

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)

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

イオン風による太陽熱蒸留システム用送気装置の電極配置の最適化と送気性能 (常温・常湿空気による実験)

吉田 巖¹藤本 雅則^{2‡}羽谷 吉郎³

Abstract

An attachment device was experimentally studied to improve the performance of a Basin-type solar distillation system by using ionic wind to enhance convection and condensation inside the system. This paper describes the air blower performance of the attachment. The attachment consists of an electrode system including of a thin metal wire of 0.14 mm O.D. and two metal pipes of 40 mm O.D. When the distance between the thin wire and each pipe is kept equal and a high voltage is applied between the electrodes, ionic wind blows from the thin wire electrode to each pipe electrode. The optimal dimensions and placement of the electrodes for maximum efficiency are experimentally determined, and the air blowing performance at that dimensions and placement is measured using air at normal temperature and humidity. As a result, the optimal dimensions and placement of electrodes are as follows: the outside diameter of the pipe is 40mm, the distance between the thin wire electrode and each pipe electrode is 50 mm, the shortest distance between the surfaces of two pipe electrodes is 40 mm, and the discharge angle viewed from the wire electrode to the two electrode pipes is approximately 70 deg. The above values take maximum efficiency and compactness into consideration, the efficiency based on total pressure was approximately 0.6%. The maximum average speed of ionic wind was 1.4 m/s. An approximate formula for relationship between ion current and the average speed of ionic wind is also shown.

Keywords: EHD blower, Blower Performance, Electrode arrangement, Ionic wind, Solar distillation
キーワード: EHD 送気装置, 送気性能, 電極配置, イオン風, 太陽熱蒸留

1. はじめに

近年, 世界各地で大雨や干ばつが頻発しており, 地球上の水循環は異変をきたしているように見える. 長い年月を経て貯えられてきた地下水は大規模農業等で大量に使用され, 遠くない将来に, 地球上の多くの地域で枯渇するとの予測がある¹⁾. しかしながら, 農業用水や工業用水の必

要量はあまりに膨大で, 淡水化技術で賄うことは極めて難しい. それに対して飲用水は, 原水を得られれば, 淡水化技術やその工夫で対応できる可能性がある.

近年の淡水化技術は膜法が中心であり, 一般的に多くの電力を必要とする. 設備, コスト, メンテナンス等を含めて地球規模で考えると, 膜法が最善の選択と言える地域は限られる. 一方, 蒸留法は長い歴史をもち, 熱源に自然エネルギーの代表である太陽エネルギーを選択できる地域は広大である. 太陽エネルギーには, 温水器等の簡単な装

*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 17 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17日)

置で得られる温度の低さや、間欠性、面積支配等の特徴があり、その利用に際してはこれらが短所とならない工夫や対策が望まれる。太陽熱蒸留は、晴天時に蒸留して成果物である蒸留水を蓄積できるため、晴天・曇天時はもちろん、夜間にも水の利用は可能であり、間欠性という短所は克服できる。

太陽熱蒸留器の基本形は Basin 型である。構造は簡単であるが高性能とは言えず、性能向上法が種々検討されている。例えば、傾斜ウィック²⁾、階段状蒸発面³⁾、反射板や集光器の付加⁴⁾、外付けコンデンサー付波形ウィック⁵⁾、コンデンサ空冷ファンの付加⁶⁾、多重効用や複合化⁷⁻¹⁰⁾などである。また、太陽熱蒸留の性能向上に関するレビュー記事¹¹⁻¹⁴⁾も見られる。いずれの方法も構造の複雑化は避けられず、コストやメンテナンスの上で難度が増大する。

文献から次の二点を読み取れる。太陽熱蒸留器内部の自然対流を強制対流化すれば、キャリアである湿り空気の移動が促進されて性能向上を期待できること、さらに湿り空気を凝縮器に衝突させれば、凝縮の促進と局所化が可能になって凝縮水の収集と熱回収が容易になり、回収熱の原水予熱への利用や、多重効用化も期待できる。

もし、上記のような機能を持つユニットが実現できれば、新設時はもちろん、設置後の適切な時期に増設することも可能であって、コストを分割でき、取り外してメンテナンスが可能である上に、増設工事期間にも本体は蒸留器として稼働できる可能性があるなど利点が多い。

蒸留器内の強制対流化は、一般に送風機による。しかし、飲用水の製造では、蒸留器内部に汚染源のないことが絶対条件であり、オイルミスト等を発生する潤滑系をもたない送風機が理想であるから、電気モーター駆動の送風機は好ましくない。

本研究は、以上のような機能を実現するユニットの開発を目指しており、Basin 型太陽熱蒸留器内に付加的に組み込み可能な凝縮・送気装置に関するものである。凝縮促進機能に加えて、強制対流化するための送気機能を併せ持ち、かつ潤滑系をもたない点に特徴がある。凝縮促進および送気機能は高電圧電源により動作するが、電力的には小面積の太陽電池で賄える程度である。また、電力は蒸留器作動時に消費され、蒸留器と太陽電池の作動時間は一致する。加えて、凝縮促進機能は、凝縮器の小型化、低コスト化に貢献できると同時に、太陽光導入経路での凝縮量減少による太陽光入射量の改善が期待できる。一方で、カバーガラス面での凝縮量の減少による面温度の低下が、逆に凝縮量を増加させるという逆効果の可能性もある。凝縮器の冷却に原水を用いれば、回収された凝縮熱で原水を予熱でき、蒸留性能の向上につながる可能性もあり、実用化上はより好ましいと考えられる。

潤滑系を持たない凝縮促進および送気にはイオン風を用いる。後述するイオン風について、簡潔に言えば、電極間のコロナ放電によって発生する気流であり、本研究の電極系は、放電電極として金属細線、コレクタ電極として2

本の金属円管からなる。

このような原理、構造であるから、イオン風発生装置およびイオン風が系を汚染する可能性は極めて低く、また保守性の点でも優れている。さらに工夫すれば、同時にオゾンが発生し、活用できる可能性もある。著者の一人は、これまでイオン風による送気装置の研究を行ってきており¹⁵⁻¹⁷⁾、本研究で提案する送気装置は、送気機能に加えて凝縮促進機能をもつ。具体的には、コレクタ電極に金属円管外面を用い、電極と凝縮面とを兼用する。また、コレクタ電極は一定間隔をおいて二本用いることで、セル状流れの流れ方向を制御している。このような二つの機能を同時に実現する視点の研究は、これまでの調査では見つかっていない。イオン風による送気装置の性能は多くの因子に支配され、それらは互いに影響し合うことが予想される。その結果、例えば、性能の支配因子と予想される金属細線と2本の円管の寸法や配置が性能に与える影響すら明らかでない。

本報告の目的は、常温・常湿空気を用いて、Basin 型太陽熱蒸留器内に設置可能なコンパクトさを保ちつつ、全圧効率ができるだけ大きくなる電極の寸法とその配置を明らかにすること、およびその条件下における送気特性、性能曲線を明らかにすることである。なお、本報告では凝縮は考慮せず、凝縮機能とその性能については次報で報告する。なお、Basin 型太陽熱蒸留器内における本装置の最適設置位置は収量が最大になる位置であり、その検討は送気や凝縮の基本性能が明らかになった段階で可能になると考える。本報では設置位置については扱っていない。

2. 実験

2.1 送気機構

図1は、紙面に垂直な方向に設置した1本の線電極と1本の金属円管電極の間に高電圧を印加する際に発生するイオン風のイメージ図である。このとき、両電極間にコロナ放電が起こり、線電極近傍でイオンが発生する。イオンは対極である円管電極(コレクタ電極)に向かって運動し、その途中で周囲の空気分子を駆動して、全体としてイオン風となってコレクタ電極に向かい、一部は電極面に衝突する。衝突後、空気流は上下に分かれ、図のようなセル状の循環流AおよびBを生じる。

いま、図2のように、ある間隔 L 離れた2本のコレクタ電極と、両者から等しい距離にある1本の線電極を紙面に垂直な方向に設置し、両電極間でイオン風が発生した場合、上管下側のセル状流れ(図1のBに対応)と、下管上側のセル状流れ(図1のAに対応)は互いに干渉し、電極配置が適切であれば二つの流れは合流し、両管の間を通り抜ける流れが発生する。本研究は、前述の衝突流と、この通り抜ける流れとを利用して、Basin 内の凝縮促進と強制対流化を図ることを企図している。なお、送気として

は、上管の流れ B と下管の流れ A のみを対象とした。それら以外の流れの方向制御は、電場やイオン風に影響する可能性があるとの判断から断念した。その結果、これらの流れは送気として扱っていない。

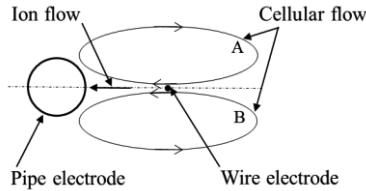


Fig.1 Image of cellular flow induced around ionic wind between a wire and a pipe electrode.

図1 線電極と円管電極間のイオン風に誘起されるセル状流れのイメージ図

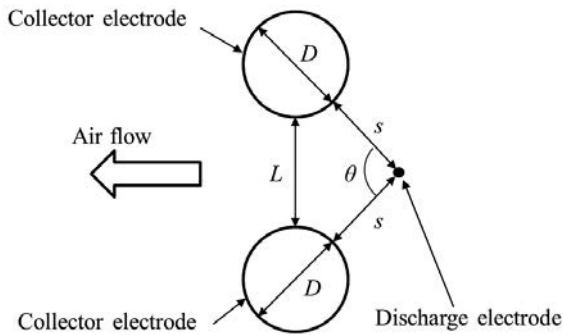


Fig.2 Configuration of discharge and collector electrodes.

図2 放電電極とコレクタ電極の配置

2.2 実験装置

図3は実験装置主要部であり、送気部、試験部、風速測定系からなる。なお、高電圧の測定系は省略した。

送気部の詳細は、図2のとおりである。電極系はφ0.14mmの鉄-クロム線による放電電極（正極）と、二本の外径Dの銅製円管によるコレクタ電極（負極）とからなる。二本のコレクタ電極間隔をL、放電電極との距離をsとする。放電電極の有効長は148mm、コレクタ電極のそれは1本あたり150mmであり、その長さ方向は紙面に直角方向であり、線電極には張力をかけて緩みを防止している。

前述の、2本の円管間を通り抜けた流れは、図3のように、その後方に設けた、内寸で幅150mm×高さ40mm×長さ795mmの試験部に入る。試験部では、整流後、JISピトー管（LK-1、鼻管直径6mm、岡野製作所）とデジタル微圧計（DMS-4-2L、HITACHI）により全圧、静圧が測定される。測定は、流路断面積を幅方向に6等分、高さ方向に3等分の合計18等分して、それぞれの面積の中心にピトー管を配して行った。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）で読んだ。流量は、試験部出口に設けた弁により調節した。

直流高電圧は、ネオントランス（No.K-43756 P-2、長野愛知電機）、ダイオード（ESJA53-20、富士電機）、コンデンサ（1μF、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。正出力を放電電極に、負出力をコレクタ電極に接続し、後者は接地した。

2.3 実験方法とデータ整理

実験は、図2の電極系の寸法・距離を変えて行った。各寸法等は、コレクタ電極の外径D=10, 20, 40mm、コレクタ電極間の距離L=20~50mmで10mm刻み、線電極とコレクタ電極間の距離s=30~60mmで5mm刻みとした。また、印加電圧E=18~28kVで2kV刻みとし、消費電力 $P_0 = E \cdot I$ は、 $P_0 = 2.0 \text{ W}$ を中心に、2.5, 3.0Wで行った。なお、電流Iはコレクタ電極2本の合計値である。

放電電極およびコレクタ電極は、治具により平行度を確認して設置した。念の為、上、下両コレクタ電極へのイオン電流を別々に測定し、両者の差の許容範囲を3μA以内として電極位置を微調整した。

実験は常温・常湿下で行い、温度、湿度は温湿度計（HMI-32、Vaisala）で測定した。実験時の温度、湿度の範囲は、21.8~26.7℃、29.0~48.7%である。データ処理は原則としてJISB8330に沿った。

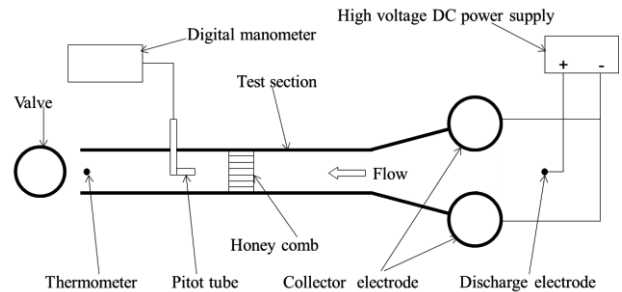


Fig.3 Experimental apparatus.

図3 実験装置

3. 結果と検討

本章では、送気性能に対する主要因子の影響を検討し、最適電極寸法および配置を決定した後、その配置における送気性能について述べる。

送風機の効率は一般に、軸動力を基準にして計算される。しかし、本装置は送風原理が異なり、この値が存在しない。本研究では、軸動力に代えて消費電力 $P_0 = E \cdot I$ を用いる。E、Iはそれぞれ印加電圧、イオン電流であり、両者の関係については、後述する。

効率ηは次式(1)で定義し、Q、Pはそれぞれ体積流量、圧力である。なお、全圧効率 η_{pt} 、静圧効率 η_{ps} に対しては、それぞれ $P = P_t$ 、 $P = P_s$ とする。ここに、 P_t 、 P_s はそれぞれ全圧、静圧である。

$$\eta = \frac{Q \cdot P}{P_o} \cdot 100 \tag{1}$$

3.1 コレクタ電極直径の決定

本ユニットの性能を支配する因子は、図2に示した D , L , s であり、互いに影響し合うと考えられる。 D は送気に影響するとともに、本ユニットの要である凝縮性能に直結する値であり、寸法的には L と合わせて $2D + L$ が蒸留器内の湿り空気中におけるユニットの高さになる。蒸留器内での設置上、高さに加えてカバーガラス内面および水面との間に適度な間隔が必要である。 L は送気量に影響し、 D の影響を受けると考えられる。 s は印加電圧に関係するが、ユニットの寸法上の自由度は比較的高い。以上のことから、はじめに D について検討する。

図4は、コレクタ電極の外径 D が全圧効率 η_{pt} に与える影響を示しており、パラメータは L で、 $s = 50$ mm, $P = 2$ W の場合である。 $s = 50$ mm とした理由は次項で述べる。曲線は最小二乗近似による結果である。図4では、 η_{pt} が L , D の増加に伴って増加し、 L , D ともに大きい方が望ましいことを示している。

ところで前述のように、本研究では、コレクタ電極外面を凝縮面とすることを企図している。 D が大きいことは凝縮面積が大きいことを意味し、凝縮量の増加が期待される。一方で、大きい D は、管内を流れる冷却水の流量増加、流速減少による伝熱性能の低下、イオン風による凝縮促進効果の及ばない面積の増加を招き、装置の大型化も危惧される。図4に示した $D \leq 40$ mm の範囲では、明確な傾向は出ていないが、 D が大きくなると気流の衝突面が平面に近づくので、2本のコレクタ電極間を通り抜ける流れの流速が低下して、Basin内の対流効果が十分に得られないことも考えられる。以上の検討結果を総合的に考慮して、 $D = 40$ mm が最適と判断し、これ以降の実験は $D = 40$ mm で行った。なお、 $D = 40$ mm における送気の流速は、後述の図8のように $0.8 \sim 1.4$ m/s が得られ、Basin型太陽

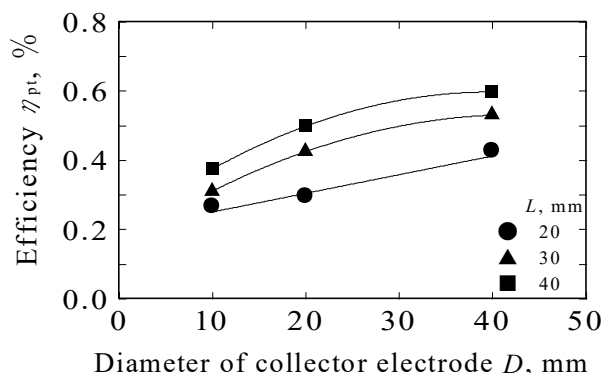


Fig.4 Effect of diameter of collector electrode on total pressure efficiency ($s = 50$ mm, $P = 2$ W).

図4 全圧効率に対するコレクタ電極直径の影響 ($s = 50$ mm, $P = 2$ W)

熱蒸留器内にある程度の強制対流を起こすことができると考える。

3.2 電極間距離の決定

図5は、 η_{pt} に対する L , s の影響を示しており、 $P = 2$ W の場合である。二次式による最小二乗近似曲線を付した。 L と s は、送気性能に強く影響する。一つは、電極系への気体の流入、すなわち線電極近傍への給気への影響である。他の一つは、上管に衝突後に下方へ進む流れと、下管に衝突後に上方へ進む流れとが効率よく合流し、両円管の間を通過して送気となることへの影響である。

図5から次のことが分かる。 $L = 30$ mm では、全体として η_{pt} の値は小さい。 η_{pt} に対する s の影響は、 $s = 50$ mm で最大であり、それより小さくても大きくても η_{pt} は低下する。このことは、上述の給気や合流の良否によると推測される。

L の影響についてみると、 $L = 30$ mm から $L = 40$ mm までは η_{pt} は増加し、 $L = 40$ mm でほぼピークをとり、その値は最大で約 0.6% である。 $L > 40$ mm での変化は s によって異なり、 $s \leq 50$ mm では η は低下し、 $s \geq 55$ mm ではほぼ最大値をとり続ける。

ところで、電極系は Basin 型太陽熱蒸留器の湿り空気内に設置することを企図しているから、極力小型であること、すなわち L , s はともに小さいことが望まれる。図において最大の η_{pt} を得られる L , s の最小値は $L = 40$ mm, $s = 50$ mm である。

図2に示すように、放電電極から上方および下方のコレクタ電極を見る角度を放電角 θ と定義すると、 θ はイオン流間の角度である。 $L = 40$ mm, $s = 50$ mm のときの θ は $\theta \approx 70$ deg であり、同種イオン流間の干渉等によると考えられる流れの不安定は見られなかった。

以上から、 $L = 40$ mm, $s = 50$ mm を最適値と判断した。

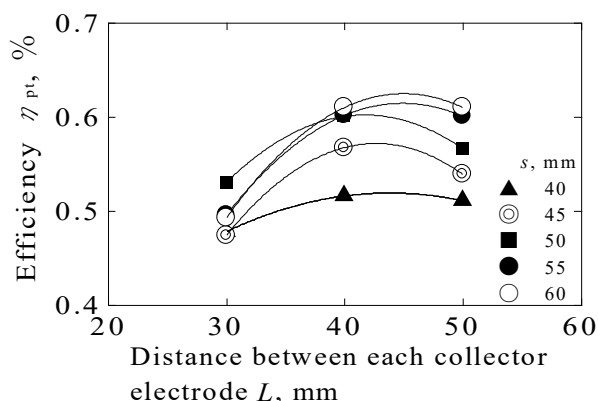


Fig.5 Effect of distances between collector electrodes, and between a wire and each collector electrode, on total pressure efficiency ($P = 2$ W).

図5 コレクタ電極間距離、および線電極とコレクタ電極間距離の全圧効率に対する影響 ($P = 2$ W)

3.3 送気性能

図6は、本研究で最適値と判断した $D=40\text{ mm}$, $L=40\text{ mm}$, $s=50\text{ mm}$ の条件における全圧効率 η_{pt} , 静圧効率 η_{ps} , 全圧 p_t , 静圧 p_s , 消費電力 P_o を示している。図中の曲線は、いずれも二次式による最小二乗近似の結果である。

図6の P_o は、 Q に対してばらつきの範囲でほぼ一定とみなすことができ、このことは E によらない。この点は、一般の送風機の性能曲線とは異なる。ほぼ一定になる理由は、コロナ放電が気流の有無の影響を受けないか、あるいは受けるとしても本研究の Q , u の範囲では無視できるほど小さいためであろう。

一方、 p_s および p_t については、一般の送風機と同様の傾向を示している。プロットに若干のばらつきが見られるものの、二次曲線ではほぼ近似できている。 p_s , p_t ともに、当然ながら無負荷時の値は一致しており、その値は 2.6 Pa 程度であって、決して高いとは言えない。しかしながら、繰り返し述べているように、本研究が目指す用途は、Basin型太陽熱蒸留器内の強制対流化と凝縮促進であり、蒸留器内部の高湿度空气中に設置して流れを起こすことが目的である。したがって、流動抵抗は十分小さく、この程度の p_s および p_t であっても、ある程度の効果を期待できると考えられる。

全圧効率 η_{pt} は、 Q の増加とともに増加し、一定値に近づく傾向を示す。その最大値は約 0.6% であり、この値は E によらない。このことから、 Q を機械的に絞って部分負荷で使用することは、エネルギー有効利用の観点から避けるべきである。Basin型太陽熱蒸留器内では、送風機出口は蒸留器内部に開放されるので、性能試験のように機械的方法で Q を絞ることはない。 E を変化させて Q を調整すれば、 η_{pt} の最大値約 0.6% で運転、使用することが可能である。このことは、流量の調節が制御性の良い電気的方法でできることを意味する。

一般の送風機では、 η_{pt} はピークをもつ。本装置では、 $E=18\text{ kV}$ の場合に $Q \approx 0.25\text{ m}^3/\text{min}$ でほぼピークに近いと思われるが、 $Q > 0.25\text{ m}^3/\text{min}$ の範囲ではピークをとる Q を測定できていない。 $E=28\text{ kV}$ では、測定できた最大の Q は $Q=0.5\text{ m}^3/\text{min}$ であるが、ピークを与える Q はさらに大きいように思われる。このように、今回の実験条件の範囲では、 η_{pt} がピークを取る Q の値は明らかにできていない。しかし、 Q の増加に伴って、 η_{pt} の増加割合は減少すること、すなわち、 E の増大につれて η_{pt} が最大になる Q の値が増大する傾向をもつように見える。

一方、静圧効率 η_{ps} の傾向は、一般の送風機と大差ない。 η_{ps} のピークを与える Q は、その最大値を与える Q の約 $1/2$ 付近である。 $E=18\text{ kV}$ のピーク値が少し高いものの、他の E に対するピーク値については大差なく、ほぼ同値と判断できる。したがって、少なくとも本研究の実験条件の範囲では、 η_{ps} のピーク値には、 E の影響はほとんど見られないといってよいと考える。

3.4 イオン電流と印加電圧および平均風速

図7は、 E と I の関係を示している。プロット○は5回の送気実験で得られた値の算術平均であり、ばらつきは

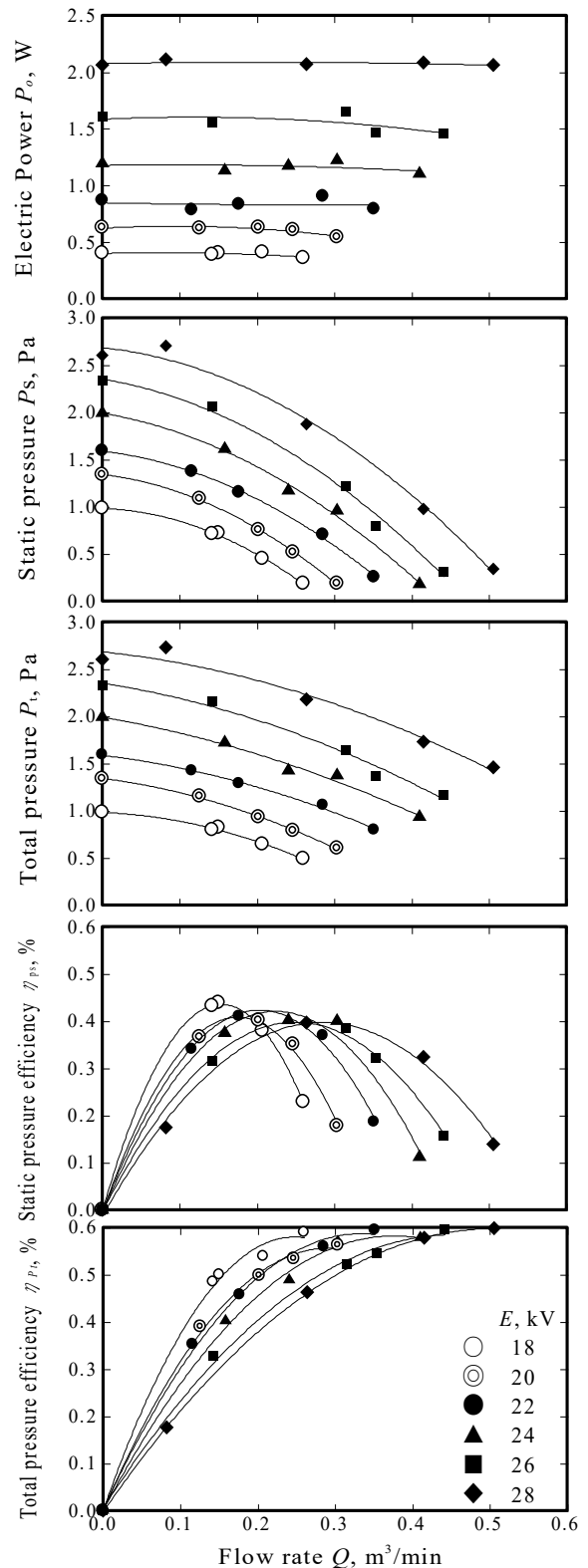


Fig.6 Performance curve.

図6 性能曲線

Iバーで示した。一方、プロット△は、送気実験とは別に測定した E と I の関係であり、後述の二次式による近似曲線を併せて示した。 I は E の増加とともに増加し、その増加割合は E の増加につれて増加する傾向をもつ。イオン風の原因であるコロナ放電は、電極間に数 kV 以上の電圧を印加して形成した不平等電場において発生する。この閾値は電極の形状などの条件によって異なる。図および後述の式(4)から、今回の実験条件では、コロナ放電の開始電圧 E_0 は $E_0 \approx 9 \sim 10$ kV であり、それ以下では $I = 0 \mu\text{A}$ とみることができる。イオン風はこの E_0 以上で発生するが、小さい I の領域では気流が不安定で、実用上は十数 μA 以上の電流が必要と判断した。

図7は、常温・常湿下における結果ではあるが、 I は非常に小さく、消費電力も小さい。このことが、太陽電池を電源として利用できるという主張の根拠になっている。

なお、太陽電池を使用する際は昇圧装置が必要であり、消費電力にその効率を考慮する必要がある。

図7中の曲線は、上述のように、前もって測定した E 、 I の関係を二次式で最小二乗近似した式(2)の値を示している。式(2)の決定係数 R^2 は 0.9998 である。

$$I = 0.1408 E^2 - 1.3340 E + 1.0104 \quad (2)$$

ところで、針-平板電極系におけるコロナ放電では、 E と I の関係が近似的に Warburg の実験式¹⁸⁾ と呼ばれる次式を満足するとされる。

$$I = a E (E - b) \quad (3)$$

ここに、 a 、 b は定数である。式(2)を式(3)の形に書き換えると、次式のように定数 1.010 が現れ、その単位は μA である。

$$I = 0.1408 E (E - 9.474) + 1.010 \quad (4)$$

この $1.010 \mu\text{A}$ は、イオン電流に対して、 $E = 18$ kV の場合で 4.4 %、 28 kV では 1.4 % 程度である。針電極に対する実験式(3)を、線電極に適用していることを考慮すれば、ほぼ妥当と判断できる。この程度の差を前提とすれば、線電極系におけるコロナ放電の I も、 E の二次式、すなわち式(2)でほぼ近似できる。なお、実測値と式(2)の値との差は、本実験の範囲 $18 \text{ kV} \leq E \leq 28 \text{ kV}$ において、 $E = 18$ kV のみ 2.2 % となるが、それ以外では ± 1 % 以内であった。また、図7の送気実験のプロット○との差は、 ± 5 % 以内であった。

図8は電気量と送気の流速の関係を示しており、前者として I を、後者として平均風速 u をとっている。なお、測定流路内の平均流速 u は $0.7 \sim 1.4$ m/s であるが、凝縮管への衝突速度はこれよりも大きい筈であるから、凝縮促

進効果もある程度期待できると考える。Robinson は、針-金網電極系に対してイオン風の風速 u がイオン電流 I の $1/2$ 乗と、物性値等で決まる項 c との積として、 $u = c I^{1/2}$ のように表せることを示している¹⁹⁾。本研究では、Robinson とは電極系が異なるが、実験結果をもとに、Robinson の式に定数項 d を加えて次式のように表示する。

$$u = c I^{1/2} + d \quad (5)$$

図8では、Robinson の式から、横軸、縦軸に $I^{1/2}$ と u をとっている。図中の実線は測定値を最小二乗近似して求めた結果であり、定数は $c = 0.1685$ 、 $d = -0.0264$ 、決定係数は $R^2 = 0.9975$ である。プロットと近似式の間には比較的良い一致が見られ、実験値は式(5)の形で記述できると判断する。なお、式の成立範囲は $I^{1/2} > 4 (\mu\text{A})^{1/2}$ であり、この領域では安定な気流が得られる。

図7の結果と併せて考えると、 $I = 0 \mu\text{A}$ であれば $u = 0$ m/s、すなわち $d = 0$ となって Robinson の式と一致する筈である。しかし、実際には $d = 0.0264$ m/s となり、これは近似による誤差と考えられる。図8から、得られる平均流速の最大は約 1.4 m/s である。自然対流に比して速く、Basin 内の強制対流化と凝縮促進に寄与できるオーダーと考える。

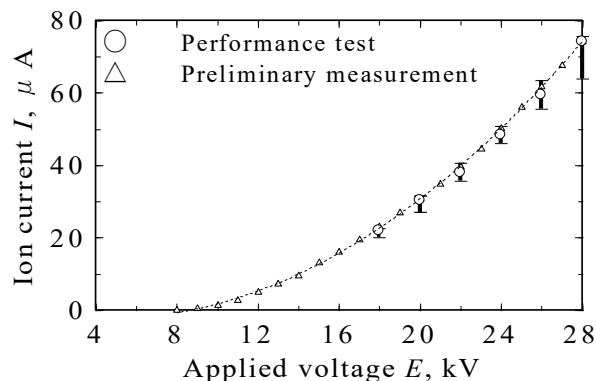


Fig.7 Relation between ion current and applied voltage.

図7 印加電圧とイオン電流の関係

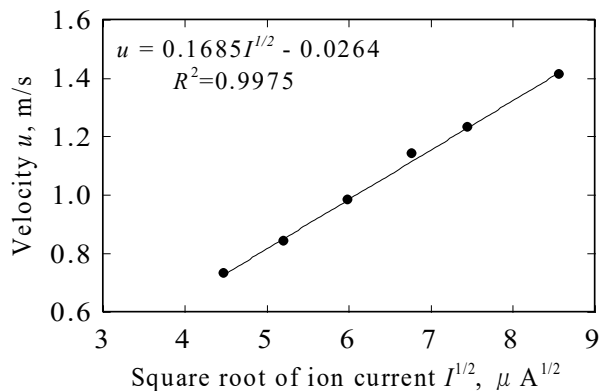


Fig.8 Relation between ion current and mean flow velocity.

図8 イオン電流と風速の関係

4. まとめ

Basin 型太陽熱蒸留器の性能向上を目的として、その内部の湿り空気を強制対流化するための送気装置を実験的に検討した。装置の主要部は、金属細線による放電電極と、外径 40 mm の金属円管 2 本をコレクタ電極とする電極系からなり、両電極間に高電圧を印加した際に生じるイオン風を利用する。実験の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 電極系の最適寸法、配置条件は、コレクタ管外径 40 mm、コレクタ電極表面間の最短距離 40 mm、放電電極とコレクタ電極表面間の最短距離は 50 mm である。このとき、放電電極と 2 本のコレクタ電極の中心とがなす開き角は約 70° である。これらの値は、できる限り高い効率を得られること、装置ができる限りコンパクトに構成できること等を考慮している。
- (2) 送気装置の静圧、動圧に対する流量の影響は、一般的な送風機とほぼ同様の傾向を示し、得られる圧力は流量ゼロ時の最大値で 2.6 Pa であった。しかし、太陽熱蒸留器の性能向上の用途では、ある程度の性能向上を期待できると考えられる。
- (3) 全圧効率の最大値は、印加電圧によって変化し、約 0.6% であり、静圧効率は 0.4~0.43 % である。
- (4) 得られる平均風速の最大値は約 1.4 m/s である。また、送気装置の平均風速はイオン電流の 1/2 乗に比例し、平均風速とイオン電流の近似式を得た。

謝辞 実験に際しては、当時の榎谷研究室 学部生 新町正人、中屋孝博、前田陽一、遠藤猛、片山誠一の諸氏、および藤本研究室 学部生 川越章裕氏の協力を得た。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) 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).
- 3) for example, A. S. Abdullah, Improving the performance of stepped solar still, *Desalination*, **319**, 60-65 (2013).
- 4) for example, 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).
- 5) for example, 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, IWTC18 (March 2015)* 519-521, Sharm EL Sheikh, Arab Republic of Egypt.
- 6) for example, Ahmed Z. Al-Garni, Productivity Enhancement of Solar Still Using Water heater and Cooling fan, *Journal of Solar Energy Engineering*, **134**, (2012) (DOI:10.1115/1.4005760).
- 7) 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).
- 8) 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, (*Communication*) *Energy Environ. Sci*, **13**, 830-839 (2020) (DOI:10.1039/C9EE04122B).
- 9) Yoshiro Tochitani, Shinichi Satoh, 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).
- 10) Dai Tanaka, Takehiro Nosoko, 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).
- 11) V. Sivakumar, E. Ganapathy Sundaram, Improvement techniques of solar still efficiency: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **28**, 246-264 (2013) (DOI:10.1016/j.rser.2013.07.037).
- 12) 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) (DOI:10.1016/j.rser.2012.09.035).
- 13) 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).
- 14) 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) (DOI:10.1088/1757-899X/928/2/022046).
- 15) Yoshiro Tochitani, Hideharu Matsuoka, A Study on EHD Blower for Solar Distillation System. Experimental results by use of air at room temperature and humidity, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **24**(3), 45-52 (1998).
- 16) Yoshiro Tochitani, Hideharu Matsuoka, Study on EHD Fan with Two-dimensional Electrode System. Effect of Ionic-wind Type on Performance and Optimum Arrangement of Electrode, *Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese)*, **28**(1), 38-45 (2002).
- 17) Yoshiro Tochitani, Hideharu Matsuoka, Study on EHD Fan

with Two-dimensional Electrode System. Performance Curve and Effect of Electrode Installation Error on Performance, Journal of Japan Solar Energy Society (in Japanese), **28**(1), 45-50 (2002).

18) Kanji Honda, Gas discharge phenomenon, Tokyo Denki University Press (in Japanese), 94 (1973).

19) Myron Robinson, Movement of Air in the Electric Wind of the Corona Discharge, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, **80**(2), 143-150 (1961).