

斜面照度の計算

斜面照度とは、建築物の様々な壁や屋根にある窓等の開口部に入射する照度のことである。斜面照度は、建物内部の昼光照明設計の基礎データとなる。拡張アメダス気象データ（EA 気象データ）は、全天日射量、及び全天日射量を直散分離して得られた直達日射と天空日射にそれぞれの発光効率を掛けて全天照度（グローバル照度）、直達照度、天空照度に変換するプログラム RadtoLux、及び一様分布モデル（isotropic モデル）と Perez の非一様分布モデル（anisotropic モデル）により、斜面照度を計算するプログラム TilLux を有している。斜面照度の計算法を斜面日射の計算法と比べると、日射が照度が変わった以外は同じであるから、TilLux は斜面日射を計算するプログラム TilRad とほとんど同じである。

斜面照度は、isotropic モデルや anisotropic モデルに限らず、天空輝度分布（天空要素の天頂輝度に対する比率）と天頂輝度とから求めるのが一般的な方法である。EA 気象データは井川モデルによる天空輝度分布を描画するプログラム SkyMap を有しているが、天空輝度分布に関しては、CIE による標準曇天空、標準晴天空のモデルの他、中間天空、平均天空等も提案されている。このように天空輝度分布には多くのモデルがあるが、どれもが天頂輝度に対する比率を算出するものであるから、天空要素毎の輝度を計算するには、時々刻々と変化する天頂輝度の値を知る必要がある。そのため、EA 気象データでは、RadtoLux に天頂輝度を計算する機能を付加している。

この技術解説では、発光効率と天頂輝度の計算プログラム RadtoLux、及び斜面照度の計算プログラム TilLux の計算の流れをまとめる。

1. 発光効率の計算

発光効率は、一般には 100~120[lm/w]程度 [1] であり、ISO 52010-1 [2] では全日射に対する発光効率 (luminous efficacy) として 115[lm/W] を用いている。しかし、発光効率は日射が全天日射であるか、直達日射であるか、あるいは天空日射であるかによって異なるので、RadtoLux では、井川ら [3] による水平面全天日射量 I_g 、法線面直達日射 I_b 、水平面天空日射量 I_d に対応した発光効率 η_g 、 η_b 、 η_d を用いている。 I_g 、 I_b 、 I_d のそれぞれに η_g 、 η_b 、 η_d を掛ければ、水平面全天照度（グローバル照度） E_g 、法線面直達照度 E_b 、水平面天空照度 E_d を得ることができる。

（1）日射量の単位換算

発光効率は[lm/w]で表されるが、EA 気象データの日射量の単位は [MJ/(m²h)] である。そのため 1[MJ/(m²·h)] \simeq 277.7778[W/m²] により I_g 、 I_b 、 I_d に 277.7778 を掛けて [W/m²] に換算する。MJ/(m²·h) は 1 時間積算値を表し、W/m² は瞬時値を表す。EA 気象データの日射量は毎正時前後 30 分の積算値であるから、瞬時値とは正時を代表する値で、照度も正時の値とみなすのが妥当である。

（2）天空状態を表す指標 K_c 、 C_{ie} の計算法

井川ら [3] は、発光効率の他、PAR 効率、UV 効率等の変換係数に共通に適用できる天空状態を表す指標として、 K_c 、 C_{ie} を提案している。また、本ホームページの技術解説[日射量から昼光照度

への変換]には発光効率の計算式を掲載しているが、この技術解説でも文献[3]に基づく発光効率の計算手順を改めて整理する。

まず K_c は式(1)で計算される。

$$K_c = I_g/S_g \quad (1)$$

ここに、

I_g : 水平面全天日射量[W/m²]

S_g : 基準全天日射量[W/m²]

S_g は式(2)で表される。

$$S_g = 0.84 \frac{I_0}{m} \exp(-0.054 \times m) \quad (2)$$

ここに、

I_0 : 大気外法線面日射量[W/m²]

m : 大気路程 (relative air mass) [-]

$$m = \frac{1}{\sin sh + 0.15(93.885 - Z_d)^{-1.253}} \quad (3)$$

ここに、

Z_d : 天頂角, $Z_d = 90 - sh$, sh は太陽高度 (°)

次に C_{le} は式(4)で計算される。

$$C_{le} = \frac{1 - C_e}{1 - C_{es}} \quad (4)$$

C_e : クラウド・レイシヨ

$$C_e = I_d/I_g \quad (5)$$

ここに、

C_{es} : 基準クラウド・レイシヨ

$$C_{es} = 0.08302 + 0.5358 \times \exp(-17.394 \times sh_{rad}) + 0.3818 \times \exp(-3.2899 \times sh_{rad}) \quad (6)$$

(3) 発光効率 η の計算

発光効率 η [lm/W] は、天空状態を表す指標 K_c , C_{le} , 及び可降水量 W を用いて式(7)で計算される。

$$\eta = a \cdot K_c + b \cdot C_{le} + c \cdot \ln(K_c) + d \cdot \exp(C_{le}) + e \cdot W + f \quad (7)$$

ここに、

W : 可降水量[cm]

$$W = \exp(0.07 \times T_{dew} - 0.075) \quad (8)$$

T_{dew} : 露点温度[°C]

露点温度 T_{dew} は、気温 T_c [°C] と絶対湿度 H_r [g/kg] とから計算することができる。

発光効率 η は、全天日射量 I_g , 天空日射量 I_d , 直達日射量 I_b を、それぞれ全天照度、天空照度、直達照度に換算する発光効率に分けられるので、それぞれを η_g , η_d , η_b とする。 I_g , I_d , I_b の単位系

を[MJ/(m²h)]から[W/m²]に換算し、それぞれに η_g , η_d , η_b を掛けると照度[lm/m²=lx]が得られる。式(7)の係数 a, b, c, d, e, f は η_g , η_d , η_b によって異なるが、a, b, c, d, e, f のすべてが次式(9)で表されるため、x は a, b, c, d, e, f を代表させている。式(9)の係数 A, B, C は表1のとおりである。なお、表1の数値は、本ホームページの技術解説「日射量から昼光照度への変換」の Table 1 の数値と同じである。

$$x = A \cdot sh_{rad}^2 + B \cdot sh_{rad} + C \tag{9}$$

表1 式(11)の係数 A, B, C の値の一覧表

η の種別	式(9)の係数	A	B	C
η_g	a	31.777	-36.903	20.341
	b	-84.690	152.80	-86.306
	c	-16.534	20.942	-20.828
	d	40.441	-76.504	45.149
	e	-2.7163	4.0230	0.6567
	f	-60.423	99.559	45.919
η_d	a	4.1472	21.852	-28.685
	b	35.775	-42.243	25.986
	c	-4.6244	-2.3053	-6.5705
	d	-11.192	-2.8112	26.243
	e	-3.4999	4.1531	1.1250
	f	11.216	-13.942	94.711
η_b	a	100.75	-287.25	171.56
	b	-178.92	321.04	-205.49
	c	-17.329	120.47	-95.215
	d	141.02	-257.77	151.91
	e	-1.5475	4.2673	-0.3197
	f	-302.24	661.76	-275.27

2. 斜面照度の計算の流れ

RadtoLux では、水平面全天日射量、及び水平全天日射量から SplitG によって直散分離された法線面直達日射、水平面天空日射に発光効率を掛け、水平面全天照度（グローバル照度）、法線面直達照度、水平面天空照度を得ている。

次に、TilLux によって斜面照度を計算するが、計算の手順は isotropic モデルと anisotropic モデルで異なっている。isotropic モデルでは、法線面直達照度、水平面天空照度、グローバル照度に係数（それぞれ、 $\cos i$, $(1+\cos \beta)/2$, $(1-\cos \beta)_\rho/2$ ）を掛け、斜面直達照度、斜面天空照度、斜面地物反射照度を計算している。一方 Perez et al.[4]による anisotropic モデルでは、斜面直達照度、地物反射照度に関しては isotropic モデルの場合と同じく、法線面直達照度と水平面全天照度（グローバル照度）に換算係数（それぞれ、 $\cos i$, $(1-\cos \beta)_\rho/2$ ）を掛けて計算する。しかし、斜面天空照度に関しては、式(10)（本ホームページの技術解説[直散分離と斜面日射量の計算]の式(36)と同じ）の右辺の3つの項に水平面天空照度を掛け、斜面天空照度の3成分、すなわち、斜面準直達照度、斜面一様天空照度、斜面地平天空照度を計算している。

$$F = (1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \tag{10}$$

$$a = \max(0, \cos i), \quad b = \max(0.087, \cos Z) \tag{11}$$

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)Z \tag{12}$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)Z \tag{13}$$

$$\varepsilon = \frac{\frac{E_d + E_b}{E_d} + kZ^3}{1 + kZ^3} \tag{14}$$

$$\Delta = \frac{E_d m}{E_0} \tag{15}$$

ここに, F_1 : circumsolar brightening coefficient [-],

F_2 : horizon brightening coefficient [-],

β : 水平面に対する斜面の傾斜角 [°],

i : 直達日射の入射角 [°],

Z : 天頂角 [rad.],

Δ : atmospheric brightness parameter [-],

ε : atmospheric clearness parameter [-],

k : 定数 (1.041 [-]) ,

m : 大気路程, relative air mass [-],

Z_d : 天頂角[°],

E_0 : 法線面大気外照度 [lx], E_b : 法線面直達照度 [lx], E_d : 水平面天空照度 [lx],

E_G : 水平面全天照度 (グローバル照度) [lx], ρ : アルベド [-].

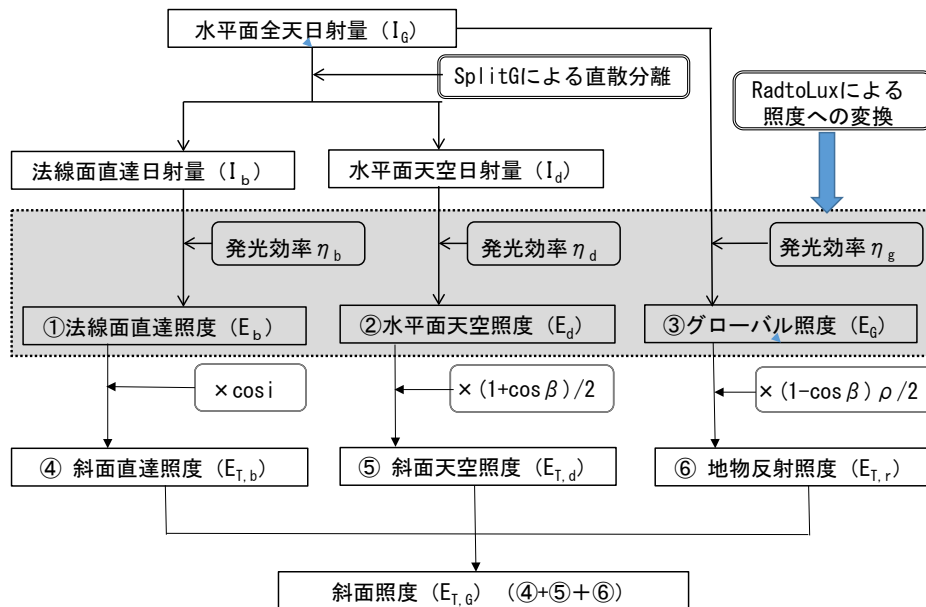
式(10)~式(13)は天空日射を3成分に分離する式と同一であるが (技術資料[直散分離と斜面日射量の計算]参照) , 式(14), (15)では日射を照度に置き換えている。また, 式(12), (13)の F_{ij} ($i=1,2, j=1,3$) は表2の値を用いる。

表2 Perezの anisotropic モデルの係数値

ε	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1.000~1.065	0.011	0.570	-0.081	-0.095	0.158	-0.018
1.065~1.230	0.429	0.363	-0.307	0.050	0.008	-0.065
1.230~1.500	0.809	-0.054	-0.442	0.181	-0.169	-0.092
1.500~1.950	1.014	-0.252	-0.531	0.275	-0.350	-0.096
1.950~2.800	1.282	-0.420	-0.689	0.380	-0.559	-0.114
2.800~4.500	1.426	-0.653	-0.779	0.425	-0.785	-0.097
4.500~6.200	1.485	-1.214	-0.784	0.411	-0.629	-0.082
6.200~	1.170	-0.300	-0.615	0.518	-1.892	-0.055

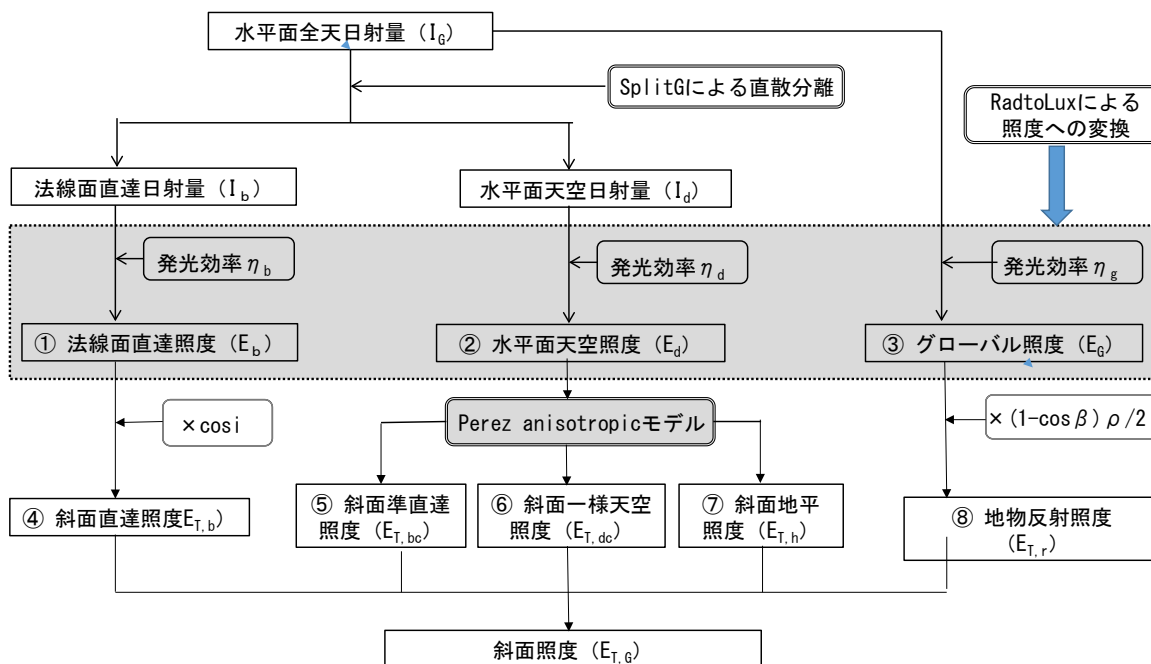
屋内の昼光照度設計では, 窓面等に入射する照度の強さやその指向性によって扱いが異なる場合 (例えば, 光源として直達照度を用いず天空照度のみを用いるような場合) がある。この点を考慮し, **TiLux** では, 斜面照度の総量だけでなく成分別の照度も出力するようにしている。

以上で説明した RadtoLux による日射から法線面直達照度，水平面天空照度，グローバル照度への変換，及びそれらを TilLux によって斜面照度に変換する計算フロー図を，図 1（Isotropic モデル，図 2（anisotropic モデル）に示す。



i : 斜面への直達日射入射角, β : 斜面の傾斜角, ρ : 地物反射率
 ①, ②, ③はRadtoLuxにより出力され, ④, ⑤, ⑥はTilLuxにより出力される。

図 1 Isotropic モデルによる斜面照度の計算フロー



i : 斜面への直達日射入射角, β : 斜面の傾斜角, ρ : 地物反射率
 ①, ②, ③はRadtoLuxにより出力され, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧はTilLuxにより出力される。

図 2 Perez の anisotropic モデル[4]による斜面照度の計算フロー

3. 天頂輝度の計算

RadtoLux では、2. で得られた水平面天空照度 E_d に、井川の All Sky Model による係数 $A(k)$ を掛けて天頂輝度 L_{vz} (cd/m^2) を計算している。

$$L_{vz} = E_d \sum_{k=0}^5 [A(k) \cdot k_c^k] \tag{11}$$

係数 $A(k)$ の計算方法については、本ホームページの技術解説[天空放射輝度分布, 天空輝度分布の推定]p5 の表 2 を参照のこと。式(11)の k_c は式(1)による。水平面全天日射量から天頂輝度を計算するフロー図を図 3 に示す。

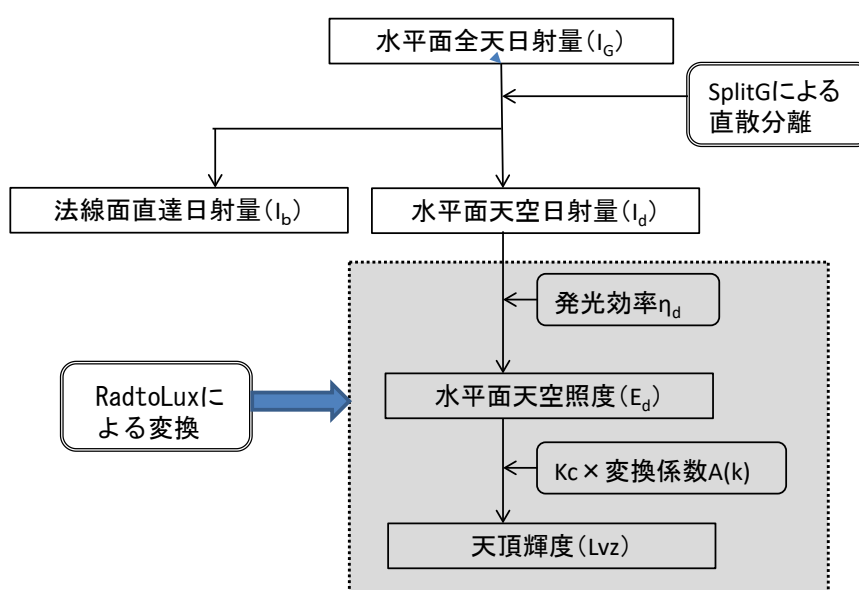


図 3 水平面全天日射量から天頂輝度に至る計算のフロー

参考・引用文献

- [1] 浦野良美, 中村洋 編著, 建築環境工学, 森北出版, p.133
- [2] ISO 52010-1, Energy performance of buildings – External climatic conditions - Part 1: Conversion of climatic data for energy calculations
- [3] 井川憲男, 永村一雄, ファーナム クレイグ, 日射量による昼光照度, PAR, UV-A, UV-B の推定, 日本建築学会環境系論文集, No.726, pp.679-685, 2016
- [4] R.Perez, P.Ineichen, R.Seals, J. Michalsky and R. Stewart: Modeling Daylight Availability and Irradiance from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, Vol.44, No.5, pp.271-289(1990)