

実測に基づく日射と長波放射の 平均放射温度の算出方法

正会員 ○辻原 万規彦*
同 中村 泰人**

平均放射温度 立方体放射束計 上下二面日射計

1. はじめに

大きな窓面を持つ室内空間や半戶外空間、また屋外空間の温熱環境には日射が大きな影響を与え、日射と長波放射の分離測定が必要なため、従来用いられてきたグローブ温度計は適していない。また中村が既に開発した立方体放射束計^{1)~3)}を用いて日射を考慮した平均放射温度を求めることが、最も合理的ではあるが、未だ一般には入手不可能である。そこで本稿では、一般に入手可能な測定機器を用いて、日射を考慮した平均放射温度を算出する方法について考察する。

2. 日射を考慮した平均放射温度の表現

日射がある場合の人体表面の顕熱流に対する熱平衡式は次のようになり⁴⁾、(1)式の右辺第3項が日射の影響を考慮した項である。

$$q = h_c \cdot (t_a - t_s) + h_r \cdot (t_r - t_s) + a \cdot \frac{A_r}{A_D} \cdot J \quad (1)$$

$$= h_c \cdot (t_a - t_s) + h_r \cdot (t_r^* - t_s) \quad (2)$$

ここに、

$$t_r^* = t_r + \frac{a}{h_r} \cdot \frac{A_r}{A_D} \cdot J \quad (3)$$

日射を考慮した平均放射温度 t_r^* [°C] に関する(3)式の右辺の第1項が長波放射の平均放射温度であり、第2項が日射の平均放射温度である。

3. 日射と長波放射の平均放射温度の算出方法

3.1 立方体放射束計を用いた平均放射温度の算出方法

立方体放射束計を用いた長波放射の平均放射温度 t_r [°C] は、中村らの立方体を基にした表現⁵⁾に従うと、次のようになる。

$$t_r = \sum_i F_{b,i} \cdot t_{p,i} \quad (i = \pm x, \pm y, \pm z) \quad (4)$$

また、立方体放射束計を用いた人体(着衣)に当たる全方向からの平均日射量 J [W/m²] は、長波放射の場合の表現にならって、次のように算出できる。

$$J = \sum_i F_{b,i} \cdot J_i \quad (i = \pm x, \pm y, \pm z) \quad (5)$$

また、立方体の i 方向を向いた面から周壁全体を見る等価形態係数 $F_{b,i}$ [N.D.] は、武田ら⁶⁾の研究に基づいて設定できる。本稿では、人体形状の方向は考えず、前後左右方向については、同一の値としてある。

$$F_{b,x} : 0.138 \quad F_{b,-x} : 0.190 \quad F_{b,\pm x}, F_{b,\pm y} : 0.168$$

3.2 上下二面日射計を用いた平均放射温度の算出方法

3.2.1 上下二面日射計を用いた人体に対する平均日射量の算出方法

上下二面日射計(全天日射計2台を上下に貼り合わせた測定機器)を用いれば上向き面と下向き面に入射する平面日射量 $J_{\pm x}$ [W/m²] が得られるが、その他の垂直面に対する平面日射量 $J_{\pm y}$, $J_{\pm z}$ は測定することが困難なため、現場の状況に応じ、合理的な仮定を適切に行い、 $J_{\pm x}$ から推定する。

ここでは屋外で観測される直達成分と拡散成分の割合と同じ割合で、直接日射が当たっている上下二面日射計の上面でも日射量が観測されると仮定し、直達成分と拡散成分の配分を行う。次に直接日射が当たっている立方体を想定して、その南面と西面(時刻によっては東面)で観測される日射量の直達成分と拡散成分を太陽高度と方位角を考慮して推定する。

また、直接日射の当たっていない立方体の東面(時刻によっては西面)と北面へ入射する日射量は、周壁からの反射によるが、放射場が入り組んでいる場合、時々刻々とその様子に変化して計算による推定は困難であるため、下面へ入射する日射量と同量であると仮定する。なお南面と西面の日射量の推定時に、下面の観測値をも割り振る必要があるが、東面と北面の日射量の推定時に、それらの影響を合わせて組み込む。

3.2.2 周壁の表面温度を用いた長波放射の平均放射温度の算出方法

(4)式中の、立方体の i 面からみた平面放射温度 $t_{p,i}$ [°C] の算出には、一般に入手可能な測定機器で測定できる周壁の表面温度と正射影型の魚眼レンズで撮影した正射影画像を用いる。「代表的な表面温度を含む部分では、同じ表面温度を示す」と仮定して、代表的な表面温度の測定値に形態係数を乗じて算出する。

4. 測定概要

既に開発された立方体放射束計^{1)~3)}を用いて、上下二面日射計を用いた場合の平均放射温度の算出方法を評価するための測定を行った。

測定は、京都大学工学研究科新2号館8階の南向きの大きな窓面をもつ空間で、晴天であった1997年12月10日(木)の12:05~14:17に行った。また比較のため、曇天であった12月9日(水)の13:05~14:45にも測定を行った。

日射量の測定には上下二面日射計(アルベドメータ-MR-22, 英弘精機製)、周壁の表面温度と気温の測定には線径0.08mmのT型極細熱電対、風速の測定には三次元超音波風

Calculation Method of Mean Radiant Temperature of Short and Long Wave Radiation based on Filed Observation

TSUJIHARA Makihiko and NAKAMURA Yasuto

速計（本体：DA-600-3TV，プローブ：TR-90AH，共にカイジョー製）を用いた。周壁の表面温度は合計20点を測定したが、12月9日では3点が欠測であった。これらの測定機器と立方体放射束計はデータロガー（サーモダックEとEF，共に江藤電気製）に接続し、10秒間隔でスキャンした。また京都大学昼光観測システムのデータのうち、1分間隔でスキャンされた法線面直達日射量と水平面拡散日射量を用いた。

5. 測定結果

5.1 人体に対する平均日射量の算出結果

図1に、晴天であった12月10日における人体に当たる全方向からの平均の日射量の算出結果を示す。凡例の「上下二面日射計から」は上下二面日射計の観測値から求めた人体に対する平均日射量、「立方体放射束計から」は立方体放射束計の観測値から算出した平均日射量を示している。

測定開始から12:30頃までと、12:50頃から13:05までは、上下二面日射計と立方体放射束計に対する日射の当たり方が、機器の配置と周囲の状況の関係で異なっていたために、両者は一致していない。その他の時間帯では、誤差はおおむね±5%以内に収まっており、機器が全く同じ位置に配置できなかったことを考慮すれば、両者はよく一致している。また12月9日の場合（図は省略）でも、両者はよく一致していると判断できた。したがって上下二面日射計の上面と下面の観測値が得られれば、合理的な仮定を適切に行うことによって、人体に対する全方向からの平均日射量を求めることができる。

5.2 長波放射の平均放射温度の算出結果

図2と図3に、晴天であった12月10日と曇天であった12月9日における長波放射の平均放射温度の算出結果を示す。凡例の「表面温度から」は、周壁の表面温度から求めた長波放射の平均放射温度を示している。

図3に示した曇天の12月9日では、周壁の表面温度と立方体放射束計から算出した長波放射の平均放射温度は、よく一致しているが、図2に示した晴天の12月10日では、両者は一致しているとは言いがたい。しかしこれには次のような原因が考えられ、これらを考慮すれば、定性的には一致する方向へ向かうと考えられ、曇天時には両者はよく一致していることから、周壁の表面温度から長波放射の平均放射温度を算出する方法自体に問題はないと言える。

- 1) 南面の窓枠の表面温度を過大評価している。
- 2) ガラスの長波放射の反射率の仮定に問題がある。
- 3) 一部の極細熱電対に直射日光が当たっている。
- 4) 表面温度と平均放射温度の差が大きい。

6. まとめ

- 1) 日射を考慮した平均放射温度、すなわち日射と長波放射の平均放射温度の算出方法を示した。
- 2) 既に開発された立方体放射束計を用いて、上下二面日射計を用いた場合の平均放射温度の算出方法の評価を行った。

た。

- 3) 測定を行う放射場に応じた合理的な仮定を適切に行うことによって、上下二面日射計の観測値と周囲の壁の表面温度から、日射を考慮した平均放射温度が求められることを示した。

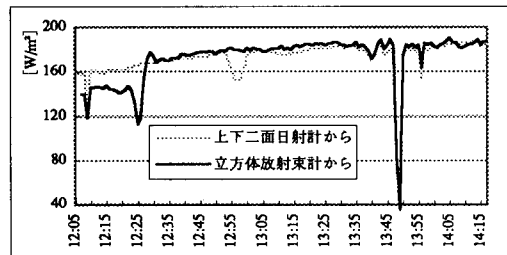


図1 上下二面日射計および立方体放射束計から算出した平均日射量（12月10日）

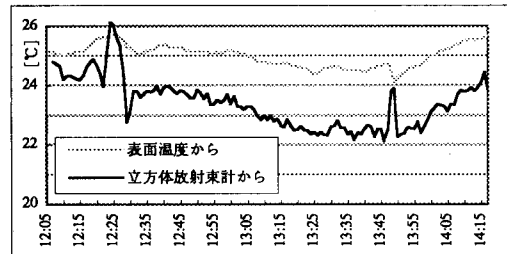


図2 周壁の表面温度および立方体放射束計から算出した長波放射の平均放射温度（12月10日・晴天）

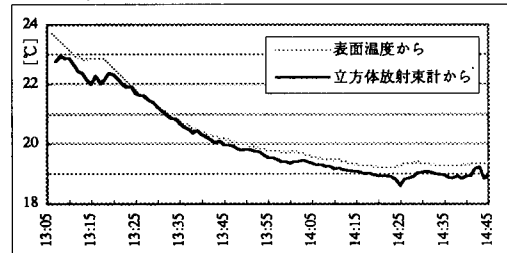


図3 周壁の表面温度および立方体放射束計から算出した長波放射の平均放射温度（12月9日・曇天）

<記号>

- q : 人体表面の顕熱流束 [W/m^2] t_s : 人体（着衣）の表面温 [$^{\circ}C$]
 h_c , h_r : それぞれ人体（着衣）に対する対流、放射熱伝達率 [W/m^2K]
 a : 人体（着衣）の日射の吸収率 [N.D.] (=0.66) t_a : 気温 [$^{\circ}C$]
 A_D : 人体の体表面積 [m^2] A_r : 人体（着衣）の有効放射面積 [m^2]

<参考文献>

- 1) 中村泰人：建築都市空間における熱放射環境計測のための環境放射束計の提案，建築学会計画系論文集，第383号，pp.16~23，1988.1.
- 2) 中村泰人：環境放射束計の性能に関する理論的考察，建築学会計画系論文集，第387号，pp.33~41，1988.8.
- 3) 中村泰人：環境放射束計の性能に関する実験的考察，建築学会計画系論文集，第390号，pp.21~30，1988.8.
- 4) Nakamura, Y.: Measurements of Thermal Radiation Fields on Occupied Space in a Room Using the Cubic Radiant Flux Detector and Personal Computer, The Fourth International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings, p.68, 1984.
- 5) 中村泰人他：人体形状に対応した微小立方体から見る等価形係数 その1 等価形係数の表現，大会梗概集，p.990，1992.8.
- 6) 武田諭他：人体形状に対応した微小立方体から見る等価形係数 その2 等価形係数の算定，大会梗概集，pp.991~992，1992.8.

*：京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 博士後期課程・修士（工学）

**：京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Global Environment Eng., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., M. Eng.

Prof., Dept. of Global Environment Eng., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.