

夏季における空気式床下空調と対流式空調の熱的快適性評価に関する研究

指導教員 和田 百花
佐藤 理人

室内温熱環境 空気式床下空調 対流空調
対流・放射熱伝達率 温冷感 踵熱伝導量

1. 研究背景と目的

近年、より快適な室内環境を実現するため、様々な冷暖房システムが開発されている。例えば、室内全体を素早く効率的に温度調節できる対流式空調や、室内機で調整した空気を床下に送風し、床温と気流感を調整することで、熱的快適性を向上させる空気式床下空調^{注1)}がある。夏季における対流式空調は、室温変動や気流感が大きいことで、不快に感じる居住者も多い。これに対し空気式床下空調は、室温変動や不快な気流感が小さいため、熱的快適性評価が高い傾向にある。他方で、対流式空調と空気式床下空調の放熱特性の違いについては、十分に解明されておらず、人体からの放熱量や放熱成分が具体的にどの程度異なることが、熱的快適性に寄与しているかについては十分な知見が得られていない。

そこで本研究では、第一に空気式床下空調と対流式空調の皮膚表面からの放熱量の違いを明らかにするため、対流成分、放射成分、伝導成分をそれぞれ測定し、対流式空調と空気式床下空調の放熱特性の違いを評価する。第二に生理量の測定と合わせて温熱心理量測定も行った。それらの結果から、生理量と心理量の双方の比較・評価を行うことで、対流式空調と空気式床下空調の熱的快適性の違いについて考察することを目的とした。

2. 空気式床下空調の概要

空気式床下空調の構成を図1に示す。床の構成は床下地材と樹脂部により構成され、床下は樹脂部によって上下2層に区切られている。ダクトを通して床下に供給された空気が1層目(サプライ側)に流れ込み、パネルを通して床下地材に吹き付けることで床下地材を冷却する。その後、室内に設置された還流口から室内に吹き出し、室内機に戻り熱交換されて再び床下へ供給される。また室温は、室内機の吸込み温度またはコントローラー部の温度によって制御が可能である。

3. 実測概要

3.1 実測対象室の概要

実測用木造戸建住宅は岡山市内に立地し、1階南西部の一室を測定対象として本システムを導入した。対象室は南西に内付けの日射遮蔽部材を付与した掃出し窓が設けられ、

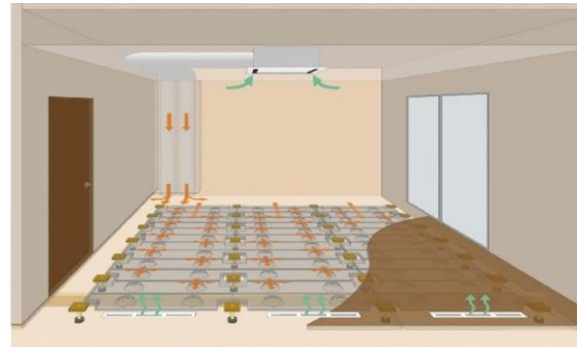


図1 空気式床下空調システム構成図¹⁾

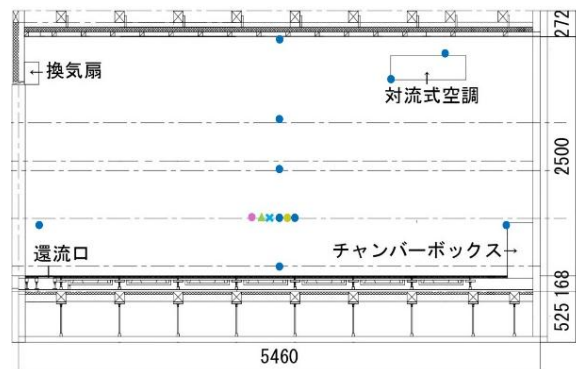


図2 対象室断面図

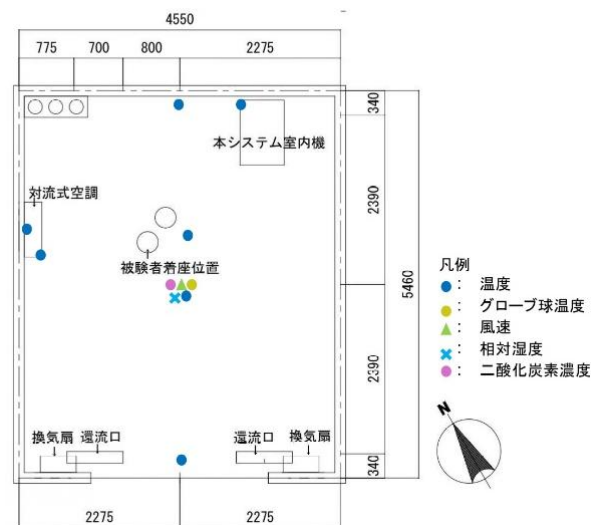


図3 対象室平面図

卒業論文概要

南西及び北西面が外気と接している。表1に対象室の空調機器定格能力値を示す。空気式床下空調の空調機は、断熱されたダクトとチャンパーボックスを介して床下空間に接続されている。また床仕上げ材は木質フローリング(t=12mm)とした。

3.2 温熱環境測定概要

対象室の実験概要を表2に示す。また対象室の断面図を図2、平面図を図3に示す。室中央と還流口付近およびエアコン付近を中心に、風速、空気温度、表面温度、グローブ温度、相対湿度、CO₂濃度を1分間隔で測定した。また室内の上下温度分布については、室中央の床表面温度、床上0.1m、0.6m、1.1m、1.6m、2.7m高さの空気温度および天井表面温度を測定した。また熱的快適性評価のための測定点に関しては、日本建築学会室内温熱環境測定基準・同解説^{注2)}に基づいて、立位人体を対象とした1.1mと椅坐人体を対象とした0.6m位置とした。空調機については、対流式空調、空気式床下空調双方について、吹出口、吸込口空気温度を測定した。使用測定機材を表3に示す。

3.3 温熱生理量測定概要

実施した被験者実験の概要を表4に示す。また図4に示す通り、身体測定点^{注3)}については、額部に標準熱流センサ、低放射率熱流センサを垂直に並べ、医療用両面テープ^{注4)}で貼付した。踵部は、床面に標準熱流センサを高熱伝導性両面テープで固定した上で、被験者の踵を密着させることで測定した。また熱流センサの対流・放射熱伝達量の分離は、標準センサの放射率0.86における総合熱伝達量 $Q_{0.86}$ と低放射率センサの放射率0.08における総合熱伝達量 $Q_{0.08}$ を用いて、1)式(放射熱伝達量)及び2)式(対流熱伝達量)により算出した。

3.4 温熱心理量測定概要

温熱心理量については全身温冷感・快適感・足裏接触温冷感・湿度感・気流感・室温受容度・床温受容度を表5に示す7段階尺度^{注5)}を用い、室温ごとに椅坐静位10分後・20分後申告値を集計した^{注6)}。その後休憩室で30分間休憩をとり、休憩時間中に対象室の空調制御変更を行った。

空調制御は3条件(条件①:空気式床下空調、条件②:対流式空調(風除け有)、条件③:対流式空調(風除け無))とした。このとき、対流式空調については、フィンの運転方向、気流速度を固定した上で、吹出口にガードを設置した条件を風除け有(条件②)とし、被験者に吹出口からの冷風が直接当たる条件を風除け無(条件③)とした。また各被験者(計7名)について、条件ごとに午前・午後に1回ずつ測定を行い、食事誘導発熱産生(DIT)^{注7)}によるmet値への影響を極力避けるため、昼休憩については90分とした。座席位置は、温熱環境分布の影響を避けるため、着座位置は、最大2名として風除け有・無の両条件で座席位置による温熱環境の差がないことを事前に確認した位置を設定した。また着衣量は0.5~0.6clo^{注8)}とし、靴下は同一のものを配布した上で、測定時のみスリッパなしとした。

表1 空調機器冷房能力

	空気式床下空調	対流式空調
定格冷房能力[kw]	3.6	5.6
定格消費電力[kw]	1.00	1.67
APF [-]	4.9	5.5

表2 実験概要

対象地	岡山県岡山市
実験住宅概要	2F 建木造軸組工法
実測期間	2025/8/19~2025/8/22, 8/25
空調制御条件	空気式床下空調、対流式空調(風除け無)、対流式空調(風除け有)
対象室内温度	夏季 25~27℃
対象室内相対湿度	40~60%
対象室内	空気式床下空調:24~26℃
床表面温度	対流式空調:25~27℃
休憩室温湿度	夏季 26℃ 相対湿度 50% (PMV=0 相当)

表3 測定機材

測定項目	測定機材
空気・表面温度	T熱電対0.2mm
グローブ温度	T熱電対0.2mm, グローブ球Φ150mm
風速	熱線式 (Model 6332 KANOMAX)
相対湿度	高分子湿度センサー (神栄テクノロジー)
二酸化炭素濃度	非分散型赤外線吸収式 (TR-76Ui T&A)
空調機吹出口、吸込口、額近傍空気温度	T熱電対0.2mm

表4 被験者実験条件

踵温度・熱流	標準(ε=0.86)熱流センサ (T-標準M, TOYOTA) t=0.25mm
皮膚表面温度・熱流(額)	低放射率(ε=0.08)熱流センサ (T-内臓M*AI, TOYOTA) t=0.25mm 標準(ε=0.86)熱流センサ (T-標準M, TOYOTA) t=0.25mm
被験者数	男性3名(20~30代) 女性4名(20~40代)
代謝量	1.0Met (椅座位安静状態)
着衣量	0.6clo程度 (半袖長ズボン)

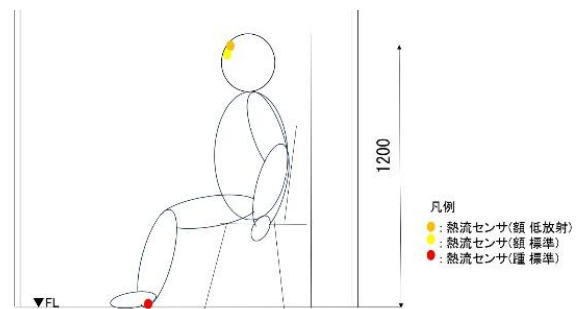


図4 被験者温熱生理量測定部位

$$q_r = 0.95 \times \frac{0.86 - 0.08}{Q_{0.86} - Q_{0.08}} = \frac{0.741}{Q_{0.86} - Q_{0.08}} \quad [\text{W/m}^2] \quad 1)$$

$$q_c = \frac{0.0624}{Q_{0.86} - Q_{0.08}} - Q_{0.08} \quad [\text{W/m}^2] \quad 2)$$

q_r :放射熱伝達量[W/m²] q_c :対流熱伝達量[W/m²]
 $Q_{0.86}$:熱流量(ε=0.86) [W/m²] $Q_{0.08}$:熱流量(ε=0.08) [W/m²]

4. 実験結果

4.1 皮膚温及び対流・放射熱伝達量測定結果

図5に額皮膚温、室温、MRT(平均値)を測定した結果を示す。図5より20分経過後の皮膚温は、条件①33.4℃、条件②33.8℃、条件③31.8℃となった。また室温は、各条件とも同程度で26.2℃程度となった。MRTについては、条件①26.6℃、条件②27.4℃、条件③27.7℃となり、条件①の方が条件②、③よりも約1℃低い結果となった。室温は皮膚温よりも条件①で約7.3℃、条件②約7.7℃、条件③約5.4℃低く、MRTは、皮膚温よりも条件①で約6.8℃、条件②約6.4℃、条件③約4.1℃低い結果となった。

4.2 対流・放射熱伝達量測定結果

前節に基づき、表6に蔵澄らの式及びステファン・ボルツマンの法則に基づいて算出した額における対流・放射熱伝達量推定値と本実測平均値を比較した結果を示す。

対流熱伝達量[W/m²]は、実測値で条件①44.1、条件②57.5、条件③110.5となり、放射熱伝達量[W/m²]は、条件①45.6、条件②42.0、条件③30.4となった。表6よりいずれの条件においても対流熱伝達量及び放射熱伝達量は推定値の範囲内であった。

4.3 対流・放射熱伝達率推定結果

表7に蔵澄ら²⁾、桃井ら³⁾、山本ら⁴⁾の既往研究結果と本実測より算出した対流・放射熱伝達率を比較した結果を示す。表7より本実測結果における対流熱伝達率[W/(m²・K)]は、条件①5.8、条件②6.9、条件③17.6であった。また放射熱伝達率[W/(m²・K)]は条件①5.6、条件②5.6、条件③4.7であった。既往研究と比較すると、本実測結果はいずれも既往研究の範囲内にあり、数値は妥当であると判断できる。

4.4 踵熱伝導量測定結果

表8に水冷パネルを用いた足裏の局所冷却が人体生理や温度感覚に及ぼす影響について測定を行った袴田ら⁵⁾の踵熱伝導量・踵温度・床表面温度の結果と本実測結果を比較した結果を示す。本研究の平均踵熱伝導量[W/m²]は条件①93.0、条件②70.7、条件③55.3となった。袴田らの80~120[W/m²]と比較すると、接触面積、測定環境の違いの影響を考慮すると本研究は既往研究と同程度の範囲内にあり、妥当範囲内である。また平均踵温度は、条件①約29.9℃、条件②約29.3℃、条件③約28.8℃であった。平均床表面温度は、条件①約25.4℃、条件②約26.3℃、条件③約26.1℃であった。本研究の踵温度は既往研究より約3℃高い温度を示したが、既往研究の床表面温度が本研究より約2.5℃低いことを踏まえると本研究の踵温度も妥当範囲内であると考えられる。

5. 成分別放熱量と温熱心理量に基づく考察

図8に条件別の全被験者について積算した成分別放熱量平均値を示す。また図9に快適感申告値を[非常に不快]=0から[非常に快適]=6として整理した条件別平均値を示す。図8より積算した成分別放熱量[W/m²]は、条件①178.1、条件②162.4、条件③207.8となった。

表5 温熱心理量尺度

言語尺度	暑い	暖かい	温かい	やや温かい	やや涼しい	涼しい	非常に涼しい	暑い	やや暑い	どちらでもない	冷たい	非常に冷たい	快適	やや快適	快適でも不快でもない	やや不快	非常に不快				
	尺度	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	+3	+2	+1	0	-1	-2

言語尺度	非常に乾いている	乾いている	やや乾いている	やや湿っている	湿っている	非常に湿っている	非常に感じる	やや感じる	感じない	室温を上げたい	このままでよい	室温を下げたい	床温を下げたい	
	尺度	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	3	2	1	0	-1	-2

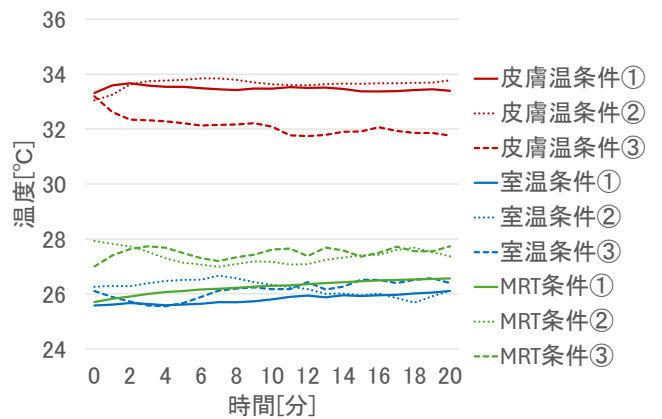


図5 額皮膚温・室温・MRT測定結果例

表6 対流・放射熱伝達量の推定値と測定値比較

単位[W/m ²]	測定値		推定値	
	対流熱伝達量	放射熱伝達量	対流熱伝達量	放射熱伝達量
条件①	44.1	45.6	40.0	42.4
条件②	57.5	42.0	51.8	42.1
条件③	110.5	30.4	105.6	33.5

表7 本実測と既往研究^{2~4)}測定結果の比較

熱伝達率[W/(m ² ・K)]	測定結果		蔵澄らの結果		既往研究結果	
	対流	放射	対流	放射	対流	放射
条件①	5.8	5.6	5.2	4.7	3.4~5.2	3.55~4.7
条件②	6.9	5.6	6.9			
条件③	17.6	4.7	16.5			

表8 踵熱伝導量・温度の既往研究⁵⁾との比較

単位	測定結果			既往研究		
	踵伝導量	踵温度	床表面温度	踵伝導量	踵温度	床表面温度
条件①	83.1~144.1	25.2~33.8	24.7~26.1	80~120	26~30	23~23.9
条件②	54.4~98.4	25.1~33.9	25.8~26.8			
条件③	47.1~59.7	26.1~31.8	25.8~27.0			

卒業論文概要

図9より快適感申告平均値は、条件①3.7、条件②3.6、条件③3.1であり、条件①が最も快適感申告値の高い結果となった。一方条件③は不快側と快適側の申告値が同程度となっており、対流熱伝達量(121.2[W/m²])が最大であったことから、対流成分による放熱が快適と感じる被験者と不快と感じる被験者に分かれる結果となった。

次に熱伝導成分と対流成分の適切さを評価するため、図10に床温冷感申告、図11に気流感申告結果を条件別に整理した結果を示す。図10及び図11より条件①は床表面温度が最も低いにもかかわらず、床温上昇を望む申告は少なく、また気流感申告も小さい傾向を示した。これらより、条件①では気流の影響が小さいことにより局所不快感が生じにくく、結果として平均快適感申告値が最も高くなったと考えられる。

6. まとめ

夏季における空気式床下空調と対流式空調の熱的快適性の違いについて、温熱生理量と温熱心理量による評価を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 空気式床下空調条件では、踵からの熱伝達量が対流式空調よりも約 22~38W/m²程度増加するが、快適感は不快側の申告値は少なく、平均値が 3.71 と最も高かった。
 - 2) 対流式空調（風除け無）条件では、対流熱伝達量が条件①及び②より約 60W/m²多くなるが、快適感は快適側と不快側申告が同程度あり、評価が分かれる結果となった。
 - 3) 対流式空調（風除け有）条件では、上記2条件の中間的な放熱量及び快適感評価を示したが、気流感は空気式床下空調よりも感じる側の評価が3倍程度多い。
- 今後は冬季においても同様の測定を行い、温熱生理量と温熱心理量の関係について明らかにしていく。

謝辞) 本研究を実施するにあたり、多くの被験者の方々にご協力を頂きました。ここに記し、謝意を表します。

- 注1) DAIKEN 株式会社：空気式床下空調概要, DAIKEN 公式 Web サイト, <https://www.daiken.jp/buildingmaterials/yukarela/> (参照 2025-01-08)
- 注2) 日本建築学会：室内温熱環境測定規準・同解説, 日本建築学会, 2002
- 注3) 測点部位は Hardy/DuBois の7点部位法に基づき行った。
- 注4) センサ貼付方法：3M 社医療用両面テープ B078V6R4SF (縦:7.5cm, 横:2.5cm, 厚さ:0.2mm) を用い、センサ裏側を被験者の額部に貼付した。
- 注5) 日本建築学会：温熱心理・生理測定法規準・同解説, 日本建築学会, 2005
- 注6) 本研究は高知工科大学倫理審査委員会の承認 (承認番号:302) を得て実施した。
- 注7) DIT (Diet Induced Thermogenesis) は食事摂取に伴う熱産生を示す。
- 注8) ISO 9920 に基づく夏季軽装の代表 clo 値
- 1) 佐藤, 井口, 吉岡他: 空気式床放射パネルを用いた暖冷房システムに関する研究 その1, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 121-124, 2022. 9
- 2) 蔵澄, 土川, 大和他: 気流の方向と姿勢を考慮した人体の熱伝達率の実測, Japanese Society of Human-Environment System, 20(1), pp51-61, 2013
- 3) 桃井, 宮本, 義江他: 低風速気流曝露時における人体各部位の静圧および対流熱伝達率に関する研究 47th Symposium on Human-Environment System, HES47 in Fukuoka, pp25-26, 2023
- 4) 山本, 遠藤, 新原他: 人体熱ストレスによる温熱生理に関する基礎的検討(その2) CFD 解析を用いた局所対流熱伝達率の考慮, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp249-252, 2022
- 5) 袴田, 青島, 浅輪他: 夏季の室内環境における足裏の局所冷却が人体温熱生理および温熱感覚に及ぼす影響, 日本建築学会関東支部研究報告書集II, pp43-46, 2023

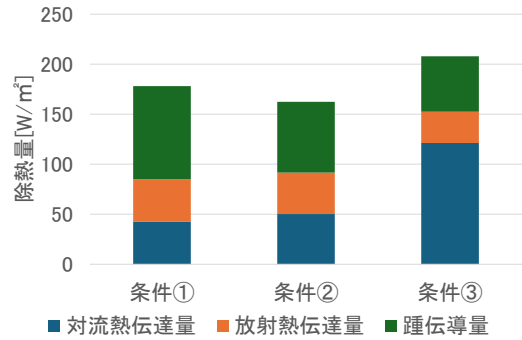


図8 条件別成分別放熱量

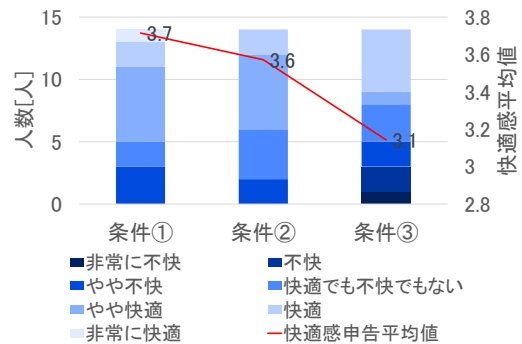


図9 快適感申告結果及び平均値

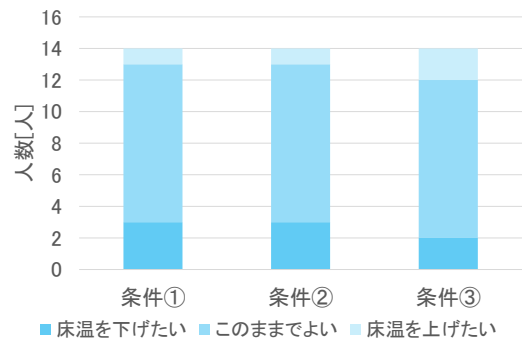


図10 床温冷感申告結果

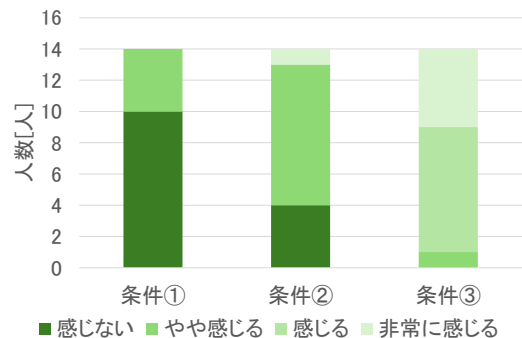


図11 気流感申告結果