

A Study on Condenser for Solar Distillation System with Functions of Blower and Condensation Enhancement by Use of Ionic Wind

Iwao YOSHIDA^{*1}Masanori FUJIMOTO^{*2‡}Yoshiro TOCHITANI^{*3}

イオン風による凝縮促進および送気機能を持つ 太陽熱蒸留システム用凝縮器の研究

吉田 巖¹藤本 雅則^{2‡}棚谷 吉郎³

Abstract

This paper describes an attachment device to be installed in a basin-type solar distiller, which improve performance by enhancing condensation and internal convection. The device is composed of an electrode system of a thin metal wire and two metal pipes of which surface temperature is kept low by flowing cool water inside the pipes. As high voltage is applied between the wire and the pipes in high temperature and high humidity air, ionic wind blows from the former toward the latter. Water vapor in the wind condenses on the outer surface of the pipes when it collides with them. And the wind passing through between the pipes causes forced convection in the distiller. The performance of blower and condensation enhancement are examined experimentally on the optimal placement of the electrodes described in the previous paper by the authors. The experimental conditions are adopted such as 80, 60, 40°C in nominal environmental temperature, 60, 40, 20°C in nominal temperature of condensation surface with some exceptions, 90% in nominal relative humidity, and 18-26 kV in applied voltage. As a result, the effect of the ionic wind on the condensation enhancement and the blowing performance curves for the above conditions are clarified. Efficiency based on total pressure drops 30 % relative to the value under condition of normal temperature and humidity. Ionic wind increased the amount of condensate by more than 1.8 times, ratio of latent heat for condensation to electric power consumption for ionic wind generation is obtained up to approximately 560 times maximum. The experimental results shows that the ionic wind is effective for performance improvement of the distiller.

Keywords: Solar distiller, Basin type, Performance improvement, Condensation enhancement, Ionic wind
キーワード: 太陽熱蒸留器, Basin 型, 性能向上, 凝縮促進, イオン風

1. はじめに

遠くない将来に、地下水の枯渇が地球規模で起こるとの予測があり¹⁾、大規模農業等で必要な水の不足が危惧されている。飲用水についても、人口増加や気候変動、環境汚染等の進行を考えると、楽観できる状況にはなく、人類が

生きていくための水の確保は待ったなしの状況にあると言ってよいであろう。

近年の淡水化装置は膜法が主流といってよい。化石燃料による蒸留法に比べると環境への負荷は小さく、省エネルギーであるが、電力が不要ということではない。

ところで、近年、頻発する異常気象は地球温暖化が主因とされ、二酸化炭素がその中心的原因物質の一つとして排出削減が進められている。この異常は、自然エネルギーへ

*1 Graduate School of Engineering, Kanazawa Institute of Technology (at that time), Representative, Iwao Yoshida First-Class Architect Office, (Present)

*2 Professor, Department of mechanical engineering, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa 921-8501, Japan

‡ e-mail: fujimoto-m@neptune.kanazawa-it.ac.jp

*3 Professor, Department of mechanical engineering, Kanazawa Institute of Technology (at that time), Professor Emeritus, Kanazawa Institute of Technology (Present)

Received: November 20 2024, Accepted: February 5 2025

*1 金沢工業大学 大学院 工学研究科 機械工学専攻 (当時), 吉田巖一級建築士事務所 代表 (現在)

*2 金沢工業大学 工学部 機械工学科 教授 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘 7-1)

‡ e-mail: fujimoto-m@neptune.kanazawa-it.ac.jp

*3 金沢工業大学 工学部 機械工学科 教授 (当時), 金沢工業大学 名誉教授 (現在)

(原稿受付: 2024年11月20日, 受理日: 2025年2月5日)

の速やかな大幅転換によって沈静化に向かうことが期待されるが、使い易い化石燃料からの転換は遅々として進んでいない。その理由の一つが、使い難さである。自然エネルギーの多くは低密度と間欠性を特徴とする。太陽エネルギーの熱利用を例にとると、得られる温度は低く、夜間や雨天時は使用できない。低温の太陽熱を従来のエネルギー技術で利用するためには高密度化が不可避である。しかし、この種の技術はコストの増加やシステムの複雑化を招き、これらは導入の阻害要因となる。研究・技術開発は進められているが、実用化への道は遠いと言わざるを得ない。

一方、間欠性については、工夫が可能である。例えば、乾燥操作のように、晴天時に成果物を作り、それを蓄積しておく用途が考えられる。装置は夜間や曇天時に稼働を停止するが、蓄積された成果物は間断なく利用できる。

以上のように考えると、淡水化技術に関しては、地味な存在ながらも太陽熱蒸留は捨てがたい。また、地球規模で見れば、太陽熱蒸留に適した地域は多く、必要とする人々の数も決して少なくはない。太陽熱蒸留器の性能向上を目指す種々の改善、工夫²⁻⁸⁾が続けられており、それらのレビュー記事も見られる⁹⁻¹²⁾。

太陽熱蒸留器の中でも Basin 型は、構造が簡単であり、低コストで、メンテナンスが比較的容易という利点がある一方で、その性能は高いとは言えない。性能向上を目指す立場の研究には、例えば、凝縮器やウィック等を工夫した蒸留器¹³⁻¹⁶⁾や凝縮面等の研究¹⁷⁻¹⁸⁾、さらに多重効用化や蒸発、凝縮の促進機能を加える研究¹⁹⁻²⁷⁾などがある。

文献に見られるように、蒸留器の性能は、凝縮過程の影響を受ける。Basin 型では、すべての内面で凝縮が起こり得るので、すべての凝縮液を回収することは容易ではない。また、蒸発面（気液界面）から凝縮面への湿り空気の移動過程も性能上無視できない。Basin 型蒸留器内のキャリア空気の流れは一般に自然対流である。これを強制対流化すれば、凝縮面へのキャリア空気の速やかな移動、蒸発量の増加が期待できる。

本研究は、既存の Basin 型太陽熱蒸留器に付加して性能向上を図る装置の開発を企図している。付加装置は凝縮機能と送気機能を併せ持ち、両機能はコロナ放電で発生するイオン風によって実現する。

いま、放電電極を金属細線、コレクタ電極を金属円管外面として、両電極の軸が互いに平行で、間隔一定の電極系を考え、この電極系を高温・多湿の空気中におく。両電極間に高電圧を印加すると、金属細線近傍で発生したイオンは円管外面に向かって運動し、その途中で湿り空気を駆動してイオン風と呼ばれる空気流とともに円管外面に衝突する。衝突流は、2方向に分かれて管の表面に沿って流れる。この際、コレクタ電極面が低温であれば、水分は電極面上に凝縮する。また、前報²⁷⁾で述べたように、1本の放電電極から等距離の位置になるようにコレクタ電極を2本配置すると、イオン風の一部は両コレクタ電極の間をすり抜けて流れる。この流れは送気として利用できるので、

電極系は Basin 内の湿り空気の駆動源となり、強制対流化が実現される。

イオン風の発生には高電圧電源が必要であるが、電流は小さく、電力的には比較的小面積の太陽電池で賄える。蒸留器と高電圧電源の作動時間はほぼ一致するので、太陽電池と組み合わせた本システムは蒸留動作に最適と考える。蒸留器内には2本の円管と金属細線を設置するのみであり、系内に汚染源を持たないことも特徴の一つである。

本報告の目的は、Basin 型太陽熱蒸留器の動作条件に近い高温・高湿度空気に対する凝縮器の凝縮促進効果とその性能を実験的に把握・検討するとともに、イオン風送気・凝縮装置の送気性能を室内実験で明らかにすることである。

2. 実験

2.1 実験装置

図1は実験装置の概略であり、高電圧電源および測定系は省略した。高温・高湿度空気による実験環境は横1.8 m、縦0.9 m、奥行0.9 mの小室内で実現し、周囲は厚さ30 mmの発泡スチロール板で断熱して、その外側を合成樹脂製シートで覆った。小室内には、加熱系、加湿系、流速・温度・湿度の検出系、攪拌系等を設置した。小室内の湿り空気は電気ヒーターで加熱され、その温度はJIS T型熱電対によって検出されて、ソリッドステートリレー(G3PA, オムロン)、デジタル指示調節計(UT-40, 横河電機)によって制御された。小室内の加湿は加熱型加湿器3台によった。三つの金属製容器それぞれに、蒸留水と1 kWの投げ込み型電気ヒーターを入れて約90℃まで加熱して水蒸気を発生させた。水温は代表容器内に設けたJIS T型熱電対で検出し、デジタル指示調節計(UT-40, 横河電機)、ソリッドステートリレーを用いて電気ヒーターへの供給電力を制御した。加湿器上部には邪魔板を設けて加湿、加湿の均一化を図った。蒸留水は自動蒸留器(WA-53, ヤマト科学)で製造し、小室の外から補給した。小室内にはファン2台を設置し、定常状態になるまではほぼ定格運転を行い、実験時は極微風速で運転した。この極微風速が実験結果に影響しないことは予備実験により確認した。なお、小室はチムニーによって室外と繋がっており、内部の圧力は大気圧である。

試作した実験用付加装置、すなわち放電電極とコレクタ電極兼凝縮管は、図1に示すような試験部に接続され、全体は小室の上部に配置された。これらは前報²⁷⁾で使用した送風部、試験部、風速測定系と同じであるが、コレクタ電極兼凝縮管内に冷却水を流してその表面温度を設定可能にしている点が異なる。試験部は、内寸で幅150 mm×高さ40 mm×長さ795 mmであり、流れ方向へ約22 deg傾斜させて、上部凝縮管の凝縮液が下部凝縮管に落下しないように配慮した。また、放電電極および凝縮管は水平に対して約5 deg傾斜させて、管下端に集まる凝縮液を採取

容器方向に流した。冷却水は、恒温水槽と投げ込み型冷却器（クールパイプ 400R, TITEC），制御系をもつ電気ヒーターによって所定の温度に設定して，ポンプで循環させた。

図 2 は実験用付加装置の詳細であり，放電電極とコレクタ電極兼凝縮管の位置関係，寸法および凝縮管の外面温度測定用熱電対の位置を示している。以後，この放電電極とコレクタ電極兼凝縮管をまとめて凝縮・送気ユニットと呼び，コレクタ電極兼凝縮管をコレクタ管と略称する。熱電対は，その検出部が管外面に一致するようにコレクタ管内側から取り付け，その測定値をコレクタ管外表面温度すなわち凝縮面温度 T_s とみなした。 $\theta = 0 \text{ deg}$ の方向は送気・凝縮ユニットの水平方向であるが，上述のように，ユニットは約 22 deg 前方に傾けて取り付けられているので，実験時は地上と平行ではない。また，イオン風の淀み点と $\theta = 0 \text{ deg}$ は一致せず，上方管，下方管の淀み点は，それぞれ $\theta \approx -35, 35 \text{ deg}$ である。なお，温度の測定誤差は $\pm 0.3 \text{ K}$ と見積もっている。

放電電極は $\phi 0.14 \text{ mm}$ の鉄-クロム線で，有効長は 148 mm であり，コレクタ管は前報²⁷⁾で決定したように外径 $D = 40 \text{ mm}$ とし，有効長 150 mm ，肉厚 1 mm の銅管 2 本であり，いずれも紙面に垂直な方向に設置されている。コレクタ管の外表面は購入時の状態であり，表面処理等を行っていない。放電電極およびコレクタ電極は，前報²⁷⁾で求めた最適寸法・配置すなわち，2 本のコレクタ電極外面間の最短距離を 40 mm ，放電電極とコレクタ電極外面間の距離を 50 mm とした。2 本のコレクタ電極に対するイオン電流はそれぞれ独立に測定し，両者の差が許容範囲 $\pm 3 \mu\text{A}$ 以内に入るように電極間距離を微調整した。

イオン風は放電電極から 2 本のコレクタ管に向かい，コレクタ管の間を流れて，その後方の試験部に入り，整流される。試験部内の気流速度は，JIS ピトー管（LK-1, 鼻管直径 6 mm ，岡野製作所）とデジタル微圧計（DMS-4-2L, HITACHI）により動圧，静圧を測定して求めた。測定は，試験部流路断面積を縦 3 等分，横 6 等分の合計 18 等分して，それぞれの面積の中心位置で行った。微圧計の出力は，ローパスフィルターを通してイオン風特有の変動成分を極力取り除き，デジタルマルチメータ（34401A, Hewlett Packrd）で読み取った。流量の調節は，試験部最後端に設けた弁で行った。

直流高電圧は，ネオントランス（No.K-43756P-2, 長野愛知電機），ダイオード（ESJA53-20, 富士電機）コンデンサ（ $1 \mu\text{F}$, ニチコン）を用いて得た。出力電圧は，ネオントランスの入力電圧をスライドトランスで調節した。高電圧の正出力は放電電極に，負出力はコレクタ電極（コレクタ管）に接続し，後者を接地した。

2.2 実験条件および実験方法とデータ整理

小室内の雰囲気温度 T_a の代表値は $80, 60, 40 \text{ }^\circ\text{C}$ であり，その範囲はそれぞれ $T_a = 79.3 \sim 82.4 \text{ }^\circ\text{C}$, $58.0 \sim 61.7 \text{ }^\circ\text{C}$, $40.0 \sim 41.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，相対湿度 H_R の代表値は 90% であり，その範囲は $H_R = 87.1 \sim 93.8 \%$ である。また，凝縮管表面温

度 T_s の代表値は $T_s = 20, 40, 60 \text{ }^\circ\text{C}$ で許容差を $\pm 0.5 \text{ K}$ とし， $\theta = 0 \text{ deg}$ の値で代表させた。 T_s は測定値の算術平均を用いた。印加電圧 E は $E = 18, 22, 26 \text{ kV}$ とした。冷却装置の能力を超える条件，すなわち $T_a = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $T_s = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ，および $T_a = T_s = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ の実験は省略した。

凝縮水の質量は電子天秤（Chyo, MJ-500）で測定し，実験の 1 ランにつき 15 分おきに 3 回測定して，その算術平均値とした。湿度は，熱電対を乾球とし，ガラス管標準温度計（ $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 目盛）とガーゼを組み合わせた湿球と組み合わせ測定した。湿り空気温度は，放電電極の前方 150 mm の流路中心と，それから両側方に 75 mm 離れた位置に設けた JIS T 型熱電対 3 本により測定し，測定値に差がある場合は算術平均値を採用した。実験は定常状態に達したことを確認した後に開始した。

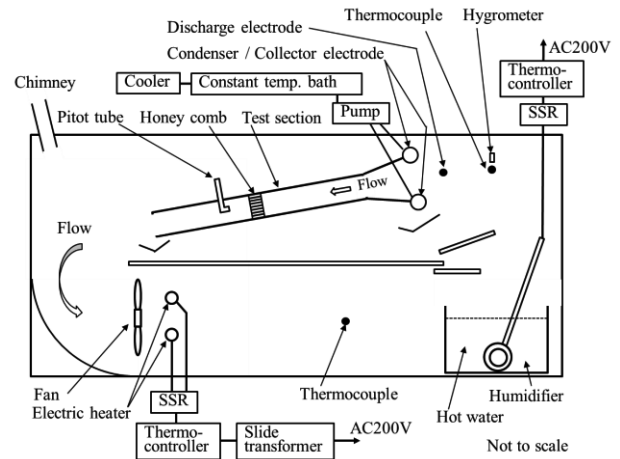


Fig.1 Experimental apparatus.

図 1 実験装置

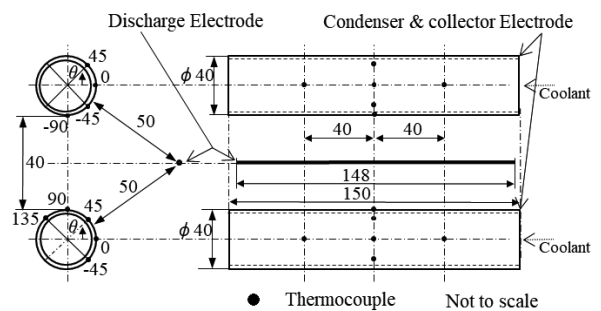


Fig.2 Arrangement of electrodes and thermocouples on surface of condenser/collector electrode pipes.

図 2 電極及びコレクタ電極兼凝縮管表面熱電対の配置

3. 結果と検討

3.1 高温・高湿度空気の送気性能

電極間に高電圧を印加するとコロナ放電が起こり，線電極近傍で生じたイオンはコレクタ管に向かって運動する。その際，周辺の空気分子を伴ってイオン風になり，コレクタ管に衝突する。衝突流は，コレクタ管面で上下に分かれ，

2本のコレクタ管の間を通過した流れは試験部に入る。本節では、この試験部に入った流れに対する送気性能を扱う。なお、流路の外側に向かう流れはコレクタ管の周辺でセル状流れを形成し、衝突流およびコレクタ管に沿う流れは湿り空気中の水分の凝縮を促進するが、これらについては後述する。

図3は、イオン風を用いた送気装置の、高温度・高湿度湿り空気に対する性能曲線である。全圧効率 η_{pt} の最大値は約 0.42% であり、常温空気に対する前報²⁷⁾ の値、約 0.60% に比べて小さい。その原因としては次のようなことが考えられる。

高温度・高湿度下では、常温・常湿下に比して空気中の H_2O が増加し、その分 N_2 , O_2 が減少するとともに、温度上昇が起こっている。したがって、効率の低下はこれらの変化に起因すると考えられる。一方で、線電極近傍は極めて強い電場強さの領域であるから、気体はプラズマ状態にあると考えられる。効率の低下はプラズマ化学反応と結びついており、現象は極めて複雑で、効率低下の主因を明確にすることはできなかった。

図3から、全圧 p_t 、静圧 p_s は最大でも 2.7 Pa 程度であり、送気装置としては低いが、Basin型蒸留器内の静止湿り空気の駆動は可能と考える。図中のプロットは若干ばらついているが、数 Pa オーダーの微圧測定であり、やむを得ないと判断した。最上段の図は流量に対する電極での消費電力 P_0 を示している。消費電力が電極長さに比例すると仮定すると、放電電極 1 m あたり（コレクタ管は上管、下管合わせて 2 m あたり）の消費電力は最大でも 17 W/m 程度であり、消費電力は小さい。このことが、高電圧電源の効率を考慮しても、小面積の太陽電池で賄い得る程度という主張の根拠である。

3.2 コレクタ電極兼凝縮管の凝縮状態

凝縮量が増加すると、放出された凝縮潜熱によって凝縮面温度は上昇する。したがって、局部的凝縮状態はその位置の凝縮面温度を検出することで把握できる。

図4, 5は $T_a = 80^\circ C$, $T_s = 40^\circ C$ におけるコレクタ管の外面温度 T_s の周方向分布であり、それぞれ上コレクタ管、下コレクタ管である。

図4のすべてのプロットは $39 < T_s < 40^\circ C$ にあり、プロット間の差は小さく、 θ 方向の変化も小さい。高い E では T_s が大きくなる傾向があり、僅かながら促進効果が見られる。しかし、逆転しているプロットもあり、全体として、促進効果は極めて小さい。

一方、図5のプロットは、図4とは大きく異なり、 $E > 0 kV$ の T_s が、 $E = 0 kV$ のそれと比べて明らかに大きい。また、 T_s は、ばらつきがあるものの、 θ に関わらず、 E の増加につれて増加している。いずれもイオン風による凝縮促進効果の証左である。 θ 方向の T_s の変化の詳細については、凝縮面の観察ができないこと、表面の濡れ特性等が不均一である可能性が高いことなどのために明確な説明は困難であるが、例えばコレクタ管の頂部付近では凝縮液

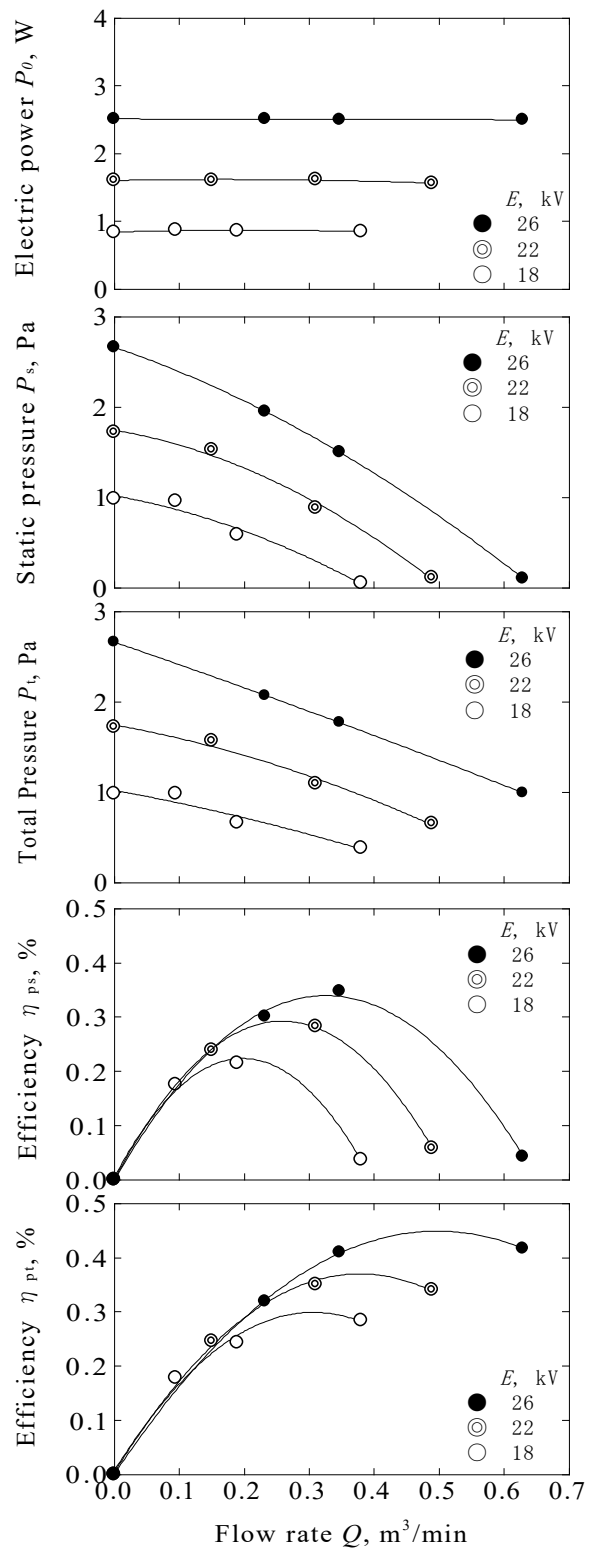


Fig.3 Performance curve ($T_a = 80^\circ C$, $T_s = 40^\circ C$).

図3 性能曲線 ($T_a = 80^\circ C$, $T_s = 40^\circ C$)

が管の両側方に流下することにより、液膜厚さが薄くなることで凝縮量が増加していると推測できる。

図5に比べると、図4ではイオン風の効果が見られるとはいえない。しかし、プロットは全体として同じ傾向を

持つことから、全てのプロットが異常値とは考え難く、何らかの物理的原因によると考えるのが自然である。

この点を確認するために、新たに簡単な装置を製作して検証実験を行った。その結果、凝縮性能は上コレクタ管と天板との間隔の影響を受けることが明らかになり、図4の信頼性が確認できた。なお、詳細については、本ユニットの実用化や使用条件等に直接関係することから、別途報告する予定である。

上コレクタ管の凝縮量が小さくなる原因の一つは、検証実験の結果から、次のように考えられる。一般に、Basin型蒸留器では、水面とカバーガラス間の距離を小さくして、湿り空気の移動距離を短くする。本ユニットはその狭い空間に設置することになるので、本研究ではその状況を模擬して天板と上コレクタ管の距離を小さくしている。実機でいえば、上コレクタ管はカバーガラスに近く、雰囲気温度は低い。一方、下コレクタ管は蒸発面である水面に近く、雰囲気温度は高い。言い換えれば、上コレクタ管は絶対湿度の低い領域に入ることになる。このことが、本実験においても起こっていると考えられる。

図6は、上コレクタ管付近の、天板側流れのイメージ図である。線電極付近で駆動されたイオン風は上コレクタ管に衝突後、時計回りに流れて線電極に戻る循環流、前報²⁷⁾でセル状流れと呼んだ流れを形成する。この際、天板下面と上コレクタ管の距離が近いと、セル状流れは天板下面に接して流れる。天板は断熱されているが、その表面温度は小室の雰囲気温度に比べれば低い。両者間の対流伝熱によってセル状流れは継続的に冷却され、上コレクタ管に衝突する湿り空気の温度 T_a が低下し、飽和水蒸気量も低下する。これが凝縮量の減少を招く一因となり得る。

見方によっては、上記現象は本質に関わる弱点であり、本ユニットには価値がないと映るかもしれない。しかしながら、少なくとも下コレクタ管は図5に示すように効果的に作動しており、性能向上に寄与すると考えられる。また、本ユニットを適用する機器や条件によっては、片方のコレクタ管の凝縮性能が低下する可能性があることを含めて、その全体的性能・特性を把握、検討しておくことには価値があると考えられる。

上記のことから、本ユニットを設置する際の最適位置、送風方向、さらに上コレクタ管内の冷却水の要不要などについてはさらなる検討が必要であると考えられる。

3.3 イオン電流と凝縮量

図7は凝縮量 m に対するイオン電流 I の影響を示している。 m は上、下2本のコレクタ管の合計であり、パラメータは温度差 $\Delta T = T_a - T_s$ である。

図7は次の特徴を持つ。 m は、 T_a および I の増加に伴って増加し、この傾向は T_a , ΔT によらない。また、 m の大部分のプロットは、 I の増加に伴って、飽和傾向を示すように見える。 I の範囲が狭いこと、凝縮状態が観察できないことなどから、詳細な議論は困難であるが、これらの傾向については、次のように理解できる。

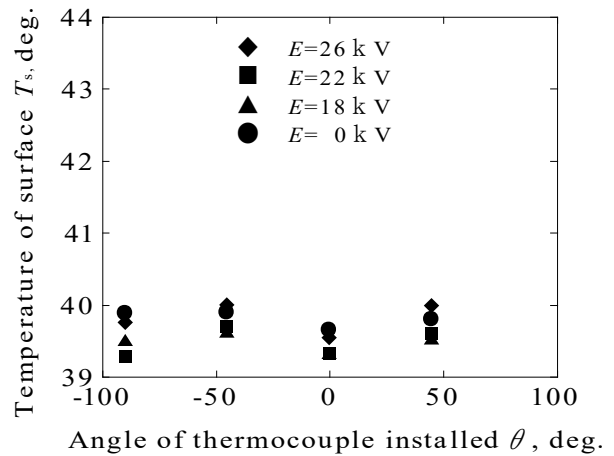


Fig.4 Surface temperature distribution of upper collector and condensation pipe ($T_a = 80^\circ\text{C}$, $T_s = 40^\circ\text{C}$).

図4 上方コレクタ電極兼凝縮管外面の温度分布 ($T_a = 80^\circ\text{C}$, $T_s = 40^\circ\text{C}$)

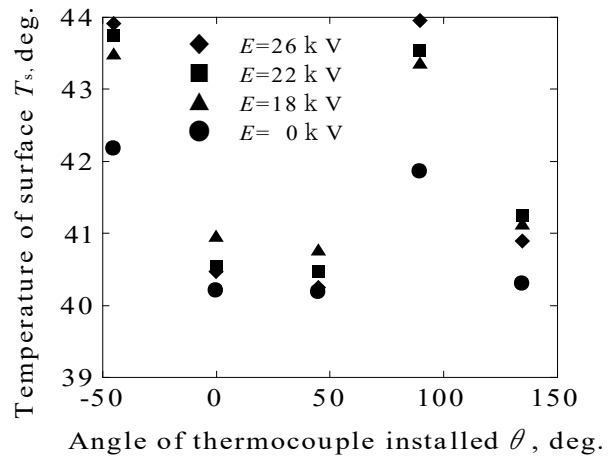


Fig.5 Surface temperature distribution of lower collector and condensation pipe ($T_a = 80^\circ\text{C}$, $T_s = 40^\circ\text{C}$).

図5 下方コレクタ電極兼凝縮管外面の温度分布 ($T_a = 80^\circ\text{C}$, $T_s = 40^\circ\text{C}$)

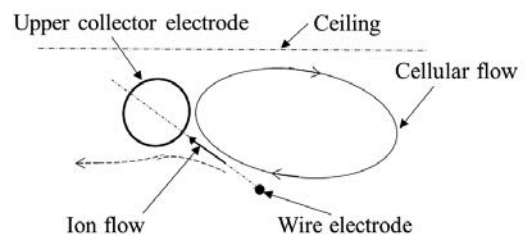


Fig.6 Image of cellular flow near upper collector electrode.

図6 上コレクタ管周りのセル状流れのイメージ

最初の m の増加については、凝縮面(コレクタ管表面)への湿り空気の供給量の変化が主因であろう。凝縮管への湿り空気の供給量は、イオン風の流速 u に支配される。

前報²⁷⁾で述べたように、 u はイオン電流 I を用いて近似的に、

$$u \sim I^{1/2} \tag{1}$$

のように表現できる。したがって、 I の増加は湿り空気の供給量の増加を意味すると考えてよく、凝縮が速やかに起こる範囲では、 m は増加傾向をもつことになる。 $T_a, \Delta T$ の影響については、次のように考える。 T_a が増加すると、湿り空気の飽和水蒸気量が増加し、含有水蒸気量が増加する。したがって、この水蒸気の供給量増加が m の増加の原因と考えられる。一方、図7では T_a =一定なので、 ΔT の増加は T_s の低下を意味する。 T_s の低下分だけ凝縮面への物質移動のポテンシャル差が大きくなり、凝縮面への移動水蒸気量が増加して、 m の増大に繋がると考えられる。

飽和傾向については、式(1)の頭打ち傾向による供給水蒸気量の減少と、凝縮割合（凝縮速度）の低下の二点が主因であろう。上述のように、 I が増加すると凝縮量が増加し、凝縮面は凝縮滴や凝縮液膜で覆われる。凝縮がある程度進めば凝縮液や滴は流下し、凝縮面は更新されるが、その後再び、凝縮滴または凝縮液膜で覆われ、これが繰り返される。液で覆われた部分における凝縮は気液界面で起こることになり、固気界面に比べて伝熱性能は低い。この結果、伝熱性能の高い固気面積の減少と相俟って、単位時間あたりの凝縮量は低下する。このことが、上述の飽和傾向の一因と考えられる。

3.4 イオン風の凝縮促進効果

図8は、式(2)で定義する凝縮促進比 α に対する I の影響を示しており、パラメータは $T_a, \Delta T$ である。

$$\alpha = \frac{m_I}{m_0} \tag{2}$$

ここに、 m_0, m_I はそれぞれ、イオン風の付与なし、すなわち $I=0 \mu A$ と、イオン風の付与あり、すなわち $I>0 \mu A$ を示しており、それぞれ上、下コレクタ管の凝縮液質量の合計である。

図8は全体的に見て、 $I>0 \mu A$ では $\alpha > 1$ であり、イオン風による促進効果が確認できる。 α の増加割合は、 $T_a=40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T=20 \text{ K}$ で最大であり、 $T_a=80 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T=40 \text{ K}$ で最小である。例えば、 $\alpha=2$ は、イオン風の付与が収量を2倍にすることを意味する。したがって、同じ収量を得る蒸留器の面積は半分でよいことになって、本方法による凝縮促進は効果的であると判断できる。

3.5 消費電力あたりの促進効果

凝縮潜熱 L_h と凝縮量 m との積 $m \cdot L_h$ 、すなわち凝縮のための除去エネルギーと、消費電力 P_o 、すなわち供給エネルギーを考え、それらの比を凝縮潜熱-消費電力比 β として式(3)で定義する。

$$\beta = \frac{m \cdot L_h}{P_o} \tag{3}$$

図9は、 β に対する P_o の影響を示しており、パラ

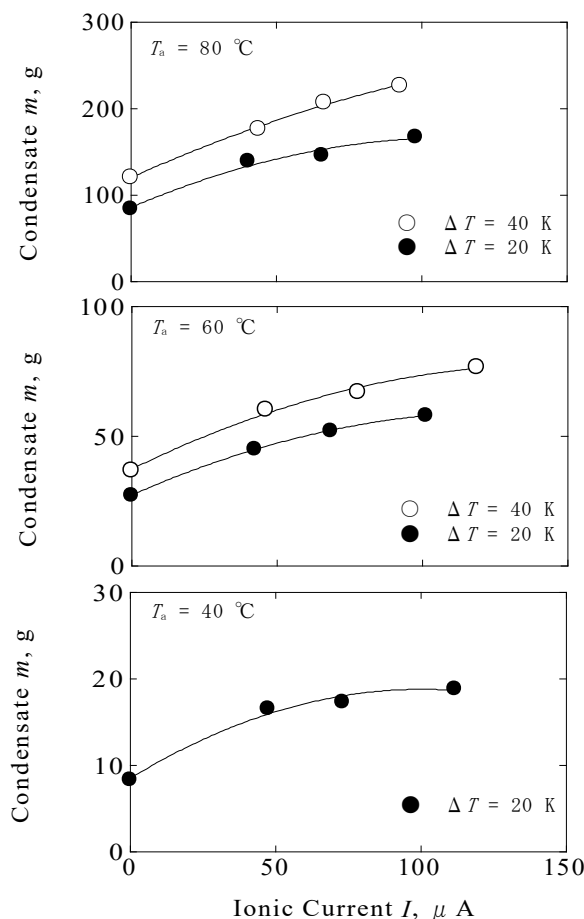


Fig.7 Relation between ion current and condensate.

図7 イオン電流と凝縮量の関係

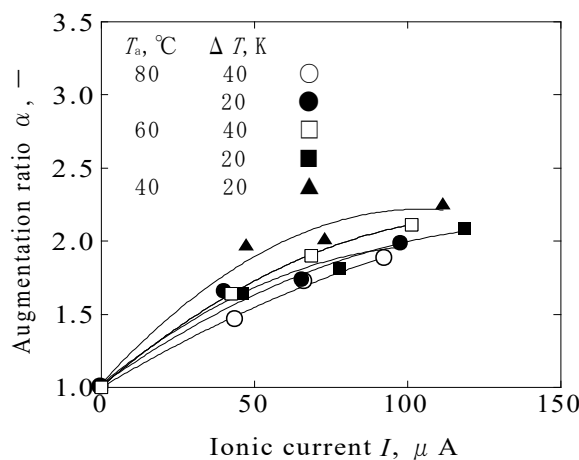


Fig.8 Augmentation ratio vs. ionic current

図8 促進比に対するイオン電流の影響

メータは T_a , ΔT である。全体的に見て, P_o の増加とともに β は大きく減少する。 β は T_a , ΔT が大きいほど大きく, 単位消費電力あたりの効果が高い。その値は, $P_o \approx 0.8 \text{ W}$ で, 最大 560 倍程度に達することから, 僅かな電力で高い効果を期待できることが分かる。

以上を総合的に考えると, 本研究で提案, 検討した付加装置は Basin 型太陽熱蒸留器の性能向上に有効であると判断できる。今後, 実用化に向けて, Basin 型の太陽熱蒸留器内の実装における配置, 送風風向等の最適化, および凝縮性能と送気性能の双方を考慮した電極構成や運転パラメータの最適化について, 研究を進めたいと考える。

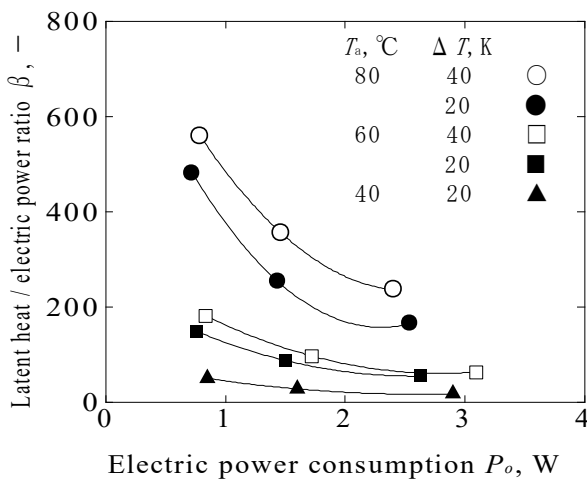


Fig.9 Ratio of latent heat to electric power consumption vs. electric power consumption

図9 潜熱と消費電力の比に対する消費電力の影響

4. まとめ

Basin 型太陽熱蒸留器内に設置して, 内部の湿り空気を強制対流化するとともに, 凝縮を集中的に行うことによって性能向上を目指す凝縮器を実験的に検討した。凝縮促進および送気にはイオン風を利用し, その発生は金属細線による放電電極と, 管内に冷却液を流した円管 2 本によるコレクタ電極兼凝縮管によった。装置の性能実験の結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 高温・高湿度空気に対する送気装置としての全圧効率は, 約 0.42% で, 常温・常湿の空気に対する値よりも小さい。
- (2) 天板近傍に設置したコレクタ電極兼凝縮管に対する凝縮促進効果は, それより下方に設置したコレクタ電極兼凝縮管に比べて低い。管および循環流为天板下面に形成される低温領域に入ること, この領域の絶対湿度が低いことが主因と考えられる。
- (3) 凝縮管外表面の凝縮量は, イオン電流の増加とともに増加し, あるイオン電流でピークをとる傾向を示す。
- (4) イオン風を付与しない場合に対するイオン風付与に

よる凝縮の促進割合は, 湿り空気温度, 凝縮面温度により変化するが, イオン電流 $100 \mu\text{A}$ 前後で 1.8 倍以上が得られた。

- (5) イオン風の発生に要した電力に対する凝縮潜熱の比は, 消費電力が低いほど高く, コレクタ電極兼凝縮管長 0.3m (0.15m, 2 本) に対して 0.8 W/m 弱で最大 560 倍程度が得られ, イオン風によって高い促進効果が期待できる。
- (6) 本研究で提案する付加装置は Basin 型太陽熱蒸留器の性能向上に有効であると考えられる。

謝辞 実験に際しては, 当時の棚谷研究室 学部生 伊藤大輔, 上原弘和, 内藤邦雄, 三島丈志の諸氏, および藤本研究室 学部生 濱本大進氏の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Inge E. M. de Graaf, Tom Gleeson, L. P. H. (Rens) van Beek, Edwin H. Sutanudjaja and Marc F. P. Bierkens, Environmental flow limits to global groundwater pumping, *Nature*, **574**, 90-94 (2019).
- 2) Koutaro Tanaka, Kouichi Watanabe, Tilting wick solar distiller and its performance, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **9**(5), 38-47 (1983).
- 3) Dai Tanaka, Yasuhito Nakatake, Improvement of a tilted-wick solar still by using a flat plate reflector and changing its azimuth angle once a day, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **32**(6), 33-38 (2006).
- 4) A. S. Abdullah, Improving the performance of stepped solar still, *Desalination*, **319**, 60-65 (2013).
- 5) Z. M. Omara, A. E. Kabeel, M. M. Younes, Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors, *Energy Conversion and Management*, **78**, 876-881 (2014).
- 6) Dai Tanaka, Yasuhito Nakatake, Experimental study of a vertical diffusion solar still coupled with a flat plate reflector, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **32**(2), 45-51 (2006).
- 7) Yasser Fathi Nasser, Saib A. Yousif, Abubaker Awidat Salem, The second generation of the solar desalination systems, *Desalination*, **209**, 177-181 (2007).
- 8) Ahmed Z. Al-Garni, Productivity Enhancement of Solar Still Using Water heater and Cooling fan, *Journal of Solar Energy Engineering*, **134**, 031006-1 (2012).
- 9) V. Sivakumar, E. Ganapathy Sundaram, Improvement techniques of solar still efficiency: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**, 246-264 (2013).
- 10) T. Rajaseenivasan, K. Kalidasa Murugavel, T. Elango, R. Samuel Hansen, A review of different methods to enhance the

- productivity of the multi-effect solar still, A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **17**, 248-259 (2013).
- 11) Mohammad Abd Al Amir Khadim, Wisam A. Abd AL-Awahid, Dhafer M.Hachim, Review on the types of solar stills, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **928**, 1-15 (2020).
- 12) Karrar A. Hammoodi, Hayder A. Dhahad, Wissam H. Alawee, Z. M. Omara, Talal Yusa, Pyramid solar distillers: A comprehensive review of recent techniques, *Results in Engineering*, **18**, 1-24 (2023).
- 13) F. A. Essa, A. E. Kabeel, and Z. M. Omara, Effect of Using Nanofluids and Providing Vacuum on the Yield of Corrugated Wick Solar Still, Eighteenth International Water Technology Conference, Sharm EL Sheikh, 519-521 (2015).
- 14) P. Monowe, M. Masale, N. Nijegorodov, V. Vasilenko, A portable single-basin solar still with an external reflecting booster and outside condenser, *Desalination*, **280**, 332-338 (2011).
- 15) A. Madhlopa, C. Johnstone, Numerical study of a passive solar still with separate condenser, *Renewable Energy*, **34**, 1668-1677 (2009).
- 16) A. El-Bahi, D. Inan, Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser, *Renewable Energy*, **17**, 509-521 (1999).
- 17) Kazufumi Saibe, Takashi Machimura, Katsuhito Yamaguchi, Satoshi Soda, Performance and water quality improvement of the solar still using transparent film coated with titanium dioxide for condensing cover, *Proceedings of JSES/JWEA Joint conference (in Japanese)*, 305-308 (2003).
- 18) R. Bhardwaj, M. V. ten Kortenaar, R. F. Mudde, Influence of condensation surface on solar distillation, *Desalination*, **326**, 37-45 (2013).
- 19) Hideaki Okamura, Koutarou Tanaka, Kouichi Watanabe, Study on the performance of multiple effect solar still(Experimental results and simulation analysis under outdoor insolation for downward heating type stills), *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **14**(6), 27-34 (1988).
- 20) Dai Tanaka, Outdoor experiments on a vertical multiple-effect diffusion solar still with a flat plate reflector, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **33**(5), 75-81 (2007) .
- 21) Dai Tanaka, Takehiro Nozoko, Koushi Nagata, Experimental and Theoretical Study of Basin-Type-Multiple-Effect Coupled Solar Still, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **27**(2), 59-66 (2001).
- 22) Mansoor Feilizadeh, M. R. Karimi Estahbanati, Khosrow Jafarpur, Reza Roostaazad, Mehrzad Feilizadeh, Hamed Taghvaei, Year-round outdoor experiments on a multi-stage active solar still with different numbers of solar collectors, *Applied Energy*, **152**, 39-46 (2015).
- 23) Jianyin Xiong, Guo Xie, Hongfei Zheng, Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface, *Energy Conversion Management*, **73**, 176-185 (2013).
- 24) Zhenyuan Xu, Lenan Zhang, Lin Zhao, Bangjun Li, Bikram Bhatia, Chenxi Wang, Kyle L. Wilke, Youngsup Song, Omar Labban, John H. Lienhard, Ruzhu Wang and Evelyn N. Wang, Ultrahigh-efficiency desalination via a thermally-localized multistage solar still, *Energy Environmental Science*, **13**, 830-839(2020).
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ee/c9ee04122b>
- 25) Yoshiro Tochitani, Takao Taniguchi, Forced-convection effect of ionic wind on performance of multiple-effect unit for solar distillation system, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **20**(6), 33-39 (1994).
- 26) Yoshiro Tochitani, Shinichi Satou, A study on multiple-effect unit with forced-convection induced by ionic wind. Distillation and enrichment characteristics and effect of number of discharging electrode, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **22**(6), 67-74 (1996).
- 27) Iwao Yoshida, Masanori Fujimoto, Yoshiro Tochitani, A Study on Optimization of Electrode Arrangement and Performance of Blower for Solar Distillation System by Use of Ionic Wind (An Experiment under Condition of Normal Temperature and Humidity), *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **51**(2), 55-62 (2025).