

PMV と QDA 法を用いた輻射熱空調とヒートポンプ式空調との快適性評価比較
冷房運転時の評価

Comparison of comfort evaluation between radiant heating and cooling system and heat pump air conditioning using PMV and QDA methods: Evaluation during cooling operation

豊貞 佳奈子

Kanako Toyosada

keywords : Radiant heating and cooling system, Comfort evaluation, PMV, QDA

輻射熱空調、快適性評価、PMV、QDA

1. 緒言

現在、室内の空気環境の快適性の評価には、PMV 評価法が国際的に多用されている。PMV 評価は、人間活動である「活動量（代謝量）」、「着衣量」と、室内空気環境の物理量である「温度」、「湿度」、「放射」、「気流」といった容易に計量可能な6つのパラメータを用いて、人が感じる「暑い」、「寒い」といった空間の温熱感覚の至適領域を定量的に示すもので、実用性が高い評価法である。一方、快適性とは人間が外部刺激を受けて生じる種々の身体反応を心理面で統合評価した指標であることから、室内の空調環境への人の快・不快の心理反応には、PMV で評価される熱刺激の側面だけでなく、空気環境によって人体に生じる変化、例えば皮膚の乾燥や倦怠感、体調不良なども影響することが知られている¹⁾⁴⁾。

近年は、空調機器の性能進化により、加湿機能を付加したものが上市されており、さらに2019年末から社会不安を引き起こしている新型コロナウイルスパンデミックでは、換気機能が付加された空調が望まれるなど、今後、より付加価値の高い空調機器、システムの普及が望まれる。また、省エネ法トップランナー制度等を受けて、人だけではなく地球にも優しい空調システムの開発も継続的に進んでいる⁵⁾。

これまでの空調機器の主な価値提供は、快適な温熱環境であったが、今後は、温熱環境の快適性に加えて、さらに人にも地球にも優しい機能が付与される可能性が高い。そのため、これらの機能も含めて空調機器・システムの性能を統合評価できる手法の確立が望まれる。

外部刺激に対する人の心理反応を定量評価して開発等に活用する事は、食品分野で官能評価試験として以前より実施されている⁶⁾⁷⁾。官能評価では、分析機器はパネラー（人）で、食味等の外部刺激に対し、パネラーが惹起した感想を文字化し、さらに尺度付けすることで、定量可能な計測値としている。その手法には、定量的記述分析法（Quantitative Descriptive Analysis, QDA 法）やSD法（Semantic Differential）がある。本報では、空調環境の新たな快適性評価手法確立の一助となるよう、QDA法を用いて、空調方式の異なる空調機の快適性評価を行い、PMV評価との比較検討を行った。試験は空間の温熱環境の制御方法が異なる輻射熱空調と、ヒートポンプ式

空調が設置されたモデル住宅を対象に実施した。

2. 試験方法

2.1 空調機器と試験空間、測定機器の概要

実験の概要と実験で使用したモデル住宅の概要を表-1と図-1に示す。実施時期について、PMV、QDA計測時の試験場所の平均外気温は30.8℃、相対湿度は65.9%であった⁸⁾。設置されている空調機器の性能は表-2に示す。既存のモデルルーム棟を実験場所としたため、比較する2棟で空間容積、設置設備が異なるため、空調機器のエネルギー効率比較は行えなかった。

表-1 試験概要

実施時期	2017年8月17日13時～ QDA 事前準備 2017年8月18日9:20～11:40 PMV、 QDA 計測
試験場所	戸建て住宅モデルルーム2棟 (輻射熱空調設置棟/ヒートポンプ空調設置棟) 住所: 福岡県福岡市西区今津
試験条件	各室の中央(定点)で26℃になるように調整
物理量 計測項目	屋外: 外気温・湿度・肌水分・油分量 屋内(4地点): PMV・温度・湿度・壁面熱 放射温度・風速・電力消費量・肌水分・油分量
パネラー	20才代女性・10名
代謝量	1met 椅座安静状態
着衣量	0.3clo 半そでTシャツ+スカート(ひざ丈程度)

PMV計測には、京都電子工業製AM-101を用い、図-1に示した計測位置の床上120cmの位置で、QDA評価試験の間連続して計測した。QDA評価は、パネラー等を変えて繰り返し

*福岡女子大学・国際文理学部・環境科学科 教授・工博

Prof., Department of Environmental Science, International College of Arts and Science, Fukuoka Women's University, Dr. Eng.

し計測したが、その各回を1タームとし、PMVは各ターム間の値を平均化してその値とした。肌水分量はモリテックス社製 Triplesense を用いて、各ターム時間終了直前に全パネラーの額と目尻で値を計測した。



図-1 実験住宅とパネラー配置位置の概要

表-2 空調機器の概要

	輻射熱空調機	ヒートポンプ空調機
空調機概要	AEYC-0640M (長府製作所製) ラジエーターによる熱交換・ 輻射空調	MSZ-GE4017S-W (三菱電機製) 家庭用エアコン
運転条件等	【ラジエーター】 循環水量 8L/min 循環水温度(冷房) 7°C 循環水温度(暖房) 50°C 熱交換面積 20.1m ² 【空調温度制御】 循環水温度にて制御	冷房能力4.0kW 暖房能力5.0kW

2.2 QDA 評価法

QDA 評価の手順を表-3 に示す。試験手順は、食品の官能評価試験で実施される方法に準拠した^{6,7)}。試験結果は、抽出された特性評価用語ごとに各パネラーの繰り返し試験結果を積算して平均値とした。また、各特性評価用語別の平均値を全平均して空間の QDA 平均値も算出した。その上で、各各特性評価用語平均値、QDA 平均値と同時に測定した各物理量との相関は、ピアソンの積率相関分析で評価した。

表-3 QDA 評価法手順の概要

作業項目	作業の概要
1)事前準備	
言葉出し	・全パネラーで試験対象空間を体験し、空間の快適性、不快性を表現できる言葉を各パネラーが書き出した。
特性表現用語の選定	・全パネラーで書き出された特性表現用語を類似表現ごとに集約し、用語を絞り込んだ。その上で各用語の快適性を、7を快適、4を中庸、1を不快とする7段階で尺度付けした。
2)評価試験	<ul style="list-style-type: none"> ・パネラーを5人1組とし、2組設定した。 ・各組が輻射熱空調棟とヒートポンプ空調棟に25分間滞在し、図-1に図示した着座位置に着いて、事前準備で設定した特性表現用語の5段階尺度を決定した。 ・これを1タームとし、両試験棟で順番に試験した。 ・さらに、着座位置を変えて繰り返し、全4ターム実施した。 ・各ターム評価の前に20分間外気浴し、前評価空間の印象を最小化した。

3. 結果と考察

3.1 冷房時の評価

(1) 特性表現用語の選定

QDA 事前準備試験で空調空間の快適性、不快性を表現する用語をパネラーから収集し、共通概念ごとに類型化した。結果を表-4 に示す。類型化された快適性表現用語は、その指標の最大の快適を表す7から、中庸の4、最も不快の1で尺度付けして QDA 評価指標とした。

表-4 特性表現用語の抽出と分類結果

言葉出し結果	類型化
全身の冷え方、末端が冷える、体感に変化する速度等	自然な冷感
体のだるさ、頭痛など	倦怠感
乾燥、鼻と喉が気持ち良い、しっとり感など	うるおい感
におい、消臭など	におい
静か、騒音がない、音など	静穏性
温度の安定さ、温度の変動、全体の涼しさなど	温度均一性

(2) 試験空間の影響

試験空間での計測値の分布を表-5 に示す。定常状態では、輻射熱空調は、空間の温度分布の均一性が高いことが知られている⁹⁾。しかし、試験時は、試験空間にパネラーと試験関係者が出入りを繰り返していた。試験時間には、空間に10人超のパネラー、関係者が一定時間入室したが、その時の発熱量は100W/人として4MJ程度と見積もられ、自然対流で室内空間

の温度制御等を行う輻射熱空調では、空間の温度上昇や温度分布の不均一化等の温熱環境の変化が想定されたが、表-5に示すように、空間的な均一性も、試験時間を通した時間的な均一性も高かった。これは、試験空間の壁面放射温度が、空間温度とよく一致しており、壁面を含めた空間の熱容量が十分に大きいことによる緩衝効果と考えられた。なお、輻射熱空調では、ラジエータパネルの水温を設定することで室温を調整するため、部屋中央の温度が26℃よりも高めになった。ヒートポンプ式空調では、部屋の中央は、設定温度通りの室温となっていたものの、送風循環のための風がパネルに直接当たる機器前では、設定温度以下に低下していた。

表-5 試験空間の特性

項目		輻射熱空調		ヒートポンプ空調	
		①機器前	②部屋中央	③機器前	④部屋中央
室温(℃)	平均値	26.8	27.6	24.0	26.0
	標準偏差	0.360	0.412	0.623	0.464
輻射温度(℃)	平均値	25.6	27.4	24.6	26.3
	標準偏差	0.372	0.518	0.460	0.489
相対湿度(%)	平均値	65.70	59.67	57.44	47.98
	標準偏差	4.172	5.144	4.727	4.470
風速(m/s)	平均値	0.006	0.009	0.195	0.070
	標準偏差	0.009	0.011	0.077	0.033
PMV	平均値	0.20	0.31	1.68	0.43
	標準偏差	0.177	0.200	0.439	0.221
QDA	平均値	6.2	6.22	2.92	3.5
	標準偏差	0.743	0.678	0.371	0.588

(3) PMV 値と QDA 値

計測した PMV 値を表-5に、QDA を評価指標ごとのレーダーチャートとして図-2に示す。また QDA の全評価指標の平均値は QDA 平均値として表-5に示した。QDA で抽出された評価指標は、主に室内の温熱環境によって引き起こされる身体反応に起因した心理面の反応である「自然な冷え感」、「倦怠感」、「うるおい感」と、空調機器の運転に伴って生じる空間での音、匂い環境変化によって生じる心理的反応の「静寂性」、「匂い」が抽出された。

「静寂性」は、室内空気の攪拌に可動部を有しない輻射熱空調が、ファンで強制送風するヒートポンプ式空調より在室者に与える心理的ストレスが小さいことがわかる。「匂い」に関しては、輻射熱空調がヒートポンプ式空調より快適性が高い結果となった。輻射熱空調機は定期的にラジエーター部の掃除が為され、ヒートポンプ式空調は本試験に合わせて新型品に交換しており、「匂い」の原因が空調機のラジエーター部の汚れの可能性は低い。今回試験で使用したモデルルームは、被験者が空調機器等住宅設備の性能を宿泊して体験できる施設で、2015年から供用されている。そのため、長年の使用に伴う生活臭が壁紙等に付着し、その放出臭が、今回の試験結果に影響した可能性が考えられた。

次に、空気環境の熱刺激によって人に惹起される心理面の変化と、PMV、QDA 評価で表現される尺度との関係を考察した。至適温度域とされている PMV 値が±0.5 内に入る輻射熱

空調の両試験位置(図-1中の①、②)の QDA 特性とヒートポンプ式空調の中央位置(図-1中の④)の QDA 特性は、レーダーチャートのプロフィールが大きく異なることがわかった。また、ヒートポンプ式空調では、その評価位置で QDA の「自然な冷え感」への評価が大きく異なり、本実験条件下では、機器からの冷風が直接パネルに当たる位置では、評価結果が悪化する結果となった。

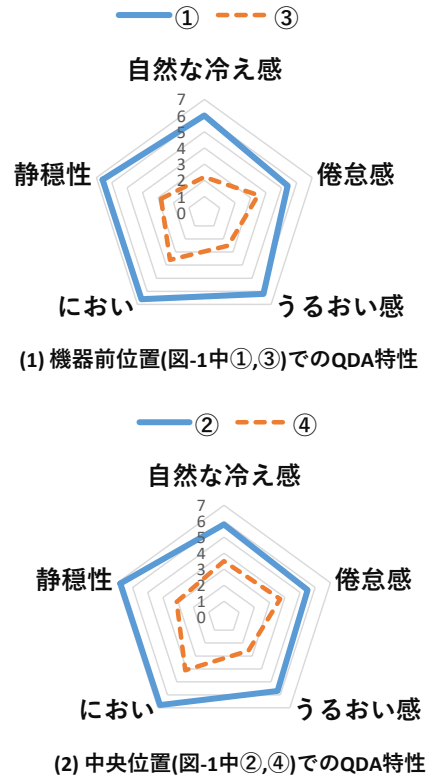


図-2 試験空間の QDA 特性

感性工学手法で快適性を評価した QDA 平均値と空間設計に多用される PMV の絶対値に関し、試験空間ごとに関係性を確認した。図-3に示す。QDA 平均値と PMV 絶対値との間に相関は認められず、空調方式で明らかに傾向が異なる結果となった。両手法での評価結果の差を考察するため、PMV 算定の元となっている物理量と QDA の各指標との相関を分析した。

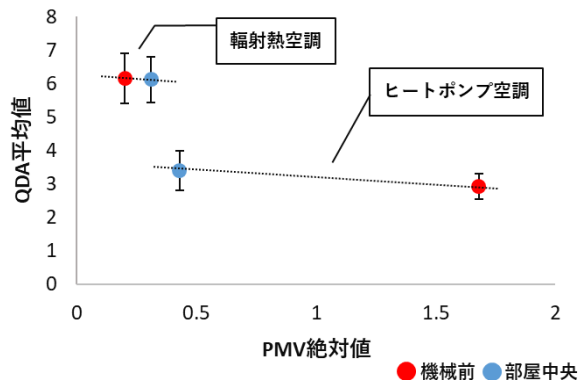


図-3 空調空間の PMV と QDA 平均値との関係

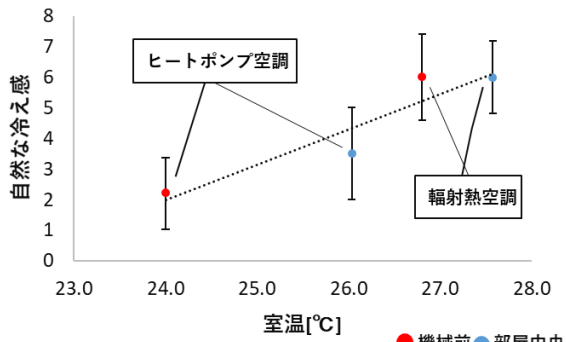


図-4 自然な冷え感と室温との関係

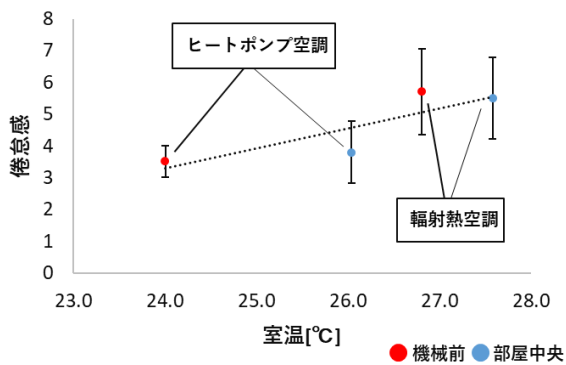


図-5 倦怠感と室温との関係

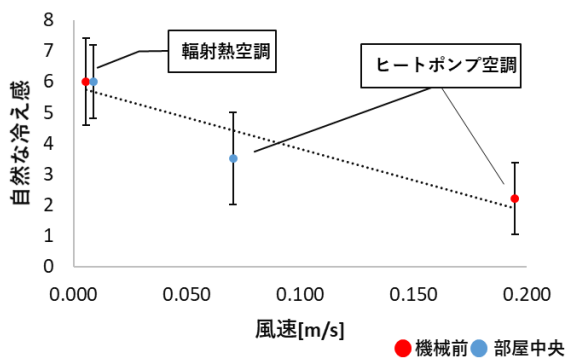


図-6 自然な冷え感と風速との関係

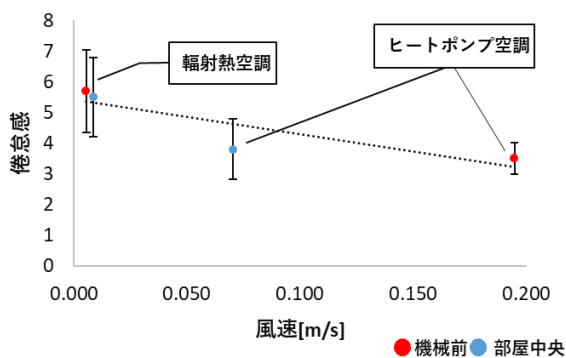


図-7 倦怠感と風速との関係

食味等の官能評価に適応される QDA 評価法は、その評価基準等が確立して広く活用されているため、パネラーの評価水準を合わせるための事前評価試験が行われる。しかし、空間の快適性評価では、尺度評価の基準はまだなく、本試験でもパネラーの評価レベル合わせを行っていない。そのため、パネラー間のばらつきが生じた。しかし、「自然な冷え感」、「倦怠感」と室温、風速との間には、有意な相関が認められた。図-4 から 7 と、表-6 に結果を示す。なお、図中の近似直線は、視認性を確保するため、破線で示した。

表-6 各パラメータ間の相関関係

		気温	放射温度	相対湿度	風速
QDA 平均	相関係数	0.828	0.546	0.648	-0.807
	有意確率	0.011	0.162	0.082	0.015
自然な冷え感	相関係数	0.871	0.622	0.53	-0.845
	有意確率	0.005	0.1	0.176	0.008
倦怠感	相関係数	0.726	0.475	0.676	-0.695
	有意確率	0.041	0.235	0.066	0.056
うるおい感	相関係数	0.775	0.486	0.739	-0.762
	有意確率	0.024	0.222	0.036	0.028
匂い	相関係数	0.792	0.508	0.624	-0.764
	有意確率	0.019	0.199	0.098	0.027
静穏性	相関係数	0.842	0.546	0.601	-0.833
	有意確率	0.009	0.161	0.115	0.01

空間からの熱刺激によって生じる身体反応は、皮膚からの熱と水分との移動現象として捉えることができる。この熱と水分の移動は、図-8 に示すように、皮膚表面の拡散層（境膜）に形成された温度勾配あるいは水分濃度の勾配を駆動力として起こる移動現象である¹⁰。この勾配は、境膜を挟む両層の温度差で決まる。また、境膜の厚さで決まるが、境膜の厚さは風速で変化する。「自然な冷え感」という特性表現用語は、皮膚から空間への熱移動によって身体に生じた心理的反応とすると、心理的反応と温度、風速との高い相関が説明できる。一方、「自然な冷え感」は、人が評価空間に暴露された場合に早期に惹起される感覚であるものの、「倦怠感」は、皮膚からの熱移動による身体的ストレスが蓄積することで生じる身体変化が原因と考えると、今回の試験結果での両評価指標の相関の差を説明できるかもしれない。今回の試験が 25 分間暴露と短時間であったため、早期に惹起される「自然な冷え感」は、人の肌から熱移動を起こさせる温度と風速に強い相関を示し、その熱移

動の蓄積によって生じる心理的ストレスの表現形態である、「倦怠感」は、今回の試験時間では評価される程度の心理的变化に至らなかったと考えられる。

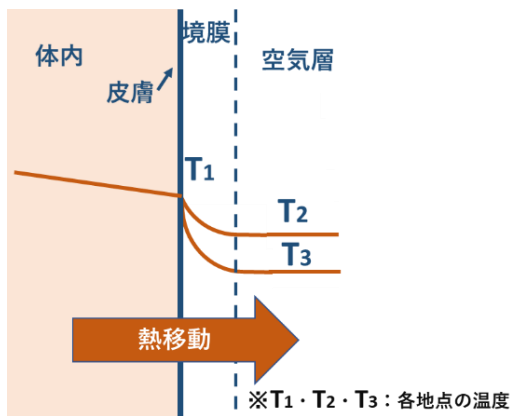


図-8 身体からの熱移動モデル図

(4) 肌のうるおい感への空調方式の影響

パネラーの肌の水分量と、空間の相対湿度、QDA 評価でのうるおい感指数との関係を表-7 に示す。建築物室内での至適相対湿度は 55-70%とされている¹¹⁾。また、一般に肌に良い湿度は 50-60%とされているが¹²⁾、今回の試験は、快適に感じつつ、肌にも優しい条件であったことがわかる。肌水分量の計測に当たっては、試験室内に入る前の外気浴中の値も計測している。図-9 に示す。各パネラーで肌水分量に関しては個人差が大きいものの、外気環境下では、肌水分量は平均で 68%あったものが、空調室内滞在 25 分で 15%ほど水分が失われ、空調方式による差は認められなかった。傾向は、目尻の水分量測定でも同様であった。

表-7 肌のうるおい感への空調方式の影響

項目		輻射熱空調		ヒートポンプ式空調	
		①機器前	②部屋中央	③機器前	④部屋中央
相対湿度 (%)	平均値	65.70	59.67	57.44	47.98
	標準偏差	4.172	5.144	4.727	4.470
うるおい感	平均値	6.0	6.0	2.5	2.6
	標準偏差	1.000	0.632	1.204	1.020
肌水分量	平均値	53	52	55	54
	標準偏差	17.117	17.116	12.290	16.855

肌の水分量変化は、皮膚内外の水分濃度、水蒸気圧差を駆動力とする水の移動現象と考え、駆動力が大きくなる乾燥空間内の方が肌の乾燥は進むとも考えられたが、計測値では、空間の相対湿度による肌水分量への影響は認められなかった。肌内部から表面への水分の拡散供給が律速段階と捉えたと測定結果に整合性が得られる。本推察は、肌暴露空気中の水分率を変えては肌水分量変化を調べた開原らの研究結果と一致する¹³⁾。

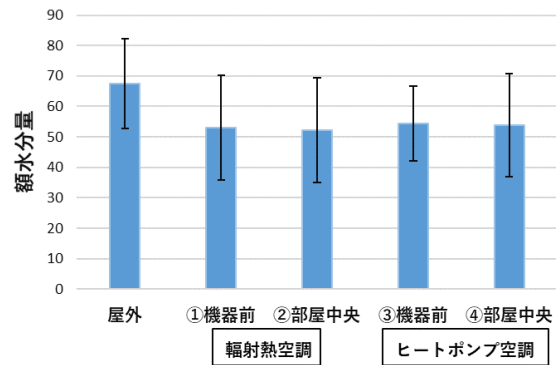


図-9 各測定位置での額水分量の平均値と標準偏差

本研究で採用した輻射熱空調は、縦型のパネルを室内に設置し、最低 7℃の冷水を供給することにより、パネル表面で冷却除湿させ、その結露水をドレンで排出している。また、室外機内部にヒートポンプサイクルが入っており、そこで熱交換して冷やした冷水を室内のパネルへ供給している。つまり、室外機内部で、空気→水(循環液)による熱交換をおこなったものを循環させ、室内のパネルで放射および空気との熱交換により、冷房している。一方、本研究で採用したヒートポンプ式空調(家庭用エアコン)では、室外機から室内機のヒートポンプサイクルで、室内機で直接空気を当てて熱交換している。また、実験を行ったモデルルームの換気はいずれも第 3 種換気となっており、トイレ、浴室、キッチンの 3 か所で換気を行うが、実験時はいずれの換気扇も停止していた。

空調方式による肌の乾燥に関して、快・不快と感じる心理的側面は、表-6 の「うるおい感」で示されるごとく、空調方式によって差が生じていた。これは、輻射熱空調では自然な除湿で空気をかきまわさないのに対し、ヒートポンプ式空調(家庭用エアコン)では、除湿した空気をかきまわすこと、ヒートポンプ式空調の方が輻射熱空調に比べて除湿量が多かった可能性があると考えられるが、今回の実験では除湿量の比較は行っていない。要因の解明には、今後の更なる研究を待ちたい。

4. 結言

輻射熱空調とヒートポンプ式空調で冷房された室内の快適性を PMV と QDA 法で評価し、結果を比較した。冷房環境下では、人の身体から熱や水分が空気中に放出されるが、その放出速度は、空間の気流と温度の影響を受ける。身体からの熱、水分放出が過剰となると、心理的ストレスを生じさせ、過剰な冷え感、倦怠感と表現される不快感を惹起させている可能性が試験結果から示唆された。この PMV では表現されて来なかった心理的側面に着目すると、PMV では同等の快適性評価として表現される輻射熱空調とヒートポンプ式空調の快適性を定量的に区別することができるようになる。

本研究では、空調空間の快適性評価方法として、パネラーによる官能評価試験方法である QDA 法が、従来建築分野等で多用されている PMV では表現しきれなかった人の倦怠感等の心理的ストレスも評価に織り込めることを明らかにした。しかし、QDA 法は、複数のパネラーで空間の快適性を表現できる特性表現用語を言葉出しで抽出し、その後尺度付けをしたうえで、対象空間の評価を実施するという、煩雑な工程が必要

で、実務に耐える評価法とは言い難い。また、今回の QDA 評価では、通常の官能評価試験で実施されるパネラーの評価レベルを合わせる事前準備を行わなかった。そのため、各特性表現指標の尺度値がパネラーによりばらついた。空間の快適性評価へ QDA 法を適用させるには、多くの研究者によって、特性表現用語の選定が進められ、それらの知見が統合されて、事前に特性表現用語と尺度を固定化した簡便な評価法に発展させて、多様な場面に容易に適合できるように進化させる必要がある。そのための一助として本研究成果が活用されることを期待する。

[謝辞]

本研究は、KFT 株式会社（現：FUTAEDA 株式会社）との共同研究として実施した。実験にご協力いただきました、同社代表取締役社長 二枝たかはる氏、宮本直幸氏ならびに当時福岡女子大学卒論生の周曉慧氏に深謝いたします。

[参考文献]

1. 柳瀬 友輝、伊香賀 俊治、佐藤 啓明、清水 洋、伊藤清、川上 梨沙：オフィスの冷房方式の違いが執務者に及ぼす影響に関する被験者実験（その 1）：冷房方式による室内環境の違いが皮膚表面温度・心理量・知的生産性に及ぼす影響、日本建築学会環境系論文集、86、781、205-214(2021)
2. 岡田 睦美、宇野 充子、永野 英子、野村 義治、大平哲也、佐藤 眞一、橋本 喬：冷え症における冷水負荷サーモグラフィと循環器検診成績、生活習慣との関連、Biomedical Thermology、第 24 巻、第 3 号、pp.44-50、2005
3. 土屋 基、鈴木 勝彦、井上 忠夫、橋口 和洋：異なる気候条件下で暮らす女子高生の「冷え症」と生活状況の検討、民族衛生、第 71 巻、第 5 号、pp.207-218、2005
4. 高尾 文子、東真 由果、石井 洋三：大学生の冷え症に関する研究—疲労および食生活との関連、Biomedical Thermology、第 24 巻、第 3 号、pp.51-57、2005
5. 長友繁美：空調分野における省エネルギー技術について：ルームエアコンディショナの効率向上技術、日本マリンエンジニアリング学会誌、44、5、713-718(2009)
6. 飯塚 佳子、森田 香絵、相島 鐵郎：講座 定量的記述分析法(QDA 法)の特徴と展望、日本官能評価学会誌 6(2)、138-145、2002-09
7. 今村 美穂：記述型の官能評価／製品開発における QDA 法の活用、化学と生物、50、11、818-824(2012)
8. 気象庁ホームページ：過去の気象データ、<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
9. 鶴飼 真成、高橋 満博、村上 宏次、雨宮 沙那、野部達夫：S ビルにおける室内温熱環境調査と執務者の受容性に関する考察、日本建築学会環境系論文集、第 81 巻、第 724 号、pp.535-543、2016-06
10. 高田 暁：人体熱モデルを用いた 体温調節反応の解析、<http://www.netsubussei.jp/group/takada4.pdf>
11. 小林 陽太郎、他：ビルディングの環境衛生に関する研究、昭和 40 年度厚生科学研究、1966
12. ウェザーニューズ、専門医が教える！ 冬の肌に快適な

湿度とは？、

<https://weathernews.jp/s/topics/201901/080125/>

13. 開原 典子、高田 暁：周辺空気の絶対湿度変化に対する皮膚含水率の経時変化の測定、人間と生活環境、21(2)、67-74、2014