

低濃度塩水を用いたソーラーポンドの蓄熱特性 に関する野外実験

A FIELD EXPERIMENT ON HEAT ACCUMULATION OF SOLAR PONDS BY LOW CONCENTRATION SALT WATER

有田正光¹・中井正則²・佐藤玲³

Masamitsu ARITA, Masanori NAKAI and Rei SATO

¹正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

²正会員 工博 東京電機大学助教授 理工学部建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

³学生会員 東京電機大学大学院理工学研究科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町大字石坂)

A field experiment on the heat accumulation of solar ponds was carried out using low concentration salt water. The solar pond system exhibited certain heat accumulation, by being taken the special measures, in a relatively short period (1-3 weeks). The temperature in the lower layer was about 6 °C higher than that in the upper layer, in addition, maximally about 15 °C higher than the air temperature in the night-time. The accumulated heat in the lower layer of the solar pond could be used for heating relatively narrow spaces, for example, rooms in general houses and greenhouses in farms.

Key Words : Solar pond, Heat accumulation, Low concentration salt water

1. はじめに

自然エネルギーである太陽エネルギーの利用は地球環境保全の観点から重要な課題であり,多くの利用法が提案されている。その中で実現可能性が高いとされる手法の一つに,ソーラーポンドと呼ばれる貯水池に蓄熱する技術がある。

ソーラーポンドでは貯水池の下層水に塩化ナトリウムなどの無機塩類を溶解させ,その密度を大きくする。それにより,夜間の放射冷却による上層水密度の増大が生じても,水深スケールの鉛直対流の発生が抑制され,下層に蓄熱することが可能となる。

ソーラーポンドは1902年, Kalecsinskyがハンガリーのメドバ湖における調査(夏期)で,水深1.3mの水温が70°Cに保たれていることを偶然発見したことが起源であるとされている¹⁾。また,1948年には, Blochが塩水の濃度勾配を利用した人工的なソーラーポンドの着想を提案している¹⁾。その後,ソーラーポンドの蓄熱特性に関する理論解析,ソーラーポンドを動力源として利用する可能性,空調供給源として利用する可能性に関する検討などが行われてきている²⁾⁻⁴⁾。また,国内でも,いくつかの機関で様々な検討が行われてきたものの⁵⁾⁻⁸⁾, 実用化には至っていないのが現状である。

ソーラーポンドが実用化に到っていない原因の一つとして,従来の研究が下層の無機塩類の濃度を20~30%と高濃度に設定し,高い蓄熱効果を目指したため,高コストになっていたことが挙げられる。この点を考慮に入れて本研究では,下層水に塩分濃度1~3%の低濃度塩水を用いることとした。つまり,本研究は海岸線に隣接し,海水と河川水を費用負担なく得られる地域を念頭に置き,ソーラーポンドの下層水に海水を使用するとともに,その構造は素堀などの簡易なものとする事で費用負担を極めて小さくし,実用化への道を探ろうとするものである。

2. ソーラーポンドの蓄熱原理

ここではソーラーポンドの蓄熱原理を熱の伝達様式に着目して整理する。熱の伝達様式は放射・対流・伝導の3種類に分類できるが,以下にそれぞれによるソーラーポンドの下層における熱の授受について述べる。なお,ここでは上層・中間層・下層の3層系を考え(図-2参照),全層にわたって十分な透明度が維持されているものとする。

放射熱伝達の中で重要なものは太陽からの短波放射である。短波放射は上層・中間層・下層中でほとんど吸収されず,ソーラーポンドの底面まで到達す

る。そして、底面が吸収した放射熱は伝導と対流によって下層全体に伝達され、下層水温が上昇することになる。一方、加熱されたソーラーポンドの下層水からは長波が放射されるが、それは水中ではわずか数mm～数cm程度で吸収されるので、密度界面(中間層)を通り抜けてその上部へ到達することはほとんどない。つまり、放射熱伝達による蓄熱は大気中の温室効果と類似な現象の結果として生ずるものである。

対流熱伝達については、安定な密度成層が形成されているソーラーポンドでは水深スケールの熱対流が抑制され、これによる上下層間の熱のやり取りは無視できる。また、伝導熱伝達については、ソーラーポンドの下層水の水温が周囲より高いために、密度界面(中間層)および貯水池壁面を通じて下層から上層、大気中、地中への熱伝導が生じ、熱が失われるものの、量的にはかなり小さい。

要するに、ソーラーポンドの下層水は太陽からの短波放射によって熱を得るとともに、熱伝導によって熱を失う。しかし、その大きさは前者の方が後者より大きいために、ソーラーポンドの下層に蓄熱が生じることになる。なお、長時間経過後には両者がバランスし、ソーラーポンドの下層水は一定温度となる。ソーラーポンドの蓄熱原理の詳細については、文献1)を参照されたい。

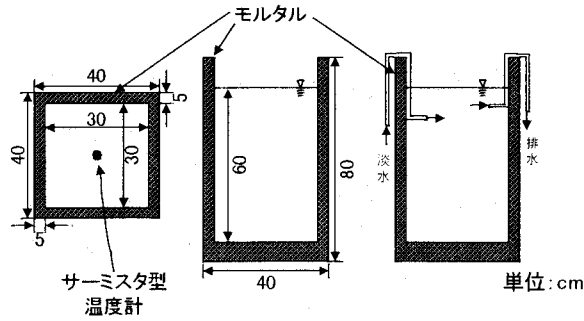
3. 予備実験とその結果

(1) 実験方法

ソーラーポンドをより有効に機能させる、つまり、下層の蓄熱量を大きなものとするための基礎的知見を得るために、図-1(a),(b)に示すような厚さ5cm、縦0.4m×横0.4m×高さ0.8mのモルタル製水槽を8体使用し、予備実験を実施した。

予備実験用の水槽に作製した密度成層は図-2に示すように、上層(淡水層)、中間層(淡塩混合層)、下層(塩水層)から成る3層系である。図中に示すように、 h_1 、 h_2 、 h_3 は各層の厚さ、 h_0 は全水深、 C_1 、 C_2 、 C_3 は各層の塩分濃度である。なお、上層には淡水を使用しているので、いずれのケースも $C_1=0\%$ である。

実施した予備実験は表-1に示すように、8ケースであり、すべての実験ケースで全水深 h_0 を60cmとした。また、シリーズAは下層の塩分濃度 $C_3=1\%$ 、中間層厚さ $h_2=2.5\text{cm}$ の場合であり、上下層間の塩分濃度差が小さくシャープな密度成層を持つケースである。このシリーズの中間層の塩分濃度勾配は $dC_2/dz=0.4\%/cm$ である(z :水表面から下向きにとった座標)。一方、シリーズBは $C_3=3\%$ 、 $h_2=30\text{cm}$ の場合であり、上下層の塩分濃度差は大きいものの、緩やかな密度成



(a)平面図 (b)側面図 (c)上層水の交換
図-1 予備実験に使用したモルタル製水槽

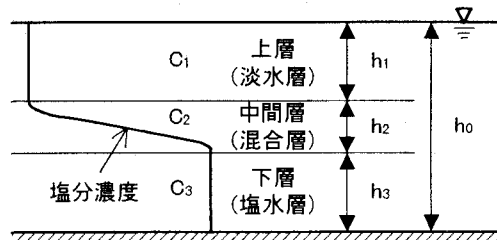


図-2 密度成層

層を持つケースである。なお、このシリーズの中間層の塩分濃度勾配は $dC_2/dz=0.1\%/cm$ である。

シリーズAでは中間層が薄く密度成層がシャープであるため、系全体としては安定しているものの、厚い下層中では密度が一定であるために熱伝導などが原因となって対流が生じやすい。一方、シリーズBでは中間層が厚く、下層が薄いために下層中对流が生じにくい。なお、下層中对流が生ずることは下層へ入射した熱エネルギーの一部が運動エネルギーに変換されることを意味し、結果として蓄熱効率が低下することになる。

また、各シリーズはそれぞれRun1～Run4の一連の実験ケースからなっている。それぞれのRunの特徴を以下に示す。

①Run1はモルタル製水槽に特別の蓄熱促進対策を実施しないケース。

②Run2は壁面での光の反射を抑制するために、水槽の内側を黒く塗装したケース。

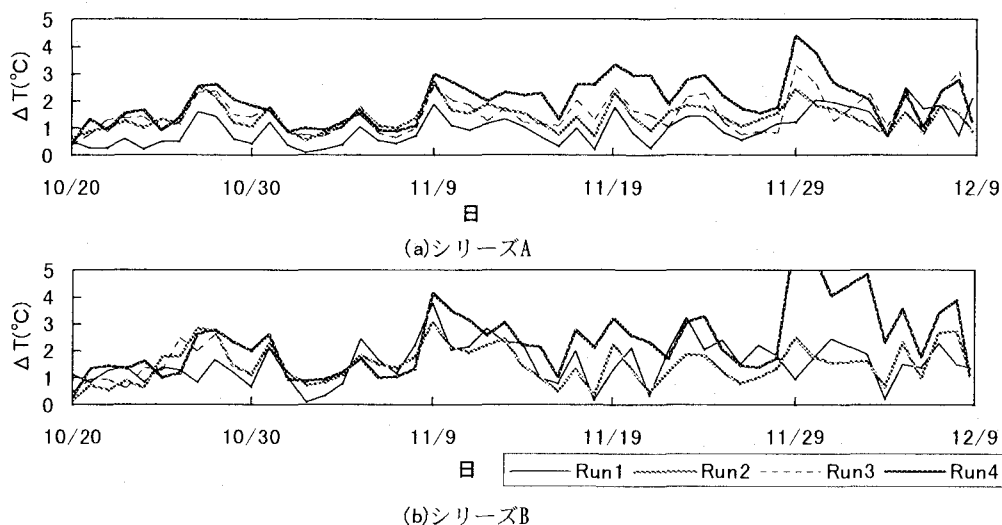
③Run3はRun2と同様に水槽の内側を黒く塗装するとともに、側壁を通じての熱の流出を抑制するために厚さ約3cmの発泡スチロールで断熱を施したケース。

④Run4はRun3と同様の水槽に上層水の濁りを防ぐための上層水交換装置を取り付けたケース(図-1(c)参照)。つまり、微小流量で上層に淡水を給排水して上層水の濁りを抑制し、より多くの太陽エネルギーを下層に入射させようとするものである。

要するに、Run1では蓄熱促進対策を実施しないのに対して、Run2、Run3、Run4は蓄熱対策を実施するケースである。また、Run2→Run3→Run4の順に蓄熱促進を強化しているため、Run1→Run4の順に下層の

表-1 予備実験ケース

実験ケース	予備実験							
	シリーズA				シリーズB			
	Run1	Run2	Run3	Run4	Run1	Run2	Run3	Run4
実験実施日	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8	00'10.20 ~12.8
h ₁ (cm)	28.75	28.75	28.75	28.75	15	15	15	15
h ₂ (cm)	2.5	2.5	2.5	2.5	30	30	30	30
h ₃ (cm)	28.75	28.75	28.75	28.75	15	15	15	15
h ₀ (cm)	60	60	60	60	60	60	60	60
C ₃ (%)	1.0	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0	3.0
蓄熱促進対策	なし	塗装	塗装 断熱	塗装, 断熱 上層水の交換	なし	塗装	塗装 断熱	塗装, 断熱 上層水の交換

図-3 水温差 $\Delta T (=T_3 - T_1)$ の時系列(予備実験)

蓄熱効果が高くなることが期待される。なお、実験における温度測定は水槽中央で行い、測定点はシリーズAでは水深15, 45cmの2点、シリーズBでは水深7.5, 52.5cmの2点とした。これらの測定点はそれぞれのシリーズの上下層のほぼ中心である。また、Run4における上層水の交換は上層水と同じ水温に調節した淡水を流量 $4\text{cm}^3/\text{s}$ 程度で上層に供給し、同時に同流量で上層より排水することにより行った(交換時間は約30分である)。

(2) 実験結果

図-3(a), (b)は下層水温 T_3 と上層水温 T_1 の差 $\Delta T = T_3 - T_1$ の実験期間50日間における時系列を示している。なお、 ΔT は後述のように日周変動を伴うが、同図ではAM1:00の水温 T_1 , T_3 を蓄熱効果を表すための値として採用している。同図より、両シリーズともにRun番号が大きいほど ΔT が大きく、下層の蓄熱が大きくなっていることが分かる(ただし、シリーズB-Run3は漏水により実験が途中で中断されている)。これは、蓄熱促進対策が一定程度の効果をあげていることを表している。なお、シリーズAの方が蓄熱促進対策の効果が明瞭に表れている。

また、シリーズAに比べ、シリーズBの方が(同一のRun番号に対して) ΔT が全体として若干大きいことが認められる。この原因は、シリーズBでは中間

層の密度勾配が緩やかであり、系としての安定性は弱いものの、(中間層が厚く)下層が薄いため、下層中の対流が抑制されるからと考えられる。また、密度勾配が大きい中間層ではそこで太陽光の反射率が増大し、下層へ到達する放射熱が減少することも、シリーズAで蓄熱効果が低い原因の一つと考えられる¹⁾。

図-4は予備実験ケースの中で最も蓄熱効果が高いと見なされたシリーズB-Run4の T_1 , T_3 , ΔT および気温 T_a の2日間わたる時系列を示している。同図より、気温 T_a が夜間に低下し、日中に上昇する日周変動に伴い、数時間遅れて上層水温 T_1 の変動が認められること、下層水温 T_3 も T_1 と同様に変動するものの、その振幅は極めて小さく、ほぼ一定の水温を保っていることが分かる。結果として、 ΔT は気温の高い日中に小さく、気温の低い夜間に大きくなるような日周変動を示している。

4. 本実験結果とその考察

(1) 実験方法と実験結果

前章で述べた予備実験の結果を参考にしうえて、ソーラーポンドの実用化を念頭に置いた本実験を計画した。本実験に使用した水槽は図-5(a), (b)に示すような縦 5.5m ×横 4.5m ×高さ 1.75m のコンクリー

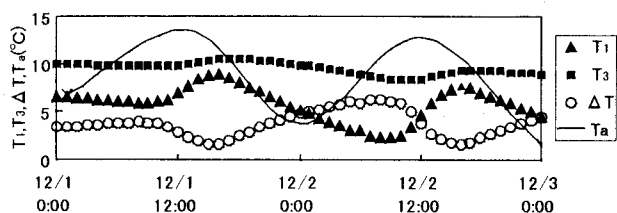


図-4 T_1 , T_3 , ΔT , T_a の時系列の例
(予備実験, シリーズB-Run4)

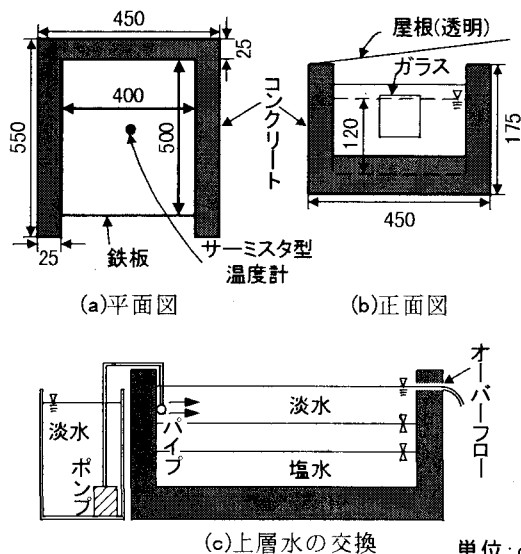


図-5 本実験に使用したコンクリート製水槽

ト製水槽であり、水槽には透明の屋根を取り付けて雨水の流入を防いだ(ただし、水槽と屋根の間に隙間があり、風は完全には遮断されていない)。実験水槽には、①水槽内壁の黒色塗装、②上層水の交換(図-5(c)参照)、の2点の蓄熱促進対策を施した。なお、上層水の交換方法はRun4の場合と同様であり、この場合の淡水供給流量は $70\text{cm}^3/\text{s}$ 程度、交換時間は約4時間であった。また、水槽側壁のコンクリートは25cmと十分に厚いため、断熱性は十分であると判断し、断熱材の取り付けは行っていない。

実験は全水深 $h_0=120\text{cm}$ 、上層厚さ $h_1=45\text{cm}$ 、中間層厚さ $h_2=30\text{cm}$ 、下層厚さ $h_3=45\text{cm}$ 、下層塩分濃度 $C_3=3\%$ で実施した。また、中間層の塩分濃度勾配は $dC_2/dz=0.1\%/cm$ である(この値は予備実験のシリーズBを念頭に置いて設定した)。なお、この実験ケースを以下ではRun5と称する。

さらに、Run5で実施した蓄熱促進対策の効果を検討するために、Run5の実験以前に実施した、上記①、②の対策がなされていないケース(図-5の水槽を使用)の結果をRun6として引用する。Run5, Run6の実験条件を表-2にまとめて示す。同表に示すように、蓄熱促進対策以外の基本的な実験条件は両ケースで同じである。

図-6はRun5における実験開始から1週間後(2000年11月24日, AM1:00とPM1:00)の水温鉛直分布を示している。同図より、下層水温が上層水温より高い

表-2 本実験ケース

実験ケース	Run5	Run6
実験実施日	00'11.18~01'1.18	99'9.11~99'12.31
$h_1(\text{cm})$	45	45
$h_2(\text{cm})$	30	30
$h_3(\text{cm})$	45	45
$h_0(\text{cm})$	120	120
$C_2(\%)$	3.0	3.0
蓄熱促進対策	塗装, 上層水の交換	なし

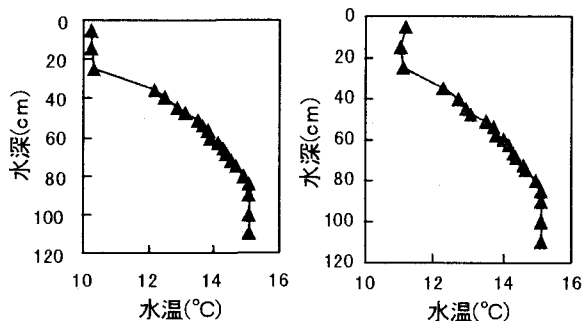


図-6 水温鉛直分布の例(Run5)

こと、中間層の水温は下層に向かってほぼ直線的に上昇していることが分かる。このように、昼夜に関わらず下層には蓄熱が生じており、ソーラーポンドとして機能していることが分かる。

図-7は、Run5におけるAM1:00の上層水温 T_1 、下層水温 T_3 、ならびに気温 T_a の時系列を示している。実験は11月中旬から1月中旬の気温が低下する冬期に実施されているが、これはソーラーポンドを冬期における温室などの暖房用として実用化することを念頭に置いたためである。同図より、気温の低下に伴って T_1 , T_3 ともに低下していることが認められる。しかしながら、 T_3 は気温 T_a よりも平均して 10°C 程度高く、最大で 15°C 程度高くなっている。

図-8はRun5およびRun6の上下層の水温差 $\Delta T(=T_3-T_1)$ の時系列を比較したものである。ただし、両実験で実施日時が異なるため、図の横軸は実験開始日からの経過日数をとっている。同図より、Run5の場合には、気温の低下時期に実施された実験であるにも関わらず、 ΔT は実験開始後数日程度で 4°C 程度に達して以降徐々に上昇し、最終的には $\Delta T=6^\circ\text{C}$ 程度のほぼ一定値を保っていることが分かる。また、Run5はRun6に比較して ΔT の値が大きいことが認められるが、これはRun5で実施した蓄熱促進対策の効果を示しているものである。ただし、実験開始から30日程度をすぎると、両実験ケースともに ΔT の値がほぼ同一となる。つまり、蓄熱促進対策を施した場合でも下層の蓄熱量が一定程度を越えると、水槽壁面や上層を通じての熱伝導、下層中での対流などによって熱が失われ、入射熱量と流出熱量がつり合い、

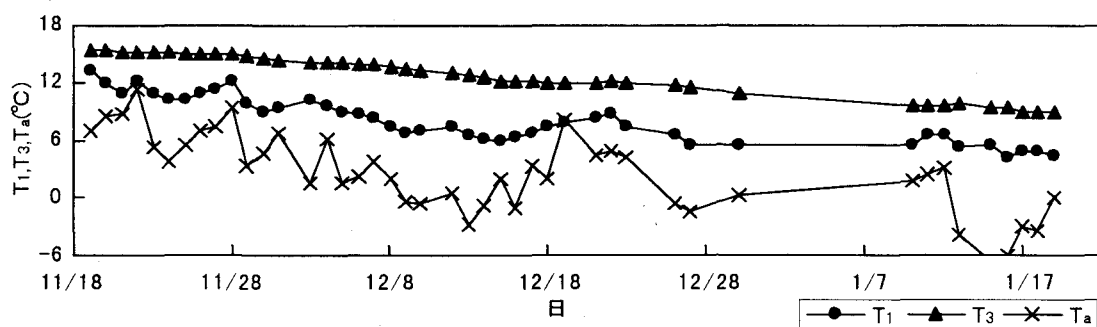


図-7 T_1 , T_3 , T_a の時系列(Run5, AM1:00)

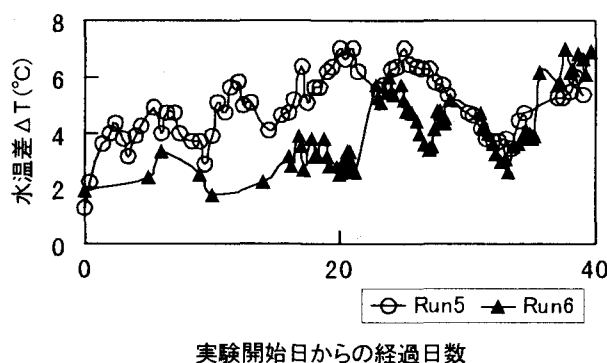


図-8 水温差 ΔT の時系列(Run5, 6)

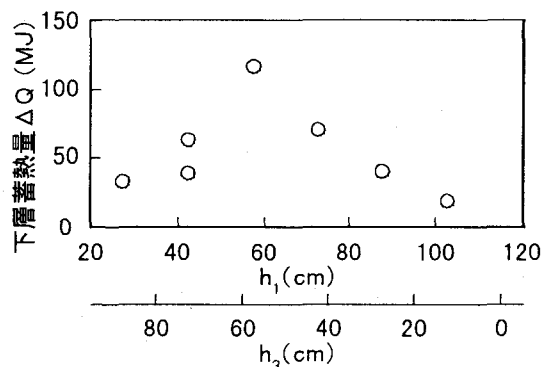


図-9 上下層厚さ h_1 , h_3 と下層蓄熱量 ΔQ の関係

平衡状態に達すると考えられる。

(2) 下層蓄熱量の評価と利用法

ソーラーポンド下層の蓄熱量 ΔQ は次式で定義される。

$$\Delta Q = \rho_3 c_3 V_3 \Delta T \quad (1)$$

ここに、 ρ_3 , c_3 , V_3 はそれぞれ下層の密度、比熱、体積である。下層の蓄熱効率を高める手法については前章で検討した。同章では、上下層の厚さを同一とした場合 ($h_1=h_3$) のみについて検討したが、実際には上下層の厚さ h_1 , h_3 (もしくはその比 h_1/h_3)を適切に選ぶことも重要であると考えられる。図-9は図-5に示した本実験用のコンクリート製水槽を用い、全水深 $h_0=120\text{cm}$ 、中間層厚さ $h_2=5\text{cm}$ 、下層塩分濃度 $C_3=1\%$ と固定して、上層・下層の厚さ h_1 , h_3 を変化させ、実験開始から約20時間後の下層蓄熱量 ΔQ の変化を調べたものである。ただし、実験水槽にはRun6と同様に蓄熱促進対策を施していない。

同図より、 $h_1=h_3=57.5\text{cm}$ 、つまり、中間層が全水深の中間に位置している時に ΔQ が最大となっていることがわかる。これは、上層が薄く、下層が厚い場合には下層内で熱伝導等によって駆動される対流によって熱エネルギーが失われ、逆に上層が厚く下層が薄い場合には下層の体積そのものが小さいために蓄熱量が小さくなるからと考えられる。これより、本実験程度の大きさの水槽をソーラーポンドとして利用する場合には、上下層の厚さを同程度とすれば良いことが分かる。なお、Run5, Run6において上下

層の厚さを等しくしたのはこの点を考慮したためである。

つぎに、Run5で得られた結果に基づいて、このソーラーポンドの実用可能性を詳細に検討する。図-8より分かるように、Run5では実験開始から数日で $\Delta T=4^\circ\text{C}$ 程度、1週間で $\Delta T=5^\circ\text{C}$ 程度、20日で $\Delta T=7^\circ\text{C}$ 程度に達している。特に、最初の僅か1日で ΔT は急激に増大し、冬期であるにもかかわらず $\Delta T=3^\circ\text{C}$ 程度が観測されている。ここでは、まず1週間で得られる $\Delta T=5^\circ\text{C}$ の結果をベースにして、実用可能性に関する検討を行う。

$\Delta T=5^\circ\text{C}$ に対する下層蓄熱量 ΔQ は、Run5における諸量を式(1)に代入して、 $\Delta Q=2.4 \times 10^3 \text{MJ}$ 程度と見積もられる。この程度の蓄熱量を利用するためには、家庭室内あるいは農業用温室内の夜間の補助暖房などとして、熱の形で直接利用することが最も効率的であると考えられる。利用方法の例として、ソーラーポンド下層と家庭室内もしくは温室内の両方にラジエーターを設置し、管水路で結んで下層の熱を取り出す方法が挙げられる。この場合、熱効率を向上させるために、ソーラーポンド側にラジエーターを使用せず、直接下層水を取水して循環させることも選択肢の一つとなる。

この蓄熱された熱量を利用して体積 $V_0=10^3 \text{m}^3 (=10\text{m} \times 10\text{m} \times 10\text{m})$ の家庭室内あるいは温室内を1週間にわたって夜間暖房することを考えると、1夜当たりに利用可能な熱量 ΔQ_0 は $\Delta Q_0=\Delta Q/7=34 \text{MJ}$ 程度となる。この熱量による室内の気温上昇 ΔT_{s0} は、空気

密度 ρ_a を $\rho_a=1.225\text{kg/m}^3$ 、定圧比熱 C_{pa} を $C_{pa}=1.004\times 10^3\text{J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ として、次式で与えられる。

$$\Delta T_{a0} = \frac{\Delta Q_0}{\rho_a C_{pa} V_0} = 27.6(^\circ\text{C}) \quad (2)$$

実際には熱効率および室内から外部への放熱も考慮する必要がある。なお、本試算では、日中(1日)の蓄熱量をその日の夜間に使用すると考えている。つまり、夜間に使用された熱量分は翌日の日中に再び太陽から供給される。このような使用法をとると、ソーラーポンドの利用は原理的には永久に持続可能となる。

上記の試算では $\Delta T=5^\circ\text{C}$ の場合の蓄熱量を1週間で使用する場合について検討したが、最初の1日の $\Delta T=3^\circ\text{C}$ 程度の温度上昇による蓄熱量を1夜ですべて使用する場合には、 $\Delta T_{a0}=117.0^\circ\text{C}$ となる(もちろん、この場合にも熱効率および外部への放熱を考慮する必要がある、実際にはこれほどの高温にはならない)。以上の試算より、1日の昼間の蓄熱量を夜間の補助暖房に用いることなど、ソーラーポンド下層に蓄熱された熱を効率的に利用する工夫をすれば、実用可能性が高まると考えられる。

前述のように、本研究で取り扱ったソーラーポンドは上下層の水温差 ΔT が最大で $\Delta T=7^\circ\text{C}$ 程度であった。海外では、下層水温が 90°C 以上($\Delta T=60^\circ\text{C}$ 程度と推測される)に達するソーラーポンドの報告例もある³⁾。しかし、これらは特殊な例であり、国内では $\Delta T=10^\circ\text{C}$ 程度のものが多い^{4), 8)}。従来のソーラーポンドでは下層水の塩分濃度が20~30%程度に設定されていることを考えれば、本研究で報告したソーラーポンドは塩分濃度が低い割には高い蓄熱効果が得られていると考えられる。

ところで、本研究では上層水の透明度を高く保つために、上層水の交換を実施している。実際のソーラーポンドにおいて本実験と同様な方法で上層水交換を行う場合には、そのために要するエネルギーをソーラーポンドのエネルギー効率の中に考慮する必要がある。しかし、本実験の目的は上層水の透明度がソーラーポンドの蓄熱特性に及ぼす効果を明らかにすることであり、実験の手法を現地で採用することを前提としている訳ではない。よって、上層水交換によるエネルギー効率の低下については考察していない。

なお、現地での上層水交換に際しては、河川水を自由落下により通水したり、サイフォンを利用するなどして、付加的なエネルギーならびに経常的な費用負担が発生しない方法を採用することを考えている。さらに、上層水の透明度を保つための様々な工夫も必要となるであろう。

5. まとめ

本研究は海水利用を念頭に置いて、1~3%程度の低濃度塩水を使用したソーラーポンドの蓄熱特性について実験的に検討したものである。このように、低濃度塩水を使用することは低コスト化、環境リスクの軽減化において有利な手法である。

本文中に示したように、今回用いた規模のソーラーポンドでも、その蓄熱量は室内や温室内の夜間の補助暖房など利用用途によっては十分なものであることがわかった。したがって、ソーラーポンドを素堀としたり、集熱および放熱のためのラジエーターとして廃車の部品を使用するなどの工夫により建設コストを削減できれば、実用性はさらに高まると考えられる。

なお、本実験に使用した野外水槽の東側には建物があり、冬季における実験水槽への日照時間は短いものであった。このため、今回の実験では上下層の水温差 ΔT は最大で 7°C 程度であったが、より日照時間の長い場所を選べば、さらに大きな ΔT および下層蓄熱量 ΔQ を得ることが可能になると考えられる。また、本文中に示したように、中間層の厚さとそこでの密度勾配は蓄熱特性に大きな影響を与えるので、今後の追加的な検討が待たれる。

参考文献

- 1) 多賀正夫：Solar Pondsについて、太陽エネルギー、第5巻、第3号、pp.50-57、1979。
- 2) Weinberger, H. : The physics of the solar pond, Solar Energy, Vol.8, No.2, pp.45-56, 1964。
- 3) Tabor, H. : Large-area solar collectors for power production, Solar Energy, Vol.7, No.4, pp.189-194, 1963。
- 4) Rabl, A. and Nielsen, C.E. : Solar ponds for space heating, Solar Energy, Vol.17, No.12, pp.1-12, 1975。
- 5) 多賀正夫：Solar Pondに関する二、三の実験、日本太陽エネルギー学会第6回研究発表会講演論文集、pp.49-52、1980。
- 6) 木ノ瀬紘一、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(I)、農業土木試験所報告、第19号、pp.65-84、1980。
- 7) 木ノ瀬紘一、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)、農業土木試験所報告、第21号、pp.203-225、1981。
- 8) 渡辺昭、清水博、清水泰、榊原俊作：塩濃度勾配ソーラーポンドの模型実験による集熱・蓄熱、名古屋工業技術試験所報告、第36巻、第8・9号、pp.200-207、1987。
- 9) 村田和美：光学、サイエンス社、pp.20-35、1979。

(2001. 10. 1受付)