

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420618

研究課題名(和文) 居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法の実験検証

研究課題名(英文) Experimental Verification on Air-conditioning Load Calculation Method Considering Thermal Sensation of Resident

研究代表者

崔 軍 (CUI, Jun)

近畿大学・工学部・教授

研究者番号：90320340

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：現在の空調負荷計算法は、負荷計算の段階では居住者の温冷感を十分に考慮していない問題がある。この問題に対し、筆者は、空調負荷を再定義し、現在の負荷計算法を包含できる新しい負荷計算法として「居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法」を提案した。これまでは、この新しい計算法について一連のケーススタディを行い、その有効性を明らかにした。

本研究では、エアコンと壁放射パネルについて、温度センサーの設置位置や温度設定値の違いによる投入熱量を測定し、投入熱量と新しい負荷計算法で予測した結果との整合性を分析して「温冷感法」の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：There is a problem that resident's thermal sensation isn't being considered sufficiently in the stage of load calculation with the current air-conditioning load calculation method. To settle this problem, I changed the definition of air-conditioning load, and showed an "air-conditioning load calculation method considering resident's thermal sensation" as new calculation method. Up to now, the validity of this new calculation method was done clearly by several numerical simulations.

This research measured input energy of heating panel in different experimental conditions and confirmed the validity of the new load calculation method using measured Input Energy.

研究分野：建築環境工学

キーワード：空調負荷計算 温冷感 PMV 実験検証

1. 研究開始当初の背景

(1) 空調負荷計算法は、空調システム設計の基礎であり、空調エネルギー消費量を大きく左右するものである。1967年に応答係数法^{1,2)}が提案され、現在の非定常負荷計算法の基礎が築かれた。その後、負荷計算に関する研究が盛んに行われ、計算時間の短縮^{3,4)}、コンピューター記憶容量の節約^{5,6)}、時変係数⁷⁾及び熱伝導方程式の非線形性⁸⁾への対応などの工夫によって数多くの計算法が提案された。しかしながら、現在では、空調負荷は、室内空気温湿度を一定に保つために室内空気に供給すべき熱量として定義され、一定の温湿度が維持されたときに壁体などから室内空気への伝達熱量として計算されているため、各種の計算法は細部に違いがあるものの、負荷計算の段階において居住者の温冷感が十分に考慮されていない点には変わりがない。

(2) このような問題に対し、筆者は、空調負荷の定義を改め、室内のある計算対象点での温冷感を設定値に保つために室内(空気や壁面など)から除去すべき熱量を空調負荷として再定義し、現在の負荷計算法(以下、「現行法」)を包含できる新しい負荷計算法(居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法、以下、「温冷感法」)を提案した^{9,10)}。

2. 研究の目的

これまで、「温冷感法」について、シミュレーションを用いて一連のケーススタディーを行い、その有効性を計算で明らかにした。しかし、「温冷感法」を実用化させるため、その有効性を実験でも検証しておかなければならない。そこで、本研究では、「温冷感法」に指摘された事項を実験で検証し、その有効性を確認することを目的とした。

3. 研究の方法

「温冷感法」では、空調負荷は、温冷感評価指標によって異なるが、計算アルゴリズム上、とくに評価指標を限定しない。本研究では、空気温度、グローブ温度及びPMVを温冷感評価指標として用いた。

実験は、エアコンと壁放射パネルを用いて、温度センサーの設置位置や温度設定値を変えて投入熱量を測定する。測定した投入熱量と「温冷感法」で予測した結果との整合性を分析し、「温冷感法」の有効性を確認する。

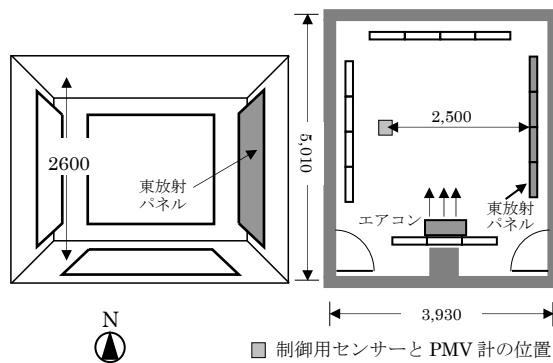
4. 研究成果

ここでは、壁放射暖房実験の結果について報告する。

(1) 温冷感を室温及びグローブ温度で評価する場合の壁放射暖房の投入熱量について

① 実験条件

実験室(図1)は、研究棟(RC造、3階建



(a) 放射パネルの配置 (b) 測定点の配置

図1 実験室(単位:mm)

表1 測定項目(測定時間間隔:1分)

測定項目	測定機器、設置位置、測定点数
外気温度	T型熱電対、φ0.32mm、地上1.2m、計1点
周辺室温	市販温湿度センサー、床上1.2m、計4点
パネルなどの表面温度	T型熱電対、φ0.32mm、東パネル4点、北・西・南・床パネル各1点、天井面1点、計9点
室温	T型熱電対、φ0.32mm、計20点 4箇所(北東・北西・南西・南東)の上下温度: 床上0.1m、0.6m、1.1m、1.7mm、天井下0.1m
グローブ温度	φ0.32mmのT型熱電対をグローブ球内に挿入、床上1.2m、4箇所、計4点
PMV	PMV計、床パネル上0.6m、1.2m、(着衣量:0.88clo、代謝量:1.1met)、計2点
パネルの表面熱流	市販熱流計、表面4点(MF-190)、裏面3点(MF-200)、裏面1点(MF-180)、計8点

表2 実験パターン(2015年)

制御方式	温度設定値 ^{*1}	実験期間	実験最後3時間半の平均温度 ^{*2}
室温制御実験	20℃	12月7日 21:50~7:20	21.6℃
	22℃	12月6日 23:00~8:30	23.5℃
	24℃	12月6日 2:30~10:00	25.3℃
	26℃	12月4日 1:10~10:40	27.1℃
グローブ温度制御実験	20℃	12月10日 22:30~8:00	21.7℃
	22℃	12月11日 22:30~8:00	23.1℃
	24℃	12月9日 22:30~8:00	24.2℃
	26℃	12月8日 22:30~8:00	25.9℃

*1: 室温制御実験では室温設定値、グローブ温度制御実験ではグローブ温度設定値を意味する。

*2: 室温制御実験では平均室温、グローブ温度制御実験では平均グローブ温度を意味する。

て)の1階北側に位置し、内壁に囲まれているため、外界気象条件の影響を受けにくく暖房負荷が生じにくい。この問題に対処するため、暖房実験は、実験室周辺部屋の窓を開放し、外気温度が低くその変化の少ない夜間で実験を行った。実験室内には東側、西側、北側、床にそれぞれ4枚、南側に3枚の計19枚の放射パネル(1,600H×600Wmm)が設置されている。実験室の天井高は2.6mで、壁パネルの下端は、床面から0.43m、床パネルから0.36m離れている。今回の放射暖房実験は、

東パネル（4枚）のみを使って行った。他のパネルには温水を流していない。アルミで作られたパネルは白色のペイントで塗装されている。実験中に実験室東・西側の扉が閉まっているため、隙間風がないものとする。実験室の熱損失係数は $3.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ である。

② 実験方法

測定項目と測定点は図1、表1に示す。東パネルから 2.5m 離れたところに、床パネル上 0.6m（以降、高さ 0.6m）と 1.2m（以降、高さ 1.2m）の高さに PMV 計 2 台を設置した（図1）。この 2 点を「対象点」として、その PMV、温度、湿度、気流速度、グローブ温度（平均放射温度から算出）を 1 分間隔で測定した。

室温（グローブ温度）制御実験では、高さ 1.2m の「対象点」に温度（グローブ温度）センサーを設置して室温（グローブ温度）を検知しその信号を用いて電動三方弁の開度を調節することによりパネルへの送水温度をコントロールする制御方式をとっている。

実験パターンを表2に示す通りである。実験条件を統一させるため、各実験の間に 13 時間以上の非暖房時間を設け、その間、パネルへの送水を停止して実験室の扉を開放し換気扇で換気する。各実験の時間を 9 時間 30 分とする。最初の 30 分間はデータ収録をするがパネルに送水しない。実験開始 30 分後からパネルへ送水する。パネルの投入熱量は、パネル表面及び裏面に貼付した熱流計の出力電圧を測定しそれを各熱流計特有の感度係数で除して求める。

③ 温度制御実験の結果

実験設備の制約上、実験室の周辺室温がコントロールできなかったが、実験期間中の実験室周辺室温が約 $8 \sim 11^\circ\text{C}$ で、概ね安定していた（図2）。各実験では、「対象点」の室温（床パネル上 1.2m の PMV 計の値）を図3に示す。図より、室温が暖房開始から設定値になるまでの時間は、室温設定値により大きく異なり、室温設定値が 26°C の場合は最も長く約 4.5 時間かかることがわかる。また、いずれの実験においても、実験開始から 6 時間後（実験終了までの最後の 3.5 時間）の室温は、設定値の近傍で推移しほぼ周期的定常状態になったことがわかる。

各実験の PMV（床パネル上 1.2m の PMV 計によるもの）を図4に示す。室温と同様に実験開始から 6 時間後の PMV もほぼ周期的定常状態になり、 ± 1.0 の範囲内に収まっている。

各実験の投入熱量を図5に示す。設定室温が 26°C の場合、パネルの投入熱量が暖房開始時から約 5.5 時間の間に約 $1,000\text{W} \sim 1,200\text{W}$ の値で推移し、その後は室温を設定値に保つために大きく増減している。設定室温が 24°C 、 22°C 、 20°C と低下していくと、投入熱量は比較的早い段階から大きく増減することになった。

図6は、各実験（終了までの最後の 3.5 時

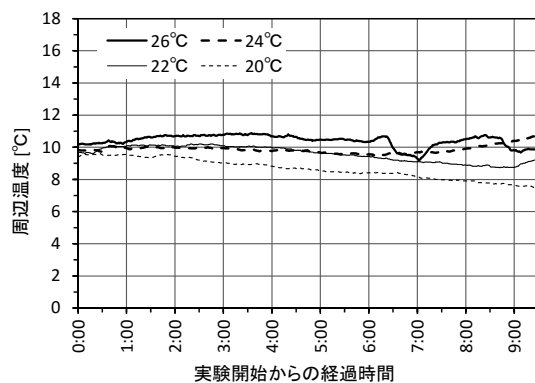


図2 周辺温度（温度制御実験）

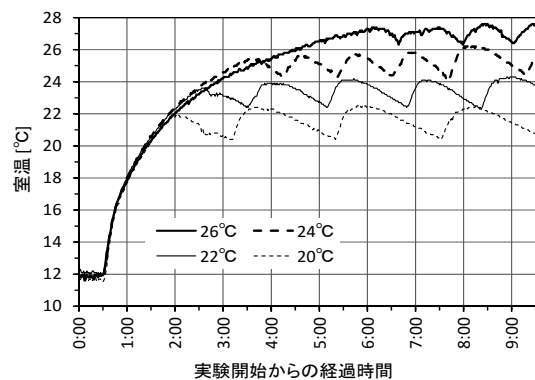


図3 室温（温度制御実験）

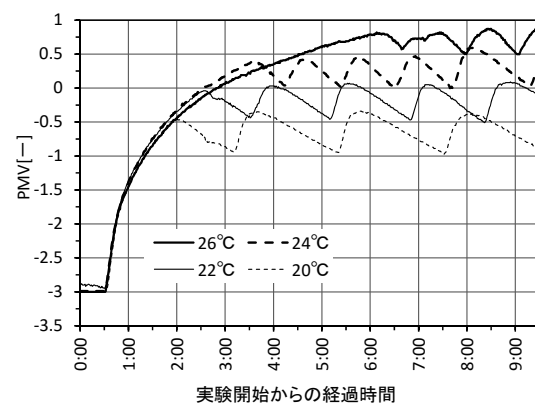


図4 室内 PMV（温度制御実験）

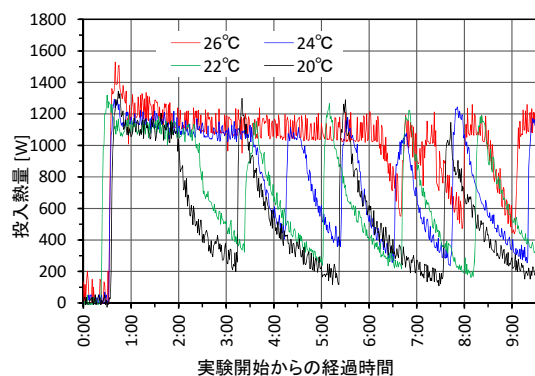


図5 投入熱量（温度制御実験）

間) の投入熱量の時間平均値と、高さ 1.2m の「対象点」における室温の時間平均値との関係を示したものである。この図から、「対

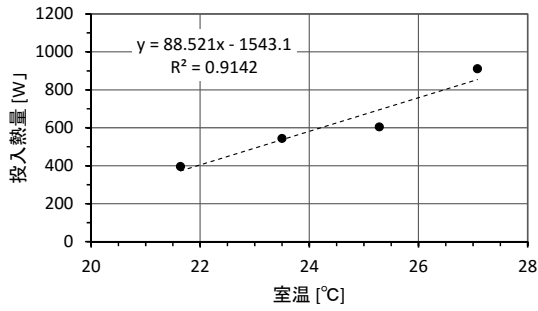


図 6 室温と投入熱量
(温度制御実験、高さ 1.2m)

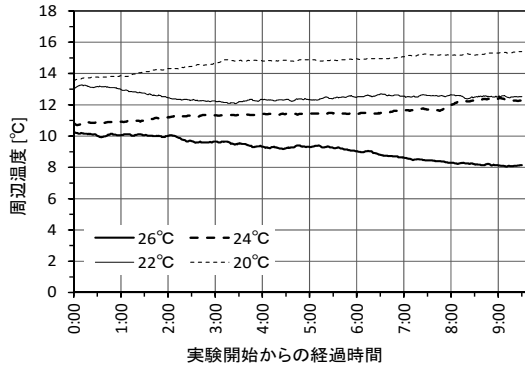


図 7 周辺温度 (グローブ温度制御実験)

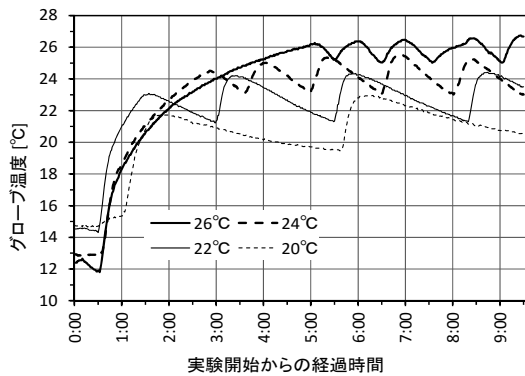


図 8 グローブ温度 (グローブ温度制御実験)

象点」の室温をある一定の値に保つための投入熱量を読み取れる。

④ グローブ温度制御実験

実験期間中の周辺気温が約 8~15°C で、「室温制御実験」の場合より若干高い (図 7)。図 8 は各実験のグローブ温度変化を示すものである。いずれの実験も実験開始 6 時間以降はグローブ温度がほぼ周期的定常状態になった。「グローブ温度制御実験」の PMV を図 9 に示す。実験開始から 6 時間以降は PMV がほぼ周期的定常状態になり、-0.6~+0.75 の範囲内に収まっている。

各実験の投入熱量を図 10 に示す。グローブ温度設定値が 26°C の場合、パネルの投入熱量が暖房開始時から約 4.5 時間の間に高い値 (1,000~1,200W) のままで推移し、その後はグローブ温度を設定値に保つために増減している。グローブ温度設定値が 24°C、22°C、

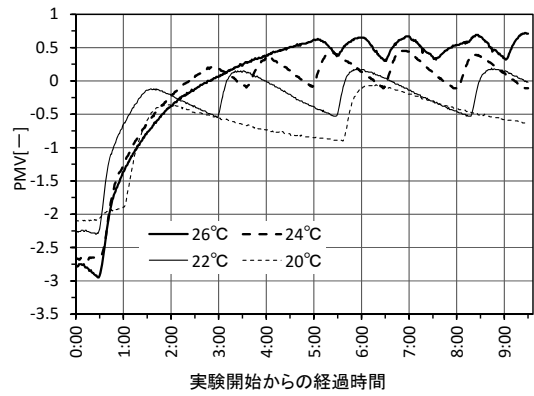


図 9 室内 PMV (グローブ温度制御実験)

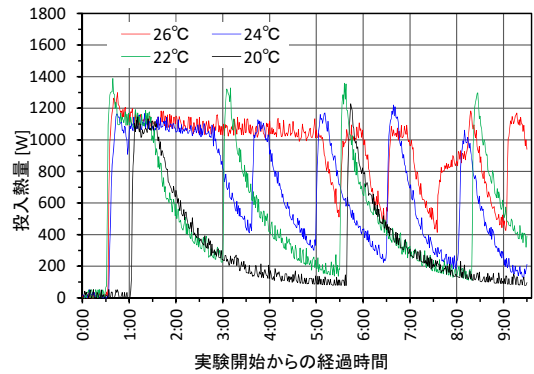


図 10 投入熱量 (グローブ温度制御実験)

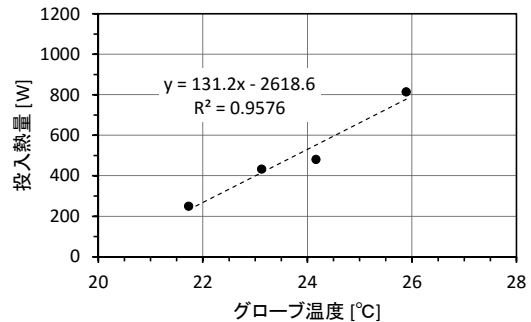


図 11 グローブ温度と投入熱量
(グローブ温度制御実験、高さ 1.2m)

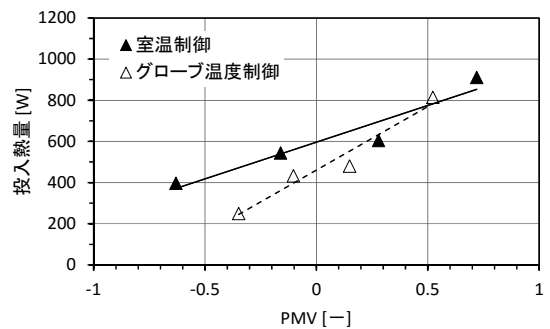


図 12 PMV と投入熱量
(室温制御実験・グローブ温度制御実験、高さ 1.2m)

20°C と低下していくと、投入熱量が著しく減少し、実験時間中に大きく変動している。

図 11 は、各実験 (終了までの最後の 3.5 時間) の投入熱量の時間平均値と、「対象点」におけるグローブ温度の時間平均値の関係

を示したものである。この図から、「対象点」のグローブ温度をある一定の値に保つための投入熱量を読み取れる。

⑤ 投入熱量と PMV の関係

今回の実験は、室温とグローブ温度を温冷感評価指標として用いたが、実験中に「対象点」での PMV も計測されているため、「対象点」の PMV と投入熱量の関係も図 12 のようにまとめた。図 12 から、投入熱量は要求された PMV (高さ 1.2m) により変わることがわかる。

⑥ 結果

「現行法」と「温冷感法」の最大の違いは、負荷を設定室温の関数として求めるか、要求された居住者の温冷感の関数として求めるかにある。「現行法」による負荷は、設定室温を維持するためのものと考えられる。それに対し、「温冷感法」による負荷は、居住者の温冷感を設定値に保つためのものと定義されている。

今回の実験では、快感空調の負荷が在室者の温冷感を考慮して求めるべきという「温冷感法」の基本方針を実験で確認できた。また、壁放射暖房の投入熱量(負荷)が「検討点」での温冷感(PMV)とほぼ直線関係にあることも明らかにした。

(2) 壁放射暖房の投入熱量に対する負荷計算対象点の高さの影響について

① 実験条件と実験方法

(1)の実験において、東パネルから 2.5m 離れたところに、床パネル上 0.6m と 1.2m の高さに PMV 計 2 台を設置していた(図 1)。この 2 点を「対象点」として、その PMV、温度、湿度、気流速度、グローブ温度(平均放射温度から算出)を 1 分間隔で測定した。ただし、制御用センサーは高さ 1.2m の PMV の近傍に設置している。

② 温度制御実験の結果

図 13、14 は、各実験(終了までの最後の 3.5 時間)の投入熱量の時間平均値と、高さ 1.2m の「対象点」における室温・PMV の時間平均値との関係を示したものである。「対象点」の室温を保つため、高さ 1.2m に比べ高さ 0.6m の方は、投入熱量が約 17% 高くなる(図 13)。また、「対象点」の PMV を保つためには、高さ 1.2m に比べ高さ 0.6m の方は、投入熱量が約 12% 高くなる(図 14)。

③ グローブ温度制御実験の結果

図 15、16 は、各実験(終了までの最後の 3.5 時間)の投入熱量の時間平均値と、高さ 1.2m の「対象点」におけるグローブ温度・PMV の時間平均値との関係を示したものである。「対象点」のグローブ温度を保つため、高さ 1.2m に比べ高さ 0.6m の方は、投入熱量が約

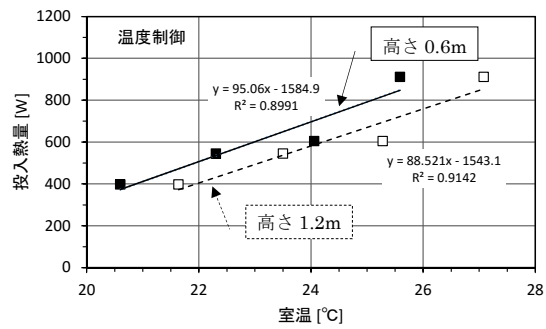


図 13 室温と投入熱量(室温制御実験)

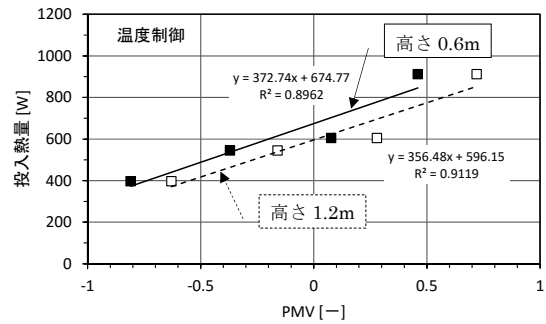


図 14 PMV と投入熱量(室温制御実験)

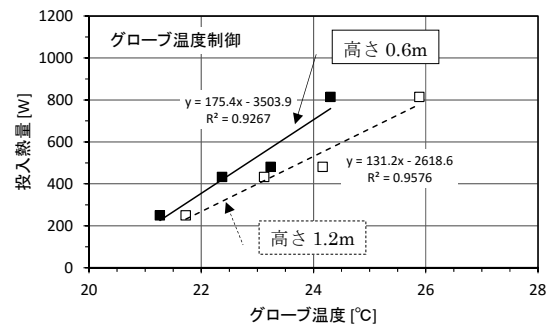


図 15 グローブ温度と投入熱量(グローブ温度制御実験)

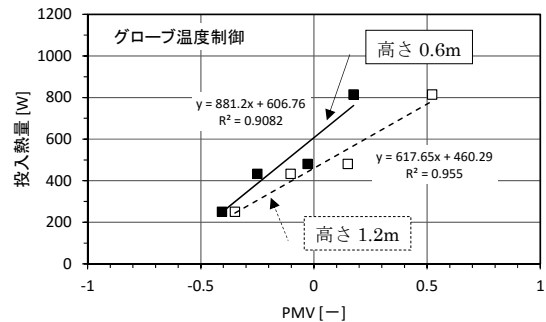


図 16 PMV と投入熱量(グローブ温度制御実験)

25% 高くなる(図 15)。また、「対象点」の PMV を保つためには、高さ 1.2m に比べ高さ 0.6m の方は、投入熱量が約 20~24% 高くなる(図 16)。

④ 結果

今回の実験では、「温冷感法」で示唆された、空調負荷が在室位置(高さ)によって変わることを実験で確認できた。また、今回の

実験条件においては、高さ 1.2m に比べ、高さ 0.6m の方は投入熱量が約 12~25% 高くなることがわかった。

(3) 結論

本研究を通じて以下の知見を得た。

① 快感空調の負荷が在室者の温冷感を考慮して求めるべきという「温冷感法」の基本方針を実験で確認できた。

② 今回の実験条件において壁放射暖房の投入熱量（負荷）が「検討点」の温冷感（PMV）とほぼ直線関係にあることがわかった。

③ 「温冷感法」で示唆された、空調負荷が在室位置（高さ）によって変わることを実験で確認した。

④ 今回の実験条件において、高さ 1.2m に比べ、高さ 0.6m の方は投入熱量が約 12~25% 高くなることがわかった。

「温冷感法」の計算モデルは、独創的なものであり、類似するものが報告されていない。

「温冷感法」の有効性を実験で確認できたことは、空調負荷計算に関する研究を大きく前進させるものである。今後、実務に向けた「温冷感法」の計算体系を構築できれば、空調システム設計に変革をもたらし、空調システムの省エネや CO₂ 排出量削減に貢献できると確信している。

<引用文献>

- 1) Stephenson, D. G. and Mitalas, G. P. : Cooling load calculations by thermal response factor method, ASHRAE Trans., Vol. 73, Part 1, pp. III. 1. 1-III. 1. 7, 1967
- 2) Mitalas, G. P. and Stephenson, D. G. : Room thermal response factors, ASHRAE Trans., Vol. 73, Part 1, pp. III. 2. 1-III. 2. 10, 1967
- 3) 松尾陽：壁体応答特性近似解法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 55-56、1969
- 4) 木村建一、石野久彌：時系列畳み込み積分の近似算法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 127-128、1971
- 5) 松尾陽：建物伝熱の近似解法とその応用、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 133-134、1971
- 6) 斎藤平蔵、李鍵、赤坂裕：Z 変換法による非定常伝熱計算法、空気調和・衛生工学、第 47 巻、第 9 号、pp. 1-9、1973
- 7) 中沢康明、岡田康郎：時変係数熱的系の遷移行列による解法について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 331-332、1975
- 8) 浦野良美、渡辺俊行、三木信博：逐次状態遷移法による多層壁体伝熱問題の近似解法（その 1 計算方法）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 387-388、1977
- 9) 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究、日本建築学会環境系論文集、Vol. 74、No. 638、

pp. 449-456、2009

- 10) 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究—潜熱負荷計算モデルについて—、日本建築学会環境系論文集、Vol. 80、No. 708、pp. 139-148、2015

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- ① 崔軍、渡辺俊行：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法に関する研究—潜熱負荷計算モデルについて—、日本建築学会環境系論文集、Vol. 80、No. 708、pp. 139-148、2015（査読あり）

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① 崔軍：居住者の温冷感を考慮した空調負荷計算法の実験検証 その 1 温冷感を室温及びグローブ温度で評価する場合の壁放射暖房の投入熱量、日本建築学会中国支部、2016. 3. 6、近畿大学（広島県・東広島市）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<http://www.archi.hiro.kindai.ac.jp/laboratory/EFL/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

崔 軍 (CUI, Jun)
近畿大学・工学部・教授

研究者番号：90320340

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：