

分光学的要因を取り入れたソーラポンドの熱計算

Thermal Calculations of a Solar Pond Taking Spectroscopic Factors into Account

李 相一^{*1}
Xiang-yi LI金山 公夫^{*2}
Kimio KANAYAMA馬場 弘^{*2}
Hiromu BABA遠藤 登^{*2}
Noboru ENDOH前田 佳邦^{*1}
Yosikuni MAEDA

Abstract

The thermal collection and storage processes in a solar pond are dependent on the various factors related to physical properties and phenomena of each part of solar pond proper and surroundings. The performance of the solar pond is calculated as a typical problem of heat and mass transfer. From this point of view, purpose of this work is to make clear the thermal performance of solar pond by means of numerical calculation using a simulation model, taking as many factors inside and outside the solar pond as possible into account.

Items of physical properties and phenomena are as follows: ① spectrum of the incident ray and spectral transmittance of working fluid of salt water solution, ② based on an absorption coefficient of working fluid related to the salt concentration, a curved locus of transmitting ray in non-convective salt gradient zone (NCZ) and so on, ③ dispersion of salt toward upper layer in the pond, and ④ reflection of the ray incident upon the water surface. Solving numerically the heat transfer equations, we could obtain the distribution profiles of the temperature and salt concentration by the simulation model, and the calculation results are verified by the experiments using the solar pond model under a solar simulation indoors.

Key words : Solar pond, Spectral calculation, Temperature and concentration distributions, Spectral transmittance, Incident ray's spectrum, Simulation, Numerical calculation.

1. まえがき

ソーラポンドの集熱および蓄熱特性は非常に多くの要因によって左右される。特に、実用ソーラポンドでは大面積で長期間かけて集熱するので、蓄熱量が膨大な量となり、熱計算に際しての便宜的に簡略化を行うことは、時には大きな誤差につながりかねない。しかし、ソーラポンドと周囲環境との熱的関わりはいわゆる伝熱問題に属し、本研究ではポンド内外の物理的諸現象をできるだけ忠実に取り入れて、ポンド内部の温度および濃度分布など熱的特性を実際に即した計算を

行うように試みた。ソーラポンドの熱収支に関してはすでに多くの研究者より、種々の計算モデルが提案され、シミュレーション計算が行われてきている。しかし、正確な計算を行うには関連する種々の基礎データを用いて適切な計算モデルを設定して行う必要がある。特に太陽光が媒体を透過する際に吸収される割合が波長によって異なるので、日射のスペクトルおよび媒体の分光透過率を用いて単色光毎に取り扱う必要がある。また、塩水勾配層では濃度と温度の両方に勾配があるため各塩水層の熱物性値は位置と時間によっ

*1 会員 北見工業大学大学院

*2 会員 北見工業大学工学部 (〒090-8507 北見市公園町165)
(原稿受付 平成10年7月6日)

Students at Graduate Course
Department of Mechanical Engineering
Kitami Institute of Technology

て変化し、お互いに影響し合うので物質移動と熱移動を同時に考えて熱計算しなければならない。

本研究は、著者ら^{(7)・(8)}によって測定された塩類水溶液の分光透過率等の基礎データを用い、入射光にMoonのスペクトルを与えて、水面での光の反射、塩水中での光の屈折および塩の拡散と熱移動を考慮して、波長積分による各水深での全透過率、勾配層の濃度および温度分布等を算出し、ポンドの入出熱を詳細に計算したものである。計算に際して、初期条件、境界条件およびそれらの経時変化は、著者ら⁽⁹⁾が行ったNaCl水溶液を媒体とした3m³の濃度勾配型実験ポンドの測定値を参考にし、ソーラシミュレーターの下で行った同上ポンドによる集熱および蓄熱実験の条件⁽⁹⁾をそのまま用い、上記の計算結果を実験結果と比較して計算モデルの妥当性を検討した。

解析において、同一水深の塩水は一樣と見なせるので、ポンド内における熱および物質移動は一次元の問題として考えた。従って、各種の計算において、計算にかかわる諸変数は水深Xの関数として扱っている。

各時刻、各水深の層における入熱、出熱、物質移動および熱移動等の状況は時間的に変動するので、ソーラポンドの熱収支の計算には、各時刻の濃度分布および温度分布が結果として算出された。

2. 主な記号

- I 入射光強度 $W \cdot m^{-2}$
- k 媒体の吸収係数 m^{-1}
- X UCZとNCZの境界面からの垂直水深 m
- L ポンド表面からの垂直水深 m
- S 透過光の光路長さ m
- n 屈折率
- h 太陽高度 $^{\circ}$
- A_m エアマス $(=1/\sin h)$
- C 塩水濃度 $\%$ (質量)
- C^* 塩水濃度 $kg \cdot m^{-3}$
- ρ 媒体密度 $kg \cdot m^{-3}$
- m 塩の拡散流速 $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
- T 媒体の温度 $K, ^{\circ}C$
- D 塩の拡散係数 $m^2 \cdot s^{-1}$
- Q 媒体層の吸収熱量 $W \cdot m^{-2}$
- q 媒体層が入射光から得る熱量 $W \cdot m^{-2}$
- t 経過時間 s
- c 媒体の比熱 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
- τ 光の透過率
- λ 波長あるいは媒体の熱伝導率 $\mu m, W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

- ω 入射光のポンド表面における反射率
- θ 入射光の入射角度 $^{\circ}$
- ϕ 透過光の屈折角度 $^{\circ}$
- δ 数値計算において媒体層の差分厚さ m
- C^* 定数, $kg \cdot m^{-3}$
- T 定数 K
- a_0, a_1 式(11)の係数
- b_{0-2} 式(12)の係数
- A_{0-2} 式(13)の係数
- α 式(17)の係数 $m^2 \cdot s^{-1}$
- β, γ 式(17)の指数
- f_{0-3} 式(18)の係数 K

添字

- 0 ポンド表面における値
- i ($=0, 1, 2, \dots$) 分割層の番号
- X 垂直水深
- λ 波長あるいは単色光

3. 分光吸収係数と全透過率

ソーラポンドの塩水層を透過する光は、一部が塩水層に吸収され入熱になってその層の温度変化をもたらす、残りがその層を透過する。ゆえに、各層の入熱を計算するには各水深ごとの全透過率の値が必要である。また、入射光の透過および塩水溶液の吸収は光に対し波長依存性がある。図1にNaCl水溶液の分光吸収係数⁽⁸⁾を示す。図には、 $0.3 \mu m \leq \lambda \leq 0.9 \mu m$ の範囲で吸収係数の変化を示したが、 $\lambda > 0.9 \mu m$ の波長域では、吸収係数が急激に大きくなる。ゆえに、全透過率を正確に計算するには単波長ごとに分光値で扱わなければならない。

波長 λ なる単色光が分光吸収係数 k_{λ} の濃度および

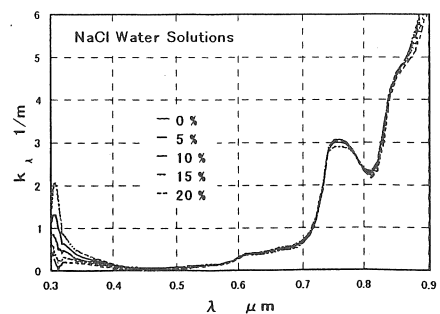


図1 NaCl水溶液の分光吸収係数
Fig.1 Absorption coefficient of NaCl water solution

温度が様な微小層を透過する際、媒体の吸収による光強度の変化分 $dI_{\lambda X}$ は Lambert's Lawより式(1)で表わされる。

$$dI_{\lambda X} = -k_{\lambda} I_{\lambda X} dX \quad (1)$$

媒体の分光吸収係数 k_{λ} は境界条件($X=0$ で $I_{\lambda X}=I_{\lambda 0}$, $X=L$ で $I_{\lambda X}=I_{\lambda L}$)より式(2)のように求めることができる。

$$k_{\lambda} = -\ln(I_{\lambda L}/I_{\lambda 0})/L \quad (2)$$

さらに、 k_{λ} が既知の場合、水深 X 処の分光透過率 τ_{λ} は式(3)によって計算される。

$$\tau_{\lambda} = I_{\lambda X}/I_{\lambda 0} = \exp(-k_{\lambda} X) \quad (3)$$

全透過率は分光透過率の波長積分値であるので、水深 X での全透過率 τ_X は(4)より求められる。

$$\tau_X = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda X} I_{\lambda 0} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda 0} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \exp(-k_{\lambda} X) I_{\lambda 0} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda 0} d\lambda} \quad (4)$$

実際の塩水濃度勾配型ソーラポンドにおいて、入射光はポンド表面でその一部が反射される。濃度 C は水深 X によって変化するので、吸収係数 k_{λ} も水深によって変化する。また、屈折率 n は濃度によって変わるので透過光は水深毎に屈折し、ある曲線の軌跡で進むことになる。

ゆえに、式(4)における $I_{\lambda 0}$ はポンド表面の反射の影響で、ポンド水中への入射光強度とはならず、また X も垂直入射でない限り垂直水深と等しくはならず、そのためそれぞれに修正を加える必要がある。

4. 表面反射による入射光の修正

図2で示すとおり、ポンド表面における光の反射は水と空気の屈折率、光の入射角および波長によって変化する。水面が完全平面と仮定して光の水面における反射率 ω はFresnelの法則⁽¹⁰⁾より式(5)で計算される。

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_0 - \phi_0)}{\sin^2(\phi_0 + \theta_0)} + \frac{\tan^2(\theta_0 - \phi_0)}{\tan^2(\phi_0 + \theta_0)} \right] \quad (5)$$

式(5)中 ϕ_0 は表面における入射光の水中への屈折角で、入射角 θ_0 および清水層と空気の相対屈折率 n_1 (以下屈折率と略称)により変化する。 ϕ_0 および θ_0 は式(6)および式(7)により計算される。

$$\phi_0 = \sin^{-1}[(\sin \theta_0)/n_1] \quad (6)$$

$$\theta_0 = \pi/2 - h = \pi/2 - \sin^{-1}(1/A_m) \quad (7)$$

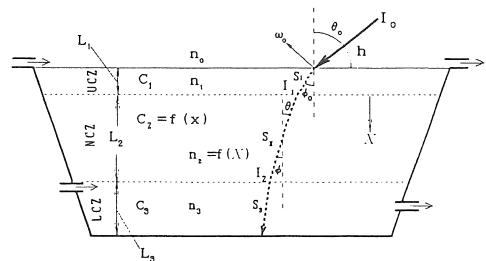


図2 ポンドの構造及び入射光の透過軌跡
Fig.2 Structure of the pond and transmission locus of the incident ray (UCZ:Upper convection zone. NCZ:Non-convection zone. LCZ:Lower convection zone)

塩水溶液の屈折率は塩の種類、濃度、温度および透過光の波長によって変化する。実際のソーラポンドの上部清水層は、勾配層からの塩分子の拡散により2~3%の塩分を持つので、屈折率が真水より若干大きくなる。しかし、濃度の薄い塩水層の屈折率を考えると、温度が常温付近であれば、真水とそれほど差がなく、 $n=1.33\sim 1.35$ の範囲内である。そして、屈折率の変化幅 $\Delta n=0.01$ による反射率 ω の変化はわずか0.2%に過ぎないので、本研究では計算の便宜上清水層の屈折率を $n_1=1.34$ とおいた。

図3に、式(5)による表面反射率 ω の計算結果を表面透過率 $\tau (=1-\omega)$ とともに示す。図よりわかるように、太陽高度 $h \leq 30^\circ$ ($A_m \geq 2$) のときは、反射率が急激に大きくなる。逆に、太陽高度 $h > 30^\circ$ ($A_m < 2$) のときは、ソーラポンドへの入射光の透過率は大きくなる。ゆえに、式(4)を用いて全透過率を計算する際、 $I_{\lambda 0}$ は $I_{\lambda 0} \cdot (1-\omega)$ に修正して入射光強度とする。

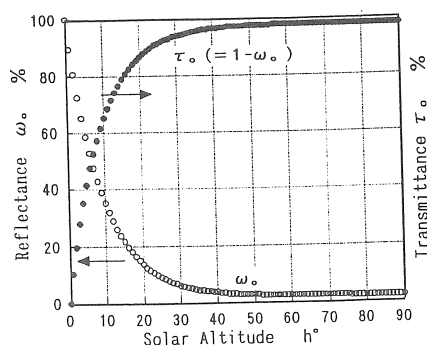


図3 式(5)によるpond水面の ω_0 の計算結果
Fig.3 The result of ω_0 by Eq.(5) on the pond surface

5 透過光の軌跡と光路長さ

式(3)より単色光の透過率を計算する場合、図2に示すように入射光は式(6)から算出される屈折角 ϕ_c で清水層を透過する。濃度一様な清水層での透過光の軌跡は直線であり、その光路長さ S_1 は簡単に式(8)で計算される。

$$S_1 = L_1 / \cos \phi_c \quad (8)$$

つぎの濃度勾配層では水深の増加とともに濃度が徐々に増大するので、屈折率も次第に大きくなる。従って、屈折角 ϕ_x が徐々に小さくなり、勾配層を透過する光は屈折をつづけ、光の進む軌跡は曲線となる。その透過光の光路長さを求めるには透過光軌跡の方程式が必要である。

図4に示すような勾配層内の任意の厚さ dX の微小層に対して次の微分式が成り立つ。

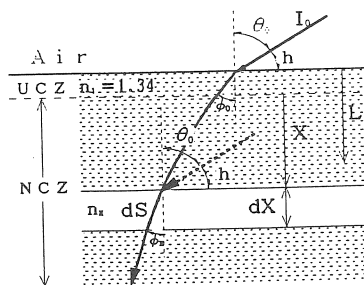


図4 勾配層における透過光の屈折角と軌跡
Fig.4 Refraction angle and locus of incident ray in differential layer in non-convection zone

$$dX = \cos \phi_x \cdot dS \quad (9)$$

式(9)中の ϕ_x は水深 X における屈折角で、 ϕ_x はpond表面での太陽光の入射角 θ_c と微小な薄層の屈折率 n_x にのみ関係し、上の液層の存在は無関係となり、式(10)で求められる⁽¹²⁾。

$$\phi_x = \sin^{-1}(\sin \theta_c / n_x) \quad (10)$$

式(10)中の n_x は水深 X の塩水の屈折率で、屈折率および水深との関係より次のように計算される。

まず、塩水の屈折率と濃度の関係は濃度-屈折率データ⁽¹¹⁾を用いて、式(11)の一次式で表わされる。

$$n_x = a_0 + a_1 C_x \quad (11)$$

表1に各塩水溶液に対する係数 a_0 と a_1 の値を示す。

表1 相関式(11)の係数 a_0 と a_1

Table 1 Coefficients of the correlation Eq.(11)

Salt water Solution	a_0	a_1
NaCl	1.3324	1.800×10^{-3}
KCl	1.3326	1.302×10^{-3}
MgCl ₂	1.3324	1.800×10^{-3}
CaCl ₂	1.3328	1.200×10^{-3}

次に、濃度勾配層での濃度と水深の関係は、式(12)に示す二次式で表される。

$$C_x = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 \quad (12)$$

式(12)を式(11)に代入して整理すると、屈折率と水深の関係を表す式(13)が得られる。

$$n_x = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 \quad (13)$$

勾配層の水深 X にある微小層を透過する光の光路長さ S_x は式(9)の積分により求められる。すなわち、

$$S_x = \int dS = \int_{X_1}^{X_2} (1 / \cos \phi_x) dX \quad (14)$$

式(10)、式(13)および式(14)より積分式(15)が導かれる。式(15)より勾配層内を透過する光の光路長さ S_x を正確に計算することができる。

$$S_x = \int_{X_i}^{X_{i+1}} dS = \int_{X_i}^{X_{i+1}} \frac{dX}{\cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_c}{A_0 + A_1 X + A_2 X^2} \right) \right]}$$

$$= \int_{X_i}^{X_{i+1}} \frac{dX}{\left[1 - \left(\frac{\sin \theta_c}{A_0 + A_1 X + A_2 X^2} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (15)$$

蓄熱層での光路長さ S_3 は、濃度が一樣なので清水層と同じく式 (6) と式 (8) の形で計算される。

式 (4) を用いて全透過率を計算する際、 X は S に代えて計算する。ここで、勾配層微小層の k_λ はその水深の濃度 C_λ によって計算される^{(12)・(13)}。ただし、ポンド水中の各層間の濃度差による境界面での反射は極く微小であるので無視する。

6. 温度場における塩の拡散

濃度勾配層では熱拡散と物質拡散の二つの現象が存在し、それにより形成される温度分布と濃度分布はお互いに影響し、各層の熱物性の变化をもたらすので、各層での熱計算には両者の分布および相互関係を把握する必要がある。

ソーラポンドは長い時間をかけて集熱、蓄熱するので、平衡状態を保ちながら変化すると考えることができる。まず、蓄熱層は常に清水層より濃度が高く、上下両対流層の濃度差により一定量の塩 m が下の蓄熱層から上の清水層に向けて移動することになる。Fick の法則により、勾配層の水深 X における任意微小層において式 (16) が成り立つ。

$$m = -D \frac{dC^*}{dX} \quad (16)$$

式中、濃度拡散係数 D は温度 T と濃度 $C^* [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ の関数で、基礎データ^{(11)・(14)}より式 (17) のような相関式で得られる。

$$D = \alpha (C^* + C^*_0)^{\beta} \cdot (T + T_0)^{\gamma} \quad (17)$$

ここで、 C^*_0 , T_0 , α , β および γ は定数および相関係数で、NaCl 溶液に対しそれぞれ 1, 40, 2.3×10^{-3} , 314 および 1.6 である。なお、式 (17) に関する重相関係数は 0.998 である。ある層の温度はその層での入射光の吸収、隣接する上下層間への熱移動、および壁面への熱ロスによって定められる。また、温度は水深 X の関数として次の三次式で与えられる。

$$T = f_0 + f_1 X + f_2 X^2 + f_3 X^3 \quad (18)$$

ゆえに、式 (16), (17), (18) より次のような微分方程式 (19) が得られる。

$$(C^* + C^*_0)^{\beta} dC^* = - \frac{m \cdot dX}{\alpha (f_0 + f_1 X + f_2 X^2 + f_3 X^3 + T_0)^{\gamma}} \quad (19)$$

境界条件 $X = 0$, $C^* = C^*_1$ および $X = L$, $C^* = C^*_3$ を代入して定積分をすることにより塩移動量 m が得られる。

$$m = \frac{-\alpha \int_{C^*_1}^{C^*_3} (C^* + C^*_0)^{\beta} dC^*}{\int_0^L (f_0 + f_1 X + f_2 X^2 + f_3 X^3 + T_0)^{-\gamma} dX} \quad (20)$$

式 (20) で得られた m を式 (19) に代入して 0 から X まで定積分すると、水深 X における濃度 C^*_x を求める解析解として式 (21) が得られる。

$$C^*_x = \left\{ (\beta + 1) \left[\frac{(C^* + C^*_0)^{\beta+1}}{\beta + 1} + \frac{m}{\alpha} \int_0^X (f_0 + f_1 X + f_2 X^2 + f_3 X^3 + T_0)^{-\gamma} dX \right] \right\}^{1/(\beta+1)} - C^*_0 \quad (21)$$

式 (21) により勾配層における濃度分布が得られることになる。

7. ソーラポンドの熱計算

清水層と蓄熱層は温度および濃度の一樣層であるので、熱収支の計算は割合単純である。勾配層と上下二つの対流層間の熱移動量は、上下両対流層の状態のみならず、勾配層の熱、物質拡散による温度分布、濃度分布および入射光 q_i にも関係する。ゆえに、熱計算を行うために図 5 で示すようなモデルを考える。

熱計算は室内実験⁽⁹⁾を模擬して行うが、図 5 で示すモデルにおいて、時間、水深とも数値化して計算を行った⁽¹⁵⁾。つまり、時間は時刻 $t=0$ から $\Delta t (=20 \times 60 \text{ s})$ 毎に進み、初期値として、 $t=0$ において実験初期の温度分布と濃度分布を与えた。勾配層は全体を有限層 $n (=20)$ に分割して、任意の i 層に着目すると、分割時間 Δt 内にその層での吸収熱 Q_i は方程式 (22) で計算される。

$$Q_i = q_i + \lambda_i \frac{T_{i+1} - T_i}{\delta_i} - \lambda_i \frac{T_i - T_{i-1}}{\delta_i} - Q_{w(i)} \quad (0 < i < n) \quad (22)$$

i 層の吸収熱 Q_i は i 層の温度変化 ΔT_i を生みだし、次の式 (23) が成立する。

$$\Delta T_i = \frac{Q_i \Delta t}{\rho_i c_i \delta_i} \quad (23)$$

式 (22) および式 (23) において、i 層での塩水の熱伝導率 λ_i 、密度 ρ_i および比熱 c_i は温度 T_i および濃度 C_i の関数であり、それぞれの基礎データから相関式 (24)、(25) および (26) のように導出される。

$$\lambda_i = 4.9 + 1.381 C_i / 100 - 1.066 T_i / 100 \quad (24)$$

$$\rho_i = 1.007 + 7.449 C_i - 5.021 T_i / 10000 \quad (25)$$

$$c_i = 1.560 (C_i + 10)^{-0.197} (T_i + 10)^{0.00621} \quad (26)$$

勾配層での熱移動量が把握できれば上、下対流層の入出熱はそれぞれ式 (27) および式 (28) で計算することができる。

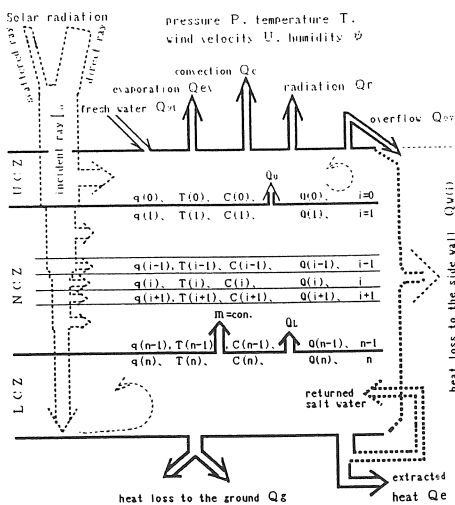


図5 ソーラポンドの熱計算モデル

Fig.5 Calculation model of the heat balance on a solar pond

$$Q_{(0)} = q_{(0)} + Q_{wL} + Q_{cV} + Q_c + Q_r + Q_U + Q_{W(0)} + Q_{eV} \quad (27)$$

$$Q_{(n)} = q_{(n)} + Q_g + Q_e + Q_L + Q_{W(n)} \quad (28)$$

上、下対流層の温度変化は式 (23) により計算することができる。ただし、i はそれぞれ 0 と n である。一サイクルの計算が終わると、全層の温度を更新して繰り返し計算に入る。新しいサイクルの計算は先ず濃度分布の計算から始める。図 6 に熱分光計算のフローチャートを示す。

本研究における 3 m^2 の実験ポンドによる室内実験 (9) に対する温度分布の計算結果を実測値と比較して図 7 に経時変化で示す。実験はソーラシミュレーターの照射は一日一回 8 時間とし、北見の年平均日射強度で垂直入射の条件で行った。計算はソーラシミュレーターからの入射光スペクトルを含め実際の実験条件を代入して行った。図中ドット印が実測値で、実線がシミュレーション結果である。図よりシミュレーション結果である。図よりシミュレーション結果である。

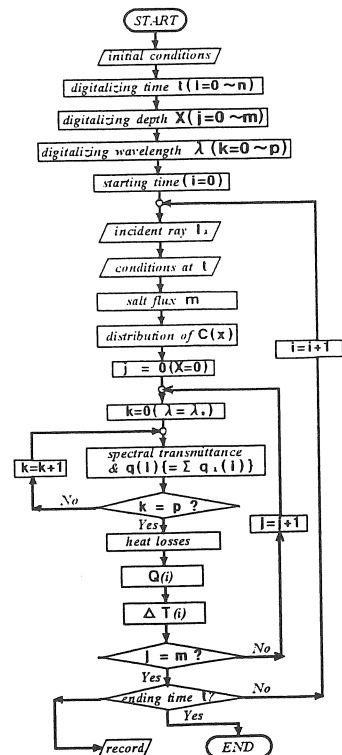


図6 シミュレーション計算フローチャート

Fig.6 The flow chart of simulation calculation

ン結果が実験値に良く近似していることがわかる。

一方、入射光スペクトルの計算結果への影響を比較するために、同じ実験条件のもとで、Moonのスペクトルで表わされる自然光が入射した場合の計算結果を点線で示した。図8に二つのスペクトルを示す。図7より、シミュレーターのスペクトルとMoonのスペクトルでは勾配層の温度分布に大きな相違が生ずることがわかる。しかし、図7からいずれの場合でも勾配層の温度分布は逆S字形で変化していくことが分かる。入射光が自然光の場合は勾配層全域で分布が割合なめらかであるに対して、ソーラシミュレーターの場合は勾配層の上部で温度勾配が大きく、下部では逆に小さい特徴を示す。そして温度勾配がある時期に温度勾配層の中部で逆転することが見られる。これは、ソーラシミュレーターのスペクトルは図8で示すように、光の長波長域に強い輝線があり、これが照射時に勾配層の上部で吸収され、温度上昇をもたらすが、消灯したとき

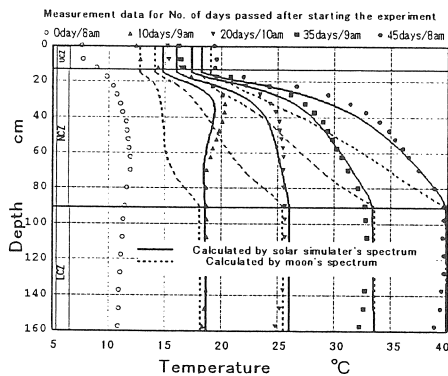


図7 ソーラポンドモデルでの温度分布の経時変化
Fig.7 The change of temperature distributions with time elapse in a solar pond model.

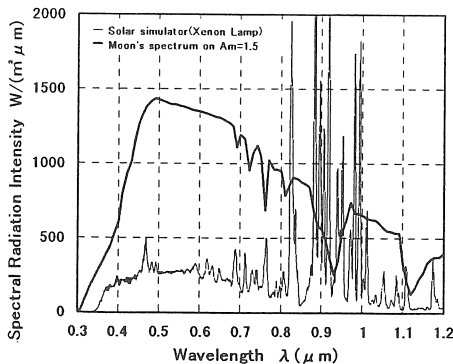


図8 Moonとソーラシミュレーターのスペクトル
Fig.8 Spectra of Moon and the solar simulator

に冷却され表面の温度降下が起こって温度の逆転を生じたものと思われる。

8. むすび

塩水濃度勾配型ソーラポンドの熱性能の計算を行うに当たって、光の入射、屈折、塩および熱の拡散、および熱放出等が相互影響し合う現象を定量化するシミュレーションモデルを立てた。その結果、光の入射による各層の温度変化、光の屈折による透過光軌跡の変化およびそれによる光透過率の変化、塩と熱の拡散による各層の物性値の変化、およびこれらの変化による濃度分布と温度分布の変化を把握することができた。なお、分光計算により異種の光源を入射光とした場合の熱計算を行い、勾配層の温度プロファイルに明らかな相異が生ずることが分かった。数値シミュレーションの結果を、 3 m^2 の実験ポンドを用いてソーラシミュレーター（キセノンランプ）の下で人工光照射による集熱、蓄熱の実験結果と比較して複雑な現象の割には傾向、大きさともよく近似し、計算モデルおよび計算法は妥当なものと考えられる。

参考文献

- (1) 木ノ瀬純一, 桜井喜十郎, 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), 農業土木試験場報告, 21(1981), 203-210.
- (2) P.Vadasz, D.Weiner, Y.Zvirin, A halo-thermal simulation of the dead sea for application to solar energy projects, Journal of Solar Energy Engineering, ASME., 105(1983), 348-355.
- (3) Z.Panahi, J.C.Batty, J.P.Riley, Numerical simulation of the performance of a salt-gradient solar pond, Journal of Solar Energy Engineering, ASME., 105(1983), 369-374.
- (4) F. B. Alagao, Simulation of the transient behavior of a closed cycle salt-gradient solar pond, Solar Energy, 56-3(1996), 245-260.
- (5) T.A.Newell, Simulation of a solar pond with a stratified storage zone, Journal of Solar Energy Engineering, ASME., 105(1983), p.363.
- (6) A.Rabl, and C.E.Nielsen, Solar ponds for space heating, Solar Energy, 17(1975), 1-12.
- (7) K. Kanayama, H. Baba; Transmittance of distilled water and sodium-chloride-water solutions, J. Solar Energy Engng., 110(1988), 113-119
- (8) 金山公夫, 馬場 弘, 遠藤 登, 根本 勉, ソーラポンド熱媒としての水および塩化ナトリウム水溶液の分光透過率, 機論, B, 62-601(1996), 3399-3405.

- (9) 李相一, 金山公夫, 馬場 弘, 遠藤 登, 前田 佳邦, ソーラボンド性能のシミュレーターによる室内実験, 日本太陽エネルギー学会, 25-6(1998)
- (10) 山口重雄, 屈折率, (1981), 14, 共立出版.
- (11) 日本海水学会, 海水利用ハンドブック, (1974), 156.
- (12) 李相一, 金山公夫, 馬場 弘, 遠藤 登, ソーラボンド塩水溶液の全透過率の現実に応じた計算法, 日本機械学会論文集, B, 64-620(1998), 272-278.
- (13) 李相一, 金山公夫, 馬場 弘, 遠藤 登, ソーラボンド塩水溶液の入射光と吸収性質の相関, 第34回日本伝熱シンポジウム論文集, (1997), 153-154
- (14) S. Sourirajan, "Reverse Osmosis", Logos Press (1971), 563
- (15) 李相一, 前田 佳邦, 金山公夫, 馬場 弘, 遠藤 登, 光の反射屈折及び塩の拡散を考慮したソーラボンド性能の計算及び実験, 第35回日本伝熱シンポジウム論文集, (1998), 571-572