

# 天空放射輝度分布、天空輝度分布の推定

信頼性の高いシミュレーションには、実現象を再現する適切な気象データが不可欠である。しかし、すべての気象要素に関する実測情報を恒常的な気象観測所のデータから入手することは容易ではない。

気象データは各種シミュレーションの精度に直接的に影響を及ぼすため、モデル化されたり変換されたりして得られる気象要素は、再現性の高い手法による必要がある。井川らは CIE<sup>注1</sup>の IDMP<sup>注2</sup>による測定データを基にして、太陽放射に起因する気象要素の変換方法と天空の放射輝度・輝度分布モデルを提案している。ここでは、EA 気象データにおいて天空状態の分類法と、これを基にした天空放射輝度分布と天空輝度分布の数式モデルについて述べる。

## 1 天空放射輝度分布と天空輝度分布を推定するモデル

天空状態を適切に分類して太陽放射に起因する気象要素との関連を定量的に表現すると、日射や昼光に関する気象データのモデル化に有益である。井川らは全天日射量と天空日射量から天空状態を分類する手法を提案し[1]、これを基にすべての天空状態の天空放射輝度分布を推定する方法を提案している[2]。また、天空の放射輝度と輝度について、天頂の値に対する相対分布は同じ式で表せるとしている[3]。さらに、これらの成果を改良・整理し、天空状態を分類する指標として晴天指標と澄清指標を定義し、両指標で天空状態を分類し、最終的にすべての天空状態の天空輝度と天空放射輝度の分布の絶対値を連続的に表す式を提案している[4]。その後も、天空モデルは改良が重ねられ、非常に再現性の高いモデルとなっている[5], [6]。ここでは、改良された天空状態の分類法と、これに基づいて構成された天空放射輝度分布と天空輝度分布の数式モデルについて述べる。

### 1.1 天空状態を推定する指標

一般に、全天日射量の値は、大気が清浄な晴天空では大きく、曇天空では小さくなる。このため、晴天時の全天日射量を基準全天日射量とする。基準全天日射量は、Kasten[7]による晴天時の全天日射量の式を修正して、Linke の混濁因子を 2.0 とする晴天空の全天日射量を大気外法線直達日射量と大気路程の関数として次式で表す。

$$Seeg = 0.84 \cdot Eeo/m \cdot \exp(-0.0027 \times 2.0 \times m) \quad (1)$$

$Eeo$ : 大気外法線直達日射量 [ $1,367\text{W/m}^2$ ],

$m$ : 大気路程 ( $m = 1/[\cos \gamma_{sz} + 0.50572 \cdot (96.07995 - \gamma_{sz})^{-1.6364}]$ )[8],

$\gamma_{sz}$ : 太陽の天頂角 [deg].

晴天時の全天日射量（基準全天日射量）に対する検討時の全天日射量の比は、天空状態を示す一つの指標となる。これを晴天指標（clear sky index）と称して次式で表す。

$$Kc = Eeg/Seeg \quad (2)$$

$Kc$ : 晴天指標 (clear sky index),

$Eeg$ : 全天日射量 [ $\text{W/m}^2$ ],

$Seeg$ : 基準全天日射量 [ $\text{W/m}^2$ ].

また、クラウド・レイシヨは、全天日射量に対する天空日射量の比で表され、この値が小さいほど全天成分中の直達成分が大きいことを示し、直達成分がないとき（曇天空）は 1 となる。Linke の混濁因子が 2.0 の晴天空のクラウド・レイシヨを基準クラウド・レイシヨとする。検討時のクラウド・レイシヨの 1 との差を、基準クラウド・レイシヨの 1 との差で除すと、直達成分の大小を示す指標となる。これを澄清指標と定義して次式で表す。澄清指標は、検討時の直達日射量を晴天の直達日射量で除した値と同様な意味を持っている。

$$Cle = (1 - Ce)/(1 - Ces) \tag{3}$$

- Cle*: 澄清指標 (cloudless index),
- Ces*: 基準クラウド・レイシヨ,
- Ce*: クラウド・レイシヨ(=  $Eed/Eeg$ ),
- Eed*: 天空日射量 [W/m<sup>2</sup>],
- Eeg*: 全天日射量 [W/m<sup>2</sup>].

基準クラウド・レイシヨは太陽高度の関数として次式で表せる。

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

$\gamma_s$ : 太陽高度 [rad].

以上、定義した 2 つの指標、晴天指標 *Kc* と澄清指標 *Cle* は、それぞれ全天日射と直達日射の強度のレベルを示し、両者を組合せると全天日射量に対する直達成分の比率を表すことができる。これにより晴天空から曇天空まで連続的に変移する天候状態を分類して類型化することもできる。

図 1 に *Kc* と *Cle* をマトリックスに組み合わせ、天空状態を便宜的に大まかに 5 種類 (Clear Sky, Intermediate Clear Sky, Intermediate Sky, Intermediate Overcast Sky, Overcast Sky) に分類して類型化したときの状況を示す。

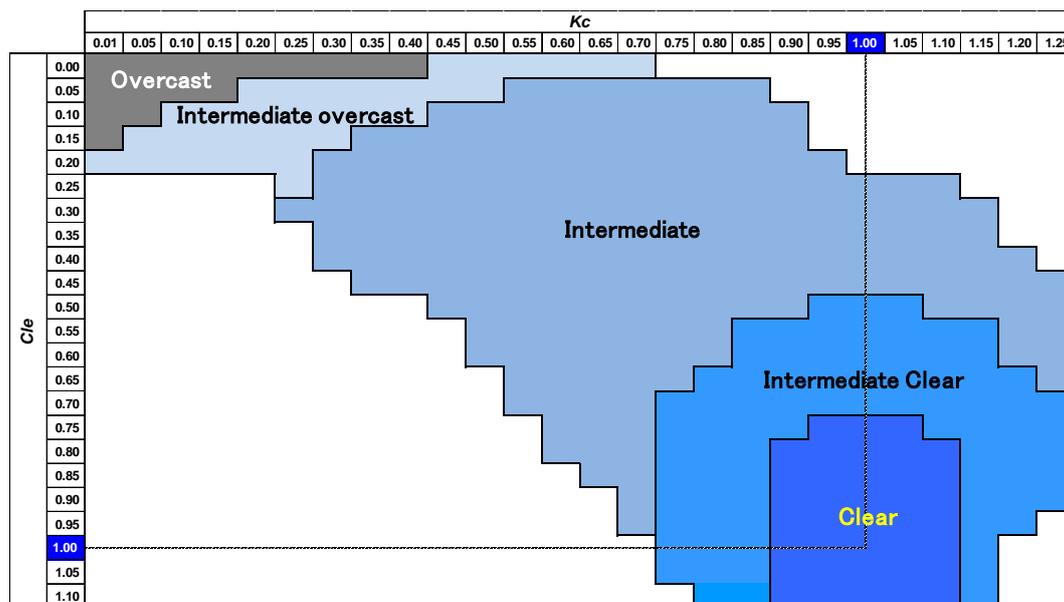


図 1 晴天指標(*Kc*)と澄清指標(*Cle*)による天空状態の分類

### 1.2 天空放射輝度分布と天空輝度分布の数式モデル

晴天指標と澄清指標により天空状態が分類できると、天空放射輝度分布と天空輝度分布も両指標で推定できる。これまでに、晴天指標と澄清指標で分類した区域における天空放射輝度と天空輝度の天頂の値に対する比、すなわち、両者の相対天空分布を比較してほぼ同等であることを確認している。したがって、放射輝度と輝度の相対天空分布は同じ式で表すことができる。天空放射輝度分布と天空輝度分布は、CIE 標準晴天空の式を基にした次式で表す。

$$L(\gamma_s, \gamma, \zeta) = \frac{\phi(\gamma) \cdot f(\zeta)}{\phi(\pi/2) \cdot f(\pi/2 - \gamma_s)} \tag{5}$$

$L(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ : 相対天空 (輝度・放射輝度) 分布,

$\phi(\gamma) = 1 + a \cdot \exp(b/\sin \gamma)$ : 階調関数,

$f(\zeta) = 1 + c \cdot [\exp(d \cdot \zeta) - \exp(d \cdot \pi/2)] + e \cdot \cos^2 \zeta$ : 散乱関数,

$\zeta$ : 太陽と天空要素の各距離 [rad],

$\gamma$ : 天空要素の高度 [rad].

階調関数の係数  $a$ 、 $b$ 、と散乱関数の係数  $c$ 、 $d$ 、 $e$  は、次式の  $x$  で示すように  $Kc$  と  $Cle$  の関数として表される。

$$x = A + B \cdot \exp\left(-\frac{G_{Kc}}{2}\right) + E \cdot \exp\left(-\frac{G_{Cle}}{2}\right) + H \cdot \exp\left(-\frac{G_{Kc} + G_{Cle}}{2}\right) \tag{6}$$

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

ここでの係数 A~H を表 1 に示す。

表 1 天空放射輝度・放射分布を表すための係数

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

相対天空分布と、天頂放射輝度または天頂輝度の積により、すべての天空状態に対応する絶対値で示す天空の放射輝度と輝度の分布を示す数式、すなわち、All Sky Model-R と All Sky Model-L とを構成することができる。

$$Lea(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lez(\gamma_s) \cdot L(\gamma_s, \gamma, \zeta) \tag{7}$$

$Lea(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ : 絶対値で示す天空放射輝度分布(All Sky Model-R) [W/m<sup>2</sup>sr],

$Lez(\gamma_s)$ : 天頂放射輝度 [W/m<sup>2</sup>sr],

$L(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ : 相対天空放射輝度分布.

$$Lva(\gamma_s, \gamma, \zeta) = Lvz(\gamma_s) \cdot L(\gamma_s, \gamma, \zeta) \tag{8}$$

$Lva(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ : 絶対値で示す天空輝度分布(All Sky Model-L) [cd/m<sup>2</sup>],

$Lvz(\gamma_s)$ : 天頂輝度 [cd/m<sup>2</sup>],

$L(\gamma_s, \gamma, \zeta)$ : 相対天空輝度分布.

天頂放射輝度は、次式のように相対天空放射輝度分布を全天に渡って積分した値で天空日射量を除して得られる。

$$Lez(\gamma_s, Kc, Cle) = \frac{Eed}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} L(\gamma_s, \gamma, \zeta) \sin \gamma \cos \gamma d\gamma d\alpha} = Eed \cdot LzEd \tag{9}$$

$Lez(\gamma_s, Kc, Cle)$ : All Sky Model-R の天頂放射輝度 [W/m<sup>2</sup>sr],

$LzEd$ : 相対天空放射輝度分布の全天に渡る積分値の逆数.

相対天空分布の積分計算はやや煩雑であるため、 $LzEd$  を太陽高度と晴天指標と澄清指標の関数として表すと便利である。回帰分析により得られた  $LzEd$  に関する係数  $i, j, k$  を表 2 に示す。

$$LzEd = \frac{1}{\int_{\gamma=0}^{\pi/2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} L(\gamma_s, \gamma, \zeta) \sin \gamma \cos \gamma d\gamma d\alpha} = \sum_{k=0}^5 [A(k) \cdot Kc^k] \tag{10}$$

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

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

天空放射輝度と天空輝度の相対天空分布が共通であるため、天頂輝度の式は天頂放射輝度と同様の構成となり、全天空照度と  $LzEd$ 、あるいは天空日射量と天空日射の発光効率と  $LzEd$  により表すことができる。

$$Lvz(\gamma_s, Kc, Cle) = Evd \cdot LzEd = \eta_d \cdot Eed \cdot \sum_{k=0}^5 [A(k) \cdot Kc^k] \tag{11}$$

$Lvz(\gamma_s, Kc, Cle)$ : All Sky Model-L の天頂輝度 [cd/m<sup>2</sup>],

$Evd$ : 全天空照度 [lx],

$\eta_d$ : 天空日射の発光効率 [lm/W].

表 2  $LzEd$  の係数  $C(i, j, k)$

$k$	$j$	$i$					
		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

晴天指標と澄清指標を 0.1 間隔に分割したときの、All Sky Model-R による天空放射輝度分布と All Sky Model-L による天空輝度分布について、太陽高度 35°の例をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

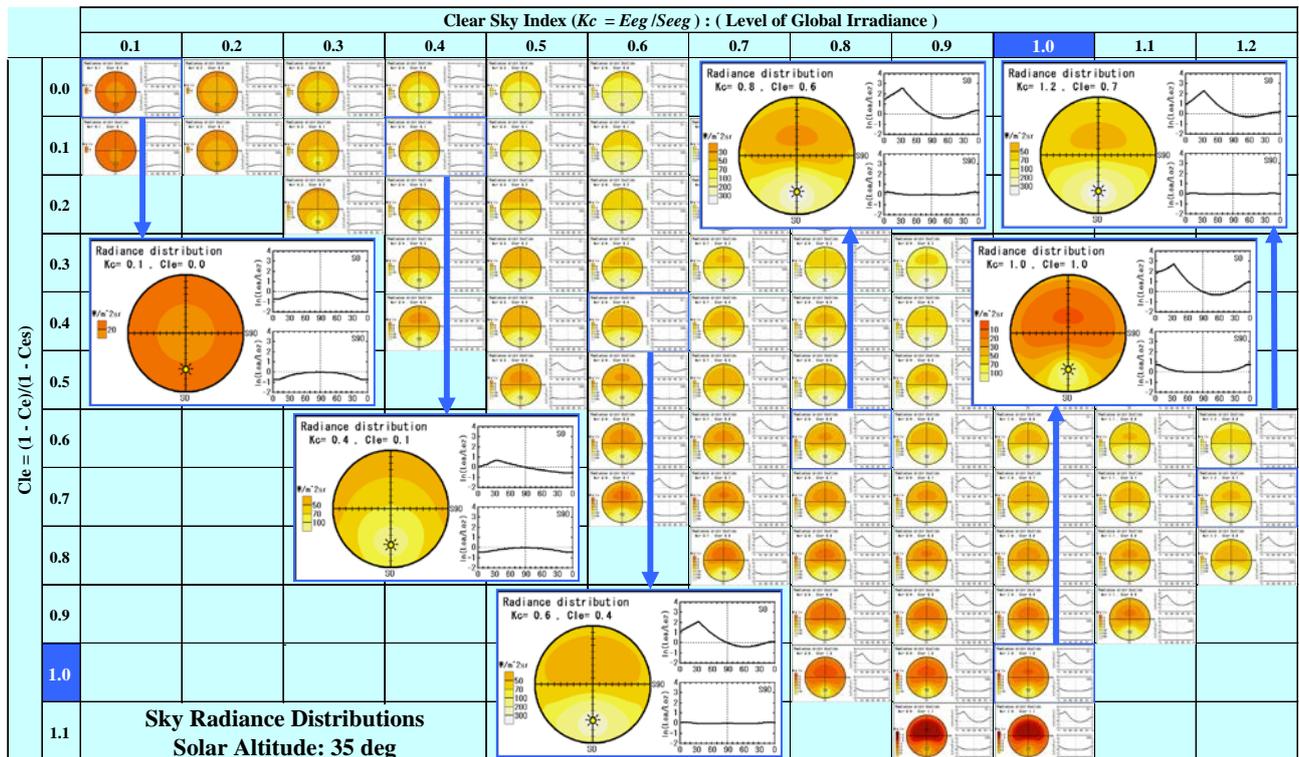


図2 All Sky Model-Rによる天空放射輝度分布の例 ( $\gamma_s = 35^\circ$ )

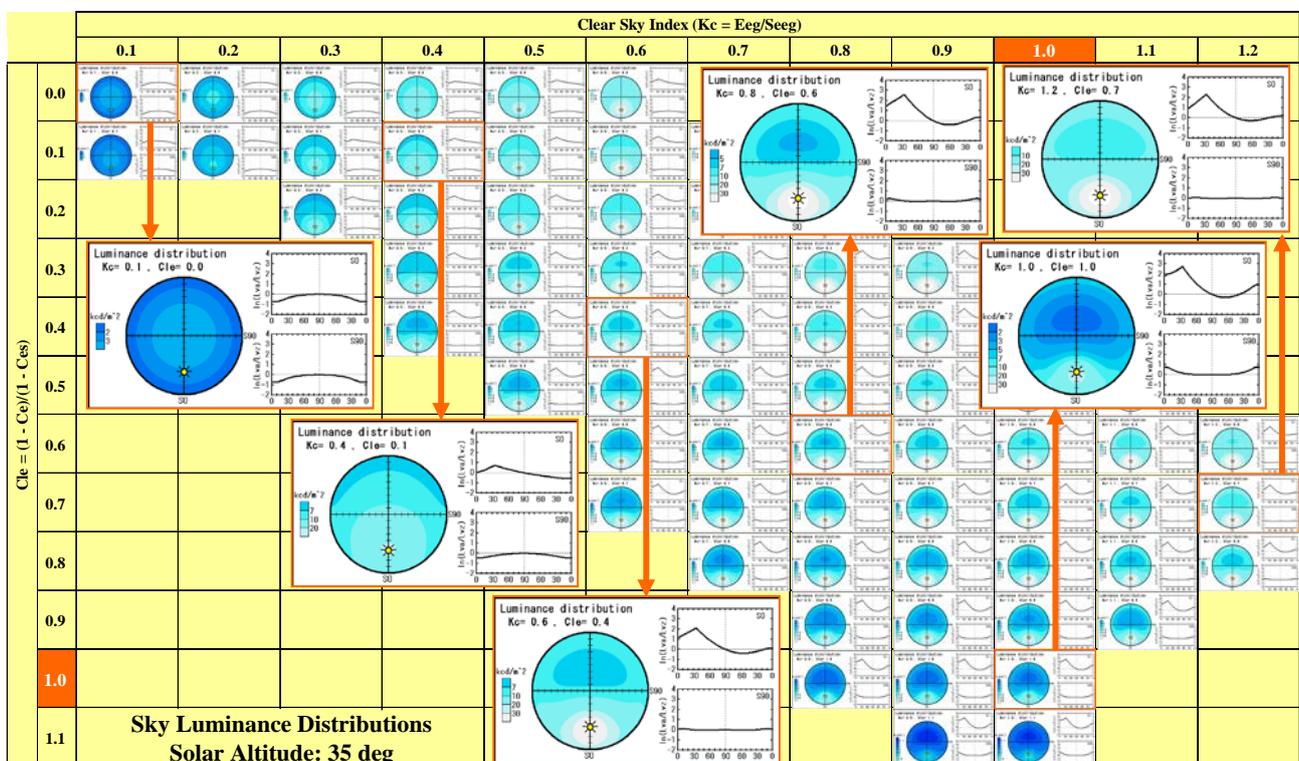


図3 All Sky Model-Lによる天空輝度分布の例 ( $\gamma_s = 35^\circ$ )

- 注1 mission Internationale de l'Éclairage (国際照明委員会)の略。CIE は、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、研究の交流を図ったりしている。また、照明に関する ISO 規格も作成している。
- 注2 International Daylight Measurement Programme の略。国際照明委員会 (CIE) が、照明環境や温熱環境の計画・設計と予測に有用な標準資料の作成を目的として、世界各地に推進した昼光・日射の実測データの収集とその展開に関する活動。

#### 【参考文献】

- [1] 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 長崎慶人; 天空放射輝度分布を推定するための指標, 天空放射輝度分布のモデル化に関する研究(その 1), 日本建築学会計画系論文集, No.553, pp. 28-35, 2002.03
- [2] 井川憲男, 中村洋, 松澤朋子, 古賀靖子, 穴井謙; すべての天空状態の天空放射輝度分布を示す数式と鉛直面日射量の推定, 天空放射輝度分布のモデル化に関する研究(その 2), 日本建築学会計画系論文集, No.557, pp. 17-24, 2002.07
- [3] 井川憲男, 中村洋, 古賀靖子, 松澤朋子; 全天日射量と天空日射量で推定する天空放射輝度分布と天空輝度分布, 日本建築学会環境系論文集, No. 573, pp. 33-40, 2003.11
- [4] Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., and Nakamura H.; Models of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution, Solar Energy, Vol. 77, No. 2, pp. 137-157, 2004.06
- [5] 井川憲男; 天空輝度・放射輝度分布を推定する天空モデルの整備, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 78, No. 687, pp. 393-399, 2013.05
- [6] Igawa, N; Improving the All Sky Model for the luminance and radiance distributions of the sky, Solar Energy, Vol. 105, (2014), pp. 354-372, 2014.07
- [7] Kasten, F.; Strahlungsaustausch zwischen Oberglaeichen und Atmosphaere, VDI Ber (Ver Dtsch Ing), No. 721, pp. 131-158, 1989
- [8] Kasten, F. and Young, A.T.; Revised optical air mass tables and approximation formula, Applied Optics 28 (22), pp. 4735-4738, 1989