HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	生理・心理反応に基づく病室の温熱環境変動の評価方法の検討
Author(s)	糸井川, 高穂; 羽山, 広文; 絵内, 正道 他
Citation	日本建築学会環境系論文集, 614, 79-86
Issue Date	2007-04-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50470
Rights	日本建築学会、本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
Type	journal article
File Information	AIJ.614.79-86.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Architectural Institute of Japan

【カテゴリーII】

日本建築学会環境系論文集　第614号，79-86，2007年4月
J. Environ. Eng., AIJ, No. 614, 79-86, Apr., 2007

生理・心理反応に基づく病室の温熱環境変動の評価方法の検討

EXAMINATION OF AN EVALUATION OF CHANGE OF THERMAL ENVIRONMENT BASED ON PSYCHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL REACTION FOR HOSPITALS

糸井川 高穂*1，羽山広文*2，絵内正道*3，菊田弘輝*4，山岸　浩*5
Takaho ITOIGAWA, Hirohumi HAYAMA, Masamichi ENAI,
Koki KIKUTA and Hiroshi YAMAGISHI

In medical facilities, the aim of room temperature is based on past studies for postures of standing and chair sitting, and on epidemiological knowledge. Studies aimed to clarify an evaluation of change of thermal environment based on psychological and physiological reaction for a posture of supine are needed. This report aims to exam an evaluation of change of thermal environment based on psychological and physiological reaction for hospitals. As a result, mean skin temperature for thermal neutralization became 33.7～33.8℃ and for maximum thermal comfort became 34.1～34.3 ℃ regardless of sex and cooling system almost equally to the value. Based on amount of physiological unit and psychological slope ratio, the radiant cooling system and convection cooling system has almost the same performance for hospitals.

***Keywords**: Hospital, MRT, PMV, SET*, Amount of physiological unit, Psychological slope ratio*
病室，平均放射温度，PMV，SET*，単位生理量，心理量変化率

1. はじめに

現在の医療施設の冷暖房において目安とされている室温や湿度は、定常な温熱環境における椅座や立位を対象とした既往の研究成果に基づいた値に病理学的な知見が加わった値であり、利用者が自分自身にとって心理的に快適と感じる温熱環境に空調設備の設定値を変更するといった温熱環境の変動が人体の生理・心理反応に及ぼす影響や、患者が長時間維持することを強いられる仰臥姿勢は考慮されていない。このため、室内温熱環境の変動による生理的な負担と心理的な快適性の不適合が生じる程度を検討した研究成果や、姿勢の影響を考慮した研究成果が求められている。加えて、近年医療施設では、従来の対流式冷房に加えて天井放射冷房の導入が進められており、これら2種類の冷房方式を対象とし、室温の設定変更や仰臥姿勢を考慮した研究成果は、医療施設の冷房の管理において有益な資料となる。

温熱環境の変動を対象とした研究[1)-3)]は過去に行われているものの、それらは温熱環境の変動が心理反応に及ぼす影響を検討することを主な目的としており、生理・心理反応を基にして温熱環境の変動を評価することを目的としていない。対流式冷房における至適域に関する研究[4)-11)]や天井放射冷房における至適域に関する研究[12)-16)]は数多く行われているものの、そのほとんどが椅座や立位を対象としている。また、対流式冷房と天井放射冷房の快適性について比較した研究[17)-23)]も盛んに行われているが、それらは温熱評価指標を用いるのみで、人体の生理・心理反応に着目しない場合が多い。病室を想定し、仰臥姿勢を対象として行われた研究[24)25)]においても、検討されている項目は、従来の温熱評価指標による評価に止まる。

本研究では、設定室温の変更に例えられる病室の温熱環境の変動を生理・心理反応に基づいて評価する指標として単位生理量および心理量変化率を定義し、検討した。さらに、病室を想定するものの

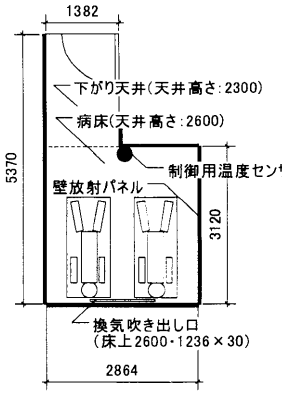

図1　人工気候室平面図
（単位・mm）

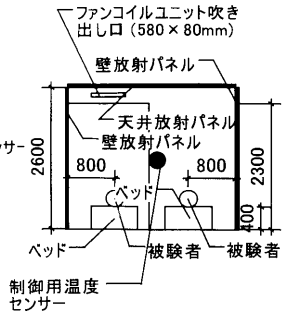

図2　人工気候室断面図
（単位・mm）

*1 北海道大学大学院工学研究科　大学院生
*2 北海道大学大学院工学研究科　助教授・博士(工学)
*3 北海道大学大学院工学研究科　教授・工博
*4 北海道大学大学院工学研究科　助手・博士(工学)
*5 ㈱トヨックス

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.
Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
Research Assoc., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.
TOYOX Co., Ltd.

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

実際の利用者である患者を被験者とすることは難しいため健常者を被験者とし、天井放射冷房とファンコイルユニットを採用した対流式冷房を用いた冷房環境への曝露実験を行ない、天井放射冷房と対流式冷房を単位生理量および心理量変化率で評価し、比較した。

2. 実験計画

2-1. 実験室

実験は2005年10月3日から10月31日に、株式会社トヨックス富山本社事務所棟内に病院の2床室を想定して試作した人工気候室で行った。人工気候室の概要を図1および図2に示す。人工気候室には、天井放射パネル、ファンコイルユニット（吹き出し口：580×80mm×有効開口率 80%）および換気設備（吹き出し口：1236×30mm）を組み込み、それぞれ独立した制御が可能である。人工気候室は、奥行き5370mm、幅2864mm、病床部分の天井高さ2600mm、出入り口部分の天井高さ2300mmで、床面積は約12.1m^{2}である。人工気候室の天井および壁には放射パネルをはめ込み、各面の放射パネルへの送水温度および送水量は各面独立して制御した。天井放射パネルの設置面積は約9.3m^{2}で、天井全体の約77%を占める。天井の放射パネルは、穴径1.0mm、厚さ0.7mmのパンチングメタルに内径2.3mmの配水管を10.0mm間隔で配置し、40.0mmの32Kグラスウールで押さえつけた構造をしている。また、壁の放射パネルは、15mm間隔で配置された内径2.3mmの配水管と41.5mmの硬質ウレタンフォームを、厚さ0.4mmで滑らかな表面のカラー鉄板ではさんだ構造をしている。

2-2. 設定条件

各実験の設定条件を表1に示す。患者が病室に長期間滞在することを考慮し、裸体で長時間滞在時に快適とされる室温28℃、湿度50%[26]を基準とした26℃、28℃、30℃の設定室温3条件と、天井放射冷房、対流式冷房の冷房方式2条件を組み合わせた6条件を、実験の設定条件とした。床上1.5mの壁面に取り付けた制御用温度センサーで測定した室温を設定室温とし、このセンサーの測定値が設定室温となるように、天井放射パネルおよびファンコイルユニットへの送水量を比例制御した。相対湿度は50%とした。日射による負荷は、約440Wで、ドイツ工業規格（Deutsche Institut fuer Normung）[27]に基づき、白熱電球を用いた床置きの擬似負荷装置で発生させ、電力量を制御することで負荷を制御した。一方、外壁からの貫流による負荷は約430Wで、壁の放射パネルの表面温度を制御することで模擬した。冷房負荷の合計は870W程度とした。最大熱負荷計算[28][29]に用いた設定条件を表2に示す。

天井放射冷房では、天井の放射パネルのみに負荷の除去を負担させるため、換気の供給温度は設定室温と同じ温度とした。天井放射パネルへの送水温度は、16℃で一定とした。対流式冷房では、ファンコイルユニットのみに負荷の除去を負担させるため、換気の供給温度は設定室温と同じ温度とした。相対湿度を50%程度で維持するため、換気の供給空気の湿度を調節した。

天井放射冷房における負荷の除去では、天井放射パネルへの送水量のみを制御し、天井表面温度は成り行きとした。また、対流式冷房における負荷の除去では、ファンコイルユニットへの送水温度および吹き出し風量のみを制御し、吹き出し温度および吹き出し気流速度は成り行きとした。

2-3. 被験者

生理反応および心理反応における性差に関する既往の研究[4][30)-32)]に従い、性別ごとに評価を行なうため、健康な青年男女各3名を被験者とした。被験者の概要を表3に示す。体表面積の算出には、日本人を対象とした体表面積の算出式である藏澄らの式[33]を用いた。一般に病院で用いられている寝間着と被験者に用意させた下着を着衣とし、着衣の重量を基にした推定式[34]により着衣の熱抵抗を算出した。厚さ200mmのマットレスに薄いシーツをかけたベッドの上で、被験者には会話や若干の体動程度のみの仰臥安静状態を維持させ、睡眠や仰臥姿勢の崩れる寝返りは禁止した。布団を掛けることにより、人体と天井の間の放射による熱交換を遮ることは容易であるが、掛け布団と枕や敷布団との隙間を介して生じる人体表面の対流の影響を除くことは困難であり、放射と対流の比較を簡単にするため、また、冷房で目標の温熱環境に調節することにより掛け布団を温熱感覚の個人差や微調節に対応するためにのみ用いることを本研究では想定し、掛け布団を用いなかった。人体とマットレスの接触部分では熱交換が生じにくいと考えることができ、仰臥姿勢の患者と立位の看護師のように姿勢の異なる人体を比較する場合、姿勢の違いによる放熱面積の違いを考慮する必要がある。しかし、本研

表1 設定条件

前条件			主条件		
室温 [℃]	相対湿度 [%]	冷房方式	室温 [℃]	相対湿度 [%]	冷房方式
28	50	対流式	26	50	天井放射
					対流式
			28		天井放射
					対流式
			30		天井放射
					対流式

表2 最大熱負荷計算における設定条件

立地	東京	外壁の熱貫流率	0.92[W/m^2℃]
室名	病室	内壁の熱貫流率	2.86[W/m^2℃]
窓の方位	南向き	在室者	2[人]
床面積	12.05[m^2]	隙間風量	0[m^3/h]
容積	30.38[m^3]	照明発熱量	10[W/m^2]
窓面積	19.2[m^2]	機器発熱量	175[W]
日射遮蔽係数	0.44[ND]	天井の総合熱伝達率	11.4[W/m^2℃][35]
窓の熱貫流率	4.9[W/m^2℃]	壁の総合熱伝達率	8.7[W/m^2℃][35]

表3 被験者の概要

被験者	年齢	性別	身長 [cm]	体重 [kg]	体表面積 [m^2]	着衣量 [clo]	出生地
K.K.	19	男性	184.0	64.0	1.8	0.5	富山県
S.A.	19	男性	169.0	58.6	1.7	0.5	富山県
H.O.	29	男性	167.0	67.0	1.7	0.5	富山県
M.A.	21	女性	152.0	44.8	1.4	0.5	富山県
Y.I.	20	女性	152.0	52.0	1.5	0.5	富山県
K.Y.	20	女性	162.0	56.6	1.6	0.5	富山県

表4 実験スケジュール

時刻	-30分	0分	60分
曝露条件	前条件	主条件	前条件
場所	控え室	人工気候室	控え室

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

究は仰臥姿勢の人体のみを対象としており、人体とマットレスの関係は実験条件に関わらず一定であるため、本研究ではマットレスが人体の生理・心理反応に及ぼす影響を無視した。ベッド上面は床上400mmで、天井表面までは2200mmの距離がある。被験者には実験2時間前からの飲食と過度の運動の制限を依頼した。なお、被験者には実験後に適切な報酬を支払った。

2-4. 実験スケジュール

実験スケジュールを表4に示す。室温約28℃、相対湿度約50%の前条件に制御された控え室での30分間の曝露中に、被験者に熱電対、熱流計、心拍計を着装した。前条件の後、被験者を主条件に制御された人工気候室に60分間曝露し、実験開始直後および実験開始から5分間隔で心理反応の申告を、仰臥姿勢を維持して行なわせた。主条件への曝露の後、被験者を前条件に制御された控え室へ移動し、熱電対、熱流計等を取り外し、1回の実験を終了した。

2-5. 測定項目および測定方法

表5に、測定項目および測定位置を示す。室温の測定は、床上300mm間隔で測定された上下温度分布を含む18点で、0.3mmφT型熱電対を用いて行なった。上下温度分布の測定は、ファンコイルユニットと換気の吹き出し空気が直接あたらない位置で行った。気流速度は、被験者の頭部と同じ程度の位置で、超音波風速計（株式会社ジェイエムエス製 UA30）で測定し、連続記録した。グローブ温度は、150mmφのグローブ温度計を用い、被験者と同じ高さで測定した。相対湿度は湿度計（第一科学製 THT-B111/THP-B4）を用いて測定し、絶対湿度は湿度センサー（株式会社芝浦電子製作所製 CHS-2 形）を用いて測定した。天井、壁、床の表面温度は、0.3mmφT型熱電対を用い、それぞれ7点、8点、2点測定した。擬似負荷装置の消費電力量は電力量測定センサー（日本ベンディング株式会社製 EPW3AR-T1）を用い、9個の白熱電球を個別に測定した。室温、室内各部表面温度、グローブ温度、相対湿度、絶対湿度は、データロガー（横河電機株式会社製 DARWIN-DA100）を介して、パソコンに30秒間隔で連続記録した。

各部皮膚温は、Hardy-DuBoisの7点法[36]の部位に、0.3mmφのT型熱電対を医療用テープで直接皮膚表面に貼り付けて測定した。平均皮膚温は、姿勢を考慮した藏澄らの式[37]により算出した。舌下温度は、消毒した0.3mmφのT型熱電対を口腔舌下に留めて測定した。熱流量は、Hardy-DuBoisの7点法に従い、熱流計（英弘精機株式会社製 MF-180）を医療用テープで直接皮膚表面に貼り付けて測定した。心拍は、携帯型心電図解析器（日本光電富岡式会社製 RAC-1202）を用いて測定した。皮膚温、舌下温度、熱流量は、データロガー（横河電機株式会社製 MV200）に30秒間隔で記録した。

被験者の心理反応は、全身の温冷感と快適感、顔、胸、手、足、背中の温冷感と快適感を、直線評価尺度[4]を用いた申告により、実験開始直後および実験開始から5分間隔で測定した。直線評価尺度を用いた測定結果を、直線の全長を100として数値換算し、心理反応を評価した。

3. 温熱環境評価方法

3-1. 平均放射温度

平均放射温度MRT（Mean Radiant Temperature）には、式(1)に示されるように人体に対する形態係数を基にして算出されるMRT（以下MRT_ϕ）と、式(2)に示されるようにグローブ温度と気流速度を用いて算出されるMRT（以下MRT_g）がある。

病室の仰臥姿勢の患者は天井と正対しているため、放射による熱の授受における天井面の影響は大きい。また、マットレスが十分に厚いため、人体の背面とベッドとの熱の授受は、人体の前面と室内との熱の授受と比較し十分に小さいことが予想できる。従って、仰臥姿勢を対象とする本研究では、人体の形状と姿勢が考慮された藏澄らの形態係数を用いたMRT_ϕを採用することが適切であると考える。表6に、仰臥姿勢の人体に関する形態係数[38]を示す。

一方、MRT_gは、室内の気流を静穏と仮定することにより、グローブ温度と室温のみで算出することができるため、実用的である。

従って、本研究では、精度と実用性を考慮し、MRT_ϕとMRT_gの両方を算出し、仰臥姿勢におけるMRT_ϕとMRT_gの換算式を提案する。なお、作用温度およびPMVの算出にはMRT_ϕを用い、精度を重視する。

$$MRT_\phi = \sum_{i=1}^{n} \phi_{s-i} \cdot T_i \quad [℃] \qquad (1)$$

ここで、ϕ_{s-i}: 人体sと面iとの間の形態係数 $[ND]$

T_i: 面iの表面温度 [℃]

$$MRT_g = T_g + 2.37\sqrt{V} \cdot (T_g - T_a) \quad [℃] \qquad (2)$$

ここで、T_g: グローブ温度 [℃]

V: 気流速度 $[m/s]$

T_a: 室温 [℃]

3-2. 作用温度

作用温度OT（Operative Temperature）は、湿度の影響が小さい場合に熱放射と温冷感の関係を良く表す指標と考えられている[39]。本研究では、天井放射冷房と対流式冷房の人体への影響を明確に比較するため、式(3)に示す作用温度を用いた。OTの算出は、室温およびグローブ温度の実測値と、放射熱伝達率hrと対流熱伝達率hcの推定値を基に行った。hrには、ASHRAEに採用されているhr=ε×4.7W/m²℃[40]に、人体の放射率ε=0.98を代入して得られる

表5 測定項目および測定機器

環境条件		
測定項目	測定機器	測定位置
室温	0.3mmφT型熱電対	8点
上下温度	0.3mmφT型熱電対	床上0・300・600・900・1200・1500・1800・2100・2400・2600[mm]
相対湿度	湿度計	床上1200[mm]
気流速度	超音波風速計	床上400[mm]
グローブ温度	グローブ温度計	床上400[mm]
人体条件		
測定項目	測定機器	測定位置
皮膚温	0.3mmφT型熱電対	Hardy-DuBois 7点
舌下温度	0.3mmφT型熱電対	口腔舌下
熱流量	熱流計	Hardy-DuBois 7点
心拍	携帯型心電図解析器	−

表6 仰臥姿勢の人体に関する形態係数

面の位置	形態係数 [ND]
天井	0.11
壁	0.48
ベッド上面	0.41

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

hr=4.6W/m²℃を採用した。hc には、仰臥安静状態の hc として示されている持田らの式[41]より求められる hc=2.9W/m²℃を採用した。

$$OT=\frac{h_r\cdot T_r+h_c\cdot T_a}{h_r+h_c}\quad[℃] \qquad (3)$$

ここで、h_r: 放射熱伝達率 $\left[W/m^2℃\right]$

h_c: 対流熱伝達率 $\left[W/m^2℃\right]$

T_r: 平均放射温度 [℃]

T_a: 室温 [℃]

3-3. PMV

PMV (Predicted Mean Vote)[42]は、着衣量の少ない場合や気流速度の速い場合、発汗が多量に発生するときの信頼性が疑われている[43)-45)]。一方、PMV の適用範囲を-0.5~+0.5 と若干の寒冷側に限定する場合、理論上の矛盾は大きくないことが知られている[46)47)]。本研究では、日常的な服装と同じ程度の着衣量であること、気流速度がほぼ静穏であること、若干の温熱性発汗が生じると考えられている室温 30℃を設定室温の上限とすること、適用範囲を-1.0~+0.5 程度に限定することにより、PMV の適用による問題は生じないと考えることができるため、PMV を用いて温熱環境を評価した。PMV に用いる温熱環境要素のうち、室温、相対湿度、気流速度、平均放射温度、着衣量には実測値を用い、代謝量は安静状態の 0.8met[48]とした。

3-4. 心理量変化率

病院には、老若男女の所謂生理的弱者が多く集まる。従って、病室の温熱環境の管理は、心理的な快適性を目指すだけでなく、生理的な負担が生じないように行うことも重要である。室内温熱環境の変動による心理的な快適性と生理的な負担の不適合を避けるため、本研究では、特に高齢者において生理反応の変動は生理的な負担であるという考え方[49)-53)]に基づき、温熱評価指標を単位量変動させたときの生理反応の変化量の推定値と心理反応の変化量の推定値を基に、式(4)で表される単位生理量および式(5)で表される心理量変化率を検討した。

$$\text{単位生理量}=\frac{\text{生理反応の変化量}}{\text{温熱評価指標の単位量}}\quad[OT:℃/℃, PMV:℃] \qquad (4)$$

$$\text{心理量変化率}=\frac{\text{心理反応の変化量}}{\text{生理反応の変化量}}\quad[-/℃] \qquad (5)$$

心理量変化率は、高い値であるほど、設定温熱環境の変動に伴うわずかな生理反応の変動でも心理反応に反映されることを示しており、生理的な負担と心理的な変動量の比と言うことができる。ここでは温熱評価指標として OT と PMV を採用し、OT では 1.0℃を、PMV では 0.5 を単位量とした。また、生理反応は、平均皮膚温、大腿および足背の皮膚温とし、生理反応の経時変化を考慮し、実験開始から 30 分以降平均値を用いた。血流量や代謝量など、皮膚温以外の生理反応を用いた評価も可能であるが、本報では皮膚温のみを扱った。心理反応には生理反応と良く対応する温冷感を用いた。

なお、生理的な刺激量から心理量を直接予測する方法として Stevens のベキ関数[54]があるが、本研究における単位生理量と心理量変化率は、至適域からの生理反応の逸脱の程度に対する心理反応における認識の程度を表すものであり、Stevens のベキ関数と本研究は目的が異なる。

4. 実験結果

4-1. 実験条件

表 7 に、男性を被験者とした場合の、各設定条件における人工気候室の室温 T_a、相対湿度 RH、グローブ温度 T_g、気流速度 V、天井表面温度 T_c、壁表面温度 T_w、ファンコイルユニット吹き出し温度 T_f、ファンコイルユニット吹き出し気流速度 V_f の実験中のそれらの測定結果の平均値を示す。V は、天井放射冷房と対流式冷房において大きな差はなく、0.1m/s 以下の静穏であった。なお、女性を被験者とした実験における実験条件は、男性を被験者とした場合とほぼ同様の結果であった。

4-2. 露点温度

表 8 に、天井放射冷房の各設定条件における、天井表面温度と露天温度の差の実験中の最小値を示す。全ての設定条件において、結露は生じないことを確認した。

4-3. 上下温度分布

表 9 に、男性を被験者とした場合の、床表面温度と床上 1200mm の室温の差および床上 300mm と 1200mm の室温の差を示す。床表面温度と床上 1200mm の室温の差は、天井放射冷房では 1.5℃、対流式冷房では 0.4℃であった。一方、床上 300mm と 1200mm の室温の差は、全ての設定条件で 0.3℃程度以内であった。従って、ISO-7730 で示されている 3℃以内という床上 10mm と 1100mm との室温の差の推奨値[55]は、全ての設定条件で満たされたと言うことができる。

図 3 に、男性を被験者とした実験における、人工気候室内の上下温度分布を示す。天井放射冷房における床表面温度と床上 1200mm の室温の差の、設定室温の上昇に伴う拡大が生じた。これは、天井放射パネルへの送水温度が一定なため、2℃間隔で室温が設定されているのに対し、天井表面温度はおよそ 1℃間隔で上昇していることにより、設定室温と天井表面温度の差が拡大したと考える。なお、女性を被験者とした実験における人工気候室内の上下温度分布は、男性を被験者とした場合とほぼ同様の傾向となった。

表 7　実験条件・男性

冷房方式	天井放射			対流式		
設定室温[℃]	26	28	30	26	28	30
T_a[℃]	26.4	28.2	30.0	25.5	27.5	29.6
RH[%]	56.5	51.1	44.8	52.5	46.9	51.4
V[m/s]	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
T_g[℃]	26.7	28.4	30.3	26.2	28.1	30.3
T_c[℃]	20.0	20.9	22.5	26.1	28.0	30.1
T_w[℃]	27.0	28.9	30.9	26.9	29.0	31.2
T_f[℃]	−	−	−	15.4	18.5	21.7
V_f[m/s]	−	−	−	2.6	2.6	2.6

表 8　天井表面温度と露点温度の差

設定室温[℃]	26	28	30
天井表面温度と露点温度の差[℃]	1.9	1.4	2.6

表 9　上下温度分布・男性

	床上 1200-床上 0[mm]					
冷房方式	天井放射			対流式		
設定室温[℃]	26	28	30	26	28	30
温度差[℃]	0.9	1.3	1.5	-0.4	0.1	0.3
	床上 1200-床上 300[mm]					
冷房方式	天井放射			対流式		
設定室温[℃]	26	28	30	26	28	30
温度差[℃]	0.1	0.0	0.1	-0.3	-0.2	-0.2

NII-Electronic Library Service

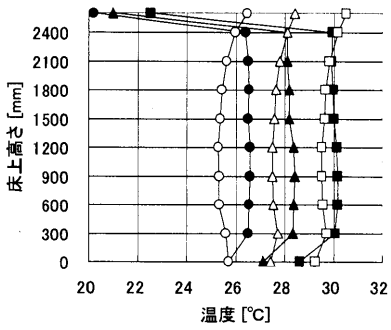

図 3　上下温度分布・男性

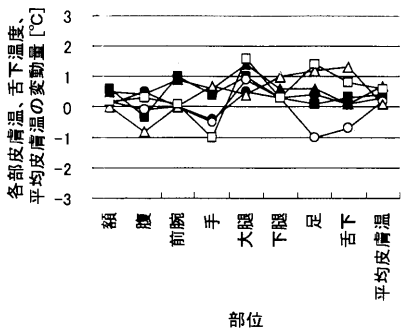

図 5 (a)　生理反応の経時変化量（男性）

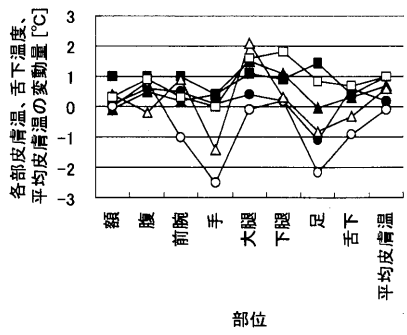

図 5 (b)　生理反応の経時変化量（女性）

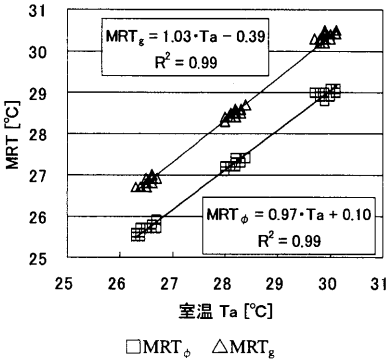

図 4　MRT_ϕ と MRT_g

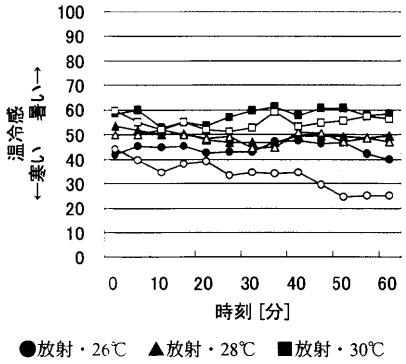

図 6 (a)　心理反応の経時変化（男性・温冷感）

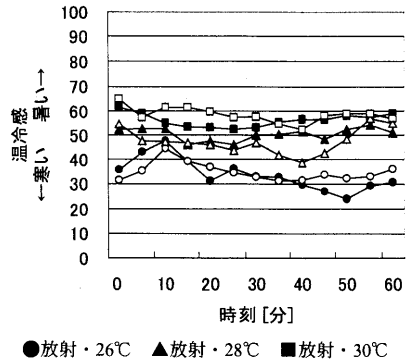

図 6 (b)　心理反応の経時変化（女性・温冷感）

4-4. 平均放射温度

図 4 に、MRT_ϕ と MRT_g を示す。MRT_g と比較し冷却面である天井の影響を大きく受ける MRT_ϕ は、設定室温 26～30℃において MRT_g より 1.2℃程度低い値となり、長野らの示す 1℃[24]とほぼ同じ値を示した。算出が簡易な MRT_g を説明変数にした、MRT_g と MRT_ϕ の換算式を式(6)に示す。

$$MRT_g = 0.94 \cdot MRT_\phi + 0.52 \quad [℃] \qquad (6)$$

4-5. 生理反応の経時変化量

図 5 に、各部皮膚温、舌下温度および平均皮膚温の設定条件ごとの経時変化量として、実験開始直後と実験開始から 60 分経過した時点の差を、男女別の被験者平均で示す。額の皮膚温と平均皮膚温の経時変化量は、男女とも 1℃以内の上昇で、30 分以降の変動は小さいことがわかる。設定室温 30℃では、大腿の皮膚温は男女とも最大 2℃程度の経時に伴う上昇を示し、足背の皮膚温は男女とも最大 1℃程度上昇した。

一方、設定室温 26℃では、大腿の皮膚温は男女ともほぼ一定の値であったのに対し、足背の皮膚温は特に対流式冷房において男性で 1℃程度、女性で 2℃程度低下した。手や足背などは露出部位であるため他の部位より対流による放熱が行なわれやすく、末梢に近いため寒冷環境における血流量調節の影響を受けやすく、断熱作用のある皮下脂肪の薄い部位であるため、皮膚温の低下が大きいと考える。また、末梢の血流量の増加閾値となる室温は、女性より男性の方が低い[51]ため、足背の皮膚温における男女差が生じたと考える。

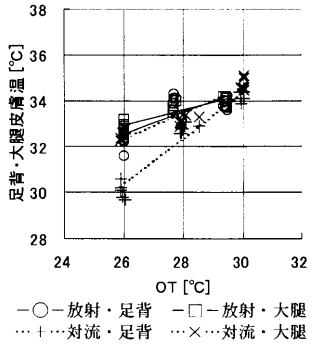

図 7 (a)　OT と生理反応（男性）

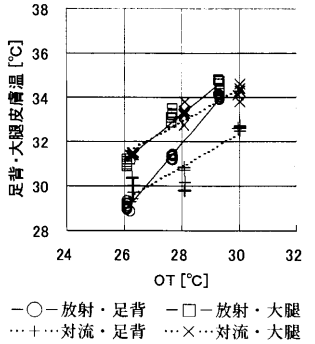

図 7 (b)　OT と生理反応（女性）

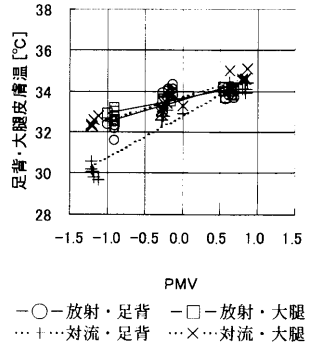

図 8 (a)　PMV と生理反応（男性）

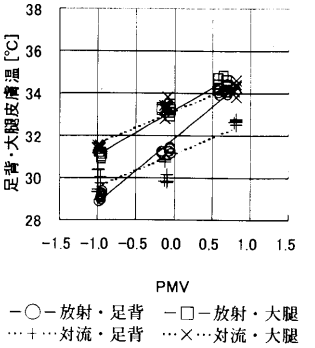

図 8 (b)　PMV と生理反応（女性）

NII-Electronic Library Service

従って、暑熱環境では躯幹部の皮膚温の上昇と末梢の皮膚温の上昇が生じ、寒冷環境では末梢の皮膚温の低下量と比較し、躯幹部の皮膚温の低下量は小さいと言うことができる。

4-6. 心理反応の経時変化

設定条件ごとの温冷感の程度を比較するため、図 6 に心理反応の経時変化を示す。設定室温 28℃以上では、曝露開始から 10 分以降において、性別に関わらず温冷感および快適感の経時に伴う変動は小さいことが示された。一方、設定室温 26℃では、男性では対流式冷房において、女性では冷房方式に関わらず、温冷感は連続して低下した。

従って、暑熱環境における心理反応は 10 分程度で安定し、寒冷環境での心理反応は連続して変動すると言うことができる。

5. 考察

5-1. 温熱評価指標と生理反応

図 7 および図 8 に、OT および PMV と大腿および足背の皮膚温の関係を、男女別の被験者平均で示す。温熱評価指標と生理反応の関係はいずれの関係においても良く対応し、OT および PMV は各部位の皮膚温を良く表すと言うことができる。また、冷房方式の違いによる、温熱評価指標と生理反応の関係における大きな違いは見られなかった。

OT による比較では、男性の対流式冷房における足背の皮膚温が女性と同程度の温度まで低下したことを除き、OT26℃では大腿で約 2℃、足背で約 4℃女性の方が低い皮膚温となった。また、OT30℃においては、女性の対流式冷房における足背の皮膚温が低かったことを除き、大腿と足背の皮膚温は男女ともおよそ 34℃となった。

PMV による比較でも OT による比較と同様な傾向が見られ、PMV が 0 となる温熱環境における男性の大腿と足背の皮膚温は 33～34℃であった。一方、女性では、PMV が 0 の温熱環境における大腿の皮膚温は 33～34℃、足背の皮膚温は 31～32℃であった。従って、仰臥姿勢の女性では冷房方式に関わらず、一般に快適とされる PMV が 0 程度の温熱環境において、すでに寒冷による生理的な負担が生じていると言うことができる。

従って、冷房方式に関わらず、男性より女性の方が温熱環境の変動にともなう生理反応の変動が大きいと言うことができる。なお、皮膚温の経時変化を考慮し、比較的変動の小さな実験開始から 30 分以降の測定値を生理反応として用いた。また、本研究における PMV は、概ね-1.0～0.5 の適用範囲を満足した。

5-2. 温熱評価指標と心理反応

図 9 および図 10 に、OT および PMV と温冷感および快適感の関係を、男女別の被験者平均で示す。温熱評価指標と温冷感の関係は直線で、温熱評価指標と快適感の関係は 2 次曲線で近似した。いずれの冷房方式においても、OT および PMV は温冷感を良く表すと言うことができるものの、温熱条件により快適感は大きく変動することがわかった。温冷感が 50 を示す熱的中立状態と快適感が最大となる温熱条件はほぼ等しく、天井放射冷房では、男性で OT27.5℃および PMV-0.3、女性で 28.1～28.2℃および 0.0～0.1、対流式冷房では、男性で 28.9℃および 0.2～0.3、女性で 28.2～28.8℃および-0.1～0.2 となった。天井放射冷房について熱的中立

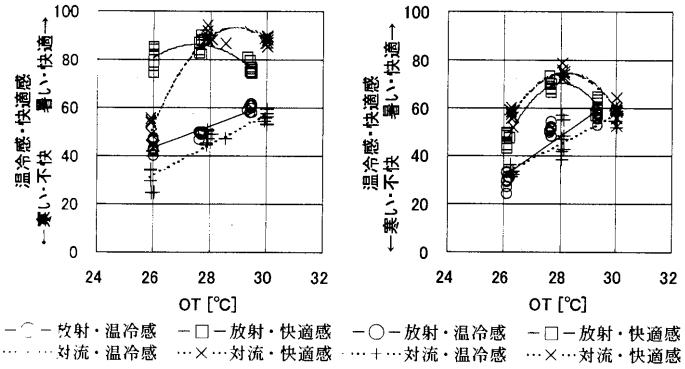

図 9 (a)　OT と心理反応（男性）

図 9 (b)　OT と心理反応（女性）

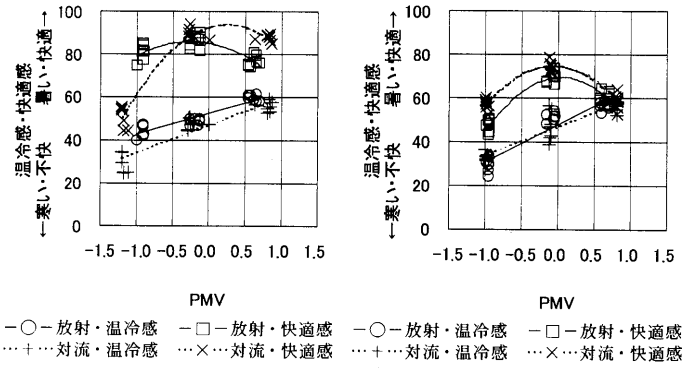

図 10 (a)　PMV と心理反応（男性）

図 10 (b)　PMV と心理反応（女性）

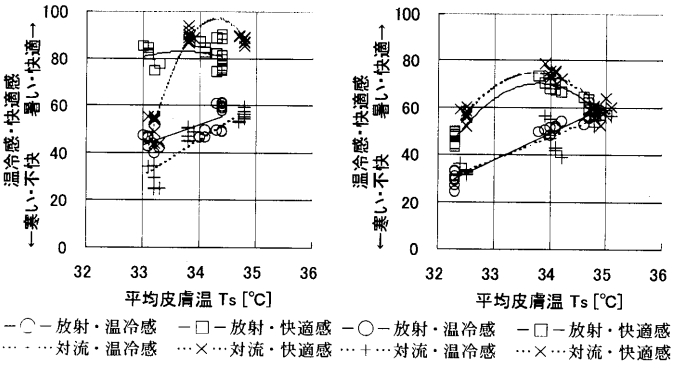

図 11 (a) 生理反応と心理反応（男性）

図 11 (b) 生理反応と心理反応（女性）

表 10　単位生理量（単位・OT:℃/℃、PMV:℃）

温熱評価指標	冷房方式	部位		
		足	大腿	平均皮膚温
OT	天井放射	1.0	0.7	0.6
	対流式	0.9	0.6	0.5
PMV	天井放射	1.0	0.7	0.6
	対流式	0.9	0.7	0.5

表 11　心理量変化率（単位・－/℃）

温熱評価指標	冷房方式	部位		
		足	大腿	平均皮膚温
OT	天井放射	5.1	8.8	9.9
	対流式	6.1	9.2	12.6
PMV	天井放射	5.1	8.8	9.9
	対流式	6.1	9.2	12.6

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

状態となり快適感が最大となる温熱条件として示されている長野らのPMV0.25[24]より、本研究では男女とも寒冷側の値となった。

また、男性では、最大の快適感を示す温熱条件より寒冷側での快適感の低下が、天井放射冷房より対流式冷房において著しく大きいことがわかった。これは、男性に対し、天井放射冷房は寒冷環境における不快感を対流式冷房より感じさせにくい冷房方式で、対流式冷房は暑熱環境における不快感を天井放射冷房より感じさせにくい冷房方式であると言い換えることができる。一方、女性では、冷房方式の違いが温熱評価指標と心理反応の関係に及ぼす影響は小さいことがわかった。

従って、至適温熱条件の比較より、オフィスなどでは天井放射冷房は対流式冷房より暑熱側の制御で同等の快適性を確保することができるという従来の考え方[17)-21)]と異なり、病室で男性を対象とする場合、天井放射冷房は対流式冷房よりOTで0.7℃程度、PMVで0.2～0.3程度寒冷側の制御とする必要があると言うことができる。また、冷房方式と快適感の比較より、男性の快適感に基づく制御は、天井放射冷房では女性に対し寒すぎる制御となり、対流式冷房では女性に対し暑すぎる制御となる危険性があるため、女性の快適感に基づく制御が性別に関わらず高い快適感を得ることのできる制御となると言うことができる。なお、心理反応の経時変化を考慮し、実験開始から30分以降の変動の小さな部分における測定値を心理反応として用いた。

5-3. 生理反応と心理反応

図11に、平均皮膚温と温冷感および快適感の関係を、男女別の被験者平均で示す。平均皮膚温と温冷感の関係は直線で、平均皮膚温と快適感の関係は2次曲線で近似した。冷房方式の差および性別の差は平均皮膚温と温冷感および快適感の関係において明らかに見られるが、冷房方式および性別に関わらず、熱的中立状態を示す平均皮膚温は33.7～33.8℃、最大の快適感を示す平均皮膚温は34.1～34.3℃であった。熱的に中立となる平均皮膚温として長野らが示す34.4～34.5℃[24]と比較し、本研究における熱的中立状態の平均皮膚温は約0.7℃低い。

また、平均皮膚温の状態により快適感は大きく変動するため、快適・不快を規準とした冷房設備の制御は、室内温熱環境の変動による心理的な快適性と生理的な負担の不適合を生じる危険があると考える。なお、変動の小さな実験開始から30分以降の部分における測定値を生理反応および心理反応として用いた。

5-4. 心理量変化率

表10および表11に、OTおよびPMVを用いた場合の単位生理量および心理量変化率を、病室には老若男女が混在することを想定し、男女の平均値で示す。設定室温30℃程度の暑熱環境においては、軀幹部の皮膚温の変動と末梢の皮膚温の変動が顕著であるため、大腿と足背を対象とした心理量変化率を検討する必要がある。単位生理量および心理量変化率は天井放射冷房と対流式冷房でほぼ同じ値を示し、暑熱環境における天井放射冷房と対流式冷房は、同じ皮膚温の変動量に対し同じ程度の心理反応の変動を示すことがわかった。

一方、設定室温26℃程度の寒冷環境では、末梢の皮膚温の変動が軀幹部の皮膚温の変動より大きく生じているため、足背を対象とした心理量変化率を検討する必要がある。足背を対象とした場合の天井放射冷房と対流式冷房の単位生理量および心理量変化率は、ほぼ同じ値となった。従って、寒冷環境において、天井放射冷房と対流式冷房は、生理反応と心理反応の連動性において同じ程度の性能を示すと言うことができる。なお、設定室温26～30℃における平均皮膚温の単位生理量は小さく、平均皮膚温を対象とした心理量変化率は、暑熱環境または寒冷環境において生理反応を過大に評価する危険がある。

以上より、暑熱環境および寒冷環境を含む温熱環境における心理量変化率に関して、天井放射冷房と対流式冷房は、病室における冷房方式として同じ程度の性能であると言うことができる。

6. 結論

生理・心理反応に基づき病室の温熱環境の変動を評価する方法を検討し、天井放射冷房と対流式冷房を比較するため、室温26～30℃およびPMV-1.0～0.5を温熱環境の適用範囲、また健康な青年男女を適用する対象の範囲とし、青年男女各3名を用いた被験者実験を行ない、以下の知見を得た。

(1) 温熱環境の変動が生理・心理反応に及ぼす影響を評価する指標として、単位生理量および心理量変化率を定義し、検討した。

(2) 天井放射冷房において、形態係数を基に算出したMRT_{ϕ}と、グローブ温度を用いて算出したMRT_{g}の換算式を提案した。また、天井放射冷房ではMRT_{ϕ}はMRT_{g}より約1.2℃低い値となる。従って、本研究における天井放射冷房のように、放射による冷暖房を行う場合、形態係数を基にしたMRT_{ϕ}を用いる必要がある。

(3) 温冷感が50を示す熱的中立状態と快適感が最大となる温熱条件はほぼ等しく、天井放射冷房では、男性でOT27.5℃およびPMV-0.3、女性で28.1～28.2℃および0.0～0.1、対流式冷房では、男性で28.9℃および0.2～0.3、女性で28.2～28.8℃および-0.1～0.2となった。これは、オフィスなどでは天井放射冷房は対流式冷房より暑熱側の制御で同等の快適性を確保することができるという従来の考え方と異なり、病室で男性を対象とする場合、天井放射冷房は対流式冷房より寒冷側の制御を行なう必要があることを示している。

(4) 冷房方式および性別に関わらず、熱的中立状態となる平均皮膚温は33.7～33.8℃、快適感が最大となる平均皮膚温は34.1～34.3℃であった。

(5) 平均皮膚温を対象とした心理量変化率は、暑熱環境または寒冷環境において生理反応を過大に評価する危険がある。また、いずれの冷房方式においても快適感は生理反応との対応の程度が温熱環境の条件により大きく異なり、快適・不快を基準とした冷房設備の制御は、室内温熱環境の変動による心理的な快適性と生理的な負担の不適合を生じさせる危険があるため、冷房設備の制御は暑い・寒いという感覚を基準として制御する必要がある。

(6) 暑熱環境および寒冷環境を含む温熱環境における心理量変化率に関して、天井放射冷房と対流式冷房は、病室における冷房方式として同じ程度の性能である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(C),16560522）「熱搬送動力の削減を目指したオフィス用空調方式の開発」（研究代表

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

者：羽山広文)、科学研究費補助金（萌芽研究,18656161)「建築都市の安全性の評価分析とバリアフリー対策」(研究代表者：羽山広文)および国土交通省平成17年度建設技術研究開発費補助金「エネルギー自律型都市代謝システムの開発を通じた生活環境の改善」(研究代表者：絵内正道）の一環で実施しました。関係各位に感謝いたします。また、本研究を遂行するにあたり、研究の主旨をご理解いただき被験者として参加していただいた方々に、深謝の意を表します。

参考文献

1) 宇野勇治、堀越哲美、有富由香、橋本剛、田中稲子：温熱環境を変化させた場合における生理心理反応の季節差および年齢差、性差、日本建築学会学術講演会梗概集、pp471-472、2003.9
2) 石垣秀圭、松原辰樹、権田信、堀越哲美：気温および湿度のランプ変化が人体の生理・心理反応に及ぼす影響（その３)、日本建築学会学術講演会梗概集、pp365-366、2001.9
3) 高木顕、平川恵、長野和雄、栃原裕：温冷感に及ぼす気温のステップ変化の影響、日本建築学会学術講演会梗概集、pp367-368、2001.9
4) 志村欣一、堀越哲美、山岸明浩：日本人を対象とした室内温湿度条件の至適域に関する実験研究－夏季至適域の提案－、日本建築学会計画系論文集、第480号、pp15－24、1996.2
5) 石垣秀圭、松原辰樹、堀越哲美、権田信、宮本征一：気温と湿度の組み合わせ条件が人体の生理・心理反応に及ぼす影響に関する実験的研究（その２）経路別熱収支・ぬれ面積率・湿り作用温度について、日本建築学会東海支部研究報告集、第37号、pp533-536、1999.2
6) 深井一夫、伊藤宏、後藤滋、阿久井哲、斎藤純司：標準新有効温度（SET*）と日本人の温熱感覚に関する実験的研究　第２報－冬季および夏季における温熱感覚の比較、空気調和・衛生工学会論文集、No.51、pp139-147、1993.2
7) 田辺新一、木村健一：夏季の成人の温冷感と快不快感に関する試行実験、日本建築学会計画系論文集、第368号、pp31－41、1986.10
8) Shin-ichi Tanabe、Ken-ichi Kimura、Toshihiro Hara、Takashi Akimoto：Effects of Air Movement on Thermal Comfort in Air-conditioned Spaces during Summer Season、日本建築学会計画系論文集、第382号、pp20－30、1987.12
9) Lynda H. Webb、Kenneth C. Parsons：Case Studies of Thermal Comfort for People with Physical Disabilities、ASHRAE Transaction、Vol.104、Part 1、pp883-895、1998
10) F. H. Rohles、J. E. Laviana、R. Wei、R. Wruck：The Human Response to Temperature Drifts in a Simulated Office Environment、ASHRAE Transaction、Vol.91、Part 1A、pp116-123、1985
11) Richard J. de Dear、Gail Schiller Brager：Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference、ASHRAE Transaction、pp145-167、1998
12) 平山慶太郎、堀越哲美、小林陽太郎、土川忠浩、藏澄美仁、三輪恵美、松田健一：上下不均一冷暖放射環境の人体影響に関する実験的研究－椅座安静・着衣・青年男子の場合－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp845-946、1986.8
13) 工藤奈津美、李周妍、磯田憲生：天井冷房の快適性評価に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp1341－1344、2001.9
14) 工藤奈津美、磯田憲生：天井放射冷暖房の快適温度に関する実験的研究、日本建築学会大会学術梗概集、pp1073-1074、2003.9
15) 船越砂穂、松尾一也、中村啓夫、川村浩伸：放射冷暖房の快適性評価、第16回人間－熱環境系シンポジウム、pp11-14、1992.11
16) Koichi Kitagawa、Norio Komoda、Hiroko Hayano、Shin-ichi Tanabe：Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments、Energy and Buildings、30、pp185-193、1999.6
17) 瀬沼央、武田仁：放射冷暖房システムに関する研究　第１報－水熱媒冷暖房システムの構築と従来システムとの比較、空気調和・衛生工学会論文集、No.73、pp57-63、1999.4
18) 武田仁、瀬沼央：輻射冷暖房システムの開発、日本建築学会技術報告集、第１号、pp244-249、1995.12
19) 瀬沼央、武田仁、世良伸彦：輻射冷暖房システムの開発－（その２）水熱媒冷暖房システムの構築と従来システムとの比較、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp13－16、1993.10
20) 瀬沼央、武田仁、世良伸彦：天井輻射冷房システムの開発（その３　水熱媒冷房システムの構築と従来システムとの比較)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1689-1690、1993.9
21) 瀬沼央、武田仁、世良伸彦：天井輻射冷房システムの開発（その４　水熱媒冷房システムの構築と従来システムとの比較)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1691-1692、1993.9
22) 加藤信介、村上周三、佐藤昌之、中谷義宣、崔棟皓：強制対流・放射併用冷房の室内環境に関する実験　第１報－強制対流式、冷却パネル単独式、併用式の比較実験、空気調和・衛生工学会論文集、No.57、pp93-103、1995.2
23) 永野徹、長井智彦、美藤一博、岸本孝志：輻射式冷暖房装置に関する実験的研究（その１）－天井輻射冷房に関する基礎的実験－、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp1339-1340、1993.9
24) 長野克則、持田徹、嶋倉一寛、吉野博：仰臥姿勢を対象とした天井放射冷房システムの温熱環境設計に関する実験的検討、空気調和・衛生工学会論文集、No.81、pp59-69、2001.4
25) 長野克則、持田徹、嶋倉一寛、杉岡啓子：放射冷房の熱的快適性とその評価に関する実験的検討、空気調和・衛生工学会北海道支部第32回学術講演論文集、pp13-16、1998.3
26) 空気調和・衛生工学会編：設計用最大熱負荷計算法、丸善株式会社、1996
27) DIN 4715-1：Deutsche Institut fuer Normung、1994
28) 井上宇市：空気調和ハンドブック、丸善株式会社、1996
29) 空気調和・衛生工学会編：快適な温熱環境のメカニズム、丸善株式会社、1997
30) 深井一夫：冷房環境に関する実験的検討－長時間滞在における生理心理反応の経時変化と男女差－、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp909－912、1998.8
31) 深井一夫：冷房環境に関する実験的検討その２－快適温度条件の男女差と経時変化－、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp1513－1516、1998.8
32) M. P. Modera：Skin Temperature and Evaporative Heat Loss Variations for Men and Women in Thermal Comfort、ASHRAE Transaction、Vol.99、Part 2、pp210-222、1993
33) 藏澄美仁、堀越哲美、土川忠浩、松原斎樹：日本人の体表面積に関する研究、日本生気象学会雑誌、No.31(1)、pp5-29、1994
34) 花田嘉世子：着衣量、温冷感シンポジウム「温熱環境測定法」、空気調和・衛生工学会　空気調和設備委員会・温冷感小委員会、空気調和・衛生工学会、1992
35) 渡辺要編：建築計画原論Ⅱ、丸善株式会社、1965
36) Hardy, J. D.、DuBois, E. F.：The Technique of Measuring Radiation and Convection、Journal of Nutrition、No.15、pp461-475、1938
37) 藏澄美仁、土川忠浩、角谷孝一郎、大和義昭、鳥居孝行、松原斎樹、堀越哲美：対流伝熱面積を考慮した平均皮膚温に関する研究－正座位、胡座位、横座位、立て膝位、投げ足位、側臥位、仰臥位姿勢の算出法－、日本建築学会計画系論文集、第585号、pp19－26、2004.11
38) 藏澄美仁、土川忠浩、大和義昭、中谷岳史、松原斎樹、堀越哲美：放射冷暖房空間における人体の放射熱収支に関する研究　横座位・投げ足位・側臥位・仰臥位姿勢の人体の有効放射面積と人体と矩形面との間の形態係数、空気調和・衛生工学会論文集、No.97、pp1-14、2005.4
39) Winslow, C-E. A.、Herrington, L. P.、Gagge, A. P.：The relative influence of radiation and convection upon the temperature regulation of the clothed body、American Journal of Physiology、Vol.124、pp51-61、1938
40) ASHRAE HANDBOOK Fundamentals、1997
41) 持田徹、長野克則、嶋倉一寛、桑原浩平：仰臥姿勢における平均対流熱伝達率、空気調和・衛生工学会北海道支部第31回学術講演論文集、pp1-4、1997.3
42) Fanger, P.O.：Thermal Comfort、Danish Technical Press、Copenhagen、1970
43) Michael A. Humphreys、J. Fergus Nicol：The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments、Energy and Buildings、34、pp667-684、2002.7
44) 堀越哲美：温熱指標としての PMV の評価と応用、建築設備と配管工事、10、pp35-40、1984
45) 西安信：PMV の成果と問題点、日本生気象学会雑誌、29(3)、pp164、1992
46) 堀越哲美：温熱環境の評価（３）温熱環境の評価指標（その２)、空気調和・衛生工学、第70巻、第1号、pp65-71、1996
47) 持田徹、佐古井智紀：代表的な温熱指標の温感工学的考察（１）PMV の独創性と特徴、空気調和・衛生工学、第76巻、第3号、pp45-50、2002
48) 中山昭夫編：温熱生理学、理工学社、1981
49) 栃原裕：人工環境の健康影響と快適性、弘学出版、1997
50) 栃原裕、大中忠勝、徳田哲男、川島美勝：寒冷および暑熱曝露時の高齢者の生理心理反応の特徴、第14回人間－熱環境系シンポジウム報告集、pp87-89、1990
51) 小川徳雄：老若男女の温熱生理学（２）－性差と加齢の影響－、人間と生活環境、4(1)、pp2-7、1996
52) 徳田哲男、栃原裕、梁瀬度子：環境温度の変化と高齢者の心身諸機能に関する研究、人間工学、Vol.25、No.4、pp197-206、1989
53) 榎本ヒカル、久保博子、磯田憲生、梁瀬度子：加齢による温熱環境の生理・心理反応の違いに関する実験的研究－夏期における気温および気流による人体影響について－、人間工学、Vol.31、No.2、pp161-168、1995
54) Joseph C. Stevens、Lawrence E. Marks、Donald C. Simonson：Regional Sensitivity and Spatial Summation in the Warmth Sense、Physiology and Behavior、Vol.13、pp825-836、1974.12
55) ISO-7730：International Standard 7730、1984

(2006年６月９日原稿受理，2006年12月５日採用決定)

NII-Electronic Library Service