

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 冬季における足裏加熱が熱的快適性に与える影響

1250002 秋山 玲也
指導教員 佐藤 理人

室内温熱環境 空気式床下空調 対流空調
足裏加熱 温冷感 住宅

1. 研究背景と目的

既往の冬季における床暖房と対流式空調とを比較した研究¹⁾では、全身温冷感申告に基づく中立温度は、2~3℃床暖房の方が低くなるという結果が報告されている。他方で床放射パネルを利用した



図1 実測風景

空気式床下空調システム²⁾³⁾⁴⁾（以下、本システム）は、床表面温度を制御することにより、適切な上下温度分布が形成されるとともに、気流感が少なく静穏なため、対流式空調と比較して冬季はより低温で中立となる温冷感申告が得られることが期待される。ただし、本システムは一般的な床暖房のように温水や電熱線を用いて床表面温度を上昇するのではなく、床下に温風を送風することで室温+2℃程度の床表面温度を維持し、省エネ性向上を目指したシステムである。従って床暖房と同様の中立温度が得られるかについては未解明であった。そこで本研究では、冬季において本システムと対流式空調の熱的快適性評価を行い、全身温冷感申告に基づく中立温度の違いや足部温度との関係を明らかにすることを目的とする。

2. 空気式床下空調システムの概要

空気式床下空調システムの構成を図2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温める。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



図2 空気式床下空調システム構成図

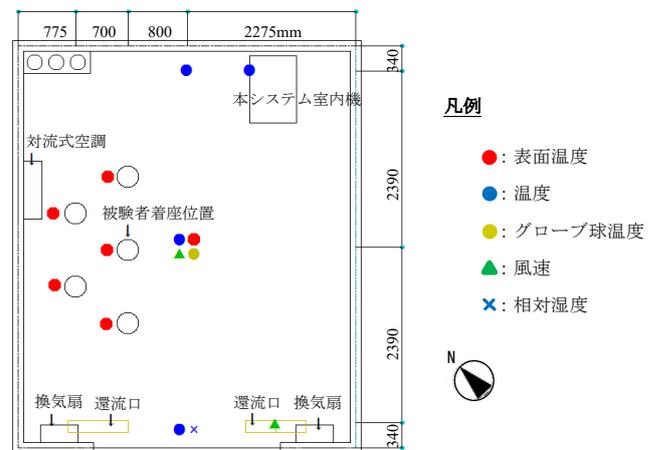


図3 対象室平面図

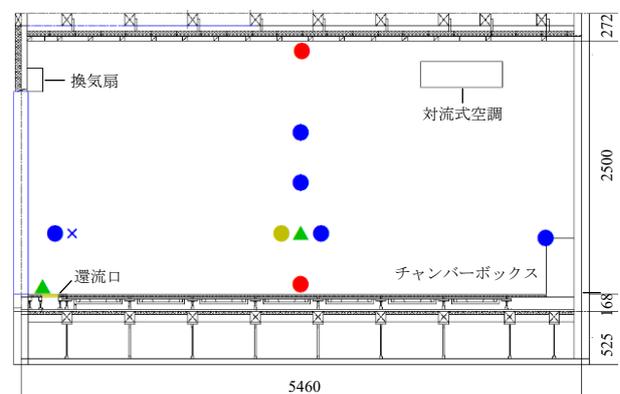


図4 対象室断面図

られ、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。本システムの空調機は、断熱されたダクトとチャンバーボックスを介して床下空間に接続されている。床仕上げは木質フローリング (t=12mm)とした。実測は、温度に対するヒトの順化速度を考慮したステップ変動^{注1)} (18~26℃) による制御を行った上で、各温度帯における温熱心理量の申告を、空調方式ごとに実施した (表2)。

3.2 温熱環境測定概要

対象室の平面図を図3に、断面図を図4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、グローブ球温度、風速、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を確認するため、室中央の床表面温度、床上+0.1m高さ、0.6m高さ、1.1m高さ、1.6m高さ、2.5m高さにおける空気温度、および天井表面温度を測定した。使用した測定機材を表3に示す。足部の測定位置については、Hardy・DuBoisの7点部位法に基づきつま先・足の甲の測定点を定めた。また、放射温度計を用いた足部皮膚温度についてはくつ下表面の放射温度測定結果より推定した^{注3)}。

3.3 温熱心理量測定概要

温熱心理量⁵⁾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4に示す言語尺度を用い、室温ごとに椅座静止後10分後・20分後申告値を集計した。その後足部温の測定を行い、休憩室で30分間休憩をとり、休憩時間中に対象室の室温変更を行った。なお食事誘発性熱産生(DIT)によるmet値への影響を極力避けるため、昼休憩は1時間30分とした。

被験者内訳を表5に示す。着座位置は最大5名として千鳥配置とし、座席位置による温熱環境分布の影響を避けるため、対流式空調時については、フィンの運転方向、気流速度を固定し、被験者に気流があたらないようにした。冬季の着衣量は0.9~1.0cloとし、代謝量は椅座位安静状態(1.0met)とした。使用する靴下は同一のものを使用し、測定時のみスリッパを履かないものとした。

4. 既往研究との比較

表6に対流式空調・床暖房を用いた松本らの研究の実験条件について示す。松本らの研究は温水式の床暖房を用いており、60℃の温水を1.5L/min連続供給している。そのため本研究と比べ、温冷感申告時の室温に対して床表面温度の値にばらつきがみられる。

松本らの全身温冷感申告は中立を示す申告値が[0, どちらでもない]となっているがそれ以外の申告値については同一の7段階尺度である。なお本研究では日本建築学会温熱心理・生理測定基準に基づく7段階尺度を採用した。次章では全身温冷感申告と室内温熱環境の関係及び足部温と室内温熱環境の関係について評価した結果を報告する。

表1 空調機器暖房能力

	空気式床下空調	対流式空調
定格暖房能力[kw]	4.8	6.7
定格消費電力[kw]	1.27	2.01
APF [-]	4.9	5.0

表2 実測概要

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	2024/2/1~2024/3/1
暖房方式	空気式床下空調、対流式空調
対象室内温度	18, 20, 22, 24, 26℃
対象室内相対湿度	40~60%
対象室内床表面温度	空気式床下空調:室温+2℃ 対流式空調:室温-2℃
休憩室温度	23℃ 相対湿度 50% (PMV=0 相当)

表3 測定機材

測定項目	測定機材
空気温度・表面温度	T型電熱対 0.2mm
グローブ球温度	T型電熱対 0.2mm φ150mm
風速	熱線式 kanomax model 6332
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&D
記録	ロガー Graphtec midi Loger GL840
表面温度(床全体)	赤外線放射カメラ infRec R450 Avio
表面温度(足の先、甲)	放射温度計 FT3700 HIOKI

表4 温熱心理量測定方法

	温冷感				足裏接触温冷感				快適感											
言語尺度	暑い	暖かい	やや暖かい	暑くも暖かい	やや涼しい	暑くも涼しい	冷たい	非常に冷たい	暑い	やや暑い	どちらでもない	やや冷たい	非常に冷たい	非常に不快	不快	やや不快	不快でもない	不快でもない		
	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	+3	+2	+1	0	-1	-2

	湿度感				気流感				室温		床温			
言語尺度	非常に乾いている	乾いている	やや乾いている	どちらともいえない	湿っている	非常に湿っている	感じない	感じると感じる	室温を上げたい	このままでよい	室温を下げたい	床温を上げたい	このままでよい	
	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	3	2	1	0	3	2	1

表5 被験者内訳

	20代	30代	40代	50代	60代	合計
男性[人]	5	3	3	3	1	15
女性[人]	8	0	3	1	0	12

表6 既往研究¹⁾の実験条件

室温-床温(℃)	対流式空調:16-17,20-19,22-21,26-23,30-23 温水式床暖房:16-23,20-25,22-27,26-30,30-30 ※床温は温冷感申告時の平均床表面温度
被験者人数	12人(男性8人・女性4人)
平均年齢	31.1歳±4.2歳(男性32.5歳・女性28.3歳)
温冷感申告	日本建築学会環境基準に基づく7段階尺度

5. 実験結果

5.1 全身温冷感申告と温熱環境

図5、図6に空気式床下空調と対流式空調について、全身温冷感申告(計27名)と室温の関係を示し、図7に男女別の結果を示す。目的変数を全身温冷感申告、説明変数を室温として最小二乗法により近似した単回帰式も合わせて示す。その結果、いずれの回帰式においても決定係数 R^2 が0.6を超え、全身温冷感申告と室温との間に有意な相関がみられた。このとき全身温冷感中立を示す室温は、表7に示すように空気式床下空調では約22.5℃、対流式空調では約23.2℃となり、約0.7℃空気式床下空調の方が低い結果が得られた。また、男女別で比較した結果では、男性は約0.4℃、女性は約1.1℃空気式床下空調の方が低い結果となった。

松本らの中立温度は対流式と比較して約3.6℃床暖房の方が低い結果となっている。一方本研究では、空気式床下空調の方が約1℃中立温度が低い結果となったが本システムは温水式床暖房よりも床表面温度が低いことから妥当な範囲といえる。また本測定では対流式空調であっても室内機からの送風が直接被験者に当たらない位置で熱的快適性申告を実施しているため、全身温冷感申告の違いは床表面温度の違いによるものといえる。そのため、床表面温度差が約4℃とわずかであっても全身温冷感に一定程度の効果があるといえる。

5.2 室温別足裏接触温冷感申告比率の比較

次に室内温熱環境と足裏接触温冷感との関係を明らかにするため、図8に空気式床下空調と対流式空調の室温別足裏接触温冷感申告比率を算出した結果を示す。この結果からも空気式床下空調においては、中立を示す「どちらでもない」を申告した比率が室温22℃で最も高くなるのに対し、対流式空調では室温24℃または26℃の時に比率が最大となっている。これらのことから床温の違いがわずかであっても中立温度付近においては、足裏からの熱伝導が温冷感申告に影響しているものと考えられる。

5.3 足部温と室内温熱環境の比較

次に足部温と室内温熱環境との関係を比較するため、図9に床表面温度と足のつま先・足の甲の皮膚温を比較した結果を示す。また表8には空調方式ごとの回帰式及び決定係数を示す。足のつま先の皮膚温については、空気式床下空調(床下空調)の場合、床表面温度に応じて上昇している傾向がみられた。一方、足の甲においてはどちらの空調方式でも床表面温度と有意な相関はみられなかった。

また図10に室温と足部皮膚温との関係を示し、表9に回帰式および決定係数を示す。その結果、床表面温度と同様に床下空調のつま先温度のみ有意な相関がみられた。

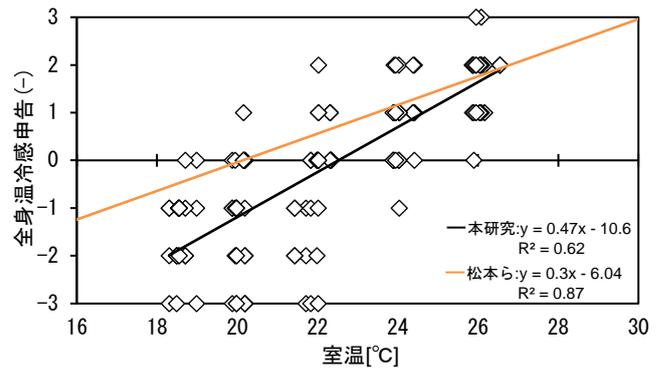


図5 全身温冷感申告と室温の関係(空気式床下空調)

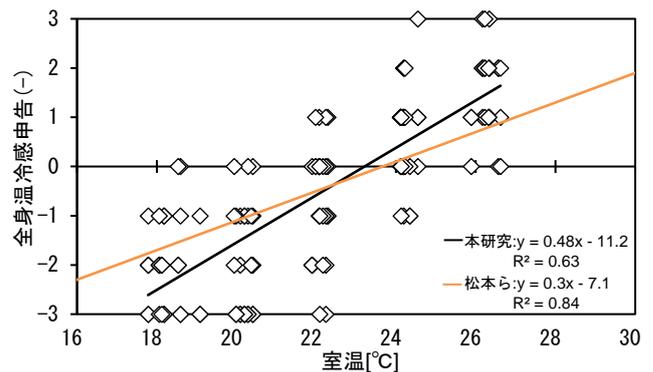


図6 全身温冷感申告と室温の関係(対流式空調)

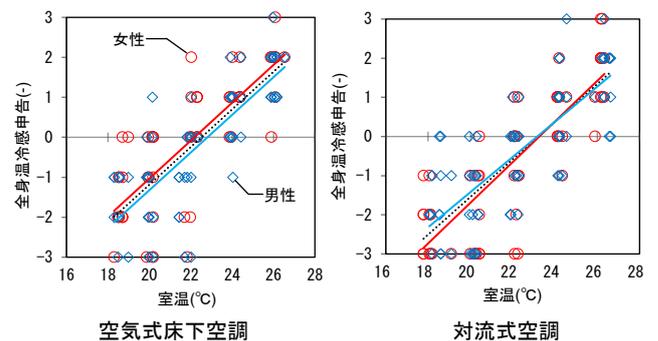


図7 全身温冷感申告と室温の関係(男女別)

表7 空調方式男女別の回帰式および中立温度

	回帰式	決定係数	中立温度
空気式床下空調	全体: $y = 0.47x - 10.61$	$R^2 = 0.62$	全体: 22.5℃
	男性: $y = 0.47x - 10.75$	$R^2 = 0.64$	男性: 22.8℃
	女性: $y = 0.47x - 10.52$	$R^2 = 0.61$	女性: 22.2℃
対流式空調	全体: $y = 0.48x - 11.17$	$R^2 = 0.63$	全体: 23.2℃
	男性: $y = 0.45x - 10.4$	$R^2 = 0.60$	男性: 23.2℃
	女性: $y = 0.52x - 12.08$	$R^2 = 0.68$	女性: 23.3℃

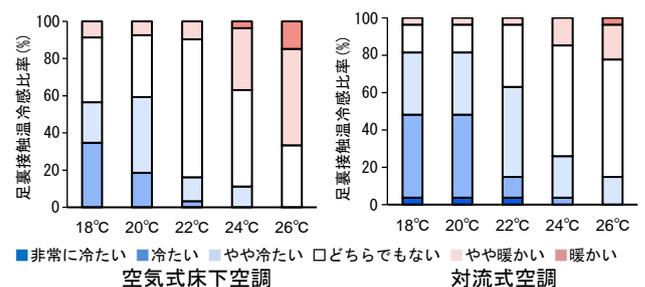


図8 室温別足裏接触温冷感申告

6. 室内温熱環境と全身温冷感申告との関係

表 10 に本実測で得た入室 20 分後の全身温冷感申告と室内温熱環境について重回帰分析を行った結果(サンプル数 155)を示す。重回帰分析の目的変数は全身温冷感申告で説明変数は室温、床表面温度の 2 要素とした。その他物理量である MRT、上下温度差は松本らの研究より全身温冷感と有意がみられないとの結果が得られているため今回は除外した。

その結果いずれの説明変数も危険率 P-値<0.01 となり有意となった。また影響度(t)値は、室温で 7.45(P-値:0.00)、床表面温度で 2.91(P-値:0.004)であった。

7. まとめ

空気式床下空調と対流式空調の冬季熱的快適性の違いについて温冷感申告による評価を行い、以下の知見が得られた。

- 1)全身温冷感申告と室温の関係より単回帰式を用いて中立温度を求めた結果、空気式床下空調では約 22.5℃、対流式空調では約 23.2℃と約 0.7℃空気式床下空調の方が低くなる結果が得られた。
- 2)床表面温度差が約 4℃とわずかであっても足裏接触温冷感の改善に効果があり、特に足部温についてはつま先温度の改善に効果があることが示唆された。
- 3)全身温冷感申告値と、室温及び床表面温度を説明変数とする重回帰分析を行った結果、いずれの説明変数も危険率 P-値<0.01 で有意となった。また影響度(t)は、室温で 7.45、床表面温度で 2.91 の結果が得られた。

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

注釈)

注 1)既往研究を参考に対象室の室温および床温を 30 分の休憩を設けながら段階的に変化させた。

注 2)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 3)本研究では、放射温度計(HIOKI FT3700)を用いて離隔距離約 25cm から垂直に靴下有りの足部温と皮膚温度を比較した予備実測を行い、靴下有りの足部温より皮膚温度の推定を行った。

参考文献

- 1)松本泰輔, 松井勇:吹抜けを有する冬期実空間における足裏加熱が全身温冷感に及ぼす影響に関する研究 実験室の温度設定にステップ変動を与えた場合について, 日本建築学会環境系論文集, Vol75, No.652, pp.491-497, 2010.6
- 2)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
- 3)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 2, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.285-288, 2023.9
- 4)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 3, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.289-292, 2023.9
- 5)日本建築学会, 日本建築学会環境基準 AIJES-H0004-2014: 温熱心理・生理測定基準・同解説, 日本建築学会, 2014.3
- 6)伊東, 秋山, 佐藤他: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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.871-872, 2024.8
- 7)秋山, 伊東, 佐藤他: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 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.873-874, 2024.8
- 8)三浦真由美:室内環境制御と Human in the Loop, 第 61 回自動制御連合講演会, pp.388-392, 2018.11
- 9)平良拓也他:ヒューマンカロリーメーターを用いた朝食, 昼食および夕食の食後におけるエネルギー消費量の推移の比較検討, 栄養学雑誌, Vol.68 No.6, pp.373-377, 2010

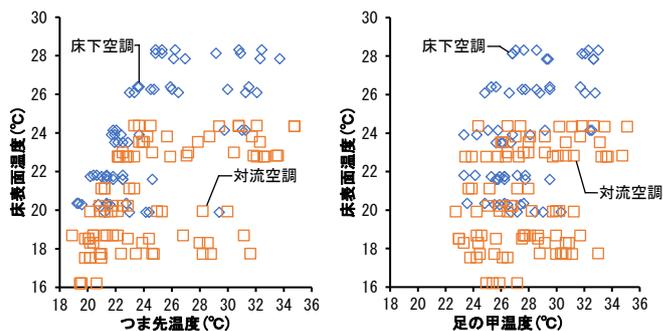


図 9 床表面温度と足部温度の関係

表 8 床表面温度とつま先・足の甲温度の回帰式

床表面温度	回帰式	決定係数
(a)つま先	放射: $y = 0.48x + 12.1$	$R^2 = 0.41$
	対流: $y = 0.31x + 13.03$	$R^2 = 0.28$
(b)足の甲	放射: $y = 0.53x + 9.41$	$R^2 = 0.22$
	対流: $y = 0.24x + 13.8$	$R^2 = 0.09$

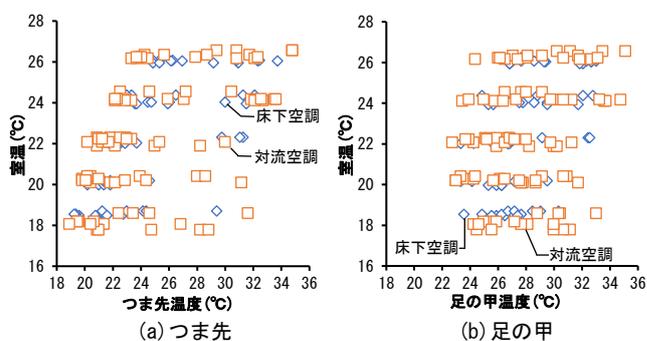


図 10 室温と足部温度の関係

表 9 室温とつま先・足の甲温度の回帰式

室温	回帰式	決定係数
(a)つま先	放射: $y = 0.46x + 11.0$	$R^2 = 0.43$
	対流: $y = 0.32x + 14.21$	$R^2 = 0.24$
(b)足の甲	放射: $y = 0.50x + 8.27$	$R^2 = 0.24$
	対流: $y = 0.24x + 15.48$	$R^2 = 0.07$

表 10 全身温冷感申告と環境温度に関する重回帰分析

回帰統計	分散分析	回帰	残差	合計
重相関 R	0.82	自由度	2	152
重決定 R ²	0.67	変動	318.80	156.59
補正 R ²	0.67	分散	159.40	1.03
標準誤差	1.02	分散比	154.72	
観測数	155	有意 F	0.00	
	係数	標準誤差	t	P-値
切片	-11.59	0.65	-17.72	0.000
室温	0.38	0.05	7.45	0.000
床表面温度	0.13	0.05	2.91	0.004

- 10)近本智行他:ヒューマンファクターを組み込んだ空調システム・制御システムの構築(その7) 一日の代謝量変化に合わせた緩やかな室温変化が人の快適性に与える影響の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.88-92, 2017