

温室暖房用無塩型ソーラーポンドの性能

PERFORMANCE OF NONSALT SOLAR POND FOR HEATING A GREENHOUSE

多賀正夫^{*1}

Masao TAGA

松岡淑夫^{*2}

Yoshio MATSUOKA

越智敏明^{*3}

Toshiaki OCHI

Abstract

A new type of nonsalt solar pond was investigated by field test. The roof of the solar pond was composed of transparent double films. In the first test, insulating pellets were packed between the layers of the transparent double films of the roof at sunset. In the second test, the water surfaces of the pond was insulated by two transparent films instead of the insulation by the filling of pellets. The warm water stored in the solar pond was utilized as a heat source for a gas engine heat pump used to heat a greenhouse. And, the best structure and the possible energy extraction were discussed by the theoretical analysis which was carried out on the simulation model of this solar pond under the same climate condition to the field test. These tests and analysis showed the availability of this solar pond system used to heat a greenhouse.

Key words: Solar energy, Solar pond, Heat storage, Nonsalt solar pond

1. 緒言

ソーラーポンドは、太陽エネルギーを大量の温水として長期間にわたって蓄える、低コストで簡単な方法として期待されている。通常は、ポンドの蓄熱層上部に形成した塩水濃度勾配層の断熱効果で蓄熱する塩水型ポンドであるが、これは塩水濃度勾配維持の厄介なことと、漏水時の塩害に問題があるため、最近、種々の無塩型ソーラーポンドが研究されている。その型式についてはT.S. Jayadeb⁽¹⁾、一色ら⁽²⁾、によって紹介されているが、これらを大別すると(1)表面断熱層として透明な粘性液体およびこれに分割透明膜を併用した非対流型^{(3)・(4)}、(2)ポンド上部を透明断熱材でカバーするか、これに夜間のみ断熱ペレットを搬入するカバー方式⁽⁵⁾、(3)ポンド水面を黒色光吸収面としてポンド水の滴下、噴射等によって集熱する表面集熱式⁽⁶⁾、(4)厚さの薄い透明袋を広い面積に敷設するシャローソーラーポンド⁽⁷⁾等の各種型式のものがある。

本報告では(2)のカバー方式ソーラーポンドの一種としてポンド上部に透明二重膜の屋根を設け、その二

重膜間に夜間のみ断熱用の発泡スチロールペレットを搬入することによって放熱を防ぎ、日照時の太陽エネルギーを蓄熱するペレットルーフ型とポンド水面に透明断熱膜を敷設して放熱を防ぐ水面カバー方式について述べる。

ソーラーポンドで得られる蓄熱水温度は、最高でも80°C程度であるから、これを発電用等の高温熱源として利用するのは適当ではなく、むしろ農業用の温室暖房のような低温熱源として利用すべきである。また、本研究で述べる無塩型の水面カバー方式のソーラーポンドは塩水濃度勾配型と異なり、季節的な長期蓄熱には適せず、本来、短期蓄熱用である。この見地に立って、本研究のソーラーポンドは隣接するマンゴウ用温室の暖房に利用することを目的とした。マンゴウは熱帯性植物であるが、その根は地下1~2mに伸びる深根性であるので、本システムではソーラーポンドで得られた温水を温室地下の熱交換用パイプに循環させて地温を上昇させ、その成育に役立てるようにしてある。またマンゴウの開花を4、5月頃とするならば、冬期の温室の最低温度は5°C以下にならなければ良い。そこで冬期には、このソーラーポンドの熱を低温側熱源とするエンジンヒートポンプによって温室の暖房を行っている。さらに、このシステムでは冬期でも温室内

* 原稿受付 平成5年4月30日

* 1 会員、近畿大学理工学部(〒557東大阪市小若江3-4-1)

* 2 同 上

* 3 会員、大阪府立工業高等専門学校(〒572寝屋川市幸町26-12)

の屋根裏の温度が晴天時にかなり高温に上昇するので、ソーラーポンドの蓄熱水を屋根裏に設置した黒色パイプに循環させ、その温度上昇を図るようにしてある。

本報告では、このソーラーポンドの屋外での実地試験の結果および理論計算によってその性能を予測し、実用性を吟味した結果について主として述べる。なお、試験的に行った温室暖房システムに関する一部の実験結果も報告する。

2. 屋外性能試験

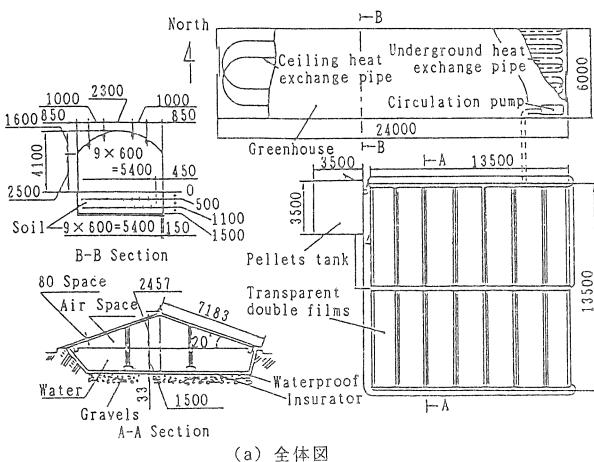
2.1 実験装置および方法

図1に実験装置の概略および写真を示す。このポンドは、上部寸法 $13.5\text{m} \times 13.5\text{m}$ 、深さ 1.5m の図のような構造で、底部は、約 150mm の栗石層と排水用カナドレンが設置され、その上部に厚さ 30mm の断熱用発泡スチロール板を敷き、さらにその上部に厚さ 1.5mm の黒色止水用ポリ塩化ビニールシートを敷設し、入射光を有効に吸収できるようにしてある。蓄熱水層上部の断熱層であるポンド屋根部は、鉄骨製の枠組みに厚さ 0.15mm の透明ポリエチレンフィルム(三菱モンサント製シクスライトクリーン)を貼り付けた間隔 80mm の二重膜構造となっており、全体が14のパネルで構成されている。東西の妻面は予備実験の結果から朝日および夕日の入射効果よりも、放熱損失の方が大きいことがわかったため、 10cm 厚さの発泡スチロール板で断熱している。

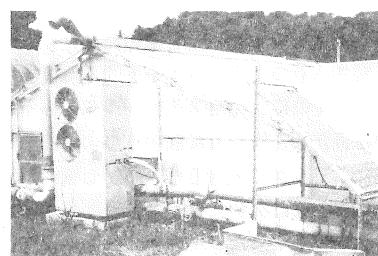
屋根の二重膜間には、日没時に直径 $3 \sim 5\text{mm}$ の断熱用発泡スチロールペレットを、2 PSと1 PSのファン2台で、約45分で北西端に設置された貯蔵タンクから搬出し、充填する。また日出時には、1 PSのファン2台で、約30分で貯蔵タンクに回収する。

ペレットの搬入は、屋根上部の東及び西端より、とい状の通路にペレットと空気を混合して噴出させ、空気はとい部中央の空気抜きより外部に排出し、ペレットは自重によって傾斜した二重膜面を流下するようにしてある。その場合、二重膜間の空気は下部に設けた空気抜きパイプより抜ける。また、搬出に際しては、ファンが作動して空気の吸引が始まると、ペレットが屋根下方に次第にずり落ちて逐次貯蔵タンクに回収される。この搬入、搬出は屋根パネルの傾斜角、二重膜間隔、膜材質、ペレット寸法、空気抜きの位置、搬送用パイプの太さ、空気流量とペレット流量の比等が適切でないと、途中でペレットが閉塞してしまい、完全な充填が出来ない。そこでこれらの最適条件を調べるために、あらかじめ実験室内に1パネル分の装置を作成し、予備実験として屋根角度、二重膜間隔等に関する最適構造とペレット閉塞限界、充填時間等の測定を行った。しかし、実際ににおいて最も厄介な問題は、静電気の発生によるペレットの閉塞および屋根膜面への付着であった。その防止方法としては、ペレット搬送用パイプのアース接続および静電気防止剤であるエレクトロストッパーSRの1%濃度水溶液を、搬送充填中のペレットに、約 $80\text{cc}/\text{min}$ の割合で噴霧して適当な湿度をもたらす方法が用いられた。

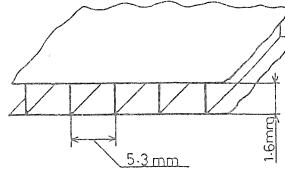
本実験では、平成2年9月中頃までは、ペレット搬送時の性能測定を行い、それ以降はペレット搬送を中止して、代わりに断熱用透明膜(宇部日東化成製サニーコートH100)を二重にしてポンド水面に浮かべた場合の測定を行った。この膜は図1(c)に示すようなハニカム構造であり、膜自体に $1.6\text{mm} \times 5.3\text{mm}$ の空気層をもち、断熱性を有する。また、ポンド表面をこの膜で覆うことにより、蒸発損失を防止する効果もかなり大きい。



(a) 全体図



(b) 屋根部およびヒートポンプ



(c) 透明断熱膜

図1 実験装置

ポンド温水を利用するためのマンゴウ温室は図1に示すような床面積24m×6mのビニールハウスで、その屋根裏には内径50mm、全長109mの黒色アクリルパイプを設置し、晴天時にソーラーポンドの蓄熱水を循環して、屋根裏の高温および日射によって蓄熱水温度をさらに上昇させるようにしてある。

夏期にソーラーポンドで蓄えられた温水は、冬期の温室暖房に役立てる目的で10月中旬頃から温室地下の図1に示す位置に配管された内径40mm、全長480mの塩化ビニールパイプに循環させ、深根性植物であるマンゴウの地中温度を上昇させるようにしてある。また、温室内温度が5°C以下となる冬期間には、一次側熱源としてポンド空間の空気を室外機より吸い込み、蓄熱水の熱を利用するようにした図1(b)の空気熱源のヒートポンプを運転することにより、冬期の熱利用を図った。使用したヒートポンプは、低コストで一般性のあるヤンマー製のY4GPA型のガスエンジン式ヒートポンプで、使用燃料はプロパンである。

温度測定は蓄熱水温、ポンド水温、ペレット層空間、ポンド底部地中およびヒートポンプ、温室内各部等にK型熱電対を取り付け、日射量、外気温等と共に1時間毎の測定値を、英弘精機製のSOLACⅢによって測定、記録し、そのデータをコンピューターによって処理した。

2.2 ソーラーポンドの温度上昇と性能

図2は平成2年7月6日から平成3年7月5日までの、1年間についての蓄熱水温、外気温および日射強度の各日の平均値を示す。また蓄熱水温に関しては、参考のために、平成3年の8月1日から10月23日までの変化も破線で示す。平成2年の7月、8月には晴天の日が長期間にわたって続いたこともあり、実線で示す蓄熱水温は約50°Cという、かなり高い温度を維持していたが、9月下旬には台風のために雨水の侵入を受け、図中A点のように40°Cを下回る温度まで急激に低下した。その後、発泡スチロールペレット搬入による断熱は停止し、代わりに図中B点より断熱用透明膜を二重にして水面に敷設した。しかし蓄熱水温は、外気温の低下と共に次第に低下し、翌年1月に20°Cを下回る温度まで低下した。その後2月下旬からは、外気温の上昇と共に、徐々に快復に向かった。1年目(実線)と2年目(破線)の温度変化を比較した場合、2年目の蓄熱水温度は、ほぼ1年目と同程度の温度まで到達している。従って、断熱用透明膜は、ペレットによる保温と同程度の効果があることがわかる。また、図示のように、蓄熱水温は下図に示す日射よりも、一点鎖線で示す外気温の季節的変動に大きく依存しており、外気温の上昇、下降にともなって蓄熱水温も15°C前後の

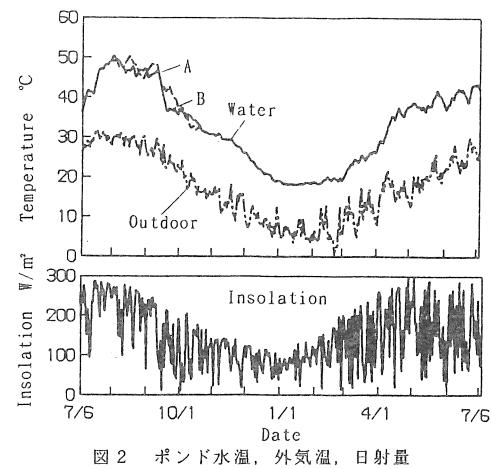


図2 ポンド水温、外気温、日射量

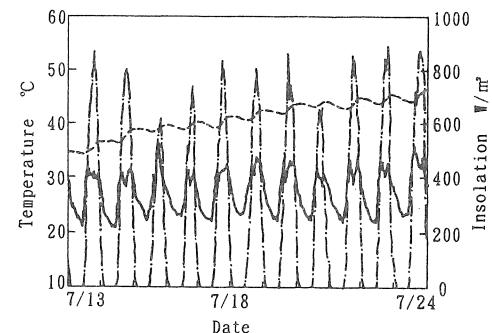


図3 蓄熱水温(破線)、外気温(実線)、日射量(鎖線)

温度差を保ちつつ上昇、下降している。これは、本実験では熱抽出を行っていないので、各日での日射による集熱量に対して水温と外気温の温度差に基づく放熱量が常にほぼ等しい平衡状態であり、その結果この15°C程度の温度差が保たれているのである。すなわち、この温度差が本ソーラーポンドの断熱性の限界を表していることになる。利用可能熱量については熱抽出を伴う実験によって正確に測定するか、本実験の結果から得られる集熱、蓄熱性能よりの推定によって求まる。なお、本報告では後述の理論計算の項でその利用可能熱量を評価している。

図3は平成元年7月13日から24までの蓄熱水温、外気温、日射強度の時間的変化を示したものである。これはポンドに注水後の初期におけるデータであり、この年の8月3日頃までは未だ水温が上昇中で、集熱と蓄熱とが平衡に達していない期間での実験結果である。したがって、この場合は熱抽出を行って水温が下降した場合と同様の状態と考えられるので、この実験値からは本ソーラーポンドの一般的な集熱、蓄熱に関する性能が得られる。図のように、破線で示す蓄熱水温は日毎に上昇、下降を繰り返しつつ次第に上昇して

いる。すなわちソーラーポンドは、その断熱効果によって夜間の放熱が抑えられて、前日の蓄熱が翌日に持ち越され、水温が未だ限界に達していない場合には、図示のように晴天が続ければ、水温は徐々に上昇する。

ソーラーポンドにおいても負荷抽出のない場合の熱バランスの式は通常の太陽集熱器と同様に次の式(1)で表される。

$$H_0 \cdot \eta_c - K \cdot (t_{wm} - t_{om}) = \Delta q = G \cdot C \cdot \Delta t_w \quad (1)$$

ここで、 η_c はポンドへの集光効率=(ポンド水への入射エネルギー)/(日射量 H_0)で、主として屋根、断熱カバー等の光透過性と太陽光の入射角によって定まる値で、 K は放熱係数=(ポンド水面の単位時間、単位面積当り放熱量)/(平均水温の t_{wm} -平均外気温の t_{om})で、ポンドの断熱性によって定まる値であり、これらは平均的には定数と見なされる。 Δq は入射エネルギーの $H_0 \cdot \eta_c$ と放熱量の $K \cdot (t_{wm} - t_{om})$ との差であり、蓄熱水と外気温との温度差の上昇分を Δt_w とし、単位面積当りのポンド容量を G 、水の比熱を C とすれば、 $\Delta q = G \cdot C \cdot \Delta t_w$ である。この Δq の1日、1ヶ月、1ヶ年を通じての値が正であれば、ポンド水へ太陽エネルギーが蓄熱される。

つぎに、図4は、外気温がほぼ一定であった図3で示した期間中の実験結果から、このソーラーポンドの性能を評価するために日照時間中(A.M. 5:00~P.M. 7:00)の水温上昇 Δt_w を用いて、集熱効率を $\eta_c = (G \cdot C \cdot \Delta t_w) / H_0$ と定義し、一昼夜の水温変化 Δt_w より求めた蓄熱量 $G \cdot C \cdot \Delta t_w$ を用いて、蓄熱効率を $\eta_s = (G \cdot C \cdot \Delta t_w) / H_0$ と定義し、また、夜間(P.M. 7:00~A.M. 5:00)のみの水温変化 Δt_s より求めた放熱量 $G \cdot C \cdot \Delta t_s$ を用いて、前述の定義の放熱係数 K を算出し、各日でのそれぞれの実験値を図示したものである。図示のように各値はその日の気象条件、断熱ペレットの充填状態等によって影響を受け、かなり大きくばらつく。しかし、平均として $\eta_c = 28\%$ 、 $\eta_s = 18\%$ および $K = 3.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ の値が得られた。

なお、式(1)によれば、 $\eta_c = \eta_s - K(t_{wm} - t_{om}) / H_0$ であるので、 η_c は $(t_{wm} - t_{om}) / H_0$ の関数である。図5はこの η_c と $(t_{wm} - t_{om}) / H_0$ との関係を平成元年の夏期の日照時間中の実験結果より算出して示したものであり、カバー方式ペレットルーフ型ソーラーポンドの日照時の集熱性能を表している。集光効率 η_c の値は約40%であり、これは通常の塩水濃度勾配型ソーラーポンドの場合の2倍程度である。しかし、夜間の放熱係数 K は前述のように $3.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であり、この値は塩水ポンドの場合より8~10倍大きな値である。このように本ソーラーポンドは集光性が優れているので、日射が良ければ急激な水温上昇が得られるが、断熱性

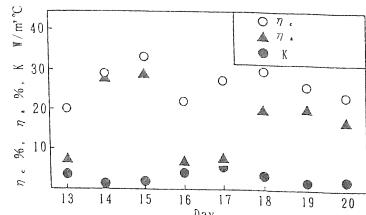


図4 集熱効率(η_c)、蓄熱効率(η_s)、放熱係数(K)

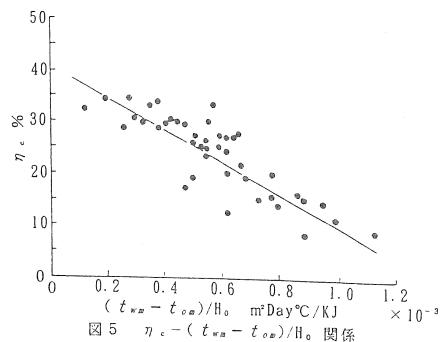


図5 $\eta_c - (t_{wm} - t_{om}) / H_0$ の関係

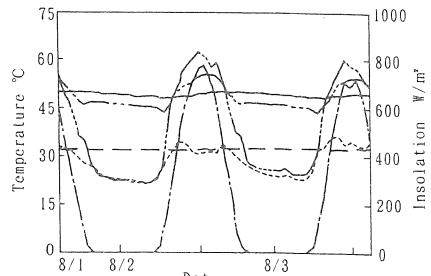


図6 日射(一点鎖線)、外気温(破線)、
二重膜間温度(三点鎖線)、空間温度(二点鎖線)、
蓄熱水温(実線)、地下温度(長波線)の日変化

が悪いので長期的蓄熱特性は良くないという特色を有する。したがって本装置の利用に際しては、この特性を十分に考慮して、その用途と負荷抽出条件を適切に選定する必要がある。

つぎに、図6は夏期晴天日の日射強度、外気温、ソーラーポンド屋根面二重膜間温度、ソーラーポンド屋根と水面との間の空間温度、蓄熱水温、ソーラーポンド底部地下10cmの位置での温度の代表的な日変化を示したものである。三点鎖線で示す屋根二重膜間温度、二点鎖線で示すソーラーポンド空間温度は、日照時間中には、実線の蓄熱水温よりもかなり高い温度を示しており、特にソーラーポンド空間は、夜間でも破線の外気温より高い温度を示し、蓄熱水温より3~4°C低いだけである。これは曇天の日およびペレット搬入なしでの蒸発防止膜を敷設した場合でも、ほぼ、同様である。このことは、このソーラーポンドの断熱に対しては、屋根二重膜の効果が大であることを意味

している。また長破線で示す、ソーラーポンド地下10cmの地点における土中温度は、日変化はほとんどなく、夏期においては約32°C、冬期においては約28°Cでほぼ一定で、夏期の屋外平均地中温度の26°C、冬期の屋外平均地中温度の15°Cと比較して、それぞれかなり高い温度を保っていて地下土中への放熱が、かなり抑制されていることがわかる。さらに測定結果では冬期の土中温度は、蓄熱水と比較して同程度か、もしくはそれ以上の温度を示している。このことは、夏期に、蓄熱水に集熱された太陽エネルギーが、ソーラーポンド地下土中にも蓄えられ、逆に冬期には、熱を保有した地下土中から蓄熱水に熱が供給され、蓄熱水の温度低下防止に、かなり有効に作用することを示している。

2.3 その他の試験

2.3.1 温室地下配管への蓄熱水循環

本システムは、ソーラーポンドによって蓄えられた温水を、隣接した温室のマンゴウの栽培に役立てる目的としている。そこで、ソーラーポンドの年間の性能試験の結果に影響をおよぼさない程度に、平成2年10月24日より7日間、温室地下50cmの図1に示した位置に配管した内径4cmの熱交換用塩化ビニールパイプに試験的に約35°Cの蓄熱水を流量約18ℓ/minで循環し、その効果を調べた。その時の蓄熱水温および土中温度変化を図7に示す。

図のように、約24°Cの地温は蓄熱温水循環後には、三点鎖線で示した土中配管より5cm離れた地点で6°C程度上昇し、長破線で示した配管から30cm離れた地点の温度についても、2~3°C上昇している。さらに循環を続ければポンド蓄熱水の有する熱量が地中へ蓄熱でき、この温室で栽培しているマンゴウが深根性で地下2m程度まで伸びることを考慮すれば、その育成にとてある程度有効であるといえる。蓄熱水については、実線で示した蓄熱水層底部の抽出温度と比べて、破線で示した蓄熱水層上部の温度は、ある程度の日射があるときには数°C高くなる。したがって、抽出位置を現在の水面下50cm付近よりもさらに表面付近に変更すると共に、この型のソーラーポンドの温度回復が早いという利点を利用して、蓄熱水循環を連続して行わずに、蓄熱水と土中との温度差に応じて循環、停止を繰り返すならば、ソーラーポンドに蓄えられた温水を土中蓄熱に、より有効に利用することができる。

2.3.2 屋根裏配管への蓄熱水循環

マンゴウ温室屋根裏の黒色パイプにポンド水を流量12ℓ/minで循環させた場合の水温上昇効果が夏期と冬期の晴天および曇天日を選んで試験された。図8は一例として冬期晴天日の1月8日におけるポンド水の温度

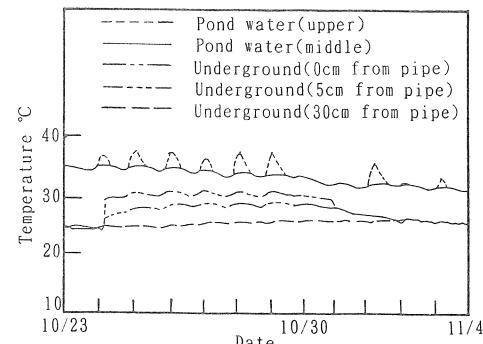


図7 温室地下配管への水循環実験

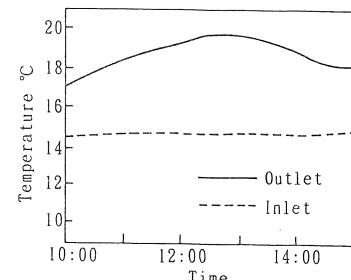


図8 屋根裏配管への蓄熱水循環実験

上昇を示す。図示のように入口から出口までの温度上昇は最高5.3°C、平均3.46°Cであり、この場合約70000kJ/Dayの熱量が取得できる。この温度上昇にはポンド水温の低い冬期の晴天日が最も有効で、これに対して夏季晴天日ではポンド水温が高いので20000kJ/Day程度で、曇天日はさらに効果が小さく、むしろ出口で温度が下がる場合もある。したがってポンド水温および日照、気温に応じて水循環をコントロールすれば、このシステムもかなり効果を発揮するものと思われる。

2.3.3 ヒートポンプによる温室暖房

平成3年および4年の1月~3月には空気熱源式エンジンヒートポンプの室外機を図1(b)のようにソーラーポンドに接続して設置して隣接するマンゴウ温室の暖房を実施した。図9は代表日として選んだ平成4年2月9日における運転中の各部の温度変化を示す。室温が8°C以下となったP.M. 18:00頃より運転が開始され、室内機吹き出し口温度(一点鎖線)が急上昇している。また、翌A.M. 6:00頃に運転が停止し、吹き出し口温度が降下している。室外機はポンドからの伝熱によって外気温度(長破線)より5~6°C高くなつたポンド空間(二点鎖線)の空気を吸い込み、図中のハツチングで示した三点鎖線の吹き出し口温度までの熱を一次側の熱源として取得している。つぎに、図10は2月4日から2月25日までの期間について上記の図13のような測定

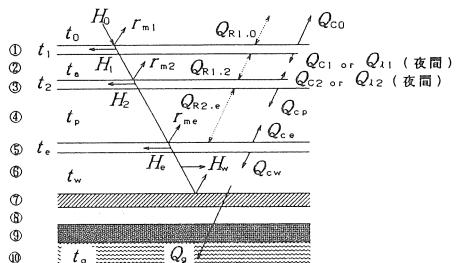
値を基に算出した本システムの性能を示す。図示のように、この期間には最低外気温が0°C以下の日が数日あったが、温室内はマンゴウの成育に必要な5°C以上に保たれていた。室内へのヒートポンプの供給熱(△印)に対するソーラーポンドから取得した室外機吸い込み熱(▲印)は約20%であり、これは前日の積算日射量の約9%に相当する。ヒートポンプのC.O.P.=(室内機の温室への供給熱量)/(使用プロパンの燃焼熱)の各日での算出値は図示のようであり、その平均値は1.25であった。これを通常の電気式ヒートポンプの場合に換算すると3.67となる。したがって一般市販のこのようなヒートポンプでも、かなり有用であることが確認された。さらに、ポンド水の熱を直接利用する型式のヒートポンプを用いれば、コスト高とはなるが、より有効にソーラーポンドの熱が利用できるものと思われる。

3. 理論計算による性能予測

3.1 計算モデルおよび計算式

実地試験を行ったソーラーポンドは必ずしも最適寸法で設計されたものではない。本節では実地試験と同一型式の場合について断熱方法、屋根角度、屋根二重膜間隔、蓄熱水層深さ等の構造の差異および実際に熱を利用する場合の熱抽出の条件が性能におよぼす影響を理論的計算によって解明した結果を述べる。

ソーラーポンド屋根部の透明二重膜面の上部から入射した太陽エネルギー(水平面全天日射量) H_0 [W/m²]は、図11の計算モデルに示すように、各膜面で反射率 r_m 、



- ①屋根二重膜外側膜
- ②屋根二重膜空間
- ③屋根二重膜内側膜
- ④ポンド空間
- ⑤水面膜
- ⑥蓄熱水層
- ⑦底部止水膜
- ⑧底部断熱層
- ⑨底部碎石層
- ⑩土地

図11 計算モデル

吸収率 κ_f で反射、吸収された後、透過率 η_m で下方へ透過して、最終的に、 H_w の太陽エネルギーが蓄熱水層へ到達する。蓄熱水層底部まで到達したエネルギーは、黒

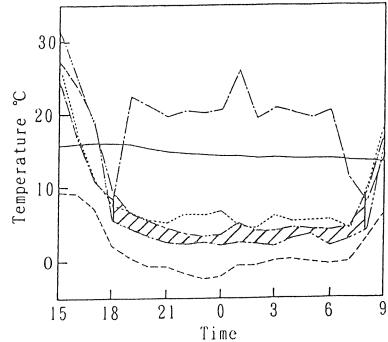


図9 ヒートポンプの実験での各部温度
蓄熱水(実線)、温室内(短破線)、外気(長破線)、
室内機吹出口(一点鎖線)、ポンド空間(二点鎖線)、
室外機吹出口(三点鎖線)

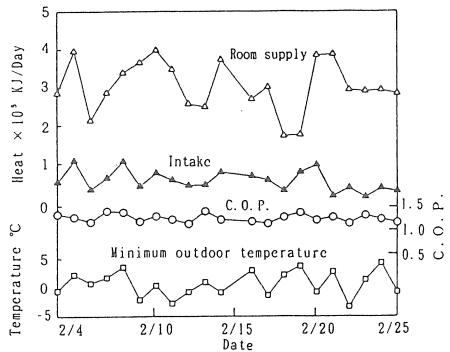


図10 ヒートポンプの性能

色止水膜で吸収され、その温度上昇をもたらすが、このエネルギーはポンド地下の土壤中へ伝熱されるものを除き、再び蓄熱水層へ伝熱する。各膜温度 t_1 、 t_2 、 t_e および二重膜間温度 t_a 、ポンド空間温度 t_p 、蓄熱水温 t_w は、それぞれに吸収された太陽エネルギー H_1 、 H_2 、 H_e 、 H_w および、それぞれの隣接層への放射および対流伝熱による移動熱量、 Q_R および Q_C との熱バランスによって時々刻々と変化する。計算では、各時刻における日射量 H_0 、外気温度 t_0 等の気象条件をデータとして入力し、一定の初期温度から始めて、一定刻み時間毎に、上記の入射エネルギーと移動熱量との熱バランスの式を用いて、膜、空間および蓄熱水の各部での次の刻み時間の温度 t' を求め、これを繰り返すことによって任意の時刻での各部の温度を計算する。(付図参照)

たとえば、面積 $F\text{m}^2$ の透明二重膜の外側膜の日照時における熱バランスの式は、次のようになる。

$$G_f C_f (t_1' - t_1) = H_1 - Q_{C10} - Q_{R10} - Q_{R12} \quad (3.1)$$

ここで、 G_f : 膜の質量 = $F \cdot \rho_f$ [kg]

ρ_t : 膜の単位面積当たりの質量 0.2 [kg/m²] C_t : 膜の比熱 500 [J/(kg·K)]また、膜の吸収エネルギーは $H_1 = \kappa_t \cdot H_0 \cdot C_{conv} \cdot F$ [W] ここで、

$$C_{conv}$$
 : 屋根面への垂直成分比 = $\frac{\sin(i_{alt} \pm \theta)}{\sin i_{alt}}$

 i_{alt} : 太陽高度 [°] θ : 屋根角度 [°] (+ : 南面, - : 北面)

膜上面から外気への対流伝熱量は

$$Q_{co} = \alpha_a \cdot (t'_1 - t_a) \cdot F$$
 [W] (3.2)

ここで、

 α_a : 膜と外気との間の熱伝達率 30 [W/(m²·K)]

膜下面から透明二重膜空間への対流伝熱量は

$$Q_{c1} = \alpha_a \cdot (t'_1 - t_a) \cdot F$$
 [W] (3.3)

ここで、 α_a : 膜と空気の熱伝達率 5 [W/(m²·K)]

$$\text{膜上面と天空との間の放射伝熱量は}^{(8)} Q_{R1,0} = 5.67 \cdot \varepsilon_t \cdot \left[\left(\frac{t_k + t'_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_k + (t_a - 6)}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$
 [W] (3.4)

 ε_t : 膜の放射率 0.9 t_k : 摂氏零度 273.15 [K]

$$\begin{aligned} \text{二重膜の外側膜と内側膜との交換放射伝熱量は } Q_{R1,2} \\ = 5.67 \cdot f_e \cdot \left[\left(\frac{t_k + t'_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_k + t'_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \end{aligned}$$
 [W] (3.5)

$$f_e$$
 : 上下の膜間の放射係数 = $\frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{1}{\varepsilon_t} - 1}$

膜の反射率 r_m および透過率 η_m は、多重反射を考慮した次式で算出される。

$$r_m = r_t \cdot \left\{ 1 + \frac{(1 - r_t)^2 \cdot (1 - \kappa_t)^2}{1 - r_t^2 \cdot (1 - \kappa_t)^2} \right\}$$

$$\eta_m = \frac{(1 - r_t)^2 \cdot (1 - \kappa_t)}{1 - r_t^2 \cdot (1 - \kappa_t)^2} \cdot D_t$$

 D_t : 膜(1枚)の汚れ係数 0.6ここで、 r_t は膜境界面での反射率で、各時刻における膜面への太陽光入射角 i_{mat} [°] = $90 \pm \theta - i_{alt}$ と屈折角 ϕ [°] を用いて、次式⁽⁹⁾で求める。

$$r_t = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{\tan^2(i_{mat} - \phi)}{\tan^2(i_{mat} + \phi)} + \frac{\sin^2(i_{mat} - \phi)}{\sin^2(i_{mat} + \phi)} \right\}$$

屈折角 ϕ は、Snellの法則 $n_1 \cdot \sin i_{mat} = n_2 \cdot \sin \phi$ から求める。ここで、 n_1 : 空気の屈折率 1, n_2 : 膜の屈折率 1.58 である。また、膜の吸収率 κ_t は、実測による垂直光の透過率

$$\eta_{tn} = 95\% \text{ を用いて, } \kappa_t = \frac{1 - \eta_{tn}}{\cos \phi} \text{ として計算する。}$$

式(3.1)によって透明二重膜外側膜の刻み時間後の温度 t' が求まるが、続いて、二重膜空間部、内側膜、ポンド空間、水面膜、蓄熱水層の順に上記と同様の方法で、それぞれの温度を算出する。ただし、日照時の計算において、各膜面で反射率 r_m で反射した光は、その外側膜との間で二重反射が行われるはずであるが、その計算結果におよぼす影響は微小であるので、これを無視した。夜間においては、二重膜間にペレットが搬入されるので、式(3.1)において、 Q_{c1} と $Q_{R1,2}$ の代わりに、ペレット層の熱伝導による伝熱量 Q_A の次式を用いる。

$$Q_A = \lambda_p \cdot \frac{t_2 - t_1}{\ell} \cdot F$$
 [W] (3.6)

ここで、 λ_p : ペレットの熱伝導率 0.038 [W/(m·K)], ℓ : ペレット層の厚さ 0.08 [m] である。なお、蓄熱水層での熱バランスを計算する場合において、水面に蒸発防止用の透明断熱膜を敷設しない場合の蒸発潜熱による熱移動量 Q_E は次式⁽¹⁰⁾で算出する。

$$Q_E = 8849.78 \cdot \left\{ \left(\frac{t_w + 93.0}{192.64} \right)^7 - \left(\frac{t_p + 93.0}{192.64} \right)^7 \right\} \cdot F_w$$
 [W] (3.7)

また、ポンド底部から土壤への伝熱量 Q_G は次式によつて求める。

$$Q_G = K_g \cdot (t_w - t_g) \cdot F_b$$
 [W] (3.8)

ここで、 F_b : 蓄熱層底部面積, K_g : 土壤熱貫流率 =

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_{wb}} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{L_r}{\lambda_r} + \frac{L_g}{\lambda_g}}$$
 [W/(m²·K)]

α_{wb} : 蓄熱水層底部での熱伝達率 349 [W/(m²·K)], δ_t : 止水膜の厚さ 0.0015 [m], λ_t : 止水膜の熱伝導率 1.6 [W/(m·K)], δ_p : 断熱材(発泡スチロール)の厚さ 0.03 [m], L_r : 砕石層厚さ 0.15 [m], λ_r : 砕石層の熱伝導率 0.93 [W/(m·K)], L_g : 温度一定(14°C)となる土中の深さ 14 [m], t_g : 地下14mでの土中温度 14 [°C], λ_g : 土地の熱伝導率 0.85 [W/(m·K)]

3.2 計算結果

図12は、計算結果と実験結果との比較を示す。

この場合平成2年7月6日～9月25日までは、屋根二重膜間に発泡スチロールペレットを搬入、水面の蒸発防止膜なしで、以後は、ペレットの搬入なし、蒸発防止膜ありの条件である。

計算結果は、実測値と比べて約5°C以内の差異がある程度で、一年間の傾向としてはほぼ一致している。したがって、この理論計算の正当性が確認できた。

3.2.1 断熱方法の違いによる差異

ソーラーポンドの水温上昇はその断熱方法によって支配される。図13は透明二重膜の屋根を有する本実験のポンドの場合について水面での断熱方法の差異およびペレット搬入の有無による水温の一年間の変化を比較した計算結果である。

図示のように、水面の断熱なし(a:実線)では最高温度が約40°Cであるが、夜間の発泡スチロールペレットの搬入を行えば(b:破線)，最高蓄热水温がこれより約10°C上昇する。ペレットなしで、蒸発防止用サニーコートを敷設する方式(c:一点鎖線)ではより高温で、サニーコートと発泡スチロールペレット搬入を併用する場合(d:二点鎖線)はさらに高温で、最高温度が60°C近くに達する。

3.2.2 屋根角度の影響

つぎに、以下にはポンドの構造、熱抽出条件による性能の差異を実地試験と同一の断熱条件の場合について検討する。

図14は、ソーラーポンドの屋根を、実地試験と同様の両流れの場合と、片流れにした場合について各種角度で行った計算結果の蓄热水温度と外気温度の一年間の平均値の差を示す。

片流れにおいては、北面は垂直な二重膜構造であるが、この二重膜間に発泡スチロール断熱材を入れた場合(□印)はその内面での反射のみを考慮し、断熱材を入れない場合(△印)は、光が透過してしまうものとして計算した。

図示のように、両流れ(○印)については、角度が大となるとともに温度差が大となり、屋根角度が55°付近で最大となっている。これは、屋根角度が大きくなると受光面積は大となり、ポンド空間に入射するエネルギーが大となるためである。しかし、大き過ぎると放熱が大となり、温度差は小さくなる。片流れにおいては、やはり、角度が大となるほど受光面積が大となる。したがって、温度差も大となるが、北面に断熱材が入っていない場合(△印)は、屋根角度が大となると、北面を透過して再び外部へ逃げる光が大となるので、30°以上では、角度が大となり受光面積が大となつても、温度差は大とはならない。北面に断熱材が入っていれば(□印)、屋根角度が大となるほど受光量が大となるが、妻面からの放熱量も大となるので、やはり限界が存在し、計算では50°付近で温度差が最大となった。

この計算結果から結論として屋根の構造は片流れが良く、北面には断熱材を入れるべきであり、そのときの最適角度は、計算では約50°である。しかし、実際の建設工事、コスト等を加味すると、やはり通常の平板

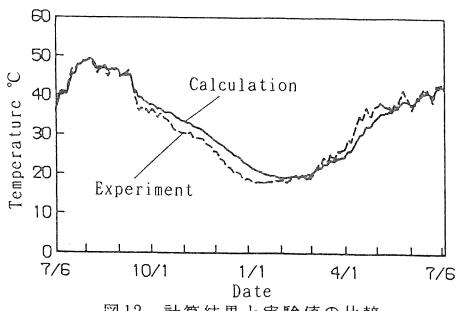


図12 計算結果と実験値の比較

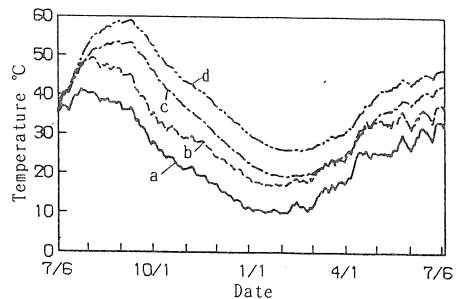


図13 断熱方法による蓄热水温度の変化

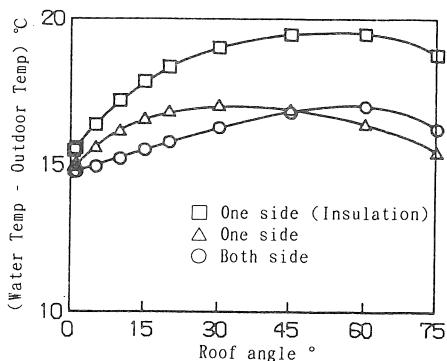


図14 屋根角度による蓄热水温度と外気温の一年間の平均値の差

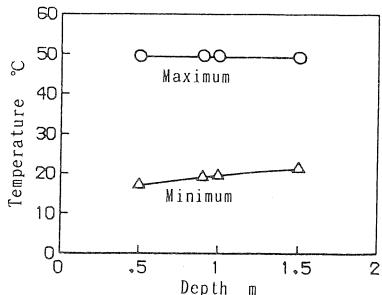


図15 蓄热水槽深さによる蓄热水の最高・最低温度

型コレクターと同じ30°程度が適当であろう。

なお、屋根二重膜間距離の影響に関しては計算結果によれば、間隔8cm以上では水温上昇に大きな影響はないことがわかった。実際問題としても間隔をあまり大きくするとペレット量が多くなり過ぎるので、間隔8cm程度が最適と考えられる。

3.2.3 蓄熱層深さの影響

図15は、蓄熱水層深さが蓄熱水の年間の最高・最低温度におよぼす影響を示す。

蓄熱水温度は、冬季には深さが大きい方が冷却しにくく、夏季は、深さが小さい方が上昇し易い。図示のように、蓄熱水層が深くその熱容量が大となればなるほど、最高温度と最低温度の差がなくなる。

したがって、ソーラーポンドは夏季の高温度を利用するのであれば浅くして、蓄熱層の温度上昇をうながし、冬季の熱を利用するのであれば、蓄熱層を深くして放熱を妨ぎ、蓄熱水温度を高く保つ必要がある。

3.2.4 热抽出の影響

2.2節でも述べたように、実地試験は負荷抽出なしで行われたので、利用可能熱量に関しては以下の理論計算によって考察する。

図16は、一年間を通じて連続して熱抽出を行った場合、一年間夜間(太陽高度が0°以下になる日の入りから日の出までの間)のみ熱抽出を行った場合および冬季(10/1~3/31)の夜間のみ熱抽出を行った場合の年間の抽出熱量と熱抽出期間の蓄熱水温と外気温の差の平均値との関係を示す。

図示のように、抽出熱量が多いほどポンド水温は低下するので、利用側で必要とする温度に応じて抽出できる熱量が決まることになる。同一温度差の場合には、深さが1.5mの方が抽出熱量が大である。これは前述のように深さが大であると、冬季は冷却し難く、夏季は一般に温度が高いためである。

なお、前述した最適構造の傾斜角30°の片流れの屋根で北面に断熱ペレットを充填し、蓄熱水層深さを1.5mとし、1年間夜間のみ負荷抽出を行った場合の計算結果によれば、このソーラーポンドの利用可能エネルギーの石油換算量は平均温度差20°Cおよび10°Cでそれぞれ3.67l/m²および13.84l/m²である。

4. 結論

ペレットルーフ型および水面カバー方式のソーラーポンドとこれを用いたマンゴウ温室の暖房に関する実地試験の結果および理論計算の性能予測結果より以下の結論が得られた。

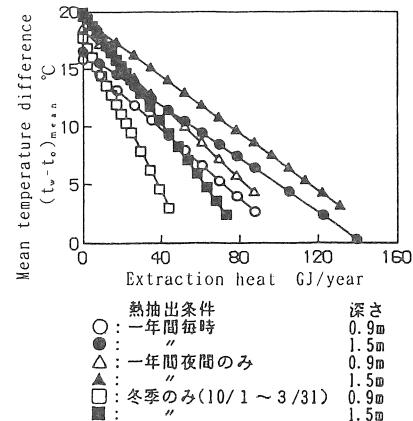


図16 各条件、構造における年間熱抽出量と
熱抽出期間の蓄熱水温度と外気温度の差の平均値

- (1) 热抽出なしの場合のポンド水温は年間を通じて外気温より約15°C高く保たれる。
- (2) ペレット搬入方式と搬入なしの水面カバー方式の場合の温度上昇はほぼ等しく、同一性能であると考えられる。
- (3) 日照時のポンドの集熱効率は約28%，蓄熱効率は約18%，放熱係数は約3.08W/m²Kで、屋根の集光効率は約40%である。
- (4) ポンド温水の温室地下への蓄熱システムおよび冬期のヒートポンプによる温室暖房に本ソーラーポンドを利用するシステムは実用上有効である。
- (5) 理論計算によれば、本ソーラーポンドの最適設計条件の傾斜角30°の片流れ屋根で、蓄熱水層深さ1.5mの場合の1年間の利用可能エネルギー量は外気との平均温度差20°Cで石油換算3.67l/m²である。

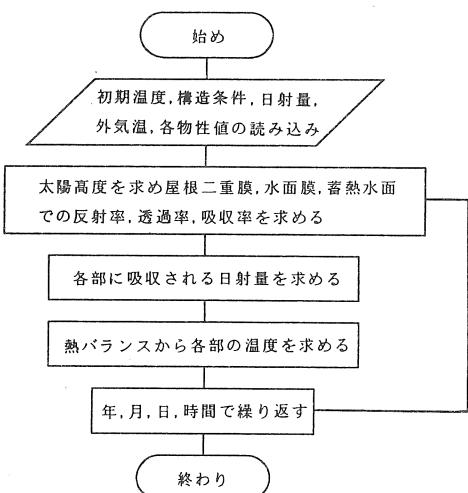
おわりに本研究に当たり実験設備の建設および実験に協力を賜った太陽工業株式会社および近畿大学付属湯浅農場の方々と当時近畿大学院生の松下克己、会川浩一、谷口正浩、植田祐生、宝山登氏に深甚の感謝の意を表明する。

文献

- (1) T.S.Jayadev and M.Edesess, Solar Pond Concepts, American Chem.Soc., Copyright(1979), 45-48.
- (2) 一色尚次, ソーラーポンドとその開発状況, 日本機械学会誌, 84-757(1981), 133-1337.
- (3) L.H.Shaffer, Viscosity Stabilized Solar Pond, Proc. Int. Solar Energy Soc. (1978-1), 1171-1175, New Delhi, India.
- (4) 多賀正夫, 中部主催, 松岡敏夫, 膜型粘性ソーラーポンドの性能, 太陽エネルギー, 17-1(1991), 23-30.
- (5) M.Taga, Yoshiro Matuoka, Yoshihiro Matuoka, M.Yamamoto, T.Taga and H.Minami, Application of Solar Pond for Heating a Greenhouse, Proc. Int. New & Renewable Energy Conf.(1990-6), 443-450, Beijing, China.
- (6) M.Sokolov and A.Arbel, Freshwater Floating-Collector-Type Solar Pond, Solar Energy, 44-1 (1990), 13-21.
- (7) W.C.Dickinson, et al, LLL-Sohio Solar Process Heat Project Report No.3, Lawrence Livermore Laboratory UCID-16630-3, (1976), 1-27.
- (8) J.A.Duffie and W.A.Beckman, Solar energy thermal processes, ch.4(1974), 76-77, Wiley, New York.
- (9) エンジニアリング振興協会, モデル地域に適した新しい太陽熱利用システムに関する調査研究分科会, (昭和57年6月), 報告書(1982), 131.
- (10) W.H.Carrier, Fan Engineering, 5th Ed.(1949), 95, Buffalo Forge Co., Buffalo, U.S.A.

付表 理論計算に用いた主な記号

- C : 比熱 [J/(kg·K)]
 F : 面積 [m^2]
 f : 放射係数
 G : 質量 [kg]
 H : 日射量 [W/m^2]
 K : 热貫流率 [$W/(m^2·K)$]
 Q : 热量 [J]
 r : 反射率
 t : 温度
 α : 热伝達率 [$W/(m^2·K)$]
 ϵ : 放射率
 η : 透過率
 λ : 热伝導率 [$W/(m·K)$]
- 添字
- b: ポンド底部
c: 対流
E: 蒸発
f: 膜部
G, g: 土地部
m: 多重反射
o: 外気
P: ペレット部
R: 放射
r: 砕石部
w: 蓄熱水部
l: 屋根外側膜



付図 理論計算流れ図