

9012 太陽熱利用脱塩装置に関する研究

外山 茂樹(名古屋大学)

屋根型太陽熱利用脱塩装置についての3つの課題について研究し、それぞれ次のことが明らかになった。

1. 屋根型太陽熱利用脱塩装置の設計と関連して、傾斜溝を流れる液膜の流動伝熱現象について理論的な検討を行った。構成方程式は有限要素法によって数値計算し、速度分布、温度分布および断面における対流の速度ベクトル、平均温度を求めた。結果は対流による液の平均温度の上昇、蒸発速度の増進効果を定量的に求めることができた。
2. 建設費において大きな割合を占める屋根の材質選定について検討し、次のようなことを指摘した。
 - (i) コンクリート板は熱帯乾燥地においてグリーンハウスの屋根材と兼用するのに適している。
 - (ii) プラスチックシートはレクリエーションや非常用として使い捨てに適している。
 - (iii) 太陽光発電素子パネルを屋根に用い脱塩装置の受熱面とするハイブリッド構造の設計は検討に価する。
3. 人工海水湖(Inland Marine Oasis Solartopia: IMOSシステム)が上記ハイブリッド構造の発電-脱塩二重目的プラントを評価するために概念設計が行われ、次のことが明らかになった。
 - (i) 一対の100万kW太陽光発電素子のパネルをハイブリッド型脱塩装置にすると12万t/日の淡水が生成できる。
 - (ii) 発生電力で人工海水湖に送水しその周りと海岸に脱塩装置を設置して、余った電力で淡水化を行ってかんがい用にと1000km²の砂漠が緑化できる。

9012 太陽熱利用脱塩装置に関する研究

外山 茂樹(名古屋大学)

1. 研究目的

太陽熱を利用して塩水を蒸発させ淡水を生成する装置としてよく知られている形式は、ベーシン型とよばれるものである。これはベーシンすなわち水盤に塩水を張り、その上をガラスのような透明な板で覆い、塩水を温めて蒸発させ、蒸気は透明な板で冷やされて凝縮し淡水を生成する構造となっている。面積当たりの生産性が低いので、広い水の通らない水平な水盤を作るといっただけで大きな費用の負担となる。さらにガラスの覆いをつけるわけであるから、コスト高となって実用化を難しくしている。

これに対して、屋根型は太陽光線からの受熱面である屋根の裏側に塩水を流して蒸発させ、並行に対置する仕切り板の上向き面で凝縮させて淡水を生成する構造となっている。この屋根型太陽熱脱塩装置は費用のかかる水盤が不要であるため、建設費が大幅に節減できる。また、仕切り板を何枚も重ねると多重効用蒸発となり、原理的には淡水生成量は仕切り板の数だけ倍増するということが注目されている。しかし、実用化のためにはなお次の事項を解決する必要がある。

- ① 傾斜板の裏面にスケールを発生させることなく安定に塩水を流す液膜流の形成およびその流動伝熱機構
- ② 太陽光線から受熱する屋根および仕切り板に対して、塩水に耐食性があり、かつ安価な材料の選定
- ③ 応用システムの概念設計による評価

それぞれの項目について研究を行い、次のような成果を得た。

2. 傾斜溝に沿って流れる液膜における表面蒸発

2-1 理論式と計算方法

傾斜溝に沿って流れる液体の運動方程式は次のように表せる。

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \pm \rho g \cos \beta$$

ここで右辺の記号の正は液が板上を、負は板の下面を流れる場合である。また、境界条件は次のようにあたえられる。

(i) メニスカス表面で $z = h(x), \quad v / \partial n = 0$

(ii) 溝壁面で $v = 0$

(iii) 溝対称軸で $\partial v / \partial x = 0$

メニスカス表面の形状は、表面張力と重力の釣り合いから次のように与えられる。

$$\frac{d}{dx} \left\{ \frac{\frac{d^2 h}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\} = \frac{\mp \rho g \cos \beta}{\sigma} \cdot \frac{dh}{dx}$$

境界条件は次のように与えられる。

$$x = 0: \quad dh/dx = 0$$

$$x = x_{wc}: \quad dh/dx = \tan(\theta_0 - \theta_c)$$

液流路断面における対流を求めるための、伝熱に関する基礎方程式は

$$\rho_0 \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho_0 \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_0 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \pm g(\rho_0 - \rho)$$

$$\rho_0 C_{p0} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \kappa_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

で与えられる。また境界条件は次のようになる。

(i) メニスカス表面で $\partial u / \partial n = \partial w / \partial n = 0$

(ii) 溝表面で $u = w = 0, \quad T = T_{wc}$

(iii) 対称面で $u = \partial w / \partial x = \partial T / \partial x = 0$

これらの構成方程式は有限要素法によって数値計算を行った。

2-2 計算結果および考察

(1) メニスカスの形状および流速分布

メニスカスおよび等速度線で表した流速分布の計算結果の一例をFig. 1に示す。

この計算の妥当性はすでに著者らによって、実験的に確かめられている。

(2) 温度分布と対流

伝熱方程式から温度分布を求めたが、ここではその温度差による対流の大きさと方向に関する計算結果の一例をFig. 2に示す。

この対流は伝熱促進にかかわるものであり、計算による定量的評価が可能になった。

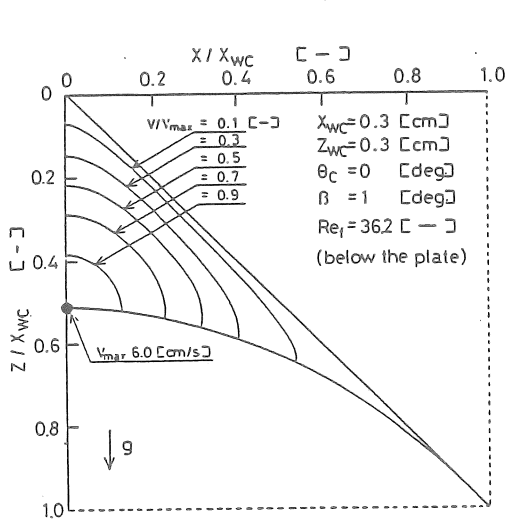


Fig. 1 Contour of Velocity Flowing Down for the Case of Below the Plate Surface

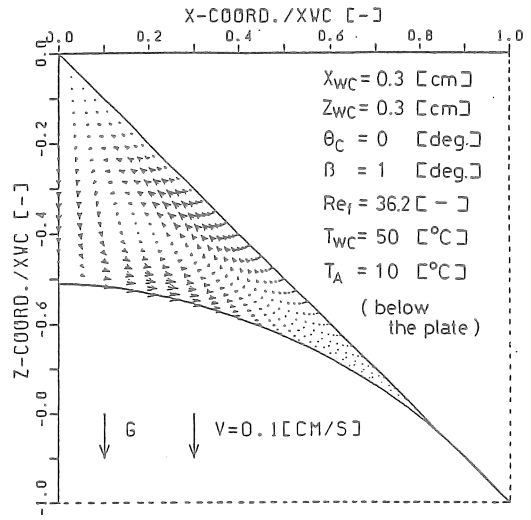


Fig. 2 Heat Convectional Velocity Vector for the Case of Below the Plate Surface

(3) 平均温度の上昇と蒸発速度

流路断面に関する平均温度と、メニスカス表面からの蒸発速度に関する計算結果を Fig. 3 に示す。

対流による伝熱促進効果による蒸発速度の増加は、安定に計算できる範囲では、最大17%であった。

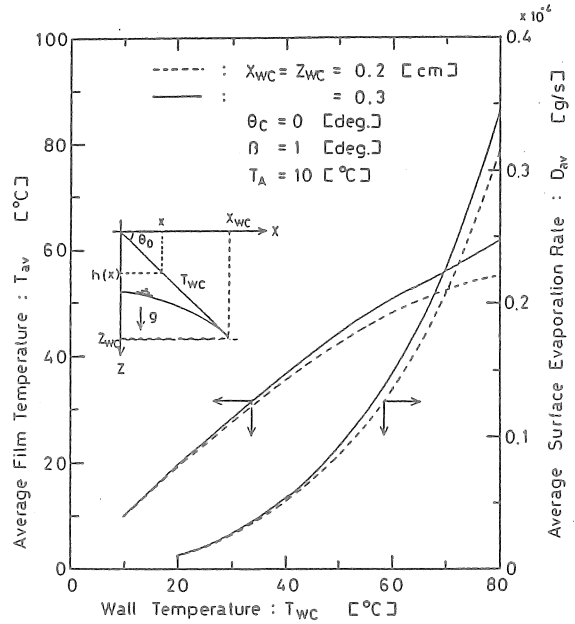


Fig. 3 Effect of Wall Temperature on the Average Film Temperature and Surface Evaporation Rate for the Case of Below the Plate Surface

2-3 総括

屋根型太陽熱利用脱塩装置の設計に関連させて、傾斜溝を流下する液膜の流動伝熱問題を理論的に検討した。その結果、流路断面に関する対流の状況と、その伝熱と蒸発速度の増進への効果を定量的に求めることができた。

【この章で用いた主な記号】

| | | |
|--------|--|------------------------|
| C_p | specific heat of liquid | [J / kg · °C] |
| D | average surface evaporation rate | [g / s] |
| $h(x)$ | height of liquid surface at x | [cm] |
| n | unit normal vector at liquid surface | [-] |
| q | heat flux by evaporation at liquid surface | [W / m ²] |

| | | |
|------------|---|----------------------|
| T | average temperature of liquid | [°C] |
| z | diffusion length from liquid surface to air | [cm] |
| (Greek) | | |
| β | inclination angle | [deg] |
| θ_c | contact angle of liquid to a groove | [deg] |
| ρ | density of liquid | [kg/m ³] |
| μ | viscosity of liquid | [kg/m · s] |
| σ | surface tension | [N/m] |
| κ | thermal conductivity of liquid | [W/m · K] |
| λ | heat of vaporization | [J/kg] |

3. 屋根型太陽熱利用脱塩装置における材料の選定

3-1 コンクリート受熱板

温熱海水に対するコンクリートの耐久性はすでに充分実証されている。そこで太陽光線にさらされる屋根、すなわち受熱板をコンクリートにした場合の計算機シミュレーションを行った。その結果、太陽熱による加熱は工業装置に比べて微弱なものであるから、コンクリートでも充分熱を伝え塩水を蒸留して淡水化できることがわかった。日の出から日没までの造水量を金属受熱板とコンクリート受熱板にした場合の比較をFig. 4に示す。

コンクリート受熱板の場合は蓄熱の効果により日没後も造水を続けるため、全造水量は金属板の場合とあまり変わらない。

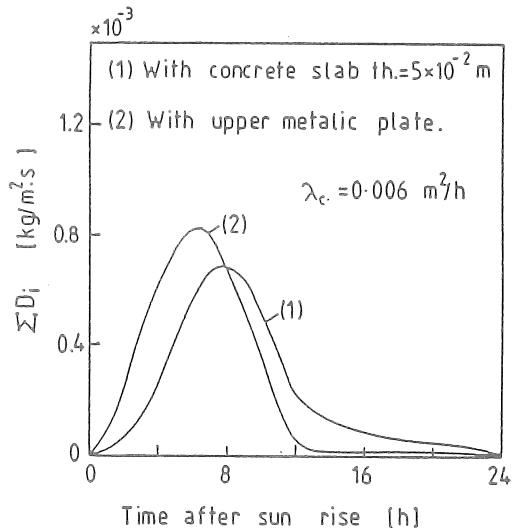


Fig. 4 Variation of the Distillate Production Rate with the Operation Time

3-2 プラスチック・シート

安い材料といえはなんといってもプラスチック・シートである。そこで、厚さ1mmのポリエチレン・シートで500mmの正方形の袋を作り、3本のパイプでFig. 5のような実験装置を作製しテストを行った。赤外線ランプで加熱したときの実験結果をFig. 6に示す。

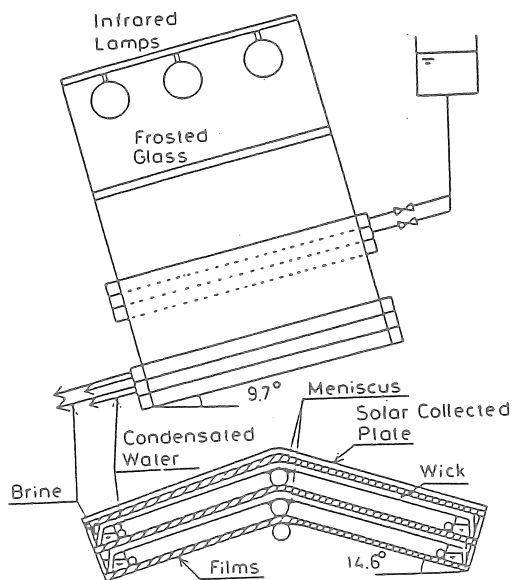


Fig. 5 Experimental Apparatus

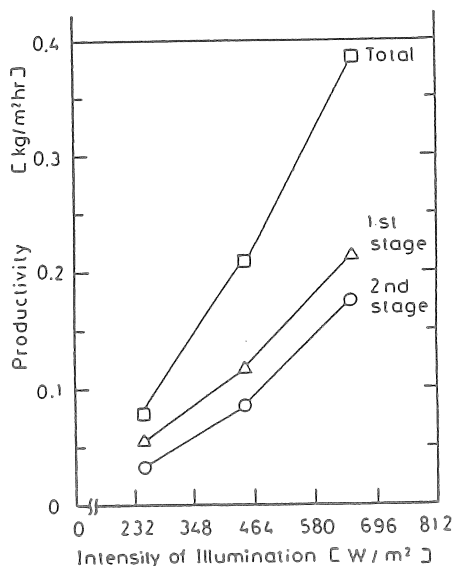


Fig. 6 Productivity

このような構造にすると、プラスチック・シートでも充分その機能を発揮することができ、しかも簡単二重効用とすることもできる。しかし、プラスチックは一般的にいて太陽光線にたいする耐久性が小さいので、使い捨て的な用途に適するであろう。

3-3 太陽光発電とのハイブリッド・システム

地球環境問題にも関連して最近では、太陽光発電が注目されている。そこで太陽光発電素子のパネルの裏に塩水を流し、パネルを冷却しながら熱をえてその一部が蒸発して淡水をうるという、ハイブリッド・システムについて検討した。計算機シミュレーションによって、各塩水流量にたいするパネルの冷却効果と、生成淡水量の関係を

求めた。これをFig. 7にしめす。

これは一種の発電造水二重目的プラントである。サウジ・アラビアにおける1989年の造水施設容量は86,200 m³/hで、発電容量は4,079MWとなっている。そうすると全体的な水-電力比は0.02 m³/kW・hである。これに対してこのハイブリッド・システムでは、Fig. 7から読み取ると0.006 m³/kW・hとなっている。この比はサウジ・アラビアの施設の30%に達する。

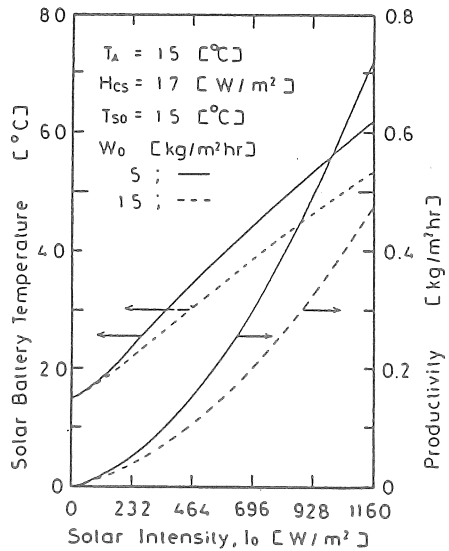


Fig. 7 Photocell Temp. vs. I_0
Productivity vs. I_0

3-4 総括

屋根型太陽熱利用脱塩装置の建設コストにおいて、大きな割合を占める受熱面の材料の選定に関する2, 3の試案について検討し、次のことを明らかにした。

- ① コンクリート板は熱帯乾燥地域などにおいて、グリーンハウスの屋根に兼用させるのに適している。
- ② プラスチック・シートはレジャーや非常用など、使い捨て用に適している。
- ③ 太陽光発電素子を受熱板と兼用させるハイブリッド・システムは地球環境という観点からみて、将来性があることを指摘した。

4. 人工海水湖による砂漠の緑化構想

4-1 IMOSシステム

前章で提案した太陽光発電素子とハイブリッドした脱塩装置の用途と有効性を評価するために、人工海水湖による砂漠の緑化構想 (Inland Marine Oasis Solartopia :

I M O Sシステム）を提案し検討した。構想図をFig. 8 に示す。

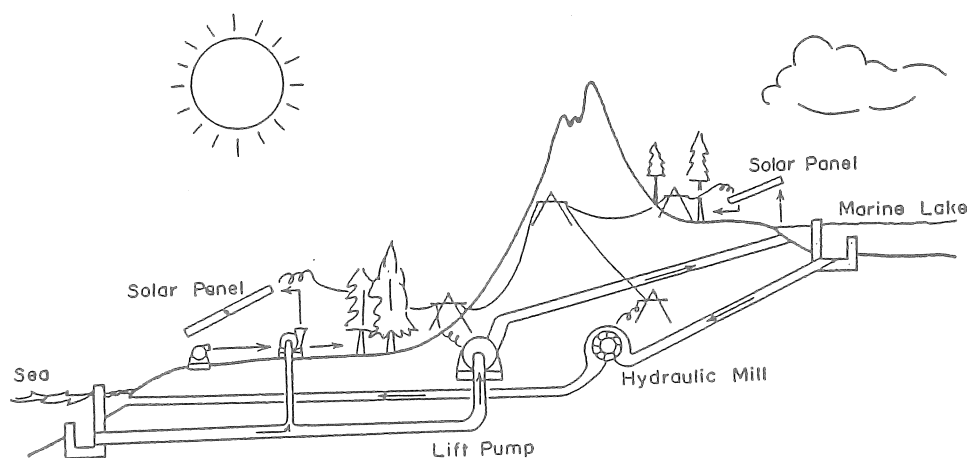


Fig. 8 Illustration of Inland Marine Oasis Solartopia (IMOS System)

海岸にこのハイブリッド・システムを設置し、造水と発電を行う。太陽光発電素子の面積を幅1 km、長さ10 kmの10 km²とすると、変換効率を10%として100万kWの発電ができる。そのパネルの裏に海水を流すと、6万 m³の淡水が得られる。発生した電力で海水を内陸に送水し人工の海水湖を造成する。その海水湖の周りも同様な100万kWのハイブリッド・システムを設置し、発生した電力で人工湖の海水を淡水化する。これで周辺の砂漠を緑化する。人工湖の塩分があまり濃くならないように、一部を還流する。

4-2 概念設計と考察

I M O Sシステムの物質および熱収支を求めるために画いたフローシートをFig. 9 に示す。

一つの海水湖の直径を30 kmとし、淡水化の所要エネルギーや送水のポンプ動力に現実的な数値を代入してケース・スタディを行った。計算結果の一例をFig. 9 に記入した。また、このシステムによってどれだけの地域が緑化できるか、試算した結果をTable 1 に示す。

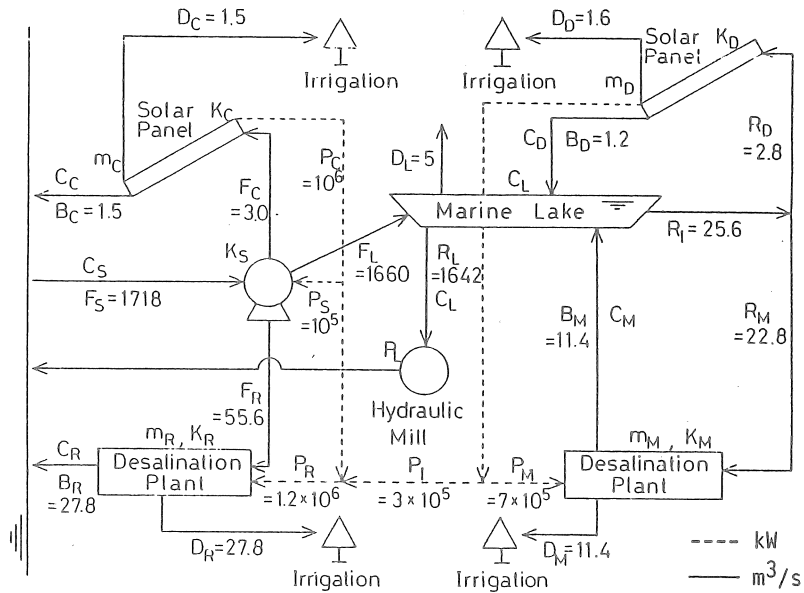


Fig. 9 Mass and Energy Flow of the IMOS System

TABLE 1. Capability of irrigation

| Natural rainfall (mm) | Afforestation area (km ²) | | | Total water product × 10 ⁶ (m ³ /y) |
|-----------------------|---------------------------------------|-------|-------|--|
| | 0 | 100 | 200 | |
| Case 1 | 675 | 946 | 1,577 | 236.5 |
| Case 2 | 1,113 | 1,558 | 2,597 | 389.6 |

cf. Territory area Hong Kong 1,045 km²
 Luxemburg 2,586
 Qatar 11,000

4-3 総括

100万kWの太陽光発電設備を二個所に設置したIMOSシステムよると、1,000km²の地域を緑化することができ、地球環境を改善するために将来性のあるシステムであることを示した。

5. 今後の課題

屋根型太陽熱利用脱塩装置の受熱面の材料の選定について試案を検討し、実用化の方策を提案した。また、この装置を組み込んだシステムを構想し、その有効性を示した。ここでなお残された大きな問題の一つが、実はこの装置の構造的特徴である板の裏面に安定して液を流すことである。本来的に野外に設置されるものであるから、激しい風雨にさらされることもあるわけで、ゆさぶられたとき板の裏面を流れる塩水が滴下すると、生成した淡水と混ざって使いものにならなくなる。こうしたトラブルを完全に防止するには、受熱蒸発面と凝縮面の間を空間ではなく、ガス透過性膜を挟み込むことである。このような考え方で現在研究を続行中である。

Studies on Solar Desalting Stills

Shigeki Toyama, Masaaki Nakamura, Hidetoshi Mori
and Kazunori Murase

(Dept. of Chemical Engineering, Nagoya University)

Summary

Following three subjects have been studied.

1. Liquid flow along an inclined groove was theoretically analyzed in connection with designing the roof type solar still. The momentum and heat transfer equations were established and finite element method was used to calculate the shape of meniscus, the velocity distribution, the convectional flow vector and the temperature distribution with respect to a cross section of the flow. The result qualitatively indicated the effect of convection on the average temperature rise and enhancement of the evaporation rate.
2. Selection of the materials was discussed and following are pointed out.
 - 1) Concrete slab is suitable to roofing a green house at hot arid area.
 - 2) Plastic sheet would be favorably used as a temporary purpose in resort or emergency.
 - 3) The hybrid system of the roof type solar still connected with photoelectric cell is worthy to evaluate.
3. The "Inland Marine Oasis Solartopia: IMOS System" is proposed to evaluate roof type solar stills and the conceptual design revealed as follows.
 - 1) A module of IMOS System with solar photovoltaic cell having total capacity of 2,000 MW can afforest desert of about 1,000 km².
 - 2) The hybrid solar stills produce about 120,000 m³ fresh water per day which is quite sufficient for maintenance of the site and the remaining can irrigate around the site.