天空輝度・放射輝度分布を推定する天空モデルの整備

ADJUSTMENT OF THE SKY MODEL FOR THE ESTIMATION OF LUMINANCE AND RADIANCE DISTRIBUTIONS OF SKY

井川 憲 男*
Norio IGAWA

In the former paper, All Sky Model to estimate the sky luminance and the radiance distribution that authors had proposed on 2004 was improved, and the improved model was compared with former All Sky Model, CIE Standard General Sky and Perez model.

Afterward, further examinations are repeated, and appropriate coefficients for the basic equation were derived applying the same structure of the basic equation, which can estimate high accurate sky luminance and radiance distributions of with small regional dependency.

When the range of the combination of coefficients of the CIE Standard General Sky was considered too much, the limit turned out in the estimating accuracy by the model. Some ranges of the combination of coefficients were arranged a little, the re-improvement was tried, and the coefficients for more high accurate estimation were derived.

In this paper, All Sky Model adjusted again is introduced.

Keywords : Sky luminance distribution, Sky radiance distribution, All Sky Model, Adjustment

天空輝度分布, 天空放射輝度分布, All Sky Model, 整備

1. はじめに

既報¹⁾において、2004年に筆者らが提案した天空輝度・放射輝度分布を推定する All Sky Model-L、R（以下、As と略記）²⁾を改良したモデル（既報では I-As と略記したが、本論文では I-As_O と略記）を、CIE 標準一般天空（CIE Standard General Sky : Gs）³⁾、Perez の All Weather Model（Aw）⁴⁾と比較検討した結果を報告した。

CIE 標準一般天空の 15 の Type について、Type の出現頻度の検討や、簡略化して 15 未満の Type で代表させる検討⁵⁾などは依然としてみられるが、Type を決定する方法は確立されていない。天空輝度分布の実測を継続している測定所が非常に少ないこともあり、Type と天空輝度分布の実測データとの比較検討も十分とはいえない。

その後、I-As_O について更なる検討を重ね、モデルの基本式の構造は同様であるが、より推定精度が高く地域依存性の小さい適切な係数を導出する。従前のモデル化においては、天空状態を示す係数について、Gs の係数を考慮して、これらとあまり乖離しない範囲の係数の組み合わせとなるように表していた。

また、既報で述べたように、Type は限定された狭い指標範囲に出現するとは限らず、広範囲の指標の下に出現する Type もあるため、Type を特定する手法の確立が困難となっている。

このような状況から、本研究は細分化された指標の範囲に出現する天空輝度・放射輝度の平均的分布を連続的に表すことで実用的なモデルとして表現することを目指しているものである。なお、CIE 標準一般天空の係数の組み合わせを意識しすぎるとモデルの推定精

度に限界があることが判明したため、係数の組み合わせの範囲を僅かに拡大して整備を試み、より推定精度の高い係数を導出する。

本論文は、整備された improved All Sky Model（i-As）の開発と検証について報告する。

2. モデル化と検証に使用する測定データ

モデル化のための基礎データとして、大阪（34°36'N, 135°30'E）における 2007 年 1 月 1 日から 2008 年 12 月 31 日までの IDMP^{注1}のガイド⁶⁾に準じた測定データを使用する。

また、モデルの検証には、2006 年 1 月 1 日から 2011 年 12 月 31 日までの大阪における測定データを使用する。測定方法は既報に述べたとおりである。また、東京（35°36'N, 139°30'E）の IDMP 測定所⁷⁾で取得した、1992 年 3 月 1 日から 1993 年 9 月 30 日までの天空輝度分布と、1993 年 1 月から同年 9 月までの放射輝度分布のデータを使用する。なお、東京においては、スカイスキナー（MS-300LR : 英弘精機）を使用し、1992 年は輝度分布のみを対象として 1 回の 145 点の分布測定は約 2 分 30 秒であった。1993 年は輝度と放射輝度を同時測定し測定時間は約 3 分 30 秒であった。大阪の 6 年間の天空輝度・放射輝度分布はスカイスキナー（MS-312LR : 英弘精機）で測定し、1 回の測定時間は約 4 分 30 秒であった。天空状態の急変を考慮すると測定時間は可能な限り短いほうが好ましい。しかし、放射輝度測定用センサーは時定数が大きいため、高速測定では時定数に起因する誤差が大きくなる。大阪における輝度・放射輝度の測定

* 大阪市立大学大学院生活科学研究科 特任教授・博士(工学)

Prof., Graduate School of Human Life Science, Osaka City University, Dr. Eng.

時間は東京に比べて長く、1 点ごとの放射輝度の測定値は安定すると思われるが、145 点を測定する時間が長くなるため、測定中の天空状態の急変に十分に対応しているとは言い難い。センサーの特性を把握した適当な測定時間の設定も重要な課題となる。現実的には輝度分布のみを高速測定し、相対輝度分布を相対放射輝度分布に転用する方が好ましいとも考えられる。なお、既報の検証で使用したイタリアの測定データは、詳細に吟味した結果、日射量の測定値が不安定であることが判明し、本論文の検証には使用しない。

なお、実測データが次に示す状況の場合、当該時刻の全データを削除し、モデル化や検証の対象としない。

- (1) 天空輝度・天空放射輝度の 145 点の測定において、1 個でも測定値が 0 以下である場合。
- (2) 周辺建物付属物や未確認物体などにより、一時的に影が発生したと考えられる場合。
- (3) 日射量や照度の測定値に鳥（主にカラス）などの飛来による影響があると考えられる場合。（なお、2011 年にはセンサー上空に釣り糸を 30cm 間隔に平行に張りこれを防いだ。）
- (4) 直達日射・直射照度の測定における太陽追尾や、天空日射量、全天空照度の測定値に顕著な異常が見られる場合。

既報では、CIE 標準一般天空のどの Type とも相対 RMSE が 70% 以上乖離する実測データを除外していた。今回は、前記(1)～(4)に該当しない全データを使用する。

なお、本研究における鉛直面照度・日射量は、測定地点特有のアルベドの影響を除くため、地物反射を遮って地域依存性を極力小さくするように配慮して測定を行っている。

3. 天空状態を表す指標

天空状態を表す指標として、Linke の混濁因子が 2.0 の場合を晴天の代表とし、晴天指標(Kc)と澄清指標(Cle)とを定義する。なお、既報で示した Cle が複雑すぎたため、式(4)のように改める。

$$Kc = Eeg/Seeg \quad (1)$$

$$Cle = (1-Ce)/(1-Ces) \quad (2)$$

$$Seeg = 0.84 \cdot Eeo / m \cdot \exp(-0.054 \cdot m) \quad (3)$$

$$Ces = 0.08302 + 0.5358 \cdot \exp(-17.394 \cdot \gamma_s) + 0.3818 \cdot \exp(-3.2899 \cdot \gamma_s) \quad (4)$$

ここで、 Eeg : 水平面全天日射量 [W/m^2]、 $Seeg$: 基準全天日射量 [W/m^2]、 Ce : クラウドレイシヨ (= Eed/Eeg)、 Ces : 基準クラウドレイシヨ、 Eeo : 大気外法線直達日射量 [W/m^2]、 m : 大気路程⁸⁾、 γ_s : 太陽高度 [deg]、 Eed : 水平面天空日射量 [W/m^2]。

4. All Sky Model の再改良

基本式は、旧来の As の式 (G_s と同等) を継承し、この中の係数 ($a \sim e$) を得る式を再度改良する。

整備された測定データから、まず、2007 年と 2008 年の測定値を基に、天空指標とする Kc と Cle を算出する。次に、太陽高度帯を 5 度 (± 2.5 度) ごとに分割する。分割された太陽高度帯ごとに Kc 、 Cle を 0.05 (± 0.025) 間隔で細分し、それぞれの区域の平均天空輝度分布を求める。得られた平均天空輝度分布を基に、回帰分析により太陽と天空要素の角距離と天空要素の高度の関数として、 Kc - Cle 区域ごとの係数 ($a \sim e$) を得る。

天空輝度分布と天空放射輝度分布の基本式の構成は、CIE の標準

一般天空と同様に、それぞれ、式(5)、式(6)で表される。

$$Lva(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lvz(\gamma_s) \cdot Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lvz(\gamma_s) \frac{\varphi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\varphi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - \gamma_s)} \quad (5)$$

$$Lea(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lez(\gamma_s) \cdot Le(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lez(\gamma_s) \frac{\varphi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\varphi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - \gamma_s)} \quad (6)$$

$$\varphi(\gamma) = 1 + a \cdot \exp(b / \sin \gamma) \quad (7)$$

$$f(\zeta) = 1 + c \{ \exp(d \cdot \zeta) - \exp(d \cdot \pi/2) \} + e \cdot \cos^2 \zeta \quad (8)$$

ここで、 γ_s : 太陽高度[rad]、 γ : 天空要素の高度[rad]、 ζ : 太陽と天空要素の角距離[rad]。

係数 $a \sim e$ は、式(9)の x で、表1に示す係数 $A \sim H$ により得られる。

$$x = A + B \cdot \exp\left(-\frac{G_{Kc}}{2}\right) + E \cdot \exp\left(-\frac{G_{Cle}}{2}\right) + H \cdot \exp\left(-\frac{G_{Kc} + G_{Cle}}{2}\right) \quad (9)$$

$$G_{Kc} = \{(Kc - C)/D\}^2, \quad G_{Cle} = \{(Cle - F)/G\}^2$$

以上により、日射量のデータを基に、相対天空輝度分布、相対天空放射輝度分布を得ることができる。

天空分布を実際に活用するためには、天頂輝度、天頂放射輝度を乗じて絶対値を得る必要がある。

全天日射量と天空日射量から相対天空輝度分布(Lv)が得られると、天頂輝度は、式(10)で表すことができる。

$$Lvz(\gamma_s, Kc, Cle) = \frac{Evd}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} Lv(\gamma_s, \gamma, \zeta) \cdot \cos \gamma \cdot d\gamma \cdot d\alpha} \quad (10)$$

式(10)の分母の積分計算は、若干煩雑で計算時間を要する。計算時間を短縮するため、式(11)、式(12)のように $LzEd$ を相対天空分布の積分値の逆数で表し、事前にこれを求める式を作成しておく。

$$Lvz(\gamma_s, Kc, Cle) = Evd \cdot LzEd \quad (11)$$

$$Lez(\gamma_s, Kc, Cle) = Eed \cdot LzEd \quad (12)$$

ここで、事前に太陽高度帯ごとに Kc - Cle 区域ごとに $LzEd$ を計算し、太陽高度帯ごとの計算結果をまとめると、式(13)のように太陽高度と Kc と Cle の関数として表すことができる。

$$LzEd = \sum_{k=0}^5 [A(k) \cdot Kc^k] \quad (13)$$

$$A(k) = \sum_{j=0}^6 [B(j, k) \cdot Cle^j] \quad B(j, k) = \sum_{i=0}^5 [C(i, j, k) \cdot \gamma_s^i]$$

$LzEd$ を求めるための係数を表 2 に示す。ここで、太陽高度を 5° から 90° までの 5° 間隔として、 Kc と Cle をそれぞれ 0.1 に分割して、表 2 を基に簡易に計算した $LzEd$ と、相対天空分布から方位角と高度角を 2° 間隔で数値積分して得た $LzEd$ との関係を図 1 に示すが、 $LzEd$ を使用して簡易に計算しても、相対天空分布の全天に渡る積分と同等の値となり、実用的に十分な精度が得られことを示している。

表 1 係数表

	a	b	c	d	e
A	-1.0193	-0.3646	-3.3246	-3.8472	-0.6370
B	-0.0955	0.8806	1.8413	2.1573	0.5995
C	-0.0823	1.6503	0.8436	-0.5050	1.0259
D	0.4530	0.3319	0.3009	0.6257	1.3334
E	-0.1294	-0.6525	8.3642	61.0275	-0.0022
F	-0.2876	-0.2681	0.8183	-3.2725	1.0765
G	0.3169	0.5434	0.5424	1.2096	0.7066
H	6.4046	-12.3328	9.1901	31.1039	0.5187
Note	if $b > 0, b = 0$		if $c < 0, c = 0$		if $e < 0, e = 0$

表2 $LzEd$ を求めるための係数

k	j	i					
		5	4	3	2	1	0
5	6	5.6146	-29.4046	47.2024	-43.8510	8.2509	-0.9358
	5	-17.9921	93.4316	-142.8905	130.9200	-17.7456	2.6364
	4	20.0121	-103.1918	142.9116	-130.0067	3.1167	-3.7005
	3	-12.0503	55.2228	-58.2657	49.5379	14.3877	3.5037
	2	8.2042	-28.2605	23.5534	-13.0987	-9.0805	-2.2572
	1	-2.2514	7.3074	-5.7338	2.4593	2.3038	1.2745
	0	0.4774	-1.2853	0.8565	-0.2806	-0.1641	-0.7447
4	6	-17.2129	85.8973	-129.4606	125.4744	-16.6675	-1.7011
	5	63.0588	-298.9370	420.7243	-391.1156	25.7323	8.4401
	4	-86.5230	382.9478	-477.7507	419.8383	28.0500	-10.4232
	3	64.5195	-250.6187	249.3821	-189.4251	-70.2059	1.0365
	2	-36.9118	122.2518	-103.4001	56.5677	38.5437	4.9664
	1	8.3944	-26.3761	19.1065	-8.7967	-9.4755	-3.6080
	0	-1.6652	4.5943	-3.1165	1.4959	0.5221	1.9573
3	6	21.5603	-98.3234	133.2000	-134.7364	5.7213	7.9890
	5	-88.8005	376.6700	-473.6141	443.8715	15.9462	-31.5361
	4	140.5464	-549.7882	617.7442	-524.2791	-92.1837	41.4865
	3	-115.2602	408.1553	-389.1329	279.5759	121.5988	-18.9449
	2	58.4325	-188.1080	158.1039	-90.2370	-60.4685	-0.8295
	1	-12.5318	38.1286	-26.3229	14.5404	13.3797	2.5300
	0	1.7622	-5.0850	2.9477	-2.1838	-0.5745	-1.2611
2	6	-16.1603	62.0261	-68.6303	66.7874	9.3995	-8.0240
	5	68.1074	-249.5476	263.2480	-233.4506	-51.2836	30.4587
	4	-110.3658	384.7705	-376.5734	301.1853	105.3289	-41.6451
	3	88.4298	-291.6143	255.1865	-180.4192	-100.9524	24.4274
	2	-39.1455	122.2380	-95.2499	60.1343	43.8912	-5.8629
	1	8.5411	-25.5973	17.1831	-11.9369	-7.4727	0.8271
	0	-0.5530	1.8213	-0.3930	1.0051	0.2158	-0.0791
1	6	5.6538	-18.5946	15.3888	-15.0642	-6.8261	2.4525
	5	-22.4881	72.5977	-58.6626	54.7188	28.0338	-9.9369
	4	34.5496	-109.0127	83.4590	-75.1759	-45.1168	15.8059
	3	-26.0768	80.1132	-55.9029	49.8447	34.7254	-12.6379
	2	10.1609	-30.7499	19.0722	-17.7449	-11.9372	5.3456
	1	-1.4801	4.7414	-1.9300	2.6996	1.2676	-1.0207
	0	0.0550	-0.2373	-0.0316	-0.0642	0.0032	-0.0227
0	6	-0.8791	3.2070	-2.8856	3.0796	0.2823	0.1061
	5	2.7495	-10.1893	8.5197	-10.6148	-1.0694	0.2046
	4	-3.0179	11.6684	-8.6199	14.0185	1.3755	-1.7036
	3	1.1932	-5.4566	3.0029	-8.7173	-0.5736	2.7262
	2	-0.0024	0.7879	-0.0560	2.4222	-0.1517	-1.4338
	1	0.0089	-0.1344	0.1890	-0.1446	0.1348	-0.1598
	0	-0.0018	0.0124	-0.0062	-0.0134	-0.0078	0.4086

Note: If $Cle=0.05$ and $Kc=<0.25$ then $LzEd=-0.1700 \cdot Kc^2 - 0.020 \cdot Kc + 0.4029$ 図1 相対分布の全天を積分して得た $LzEd$ と簡易に計算した $LzEd$

5. 天空輝度分布・放射輝度分布の推定精度の検証

既報で比較対象とした、As と Aw と I-As_O ならびに今回整備した All Sky Model (i -As) の推定精度を、CIE の IDMP に準じて取得した、2006 年 1 月から 2011 年 12 月までの大阪の測定データと、1992

年 3 月から 1993 年 9 月までの東京の測定データで比較する。

具体的には、全天日射量、天空日射量、全昼光照度、天空照度などから推定した各モデルの値を、天空輝度分布と天空放射輝度分布の実測値と比較する。

なお、既報¹⁾では天頂輝度と天頂放射輝度に実測値を使用して各天空要素の絶対値を推定した。しかし、一般的に天頂輝度・天頂放射輝度のデータは入手できない。このため、日射量から天空の相対分布を推定し、次いで相対分布と全天空照度・天空日射量から天頂輝度・天頂放射輝度を推定し、これを相対分布に乗じて絶対値で示す分布を得る方が実用的である。本論文では次式で得られた天頂輝度・天頂放射輝度を使用する²⁾。

$$Lvz = \frac{Evd}{\sum_{p=1}^{145} Lv_p \cdot c_p} \quad (14), \quad Lez = \frac{Eed}{\sum_{p=1}^{145} Le_p \cdot c_p} \quad (15)$$

ここで、 p : スカイスキャナーによる 145 点の天空要素の測定点、 Lv_p : p 点の相対天空輝度の推定値、 Le_p : p 点の相対天空放射輝度の推定値、 c : 天空要素 p の立体角投射率。

5.1 天空分布推定値の年間の RMSE と MBE の平均値の比較

東京と大阪における天空輝度分布と天空放射輝度分布の実測値と各モデルによる推定値の RMSE と MBE の年平均値を表 3 と表 4 に示す。図 2、3 に天空輝度分布の、図 4、5 に天空放射輝度分布の年別の RMSE と MBE の比較を示す。

天空輝度分布と天空放射輝度分布の推定精度の傾向は非常に似通った特性を示しており、いずれのモデルもかなり良い推定精度を有していると評価できる。As の RMSE は東京においては I-As_O より小さいが、大阪では I-As_O の方が小さく、モデルを作成したデータに依存する傾向が若干みられる。天空輝度分布については i -As の RMSE がいずれの年でも他に比べて最も小さい。

天空放射輝度分布については、 i -As の RMSE が他に比べて小さく、最も推定精度が優れている。As の RMSE は東京では i -As に次いで小さいが、全年を通すと As、Aw、I-As_O の相違は大きくない。

今回比較対象としたモデルはいずれもかなり高精度なモデルであることが確認できるが、整備して提案する i -As は、すべての条件において年間平均の RMSE と MB の値が最も小さく、より高精度なモデルであることが確認できる。

表 3 天空輝度分布の推定精度の比較 (東京、大阪)

	Year	N	RMSE [kcd/m ²]				MBE [kcd/m ²]			
			As	Aw	I-As_O	i -As	As	Aw	I-As_O	i -As
Tokyo	1992	10,807	1.028	1.352	1.109	1.041	0.137	0.117	0.151	0.131
	1993	9,697	1.109	1.159	1.152	1.080	0.148	0.156	0.172	0.141
Osaka	2006	20,724	1.284	1.333	1.259	1.237	0.099	0.087	0.095	0.061
	2007	21,138	1.358	1.369	1.325	1.291	0.138	0.118	0.132	0.096
	2008	20,769	1.323	1.362	1.295	1.268	0.100	0.072	0.094	0.059
	2009	13,844	1.301	1.354	1.285	1.261	0.089	0.058	0.085	0.050
	2010	17,308	1.353	1.376	1.346	1.284	0.204	0.163	0.199	0.167
	2011	19,041	1.381	1.350	1.358	1.288	0.174	0.144	0.168	0.135
Total		133,328	1.293	1.342	1.283	1.239	0.135	0.112	0.134	0.101

表 4 天空放射輝度分布の推定精度の比較 (東京、大阪)

	Year	N	RMSE [W/m ² /sr]				MBE [W/m ² /sr]			
			As	Aw	I-As_O	i -As	As	Aw	I-As_O	i -As
Tokyo	1993	7,865	11.95	12.80	12.34	11.81	1.67	1.62	1.88	1.60
	2006	20,724	10.93	10.99	10.74	10.35	0.98	0.86	0.94	0.69
Osaka	2007	21,138	11.59	11.36	11.38	10.84	1.38	1.20	1.32	1.06
	2008	20,769	11.31	11.22	11.11	10.63	0.99	0.74	0.93	0.67
	2009	13,844	11.04	11.16	10.99	10.55	0.97	0.70	0.92	0.67
	2010	17,308	11.39	11.32	11.36	10.69	1.55	1.21	1.50	1.28
	2011	19,041	11.75	11.36	11.57	10.94	1.37	1.12	1.32	1.08
Total		120,689	11.35	11.24	11.19	10.67	1.21	0.98	1.16	0.91

図 2 天空輝度分布の年別 RMSE (東京、大阪)

図 3 天空輝度分布の年別 MBE (東京、大阪)

図 4 天空放射輝度分布の年別 RMSE (東京、大阪)

図 5 天空放射輝度分布の年別 MBE (東京、大阪)

5.2 天空状態別のモデルの比較

比較対象とした天空モデルによる推定精度について、天空状態別に比較する。ここで、便宜的に天空状態を、(1)晴天空、(2)中間晴天空、(3)中間天空、(4)中間曇天空、(5)曇天空の 5 種に分類する。天空状態は次に示す方法で分類する。まず、 Kc と Cle により天空指標 (Siv) を式 (16) のように定義する。次に、 $Kc=1$ 、 $Cle=1$ の区域との位置関係により天空状態を分類する。

$$Siv = \sqrt{(1.0 - Kc)^2 + (1.0 - Cle^{0.5})^2} \quad (16)$$

(1)晴天空 (Clear Sky) : $Siv < 0.15$

(2)中間晴天空 (Intermediate Clear sky) : $0.15 \leq Siv < 0.3$

(3)中間天空 (Intermediate Sky) : $0.3 \leq Siv < 0.9$

(4)中間曇天空 (Intermediate Overcast Sky) : $0.9 \leq Siv < 1.15$

(5)曇天空 (Overcast Sky) : $Siv \geq 1.15$

分類された天空を $Kc - Cle$ 区域に現すと図 6 のようになる。Linke の混濁因子を 2.0 とする晴天空は $Kc=1$ 、 $Cle=1$ の区域に相当する。

Kc が 1 を超える区域は、雲や大気の状態による影響で天空成分が増大して全天日射量が晴天空に比べて大きくなる。このとき、直達成分が低下するため Cle が低下している。このような、天空に雲などが散在して全天日射量が晴天空より大きい場合には、その分布は晴天空から中間天空に近い分布へと変化する。

なお、図 6 の中の空白の区域は、例外的な状況を除き出現機会がほとんどない区域である。または、天候状態が非常に不安定な状況や測定に異常がある状況などで発生する可能性のある区域である。このような区域に相当するデータは対象としない。

以上のような天空分類のもとで、大阪における 2006 年から 2011 年の 6 年間の天空状態別の天空輝度分布と天空放射輝度分布をモデル別に推定した結果を表 5 と表 6 に示す。また、天空輝度分布に関する各モデルによる推定の RMSE と MBE を図 7 と図 8 に、天空放射輝度分布のそれらを図 9 と図 10 に示す。

モデルと実測値との比較において、天空輝度分布と天空放射輝度分布はほぼ同様な特性を示している。

5 種の天空状態の中では、雲の動きが激しくて不安定な中間天空の推定精度が最も低く、4 モデルによる天空輝度と天空放射輝度の

図 6 $Kc - Cle$ 区域と便宜的に分類した天空状態

表 5 天空状態別の天空輝度分布の比較 (大阪 2006-2011)

Sky conditions	N	RMSE [kcd/m²]				MBE [kcd/m²]			
		As	Aw	I-As_O	i-As	As	Aw	I-As_O	i-As
Overcast	20,710	0.679	0.701	0.675	0.663	-0.072	-0.015	-0.066	-0.073
I-Overcast	20,032	1.560	1.589	1.527	1.507	0.000	0.025	-0.042	-0.088
Intermediate	28,590	1.860	1.888	1.826	1.767	0.105	-0.020	0.093	0.130
I-Clear	20,005	1.381	1.457	1.294	1.286	0.138	0.196	0.156	0.090
Clear	23,487	1.039	1.005	1.076	0.992	0.461	0.367	0.468	0.359
Total	112,824	1.334	1.357	1.311	1.272	0.134	0.108	0.129	0.095

表 6 天空状態別の天空放射輝度分布の比較 (大阪 2006-2011)

Sky conditions	N	RMSE [W/m²/sr]				MBE [W/m²/sr]			
		As	Aw	I-As_O	i-As	As	Aw	I-As_O	i-As
Overcast	20,710	5.64	5.82	5.61	5.51	-0.49	-0.07	-0.44	-0.51
I-Overcast	20,032	13.47	13.60	13.13	12.90	0.34	0.53	-0.01	-0.39
Intermediate	28,590	16.13	16.17	15.87	15.37	0.89	-0.17	0.78	1.09
I-Clear	20,005	11.59	11.32	11.01	10.39	1.27	1.68	1.39	0.90
Clear	23,487	8.54	7.93	8.91	7.85	3.79	3.10	3.83	3.05
Total	112,824	11.35	11.24	11.19	10.67	1.21	0.98	1.16	0.91

図 7 天空状態別の天空輝度分布の RMSE の比較

図 8 天空状態別の天空輝度分布の MBE の比較

図 9 天空状態別の天空放射輝度分布の RMSE の比較

図 10 天空状態別の天空放射輝度分布の MBE の比較

RMSE は 1.888～1.767 kcd/m²、16.17～15.37 W/m²/sr となっている。

雲が不安定で、中間天空と曇天空との過渡的な状態である中間曇天空の推定精度が次に低く、RMSE は 1.589～1.507 kcd/m²、13.60～12.90 W/m²/sr となっている。

また、中間晴天天空の RMSE は 1.457～1.286 kcd/m²、11.59～10.39 W/m²/sr となっている。

雲の影響がほとんどなく、天空状態が安定した晴天天空の RMSE は 1.076～0.992 kcd/m²、8.91～7.85 W/m²/sr である。

太陽と全天が雲で覆われ、天空状態が比較的安定した曇天空は、天空成分の絶対値が小さいこともあり、RMSE は 0.701～0.663 kcd/m²、5.82～5.51 W/m²/sr の範囲にあり最も推定精度が高い。

以上、いずれのモデルもかなり高精度な天空分布の推定が可能な実用的な天空モデルと考えられる。このような中で、*i-As* はいずれの天空状態においても、天空輝度と天空放射輝度の RMSE が他のモデルに比べて最も小さい。すなわち、現状のモデルと比較して整備

改良された *i-As* の推定精度が最も高い。

晴天天空ならびにほぼ晴天天空は、他の天空状態に比べて相対分布の天空位置依存性が高いことや太陽付近の測定困難部分の影響などのため、MBE は他の天空に比べて大きくなっている。この場合でも、輝度と放射輝度の MBE の絶対値が 0.5 kcd/m² 未満、4 W/m²/sr 未満と小さく、実用的に十分な推定精度を有していると考えられる。

なお、*Aw* は晴天天空についてはかなり良好な推定が可能であるが晴天天空以外の天空状態では他のモデルが優れている。

いずれにしても、天空輝度分布と天空放射輝度分布の双方において、すべての天空状態で *i-As* の推定精度が最も優れている。

図 11 と図 12 には、天空輝度分布と天空放射輝度分布の天空状態別の、*As* と *Aw* と *i-As* による推定値の RMSE の出現頻度を示す。

これらの図においては、ピークが縦軸に近づくにつれて急峻になっているほど推定精度が高いことを表す。図中では出現頻度が似通っているためモデルの判別が困難な部分があるが、どのモデルの RMSE の

図 11 天空状態別の天空輝度分布の RMSE の出現頻度

図 12 天空状態別の天空放射輝度分布の RMSE の出現頻度

出現頻度も、曇天空と晴天空では同様な特性を示している。中間天空は各モデルのピーク値が小さく、RMSE がやや広範囲に分布し、不安定な天空状態であることを示している。

各天空状態において、i-As は RMSE の分布が最も安定して小さく、高精度な推定が可能であることを示している。

5.3 モデル別の天空位置別の推定精度

天空要素の位置を便宜的に次の 4 部位に分類して、各部位の天空要素の推定精度について比較する。なお、太陽からの各距離 18°未満と天空要素の高度が 6°のデータは対象としない。

- (1) 天空要素の高度 60°以上の天空要素(Zenith)。
- (2) (1)を除き、太陽方位軸に対して天空要素の方位角が $\pm 45^\circ$ の天空要素(South)。
- (3) (1)を除き、太陽方位軸に対して天空要素の方位角が $+135^\circ$ 以上、 -135° 以下の天空要素(North)。
- (4) (1)を除き、太陽方位軸に対して天空要素の方位角が $-45^\circ \sim -135^\circ$ と $45^\circ \sim 135^\circ$ の天空要素(East & West)。

図 13 天空輝度の天空要素の位置別推定値の RMSE の比較

図 14 天空放射輝度の天空要素の位置別推定値の比較

すべての天空状態における天空輝度分布に関する天空要素の位置別推定値の RMSE を図 13 に、天空放射輝度分布に関する天空要素の位置別推定値の RMSE を図 14 に示す。

天空輝度分布は太陽に直面する South の RMSE が他の方向に比べて大きい傾向があり、Zenith がこれに続く。これらの太陽位置に近い天空要素が含まれる位置の測定では、直射日光の影響により信頼性の高いデータを取得することが困難であり、その影響が現れているものと考えられる。このような中で、全般的に i-As の RMSE が小さく、推定精度が高いことを示している。

天空放射輝度分布に関する推定値の天空要素の位置別比較は、天空輝度と同様な特性を示している。この場合も、i-As の RMSE はどの天空位置においても最も小さく、良好な推定が可能であることを示している。

5.4 モデル別の鉛直面日射量の推定

モデル別の天空分布を基にした鉛直面照度・日射量の推定値について、2006 年～2011 年の実測値と比較する。ここでは、i-As、As、Aw に加えて一様天空 (Is) を比較の対象とする。

鉛直面照度の推定値の RMSE と MBE の 6 年間の平均値を図 15、16 に示す。

鉛直面照度の RMSE は、全体的に i-As が最も小さく、Aw、As の順に大きくなっているが、3 者において極端な相違はみられない。Is は、RMSE が分布型の 3 モデルに比べて極端に大きい。Is は直射日光が当たる面は小さく推定し、直射日光が当たらない面は大きく推定する傾向がある。したがって、例えば東面の MBE は、午前中は負になり、午後は正になる。このため、MBE を単純平均すると、その日の天候状態によっては午前と午後の正負が相殺されて一日の平均 MBE はかなり小さな値となることもある。現実には、時間帯別に大きな乖離が見られる。西面も東面と時間帯が逆になるが、同様な傾向を示す。したがって、とくに東面と西面の平均 MBE は必ずしも現象を十分に説明していないことに留意する必要がある。

鉛直面日射量の推定値の RMSE と MBE の 6 年間の平均値を図 17 と図 18 に示す。

鉛直面日射量の RMSE は、鉛直面照度と非常に良く似た特性を示しており、分布型の 3 モデルにおいて極端な相違はみられないが、すべての方位で i-As が最も小さく、As、Aw の順に大きくなっている。鉛直面照度と同様に、MBE も Is 以外のモデルにおいては極端な相違は見られない。

図 15 鉛直面照度の推定値の RMSE

図 16 鉛直面照度の推定値の MBE

図 17 鉛直面日射量の推定値の RMSE

図 18 鉛直面日射量の推定値の MBE

鉛直面日射量を一樣天空で想定すると、直達日射が当たる時、当該面の鉛直面日射量を小さく予測する傾向があるため、例えば、冷房のピーク負荷を過小に評価することになり、機器の能力不足などに十分に注意する必要があることを示している。このような状況から、一樣天空を基にした鉛直面の照度や日射量を、現実の建築環境・設備の計画・設計・計算・予測に適用することは不適切といえる。

分布型モデルによる鉛直面照度と鉛直面日射量の方位別の推定値の傾向として、北面の RMSE が最も小さく、次に東面と西面の RMSE と続き、南面の RMSE が最も大きい傾向にある。これは、スカイ

キャナーで測定する場合に、太陽位置と太陽周辺の天空の輝度・放射輝度の測定に不確かな部分があり、これらの影響度合いの大きい方位の測定精度が低いため、これに伴って推定精度も低下する。

6 まとめ

既報¹⁾において、大阪における IDMP の測定データを基に、既提案の All Sky Model (As) を改良したモデル (I-As_O) を提案した。今回、さらに検討を重ねて All Sky Model を整備した。整備されたモデル (i-As: improved All Sky Model) は、東京 (1992 年—1993 年) と大阪 (2006 年—2011 年) の実測データを基に比較検討された。

天空の分布測定は市販の測定器に依存し、この中でいくつかの測定上の課題^{注3)}も浮き彫りにされ、モデル化における不都合も感じられた。その中で、今回提案するモデルは、現状の測定器を基にした限界モデルとも考えられる。

通年の推定値や、天空状態別、天空位置別の推定値や、鉛直面照度・日射量の推定値などの比較において、本研究で比較対象とした As、Aw は、いずれもかなり高精度で実用的な完成度の高いモデルであることが明らかになった。さらに、整備された i-As は、いずれの条件でも推定精度が最も高いことが確認され、変移する現象をより現実的に再現することが可能となった。既に既報のモデルを参照されていた方は、本論文の係数に修正いただければ幸いである。

謝辞

本研究の一部は、科研費基盤研究(B) 17360285、(B)21360279 (代表: 井川憲男)の援助を受けた。記して謝意を表する。

注

- 注1) International Daylighting Measurement Programme の略。CIE が昼光と日射の基礎データ取得と標準資料作成のため、1991 年から世界各地で長期測定を実施。
- 注2) 太陽に近接する天空要素は、直射の影響で正確な測定が不可能である。この部分の輝度と放射輝度は 50 kcd/m^2 、 $420 \text{ W/m}^2/\text{sr}$ と仮置きする。
- 注3) 天空の雲の増減やその移動、太陽位置の移動などを考慮すると、可能な限り短時間で分布測定が完了することが望まれる。また、センサーはシャープなカットオフ開口角を有していることが必須である。

参考文献

- 1) 井川憲男, 永村一雄: 天空輝度・放射輝度分布を推定する All Sky Model の改良, 日本建築学会環境系論文集, No.673, pp. 121-127, 2012.3.
- 2) Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., Nakamura, H.: Models of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution, Solar Energy, Vol. 77, No. 2, pp. 137-157, 2004.
- 3) CIE: Spatial Distribution of Daylight - CIE Standard General Sky, CIE S 011/E:2003, 2003
- 4) Perez, R., Seals, R., and Michalsky, J.: All-weather model for sky luminance distribution - Preliminary configuration and validation, Solar Energy, Vol. 50, No. 3, pp. 235-245, 1993.
- 5) 細淵勇人, 吉田治典, 上谷芳昭: 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, 日本建築学会環境系論文集, No. 609, pp. 31-38, 2006.11.
- 6) CIE: Guide to recommended practice of daylight measurement, Pub. CIE 108, ISBN 3 900 734 50 X, 1994.
- 7) 井川憲男: 昼光と日射の研究クラスの測定システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D1, pp. 255-256, 1992.
- 8) Kasten, F. and Young, A.T.: Revised optical air mass tables and approximation formula, Applied Optics 28 (22), pp. 4735-4738, 1989.

(2012年10月10日原稿受理, 2013年1月25日採用決定)