

人体に対する放射熱環境の計測について

中 村 泰 人

熊本県立大学 京都大学 名誉教授

Instrumentation of Incident Radiation Flux on the Human Body

Yasuto NAKAMURA

Prefectural University of Kumamoto and Kyoto University Professor Emeritus

Abstract : Essential indices necessary for instrumentation of incident radiation flux on the human body were described. The radiation was separated into short-wave radiation from the sun and long-wave radiation from the terrestrials and the atmosphere. The cubic net radiometer was devised and used to measure indices of the thermal radiation field for the human body in the outside of buildings. Consequently the thermal environment was made clear in detail.

Key Words : solar radiation, long-wave radiation, index, instrumentation, thermal radiation field

要旨 : 人体に入射する放射束を測定するのに必要な指数について述べた。放射は太陽から来る短波長放射と地物と大気から来る長波長放射に分けて表現した。立方体正味放射計が考案され、屋外で人体に対する熱放射場の測定に用いられた。その結果、放射熱環境を詳細に把握することができた。

キーワード : 日射、長波長放射、指数、計測、熱放射場

1. はじめに

本題は、第1回人間-熱環境系シンポジウム（1977年8月30日・9月2日）で発表された研究と同題目である。当時は、「放射束ベクトル測定器（立方体正味放射計の試作1号機）を考案、製作、使用し、放射熱環境の固有の情報を捉えることができたので、その成績を報告する。」とした。30年を経た今回は、その間の進歩について述べる。

2. 人体に作用する熱放射場の指標

計測に先立って、何を計測するか、計測の対象となる熱放射場の指標について確認しておく。なお、これらの指標は、基本的には30年前と変わらない。

2.1 一般的な指標

人体に作用する熱放射場を表すために用いられる一般的な指標（ASHRAE, 2005）は、次のとおりである。

（1）平均放射温度（Mean Radiant Temperature） t_r

平均放射温度とは、実際の非一様な空間において、人体から損失する放射熱と等しい放射熱損失を与える温度が一様な仮想空間の温度をいう。これは次のように言うこともできる。黒体放射の法則にしたがって、人体が周囲から受ける放射熱と等しい放射熱を射出す

る黒体の温度が平均放射温度である。

ここでいう「平均」には、人体表面全体の面積の平均と、人体表面から見えるあらゆる方向から放射を受けるといふ方向の平均と、両方の意味がある。

平均放射温度の取得については、

- a) グローブ温度計を用いた測定によって求める方法
- b) 周壁表面温度と形態係数とから計算で求める方法
- c) 立方体6面の、次に述べる面放射温度を用いて、計算で求める方法、

などが紹介されている（ASHRAE, 2005）。

（2）面放射温度（Plane Radiant Temperature） t_{pr}

面放射温度とは、実際の環境で小平面の片面に入射する放射束と等しい放射束を射出する温度が一様な空間の温度をいう。別の言い方をすれば、黒体放射の法則にしたがって、小平面の片面に入射する放射束と等しい放射束を射出する黒体の温度、である。

平均放射温度と違って面放射温度は、面は固定しているが、入射する放射の方向については平均したものである。したがって、面に対する平均放射温度といっても間違いではないが、誤解を招きやすいので、平均放射温度は人体に限定して表すものとする。

（3）非対称放射温度（Radiant Temperature Asymmetry） Δt_{pr}

非対称放射温度とは、小平面の表裏両面の面放射温度の差をいう。放射熱環境の非対称性を表す指標で、非対称性がなければ値は0になる。面が向く方向が固定されるので、天井向き面と床向き面の差、窓向き面と室内向き面の差など、方向を指定する必要がある。

(4) 有効放射場 (Effective Radiant Field) ERF

有効放射場とは、気温基準で表した人体で吸収される放射熱量で、 $ERF = h_r(t_r - t_a)$ [Wm^{-2}]で表される。ここに、 h_r は人体表面の放射熱伝達率 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]、 t_a は人体周辺の気温 [$^{\circ}\text{C}$]である。

2.2 特徴的な指標

人体に作用する熱放射場を表す一般的な指標よりも、詳細で特徴をよく表す指標である。

(1) 放射束ベクトル (Radiant Flux Vector)

放射束ベクトル (中村, 1973a) とは、空間における放射の流れをベクトルで表したものである。ベクトルは大きさと方向をもつのが特徴で、放射束ベクトルの場合に大きさと方向とは、空間における放射の指向性を表す。上記の非対称放射温度の厳密な表現である。非対称放射温度は一次元で表されるが、放射束ベクトルでは三次元で表される。空間中で方向に対して放射の分布があるときは、放射束ベクトルによって、正または負の放射源がどの方向にあるかが特定できるので、放射熱環境の解析と評価には有用な指標である。

(2) ベクトル放射温度 (Vector Radiant Temperature)

McIntyre (1974) が用いたもので、放射束ベクトルの放射束 [Wm^{-2}]の代わりに面放射温度 [$^{\circ}\text{C}$]で表したものである。三次元で表した非対称放射温度である。

(3) 等価気温 (Equivalent Air Temperature) t_e

等価気温とは、放射を受けて表面で吸収する効果を、それと等価な気温の上昇に置き換えて表したものである。等価気温 t_e [$^{\circ}\text{C}$]には、日射に対する等価気温 t_{es} [$^{\circ}\text{C}$]と長波長放射に対する等価気温 t_{el} [$^{\circ}\text{C}$]があり、その構成は次のとおりである。

$$t_{es} = a(A_r/A_D)J_m/h \quad (1)$$

$$t_{el} = h_r(t_r - t_a)/h \quad (2)$$

$$t_e = t_{es} + t_{el} \quad (3)$$

ここに、 a は人体表面における日射吸収率[ND]、 (A_r/A_D) は有効放射面積率[ND]、 J_m は人体に当たる全方向からの平均日射量 [Wm^{-2}]、 h は人体表面の総合熱伝達率 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]、である。

日射に対する等価気温 t_{es} は、人体での日射の吸収熱量を総合熱伝達率で除したものの、長波長放射に対する等価気温 t_{el} は、気温基準の長波長放射の吸収熱量(有効放射場ERF)を総合熱伝達率で除したものである。

(4) 日射に対する指標 (Index for Solar Radiation)

日射は地上における太陽からの熱放射で、波長が

0.3 μm 以下の電磁波、長波長放射は地上物体や大気からの熱放射で、波長が0.3 μm 以上の電磁波である。

これまでに述べてきた熱放射場の指標は等価気温を除いて、長波長放射を対象にしている。したがって、それらは日射が無視できる室内を対象にしているが、窓開口の大きい室内や屋外では日射の作用を欠かすことができない。しかし、日射と長波長放射は構成波長に重なるところがないので、上記の記述は日射と長波長放射を分離、加算して拡張表現が可能である。

人体表面で吸収される顕熱流束 q [Wm^{-2}]は、

$$q = h_c(t_a - t_{cl}) + h_r(t_r - t_{cl}) + a(A_r/A_D)J_m \quad (4)$$

で表される。ここに、 h_c は人体表面の対流熱伝達率 [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]、 t_{cl} は人体(衣服)の表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]、である。

作用温度 t_o [$^{\circ}\text{C}$]を用いると、式(4)は、

$$q = (h_c + h_r)(t_o - t_{cl}) \quad (5)$$

となる。等価気温を用いると作用温度は、

$$t_o = t_a + t_{el} + t_{es} \quad (6)$$

と表せる。作用温度は気温と等価気温の和である。

係数に妥当な数値 (ASHRAE, 2005) を代入すると、等価気温の概数値を知ることができる。すなわち、 $h_c = h_r = 4.7$ [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]、 $a = 0.67$ [ND]、 $(A_r/A_D) = 0.7$ [ND]、とすると、

$$t_{el} = 0.5(t_r - t_a) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

$$t_{es} = 0.05J_m \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8)$$

と表せる。等価気温はそれぞれ、長波長放射では気温基準の平均放射温度の1/2、日射では平均日射量の1/20、である。

このように、等価気温で表現すると、作用温度に及ぼす長波長放射と日射の効果が、同じ温度の次元で比較できるので、評価には極めて有効である。

後述する立方体正味放射計を用いた計測では、立方体の6表面で日射と長波長放射が個別に、入射熱量が求まるので、人体形状(姿勢)に対応した放射熱環境の評価が可能である。

3. 立方体正味放射計の試作検討

人体に作用する熱放射場を表すためには、まず、平均的な放射熱の強さの指標として平均放射温度が必須である。次いで熱環境設計の立場からは、どの方向からの放射が強い、弱い、放射の指向性が知りたいので、放射束ベクトル(あるいはベクトル放射温度)が望まれる。非対称放射温度では、指向性が不明の場合に対応できないので不適当である。さらに屋外放射熱環境への関心の高まりから、日射の効果を長波長放射と区別して表すことが望まれる。これらの要求を満たすものとして、立方体正味放射計が考案された。

3.1 立方体正味放射計の試作1号機の特徴

(1) 外 観

一辺が 10cm の立方体である。大きさ 100mm×100mm で厚さ 3.5mm の、独立な環境放射計（中村、1976）6 枚からなっている。各面の中央部 30mm×30mm がセンサーである。センサーは表面が黒色の熱流計 1 枚と、表面がアルミ箔仕上げの熱流計 1 枚、計 2 枚からなっている。

計測器の設置は、立方体の四隅から紐を出し、上方の支持棒から吊り下げて所定の位置を保った。

(2) 計測対象

長波長放射における立方体表面の面放射温度、平均放射温度、放射束ベクトル。

(3) 測定原理

環境放射計のセンサー表面に入射する（センサーに当たる直前の）長波長放射の熱流束 σT_{pr}^4 [Wm⁻²] が測定される。

$$\sigma T_{pr}^4 = (K_1 V_1 - K_2 V_2) / \varepsilon_{i2} + \sigma T_2^4 \quad (9)$$

ここに、 T_{pr} は環境放射計に対する面放射温度 [K]、 σ はステファン・ボルツマン定数 $= 5.67 \times 10^{-8}$ [Wm⁻²K⁻⁴]、 K_i は計器定数 [Wm⁻²/mV]、 V_i は起電力 [mV]、添え字 $i=1$ は黒色表面、 $i=2$ はアルミ表面、 ε_{i2} は有効放射率 [ND]、 T_2 はアルミ表面の温度 [K]、である。

$K_1, K_2, \varepsilon_{i2}$ はあらかじめ較正しておく定数で、起電力 V_1, V_2 と温度 T_2 を計って、面放射温度 T_r が求められる。

人体に対する平均放射温度 T_r は次式で求められる。

$$T_r = \varphi_1 T_{pr1} + \varphi_2 T_{pr2} + \varphi_3 T_{pr3} + \varphi_4 T_{pr4} + \varphi_5 T_{pr5} + \varphi_6 T_{pr6} \quad (10)$$

ここに、 φ_i ($i=1,2,\dots,6$) は人体から周囲を見る形態係数に対応した立方体各面の重み係数 [ND] である（中村、1973b; ASHRAE, 2005）。

(4) 較正方法

計器定数 K_1, K_2 は、環境放射計として組みあがった状態で、平板熱流計法に準じた方法で較正される。 ε_{i2} は、恒温室内で定温度水槽により環境放射計の温度を調節し、放射受熱量を計算して定められる。

(5) 特 徴

- ・外観上の特徴は、センサーに遮蔽物がなく、露出していることである。

- ・30 秒間隔 10 回平均の実測では、立方体各面の気温基準の放射受熱量は 0.1kcal m⁻²h⁻¹ のオーダーで表示され、面放射温度は 0.01K のオーダーで表示され、それぞれ特徴をよく表した。放射束 0.1kcal m⁻²h⁻¹ は温度差では 0.02K に相当する。

- ・気温基準の放射束ベクトルは、周囲の熱環境状態を勘案すると、ベクトル成分が相互に矛盾のない妥当な値を示すとともに、周囲全面の放射熱環境の推測を可能にした。

- ・立方体正味放射計の試作 1 号機は、既往の放射関連測定計器に比して、格段に精細な熱放射場の計測が

可能である。

(6) 問題点

- ・長波長放射と日射の個別測定を可能にすること。
- ・信頼度の高い較正法を確立すること。

3.2 立方体正味放射計の現用機の特徴

(1) 外 観

試作 1 号機と同一形状であるが、センサーは 3 種類で、いずれも短冊型、同形の熱流計である。第 1 素子は表面黒色 1 枚、第 2 素子は表面アルミ箔 2 枚、第 3 素子は表面白色 2 枚、計 5 枚からなっている。これら 3 種類の素子は周辺風向による影響を除くため、対称形に配置されている（中村ら、2004）。

計測器の設置は、立方体の四隅から支持棒を出し、床を支点として 4 点で支える方法によった。

(2) 計測対象

日射と長波長放射の、立方体表面の放射束、面放射温度、および平均放射温度、放射束ベクトル。

(3) 測定原理

環境放射計のセンサー表面に入射する（センサーに当たる直前の）日射の熱流束 J [Wm⁻²]、および長波長放射の熱流束 σT_{pr}^4 [Wm⁻²] が、次式で表される。

$$J = (E_{12} Q_{13} - E_{13} Q_{12}) / (A_{13} E_{12} - A_{12} E_{13}) \quad (11)$$

$$\sigma T_{pr}^4 = (A_{13} Q_{12} - A_{12} Q_{13}) / (A_{13} E_{12} - A_{12} E_{13}) + \sigma T_1^4 \quad (12)$$

ここに、 Q_{12}, Q_{13} は伝導熱流束を表す媒介変数 [Wm⁻²] である。

$$Q_{12} = [(V_1/S_1) - (V_2/S_2)] / (1 - C_{12} v^{1/2}) \quad (13)$$

$$Q_{13} = [(V_1/S_1) - (V_3/S_3)] / (1 - C_{13} v^{1/2}) \quad (14)$$

立体の英文字は、あらかじめ定めておく較正值で、3 素子の起電力 V_1, V_2, V_3 [mV]、周辺の風速 v [ms⁻¹]、第 1 素子の表面温度 T_1 [K] を測ることによって、式 (11), (12) から所定の放射束が求められる。ただし、室内測定では風速 v の測定が省略できる。

人体に当たる全方向からの平均日射量 J_m [Wm⁻²] は、次式で求められる。

$$J_m = \varphi_1 J_1 + \varphi_2 J_2 + \varphi_3 J_3 + \varphi_4 J_4 + \varphi_5 J_5 + \varphi_6 J_6 \quad (15)$$

ここに、 φ_i ($i=1,2,\dots,6$) は前出と同じ、立方体各面の重み係数 [ND] である（中村、1973b ; ASHRAE, 2005）。

(4) 較正方法

S_1, S_2, S_3 は感度 [mV/Wm⁻²] で、試作 1 号機と同様に環境放射計として組みあがった状態で、平板熱流計法に準じた方法で較正される。

C_{12}, C_{13} は風速補正定数 [(ms⁻¹)^{-1/2}] で、理論的に両者等しく一定値とおける関係が導かれる。

E_{12}, E_{13} は有効放射吸収率 [ND] で、天空の開けた屋外で晴れた夜間に基準器（精密級全天日射計と精密赤外放射計）との比較測定によって、決定される。

A_{12}, A_{13} は有効日射吸収率 [ND] で、天空の開けた屋

外で晴れた日中に基準器（精密級全天日射計と精密赤外放射計）との比較測定によって、決定される。

（５）特 徴

・日射と長波長放射について、強風と雨天屋外を除けば屋内外を問わず、熱放射場の表現に必要なほとんどの指標を、測定によって求めることができる。

・外観上の特徴は、試作１号機と比較すると、センサーが３種類、５枚に増加したことを除いて、基本的に変わりがない。設置は床から４本の支持棒による。

・時定数は約 10 秒である。

・長波長放射の測定精度は $\pm 0.3 \text{ K}$ 、 $\pm 2 \text{ Wm}^{-2}$ を有する。日射の測定精度は $\pm 3 \text{ Wm}^{-2}$ を有する。

・風速補正定数が一定値になることの導出、および有効日射吸収率と有効放射吸収率の較正法の確立のために、長年月を要した。

（６）問題点

・現在の使用では、センサー表面が汚れないこと、水にぬれないことが条件になっている。しかしこの条件は、センサーの表面仕上げ材料の適切な選択によって、保守面での対応が可能と考えられる。

４．屋外計測への応用

図 1 に、熊本県立大学のキャンパスの屋外で測定した熱放射場を示す。測定時期は 3 月 26 日、晴天、キャンパス内の A～H の 8 箇所、午前・午後・夜間それぞれ 10 分ずつの測定である。D と E で作用温度が低いのは、日影の多い周辺構造の影響である。等価気温の表現によって、日中は 3 月下旬でも直達日射の効果が大きいことがよくわかる (Nakamura, et al., 2003)。

５．まとめ

人体に対する熱放射場を表すために必要な指数について述べ、立方体正味放射計を用いた屋外計測によって、放射熱環境が詳細に把握できることを述べた。

６．文 献

ASHRAE 2005. Handbook Fundamentals.

McIntyre, D.A. 1974. The thermal radiation field. Building Science. 9:247.

中村泰人. 1973a. 室内放射熱環境の表現方法. 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北). 319/320.

中村泰人. 1973b. 環境空間設計からみた人体に対する放射場の表現方法の検討. 日本生気象学会雑誌. 9: 30.

中村泰人. 1976. 環境放射計およびその原理と応用. 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集. 145/148.

Nakamura, Y., Tsujihara, M., Kagawa, H. 2003. 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 Sept. 2003. Lodz. Poland. 2:397/400.

中村泰人, 辻原万規彦, 西村浩一, 香川治美. 2004. 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. 580:15/21.

<連絡先>

著者名 中 村 泰 人

住所 606-8061 京都市左京区修学院宮ノ脇町 1-2

E-mailアドレス yasuto-n@nifty.com

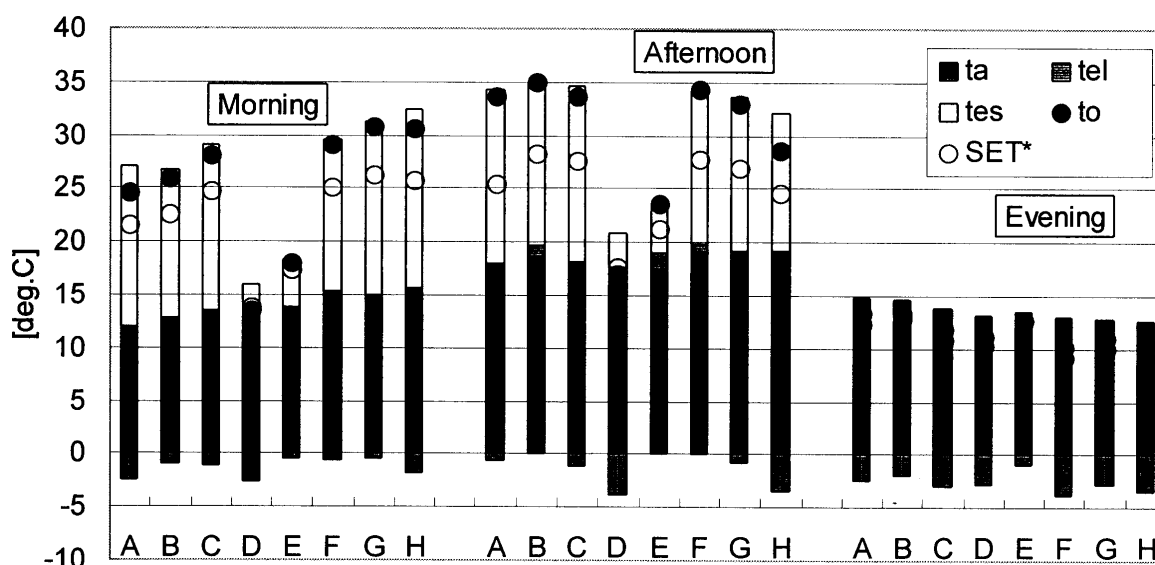


図 1 熱放射場の計測値、ta : 気温、tes : 日射等価気温、tel : 長波長放射等価気温、to : 作用温度、SET*