

パーソナル空調における人体生理反応と温冷感に及ぼす影響

The Effects of Physiological Response of Human Body and Thermal Sensation by using the Personal Air-conditioning System

立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科

Ritsumeikan University, Department of Architecture and Urban Design

李 明香

Myonghyang LEE

キーワード：パーソナル空調 (Personal Air-conditioning System), 生理反応 (Physiological Response), 温冷感 (Thermal Sensation), 被験者 (Test Subject), 人体熱モデル (Mathematical Human Model)

1. はじめに

オフィスの空調は、省エネルギー性と快適性、生産性の向上が求められている。省エネルギーの取り組みの一つとして空調設定温度の緩和があるが、オフィスでは内勤者と外勤者、男性と女性など、代謝量や着衣量の異なる執務者が混在しているため、全員の快適性を保つことは従来の室内全体を対象とした天井カセット式の拡散型空調では困難であると考えられる。そこで、これまでに省エネルギー性と快適性の両立のために、個人の好みに応じて2種類の気流（指向性気流と拡散性気流）を切替えることができるパーソナル吹出口を有した空調システムを提案している^{文1)}。本システムの概念図を図1に示す。これまでに、パーソナル空調室におけるCFD解析や被験者実験により居住域の環境解析、温冷感評価、省エネルギー解析を行うことでシステムの導入効果を確認している^{文2)～文4)}。

一方で、本システムの気流切替型のパーソナル空調システムは、吹出し気流の不均一性と非定常性を有していることから、従来の1質点系であり定常時を想定した快適指標であるSET*やPMVによる評価は難しい。また、局所冷却部位や気流温度の違いについては、実験室実験で詳細に検討する必要がある。そこで、指向性気流の吹出口を作成した実験室において被験者実験を行うことにより、温冷感、快適感、発汗感についてアンケートを行い、局所気流の有無や人体への吹出し部位、気流温度の影響について検討した。また、部位および人体部位ごとの局所気流の影響、時間経過に伴う気流変化の影響を考慮できる人体熱モデルを採用して人体生理量を解析した。アンケートによる心理量と人体熱モデルによる生理量を比較することで快適閾値の有効性について検討し、本システムの気流切替のタイミングの推奨時間、局所冷却する部位、指向性気流による局所冷却の影響などについて報告する。

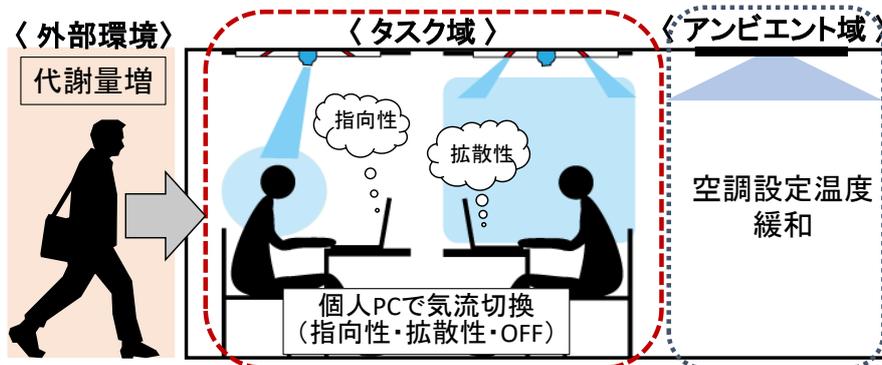


図1 パーソナル空調システムの概念図

(1) パーソナル空調システムの概要

図 1.3 に、システムの概念図を示す。本システムは、個人の快適性に対応できるように 1 人 1 台の吹出口を有し、拡散性と指向性の 2 種類の気流を個人の PC により切替えることができる。外出先からの帰社時に代謝量が高くなった執務者をターゲットとして、夏期の空調設定温度を緩和する狙いがある。図 2 に、実際に開発したパーソナル吹出口を示す。人体に直接気流が届く“指向性吹出口”と、直接的な気流はなく人体周りに気流が拡散する“拡散性吹出口”の二つの吹出口が一つの吹出パネルに集約されている。指向性吹出口はパンカールーバを採用することで吹出方向を調節し、拡散性吹出口はドラフト感を抑えるため天井面に対して 45° の角度で送出する。これらの吹出し気流を個人で切替えてもらうことで、アンビエント空間の空調設定温度を下げることなく、執務者全員の快適性向上を図るシステムである。

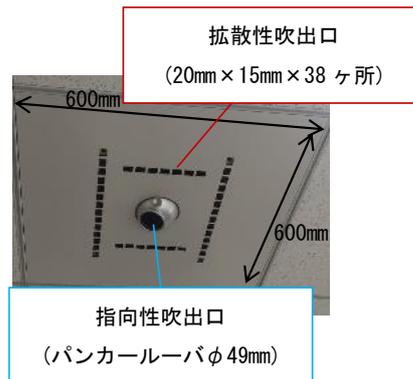


図 2 パーソナル吹出口

2. 被験者実験の概要

図 3 に、立命館大学びわこくさつキャンパス内にある恒温恒湿実験室の平面図および測定点を示す。幅 2,060mm (X)，奥行 2,080mm (Y)，天井高 2,700mm (Z) の空間が 2 室隣接している。各室に天井吹出口 1 台と床吹出口 2 台が設置されており、天井吹出口と床吹出口の吹出風量割合を調節することが可能である。1 室を執務室とし、もう 1 室を外部空間として使用した。また、2 室の移動経路も外部空間として、通路を気泡緩衝材で覆い、電気カーペットを発熱体とすることで外部空間を再現した。アメニティメータと熱電対を用いて、室内温湿度、上下温度分布、壁面温度、吸出・吸込・排気口温度の 19 点×2 室を測定した。また、人体熱モデルにより実験時の皮膚温度の精度を確認するために、被験者の皮膚表面温度を熱電対で測定した。測定点は胸・上腕・太腿とし、Burton の 3 点式を用いて平均皮膚温度を算出した。

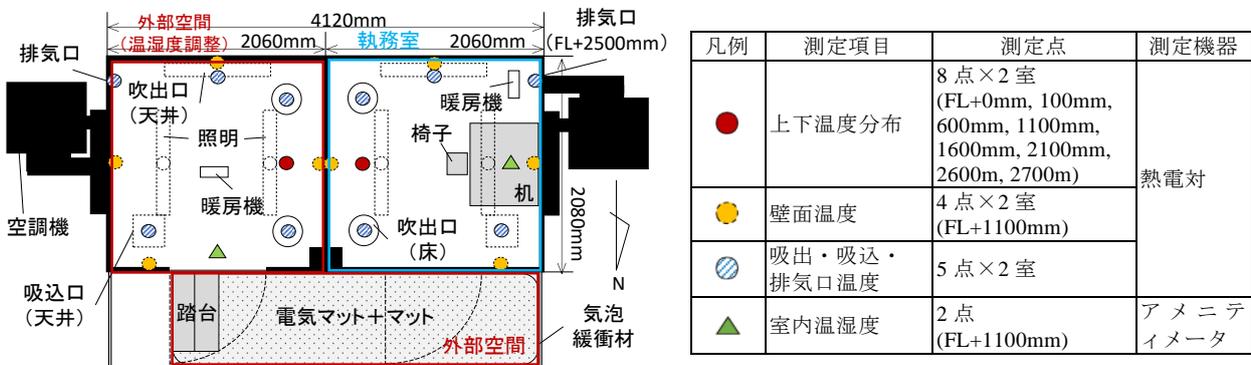


図 3 恒温恒湿実験室の平面図および測定点

被験者は健康な成人男子学生1名とし、前日の睡眠時間を十分に確保させ、飲酒を禁止とした。実験は、2015年12月21日～12月22日の計2日間に実施した。実験手順を図4に示す。まず、被験者を夏期の環境に順応させるため、冬期の着衣のまま室内温度28℃の執務室で安静にさせた(60分)。次に、執務室にて夏期における外出先からの帰社時を想定した着衣への着替えと熱電対の装着をし、待機させた(20分)。その後、外部空間において踏台昇降(10分)をさせ、再び執務室に入室しケースごとに気流感を変化させた(30分)。その際、表1に示す項目の温冷感アンケートを、入室10分間は毎分行い、入室10分から実験終了までは5分ごとに行った。アンケートの申告は、毎分の詳細な申告を得るため、7段階評価をさらに5分割し、前時点の申告を見ながら回答させた(図5)。実験ケースは表2に示す通りで、気流を被験者に当てず、拡散空調を行うCase Aに加え、局所気流を首および腕に当てるCase BとCase C、さらに首に当てる気流温度を変化させたCase Dの計4ケースとした。実験室での局所気流は、床吹出口にフレキシブルダクトを取り付けて、気流が被験者に当たるように三脚で固定することで再現した(図6)。被験者の着衣量はノーネクタイ・ノージャケットのクールビズを想定し0.7cloとした。

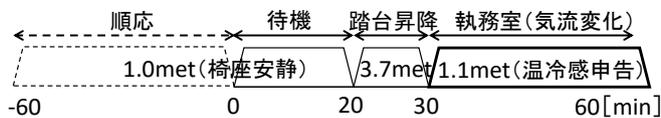


図4 実験手順

表1 アンケート項目

温冷感／快適感／気流感／発汗／発汗している部位／自由記述

表2 実験ケース

Case	気流性状	執務室温度 [°C]	吹出温度 [°C]	風速 [m/s]	気流を当てる部位
A	拡散性	28.0	22.0	-	-
B	指向性			1.0	首
C				0.4	左腕
D			24.0	1.0	首

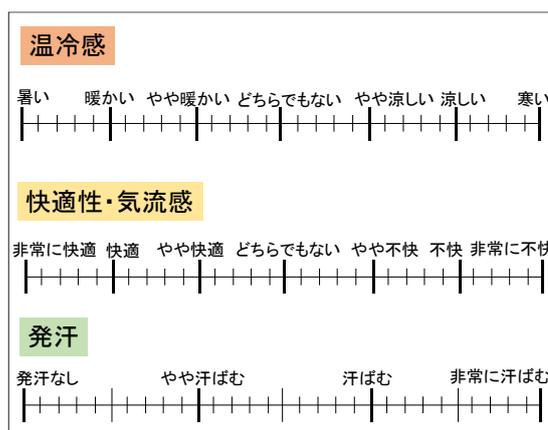


図5 アンケート分割



図6 局所気流装置

3. 人体熱モデルによる実験時の人体の再現

3.1 人体熱モデルの概要

解析には田辺ら^{文5)}による人体熱モデル COM を用いた。COM は、詳細な四肢血流モデルを含む、人体熱数値計算モデルである(図7, 図8)。人体を Core 層と Skin 層からなる 17 の Segment に分類することで、59 点の血流や皮膚の温度分布を精度良く予測できる。人体部位別に温熱環境要素(空気温度, 放射温度, 相対湿度, 風速, 着衣量, 代謝量)を境界条件として入力することで、皮膚温度や産熱量, 放熱量, ぬれ率などの生理量を予測する。COM には人体部位分割の 1 つに首が含まれており, 不均一かつ非正常状態の解析が可能であるため, 被験者実験を再現できる。また, 人体各部位の対流熱伝達率は, 中風速域における人体の部位ごとの対流熱伝達率の計算式^{文6)}を用いて実験の風速値から算出した。

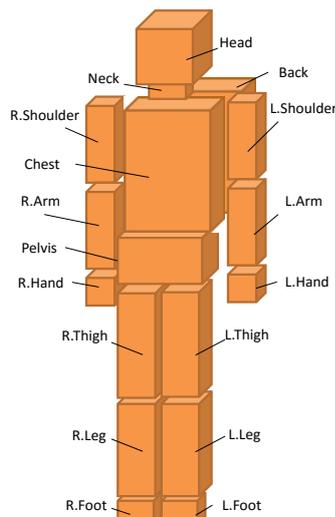


図7 COMの概要

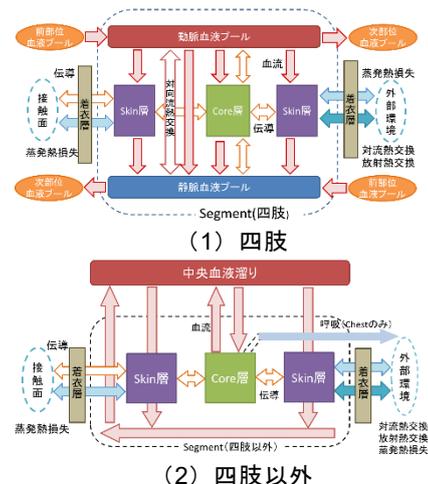


図8 血流による熱交換

3.2 人体熱解析の境界条件

表3に人体熱モデルの境界条件を示す。計算の入力条件には実験時に測定したデータを使用した。以下に、境界条件の決定方法を述べる。

実験では人体の17部位ごとの計測は行っていないため、上下温度分布の測定結果からケースごとに人体を3分割し、温度条件を入力した。ケースごとの部位の分割は、Case Aは頭・首, 上半身(9部位), 下半身(6部位)とし、頭はアメニティメータのデータ, 上半身はFL+600mmと1,100mmの上下温度分布の平均値, 下半身はFL+100mmと600mmの上下温度分布の平均値を用いた。Case B・Case Dは頭, 首, その他(15部位), Case Cは頭・首, 左腕, その他(14部位)とし、頭はアメニティメータのデータ, その他の部位はFL+100mm, 600mm, 1,100mmの計測データの平均値とした。指向性気流は床吹出口からダクトで繋げて人体局所に吹出しているため、予備実験により実験室の床吹出口と各部位の温度差を事前に測定した。この温度差を利用して被験者実験時の床吹出温度を補正して人体の局所部位に当たる気流温度とした。相対湿度は、実験時に設置したアメニティメータの相対湿度データを用いた。今回の解析では、測定点が1点であったため、全体で統一した相対湿度を与えている。また、局所気流の部位については、アメニティメータの結果から各部位の相対湿度を算出して入力した。風速は、局所気流部位においては実験時に測定した1点の計測値(Case B・Case D: 1.0m/s, Case C: 0.4m/s)を入力している。その他の部位においては、人体熱モデルの風速の最小値の0.1m/sとした。着衣量は、被験者実験時に想定したクールビズ(ノーネクタイ・ノージャケット)の着衣量を、部位別与えた。部位ごとの着衣量は上半身と下半身の平均値の合計が0.7cloになるように設定した。実験手順の、待機・踏台昇降・執務室における代謝量を待機は1.0met, 踏み台昇降は3.7met^{注1)}, 執務室は1.1metとして与えた。

表 3 人体熱モデルの境界条件

Case	部位分割	相対湿度[%]	順応 (60分, 1.0met)		待機 (20分, 1.0met)		踏台昇降 (10分, 3.7met)		執務室 (30分, 1.1met)	
			温度 [°C]	風速 [m/s]	温度 [°C]	風速 [m/s]	温度 [°C]	風速 [m/s]	温度 [°C]	風速 [m/s]
A	頭, 首	46.0	28.0	0.1	28.0	0.1	31.6	0.1	27.8	0.1
	上半身				28.9				28.7	
	下半身				28.2				27.9	
B	頭	43.3	28.0	0.1	27.9	0.1	31.8	0.1	29.6	0.1
	首				27.9				24.1	
	その他				28.7				25.9	
C	頭, 首	43.3	28.0	0.1	28.3	0.1	31.3	0.1	28.4	0.1
	左腕				28.5				25.4	
	その他				28.5				25.8	
D	頭	45.8	28.0	0.1	28.0	0.1	31.2	0.1	28.3	0.1
	首				28.0				26.4	
	その他				28.2				26.4	

4. 皮膚温度の比較による計算精度の検証

図 9 に、Case A~Case D の平均皮膚温度の測定値と計算値を示す。待機時の温度に差があるが、これは人体熱モデルの特性値であり、被験者と代謝量が異なるためである。待機時の皮膚温度は、解析時と同様に被験者もほぼ一定となっており、十分な安静状態を得られている。また、踏台昇降時には測定値の皮膚温度が低下している。これは、踏台昇降運動によって人体周りに風速が生じたことが原因と考えられる。踏台昇降後の執務室の推移は、測定値はいずれのケースも執務室入室直後には温度低下が始まらず、踏台昇降により上昇した代謝量が低下するまでに概ね 3 分の遅れが見られた。これは、人体熱モデルによる解析では、ステップごとに代謝量を設定できるが、実際の被験者は踏台昇降時の代謝量の増加が涼しい執務室に入ったとしても即時に低下しないことを意味する。そこで、測定値の温度低下が始まる 3 分後を 0 分と仮定し、以後 10 分間の平均皮膚温度の低下傾向を解析値の 0~10 分の低下傾向と比較した (図 10)。Case A, Case B, Case D の傾向はほとんど一致している。一方、Case C は計算値より測定値の方が低下している。これは腕に気流を当てるために実験時に腕を机に固定させたため、机からの伝熱の影響が考えられる。

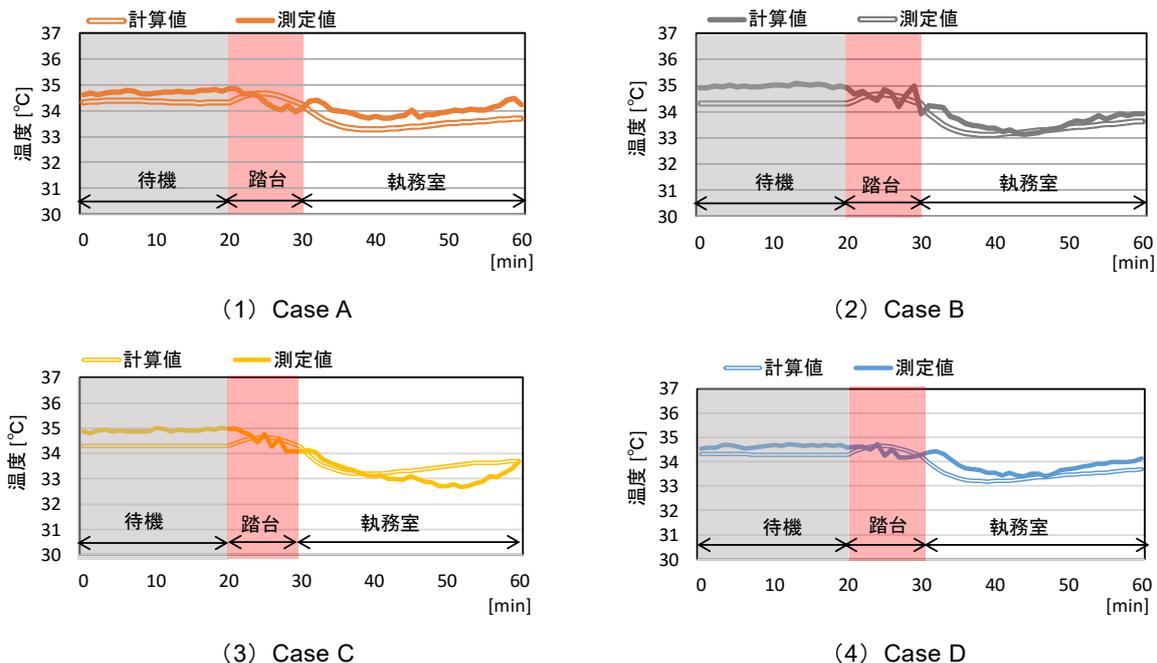


図 9 実験と解析の平均皮膚温度

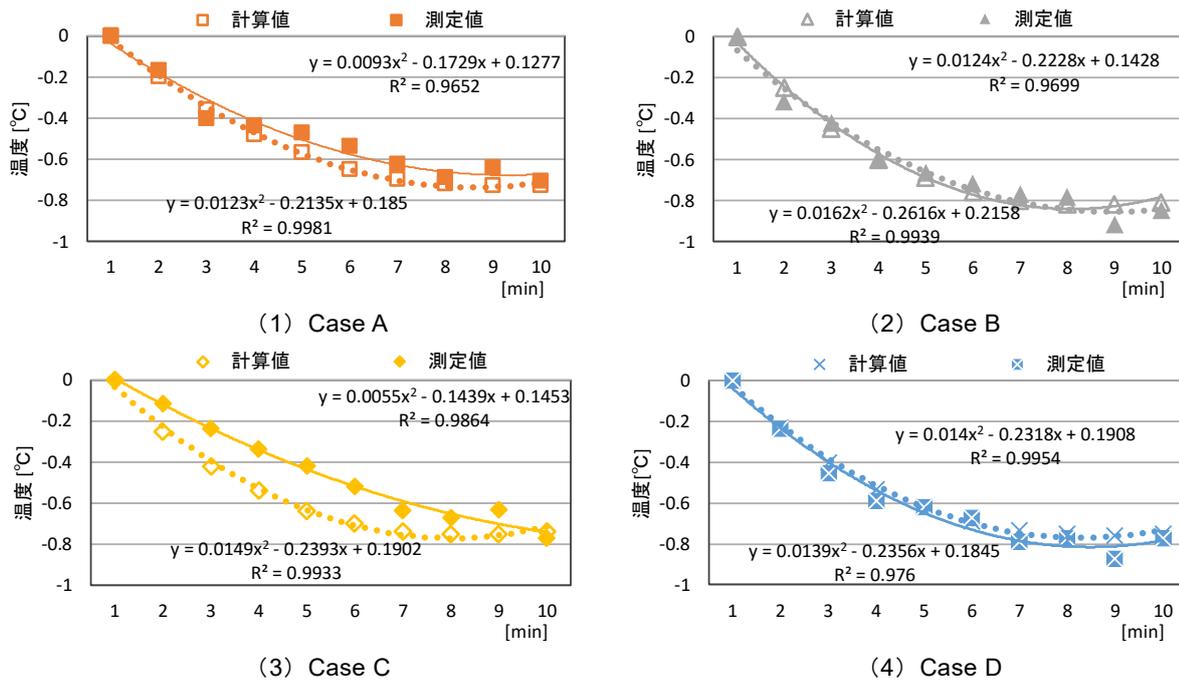
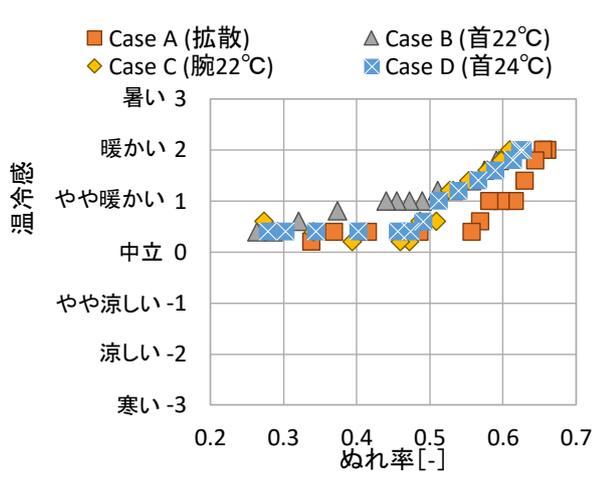


図 10 平均皮膚温度の低下傾向

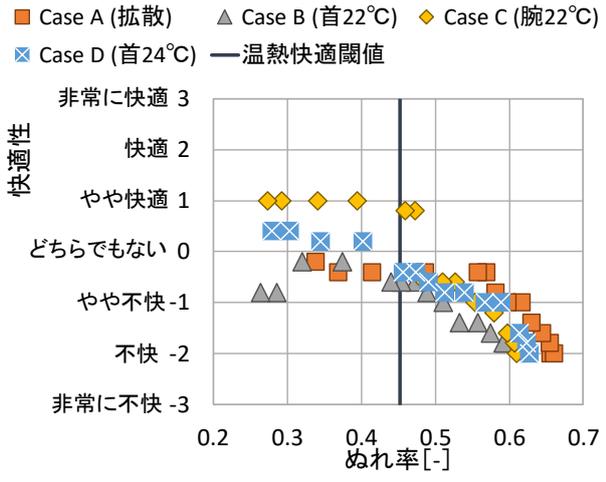
5. 被験者実験および人体熱モデルを用いた快適性評価

図 11 に、執務室入室 30 分間の被験者の申告（温冷感・快適感・気流感）と解析によるぬれ率との関係を示す。表 4 に、ぬれ率を用いた温熱的快適閾値の推定式^{注2), 文7)}で算出した値を示す。気流感と快適感にはぬれ率の温熱的快適閾値を示している。温冷感は、いずれのケースでもぬれ率の低下と共に涼しい側に推移している。快適感、ぬれ率が温熱的快適閾値よりも小さくなるとケースごとに差が見られ、Case A, Case C, Case D は快適側に推移しており、Case B は気流感の影響により不快側に推移している。気流による快適感については、Case B, Case D は低下し続け、Case C は、ぬれ率が低下しても快適であった。ここで、温熱的快適閾値を指標とするために、アンケートの快適感と発汗の関係を図 12 に示す。Case B を除いて、発汗なしと申告した後は快適性が向上しており、快適感、ぬれ率の申告に発汗の関係があると判断した。そこで、被験者が発汗なしと申告した時のぬれ率を解析値から抽出したところ（表 4）、Case B 以外はぬれ率の範囲の中に温熱的快適感閾値を含んでいる。このことから、推定式により求めた閾値の有効性があると判断し、閾値到達後に気流を切り換えることが望ましいと考えた。Case B については、ぬれ率の低下は他のケースと同様の傾向であるが、実験時の環境温度が高く、被験者の衣服に付着した汗が蒸発されにくい条件であったため発汗なしの申告が遅れたと考えられる。また、使用した人体熱モデルは、着衣の蓄湿の影響は考慮されていないため、実験時の発汗なしの申告と解析のぬれ率に差異が生じたことが温熱的快適感閾値に含まれなかった要因である。

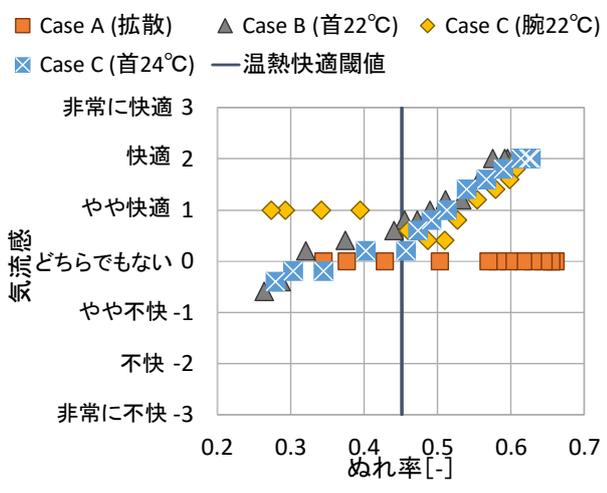
図 13 に、熱収支とぬれ率の関係を示す。Case B が入室 10 分で温熱的快適閾値に到達している。また、図 11 のぬれ率と気流感の関係から、首に気流を当てるケースでは温熱的快適感閾値に到達した後の気流感は不快になる一方である。以上から、温熱的快適感閾値に到達する 10 分までは首を冷却し、その後は気流が必要な場合には腕に気流を切り換え、気流が不要であれば拡散性に切り換えることが望ましいと考える。



(1) 温冷感



(2) 快適感



(3) 気流感

表 4 温熱快適閾値および発汗申告で発汗なしと申告した時のぬれ率

Case	発汗なし申告時の 人体熱モデルのぬれ率	温熱快適閾値
A	0.43~0.49	0.45
B	0.32~0.37	
C	0.40~0.46	
D	0.41~0.46	

図 11 被験者の申告と解析によるぬれ率の関係

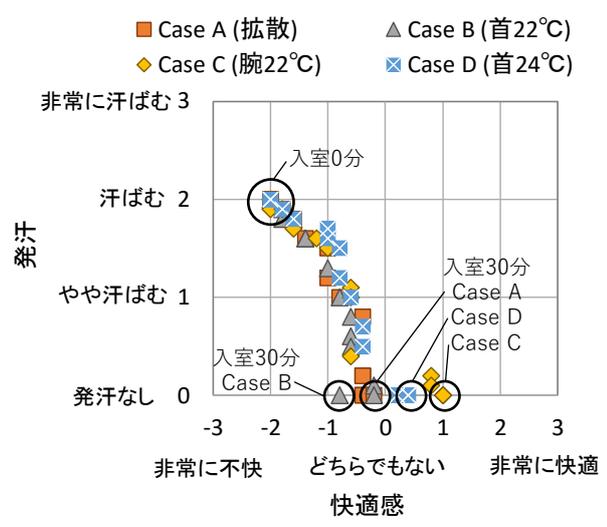


図 12 被験者申告の発汗と快適感との関係

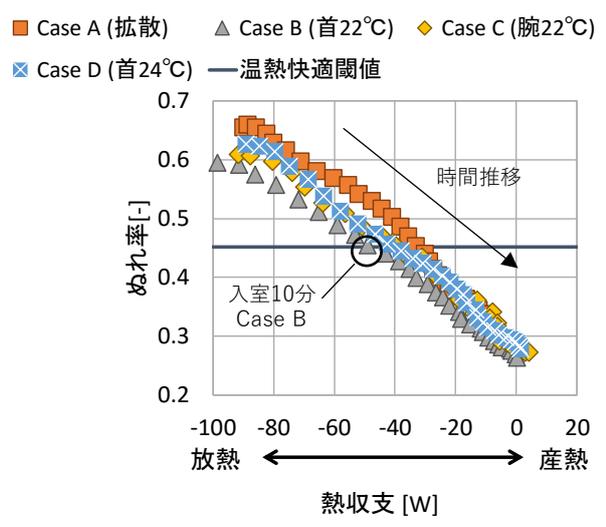


図 13 解析によるぬれ率と熱収支の関係

6. まとめ

個人の好みに応じて気流を切替えることができるパーソナル空調システムの温熱環境と切替タイミングについて、被験者実験の心理量と人体熱解析による生理量の結果より検証した。得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 人体熱モデルの計算精度は、被験者実験の皮膚温度と計算結果の低下傾向が一致したことにより確認した。
- 2) 発汗なしと申告した時点のぬれ率を人体熱モデルで算出することで、定義した温熱的快適閾値の有用性を確認した。
- 3) 首の冷却は他のケースより早く温熱的快適閾値に達するが、それ以降は気流感の影響により不快に感じる場合がある。
- 4) 温熱的快適閾値に達した後は、気流部位を腕に変更するか拡散性気流に切替えることが適していると考えられる。

注釈

注1) 被験者実験の踏台昇降の代謝量は以下の式によって得た。エネルギー代謝量 (kcal/分) = $0.0163 \times \text{体重 (kg)} \times \text{台高 (m)} \times \text{昇降回数 (回/分)} + \text{安静時エネルギー代謝量 (kcal/分)}$ ^{文8)}, 基礎代謝量 (kcal/日) = 基礎代謝基準値 (kcal/kg 体重/日) \times 基準体重 (kg)^{文9)}

注2) 温熱的快適感の閾値とは、代謝量を指標とした人が温熱的不快感を覚え始めるぬれ率の閾値である。閾値の推定式は次式である。Comfort limit in w (for Male) = $0.0011 \times M + 0.32(w: \text{ぬれ率}[-], M: \text{産熱量}[\text{W}])$

参考文献

- 文1) 岡本他：個別分散型エアコンを用いたパーソナル空調の検討（その1）、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、環境工学II、pp.927-928、2012.9
- 文2) 小崎他：個別分散型エアコンを用いたパーソナル空調の検討（その7）指向性・拡散性切替可能な実吹出口の検証及び実空間を対象としたCFD、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、I-53、pp.105-108、2014.9
- 文3) 小崎他：個別分散型エアコンを用いたパーソナル空調の検討（その10）実建物での夏期及び冬期における温熱環境・温冷感・省エネルギー性能の評価、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、I-53、pp.397-400、2015.9
- 文4) 文1) 岡本他：個別分散型エアコンを用いたパーソナル空調の検討(その13)、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2016.9
- 文5) 田辺他：温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発、日本建築学会環境系論文集、599、pp.31-38、2006.1
- 文6) 桑原他：サーマルマネキンを用いた中風速域における人体対流熱伝達率の測定、人間と生活環境、8(1,2)、pp.27-32、2001.6
- 文7) 深沢他：日本人若年者における温熱的快適性評価、人間-生活環境系シンポジウム報告集、第38号、pp.269-272、2014.11
- 文8) 平川和文：踏み台昇降運動時エネルギー代謝量の推定 - 身体特性と機械的効率からの検討-, 日本体力医学会、体力科学、32(5)、pp.285-292、1983.10
- 文9) 厚生労働省策定：日本人の食事摂取基準、2005年度版、pp.43-61、2015