

膜型粘性ソーラーポンドの性能

PERFORMANCE OF MEMBRANE VISCOSITY
STABILIZED SOLAR POND

多 賀 正 夫*

Masao TAGA

中 部 主 信**

Kazunobu NAKABE

松 岡 淑 夫***

Yoshio MATSUOKA

Abstract

The membrane viscosity stabilized solar pond has the non-convective layer which is composed of a viscous polymer solution partitioned by a number of transparent films. An advantage of partitioning is that a thinner polymer solution can be used to prevent convective heat transfer and that the light transmittance increases. In the design for this solar pond, the determination of optimum conditions on the thickness of polymer layer and the number of membranes is very important. The theoretical calculations by a simple one-dimensional simulation model to determine the optimum conditions were carried out. Optimum conditions for the practical use are 0.5 m in thickness of the polymer layer, 7 sheets in number of membranes, 1 m in thickness of storage water layer and $20 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in flow rate of extraction. An utility of this solar pond based on these performances is described.

Key words : Solar energy, Solar pond, Heat storage, Saltless solar pond, Gel pond.

1. 緒 言

ソーラーポンドは通常深さ1.5m程度の底部蓄熱層に太陽エネルギーを温水として蓄え、その上部に塩水濃度勾配層を形成して、その対流抑制作用で放熱を防止している。この塩水濃度勾配型ソーラーポンドに関しては現在かなり研究が進み、すでに実用化の段階に入っている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし塩水濃度勾配型ソーラーポンドは塩水濃度勾配の維持及び漏水時の周囲土壌への塩害の点で問題がある。そこで従来からこの難点を避けた無塩型ソーラーポンドが考えられ、各種型式のものが提案されている⁽³⁾。著者らも、すでに断熱層としての非対流層に高粘度の透明なポリマー溶液を用い、その粘性によって対流を抑制して放熱を防ぐ粘性安定型ソーラーポンドと、さらにそのポリマー断熱層を数枚の透明膜で分割して、その膜間に低濃度のポリマー溶液を充満して光の透過性を向上させた膜型粘性ソーラーポンドおよび断熱層として透明二重膜のカバーをポンド上に設け、これに夜間のみ断熱用発泡スチロールを充填するペレットーフ型ソーラーポンド等を提案し、その設計に必要な基礎的研究と実用化への

検討⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾を進めている。

本報はこれらの中で膜型粘性ソーラーポンドに関して、一次元モデルでのシミュレーション数値計算から得られたその性能に関する特性およびポンド設計のための指針を述べる。なお実用化に向けての検討についても若干触れることにする。

2. 膜型粘性ソーラーポンドの利点と特色

蓄熱水層の上部にポリマー等の透明な粘性剤の層を設け、その対流抑制による断熱効果で長期蓄熱を行う無塩型ソーラーポンドは、1978年に粘性安定ソーラーポンドとして L.H.Shaffer⁽⁷⁾ によって提案され、その後 S.Wilkins⁽⁸⁾ 他による性能確認のための研究が発表されている。またポンド上部の断熱層として、テフロンのような透明性の良い薄膜を数mm間隔で積層し、膜間にその膜と屈折率がほぼ等しい砂糖水、エステル等の溶液をみたしたメンブレン型ソーラーポンドの構想については、J.R.Hull⁽⁹⁾ の研究がある。これらの無塩型ソーラーポンドは従来の塩水ソーラーポンドにくらべ、(1)断熱層表面上にカバーがあるため、風雨塵埃等のために断熱層が破壊されたり、汚染されたりしない。(2)断熱層と蓄熱水層とが隔壁によって分離されているので、蓄熱水層からの熱抽出に際して断熱

1990年9月7日 原稿受理

* 近畿大学 教授

** 近畿大学 助教授

*** 近畿大学 講師

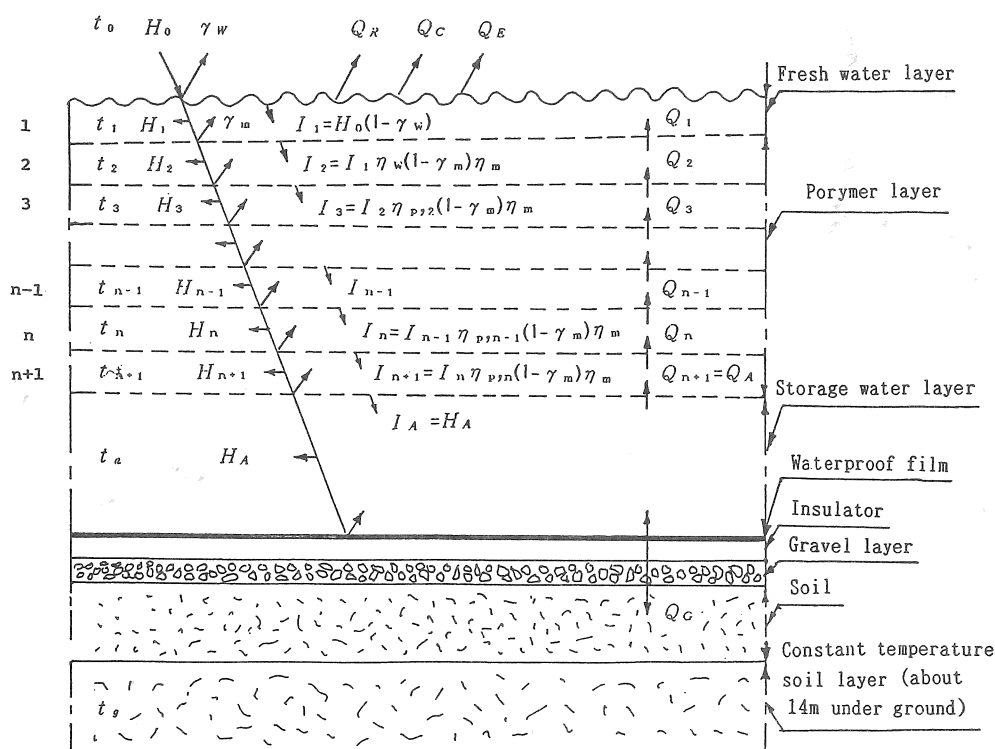


図1 膜型粘性ソーラーポンドの計算モデル

層が影響を受けない。(3)塩水濃度勾配層を維持するための連続的な保守は不必要である。(4)漏水に際して周囲土壌への塩害が生じない。等の利点がある。しかし、L.H. Shafferらの粘性安定ソーラーポンドでは、ポリマー層が分割されていないので、ポリマー溶液で対流抑制に必要な粘度を得るためには、その溶液層の厚さに応じて相当高濃度の粘性剤が必要であり、十分な光透過性が得られず、コストも高くなる。また、対流抑制のためにポリマーを半固体状にゲル化する方法もあるが、この場合は対流は完全に抑制され、光透過性も良好である。しかしゲル化のためにはポリマーをクロスリンク状にする厄介な手段が必要であり、また、大量のゲル化の実現は実際上困難である。一方、J.R. Hullのメンブレン型ソーラーポンドも膜の数が多いので、膜自身の反射、吸収に基づく光透過率の低下が大きく、構造が複雑でコストが高くなる欠点がある。

そこで著者らは図1に示すような膜型粘性ソーラーポンドを考案した。本提案では、粘性溶液として、比較的低濃度で高粘性が得られ、透明性、耐候性も良く、廉価であるイオン性ポリアクリルアミド水溶液S.P.R. 402(三洋化成製)⁽¹⁰⁾を用い、このポリマー層を分割するために、それほど高価でもなく、透明性、耐候性の

良い硬質ポリエステル膜のシクスライトクリーン(三菱モンサント製)を5~10cm間隔で設けている。このようにしてポリマー層の各分割層の厚みを小さくすれば、粘性による対流抑制効果が大きくなるので、ポリマー溶液自身の濃度は薄くてすみ、したがって、光透過率が大きくなり、ポンドの集熱性能が向上する。すなわち本構造では、Hullのメンブレン型ソーラーポンドほど多数の膜は必要でなく、また、ポリマー層が単一層であるL.H. Shafferらの粘性安定ソーラーポンドほど高濃度のポリマーを必要としないので、比較的低コストで高性能が得られる。ただし、この膜型粘性ソーラーポンドでは、ポリマー層を分割する膜数に最適設計条件がある。すなわち層間隔を狭くするために膜数を増やしすぎると、膜の反射、吸収損失の増加によってかえって断熱層全体での光透過率が低下し、ポンドの性能が低下することになる。そのために本研究では、この膜型粘性ソーラーポンドの断熱ポリマー層全厚さ、蓄熱水層厚さ及び分割膜数に関してポンドの用途、気象条件に応じた最適設計条件を考察した。すなわち、簡単化した一次元シミュレーションモデルによる理論解析式を導き、その数値計算の結果によってこのポンドの性能を議論した。

3. 理 論

3.1 モデルおよび計算式

計算のために図1に示すように、面積が十分広く、端面の影響を無視し得る一次元モデルポンドを仮定する。入射太陽エネルギー H_0 (単位面積、単位時間当り全天水平面日射量 $[W/m^2]$) は、まず、塵埃等からポンドを保護するための上部真水層 (0.05m) の表面でその一部が水面反射率 γ_w で反射され、残りの $I_1 = H_0(1 - \gamma_w)$ がこの真水層に入射する。その入射エネルギーは透過率 η_w の真水層内を透過し、 $H_0(1 - \gamma_w)\eta_w$ のエネルギーが反射率 γ_m の透明膜表面に達し、透過率 η_m で膜を透過する。従って図の第2層のポリマー層への入射エネルギーは $I_2 = I_1\eta_w(1 - \gamma_m)\eta_m$ となる。ついでこの入射エネルギーは透過率 $\eta_{p,2}$ の第2層のポリマー層を透過し、次の第3層のポリマー層に $I_3 = I_2\eta_{p,2}(1 - \gamma_m)\eta_m$ で入射する。以下順次反射、透過を繰り返して第 n 番目のポリマー層に

$$\begin{aligned} I_n &= I_{(n-1)}\eta_{p,n-1}(1 - \gamma_m)\eta_m \\ &= H_0(1 - \gamma_w)(1 - \gamma_m)^{n-1}\eta_w\eta_m^{n-1}\eta_{p,2}\eta_{p,3} \\ &\quad \cdots \eta_{p,n-1} \text{ で入射し、次の } n+1 \text{ 層には} \\ I_{n+1} &= I_n\eta_{p,n}(1 - \gamma_m)\eta_m \text{ で入射する。従って各層にはこれらの差の } H_n = I_n - I_{n+1} \text{ のエネルギーが吸収される。すなわち各層の単位面積、単位時間当りの吸収エネルギー } H_1, H_2, \cdots H_n \text{ および蓄熱水層の吸収エネルギー } H_R \text{ はそれぞれ次式で表わされる。} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_1 &= I_1 - I_2 \\ &= H_0(1 - \gamma_w)\{1 - (1 - \gamma_m)\eta_w\eta_m\} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\begin{aligned} H_n &= I_n - I_{n+1} \\ &= H_0(1 - \gamma_w)\eta_w(1 - \gamma_m)^{n-1}\eta_m^{n-1}\eta_{p,2}\eta_{p,3} \\ &\quad \cdots \eta_{p,(n-1)}\{1 - (1 - \gamma_m)\eta_{p,n}\eta_m\} \\ &\quad (\text{ただし } n \geq 2) \end{aligned} \quad \cdots \cdots (2)$$

$$\begin{aligned} H_R &= H_0(1 - \gamma_w)\eta_w(1 - \gamma_m)^n\eta_m^n\eta_{p,2}\eta_{p,3} \\ &\quad \cdots \eta_{p,n} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (3)$$

つぎに、各透明膜および蓄熱水層底部の止水膜で反射したエネルギーはすべてその上部の層に吸収されるものとし、また、各膜の熱容量は小さいので、これを無視すれば、上記の各吸収エネルギーと以下に述べるポンド上下面での熱損失および各層間の伝熱量との熱収支を計算することによって各層の温度変化が求まる。すなわち、ポンド上部真水層表面では反射損失 $H_0\gamma_w$ の他に、水面での放射熱損失 Q_R 、蒸発熱損失 Q_E 、および対流熱損失 Q_C が失われ、ポンド底部からは土中への熱損失 Q_G が失われ、各層間では、その溶液濃度を対流発生限界内としてあるので、それぞれの温度差に基づく熱伝導量 $Q_1 \cdots Q_n$ のみが移動するものと仮定する。ただしポンド内各層の温度 t_i および t_a は時々

刻々の気象条件に基づいて非定常に変化しているのであるが、ソーラーポンドは蓄熱容量が大きく、また、年間にわたる長期蓄熱方式であるから、計算を行う場合に分割刻み時間 $\Delta\tau$ を1時間程度にとれば、その程度の時間内では各層内の温度 t および出入熱量 Q は一定と考えることができる。従って各層内では定常的な熱収支として次式(4)~(6)が成立する。

$$t_1 = (H_1 - Q_R - Q_C - Q_E + Q_1) \cdot \Delta\tau / (G_w \cdot C_w) + t_1' \quad \cdots \cdots (4)$$

$$t_n = (H_n - Q_{n-1} + Q_n) \cdot \Delta\tau / (G_p \cdot C_p) + t_n' \quad (\text{ただし } n \geq 2) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$t_a = (H_R - Q_R - Q_G) \cdot \Delta\tau / (G_w \cdot C_w) + t_a' \quad \cdots \cdots (6)$$

ここで

t_1', t_n', t_a' : 一分割刻み時間前の温度 $[^\circ\text{C}]$

$\Delta\tau$: 分割刻み時間 $[h]$

$G_w \cdot C_w$: 水層の単位表面積当りの熱容量

$[Wh/(m^2 \cdot K)]$ ただし、

C_w : 水の比熱 $=4.18 [kJ/(kg \cdot K)]$ とする。

$G_p \cdot C_p$: ポリマー溶液層の単位表面積当りの熱容量

$[Wh/(m^2 \cdot K)]$ ただし、

C_p : ポリマー溶液の比熱=低濃度であるから水と同一値の $4.18 [kJ/(kg \cdot K)]$ とする。

Q_R : 放射熱損失 $[W/m^2]$ ⁽¹¹⁾

$$= 5.67 \varepsilon_s \{(T_1/100)^4 - (T_{sky}/100)^4\} \quad \cdots \cdots (7)$$

ただし、

ε_s : 真水層表面の放射率 $=1.0$ とする。

T_1 : 真水層の絶対温度 $=t_1 + 273.15 [K]$

T_{sky} : 等価天空温度 $=0.0532 T_0^{1.5} [K]$

T_0 : 周囲気温の絶対温度 $=T_0 + 273.15 [K]$

$$Q_C : \text{対流熱損失} = \alpha_0(t_1 - t_0) \quad \cdots \cdots (8)$$

α_0 : ポンド表面での対流熱伝達係数 $=46.5$

$[W/(m^2 \cdot K)]$ と仮定する。

Q_E : 蒸発熱損失 $[W/m^2]$ ⁽¹²⁾

$$= 8840.3 + 129.6 V_E (e_w - h_e \varepsilon_s) \quad \cdots \cdots (9)$$

ただし

V_E : 風速 $[m/min]$ = 年間平均 $12 [m/min]$ と仮定する。

e_w : 真水層温度の飽和空気の水蒸気圧 $[bar]$

h_e : 相対湿度=大阪での年平均値の 0.67 とする。

ε_s : 周囲外気温での飽和水蒸気圧 $[bar]$

Q_1, Q_n : ポリマー層から真水層および蓄熱水層からポリマー層への伝熱量 $[W/m^2]$

$$= K \cdot \Delta t$$

$$= \Delta t / \{(1/\alpha_w) + (\delta_r/\lambda_r) + (L_p/2\lambda_p)\}$$

ただし、

Δt : 両相の温度差 $[^\circ\text{C}]$

K : 両相間の熱貫流係数 $[W/(m^2 \cdot K)]$

α_w : 膜表面から水層への熱伝達係数 $[W/(m^2 \cdot K)]$
 $= 349 [W/(m^2 \cdot K)]$ と仮定する。

δ_f : 透明膜の厚さ $= 0.00015 [m]$

λ_f : 透明膜の熱伝導率 $= 0.14 [W/(m \cdot K)]$ とする。

L_p : ポリマー層の分割膜間隔厚さ $[m]$

λ_p : ポリマー層の熱伝導率 $= 20^\circ C \sim 80^\circ C$ の範囲で
 $0.594 \sim 0.672 [W/(m \cdot K)]$ とする。

$Q_2, Q_3, \dots, Q_{n-1}$: 各ポリマー層間の熱伝導による
 伝熱量 $[W/m^2]$

$$= \Delta t / \{ (\delta_f / \lambda_f) + (L_p / \lambda_p) \} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Q_6 : ポンド底面から土中への損失熱 $[W/m^2]$

$$= K_g (t_g - t_o) \\ = (t_g - t_o) / \{ (1 / \alpha_w) + (\delta_{fg} / \lambda_{fg}) \\ + (L_{rg} / \lambda_{rg}) + (L_g / \lambda_g) \} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、

K_g : ポンド底部より土中への熱貫流率 $[W/(m^2 \cdot K)]$
 $= 0.06 [W/(m^2 \cdot K)]$ とする。

t_g : 恒温土壌層の温度 $[^\circ C]$
 $=$ 地下14mで14℃とする。⁽¹³⁾

α_w : 蓄熱水層底部での熱伝達係数 $[W/(m^2 \cdot K)]$
 $= 349 [W/(m^2 \cdot K)]$ と仮定する。

$\delta_{fg} / \lambda_{fg}$: 止水膜の熱抵抗 $[(m^2 \cdot K) / W]$
 $\delta_{fg} = 1.5 [mm], \lambda_{fg} = 1.6 [W/(m \cdot K)]$ とする。

L_{rg} / λ_{rg} : 砕石層の熱抵抗 $[(m^2 \cdot K) / W]$
 $L_{rg} = 0.3 [m], \lambda_{rg} = 1.86 [W/(m \cdot K)]$ とする。

L_g / λ_g : 土壌の熱抵抗 $[(m^2 \cdot K) / W]$
 $L_g = 14 [m], \lambda_g = 0.85 [W/(m \cdot K)]$ とする。

3・2 計算プログラムのデータ

3・2・1 日射量と外気温

計算プログラムには大阪(北緯34°46', 東経135°37')
 の気象条件を用いた。日射量 H_0 は正確には時々刻々の
 気象データの入力が必要とするが、ソーラーポンドは
 年間にわたる長期的蓄熱であるので、各月毎の積算日射
 量と日射変化パターンさえ与えれば十分である。本計
 算の場合、各月毎の標準日射変化パターンに次式⁽¹⁴⁾
 $H_0 = (\pi H_d / 2 \tau_0) \cos \pi \{ (\tau - 12) / \tau_0 \} \quad \dots\dots (13)$
 を用い、これに月別の日積算全天水平面日射量の平均
 値 $H_d [kJ/(m^2 \cdot day)]$ 、および月別の1日当り日照時
 間の平均値 $\tau_0 [h]$ の実測データ⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を代入し、
 各時刻 τ での値を算出し、各月での値をデータとして
 入力した。また外気温 t_o に関しても同様に標準日変
 化パターンの次式で各月のデータを算出して用いた。

$$t_o = [0.5 \cos \{ \pi (\tau + 11) / 17 \} + 0.5] \\ \cdot (t_{max} - t_{min}) + t_{min} \quad \dots\dots\dots (14) \\ \text{(A.M. 0時} \sim \text{A.M. 6時)}$$

$$t_o = [0.5 \cos \{ \pi (\tau - 6) / 7 \} - 0.5] \\ \cdot (t_{max} - t_{min}) + t_{min} \quad \dots\dots\dots (15) \\ \text{(A.M. 6時} \sim \text{P.M. 13時)}$$

$$t_o = [0.5 \cos \{ \pi (\tau - 13) / 17 \} + 0.5] \\ \cdot (t_{max} - t_{min}) + t_{min} \quad \dots\dots\dots (16) \\ \text{(P.M. 13時} \sim \text{P.M. 24時)}$$

ただし、 t_{max} : 月別の日最高気温の平均⁽¹⁴⁾

t_{min} : 月別の日最低気温の平均⁽¹⁴⁾

3・2・2 透明膜の総合反射率 γ_m 、総合透過率 η_m および水面反射率 γ_w

γ_m, η_m の値は膜の上下界面内での多重反射の総合
 値として算出する。そのために、まず、膜界面での反
 射率 γ_1 を次式⁽²⁾によって算出する。

$$\gamma_1 = 0.5 \{ \tan^2 (i - \phi_1) / \tan^2 (i + \phi_1) \\ + \sin^2 (i - \phi_1) / \sin^2 (i + \phi_1) \} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ただし、

i : 各時刻の太陽光の入射角で緯度、日赤緯、時角
 等により算出される。[rad]

ϕ_1 : 入射する媒体中での屈折角 [rad]

$$\phi_1 = \sin^{-1} (n_0 \sin i / n_1) \quad \dots\dots\dots (18)$$

n_0 : 上部媒質の屈折率

n_1 : 下部媒質の屈折率

(屈折率の値は空気=1.0、水およびポリマー溶液=
 1.33、膜=実測により1.6とする)

つぎに、膜の透過率 η_1 は各時刻の入射角 i によっ
 て定まる光の通過距離比 $\sec \phi_1$ を用いて次の式(19)によ
 って算出される。

$$\eta_1 = 1 - (1 - \eta_v) / \cos \phi_1 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、 η_v : 膜への垂直光の透過率(実測により
 0.947とする)

これらの γ_1 および η_1 の値を用いて、透過膜の総合
 反射率 γ_m 、総合透過率 η_m の値が多重反射に基づく等
 比級数の和として次式で算出される。

$$\gamma_m = \gamma_1 \{ 1 + \gamma_1^2 (1 - \gamma_1^2) / (1 - \gamma_1^2 \gamma_1^2) \} \\ \dots\dots\dots (20)$$

$$\eta_m = \eta_1 (1 - \gamma_1^2) / (1 - \gamma_1^2 \gamma_1^2) \quad \dots\dots\dots (21)$$

そこで、上記の計算に必要な各時刻の透過距離比
 $\sec \phi_1$ の値は、あらかじめ各月の15日での値を代表デ
 ータとしてプログラム中に入力しておく。

水面反射率 γ_w は式(17)および式(18)により算出さ
 れるので、上記と同様に各月の15日での各時刻での値を
 求め、これを各月のデータとして用いる。

3・2・3 ポリマー溶液層透過率 η_p および水中透過 率 η_w

η_p の値は文献による精密な実測値⁽¹⁶⁾に基づいて算
 出した図2によって求める。この値は、エアマス=1の
 太陽光がポリマー層を透過する場合の透過率を示す。
 この場合ポンド内に入射した光は各層を屈折角 ϕ_i で斜
 めに透過するので、透過距離 $=$ (層厚さ) $\cdot \sec \phi_i$ の η_{pi}
 を用いる。なお η_{pi} の算出に先立って、使用するポリ
 マー溶液の濃度を決定しなければならない。これはポ

リマー分割層の膜間厚さ L_p と層内温度勾配に対応して決まる対流発生限界の濃度によって定まる。この層内対流発生限界に関しては、ポリマー溶液層が下方から加熱された場合について、予め著者らが行った予備実験結果⁽⁵⁾から誘導した次の実験式によって算出する。

$$\begin{aligned} (\Delta T/L_p)_{cr} : \text{対流発生限界温度差 } [^{\circ}\text{C}/\text{m}] \\ = (55 - 185 \ln L_p) \exp(4.66 L_p^{0.505} \ln \xi) \\ \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

ΔT : 膜間温度差 $[^{\circ}\text{C}]$

ξ : ポリマー溶液濃度 $[\%]$

L_p : 膜間距離 $[\text{m}]$

すなわち、プログラム中に図2の値をデータとして入力し、式(22)で算出された濃度 ξ に対応する透過率 η_p を求めて計算に用いる。

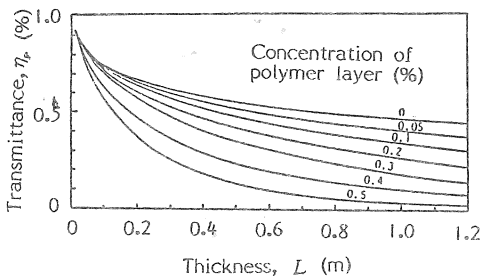


図2 ポリマー層のエアマス=1の条件での太陽エネルギー透過率

3.3 計算方法とその吟味

計算は前記の計算式および各データを入力したプログラムを用いて、まず、各層の初期温度および各層厚さ、膜数等の計算条件を設定した後、分割刻み時間 $\Delta\tau=1$ 時間毎に、式(4)(5)(6)によって上部真水層、各ポリマー層及び蓄熱水層の各温度 t を求め、その繰り返し計算をすることにより1年間の温度変化を算出する。なお、本理論の正当性を確認するため予め以下の各計算による吟味を行った。

- (1) H_0 の変化パターンを変更し、晴天と曇天や雨天の日を交互に設定した計算を行った。その結果は月間の積分日射量さえ等しければ年間の温度変化はほとんど同一であることが確認できた。
- (2) 実際の日射では散乱光を考慮しなければならないから、別に直散分離によって散乱光成分を分離して計算するプログラムを作成して計算を行った。直散分離すると約5%程度低い温度となったが、本研究の結論には影響しなかった。
- (3) 計算式中の各係数の値は従来のソーラーポンドの実験結果を考慮して定めたものであるが、これらの中で、 ε , α_0 , α_w , h_E , e_s 等については、それらの値を1~1.5倍変化させても計算結果の水温は5℃以下の差異しか生じなかった。ただしポリマー溶液の

熱伝導率 λ_p とポンド底部から土中への損失係数 K_d の値は計算結果に大きな影響をおよぼす。したがって実際の性能を予測するためには使用するポリマー溶液の種類およびポンド地下の地下水位位置等に応じてこれらに適切な値を定める必要がある。

4. 計算結果

4.1 蓄熱水層深さとポンド性能

図3はポリマー断熱層厚さ0.8m、分割膜数8枚で熱負荷無抽出の場合について各種蓄熱水層深さでの年間蓄熱水温度(各日の最高水温)の変化状態を示したものである。この計算は4月から運転開始したものであるが、どの蓄熱水層深さの場合でも、最高温度に達するのは9月~10月である。1年目を終わった4月の段階では初期値よりも20℃近く高温となるが、2年目以降に関しては図中に破線で深さ0.5mの場合について例示したように9月の最高温度に達した時点では1年目と同一曲線となり、3年目からも同じ変化を繰り返す。これは温度が高いと、それだけ放熱損失も大となり、熱バランスによって温度が定まるためと考えられる。

図示のように蓄熱水層深さが浅いと夏期の最高温度は高いが、冬期の温度が低い。逆に蓄熱水層が深いと熱容量が大きいので冬期の温度降下が少ない。従って、蓄熱水層の深さはポンドの用途に応じて適当に選ぶべきであるが、蓄熱水層深さ2m以上では図示のように冬期にはほぼ同一温度となり、一定温度以上にならないので、蓄熱水層はあまり深くしても無意味と思われる。なお、上記の留意点に関しては他のポリマー断熱層深さ及び負荷のある場合も同様である。

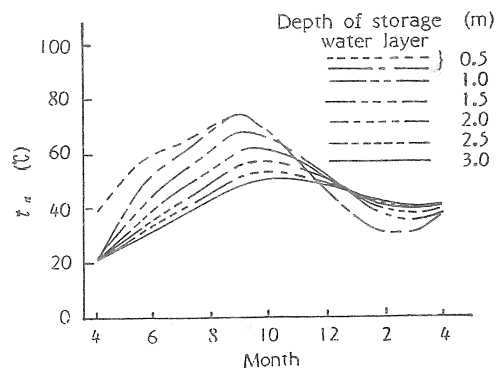


図3 各種蓄熱水層深さでの年間蓄熱水温 t_a の変化 (ポリマー層 0.8m、膜数 8枚、無負荷)

4.2 ポリマー層厚さと膜数の最適条件

前述したようにこの型のソーラーポンドではポリマー層を分割する膜数が最適である場合に蓄熱水層への到達エネルギーが最大となり、蓄熱水温が最高となる。

図4は蓄熱水層厚さ0.5m、ポリマー層厚さ0.5mの場合における分割膜数5～9枚での年間の最高到達水温 $t_{a,max}$ の計算結果を示す。図の場合に $t_{a,max}$ の値は7枚の場合が最大で、これがこの厚さでの最適膜数である。表1はポリマー層厚さが0.3～1.1mの範囲で、各層厚さについて、それぞれ前記の図4の場合と同様に、膜数を各種に変えて計算した結果から得られた最適膜数と、その場合の使用ポリマー濃度とを示す。なお、この最適条件の膜数は蓄熱水層深さおよび抽出負荷量によつては変わらない。

次に、上記の最適膜数によって計算した各ポリマー層厚さの場合の無負荷での年間の蓄熱水温 t_a の変化を図5に示す。図示のように冬季においては、ポリマー層厚さが厚いほど、その断熱効果が大となるので

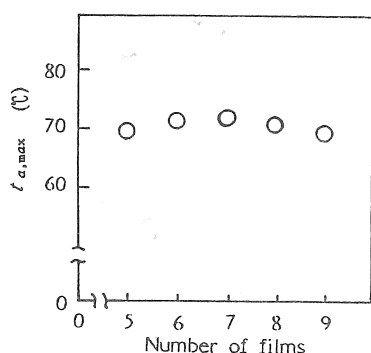


図4 膜数と蓄熱水最高到達温度 $t_{a,max}$
(蓄熱水層 0.5m、ポリマー層 0.5m)

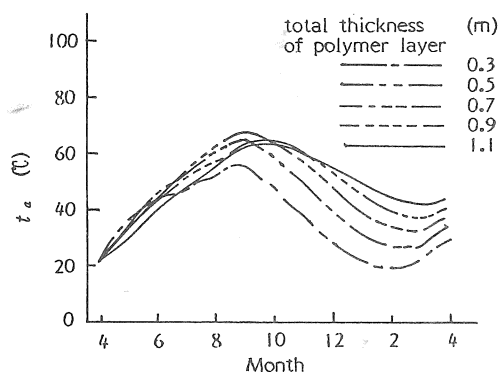


図5 各種ポリマー層厚さでの年間蓄熱水温 t_a の変化 (蓄熱水層 1m、膜数は表1の最適膜数、無負荷)

表1 各ポリマー断熱層厚さでの最適膜数

Total thickness of polymer layer [m]	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Number of films	5	6	7	7	7	8	8	8	9
Concentration [wt%]	0.40	0.33	0.29	0.30	0.31	0.28	0.29	0.30	0.27

t_a が大となっている。しかし、ポリマー層が1.1m以上に厚くなってもそれほど効果がなく、逆に夏季において、厚さ0.7mの場合が最大でそれ以上では $t_{a,max}$ の値が低下している。これは厚さの厚いことによる断熱効果よりも光透過率の低下の方が大きく影響するためである。従つてポリマー層全厚さの選定に際してはポンドの利用時期、使用温度に応じた最適な厚さを採用する必要がある。

4.3 負荷抽出の場合の性能評価

前節では負荷抽出なしの場合の温度上昇のみに着目した最適設計条件を議論したが、実用上では蓄熱層からの抽出可能エネルギー量が重要であり、これに対して最適設計条件を吟味する必要がある。そこで、ここでは温水を一定流量で蓄熱層から抽出し、これに代わつてその時点での外気温に等しい温度の冷水を同量補給する負荷抽出法に従つて計算された年間の総抽出可能エネルギー Q_T 、総抽出可能エクセルギー E_X および蓄熱水最高到達温度 $t_{a,max}$ とポリマー層厚さとの関係を議論する。ここで Q_T および E_X は次式で算出した値である。

$$Q_T = \sum G_W \cdot C_W \cdot (t_a - t_0) \cdot \Delta \tau \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$E_X = \sum G_W \cdot C_W \cdot \{ (T_A - T_0) - T_0 \cdot \ln(T_A / T_0) \} \cdot \Delta \tau \quad \dots\dots\dots (24)$$

T_A : 蓄熱水温度の絶対温度 [K]

T_0 : 外気温の絶対温度 [K]

G_W : 抽出量 [kg/h]

C_W : 抽出水の比熱 [kJ/(kg·h)]

$\Delta \tau$: 抽出時間 [h]

図6は一例としてポンドの単位表面積当り、単位時間当り抽出流量 $G_W = 0.05, 2.0$ [$\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] の場合の各ポリマー断熱層厚さに対する計算結果を示す。各場合の膜数はそれぞれの厚さの場合に表1に示す最適膜数で計算した。図示のように抽出流量の多い2.0 [$\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] の場合は Q_T 、 E_X および $t_{a,max}$ の値はポリマー断熱層厚さの薄い0.5mの場合に最高となる。しかし流量の少ない0.05 [$\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] の場合は、 Q_T と E_X は膜厚さ1.1mで最大、 $t_{a,max}$ は0.9mの場合が最も高い。この理由は抽出流量が少なければ、ポリマー層が厚くて断熱能力の大きい方が有利であるが、抽出流量が多くなると蓄熱水温度が上がらなくなるので、断熱能力よりもむしろ光透過率の良好なポリマー層の薄い場合に抽出可能エネルギーが大となるからである。

ただし、あまりにもポリマー層が薄いと蓄熱能力がなくなるので、厚さ0.5mで最大値が現れるものと思われる。なお、図7はポリマー層厚さ0.7m、膜数7枚の場合における Q_T と E_x の流量 G_w に対する関係を示す。 Q_T の値は抽出流量の増加とともに大となるが、得られる水温は低下するので図示のように E_x の値は1 [$\ell / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$] で最大値を示している。したがって抽出流量に関してもポンドの使用目的に応じて最適条件を決定すべきである。

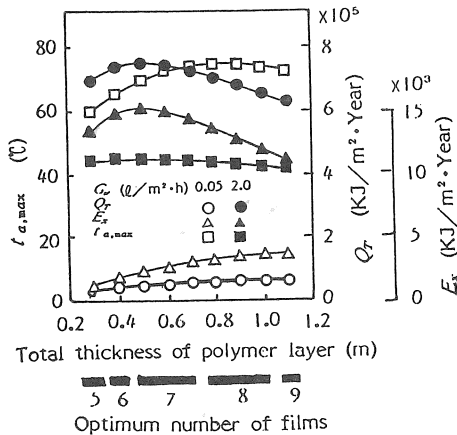


図6 年間総抽出可能エネルギー Q_T 、エクセルギー E_x 、および蓄熱水最高到達温度 $t_{a, \max}$
(蓄熱水層1m、抽出流量 $G_w=0.05, 2 \ell / \text{m}^2 \cdot \text{h}$)

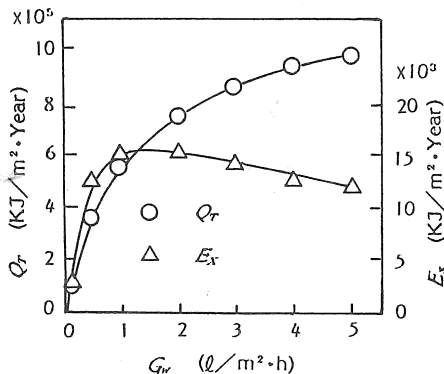


図7 年間総抽出可能エネルギー Q_T 、エクセルギー E_x と抽出流量 G_w との関係
(ポリマー層 0.5m、膜数 7枚、蓄熱水層 1m)

5. 実用性の検討

膜型粘性ソーラーポンドの実用的に適切な設計条件としては、前述の図6、7等より判断すると、ポリマー層0.5m、膜数7枚、蓄熱水層1mの構造であり、この場合の性能は抽出流量 $G_w=2$ [$\ell / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$]、抽出可能エネルギー $Q_T=7.6 \times 10^5$ [$\text{kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{year})$]、抽出

水最高温度 $t_{a, \max}=45^\circ\text{C}$ で、全天日射量に対するエネルギー利用率は16%である。これは米国のオハイオ州マイアミスバーク市に設けられた米国における実用第一号の塩水ソーラーポンド(温水プール用、面積2000 m^2)の1979年の実績である全熱使用量 5.06×10^5 [$\text{kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{year})$]、利用効率14.3%よりは良好な性能である。しかし、この程度の利用価値であれば、低緯度高日射の低開発国では有用であるが、我国のような場合は、石油価格が現在の数倍に高騰しない限り、コスト的に実用性があるとは言えない。ただし、本報のような無塩式のソーラーポンドはShaffer⁽⁷⁾も述べているように集合住宅地等の温水供給用小型ソーラーポンドとして利用すると、無害で保守が容易であるので有用である。また、実用化のためには、通常集熱器と結合したり、工場排熱などの蓄熱タンクと兼用することも考えられる。

図8は5m×5mの小型ポンドの設計例である。透明膜には透明繊維入りP.V.C膜を用い、運搬、加工および取付、取り替え工事などを考慮して5m×25mパネルの組立式構造とした。20m×20m以上の大型ポンドの場合は側壁のコンクリート壁を勾配3:1の土壁のままとするが、いずれの場合も止水のためのP.V.C黒色膜を底、側面に敷き、暗きょ配水管工事も行っている。

なお、膜型粘性ソーラーポンドの実用化に当たっては次に述べるような技術上の問題点に留意しなければならない。(1)大量のポリマー溶液の作成、注入、交換および廃棄方法。(2)ポリマー溶液の酸化防止、防藻および紫外線劣化対策。(3)ポリマー層と蓄熱水層との隔壁の支持方法。(4)反射板利用等による有効表面積の増加対策。

6. 結 論

新型式の膜型粘性ソーラーポンドの利点と特色を述べ、その一次元モデルによるポンド内各層の準定常的熱平衡方程式の数値計算によって蓄熱水温、抽出可能エネルギーおよびエクセルギー等の特性が解明された。考察によって得られた結論を要約すると次のようである。

- (1)一定ポリマー層厚さでの蓄熱水温度は、夏季には層厚さが薄いほど高く、冬季には約2mまでは、厚さが大となるほど高い。
- (2)各ポリマー層厚さに対してそれぞれ集熱率を最高とする最適な膜数およびポリマー溶液濃度が決定された(表1)。
- (3)蓄熱層厚さ1mの場合、最高蓄熱水温度を得るためのポリマー層厚さは夏季には約0.7m、冬季には約

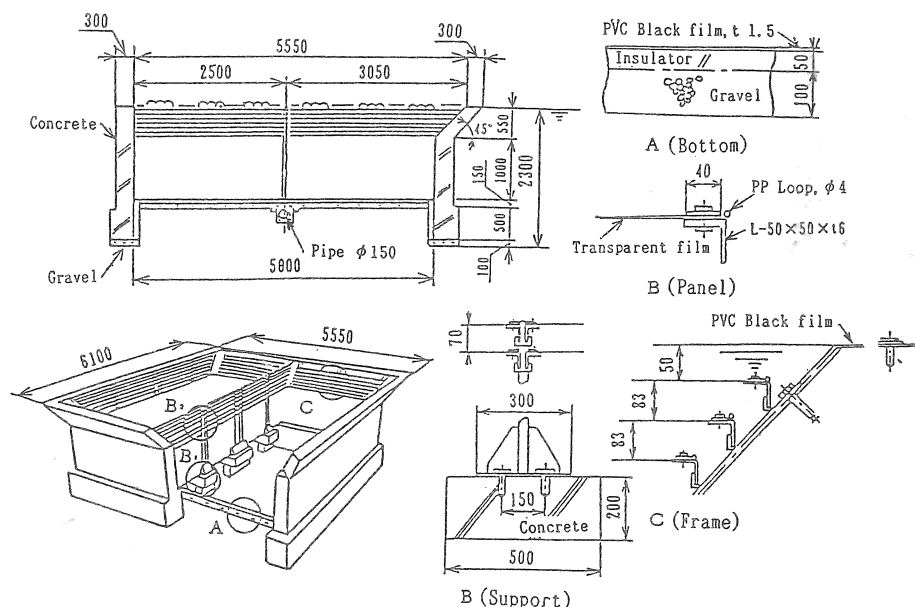


図8 小型ポンドの設計例

文 献

- 1.1mである。
 - (4)一定流量負荷抽出の際に抽出可能エネルギーおよびエクセルギーが最大となるポリマー層厚さは、蓄熱水層厚さ1mの場合、抽出流量の大きい2 [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] では0.5mであるが、流量が小となるほど大となる。
 - (5)抽出可能エネルギーは流量の増加とともに大となるが、次第に限界値に近づく。しかし抽出可能エクセルギーは一定の流量(約1~2 [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$])の場合に最大となる。
 - (6)実用上の最適設計条件はポリマー層厚さ0.5m、膜数7枚、蓄熱水層1m、抽出流量1~2 [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] である。
 - (7)膜型粘性ソーラーポンドは塩水型ソーラーポンドとほぼ同等の性能を有するが、構造上、コスト上の問題点を考慮すると小規模の集合住宅用、工場廃熱蓄熱との兼用等の用途に対して実用の可能性がある。
7. 謝 辞
- おわりに本研究に対して資料の提供、設計などに協力いただいた太陽工業株式会社、三洋化成株式会社と数値計算にたずさわった当時近畿大学院生の松下克己氏に深甚の感謝の意を表する。
- (1) H. Tabor, Review Article Solar Ponds, Solar Energy, 27-3(1981), 181-194.
 - (2) (財)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, 第1回(昭和57年6月), 第2回(昭和58年3月)報告書
 - (3) 一色尚次, ソーラーポンドとその開発状況, 日本機化学会誌, 84-757(1981), 1333-1337
 - (4) M. Taga, T. Matsumoto and T. Ochi, Experimental Studies on Viscosity Stabilized Solar Pond, Proc. Int. Conf. on Solar and Wind Energy Application, (1985-8), A, 6-11, Beijing, China.
 - (5) M. Taga, T. Matsumoto and T. Ochi, Research on Membrane Viscosity Stabilized Solar Pond Advance in Solar Energy Technology, 2(1987-9), 1587-1541, Hamburg
 - (6) M. Taga, Yoshio Matsuoka, Yoshihiro Matsuoka, M. Yamamoto, T. Taga and H. Minami, Application of Solar Pond for Heating a Greenhouse, Int. New and Renewable Energy Conf. (1990-6), Beijing, China.
 - (7) L. H. Shaffer, Viscosity Stabilized Solar Pond, Proc. Int. Solar Energy Soc., (1978-1), 1171-1175, New Delhi, India.
 - (8) E. S. Wilkins and T. K. Lee, Development of the Gel Ponds Technology, Solar Energy, 39-1(1987), 33-51
 - (9) J. R. Hull, Membrane Stratified Solar Ponds, Solar Energy, 25-4 (1980), 317-325
 - (10) 三洋化成工業株式会社(出願)多賀正夫(発明), 光透過性断熱材用ポリマー組成物, 特許(1983-2), 239-245
 - (11) J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Energy Thermal Processes (1974), 76-77, Wiley, New York, N. Y..
 - (12) W. H. Carrier, Fan Engineering, 5th Ed. (1949), 95, Buffalo Forge Co., Buffalo, U. S..
 - (13) 村下敏夫, 地下水学要論(1962), 163, 昭見堂, 東京
 - (14) 日本太陽エネルギー学会, 太陽エネルギーの基礎と応用(1981), 29, 31, オーム社, 東京
 - (15) 東京天文台, 理科年表(1987), 210-211, 丸善株式会社, 東京
 - (16) T. Makino, M. Maerefat and T. Kunitomo, Measurement of Viscosity-Stabilized Solar Pond, Proc. of the ASME-JSME Solar Energy Conf., (1987), 172-177.