屋外空間における短波および長波の放射強度の分布に関する実測

A SURVEY ON THE RADIANT INTENSITY DISTRIBUTION
OF THE SHORT AND LONG WAVE ZONES IN OUTDOORS

足永靖信*

Yasunobu ASHIE

A radiant heat measuring device, which has an automatic spherical tracking system with both sensors of the solar radiation and the infrared radiation, was developed to investigate the thermal distribution in outdoors. First, a calculation method to obtain the mean radiant temperature around a plate and a sphere was given by integrating the spot radiation data in every angle. Then, several outdoor spaces in a forest canopy and building canopies were investigated. The measurement results of the mean radiant temperature corresponds well with the data by the black sphere method with an error of 7%, though this is under a dynamic weather condition.

Keywords : Solar Radiation, Infrared Radiation, Radiant Heat, Mean Radiant Temperature, Thermal Sensation

日射、赤外線、放射熱、平均放射温度、温冷感

1. はじめに

戸外で人々が日陰を追い求める姿は夏の風物といえよう。日射が温熱感覚に影響することは言うまでもない。しかし、放射熱の場を把握することは一般に困難である。放射熱は波長域の異なる短波放射（日射）と長波放射（赤外輻射）に大別される。両者は地表面や建物等の地物の中で複雑に交錯し、一部は反射し合っている。その様子は目で捕らえることはできず、実感されにくいのも事実である。放射熱の発生を建物壁や地表面被覆等の地物単位で把握できれば建築的方策も採りやすい。屋外空間における放射熱環境の計測はこれまでもいくつか研究報告がなされているが、計測上の制限もあり、いずれも人体に見立てた球や円筒が受ける日射や長波放射の総熱量を評価するにとどまっている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。中村は放射熱流束の方向成分を検討している⁵⁾。これは放射率等の物性値の異なる複数の素子を有する6組の正方形プレートを立て方に組み上げて上下、左右、前後の長波、短波の放射熱流束を別個に検知しようとするものである。しかし、地物単位の詳細なスケールで放射熱流束の特性は検討されていない。本報は、スポット式の放射センサを用いて全球的なトラバース計測を行い、従来の方法では知り得なかった屋外空間における短波、長波の放射強度の連続的分布を明らかにしたものである。

2. 計測システム

計測システムの全体構成を図1に示す。全球的に長波長および短波長の放射強度を計測し、波長毎に放射強度を等距離射影方式でパ

ソコン画面上で可視化し、魚眼画像と照合させることができる。写真1は計測器の外観を表したものである。短・長波長のセンサを搭載したトラバースを仰角方向および円周角方向に駆動させることによりあらゆる方向の波長毎放射強度を得ることができる。表1にセンサの仕様を記す。詳細な分布を短い計測時間で得るために可能な

図1 屋外放射熱環境計測システム

表1 センサ仕様

項目	波長範囲	開口角	応答速度	精度	感度
短波	0.3~2.6 μm	11deg.	1sec	5%	8.33mV $\cdot\text{m}^2\text{str/W}$
長波	4~15 μm	11deg.	1sec	7%	0.0205mV $\cdot\text{m}^2\text{W}$

* 建設省建築研究所 主任研究員・工博

Chief Research Worker, Building Research Institute, Ministry of Construction, Dr. Eng.

限り、開口角を絞り、応答性が高いものとした。また、短波センサは照り返し日射を捕らえるため、高感度タイプとした。半球の計測メッシュを等距離射影方式で図2に示す。計測メッシュ数は半球分で169点、全球分で338点であり、各々の計測メッシュにて短波、長波の放射強度が求まる仕組みである。半球のスキャン計測時間は約4分半である。全球の計測方式は、上半球の計測終了後、トラバースを反転させて下半球分を実施するものであり、トラバースの反転に要する時間も含めて全体で約10分の時間を要する。

写真1 計測器外観

図2 計測メッシュ
(等距離射影方式)

3. センサの校正

センサ受感部 dA_p が周囲メッシュ A_n から受ける短波および長波の放射熱量 $Q_{s,l}\{A_n \rightarrow dA_p\}$ は次式で表される。

$$Q_{s,l}\{A_n \rightarrow dA_p\} = I_{s,l}\{A_n\} dA_p \Omega\{dA_p \rightarrow A_n\} \quad (1)$$

$\Omega\{dA_p \rightarrow A_n\}$ は dA_p から A_n を見た立体角の投影であり、センサの開口角から決定される。

短波センサの校正は屋外にて実際の日射を計測し、標準測器と比較する方法によった。標準測器は世界放射基準(WRR)準拠の直達日射計を用いた。下式に、センサの電圧出力 V_s と標準測器の値を代入し、センサ定数 C_s 、 η_s を求めた。

$$\text{短波センサの熱流束} = \text{標準測器の値} \times D = C_s + \eta_s V_s \quad (2)$$

D は標準測器との計測レンジの相違を補正するため、短波センサに装着したフィルタの日射減衰率で既知の値である。実際の計測時にはフィルタを脱着して使用する。(1)、(2)式より放射強度の短波成分は次式で表される。

$$I_s\{A_n\} = \frac{Q_s\{A_n \rightarrow dA_p\}}{dA_p \Omega\{dA_p \rightarrow A_n\}} = \frac{C_s + \eta_s V_s}{\Omega\{dA_p \rightarrow A_n\}} \quad (3)$$

長波センサは温度一様とした黒体炉において校正を行った。黒体炉温度から得られる炉表面の放射熱流束 σT_r^4 とセンサの電圧出力 V_l を次式に代入してセンサ定数 C_l 、 η_l を求めた。

$$\text{長波センサの熱流束} = \sigma T_r^4 \Psi\{dA_p \rightarrow A_n\} = C_l + \eta_l V_l \quad (4)$$

放射強度の長波成分は次式で表される。

$$I_l\{A_n\} = \frac{Q_l\{A_n \rightarrow dA_p\}}{dA_p \Omega\{dA_p \rightarrow A_n\}} = \frac{C_l + \eta_l V_l}{\Omega\{dA_p \rightarrow A_n\}} \quad (5)$$

4. 球および平面周りの平均放射温度の計算方法

4-1. 局所放射温度

放射強度データは下記のような局所放射温度に変換できる。

$$T_{ri,l} = \sqrt[4]{\frac{\pi I_l\{A_{ri}\}}{\sigma}} \quad (6.a)$$

$$T_{ri} = \sqrt[4]{\frac{\pi(I_s\{A_{ri}\} + I_l\{A_{ri}\})}{\sigma}} \quad (6.b)$$

式(6.a)に示される局所放射温度 $T_{ri,l}$ は、完全拡散、完全黒体の仮想面に囲まれた空間における表面温度と解釈できる。したがって、現実の空間の温度とは必ずしも一致しない。相互放射、水蒸気の吸収等様々な過程を経て結果的に計測された長波放射強度を等価温度に算定するものである。式(6.b)の局所放射温度 T_{ri} は日射影響も考慮した等価温度である。

4-2. 球周りの平均放射強度

微小球 g と周囲 A_r の放射熱流束の収支は次式で表される。

$$\begin{aligned} Q_{s,l}\{A_r \leftrightarrow g\} / A_g &= \sum_{\text{sphere}} Q_{s,l}\{A_{ri} \leftrightarrow g\} / A_g \\ &= \frac{1}{4} \sum_{\text{sphere}} (I_{s,l}\{A_{ri}\} - I_{s,l}\{g\}) \Omega\{g \rightarrow A_{ri}\} \quad (7) \end{aligned}$$

ここで、 $Q_{s,l}\{A_{ri} \leftrightarrow g\}$ は微小球 g が周囲メッシュ A_{ri} と交換する短波、長波の放射熱量の収支、 $\Omega\{g \rightarrow A_{ri}\}$ は微小球 g から見た周囲メッシュ A_{ri} の立体角を表す。半球平均放射強度 $I_{s,l}\{\text{semisphere}\}$ 、全球平均放射強度 $I_{s,l}\{\text{sphere}\}$ は以下の式で示される。

$$I_{s,l}\{\text{semisphere}\} = \frac{\sum_{\text{semisphere}} I_{s,l}\{A_{ri}\} \Omega\{g \rightarrow A_{ri}\}}{2\pi} \quad (8.a)$$

$$I_{s,l}\{\text{sphere}\} = \frac{\sum_{\text{sphere}} I_{s,l}\{A_{ri}\} \Omega\{g \rightarrow A_{ri}\}}{4\pi} \quad (8.b)$$

4-3. 球周りの平均放射温度

微小球 g の全放射熱流束収支を局所放射温度 T_{ri} で表す。

$$\begin{aligned} \sum_{\text{sphere}} (Q_s\{A_{ri} \leftrightarrow g\} + Q_l\{A_{ri} \leftrightarrow g\}) / A_g \\ &= \sum_{\text{sphere}} (\sigma T_{ri}^4 - \sigma T_g^4) \Psi\{g \rightarrow A_{ri}\} \\ &= \sum_{\text{sphere}} \sigma \kappa\{A_{ri} \leftrightarrow g\} (T_{ri} - T_g) \Psi\{g \rightarrow A_{ri}\} \quad (9) \end{aligned}$$

ここで $\kappa\{A_{ri} \leftrightarrow g\}$ は A_{ri} と g の放射熱交換における局所温度係数であり、次式で定義される。

$$\kappa\{A_{ri} \leftrightarrow g\} = (T_{ri}^2 + T_g^2)(T_{ri} + T_g) \quad (10)$$

半球平均放射温度 $MRT_{\text{semisphere},l}$ 、全球平均放射温度 $MRT_{\text{sphere},l}$ の定義を以下に示す。

$$MRT_{\text{semisphere},l} = \sqrt[4]{\frac{\pi(I_s\{\text{semisphere}\} + I_l\{\text{semisphere}\})}{\sigma}} \quad (11.a)$$

$$MRT_{sphere, I} = \sqrt[4]{\frac{\pi(I_{s, \{sphere\}} + I_{l, \{sphere\}})}{\sigma}} \quad (11.b)$$

以上が放射強度を積算して平均化を行う方法であるが、放射温度で積算する方法も考えられる。局所温度係数 κ の値は通常の温度条件では変化が小さい。(9)式において局所温度係数 $\kappa \{A_{ri} \leftrightarrow g\}$ が全球で一定と見なせば

$$\begin{aligned} & \sum_{sphere} (Q_{s, \{A_{ri} \leftrightarrow g\}} + Q_{l, \{A_{ri} \leftrightarrow g\}}) / A_g \\ &= \sigma \kappa \left[\sum_{sphere} \Psi \{g \rightarrow A_{ri}\} T_{ri} - T_g \right] \quad (12) \end{aligned}$$

したがって、球周りの平均放射温度は局所放射温度を形態係数 $\Psi \{g \rightarrow A_{ri}\}$ で重みづけ積算した形で表される。

$$MRT_{sphere, T} = \sum_{sphere} \Psi \{g \rightarrow A_{ri}\} T_{ri} \quad (13)$$

4-4. 平面周りの平均放射強度

微小面 dA_p と周辺 A_{ri} の放射熱流束の収支は次式で表される。ここで、平面とは表裏2面のうち1面を指し、対象面側の半球分の放射強度のみを問題とする。

$$\begin{aligned} Q_{s, l} \{A_{ri} \leftrightarrow dA_p\} / dA_p &= \sum_{plate} Q_{s, l} \{A_{ri} \leftrightarrow dA_p\} / dA_p \\ &= \sum_{plate} (I_{s, l} \{A_{ri}\} - I_{s, l} \{dA_p\}) \Omega \{dA_p \rightarrow A_{ri}\} \quad (14) \end{aligned}$$

球周りの熱流束収支では放射強度を立体角 $\Omega \{g \rightarrow A_{ri}\}$ で重み付け積算したのに対して、平面の場合では立体角の投影 $\Omega \{dA_p \rightarrow A_{ri}\}$ で重み付け積算を行う。半球の積算による平板周りの平均放射強度 $I_{s, l} \{plate\}$ は次式で示される。

$$I_{s, l} \{plate\} = \frac{\sum_{plate} I_{s, l} \{A_{ri}\} \Omega \{dA_p \rightarrow A_{ri}\}}{\pi} \quad (15)$$

4-5. 平面周りの平均放射温度

平面周りの平均放射温度 $MRT_{plate, I}$ を式(16)に示す。

$$MRT_{plate, I} = \sqrt[4]{\frac{\pi(I_{s, \{plate\}} + I_{l, \{plate\}})}{\sigma}} \quad (16)$$

上式は放射強度の積算により平均化を行う方法である。これに対し4-3と同様に局所温度係数 κ が平面半球で一定と見なし、放射温度で積算する方法も考えられる。

$$MRT_{plate, T} = \sum_{plate} \Psi \{dA_p \rightarrow A_{ri}\} T_{ri} \quad (17)$$

4-6. 本計測システムの特徴

放射強度を積算して求めた平均放射温度 $MRT_{sphere, I}$ および $MRT_{plate, I}$ は、局所放射温度の積算による $MRT_{sphere, T}$ および $MRT_{plate, T}$ に比較し、温度係数 κ が一定の仮定を必要としない分、精度が高いと言える。したがって、以降の分析では放射強度の積算による方法を用いることとする。しかし、4乗則で表されるので線形的な取り扱いができなくなる。中村は、立方体の各面周りの平均放射強度を計測し、該当方向に対して均一な放射強度を仮定して放射束ベクトルを推定する方法により、任意方向の「局所平均放射温度」を算出する方法を示した⁶⁾。本計測システムは、放射束ベクトルを直

接計測するものであると言え、全球的な放射強度データを任意の方向を向いた平面周りの平均放射温度、すなわち「局所平均放射温度」として $MRT_{plate, I}$ と $MRT_{plate, T}$ のいずれにも加工することが可能である。その際、関係する方向の放射強度の実測値に基づいた積算を行うので実態に即した値が得られるのが特徴である。

5. 放射強度分布の実態調査

夏期の屋外空間にて、放射強度の連続的分布の実態調査を実施した。計測は樹林1箇所および住棟間3箇所で行った。計測期間は平成8年9月9日、計測場所は福岡市貝塚の団地および大学キャンパスである。樹林の地表面は草地、住棟間の地表面はそれぞれ打ち水を施した保水性セラミック舗装、保水性セラミック舗装、アスファルト舗装である。以降、これらの計測箇所をF（樹林）、W（住棟間、地表が湿りセラミック）、C（住棟間、地表がセラミック）、A（住棟間、地表がアスファルト）と称する。各計測箇所の様子を写真2～5に示す。各測定箇所にて放射強度分布および気温、日射等の気象条件を順次計測した。気温、湿度は日陰にてアスман乾湿度計を用いて計測を行った。放射強度の計測は人体への放射熱影響を検討するため、地上1.5m高さにおいて行った。同様の位置にて黒球温度の計測も合わせて行った。黒球は直径75mmのものを用い、応答性の確保に努めた。太陽位置に該当する計測メッシュでは搭載した短波センサの適用限界を越えたため、全日射計の値から太陽位置のメッシュ以外の放射熱量データの総和を差し引き、当該メッシュの放射強度を見積もった。気象条件の一覧を表2に示す。当日の天候は薄曇りの晴れ日であった。実測日以前の1週間は晴れ日もしくは薄曇りの安定した天候状況であった。

写真2 計測箇所Fの風景

写真3 計測箇所Wの風景

写真4 計測箇所Cの風景

写真5 計測箇所Aの風景

表2. 気象条件

* 計測箇所Fの全日射量は樹林内外の両方の値を示してある

	℃	℃	%	kg/kg'	W/m ²	℃	m/s
計測箇所	乾球温	湿球温	相対湿度	混合比	全日射量	黒球温度	風速
F	32.0	26.1	63.0	0.0190	46.0/736.0	32.4	0.15
W	30.2	25.9	72.0	0.0195	869.0	39.2	2.60
C	30.3	25.4	68.0	0.0185	907.0	43.1	3.20
A	30.4	25.8	68.0	0.0190	916.0	38.7	3.83

6. 計測結果と考察

6-1. 放射強度分布

住棟間（計測箇所A）と樹林（計測箇所F）を例として、放射熱環境を比較する。各々の天空側魚眼写真を写真6～7に示す。これらの魚眼写真と同様な位置関係で短波および長波の放射強度分布を可視化したのが図3～6である。分布の表示に際しては線形補間でスムージングを施してある。このようなグラデーション表示は分布の判別し易さに役立つものであるが、データの解像度とは必ずしも合致していない点に留意する必要がある。図3および図4に示される記号は、A-1：太陽、A-2：雲、A-3：青空、A-4：建物壁に相当する計測メッシュを示す。図5および図6に示される記号はF-1：樹冠、F-2：樹冠の切れ間に相当する計測メッシュを示す。これらの計測メッシュは地物単位の比較を行うため、センサの立体角を考慮し¹¹⁾、A-1：太陽のメッシュを除き他の地物が混在していないものを選定した。図中の数値は各計測メッシュにおける放射強度を表すものである。図中に記載した地物と天空の境界線は放射強度のコントラストとほぼ一致していることが分かる。局所的な放射強度の特徴を以下に述べる。太陽位置（A-1）では短波、長波ともに最大値を示し、特に短波の値は桁違いに大きい。太陽周辺の雲域（A-2）においては短波、長波ともに大きめの値を示す。一方、太陽位置から外れた青空（A-3）では短波の値は雲域のものよりかなり小さくなり、長波の値は最小値を示す。大気特有の放射特性の影響も考えられる。建物壁（A-4）、樹冠（F-1）では、短波の値が小さいため、長波の値は青空（A-3）のものより大きいものの、短波、長波の合計値は青空（A-3）より低い。樹冠の切れ間（F-2）の値は短波、長波ともに雲域（A-2）と同程度の値が得られた。

6-2. 放射強度の全球的な和算

式(8.a),(8.b)を用いて球周りの長波および短波の放射強度を半球および全球で積算し、図7に整理した。図中に示す「short↓」、「long↓」は天空側半球における短波および長波の半球平均放射強度、「short↑」、「long↑」は地表面側半球における短波および長波の半球平均放射強度、「total」は短波、長波の放射強度の和を全球で積算した全球平均放射強度の値である。「total」が最小値を示したのが計測箇所Fである。主因は樹冠の日射遮蔽により、天空側の半

図7 球周りの半球平均、全球平均の放射強度（地上1.5m）

F：樹林（草地）、W：住棟間（湿りセラミック）
C：住棟間（セラミック）、A：住棟間（アスファルト）

球平均放射強度「short↓」がきわめて小さいことがあげられる。これにともない「short↑」もかなり小さい値となっている。ただし、「long↓」は計測箇所W、Aよりも高めに現れている。これは樹冠部の放射強度が天空と比較して高いことを示している。天空の放射強度が低い理由としては大気の赤外波長域の透過性も一因と考えられる。なお、樹冠の温度レベルはアスファルト等の地表面と比較すると高くない。むしろ日射を受けながらも樹冠の温度上昇は抑制されていると考えるのが妥当である。計測箇所Wの「short↑」、「long↑」は計測箇所Cのものよりも小さい。後述の天候変化の影響に加え、打ち水による日射吸収率の増加、蒸発冷却による表面温度の低下も一因であると考えられる。計測箇所Aでは、「long↑」の値が大きく、アスファルト面の高温化を裏付けているが、その一方「short↑」の値はかなり小さい。その結果、「total」の値は計測箇所Cのものよりも小さい。総熱量で見た場合、照り返し日射の影響は無視できないことが分かる。

6-3. 計測期間中の温度変動

気温と表面温度の時間変動を図8に示す。図中、矢印で示した期間は計測実施期間を示すものである。全体的に急激な天候の変化はない。計測箇所Cの計測時においては晴れ間が覗いたため気温、表面温度ともに若干の温度上昇が見られた。

図8 計測期間中の温度変動

6-4. 平均放射温度

短波、長波の放射強度の和を全球で積算し平均放射温度を見積もった。計算式は(11.b)を用いた。平均放射温度は実際の温度場とは異なるが、総熱量の評価には有効と考えられる。平均放射温度の値は、Fでは31.1℃となり、気温の値32.0℃と同程度になった。日射のある住棟空間では気温を大きく上回る結果が得られた。平均放射温度の値はWで69.0℃、Cで83.7℃、Aで68.9℃を示した。屋外においては平均放射温度は気温と大きく乖離するため、対流と放射を分離した解析が必要である。総合熱伝達率の問題点を再確認したと言える。

また、屋外では放射温度のむらが大きい点に注意する必要がある。図9は計測箇所Aにおける局所放射温度の頻度分布を局所温度係数 κ $\{A \leftrightarrow g\}$ の値と合わせて表示したものである。局所温度係数 κ は局所放射温度および黒球温度の実測値を式(10)に代入して求めた。局所放射温度は広範囲に存在していることが分かる。ここには示していないが日射位置に該当する計測メッシュでは700℃近い値を示した¹²⁾。局所温度係数の値は、局所放射温度の違いにより影響を受けるため一定値とは見なせない。局所放射温度を積算する方法で平均放射温度を推定する場合には代表的な放射熱伝達率を何らかの形で求めておく必要がある。

写真6 住棟間（計測箇所A）の天空側魚眼画像（等距離射影）
（上側を南方位として表示）天空率6.9%

写真7 樹林（計測箇所F）の天空側魚眼画像（等距離射影）
（上側を南方位として表示）天空率9%

放射強度

($W/m^2 \cdot str$)

図3 住棟間（計測箇所A）における天空側短波放射強度の分布
（上側を南方位として表示）

放射強度

($W/m^2 \cdot str$)

図5 樹林（計測箇所F）における天空側短波放射強度の分布
（上側を南方位として表示）

放射強度

($W/m^2 \cdot str$)

図4 住棟間（計測箇所A）における天空側長波放射強度の分布
（上側を南方位として表示）

放射強度

($W/m^2 \cdot str$)

図6 樹林（計測箇所F）における天空側長波放射強度の分布
（上側を南方位として表示）

図9 計測箇所Aの局所放射温度の頻度分布

今回の結果を黒球の熱収支式から推定^{注3)}した平均放射温度の値と比較して表したのが図10である。両者の開きは7%以内に収まっており、変動の激しい屋外の気象状況下での計測であったのにも関わらず良好な一致を見せた。黒球温度は各測定箇所にて5分間の目読を行い安定した時の値を用いた。150mm φの黒球は2分程度の平均化を行えばその間の気象条件を反映すると言われている⁸⁾。今回の計測時間を勘案すれば平均化のプロセスに検討の余地を残しているものの75mm φ黒球の応答性は十分であると考えられる。放射強度の全球計測の間には気象状況も変化しているが、結果的には妥当な値が得られているようである。今回の計測における気候変動であれば、本計測システムは総熱量の評価に有効であると思われる。

図10 球周りの平均放射温度に関する
黒球法と本システムの比較

6. 5 平面放射熱流束

地上1.5m高さに位置する平面周りの長波および短波の放射熱流束の集計結果を表3に一覧する。放射熱流束は式(15)から得られる $I_{s, \epsilon} \{plate\}$ に π を乗じた値を用いた。表中に示す「LONG↓」,

「SHORT↓」は天空側平面における長波および短波の放射熱流束、「LONG↑」,「SHORT↑」は地表面側平面における長波および短波の放射熱流束である。魚眼画像から求めた各計測箇所の天空率はF:9%、W:62%、C:61%、A:69%である。F、W、Cにおける「LONG↓」の値は430~520W/m²の値を示す。通常の夏季の大気放射量よりも若干高い値を示している。天空率から考えて周辺地物の影響を30~40%含むものである。下向き魚眼画像を調べると全ての計測箇所に地表面の形態係数は0.95を越えている。したがって、「SHORT↑」は地表面からの照り返し日射と見なしてよい。「SHORT↑」を「SHORT↓」で除した値は各地表面被覆物のいわゆるアルベド値となる。その値は、F(地表が草地):0.26、W(地表が湿りセラミック):0.24、C(地表がセラミック):0.33、A(アスファルト):0.06である。

表3 平面放射熱流束の計測結果

単位: W/m²

計測箇所	LONG ↓	SHORT ↓	LONG ↑	SHORT ↑
F	433.8	72.9	459.1	19.2
W	428.5	869.0	470.4	200.0
C	517.7	907.0	491.7	290.4
A	412.7	916.0	550.1	59.9

7. 結論

- 1) 平面および球周りの平均放射温度の計算方法として放射強度を積算する方法と局所放射温度を積算する方法を示した。
- 2) 太陽近傍、建物壁、樹冠等の局所的な放射強度を実測し、波長毎の特徴を明らかにした。
- 3) 放射強度の積算による平均放射温度の値を黒球の熱収支式から推定した値と比較し、本計測システムの総熱量評価に関する有効性を確認した。

謝辞 住宅都市整備公団九州支店には計測場所を提供いただいた。実測にあたっては、青木建設株式会社九州支店、青木建設株式会社研究所、埼玉大学建設学科ヴァンカ助教、九州大学農学部鈴木義則研究室に協力を得た。また、大気の放射特性に関しては大林組技術研究所の大塚清敏氏に貴重なご意見をいただいた。記して感謝の意を表します。

注1) 今回の計測メッシュの立体角は0.0326~0.1207strの範囲にあり、いずれもセンサの立体角0.0289strより大きな値である。

注2) センサの開口角の中で太陽の占める割合を考慮し、計測箇所Aにおける放射強度データを太陽の放射温度に換算すると、4417 Kになる。これは、法線直達日射量460W/m²に相当し、薄曇日の地上観測としては妥当な値である。

注3) 黒球の熱収支は次式で表される。

$$\alpha_c (T_g - T_a) = \epsilon \sigma (MR T^4 - T_g^4)$$

$$MR T = \{ \alpha_c (T_g - T_a) / \epsilon \sigma + T_g^4 \}^{0.25}$$

球周りの強制対流伝達率 (弓削) η

$$Nu = 2 + 0.493 Re^{0.5} \quad Re < 1.8 \times 10^3$$

$$Nu = 2 + 0.3 Re^{0.5664} \quad 1.8 \times 10^3 < Re$$

記号説明

$Q \{A_1 \rightarrow A_2\}$: A_1 から A_2 に入射する放射熱量 (W)
 $Q \{A_1 \leftrightarrow A_2\}$: A_2 が A_1 と交換する放射熱収支量 (W)
 $I \{A_1\}$: A_1 における放射強度 (W/m²·str)
 T : 温度 (K)
 T_{rj} : 局所放射温度 (K)
 MRT : 平均放射温度 (K)
 T_a : 気温 (K)

V : 電圧 (Volt)
 A : 面積 (m^2)
 D : 日射減衰係数
 C : センサ定数
 η : センサ定数
 $\Psi \{A_1 \rightarrow A_2\}$: A_1 から A_2 を見た形態係数
 $\Omega (dA_p \rightarrow A_{ri})$: dA_p から見た A_{ri} の立体角の投影
 $\Omega (g \rightarrow A_{ri})$: g から見た A_{ri} の立体角
 $\kappa \{A_1 \leftrightarrow A_2\}$: A_1 と A_2 の 2 面間における局所温度係数

$$\kappa = (T_{A1}^2 + T_{A2}^2)(T_{A1} + T_{A2})$$

α_c : 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
 σ : ステファンボルツマン定数 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$)
 ε : 黒球の放射率 $\varepsilon=1.0$ (—)
 Nu : ヌッセルト数 $Nu = \alpha_c d / \lambda$
 d : 黒球直径 (m)
 λ : 空気の熱伝導率 (W/mK)
 Re : レイノルズ数 $Re = wd / \nu$
 w : 風速 (m/sec)
 ν : 動粘性係数 (m^2/sec)

添え字

s : 短波
 ι : 長波
 r : 周囲
 ri : 周囲のメッシュ分割
 g : 微小球
 p : 半球の接平面上の微小面

参考文献

- 1) KATAYAMA, T. and MORIKAWA, A. and MASUDA, S.: Investigation on the Formation of Thermal Environment in an Urban Canyon, Journal of Transaction of AIJ, NO. 372, pp.30-41, 1987
- 2) BROWN, R. D. and Gillespie, T. J.: Estimating Outdoor Thermal Comfort Using a Cylindrical Radiation Thermometer and an Energy Budget Model, Int. J. Biometeor., Vol.30, No.1, PP.43-52, 1986
- 3) 梅干野晃、何江: 屋外熱環境計の試作とその検討、日本建築学会計画系論文、NO.388、PP.29-37、1988.6
- 4) 孫章烈、磯田憲生、松井昌幸、小林陽太郎: 単純形態と環境との間の熱交換による温熱環境の総合評価に関する研究 (第1報 温度降下状態における黒塗球に対する環境の冷却力)、日本建築学会計画系論文、1981.1、PP.83-94
- 5) 中村泰人: 人間熱—環境系 (3.10 環境ふく射の計測)、日刊工業新聞社、PP.207-213、1989
- 6) 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、NO.376、PP.29-35、1987.6
- 7) T.YUGE, Experiments on Heat Transfer of Spheres/ Report 3, Rep. Inst. High Sp. Mech., Japan, Vol.11, 1959/1960, No.108, p.217
- 8) 片山忠久ら: 放射環境下における気温およびグローブ温度の測定精度に関する実験的研究、日本建築学会計画系論文、No.381、pp.20-26、1981.1

(1996年12月2日原稿受理、1997年5月16日採用決定)