

牛床暖房ソーラーシステムの集熱能力について

三浦健志・奥島史朗^{a)}

(農業水利学研究室)

緒 言

オイルショックを期に、石油節約のための代替エネルギーの一つとして太陽エネルギーが注目をあびている。そのなかにおいて、昭和53年に完成した岡山大学農学部附属農場津高牧場の繁殖と肥育の両牛舎には床暖房に我が国ではじめてソーラーシステムが導入された。津高牧場の位置する岡山県南部の瀬戸内地方は、全国的にみても太陽に恵まれ雨量も少なくソーラーシステムには好条件の地域である。

本報告は、床暖房が行われる晩秋の11月から3月にかけて、日射量の実測とシステムの稼働状況を調べ、集熱量の概算を行い、本ソーラーシステムの集熱能力を検討したものである。

材 料 と 方 法

1. システムの概要

太陽エネルギーの特徴は次の3点にまとめられる。1.稀薄である。2.時間的・場所的に不定である。3.変換の難しい放射エネルギーである。このため太陽エネルギーを利用するには、広い表面積をもった集熱器(コレクター)と集熱と利用の時間的ずれに備えて貯熱ソウが必要となる。

システムの概要と熱の流れはおおよそ次のとおりである(Fig.1)。牛舎の南側の屋根根に設置したコレクターにより太陽放射をとらえ熱エネルギーに変換する。コレクター内の温水をポンプ(P₁)により地下の貯熱ソウに送水して貯熱する。床暖房が必要なときはポンプ(P₂)により貯熱ソウ内の温水を牛床に埋設されたパイプに通水し放熱させる。ポンプP₁はコレクター内の水温が地下の貯

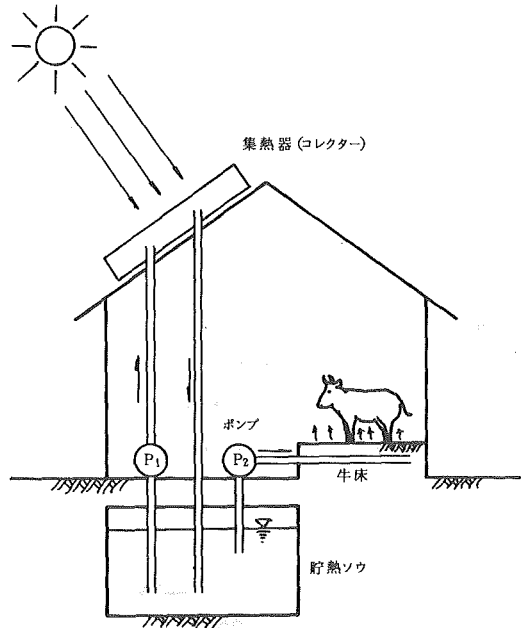


Fig.1 牛床暖房ソーラーシステムの概要

熱ソウの水温より2℃以上高くなると作動し、2℃以下になると停止する。ポンプP₂は牛床温度が暖房設定温度(例えば15℃)より低下すると作動する。なお、これらは自動制御されている。

コレクターは、有効集熱面積1.91㎡の集熱板が約200×100×9.5cmの外箱に組み込まれ、放熱防止のための透明板でおおわれた構造となっている。集熱板の表面は、太陽放射の波長域(0.3~3.0μ)においては吸収率が1に近く、熱放射の波長域(3.0μ以上)では放射率が0に近い特性をもつような面(選択吸収面)となっている。その値は太陽光線吸収率0.91~0.94,放射率0.09~0.12,上部の透

a) 附属農場

明板には厚さ3mm, 太陽光線垂直透過率0.876の強化ガラスが用いられている。

このようなコレクターが繁殖牛舎に25枚, 肥育牛舎に18枚設置されている。地下の貯熱ソウの有効貯水量は繁殖, 肥育各々8m³, 9m³である。暖房が行われている牛床面積は繁殖牛舎76m²(全体412.8m²), 肥育牛舎54m²(全体240m²)である。牛床中の放熱用パイプはコンクリートの牛床面より5cm深さのところと20cm間隔で埋設されている。集熱用ポンプP₁には出力0.25kw(3500rpm)揚程10mのときの揚水量0.06m³/minのものが各牛舎に各1台, 牛床暖房用ポンプP₂には出力0.15kw(3420rpm)揚程10mのときの揚水量0.02m³/minのものが各牛舎に各2台使用されている。

2. 測定項目と測定方法

測定したものは, 日射量, 戸外気温, 牛舎内気温, 貯熱ソウ水温, 貯熱用ポンプP₁の稼働時間である。このうち日射量は牛舎北側

のサイロの上に設置した全天日射計(英弘精機)により, 繁殖牛舎のポンプP₁稼働時間は電流のON, OFFのデータとして日射計と同じ記録紙上に, 戸外気温は百葉箱内のバイメタル温度計により長期自記記録した。また, 昭和56年3月中旬には肥育牛舎において, 牛床上約20cm高さの気温をバイメタル自記温度計により, 貯熱ソウからコレクターへ送水される水の温度を貯熱ソウの水温として送水管に付設されている棒状温度計により9:00~17:00の間15分毎に測定した。

結 果

1. 晴天日の日射量・戸外気温・牛舎内気温・貯熱ソウ水温の日変化

昭和56年3月17・18日の戸外気温・牛舎内気温・貯熱ソウ水温の日変化を水平面日射強度の日変化とともにFig.2に示す。なお, 両日の床暖房の設定温度は20℃であった。

戸外の気温は, 日の出とともに急激に上昇

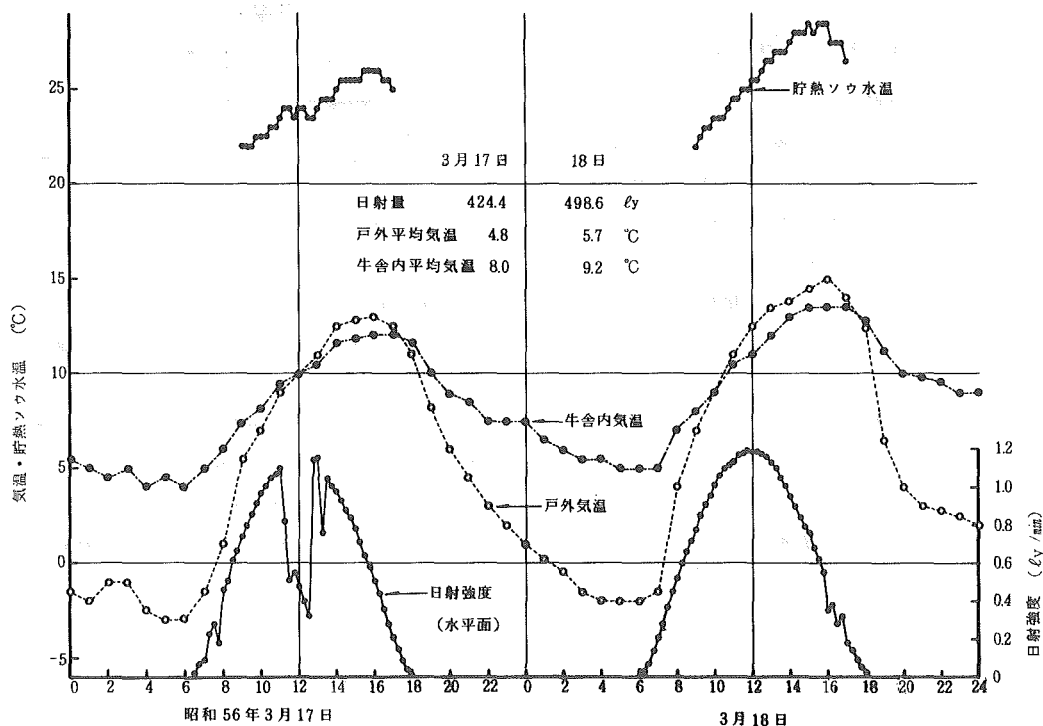


Fig.2 日射強度・戸外気温・牛舎内気温・貯熱ソウ水温の日変化

し、日射が弱くなる15~16時ごろ最高となり、さらに日没とともに急激に低下し日の出直前の5~6時ごろ最低となるような日変化をしている。牛舎内の気温は4~6時に最低、15~17時ごろに最高となった。戸外の気温は、3月17日：-3~13℃、日較差16℃、平均4.8℃、3月18日：-2~15℃、日較差17℃、平均5.7℃、牛舎内の気温は、3月17日：4~12℃、日較差8℃、平均8.0℃、3月18日：5~13.5℃、日較差8.5℃、平均9.2℃となった。このように日較差は戸外では大きく牛舎内のちょうど2倍になっている。戸外の気温が牛舎内を上まわるのは昼間の短時間だけであり、それもわずかである(1℃差)。最低気温は戸外が牛舎内をかなり下まわる(7℃差)。平均気温にすると3月17日3.2℃差、18日3.5℃差と牛舎内が高くなっている。このうち床暖房が寄与している割合はどの程度か手持ちのデータからは判定できないが、ともかく一日の大半は牛舎内の気温が戸外より高くなっていることがわかる。

貯熱ソウ水温は、3月17日9:30の22℃から15:30の26℃まで4℃上昇、3月18日9:00の22℃から15:00の28.5℃まで6.5℃上昇している。有効貯水量9m³をかけると、同時間に、3月17日36,000kcal、3月18日58,500kcal貯熱されたことになる。同時間にコレクターが受けた日射量は、考察のところで詳述するが、3月には水平面積日射量にはほぼ等しいと考えられ、その値は3月17日： $304.7ly^a) \times 1.91m^2 \times 18枚 \approx 105,000kcal$ 、3月18日： $373.2ly \times 1.91m^2 \times 18枚 \approx 128,000kcal$ となる。同時間にコレクターが受けた日射量のうちどれだけが貯熱されたかを概算すると3月17日34%、18日46%という数値をえる。しかし、その間も床暖房に熱が消費されており、消費がない場合はこの割合はもう少し大きくなるであろう。牛床温度は水温の測定を行った9:00~17:00の間は20℃に保たれていた。18日の貯熱ソウの水温の最低温度を水温の日変化、ポンプの

運転状況から推定すると18~20℃程度になる。このことから判断すると、牛床温度の方もある程度適温の範囲に維持できていたものと考えられる。昭和57年度の冬期には床暖房の温度を15℃に設定されていたが、厳冬期の日照条件が悪いときには床温を12℃程度にしか維持できなかったことが確認されている。しかし、牛床温度の12℃という値は十分とはいえないまでも過酷な条件ではない。という意味において、本ソーラーシステムの床暖房能力は十分にあると考えてよいであろう。

2. 日射量と日照時間と貯熱用ポンプ稼働時間との関係

昭和57年11月から58年3月までの日別の日射量・日照時間、貯熱用ポンプ稼働時間の値を整理するとTable 1のようになる。日照時間は岡山地方気象台での値である。この期間は日照時間等から判断すると、11月は他の月に比べて日照が少なく、逆に2月は晴天の日が多いことがわかる。

Table 1の*印はポンプの作動状態に疑問があるので除き、日照時間nとポンプ稼働時間Tとの関係を求めるとFig.3のようになる。

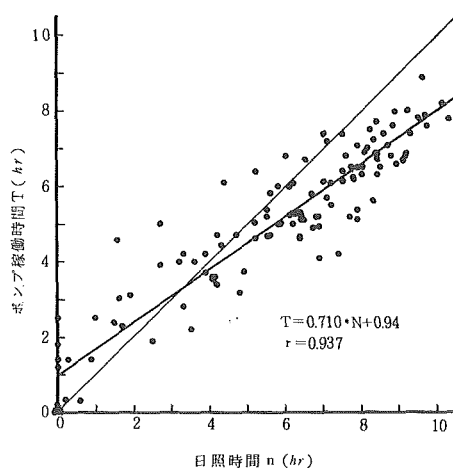


Fig. 3 日照時間と貯熱用ポンプ稼働時間との関係

a) $1y = cal / cm^2$: ラングリー

Table 1 昭和57年11月～58年3月の日射量R, 日照時間n, 貯熱用ポンプ稼働時間T

日付	昭和57年11月			12月			昭和58年1月			12月			3月		
	R	n	T	R	n	T	R	n	T	R	n	T	R	n	T
1	1584	2.7	5.0	2019	6.4	5.3	1921	5.2	5.0	2459	5.9	5.0	1345	0.3	1.4
2	3105	9.1	6.7	2117	7.6	6.8	1870	4.7	4.7	486	0.0	0.0	1372	0.0	2.5
3	3550	9.2	6.9	2446	8.1	6.9	1909	4.3	4.4	3069	6.4	5.1	2450	1.9	3.1
4	2314	4.1	3.6	2606	7.9	9.2*	2678	8.3	7.2	2661	6.8	5.2	296.0	4.1	4.7
5	50.5	0.0	0.0	36.0	0.0	0.0	71.1	0.2	0.3	2886	6.2	6.1	2934	6.7	4.9
6	2499	5.5	5.2	1928	6.2	9.4*	1354	3.3	2.8	2391	7.7	5.2	3343	6.8	5.2
7	625	0.0	0.0	2319	6.3	8.7*	1646	3.9	3.7	330.3	9.2	6.8	399.1	8.4	8.9*
8	2385	6.4	4.6	2367	7.4	9.0*	92.6	0.5	4.4*	307.9	7.2	5.5	392.1	6.5	6.7
9	1343	2.5	1.9	2489	8.0	9.0*	225.1	6.9	8.1*	310.2	7.8	6.2	4368	8.8	7.6
10	405	0.0	0.0	2489	7.9	9.4*	224.1	8.0	7.8*	2398	6.8	4.1	1268	0.0	1.2
11	2722	7.1	5.7	1386	2.6	8.1*	257.1	8.0	6.3	2868	5.5	5.4	400.9	9.7	7.6
12	823	0.0	0.2	1572	7.3	8.2*	2134	6.4	5.2	353.9	7.9	7.1	2442	3.3	4.2
13	2425	6.7	5.8	2523	7.8	9.2*	188.7	5.2	4.6	3098	7.5	6.4	2033	1.0	2.5
14	2913	8.2	7.0	2007	5.8	6.0	278.9	8.4	6.7	357.4	9.3	7.4	325.6	8.3	5.6
15	474	0.0	0.0	2607	8.6	9.3*	150.2	2.7	3.9	328.3	7.5	7.4	451.1	10.3	7.8
16	1143	0.0	1.4	1874	5.2	6.4	230.9	7.5	9.2*	297.1	7.2	6.1	68.1	0.0	0.0
17	2202	4.1	4.5	1249	1.7	2.3	161.0	2.9	8.0*	76.6	0.0	0.1	349.1	5.5	4.7
18	2895	8.7	7.1	2137	7.0	6.1	112.2	1.6	2.5	213.6	7.4	4.2	341.1	5.8	5.0
19	1907	4.1	3.6	2673	8.4	7.7	165.4	4.9	3.7	318.4	8.4	6.9	478.9	9.6	8.9
20	2219	7.9	5.4	1947	6.5	5.1	296.5	8.8	6.8	349.2	7.0	7.4	453.9	8.2	7.5
21	2365	6.2	5.3	1708	5.2	4.9	255.4	6.9	4.9	312.9	7.1	7.2	129.5	0.9	1.4
22	1283	1.5	2.4	624	0.0	2.8*	282.2	7.9	5.1	359.1	9.5	7.8	489.5	10.1	8.2
23	1848	3.2	4.0	2001	4.6	8.2*	278.8	7.5	6.1	253.7	4.4	6.0	48.3	0.0	0.0
24	2220	6.4	4.7	2219	7.5	9.1*	261.8	6.1	5.2	214.4	1.6	4.6	159.9	0.0	1.8
25	1941	6.3	5.3	2096	5.6	5.8	278.0	8.5	6.5	298.4	6.0	6.8	434.5	7.7	6.5
26	2111	6.1	6.0	629	0.6	0.3	281.2	8.4	6.3	—	—	—	268.6	3.6	4.0
27	1866	3.9	4.2	1356	4.8	3.2	237.7	7.8	6.2	—	—	—	447.2	8.9	6.6
28	2833	8.9	8.0	2566	8.6	7.4	272.5	8.4	6.8	418.2	9.7	7.9	392.1	7.2	9.1*
29	242	0.0	0.0	2358	7.9	6.5	277.5	8.0	6.5	—	—	—	142.0	0.4	6.5*
30	—	—	—	1954	5.6	4.7	137.4	3.5	2.2	—	—	—	162.3	0.1	8.4*
31	—	—	—	146.0	4.2	3.4	322.6	9.2	8.0	—	—	—	166.2	0.5	6.0*
計	54743	1288	1145	60186	181.3	198.4	6690.1	183.9	169.1	7331.2	170.0	147.9	8951.8	144.6	158.5
平均	1888	4.4	3.9	1941	5.8	6.4	2158	5.9	5.5	282.0	6.5	5.7	288.8	4.7	5.1

(単位 R: ly, n:T:hr)

* ポンプが正常に作動していないと推定されるもの

直線近似すると(1)式のように比較的高い相関があることがわかる。

$$T = 0.710 \cdot n + 0.94 \dots\dots\dots(1)$$

$$r = 0.937$$

ポンプは、前述のとおり、コレクター内の水温が貯熱ソウの水温より2℃以上高いときに作動する。それゆえ、稼働時間は日射の大小とともに貯熱ソウの水温にも影響を受ける。すなわち、日射の弱い日は貯熱ソウの水温も低く、弱い日射でもポンプは作動する。逆に日射が強い日は貯熱ソウの水温も上昇し、弱い日射ではポンプは作動しない。このことから日照時間の増分より稼働時間の増分が小さく(勾配が1より小さく)なると考えられる。

つぎに、日射量と日照時間の関係を調べる。日射量をR、大気圏外日射量^{a)}をR₀、日照時間をn、可照時間^{b)}をNとするとR/R₀とn/Nとの間には直線関係があり全データより回帰式を求めると(2)式をえる。

$$R = R_0 \cdot (0.173 + 0.545 \cdot n/N) \dots\dots(2)$$

$$r = 0.948$$

この式の係数は一般によく用いられているPenmanがイギリスで求めた関係式

$$R = R_0 \cdot (0.18 + 0.55 \cdot n/N)$$

と非常に近い値である。

考 察

1. コレクター(斜面)の受ける日射量

地表面に到達する太陽放射は直達放射と散乱放射とからなっている。直達放射は一方向から入射するのに対し、散乱放射は全天すべての方向から入射する。そのため斜面の受ける直達放射強度は斜面と太陽との位置関係で決まるが、散乱放射は斜面によらないと考えられる。それゆえ、実測された水平面日射量を斜面の受ける日射量に換算するには直達放射と散乱放射に分離して考える必要がある。

緯度φの地点で方位角α(北が0°)傾斜角kの斜面が赤緯δの日の時刻t(t:時角, 12時が0°, 午後が正)に受ける日射強度R(t)は(3)式で表される¹⁾。

$$R(t) = I_{do}(t) \left\{ \sqrt{1 - (\sin k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi + \cos k \cdot \sin \varphi)^2} \cdot \cos \delta \cdot \cos(t + \theta) + (\sin k \cdot \cos \alpha \cdot \cos \varphi + \cos k \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \delta \right\} + I_s(t) \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sin k \cdot \sin \alpha}{\cos k \cdot \cos \varphi - \sin k \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、I_{do}(t)、I_s(t)は時刻tにおける太陽放射に垂直な面の受ける直達放射強度および水平面散乱放射強度である。

コレクターは牛舎の南向き屋根(α=180°)に傾斜角度k=60°で設置されている。(3)(4)式において、sinα=0、cosα=-1とおくと加法定理により、

$$R(t) = I_{do}(t) \left\{ \sqrt{1 - \sin^2(\varphi - k)} \cdot \cos \delta \cdot \cos t + \sin(\varphi - k) \cdot \sin \delta \right\} + I_s(t) \dots\dots\dots(5)$$

津高牧場の緯度φ=34.75°N、k=60°を代入すると、

$$R(t) = I_{do}(t) (0.904 \cdot \cos \delta \cdot \cos t - 0.427 \sin \delta) + I_s(t) \dots\dots\dots(6)$$

(6)式が本システムのコレクターが受ける日射強度を表す式である。

(5)式において、k=0°とおくと水平面の受ける日射強度を表す式になる。

$$R(t) = I_{do}(t) \{ \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \} + I_s(t) \dots\dots\dots(7)$$

直達放射強度I_{do}(t)と散乱放射強度I_s(t)の日変化がわかり、(3)、(6)、(7)式を日出没時刻間で積分すれば、それぞれ任意斜面、コレクター面、水平面の受ける1日間の日射量を正確に計算することができる。

ここで、水平面とコレクター面の受ける日射の大小を比較するため、I_{do}(t)=1.0 ly/min、I_s(t)=0.0 ly/min(散乱放射なし)とおき、水平面・コレクター面別、季節別に日射の日変化を計算するとFig.4をえる。12時の水平面日射強度は、夏至、春秋分、冬至で0.98、0.82、0.53 ly/minと夏至は冬至の2

a) 大気がないとしたときの日射量

b) 水平面での日出没時刻間の時間

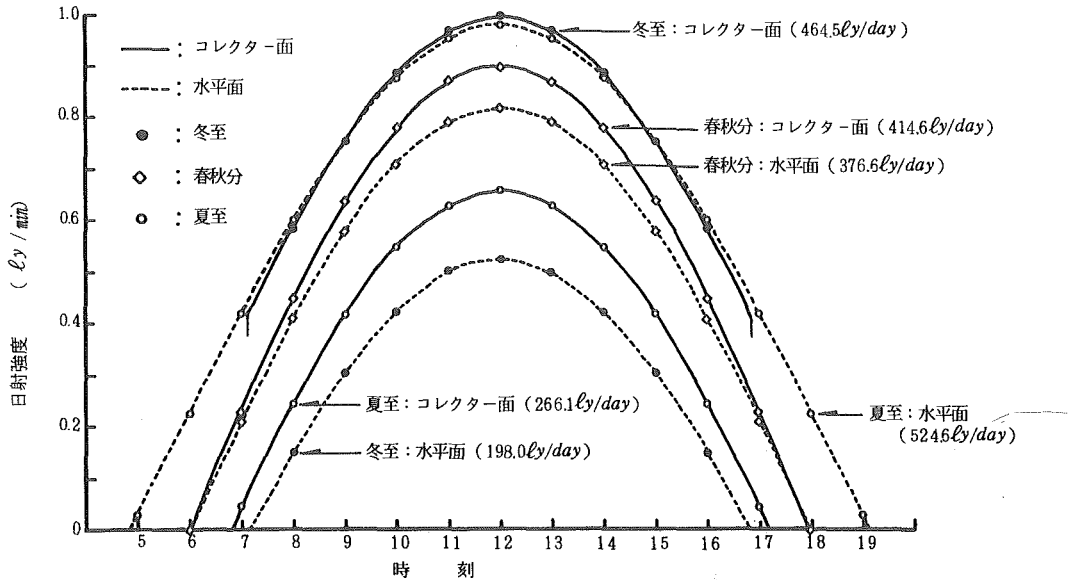


Fig. 4 季節の水平面・コレクター面 ($k=60^\circ$) の受ける日射強度の日変化
 $(I_{do}(t)=1.0 \text{ ly/min}, I_s(t)=0.0 \text{ ly/min})$

倍弱となっているが、傾斜角 60° のコレクター面では、夏至、春秋分、冬至で 0.66, 0.90, 1.00 と逆に冬至が最も大きく夏至の 1.5 倍にもなっている。これは、コレクター面は 12 時において、冬至ではほぼ垂直に日射を受けるのに対し、夏至では入射角が 48.7° となるためによる。1 日間の日射量を比較すると、水平面では、夏至、春秋分、冬至で 524.6, 376.6, 198.0 ly/day となる。これに対してコレクター面では、266.1, 414.6, 464.5 ly/day と冬の方が逆に多くの日射量を受けることがわかる。見方を変えれば、暖房が最も必要な冬期に多くの日射量を受けられるようにコレクター面に傾斜をもたせてある訳である。

2. 集熱量の概算

コレクターで受けた日射量のうち何割が熱エネルギーに変換されるかは集熱効率で表される。集熱率は、コレクターの受ける日射量、集熱板の太陽光線吸収率、放射率、おおいのガラスの太陽光線の透過率、さらにコレクター内の水温と外気温の温度差により左右

され、晴天の日でおおよそ 0.3~0.7 の値を示す²⁾。すなわち、コレクターの受けた日射量の 3 割から 7 割が集められることになる。さらに、貯熱ソウへの輸送中のロス、貯熱ソウからのロス、貯熱ソウから牛床への送水途中でのロスがさしひかれ、残りの熱量が牛床暖房に使われる。本来システムの能力を判定するには、コレクターの受けた日射量のうち何割が牛床暖房に使われるかを明らかにしなければならないと考えるが、測定上の種々の制約から、ここでは地下の貯熱ソウの水温上昇に寄与した熱量を集熱量と考え、本ソーラーシステムの集熱能力の検討を行うことにする。

昭和 57 年 11 月から 58 年 3 月の間の水平面日射量の合計は 34,466 ly 、欠測の日を考慮に入れると約 35,000 ly である。傾斜角度 60° のコレクター面の受ける直達日射量の水平面のそれに対する比は、Fig.4 より、春分で $414.6/376.6 \approx 1.10$ であるのに対し、冬至では $464.5/198.0 \approx 2.35$ とコレクター面の方がかなり多くの日射量を受ける。

日射量のうち散乱放射の占める割合^{a)}を50%と仮定すると、コレクター面は冬至で水平面の1.67倍、春分で1.05倍の日射量を受けることになる。この値を参考にして、各月の倍率を次のように定める。

Table 2 月別の比：コレクターの
受ける日射量 / 水平面日射量

月	11	12	1	2	3
比	1.4	1.6	1.4	1.2	1.0

Table 1 の各月の日射量にこの比をかけたし合せると、昭和57年11月から58年3月の間にコレクターが受ける日射量が約45,000 *ly*、水平面の約1.3倍という値をえる。コレクターは両牛舎合せて43枚あり全体で、

$45,000 \text{ ly} \times 191 \text{ m}^2 \times 43 \text{ 枚} \approx 37,000,000 \text{ kcal}$
の日射量を受けたことになる。このうち貯熱ソウに集熱される割合を、昭和56年3月17・18日に求めた値を参照して40%とすると、 $37,000,000 \text{ kcal} \times 0.4 = 14,800,000 \text{ kcal}$ が貯熱ソウに集熱された計算になる。この熱量を、発熱量 $10,000 \text{ kcal/kg}$ 、密度 0.88 kg/l の重油に熱効率0.95として換算すると、

$$14,800,000 \text{ kcal} \div 10,000 \text{ kcal/kg} \\ \div 0.88 \text{ kg/l} \div 0.95 \approx 1,770 \text{ l}$$

ドラムかんにして9本弱ということになる。また、 $1 \text{ kwh} = 860 \text{ kcal}$ 、熱効率1.00として電力量に換算すると、

$$14,800,000 \text{ kcal} \div 860 \text{ kwh / kcal} \\ \approx 17,200 \text{ kwh}$$

となる。

この値を多いとみるか少ないとみるかは評価がわかれるところであるが、エネルギーの節約量としてとらえるにはその前に関与する種々の因子の検討が必要とならう。なお、ここで求

めた熱量は観測期間の5ヶ月間において昼間に貯熱ソウに集熱されたと考えられる熱量であり、この値イコール節約量とならないことをことわっておかねばならない。

結 言

本研究は、ソーラーシステムの集熱能力を検討するため、長期にわたる日射量の測定と、貯熱ソウの水溫、牛舎内外気溫等の集中観測から貯熱ソウへの集熱量の概算を行った。その結果、昭和57年11月から58年3月の5ヶ月間に貯熱ソウへの集熱量は両牛舎合せて14,800,000 *kcal* という値を得た。この熱量は重油に換算して1,770 *l* (ドラムかん9本弱)、電力量に換算すると17,200 *kwh* というものである。

今後の課題として、ソーラーシステムの暖房能力、エネルギー節約量、経済性等の検討が残されているが、これらはシステムの温度・放射状況・熱収支等を詳細に観測し、熱の流れを定量化することにより解決されるであろうと考える。

謝 辞

観測に際して、津高牧場井上良教授、岸田芳朗助手には種々の便宜供与をうけた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 三浦健志他：傾斜地の日射量分布計算法—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究(I)—、農土論集88, 1-7 (1980)
- 2) 矢崎総業株式会社：太陽集熱器ブルーパネル技術資料, 9-11

a) この割合は晴天日の約20%から完全曇天日の100%まで変化する。