日射量を用いた CIE 標準一般天空の天空タイプ推定手法に関する研究

STUDY ON IDENTIFYING THE SKY TYPES RECOMMENDED AS CIE STANDARD GENERAL SKY BY MEASURED FLUX OF SOLAR RADIATION

細淵 勇人*¹, 吉田 治典*², 上谷 芳昭*³

Hayato HOSOBUCHI, Harunori YOSHIDA and Yoshiaki UETANI

In this paper, by using the sky luminance distribution model of the CIE standard general sky in place of the measured sky radiance distribution, the authors propose the method of identifying the sky types of the CIE standard general sky using values of horizontal global sky radiation (E_{gh}), normal direct solar radiation (E_{dn}), without measuring the sky radiance distribution which is measured rarely.

1) The sky type of CIE standard general sky is determined by the set of parametrised Gradation and Indicatrix functions. So, to identify the set of parameter values of Gradation function and that of Indicatrix function, the regression curves are fitted to the correlation between the sun's height and E_{gh} in Gradation functions and the correlation between E_{dn} and E_{gh} in Indicatrix functions respectively in each sky types.

2) Using the relation between the fitted regression curves and the sun's height and i) E_{gh} in Gradation function, and ii) E_{dn} in Indicatrix function, the set of parameter values of Gradation function and that of Indicatrix function are identified.

By the each set of parameter values of two functions, the sky type is identified. And, using the sky radiance distribution of the identified sky type, the vertical irradiance values are calculated.

Keywords : Sky Radiance Distribution, CIE Standard General Sky, Sky Type, Vertical Irradiance

天空放射輝度分布, CIE 標準一般天空, 天空タイプ, 鉛直面日射量

1. 序

昼光・日射分野の気象モデルの研究では, 天空輝度分布, 天空放射輝度分布を, 晴れから曇りに至る天空状態の違いを考慮し, いくつかの天空タイプに分類してモデル化するのが一般的である¹⁾²⁾. これらのモデルのうち, 輝度階調関数 (Gradation function) と散乱関数 (Indicatrix function) という二つの関数によって, 晴天空から曇天空を 15 の天空タイプで表す Kittler, Perez ら⁴⁾ の相対天空輝度分布のモデルは国際照明委員会 (Commission Internationale De L'eclairage(CIE)) により標準一般天空⁵⁾ として採用されている.

筆者らは, 熱環境予測において現在一般的に様であると仮定される天空放射輝度分布に, この標準一般天空モデルを流用し, 次のことを示した⁶⁾. 1) 15 の天空タイプと測定値との差の RMSE (Root Mean Square Error) によって, 測定された天空放射輝度分布に一番近い天空タイプ (近似タイプ) を決定すれば, これより実際の天空放射輝度分布から得られる方位別鉛直面日射量により近い精密な方位別鉛直面日射量が求められる. 2) 15 の天空タイプを出現頻度の高い 5 つの天空タイプに集約して方位別鉛直面日射量を求めても, 測定された天空放射輝度分布より求めた方位別鉛直面日射量に対する相対誤差に大きな差はない.

天空タイプの推定には天空放射輝度分布の測定値が必要であるが,

天空放射輝度分布は通常測定されていないため, 他の地域の分布を推定するには, 通常よく測定されている気象要素を用いて, 天空タイプを推定する手法の開発が必要である. そこで本報では, 1) 水平面全日射量や, 法線面直達日射量といった気象要素と, 天空放射輝度分布の測定値に最も近い天空タイプ (近似タイプ) の関係を見出して, その関係より天空タイプを推定する手法を開発し, 2) 推定した天空タイプを用いて東西南北四方位の鉛直面日射量を求め, 天空放射輝度分布測定値から得られた方位別鉛直面日射量に対する相対誤差を分析し, その精度より本手法の妥当性を検証する.

2. 日射量・天空放射輝度分布の測定値

本研究では, CIE の国際昼光測定プログラム (CIE-IDMP(International Daylight Measurement Programme)) に準拠して, 京都大学で測定を行っている気象データのうち, 2001 年 1 月 1 日から 2001 年 12 月 31 日までの 1 年間の天空放射輝度分布, 天空輝度分布, 水平面全日射量, 法線面直達日射量データを用いて分析を行う. 表 1 に測定項目及び測定機器, 表 2 に測定地点の概要を示す. 分析に先立ち, 毎日 4:00 から 19:00 まで (6 月以降は 20:00 まで) の時間帯において 15 分間隔で自動測定した天空放射輝度と天空輝度分布の測定値, 及び全日射計および直達日射計の 1 分間隔

*¹ 京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻
博士課程・工修

*² 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授・工博

*³ 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 助教授・工博

Graduate Student, Dept. of Global Environmental Eng., Grad. of Eng., Kyoto University, M. Eng.

Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Grad. of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Grad. of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

測定値に対して、補正^{注1)}及びCIEガイドによるデータの品質管理テスト⁷⁾⁸⁾を適用し、上記の測定値のうちの一つでも不合格となった時間の測定値は分析対象から除外する。また太陽高度が5°以下の時刻の測定値については周辺事物の影響を受けていると考え、これも除外する。

3. 天空タイプと日射量

3.1 Gradation, Indicatrix グループと日射量

Kittler, Perezらによれば、CIE標準一般天空を構成する輝度階調関数(Gradation function, 式(1), (2))とは天頂を中心とする円状の輝度分布を、散乱関数(Indicatrix function, 式(3), (4))とは太陽(位置)を中心とする円状の輝度分布を表す関数のことをいう⁵⁾。天空タイプと日射量との関係の分析には、それぞれの分布を表現する輝度階調関数、散乱関数の各グループと気象要素との関係进行分析の方が、その関係をより明確に見出せると考える。本報は、通常よく測定されている気象要素から天空タイプを容易に推定する手法の開発を目的とするため、天空要素の高度に依存する輝度階調関数(Gradation function)では、より一般的に測定されている気象要素である水平面全天日射量 E_{eg} を、太陽高度、太陽方位といった太陽位置の関数である散乱関数(Indicatrix function)では、太陽位置に関する法線面直達日射量 E_{es} をそれぞれ分析対象とする。

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad (1)$$

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (2)$$

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left[\exp(d\chi) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \quad (3)$$

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[\exp(dZ_s) - \exp\left(d\frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (4)$$

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos|\alpha - \alpha_s|) \quad (5)$$

ここで、

- χ : 太陽と天球上任意点の角距離[rad]
- Z : 天球上任意点の天頂角[rad]
- Z_s : 天頂からの太陽高度[rad]
- a, b : 輝度階調関数のパラメータ[-]
- c, d, e : 散乱関数のパラメータ[-]
- α : 天球上任意点の方位角[rad]
- α_s : 太陽方位角[rad]

図1a)に、測定された天空放射輝度分布と15の天空タイプとのRMSEにより決定した近似タイプ⁶⁾のGradation I~VIグループと、同時刻の水平面全天日射量 E_{eg} [W/m²] (スカイキャナ測定開始時刻の瞬時値)との関係を、図1b)にはIndicatrix 1~6グループと法線面直達日射量 E_{es} [W/m²] (E_{eg} と同様)の関係を示す。

図1a)から、Gradationには、グループの番号が大きくなるほど水平面全天日射量 E_{eg} が大きくなり、かつ E_{eg} の分散が減るという傾向が見られる。グループI, II, グループIII, IV, グループV, VIそれぞれの E_{eg} のとり範囲は、グループで明確に分離されない。また図1b)からIndicatrixも、Gradationと同様にグループの番号が大きくなるほど E_{es} は大きくなる傾向があるが、グループ4では、観測される E_{es} の分散が特に大きい。

表1 測定項目及び測定機器

測定項目	測定機器	備考
天空放射輝度分布[W/m ² ・sr]	スカイキャナ(EKO製 MS-301LR)	半開口角 5.5°
天空輝度分布[kcd/m ²]	スカイキャナ	測定天空要素数: 145
水平面全天日射量[W/m ²]	精密全天日射計(EKO製 MS-801)	-
法線面直達日射量[W/m ²]	直達日射計(EKO製 MS-52) 太陽追尾装置(EKO製 STR-02A)	半開口角 2.5° -

表2 測定地点の概要

測定地点	所在地	緯度・経度・海拔
京都大学 工学部 7号館屋上	京都市 左京区 吉田本町	北緯 35° 1' 東経 135° 47' 海拔 90m

図1 Gradation, Indicatrix と日射量測定値の関係

以上のように、Gradation, Indicatrixとともにグループの番号が大きくなるほど日射量は大きくなるが、その分散が大きかったり、日射量の範囲が、他のグループの日射量の範囲と明確に分離されないグループが見られるため、図1のような散布図では近似タイプと日射量の関係を明らかにすることは困難である。そこで日射量とGradation, Indicatrixの各グループの関係をより明確に把握するために、Gradation, Indicatrixの各グループに対応する日射量の平均値を太陽高度幅 5° ごとに求め、その平均値とGradation, Indicatrixの各グループの関係を分析する。図2に示すように、Gradation, Indicatrixともに同じ高度に対し、グループの番号が大きくなるほど日射量の平均値は大きくなる。

3.2 日射量の分析

天空放射輝度分布は毎正時から15分間隔で、水平面全天日射量 E_{eg} 、法線面直達日射量 E_{es} は同じく1分間隔で測定を行っている。スカイスキャナによる天空放射輝度分布の測定にはおよそ2分40秒を要するので、この間に日射量の測定は3回行われる。天空タイプをより精度良く決定する日射量を選定するためには、この3回の測定で得られる日射量測定値のうちから、その時刻の近似タイプと相関が最も高いものがどれであるかを把握する必要がある。また、水平面全天日射量 E_{eg} 、法線面直達日射量 E_{es} は、例えば太陽を覆うような雲が存在するとその値は短時間のうちに変化することもあるが、天空放射輝度分布を考えた場合、局所的な雲の出現等が、分布全体にもたらす変化は大きくないことも考えられる。このため天空放射輝度分布と日射量との関係を分析する際には、ある時刻の天空放射輝度分布を表す天空タイプと日射量との瞬間的な関係だけではなく、その時刻の前後で測定された日射量の影響も考慮して関係を分析する必要がある。

そこで、図3に示すように、スカイスキャナ測定開始後0, 60, 120secを中心として、それぞれ前後420secの範囲で0, 180, 300, 420, 540, 660, 780, 900secと平均化時間を変えて、 E_{eg} , E_{es} の平均値をGradation, Indicatrix各グループごとに算出し、 E_{eg} , E_{es} 測定値に代えて分析用データ E_{eg}' , E_{es}' とする（つまり、各平均化時間ごとに E_{eg} , E_{es} 測定値と同数の E_{eg}' , E_{es}' を分析のために造成する）。天空タイプとの相関が最も高くなるものを明らかにするためにこの値の標準偏差を平均化時間ごとに求める。標準偏差が大きいほど、ある天空タイプに対応する日射量の値に散らばりがあり、天空タイプ(Gradation, Indicatrixの各グループ)と日射量との関係が小さい。以下に、標準偏差の算出方法を示す。

標準偏差の算出に際し、まず各平均化時間について、Gradation, Indicatrixの各グループの太陽高度幅 5° ごとに E_{eg}' , E_{es}' の平均値 $\overline{E_{eg}}_{gn,m,\bar{i},T}$, $\overline{E_{es}}_{in,m,\bar{i},T}$ を求める。

$$\overline{E_{eg}} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{eg}'}{N} \quad (6)$$

※ E_{es}' の場合も同様に算出する。

(以下(7)～(10), (17)式についても E_{eg}' の場合のみ示す。)

ここで

E_{eg}' : 各平均化時間で平均した水平面全天日射量[W/m²]
 E_{es}' : 各平均化時間で平均した法線面直達日射量[W/m²]

図2 日射量測定値の太陽高度 5° 毎の平均値

図3 近似タイプを決定したRMSEの分布

$\overline{E_{eg}}$: 太陽高度幅 5° ごとの E_{eg}' の平均値[W/m²]

$\overline{E_{es}}$: 太陽高度幅 5° ごとの E_{es}' の平均値[W/m²]

N : 日射量の標本数[-]

【添え字】

gn : GradationグループのNo. [-] ($gn=1 \sim 6$)

in : IndicatrixグループのNo. [-] ($in=1 \sim 6$)

$\bar{i}$: 平均の中心時刻[sec] ($\bar{i}=0, 60, 120$)

T : 平均化時間[sec]

($T=0, 180, 300, 420, 540, 660, 780, 900$)

m : $5 < h \leq 10$ ($m=1$) から $75 < h \leq 80$ ($m=15$) の太陽高度帯No. [-] ($m=1 \sim 15$)

i : 標本数[-]

次にGradation, Indicatrixの各グループの太陽高度幅 5° ごとに E_{eg}' , E_{es}' の標準偏差 $SDg_{gn,m,\bar{i},T}$, $SDi_{in,m,\bar{i},T}$ を求める。

$$SDg = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{eg}' - \overline{E_{eg}})^2}{N-1}} \quad (7)$$

求めた標準偏差 $SDg_{gn,m,\bar{i},T}$, $SDi_{in,m,\bar{i},T}$ には、Gradation, Indicatrixの各グループごとに、 E_{eg}' , E_{es}' の平均値、天空タイプの出現頻度に違いがあるため、太陽高度幅 5° ごとに、 E_{eg}' , E_{es}' の平均値、Gradation, Indicatrix各グループの出現頻度で重み付けを行い、これを重み付け標準偏差 $SDg'_{gn,\bar{i},T}$, $SDi'_{in,\bar{i},T}$ とする。

$$SDg' = \sum_{m=1}^{15} (SDg \times \frac{1}{\overline{E_{eg}}} \times \frac{N}{\sum_{m=1}^{15} N}) \quad (8)$$

求めた重み付け標準偏差 $SDg'_{gn,\bar{i},T}$, $SDi'_{in,\bar{i},T}$ の比較には、

$\bar{t}=0[\text{sec}]$, $T=0[\text{sec}]$ (測定開始時刻の瞬時値) の重み付け標準偏差 $SDg'_{gn,0,0}$, $SDi'_{in,0,0}$ で標準化した基準化標準偏差 $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$, $\widehat{SDi}_{in,\bar{t},T}$ を用いる.

$$\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T} = \frac{SDg'_{gn,\bar{t},T}}{SDg'_{gn,0,0}} \quad (9)$$

図4, 5にそれぞれ Gradation, Indicatrix 各グループの Eeg' , Ees' の基準化標準偏差 $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$ [-], $\widehat{SDi}_{in,\bar{t},T}$ [-] を示す. $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$, $\widehat{SDi}_{in,\bar{t},T}$ が大きいほど, ある天空タイプに対応する日射量の値にちがひがあり, 天空タイプ (Gradation, Indicatrix の各グループ) と日射量の値の関係が小さくなることを意味する.

図4a)によると Gradation グループ I, II では, 平均化時間 T の違いによる Eeg' の基準化標準偏差 $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$ の変化はほとんど見られないが, グループ III では, 平均の中心 $\bar{t}$ が 0, 60, 120sec それぞれにおいて, 平均化時間 T が長くなるにつれ $\widehat{SDg}_{3,\bar{t},T}$ が小さくなっていく. グループ V, VI では, $\bar{t}=0, 60, 120[\text{sec}]$ それぞれに対し $T=0[\text{sec}]$ で $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$ が一番大きく, $T=540 \sim 780[\text{sec}]$ で最小となる. グループ IV では, $\bar{t}=0, 60, 120[\text{sec}]$ それぞれで $T=0[\text{sec}]$ で $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$ が一番大きいのはグループ V, VI と同様であるが, T が長くなるにつれ $\widehat{SDg}_{4,\bar{t},T}$ は小さくなり, $T=420[\text{sec}]$ の場合に最小となる (図4b). この $\widehat{SDg}_{4,\bar{t},T}$ の減少は他の Gradation グループと比べて大きく, $T=900[\text{sec}]$ の場合に $\widehat{SDg}_{4,\bar{t},T}$ はおよそ 0.8 となる.

図5a) の Indicatrix グループ 1, 2, 3 の場合, グループ 2, 3 では T が長くなるに従って Ees' の基準化標準偏差 $\widehat{SDi}_{in,\bar{t},T}$ は小さくなる傾向が見られるが, グループ 1 では T が長くなるに従って $\widehat{SDi}_{1,\bar{t},T}$ が増加する傾向があり, 1.4 を超えるものも見られる. Indicatrix グループ 4~6 では (図5b)), グループ 4 では T が長くなるに従って Ees' の基準化標準偏差 $\widehat{SDi}_{4,\bar{t},T}$ は小さくなる傾向があるが, グループ 5, 6 では, 逆に T が長くなるに従って $\widehat{SDi}_{in,\bar{t},T}$ が増加する傾向が見られる.

次に, グループごとに求めた $\widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T}$, $\widehat{SDi}_{in,\bar{t},T}$ を Gradation, Indicatrix それぞれで平均し, Eeg' , Ees' の基準化標準偏差 $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$, $\overline{SDi}_{\bar{t},T}$ を求める.

$$\overline{SDg}_{\bar{t},T} = \sum_{gn=1}^6 \widehat{SDg}_{gn,\bar{t},T} / 6 \quad (10)$$

さらに, 日射量の平均化時間を Gradation, Indicatrix で統一するため, $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$ と $\overline{SDi}_{\bar{t},T}$ との平均し, 基準化標準偏差 $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$ を求める.

$$\overline{SDg}_{\bar{t},T} = (\overline{SDg}_{\bar{t},T} + \overline{SDi}_{\bar{t},T}) / 2 \quad (11)$$

図6に示すように $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$ では, $\bar{t}$ にかかわらず, 概ね T が長くなるに従い, $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$ の値が小さくなる傾向が見られる. 一方, $\overline{SDi}_{\bar{t},T}$ は, $T=300 \sim 540[\text{sec}]$ までは, T が長くなるに従い減少するが, さらに T が長くなると増加に転じる傾向が見られる.

$\overline{SDg}_{\bar{t},T}$, $\overline{SDi}_{\bar{t},T}$ の平均である $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$ の変化を見ると, $T=300$

図5 Indicatrix 各グループの基準化標準偏差

図6 基準化標準偏差の変化

~540[sec] では, T が長くなるに従い減少するが, さらに T が長くなってもあまり変動は見られなくなる. $\overline{SDg}_{\bar{t},T}$ が最小となるのは, $\bar{t}=120[\text{sec}]$, $T=660[\text{sec}]$ の場合である. 以上より, 本研究では, スカイキャナ測定開始後 120sec を中心とした前後 300sec ($T=660[\text{sec}]$) の日射量を平均した値と天空タイプの関係进行分析することとする.

4. 天空タイプ推定手法

4.1 近似タイプ決定の RMSE

既報⁹⁾では, 測定された天空放射輝度分布に一番近い天空タイプを $RMSE^{(注2)}$ を規範として決定し, これを近似タイプと定義した. しかし $RMSE$ が小さくその天空タイプに類似度の高い天空状態もあれば, $RMSE$ が大きく類似度が低いものもある. 図7に各近似タイプの $RMSE$ の累積度数分布を示す. 例えば, 累積度数 80% に達する $RMSE$ が 0.3 (天空タイプ 3) から, 0.7 (天空タイプ 15) までである. 前者は主に曇天の天空タイプ (天空タイプ 3, 1), 後者は晴天の天空タイプ (天空タイプ 15, 14) である. 近似タイプを決定する $RMSE$

図7 近似タイプを決定した RMSE の分布

の閾値を小さくするほど標準一般天空の天空タイプにより近くなるが、その一方で度数が低下し、十分な度数を確保できない天空タイプが出現し、信頼度が落ちる。そこで本報では各天空タイプに対するRMSEの累積度数上位10%に入る観測値だけを用いて分析を行う。(図7 領域*)。

4.2 境界曲線による天空タイプ推定

図2に示すように、Gradation, Indicatrixともに同じ高度に対し、グループの番号が大きくなるほど日射量の平均値は大きくなる。各天空タイプに対するRMSEの累積度数上位10%に入る類似度のより高い近似タイプのGradation, IndicatrixグループとEeg', Ees'を用い、図2の場合と同様に、太陽高度幅5°ごとに同一高度帯と定めて、Eeg', Ees'の平均値を求める(図8)。一部の高度帯で平均値が逆転するところも見られるが、図2と同様に各高度帯でグループ番号が大きいのから順に並んでいる。そこで各グループ間に、以下の手順により境界を求めて、Gradation, Indicatrixの各グループを推定することとする。

- 1) Gradation, Indicatrixの各グループにおいて、近似タイプ決定の際のRMSEが上位10%の時刻の近似タイプ、日射量を分析に用い、その他の時刻のデータは除外する。
- 2) 太陽高度帯5°ごとに、各グループのEeg', Ees' ($t_i=120[\text{sec}]$, $T=660[\text{sec}]$ の平均値)の平均を求める。
- 3) 太陽高度帯毎に、隣あうグループの平均値の中間値 Eeg_{med} , Ees_{med} を求める。
- 4) Gradation I, IIの太陽高度70°の帯域のように平均値の逆転する場合は、3)で求める Eeg_{med} , Ees_{med} は存在しないものとする。
- 5) 3)で求めた Eeg_{med} , Ees_{med} を以下(12)~(15)式のように、太陽高度 h の3次及び2次の関数で近似して、これをグループ推定の為の境界^{注3)}とする。これをそれぞれGradation境界曲線、Indicatrix境界曲線と定義する。

i) Gradation 境界曲線 :

$$3\text{次}: B_{g,3} = a_{g,1} \cdot h^3 + a_{g,2} \cdot h^2 + a_{g,3} \cdot h + b_g \quad (12)$$

$$2\text{次}: B_{g,2} = a_{g,1} \cdot h^2 + a_{g,2} \cdot h + b_g \quad (13)$$

ii) Indicatrix 境界曲線 :

$$3\text{次}: B_{i,3} = a_{i,1} \cdot h^3 + a_{i,2} \cdot h^2 + a_{i,3} \cdot h + b_i \quad (14)$$

$$2\text{次}: B_{i,2} = a_{i,1} \cdot h^2 + a_{i,2} \cdot h + b_i \quad (15)$$

ここで、

h : 太陽高度[°]

$a_{g,1}, a_{g,2}, a_{g,3}, b_g$: Gradation境界曲線の係数[-]

$a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, b_i$: Indicatrix境界曲線の係数[-]

表3にGradation境界曲線の係数を、表4にIndicatrix境界曲線の係数を、図9に3次のGradation, Indicatrix境界曲線と各グループの出現領域を示す。

境界曲線の次数選択

以上のような3次、2次のGradation, Indicatrix境界曲線のモデルについて、それぞれ以下に示すAIC (Akaike's Information Criterion)¹⁰⁾を求め、これが小さくなる次数のものを、グループ推定の為の境界曲線の最適モデルとして選択する。

表3 境界曲線の係数 (Gradation 15タイプ)

GRADATION					
3次		$a_{g,1}$	$a_{g,2}$	$a_{g,3}$	b_g
	I-II	-0.0021	0.35	-10.84	170.93
	II-III	-0.0021	0.31	-4.87	99.05
	III-IV	0.0004	-0.11	17.62	-142.95
	IV-V	-0.0012	0.07	14.11	-93.63
2次		$a_{g,1}$	$a_{g,2}$	$a_{g,3}$	b_g
	I-II	0.0583	0.98	-	34.35
	II-III	0.0070	8.01	-	-51.42
	III-IV	-0.0574	15.67	-	-122.63
	IV-V	-0.0823	19.50	-	-150.78
	V-VI	-0.1391	24.08	-	-181.91

表4 境界曲線の係数 (Indicatrix 15タイプ)

INDICATRIX					
3次		$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	b_i
	1-2	0.0001	-0.02	0.82	-7.31
	2-3	0.0009	-0.16	9.09	-82.30
	3-4	0.0019	-0.32	17.05	-79.19
	4-5	0.0030	-0.54	29.20	-67.36
2次		$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	b_i
	1-2	-0.0009	0.24	-	-1.36
	2-3	-0.0379	4.21	-	-32.40
	3-4	-0.0583	6.84	-	23.61
	4-5	-0.1287	13.30	-	92.61
	5-6	-0.1729	18.03	-	116.71

図9 境界曲線と各グループの出現領域 (3次)

表5 Gradation 境界曲線の AIC, 残差平方和, データ数

	2次			3次			選択すべきモデル
	AIC	残差平方和	データ数	AIC	残差平方和	データ数	
Gradation	I-II	79.91	16211.50	10	81.08	14919.44	10
	II-III	74.57	5607.53	11	72.06	3721.33	11
	III-IV	59.79	2167.51	10	61.71	2150.69	10
	IV-V	68.25	3155.65	11	69.72	3007.98	11
	V-VI	86.70	9997.76	12	77.83	4040.32	12
average	73.84	7427.99		72.48	5567.95		3次

表6 Indicatrix 境界曲線の AIC, 残差平方和, データ数

	2次			3次			選択すべきモデル
	AIC	残差平方和	データ数	AIC	残差平方和	データ数	
Indicatrix	1-2	27.96	64.87	15	27.16	53.81	15
	2-3	103.01	9654.69	15	103.75	8877.57	15
	3-4	99.91	11466.46	14	97.72	8499.63	14
	4-5	113.87	31071.84	14	112.19	23887.08	14
	5-6	72.43	7674.86	10	73.45	6958.05	10
average	83.44	11986.54		82.85	9655.23		3次

図10 鉛直面日射量相対誤差の月平均

$$AIC = N \log(Q/N) + 2(p+1) \quad (16)$$

$$Q = \sum (E_{g,med} - B_{g,p})^2 \quad (17)$$

ここで、

 Q : 残差平方和 $E_{g,med}$: 太陽高度帯毎の中間値 (日射量) $B_{g,p}$: モデルによる各太陽高度帯の日射量 p : モデル次数 N : データ数

表5, 6にGradation, Indicatrix境界曲線のAIC, 残差平方和, データ数を示す。AICについてはGradation, Indicatrixの各5本の境界曲線についてそれぞれ求める。

AICは、2次あるいは3次のものの一方がすべての境界曲線について小さくならない。このため、Gradation, Indicatrix境界曲線について、2次, 3次のAICの平均を求める。これによればGradation, Indicatrix境界曲線ともに、3次のモデルのAICが小さくなる。以上より境界曲線の次数は3次とする。

4.3 鉛直面日射量^{注4)}

境界曲線により推定したGradation, Indicatrixの各関数のグループから推定した天空タイプより、東西南北四方位の鉛直面日射量を求め、スカイスキャナにより測定された天空放射輝度分布によって求めた鉛直面日射量 $I_{m,sh}$ [W/m²]に対する相対誤差と比較することで、この推定手法の妥当性を検証する。

$I_{m,sh}$ に対する $I_{i-15,sh}$, $I_{u,sh}$, 既報で求めた近似タイプの場合の鉛直面日射量 $I_{c,sh}$ それぞれの相対誤差^{注5)} $I_{i-15,re}$, $I_{u,re}$, $I_{c,re}$ の各月平均値を求め、比較を行う。

図10から、全方位について一様天空の場合と比べ精度良く鉛直面日射量を求めることができていくことがわかる。

南面では、 $I_{i-15,re}$ は、一年を通し概ね±5%未満で、精度は良い。また、一般に熱環境シミュレーションの際に仮定される一様天空の $I_{u,re}$ は冬季に-12.1%, 夏季に+19.5%となり誤差が大きい。

西面では、 $I_{i-15,re}$ は2月に9.0%を超えるが、他の月では概ね+5%未満で精度は良い。また年間の変動は最大で8%程度である。一方、 $I_{u,re}$ は一年を通して10.0%を超え、最小でも12.5% (12月), 最大で27.9% (8月) である。

北面では、 $I_{i-15,re}$ は2月, 11月, 12月に10.0%を超えるなど冬季にやや大きいが、その他の月では概ね+5%程度であり、精度よく鉛直面日射量を求められている。また $I_{u,re}$ は一年を通して20.0%を超え、最小でも21.3% (7月), 最大で38.2% (2月) となり、 $I_{i-15,re}$

と比べ格段に大きい。

東面では、 $I_{i-15,re}$ は、冬季に (2月6.8%) やや大きくなるものの、一年を通し概ね±5%以下と小さい。 $I_{c,re}$ と比べても冬季にやや大きくなる以外はほぼ同程度の値を示しており、精度よく鉛直面日射量を求められている。これに比べ $I_{u,re}$ は一年を通し概ね+15%以上と大きい。

以上のように、相対誤差 $I_{i-15,re}$ は北面, 西面で冬季にやや大きいが、概ね±5%未満であり、精度はよい。既報で求めた $I_{c,re}$ と比較しても遜色の無いモデルである。一方、現在一般的に用いられている一様天空の場合と比べると相対誤差は十分小さい。

5. 天空タイプ5タイプの推定

5.1 境界曲線による天空タイプ推定

既報⁶⁾で示したように、近似する天空タイプを15から出現頻度の低い順に減少させてゆくと、鉛直面日射量のRMSEは天空タイプの数が5以上では大きな変化は無いが、4以下になると南, 西面ではそれまでより約10[W/m²]大きくなり、東面ではRMSEの季節差が2.3倍になるなど急に誤差が大きくなる傾向が見られた。CIE標準一般天空の天空タイプは15タイプに規定されているが、天空タイプの数を15から減らすことができれば、より少ない天空タイプを推定すればよいことになり、推定が容易になると考える。そこで本報では、既報に基づき天空タイプを5つに集約した場合に天空タイプ推定手法を適用する。集約した5つの天空タイプは1, 8, 13, 14, 15である。天空タイプ1の輝度階調関数, 散乱関数グループの組み合わせはIと1であり、天空タイプ8, 13, 14, 15の組み合わせはそれぞれIIIと4, Vと5, VIと5, VIと6である。これより、集約した5つの天空タイプを推定するには、輝度階調関数 (Gradation) グループではI, III, V, VIを、散乱関数 (Indicatrix) グループでは1, 4, 5, 6をそれぞれ水平面全天日射量 E_g , 法線面直達日射量 E_s から推定すればよいことになる。このためGradationグループではI-III, III-V, Indicatrix

図11 天空タイプの境界曲線と出現領域 (5タイプ)

図12 鉛直面日射量相対誤差の月平均

グループでは1-4の境界曲線を新たに求める。

図11に境界曲線と各グループの出現領域を示す。この時の境界曲線は以下の様になる。境界曲線の係数の表中網掛け太文字のものが新たに求め Gradation, Indicatrix 境界曲線の係数である。

i) Gradation 境界曲線 :

$$3 \text{ 次} : B_{g,3} = a_{g,1} \cdot h^3 + a_{g,2} \cdot h^2 + a_{g,3} \cdot h + b_g \quad (18)$$

ここで,

	$a_{g,1}$	$a_{g,2}$	$a_{g,3}$	b_g
I-III	-0.0003	0.06	4.62	-9.51
III-V	-0.0025	0.26	4.68	6.88
V-VI	-0.0028	0.24	9.64	-44.82

ii) Indicatrix 境界曲線 :

$$3 \text{ 次} : B_{i,3} = a_{i,1} \cdot h^3 + a_{i,2} \cdot h^2 + a_{i,3} \cdot h + b_i \quad (19)$$

ここで,

	$a_{i,1}$	$a_{i,2}$	$a_{i,3}$	b_i
1-4	0.0019	-0.29	13.41	-45.23
4-5	0.0030	-0.54	29.20	-67.36
5-6	-0.0021	0.16	1.82	355.83

5. 2 鉛直面日射量

境界曲線により推定した天空タイプを用いて鉛直面日射量 $I_{i-5,sh}$ を求め、 $I_{m,sh}$ に対する相対誤差 $I_{i-5,re}$ の各月平均値を求め、精度の検証を行う。図12に測定値より求めた鉛直面日射量 $I_{m,sh}$ に対する、本手法で求めた鉛直面日射量 $I_{i-5,sh}$ 、一様天空の鉛直面日射量 $I_{u,sh}$ の相対誤差 $I_{i-5,re}$ 、 $I_{u,re}$ の各月平均値を示す。

南面では、 $I_{i-5,re}$ は3月から8月は-5%以下であり、精度よいが、冬季には $I_{u,re}$ と同程度となり、11月、12月には15%程度と精度が悪くなる。

西面では、 $I_{i-5,re}$ は、9月に-5.8%となり他の月と比べやや大きくなるものの、それ以外の月は±5%未満であり、精度よく鉛直面日射量を求められている。

北面では、 $I_{i-5,re}$ は、2月に10.0%を超えるものの、その他の月では精度よく、一年を通して20.0%を超える $I_{u,re}$ と比べても格段に小さく、大きな年間変動も見られない。

東面では、 $I_{i-5,re}$ は、一年を通し±5%以下と小さく、精度よく鉛直面日射量を求められている。

また、15タイプ、5タイプの天空タイプを推定し鉛直面日射量を求めた場合のそれぞれについて各方位各月の鉛直面日射量の %RMSE

図13 鉛直面日射量の %RMSE の差

を求め、この差 $\Delta \%RMSE$ より、15タイプの場合からの精度低下を検証する。

$$\%RMSE_5 = 100 \times \frac{\sqrt{\sum (I_{i-5,sh} - I_{m,sh})^2 / k}}{\sum I_{m,sh} / k} \quad (20)$$

$$\%RMSE_{15} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum (I_{i-15,sh} - I_{m,sh})^2 / k}}{\sum I_{m,sh} / k} \quad (21)$$

$$\Delta \%RMSE = \%RMSE_5 - \%RMSE_{15} \quad (22)$$

ここで,

k : 各方位各月の鉛直面日射量計算値の個数 [-]

図13に各方位各月の $\Delta \%RMSE$ を示す。15タイプの場合と比べ5タイプの場合は年間で北面2.8%南面4.1%東面3.6%西面4.1%の精度低下が見られる。季節では東面・西面夏季、南面冬季に $\Delta \%RMSE$ が5%を超えることもあるが、最大でも8.9% (東面 7月) であり、著しく大きくなることはない判断した。

6. 結

散乱関数 (Indicatrix function) のグループと法線面直達日射量 E_{es} 、輝度階調関数 (Gradation function) のグループと水平面全天日射量 E_{eg} の関係を分析し、Gradation, Indicatrix の各グループを推定するための各グループの区分を表す境界曲線を求め、これより天空タイプを推定する手法を開発した。

1) 推定した天空タイプを用いて求めた鉛直面日射量に対する相対誤差を分析した。本報で提案する天空タイプ推定手法を用いた場合

の鉛直面日射量の相対誤差月平均 $I_{i-15, re}$ は、北面、東面で冬季にや
や大きくなる傾向が見られたものの、概ね $\pm 5\%$ 未満であり精度よ
く鉛直面日射量が求められている。従来の一様天空の場合と比べて
もその値は十分小さい。また既報で求めた近似タイプの相対誤差
 $I_{c, re}$ と比較しても著しく大きくなることはなかった。これより本研
究で提案する天空タイプ推定手法の妥当性を示すことができた。

2) 天空タイプ推定手法を、既報で集約した 1, 8, 13, 14, 15 の 5 つ天
空タイプの場合に適用して求めた $I_{i-5, re}$ の相対誤差は南面、北面の
冬季に $\pm 10.0\%$ を超える月も見られたが、15 タイプ、5 タイプ場合
のそれぞれについて各方位各月の鉛直面日射量の $\%RMSE$ を求め、
この差 $\Delta \%RMSE$ より、15 タイプの場合からの精度低下を検証した
ところ、東面・西面夏季、南面冬季に $\Delta \%RMSE$ は 5% を超えること
もあるが、最大でも 8.9% (東面 7 月) であり、著しく大きくな
ることはないと判断した。これより 15 の時と同様集約した天空タイ
プの推定にも本報の天空タイプ推定手法を利用し、精度よく鉛直面
日射量を求められることを示した。

注

注 1) 天空放射輝度・天空輝度分布測定値、及び各種日射計測定値の補正

以下の補正を行った。

① 水平面拡散日射量は、遮蔽バンドの補正を 1 日単位で行う⁹⁾。

② スカイスキャナの測定上限値 (放射輝度 $300 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$ 、輝度 $55,000 [\text{cd}/\text{m}^2]$)
を超える天空要素の放射輝度測定値は、輝度測定値を用いた補正 (参考文献 6 注
記 4 参照)。

③ スカイスキャナ天空要素の第一高度帯 (高度角 6° 、天空要素 No. 1 ~ No. 30) の測
定値は、周辺地物の影響を受けているので、近似タイプの第二高度帯の値を用いた
補正を行う (参考文献 6 注記 6 参照)。

注 2) 近似タイプの $RMSE$

近似タイプの $RMSE$ は既報⁸⁾の (7) 式を用いて計算した。

注 3) Gradation, Indicatrix グループの判定

3 次の境界曲線を求めた時、低高度帯 (10°) で曲線が交差するものが見られた
が、交差領域のグループ判定はグループ番号の小さいものを優先した。

注 4) 鉛直面日射量

スカイスキャナによる天空放射輝度分布測定値、一様天空、天空タイプを用いた
鉛直面日射量の算出方法については、参考文献 6 の 4 章 4 節を参照

注 5) スカイスキャナ測定値から求めた鉛直面日射量に対する相対誤差は以下の式を
用いて算出した。

$$I_{c, re} = \frac{(I_{c, sh} - I_{m, sh})}{I_{m, sh}} \times 100 \quad (23)$$

$I_{u, sh}$ 、 $I_{i-15, sh}$ 、 $I_{i-5, sh}$ の相対誤差については $I_{c, sh}$ に代えて、 $I_{u, sh}$ 、 $I_{i-15, sh}$ 、
 $I_{i-5, sh}$ を用いる。相対誤差は $I_{u, re}$ 、 $I_{i-15, re}$ 、 $I_{i-5, re}$ となる。

【記号表】

χ	: 太陽と地球上任意点の角距離 [rad]
Z	: 地球上任意点の天頂角 [rad]
Z_s	: 天頂からの太陽高度 [rad]
a, b	: 輝度階調関数のパラメータ [-]
c, d, e	: 散乱関数のパラメータ [-]
α	: 地球上任意点の方位角 [rad]
α_s	: 太陽方位角 [rad]
h	: 太陽高度 [$^\circ$]
$\alpha_{g,1}, \alpha_{g,2}, \alpha_{g,3}, b_g$	: Gradation 境界曲線の係数 [-]
$\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}, \alpha_{i,3}, b_i$	: Indicatrix 境界曲線の係数 [-]
$I_{m, sh}$	: スカイスキャナ測定値から求めた鉛直面日射量 [W/m^2]
$I_{c, sh}$	: 決定手法による天空タイプによる鉛直面日射量 [W/m^2]
$I_{u, sh}$	: 一様天空による鉛直面日射量 [W/m^2]
$I_{i-15, sh}$	: 3 次の境界曲線で推定した 15 の天空タイプによる鉛直面日射量 [W/m^2]
$I_{i-5, sh}$	: 3 次の境界曲線で推定した 5 の天空タイプによる鉛直面日射量 [W/m^2]
$I_{c, re}$	: $I_{c, sh}$ の $I_{m, sh}$ に対する相対誤差 [%]
$I_{u, re}$	: $I_{u, sh}$ の $I_{m, sh}$ に対する相対誤差 [%]
$I_{i-15, re}$	: $I_{i-15, sh}$ の $I_{m, sh}$ に対する相対誤差 [%]
$I_{i-5, re}$	: $I_{i-5, sh}$ の $I_{m, sh}$ に対する相対誤差 [%]
Eeg	: 水平面全天日射量測定値 [W/m^2]

Ees	: 法線面直達日射量測定値 [W/m^2]
Eeg'	: 各平均化時間で平均した水平面全天日射量 [W/m^2]
Ees'	: 各平均化時間で平均した法線面直達日射量 [W/m^2]
$\overline{Eeg}$	: 太陽高度幅 5° ごとの Eeg' の平均値 [W/m^2]
$\overline{Ees}$	: 太陽高度幅 5° ごとの Ees' の平均値 [W/m^2]
SDg	: Eeg の標準偏差 [W/m^2]
SDi	: Ees の標準偏差 [W/m^2]
SDg'	: Eeg の重み付き標準偏差 [W/m^2]
SDi'	: Ees の重み付き標準偏差 [W/m^2]
$\overline{SDg}$	: Eeg の基準化標準偏差 [-]
$\overline{SDi}$	: Ees の基準化標準偏差 [-]
$\overline{SDg}$	: Gradation の基準化標準偏差 [-]
$\overline{SDi}$	: Indicatrix の基準化標準偏差 [-]
$\overline{SDgi}$	: 基準化標準偏差 [-]
Q	: 残差平方和 [-]
Eeg_{med}	: 水平面全天日射量の太陽高度帯毎の中間値 [W/m^2]
Ees_{med}	: 法線面直達日射量の太陽高度帯毎の中間値 [W/m^2]
$B_{g,p}$	: 次数 p の Gradation 境界曲線による水平面全天日射量 [W/m^2]
$B_{i,p}$	: 次数 p の Indicatrix 境界曲線による法線面直達日射量 [W/m^2]
p	: モデル次数 [-]
N	: データ数 [-]
k	: 各方位各月の鉛直面日射量データ個数 [-]

【添え字】

gn	: Gradation グループの No. [-] ($gn=1 \sim 6$)
in	: Indicatrix グループの No. [-] ($in=1 \sim 6$)
$\bar{t}$	: 平均の中心時刻 [sec] ($\bar{t}=0, 60, 120$)
T	: 平均化時間 [sec] ($T=0, 180, 300, 420, 540, 660, 780, 900$)
m	: $5 < h \leq 10$ ($m=1$) から $75 < h \leq 80$ ($m=15$) の太陽高度帯 No. [-] ($m=1 \sim 15$)
i	: 標本数 [-]

参考文献

- 1) Perez, R., Seals, R., and Michalsky, J.: All-Weather Model for Sky Luminance Dis-tribution - Preliminary Configuration and Validation, Solar Energy, 50 (3), pp. 235-245, 1993
- 2) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R.: Modeling Day Light Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiancen, Solar Energy, 44 (5), pp. 271-289, 1990
- 3) 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 穴井謙: すべての天空状態の天空放射輝度分布を示す数式と鉛直面日射量の推定, 天空放射輝度分布のモデル化に関する研究 (その 2), 日本建築学会計画系論文集, 第 557 号, pp. 17-24, 2002. 7
- 4) Kittler, R., Perez, R. and Darula, S.: A Set of Standard Skies Characterising Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design, Final Report of U.S.-Slovak Grant Project US-SK 92 052, 1998
- 5) CIE Standard: Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky, CIE S 011.1/E, 2003.
- 6) 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭: 天空放射輝度分布への CIE 標準一般天空の流用と天空タイプの集約, 日本建築学会環境系論文集, 第 583 号, pp. 29-36, 2004. 9
- 7) CIE TC 3-07: Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE, Technical Report 108-1994
- 8) 柴田要, 中村洋, 大鶴徹, 古賀靖子, 田中信之: CIE の昼光測定ガイドによる昼光測定データの品質管理の試み, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 32 号, pp. 37-40, 1991. 3
- 9) 日本建築学会: 建築環境工学実験用教材 I, 環境測定演習編, 1982
- 10) 情報量基準による統計解析入門, 鈴木義一郎, 講談社, 1995

(2006 年 3 月 10 日原稿受理, 2006 年 8 月 9 日採用決定)