

太陽エネルギー利用膜構造蒸留器による
海水淡水化システムに関する基礎的研究
Fundamental study of seawater-desalination
by solar still with transparent sheet

9009 大野 弘之

Desalinating of seawater plays an important role to short water supply which is one of the global environmental problems. Solar desalination system is more desirable for global environment than desalination system using fossil fuel. This paper proposes conventional roof type solar still using newly transparent sheet instead of usual glass cover, and evaluates its performance to desalinate by computer simulation using numerical one-dimensional model and a model experiment. As a result, the simulation model was able to predict accurately the amount of fresh water collected in the solar still by introducing some assumptions specific to the experimental model. Finally I suggested some optimum conditions to produce fresh water by the solar still.

キーワード：太陽エネルギー，海水淡水化，水盤型ソーラスチル
solar energy, seawater desalination, basin type solar still

1. はじめに

世界の乾燥地や離島において大きな環境問題の一つとなっているのが水不足問題である。この水不足問題に対し、海水淡水化手法の果たす役割は大きく、実際、海水淡水化に関する研究はかなり古くから行われてきた。現在、世界の主流となっているのが、化石燃料を用いる多段フラッシュ法に代表される蒸発法[1]や、高圧ポンプを用いる逆浸透法[1]であるが、これらは高い技術やコストを必要とする。それに対し、太陽熱などの自然エネルギーを利用する海水淡水化手法は技術的にもコスト的にも有効であり、化石燃料を用いないという点は現在の地球環境を考えると非常に望ましいと言える。

そこで本研究では太陽エネルギーを利用する水盤型ソーラスチル（太陽熱蒸留器）[2],[3]に着目し、従来太陽光透過面として用いられてきたガラスカバーに代えて、より軽量で破損しにくく取り扱いやすい透明膜を利用するソーラスチルを提案し、その造水能力等の性能評価や、より高い造水効率のための最適設計法について模型実験とコンピュータシミュレーションの両面から検討する。

2. 造水量予測モデル

本モデルはモデル領域を構成する外気、膜、内部空気、水の各層間での熱収支式により成り立つ。Fig.1に本モデルの概略図を示す。式(1)~(4)に膜面(内外)、内部空気、水における熱収支式を示す。ここで、 ρ :密度[kg/m³]、 d :厚さ[m]、 C_p :比熱[J/K·kg]、 T :温度[K]、 T_{RL} :膜の長波透過率[-]、 R :長波放射量[J/m²s]、 H :顕熱輸送量[J/m²s]、 E :水蒸気輸送量[kg/m²s]、 X_L :蒸発潜熱[J/kg]、 C_D :熱伝導量[J/m²s]、 SHD :短波日射量[J/m²s]、 RHD :長波日射量[J/m²s]、 T_{ABS} :膜の短波吸収率[-]、 T_R :日射の大気透過率[-]、 T_{RD} :膜の短波透過率[-]、 H_{REF} :水面の短波反射率[-]である。 w 、 D 、 D_{in} 、 D_{out} 、 i 、 a の添え字はそれぞれ水、膜、膜(内側)、膜(外側)、内部空気、外気を表す。2つの添え字が同時に存在する場合は、その2層間での移動を表す。また、顕熱・潜熱輸送量はそれぞれ輸送係数(h 、 e)と移動する2層間の温度差 T 、比湿差 q を用いると、 $H=h T$ 、 $E=e T$ となる。

膜面内側

$$r_D \left(\frac{1}{2} d_D \right) C_{pD} \frac{dT_{Din}}{dt} = (1 - T_{RL}) R_w - R_{Din} + H_{iD} + X_L E_{iD} - C_D \quad (1)$$

膜面外側

$$r_D \left(\frac{1}{2} d_D \right) C_{pD} \frac{dT_{Dout}}{dt} = (1 - T_{RL}) RHD - R_{Da} - H_{Da} + T_{ABS} SHD + C_D \quad (2)$$

内部空気

$$r_a d_a C_{pa} \frac{dT_i}{dt} = H_{iD} + X_L E_{ii} - H_{wi} \quad (3)$$

水面

$$r_w d_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = T_R T_{RD} H_{REF} SHD + R_{Din} - R_w - H_{wi} - X_L E_{wi} + T_{RL} SHD \quad (4)$$

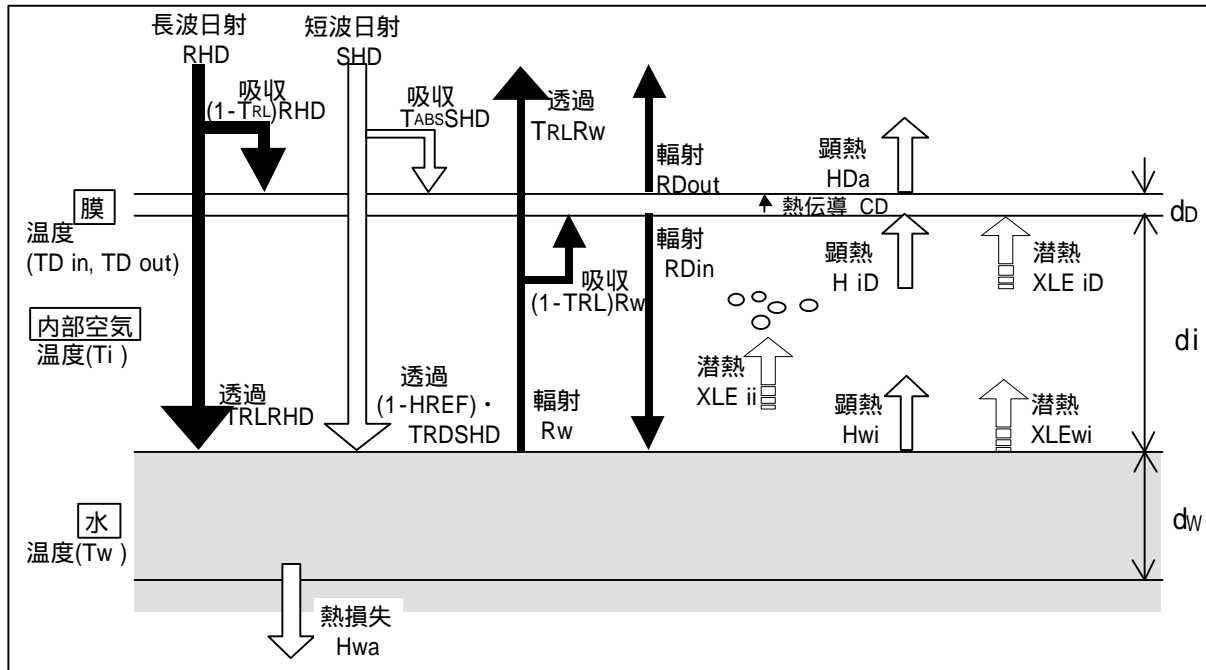


Fig.1 Schematic Diagram of Simulation Model

3. 模型による造水実験

3-1 実験装置

本実験は造水量予測モデルの精度検証を目的として行う。Fig.2 に本研究で用いた造水装置を示す。本装置はシングルーフタイプの水盤型ソーラースチルであり、黒く塗られた水盤底面が日射により加熱されると、直ちに海水に熱が伝えられて、海水温度が上昇する。そして、海水表面で発生した水蒸気は高温の水面と低温の膜面との間で生じた自然対流に乗り膜面まで運ばれる。運ばれてきた水蒸気はここで冷却されて凝縮水(淡水)となる。生成した淡水は透明膜の傾斜に沿って流下し集水トラフにより集められ装置外に取り出される。

また本研究では、透明膜の内面に対し酸化チタンの塗布を行った。これにより透明膜の親水性が向上するため、水滴が膜面に対し広がった形で付着し、膜の透明度が上昇するという効果が得られることになる。

3-2 造水量測定実験

水深を 5cm として、造水実験を行った。また、本実験では錆などの影響を考え、海水の代わりに水道水(淡水)を用いた。場所は大阪大学工学部環境工学科棟(大阪府吹田市)の屋上である。測定項目は造水量、温度、日射量であり、造水量は測定装置として雨量計と電接点記録計を利用した。また、温度については外気、膜表面(外側)、内部空気、水の各温度を熱電対により測定し、日射量については全天日射計により測定した、それぞれデータロガーにより 10 分おきに測定した。Fig.3 に本実験の測定システムの構成図を示す。

3-3 実験結果

実験は12月15日から21日において行った。この実験によって得られた造水量[kg/m²Day]と造水効率[%](=蒸発潜熱×造水量/日射量)の結果をTable.1に示す。

Table1 Experimental Result

日付	12/15	12/16	12/17	12/18
造水量	0.50	0.47	0.59	0.87
造水効率	21.6	17.8	15.5	18.9
日付	12/19	12/20	12/21	平均
造水量	0.66	0.33	0.50	0.56
造水効率	16.3	9.1	16.9	16.5

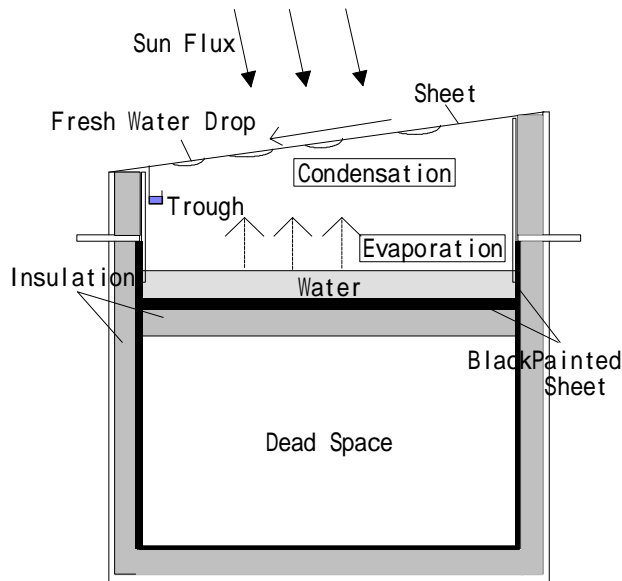


Fig. 2 Experimental Apparatus of Basin Type Solar Still

4. 実験と計算の比較

4-1 モデルの修正

まず造水実験の再現計算を行う上で、モデルに対する補正として行った模型固有のパラメータの導入について述べる。

(1) 装置壁面からの熱損失

装置壁面にはすべて断熱材として発泡スチロールを貼り付けてあるが、これで完全に断熱されるというわけではなかったため、膜面を断熱材で覆って、外部からの熱エネルギーを遮断することにより、装置からの熱損失量を測定した。この結果、熱損失の大半が水からのものであったため、水槽からの熱損失係数として h_{loss} を計算し、モデルに導入した。

(2) 形態係数

水面から膜面への長波放射量は、装置の内側壁の存在を考えた場合、水面から出た量がすべて膜面に達する訳ではない。また、膜面からの放射に関しても、装置の側に高い壁が存在することから同様のことが言える。そのためそれぞれの長波放射量に対し、形態係数によって制限を与える必要がある。そこで、この形態係数をそれぞれ幾何学的に計算し、モデル内に導入した。水面の膜に対する形態係数を V_F1 、膜の天空に対する形態係数を V_F2 とすると、上記の熱損失の項も含め、基礎方程式は以下ようになる。

膜面内側

$$\tau_D \left(\frac{1}{2} d_D \right) C_{pD} \frac{dT_{Din}}{dt} = V_F1(1 - T_{RL})R_w - V_F1R_{Din} + H_{iD} + X_L E_{iD} - C_D \quad (5)$$

膜面外側

$$\tau_D \left(\frac{1}{2} d_D \right) C_{pD} \frac{dT_{Dout}}{dt} = (1 - T_{RL})R_{HD} - V_F2R_{Da} - H_{Da} + T_{ABS}SHD + C_D \quad (6)$$

水面

$$\tau_w d_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = T_R T_{RD} H_{REF} SHD + V_F1R_{Din} - V_F1R_w - H_{wi} - X_L E_{wi} + T_{RL} SHD - H_{loss} \quad (7)$$

4-2 モデルの精度検証

模型実験の再現計算として、12月17日の日射と外気温のデータを用いて、造水量予測計算を行った。Fig.4, 5にそれぞれ実験と計算による各層の温度変動グラフを示す。Fig.6は造水量変動である。また各層の温度を個々に比較したグラフをFig.7,8,9に示す。造水量変動の比較では、実験と計算では午前中までは良い一致を見せているが、午後からの変動に違いが生じている事がわかる。これは日中の水と内部空気の温度変動が実験と計算で一致しないことが直接の原因である。Fig.8,9を見ると実験では日中の水温が計算よりも低く、逆に内部空気温は高くなっている。このため蒸発量が減少し、造水量変動の違いとなったと考えられる。そしてこの温度変動が生じた原因としては、2つ考えられる。1つは日射により加熱された装置外壁からの熱伝導であり、これによ

って内部空気の上昇が起こっていると考えられる。もう1つは装置内壁のアルミ板の反射率の低さに起因する日射入射量の低減である。どちらも模型装置固有の問題であり、装置側壁の高さを抑え、断熱効果を向上させることで改善されると思われる。よって現段階では日中の予測に問題はあがるが、本モデルによりほぼ実験の再現ができたと言える。

5.カイロとアブダビでの造水量予測

実際に造水装置の最適設計法を考える際、最低限の条件として、降雨量が少ない事、海が近い事、広大な面積が利用できる事を考慮しなければならない。そしてこの他に、緯度や外気温、立地条件等についての考察も必要であると言える。ここでは、具体的にアフリカのカイロとアラビア半島のアブダビの2地点について造水量予測計算を行い、緯度、外気温、立地条件が造水量に及ぼす影響について考察する。なお、計算条件としては、造水装置の面積が十分に広いとして、模型装置固有のパラメータである熱損失係数や水面の膜に対する形態係数については無視する。雲量についても再現計算では0.6としたが、ここでは快晴であるとして雲量を0.0とする。膜面の天空に対する形態係数については、立地条件の影響を考察するため $V_{F2}=1.0, 0.7$ の2通りの値を与えて計算する。各地点の外気条件については最高最低気温をもとにして午前2時に最低、午後2時に最高となるようなサインカーブによる変動を与えて用いる。また、計算は冬(1月)と夏(7月)の2通り行う。Table.2にカイロとアブダビの入力条件を示す。

計算結果としてTable.3に各条件での造水量を示す。熱損失や雲が無いといった好条件のためか、かなりの造水量となった。しかし、計算上では内部空気層に発生している湯気による日射の反射の効果をモデル内で見積もっていないため、実際はこれほどの造水量は得られないと思われる。形態係数の影響についてはある程度は見られた。つまり、日射量に影響を及ぼさないような壁などの障害物が存在する方が、装置からの放射量を押さえることができ、造水量の増加につながる事がわかる。また、この2地点のデータからは緯度の影響はほとんど見られなかった。比較的緯度的に近いということであろうが、乾燥地を造水装置利用の対象としたとき乾燥地自体の緯度はさほど変わらないため、この影響についてはあまり考慮に入れなくても良いと思われる。計算結果から見ても、緯度よりもむしろ外気温の影響の方が大きいと言える。

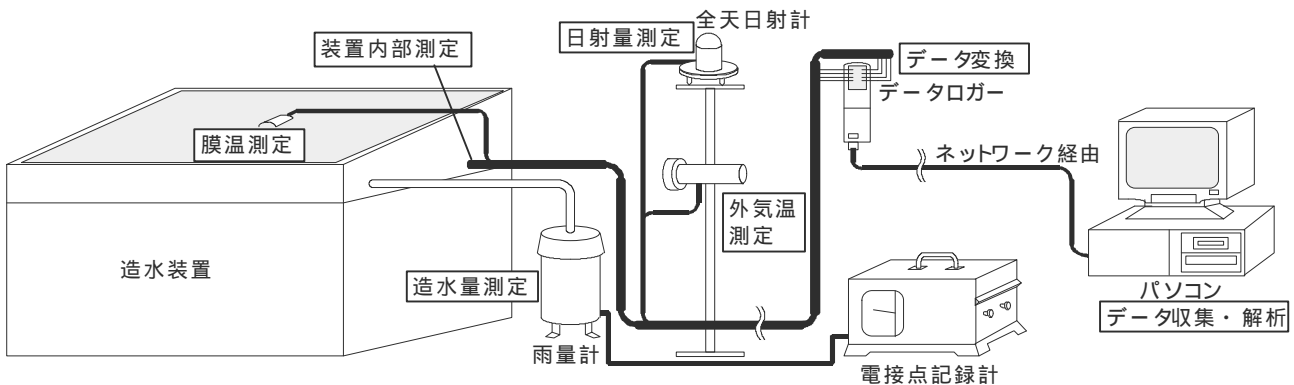


Fig.3 Experimental Setup

Table2 Input Data

		Cairo	Abu Dhabi
緯度°		30.0	25.0
経度°		30.11	55.0
外気温	1月最高	20.0	36.0
	1月最低	8.0	22.0
	7月最高	24.0	39.0
	7月最低	14.0	29.0

Table3 Still Yield of Cairo & Abu Dhabi

		Cairo	Abu Dhabi
$V_{F2}=1.0$	造水量 [kg/m ² Day]	1月: 2.2	7月: 7.9
	造水効率 [%]	1月: 34.4	7月: 64.7
	造水効率 [%]	7月: 64.7	64.7
$V_{F2}=0.7$	造水量 [kg/m ² Day]	1月: 2.3	7月: 8.2
	造水効率 [%]	1月: 36.0	7月: 67.2
	造水効率 [%]	7月: 67.2	70.6

6.まとめ

本研究では透明膜を利用した水盤型ソーラースチルに対し、模型実験とコンピュータシミュレーションの両面からその性能評価と最適設計法の提案を行った。その結果、造水量予測モデルでは装置内に発生する湯気の影響を除けば、ほぼ模型実験を再現できることがわかった。また応用計算においては、造水量は外気温等の気象条件だけでなく、造水装置まわりの地形による影響についても考慮に入れる必要があることがわかった。

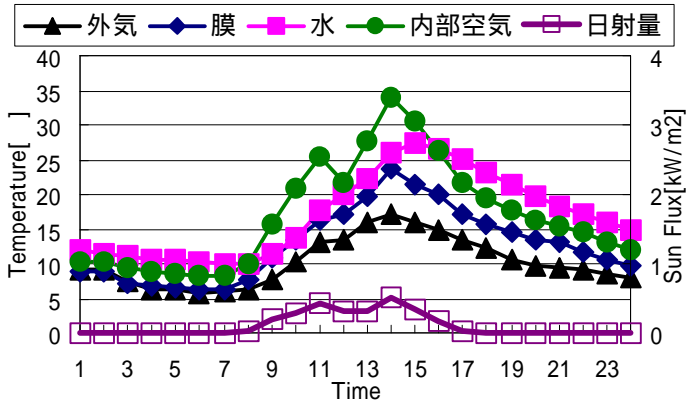


Fig.4 Experimental Result

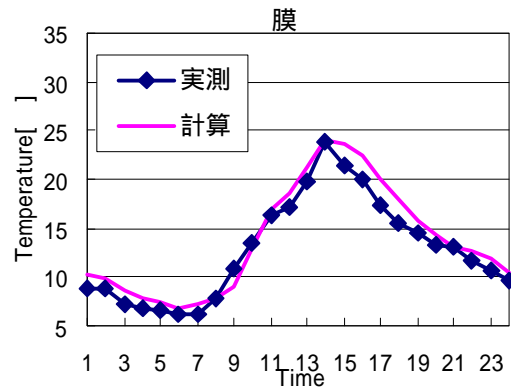


Fig.7 Comparison of Sheet Temperature

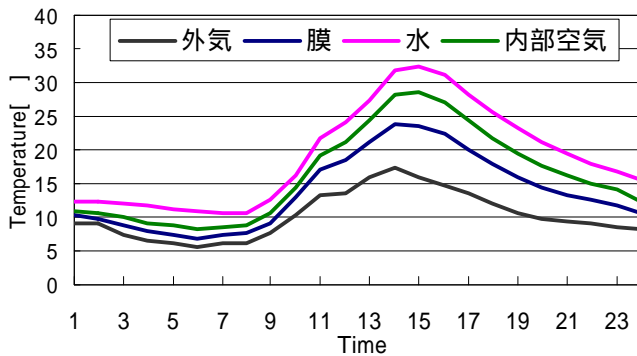


Fig.5 Calculation Result

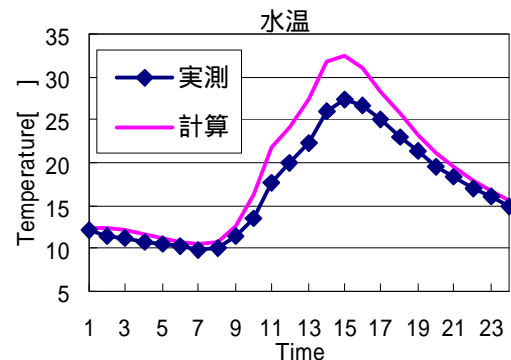


Fig.8 Comparison of Water Temperature

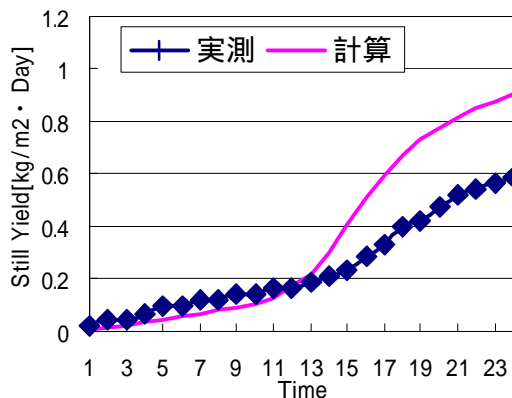


Fig.6 Still Yield

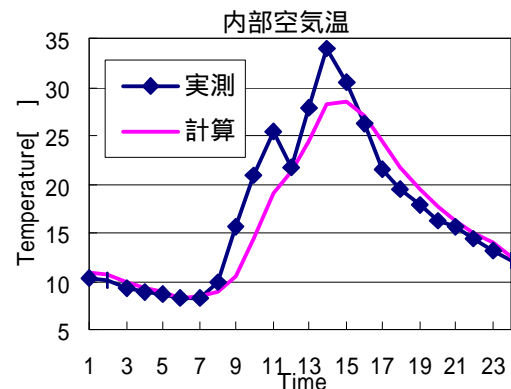


Fig.9 Comparison of Inair Temperature

参考文献

- 1)宮武 修：日本海水学会誌，**50** - 4，1996，pp.222 - 223
- 2)久保田 昌治ほか：日本海水学会誌，**41** - 3，1987，pp.123
- 3)中嶋 義弘：太陽エネルギー利用淡水化技術，造水技術，**12** - 3，1986，pp.4 - 8