等 昼 光 率 網 目 に つ い て

専門会員 藤原 義輝* 正会員 大谷 義彦*

On the Diagram of Iso-daylight-factor

Yoshiteru Fujiwara (Fellow Member), Yoshihiko Otani (Member)
(College of Industrial Technology Nihon Univ.)

ABSTRACT

The improved Iso-daylight-factor Diagrams are described for calculating the direct daylight-factor by using the images of solid angle projection diagram, convex mirror and fish-eye lens.

We devised two types of the diagram for each of the above three images and were able to use one of them according to shape of light source.

We compared theoretical values to experimental values about the direct daylight-factor of some examples, so made sure to put these methods to practical use.

1. 緒 言

採光設計における明るさの基準としては昼光率が使用される。昼光率による照度は季節や時刻に伴う太陽高度の変化、天候などによって変動する。そこで光源の変動の影響を受けずに、しかも明るさの指標となるものとして昼光率が用いられる¹⁾。

昼光率の測定法あるいは算定法については、過去に数多くの報告がなされており、実際に用いられているものもある。これらの方法を大別すると、(1)直接計算する方法(たとえば立体角投射の法則)、(2)算定図または表による方法(たとえば立体角投射図²⁾、小木曾の図⁴⁾)、(3)分度器による方法(たとえば BRS 分度器³⁾)、(4)写真機による方法(たとえば立体角投射写真機⁵⁾ Globo scope⁶⁾)になる。

本論に述べる等昼光率網目は、立体角投射図、凸面鏡、魚眼カメラより得られる光源の投影像から直接昼光率の値を算定しようとするものであり、容易に、迅速に、かつ正確に求めることを目標に試みたものである。

2. 立体角投射図に対する網目^{9~11)}

2.1 立体角投射図

立体角投射図は、図1に示すように立体角投射の法則

を応用して、水平角および鉛直角の網目を描いたもので、水平角 φ はそのまま、鉛直角 θ を $(1 - \cos \theta)$ にとってある。たとえば図2のように光源 S の境界線上の諸点 A, B, C, D に相当する立体角投射図上の点 a', b', c', d' をとって、これらを結べば、光源の立体角投射面積 S_0 が得られる。したがって、 P 点における直接照度 E_d は光源の輝度 B が一定ならば、立体角投射の法則により

$$E_d = \int_{S_0} B dS_0 = BS_0 \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。またこのときの全天空照度 E_s は

$$E_s = B \bar{S}_0 \dots \dots \dots (2)$$

となり、 $\bar{S}_0$ は全天空の立体角投射面積で、全円の面積である。

直接昼光率は、ある点の直接照度とその点の全天空照度との比で示されるから、上記の場合の直接昼光率 D_d は

$$D_d = \frac{E_d}{E_s} \times 100 = \frac{BS_0}{B\bar{S}_0} \times 100 = \frac{S_0}{\bar{S}_0} \times 100(\%) \dots (3)$$

となり、立体角投射面積の比で与えられることがわかる。

2.2 網目の作成

(3)式により立体角投射面積が昼光率の値に比例することとは明らかである。したがって、等昼光率網目を得た

* 日本大学生産工学部電気工学科

図1 立体角投射図

図2 立体角投影面積

めには、全円を等面積の網目となるように分割すれば、おのおのの網目は等しい昼光率を示すことになる。そこで、分割の方法に円および楕円を考え、おのおのを網目 S-I および網目 S-II として以下に述べる。

(a) 網目 S-I

半径 $r=1$ の円を考え、同心円（緯度）により十等分する。すなわち図3において、全円の面積を $\bar{S}_0$ 、斜線を施した同心円の半径を r_0 、その面積を S_0 とすれば、

$$S_0/\bar{S}_0 = \pi r_0^2 / \pi \times 1^2 = r_0^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

であるから、

$$r_0^2 = 0.1, 0.2, \dots, 0.9 \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる r_0 を求め、半径 r_0 の同心円で分割する。

次に中心より 18° 間隔の放射線（経度）で細分割して網目を完成させる。このようにしてできた緯度、経度によって囲まれる網目はおのおの $\bar{S}_0/200$ となり、すべて 0.5% の昼光率を示していることになる。表1に半径 r_0 の値および r_0 に対する天頂角 θ の値を示す。

図3 立体角投射図に対する網目の作成 (S-I)

表1 半径と天頂角 (S-I)

$\frac{S_0}{\bar{S}_0}$	r_0	θ
0.1	0.316	$18^\circ 26'$
0.2	0.447	$26^\circ 34'$
0.3	0.548	$33^\circ 13'$
0.4	0.632	$39^\circ 14'$
0.5	0.707	$45^\circ 00'$
0.6	0.775	$50^\circ 46'$
0.7	0.835	$56^\circ 47'$
0.8	0.894	$63^\circ 26'$
0.9	0.949	$71^\circ 34'$
1.0	1.000	$90^\circ 00'$

(b) 網目 S-II

図4のように半径 $r=1$ の円内に長径が円の半径と等しく、短径が r_0 の楕円を考える。円の面積を $\bar{S}_0$ 、楕円の面積を S_0 とすれば

$$S_0/\bar{S}_0 = \pi r_0 / \pi \times 1 = r_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

であるから

$$r_0 = 0.1, 0.2, \dots, 0.9 \quad \dots\dots\dots (7)$$

図4 立体角投射図に対する網目の作成 (S-II)

を短径とする楕円で分割すれば、すべて等面積となる。このときの各 r_0 に対する天頂角 θ の値を表2に示す。

次に細分割であるが、図5のように半径 $r=1$ の円

表 2 短径と天頂角 (S-II)

$\frac{S_0}{S'_0}$	r_0	θ
0.1	0.1	5°44'
0.2	0.2	11°32'
0.3	0.3	17°27'
0.4	0.4	23°35'
0.5	0.5	30°00'
0.6	0.6	36°52'
0.7	0.7	44°26'
0.8	0.8	53°08'
0.9	0.9	64°09'
1.0	1.0	90°00'

図 5 立体角投射図に対する網目の作成 (S-II: 細分割)

に内接する短径 r_1 , r_2 の楕円を考える。この二つの楕円と短径 $\overline{PO}$ とで囲まれる面積を S'_0 とし、また短径 $\overline{PO}$ から角 φ の直線によってできる斜線部分の面積を S''_0 とすれば、

$$S''_0/S'_0 = \frac{1}{2} \{ r_2 \tan^{-1}(r_2 \tan \varphi) - r_1 \tan^{-1}(r_1 \tan \varphi) \} /$$

$$\frac{1}{4} \pi (r_2 - r_1) \dots\dots\dots (8)$$

であるから、 $[r_2=1.0, r_1=0.9]$, $[r_2=0.9, r_1=0.8]$ $[r_2=0.1, r_1=0.0]$ のときに

$$S''_0/S'_0 = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 \dots\dots\dots (9)$$

となる φ の値を求めると表 3 のようになる。これらの値を用いて、前に楕円で分割したものを、さらに細分割すれば網目はでき上がり、すべて 0.5% の昼光率を示していることになる。

3. 凸面鏡に対する網目

3.1 凸 面 鏡

凸面鏡は、底面の中心を含む垂直断面の切り口が放物線になるものを用いた。すなわち図 6 のように、底面

表 3 細分割に用いる角度 (φ)

S''_0/S'_0	0.2	0.4	0.6	0.8
r_2/r_1				
$r_2=1.0$ $r_1=0.9$	9°30'	19°30'	31°00'	45°00'
$r_2=0.9$ $r_1=0.8$	11 00	21 30	33 00	48 30
$r_2=0.8$ $r_1=0.7$	12 30	24 30	37 00	51 30
$r_2=0.7$ $r_1=0.6$	14 00	27 00	41 00	56 00
$r_2=0.6$ $r_1=0.5$	16 00	31 30	46 00	59 30
$r_2=0.5$ $r_1=0.4$	20 30	37 00	51 30	65 00
$r_2=0.4$ $r_1=0.3$	25 00	44 30	58 30	69 30
$r_2=0.3$ $r_1=0.2$	32 30	53 30	66 30	75 30
$r_2=0.2$ $r_1=0.1$	46 30	66 00	75 30	81 30
$r_2=0.1$ $r_1=0.0$	73 00	82 30	86 00	88 00

半径を R , 中心を O , 天頂角 θ の鏡面上の一点を P とすれば、焦点半径 $r (= \overline{OP})$ が

$$r = \frac{R}{1 + \cos \theta} \dots\dots\dots (10)$$

で与えられる放物面鏡である。したがって、中心 O は放物面鏡の焦点となり、中心 O に向かう天空内のすべての光線は鏡面 G で正反射して、底面に垂直な平行光線となる。また、天頂角 θ にある光源 AS の投影像 AS' は、底面上の P' に生じ、この像の中心 O からの距離 R' ($= \overline{OP'}$) は、

図 6 放物面鏡による投影像

$$R' = R \sin \theta / 1 + \cos \theta = R \tan \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots (11)$$

である。

われわれの使用した放物面鏡は、底面半径 $R=10(\text{cm})$ である。これを測定面に置き、中心 O より高さ $h=1(\text{m})$

のところに写真機を設置して、鏡面の反射像を撮影することにより、天空内にある被写体の平射図が得られる。

3.2 網目の作成

さきに求めた立体角投射図に対する網目は、等昼光率の光源による投影であると考えられるから、凸面鏡に対する網目を作成する場合には、上記光源の凸面鏡による投影図を求めればよい。

立体角投射図に対する網目における、円分割 (S-I) および楕円分割 (S-II) に対応するものを、ここでは網目 P-I および網目 P-II として、その作成方法を述べる。

(a) 網目 P-I

網目 S-I における同心円をたとえば、水平円形光源の投影と考えて、この光源の凸面鏡による投影像を求める。図 7 において、光源 S の凸面鏡 G による投影を S' とすれば、立体角投射図の場合と同様に円となる。この場合の半径 R' は(11)式により計算でき、天頂角 θ の値は表 1 を用いればよい。計算結果を表 4 に示す。した

図 7 凸面鏡に対する網目の作成 (P-I)

表 4 半径の値 (P-I)

R'
0.162
0.236
0.298
0.356
0.414
0.474
0.540
0.618
0.721
1.000

がって、 R' を半径とする同心円と、中心より 18° 間隔の放射線で分割すれば網目はでき上がる。この場合、各網目の面積は等しくないが、昼光率ではすべて 0.5% を示すことになる。

(b) 網目 P-II

網目 S-II における楕円は、立体角投射の法則により測定面に平行な無限直線の投影である。いま図 8 のよ

図 8 無限直線の投影 (立体角投射の法則)

うに長径 1、短径 r_0 の楕円を考えて、短径より φ 傾いた楕円の動径を R_0 とすれば

$$R_0 = \frac{1^2 \times r_0^2}{1^2 \times \cos^2 \varphi + r_0^2 \sin^2 \varphi} \quad (12)$$

であり、このときの無限直線に対する天頂角 θ は

$$\theta = \sin^{-1} R_0 \quad (13)$$

である。

上記無限直線の凸面鏡に対する投影が図 9 のように弓形となったとすれば、短径より φ 傾いたときの動径

図 9 凸面鏡に対する網目の作成 (P-II)

表 5 動径の値 (P-II)

ρ	R'_1	R'_2	R'_3	R'_4	R'_5	R'_6	R'_7	R'_8	R'_9
0	0.050	0.100	0.153	0.209	0.268	0.333	0.408	0.500	0.627
10	0.051	0.102	0.155	0.212	0.272	0.338	0.413	0.505	0.631
20	0.053	0.106	0.162	0.221	0.281	0.350	0.427	0.518	0.644
30	0.058	0.116	0.175	0.238	0.303	0.373	0.451	0.543	0.664
40	0.065	0.131	0.197	0.265	0.335	0.408	0.488	0.579	0.695
50	0.078	0.155	0.231	0.307	0.383	0.460	0.540	0.628	0.735
60	0.099	0.194	0.288	0.375	0.457	0.535	0.613	0.693	0.787
70	0.144	0.276	0.389	0.487	0.570	0.643	0.710	0.775	0.848
80	0.268	0.462	0.590	0.678	0.742	0.795	0.838	0.878	0.919

R' は(13)式の θ の値を(11)式に代入すれば求めることができる。

したがって、図面を描くのに必要なだけ φ をとり、表 2 に示した r_0 の値を用いて計算すれば、 R' の値は表 5 のようになる。この結果により、立体角投射図を凸面鏡の投影図とすることができる。

次に細分割するのであるが、測定面に垂直な線は、立体角投射図においても、また凸面鏡の投影図においても同じように投影するから、表 3 の値をそのまま用いばよい。

4. 魚眼レンズに対する網目^{12~14)}

4.1 魚 眼 カ メ ラ

日本光学製の魚眼レンズ (Fish-eye-NIKKOR) を装てんしたカメラを用いて、画角 180° の半球全体の物体を撮影する。この魚眼レンズは図 10 に示すように、天空内にある光源 AS の天頂角を θ とし、その P'' に生じた像点 AS'' の光軸からの距離を R'' とすれば

図 10 魚眼レンズによる投影像

$$R'' = C\theta \quad \dots\dots\dots(14)$$

(ただし、 C は比例定数)

で与えられる等距離射影の性質を有している。

4.2 網 目 の 作 成

魚眼レンズに対する網目も、さきに求めた凸面鏡の方法と同様に考えればよい。

(a) 網 目 F-I

表 1 に示した天頂角 θ の値を(14)式に代入して R'' を求めると、表 6 のようになる。

表 6 半径の値 (F-I)

R''	R''
0.221	0.564
0.296	0.630
0.369	0.705
0.436	0.795
0.500	1.000

したがって、 R'' を半径とする同心円と、中心より 18° 間隔の放射線で分割すればよい。

(b) 網 目 F-II

測定面に平行な無限直線を考えて、魚眼レンズによる投影が図 11 のような弓形となったとする。短径より

図 11 魚眼レンズに対する網目の作成 (F-II)

φ 傾いた動径 R'' は(14)式により求められるから、さきに述べた凸面鏡の場合と同様に(12)、(13)式を用いて計算すれば表 7 の結果を得る。細分割も同様に表 3 の値を用

表 7 動 径 の 値 (F-II)

φ	R''_1	R''_2	R''_3	R''_4	R''_5	R''_6	R''_7	R''_8	R''_9
0	0.064	0.128	0.194	0.262	0.333	0.410	0.497	0.590	0.713
10	0.065	0.130	0.197	0.265	0.337	0.414	0.498	0.595	0.717
20	0.068	0.136	0.206	0.276	0.351	0.429	0.513	0.609	0.728
30	0.074	0.147	0.222	0.297	0.374	0.454	0.539	0.633	0.747
40	0.083	0.166	0.248	0.330	0.411	0.493	0.578	0.668	0.773
50	0.099	0.196	0.289	0.380	0.466	0.549	0.630	0.729	0.808
60	0.126	0.247	0.357	0.457	0.546	0.626	0.700	0.772	0.849
70	0.182	0.343	0.473	0.577	0.660	0.728	0.786	0.840	0.896
80	0.334	0.551	0.679	0.759	0.814	0.855	0.888	0.918	0.955

いればよい。

5. 等昼光率網目の使用

以上のように、立体角投射図、凸面鏡および魚眼レンズに対する等昼光率網目の作成方法について述べた。おのおのについてⅠおよびⅡ型の2種類あるが、使用の便宜を考えて一つにまとめた。図12に立体角投射図に対する網目(S-I, Ⅱ), 図13に凸面鏡に対する網目

図12 立体角投射図に対する等昼光率網目

図13 凸面鏡に対する等昼光率網目

図14 魚眼レンズに対する等昼光率網目

(P-I, Ⅱ) および図14に魚眼レンズに対する網目(F-I, Ⅱ)を示す。

立体角投射図に対する網目は、光源の輪郭を記入した同一直径の立体角投射図(図1)に重ね合わせて、網目の数をかぞえれば、直ちに昼光率の値を知ることができる。したがって、従来行なわれてきたプランメータなどによって面積比を求める方法より簡易に昼光率算定ができる。この場合、光源の形が矩形、円形等純幾何学的形態でないと、立体角投射図への記入が困難であるから、おのづとその利用には限度がある。しかし、立体角投射写真機⁵⁾、OTスコープ¹⁵⁾などは全天空の立体角投射像を直接得ることができるから、それらに応用すれば便利である。

凸面鏡および魚眼レンズに対する網目は、それぞれの方法により撮影した写真を同一直径に引き伸ばして、重ね合わせればよい。

おのおのにおけるⅠおよびⅡ型を使用する場合、前者については、水平円形光源(たとえば、円形天窗)、円筒形室の窓、後者は鉛直矩形光源(たとえば、鉛直矩形窓、鋸歯状窓)の昼光率算定に用いるとよい、また投射図における光源の輪郭が上記形状にあてはまらないような複雑な場合でも、多少の誤差を容認するならば、同様に求めることができる。以上述べたような、網目を用いて昼光率を算定する方法は、内外に数例を見ることができ

これらのうち、極射影カメラに用いる等投射率網目図¹⁾¹⁵⁾、Robin Hill Camera に用いる Illumination ratio (sky factor) diagram¹⁶⁾ はそれぞれ本論におけるP-I型、F-I型の網目に近似なものである。しかし細分割における経度のとり方が若干異なっており、またいずれもⅡ型に相当する網目は考案されていない。

6. 実 測 例

一例として、本校講堂における昼光率の算定結果を示す。図15は講堂の概略図であり、A、B、CおよびDの各点は測定位置を示し、いずれも床上80cmの机上面で測定した。

図16~19は凸面鏡による投影図、図20~23は魚眼レンズによる投影図である。

表8 算定値および計算値

測定位置	昼 光 率 (%)		
	凸 面 鏡	魚眼レンズ	計 算 値
A	14.0	15.0	16.5
B	12.5	13.0	15.6
C	1.6	1.7	1.97
D	1.0	1.1	1.21

図 15 測定場所の概略図

図 16 凸面鏡による投影図 (A点)

図 17 凸面鏡による投影図 (B点)

算定に際しては、南側の窓による直接昼光率だけ行ない（北側はくもりガラスになっており、また廊下があるため）網目はいずれもⅡ型を用いた。

図 18 凸面鏡による投影図 (C点)

図 19 凸面鏡による投影図 (D点)

図 20 魚眼レンズによる投影図 (A点)

図 21 魚眼レンズによる投影図 (B点)

図 22 魚眼レンズによる投影図 (C点)

図 23 魚眼レンズによる投影図 (D点)

表 8 に上記算定値および直接計算により求めた結果を示す。魚眼レンズによるもののほうが、凸面鏡よりよい結果を得ているが、これには凸面鏡の精度の問題もあると思われる。

等昼光率網目は、いずれも円の周辺に近い部分が疎になっているため、C、D点のように天頂角 θ の大なる光源の昼光率を求めるとき、多少算定しにくい場合がある。したがって、精度を良くするためにも、分割をもう少し細かくする方法も考えられる。

凸面鏡および魚眼レンズによる昼光率算定は、直接計算から求めるよりも迅速かつ容易であり、一応本研究の目的を達成し得た。

最後に、終始ご指導ごべんたつを賜りました本学生産工学部長横地伊三郎先生に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 日本建築学会：採光設計 (1963) 12, 64
- (2) 照明学会：照明のデータブック オーム社 (1958) 197
- (3) H.Cotton : Principles of Illumination, Chapman & Hall Ltd. (1960) 463
- (4) 小木曾：日本建築学会研究報告 No. 15 (1951)
- (5) 関原・渡辺・小木曾：建築計画の研究 (第一輯 昼光照明) 森北出版 (1949)
- (6) P.F.O'brien : Pleijel's Globoscope for Lighting Design, Illum. Engng (1963) 132
- (7) 藤原・大谷：簡易立体角投射写真撮影装置について 日大理工学術講演会論文集 (1962) 141
- (8) 藤原・大谷：簡易昼光率計について 電気四学会連大論文集 (1963) 1103
- (9) 藤原・大谷：等昼光率網目について 日大理工学術講演会論文集 (1963) 153
- (10) 藤原・大谷：等昼光率網目について 電気四学会連大論文集 (1964) 977
- (11) 藤原・大谷：昼光率の一測定法について 日大理工学術講演会論文集 (1964) 139
- (12) 藤原・大谷・後藤：魚眼レンズを用いた昼光率測定法について 電気四学会連大論文集 (1965) 12 85
- (13) 藤原・大谷・後藤：魚眼レンズ用等昼光率網目 (矩形窓) 電気四学会東海支部連大論文集 (1965) 141
- (14) 藤原・大谷・後藤：矩形窓のための等昼光率網目 (魚眼レンズ用) 日大理工学術講演会論文集 (1965) 203
- (15) 小木曾・武井：正射影型魚眼撮影装置「OTスコープ」の考案 日本建築学会論文報告集 No. 119 (1966)
- (16) J. Longmore : The Full Field Camera, The Photographic Journal 104-5 (1964)

(受付1967年7月29日 再受付1967年9月25日)