

屋外環境と人体との間の熱収支式における長波長・短波長放射の表現法

栗原浩平、長野克則、持田徹、濱田靖弘
北海道大学

**Expression of long-wave and short-wave radiation
in heat balance equation between human body and outdoor environment**

Kouhei KUWABARA, Katsunori NAGANO, Tohru MOCHIDA and Yasuhiro HAMADA
Hokkaido University

Abstract: We verified the property of an effective radiant temperature based on direct radiation using an effective radiant temperature based on multiple radiations. The difference between two formulae was within ± 1 °C when short-wave reflectance of buildings' surface was less than 4 °C and the temperature difference between building surface and ground surface was within 5 °C. The ratio of atmospheric radiation to long-wave radiation from the ground was newly defined as long-wave radiation property. Expression of linearized radiative heat transfer between the human body and outdoor environment was defined using the property.

Key words: Outdoor environment, radiative environment, effective radiant temperature, long-wave radiation property and radiative heat transfer coefficient

要旨：屋外環境における日射を加味した有効放射温度の算出式について、直達放射のみを考慮した算出式の特性を、多重放射考慮の算出式との比較により検証した。建築面と地表面の温度差が 5°C 以内で建物表面の短波長反射率が 0.4 以内であれば、両式の差は ± 1 °C 程度の範囲内で推移することが明らかとなった。また、人体に対する地表面からの長波長放射に対する大気放射の比を長波長放射特性として定義し、屋外環境と人体との間の線形化された放射熱収支式の表現法を示した。

キーワード：屋外環境、放射環境、有効放射温度、長波長放射特性、放射熱伝達率

1. はじめに

著者らは、屋外環境における温冷感・快適感を評価するために、放射環境の表現法として直達放射のみを考慮した有効放射温度（栗原ら、2003）と多重放射をも考慮した有効放射温度（近藤ら、2001）の二種類を定義した。直達放射を考慮した有効放射温度は、人体表面と地表面や仮想天空面、地物表面との間の正味の長波長放射熱交換と、人体に入射する短波長放射量を加味した放射熱収支式から導かれている。実際の計算においては、仮想天空温度を必要とするため気象データ等からの計算を要する。多重放射考慮の有効放射温度は、多重放射の影響を表す入射係数を計算するために連立一次方程式を解く必要がある。そのため現場での簡便な使用という観点では、直達放射考慮の有効放射温度の精度を把握し、さらに仮想天空温度を使用しない表現法を提案することが必要である。

そこで本報では、多重放射考慮の有効放射温度と直達放射のみを考慮した有効放射温度を比較検討し、その適用範囲を明示すると共に、より簡便な使用へ向け

た新たな表現法を提案することを目的とする。

2. 記号

本論文にて使用する記号を以下に列挙する。

A_{cl}	：衣服表面積	[m ²]
A_{sk}	：皮膚表面積	[m ²]
C	：対流による熱授受	[W]
ERT	：多重放射考慮の有効放射温度	[°C]
F_{cl}	：衣服の伝熱効率	[N.D.]
H_d	：人体表面で吸収される直達日射量	[W/m ²]
H_r	：人体表面で吸収される反射日射量	[W/m ²]
H_s	：人体表面で吸収される天空拡散日射量	[W/m ²]
J_H	：大気放射量	[W/m ²]
S_{dis}	：直達日射の有無を表す係数	[N.D.]
T_a	：気温	[°C]
T_{cl}	：平均衣面温	[°C]
T_{cv}	：地物面温度	[°C]
T_{gr}	：地表面温度	[°C]
T_{er}	：直達放射考慮の有効放射温度	[°C]

T_{sk}	: 平均皮膚温	[°C]
T_{sky}	: 仮想天空温度	[°C]
U	: 天空率	[N.D.]
U_r	: 放射天空率	[N.D.]
R	: 放射による熱授受	[W]
Y	: 本研究で定義する放射量	[W/m ²]
f_{cl}	: 着衣面積率	[N.D.]
f_{ef}	: 人体の有効放射面積率	[N.D.]
f_p	: 投射面積率	[N.D.]
Ω	: 大気放射と地表面からの長波長放射の比	[N.D.]
ϕ	: 形態係数	[N.D.]
γ	: 入射係数	[N.D.]
ε	: 放射率	[N.D.]
ρ	: 反射率	[N.D.]
λ	: 場所と日時に関する長波長放射特性	[N.D.]
σ	: Stefan-Boltzmann係数(= 5.67×10^{-8})	[W/(m ² K ⁴)]
添字		
L, S: 長波長、短波長、gr: 地表面、k: 閉空間構成面、		
p: 人体、w: 建物表面		

3. 有効放射温度の適用範囲

3.1 有効放射温度

上述のように、著者らはこれまでに直達放射のみを考慮した有効放射温度と多重放射の有効放射温度を考案している。直達放射のみを考慮した有効放射温度 T_{er} は、式(1)に示すように地表面温度、仮想天空温度、日射量と放射天空率から算出可能である。

$$T_{er}^4 = (1 - U_r) T_{gr}^4 + U_r T_{sky}^4 + \frac{H_d + H_s + H_r}{\varepsilon \sigma f_{ref}} \quad (1)$$

$$H_d + H_s + H_r = I_{DN} f_{p,ref} + I_{SH} U_r f_{ref} + \rho_{Sgr} (S_{dis} I_{DH} + I_{SH} U) \psi_{p,gr} f_{ref} \quad (2)$$

他方、多重放射考慮の有効放射温度 ERT は、式(2)のように表され、長波長放射、短波長放射共に人体に直接照射する放射と構成面により反射された放射の合計で表されている。

$$ERT^4 = \frac{1}{\varepsilon_p \sigma} \left\{ (1 - \rho_{Lp}) \left(J_H U_r + \sum_{k=1}^n \gamma_{Lpk} Y_{Lk} \right) + (1 - \rho_{Sp}) \left(I_{DN} f_p + I_{SH} U_r + \sum_{k=1}^n \gamma_{Spk} Y_{Sk} \right) \right\} \quad (3)$$

ERT は人体と構成面の形態係数と反射率から、入射係数 (Incidence Factor) を求めるために連立一次方程式を解く必要がある。

式(3)において多重放射が一回のみと仮定するとほぼ $ERT = T_{er}$ となるが、 T_{er} は地表面からの反射日射のみを考慮しているため、地物面の短波長反射率が大きいほど両者の差が大きくなる。有効放射温度としての精度を鑑みると、ERTの方が T_{er} より精確な値を示すと考

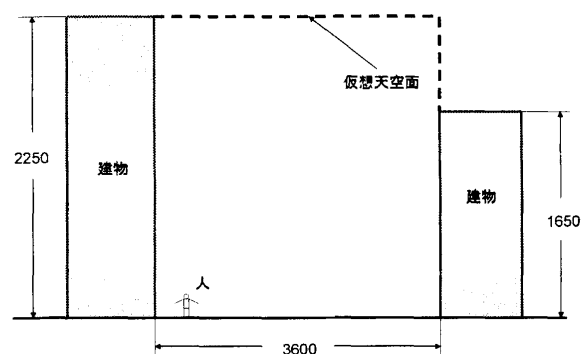


Figure 1 Cross-section diagram of supposed space

Table 1 Calculation condition

月日	8月1日
時刻	12時
建物表面短波長反射率 ρ_{sw}	0~1
長波長反射率 ρ_L	0
地表面温度 T_{gr}	40°C
地物面温度 T_{cv}	35, 40°C
日射量 I_{TH}	600 W/m ²
大気放射量 J_H	400 W/m ²

えられるが、計算の手間を考えると T_{er} で簡便に導出する方が有利と考える。

そこで本章ではある街路空間を想定し、式(1)と式(2)で求められる有効放射温度を比較検討することで、 T_{er} の適用範囲を明らかにする。

3.2 有効放射温度の前提条件

式(1)の有効放射温度 T_{er} は、いくつかの仮定条件のもとで導出された式である。

仮定 1) 地表面温度 T_{gr} と地物面温度 T_{cv} は等しい

仮定 2) 各構成面の長波長放射率は1とする

仮定 3) 地表面からの一回目の短波長反射のみ考慮

他方、有効放射温度ERTは、上記の仮定条件を必要としないため、 T_{er} とERTが等しくなるには、地表面温度と地物面温度が等しいこと、各面の放射率1であること、なおかつ壁面からの短波長反射率が0、の3条件が必要である。そこで壁面の日射反射率を0~1に変化させた場合の T_{er} とERTの比較を行い、さらに T_{gr} と T_{cv} の差が有効放射温度へ及ぼす影響について検証する。

3.3 T_{er} の有効性の検証

ここで片側二車線道路のあるビルに囲まれた空間内において歩道に人がいる場合を想定する。Figure 1に想定空間の断面図を示す。仮定条件として、建築構成面は全て完全拡散面と考え、放射率1とした仮想天空面および構成面に囲まれた閉空間を想定する。実際の建物表面において長波長反射率は0に近いと考えられるため、本節では建物表面の短波長反射率を変化させ

た場合のみ考察する。Table 1 に計算で使用する設定条件を示す。8 月 1 日の正午を想定し、 $T_{gr}=T_{cv}$ として壁面の短波長反射率 ρ_s を 0~1 に変化させた場合の有効放射温度の変化を示した図が Figure 2 である。Figure 2 において T_{er} と建物表面 $\rho_{sw}=0$ の ERT は同じ値を示すことから線が重なっている。 ρ_{sw} が大きくなるほど T_{er} と ERT の差が大きくなっていることがわかる。 $\rho_{sw} \leq 0.5$ であれば、両温度の差は 3~4°C 以内であった。高反射率の壁面を持つ空間での使用は難しいことが読み取れる。次に地表面温度 40°C、壁面温度 35°C と温度差がある場合の有効放射温度の比較を Figure 3 に示す。 T_{er} の計算で $T_{cv}=T_{gr}$ とすることにより、今回の設定温度では壁面からの長波長放射分を過大に評価することになるため、ERT の $\rho_{sw}=0$ の線より上方にずれていることがわかる。明るい色のコンクリートで短波長反射率 0.4 程度であることを考えると、両者の差は $\pm 1^\circ\text{C}$ の範囲内で推移することから実用には十分な精度であることが読み取れる。しかしながら今回のケースでは両壁面と地表面との温度差を 5°C 以内としたためであり、さらに温度差が大きい場合には T_{er} の方が過大評価する可能性がある。この差は、 $T_{cv} \neq T_{gr}$ として人体と地物との間の形態係数を考慮することで解消することが可能であるが、簡便な計算という利点は少なくなる。

4. 屋外環境における長波長、短波長放射の表現法

前章において直達放射のみを考慮した有効放射温度 T_{er} の適用範囲について検討したが、直達放射のみを考慮する有効放射温度であっても、仮想天空温度を計算する必要がある。本研究における仮想天空温度は、近藤（1998）の下向き大気放射量の推定式から計算しているが、日平均気温や雲量等が必要なため、気象観測

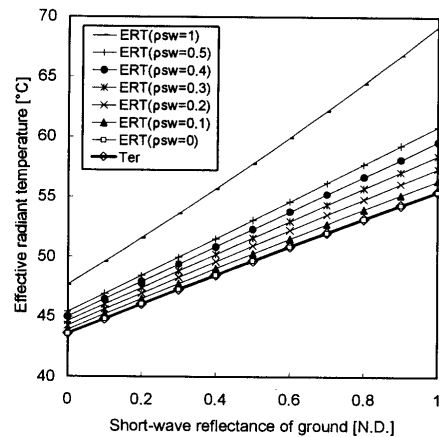


Figure 2 Influence of short-wave reflectance on effective radiant temperatures when wall temperatures are equal to ground temperature

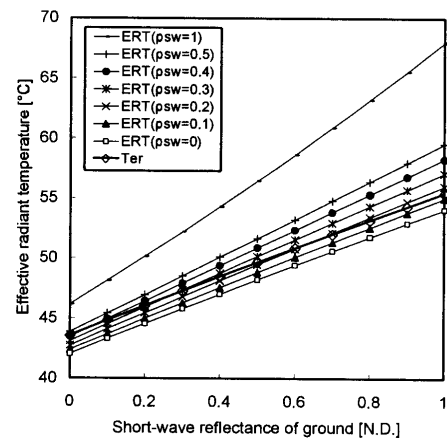


Figure 3 Influence of short-wave reflectance on effective radiant temperatures when wall temperatures are not equal to ground temperature

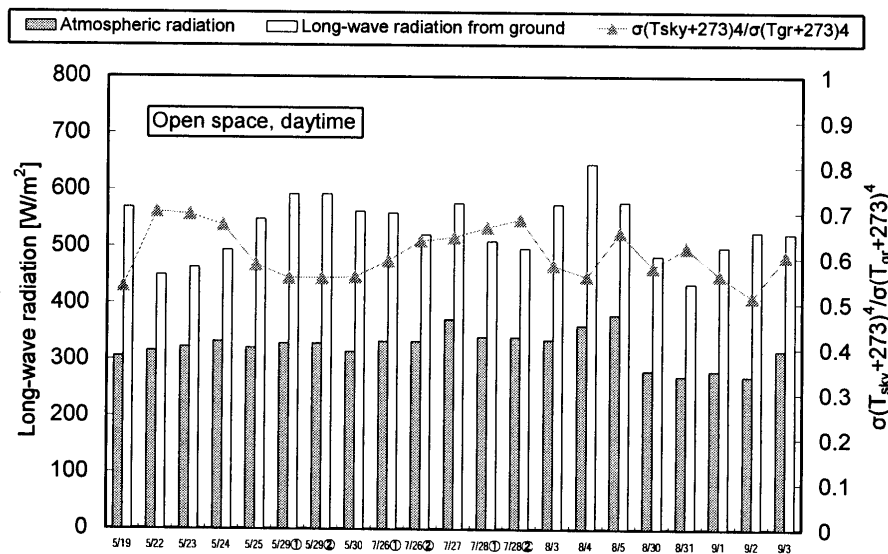


Figure 4 Experimental conditions on open space in Sapporo city in daytime

データ等入手する必要がある。

Figure 4 に、札幌の屋外環境での被験者実験における長波長放射を示す（栗原ら、2002）。Figure 4 より大気放射量は季節に因らずほぼ安定した値を示しているのに対し、地表面からの長波長放射は日射等のその日の環境により変化している。

著者らの定義した有効放射温度の算出式、及び実測データ Figure 4 の分析を参照し、人体と天空面の間の形態係数を表す放射天空率も含めて $(T_{sky}+273)^4 U_r / (T_{gr}+273)^4 (1-U_r) \equiv \Omega$ とおくと、式 (4) を経て人体と屋外環境との間の放射熱収支式 (5) が得られる。

$$\begin{aligned} & (T_{sky}+273)^4 U_r + (T_{gr}+273)^4 (1-U_r) \\ & = (1+\Omega)(T_{gr}+273)^4 (1-U_r) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R &= \varepsilon_{cl} \varepsilon_{gr} \sigma \left\{ (T_{cl}+273)^4 - (T_{gr}+273)^4 \right\} (1-U_r) f_{ref} \\ &+ \varepsilon_{cl} \varepsilon_{sky} \sigma \left\{ (T_{cl}+273)^4 - (T_{sky}+273)^4 \right\} U_r f_{ref} \\ &- (H_d + H_s + H_r) \\ &= \varepsilon_{cl} \sigma \left\{ (T_{cl}+273)^4 \right. \\ &- \left. \left\{ (T_{gr}+273)^4 (1-U_r) + (T_{sky}+273)^4 U_r \right\} f_{ref} \right. \\ &- (H_d + H_s + H_r) \left. \right\} \\ &= \varepsilon_{cl} \sigma \left\{ (T_{cl}+273)^4 - (1+\Omega)(T_{gr}+273)^4 (1-U_r) \right\} f_{ref} \\ &- (H_d + H_s + H_r) \\ &= \varepsilon_{cl} \sigma \left\{ (T_{cl}+273)^2 + (1+\Omega)^{\frac{1}{2}} (1-U_r)^{\frac{1}{2}} (T_{gr}+273)^2 \right\} \\ &\times \left\{ (T_{cl}+273) + (1+\Omega)^{\frac{1}{4}} (1-U_r)^{\frac{1}{4}} (T_{gr}+273) \right\} \\ &\times \left\{ (T_{cl}+273) - (1+\Omega)^{\frac{1}{4}} (1-U_r)^{\frac{1}{4}} (T_{gr}+273) \right\} f_{ref} \\ &- (H_d + H_s + H_r) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで式 (6) を定義することにより、屋外環境における放射熱伝達率として式 (7) が得られる。式 (6) における λ は、場所や時間に関する人体に対する長波長放射特性として定義される。

$$(1+\Omega)^{\frac{1}{4}} (1-U_r)^{\frac{1}{4}} \equiv \lambda \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{cl} \sigma \left\{ (T_{cl}+273)^2 + \lambda^2 (T_{gr}+273)^2 \right\} \\ & \times \left\{ (T_{cl}+273) + \lambda (T_{gr}+273) \right\} \equiv h_r \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) で定義された放射熱伝達率を用いることで、線形化された放射熱収支式 (8) が得られた。

$$\begin{aligned} R &= h_r \left\{ (T_{cl}+273) - \lambda (T_{gr}+273) \right\} f_{ref} \\ &- (H_d + H_s + H_r) \end{aligned} \quad (8)$$

また衣服の影響を加味した対流と放射による熱収支式は、次式で示される。

$$\begin{aligned} C+R &= \frac{(T_{sk}+273)-(T_{cl}+273)}{R_{cl}} A_{sk} \\ &= h_c \left\{ (T_{cl}+273) - (T_a+273) \right\} A_{cl} \\ &+ h_r \left\{ (T_{cl}+273) - \lambda (T_{gr}+273) \right\} f_{ref} A_{cl} \\ &- (H_d + H_s + H_r) A_{cl} \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) を T_{cl} について解くことにより単位体表面積当たりの対流と放射による熱収支式 (10) を得た。

$$\begin{aligned} \frac{C+R}{A_{sk}} &= h_c (T_{sk} - T_a) F_{cl} f_{cl} \\ &+ h_r \left\{ (T_{sk}+273) - \lambda (T_{gr}+273) \right\} f_{ref} F_{cl} f_{cl} \\ &- (H_d + H_s + H_r) F_{cl} f_{cl} \end{aligned} \quad (10)$$

あらかじめ各地域、時間帯における長波長放射特性 λ を計算しておくことで、地表面温度と日射量のみから対流と放射による熱交換の計算が可能となる。詳細については別報（栗原ら、2006）にて検討する。

5. おわりに

本報では、地表面からの反射日射のみを考慮している有効放射温度の有効性について、多重放射の影響を考慮した算出式を用いて検証した。地物面と地表面の温度差が 5℃程度で、地物面の短波長反射率が 0.4 以内であれば ±1℃以内適用可能であることを示した。

また仮想天空温度と地表面温度の比から新たに長波長放射特性を定義することで、線形化された放射熱収支式の表現法を示した。この長波長放射特性を各空間や時間帯等に応じてあらかじめ計算しておくことで、屋外環境における放射熱交換を、地表面温度と日射受熱量のみから計算することを可能にした。

参考文献

- 栗原浩平、持田徹、長野克則、嶋倉一實、2002、屋外環境における温冷感の実験的検討と評価、人間と生活環境、9(1): 10/17
- 近藤基、持田徹、栗原浩平、長野克則、2001、屋外放射熱環境の評価法に関する基礎的研究、空気調和・衛生工学会論文集、81: 1/9
- 日本建築学会編、建築設計資料集成 1 環境、丸善、p.122、1978
- 近藤純正、1998、水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—、朝倉書店、90
- 栗原浩平、長野克則、持田徹、濱田靖弘、2006、屋外空間の人体に対する放射特性、第 30 回人間—生活環境系シンポジウム報告集

<連絡先>

栗原浩平

札幌市北区北 13 条西 8 丁目
北海道大学大学院工学研究科
kuwa@eng.hokudai.ac.jp