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)

RELATION BETWEEN THE INDEXES OF SKY CONDITIONS AND SKY LUMINANCE DISTRIBUTION

A study on classification method of sky luminance distribution Part 2

井川 憲男*, 中村 洋**, 古賀 靖子***, 古城 真也****

Norio IGAWA, Hiroshi NAKAMURA, Yasuko KOGA
and Shinya KOJO

In the previous report, every 5% of average sky luminance distribution of the accumulate frequency of occurrences was obtained by every 5 degrees of solar altitude. The luminance distribution of the average sky was classified into five categories of the clear sky, the near clear sky, the intermediate sky, the near overcast sky and the overcast sky. However, this method can not be applied when the sky luminance distribution is not measured. It is necessary to develop a method to estimate sky luminance distribution based upon other data gained easily in order to provide sky luminance distribution as the basic data of the daylighting design. The relation between the quantities concerned the daylight and the classified sky luminance distribution was examined. Finally the value of horizontal global illuminance multiplied optical air-mass and divided by extraterrestrial illuminance was selected as the index shown the correlation with the sky luminance distribution.

Keywords: Sky luminance distribution, CIE Standard Clear Sky, CIE Standard Overcast Sky, Intermediate Sky, Global Illuminance

天空輝度分布、CIE 標準晴天空、CIE 標準曇天空、中間天空、グローバル照度

1. はじめに

前報¹⁾において、実測により取得した天空輝度分布を、CIE 標準晴天空ならびに CIE 標準曇天空と比較し、晴天空に近いものから曇天空に近いものの順に並べることを試みた。実測により取得した天空輝度分布の CIE 標準晴天空との相関係数(Rcs)と CIE 標準曇天空との相関係数(Ros)を基に天空輝度分布の分類係数(Eroc)を設定した。これにより、実測により取得した天空輝度分布を、太陽高度別に晴天空から曇天空の順に順位づけ、太陽高度帯5度ごと、累積出現頻度5%ごとに整理し、平均天空輝度分布を求めた。さらに、これらを CIE 標準晴天空、CIE 標準曇天空、中間天空と比較し、晴天空、近晴天空、中間天空、近曇天空、曇天空に分類した。晴天空から始まって、徐々に太陽位置と反対側の輝度が低下し、中間天空に移行し、さらに太陽位置の輝度が低下し、曇天空に至る変化を観察することができた。実測により取得した天空輝度分布を、両 CIE 標準天空との相関係数により分類する方法は、かなり適切な天空輝度分布の分類法であると考えられる。

しかし、この分類法は、実測により天空輝度分布のデータが取得できる場合のみに有効な手法である。天空輝度分布の測定を行っていないときは適用できない。CIE²⁾の IDMP³⁾における昼光と日射の測定所でも、天空輝度分布の測定を行っている測定所は限られている。

天空輝度分布の測定は若干厄介である。測定機器も比較的高価で

ある。数多くの地点で天空輝度分布を常時測定することは実際上不可能である。他方、より精緻な昼光照明の計画や設計には天空輝度分布に関する知識は不可欠である。したがって、比較的容易に取得できるデータの測定値や、それから求める計算値から天空輝度分布を推定する方法の開発が必要である。

本報では、天空輝度分布以外の昼光や日射に関する一般的測定値や計算値のうち、天空輝度分布との関係の深いものを選択し、これと分類した天空輝度分布との関係を求め、天空輝度分布以外の昼光と日射の測定値や計算値から天空輝度分布を推定する指標について検討を行った。この、天空輝度分布の推定に使用する、昼光や日射に関連する測定値やそれから導出される指標を、以降、天空指標と称する。

2. 天空状態と関連する諸指標

天空輝度分布の推定には、これまで、クラウド・レイショ^{4,5)}、大気透過率⁶⁾、大気放射混濁因子⁷⁾、雲量⁸⁾など、いくつかの指標が使用されている。ここでは、既往の研究で、天空輝度分布の推定に使われた天空指標と、指標として可能性のある種々の天空指標について述べる。

2.1 クラウド・レイショ (cloud ratio)

クラウド・レイショ (cloud ratio) は、水平面グローバル放射照度に

* 株式会社中務店技術研究所 主任研究員・工修

** 九州大学工学部建築学科 教授・工博

*** 九州大学工学部建築学科 助手・工博

**** 西日本技術開発株式会社 工修

Chief Researcher, Research & Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kyushu University, Dr. Eng. Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kyushu University, Dr. Eng.

Architecture Dept., West Japan Engineering Consultants, M. Eng.

対する水平面拡散放射照度の比として定義されている。元来、放射照度の研究のために工夫された指標であるが、近年、昼光に関しても、同等の比、すなわち、グローバル照度に対する全天空照度の比を昼光の研究に用いるようになった。本研究では、前者を放射クラウド・レイショ(Ce)と称し、後者を昼光クラウド・レイショ(Cv)と称する。

放射クラウド・レイショは、次式で表される。

$$Ce = \frac{E_{ed}}{E_{eg}} = \frac{E_{ed}}{E_{ed} + E_{es} \cdot \sin \gamma_s} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (1)$$

Ce : 放射クラウド・レイショ [-]、

E_{ed} : 地表面での水平面拡散放射照度[W/m²]、

E_{eg} : 地表面での水平面グローバル放射照度[W/m²]、

E_{es} : 地表面での法線直達放射照度[W/m²]、

γ_s : 太陽高度[rad. or deg.]。

昼光クラウド・レイショは、次式で表される。

$$Cv = \frac{E_{vd}}{E_{vg}} = \frac{E_{vd}}{E_{vd} + E_{vs} \cdot \sin \gamma_s} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (2)$$

Cv : 昼光クラウド・レイショ [-]、

E_{vd} : 地表面での全天空照度[klx]、

E_{vg} : 地表面での水平面グローバル照度[klx]、

E_{vs} : 地表面での法線直射照度[klx]。

日射が無く、すなわち、直達あるいは直射成分が無く、拡散成分とグローバル成分が等しいときは、放射クラウド・レイショおよび昼光クラウド・レイショの値は1である。

クラウドレイショは、最小値が太陽高度により異なる。また、0にもならない。このため、Perraudeau, M.P.は、晴天空で1に、曇天空で0になるような指標 Nebulosity index を、クラウド・レイショを基にして提案している⁹⁾¹⁰⁾。Nebulosity index は標準的な晴天空では1に、曇天空では0になる。本論文では Nebulosity index による検討を行っていないが、参考として以下に示す。

Nebulosity index は次式のように表される。

$$N = \frac{1 - E_{vd} / E_{vg}}{1 - C_{vT}} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (3)$$

N : Nebulosity index [-]

E_{vd} : 地表面での全天空照度[klx]、

E_{vg} : 地表面での水平面グローバル照度[klx]、

C_{vT} : 理論昼光理論クラウド・レイショ。

Littlefair, P.は理論昼光クラウド・レイショ(C_{vT})を次の式¹¹⁾で表している。

$$C_{vT} = \frac{\Omega \cdot L_{zcl}}{\Omega \cdot L_{zcl} + 125000 \cdot \sin \gamma_s / (1 + 0.45 \cdot \cos \gamma_s)} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (4)$$

L_{zcl} : 晴天空の天頂輝度[cd/m²]、

これを Littlefair, P.は、Kittler, R.の次の式¹²⁾で表している。

$$L_{zcl} = 300 + 3000 \cdot \tan \gamma_s \quad [\text{cd/m}^2] \quad \dots\dots\dots (5)$$

Ω : 天頂輝度に対する晴天空の水平面拡散照度の比[-]、

これに関し、Aydinli と Krochman の次式¹³⁾を採用している。

$$\Omega = 6.971 + 4.2496 \cdot 10^{-2} \gamma_s - 8.5375 \cdot 10^{-4} \gamma_s^2 - 8.6088 \cdot 10^{-5} \gamma_s^3 + 1.9848 \cdot 10^{-6} \gamma_s^4 - 1.6222 \cdot 10^{-8} \gamma_s^5 + 4.7823 \cdot 10^{-11} \gamma_s^6 \quad \dots\dots (6)$$

γ_s : 太陽高度[deg.]。

2.2 大気透過率

大気透過率は、大気の清澄の程度に関する指標であり、レーリー

(Rayleigh)の散乱理論に基づいて定義されている。すなわち、太陽が天頂にあるとしたときの、直達日射、および、直射日光の地表面における大気の透過率である。本研究では、直達日射の地表面における大気の透過率を、放射大気透過率(Pe)と称し、直射日光の地表面における大気の透過率を、昼光大気透過率(Pv)と称することにする。

放射大気透過率は、地表面ならびに大気圏外における法線直達放射照度と大気路程で次のように表される¹⁴⁾。

$$Pe = \eta \sqrt{\frac{E_{es}}{E_{eo}}} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (7)$$

Pe : 放射大気透過率[-]、

E_{es} : 地表面での法線直達放射照度[W/m²]、

E_{eo} : 大気圏外における法線直達放射照度[W/m²]、

m : 大気路程[-]。

昼光大気透過率は、地表面ならびに大気圏外における法線直射照度と大気路程で次のように表される。

$$Pv = \eta \sqrt{\frac{E_{vs}}{E_{vo}}} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (8)$$

Pv : 昼光大気透過率[-]、

E_{vs} : 地表面での法線直射照度[klx]、

E_{vo} : 大気圏外における法線直射照度[klx]。

大気路程は、直射日光が大気圏外から地表に到達するまでの経路に沿っての空気量で、太陽が天頂にあるときを単位として表す。その数値に関しては、古くから多くの提案があるが、Bemporad の提案値¹⁵⁾が最もよく用いられている。また、これに対する近似式も多く提案されている。さらに、最近の理科年表¹⁶⁾には、Bemporad の提案値と僅かに異なる数値も記載されている。本研究では、Kittler, R.による、次の近似式¹⁷⁾を用いる。

$$m = \frac{2 \cdot (\sqrt{\sin^2 \gamma_s + 0.0031465} - \sin \gamma_s)}{0.0031465} \quad \dots\dots\dots (9)$$

m : 大気路程[-]、

γ_s : 太陽高度[rad. or deg.]。

2.3 大気の混濁因子

大気の混濁因子は、放射に関してリンケ(Linke, F.)が提唱した¹⁸⁾。その後、若干の検討・改良がなされているようであるが、これを、一般にリンケの混濁因子という。Kittler, R.は Homogeneous Sky の提案⁷⁾において、リンケの混濁因子を指標として採用している。

リンケの放射に関する混濁因子、すなわち、放射混濁因子は、混濁した大気による直達日射の消散係数と乾燥清澄大気による直達日射の消散係数により、次式で表される。

$$TL = \frac{a}{a_R} \quad \dots\dots\dots (10)$$

TL : 放射混濁因子[-]

a : 混濁した大気による直達日射の消散係数[-]、

a_R : 乾燥清澄大気による直達日射の消散係数[-]。

放射混濁因子と放射大気透過率との関係は次のようである。

$$Pe = e^{-a_R \cdot TL} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Pe : 放射大気透過率[-]。

Kasten, F.は乾燥清澄大気による直達日射の消散係数を次式で表している¹⁹⁾。

$$a_R = \frac{1}{9.4 + 0.9 \cdot m} \quad \dots\dots\dots (12)$$

放射混濁因子(TL)と同様に、星光に関するリンケの混濁因子、すなわち、星光混濁因子(TvL)^{20,21}も次式で表される。

$$TvL = \frac{a_v}{a_{vR}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

TvL : 星光混濁因子[-]、

a_v : 混濁した大気による直射日光の消散係数[-]、

a_{vR} : 乾燥清澄大気による直射日光の消散係数[-]。

星光混濁因子と星光大気透過率との関係は次の式で表される。

$$P_v = e^{-a_{vR} \cdot TvL} \quad \dots\dots\dots (14)$$

P_v : 星光大気透過率[-]。

Navvab, M.らは、乾燥清澄大気による直射日光の消散係数(a_{vR})として次の式を提案している。

$$a_{vR} = \frac{1}{9.9 + 0.043 \cdot m} \quad \dots\dots\dots (15)$$

2.4 Sky Clearness と Sky Brightness

Perez, R.は天空輝度分布と関係のある日射に関する指標として、Sky Clearness と Sky Brightness と称する指標を定義し²²、これにより放射照度に関する測定データの検討を行い²³、天空輝度分布に関する All Weather Model を提案²⁴している。

Sky clearness は下式で表されている。

$$\varepsilon = \frac{(E_{ed} + E_{es}) / E_{ed} + 1.041 \cdot \gamma_{sz}^3}{1 + 1.041 \cdot \gamma_{sz}^3} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ε : Sky Clearness[-]、

E_{ed} : 水平面拡散放射照度[W/m²]、

E_{es} : 法線直達放射照度[W/m²]、

γ_{sz} : 太陽の天頂角($= \pi / 2 - \gamma_s$) [rad.]。

日射が無く、すなわち、直達あるいは直射成分がないとき、Sky Clearness はに最小値をとり 1 となる。

Sky Brightness は、大気圏外法線直達放射照度に対する水平面拡散放射照度の比に、大気路程を乗じたもので、次式で表されている²⁵。

$$\Delta = m \cdot \frac{E_{ed}}{E_{eo}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

Δ : Sky Brightness[-]、

E_{ed} : 水平面拡散放射照度[W/m²]、

E_{eo} : 大気圏外法線直達放射照度[W/m²]、

m : 大気路程[-]。

2.5 全天空照度と無次元全天空照度

全天空照度は太陽高度に従属する。したがって、天空指標として検討するため、全天空照度を大気圏外水平面直射照度で除し無次元化する。すなわち、 $E_{vd} / (E_{vo} \cdot \sin \gamma_s)$ である。ここに含まれる $1 / \sin \gamma_s$ は大気路程の近似式として用いられている。しかし、太陽高度が低いとき、この近似式は適用できない。本研究では、大気路程に式(9)に示す近似式を適用して、式(18)のようにあらわす。これを、無次元全天空照度と称する。

$$E_{vdm} = m \cdot \frac{E_{vd}}{E_{vo}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

E_{vdm} : 無次元全天空照度[-]、

E_{vd} : 全天空照度[lx]、

E_{vo} : 大気圏外法線直射照度[lx]、

γ_s : 太陽高度[rad. or deg.]。

2.6 水平面グローバル照度と無次元水平面グローバル照度

星光に関連する測定要素で、一般的に最も容易にデータが入手できるのは、水平面グローバル照度である。

水平面グローバル照度は、星光測定で最も容易に測定が可能である。全天空照度測定の遮蔽リングや、直射光測定の太陽追尾装置などを必要としない。このため、計測や制御のシステムも簡易である。

水平面グローバル照度も、全天空照度と同様に無次元化して次のようにあらわす。これを、無次元水平面グローバル照度と称する。

$$E_{vgm} = m \cdot \frac{E_{vg}}{E_{vo}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

E_{vgm} : 無次元水平面グローバル照度[-]、

E_{vg} : 水平面グローバル照度[lx]、

E_{vo} : 大気圏外法線直射照度[lx]。

以上の他に、天空状態を表す指標として、法線直射照度も検討の対象になる。また、水平面グローバル放射照度や水平面拡散放射照度や法線直達放射照度も指標として検討の対象になる。水平面グローバル照度のおおよその値は、発光効率により、水平面グローバル放射照度から求めることができる。水平面グローバル放射照度は、日本各地の主な気象台で、毎日 1 時間ごとに測定し、これを他の気象要素と共に SDP データとしてフロッピーディスクに収録し販売している。日本の大部分の地点では、星光の測定が常時行われていない。これらの地点では、水平面グローバル放射照度の活用も考えられる。

3. 天空輝度分布推定のための天空指標の検討

天空指標から、天空輝度分布を推定するため、順位係数で分類した天空輝度分布パターンと、天空指標との関係を比較検討する。順位係数と各種の天空指標との関係を検討し、有効な天空指標で累積出現頻度との関係を求めれば、星光日射関連の測定値から天空輝度分布を推定できると考える。

3.1 天空指標と天空輝度分布の概略の関係

天空輝度分布と各天空指標との、大まかな関係を把握するため、太陽高度別の順位係数と各天空指標との関係が直線的関係にあるとした時の、両者の相関係数を求める。これにより、天空輝度分布推定に有望と思われる天空指標を選択する。

本研究では天空指標として、既存の研究で使われた天空指標として、星光クラウド・レイショ、放射クラウド・レイショ、星光大気透過率、放射大気透過率、星光混濁因子、放射混濁因子、Clearness、Brightness を、新たに天空指標として可能性があると予想される天空指標として、水平面グローバル照度、水平面グローバル放射照度、無次元水平面グローバル照度、無次元水平面グローバル放射照度、法線直射照度、法線直達放射照度、全天空照度、水平面拡散放射照度、無次元全天空照度、無次元水平面拡散放射照度を取り上げ検討する。なお、太陽高度が 5 度以下の場合には、直射光が周辺の地物により遮られる場合があるため、検討の対象としていない。

グローバルに関する天空指標には、グローバル照度、無次元グローバル照度、グローバル放射照度、無次元グローバル放射照度がある。これらと順位係数との関係を図 1 に示す。これらの天空指標の値は、晴天空のとき大きく、曇天空のとき小さい。順位係数の値は晴天空のとき最も小さく、曇天空になるほど大きくなる。したがっ

て、グローバルに関する天空指標は、いずれも負相関であるが、順位係数との相関が比較的大きく、かなり有望な指標と考えられる。これらは、太陽高度の変化の影響が少なく、相関係数の太陽高度に対する変動が比較的小さい。特に、無次元グローバル照度は太陽高度の低い時の変動が少なく、天空輝度分布を推定するための指標として詳細に検討する必要がある。

直射成分を主体とし、また、これに拡散成分を考慮した天空指標には、昼光クラウド・レイショ、放射クラウド・レイショ、昼光大気透過率、放射大気透過率、昼光混濁因子、放射混濁因子、Clearness、法線直射照度、無次元法線直射照度、法線直達放射照度、無次元法線直達放射照度がある。これらの天空指標の順位係数との相関係数が正相関の場合を図2に、負相関の場合を図3に示す。いずれも、太陽高度が低い場合に、相関が小さくなる傾向にある。クラウド・レイショは太陽高度が高い場合、かなり相関階数が大きくなっている。放射混濁因子は、それほど大きな相関係数になっていない。ここでは、既往の研究で使用されていることも考慮して、昼光クラウド・レイショ、昼光混濁因子、昼光大気透過率、Clearnessを詳細に検討する対象とする。

拡散成分を主とした天空指標には、全天空照度、無次元全天空照度、水平面拡散放射照度、無次元水平面拡散放射照度、Brightnessがある。これらの天空指標と順位係数との関係を図4に示す。いずれも、太陽高度が高くなると相関係数は小さく、天空輝度分布の推定には使用できないと考える。他の天空指標との比較を目的として、Brightnessの検討をする。

ここまでの比較検討は、天空指標と順位係数との一次直線的関係に関する相関係数の比較である。天空輝度分布の天空指標との関係は、グローバルに関する天空指標との相関が高く、次に直射成分を主とした天空指標との相関が高く、拡散成分を主とした天空指標との相関が低くなる傾向にある。

ここまでの検討結果から、天空輝度分布を推定するために可能性のある天空指標として、無次元グローバル照度、昼光クラウド・レイショ、昼光大気透過率、昼光混濁因子、Clearness、Brightnessを取り上げる。

3.1 天空輝度分布の累積出現頻度と天空指標との関係

天空輝度分布を推定する指標として可能性があると思われる天空指標（無次元グローバル照度、昼光クラウド・レイショ、昼光大気透過率、昼光混濁因子、Clearness、Brightness）について、順位係数により並べた天空輝度分布の累積出現頻度との関係を検討する。

天空輝度分布の累積出現頻度の無次元水平面グローバル照度との関係を図5に、昼光クラウド・レイショとの関係を図6に、昼光大気透過率との関係を図7、昼光混濁因子との関係を図8に、Clearnessとの関係を図9に、Brightnessとの関係を図10に、太陽高度が25°-30°の場合と45°-50°の場合について示す。

各天空指標は、太陽高度帯5%ごと、累積出現頻度帯5%ごとに、平均値と標準偏差(SD)を求めた。異常値を除くため、各帯域において平均値から標準偏差の±2倍を越える値(全データの約5%)は除外した。

(1) 無次元水平面グローバル照度と天空輝度分布の関係

図5によれば、累積出現頻度と無次元水平面グローバル照度との関係は、1次直線的な関係ではないが、累積出現頻度が高くなるに

図1 グローバルに関する天空指標と順位係数との関係

図2 直射に関する天空指標の順位係数との関係（正相関指標）

図3 直射に関する天空指標の順位係数との関係（負相関指標）

図4 拡散に関する天空指標の順位係数との関係

図5 累積出現頻度と無次元グローバル照度の関係

つれて、無次元水平面グローバル照度が徐々に低下し、曇天空と思われるところでは 0.2 程度まで低下している。晴天空では無次元水平面グローバル照度はおおよそ 0.7 以上、曇天空ではおおよそ 0.2 以下程度であると思われる。その間が、近晴天空、中間天空、近曇天空とに分類できそうである。直射光と拡散光の両方で構成された、無次元水平面グローバル照度と天空輝度分布との関係が確立できれば、グローバル照度から天空輝度分布が推定でき、最も測定が簡単で汎用的な指標になると思われる。

(2) 昼光クラウド・レイショと天空輝度分布の関係

図 6 によれば、相関係数を基にした順位係数により並べた天空輝度分布と昼光クラウド・レイショは、晴天空では、かなり良く一致している。したがって、昼光クラウド・レイショを小さいものから順に並べて、太陽高度別・累積出現頻度別の平均天空輝度分布を求めることもできる。

相関係数を基にした順位係数で晴天空から曇天空に並べた方法と同様の方法で、実測により取得した天空輝度分布を、昼光クラウド・レイショにより順位づけすることもできる。

昼光クラウド・レイショは直射光と拡散光との関係を表したものであり、直射光の有無とその強度の検討には効果的な指標として利用できるが、天空輝度分布を直接的に表すものではない。また、曇天や直射光が雲などで隠れている場合、昼光クラウド・レイショは 1 となる。既往の研究²では、出現する天空の 50% 以上は昼光クラウド・レイショが 0.9 以上になっている。したがって、曇天に近い天空状態で分類が困難になる傾向がある。晴天空に近い状態で、太陽が雲で隠れたときも、昼光クラウド・レイショは 1 になり、天空輝度分布のパターンは晴天空に近似しているが、曇天空と同じ順位係数になることもある。

昼光クラウド・レイショは、晴天空に近い天空では、天空状態をかなり適正に分類できると考えられるが、曇天空に近い天空では昼光クラウド・レイショが 1 になるため、天空状態の分類が困難になることが考えられる。

(3) 昼光大気透過率と天空輝度分布の関係

図 7 によれば、晴天空に近いほど昼光大気透過率は大きく、曇天空に近いほど昼光大気透過率は小さくなる傾向がみえる。しかし、累積出現率が 70% 以上になると、昼光大気透過率はほとんど 0 に近くなるため、ここでは天空の分類は困難である。これは、昼光大気透過率が直射光だけを基に計算されているため、直射光がなければ昼光大気透過率の計算が成立しないためである。

曇天空や曇天空に近い天空では分類が困難であるが、晴天空を分類するには指標として十分使用可能である。

(4) 昼光混濁因子と天空輝度分布の関係

図 8 によれば、大気透過率やクラウド・レイショと同様に、晴天空に近い天空の場合は、昼光混濁因子によって、天空状態の順位付けが可能である。曇天空に近くなると、昼光混濁因子がかなり大きく変化して、順位づけの値の幅が大きく分類が困難になる。

(5) Clearness と天空輝度分布の関係

Clearness は前記の式で表すように、直射光の大小でその値が変わる。直射光がない場合には 1 になり、直射光が大きくなるほどその値が大きくなる。図 9 によれば、天空輝度分布の分類との関係は、かなり良く整理されているが、累積出現頻度が 50% を越えると

図 6 累積出現頻度と昼光クラウド・レイショの関係

図 7 累積出現頻度と昼光大気透過率の関係

図 8 累積出現頻度と昼光混濁因子の関係

図 9 累積出現頻度と Clearness の関係

図 10 累積出現頻度と Brightness の関係

Clearness は、ほとんど 1 に近い値になり、判別が困難である。

Perez, R.らは Clearness を 1~1.065~1.230~1.500~1.950~2.800~4.500~6.200~の 8 つの領域に不等分に分割して、晴天から曇天空にパターンに分類し、Brightness との組み合わせで、輝度分布を与える係数を設定している²¹。

(6) Brightness と天空輝度分布の関係

図 10 によると、Brightness は、どの太陽高度においても、累積出現頻度が大きくなるに従って徐々に大きくなり、累積出現頻度 50% 前後で最大になる。それから、また徐々に小さくなり、累積出現頻度が 80% 前後以上では、ほぼ一定になっている。Brightness の変化は、異なる累積出現頻度帯域で、同じ値をとることがあるため、この値だけで天空輝度分布との関連を言及するには適当でない。なお、全天空照度や無次元全天空照度も、Brightness と同様の傾向を示す。

4. まとめ

天空輝度分布を推定する、これまで使用された天空指標や、指標として可能性があると思われる天空指標の、太陽高度別の天空輝度分布との関係について検討を行った。これにより、次の結果が得られた。

(1) 無次元水平面グローバル照度は、直射光と拡散光の両者が一体となった指標である。直射光がない場合も天空状態に応じて異なった値を取り、推定が不能になることが少ない。累積出現頻度帯ごとの標準偏差のまとまりはクラウド・レイショのほどではないが、分類できる範囲が広い特性がある。また、最も簡易に多地域のデータが入手できるグローバル放射照度に適正な発光効率を考慮すれば、多くの地域における天空輝度分布の推定にもつながる。

無次元水平面グローバル照度を天空輝度分布を推定するための天空指標として、詳細な検討を加える必要がある。

(2) 直射光だけを基にした天空指標である、昼光大気透過率や昼光混濁因子は、晴天に近い天空においては、かなり効果的に天空輝度分布の推定ができると考えられるが、曇天空に近い天空では、直射光が 0 になるため、天空輝度分布を推定する指標としては不十分である。

(3) 拡散光だけを基にした指標の Brightness や無次元全天空照度は、異なる累積出現頻度帯で同一の値になることがあるため、天空輝度分布を推定するための指標としては不適当と考える。

(4) 直射光と拡散光との両者の組み合わせによる指標である Clearness や昼光クラウド・レイショや無次元水平面グローバル照度は、比較的 sky 輝度分布との相関が高い傾向がある。この中で、Clearness は、特に晴天における指標としては、かなり良好な指標といえるが、曇天、すなわち、直射光がない場合は 1 になり、天空輝度分布の推定には適さない。昼光クラウド・レイショも、晴天での sky 輝度分布の推定には適している。直射光がない場合には 1 になり、天空輝度分布の推定に適しているとはいえない。Clearness や昼光クラウド・レイショは、その値が 1 の場合、天空輝度分布を曇天空として整理するのであれば、指標として採用できる。

次報において、無次元水平面グローバル照度から、その時の sky 輝度分布を推定する方法について報告する予定である。

参考文献及び注

- 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 sky 輝度分布の分類—sky 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、1997。
- ² Commission Internationale de l'Eclairage(国際照明委員会)の略。CIE は世界のすべての先進国を含め、約 40ヶ国が加盟する照明に関する唯一の国際機関である。照明に関する基準や標準を定めたり、勧告したり、また、研究の交流を計っている。また、照明に関する ISO 規格も作成している。CIE の歴史は 100 年に及ぶ。
- ³ International Daylighting Measurement Programme の略。省エネルギー設計やその効果予測のための、詳細な昼光と日射のデータ取得と標準資料作成を目的として、CIE により、長期的測定を 1991 年から世界各地約 50ヶ所で実施している。
- ⁴ Matsuzawa, T., Nakamura, H., Koga, Y., Rahim, M.R., Igawa, N., An investigation on cloud ratio, Proceedings of Lux Europa 1993, Vol.II, pp.622-629, 1993.
- ⁵ 松澤朋子、中村洋、古賀靖子、瞬時的な昼光環境推定のための sky 輝度分布に関する研究、九州大学工学集報、第 69 巻、第 2 号、pp.167-173, 1996.
- ⁶ Nakamura, H., Koga, Y., Igawa, N., Development of a method for classification of sky conditions, IES 39th Convention, Light 94, Sydney, pp.1-6, 1994.
- ⁷ Kittler, R., Luminance model of homogeneous skies for design and energy performance predictions, Proc. 2. 1986 International Daylight Conference, Long Beach, pp.31-37, 1986.
- ⁸ Harrison, A.W., Directional sky luminance versus cloud cover and solar position, Solar Energy, Vol.46, No.1, pp.13-19, 1991.
- ⁹ Perraudau, M., Chauvel, P., One year's measurement of luminous climate in Nantes, Proc. Int. Daylighting Conf., Long Beach, CA(1986).
- ¹⁰ Perraudau, M., Climate lumineux a Nantes: Resultats de 15 mois de mesures, CSTB, Nantes(1988).
- ¹¹ Littlefair, P.J., Predicting hourly internal daylighting illuminances for dynamic building energy modeling, Technical Note 89/1, Building Environmental Performance Analysis Club, BRE, Garston, 1989.
- ¹² Kittler, R., Some consideration concerning the zenith luminance of the cloudless sky, Attached document of circular letter No.11 of CIE Committee E-3.2, 1970.
- ¹³ Aydinli, S., Krochmann, J., Data on daylight and solar radiation, draft for CIE TC 4.2, 1983.
- ¹⁴ 小島武男、中村洋共編、現代建築環境計画、オーム社。
- ¹⁵ 藤原映平、北岡龍海、岩波講座 物理学 VII. A. 気象光学、岩波書店、p.6.
- ¹⁶ 理科年表、国立天文台編、丸善、p. 172, 1995.
- ¹⁷ Kittler, R., A new concept for standardizing the daylight climate state, Proc. 6th Lux Europa, Vol. 1, pp.303-312, 1989.
- ¹⁸ Linke, F., Transmission-Koeffizient und Trübungsfaktor, Beitr. Phys. Atmos. 10, pp.91-103, 1992.
- ¹⁹ Kasten, F., A simple parameterization of the pyrheliometric formula for determining the Linke turbidity factor, Meteorol. Rdsch., 33, pp.124-127, 1980.
- ²⁰ Navvab, M., Karayel, M., Ne'eman, E., Selkowitz, S., Analysis of atmospheric turbidity for daylight calculations, Energy and Buildings, Vol. 6, pp.293-303, 1984.
- ²¹ Spatial distribution of daylight Luminance distributions of various reference skies, Pub. CIE No.110, 1994.
- ²² Perez, R., Stewart, R., Scott, T., A two-parameter description of the sky hemisphere, Proceedings of AMS 5th Conference on atmospheric radiation, Baltimore, MD, pp.322-325, 1983.
- ²³ Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, Solar energy, Vol.44, No.5, pp.271-289, 1990.
- ²⁴ Perez, R., Seals, R., Michalsky, J., All-weather model for sky luminance distribution - Preliminary configuration and validation, Solar Energy, Vol. 50, No. 3, pp.235-246, 1993.
- ²⁵ ここでの Sky Brightness は CIE の定義する Brightness とは無関係である。

(1996年12月10日原稿受理、1997年1月30日採用決定)