放射輝度分布の不規則性と雲の状態による要因

日射の直散分離に影響を及ぼす気象要素の特性研究 (その2)

INFLUENCES OF IRREGULARITY OF THE SKY RADIANCE DISTRIBUTION
AND CLOUD STATUSCharacteristic study on meteorological elements effect on separation
of global irradiance (Part 2)

中山哲士*, 石野久彌**

Satoshi NAKAYAMA and Hisaya ISHINO

It is important to understand properties of the essences of the specific meteorological elements, to improve the precision of the separation of global to direct and diffuse solar irradiance. In this paper, we picked two meteorological elements up, one is the irregularity of the sky radiance distribution and the other is the cloud status, and examined the characteristics of each factor. For the irregularity of the sky radiance distribution, we proposed the expressive index of this factor, and showed the relationship with the irradiance separation. For the cloud status, we showed the characteristics of appearance of the cloud combination each altitude of the sky. When the correction model based on the cloud status was applied to the irradiance separation, the precision of prediction was slightly improved.

Keywords : Accuracy the separation of global irradiance, Irregularity of the sky radiance distribution, Cloud status

直散分離精度, 放射輝度分布の不規則性、雲の状態

1 はじめに

全日射量から直達日射成分と拡散日射成分の各成分を推定する直散分離は建築環境予測に不可欠な手段である。既往の直散分離モデルの多くは予測値の平均的誤差を小さくするように導き出されたものであり、日射の全ての現象を忠実に再現するものではない。これら既往のモデルに与えている種々の誤差要因について、個々に検証していくことは今後の直散分離精度向上の足がかりとして、基本的かつ重要なことと思われる。既報¹⁾では誤差要因として日射の短時間変動性を取りあげ、日射積分時間内の短時間の日射変動が直散分離精度に影響を及ぼすことを示した。本報では天空放射輝度分布の不規則性および雲の形態の2つの要因を取りあげ、各要因についての指標を数値化し直散分離精度との関連性についての検討を行うこととする。

1つめの天空放射輝度分布の不規則性とは、例えば雲が天空に散在するとき、太陽が雲に隠れる現象は時間的・場所的にランダムに発生するため、直散分離の予測は当然誤差が発生しやすくなるであろうということである。この現象を具体的に数値化し直散分離式の精度との関連性を評価することを提案するものである。具体的な不規則性の評価法としては、まず基準となる天空放射輝度分布として井川らにより提案されている All Sky Model-R^{2),3)}を用いて、これと実際に観測される放射輝度分布との隔たりがどの程度であったかを指標化することとした。All Sky Model-R は基本的な幾何学的要素(太陽

位置)、全日射量と天空日射量の関係が分かれば、中間天空を含めた全ての天空状態の任意の天空要素の輝度・放射輝度を予測することを目指して開発されたモデルである。いわば典型的な天空の状態を表すモデルであり特異な天空の状態を表すものではないので、実際に観測される予測し得ない天空放射輝度分布との差が不規則性として表される。本報ではこの天空放射輝度分布の不規則を表す指標と、直散分離式の精度との関連性について検討を行うこととする。

2つめの検討項目は雲の形態そのものと日射の直散分離精度についての関連性についてである。現在、主な気象官署では「雲量」および、下層・中層・上層の各高度ごとの「雲の状態」についての目視観測を3時間ごとに実施している。目視観測による個人差などが問題点として挙げられるが、雲の状態を継続的かつ系統的に知る上で非常に有用な情報といえる。本報では日原簿に記載されるこの雲の状態に関連するデータを解析に使用することとした。

なお、本論文は文献^{4),5)}に検討を加え加筆修正したものである。

2 解析に使用した日射量データの概要

2.1 気象台観測データ

本報で使用した気象台観測データは東京管区気象台における1998年から2002年までの5年間の「地上観測原簿(時別値)」および「地上観測連続値(1分値)データ」である。雲に関しては日原簿データ

* 首都大学東京大学院都市環境科学研究科
研究員・博士(工学)

** 首都大学東京大学院都市環境科学研究科 教授・工博

Research Assoc., Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Ph. D.
Prof., Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.

図1 スカイスキャナー (左) と天空放射輝度測定点 (右)

に含まれる3時間ごとの「雲量」、「雲の状態(下層雲、中層雲、上層雲)」の観測記録を使用する。また、日射量に関しては原簿データの「日照時間」および「全天日射量」、1分値データの「全天日射量」および「法線面直達日射量」を使用する。直達日射量は日射日照計による出力値とする¹⁾。原簿データと1分値データによる全天日射量が異なる値が記録されていた場合にはエラーとしてそのデータは除外した。

2.2 天空放射輝度分布データ

天空放射輝度分布データは本学(東京都八王子南大沢)におけるスカイスキャナーによる観測値を使用した。観測に使用しているスカイスキャナー(MS-300LR, EKO)と天空上の測定点を図1に示す。センサーの開口角は 5.5° (半角)、測定間隔は30分、1回の測定にかかる所要時間は約3分半である。観測機器の特性による太陽周辺の強放射輝度領域の欠落データは天空輝度の測定データにより補正している⁶⁾。

解析には2000年6月30日～2002年2月4日、太陽高度 $\sin h \geq 0.3$ のデータを使用した。

3 放射輝度分布の不規則性による影響

3.1 基準となる天空放射輝度分布モデル

天空放射輝度分布の基準値としては井川らによるAll Sky Model-R^{2),3)}を用いる。All Sky Model-Rは諸調指標 $\phi(\gamma)$ と散乱指標 $f(\zeta)$ 、天頂放射輝度により全天空の放射輝度を予測するモデルで次式で表される。

$$Lea(h, \gamma, \zeta) = Lez(h) \cdot Le(h, \gamma, \zeta) \quad (1)$$

$$= Lez(h) \frac{\phi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\phi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - h)} \quad (2)$$

$$\phi(\gamma) = 1 + a \cdot \exp(b/\sin \gamma) \quad (3)$$

$$f(\zeta) = 1 + c[\exp(d \cdot \zeta) - \exp(d \cdot \pi/2)] + e \cdot \cos^2 \zeta \quad (4)$$

ここで、 $Lea(h, \gamma, \zeta)$: 天空要素の放射輝度 [$W/(m^2 \cdot sr)$]、 $Lez(h)$: 天頂放射輝度 [$W/(m^2 \cdot sr)$]、 h : 太陽高度 [rad]、 γ : 天空要素の高度 [rad]、 ζ : 太陽と天空要素の角距離 [rad]。

諸調指標、散乱指標に用いる係数 $a \sim e$ には文献³⁾の式を用いた。天頂放射輝度に関する簡易予測式も提案されているが本報では次式を用いて天空日射量から逆算した。

$$Lez(h) = \frac{I_{SH}}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} Le(h, \gamma, \zeta) \sin \gamma \cos \gamma \cdot d\gamma d\alpha} \quad (5)$$

ここで、 α : 天空要素の方位角 [rad]。

図2に式(5)から求めた天頂放射輝度とスカイスキャナーによる測定値(No.145)の関係を示す。比較的精度よく予測される結果が得られた。

図2 All Sky Model-Rによる天頂放射輝度の予測結果

図3 スカイスキャナーによる測定値と基準放射輝度 (All Sky Model-R) の関係 (例)

3.2 放射輝度分布の不規則性指標

All Sky Model-Rはその成り立ちと式の性質上、その時々平均的な天空状態を再現するモデルであるので、例えば太陽方位軸線に対して対称分布になっているなど、現実には起こりうる不規則的な天空状態には対応していない。換言すれば、これに外れたものが不規則的要素を表しているといえる。

図3は東京の代表的な太陽高度帯における天空放射輝度について、スカイスキャナー測定値と基準としたAll Sky Model-Rとの関係を示したものである。横軸は太陽と天空要素との角距離である。太陽の極近傍は測定機器の特性からモデルと観測値とは一致しないがこれを除けば比較的精度よく一致しているといえる。本報では放射輝度の測定値と基準天空放射輝度との差 ΔR_i [$W/(m^2 \cdot sr)$]を不規則的要素と捉え、その標準偏差 $\sigma_{\Delta R}$ [$W/(m^2 \cdot sr)$]を放射輝度分布の不規則性指標として定義する。

$$\Delta R_i = R_i - Lea_i, \quad (6)$$

$$\sigma_{\Delta R} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta R_i - \bar{\Delta R})^2}{(n-1)}}, \quad (7)$$

ただし ($\zeta > 20^\circ, \gamma > 6^\circ$)

ここで、 R_i : 天空要素 i の天空放射輝度測定値 [$W/(m^2 \cdot sr)$]、 Lea_i : 天空要素 i の天空放射輝度基準値 (All Sky Model-R) [$W/(m^2 \cdot sr)$]、 ζ : 太陽と天空要素との角距離 [$^\circ$]、 γ : 天空要素の高度 [$^\circ$]。

図4 日射の各指標日別平均値の相互関係

図5 代表日における日射指標の日変動 (2001年7月7日)

3.3 放射輝度分布の不規則性指標と直散分離精度

図4は全天日射量、法線面直達日射量、水平面拡散日射量を大気圏外日射量で無次元化した K_T , K_D , K_S と代表的な直散分離式によ

図6 代表日における放射輝度分布の状態 (2001年7月7日)

図7 放射輝度分布の不規則性と直達日射量推定誤差

る直達日射量の推定誤差 $RMSE_{idn}$ 、放射輝度分布の不規則性指標 $\sigma_{\Delta R}$ の日平均値の相互関係を示した。 K_D が 0 のものは除外した。また、ここでの法線面直達日射量の推定誤差は従来から直達日射量の推定に多く使われてきた Bouguer の式より、大気透過率 P を 0.86 とした場合を基準として日射量を無次元化した。

法線面直達日射量の推定誤差 [-]

$$= (I_{DN,pred} - I_{DN,meas}) / (I_0 \cdot 0.86^{am}) \quad (8)$$

ここで、 I_0 : 大気圏外日射量、 am : エアマス。

図5は晴天指数、推定誤差、放射輝度の不規則性指標の比較的大きい日として2001年7月7日を代表日として選出し、各日射指標の日変動を示したものである。午前中は若干日はあるものの曇り、午後は天気が回復して日がでてきた。放射輝度の不規則性を表す $\sigma_{\Delta R}$ は8時半に最大の $48.8 W/(m^2 sr)$ となりその後時間とともに小さくなるが、午後日射が始まる12時半に値は一時的に上昇する。このような天候の変わり目において天空放射輝度是不規則性を生じ、直散分離精度も得られにくい傾向が見られる。図6は2001年7月7日の代表的な時刻における放射輝度分布の状態を表したものであるが、8:30は太陽からの角距離が 30° 程度の領域の誤差が大きくなっていること、12:30はそれまで曇天であった後に雲の間から日が差し始め

図8 放射輝度分布の不規則性による直達日射推定誤差の出現特性 (例: 渡辺の式⁷⁾)

た状態であったと考えられ、実際の天空放射輝度の値は小さいものの All Sky Model-R では高い値を予測しているものと推測され、このようなときの直散分離の予測精度は得られにくいことなどが考察される。

図7は放射輝度分布の不規則性指標 $\sigma_{\Delta R}$ とそのときの代表的な直散分離式⁶⁾⁻⁸⁾による法線面直達日射量の予測精度の関係を示したものである。 $\sigma_{\Delta R}$ によって誤差のパラツキに違いが生じているのが分かる。図7はプロットが重なり過ぎているので、これをもとに放射輝度分布の不規則性指標 $\sigma_{\Delta R}$ の各区分ごとに法線面直達日射量予測値の誤差を示したのが図8である。実際には不規則性指標の高い状態は中間天空時に発生する頻度が高いため、中間天空時の予測精度評価を行う上で有効である。これによると、検証したモデルでは $\sigma_{\Delta R}$ 値が大きくなるに従い直達日射量の推定値は観測値に対して大きい側に予測していることが分かる。ここでは示していないがモデルによる分布の差異は当然あるが、 $\sigma_{\Delta R}$ 値の増加に伴い、推定誤差の頻度が広がっていく点ではほぼ同様の傾向が見られる。

4 雲の状態による影響

4.1 雲の状態の分類

次に、2番目の検討項目としてあげる「雲の状態」について検討する。天空の状況は絶えず変化しているが、目に見える最も顕著な現象が「雲」である。気象観測原簿データに含まれる雲に関する主な項目は、「雲量」および「雲の状態」である。ここでは、代表として東京の過去5年間に観測された「雲の状態」の出現特性を示すとともに日射の直散分離精度にどの程度寄与するのか検討を行うこととする。

表1 雲の状態を表す符号の意味と本論文での分類
(a) 下層雲 (発生高度: 地表~2km)

符号	下層雲の状態	下層雲なし	層積雲・積乱雲	層積雲・層積雲等	不明
0	積雲、積乱雲、層積雲及び層雲なし	○			
1	晴天時の積雲、ほつれ・盛上がりがある		○		
2	中程度以上に発達した積雲		○		
3	雲頂が羽毛・かなとこ状でない積乱雲			○	
4	積雲が広がってできた層積雲			○	
5	積雲が広がってできないものではない層積雲			○	
6	層雲、層雲のちぎれ雲			○	
7	悪天の際のちぎれ雲、積雲・層雲			○	
8	雲低の高さが違う積雲と層積雲			○	
9	雲長が羽毛状でかなとこ状の積乱雲			○	
15	不明				○

(b) 中層雲 (発生高度: 2~7km)

符号	中層雲の状態	中層雲なし	高層雲	乱層雲	不明
0	乱層雲、高層雲及び高積雲なし	○			
1	薄い高層雲 (太陽・月がわかる)		○		
2	厚い高層雲、あるいは乱層雲		○		
3	薄い高積雲 (太陽・月がわかる)			○	
4	外観が絶えず変わる高積雲			○	
5	地平線から空に広がりつつある高積雲			○	
6	積雲、積乱雲が広がって出来た高積雲			○	
7	高積雲または高積雲と高層雲、乱層雲			○	
8	塔状またはふさ状の高積雲			○	
9	混沌とした険悪な空模様			○	
15	不明				○

(c) 上層雲 (発生高度: 5~15km)

符号	上層雲の状態	上層雲なし	巻層雲	巻積雲	不明
0	巻雲、巻積雲及び巻層雲なし	○			
1	薄い毛状の巻雲が他の巻雲より多い		○		
2	濃い巻雲と房状の巻雲が他の巻雲より多い		○		
3	巻積雲からできた濃い巻雲		○		
4	地平線から空に広がりつつある巻雲		○		
5	45°以上に広がっていない巻層雲			○	
6	45°以上に広がっている巻層雲			○	
7	全天を追おう巻層雲			○	
8	空に広がる傾向のない巻層雲			○	
9	巻積雲のみ、または巻積雲が巻雲・巻層雲より多い			○	
15	不明				○

東京管区気象台では深夜0時を除く3時から21時までの3時間ごとに1日7回の「雲の状態」に関する目視観測が行われている。今回解析の対象とした1998~2002年の5年分の日原簿データにおいて欠測は見られなかった。

地上気象観測原簿に記載される「雲の状態」に関する情報は高さ毎に各層の雲の状態を符号(0~9, 15)で記録してある。本論ではこれを便宜的に5種類に再編した。気象観測原簿で使われている符号の意味と本論文での分類を表1に示す。

4.2 雲の状態の出現特性

図9は各層ごとの「雲の状態」の出現頻度を月別に示したものである。データは1日7回の観測データから明らかに日没時である3時と21時を除く1日5回分のものとした。季節変動を見ると、下

図9 東京における各種「雲の状態」の月別出現頻度（1998～2002年，6～18時）

層雲は夏季の7～9月において「下層雲なし」や比較的厚みの薄い積層雲・層雲の発生頻度が少なくなり、積雲や積乱雲の発生頻度が増えていることがわかる。また、中層雲においては夏季の高積雲や乱層雲の発生頻度が高くなり、「中層雲なし」の頻度が冬季に比べて小さくなっていること、上層雲については下層・中層雲の多く発生する夏季において「不明」の割合が増えているが、冬季の「上層雲なし」の出現頻度が高いことがわかる。これらから、東京においては冬季の晴天頻度が高く、夏季における積雲、積乱雲、高積雲が多く発生していることが分かる。

次に、各層における「雲の状態」の組み合わせについて検討する。表1に示したように各層の雲の状態をそれぞれ5種類に分類すると、下層-中層-上層の組合せは 5^3 の計125通りが考えられるが、東京に

図10 下層雲・中層雲・上層雲の状態の組合せによる出現特性

おける過去5年分（1998～2002）の観測結果から実際に発生した雲の状態の組合せを検証したところ、実際には66通りの組合せのみが観測されていた。そのうち、48通りの組合せは発生頻度が1%以下であり、実際の組合せはいくつかの分類に絞られることがわかった。

図10は雲量を観測していた時間帯のデータのうち、太陽高度の条件が $0.1 \leq \sin h$ を満たすものを選び出し、各層の雲の状態の組合せごとの出現頻度と累積度数を降順に並べかえ、そのときの日射量および日照時間、雲量の平均値を示したものである。図中の横軸項目は各層の「雲の状態の組合せ」を示したものである。この図より、出現した66通りの組合せのうち実際には上位5通りで全体の約半数を、12位までで全体の80%を占めていたことが分かる。最も出現頻度が高かったのは低層に層積雲が立ちこめ、中層、上層雲の状態が分からない状態のときで約15%を占める。層積雲は地上からの高度2km以内の「低い空に連なる凹凸のある雲」で「空を覆うと辺りが暗くなるが雨が降ることはない」雲である⁹⁾。つまり典型的な曇天時であり、このときの平均雲量も10を示した。2位は下層のみに積雲が観測されるときで12%、3位はこれに上層雲として巻雲が加わったもので両者を含めて約20%を占め、快晴ではないものの晴れた状態を表している。このときの全天日射量、直達日射量とも比較的高い値をとる。5位に位置する各層の雲が全く観測されない時（快晴時）と比較すると、直達日射量は低い値となっているが、全天日射量の値はむしろ高い値となっていた。これは下層に発生する積雲は夏季に多く発生する傾向が見られたが（図9）、下層積雲による散乱成分の増加による影響や、快晴日の多い冬季に比べて夏季の太陽高度が高いことが影響していることなどが理由として考えられる。

図 11 日照時間と全天・直達日射量

図 12 雲量と直達日射量

図 13 平均雲量と日照時間

4.3 雲の状態と直散分離精度

ここでは雲の量を表す指標である雲量とそれにより遮られる日射の影響を表す日照時間との関係について示す。図 11 は日照時間と全天日射量及び法線面直達日射量との関係を示したものである。全天日射量はやや幅はあるもののほぼ日照時間と正の相関がある。直達日射については日照時間と明確な正の相関が確認された。

図 12 は雲量と法線面直達日射量の関係、図 13 は平均雲量と平均日照時間との関係を示したものである。雲量と法線面直達日射量との関係ではほぼ負の相関が確認されたが、雲量 10 付近での直達日射量にバラツキがあることが分かる。つまり図 13 に示すように雲量と日照時間との関係にもほぼ負の相関があるものの、雲量 10 付近において雲の状態によって日照時間に大きく幅があることが影響しているためであろう。これらのことから、日照時間と日射量にはハッキリした関連性を見出すことができるが、雲量には不確定要素が多く日射量との関連性を見出すのは困難であるといえる。

図 14 に各種雲の状態における全天日射量から既往の直散分離式^{1), 6), 7), 10)~12)}による法線面直達日射量の RMSE および MBE 値を示す。この図ではいずれのモデルも上層雲が「不明」となっているもの、つまり上層雲まで観測が不可能となるような積層状の雲が下層、中層に覆われている場合で直達日射は必然的に小さくなっているときに誤差値 RMSE, MBE は小さくなっている。その他の雲の状態のときは RMSE 値は 80~100 W/m² 程度で推移しているが、MBE 値との組合せを考えると誤差の傾向が異なっているといえる。

図 15 は図 14 を出現頻度を乗じて基準化したものである。出現頻度を考慮すると順位が 2~5 位の雲の状態を除いては全体に占める誤差の割合は小さいものといえる。下層部に積雲が発生している時や晴天時において直散分離精度を向上させることが、全体としての直散分離精度を上げる可能性を秘めているものと思われる。

図 14 各種雲状態における直達日射推定値の RMSE・MBE

図 15 図 14 を出現頻度で基準化したもの (※横軸の項目は図 14 と同じ)

4.4 雲の状態による直散分離の補正

ここでは雲の状態を考慮した直散分離の精度向上への可能性を検証する。暫定的ではあるが、前節までに示した実際に東京で観測された 66 種の各種雲状態の組合せごとに法線面直達日射量の観測値と推定値との 1 次近似式を最小二乗法により導き、その係数を予測値に乘じることによって予測値を補正することとした。

表 2 に雲の状態による補正を行う前後の各直散分離モデルの精度検証を行った結果を示す。モデルによる差はあるが、RMSE で約 2~14 W/m² 程度の精度の改善が見られた。ここで検証している方法は補正係数そのものが測定値がないと導き出されないものであるので正確な意味での予測式とはなっていないが、雲の状態を考慮することにより直散分離の精度を向上させる可能性があることを示唆する結果となった。

5 結論

本報では、直散分離式の精度に影響を与える要因として天空放射輝度分布の不規則性と雲の状態に着目していくつかの視点からこの気

表2 雲の状態による補正を加えた法線面直達日射量の予測精度比較

直散分離 Model	RMSE[W/m ²]		MBE[W/m ²]	
	補正前	補正後	補正前	補正後
前報 ¹⁾ (6)式	70.5	65.7	5.0	0.0
中山&石野 ⁶⁾	76.4	64.1	-29.5	-18.2
渡辺 ⁷⁾	69.9	68.0	15.2	22.5
Erbs ¹⁰⁾	77.6	68.8	-25.9	-9.9
宇田川 ¹¹⁾	71.1	64.3	-3.2	3.2
稲沼 ¹²⁾	82.4	68.3	-29.1	-18.8

象要素の特性を検証した。放射輝度分布の不規則性については、All Sky Model-R を用いた指標を提案し、不規則性指標の大きいときほど直散分離式の精度が得られにくい傾向があることを示した。

雲の状態については雲の状態の月別出現特性、組合せによる出現頻度、そのときの日射状況と直散分離精度を示した。その結果、東京においては雲の状態の観測値の組合せの種類はそれほど多くはなく、下層積雲の発生する場合や快晴時の直散分離精度を向上させることが全体としての直散分離精度につながる可能性があることが示唆された。暫定的な補正モデルを適用した結果、法線面直達日射量の推定精度はRMSEで約2~14 W/m²の改善が見られた。

実際には放射輝度分布のデータの入手性の問題、雲の観測における目視観測ゆえの個人差、不連続性などが問題点として挙げられる。

【記号表】

I_{TH}	: 全日射量	[W/m ²]
I_{DN}, I_{SH}	: 法線面直達日射量、水平面拡散日射量	[W/m ²]
I_0	: 大気圏外日射量	[W/m ²]
h	: 太陽高度	[rad]
am	: エアマス (Kasten 1989)	[-]

$$am = 1 / \{ \cos Z + 0.50572(96.07995 - Z_d)^{-1.6364} \} \quad (9)$$

Z, Z_d : 天頂角 [rad, deg]

添え字 $meas, pred$: 観測値、予測値

RMSE: Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\sum^n (\text{予測値} - \text{観測値})^2 / n} \quad (10)$$

MBE: Mean Bias Error

$$MBE = \sum^n (\text{予測値} - \text{観測値}) / n \quad (11)$$

参考文献

- 1) 中山哲士, 石野久彌. 日射の短時間変動と直散分離の予測精度に関する検討 日射の直散分離に影響を及ぼす気象要素の特性研究(その1). 日本建築学会環境系論文集, No. 599, pp. 47-52, 2006.1.
- 2) 井川憲男, 中村洋, 古賀靖子, 松澤朋子. 全日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布. 日本建築学会環境系論文集, No. 573, pp. 33-40, 2003.11.
- 3) 井川憲男, 松澤朋子, 古賀靖子. All Sky Model-R と All Sky Model-L の既往のモデルとの比較. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp. 57-58, 2004.8.
- 4) 中山哲士, 石野久彌. 放射輝度の不規則性と直散分離式の推定精度に関する研究. 日本建築学会学術講演会梗概集, 環境工学 II, pp. 1065-1066, 2005.9.
- 5) 中山哲士, 石野久彌. 東京における雲の特性と日射の直散分離精度向上の可能性に関する検討. 日本建築学会学術講演会梗概集, 環境工学 II, pp. 1095-1096, 2006.9.
- 6) 中山哲士, 石野久彌. 天空放射輝度分布を考慮した直達・拡散日射量の推定法に関する研究. 日本建築学会計画系論文集, No. 557, pp. 33-39, 2002.7.
- 7) 渡辺俊行, 浦野良美, 林徹夫. 水平面全日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定. 日本建築学会計画系論文集, No. 330, pp. 96-108, 1983.8.
- 8) R. R. Perez, P. Ineichen, E. L. Maxwell, R. D. Seals, and A. Zelenka. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. *ASHRAE Transaction-Research Series*, pp. 354-369, 1992.
- 9) 武田康雄. 楽しい気象観測図鑑. 草思社, 2005.8.

- 10) D. G. Erbs, S. A. Klein, and J. A. Duffie. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, Vol. 28, No. 4, pp. 293-302, 1982.
- 11) 宇田川光弘, 木村建一. 水平面全日射量観測値よりの直達日射量の推定. 日本建築学会論文報告集, No. 267, pp. 83-89, 1978.5.
- 12) 稲沼實, 武田仁. 長期観測データに基づく日射の直散分離に関する実証的研究. 日本建築学会環境系論文集, No. 575, pp. 41-46, 2004.1.

(2006年3月24日原稿受理, 2006年10月5日採用決定)