

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 4)
パーソナル空調による人体部位別温冷感特性の検討

正会員 須藤美音*1 同 村上周三*3
 同 加藤信介*4 同 宋 斗三*5
 同 大森敏明*6 同 松本さやか*2

パーソナル空調 被験者実験 生理心理 感度分析 数値解析

1. 研究の概要 前報(その3)^(文1)に引き続き、本報では被験者実験及び人体周辺気流の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各部位及び全身の生理・心理に及ぼす熱的影響を検討し、局所的温冷感特性と全身温冷感の関係を検討する。これはパーソナル空調により人体を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 人間の全身温冷感には人体各部位の温冷感が影響しており、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。被験者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との相関を分析する。

2.1 実験の概要(図1,2,表1) 実験は、前報(その3)と同じ実験室にて行う。パーソナル空調の吹出し風速は2.53m/s、温度26に固定し、吹出し風向(図1)を上向き吹出し(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(表1)。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2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)^(文2)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3) 図3に全身温冷感の男性5名の平均を示す^(註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4) 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4に全身温冷感と人体部位温冷感の相関係数を示す^(註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で胸部、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5) 図5の上段

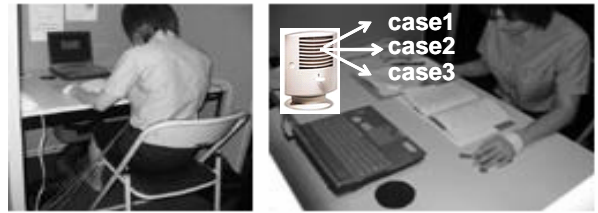


図1 実験の様子

表1 アンビエント空調・パーソナル空調の設定条件

アンビエント空調	温度	case1	case2	case3
	風速	28		
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

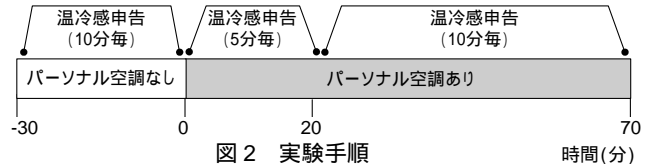


図2 実験手順

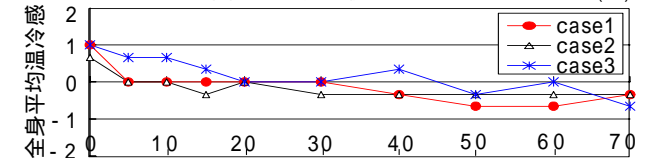


図3 全身温冷感経時変化(男性)

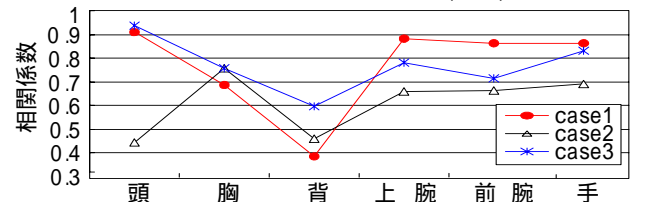


図4 全身温冷感と人体各部位の温冷感の相関関係(男性)

に相関分析(図4)で高い相関がみられた人体部位における男性被験者5名の平均皮膚温、下段に同じく5名の平均部位温冷感の経時変化を示す^(註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、特に頭部の皮膚温の変化が大きく、10分位まで急激に変化し、その後は緩やかな変化を示す。頭部の温冷感も実験開始後5分まで急に変化し、それ以後勾配が緩やかになる。case2では全身温冷感とやや相関のあった胸部では、実験開始後、温冷感は大変大きく変化をするが、皮膚温の変化はほとんどない。これは首に気流が曝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、case2、case3では実験開始後、手の皮膚温は最も大きな変化を示した。人体末梢部は周辺の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ないことがわかる。以上の結果より、頭部の温冷感は全身温冷感と高い相関がみられることから、頭部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

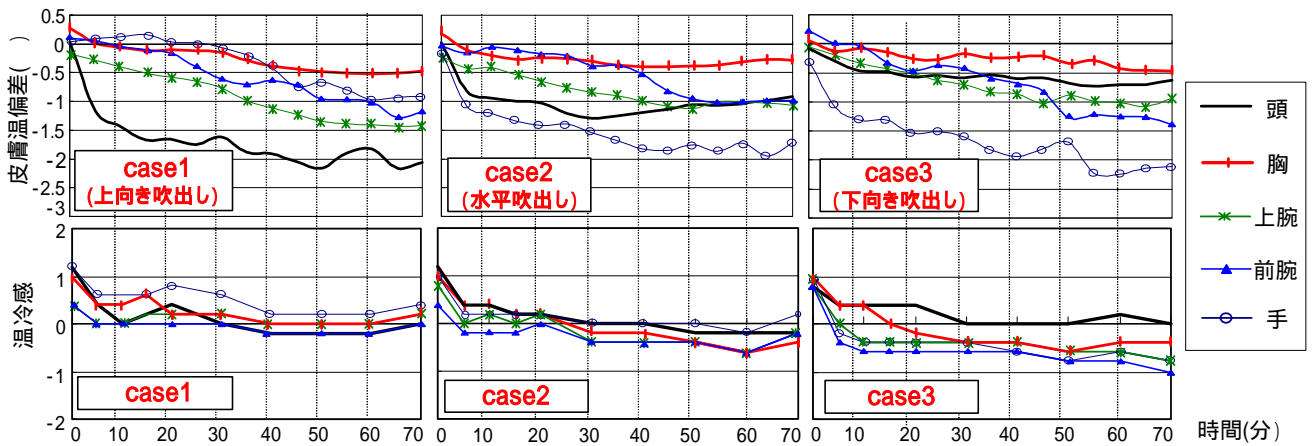


図5 人体部位皮膚温偏差と部位温冷感経時変化

下げることができると考えられる。しかし、前報(その3)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が生じる可能性も高い。

3. CFDによる人体周辺温熱環境性状の解析

3.1 解析概要 前章の被験者実験と対応した人体周辺のCFD解析を行い、人体周辺の温熱環境性状を検討する。解析空間は実験室と同じ空間で、実人体形状を再現する。放射・対流連成解析を行い、流れ場解析は低Re数型k-εモデルに基づく。CFD解析の詳細は(文3、注3)参照。計算領域内の熱負荷は人体、パソコン、照明とする(注3)。人体モデルの表面熱流束と皮膚温はすべての部位一様に快適方程式の関係を与える(注4)。人体モデルの着衣は、前章の男性被験者の着衣と同等の熱抵抗値を快適方程式の分母に加えて簡易的に扱う。

3.2 計算結果と考察 (図6,7,8) 図6に被験者実験で冷却効果が高い結果となったcase1(上向き吹出し)における人体周辺風速分布を示す。2.53m/sのパーソナル空調吹出し風速は頭部付近では約0.77m/s、胸部では約0.48m/s程度まで減衰している。また、風が直撃しない人体背部や机下では風速は約0.13m/sと静穏な環境である。図7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と低温である。風速が低い人体背部では約28.4、机下では28~29.5とやや高温となる。人体皮膚温分布を図8に示す。ただし、着衣を身に着けている部位(図9-(a)人体破線部)は着衣表面温度となる。パーソナル空調気流が到達する顔面が最も低温となっている。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気流が直接当たらないことから高温となっている。机下は空気の流通が悪く熱が溜まることが原因で、特に大腿部の皮膚温が高い。なお、今回の解析は人体側に快適方程式で表される簡易的な発熱モデルを与えている。被験者実験結果との対応も含め、パーソナル空調による風が人体に与える影響を検討するためには、人体の熱収支の詳細な検討が重要であり、今後精密な人体モデルを組み込み、さらに詳細に検討を行う必要がある。

4. 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を検討し、以下の知見を得た。1) 吹出し風向が上向き吹出し、水平吹出しのとき全身温冷感は大きく下がり、快適の方向へ向かう。2) 頭が直接気流に曝露されるとその皮膚温・温冷感は大きく変化し、全身温冷感も変化する。3) 手の皮膚温はパーソナル

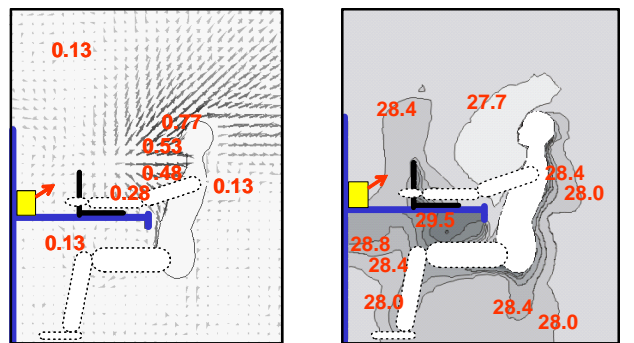


図6 人体辺風速分布(case1) 図7 人体周辺温度分布(case1)

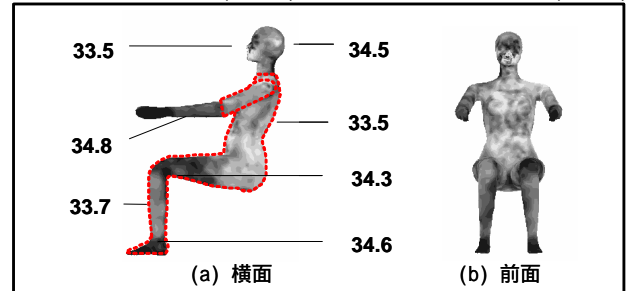


図8 人体皮膚温分布

空調の気流に曝露されることによって大きく変化するが温冷感への影響は小さく、全身温冷感へ影響度も低い。4) 頭部に空調気流が到達する場合、CFD解析も対応して頭部の皮膚温が最も低温になった。頭部以外の高い皮膚温は今回の検討の範囲内では全身温冷感にそれほど大きな影響を与えていない。

【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から多大なご助言を得た。また実験装置作成にあたり高砂熱学工業の清水保夫氏及び三河直人氏、川本英治氏にご協力頂いた。ここに記して深甚の謝意を表する。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が同様の傾向。(2) 下半身は風の影響が少ないため省略。(3) 境界条件 アンビエント空調吹出し: $k_n = 0.69 \times 10^{-3} [m^2/s^2]$, $n = 5.28 \times 10^{-3} [m^2/s^2]$ パーソナル空調吹出し: $k_n = 8.00 \times 10^{-3} [m^2/s^2]$, $n = 0.50 [m^2/s^2]$ 流出: フリースリップ パソコン表面温度: 34 (測定値) 照明: 100W (3個) 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): 断熱。(4) 人体モデル表面の熱流束を $q [W/m^2]$ 、皮膚温を $t_s [^\circ C]$ とした時、次式を仮定。 $q = (36.4 - t_s) / 0.054$ **【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3), 日本建築学会学術講演梗概集, 2003.9 (2) 中山昭雄: 温熱生理学, 理工学社, 1981 (3) 須藤ら: 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2), 日本建築学会関東支部公研究報告集, pp579-583, 2003.3 (4) 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公研究報告集, pp687-690, 2003.3 (5) 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

*1 慶應義塾大学大学院 大学院生
 *2 慶應義塾大学 大学生
 *3 慶應義塾大学 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
 *6 東京ガス 工博

Graduate School, Keio University
 Keio University
 Prof., Keio University, Dr. Eng
 Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
 Research Associate, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
 Tokyo Gas, Dr. Eng