絶対値で表す天頂輝度と天空輝度分布

天空輝度分布の分類法の研究 (その4)

ZENITH LUMINANCE AND SKY LUMINANCE DISTRIBUTION
IN ABSOLUTE VALUE

A study on classification method of sky luminance distribution Part 4

井川 憲男*, 中村 洋**, 古賀 靖子***, 古城 真也****

Norio IGAWA, Hiroshi NAKAMURA, Yasuko KOGA
and Shinya KOJO

A numerical equation has been proposed by the authors in the previous papers. It gives the relative values of the sky luminance distribution for all sky conditions. Though the numerical equations for the zenith luminance in absolute value on the various standard skies have been proposed by several researchers to get the sky luminance distribution in absolute value, they do not bring the suitable value for the new equation. A numerical equation on the zenith luminance using the same indices as those of the newly proposed equation has been composed. It has made it possible for the sky luminance distribution in absolute value to be estimated by one of the easiest measurable values, the global illuminance. The result of this research work convinced the authors of its contribution to the progress and development of the prediction technique in the daylight environment. The new equation of the zenith luminance in absolute value is introduced, the process of composing it is explained in detail and the examples of the sky luminance distribution for all sky conditions in absolute values are illustrated in this paper.

Keywords: Sky luminance distribution, Normalized global illuminance, Zenith luminance, All Sky Model

天空輝度分布、正規化グローバル照度、天頂輝度、ALL SKY MODEL

1. はじめに

既報^{1,2,3}で、正規化グローバル照度^{註1}を指標として、相対天空輝度分布である全天型天空輝度分布の推定式を提案した^{註2}。これを実際に応用するには、天空輝度分布とその絶対値を知る必要がある。

天頂輝度は、天空状態などその時々条件によって異なる。また、大気透過率などを指標とし太陽高度の関数として取り扱うことができる。既に多くの研究者により CIE 標準晴天天空や CIE 標準曇天天空や中間天空に対する天頂輝度が数式化され提案されている。

しかし、全天型天空輝度分布に対応できる天頂輝度は提案されていない。また、全天型天空輝度分布は、天空指標として正規化グローバル照度を採用しているため、これと同一の天空指標に基づく全天型天頂輝度の数式化が必要と考える。

本報では、任意の太陽高度の、任意の天空状態の天頂輝度を、そのときの正規化グローバル照度の関数として数式化した天頂輝度を提案する。これを全天型天頂輝度と称することにする。

以上により、水平面グローバル照度により、全ての天空状態における天空輝度とその分布を絶対値で表すことができる。以後、本研究で述べる絶対値で表す全天型天空輝度分布を All Sky Model と称することにする。

2. 既往の天頂輝度の提案式

各種の天空状態の天頂輝度については、多くの研究者が多くの推定式を提案している。CIE のテクニカルレポート⁴では次のようないくつかの推定式を示している。これらの推定式は天候状態により適宜適用するものであるが、その方法は示されていない。

2.1 晴天の天頂輝度

晴天の天頂輝度 L_{zcl} には、次のように多くの提案式がある。

(1) Kittler, R.による晴天の天頂輝度⁵。
$$(\gamma_s < 70 \text{ deg. での } 2.25 < TL < 3.25 \text{ のとき})$$

$$L_{zcl}(\gamma_s) = 0.3 + 3.0 \cdot \tan \gamma_s \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \dots (1)$$

$$\gamma_s : \text{太陽高度} [\text{rad.}], TL : \text{放射大気混濁因子} [-].$$
(2) Dogniaux, R.による晴天の天頂輝度⁶。
$$(\gamma_s < 70 \text{ deg. のとき})$$

$$L_{zcl}(\gamma_s, TL) = (1.234 \cdot TL - 0.252) \cdot \tan \gamma_s + 0.112 \cdot TL - 0.0169 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \dots (2)$$

(3) Krochmann, J.による晴天の天頂輝度⁷。
$$(TL = 2.75 \text{ のとき})$$

$$L_{zcl}(\gamma_s) = 0.1 + 0.063 \cdot \gamma_s + 0.001 \cdot \gamma_s \cdot (\gamma_s - 30) \cdot \exp\{(\gamma_s - 68) \cdot 0.0346\} \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \dots (3)$$

$$\gamma_s : \text{太陽高度} [\text{deg.}].$$

* 梶竹中工務店技術研究所 主任研究員・工博

** 高知女子大学生活科学部 教授・工博

*** 九州大学大学院人間環境学研究院 助教授・工博

**** 西日本技術開発株式会社 工修

Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.
Prof., Faculty of Human Life and Environmental Science, Kochi Women's University, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University, Dr. Eng.
Architecture Dept., West Japan Engineering Consultants, M. Eng.

(4) Liebelt, C.による晴天空の天頂輝度⁸。

($\gamma_s < 60 \text{ deg.}$ で $3.0 < TL < 7.5$ のとき)

$$L_{zcl}(\gamma_s, TL) = (1.34 \cdot TL - 3.46) \cdot \tan \gamma_s + 0.1 \cdot TL + 0.9 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (4)$$

(5) Gusev, J.による晴天空の天頂輝度⁹。

($\gamma_s < 70 \text{ deg.}$ で $5 < TL < 6.5$ のとき)

$$L_{zcl}(\gamma_s) = 0.9 + 6.5 \cdot \tan \gamma_s \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (5)$$

(6) 永田による晴天空の天頂輝度¹⁰。($P_v > 0.75$ ($TvL < 2.9$) のとき)

$$L_{zcl}(\gamma_s, P_v) = \frac{1}{19.6} (2.4 - 1.5 \cdot P_v) \cdot E_{vo} \cdot f(\pi/2 - \gamma_s) \cdot \psi(\gamma_s, P_v) \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (6)$$

$$f(\pi/2 - \gamma_s) = 0.91 + 10 \cdot \exp(-3 \cdot (\pi/2 - \gamma_s)) + 0.45 \cdot \cos^2(\pi/2 - \gamma_s),$$

$$\psi(\gamma_s, P_v) = \frac{P_v^{\cos \gamma_s} - P_v}{1 - \cos \gamma_s},$$

ただし、 $\gamma_s = \pi/2$ の場合、 $\psi(\gamma_s, P_v) = P_v \cdot (-\ln P_v)$ 、
 P_v : 昼光大気透過率 [-]、 TvL : 昼光大気混濁因子 [-]、
 E_{vo} : 大気圏外の法線直射照度 [lx]

(7) LBL による晴天空の天頂輝度¹¹。

($2 \text{ deg.} < \gamma_s < 76 \text{ deg.}$ で $1.5 < TL < 8.5$ のとき)

$$L_{zcl}(\gamma_s, TL) = (1.376 \cdot TL - 1.81) \cdot \tan \gamma_s + 0.38 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (7)$$

(8) Nakamura, H., Oki, M. らによる晴天空の天頂輝度¹²。

$$L_{zcl}(\gamma_s) = 4.47 \cdot \tan^{1.13} \gamma_s + 0.14 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (8)$$

以上の各推定式の多くは、比較的高緯度地域の測定データに基づいて数式化されているので、太陽高度が高い場合の適用には疑問がある。したがって、中村、Rahim は太陽高度が 90° になる赤道直下でも適用可能な下記のような式(8)の修正式を提案している^{13,14,15}。

$$L_{zcl}(\gamma_s) = 6.4 \cdot \tan^{1.18} (0.846 \cdot \gamma_s) + 0.14 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (9)$$

2.2 曇天空の天頂輝度

曇天空の天頂輝度 L_{zoc} には、次のようないくつかの提案式がある。

(1) Krochmann, R.による曇天空の天頂輝度¹⁶。

$$L_{zoc}(\gamma_s) = 0.123 + 8.6 \cdot \sin \gamma_s \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (10)$$

(2) Kittler, R.による曇天空の天頂輝度¹⁷。

$$L_{zoc}(\gamma_s) = 3.990 \cdot (1 + (3/2) \cdot \sin \gamma_s) \cdot \sin \gamma_s \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (11)$$

(3) 中村らによる曇天空の天頂輝度^{13,14,15}。

$$L_{zoc}(\gamma_s) = 15.0 \cdot \sin^{1.68} \gamma_s + 0.07 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (12)$$

2.3 中間天空の天頂輝度

中間天空の天頂輝度 L_{zin} には、若干の提案がある^{4,12,18}。中村らは当初中間天空を次のように提案していた¹²。

$$L_{zin}(\gamma_s) = 0.47 \cdot (4.47 \cdot \tan^{1.13} \gamma_s + 0.14) + 0.66 \cdot (\sin^{1.68} \gamma_s + 0.07) \quad [\text{kcd/m}^2] \quad (13)$$

式(13)は、太陽高度が主として 80° 以下のときの実測値に基づいているので、式(9)を除く上述の各推定式と同様に、太陽高度が高い場合の適用には疑問がある。中村、Rahim は、式(13)を、最近、下記のように修正している^{13,14,15}。

$$L_{zin}(\gamma_s) = 9.90 \cdot \sin^{1.68} \gamma_s + 3.01 \cdot \tan^{1.18} (0.846 \cdot \gamma_s) + 0.112 \quad [\text{kcd/m}^2] \quad \cdots \cdots (14)$$

3. 基礎資料とその整理

相対天空輝度分布の数式化に適用した資料の中から天頂輝度に関する取得データを用いる。データの総数は約 20,000 である。

まず、天頂輝度と正規化グローバル照度のデータを相対天空輝度分布の数式化と同様に、太陽高度 5° から 70° まで、 5° おきの 13 グル

表 1 太陽高度別、正規化グローバル別の天頂輝度の対数値

		太陽高度 [deg.]												
		7.5	12.5	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.5	57.5	62.5	67.5
正 規 化 グ ロ ー バ ル 照 度 [-]	0.05	4.60	5.25	5.75	6.16	6.44	6.70	6.88	7.04	7.20	7.25	7.30	7.35	7.40
	0.10	5.57	6.20	6.65	7.00	7.20	7.45	7.65	7.75	7.80	7.90	8.00	8.00	8.10
	0.20	6.15	6.80	7.30	7.70	7.90	8.20	8.30	8.45	8.55	8.70	8.75	8.80	8.85
	0.30	6.60	7.30	7.75	8.10	8.35	8.60	8.70	8.80	8.95	9.10	9.20	9.25	9.30
	0.40	6.75	7.45	7.90	8.30	8.55	8.75	8.85	9.15	9.20	9.35	9.40	9.55	9.60
	0.50	6.85	7.50	7.95	8.30	8.60	8.85	9.05	9.25	9.35	9.50	9.60	9.70	9.80
	0.60	6.84	7.40	7.90	8.20	8.45	8.75	8.90	9.20	9.30	9.50	9.65	9.80	9.95
	0.70	6.72	7.30	7.75	7.95	8.20	8.50	8.70	9.00	9.10	9.38	9.56	9.75	10.00
	0.80	6.65	7.18	7.50	7.70	7.90	8.20	8.44	8.70	8.90	9.13	9.36	9.60	9.84
	0.90	6.53	7.00	7.30	7.50	7.70	7.90	8.10	8.35	8.52	8.75	9.00	9.25	9.56
	1.00	6.31	6.75	7.00	7.15	7.32	7.50	7.66	7.80	7.96	8.16	8.35	8.60	8.93

図 1 太陽高度別の正規化グローバルと天頂輝度の対数値の関係に区分する。

次いで、それぞれの太陽高度のグループごとに、正規化グローバル照度 0.05 および 0.1 から 1 まで 0.1 間隔の値を中央値にする 11 個の帯域に区分して、帯域ごとに天頂輝度の平均値を求めた。

天頂輝度は太陽高度ごとに異なった値を示す。その帯域も広い。したがって、回帰分析を簡単に行うために、各帯域を代表する天頂輝度は、その帯域の平均天頂輝度の対数値とした。これを天頂輝度を数式化するための基礎資料とし、表 1、図 1 に示す。

4. 天頂輝度の数式化

4.1 数式化の基本式

基礎資料を検討し、天頂輝度については太陽高度と正規化グローバル照度の関数として次のような 5 次式により回帰分析する。

$$Lvzl = A \cdot Nevg^5 + B \cdot Nevg^4 + C \cdot Nevg^3 + D \cdot Nevg^2 + E \cdot Nevg + F \quad (15)$$

ここで、

$$Lvzl = \ln\{Lvz(\gamma_s, Nevg)\},$$

$$Lvz(\gamma_s, Nevg) : \text{全天型天頂輝度} [\text{cd/m}^2],$$

A, B, C, D, E, F : 太陽高度 γ_s の関数とする未確定項 [-]、

γ_s : 太陽高度 [rad.]、 $Nevg$: 正規化グローバル照度 [-]、

とする。

式(15)を全天型天頂輝度の基本式と称することにする。全天型天頂輝度は式(15)を次式のように変換して求めることができる。

$$Lvz(\gamma_s, Nevg) = \exp(A \cdot Nevg^5 + B \cdot Nevg^4 + C \cdot Nevg^3 + D \cdot Nevg^2 + E \cdot Nevg + F) \quad [\text{cd/m}^2] \quad \cdots \cdots (16)$$

4.2 基本式の未確定項の推定

表 1 に示す太陽高度別の正規化グローバル照度と天頂輝度の対数に基づき、太陽高度別に式(15)による回帰分析を行う。

まず、表 1 と図 1 に示した基礎資料に基づき、太陽高度ごとに回

図2 太陽高度 γ_s と未確定項 A の関係

帰分析を試み、それぞれの太陽高度に関する未確定項 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F の値を得た。次いで、得られた未確定項 A の値に基づき、太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 A について次式を得た。これを図2に示す。

$$A(\gamma_s) = 18.373 \cdot \gamma_s + 9.955 \quad \cdots \cdots (17)$$

次に、式(15)に式(17)を代入して、再度基礎資料による回帰分析を試みた。その結果、それぞれの太陽高度に関して得られた未確定項 B の値に基づき、太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 B について次式を得た。これを図3に示す。

$$B(\gamma_s) = -52.013 \cdot \gamma_s - 37.766 \quad \cdots \cdots (18)$$

続いて、式(15)に式(17)と式(18)を代入して、基礎資料による回帰分析を重ねた。その結果、それぞれの太陽高度に関して得られた未確定項 C の値に基づき、太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 C について次式を得た。これを図4に示す。

$$C(\gamma_s) = 46.572 \cdot \gamma_s + 59.352 \quad \cdots \cdots (19)$$

さらに、式(15)に式(17)と式(18)と式(19)を代入して、基礎資料による回帰分析を行った。その結果、それぞれの太陽高度に関して得られた未確定項 D の値に基づき、太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 D について次式を得た。これを図5に示す。

$$D(\gamma_s) = 1.691 \cdot \gamma_s^2 - 16.498 \cdot \gamma_s - 48.670 \quad \cdots \cdots (20)$$

さらに、式(15)に式(17)と式(18)と式(19)と式(20)を代入して、基礎資料による回帰分析を行った。その結果、それぞれの太陽高度に関して得られた未確定項 E の値は太陽高度の関数として、 F の値は太陽高度の対数の関数としてそれぞれ回帰分析を行い、未確定項 E と F について次式を得た。これを図6に示す。

$$E(\gamma_s) = 1.124 \cdot \gamma_s + 19.738 \quad \cdots \cdots (21)$$

$$F(\gamma_s) = 1.170 \cdot \ln(\gamma_s) + 6.369 \quad \cdots \cdots (22)$$

5. 回帰式による計算値と実測値との比較

太陽高度と正規化グローバル照度の関数としての天頂輝度を求める式は以下のようである。

$$\begin{aligned} Lvz(\gamma_s, Nevg) = & \exp\{(18.373 \cdot \gamma_s + 9.955) \cdot Nevg^5 \\ & + (-52.013 \cdot \gamma_s - 37.766) \cdot Nevg^4 \\ & + (46.572 \cdot \gamma_s + 59.352) \cdot Nevg^3 \\ & + (1.691 \cdot \gamma_s^2 - 16.498 \cdot \gamma_s - 48.670) \cdot Nevg^2 \\ & + (1.124 \cdot \gamma_s + 19.738) \cdot Nevg \\ & + (1.170 \cdot \ln(\gamma_s) + 6.369)\} \quad [\text{cd/m}^2] \quad \cdots \cdots (23) \end{aligned}$$

図3 太陽高度 γ_s と未確定項 B の関係 図4 太陽高度 γ_s と未確定項 C の関係 図5 太陽高度 γ_s と未確定項 D の関係 図6 太陽高度 γ_s と未確定項 E 、 F の関係

ここで、

$Lvz(\gamma_s, Nevg)$: 全天型天頂輝度 [cd/m^2],

γ_s : 太陽高度 [rad.],

$Nevg$: 正規化グローバル照度 [-],

である。

図 7-1 から図 7-6 に、実測により取得した天頂輝度と、式(23)で求めた正規化グローバル照度の関数としての天頂輝度について、太陽高度ごとに比較して例示する。正規化グローバル照度が 0.7 より大きいときに、実測により取得した値のばらつきがやや大きくなる傾向がある。主として測定時の天空状態によるもので、直射光があるとき、天頂付近に雲があるときなどに起こりやすい現象である。式(23)の実用上の障害にはならないと考える。

以上、図 7-1 から図 7-6 の、いずれの図においても式(23)で計算した値と実測により取得した値はよい相関を示していると考えられる。

図 7-1 実測で取得した天頂輝度と推定式 (太陽高度 10°-15°)

図 7-2 実測で取得した天頂輝度と推定式 (太陽高度 20°-25°)

図 7-3 実測で取得した天頂輝度と推定式 (太陽高度 30°-35°)

図 7-5 実測で取得した天頂輝度と推定式 (太陽高度 50°-55°)

図 7-4 実測で取得した天頂輝度と推定式 (太陽高度 40°-45°)

図 7-6 実測で取得した天頂輝度と推定式 (太陽高度 60°-65°)

6. 既往の天頂輝度モデルとの比較

本研究で提案する全天型天頂輝度について正規化グローバル照度を 0.8、0.9、1.0 としたときの値を、Kittler, R.⁵ と Dogniaux, R.⁶ と Krochmann, J.⁷ と永田¹⁰ と中村^{13,14,15} の提案している晴天天空の天頂輝度と比較した。これを図 8 に示す。これらのうち、正規化グローバル照度が 0.8 の場合は前報において近晴天天空に分類したものである。

本研究で提案する全天型天頂輝度は、既に提案されている天頂輝度と比較すると、正規化グローバル照度が 1.0 のときは既往の提案式の下限に近いが、0.9 のときは中村の式に近い値となっている。

同様に、曇天空に関して、全天型天頂輝度について正規化グローバル照度を 0.2 と 0.25 と 0.35 としたときの値を Kittler, R.¹⁷ と Krochmann, J.¹⁶ と中村の提案している天頂輝度と比較した。これを図 9 に示す。これによれば、既往の曇天空の天頂輝度の値は全天型天頂輝度の範囲に含まれている。

また、正規化グローバル照度が 0.35 のときの値は中村の提案式による値に非常に近い。正規化グローバル照度が 0.35 のときは前報³において近曇天空に分類されたものである。

中間天空の天頂輝度に関する提案式は少ない。中村は、中間天空の輝度分布の提案とともに中間天空の天頂輝度を提案している¹³。その他若干の中間天空に類する天空の天頂輝度に関する提案式があるが、中間天空に類する天空の定義が異なるため、これらと適切な比較ができないと考える。

中村の中間天空は晴天天空や曇天空と思われる天空を除いた天空の平均であり、式(23)の中間天空に相当する天空状態とは定義が異なる。中村の中間天空は必ずしも現実に出現する天空とはいえない。したがって、単純に比較はできない。しかし、正規化グローバル照度を 0.4 と 0.5 と 0.7 の 3 種類としたときの式(23)により計算した全天型天頂輝度と、中村^{13,14,15}の中間天空の天頂輝度と比較した。その結果を図 10 に示す。

中村の中間天空の天頂輝度は晴天天空に近い天空から曇天空に近い天空までのすべてを含む天空天頂輝度分布の平均値である。一般に、天頂輝度は曇天空では低く、曇天空から中間天空に移行するに従い徐々に高くなり、中間天空から晴天天空に移行するに従い再び徐々に低くなる傾向がある。図 10 に示す全天型天頂輝度は最も高い部分の天頂輝度である。広い範囲の平均である中村の中間天空の天頂輝度より若干高くなる傾向は当然であると考ええる。

以上のように、実測値や既往の種々の提案式との比較の結果、本研究で提案する全天型天頂輝度は適正であると考えられる。

7. ALL SKY MODEL

本研究の結果、水平面グローバル照度の測定データだけから求められる正規化グローバル照度により、すべての天空状態に対応する相対天空輝度分布と天頂輝度を知ることができるようになった。これにより全天型天空輝度分布を絶対値で表すことができる。すなわち、水平面グローバル照度の測定データだけで ALL SKY MODEL を簡単に構成できるようになった。

水平面グローバル照度は測定が簡単で、実測データの取得が比較的容易である。また、水平面グローバル照度の実測データが入手できないときは水平面グローバル放射照度に既往の提案がかなりあるグローバル照度に関する発光効率^{19,20,21,22,23,24,25}を乗じて求めることもできる。水平面グローバル放射照度は気象庁で測定している。これを利用することもできる。

7.1 全天型天空輝度分布と全天型天頂輝度で構成する ALL SKY MODEL

ALL SKY MODEL を構成するには、全天型天空輝度分布と本報で提案する全天型天頂輝度の積を求める。ALL SKY MODEL をまとめて式(24)に示す。

$$Lva(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) = Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) \cdot Lvz(\gamma_s, Nevg) \quad [\text{cd/m}^2] \quad (24)$$

ここで、

$Lva(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg)$: ALL SKY MODEL による絶対値で表す天空輝度 $[\text{cd/m}^2]$ 、

$Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg)$: 全天型天空輝度分布による相対天空輝度 $[-]$ 、

図 8 提案する天頂輝度と既往提案の天頂輝度の比較(晴天天空)

図 9 提案する天頂輝度と既往提案の天頂輝度の比較(曇天空)

図 10 提案する天頂輝度と既往提案の天頂輝度の比較(中間天空)

$$Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) = \frac{\phi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\phi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - \gamma_s)} \quad [-],$$

$$\phi(\gamma) = 1 + a \cdot (1 - \sin^{0.6} \gamma) \quad [-],$$

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

$$a = 9.93 \cdot Nevg^3 - 10.68 \cdot Nevg^2 + 7.09 \cdot Nevg - 2.11 \quad [-],$$

$$b = 23.4 \cdot (1.6 \cdot Nevg)^{5.9} \exp(-0.17 \cdot Nevg) \cdot (1.1 - Nevg)^{1.5} \quad [-],$$

$$c = 62.16 \cdot Nevg^6 - 257.62 \cdot Nevg^5 + 405.67 \cdot Nevg^4 - 296.6 \cdot Nevg^3 + 99.30 \cdot Nevg^2 - 16.34 \cdot Nevg + 0.43 \quad [-],$$

$$d = 2.06 \cdot Nevg^5 - 6.40 \cdot Nevg^4 + 6.02 \cdot Nevg^3 - 1.31 \cdot Nevg^2 + 0.08 \cdot Nevg \quad [-],$$

$Lvz(\gamma_s, Nevg)$: 全天型天頂輝度 $[\text{cd/m}^2]$ 、式(23)参照、

$Nevg$: 正規化グローバル照度 $[-]$ ($= Evgm / Evgms(\gamma_s)$)、

$Evgm$: 無次元グローバル照度 $[-]$ ($= m \cdot Evg / Evo$)、

Evg : 水平面グローバル照度 $[\text{lx}]$ 、

$Evgms(\gamma_s)$: 基準無次元グローバル照度 [-],

$$Evgms(\gamma_s) = -0.323 \cdot \gamma_s^4 + 1.486 \cdot \gamma_s^3 - 2.581 \cdot \gamma_s^2 + 2.090 \cdot \gamma_s + 0.190 \quad [-],$$

ζ : 太陽と天空要素との角距離 [rad],

Evo : 大気圏外の法線直射照度 [133,700 [lx]²⁶],

γ : 天空要素の高度 [rad], m : 大気路程 [-]²⁷,

である。

なお、 a, b, c, d を求める式で $Nevg > 1.0$ のときは $Nevg = 1.0$ 、 a を求める式で $Nevg < 0.24$ のときは $Nevg = 0.24$ として計算する。

全天型天空輝度分布と全天型天頂輝度で構成する ALL SKY MODEL の例 (太陽高度 35°) を図 11-1 から図 11-9 に示す。

7.2 全天空照度と全天型天空輝度分布で構成する ALL SKY MODEL

全天型天頂輝度によらないで、全天空照度と全天型天空輝度分布とでも ALL SKY MODEL を構成することができる。すなわち、全天型天頂輝度と全天型天空輝度分布で構成する ALL SKY MODEL を積分して得られる全天空照度の値と実測で取得した全天空照度の値を等しいとすれば、全天型天頂輝度は実測で取得した全天空照度を全天型天空輝度を積分して得られる全天空照度 (相対値) で除した値である。これを数式で表せば以下のようである。

$$Lvz(\gamma_s, Nevg) = \frac{Evd}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma \cdot d\alpha} \quad (25)$$

ここで、 Evd : 全天空照度 [lx]、 α : 天空要素の方位角 [rad]、である。

したがって、全天空照度と全天型天空輝度分布とで構成する ALL SKY MODEL は次のように示される。

$$Lvz(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) = \frac{Evd \cdot Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg)}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma \cdot d\alpha} \quad (26)$$

式(25) で示される全天空照度による全天型天頂輝度の推定には、全天空照度の測定時の全天型天空輝度分布を知るために正規化グローバル照度が必要である。これを求めるには、水平面グローバル照度の測定値が必要である。すなわち、ここで述べる方法は、水平面グローバル照度と全天空照度の両方の測定データを必要とする。

一般に昼光を測定する場合は水平面グローバル照度と全天空照度を同時測定することが多い。また、CIE²⁴が推進している IDMP²⁵では、測定項目の少ない一般クラスの測定所²⁶でもこの両者を必須の測定項目としている。したがって、水平面グローバル照度と全天空照度を同時に測定したデータは比較的多く、この両者を一緒に入手することは比較的容易である。また、コンピュータを用いれば、式(23)や式(26)の数値計算も容易である。

ALL SKY MODEL を構成するとき、水平面グローバル照度のみによるか、水平面グローバル照度と全天空照度を用いるかは、その時々判断によればよいと考える。

気象台では水平面グローバル放射照度を定時測定している。これとグローバル照度に関する発光効率²⁷により水平面グローバル照度を求められることは既に述べた。全天空照度は水平面グローバル放射照度を直散分離して得られる水平面拡散放射照度に天空照度に関する発光効率を乗じて求めることができる。

図 11-1 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=1.0$)

図 11-2 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.9$)

図 11-3 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.8$)

図 11-4 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.7$)

図 11-5 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.6$)

図 11-6 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.5$)

図 11-7 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.4$)

図 11-8 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.3$)

図 11-9 ALL SKY MODEL の天空輝度分布 ($\gamma_s = 35^\circ$, $Nevg=0.2$)

8. まとめ

本研究では、すべての天空状態における天空輝度分布をコンピュータで取り扱うことのできる全天型天空輝度分布に対応した天頂輝度の数式を提案した。これにより天空輝度分布を絶対値で表すことが可能になり、ALL SKY MODEL を提案した。これにより、いずれの地点でも水平面グローバル照度が得られれば天空輝度とその分布の絶対値を推定することが可能になった。

本研究で提案する全天型天頂輝度に関して以下のように列記することができる。

- (1) 天頂輝度の数式化で適用した基礎資料と、本研究で得た全天型天頂輝度との誤差は小さい。
- (2) 全天型天頂輝度は、全天型天空輝度分布と同様に、正規化グローバル照度と太陽高度の関数として比較的簡単な数式で表すことができる。
- (3) 全天型天頂輝度は既往の天頂輝度に関する提案式とかなりよく整合している。
- (4) 全天型天頂輝度は、コンピュータによる計算にも容易に適用でき、これに要する関数も比較的容易に入手でき、極めて実用的である。

既往の天空輝度分布については主に相対天空輝度分布についての検討に重点がおかれ、天空輝度やその分布の絶対値との整合性が不十分であったと見受けられる。本研究はALL SKY MODEL の構成を容易に可能としている。すなわち、最も基本的な昼光の測定データである水平面グローバル照度により、状態が晴天から曇天に連続的に変移する天空に対応する天空輝度分布とその絶対値の推定を可能にしている。加えて、本研究で提案する手法は、気象台で常時測定している水平面グローバル放射照度と適切な発光効率とでもALL SKY MODEL の構成を可能としている。すなわち、昼光の測定データを欠く地点でも、絶対値で表す天空輝度分布の推定を可能としている。これは、建築内部環境の温熱環境と昼光環境の連携した計画や設計を可能とするものである。

以上、本研究の成果が省エネルギーを時代の必須の要件とする建築環境工学、とくに、昼光照明環境や温熱環境の計画や設計に寄与するところが極めて大きいと信じる。

注記

注1) 前報 (その3) 参照。

注2) 全天型天空輝度分布は、正規化グローバル照度を1としたとき、CIE 標準晴天の散乱インディカトリックスと一致しなければならない。しかし、前報 (その3) で提案した全天型天空輝度分布の式では若干の誤差を生じていた。

このために、本報では、基準無次元グローバル照度の計算式を次のように修正した。

$$E_{vgms}(\gamma_s) = -0.323 \cdot \gamma_s^4 + 1.486 \cdot \gamma_s^3 - 2.581 \cdot \gamma_s^2 + 2.090 \cdot \gamma_s + 0.190 \quad (C1)$$

これにともない、本報では、全天型天空輝度分布を表す式の係数などを、次のように若干修正し、これを用いている。本研究では、これを新たな提案式とする。

$$Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg) = \frac{\phi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\phi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - \gamma_s)} \quad \cdots (C2)$$

図 C1 基準無次元グローバル照度

ここで、

$Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta, Nevg)$: 全天型天空輝度分布による相対天空輝度 [-],

$$f(\zeta) = 1 + b \cdot (\exp(c \cdot \zeta) - \exp(c \cdot \pi/2)) + d \cdot \cos^2 \zeta \quad \cdots (C3)$$

$$\phi(\gamma) = 1 + a \cdot (1 - \sin^{0.6} \gamma) \quad \cdots (C4)$$

$$a = 9.93 \cdot Nevg^3 - 10.68 \cdot Nevg^2 + 7.09 \cdot Nevg - 2.11 \quad \cdots (C5)$$

$$b = 23.4 \cdot (1.6 \cdot Nevg)^{5.9} \exp(-0.17 \cdot Nevg) \cdot (1.1 - Nevg)^{1.5} \quad \cdots (C6)$$

$$c = 62.16 \cdot Nevg^6 - 257.62 \cdot Nevg^5 + 405.67 \cdot Nevg^4$$

$$- 296.6 \cdot Nevg^3 + 99.30 \cdot Nevg^2 - 16.34 \cdot Nevg + 0.43 \quad \cdots (C7)$$

$$d = 2.06 \cdot Nevg^5 - 6.40 \cdot Nevg^4 + 6.02 \cdot Nevg^3$$

$$- 1.31 \cdot Nevg^2 + 0.08 \cdot Nevg \quad \cdots (C9)$$

γ : 天空要素の高度 [rad.],

ζ : 太陽と天空要素との角距離 [rad.],

である。

前報 (その3) で記した基準無次元グローバル照度の計算式は、永田の晴天の天頂輝度の提案式¹⁰による値に基づいて求めた。本報で示す式 (C1) は、大気透過率が0.75のときの天頂輝度の測定値と永田の晴天の天頂輝度の提案式による値との平均値に基づき、正規化グローバル照度を1としたとき、CIE 標準晴天の散乱インディカトリックスと一致するようにして、前報 (その3) と同様な方法で求めた。この両者を図 C1 に示す。

注3) 中間天空 (Intermediate sky) は、元来、中村が、両極端の天空状態を示す CIE 標準晴天と CIE 標準曇天の間の天空について、太陽高度別の平均天空輝度分布を提案したときに定義した用語である。このとき、中間天空の天頂輝度も提案している。現在では、中間天空は、両標準天空の間の天空を示す一般的な用語として用いられている。

注4) CIE : Commission Internationale de l'Eclairage (国際照明委員会)、照明に関する基準や標準を定めたり、これらを勧告したり、また、研究の交流を計る国際機関で、照明関係の ISO 規格の原案も作成している。100 年の歴史を誇り、現在、先進国を中心に約 40 ヶ国が加盟している。

注5) IDMP : International Daylight Measurement Programme (国際昼光測定プログラム)、化石エネルギーに代替すべき自然エネルギーである昼光や日射に関し、その実態を示す資料が乏しい現況を憂え、CIE が 1983 年に開始した世界的規模での昼光と日射の実測資料の収集活動である。この実施のために CIE は技術委員会 TC3-25 を設けている。1991 年以降から、本邦の 12 ヶ所の測定所を始め、世界各国に約 50 ヶ所の測定所が設置され、常時 1 分ごとのデータを測定している。

筆者のうち中村は1998年までこの委員会の委員長を務め現在委員である。古賀は現在幹事の一人であり、井川は委員である。

<http://idmp.entpe.fr>参照。

注6) 一般クラスの測定所: IDMP は、限定した基本的な測定項目のみを常時測定する一般クラス(General Class)と、それより多い測定項目を測定する研究クラス(Research Class)に、測定所を分けている。各測定所は原則的にこのカテゴリーに区分されている。測定項目は測

定所によってかなり異なる。しかし、水平面グローバル照度と全天空照度は全ての IDMP 測定所で同時測定されている。

注7) 発光効率に関する既往の研究は少なくない。しかし、その提案値、あるいは、提案式は様々である。定説とするものはない。昼光の特性は天空状態により著しく異なる。したがって、発光効率は、グローバル照度、天空光照度、直射照度のそれぞれに関して取り扱うべきであると考えるが、そのような研究報告も少ない。

参考文献

- ¹ 井川憲男、中村洋、古賀靖子、古城真也、CIE 標準天空との相関係数による天空輝度分布の分類 - 天空輝度分布の分類法の研究(その1)、日本建築学会計画系論文集、No. 494, pp. 15-22, 1997.
- ² 井川憲男、中村洋、古賀靖子、古城真也、天空状態を示す指標と天空輝度分布の関係 - 天空輝度分布の分類法の研究(その2)、日本建築学会計画系論文集、No. 496, pp. 23-28, 1997.
- ³ 井川憲男、中村洋、古賀靖子、古城真也、藤井俊一、全ての天空状態の天空輝度分布を表す全天型天空輝度分布モデル - 天空輝度分布の分類法の研究(その3)、日本建築学会計画系論文集、No. 508, pp. 1-8, 1998.
- ⁴ Spatial Distribution of Daylight - Luminance Distribution of Various Reference Skies, Technical Report, CIE 110-1994, ISBN 3 900 734 52 6, 1994.
- ⁵ Kittler, R., Some considerations concerning the zenith luminance of the cloudless sky, Attached document of circular letter No.11 of CIE committee E-3.2, Aug. 1970.
- ⁶ Dogniaux, R., Variations qualitatives et quantitatives des composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale par ciel serein en fonction du trouble atmospherique, Public. IRM, Serie B(62), Bruxelles, 1979.
- ⁷ Krochmann, J., et al, Über die Horizontalbeleuchtungsstärke und die Zenitlichtdichte des klaren Himmels, Lichttechnik, 22/II, pp.551-554, 1970.
- ⁸ Leibelt, C., Leuchtdichte- und Strahldichteverteilung des Himmels, Dissertation Universität Karlsruhe, 1978.
- ⁹ Krochmann, J., Seidel, M., Quantitative data on daylight for illuminating engineering, Lighting Res. & Tech., Vol. 6, No. 3, pp. 165-171, 1974.
- ¹⁰ Nagata, T., Luminance distribution on clear skies, Part 2 - Theoretical consideration, Trans. A.I.J. No. 186, 1970.
- ¹¹ Karayel, M., Navvab, M., Ne'eman, E., Selkowitz, S., Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations, Energy and Buildings, 6/2, 3, 4, pp.283-291, 1984.
- ¹² Nakamura, Oki, M., et al., The mean sky composed depending on the absolute luminance values of the sky element and its application to the daylighting prediction, Proc. 1986 International Daylighting Conference, Long Beach, pp.61-66, 1986.
- ¹³ Rahim, M.R., Daylight availability in tropic area、学位論文(九州大学)、1991.
- ¹⁴ Rahim, M.R., Nakamura, H., Koga, T., Examination on the zenith luminance of the intermediate sky, 日本建築学会九州支部研究報告、第33号, pp. 13-16, 1992.
- ¹⁵ Rahim, M.R., Nakamura, H., Koga, Y., Matsuzawa, T., The modified equation on the zenith luminance of the clear sky, 2nd Lux Pacifica, Bangkok, pp. C1-C6, 1993.
- ¹⁶ Krochmann, J., Über die Horizontalbeleuchtungsstärke der Tagesbeleuchtung, Lichttechnik, 15/11, pp.559-562, 1963.

¹⁷ Kittler, R., Beitrag zur Bestimmung der tageslichttechnischen Verhältnisse des natürlichen Lichtklimas bei bedecktem Himmel, Lichttechnik(draft)

¹⁸ Kittler, R., Some comments and suggestions to the direction of the TC 3-09 activities, TC 3-09 Circular letter No.3 APPENDIX III(CL-3), 1984.

¹⁹ 宿谷昌則、木村建一、昼光の発光効率による毎時水平面日射量からの照度の推定、日本建築学会論文報告集、第293号、pp. 85-95, 1980.

²⁰ Aydinli, S., Über die Berechnung der zur Verfügung stehenden Solarenergie und des Tageslightes, Forsch, Vol.2, Nr.79, Verlag Dusseldorf, 1981.

²¹ Littlefair, P.J., The luminous efficacy of daylight: a review, Lighting Res. & Tech., Vol. 17, No. 4, pp. 162-182, 1985.

²² Littlefair, P.J., Measurements of the luminous efficacy of daylight, Lighting Res. & Tech., Vol. 20, pp.177-188, 1988.

²³ Molineaux, B., Ineichen, P., Delaunay, J.J., Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity improving model performance, Solar Energy, Vol.55, No.2, pp.125-137, 1995.

²⁴ Chandra, M., Luminous efficacy of solar radiation and evaluation of natural illumination - a review, Energy Convers. Mgmt., No.11, pp.1623-1634, 1996.

²⁵ Koga, Y., Nakamura, H., Oki, M., Matsuzawa, T., Rahim, M.M., Study on Luminous Efficacy - The Relation to Cloud Ratio, LUX EUROPA 1993, Edinburgh, pp. 799-803, 1993.

²⁶ Nakamura, H., Oki, M., Iwata(Matsuzawa), T., Mathematical description of the intermediate sky, Proc. 21st CIE Session, Vol. 1, pp. 230-231, 1987.

²⁷ Kittler, R., A new concept for standardizing the daylight climate state, Proc. 6th Lux Europa, Vol. 1, pp. 303-312, 1989.

(1999年2月10日原稿受理, 1999年4月23日採用決定)