

補遺 1：簡易体感温度の計算方法について

簡易体感温度の計算と放射環境改善効果の推定について、その導出方法の詳細を取りまとめた資料である。なお、本資料は、平成27年度 暑さ対策ガイドライン 技術検討ワーキンググループの足永靖信氏の指導のもと事務局でとりまとめた。

1. 簡易体感温度の計算方法

作用温度 OT (°C) は気温と平均放射温度から熱収支計算に基づいた体感温度を算出できる。

$$OT = (h_c \times T_a + h_r \times MRT) / (h_c + h_r) \quad (1)$$

ここで、 T_a ：気温(°C)、 MRT ：平均放射温度(°C)、 h_c ：対流熱伝達率(W/(m²・K))、 h_r ：放射熱伝達率(W/(m²・K))である。

気温の低下や放射環境を改善する対策で、湿度や風の大きな変化を伴わない場合、(1)式から作用温度の変化量を以下のように表すことができる。

$$\Delta OT = (h_c \times \Delta T_a + h_r \times \Delta MRT) / (h_c + h_r) \quad (2)$$

ここで、 ΔOT ：作用温度の変化量 (°C)、 ΔT_a ：気温の変化量 (°C)、 ΔMRT ：平均放射温度の変化量 (°C) である。

h_c は風速によって変化するため、 ΔOT は ΔT_a と ΔMRT 及び風速の関数として表すことができる。本ガイドラインでは、この風速の関数を風力階級に応じた風速係数として設定し、 ΔT_a 、 ΔMRT と風速係数から求める作用温度の変化量を簡易体感温度の変化量 (Δ簡易体感温度) と呼ぶ。

$$\Delta \text{簡易体感温度} (^\circ\text{C}) = \text{風速係数} \times \Delta T_a + (1 - \text{風速係数}) \times \Delta MRT \quad (3)$$

風速係数は、ISO7726(1998) Annex G を参考に、風速階級別に以下のように設定する。

表 1 風速係数

| 風 速 | 風速係数 |
|---------------------|------|
| 0.2m/s 未満 | 0.5 |
| 0.2m/s 以上、0.6m/s 未満 | 0.6 |
| 0.6m/s 以上、1.0m/s 未満 | 0.7 |

ΔT_a については実測の結果や既往の文献等から求め、 ΔMRT については次頁以降に簡易的に推定する方法を検討した。

2. 平均放射温度の変化量の推定方法の検討

1) 放射熱伝達率による ΔMRT の推定方法

人の放射特性に近い微小球が受ける放射熱 $Q(W/m^2)$ と $mrt(K)$ との関係を(4)式に示す。

$$Q = \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot mrt^4 \quad (4)$$

ここで、 ε_p は人体の放射率：0.97、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8}(W/(m^2 \cdot K^4))$)である。(4)式より、暑熱対策前後の全放射量の変化は、以下のように計算することができる。

$$Q_1 - Q_2 = \varepsilon_p \cdot \sigma (mrt_1^4 - mrt_2^4) \quad (5)$$

ここで、 Q_1 は対策前の全放射熱量(W/m^2)、 mrt_1 は対策前の平均放射温度 (K)、対策後はそれぞれ Q_2 (W/m^2)、 mrt_2 (K)である。

(5)式で $\sigma(mrt_1^2 + mrt_2^2)(mrt_1 + mrt_2)$ を短波、長波を含めた全放射の放射熱伝達率 $H_{r,all}(W/(m^2 \cdot K))$ として置き換えると、平均放射温度の変化量 $\Delta MRT(^{\circ}C)$ を(6)式のように表すことができる。

$$\Delta MRT = mrt_1 - mrt_2 = \frac{1}{\varepsilon_p \cdot H_{r,all}} (Q_1 - Q_2) \quad (6)$$

足永の方法¹⁾によれば、微小球が受ける全放射熱量は、全球短波放射強度 $I_s\{sphere\}$ ($W/(m^2 \cdot sr)$)と全球長波放射強度 $I_L\{sphere\}$ ($W/(m^2 \cdot sr)$)から求めることができる。人体による短波放射と長波放射の吸収率を考慮して以下のように示すことができる。

$$Q = \pi(a_s \cdot I_s\{sphere\} + a_L \cdot I_L\{sphere\}) \quad (7)$$

ここで、 a_s は短波放射の吸収率：0.7、 a_L は長波放射の吸収率：0.97である。

$I_s\{sphere\}$ は、直達日射 Q_{direct} (W/m^2)、散乱日射 $Q_{diffuse}$ (W/m^2)、面 i からの反射日射 $Q_{reflect,i}$ (W/m^2)を用い、 $I_L\{sphere\}$ は、面 i の表面温度 T_{Si} (K)を用いて以下のように示すことができる。

$$Q = \frac{a_s \cdot Q_{direct}}{4} + \frac{a_s \cdot Q_{diffuse} \varphi_{sky}}{4\pi} + \frac{a_s \cdot \sum_i (Q_{reflect,i} \varphi_i)}{4\pi} + \frac{a_L \cdot \sigma \sum_i T_{Si}^4 \varphi_i}{4\pi} \quad (8)$$

ここで、 φ_{sky} (sr)は天空の立体角、 φ_i (sr)は面 i の立体角である。

(8)式より暑熱対策前後の全放射熱量の変化は、短波放射と長波放射に分け、短波放射については、簡略化のためここでは直達日射のみを扱い、長波放射については長波放射のみの放射熱伝達率によって線形化し、対策によって表面温度が変化した面 i の立体角の割合と表面温度で表すことができる。

なお、透過性のある素材で日射を遮蔽する場合の散乱日射を考慮した MRT 削減効果の試算については、補遺2に示した。

$$\begin{aligned} Q_1 - Q_2 &= a_s \frac{Q_{direct,1} - Q_{direct,2}}{4} + a_L \cdot \sigma (T_{S1}^4 - T_{S2}^4) \\ &= a_s \frac{\Delta SUN}{4} + a_L \cdot H_{r,long} (T_{S1} - T_{S2}) \end{aligned}$$

¹ 足永, 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, 日本建築学会計画系論文集第500巻, 71-77, 1997

$$\begin{aligned}
&= a_s \frac{\Delta SUN}{4} + a_L \cdot H_{r_long} \left(\sum_i \phi_i \cdot T_{S1,i} - \sum_i \phi_i \cdot T_{S2,i} \right) \\
&= a_s \frac{\Delta SUN}{4} + a_L \cdot H_{r_long} \sum_i \phi_i \cdot \Delta T_{S,i} \quad (9)
\end{aligned}$$

ここで、対策前の直達日射 Q_{direct_1} (W/m²)、周囲の平均表面温度 T_{S1} (K)、対策後はそれぞれ Q_{direct_2} (W/m²)、周囲の平均表面温度 T_{S2} (K)、 $\Delta SUN = Q_{direct_1} - Q_{direct_2}$ (W/m²)、長波放射のみの放射熱伝達率 H_{r_long} (W/(m²·K))= $\sigma(T_{S1}^2 + T_{S2}^2)(T_{S1} + T_{S2})$ 、対策面 i の立体角の割合 ϕ_i と対策による対策面 i の表面温度の低下量 $\Delta T_{S,i}$ (= $\Delta T_{S1,i} - \Delta T_{S2,i}$)(°C)である。

(6)、(9)式より、 ΔMRT は短波放射低減効果 (ΔMRT_S) と長波放射低減効果 (ΔMRT_L) を合計したものであり、それぞれ(11)、(12)式のように表すことができる。

$$\Delta MRT = \Delta MRT_S + \Delta MRT_L \quad (10)$$

$$\Delta MRT_S = \frac{a_s}{4 \cdot \varepsilon_p \cdot H_{r_all}} \Delta SUN \quad (11)$$

$$\Delta MRT_L = \frac{H_{r_long}}{H_{r_all}} \sum_i \phi_i \Delta T_{S,i} \quad (12)$$

上で定義した放射熱伝達率 h_{r_all} 、 h_{r_long} について、図 1 より、夏季屋外の日射環境下であれば 7～9 程度の値をとり得ることが分かる。対策による MRT の変化量の過大評価を避けるため、 H_{r_all} は高め、 H_{r_long} は低めに設定することとする。そこで、 MRT_1 と MRT_2 をそれぞれ 70°C程度として H_{r_all} を 9(W/(m²·K))、 T_{S1} と T_{S2} をそれぞれ 40°Cとして H_{r_long} を 7(W/(m²·K))に設定し、 ΔMRT_S 、 ΔMRT_L を(13)、(14)式のように近似的に推定する。

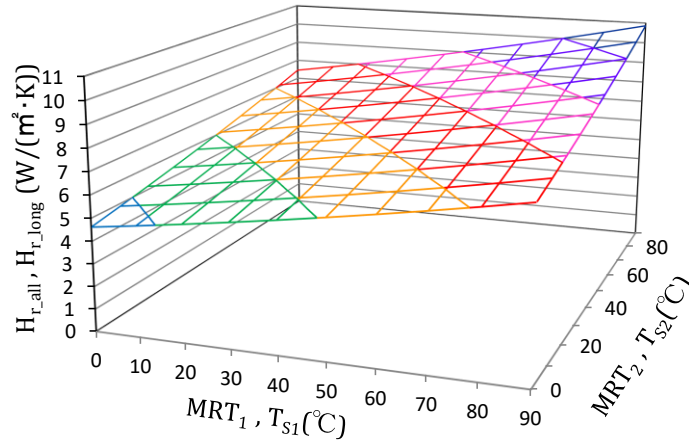


図 1 平均放射温度、表面温度と放射熱伝達率の関係

$$\Delta MRT_S \sim 0.02 \times \Delta SUN \quad (13)$$

$$\Delta MRT_L \sim 0.8 \times \sum_i \phi_i \Delta T_{S,i} \quad (14)$$

ΔMRT_s は、日射変化量 ($\Delta SUN : W/m^2$) に短波係数 $0.02 (^\circ C \cdot m^2/W)$ を乗じて近似的に推定、 ΔMRT_L は、対策面 i の表面温度変化量 ($\Delta T_{s_i} : ^\circ C$) と面 i の立体角の割合 (Φ_i) に長波係数 0.8 (ー) を乗じて近似的に推定する。

なお、短波係数と長波係数について、短波放射量と平均表面温度（長波放射量）と各係数の関係を示すと、図 2 のようになる。

短波放射と MRT との関係は、平均表面温度が $60^\circ C$ のときに短波係数が「 0.02 」となり、平均表面温度が $30^\circ C$ のときには係数が「 0.025 」と大きくなる。また、長波放射と MRT との関係は、日射量が $900W/m^2$ のときに短波係数が「 0.8 」となり、日射量が $400W/m^2$ のときには係数が「 0.9 」と大きくなる。(13)、(14)式で設定した係数については、それぞれ ΔMRT を過大に推計しないような熱環境条件での設定であることが分かる。

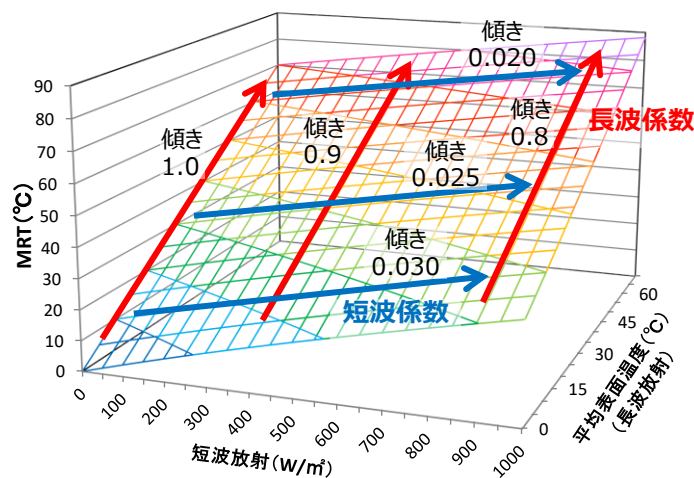


図 2 短波放射、平均表面温度（長波放射）と MRT の関係

2) 立体角の推定

立体角の割合の計算は複雑であるが、等立体角射影方式の魚眼レンズを用いて対策面を撮影することで、面積から立体角を求めることができる。本ガイドラインでは簡易的に対策面 (i) の面積 (A_i) と対策面までの垂直距離 (D_i) から線図によって立体角の割合を求める方法を提示する。なお、評価点は対策面の中央に位置するものとする。

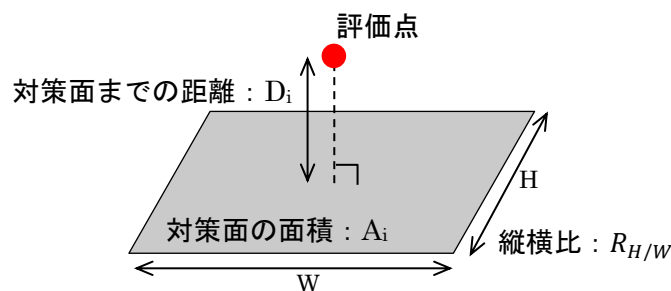


図 3 評価点と対策面との関係

微小球から見た対策面の立体角(sr)の計量手法に関する既往研究²では、図4に示す面Fの縦横の長さ (h, w) と評価点Oからの距離 (r_1, r_2) により立体角Sを求める手法が示されている。

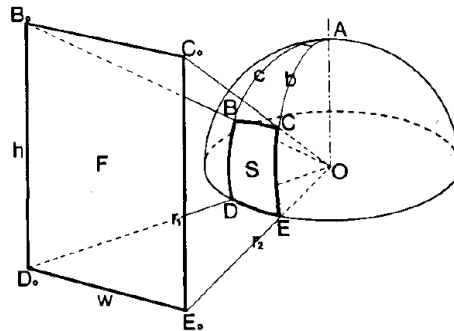


図4 面Fと立体角S、評価点Oの関係²

上記の立体角の計量手法を参考に、図3における対策面A_iの面積 (m²) と対策面までの垂直距離D_i (m) から (評価点から見た) 対策面A_iの立体角割合を求めるための線図 (図5) を作成した。

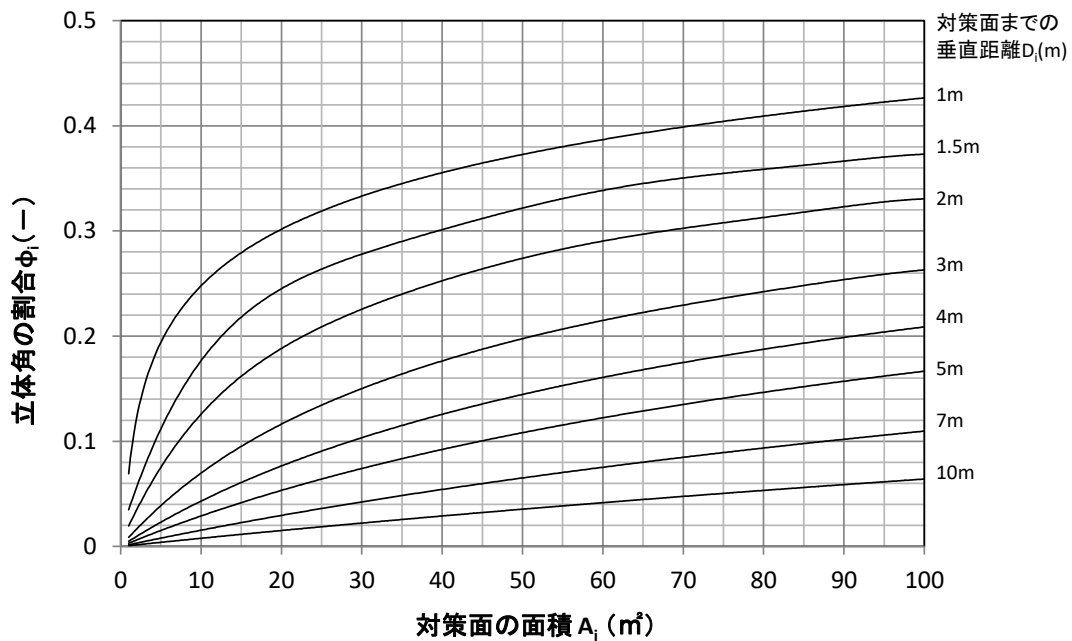


図5 対策面の面積と対策面までの垂直距離から立体角割合を求める線図

また、対策面の縦横比 $R_{H/W}$ が1から乖離すると、立体角の割合が小さくなる。目安として、縦横比が「1」から1増加することで立体角割合は約5%ポイント減少する (縦横比7程度まで)。

² 中岡ほか, 都市空間における天空開放性の計量技法に関する研究, 土木計画学研究・講演集No.7, 499-504, 1985