

## 不均一熱環境における熱的快適性の評価に関する研究

—床面温度が熱的快適性に及ぼす影響と局部温冷感による熱的快適性予測について—

EVALUATION OF THERMAL COMFORT IN A NON-UNIFORM  
THERMAL ENVIRONMENTEffect of floor temperature on thermal comfort and prediction  
of thermal comfort on the basis of local thermal sensation

堀 祐治\*, 伊藤直明\*\*, 須永修通\*\*\*, 室 恵子\*\*\*\*

Yuji HORI, Naoaki ITO, Nobuyuki SUNAGA

and Keiko MURO

In evaluating a room environment, should be considered thermal comfort in addition to thermal sensation. In other words, different heating systems provide different levels of thermal comfort due to non-uniform temperature distribution. This study proposes a thermal comfort evaluation method for a room in which the temperature is not uniform. The experiments were conducted using test chambers set up in an environmental laboratory. More than seven hundred people participated to the experiments as subjects.

From this experiment, determination of vertical air temperature distribution such that the head was cold and feet were warm indicated high thermal comfort. Using this consequence, it was possible to estimate thermal comfort under a non-uniform environment by multiplying the heat load of human body parts.

**Keywords:** *Non-uniform Thermal Environment, Thermal Sensation, Thermal Comfort, Local Thermal Sensation, Subject, Floor Temperature*

不均一熱環境、温冷感、快適感、局部温冷感、被験者、床面温度

## 1. はじめに

室内の熱環境は様々な暖・冷房方式を用いて形成されるが、昨今システム・機器の効率、省エネルギー性と共に、快適性の向上も強く求められており、室内環境の熱的快適性を適切に評価することが必要である。また、快適性を評価することは、居住性の向上のみならず、より効率的な機器設計、運用に役立ち、しいてはエネルギー消費量の削減にもつながるものである。

熱的快適性<sup>1)</sup>の評価には、PMV<sup>1)</sup>やこれより算出されるPPD等が用いられ、居室が人体の全身温冷感に与える影響で測られることが多い。しかしながら、これら温熱環境の主な評価指標、PMVやSET<sup>2)</sup>等は、2-NODE MODEL<sup>3)</sup>に見られるように、評価するための熱環境は温熱要素が標準的な範囲にあり、かつ空気温度、輻射温度は、極端な分布が無いことを条件としており、空気や輻射の温度分布が不均一な熱環境（以下、不均一熱環境）の評価には適さない。

一方、実際の熱環境には対流やドラフト等による垂直方向の空気温度分布やパネルヒータ・窓面等といった部分的な温・冷輻射面の存在、床への接触による局所的な加温・冷却等があり、温度分布の均一な室内環境はほとんど存在しない。例えば冬期には、温風式や対流式、床暖房などの暖房が行われ、対流や輻射、伝導による温度

分布の存在から、均一な熱環境の仮定は難しいといえる。当然のことながらこれら室内熱環境の不均一性は、熱的快適性に影響し、上下温度分布や輻射など、温度分布の多くは熱的快適性を損う要因となっており、ASHRAE STANDARD<sup>4)</sup>などでも、これら不均一性を規制する基準が設けられている。その一方、床に周囲よりも高い温度面を持つ不均一環境（床暖房時）では、その熱的快適性の高さが認められ、接触部の温度、空気温度と床面温度の至適範囲について様々な研究・報告<sup>5)~20)</sup>がなされている。

温度分布の不均一性は、室内の熱的快適性に大きく影響し、たとえ中立な温冷感が得られる部屋であっても、垂直温度分布や不均一輻射の有無は室内熱環境を異なるものにする。不均一な温度分布が熱的快適性をどの程度損ない、または高めるか、その影響を定量的に把握し評価指標を作成することは、多様な室内環境の評価において重要な課題と思われる。

本研究は、不均一熱環境下における熱的快適性の定量的な把握を目的とし、室の床に不均一輻射面を持つ冬期暖房時の被験者実験の実施、その結果による不均一熱環境下における熱的快適性の評価手法について検討を行ったものである。

\* 早稲田大学理工学総合研究センター 研究員・工修

\*\* 早稲田大学理工学総合研究センター 教授・工博

\*\*\* 東京都立大学工学部建築学科 助教授・工博

\*\*\*\* 東京都立大学工学部建築学科 助手・工修

Researcher, Research Institute for Science and Engineering, Waseda Univ., M. Eng. Prof., Research Institute for Science and Engineering, Waseda Univ., Dr. Eng. Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan Univ., M. Eng.

2. 実験手法及び測定結果

さまざまな条件が考えられる不均一熱環境の中から、その不均一性が高い快適性をもたらしている床暖房に着目し、冬期暖房時を想定した室内被験者実験を行い、床面が不均一な室内熱環境形成の要因となっている場合について、不均一熱環境が熱的快適性に与える影響を測定するものとした。

床面を室内温度分布の不均一な部位とする場合、床面温度とそれ以外の温度には、以下のような条件が考えられる。1. 床暖房を想定した床面温度が他よりも高い場合（以下、床暖房時と呼ぶ）、2. 空気温度および室内表面温度がほぼ同等な場合（以下、均一暖房時と呼ぶ）、3. 通常の空気式暖房時に見られる床面温度が他の部位よりも低い場合（以下、空気暖房時と呼ぶ）の3条件である。本実験では、これらの条件を床面温度と空気温度の組み合わせにより形成し、その組み合わせが被験者の全身温冷感や局部温冷感、熱的快適性に与える影響の測定を行った。

(1) 実験の諸条件

◦実験室及び実験装置

被験者実験は、東京都立大学内の人工気象室に作成した試験室で行った。試験室の概要を図1に示す。試験室は形状及び熱性能の等しい8畳大（3.6m×3.6m、高さ2.6m）の2室で、両室とも空気温度と床面温度を別々に制御できるように考慮され、床には水を熱媒とした輻射パネルが設置されている。床面温度の調整は、このパネルに温水または冷水を循環して行う。壁面、及び天井表面温度はなりゆきであるが、本実験では室内の温度分布が熱的快適性に及ぼす影響を、その部位と温度について明確にする必要があり、床面以外の壁・天井面、空気温度については、同等かつ均一な温度分布でなくては

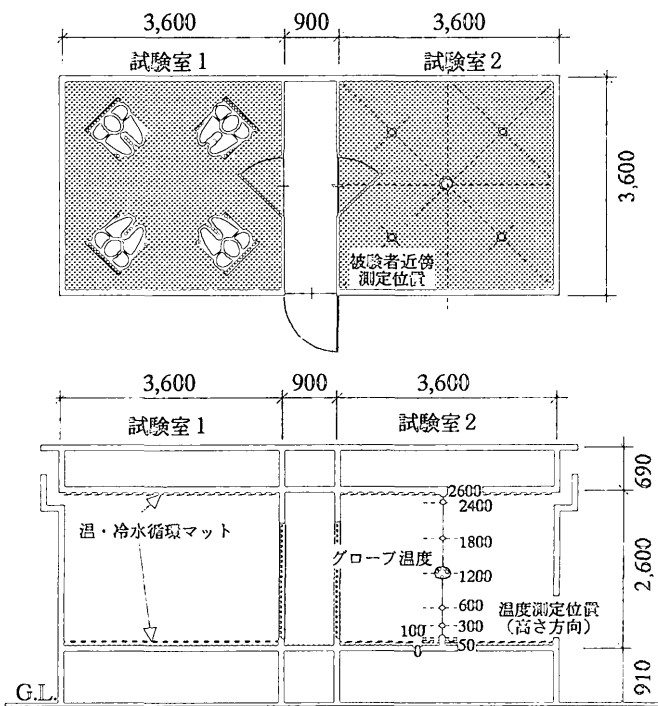
ならない。そのため、試験室外の条件が、試験室内壁面温度に与える影響をできるだけ無くすよう厚さ100mmの断熱を施し、ドラフトの防止、壁・天井表面温度の試験室内空気温度への近似化を図った。  
◦温熱条件

今回行った被験者実験の温度設定を床面温度と空気温度の組み合わせで表1に示す。実験範囲は既往の研究を踏まえ、床面温度を16℃～36℃、空気温度を16℃～30℃の範囲とし、この組み合わせの中から表に示す41ケースについて行った。今回の実験では床面温度が空気温度よりも高くなる床暖房時の条件を中心に、床面温度と空気温度が等しい均一環境時、床面温度が空気温度より低い状態の3つの条件について行っているが、それぞれの条件において、温熱的に中立（暑くも寒くもない）と思われる温度設定を中心に、20℃から30℃程度の作用温度が得られるような実験ケースの選定を行った。

試験室の周囲は、被験者入室前の熱環境条件を統一するための前室として使用し、温熱的にほぼ中立と思われる空気温度23.5度一定に制御した。空気湿度については、試験室内、前室共に冬期の平均的湿度<sup>※2</sup>を想定し40%一定とした。

◦被験者と実験のスケジュール

被験者は18才～26才の健康な青年男女で、1ケースあたり男女各8名以上あわせて16名以上のデータを得るものとし、実験総数は延べ747名になった。被験者の概要を表2に示す。被験者には冬期の標準的な服装を想定した指定の着衣（着衣量=1clo<sup>※3</sup>）を着用してもらい、図1に示すように一回の実験を1室4名ずつで行った。実験中は椅子座姿勢を保ち足はなるべく床につけているよう指示し、読書程度の作業を行ってもらった。被験者は指定の着衣に着替え、前室で20分すごしてもらった後、試験室内の環境条件に70分間曝露された。



試験室1、試験室2で室の仕様、温度等の測定位置は同じ

図1 試験室概要

表1 温度設定一覧

空気温度 [°C]	30					○		○					
	28			○	○			○		○		○	
	26		○	○		○		○		○		○	
	24		○		○	○	○	○	○	○			
	22	○		○		○	○	○		○			
	20	○		○		○	○	○		○			
	18		○		○		○		○		○		
	16		○		○		○		○		○		
		16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	
		床面温度 [°C]											

被験者	人数 (人)	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
全体	747	21.0	165.2	55.0
男性	375	21.2	171.4	60.6
女性	372	20.8	158.9	49.3
着衣状況	トレーナー、長袖シャツ、Tシャツ、ジーンズ、下着、靴下 (1.0 clo 相当)			
活動状況	椅子座・読書程度の軽作業 (1.0 met 相当)			

表2 被験者概要

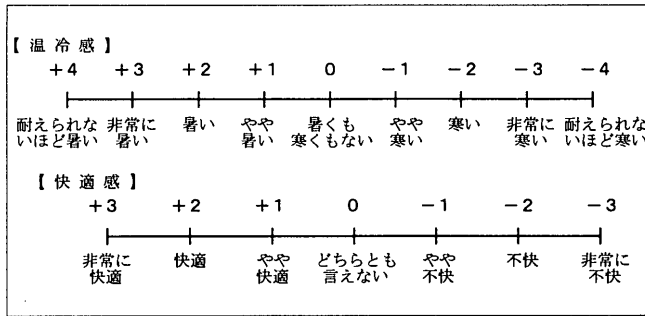


図2 申告に用いた尺度と用語

・申告項目

心理量について、全身温冷感、局部温冷感、熱的快適感、不満足感などの主観申告を、前室において2回(入室時と退室時)、試験室内で6回(入室時から15分間隔で5回+70分目)申告してもらった。申告に使用した尺度は、図2に示すように、全身と局所の温冷感について9段階の尺度を、熱的快適性について7段階の尺度を用いた。温冷感尺度には涼暖感を含まない寒暑感だけの尺度<sup>24)</sup>を採用した。これは、温冷感申告に熱的快適性の意味合いを持たせず、熱的中立を熱的快適性とできるだけ区別することを目的としたためであり、快適性の意味合いを持つと考えられる涼暖感については使用を避けている<sup>25)</sup>。また快適感申告には、不快側のみの片側尺度が一般的に用いられているが、本実験では温熱的な中立時においてもその熱的快適性には差が生じるものと考え、より詳しく区別する必要性から、積極的な快適性を示す「非常に快適」から「やや快適」までの3つに区分した。不満足感については、曝露された試験室の熱環境条件を「満足できる」、「満足できない」の2値で評価させ、この申告をもとに、各実験ケースの熱的不満足率を求めた。熱的不満足率は、同一条件下に曝露された被験者(16名以上)の内、「満足できない」と回答された割合をパーセンテージで表している。

・温熱環境要素の測定

試験室内の熱環境は、0.2mmφC-熱電対を用い室中央の温度分布を中心に気温、壁面温度、グローブ温度等についてデータロガーによる1分間隔の計測を行った。また気流速度については3次元風向風速計を用い、実験開始前の被験者がいない状態で空調吹き出し口付近、及び被験者位置の足下、椅子座時の人体中心位置と思われる高さ600mmの位置で測定を行った。

(2) 試験室内の熱環境測定結果

試験室内の気流速度は、空気温度の調整のため室内温度に比べて低い吹出温度が必要だった実験ケース(空気温度18℃以下、床面温度24℃以上)で、位置によって0.2m/s程度の気流が測定されたが、被験者の座席付近ではすべての実験条件において0.15m/s以下に抑えられていた。部屋中央の垂直温度差はほとんどなく、床上600mmと1200mmの温度差は、ほとんどの実験ケースで0.5℃<sup>26)</sup>以下に収まっていた。設定値と実験時の設定温度誤差は空気温度-0.3℃~+0.5℃、床面温度-0.6℃~+0.8℃であった。

(3) 解析に使用した申告データ

申告値の経時変化の一例を図3に示す。実験時の温冷感・快適感等の申告値は、ほとんどすべての実験ケースにおいて15分以降大き

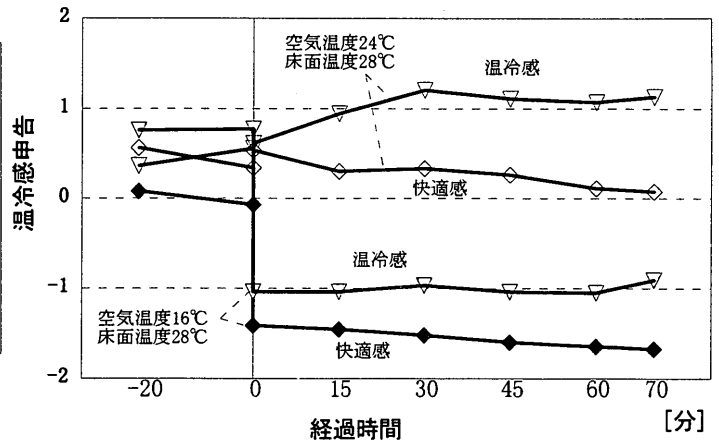


図3 全身温冷感の経時変動

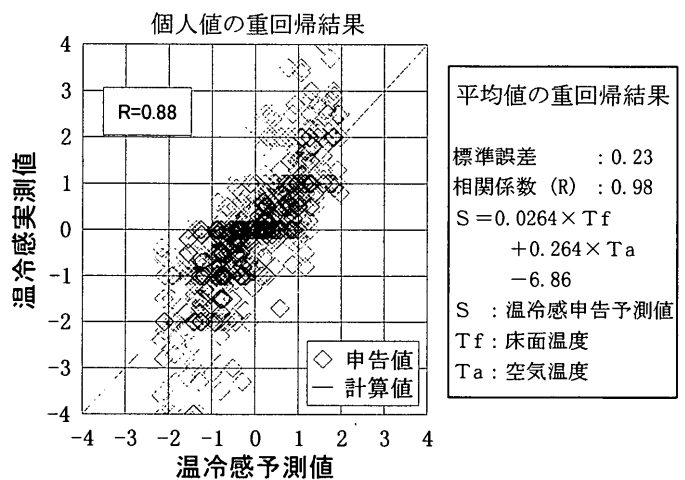


図4 床面温度と空気温度による全身温冷感の重回帰結果

実験時の設定誤差

	[°C]	平均誤差	標準偏差	[°C]	平均誤差	標準偏差
空気温度	-0.03	0.49		床面温度	+0.10	0.30

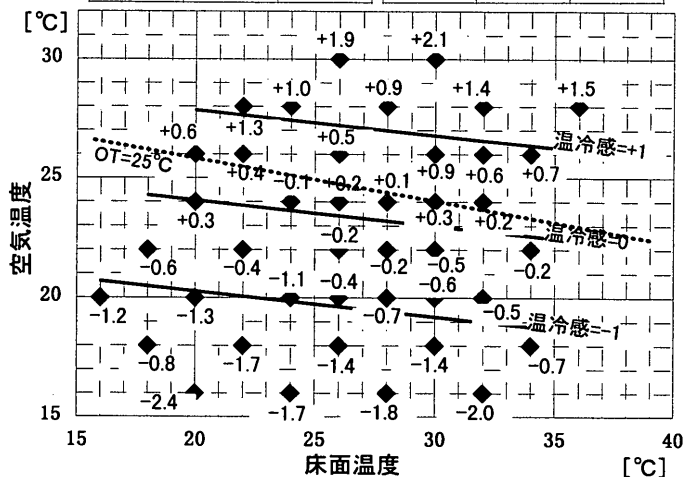


図5 床面温度と空気温度による全身温冷感の分布

な変化は見られず、申告値においては15分以降ほぼ安定するものと考えた。本研究の解析には定常時のデータを使用するものとして、さらに45分間の暴露時間を取り、試験室入室後60分以降のデータのみを使用した。また解析には総数747名分の被験者データから、申告の記入漏れがあったものと、試験室の温度調整に不備があった実験ケース<sup>26)</sup>を除き、41ケース678名分について解析を行った。

3. 熱的快適性に関する考察

(1) 床面温度と空気温度による全身温冷感の予測

図4は、全身温冷感を目的変数に、床面温度と空気温度を説明変数に重回帰分析を行い、その結果得られた予測式と実際の申告結果を比較している。得られた相関係数は $R=0.88$ で、全身温冷感との相関が認められる。ここで、本研究において熱的不満足率の算出など床面温度と空気温度の組み合わせによる各実験条件ごとに評価を行う目的から、各実験条件ごとの全身温冷感の平均値を求め、同様の分析を行った。実験値と予測結果の相関は $R=0.98$ と非常に高く、本実験条件における各条件ごとの全身温冷感の平均値を、床面温度と空気温度によりほぼ正確に予測することが可能と思われる。この回帰結果から床面温度の変動が人体温冷感に与える影響は、空気温度による影響の1/10程度であると考えられる。

この重回帰の結果から床面温度と空気温度による全身温冷感の予測を行い、実際の申告値とともに図5に示す。図中の温冷感が等しいと予測される床面温度と空気温度の組み合わせは、グラフ上でやや右下に傾く直線で示され、空気温度が等しい場合、床面温度が高くなるにつれ全身温冷感もやや高くなる傾向が示される。しかしながらこの傾きは同じ作用温度を示す直線よりも緩やかで、全身温冷感には空気温度による影響が大きい<sup>(註7)</sup>ものと思われる。

(2) 全身温冷感と熱的快適性

図6は、全身温冷感と熱的快適性の関係について示している。熱的快適性は、全身温冷感が $\pm 0$ (暑くも寒くもない)付近で高くなり、+(暑い)側もしくは-(寒い)側に向かってその快適性は低下している。しかしながら温冷感が $\pm 0$ と申告されている場合でも、快適感が-1(やや不快)とされている場合もあり、熱的快適性には全身温冷感以外の要素も関係していると考えられる。いいかえれば、不均一熱環境下では、温冷感が中立であっても常に快適な熱環境であるとは言えない。そこで、この原因を床面温度と空気温度の不均一性による影響と考え、快適感申告を、床面温度と空気温度の組み合わせで、前述した3条件[床面温度が空気温度よりも低い場合(空気暖房時)、高い場合(床暖房時)、等しい場合(均一時)]<sup>(註8)</sup>に分け考察を行った。

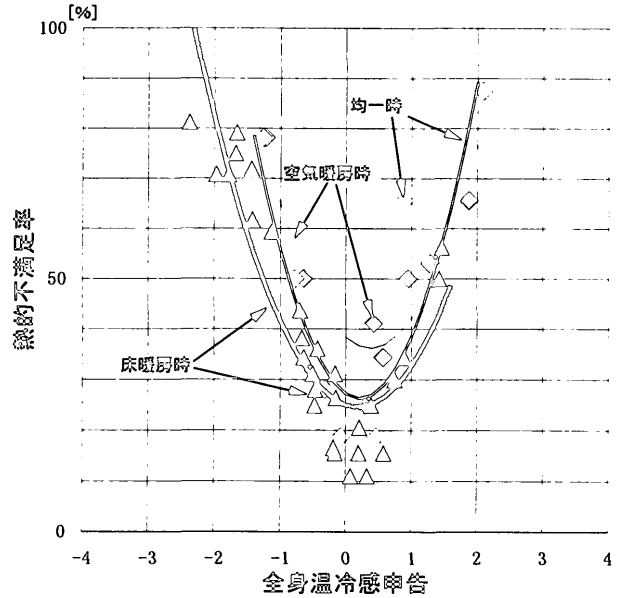


図7 全身温冷感申告と熱的不満足率

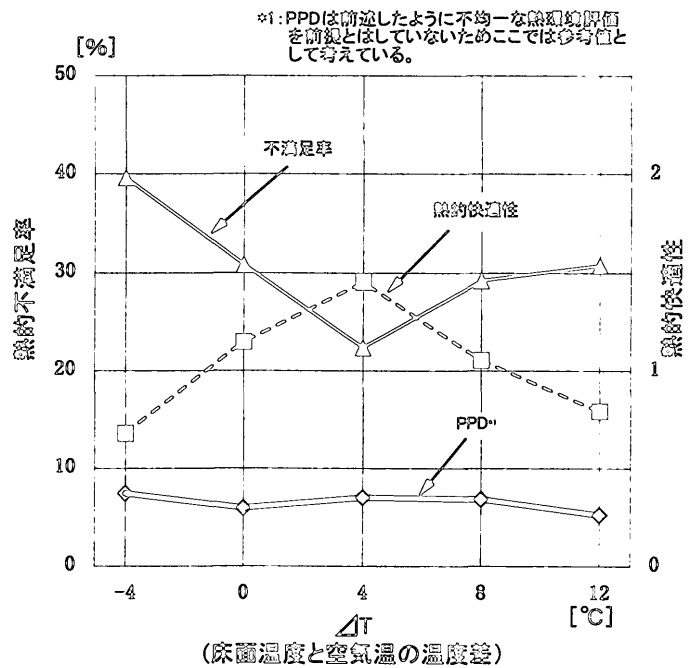


図8 全身温冷感が $\pm 0$ の時の熱的快適性

表3 全身温冷感が $\pm 0$ の時の熱的快適性

$\Delta T$	熱的快適性	$\sigma$	$\Delta T=4$ などの5% 有意差	不満足率	ppd	温冷感=0と予測される床温と空気温
-4 °C	0.68	0.73	○	39.6 %	7.5 %	床20.0 - 空24.0
$\pm 0$ °C	1.15	0.89	×	30.9 %	6.0 %	床23.6 - 空23.6
+4 °C	1.46	0.81	-	22.4 %	7.0 %	床27.3 - 空23.3
+8 °C	1.05	0.87	○	29.3 %	6.9 %	床30.9 - 空22.9
+12 °C	0.79	1.13	○	30.8 %	5.3 %	床34.5 - 空22.5

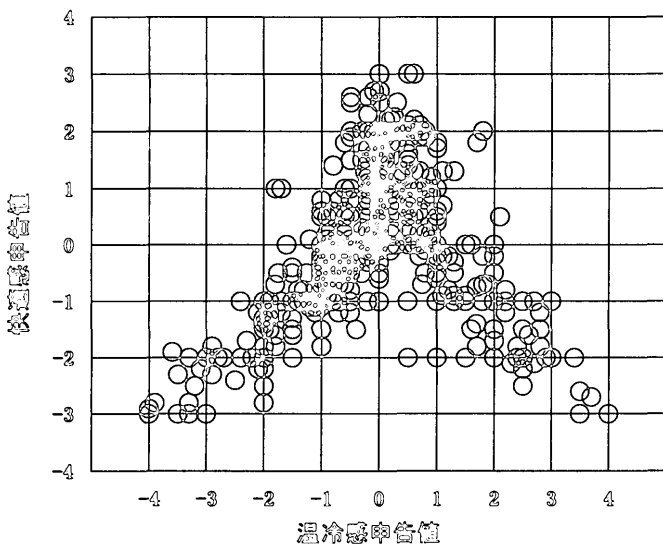


図6 全身温冷感申告と快適感申告

図7では申告から得られた熱的不満足率と全身温冷感との相関を、3つの条件に分けて表記している。それぞれの条件は共に[暑い]もしくは[寒い]側に行くに従い不満足率が高くなり、±0(暑くも寒くもない)付近(空気暖房時では+0.5付近)で不満足率が最も低くなっている。次に、それぞれの方式別に得られる最も低い不満足率は、均一時と床暖房時がほぼ等しい値25%程度であるのに比べ、空気暖房時では最も快適と予測される場合でも36%程度にとどまっている。このことから、至適な温冷感が得られた場合であっても、床面温度が空気温度よりも低い場合は、均一時や床暖房時に比べ、その熱的快適性(熱的不満足率)が低く示されることが認められた。

ここで、これら3つの条件を床面温度と空気温度の差( $\Delta T$ と記す。 $\Delta T = \text{床面温度}(\text{°C}) - \text{空気温度}(\text{°C})$ )で分類し、床面温度と空気温度の組み合わせが熱的快適性に与える影響をより詳しく解析する。表3・図8は、今回の実験条件を $\Delta T$ で分類し、それぞれの条件 $\Delta T$ ごとに全身温冷感申告±0が得られた際の熱的快適性・不満足率<sup>29)</sup>についてに示している。熱的快適性は床面温度が空気温度よりも4°C高い時( $\Delta T = +4\text{°C}$ )に最も高く、また $\Delta T = -4\text{°C}$ の空気暖房時にその快適性は最も低く示された。これにより、床暖房時(床面温度が空

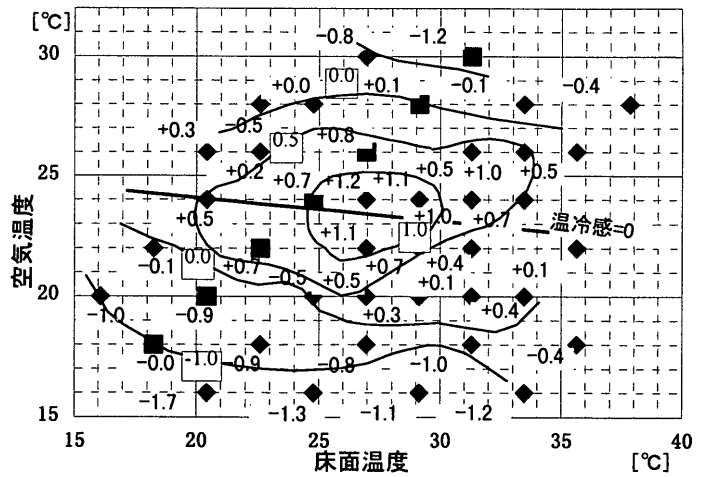


図9 床面温度と空気温による快適感の分布

気温度よりも高い場合)の快適性の高さがあらためて認められたが、床面温度が空気温度よりも8°C以上高い場合( $\Delta T \geq 8\text{°C}$ )その快適性は低くなる傾向にある。

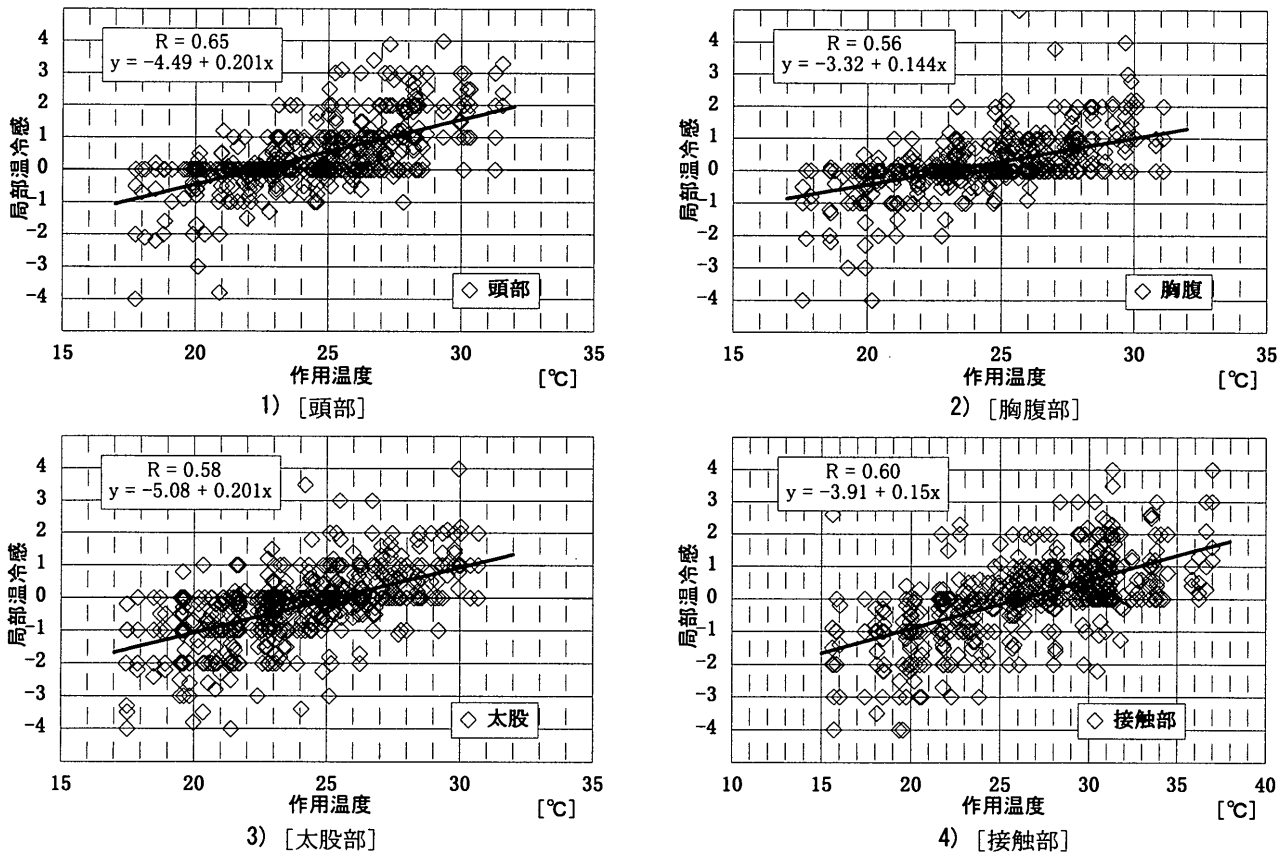


図10 作用温度と局部温冷感

表4 局部毎の至適作用温度

部位	頭部	首	腕	手	背中	胸腹	腰	太股	膝下	足首	接触	全身
床上位置(mm)	1200	1000	700	600	800	800	600	500	300	100	0	600
至適作用温度	22.3	23.4	23.7	23.3	23.6	22.9	23.3	25.3	26.3	26.6	26.2	24.4
相関係数	0.65	0.61	0.63	0.62	0.61	0.56	0.48	0.58	0.61	0.60	0.62	0.76

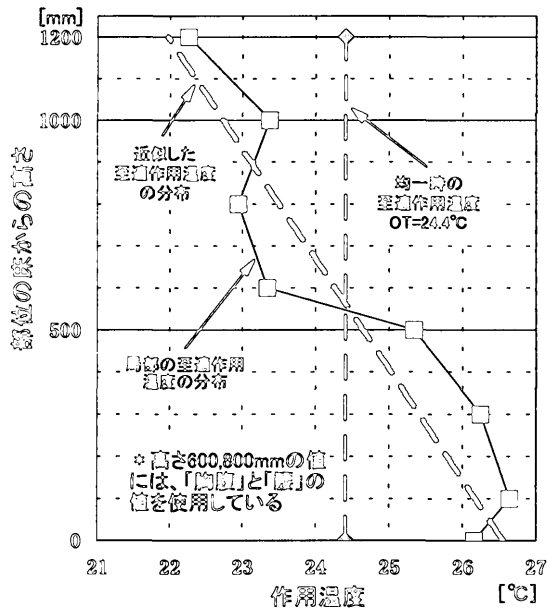


図11 局部至適温度

この結果から室の床に温・冷放射面が存在する不均一熱環境において、その熱的快適性は全身から求められる温熱的な暑さ寒さのみに起因するのではなく、床面温度との組み合わせによる不均一性といった要素も影響していることが示された。図9には、今回の実験から得られた熱的快適性を床面温度と空気温度について整理し、その分布について示している。図中には全身温冷感が±0と予測される床面温度と空気温度の組み合わせ（グラフでは直線上に分布している）を共に示しているが、そのライン付近において熱的快適性の違いが認められる。この図より、熱的快適性は床面温度25°C～32°C、空気温度23°C～25°Cのとき最も高く、この範囲をはずれ周囲に行くに従い低い値が示されている。

(3) 局部温冷感と局部至適温度

今回の実験により、不均一環境においては、たとえ温冷感が中立であってもその熱的快適性には差異が生じることが示された。しかしながら、図8に示されたように、熱的不満足を数値的に求める指標PPDIにおいては、温度の不均一性による影響は示されない。もとより不均一環境への適応には制限があるが、その大きな要因には、PPDが全身の温冷感を基に考えられているのに対し、不均一熱環境下では、たとえ「暑くも寒くもない」全身温冷感が中立な状態においても、足部の冷えや床暖房時の床への接触のように、局所的な加温・冷却等が存在し、これら局部へ影響が熱的快適性に差異を生じさせるためと考えられる。そこで、局部に与えられる影響を考慮することで、不均一熱環境の熱的快適性の評価を数値的に把握できないかと考えた。すなわち、ここまで全身の温冷感でとらえてきた熱的快適性に、局部温冷感による影響を考慮することで、全身温冷感ではとらえられない、温度分布の不均一性がもたらす影響についても評価しようと試みるものである。

まず、人体局部の温冷感について、作用温度との相関を求めた。今回定義した人体の区分は「頭部」から「床との接触部」までの11部位で、表4に区分した部位とその高さ、部位毎に得られた温冷感と作用温度の相関を示す。人体各部位の床からの高さについては、個人差もあり、上半身において多少の誤差も考えられるが、以下の

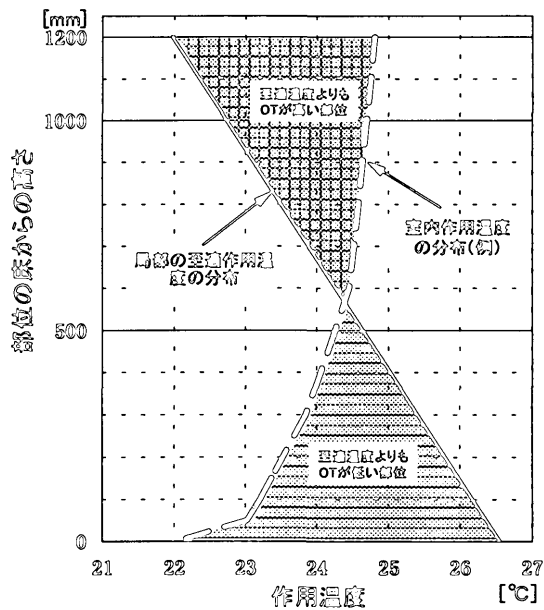


図12 空気温度と局部至適温度

解析では全被験者に対しこの数値を使用している。また、接触部の計算には作用温度ではなく床面温度を用いている。図10には例として頭部、胸腹部、太股部、接触部における作用温度と局部温冷感の回帰結果を示す。

ここで、各部位の作用温度との相関はそれほど高くはないが、局部おのおので温冷感が±0（暑くも寒くもない）となる作用温度を至適な作用温度とし、各部位について回帰式より至適作用温度を求めた。図10-1)頭部における局部温冷感と、床上1200mmの位置の作用温度の回帰の結果、頭部における至適作用温度は22.3°Cとなり、同様に計算された他の部位の至適作用温度（表4）と比較して最も低い値を示した。それに対し、至適作用温度が最も高かったのは足首部の26.6°Cであった。

図11は、各部位毎に求めた至適作用温度を床からの高さで表している。局部ごとに求められた至適作用温度は、頭部から足部にかけて高くなり、頭寒足熱の傾向が示されている。

(4) 局部温冷感による全身温冷感と熱的快適性の予測

環境温度と局部の至適温度の違いを熱的快適性を損なう要因と考えられるなら、通常の室内気候は、たとえ温度分布がなく中立の温冷感が得られる室内環境であっても、図11に記した均一時の至適温度のように、上半身ではより低く、下半身ではより高い作用温度が求められていると考えられる。すなわち、本実験の結果である頭寒足熱の傾向が、最も至適な温度分布であるとすれば、通常の室内環境には局部的な負荷（至適温度からのずれ）が常に存在し、局部に熱的不快感を与えていると考えられる。このずれの大きさが熱的快適性を損なう要因と考えれば、床暖房時（至適温度分布に似た室温形成が可能）の快適性の高さや、ドラフトによる足もとの冷えなど、室内温度分布による快適感への影響を表現することができ、不均一熱環境における熱的快適性を数値的に予測することが可能と思われる。

そこで、図12のように表される環境の作用温度と局部毎の至適温度との温度差を局部的な熱負荷（熱的快適性を損なう要因）と考え、この負荷を数値化し、不均一熱環境下における温冷感と熱的快適性の予測式の作成を試みた。全身温冷感については、図中に示される

環境の温度分布が局部の至適温度分布よりも高い部分と低い部分のバランスで表し、熱的快適性については、環境の温度分布が高い側低い側に関わらず、至適温度とのずれの大きさで表すものとした。すなわち、至適温度分布に比べ室内熱環境の温度分布が大ききはずれている場合であっても、そのずれの+側と-側がバランスするならば、全身温冷感としては暑くも寒くもない環境であり、一方熱的快適性は+側、-側それぞれの符号には関係なく、ずれの大きさが快適性を損なう要因とした。

全身温冷感に影響する環境温度と至適温度のずれのバランスを表す指標として「全身温冷感への有効負荷温度：LS」を(式1)に、熱的快適感に影響するずれの大きさについて「熱的快適性への有効負荷温度：LC」を(式2)に示す。「全身温冷感への有効負荷温度」は環境温度と至適温度の差の平均を、「熱的快適性への有効負荷温度」では、温度差の絶対値の平均を求めている。平均値を取ることで、温度分布が至適温度分布と等しい等しい傾きを持つ熱環境、すなわち、環境の温度分布が高さ方向に、至適温度分布と同様の傾きを持ち至適温度分布から見て垂直温度差のない均一な分布を仮定し、全身で同等の負荷が得られる場合の至適温度とのずれとして表した。

至適温度分布から求めたこのLS(式1)、LC(式2)を実際の申告結果に合わせ、全身温冷感(式3)<sup>注10,注11</sup>、熱的快適感(式4)<sup>注12</sup>、熱的不満足率(式5)の予測式を作成した。式3より求めた全身温冷感の予測結果と実際の申告値をともに図13に示す。予測結果と実測値の相関はR=0.93となり、ほぼ正確に全身温冷感の申告結果を表すことができた。

熱的快適感・熱的不満足率の予測結果を図14に、また今回の実験範囲について床面温度と空気温度による熱的不満足率の予測結果<sup>注13</sup>を図15に示す。熱的不満足率の予測の結果、予測値と実測値の相関はR=0.81となり、床に温・冷輻射面を持つ今回の実験範囲についてその熱的快適性をほぼ表すことができたものと思われる。

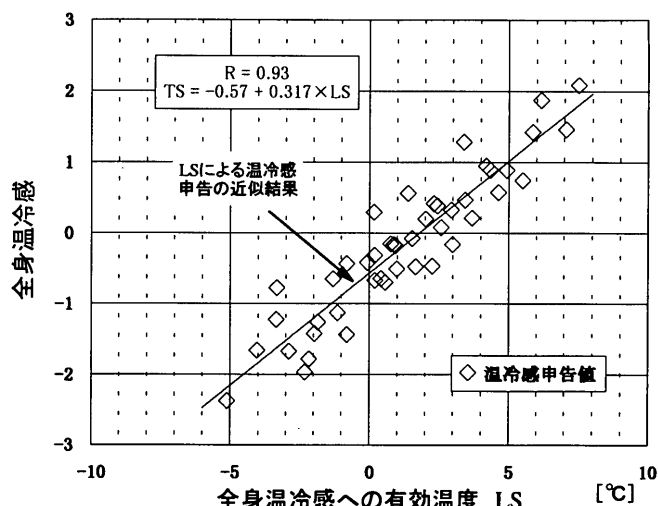


図13 全身温冷感予測結果

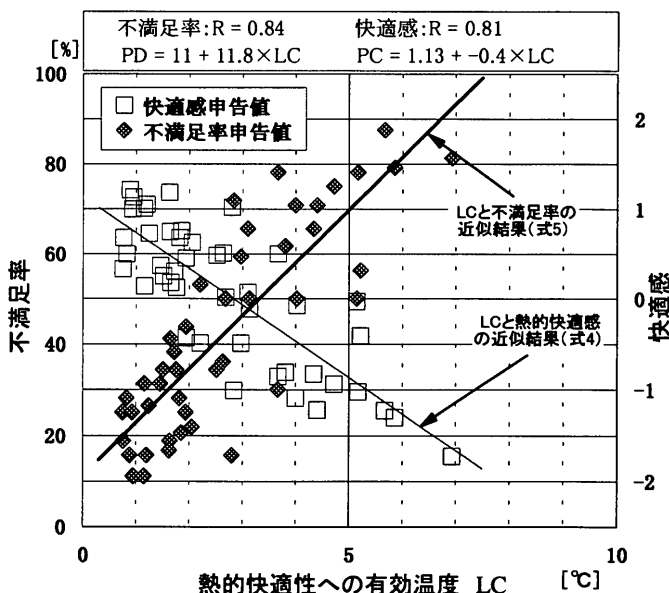


図14 不満足率・快適感予測結果

局所至適温度から求めた「全身温冷感への有効負荷温度」

$$LS = \sum_{h=0}^{1200} (OT_h - OP_h) / 1201 \quad \dots(式1)$$

局所至適温度から求めた「熱的快適性への有効負荷温度」

$$LC = \sum_{h=0}^{1200} (OT_h - OP_h) / 1201 \quad \dots(式2)$$

LSによる全身温冷感予測式

$$TS = 0.317 \times LS - 0.57 \quad \dots(式3)$$

LCによる快適感予測式

$$PC = 11.8 \times LC + 11.0 \quad \dots(式4)$$

LCによる不満足率予測式

$$PD = -0.4 \times LC + 1.13 \quad \dots(式5)$$

TS : 全身温冷感の予測値    h : 床からの高さ(mm)  
 PC : 熱的不満足率の予測値    OTh : 高さh毎の作用温度  
 PD : 熱的不満足率の予測値    OP\_h : 高さh毎に求められた至適作用温度

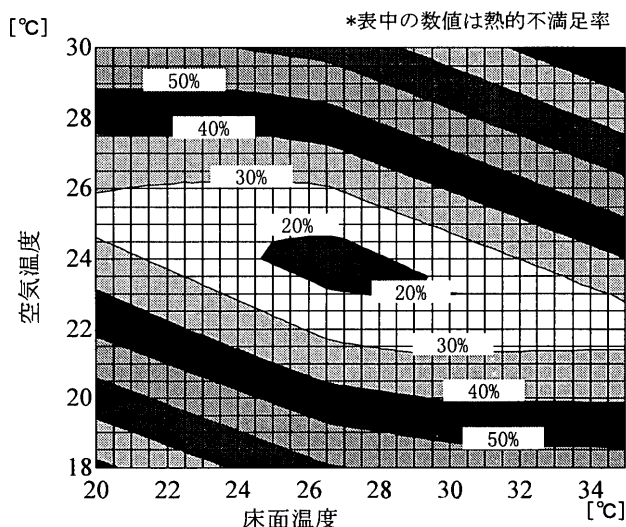


図15 床面温度と空気温度による不満足率予測結果

## 4. まとめ

本報では、不均一環境における熱的快適性を定量的に把握する評価手法の作成を目的とし、冬期暖房環境を想定した試験室において、青年男女述べ747名による被験者実験を行い、局部温冷感を用いた熱的快適性評価手法について検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 今回の実験範囲について、温冷感申告を、床面温度と空気温度によりほぼ正確に表すことができた。
- 2) 熱的快適性は、床面温度25℃～32℃、空気温度23℃～25℃で最も高くなり、床面温度、空気温度共にそれ以上、それ以下であっても熱的快適性は低く示された。<sup>注14</sup>
- 3) 熱的快適性は、たとえ環境が与える温冷感が中立であっても、室内温度分布の状態により異なった快適性が得られた。
- 4) 人体局部における至適作用温度は、頭部が22.3℃と最も低く、足部の床への接触部26.1℃まで、人体下部に行くに従い高い値を示し、頭寒足熱の傾向が認められた。
- 5) 人体局部ごとの至適作用温度を基準し、環境温度との差を表した「温冷感への有効負荷温度」、「熱的快適性への有効負荷温度」を用いることにより、床面温度と空気温度を組み合わせた不均一環境における温冷感・熱的快適性（不満足率）について、その温度分布がもたらす影響を含め、評価を行うことができた。

## 注

- \*1 熱的快適性の定義には様々あり、例として用いたPPDは熱的に不満足とされる割合を示すものである。本論文では熱的な快適性のみならず、不快性や熱環境に対する許容の有無までも含め「熱的快適性」として広義に解釈した。また、熱的な快・不快性を一軸に表したものを熱的快適感、この快適感に起因すると思われる熱環境に対する許容の有無を不満足率と区別した。
- \*2 冬期暖房時の室内湿度は、暖房方式、在室者数、換気量などにより変化し、実際の暖房環境では、40%以下になる場合も多い。しかしながら、本実験では床面温度と空気温度の温度の不均一性について特化し、湿度については40%一定とすることで、温冷感・快適感への影響については考慮しないものとした。
- \*3 着衣量の計算は花田らの式<sup>21)</sup>を使用し0.98と算出されたが、実際に被験者が持参したトレーナー、長袖シャツ、ジーンズそれぞれのclo値にはばらつきがある。例えば、被験者にはシャツの素材等について厚手のものを指定したが、その素材厚さにばらつきがあり、実際の数値としては全体で0.8clo～1.0cloであったと思われる。
- \*4 温冷感・快適感の尺度については様々な議論がなされているが、今回の実験では尺度用語に快適性の意味合いを持たない身寄感のみの尺度を使用した。また参考文献<sup>23)</sup>では、これまで温冷感実験に使用されてきた尺度について、その一部をまとめ、報告している。
- \*5 垂直温度差の平均値は0.16℃であった。下表に詳細を示す
- | 平均   | 標準偏差 | 90%区間 | 最大値  | 最小値   |
|------|------|-------|------|-------|
| 0.16 | 0.24 | 0.47  | 0.78 | -0.24 |
- \*6 温冷感快適感申告について、何か一つでも記入漏れがあったものは解析には用いていない。実験時の温度設定に不備（極端な温度変動など）があったものに関しては、再実験を行った。
- \*7 本実験条件においては、着衣量、代謝量、気流速度、湿度が一定であるため、PMV、SET等は作用温度により同等に表されるが、本実験での全身温冷感申告はこれらの指標による熱収支と比較して、床面温度の変動による影響が小さく表されている。
- \*8 床面温度が空気温度よりも低い場合は、通常の冬期暖房環境ではよく見られる状態であるが、本文中では便宜上[空気暖房時]として明記した。また、空気温度と床面温度がほぼ同等な場合を[均一時]と表記した。
- \*9 ここで表された熱的快適性、不満足率は、 $\Delta T$ が等しい実験条件それぞれで全身温冷感申告±0が得られた被験者の申告を抽出し、その際の快適感申告値の平均と、「不満足」と答えた被験者の割合を示すものである。同様に、図中に示したPPDは、全身温冷感±0が得られた際の室内熱環境測定結果より計算値で、 $\Delta T$ ごとに平均を求めている。
- \*10 本式「Σ」より右辺では至適温度と作用温度のいずれの平均値を求めている。また「Σ」にかかる係数は申告値との近似により求めた。
- \*11 式1,2ともに、各部位それぞれの位置における作用温度は、その部位での空気温度と微小球に対する放射温度を周囲の壁面温度と天井面温度、床面温度より算出している。また計算に用いた空気温度は室中央で測定されたものであるが、測定を行っている位置は室中央の床面、床上50、100、300、600、1200（mm）で、測定されていない高さについては測定されている位置の実測値から直線的に補完を行っている。
- \*12 本式は、至適温度分布と環境の温度分布のずれをその符号に関係なく表すため、[OTh-OPh]を絶対値で平均している。また、温度差を測定する高さ方向の間隔は1mmとした。この間隔を小さくすることにより、床面付近

の細かな分布についても計算を行うものとした。

- \*13 床面温度と空気温度により形成される室内の作用温度の分布は、壁面、天井面温度については空気温度と等温、空気温度の分布については300mm以上に温度分布はなく、0～300mmまでは床面温度と空気温度から直線的な傾きを持つものとした。
- \*14 既往の研究<sup>31)~38)</sup>に見られる床暖房時の床面温度と空気温度の推奨値は、床面温度が25℃～32℃、空気温度が18℃～23℃程度であった<sup>31)</sup>。本実験の結果では、床面温度については同程度の温度範囲が得られたが、空気温度については23℃～25℃と高い範囲を示している。この理由の一つは、本研究が示す温度が推奨値ではなく至適範囲であり、冬期暖房時にはエネルギー的に推奨できない暖めすぎた環境をも含んでいること、また、本実験時に使用した着衣は、計算上1cloとなるように選出したが、脚注4でも述べた着衣量の少なさが大きな要因と考えられる。

## 参考文献

- 1) Fanger, P.O. : Thermal Comfort 2ed ed , Facsimile of 1970ed., McGraw-Hill, New York, 1972
- 2) Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L.G. : A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, Part 2B, pp709-731
- 3) McIntyre, D.A. : Indoor Climate, Applied Science Publishers, 1980
- 4) ASHRAE : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE STANDARD, ANSI/ASHRAE 55-1992
- 5) 堀越 他 : 床温が人体に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集, 1991
- 6) 宮本 他 : 床暖房時の温熱環境表現方法に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集, 1994
- 7) 永村 他 : 床暖房時の人体生理・心理反応に関する研究 その1,2,3 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1990・91
- 8) 坊垣 他 : 体感気候に関する研究 第IX報、日本建築学会大会講演梗概集, 1978
- 9) 坊垣 他 : 床暖房の体感効果に関する実験的研究、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1984
- 10) 磯田 他 : 床暖房温度の人体に及ぼす影響について、日本建築学会大会講演梗概集, 1986
- 11) 坊垣 他 : 床暖房の体感効果に関する実験的研究II、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1986
- 12) 磯田 他 : 床暖房温度の人体に及ぼす影響について その2、日本建築学会大会講演梗概集, 1987
- 13) 井上 他 : 低温輻射暖房、温風暖房、床暖房の快適性とエネルギー消費量に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1988
- 14) 坊垣 他 : 床暖房の快適性に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1990
- 15) 高橋 他 : 不均一熱環境の快適性評価に関する基礎的研究、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1990
- 16) 坊垣 他 : 床暖房の体感効果に関する実験的研究III、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1990
- 17) 磯田 他 : 床暖房の快適性に関する研究 その2、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1991
- 18) 伊藤 他 : 室内気候における輻射要素に関する研究 2、建調東支'76
- 19) 伊藤 他 : 暖房環境における輻射要素に関する研究 その1、日本建築学会大会講演梗概集, 1987
- 20) 伊藤 他 : 床暖房のアメニティ評価に関する研究委員会：報告①、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1990・91
- 21) 花田 他 : 男子用下着類の熱抵抗の計測に関する研究, 1983, 繊維消誌, 24-8, pp. 363-369
- 22) 久野 他 : 温熱環境が変化する場合を含んだ温冷感評価について、寒暑感と涼暖感, 1985年, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 543-544
- 23) 伊藤 他 : 熱的快適性からみた床暖房時の床温と空気温の関係について-1. 既往研究のデータによる快適域の検討-, 1992年, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 995-996
- 24) 伊藤 他 : 熱的快適性からみた床暖房時の床温と空気温の関係について-2. 被験者実験による等快適ラインの検討-, 1992年, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 997-998
- 25) 伊藤 他 : 冬期における床温と空気温の組み合わせによる熱的快適性について-その1. 被験者実験による検討-, 1993年, 空気調和衛生工学会学術講演論文集, 77-80
- 26) 伊藤 他 : 冬期における床温と空気温の組み合わせによる熱的快適性について-その2. 床面温度と室内空気温度による熱的快適性予測式の検討-, 1993年, 空気調和衛生工学会学術講演論文集, 81-84
- 27) 伊藤 他 : 異なる暖房方式の熱的快適性の評価に関する研究-その1. 全身温冷感と局部温冷感に関する研究-, 1994年, 空気調和衛生工学会学術講演論文集, 1317-1320
- 28) 伊藤 他 : 異なる暖房方式の熱的快適性の評価に関する研究-その2. 床温と空気温の組み合わせによる等快適ラインの検討-, 1994年, 空気調和衛生工学会学術講演論文集, 1321-1324
- 29) 伊藤 他 : 異なる暖房方式の熱的快適性の評価に関する研究-その3. 床坐での温冷感と快適感に関する考察-, 1995年, 空気調和衛生工学会学術講演論文集, 1241-1244
- 30) 伊藤 他 : Study on Establishing an Equivalent Thermal Comfort Chart for Comparative Evaluation of Heating Systems., 1995年, The 2nd International Conference on New Energy Systems & Conversions, 285-290 S

(1996年10月10日原稿受理, 1997年6月24日採用決定)