

# 日射量から昼光照度への変換

恒常的な気象観測所の実測情報から環境シミュレーションのために必要なすべての気象要素のデータを入手することは困難である。たとえば、通常的气象官署では日射量は測定されているが、昼光照度は測定されていない。このため、室内の光環境の計画や予測のために必要である昼光照度は、日射量から推定されて使用される例が多く、これまでも多くの発光効率モデルが提案されている<sup>1),2),3),4)</sup>。

ここでは、大阪での実測データを基にして開発された、あらゆる地域に適用可能な日射量から昼光照度を推定する方法について述べる<sup>5)</sup>。

## 1. 天空状態を表す指標

日射量は各種の気象要素を推定するときの天空状態を表すための指標の基本要素として有用な基礎資料である。日射量から照度を推定するために日射量を基に天空状態を表す。

Igawa は晴天時 (Linke の混濁因子が 2.0 の場合) の全天日射量を基準全天日射量と称し、これに対する検討時の全天日射量から晴天指標  $Kc$  を定義し、晴天時のクラウド・レイシヨと検討時のクラウド・レイシヨから澄清指標  $Cle$  を定義している<sup>6)</sup>。

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

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

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

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

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<sup>7)</sup>、 $Eed$  : 水平面天空日射量 [ $W/m^2$ ]、 $\gamma_s$  : 太陽高度 [rad]。

$Kc$  と  $Cle$  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することができる。天空状態が分類できれば、そこでの日射量に対する照度の関係が把握できる。

## 2. 日射量から推定する昼光照度

気象官署において昼光照度は恒常的な測定が行われていないため、日射量から昼光照度を推定し、昼光照明設計などに活用することが一般的になっている。日射から照度を推定するためのモデルは、これまでも多く発表されている。それらの中で、Olseth<sup>1),2)</sup>のモデルはヨーロッパを中心とした Satel-Light などの気象データにおける日射量の照度変換に利用されており、Perez<sup>3)</sup>のモデルは米国を中心として TMY2 などの気象データにおける日射量の照度変換に使用されている。いずれも推定精度の評価は高い。これまで「拡張アメダス気象データ」では、日射量から照度を推定するためにいくつかの変遷を経て Igawa\_C<sup>4)</sup>を使用しているが必ずしも十分とは言えない。このため、さらに推定精度を向上させるため大阪における測定データを基にして開発された日射量を照度に変換する基本式を次のように定める。

$$\eta = a \cdot Kc + b \cdot Cle + c \cdot \ln(Kc) + d \cdot \exp(Cle) + e \cdot W + f \quad (5)$$

ここで、 $\eta$  : 発光効率[lm/W] ( $\eta \geq 0$ )、 $W$  : 可降水量[cm]。

全天、天空、直射の  $\eta$  を  $ef\_Evg$ 、 $ef\_Evd$ 、 $ef\_Evs$  とし、全天日射量  $Eeg$ 、天空日射量  $Eed$ 、法線直達日射量  $Ees$  を乗じて全天照度  $Evg$ 、天空照度  $Evd$ 、法線直射照度  $Evs$  が得られる<sup>注2)</sup>。

$Kc$  と  $Cle$  と可降水量  $W$  の関数とする日射量と照度との関係は、係数  $a\sim f$  を太陽高度[rad]の関数として  $x = A \cdot \gamma_s^2 + B \cdot \gamma_s + C$  で表すことができる。得られた係数  $A\sim C$  を Table 1 に示す。

式(5)を  $Igawa\_D$  と称し、 $Igawa\_C$ 、 $Perez$ 、 $Olseth$  のモデルを基にして日射量から推定した全天照度、天空照度、法線直射照度を実測値と、また、天空照度と直射照度と太陽高度により計算できる全天照度を合成全天照度  $Evg\_S$  とし、要素ごとの推定値の一致度を確認した比較の一例として 2008 年の大阪における測定例をモデル別に Fig. 1 から Fig. 4 に示す。

Table 1 Constants for luminous efficacy

|               |          | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> |
|---------------|----------|----------|----------|----------|
| <i>ef_Evg</i> | <i>a</i> | 31.777   | -36.903  | 20.341   |
|               | <i>b</i> | -84.690  | 152.80   | -86.306  |
|               | <i>c</i> | -16.534  | 20.942   | -20.828  |
|               | <i>d</i> | 40.441   | -76.504  | 45.149   |
|               | <i>e</i> | -2.7163  | 4.0230   | 0.6567   |
|               | <i>f</i> | -60.423  | 99.559   | 45.919   |
| <i>ef_Evd</i> | <i>a</i> | 4.1472   | 21.852   | -28.685  |
|               | <i>b</i> | 35.775   | -42.243  | 25.986   |
|               | <i>c</i> | -4.6244  | -2.3053  | -6.5705  |
|               | <i>d</i> | -11.192  | -2.8112  | 26.243   |
|               | <i>e</i> | -3.4999  | 4.1531   | 1.1250   |
|               | <i>f</i> | 11.216   | -13.942  | 94.711   |
| <i>ef_Evs</i> | <i>a</i> | 100.75   | -287.25  | 171.56   |
|               | <i>b</i> | -178.92  | 321.04   | -205.49  |
|               | <i>c</i> | -17.329  | 120.47   | -95.215  |
|               | <i>d</i> | 141.02   | -257.77  | 151.91   |
|               | <i>e</i> | -1.5475  | 4.2673   | -0.3197  |
|               | <i>f</i> | -302.24  | 661.76   | -275.27  |

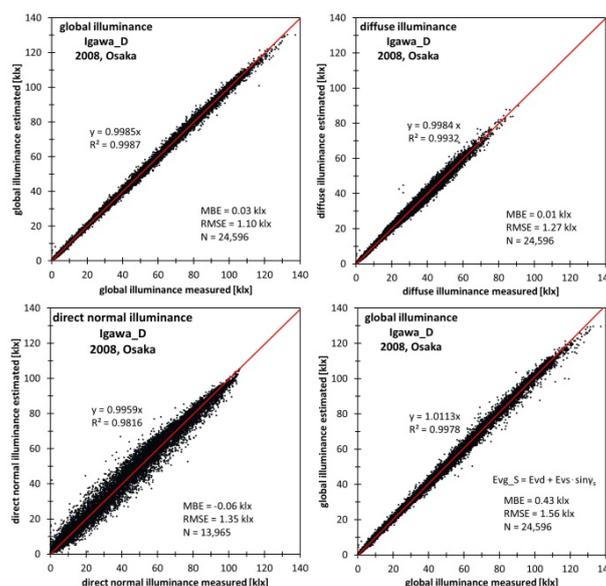


Fig. 1 Measurements and estimations for illuminances by Igawa\_D

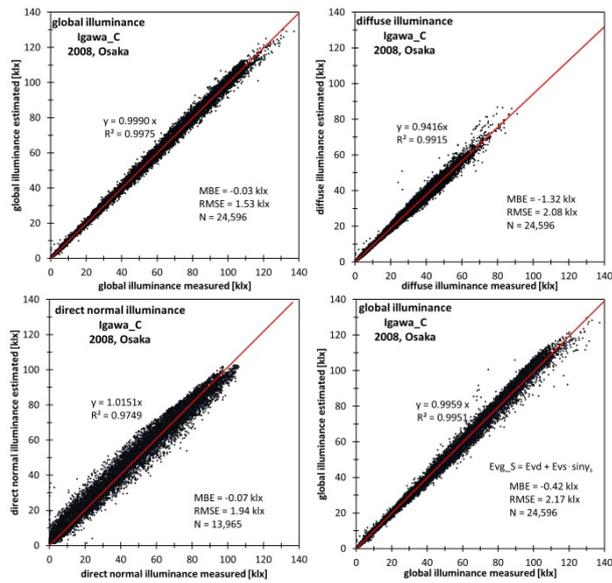


Fig. 2 Measurements and estimations for illuminances by Igawa\_C

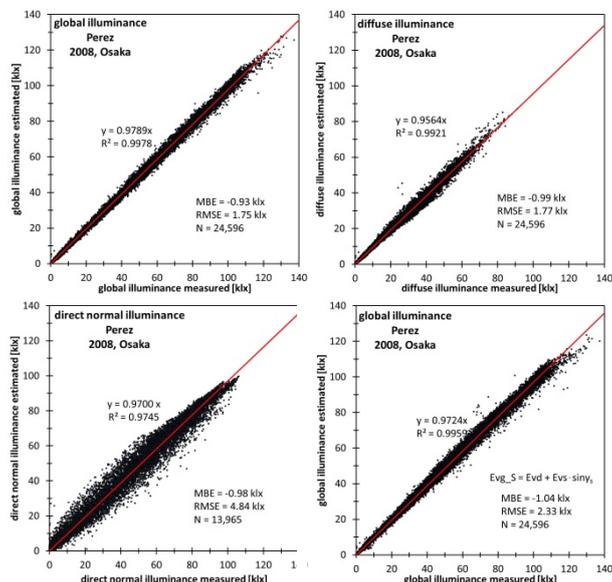


Fig. 3 Measurements and estimations for illuminances by Perez

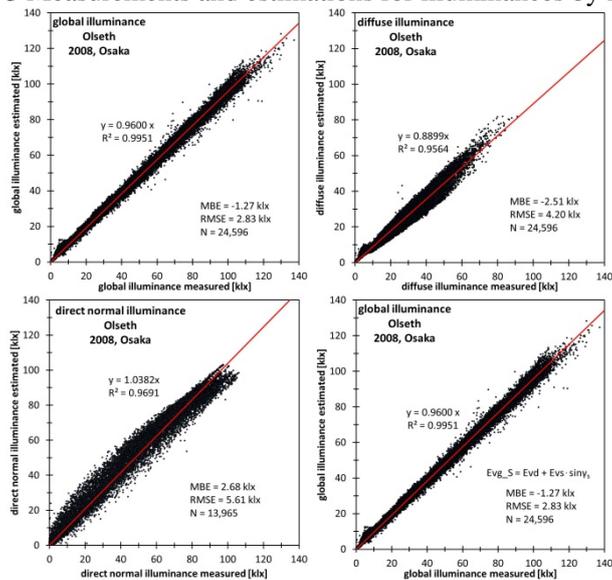


Fig. 4 Measurements and estimations for illuminances by Olseth

なお、図中には全天照度（左上）、天空照度（右上）、法線直射照度（左下）、天空照度と法線直射照度から合成した全天照度（右下）の4種の実測値と推定値の比較を示している。

2006年から2011年の照度推定値のMBEとRMSEをTable 2に示し、全期間のMBEとRMSEをFig. 5とFig. 6に示す。ここで使用したデータは2006年から2011年の6年間の実測値を10分間隔に整理されたものでデータ数は140,722個であった。直達日射の有無の基準はWMOでは120W/m<sup>2</sup>とされるが、本研究では法線直達日射量が10W/m<sup>2</sup>未満のデータを除外して検討した。6年間の直達成分のデータ数は79,630個となった。

ここで、比較検討に使用したモデルはいずれも推定精度が高いものであるが、新たに提案したIgawa\_DはMBEが最も小さく、RMSEも他のモデルに比べて小さいことが確認できた。また、合成全天照度も実測全天照度とよく一致している。

以上のような結果から、新たに提案したIgawa\_Dは日射量から昼光照度を推定する有用なモデルであると考えられる。

Table 2 MBE and RMSE for the estimation of illuminance [klx]

| models  | year      | data number    |        | Evg   |      | Evd   |      | Evs   |      | Evg_S |      |
|---------|-----------|----------------|--------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|         |           | global diffuse | direct | MBE   | RMSE | MBE   | RMSE | MBE   | RMSE | MBE   | RMSE |
| Igawa_D | 2006      | 24,689         | 12,512 | -0.04 | 1.55 | -0.09 | 1.45 | 0.43  | 5.20 | 0.26  | 2.25 |
|         | 2007      | 24,762         | 13,834 | -0.06 | 1.35 | 0.05  | 1.60 | 0.10  | 4.35 | 0.80  | 1.97 |
|         | 2008      | 24,596         | 13,965 | -0.03 | 1.10 | 0.01  | 1.27 | 0.14  | 3.98 | 0.43  | 1.56 |
|         | 2009      | 19,042         | 11,053 | -0.23 | 1.21 | 0.04  | 1.30 | -0.57 | 4.06 | -0.03 | 1.52 |
|         | 2010      | 24,750         | 15,016 | -0.22 | 1.18 | 0.25  | 1.37 | -1.17 | 4.41 | -0.29 | 2.08 |
|         | 2011      | 22,883         | 13,250 | -0.17 | 1.31 | 0.57  | 1.72 | -0.86 | 4.79 | -0.12 | 1.96 |
|         | 2006-2011 | 140,722        | 79,630 | -0.12 | 1.30 | 0.13  | 1.46 | -0.33 | 4.48 | 0.19  | 1.92 |
| Igawa_C | 2006      | 24,689         | 12,512 | -0.12 | 1.89 | -1.38 | 2.32 | 1.92  | 5.71 | -0.59 | 2.83 |
|         | 2007      | 24,762         | 13,834 | -0.07 | 1.94 | -1.67 | 2.49 | 1.70  | 5.09 | -0.06 | 2.61 |
|         | 2008      | 24,596         | 13,965 | -0.03 | 1.53 | -1.32 | 2.08 | 1.60  | 4.67 | -0.42 | 2.17 |
|         | 2009      | 19,042         | 11,053 | -0.20 | 1.59 | -1.45 | 2.13 | 1.18  | 4.64 | -0.89 | 2.50 |
|         | 2010      | 24,750         | 15,016 | -0.13 | 1.58 | -1.04 | 1.94 | 0.39  | 4.64 | -1.04 | 2.79 |
|         | 2011      | 22,883         | 13,250 | 0.05  | 1.81 | -0.98 | 1.98 | 0.62  | 4.64 | -0.73 | 2.75 |
|         | 2006-2011 | 140,722        | 79,630 | -0.08 | 1.74 | -1.31 | 2.17 | 1.22  | 4.90 | -0.61 | 2.62 |
| Perez   | 2006      | 24,689         | 12,512 | -1.01 | 2.10 | -1.05 | 1.99 | -0.91 | 5.74 | -1.20 | 3.00 |
|         | 2007      | 24,762         | 13,834 | -1.00 | 2.07 | -1.06 | 2.06 | -0.96 | 5.50 | -1.11 | 2.84 |
|         | 2008      | 24,596         | 13,965 | -0.93 | 1.75 | -0.99 | 1.77 | -0.98 | 4.84 | -1.04 | 2.33 |
|         | 2009      | 19,042         | 11,053 | -1.16 | 1.97 | -1.12 | 1.90 | -1.62 | 5.08 | -1.64 | 2.83 |
|         | 2010      | 24,750         | 15,016 | -1.07 | 1.80 | -0.75 | 1.61 | -2.16 | 5.40 | -1.71 | 3.28 |
|         | 2011      | 22,883         | 13,250 | -0.94 | 1.85 | -0.57 | 1.82 | -1.84 | 5.73 | -1.86 | 3.18 |
|         | 2006-2011 | 140,722        | 79,630 | -1.02 | 1.93 | -0.92 | 1.86 | -1.42 | 5.39 | -1.41 | 2.93 |
| Olseth  | 2006      | 24,689         | 12,512 | -1.32 | 3.42 | -2.43 | 4.22 | 3.13  | 6.58 | -1.32 | 3.42 |
|         | 2007      | 24,762         | 13,834 | -2.28 | 3.65 | -4.49 | 5.51 | 2.78  | 6.06 | -2.28 | 3.65 |
|         | 2008      | 24,596         | 13,965 | -1.27 | 2.82 | -2.51 | 4.20 | 2.68  | 5.61 | -1.27 | 2.82 |
|         | 2009      | 19,042         | 11,053 | -1.72 | 3.17 | -2.56 | 4.14 | 2.05  | 5.10 | -1.72 | 3.17 |
|         | 2010      | 24,750         | 15,016 | -1.94 | 3.94 | -2.17 | 3.75 | 1.04  | 5.26 | -1.94 | 3.94 |
|         | 2011      | 22,883         | 13,250 | -3.10 | 4.35 | -3.85 | 4.74 | 1.56  | 5.38 | -3.10 | 4.35 |
|         | 2006-2011 | 140,722        | 79,630 | -1.93 | 3.60 | -3.01 | 4.47 | 2.18  | 5.69 | -1.93 | 3.60 |

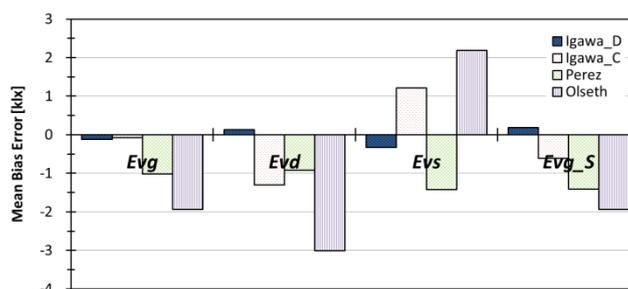


Fig. 5 Mean Bias Error of estimated illuminance (2006-2011)

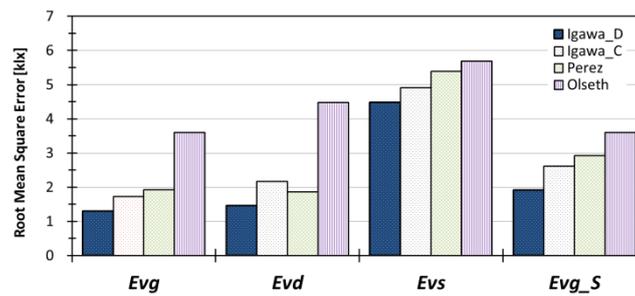


Fig. 6 Root Mean Square Error of estimated illuminance (2006-2011)

### 3. まとめ

日射量を基に昼光照度を推定することを試み、既提案の式に比べて推定精度が高く、実用的に使用可能と考えられる発光効率式を提案した。

たとえば、拡張アメダス気象データでは日射量が基本データとして提供されている。このデータを活用すれば全国各地の昼光照度を推定できるため、広範な気象データの活用が可能になると考える。

なお、太陽高度が5°未満の場合、大気の影響や測定上の余弦則の影響が大きいため推定値がやや不安定になる場合があるため、太陽高度5°の発光効率の適用を推奨する。

注1) International Daylighting Measurement Programme の略。CIE（国際照明委員会）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) これまで光環境分野で使用されている全天空照度の「全」は、周辺に全く障害がない天空という意味とされているが、全天日射量の「全」は直達と天空の和という意味であり、両者の表記において「全」の意味が異なり混乱が生じやすい。このため、昼光照度についての表記は、全天日射量に対応する全天空照度、天空日射量に対応する天空照度、法線直達日射量に対応する法線直射照度としている。

#### 【参考文献】

- 1) Olseth, J.A., Skartveit, A.; Observed and Modelled Luminous Efficacies under Arbitrary Cloudiness, Solar Energy, Vol. 42, pp. 221-233, 1989
- 2) Skartveit, A., Olseth, J.A.; Luminous Efficacy Models and Their Application for Calculation of Photosynthetically Active Radiation, Solar Energy, Vol. 52, No. 5, pp. 391-399, 1994
- 3) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. and Stewart, R.; Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, Vol.44, No.5, 271-289, 1990
- 4) 井川憲男; 天空輝度・放射輝度分布モデルの改良, 日本建築学会光環境シミュレーション小委員会公開研究会資料, 2013.2
- 5) 井川憲男, 永村一雄, Craig Farnham: 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, 第 726 号, pp.679-685, 2016.8.
- 6) Igawa, N; Improving the All Sky Model for the luminance and radiance distributions of the sky, Solar Energy, Vol. 105, (2014), pp. 254-372, 2014.6
- 7) Kasten, F., Young, A.T.: Revised optical air mass tables and approximation formula. Applied Optics 28 (22), 4735-4738, 1989.