

天候指標による天空輝度分布の推定に関する研究

建築環境工学 加納隆維

1 背景と目的 1.1 背景と目的 2000年にCIE(国際照明委員会)は晴天空5、中間空5、曇天空5の合計15種類の標準天空CIE General Skyを提案した。実際には天空輝度分布の観測は困難であるので、実用上に天空輝度分布は昼光日射の観測値から推定せざるを得ない。しかし、昼光日射の測定値から、天空輝度分布を推定する方法はまだ確立されていない。

そこで本研究は長期観測データを用いて、昼光日射と天空輝度分布の関係を分析し、昼光日射データから天空輝度分布タイプを推定する方法を提案した。具体的には京都の天空輝度分布での観測データを基にして、1)天空状態を天空指標の組合せによって表現する。2)その組合せの各分類における天空輝度分布のタイプを明らかにする。3)天空輝度分布に最適な天候指標の特性分析を行い、推定法を確立する

1.2 CIE 標準モデル R.Kittlerらによって提案された、15種類の天空タイプモデルは2000年8月に標準案としてCIEで採用された。この標準案³⁾はそれぞれ6つの階調関数と散乱関数の選択された組合せを利用し、それぞれa,b,c,d,eパラメータを用いて指数近似概算することによってモデル化された。以下に、その式を示す。

$$\frac{L}{L_z} = \frac{f(x) \times \varphi(Z)}{f(Z_s) \times \varphi(0^\circ)}$$

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

$$f(x) = 1 + c \left\{ \exp(dx) - \exp\left(d \frac{\pi}{2}\right) \right\} + e \cos^2 x$$

$$\cos x = \cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos A_z$$

L : 天空要素の輝度 [cd/m²]

L_z : 天頂輝度 [cd/m²]

Z : 天空要素の天頂角 [rad]

Z_s : 太陽の天頂角 [rad]

A_z : 天空要素と太陽の方位角の差 [rad]

x : 散乱角 [rad]

f(x) : 相対散乱インディカトリクス関数

φ(Z) : 階調関数

a,b,c,d,e : 標準セットのパラメータ

2方法 2.1 使用したデータ IDMP 京都観測所において、1998年7月~1999年6月の1年間にわたって、15分間隔で測定された太陽高度5°以上の昼光測定データとそ

れに対応する天空輝度分布データを用いる。

2.2 解析方法 2.2.1 指標の組合せによる分類の方法 本研究では、最近隣重心ソート法でクラスター分析を行い、天候指標の組合せによって、すべての実測データを15グループに分類した。

2.2.2 天空輝度分布実測値による天空タイプの推定方法 推定タイプの判別は、最適法である。実測値とモデル値の差からタイプごとに判別値を計算し、タイプ間でその値を比較して、最小のタイプをその天空輝度分布データの推定タイプとした。

3 結果と考察 3.1 天候状態を表す指標 本研究で用いる10の天候指標は、表3.1のようである。また、大気外日光法線照度は13.8klx、太陽定数は1354 W/m²とした。

表3.1 天候指標

指標	計算式
昼光クラウド・レイシヨ ¹⁾	$C_v = \frac{E_{vd}}{E_{vg}} = \frac{E_{vd}}{E_{vd} + E_{vs} \sin \gamma_s}$
昼光大気透過率 ¹⁾	$P_v = \sqrt{\frac{E_{vs}}{E_{vo}}}$
昼光混濁因子 ¹⁾	$TvL = \frac{1 + 0.0045m}{0.1m} \bullet \ln \frac{E_{vso}}{E_{vs}}$
クリアネス ¹⁾	$\varepsilon = \frac{(E_{ed} + E_{es}) / E_{ed} + 1.041\gamma_{sz}^3}{1 + 1.041\gamma_{sz}^3}$
ブライトネス ¹⁾	$\Delta = m \frac{E_{ed}}{E_{eo}}$
無次元全天空照度 ¹⁾	$E_{vdm} = m \frac{E_{vd}}{E_{vo}}$
無次元水平面グローバル照度 ¹⁾	$E_{vgm} = m \frac{E_{vg}}{E_{vo}}$
全天空照度に対する天頂輝度の比 ³⁾	$\gamma_{Lz} / E_{vd} = \frac{L_z}{E_{vd}}$
無次元天空照度(Killter) ³⁾	$E_{vdm}(Killter) = \frac{E_{vd}}{E_{vo} \sin \gamma_s}$
無次元直射照度 ⁴⁾	$E_{vsm} = m \frac{E_{vs}}{E_{vo}}$

本研究では大気路程の式として、Kasten と Young の式(1989)²⁾を用いる。

$$m = F(\gamma_s) = \frac{1}{\sin \gamma_s + 0.50572(\gamma_s + 6.07995^\circ)^{-1.6364}}$$

3.2 指標の組合せによる天候状態の分類 CIE 品質管理テストに合格した 10,005 個日光日射データについて、異常値を除くため、以上の 10 指標において平均値から標準偏差の ±2 倍を超える値は除外した。7508 個日光日射データについて、クラスター分析を行った。10 の天候指標の組合せによって、15 グループに分類した。

3.2.1 分類データと天候指標の関係 各指標の値を正規化し、天候グループの指標値の分布形状に基づいて 15 の天候グループから類似のグループ同士を 4 つの天候グループに集約する。正規化した指標値の範囲を図 3.1 に示す。指標の範囲を考察して、これらを曇天から晴天までの天空状態について対応させて、結果は表 3.2 に示す。

表 3.2 4 つの天候グループと天空状態の対応付け

曇天空	gr3、gr7、gr10
近曇天空	gr1、gr14
中間天空	gr5、gr15
晴天空	gr2、gr4、gr13
(対応付けが困難)	gr6、gr8、gr9、gr11、gr12

3.3 天空輝度分布データに基づく輝度タイプと天候グループの関係 日光日射データに対応した天空輝度分布データを用いて最適法によって輝度タイプを分類し、3.2 の天候グループと輝度タイプとの関係を検討する。

3.3.1 天空輝度分布データによる輝度タイプの推定 輝度タイプの発生頻度を図 3.2 に示す。ty1「CIE 標準曇天空すなわち、急な階調と方位一様性を持った曇天空」が最も高く、26.96%を占める。ついで、ty8「明るい太陽コロナとある程度の一様性を持った部分曇り」(21.30%)が高い。晴天側では ty11「明るい太陽コロナを持った白みがかかった青空」(12.20%)の発生頻度が高い。ty13「CIE 標準晴天空、すなわち、より広い範囲の太陽コロナを持った雲のない汚染された天空」は 6.62%である。ty9、10、12「CIE 標準晴天空」、14、15 はほとんどない。

以上から、出現する主な輝度タイプとして、ty1、ty1 以外の曇天空(ty2、3、4、5)、ty8、ty8 以外の中間天空(ty6、7、9、10)、ty11、ty13 の 6 つに分けられる。

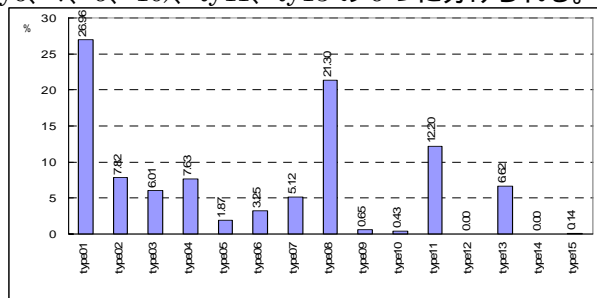


図 3.2 天空輝度タイプの出現頻度(全 6,484 個)

3.3.2 相互の出現頻度による天候グループと輝度タイプの対応付け ここで、天候グループとは、天候指標に基づいてクラスター分析して分類したものをさす。輝度タイプとは最適法により天空輝度分布データに基づいて推定した CIE の 15 輝度タイプをさす。

6 つの主な輝度タイプ ty1、ty1' (ty2、3、4、5)、ty8' (ty6、7、9、10)、ty8、ty11、ty13 の割合について、割合が高いタイプに着目して考察する。

ty1 の割合が最も高いグループは gr3、7、10 である。図 3.3 に示す。

ty1' の割合が最も高いグループは gr1、11、14 であるが、gr11 は ty1 と ty8 の割合も高い。図 3.4 に示す。

ty8' の割合が最も高いグループはない。

ty8 の割合が最も高いグループは gr5、8、9、12、15 であるが、gr8 は ty8 の割合も高い。gr9 は ty13 の割合も高。図 3.5 に示す。gr8、gr9 は gr5、12、15 と分布形状が異なる。

ty11 の割合が最も高いグループは gr2、4、13 であるが、いずれも ty8 の割合も高い。gr13 は ty13 の割合も高い。図 3.6 に示す。

ty13 の割合が最も高いグループは gr6 であるが、gr6 は ty11 の割合も高い。図 3.7 に示す。

以上の考察をもとに、天候グループにおける輝度タイプの出現パターンによって、15 の天候グループを分類すると表 3.3 のようになる。gr8、gr9 は ty8 の割合が最も高いが、分布形状は gr5、12、15 と異なるので、不明確なグループとして扱う。以上、6 つに分類することができる。ただし、gr11 は ty1' も多いが ty1 も多く含んでいる。ty11 を最も多く含む gr2、4、13 は ty8 もまた多く含んでいる。gr6 は ty13 を最も多く含むが、ty11、8 も多く含む。gr8 は ty8、11 を同程度に多く含んでいる。

表 3.3 輝度タイプの出現頻度に基づく天候グループの分類

ty1 が多いグループ	gr7、gr10、gr3
ty1' が多いグループ	gr1、gr11、gr14
ty8 が多いグループ	gr5、gr12、gr15
ty11 が多いグループ	gr2、gr4、gr13
ty13 が多いグループ	gr6
不明確なグループ	gr8、gr9

さらに、タイプにおけるグループの出現頻度を考えると天候グループと輝度タイプの対応付けは表 3.4 のようになる。gr11 は ty1 の出現頻度も高いため、ty1' と ty11 の両方に対応するといえる。gr6 は ty11 の出現頻度も高いため、ty13 と ty11 の両方に対応するといえる。gr8 においては ty8 の出現頻度が最も高いが、ty11 も高いことから、対応させることが難しいが、ty8 に対応することに

した。gr9 においては ty8 の出現頻度が高いが、ty13 も高いことから、どのタイプとも対応させることが難しい。

表 34 相互の出現頻度に基づく天候グループと輝度タイプの対応付け

ty1	gr7、gr10、gr3、(gr11)
ty1'	gr11、gr1、gr14
ty8	gr5、gr15、gr12、(gr8)
ty11	gr4、gr2、gr13、(gr6)
ty13	gr6
(対応付けが困難)	gr9

3.3.3 天候グループの天空状態への対応付け ここでは、表 3.4.2 に表 3.3.5 を合わせて輝度タイプも考慮して天候グループを天空状態と対応付ける

表 3.1 と表 3.3 に基づいて、15 の天候グループを表 3.5 のような曇天空から晴天空までの 7 つの天空状態に対応付けることができる。gr11 は近々曇天空、gr12 は近晴天空、gr2、4、13 は近々晴天空と呼ぶことにする。

表 35 輝度タイプを考慮した天候グループの天空状態への対応付け

天空状態	天候グループ	データ数
曇天空	gr7、gr10、gr3	2073
近々曇天空	gr11	1451
近曇天空	gr1、gr14	684
中間天空	gr5、gr15	969
近晴天空	gr12	65
近々晴天空	gr4、gr2、gr13	535
晴天空	gr6	395
(対応付けが困難)	gr8、gr9	312

3.3.4 指標値の範囲に基づく天空状態の分離 3.3.4.1 天空状態の分離に有効な天候指標 図 3.8 に各天空状態における天候指標の平均値±標準偏差の範囲を示す。これに基づいて、隣り合う天空状態の間で指標の範囲が重なっていない天候指標を考察する。曇天空と近々曇天空では天候指標は KITL(無次元全天空照度(kittler))である。近々曇天空と近曇天空では PERV(昼光大気透過率)、TURV(昼光大気混濁因子)、BRGT(ブライトネス)、EVDVM(無次元全天空照度)、EVGM(無次元水平面グローバル照度)である。近曇天空と中間天空では CLDV(昼光クラウド・レイショ)、CLER(クリアネス)、BRGT、EVDVM である。中間天空と近晴天空の分離では CLDV、PERV、TURV、CLER、EVDVM、EVSM(無次元直射照度)である。近晴天空と近々晴天空の分離では LERT(全天空照度に対する天頂輝度の比)である。近々晴天空と晴天空では CLER、BRGT、EVDVM である。

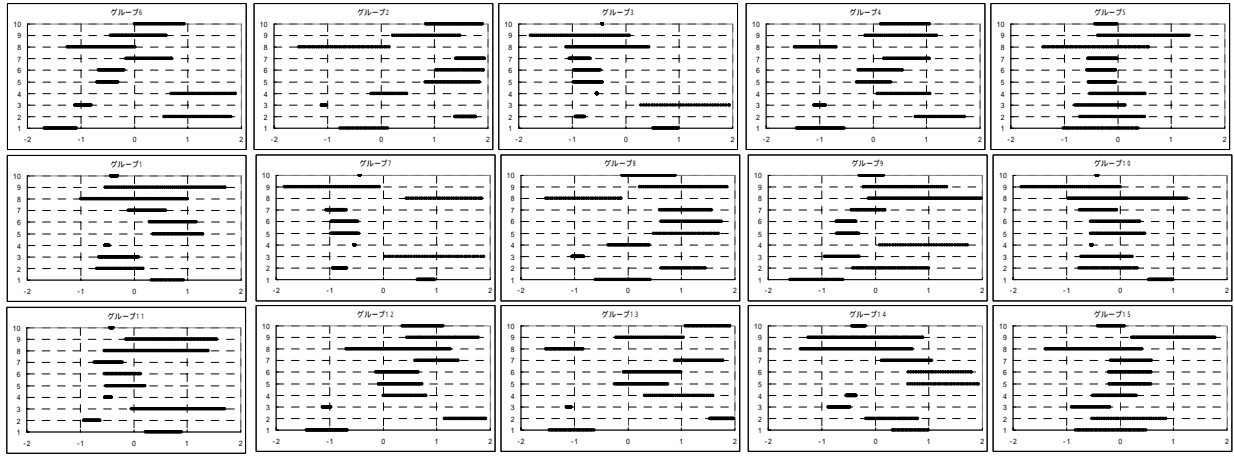
以上から、曇天空と近々曇天空、近晴天空と近々晴天空の分離に有効な天候指標はそれぞれ 1 個しかないので、

これらを含める。全ての天候状態を分離するために最低必要な指標は CLDV、BRGT、LERT、KITL である。CLDV、BRGT、LERT、KITL を求めるには照度のグローバルと拡散成分が必要である。EVDVM、EVGM はこれらの成分から求めることができるので、EVDVM、EVGM も加えて、6 つの有効指標(CLDV、BRGT、EVDVM、EVGM、LERT、KITL)を天空状態の分離に有効な天候指標とする。3.3.4.2 6 つ指標値の範囲による天空状態の分離の方法 6 つの指標のうち天空状態を分離するのに最低必要な指標は 4 種類であり、4 種類の指標によって分離する方法は以下の 4 とおりである。すなわち、CLDV、BRGT、LERT、KITL、CLDV、EVDVM、LERT、KITL、BRGT、EVGM、LERT、KITL、EVDVM、EVGM、LERT、KITL である。

は天空状態の分離方法としては理論上で可能であるが、分離の方法は、より難しい。本研究では検討しない。の場合に必要なデータは全天空照度、水平面グローバル照度、水平面拡散放射照度、太陽高度、天頂輝度である。の場合に必要な測定項目は全天空照度、水平面グローバル照度、太陽高度、天頂輝度である。より必要なデータは少ないので、本研究はの方法を選んだ。の方法によって天候指標から天空状態を分離するフローチャートを図 3.9 に示す。

4 まとめ 長期観測データを用いて、昼光日射と天空輝度分布の関係を分析し、昼光日射データから天空輝度分布タイプを推定する方法を提案した。1)昼光・日射データから 10 種類の天候指標を計算し、その範囲に基づいて、天候状態を最近隣重心ソート法によって 15 のグループに分類した。2)天空輝度分布データから、最適法により CIE 標準(案)の輝度タイプを推定した。観測地の出現輝度タイプは 6 タイプに集約できた。3)1)の天候グループの天候指標の分布範囲と 2)の天空輝度分布タイプのグループ内出現頻度の相互を勘案して類似のグループを集約し、曇天空から晴天空まで 7 天空状態に集約できることを明らかにした。4)隣り合う天空状態の分離に着目し、指標の範囲の相違にもとづいて分離に有効な天候指標を抽出し、「昼光クラウド・レイショ」、「無次元全天空照度」、「無次元全天空照度(Kittler)」、「全天空照度に対する天頂輝度の比」の 4 指標に絞った。5)4 指標の範囲に基づいて、照度と日射量のデータだけから天空を 7 つの天空に分離する流れ図を作成した。

すなわち、天空輝度分布の実測値がなくても、拡散照度、水平面グローバル照度、天頂輝度の実測値だけから、曇天空から晴天空までの 7 つの天空状態(曇天空、近々曇天空、近曇天空、中間天空、近晴天空、晴天空)に分離する方法を提案した。



1: 昼光クラウド・レイショ 2: 昼光大気透過率 3: 昼光混濁因子(1/100) 4: クリアネス 5: ブライツネス 6: 無次元全天空照度
7: 無次元水平面グローバル照度 8: 全天空照度に対する天頂輝度の比(10倍) 9: 無次元天空照度(Kittler) 10: 無次元直射照度

図 3.1 正規化した天候指標値の範囲

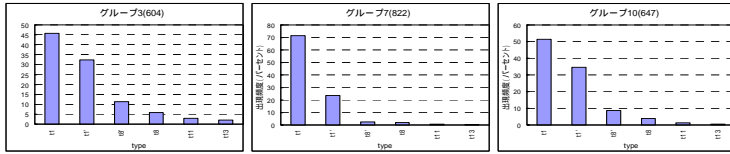


図 3.3 ty1の出現頻度が最も高い天候グループ

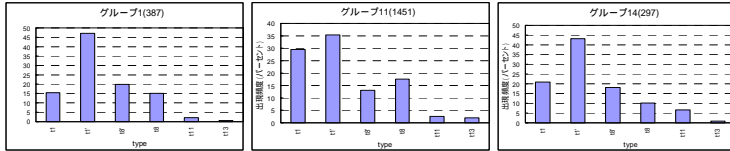


図 3.4 ty1'(ty2,3,4,5)の出現頻度が最も高い天候グループ

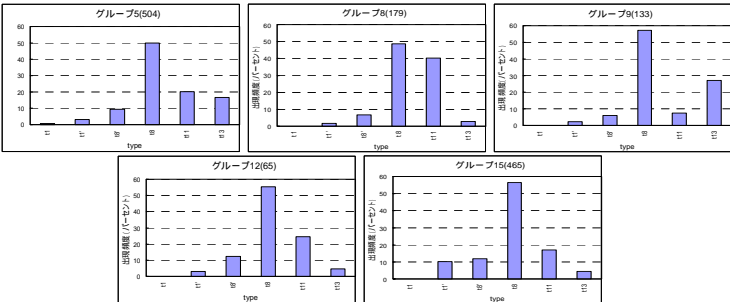


図 3.5 ty8の出現頻度が最も高い天候グループ

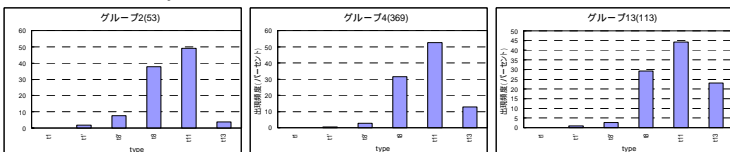


図 3.6 ty11の出現頻度が最も高い天候グループ

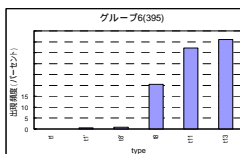
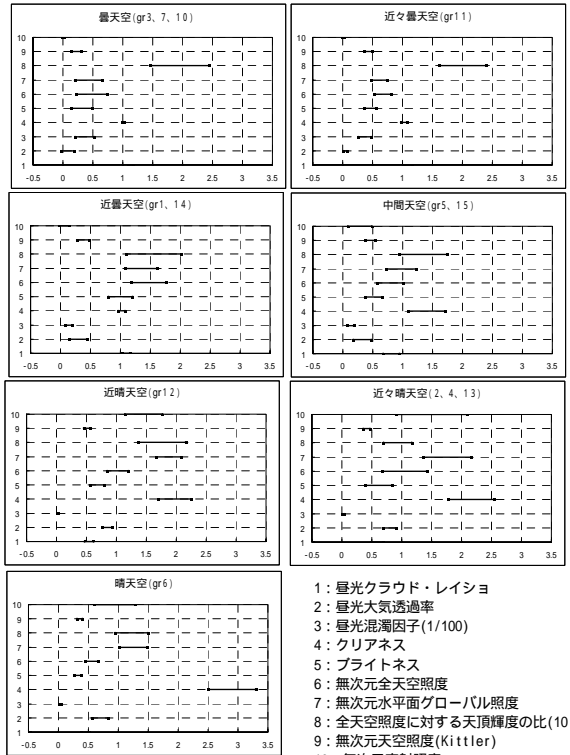


図 3.7 ty13の出現頻度が最も高い天候グループ

記号表

記号	項目	記号	項目
E_{eg}	水平面グローバル放射照度[W/m ²]	E_{vd}	全天空照度[klx]
E_{ed}	水平面拡散放射照度[W/m ²]	E_{vs}	法線直射照度[klx]
E_{es}	法線放射照度[W/m ²]	L_z	天頂輝度[cd/m ²]
E_{vg}	水平面グローバル照度[klx]	γ_s	太陽高度[rad. or deg.]



1: 昼光クラウド・レイショ 2: 昼光大気透過率 3: 昼光混濁因子(1/100) 4: クリアネス 5: ブライツネス 6: 無次元全天空照度 7: 無次元水平面グローバル照度 8: 全天空照度に対する天頂輝度の比(10倍) 9: 無次元天空照度(Kittler) 10: 無次元直射照度

図 3.8 天候指標の平均値 ± 標準偏差の範囲

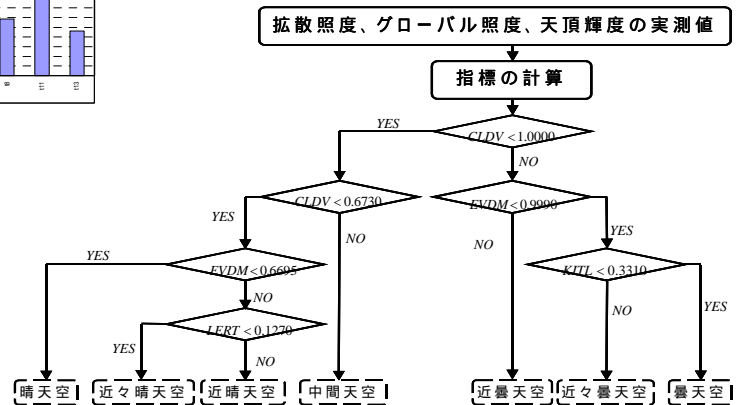


図 3.9 天空状態を7つに分離する流れ図

文献: 1. 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、第496号、23-28, 1997.
2. F. Kasten and A. Young, Revised optical air mass tables and approximation formula, Applied Optics 28, 4735-4738 (1989).
3. Kittler, R., Darula, S., Perez, Z.: A set of standard skies: Characterizing Daylight Conditions for Computer and Energy Conscious Design
4. Umeyiya, N: Classification of the IDMP data of Kyoto into Kittler-Perez model of sky luminance distribution, Proceedings of the third European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings, Lyon, pp.673-678, 2002.