

人間のアダプティブ性を考慮したパーソナル空調システムの開発 (その5) パーソナル空調による人体部位別温冷感特性及び熱収支の検討

Study on the Personal Air-conditioning System Considering Human Thermal Adaptation (Part 5)

Thermal sensitivity and heat balance of each part of human body with Personal AC

学生会員 須藤 美音(慶應義塾大学)

正会員 村上 周三(慶應義塾大学)

正会員 加藤 信介(東京大学生産技術研究所)

正会員 宋 斗三(東京大学生産技術研究所)

正会員 大森 敏明(東京ガス)

Mine SUDO*¹ Shuzo MURAKAMI*¹ Shinsuke KATO*² Doosam SONG*² Toshiaki OMORI*³

*1 Keio University *2 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, *3 Tokyo Gas

Personal air-conditioning system alleviates the human thermal-discomfort efficiently by cooling a human body partially. For evaluating the efficiency of a personal air-conditioning in terms of thermal comfort, it is required to define the thermal sensitivity of a human body in detail. This paper examines the local thermal-sensitivity of a human body in case of using personal air-conditioning system. This paper, in particular describes the results of the subject experiment which was conducted with changing the wind-direction of the diffuser. The result shows that the fastest way to cool the human body is to cool the head. Furthermore, through CFD analysis and a thermal manikin experiment, the heat balance of each part of human body is analyzed.

1. はじめに

近年 OA 化による内部熱負荷の増加・偏在化やオフィスのパーソナル化などにより、従来の居室全体の均質な熱環境維持を目的とした空調方式に対し個別制御可能なパーソナル空調が注目されている。しかし、パーソナル空調の導入により快適性の向上が期待されているが、普及には至っていない。本研究では、人の熱的適応性を空調制御論理に組み込み従来型のパーソナル空調システムより快適かつ省エネルギー的な新たなパーソナル空調システムの開発を目的としている。

パーソナル空調は従来の居室全体の空調と異なり、人体を局所的に冷やすことにより効率的に熱刺激を緩和させることを意図したシステムである。そのため、パーソナル空調の快適性評価を行うにあたっては人体の部位別の温冷感特性や熱収支などの詳細な検討が必要となる。本報は、パーソナル空調の吹き出し風向を変化させた時の人体各部位温冷感変化及び全身の生理的・心理的变化に及ぼす影響を検討し、人体部位別の温冷感特性を解明する。更に CFD 解析・サーマルマネキン実験により、人体周辺温熱環境性状及び人体部位別の熱収支を検討する。

2. 被験者実験による人体温熱感度分析

全身温冷感には人体各部位の温冷感が個別に関与しており、全身が清涼な環境に曝露されていなくとも、人体の特定部分を冷却することによって全身として快適な状態に保つことができると考えられる。被験者実験ではパーソナル空調の吹き出し風向を制御し、人体各部位に到達する気流速度を変化させた場合の人体部位別の皮膚温及び温冷感の変化とそれに伴う全身温冷感変化との相関を分析する。

2.1 実験の概要(図 1,2,3,表 1)

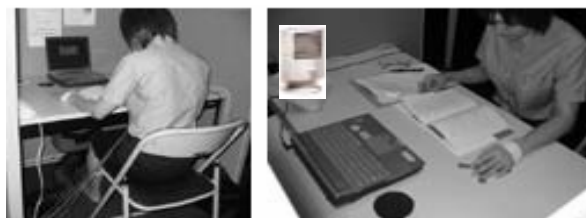


図 1 実験の様子

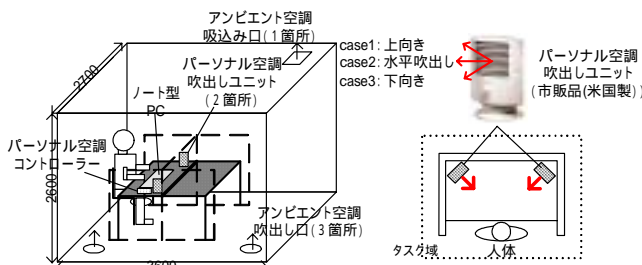


図 2 慶應義塾大学理工学部 環境実験室

表 1 アンビエント空調・パーソナル空調の設定条件

		case1	case2	case3
アンビエント空調	温度	28		
	風速	0.74 m/s		
パーソナル空調	温度	26		
	風速	2.53 m/s		
	風向	上向き	水平方向	下向き

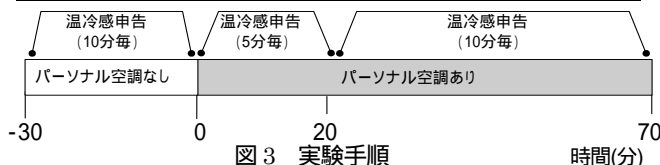


図 3 実験手順

実験は慶應義塾大学理工学部環境実験室(図 2)にて行われた。パーソナル空調としては図 2 に示す市販品(米国製)の一般的なユニットを用いた。アンビエント空調及びパーソナル空調の条件を表 1 に示す。アンビエント空調の吹き出し風速は 0.74m/s、温度 28 とする。パーソナル空調の吹き出し風速は 2.53m/s、温度 26 に固定し、吹き出し風向(図 2)を上向き吹き出し(case1)、水平

吹出し(case2)、下向き吹出し(case3)とした全3ケースに対して検討を行う。被験者は男女各5名の計10名、標準的な体格の健康な大学生を対象とし、夏のオフィスを想定した着衣(男性 0.7clo、女性 0.55clo)に統一した。図3に実験手順を示す。はじめに被験者を30分程度パーソナル空調なしの環境(室温 28℃)で読書をさせ、実験室の環境及び熱電対に十分慣れさせた状態で臨ませた。パーソナル空調をONにした後、被験者には引き続き読書をさせ70分間気流に曝露させた。被験者は実験中、皮膚温の測定及び全身・部位別の温冷感申告を行う。皮膚温はQRECの10点法(頭、胸、背、上腕、前腕、手、大腿(2点)、下腿、足)^(x1)に準じて測定を行った。温冷感申告はASHRAEの7段階スケールに準じて行った。また、人体各部位の局所温冷感申告は皮膚温測定点に対応する箇所について行った。

2.2 実験結果と考察

1) 全身温冷感(図4)

図4に全身温冷感の男性5名の平均を示す^(注1)。case1(上向き吹出し)、case2(水平吹出し)の場合は約5分で熱的中立状態になったが、case3(下向き吹出し)の場合はなだらかに変化し、約20分で熱的中立状態となる。これより、吹出し風向が上向き吹出し(case1)、水平吹出し(case2)の場合は効率よく全身を冷却できることが確認された。

2) 全身温冷感と人体部位別温冷感の相関分析(図5)

人体部位温冷感が全身温冷感に与える影響の検討を行う。図5に全身温冷感と人体部位温冷感の相関係数を示す^(注2)。ここでは、男性の結果のみを示す。case1では頭、上腕、前腕、手に高い相関がみられる。case2は主に着衣のある胸に気流が曝露されることから、全体的に相関は低い。case3では頭、上腕、手に相関がみられる。女性は(図省略)case1で胸、上腕に相関がみられるが、case2、3では全体的に相関が低い。

3) 人体皮膚温及び部位温冷感の経時変化(図6)

相関分析(図5)で高い相関を示した人体部位に関して男性被験者5名の平均皮膚温を図6上段に、同じく

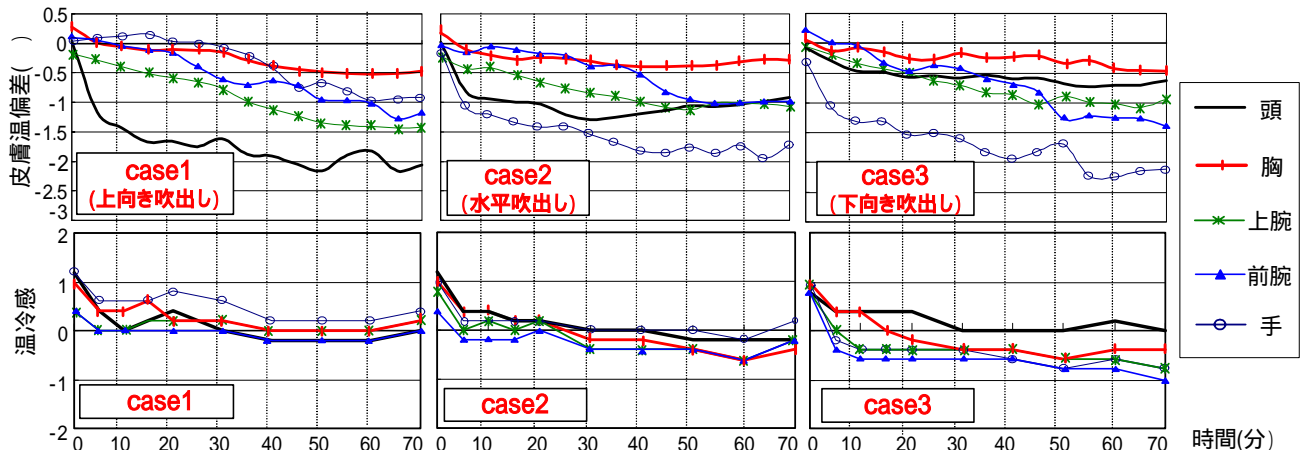


図6 人体部位皮膚温偏差と部位温冷感経時変化(上段の皮膚温偏差はパーソナル空調なしの環境の皮膚温が基準)

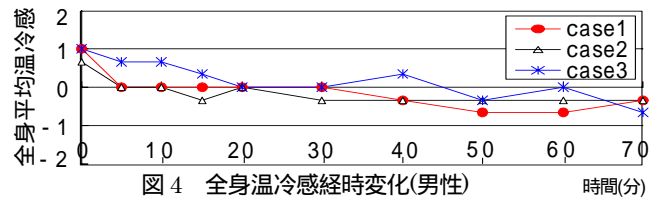


図4 全身温冷感経時変化(男性)

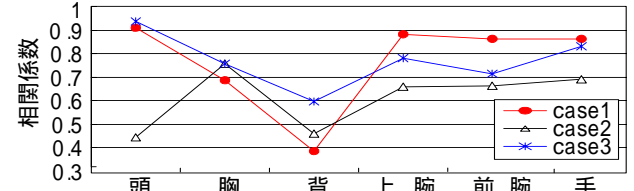


図5 全身温冷感と人体各部位の温冷感の相関関係(男性)

5名の平均部位温冷感の経時変化を図6下段に示す^(注1)。平均皮膚温はパーソナル空調なしの環境における後半20分間の皮膚温の平均に対する偏差で表示している。

case1では実験開始後、頭の皮膚温の変化が大きく、10分位まで急激に、その後は緩やかに変化する。頭の温冷感の実験開始後5分まで急激に変化する。case2では全身温冷感とやや相関のある胸で実験開始後に温冷感大きく変化をするが、着衣の影響から皮膚温の変化はあまりない。また、case2、case3では実験開始後、手の皮膚温が最も大きく変化する。人体末梢部は温熱環境の変化によって皮膚温が変化しやすい。しかし、手の温冷感の変化は最初の5分程度で、皮膚温の変化に対してあまり変化をしていない。

以上の結果より、頭の温冷感と全身温冷感と高い相関がみられることから、頭に直接気流を当てることにより効果的に全身の温冷感を下げることができると考えられる。しかし、別報^(x2)の実験のアンケート結果からわかるように、直接顔面に気流を浴び続けることにより、ドライアイなどで不快を生じる可能性も高い。

3. CFDによる人体及び人体周辺温熱環境性状の検討

3.1 CFD解析概要(表2)

前章の被験者実験と対応したCFD解析を行い、パーソナル空調吹出し風向の違いによる人体周辺の温熱環境性状及び人体表面温度の検討を行う。解析空間は実験室(図2)と同じ空間で、実人体形状を再現する。放

射・対流連成解析^{([文3](#))}を行い、流れ場解析は低 Re 数型 k-ε モデルに基づく。境界条件を表 2 に示す。人体は裸体モデルとし、読書に相当する代謝量 (1.0met) を顕熱放散量(40.4W/m²) に換算した熱流束を与える。

3.2 計算結果と考察

1) 人体周辺温熱環境性状(図 7,8)

図 7 に人体周辺風速分布を示す。case1(上向き吹き出し)では頭部に、case2(水平吹き出し)では胸部に速い風速が見られる。また、case2,case3(下向き吹き出し)ではパーソナル空調の風が人体の脇を通り背部に到達するため、やや高い風速分布となる。各ケースともに机下の風速は約 0.18m/s と静穏な環境である。図 8 に人体周辺温度分布を示す。パーソナル空調空気が到達する頭部や胸部では約 27.8 と低温である。風速が低い机下では熱が溜まり、28~29.8 とやや高温となる。

2) 人体皮膚温分布(図 9)

人体皮膚温分布の計算値を図 9 に示す。case1 ではパーソナル空調 airflow が到達する頭部の特に額の部分が最も低温となる。前腕・手はパソコンからの放射熱の影響やパーソナル空調の airflow が直接当たらないことから皮膚温はやや高い。case2 では頭や胸、case3 では胸や腕の皮膚温が低い。机下は空気の流通が悪く熱が溜まるので、各ケースともに特に下半身の皮膚温が高い。また、頭部の前後や腕の内側と外側など、パーソナル空調の airflow があたる側面とあたらない側面では同じ部位でも皮膚温は 2~3 程度の差が見られる。

4. CFD 解析・サーマルマネキン実験による対流熱伝達率の検討

ここでは前章の CFD 解析による各ケースの人体表

表 2 境界条件

アンビエント空調流入	$U_{in} = 0.74 \text{ m/s}$, $k_{in} = 0.5(U_{in} \times 0.05)^2$, $l_{in} = 0.028 \text{ m}$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} k^{3/2} / l_{in}$, $\theta = 28$
パーソナル空調流入	$U_{in} = 2.53 \text{ m/s}$, $k_{in} = 0.5(U_{in} \times 0.05)^2$, $l_{in} = 1.286 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} k^{3/2} / l_{in}$, $\theta = 26$
流出	速度は自由流出 (質量保存則による) k_{out} 、 ϵ_{out} はフリースリップ
壁面	パソコン: 1 個 (34)、照明: 100W×3 個、 人体: 1 人 (40.4W/m ²)、その他: 断熱
乱流モデル	低 Re 数型 k-ε モデル
差分スキーム	一次風上差分
メッシュ数	約 200000 メッシュ

面の対流熱伝達率の結果とサーマルマネキン実験による実験結果との比較・検討を行う。

4.1 サーマルマネキン実験と放射解析の概要

被験者実験及び CFD 解析と対応したサーマルマネキン実験を行う。実験条件・実験ケースは被験者実験と同様で表 1 参照。サーマルマネキンは 16 部位分割の女性形状で、裸体とする。供給電力を調節し CFD 解析と同量の顕熱放散量(40.4W/m²)を与える。測定項目はマネキンの顕熱放散量 $Q_{t,i}$ [W/m²]、16 部位皮膚温 []、実験室の空気温度 []、周壁面温度 []、家具表面温度 [] とする。これを境界条件としてラジオシティ法に基づき放射解析を行い人体部位別放射熱伝達量 $Q_{r,i}$ [W/m²] を算出し、式(1)から人体部位別対流熱伝達量 $Q_{c,i}$ [W/m²] を、式(2)から対流熱伝達率 $\alpha_{c,i}$ [W/m²·K] を算出する^{([文4](#))}。

$$Q_{c,i} = Q_{t,i} - Q_{r,i} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

$$\alpha_{c,i} = Q_{c,i} / (T_{sk,i} - T_{air}) \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (2)$$

4.3 結果と考察 (図 10,11)

図 10 に CFD 解析による上半身の部位別の対流熱伝達率を示す^{([注2](#))}。case1(上向き吹き出し)ではパーソナル空

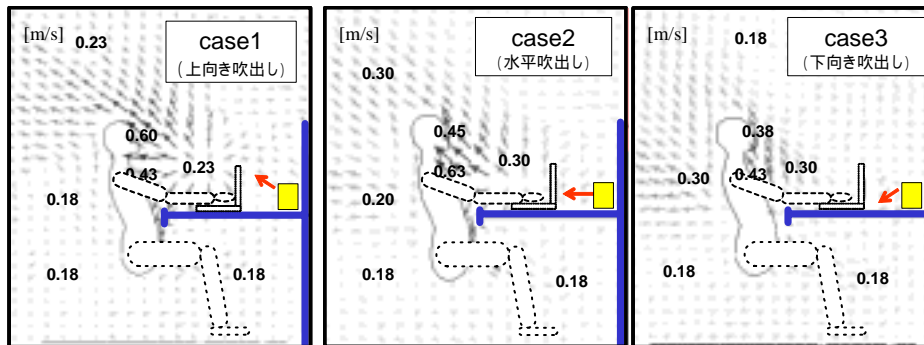


図 7 タスク域の気流分布 (CFD,人体中心部の鉛直分布) [m/s]

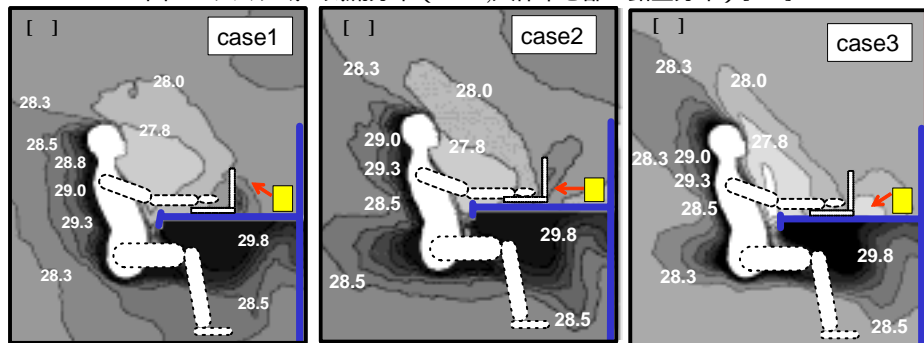


図 8 タスク域の温度分布 (CFD,人体中心部の鉛直分布) []

調の風が直接あたる頭や胸で対流熱伝達率が高くなるが、それ以外の部位は4~6W/m²程度である。また、case2(水平吹出し)、case3(下向き吹き出し)ではパーソナル空調に近い手や前腕で高い値となる。

図11にマネキン実験より算出した対流熱伝達率を示す。また、同図に従来型空調方式の場合の対流熱伝達率として、風速が0.2m/s以下の静穏な環境に着席時の対流熱伝達率3.1[W/m²] (Michell(1997))を示す⁽⁵⁾。CFDによる対流熱伝達率計算値とマネキン実験による実験値を比較すると実験値は全体的に低い。実験値の対流熱伝達率は全ケースともに胸が他の部位と比べて高い。速い風速の風が直撃するcase3の手では他のケースと比べてやや高い。しかし、手・胸以外部位では3ケース間または人体部位間で大きな対流熱伝達率の差は見られていない。これは、サーマルマネキンが16部位分割しかないために、例えば後頭部と顔面のように風の当たる側面と当たらない側面で温度差が生じ、平均化されることにあると考えられる。胴体では胸と背中に分解がなされているため、対流熱伝達率に差がみられる。また、CFD解析で人体表面温度が過小評価され、その結果対流熱伝達率が大きく評価される可能性は否定できない。しかし過去に発表された実験値⁽⁵⁾と比較すると大きな差は見られないため、さほど問題はないものと考えられる。

以上のことからパーソナル空調を用いた不均一な空間の快適性評価を行う場合は、マネキン実験による検討では限界があり、CFDを含めたより詳細な人体の解析手段が必要となると考えられる。また、パーソナル空調では人体の部位ごとに対流熱伝達率に差が見られるため、従来型の空調方式のように対流熱伝達率を一定値で与えることは適切でない。

5. まとめ

実験とCFD解析によりパーソナル空調における人体各部位の温冷感特性・熱収支を検討し、以下の知見を得た。1)被験者実験により人体各部位の温冷感特性の検討を行い、今回の検討の範囲では頭に風を当てることが有効である。2)CFD解析により吹出し風向の変化による人体表面温度と対流熱伝達率の影響の検討を行い、同じ人体部位でも風の当たる面と当たらない面では2,3の温度差が見られる。3)サーマルマネキン実験により対流熱伝達率を算出しCFD解析による計算値との比較・検討を行った。4)パーソナル空調による不均一な環境下では、サーマルマネキンの限界から熱収支の詳しい評価は困難であるため、CFD解析等によるより詳細な検討手段が必要とされる。

【謝辞】 研究の遂行にあたり東京大学生産技術研究所の梁禎訓氏に多大なご助言を得た。ここに記して深甚の謝意を表す。本研究の一部は文部科学省の科研費の助成を得ている。

【注】 (1) 女性の結果は全体として男性よりやや低い値を示す

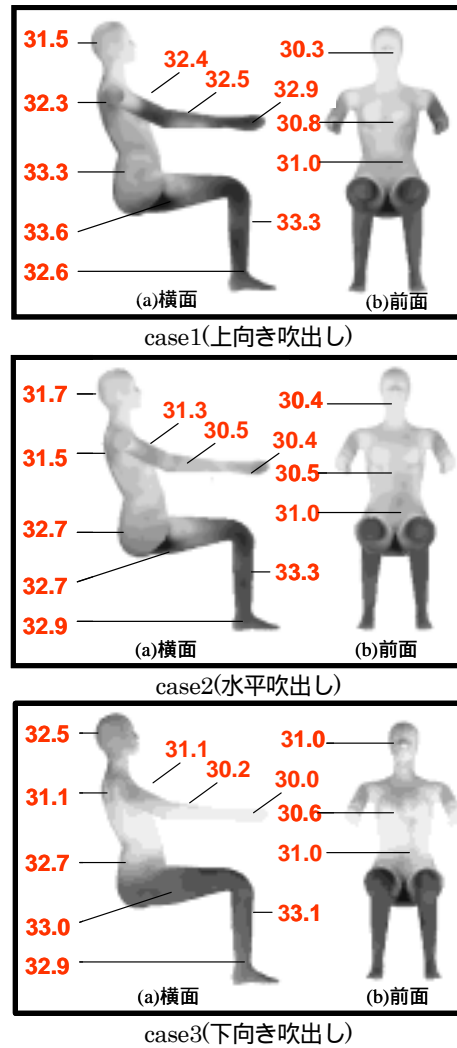


図9 人体皮膚温分布(CFD)

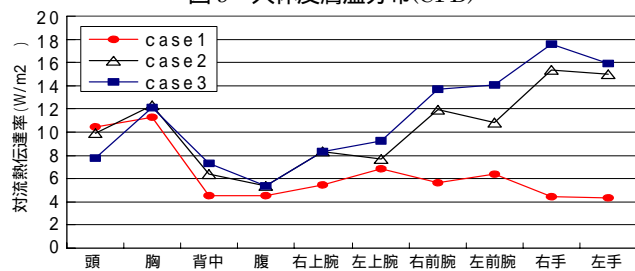


図10 人体部位別対流熱伝達率(CFD)

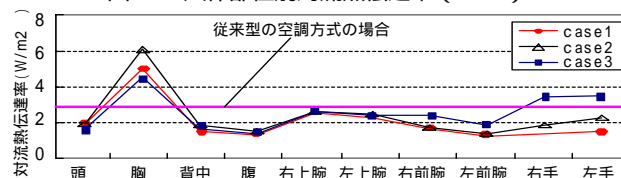


図11 人体部位別対流熱伝達率(マネキン実験値)

が同様の傾向。(2) 下半身は風の影響が少なく各ケースの差があまりないため省略。

【参考文献】 (1) 中山昭雄:温熱生理学,理工学社,1981 (2) 松本ら:人間のアダプティブ性を考慮したパーソナル空調システムの開発(その1),日本建築学会関東支部研究報告集,pp687-690,2003.3 (3) 大森ら:複雑形状に対応する放射伝熱解析法と静穏室内に設置された人体モデルへの適用,空気調和・衛生工学会学術講演会論文集,pp189-191,2001.9 (4) 梁ら:実験及び数値サーマルマネキンを用いた人体の対流熱伝達率の側定,空気調和・衛生工学会学術講演論文集,pp777-780,2001.9 (5)ASHRAE Fundamentals,1997