

傾斜ウィック型太陽熱蒸留器とその性能

Tilted Wick Type Solar Stills and their Performance

田 中 耕 太 郎*
Kotaro TANAKA渡 部 康 一**
Koichi WATANABE

Abstract

This paper deals with the experimental and analytical study on the solar stills. The conventional single roof-
ed basin type solar still and the newly designed tilted wick type solar stills have been constructed and the ex-
perimental measurements on the performance of the solar stills have been conducted under the actual outdoor
conditions. The results showed the superiority of the tilted wick type solar still mainly due to its small heat
capacity.

Furthermore, the experimental measurements on the performance of the tilted wick type solar still have been
carried out under the indoor simulated conditions using with conventional illuminating lamps. The indoor
measurements have been performed both under the steady and non-steady operating conditions and the measur-
ed performance was found in good agreement with the results obtained by the theoretical analysis.

On the other hand, based upon the energy balance equations concerned with the solar still, the heat and mass
transfer processes have been studied analytically and the digital simulation method has been developed. The
simulated results showed a satisfactory agreement with both of the indoor and outdoor measured results and the
effects of various factors on the distilling performance have been revealed. Thus, the performance of the
solar stills can be predicted by the present simulation methods and this would become useful for further deve-
lopments of more efficient solar stills.

主要記号の説明

B : 無次元化した濃度推進力
 C : 蒸留器 1 m^2 あたりの蓄熱容量 [$\text{kJ/m}^2\text{K}$]
 d : 厚さ [m]
 k : 透過率
 Le : レイス数
 $\dot{m}_{in}$: 供給塩水量 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
 $\dot{m}_{loss}$: 排水量 [$\text{kg/m}^2\text{s}$]
 $\dot{m}_{out}, \Sigma \dot{m}_{out}$: 蒸留収量 [$\text{kg/m}^2\text{s}, \text{kg/m}^2\text{d}$]
 Nu : ヌセルト数
 P : 圧力 [Pa]
 $\dot{q}$: 熱流束 [kW/m^2]
 r : 反射率
 Ra : レイレイ数
 Sc : シュミット数
 Sh : シャーウッド数
 t : 温度 [$^{\circ}\text{C}$]
 U : 風速 [m/s]
 α : 吸収率
 η : 蒸留器の効率

θ : 蒸留器傾斜角度 [$^{\circ}$]
 ξ : 水の蒸発潜熱 [kJ/kg]
 τ : 時間 [min]
添字
 a : 周囲大気
 b : 蒸留器側壁および底面から熱伝導
 c : 対流
 e : 蒸発・凝縮
 f : 塩水の給・排水
 g : カバーガラス, カバーガラスから周囲
 gi : カバーガラス内面
 go : カバーガラス外面
 r : 放射
 s : 太陽からカバーガラスへの放射
 w : ウィック, ウィックからカバーガラス
 ws : ウィック表面

* 慶応義塾大学大学院工学研究科 学生

Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Science and Technology, Keio
University

Graduate Student

* * 慶応義塾大学理工学部 教授

Professor

1. 緒 言

地球上には人間の生活に欠くことのできない真水を得ることが難しい地域が数多く存在する。本研究は、それらの真水の得にくい地域の人々に太陽エネルギーを利用して海水や塩分を含んだ地下水などを脱塩し、簡便にかつまた良質な生活用水を供給するための太陽熱蒸留システムに注目し、システム性能の向上に関する実験的および理論的研究を実施した。

太陽エネルギーを熱として利用して海水などを淡水化する方法は従来より数多く提案されている⁽¹⁾が、その基本原理を大別すると直接法と間接法と呼ばれる方法に大別される。直接法は太陽エネルギーを熱として集熱する部分と蒸発・凝縮する部分が一体となった方式であり、間接法は両者を分離したものである。

本研究は、直接法に属する太陽熱蒸留器について注目したが、その特徴は

- (1) 構造が簡単であり、建設費が安い。
- (2) システムの保守・運転が容易であり、自動化し易い。
- (3) 作動部分が少ないために運転コストが僅かである。
- (4) 小規模に分散している水需要に適する。

などがあげられる。一方、直接法は間接法と比較して蒸留器単位面積あたりの造水能力が低いという欠点がある。

間接法は現在、蒸発法、逆浸透法、電気透析法などの数多くのシステムが提案されている。それらのシステムは、従来の化石燃料を使用するシステムに全面的に、あるいは補助的に太陽エネルギーの利用を組み合わせたものである。間接法はシステムが複雑となるために建設費が高くなることが問題となるが、直接法と比較して中規模の造水に適し、造水能力は高く、今後の研究が期待される。

太陽熱蒸留器の歴史は比較的古く、世界で最初に実用規模で運転が行なわれたのは、1872年にチリのラスサリナスの鉱山に作られた蒸発面積 $4,500\text{m}^2$ 、造水量 $15\text{m}^3/\text{d}$ の蒸留器であるといわれている。その後も数多くの大規模な実用化プラントが、米国、オーストラリア、ギリシャ、インド、メキシコ、スペイン、チュニジア、ソ連などの各国に建設された。特にギリシャにおいては淡水の不足している小さな島が数多く存在するため、現在までに6つの島々に合計で蒸発面積 $20,000\text{m}^2$ 以上の蒸留器が建設されており、現在も稼

動して島民に生活用水を供給している⁽²⁾。また世界最大の蒸留器はパキスタンのグワダールに建設された蒸発面積 $9,000\text{m}^2$ の蒸留器であるといわれている。我が国においても試験研究プラントが機械システム振興協会により瀬戸内海の屏風島に建設された。この試験プラントの造水能力は $2\text{m}^3/\text{d}$ 、蒸発面積 600m^2 であり、1977年より運転研究が実施されている。

従来のこれらの太陽熱蒸留器はすべて後述する Basin 型蒸留器と呼ばれる型式である。本報では、この Basin 型蒸留器とその性能向上を目指して改良を行なった傾斜ウィック型蒸留器の両者について、一連の実験的、理論的研究を実施した結果について報告するものである^{(3)~(8)}。

2. 太陽熱蒸留器の構造および原理

太陽熱蒸留器の構造は図1、図2および図3に示すような簡単なものであり、図1は片屋根式 Basin 型蒸留器、図2、図3は傾斜ウィック型蒸留器をそれぞれ示す。

片屋根式 Basin 型蒸留器は底部に浅い水槽があり、この水槽に海水やかん水を給水して溜めておく。蒸留器の側壁および水槽底部は断熱されていることが望ましく、蒸留器の上面は一般に傾斜させたカバーガラスにより密閉されている。

蒸留の原理は、太陽光がカバーガラスを透過し、水槽内の塩水および黒色に塗布してある水槽底部で吸収され熱となり、水槽内の塩水の温度を上昇させ、水面からの蒸発を促進する。蒸発した水蒸気は、外面が外

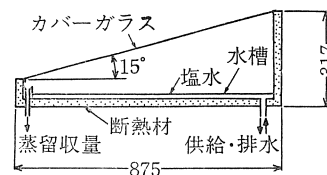


図1 片屋根式 Basin 型蒸留器の構造

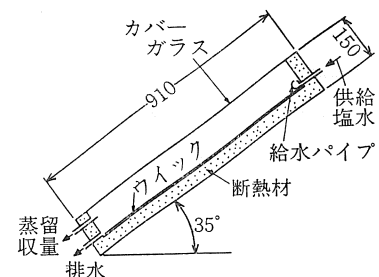


図2 傾斜ウィック型蒸留器 (Type 1) の構造

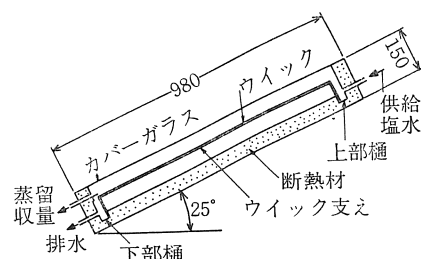


図3 傾斜ウィック型蒸留器 (Type 2) の構造

気と接触しているために温度の低いカバーガラス内面で凝縮し、傾斜させてあるカバーガラス内面に沿って流下し、カバーガラス下端に設けた流路に集められ蒸留された淡水として得られる。水槽内に供給された塩水は蒸発が進み塩分の濃度が増加すると塩が析出するため、ある程度までの濃縮比におさえる必要があり、水槽には適度の水深と排水、給水をすみやかに行なえる設備が必要である。

図2および図3に示した傾斜ウィック型蒸留器の原理は上述した Basin 型蒸留器とほぼ同様であるが、大きな相違点は傾斜ウィック型蒸留器では蒸留器上部より塩水を供給し、傾斜させたウィックに浸透・流下させる点である。供給された塩水はウィックの中を流れ落ちる間に黒色であるウィック面が太陽光を受けて温度が上昇するため蒸発する。ウィックに含まれる供給塩水は濃度を高くしないために給水はウィック面に対して均一に、またウィック面に塩が析出する以前に蒸留器下部より排水する必要がある。

3. 実験装置

3.1 屋外実験装置

本研究で製作した片屋根式 Basin 型蒸留器は蒸発面積 1 m^2 ($1.25\text{ m} \times 0.80\text{ m}$)、カバーガラス面積 1.12 m^2 ($1.28\text{ m} \times 0.87\text{ m}$) を有し、カバーガラスは厚さ 2 mm の普通板ガラスを使用した。カバーガラスは水平より 15° に傾斜させ、水面とカバーガラスの距離は前方で約 5 cm 、後方で約 25 cm である。蒸留器の側壁および底面は厚さ 25 mm の硬質ウレタンフォーム断熱材により断熱されている。蒸留器は慶応義塾大学矢上台図書館屋上（北緯 $35^\circ 33'$ 、東経 $139^\circ 39'$ ）に真南に向けて設置し、実際の屋外条件下において種々の性能を測定した。供給塩水に関する実験条件は初期注水量を蒸留器面積あたり 12 l とし、測定日前日の日没後注水を行なった。

図2に示す傾斜ウィック型蒸留器 (Type 1) は、ウィック面への給水を上部に水平に固定したパイプで行なう型式である。図3に示す蒸留器 (Type 2) は、Type 1 の改良として供給塩水がウィックに浸透することを利用して給水する方式を採用したものであり、この方式は傾斜ウィック型蒸留器の給水方式として非常に有効であると考えられる。その理由として、給水をパイプで行なう方式は本研究で製作した程度の横幅が小さいものであれば問題はないが、実際の横幅の大きい蒸留器に対してはウィック面に微量の給水を均一に行なうことが難しくなるためである。その点改良を

行なった Type 2 の給水方式は蒸留器内上部樋部を水平に設置し、その水位を一定に保つことにより横幅の大きい蒸留器に対しても簡単にウィック面に均一に塩水を供給することが可能である。

Type 1 および Type 2 の傾斜ウィック型蒸留器の蒸発面積はそれぞれ Type 1 で 0.48 m^2 、Type 2 で 0.52 m^2 であり、カバーガラス面積は Type 1 で 0.48 m^2 、Type 2 で 0.59 m^2 である。Type 2 の蒸留器はカバーガラス面積と蒸発面積が異なるため平均値 0.55 m^2 を蒸留器面積として計算に使用した。カバーガラスは厚さ 2 mm の普通板ガラスを使用し、ウィック面とカバーガラス面の距離は Type 1 で 10 cm 、Type 2 で 5 cm である。蒸留器の側壁および底面は片屋根式 Basin 型蒸留器の場合と同様の断熱材 (Type 1 では施工厚さ 45 mm 、Type 2 では施工厚さ 50 mm) により周囲と断熱されている。また、今回の実験に使用したウィック素材としては市販の黒色綿タオル地 (厚さ約 4 mm) を使用した。

3.2 室内実験装置

屋外においては気象条件の変動が大きく、蒸留器の性能解析が難しくなる要素も多いため、屋外実験と併せて室内においても同様な実験的研究を実施する目的で太陽の代りに赤外線電球を利用した実験装置を製作した。図4に室内実験装置の概要を示す。電球は反射型赤外線電球 ($375\text{ W} \times 19$ 個) を使用し、近赤外域の 1.0 kW/m^2 までの放射熱流束を 1 m 離れた蒸留器に与えることができるように設置した。また、蒸留器側方に備えつけたファンにより最大風速 2.5 m/s までの風を蒸留器側方より送ることが可能である。蒸発・凝縮によって得られた蒸留水は蒸留器下部に設置した化学天秤秤上の計測用容器に導かれ、短い時間内に得られる少

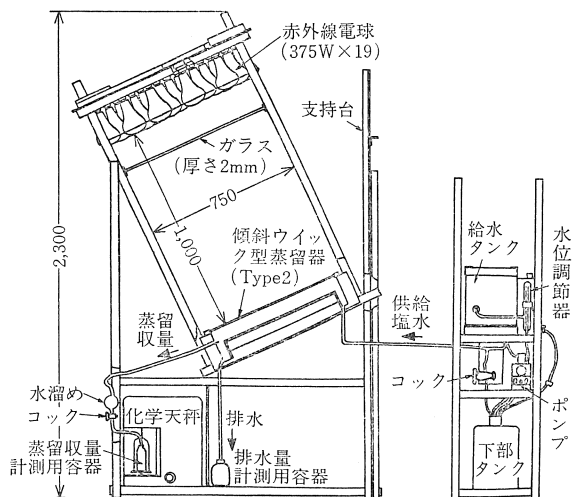


図4 室内実験装置の概要

量の蒸留収量を敏速にかつ精度よく測定できるようにした。蒸留器への塩水の供給は給水タンクの水位を一定にする方法で行なった。この室内実験装置に屋外の傾斜ウィック型蒸留器 (Type 2) と同型式の蒸留器 (蒸発面積 0.33m^2 , カバーガラス面積 0.41m^2 , 蒸留器面積 0.37m^2) を設置して実験を実施した。

4. 理論解析

4.1 蒸留器内外の熱・物質移動

蒸留器に関する理論的解析として蒸留器内外の熱移動および物質移動に着目した。図5は傾斜ウィック型蒸留器に関する各種の熱移動・物質移動の様子を示したものである。なお、Basin型蒸留器については給排水の方法が異なるが熱移動・物質移動の様子はほぼ同様に考えることが可能であり、以下傾斜ウィック型蒸留器について述べる。

太陽から傾斜しているカバーガラス面に入射する放射熱流束 $\dot{q}_s$ はカバーガラス部を透過し、黒色であるウィック表面に到達して吸収される。カバーガラス部における反射率 r_g , 透過率 k_g , 吸収率 α_g は入射角度による関数として与え、またウィック表面における吸収率 α_w は一定値 0.9 であるとした。

ウィック部で吸収された放射熱流束は塩水の給排水による熱損失量 $\dot{q}_f$, 側壁および底面から熱伝導による熱損失量 $\dot{q}_b$, またウィック面からカバーガラス面へは対流による熱流束 $\dot{q}_{cw}$, 蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$, 放射による熱流束 $\dot{q}_{rw}$ の各種の形態により移動する。

カバーガラス外面から蒸留器周囲大気への熱移動は対流による熱流束 $\dot{q}_{og}$, 放射による熱流束 $\dot{q}_{rg}$ となる。

蒸留器に関する蓄熱量はカバーガラスに対する蓄熱量 $\dot{q}_g$, ならびに蒸留器内のウィック部に対する蓄熱量 $\dot{q}_w$ とに分けて考慮した。

次に蒸留器に関する水の移動について考えてみると供給塩水量 $\dot{m}_{in}$, 蒸留して得られる蒸留収量 $\dot{m}_{out}$, 蒸発せずに蒸留器外に排水される量 $\dot{m}_{loss}$ が次の関係によって示される。

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} + \dot{m}_{loss} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ は蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$ と水の蒸発潜熱 ξ より次式で相関できる。

$$\dot{m}_{out} = \frac{\dot{q}_{ew}}{\xi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

蒸留器の性能を表わす効率 η は入射する放射熱流束 $\dot{q}_s$ に対する蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$ の比として次式により定義した。

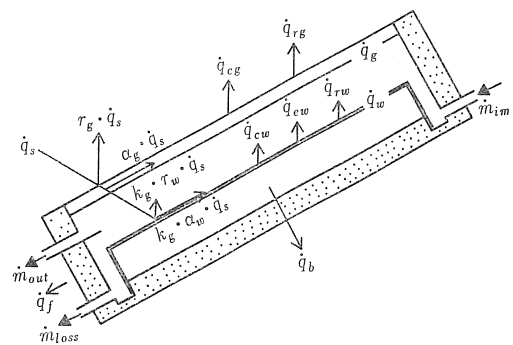


図5 傾斜ウィック型蒸留器に関する熱移動・物質移動の形態

$$\eta = \frac{\dot{q}_{ew}}{\dot{q}_s} = \frac{\xi \cdot \dot{m}_{out}}{\dot{q}_s} \quad \dots\dots\dots (3)$$

4.2 蒸留器内外の各熱移動量の計算方法

蒸留器に関する熱移動量の中で特に重要であるのはウィック面からカバーガラス面への蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$ である。本研究では、この物質移動現象を以下に述べる熱移動現象との相以性に注目して計算した。なお、以下の議論では、蒸発に寄与する熱流束は凝縮に関与するそれに等しいと仮定している。

最初に、蒸発・凝縮変化を伴わない対流によるウィック面からカバーガラス面への熱流束について考える。蒸留器内の対流は密閉平行傾斜二平面間の自然対流現象であると考えられ、次式により計算できる⁽⁹⁾。

$$Nu = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right]^* \left(1 - \frac{1708 (\sin \theta)^{1.6}}{Ra \cos \theta} \right) + \left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで*は〔〕内が負の場合0とすることを示し、 Nu はヌセルト数、 Ra はレイレイ数、 θ は水平面からの角度を示す。また、蒸留器内での物質状態は飽和湿り空気と仮定し、ヌセルト数、レイレイ数の計算に使用する各物性値はウィック面とカバーガラス内面の平均温度を代表温度とした値を使用した。代表長さはウィック面とカバーガラス面の距離とした。式(4)により、対流による熱流束 $\dot{q}_{cw}$ はウィック面温度 t_{ws} , カバーガラス内面温度 t_{gi} を与えることにより求めることができる。

熱移動と物質移動の相似関係については従来からいくつかが方法が提案されているが、本研究では Chilton-Colburn の相似則として次式を計算に使用した。

$$Sh = Nu \cdot Le^{\frac{1}{3}} (P/P_{am}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここでは Sh はシャーウッド数、 Le はルイス数、 P は全圧(大気圧)、 P_{am} はかわき空気の分圧の対数平均値を示す。計算に使用する各物性値および代表長さは前と同様にした。

つぎに、相似則の適用条件として次式に示す無次元化された濃度推進力 B をシュミット数 Sc の $2/3$ 乗で割った値について考え、熱移動に対する物質移動の影響について検討した。⁽¹⁰⁾

$$\left| \frac{B}{Sc^{2/3}} \right| < 0.1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで

$$B = (w_{ws} - w_{gi}) / (1 - w_{gi}) \dots\dots\dots (7)$$

w_{ws} , w_{gi} はウィック面およびカバーガラス内面温度における水蒸気の質量分率を示す。蒸留器に関しては物質移動の影響が大きい場合に対しても式(6)の関係が成り立ち、相似則の適用範囲内であると考えられる。したがって、式(5)よりウィック面からカバーガラス面への物質移動量、すなわち蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ が、また式(2)より蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$ が求められる。

ウィック面からカバーガラス面への放射熱流束 $\dot{q}_{rw}$ およびカバーガラスから周囲大気への放射熱流束 $\dot{q}_{rg}$ は Stefan-Boltzmann の法則により計算した。ここでカバーガラスから周囲大気への放射熱流束に関して、室内実験においては電球を用いた点を形態係数の算定の際に考慮し、屋外実験においては天空温度が地表の外気温度 t_a より12K低いと仮定して計算した。

カバーガラス面から周囲大気への対流による熱流束 $\dot{q}_{cg}$ に関しては、自然対流の場合には藤井らの式⁽¹¹⁾、強制対流の場合には熱流束一定の平板からの層流熱伝達と仮定して計算を行なった。

塩水の給排水による熱損失量 $\dot{q}_f$ は蒸留器入口・出口温度差および供給・排水量より計算し、側壁および底面から熱伝導による熱損失量 $\dot{q}_b$ は蒸留器内部と周囲大気との温度差により計算した。

カバーガラス部への蓄熱量 $\dot{q}_g$ はガラスの比熱と入射放射熱流束の時間変化によるカバーガラスの温度変化に基づき、蒸留器 1 m^2 あたりの蓄熱容量を $C_g = 3\text{ kJ/m}^2\text{K}$ として計算した。蒸留器内のウィック部に対する蓄熱量 $\dot{q}_w$ に関しては、ウィックに含まれている塩水の質量、上下の樋部内に残存する塩水量より計算した。ここで蒸留器内の他の構成要素に関する蓄熱量は蒸留器内の塩水に対する蓄熱量が大きいため無視できると考えた。本研究で製作した傾斜ウィック型蒸留器 (Type 2) の単位面積あたりに含まれる塩水量は約 5 l であり、蒸留器 1 m^2 あたりの蓄熱容量は $C_w = 20\text{ kJ/m}^2\text{K}$ と見積った。

4. 3 電算機を用いたシミュレーションによる計算方法

蒸留器内外の各熱移動量を蒸留器のウィック部、カ

バーガラス部、蒸留器全体についての収支として考えるとそれぞれ次式が得られる。すなわち、蒸留器内の塩水を含むウィック部については、

$$k_g \alpha_w \dot{q}_s = \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ew} + \dot{q}_{rw} + \dot{q}_b + \dot{q}_f + \dot{q}_w \dots\dots (8)$$

カバーガラス部については、

$$\dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ew} + \dot{q}_{rw} + \alpha_g \dot{q}_s = \dot{q}_{cg} + \dot{q}_{rg} + \dot{q}_g \dots\dots (9)$$

また、蒸留器全体に関しては、

$$(k_g \alpha_w + \alpha_g) \dot{q}_s = \dot{q}_{cg} + \dot{q}_{rg} + \dot{q}_g + \dot{q}_b + \dot{q}_f + \dot{q}_w \dots\dots\dots (10)$$

の各式が成り立つ。上式の各熱流束をウィック面温度 t_{ws} 、カバーガラス内面温度 t_{gi} 、外面温度 t_{go} 、および周囲大気温度 t_a を用いて表わし、太陽または電球から入射する放射熱流束、風などの条件を考慮して式(8)~(10)を満たすように繰り返し計算を行ない、各熱流束の値を決定することにより電算機を用いたシミュレーションによる計算が行なえる。ここでカバーガラス内面温度 t_{gi} 、外面温度 t_{go} 間の関係としては次式を用いた。

$$(t_{gi} - t_{go}) \lambda_g / d_g = \dot{q}_{cg} + \dot{q}_{rg} \dots\dots\dots (11)$$

ここで λ_g はガラスの熱伝導率、 d はカバーガラスの厚さである。

5. 結 果

5. 1 片屋根式 Basin 型蒸留器と傾斜ウィック型蒸留器の性能比較

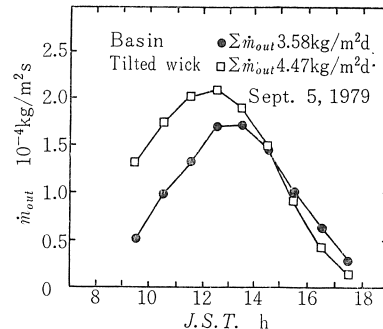


図 6 傾斜ウィック型蒸留器 (Type 1) と片屋根式 Basin 型蒸留器の 1 日の蒸留性能の経時変化

図 6 に片屋根式 Basin 型蒸留器と傾斜ウィック型蒸留器 (Type 1) の 1 日の代表的な蒸留性能の比較を示す。傾斜ウィック型蒸留器の供給塩水量に関する実験条件は $\dot{m}_{in} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$ とした。比較した 2 つの蒸留器は断熱材厚さおよびカバーガラス傾斜角度が異なるなど両者を単純に比較することはできないが、図 6 より蒸留性能の特徴として明らかなことは午前中の蒸留収量の値に大きな差が両者間に生じることである。また、このことは 1 日の蒸留収量の値 $\Sigma \dot{m}_{out}$ の値に大きな影響を与え、傾斜ウィック型は Basin 型

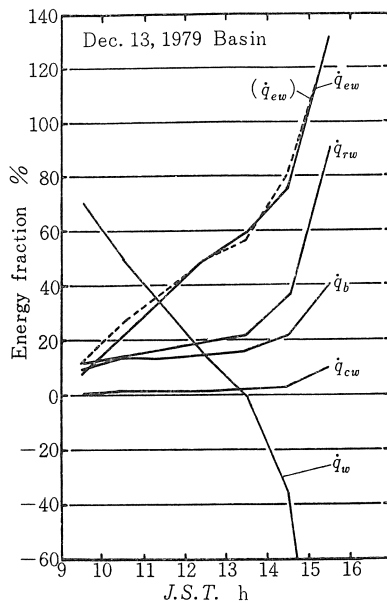


図7 片屋根式Basin型蒸留器に関する熱移動の割合の経時変化

に対し約25%ほど蒸留収量の値が増加していることがわかる。

片屋根式 Basin 型蒸留器の午前中の蒸留性能が低いことは図7, 図8によりよく説明される。これらの図は2つの蒸留器の屋外実験における蒸留器各部温度の実測値より式(8)右边に関係する各熱流束について4.2節で述べた方法により計算し、入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ に対する割合を示したものである。ここで図中の $\dot{q}_{ew}$ は式(5)による値を示し、破線で示した $(\dot{q}_{ew})$ は実際の屋外実験における実測により得られた蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ の値より式(2)で計算した値を意味している。

これらの図より、片屋根式 Basin 型蒸留器は蒸留器内の塩水に対する蓄熱量 $\dot{q}_w$ が大きく、したがって午前中には水槽内の塩水を暖めるために多くの熱量を必要とするため蒸留器内の温度上昇が遅く、午前中の時

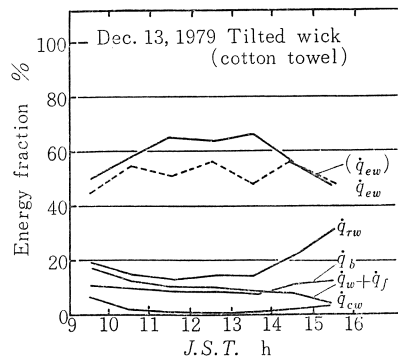


図8 傾斜ウィック型蒸留器 (Type 1) に関する熱移動の割合の経時変化

一方、傾斜ウィック型蒸留器に関しては、図8に示すように1日中各熱流束の割合はほぼ一定であることがわかる。したがって、傾斜ウィック型蒸留器における蒸留収量の値は入射する放射熱流束の増加に伴いほぼ時間遅れを示さずに増加し、蒸留器の効率も高い値を示す。

図9は1日の蒸留収量の値 $\Sigma \dot{m}_{out}$ とそれぞれの蒸留器カバーガラスの傾斜面に対する1日の入射放射熱流束の合計値 $\Sigma \dot{q}_s$ の関係について、2種類の蒸留器の性能を比較して示したものである。ここで図9における $\Sigma \dot{q}_s$ の値に関して両蒸留器の形状が異なるため次のように考慮した。傾斜ウィック型蒸留器に関してはカバーガラス面積と蒸発面積がほぼ等しく、また両面は接近しているため側壁などの影響は無視できると考えられる。そこでカバーガラス単位面積あたりの入射放射熱流束をそのまま $\Sigma \dot{q}_s$ とした。一方、Basin 型蒸留器に関してはカバーガラス面積と蒸発面積が異なるためカバーガラス単位面積あたりの入射放射熱流束にカバーガラス面積と蒸発面積の比1.12および背面、側面による反射、側面による影の影響を考慮した係数を乗じた値を $\Sigma \dot{q}_s$ とした。この図より傾斜ウィック型蒸留器の性能がかなり Basin 型蒸留器に対して優れていることがわかり、図9の結果では同一の $\Sigma \dot{q}_s$ の値に対して前者の蒸留収量は約20~50%も改善されていることがわかる。

5.2 室内実験結果

室内においては傾斜ウィック型蒸留器 (Type 2) に関して実験を実施した。実験は電球からの入射放射熱流束を一定とし、蒸留器を定常入力状態とした場合の性能測定および放射入力を時間に対して変化させた非定常入力状態における過渡

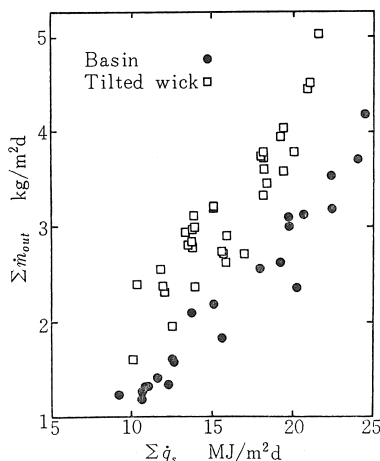


図9 傾斜ウィック型蒸留器 (Type 1) と片屋根式 Basin 型蒸留器の蒸留性能の比較

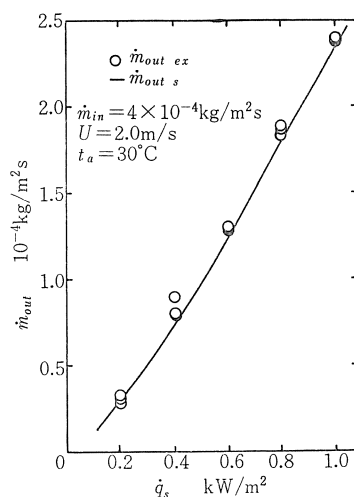


図10 室内定常状態における実験結果

特性の測定について実施した。

定常状態における実験結果の一例を図10に示した。実験条件は蒸留器への供給塩水量 $\dot{m}_{in}=4 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 、風速 $U=2.0 \text{ m/s}$ 、周囲大気温度 $t_a=25^\circ \text{C}$ 、蒸留器の傾斜角度 $\theta=25^\circ$ であり、入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ を 0.2 kW/m^2 から 1.0 kW/m^2 までの値になるよう変化させた場合の蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ の値を図示してある。

入射放射熱流束と蒸留収量はほぼ直線関係となるが、蒸留収量は入射放射熱流束の値が大きくなると多少1次関数よりも大きな傾きを示す。図中に示された実線は4.3節で述べた電算機を用いたシミュレーション手法により計算を行なった結果であり、実測値と極めてよい一致を示すことがわかる。

図11は図10と同様の実験条件における蒸留器各部の温度測定値より、蒸留器ウィック部に関する各熱流束、すなわち式(8)の右辺の各熱流束について計算した結果をそれぞれ示したものである。図11(a)は各熱流束の入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ に対する変化の様子を、同図(b)は各熱流束の $\dot{q}_s$ に対する割合を示す。これらの図より、ウィック面からカバーガラス面への蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$ が他の熱流束に対し大きな割合となり、 $\dot{q}_s$ の増加とともに30%から55%にも達することがわかる。また図中の実線は電算機を用いたシミュレーションによる計算結果であり、実測値であるプロットの傾向と良く一致している。

つぎに、電算機を用いたシミュレーション手法を用いた計算結果について述べる。図12(a)では入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ を 0.2 kW/m^2 とした場合、図12(b)では 0.8 kW/m^2 とした場合の蒸留器内外の各熱流束の割合を示したものである。これらの図より、蒸留器側壁および底面からの伝導による熱損失量 $\dot{q}_b$ および塩水の給排水による熱損失 $\dot{q}_f$ はそれぞれ約10%程度であることがわかる。また、ウィック面からカバーガラス面への各熱流束に関しては、入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ が大きな場合の方が蒸発・凝縮による熱流束 $\dot{q}_{ew}$ の割合が大きくなる。したがって $\dot{q}_s$ が大きな値の方が蒸留器の効率は向上し、この場合は式(3)より $\dot{q}_s=0.2 \text{ kW/m}^2$ の場合に $\eta=36\%$ 、 $\dot{q}_s=0.8 \text{ kW/m}^2$ の場合に $\eta=52\%$ である。

定常状態のもとで蒸留器に対する各条件を変化させた場合の電算機を用いたシミュレーションによる計算結果を図13から図17に示した。図13は供給塩水量 $\dot{m}_{in}$

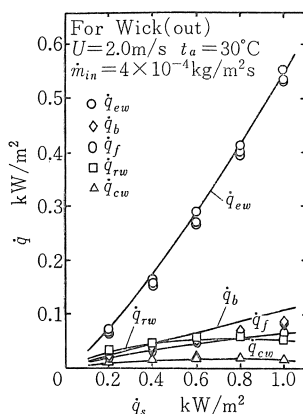


図11 (a) 定常状態における各熱流束の値

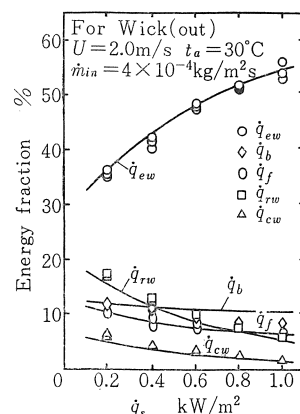
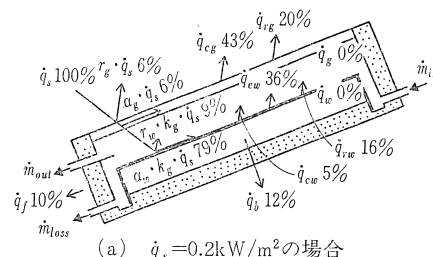
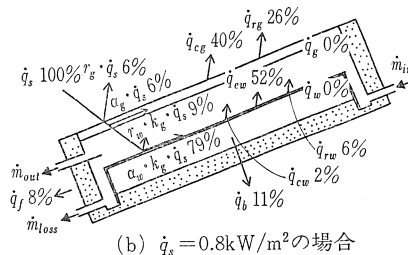


図11 (b) 定常状態における各熱流束の割合



(a) $\dot{q}_s=0.2 \text{ kW/m}^2$ の場合



(b) $\dot{q}_s=0.8 \text{ kW/m}^2$ の場合

図12 定常状態における蒸留器内外の熱移動の割合

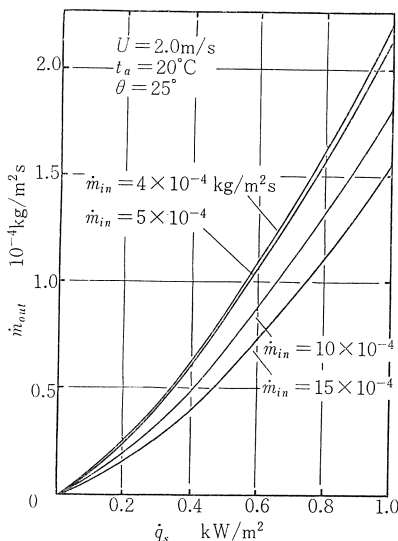


図13 入射放射熱流束の影響

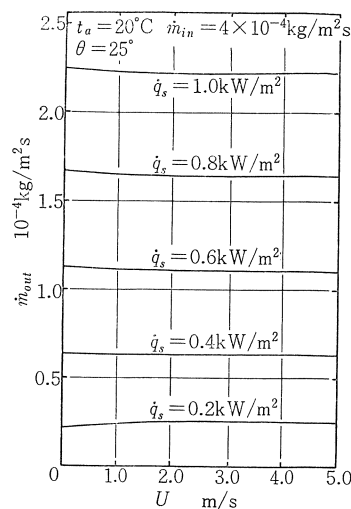


図14 風速の影響

を変えた場合の蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ に対する入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ の影響、図14は風速 U を変化させた場合の影響、図15は供給塩水量 $\dot{m}_{in}$ を変化させた場合の影響、図16

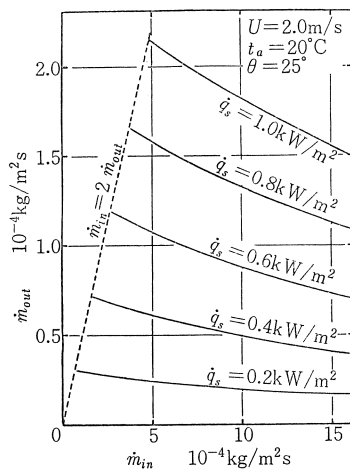


図 15 供給塩水量の影響

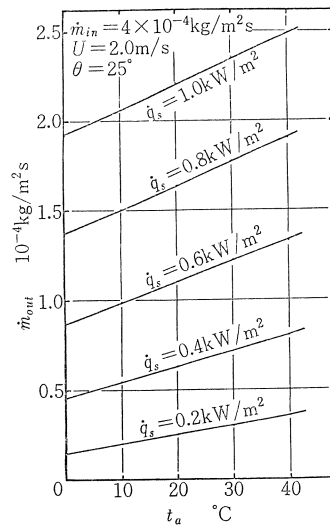


図 16 周囲大気温度の影響

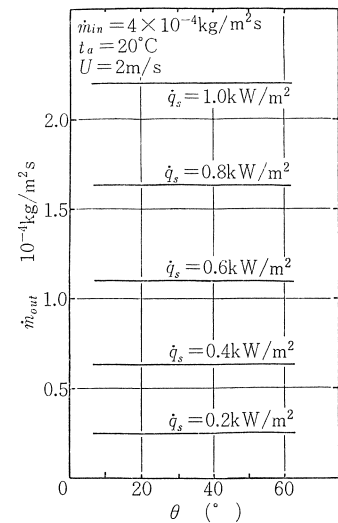


図 17 蒸留器傾斜角度の影響

は周囲大気温度 t_a の影響、図17は蒸留器傾斜角度の影響をそれぞれ示す。以上の計算結果より、蒸留器の性能、特に蒸留収量の大きさに顕著に影響する因子は入射放射熱流束、供給塩水量、周囲大気温度であることがわかる。この中で特に供給塩水量は蒸留器 1 m^2 あたりの値が小さいため、その微量の供給量を制御する方法は蒸留器の性能向上に対して重要であることが指摘できる。風速および蒸留器傾斜角度は蒸留収量に対してほとんど影響しないと考えられる。

非定常な入射放射熱流束を与える実験としては、図18に示すステップ状の入力を与えた場合と図19に示すような三角波状の入力を与えた場合について実験を行った。

図18は時刻0分の時に赤外線電球を点灯し、入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ を与え始め、時刻200分の時に消灯した場合の蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ の経時変化を示すものである。他の実験条件は定常実験の場合と同様である。入力を開始した後、約80分程度でほぼ蒸留収量の値は一定となり、蒸留器は定常状態に達したものと考えられる。図中の実線は蓄熱項も含めた電算機を用いたシミュレーションによる計算結果であるが、定常状態の場合と同様によく実測値と一致する。

同様に、三角波状（図中の波線で示す）の入射放射熱流束を与えた場合の実測値および計算結果を図19に示した。時刻0分に近い所で蒸留収量の実測値が0であるのは流路などに水が溜まるためであると考えられる。この図においても実測値、計算結果の両者は非常に一致を示し、電算機を用いたシミュレーション手法が蒸留器に関する熱の移動現象を定常状態の場合のみならず、非定常の作動条件下でもよく表現していることが確認できたといえよう。

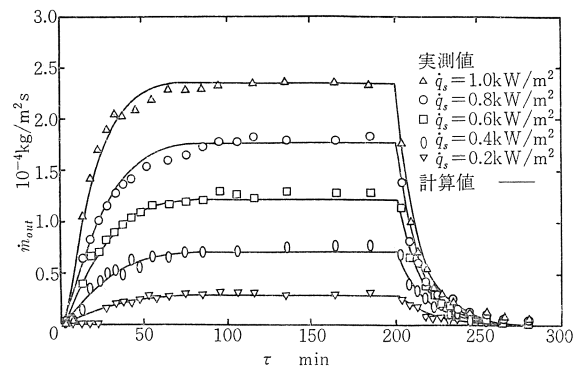


図 18 スラップ入力に対する蒸留収量の過渡特性

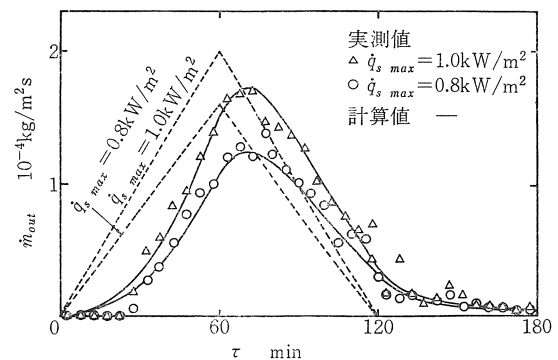


図 19 三角波状入力に対する蒸留収量の過渡特性

5.3 屋外実験結果

屋外の実際の日射条件下における傾斜ウィック型蒸留器 (Type 2) の測定結果および電算機を用いたシミュレーションによる計算結果を図20および図21に示した。太陽からの入射放射熱流束 $\dot{q}_s$ は蒸留器と同様に傾斜させた全天日射計により測定し、実験の条件は蒸留器傾斜角度 25° 、供給塩水量 $\dot{m}_{in} = 4 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ とした。それぞれの図に示されるように、快晴日

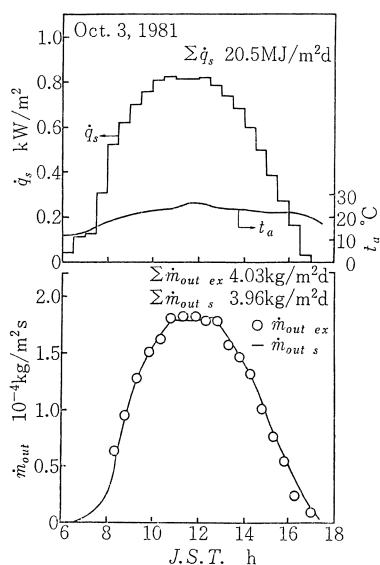


図20 1日の蒸留収量の経時変化
(晴天の場合)

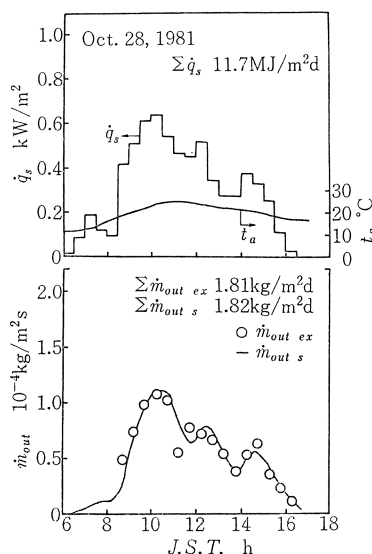


図21 1日の蒸留収量の経時変化
(曇天の場合)

(図20) および曇天日(図21)において蒸留収量 $\dot{m}_{out}$ の実測値のプロットと計算結果である実線はよい一致を示す。また、1日の蒸留収量 $\Sigma \dot{m}_{out}$ はそれぞれ $4 \text{ kg/m}^2\text{d}$, $1.8 \text{ kg/m}^2\text{d}$ であり、1日の蒸留器効率 η はそれぞれ46%, 37%であった。

つぎに、実際にウイックを使用した蒸留器を大規模に実用化する際に予想される問題点である太陽光によるウイック素材の劣化および塩水を流した場合のウイック面での塩の析出、目づまりなどについて検討を行なうため、1982年6月下旬より11月まで連続的に屋外の実験の日射条件下で実験を実施した。供給塩水としては海水の代用として濃度3.5wt%の食塩水を使用した。図22および図23に供給塩水量 $\dot{m}_{in} = 2 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2\text{s}$ とした場合の1日の蒸留収量および効率の測定結果を示す。これらの図より、約半年程度の期間におけるウイック素材、黒色綿タオル地の劣化による蒸留収量の低下はみられず、またウイック面における塩の析出もほとんど起こらなかった。また日射量が多い場合にウイック面下方に塩が析出することがあっても、日射量の低下する夕方には析出した塩は再び溶け、ウイック面での目づまりなどの問題となることはなかった。図22より、1日の蒸留収量は最高で約 $5 \text{ kg/m}^2\text{d}$ 、日射量の小さい日に対してもかなりよい蒸留性能を示すことが確認できた。図23から明らかなように、本研究の蒸留器は日射量の大きい晴天日で約50%程度、日射量の小さい日で約20%程度の効率を示すことがわかった。なお図中の実線はシミュレーションによる計算結果である。

図24は、本研究による結果とこれまでに報告されて

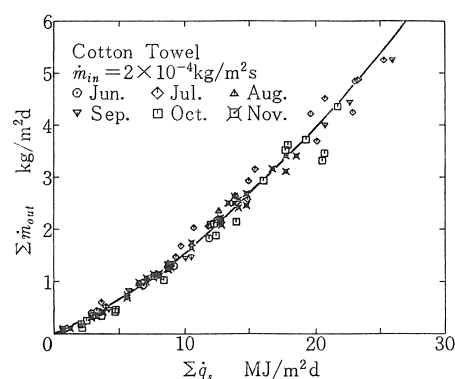


図22 1日の総日射量と蒸留収量の関係

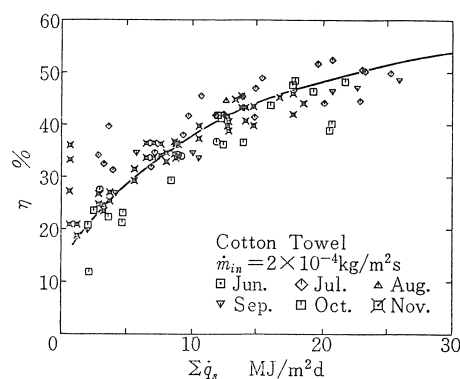


図23 1日の総日射量と蒸留器の効率の関係

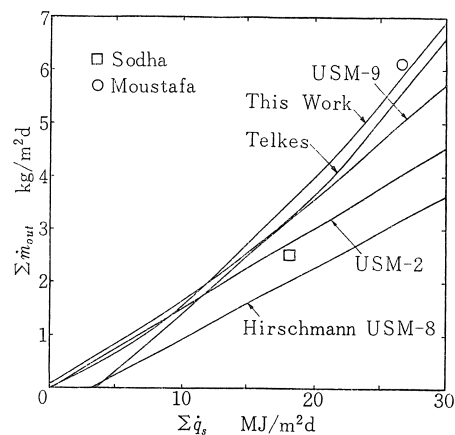


図24 従来の研究と本研究との蒸留性能の比較

いる他の研究者による傾斜ウイック型蒸留器の性能との比較を示したものである。Telkes⁽¹²⁾の実験は、米国フロリダの海岸に設置された蒸発面積 2.37 m^2 、傾斜角度 30° の蒸留器を20基使用した大規模なものであり、それらの蒸留器の性能も優れている。チリのHirschmann ら⁽¹³⁾は USM-2, USM-8, USM-9 と名づけられた3種の傾斜ウイック型蒸留器について実験を実施し、その中では USM-9 が本研究の蒸留器と似た構造を持っており、蒸留性能も本研究とほぼ同様である。またこれらの蒸留器のウイック素材としては麻を使用している。インドの Sodha ら⁽¹⁴⁾の蒸留器は

多層にウィックを重ねて給水方法に工夫している点が特徴である。彼らの蒸留器の蒸発面積は 0.86 m^2 、傾斜角度は 15° と報告されている。米国の Moustafa ら⁽¹⁵⁾ の蒸留器は蒸発面積 0.182 m^2 、傾斜角度 45° であり、本研究の Type 1 の傾斜ウィック型蒸留器と似た構造をもっている。図中の各研究者の値は Sodha らおよび Moustafa らの値は 1 日分についての報告より、Hirschmann らの値は測定値を最小自乗法した 1 次の相関式より、Telkes の値は原報所載の図より読み取った値をそれぞれ示した。これらの値はいずれも屋外実験を実施して求められた値であるが、本研究の電算機を用いたシミュレーションによる計算結果とよい一致を示している。

6. 結 言

離島などの淡水の不足している地域に対する淡水供給方法として太陽熱蒸留器について実験的研究を実施した。太陽熱蒸留器として従来より実用化されている Basin 型蒸留器と本研究で提案した傾斜ウィック型蒸留器を比較し、傾斜ウィック型蒸留器が蒸留性能の点で優れていることを、実験的にまた熱移動の面から検討を行なった。傾斜ウィック型蒸留器に関しては室内において性能を測定できる実験装置を製作し、その熱移動現象について詳しく実験を実施した。また理論的研究として蒸留器の熱・物質移動に着目した電算機を用いたシミュレーション手法を導き、実際の測定結果と満足すべき一致が得られることを確認した。屋外における実際の日照条件下に対する実験に関しては、約半年間の連続的測定を実施し、本研究の傾斜ウィック型蒸留器が実際条件下においても予想される蒸留性能で運転されることを確認した。測定値より蒸留器 1 m^2 あたりの 1 日の蒸留収量は最高で約 5 l/m^2 、日射量の小さい日に対してもほぼ日射量に比例して蒸留収量が得られることがわかった。また電算機を用いたシミュレーション手法による計算結果は屋外実験結果ともよく一致し、実際の蒸留システム設計に対して有効であるシミュレーション手法を導入できたと考えられる。

謝 辞

本研究の実施にご協力いただいた御牧誠氏（当時慶応義塾大学大学院工学研究科学生）、山下篤志氏、川瀬恵一氏、梅原規司氏（当時慶応義塾大学工学部学生）に深い感謝の意を表します。また本研究の一部は昭和 56、57 年度文部省エネルギー特別研究（2）自然エネ

ルギーの研究による研究補助金により実施したものであることを記し深い感謝の意を表します。

文 献

- (1) 機械振興協会・新機械システムセンター：太陽エネルギーを利用した海水の淡水化に関する調査研究報告書，(1978)
- (2) E. A. Delyannis and A. A. Delyannis（渡部康一訳），太陽エネルギー，Vol. 6, No. 4, 35—42 (1980)
- (3) 渡部康一，御牧誠，田中耕太郎，日本太陽エネルギー学会第 5 回研究発表会講演論文集，9—12 (1979)
- (4) M. Mimaki, K. Tanaka and K. Watanabe, Energy Developments in Japan, Vol. 3, 207—225 (1981)
- (5) K. Tanaka, A. Yamashita and K. Watanabe, Solar World Forum, Proc. Int. Solar Energy Congr. 1087—1091 (1981)
- (6) 渡部康一，田中耕太郎，カービ・ネジャディアン，川瀬恵一，日本太陽エネルギー学会第 7 回研究発表会講演論文集，9—12 (1981)
- (7) 田中耕太郎，渡部康一，第 19 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 301—303 (1982)
- (8) 田中耕太郎，梅原規司，渡部康一，日本太陽エネルギー学会第 8 回研究発表会講演論文集，221—224 (1982)
- (9) K. G. T. Hollands et al., Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., Journal of Heat Transfer, 98C, 189—193 (1976)
- (10) 浅野康一，物質移動論，共立出版 (1976)
- (11) T. Fujii and H. Imura, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 15, 755—767 (1972)
- (12) Battelle Memorial Inst., Saline Water R & D Progr, Rept. No. 147 (1965)
- (13) J. Hirschmann et al., Proc. of 5th Int. Symp. on Fresh Water from the Sea, Vol. 2, 447—456 (1976)
- (14) M. S. Sodha et al., Solar Energy, Vol. 26, 127—131 (1981)
- (15) S. M. A. Moustafa et al., Solar Energy, Vol. 22, 141—148 (1979)

（昭和 58 年 2 月 26 日 原稿受理）