

## 寒冷地における塩水太陽池の熱特性評価\*

稲葉英男\*<sup>1</sup>, 福田武幸\*<sup>2</sup>Numerical Simulation of Thermal Performance of a Salt-Gradient  
Solar Pond in a Cold Climate

Hideo INABA and Takeyuki FUKUDA

A one-dimensional numerical model which simulates the dynamic thermal performance of stratified salt-gradient solar pond is described. The model simulates the thermal performance in the upper convective layer, the nonconvective layer and the lower convective layer in a cold climate. In addition to the energy flux in the solar pond, the model simulates the varying ice thickness appearing in the upper convective layer during the winter season. From the results, it is noticed that it is important to maintain the optimum thickness of the nonconvective layer and the clearness of the upper convective layer for the high thermal efficiency of the salt-gradient solar pond.

**Key Words:** Salt-gradient Solar Pond, Heat Storage Characteristics, Ice Formation, Numerical Simulation

## 1. 結 論

太陽池(ソーラポンド)は、広い池に塩水や水などの熱容量の大きな液体を溜めて置き、降り注ぐ太陽エネルギーを低温集熱(最大100°Cくらい)すると同時にその液体の大きな熱容量を利用して、それ自体を蓄熱装置とするものである。太陽池は通常の太陽熱利用システムに比してその大きな蓄熱能力にもかかわらず装置が簡単で、種々の地域で容易に利用可能な技術である。また、その蓄熱容量の大きさより、太陽エネルギーの日単位での変化の影響をほとんど受けず、太陽池の蓄熱水温度は、日射の季節的变化により比較的長周期の変化をするために長期の太陽エネルギー蓄熱が可能となる。近年太陽池は、太陽熱エネルギーの蓄積ばかりでなく、各種低温廃熱の蓄熱場としての利用も考えられ始めている。太陽池には、蓄熱部より大気への熱対流による熱損失防止のための種々の方策が提案され、その種類も多岐にわたる<sup>(1)</sup>。本研究は、図1(a)に示すように無機塩濃度を太陽池底部に向かうに従って増大した安定な非対流層(Non-Convective Layer)を

設けて、蓄熱層(下部対流層, Lower Convective Layer)よりの熱対流を抑え、上部熱損失を軽減する塩水太陽池を対象とする。すなわち、下部対流層である蓄熱層へ入射した太陽エネルギーは、非対流層を通して伝導伝熱による損失、太陽池側面および底面より土壌を経ての地下および大気への熱損失を差し引いた残りの熱エネルギーが蓄熱層に順次蓄積されることになる。非対流層の塩分濃度こう配は下方に従って塩分濃度が増大するように、濃度  $C$ 、密度  $\rho$  および温度  $T$  の関係で熱、物質拡散を考慮して次のように与えられる<sup>(2)</sup>。

$$(\nu + \alpha)(\partial\rho/\partial T)(\partial T/\partial x) + (\nu + D_s)(\partial\rho/\partial C)(\partial C/\partial x) > 0$$

実際の太陽池においては非対流層上部よりの風、水分蒸発、降雨などによる濃度こう配層の侵食および破壊、下部対流層よりの塩分分子拡散による濃度こう配層の破壊を防止する目的により清水または低濃度塩水を強制流動させる上部対流層が非対流層上部に付与される。塩水太陽池の歴史は1902年ハンガリーのKaleczinskyが、ハンガリーの天然塩水湖において、水深1.3mで、約70°Cの高温塩水の存在を発見したことに始まる。その後岩塩の豊富な低緯度地域で、太陽エネルギーの低温、大容量熱源としての人工の塩水

\* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年6月12日。

\*<sup>1</sup> 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中3-1-1)。

\*<sup>2</sup> 正員、北見工業大学 (〒090 北見市公園町165)。

太陽池に関する基礎研究が活発に行われるようになった<sup>(3)</sup>。一方、高緯度寒冷地域である南極において天然塩水太陽池が1971年に発見され、年平均気温 $-20^{\circ}\text{C}$ の極帯気候条件で約60mの深さで最大 $25^{\circ}\text{C}$ の塩水層の存在が報告されている<sup>(4)</sup>。最近に至り、平均気温 $-3\sim-4^{\circ}\text{C}$ のアラスカにおいても人工太陽池を建設し、冬期の暖房熱源とする計画が、太陽池の北側にアルミシートなどの反射板を利用し日射強度を高めたり、また冬期の放熱防止に太陽池表面に断熱材を利用するなどの工夫により進められている<sup>(5)</sup>。本研究は、比較的高緯度地域での人工塩水太陽池の可能性を、実際の太陽池におけるデータをもとに数値シミュレーションにより明らかにしようとするものである。

### 記号

- $A$ : 太陽池表面積  $\text{m}^2$   
 $C$ : 塩分濃度 %  
 $C_p$ : 定圧比熱  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$   
 $D$ : 太陽池直径  $\text{m}$   
 $D_s$ : 塩分分子拡散係数  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $F$ : 式(12)で定義される汚れ割合  
 $g$ : 重力加速度  $\text{m}/\text{s}^2$   
 $H$ : 絶対湿度  $\text{kg}/\text{kg}$   
 $H_s^*$ : 総水平全天日射量  $\text{W}, \text{J}/\text{month}$   
 $H_T$ : 水中日射透過熱量  $\text{W}$   
 $h_s^*$ : 日当たり水平全天日射量  $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{day})$   
 $h_T$ : 日射透過率  
 $i$ : 入射角  $^{\circ}$   
 $j$ : 分割要素  
 $K$ : 熱通過率  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$   
 $L$ : 太陽池深さ  $\text{m}$   
 $L_a$ : 融解潜熱量  $\text{J}/\text{kg}$   
 $l$ : 各層深さ  $\text{m}$   
 $N$ : 雲量 (0~10)  
 $n$ : 総分割要素数  
 $P_w$ : 水蒸気圧力  $\text{Pa}$   
 $Q$ : 熱量  $\text{J}$   
 $R$ : 太陽池半径  $\text{m}$   
 $Re_f$ : 反射率  
 $T$ : 温度  $\text{K}, ^{\circ}\text{C}$   
 $t$ : 時間  $\text{h}, \text{day}, \text{month}$   
 $U$ : 風速  $\text{m}/\text{s}$   
 $X$ : 水面よりの深さ方向の距離  $\text{m}$   
 $\alpha$ : 温度伝導率  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\alpha_s$ : 日射補正係数  
 $\beta$ : 水平全天日射量に対する直達日射量の割合

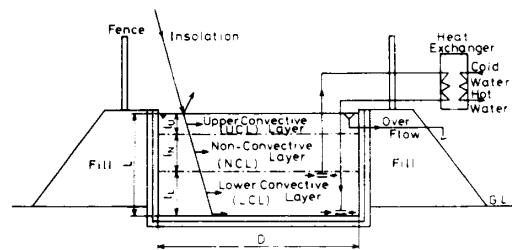
- $\gamma$ : 屈折率  
 $\lambda$ : 熱伝導率  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$   
 $\epsilon$ : 放射率  
 $\nu$ : 動粘性係数  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\phi$ : 相対湿度 %  
 $\rho$ : 密度  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $\sigma$ : ステファン・ボルツマン定数  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$

### 添字

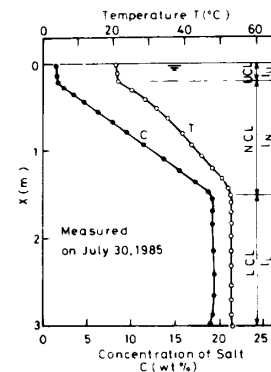
- $a$ : 大気条件  
 $cd$ : 伝導伝熱  
 $G$ : 地中  
 $i$ : 氷層  
 $L$ : 下部対流層  
 $N$ : 非対流層  
 $out$ : 熱抽出  
 $s$ : 雪層  
 $U$ : 上部対流層  
 $w$ : 水層

## 2. 実証太陽池の概要

有効表面積 $A=1509\text{m}^2$ (直径 $D=43.8\text{m}$ )、全深さ3mの円筒形有塩太陽池が、昭和60年に北海道網走市能取漁港(北緯 $41^{\circ}01'$ )に建設された。寒冷地域で太陽熱エネルギーを効率良く蓄積し、その熱エネルギー



(a) 塩水太陽池概略



(b) 温度分布、塩水濃度分布実測値

図1

を産業プロセスヒートとして利用する太陽池熱利用システムの実証試験が昭和60年～62年の3年間にわたって行われた。建設地は海岸近くで地下水位が1.9mと浅いことを考慮して、側壁を鉄筋コンクリート構造(厚さ300mm)底部をグランドレベルに基礎を設けた粗粒アスファルト敷(厚さ100mm)とし、内面仕上げは全面にクレタフォーム80mmの断熱施工を行っており、さらにその内面に日射吸収を兼ねた黒色の止水シートを設けた太陽池構造となっている。図1(b)の温度分布 $T$ および塩濃度分布 $C$ に示したように実証太陽池の下半分の $l_u=1.5$ mは $C=19\%$ (重量%)の塩水(NaCl)の下部対流層(Lower Convective Layer)である蓄熱層とし、その上に塩分濃度 $C=19\%$ の塩水より塩分濃度0%の清水の濃度こう配層が厚さ $l_n=1.3$ mにわたって非対流層(Non-Convective Layer)として設けてある。さらに上部に $l_u=0.2$ mの上部対流層(Upper Convective Layer)の清水層を持つ、全水深 $L=3$ mの塩水太陽池を本研究の対象とする。北緯 $41^{\circ}01'$ にある太陽池建設地は、少雪寒冷地で、10年の年平均気象条件は次のようである。

水平全天日射 $h_s^*=11.7$  MJ/( $m^2 \cdot day$ )、気温 $T_a=5.94^{\circ}C$ 、相対湿度 $\psi=75.8\%$ 、雲量(10分割) $N=6.68$ 、降水量 $=839$  mm、凍結指数 $=-610(^{\circ}C \cdot day)$ 。

下部対流層よりの熱抽出は、温塩水を円盤状ディフューザにより太陽池外部に導き熱交換器により熱抽出後の冷塩水は再び下部対流層に戻す方法によった。太陽池周辺には、風による上部対流層の波立ちによる非対流層上部の侵食防止のために高さ2mの防風フェンスが設けられている。また雨水および太陽池清澄度維持のために流入水排出用のオーバーフロー管が清水層上部に設けてある。太陽池の温度、塩濃度、清澄度、熱流量そして気象データ収録、維持管理のために太陽池中心迄棧橋、太陽池の傍に計測室および機械室が設けられている。

### 3. 太陽池の熱性能評価の数値シミュレーション

**3.1 数値シミュレーションの概要** 前述の実証太陽池を対象として、実測データをもとに太陽池熱性能評価に関する計算モデルを立案し、実際の太陽池に影響を及ぼす汚れ、結氷などを考慮した寒冷地における太陽池の非定常熱特性を解明する。図1に示されるように本実証太陽池の構造は、実証太陽池として十分精度の高いデータが再現よく得られる大きさとして表面積 $A=1509$   $m^2$ 、その形状としては、角部のないすなわち熱損失の少ない円形状そして円すい台形より内

部流れの比較的安定な円筒形状としてある。さらに本太陽池の設置場所の地下水位が約1.9mと高いことを考慮して太陽池本体は地面上に盛土した上に建設され、周囲への熱損失軽減の目的より太陽池側、底部は厚さ80mmのウレタンフォーム断熱材により覆われている。太陽池熱性能予想のための計算モデル誘導のため種々の仮定が行われた。塩濃度こう配太陽池は太陽日射を水中に透過させ、底部の対流層で集熱、蓄熱を行い、発生した熱対流を上部に設けた安定な塩水濃度こう配層を付与することにより抑制する大きな熱容量構造のものである。したがって、その熱特性の変動も比較的遅いものとなる。計算モデルは次の仮定の基に誘導された。

- (1) 太陽池の半径 $R$ と深さ $L$ の比が $R/L=7.3$ と比較的大きいことより、熱平衡支配方程式は深さ方向( $X$ 方向)の一次元熱伝導問題として扱う。
- (2) 上部対流層(U. C. L.)と下部対流層(L. C. L.)においては対流熱伝達を無視する。
- (3) 上部対流層に流入する降水及び清澄度維持用オーバーフロー水の出入りに伴う熱出入は無視する。
- (4) 塩分の拡散に伴う物質移動は無視する。
- (5) 物性値の評価はブジネ近似により行う。
- (6) 日射、気温などの気象データは、測定データを利用するものとし、その他の非対流層の厚さなどは極力測定データを用いることとし、極力実証太陽池特性に忠実に計算モデルを作成することとする。

#### 3.2 熱平衡基礎式

(1) 熱平衡基礎式の誘導 図2は円筒形太陽池(直径 $D$ )の濃度こう配層において熱エネルギー収支を深さ方向( $X$ 方向)に微少要素 $\Delta X$ を考慮して表したものである。微少要素 $\Delta X$ の熱収支は日射の吸収熱量

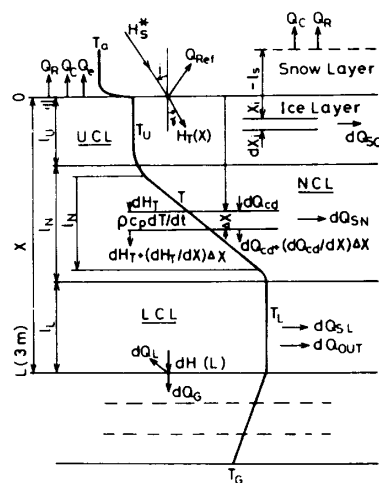


図2 計算モデル

$dH_T$ , 上方向への伝導熱移動  $dQ_{cd} = \lambda(\partial^2 T/\partial X^2)\Delta X A$ ,  
 そして側面への熱損失  $dQ_s = K_s \Delta X \pi D (T - T_a)$  により  
 定まり, 次のように表される.

$$\rho C_p (\partial T/\partial t) = \lambda(\partial^2 T/\partial X^2) - (1/A)\partial H_T/\partial X - (\pi D/A)K_s(T - T_a) \dots\dots\dots (1)$$

なお, 下部対流層の計算においては, 上式の右辺より  
 抽出熱量  $Q_{out}/(A l_L)$  を加味して計算する. ここで,  
 $A$ : 太陽池面積 ( $\pi D^2/4$ ),  $K_s$ : 太陽池側壁の熱通過率,  
 $T_a$ : 外気温度. また, 日射熱エネルギーの塩水透過率,  
 $h_T(X) = H_T(X)/H_s^*$  は直達日射割合  $h_l$  と散乱日射割合  
 $h_d$  の合計として Berlage の日射直散分離<sup>(6)</sup> の関係  
 より, その水平全日射  $H_s^*$  に対する直達割合  $\beta$  を用  
 いて次のように表現した.

$$h_T(X) = \beta h(X') + (1 - \beta)h(X)$$

ここで水と空気の屈折角  $\gamma$  で入射した直達日射の  
 深さ方向 ( $X$  方向) での到達距離  $X'$  は図 2 に示され  
 るように  $X' = X \sec \gamma$  の関係より得られる. なお, 屈  
 折角  $\gamma$  は, 日射の入射角  $i$  (太陽高度の関数) により変  
 化するものである. 太陽光の塩水透過率  $h_T(X)$  は, 本  
 実証太陽池の各層の塩濃度分布 (上部対流層  $l_U = 0.2$   
 m,  $C = 0\%$ ; 非対流層  $l_N = 1.3$  m,  $C = 0 \sim 19\%$ ; 下部  
 対流層  $l_L = 1.5$  m,  $C = 19\%$ ) を考慮し, 初期の段階で  
 は次のように深さ  $X$  に対して多項近似式とした<sup>(6)</sup>.

(i)  $0 < X \leq 0.25$ (m)

$$h_T(X) = 0.766 - 3.82X + 1.82X^2 - 31.3X^3 \dots\dots\dots (2)$$

(ii)  $X > 0.25$ (m)

$$h_T(X) = 0.516 - 0.262X + 0.191X^2 - 7.51 \times 10^{-2}X^3 + 1.11 \times 10^{-2}X^4 - 6.04 \times 10^{-4}X^5 - 2.29 \times 10^{-4}X^6 \dots\dots\dots (3)$$

式(2), (3)において, 右辺の第1項めを除いた各  
 項の係数には,  $X$  の次数に応じて長さに反比例する  
 次元が含まれる.

実際に太陽池の各深さ毎に吸収される日射エネルギ  
 $-H_T(X)$  は, 太陽池に入射する日射の棧橋, 側壁の  
 陰などによる影響を考慮した日射補正係数  $\alpha_s$  を用い  
 ると次のようになる.

$$H_T(X) = (1 - R_{ef})\alpha_s H_s^* A [1 - h_T(X)] \dots\dots (4)$$

ここで  $R_{ef}$  は日射の静水面での反射率で太陽高度  
 で決まり, 次のようになる.

$$R_{ef} = 0.5[\tan^2(i - \gamma)/\tan^2(i + \gamma) + \sin^2(i - \gamma)/\sin^2(i + \gamma)] \dots\dots\dots (5)$$

なお, 冬期結氷, 積雪層が太陽池上部に存在する場  
 合には, 太陽池内への日射の入熱はないものとする.

(2) 境界条件

(a) 上部対流層に結氷のない場合

$$\cdot X = 0; \lambda_w A (\partial T/\partial X) = Q_R + Q_c + Q_e \dots\dots (6)$$

ただし  $Q_R$ : 放射損失熱量

$$\varepsilon \sigma A T^4 (1 - 0.062N) \{0.49 - 2.1\sqrt{[H/(622 + H)]}\}$$

$H$ : 絶対湿度  $H = 18/(29/P_a) - 11$ ,  $P_a$ : 空気の蒸気圧,  
 $P_a = 101.3\phi[(T + 93)/193]^7$ ,  $\varepsilon$ : 水の放射率,  $Q_c$ : 対流  
 損失熱量,  $(5.3 + 3.6U)(T - T_a)A$ ,  $Q_e$ : 蒸発損失熱量,  
 $131(U + 68)(P_w - P_a)A$ ,  $P_w$ : 水表面温度に等しい飽  
 和蒸気圧,  $P_w = 101.3[(T + 93)/193]^7$

$\cdot X = L$ (太陽池底面)

$$\lambda_L A (\partial T/\partial X) = H_T(L) - K_c A (T_L - T_c) \dots (7)$$

ただし  $\lambda_L$ : 19%塩水の熱伝導率,  $T_L$ : 太陽池底面温  
 度,  $K_c$ : 太陽池底部より地中への熱通過率,  $T_c$ : 地  
 中 5 m の地温 (10°C 一定)

(b) 上部対流層に結氷, 積雪のある場合

$\cdot X = -l_s$ ( $l_s$ : 降雪厚さ)

$$\lambda_s A (\partial T/\partial X) = Q_R + Q_c \dots\dots\dots (8)$$

ただし,  $\lambda_s$ : 雪の熱伝導率,  $Q_R$  の算定には雪の放射率  
 $\varepsilon$  を使用する.

$\cdot X = 0$ (雪-水界面);  $\lambda_s(\partial T/\partial X) = \lambda_i(\partial T/\partial X)$

$$\dots\dots\dots (9)$$

ただし  $\lambda_i$ : 水の熱伝導率

$\cdot X = X_i$ (氷-水界面)

$$\rho L_a (\partial X_i/\partial t) = \lambda_i(\partial T/\partial X) - \lambda_w(\partial T/\partial X)$$

$$\dots\dots\dots (10)$$

$\cdot X = L$ (太陽池底面)

$$\lambda_L(\partial T/\partial X) = -K_c(T_L - T_c) \dots\dots\dots (11)$$

$\cdot$  太陽池側壁, 底部の熱通過率の算定

太陽池よりの熱損失算定のための太陽池構成要素の  
 寸法 (単位 mm), 熱伝導率  $\lambda$ (W/m·K) および熱通過  
 率  $K$ (W/m<sup>2</sup>·K) を図 3 に示す. 熱通過率  $K$  は各構成  
 要素の熱伝導より算定し,  $K = 1/[\sum_{j=1}^n (l_j/\lambda_j)]$  となる. 太  
 陽池底面下の土壌はその含水率により 3 層に分割して

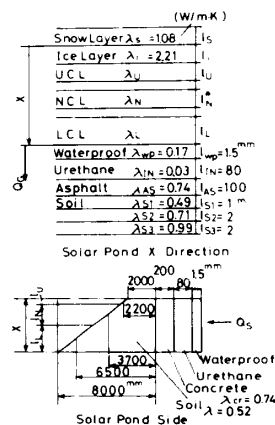


図 3 実証太陽池熱抵抗

ある。下部対流層より上面への熱損失算定のため、非対流層厚さ  $l_n$  は、実証太陽池の実測データを用い、 $l_c$  は非対流層上面および下面に存在する対流混合層厚さを除いた正味の非対流層厚さをを用いている。得られた側壁の熱通過率  $K_v=0.139 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $K_n=0.0994 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,  $K_l=0.0647 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , 底面の熱通過率  $K_c=0.103 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  である。なお、各層における熱伝導率  $\lambda(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$  は塩水濃度を考慮して次のようにした。

$$\text{上部対流層} \quad \lambda_u = 0.565 + 1.54 \times 10^{-3} T$$

$$\text{非対流層} \quad \lambda_n = 0.557 + 1.54 \times 10^{-3} T$$

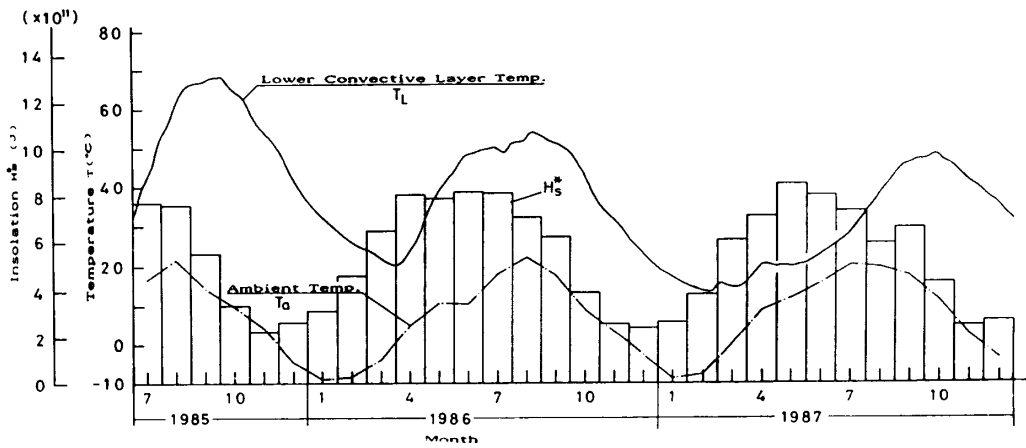
$$\text{下部対流層} \quad \lambda_l = 0.550 + 1.54 \times 10^{-3} T$$

**3.3 計算** 前述の一次元熱エネルギー平衡微分方程式(1)および各境界層条件より、各分割要素の熱エネルギーの収支そして温度が数値計算により解かれた。上部対流層および下部対流層の深さ方向への分割は単一層とし、非対流層は10分割の要素に分けて計算を行った。また時刻刻みは1時間単位として1日および月ごとの平均値を算出した。上部対流層に凍結層

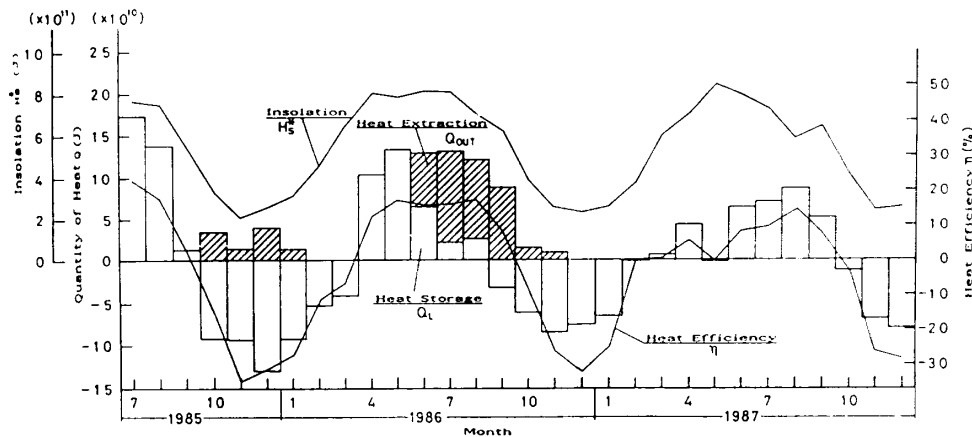
が発達する場合には、上部対流層を20分割し、移動節点法<sup>(7)</sup>により差分計算を行って凍結界面位置を決めた。計算は初期条件として本実証太陽池の運転開始である昭和60年6月24日太陽池各部の実測温度データを用いた。この初期温度より、式(1)の熱収支計算を境界条件のもとで時刻ごとに行って、各分割要素の温度を算出した。この新たに求めた温度を再び初期値として計算を逐次進行させ、各日、各月毎の太陽池の熱計算を行った。

#### 4. 結果および考察

図4(a), (b)は、実証太陽池の下部対流層平均温度  $T_L(^{\circ}\text{C})$ , 下部対流層の蓄熱量  $Q_L(\text{J})$ , 外部への熱抽出量  $Q_{out}(\text{J})$ , 熱効率  $\eta(\%)$ , および水平全天日射量  $H_s^*(\text{J})$ , 外気温度  $T_a(^{\circ}\text{C})$  の経時変化を示したものである。各月の熱効率は  $\eta = (Q_L + Q_{out})/H_s^*(\%)$  としてある。本太陽池設置場所は、地下水位が高いことより、太陽池側、底部に断熱材(ウレタンフォーム80mm)を用い熱損失軽減を図っている関係から、周囲土壤の熱

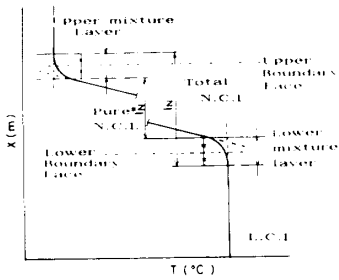


(a) 下部対流層温度、気温および水平全天日射の経時変化

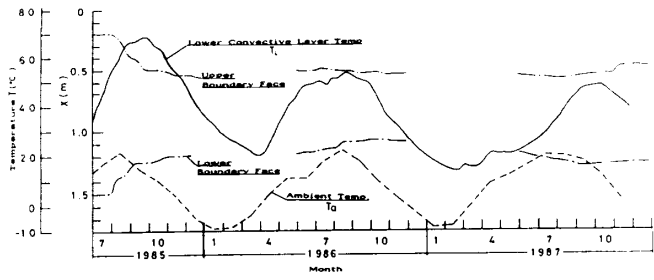


(b) 蓄熱量、熱抽出量および熱効率の経時変化

図4



(a) 非対流層の塩濃度分布



(b) 非対流層厚さの経時変化

図 5

容量を利用した蓄熱効果を期待できず、下部対流層平均温度  $T_L$  の温度変動周期は、毎年類似したものとなるが、太陽池の日射透過率の低下とともにその温度の絶対値は下降している。昭和 61 年夏季の多量の熱抽出は、下部対流層温度上昇を抑制する目的より行われた。

非対流層は、不飽和塩水の分子拡散以外に、非対流層上部の風および流動清水による侵食そして下部対流層に発生した熱自然対流による非対流層の侵食のため、その非対流層厚さ  $l_N$  は時間の経過とともに減少することになる。図 5 (a) は、非対流層上、下面近傍に発生した対流混合層による非対流層厚さの減少を示したものである。本研究の熱損失計算においては、図 5 (a) に示す正味の非対流層厚さ  $l_N^*$  を非対流層よりの熱損失計算に用いる。図 5 (b) は、正味の非対流層上面および下面境界の経時変化の実測値を示したもので、太陽池建設後数ヶ月間で徐々に非対流層の上、下面よりの侵食の進行する様子が理解できる。ある期間を過ぎると非対流層厚さもほぼ一定となり、若干、上、下対流層の影響によりその厚さの変動がある。図中の非対流層厚さのデータのない期間は、太陽池に結水のある期間である。

下部対流層への日射蓄熱量は、上部対流層と非対流層の日射透過率に大きく影響を受ける。図 6 は、太陽池の汚れ係数  $F$  と下部対流層上面そして水面下 1.5 m の深さにおける見かけの透過率  $h_T$  の経時変化を示したものである。汚れ係数  $F$  は、太陽池が汚れないとした場合の計算による下部対流層への正味入熱量  $Q_{LC}$  に対する実証太陽池の実測入熱量  $Q^*$  の比として、次のように定義した。

$$F = Q^*/Q_{LC} = (Q_L + Q_{SL} + Q_{out})/Q_{LC} \dots\dots(12)$$

ただし、 $Q_L$ ,  $Q_{SL}$ ,  $Q_{out}$  は実証太陽池の温度分布、熱流量測定により算出された下部対流層での蓄熱量、熱損失および熱抽出量である。図 6 によれば汚れ度  $F$  は、太陽池設置時に  $F=1$  であるが、時間の経過と

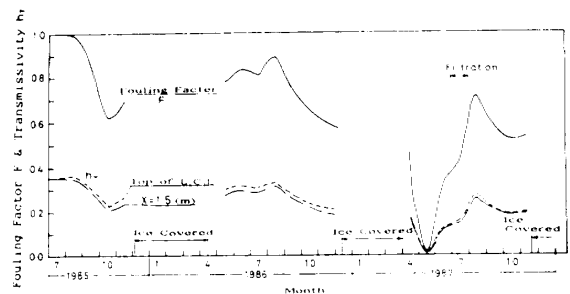


図 6 汚れ係数と日射透過率の経時変化

もに  $F$  値の低下が観測され、特に昭和 62 年 5 月には大幅な  $F$  値の低下が観測された。昭和 62 年 6~7 月の  $F$  値の大幅な回復は、上部対流層および非対流層の砂ろ過器処理の効果によるものである。このような太陽池の透過率の低下は、浮遊物の各層での滞留以外に、環境条件に左右される藻の発生によるところが大きい。したがって太陽池の清浄度を保つには、藻発生防止を確立する必要があると言えよう。

図 7 は、下部対流層平均温度  $T_L$  の実測値 (実線)、図 6 で示した実際の太陽池の汚れによる透過率  $h_T$  を用いた計算結果 (破線) と、参考までに太陽池が汚れない場合の計算結果 (一点鎖線) を経時変化で示したものである。計算においては、実際の熱抽出量  $Q_{out}$  も加味してある。本計算値は、実測値と昭和 61 年 10 月より昭和 62 年 2 月の期間を除いて比較的良い一致が見られる。両者の差が生じた主な原因は、昭和 62 年 6 月~11 月に行った熱抽出により、下部対流層の温度測定領域に熱抽出後の戻り冷塩水の滞留のため、実測値が計算値より下回ったものと思われる。

図 8 は、実証太陽池より熱損失の計算結果を示したものである。上部対流層より大気への蒸発  $Q_e$ 、対流  $Q_c$  および放射熱  $Q_R$  が非常に多いことが理解できる。また蓄熱部である下部対流層を中心に熱損失を考えると太陽池より下部土壌および側壁より大気への熱損失は非常に少なく、非対流層を通じての上部への伝導熱損

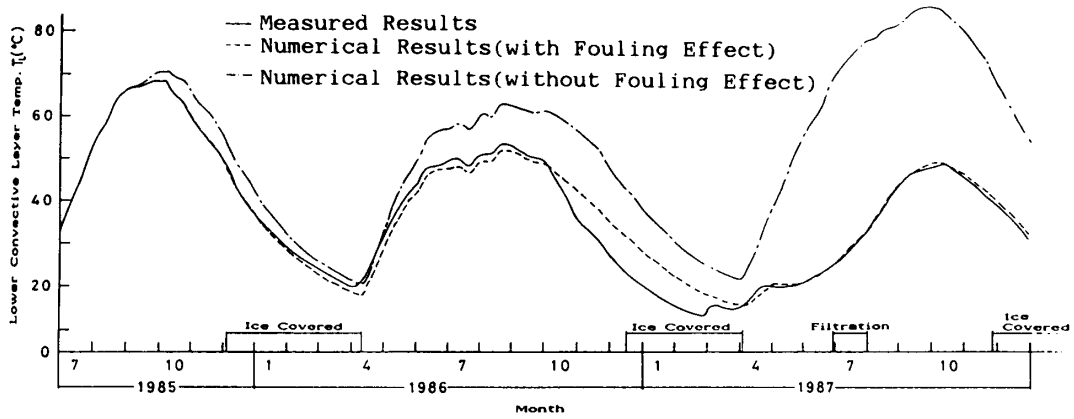


図 7 非対流層温度の実測値と計算結果の比較

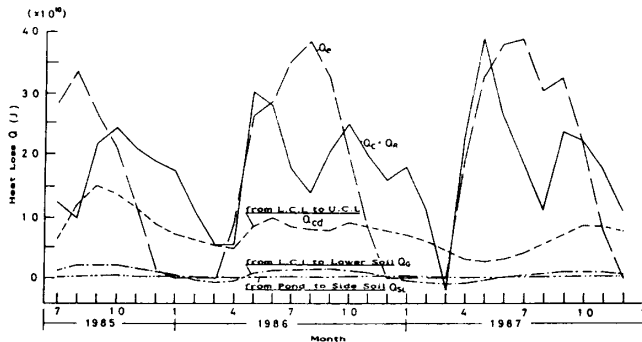


図 8 太陽池よりの熱損失の経時変化

失が大きいことがわかる。この結果より太陽池周囲を断熱材で覆った本実証太陽池の特徴がわかる。冬期間若干の入熱が、太陽池底部土壤からあることも理解できよう。

寒冷地域での塩水太陽池の熱特性は、冬期間の積雪および上部対流層の結氷による影響を大きく受ける。したがって太陽池の凍結、積雪状態を把握する必要がある。図 9 は、前述の計算方法により上部対流層に発生する凍結層厚さ  $l_i$  および気象データに基づく降雪厚さ  $l_s$  の経時変化を示したものである。本実証太陽池では、毎年徐々に凍結層厚さが最大 30 cm くらいまで増大し、春先に急速に融解が進行し、氷層が消滅する様子がわかる。

塩水太陽池は、下部対流層が高濃度塩水であることから、ヒートポンプの併用により冬期間も  $0^{\circ}\text{C}$  以下の塩水よりの熱抽出を想定して熱抽出量をその月の日射の 0%、10%、20%、30% の割合で通年行った場合の計算例を図 10 に示す。太陽池の規模および気象条件などは、本実証太陽池を想定し、計算は太陽池の汚れがない ( $F=1$ ) との仮定により行った。計算で対象とした下部対流層の食塩濃度  $C=19\%$  でその凝固点は、 $18.2^{\circ}\text{C}$  である。太陽池の清澄度が初期の状態を保たれ

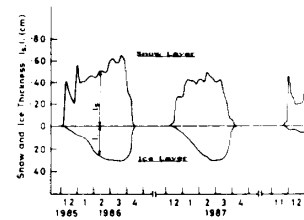


図 9 雪層、氷層厚さの経時変化

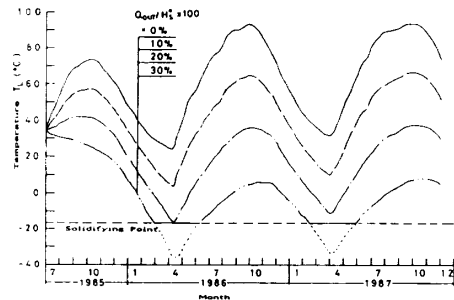


図 10 種々の熱抽出割合に対する非対流層温度の変化

ていれば、冬期ヒートポンプで熱抽出を行った場合、寒冷地域においても下部対流層の結氷なしに水平全天日射量の 20% の熱抽出が可能であることがわかる。また冬期間の熱抽出で太陽池の温度が降下すれば、その分春、夏期の下部対流層の温度上昇割合が大きくなり、太陽池の蓄熱効果が増大することになる。またある範囲であれば冬期の熱抽出量の増大そして結氷による相変化熱の利用もヒートポンプ熱交換器の太陽池内設置で可能となる。

### 5. 結 論

積雪寒冷地に設置された実証塩水太陽池をモデルとし、その非定常熱特性を数値シミュレーションにより予想した。数値シミュレーションには極力実証太陽池

の各種データを組込む方法が採用され、太陽池の塩分濃度こう配層である非対流層厚さおよび日射透過率がその蓄熱特性に大きく影響を及ぼすことが判明した。冬期間における太陽池上部の結氷、積雪は、太陽日射の太陽池への遮蔽など入熱の減少となるが、太陽池より上部対流層を通しての熱損失の軽減および上部対流層の凍結による塩分濃縮効果なども期待できる。本研究において、計算により実証太陽池の凍結量の予測も行い、凍結による太陽池の性能評価に対する基礎資料を与えることができた。さらに、塩水太陽池の水点がかかなり低いことを考慮し、太陽池をヒートポンプの低熱源とした場合の太陽池の性能予想を計算により行い、今後の太陽池熱有効利用に対する基礎資料を得ることができた。

終わりに、本研究の実証太陽池のデータの利用に際して種々の便宜を計って下さった中小企業事業団情報

調査部の皆様、日本鋼管(株)、(株)荏原製作所および大成建設(株)の関係者そして北見工業大学の関係者に感謝の意を表する次第である。

## 文 献

- (1) 稲葉, ターボ機械, 13-5 (1985), 293.
- (2) Panahi, Z., ほか2名, *Trans. ASME, J. solar Energy Eng.*, 105-4 (1983), 369.
- (3) Tabor, H., *Solar Energy*, 27-3 (1981), 181.
- (4) Nielsen, C. E., *Proc. of Int. Solar Energy conf. (Canada)*, 5 (1976), 169.
- (5) Rabl, A. and Nielsen, C. E., *Solar Energy*, 21-1 (1975), 1.
- (6) エンジニアリング振興協会編, 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報告書, ENAA 1982-ブ, 12 (1983), 31.
- (7) Murray W. D. and Landis, F., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 81-2 (1959), 106.

## 討 論

〔質問〕 上原 春 男〔佐賀大学理工学部〕

1987年6~7月に行った上部対流層および非対流層の砂ろ過処理効果により汚れ係数  $F$  の大幅な回復を得たとあるが、砂ろ過器処理とは具体的にどのようなものか。それによって非対流層の濃度こう配が破壊されることはないのか。また、蓄熱層の最高到達温度は、1985年には約68°Cであったものが1987年には約47°Cと低くなっているが、ろ過処理を行わなかった場合それが何°C程度になると予測されるか。

〔回答〕 砂ろ過器は、直径1.2mm、高さ2mの円筒容器に、下部より粒径約5~7mmの碎石、1~3mmの砂そして、0.5~1mmの活性炭を多層に積層した構造(総高さ1.8m)で、円盤状ディフューザによ

り濃度こう配層の汚れた塩水を抽出し、ろ過後の清浄な塩水を濃度こう配層に戻すシステムとなっている。ディフューザにより水平面で濃度こう配層の塩水を抽出し、再び同じ深さに設置したディフューザにて水平方向にろ過後の清浄な塩水を戻すために、濃度こう配層の破壊はほとんど起こらないと思われる。また、ディフューザを段階的に上昇し、すべての濃度こう配層のろ過処理を行っている。本太陽池の汚れの主体は、濃度こう配層に発生した藻であり、ろ過処理を行わなかった場合の温度などの条件による藻の繁殖状態は不明であり、藻の発生量によっては蓄熱層温度の大幅な降下(40°C以下)も考えられ、今後の大きな研究課題と思われる。