

参考資料：簡易体感温度指標による効果把握

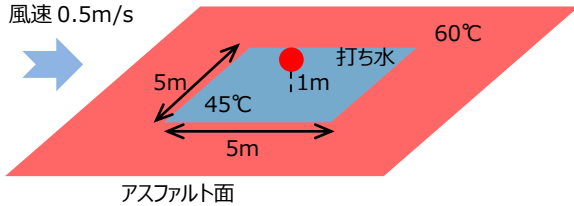
暑さ対策の効果把握するには体感温度への影響を評価します（第5章）。

ここでは、局所的な気温低下や、日除けによる日射対策、路面・壁面等の温度を下げる対策について、効果の目安を体感温度として手軽に計算する方法を紹介します。詳細は次頁以降をご覧ください。

【計算してみよう】 打ち水で体感温度はどのくらい下がる？

(条件)

気温 30℃
風速 0.5m/s



夏の日中、表面温度が 60℃になっているアスファルト面の 5m×5m の範囲に打ち水をしました。すると、アスファルトの表面温度は 45℃に下がり、涼しく感じました（評価点の高さは 1m）。気温 30℃、風速 0.5m/s のとき、体感温度の改善効果の目安を簡易的に求めてみましょう。なお、打ち水前後の気温は変わらないものとします。

STEP 1：気温の変化を把握 → 気温は変化していない！

気温変化量(Δ気温) = 0℃

STEP 2：日除けによる効果(短波放射の低減)を把握 → 日射対策はしていない！

短波放射の変化量(ΔMRT_S) = 短波係数(0.02℃・m²/W)×日射変化量(0W/m²) = 0℃

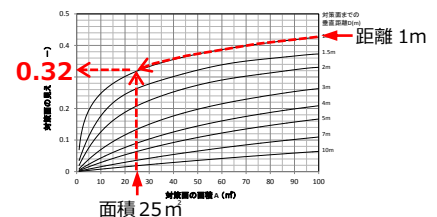
STEP 3：路面等の高温化抑制対策の効果(長波放射の低減)を把握 → 25 m²が 15℃低下！

長波放射の変化量(ΔMRT_L)

= 長波係数(0.8)×対策面の見える割合(※1)×表面温度変化量(-15℃)

(※1 対策面の見える割合は、面積 25 m²と評価点までの距離 1m として「0.32」。右に示すように、図 4 から求めることができます。)

= 0.8×0.32×(-15) ≒ -3.8℃



STEP 4：簡易体感温度を把握 → STEP 1～STEP 3 をまとめましょう！

Δ簡易体感温度 = 風速係数(※2)×Δ気温 + (1 - 風速係数)×(ΔMRT_S + ΔMRT_L)

(※2 風速係数は、風速 0.5m/s のとき「0.6」。右に示すように、表 2 から求めることができます。)

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

← 風速 0.5m/s

= 0.6×0℃ + (1 - 0.6)×(0℃ - 3.8℃) ≒ -1.5℃

気温は変わらなくても、打ち水することで体感温度は約 1.5℃、涼しく感じます！

以下に、簡易体感温度による効果把握の考え方、具体的な方法、留意事項等をまとめました。適用できる対策や気象条件等に制約がありますが、気温と放射環境の改善による暑さ対策の効果の目安を手軽に計算することができます。

計算方法の詳細については、「補遺 1：簡易体感温度の計算方法について」を参照ください。

1. 効果把握の考え方

1) 簡易体感温度

人体の熱収支計算に基づく体感温度指標である作用温度 OT (Operative Temperature) の考え方を我们用います。表 1 に示すように、作用温度 OT は、気温と平均放射温度 MRT から求めます。

表 1 作用温度の概要

指標	概要
作用温度 OT	熱収支計算に基づき気温と放射環境で評価する指標であり、風が弱く、比較的乾いた環境での利用に適している。 $OT = (h_c \cdot T + h_r \cdot MRT) / (h_c + h_r)$ T：気温(℃)、MRT：平均放射温度(℃)、 h_c ：対流熱伝達率(W/℃m ²)、 h_r ：放射熱伝達率(W/℃m ²)

本ガイドラインでは、風の強さに応じた熱伝達率を設定し、以下の方法で求める作用温度を「簡易体感温度」と呼びます。

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

風速係数は、以下のように設定します。

簡易体感温は、風が弱い場合は気温と MRT をそれぞれ 2 分の 1 して足し合わせた値（風速係数が 0.5）になりますが、風が強くなるほど簡易体感温度に対する気温の影響が大きくなり、一方で MRT の影響が小さくなります。この係数は ISO7726 を参考に設定しています。

表 2 風速係数 (ISO7726(1998))

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

なお、対策実施前の現状の簡易体感温度を求める場合、現状の MRT を求める必要がありますが、黒球温度と気温、風速を実測し、以下のように計算することができます。ただし、黒球は放射熱の吸収率が高く、一般的な着衣の人が受ける MRT より高くなります。

$$MRT = \left[(t_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V_a^{0.6} (t_g - t_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (\text{ISO7726(1998)})$$

ここで、MRT：平均放射温度(°C)、 t_g ：黒球温度(°C)、 t_a ：気温(°C)、 V_a ：風速(m/s)。ただし、標準的な黒球温度計（直径 15cm）の場合。

2) 効果把握の方法

簡易体感温度で対策効果の目安を事前に把握する際、対策後の気温と MRT の把握が必要になります。対策後の気温と MRT が厳密に何°Cになるかを予測することは簡単ではありませんが、既往の対策事例から局所的な気温の低下量（ Δ 気温）を把握したり MRT の変化量（ Δ MRT）を近似的に推定することは可能です。

そこで、本ガイドラインでは、簡易体感温度の変化量（ Δ 簡易体感温度）を Δ 気温と Δ MRT から求めます。

$$\Delta \text{簡易体感温度} (\text{°C}) = \text{風速係数} \times \Delta \text{気温} + (1 - \text{風速係数}) \times \Delta \text{MRT}$$

表 3 風速係数（再掲）

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

Δ 気温は、実験的に対策効果を実測したり、既往の文献等から効果を求めます。

← 1 頁 STEP1

Δ MRT は、次頁に示す「 Δ MRT 簡易計算式」を用いて推定します。

2. ΔMRT 簡易計算式

1) 計算式の概要

ΔMRT 簡易計算式は、対策による短波放射と長波放射の変化量から、MRT のおおよその変化量を近似的に見積もるものです。

ΔMRT は、短波放射の変化量 (ΔMRT_S) と長波放射の変化量 (ΔMRT_L) を足し合わせて求めます。

$$\underline{\Delta MRT = \Delta MRT_S + \Delta MRT_L}$$

ΔMRT_S は、主に上面からの日射の遮蔽効果を把握するもので、対策による日射の変化量 (ΔSUN : W/m²) に短波係数 0.02 (°C・m²/W) を乗じて近似的に推定します。

$$\underline{\Delta MRT_S \sim 0.02 \times \Delta SUN}$$

ΔMRT_L は、主に路面や壁面の高温化抑制 (冷却) 対策の効果を把握するもの対策面の数だけ効果を足し合わせて推計します。ある対策面 i の長波放射の変化量 (ΔMRT_{L*i*}) は、面 i の表面温度の変化量 (ΔT_{Si} : °C) と面 i の見える割合 (V_i) に長波係数 0.8 (-) を乗じて近似的に推定します。

$$\underline{\Delta MRT_L \sim \sum_i (0.8 \times V_i \times \Delta T_{Si})}$$

ΔMRT_S は日射の低減量が大きいくほど、ΔMRT_L は対策面の温度低下量が大きいくほど、対策面積が大きく対策面の見える割合が大きいくほど、その低下量が大きくなります。

2) 計算可能な対策

ΔMRT 簡易計算式は暑さ対策の効果を簡易的に推定するものであり、効果のメカニズムが複雑な対策や正確に予測したい場合については別途、詳細なシミュレーションツールを活用ください。以下に簡易計算式で対象とする対策の例を示します。

- ① 太陽から直接、降り注ぐ日射の低減対策
- ② 日射が当たるのを防いだり保水化させることで、路面や壁面などの高温化を抑制する対策
- ③ 歩道から見える高温化した車道面を生垣などで遮る対策
- ④ 蒸発冷却により路面や壁面等を気温より低下させる対策

特に短波放射については、太陽から直接、降り注ぐ日射のみを対象としており、路面等の日射反射率を高めて路面等の高温化を抑制する遮熱性舗装などの対策は、路面等からの反射日射が増加するなど、複雑なメカニズムとなることから現状では対象としていません。遮熱性舗装などの対策は、歩行者等への反射日射の影響を考慮して実施してください。

また、Δ簡易体感温度の制約上、対象とする気象条件は風速 1m/s 未満です。

テントなどによる日射遮蔽対策では、上からの短波放射と、路面の高温化が抑制されて下からの赤外放射が低減しますが、日射吸収率の高いテント生地では生地自体が 60℃以上にもなる場合があり、テント生地からの長波放射量を増加させるため、計算が複雑になります。詳細は、「3. 計算事例」を参照ください。

3) 短波放射の変化量： ΔMRT_S

← 1 頁 STEP2

日射の変化量 ΔSUN は、実際に日射計を用いて計測するか、具体的な製品や対策技術シートなどの日射透過率データを用い、夏季正午の日射量を 900W/m²と仮定して計算します。例えば日射透過率が 50%の場合、 ΔSUN は 900×0.5=450W/m²となります。

日射透過率 50%の場合、 ΔMRT_S は近似的に 9℃低下すると推定できます。

$$\Delta MRT_S \sim 0.02^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W} \times 450 \text{ W/m}^2 = 9^\circ\text{C}$$

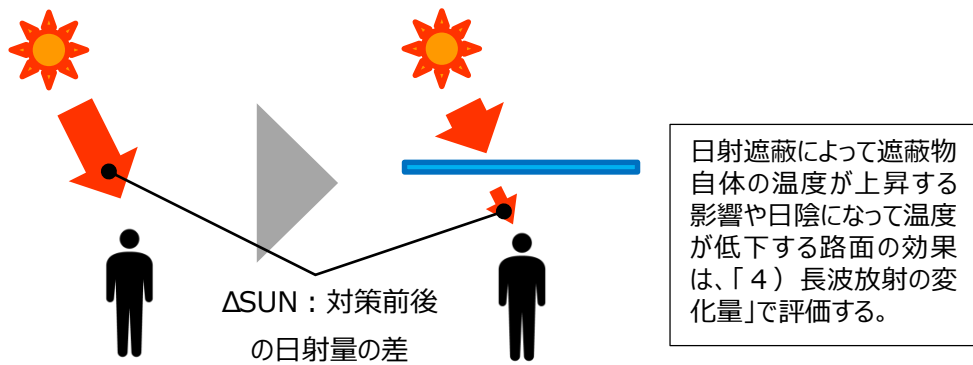


図 1 日射低減対策のイメージ

4) 長波放射の変化量： ΔMRT_L

← 1 頁 STEP3

対策面 i の表面温度の変化量 ΔT_{Si} は、対策による表面温度の低下量を実際に計測するか、具体的な製品や対策技術シートなどのデータなどを用いて計算します。対策面 i の見える割合 V_i は、対策面の面積と評価点までの距離から次頁の図 4 から読み取ります。

面 i の $\Delta T_{Si}=20^\circ\text{C}$ 、 $V_i=0.3$ の場合、 ΔMRT_L は近似的に 4.8℃低下すると推定できます。

$$\Delta MRT_L \sim \sum_i (0.8 \times 0.3 \times 20^\circ\text{C}) = 4.8^\circ\text{C}$$

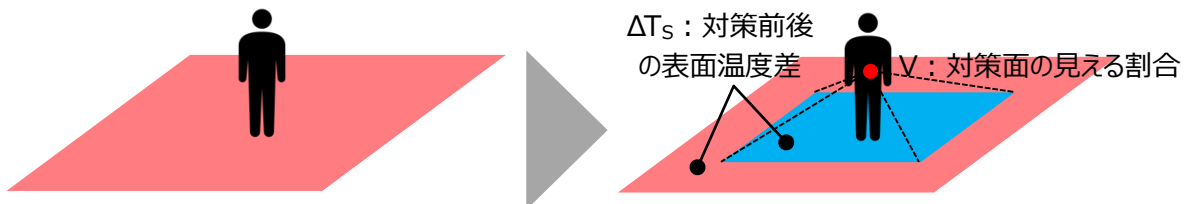


図 2 路面の高温化抑制対策のイメージ

5) 対策面の見える割合： V_i

対策面の見える割合とは、評価点から見た対策面が、全球に対してどの程度の割合を占めるかを示すものです。対策面の見える割合の計算は複雑です。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、その面積から求めることができます。本ガイドラインでは対策面の面積 A (m^2) と対策面までの垂直距離 D (m) から簡易的に対策面の見える割合を求めるための線図を作成しました。ただし、評価点の位置は対策面の中央にあることを条件とします。

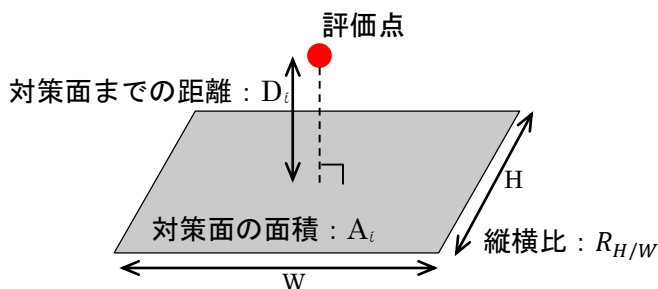


図3 評価点と対策面との関係

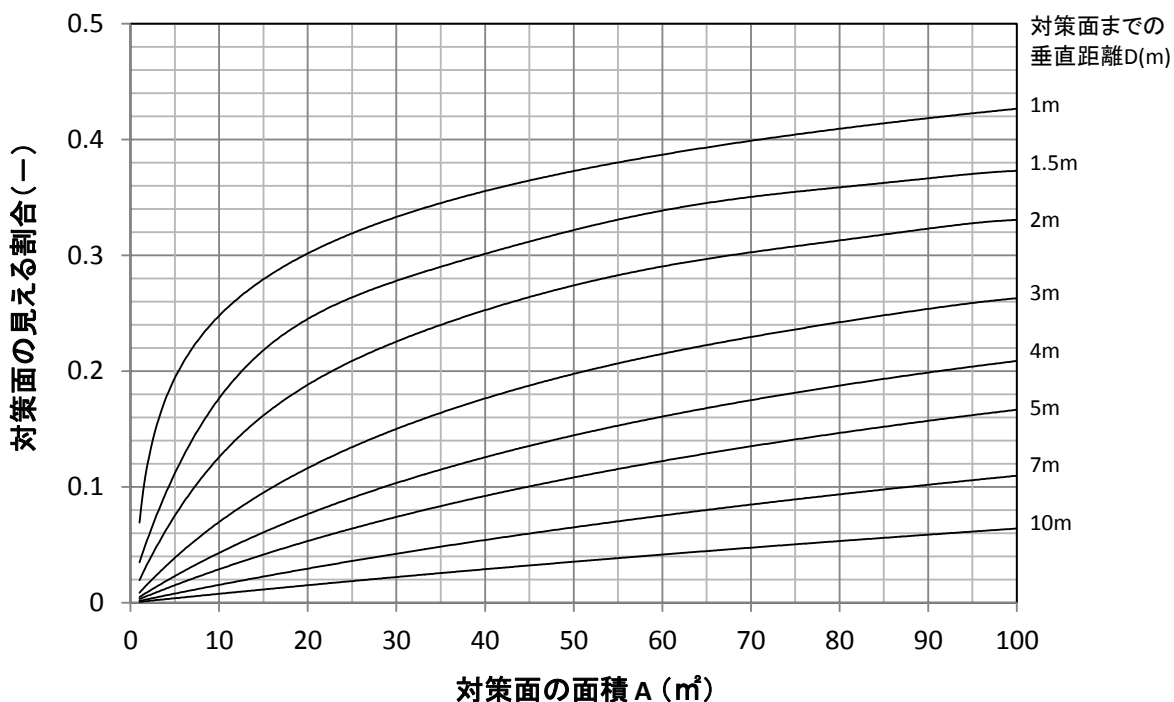


図4 対策面の面積、対策面までの垂直距離と対策面の見える割合（縦横比 $R_{H/W} = 1$ の場合）

なお、対策面の縦横比 $R_{H/W}$ が 1 から乖離すると、対策面の見える割合が小さくなります。目安として、縦横比が「1」から 1 増加することで割合は約 5%ポイント減少します（縦横比 7 程度まで）。

3. 計算事例

①歩道の保水化

条件：■対策内容

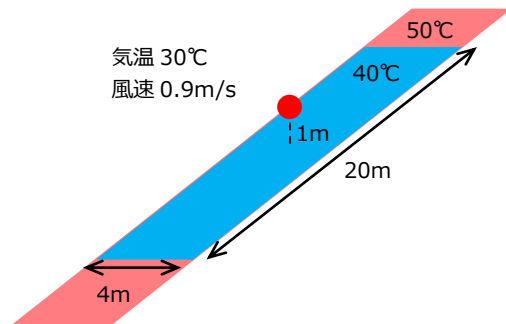
歩道幅 4m、歩道延長 20m に保水性ブロックを整備し保水化、初期表面温 50℃の歩道の温度が 10℃低下する。

■対策による変化

路面の温度が 4m×20m 範囲で 10℃低下

■計算の条件

評価点は、歩道の中央、高さ 1m とする。気温は対策前後とも 30℃、風速は 0.9m/s とする。



効果：STEP1：気温は変化していないので、 $\Delta T_{\text{気温}} = 0^\circ\text{C}$

STEP2：日射対策はしていないので、 $\Delta MRT_s = 0^\circ\text{C}$

STEP3：

V (歩道の保水化) …… 図 4 から面積 80 m^2 ・距離 1m・縦横比 1 のとき 0.41、対策面の縦横比 5 なので面の見える割合が 25% 小さくなり、対策面の見える割合 V (歩道の保水化) は 0.308

ΔT_s (歩道の保水化) …… -10°C

ΔMRT_L (歩道の保水化) は、 $0.8 \times 0.308 \times (-10^\circ\text{C}) \approx -2.5^\circ\text{C}$

STEP4：

【簡易体感温度】

風速 0.9m/s の場合、 Δ 簡易体感温度 = $-2.5^\circ\text{C} \times (1 - 0.7(\text{風速係数})) = -0.75^\circ\text{C}$

②歩道の保水化+緑化フェンス

条件：■対策内容

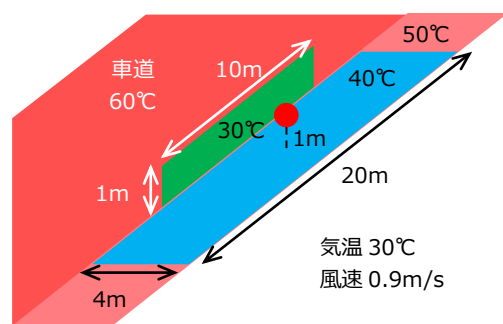
歩道幅 4m、歩道延長 20m に保水性ブロックを整備し保水化、初期表面温 50℃の歩道の温度が 10℃低下する。さらに、車道との間に高さ 1m、延長 10m の緑化フェンスを整備し、表面温度 30℃の葉によって、60℃の車道が遮蔽される。

■対策による変化

事例①に加えて、側面の温度が $1\text{m} \times 10\text{m}$ 範囲で 60°C から 30°C になる。

■計算の条件

評価点は、歩道の中央、高さ 1m とし、生垣からの距離は 2m とする。気温は対策前後とも 30℃、風速は 0.9m/s とする。



効果：STEP1：気温は変化していないので、 Δ 気温 = 0℃

STEP2：日射対策はしていないので、 Δ MRT_S = 0℃

STEP3：

【歩道の保水化】

Δ MRT_L (歩道の保水化) は -2.5℃ (事例①)

【緑化フェンスの整備】

V (緑化フェンス) …フェンスの高さを 2m と仮定し、図 4 から面積 20 m²・距離 2m・縦横比 1 のとき 0.19。対策面の縦横比 5 なので面の割合が 25% 小さくなり、高さ 2m と仮定した場合の対策面の見える割合は 0.14。高さ 1m の緑化フェンスの見える割合は、その半分となり、V (緑化フェンス) は 0.07。

Δ T_S (歩道の保水化) … 60℃ から 30℃ になるので -30℃

Δ MRT_L (緑化フェンス) は、 $0.8 \times 0.07 \times (-30℃) \div -1.7℃$

【MRT_L 合計】

Δ MRT_L = Δ MRT_L (歩道の保水化) + Δ MRT_L (緑化フェンス) = -2.5℃ - 1.7℃ \div -4.2℃

STEP4：

【簡易体感温度】

風速 0.9m/s の場合、 Δ 簡易体感温度 = -4.2℃ × (1 - 0.7(風速係数)) = -1.26℃

③ テントによる日射遮蔽

条件：■ 対策内容

縦 5m、横 5m の日射透過率 0.2 のテントで頭上を覆い、日陰となる路面温度が 50℃ から 35℃ に低下する。テント膜の温度が 35℃ となる。

■ 対策による変化

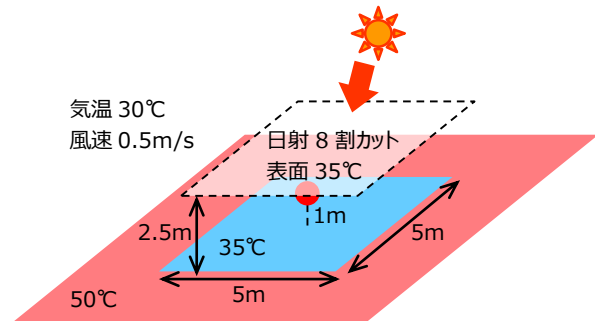
日射透過率 0.2。

路面の温度が 5m × 5m 範囲で 50℃ から 35℃ になる。

頭上の温度が 5m × 5m 範囲で 30℃ (気温) から 35℃ になる。¹

■ 計算の条件

テントは地上 2.5m とし、評価点は地上 1m でテント下の中央とする。気温は対策前後とも 30℃、風速は 0.5m/s とする。日射量は 900 W/m² とする。



効果：STEP1：気温は変化していないので、 Δ 気温 = 0℃

STEP2：

日射対策によって、日射の変化量 Δ SUN は $900 \text{ W/m}^2 \times (1 - 0.2) = 720 \text{ W/m}^2$

¹ テント設置前の天空の温度は、実際には気温よりも低いですが、ここでは簡便のために気温相当としている。

$$\Delta MRT_S \text{ は、} 0.02 \times (-720) = -14.4^\circ\text{C}$$

STEP3 :

【路面の表面温度低下】

$V_{\text{(日陰の路面)}}$ …… 図 4 から面積 25 m^2 ・距離 1 m ・縦横比 1 のとき、 0.32 。

ΔT_S (日陰の路面) …… 50°C から 35°C になるので -15°C

ΔMRT_L (日陰の路面) は、 $0.8 \times 0.32 \times (-15^\circ\text{C}) \doteq -3.8^\circ\text{C}$

【テント生地 of 温度上昇】

$V_{\text{(テント生地)}}$ …… 図 4 から面積 25 m^2 ・距離 1.5 m ・縦横比 1 のとき、 0.26 。

ΔT_S (テント生地) …… 30°C から 35°C になるので $+5^\circ\text{C}$

ΔMRT_L (テント生地) は、 $0.8 \times 0.26 \times (+5^\circ\text{C}) \doteq +1.0^\circ\text{C}$

【 MRT_L 合計】

$$\Delta MRT_L = \Delta MRT_L \text{ (日陰の路面)} + \Delta MRT_L \text{ (テント生地)} = -3.8^\circ\text{C} + 1.0^\circ\text{C} \doteq -2.8^\circ\text{C}$$

STEP4 :

【簡易体感温度】

風速 0.5 m/s の場合、 Δ 簡易体感温度 = $(\Delta MRT_S + \Delta MRT_L) \times (1 - 0.6(\text{風速係数}))$

$$= (-14.4^\circ\text{C} - 2.8^\circ\text{C}) \times 0.4 \doteq -6.9^\circ\text{C}$$

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、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 j 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

$$\begin{aligned}
&= a_s \frac{\Delta SUN}{4} + a_L \cdot H_{r_long} \left(\sum_j \phi_j \cdot T_{S1_j} - \sum_j \phi_j \cdot T_{S2_j} \right) \\
&= a_s \frac{\Delta SUN}{4} + a_L \cdot H_{r_long} \sum_j \phi_j \cdot \Delta T_{S_j} \quad (9)
\end{aligned}$$

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 j の立体角の割合 ϕ_j と対策による対策面 j の表面温度の低下量 ΔT_{S_j} (= $\Delta T_{S1_j} - \Delta T_{S2_j}$)(°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。

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

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

$$\Delta MRT_L = \frac{H_{r_long}}{H_{r_all}} \sum_j \phi_j \Delta T_{S_j} \quad (12)$$

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。

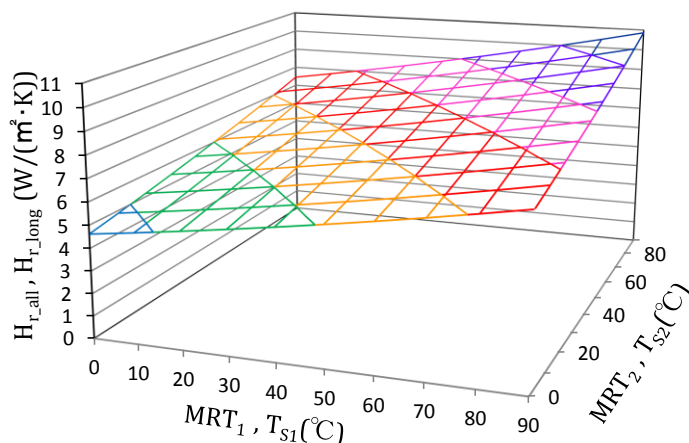


図 1 平均放射温度、表面温度と放射熱伝達率の関係

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

$$\Delta MRT_L \sim 0.8 \times \sum_j \phi_j \Delta T_{S_j} \quad (14)$$

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 j の表面温度変化量 ($\Delta T_{s_j} : ^\circ C$) と面 j の見える割合 (V_j) に長波係数 $0.8 (-)$ 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 $900 W/m^2$ のときに短波係数が「 0.8 」となり、日射量が $400 W/m^2$ 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。

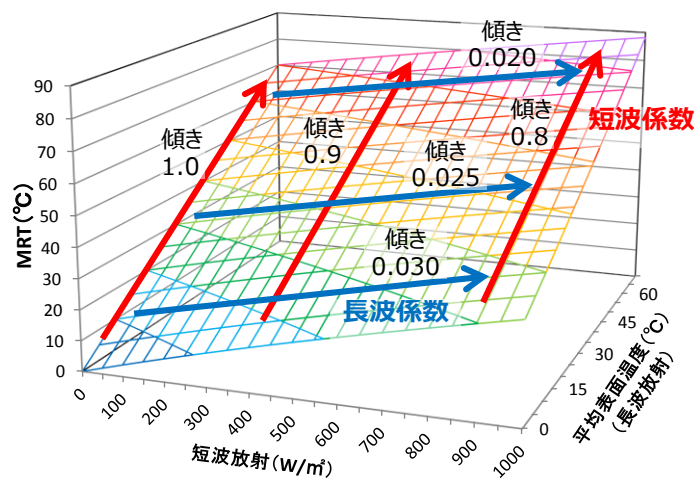


図 2 短波放射、平均表面温度（長波放射）と MRT の関係

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 (j) の面積 (A_j) と対策面までの垂直距離 (D_j) 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。

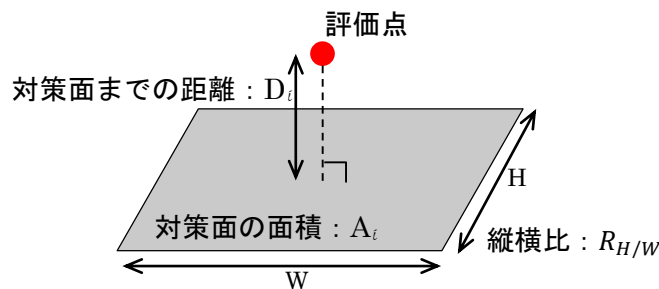


図 3 評価点と対策面との関係

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。

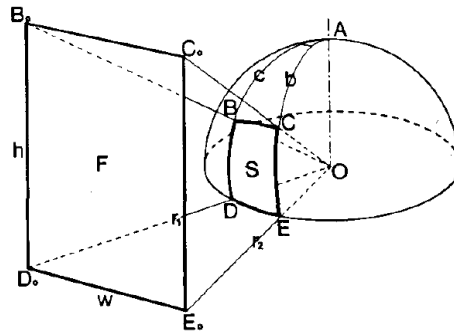


図4 面Fと立体角S、評価点Oの関係²

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の面積 (m^2) と対策面までの垂直距離D (m) から (評価点から見た) 対策面Aの立体角割合を求めるための線図 (図5) を作成した。

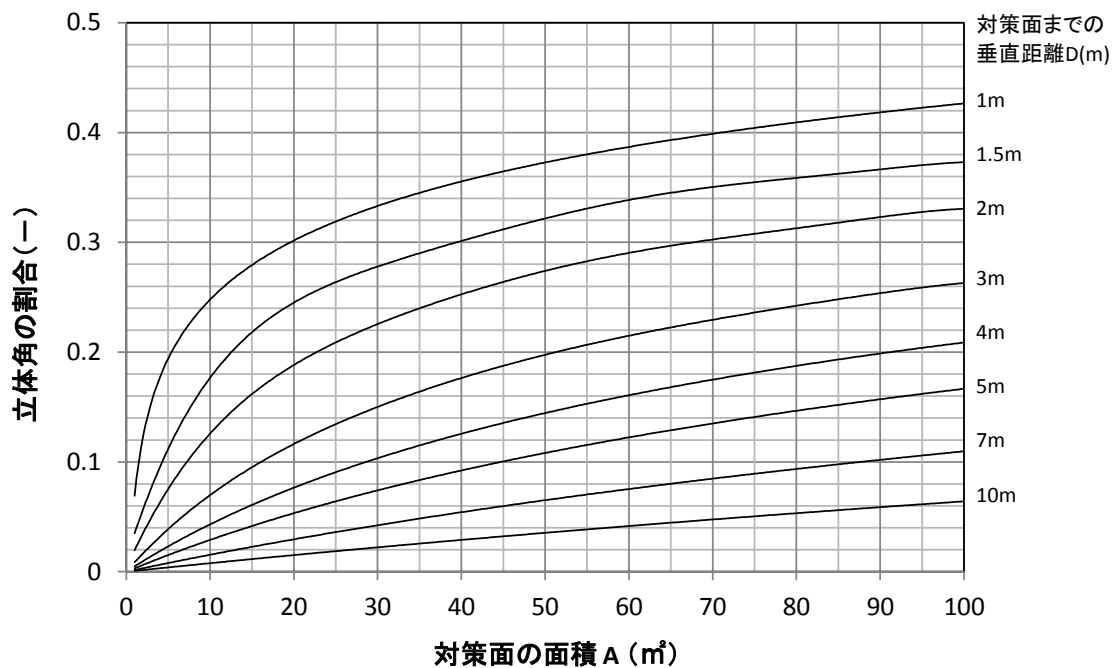


図5 対策面の面積と対策面までの垂直距離から立体角割合を求める線図

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

補遺 2 : 透過性のある日射遮蔽物 (テントや日傘) の対策効果

— 天候による日射量の直散比率の変化を考慮する場合 —

本資料は、暑さ対策ガイドライン 技術検討ワーキンググループの鍋島美奈子氏の指導のもと、大阪市立大学 地域環境計画研究室でとりまとめたものである。

1. はじめに

テントや日傘のような透過性のある素材で日射を遮蔽する場合の MRT 削減効果を試算する。遮蔽物に覆われることによって、直達日射だけでなく天空日射も遮られることを考慮する。また、晴れて全天日射量が多い時は直達日射の割合が高く、曇天で全天日射量が少ない時は天空日射の割合が大きくなるといった天候による直散比率の変化を考慮する。ただし、今回は日射遮蔽物からの長波放射増分や遮蔽物の大きさの違いによる地表面温度の変化は考慮していない。

2. 直散分離を考慮した MRT の算出方法

算出する MRT に関して、対策前を式 1 に、対策後を式 2 に、その差をとったものを式 3 に示す。対策後の MRT(式 2)に関して、1 項目は遮蔽物から透過する直達日射項、2 項目は遮蔽物から透過する天空日射項、3 項目はテント外から入射する天空日射項、4 項目は地表面からの反射日射項、5 項目は地表面からの長波長放射項である。

$$MRT_{前} = \sqrt[4]{\frac{Q_{direct}}{4\sigma} + \frac{Q_{diffuse}\varphi_{sky}}{4\pi\sigma} + \frac{\sum i(Q_{reflect_i}\varphi_i)}{4\pi\sigma} + \frac{\sum iT_i^4\varphi_i}{4\pi}} \quad \text{式 1}$$

$$MRT_{後} = \sqrt[4]{\frac{Q_{direct}P_s}{4\sigma} + \frac{Q_{diffuse}\varphi_{cover}P_s}{4\pi\sigma} + \frac{Q_{diffuse}\varphi_{sky}}{4\pi\sigma} + \frac{\sum i(Q_{reflect_i}\varphi_i)}{4\pi\sigma} + \frac{\sum iT_i^4\varphi_i}{4\pi}} \quad \text{式 2}$$

$$\Delta MRT = MRT_{前} - MRT_{後} \quad \text{式 3}$$

Q_{direct}	: 直達日射量[W/m ²]	$Q_{diffuse}$: 天空日射量[W/m ²]
φ_i	: 立体角[sr]	φ_{sky}	: 天空率[sr]
$Q_{reflect_i}$: 反射日射[W/m ²]	φ_{cover}	: 遮蔽物の立体角[sr] (=2π-φ _{sky})
T_i	: 地表面温度[K]	P_s	: 遮蔽物の透過率[-]
σ	: ステファン・ボルツマン定数[W/m ² K ⁴]		

また全天日射量を直達日射 Q_{direct} と天空日射 $Q_{diffuse}$ に直散分離する必要がある。簡易的に図 1 の $\sin h=0.9$ (太陽高度 h が高い時間帯を想定) の実線を用いて、全天日射量が 0~1000W/m² の

時の天空日射量の値を読みとった。読み取った全天日射量，天空日射量，残差としての直達日射量値を表 1 に示す。

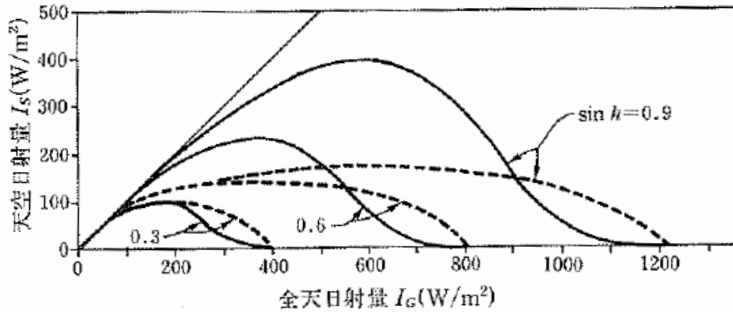


図 1 全天日射量と天空日射量の関係

(浦野良美，中村洋編著「建築環境工学」森北出版，P144，1996)

表 1 直散分離

全天日射量 [W/m ²]	直達日射量 [W/m ²]	天空日射量 [W/m ²]
0	0	0
200	0	200
400	70	330
600	200	400
800	500	300
1000	950	50

3. 大きな日射遮蔽物（テント）を想定（立体角： $2\pi \times 0.8$ ）

全天日射量を 400～1000W/m² まで変化させて $\Delta\text{SUN} = 200\text{W/m}^2$ 刻み毎に ΔMRT を算出したもの図 2 に、透過率を 0～1 まで変化させたものを図 3 に示す。また遮蔽物の透過率を 0～1 まで 0.2 刻みごとに分類し、全天日射量を 400～1000W/m² まで変化させたものを図 4 に示す。その際、地表面温度は一様に 30℃ であると仮定した。

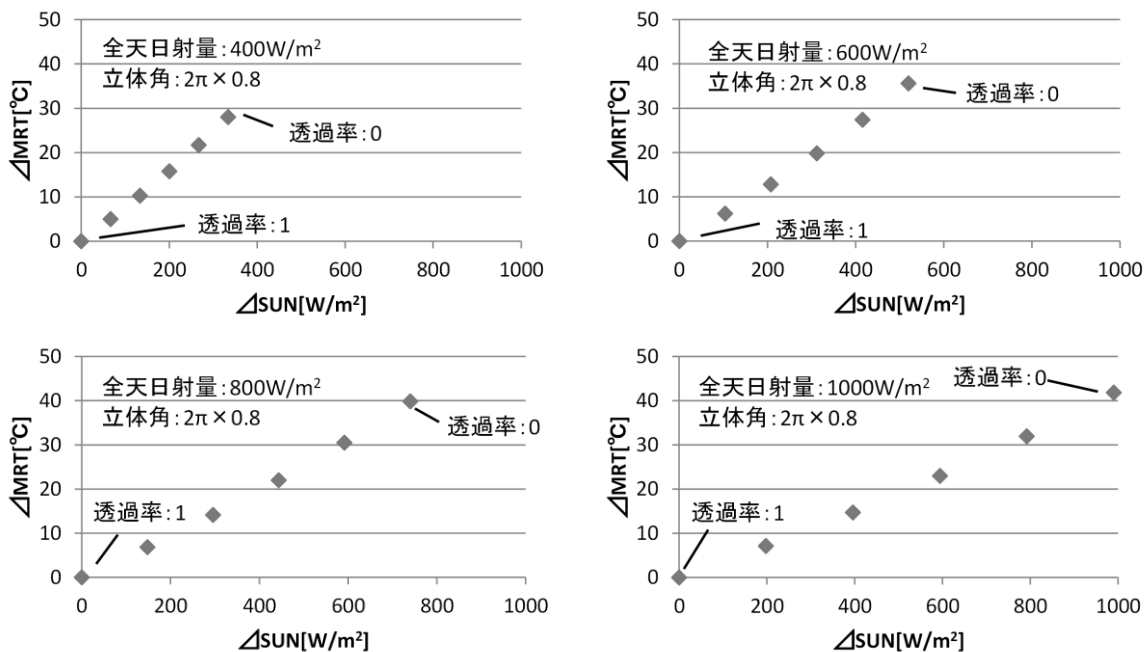


図 2 ΔSUN と ΔMRT との関係

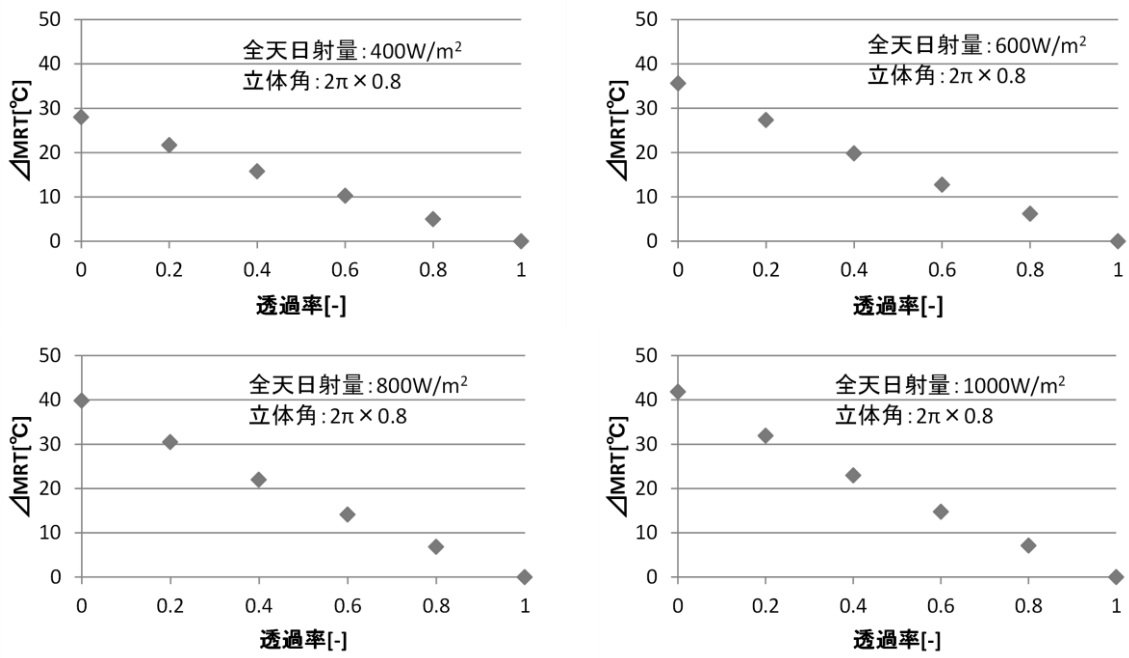


図 3 透過率と ΔMRT との関係

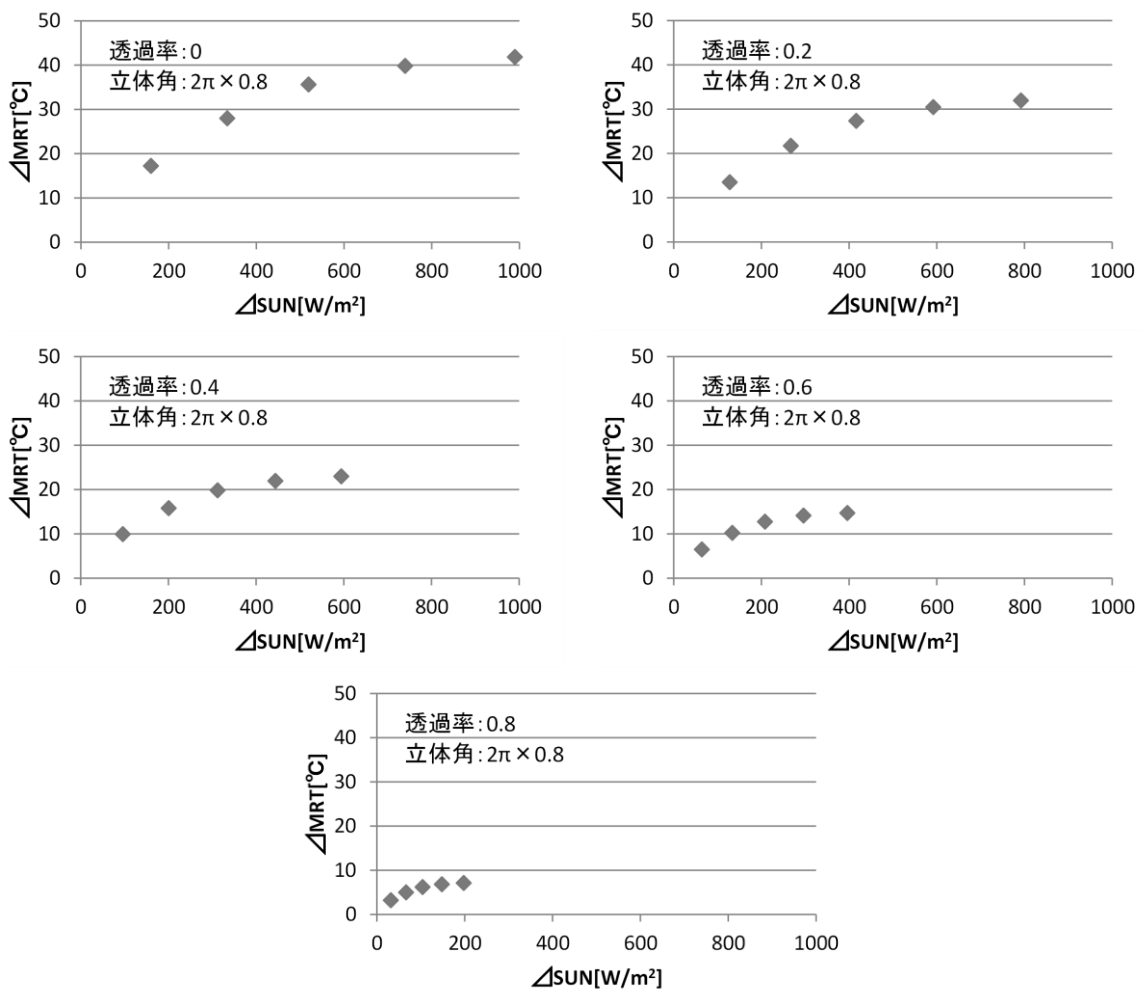


図 4 ΔSUN と ΔMRT との関係

図 2 より、全天日射量が大きくなるほど Δ SUN と Δ MRT の関係式の傾きが小さくなる傾向が読み取れる。図 3 より、同じ透過率であれば全天日射量が大きくなるほど Δ MRT が大きくなることがわかる。図 4 より、同じ Δ SUN でも透過率が高いほど Δ MRT が低くなることがわかる。すべてのデータをまとめて、 Δ SUN と Δ MRT との関係を図 5 に示す。

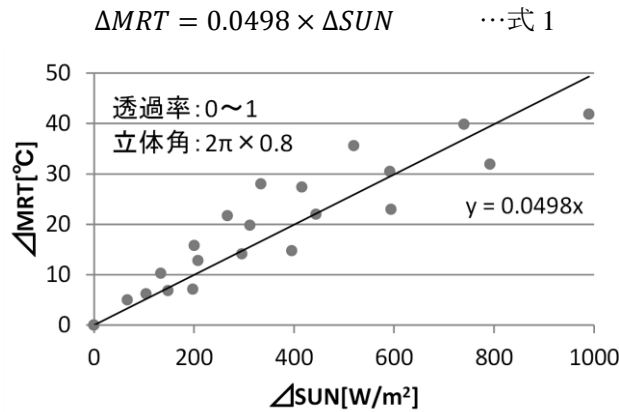


図 5 Δ SUN と Δ MRT との関係

4. 小さい日射遮蔽物（傘など）を想定（立体角： $2\pi \times 0.2$ ）

全天日射量を $400 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ まで変化させて Δ SUN = 200 W/m^2 刻み毎に Δ MRT を試算したもの図 6、透過率を $0 \sim 1$ まで変化させたものを図 7 に示す。また透過率を $0 \sim 1$ まで 0.2 刻みごとに分類し、全天日射量を $400 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ まで変化させたものを図 8 に示す。すべてのデータをまとめて図 9 に示す。その際、地表面温度は一様に 30°C であると仮定した。

立体角 $2\pi \times 0.8$ の式 1（図 5）と、立体角 $2\pi \times 0.2$ の式 2（図 9）の回帰係数を比較すると、式 1 は 0.0498 、式 2 は 0.0403 となり、日射遮蔽物の立体角が大きい(遮蔽物が大きい)ほど Δ SUN にかかる回帰係数が大きくなり、 Δ MRT が大きくなることがわかる。

5. まとめ

日射遮蔽対策を評価するにあたり、天候の変化による全天日射の直散比率の変化の影響を分析した。全天日射量を直散分離して対策前後の Δ SUN を算出し Δ MRT を推定すると、ばらつきは大きくなり、 Δ SUN から Δ MRT への単回帰式の説明力が低下することがわかった。しかし、線形近似でも対応可能であることもわかった。また、日射遮蔽物の大きさ（立体角）が大きいほど Δ SUN にかかる回帰係数が大きくなり、 Δ MRT が大きくなることがわかった。

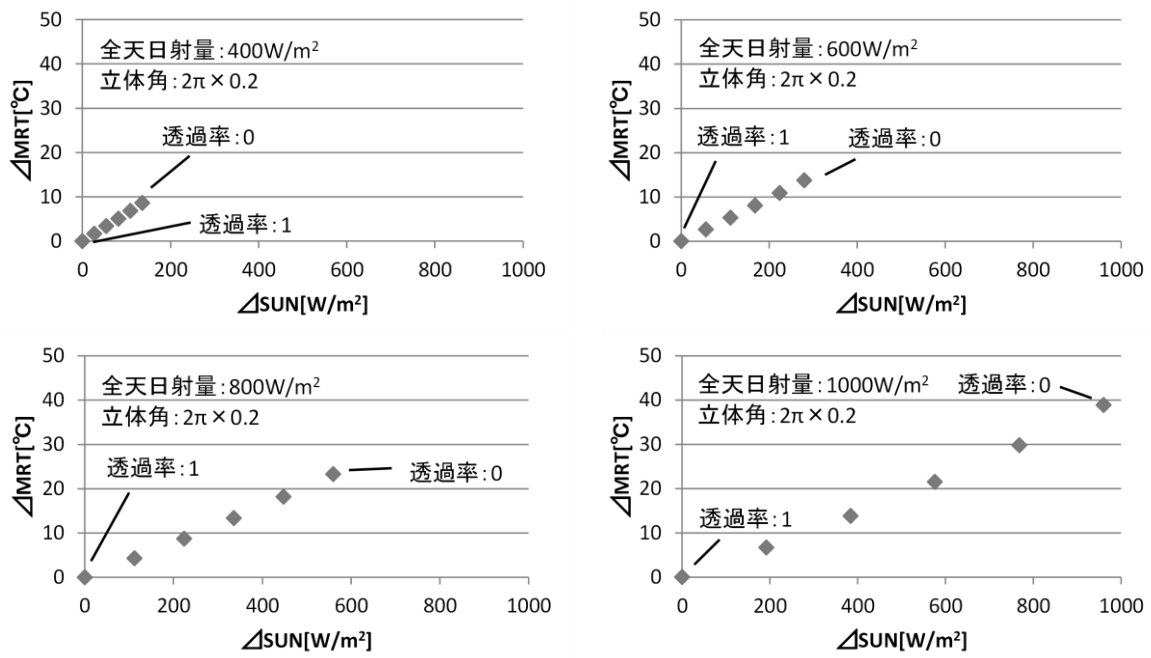


図 6 ΔSUN と ΔMRT との関係

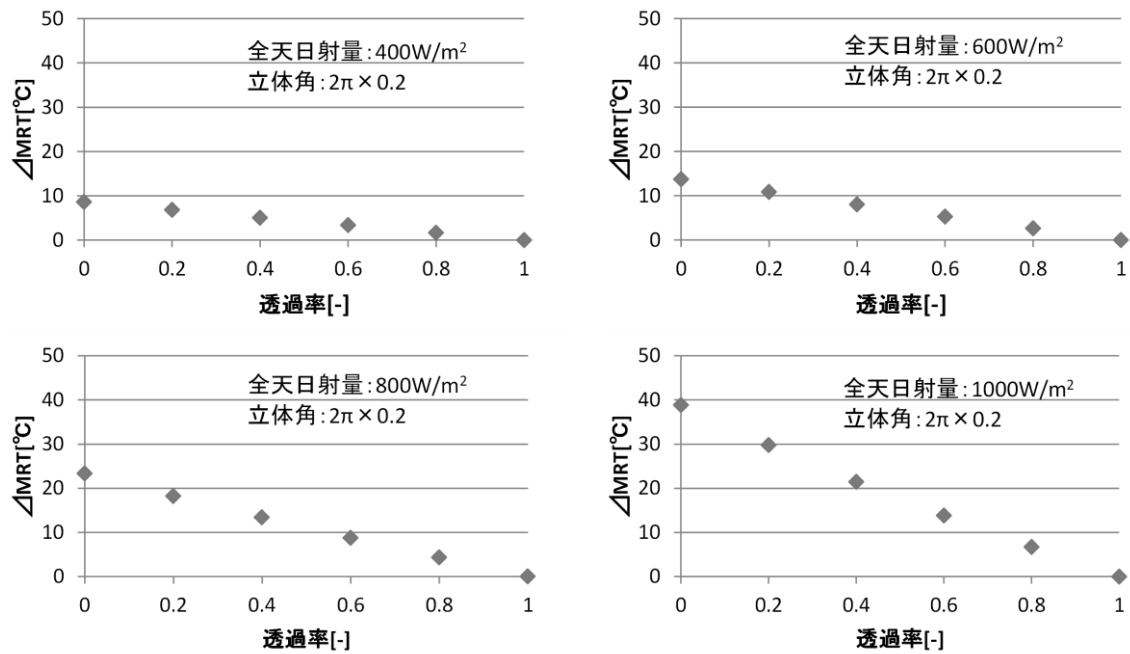


図 7 透過率と ΔMRT との関係

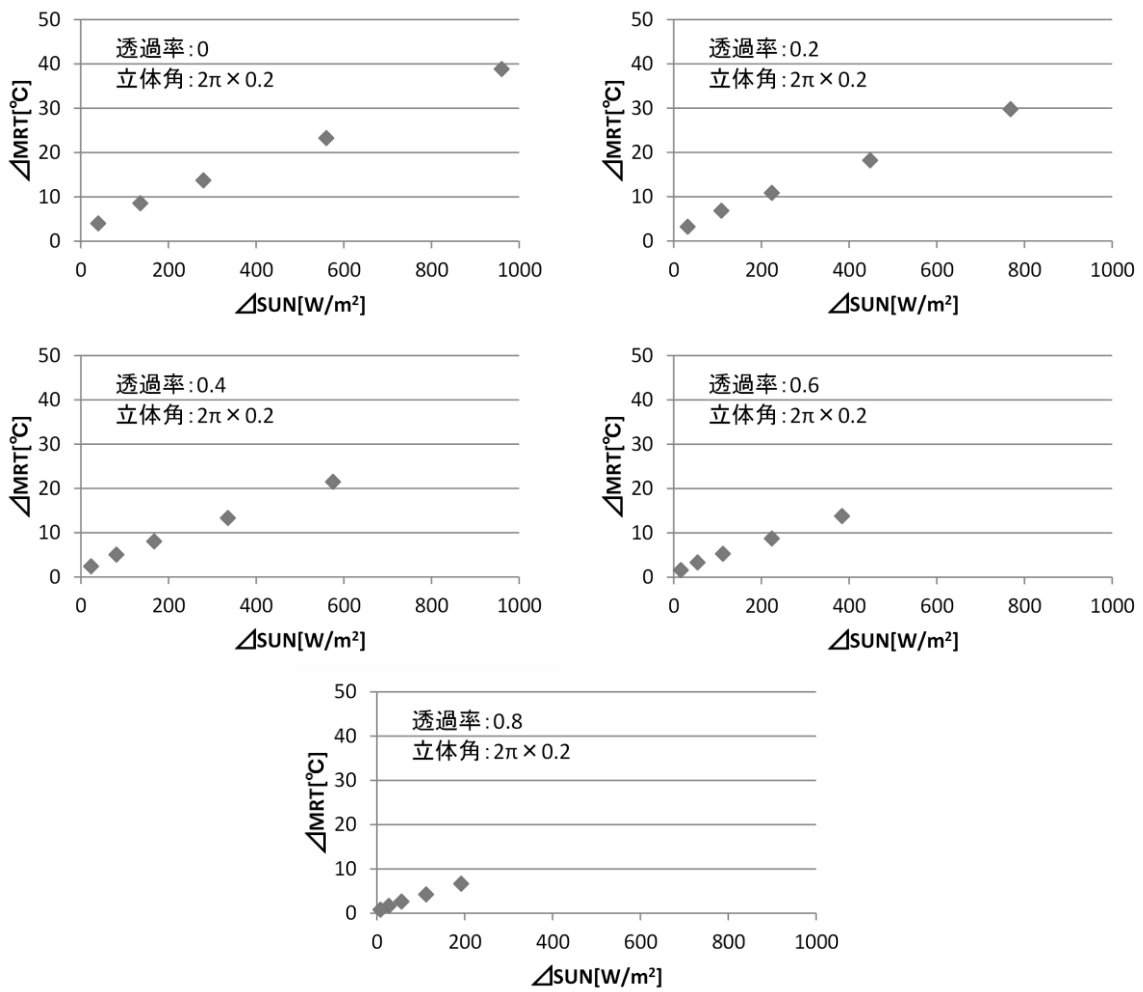


図 8 ΔSUN と ΔMRT との関係

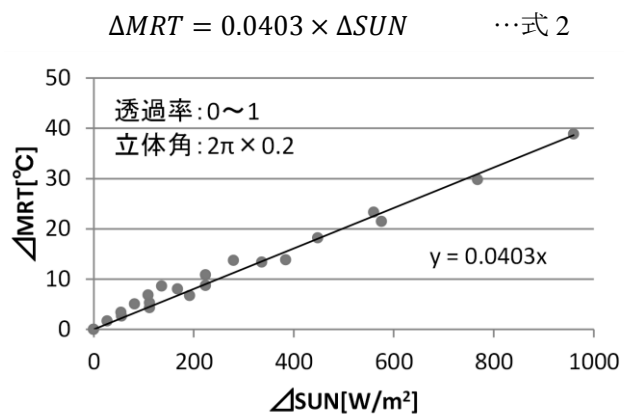


図 9 ΔSUN と ΔMRT との関係

平成27年度ヒートアイランド現象に対する適応策検討委員会

- 足永 靖信 国土交通省国土技術政策総合研究所 住宅研究部 建築環境研究室 室長
- 国富 剛 三菱地所株式会社 開発推進部 副長
(一般社団法人大手町・丸の内・有楽町地区まちづくり協議会事務局)
- 後藤 圭二 吹田市市長
- 都築 和代 産業技術総合研究所 人間情報研究部門 総括研究主幹 (第1回検討会まで)
- 鍋島 美奈子 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 准教授
- 成田 健一 日本工業大学 学長 (座長)
- 堀越 哲美 愛知産業大学 学長
- 本條 毅 千葉大学大学院 園芸学研究科 教授
- 三坂 育正 日本工業大学 工学部建築学科 教授 (五十音順、敬称略)

まちなかの暑さ対策ガイドライン 技術検討ワーキンググループ

- 足永 靖信 国土交通省国土技術政策総合研究所 住宅研究部 建築環境研究室 室長
- 鍋島 美奈子 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 准教授
- 成田 健一 日本工業大学 学長
- 堀越 哲美 愛知産業大学 学長
- 本條 毅 千葉大学大学院 園芸学研究科 教授
- 三坂 育正 日本工業大学 工学部建築学科 教授 (五十音順、敬称略)

事務局

一般社団法人環境情報科学センター