

スカイキャナ実測値を用いた 昼光・日射の直散分離に関する研究

建築環境工学 飯沼清明

1. 背景と目的

多くの建物において昼光を積極利用し、照明設計・温熱環境設計に生かせば化石燃料の消費を抑制することができる。ただ設計に使用するための昼光データの整備は未だ不十分である。現在、一般に入手可能なデータは気象台のグローバル日射量データである。上記の設計にはグローバル・拡散・直達日射量、およびグローバル・拡散・直射照度が必要となる。本研究ではこれらに必要なデータをグローバル日射量のみを用い、予測する直散分離、および発光効率の推定モデルを提案し、設計に供する昼光の基礎データを提供する。また既往の研究では主に日射を扱う分野の研究者によって直達領域(太陽近傍の方向性を持った成分の占める領域)の研究が行われているが、照度の点から考察を行っている研究はあまり見られない。本研究ではスカイキャナの天空輝度分布を用い、別途、直達領域推定の手法を提案する。目的を以下に示す。1) 三成分の関係を調べる、2) 直達領域を明確にする、3) 直散分離の推定モデルを導く、4) 発光効率の推定モデルを導く。

2. 方法

2.1. 測定方法

測定はIDMP京都観測所(研究クラスに属する。緯度: 35° 01' 30" N、経度: 135° 47' 10" E)で行われた。日射量は精密全天空日射計EKO-MS-801、照度は照度計EKO-ML-010SDを用いてグローバル、拡散成分を測定し、EKO-MS-52(半開口角2.5°)を用いて直射成分を1分間隔で測定した。拡散成分の測定には25cm、幅5cmの遮蔽バンドを用い、直射成分は日内における太陽追尾装置を用いた。天空輝度はスカイキャナを用い、天空要素145点を約2.5分かけ、15分間隔で測定する。図1にスカイキャナの145点の天空要素による構成を示す。

2.2. 使用したデータ

使用したデータは1993年5月から94年4月まで(以降、93年データと称す。n = 8864)、2000年9月2001年4月まで(以降、2000年データと称す。n = 9269)に測定したもので、15分間隔の瞬時値であり、C I Eのデータ品質管理テスト⁴⁾の合格データである。なお拡散成分の測定においては、手動による遮蔽バンドを用い遮蔽を行っている。また太陽高度5°以下のデータは用い

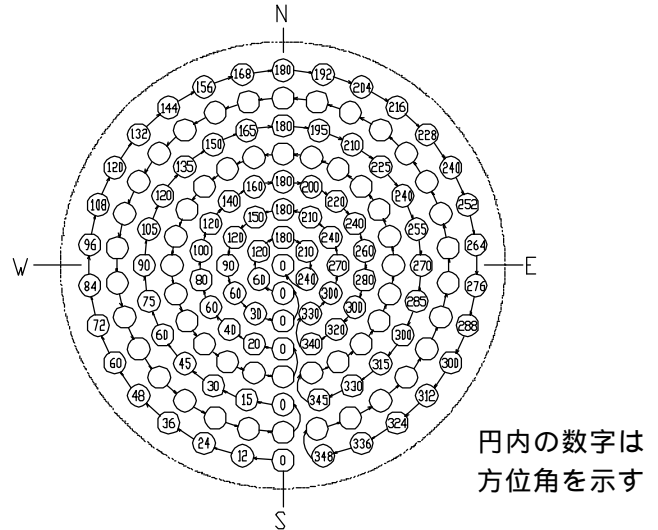


図1 スカイキャナの各天空要素

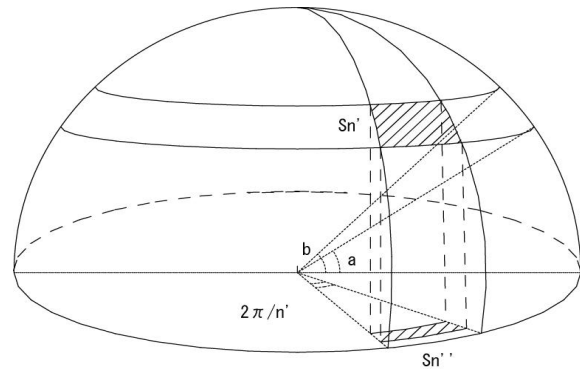


図2 立体角投射率と天球の関係

ていない。なお本報ではA.J.Drummondの補正式を用いて、遮蔽による拡散成分の補正を行った。

$$g = \frac{1}{1 - \frac{2b}{pr} \cos^2 d [(\sin f \sin d)_{t_0} + \cos f \cos d \sin t_0]}$$

ここで、 t_0 : 日没時の太陽の時角(rad)

f : 観測点の緯度 d : 視赤緯(観測日)

b : 遮蔽バンドの中 r : 遮蔽バンドの半径

g : 補正係数

ただし

$$t_0 = 2 \sin^{-1} \sqrt{\frac{\sin \left(45^\circ + \frac{f-d+s}{2} \right) \sin \left(45^\circ - \frac{f-d-s}{2} \right)}{\cos f \cos d}}$$

s : 地平大気差定数(≒ 45')

2.3. 計算方法

スカイスキナーの半開口角が 5.5° であることから計算すると、スカイスキナーは天空の約1/3はカバーしていない。そこで外周から $6^\circ, 18^\circ, 30^\circ, 42^\circ, 54^\circ, 66^\circ, 78^\circ, 90^\circ$ の角を地表面と成している天空要素をそれぞれが $0^\circ \sim 12^\circ, 12^\circ \sim 24^\circ, 24^\circ \sim 36^\circ, 36^\circ \sim 48^\circ, 48^\circ \sim 60^\circ, 60^\circ \sim 72^\circ, 72^\circ \sim 84^\circ, 84^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を観測しているものと仮定した。その際の立体角投射率の与え方、ならびに輝度を用いた照度の計算方法を以下に示す。図2のような半球において角 a と角 b によって半球上にリングが形成され、同高度に n' 個の天空要素がある。一つの天空要素の占める面積を S_n' とし、これを底面に投射してできたリングの一部の面積を S_n'' とすると

$$S_n'' = \pi (\cos^2 a - \cos^2 b) / n' \quad \dots (1)$$

この天空要素の立体角投射率を c_n とすると

$$c_n = S_n'' / (\pi \cdot n') = (\cos^2 a - \cos^2 b) / n' \quad \dots (2)$$

S_n' による照度 E_n は

$$E_n = \pi \times L_n (\text{輝度}) \times c_n \quad \dots (3)$$

したがって天空全体による照度 E [lx]は

$$E = \sum_{n=1}^{145} \pi \cdot L_n \cdot c_n \quad \dots (4)$$

2.4. 推定指標

RMSEは各推定式による推定の誤差を表す指標であり、推定精度の比較に用いた。以下で示される。

$$RMSE = \{ \sum_i (C_i - M_i)^2 / N \}^{1/2} / M_{ave}$$

$$MBE = \{ (C_i - M_i) / N \} / M_{ave}$$

C_i : 推定値 [lx], M_i : 測定値 [lx],

M_{ave} : 全測定値の平均値 [lx], N : データ数

3. データ品質管理テスト

観測データをCIEの定める品質管理テストにかけているがTEST2において合格率が低かった。グローバル成分実測値が拡散成分と直射成分の計算値と許容範囲内で合致するかを確認するものである。TEST2の内容を示す。

$$TEST2.1 \quad E_{eg} = (E_{es} \cos q_z + E_{ed}) \pm 15\% (25\%)$$

$$TEST2.2 \quad E_{vg} = (E_{vs} \cos q_z + E_{vd}) \pm 15\% (25\%)$$

E_{eg} : グローバル日射量 [W/m²],

E_{ed} : 拡散日射量 [W/m²], E_{es} : 直達日射量 [W/m²],

E_{vg} : グローバル照度 [lx], E_{vd} : 拡散照度 [lx],

E_{vs} : 直射照度 [lx], q_z : 太陽高度 [°]

日射と照度の合格率を比較すると照度の方が合格率が低い。TEST2の不合格データを分析したところ、直射成分の観測値が過小に観測されていることがわかった。

日射・照度の双方において直射成分の観測値が大きくなると合格率が悪くなることがわかった。以上のことから昼光の観測においては直射の観測機器の調整に一段の注意を要すると考え、また第5章において直射成分ではなく拡散成分を用いて直達領域を算定する必要性を示せた。

4. 直達領域の算定手順

直射成分が太陽周辺のどの範囲を占めるか、つまり太陽位置から角距離がいくらの位置までを直達領域として規定すべきかを検討する。最も簡単な方法として天空要素145点のうち太陽位置から角距離 X 度の範囲内にある天空要素で観測した輝度のみを用い、最適な X を算定すればよい。ただ現実にはスカイスキナーは受感部保護のため100(kcd/m²)を越える値の観測はできず、オーバーフロー値として記録され、太陽近傍の値は測定できないためこの手法は不適である。したがってここでは、1) 太陽位置から角距離 X 度以内のものを一旦除去し、2) 残りの天空要素の輝度の平均値を、除去した天空要素に代入し、3) それらの輝度から照度を求めた。4) この照度を角距離 X を変化させ、それぞれの推定値と拡散照度の実測値とを比較し、最もRMSEが小さい時の X を直達領域とした。

5. 輝度から照度を推定する式

第4章に示す手順においてスカイスキナーで得た輝度から照度を求める拡散成分の推定式が必要である。式(4)において変換式を提示しているものの、各天空要素に便宜的な面積を与えているため誤差が生じ、また計測機器の校正誤差等(照度計EKO-ML-010SDは他社の製品より大きな値を示すと言われている^{注)})の影響を受けるため推定式が必要となる。そこで推定式を導くために、直射成分がほぼ0のデータとして、 E_{vd} (拡散照度) >

E_{vg} (グローバル照度) × 0.95の時のデータを抽出し、天空輝度から推定したグローバル照度の計算値 E とグローバル照度実測値 E_{vg} を回帰させた($n = 3970$)。大気路程を反映させるため変数に太陽高度 h_s [deg]を用いた。回帰式は以下ようになる。

$$E_{vg} = 1.0903 \times E + 80.0705 \times h_s + 608.5 \quad \dots (5)$$

$E_{vd} > E_{vg} \times 0.95$ のデータを用いたのは、この時は直射がほとんどなく、グローバル照度が拡散照度と同値であるとみなすことができ、直射が無い条件下での拡散成分の推定式に転用できると考えたためである。よって拡散照度推定値 \tilde{E}_{vd} は以下の式で求まる。

$$\tilde{E}_{vd} = 1.1352 \times E + 82.2734 \times h_s + 329.9 \quad \dots (6)$$

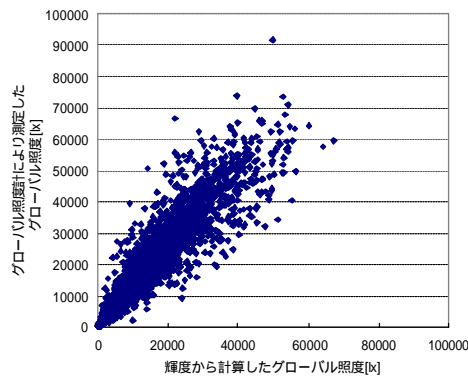


図4 曇天時のグローバル照度の実測値と推定値の関係 (n=3970)

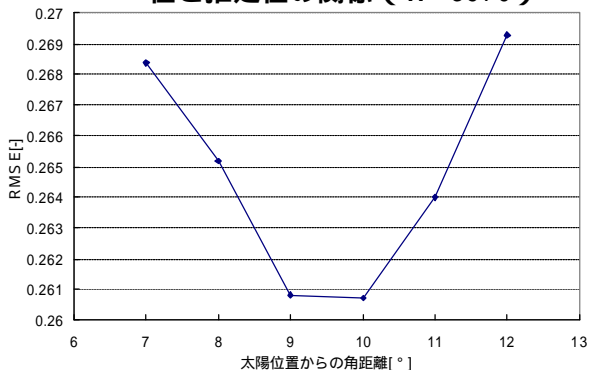


図5 角距離とRMSEの関係

なおこの式の相関係数は0.935であった。グローバル照度実測値 E_{vg} と $E\tilde{v}d$ の関係を図4に示す。

注) 2004年の建築学会大会における松澤朋子氏の発言を引用

6. 直達領域の決定

既往の研究で照度を用いた直達領域の算定はあまり行われていないので本研究では照度・日射の両面から直達領域に関する知見を加える。

6.1. 93年データにおける検討

拡散照度の実測値と、角距離 X を変化させて、 X の範囲を除き、式(6)によって天空輝度から推定した拡散照度計算値のRMSEの関係を図5に示す (n=4412)。最もRMSEが小さかったのは角距離を10°とした時であった。

6.2. 2000年データにおける検討

章6.1では照度という点において検討を加えてきたが、ここで2000年データを用い、照度及び日射量の二点から直散分離の検討を行う。最も推定誤差が小さかったのは太陽位置から角距離8°を直達領域とした時である。

同様に放射照度を用いて日射量に関する直達領域の範囲の推定を行った。結果、角距離7~10°において相対的に低い推定誤差を示したが、グラフ形状が異なったが、照度同様、直達領域は8°前後である。

6.3. 各成分の占める領域

既往の研究では直達領域を明確にするための提案がいくつかなされている。なおそれらの研究で用いられた手法は本報で用いた方法とは異なる上、日射量ではなく主に照度について検討を加えてきたことをここに明記する。

既往の研究では日射の観点から中山ら²⁾は傾斜面日射量により確認し、直達領域を太陽位置から角距離50°以内が適切と述べている。対して赤坂ら³⁾は、独自に開発した太陽追尾型天空日射装置により、準直達日射の範囲としては15°程度が適切と述べている。本研究では準直達成分の占める領域は太陽位置から角距離10°程度であるとする。図6に天空輝度測定の実成分の分布概念を示す。太陽近傍の方向性を強く有した成分を準直射成分とする(図中②)のであれば、直射成分(図中①)を太陽視半径と同一、つまり視半径0.267°とすることが最適である。しかし現在一般に使用されている直達日射計、および直射照度計は半開口角が2.5°であり、そのような狭い範囲を測定することは実務上不可能である。そのため本研究では狭義の直射成分の占める領域を太陽位置から角距離2.5°とする。

7. 直散分離

グローバル日射量から拡散、直達日射量を推定するためには直散分離の推定モデルが必要であるが、説明変数のとり方によって推定精度が変わる。直散分離は大気路程や大気混濁度などの因子によって影響されると考える。反面、直散分離の推定モデルは簡易であることが望まれることから大気の状態を反映する変数を用いることが必要となる。変数の取り方によって推定誤差を算出し、比較した結果、変数にクリアネス K を用いると推定誤差が最も小さくなることがわかったため、直散分離の推定式をクリアネスの4次式で表した。拡散日射量推定値 $E\tilde{e}d$ は以下の式で求まる。

$$E\tilde{e}d = (0.00762 \times K^4 + 2.5856 \times K^3 - 4.2602 \times K^2 + 0.8956 \times K + 0.9476) \times E_{eg} \dots (7)$$

ただし、 $K: E_{eg} / (1367 \times \sin h_s)$ 、 E_{eg} はグローバル日射量実測値である。

式(9)を用いて推定した拡散日射量と実測値の関係を図7に示す。

同様に照度の直散分離の推定モデルを導いた。拡散照度推定値 $E\tilde{v}d$ は以下で求まる。

$$E\tilde{v}d = (0.0039 \times K^4 + 0.6088 \times K^3 - 1.8094 \times K^2 + 0.2147 \times K + 0.9926) \times E_{vg} \dots (8)$$

ただし、 E_{vg} はグローバル照度実測値である。

この式を既往の研究のモデルと比較した。サンプルに京都の1分間隔の測定データを用い、RMSEの大小を比較することにより精度の優劣を見た。表1に結果を示す。表に示す通り、本研究のモデルが実用的であることが示された。

8. 発光効率

日射量から照度を推定する変換式、つまり発光効率の

表1 各直散分離推定モデルのRMSE

本研究	0.2415
稲沼の式	0.2869
Reindlの式	0.3503

表2 各発光効率モデルのRMSE

本研究	0.058
Muneer	0.117
稲沼	0.075
井川	0.094

推定モデルを導いた。直散分離の推定式同様、クリアネスを変数とすると最も推定誤差が小さくなることからクリアネスの4次式で表した。グローバル、拡散、直射成分の各発光効率を順に以下に h_G 、 h_D 、 h_S で示す。

$$h_G = 166.6 - 304.8 K + 1016.6 K^2 - 1545.1 K^3 + 822.4 K^4 \dots (9)$$

$$h_D = 176.6 - 563.6 K + 1760.6 K^2 - 2021.9 K^3 + 765.1 K^4 \dots (10)$$

$$h_S = 96.9188 - 55.1414 K + 27.7486 K^2 + 55.9771 K^3 - 0.6850 K^4 \dots (11)$$

図8に各成分の発光効率とクリアネスの関係を示す。表2に式9と既往のモデルとのRMSEの比較の結果を示す。表より本研究のモデルが実用的であることが示された。ところで第5章で述べたように直達領域を太陽位置から角距離 10° とするなら発光効率も異なる定義になり、以下で表せる。

$$h_D = 177.3 - 369.6 K + 1132.6 K^2 - 1238.3 K^3 + 413.3 K^4 \dots (12)$$

図9に式10と式12の比較を示す。図に示す通り、直達領域の定義によって値も変化する。直達領域の測定は機器の開口角の問題とも絡むが定義の共通化が望まれる。

9. まとめ

最後に本研究の結論を示す。

- (1) CIEの定める品質管理テストで昼光データが不合格になる要因として直射成分の影響が大きい。
- (2) 天空輝度分布を用い、直達領域は太陽位置から角距離 10° 程度が適当であると判明した。
- (3) 直散分離のクリアネスとの関係を示し、推定モデルを導いた。
- (4) 発光効率のクリアネスとの関係を示し、推定モデルを導いた。

以上によりグローバル日射量のみから拡散・直達日射量、およびグローバル・拡散・直射照度の予測に関する知見を与えた。

参考文献 1) CIE, Technical Report, Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE 108-1994.

2) 中山哲士、石野久弥、天空放射輝度分布を考慮した直達・拡散日射の推定法に関する研究、日本建築学会計画系論文集 第557号、33-39 2002年7月

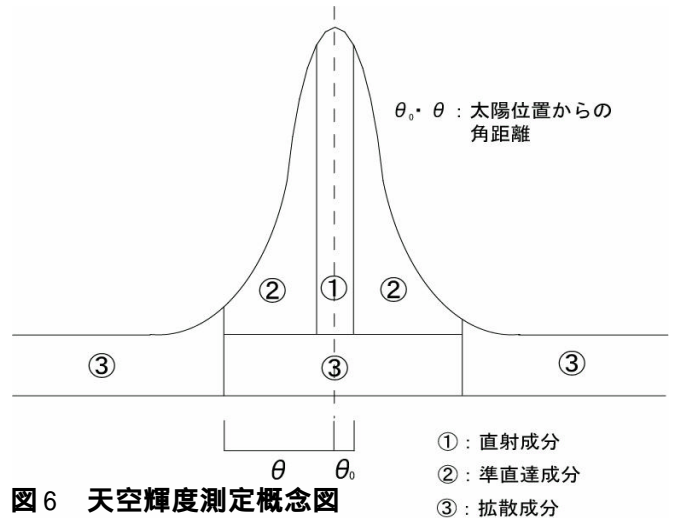


図6 天空輝度測定概念図

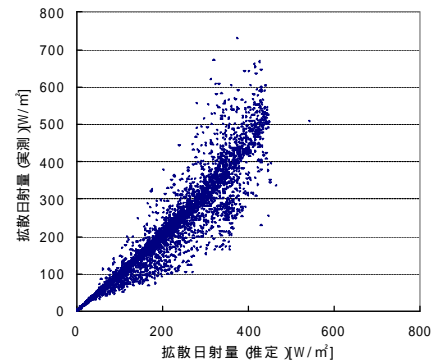


図7 拡散日射量の実測値と推定値の関係

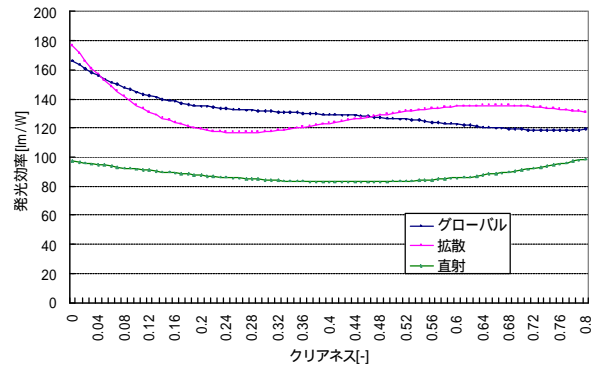


図8 各成分の発光効率とクリアネスの関係

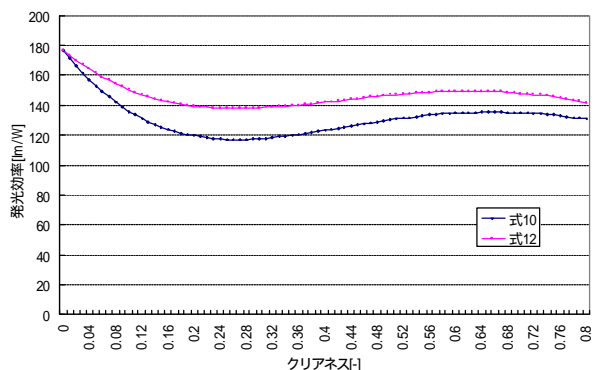


図9 直達領域の違いによる拡散成分発光効率の変化

3) 赤坂裕、黒木荘一郎、稲村悌成、二宮秀興、準直達日射・天空日射の測定とその推定式の作成、日本建築学会計画系論文集 第405号、19-27 1989年11月

4) 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、第575号、pp.41-46、2004年1月