

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2) パーソナル空調の吹出し風向の違いが人間の生理・心理に及ぼす影響

4.環境工学-17 (環境生理心理)

正会員 ○須藤美音*¹

学生会員 松本さやか*²

〃 村上周三*³

〃 加藤信介*⁴

パーソナル空調 感度分析 数値解析

〃 宋斗三*⁵

1. 研究の概要

前報^(文1)に引き続き、本報では被験者実験及びCFD解析を行い、パーソナル空調の吹出し風向の違いが人体の各部位の温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、人体部位別の温感特性を解明する。これはパーソナル空調により人をより効率的に快適にする制御法開発の一途となる。

2. 被験者実験による人体温熱感度分析

人間の全身温冷感とは人体の各部位における温冷感が影響しており、人体全身が清涼な環境に暴露されていなくとも、人体の特定の部分を清涼に保つ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。パーソナル空調はこのように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。

本実験ではパーソナル空調の吹出し風向を制御し、人体各部位に浴び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の変化との相関を分析を行う。

2.1 実験の概要 (図1、2、表1)

本実験は前報同様、慶應義塾大学の環境実験室にて2002年11月18日~12月14日に行われた。パーソナル空調はジョンソン製のタスクユニットで机上の両端に設置され人体方向に吹出している。アンビエント空調は床3箇所からの吹出し、天井吸込み方式を用いた。アンビエント空調及びパーソナル空調の設定条件を表1に示す。アンビエント空調の風量は吹出し口1個あたり90m³/h、温度は28℃とした。パーソナル空調の吹出し風量は1個あたり26m³/h、温度26℃と固定し、吹出し風向を上向き(case1)、水平方向(case2)、下向き(case3)とした全3ケースに対して検討を行う。主にcase1では顔面、case2では上半身、case3では腕、手に気流が暴露される。またオフィスを想定し、机上にはパソコンを設置することによって熱放射の影響を加えた。

被験者は男性5名、女性5名の計10名、標準的な体格の健康な大学生を対象とし、前報の実験同様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2の実験手順に示すように実験では季節の順化効果をなくすため、被験者を約30分程度パーソナル空調なしの28℃の環境で読書をするリラックス状態にさせ、28℃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分間気流に暴露させた。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)



図1 実験の様子

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	90 m ³ /h(吹出し口1個あたり)		
パーソナル空調	温度	26℃		
	風速	26 m ³ /h(吹出し1個あたり)		
	風向	上向き	水平方向	下向き

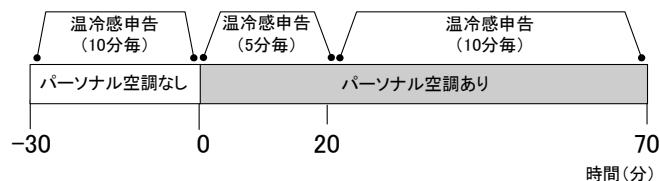


図2 実験手順

に準じて10秒間隔で測定を行った。温冷感の申告はASHRAEの7段階スケールに準じて行った。また、人体各部位の温冷感申告は皮膚温測定点と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3)

図3に男性5名、女性5名の全身の平均温冷感申告結果を示す。被験者数はまだ十分であるとはいえないので、この点は今後の課題とする。男性被験者の場合、case1(上向き)、case2(水平方向)の風を受けた時は約5分、case3(下向き)の風を受けた時は約20分で熱的中立状態となり、実験開始30分後にはcase1、case2ともに温冷感が寒い側になったものの70分経過の時点では各ケースにおける温冷感の差は見られなかった。一方女性の場合、パーソナル空調なしの環境ですでに快適な状態であったため、全身温冷感はいずれも寒い側に申告している。各ケースの全身温冷感の変化率を比較すると、case1、case2はやや急激に変化したが、case3は緩やかに変化した。

以上の結果より、吹出しの風向きが上向き(case1)、水平方向(case2)の場合が全身温冷感の変化が大きいことがわかる。

2) 全身温冷感と人体部位別温冷感の相関分析 (図4)

人体各部位の温冷感が全身温冷感に与える影響について

検討を行う。分析には2つの時系列データの間の相関を求める交差相関分析を用いた。ここでは人体部位別温冷感と全身温冷感の時系列データの階差(時間変化)との間の交差相関分析を行った。

図4に全身温冷感と人体各部位の温冷感、特に上半身部(頭、胸、背、上腕、前腕、手)の相関係数を示す(注1)。case1では男性は頭、上腕、前腕、手に、女性は頭、胸、上腕に高い相関がみられた。case2は主に着衣のある胸部に気流が暴露されることから、全体的に相関は低いが、男性・女性共に胸にやや高い相関がみられている。case3では男性は頭、上腕、手に高い相関がみられるが、女性は全体として低い結果となった。

3) 人体部位別皮膚温及び温冷感の経時変化(図5,6)

図4の相関分析において高い相関がみられた頭、

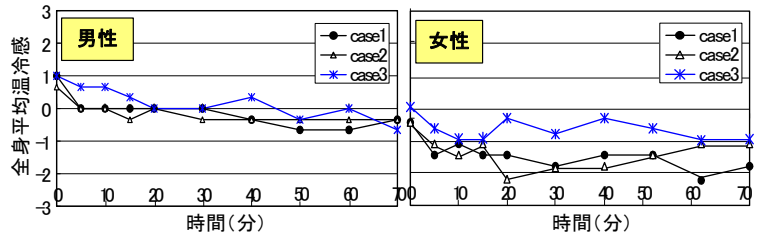


図3 全身平均温冷感

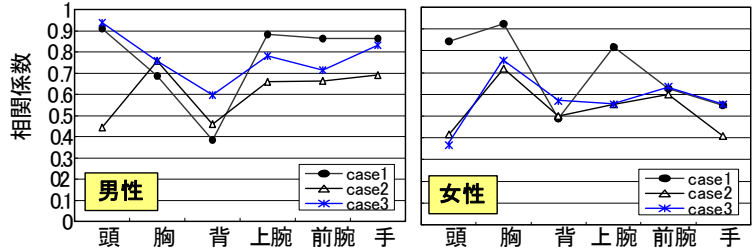


図4 全身平均温冷感と各部位の温冷感の相関関係

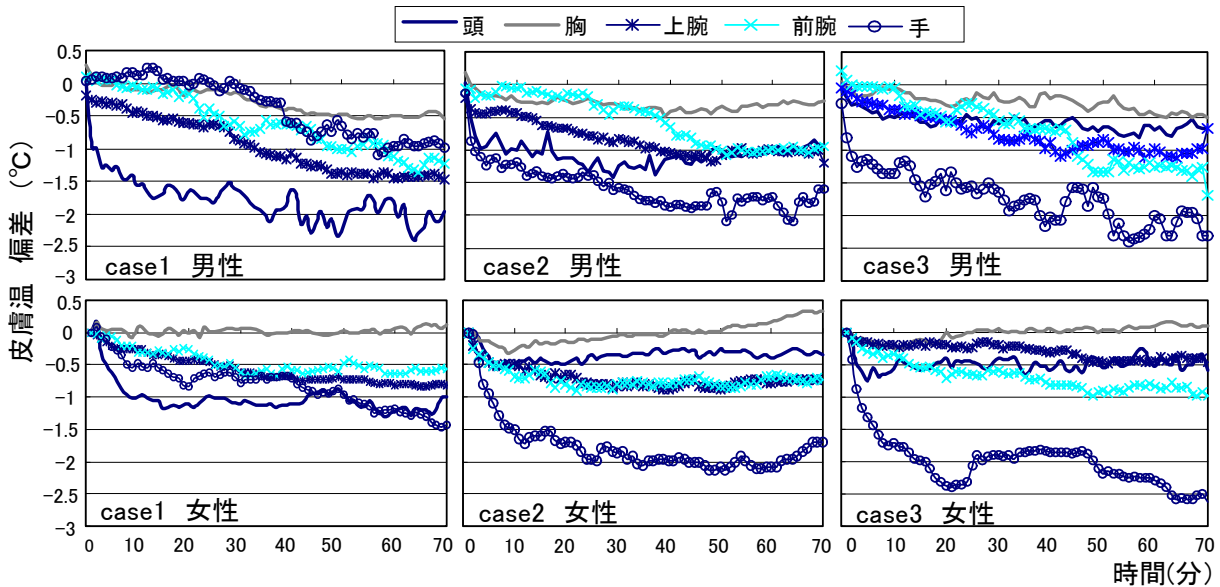


図5 人体部位別皮膚温偏差の経時変化

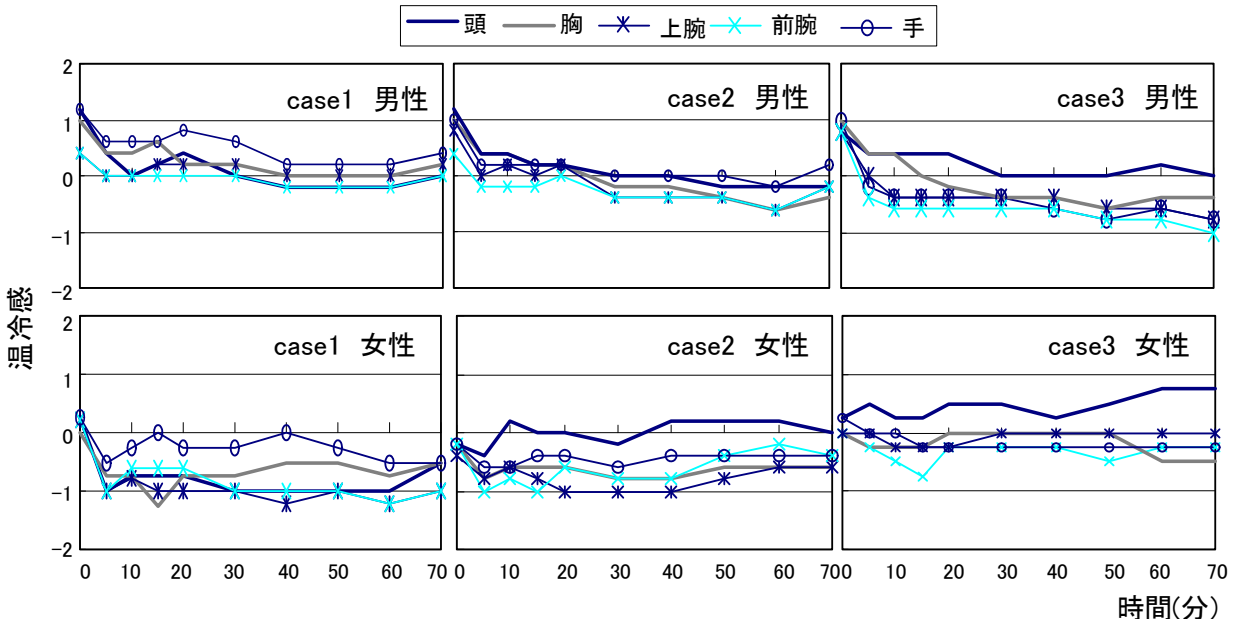


図6 人体部位別温冷感の経時変化

胸、上腕、前腕、手に対する男性5名、女性5名の平均皮膚温と温冷感の経時変化を図5、6に示す。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値に対する偏差で表示している。

case1で風向を上向きにすることにより、男女共に、検討したケースの中で最も急激に変化する。特に頭部の皮膚温の変化が大きく、実験開始10分位まで急激に変化し、その後は緩やかな変化を示す。頭部の温冷感も男女ともに開始5分まで急に変化し、それ以後変化が緩やかになる。男性の場合、部位別温冷感では頭と前腕以外は暖かい側になっているが、全身温冷感(図3参照)を見ると30分過ぎた時点で寒い側になっているのは、頭部と前腕部の温冷感が全身温冷感と相関が高いからであると言える(図4参照)。女性の場合は実験開始から全ての部位に対して温冷感が寒い側となっている。

case2(水平方向)では男女共に胸部は全身温冷感とやや高い相関がみられているが、皮膚温の変化はほとんどない。これは首に気流が暴露されることによって、胸部も涼しいと感じてしまうことが原因であると考えられる。また、手は全身温冷感と高い相関はみられていないが、case2でもっとも皮膚温の変化が大きい。男性は約40分間にわたり皮膚温が変化する。女性は10分程度急に変化し、その後40分頃まで緩やかな変化があった。手や足などの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分程度であった。手は冷えやすい部位ではあるが全身の温冷感にはあまり影響しないものと思われる。

case3(下向き)ではパーソナル空調の風が直接手にあっているため男女共に手の皮膚温が大きく変化をしている。また、手の温冷感はパーソナル空調ONにした後5分ではやや急に変化をしているが、それ以後はほとんど変化がない。男性は手の温冷感の変化と全身の温冷感変化は高い相関がみられているが、女性の相関はあまり高いとはいえない。男性は頭と上腕に高い相関がみられているが、それぞれの温冷感にはパーソナル空調ON後30分間はやや大きく変化してそれ以後は滑らかに変化していた。

3. CFDによる人体周辺温熱環境性状の解析

3.1 解析概要

3.1.1 解析対象モデル(図7、8)

前章の被験者実験と対応したCFD解析を行い、人体周辺の温熱環境性状について検討する。人体形状は実人体形状を再現し、解析空間は実験室と同じ空間が設定され、パーティションで仕切られたデスクが配置し、卓上にはパソコンが置かれている。パーソナル空調ユニットはデスクの両端に人体に向けて(デスクに対し45度の角度)配置されている。天井面には照明と吸込み口が設けられている。床面には3隅のアンビエント空調の吹出口がある(図7)。

3.1.2 解析条件及び解析ケース(表2、3)

アンビエント空調及びパーソナル空調の吹出し口は実現象と合わせるため開口率を考慮する。アンビエント空調の吹出

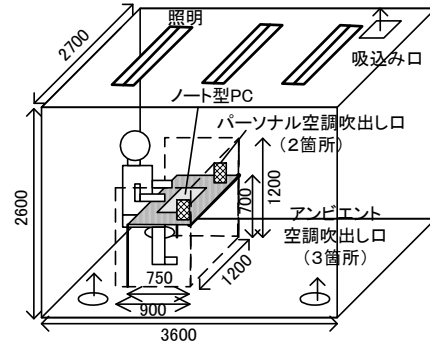


図7 解析対象モデル

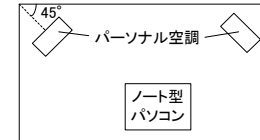


図8 机上モデル

表2 解析ケース

		case1	case2	case3
アンビエント空調	温度	28 °C		
	風速	0.74 m/s (換気回数 約3回)		
パーソナル空調	温度	26 °C		
	風速	2.53 m/s		
	風向	上向き	水平方向	下向き

表3 境界条件

アンビエント空調流入	$U_{in} = 0.74 \text{ m/s}$, $k_{in} = 0.5(U_{in} \times 0.05)^2$, $l_{in} = 0.028 \text{ m}$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} k^{3/2} / l_{in}$, $\theta = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$
パーソナル空調流入	$U_{in} = 2.53 \text{ m/s}$, $k_{in} = 0.5(U_{in} \times 0.05)^2$, $l_{in} = 1.286 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\epsilon_{in} = C_{\mu} k^{3/2} / l_{in}$, $\theta = 26 \text{ }^{\circ}\text{C}$
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°C)、照明: 100W×3個、人体: 1人(35°C)、その他: 断熱対流熱伝達率 α_c は文献値(※2)を用い、人体モデルは $4.0\text{W/m}^2 \cdot \text{k}$ 、それ以外の壁面は $9.0\text{W/m}^2 \cdot \text{k}$ とする
乱流モデル	低 Re 数型 k-ε モデル (Lien-Chen- Leschziner)
差分スキーム	一次風上
メッシュ数	約 200000 メッシュ

し風速は 0.74m/s、温度 28°C一定。パーソナル空調吹出し風速 2.53m/s、温度 26°Cに固定。実験と同様吹出し風向を変化させた3ケースにおける人体周辺温熱環境性状の解析を行う。

CFD解析の境界条件を表3に示す。流れ場の解析は低 Re 数型 k-ε モデルを、k-ε 方程式移流項には1次風上差分を用いる。パソコンは測定値の34°Cを与えた。天井の照明はそれぞれ100Wの熱量を与えた。人体モデルは皮膚温度35°C一定。本解析では人体を裸体モデルとしたが、今後の解析では着衣を考慮したモデルで解析を行い、皮膚温分布を詳細に検討する予定である。その他の壁面、家具(デスク、パーティション、パーソナル空調等)は断熱。今回の解析では対流計算のみを行ったが、人体以外の固体面の対流熱伝達率に一

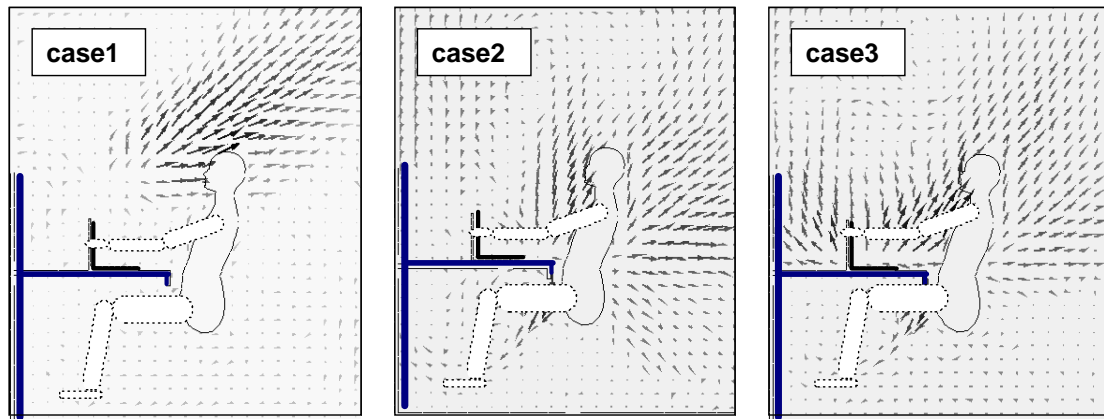


図9 タスク域の気流分布（人体中心部の鉛直分布）

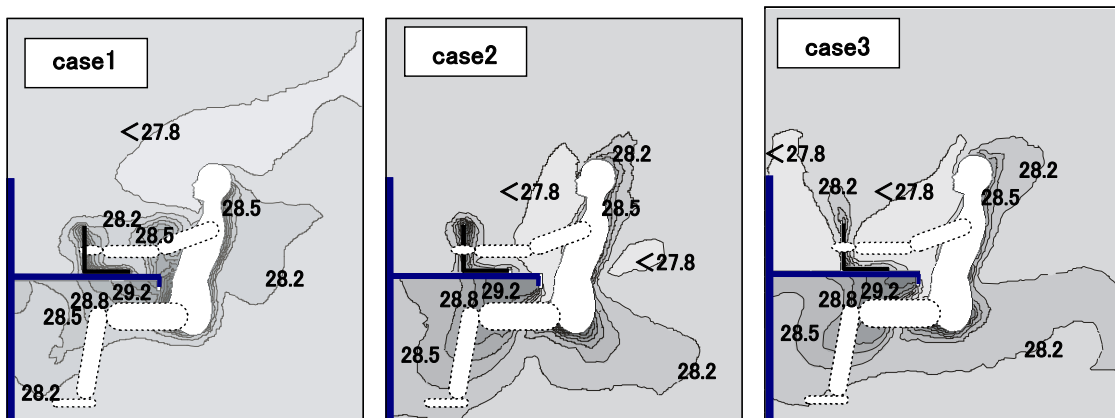


図10 タスク域の温度分布（人体中心部の鉛直分布）

一般的な総合熱伝達率(約 $9.0\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{k}$)を与えることによって、簡易的に放射の影響を考慮した。

3.2 計算結果と考察(図9,10)

図9にタスク域の気流分布、図10に温度分布を示す。case1(上向き)では人体で顔面のみ強い風速となり $0.35\sim 0.6\text{m/s}$ の風速となっている。頭部に当たった風が胸部に沿って下降し、胸部には約 $0.15\sim 0.3\text{m/s}$ の弱い風速の分布となる。吹出し空気(26°C)が直接当たって、顔面周辺は低い温度(約 27.5°C)分布となる。胸部はパソコンからの熱放射の影響により約 $28.5\sim 30^\circ\text{C}$ と高い温度分布を示す。机下は余り風の影響が少なく、人体からの熱が溜まり、大腿部とデスクの間に高い温度分布となっている。

case2(水平)では、吹出し空気が胸に沿って上昇し、人体周辺の風速は約 $0.2\sim 0.5\text{m/s}$ となっている。パソコンからの熱の影響も少なくなり人体前面部は約 27.5°C 程度となり、case1と比べて清涼な環境であるといえる。

case3(下向き)の場合、吹出し空気は机面に沿って流れ、手、前腕、胸などに当たっている。また、吹出し空気はパソコンに直撃しており、パソコンの周辺の温度は低い分布となる。吹出し空気の影響とパソコンからの熱も除去され人体の顔面・胸部には低い温度分布が生じる。CFD解析結果と被験者実験結果を照らして見ると、効率的に人体を冷やすためには、吹出し風を拡散せずに人体まで到達させる上向き(case2)又は水平向き(Case2)にするのが有利である結果となった。また、前報で問題となった人体の前面と背面の

温度差についても確認でき再大で約 2.5°C 程度もあった。

4. まとめ

- 1) 吹出し風向が上向き、水平方向のとき全身温冷感が大きく低下した。
- 2) 頭が直接気流に暴露されると皮膚温・温冷感は大きく変化し、それに伴い全身温冷感も変化している。
- 3) 手の皮膚温はパーソナル空調の気流に暴露されることによって大きく変化をするが温冷感は大きな変化はなく、全身温冷感の変化にも影響度は低い。
- 4) 効率的に人体を冷やすためには、吹出し風を拡散せずに人体まで到達させる上向き又は水平向きにするのが有利である

[謝辞] 研究の遂行にあたり日建設計の伊香賀俊治氏及び近本智行氏、東京ガスの大森敏明氏から多大なご助言を頂き、ここに謝意を表します。また実験装置作成にあたり高砂熱学工業の清水保夫氏、三河直人氏及び川本英治氏にご協力頂き、心より感謝致しております。

[注] (1) 下半身の場合は風の影響があまり少なく、風向きに関わらず全身温冷感との相関が高いため、分析にははらず。

[参考文献]

- (1) 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)、(2) 田中俊六ら:最新建築環境工学、井上書院

*1 慶應義塾大学大学院 *2 慶應義塾大学システムデザイン工学科4年 *3 慶應義塾大学システムデザイン工学科教授、工博 *4 東京大学生産技術研究所教授、工博 *5 東京大学生産技術研究所助手、工博