

VII-119

ソーラーポンドの蓄熱特性に関する解析

東京電機大学大学院 学生員 山内敏和

東京電機大学理工学部 正会員 有田正光 中井正則

東京電機大学大学院 学生員 根本玲生 梅基 淳

1. はじめに

ソーラーポンドと呼ばれる貯水池は環境科学上の省エネルギー技術の一つであり、諸外国では古くから注目されている。これは、貯水池の底層水に塩化ナトリウムなどの無機塩類を溶解させて底層水の密度を大きくし、夜間の水面冷却に伴う熱対流を抑制して貯水池の底層に熱を貯蓄しようとするものである。

本研究では、ソーラーポンドに関する野外実験の結果を上手く説明する簡易解析モデルの構築を試み、解析結果を実験結果と比較検討した。

2. 解析モデル

解析の対象は薄い遷移層(密度躍層)を持つ塩淡水二成層が形成された水槽(ソーラーポンド)とし(図-1参照)、この場に対して水温の経時変化を求める。解析に際して、①夜間の水面冷却に伴う全水深スケールの熱対流は発生しない、②第I層、第III層の各層内では、対流により水温が常に一様になっている、③第II層(遷移層)は第I層⇄第III層の熱移動を媒介するに過ぎず、この層の熱の吸収・放出はない、④水槽中に入射した短波のすべてが第I層あるいは第III層に吸収される、の4つの仮定を用いた。

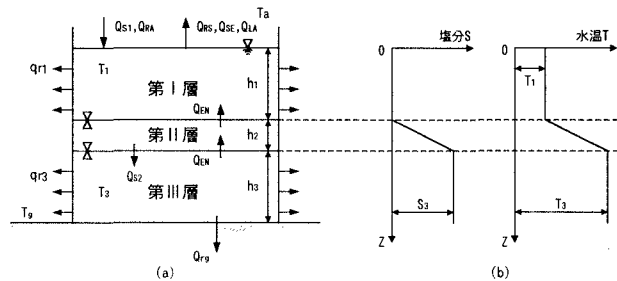


図-1 解析の対象とした塩淡水二成層場

解析の基礎となる方程式は次式で示す第I層、第III層の熱収支式である。

$$\rho_1 c_1 h_1 A_0 \frac{dT_1}{dt} = (Q_{S1} + Q_{RA} - Q_{RS} - Q_{SE} - Q_{LA} + Q_{EN}) A_0 - q_{r1} A_1 \quad (1)$$

$$\rho_3 c_3 h_3 A_0 \frac{dT_3}{dt} = (Q_{S2} - Q_{EN} - Q_{RG}) A_0 - q_{r3} A_3 \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 T_1 、 T_3 、 ρ_1 、 ρ_3 、 c_1 、 c_3 、 h_1 、 h_3 はそれぞれ第I層、第III層の水の温度、密度、比熱、水深であり、また、 A_0 は水槽の表面積、 A_1 、 A_3 はそれぞれ第I層、第III層に当たる水槽の総側面積である(添字1, 3はそれぞれ第I, III層を表している)。

以下で、式(1)、(2)の右辺の各項について説明する。式(1)の右辺の Q_{S1} 、 Q_{RA} 、 Q_{RS} 、 Q_{SE} 、 Q_{LA} はそれぞれ太陽放射(短波放射)による第I層への熱の流入、大気からの長波放射による第I層への熱の流入、水面から大気中への長波放射(逆放射)による熱の放出、水面から大気中への対流による顕熱の放出、水面から大気中への潜熱の放出であり、式(3)~(7)のように定式化した。また、 Q_{EN} 、 q_{r1} はそれぞれ第II層を通じての第III層からの伝導による熱の流入(あるいは第III層への放出)、側壁を通じての伝導による大気中への熱の放出であり、ともにフーリエの法則を用いて式(8)、(9)のように定式化した。

$$Q_{S1} = (1 - \alpha) \beta I \quad (3)$$

$$Q_{RA} = \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{ea}) \quad (4)$$

$$Q_{RS} = \varepsilon \sigma T_1^4 \quad (5)$$

$$Q_{SE} = h(T_1 - T_a) \quad (6)$$

$$Q_{LA} = k(es - ea) \quad (7)$$

$$Q_{EN} = \lambda_2 \frac{dT_2}{dz} = \lambda_2 \frac{T_3 - T_1}{h_2} \quad (8)$$

$$q_{r1} = \lambda_w \frac{T_1 - T_a}{d_w} \quad (9)$$

Key words : Solar pond, Heat accumulation, Two-layered stratification in salinity, Numerical model

〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 TEL 0492-96-2911 FAX 0492-96-6501

ここに、 I 、 T_a 、 e_a 、 e_s はそれぞれ短波放射強度、大気温、大気中の水蒸気圧、水面の水温に対する飽和水蒸気圧であり、また、 h_2 、 d_w はそれぞれ第II層の層厚、側壁の厚さである(他の諸量については、表-1を参照されたい)。

一方、式(2)については、右辺の Q_{S2} 、 Q_{EN} 、 Q_{rg} 、 q_{r3} はそれぞれ太陽放射による第III層への熱の流入、第II層を通じての第I層への伝導による熱の放出(あるいは第I層からの流入)、底面壁を通じての伝導による地中への熱の放出、側壁を通じての伝導による大気中への熱の放出であり、それぞれ式(10)～(12)のように定式化した(Q_{EN} は式(8)と同じである)。

$$Q_{S2} = (1 - \beta)(1 - \alpha)I \quad (10)$$

$$Q_{rg} = \lambda_b \frac{T_3 - T_g}{d_b} \quad (11)$$

$$q_{r3} = \lambda_w \frac{T_3 - T_a}{d_w} \quad (12)$$

ここに、 d_b は底面壁の厚さである。式(3)～(12)を式(1)、(2)へ代入することにより、 dT_1/dt 、 dT_3/dt に関する式が得られ、この式を数値的に積分することにより、 T_1 、 T_3 の経時変化が求められる。

3. 解析結果

ここでは、本解析の結果を野外実験(1998.11.3～12.22実施)の結果¹⁾と比較検討する。なお、野外実験の条件は表-1に、また、式(3)～(12)で用いた諸係数は表-2に示されている(水槽の側壁および底面壁からの熱の流失は無視している)。これらの係数は全て定数で与えており、実験結果を良好に再現するために常識的な範囲で修正を加えたものもある。

図-2は1998.11.4、11.24、12.18における水温鉛直分布の結果を示している。同図において、解析結果と実験結果にはずれが認められ、本解析モデルはまだ十分な予測精度を持っていないことがわかる。なお、実験結果は第I、III層においてともにほぼ様な水温分布を示しており(厳密に見ると、表層に若干の高温域が見られる)、先の仮定②がほぼ成立していることが確認される。図-3は全実験期間(1998.11.3～12.22)にわたる第I、III層の水温 T_1 、 T_3 の時系列を示したものである。なお、実験結果の T_1 、 T_3 は各層の層平均水温であるが、日中(晴天日)に表層に形成される高温域(表面躍層)の影響は無視している。全体的に見て、解析結果は実験結果を比較的良好に再現しているが、両者の不一致の度合いが大きい期間も現れている。この不一致は先の諸仮定にも起因するものの、より大きな原因として風速によって大きく変動する熱伝達係数 h 、潜熱伝達係数 k を一定としていることが挙げられる。

図-2は1998.11.4、11.24、12.18における水温鉛直分布の結果を示している。同図において、解析結果と実験結果にはずれが認められ、本解析モデルはまだ十分な予測精度を持っていないことがわかる。なお、実験結果は第I、III層においてともにほぼ様な水温分布を示しており(厳密に見ると、表層に若干の高温域が見られる)、先の仮定②がほぼ成立していることが確認される。図-3は全実験期間(1998.11.3～12.22)にわたる第I、III層の水温 T_1 、 T_3 の時系列を示したものである。なお、実験結果の T_1 、 T_3 は各層の層平均水温であるが、日中(晴天日)に表層に形成される高温域(表面躍層)の影響は無視している。全体的に見て、解析結果は実験結果を比較的良好に再現しているが、両者の不一致の度合いが大きい期間も現れている。この不一致は先の諸仮定にも起因するものの、より大きな原因として風速によって大きく変動する熱伝達係数 h 、潜熱伝達係数 k を一定としていることが挙げられる。

参考文献

1)出口・梅基・有田・中井：ソーラーポンドの蓄熱特性に関する野外実験，土木学会第54回年講概要集(第VII部)，1999。

表-1 野外実験の条件

<成層作成日：1998.11.1>
h1：第I層の層厚=0.575[m]
h2：第II層の層厚=0.05[m]
h3：第III層の層厚=0.575[m]
S1：第I層の塩分濃度=0[%]
S3：第III層の塩分濃度=1.0[%]
A0：水槽の表面積=17.4[m ²]

表-2 解析に用いた諸係数

α ：水面のアルベド=0.05
β ：吸収係数=0.5
σ ：ステファン・ボルツマン定数 = 5.67×10^{-8} [J/(m ² sK ⁴)]
a：山本の定数=0.62
b：山本の定数=0.066
ϵ ：射出率=1.0
h：熱伝達係数=6.28 [J/(m ² sK)]
k：潜熱伝達係数=1.5h [J/(s·hPa)]
λ_w ：側壁の熱伝導係数=0 [J/(msK)]
λ_b ：底面壁の熱伝導係数=0 [J/(msK)]
λ_2 ：第II層の熱伝導係数 =0.70 [J/(msK)]
c1：第I層の水の比熱 = 4.183×10^3 [J/(kgK)]
c3：第III層の水の比熱 = 4.183×10^3 [J/(kgK)]
注) β は水槽に流入する全太陽放射のうち、第I層に吸収される割合を示している。

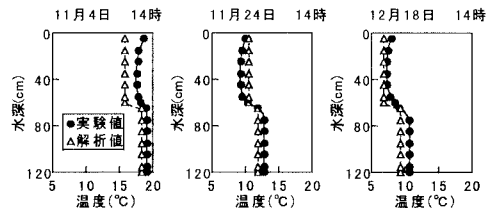


図-2 水温鉛直分布の例

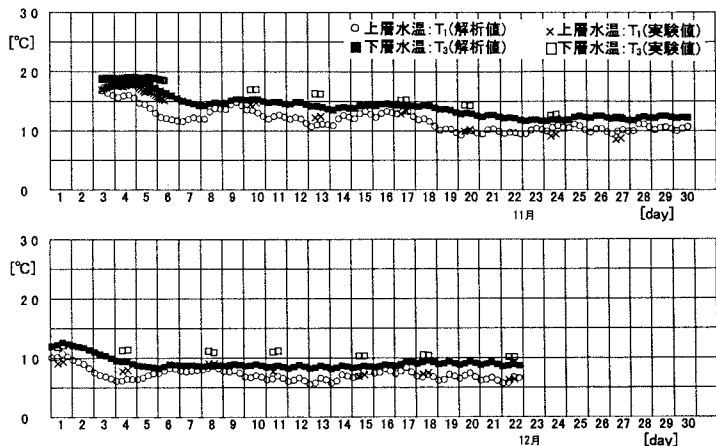


図-3 T_1 、 T_3 (解析値、実験値)の時系列