

長期観測データに基づく日射の直散分離に関する研究

Estimation Method of Direct and Diffuse Solar Irradiance from Measured Global Horizontal Solar Irradiance based on Long-term Observation Data

稲 沼 實

要 約

著者は国際照明委員会CIEの提案する国際昼光測定プログラムIDMP測定所の一つとして、東京都調布市(鹿島技術研究所)で、1993年1月より測定を開始し、2003年3月完了した。本論文は、これら長期観測データのうち、全天日射量から直達日射・天空日射(拡散日射)を推定する式(直散分離式と称す)につき検討した。本論文は精度が良いとされているReindlらの式を基に、同程度の推定精度を有し、かつ簡易な直散分離式の作成を行い、既往の直散分離式と比較検討した。

目 次

- I. はじめに
- II. 解析用データファイルの作成
- III. 直散分離式の作成
- IV. 直散分離式の推定精度の検討
- V. おわりに

I. はじめに

建築の窓・外壁・屋根などに入射する日射量は、建築消費エネルギー・温熱環境・光環境計画などを行うに際し、重要な外界気象要素の一つである。この時、建物各方位の日射量が必要となるが、建築デザインが求める任意の方位別日射量の測定は不可能に近く、一般的には法線面直達日射量と天空日射量を求め、任意面への日射量を合成(計算)する方法によっている。しかしながら、この直達・天空日射の長期測定は必ずしも十分ではない。

日本においては、気象庁が全国157気象管区で気象の定時観測を行っており、このうち水平面全天日射の観測は67箇所である。さらに、直達日射を測定しているのは14箇所に過ぎない。そこで、この全天日射量から直達日射・天空日射(拡散日射)を推定する式(松尾の命名に準じ、直散分離¹⁾と称す)が、多くの研究者から提案され、その主な直散分離式の評価も曽我・赤坂^{2), 3)}らによりなされている。

直散分離式は天空日射を大気透過率 P_i の関数として求め、直達日射の理論式・Bouguerの式¹⁾と連立させ、 P_i を収束計算させる式(P群の式と仮称す)と、晴天指数²⁾ K_{Ti} などの全天日射量で決まる指標から求める式(K群の式と仮称す)に分類される。P群の式から求めた P_i は、各直散分離式ごとに異なることになる。K群の式によれば、例えば K_{Ti} は直散分離式すべてに同一の値となる特徴を持っている。

P群の式として、渡辺らの式⁴⁾(式Wと称す。以下同様)、赤坂らの式(式A)⁵⁾、Lui&Jordanの式⁶⁾(式L)などがある。K群の式として、Reindlらの式⁷⁾、^{注3)}(文献7の式2、式R)、Erbsらの式⁸⁾(式E)、Perezらの式⁹⁾(式P)、宇田川・木村の式¹⁰⁾(式U)、中山・石野の式¹¹⁾(式 N_k)などがある。

式Rは天空日射を推定する式で比較的良好とされている²⁾が、 K_{Ti} のほかに予測因子として太陽高度、気温、湿度を必要としている。式Eは天空日射を推定する式で K_{Ti} の値で3グループに分けクラウド・レイシオ^{注4)} C_{Ri} を回帰した式である。式Pは直

達日射を推定する式であるが、 K_{Ti} のほか、露点温度、固有の係数群などを含んでいる。式Uは直達日射を推定する式で、比較的簡便である。式 N_k は式Rを基に気温・湿度の項を除外した式であるが、回帰係数が K_{Ti} の分類とともに季節によっている。

本論文はこれらの既往の直散分離式を参考にして、精度が良いとされている式Rを基に、同程度の推定精度を有し、かつ簡易な直散分離式の作成を行い、既往の直散分離式と比較検討した結果を報告する。

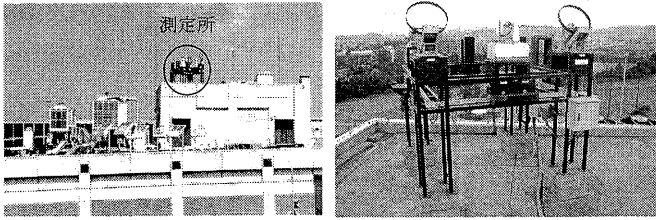
II. 解析用データファイルの作成

著者は国際照明委員会CIE(Commission Internationale de l'Eclairage)の提案する国際昼光測定プログラムIDMP(International Daylight Measurement Programme)¹²⁾・¹³⁾測定所の一つとして、東京都調布市(鹿島技術研究所)で1993年より測定を開始した。このIDMPによる測定により、1991年から米国、英国、フランス、日本^{注5)}をはじめとして約50箇所に及ぶ世界的規模で、長期連続測定による昼光と日射に関するデータの蓄積と整備が行われている。昼光観測システムの外観写真をPhoto 1に、日射に関する計測器概要をTable 1に示す。

長期連続測定により得られた生データは、種々のトラブルにより異常値などが発生し、そのまま利用することはできない。そこで、文献12)及び既報^{14), 15)}を参考に異常値など利用不能なデータの除去を行い、1993年から1999年までの解析用データを作成した。この時、雨天・曇天を含むすべてのデータの実態を直散分離式に極力反映させるため、異常値のみを除外するように心がけた。主な異常値処理は、(a)各測定項目ごとに上限・下限を設定した、(b)水平面全天日射量の合成値(天空日射量と水平面直達日射量の和)と測定値の誤差15%超を除去した、(c)クラウド・レイシオ、スカイ・レイシオ^{注6)}及び晴天指数につき上限・下限をそれぞれ1、0とした、(d)Bouguerの式により、大気透過率を求め、上限・下限をそれぞれ0.85、0とした(最大0.85程度といわれている)。なお、今後の昼光照明度への研究展開を考慮し、昼光照明度についても同様な処理を行っている。また、既報における相対湿度90%の制限は行わず、異常値を除くためのみ上限を100%とした。

本論文では昼間を解析対象とし、周囲の建物などの影響を考慮し、太陽高度の5°未満を除去した。なお、本論文で用いた全天日射量、天空日射量は水平面、直達日射量は法線面であり、測定間

キーワード; 実測, IDMP, 日射, 直散分離,
晴天指数, 大気透過率, CIE



(a) Distant View (b) Close-range View

Photo 1 Outside View of Measuring System

Table 1 Outlines of Measuring Apparatus on Solar Irradiance

- ①水平面;精密全天日射計(英弘精機製,MS-801), センサ直径11mm, 精度 $\pm 1.5\%$ 以内, 応答速度2.5s
- ②水平面;遮へい(蔽)バンド(英弘精機製,MB-11), バンド半径250mm, バンド幅50mm
- ③法線面;直達日射計(英弘精機製,MS-53), センサ直径12mm, 精度 $\pm 1.5\%$ 以内, 応答速度1.4s, 半開口角 2.5°
- ④鉛直面(各4方位);精密全天日射計(英弘精機製,MS-801), ①と同一, 天空日射測定用遮へい(蔽)板端部との垂直距離200mm

隔は全て1分間隔の瞬時値である。その結果,それぞれの測定項目のデータは約623,421(分)となった。

Ⅲ. 直散分離式の作成

本論文で作成した1993年から1999年までの解析用データにより,簡易で実用的な直散分離式を作成した。Fig.1に示すごとく,この解析用データに式Rを厳密に適用し,さらに式RはP群の式ではないが,得られた直達日射からBouguerの式による大気透過率 P_i を求め,上限を0.85とした。このようにして得られた式Rによるクラウド・レイシオ C_{Ri}' を求め,改めて晴天指数測定値 K_{Ti} との関係を最小二乗法により求めた。なお, K_{Ti} の0.81以上はデータ数が少ないため $K_{Ti}=1$ における C_{Ri}' の下限を設定し直線の式とした(Nはデータ数)。Fig.2にクラウド・レイシオ測定値 C_{Ri} とこの C_{Ri}' の関係を示す(|R|はピアソンの偏差積率相関係数の絶対値)。ばらつきがあるが,平均的には C_{Ri} と C_{Ri}' はほぼ一致している。

得られた直散分離式(式I)を次に示す。

- (a) $0 \leq K_{Ti} \leq 0.81$ $C_{Ri} = 0.98965 + 0.014886K_{Ti} + 0.96096K_{Ti}^2 - 8.2762K_{Ti}^3 + 6.9074K_{Ti}^4 \dots$ (1)
 - (b) $0.81 < K_{Ti} \leq 1.0$ $C_{Ri} = 0.43438 - 0.28038K_{Ti} \dots$ (2)
- 即ち, $I_S = I_G C_{Ri}$, $I_D = (I_G - I_S) / \sinh \dots$ (3) である。

ここに I_S , I_G , I_D はそれぞれ水平面天空,水平面全天,法線面直達日射量 [W/m^2], h は太陽高度[rad]である。

Ⅳ. 直散分離式の推定精度の検討

本論文で求めた式Iを含めP群から6式,K群から8式を取り上げ推定精度の検討を行った。式記号と開発者をTable 2に示す。評価用データは本論文に示す同一の処理(ただし解析用データは全天日射量と直達,天空日射量から求めた合成計算値の差を15%としたが,評価用データは適用範囲を広くして25%まで許容した)による2000年から2002年のデータ(調布(IDMP)と記述)及び気象庁測定(福岡,札幌)のSDP^{注7}データ(日射量は1時間積算値。計算代表時刻は30分前)とした。

評価指標はRMSE及びMBE(ただし,それぞれ測定平均値に対する割合とした)^{注8}である。Fig.3に算定結果を示す。これによればK群の方がP群より推定精度が良く,式I,式R,式S,式E,式 N_k は同程度と言える。

本論文で作成した式Iは太陽高度の関数となっていない。そこ

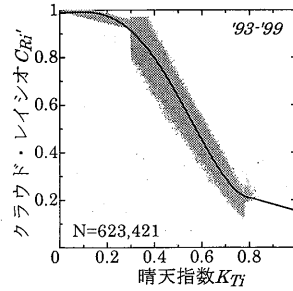


Fig.1 Relationship between Measured Clearness Index K_{Ti} and Cloud Ratio C_{Ri}' of Eq.R

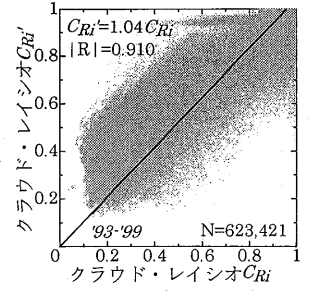
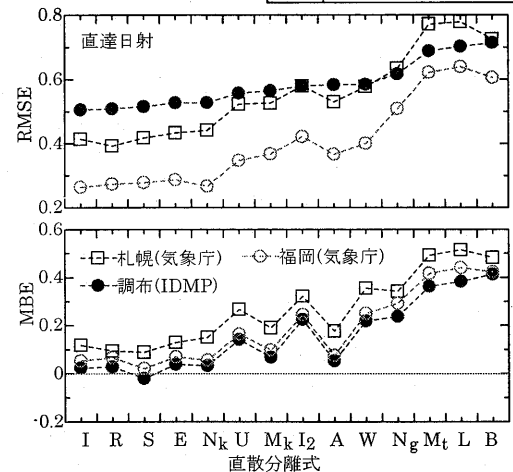


Fig.2 Relationship between Measured Cloud Ratio C_{Ri} and Calculated Cloud Ratio C_{Ri}' of Eq.R

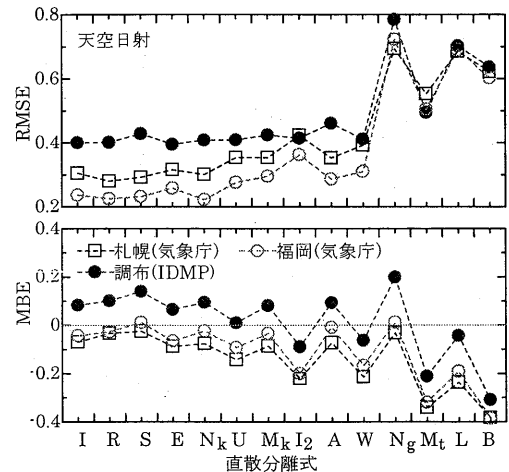
Table 2 Various Estimation Models of Direct and Duffuse Irradiance from Measured Global Horizontal Solar Irradiance

P群の式		K群の式	
記号	開発者	記号	開発者
A	赤坂・黒木 ⁵⁾	I	稻沼・武田(本論文)
W	渡辺・浦野・林 ⁴⁾	R	Reindl, Beckman & Duffie ⁷⁾
N_g	永田・沢田 ¹⁹⁾	S	Skartveit & Olseth ¹⁷⁾
M_t	小木曾・斎藤・松尾 ¹⁶⁾	E	Erbs, Klein & Duffie ⁸⁾
L	Liu & Jordan ⁶⁾	N_k	中山・石野 ¹¹⁾
B	Berlage ²⁰⁾	U	宇田川・木村 ¹⁰⁾
		M_k	三木・浦野・山崎・前田 ¹⁸⁾
		I_2	稻沼・武田(式A3) ¹⁴⁾

注:右肩の数字は参考文献番号と対応している。

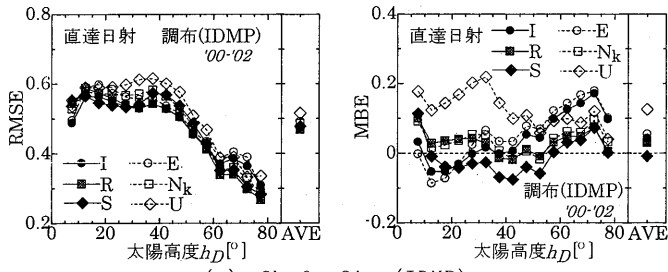


(a) Direct Solar Irradiance

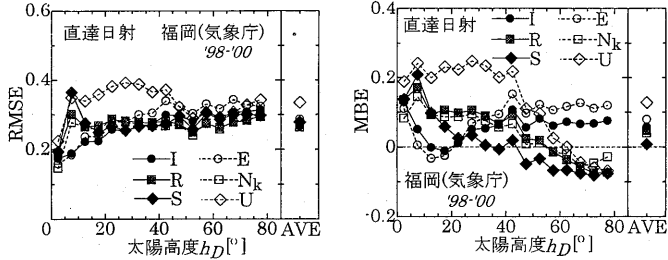


(b) Diffuse Solar Irradiance

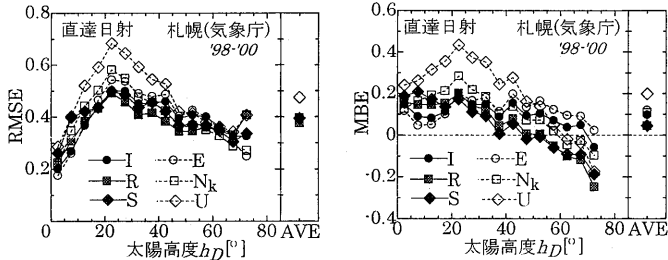
Fig.3 Calculated Results of RMSE and MBE of Various Models



(a) Chofu-City (IDMP)

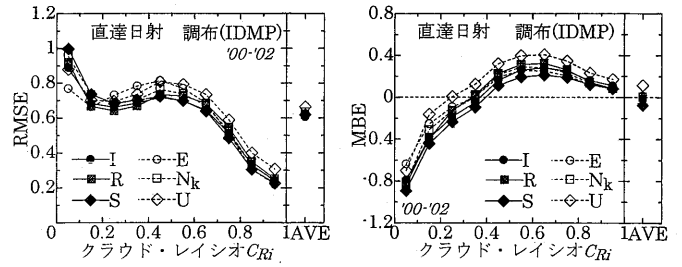


(b) Fukuoka-City (Meteorological Agency Data)

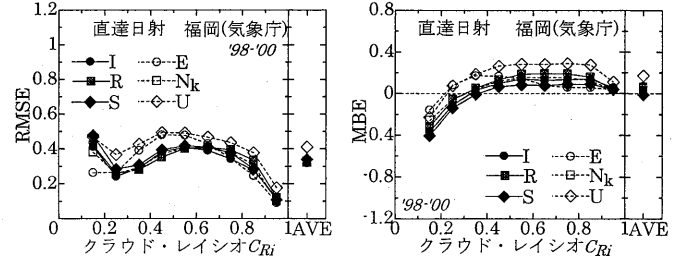


(c) Sapporo-City (Meteorological Agency Data)

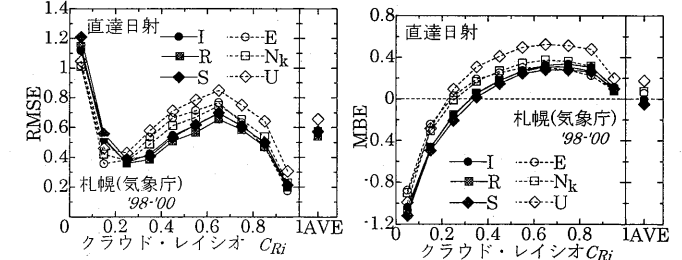
Fig.4 Calculated Results of *RMSE* and *MBE* of Direct Solar Irradiance by Various Models



(a) Chofu-City (IDMP)



(b) Fukuoka-City (Meteorological Agency Data)



(c) Sapporo-City (Meteorological Agency Data)

Fig.5 *RMSE* and *MBE* of Direct Solar Irradiance by Cloud Ratio

Table 3 Relative Evaluation of *RMSE* of Various Models (Eq. I=1)

(a) By Solar Altitude

(h_D)		I	R	S	E	N _k	U	A
直達	調布	1.00	0.99	1.01	1.04	1.02	1.09	1.38
	福岡	1.00	1.02	1.04	1.08	0.99	1.26	1.35
	札幌	1.00	0.96	1.01	1.01	1.02	1.22	1.24
	(平均)	1.00	0.99	1.02	1.04	1.01	1.19	1.32
天空	調布	1.00	1.00	1.06	1.00	1.02	1.03	1.17
	福岡	1.00	0.96	0.99	1.09	0.95	1.16	1.26
	札幌	1.00	0.95	0.97	1.00	0.96	1.15	1.19
	(平均)	1.00	0.97	1.01	1.03	0.98	1.11	1.21

(b) By Cloud Ratio

(C_{Ri})		I	R	S	E	N _k	U	A
直達	調布	1.00	1.02	1.02	1.03	1.05	1.10	1.15
	福岡	1.00	1.04	1.07	1.04	1.01	1.29	1.39
	札幌	1.00	0.97	1.03	1.02	1.03	1.17	1.24
	(平均)	1.00	1.01	1.04	1.03	1.03	1.19	1.26
天空	調布	1.00	1.00	1.06	1.01	1.03	1.03	1.14
	福岡	1.00	0.97	0.99	1.04	0.95	1.16	1.19
	札幌	1.00	0.96	1.00	0.99	0.97	1.12	1.16
	(平均)	1.00	0.98	1.02	1.01	0.98	1.10	1.16

で、推定精度が良かった式を含め、太陽高度5°帯域ごとに検討した直達日射の結果がFig. 4である(図中AVEは平均値)。更にP群の式Aを加えて、式Iを基準(1.00)として表示した*RMSE*の平均的相対値をまとめてTable 3(a)に示す。各地域により若干の相違はあるが、上記の式Iから式N_kは太陽高度別に見ても同程度の推定精度と言える。

次に天候の違いによる推定精度を検討するため、0.1帯域ごとのクラウド・レイシオ*C_{Ri}*別検討を行った。直達日射の算定結果をFig. 5に示す。これによれば、いずれも*C_{Ri}*の比較的小さい(快晴、晴れ)帯域で誤差が大きく、大きい(雨天・曇天)^{注9}ところで誤差が小さい傾向があるが、各直散分離式間の差は顕著ではない。クラウド・レイシオ別検討結果の相対的平均値をTable 3(b)に示す。これによっても、式Iから式N_kの推定精度は同程度である。

V. おわりに

式Rを基に作成した太陽高度によらない式Iは、調布、福岡、札幌のデータにより検討した範囲内において、推定精度が同程度であり、またその誤差の出現パターンも類似していることが判明した。また簡易であり、実用的な推定式が作成できたと考えている。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、東京理科大学教授の武田仁博士のご協力を得ました。記して謝意を表します。

注

注1 $I_D = I_0 \cdot P_i^{1/\sinh}$ (直達日射の式)

ここに I_0 は太陽定数 (= 1,367W/m²)

注2 Clearness Index, $K_{Ti} = I_G / (I_0 \sinh)$

注3 式R; Reindlらの式⁷⁾

(1) $0 \leq K_{Ti} \leq 0.3$; Constraint; $C_{Ri} \leq 1$

$C_{Ri} = 1.000 - 0.232K_{Ti} + 0.0239\sinh$

$-0.000682\theta + 0.0195\phi$

(2) $0.3 < K_{Ti} < 0.78$;

Constraint ; $C_{Ri} \leq 0.97$ and $C_{Ri} \geq 0.1$

$$C_{Ri} = 1.329 - 1.716K_{Ti} + 0.267\sinh - 0.00357\theta + 0.106\phi$$

(3) $0.78 \leq K_{Ti}$; Constraint ; $C_{Ri} \geq 0.1$

$$C_{Ri} = 0.426K_{Ti} - 0.256\sinh + 0.00349\theta + 0.0734\phi$$

ここに θ, ϕ はそれぞれ外気温度 $^{\circ}\text{C}$, 外気相対湿度[-],

C_{Ri} , Cloud Ratio[-] 注4

注4 Cloud Ratio, C_{Ri} , 水平面全天日射量 I_G [W/m^2] に対する水平面天空日射量 I_S [W/m^2] の比。 $C_{Ri} = I_S / I_G$ である。

注5 1DMP 測定所；日本建築学会に委員会を設置し実施した。発足当時(1993年)のResearch Classの測定所(当時の研究代表者)は、1. 九州大学(中村洋・古賀靖子) 2. 京都大学(中村泰人) 3. 北海道大学(落藤澄) 4. 鹿島技研(小原俊平・稲沼實) 5. 竹中技研(井川憲男)(順不同)である。

注6 Sky Ratio, S_{Ri} , 水平面全天日射量に対する水平面直達日射量の比。 $S_{Ri} = I_D \cdot \sinh / I_G$, $S_{Ri} + C_{Ri} = 1$ である。

注7 Surface Daily observation Points

注8 評価指標: RMSE, Root Mean Square Error, MBE, Mean Bias Error

本論文では測定平均値で除して、記号を次とする。

$$RMSE = RMSE_0 / M_{ave}, \quad MBE = MBE_0 / M_{ave}$$

$$\text{ここに, } RMSE_0 = \{ \sum_j (C_j - M_j)^2 / N \}^{1/2} \quad [\text{W}/\text{m}^2],$$

$$MBE_0 = \sum_j (C_j - M_j) / N \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

C_j ; 推定値 [W/m^2], M_j ; 測定値 [W/m^2],

M_{ave} ; 全測定値の平均値 [W/m^2], N ; データ数。

注9 ただし、晴天でも太陽高度の低い時間帯は含んでいる。

参考文献

- 1) 松尾陽；天空日射量の推定と直散分離，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，No. 4167, (1973. 10), pp. 333 ~ 334.
- 2) 曾我和弘，赤坂裕，二宮秀興；全天日射量から直達日射量と天空日射量を推定する各種モデルの比較と評価，日本建築学会計画系論文集，No. 512, (1998. 10), pp. 17 ~ 24.
- 3) 日本建築学会；拡張アメダス気象データ，丸善，2000. 1.
- 4) 渡辺俊行，浦野良美，林徹夫；水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定，日本建築学会論文報告集，No. 330, (1983. 8), pp. 96 ~ 108.
- 5) H. Akasaka & S. Kuroki; Models of Circumsolar Radiation and Diffuse Sky Radiation Including Cloudy Sky, Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Vol. 1, Pt. 2, (1991. 8), pp. 933 ~ 938.
- 6) B. Y. H. Lui & R. C. Jordan; The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, Solar Energy, Vol. 4, No. 3, (1960), pp. 1 ~ 19.
- 7) D. T. Reindl, W. A. Beckman & J. A. Duffie; Diffuse Fraction Correlations, Solar Energy, Vol. 45, No. 1, (1990), pp. 1 ~ 7.
- 8) D. G. Erbs, S. A. Klein and J. A. Duffie; Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, Solar Energy, Vol. 28, No. 4, (1982), pp. 293 ~ 302.
- 9) R. Perez, P. Ineichen, E. L. Maxwell, R. D. Seals and A. Zelenka; Dynamic global-to-direct irradiance conversion models, ASHRAE Transaction-Research Series, (1992), pp. 354 ~ 369
- 10) 宇田川光弘，木村建一；水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定，日本建築学会論文報告集，No. 267, (1978. 5), pp. 83 ~ 90.
- 11) 中山哲士，石野久彌；天空放射輝度分布を考慮した直達・拡散日射の推定法に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No. 557, (2002. 7), pp. 33 ~ 39.
- 12) CIE; Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement, CIE Technical Report, (1994), CIE 108-1994.
- 13) 中村洋；日射と昼光の総合的な測定 国際昼光測定プログラムについて，気象データの建築環境工学への応用に関する総合的研究，1991年度科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書，(1992. 3), pp. 13 ~ 23.
- 14) 稲沼實，武田仁；長期観測データに基づく建築環境外界気象要素の特性に関する実証的研究(その3)，空気調和・衛生工学会論文集，No. 87, (2002. 10), pp. 31 ~ 40.
- 15) 稲沼實，武田仁；長期観測データに基づく昼光の発光効率に関する実証的研究，日本建築学会計画系論文集，No. 560, (2002. 10), pp. 7 ~ 13.
- 16) 小木曾定彰，斉藤平蔵，松尾陽；快晴時の日射について(日射量に関する研究2)，日本建築学会論文報告集，No. 66, (1960. 10), pp. 21 ~ 24.
- 17) A. Skartveit, J. A. Olseth; A MODEL FOR THE DIFFUSE FRACTION OF HOURLY GLOBAL RADIATION, Solar Energy, Vol. 38, No. 4, (1987), pp. 271 ~ 274
- 18) 三木信博，浦野良美，山崎均，前田幸輝；標準気象データの日射直散分離に関する研究(その6日射直散分離法の提案)，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1991. 9), pp. 857 ~ 858.
- 19) 永田忠彦，沢田康二；晴天空による水平面散乱日射の式の試案，日本建築学会大会学術講演梗概集，(1978. 9), pp. 519 ~ 520.
- 20) Berlage, Von H. P.; Zur Theorie der Beleuchtung einer horizontalen Fläche durch Tageslicht, Meteorologische Zeitschrift, Vol. 45, (1928. 5), pp. 174 ~ 180.
- 21) 稲沼實，武田仁；長期観測データに基づく建築環境外界気象要素の特性に関する実証的研究(その1)，空気調和・衛生工学会論文集，No. 84, (2002. 1), pp. 97 ~ 106.
- 22) 稲沼實，武田仁；長期観測データに基づく建築環境外界気象要素の特性に関する実証的研究(その2)，空気調和・衛生工学会論文集，No. 85, (2002. 4), pp. 77 ~ 86.
- 23) 武田仁，稲沼實，横田覚；長期測定データに基づく昼光照度と日射量の相関に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No. 531, (2000. 5), pp. 17 ~ 22.