

気流切換型吹出口の指向性・拡散性気流が人体生理反応と温冷感に及ぼす影響

環境都市専攻 建築都市デザインコース 6143140007-2 小崎 麻莉菜
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

オフィスビルにおいて省エネルギー化・節電の取り組みが行われている。その1つとして空調の設定温度の緩和があり、夏期における空調設定温度を28℃とすることが浸透している。しかし室内温度28℃は労働者の許容最低限度の値であり、執務者の快適性を損ねることなく省エネ・節電を実現するためには空気調和設備が果たす役割は大きいと田辺ら^{文1)}は述べている。野部^{文2)}はタスク空調に分別されるパーソナル空調の近年の研究動向についてまとめており、執務者に環境選択権を与えることが重要であると述べた。気流選択が可能な天井吹出方式のパーソナル空調の実施事例^{文3)}は多々あるものの、一般的な普及には至っていない。

そこで、主に夏期における帰社時に増加する代謝量低下を目的とした、気流切換が可能な天井吹出型パーソナル空調システムを提案した^{文4)}。図1にシステム概念図を示す。1人1台の吹出口とし、1つの吹出パネルに集約された指向性と拡散性の2つの吹出口を好みに応じて個人PC操作で自動切換を可能とした。これまでに実運用前のCFD解析^{文5)}と、実運用時の温熱環境測定・被験者実験による温冷感評価、省エネルギー性能評価を行った^{文6)}。この実験でパーソナル空調を使用した被験者の快適性が向上したが、局所気流による人体生理反応は把握できておらず、システムの最適な使用条件の検討は行っていない。そこで本研究では、帰社時にパーソナル吹出口の使用を想定した被験者実験と人体熱解析を行い、人体の生理反応が温冷感に及ぼす影響を把握し、気流切換の最適条件を検討する。さらに人体熱解析において、パーソナル空調の指向性気流を想定した人体条件および気流条件変化による影響を確認する。

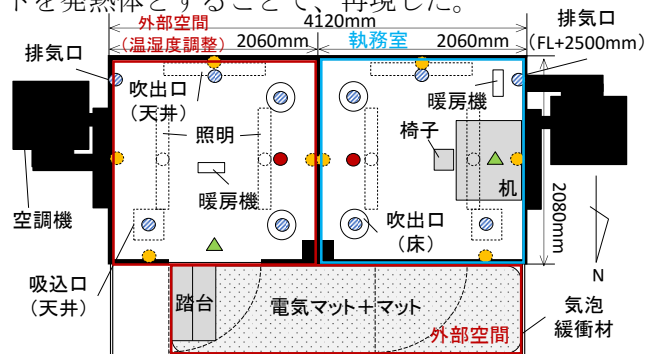


図1 気流切換型パーソナル空調システム 概念図

2. 被験者実験概要

2.1 実験空間

実験は、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にて行った。図2に示すように、幅2060mm(X)、奥行2080mm(Y)、天井高2700mm(Z)の空間が2室隣接している。1室あたり天井吹出口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室を外部空間の温湿度の調整として使用した。外部空間は、2室の移動経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、再現した。



凡例	測定項目	測定点数	測定機器
●	上下温度分布	8点×2室(0mm、100mm、600mm、1100mm、1600mm、2100mm、2600mm、2700mm)	熱電対
●	壁面温度	4点×2室(東西南北面 各1点:1100mm)	
●	吹出・吸込・排気口温度	5点×2室(天井吹出口×1、床吹出口×2点、吸込口×1点、排気口×1点)	アメニティメータ
▲	室内湿度	2点(執務室、外部想定空間共にFL+1100mm)	

図2 実験空間および環境測定点

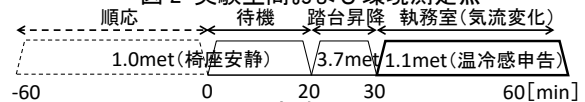


図3 実験手順

Effect of Directivity and Diffusibility of Outlet can be switched Airflow on Human Physiological Responses and Thermal Sensations

2.2 測定項目

実験時の測定項目は、環境測定として図 2 に示した点においてアメニティメータ・熱電対を用いて測定を行った。また、人体熱解析で実験の再現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。

2.3 実験手順・ケース

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 3 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着替え、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、その後実験終了の 30 分までは 5 分ごとに行った。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 Case1-1 に加え、局所気流を首および腕に当てる Case2-1 と Case2-2、さらに首に当てる気流温度を変化させた Case2-3 の計 4 ケースを行った。実験室での局所気流は、図 4 のように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。被験者の着衣量はクールビズを想定し 0.7clo とした。

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[℃]	吹出温度[℃]	気流を当てる部位
1-1	拡散性	28	22	首(1.0m/s)
2-1	指向性			腕(0.4m/s)
2-2				首(1.0m/s)
2-3			24	首(1.0m/s)



図 4 局所気流装置

3. 人体熱解析による実験時の人体の再現

3.1 人体熱モデルによる解析概要

実験時の各ケースの被験者の生理量を再現するため、実験時の温熱環境を使用して人体熱解析を行う。

解析には田辺らによる人体熱数値計算モデル COM を用いた^{文7)}。COM は人体を 17 の部位に分割

しモデル化しており、各部位別に温熱環境要素(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、人間の生理量を予測する。この分割部位の 1 つには首が含まれており、不均一かつ非定常状態を対象としているため、本研究で行った実験における被験者の再現が可能である。また対流熱伝達率は、実験の風速値から算出するように、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4)}を用いた。

3.2 人体熱解析の境界条件

計算条件を表 3 に示す。これは前章の実験ケースと対応しており、実験時に測定したデータを使用した。実験では解析条件の 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^{注1)}し、温度条件を入力した。また気流を首または腕に当てたケースの気流温度は、実験日とは別に実験室の床吹出口と気流が当たる部位における各温度を測定し、その温度差を実験の際に測定した床吹出温度に加えた温度を条件値とした。

表 3 人体熱解析 計算条件(実験ケースと対応)

case	部位分割	相対湿度[%]	順応(60min, 1.0met)		椅座安静(20min, 1.0met)		踏台昇降(10min, 3.7met)		執務室(30min, 1.1met)	
			温度[℃]	風速[m/s]	温度[℃]	風速[m/s]	温度[℃]	風速[m/s]	温度[℃]	風速[m/s]
1-1	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	
2-1	頭	43.3	28.0	0.1	27.9	0.1	31.8	0.1	24.1	1.0
	首				28.7				25.9	
	その他				28.3				28.4	
2-2	頭、首	43.3	28.0	0.1	28.5	0.1	31.3	0.1	25.4	0.4
	左腕				28.5				25.8	
	その他				28.0				28.3	
2-3	頭	45.8	28.0	0.1	28.0	0.1	31.2	0.1	26.4	1.0
	首				28.2				26.4	
	その他				28.2				26.4	

3.3 実験測定結果との再現性の確認

被験者実験と人体熱解析を行って得た平均皮膚温度を比較した。図 5 に Case1-1 と Case2-1 の実験と解析の平均皮膚温度の推移を示す。待機時の温度に差があるものの、代謝量の変化に対応できている。また、測定値はどのケースも代謝量を増加させた後の執務室入室直後すぐには温度低下が始まらず、代謝量が低下するまでに 3 分の遅れが見られた。そこで、測定値の温度低下が始まる 3 分後から 10 分間の平均皮膚温度と、解析の平均皮膚温度の低下傾向を確認した(図 6)。Case1-1、Case2-1、Case2-3 は比較的一致している。Case2-2 は測定値の方が低下は小さく、10 分以降も低下し続けている。これは、腕に気流を当てる際、机に腕を固定させたため、机からの伝熱の影響が考えられる。

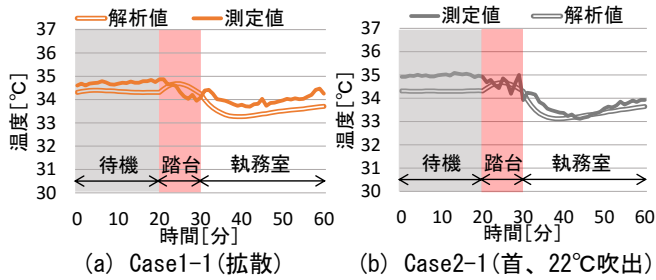


図5 実験と解析の平均皮膚温度推移

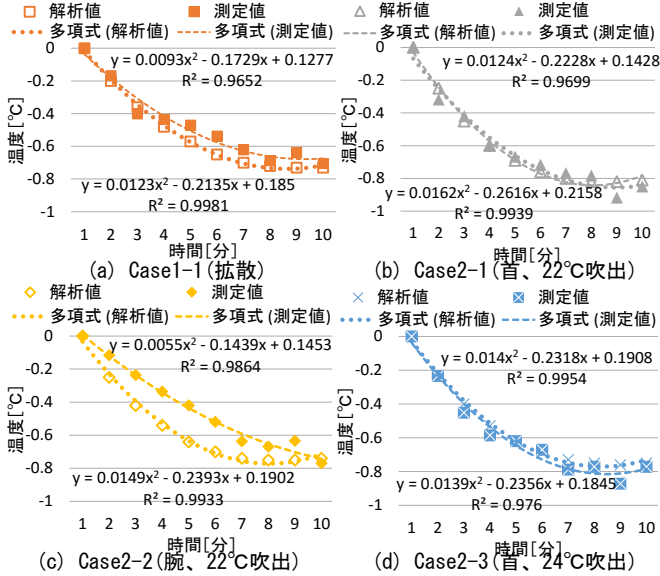


図6 平均皮膚温度の低下傾向

4. 実験時の温冷感と解析による生理量の比較

図7に、代謝量を増加させた後の執務室入室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。快適感のグラフには、ぬれ率を用いた温熱的快適感の推定式^{注2)文8)}で

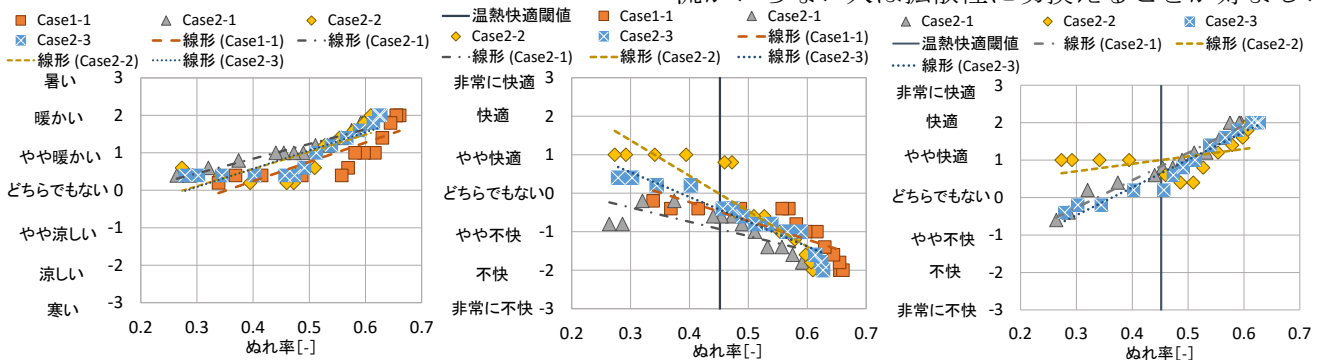


図7 被験者の申告と解析によるぬれ率の関係 (左: 温冷感、中: 快適感、右: 気流感)

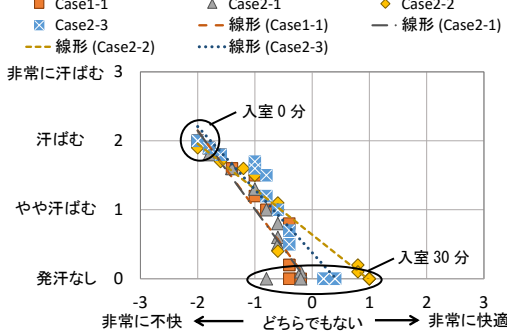


図8 被験者申告の発汗と快適感との関係

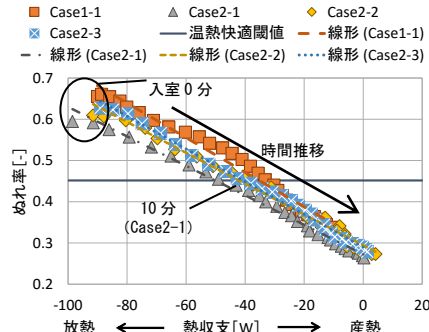


図9 解析によるぬれ率と熱収支の関係

算出した閾値を示した。温冷感は、ど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。快適感も、ぬれ率が温熱快適閾値よりも小さくなるとケースごとに差が見られる。気流感は、Case2-1、Case2-3は快適感が低下し続け、Case2-2はぬれ率が低下しても快適であった。また、被験者の快適感と発汗の関係を図8に示す。Case2-1以外で、発汗なしと申告した後は快適性が向上している。ここで、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(表4)。Case2-1以外のケースはぬれ率の範囲に温熱的快適感の閾値を含んでおり、閾値の有効性があると判断した。Case2-1は、ぬれ率の低下は他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と考えられる。使用した人体熱モデルは、被験者の着衣の蓄湿の影響は考慮されていないため、実験時は蓄湿の影響で発汗なしの申告が遅れ、快適閾値に含まれなかったと考えられる。局所冷却効果は、図9に示す熱収支とぬれ率の関係により、Case2-1が最も高い。また、図7のぬれ率と気流感の関係で、首に気流を当てるケースでは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、快適閾値に到達する10分までは首を冷却し、10分で気流がほしい人は腕に気流を切換え、気流がいらぬ人は拡散性に切換えることが好ましい。

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	温熱快適閾値 [-]	発汗なし時のぬれ率 [-]
1-1	0.45	0.43~0.49
2-1		0.32~0.37
2-2		0.40~0.46
2-3		0.41~0.46

5. 解析による局所冷却の影響確認

5.1 解析概要

前章の人体熱モデルを使用し、オフィス内でパーソナル吹出口を使用することを想定して人体の代謝量・着衣量を変化させた際の影響を確認する。人体熱解析の計算条件とケースを、表4と表5のように設定した。人体熱解析の執務室における基準ケースは、CFD解析^{注3)}にて人体と吹出口を置いた空間(図10)において吹出温度20°Cで airflow を人体首筋付近に送出し、室内温度28°Cとなるように計算した際の局所 airflow 温度と風速を抽出した。CFD解析によって得た風速分布図を図11に示す。人体熱解析のケースは、基準ケースから着衣量・外部環境の代謝量を変化^{注3)}させた計6ケースを行った。

表4 計算条件

	順応	外部環境	執務室
時間[分]	60	10	100
代謝量[met]	1.0	2.0 or 3.3	1.1
温度[°C]	28.0	32.7	28.0
相対湿度[%]	50	50	50
風速[m/s]	0.1	0.1	0.1
局所 airflow 部位・風速(m/s)			頭(0.6),首(0.5),背(0.4)
局所 airflow 温度[°C]			26.6
着衣量[clo]		0.5 or 0.7 or 1.0	

表5 解析ケース

case	外部代謝量[met]	着衣量[clo]
0	3.3	0.7
1.1	3.3	0.5
1.2	3.3	1.0
2.1	2.0	0.5
2.2	2.0	0.7
2.3	2.0	1.0

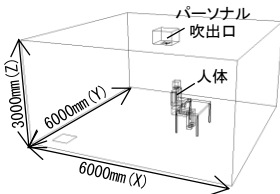


図10 CFD解析空間

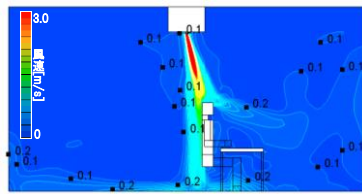


図11 CFD解析結果 (Y軸断面 風速分布)

5.2 代謝量・着衣量の影響

図12、図13に代謝量および着衣量変化による執務室入室時を0分とした平均皮膚温度とぬれ率の推移を示す。ぬれ率のグラフには4章の結果から、温熱快適閾値を使用した。平均皮膚温度は、代謝量の影響が大きく、着衣量が小さい方が着衣抵抗は少なく、放熱が促進されるため、入室時の温度低下が大きくなった。また、Case0、Case1.1、Case1.2では入室直後のぬれ率が高く、特にCase1.2は、20分程度の冷却が必要である。Case2.1とCase2.2では入室時からぬれ率は低く、局所冷却は必要ないことが確認された。以上から、代謝量が低い場合は指向性 airflow の必要はなく、拡散性 airflow の使用が適しており、着衣量はクールビズを行うことで短時間の局所冷却でぬれ率を低下させることができることが分かった。

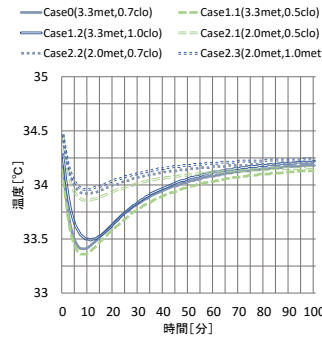


図12 人体熱解析による平均皮膚温度推移

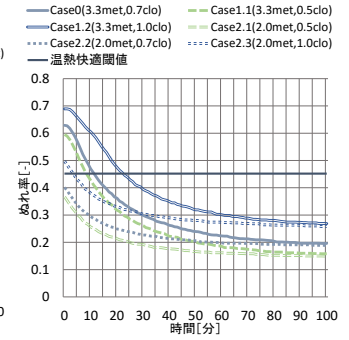


図13 人体熱解析によるぬれ率の時間推移

6. まとめ

本報告では、被験者実験と人体熱解析を行い、人体の生理反応が温冷感に及ぼす影響を確認した。実験と解析の精度が確認でき、被験者の温冷感申告と解析結果から、快適閾値に到達する10分間は首を冷却し、その後は airflow 部位を腕に変更するか、拡散性 airflow に切り替えることが適していることが分かった。さらに人体熱解析において、パーソナル空調の指向性 airflow を想定した人体の代謝量・着衣量変化による影響を確認し、予想される使用者の条件によって airflow の与え方の目安を示した。

注釈

- 1) 人体熱モデルの境界条件に設定した人体の分割は以下の通りである。
Case1-1: 頭・首、上半身(9部位)、下半身(6部位) Case2-1・Case2-3: 頭、首、その他(15部位) Case2-2: 頭・首、左腕、その他(14部位)
- 2) 温熱的快適感の閾値とは、人が温熱的不快感を覚え始める閾値である。閾値の推定式は次式である。Confort limit in w (for Male) = 0.0011×M+0.32 (w:ぬれ率[-], M:産熱量[W])
- 3) CFD解析には、STREAM Ver.10を使用し、標準 k-ε モデル(高レイノルズ)、差分スキーム QUICK で解析を行った。
- 4) 想定した着衣量・代謝量は以下の通りである。
[着衣量]0.5clo:クールビズ/半袖シャツ 1.0clo:ジャケット着用 [代謝量^{※10)}]2.0met:普通歩行 3.3met:通勤
- 5) 外部環境の温度条件は、大阪市における気象庁アメダスから、過去5年間の7月8月の最高気温データを平均した。

参考文献

- 1) 田辺他:我慢をしない省エネへ-夏季オフィスの冷房に関する提言-、空調調和・衛生工学会、温熱環境委員会報告書、2014
- 2) 野部達夫:タスク・アンビエント空調の近年の研究動向、空調調和・衛生工学会、学会誌 84-8、pp.633-636、2010.8
- 3) 平岡雅哉:天井からのタスク空調の実施事例、空調調和・衛生工学会、学会誌 84-8、pp.651-657、2010.8
- 4) 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
- 5) 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、空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集、I-53、pp.105-108、2014.9
- 6) 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、空調調和・衛生工学会大会学術講演論文集、I-53、pp.397-400、2015.9
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 厚生労働省:健康づくりのための運動基準、運動所要量・運動指針の策定検討会報告書、pp.11-13、2006.7