

## 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

花園 新太郎

## 【 論 文 要 旨 】

パーソナル空調の研究開発は、1970年代に登場した床吹出し空調に端を発し、その後1980年代には机などを活用した什器設置型に広がりを見せる。個人の温熱環境に対する要求は、千差万別であり、個人差を有している。パーソナル空調が注目されてきた理由は、この個人差の解決のために個人裁量による温冷感の調整が理に適うことにある。近年では、熱波到来時の適応（Resilient cooling）の観点からも、改めて注目されている。

既往のパーソナル空調の方式を概観すると、天井や床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什器を活用するものに大別できる。什器設置型は、空調空気や電源の供給に障壁があるものの、人が操作し易く、効果を感じ易いという利点から、これまで多くの研究が発展してきた。什器の中でも、最も身体に近接する椅子を活用することが、操作のし易さ、効果の即時性の観点から理に適うものと考えられ、クールチェアや Hyper chair なる椅子設置型のパーソナル空調が研究されてきた。ただし、これらは実用化されておらず、広く一般に適用されていない。

そこで、本論文では、まず採涼採暖椅子なるパーソナル空調機能として必要な性能を備える事務用椅子を提案し、実用化した。次に、実用機を実際の事務所に適用して、その運用状況を分析して、このデータを元に数理モデルで表した。最後に、この数理モデルを用いてシミュレーションを行い、太陽光発電による電源自給が可能なことを示した。また、採涼採暖椅子の熱的不満足率の低減効果とエネルギー消費量を5%程度削減可能なことを示した。

以下に各章毎の概要を述べる。

## 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。コンセプトとしては、電池駆動を前提に、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。要求性能については、既往研究のレビューから、サーマルマネキンによる評価で冷却時に $-1^{\circ}\text{C}$ 、加熱時に $+1^{\circ}\text{C}$ 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1.3W/(m<sup>2</sup>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<sup>2</sup>, 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、1.6W/(m<sup>2</sup>K)向上し、加熱モード時では、1.9W/(m<sup>2</sup>K)抑制することを示した。これは、等価温度で±1°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

既往研究によってパーソナル空調の効果が訴求されているものの、実用化された例が少ない理由として、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の両者間に、製品に求める要求項目・水準および想定する生産台数に対する認識の齟齬が存在するとみている。実用化に際する課題を整理し、その解決プロセスを示すことは、パーソナル空調を波及させる上で重要と考える。

そこで、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、快適感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ーを配して、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

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。

## 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。結果的に、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る。

今後の展望として、ボルトオン型への展開、心理的影響に関する研究の発展、就労形態との関連に関する研究を挙げた。ボルトオン型への展開では、一般的な座面・背面ともメッシュの事務用椅子に後付け可能な空調ユニットの提案を行った。心理的影響については、積極的快適性の獲得、自己効力感の向上、マズローの自己実現欲求の満足に関する研究の必要を挙げた。就労形態との関連については、ジョブ型雇用における個人の裁量権の必要性を挙げ、パーソナル空調との関連を示した。