電気式床暖房室内の熱放射場に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THERMAL RADIATION FIELD IN A ROOM WITH ELECTRIC FLOOR HEATING

百家裕季*, 中村泰人**, 岡本孝美***, 天川章史****
Hiroki MOMOKA, Yasuto NAKAMURA, Takami OKAMOTO
and Akifumi AMAKAWA

Thermal radiation field in a room with electric floor heating was investigated by experiments using a cubic net radiometer. The surface temperature of the floor was set at a high temperature of 50 degree centigrade at the highest, for the sake of conducting an evaluation method of thermal environment in the room with floor heating. The height of measurement was selected at 50cm above the floor corresponding to the posture of a human body sitting on the floor. Using the cubic net radiometer made it possible to analyze the variation of thermal environment in the room owing to the directionality of the instrument.

Keywords: cubic net radiometer, floor heating, instrumentation, experiment, surface temperature, thermal radiation field
立方体正味放射計、床暖房、計測法、実験、表面温、熱放射場

1. はじめに

空間中に放射性媒質を含むか否かにかかわらず、境界面上および空間中のある点では、その温度に基づいて周囲のあらゆる方向へ放射を発生すると同時に、周囲のあらゆる方向から放射を受けて吸収することを、放射伝熱学¹⁾は教えている。これら空間中における熱放射の複雑な流れの状態は、熱放射場^{2) 3)}と捉えられる。

熱放射場では一般に、温度に高低差があると無数の放射の流れに方向性が生じる。放射の方向性を示すには放射束ベクトル⁴⁾の表現が最適である。放射束ベクトルの各成分から人体に対する平均放射温度が表現できることは、すでに指摘³⁾されている。放射束ベクトルは、立方体正味放射計⁵⁾を用いた測定で得ることができる。^{注1)}

さて近年、暖房システムとして床暖房が普及してきたが、床暖房によって形成される室内の熱環境は、設計に結びつくような評価がなされることなく、今日に及んでいる。とくに床暖房は通常の暖房方式と異なっていて、一般的な熱環境指標である SET* や PMV では十分に表せないのが課題である。それゆえ、快適性や安全性のみならず、省エネルギー性の観点からも、設計に適用できる床暖房評価法の確立が望まれている⁶⁾。

しかしながら、床暖房が他の暖房システムと性質を異にするといっても、形成された熱環境の評価には、他のシステムとの比較を可能にする必要があるから、熱環境の物理的な諸量の計測が基本になることは論をまたない。そこで本研究では、床暖房による室内熱環境の適切な評価法を導出することを目標としつつ、関係する物理的

な諸量、とくに放射の方向性を中心にして、床暖房によって生じた熱放射場を実験的に精査することを目的とするものである。

熱放射場の測定には、一般にグローブ温度計が用いられるが、それで平均放射温度が得られるとしても、時定数が大きいために測定精度が劣り、しかも放射の方向性が不明であるから、それ以上に分析が進まない。その欠点に拘束されないように、本研究ではグローブ温度計に代わって立方体正味放射計を用いた。

なお、表題で電気式床暖房と称しているが、これは実験対象とした床暖房が電気式床暖房であり、電気式に固有の変動が忠実に計測できたことから電気式床暖房と記したにすぎない。一般的な研究結果は電気式床暖房にかぎらず、温水式床暖房にも適用できる。

本論文は、既発表文献⁷⁾を基に加筆構成したものである。

2. 研究方法

2.1 実験対象室

実験の対象とした室は、図1に示すように、平面4.5m×6.0m、天井高2.45mの室で、1短辺側が南に面し、南面にはガラス窓があってカーテンがかけられている。対する北側の辺は一部に開口を通じてキッチンにつながっている。すなわち、住宅のやや大型のLDKの造りである。

床は、表面はすべてフローリング仕上げで、その裏側に電気暖房パネルが設置されている。電気パネルは、1枚の大きさが303mm×1818mmであり、連続した千鳥配置として室の中央部3636mm×

* 熊本県立大学大学院環境共生学研究科 学生

** 熊本県立大学環境共生学部 教授・工博

*** 熊本県立大学環境共生学部 助手・工修

**** 関西電力㈱エネルギー利用技術研究所 主任研究員

Graduate Student, Graduate School, Prefectural University of Kumamoto
Prof., Prefectural University of Kumamoto, Dr. Eng.
Assistant, Prefectural University of Kumamoto, M. Eng.
The Kansai Electric Power Co., Inc.

4848mmを占めている。床面の裏側は高断熱仕上げとなっている。

西壁と東壁はともに1箇所、隣室につながる扉があるほかは開口部がなく、壁は高断熱構造である。天井は石膏ボード仕上げで、蛍光灯の丸型の照明器具が2個、取り付けられている。

2.2 立方体正味放射計を用いた計測法

立方体正味放射計を用いた通常の計測法は、人体形状を立方体で置き換えることを想定し、成人の立位形状に対して、立方体の中心の高さを床上100cmに設定している。しかし、住宅などの床暖房では膝を折り曲げて床に直接座る座位の場合が多く、そこに床暖房の特徴があると考えられる。したがって、床暖房の計測では床座の形状を想定して、立方体の中心高さを床上50cmに設定するのを原則とした。注2)、注3)

立方体正味放射計の設置は、写真用の三脚をはずして1本ずつを立方体の四隅から下方に伸ばし、床上100cm測定では床面での足の間隔が100cmになるよう、床上50cm測定では間隔が50cmになるよう、それぞれ固定して設置した。写真1に計測状況を示す。

放射場が平面上でどのような空間分布をしているかを知るため、床面の短辺と長辺をそれぞれ6等分し、交点の25点を測定候補点として番号をつけた。南東の隅の点をP1として西方へ順次移動し、行を換えて最後に北西隅の点P25にいたる順である。実際の空間分布測定では、室中央点P13を含む奇数の13点、または5点(P13, P3, P15, P23, P11の順)を使用した。図1中に測定点の位置を示す。

立方体正味放射計の近傍の気温は、立方体の下方で直径0.076mmのT型極細熱電対を用いて測定している⁸⁾。

写真1 床座を対象とした立方体正味放射計の計測状況 (床上50 cm)

2.3 関連測定項目

図1に示すように、室内気温の測定は床上1.2mの高さ、室平面内7点において、直径0.2mmのT型熱電対に、放射防護のためにアルミ箔でカバーをして行った。以下、断らないかぎり、室内気温は7点の平均を表す。外気温は南窓の外側で、直径0.076mmのT型極細熱電対を使用した⁸⁾。別に天気概況を知るため、南に面した窓ガラスの室内側と閉じたカーテンの間のわずかな空間に日射計を置いて、水平面日射量を測定した。

床表面温は、監視目的で常時1箇所において、熱画像式放射計で測定を続けた。室内の湿度や風速も測定しているが、一般に寒冷環境では湿度や風速は温熱環境評価にあまり効かないので、本研究でもそれらの測定結果は分析に使用していない。

2.4 実験条件

電気式床暖房の運転方式は「弱」または「強」の2種類で、通常は10時から運転開始、17時終了であり、2日連続運転も行った。計測中は、カーテンは閉じた状態とし、点灯による熱的影響を避けるために室内の照明器具は消灯した。また、室内で一定の換気を確保するため、キッチンの排気ファンを常時「弱」で運転した。

実験中の設定温度は、床を含む壁面の各部位間の温度差が大きいほうが明確な分析が可能のため、特別な温度制御はせずに成り行きまかせとした。

計測時期は2003年11月27日～12月3日、天候は曇り、このときの外気温は日中で15～22℃であった。

3. 実験結果の表示方法

3.1 立方体表面の放射受熱量の表示

本研究では、冒頭に述べた放射束ベクトルでなく、放射受熱量ベクトルで取り扱うこととする。ベクトルの成分について、放射束は発散量を正とするのに対して、放射受熱量では逆に受熱量を正とするところが異なっている。

立方体正味放射計の各表面の中央のセンサーがある面、すなわち受熱面で、単位面積当たりに吸収する熱量を q_k [W m⁻²] とすると、 q_k は次式で表される。

$$q_k = \alpha_s I + \varepsilon_s \sigma (T_r^4 - T_s^4) + \alpha_c (T_a - T_s) \quad \cdots (1)$$

ここで、 I [W m⁻²] が受熱面における日射の受熱量 (吸収する熱量ではなく面に当たる直前の熱量)、 σT_r^4 [W m⁻²] が長波長放射の受熱量である。その他の記号は、つぎのとおりである。

T_r : 受熱面での面放射温度⁹⁾ [K]

図1 床暖房室の概要、熱放射場の測定点、室内気温の測定位置

- T_a : 受熱面の周辺気温 [K]
 T_s : 受熱面の表面温度 [K]
 α_s : 受熱面の日射の吸収率 (波長範囲 0.3~3.0 μm)
 ε_s : 長波長放射の放射率 (波長範囲 3~100 μm)
 Kirchhoff の法則により、長波長放射の放射率=吸収率
 σ : Stefan-Boltzmann 定数 5.67×10^{-8} [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$]
 α_c : 受熱面の対流熱伝達率 [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

3.2 面放射温度と日射による面放射温度の表示

平面での放射受熱量は、Stefan-Boltzmann の法則にしたがって、それと同量の黒体放射に置き換えたとき、黒体の温度を面放射温度 PRT⁹⁾と呼んでいる。長波長放射による面放射温度は式 (1) に示したとおりであるが、日射についても面放射温度で表すことができれば、長波長放射と同じ温度の単位の表示となるので、比較ができて好都合である。しかし、日射について面放射温度で表すためには工夫を要する。^{注4)}

まず、式 (1) の放射の項をつぎのように変形すると、 κ_m はほぼ定数とおくことができる¹⁰⁾。

$$\varepsilon_s \sigma (T_r^4 - T_s^4) = \varepsilon_s \kappa_m (T_r - T_s) \quad \dots\dots (2)$$

$$\alpha_r = \varepsilon_s \kappa_m = \varepsilon_s \times 4 \sigma T_m^3 \quad \dots\dots (3)$$

$$T_m = (T_r + T_s) / 2 \quad \dots\dots (4)$$

この関係を用いると、式 (1) は式 (5) に変わる。

$$q_k = (\alpha_r + \alpha_c) [(\alpha_r (t_r + t_i) + \alpha_c t_a) / (\alpha_r + \alpha_c) - t_s] \quad \dots\dots (5)$$

ここに、

$$t_i = (\alpha_s / \alpha_r) I \quad \dots\dots (6)$$

t_r : 受熱面での長波長放射の面放射温度 [°C]

t_i : 新しく定義された日射による面放射温度 [°C]

t_a : 受熱面の周辺気温 [°C]

t_s : 受熱面の表面温度 [°C]

α_r : 受熱面の放射熱伝達率 [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

である。

いま、代表的な値として、関係する面の平均温度 $T_m = 295$ [K]、日射の吸収率 $\alpha_s = 0.5$ 、長波長放射の放射率 $\varepsilon_s = 0.95$ 、を与えると、式 (6) はつぎの関係における。

$$t_i = 0.09 I \quad \dots\dots (7)$$

式 (7) は日射量 [W m^{-2}] から面放射温度 [°C] を求める換算式である。日射による面放射温度は、近似的であるが日射量 [W m^{-2}] の 0.09 倍を温度 [°C] で表せばよいこととなる。

測定を行おうとする面の日射の吸収率が 0.5 と明らかに異なる場合は、式 (6) に基づいて式 (7) を修正して用いる必要がある。なぜなら、日射による面放射温度は受熱面で吸収した成分を含んでいるからである。

3.3 ベクトル量の表示

立方体正味放射計を用いた測定で得られる立方体各面における受熱量 (面放射温度も同様) は、ベクトル量の成分に相当する。すなわち、xyz の直角座標において、

q_{+x} : x 軸の正方向の面の放射受熱量 [W m^{-2}]

q_{-x} : x 軸の負方向の面の放射受熱量 [W m^{-2}]

(y 軸、z 軸についても同様に表される)

q : 正味放射受熱量ベクトル

i, j, k : 単位ベクトル

とくと、正味放射受熱量ベクトルは、

$$q = (q_{+x} - q_{-x})i + (q_{+y} - q_{-y})j + (q_{+z} - q_{-z})k \quad \dots\dots (9)$$

で表される。大きさ $|q|$ と方向余弦 l_x, l_y, l_z は、

$$|q| = [(q_{+x} - q_{-x})^2 + (q_{+y} - q_{-y})^2 + (q_{+z} - q_{-z})^2]^{1/2} \quad \dots\dots (10)$$

$$l_x = (q_{+x} - q_{-x}) / |q|$$

$$l_y = (q_{+y} - q_{-y}) / |q| \quad \dots\dots (11)$$

$$l_z = (q_{+z} - q_{-z}) / |q|$$

で表される³⁾。

しかし、ベクトル量の表示として、大きさと方向余弦では直観的な理解に乏しいので、それとは別にベクトル量の表示には、水平面における x 軸、y 軸の原点から離れる距離と角度、及び x 軸 (南北軸) を含む垂直面と y 軸 (東西軸) を含む垂直面の、両垂直面での座標軸の原点からの距離と角度で表すこととした。

なお、ベクトル量の大きさは正味放射量であり、それは空間中における放射の方向性を表す量である。大きさが 0 の場合は放射に方向性がないこと、すなわち対称性、等方性であることを示す。

図2 立方体正味放射計を用いて得られた立方体各面の面放射温度 (11月26日, P13, 床上50cm)

4. 結果と考察

4.1 室内の熱放射場に及ぼす日射の効果

図2は、室内に置かれた立方体正味放射計に日射が当たっている状態での観測例である。図中の細線が日射による、太線が長波長放射による、それぞれ面放射温度である。測定点は室中央P13で床上50cmの高さ、南窓のカーテンは11:13まで開放、それ以降は閉鎖であった。結果は、直射のために立方体表面のNo.2面 (南向き面) で最も日射の値が大きく、最大で20°Cを超えている。これは、後述する (4.3) 床暖房の有効面放射温度 (床暖房面に対する面放射温度と室内気温との差) の最高11°Cより大きい。このように、日射の効果は相当に大きい。一方、11:13にカーテンを閉じると、日射による面放射温度は急激に下がり、No.2面で1°C程度、他はそれ以下となる。長波長放射による面放射温度は、床暖房開始前では20~22°C程度であるから、カーテンによる日射遮蔽効果の大きいことがわかる。こ

の結果に基づいて、実験中は常時カーテンを閉鎖することとした。このように、日射による面放射温度は長波長放射による面放射温度に比して無視できるほど小さいので、以下では長波長放射を中心に考察することとした。なお、図中の 11:33 に長波長放射による面放射温度が急激に上昇をはじめるのは、床暖房が開始したことによる応答である。

図中の面放射温度に対応した番号は立方体の面の番号で、面の向きはつぎのとおりである。

No.1 上向き No.2 南向き No.3 西向き
No.4 北向き No.5 東向き No.6 下向き

ただし、鉛直面は室の壁面に平行または直角とした。

4.2 床暖房「弱」運転時の熱放射場の挙動

図3は、床暖房の「弱」運転時における熱放射場の経時変化を、面放射温度で示したものである。あわせて室内気温、カーテン外側の水平面日射量、および外気温を示す。立方体正味放射計を設置した位置は、原則として室中央点 P13、床上 50cm である。ただし、11時、13時、16時からの1時間は熱放射場の空間分布を知るため、12分ごとに5箇所、計測器の位置を変えた。12分のうち、2分は移動時間にあて、データ表示に10分をあてている。計測器の時定数は約10秒と短いため、2分以内で他に影響を及ぼすことなく、位置の変更とセットが可能であった。なお、計測方式は、データロガーで6秒ごとにデータを収録し、ロガー内で1分間の平均演算を行い、1分ごとに結果をディスクに記録する方式である。

図3 「弱」運転時の立方体各表面の面放射温度の経時変化 (11月27日, 床上50cm)

図3では、No.6面の周期的な変動が注目される。これは「弱」運転では4分ごとに電流のON/OFFを繰り返しているため、その影響が面放射温度にも表れたことを示している。変動の振幅の大きさは面によって違いがあり、No.6面が最大振幅を示すのは、加熱された床面を大きく見るためである。実測によれば、No.6面から床暖房パネルを見る形態係数は0.960であった。逆に、No.1面は床面が視野に入っていないので変動がないと思われたが、実際にはわずかに周期的変動が認められる。これは、室内気温にもわずかな変動が見られることから、4分ごとのON/OFFに対応して、天井温や気温にもわずかに周期的変動が及んでいたものと解される。立方体の他の鉛

直の4面では、変動の振幅はNo.6面の約半分となっているから、これも同様に理解できるところである。

運転を開始してから6時間後(16:00)には、室内気温が26.0℃となり、このときの外気温は15.6℃であった。面放射温度はON/OFF平均して最高で31.7℃、最低で25.5℃となった。振幅は最高で0.8Kである。参考までに熱画像式放射計で計った床表面温は最高で37℃であった。

立方体の各面で面放射温度の違いはかなり大きく、6時間後に、最高でNo.6面の32.5℃に対して、No.1面では25.5℃、その差は7Kに及んでいる。鉛直の4面では平均して約27.5℃であるから、No.6面との差は2Kで、No.6面だけが著しく高くなっていることがわかる。これらの面放射温度から平均放射温度を求めてみると28.0℃となり、室内気温より2K高いという結果である。

測定点の場所による違いは、離れた5点の空間分布で見るとかぎりでは、面の向きの違いにくらべると大きいとはいえない。

注目されるのは、10時から13時にかけて、No.2面の面放射温度が他の鉛直面の面放射温度よりも明らかに高い値を示していることである。これは、このときの日射量も同時に他より若干大きい値を示していることと、実測によるとNo.2面からカーテンのかかった南窓面を見る形態係数が0.262と比較的大きい値を示している(ちなみに天井を見る形態係数は0.162)ことから、日射が窓ガラスを透過してカーテンで吸収され、カーテンの表面温度が上昇したことが原因として考えられる。日射の効果はこのように、長波長域で影響を及ぼすことに留意する必要がある。

図4 「強」運転時の立方体各表面の面放射温度の経時変化 (11月28日, 床上50cm)

4.3 床暖房「強」運転時の熱放射場の挙動

図4は、床暖房の「強」運転時における室中央測定点P13を中心として、床上50cmの熱放射場の経時変化を示したものである。

常時通電のため、長波長放射の面放射温度には「弱」運転時のような周期的変動はなくなり、時間とともになだらかな上昇に変わっている。6時間経過後(16:00)には室内気温が32℃となり、外気温は17.4℃であった。面放射温度はNo.6面が最高42℃、No.1面が最低31℃であった。したがって、床面に対する面放射温度と室内気温との差で表される床暖房の有効面放射温度は最高で11℃であった。平均放射温度は35℃となり、室内気温より3K高い値であった。

指示値が高いことと周期的変動がないことを除いて、「弱」運転で見られた諸特性は「強」運転でもほぼ同様に見られる。しかしながら、変動の時間経過が滑らかであるために、日射の変動が外気温や面放射温度にまで影響を及ぼしていることを見るができる。

日射量の変動は、一時的に高い値を示す11:20頃、11:55頃、12:40頃、13:15頃に、外気温がピーク値を示すことと対応している。対応することの理由としては、日射量が増大したために建物外表面の温度が上がり、それにともなって付近の気温が上昇したことが考えられる。

長波長放射の面放射温度については、立方体の No.2 面の値が11:20頃、11:55頃、12:40頃、13:15頃に日射量の変動と呼応して変動している。これは「弱」運転のところで説明したように、カーテンによる日射の吸収と再放射によるものである。

4.4 面放射温度の測定点による違い

熱放射場の空間分布の測定には、合計13の測定点を使用した。測定時間は、一巡して最初の点に戻るものを含めて、全部で14点の測定に2時間48分を要した。この時間中における変動が少しでも安定するように、床暖房は「強」で前日より連続運転とし、2日目に実験を行った。すなわち、12月3日の9:00から床上50cmの計測、13:00から床上100cmの計測である。測定点の計測の順序は、奇数の若い番号P1からP25の順で、最後にP1に戻る。

図5に、午前中の床座人体に対応した立方体表面での面放射温度(床上50cm)の測定点による違いを、図6に、午後の立位人体に対応した面放射温度(床上100cm)の測定点による違いを示す。

日射量の変動から見る天気概況は、9:00~13:52までは晴れ、以後は曇りであった。この間に室内気温は、午前中は34.5~37.5℃まで上昇し、午後は13:00以降、37.7~35.5℃の範囲で、日射量変動と対応するように降下した。それに応じて立方体各面の面放射温度も変化している。この変化から、前述したカーテンの日射による長波長放射の効果を、さらにまた気温にも効果を及ぼしていることを、見る事ができる。各面の面放射温度の違いは、下向き(No.6)が最高の値で、床上100cmより床上50cmで大きい値を示す。しかし、測定点の違いによる空間分布は大きくないことがわかる。

図5 立方体各表面の面放射温度の室内空間分布
(12月3日, 床上50cm, P1 → P25の順)

図6 立方体各表面の面放射温度の室内空間分布
(12月3日, 床上100cm, P1 → P25の順)

4.5 正味放射ベクトルの空間分布

長波長放射の正味の面放射温度について、図7に床上50cmのベクトル図、図8に床上100cmのベクトル図を示す。いずれも図の中で、左側に水平面内の大きさと方向の図、真ん中に東西方向を含む垂直面内の大きさと方向の図、右側に南北方向を含む垂直面内の大きさと方向の図を、それぞれ示している。

一見してわかることは、水平、垂直、どの平面においても、各点の値を表す記号の散らばる範囲が、床上100cmより床上50cmで、より拡大していることである。これは床上100cmより床上50cmで、床暖房の特徴をよく捉えていることを示唆している。

そこでまず、床上50cmの水平面(図7中の左図)に注目してみると、床面上の東側に位置する3測定点P1(■)、P11(+), P21(◎)では、値が水平面内の西側に片寄っている。これは、その測定点から西側にある床暖房の強い放射を受けていることを意味している。対照的に西側に位置する3測定点P5(▲)、P15(×)、P25(△)では、値が水平面内の東側に片寄っている。これは、その測定点から東側にある強い放射を受けていることを意味している。同様に南側に位置する3測定点P1(■)、P3(●)、P5(▲)では、値が水平面内の北側に片寄っている。これは、その測定点から北側にある床暖房の強い放射を受けていることを意味している。北側に位置する3測定点P21(◎)、P23(○)、P25(△)についても、同様の説明ができる。

以上の配置にしたがって、床暖房パネルの四隅に近い測定点、南東隅P1(■)、南西隅P5(▲)、北西隅P25(△)、北東隅P21(◎)では、それぞれ値が北西寄り、北東寄り、南東寄り、南西寄りに場所を占めている。床暖房パネルからの偏りの強い放射を受けている、ということである。床上100cmの場合は、床上50cmほどではないが、しかし同様の傾向が認められる。

床上50cmの東西方向を含む垂直面では、床上100cmの場合よりも明らかに、下方より強い熱放射を受けているのがわかる。さらに、水平面で見られたように、東側に位置するP1(■)、P11(+), P21(◎)では値が垂直面内の西側に、西側に位置するP5(▲)、P15(×)、P25(△)では値が垂直面内の東側に片寄っているのがわかる。南北方向を含む垂直面でも類似の説明ができる。これらの床上50cmの垂直面についての説明は、定性的には床上100cmにおいても適用できる。

測定点 P1 における最初(■)と最後(□)の測定の間、2 時間 36 分の時間のずれは、図 7、図 8 を見るかぎりでは、空間分布には影響を及ぼしていないことがわかる。

このように、立方体正味放射計を用いることによって、床暖房の加熱面と計測器との位置関係で定まる放射受熱量が的確に、床上 50cm では床上 100cm より明確に捉えることができた。

凡 例

P1	P3	P5	P7	P9	P11	P13
■	●	▲	◆	▼	+	※
P15	P17	P19	P21	P23	P25	P1
×	◇	▽	◎	○	△	□

図 7 正味放射ベクトルの平面内分布 (12 月 3 日, 9:00~11:48, 床上 50cm) [W/m²] 図 8 正味放射ベクトルの平面内分布 (12 月 3 日, 13:00~15:48, 床上 100cm) [W/m²]

なお、図 7、図 8 の単位表示が熱量 [Wm⁻²] になっていて直感性に乏しいので、分かりやすい温度の単位 [°C] で表示しなおすと、温度が常温の 25.0°C のときには、6 Wm⁻² が温度差 1.0 K に相当する。図では最大値の枠が ± 7 Wm⁻² であるから、図 7、図 8 は熱放射場を精密、かつ詳細に表現していることがわかる。

5. まとめ

床暖房による室内熱環境の評価に関係する物理的な諸量、とくに放射の方向性を中心にして、床暖房によって生じた熱放射場を精査することを目的として、立方体正味放射計を用いて電気式床暖房が施された室内の熱放射場に関して実験を行い、以下の通りの知見を得た。

(1) 床暖房室内に設置した立方体正味放射計に直達日射が当たる状態では、日射だけで床暖房の有効面放射温度(暖房床面に対する面放射温度と室内気温との差)以上の高い面放射温度を示した。^{注5)}

(2) カーテンを閉鎖した状態では、カーテンを透過した日射の短波長成分は無視できるほどで、室内の熱放射場の形成には影響を及ぼさなかった。

(3) カーテンを閉鎖した状態では、カーテンで日射が吸収され、カーテンから再放射する長波長成分が、熱放射場の形成に影響を及ぼしていた。

(4) 電気式床暖房の「弱」運転では、4 分ごとの電流の ON/OFF にともなう、立方体正味放射計の各面で値は異なるが、熱放射場の強弱の変動を忠実に把握することができた。

(5) 室内における測定点の場所による面放射温度の違いは、立方体の面の向きによる面放射温度の違いほどには大きくはなかった。

(6) 立位人体を想定した床上 100cm よりも、床座人体を想定した床上 50cm において、人体形状に及ぼす床暖房の効果をより明確に把握することができた。

(7) 面放射温度について、正味放射ベクトルを用いることによって、測定点の位置による、床暖房面と測定点との相対的位置関係、したがって床暖房面と人体との相互の関係を立体的に把握することができた。

〔謝辞〕 実験の遂行には、中道友閣君(学生)の援助を得たことを記して謝意を表す。

注1) 立位と椅座位の人体に対する平均放射温度が立方体の6表面の放射受熱量から求まることは、すでに ISO 7726 (1985) に記載されている¹¹⁾。また、人体形状に対応した微小立方体から周囲を見たときの重み係数(等価形態係数)の表現については、発表文献¹²⁾がある。

注2) Fanger, P.O. の人体と周壁面との形態係数の提案では、立位人体の中心高さは床より1.0m、椅座位人体の中心高さは0.6m、となっている¹³⁾。

注3) 立方体正味放射計⁵⁾は、立方体の6表面がそれぞれ独立した測定器の環境放射計¹⁷⁾で、各表面に入射する(測定面に当たる直前の)日射の入射量 $[Wm^{-2}]$ と、長波長放射の入射量 $[Wm^{-2}]$ とが同時に、かつ別々に約10秒の時定数で計ることのできる計測器である。ただし、日射の入射量を温度 $[^{\circ}C]$ に換算して表示するときは、日射吸収率を指定しなければならない。とくに指定がなければ、日射吸収率として0.5を使用する。

注4) 日射の効果を温度 $[^{\circ}C]$ で表示するには、一般には等価気温¹⁴⁾を用いる。過去に、Nakamura (1983)¹⁵⁾、Nakamura et al (2003)¹⁶⁾では、それを用いた。しかし、等価気温で表す場合は、長波長放射の表示式中に気温が入っているため、時々刻々に変化する気温のため、気温によって変動するはずのない長波長放射が、等価気温ではばげしく変動してしまい、見づらい結果となる。そのため今回は等価気温ではなく、面放射温度で表すことを考えた。面放射温度で表すと気温変動とは関係なく、安定した変動を示すようになった。図2がその例である。

なお、日射による面放射温度と日射の等価気温との違いは大小関係にあり、放射熱伝達率と対流熱伝達率とが相等しいとすれば、日射による面放射温度は日射の等価気温の2倍の値となる。日射吸収率は両者で同一である。

注5) 採用通知時に査読より修正意見があり、「この立方体正味放射計に、気が付かないうちに日射が当たっている場合には、適切な長波長放射環境評価は困難になってくると思われますので、まとめの(1)での表現も、本測定装置の適用範囲や注意事項として述べるべきか」とありますが、遺憾ながら文意が理解できません。誤解ではないかと、対応に苦慮しています。

繰り返しますが、立方体正味放射計の性能については、すでに文献⁵⁾で、さらには上記の注3)で述べた。「気がつく、つかない」に関係なく日射量も長波長放射量も、同時に、かつ別々に測ることのできる計器である。日射の測定システムと長波長放射の測定システムは、互いに独立なのである。相互に影響しあうことはない。

そのことは、図2にも表れている。カーテンを閉鎖した11:13を境にして、日射量は急激に減少しているが、長波長放射量は、立方体の南向き面と下向き面でわずかに減少したに過ぎない。カーテン開放時は窓ガラスの高くなった温度と、床の日射が当たって高くなった温度を感知し、カーテンが閉鎖されるとカーテン地の低い温度と、床の日射がなくなって低くなりだした温度を感知したことを示している。日射が長波長放射か、どちらか一方の値に引きずられて他方の値が異常を示す、ということはない。当然と思われる結果が、測定値に表れているのである。

強いて言えば、センサーが3cm四方の大きさをもっているため、日射が当たるときに3cm四方全面に当たらず、部分的にしか当たらないときには、正しく測れないことがある。しかしこれは例えば、一定の視野をもった放射計で計るときに、視野に入る部分全体が様な温度でないと正しく測れないことと同類である。注意事項として述べるほどのものではなく、放射計測では当然の、初歩的な常識である。

それに関連して、屋外の本漏れ日の測定などでは、日射のために測定

対象物がキラキラと輝いて日射量がばげしく変動するので、6秒ごと60回の測定で10分間の、十分に時間をかけた平均で評価するようにしている。このように、測定に際して特別の支障はない。

以上の論述のとおり、「まとめ」の(1)の表現については、修正には及ばないと了解する。しかしただ一つ、理解の一助になるかもしれないので関連する参考文献を1件¹⁷⁾追加する。

[参考文献]

- 1) Siegel, R. and Howell, J.R.: Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw Hill, 1972.
- 2) McIntyre, D. A.: The thermal radiation field, Building Science, Vol.9, p.247, 1973.
- 3) 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文報告集、第376号、pp.29-35, 1987.6
- 4) Ozisik, M.N.: Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection, John Wiley, 1973.
- 5) 中村泰人、辻原万規彦、西村浩一、香川治美: 環境放射計からなる立方体正味放射計の構成と較正、日本建築学会環境系論文集、第580号、pp.15-21, 2004.6
- 6) 吉田治典、郡 公子: サステナブル建築のための熱環境設計と熱性能検証の技術、第7回 環境工学シンポジウム「環境工学の未来を拓く研究と技術開発」資料、日本建築学会、2004.1.29
- 7) 百家裕季、中村泰人、岡本孝美、天川章史: 床暖房による室内の放射熱分布(その1 計測)、日本建築学会学術講演梗概集、環境系 D-2、pp.29-30, 2004.8
- 8) 中村泰人: 建築環境計測における気温測定のための双対感温素子の検討、日本建築学会近畿支部研究報告集〔計画系〕、pp.57-60, 1977.5
- 9) ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment. Instruments for measuring physical quantities. Geneva: International Standards Organization, 1998.
- 10) 前田敏男: 伝熱学、新訂建築学大系8、「音・光・熱・空気・色」、彰国社、p.337, 1969.5
- 11) Parsons, K.: Human Thermal Environment, 2nd ed., Taylor & Francis, London and New York, 2003, p.101
- 12) 中村泰人、武田 論: 人体形状に対応した微小立方体から見る等価形態係数、その1 等価形態係数の表現、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.989-900, 1992.8
- 13) 前掲11) pp.99-100.
- 14) 前掲10) p.345.
- 15) Nakamura, Y.: Measurements of Thermal Radiation Fields on Occupied Space in a Room Using the Cubic Radiant Flux Detector and Personal Computer, Proceedings of the Fourth International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings, 1983, Tokyo, pp.66-71.
- 16) Nakamura, Y., Tsujihara, M. and Kagawa, H.: Observation of Solar and Long Wave Radiation Fields in Urban Canyon by Using a Cubic Radiometer, Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 September 2003, Lodz, Poland, Vol.2, pp.397-400.
- 17) 環境放射束計 特許公開平 11-173911

(2004年12月8日原稿受理、2005年5月6日採用決定)