

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22580291

 研究課題名（和文） ソーラーポンドを用いた太陽熱有効利用による  
農作物栽培施設の省電力化

 研究課題名（英文） Electric power saving of cultural facilities of farm products  
to utilize solar heat with salinity-gradient solar pond

研究代表者

平野 博之 (HIRANO HIROYUKI)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：60264115

研究成果の概要（和文）：「太陽熱を蓄える池」という意味のソーラーポンドを利用し、各種施設の暖房用熱源としての利用の可能性について、実験と数値解析の観点から検討を行った。実際に用いたポンドは、塩水の上に淡水を置き、太陽光を塩水に蓄熱するという塩濃度勾配型とよばれるものを用いた。このポンドでは、塩水と淡水の間の濃度勾配層が蓋の役割を果たすために蓄熱が可能となる。検討の結果、太陽熱の20%程度の量を蓄熱することが可能であることがわかった。

研究成果の概要（英文）：The experimental and numerical investigation to utilize solar heat as heating of the cultural facilities of the farm products with the solar pond. In this study, the salinity-gradient solar pond was used. In this system, water is placed on the saline solution, and the heat from the sun can be accumulated in the saline solution due to the salinity-gradient layer between water and the saline solution. As the result, the 20% amount of the solar power can be accumulated in the pond.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業環境工学

キーワード：自然エネルギー，太陽エネルギー，省エネルギー，蓄熱，流動，伝熱，拡散，数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

ビニールハウスをはじめとした農作物栽培施設などの維持管理経費において、とりわけ冬季夜間の暖房費の占める割合は大きい。本研究は、春季から秋季にかけて太陽熱を継続的に蓄えることが可能なソーラーポンドとよばれる装置を用いて蓄えた熱を冬季に、あるいは1日単位では日中の熱を夜間に、そ

れぞれ温水として取り出して暖房などに利用するための基礎研究を行うものである。

ソーラーポンドは、広義において「太陽の熱を蓄える池」を意味するが、ここでは、とくに、無機塩類の水溶液を用いた塩濃度勾配型の太陽熱の蓄熱システムを扱う。この種のポンドは、塩分をほとんど含まない上部対流層、濃度勾配により対流が抑えられる中間層、

塩分を含む下部対流層からなり、下部対流層に太陽光が蓄熱される。この研究は、1902年ハンガリーの自然湖において、V. Kallecsinskyが、湖底の塩分が水に溶け出してできた自然の塩分勾配により湖水の対流が抑制され、湖底部ほど水温が高くなっていることを発見したことに始まる。その後、発電プラントも含め、国内外に大小様々なソーラーポンドが作られ、研究あるいは実用化されてきた。図1に、典型的な、塩濃度勾配型のソーラーポンドの模式図を示す。

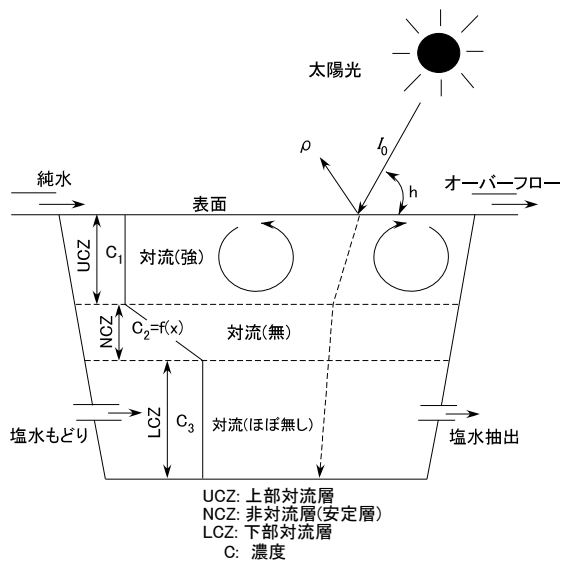


図1 塩濃度勾配型ソーラーポンドの模式図

移動現象論的に考えると、塩濃度勾配型ソーラーポンドは、エネルギーの移動と物質の移動とが重畳した、二重拡散現象である。こうした問題に関しては、これまでも、実験的、理論解析的あるいは数値解析的研究は多く報告されている。しかしながら、実現象として考えれば、ポンドの内部は透明であって可視化は困難なこと、密度・粘性係数・熱伝導率・比熱などの物性値は温度と濃度に依存する（これらの関数となる）ことなどから、実際に見合った解析はなかなか難しいといわざるを得ない。

また、国内外において存在する実機でいうと、例えば、イスラエルではエインボオカ発電プラントで6400 m<sup>2</sup>のソーラーポンドを用いて150 kWの発電実績がある。ここは、ポンド表面が30℃、ポンド底面は100℃に近い。国内では、水産加工場への給湯システムとして、網走に1600 m<sup>2</sup>のソーラーポンドの実績がある。このほかにも、アメリカやオーストラリアなどで実績がある。しかしながら、これらは非常に広大で大規模なものである。

昨今の二酸化炭素排出量削減という国際的な流れからして、自然エネルギー活用技術の1つとしてのソーラーポンドを広く一般に普及させることは極めて有用であると考えられるが、これまでの広大なスケールのものであれば、一般普及可能なクラスのものとはほど遠いといわざるを得ない。これは、広大な池を利用する場合、メンテナンスなどには労を要するが、それほど詳細な科学的議論を必要とせずとも蓄熱は可能であるのに対し、これをパーソナルユースレベルのスケールにまでダウンスケールするには、表面や側面・底面からの放熱、内部の流動様相などについて、可能な限り詳細に検討する必要があるためである。とくに、ソーラーポンドの内部は透明であることから、内部の流動状態を詳細に検討することは困難であり、実のところ、ソーラーポンドの内部において「対流しながら、どのように蓄熱されてゆくのか？」という蓄熱の様子を可視化した報告については、ほとんど例がない。

## 2. 研究の目的

本研究は、春季から秋季にかけて太陽熱を継続的に蓄えることが可能なソーラーポンドとよばれる蓄熱装置に着目し、これを利用することで、ビニールハウスをはじめとした農作物栽培施設などの冬季夜間の暖房費削減などに資することを目的とし、実験的かつ数値解析的な手法により検討を行って基礎的な知見を得る。季節単位ではなく、昼間の熱を夜間に利用するという日単位での蓄熱利用の可能性も検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験的研究

アクリル製の水槽を用い、下層に食塩水を満たし、その上に淡水をのせ、ポンドを作製した。食塩水の濃度に関しては、1種類のみならず複数種類の食塩水の場合についても実験を行った。また、塩水と淡水の間を透明膜で仕切る実験なども行った。実験にあたっては、太陽光強度とポンド内の温度の測定を行った。

### (2) 数値解析的研究

基礎式としては、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式、拡散方程式を考慮し、直角座標系にて2次元解析を行った。運動方程式を考慮したときの圧力場と速度場の計算にあたっては、SIMPLE法 (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) を用い種々計算を実施し、ここに1例を示す。初期条件として、ポンドの下半分が10 wt%の塩水でその上に淡水を置き、境界条件としてポンド表面の温度を気温に等しくし、表面への太陽光の入射、表面からの反射、水の蒸散による熱損失を考慮し側面は断熱とした。底面は

黒色とし、流れを考慮しない計算では底面に届く光をここですべて吸収させた。流れを考慮した計算では、底面温度としては実測値を与えた。本研究において対象とした計算モデルの詳細および計算条件を、それぞれ図2と表1に示す。

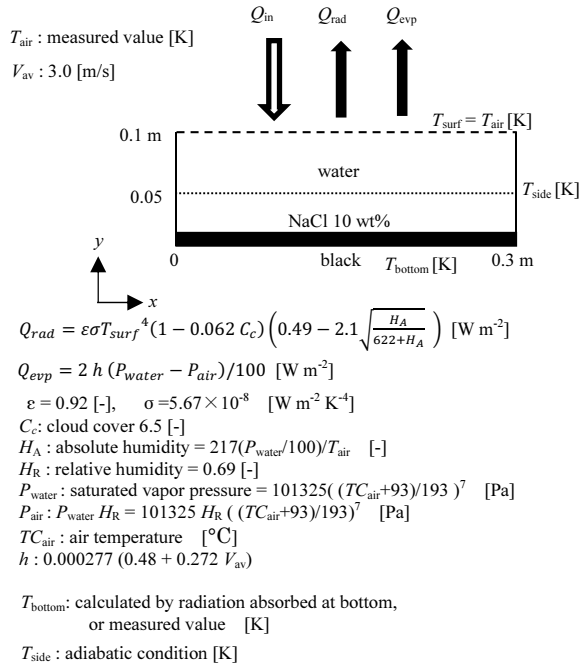


図2 数値解析モデル

表1 計算条件

時刻	日射	気温	時刻	日射	気温
[h]	$Q_{in}$ [W m <sup>-2</sup> ]	$T_{air}$ [K]	[h]	$Q_{in}$ [W m <sup>-2</sup> ]	$T_{air}$ [K]
7	290	299.45	13	1230	304.65
8	530	301.35	14	950	304.65
9	820	301.65	15	730	304.35
10	960	303.95	16	617	304.95
11	1010	304.65	17	520	303.95
12	1130	303.65	18-7	0	299.45

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験的研究

1層型ポンド(淡水のみあるいは塩水のみ)の蓄熱効率率はほぼ等しく、極めて低い。

2層型ポンドにおいては、下層の塩水に蓄熱が可能となる。

3層以上の層からなるポンドでは、底面における温度にあまり違いはみられなくなる。

直線型の濃度勾配層(多数の濃度の層)を付与されたポンドの蓄熱効率は非常に高く、このとき対流はほぼ存在しないので、ある程度、解析的な取り扱いも可能となる。

塩の拡散を抑えるため、層の間に透明膜を用いたポンドで実験を行った結果、膜によっ

て太陽光が散乱され、蓄熱効率は大幅に低下する。

おおむね、太陽光の20%程度のエネルギーを蓄熱に用いることが可能である。

##### (2) 数値解析的研究

###### ①物質移動のみの場合の解析

図2の領域について、深さ方向に50分割して計算を行ったところ、対流がない場合は、18時においても、表面あるいは底面近傍の密度は、ほぼ初期の値のままであることがわかった。なお、この計算においては、NaClの拡散係数は一定とした。

###### ②エネルギーと物質の移動がある場合の解析

日射によるポンド内部の発熱は深さの関数として減衰するように与え、密度(実測)、比熱、熱伝導率については、温度と濃度の依存性を考慮し、さらに拡散係数については、温度の依存性も考慮して表1の条件で解析を行った。その結果、3日間の計算結果からは、ポンド底面の温度は、朝、昼、夜と日射に応じて高低変化すること、日数が経過しても最高到達温度はあまり変化しないことがわかった。またこの計算結果から、24時間後の塩濃度は、表面で0.3 wt%、底面で9.7 wt%であった。

さらに実機に近い条件で、ポンドの深さを1 mとして300日間計算した結果、日数の経過とともに、底部の温度が徐々に上昇し、最終的には340 K近くまで温度が上昇した。すなわち、ポンドの深さを深くすることで、季節単位の蓄熱が可能であることがわかる。なお、ポンドの深さが1 mの場合は、30日経過しても、底面と表面における塩濃度はほぼ初期の値のままであること、300日経過後は表面では約2 wt%、底面では約8 wt%程度であることがわかった。

###### ③運動量・エネルギー・物質の移動がある場合の解析

格子刻みをx, y方向にそれぞれ、180, 60として数値解析を行った。流れの計算にあたってはさらに、物性値として粘度が必要となるが、ここでは温度と濃度の依存性を実測し、この結果を考慮して計算を行った。図3に、11:00における計算結果を示した。水と塩水溶液の中間に、薄い濃度勾配層が存在しており、この層が蓋の役割を果たして対流が抑制されていることがわかる。また、本計算の結果からすると、下部および上部の層において生じる対流の影響により、塩の物質移動が認められ、ポンド上部における塩濃度は18時において約3 wt%となった。さらに、ポンド内部における流速は、最大で8 mm/s程度であり、ポンド深さを代表長さとし、水の物性値で見積もった場合、Reynolds数は500程度、(温度差による)Rayleigh数は約 $3.96 \times 10^9$ 程度であった。

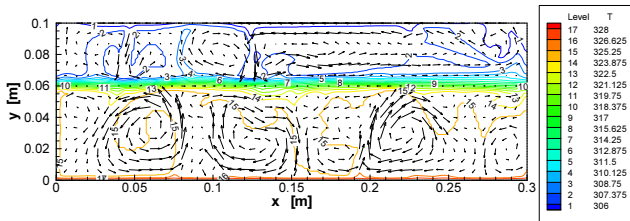


図3 11:00における速度ベクトル図と等温線図。(見やすくするため速度ベクトルは4格子ごとに描いてある)

### (3) 総括

農作物栽培施設として一般的なビニールハウスの冬季夜間の暖房用熱源として、本研究において取り上げたソーラーポンドを利用することを考える。

施設の熱損失を考えると、地中への損失、外壁(ビニール製のフィルム、継目、窓など)からの損失などが主に考えられる。さらに後者の損失の形態は、伝導、対流、放射が挙げられる。熱損失の割合で考えると、一般的に、そのほとんどはフィルムを通しての損失であり、気密性や施設の形状などにもよるが熱源の20%程度が損失となるといわれている。したがって、冬季夜間の施設内の温度維持のために必要となる暖房には、相当なエネルギー消費を伴う。地域にもよるが、暖房を灯油でまかなうとすれば、効率でいうと一般家庭の数十倍程度必要であるといわれる。

したがって、農作物栽培施設の冬季夜間の暖房に必要な熱源をソーラーポンドにより補助的にでも利用できれば、省エネルギー・省電力効果が期待できる。

本研究において実施した実験結果からすると、ソーラーポンドの蓄熱効率は、一般的にいわれている(大規模なものの)範囲にあり、太陽光の20%程度は利用可能であるという結論を得た。したがって、たとえば、平均して $400 \text{ W/m}^2$ で10時間の日射により、ソーラーポンドで蓄熱できる熱量は $2.88 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ となるが、これはほぼ $30 \text{ m}^3$ の施設内の空気を $10^\circ\text{C}$ 昇温させることが可能な量に匹敵する。フィルムからの熱損失などを考慮し、施設の周辺にポンドを複数設けるなどしてポンドの表面積の増加を検討すれば、施設の冬季夜間の暖房補助熱源としての利用は見込めるものと思われる。

### (4) これからの課題など

塩濃度勾配型のポンドを用いる限りにおいては、メンテナンスが課題となる。したがって、一般に普及させるためには、淡水のみで蓄熱を可能とするような、これまでに報告例のないような新たな蓄熱方式を検討することも重要である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

① 平野博之, 松野弘貴, 岩本光生, 桑木賢也, 岡本直孝, 塩濃度勾配型ソーラーポンドにおける移動現象の数値計算, 日本機械学会熱工学コンファレンス2012, 平成24年11月18日, 熊本大学(熊本)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 博之 (HIRANO HIROYUKI)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号: 60264115

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号:

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号: