

開発工学研究室打ち合わせ

光線追跡法を用いた日射反射率計測データの解析

Analysis of Light-Reflectivity Measuring Data by Ray Tracing Method

07186 井原 智彦*

平成 15 年 6 月 5 日

概要

建築物の冷房需要低減および都市におけるヒートアイランド現象緩和策として、高アルベド化、つまり高反射高放射塗料の導入が注目されているが、高反射高放射塗料を実際に導入した場合の反射率の劣化の計測はほとんどおこなわれていない。そこで著者らは、東京都文京区の東京大学構内に試験体を設置し、高反射高放射塗料を塗装することで、反射率に関する屋外曝露実験をおこなった。

計測された放射量より反射率を解析するにあたって、試験体表面のような非理想反射面でない場合、そのまま算出すると反射率が低く算出されてしまうが、本研究では、日射を直達日射と一様な天空日射とに分離し、それぞれについて光線追跡法を用いることにより、反射形態をできるだけ理想状態に近づけることを試みた。

さらに、一般的な関数によって記述することを試みた。その結果、反射率は緩やかな推移をもって劣化していることがわかった。塗料の寿命を考慮すると、本研究の推定結果は既往の研究結果とほぼ合致し、初期の反射率が 0.91 である高反射高放射塗料は平均して 0.7-0.8 程度の反射率を持つことが確認された。

1 高反射高放射塗料に関する屋外計測

1.1 計測状況

高反射高放射塗料 (high light-reflective and high heat-emissive paint, 光高反射熱高放射塗料) の導入対象である試験体そのものは昨年 5 月に完成したが、計測装置の故障等により、実際に塗料を塗装するに至ったのは、昨年 11 月 16 日である。ただし、その後、計測が正常におこなえず、試験体周辺の計測に関しては、塗装後約 50 日が経過した昨年 12 月 26 日より開始している (ただし、上部水平面 (屋上) の反射率について、側部鉛直面 (側面) に関しては 12 月 28 日より。また、気象観測に関しては塗装直後より正常におこなえている)。

なお、短波反射率 (short-wave reflectivity) および長波放射率 (long-wave emissivity) の計測は図 1.1 のように長短波放射計 MR-40 (栄弘精機) を計測箇所に移動した上でおこなっている。計測箇所は、試験体の上部水平面左側 (A) および右側 (B)、加えて側部鉛直面左側 (C) および右側 (D) の 4 箇所である。A と B、また C と D を平均して、上部水平面または側部鉛直面の短波反射率および長波放射率とする予定である。

* 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻博士課程, E-mail ihara@globalenv.t.u-tokyo.ac.jp



図 1.1 短波反射率および長波放射率の計測（左上から A,B,C,D の順）

1.1.1 計測項目

現在，計測をおこなっているデータ項目を，表 1.1 に示す．記録装置の後ろにある $[n]$ はチャンネル番号（1-8）を表す．[pulse] はパルス信号計測用のチャンネルである．

表 1.1 に記載する全 17 計測項目をそれぞれの計測機器の計測間隔で計測し，15 秒ごとにデータロガー（記録装置）に記録している．データロガーには最大 26 時間程度のデータが記録できるが，これらのデータを毎日正午前後に，短波反射率・長波放射率の計測と併せて，回収するようにしている．

なお，上向きに設置されているドームは，下向きに到来する短波放射・長波放射を，下向きに設置されているドームは，上向きに放射される短波放射・長波放射を計測できる．つまり，

- 短波放射計測用ドーム（上向き）は日射（下向き短波放射）を
- 短波放射計測用ドーム（下向き）は反射日射（上向き短波放射）を
- 長波放射計測用ドーム（下向き）は物体の長波放射（上向き長波放射）を

それぞれ計測できる．

表 1.1 計測項目

計測項目		計測装置	→	記録装置
外気温度	[°C]	MT-060	→	LS-3000TC [1]
外気湿度	[lx]	MT-060	→	LS-3000TC [2]
風向	[°]	MA-130	→	LS-3000TC [3]
風速	[m/s]	MA-130	→	LS-3000TC [4]
雨量	[mm]	MW-010	→	LS-3300PtV [pulse]
室内中央温度	[°C]	MT-010(1)	→	LS-3000TC [5]
室内側面温度	[°C]	MT-010(2)	→	LS-3000TC [6]
室外側面温度	[°C]	MT-010S(1)	→	LS-3000TC [7]
室外側面温度	[°C]	熱電対 (1)→AC110	→	LS-3300PtV [6]
室外屋上温度	[°C]	MT-010S(2)	→	LS-3000TC [8]
室外屋上温度	[°C]	熱電対 (2)→AC110	→	LS-3300PtV [7]
室外底面温度	[°C]	MT-010S(3)	→	LS-3300PtV [8]
短波（上向き）センサー出力	[mV]	MR-40	→	LS-3300PtV [1]
短波（下向き）センサー出力	[mV]	MR-40	→	LS-3300PtV [2]
長波（下向き）センサー出力	[mV]	MR-40	→	LS-3300PtV [3]
長波（下向き）センサー温度	[°C]	MR-40	→	LS-3300PtV [4]
長波（下向き）ドーム温度	[°C]	MR-40	→	LS-3300PtV [5]

1.1.2 計算項目

短波放射量 $I[\text{W}/\text{m}^2]$ は次式により算出される．

$$I = 1000 \frac{E_t}{S_t} \quad (1.1)$$

E_t : 出力電圧 [mV]

S_t : 感度定数 [mV/kW·m⁻²] ($S_t^\uparrow = 6.69$, $S_t^\downarrow = 6.84$)

そして，短波反射率 $a[-]$ は次式である．

$$a = \frac{I^\uparrow}{I^\downarrow} \quad (1.2)$$

$I^\uparrow$: 上向き短波放射量 [W/m²]

$I^\downarrow$: 下向き短波放射量 [W/m²]

同様に，長波放射量 $R[\text{W}/\text{m}^2]$ は次式により算出される．

$$R = 1000 \frac{E_R}{S_R} + \sigma T_R^4 + k\sigma(T_R^4 - T_d^4) + A_o \quad (1.3)$$

E_R : センサー出力 [mV]
 S_R : 感度定数 [mV/kW·m⁻²] ($S_R^\uparrow = 3.60$, $S_R^\downarrow = 4.14$)
 σ : Stefan-Boltzmann 定数 [W/m²K⁴] ($\sigma = 5.67040 \times 10^{-8}$)
 T_R : センサー温度 [K]
 T_d : ドーム温度 [K]
 k : ドーム定数 [-] ($k^\uparrow = 3.27$, $k^\downarrow = 3.41$)
 A_o : 定数 [W/m²] ($A_o^\uparrow = -6.11$, $A_o^\downarrow = -5.63$)

完全黒体を仮定したときの長波放射量 (黒体放射) R_o [W/m²] は,

$$R_o = \sigma T_o^4 \quad (1.4)$$

T_o : 表面温度 [K]

であるので, 長波放射率 ε [-] は,

$$\varepsilon = \frac{R^\uparrow}{R_o} \quad (1.5)$$

とすれば求まる.

ここで, 長短波放射計の4個のドームの各定数は, それぞれの計測装置個体に固有の値であり, 上記に示す数値は, あくまでも本研究で用いている個体の値である.

1.1.3 長波放射率の計測

計測項目は表 1.1 に記した通りであるが, このうち, 試験体内外の表面温度 (「室内側面温度」「室外側面温度」「室外屋上温度」「室外底面温度」) について正しく計測されておらず, 若干低めに温度が計測されてしまっている^{*1}. 当初より用いている Pt 測定体 MT-010(S) のほか, 熱電対を用いての計測も試み, また Pt 測定体や熱電対の表面への取り付け方を何度か変更してきたが, 一向に計測精度を改善できないので, 現在は, 長波放射率の算出はおこなっていない.

今回, 計測対象としている高反射高放射塗料は, 「高放射」と名付けているが, それは「高反射」の割には高放射というだけであり, 塗料メーカーによる計測値でも「約 90%」と記載されており, 実際には他の建築外表面 (通常, 建築外表面は 0.9 とする) と変わらないと考えられる. そのため, 高反射高放射塗料の評価においては, 長波放射率は計測できずとも不利にはならないと考える. ただし, 今後, 低放射性の建築外表面を評価する際には, 長波放射率の計測が必要となろう.

1.2 計測データ

計測地点 A に関して, 2002 年 12 月 26 日以降の日射反射率の計測結果を図 1.2 にまとめる.

図 1.2 を見ると, 日射量の多寡によって日射反射率が上下していることが分かる. 日射量が多いときには反射率が大きく, 日射量が少ないときには反射率が小さくなっている. 本来ならば, 日射量が少なくなれば, その分, 反射量も少なくなり, 算出される反射率は一定となるはずである.

ここで, 日射量の多寡によって反射率が上下する原因を, 直達日射と天空日射の反射形態の違いと考えてみる. 日射量の多い晴天の日には, 直達日射が多く, 天空日射が少ない. 日射量の少ない曇天の日では, そのほ

^{*1} 長波放射率を計算すると 1 を超えてしまうことより, 逆に表面温度の計測が正常におこなわれていないと類推した. 長波放射計測ドームの不具合も考えられるが, 計測機器メーカーに問い合わせたところ, 問題ないようである. また, 表面温度の計測は一般に難しい計測の部類に入らしい.

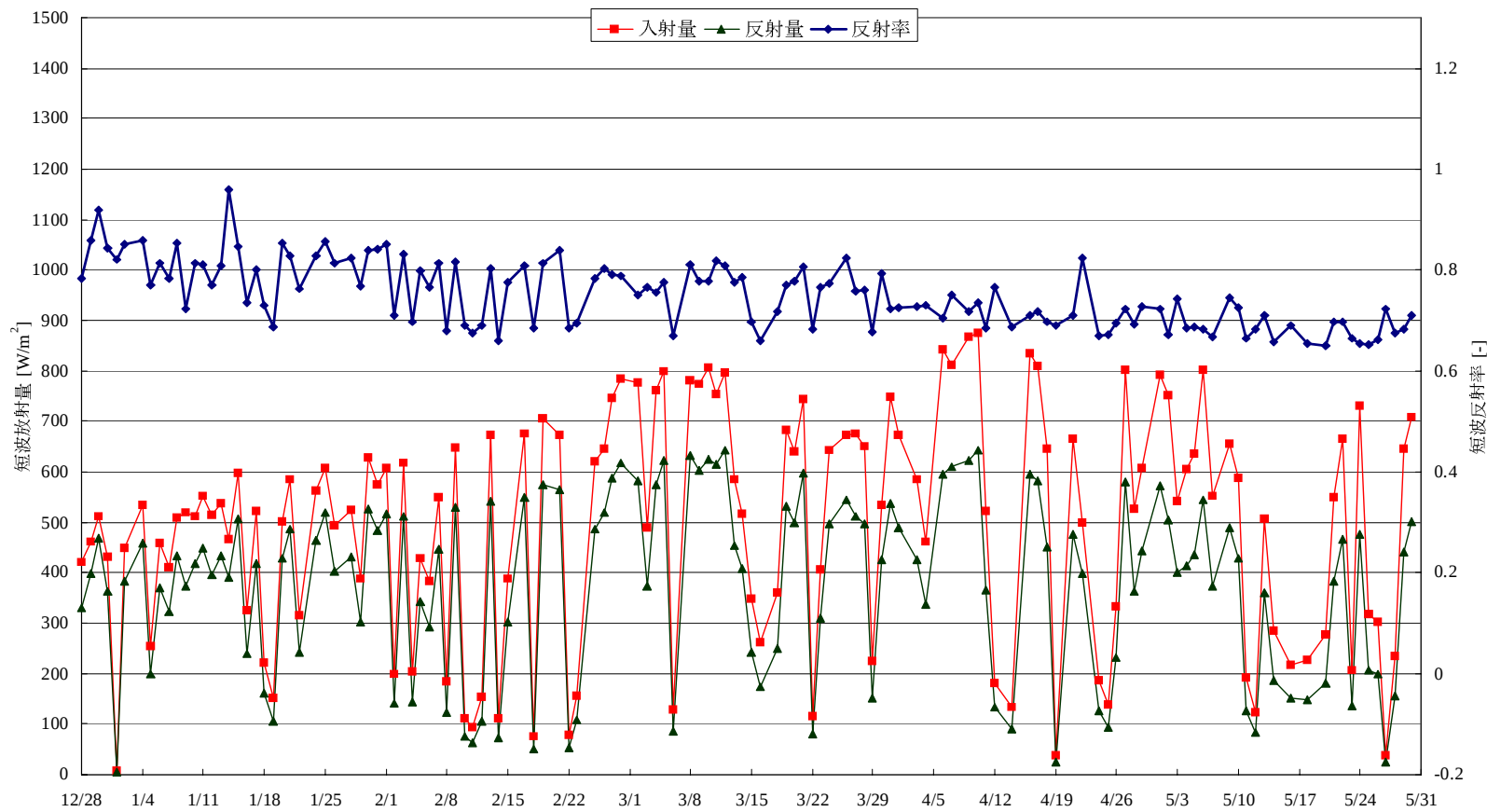


図 1.2 計測地点 A における短波反射率

とんどを天空日射が占める．直達日射に対する見かけの反射率が天空日射に対する見かけの反射率より大きければ，反射率が一定だとしても，図 1.2 の現象は説明がつくこととなる．

そこで，観測される全天日射量（図 1.2）を Perez らの直散分離モデル [1] にしたがって直達日射量と天空日射量とに分離したのが，図 1.3 である．

図 1.3 から，天空日射量が全天日射量ほとんどを占める日のみを抜粋して（直達日射量が全天日射量の 1 割未満の日について抜粋したのが図 1.4 である），反射率の変化を見ると，初期に比べて，緩やかな低下傾向にあることが分かる．また，図 1.4 は，図 1.3 に見られるような反射率の上下があまり見られないことが分かる．

では，何故，直達日射量と天空日射量とで見かけの反射率が異なるのか？

この問題点について，本研究では，物体表面における日射の反射状態を光線追跡法（ray tracing method）を用いることによって解析する．

2 物体表面における日射の反射

物体表面における日射の反射量を解析するには，物体表面における反射形態と物体表面への日射の入射形態を知る必要がある．本節では，この 2 つに関する理論を整理する．

2.1 物体表面における反射形態（BRDF）

物体表面に対して光が入射されたとき，その光がどれだけどの方向に反射されるか，を求めるには，物体表面に関して BRDF モデルを構築する必要がある．BRDF（双方向反射分布関数，bidirectional reflectance distribution function） f_r とは，光源方向 (θ_l, φ_l) からの入射光照度と視点方向 (θ_v, φ_v) への反射光輝度の比率を表した関数であり，式 (2.1) のように 4 次元関数となる．

$$f_r = f_r(\theta_l, \varphi_l, \theta_v, \varphi_v) \quad (2.1)$$

θ_l : 入射光の天頂角

φ_l : 入射光の方位角

θ_v : 反射光の天頂角

φ_v : 反射光の方位角

しかし，現実には物体表面に関して厳密な BRDF が計測されていることはなく，また，変数が 4 個もあると，取り扱いが煩雑であるので，一般に利用されている BRDF モデルでは，変数を減らし取り扱いを容易にした上で，尤もらしい数式が構築されている．BRDF モデルの開発は，そのほとんどがコンピュータ 3D グラフィックスの分野でおこなわれている．また，リモートセンシングの分野では，純粋な物体表面ではなく，雪氷面や森林のようなさまざまな物体の集合としての凹凸な表面に対する BRDF モデルが考案されている．

コンピュータグラフィックスで取り扱う BRDF モデルには，

- Lambertian diffuse
- Torrance-Sparrow-Blinn-Cook-Beckmann
- Beard-Maxwell
- Oren-Nayar
- He-Torrance-Sillicon-Greenberg
- Ward's Gaussians

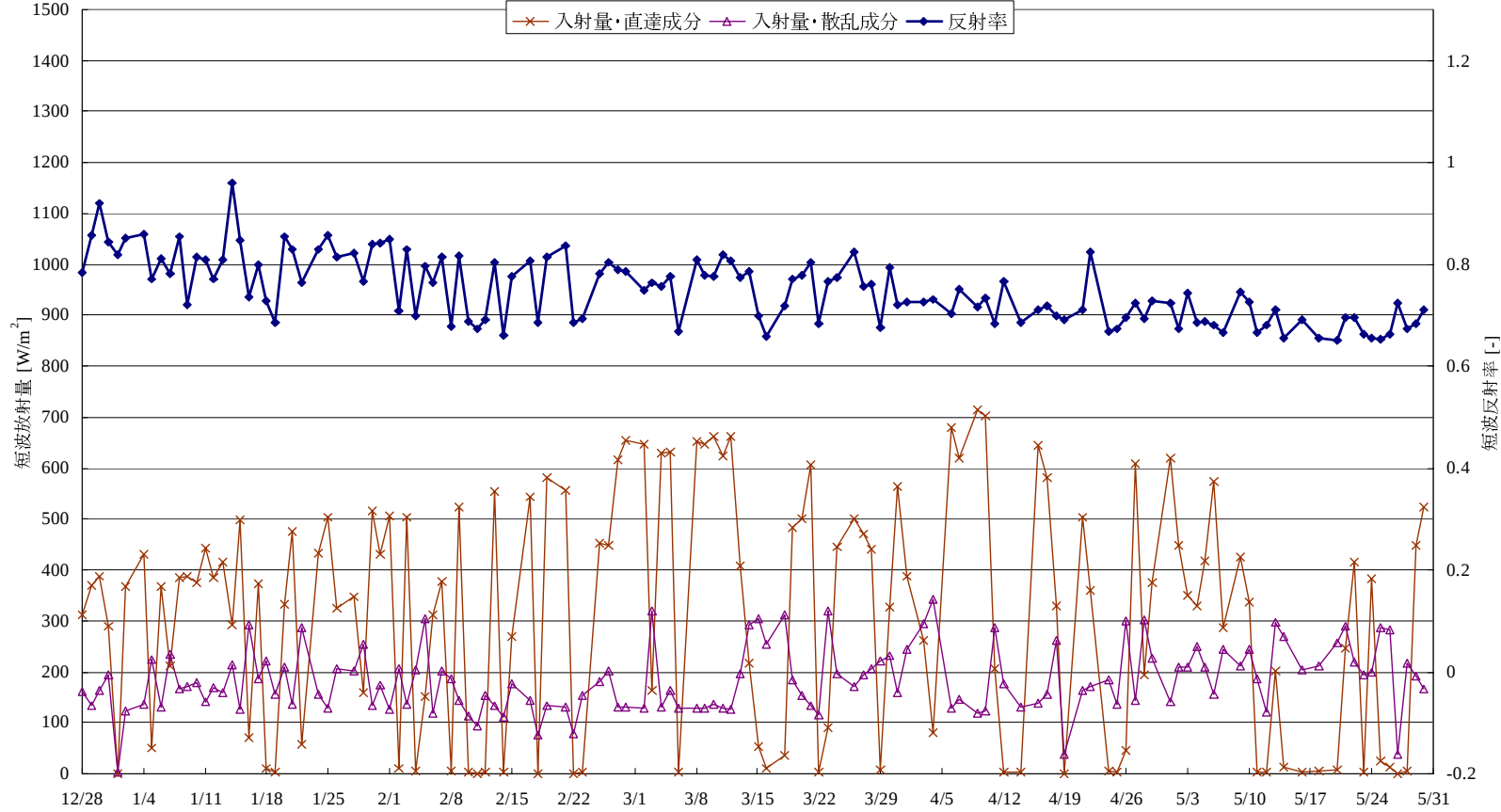


図 1.3 計測地点 A における短波反射率 (2)

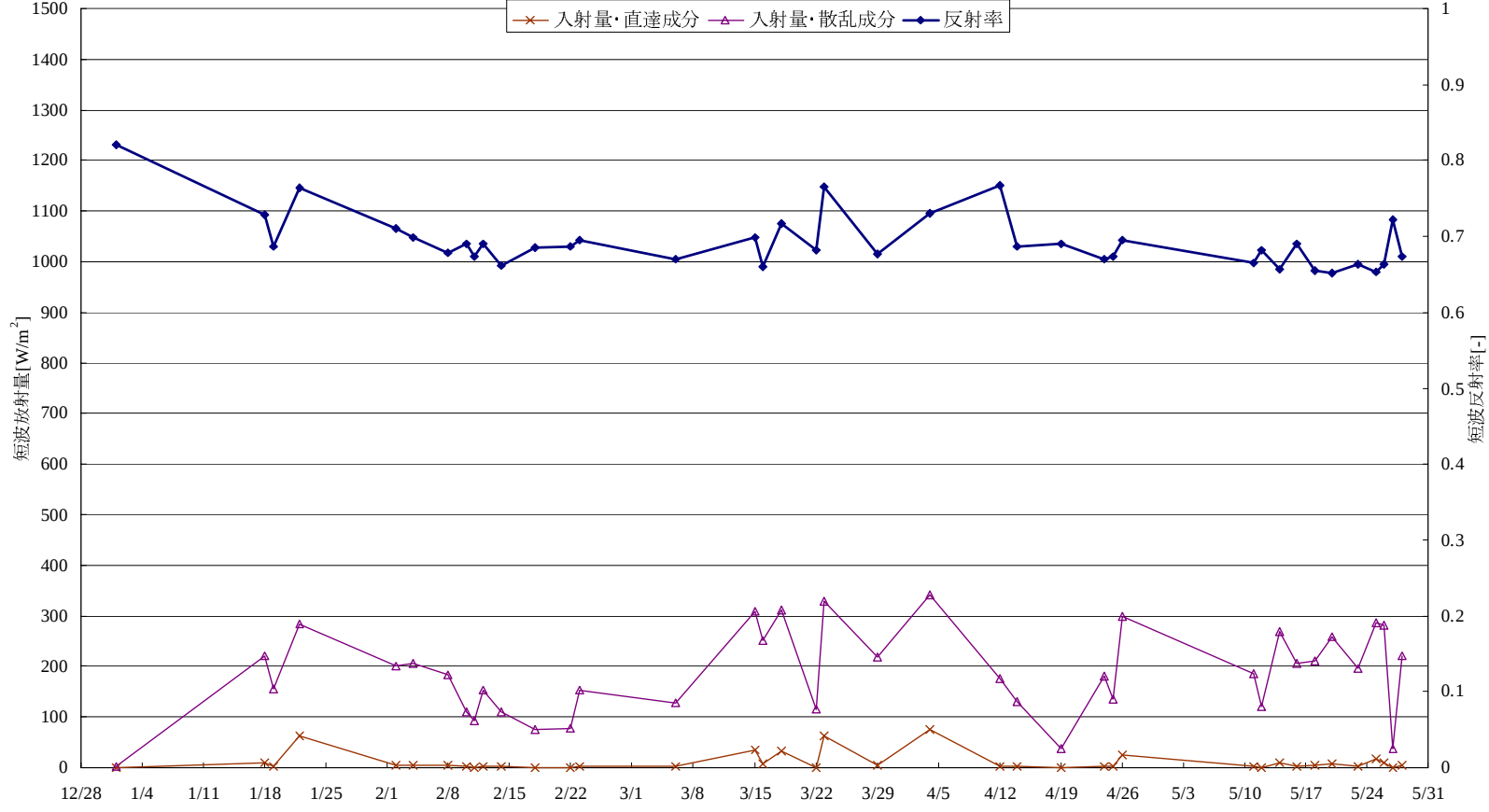


図 1.4 計測地点 A における短波反射率 (3)

- Parallel Cylinder (base on Poulin-Fournier)
- Lommel-Seeliger
- Hapke/Lommel-Seeliger Lunar Surface
- Minnaert
- Phong
- Schlick
- Lafortune's Generalized Cosine Lobes
- Strauss

などがある．一般には，物体表面の反射を鏡面反射と拡散反射とに分離する．拡散反射に関しては，その定義通り，Lambertian モデルが用いられるが，鏡面反射に関してはコンピュータグラフィックスでは純粋な鏡面反射として取り扱うのは不具合があるため，Phong や Torrance-Sparrow(Blinn)，Cock-Torrance モデルなどが主に使用される．しかし，コンピュータグラフィックスの場合，尤もらしく見えることと計算の高速性を追求するため，たとえば，最も有名である Phong モデルの場合，物理的に正しくないという指摘がされており，本研究のように物理的な正しさを要求する場合，コンピュータグラフィックスで用いられる BRDF モデルはそのまま使えないことが多い．たとえば，Phong モデルはエネルギー保存則を満たさず，また Energy-Conserving Phong モデルはエネルギー保存則を満たすものの，相反律を満たさない．物理的に正しいといえるのは，Neumann-Neumann モデルや Minnaert モデルなど計算が複雑なモデルに限られている [2]．

本研究では，高反射高放射塗料における日射の反射は拡散反射が主体的である [3] ことから，BRDF に関して，全反射をすべて拡散反射であると仮定する．そして，そのモデルは Lambert 面における反射とする（上記の Lambertian モデルと同じ）．

なお，反射理論は，一般に光束（単位 [lm]）（もしくは昼光照射度（単位 [lx]））に関して取り扱われるが，これはエネルギー束（単位 [W]）（もしくは日射量（単位 [W/m²]））について用いても同じように当てはまるものである．光束とエネルギー束の違いは，人間の視感度による重み付けがされているか否かだけである．本研究では，エネルギー束に関する反射について取り扱う．

また，入射角・反射角ともに法線とのなす角（天頂角） θ を用いて説明している参考書が多いが，本研究では，太陽位置や日射量に関する諸理論との整合をとるため，反射面とのなす角（高度角） $\gamma = \pi/2 - \theta$ を用いて記述する．方位角 φ に関しても，同様の理由により，真南を 0 とし，真南を基点に東方向は負・西方向は正にとり，真北を $-\pi (= \pi)$ と定義する．すなわち方位角 φ は， $-\pi \leq \varphi < \pi$ の範囲にあるものとする．

■ 反射に関する用語 以下に反射に関する用語を解説する．ただし，前述の通り，本研究では光束の反射ではなく，エネルギー束の反射を扱っているため，用語・単位をエネルギー束に統一して説明する．

鏡面反射 鏡面反射（mirror reflection，正反射とも）とは，光束の場合，物体表面に入射した光束が映像を作るような状態で反射される現象をいう．純粋な鏡面反射は，図 2.1 のように定義される．

$$\begin{aligned} M_v &= a_m M_l \\ \gamma_v &= \gamma_l \\ \varphi_v &= \varphi_l + \pi \end{aligned} \tag{2.2}$$

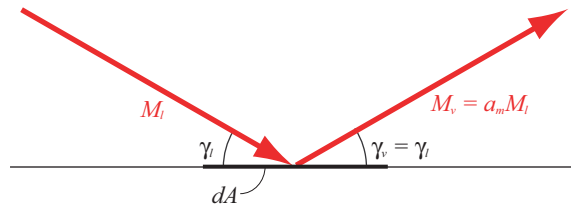


図 2.1 鏡面反射

- a_m : 鏡面反射率 [-]
 M_i : 入射光の放射光度 [W/sr]
 γ_i : 入射角 [rad]
 φ_i : 入射方位 [rad]
 M_v : 反射光の放射光度 [W/sr]
 γ_v : 反射角 [rad]
 φ_v : 反射方位 [rad]

反射面に水平な平面上で反射光を観測する場合，放射光度の式 (2.2) は，観測点での面積あたりエネルギー量の式 (2.3) に書き換えられる．

$$I_v = a_m I_i \quad (2.3)$$

- I_i : 入射光の面積あたりエネルギー量 [W/m²]
 I_v : 反射光の面積あたりエネルギー量 [W/m²]

鏡面反射は，金属やプラスチックのような物質の表面上で卓越する反射現象である．鏡面反射における反射率を鏡面反射率という．

拡散反射 一般に，光を発散する面の放射輝度は，観測する方向によって異なる．あらゆる方向に対する放射輝度が一定の面を均等拡散面 (uniform diffuser) または Lambert 面という．

拡散反射 (diffuse reflection) を，Lambert 面での反射と定義すると，その現象は，図 2.2 のように表される．なお，図中， γ は Lambert 面とのなす角を示し，Lambert 面の法線方向からのなす角 θ を用いると， $\gamma = \pi/2 - \theta$ と表せる．

面積が dA の微小な Lambert 面の法線方向 ($\gamma = \pi/2$) の放射光度を M_n [W/sr]，法線方向からの放射輝度を L_n [W/m²·sr] とすると， $L_n = M_n/dA$ である．反射面と角 γ をなす方向 (法線方向と角 θ をなす方向) の放射光度を M_γ ，放射輝度を L_γ とすると， $L_\gamma = M_\gamma/(dA \cdot \sin \gamma)$ である．Lambert 面では $L_n = L_\gamma$ であるから，式 (2.4) の関係が成立する．

$$M_\gamma = M_n \cdot \sin \gamma \quad (2.4)$$

この関係を均等拡散面における放射の余弦則あるいは Lambert の余弦則などという．

拡散反射は，インクの吸収紙や石膏板の表面などで卓越的である．物理的には，入射光を一旦吸収した後，改めて拡散的に放射している，と説明される．

ここで，Lambert 面への入射光の放射光度を M_i [W/sr]，拡散反射率を a_d [-] として，入射光と反射光の関係を考えてみる．

反射面からの角度 γ_v である線上への反射光の放射光度は，

$$M_v(\gamma_v) = M_n \sin \gamma \quad (2.5)$$

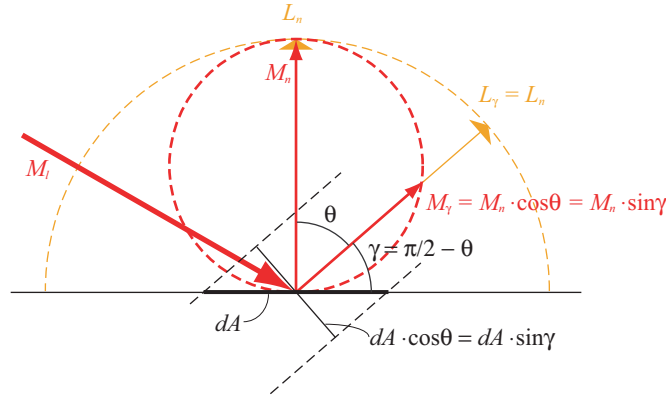


図 2.2 拡散反射

$M_v(\gamma_v)$: 反射光の放射光度 [W/sr]

γ_v : 反射面からの角度 [rad]

で表されるが、これを微小な角面積 $d\omega(d\varphi, d\gamma)$ [sr] について全半球面 Ω にわたって積分すると、

$$\int_{\Omega} M_v(\varphi_v, \gamma_v) d\omega = \int_{\varphi_v=-\pi}^{\pi} \int_{\gamma_v=0}^{\pi/2} M_n \sin \gamma_v d\omega = \pi M_n \quad (2.6)$$

となり、Lambert 面が発する全エネルギー束を F_v [W] とすると、 $F_v = \pi M_n$ [sr·W/sr] となっていることがわかる。

これを用いて反射放射光度の式 (2.5) を書き換えると、

$$M_\gamma = M_n \sin \gamma = F_v \frac{\sin \gamma}{\pi} = a_d F_l \frac{\sin \gamma}{\pi} \quad (2.7)$$

a_d : 拡散反射率 [-]

F_l : 反射面に入射する全エネルギー束 [W]

となるが、これをさらにエネルギー束の式に書き換えると次式となる。

$$F_\gamma = M_\gamma d\omega = a_d (I_l \cdot dA) \frac{\sin \gamma}{\pi} d\omega \quad (2.8)$$

さて、ここで、鏡面反射の場合と同じく面積あたりのエネルギー量の式に書き換えてみる。図 2.3 に示すように、計測装置の受光面が反射面と平行であり、かつ面積が $d\Gamma / \sin \gamma$ [m²] であるとする、受光面に到来する面積あたりエネルギー量 I_v [W/m²] は次式により表せる。

$$\begin{aligned} I_v &= \frac{F_\gamma}{\frac{d\Gamma}{\sin \gamma}} = F_\gamma \cdot \frac{\sin \gamma}{d\Gamma} \\ &= a_d (I_l \cdot dA) \frac{\sin \gamma}{\pi} d\omega \cdot \frac{\sin \gamma}{d\Gamma} = a_d (I_l \cdot dA) \frac{\sin \gamma}{\pi} \left(\frac{d\Gamma}{R^2} \right) \cdot \frac{\sin \gamma}{d\Gamma} \\ &= a_d (I_l \cdot dA) \frac{\sin^2 \gamma}{\pi R^2} = a_d (I_l \cdot dA) \frac{z^2}{\pi R^4} \end{aligned} \quad (2.9)$$

I_l : 反射面に到来する面積あたりエネルギー量 [W/m²]

r : 反射面から受光面までの水平距離 [m]

z : 反射面から受光面までの鉛直距離 [m]

R : 反射面から受光面までの距離 [m] ($R = \sqrt{r^2 + z^2}$)

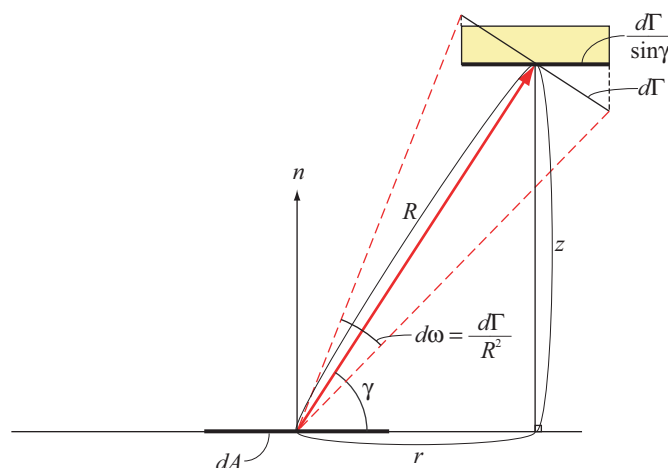


図 2.3 拡散反射の受光

全反射 物体表面の 1 点に対する全入射量と全反射量の関係を全反射といい，一般には，鏡面反射と拡散反射の和となる．

本研究では，物体表面を Lambert 面であると仮定しているため，全反射率は拡散反射率となる．

2.2 物体表面への日射の入射状態

鏡面反射の場合，物体表面への日射の入射角によって，反射方向が異なってくる．また，鏡面反射に限らず，物体表面に障害物があった場合，その障害物が天空要素（sky element）^{*2}と反射点を結ぶ線分上に位置する場合，その天空要素からの日射は物体表面には入射されない．

このように物体表面への日射の入射状態を解析するには，どの天空要素（方位角および高度角によって表される）がどれだけの光を射出しているかを知る必要がある．

昼光の天空輝度分布に関しては，観測されるグローバル照度から全天空要素（方位角および高度角によって表現）の輝度を算出するモデルが存在する．井川ら [4] は，さまざまな標準天空としての All Sky Model を比較・評価し，新たに，すべての天空状態の天空輝度分布を表す数式を提案している．しかし，日射量の天空放射輝度分布に関しては，そもそも観測例自体，ほとんど存在しない．たとえば中村ら [5, 6, 7] は，過去の研究例を挙げる一方，東京にて天空放射輝度分布の計測をおこなっているが，計測にとどまり，天空放射輝度分布に関する All Sky Model を構築するにはいたっていない．また，CIE（国際照明委員会，Commission Internationale de l'Eclairage）においても天空輝度分布に関しては CIE 標準曇天空と CIE 標準晴天を定義しているが，天空放射輝度分布に関しては全く知識がないのが現状である [8]．

そこで，本研究では，正確な天空放射輝度分布を用いず，次のようにして方位角・高度化区別の入射日射量を算出する．

- 全天日射量を Perez らの直散分離モデル [1] によって，直達日射量と天空日射量とに分離する．
- 直達日射量に関しては，その時刻における太陽位置（太陽方位角および太陽高度）を算出し，算出された

^{*2} 天空の微小部分を天空要素と呼ぶ．

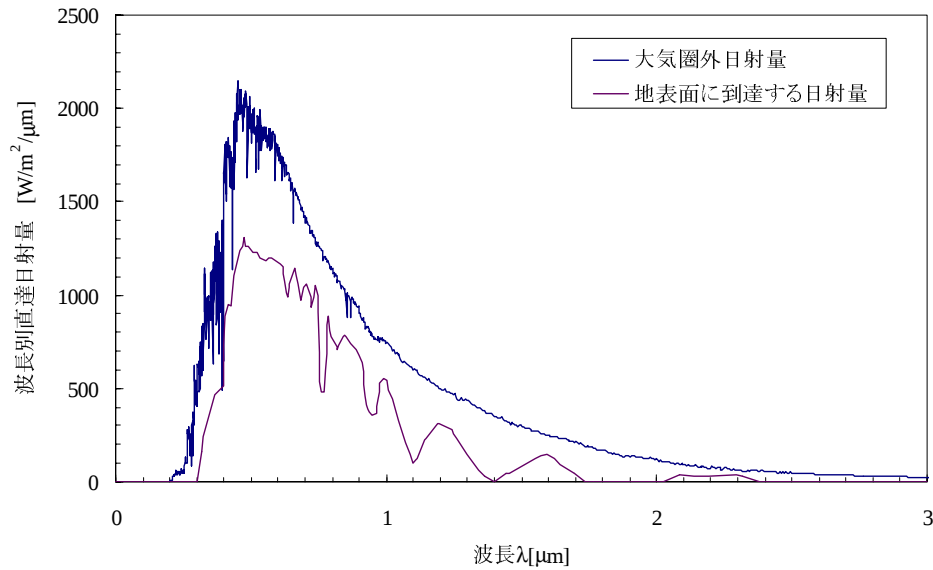


図 2.4 太陽エネルギーの波長別分布

位置より入射されるものとする。

- 天空日射量に関しては、天空放射輝度が一定の一樣分布 (uniform distribution) [9] を仮定し、全天空要素から等量ずつ太陽エネルギー束が到来するものとする。

2.3 太陽エネルギーと昼光照度および日射量の関係

光束 [lm] や照度 [lx] といった概念・単位は、太陽に当てはめて考えた場合、昼光 (daylight) に相当するものである。

太陽から直接地表面に到達する光を直射日光 (direct sunlight)、太陽以外の天空からの光を天空光 (diffuse light)、地表面にある地物によって反射された光を地物反射光 (externally reflected light) と呼ぶ。昼光とは、この直射日光と天空光、地物反射光を合わせた呼び方である。

図 2.4 に太陽エネルギー (solar energy) の波長分布 (spectral distribution) $I(\lambda)$ [W/(m² · μm)] を示す。波長 (wavelength) λ [μm] の違いによって、紫外域 (ultraviolet radiation)、可視域 (visible radiation)、赤外域 (infrared radiation) に分けられる。

これらの放射エネルギーはすべて物理量であるが、人間は可視域を光として感じる。健康な人間の目には、可視域以外をカットし波長約 0.55[μm] 付近で約 680[lm/W] の最大視感度 $K_{\max}$ をもつ釣り鐘状の視感度 (spectral luminous efficacy) がある。つまり、昼光は可視域の太陽放射エネルギーのうち人間が光 (light) として感じるもので、昼光照度 E [lx] は太陽からの放射エネルギー分布 $I(\lambda)$ と標準比視感度 (standard spectral luminous efficiency) $V(\lambda)$ との積を波長約 0.38-0.78[μm] の範囲で積分し最大視感度 $K_{\max}$ を乗じて得られる生理量である (図 2.5 上)。

$$E = K_{\max} \int_{0.38}^{0.78} V(\lambda) \cdot I(\lambda) d\lambda \quad (2.10)$$

これに対し、日射量 I [W/m²] は太陽エネルギー分布 $I(\lambda)$ を全波長域にわたって積分したものにすぎない。

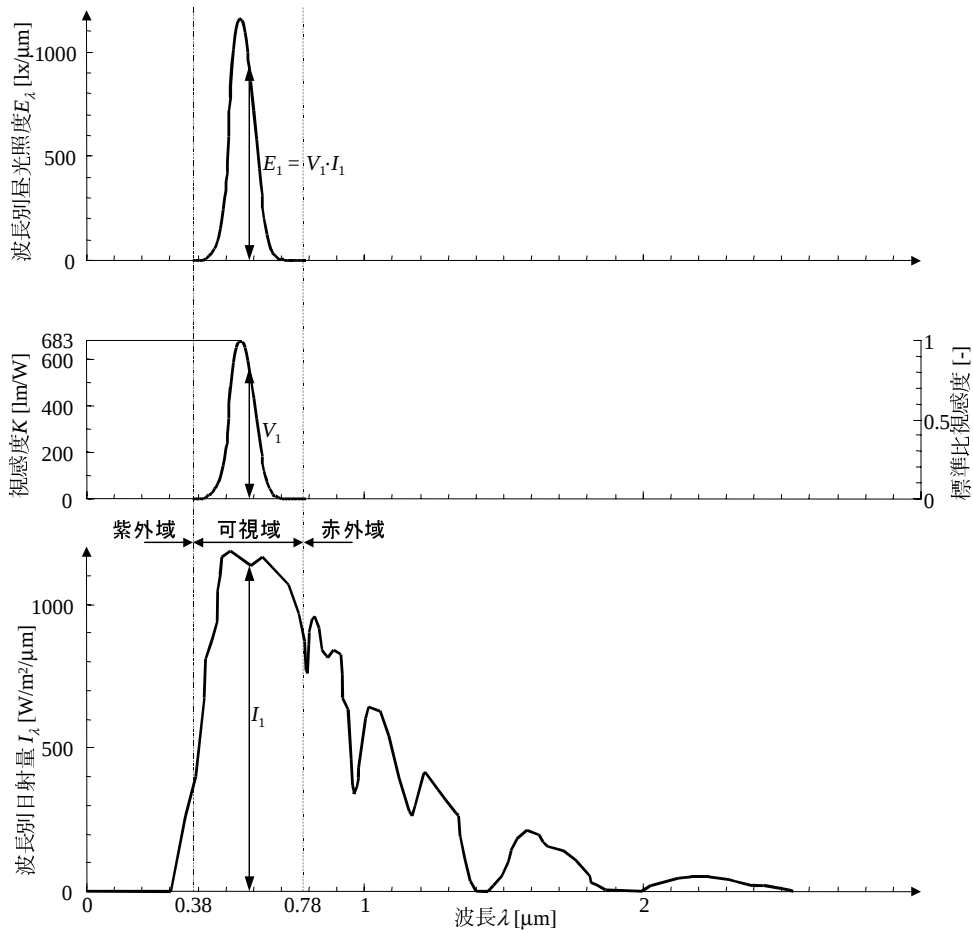


図 2.5 太陽エネルギーと昼光照度および日射量の関係

つまり、日射は太陽から来る放射熱であり、その物理的意味がはっきりしている（図 2.5 下）。

$$I = \int_0^{\infty} I(\lambda) d\lambda \quad (2.11)$$

■ 昼光における単位と日射における単位の対応 このように、昼光照度も日射量も太陽エネルギーに由来するが、日射量とは異なる概念である。

本研究では、物体表面の日射量の反射状態を求めることを目的としている。一方で、今まで解説してきた反射関数や天空状態については、日射量ではなく、昼光照度の用語を用いて説明している。昼光照度は日射量を視感度で重み付けしただけであり、反射の概念等はそのまま採用できるが、用語の読み替えが必要となる。表 2.1 に昼光と日射における測量系の対応を示す。

表 2.1 日光と日射における測量系の対応

日光における測量系		日射における測量系	
光束	[lm]	エネルギー束	[W]
照度	[lx]	日射量	[W/m ²]
グローバル照度		全天日射量（グローバル放射照度）	
直達照度		直達日射量（直達放射照度）	
天空光照度		天空日射量（天空光放射照度）	
光度	[cd]	放射光度	[W/sr]
輝度	[cd/m ²]	放射輝度	[W/m ² ·sr]
天空輝度		天空放射輝度	

3 光線追跡法による計測データの解析

3.1 光線追跡法とは

光線追跡法（ray tracing method, ray tracing algorithm）とは、空間を微小構成要素ごとに分割し、ある微小面から発射される光束を反射・屈折経路も含めて追跡することによって、空間の各微小面の輝度を計算する手法である。膨大な計算量を必要とするため、コンピュータによる数値計算は欠かせないが、コンピュータグラフィックス（computer graphics）の世界では、レンダリング（rendering）の基本手法としてよく用いられている。また、理学・工学の分野でも、光束やエネルギー束の解析のほか、重力線や磁力線を描くことで重力場や磁力場の解析などにも使われている。

本研究では、天空および反射面をそれぞれ微小面に分割し、天空から放射されるエネルギー束を解析することで、反射面の反射率が 1 の場合の短波放射計への上向き入射量を算出するのに用いる。反射面が無限平面で、かつ、反射面上に何ら障害物が存在しない場合、反射率が 1 の場合、天空より到来する下向き入射量と反射面より到来する上向き入射量は等しくなるはずであるが、実際には反射面は限られており、かつ障害物も存在する。そこで、光線追跡法を用いることで実反射面の形状を考慮し、反射率を 1 とした場合の放射計への上向き入射量を算出する。そして、実際の上向き入射量を反射率を 1 とした場合の上向き入射量で割ることで、反射率を求める。

3.2 実反射面の解析

天空・反射面を設定、微小面積ごとに分割する。また、反射面上の物体（障害物）を後述の座標系に基づいて 3 次元平面で記述する。その後に、図 3.2 にあるような手順で、反射率を 1 とした場合の上向き入射量を算出する。

光束追跡法の詳しい計算理論に関しては、紙面の都合上、ここでは省略し、計測地点 A の場合の計算条件のみ、以下に示す。実際の様子は、図 1.1 左上の通りである。煉瓦を用いて放射計を固定している。なお、反射面および障害物は、直交 3 次元座標系 (x, y, z) で記述し、天空および太陽位置に関しては、 R なし極 2 次元座標系 (φ, γ) で記述してある。

直交 3D 座標系は、試験体上部水平面において、南北方向を x 軸（上部水平面の南端を 0 とし北向きが正）、東西方向を y 軸（上部水平面の西端を 0 とし東が正）、鉛直方向を z 軸（上部水平面を 0 とし上が正）

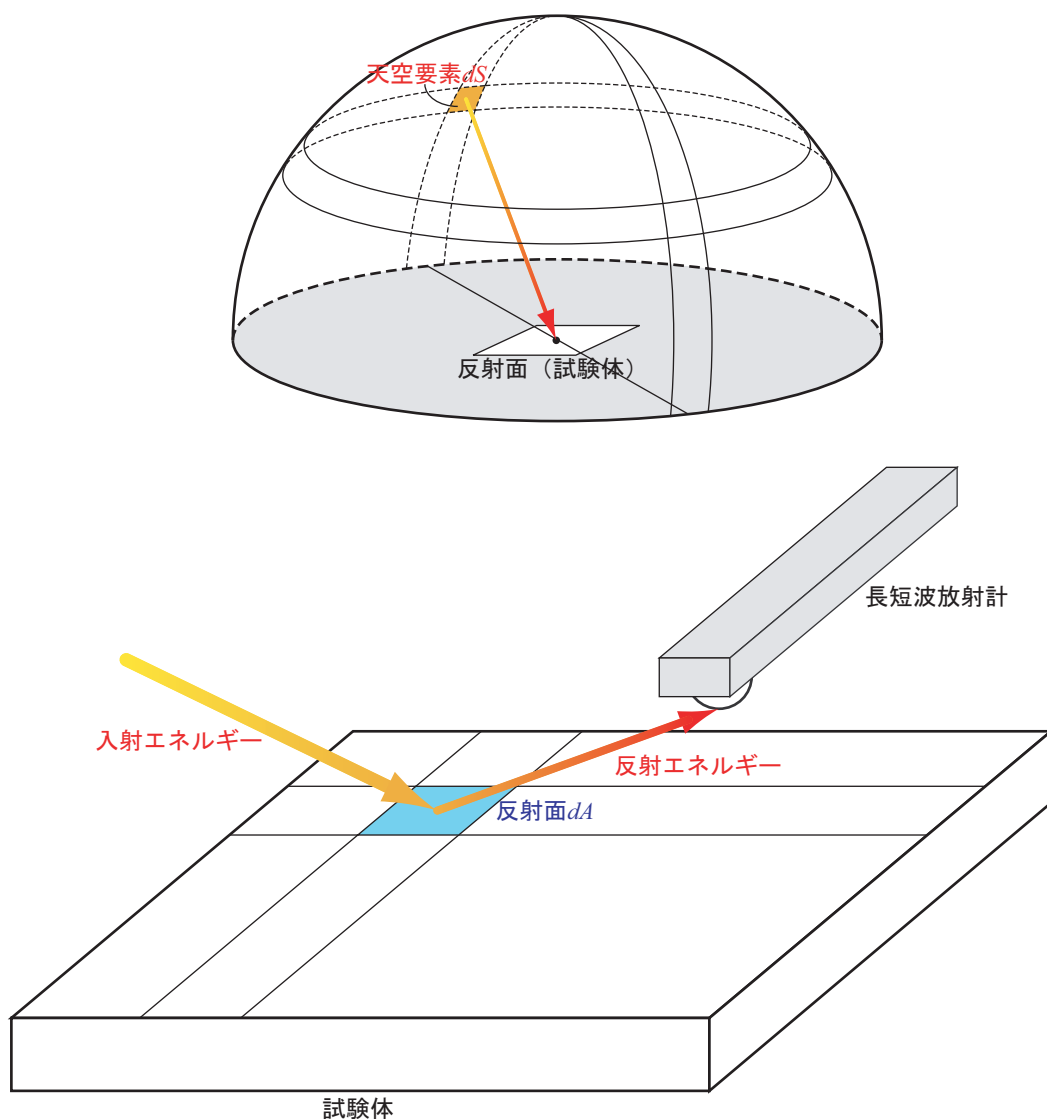
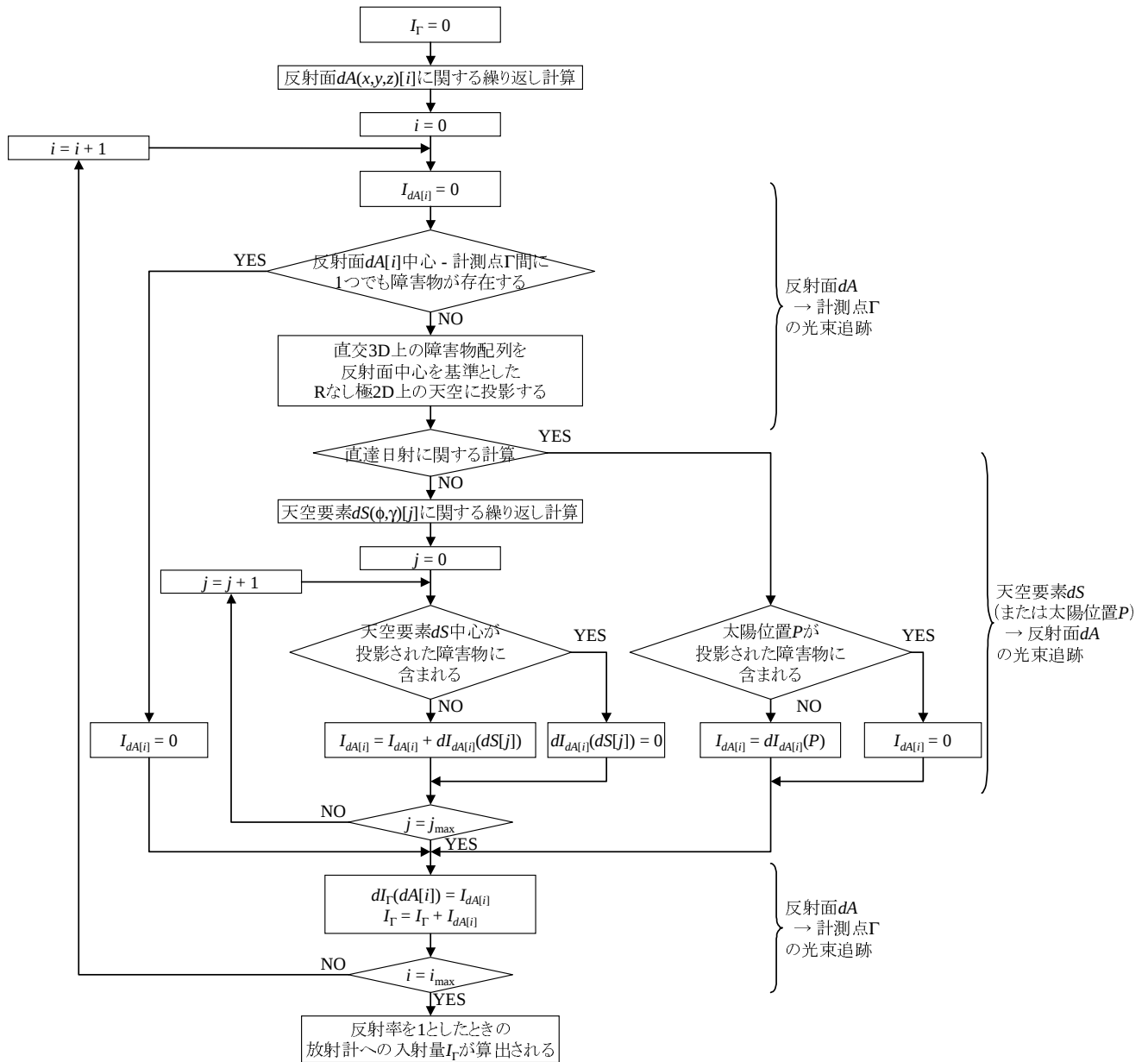


図 3.1 太陽エネルギー束の放射・反射経路（天空 → 試験体表面 → 放射計受感部）

と定義している（単位はいずれも [m]）。また， R なし極 2 次元座標系^{*3}については，日射理論との整合性をとるため，方位角を φ ($-\pi \leq \varphi < \pi$)，高度角を γ ($-\pi/2 \leq \gamma \leq \pi/2$) と定義している（単位はいずれも [rad]）。 R なし極 2 次元座標系は反射点（微小反射面 dA 中心）を基準に定義する。

- 光源（天空または太陽）
 - 入射量はいずれも法線方向を基準としている。
 - 天空日射

^{*3} 通常，極座標系は 3 次元の座標系であり，座標軸としては距離 R ，方位角 φ ，高度角 γ の 3 本が存在するが，天空は一律無限遠（ $R = \infty$ ）に存在するため， R を省略した 2 次元座標系を用いている。本研究では，この座標系を「 R なし極 2 次元座標系」と表記している。

図 3.2 光束追跡法の計算手順 (天空 $S \rightarrow$ 試験体表面 $A \rightarrow$ 放射計受感部 Γ)

天空要素 $dS(\varphi, \gamma)$ より $\frac{\pi}{\sin \gamma} \frac{dS}{S} I_d [\text{W/m}^2]$ だけ入射する。

天空は、 $(\varphi, \gamma) = (-\pi, 0) \sim (\pi, \pi/2)$ の広がりを持っており、これを $(\Delta\varphi, \Delta\gamma) = (\pi/100, \pi/100)$ ごとに分割する。

– 直達日射

太陽位置 $P(\varphi, \gamma)$ より $I_b [\text{W/m}^2]$ だけ入射する。

- 反射面 (試験体上部水平面) A

$(x, y, z) = (0, 0, 0) \sim (1.200, 1.200, 0)$

分割幅 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (0.100, 0.100, 0)$

- 入射点（長短波放射計下向き短波ドーム受感部）

$(x, y, z) = (0.344, 0.585, 0.077)$

- 障害物

- 煉瓦 a

$(x, y, z) = (0.240, 0.448, 0) \sim (0.868, 0.926, 0.100)$

- 煉瓦 b

$(x, y, z) = (0.240, 0.448, 0) \sim (1.142, 1.200, 0.100)$

- 長短波放射計 MR-40 計測装置部

$(x, y, z) = (0.314, 0.560, 0.094) \sim (0.374, 0.750, 0.134)$

- 長短波放射計 MR-40 下向き短波放射ドーム（正六角柱に近似）

$(x, y) = (0.344, 0.605) \sim (0.324, 0.596) \sim (0.324, 0.574) \sim (0.344, 0.565) \sim (0.364, 0.574) \sim (0.364, 0.596) \sim (0.344, 0.605)$

$z = 0.078 \sim 0.094$

- 長短波放射計 MR-40 下向き長波放射ドーム（正六角柱に近似）

$(x, y) = (0.344, 0.705) \sim (0.324, 0.696) \sim (0.324, 0.674) \sim (0.344, 0.665) \sim (0.364, 0.674) \sim (0.364, 0.696) \sim (0.344, 0.705)$

$z = 0.078 \sim 0.094$

文中の記号は次の通り．
 I_b : 法線面直達日射量 [W/m^2]
 I_d : 水平面天空日射量 [W/m^2]

3.3 計算結果

数値計算（光線追跡法）により，次の結果が得られた．

たとえば，太陽位置が $(\varphi, \gamma) = (0.493, 0.443)$ であるとき，直達日射量は試験体表面の反射率が 1 であっても， $0.968[(\text{W}/\text{m}^2)/(\text{W}/\text{m}^2)]$ しか観測されない．同様に，天空日射は $0.783[(\text{W}/\text{m}^2)/(\text{W}/\text{m}^2)]$ しか観測されない．

3.4 解析結果

光線追跡法を用いて上向き入射量を求め，その入射量を分母に用いて算出した反射率データを図 3.3 に示す．

図 3.3 より次のことが示唆される．

- 見かけの反射率ほどには実際の反射率（補正された反射率）は低下していないと見られる．見かけの反射率が低下しているのは，季節とともに太陽高度が上昇するため，計測装置が作る影の影響を強く受けてしまうためであると考えられる．
- 図 3.4 に示されるように，光線追跡法を用いて反射率データの解析をおこなったことにより，反射率データと全天日射量における直達成分の割合との相関がなくなっていることが分かる．一方，見かけの反射率では相関が見られる．直達日射と天空日射とで障害物の影響が変わってくるためだと考えられる．なお一

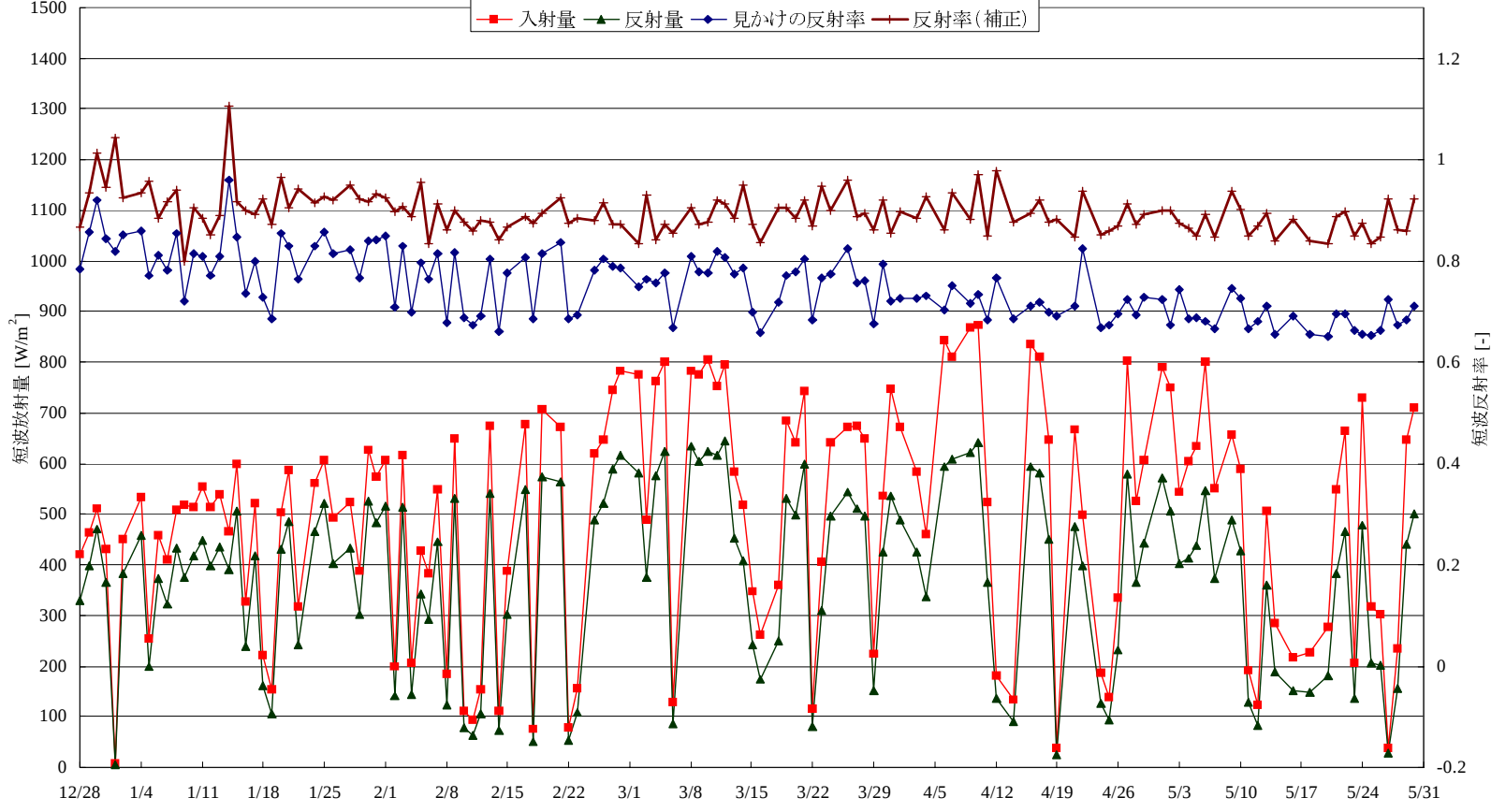


図 3.3 光線追跡法による反射率データの解析

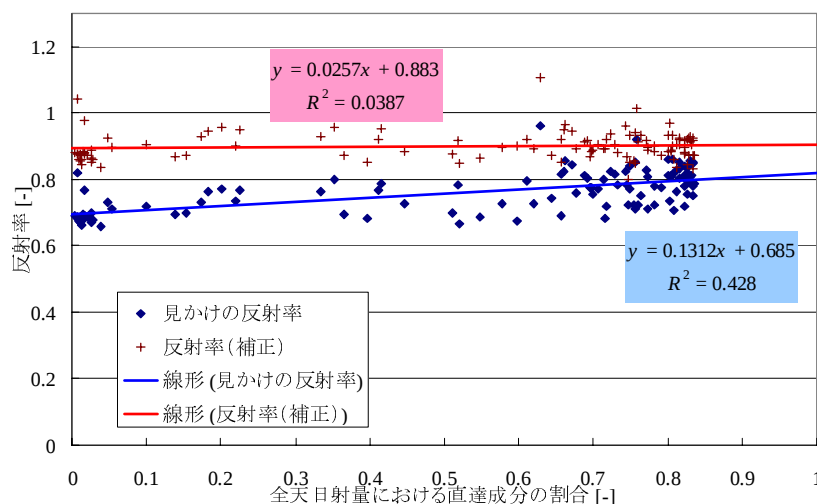


図 3.4 全天日射量における直達成分の割合との相関

部相関が見られるが、これは天空の放射輝度を一様とし、直散分離をおこなった際に天空日射に分類される準直達日射 [10] の存在を無視しているためと類推される。ちなみに、全天日射量における直達成分の割合は、季節による変動量は小さい（図 3.5 参照^{*4}）。

- 補正された反射率の推移を見ると、初期の反射率から緩やかに低下してきていることが確認される。見かけの反射率の推移でも確認されたが、計測値の季節変動（太陽高度の変化）の要因を取り除いても、低下傾向が確認されることが分かった。

4 計測された反射率データの分析

4.1 解析された反射率データ

光線追跡法を用いて見かけの反射率データを解析することにより、天空状態や反射面の状態による変動を除去した反射率データを得た（図 3.3）。得られた反射率データは光線追跡法では除去できない計測誤差要因を含んでいるため日によって上下してしまっている。

高反射高放射塗料の反射率は、実際には、経時劣化すると考えられ、また降雨により回復すると考えられている [11]。本節では、建築熱負荷あるいは都市熱環境シミュレーションプログラムで容易に利用できるよう、解析によって得られた反射率データをもとに、高反射高放射塗料の反射率の推移を経時日数と降雨の関数で表すことを試みる。

「汚れ」そのものも反射率を持つことを考えると、反射率はある程度以下には低下しないと考えられるため、反射率 $a(t)$ は次式で表すことができると考えられる。

$$a(t) = a_e + (a_o - a_e) \exp(-\Delta a \cdot t) \quad (4.1)$$

^{*4} 図中、曇天が少ないのは、図 3.5 は計測時のみの抜粋であり、計測のできない雨天時は除去しているためである。

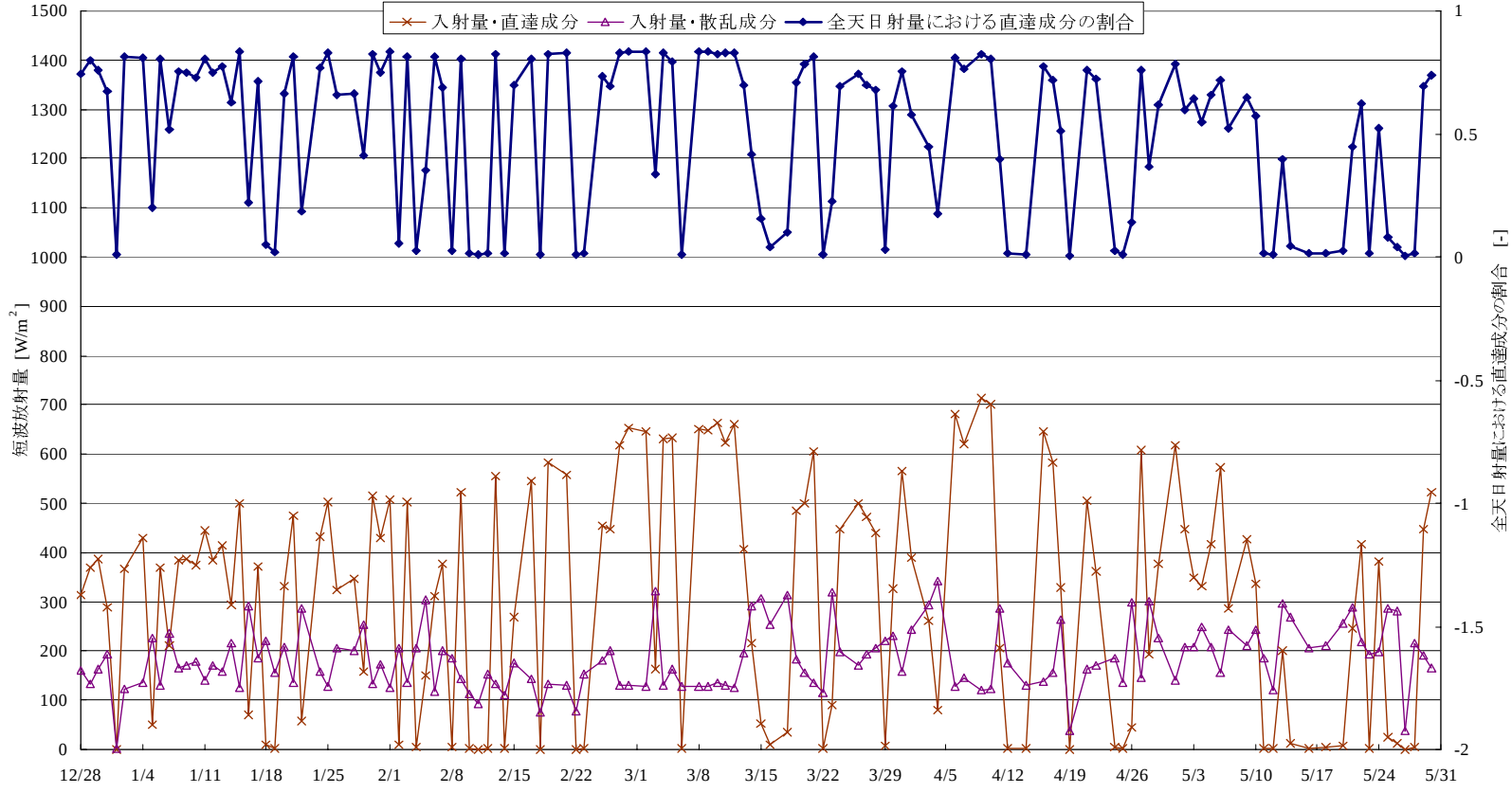


図 3.5 全天日射量における直達成分の割合の推移

a_o : 初期の反射率 [-] ($a_o = 0.91$)

a_e : 最終的な反射率 [-]

Δa : 反射率劣化係数 [-/d]

t : 曝露時間 [d]

一方、降雨により一定量ずつ汚れが除去されると考えられる (図 4.1 参照)。この影響も考慮すると、反射率の式は差分式ではあるが次式で表すことができるはずである。

$$a(t) = a_e + (a(t-1) - a_e) \exp(-\Delta a \cdot t) + \Delta c \cdot w \quad (4.2)$$

Δc : 降雨による汚濁除去係数 [-/mm]

w : 降水量 [mm]

ただし、 $a(0) = a_o$ であり、また $a(t) \leq a_o$ である。

4.2 推定反射率

$a_e \geq 0.2$ および $\Delta a > 0$ という条件を設定し、実測反射率 (補正後) と推定反射率 $a(t)$ との残差平方和が最小となるように回帰すると、各係数は次のように求まった*5。

$$\begin{aligned} \Delta a &= 0.000211 \\ a_e &= 0.2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

なお、 Δc を考慮した計算もおこなったが、 $\Delta c > 0$ となるような解は求まらなかった。二階堂ら [11] は、降雨により汚れが除去される可能性を示唆しているが、 $\Delta c > 0$ となるような解は求まらなかったのは、地点 A のように塗装面が地面に水平である場合、降雨によって汚れが流し出されることはないためと考えられる。

求めた推定反射率をグラフにプロットすると図 4.2 となる。

同様に地点 B に関しては図 4.3 となる。

計測地点 A,B および同じく上部水平面を計測した二階堂らの結果との比較を図 4.4 にまとめる。本研究での計測期間は二階堂らに比べると短い。

5 まとめ

高反射高放射塗料の屋外曝露実験をおこない、反射率をほぼ毎日計測することで、高反射高放射塗料の反射率の経時変化の計測を試みた。

反射率を計測する場合、障害物のない無限平面を反射面とするのが理想であるが、実際には難しい。そこで、本研究では、日射を直達日射と一様な天空日射とに分離し、それぞれについて光線追跡法を用いることにより、反射形態をできるだけ理想状態に近づけることを試みた。

そして、上記の補正によって反射率の推移を、一般的な関数によって記述することを試みた。そのところ、反射率は緩やかな推移をもって劣化していることがわかった。また上部水平面に関しては降雨による回復は見られず、直線的に劣化が進行していることが確認された。これは二階堂らが反射率の回復を降雨によるものと推測している結果とは異なる。

しかし、塗料の寿命 (5 年程度と見られる) も考慮すると、本研究の推定結果は二階堂らの計測と比べてや

*5 準 Newton 法により逐次計算をおこなった。計算にあたっては Microsoft Excel を利用。

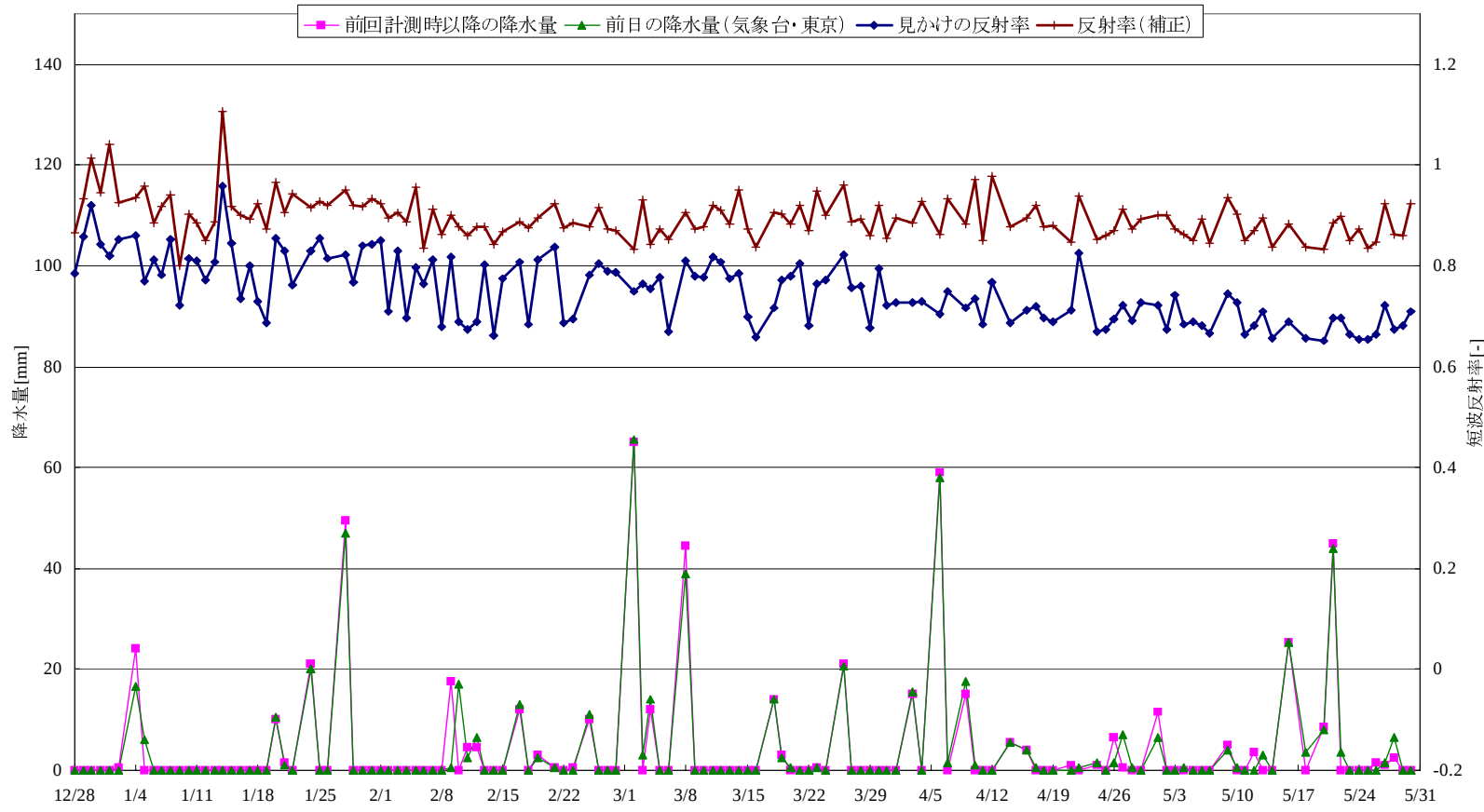


図 4.1 降水量の推移

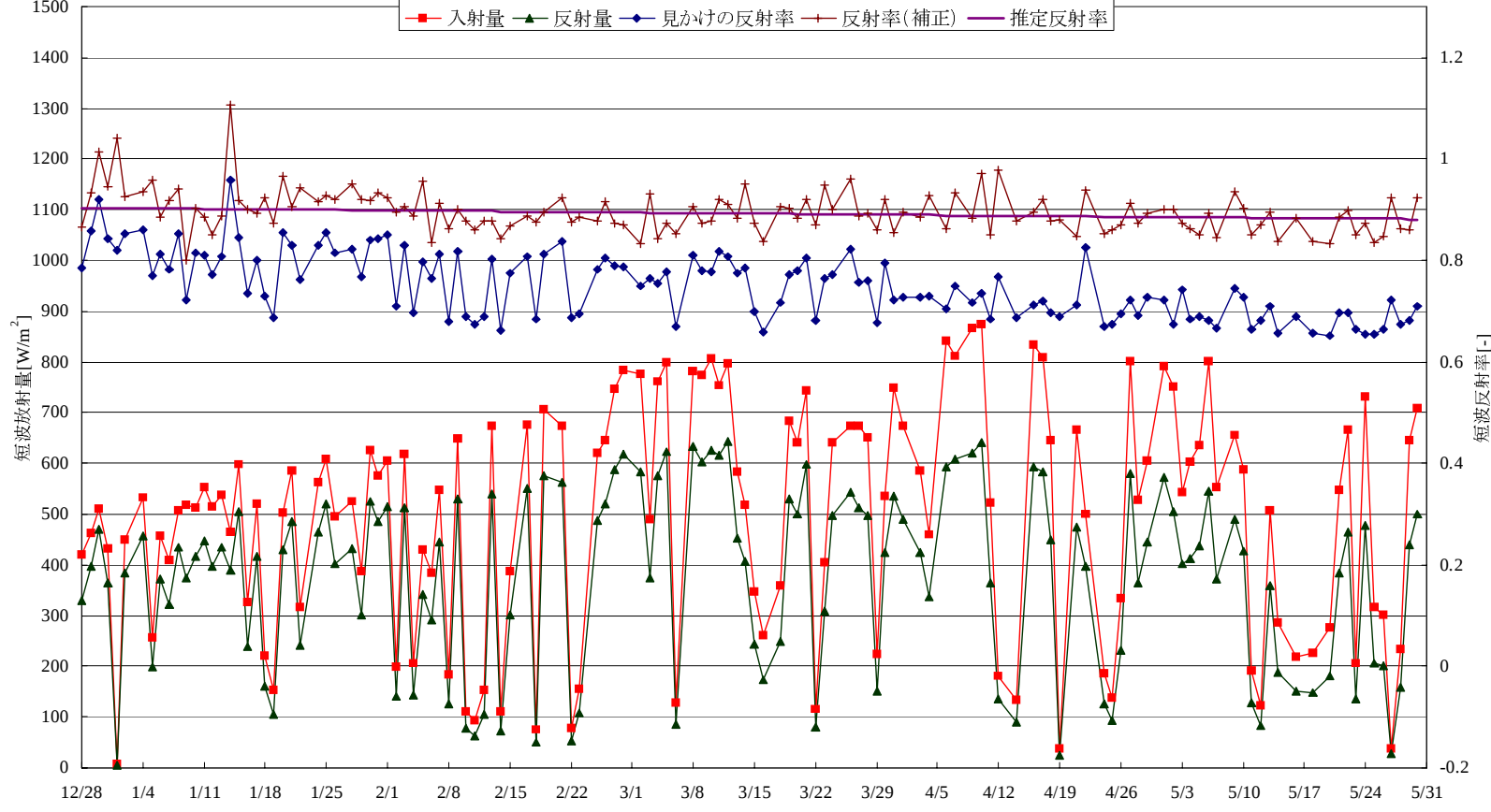


図 4.2 推定反射率

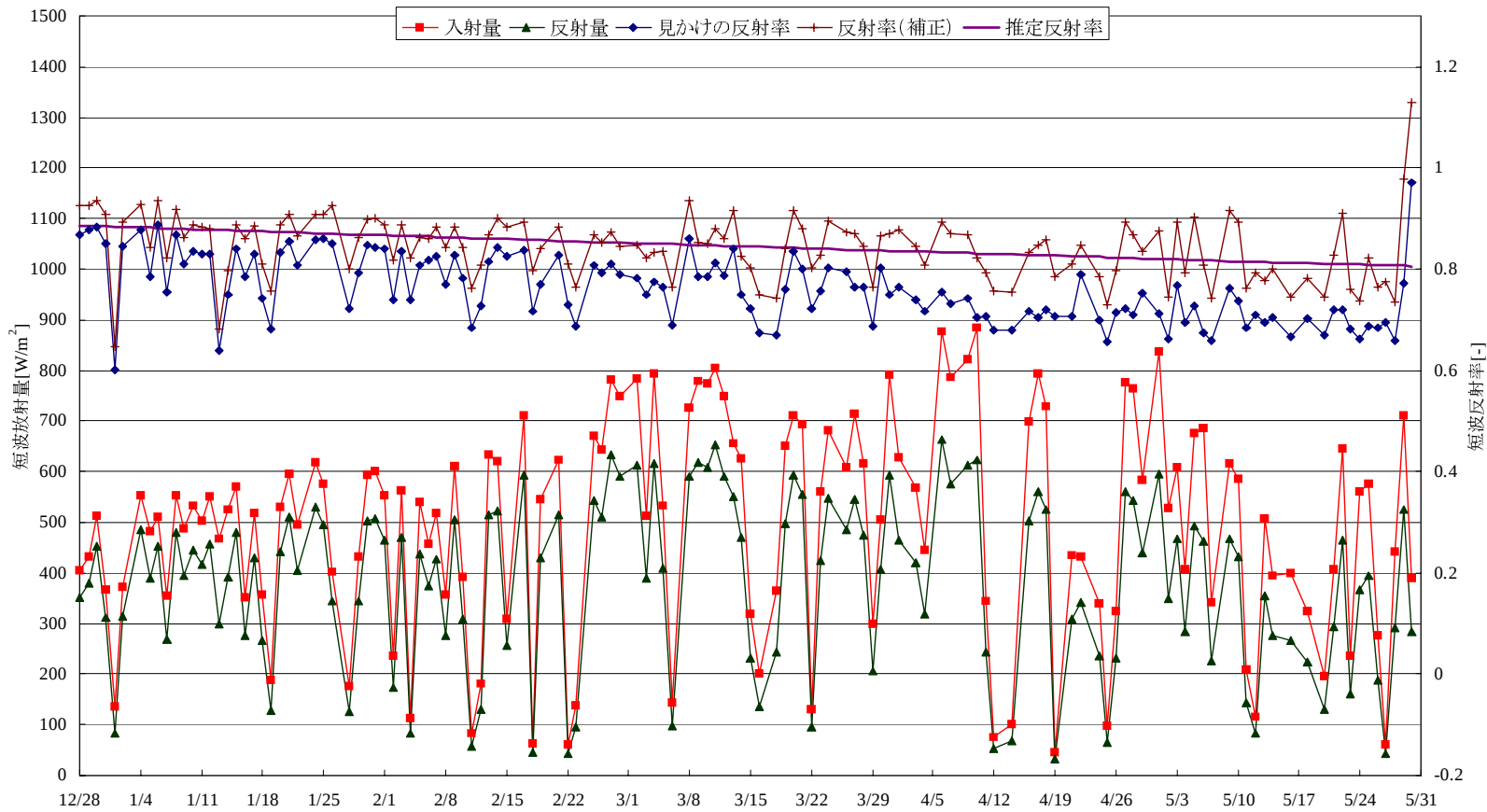


図 4.3 推定反射率 (地点 B)

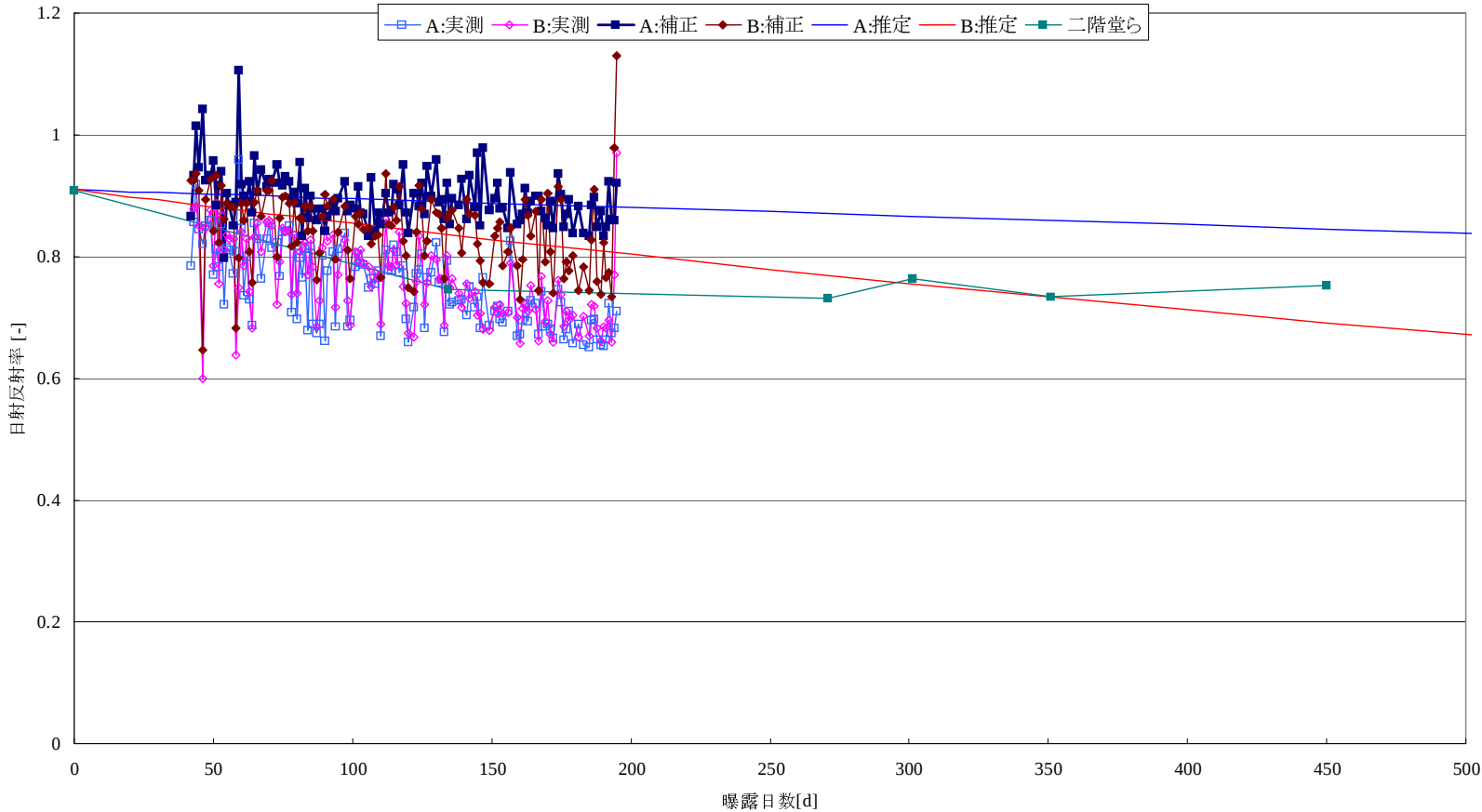


図 4.4 算出された反射率の比較

や低いものの、ほぼ合致^{*6}し、初期の反射率が 0.91 である高反射高放射塗料は平均して 0.7-0.8 程度の反射率を持つことが確認された。

参考文献

- [1] R. R. Perez, P. Ineichen, E. L. Maxwell, R. D. Seals, and A. Zelenka. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. In *ASHRAE Transactions*, Vol. 98, chapter part 1, pp. 354–369. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1992.
- [2] Robert R. Lewis. Making shaders more physically plausible. *Computer Graphics Forum*, Vol. 13, No. 2, pp. 109–120, Mar 1994.
- [3] 近藤靖史, 長澤康弘, 入交麻衣子. 高反射率塗料による日射熱負荷軽減とヒートアイランド現象の緩和に関する研究. 空気調和・衛生工学会論文集, 第 78 巻, pp. 15–24. 空気調和・衛生工学会, Jul 2000.
- [4] 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子. 標準天空としての all sky model の提案 –第 2 報すべての天空状態の天空輝度分布を表す数式–. 照明学会誌, Vol. 85, No. 5, pp. 323–331, May 2001.
- [5] 中村洋, 古城真也, 古賀靖子, 徐廷昊, 井川憲男, 穴井謙. 天空の放射輝度分布に関する研究 (その 1, 太陽高度別平均天空放射輝度分布). 照明学会誌, Vol. 81, No. 2, pp. 96–106, Feb 1997.
- [6] 中村洋, 古城真也, 古賀靖子, 徐廷昊, 井川憲男, 穴井謙. 天空の放射輝度分布に関する研究 (その 2, 平均相対天空放射輝度分布の数式化). 照明学会誌, Vol. 81, No. 2, pp. 180–190, Feb 1997.
- [7] 中村洋, 古城真也, 古賀靖子, 徐廷昊, 井川憲男, 穴井謙, 藤井俊一. 天空の放射輝度分布に関する研究 (その 3, 天頂放射輝度と絶対値で表す平均天空放射輝度分布). 照明学会誌, Vol. 81, No. 5, pp. 376–384, May 1997.
- [8] 古賀靖子. 天空輝度と天空放射輝度の標準化研究調査委員会. 照明学会誌, Vol. 86, No. 10, pp. 791–792, Oct 2002.
- [9] Benjamin Y. H. Liu and Richard C. Jordan. A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. *Solar Energy*, Vol. 7, No. 2, pp. 53–74, 1963.
- [10] 赤坂裕, 黒木荘一郎, 稲村悌成, 二宮秀興. 準直達日射・天空日射量の測定とその推定式の作成. 日本建築学会計画系論文報告集, 第 405 巻, pp. 19–28. 日本建築学会, Nov 1989.
- [11] 二階堂稔, 寺内伸. 建造物の温度上昇を抑制する光高反射・熱高放射塗料. 鹿島建設技術研究所年報, 第 47 巻, pp. 153–158. 鹿島建設技術研究所, Sep 1999.

^{*6} 二階堂らの計測は、鹿島技術研究所（東京都調布市）の屋上に設置した箱形供試体を用いておこなわれた。本研究に比べて反射率の劣化が若干緩やかなのは、大気汚染の比較的小さい郊外でおこなわれたためと考えられる。