天空の放射輝度分布に関する研究 (その3, 天頂放射輝度と絶対値で表す平均天空放射輝度分布)

専門会員 中 村 洋 (九州大学) 正会員 古 城 真 也 (西日本技術開発㈱)
正会員 古 賀 靖 子 (九州大学) 正会員 井 川 憲 男 (㈱竹中工務店技術研究所)
正会員 穴 井 謙 (九州大学) 正会員 徐 廷 昊 (九州大学) 正会員 藤 井 俊 一 (九州大学)

Study on Sky Radiance Distribution (part 3, Equation for the Zenith Radiance and the Absolute Yearly Mean Sky Radiance Distribution)

Fellow Member **Hiroshi Nakamura** (Kyushu University),
Member **Shinya Kojo** (West Japan Engineering Consultants, Inc.), Member **Yasuko Koga** (Kyushu University),
Member **Norio Igawa** (R & D Institute, Takenaka Corporation), Member **Ken Anai** (Kyushu University),
Member **Jongho Seo** (Kyushu University), Member **Shun'ichi Fujii** (Kyushu University)

ABSTRACT

Data of irradiance from the sun and the sky on the building surfaces are absolutely necessary for practical planners and engineers in order to design excellent and comfortable environments of building interiors. The direct solar irradiance is always estimated, but the sky irradiance is almost neglected because of the lack of the knowledge of the sky radiance distribution that is the origin of the sky irradiance.

The sky irradiance can be obtained as the product of the relative sky radiance and the zenith radiance.

An equation which expresses the relative yearly mean sky radiance distribution by the solar altitude to the zenith radiance has been composed based upon the data gained at the IDMP station in Kyushu University in 1994 and 1995 and reported in the preceding paper (part 2). An equation for the yearly mean zenith radiance formulated as the next step is shown in this paper. The equation has been composed as a function of the solar altitude and the frequency of occurrences. The yearly mean irradiance by the solar altitude can be easily calculated by applying the result of this research work, which is surely useful for detailed design of the advanced thermal environments of building interiors.

KEYWORDS : zenith radiance, sky radiance distribution, equation for zenith radiance, sky irradiance

1. はじめに

前報¹⁾では、天頂放射輝度に対する相対平均天空放射輝度の数式化について述べた。これを実用に供するには、相対値だけでなく絶対値も知らなければならない。それには、天頂放射輝度の値を必要とする。本報では、相対平均天空放射輝度の数式化に用いたデータを使用して天頂放射輝度を論じ、その出現頻度に関連して、数式化を試みる。さらに、その結果を適用して求めることができる絶対値で表す平均天空放射輝度の例を示す。

2. 数式化のための基礎資料

天頂放射輝度の数式化には、前々報²⁾、前報と同様に、1994年1月から1995年12月の2年間に九州大学のIDMP測定所で取得したデータを用いる。ただし、ここで検討するのは天頂放射輝度である。天頂放射輝度は低高度の地物などの障害を受けない。したがって、太陽高度0°以上5°以下の資料も加える。総資料数は前々報、前報より1,200多い15,502である。

天頂放射輝度を確率的に処理するために、以上の資料を太陽高

度5°ごとに分割する。すなわち、太陽高度0°を超え5°以下、5°を超え10°以下、10°を超え15°以下、15°を超え20°以下、20°を超え25°以下、25°を超え30°以下、30°を超え35°以下、35°を超え40°以下、40°を超え45°以下、45°を超え50°以下、50°を超え55°以下、55°を超え60°以下、60°を超え65°以下、65°を超え70°以下、70°を超え75°以下、75°を超え80°以下に区分する。

Table 1に、上記の太陽高度の区分ごとのデータ数を、その区分、代表値として適用する中央値、その区分に含まれるデータ取得時の太陽高度の平均をあわせて示す。

次いで、それぞれの区分ごとに、そこに属するデータを以下のよう整理する。すなわち、まず、区分ごとに、データをその値によって並べ、次いで、値の小さい方から5%ごとの値を求め、これをそれぞれの出現頻度とする。すなわち、出現頻度0.05(5%), 0.10(10%), 0.15(15%), 0.20(20%), 0.25(25%), 0.30(30%), 0.35(35%), 0.40(40%), 0.45(45%), 0.50(50%), 0.55(55%), 0.60(60%), 0.65(65%), 0.70(70%), 0.75(75%), 0.80(80%), 0.85(85%), 0.90(90%), 0.95(95%)の値を求める。これを基礎資料と称することとし、以下の数式化はこの基礎資料に

依る。

Table 2 に、基礎資料とする天頂放射輝度の値を太陽高度の区分別、出現頻度別に示す。また、Fig. 1 に、これを図示する。

3. 天頂放射輝度の数式化

3.1 基本式

著者らは Fig. 1 を観察し、また、若干の数式に関する検討を試みた結果、数式化の基本とする式の形を、下記のように太陽高度の2次式とすることにした。これを基本式と称することとする。なお、未確定項 A, B, C は、出現頻度の関数となることを予想した。

$R_z(\gamma_s, p) = A + B \cdot \gamma_s + C \cdot \gamma_s^2$ (13)

ここで、

$R_z(\gamma_s, p)$: 天頂放射輝度の基本式 ($W/m^2 \cdot sr$)

A, B, C : 未確定項

γ_s : 太陽高度 (deg.)

p : 天頂放射輝度の出現頻度 (-)

とする。

3.2 基本式の未確定項の推定

基本式の未確定項 A, B, C を確定するために回帰分析を試みる。なお、以下のすべての回帰分析は前報と同じ既製のソフト³⁾によったが、前報と同様に、個々の回帰分析の結果を基礎資料と図上で比較検討し必要に応じて整合のための修正を若干試みた。

まず、式(13)に基づき、基礎資料を適用し、出現頻度ごとに、天頂放射輝度を太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 A, B, C の値を求めた。

Table 3 にこれを示す。また、Fig. 2 に図示する。

未確定項 C の値は小さい。また、2 次の項の係数であり、回帰分析に与える影響も大きい。当初、これを定数とすることを考えたが、結果が思わしくないため、未確定項 C は出現頻度の 1 次関数として、下式のように回帰した。

$C(p) = 0.0075 + 0.021 \cdot p$ (14)

Fig. 3 に、式(14)と未確定項 C の関係を示す。

Table 1 太陽高度の区分とデータ数
Number of the data by the solar altitude.

太陽高度	区分	$0^\circ < \gamma_s \leq 5^\circ$	$5^\circ < \gamma_s \leq 10^\circ$	$10^\circ < \gamma_s \leq 15^\circ$	$15^\circ < \gamma_s \leq 20^\circ$	$20^\circ < \gamma_s \leq 25^\circ$	$25^\circ < \gamma_s \leq 30^\circ$	$30^\circ < \gamma_s \leq 35^\circ$	$35^\circ < \gamma_s \leq 40^\circ$
	代表値	2.5°	7.5°	12.5°	17.5°	22.5°	27.5°	32.5°	37.5°
	平均	2.48°	7.50°	12.51°	17.41°	22.41°	27.51°	32.60°	37.45°
	データ数	1,200	1,172	1,213	1,172	1,330	1,377	1,736	1,391

太陽高度	区分	$40^\circ < \gamma_s \leq 45^\circ$	$45^\circ < \gamma_s \leq 50^\circ$	$50^\circ < \gamma_s \leq 55^\circ$	$55^\circ < \gamma_s \leq 60^\circ$	$60^\circ < \gamma_s \leq 65^\circ$	$65^\circ < \gamma_s \leq 70^\circ$	$70^\circ < \gamma_s \leq 75^\circ$	$75^\circ < \gamma_s \leq 80^\circ$
	代表値	42.5°	47.5°	52.5°	57.5°	62.5°	67.5°	72.5°	77.5°
	平均	42.41°	47.34°	52.40°	57.58°	62.57°	67.50°	72.29°	77.21°
	データ数	1,131	1,033	942	828	687	599	475	416

(データの総計：16,702)

Fig. 1 太陽高度別・出現頻度別の天頂放射輝度
Zenith radiance vs. the solar altitude by the frequency of occurrence.

Table 3 未確定項 A, B, C (その 1)
Undetermined coefficients A, B and C (1).

出現頻度	0.95 (95%)	0.90 (90%)	0.85 (85%)	0.80 (80%)	0.75 (75%)	0.70 (70%)	0.65 (65%)	0.60 (60%)	0.55 (55%)	0.50 (50%)
A	6.254	6.012	3.984	4.107	2.301	3.222	4.304	4.614	5.660	5.865
B	1.669	1.179	1.117	0.890	0.912	0.656	0.395	0.269	0.053	-0.051
C	0.025	0.027	0.024	0.023	0.019	0.020	0.021	0.020	0.022	0.021

出現頻度	0.45 (45%)	0.40 (40%)	0.35 (35%)	0.30 (30%)	0.25 (25%)	0.20 (20%)	0.15 (15%)	0.10 (10%)	0.05 (5%)
A	5.701	5.888	5.842	5.024	4.968	3.614	2.389	-0.156	-0.841
B	-0.089	-0.167	-0.209	-0.160	-0.184	-0.070	0.021	0.231	0.192
C	0.020	0.020	0.019	0.016	0.015	0.012	0.009	0.004	0.003

Table 2 太陽高度の区分別・出現頻度別の天頂放射輝度
Zenith radiance by the solar altitude and the frequency of occurrence.

太陽高度	区分	$0^{\circ} < \gamma_s \leq 5^{\circ}$	$5^{\circ} < \gamma_s \leq 10^{\circ}$	$10^{\circ} < \gamma_s \leq 15^{\circ}$	$15^{\circ} < \gamma_s \leq 20^{\circ}$	$20^{\circ} < \gamma_s \leq 25^{\circ}$	$25^{\circ} < \gamma_s \leq 30^{\circ}$	$30^{\circ} < \gamma_s \leq 35^{\circ}$	$35^{\circ} < \gamma_s \leq 40^{\circ}$	$40^{\circ} < \gamma_s \leq 45^{\circ}$	$45^{\circ} < \gamma_s \leq 50^{\circ}$	$50^{\circ} < \gamma_s \leq 55^{\circ}$	$55^{\circ} < \gamma_s \leq 60^{\circ}$	$60^{\circ} < \gamma_s \leq 65^{\circ}$	$65^{\circ} < \gamma_s \leq 70^{\circ}$	$70^{\circ} < \gamma_s \leq 75^{\circ}$	$75^{\circ} < \gamma_s \leq 80^{\circ}$
	代表値	2.5°	7.5°	12.5°	17.5°	22.5°	27.5°	32.5°	37.5°	42.5°	47.5°	52.5°	57.5°	62.5°	67.5°	72.5°	77.5°
出現頻度	0.95(95%)	6.90	16.93	29.69	43.20	60.38	77.31	93.30	114.10	121.35	133.02	148.76	173.58	201.74	233.11	267.87	280.83
	0.90(90%)	5.01	14.00	24.43	36.00	51.14	63.46	79.64	94.34	104.12	117.82	133.02	154.22	184.26	209.98	243.79	271.20
	0.85(85%)	4.27	11.67	21.55	30.73	44.59	57.20	70.40	83.07	92.10	105.16	121.45	141.36	167.37	186.89	215.69	265.54
	0.80(80%)	3.58	10.33	18.22	27.90	39.32	50.35	63.65	73.68	80.83	92.45	111.62	126.37	151.83	170.60	197.07	262.31
	0.75(75%)	3.22	8.99	16.04	24.33	34.91	44.79	56.31	65.79	70.85	82.82	102.14	115.29	132.72	154.02	169.41	256.10
	0.70(70%)	2.88	8.04	14.20	21.15	30.83	40.02	49.75	57.25	61.37	73.73	91.61	102.98	120.66	140.57	155.91	225.22
	0.65(65%)	2.58	7.20	12.71	18.87	27.01	34.21	45.03	50.50	54.22	65.89	84.11	92.06	110.82	131.63	147.02	204.62
	0.60(60%)	2.38	6.65	11.67	16.93	23.54	29.89	40.17	45.78	48.61	59.24	74.28	83.51	100.20	117.33	136.05	188.53
	0.55(55%)	2.18	6.16	10.82	15.00	20.75	26.37	35.65	38.28	43.40	52.73	66.93	75.37	94.29	110.08	127.06	168.92
	0.50(50%)	1.94	5.66	9.73	13.75	19.02	23.24	30.78	34.26	38.63	47.91	61.57	69.27	87.54	100.01	119.27	155.02
	0.45(45%)	1.74	5.21	8.99	12.76	17.08	20.90	27.16	30.78	34.86	43.94	55.31	64.35	78.85	91.26	109.73	144.49
	0.40(40%)	1.54	4.77	8.24	11.52	15.09	18.67	24.03	27.21	31.23	39.97	48.51	56.70	72.19	84.56	100.79	129.69
	0.35(35%)	1.29	4.37	7.50	10.38	13.70	16.88	21.40	25.07	28.50	36.74	43.89	51.14	65.39	75.82	95.68	116.29
	0.30(30%)	1.09	4.02	6.85	9.33	12.41	15.29	19.22	22.09	25.32	33.27	40.02	46.47	57.94	68.32	84.46	102.63
	0.25(25%)	0.90	3.67	6.26	8.54	11.17	13.41	17.48	19.66	22.69	29.69	35.25	41.66	49.60	60.13	78.20	91.11
	0.20(20%)	0.70	3.08	5.56	7.70	10.13	12.31	15.74	17.83	20.71	27.11	30.54	36.99	43.40	52.18	66.24	74.78
	0.15(15%)	0.50	2.48	4.77	6.95	9.09	11.17	14.05	15.99	18.77	23.93	26.71	32.42	37.93	47.86	53.97	62.71
0.10(10%)	0.25	1.64	3.28	5.46	7.15	9.73	12.41	14.15	16.48	20.41	21.55	26.17	30.39	36.69	36.75	45.18	
0.05(5%)	0.00	0.74	1.09	3.03	4.42	6.85	8.84	9.73	13.95	14.40	14.50	17.87	18.92	25.17	27.03	28.75	

単位：($W/m^2 \cdot sr$)

以上の結果、式(13)は式(15)のようになる。

$$Rz(\gamma_s, p) = A + B \cdot \gamma_s + (0.0075 + 0.021 \cdot p) \cdot \gamma_s^2 \tag{15}$$

さらに、式(15)に基づき、再度、基礎資料を適用し、出現頻度ごとに、天頂放射輝度を太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 A、B の値を求めた。

Table 4 にこれを示す。また、Fig. 4 に図示する。

未確定項 B は出現頻度の3次関数として、下式のように回帰した。

$$B(p) = -0.26 + 1.96 \cdot p - 4.32 \cdot p^2 + 4.39 \cdot p^3 \tag{16}$$

Fig. 5 に、式(16)と未確定項 B の関係を示す。

以上の結果、式(13)は式(17)のようになる。

$$Rz(\gamma_s, p) = A - (0.26 - 1.96 \cdot p + 4.32 \cdot p^2 - 4.39 \cdot p^3) \cdot \gamma_s + (0.0075 + 0.021 \cdot p) \cdot \gamma_s^2 \tag{17}$$

最後に、式(17)に基づき、再々度、基礎資料を適用し、出現頻度ごとに、天頂放射輝度を太陽高度の関数として回帰分析を行い、未確定項 A の値を求めた。

Table 5 にこれを示す。また、Fig. 6 に図示する。

未確定項 A は出現頻度の2次関数として、下式のように回帰した。

$$A(p) = 1.88 - 1.90 \cdot p + 8.40 \cdot p^2 \tag{18}$$

Fig. 7 に、式(18)と未確定項 A の関係を示す。

以上の結果、式(13)は式(19)のようになる。

$$Rz(\gamma_s, p) = 1.88 - 1.90 \cdot p + 8.40 \cdot p^2 - (0.26 - 1.96 \cdot p + 4.32 \cdot p^2 - 4.39 \cdot p^3) \cdot \gamma_s + (0.0075 + 0.021 \cdot p) \cdot \gamma_s^2 \tag{19}$$

ここで、

$Rz(\gamma_s, p)$: 天頂放射輝度の基本式 ($W/m^2 \cdot sr$)

Fig. 2 未確定項 A, B, C と出現頻度 (その 1)
Undetermined coefficients A, B and C vs. the frequency of occurrence (1).

Fig. 3 式(14)と未確定項 C (その 1)
Equation (14) and the undetermined coefficient C (1).

Table 4 未確定項 A, B (その 2)
Undetermined coefficients A and B (2).

出現頻度	0.95 (95%)	0.90 (90%)	0.85 (85%)	0.80 (80%)	0.75 (75%)	0.70 (70%)	0.65 (65%)	0.60 (60%)	0.55 (55%)	0.50 (50%)
A	9.016	5.333	5.541	5.011	6.283	5.569	4.203	4.251	3.143	2.601
B	1.449	1.233	0.992	0.818	0.594	0.469	0.403	0.298	0.254	0.210

出現頻度	0.45 (45%)	0.40 (40%)	0.35 (35%)	0.30 (30%)	0.25 (25%)	0.20 (20%)	0.15 (15%)	0.10 (10%)	0.05 (5%)	
A	2.667	2.416	2.155	2.574	2.663	3.396	3.731	5.023	4.812	
B	0.154	0.110	0.086	0.035	0.000	-0.052	-0.086	-0.182	-0.259

Fig. 4 未確定項 A, B と出現頻度 (その 2)
Undetermined coefficients A and B vs. the frequency of occurrence (2).

Fig. 5 式(16)と未確定項 B (その 2)
Equation (16) and the undetermined coefficient B (2).

Table 5 未確定項 A (その 3)
Undetermined coefficient A (3).

出現頻度	0.95 (95%)	0.90 (90%)	0.85 (85%)	0.80 (80%)	0.75 (75%)	0.70 (70%)	0.65 (65%)	0.60 (60%)	0.55 (55%)	0.50 (50%)
A	8.322	6.379	5.975	6.017	4.862	4.365	4.522	3.847	3.600	3.381

出現頻度	0.45 (45%)	0.40 (40%)	0.35 (35%)	0.30 (30%)	0.25 (25%)	0.20 (20%)	0.15 (15%)	0.10 (10%)	0.05 (5%)	
A	2.907	2.289	2.182	1.729	1.602	1.641	2.307	2.043	1.549

Fig. 6 未確定項 A と出現頻度 (その 3)
Undetermined coefficient A vs. the frequency of occurrence (3).

γ_s : 太陽高度 (deg.)
 p : 天頂放射輝度の出現頻度 (-)
 である。

Fig. 8-1 と Fig. 8-2 に、式(19)による計算結果を、Fig. 1 に示した基礎資料とあわせて図示する。

4. 絶対値で表す平均天空放射輝度

4.1 平均天空放射輝度（絶対値）の数式表現

建築の内部空間、とくに温熱環境の計画や設計には天空放射輝度やその分布の相対値を知るだけでは不十分である。絶対値が必要である。絶対値を知るには、相対天空放射輝度やその分布に天頂放射輝度を乗じればよい。すなわち、絶対値で表す平均天空放射輝度とその分布は以下の式で求めることができる。

$$Ra(\gamma_s, \gamma, \xi, p) = R(\gamma_s, \gamma, \xi) \cdot Rz(\gamma_s, p) \quad (20)$$

ここで、

$Ra(\gamma_s, \gamma, \xi, p)$: 平均天空放射輝度（絶対値）($W/m^2 \cdot sr$)

$R(\gamma_s, \gamma, \xi)$: 相対平均天空放射輝度 (-)

$Rz(\gamma_s, p)$: 天頂放射輝度 ($W/m^2 \cdot sr$)

γ_s : 太陽高度 (deg.)

γ : 天空要素の高度 (deg.)

ξ : 太陽と天空要素の角距離 (deg.)

p : 天頂放射輝度の出現頻度 (-)

である。

Fig. 9 と Fig.10に、式(20)で求めた太陽高度30°のときの太陽の方位線上と天頂でそれと直交する方位線上の絶対値で表した平均天空放射輝度分布を出現頻度10%おきに示す。また、Fig.11と Fig.12に、出現頻度80%で太陽高度30°と60°のときの全天の絶対値で表す天空放射輝度分布を示す。また、Fig.13と Fig.14に、出現頻度80%のときの太陽の方位線上と天頂でそれと直交する方位線上の絶対値で表した平均天空放射輝度分布を太陽高度10°おきに示す。

文末の Fig.15-0 から Fig.15-9 と Fig.16-0 から Fig.16-9 に、出現頻度75%のときの絶対値で表した全天の天空放射輝度分布と、太陽の方位線上と天頂でそれと直交する方位線上の天空放射輝度分布を太陽高度0°から90°まで、10°おきに示す。

4.2 天空放射輝度と天空放射照度

天空放射照度は天空放射輝度に起因する。したがって、天空放射輝度により天空放射照度を求めることができる。例えば、太陽高度と出現頻度を固定した年間の平均の全天天空からの水平面天空放射照度は、以下のようである⁴。

$$\begin{aligned} E_{ch-\gamma_s p}(\gamma, \xi) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} Ra(\gamma_s, \gamma, \xi, p) \cdot \sin\gamma \cdot \cos\gamma \cdot d\gamma \cdot d\alpha \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} Ra[R(\gamma_s, \gamma, \xi) \cdot Rz(\gamma_s, p)] \\ &\quad \cdot \sin\gamma \cdot \cos\gamma \cdot d\gamma \cdot d\alpha \end{aligned} \quad (21)$$

ただし、

$$\xi = \cos^{-1}(\sin\gamma_s \cdot \sin\gamma + \cos\gamma_s \cdot \cos\gamma \cdot \cos|\alpha_s - \alpha|) \quad (22)$$

ここで、

$E_{ch-\gamma_s p}(\gamma, \xi)$: 全天水平面天空放射照度 (W/m^2)

$Ra(\gamma_s, \gamma, \xi, p)$: 平均天空放射輝度（絶対値）($W/m^2 \cdot sr$)

$R(\gamma_s, \gamma, \xi)$: 相対平均天空放射輝度 (-)

$Rz(\gamma_s, p)$: 天頂放射輝度 ($W/m^2 \cdot sr$)

γ_s : 太陽高度 (rad., deg.)

α_s : 太陽の方位角 (deg.)

γ : 天空要素の高度 (rad., deg.)

Fig. 7 式(18)と未確定項 A (その 3)
 Equation (18) and the undetermined coefficient A (3).

Fig. 8-1 式(19)による計算値と基礎資料による値(1)
 Zenith radiances calculated by the equation (19) and the basic data (1).

Fig. 8-2 式(19)による計算値と基礎資料による値(2)
 Zenith radiances calculated by the equation (19) and the basic data (2).

Fig. 9 太陽の方位線上の天空放射輝度分布 (太陽高度 : 30°)
 Sky radiance distribution on the solar meridian (γ_s : 30°).

α : 天空要素の方位角 (deg.)
 ξ : 太陽と天空要素の角距離 (rad., deg.)
 p : 天頂放射輝度の出現頻度 (-)

である。

また、太陽高度と出現頻度を固定した年間の平均の半天空からの鉛直面天空放射照度は、以下のようである⁴。

$$\begin{aligned} E_{ch-\gamma_s p}(\gamma, \xi) &= \int_{\alpha-\pi/2}^{\alpha+\pi/2} \int_0^{\pi/2} Ra(\gamma_s, \gamma, \xi, p) \cdot \cos^2 \gamma \cdot \cos \alpha \cdot d\gamma \cdot d\alpha \\ &= \int_{\alpha-\pi/2}^{\alpha+\pi/2} \int_0^{\pi/2} Ra[R(\gamma_s, \gamma, \xi) \cdot Rz(\gamma_s, p)] \\ &\quad \cdot \cos^2 \gamma \cdot \cos \alpha \cdot d\gamma \cdot d\alpha \end{aligned} \quad (23)$$

ただし、

$$\xi = \cos^{-1}(\sin \gamma_s \cdot \sin \gamma + \cos \gamma_s \cdot \cos \gamma \cdot \cos |\alpha_s - \alpha|) \quad (22)$$

ここで、

$E_{ev-\gamma_s p}(\gamma, \xi)$: 鉛直面天空放射照度 (W/m^2)

α : 鉛直壁が面する方位 (deg.)

である。

天空の一部分からの天空放射照度を求めるには、式(21)や式(23)の積分範囲を限定すればよい。また、傾斜面が受ける天空放射照度も式(21)や式(23)に基づき、その計算式を誘導するのは容易である。

5. 結語

本論文では、天頂放射輝度の数式化を紹介した。また、天空放射輝度と天空放射照度の関係を述べた。

天頂放射輝度の数式はかなり高い精度で完成できたと自負する。構成した式もさほど複雑ではない。コンピュータの計算にも容易に適用でき、極めて実用的と考える。とくに、本研究では、天頂放射輝度を確率的に示し、天空放射輝度とその分布、さらに、天空放射照度の確率的な取り扱いを可能とした。これは、前例のない試みで、実際的な計画や設計に寄与するところが極めて大きいと考える。したがって、本研究の成果は十分に満足できるものである。

上述したように、ここで報告する成果と前報で報告した相対平均天空放射輝度とその分布を表す数式で、絶対値で表す天空放射輝度とその分布を求めることができる。これに加えて、検討する期間の太陽高度の出現頻度を求めれば、その期間の平均と考える天空放射輝度とその分布が推定できる。その結果、水平面だけでなく、鉛直面や傾斜面に対する天空放射照度のその期間の平均を求めることができ、対象とする建築物などの表面の受熱量を知ることができる。

天空放射照度は直達放射照度より小さい。しかし、直達放射照度を受けることが少ない受熱面、たとえば、北面する壁面などの計画や設計では、天空放射照度の検討が必要と考える。冬期を基準として、北面する壁面の計画や設計を試みるなら、冬至の日の平均天空放射照度を求め、それによる受熱量に基づいて検討することも考えられる。また、北面する壁面の年間の受熱量について検討する場合も、日照率や大気透過率を加味した直達放射照度による受熱量だけでなく、天空放射照度による受熱量も検討に加える必要があるのではないかと考える。しかし、瞬時的な昼光と異なり、放射照度による熱量は建築物など対象物に蓄積され、伝導される。これが時を経て、場所を移して放熱されることを考慮に入れなければならないであろう。

本研究の次の課題は、太陽高度別、天空状態別の相対天空放射輝度とその分布の検討である。すでに、筆者らはそれに着手している。

Fig.10 天頂で太陽の方位線と直交する方位線上の天空放射輝度分布 (太陽高度: 30°)

Sky radiance distribution on the orthogonal plane to the solar meridian ($\gamma_s: 30^\circ$).

Fig.11 天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度30°, 出現頻度0.8)

Sky radiance distribution (absolute value) ($\gamma_s: 30^\circ$, frequency of occurrence: 0.8).

Fig.12 天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度60°, 出現頻度0.8)

Sky radiance distribution (absolute value) ($\gamma_s: 60^\circ$, frequency of occurrence: 0.8).

Fig.13 太陽の方位線上の天空放射輝度分布 (出現頻度0.8)

Sky radiance distribution on the solar meridian (frequency of occurrence: 0.8).

注及び文献

- (1) 中村洋他：天空の放射輝度分布に関する研究（その2，平均天空放射輝度分布の数式化），照学誌（論文号）1992年2月。
- (2) 中村洋他：天空の放射輝度分布に関する研究（その1，太陽高度別平均天空放射輝度分布），照学誌（論文号）1992年2月。
- (3) KaleidaGraph version 3.0.5.
- (4) 式(21)や式(23)が含む $E_{eh}\gamma_s p(\gamma, \xi)$ で示す全天水平面天空放射照度， $R_a(\gamma_s, \gamma, \xi, p)$ で示す平均天空放射輝度（絶対値）， $R(\gamma_s, \gamma, \xi)$ で示す相対平均天空放射輝度， $E_{eh}\gamma_s p(\gamma, \xi)$ で示す鉛直面天空放射照度， $R_z(\gamma_s, p)$ で示す天頂放射輝度の γ_s, γ, ξ の単位は度であることに注意を要する。
（受付日1996年12月3日／採録日1997年1月7日）

Fig.14 天頂で太陽の方位線と直交する方位線上の天空放射輝度分布（出現頻度0.8）
Sky radiance distribution on the orthogonal plane to the solar meridian (frequency of occurrence : 0.8).

Fig.15-0 平均天空放射輝度分布（絶対値）（太陽高度0°，出現頻度0.75）
Mean sky radiance distribution (absolute value)
($\gamma_s : 0^\circ$, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-1 平均天空放射輝度分布（絶対値）（太陽高度10°，出現頻度0.75）
Mean sky radiance distribution (absolute value)
($\gamma_s : 10^\circ$, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-0 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布（絶対値）（太陽高度0°，出現頻度0.75）
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) ($\gamma_s : 0^\circ$, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-1 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布（絶対値）（太陽高度10°，出現頻度0.75）
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) ($\gamma_s : 10^\circ$, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-2 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度20°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 20°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-3 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度30°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 30°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-4 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度40°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 40°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-5 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度50°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 50°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-2 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度20°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 20°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-3 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度30°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 30°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-4 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度40°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 40°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-5 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度50°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 50°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-6 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度60°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 60°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-7 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度70°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 70°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-8 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度80°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 80°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.15-9 平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度90°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution (absolute value)
(γ_s : 90°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-6 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度60°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 60°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-7 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度70°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 70°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-8 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度80°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 80°, frequency of occurrence : 0.75).

Fig.16-9 太陽の方位線上とそれと直交する方位線上の平均天空放射輝度分布 (絶対値) (太陽高度90°, 出現頻度0.75)
Mean sky radiance distribution on the solar meridian and the orthogonal plane (absolute value) (γ_s : 90°, frequency of occurrence : 0.75).