

太陽熱利用自然循環型海水淡化化 システムに関する研究

Study on natural convection desalination system using solar heat

永井 實^{*1}
Minoru NAGAI

屋我 実^{*1}
Minoru YAGA

久貝 幸作^{*2}
Kousaku KUGAI

山田 恵一^{*3}
Keiichi YAMADA

Abstract

In this report the author performed some preliminary investigations on a solar heat desalination system which needs no power input and little maintenance. The system consists of a circular pipe evaporator, a steam pipe and condenser. Solar heat generates steam in the circular pipe evaporator, the steam pipe conveys it from evaporator to condenser by natural convection, and the condenser set in a high, and cool place changes it into fresh water. Experiments are carried with models to investigate the effects on the evaporation of solar heat, the wick material, wind speed, color of the evaporators and the length of the steam pipes. The results show that a black steel evaporator with an inner circular wick achieves the maximum evaporation efficiency and that a 4m length of the vertical pipe promotes 1.4~2.0 times as much evaporation as a 2m length. The total efficiency of the system including the evaporation and condensation is estimated at up to 44.0%.

Key Words :Solar energy, Desalination system, Evaporation, Wick, Steam, Natural convection

1. 序論

現在、海水淡化法は多段フラッシュ法、電気透析法、逆浸透圧法などがその主流である。しかし、資源が乏しく外部からの物資輸送も困難な離島地域にとって、消費電力の大きなシステムやメンテナンスの複雑なシステムは適当とは思えない。

一方、自然界において海水は絶えず大量に蒸発し、上空で雲を形成しやがて雨や雪となって地上に降り注ぎ淡水を供給する。このような自然蒸発機構に着目し、かつメンテナンスの簡単な太陽熱海水淡化システムの研究はこれまでにも幾つかあるが^{(1)~(5)}、水蒸気の自然対流をより積極的に利用しようとする試みはあまり見られないようである。

本研究は、この様な問題意識から表題のシステムを提案し、その実用可能性を研究するものである。

2. 提案システムの概要

図1に提案システムの概念図を示す。システムは大きく三つの要素に分かれ、それぞれ蒸発器、蒸気輸送管、及び凝縮器と呼ぶ。システムの熱源は太陽熱であり、蒸発器で海水を蒸発させ高温多湿の空気をつくり、自然循環によって蒸気輸送管で高所まで導き、冷所に設置した凝縮器によって真水を回収する。揚水ポン

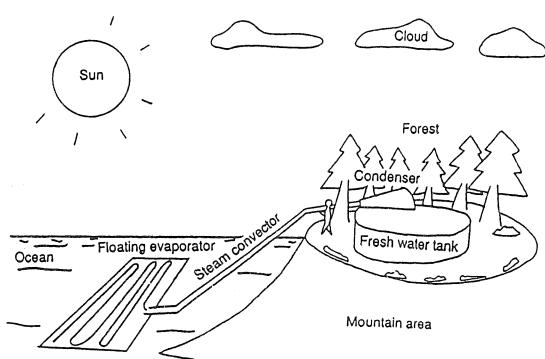


図1 提案システムの概念図

*原稿受付 1993年5月6日

*1 琉球大学工学部 (903-01 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

*2 日本輸送機株式会社 (617 京都府長岡市東神足 2-1-1)

*3 琉球大学大学院 (903-01 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

泵や送風機といった強制的な動力は用いず、原理的には蒸発器部と凝縮器部の温度差によって作動する海水淡水化システムと言うことができる。

本海水淡水化システムの特徴は以下のようである。

- 1) 自然対流を積極的に取り入れた無動力システムである。
- 2) 稼働部が存在せず、ほぼメンテナンスフリーである。
- 3) 需要の集中する夏期に真水供給量が増すと考えられ、太陽エネルギーの変動性を憂慮する必要がない。
- 4) 多くの離島がそうであるように、100m程度の丘陵が海岸線に接しておれば本システムの設置は可能である。

本研究は、上記三要素を個々に研究・開発する方針であり、本論では蒸発器及び凝縮器の製作とそれらを用いた基礎的実験の結果を述べる。

3. 実験装置と方法

本論では蒸発及び凝縮に関する実験を別々に行つた。

3.1 蒸発実験装置

蒸発実験において、蒸発による蒸発器内の水の重量の変化、日射量、風向風速の測定及びその記録には以下の計測器を用いた。

- ・デジタル上皿式自動はかりUDS-1000II
(大和製衡株式会社)
- ・全天日射計ソーラーエースMS-62
(英弘精機株式会社)
- ・風車型自記風向風速計コーシンペーンKE-500型
(光進電気工業株式会社)
- ・サーボ150 SR6510-UMI
(グラフテック株式会社)

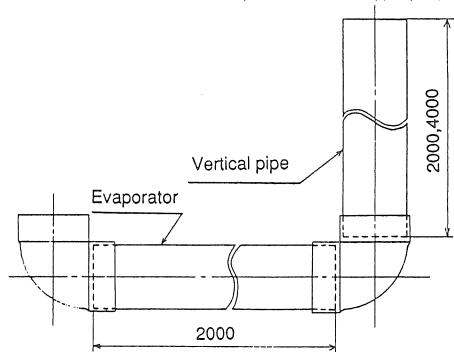


図2 円管型蒸発器及び垂直円管

図2に円管型蒸発器及び蒸気輸送用の垂直円管を示す。円管型蒸発器としては、多種の円管が規格化されており、それに準じた部材・工具等も規格化されているため、加工・組み立て及び拡張が比較的容易でかつ安価であるという利点がある。円管型蒸発器には黒色に塗装した外径60mmの水道用鉄管及び外径56mmの透明アクリル管の2種類を用い、垂直円管は黒色に塗装した外径60mmの水道用鉄管を用いた。円管型蒸発器の両端には水管用のエルボが取り付けてあり、垂直円管を脱着可能にした。図3に蒸発面積拡大のために用いたウイック(黒色フェルト生地)及びパイプ状ウイック(白色ガーゼ)を示す。

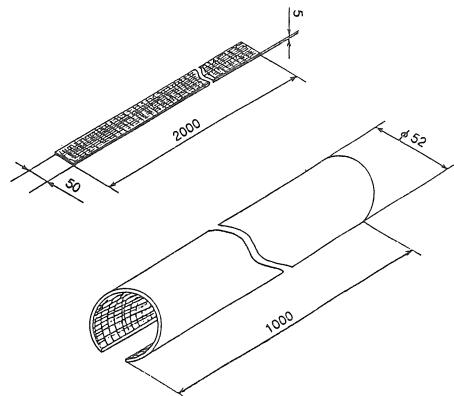


図3 ウィック及びパイプ状ウイック

3.2 凝縮実験装置

図4に凝縮実験装置の概要を示す。装置は加湿装置と凝縮器に大別される。超音波式加湿器と電熱ヒータで構成される加湿装置で噴霧及び加熱により湿り空気の蒸気分圧を高め、上昇気流によって湿り空気を凝縮器に導き、凝縮器で真水を回収する。ここで、水の重量の測定には前述の自動はかりを用い、加湿器にはテック株式会社製超音波式加湿器TUH-410を用いた。

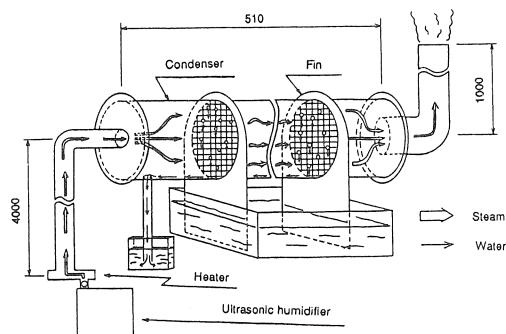


図4 凝縮実験装置概要

3.2.a 凝縮器

無動力を前提とした本システムにおける凝縮器は、冷却方式を自然風による空冷及び非循環型の水冷方式を合わせて採用した。凝縮器の周りに固定されているフィンは熱伝導の良い銅板で、装置の拡大・縮小はその枚数を増減することにより可能である。またフィン中央部に伝熱面積拡大のための金網を設けた。使用した金網は 4×6 Mesh（線径約0.55mm、閉塞率18.7%）の亜鉛ぶつけ鉄網及び 16×18 Mesh（線径約0.25mm、閉塞率30.7%）のアルミ防虫ネットの二種を用いた。

3.2.b 加湿装置

凝縮実験の際、凝縮器に導く湿り空気の温度及び湿度を調節するため、超音波式加湿器と電熱ヒータを組み合せた加湿装置を作成した。湿り空気温度は、製作した電熱ヒータの電圧を調整することにより調節し、加湿量は超音波式加湿器の加湿目盛でおおよそ調節した。

3.3 実験方法

3.3.1 円管型蒸発器による実験

円管型蒸発器による蒸発実験では、自然循環をより効果的に利用するため、日射のある野外で実験をおこなった。実験場には周囲の建物等の影響を受けにくい琉球大学工学部エネルギー機械工学科棟屋上（北緯 $26^{\circ} 15'$ 、東経 $127^{\circ} 46'$ 、標高143m）を選定した。

実験場に設置した架台に円管型蒸発器を水平に固定し、管のはば中心まで水道水約2.0kgを入れ、3時間もしくは9時間放置した。発生した蒸気は大気へ開放し、実験開始時と終了時の水の重量差をもって蒸発量とした。また、日射量、気温、相対湿度、風速、水温及び管壁温度の測定も同時にない、日射量は記録計出力より面積積分を行い算出した。ここで、太陽からの受熱量を算出する場合に用いる受熱面積は、円管型蒸発器の外径60mmあるいは56mmにその長さ2mを掛けた値である。蒸発器と垂直円管の組合せにより以下に示す3種類の実験を行った。

3.3.1.a 蒸発器の種類に関する実験

円管型蒸発器の組合せは以下の三種を用い、種類の異なる蒸発器による単位面積単位時間当たりの蒸発量及び単位日射量当たりの蒸発量を比較した。

Black steel 2×2 ：円管として強度的にもコスト的にも優れ、構造も簡単な黒色鉄管2mと垂直円管2m。

Wick 2×2 ：比較的コスト高だが温室効果と蒸発面積

の拡大による高効率が期待できる黒色フェルト生地入り透明アクリル円管2mと垂直円管2mの組合せ。

Clear 2×2 ：参考のために何も挿入しない透明アクリル円管2mと垂直円管2mの組合せ。

3.3.1.b 垂直円管の長さに関する実験

垂直円管は日射により温められ、管内の空気に自然対流を起こし空気循環発生装置として働く。蒸発器内の水は、湿り空気が飽和状態に達すると蒸発を止めてしまうため適度な空気循環により蒸発器内に飽和度の低い空気を補給する必要がある。

そこで垂直円管を0m、2m、4mの三種を用い、垂直円管の長さによる蒸発量への影響を見た。蒸発器の組合せは以下の三種である。

Black steel 2×0 ：黒色鉄管2mと垂直円管0m。

Black steel 2×2 ：黒色鉄管2mと垂直円管2m。

Black steel 2×4 ：黒色鉄管2mと垂直円管4m。

3.3.1.c ウィックの種類に関する実験

以下に述べるWick 2×2 の場合、予備実験において透明アクリル製蒸発器内に水滴が発生し、日射を遮っているものと思われた。そこで、水滴による遮光の影響を受けないように黒色鉄管にパイプ状ウィックを挿入した蒸発器を作成し、蒸発促進を試みた。

蒸発器の組合せは以下の三種である。

Black steel 2×2 ：黒色鉄管2mと垂直円管2m、ウィック無し。

Wick 2×2 ：黒色フェルト生地入り透明アクリル円管2mと垂直円管2m。

P.Wick 2×2 ：パイプ状ウィックを挿入した黒色鉄管2mと垂直円管2m。

3.3.2 凝縮実験

加湿装置により蒸気圧を高めた湿り空気からの水を回収し、回収量と加湿量との比である回収率を調べた。

表1 凝縮実験条件

Condition	Humidifying rate kg/h	Heating rate W	Mesh	Choking rate %
A	0.37	667	4×6	18.7
B	0.34	667	16×18	30.7
C	0.10	167	4×6	18.7
D	0.10	167	16×18	30.7

凝縮実験は日射を避け屋内実験とし、エネルギー機械

工学科別棟熱流体システム実験室内の一階と中二階の約4mの高低差を利用した。加湿流量、加熱量及び金網による閉塞率を変えて2~3時間の暖気作動の後、約9時間~20時間の測定を行なった。表1に凝縮実験における4種の実験条件を示す。また、次式により加湿量と回収量から回収率を算出した。同時に図5に示す凝縮器の各部6点の温度及び実験中の大気の相対湿度を測定した。

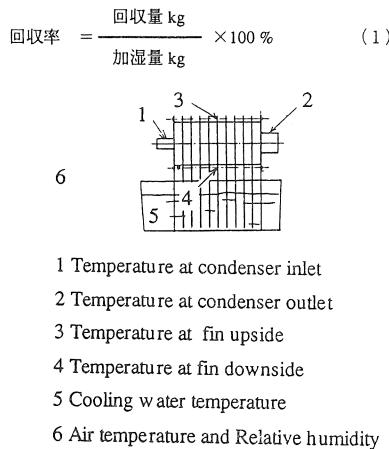


図5 実験中の温度・湿度測定部

4. 実験結果と考察

4.1 蒸発実験

4.1.a 蒸発器の種類に関する実験

図6と図7に受熱面積に基づいた単位面積単位時間当たりの蒸発量と平均日射量の関係及び単位日射量当たりの蒸発量と全日射量の関係をそれぞれ示す。

7月の同時刻すなわち11時~14時の那覇市の平均日射量は0.66kW/m²と記録されており⁽⁶⁾、これを夏期の平均日射量として採用すると本実験は夏期の平均日射量前後の範囲で実験を行なったと言える。

図6より単位面積単位時間当たりの蒸発量と平均日射量の蒸発量は多少の相関が見られるものの、変動が必ずしも一致せず蒸発が日射量のみによるものではないことを示している。またデータ2とデータ5ではBlack steel 2×2よりもWick 2×2の方が蒸発量が高い。両者の場合、常に4m/s以上の風が吹き、垂直円管出口と蒸発器内に圧力差が生じ定常的に管内に強い空気循環が起こっていたと思われる。従って、管内の空気循環が良ければWick 2×2の方が高い蒸発量を得られるようである。また、図よりデータ5のWick 2×2

で最高蒸発量0.63kg/m²hが得られた。

図7よりデータ1のBlack steel 2×2とWick 2×2、データ2のWick 2×2及びデータ5のWick 2×2で0.60kg/kWh以上の蒸発量が得られた。データ1のBlack steel 2×2とWick 2×2の場合は全日射量が低いため相対的に単位日射量当りの蒸発量が高くなつたものと思われ、データ2のWick 2×2及びデータ5のWick 2×2の場合は、前述の管内に生じた強い空気循環が蒸発を促進したものと思われる。

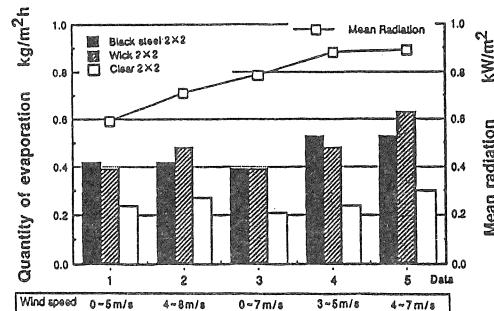


図6 単位面積単位時間当りの蒸発量と平均日射量の関係

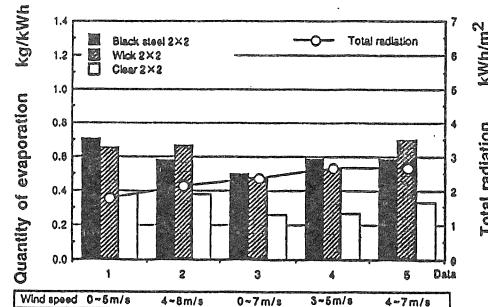


図7 単位日射量当りの蒸発量と全日射量の関係

ここで、蒸発効率 η を次式で定義する。ただし、分子は実験で得られた蒸発量を前述の受熱面積における全日射量で除した値で、理論蒸発量は蒸発器内水温における蒸発潜熱の逆数である。

$$\eta = \frac{\text{実験で得られた単位日射量当りの蒸発量 kg/kWh}}{\text{理論蒸発量 kg/kWh}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)によると、 η はデータ1のBlack steel 2×2の場合で48.0%、データ5のWick 2×2場合で47.3%となる。

本提案システムにおける蒸発器では、日射による熱量とそれに伴う作動温度の上限が、100°C以下に限られると考えられるため、より高い蒸発量を得る手段と

して管内の空気循環を良好にし、かつ Wick 等を用いて蒸発面積を拡大することが有効であると思われる。

また、Wick 2×2 では全てにおいて垂直円管から測って、1.3 m の位置すなわち蒸発器全体の約 2/3 まで管内上壁面に水滴の発生が見られた。Clear 2×2 の場合には水滴は全く確認されなかった。Wick 2×2 に発生した水滴は、蒸発器の上面に鏡面状態を構成し入射光を遮っており、好ましくない。関ら⁽¹⁾は、透明カバーに発生した水滴により最大 56 % まで日射透過率が落ち込むことを報告している。

4.1.b 垂直円管の長さに関する実験

図 8 及び図 9 に受熱面積に基づいた単位時間単位面積当たりの蒸発量と平均日射量の関係及び単位日射量当たりの蒸発量と全日射量の関係をそれぞれ示す。

但し、データ 6～8 は蒸発器両端を大気開放し、データ 9～10 は片側すなわち垂直円管の反対側を閉じたものである。また大きな全日射量を得るためにデータ 8 及びデータ 9 は特に 9 時間の測定を行なった。

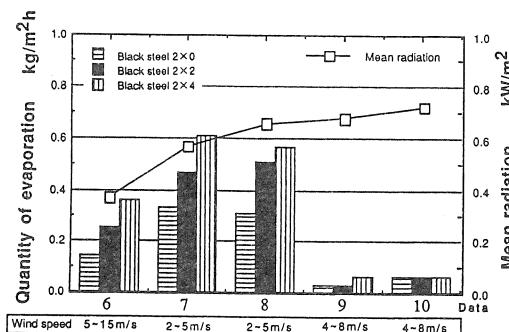


図 8 単位面積単位時間当たりの蒸発量と平均日射量の関係

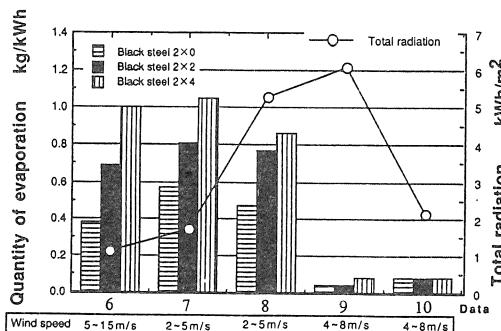


図 9 単位日射量当たりの蒸発量と全日射量の関係

表 2 垂直円管による蒸発促進

DATA	(2×2) - (2×0)	(2×4) - (2×0)
6	0.11 kg/m²·h	0.22 kg/m²·h
7	0.14 kg/m²·h	0.28 kg/m²·h
8	0.19 kg/m²·h	0.26 kg/m²·h

図 8 よりデータ 9 とデータ 10 の実験結果は、蒸発器の片側を閉じることによって、著しく蒸発が妨げられていることを示している。これは、蒸発促進のためには垂直円管を取り付けるだけではなく、蒸発管を通して大気の循環が必要なことを示している。また図より垂直円管が空気循環発生装置として働き、垂直円管の長いものほど蒸発量が増すことが確認された。データ 6～8 について、Black steel 2×2 及び Black steel 2×4 の蒸発量から、Black steel 2×0 の蒸発量を差し引くと表 2 が得られる。これより、Black steel 2×4 は Black steel 2×2 に対して 1.4～2 倍の蒸発促進を示すことがわかった。また、図よりデータ 7 で最大蒸発量 0.61 kg/m²·h が得られた。

図 9 よりデータ 7 の Black steel 2×4 で単位日射量当たりの蒸発量 1.05 kg/kWh が得られた。このことは、蒸発効率が 71.0 % にも達することを示している。

4.1.c ウィックの種類に関する実験

図 10 及び図 11 に単位面積単位時間当たりの蒸発量と平均日射量の関係及び単位日射量当たりの蒸発量と全日射量の関係をそれぞれ平均日射量の低い順に示す。

図 10 より P.Wick 2×2 は最も蒸発量が高い。P.Wick 2×2 の場合、蒸発面積が拡大しており、また受光部分である管上壁面と蒸発部が接することにより熱交換が円滑になっていると考えられる。また、図よりデータ 14 の P.Wick 2×2 で 0.69 kg/m²·h が得られ、本論中最高の値を示した。

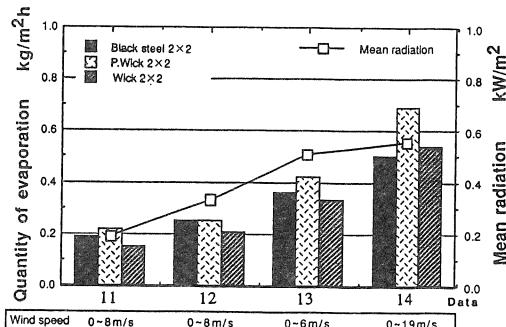


図 10 単位面積単位時間当たりの蒸発量と平均日射量の関係

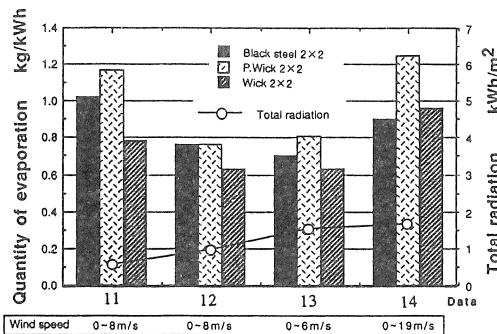


図 1-1 単位日射量当たりの蒸発量と全日射量の関係

図 1-1 よりデータ 1-4 の P.Wick 2×2 で 1.25 kg/kWh が得られ蒸発効率 85.0% と本論の実験で最高値を示した。しかし、データ 1-4 は周囲風速が 0~19 m/s の範囲で変動しており気象条件としては特殊である。従って、85.0% という値の再現性も更に慎重に考察する必要があろう。

なお、前述したように透明アクリル管を使用した場合、管上壁面への水滴発生による遮光が蒸発の阻害要因となっていたことから、透明アクリル管を使用した蒸発器を採用することには必ずしも利点はないように思われる。

4.2 凝縮実験

表 3 に凝縮実験で得られた各実験条件における測定時間、加湿量、回収量及び回収率を示す。

また、図 1-2 に各実験条件における閉塞率と回収量の関係を示し、図 1-3 ~ 図 1-6 における凝縮器の各点温度、気温及び大気の相対湿度の時間変化をそれぞれ示す。但し、図 1-4 の時刻 3 時におけるフィン上部温度(□印)は明らかに読み取りミスであろう。

図 1-2 より凝縮部金網の閉塞率が高く加湿流量及び加熱量が高い場合、回収率が高いことがわかる。特に条件 B では回収率 51.2% が得られた。

閉塞率の高い条件 B 及び条件 D の場合、凝縮器内部の伝熱面積が増加しているため、蒸気の冷却が促進され回収率が高くなつたものと思われる。

表 3 各条件における測定時間、加湿量、回収量及び回収率

Condition	Measuring Time	Quantity of humidification	Quantity of recovery	Recovery rate
A	9.67 h	3.55 kg	1.60 kg	45.1 %
B	9.00 h	3.03 kg	1.55 kg	51.2 %
C	21.58 h	2.11 kg	0.92 kg	43.6%
D	22.00 h	2.10 kg	1.06 kg	50.5 %

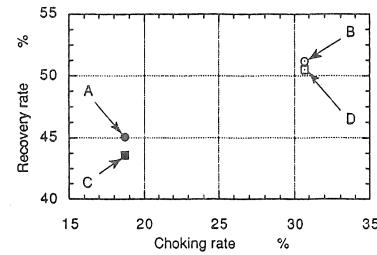


図 1-2 凝縮実験における回収率と閉塞率の関係

また、加湿流量及び加熱量の高い条件 A 及び条件 B の場合には、図 1-3 及び図 1-4 に示されるように凝縮器入口温度(△印)と冷却媒体温度である気温(○印)及び冷却水温度(◇印)との差が 20℃~32℃ であり、図 1-5 及び図 1-6 における条件 C 及び条件 D の場合の温度差 5℃~13℃ よりも大きい。従って条件 A は条件 C より、条件 B は条件 D よりも熱力学的にフィンによる放熱量がより大きくなるため蒸気の冷却が促進され回収率が高くなつたと考えられる。

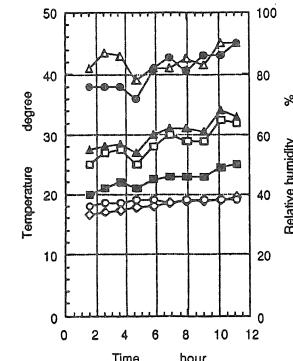


図 1-3 凝縮器の各点温度、気温及び大気の相対湿度の時間変化(条件 A)

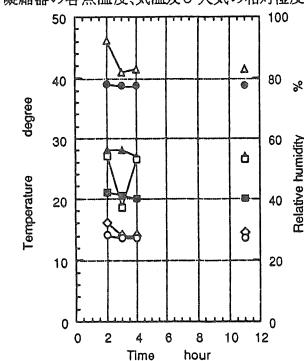


図 1-4 凝縮器の各点温度、気温及び大気の相対湿度の時間変化(条件 B)

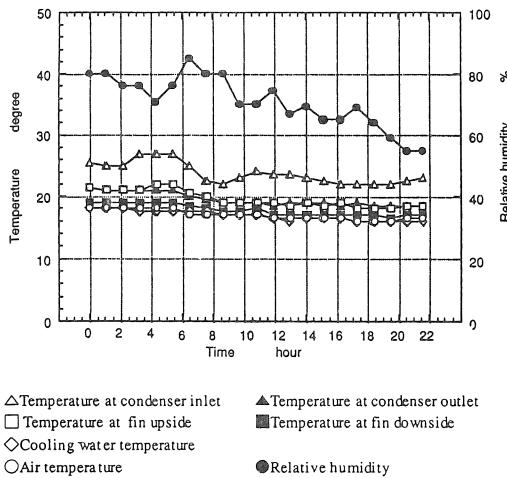


図 1-5 凝縮器の各点温度、気温及び大気の相対湿度の時間変化(条件C)

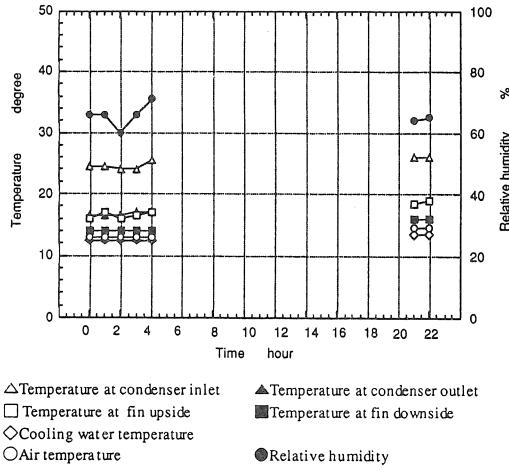


図 1-6 凝縮器の各点温度、気温及び大気の相対湿度の時間変化(条件D)

5. 結論

円管型蒸発器と垂直円管を組み合せた蒸発実験では、その組合せ条件から以下のことがわかった。

- 1) 蒸発は日射量のみではなく風の影響も受けることが確認された。ウイック等により蒸発面積を拡大した場合特に風の影響を受け易い。
- 2) 蒸発促進のため長さの異なる垂直円管を使用したところ、2 mに対して4 mのものが1.4~2倍の蒸発促進効果があった。
- 3) 蒸発を促進させるためには、蒸発器内に絶えず飽和度の低い空気を補給する必要がある。
- 4) パイプ状のウイックを挿入した黒色鉄管2 mと垂

直円管2 mの組み合せの場合、日射量1.67 kWh/m²、風速0~19 m/sのとき最大蒸発量0.69 kg/m²hが得られ、単位日射量当たり蒸発量1.25kg/kWhおよび蒸発効率85.0%をそれぞれ記録した。

自然冷却方式の凝縮器による凝縮実験では以下のことがわかった。

- 5) フィンに取り付けられた金網による閉塞率が高く、かつ凝縮器に導かれる湿り空気の温度が高いほど凝縮が促進され、最高回収率51.2%が得られた。

以上の実験結果は本提案システムの実用化可能性にかなり大きな期待を抱かせるものといえる。ただし今回の実験は蒸発部と凝縮部を分離し、それについてかなり理想的な状態で計測したものであることから、たとえば蒸発器出口部の空気の湿り度と凝縮部入口部のそれがかなり異なっていると考えられる。

したがって、蒸発器と凝縮器を組み合せた場合に発生すると予想される諸問題、ならびに本文にも述べた風の影響の再評価等は本研究の今後の課題である。

参考文献

- (1) 関守雄・清水加津子・中塩武之・畠徳宣、太陽熱利用による海水淡化に関する研究、広島県立西部工業技術センター研究報告, 32(1989), 69-72.
- (2) G. N. Tiwari and A. K. Singh, Thermal efficiency of evaporative heat loss for open and closed cycle system, International Journal of Energy Research, 15-3 (1991), 169 - 177.
- (3) M. T. Chaibi, M. J. Safi and M. Hsairi, Performance analysis of a solar desalting unit in south Tunisia, Inst. Chem. Eng. Symp. Ser., 2-125 (1991), 197-205
- (4) W. P. Taylor, Solar powerplant and still, Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf., 25-5 (1990), 152 - 155.
- (5) A. Monem and El. Bassuoni, Enhanced solar desalination units, Clean Safe Energy Forever, 2 (1990), 1374 - 1378.
- (6) 東京天文台, 理科年表昭和59年 (1984), 263, 丸善株式会社, 東京.