

平板型太陽集熱器の最適傾斜角度 及び傾斜倍率の決定法*

Decision of the Optimum Tilting Angle and Inclination Ratio of
Solar Radiation on a Flat Plate Solar Collector

金 山 公 夫**
Kimio KANAYAMA

馬 場 弘**
Hiromu BABA

Abstract

With respect to practical use of the solar energy, it is important to calculate the energy of solar radiation incident upon a flat plate solar collector installed with any tilting and azimuth angles. Global solar radiation is officially observed in a general weather station, a relation between insolation and collector surface varies hour by hour so that hourly measurements of solar radiation are desired, and then the value must be divided into three components of direct, diffused and reflected radiations for insolation analysis upon a collector surface. According to the recent research, it was clarified that monthly mean of global solar radiation can be given as a function of sunshine rate, cloud amount and snowfall rate for each month.

In this paper, based on monthly mean of solar radiation introduced by sunshine time and so on, a technical method to calculate calorimetrically the optimum tilting angle of solar collector is described and, the ratio of solar radiation on the collector surface to horizontal solar radiation which is defined as an inclination ratio can be obtained.

1. ま え が き

全国各地において任意の傾斜角度で設置された平板型太陽集熱器に入射する日射量を、一定の使用期間について求めることが出来るならば、集熱量や集熱器の適切な取付角度を求めたり、建築物などに対する日射の影響をより正確に予測することが出来る。しかし、任意の傾斜角と方位角で設置された平面に1日当りに入射する日射量、すなわち、傾斜面日射量を精度良く計算することはそう容易ではない。その理由は主に、この計算を行なうにあたっては水平面全天日射量、直達日射量及び散乱日射量の三種類の日射量観測値を要するが、太陽と傾斜面の関係が時々刻々変化することから、これらの日射測定値も時刻毎の値を必要とすることに依る。しかし、日射の観測は全国気象管署の限られた地点でしか行われておらず、観測値としては水平面全天日射量のみが気象統計として公表されているに過ぎない。これに対して日照時間の観測は古くから全国くまなく行われている。最近の吉田、

篠木の研究^{1),2)}によれば、月平均値で示した日射量と日照時間には相関があり、水平面全天日射量は日照時間から得られる日照率と雲量及び積雪日数の関数で表わされ、さらにそれを直達成分と散乱成分に分離できることが明らかにされた。本研究は、従来集熱器の傾斜角度は、その地点の緯度プラス α 度として半ば経験的に決められて来たのを、上記の方法により日照時間等から算出された日射量の月平均値にもとずいて、集熱器の使用期間内の傾斜面日射量を最大とする傾斜角、すなわち集熱面最適傾斜角度を熱量的に求めるための一手法を述べ、その際に得られる傾斜面日射量の水平面日射量に対する割合を傾斜倍率と称し、その各月毎の値を求め集熱量の計算を簡便にしようとするものである。

* 第18回日本伝熱シンポジウムで講演

** 北見工業大学機械工学科

Department of Mechanical Engineering, Kitami
Institute of Technology

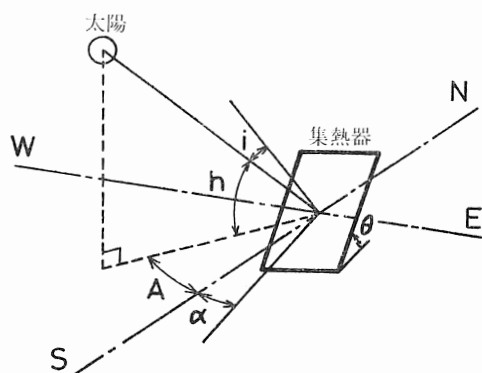


図1 太陽と集熱器の角度関係

2. 日射量測定値から傾斜面日射量を求める方法（従来法）

2.1 太陽高度と傾斜面入射角度

図1に示すように傾斜角 θ [°], 方位角 α [°]で設置された平板型集熱器に対する日射の入射角は設置地点の緯度, 経度, 日付及び時刻によって次の関係で求められる。

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad (1)$$

$$\sin A = \sin t \cos \delta / \cos h \quad (2)$$

$$\cos i = \sin h \cos \theta + \cos h \sin \theta \cos (A - \alpha) \quad (3)$$

ここで, h : 太陽高度 [°], A : 太陽の方位角 (南中時を基点に午前中を-, 午後を+とする) [°], i : 傾斜面入射角度 [°], ϕ : 緯度 [°], δ : 赤緯 [rad], t : 時角 [°] を示す。

赤緯 δ は春分点 (3月21日頃) を起点とする地球の公転軌道上の位置を示す角度 w によって近似的に式 (4) で求められる³⁾。

$$\delta = 0.000504 + \cos w (-0.008562 + 0.011635 \cos w - 0.001172 \cos^2 w) + \sin w (0.408858 + 0.001708 \cos w - 0.012879 \cos^2 w) \quad (4)$$

$$w = (2\pi/365) \cdot D \quad (5)$$

D : 春分からの経過日数 [日]。

時角 t は太陽の南中時を0とし午前を-, 午後を+とし1時間を15°で表わす。従って時刻と時角の関係は次の様に示される。

$$t = \pi/12 (\tau - 12 + w_e + e) \quad (6)$$

$$w_e = (L - 135)/15 \quad (7)$$

ここで, τ : 時刻 [h], w_e : 中央標準時と設置地点の経度差による時差 [h], L : 経度 [°], e : 均時差 [h] を示す。

e は式 (8) によって近似的に求められる。

$$e = 0.006938 + \cos w (-0.134940 - 0.014434 \cos w + 0.021273 \cos^2 w) + \sin w (-0.030873$$

$$+ 0.330601 \cos w + 0.002474 \cos^2 w) \quad (8)$$

2.2 傾斜面日射量と直散分離

傾斜面日射量 I_{IT} [kJ/m²h] は水平面全天日射量 I_{HT} [kJ/m²h] 及び散乱日射量 I_s [kJ/m²h] によって式 (9) で与えられる。

$$I_{IT} = I_D \cos i + I_s (1 + \cos \theta) / 2 + \rho I_{HT} (1 - \cos \theta) / 2 \quad (9)$$

ただし, ρ は地面からの反射率を表わす。ところで最も一般的な場合として水平面全天日射量のデータがある場合, レーリーの等輝度散乱を仮定した Berlage の式を用いて直達成分の分離が行われる。この場合散乱日射量 I_s は式 (10) で与えられる。

$$I_s = 1/2 \cdot I_0 P m_a (1 - P m_a) / (1 - 1.4 \ln P) = 1/2 \cdot I_0 R (1 - R) / (1 - 1.4 \sin h \ln R) \quad (10)$$

ここで m_a : 大気径路 (エアマス) = $1/\sin h$, P : 大気の透過率, $R = P m_a = I_D/I_0$, I_D : 法線面直達日射量 [kJ/m²h], I_0 [kJ/m²h] は太陽定数で式 (11) で求められる。

$$I_0 = 4.18605 (1164 - 39 \cos w + 9 \cos^2 w) \quad (11)$$

水平面全天日射量は, 式 (9) で $\theta = 0$ において I_s に式 (10) を代入し, I_{HT} の観測値を式 (9) の右辺に代入して直達成分が分離できる。すなわち,

$$I_{HT} = I_0 R \sin h + 1/2 \cdot I_0 R (1 - R) / (1 - 1.4 \sin h \ln R) \quad (12)$$

となり I_D の解は逐次近似法により求められる。

3. 日射時間, 雲量, 雪面反射成分から傾斜日射量を求める方法 (著者らの方法)

3.1 日照時間, 雲量及び積雪指数による日射量の推定

各地の長年の気象データの統計処理の結果, 水平面全天日射量, 直達日射量及び散乱日射量は, 月毎の日照時間 (日照率), 雲量及び雪面反射成分から, $\pm 5\%$ 以内の誤差で各月の平均値が推定出来ることが判明した¹⁾。これによると, 月平均水平面全天日射量 $\bar{I}_{HT}$ [kJ/m²月] に対する大気圏外における水平面全天日射量の月平均値 $\bar{I}_{H_0}$ [kJ/m²月] の比を月平均晴天指数 $\bar{K}_T$ と表わし式 (13) で与えられる。

$$\bar{K}_T = \bar{I}_{HT} / \bar{I}_{H_0} = 0.146 + 0.534 n / N + 0.036 \sin h_{15} + 0.047 G_{10} \quad (13)$$

ここで, n : 日照時間 [h], N : 1カ月の可照時間 [h], h_{15} : 各月15日の南中時太陽高度 [°], G_{10} : 積雪指数 (各月10 cm 以上の積雪があった日数/各月の

日数) [-].

次に水平面全天日射量の月平均値は、以下の関係で直達成分と散乱成分に分離できる。

$$\bar{I}_{HD} = (1 - \bar{K}) \bar{I}_{HT} \dots \dots \dots (14)$$

$$\bar{I}_S = \bar{K} \bar{I}_{HT} \dots \dots \dots (15)$$

ここで、 $\bar{K}$ は式 (16) に示す気象統計値の関数である²⁾。

$$\bar{K} = \begin{cases} 0.921 - 0.171 \bar{K}_T - 0.852 n/N \\ \quad (\text{雲量データがない場合}) \\ 1.215 - 2.175 \bar{K}_T + 0.909 \bar{K}_T^2 + 0.528 C_i \\ \quad (\bar{K}_T \leq 0.48) \\ 1.402 - 3.207 \bar{K}_T + 2.224 \bar{K}_T^2 + 0.528 C_i \\ \quad (\bar{K}_T > 0.48) \end{cases} \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 C_i : うす雲指数で $C_i = n/N + C_d - 1$ で表わされる。 C_d は雲量

3. 2 月平均傾斜面日射量

各地の傾斜面日射量の月平均値は式 (13), (14), (15) 及び式 (9) によって求めることが出来る。いま 1 カ月間の 1 時間当りの日射量を月平均日射量を可照時間で除した値で表わせば、

$$I_D = (\bar{I}_{HD}/N) / \sin h \dots \dots \dots (17)$$

$$I_S = (\bar{I}_S/N) \dots \dots \dots (18)$$

$$I_{HT} = (\bar{I}_{HT}/N) \dots \dots \dots (19)$$

となる。

傾斜面に入射する 1 カ月間の総日射量 Q_{IT} [kJ/m²月] は、式 (17)~(19) を式 (9) に代入し、1 日の日の出の時角から日没の時角まで積分し、それを 1 月の日数について総和することによって得られる。すなわち、

$$Q_{IT} = \frac{m_0}{m} \left[\int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} [I_{IT}]_1 dt_1 + \int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} [I_{IT}]_2 dt_2 + \dots \right] = \frac{m_0}{m} \sum_{j=1}^m \int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} [I_{IT}]_j dt_j \dots \dots \dots (20)$$

ここで、 m_0 : 1 カ月の日数 [日]、 m : 和を求めた日数 [日]、 $t_{j,1}$: 日の出の時角 [°]、 $t_{j,2}$: 日没の時角 [°]、これらは式 (1) において、 $\sin h = 0$ として求められる。

すなわち、

$$t_{j,1} = -\cos^{-1} (-\sin \phi \sin \delta / \cos \phi \cos \delta)$$

$$t_{j,2} = \cos^{-1} (-\sin \phi \sin \delta / \cos \phi \cos \delta)$$

任意の傾斜面が受ける j 日の 1 日当りの日射量は式 (9) に式 (17), (18) 及び式 (19) を代入して求められる。

$$\int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} [I_{IT}]_j dt_j = \frac{\bar{I}_{HD}}{N} \int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} (\cos i / \sin h)_j dt_j$$

$$+ \frac{\bar{I}_S}{N} \int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} [1 + \cos \theta] / 2_j dt_j \\ + \frac{\bar{I}_{HT}}{N} \int_{t_{j,1}}^{t_{j,2}} \rho [1 - \cos \theta] / 2_j dt_j \dots \dots \dots (21)$$

ただし、 $t_{j,1}'$: 傾斜面 (θ, α) に日射が当り始める時角 [°]、 $t_{j,2}'$: 傾斜面から日射が陰る時角 [°] で、これらは式 (3) において、 $\cos i = 0$ とおいて次の方法で求められる。

$$\cos t_{j,1}' = \{-ac + b \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}\} / \{a^2 + b^2\}$$

$$\text{ただし、}|t'_{j,1}| > |t_{j,1}| \text{ のとき } |t_{j,1}'| = |t_{j,1}|$$

$$\cos t_{j,2}' = \{-ac - b \sqrt{a^2 + b^2 - c^2}\} / \{a^2 + b^2\}$$

$$t_{j,2}' > t_{j,2} \text{ のとき } t_{j,2}' = t_{j,2}$$

ここで、 a, b 及び c は次式による。

$$a = \cos \phi \cos \delta \cos \theta + \sin \phi \cos \delta \sin \theta \cos \alpha$$

$$b = \cos \delta \sin \theta \sin \alpha$$

$$c = \sin \phi \sin \delta \cos \theta - \cos \phi \sin \delta \sin \theta \cos \alpha$$

以下、この方法による計算結果を述べる。

4. 最適傾斜角及び傾斜倍率の計算結果

集熱器の使用期間を通年または幾月かの一定期間として、それぞれの期間において傾斜面 ($\theta, \alpha = 0$) の Q_{IT} が最大となる傾斜角を最適傾斜角 θ_{max} と称して、傾斜角を 0° から 90° まで 2.5° きざみに Q_{IT} を計算し θ_{max} を求めた。また当該使用期間に対する θ_{max} の傾斜面への総日射量 Q_{IT} と、水平面全天日射量の比率、すなわち傾斜倍率 K_θ を求め集熱量の計算を便利にした。これにより、使用期間における傾斜面日射量は、各月毎に水平面全天日射量に傾斜倍率を掛けて期間中を総和することにより容易に求めることができる。計算に使用した気象データは昭和46年から昭和54年までの9年間の各地の気象管署の観測値より日照時間の月積算値、雲量の月平均値及び月間 10cm 以上の積雪日数などである⁴⁾。

図2は道内の代表的な3地点として稚内、札幌及び帯広の日照率、雲量及び日射量を示す。日照率の各月の変化の特徴を見ると、11月から2月に至る冬期間において3地点の差が顕著であり、稚内の日照率はかなり小さく帯広の値は大きい。3月から10月にかけては、3地域に冬期間の様な大きな差は見られない。6月から9月にかけて帯広の日照率は小さい。雲量は、日照率と逆の関係になる。これらのデータから求めた水平全天日射量は3地点とも5月が最大である。帯広は6月から9月の間を除いて他の地域より大きく、札幌の日射量は6月から9月にかけて他の地域より大きい。通年の日射量は帯広、札幌そして稚内の順にな

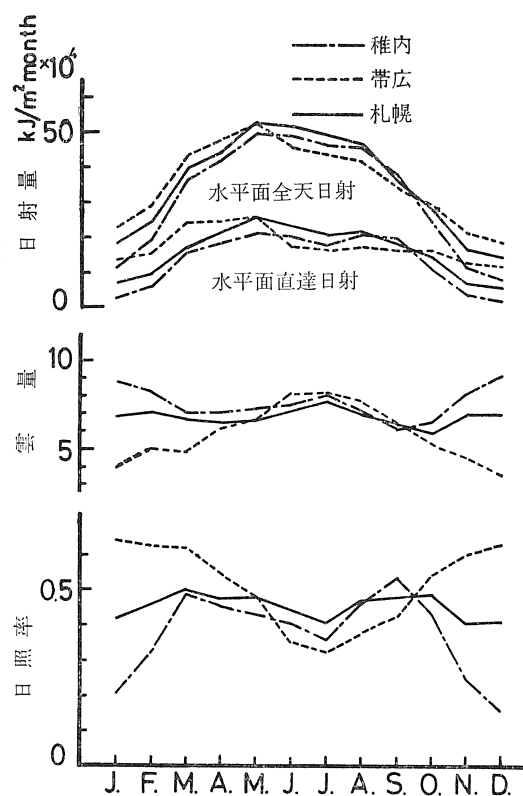


図2 日照率、雲量及び日射量の月別変化(道内)

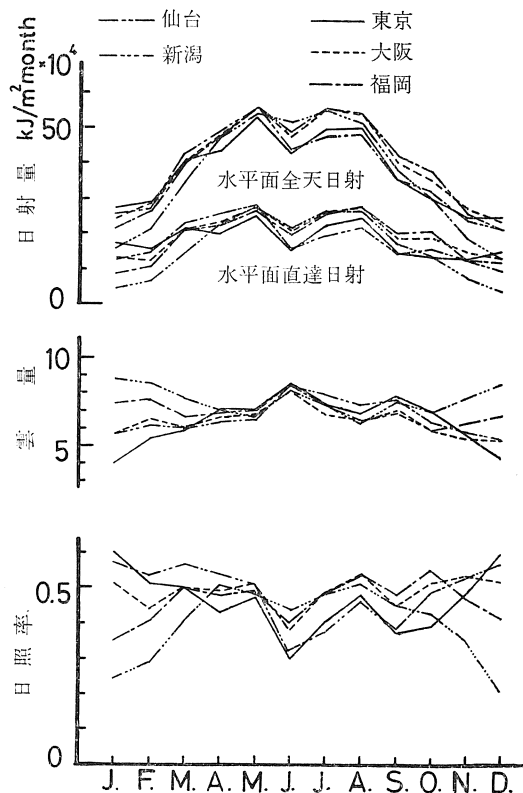


図3 日照率、雲量及び日射量の月別変化(道外)

る。いずれにしても夏期の日射量にはあまり大きな地域差は見られない。水平面直達日射量と水平面全天日射量の比は、通年平均値で稚内が0.416、札幌が0.456

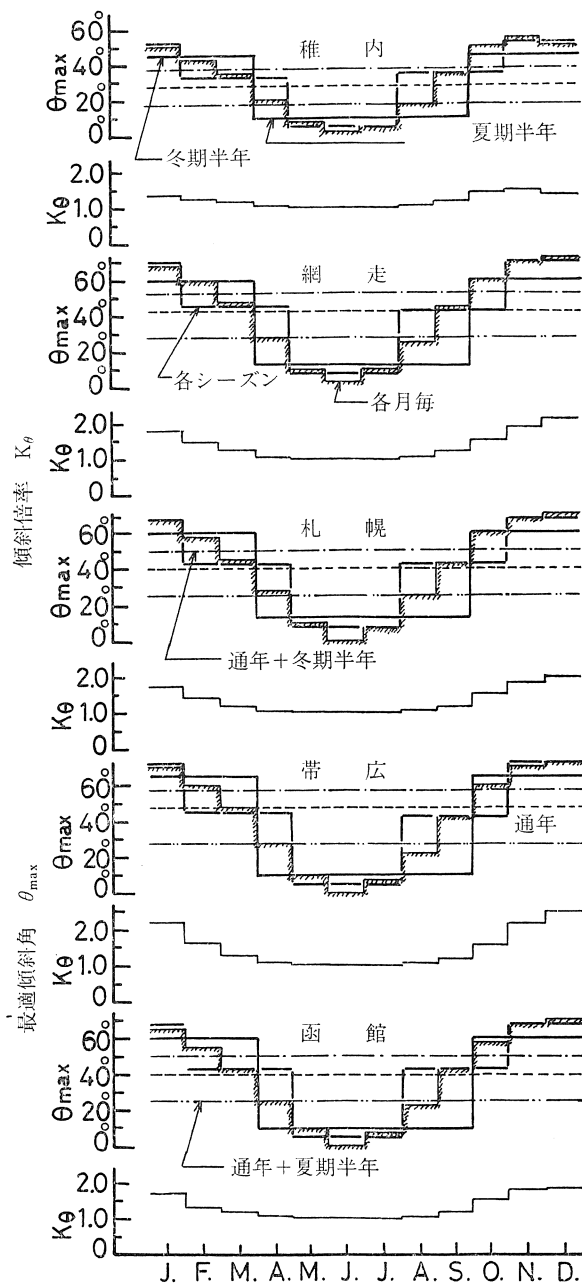


図4 道内5地点の期間別最適傾斜角度及び傾斜倍率の計算値

及び帯広が0.493である。水平面直達日射量は式(16)に示されるように晴天指数の影響を強く受ける結果、日照率が小さい地域では日射の直達成分は一層小さくなる。

図3は仙台、新潟、東京、大阪及び福岡の日照率、雲量及び水平面全天日射量と、水平面直達日射量を示す。冬期4カ月の新潟の日照率が小さいこと、全ての地域で6月の日照率が低下して梅雨の影響が見られることがわかる。

図4は道内5地点の各月毎、季節毎、冬期半年、夏期半年及び通年の集熱器使用期間に関する最適傾斜角度 θ_{max} と通年の最適傾斜角度に対する各月毎の傾斜

倍率 K_{θ} を示す。同じ使用期間について比較すると、日照率が大きく天候が良い地域程、各月の θ_{max} は大幅に変動し、網走、帯広では冬に最大 72.5° の角度を示すのに対し、夏は網走、帯広で 2.5° 、その他の地域は 0° となる。夏の θ_{max} が意外にも 0° となるのは日の出、日没の方向が東西より北寄りになり、その時間帯は、傾斜受光面に対して日影になることに起因する。寒冷地においては、冬期を中心とした利用に重点が置かれる故、冬期半年間の最適傾斜角度、及び同期間と通年の最適傾斜角度の平均値を冬期に重点を置く傾斜角度〔通年+冬期半年〕とすれば、前者の値は、

帯広 65° 、札幌 60° 、稚内 45° となり後者は帯広 57.5° 、札幌 50° 、稚内 37.5° となる。帯広と札幌の θ_{max} は、実際に用いられている集熱器の取付け角度に近似するが、稚内の θ_{max} はかなり小さい値となる。これは稚内の冬期の気象条件が悪く水平面全天日射量に占める散乱日射成分が大きいためと思われる。図の K_{θ} は通年の θ_{max} に対するもので各地の冬期間の値は、1.0以上の値を示すが、晴天の多い帯広では12月と1月で2.0を越え、このことは傾斜面における冬の日射量は見掛け上2倍以上に増加したことになる。

表1は道内5地点と道外主要5地点における各月毎

表1 全国10地点の月別水平面全天日射量と各期間に対する最適傾斜角度と傾斜倍率

① 通年 (1月~12月), ② 冬期 (10月~3月), ③ 夏期 (4月~9月), ④ 春期 (2月~4月),
 ⑤ 夏期 (5月~7月), ⑥ 秋期 (8月~10月), ⑦ 冬期 (11月~1月)

地点	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間
稚内 N 45°25' E 141°41'	QIT (kJ/m ² /月)	1168・10 ³	1926・10 ³	3629・10 ³	4203・10 ³	4906・10 ³	4888・10 ³	4605・10 ³	4588・10 ³	3826・10 ³	2436・10 ³	1193・10 ³	871・10 ³	3824・10 ³
	θ_{max} (°)	50.00	42.50	35.00	20.00	7.50	2.50	5.00	17.50	35.00	50.00	55.00	50.00	—
	K_{θ} (—)	1.34	1.26	1.17	1.04	1.01	1.00	1.00	1.04	1.19	1.41	1.49	1.36	—
	① K27.5(—)	1.27	1.22	1.16	1.04	0.97	0.94	0.96	1.03	1.18	1.32	1.36	1.28	1.08
	② K45.0(—)	1.33	1.26	1.15	0.97	0.87	0.83	0.86	0.96	1.18	1.04	1.47	1.36	1.04
	③ K10.0(—)	1.12	1.10	1.08	1.03	1.01	0.99	1.00	1.03	1.09	1.14	1.15	1.12	1.05
	④ K32.5(—)	1.30	1.24	1.17	1.02	0.94	0.92	0.94	1.02	1.19	1.36	1.40	1.31	1.08
	⑤ K 5.0(—)	1.06	1.05	1.04	1.02	1.01	1.00	1.00	1.02	1.05	1.07	1.08	1.06	1.03
	⑥ K35.0(—)	1.31	1.25	1.17	1.01	0.93	0.90	0.92	1.01	1.19	1.37	1.42	1.33	1.07
	⑦ K52.5(—)	1.34	1.25	1.12	0.92	0.81	0.77	0.80	0.91	1.15	1.40	1.49	1.36	1.00
網走 N 44°01' E 144°17'	QIT (kJ/m ² /月)	1720・10 ³	2457・10 ³	4098・10 ³	4328・10 ³	4906・10 ³	5166・10 ³	5044・10 ³	4467・10 ³	3675・10 ³	2717・10 ³	1653・10 ³	1407・10 ³	4164・10 ³
	θ_{max} (°)	67.50	60.00	47.50	27.50	10.00	2.50	10.00	25.00	45.00	60.00	70.00	72.50	—
	K_{θ} (—)	1.79	1.48	1.24	1.06	1.01	1.00	1.01	1.05	1.21	1.53	1.89	2.12	—
	① K42.5(—)	1.67	1.44	1.24	1.04	0.94	0.91	0.93	1.02	1.21	1.48	1.75	1.91	1.17
	② K60.0(—)	1.78	1.48	1.22	0.97	0.85	0.81	0.84	0.95	1.18	1.53	1.87	2.09	1.14
	③ K12.5(—)	1.24	1.17	1.11	1.04	1.01	1.00	1.00	1.04	1.10	1.19	1.27	1.32	1.08
	④ K45.0(—)	1.69	1.45	1.24	1.03	0.93	0.90	0.92	1.02	1.21	1.50	1.77	1.94	1.17
	⑤ K 7.5(—)	1.15	1.11	1.07	1.03	1.01	1.00	1.01	1.02	1.06	1.12	1.17	1.20	1.05
	⑥ K42.5(—)	1.67	1.44	1.24	1.04	0.94	0.91	0.93	1.02	1.21	1.48	1.75	1.91	1.17
	⑦ K70.0(—)	1.79	1.46	1.18	0.91	0.79	0.75	0.78	0.89	1.14	1.52	1.89	2.12	1.09
札幌 N 43°03' E 141°20'	QIT (kJ/m ² /月)	1800・10 ³	2453・10 ³	3947・10 ³	4400・10 ³	5291・10 ³	5195・10 ³	4914・10 ³	4713・10 ³	3680・10 ³	2800・10 ³	1683・10 ³	1486・10 ³	4236・10 ³
	θ_{max} (°)	67.50	57.50	45.00	27.50	10.00	0.00	7.50	25.00	42.50	60.00	67.50	70.00	—
	K_{θ} (—)	1.75	1.43	1.20	1.06	1.01	1.00	1.00	1.05	1.19	1.51	1.81	1.98	—
	① K40.0(—)	1.61	1.39	1.20	1.04	0.95	0.91	0.94	1.03	1.19	1.45	1.66	1.77	1.15
	② K60.0(—)	1.74	1.43	1.18	0.96	0.84	0.81	0.84	0.95	1.16	1.51	1.80	1.95	1.11
	③ K12.5(—)	1.23	1.16	1.10	1.04	1.01	0.99	1.00	1.04	1.09	1.18	1.25	1.29	1.08
	④ K42.5(—)	1.64	1.40	1.20	1.03	0.94	0.90	0.93	1.02	1.19	1.46	1.69	1.80	1.15
	⑤ K 7.5(—)	1.14	1.10	1.06	1.03	1.01	1.00	1.00	1.03	1.06	1.11	1.15	1.18	1.05
	⑥ K42.5(—)	1.64	1.40	1.20	1.03	0.94	0.90	0.93	1.02	1.19	1.46	1.69	1.80	1.15
	⑦ K67.5(—)	1.75	1.42	1.15	0.92	0.79	0.76	0.79	0.90	1.13	1.50	1.81	1.97	1.08
帯広 N 42°55' E 143°13'	QIT (kJ/m ² /月)	2248・10 ³	2893・10 ³	4320・10 ³	5772・10 ³	5274・10 ³	4588・10 ³	4353・10 ³	4194・10 ³	3445・10 ³	2985・10 ³	2152・10 ³	1880・10 ³	4310・10 ³
	θ_{max} (°)	70.00	60.00	47.50	27.50	10.00	0.00	7.50	22.50	42.50	60.00	70.00	72.50	—
	K_{θ} (—)	2.19	1.61	1.27	1.07	1.01	1.00	1.00	1.04	1.17	1.56	2.16	2.49	—
	① K47.5(—)	2.04	1.58	1.27	1.03	0.91	0.88	0.91	0.99	1.17	1.53	2.03	2.28	1.25
	② K65.0(—)	2.18	1.61	1.23	0.94	0.81	0.78	0.82	0.91	1.12	1.55	2.16	2.46	1.21
	③ K10.0(—)	1.28	1.17	1.10	1.04	1.01	1.00	1.00	1.03	1.07	1.16	1.28	1.34	1.09
	④ K45.0(—)	2.01	1.57	1.27	1.04	0.92	0.90	0.92	1.00	1.17	1.52	1.99	2.24	1.25
	⑤ K 5.0(—)	1.14	1.09	1.05	1.02	1.01	1.00	1.00	1.02	1.04	1.08	1.14	1.17	1.05
	⑥ K42.5(—)	1.98	1.55	1.27	1.04	0.94	0.91	0.93	1.01	1.17	1.50	1.96	2.19	1.24
	⑦ K72.5(—)	2.19	1.59	1.19	0.89	0.76	0.74	0.77	0.86	1.08	1.53	2.16	2.49	1.18
函館 N 41°49' E 140°45'	QIT (kJ/m ² /月)	1870・10 ³	2290・10 ³	3751・10 ³	4651・10 ³	5542・10 ³	4843・10 ³	4893・10 ³	4684・10 ³	3767・10 ³	3052・10 ³	1817・10 ³	1453・10 ³	4262・10 ³
	θ_{max} (°)	65.00	55.00	42.50	25.00	10.00	0.00	7.50	22.50	42.50	57.50	67.50	70.00	—
	K_{θ} (—)	1.71	1.33	1.20	1.06	1.01	1.00	1.00	1.04	1.18	1.52	1.78	1.82	—
	① K40.0(—)	1.59	1.31	1.20	1.04	0.94	0.91	0.93	1.02	1.18	1.46	1.64	1.66	1.14
	② K60.0(—)	1.71	1.33	1.17	0.96	0.83	0.80	0.83	0.94	1.15	1.52	1.77	1.80	1.10
	③ K10.0(—)	1.18	1.11	1.08	1.04	1.01	1.00	1.00	1.03	1.07	1.15	1.20	1.20	1.06
	④ K42.5(—)	1.61	1.31	1.20	1.03	0.93	0.90	0.92	1.01	1.18	1.47	1.67	1.69	1.14
	⑤ K 5.0(—)	1.09	1.05	1.04	1.02	1.00	1.00	1.00	1.02	1.04	1.08	1.10	1.10	1.03
	⑥ K42.5(—)	1.61	1.31	1.20	1.03	0.93	0.90	0.92	1.01	1.18	1.47	1.67	1.69	1.14
	⑦ K 67.5(—)	1.71	1.31	1.13	0.91	0.78	0.76	0.78	0.89	1.11	1.50	1.78	1.82	1.06

表 1 つづき

地点	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間
仙台 N38°16' E140°54'	Q_{IT} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}$)	241.1 $\cdot 10^3$	279.8 $\cdot 10^3$	422.0 $\cdot 10^3$	489.2 $\cdot 10^3$	554.1 $\cdot 10^3$	432.3 $\cdot 10^3$	475.5 $\cdot 10^3$	478.8 $\cdot 10^3$	344.1 $\cdot 10^3$	314.8 $\cdot 10^3$	234.7 $\cdot 10^3$	213.0 $\cdot 10^3$	4479 $\cdot 10^3$
	θ_{max} (°)	57.50	45.00	32.50	15.00	2.50	0.00	2.50	12.50	25.00	45.00	57.50	62.50	—
	K_{θ} (—)	1.73	1.35	1.15	1.03	1.00	1.00	1.00	1.02	1.08	1.30	1.66	1.92	—
	① K300(—)	1.55	1.30	1.15	1.00	0.93	0.91	0.92	0.99	1.08	1.27	1.50	1.66	1.12
	② K500(—)	1.71	1.34	1.10	0.89	0.78	0.76	0.78	0.87	1.00	1.30	1.65	1.88	1.07
	③ K50(—)	1.11	1.07	1.04	1.02	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.06	1.10	1.13	1.04
	④ K300(—)	1.55	1.30	1.15	1.00	0.93	0.91	0.92	0.99	1.08	1.27	1.50	1.66	1.12
	⑤ K00(—)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
新潟 N37°55' E139°03'	Q_{IT} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}$)	158.7 $\cdot 10^3$	210.5 $\cdot 10^3$	351.7 $\cdot 10^3$	472.0 $\cdot 10^3$	538.3 $\cdot 10^3$	511.6 $\cdot 10^3$	546.2 $\cdot 10^3$	513.2 $\cdot 10^3$	382.5 $\cdot 10^3$	294.5 $\cdot 10^3$	188.3 $\cdot 10^3$	130.1 $\cdot 10^3$	4298 $\cdot 10^3$
	θ_{max} (°)	45.00	35.00	27.50	15.00	2.50	0.00	2.50	15.00	27.50	42.50	50.00	50.00	—
	K_{θ} (—)	1.27	1.15	1.09	1.03	1.00	1.00	1.00	1.02	1.10	1.26	1.42	1.34	—
	① K200(—)	1.18	1.12	1.09	1.02	0.97	0.95	0.97	1.02	1.09	1.19	1.26	1.22	1.05
	② K400(—)	1.26	1.15	1.07	0.95	0.86	0.83	0.85	0.94	1.07	1.26	1.40	1.33	1.01
	③ K50(—)	1.05	1.04	1.03	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.06	1.07	1.06	1.02
	④ K275(—)	1.23	1.15	1.09	1.01	0.94	0.92	0.93	1.00	1.10	1.23	1.33	1.27	1.04
	⑤ K00(—)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
東京 N35°41' E139°46'	Q_{IT} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}$)	270.2 $\cdot 10^3$	286.1 $\cdot 10^3$	405.1 $\cdot 10^3$	433.5 $\cdot 10^3$	529.5 $\cdot 10^3$	422.4 $\cdot 10^3$	494.2 $\cdot 10^3$	498.0 $\cdot 10^3$	350.4 $\cdot 10^3$	294.1 $\cdot 10^3$	242.7 $\cdot 10^3$	241.8 $\cdot 10^3$	4468 $\cdot 10^3$
	θ_{max} (°)	55.00	42.50	27.50	12.50	2.50	0.00	0.00	12.50	22.50	37.50	52.50	60.00	—
	K_{θ} (—)	1.67	1.28	1.11	1.02	1.00	1.00	1.00	1.02	1.07	1.20	1.52	1.83	—
	① K275(—)	1.48	1.25	1.11	0.99	0.93	0.92	0.93	0.99	1.06	1.19	1.40	1.57	1.10
	② K475(—)	1.65	1.28	1.05	0.88	0.79	0.77	0.79	0.87	0.99	1.19	1.52	1.79	1.05
	③ K25(—)	1.05	1.03	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.05	1.06	1.02
	④ K275(—)	1.48	1.25	1.11	0.99	0.93	0.92	0.93	0.99	1.06	1.19	1.40	1.57	1.10
	⑤ K00(—)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
大阪 N34°41' E135°31'	Q_{IT} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}$)	252.4 $\cdot 10^3$	270.9 $\cdot 10^3$	411.9 $\cdot 10^3$	474.2 $\cdot 10^3$	558.6 $\cdot 10^3$	472.4 $\cdot 10^3$	553.3 $\cdot 10^3$	537.8 $\cdot 10^3$	397.0 $\cdot 10^3$	350.8 $\cdot 10^3$	265.8 $\cdot 10^3$	232.0 $\cdot 10^3$	4777 $\cdot 10^3$
	θ_{max} (°)	52.50	40.00	27.50	12.50	0.00	0.00	0.00	12.50	25.00	42.50	52.50	57.50	—
	K_{θ} (—)	1.53	1.22	1.10	1.02	1.00	1.00	1.00	1.02	1.08	1.23	1.54	1.68	—
	① K250(—)	1.37	1.19	1.10	1.00	0.94	0.92	0.93	0.99	1.08	1.22	1.38	1.45	1.08
	② K450(—)	1.51	1.22	1.06	0.89	0.80	0.78	0.79	0.88	1.02	1.27	1.53	1.64	1.03
	③ K25(—)	1.05	1.03	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.05	1.02
	④ K250(—)	1.37	1.19	1.10	1.00	0.94	0.92	0.93	0.99	1.08	1.22	1.38	1.45	1.08
	⑤ K00(—)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
福岡 N33°35' E130°23'	Q_{IT} ($\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}$)	211.9 $\cdot 10^3$	260.4 $\cdot 10^3$	413.8 $\cdot 10^3$	472.0 $\cdot 10^3$	542.3 $\cdot 10^3$	482.4 $\cdot 10^3$	548.6 $\cdot 10^3$	538.0 $\cdot 10^3$	415.6 $\cdot 10^3$	372.4 $\cdot 10^3$	253.3 $\cdot 10^3$	209.9 $\cdot 10^3$	4721 $\cdot 10^3$
	θ_{max} (°)	47.50	37.50	25.00	10.00	0.00	0.00	0.00	10.00	25.00	40.00	50.00	52.50	—
	K_{θ} (—)	1.33	1.19	1.09	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.07	1.27	1.45	1.50	—
	① K22.5(—)	1.24	1.16	1.09	1.00	0.95	0.93	0.94	1.00	1.07	1.21	1.30	1.33	1.06
	② K42.5(—)	1.33	1.18	1.06	0.90	0.81	0.79	0.81	0.89	1.03	1.27	1.44	1.48	1.01
	③ K25(—)	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.04	1.04	1.01
	④ K250(—)	1.26	1.17	1.09	0.99	0.93	0.92	0.93	0.99	1.07	1.23	1.33	1.35	1.06
	⑤ K00(—)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

の水平面全天日射量 Q_{IT} , 最適傾斜角度 θ_{max} , 傾斜倍率 K_{θ} 及び通年, 各シーズンなどに対する θ_{max} とそれぞれの θ_{max} に対する各月毎の K_{θ} を資料として示す。番号①から⑦は次の期間を示す。①通年 (1月～12月), ②冬期半年 (10月～3月), ③夏期半年 (4月～9月), ④春期 (2月～4月), ⑤夏期 (5月～7月), ⑥秋期 (8月～10月), ⑦冬期 (11月～1月)。この表から任意の期間にわたって傾斜面に入射する日射エネルギーを求める場合, その期間の最適角度に対する各月毎の傾斜倍率と, 月平均水平面全天日射量を掛けて, これをその期間にわたって加え合せることによって求められる。例えば, 札幌における通年の日射エネルギーの最大値を求めるためには, ①欄で傾斜角度

40°, これに対応する各月毎の倍率と水平面全天日射量の積を1月から12月まで加えると 487万 kJ/m^2 年となる。これを年間の水平面全天日射量 423万 kJ/m^2 年で除した値が年間平均傾斜倍率 1.15 である。また表 1 において, 冬期半年の場合, ②欄より最適角度 60° で冬期の倍率は 1.95 から 1.18 と大きな値を示すが, 夏期に対する倍率は, 0.81 から 1.16 と小さくなる。

次に 冬期半年に対する各地の最適傾斜角度を見ると, 稚内と新潟を除いて, 帯広の 65° から福岡の 42.5° までほぼ北から南へと緯度の低下に伴って小さくなる。そして 12月の傾斜倍率は, 帯広の 2.46 から福岡の 1.48 まで同様の傾向を示す。しかし, 稚内の冬期半年の最適角度は 45°, その角度に対する 12月の倍率

は、1.36で緯度としては最北端にあるにもかかわらず、最適角度は大阪と同じで、しかも、倍率は大阪の1.64よりも小さい。これは稚内の冬期の気象条件が悪く、日照時間が短かいために水平面全天日射量が少なく、さらに日射量中に占める直達成分が少なくなるためである。この現象は一般に裏日本の多雪地帯で見られる。この事は緯度的に接近している仙台と新潟を比較するとより明らかである。すなわち、10月から3月に至る各月毎の最適傾斜角度において、新潟は仙台より $2.5^{\circ} \sim 12.5^{\circ}$ 小さく12月の倍率は仙台の1.92に対し、新潟は1.34と小さい。

一方、夏期の最適角度を見ると、全般に冬期のような地域差は見られない。これは太陽高度が高く最適傾斜角度が水平に近づくこと、各地の気象条件が冬期のように極端な地域差が現われないことによるものと思われる。

5. む す び

日照時間、雲量及び積雪日数の気象データから日射量を推定する方法を紹介し、傾斜面日射量を簡便に計算する方法を述べた。それらをもとに日本各地の日射量を推定し、平板型集熱器の最適傾斜角度及び傾斜倍率を求めた。これによって従来半ば経験的に決められていた集熱器取付け角度に対し、熱量的見地から決定する一つの手掛りを得た。しかし、多雪地帯の場合、集熱器への積雪防止などさらに地域に適合した幾つかの補正が必要と思われる。

記号及び単位

h : 太陽高度 $[\circ]$
A : 太陽の方位角 $[\circ]$
i : 傾斜面への日射の入射角 $[\circ]$
θ : 集熱器取付け角 (傾斜角) $[\circ]$
α : 集熱器取付け角 (方位角) $[\circ]$
ϕ : 緯度 $[\circ]$
L : 経度 $[\circ]$
δ : 赤緯 $[\text{rad}]$
w : 公転軌道上の地球の位置 $[\text{rad}]$
D : 春分からの経過日数 $[\text{日}]$
t : 時角 $[\text{h}]$
τ : 時刻 $[\text{h}]$
w_e : 時差 $[\text{h}]$
e : 均時差 $[\text{h}]$
I_{IT} : 傾斜面日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}]$
I_{HT} : 水平面全天日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}]$
I_D : 法線面直達日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}]$

I_S : 水平面散乱日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}]$
ρ : 地面または雪面からの反射率 $[-]$
I_0 : 太陽定数 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{h}]$
P : 大気の透過率 $[-]$
m_a : 大気径路 (エアマス) $m_a = 1/\sin h$ $[-]$
R : $R = P^{m_a} = I_D/I_0$ $[-]$
$\bar{I}_{HT}$: 水平面全天日射量の月平均値 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}]$
$\bar{I}_{H_0}$: 大気外水平面日射量の月平均値 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}]$
n : 日照時間 $[\text{h}]$
N : 可照時間 $[\text{h}]$
h_{15} : 各月15日の南中時太陽高度 $[\circ]$
G_{10} : 積雪指数 $[-]$
$\bar{I}_{HD}$: 月平均水平面直達日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}]$
$\bar{I}_S$: 月平均水平面散乱日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2\text{月}]$
$\bar{K}_T$: 晴天指数 $[-]$
$\bar{K}$: 散乱比 $[-]$
C_i : うす雲指数 $C_i = n/N + C_d - 1$ $[-]$
C_d : 雲量 $[-]$
m_0 : 1カ月の日数 $[\text{日}]$
m : 総和した日数 $[\text{日}]$
$t_{j,1}$: 日の出の時角 $[\circ]$
$t_{j,2}$: 日没の時角 $[\circ]$
$t_{j,1}'$: 傾斜面 (θ, α) に日射が当たり始める時角 $[\circ]$
$t_{j,2}'$: 傾斜面から日射が陰る時角 $[\circ]$
Q_{IT} : 傾斜面総日射量 $[\text{kJ}/\text{m}^2]$
θ_{max} : 最適傾斜角度 $[\circ]$
K_θ : 傾斜倍率 $[-]$

文 献

- 1) 日本気象協会：昭和51年度サンシャイン計画委託調査研究報告書，太陽エネルギーシステムの研究（気象調査），昭和52年。
- 2) 吉田作松・篠木誓一：月平均全天日射量を散乱および直達成分に分離する方法，日本太陽エネルギー学会第6回研究発表講演論文集，（昭54-12）9。
- 3) 野口哲男編：太陽エネルギー利用技術，フジテクノシステム，（昭49），275。
- 4) 日本気象協会：気象月報，昭和46年1月～昭和54年12月。

（昭和56年9月14日 原稿受理）