 4.3(c)) を座面左手側面に設置している。可動部をなくした上で, 堅牢な筐体としたため, 机等との接触時にも, 簡単に壊れないスイッチとし, 耐久性を向上させた。

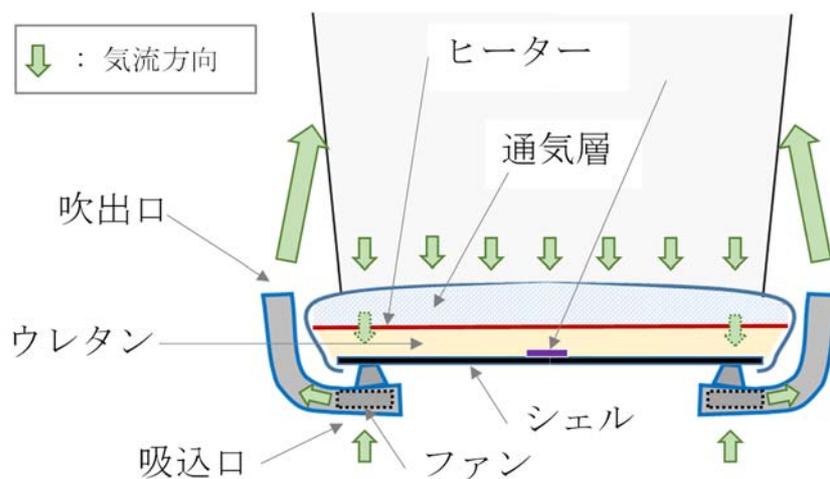


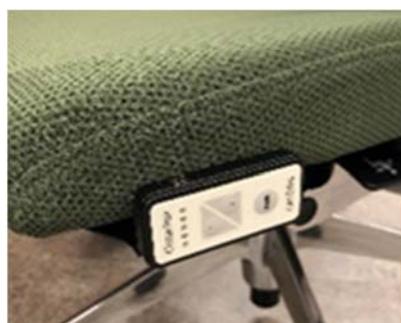
図 4.4 実用二号機の座面内部



(a) 実用二号機の電源部



(b) 実用二号機の電池



(c) 実用二号機の操作部



(d) 実用二号機の内蔵ヒーター

写真 4.3 実用二号機

4.4 実用二号機への変動風の実装

4.4.1 変動風のサンプリング

変動風を実装するにあたり、自然風を測定して、その周波数特性を解析し、快適性を評価することとした。そこで、まずは三次元風速計を用いて、松林（高松市栗林公園）、海辺（女木島港）、山頂（女木島山頂）における風速を、1秒間隔で計測した。その結果を図4.5から図4.7に示す。ここでは、風速のスカラー量を計測時間（251秒間）の最大値を100%、最小値を0%とした風速比に変換して図示している。

図4.5に示す松林を見ると、15秒から20秒にかけて、風速比15%から100%に推移するような短時間で大きな変動を示す。風速比10%以上の変化に限って、風速の増加基調と減少基調の変化周期を見ると、約5秒である。

図4.6の海辺では、130秒から140秒にかけて、100%から20%に低下する。増減基調の変化周期を見ると、約10秒から50秒程度である。

図4.7の山頂の結果から、20%以下の低風速の時間が多い。約20秒から60秒周期で、風速比が高じる。

次に、各測定結果をスペクトル解析した。測定した自然風を、周波数成分毎に時間変動を伴う波と捉えれば、それぞれが初期位相（ φ_k ）を持つ各周波数成分の合計として式4.1によって表現できる。この周波数成分毎の振幅（ a_k ）を、高速フーリエ変換によって求めた。この振幅 a_k の二乗値が、縦軸のパワースペクトル密度のことである。

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n \left\{ a_k \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} kt + \varphi_k\right) \right\} \quad \dots\dots(4.1)$$

ここに、

A_0	: 直流成分（時間平均値）	[m/s]
a_k	: 振幅	[m/s]
$2\pi/T_0$: 基本角周波数	[rad/sec]
T_0	: 対象とする最大周期 (ここでは、256)	[sec]
k	: 周波数	[Hz]
t	: 時間	[sec]
φ_k	: 初期位相	[rad]

1/f ゆらぎとは、式4.2に示す通り、振幅 a_k の二乗値（パワースペクトル密度）が周波数に反比例する波（ k^{-1} ）を指す。

$$a_k^2 = C \frac{1}{k} \quad \dots\dots(4.2)$$

ここに、

C	: 定数	[-]
-----	------	-----

図 4.8 から図 4.10 に、パワースペクトル密度を示す。図内には、最小二乗法による累乗近似式を併せて示す。

松林の結果（図 4.8）を見ると、周波数の増加に伴い、パワースペクトル密度が減少する傾向を示す。近似式を見ると、 $a_k^2 = C_1 k^{-1.023}$ を示した。その他、海辺（図 4.9）の近似式は、 $a_k^2 = C_2 k^{-1.546}$ を示し、山頂（図 4.10）では、 $a_k^2 = C_3 k^{-1.747}$ を示した。この結果から、この中では、松林が最も $1/f$ ゆらぎに近い特性を有することを把握した。

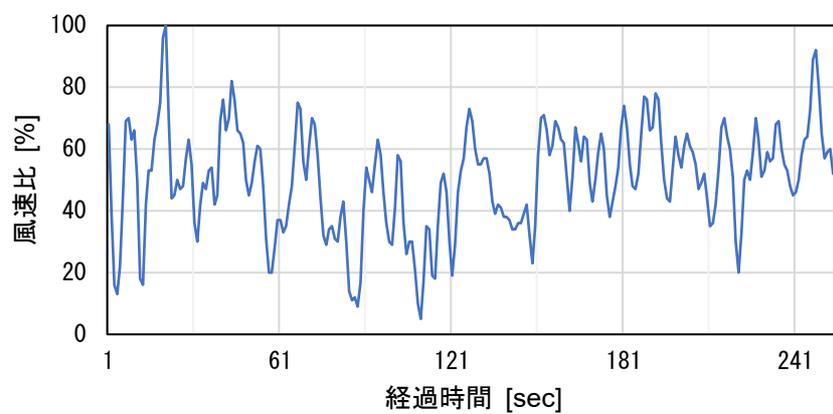


図 4.5 風速比 (松林)

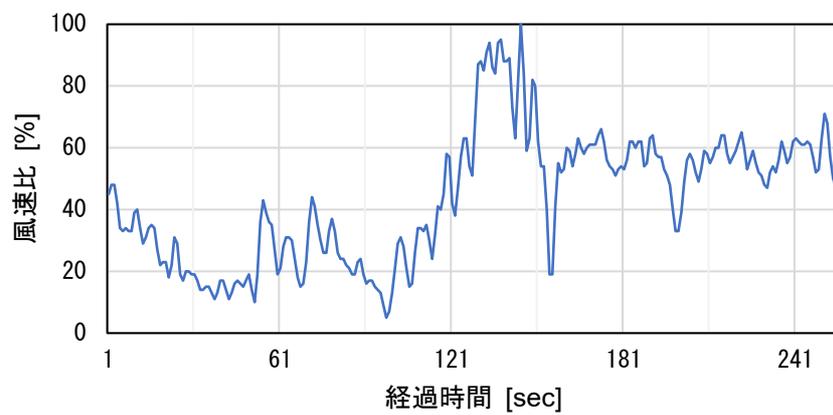


図 4.6 風速比 (海辺)

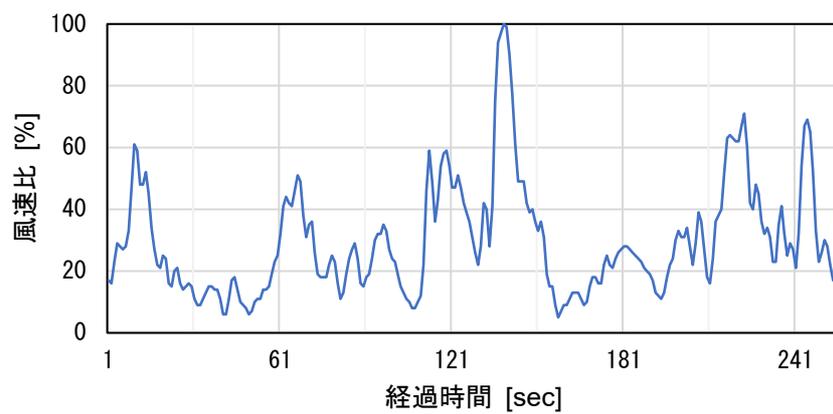


図 4.7 風速比 (山頂)

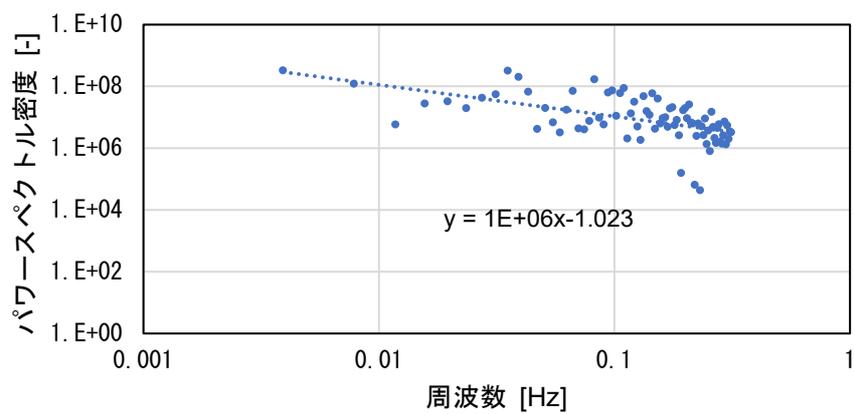


図 4.8 パワースペクトル密度 (松林)

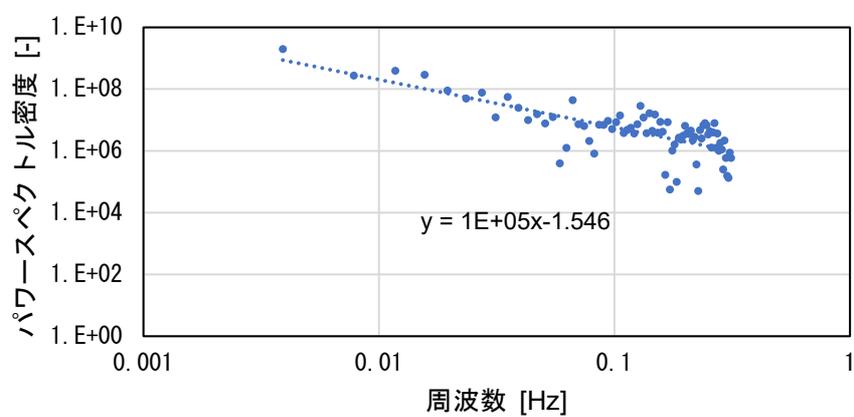


図 4.9 パワースペクトル密度 (海辺)

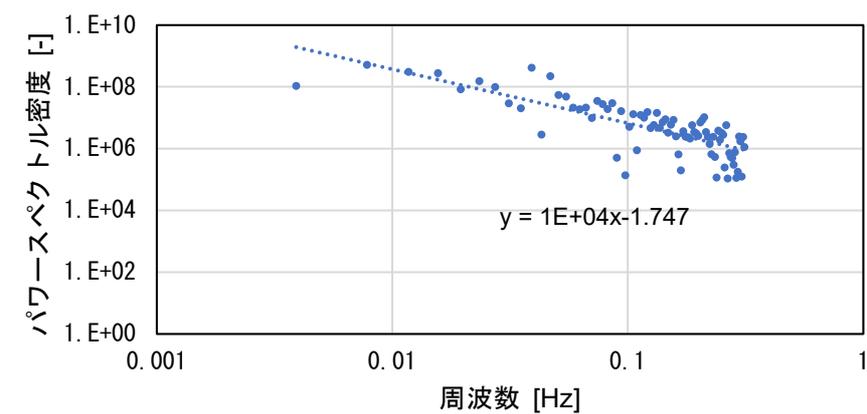


図 4.10 パワースペクトル密度 (山頂)

4.4.2 変動風の数理的な生成

数理的に変動風を生成した。式 4.3 の通り、波は周波数成分の和で表すことができる。この中の初期位相 (φ_f) は、式 4.4 で表される。

$$F_{(t)} = A_0 + \sum_{f=1}^{2^m} (A_f \cos(f \cdot t + \varphi_f)) \quad \cdots(4.3)$$

$$\varphi_f = A_0 + \sum_{f=1}^{2^m} (A_f \cos(f \cdot t + \varphi_0)) \quad \cdots(4.4)$$

ここに、

$F_{(t)}$: 風速	[m/s]
A_0	: 直流成分 (時間平均値)	[m/s]
A_f	: 周波数毎の振幅	[m/s]
f	: 周波数	[Hz]
t	: 時間	[sec]
φ_f	: 初期位相	[rad]
φ_0	: 初期位相の初期位相	[rad]

式 4.3, 4.4 を用いて変動風を作成するにあたり、周波数毎の振幅 (A_f) を設定するために、式 4.5 を用いた。

$$A_f = A \cdot f^n \quad \cdots(4.5)$$

ここに、

A	: 振幅	[m/s]
n	: 定数 (ここでは、-1)	

上記を踏まえて、数式を整理すると、式 4.6, 4.7 となる。

$$F_{(t)} = A_0 + \sum_{f=1}^{2^m} (A \cdot f^n \cos(f \cdot t + \varphi_f)) \quad \cdots(4.6)$$

$$\varphi_f = A_0 + \sum_{f=1}^{2^m} (A \cdot f^n \cos(f \cdot t + \varphi_0)) \quad \cdots(4.7)$$

1 周期のデータ数は、512 個とした。初期位相は、1 つの周波数の波形から、2 つの初期位相を抽出して、それらの周波数を合成した。合成した 2 つの波形から、4 つの初期位相を抽出して、4 つの周波数を合成した。この繰り返しによって、64 個の初期位相を抽出して、風速の波形を作成した。その結果、図 4.11 に示す通り、 $1/f$ ゆらぎを有する波を生成した。この波の周波数特性を解析して、図 4.12 に示す通り、周波数に反比例することを確認した。

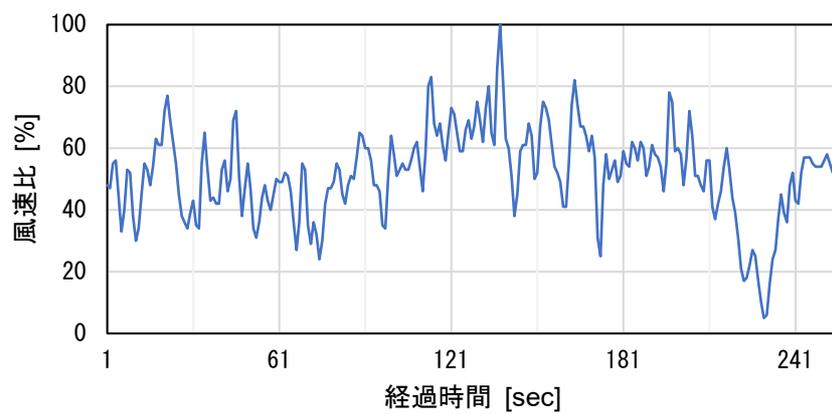


図 4.11 風速比 (1/fゆらぎ風)

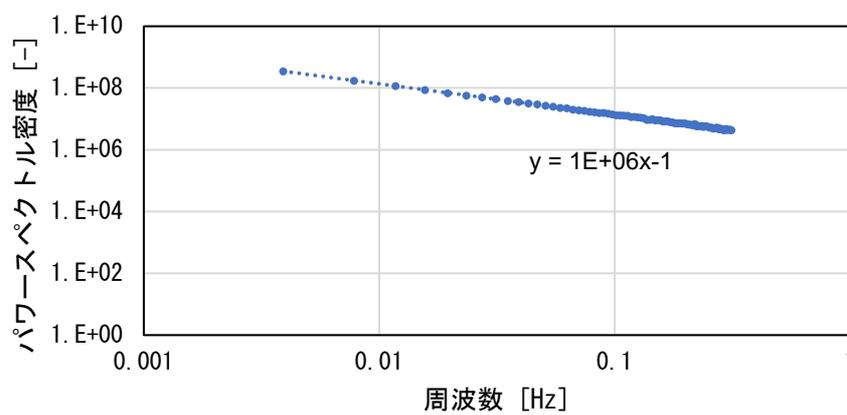


図 4.12 パワースペクトル密度 (1/fゆらぎ風)

4.4.3 被験者実験

松林、海辺、山頂の自然風および前節で生成した変動風（ $1/f$ ゆらぎ）、これらに加えて定常風と Sin 波を加えた 6 種の波を、採涼採暖椅子（プロトタイプ機）に実装して、被験者実験を行った。被験者実験は、2020 年 12 月 10 日から 26 日までの 16 日間、工学院大学八王子校舎にある KTC の実験室 A、実験室 B にて行った。被験者は男性 14 名、女性 5 名の計 19 名である。実験室は 24°C とした。

ここで、図 4.13 に 6 種の風に関する主観的な好ましさをアンケートにより回答させた結果を示す。左図の番号は、好ましさの順位を示す。右図は、好ましさの上位 2 種類および 3 種類を集計した結果を示している。

左図の最も好ましいと回答された 1 番を見ると、海辺が 25% と他に比べて割合が多いものの、他の風も 10~20% 程度を示していることから、顕著に好まれる風は存在しない。6 番を見ると、定常風および Sin 波が多い。両者は、変化しない、もしくは、変化が単調であることから、あえて好ましいと申告するほどではないと判断されたものと推察している。右図の上位 2 種類で見れば、定常風と Sin 波を除いた 4 種の変動風（松林、海辺、山頂、 $1/f$ ゆらぎ）の好ましさは、ほぼ同じ割合である。これは、上位 3 種類の結果を見ても同様である。

実装する変動風として、いずれを採用するか、被験者実験から決定的な指標を抽出するには至らなかった。ひとまず、プログラミングの取扱いの面で、比較的ハードルの低い $1/f$ ゆらぎを採用することとした。

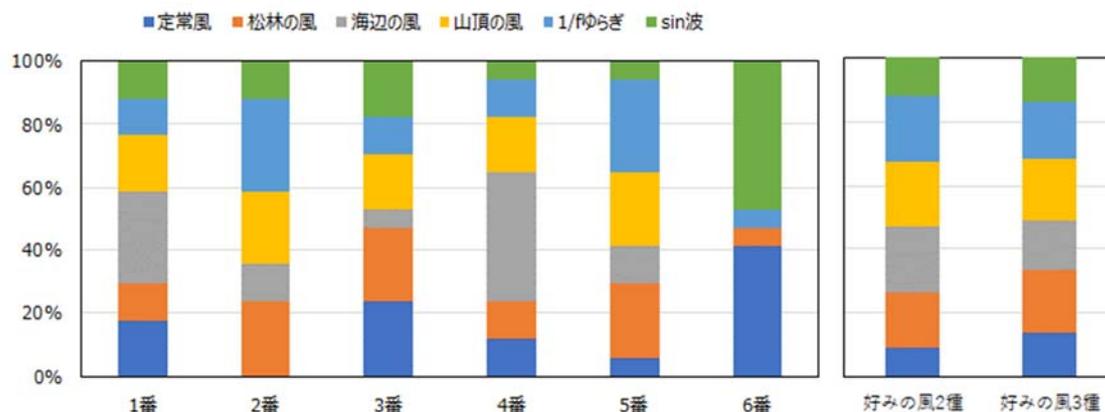


図 4.13 変動風の好ましさ

4.4.4 1/fゆらぎの実装

実用二号機の実際の使用状況を観察すると、5段階の出力レベルの内、出社直後等の急冷を欲する場合には、Lv.4~5 を選択し、1 時間以上継続して座り続けるような、長時間の執務時にはLv.3 以下の出力で使用される傾向が見られた。そこで、1/f ゆらぎを実装する際に、Lv.3 以下の出力を選択する場合に、変動風を生じさせることとした（表 4.2）。

具体的には、ファンへの入力電圧を変動させることで、吹出し風速を変動させており*、図 4.14 に示す変動を繰り返す。出力レベルに応じて、平均電圧が変化するようにパラメータ (A_0 , C) を設定した。なお、ファンの時定数を勘案し、5 秒間は一定の電圧となるようにした。ファンの仕様上、4V 以下では停止するため、Lv.1 では5 秒間停止が1 周期に2 度生じる。

この試作機を、前出の高松市某オフィスに勤務する6 名を対象に、試用評価を行ったところ、4 名から心地よく感じるといった評価を得た。

表 4.2 各出力強度における時間平均供給電圧

出力強度Lv.	1	2	3	4	5
実用二号機	5.0 (定常風)	6.8 (定常風)	8.5 (定常風)	10.3 (定常風)	12.0 (定常風)
実用二号機 (変動風実装)	6.0 (変動風)	7.2 (変動風)	9.1 (変動風)	10.3 (定常風)	12.0 (定常風)

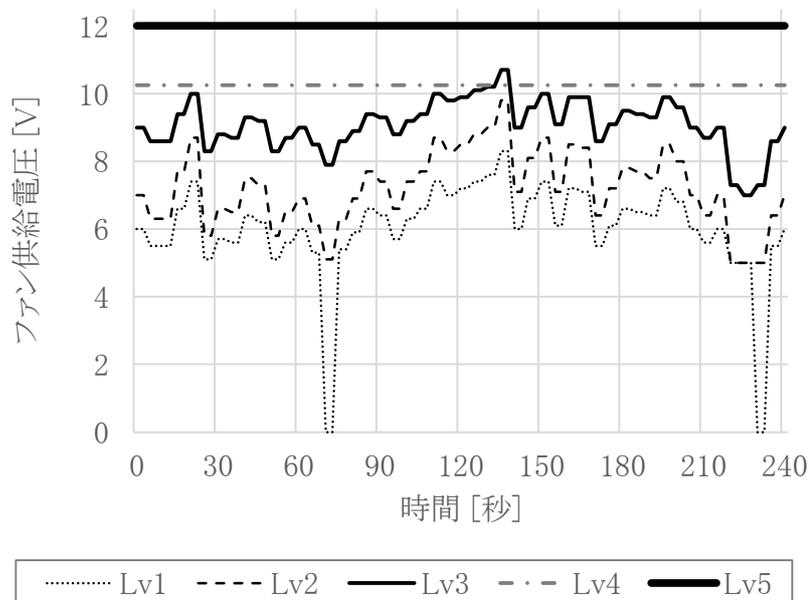


図 4.14 送風時各出力レベルでのファン入力電圧

4.5 利用者からの反応

採涼採暖椅子の利用者からの意見を表4.3に示す。実用初号機では、安全性や耐久性、座り心地に関して、意見が寄せられたものの、実用二号機での改良により解消した。

一方で、使い勝手の観点から、バッテリーの充電・装着の煩雑さ、持続時間の短さは依然として不満が残る。座面に機能を集約したことから、バッテリー設置位置が座面の裏側となるため、装脱着の際に姿勢を屈める必要があることが原因と考えられる。

また、変動風とすることで、風の音が気になるようになったとのコメントもあった。定常風では、一定のノイズとして環境雑音に紛れるところが、変動風によって気になりやすくなった可能性が示唆される。変動風機能を自由に選択できるよう操作部の改良が必要と考える。

表 4.3 使用時の意見

	ネガティブな事象・コメント	項目	進捗
実用初号機	充電コードを踏む	安全性	電池を着脱式として改善
	充電しづらい	使い勝手	未
	残量表示がないので目安がわからない	使い勝手	電池を着脱式として改善
	充電コードの保管場所がない	使い勝手	未
	座面の凹凸が気になる	座り心地	改善実施
	スイッチが足に当たり時折痛い	安全性	スイッチが足に当たらないように改善
	スイッチがすぐ壊れる	耐久性	スイッチの耐久性を向上
	風の音が気になる	機能	未
	ずっと風を浴びたくない	機能	変動風機能により改善か
実用二号機	電池交換が頻繁に必要	使い勝手	未
	バッテリー交換がしづらい	使い勝手	未
実用二号機 (変動風)	風の音が気になる	機能	未

4.6 まとめ

本章では、採涼採暖椅子の実用化に際する各課題を整理し、解決のプロセスを示した。

- 1) 座り心地の確保のために、座面がウレタンの事務用椅子をベース機に用いた。ただし、座面内部には、通気素材を挿入して、座面の熱抵抗を低下させ、冷却効果を生じさせることで、温調機能の向上と座り心地の確保を両立させた。
- 2) 使い勝手の向上のために、着座センサを付加し、離着席による自動停止・自動復帰の機能を付した。また、バッテリーの容量を最大限確保し、概ね一日の使用を可能とした。ただし、バッテリーの装脱着には、煩雑さがあり、依然として課題が残る。
- 3) 安全性の観点では、ヒーターにサーモスタットによる安全回路を設けて、一定の温度以上にならない仕様とした。
- 4) 耐久性の確保のために、操作部を堅牢な筐体として、簡単には壊れないようにした。
- 5) 製作性の向上のため、改造範囲を座面のみに限定した。
- 6) 保守の観点から、ヒーターやファン等の各部品を安定供給が可能な仕様とした。また、吹出口を故障時に交換が容易となる設計とした。
- 7) 1/f ゆらぎを理論的に生成し、実装した。試用評価したところ、高評価を得つつも、変動風により音が気になるようになったとの意見もあった。

参 考 文 献

- 1) 安久正紘, 大口國臣: 人に快適感を与える 1/f ゆらぎとその家電機器への応用, 電気學會雑誌, 113 卷(1993)1 号, pp.27-33.
- 2) 徐国海, 久野覚, 水谷慎吾, 斎藤輝幸: 変動風環境における整理・心理反応に関する研究 — 暑不快環境から気流のある中立環境へ移動した場合の温冷感実験 —, 日本建築学会計画系論文集, 第 519 号(1999), pp.47-53.
- 3) 鶴飼真成, 村松一貴, 野部達夫: 等温気流発生装置を具備した事務椅子の冷却効果, 空気調和・衛生工学会論文集, 40 卷, 223 号(2015), pp. 37-44.
- 4) 久保田裕貴, 花園新太郎, 野部達夫: 変動風発生機能を備えたクールチェアの性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(2021), 環境工学, pp.1885-1886.

5章 オフィスにおける実運用状況の解析

5.1 はじめに

図 5.1 に採涼採暖椅子を適用した場合の個人の温熱環境調節のフローを示す。室内の温湿度等の環境条件や代謝量の変動等によって、人体の熱バランスが崩れた場合には、まず生理的調節がされる。その後に行動性調節が行われて、心理的適応として温熱環境に対する期待の調整が起こり、心理的反応として快不快に顕れる。このとき、行動性調節の一手段としてパーソナル空調(ここでは、採涼採暖椅子)を付与することで、各自の自律的な環境選択が可能となり、熱的不快を減じさせるものとする。ただし、パーソナル空調の使用は、個人裁量によるものであり、環境条件やヒューマンファクターの影響を受けるために、一様な運用とならず、個人差を有することが予想される。

パーソナル空調を実環境に適用して、その運用状況を観察した既往研究としては、柳井ら¹⁾の研究が挙げられる。これは、実用オフィスにパーティションを利用したパーソナル空調を導入して、その利用状況を観察・分析したものであり、多くの執務者が代謝量の変化に応じて自発的に風量調整をしていることを指摘した。ただし、観察した期間は3日間と短期間であり、年間を通じた運用状況を把握された例は少ない。

そこで、本章では、採涼採暖椅子を実用オフィス3拠点に導入して、6ヵ月から3年の長期にわたって連続的に採涼採暖椅子の運用状況を観察した。このデータから、採暖椅子の運用に及ぼす環境条件の影響およびヒューマンファクターの影響を分析する。

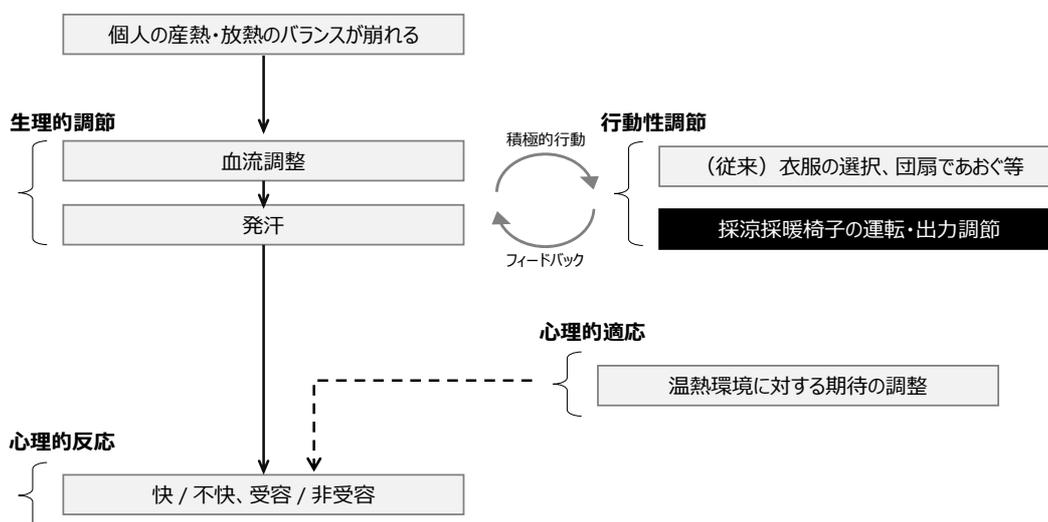


図 5.1 個人の温熱環境調節のフロー

5.2 分析対象

表 5.1 に採涼採暖椅子の分析対象の概要を示す。採涼採暖椅子を導入した 3 ヶ所の実用オフィスを対象とした。いずれの建物も地上 2 階もしくは 3 階建てで、延床面積 1,000m² 前後の小規模建物である。TM は竣工から 3 年 1 ヶ月、SP は 2 年 3 ヶ月、KZ は 7 ヶ月のデータを用いた。

これらオフィスの一部執務者（TM: 10 名、SP: 7 名、KZ: 20 名、計 37 名）が採涼採暖椅子を常用した。これらの椅子からの発信データを収集して分析に使用した。室内温湿度については、室内の壁面に設置されたセンサによる計測データを元にした。分析に用いたデータの時間粒度は 1 時間である。

表 5.1 採涼採暖椅子の分析対象の概要

拠点ID	TM		SP		KZ	
所在地	香川県高松市		北海道札幌市		石川県金沢市	
建物規模	地上 3 階建て		地上 2 階建て		地上 3 階建て	
延床面積	1,181 m ²		1,113 m ²		995 m ²	
竣工年	2019年		2021年		2022年	
分析対象期間	2019/08 ~ 2022/07		2021/07 ~ 2023/10		2022/06 ~ 2022/12	
採涼採暖椅子の 使用対象者	男	8名	男	7名	男	15名
	女	2名	女	0名	女	5名
	計	10名	計	7名	計	20名

5.3 各拠点における運用状況

5.3.1 拠点 TM における運用状況

図 5.2 に示す通り、2 階部分の事務室 1 および 2 の男性 6 名、女性 2 名 (TM-01 から TM-08) を対象に採涼採暖椅子を付与した。その他、共用席用に 2 脚設置した。2019 年 11 月から 2021 年 4 月の採涼採暖椅子の利用データを分析対象とした。

表 5.2 TM における採涼採暖椅子の使用者

ID	性別	ID	性別
TM-01	女性	TM-05	男性
TM-02	女性	TM-06	男性
TM-03	男性	TM-07	男性
TM-04	男性	TM-08	男性

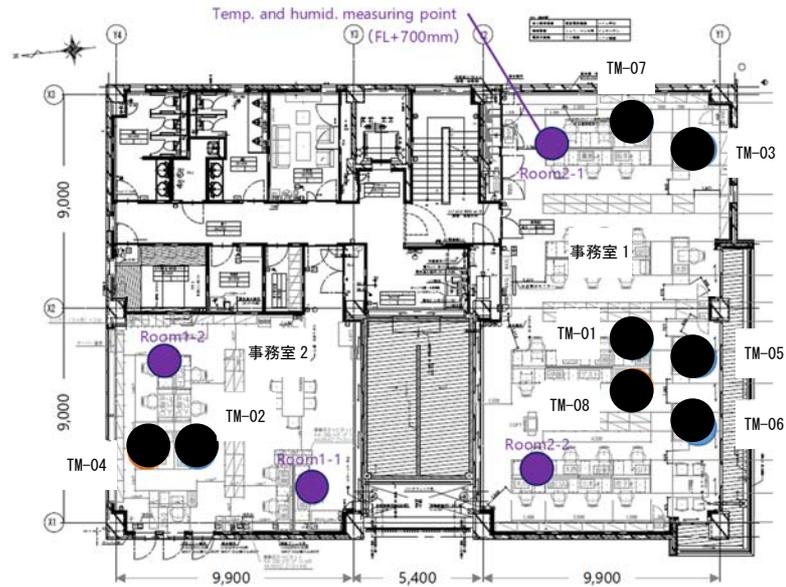


図 5.2 拠点 TM の採涼採暖椅子の配置図

図 5.3 に拠点 TM における夏期の室内空気温度の推移と採涼採暖椅子の運用状況 (TM-01, TM-02, TM-07 の 3 名) を示す。代表日として、盛夏期における典型的な室内空気温度の推移を示した 2020/8/4, 8/6, 8/7 を選定した。なお, 8/4 と 8/6 は事務室 1, 8/7 は事務室 2 の結果である。中図に示す使用率とは、着座している時間の内、冷却モード、もしくは、加熱モードを使用する時間の割合を指す。停止率とは、着座時間の内、いずれのモードも使用しなかった時間の割合を指す。下図には、5 段階で調整できる出力の推移を示す。正側に加熱モード使用時の出力、負側に冷却モード使用時の出力を示す。当該時間帯中における出力の最大値と最小値を併記している。

上図に示す室内空気温度を見ると、事務室 1 (8/4, 8/6) では、空調開始後の 9 時以降から空調が停止する 20 時頃まで約 25°C で推移した。事務室 2 (8/7) は、事務室 1 に比べてやや高く、27°C 前後を示した。

中図の使用率および停止率を見ると、いずれのユーザーも着座中は、ほとんどの時間で冷却モードを使用した。TM-01 や TM-07 は、室温が 25°C と一般的な夏期の空調設定温度 (26°C) よりも低温であったにもかかわらず、冷却モードを使用した。これは、外部の暑熱環境下で出勤することによる温熱履歴の影響と考えている。

下図の出力を見ると、TM-01 は、冷却モードを常時最大出力 (-5) で使用した。TM-02 は、使用直後には冷却モードを最大出力で使用するが、後に低出力 (-2) に変更した。TM-07 は、出社直後から午前中には、低出力 (-2) で使用して、午後 (14 時) に中出力 (-3) に出力を上げた。

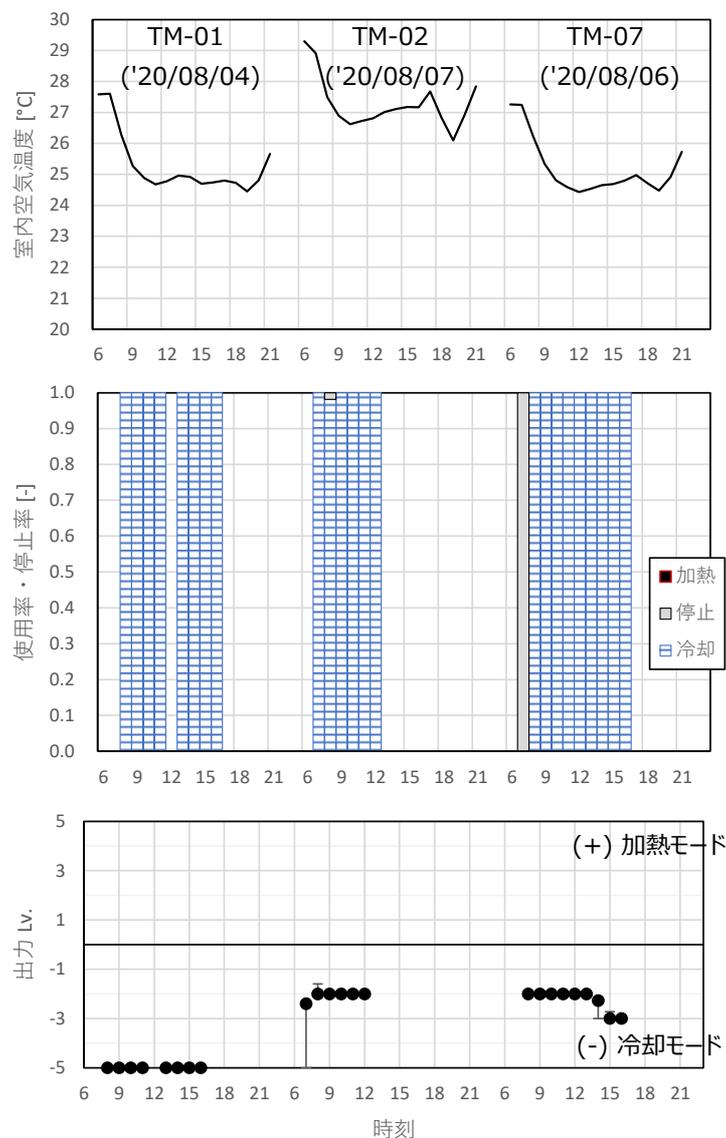


図 5.3 拠点 TM における夏期の運用状況

図 5.4 に冬期の室内空気温度の推移 (2021/1/25, 1/26, 1/28 の 3 日分) と採涼採暖椅子の運用状況 (TM-02, TM-06, TM-07) を示す。上図の室内空気温度を見ると、午前中は漸次上昇して、12 時頃に 21°C 以上に達して、午後は 22°C 前後で推移した。

中図を見るなら、TM-02 と TM-06 は、着座時は常に加熱モードで使用した。TM-07 は、午前中は停止させて、12 時以降に加熱モードを使用した。これは、執務内容が午前と午後で変わり、午後に代謝量が低下したためと推察している。

下図に示す出力より、TM-02は最大出力(5)、TM-06は中出力(3)で常時使用した。TM-07は、使用開始直後から3時間は中出力(3)で使用して、その後に低出力(1)にして、再度中出力(3)とするような調整を行った。

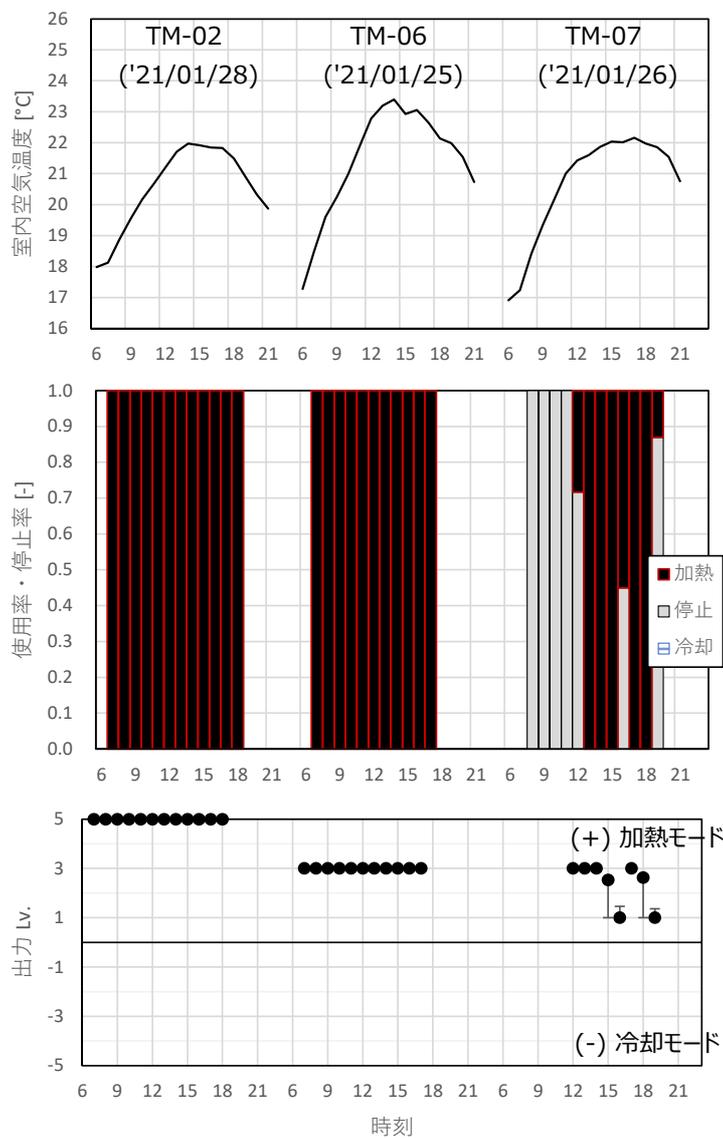


図 5.4 拠点 TM における冬期の運用状況

5.3.2 拠点 SP における運用状況

表 5.3 に示す通り、実用オフィスにおいて採涼採暖椅子の使用状況を調査した。対象施設は北海道札幌市に所在しており、2021年6月に竣工したオフィスビルである。当椅子を8名の執務者に付与し、自由に使用させた。

分析には、2021年7月から2022年3月までのデータを用いた。椅子の稼働状況は、椅子から発信される無線情報を計測ロガーで収集することで把握した。椅子からのデータは、椅子駆動用の充電電池の残容量があるとき発信される。ただし、計測ロガー不具合により、2021年12月から2022年2月の冬のデータが欠損したため、夏季および中間期のデータを元に分析した。

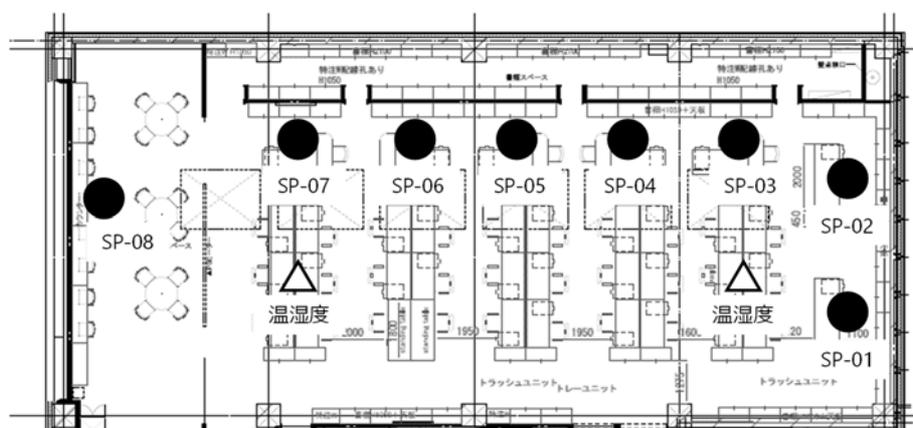


図 5.5 拠点 SP の採涼採暖椅子の配置図

表 5.3 採涼採暖椅子の計測概要

対象施設:	拠点SP
使用者数:	男性8名 (ID: SP-01 ~ SP-08)
対象期間:	2021年7月1日~2022年3月31日 (*)
計測項目:	1) 着座の有無, 2) 冷却モードの稼働の有無, 3) 加熱モードの稼働の有無, 4) 冷却モードおよび加熱モードの強度

(*) ただし、12月~2月中旬まで、計測ロガーの不具合のため、データ欠損

図 5.6 に拠点 SP における夏期の室内空気温度の推移 (2021/7/25, 7/26, 7/27) と採涼採暖椅子の運用状況 (SP-01, SP-02, SP-04) を示す。上図の室内空気温度は、24°C から 26°C の範囲内を示す。夜間と日中で温度の較差が小さいが、これは、比較的に熱容量の大きい建物であるためである。

中図の使用率・停止率を見ると、着席時には常に冷却モードで使用した。下図の出力より、SP-01は、使用開始直後には高出力（-4）で使用し、午後に低出力（-2）とした後、再度最大出力とした。SP-02は中出力（-3）、SP-04は最大出力（-5）で常時使用した。

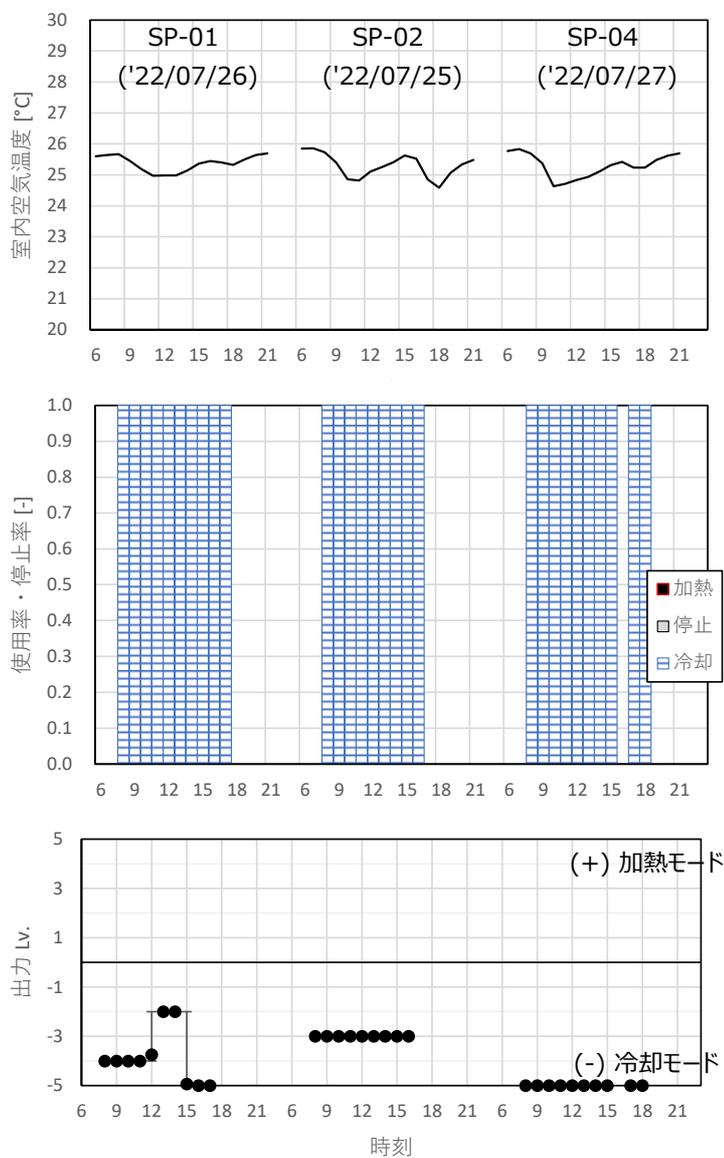


図 5.6 拠点 SP における夏期の運用状況

5.3.3 拠点 KZ における運用状況

金沢市に所在する事務所ビルを対象に、採涼採暖椅子を 20 台導入して、その運用状況を把握する。表 5.4 の計測概要を示す通り、使用者の内訳は、男性 15 名、女性 5 名である。分析対象期間は、2022 年 6 月 1 日から 2022 年 12 月 31 日の 6 ヶ月間である。

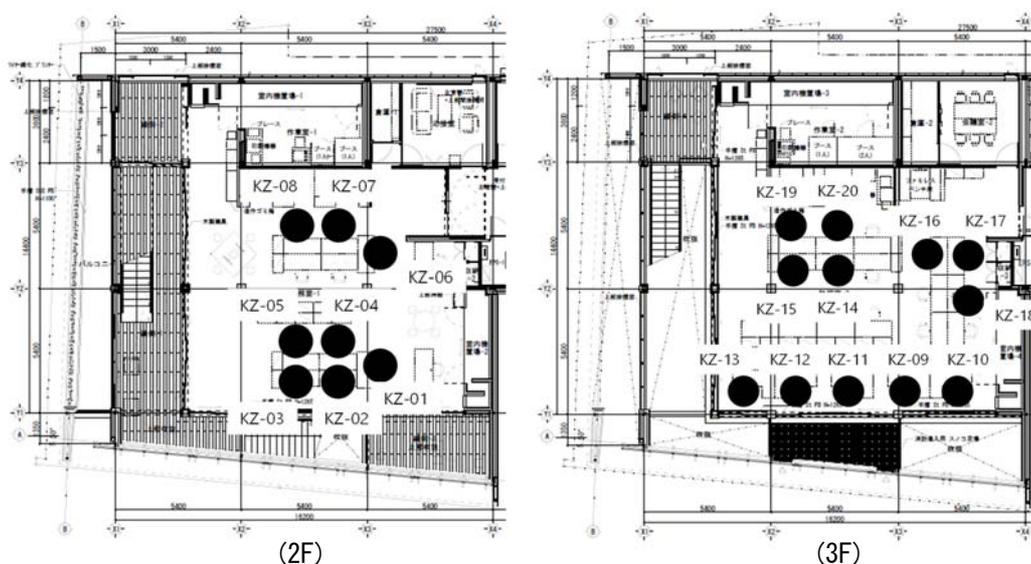


図 5.7 拠点 KZ における採涼採暖椅子の配置図

表 5.4 拠点 KZ における計測概要

対象施設:	拠点KZ
使用者数:	男性15名、女性5名 (ID: KZ-01 ~ KZ-20)
対象期間:	2022年6月1日~2022年12月31日
計測項目:	1) 着座の有無, 2) 冷却モードの稼働の有無, 3) 加熱モードの稼働の有無, 4) 冷却モードおよび加熱モードの強度

図 5.8 に夏期における室内空気温度の推移 (2022/7/14, 7/15) と採涼採暖椅子の運用状況 (KZ-09, KZ-14, KZ-15) を示す。上図の室内空気温度より、いずれの日も、9時から19時は26°C前後で推移した。

中図に示す KZ-09 を見ると、使用直後 (11 時) は冷却モードを使用するが、その後停止させて、わずかながら加熱モードを運転させた。これは、温熱履歴の解消のために、当初は冷却モードで使用するものの、汗が引いた後に寒く感じたことで加熱モードを使用したものと推察する。

KZ-14は、着座する時間帯が9時、12時、15時に限られているが、着座時には冷却モードを常に使用した。KZ-15は、着座した直後は使用せず、途中から冷却モードを使用した。

下図の出力より、KZ-14を見ると、着座直後に最大出力(-5)で使用した後、中出力(-3)に変更した。その後、再度着席した後は中出力(-3)から高出力(-4)に上げた。

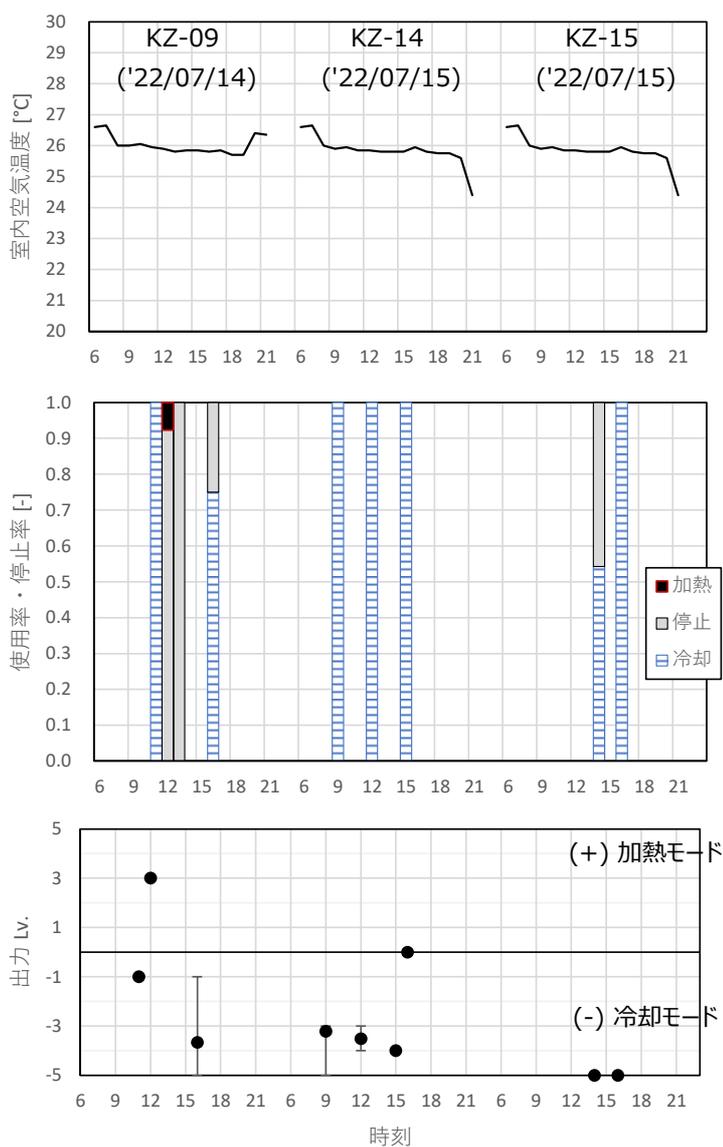


図 5.8 拠点 KZ における夏期の運用状況

図 5.9 に秋季の室内空気温度の推移（2022/11/17, 11/28, 12/1）と採涼採暖椅子の運用状況（KZ-16, KZ-17, KZ-18）を示す。上図に示す室内空気温度は、9時から12時にかけて22°C以上に推移している。

中図の使用率を見ると、KZ-16は、着座する時には、常に加熱モードを使用した。KZ-17は、午前中から15時頃まで、加熱モードを使用して、以降は停止した。KZ-18は、入社直後は使用しないものの、10時以降は常に加熱モードを使用した。

下図の出力より、KZ-16は着座した後は最大出力（5）で使用して、20時頃に1段階出力を下げて、-4とした。KZ-17は常に中出力（3）で使用した。KZ-18は、ほとんどの時間において中出力(3)で使用した。

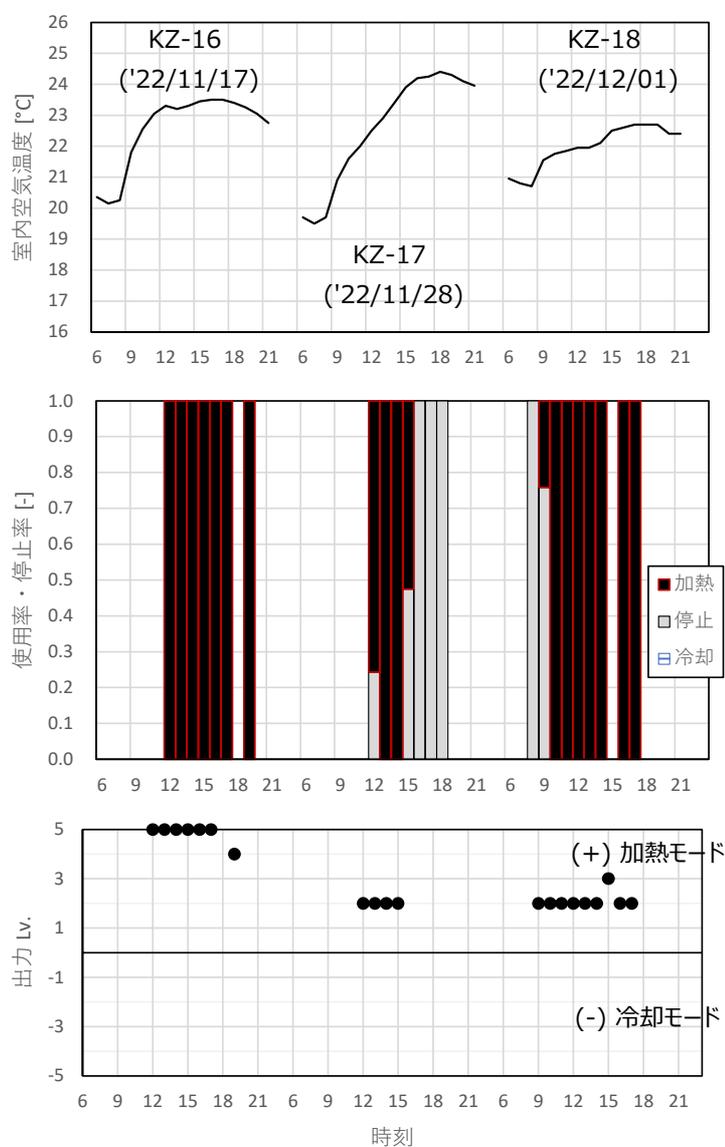


図 5.9 拠点 KZ における秋期の運用状況

ここまでを概括すると、温熱履歴の解消や代謝量の変化等に応じて、使用・停止を切り替える操作や出力を調整する操作が行われる場合が見られた。ただし、頻度は稀であり、使用され始めれば、同一のモード、同一の出力で使用される場合が多く見られた。

5.4 使用時の室内温湿度

図 5.10 に採暖椅子の使用時における室内温湿度を示す。例えば、TM-07 を見ると、冷却モードは 26°C 以上で使用され、加熱モードは 24°C 以下で使用される傾向を示しており、両モードでそれぞれ使用される温度が異なる。

一方で、SP-05 や KZ-17 のように、冷却モードで使用される温湿度と加熱モードで使用される温湿度に差が見られない場合もある。これは、使用者の着衣の調節によって、同じ室内空気お湿度条件でも、温冷感が異なることから、両モードの使用が見られたものと考えられる。このように、同一の温湿度条件下であっても、冷却・加熱両方の要求が生じることがわかる。

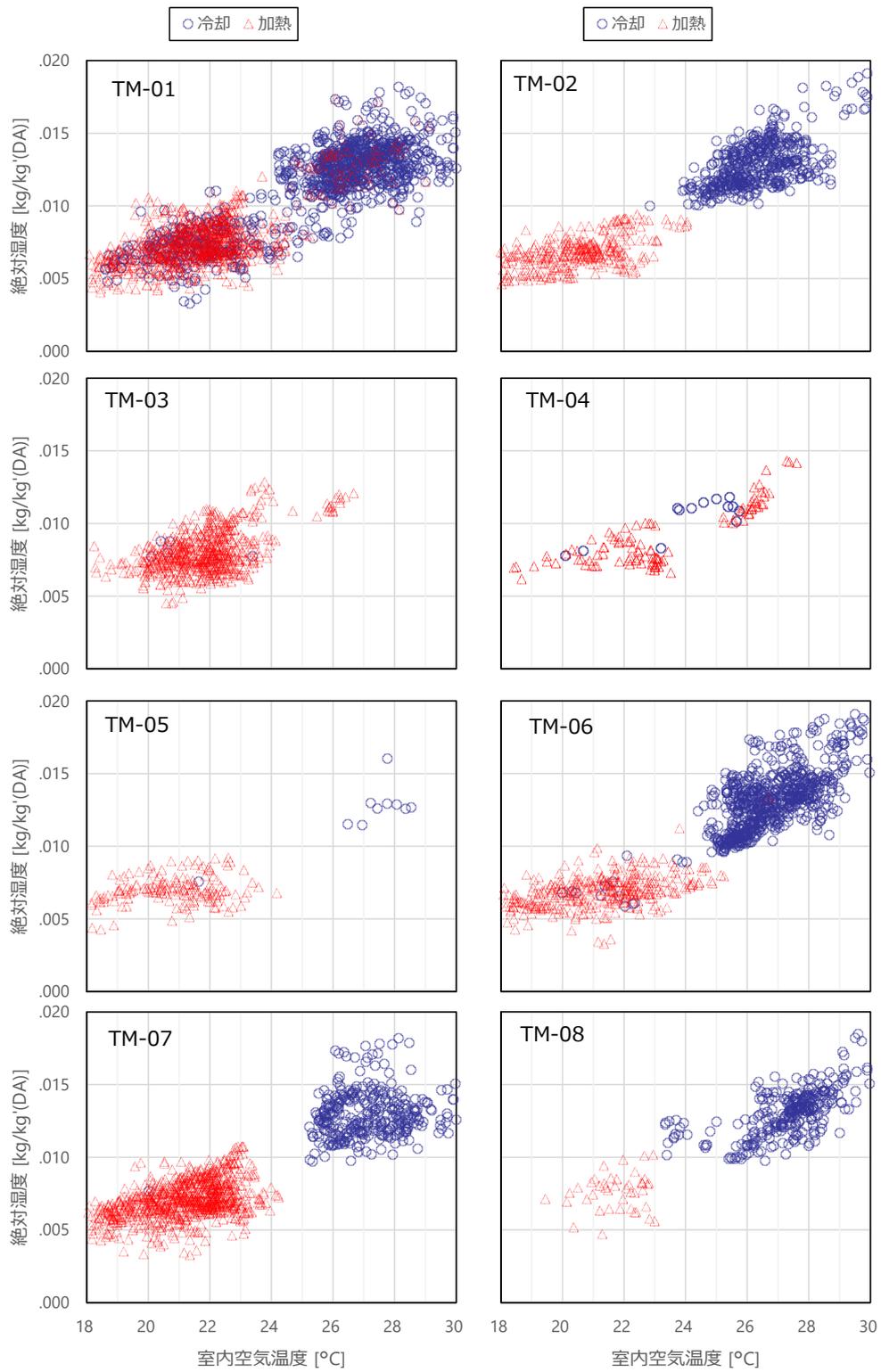


図 5.10 稼働時の室内温湿度 (1)

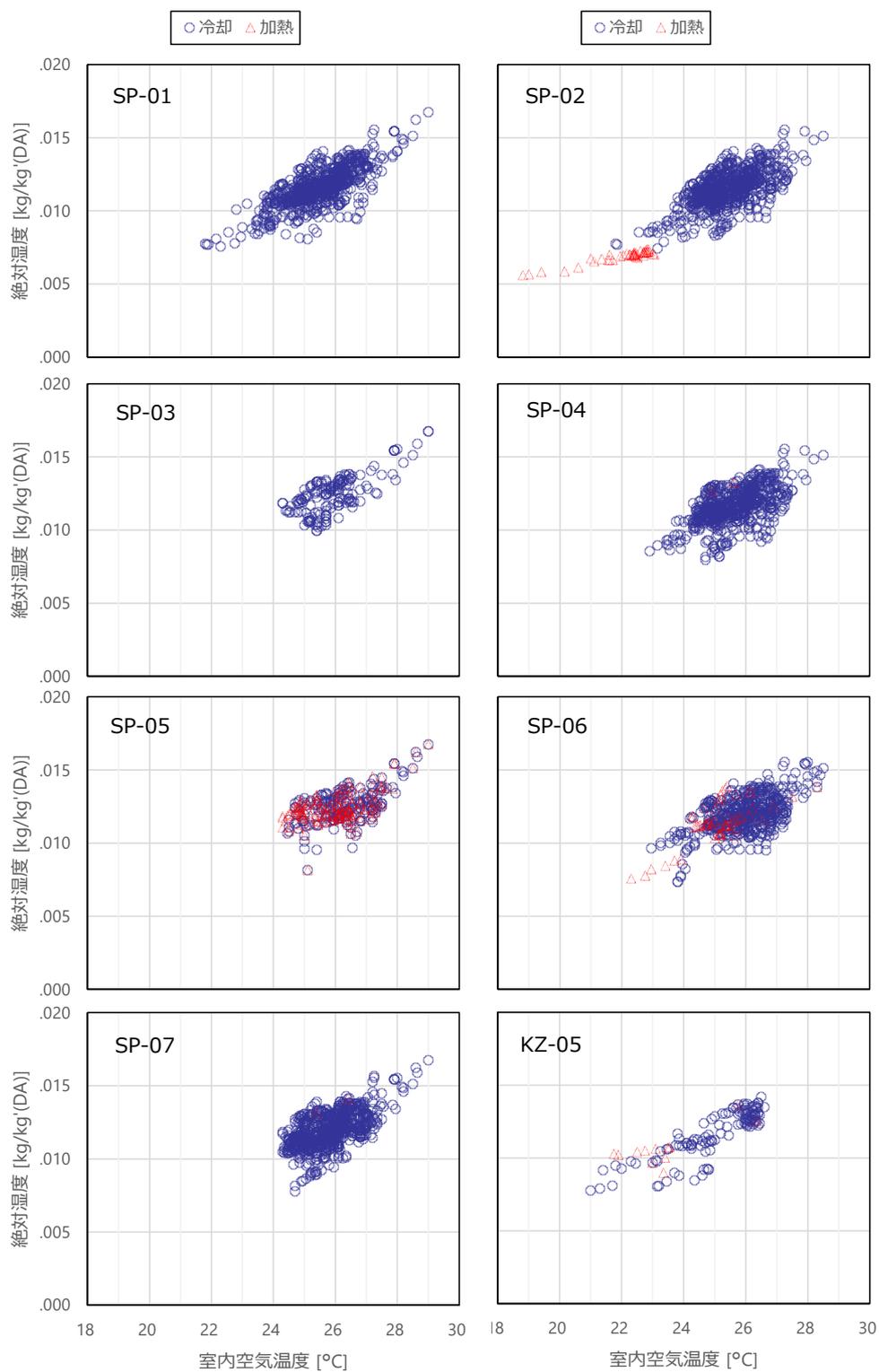


図 5.10 稼働時の室内温湿度 (2)

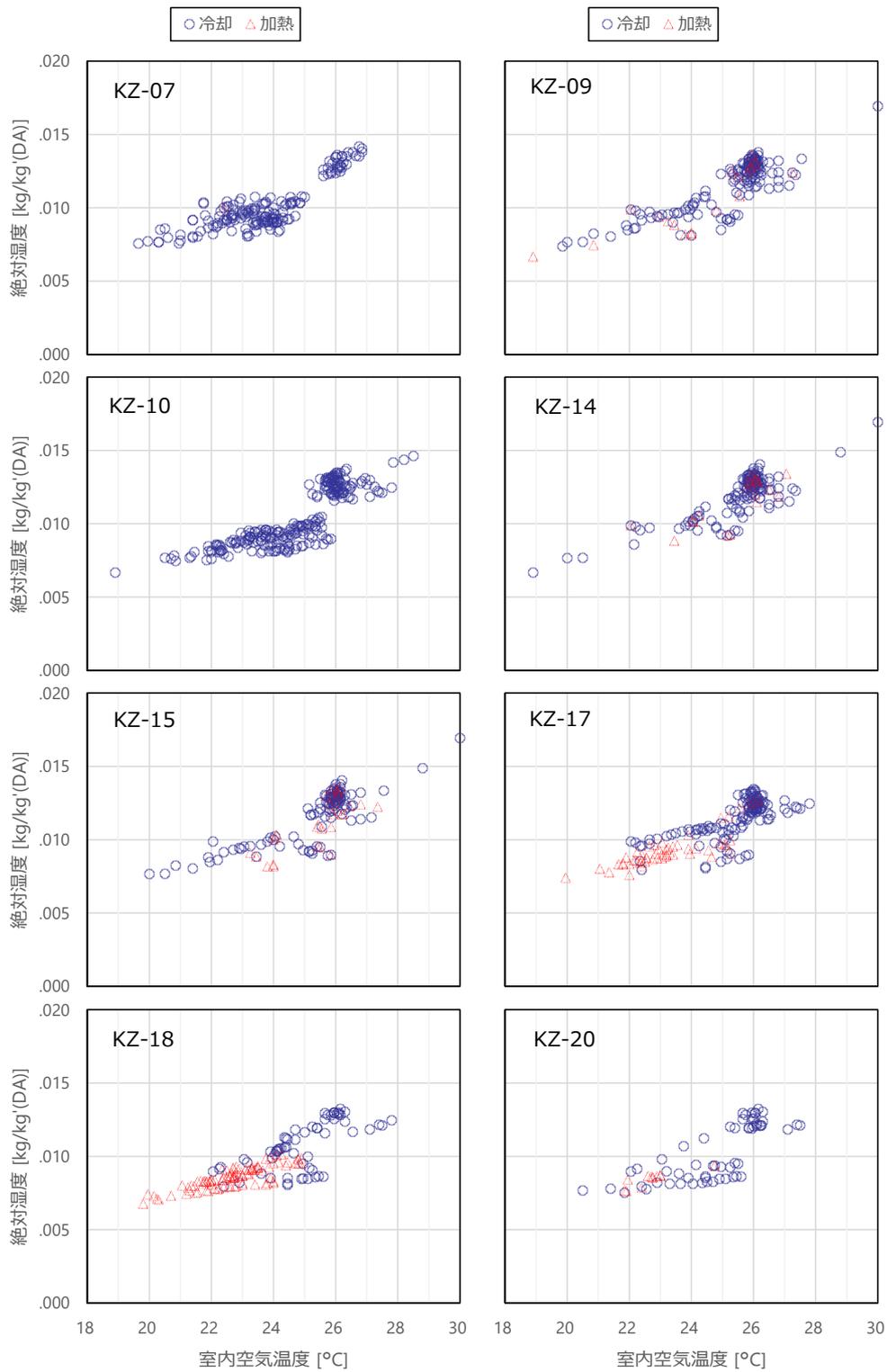


図 5.10 稼働時の室内温湿度 (3)

5.5 主観評価

5.5.1 採涼採暖椅子利用者と一般椅子利用者の温冷感申告

拠点 SP において、初年度（2019 年 11 月）および 2 年目（2020 年 11 月）の採涼採暖椅子利用者並びに一般椅子利用者の温冷感申告値(TSV)をアンケートにより調査した。その結果を図 5.11 に示す。初年度の TSV は利用者および非利用者ともに中立から外れた申告（やや寒い - 非常に寒い）が見られた。2 年目には非利用者からは中立以外の申告（やや暑い - 寒い）が見られたが、利用者からは中立の申告のみを得た。採涼採暖椅子により各自で温冷感を調整した効果と考える。

加えて、2 年目における利用者へのアンケート回答から、「暑さ寒さがあまり気にならなくなった。他人との感覚の差を埋める役割を果たしている」、「パッケージ空調機の設定温度を変えに行く回数が減ったと思う」といった意見を得た。このことから、利用者が自らの温冷感に応じた採涼採暖椅子の使い方を習得し、各自の温冷感調整手段が増えたことで、不満を感じなくなったことが示唆される。

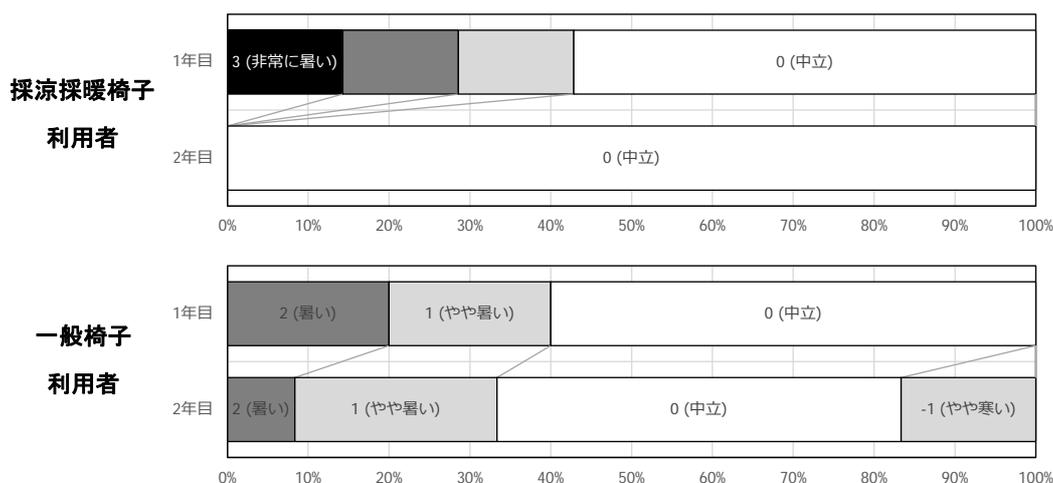


図 5.11 利用者と非利用者の TSV

図 5.12 に採涼採暖椅子の利用者と一般椅子の利用者の温熱環境満足度を示す。採涼採暖椅子の利用者の結果を見れば、竣工当初（2019 夏）は非常に不満足との回答が見られたものの、徐々に解消されて、翌年（2020 夏）には不満足なる回答は見られなくなった。一方で、一般椅子の利用者は、竣工当初には不満足との回答はなかったものの、2019 秋以降は不満足側の回答が生じた。この理由として、採涼採暖椅子の利用者は、時間経過に伴って温熱調整のノウハウを蓄積していくことで、各自が自律的に調整できるようになり、不満を感じなくなったと推察する。逆に、一般椅子利用者は、思い通り温熱環境にならないことが、徐々に表れてきたためと考える。

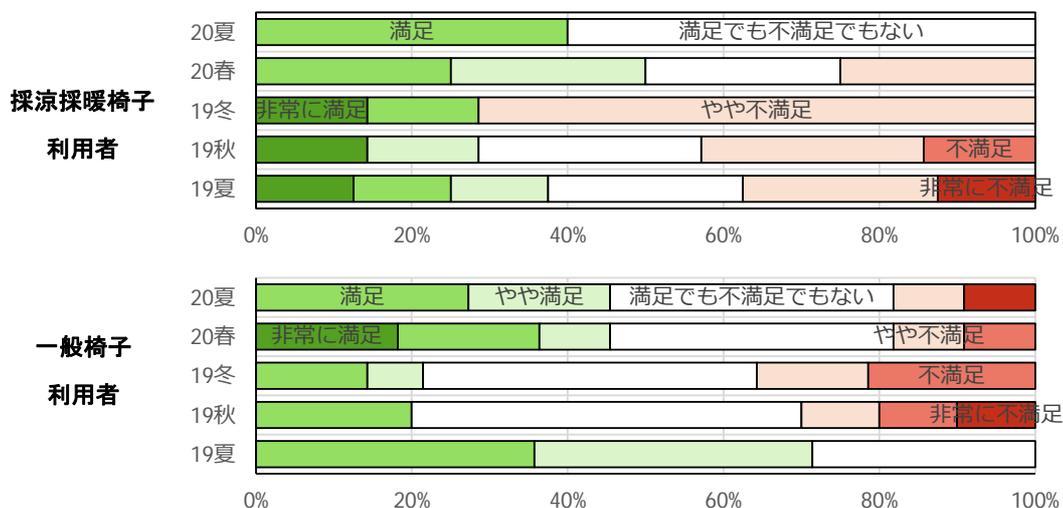


図 5.12 採涼採暖椅子の利用者と一般椅子の利用者の温熱環境満足度

5.5.2 採涼採暖椅子の満足度

図 5.13 に採涼採暖椅子の満足度を示す。常時利用者に加えて、一時的に共用の採涼採暖椅子を使用できる執務者を対象とした。その結果、6名から満足側、2名から不満側の回答を得た。不満理由に、バッテリーの容量不足、充電の煩わしさ等が挙げられている。満足度向上には、より長時間稼働させることが課題である。

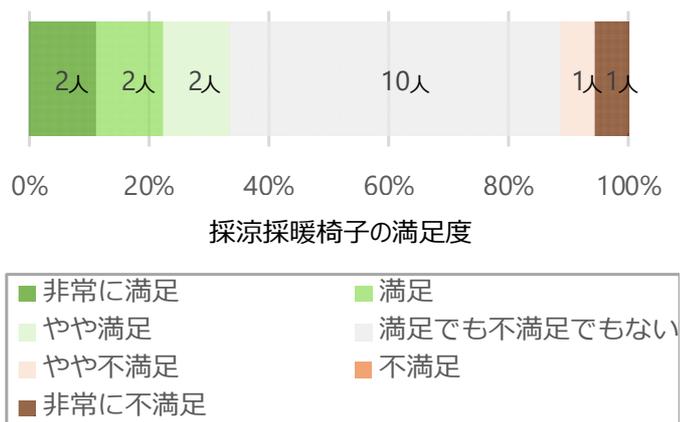


図 5.13 採涼採暖椅子の満足度

5.6 運用状況の整理

5.6.1 使用率

以降では、3拠点での計測データを元に、運用状況を整理して、環境条件およびヒューマンファクターの影響を分析する。図 5.14 に採涼採暖椅子の使用率の頻度分布を示す。ここで、使用率とは、当該時刻 1 時間当たりの着席時間を分母にして、使用時間を分子とした値を指す。本節以降では、全拠点のデータを元に分析している。

上図の冷却モードを見ると、使用率は 0.0 と 1.0 で頻度が多く、中間の 0.1 から 0.9 は少ない。加熱モードも同様である。このように、採涼採暖椅子による温熱調整動作には、使用するか否かの悉無律が見られる。

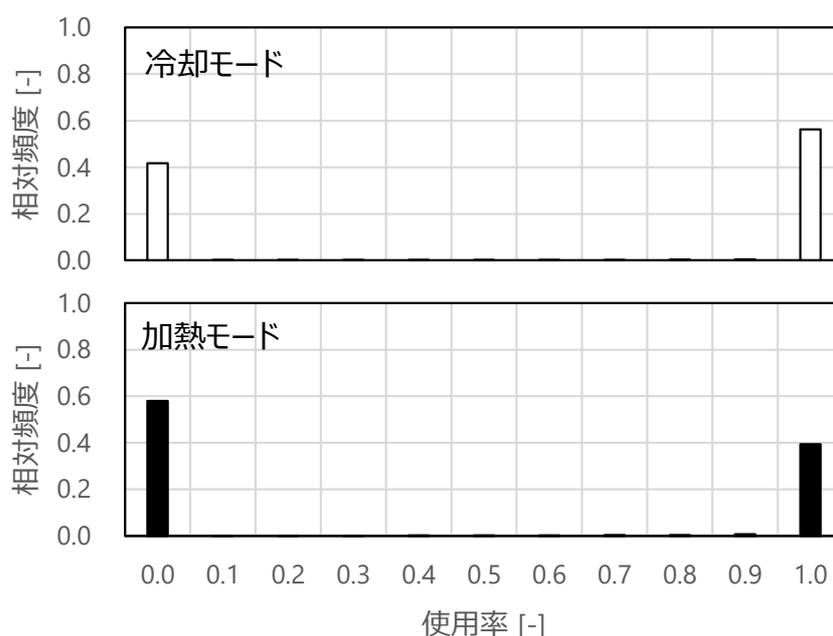


図 5.14 採涼採暖椅子の使用率

5.6.2 出力強度

図 5.15 に採涼採暖椅子の出力強度の頻度分布を示す。冷却モードを見ると、Lv.5 で 50%を示しており、他に比べて多いことから、比較的に高出力で運用される傾向にある。加熱モードを見るなら、Lv.3 以下の比較的に小出力で運用された。使用強度を平均すると、冷却モードでは 3.8, 加熱モードでは 1.6 を示す。

図 5.16 に出力強度の経時変化を示す。0 分は使用を開始した瞬間を指している。冷却モードを見ると、0 分以降の変化はほとんど見られない。事前の想定では、温熱履歴の影響がある場合、汗を蒸発させるべく、使用開始直後の過渡的状态下には大出力で運用され、その後に熱的定常状態となるに従って、小出力に推移するだろうと考えていた。実際の運用状況下では、時間的な出力の変化が見られず、ほぼ一定の出力で運用された。これは、加熱モードでも同様である。

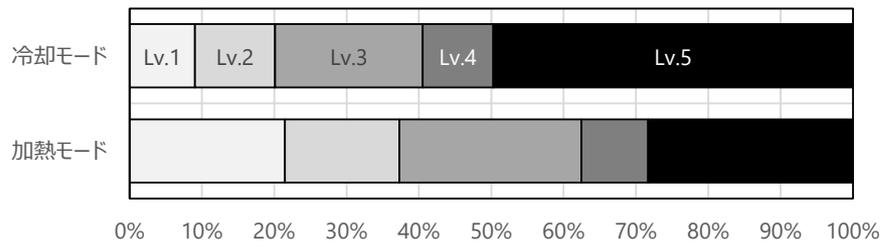


図 5.15 出力強度の頻度分布

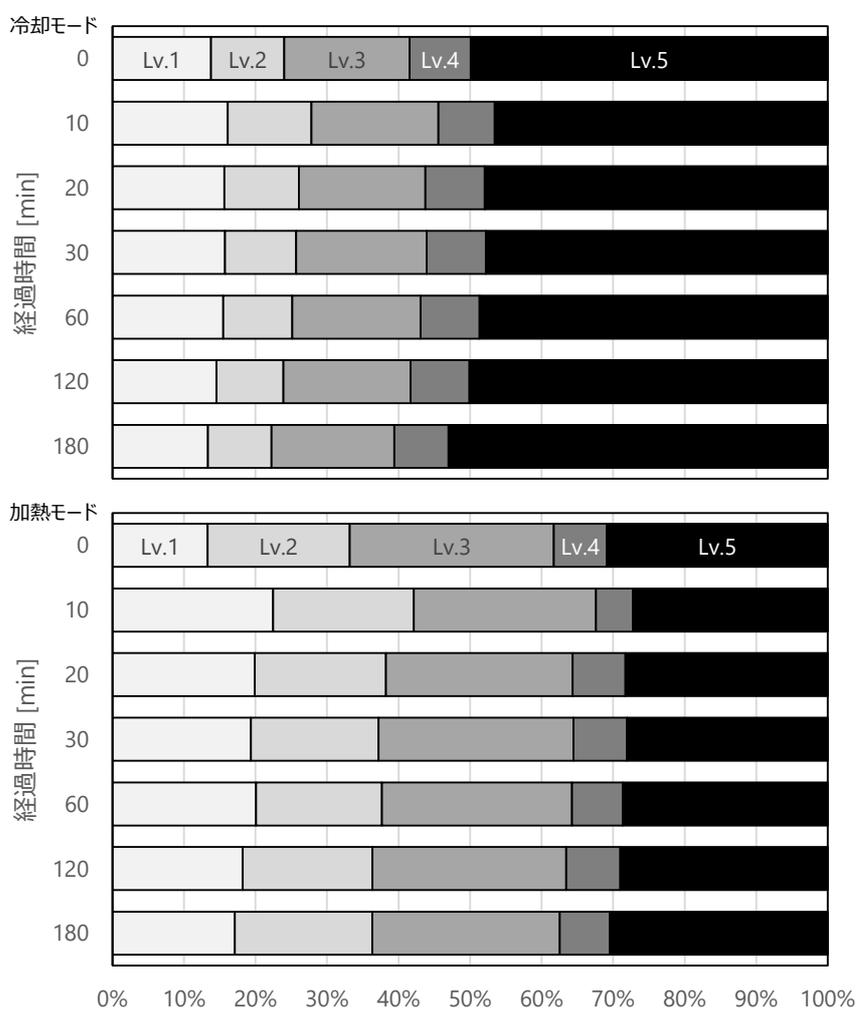


図 5.16 出力強度の経時変化

5.7 環境条件の影響

5.7.1 室内空気温度

図 5.17 に各室内空気温度帯における使用率 0.0 と 1.0 の頻度分布を示す。横軸の室内空気温度は、室内の机上に設置した温度センサによる測定値を示しており、1°C 刻みの温度帯ごとに集計した。

冷却モード（上図）より、24°C 以上において使用率 1.0 の頻度が、使用率 0.0 の頻度に比べて多くなる。23°C 以下では使用率 0.0 の頻度が多い。加熱モード（下図）は、22°C 以下で使用率 1.0 の頻度が多くなる。このことから、室内空気温度により採涼採暖椅子の使用率が変化することがわかる。

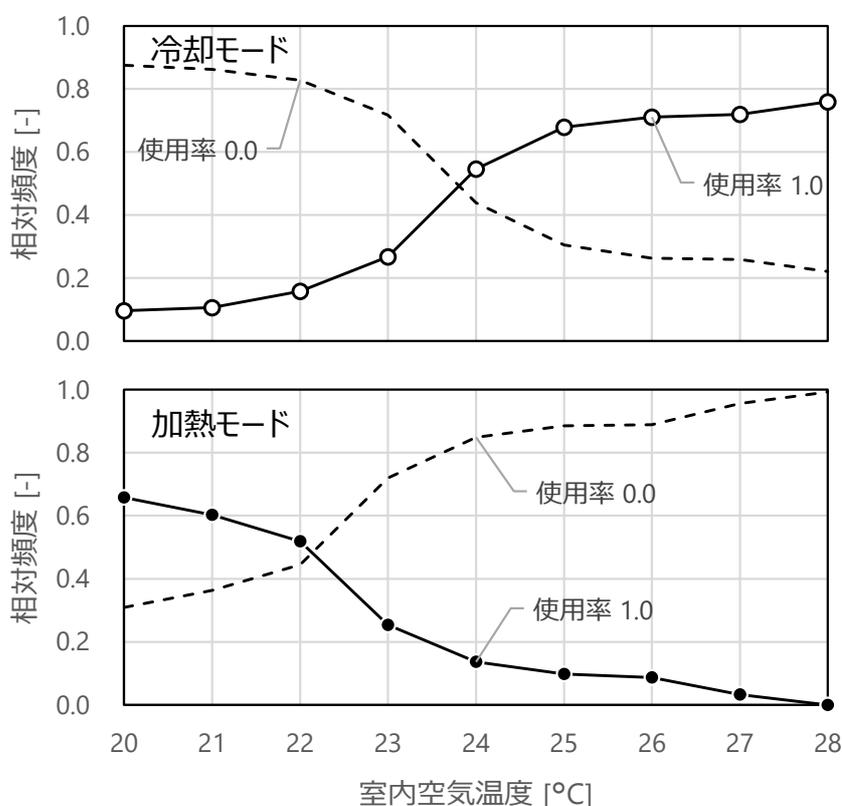


図 5.17 各室内空気温度帯における使用率 0.0 と 1.0 の頻度分布

図 5.18 に各室内空気温度帯における出力強度の頻度分布を示す。冷却モードの使用率が高くなる 24°C 以上を見ると、出力の割合に顕著な変化は見られない。加熱モードも同様に、22°C 以下で、出力の割合は変化していない。このことから、温度に応じて適宜出力を調整するというよりは、予め出力を定めておいて使用されていることがわかる。

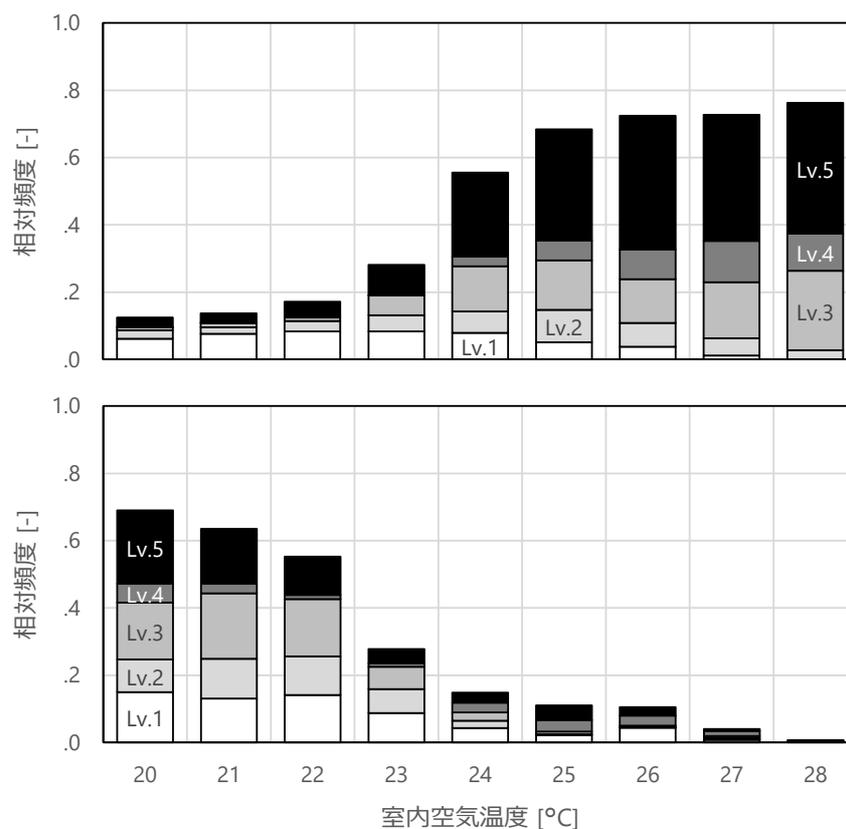


図 5.18 各室内空気温度帯における使用強度の頻度分布

図 5.19 に各室内空気温度帯において使用率を、着席時に停止させていた時間の割合（以降、停止率）で除したオッズを示す。オッズが 1 以上の場合には、使用率が停止率より高いことを表す。

冷却モードのオッズを見ると 24°C で 1、25°C では 2、26°C、27°C では 3 を示しており、高温下で使用されやすくなるといえる。加熱モードは 22°C 以下でオッズが 1 以上となり、21°C、20°C で 2、19°C で 4 を示すことから、低温下で使用されやすい。以上より、冷却モードおよび加熱モードの使用率は、室内空気温度に応じて変化することがわかる。

オッズが 1 を超える室内空気温度に着目すると、冷却モードおよび加熱モードともに、中立状態と考えられる室内空気温度(24°C 乃至 22°C)で使用される割合が高くなる。このことから、中立状態より涼しい状態もしくは暖かい状態を好む傾向を示すといえる。de Dear ら 9) は、同一の刺激を与えても、その人の内的状態により快不快のどちらの状態も引き起こしうることを示し、温熱的中立状態から外れた環境に新たな快適性が存することを理論的に整理している。パーソナル空調によって各自が望む温熱環境に調整することで、中立状態の外側にある積極的な快適性を獲得しうると考える。

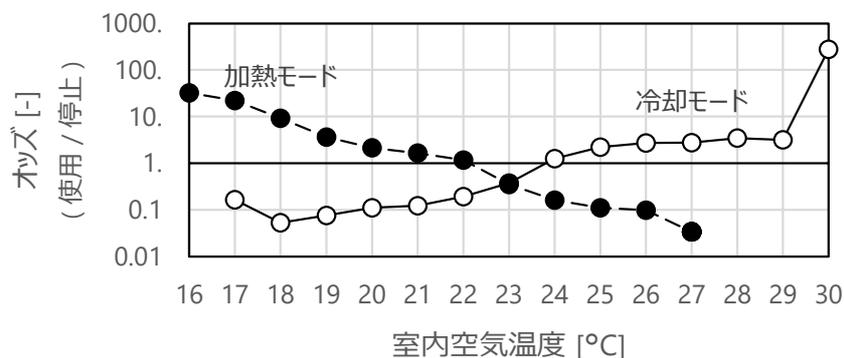


図 5.19 各気温帯における採涼採暖椅子の使用率のオッズ

5.7.2 室内湿度

湿度は潜熱移動、汗の蒸発の大小に関わることから、冷却モードの使用率に影響を及ぼしうることが考えられる。そこで、図 5.20 に各気温帯での高湿時と低湿時における冷却モードの使用率のオッズを示す。なお、オッズ比を求める際には、 χ^2 検定を行っていずれも P 値 1%以下となることを確認した。高湿と低湿とは、各気温帯において観測された絶対湿度の中央値を閾値に振り分けた。閾値は 10g/kg(DA)から 15g/kg(DA)となり、45%RH から 55%RH を示した。

24°C から 27°C の範囲では、高湿時の方が低湿時に比べて、若干使用率が高くなり、オッズ比は 1 から 2 程度を示す。28°C 以上では高湿時のオッズが顕著に高くなり、オッズ比は 2 から 10 となる。28°C 以上の環境は非空調運転時もしくは空調立上がり時に表れるが、こうした高温下では湿度による差が顕著となる。これは、高温多湿時に無効発汗となった汗をなるべく蒸発させるべく、採涼採暖椅子を運転させたものと考えられる。一方、27°C 以下の空調環境下では、湿度による影響は小さいといえる。

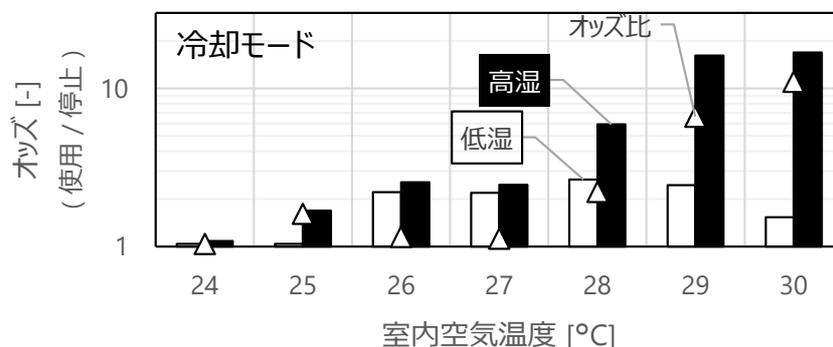


図 5.20 高湿時および低湿時における使用率のオッズ比

5.7.3 季節差

図 5.21 に各季節の各室内空気温度帯における使用時間と停止時間のオッズを示す。対象としたオフィスでは、5月から10月にかけて、クールビズによる軽装が励行されており、夏および秋の着衣量は冬および春に比べて小さい傾向にある。勤務中の執務者の服装を観察すると、個人差があるものの、夏や秋には薄手の長袖シャツもしくは半袖シャツ、冬や春には長袖シャツにネクタイを着用し、寒さを感じる場合には上衣を羽織っていた。寒冷地域にある拠点 SP でも、室内での執務時の服装は他の拠点と大差なく、概ね同様の傾向を示した。

冷却モードを示す上図より、夏では 23°C 以上、秋では 24°C 以上でオッズが 1 以上を示す。冬と春のオッズは、いずれの室内空気温度にあっても 1 以下となる。同じ室内空気温度で比較すると、夏および秋のオッズが、春および冬に比べて高く、着衣量は小さいにも関わらず、冷却モードがより使用された。これは、夏や残暑の残る時期の秋において、外部の暑熱環境を経て入室する際の温熱履歴による影響が示唆される。

下図に示す加熱モードの冬と春のオッズを見ると、いずれの室内空気温度帯でも夏や秋に比べて高い。冬と春のオッズを比べると、同じ室内空気温度下にあっても、冬の方が高くなる。これは、冬の方がより顕著に温熱履歴の影響が顕れたことや、Schweiker ら⁴⁾が指摘するように、季節間で温熱的感覚の変化が生じて、冬により暖かい状態が望まれたことが示唆される。

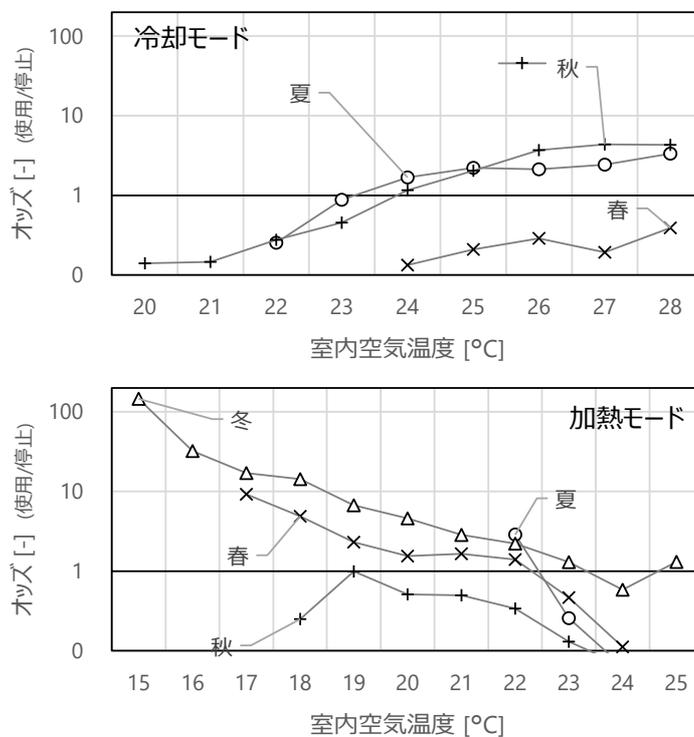


図 5.21 各季節の使用時間と停止時間のオッズ

5.8 ヒューマンファクターによる影響

5.8.1 性差

図 5.22 に性別による使用時間と停止時間のオッズ比を示す。冷却モードを見ると、26°C 以下では男性(M)の方が女性(F)に比べて高く、27°C 以上では女性の方が高い。27°C 以上では発汗が生じることから、化粧崩れを避けるために女性が冷却モードをより使用したことが示唆される。加熱モードでは、21°C から 23°C と 25°C から 26°C においては男性のオッズが高く、20°C、24°C、27°C では女性の方が高い。以上より、男性(もしくは女性)の方が、室内空気温度によらず常に使用しやすいというような、一貫した性別による影響は、今回の調査結果からは確認されなかった。

Wang ら¹⁾のレビューによれば、温熱快適に及ぼす性差の影響は見られる場合と見られない場合とがあることを指摘している。Schweiker ら⁴⁾の研究によると、好まれる環境には性差が存することが指摘している。本研究では、一部の女性は男性と同じ作業服を着用していたこと、代謝量の不足に対してひざ掛けの使用等の行動的適応を行っていたことから、顕著な性差が見られなかったものとする。

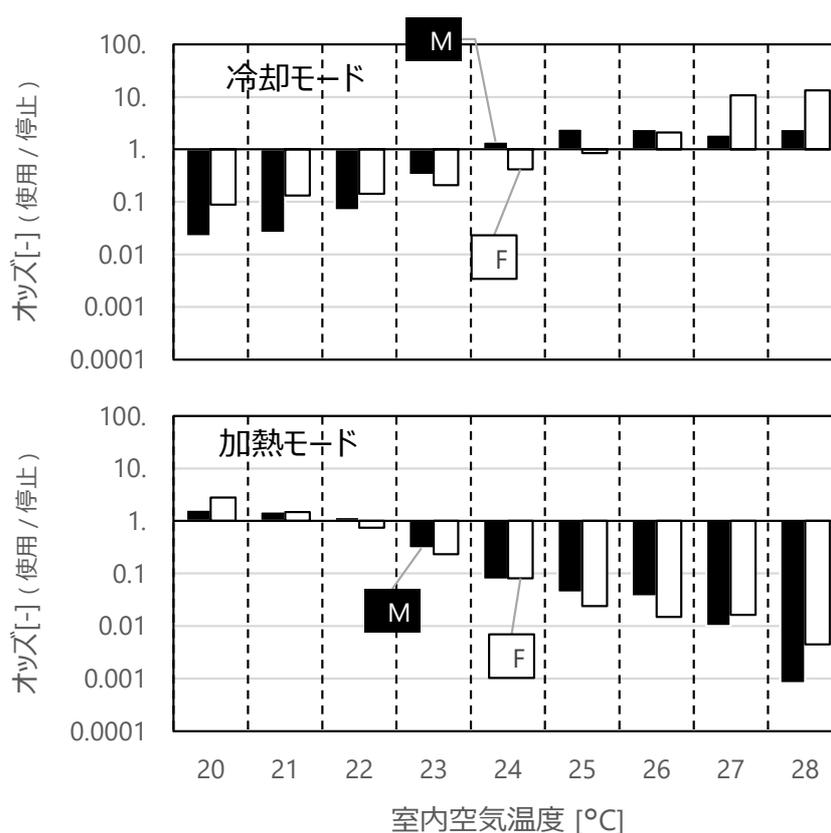


図 5.22 男性および女性の使用時および非使用時のオッズ

5.8.2 個人差

図 5.23 に各個人の冷却モードおよび加熱モードの使用時および停止時の室内空気温度を箱ひげ図として示す。着座時間が極端に少ない 12 名を除外して、25 名分のデータを元にプロットしている。ID(例. KZ-07)の横に性別を示す記号(F:女性/M:男性)を付す。停止時とは、着座した上で使用していない状態を指す。

使用される傾向は、3 グループ(A, B, C)に大別できる。A グループには、冷却モードもしくは加熱モードの片方のみを使用した者を分類した。例えば、KZ-07, KZ-10, KZ-20 の停止状態における室内空気温度を見ると、25%値では 21°C から 23°C を示し、最低値では 19°C から 21°C を示している。一般的にいえばやや寒い環境(20°C, 50%RH, 着衣量 1.0clo, 代謝量 1.1met 下で PMV-0.7)にあるものの、加熱モードが使用されておらず、着衣量による調整がなされた、もしくは、個人がやや涼しい環境を嗜好したためと推測する。

B グループには、冷却モードを使用する室内空気温度帯と加熱モードを使用する室内空気温度帯の差が、比較的大きい者を分類した。その際、冷却モードの中央値と加熱モードの中央値を両モードの閾値とみなして、その差が 1°C 以上となることを目安とした。冷却モードの中央値を見ると、個人差があるものの、25°C から 28°C の範囲にあり、この温度帯以上では冷却モードが高い確率で使用される。加熱モードの中央値は、20°C から 24°C の範囲にある。冷却モードの中央値と加熱モードの中央値の差を見ると、2°C から 6°C を示しており、室内空気温度が閾値を超えれば、冷却モードもしくは加熱モードが選択される傾向が顕著である。

C グループは、冷却モードの中央値と加熱モードの中央値の差が小さい者を分類した。冷却モードの中央値は 24°C から 27°C を示し、加熱モードの中央値は 24°C から 26°C を示す。両者の差は、それぞれ 1°C 未満である。同じ室内空気温度であっても、冷却モードを使う場合もあれば、加熱モードを使う場合もあることを示す。このグループは、他のグループに比べて、特に加熱モードの中央値が高く、高温環境下で加熱モードを使用する傾向を示す。このことから、着衣量や体調が日によって異なることが示唆され、同一の個人であっても、使用傾向が変化しうることを示す。

以上の通り、室内空気温度によって、冷却モードおよび加熱モードの使用傾向が決定する場合もあれば、個人内の変化によって、特に加熱モードの使用傾向が異なることを示した。

拠点間の差という観点でいえば、C グループには、拠点 TM の執務者は存在せず、拠点 KZ と SP の執務者のみであり、加熱モードの中央値が、24°C から 26°C と比較的高い。このことから、室内を一般的にはやや高めの設定温度(24°C 以上)に調整した場合にも、冬期の寒冷な外部環境下における温熱履歴の影響で加熱モードの需要が顕れたものと考えられる。寒冷環境下では着衣量が増えることで、加熱モードの需要は顕著に増加しないと予想していたものの、前述の通り、室内では比較的軽装で執務することが多いことから、こうした拠点間の差が生じたと推測する。

ただし、グループ B の TM-04 を見ると、加熱モードの 75 パーセント値が 26°C と比較的高く、高い室内空気温度で加熱モードが使用される傾向を示した。このことから、高温環境下での加熱モードの使用傾向には、拠点間の影響および個人差による影響も示唆される。

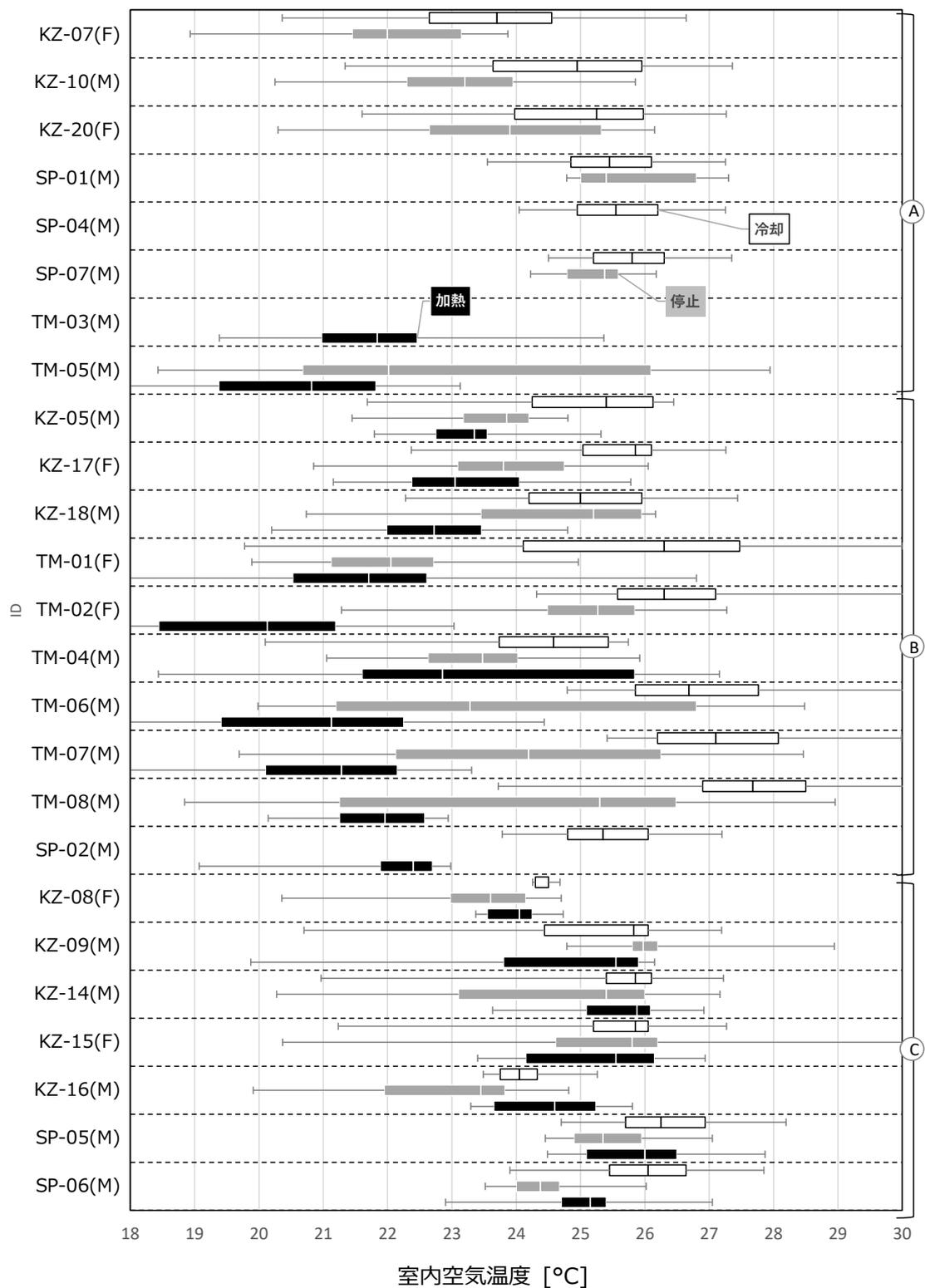


図 5.23 採涼採暖椅子の使用確率の個人間の差

5.9. まとめ

本研究では、採涼採暖椅子の使用状況のデータから、温熱環境条件並びに個人差等のヒューマンファクターによる影響を分析した。以降に要約する。

- (1) 発汗の有無や着衣の制限などに応じて、各自が採涼採暖椅子を調整することで、温熱環境の不満が減じることを示した。
- (2) 離席の多少によって、採涼採暖椅子の稼働状況が異なり、離席の多い場合には、通日同じモードで稼働させ、離席の少ない場合には、一日の中で冷却モードおよび加熱モードの両方で稼働させることを確認した。
- (3) 同じ温湿度条件下であっても、執務者の温冷感は一定ではないため、冷却・加熱両方の要求が発生しうることを確認した。
- (4) 採涼採暖椅子の使用率は1.0と0.0に偏っており、使用するか否かの悉無律が存する。
- (5) 季節差について、同じ室内空気温度で比較した場合、冷却モードの使用率は、夏および秋に、春および冬に比べて高くなり、加熱モードの使用率は、春及び冬に、夏および秋に比べて高くなる。このことから、温熱履歴による影響が示唆された。
- (6) 性差については、男性(もしくは女性)の方が、室内空気温度によらず常に使用しやすいというような、一貫した性別による影響は、今回の調査結果からは確認されなかった。
- (7) 個人差に関する分析から、使用傾向を3群に大別した。内訳は、冷却モード、もしくは、加熱モードのみを使用するグループ、冷却モードを使用する室内空気温度の閾値と加熱モードを使用する閾値の差が大きいグループ、両モードの閾値の差が小さいグループである。

参 考 文 献

- 1) 柳井崇, 秋元孝之: 実オフィスにおけるタスク空調システムの性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 79巻, 699号(2014), pp. 419-428,
<https://doi.org/10.3130/aije.79.419>
- 2) 花園新太郎, 野部達夫: 採用採暖機能付き椅子の開発, 日本建築学会環境系論文集, 第88巻 第803号, pp.36-42, 2023年1月
- 3) 花園新太郎, 久保田裕貴, 野部達夫: 採涼採暖椅子の実用機開発および変動風の実装, 空気調和・衛生工学会論文集, No.312, pp.75-81, 2023年3月
- 4) M.Schweiker, K.Schakib-Ekbatan, X.Fuchs, S.Becker: A seasonal approach to alliesthesia. Is there a conflict with thermal adaptation?, Energy and Build., 212 (2020), pp. 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109745>

6章 運用状況の数理モデル化

6.1 はじめに

前章において、採涼採暖椅子の実環境下における運用状況を明らかにしたが、異なる条件下における運用状況を予測する数理モデルを構築することで、次の項目の定量化が可能となる。

- ・ パーソナル空調による熱的快適性の改善の程度
- ・ アンビエント空調の設定緩和の可能性
- ・ アンビエント空調の設定緩和によるエネルギー消費量の削減量

本章では、採涼採暖椅子の使用状況と温熱環境の観測データのみを用いて、各モードの使用・停止を数理モデル化する。具体的には、採涼採暖椅子の発停操作および運転モードの選択に及ぼす室内温熱環境条件およびヒューマンファクターとしての性差と個人差による影響について、確率的ベイズモデルに基づく統計解析の結果を報告する。

6.2 分布の検討

パーソナル空調と温冷感の関係をシミュレーションした既往研究には、Kim¹⁾のものが挙げられる。これは、38名分の Personal Comfort System chair の使用データと執務者の温熱快適の度合いに関する申告データを元に、機械学習によって執務者の快適性を予測する数値モデルを構築し、精度、ばらつき、収束性を評価したものである。結果的に、パーソナル空調の使用状況が温熱快適性の強力な予測因子となりうることを示した。

高草木²⁾は、各個人で最適な温熱環境指標としての PMV 値が異なることを指摘して、PMV 値からワイブル分布を用いて個人の不満足申告確率を推定している。ここで、ワイブル分布とは、信頼性理論の中でよく用いられるものであり、機器の故障確率の推定で使われる。この論文では、温熱不満足の原因を目的変数として、PMV 値と個人差を表すパラメータからなる説明変数により不満足発生確率を推定したものである。

本研究では、運用状況の予測を目的としていることから、使用・停止を目的変数として、数理モデルを構築する。使用・停止の推定には、0 から 1 の範囲の値を取る発生確率を用いることが考えられる。この発生確率を表す分布として、稀に生じる事象を扱う際に用いられる極値分布（Gumbel 分布、Fréchet 分布、Weibull 分布）や、0 以上の上限のない離散変数を表すポアソン分布、0 以上の有限の離散変数を表現する二項分布が挙げられる。

本研究で対象としたデータは、稀に生じる事象ではなく、各時間で見れば使用・停止 (1, 0) の有限の観測データである。そのため、二項分布、その中でもベルヌーイ分布に従うものとして、以降の解析を行った。

6.3 階層ベイズモデルによる統計解析

統計モデルには、一般化線形モデル(GLM)、モデルに個体差を含むことのできる一般化線形混合モデル(GLMM)、ベイズモデルがある。二項分布を解析する場合の GLM には、ロジスティック回帰分析が用いられることが一般的である。

$$q_i = \text{logistic}(z_i) = \frac{1}{1 + e^{-z_i}} \quad \dots(6.1)$$

$$z_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} \quad \dots(6.2)$$

ここに,

q_i	: 発生確率
z_i	: 線形予測子
$x_{1i} \dots, x_{pi}$: 説明変数 (観測データ)
β_0	: 回帰係数 (切片)
$\beta_1 \dots, \beta_p$: 回帰係数 (傾き)

式 6.1 は, $-\infty$ から $+\infty$ の範囲の値を取りうる線形予測子 (z_i , 説明変数の線形結合) を, 0 から 1 の範囲の変数に変換するロジットリンク関数を示している。一般的なロジスティック回帰分析では, 各説明変数の回帰係数を最尤法によって推定する。

この GLM に個体差 (ε_i) を加えたものが GLMM である (6.3 式)。この個体差は, あるばらつきを有するものであり, ガンマ分布, 正規分布を想定する場合が多い。ここでは, 平均 0, 標準偏差 (σ) の正規分布を示している。GLMM によって, 二項分布では表現しきれない, 個体差によるばらつきを加味した推定が可能となる。

$$z_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i \quad \dots(6.3)$$

$$\varepsilon_i \sim \text{normal}(0, \sigma) \quad \dots(6.4)$$

ここに,

ε_i	: 誤差 (個体差)
-----------------	------------

ただし, この GLMM は最尤法を用いていることから, 多数のパラメータを扱う際には, 計算時間が長くなり, 場合によっては解析的に解けない事象が生じる。そうした場合には, マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) を用いたベイズモデルが適する。

マルコフ連鎖とは, マルコフ過程の内, とりうる状態が離散的なものを指し, 未来の挙動が現在の挙動によってのみ決定されるものである。モンテカルロ法とは, 乱数を利用した計算アルゴリズムの総称である。MCMC 法は, 乱数を用いて, 一つの計算ステップの中で, 前の状態 (q) から新しい状態 ($q^{\text{新}}$) を作り出すことから, マルコフ連鎖モンテカルロ法なる名称で呼ばれる。

MCMC 法では, 尤度が高くなる均衡分布の近辺を無作為に探索するランダムウォークを用いたアルゴリズムが多く用いられており, メトロポリス法, ギブスサンプリング法, スライスサンプリング法, ハミルトニアンモンテカルロ法等が挙げられる。

本研究では, 採涼採暖椅子の運用状況の推定を目的としているが, 前章で示した通り, 説明変数には室内空気温度や季節差に加えて, 個人差が想定される。これら複数の説明変数を含む数理モデルの推定に, ベイズモデルが適すると考えて, 以降のパラメータ推定を行った。

6.4 パラメータ推定

採涼採暖椅子を使用する確率(以降, 使用確率)について、統計モデルに個人差等のランダム効果を組み込むことが可能な階層ベイズモデルを用いて表す。使用確率とは、着座時において冷却モードおよび加熱モードを使用する確率を示す。

ベイズモデルは、式 6.5 の事後分布が尤度と事前分布の積に比例するベイズの公式に基づいている。事後分布は、乱数を用いてパラメータ q の確率分布を推定するマルコフ連鎖モンテカルロ法による収束計算によって推定される。

$$p(q | \mathbf{Y}) = \frac{p(\mathbf{Y} | q) p(q)}{p(\mathbf{Y})} \quad \dots(6.5)$$

ここに、

$p(q \mathbf{Y})$: 事後分布
$p(\mathbf{Y} q)$: q がある値を取る場合にデータ \mathbf{Y} が得られる確率
$p(q)$: q の事前分布
$p(\mathbf{Y})$: データ \mathbf{Y} が得られる確率(定数)

採涼採暖椅子の使用確率は、図 5.14 で示した通り、使用するか否かの 2 値で概ね表すことができることから、ベルヌーイ分布(式 6.6)に従うと考えた。説明変数の線形結合(式 6.7)は $-\infty$ から ∞ の範囲の実数を取りうるが、使用確率(q_i)は 0 から 1 の範囲の実数をとることから、式 6.8 に示すロジスティック関数により変換した。式 3 に含まれるランダム効果である個人差(ε)は、ID ごとに平均 0、標準偏差 σ の正規分布に従う乱数を与えた(式 6.9)。各パラメータの事前分布には、無情報事前分布を用いた。

$$Y_i \sim \text{Beroulli}(q_i) \quad \dots(6.6)$$

$$z_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \varepsilon_i \quad \dots(6.7)$$

$$q_i = \text{logisitic}(z_i) = \frac{1}{1 + e^{-z_i}} \quad \dots(6.8)$$

$$\varepsilon_i \sim \text{normal}(0, \sigma) \quad \dots(6.9)$$

ここに、

Y_i	: 採涼採暖椅子の使用時に 1, 停止時に 0 を取る応答変数
q_i	: 採涼採暖椅子の使用確率
z_i	: 線形予測子
x_{1i}, \dots, x_{pi}	: 説明変数
β_0	: 回帰係数(切片)
β_1, \dots, β_p	: 回帰係数(傾き)
ε_i	: 誤差 (個人差)
σ	: 標準偏差 (ε_i のハイパーパラメータ)

説明変数として、室内気温(x_1)、性差(x_2)、季節差(x_3)を候補に用いて、表 6.1 に示す model 1 から 4 を想定した。データ \mathbf{Y} には、ここまでの分析と同様に 3 事務所に勤務し、かつ使用もし

くは着座したデータのある 32 名の 1 時間間隔の採涼採暖椅子の使用実績および室内環境データをを用いた。

確率的プログラミング言語のソフトウェアには、Stan を用いた。サンプル列数は 3 , サンプルリングは 4,000 回, その内助走区間は 500 回として計算した。

表 6.1 検討モデル

	β_0 (切片)	$\beta_1 x_1$ (室内気温)	$\beta_2 x_2$ (性差)	$\beta_3 x_3$ (季節差)	$\beta_4 x_4$ (拠点)	ε (個人差)
model 1	●	●				●
model 2	●	●	●			●
model 3	●	●		●		●
model 4	●	●			●	●

説明変数: x_1 : 室内気温 (10°Cから40°Cで0から1をとる変数), x_2 : 男性 = 0, 女性 = 1, $x_{3.1}$: 春 = 0, 夏 = 1, $x_{3.2}$: 秋 = 1, $x_{3.3}$: 冬 = 1, $x_{4.1}$: KZ = 0, SP = 1, $x_{4.2}$: TM = 1, ε : 個人差 (32名分)

6.4.1 計算結果に基づくモデル選択

表 6.2 に推定した回帰係数およびハイパーパラメータを示す。なお, 各パラメータの \hat{R} 値は 1.00 を示すことから, 収束していることを確認した。

回帰係数を見ると, model 1 では冷却モードの β_1 が 18.3 を示している。これは室内気温が 1°C 上昇すると, 使用確率が 1.8 倍(= $\exp(18.3 * 1/30)$)となることを示す。加熱モードでは-18.9 を示しており, 室内気温の 1°C の低下に対して, 使用確率が 1.9 倍となることを表す。

model 2 の β_2 (性差)の回帰係数は, 冷却モードで 0.1, 加熱モードで-0.1 を示し, 冷却モードの使用確率は男性が女性の 1.1 倍, 加熱モードは女性が男性の 1.1 倍になると解釈できる。しかしながら, 標準偏差がそれぞれ 0.9, 1.2 を示しており, 回帰係数が正負どちらの値をもとりうる。95%ベイズ信頼区間を見ても, 冷却モードで-1.7 から 1.9, 加熱モードで-2.3 から 2.4 を示しており, いずれも信頼区間に 0 を含む。このことから, 必ずしも性差による使用確率の影響が顕著に表れていないと判断して, 説明変数から除外した。

model 3 を見ると, β_3 (季節差)の回帰係数より, 冷却モードの使用確率が, 夏および秋に春や冬に比べて高い(夏/春: 10 倍, 夏/冬: 16 倍, 秋/春: 4 倍, 秋/冬: 7 倍)。加熱モードの使用確率については, 冬および春に秋や夏に比べて高い値を示した(冬/秋: 83 倍, 冬/夏: 34 倍, 春/秋: 29 倍, 春/夏: 12 倍)。

model 4 の β_4 (拠点間の差)の回帰係数は, model 2 の β_2 (性差)と同様に, 標準偏差が大きく, 正負どちらの値をとる。95%ベイズ信頼区間を見ても, いずれも信頼区間に 0 を含むことか

ら、説明変数から除外した。加熱モードの利用傾向に地域差の影響が示唆されたものの、本研究で対象とした37名分のデータでは、個人差の影響と分離できなかったものとする。

表 6.2 モデルの回帰係数およびハイパーパラメータの推定値

		冷却モード		加熱モード	
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
model 1	β_0 (切片)	-8.9	0.4	6.2	0.5
	β_1 (気温)	18.3	0.4	-18.9	0.4
	σ (個人差)	2.1	0.3	2.6	0.4
model 2	β_0 (切片)	-9.0	0.5	6.3	0.6
	β_1 (気温)	18.3	0.4	-18.9	0.4
	β_2 (性差)	0.1	0.9	-0.1	1.2
	σ (個人差)	2.1	0.3	2.6	0.4
model 3	β_0 (切片)	-7.5	0.4	4.7	0.6
	β_1 (気温)	11.8	0.4	-10.8	0.5
	β_{3_1} (季節/夏)	2.3	0.1	-2.5	0.1
	β_{3_2} (季節/秋)	1.4	0.1	-3.4	0.1
	β_{3_3} (季節/冬)	-0.5	0.1	1.0	0.1
	σ (個人差)	2.1	0.3	2.8	0.4
model 4	β_0 (切片)	-8.9	0.5	5.7	0.7
	β_1 (気温)	18.2	0.4	-18.9	0.4
	β_{4_1} (拠点/SP)	1.9	0.9	-0.3	1.3
	β_{4_2} (拠点/TM)	-1.3	0.7	2.0	1.1
	σ (個人差)	1.8	0.3	2.5	0.4

図 6.1 に model 1 と 3 を用いて求めた使用確率の予測値と実際の使用確率の観測値を示す。冷却モードを見ると、両モデルとも使用確率 0.3 以上の範囲においては予測値が概ね観測値に近い値を示す。ただし、使用確率 0.3 以下の範囲では、model 3 の予測値の方がより観測値に近い値を示す。加熱モードでは、使用確率 0.3 以上の範囲において model 3 の方がより観測値に近い。以上より、使用確率の予測には model 3 を採用した。

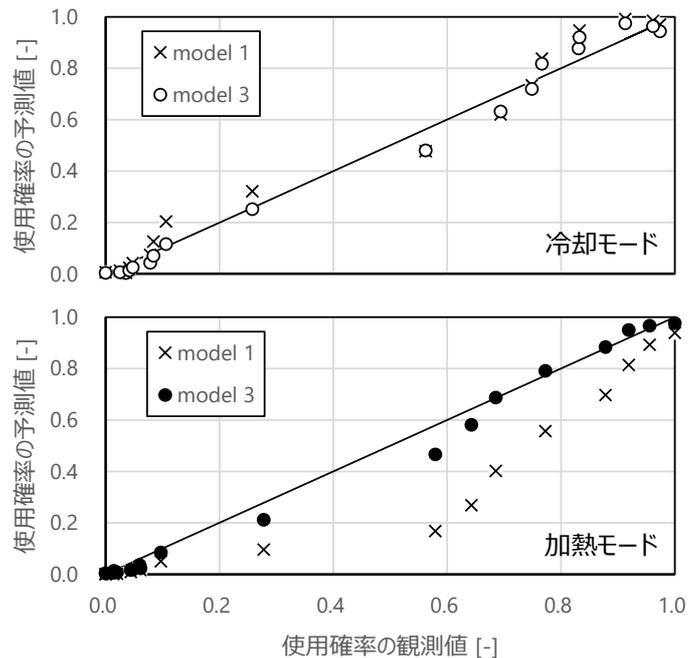


図 6.1 使用確率の予測値と観測値の比較

6.4.2 モデルの解釈

図 6.2 に各気温帯における使用確率の予測値を示す。各季節における室内気温の頻度分布を基にして、重みづけを行った結果を示す。個人差の項は平均値(=0)を与えた。

冷却モードを見ると、室内気温の上昇に伴い、使用確率が高じる傾向を示す。22°C 以下では使用確率が 0.1 以下と低い。22°C から 25°C の範囲において、使用確率が 0.1 から 0.6 に上昇する。27°C では使用確率 0.8, 29°C では 0.9 となり、高い値を示す。加熱モードでは、気温の低下に伴って使用確率が高じる。21°C から 24°C の範囲において、使用確率が 0.1 から 0.6 を示す。20°C では使用確率が 0.7, 18°C では 0.9 を示す。

22°C から 24°C の範囲では、冷却モードおよび加熱モードの使用確率が 0.1 から 0.5 となり、両方の要求が生じる。図 7 を見れば、冷却モードの使用頻度の多い室内気温と加熱モードの使用頻度が多い室内気温とが近い値を示す場合がある。このことから、どちらのモードを使用するかは、各個人の代謝量や温熱履歴、体調、好み等に基づいて各自が適宜選択していると推察する。

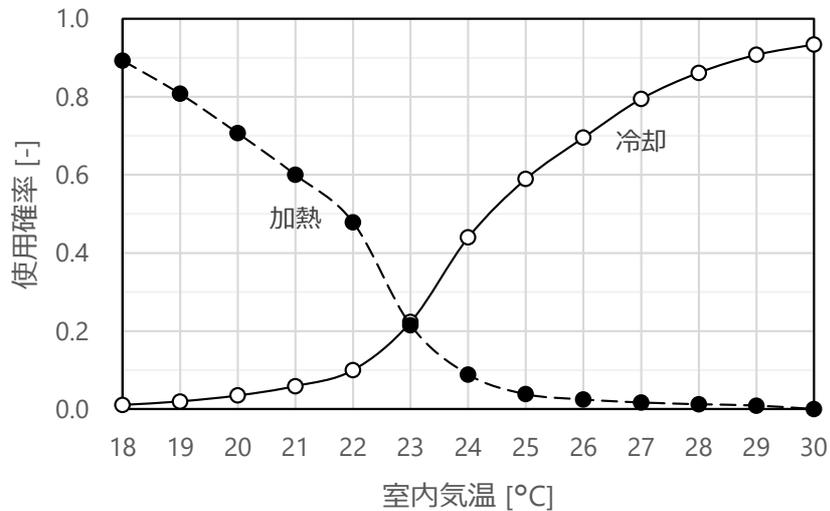


図 6.2 使用確率の予測値

図 6.3 に使用確率の個人差がとりうる範囲を箱ひげ図で示す。それぞれ 2.5%, 25%, 50%, 75%, 97.5%の値を示す。冷却モードの 25%値と 75%値の幅を見ると、24°C から 25°C の範囲で広く、それより高温もしくは低温になる程狭くなる傾向を示す。2.5%値と 97.5%値の幅を見れば、例えば 25°C では使用確率は 0.03 から 0.98 を示しており、広い値をとりうる。25°C 前後の中温域では、使用確率に個人差が表れやすいといえる。

加熱モードを見ると、22°C における 25%値と 75%値は 0.18 から 0.72 を示し、最も幅が広い。22°C 以下では、使用確率の中央値が上昇しつつ、25%値と 75%値の幅は狭くなる。22°C 以上の範囲では、使用確率の中央値が低下し、幅が狭くなる。

以上より、室内気温 22°C から 25°C の中温域において、冷却モードの使用確率および加熱モードの使用確率の個人差が大きく表れることから、両モードの混在が頻発しうる。これは、前章に示した図 5.21 を見ても、同気温帯において両モードの使用が見られることから確認できる。

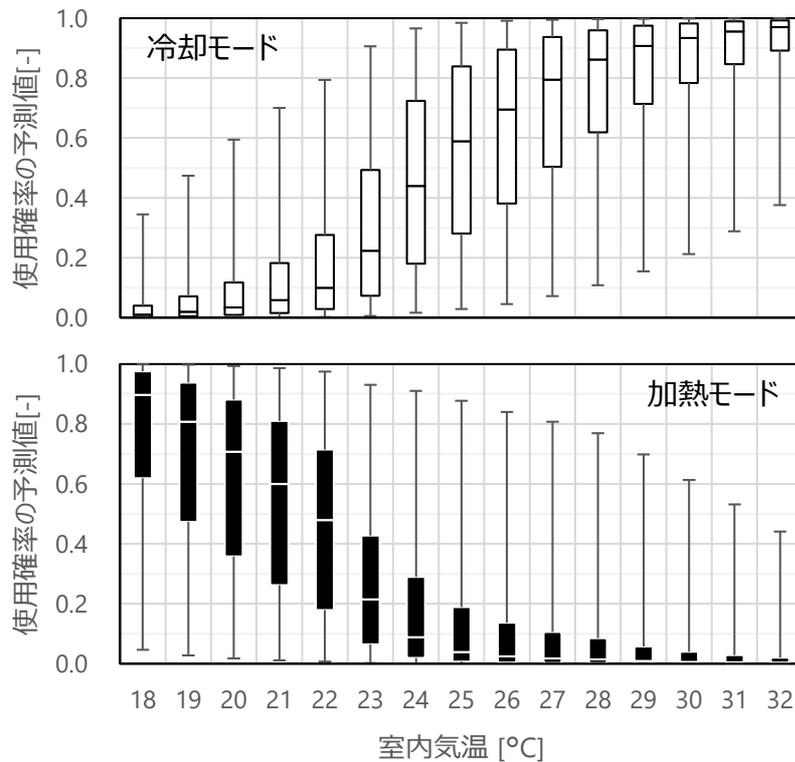


図 6.4 使用確率の個人差

6.5 まとめ

本研究では、採涼採暖椅子の使用状況のデータから、温熱環境条件並びに個人差等のヒューマンファクターによる影響を分析した。以降に要約する。

- (1) 階層ベイズ統計解析により、室内気温、季節差、個人差を説明変数としたモデルが観測値によく一致することを示した。
- (2) 採涼採暖椅子の使用状況に顕れる温熱環境条件および個人差の影響を数理モデルにより把握することができた。

参 考 文 献

- 1) J.Kim, Y.Zhou, S.Schiavon, P.Raftery, G.Brager : Personal comfort models: Predicting individuals' thermal preference using occupant heating and cooling behavior and machine learning, Build. and Env.129 (2018), pp.96-106,
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.011>
- 2) 高草木明: 室内温熱環境のばらつきを考慮した居住者の不満発生確率の推定方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.514 (1998), pp.13-19

7章 アンビエント空調との協調に基づくエネルギーシミュレーション

7.1 はじめに

パーソナル空調を適用する利点として、熱的不満の減少と空調設定の緩和によるエネルギー消費量の削減が挙げられる。エネルギー消費量の効果について、例えば設定温度を 26°C から 27°C に緩和することで、年間のエネルギー消費量を 8%削減するシミュレーション結果が報告されている¹⁾。

本章では、標準的な事務所に採涼採暖椅子を適用した場合の温熱快適性とエネルギー消費量を、前章で求めた数理モデルを用いてシミュレーションした。

7.2 使用状況のシミュレーション

図 7.1 にシミュレーションで用いた出社スケジュールの一例として、ある 1 名の 100 日分を示す。拠点 TM, SP, KZ における着座状況を見ると、出社時間および退席時間が各人、日によって異なっていた。そこで、出社時間および退席時間は、乱数を用いて設定した。

図 7.2 に室内全体の在席スケジュールを示す。最大の在席人数は、100 名とした。対象期間は 1 年間の営業日として、各季節 65 日ずつ計 260 日とした。7 時頃から出社人数が増加して、8 時に 60 名から 90 名が出社する。外出先への直行直帰があるため、ピーク時にも出社人数は 100 名に満たない想定である。8 時以降に漸減し、18 時には 20 名から 40 名程度を残して概ね帰宅する。20 時以降は 10 名以下となる。このような状況の下で、採涼採暖椅子の使用状況を前章で導いた数理モデルを用いて予測した。

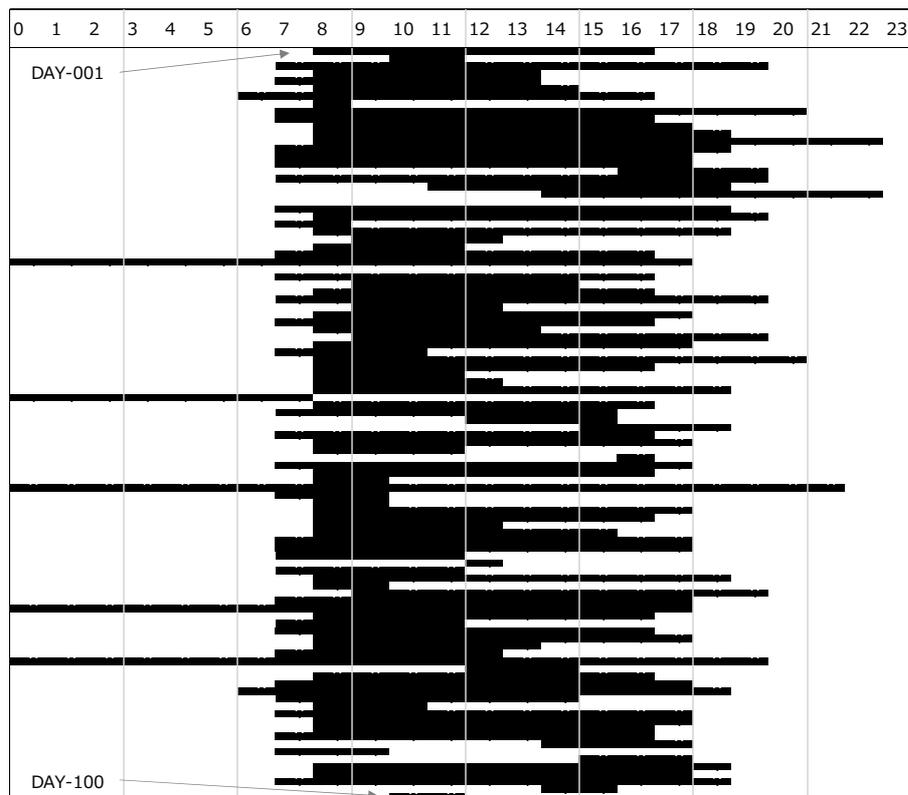


図 7.1 ある 1 名分の出社スケジュール (100 日分)

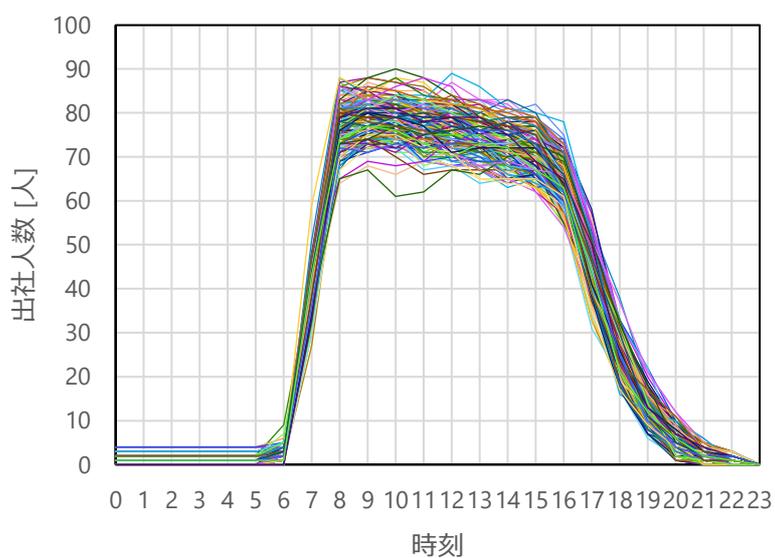


図 7.2 在席スケジュール

図 7.3 に各期間における各室温下の採涼採暖椅子の使用率を示す。各期間、一定の室温で運用する仮定でシミュレーションしている。夏期を見ると、室温の上昇に伴い、冷却モード(Cool)の使用率が増加する。一般的な運用条件である 26°C を見ると、冷却モードの使用率は 0.65 を示す。1°C 高い 27°C を見ると、使用率は 0.70 に高じる。非使用率(Not use)は 28°C で 0.18, 20°C で 0.40 を示し、室温の低下と共に減少する。加熱モードは 20°C で 0.27, 28°C で 0.07 を示しており、0 になることはない。個人の温冷感は、現状の温熱環境のみならず、ヒステリシスやヒューマンファクターの影響を含めて現れる。夏期の高温域においても、加熱モードの運転が見られることは、これらの影響と考える。

冬期には、加熱モードの使用が支配的となる。冬期の一般的な設定温度 22°C を見ると、使用率は 0.62 を示す。1°C 低い 21°C 条件では、0.66 を示し、気温の低下に従って使用率は高くなる。非使用率は 0.23 から 0.32 を示す。冷却モードの使用率は、夏期における加熱モードと同様に、最小でも 0.06 を示し、0 になることはない。

中間期は、春と秋を合わせて集計した。加熱モードは 26°C 以下の場合には 0.40 前後の値を示す。冷却モードは 0.20 から 0.65 の範囲の値をとる。非使用率は 0.14 から 0.42 の範囲となる。

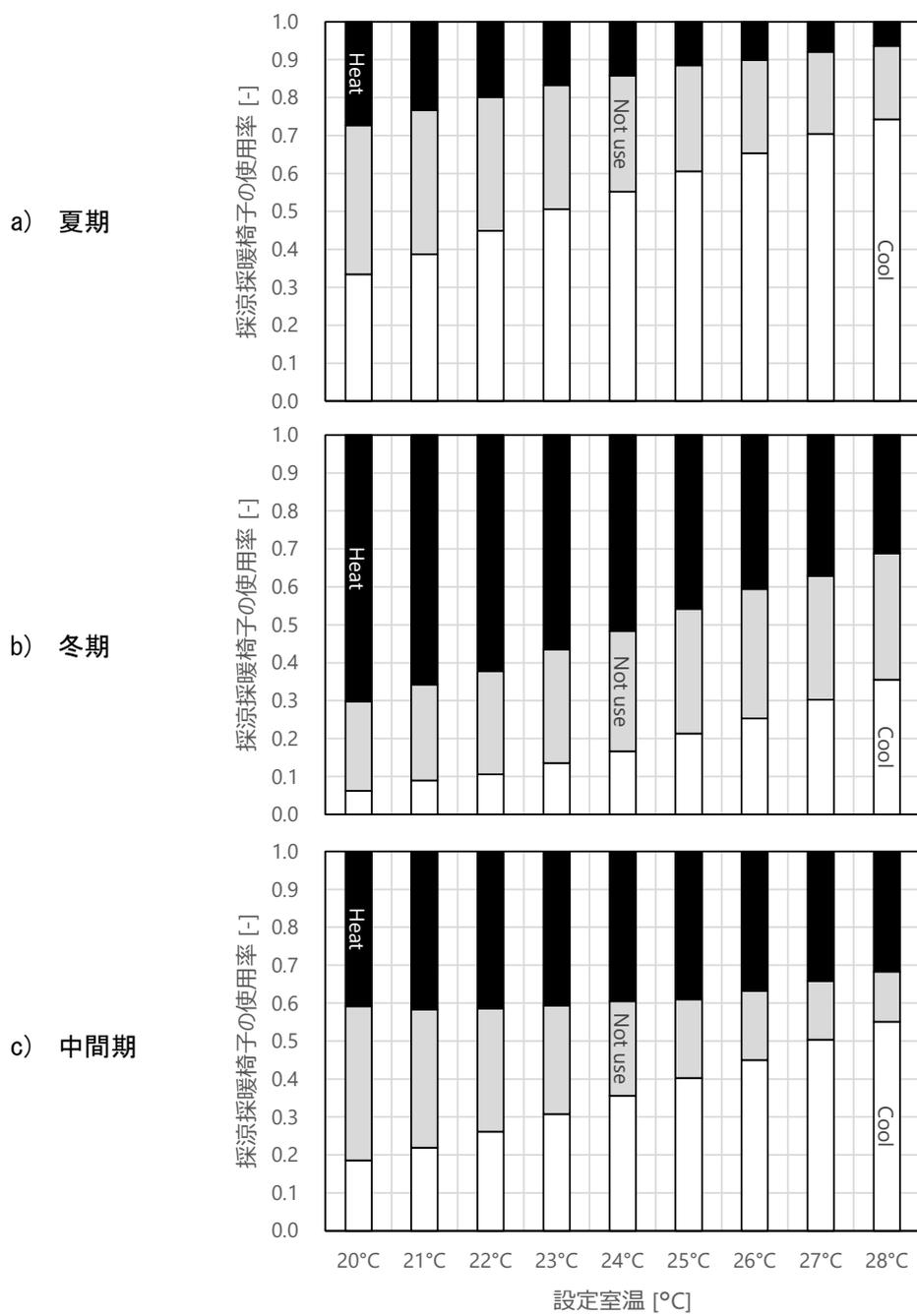


図 7.3 探涼採暖椅子の使用割合

7.3 再生可能エネルギーによる充電

7.3.1 採涼採暖椅子のエネルギー消費量

採涼採暖椅子の電力消費量は最大 10W と小さいことから、商用電源に頼らずに、再生可能エネルギーにより自給自足できる可能性がある。そこで、前節で求めた使用率を元に、採涼採暖椅子の電力消費量を予測して、必要な太陽光発電量を試算する。

図 7.4 に採涼採暖椅子 1 台当たりの各期間における電力消費量および一次エネルギー消費量の平均値を示す。電力は、冷却モード時 5W、加熱モード時 10W として計算した。夏期の結果より、一般的な運用時の設定温度 26°C を見ると、冷却モードでは 1 人当たり平均 1.7kWh、加熱モードで 0.5kWh、計 2.2kWh 消費される。例えば、省エネルギーのために室温の設定を 28°C に緩和した場合には、冷却モードの使用率が増加して、加熱モードの使用率が減少するため、電力消費量は冷却モードで 2.0kWh、加熱モードで 0.3kWh、計 2.3kWh となる。執務者からのクレーム対応により室温の設定を 24°C に低下させた場合には、冷却モード 1.4kWh、加熱モード 0.7kWh、計 2.1kWh を示す。加熱モードの電力消費量が増加するが、これは、人体熱収支の観点で言えば、熱的中立を超えて寒い側となることから、加熱モードがより多く使用されるためである。以上より、室温 26°C±2°C の範囲においては、採涼採暖椅子に要する電力消費量は、1 人当たり平均 2.0kWh から 2.2kWh の値を示すことがわかる。これは、建物全体の空調用電力消費量(7.4 節の想定ビルでは、170kWh/人)から言えば、微小な差である。

冬期には、加熱モードの電力が冷却モードに比べて大きく、使用率も高じる。そのため、電力消費量は、いずれの室温においても、夏期に比べて高い値となり、室温の変化による電力少量の変化も、夏期に比べて顕著である。冬期の一般的な設定温度 22°C を見ると、電力消費量は、加熱モードで 3.2kWh、冷却モードで 0.3kWh、計 3.5kWh を示す。夏期と同様に±2°C の範囲を見ると、20°C では、加熱モード 3.7kWh、冷却モード 0.2kWh、計 3.9kWh を示す。24°C では、加熱モードで 2.7kWh、冷却モードで 0.5kWh、計 3.2kWh となる。これより、室温 22°C±2°C の範囲において、採涼採暖椅子に要する電力消費量は 1 人当たり平均 3.2kWh から 3.9kWh を示す。

中間期では、夏期の 26°C と冬期の 22°C の中間である 24°C での運用を基準とした場合、±2°C の範囲において、4.2kWh から 4.6kWh の値を示す。

図 7.5 に採涼採暖椅子の年間の電力消費量を示す。標準的な運用条件(夏期 26°C/冬期 22°C/中間期 24°C)、通常考える省エネルギーな設定(夏期 28°C/冬期 20°C/中間期 24°C)、クレーム対応のための過剰な設定(夏期 24°C/冬期 24°C/中間期 24°C)の 3 条件の結果を示す。これらを比較すると、標準的な運用時には、電力消費量は冷却モードで 1 人当たり平均 3.8kWh、加熱モードで 6.3kWh、計 10.1kWh となる。夏期に 28°C、冬期に 20°C とする場合には、電力消費量は冷却モードと加熱モードで計 10.6kWh を示す。夏期 24°C、冬期 24°C の運用の場合には、計 9.6kWh の電力消費量となる。以上より、室内温度によって採涼採暖椅子の使用率が変化することから、電力消費量も変化するものの、その程度は年間で一人当たり 1kWh 程度と軽微であることがわかる。

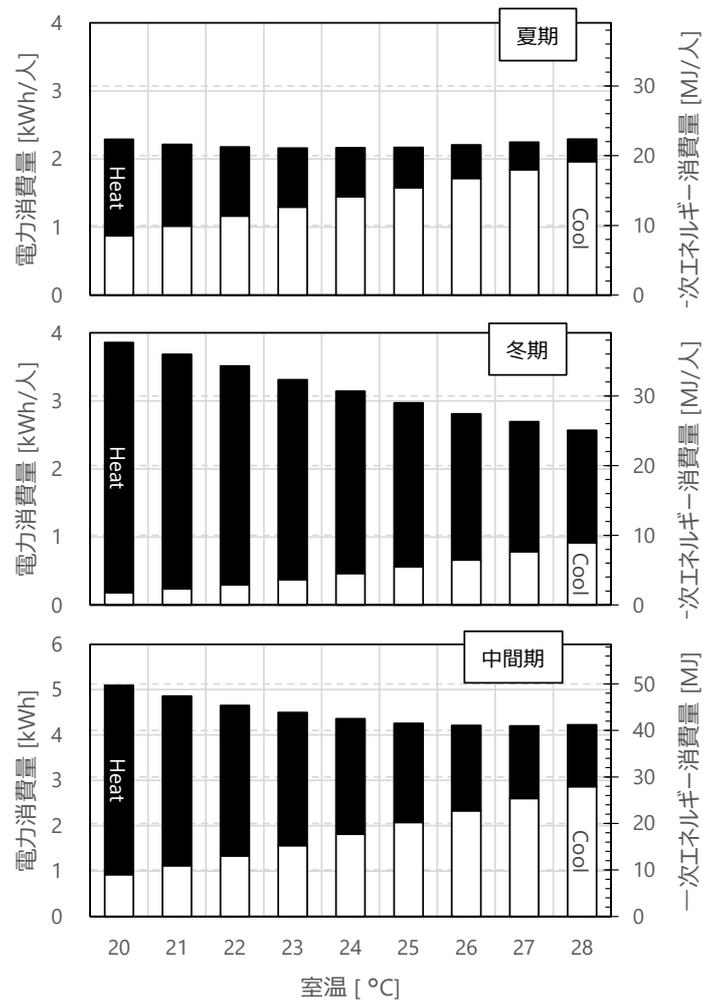


図 7.4 採涼採暖椅子 1 台当たりの電力消費量および一次エネルギー消費量

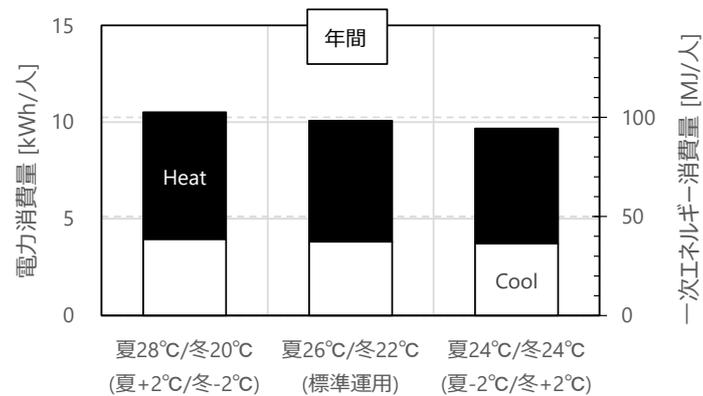


図 7.5 採涼採暖椅子 1 台当たりの年間の電力消費量および一次エネルギー消費量

7.3.2 太陽光発電量の試算

図 7.6 に 1 日当たりの太陽光発電量の箱ひげ図を示す。縦軸は発電容量当たりの発電量として、日射量の算出には NEDO のホームページ上で公開されている日射量データベース (METPV-11) を用いた。このツールは、国内 837 地点・20 年間 (1990~2009 年) の代表年に関する日射量データベースである。毎時の方位角別、傾斜角別の日射量が表示できる。気象官署 155 地点、アメダス 685 地点の計 840 地点の毎時データを元に、日照時間から日射量を推定する「日照・日射モデル」³⁾を用いて整備されたものである。場所は東京都で計算した。

図 7.5 に示した各月の中央値を見ると、1 日当たり 3 から 6 kWh/kW の発電量を示す。ただし、1 日当たりの発電量には、ばらつきがあり、例えば 7 月でいえば、1 日当たり最大 8.7 kWh/kW、最小 1.0 kWh/kW を示す等、幅広い値をとる。天候によらず、太陽光発電により充電できることが望ましい。

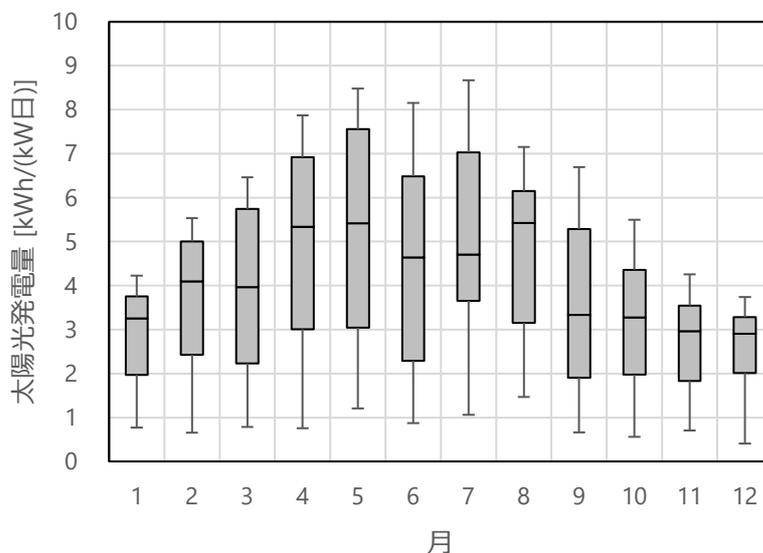


図 7.6 各月の 1 日あたりの太陽光発電量

7.3.3 電源自給の条件

図 7.7 に電源自給に要する太陽光発電容量を示す。使用者 1 人当たりにつき 48Wh の充電電池を 2 個以上支給して、日中は太陽光発電による電力を充電地に蓄電する運用を想定した。縦軸の蓄電量とは、充電電力を正、消費電力を負とした時の収支を示しており、0 以下の時は充電電力が不足し、賞用電力なしでは使用できない状態となる。同図の線は二種類あり、実線は下位 1%、点線は下位 10%を表す。

下位 1%の線を見ると、太陽光発電容量の増加に従って蓄電量も増加する。太陽光発電の容量が 0.012 kW/人までは、電池の本数によらずに同じ傾きで蓄電量が増加するが、それ以上では、

電池の支給本数が多い方が、より早く蓄電量は正側に推移する。支給電池が多ければ、発電量が小さい日が2、3日続いても、条件の良い日に充電していたものを使用することができるためである。4本支給した場合には、0.014 kW/人以上の容量があれば、充電量と消費量の収支は0以上となる。2本支給の場合には、0.020 kW/人程度の発電容量が必要となる。

下位10%の線を見ると、下位1%に比べて少ない発電容量で収支を0以上とすることができ、いずれの電池支給数であっても、0.014kW/人以上の容量で足りる。

以上より、例えば、1,000m²の事務所で専有面積10 m²/人としたとき、100名が執務することになるが、その時の必要発電量は、1.4kWから2.0kWである。この発電量は、パネル1枚当たり250W、変換効率21%、1.35m²の太陽光パネルを用いるとき、パネル面積11m²が必要となる。

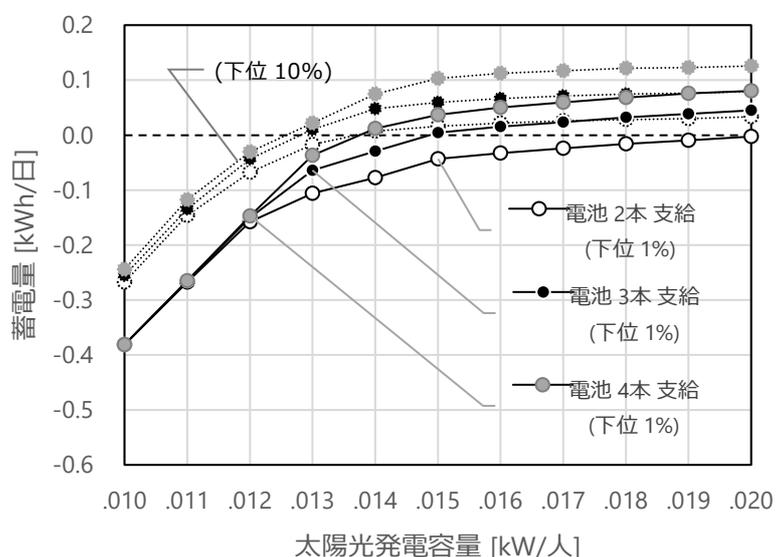


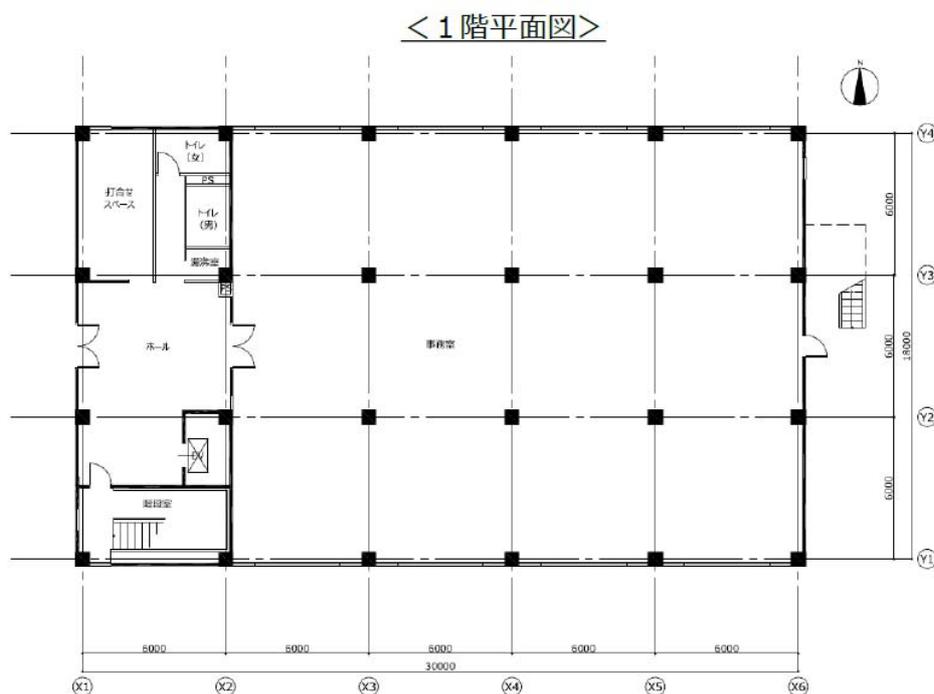
図 7.7 電源自給に要する太陽光発電容量

7.4 アンビエント空調の最適化

ここからは、採涼採暖椅子の適用によるアンビエント空調のエネルギー消費量に及ぼす影響について述べる。図 7.8 に建物の概要と平面図を示す。これは、ZEB 設計ガイドライン²⁾で用いられる例題である。地上 3 階建てで、延床面積約 1,700m²の小規模事務所ビルである。その内、事務所部分は 1,300 m²程度であり、専有面積 10 m²/人の最大 130 人が勤務する想定である。空調設備には、空冷式パッケージエアコンが設置されており、事務室部分は 120W/m²の容量で設計されている。

表 7.1 オフィスの概要

所在地	東京都
構造	RC造
階数	地上3階建て
敷地面積	1,200m ²
建築面積	564m ²
延床面積	1,706m ²

図 7.8 オフィスの1階平面図²⁾

まず、標準的な運用条件におけるアンビエント空調のエネルギー消費量を求める。図 7.9 に当事務所ビルのエネルギー消費量を示す。このエネルギー消費量は、建築物のエネルギー消費性能計算プログラム ver3.4.1（通称、WEBPRO）を用いてシミュレーションした。空調、換気、照明、給湯、昇降機のエネルギー消費量の合計値は、年間 1,243 GJ となる。その内、空調熱源のエネルギー消費量は、560 GJ を占める。パーソナル空調の適用により、設定温度を緩和した場合に、貫流負荷および外気負荷の低減が可能となるため、熱源のエネルギー消費量が削減される。以降では、ここで示した空調熱源のエネルギー消費量を基準とする。

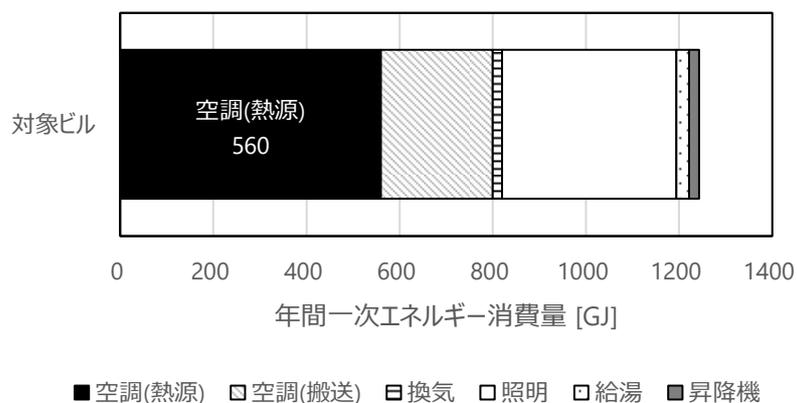


図 7.9 エネルギー消費量の内訳

図 7.10 に各季節の空調熱源用の一次エネルギー消費量を示す。WEBPRO では、年間のエネルギー消費量の合計しか取り出すことができないため、拠点 TM のエネルギー消費傾向を元にして、各季節に按分した。

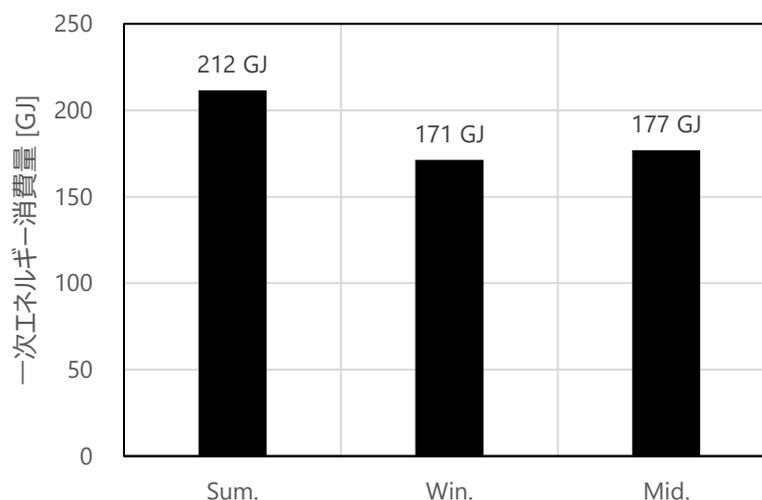


図 7.10 空調用一次エネルギー消費量

図 7.11 に事務室における室内熱負荷の頻度分布を示す。冷房負荷を見ると、1F は 48 W/m^2 以下に付置しており、平均 11 W/m^2 を示し、設計容量 (120 W/m^2) の約 1 割程度となる。2F と 3F は、1F に比べて土間床の冷熱を受けないため、高い熱負荷の頻度が高い。 84 W/m^2 以下の熱負荷が見られ、平均 35 W/m^2 を示す。

暖房負荷は、逆に 1F は土間床の影響を受けて、2F、3F に比べて、高くなる傾向にある。平均値は、1F で 31 W/m^2 、2F と 3F で 10 W/m^2 を示す。

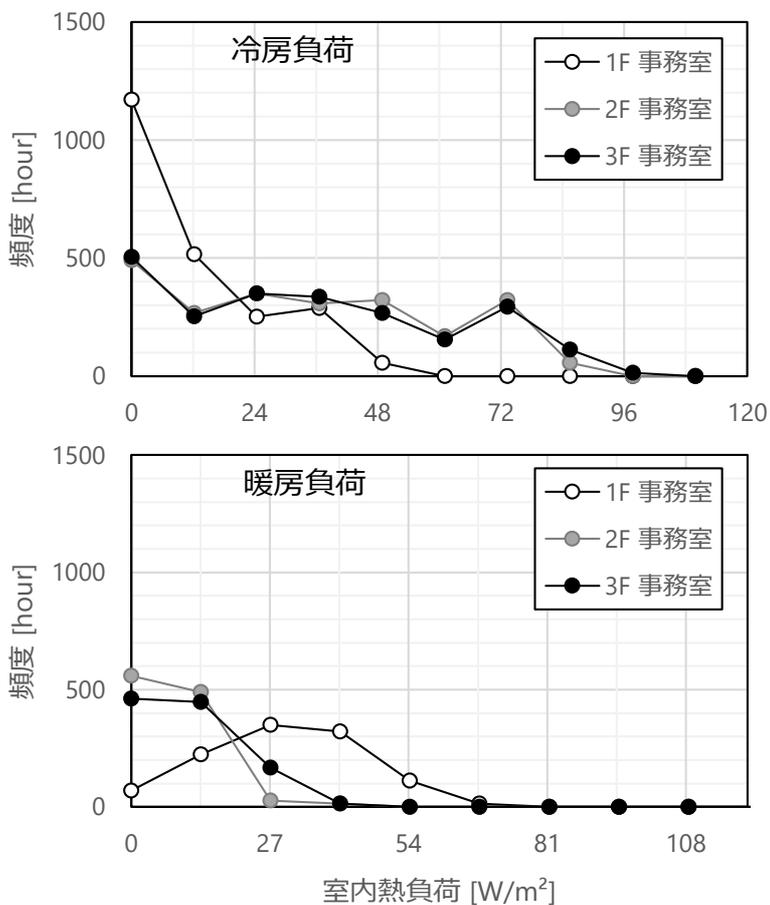


図 7.11 室内熱負荷の頻度分布

図 7.12 に各設定室温におけるエネルギー消費量の比率を示す。標準的な運用条件として、夏期 26°C, 冬期 22°C, 中間期 24°C として、この温度の時にエネルギー消費量の比率は 100%となるようにプロットしている。夏期および冬期ともに、設定室温が変化すると、貫流負荷と外気負荷が変わることで、エネルギー消費量が変化する。夏期は 4.8%/°C, 冬期は 5.5%/°C の傾きになると試算した。一方、中間期は設定室温と外気温の差がないため、設定室温の変化によるエネルギー消費量に及ぼす影響は、夏期と冬期に比べて小さい。

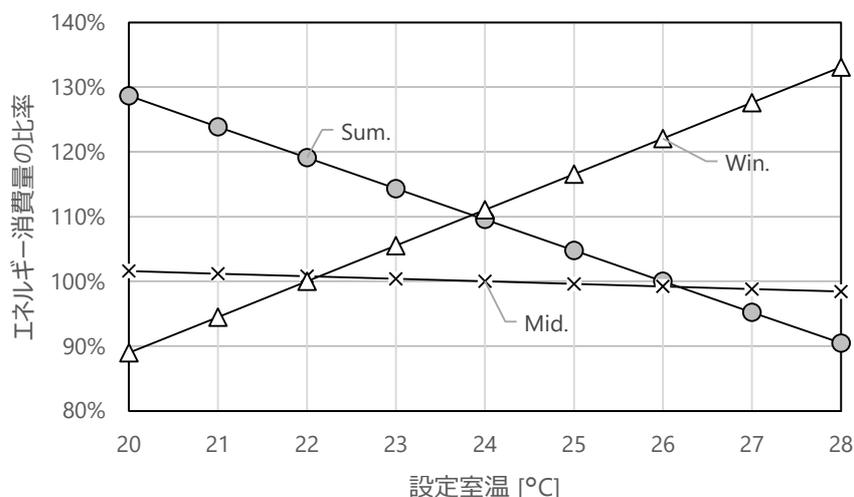


図 7.12 エネルギー消費量の比率

以上を踏まえて、図 7.13 に各室温における不満足率とエネルギー消費量を示す。PPD の計算条件を表 7.2 に示す。標準状態であるパーソナル空調なしの条件と数理モデルを用いたパーソナル空調ありの条件では、対流熱伝達率が異なるが、これは 3 章(表 3.4)で示した値を用いている。

パーソナル空調なしの PPD は、採涼採暖椅子を使用していない温熱条件下での値を示す。数理モデルの PPD は、当モデルで予測される採涼採暖椅子の使用率を用いて、非使用状態(つまり、標準状態)における PPD と冷却モードもしくは加熱モード使用下における PPD との重みづけ平均として示す。ただし、数理モデルの PPD の計算には、不満足率を悪化させる方向の運転は除いている。例えば、数理モデルでは、標準状態で熱的中立を超えて暑い(もしくは、冷たい)状態の場合に、より暖かく(もしくは、涼しく)するような運転も見られるが、その熱的条件で PPD を計算すると悪化することになる。実際は、このような運転は、執務者が自発的に至適環境を形成すべく行うものであることから、むしろ積極的快適性の獲得に寄与すると考えることから、上記の通りの計算とした。また、採涼採暖椅子の出力は、冷却及び加熱共に 5 段階で切り替えが可能なことから、出力段階は不満足率が最小となるように選択される場合を図示した。

表 7.2 PPD の計算条件

		作用温度	相対湿度	対流熱伝達率	着衣量	代謝量	
夏期	標準状態 (パーソナル空調なし)	各室温と同じ	50%RH	3.16 W/(m ² K)	0.6 clo.	1.1 met.	
	数理モデル (パーソナル空調あり)	冷却	"	"	4.75 W/(m ² K)	"	"
		加熱	"	"	1.29 W/(m ² K)	"	"
冬期	標準状態 (パーソナル空調なし)	各室温と同じ	50%RH	3.16 W/(m ² K)	0.8 clo.	1.1 met.	
	数理モデル (パーソナル空調あり)	冷却	"	"	4.75 W/(m ² K)	"	"
		加熱	"	"	1.29 W/(m ² K)	"	"

夏期における PPD(不満足率)を見れば、標準状態においては 25°C で最小値の 5%を示し、26°C では 7%、27°C では 13%となり、室温上昇に伴って、暑い側の不満足が増加する。25°C から 24°C に低下する場合には、PPD が 5%から 7%に増加し、寒い側の不満足が起こる。数理モデルを見ると、25°C で 5%、26°C で 6%、27°C で 7%と、室温上昇による PPD 増加の傾きが、標準状態に比べて小さく、熱的満足度が良化する。

PPD の閾値を 10%とすれば、標準状態では 26°C を上限とする必要がある。これは、一般的な冷房時の設定室温と符合する。一方で、数理モデルの結果より、採涼採暖椅子を適用すれば 27°C まで許容されることを示す。夏期の一人当たりの一次エネルギー消費量を見れば、室温 26°C では、アンビエント空調とパーソナル空調を含めて、1,649MJ/人であるが、27°C では 1,574MJ/人となり、75MJ 減じる。採涼採暖椅子の適用により、夏期の空調熱源のエネルギー消費量を 4.8%削減可能となる。

冬期の PPD を見ると、標準状態では 24°C で最低値を示し、室温低下に伴い PPD が増加し、22°C では 10%、21°C で 17%、20°C では 26%を示す。数理モデルでは、21°C で 10%を示しており、夏期と同様に PPD の閾値を 10%とすれば、設定室温の下限値は、標準状態では 22°C、数理モデルでは 21°C となる。冬期の一次エネルギー消費量は、22°C で 1,353MJ/人、21°C で 1,282MJ/人を示す。採涼採暖椅子の適用により設定温度を 1°C 緩和することで、71MJ/人の削減が可能となる。

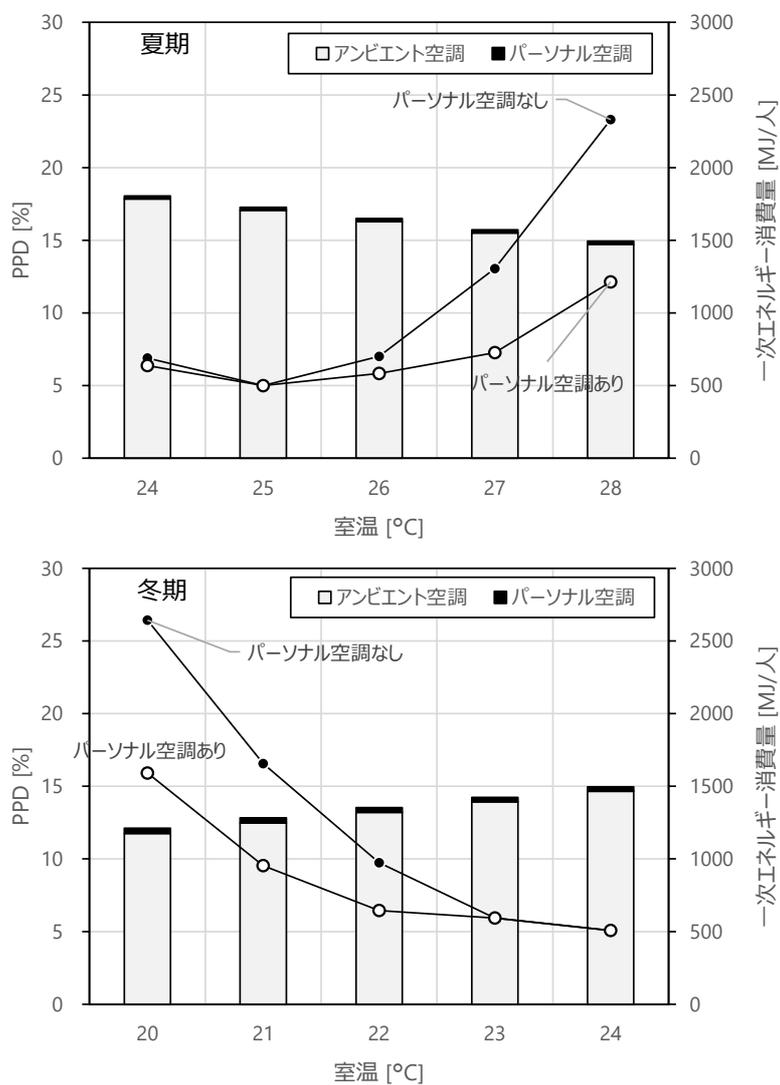


図 7.13 不満足率と空調用一次エネルギー消費量

ここで、図 7.14 に不満足率の変化量とエネルギー消費量の関係を示す。不満足率の減少量は、標準状態の PPD から数理モデルの PPD を引いた値を示す。夏期を見れば、PPD の減少量は 25°C で 0% を示し、26°C になれば 1%、27°C で 6% となる。気温上昇により、PPD の減少量が増加する。エネルギー消費量を見ると、気温 1°C の上昇に伴い、77MJ/人減少する。

冬期については、PPD の変化量は、23°C 以下で見れば、1°C あたり 4% の傾きを示す。エネルギー消費量は、気温 1°C 上昇につき 71MJ/人の削減が可能である。

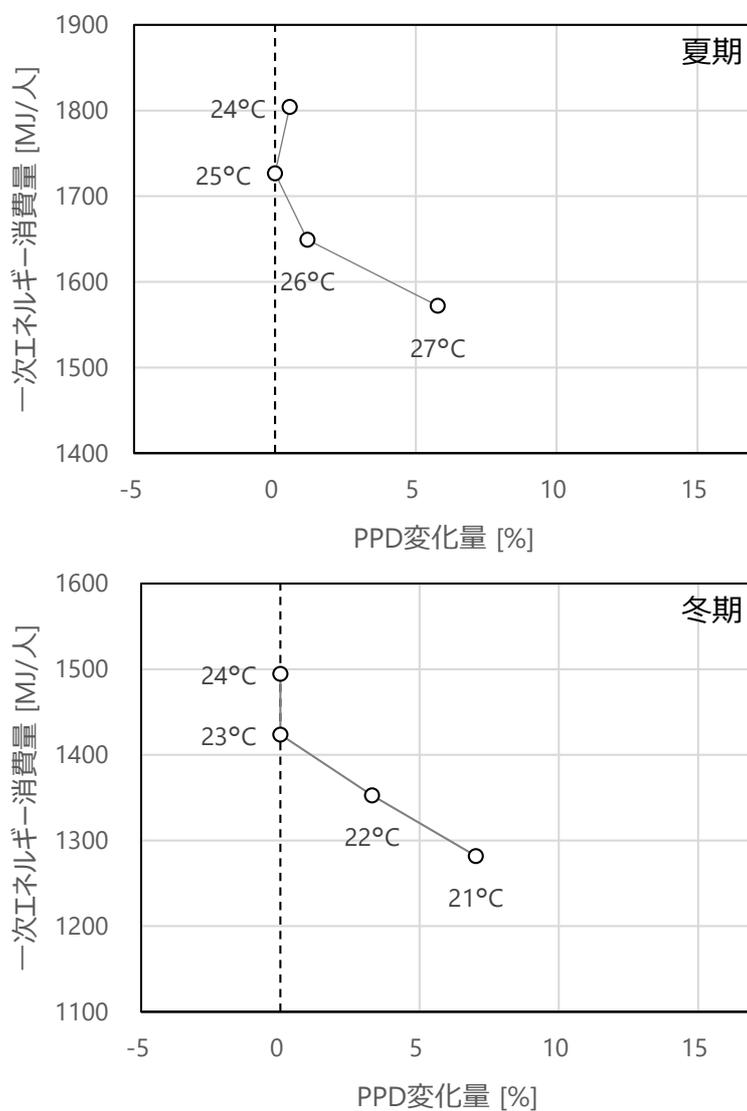


図 7.14 不満足率の変化量と空調用一次エネルギー消費量

7.5 まとめ

本章では、採涼採暖椅子の使用状況を予測する数理モデルを用いた熱的快適性およびエネルギー消費量について、シミュレーションを行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 夏期の設定室温の基準を 26°C としたとき、採涼採暖椅子があれば、室温を 27°C としても、快適性は同水準を保つことが可能である。この室温の緩和によってエネルギー消費量を 75 MJ/人(▲4.8%)削減可能である。冬期は 71MJ/人(▲5.5%)の削減効果が見られた。
- 2) 採涼採暖椅子を再生可能エネルギーのみで充電する場合におけるエネルギー消費量を計算し、太陽光発電の発電容量は、20W/人が必要なことを示した。

参 考 文 献

- 1) 栗田ら：非住宅建築物を対象とした先導的省エネルギー技術の評価方法に関する研究 その 11 タスクアンビエント空調を対象とした年間エネルギー消費量の算出方法に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2018), pp. 161-164,
https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2018.3.0_161
- 2) ZEB 設計ガイドライン【ZEB Ready・小規模事務所編】(ZEB ロードマップフォローアップ委員会編, 2018 年)
- 3) 板垣昭彦, 岡村晴美, 飯田秀重, 山田雅信, 佐々木律子: 日照時間を用いた時間積算日射量推定モデルの開発, 太陽/風力エネルギー講演論文集(2005), pp.299-302

8章 総括

8.1 各章のまとめ

本研究では、事務用椅子にパーソナル空調機能を付した採涼採暖椅子を実用化して、実オフィスに適用した。実環境下における採涼採暖椅子の運用状況を観察して、執務者の温熱需要の発生条件を分析し、冷却および加熱の使用傾向を数学的モデルに表した。このモデルから、エネルギーシミュレーションを行い、採涼採暖椅子が温熱快適性とエネルギー消費量に及ぼす影響を示した。

その結果、実用化に際しては、座り心地、使い勝手、安全性、耐久性、製造性、保守が課題として挙げられたものの、パーソナル空調機能を座面に集約して、設備機器の仕様を什器メーカーとすり合わせを行うことで解決を図り、実用機として必要な要件を示した。

この実用機を実オフィスに適用すると、運用状況には、ヒューマンファクターおよびヒステリシスの影響により、個人差が含まれるものの、室内気温と季節によって概ね説明できることを示した。

実環境下における運用データから確率的ベイズモデルを用いて、室温と季節および個人差を説明変数とした数学モデルを示して、冷却および加熱の使用傾向を定量化した。このモデルにより、採涼採暖椅子の必要充電量を求めて、電源自給が可能な太陽光発電容量を示した。さらに、採涼採暖椅子を適用した時の熱的快適性を求めて、満足率を下げることなくアンビエント空調の設定温度を1°C緩和できることを示した。これにより、夏期、冬期の空調用エネルギー消費量を5%程度削減可能なことを示した。

以降で、各章を概括する。

第1章 序論

研究の背景と各章の位置づけを示した。空調により温熱環境をいくら精緻に制御しても、各個人の温冷感は、ヒューマンファクターが影響を及ぼすことから、一様とならない。各個人に最適な温熱環境を実現するには、各自で温冷感を調節可能なパーソナル空調が有効であり、これまで数多くの研究がなされてきた。設置形態として、建築付帯型と什器設置型に分けられるが、本論文では、事務用椅子に着目して、パーソナル空調の実装を試みた。これは、身体に最も近接した什器であることから、操作が容易であり、効果を即時に体感し易いためである。椅子設置型には、これらの利点があるものの、実用化された例はほとんどなく、実建物に適用した場合の運用実態やエネルギー消費量は不明である。こうした背景を元に、本研究の目的と位置づけを整理した。

第2章 要求性能に関する検討

本章において、パーソナル空調機能を付加した事務用椅子「採涼採暖椅子」のコンセプトを示し、要求性能を整理した。電池駆動を前提とするため、冷却機能には等温気流、加熱機能には座面内のヒーターによる加温を用いることとした。冷却モード時において、既往研究を参考に、身

体近傍の風速と SET* の関係を整理し、 -1°C の調整効果を得るには、胸および上腕の近傍風速を 0.7m/s に促進して、対流熱伝達率を $1.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 向上させることが必要であることを示した。加熱モードにおいては、座面との接触部(約 0.03m^2 、全身の 2%)の放熱をなくすことで、他の部分の皮膚温が 0.2°C 程度上昇し、全身の SET* は 1°C 上がることを示した。

第3章 試作機における温熱環境調整能力の評価

前章において述べた要求性能を満たすべく、採涼採暖椅子を試作して、冷却モードおよび加熱モードにおける物理的な熱性能および被験者実験による心理的な効果について検証した。その結果、冷却モード時の送風により身体近傍の風速が 0.7m/s を計測した。加熱モードでは、加熱開始から 5 分程度で 34°C に達して、体表面温度以上となった。サーマルマネキンの計測により、人体外表面における総合熱伝達率を計測すると、冷却モード時には、 $1.6\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 向上し、加熱モード時では、 $1.9\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 抑制することを示した。これは、等価温度で $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の効果であり、既往研究で示された目安を満たした。

被験者実験では、冷房環境下(28°C)および暖房環境下(20°C)において、自由に採涼採暖椅子を使用させた際の温冷感(TSV)を申告させた。その結果、冷却モードにより TSV が 0.7 ポイント涼しい側に、加熱モードによって TSV が 0.8 ポイント暖かい側に推移した。

第4章 実用化

本章では、研究段階における試作機のプロトタイプ機から、準実用機となる実用初号機、実用機となる実用二号機と仕様を改訂したプロセスを示し、採涼採暖椅子の実用化に際して直面した課題を整理し、その対策を述べた。その後、実用二号機への変動風機能を実装した。風を含めた自然現象はゆらぎを有しており、快適性の向上に寄与していることから、更なる機能向上を意図して、数式により 1/f ゆらぎを生成し、変動風モードとして試験的に実装した。

課題として、座り心地、使い勝手、安全性、耐久性、製造性、保守の観点を挙げた。解決策として、座り心地の観点で言えば、座面をウレタンとしながら、座面内部に通気素材を挿入することで座面の熱抵抗を低下させることで採涼採暖機能との両立を図った。使い勝手の向上のために、座面内に着座センサを配して、離着席時に自動停止・自動復旧させるようにした。安全性のために、ヒーターの安全回路を設け、耐久性の確保のために、各部とも簡単には壊れない構造とした。製造性のために、すべての採涼採暖機能を座面に集約することで解決した。保守の面では、部品交換が容易となるようにした。

第5章 オフィスにおける実運用状況の解析

ここでは、採涼採暖椅子を適用した実用事務所 3 拠点における採涼採暖椅子の使用状況と温熱環境の観測データを用いて、執務者の温熱的要求に及ぼす環境因子および個人差の影響を把握した。その結果、採涼採暖椅子の使用は、こまめに発停が繰り返されることはあまりなく、使用するか否かの悉無律が存することを示した。

使用率は、室内空気温度に応じて変化しており、冷却モードの閾値は26°C前後、加熱モードでは21°C前後であった。同じ室内空気温度であっても、季節によって使用傾向が異なることから、温熱履歴による影響が示唆された。

性差についていえば、例えば男性(もしくは女性)の方が、室内空気温度によらずどちらかのモードを常に使用し易いというような、一貫した性別による影響は今回の調査結果からは確認されなかった。

個人に差に関する分析から、使用傾向が3群に大別できることを示した。内訳は、冷却モード、もしくは、加熱モードのみを使用するグループ、冷却モードを使用する室内空気温度の閾値と加熱モードを使用する閾値の差が大きいグループ、両モードの閾値の差が小さいグループであった。

第6章 運用状況の数理モデル化

本章では、運用データを元に数理モデルによって、採涼採暖椅子の使用状況を一般化することを試みた。使用状況を観察すると、室内の温熱環境条件に加えて個人差の影響が表れることから、数理モデルには、説明変数に個人差を含むことができる階層ベイズモデルを用いることとした。

従属変数には、使用するか否かの2値を用いた。説明変数には、各変数の線形結合をロジスティック関数で変換して用いた。複数のモデルを比較すると、説明変数に室内気温、季節、個人差を採用したものが観測値によく一致することを示した。このことから、採涼採暖椅子の使用状況に顕れる温熱環境条件および個人差の影響を数理モデルにより把握することができた。

第7章 アンビエント空調との協調に基づくエネルギーシミュレーション

前章で導いた数理モデルを用いて、エネルギーシミュレーションを行った。その結果、夏期の設定室温の基準を26°Cとしたとき、採涼採暖椅子があれば室温を27°Cとしても、快適性は同水準を保つことが可能であることを示した。また、この室温の緩和によってエネルギー消費量を75MJ/人(▲4.8%)削減可能であった。冬期は71MJ/人(▲5.5%)の削減効果が見られた。

採涼採暖椅子自体のエネルギー消費量は、年間一人当たり100MJ程度とわずかであることを示した。そのため、採涼採暖椅子の電源を自給自足するには、各人2本の電池を支給した場合において、1人当たりの太陽光発電装置の容量は20Wで足りるとの試算を示した。

8.2 今後の展望

<ボルトオン型への展開>

実際の事務用椅子の選定理由には、機能以外にデザインや什器メーカーとの取引実績等が影響することから、広く採涼採暖椅子を普及させるには、他種の事務用椅子に適応させることが必要と考える。

ここでは、鶺鴒らの研究を参考に、背・座共にメッシュ素材の椅子をベースにして、冷却機能と加熱機能の両立を図ることとした。

ボルトオン型採涼採暖ユニットの設置場所の検討のために、上市されている背・座共にメッシュ素材の事務用椅子を調査した。座面廻りを詳細に観察したところ、座面と脚部がそれぞれ別部品で構成される製品が多く、両者の間に高さ 100mm 程度の空間を有することが判明した。次に背面を観察すると、椅子の後ろ姿のデザインに各製品の特徴が顕れており、背面に採涼採暖ユニットを設置することはデザイン性の悪化が危惧されるため困難と考えた。そこで、座面と脚部の間を活用して採涼採暖ユニットを設置することとした。

冷却には等温気流を用いる。加熱には座面の下部に配したヒーターからのブルームによる座面の加温を用いる。座面にヒーターを接触させず、座面のメッシュ素材の通気性を損ねないような配慮である。

ヒーターには安全性を考慮して、自己温度を 80°C 以下に制御する出力 5W の PTC ヒーターを 4 個用いる。ただし、当ヒーターの放熱面積が 35mm×21mm×表裏 2 面と小さいため、自己温度制御により出力が抑制されうる。そこで、高さ 20mm のヒートシンクを取付け、放熱面積を可能な限り確保するような設計である。

写真 8.1 に試作した採涼採暖ユニットを示す。左右 2 部材から成る。端部の片方に吹出口およびファン、もう片方にヒートシンク付きのヒーターを据え付けている。

写真 8.2 に座面と脚部の空間に採涼採暖ユニットを設置した際の写真を示す。座面の中央直下にヒーター部が位置するような設計である。なお、ヒーターの高さは 30mm として、人の着座により座面がたわんだ場合にも、座面と接触しないことを確認した。

写真 8.3 に採涼採暖ユニット装着状態の椅子を示す。座面の左右両端をクランプで挟むことで装着する。

これは一例に過ぎないが、より簡便に、多種の事務用椅子に設置することが可能なユニットの開発が必要である。

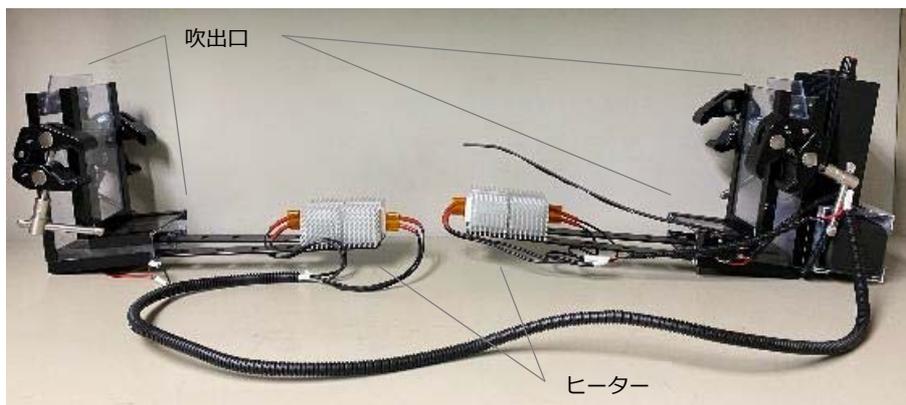


写真 8.1 ボルトオン型採涼採暖ユニット



写真 8.2 採涼採暖ユニットの設置



写真 8.3 ユニット装着状態

<心理的影響に関する研究>

本研究では、実際の使用状況から推理モデルに一般化して、温冷感およびエネルギー消費量の削減効果を示した。これは、SET*および一次エネルギー消費量といった物理的指標に基づく分析であった。パーソナル空調の効果には、これらの物理的指標に及ぼす影響のみならず、次の1)~3)の心理的な影響が期待される。

1) 積極的快適感の獲得

熱的中立状態を外れる温熱環境であっても、自身が積極的に選択して、獲得した状態であるなら、不満のない消極的快適を超える“積極的快適感”を得ることができる。このメカニズムは、1章で示した二次元モデル（久野）や Alliesthesia（de Dear）によって説明される。パーソナル空調は、自身の判断に基づき積極的に使用・停止といった状態や、モード・強度を選択するものであり、積極的快適感に寄与するものである。

2) 自己効力感の向上

自己効力感（バンデューラ）とは、自分がある状況において必要な行動をうまく遂行できると、自分の可能性を認知していることとある。この自己効力感が高いほど、実際にその行動を遂行できる傾向にあるとされる。パーソナル空調は、着衣の調整や団扇の使用等といった温熱的調節行動に新たな選択肢を与えることで、自己効力感を向上させるものである。その結果、自身が望む温熱環境に、各自が調整させることが可能となる。

3) 自己実現欲求の満足

マズローは人間の欲求を5段階の階層で理論化した（図 8.1）。温熱的な欲求として整理すると、低次欲求（生理的欲求、安全欲求、親和欲求）は、パッケージ空調システム等の一般的な空調方式でも建築物環境衛生管理基準を満たし、温熱的中立状態となるよう温熱環境を制御することにより、満足させることができる。高次欲求（尊厳欲求、自己実現欲求）は各人が組織に尊重され、自らの能力や可能性が最大限発揮されていると感じられることで満足するものである。パーソナル空調によって、各自に裁量権を与えることで、この高次欲求が満たされる。

以上に示したパーソナル空調による温熱心理的な影響については、本論文では議論していない。この影響を定量化して、メカニズムを把握することは今後の研究課題であると考えられる。

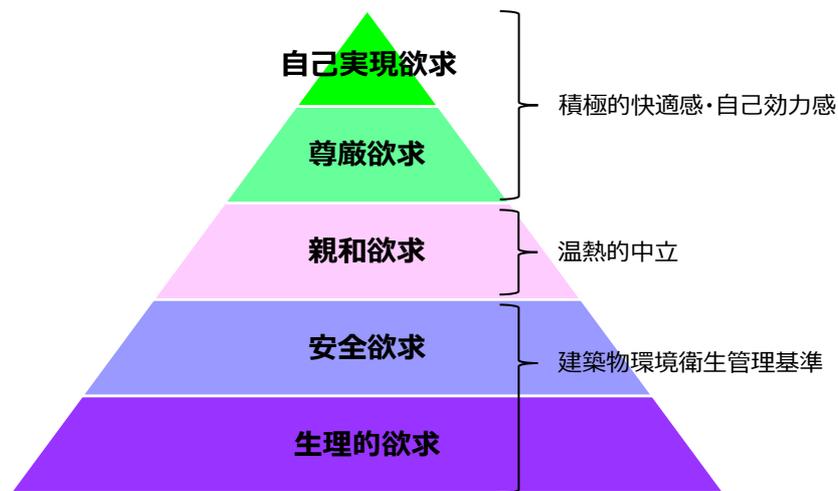


図 8.1 マズローの欲求階層

<就労形態との関連>

近年、従来のメンバシップ型雇用からジョブ型雇用なる働き方・就労形態に変化しつつある。従来のメンバシップ型雇用では各自の裁量権や自由を認めることに消極的な代わりに組織が責任を負う就労形態であった。それに対して、ジョブ型雇用とは各自に裁量権および自由を積極的に与えて、成果・責任を求める就労形態である。

この変化に伴って、オフィス環境も変革していく必要がある。温熱環境の面から言えば、従来の画一的な環境形成を目指す空調方式では不十分となる。なぜなら、ジョブ型雇用によって、各自の個性を尊重した働き方を実現するには、個人に裁量権を与えるパーソナル空調が不可欠となると考えるためである。

パーソナル空調により、如何に個人に自由を与え、自由を感じさせうるのかを評価することは、今後の研究課題の一つであろうと考える。

8.3 注記

利益相反：花園新太郎は、ダイダン株式会社の社員である。指導教授の野部達夫はダイダン株式会社から空気調和設備に関する委託研究を受けているが、いずれもその内容は客観的な知見の提供である。花園新太郎と野部達夫の共著論文は、第三者による査読を経た営利性のないものである。

謝 辞

本論文は、工学院大学建築学部建築学科 野部 達夫教授との10年間の共同研究の成果およびそれを学術的に発展させた内容を纏めたものになります。この間、先生とは、共同研究先企業の担当者として、入学してからは研究室の学生として関わりながら、実に様々なことを教わりました。例えば、何に拘り、何を妥協するかということを含めたものづくりに必要な姿勢および精神、データを客観的に捉えた上で多様な見方で分析・研究する柔軟な考え方、何事にも好奇心を持って取り組むことで人生を積極的に楽しむコツ等、上げればきりがありません。ともすれば、視野が狭くなりがちな私に、柔軟な考え方によって都度的確な助言を与えてくださったおかげで、こうして博士研究を纏めることができました。博士課程の学生として受け入れて頂き、ご指導頂きましたこと、深く深く感謝申し上げます。

同学科 柳 宇教授、富樫 英介教授には、副査としてご指導頂きました。特に内審査の際には、より良い研究論文となるようにと、性別の偏りに関する記述や章題等、非常に重要な事柄を含む助言を数々頂きました。そのおかげで、より確とした論文に仕上がったものと思います。ありがとうございます。

法政大学デザイン工学部建築学科 中野 淳太教授にも、副査としてご指導頂きました。先生の研究室で行った内容説明の際に、一貫した論文となるようなグラフ表現の工夫等、様々なご助言を頂きましたおかげで、博士研究の内容がより充実いたしました。また、先生とはその後、ASHRAE 視察団として米国のシカゴ、ニューヨークにご一緒できましたこと、大変ありがたく、ご縁を感じている次第です。

本研究は、早稲田大学理工学術院創造理工学部建築学科 鶴飼 真成講師のご助力がなければ、成らなかったものと思います。鶴飼先生が野部研究室に学生として在籍されていた頃からのお付き合いとなりますが、勝手ながら共に汗を流した仲間のように感じております。誠にありがとうございます。

題目に掲げる「採涼採暖椅子」の嚆矢は、野部研究室の先輩である清水 賢氏、古川 悠氏が始めたクールチェアの研究になります。お二方ともお忙しい中、公聴会にお越し頂き、質疑コメントまで頂いたこと大変光栄に感じております。

また、この10年間で歴代の野部研究室卒業生の皆様には、ものづくり、データ分析を含めて大変な助力を頂きました。特に大学院生として、卒論生を指導しながら、採涼採暖椅子に関する研究成果を蓄積してくれた津坂 剛男氏、土井 裕介氏、香取 尚樹氏、久保田 裕貴氏、戸坂 優介氏、林 京吾氏、山神 直央氏には大変お世話になりました。他にも協働した方が沢山おり、全員の名前を挙げられないのが心苦しい限りですが、謝意を表します。

この研究に直接関わって頂いておりませんが、私の研究者としての基礎は、広島大学大学院先進理工系科学研究科 西名 大作教授に叩き込まれたものです。学会大会の際には、質問を頂き、東京に来られた際には飲みを誘って頂く等、常に気にかけて頂きましたこと、感謝申し上げます。

社会人博士として送りだしてくれた上司のダイダン株式会社 中村 真氏には、大変感謝しております。「博士研究を言い訳に、業務の手を抜くことは許さんぞ」という厳しくも、愛のある言葉で大いに気合が入りました。何とか学位取得という難関を乗り越えられたのも、あの言葉があったればこそと思います。

最後に、妻の可奈子には、学位取得が難易度の高い目標であることを理解してもらいながら、心身共に支えてもらいました。彼女がいなければ、ここまで頑張れなかったのは間違いありません。ありがとう。

2024年3月15日

花園 新太郎