

Solar Pond の蓄熱と熱抽出

Heat Storage and Heat Extraction from Salt-gradient Solar pond

農業土木試験場 正 員 木 ノ 瀬 紘 一
農業土木試験場 桜 井 喜 十 郎

I. はじめに

塩類の濃度分布を利用した solar pond は、図 1.1 に示すように、2 層構造をもっている。すなわち濃度勾配によって蓄熱中に生ずる熱対流を防止した非対流層 (non-convective zone) と、濃度勾配が存在しない熱利用のための蓄熱対流層 (convective storage zone) から成る。このタイプの solar pond では、塩類の濃度勾配による熱対流防止効果と、太陽光線が池中に透過するときの選択吸収性を利用して蓄熱される。このように solar pond はソーラーコレクタと蓄熱槽を兼ねた極めて粗放的な太陽エネルギー利用システムであり、主として夏場蓄熱し秋、冬期に利用するなど季節的蓄熱を目標としている。

本論は、この solar pond の蓄熱温度の推定法や熱を pond から抽出する方法を検討する。

II. 塩類の濃度勾配による対流防止

1. 熱塩層の安定条件

非対流層全域に亘って、対流を防止するためには、濃度分布は線形である必要がある。完全に対流が防止されていれば、温度分布も線形に近いものとなる。熱と温度の2重拡散場に対する既応の安定解析の結果から、対流防止に必要な濃度勾配の概略値を検討して見る。まず、Vernois の安定解析¹⁾によれば、steady convective mode に対して

$$R < R_c / \tau' + 27 / 4\pi^4 \quad (2.1)$$

overstable mode に対して

$$R < \frac{\sigma + \tau'}{1 + \sigma} R_c + \frac{(\sigma + \tau')(\tau' + 1)}{\sigma} \cdot 27 / 4\pi^4 \quad (2.2)$$

ただし $\tau' = k_c / k_w$ である。

また Nielsen らの解²⁾は、

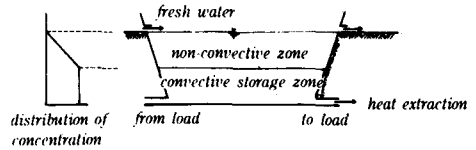


図 1.1 solar pond の概要

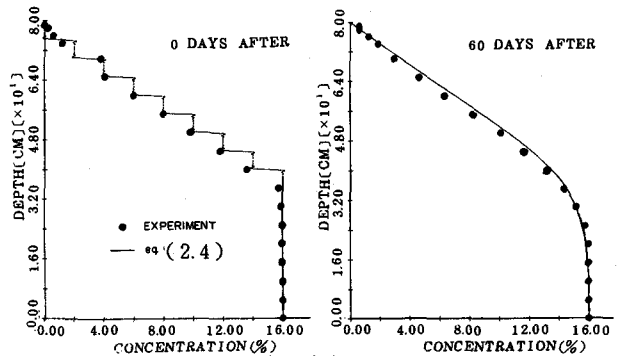


図 2.1 濃度分布の変化

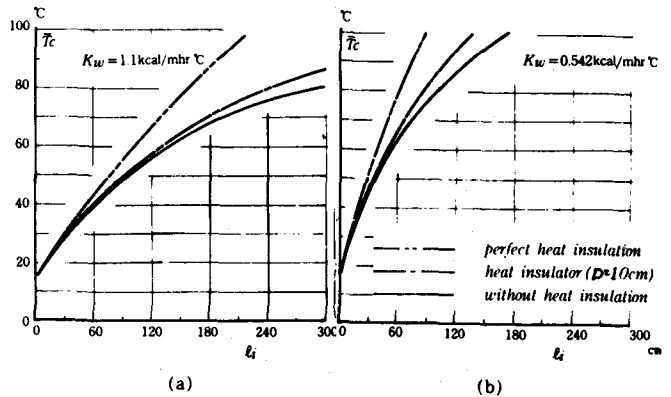


図 3.1 非対流層の厚さ ℓ_i による蓄熱温度の変化

$$\alpha_T G_T < \alpha_c G_c \tau'^{1/2} \quad (2.3)$$

である。(2.1)、(2.2)と(2.3)式の解から、勾配 G_T が $100^\circ\text{C}/\text{m}$ に対する食塩を溶質とした限界濃度勾配を試算すると、それぞれ 0.038, 4.56, $16.3 (\%/\text{m})$ が得られる。それぞれの値には、大きな差が見られ確定できない。しかし solar pond の場合は表面での風波や熱抽出時に有限振幅の攪乱が加わ

ることもあり、普通 15～20 (%/m) 程度の濃度勾配を付与することが多い。

2. 初期濃度分布の設定と拡散

この濃度分布は、pond を数層に分割して各層に一定濃度の塩水を記入しながら底部から階段状に初期濃度分布を設定する。そして拡散過程を利用して滑らかな勾配に拡散させる。濃度分布は、表面に真水を常時浮かせかつ、後述する熱抽出時に下層の蓄熱対流層の濃度が管理され、上下の境界条件が固定される。初期濃度分布の拡散過程は拡散方程式の解として次のように示される。

$$\frac{C}{C_0} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{2} \left(\frac{L-z}{L} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -k_c \left(\frac{2n-1}{2L} \right)^2 \cdot t \right\}$$

$$B_n = \frac{4}{(2n-1)\pi} \left\{ \sum_{m=M'}^M 2C_m' \cos \frac{(2m-1)(2n-1)}{4M} \right. \\ \left. \cdot \sin \frac{2n-1}{M} \pi + \sin \left(\frac{2n-1}{2M} \pi (M'-1) \right) \right\}$$

$$C_m' = \frac{1}{M} \left\{ (M'-1) + \frac{1}{M-M'} \sum_{m=M'}^M (M-m) \right\}$$

$$M = L/dz$$

$$M' = d/dz$$

図 2.1 に我々が行った実験結果との比較した例を示したが、実測値は屋外での蓄熱実験中に得られたものである。

III. 蓄熱温度の変化

1. 太陽光の透過特性と蓄熱温度

塩類の濃度分布によって対流防止が実現されていると考え、深さ z における断面平均蓄熱温度 $T(z)$ は、次の熱伝導方式で把握される。

$$\rho_w \frac{\partial T}{\partial t} = K_w \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial H(z)}{\partial z} \quad (3.1)$$

ここで、 $H(z)$ は、 z の深さまで池表面から透過してくる日射量で、太陽光の波長帯によってその透過特性が異なる。一般に水中透過日射量 $H(z)$ は、水面を原点とすると次のように表示される。

$$H(z) = \tau H_s \sum_{n=1}^4 \eta_n \exp(-\mu_n z) \quad (3.2)$$

この μ_i , η_i は、A. Defant の透明度の高い海水での実測値によれば、表 1³⁾ に示すようである。

2. 蓄熱温度の変動

pond が設置されて、数年経て蓄熱温度が定常振動的に変化するような、pond の温度変化は、(3.1)

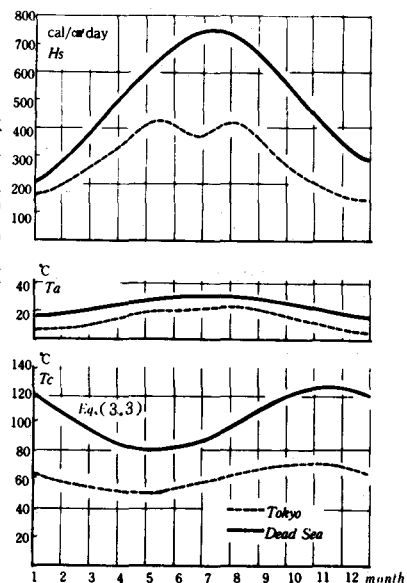


図 3.2 蓄熱温度の年変化の計算例

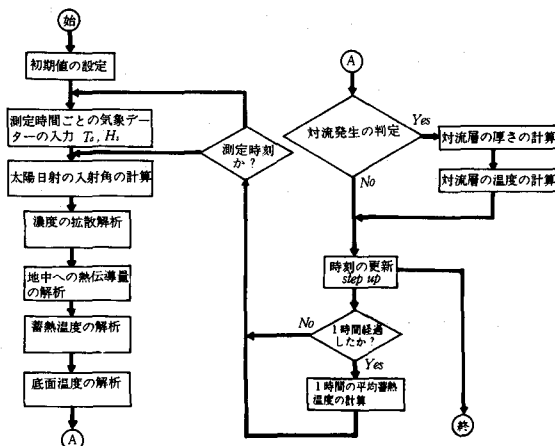


図 3.3 シミュレーションの手順

i	波長帯 (microns)	η_i	$\mu_i \text{ cm}^{-1}$
1	0.2 ~ 0.6	0.237	0.32×10^{-3}
2	0.6 ~ 0.75	0.193	4.5×10^{-3}
3	0.75 ~ 0.9	0.163	0.03
4	0.9 ~ 1.2	0.179	0.35

表 1. 海水の透過特性³⁾

式の解として、

$$T_c(d_a) = \bar{T}_c + \sum_{k=1}^5 (\tilde{T}_{co})_k \cos \{ \omega_k d_a - [(\phi_s)_k + (\phi_t)_k] \} \\ + (\tilde{T}_{co})_6 / 2 \cos \{ \omega_6 d_a - (\phi_t)_6 \} \quad (3.3)$$

$$\omega_k = 2\pi k / 365$$

で把握される。これは気温と日射量を月別平均量を用いて6次のフーリエ級数に展開した気象条件に対する応答を見たものである⁴⁾。 $\bar{T}_c$ は、年平均日射量、気温から規定される年平均蓄熱温度で、

$$\bar{T}_c = \frac{K_w/\ell_i \left[\bar{T}_a + \frac{\tau \bar{H}_s}{K_w} \sum_{n=1}^6 \frac{\eta_n}{\mu_n} (1 - e^{-\mu_n \ell_i}) \right]}{K_w/\ell_i + U \cdot A_B/A_s} + \frac{A_B/A_s}{K_w/\ell_i} \frac{U \cdot T_{s\infty}}{U \cdot A_B/A_s} \quad (3.4)$$

と示される。ここでUは周囲の地中へ熱伝導される熱量を算定するための熱コンダクタンスであり、半球状に熱伝導する半無限体の熱伝導の解と断熱のために周囲に入れる断熱材の効果をあわせて示したものであり、次のように示される。

$$\frac{1}{U} = \frac{D}{K_D} + \frac{r_0}{K_s}, \quad 2\pi r_0^2 = A_B \quad (3.5)$$

一方、 $(\tilde{T}_{co})_k, (\phi_t)_k$ は蓄熱温度 T_c の変動振幅と位相の k 次成分を示している。これには、Rabl³⁾らが求めた単一余弦波変動の日射と気温に対する応答を使う。すなわち、

$$(\phi_t)_k = (\phi_a)_k + \arctan\left(\frac{R\beta + \alpha}{R\alpha - \beta}\right)$$

$$(\tilde{T}_{co})_k = \frac{\alpha \cos(\phi - \phi_a) + \beta \sin(\phi - \phi_a)}{(K_s/\sigma_s)(K_w/\sigma_w)G_+}$$

$$\sigma_s = \sqrt{2(K_s/\rho_s)/\omega}$$

$$\sigma_w = \sqrt{2(K_w/\rho_w)/\omega} \quad (3.6)$$

である。ここで、 α, β, R, G_+ は光の透過特性や熱伝導率、pondの規模などの関数である（詳細は参考文献3、4））。
図3.1は(3.4)式を用いて、非対流層の厚さ ℓ_i が年平均蓄熱温度に与える影響を東京の気象データを用いて試算した例を示した。また図3.2は東京とイスラエルの死海の年変動のようすを試算した例を示した。いずれもpondは表面積160 m^2 で図3.2の例は非対流層と蓄熱対流層をとともに1.5 mとしてある。

3. 気象観測値を用いたシミュレーション

次に1時間間隔程度で観測される気温と日射量の観測値を用いて蓄熱温度を推定し、試験用に造成した solar pond の実測結果と比較する。この場合の周囲地中への熱伝導量 q_s は次のように求める。すなわち、熱特性が均一な土壌を想定し、半無限体の非定常熱伝導問題として取り扱う。まず pond 水の温度は気象の変化よりゆるやかに変化すると考えられるから、蓄熱温度が時間間隔 Δt 毎のstep状に変化するものと仮定し熱伝導方程式を解くと、pond 深さ z の所で側壁から x はなれた地点の地温 T_s は、

$$T_s(z, x, t) = \sum_{N=1}^N (T(z)_N - T(z)_{N-1}) \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{k_s[t - (N-1)\Delta t]}}\right) + T_0 \quad (3.7)$$

と表わされる。ただし、 $t = N\Delta t$, $\text{erfc}(\bullet)$ は補誤差関数である。従って周囲地中への heat flux q_s は

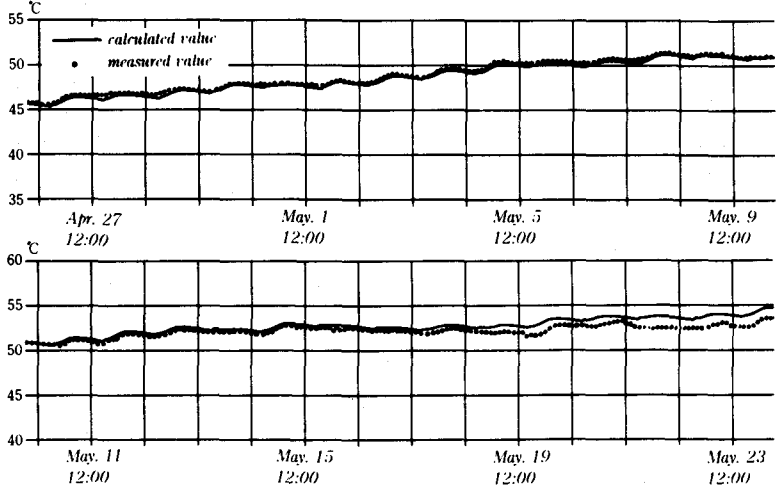


図 3.4 蓄熱温度のシミュレーションの例

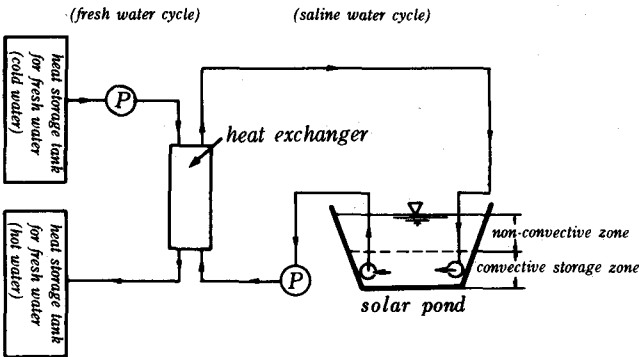


図 4.1 熱抽出システム

$$q_s(t) = -K_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = K_s \sum_{N=1}^N \frac{T(Z)_N - T(Z)_{N-1}}{\sqrt{\pi k_s [t - (N-1) \Delta t]}} \quad (3.8)$$

と表わされる。一方、表面と底面の境界条件を次のように設定する。表面においては、顕熱、潜熱による熱伝達および放射冷却などの現象が加わる。著者らもこれらを考慮した熱収支を検討した⁵⁾が、次のように、日平均的に見れば表面温度 $T(0)$ と気温との偏差はさほど大きくないことから、

$$T(0) = T_a \quad (3.9)$$

と近似する。一方下層の蓄熱対流層の温度は起る熱対流によって均一な温度となっているものとし、かつ底面から地中への熱伝導量を (3.8) 式から求めるものとするれば、

$$\begin{aligned} \rho_w \ell_c \frac{\partial T}{\partial t} &= H(\ell_i) - q_s(L) \frac{A(L)}{A(\ell_i)} - \frac{A_B(\ell_c)}{A(\ell_i)} q_s(\ell_i) \\ &\quad - K_w \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=\ell_i} - \frac{Q_L}{A(\ell_i)} \end{aligned} \quad (3.10)$$

が底面の境界条件式である。右辺の最後の項は、熱利用のために pond 外へ熱抽出される熱量 Q_L の効果を示している。

シミュレーションの手順を図 3.3 に示した。支配方程式 (3.1) 式および (3.10) 式を差分近似し、1 時間間隔で気象観測される気温と日射量を入力しながら数値積分により蓄熱温度分布を計算する。濃度分布の変化は (2.4) 式を使用するが、一度でも対流が部分的に発生した後は、濃度の拡散方程式を直接差分近似して数値積分より求める。対流の発生の有無については、これら計算された蓄熱温度と濃度分布の値から (2.3) 式の安定限界式をもちいて対流の発生を判定しながら対流層の厚さを計算する。この層の温度、濃度は層の平均量として補正しながら計算を進める。

図 3.4 に 1980 年 1 月から 6 月までの気象観測値を用いてシミュレーションを行った結果と試験 pond の実測値の比較の例を示した。

IV. pond からの熱抽出

1. 熱抽出システム

pond の下層の蓄熱対流層に蓄熱された熱を利用するとき何らかの方法で熱を pond 外に抽出しなければならない。この方法には pond 内で heat pipe や heat

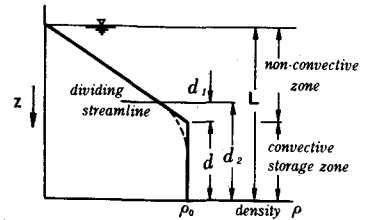


図 4.2 solar pond 密度場

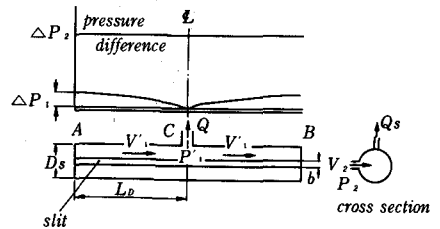


図 4.3 取水管の構造と圧力分布

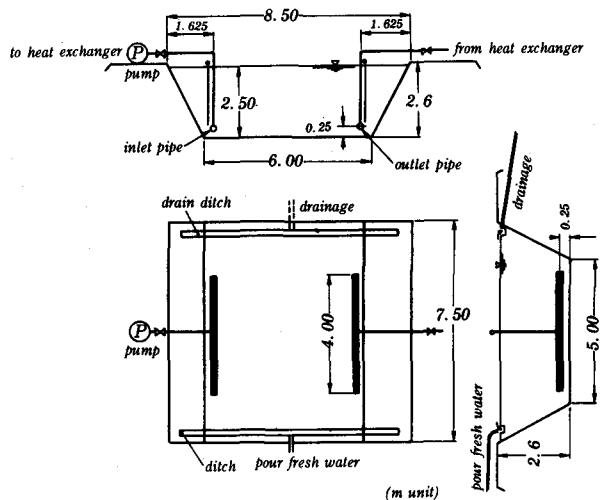


図 4.4 熱抽出実験用の solar pond

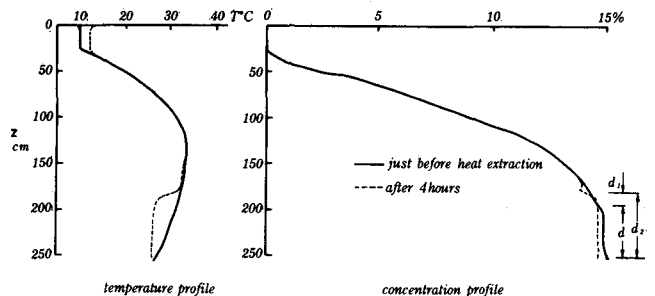


図 4.5 熱抽出前後の温度と濃度の分布

pump によって熱輸送しやすい媒体に熱交換して、熱だけを熱抽出する方法がある。しかし、この方法によって効率よく抽出を行なうには、pond の断面いっぱいheat pipe 網によって面的な熱交換を行なう必要がある。これには設備費が高くつく。そこで蓄熱対流層だけを選択的に流動させながら pond 水を選択的に pond 外に取水して pond 外で熱交換を行なう方法を考える。図 4.1 に、今回我々が採用した熱抽出システムの一部を示した。蓄熱対流層の蓄熱塩水は、取水管から取水され、熱交換などの熱利用によって冷却され、反対側に設置されている吐出管まで送水されて再び pond の蓄熱対流層に帰流させられる循環系によって熱抽出される。このとき、熱対流層だけを選択的に流動させることによって上層の非対流層の濃度分布が攪乱されることを最小限におさえる必要がある。さらに熱抽出の効率をあげるためにはこの流動の流速分布を水深方向にも横断方向にもなるべく一様になるようにして、熱のとり残しを少なくするようにする必要がある。

2. 蓄熱水の選択取水

熱抽出する前の密度分布は、図 4.2 のように点線に示すものであるが、解析には直線に示すように model 化する。密度勾配の存在しない底面から d の蓄熱対流層の流れは、流速が極めて遅いことから流れをポテンシャル流れと近似する。非対流層は一樣密度勾配と考える。分離流線は両層の境界面よりも上層に形成される。取水流量や密度勾配あるいは pond の規模などによってこの分離流線の位置が変化するが、攪乱領域を分離流線よりも下部の部分とすると非対流層の攪乱領域を推定することができる。分離流線の位置は次のように把握される。蓄熱対流層の流動は pond 底面に設置される取水・吐出管による line sink と line source によって行なわれ、これによる非対流層との境界面での流速分布を、ポテンシャル流の解析より求める⁶⁾。この結果と Koh の解析⁷⁾ による一樣密度勾配の密度場の line sink の解を組み合わせ、非対流層の攪乱領域の連行量を求めると次のようになる。

$$\Delta q = Q \left(1 - \frac{1}{1 + 1 / (0.284 \alpha_0 \ell^{2/3}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin N}{\sinh(Nd/\ell)}} \right)$$

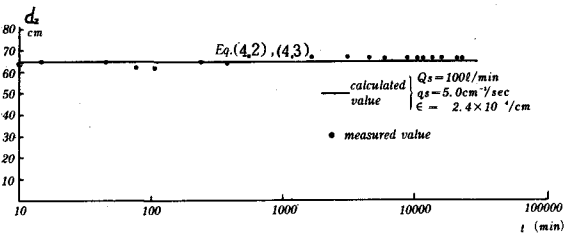


図 4.6 底面から分離流線までの位置の経時変化

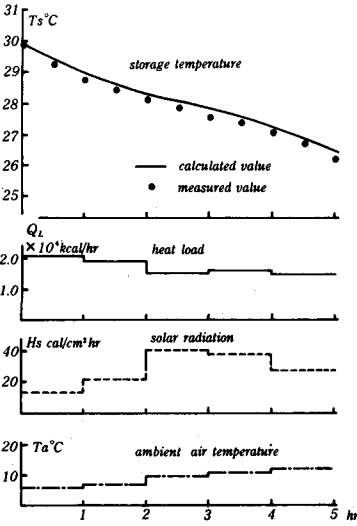


図 4.7 熱抽出による蓄熱温度の変化

$$N = \frac{2n-1}{2} \pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.1)$$

$$\alpha_0^6 = \epsilon g / D \nu, \quad \epsilon = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

ここで Q は単位幅当の取水流量である。この連行流量 Δq を使って、境界面から分離流線までの距離 d_1 は、Debler⁸⁾ の実験結果を使用すれば、

$$(d_1 / (L - d))^2 = 3.95 \Delta q / ((L - d)^2 \sqrt{g \epsilon}) \quad (4.2)$$

と表わされ、底面から分離流線の位置 d_2 は、

$$d_2 = d_1 + d \quad (4.3)$$

となる。

以上は水深方向と流れ方向の 2 次元流としての解析である。次に line sink (line source) が実現し、かつ横断方向にも流速分布がなるべく均一となる取水、吐出管の水理構造を考える。(管内外の圧力関係が逆になるが取水と吐出管は同じ水理関係にあるの

で取水管を例に検討する。)取水管の構造の概略を図 4.3 に示した。円管にスリットを入れて管の中央部から取水する。この取水によって管内の中央と両端では Δp_1 の圧力差が生じ、中央部ほど多く流入する偏流が起こる。この影響がなるべく顕在化しないよう、管内外の圧力差 Δp_2 を Δp_1 に比して十分大きくするように設定する。f を流入損失係数とすると、その条件は、

$$\Delta p_1 / \Delta p_2 = 16 / \pi^2 \left[1 / (1+f) (b/D_s)^2 (L_D/D_s)^2 \right] \quad (4.4)$$

と表わされる。今回、用いた取水・吐出管は $b=2\text{mm}$ $D_s=20\text{cm}$ とし $L_D=2.0\text{m}$ とし $\Delta p_1 / \Delta p_2 \approx 0.01$ と設計した。

図 4.4 に示す熱抽出システムを有する solar pond を造成して、熱抽出実験を行なった。図 4.5 はこの pond での実測された、熱抽出前後の温度および濃度分布の一例である。下層の温度分布から判断するとこの層だけが流動し熱交換されていることが確認される。分離流線の位置を図 4.5 で示す方法で測定し、その経時変化を見たものが図 4.6 である。若干の変動があるが、(4.2)(4.3)式で把握される値と大差ない結果を得た。

3. 熱抽出による蓄熱温度の変化

この熱抽出システムで熱抽出を行なったとき、下層の蓄熱温度の変化を見たものが図 4.7 である。図中の実線はⅢ章で見たシミュレーションの方法を使用した推算結果である。 Q_L , H_s , T_a は実測の値でこれらの値を入力値としている。

本研究は、農水省のプロジェクト研究 (GEP 82-IV-1-11) の一環で行なったものである。

参考文献

- 1) Veronis, G. (1968): Effect of stabilizing gradients of solute on thermal convection. J. Fluid Mech 34, 315 ~ 336
- 2) Nielsen, C. F. and Rabl, A. (1975): Salt requirement and stability of solar ponds. Proc joint Conf. Am. Section, Int. Solar Energy, Solar Energy Can. 183 ~ 187
- 3) Rabl, A. and Nielsen, C. E. (1975): Solar ponds for space heating. Solar Energy, 7, 1 ~ 12
- 4) 木ノ瀬紘一・桜井喜十郎 (1981): 塩類の濃度勾配を利用した solar pond の吸熱・蓄熱に関する研究 (II). 農土試報, 21, 203 ~ 225
- 5) 木ノ瀬紘一・桜井喜十郎 (1980): 塩類の濃度勾配を利用した

Solar Pond の吸熱・蓄熱に関する研究 (I). 農土試報, 19, 65 ~ 84

- 6) 木ノ瀬紘一・桜井喜十郎 (1981): Solar Pond からの蓄熱水の選択取水, 農土試報 B 49, 56 ~ 66.
- 7) Koh, R. C. Y. (1966): Viscous stratified flow toward a sink. J. Fluid Mech., 24(3), 555 ~ 575
- 8) Dehler, W. R. (1959): Stratified flow into a line sink. Proc. ASCE, 85, EM3, 51 ~ 65

記号

$A(z)$, $A_B(z)$	: 深さ z での pond の断面積と側面積
A_B , A_s	: pond の総側面積と表面積
b , D_s , L_D	: 取水管のスリット幅, 直径, 半分の長さ
C , C_o	: z の深さと蓄熱対流層の濃度
D	: 断熱材の厚さ
d	: 下層の濃度勾配のない層の厚さ
d_2	: 分離流線の位置
d_s	: 日数
f	: 流入損失係数
G_T , G_o	: 温度と濃度勾配
g	: 重力の加速度
H_s , $H(z)$	: 表面日射量と z の深さでの透過日射量
k_c	: 濃度の拡散係数
K_D	: 断熱材の熱伝導率
K_s , k_s	: 周囲土壌の熱伝導率と温度伝導率
K_w , k_w	: pond 水の熱伝導率と温度伝導率
ℓ	: pond の半幅
L	: pond の水深
ℓ_i , ℓ_c	: 非対流層と蓄熱対流層の厚さ
Q	: 熱抽出のための取水流量
Δq	: 連行流量
q_s	: 地中への heat flux
Q_L	: 抽出熱量
R , R_s	: 温度と濃度に関する Rayleigh 数
$T(z)$	: 深さ z における蓄熱温度
T_c , $\bar{T}_c$ ($\bar{T}_{co}$) $_k$	: 蓄熱対流層の温度, その平均量, k 次成分の変動振幅
T_s , $T_{s\infty}$	: 周囲地温と無限遠点の地温
α_T , α_c	: 温度と濃度の膨張率
ρ , ρ_w	: pond 水の密度と熱容量
σ	: Prandtl 数
τ	: 表面での日射の透過率
ϕ_s , ϕ_a , ϕ_t	: 日射, 気温および蓄熱温度の位相