

# 集熱器面直達日射量の反射板による効果

大 矢 征, 三 浦 直 勝

Effectiveness of the reflector plate for the daily averaged reception of beam radiation on a collector surface.

Susumu OHYA and Naokatsu MIURA

## Abstract

The heating, cooling and hot water supply systems by means of the nonpolluting solar heat are investigated in many countries from the standpoint of effective use of the natural energy and such systems are practically employed in some cases.

The installing angle of heat absorber must be especially considered when the system is for cooling use.

In this investigation, the total amount of received beam radiation from the sun is computed when a reflector is attached to the main flat plate heat collector, and the results are shown for heating period, colling period and whole year separately, indicating the effectiveness of the reflector plate.

When the reflection coefficient is 0.7, and the area is half of the main heat collector, the reflector plate is able to increase the averaged daily amount of received radiation by approximately 13~16%.

## 1. ま え が き

1973年秋のオイルショック以来、省エネルギーおよびエネルギーの有効利用という見地から種々の新旧資源が見直されている。特に太陽エネルギーの利用は古くから石油資源や生物学的、光化学的利用をしてきたわけであるが、近年、太陽熱エネルギーによる暖冷房給湯、熱電子発電および太陽熱発電、太陽光エネルギーによる光電池、そして間接的利用法である風力、波力、潮力および海洋温度差発電などの低密度エネルギーのソフトウェアが研究されている。

太陽熱利用のシステムにおいて最も実用化に近いものはソーラ・ハウスであるが、これは太陽熱の利用形式によりつぎの2つに大別される。

1. パッシブソーラ・ハウス
2. アクティブソーラ・ハウス

パッシブソーラ・ハウスの場合は一般に暖房用のみを目的とし、特別な集熱器も設置せず大部分は垂直ガラス面からの日射を利用して、室内に設けた蓄熱材に蓄熱す

る方法である。

アクティブソーラ・ハウスの場合は、高温で集熱したエネルギーを蓄熱して利用するので、特に熱エネルギーの取入口である集熱器面における日射量がシステムを動作させるに十分でなければならない。しかし、集熱量を多くするためには集熱器の数を増す、集光形とする、あるいは太陽追尾方式とするなどが考えられるがこれらはコストが高くなる。

本稿では、最も普及していて経済的である平板形集熱器に反射板を取り付けた場合の集熱器面における直達日射総量を、暖房期間、冷房期間および年間の別に計算し、有効集熱のための集熱器設置角と反射板取付角を求め、反射板による効果を調べた。

## 記号表

- $I_0$ : 太陽定数  $\cdots 19.4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{min}$  ( $81.2 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{min}$ )  
 $A$ : 太陽方位 (南は  $0^\circ$ , 東が正)  
 $B$ : 太陽高度 (水平線に見上げる角度)  
 $p$ : 大気透過率  
 $\omega$ : 時角 (南中時は  $0^\circ$ , 午前が正,  $15^\circ$  が 1 時間)

- $\delta$ : 太陽の赤緯  
 $\varphi$ : 緯度 (北半球が正)  
 $\sigma$ : 集熱器設置角 (水平面となす角)  
 $\gamma$ : 集熱面方位 (南は  $0^\circ$ , 東が正)  
 $\alpha$ : 反射板取付角 (水平面となす角)  
 $\theta_c$ : 太陽光線と集熱器面法線とのなす角  
 $\theta_R$ : 太陽光線と反射板面法線とのなす角  
 $\theta_s$ : 反射光線と集熱器面法線とのなす角  
 $I_\omega$ : 毎分の直達日射量 [ $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ ]  
 $I_{day}$ : 1日の積算直達日射量 [ $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ]  
 $I_T$ : ある期間の平均直達日射総量 [ $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ]

## 2. 集熱器面直達日射総量の計算

地表面に到達する日射は、直達日射と天空で散乱した拡散日射の和であり、これらは太陽高度や大気条件 (大気透過率や雲量など) に左右される。集熱可能な日射は直達日射が大部分なので、ここでは直達日射量の計算を基本としている。

### 2.1 計算に用いたモデル

集熱器と反射板の標準的な仕様を下記のように設定した。設置モデルの概略図は Fig. 1 に示す。(a) と (b) は反射板の取付位置が異なる。集熱器モデルの大きさは  $2 \times 4 \text{ m}$ , 反射板は  $1 \times 4 \text{ m}$  と設定した。また、集熱器の設置角  $\sigma$  は  $0 \sim 90^\circ$  可変, 反射板の取付角  $\alpha$  は (a) では  $60 \sim 120^\circ$ , (b) では  $-30 \sim 65^\circ$ , 反射板の反射率は  $0.7$  として直達日射総量の計算を行い、反射板を付けない場合も同一プログラムで計算した。

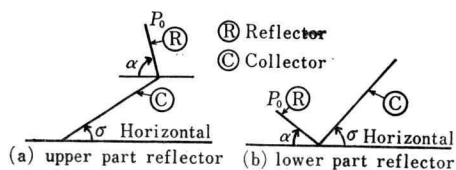


Fig. 1 Installing example for the flat plate heat collector and the reflector. (view from the east side)

### 2.2 暖冷房期間

わが国においては、大部分の地方で暖房は必要とするが、冷房設備は地域によって必要度が異なり、設備費も高いものとなる。アクティブソーラー・ハウスの場合でも暖房・給湯のみならず冷房にも太陽熱を用いるかどうかという選択の問題もあるので、計算方式としては瞬時値計算を1日分積算したのちに暖房期間、冷房期間および年間のそれぞれ1日平均値を計算した。計算対象とした場所の緯度とともに暖冷房期間とそのデグリー・デーを Table. 1 に示す。

### 2.3 直達日射量の計算

太陽光線のベクトルを  $S$ , 集熱器面の法線ベクトルを  $C$  とし、それぞれの方向余を  $S_x, S_y, S_z, C_x, C_y, C_z$  とすると、両ベクトルのなす角  $\theta_c$  は次式で求められる。

$$\cos \theta_c = \frac{S \cdot C}{|S||C|} = S_x C_x + S_y C_y + S_z C_z \quad (1)$$

ここで、 $S$  と  $C$  は太陽方位角  $A$ , 太陽高度  $B$  と集熱器の方位  $\gamma$ , 設置角  $\sigma$  によりつぎの関係がある。

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \cos A \cos B \\ S_y &= \sin A \cos B \\ S_z &= \sin B \\ C_x &= \sin \sigma \cos \gamma \\ C_y &= \sin \sigma \sin \gamma \\ C_z &= \cos \sigma \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、 $A, B$  は赤緯  $\delta$ , 緯度  $\varphi$  および時角  $\omega$  によってつぎのように表わされる。

$$\cos A = \frac{\sin B \sin \varphi - \sin \delta}{\cos B \cos \varphi} \quad (3)$$

$$\sin B = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (4)$$

集熱器面直達日射量は近似的に

$$I_\omega = I_0 p^{1/\sin B} \cos \theta_c \quad (5)$$

で表わされ、1日に受ける日射量  $I_{day}$  は

$$I_{day} = \int_{t_1}^{t_2} I_\omega dt \quad (6)$$

として求められる。 $t_1, t_2$  はそれぞれ日の出、日の入りの時刻であり、太陽時では  $t_1 = -t_2$  である。また、 $dt$  は

Table 1 Location, heating and cooling period which became the object of this calculation.

| Location  | Latitude | Heating period   | degree day | Cooling period | degree day |
|-----------|----------|--|------------|----------------|------------|
| Sapporo   | 43° 03'  | 10 <sup>M</sup> 24 <sup>D</sup> ~ 4 <sup>M</sup> 29 <sup>D</sup> | 2049°C     | M D ~ M D      | 0°C        |
| Tokyo     | 35 41    | 11 29 ~ 3 24   | 626        | 7 12 ~ 9 8     | 201        |
| Kagoshima | 31 34    | 12 22 ~ 2 21   | 180        | 6 25 ~ 9 16    | 346        |

微小時間である。

日の出時刻は (4) 式で  $\sin B=0$  とおいて

$$t_1 = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (7)$$

より求められる。太陽高度の低いときは日射量が小さいので、実際の計算では日の出 20 分後から南中時まで 4 分間隔で日射量を計算し 1 日分を算出した。

大気透過率は地域や季節により異なるが、ここでは理科年表 (1978 年版) の値を用いて計算した。有用な日射量の推定には直達日射量に日射率を乗ずる必要があるが、同一地域で短期間の場合には日照率の影響は少ない。

2.4 反射板付直達日射総量

反射板を取付けた場合の計算は、反射板による集熱器面上の影の面積と反射光の当る面積を求めれば良い。いま、Fig. 1 の集熱器と反射板の面方位  $\gamma=0$  とすると、集熱器面の方程式と反射板の方程式は

$$\sin \sigma \cdot x + \cos \sigma \cdot z = 0 \quad (8)$$

$$\sin \alpha \cdot x - \cos \alpha \cdot z = 0 \quad (9)$$

で表わされる。(1) 式より  $\theta_c$ ,  $\theta_R$  は

$$\cos \theta_c = \sin \sigma \cdot S_x + \cos \sigma \cdot S_z \quad (10)$$

$$\cos \theta_R = \sin \alpha \cdot S_x - \cos \alpha \cdot S_z \quad (11)$$

で、 $\cos \theta_c \geq 0$  の場合のみ集熱器面に太陽光が到達し、 $\cos \theta_R$  は Fig. 1 の (a), (b) により異なるが反射光を利用できる場合と集熱器面に影を生ずる場合とができる。

Fig. 1 の点  $P_0(x_0, y_0, z_0)$  を通る反射光線の式は、この方向余弦を  $S_{rx}$ ,  $S_{ry}$ ,  $S_{rz}$  とすると

$$\frac{x-x_0}{S_{rx}} = \frac{y-y_0}{S_{ry}} = \frac{z-z_0}{S_{rz}} \quad (12)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} S_{rx} &= -(\cos 2\alpha \cdot S_x + \sin 2\alpha \cdot S_z) \\ S_{ry} &= -S_y \\ S_{rz} &= -(\cos \alpha \cdot S_{rx} + \cos \alpha \cdot S_x \\ &\quad + \sin \alpha \cdot S_z) / \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$\sin \alpha=0$  の場合は次式を用いる。

$$S_{rz} = (\sin \alpha \cdot S_{rx} - \sin \alpha \cdot S_x + \cos \alpha \cdot S_z) / \cos \alpha = S_z$$

点  $P_0$  を通る反射光線と集熱器面との交点  $P_1(x_1, y_1, z_1)$  は、入射角を  $\theta_s$  とすると

$$\cos \theta_s = \sin \sigma \cdot S_{rx} + \cos \sigma \cdot S_{rz} \quad (14)$$

$$\rho_s = \frac{\sin \sigma \cdot x_0 + \cos \sigma \cdot z_0}{\cos \theta_s} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_0 - S_{rx} \rho_s \\ y_1 &= y_0 - S_{ry} \rho_s \\ z_1 &= z_0 - S_{rz} \rho_s \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

同様に、点  $P_0$  を通る太陽光線と集熱器面との交点  $P_2$

$(x_2, y_2, z_2)$  はつぎのように求まる。

$$\rho_c = \frac{\sin \sigma \cdot x_0 + \cos \sigma \cdot z_0}{\cos \theta_c} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= x_0 - S_x \rho_c \\ y_2 &= y_0 - S_y \rho_c \\ z_2 &= z_0 - S_z \rho_c \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

点  $P_1, P_2$  より反射光線の当たっている面積  $S_R$  と影の面積  $S_S$  を算出し、反射率を  $R_R$  とすると 1 日の直達日射総量は

$$I_{day} = \frac{I_0}{8} \int_{t_1}^{t_2} p^{1/\sin B} (8 \cos \theta_c + R_R S_R \cos \theta_s) dt \quad (19)$$

$$I_{day} = \frac{I_0}{8} \int_{t_1}^{t_2} p^{1/\sin B} (8 - S_S) \cos \theta_c dt \quad (20)$$

により計算できる。また、ある期間の平均直達日射総量  $I_T$  は単純に算術平均して求めた。

3. 計算結果と検討

3.1 水平面直達日射量

月別の水平面直達日射量を Fig. 2 に示す。7, 8 月の

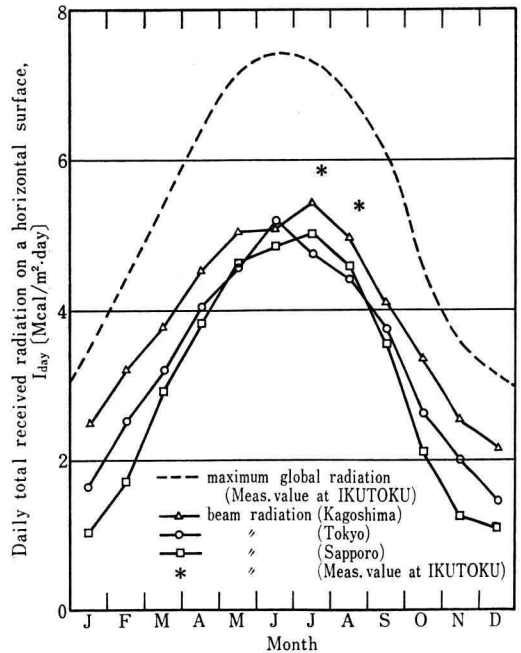


Fig. 2 Daily total received radiation on a horizontal surface

ように東京の日射量が札幌の値より小さいのは透過率によるものである。

図中の点線は幾徳工大（北緯 35°29′）において実測した全天日射量の最大値包絡線である。\*印は全天日射量からリング式拡散日射計により測定した値を差引いた直達日射量であり、7, 8 月に実測された値の最大のもを示す。東京と本学との緯度の差は 12′ と小さいので、図中の東京における直達日射量の計算値と実測値の差は、計算に用いた透過率が晴天日の平均値を基準としていることによるが、大気汚染によるものもあると思われる。

3.2 集熱器の傾きと方位による影響

Fig. 3 は反射板を取付けない状態で、集熱器を傾けたときの 1 日当りの期間平均直達日射量である。図より最大直達日射量となる集熱器設置角  $\sigma$  は、冷房期で 10~15°, 暖房期で約 50°, 年間では約 30° であり、緯度の影響はそれほどない。

アメリカにおける数多くの設置例を調べると、冷房に用いる所も少ないため北緯 35° 近辺では約 60% が  $\sigma = 45 \sim 60^\circ$  であり、20% が 27~36° である。北緯 39~45° においては  $\sigma = 45 \sim 60^\circ$  のものが 75% もあり、 $\sigma = 90^\circ$  (垂直な集熱器) のものも 14% ある。 $\sigma = 90^\circ$  のものは 70% が空気式であり、パッシブ形式のものが多い。

Fig. 3 は集熱器面方位が南 ( $\gamma = 0^\circ$ ) の場合であるが、 $\gamma$  による影響は東京の冷房期ではあまりない。しかし、暖房期では Table. 2 のように集熱器の傾き  $\sigma$  が大きく、方位  $\gamma$  が大きいほど日射量は減少する。

3.3 反射板付直達日射総量

Table. 3 は反射板を取付けた状態における各地、各期間の直達日射総量の最大値とその最大値をとる角度  $\sigma - \alpha$  を示す。年間平均値をみても札幌ではタイプ (b) の方が日射量が少し多いが他は大差ない。短期間の場合は鹿児島暖房期を除いてすべてタイプ (a) の方が日射量が多いが約 1.5% 以下の差である。

反射板の反射率は標準を 0.7 として計算したが、みが

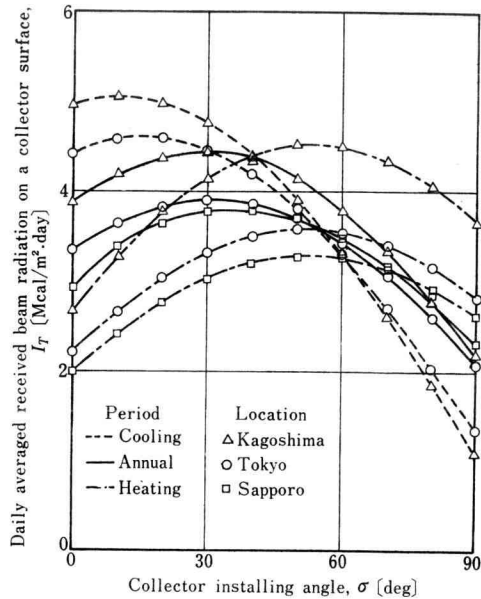


Fig. 3 Daily averaged received beam radiation on a collector surface

きアルミ板に耐候性のある透明アクリル樹脂を塗布したものは約 0.8 であるので、汚損や劣化などを考慮して 0.7 とした。安価な反射板としてはステンレス板がよいがこの反射率は約 0.5 であるので、Table. 3 には東京の欄に 0.5 のときの値を併記した。反射板の取付角が適当であれば反射板を付けない場合に比べて、短期間の日射総量は反射率 0.5 で 11.3%, 0.7 では 15.9% 増加する。年間の場合は角度一定のために短期に比べて効果は減少し、反射率 0.5 で 9%, 0.7 で 12.7% の増加となる。

Fig. 4 の (a), (b) は反射板の取付状態を Fig. 1 の (a), (b) に対応させたときの各期間別の直達日射総量  $I_T$  を、横軸に  $\sigma$ 、縦軸に  $\alpha$  をとって図示したものである。この図よりたとえば年間平均の直達日射総量が 4200 kcal/m<sup>2</sup>·day 以上得られる  $\sigma$  と  $\alpha$  の組合せであるとか、

Table 2 Percentage of decrease of the received beam radiation due to the azimuth the angle of the collector surface.

| $\sigma$ [deg] \ $\gamma$ [deg] | 15   | 30   | 45   | 60   | 75   | 90   |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 10                              | 99.6 | 99.3 | 99.1 | 98.9 | 98.7 | 98.5 |
| 20                              | 98.2 | 97.1 | 96.3 | 95.6 | 94.8 | 94.0 |
| 30                              | 96.1 | 93.6 | 91.8 | 90.2 | 88.6 | 86.6 |

Table 3 Maximum value of the averaged daily received beam radiation and the angle of  $\sigma$  and  $\alpha$  for some location.(upper value: Maximum value [kcal/m<sup>2</sup> day]  
lower value:  $\sigma$ - $\alpha$  [deg])

(a) with upper part reflector

| Location<br>Ref.<br>Coefficient    | Tokyo              |                   | Sapporo           | Kagoshima         |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                    | 0.5                | 0.7               | 0.7               | 0.7               |
| Period                             |                    |                   |                   |                   |
| Cooling<br>( $\sigma$ - $\alpha$ ) | 5111<br>10.9-106.3 | 5316<br>9.8-107.3 | —                 | 5788<br>4.3-111.5 |
| Annual<br>( $\sigma$ - $\alpha$ )  | 4212<br>25.9-84.5  | 4351<br>24.0-85.0 | 4219<br>29.5-79.2 | 4917<br>21.5-87.7 |
| Heating<br>( $\sigma$ - $\alpha$ ) | 3971<br>47.2-70.5  | 4135<br>45.4-71.3 | 3757<br>46.0-68.3 | 5237<br>48.0-71.7 |

(b) with lower part reflector

| Location<br>Ref.<br>Coefficient    | Tokyo             |                   | Sapporo           | Kagoshima         |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                    | 0.5               | 0.7               | 0.7               | 0.7               |
| Period                             |                   |                   |                   |                   |
| Cooling<br>( $\sigma$ - $\alpha$ ) | 5068<br>20.0-39.0 | 5236<br>21.8-38.5 | —                 | 5748<br>16.2-44.2 |
| Annual<br>( $\sigma$ - $\alpha$ )  | 4218<br>36.7-30.1 | 4355<br>38.0-29.8 | 4234<br>43.8-23.4 | 4915<br>35.5-32.8 |
| Heating<br>( $\sigma$ - $\alpha$ ) | 3946<br>56.5- 6.9 | 4101<br>58.5- 6.2 | 3702<br>59.5- 7.3 | 5265<br>60.0- 1.5 |

そのときの暖房期や冷房期の日射総量の値が推定できる。

タイプ (a) では風による影響や後方集熱器への影のために反射板を大きくできないが、タイプ (b) では設置場所にもよるが反射板を大きくすることは可能である。いま反射板の大きさを集熱器の大きさと等しくすると、年平均で反射板のない場合に比べて 18.2% 増加する。集熱器の半分の大きさの反射板による反射量と比較すると、この反射板による反射量は約 43% 増加する。このとき集熱器の設置角は少し大きくする必要がある。

また可動式 (フラップタイプ) 反射板として 1 ヶ月に 1 度反射板の角度を調整すると、角度固定に比べて日射総量を 5~15% 増加することもできる。

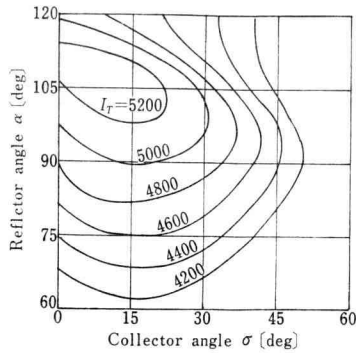
タイプ (b) で東京における最大値をとる角度 ( $\sigma$ - $\alpha$ ) の組合せは、Table 3 より冷房期で ( $20^\circ$ - $40^\circ$ )、年間で ( $40^\circ$ - $30^\circ$ )、暖房期では ( $60^\circ$ - $5^\circ$ ) であるので、年間を通じてこれらの角度に設置したときの月別の日射量を

Fig. 5 に示す。細線は  $\sigma=20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$  で反射板をつけないときの値を示す。冷房期用の設置角では反射板の角度が大きいため暖房期には影を生じ、反射板のない場合に比べて 13% も減少する。しかし夏には約 15% 増加する。年間でもっとも効果的な  $\sigma=40^\circ, \alpha=30^\circ$  では冬の減少も少なく、夏には平均 20% アップし、冬用の設置では夏の減少はなく 2 月には 18%、冬期平均では 16% の効果がある。

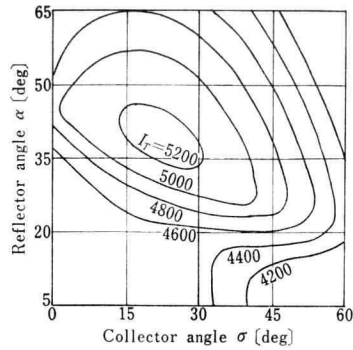
#### 4. む す び

集熱器面積の半分の大きさの反射板を取付けることにより、直達日射量は 10 数 % 増加するので、設置場所が広く、負荷が割小さい場合は安価な反射板を用いて十分集熱の効果を上げることができる。また建築物の設計時点において集熱器と反射板を組合せた屋根構造を検討することは有益である。

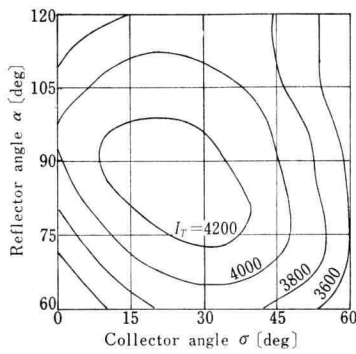
各地、各時期の直達日射総量の値は、計算の基本量で



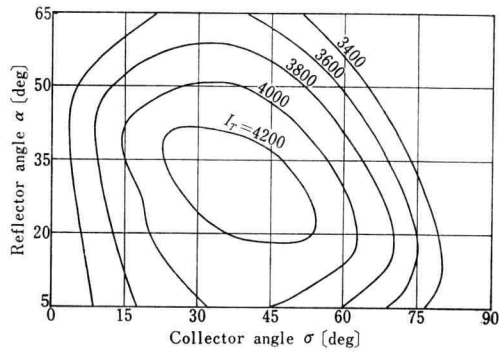
(a)-1 (Cooling period)



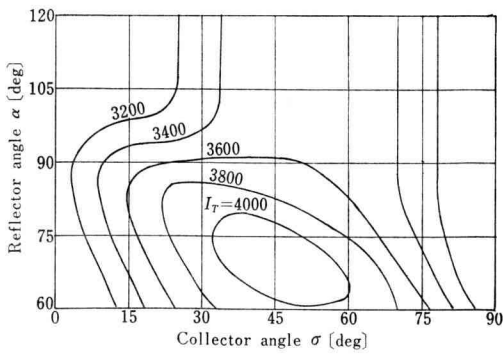
(b)-1 (Cooling period)



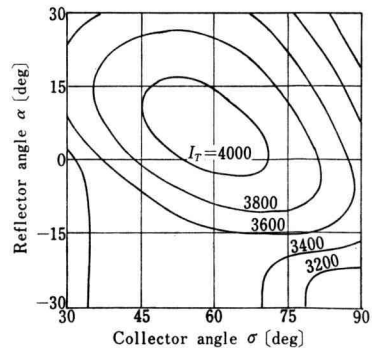
(a)-2 (Annual)



(b)-2 (Annual)



(a)-3 (Heating period)



(b)-3 (Heating period)

(a) with upper part reflector

(b) with lower part reflector

Fig. 4 The average daily amount of received beam radiation due to the installing angle  $\sigma$  and  $\alpha$ . unit:  $I_T$  [kcal/m<sup>2</sup> day] Location: Tokyo Reflector coefficient: 0.7

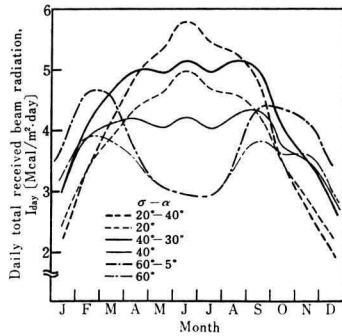


Fig. 5 Daily total received beam radiation due to the installing angle  $\sigma$  and  $\alpha$ . Thin lines show the value in case of no reflector

ある透過率と、ここではふれなかった日照率に大いに関係があるので、効果は百分率で表わした。日照率の影響は、冷房期には負荷と日射量が比例的であるのであまりない。しかし、暖房期には反比例的であるので日射量と同時にシステム機器の性能や容量が大きな課題となる。

最後に、本研究に有益な助言をいただいた本学機械工学科小口幸成助教授に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 東京天文台：理科年表，丸善