

平板反射鏡と組み合わせた 多重効用型太陽熱蒸留器の提案

A vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a flat plate mirror

田 中 大 *
Hiroshi TANAKA

中 武 靖 仁 *
Yasuhito NAKATAKE

Abstract

We present a newly designed vertical multiple-effect diffusion-type solar still, consisting of a flat plate mirror and a number of the vertical parallel partitions in contact with saline soaked wicks. The proposed still is designed to be rotated by human power to increase the solar radiation absorbed on the first partition of the still, and easily constructed with common materials in the developing countries. We theoretically analyze the performance of the proposed still, and found that the daily solar radiation absorbed on the first partition is significantly increased by changing the direction of the still one time a day at southing of sun, and the overall daily productivity is predicted to be 27.2 kg/m²day and 30.3 kg/m²day on a sunny spring equinox and summer solstice days at 26.1°N, respectively.

キーワード：太陽熱淡水化、太陽熱蒸留器、多重効用、平行平板構造、平板反射鏡

Key Words: Solar distillation, Solar still, Multiple-effect, diffusion-type, flat plate mirror

1. 緒言

平行平板構造の多重効用型太陽熱蒸留器は、構造が単純であり、かつ、その性能は高く、これまでに多くの研究が行われてきた¹⁾⁻¹¹⁾。この蒸留器は、ウィックを接着させた仕切り板を一定の間隔で平行に複数枚配置した構造をしており、水蒸気が凝縮する際に放出する凝縮潜熱を再利用し、蒸発・凝縮の過程を蒸留器内部で何度も繰り返すことにより、蒸留量を大幅に増加させることが可能である。

Tanakaら¹²⁾⁻¹⁶⁾は、仕切り板を鉛直に設置した平行平板構造の多重効用型蒸留器とBasin型を組み合わせた蒸留器について、詳細な理論解析および長期間にわたる屋外実験を行い、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、仕切り板を鉛直に設置することにより、仕切り板の自重によるたわみを大幅に減少させ、さらに、蒸留水への海水の混入を容易に防止することが出来ることを明らかにした。

著者らは、鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器とヒートパイプ式太陽集熱パネルを組み合わせた新しい型の蒸留器を提案し、詳細な理論解析を行った結果、本蒸留器の蒸留量が従来の多重効用型蒸留器よりも向上することを明らかにし¹⁷⁾⁻²⁰⁾、現在、屋内実験によってその蒸留特性を検証中である²¹⁾⁻²²⁾。

一方、著者の一人がボランティアとして活動を行っている

NPO団体は、主にインドネシアのNGO団体と共同で、インドネシアにおける小型廃水処理プラントの普及に取り組んでいるが、そのインドネシアのNGO団体からは、単純かつ高性能であり、現地でも製作可能な太陽熱蒸留器の実用化を要望する声が以前から高い。これは、インドネシアの特に東ヌサ・ティンガラ州等においては、井戸や河川等の水源の乏しい離島が多く、その住民の中には、飲料水を船で運搬されるボトル詰の水に頼っている者も多く、持続的に使用可能な小型分散型の淡水供給器への需要が高いためである。

鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器とBasin型を組み合わせた蒸留器は、片屋根式Basin型蒸留器の背面に、複数枚の仕切り板を配置しただけの非常に単純な構造をしているが、Basin型蒸留器の容積および重量が大きいため、その運搬や保管が困難である。一方、鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器とヒートパイプ式太陽集熱パネルを組み合わせた蒸留器の場合、そのサイズが非常に小さくなる反面、高い気密性を必要とするヒートパイプの製作に、比較的高度な技術が必要になるという問題点がある。

そこで本研究では、鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器と平板反射鏡を組み合わせた新しい型の太陽熱蒸留器を提案し、その基礎的蒸留性能を明らかにすることを目的とする。本蒸留器は、構造が非常に単純であり、薄い金属板、反射鏡、ガラス板および布などの現地でも調達可能な材料だけで構成されており、その製作には特別な技術を必要としない。

* 久留米工業高等専門学校機械工学科
(〒830-8555 久留米市小森野1-1-1)
e-mail: tanakad@kurume-nct.ac.jp
(原稿受付: 2004年4月30日)

2. 新しく提案する太陽熱蒸留器

本蒸留器の概略を図1に示す。本蒸留器は、平板反射鏡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、蒸留器下部にはキャスターが取り付けられており、蒸留器を自由に回転させることが可能である。蒸留部は、狭い空気層を介して鉛直かつ平行に配置された複数枚の仕切り板で構成されており、最外部を除く全ての仕切り板の背面には保水性の高いウィック（布）が接着され、ウィックには常時、一定量の海水が連続的に供給される。蒸留部の前面（1枚目の仕切り板の前面）は選択吸収膜を有し、その前方には狭い空気層を介してカバーガラスが配置される。平板反射鏡は、鏡面仕上げされた金属板であり、その角度は自由に調節することが可能である。

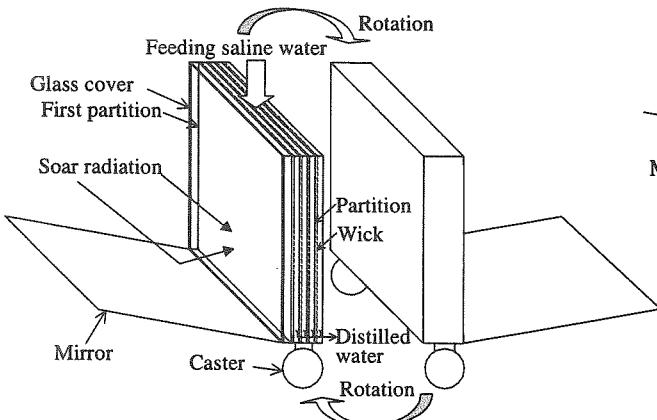


Fig. 1 Schematic diagram of a proposed solar still

蒸留の原理は次の通りである。斜めから入射する直達光、反射鏡からの反射光および散乱光が蒸留部のカバーガラスを透過し、1枚目の仕切り板で吸収される。吸収された太陽エネルギーによって、1枚目の仕切り板背面に接着されたウィック中を流下する海水が加熱され、水蒸気が発生する。発生した水蒸気は湿り空気層を拡散し、2枚目の仕切り板前面で凝縮するが、その際に放出される潜熱により、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する。この蒸発・凝縮の過程が蒸留部内部で何度も繰り返されることにより、太陽熱は再利用され、蒸留量は増加する。

本蒸留器は、太陽光を効率的に吸収することが出来るよう、蒸留器の向きを1日に1回あるいは複数回変えられるように設計されている。この作業には、自動制御の追尾機構ではなく、人力によるものを想定しているが、発展途上国では一般的に失業率が高く、1日に数回程度の作業を行う人員の確保は比較的容易であると考えられる。

3. 理論解析および数値シミュレーション計算

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

来る。

なお、本数値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) カバーガラスおよび各仕切り板の温度は一様である。
 - (2) 仕切り板と仕切り板の間および1枚目の仕切り板とカバーガラスの間隔は十分狭く、対流は生じない。
 - (3) 散乱日射光は天空の全ての角度において一様な強度を持つ。

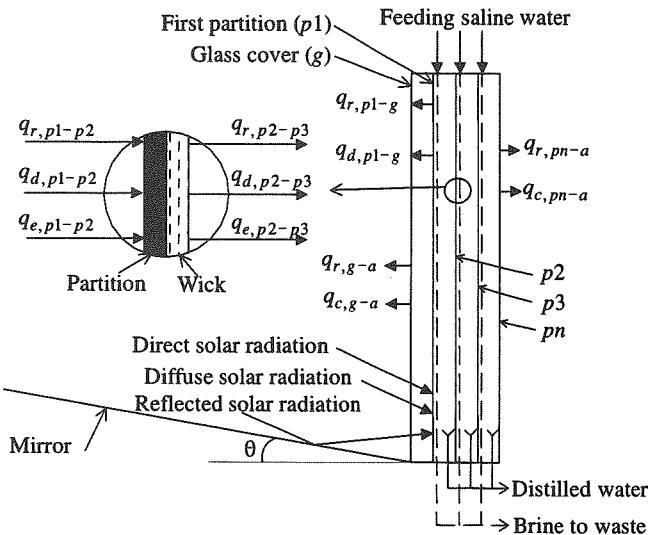


Fig. 2 Heat and mass transfer in the still

斜めから入射する直達光($q_{sun,dir}$)、反射板からの反射光($q_{sun,re}$)および散乱光($q_{sun,dif}$)は、カバーガラスによる反射および吸収で減衰された後、1枚目の仕切り板($p1$)で吸収される。吸収されたエネルギーの一部は放射(q_r)および伝導(q_d)によってカバーガラス(g)へ移動し、一部は背面のウィックへ供給した海水を加熱するための顯熱(q_h)として使われ、残りの熱が放射、伝導および蒸発・凝縮(q_e)によって2枚目の仕切り板($p2$)へ移動する。カバーガラスから周囲空気(a)へは、放射および対流(q_a)によって熱が放出される。したがって、カバーガラスおよび1枚目の仕切り板に関する熱収支は以下の式で表すことが出来る。

$$\alpha_g (q_{sun,dr} + q_{sun,re} + q_{sun,df}) + (q_r + q_d)_{p1-g} \\ = (mc_p)_g \frac{dT_g}{dt} + (q_r + q_c)_{g-a} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \tau_g \alpha_{p1}(q_{sun,dr} + q_{sun,re}) + (\tau_g)_{df} \alpha_{p1} q_{sun,df} \\ &= (mc_p)_{p1} \frac{dT_{p1}}{t_e} + (q_r + q_d)_{p1-g} + (q_r + q_d + q_e)_{p1-p2} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 α は吸収率、 τ_t は透過率、 mC_p は熱容量、 T は温度および
は時間であり、 $(\tau_t)_{av}$ は、天球全表面からの散乱光に対するカバー
ガラスの透過率の平均値であり、反射鏡の角度 θ の関数として、
次の式で表すことが出来る。

$$(\tau_g)_{df} = 4.25 \times 10^{-5} \theta^2 - 7.64 \times 10^{-3} \theta + 0.338 \quad (3)$$

なお、式中の添え字、例えば $p1-g$ は、1枚目の仕切り板($p1$)からカバーガラス(g)への熱流束を示す。

各仕切り板の間では、熱は放射、伝導および蒸発・凝縮によって移動し、熱の一部はウイックに供給された海水を加熱する

ための顯熱として使われる。また、最外部の仕切り板(pn)から周囲空気には放射および対流によって熱が放出される。したがって、 i ($i=2 \sim n-1$)枚目の仕切り板(pi)および最外部の仕切り板(pn)に関する熱収支は以下の式で表すことが出来る。

$$(q_r + q_d + q_e)_{p(i-1)-pi} = (mc_p)_{pi} \frac{dT_{pi}}{dt} + (q_r + q_d + q_e)_{pi-p(i+1)} + q_{f,pi} \quad (4)$$

$$(q_r + q_d + q_e)_{p(n-1)-pn} = (mc_p)_{pn} \frac{dT_{pn}}{dt} + (q_r + q_c)_{pn-a} \quad (5)$$

仕切り板間および1枚目の仕切り板とカバーガラス間の放射および伝導による熱流束は、それぞれ以下の式で表すことができる。

$$q_{r,pi-p(i+1) \text{ or } g} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{p \text{ or } g}} - 1} (T_{pi}^4 - T_{p(i+1) \text{ or } g}^4) \quad (6)$$

$$q_{d,pi-p(i+1) \text{ or } g} = \frac{\lambda_{h \text{ or } air}}{\delta_{gp \text{ or } ag}} (T_{pi} - T_{p(i+1) \text{ or } g}) \quad (7)$$

ここで、 σ はボルツマン定数、 ε は放射率、 λ は熱伝導率、 δ_{sp} は仕切り板の間隔、 δ_{ag} は1枚目の仕切り板とカバーガラスの間隔である。なお、式中の添え字、例えば $p_i-p(i+1)$ or g については、 i 枚目の仕切り板(p_i)から $i+1$ 枚目の仕切り板($p(i+1)$)への、あるいは1枚目の仕切り板(p_1)からカバーガラス(g)への熱流束を示す。

仕切り板間の蒸発・凝縮による熱流束は、空気中の水蒸気の
一方向拡散が生じると仮定して、次の式で表すことが出来る。
なお、本計算においては、海水の塩分濃度($s=3.5\text{wt\%}$)による沸点
上昇を考慮に入れた。

$$q_{e, pi-p(i+1)} = \frac{H_v DP}{R\delta_{gp} T_m} \ln \left(\frac{P - p_s(T_{p(i+1)})}{P - p_s(T_{pi}, s)} \right) \quad (8)$$

ここで、 H_v は水の蒸発潜熱、 D は水の空気中の拡散係数、 P は大気圧、 R は水の気体定数、 T_m は蒸発面と凝縮面の平均温度、 p_s は水の飽和蒸気圧である。

ウィックに供給した海水を加熱するための顯熱エンタルピは次の式で表すことが出来る。

$$q_{f,pi} = \dot{m}_{f,pi} c_{p,brn} (T_f - T_{pi}) \quad (9)$$

ここで、 $m_{f,pi}$ は*i*枚目の仕切り板のウイックへの海水供給量、 c_{pbm} は海水の比熱である。

最外部の仕切り板およびカバーガラスと周囲空気の間の熱伝達率は風速 u_a の関数として次の式で表すことが出来る²³⁾。

$$h = 5.7 + 3.8u_a \quad (10)$$

最外部の仕切り板およびカバーガラスからは、周囲空気と温度の等しい周囲壁への放射が生じ、その際の形態係数がそれぞれ最外部の仕切り板およびカバーガラスの放射率に等しいと仮定して、その放射の熱流束は次の式で表すことが出来る。

$$q_{L, pn \text{ or } g-a} = \sigma \varepsilon_{pn \text{ or } g} (T_{pn \text{ or } g}^4 - T_a^4) \quad (11)$$

1枚目の仕切り板への直達光 $q_{sun,dt}$ は、1枚目の仕切り板が水平面に投影する影の面積と水平面直達日射量 G_{dt} の積で求めること

が出来る。直達光の概要を図3に示す。図中の l_p および n_m はそれぞれ、1枚目の仕切り板($AA'B'B$)および反射板($AA''B''B$)の長さ、 w は1枚目の仕切り板および反射板の幅、 θ は反射板の角度、 γ は蒸留器の方位角、 ϕ および ψ は太陽方位角および太陽高度である。図に示すように、太陽高度 ϕ が反射鏡の角度 θ よりも大きい場合($\phi \geq \theta$)、1枚目の仕切り板の影は $ABCD$ となり、一方、 $\phi < \theta$ の場合は、1枚目の仕切り板が吸収する直達光の影は、反射板の影と重なる部分($ABHF$)を引いた部分($AFHCD$)となる。したがって、直達光 $q_{sun,d}$ は以下の式で表すことが出来る。

$$\phi \geq 0: q_{sun,dr} = G_{dr} w l_{p1} \cos(\phi - \gamma) / \tan\phi \quad (12)$$

$$\phi < \theta;$$

$$q_{sun,dr} = G_{dr} \{ w l_{p1} \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\tan\phi} - l_{mr} (\frac{\sin\theta\cos(\varphi - \gamma)}{\tan\phi} - \cos\theta) \\ \times (w - \frac{1}{2} l_{mr} \cos\theta \tan|\varphi - \gamma|) \} \quad (13)$$

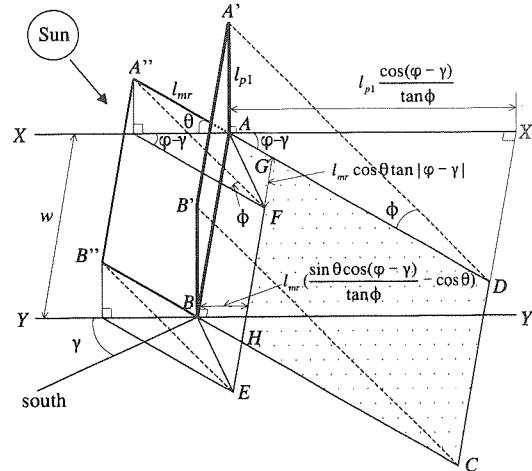
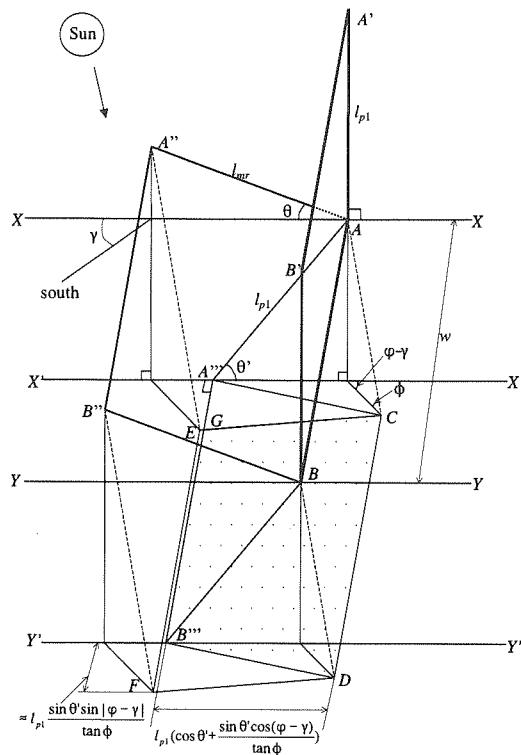


Fig. 3 Direct solar radiation and its shadows on a horizontal plane

反射板からの反射光 q_{surve} を計算するための概略図を図4に示す。図中の $AA''B''B$ は、1枚目の仕切り板($AA'B'B$)の反射鏡($AA''B''B$)に対する鏡像面であり、反射光 q_{surve} は、この鏡像面と反射鏡が XY 水平面に投影する影の重なった部分すなわち $CGB''D$ の面積と水平面直達日射量および反射鏡の反射率 ρ_{nr} の積で表すことが出来る。したがって、反射光 q_{surve} は次の式で表すことが出来る。

$$q_{sun,re} = \rho_{mr} G_{dr} l_{p1} (\cos \theta' + \frac{\sin \theta' \cos(\phi - \gamma)}{\tan \phi}) \times \\ (w - \frac{1}{2} l_{p1} \frac{\sin \theta' \sin|\phi - \gamma|}{\tan \phi}) \quad (14)$$

$$\theta' = 180^\circ - 2\theta \quad (15)$$

Fig. 4 Reflected solar radiation and its shadow on $X'Y'$ horizontal plane

式(1)から(15)および関係する式を解くことにより、1枚目の仕切り板が吸収する日射量、カバーガラスおよび各仕切り板の温度、蒸留器内部の熱流束および各仕切り板における凝縮量を計算した。本数値シミュレーション計算における蒸留器の寸法、操作条件、および気象条件を表1に示す。なお、計算に使用した空気、湿り空気、海水等の物性値については、Tanakaら¹²⁾の文献の値を用いた。

表1. 蒸留器の設計および操作条件、および気象条件

設計および操作条件

- ・反射板：鏡面仕上げアルミ板
長さ1m×幅1m
反射率 $\rho_m=0.95$
- ・仕切り板：ステンレス板
高さ1m×幅1m×厚さ0.5mm
放射率 $\epsilon_p=0.9$
- ・カバーガラス：ソーダガラス板
高さ1m×幅1m×厚さ3mm
放射率 $\epsilon_g=0.9$
入射角 β の太陽光に対する透過率 $\tau_g(\beta)$
$$\tau_g(\beta) = 0.719 \cos^4 \beta - 0.32 \cos^3 \beta - 2.163 \cos^2 \beta + 0.642 \cos \beta$$
- ・仕切り板と仕切り板の間隔 $\delta_{sp}=5\text{mm}$
- ・1枚目の仕切り板とカバーガラスの間隔 $\delta_{ag}=10\text{mm}$
- ・1枚目の仕切り板の表面：選択吸収膜
太陽光の吸収率 $\alpha_{pi}=0.9$ 、放射率 $\epsilon_{pi}=0.2$
- ・ウィックへの海水供給量：1枚目の仕切り板の日射吸収量が南

中時の水平面全天日射量に等しいと仮定して算出された各ウィックからの定常状態での蒸発量の2倍

・ウィックへの海水供給温度 T_f =周囲空気温度 T_a

気象条件

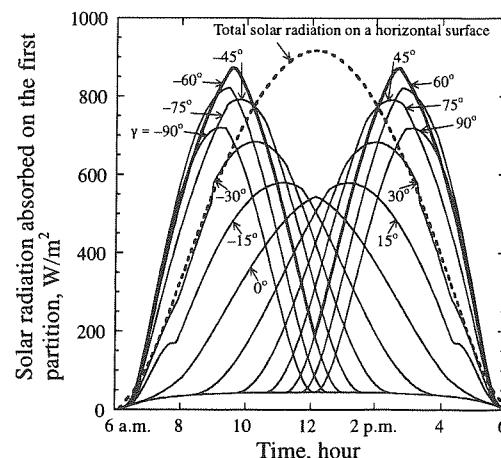
- ・周囲空気温度 $T_a=25^\circ\text{C}$ （春分）および 33°C （夏至）
- ・周囲空気風速 $u_a=1\text{m/s}$
- ・水平面直達日射量 G_d および水平面散乱日射量 G_d ：北緯 26° および太陽定数 1370W/m^2 を用いて、それぞれBouguerおよびBerlageの式²⁴⁾より算出。

4. 結果

4.1 1枚目の仕切り板が吸収する日射量

本蒸留器は、その方位角および反射鏡の角度を変えることにより、太陽光を効率的に吸収することが出来るように設計されている。そこでまず、蒸留器の方位角および反射鏡の角度と1枚目の仕切り板が吸収する日射量の関係を計算した。本蒸留器が春分の日に北緯 26° （沖縄県那覇市に相当）に設置されたと仮定して、反射鏡の角度が 0° （水平）で、蒸留器の方位角 γ を図に示すそれぞれの値で一日中固定した場合の、1枚目の仕切り板が吸収する日射量の経時変化を図5に示す。なお、蒸留器の方位角は真南を 0° とし、時計回りを正とする。

蒸留器の方位角が負の場合（東向き）、日射吸収量は午前中にピーク値を取り、一方、正の場合（西向き）は午後にピーク値を取る。蒸留器をいずれの方位角で固定した場合でも、吸収日射量は、日照時間中は最低でも 30W/m^2 程度の値を示すが、これは、散乱日射光が天空の全ての角度において一様な強度を持つと仮定しているためであり、どの方位角においても散乱日射吸収量が等しくなるためである。方位角が正負いずれの場合も、その絶対値が大きいほど直達光および反射光を吸収できる時間が短くなり、特に $\gamma=-90^\circ$ （真東向き）および 90° （真西向き）においては、午前および午後のみにおいてしか直達および反射光を吸収できず、それ以外の時間は散乱光のみを吸収していることがわかる。

Fig. 5 Time variation of the solar radiation absorbed on the first partition varying with azimuth angle γ of the still on a spring equinox day

本蒸留器の向きを変える作業は人力を想定しているため、その作業回数は少ない方が望ましい。蒸留器の向きを太陽の南中時（正午頃）において1回だけ変え、午前および午後は蒸留器の方位角を固定し、その方位角の絶対値を等しくする（例えば午前は -15° 、午後は 15° ）と仮定した場合の、1枚目の仕切り板における1日の積算日射吸収量を表2に示す。方位角を $\pm 60^\circ$ 、すなわち午前に -60° 、午後に 60° とした場合の積算日射吸収量が最も大きく($21.9\text{MJ/m}^2\text{day}$)、この値は、積算日射吸収量が最大になるように、各時間において最高日射吸収量が得られる方位角に、 15° ずつ1日に何回も向きを変えた場合の日射吸収量($24.5\text{MJ/m}^2\text{day}$)よりも約10%低いだけであり、また、水平面全天日射量($22.9\text{MJ/m}^2\text{day}$)との差は約5%だけである。

表2. 方位角と1枚目の仕切り板における1日の積算日射吸収量

方位角、 ±°	0	15	30	45	60	75	90
積算日射 吸収量 $\text{MJ/m}^2\text{day}$	10.4	15.3	18.7	21.5	21.9	20.3	17.1

春分の日において、反射鏡の角度を 0° および蒸留器の方位角を $\pm 60^\circ$ （午前に -60° 、午後に 60° ）とした場合の、1枚目の仕切り板が吸収する総日射吸収量(Total)、直達日射吸収量(Direct)、反射日射吸収量(Reflected)および散乱日射吸収量(Diffuse)の経時変化を図6に示す。1枚目の仕切り板が吸収する総日射吸収量は、その大部分が直達日射吸収量および反射日射吸収量であり、散乱日射吸収量の寄与は非常に小さい。反射日射吸収量は直達日射吸収量と比較してわずかに低いものの、平板反射鏡を用いることにより、1枚目の仕切り板が吸収する日射吸収量が大きく増加することがわかる。

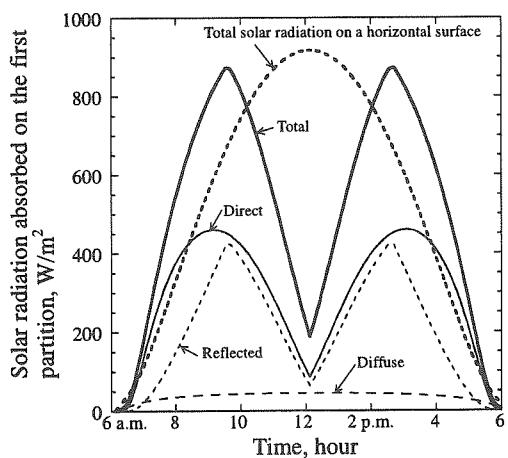


Fig. 6 Time variation of direct, reflected and diffuse solar radiation absorbed on the first partition on a spring equinox day

なお、本計算においては、平板反射鏡として反射率0.95の鏡面仕上げのアルミ板を想定しているが、製作コストの低減のため反射率の低い反射鏡を使用する場合、あるいは、使用環境に

よってはほこり等により反射率が低下する場合を考えられる。例えば、反射鏡の反射率が0.8と、本計算で仮定した値から約2割低下した場合においては、1枚目の仕切り板における1日の総日射吸収量の減少割合は約1割程度と予測できる。これは、1枚目の仕切り板における総日射吸収量の内、反射日射吸収量の割合が半分程度であるためである。

夏至において、反射鏡の角度を 0° とした場合の、図5と同様の計算結果を図7に示す。いずれの方位角においても、南中時付近において日射吸収量は著しく低下するが、これはその時間帯における太陽高度が高く、直達光および反射光とともに1枚目の仕切り板でほとんど吸収できないためである。夏至においても、蒸留器の向きは南中時に一回変えれば十分であり、蒸留器の方位角を午前に -90° 、午後に 90° とした場合の積算日射吸収量は $21.1\text{MJ/m}^2\text{day}$ であり、水平面全天日射量($28.1\text{MJ/m}^2\text{day}$)の約75%となることがわかる。

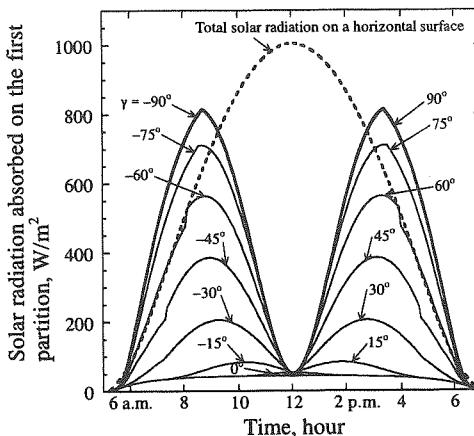
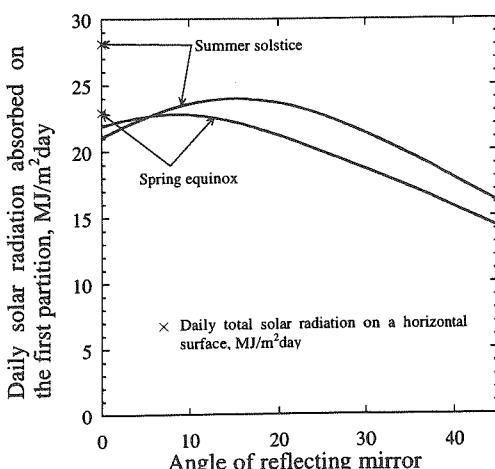
Fig. 7 Time variation of the solar radiation absorbed on the first partition varying with azimuth angle γ of the still on a summer solstice day

Fig. 8 Variation of the daily solar radiation absorbed on the first partition with an angle of the reflecting mirror

太陽の南中時にのみ蒸留器の向きを変えた場合の、反射鏡の角度と1枚目の仕切り板における1日の積算日射吸収量の関係を図8に示す。なお図に示す値は、それぞれの条件において、積算

日射吸収量が最大となる様に、午前および午後の方位角を決定して計算した値である。積算日射吸収量は、春分においては反射鏡の角度が約8°付近でピーク値(約22.8MJ/m²day)を取り、一方、夏至においては、反射鏡の角度が約15°においてピーク値(約24.0MJ/m²day)を取る。なお、この時の蒸留器の方位角は春分および夏至においてそれぞれ±60°および±90°である。したがって、蒸留器の方位角および反射鏡の角度を適切に決定することにより、蒸留器の向きを太陽の南中時に一回変えるだけで、1枚目の仕切り板における1日の積算日射吸収量は、春分においては全天日射量とほぼ同じ値になり、夏至においては全天日射量の約85%になることがわかる。

4.2 蒸留器から得られる蒸留量

夏至において、1枚目の仕切り板における1日の積算日射吸収量が最大となる反射鏡の角度(15°)および蒸留器の方位角(±90°)にした場合の、1枚目の仕切り板における日射吸収量および蒸留器全体から得られる総蒸留量の経時変化を図9に示す。なお総蒸留量は、蒸留部の単位面積当たりの値である。総蒸留量は日射吸収量とほぼ同様の変化を示し、その変化は日射吸収量に比べて約15分遅れているが、これは蒸留器の熱容量によるものである。なお、蒸留器内部の温度分布および各凝縮面での凝縮量の分布は、本蒸留器の蒸留部をヒートパイプと組み合わせた場合と同様の挙動を示すが、蒸留挙動の詳細および蒸留器の設計条件および操作条件が蒸留性能に与える影響等については、次報にて報告する予定である。

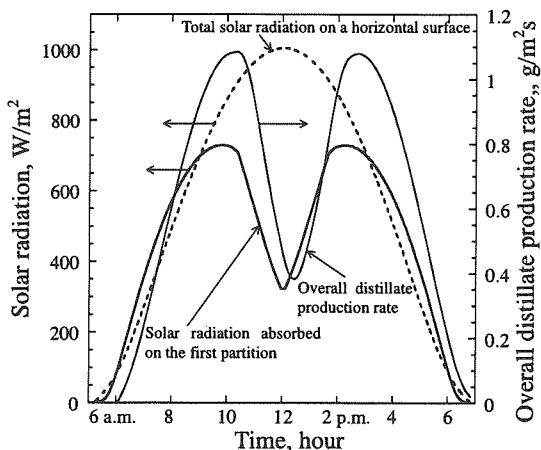


Fig. 9 Time variation of the solar radiation absorbed on the first partition and the overall distillate production rate of the still on a summer solstice day

春分および夏至において、蒸留器を南向きに固定しつつ反射鏡を設置しない場合、蒸留器を南向きに固定した場合、および南中時に蒸留器の向きを一回だけ変えた場合(春分においては反射鏡の角度=8°、蒸留器の方位角=±60°、および夏至においては反射鏡の角度=15°、蒸留器の方位角=±90°)の、蒸留器全体から得られる1日の総蒸留量を図10に示す。なお、蒸留器の方位角を南向きに固定した場合、図11に示すように、1枚目の仕切り板における1日の積算日射吸収量は、春分および夏至に

おいて鏡の角度がそれぞれ約10°および約30°で最大となるため、南向きで固定した場合の反射鏡の角度は、春分および夏至においてそれぞれ10°および30°として計算を行った。

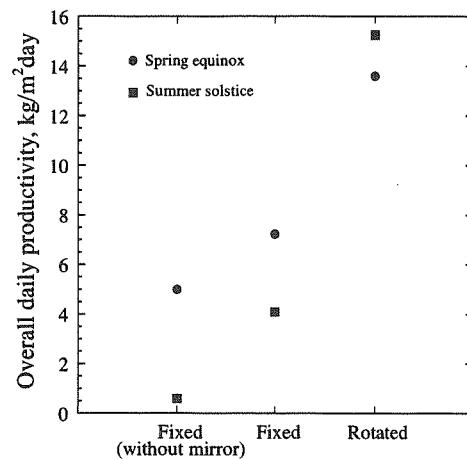


Fig. 10 Overall daily productivity of the fixed (without mirror), fixed and rotated stills

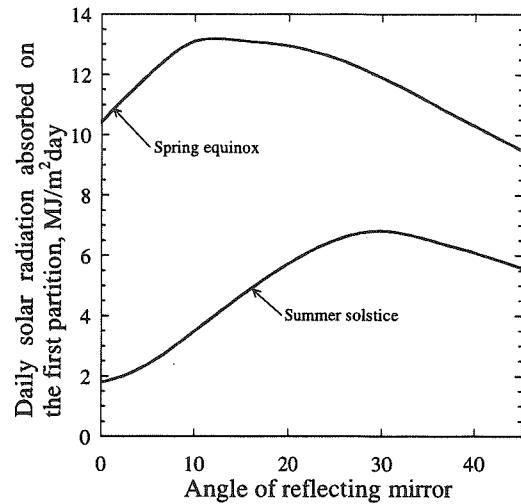


Fig. 11 Variation of the daily solar radiation absorbed on the first partition with an angle of the reflecting mirror without rotation of the still

南向きに固定しつつ反射鏡を設置しない場合、春分および夏至ともに蒸留量はほとんど得られないが、鏡を設置し、かつ南中時に一度だけ蒸留器を回転させることにより、蒸留量は著しく増加し、春分および夏至においてそれぞれ約27.2kg/m²dayおよび30.3kg/m²dayの蒸留量が得られることがわかる。

蒸留器を南向きに固定した場合、鏡を設置することにより、蒸留部の単位面積当たりの蒸留量は、春分および夏至においてそれぞれ約14.5kg/m²dayおよび約8.2kg/m²dayとなる。本蒸留器は反射鏡を使用しているため、蒸留性能を他の蒸留器と単純に比較することは難しいが、本蒸留器を固定して使用した場合においても、本蒸留器の蒸留量は、本蒸留器の蒸留部と同じ水盤面積を有する単段式のBasin型蒸留器の一般的な蒸留量(約5kg/m²day)の約3倍および約1.6倍となる。

本蒸留器の蒸留部(仕切り板の間隔5mm、仕切り板の枚数10枚)とヒートパイプ式太陽集熱パネルを組み合わせた蒸留器が、

北緯 26° に設置されたと仮定した場合、蒸留部の単位面積当りの蒸留量は、春分および夏至においてそれぞれ約 $31\text{kg/m}^2\text{day}$ および $39\text{kg/m}^2\text{day}$ と推算されている¹⁸⁾。反射鏡を用いた本蒸留器の蒸留量は、ヒートパイプ式太陽集熱パネルと組み合わせた場合に比べて若干少くなり、かつ、蒸留器の向きを1回あるいは複数回変えなければならないという手間も増えるが、本蒸留器の構造は非常に単純であり、発展途上国等においても自作が十分可能であると考えられる。

5. 結論

鉛直平行平板構造の多重効用型蒸留器と平板反射鏡を組み合わせた、新しい型の太陽熱蒸留器を提案し、その基礎的蒸留性能を数値シミュレーション計算により予測した。本研究の結果は以下のように要約できる。

1. 本蒸留器の向きを南中時に1回だけ変える場合、春分において反射鏡の角度が 8° 、および午前および午後の蒸留器の方位角がそれぞれ -60° および 60° の場合に、夏至において反射鏡の角度が 15° 、および午前および午後の方方位角がそれぞれ -90° および 90° の場合に、1枚目の仕切り板が吸収する1日の積算日射量が最大となり、その積算日射量は、春分においては水平面全天日射量とほぼ同程度の $22.8\text{MJ/m}^2\text{day}$ となり、夏至においては水平面全天日射量の約85%の $24.0\text{MJ/m}^2\text{day}$ となることがわかった。
2. 本蒸留器を南向きに固定して使用した場合、春分および夏至における蒸留部の単位面積当りの蒸留量は、それぞれ 14.5 および $8.2\text{kg/m}^2\text{day}$ となり、単段式蒸留器の約3倍および約1.6倍になることが予測された。
3. 本蒸留器の向きを南中時に1回だけ変えて使用した場合、春分および夏至における蒸留部の単位面積当りの蒸留量は、それぞれ 27.2 および $30.3\text{kg/m}^2\text{day}$ となることが予測された。
4. 本蒸留器の蒸留量は、本蒸留器の蒸留部をヒートパイプ式太陽集熱パネルと組み合わせた蒸留器よりも若干少なく、かつ、蒸留器の向きを変えるという作業が必要になるが、本蒸留器は構造が非常に単純であり、使用材料も入手しやすいものばかりであるため、発展途上国においても自作が十分可能であると考えられる。

記号表

c_{pbm}	海水の比熱, kJ/kgK
G_d	水平面直達日射量, W/m^2
H_v	水の蒸発潜熱, kJ/kg
l	長さ, m
m_f	海水供給量, $\text{kg/m}^2\text{s}$
P	大気圧, Pa
p_s	水の飽和蒸気圧, Pa
q_{sol}	日射量, W/m^2
s	塩分濃度, $\text{wt}\%$
t	時間, s
w	蒸留器と反射板の幅, m
α	吸収率
δ_{ag}	1枚目の仕切り板とカバーガラスの間隔, m

δ_{ag}	仕切り板の間隔, m	ϵ	放射率
ϕ	太陽高度	γ	蒸留器の方位角
φ	太陽の方位角	λ	熱伝導率, W/mK
θ	反射板の角度, $^{\circ}$	θ'	1枚目の仕切り板の反射板に対する鏡像面の角度, $^{\circ}$
ρ	反射率	σ	ボルツマン定数, $\text{W/m}^2\text{K}^4$
τ_g	ガラスの透過率		

添字

a	周囲空気	air	空気
c	対流	d	伝導
df	散乱	dr	直達
e	蒸発・凝縮	f	ウイックへの供給海水
g	カバーガラス	h	湿り空気
m	平均温度	mr	反射板
p	仕切り板	pi	i 枚目の仕切り板
r	放射	re	反射

参考文献

- 1) 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
- 2) R. V. Dunkle, Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still, *Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, U.S.A.*, Part 5, 1961, 895
- 3) 田中耕太郎, 太陽熱を利用した海水淡水化蒸留システムに関する基礎研究, 慶應大学, 博士論文, (1985)
- 4) 津村健児・山下正幸・渡辺裕人・稻葉秀達, 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) R. C. Ouahes and P. J. Le Goff, A Hardy, High-Yield Solar Distiller of Brackish Water, *Desalination*, 67(1987), 43
- 7) 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
- 8) K. Ohshiro, T. Nosoko and T. Nagata, A Compact Solar Still Utilizing Hydrophobic Poly(Tetrafluoroethylene) Nets for Separating Neighboring Wicks, *Desalination*, 105(1996), 207
- 9) B. Bouchekima, B. Gros, R. Ouahes and M. Diboun, Performance Study of the Capillary Film Solar Distiller, *Desalination*, 116(1998), 185
- 10) K. Fukui, T. Nosoko, H. Tanaka and T. Nagata, A Maritime Lifesaving Solar Distiller, *Thermal Science & Engineering*, 10-4(2002), 63
- 11) K. Fukui, T. Nosoko, H. Tanaka and T. Nagata, A new maritime lifesaving multiple-effect solar still design, *Desalination*, 160(2004), 271
- 12) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, A highly productive basin-type – multiple-effect coupled solar still, *Desalination*, 130(2000), 279
- 13) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, Parametric investigation on a basin-type – multiple-effect coupled solar still, *Desalination*, 130(2000), 295
- 14) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, Improvement of performance of a basin type-multiple effect coupled solar still by increasing the number of distillation cells with narrow diffusion gaps, *Proc. 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Kobe, Japan*, October 1-6, 2000, 1-253
- 15) 田中大・野底武浩・長田孝志・Basin—多重効用複合型海水淡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
- 16) H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, Experimental study of basin-type, multiple-effect, diffusion-coupled solar still, *Desalination*, 150(2002), 131
- 17) 田中大・中武靖仁・平瀬国男・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, 太陽エネルギー, 28-6(2002), 33

- 18) 田中大・中武靖仁、ヒートパイプと組み合わせた太陽熱蒸留器の特性
(第2報: 気象条件がおよぼす蒸留性能への影響)、太陽エネルギー、
29-5(2003), 49
- 19) 田中大・中武靖仁、ヒートパイプと組み合わせた太陽熱多重効用型蒸
留器の特性 (第3報: 蒸留器の設計および操作条件)、太陽エネルギー、
30-1(2004), 41
- 20) H. Tanaka, Y. Nakatake, A vertical multiple-effect diffusion-type solar still
coupled with a heat-pipe solar collector, *Desalination*, 160(2004), 195
- 21) 田中大・中武靖仁・渡邊勝宏・田中真人、太陽熱蒸留器に用いるヒー
トパイプ式太陽集熱パネルの屋内実験, *J. Ecotech. Res.*, 10-1(2004), 15
- 22) 田中大・中武靖仁・田中真人、ヒートパイプを用いた太陽熱蒸留器の屋
内実験、太陽エネルギー、30-5(2004), 掲載予定
- 23) M. A. S. Malik and V.V. Tran, A simplified mathematical model for predicting
the nocturnal output of a solar still, *Solar Energy*, 14(1973), 371
- 24) 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