

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

Experimental and Theoretical Study of Basin-Type - Multiple-Effect Coupled Solar Still

田中・大*¹
Hiroshi TANAKA

野底武浩*²
Takehiro NOSOKO

長田孝志*²
Takashi NAGATA

Abstract

Newly designed multiple-effect solar stills with a triangle cross-section consisting of a horizontal basin liner, a tilted double glass cover and the vertical parallel partitions in contact with saline-soaked wicks were constructed and the productivity of distillate was measured on several days in autumn and winter at Okinawa, Japan. The heat and mass transfer processes occurring in the stills were theoretically analyzed to predict the performance of the stills. The experimental results and the theoretical predictions show that the production rate of distillate is drastically increased by narrowing the vapor-diffusion gaps between partitions and increasing the number of the partitions. The still consisting of 8 partitions with 5 mm diffusion gaps produced $10.0 \sim 12.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ at $18.8 \sim 21.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ solar radiation on the glass cover, showing that the newly designed still is 3.2 to 3.5 times more productive than the basin type still. These experimental values for the productivity are lower by 14 % than the predicted ones, and the discussion on this discrepancy is presented.

キーワード: 太陽エネルギー, 淡水化, 太陽熱蒸留, 太陽熱蒸留器, Basin型, 多重効用

Key Words: Solar Energy, Desalination, Solar Distillation, Solar Still, Basin-Type, Multiple-Effect

1. 緒言

砂漠地帯などの乾燥地域や、保水能力の低い土壌の離島などでは、慢性的な水不足に悩まされており、飲料水の確保は重要な課題である。また、発展途上国の貧しい集落では、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も深刻である。このため、高度な技術を必要としない、安価な分散型の淡水化装置が求められているが、太陽熱を熱源とする海水淡水化装置（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考案されているが、中でも多重効用蒸留器は、水蒸気の凝縮潜熱を再利用し、海水の蒸発・凝縮の過程を複数回繰り返して行う構造であり、最も性能が高い。CooperとAppleyard^[1]は、カバーガラス板、上面が太陽光吸収面である仕切り板および3枚の仕切り板を、上から順に、空気層を介して平行に配置した3段効用（3回の蒸発・凝縮過程の繰り返し）の、傾斜平行平板型蒸留器を製作し、屋外実験を行った。最下面を除く全ての仕切り板の下面には、ウィックが貼り付けられ、海水が一定流量で供給される。太陽光集熱板の下面のウィックから発生した水蒸気は、空気層を拡散し2枚目の仕切り板の上面で凝縮する。その際に放出される潜熱は、2枚目の仕切り板の下面のウィックに伝わり、ウィック中の海水を加熱し、水蒸気を発生させる。この蒸発・凝縮の過程が2

段目、3段目で繰り返されること（すなわち、熱の再利用）により、装置全体の蒸留量は増大する。

Toyama^[2]、津村^[3]、田中^[4]、OuahesとGoff^[5]、Yeh^[6]、岡村^[7]、Ohshiro^{[8][9]}とBouchekima^[10]は、この型の多重効用蒸留器について理論的および実験的に詳細に研究を行った。Toyamaらおよび津村ら、Ohshiroらは、仕切り板と仕切り板の間隔を狭く、すなわち水蒸気が拡散する距離を短くし、効用数（蒸発・凝縮過程の数）を増加させることによって蒸留量が飛躍的に増加することを明らかにした。

しかし、従来の傾斜平行平板型多重効用蒸留器は、海水を含んだウィックが凝縮面の上方に位置するため、海水が蒸留水に混入しやすいという欠点を持っている。海水の蒸留水への混入は、多くの場合、仕切り板の自重あるいは熱応力によるたわみによりウィックと凝縮面が接近し、かつ、ウィックのけばが海水を含むことにより重くなり、向かい合う凝縮面に触れることによって生じる。Ohshiroらは室内実験において、ウィックにアイロンをかけて表面のけばを平らにすることにより、ウィックと凝縮面の間隔が2mmの場合でも、比較的短期間ではあるが、海水の凝縮水への混入を防止できることを報告している。

著者らは前報^{[11]-[13]}において、Basin型と鉛直の多重効用平行平板型を組み合わせた新しいタイプのBasin-多重効用複合型蒸留器を提案し、理論解析によってその基本的な性能

*1 久留米工業高等専門学校、

*2 琉球大学工学部、

(原稿受理 平成12年10月6日)

Kurume National college of Technology
Faculty of engineering, University of the Ryukyus

を解明し、複合型蒸留器の蒸留性能が高いことを明らかにするとともに、蒸留性能に及ぼす気象条件、設計および操作パラメータの影響を調べた。また、多重効用部内の1段を模擬した単段蒸留器を製作し、屋内実験を行い、多重効用部を鉛直に設置すれば、ウィックのけばが自重によりウィックに張り付くため、海水の蒸留水への混入を生じさせることなく、仕切り板の間隔を2mmまで狭く出来ることを明らかにした。しかし、この複合型蒸留器の性能について、屋外実験による実証は行われていない。

本論文では、製作したBasin-多重効用複合型蒸留器の構造とそれを用いた屋外実験の結果を報告するとともに、実験結果と数値シミュレーションの計算結果との比較を行う。また、数値シミュレーション計算によって得られた、本蒸留器の基礎的な蒸留特性について述べ、それらを用いて屋外実験結果について議論・検討を行う。

2. 実験装置および実験方法

Basin-多重効用複合型・太陽熱蒸留器を模式的に図1に示す。本装置は、三角形の断面を有し、底面に海水の入った水盤、太陽に向かう斜面に二重のカバーガラス、鉛直面にウィックを貼り付けた多数の仕切り板から成る多重効用部が配置される。多重効用部の最前面の仕切り板(p_1)の前面は、太陽光を吸収するよう黒色に塗布されている。

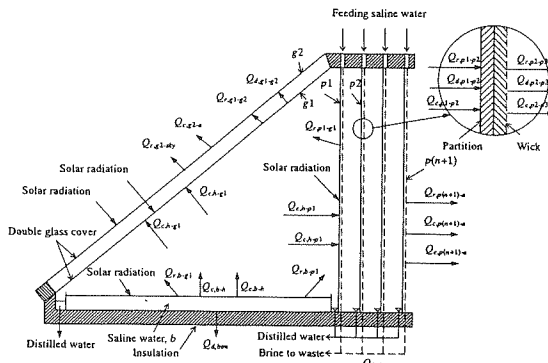


Fig. 1 Schematic diagram of a basin type - multiple effect coupled solar still, and heat and mass transfer in the still

二重カバーガラスを透過した太陽光は、水盤に吸収され海水を加熱・蒸発させるとともに、多重効用部の最前面の仕切り板(p_1)を加熱する。水盤から発生した水蒸気は、内側のガラス板(g_1)の下面および仕切り板(p_1)の前面(太陽光吸収面)で凝縮する。仕切り板(p_1)で放出される凝縮潜熱と仕切り板(p_1)が直接吸収した太陽エネルギーは、その板を通過し背面に接するウィックに含まれる海水を加熱・蒸発させる。発生した水蒸気は、湿り空気層を拡散して2枚目の仕切り板(p_2)で凝縮する。この凝縮・蒸発の過程が多重効用部(鉛直な仕切り板群)内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。

二重のカバーガラスを採用することにより、内側のガラス

板(g_1)の温度を高く保ち、仕切り板(p_1)での凝縮量を増加させるとともに、水盤および仕切り板(p_1)からガラス板(g_1)への放射および対流による熱の移動を小さくしている。

蒸留器は、実機レベルの大型のものと小型のもの2台を製作し、沖縄県中頭郡西原町琉球大学構内(北緯 26.1° 、東経 127.4°)に設置して屋外実験を行った。大型の蒸留器は1998年10月29日～11月12日および1999年9月6日～9日の間(秋季)の実験に用いた。それが大型台風により壊れたため、小型の蒸留器を製作し、2000年1月4日の実験に用いた。いずれの蒸留器の水盤および枠組みは、耐水ベニヤおよびヒバの角材を用い、底面と側壁は厚さ50mmの硬質ウレタンフォームで断熱した。個々のカバーガラスの厚さは3mmであり、断熱のためガラス板の間に10mmの乾燥空気層を設けた。装置内部の三角形部の側壁には、太陽光反射のために鏡面仕上げしたステンレス板を設置した。多重効用部の仕切り板には、厚さ0.5mmのネル生地(ウィック)を貼り付けたステンレス板(厚さ0.5mm)を用いた。冬至において、太陽熱は最も多く仕切り板(p_1)に直接吸収されるため、多重効用部内のウィックからの蒸発量も最大となる。よって、冬至の南中時の最高日射量が、定常蒸留装置に当りつづけるものと仮定して数値計算を行い、各ウィックからの蒸発量を求め、その蒸発量の2倍を各ウィックへの原水供給量とした。従って、原水供給量は、各ウィックごとに異なるが、時間変化はないという条件で実験を行った。大型および小型の蒸留器のカバーガラスの水平面からの角度 θ 、水盤底面の寸法は、それぞれ 35° 、 $1.5 \times 3.0\text{m}^2$ および 40° 、 $0.75 \times 1.5\text{m}^2$ である。大型の蒸留器の多重効用部は、スパン方向に等間隔に三つに区切られており、各区域の仕切り板の蒸発面積はスパン方向長さ1.05m、高さ1.05mである。個々のステンレス板(仕切り板)の上部をヘアピン型に曲げて溝を設け、その溝にウィックの上端を入れ、そこに原水を毛細管を経て供給し、ウィックに原水を浸透させた。原水の供給部は、個々の仕切り板のスパン方向の中央部の一ヶ所である。小型の蒸留器には区切りはなく、蒸発面積は $1.5 \times 0.8\text{m}^2$ である。

実験では、日の出前に深さ約10mmまで水盤に原水を注入し、測定を開始した。各ウィックには、原水を連続的に供給し、一時間ごとに各凝縮面からの蒸留量を測定した。全日射計で水平面日射量を測定した。なお、多くの実験において原水として海水の代わりに水道水を用いたが、それによる蒸留量への影響は高々2ないし3%程度であると、塩分による水蒸気分圧の低下を考慮した場合とそうでない場合のシミュレーション計算により見積もられた。

3. 解析モデルおよび数値シミュレーション方法

本蒸留器内における熱および物質移動の概略を図1に示す。図では例として3段の効用を示す(仕切り板は4枚)が、効用数 n がいくつの場合でも、以下の解析モデルを適用することが出来る。解析モデルおよび数値シミュレーションの方法は、Tanakaら^[11]に詳細に記述されており、ここでは要点だけを述

べる。

太陽エネルギーは、2枚のカバーガラス、水盤および仕切り板(p1)によって吸収され、装置の構成要素間では、放射、対流（あるいは伝導）および蒸発・凝縮の複数の形態で熱移動が生じる。海水の入った水盤、2枚のカバーガラス、多重効用部の個々の仕切り板についての熱収支式、およびBasin部三角空間内部のバルク湿り空気についての熱収支式および水蒸気の収支式は、順に式(1)～(8)で与えられる。ここで熱移動速度 Q の添え字、例えば $b-g1$ は、水盤中の海水(b)からガラス板(g1)への熱移動量であることを示す。

熱収支式：

$$b: \tau_g^2 \alpha_b G_{dr} + (\tau_g^2 \alpha_b)_{df} G_{df} = \frac{d(C_b T_b)}{dt} + \frac{(Q_{c,b-h} + Q_{r,b-g1} + Q_{r,b-p1} + Q_{e,b-h} + Q_{d,bm})}{A_b} \quad (1)$$

$$g1: \tau_g \alpha_g G_{dr} (\cos \theta + \frac{\sin \theta \cos \varphi}{\tan \phi}) + (\tau_g \alpha_g)_{df} G_{df} + \frac{(Q_{c,h-g1} + Q_{e,h-g1} + Q_{r,h-g1} + Q_{r,p1-g1})}{A_g} = C_g \frac{dT_{g1}}{dt} + \frac{(Q_{d,g1-g2} + Q_{r,g1-g2})}{A_g} \quad (2)$$

$$g2: \alpha_g G_{dr} (\cos \theta + \frac{\sin \theta \cos \varphi}{\tan \phi}) + \alpha_g G_{df} \frac{1 + \cos \theta}{2} + \frac{(Q_{d,g1-g2} + Q_{r,g1-g2})}{A_g} = C_g \frac{dT_{g2}}{dt} + \frac{(Q_{c,g2-a} + Q_{r,g2-ky})}{A_g} \quad (3)$$

$$p1: \tau_g^2 \alpha_{p1} G_{dr} \frac{\cos \varphi}{\tan \phi} + (\tau_g^2 \alpha_{p1})_{df} G_{df} + \frac{(Q_{c,h-p1} + Q_{r,b-p1} + Q_{e,h-p1} - Q_{r,p1-g1})}{A_p} = C_p \frac{dT_{p1}}{dt} + \frac{(Q_{d,p1-p2} + Q_{r,p1-p2} + Q_{c,p1-p2} + Q_{f,p1})}{A_p} \quad (4)$$

$$pi: \frac{(Q_{d,p(i-1)-pi} + Q_{r,p(i-1)-pi} + Q_{e,p(i-1)-pi})}{A_p} = C_p \frac{dT_{pi}}{dt} + \frac{(Q_{d,p(i-1)-pi} + Q_{r,p(i-1)-pi} + Q_{e,p(i-1)-pi} + Q_{f,p(i-1)-pi})}{A_p} \quad (5)$$

$$p(n+1): \frac{(Q_{d,pn-p(n+1)} + Q_{r,pn-p(n+1)} + Q_{e,pn-p(n+1)})}{A_p} = C_p \frac{dT_{p(n+1)}}{dt} + \frac{(Q_{c,p(n+1)-a} + Q_{r,p(n+1)-a} + Q_{e,p(n+1)-a} + Q_{f,p(n+1)})}{A_p} \quad (6)$$

$$h: Q_{c,b-h} + Q_{e,b-h} = Q_{c,h-g1} + Q_{e,h-g1} + Q_{c,h-p1} + Q_{e,h-p1} \quad (7)$$

水蒸気の収支式：

$$h: Q_{e,b-h} = Q_{e,h-g1} + Q_{e,h-p1} \quad (8)$$

シミュレーション計算は、夏至および秋分、冬至の晴天日

を想定して行ったものと、屋外実験結果との比較のために行ったものがある。前者の場合には、蒸留器は、沖縄県中頭郡西原町（北緯26.1°、東経127.4°）に設置されているものとして、日射量等の気象条件を決定した。後者の場合には、同地で測定した水平面日射量をもとに直達および分散日射量をBouguerおよびBerlageの式^[14]を用いて算出した。前者の場合においてシミュレーション計算で用いた、気象、設計および操作パラメータの条件を表1に示す。後者の場合も、日射量および気温以外のパラメータは、表1のものと同一である。これらの条件のもと、式(1)～(8)中の時間微分項を一次差分し、 $\Delta t=600s$ を用いて、次の時間ステップにおける蒸留器各部の温度、各面での凝縮量を求め、それを繰り返すことにより1日を通しての時間変化を求めた。日の出時に、蒸留器各部の温度が気温 T_a に等しいという初期条件を用いた。

表1 気象、設計および操作条件

気象条件

$T_a=20^\circ\text{C}$ （冬至）、 33°C （夏至）、 30°C （秋分）、 $u_a=1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

G_{dr} ：北緯26.1°を想定してBouguerの式^[14]より算出

G_{df} ：北緯26.1°を想定してBerlageの式^[14]より算出

ただし、 G_{dr} 、 G_{df} ともに太陽定数 $1370\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ の値を用いた
大気透過率=0.72（冬至）、0.65（夏至）、0.66（秋分）

供給原水の温度= T_a

設計および操作条件

$l_g=1.83\text{m}$ 、 $l_b=l_g \cos \theta=1.5\text{m}$ 、 $l_p=l_g \sin \theta=1.05\text{m}$

$\theta=40^\circ$ 、 $\delta_{gp}=10\text{mm}$

$C_b=41.9\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ （Basin部の10mm深さの初期原水量を想定）、

$C_g=6.1\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ 、 $C_p=4.4\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$

m_{fpi} ：冬至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留量の2倍

4. 結果および考察

4.1 夏至および冬至における蒸留性能の計算結果

一般に、太陽熱蒸留器の蒸留量は、日射量とともに増大し、また気温が高いほど大きな値をとる。Basin—多重効用複合型においては、仕切り板(p1)に直接当たる日射量が多いほど多重効用部での蒸留量が増大するため、総蒸留量は、日射量の値ばかりでなく、太陽高度にも強く依存する。

太陽高度の大きく異なる冬至および夏至の晴天日において、仕切り板の間隔 $\delta_{gp}=10\text{mm}$ 、多重効用部の効用数 $n=7$ の蒸留器についてシミュレーションを行った。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の計算結果を図2に示す。なお、本論文では、本複合型の蒸留量は、太陽光が透過するカバーガラスの単位面積当りの値で示す。カバーガラス面日射量は、夏至、冬至ともに12時半頃にピーク

を取る。カバーガラスの水平面からの傾斜角度が $\theta=40^\circ$ 、南中時の太陽高度が夏至、冬至において各々 87° 、 40° であり、冬至のカバーガラス面日射量($21.5\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$)は夏至のそれ($21.0\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$)とほぼ同程度である。総蒸留量は、夏至、冬至ともに日射量のピークに比べて約1時間遅れてピークを取る。この蒸留量の時間遅れは、蒸留器の熱容量によるものである。

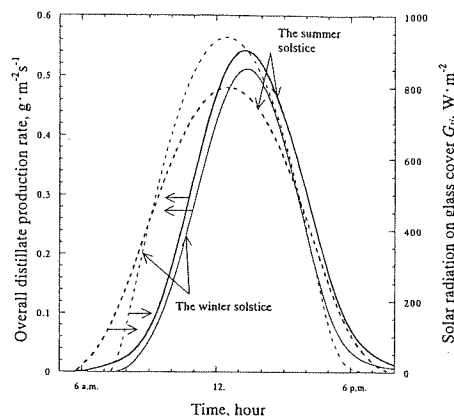


Fig. 2 Time variation of overall production rate in summer and winter solstice days

一日の蒸留器全体からの総蒸留量は、夏至および冬至で各々 $11.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ および $9.7\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、冬至の1日の蒸留量は、夏至に比べて2割程度の減少である。この減少は、冬至では気温 T_a が夏至に比べて13K低く、それに対応して蒸留器内の温度分布も低くなるのが原因である(図3参照)。一般に、蒸留器内の個々の蒸発・凝縮過程の蒸留効率 $Q_e/(Q_e+Q_c(\text{or } Q_d)+Q_r)$ は、温度とともに増大することが知られている(例えば、Ohshiroら^{[8][9]})。Tanakaら^[11]の方法を用いて、同条件下においてBasin型蒸留器について計算を行うと、その蒸留量は、冬至においては、夏至における値より約6割低下する。本複合型の冬至における蒸留量の低下が2割程度とかなり小さいのは、冬至における太陽高度は低く、より大きい割合の日射量が多重効用部の仕切り板(p1)を直接加熱するためである。

夏至および冬至において、1日の総蒸留量がピーク値を取る時間における蒸留器内の温度分布を図3に示す。夏至、冬至ともに水盤で温度が最も高く、カバーガラス部、多重効用部ともに外側ほど温度は低下する。夏至、冬至ともに二重のガラス板間で約30Kの温度差が生じており、二重のカバーガラスの高い断熱性を示す。冬至では、夏至よりも外気温が13K低く、太陽光をより多く直接吸収する仕切り板p1を除いて、蒸留器内の温度分布は夏至よりも常に低い。隣り合う仕切り板の間の温度差は、多重効用部の外側ほど大きくなる。夏至および冬至において蒸留器内の各凝縮面g1、p1~p(n+1)で得られた一日の蒸留量(凝縮量)の計算結果を図4に示す。夏至、冬至ともに、仕切り板p2において蒸留量は最

も多く、より外側の仕切り板ほど蒸留量は減少する。これは、各ウィックに流入する原水の加熱に要する顕熱 Q_r が原水とともに器外へ持ち去られることによって、外側ほど各仕切り板間を通過する総熱量($Q_e+Q_d+Q_r$)が減少すること、また、外側ほど温度が低く、蒸留効率 $Q_e/(Q_e+Q_d+Q_r)$ が低下することによる。

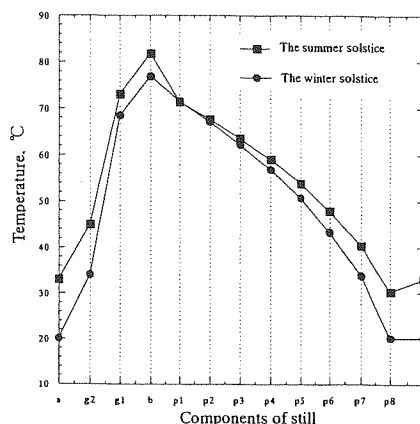


Fig. 3 Distribution of temperature in the still at the peak of production rate on winter and summer solstice days

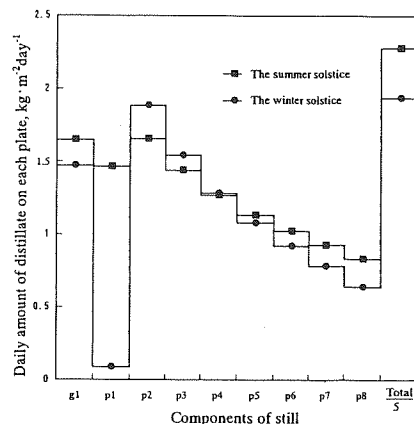


Fig. 4 Daily amounts of distillate on the glass plate and all partitions on summer and winter solstice days

仕切り板p2からp4までは冬至の方が凝縮量が多く、p5からp8においては夏至の方が凝縮量が多い。すなわち、p1からp8にかけての凝縮量の減少割合は、冬至のほうが大きい。これは、第一に、冬至においては、太陽光が斜めから入射するため、仕切り板p1へ吸収される総熱量が夏至に比べて大きいものの、p1からp8にかけての温度の低下の割合が大きく(図3参照)、各仕切り板間での蒸留効率 $Q_e/(Q_e+Q_d+Q_r)$ の減少割合が大きいことによる。第二には、仕切り板から持ち去られる熱量 $Q_r \propto (T_{p1}-T_a)$ の値が冬至の方がより大きく、その結果、各仕切り板間を通過する総熱量($Q_e+Q_d+Q_r$)の減少割合が大きいことによる。

夏至では、水盤から発生した水蒸気は、ガラス板 g_1 および仕切り板 p_1 にほぼ同じ割合で凝縮する。一方、冬至においては水盤から発生した水蒸気の大部分はガラス板 g_1 で凝縮する。これは、斜めから入射する太陽光により仕切り板 p_1 が直接加熱され、 p_1 の温度が g_1 よりも約2K高くなるためである(図3)。以上の結果および考察より、太陽高度の低い季節ほど、総蒸留量に対する多重効用部で得られる蒸留量の割合が増加することがわかる。

4.2 仕切り板の間隔 δ_{gp} と多重効用部の効用数 n の影響 (計算結果)

秋分における太陽高度は夏至と冬至の中間であり、水盤からの水蒸気の凝縮潜熱と仕切り板(p_1)での太陽光の直接吸収の両方が、多重効用部の熱源となる。また、本研究の実験地である沖縄では、秋において少雨天候が続くことが多い。

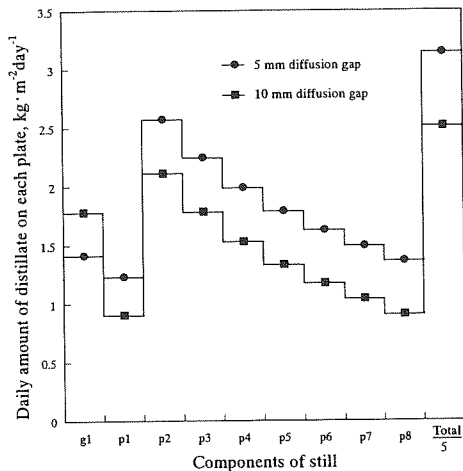


Fig. 5 Daily amounts of distillate on the glass plate and all partitions in the stills with 5 mm and 10 mm diffusion gaps on autumn equinox day

秋分の晴天日において ($\Sigma G_{tr} = 22.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, $\Sigma G_{di} = 23.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)、同一の効用数 $n=7$ の条件下で行った、仕切り板と板の間隔 $\delta_{gp}=5\text{mm}$ および 10mm の場合の計算結果の比較を図5に示す。凝縮量の分布状況は、間隔 $\delta_{gp}=5, 10\text{mm}$ の場合とも、ほぼ同様であるが、仕切り板 p_1 から p_8 にかけての凝縮量は、 $\delta_{gp}=5\text{mm}$ の方がはるかに大きい。逆にカバーガラス g_1 での凝縮量は、 $\delta_{gp}=10\text{mm}$ の方が多い。これは、 δ_{gp} を減少すると、各々の仕切り板間の湿り空気層の伝熱抵抗は減少し、かつ蒸留効率 $Q_c/(Q_c+Q_d+Q_r)$ が増加することによる。多重効用部全体を通しての伝熱抵抗も大幅に減少するため、Basin部および p_1 で吸収した太陽熱が多重効用部を通過する割合は、大幅に増大し、かつ、個々の仕切り板間の蒸留効率 $Q_c/(Q_c+Q_d+Q_r)$ は大きくなるため、 δ_{gp} を 10mm から 5mm へと減少することにより、蒸留器全体からの総蒸留量は約25%増加する。このように、仕切り板間隔 δ_{gp} 減少の効果は、非常

に大きい。

秋分の晴天日において、仕切り板の間隔 δ_{gp} を 10mm 一定として、多重効用部の効用数 $n=7$ (仕切り板の枚数8) あるいは $n=10$ とした場合のシミュレーションを行った。効用数 n を7から10に増やすことによる総蒸留量の増加は、1割程度であった。これは、効用数 n が多い $n=10$ の場合には多重効用部全体を通しての伝熱抵抗が大きくなり、多重効用部を通過する熱量が減少し、各段での蒸留量が約1割減少するためである。これが、凝縮潜熱をより多くの回数の再利用で蒸留水を増加させる効果を半減させることになる。

4.3 仕切り板の間隔 δ_{gp} および多重効用部の効用数 n の影響 (計算結果)

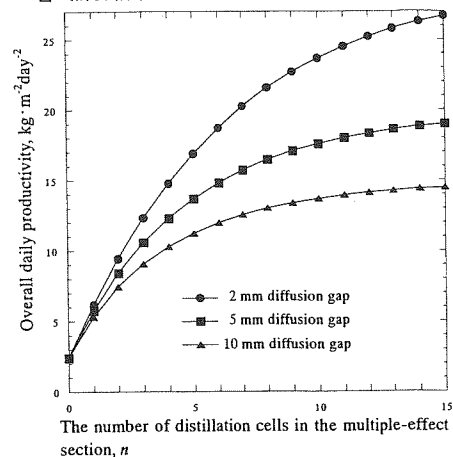


Fig. 6 Variation of overall daily amount of distillate with the number of distillation cells

仕切り板の間隔 δ_{gp} が 10mm 、 5mm および 2mm の場合について、多重効用部の効用数 n と複合型蒸留器の総蒸留量の関係を図6に示す。計算に用いた条件は秋分における晴天日のものである。いずれの仕切り板間隔 δ_{gp} の場合も効用数 n の増加とともに総蒸留量は、初め急激に増大し、その後、飽和の傾向を示す。 δ_{gp} が小さいほど、総蒸留量はより大きく、また効用数 n が大きいほど、蒸留量の差は大きい。同図は、 δ_{gp} を小さくすることにより、効用数 n を増やすことが可能であり、その結果、総蒸留量を著しく大きくできることを示す。 $\delta_{gp}=2\text{mm}$ 、 $n=15$ の蒸留器は1日 $26.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の高い蒸留量が得られ、本複合型の可能性の高さを示唆している。

4.4 小型の蒸留器 ($\theta=40^\circ$) を用いた冬季における屋外実験結果および計算結果

まず、比較的实验がうまくいった、2000年1月4日における、小型の蒸留器 (仕切り板の間隔 $\delta_{gp}=5\text{mm}$ 、多重効用部の効用数 $n=10$) の結果について述べる。その日の水平面日射量の測定値と総蒸留量の経時変化の測定値および計算結果を図7に示す。なお、蒸留器の傾斜カバー面上の日射量の時間変化は、1時間毎の積算日射量の測定値をもとに算出された

ものである。日射量は12時半頃にピークに達しているが、シミュレーションによる蒸留量のピークは日射量より約1時間遅れており、その後、日射量の減少とともに蒸留量は減少する。実験値と計算値は、全体を通してよく一致しているが、午後1時前後の最も蒸留量が多い時間帯で、実験値は計算値よりも低い値を示す。これは主として、仕切り板が最も高温となるこの時間帯に、熱応力によるたわみが生じ、ウィックの一部が凝縮面に接触し、凝縮水の一部を吸収したためと考えられる。なお、日の出から午前10時頃までの間においても、測定値は計算値よりも低い値を取るが、これは、蒸留開始時において蒸留器内の各面での凝縮水が、測定部まで流出するのにある程度の時間を要するためである。

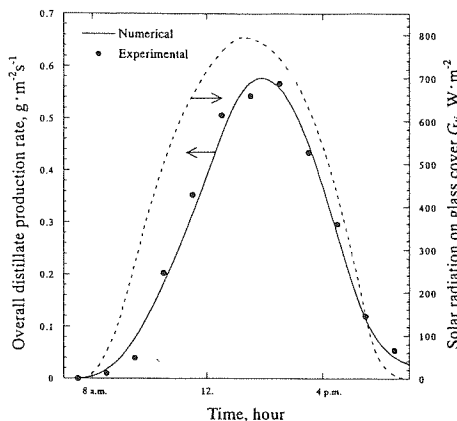


Fig. 7 Comparison of experimental results with theoretical predictions in time variation of overall distillate production rate on Jan. 4th 2000

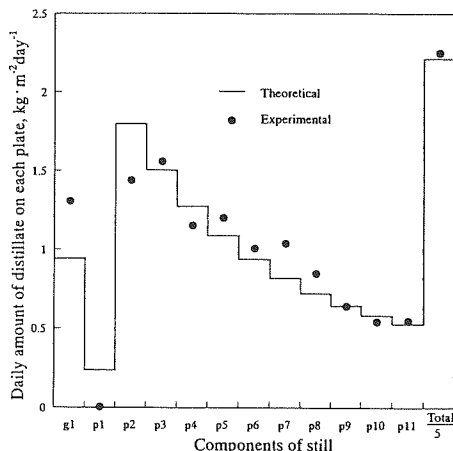


Fig. 8 Comparison of experimental results with theoretical predictions in daily amounts of distillate on the glass plate and all partitions on Jan. 4th 2000

同じ日の蒸留器内の各面での1日の総凝縮量の分布を図8に示す。実験値にばらつきはあるものの、全体的には、実験値は計算値とほぼ同様の分布を示す。詳細に言えば、カバーガラスg1での凝縮量は、実験値が計算値より大きく、p1ではその逆である。また、多重効用部内では、p2、p4およびp6

の凝縮量の測定値が、それぞれ一つ後段での凝縮量より低い。前述の通り、実験ではp1-p2、p3-p4およびp5-p6間でウィックの一部が凝縮面に接触し、凝縮水を吸収したためだと考えられる。なお、その実験日は1月4日であり、多重効用部のp1の主要な加熱源が、p1での直接の太陽光吸収である。本シミュレーションでは、Basin部の原水表面や前方の地面からの太陽の反射光は考慮されていないが、実際は、太陽高度が低い冬季においては、これらの反射光が仕切り板p1に吸収される割合は大きい。この考慮しなかった太陽光吸収の分が、Basin部からの水蒸気の凝縮潜熱によるp1の加熱の減少分を補ったことによって、p2とp4を除く仕切り板での凝縮量が、計算結果とほぼ同程度かそれ以上の値を示したのと考えられる。また、その反射光の吸収によりp1の温度が上昇し、p1での凝縮量は大幅に減少したのと考えられる。

その日のカバー面の積算日射量は $\Sigma G_{ai}=18.2\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であり、得られた総蒸留量は、カバー面積基準で $11.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ であった。田中^[4]は、傾斜平行平板型の多重効用蒸留器を用いて屋外実験を行い、カバー面日射量 $\Sigma G_{ai} \approx 18\text{ MJm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の日に、約 $9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の蒸留量が得られたことを報告している。最近、佐藤らのグループ^[16, 17]が、器内を真空に引いた新しい型の多重効用蒸留器を開発しており、傾斜面日射量 $\Sigma G_{ai} \approx 18\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の日に約 $12\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の蒸留量が得られたと報告している。気象条件が異なるため、直接の比較は出来ないが、上記の結果は、本複合型が非常に高い蒸留性能を有していることを示している。

塩水(3%)を全てのウィックに供給し、凝縮水の水質を調べる実験を6回行った。仕切り板p2やp4での凝縮量が後段のp3やp5より低く、ウィックが凝縮面に接触したと考えられる実験を含め全ての実験において、0.01%の分解能の濃度計によっては、凝縮水から塩分は検出されなかった。

4.5 大型の蒸留器 ($\theta=35^\circ$) を用いた秋季における屋外実験結果および計算結果

大型の蒸留器 ($\delta_{gp}=10\text{ mm}$, $n=5$) を用いた、1998年11月11日の結果を図9、10に示す。総蒸留量の時間変化は、全体として計算値とほぼ一致している。午前中、測定値の方が立ち上がり早いのは、実際の蒸留器の熱容量が、シミュレーションで用いた値よりも低いためと考えられる。各凝縮面での蒸留量(図9)も、全体として、測定値と計算値は一致している。ただし、多重効用部では、測定値の方が大きく、また、総蒸留量も測定値の方が大きい。これは、前述の太陽の反射光によるものおよび、後述のシミュレーションにおける直達日射量の低い見積もりによるものと考えられる。また、多重効用部において、p2からp6にかけて蒸留量は常に減少している。これは、 $\delta_{gp}=10\text{ mm}$ と間隔が大きかったため、ウィックの凝縮面への接触が少なかったためと考えられる。

大型の蒸留器 ($\delta_{gp}=10\text{ mm}$, $n=5$ および $\delta_{gp}=5\text{ mm}$, $n=7$) についての実験結果のまとめを図11に示す。 $\delta_{gp}=5\text{ mm}$, $n=7$ の蒸留器についての実験は1999年9月6日から9日の期間に、

$\delta_{gp}=10\text{mm}$, $n=5$ の蒸留器についての実験は1998年10月29日から11月12日の期間に行った。表2に測定日の気象条件等を示す。図中の実線および点線は、9月9日の気象条件における $\delta_{gp}=5\text{mm}$, $n=7$ の蒸留器について、および11月11日の気象条件における $\delta_{gp}=10\text{mm}$, $n=5$ の蒸留器についての計算結果である。なお、それらのシミュレーション計算においては、1日を通しての大気透過率の値は一定とおき、その値を変化させることにより、1日の積算日射量を変化させた。比較のため、田中によるBasin型蒸留器の1日の総蒸留量の実験の平均値と水平面日射量 ΣG_{hr} の関係を一点鎖線を示す。なお、Basin型蒸留器については、水平な水盤の単位面積あたりの蒸留量を示す。田中のBasin型蒸留器の蒸留量の実験値は、Cooper^[15]の実験値とよい一致を示し、信頼できる。

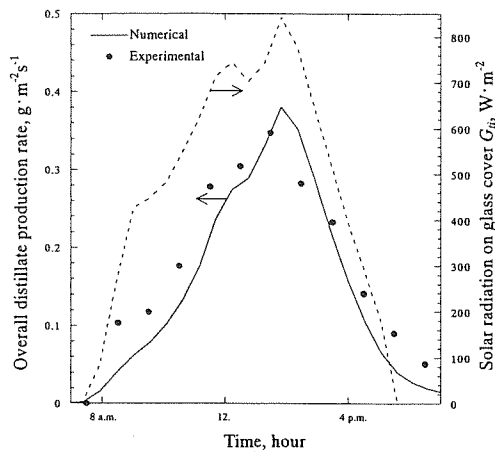


Fig. 9 Comparison of experimental results with theoretical predictions in time variation of overall production rate on Nov. 11th 1998

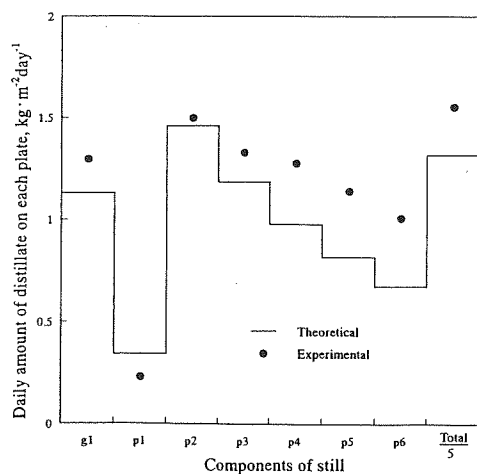


Fig. 10 Comparison of experimental results with theoretical predictions in daily amounts of distillate on the glass plate and all partitions on Nov. 11th 1998

実験値と計算値を比較すると、 $\delta_{gp}=10\text{mm}$, $n=5$ の蒸留器

では、カバーガラス面日射量 ΣG_{hr} が小さい所では実験値が計算値よりも大きく、 ΣG_{hr} が大きいところでは逆になる。この主要な理由は、日射量 ΣG_{hr} の小さい所のシミュレーション計算においては、大気透過率を実際の値より減少させることによって、日射量 G_{hr} を減少させたことによる。観察によれば、日射量の低い日は、大気透過率の減少によるのではなく、雲による日射の断続的な遮蔽が日射量低下の主たる原因である。また、全天日射量の測定は、1時間の積算値を測定しており、実際の激しい日射量の時間変化を比較的なだらかな変化として検知している。したがって、シミュレーションでは、実際よりなだらかな日射量変化および低い直達日射量を用いることになり、それらが蒸留量の測定値より低い計算結果を生ずる原因である。

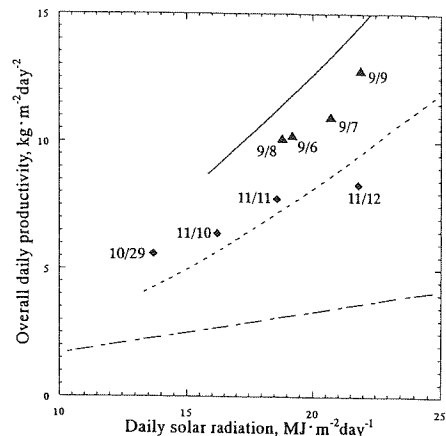


Fig. 11 Comparison of experimental results with theoretical predictions in overall daily productivity; experimental and theoretical values for the still with 8 partitions and 5 mm diffusion gaps (▲ and —), experimental and theoretical values for the still with 6 partitions and 10 mm diffusion gaps (◆ and ---); experimental average values for basin type stills by Tanaka^[4] (----)

表2 図11の各実験日の気象条件

実験日	天候	気温 ℃	南中時 太陽高度	計算に用いた 大気透過率
1998年10月29日	晴れ・くもり	no data	49.5°	0.48
1998年11月10日	晴れ・くもり	20~24	46.0°	0.55
1998年11月11日	晴れ・くもり	19~23	45.7°	0.61
1998年11月12日	晴れ	19~25	45.5°	0.69
1999年9月6日	晴れ・くもり	29~32	69.7°	0.51
1999年9月7日	おおむね晴れ	29~32	69.3°	0.56
1999年9月8日	晴れ・くもり	29~32	68.9°	0.50
1999年9月9日	晴れ	29~32	68.5°	0.59

$\delta_{gp}=5\text{mm}$, $n=7$ の蒸留器については、日射量が比較的大きい $\Sigma G_{hr}=18.8\sim 21.9\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ の範囲で行われたが、総蒸留量の実験値は、計算値よりも平均して14%低い値を示す。これは、2000年1月4日の結果で述べた通り、ウィックが凝縮面に接触し、凝縮水を吸収したためと考えられる。

複合型蒸留器の蒸留量とBasin型を比較すると、日射量 Σ

$G_n=22\text{MJ}\cdot\text{m}^2\text{day}^{-1}$ において、 $\delta_{gp}=5\text{mm}$ 、 $n=7$ の複合型は、計算値でBasin型の4.3倍、実験値で約3.5倍の蒸留量が得られる。なお、9月9日の日射量 $\Sigma G_n=22\text{MJ}\cdot\text{m}^2\text{day}^{-1}$ の場合において、水平面日射量 ΣG_h とカバーガラス面日射量 ΣG_n はほぼ同じ値である。

以上の結果より、 δ_{gp} を小さくすると、熱応力による仕切り板のたわみによりウィックが凝縮面に接触し、凝縮水の回収量が低下するという新たな課題が、本研究によって明らかになった。なお、最近の著者らの実験によって、ウィックと凝縮面の間に小さなスぺーサーを数個設置することにより回収量が向上することが明らかになりつつある。今後、著者らは、このような改良を進め、 δ_{gp} を5mm以下にし、本複合型蒸留器のさらなる性能向上を図る予定である。

5. 結言

著者らは、新しい型のBasin—多重効用複合型太陽熱蒸留器を考案^[1]、製作し、沖縄県西原町の琉球大学構内に設置し、屋外実験を行った。また、シミュレーション計算を行い、本複合型の蒸留性能および特性を予測した。得られた結果は、以下のように要約される。

1 太陽高度の高い夏季は、Basin部の水盤からの水蒸気の凝縮が多重効用部の主たる熱源であり、一方、太陽高度の低い冬至は、多重効用部に直接当たる太陽光がその熱源となる。その結果、冬季の1日の蒸留量は、夏季の場合に比較して、約2割の減少であり、その差が小さいことを数値シミュレーションにより明らかにした。

2 多重効用部の仕切り板間隔 δ_{gp} を小さくすることにより、蒸留性能は著しく向上し、さらに、仕切り板枚数(すなわち効用数)を増やすことにより、蒸留量が増加することを数値シミュレーションにより明らかにし、屋外実験により実証した。

3 $\delta_{gp}=5\text{mm}$ 、 $n=7$ の蒸留器についての蒸留量の実験値は、カバーガラス面日射量 $18.9\sim 21.9\text{MJ}/\text{m}^2\text{day}^{-1}$ の範囲で、平均して計算値の86%の値を示した。14%の減少は、多重効用部の仕切り板が熱応力によりたわみ、ウィックが凝縮面に接触し、凝縮水を吸収するためと考えられる。この接触防止のための改良が今後の課題である。

4 ウィックと凝縮面の接触が少ないと考えられる場合の $\delta_{gp}=5\text{mm}$ 、 $n=10$ の実験結果は、計算結果と同程度の高い蒸留性能を示した。また、その蒸留性能は、これまで報告されている高性能な多重効用蒸留器と同程度の値である。

6. 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] S. Toyama, T. Aragaki, H. M. Salah and K. Murase, Dynamic Characteristics of a Multistage Thermal Diffusion Type Solar Distiller, *Desalination*, 67(1987), 21
- [3] 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、32-3(1985), 129

- [4] 田中耕太郎、慶応大学、博士論文、(1985)、100、147-148
 - [5] R. C. Ouahes and P. J. Le Goff, A Hardy, High-Yield Solar Distiller of Brackish Water, *Desalination*, 67(1987), 43
 - [6] 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
 - [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] 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
 - [10] B. Boucekima, B. Gros, R. Ouahes and M. Diboun, Performance Study of the Capillary Film Solar Distiller, *Desalination*, 116(1998), 185
 - [11] H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, A Highly Productive Basin Type - Multiple Effect Coupled Solar Still, *Desalination*, 130(2000) 279
 - [12] H. Tanaka, T. Nosoko and T. Nagata, Parametric Investigation on a Basin Type - Multiple Effect Coupled Solar Still, *Desalination*, 130(2000) 295
 - [13] 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, *The 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference*, October 1-6, 2000, Kobe, Japan
 - [14] 太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会、太陽エネルギーハンドブック、(1985)、20、温故堂印刷株式会社、東京
 - [15] P. I. Cooper, The Maximum Efficiency of Single-Effect Solar Still, *Solar Energy*, 15(1973), 205
 - [16] 神谷一郎・榎崎祐三・中谷晃・佐藤春樹、太陽エネルギー真空蒸留システムの実機性能とその応用、太陽・風力エネルギー講演論文集1999、(1999)、205
 - [17] T. Kawahara, Y. Toyoshima, A. Nakaya, Y. Narasaki and H. Sato, Performance of Triple Effect Evacuated Solar Still System, *Proceedings of Renewable and Advanced Energy Systems for The 21st Century*, April 11-15, 1999, Maui, Hawaii, Paper No. RAES99-7687
- 記号: A : 面積, m^2 ; C : 熱容量, $\text{J m}^{-2}\text{K}^{-1}$; G : 日射量, W m^{-2} ; H_v : 水の蒸発潜熱, J kg^{-1} ; $\dot{m}_f$: 蒸発・凝縮の質量流速, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$; $\dot{m}_f$: ウィックへの原水供給量, $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$; n : 多重効用部の効用数; Q : 熱移動速度, W ; u : 風速, ms^{-1} ; T : 温度, K ; t : 時間, s ; α : 光の吸収率; δ : 厚さ, m ; θ : カバーガラスの角度; ϕ : 太陽光線と水平面の成す角; ψ : カバーガラス面の法線と太陽光線のなす角; τ : 太陽光の透過率
- 添字: a : 周囲空気; b : 水盤; btm : 水盤下方の断熱材; c : 対流; d : 伝導; df : 水平面散乱日射量; dr : 水平面直達日射量; e : 蒸発・凝縮; f : 供給水; g : ガラス; $g1$: 内側のガラス板; $g2$: 外側のガラス板; gp : 仕切り板間の湿り空気層; h : Basin部内のバルク気体; hr : 水平面; p : 仕切り板; pi : i 枚目の仕切り板; sky : 天空; ti : カバーガラス面