

ソーラポンド性能のシミュレーターによる室内実験

Experiment indoors on the Performance of a Solar Pond
under Solar Simulator

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

In order to make clear the mechanism of heat collection and heat storage of a solar pond, the authors conduct the experiment indoors and numerical analysis on a small scale model of salt gradient solar pond with 2 m² of surface and 1.6 m depth, under incident ray from a Xe-lamp solar simulator. In the experiment, temperatures in the pond water and surroundings were measured continuously and recorded automatically in a recorder, however, concentration of the salt water solution was measured manually by a C.E.T. sensor.

We could find that several phenomena different from the expectations occurred, but the distributions of temperature and concentration in the pond water were well explained from the analytical result by means of spectroscopical consideration for the incident ray. We also observed the phenomena of erosion of the lower part of the gradient zone by convection of the storage zone. Therefore, the spectroscopical consideration for thermal performance of any solar pond is necessary to obtain a correct solution under the special incidence from natural rays.

Key words:Solar Pond, Solar Simulator, Experiment and Spectral Calculation, Temperature and Concentration Distributions, Spectral Transmittance, Incident Ray's Spectrum.

1. はじめに

ソーラポンドの実験は、それが自然の状態で実用される技術であるゆえに、本来屋外において実際の気象条件のもとで大きなスケールで行われるべきである。しかし、自然の気象条件は、太陽高度や日射量をはじめ、気温、湿度あるいは風速が変化し、時には降雨、降雪、塵埃、結氷などを伴うこともあり、安定した周囲環境を得ることは不可能である。したがって、得られた実験結果の整理、解析、評価などを十分な精度で行うことも困難である。

そこで著者らは、実際のソーラポンドを模擬したモデルを作成し、これをソーラシミュレーターのもとで種々の実験条件を人為的に設定して、ソーラポンドの集熱・蓄熱に関する屋内実験を実施して、実験結果の検討および考察を行った。室内実験のゆえに、周囲環境の条件は自然界のそれとは異なり、特に実際の太陽からの自然光に対して、シミュレーターから的人工光はそのスペクトルが相異する。入射スペクトルの分布はソーラポンドの性能に大きく影響するので、分光日射量として考え、また熱媒の光学的性質も分光透過率で与えて単色光ごとに扱い、種々の現象に対する解析

*1会員、北見工業大学大学院(〒090-8507 北見市公園町165)

*2会員、北見工業大学工学部
(原稿受付 平成10年6月11日)

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

を行った。

幸い、著者ら^{(1)～(4)}は、太陽光および塩水溶液の分光に関する多くのデータおよび技術を持ち合わせているので、これらを活用してソーラボンド性能の実験結果の解析を行い、実用ソーラボンドを想定した熱解析シミュレーションモデルの作成のための理論的根拠を実験的に明らかにすることができた。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

図1に本実験に用いられた実験装置全体の構成を示す。装置の主要部は実験ボンド、ソーラシミュレーター、溶液調整・熱抽出系および計測系からなる。実験ボンド本体は黒色の低密度ポリエチレン製の円筒型タンク($D=\phi 1.6\text{m}, L=1.6\text{m}$)を改造して用い、濃度勾配層および境界層の観察のために、タンク周囲の壁に透明アクリル板による小さなそき窓を4個所設けた。ボンド水の温度測定にはK型熱電対を用い、ボンド直径のおよそ1/2(中心)および1/4(中心と周壁の中間)の二箇所に縦方向に5cm間隔でそれぞれ32点ずつの測定点を配置した。このほか、ボンド内壁および外壁の温度、ならびに室内温度および床面温度の測定点も設けた。ボンド塩水の濃度測定はC.E.T.センサー⁽⁵⁾により行い、濃度勾配層においては2cm間隔でデータを取った。実験開始後20分間隔で各測定点の温度をパソ

コンを用いて自動記録計に連続的に記録し、濃度は7～10日おきにマニュアルで測定した。

2.2 塩水層の作成

ソーラボンドの塩水層の作成は下部層の上に上部層を積み上げる方法に従って、先ず高濃度塩水の蓄熱層をつくり、その上にディフューザーを浮かせて濃度勾配層、清水の上部対流層をつくった。すなわち、先ず濃度20%の塩水をタンクの所定の深さに満たした後、薄い平板を浮かせてその上に所定の濃度の塩水を低流速(0.21/min)で放射状に広がるように注水し、勾配層を一層づつ積み上げ、最後に清水を流入して上部対流層を作成した。勾配層は厚さ7cmの一定濃度層を10層積み上げてつくれた。なお、塩水溶液はNaCl一級試料を水道水で溶解して用いた。

2.3 光源の性質

本実験で使用したソーラシミュレーターはキセノンランプ(8kW×20灯)を光源としている。その色温度は約6000Kで可視域のスペクトル分布は自然光に近似した人工光源(JIS C8911, AM1.5)と言われる。スペクトル分布はランプへの供給電力にほとんど影響されず、寿命までの使用時間(約500h)中ほぼ一定である。さらに点灯すると同時に安定な光源をつくり、消灯後再び点灯しても瞬時に復帰するので使い易い光源である。しかし、本実験に使用した20個のキセノンランプで構

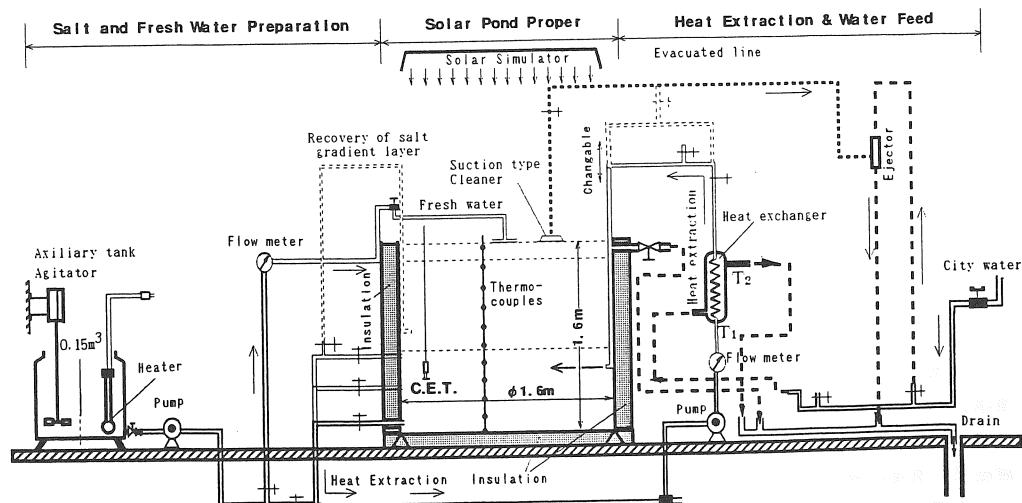


図1 実験装置および方法の概略
Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus and method

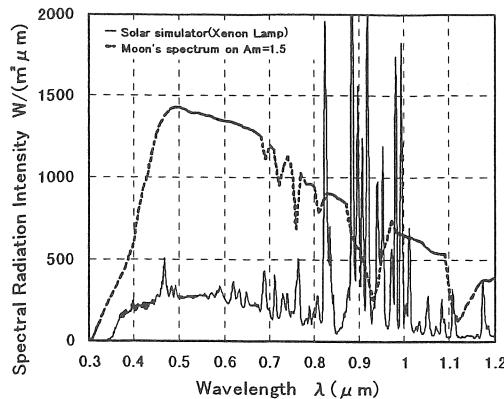


図2 Moonのスペクトルとキセノンスペクトルの比較
Fig.2 The comparison of radiation intensity of two incident rays of Moon's and Xenon's spectra

成されたプロジェクターからの人工光は、次の2点で自然光と異なることがわかった。

その一つは図2に示すように光線のスペクトルの違いである。図から明らかなように本シミュレーターからの光線スペクトルは、自然光の標準とされるMoonの標準光と相当異なった分布を示す。特に人工スペクトルは、波長0.83~1.01μmの近赤外域で強いスパイク状の輝線を有する点である。すなわち、人工光のスペクトルの強い部分は可視域より長波長域にあることにより、ポンドに入射後の塩水中の全透過率が自然光の場合と異なり、ポンド水中の温度分布や熱バランスが大きな影響を受けることになる。ちなみに本実験に用いた入射光スペクトルに対するポンド塩水の全透過率を波長積分計算によって求め、Moonのスペクトルのそれと比較して図3に示す⁽⁴⁾。

図3より明らかなように、人工光スペクトルは可視域成分が少ない点で全透過率は自然光の半分程度でしかないことがわかる。このことはソーラーボンドの熱収支は入射光のスペクトルと媒体の分光透過率を考慮して単波長ごとの値を求めてから、最後に波長積分によって算出する分光学的計算によらなければならないことを意味する。

二つめは、入射光の非平行性である。プロジェクターは有限の大きさ(1.2m×2.2m)で、その中の数灯を点灯して約4mの距離から照射するので、入射光は±10°程度の非平行成分を含んでいる。事実、全天日射計によって標準日射量1000W/m²の入射に対して、直達日射により直達光成分を測定すると、これよりかなり小さな値しか検出されない。照射実験中ポンド壁面の温度

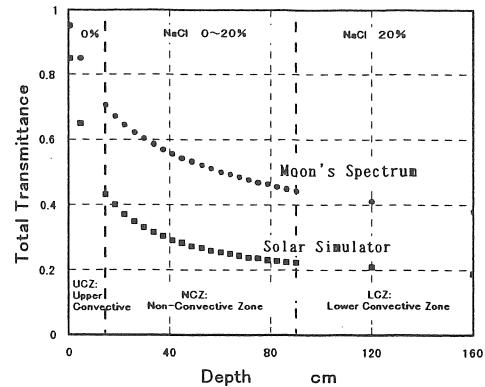


図3 実験ポンドにおけるMoonのスペクトルおよびキセノンスペクトルを用いた全透過率計算の比較
Fig.3 The comparison of total transmittances of the pond water for two incident rays of Moon's and Xenon's spectra
(UCZ: Upper convective zone, NCZ: Non-convective zone, LCZ: Lower convective zone)

が同一レベルのポンド水の温度より高く検出されたが、これは入射光の非平行成分を受けて壁面の温度が上昇したものと考えられる。しかし、本研究の熱計算において入射光は平行光として扱っている。

2.4 実験方法

モデルポンドのタンクに蓄熱層、勾配層および清水層からなるポンド水を充填した後、本実験を開始した。実験は午前中にプロジェクターのキセノンランプを強度分布が少なくかつ標準日射量となる位置と個数を選んで点灯し、一定時間照射した後消灯して一日の実験を終了する。各点の温度は自動記録し、濃度はC.E.T.センサーで人力で測定した。経過日数とともに蓄熱層の温度が次第に上昇するが、50°Cになるまでは清水層の補充とオーバーフロー、清水層の浄化を行った後に投光する順序に従った。清水層の補充は温度変化の影響を少なくするためにオーバーフローとほぼ同じ温度の清水を供給した。蓄熱層の温度が50°C以上になった時は、投光と同時に熱抽出も行って、それ以上の温度にならないように調節した。

ソーラーボンドの熱収支に影響する要因は多数あるが、ポンド表面からの水の蒸発の影響は大きい。蒸発量算出のために種々のモデルが提案^{(6), (7)}されているが、それらの間の数値の差が大きいため、本研究では毎日の正味清水補充量を記録し、これを蒸発量とした。照射実験は毎日一定時間同じ強度のもとで照射した。一日当たりの照射時間および日射強度は年間の平均日照

時間および平均日射量を参考にしながら段階的に変化させて行った。

清水層の浄化にはエゼクター真空吸引法を併用した。

3. 実験結果および検討

3.1 ポンド表面の浮遊物

本研究は室内実験にもかかわらず、毎日決まったように塵がポンド表面に浮上する現象が観察された。そのままにしておけば浮遊物は次第に増加してソーラボンドの熱性能に影響を及ぼす恐れがあるので、表面に清水を流入させオーバフローにより除去した。表面の浮遊物除去には一定の流速が必要であるが、本実験の清水流入量では清水層の流速は小さく、浮遊物を除去し終わるまでに長い時間と大量の流入が必要であった。ここで、清水流入量を増大させオーバフローの流速を増やせば清水層の厚さの増大となり、そのことは濃度勾配層の厚さおよび濃度分布に、ひいてはソーラボンドの蓄熱性能にも影響を及ぼすことになる。

本実験において、2ヶ月間で清水層の厚さは初期の15cmから100日後には35cmに増大したことが観察された。清水層の清浄作業を上手に行い、設計通りに清水層および勾配層を安定に保つことは実用上重要な技術と考えられる。

3.2 清水層の挙動及び上部勾配層の浸食

本研究で清水層の厚さが短い期間で増大したが、3.1項に述べた以外のもう一つの原因として次のようなことが上げられる。

すなわち、図2からわかるように、ソーラシミュレーターのキセノン光源のスペクトルの特徴は水の吸収係数の大きい近赤外域で値が大きい。このことは照射された光はポンド表面の清水層の薄い部分で吸収され、清水層の温度上昇をもたらすことを意味する。それは図3のポンド水深と全透過率の関係からも明らかなように、キセノン光源はポンド水深20cmで約60%の光エネルギーを吸収することになる。これは清水層の温度上昇と、濃度勾配層上部に大きな温度勾配をもたらすことになる。

図4に実験中の清水層の温度の実験初期と後期の値を一日の変化で示す。図からわかるように、清水層の温度は日時の経過とともに上昇し、実験開始3日後と80日後では約13°Cの温度差で推移し、入射光の有無によって上下に変動するが、実験開始80日後の最高温度は36°C以上に達する。本実験は冬期に行ったので室温は平均で約11°Cと低く、清水層表面の空気温度と

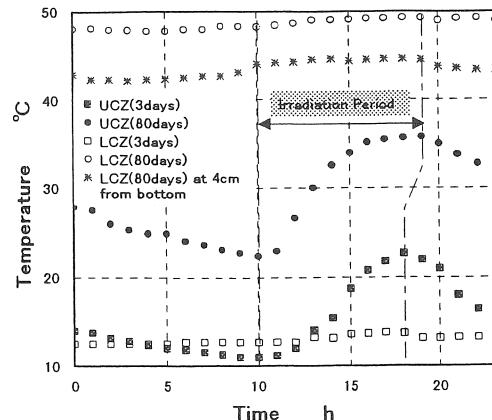


図4 実験初期と後期におけるUCZとLCZの1日温度変化

Fig.4 Temperature changes of UCZ and LCZ through a day when different No. of days elapsed

の差が大きいため自然対流が発生し、また濃度勾配層上部の大きな温度勾配により不安定となり勾配層の上部が浸食され、清水層の厚さと濃度の増大につながったものと思われる。

3.3 浸食された勾配層の修復

浸食された上部勾配層を正常の状態に戻すため、修復作業を行った。修復作業は先ず上下移動可能なディフューザーを浸食された勾配層の壁面位置に固定して、浸食された液層をゆっくり(0.3l/min)抜き取った。次に、同じ位置で、このディフューザーを用い、抜き取り時とほぼ同じ流速で所定濃度の塩水を同じ量注入して修復することができた。修復後、C.E.T.センサーにより濃度測定を行った結果、初期値に回復していることが確認された。

3.4 対流蓄熱層の温度変化

図4には清水層温度とともに対流蓄熱層の平均温度および底面付近の1日の温度変化も併記してある。図よりわかるように清水層に比べ、対流蓄熱層の温度は高く、その変化は非常に緩やかなことがわかる。この場合、蓄熱層の温度上昇をもたらした分がソーラボンドの集熱量となる。なお、蓄熱層温度の上昇につれて、底面付近の温度が常に蓄熱層平均温度より低いことから、底面からの熱ロスが大きいことがわかる。

3.5 勾配層浸食についての考察

実際のソーラボンドにおいて、勾配層の浸食は下部

からも進行し、蓄熱層の厚さが成長するのに対して、勾配層の厚さが徐々に薄くなり、その機能を失うことになる⁽⁸⁾。それは主に温度上昇にともなって激しくなる蓄熱層における対流が原因と考えられる。

そこで下部勾配層浸食の現象を観察するために底面に加熱ヒータを有する小型実験ポンドを別に作り、蓄熱層温度上昇の際の自然対流の流れ模様を観察した。本装置による浸食実験において目視により観察された蓄熱層の流動パターンを図5に示す。図よりわかるように、ヒータにより加熱された蓄熱層下部の塩水溶液は温度が上がると密度が低下して軽くなり、その浮力により上昇流となる。この上昇流は蓄熱層と勾配層の境界面に達すると放射状に広がる流れとなるが、このとき液体の粘性により勾配層の下部を巻き込むよう浸食する。この作用は蓄熱層の温度が高いほど、また勾配層界面付近の温度勾配が急なほど激しくなるので、それによって勾配層は下部から浸食され厚さが次第に薄くなると解釈できる。

いま本実験における濃度勾配層の温度測定の結果を図6に符号で示す。図から勾配層における温度分布の測定値は勾配層下部では緩く、上部では急なことがわかる。このことは勾配層下部の浸食作用は弱いが、上部は強くなることが予測され、現実にそのような結果になっている。いっぽう、屋外での実際のソーラーポンドにおいては過去の実験結果⁽⁸⁾から勾配層下部においても温度勾配は急なため、蓄熱層の温度上昇と合いまって浸食は強く現れることが推測される。

3.6 ポンド表面からの蒸発量

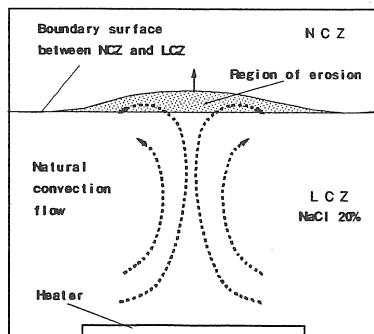


図5 蓄熱層の温度上昇により起きた自然対流の流れパターンおよび自然対流による勾配層の浸食

Fig.5 The flow pattern by natural convection caused by temperature rise on the LCZ and erosion of NCZ due to the natural convection.

本実験におけるポンド表面からの蒸発量を清水を補充したときの正味注入量（清水注入量とオーバーフロー水量との差）で示すと表1の通りである。表より日数が経過し、清水層の温度が上昇するとともに清水の正味注入量すなわち蒸発量も増大する。

表1 ポンド表面における日間蒸発量

Table 1 Amount of evaporation from the surface of solar pond

No. of days passed	1	10	20	30
Litter/(m ² day)	2.3	3	4	5
No. of days passed	40	50	60	70
Litter/(m ² day)	6	7	9	10

3.7 温度分布および濃度分布^{(3), (4)}

本研究のソーラーポンドモデルにおける実験期間中のポンド水の温度分布および濃度分布のプロファイルとその変化を図6および図7に示す。図6の符号で示した実験値の温度分布において蓄熱層の温度は日時の経過とともに徐々に上昇するが、勾配層の温度分布は初期の逆S字型から後期にはほぼ上に凸の曲線状に変化しながら温度上昇をつづけることがわかる。清水層は入射光の長波長成分が大きい関係でエネルギーの吸収が大きく、温度上昇も大きいが、温度分布はほぼ一定で変化する。また日時とともに清水層が厚くなっていることがうかがわれる。それに対して図7に示す濃度勾配層の濃度分布の測定値は上部を除いて2ヶ月以上の実験期間中ほとんど変化なく、最初に設定した濃度勾配が維持されていることがわかる。

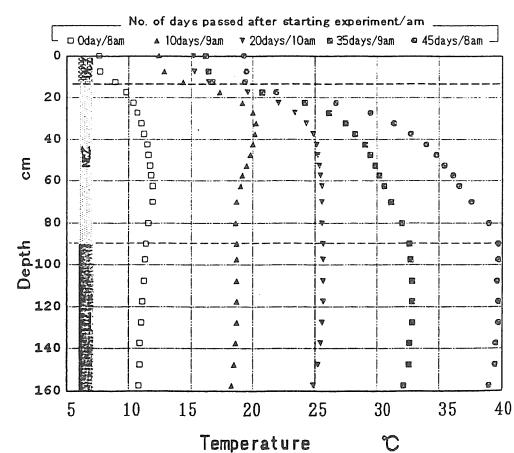


図6 ポンド中央部における温度分布の測定値

Fig.6 Temperature profiles measured in the center of solar pond

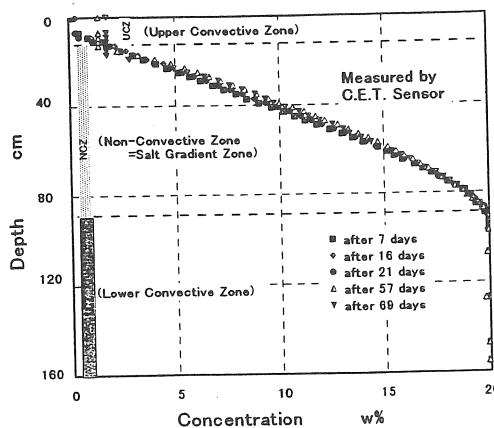


図7 C.E.T. センサーによる濃度分布の測定値

Fig.7 Concentration distributions of the solar pond measured by C.E.T. sensor

4. むすび

表面積 2m^2 、水深1.6mの円筒形の実験ソーラーポンドを用いて、キセノンランプ光源のソーラシミュレーターの下で人工光照射による集熱、蓄熱および熱抽出の実験を行った。分光解析の手法により実験結果を解析し、温度分布、濃度分布の変化および勾配層の浸食などについて詳細に測定、観察した。その結果今後予定

している実用ソーラーポンドの熱的性能を予測するシミュレーション計算モデル作成のための理論的および実験的な根拠が得られた。

参考文献

- (1) 金山公夫、馬場 弘、遠藤 登、根本 勉、ソーラー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.
- (2) 馬場 弘、金山公夫、遠藤 登、金沢 浩志、太陽エネルギー利用のための分光日射量の測定と整理、機論、B, 63-605(1997),299-305.
- (3) 金山公夫、李相一、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ーポンドの熱計算、日本太陽／風力エネルギー講演論文集(1997),437-440.
- (4) 李相一、金山公夫、馬場 弘、遠藤 登、ソーラーポンド塩水溶液の全透過率の現実に即した計算法、機論、B, 64-620(1998), 1240-1246.
- (5) 李相一、金山公夫、馬場 弘、遠藤 登、C.E.T.センサーによるソーラーポンド塩水溶液の濃度、温度の同時測定、太陽エネルギー、24-4(1998).
- (6) J.R.ホールマン,(平田 賢監訳), 伝熱工学(下), ブレイン図書出版,東京,(1985),481-483.
- (7) 佐久間俊雄、ソーラーポンドの集熱及び採熱方法に関する研究、電力中央研研究報告、(JPN)(28081),(1986), 11-13.
- (8) Kanayama, K, et al., Experiment and analysis by practical-scale solar pond stabilized with salt gradient, Solar Energy, 46-6(1991),353-359.