

ヒートパイプと組み合わせた太陽熱蒸留器の提案とその特性

A newly designed multiple-effect-diffusion type solar still coupled with heat-pipe

田中 大^{*1}
Hiroshi TANAKA

中武 靖仁^{*2}
Yasuhito NAKATAKE

平 濤 国 男^{*3}
Kunio HIRAHARA

Abstract

We proposed a newly designed, compact multiple-effect-diffusion type solar still consisting of a heat-pipe solar collector and a number of the vertical parallel partitions in contact with saline soaked wick. The solar collector and the partition section can be folded or separated when it is carried. The solar energy from the solar collector is transported as latent heat of working fluid to the partition section where the energy is recycled to increase the production rate of distillate. The performance of the still is analyzed theoretically, and we found that the still's productivity is greater than that of conventional multiple-effect solar still coupled with basin-type still.

キーワード：太陽エネルギー、淡水化、太陽熱蒸留器、多重効用、集熱パネル

Key Words: Solar energy, Desalination, Solar distillation, Solar still, Multiple-effect, Solar collector

1. 緒言

発展途上国の貧しい集落などにおいては、上水道整備の遅れから衛生的な飲料水の確保が困難であり、非衛生的な水の摂取による乳幼児の健康への影響は深刻である。また、南アジアから東アジアにかけての地域では井戸水のヒ素による汚染が広がっており、その対策が急務とされている。このため、高度な技術を必要としない、安価で分散型の淡水化装置が求められているが、太陽熱を利用した海水淡水化蒸留器はそのニーズを満たし得るものである。

これまでに、様々な型の、太陽熱を利用した海水淡水化蒸留器が研究されてきたが、多重効用型蒸留器は、水蒸気の凝縮潜熱を再利用し、海水の蒸発・凝縮を複数回繰り返す構造であり、最も性能が高い。中でも、仕切り板（金属板）を一定の間隔で複数枚配置した平行平板構造の多重効用型蒸留器（図1の蒸留部と同様の構造）の性能は高く、これまでに多くの研究が行われており、田中¹⁾、日本太陽エネルギー学会²⁾および田中³⁾によって概説されている。この蒸留器の各仕切り板にはウィック（布）が貼り付けられ、そこに海水が一定量、連続して供給される。1枚目の仕切り板が直接あるいは間接的に太陽熱によって加熱され、その

背面のウィック中の海水が加熱・蒸発する。発生した水蒸気は拡散して2枚目の仕切り板に達し、ここで凝縮する。その際に水蒸気が放出する凝縮潜熱によって、さらに2枚目の仕切り板背面のウィックから水蒸気が発生し、この蒸発・凝縮の過程が蒸留器内で繰り返される。このように、水蒸気の凝縮潜熱を繰り返し利用することにより、蒸留量は増加する。また、仕切り板の間隔を狭くすることにより、仕切り板間の湿り空気層の伝熱抵抗が大幅に減少し、蒸留量が飛躍的に増加することが明らかにされている⁴⁾⁵⁾。

これまで、蒸留器を水平に近い角度で斜めに傾け、1枚目の仕切り板を太陽光により直接加熱する、上方加熱式の多重効用型蒸留器の研究が広く行われてきた⁶⁾¹²⁾。この型の蒸留器は、蒸留器を直接加熱できるという長所を有するが、一方、自重により仕切り板が大きくなると仕切り板の間隔を狭くした場合、仕切り板と仕切り板が接触しやすく、また、海水を含んだウィックが凝縮面の上方に位置するため、海水が凝縮水に混入しやすいという重大な欠点を持っている。

田中ら¹³⁾は、下方加熱式多重効用型蒸留器（仕切り板群は水平に近い角度で設置され、蒸発・凝縮の過程が下から上向きに繰り返される構造）とヒートパイプ集熱パネルを組み合わせた蒸留器の数値計算および屋外実験を行っている。下方加熱式の蒸留器も上方加熱式と同様の欠点を持ち、仕切り板の間隔を狭くすることが困難である。このため、蒸留器の伝熱抵抗が増加し、集熱パネルで吸収した太陽エネルギーの内、蒸留器に供給できる熱量は少なくなり、集熱パネルからの熱損失が大きくなる。田中

*1 久留米工業高等専門学校機械工学科助手
(〒830-8555 久留米市小森野1-1-1)

e-mail: tanakad@kurume-nct.ac.jp

*2 久留米工業高等専門学校機械工学科講師

*3 久留米工業高等専門学校機械工学科教授
(原稿受付：2002年5月27日)

らは、仕切り板の間隔が10mmおよび仕切り板の枚数6枚の蒸留器を用いて屋外実験を行った結果、集熱パネルのカバーガラス面日射量の約35%の熱量しか蒸留器に供給されなかったと報告している。

田中ら^{14,17)}は、鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器とBasin型蒸留器を組み合わせた、新しい型の蒸留器を考案し、屋外実験および理論解析を行った。その結果、仕切り板を鉛直に設置する利点が非常に大きいこと、すなわち、仕切り板の自重によるたわみが減少し、蒸留水に海水を混入させることなく仕切り板の間隔を5mm以下と非常に狭くすることができることを明らかにした。しかし、Basin型と組み合わせた場合、蒸留器全体、特にBasin型蒸留器の容積が大きく、重量も大きいので、運搬が困難であり、運搬費用も高くなるという欠点があった。

本論文では、鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器と太陽光ヒートパイプ集熱パネルを組み合わせた、運搬が容易な、新しい型の太陽熱蒸留器を提案する。提案した蒸留器の構造について述べるとともに、数値シミュレーション解析により得られた本蒸留器の基本的な蒸留性能および特性を記述し、得られた結果を従来の太陽熱蒸留器と比較検討する。

2. 新しく提案する太陽熱蒸留器

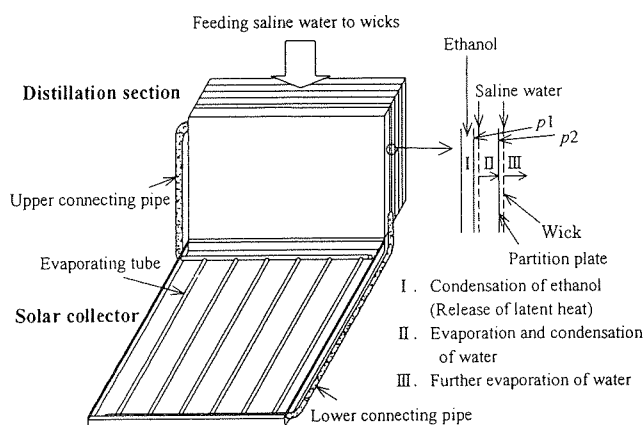


Fig. 1 Schematic diagram of multiple-effect-diffusion type still coupled with solar collector.

本蒸留器の概略を図1に示す。本蒸留器は、太陽光ヒートパイプ集熱パネルと鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器（以降、蒸留部と呼ぶ）から構成される。集熱パネルは、選択吸収面を有する集熱板（アルミ板）と上方に空気層を介して配置されたガラス板から成り、集熱板の下面には一定のピッチで銅管が接着されている。蒸留部は狭い空気層を介して平行かつ鉛直に配置された複数枚の仕切り板で構成されており、外側の面を除く全ての仕切り板の背面にはウィックが張り付けられている。ウィックは保水性の高い布であり、仕切り板とは接着剤等で保水性が損なわれないように接着される。ウィックには常時、一定量の海水が供給される。1枚目の仕切り板 $p1$ 前面には狭い間隔を介して銅板が配置され、1枚目の仕切り板 $p1$ との間に流路を成す。この流路と、集熱パネルの集熱板下面に接着された銅管群が2本のつなぎ管により連結される。このように閉ループが構成され、この中に作動流体であるエタノールが注入され、真空ポンプにより

減圧される。蒸留部の前面および集熱板下面は断熱材で断熱される。

ガラスを透過した太陽光は集熱板で吸収され、集熱板下面に接着された銅管中のエタノールを加熱・蒸発させる。エタノール蒸気は、上部つなぎ管を通して仕切り板 $p1$ 前面の流路上端に移動し、仕切り板 $p1$ 前面に凝縮しながら流下する。凝縮液は、重力の作用によって下部つなぎ管を経て集熱板の銅管中に戻る。仕切り板 $p1$ の前面で凝縮したエタノールの潜熱は、仕切り板 $p1$ を通過し、その背面に貼り付けられたウィック中を流下する海水を加熱・蒸発させる。発生した水蒸気は湿り空気層を拡散し、仕切り板 $p2$ の表面で凝縮し、その際に放出される潜熱により、さらに仕切り板 $p2$ 背面のウィックから水蒸気が発生する。この蒸発・凝縮の過程が蒸留部で繰り返されることにより、熱はリサイクルされ、蒸留量を増加させる。

本蒸留器は、運搬時には集熱パネルと蒸留部を分離し、コンパクトにすることが可能であり、重量も小さいという利点がある。さらに、場所や季節によって変化する太陽高度にあわせて、本蒸留器の太陽光集熱板の傾斜角度は容易に調節できるため、それぞれの使用条件下において最適な角度に設定することができる。

3. 理論解析および数値シミュレーション

本蒸留器内における熱および物質移動の様子を図2に示す。図では例として蒸留部の仕切り板が4枚($n=4$)の場合を示すが、仕切り板の枚数 n がいくつの場合でも、以下の理論解析を適用することができる。

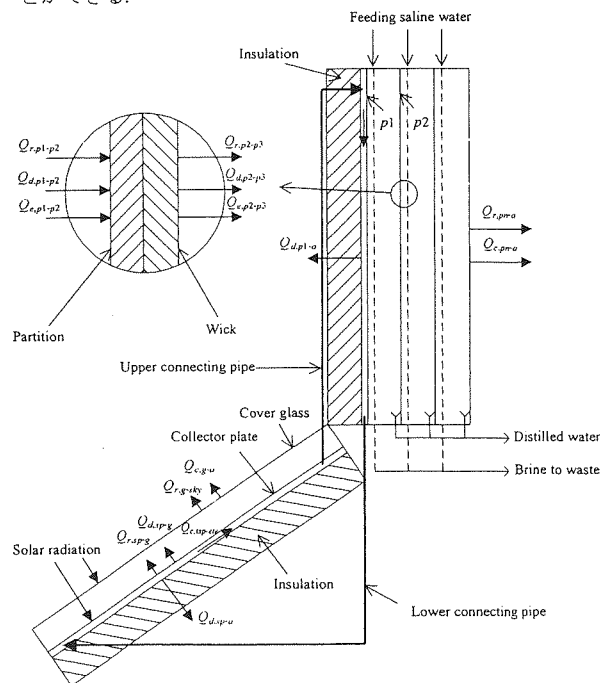


Fig. 2 heat and mass transfer in the still

なお、本シミュレーション計算における主な仮定は以下の通りである。

- (1)カバーガラス、集熱板、蒸発管および仕切り板は温度が一樣である。
- (2)集熱板とカバーガラス間、および、仕切り板と仕切り板の間

の間隔は非常に狭く、対流は生じない。

(3) 蒸留部の上部および下部の壁からの熱移動は無視できる。

(4) 蒸発管に流入したエタノールは、流入後すぐに蒸発温度まで加熱され、蒸発管の全域において核沸騰が生じる。

(5) 散乱日射は天空の全ての角度において一様な強度をもつ。

太陽光は、集熱パネルのカバーガラスを透過し、集熱板で吸収される。吸収された熱の一部は、放射および伝導によりカバーガラスへと移動し、また断熱材を通過して集熱パネル下方から周囲空気へ放出される。残りの熱により集熱板下面に接着された蒸発管群内のエタノールが加熱・蒸発される。従って、カバーガラスおよび集熱板に関する熱収支は以下の式で表すことができる。

$$q_{sun-g} + (q_r + q_d)_{sp-g} = (mc_p)_g \frac{dT_g}{dt} + q_{r,g-sky} + q_{c,g-a} \quad (1)$$

$$q_{sun-sp} = (mc_p)_{sp} \frac{dT_{sp}}{dt} + (mc_p)_{isp} \frac{dT_{isp}}{dt} + (q_r + q_d)_{sp-g} + q_{d,sp-a} + \frac{A_{isp}}{A_{sp}} q_{c,isp-ete} \quad (2)$$

ここで、 q_{sun} 、 q_r 、 q_d および q_c はそれぞれ、吸収した太陽エネルギー、放射、伝導および対流による熱流束を表す。 q の添字、例えば $sp-g$ は、集熱板(sp)からカバーガラス(g)への熱流束を表す。 mc_p は単位面積当りの熱容量、 T は温度、 t は時間、 A は面積を表す。

なお、 q_{sun-g} および q_{sun-sp} は以下の式で求めた。

$$q_{sun-g} = \alpha_g [G_{dr} (\cos \theta + \frac{\sin \theta \cos \omega}{\tan \phi}) + G_{df} \frac{1 + \cos \theta}{2}] \quad (3)$$

$$q_{sun-sp} = \tau_g \alpha_{sp} G_{dr} (\cos \theta + \frac{\sin \theta \cos \omega}{\tan \phi}) + (\tau_g \alpha_{sp})_{df} G_{df} \quad (4)$$

ここで、 G_{dr} および G_{df} はそれぞれ、水平面直達および散乱日射量を表し、 α および τ はそれぞれ吸収率および透過率を表す。 θ はカバーガラスと水平面の成す角、 ω は太陽の方位角、 ϕ は太陽高度である。なお、 $(\tau_g \alpha_{sp})_{df}$ は、カバーガラスの角度 θ の関数であり、集熱板上の散乱日射を積分することによって求めた。

蒸発管内のエタノールは、 $q_{c,isp-ete}$ の熱流束を得て、蒸発管に流入するエタノールを加熱し、エタノールを蒸発させる。従って、蒸発管内のエタノールに関する熱収支は次式で表すことができる。

$$q_{c,isp-ete} = (\dot{m}_p)_{etc} (T_{eti} - T_{eti}) + \dot{m}_{etc} H_{v,et} \quad (5)$$

ここで、 $\dot{m}_{etc}$ および $\dot{m}_{eti}$ は、仕切り板 $p1$ 前面で凝縮する、および集熱板下面の蒸発管で蒸発する単位面積単位時間当りのエタノール量、 $H_{v,et}$ はエタノールの蒸発潜熱である。

蒸発管で蒸発したエタノール蒸気は、上部つなぎ管を通過する際に周囲空気へ熱の一部を放出し、エタノール蒸気の一部は凝縮して蒸発管に流入する。残りのエタノール蒸気は、仕切り板 $p1$ 前面の流路上端に流入する。したがって、上部つなぎ管を流入流出するエタノールについての熱収支は次の式で表される。

$$(\dot{m}_{eti} - \dot{m}_{etc}) H_{v,et} = (mc_p)_{ig} \frac{dT_{ig}}{dt} + U_{ig-a} (T_{eti} - T_a) \quad (6)$$

ここで、 U は熱通過率である。

上部つなぎ管からの蒸気は、仕切り板 $p1$ の前面で凝縮し、その

際に放出されるエタノールの凝縮潜熱の一部は断熱材を通して周囲空気へ放出され、一部は背面のウィック中の海水を加熱する顕熱 $q_{t,p1}$ として使われ、残りの熱が放射、伝導および蒸発・凝縮の三つの形態で仕切り板 $p2$ に移動する。したがって、仕切り板 $p1$ についての熱収支式は次の式で表すことができる。

$$\dot{m}_{etc} H_{v,et} = (mc_p)_{p1} \frac{dT_{p1}}{dt} + (q_r + q_d + q_e)_{p1-p2} + q_{f,p1} + U_{p1-a} (T_{p1} - T_a) \quad (7)$$

ここで、 q_e は蒸発・凝縮による熱流束を表す。

各仕切り板の間では、熱は放射、伝導および蒸発・凝縮で移動する。よって、 $i(i=2 \sim n-1)$ 枚目および最後部の n 枚目の仕切り板についてはそれぞれ以下の収支式が成り立つ。

$$(q_r + q_d + q_e)_{p(i-1)-pi} = (mc_p)_{pi} \frac{dT_{pi}}{dt} + (q_r + q_d + q_e)_{pi-p(i+1)} + q_{f,pi} \quad (8)$$

$$(q_r + q_d + q_e)_{p(n-1)-pn} = (mc_p)_{pn} \frac{dT_{pn}}{dt} + (q_r + q_c)_{pn-a} \quad (9)$$

表1. シミュレーション計算で使用する蒸留器の寸法、操作および気象条件

寸法および操作条件

太陽光集熱パネル

- ・集熱板：選択吸収膜処理アルミ板
長さ2m×幅1m×厚さ1mm
吸収率 $\alpha_{sp}=0.9$ 、放射率 $\varepsilon_{sp}=0.2$ 、熱伝導率 $\lambda_{sp}=237\text{W/mK}$
- ・カバーガラス
長さ2m×幅1m×厚さ3mm
- ・蒸発管：銅管
内径4mm、30mmピッチ
- ・集熱板とカバーガラスの間隔：10mm
- ・カバーガラスと水平面の成す角：26°

蒸留部

- 仕切り板：ステンレス板
高さ1m×幅1m×厚さ0.5mm

集熱板底面および仕切り板 $p1$ 前面の断熱材

- 厚さ20mm、熱伝導率0.04W/mK

ウィックに供給する海水の量

秋分の南中時の日射量が定常蒸留器に当たり続けると仮定して算出された個々のウィックからの蒸発量の2倍

気象条件

周囲空気温度 $T_a=30^\circ\text{C}$ 、相対湿度=60%
供給海水温度 T_o
周囲空気風速 $u_o=1\text{m/s}$
水平面直達日射量 G_{dr} 、水平面散乱日射量 G_{df} ：北緯26.1°、太陽定数1370W/m²を用いて、それぞれBouguerおよびBerlageの式¹⁹⁾より算出

凝縮したエタノール液は、下部つなぎ管を経る際に周囲空気へ熱を放出し、温度 T_{et} で集熱板の銅管内に流入する。つなぎ管を流入流出するエタノールについての熱収支は次の式で表される。

$$(\dot{m}_p)_{etc} (T_{eti} - T_{eti}) = U_{ir-a} \frac{T_{eti} - T_{eti}}{\ln[(T_{eti} - T_a)/(T_{eti} - T_a)]} + (mc_p)_{ir} \frac{dT_{ir}}{dt} \quad (10)$$

以上の熱収支式群中の熱流束 $q_{r,sp-g}$, $q_{d,sp-g}$, $q_{r,g-ky}$, $q_{c,g-a}$, $q_{r,p1(p+1)}$, $q_{d,p1(p+1)}$, $q_{c,p1(p+1)}$, $q_{f,p1}$, $q_{r,p1-a}$, $q_{c,p1-a}$ については、参考文献¹⁴⁾に詳細が記述されている。

集熱板を蒸発管のフィンとみなすことができ、集熱板の平均温度 T_p と蒸発管の温度 T_{sp} の間には次式が成り立つ。

$$T_{sp} - T_{isp} = \frac{1}{3} \frac{(q_{sun-sp} - (q_r + q_d)_{sp-g} - q_{d,sp-a}) w^2}{\lambda_{sp} \delta_{sp}} \quad (11)$$

ここで、 w は蒸発管のピッチ、 λ_{sp} および δ_{sp} はそれぞれ集熱板の熱伝導率および厚さを表す。

蒸発管では核沸騰が生じ、凝縮面で層流液膜が生じると仮定すると、エタノールの沸騰 $(q_{c,sp-ete})$ および凝縮 $(\dot{m}_{etc} H_{v,et})$ の熱流束はそれぞれ以下の式で表すことができる¹⁸⁾。

$$q_{c,sp-ete}^{0.33} = 2.62 (p_{s,et} \times 10^{-5})^{0.26} (T_{isp} - T_{ete}) \quad (12)$$

$$(\dot{m}_{etc} H_{v,et})^{4/3} = 1.47 \lambda_{et} (\rho_{et} H_{v,et} g / 4 \nu_{et} l_{p1})^{1/3} (T_{etc} - T_{p1}) \quad (13)$$

ここで、 $p_{s,et}$ はエタノールの飽和蒸気圧、 λ_{et} 、 ρ_{et} および ν_{et} はそれぞれ、エタノールの熱伝導率、密度および動粘度である。 g は重力加速度、 l_{p1} は仕切り板 $p1$ の高さである。

式(1)~(13)の熱収支式および関係する式の連立方程式を、市販のプログラム(Mathematica)を用いて解くことにより、蒸留器内の各部の温度、および熱移動量、さらに各仕切り板での蒸留量を求めた。数値シミュレーションで使用した装置の寸法、操作および気象条件を表1に示す。なお、蒸留部に関する各種物性値は前報¹⁴⁾に詳細を記述している。エタノールの物性値は文献¹⁸⁾の値を使用した。

4. シミュレーション計算結果

秋分の晴天日において、本蒸留器が沖縄県那覇市(北緯26.1°, 東経127.4°)に設置されたと仮定して、蒸留部の仕切り板の枚数 $n=11$ 枚、仕切り板の間隔 $\delta_{sp}=5\text{mm}$ および 3mm の場合についてシミュレーション計算を行った。カバーガラス面上の日射量および蒸留器の総蒸留量の経時変化を図3に示す。なお、本論文では、本蒸留器の蒸留量は、太陽光が透過する集熱パネルのカバーガラスの単位面積当りの値で表す。

日射量は正午頃にピークを取る。仕切り板の間隔 $\delta_{sp}=5\text{mm}$ および 3mm の場合ともに、蒸留量のピークは日射量のピークより15分ほど遅れるが、これは蒸留器の熱容量によるものである。一日を通して、 $\delta_{sp}=3\text{mm}$ の方が $\delta_{sp}=5\text{mm}$ よりも常に蒸留量は大きい。これは、仕切り板の間隔 δ_{sp} を小さくすることにより、各々の仕切り板間の湿り空気層の伝熱抵抗が減少し、かつ、蒸留効率 $q/(q_r+q_d+q_e)$ が増加するためである。この日の一日のカバーガラス面日射量は $24.4\text{MJ/m}^2\text{day}$ であり、一日の蒸留器全体からの総蒸留量は、 $\delta_{sp}=5\text{mm}$ および 3mm の場合でそれぞれ 17.5 および $20.2\text{kg/m}^2\text{day}$ である。

一日の総蒸留量がピークを取る時間における蒸留器内部の温度分布を図4に示す。 $\delta_{sp}=5\text{mm}$ および 3mm の場合ともに、集熱板(sp)の温度が最も高く、蒸留部において、1枚目の仕切り板 $p1$ から

最後部の仕切り板 $p11$ まで温度は徐々に低下する。集熱板とカバーガラス(g)の間で30数Kの温度差が生じており、カバーガラスの高い断熱性能を示す。 δ_{sp} がいずれの場合も、集熱板と一枚目の仕切り板 $p1$ の間に約3Kの温度差が生じているが、これは主に、集熱板下面に接着された蒸発管内でエタノールが核沸騰する際に生じる蒸発管とエタノール蒸気の温度差によるものである。Nishikawa, et al.²⁰⁾は、太陽光集熱パネルと真空式多重効用型蒸留器を組み合わせた造水システムの研究を行い、晴れた日の屋外実験において、集熱パネルの集熱板温度と作動流体が凝縮する熱交換器の温度差が3~5K程度であったと報告し、田中ら²⁾は、ヒートパイプと下方加熱式を組み合わせた蒸留器の屋外実験において、集熱板と1枚目の仕切り板の温度差が5K以内であったと報告しており、本蒸留器においても、同程度の温度差が生じると考えられる。

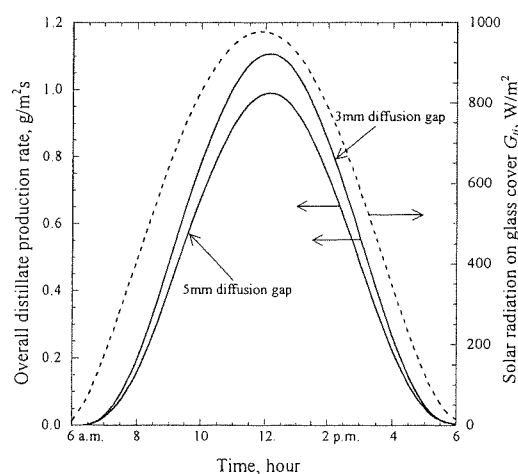


Fig. 3 Time variation of overall production rate of the still with 3 mm and 5 mm diffusion gaps

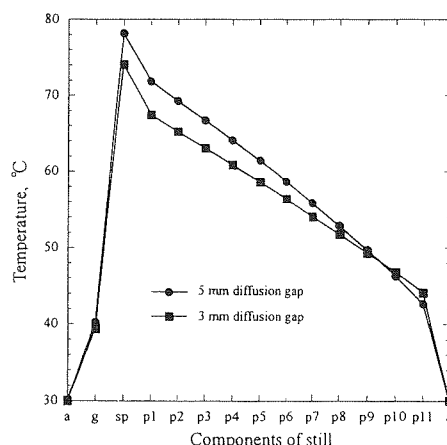


Fig. 4 Distribution of temperature in the still with 3 mm and 5 mm diffusion gaps

仕切り板の間隔 $\delta_{sp}=5\text{mm}$ の方が、集熱板および仕切り板 $p1$ の温度は高く、蒸留部全体を通して隣り合う仕切り板の間の温度差も大きい。これは、仕切り板の間隔 δ_{sp} が増加すると、それぞれの仕切り板間の湿り空気層の伝熱抵抗が増加し、蒸留部全体の伝熱抵抗も増加するためである。その結果、 $\delta_{sp}=5\text{mm}$ の方が 3mm に比べて、集熱板および蒸留部の前側で温度は高く、蒸留部の後ろ側では逆に温度が低くなっている。

仕切り板の間隔 $\delta_g=5\text{mm}$ および 3mm の場合の集熱パネルの集熱効率 η_{sp} の経時変化を図5に示す。ただし、 η_{sp} は次式で定義した。

$$\eta_{sp} = \frac{\text{蒸発管内のエタノールが得た熱量}}{\text{カバーガラス面上の日射量}} \quad (14)$$

集熱効率 η_{sp} は、 δ_g がいずれの場合も同じような変化を示し、9時から3時の間は0.5～0.55程度の値を取る。集熱効率 η_{sp} は常に $\delta_g=3\text{mm}$ の方が大きい、これは $\delta_g=3\text{mm}$ の方が $\delta_g=5\text{mm}$ に比べ集熱板の温度が低く(図4)、カバーガラスを通して周囲空気へ逃げる熱量が小さくなるためである。

$\delta_g=5\text{mm}$ の蒸留器の場合、蒸留量がピーク値を取る時間において、カバーガラス面日射量に対して、集熱板が吸収する熱量、集熱板からカバーガラスへの熱量および集熱板下部から断熱材を通過して周囲空気へ逃げる熱量の割合はそれぞれ、76%、14% および8%であり、集熱効率 η_{sp} は約54%となり、集熱パネルと下方加熱式と組み合わせた場合の実験結果(約35%)と比較して、集熱効率は大きく向上する。

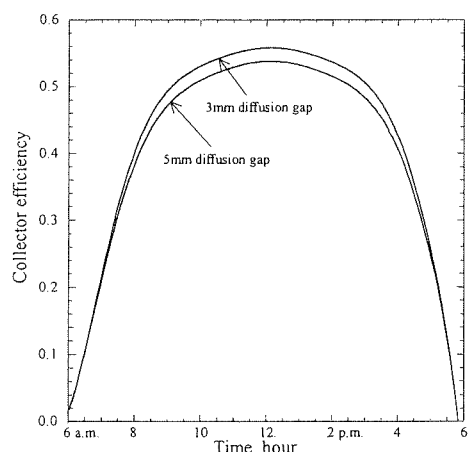


Fig. 5 Time variation of collector efficiency of the still with 3 mm and 5 mm diffusion gaps

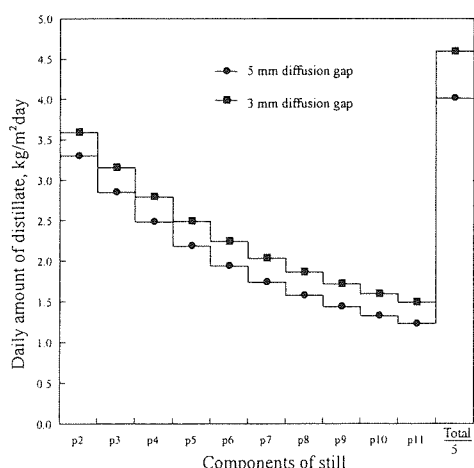


Fig. 6 Daily amount of distillate on all partitions in distilling section with 3 mm or 5 mm diffusion gaps

各凝縮面で得られた一日の凝縮量を図6に示す。なお、グラフを見やすくするため、蒸留器全体から得られた総蒸留量は5分の1の縮尺で示す。仕切り板の間隔 $\delta_g=5\text{mm}$ および 3mm いずれの場合も、2枚目の仕切り板p2で最も大きく、蒸留部外側ほど小さ

くなる。これは、各仕切り板のウィックに供給する海水を加熱するための顕熱エンタルピーが濃縮海水の流出に伴い蒸留部の外に放出されるため、蒸留部の外側ほど仕切り板間の湿り空気層を通過する熱流束が減少し、かつ、各仕切り板の間の蒸留効率 $q_d/(q_r+q_d+q_e)$ が平均温度の低下に伴い減少するためである。全ての凝縮面において、 $\delta_g=3\text{mm}$ の方が常に凝縮量は大きい、これは、仕切り板の間隔 δ_g が減少すると、各々の仕切り板の間の湿り空気層の伝熱抵抗が減少するため、蒸留部全体の伝熱抵抗も減少し、集熱板が吸収した太陽エネルギーが蒸留部を通過する割合、すなわち仕切り板p2における凝縮量が9%増加し、かつ、それぞれの仕切り板の間の蒸留効率も増加するためである。この結果、 $\delta_g=5\text{mm}$ から 3mm へと減少することにより、1日に得られる蒸留器からの総蒸留量は約15%増加する。

同じ日の日射量において、蒸留部の仕切り板の枚数 n を2から15まで変化させた場合の、蒸留器全体から得られる総蒸留量の変化を、 $\delta_g=5\text{mm}$ および 3mm の場合について図7に示す。 $\delta_g=5\text{mm}$ および 3mm いずれの場合も、仕切り板の枚数 n の増加とともに総蒸留量は初め急激に増加し、その後飽和の傾向を示す。 $\delta_g=3\text{mm}$ の方が常に蒸留量は大きく、枚数 n が大きいほど蒸留量の差は大きい。蒸留部の仕切り板の間隔 δ_g を小さくするとともに、仕切り板の枚数 n を増加することにより、蒸留量は大幅に増加し、例えば $\delta_g=3\text{mm}$ 、 $n=15$ の蒸留器では、一日に得られる蒸留量は $26.1\text{kg/m}^2\text{day}$ となる。

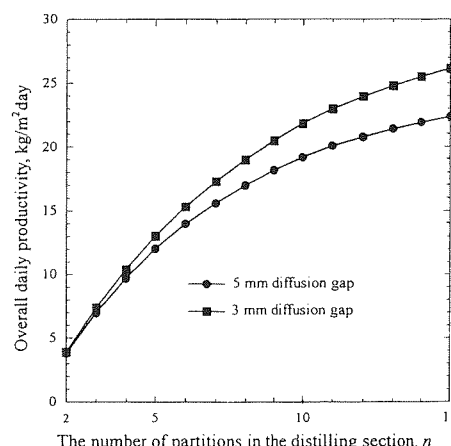


Fig. 7 Variation of overall daily productivity with the number of partitions with 3 mm and 5 mm diffusion gaps

鉛直平行平板構造の多重効用型とBasin型を組み合わせた蒸留器¹⁶⁾ ($\delta_g=5\text{mm}$ 、多重効用型蒸留器の仕切り板の枚数 $n=10$) の同じ日の蒸留量の計算値は約 $17.5\text{kg/m}^2\text{day}$ であり、本蒸留器 ($\delta_g=5\text{mm}$ 、 $n=10$) の方が約15%蒸留量が多い。したがって、多重効用型蒸留器と集熱パネルを組み合わせた場合、Basin型と組み合わせの場合と比較して、蒸留量が増加し、かつ、運搬時の容積が大幅に低減できることがわかる。

仕切り板の枚数 n を増加することにより得られる蒸留量は増加するが、その反面、蒸留器の製作費用も増加するため、枚数 n にはある最適値が存在すると考えられるが、その最適値は、使用する地域、使用頻度や目的等によって変化する。仮に、仕切り板の枚数 n が、製作費用と蒸留水を造水することにより得られる利

益の関係から単純に決定されたとすると、次式を満足する間は仕切り板の枚数 n を増加することが可能であると考えられる。

$$\Delta(\Sigma m_d)_n \cdot Price \cdot A_p > \frac{\Delta C}{D} \cdot Y \quad (15)$$

ここで、 $\Delta(\Sigma m_d)_n$ は仕切り板の枚数を $(n-1)$ から n 枚に増やした場合の1日に得られる総蒸留量の増加分[kg/m²day], $Price$ は蒸留水1kg当りの造水利益[yen/kg], A_p はソーラーパネルの面積[m²], ΔC は仕切り板を1枚増やすための費用(材料費, 加工費等)[yen], D は1年間のうち蒸留器を運転する日数[day/year], Y は蒸留器(あるいは仕切り板)の耐用年数[year]である。ただし式(15)は、全ての運転日において図7に示す蒸留量が得られると仮定している。

式(15)において、右辺は、仕切り板を1枚増やした場合にかかる1日当りのコストであり、仕切り板の枚数 n にかかわらず一定の値をとる。一方、左辺は、仕切り板の枚数を $(n-1)$ 枚から n 枚に増やした場合の一日当りの造水利益であり、 n によって値が異なり、 n の増加とともに減少する(Fig. 7参照)。例えば、 $Price=5$ yen/kg, $\Delta C=10000$ yen/枚, $Y=5$ 年, $D=180$ 日(夏・秋期のみ運転)とすると、表1に示す寸法の蒸留器($A_p=2$ m²)では、 $\Delta(\Sigma m_d)_n > 1.11$ となるため、この条件を満たす間は仕切り板の枚数 n を増加することが出来る。従って、 $\delta_{gp}=5$ mmおよび3mmの場合、仕切り板の枚数 n の最適値はそれぞれ9枚および11枚となる。

5. 結言

著者は、集熱パネルと鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器を組み合わせた、新しい型の太陽熱蒸留器を考案し、シミュレーション計算を行い、蒸留器の基本的な蒸留性能を予測した。得られた結果は以下のように要約される。

- 1 本蒸留器は、集熱パネルと蒸留部を分離でき、重量も小さいため、運搬が容易であり、運搬費用が安いという利点がある。
- 2 本蒸留器が沖縄県那覇市に設置されたと仮定すると、秋分の晴天日(カバーガラス面日射量24.4MJ/m²day)において、蒸留部の仕切り板の枚数 $n=11$ 、仕切り板の間隔 $\delta_{gp}=5$ mmおよび3mmの場合、蒸留器から得られる1日の総蒸留量はそれぞれ17.5および20.2kg/m²dayであると算出された。
- 3 蒸留部の仕切り板の間隔 δ_{gp} を小さくし、仕切り板の枚数 n を増加することにより、蒸留量は大幅に増加する。
- 4 鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器をBasin型蒸留器と組み合わせた従来の蒸留器と比較して、本蒸留器の蒸留量は約15%向上する。
- 5 仕切り板の枚数を増やすための費用と、仕切り板を増やすことによる造水利益の関係から、ある条件における仕切り板の最適枚数を算出した。

記号表:

A : 面積, m ²	D : 蒸留器の運転日数, day/year
G : 日射量, W/m ²	g : 重力加速度, m/s ²
H_v : 蒸発潜熱, J/kg	l : 長さ, m
m_{cp} : 熱容量, J/m ² K	m_d : 蒸留量, kg/m ² s
$\dot{m}$: 蒸発あるいは凝縮速度, kg/m ² s	
n : 仕切り板の枚数	

$Price$: 蒸留水1kg当りの造水利益, yen/kg

p_s : 飽和蒸気圧, Pa q : 熱流束, W/m²

T : 温度, K t : 時間, s

U : 熱通過率, W/m²K u : 風速, m/s

w : 蒸発管のピッチ, m Y : 耐用年数, year

α : 吸収率

ΔC : 仕切り板1枚当りの費用, yen

δ : 間隔, m δ_{gp} : 仕切り板間の間隔, m

η_{sp} : 集熱パネルの集熱効率

θ : カバーガラスと水平面の成す角

λ : 熱伝導率, W/mK ν : 動粘度, m²/s

τ : 透過率 ϕ : 太陽高度

ω : 太陽の方位角

添字

a : 周囲空気

c : 対流

d : 伝導

df : 水平面散乱日射

dr : 水平面直達日射

e : 蒸発・凝縮

et : エタノール

etc : エタノールの凝縮

ete : エタノールの蒸発

eti : 蒸発管入口部エタノール

f : 顕熱エンタルピー変化

g : ガラス

gp : 仕切り板間の湿り空気層

r : 放射

sky : 天空

sp : 集熱板

sun : 太陽光の吸収

pi : 枚目の仕切り板

tg : 上部つなぎ管

tr : 下部つなぎ管

tsp : 蒸発管

参考文献

- 1) 田中耕太郎, 慶応大学, 博士論文, (1985)
- 2) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会, 新太陽エネルギー利用ハンドブック, (2000), 625-635, ニッポンパブリシティ, 東京
- 3) 田中大, 琉球大学, 博士論文, (2001)
- 4) 津村健児・山下正幸・渡辺裕人・稲葉秀達, 太陽直射多重効用蒸留装置における集熱面温度と蒸留水収量の関係, 日本海水学会誌, 39-3(1985), 129
- 5) S. Toyama, T. Aragaki, H. M. Salah and K. Murase, Dynamic Characteristics of a Multistage Thermal Diffusion Type Solar Distillator, *Desalination*, 67(1987), 21
- 6) K. Ohshiro, T. Nosoko and T. Nagata, A Compact Solar Still Utilizing Hydrophobic Poly(Tetrafluoroethylene) Nets for Separating Neighboring Wicks, *Desalination*, 105(1996), 207
- 7) P. I. Cooper and J. A. Appleyard, The Construction and Performance of a Three-Effect, Wick-Type, Tilted Solar Still, *Sun at Work*, 12-1(1967), 4
- 8) R. C. Ouahes and P. J. Le Goff, A Hardy, High-Yield Solar Distiller of Brackish Water, *Desalination*, 67(1987), 43
- 9) H. M. Yeh, S. W. Tsai and N. T. Ma, Multiple-Effect Solar Distiller, 22nd *Intersocial Energy Conversion Engineering Conference*, vol. 4, Philadelphia, Pennsylvania, August 10-14(1987), 1723
- 10) 岡村秀昭・田中耕太郎・渡部康一, 多重効用型太陽熱蒸留器の性能に関する研究(上方加熱方式蒸留器の屋外実験結果とシミュレーション解析), 太陽エネルギー, 14-6(1988), 27
- 11) K. Ohshiro, T. Nosoko, T. Shinzato and T. Nagata, A Compact Solar Still Utilizing Hydrophobic Nets for Separating Neighboring Wicks (Part2 Dependence of Productivity on Design and Operation Parameters), *The Ninth International Symposium on Transport Phenomena in Thermal-Fluids Engineering*, Singapore, June 25-28, 1996, 1152

- 12) B. Boucekima, B. Gros, R. Ouahes and M. Diboun, Performance Study of the Capillary Film Solar Distiller, *Desalination*, **116**(1998), 185
- 13) 田中耕太郎・岡村秀昭・菅誠・渡部康一, 多重効用型太陽熱蒸留器の性能に関する基礎研究(第2報, 下方加熱方式蒸留器の屋外日照条件下における実験結果について), 日本機械学会論文集(B編), **53**-496(1987), 3771
- 14) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, A Highly Productive Basin Type - Multiple Effect Coupled Solar Still, *Desalination*, **130**(2000), 279
- 15) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, Parametric Investigation on a Basin Type - Multiple Effect Coupled Solar Still, *Desalination*, **130**(2000), 295
- 16) 田中大・野底武浩・長田孝志, Basin—多重効用複合型海水淡水化装置に関する実験および理論的研究, 太陽エネルギー, **27**-2(2001), 59
- 17) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, Experimental study of basin-type - multiple-effect-diffusion coupled solar still, *Desalination*, in press.
- 18) 日本機械学会, 伝熱工学資料第4版, (1986), 129, 148, 325, 日本機械学会, 東京
- 19) 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会, 太陽エネルギー利用ハンドブック, (1985), 20, 温故堂印刷株式会社, 東京
- 20) H. Nishikawa, T. Tsuchiya, Y. Narasaki, I. Kamiya and H. Sato, Triple effect evacuated solar still system for getting fresh water from seawater, *Applied Thermal Engineering*, **18**(1998), 1067