

Improvement in performance of a multiple-effect unit for a solar distiller by ionic wind with evaporation and condensation on each surface of annular space

Jumpei KAKUDA^{*1}Masanori FUJIMOTO^{*2‡}

二重管の外管内面・内管外面を蒸発・凝縮面とする 太陽熱蒸留器用多重効用ユニットのイオン風による性能向上

角田 潤平^{*1}藤本 雅則^{*2‡}

Abstract

A basic study to improve the performance of solar distiller has been studied experimentally. This study uses forced convection by ionic wind to actively transfer heat and mass inside the annular space of formed a double pipe, composed by the inner surface of outer pipe and outer surface of inner pipe, and to enhance simultaneously evaporation and condensation. The ionic wind generated in the annular generates with the circumferential flow and the collision flow. Furthermore, the ionic wind, consisting of circumferential and impinging flows, has a velocity of approximately 2.0 m/s maximum and a power consumption of approximately 1.0 W. It was experimentally shown that this flow velocity is proportional to the 1/2 th power of the ionic current. It was confirmed that the composite flow consisting of two flow with four pair of wire electrodes can enhance a condensation volume of approximately 2.0 kg/(m²·h) and 1.9 times the facilitation ratio.

Keywords: Ionic wind, Electro hydro dynamics flow, Mass transfer enhancement, Annular space, Solar distillation.
キーワード：イオン風，電気流体力学的流れ，物質移動促進，環状空間，太陽熱蒸留器。

1. 緒論

人類の生命維持活動において、飲料水は不可欠であり、その確保は最重要課題である。しかし、今後も人口増加により、水の需要が高まり、それによる水不足は必至である。

地球上に存在する水の内、我々が容易に利用できる水資源はわずか 0.01%¹⁻²⁾である。地下水の利用にも限界がある³⁾ことから、海水淡水化を安全かつ安心な精製技術とすることは必須である。しかし、従来の装置は化石燃料由来のエネルギー源とし、消費電力が大きく、環境負荷が大きい。そこで蒸留器による造水は、再生可能エネルギーを利用した有効な一手法である。そのため、これまで環境に優しい太陽熱蒸留器の開発が検討されている。

Basin 型のような太陽熱蒸留器は自然エネルギーである太陽熱により貯留水の蒸発を行うため、環境負荷が小さく、かつ無尽蔵にエネルギーを得られる利点がある。

一方、欠点として、原水が装置下部に貯留され、流体は静止しており、装置内部の湿り空気の流れは自然対流である。そのため、単位面積当たりの蒸留能力は小さく、これ以上の蒸発・凝縮量の増大は期待できない。

その解決案として、複数円筒で構成される多重効用ユニットを想定し、装置内の湿り空気の流れ促進のために、送風機等を設置することで強制対流としたものがある⁴⁾。その他に、Basin 型⁵⁾への適用例がある。しかしながら、送風機の使用に大きな消費電力を必要とすること、ファンに組み込まれるモータの潤滑油や摩耗粉等の発生が蒸留水の汚染につながり、衛生上好ましくないことから、省電力

*1 Kanazawa Institute of Technology, Graduate School of Engineering student

*2 Kanazawa Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, Professor, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi-shi, Ishikawa, 921-8501, Japan

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

Received: February 15, 2023, Accepted: March 23, 2023

*1 金沢工業大学 大学院 工学研究科 機械工学専攻 学生

*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

(原稿受付：2023 年 2 月 15 日，受理日：2023 年 3 月 23 日)

化及び飲料水への適用では課題とされている。

それらの解決手段として、水の蒸留過程での物質移動の促進に電気流体力学 (EHD) 的効果を援用する手法がある⁶⁻⁷⁾。線-平板電極系の不平等電場中に生じるイオン風は、気体中のコロナ放電により、多量のイオンが発生して、そのイオンは電場に沿って加速される。それと同時に、流体中の中性粒子との衝突により、イオンの運動エネルギーを中性粒子に与えることで、イオン及び中性粒子の両方が対極へ向かって移動する。対極では、イオンは中和されるが中性粒子の流れは維持される⁸⁾。以上のことから、湿り空气中に流れが連続的に生じる。

イオン風の特徴は、摩耗部材等がなく構造が単純であるため、複雑な任意の空間に対して適用が可能である。この特徴から、狭小空間にもフレキシブルに適用でき、衛生上の配慮が必要な飲料水の採集にも汎用性がある。加えて、消費電力が小さく、省電力化が図れる。

ここで、イオン風の研究例には、二重管により形成される環状空間内での線-円管電極を用いた流れの効果⁹⁾がある。また、針-平板電極系のイオン風の利用¹⁰⁾、負イオン風の発生も知られており、放電電流値が等しい時、正イオン風の流速は、負イオン風のその約 1.2 倍であるとの報告がある¹¹⁾。

太陽熱蒸留器の研究例には、多重効用型太陽熱蒸留器の性能に関する基礎研究⁷⁾、¹²⁻¹⁷⁾等がある。電場を用いた相変化を伴う現象に関しては、電場による凝縮の促進¹⁸⁾があり、凝縮伝熱場に不平等電界を援用して、液体の引き出し現象を利用して、凝縮伝熱を促進させる方法について実験的に検討している。一方、先述した電場により発生するイオン風を蒸留器に援用した研究に限定すれば、極めて少ないのが現状である。

本研究では、電極は、一對の線電極及び内管外面・外管内面である。その内、一本の線電極を正極、その他の電極を負極とし、両管により挟まれた環状空間内に不平等電場を形成し、イオン風による強制対流の利用を企図する。そのイオン風を三種に大別し、環状空間を周回する流れ、両管に向かって流れて衝突する流れ及びその両者が混在した流れから成り、系内部を循環する連続的な流れと濃度及び温度の両境界層の破壊等の効果が期待できる。以降、周回する流れを旋回流、内・外管へ向かう流れを衝突流、両流れの混成する流れを複合流と呼ぶ。なお、本報では二重管を対象とするが、最終目標は Basin 型太陽熱蒸留器の蒸留量を増大させることである。具体的には、Basin 型蒸留器内の水蒸気を本研究のユニットに取り込み、凝縮水を取り出した後、湿り空気は蒸留器へ戻す。あるいは、Basin 型蒸留器内の温水を本ユニットの原水として取り込み蒸発させて凝縮水を取り出す。ユニット内に放出された凝縮潜

熱は多重効用段で繰り返し蒸留に使用することで蒸留量の増加を図る。このような方法による凝縮量の増大を視野に入れている。

本研究の目的は、太陽熱蒸留器の蒸留量の増大に向けた開発的な基礎と研究して、本装置内にある蒸発面及び凝縮面への促進効果に着目し、イオン風による強制対流を用いて、環状空間内で蒸発・凝縮を同時に促進させることである。特に、一對または複数の線電極及び両円管電極内でのイオン風の流速及び印加電圧-イオン電流特性の検討、蒸発・凝縮同時促進の促進比による評価について報告する。なお、本報では、蒸発促進を直接扱わず、蒸留性能は凝縮促進結果で代表させて述べる。

2. 実験

2.1 イオン風の流速及び印加電圧-イオン電流の測定

図 1 は流れ場を把握するための装置の概要を示しており、同図 (a) に流速測定実験の試験部、同図 (b) に試験部の上面図及び電極配置を示す。

図 1(a)の有効高さ 100 mm の外管内径及び内管外径は、106.6 mm 及び 48.6 mm とともに SUS 製である。また、外部の影響を最小限にするため、上面と下面をアクリル板で塞いだ。

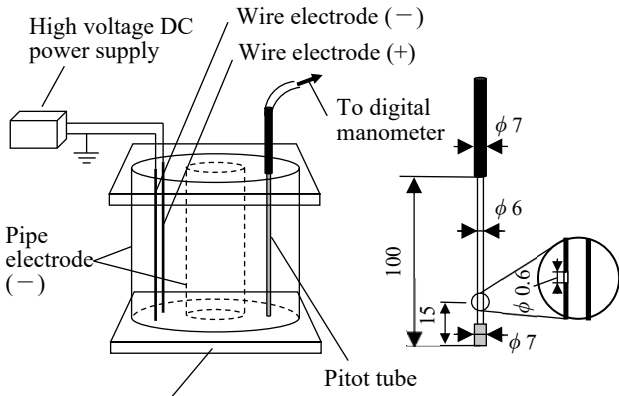
電極は、同有効高さの $\phi 0.3$ mm の銅細線一對、外管及び内管で構成されている。一對の線電極の片方を正極、他方を負極、加えて外管内面、内管外面を負極として、高電圧印加のため、直流高圧安定化電源 (AMS-40K01P/100 型、マクセレック) にリード線を用いて接続し、負極は接地した。なお、一對の線電極と内・外管電極との距離 d_1 は 14.5 mm とした。

円周上に配した一對の線電極間の距離 d_w は 6, 9, 12, 15 mm であり、本装置の上下板に加工を施し、それらを変更可能とした。その際、電極のリード線は、テフロン管に通して、上・下面板との接触を回避した。図 1 (b) に示すように、線電極位置及び流速の測定位置については、円座標 (r, θ) で示した。線電極は、 $r = 38.8$ mm の円周上にあり、正極位置は円管上部正午の位置を $\theta = 0$ rad とした。同図中に×印で示した測定位置は、 $r = 30.3, 36.3, 41.3, 47.3$ mm の円周上にあり、そこから時計回りに $\theta = \pi/4$ rad, $3\pi/4$ rad, $5\pi/4$ rad, $7\pi/4$ rad の 4 箇所とした。

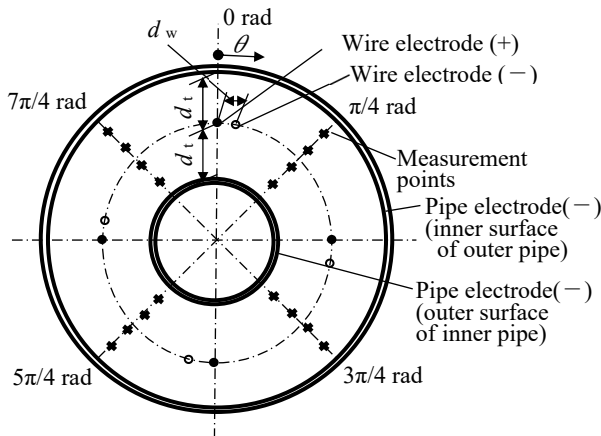
線電極対の数 N [-] は、(A) 一對一箇所、(B) 一對二箇所、(C) 一對四箇所の 3 パターンで適宜実験を行った。線電極対の数と設置位置の角度について表 1 に示す。本系において、線電極対の数 $N = 1, 2, 4$ のイオン電流 I は、それぞれ $I^{1/2}$, $(I/2)^{1/2}$, $(I/4)^{1/2}$ であり、その時の理論的なイオン風の流速 V との比は、1.0, 0.7, 0.5 倍となる。

イオン風の流速測定には、圧力分解能 0.001 Pa、差圧の精度 0.025 Pa である微差圧計 (8715DP-CALC, トランステック) を使用し、片方を大気圧に開放し、本機に接続し

たピトー管により、その検出を行った。本ピトー管は、図1(a)に示すように単孔の円筒形であり、外径 6 mm、長さ 150 mm のプラスチック製で、管の先端から 15 mm の位置に圧力測定孔径 0.6 mm を設けてある。本実験に先立って、イオン風の流速測定に用いたピトー管のピトー管係数を確認し、その値を用いて流速に換算した。



(a) Test section (in case of one pair wire electrode)
(a) 試験部 (線電極一対の場合)



(b) Electrode arrangement and measurement position in annular space

(b) 環状空間内の流速測定箇所及び電極配置

Fig.1 Flow velocity measurement of experimental apparatus.

図1 流れ場測定の実験装置図。

Table 1 Number of wire electrode pairs and angle of installation position.

表1 線電極対の数と設置位置の角度。

Mark	Number of wire electrode pairs N [-]	Angle indicating the position of flow velocity measurement θ [rad]
(A)	One pair	0
(B)	Two pairs	0 and $\pi/2$
(C)	Four pairs	0, $\pi/4$, $\pi/2$ and $3\pi/4$

消費電力を算出するため、デジタルマルチメータ (Digit Multimeter 34450A, キーサイト・テクノロジー) によって、印加電圧及びイオン電流を測定した。

2.2 蒸発・凝縮量の測定

図2は蒸発・凝縮実験の試験部である。高電圧電源等の基本的な装置は図1(a)の通りであり、試験部の有効長を 550 mm に変更し、蒸発・凝縮量を測定可能なように工夫した。電極の配置及び装置の構造は図1(b)の通りである。2.1 で述べた装置に変更または追加した装置を以下に示す。

内管外面を冷却面としてその温度 $T_c = 10, 20^\circ\text{C}$ 、外管内面を蒸発面としてその温度 $T_e = 50, 60^\circ\text{C}$ とし、両管の温度差 $\Delta T = T_e - T_c = 30^\circ\text{C}$ (冷却面温度 20°C 、加熱面温度 50°C)、 50°C (同 10°C 、同 60°C) とした。表2に蒸発面及び凝縮面の設定温度差を示す。ここで、括弧内の数値は冷却面温度、加熱面温度であり、加熱のため外管外面にシリコンバルトヒータ (V-10-100V-277W, ヤガミ) を巻き付けて実験を行った。加熱面となる外管外面は、加熱用のヒータ (BWA1210, 八光電機) を温度調節器 (E5EC-QR2ASM, オムロン) 及びソリッドステート・リレー (G3PA-240B-VD, オムロン) によって実験の設定温度に制御された。また、冷却水の温度調整は、クーラ (LPC2, オリオン機械) により循環させる水を冷却し、温度調節器等は上述の通りである。内管外面を凝縮面とするため、内管の内部にはポンプ (MDT0RM-N, イワキ) により冷却水を循環させた。

原水を蒸発面全面かつ均一に保水させるため、蒸発面には布製のウイックを密着させて貼り付けた。上面板に開けた4箇所からウイックに原水の供給が行われた。試験部下面板には原水排水用の外溝、凝縮水採水用の内溝を付け、その両液が混合しないよう工夫した。

蒸発面、凝縮面及び原水等の温度測定は、取り付けした T 型熱電対及び熱電対データロガー (TC-08, Pico Technology) によって温度の測定を行った。蒸発面温度は鉛直方向に測定を行い、その位置は、周方向の $\theta = \pi/4$ rad、試験部下面から 100, 275, 450 mm とした。また、供給する原水の温度は、実験条件の設定温度 50°C または 60°C であり、試験部入口直近の T 型熱電対により測定して、代表温度とした。凝縮面温度は、環状空間内の電場の影響から、その測定が困難であると判断し、内管内面の流入口直近及び流出口直後を代表値とした。加えて、実験中には冷却水の温度が変化しないことを確認している。

原水の供給量は 900 g/h とし、原水の流量調節を4つの供給箇所に取り付けた流量調節器により行った。その後、十分な時間経過後、各箇所の温度を先述の T 型熱電対により測定し、定常状態となったことを確認した。同時に、原水供給開始後、貼り付けたウイック全体に浸透し、装置下面板下部からの排水量が一定になることを確認して、実験を行った。ここで、自然対流下での凝縮量及びイオン風による強制対流下の凝縮量の測定後、凝縮に対する促進効果について実験的に検討した。

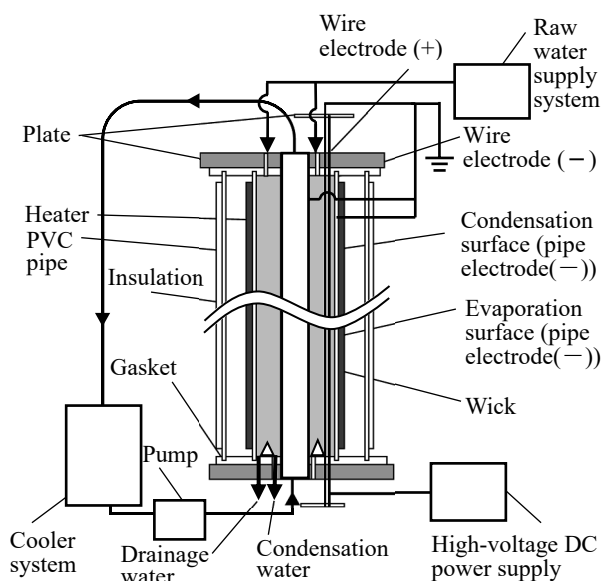


Fig.2 Simultaneous enhancement of evaporation and condensation of experimental apparatus.

図2 蒸発・凝縮量測定の実験装置図.

Table 2 Difference in set temperatures of evaporating and condensing surfaces.

表2 蒸発面及び凝縮面の設定温度差.

Difference in temperature ΔT [°C]	Evaporating surface temperature T_E [°C]	Condensing surface temperature T_C [°C]
30	50	20
50	60	10

3. 結果及び考察

3.1 環状空間内の流れ

図3は流速測定位置を示す角度 θ [rad]とイオン風の流速 V [m/s]の関係を示しており、パラメータは表1のように線電極対の数 N [-]である。イオン風の流速 V の測定値は、4つの角度のそれぞれ4箇所での測定値の平均値とした。

線電極対の数 $N = 1$ の場合、正の線電極位置 $\theta = 0$ radの直後では、イオン風の流速 V が大となり、流速測定位置 $\pi/4$ radでは最大値 1.35 m/sであった。イオン風の発生開始位置である線電極対から離れるに従い、イオン風の流速 V は小さくなっている。

別途行った実験結果から、イオン風の流速 V の速度分布において、イオン風の流速 V は外管内面付近で大きい傾向を示した。それらは、線電極対の数 $N=2$ 及び4でも同様の傾向があることを確認した。

蒸発現象のポテンシャルは濃度差であり、蒸発量は蒸発面近傍の水蒸気濃度の影響を受ける。したがって、蒸発面

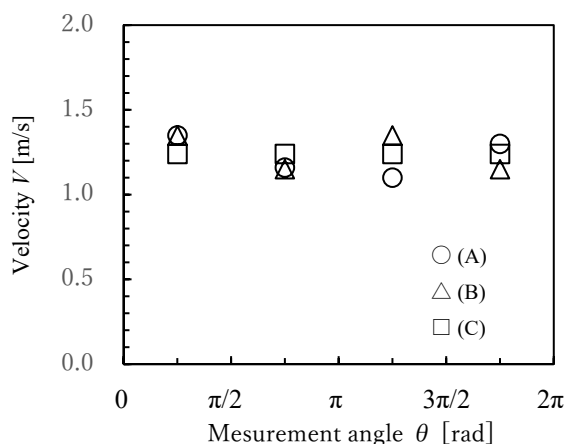


Fig.3 Relationship between velocity measurement angle and ionic wind velocity in an annular space at each number of wire electrode locations (in case of one pair wire electrode, the distance between the wire electrodes was $d_w = 15$ mm, and the ion current was $I = 125 \mu A$).

図3 各線電極対の数における環状空間内での流速測定角度とイオン風の流速の関係（線電極一対の場合）。

近傍の高水蒸気濃度の湿り空気層をイオン風によって強制的に移動させて低濃度化できれば、蒸発は促進される。

しかしながら、現段階では狭小な環状空間の詳細な流速測定が困難なため、これ以上詳細な流速測定はできていない。また、比較となる自然対流の流速は温度変化及び相変化を伴い、さらに流速は不均一となるため、その詳細な流速の測定は今後の検討課題としたい。

3.2 イオン風の流速と印加電圧-イオン電流の関係

前節では、環状空間内での定常状態におけるイオン風の発生を確認し、イオン風の流速 V について検討した。本節では、このイオン風の流速 V 及び印加電圧 E [kV]とイオン電流 I [μA]の関係について述べる。

図1に示す実験装置により測定したイオン電流 I の1/2乗とイオン風の流速 V の関係を図4に示す。イオン風の流速 V は負の線電極の後方 $\theta = \pi/4$ radで測定されており、実験開始後十分に時間をおき、イオン風が定常後に測定を行った。各線電極間の距離 d_w をパラメータとして同図内に記載した。

イオン風の流速 V は線電極間の距離 d_w が短いほど大きくなること⁸⁾が知られており、本系でもそれが確認でき、線電極間の距離 $d_w = 6, 9, 12, 15$ mmの順で小さくなった。図4では、イオン電流 I の1/2乗の増加に伴って、その差は顕著に表れている。また、プロットを結ぶ直線と横軸との交点は、イオン風の発生に必要な電流 I の1/2乗であり、この I に対応する印加電圧 E がイオン風発生に必要な印加電圧 E の閾値と考えられる。言い換えれば、これ以下の印加電圧 E ではイオン風は発生せず、閾値と考えられる。

本系では正及び負極の一対の線電極に加え、負極とした

両円管電極の関係から、線電極間の距離 d_w が大きいほど、線対円管電極への相対的な距離が小さくなる。すなわち、流れの支配要素が線電極間の距離 d_w から、線対円管電極の距離 d_t となり、イオン風の流れが旋回流から衝突流に変化することで、衝突流の流速が旋回流の流速より大きくなった可能性も考えられる。

次に、Robinson¹⁹⁾ は、イオン風の流速 V がイオン電流 I の $1/2$ 乗に比例するとしており、それについて考察する。針を放電電極とする場合、Robinson¹⁹⁾ はイオン風の流速 V を式(1)で与えている。

$$V = g \cdot (I/\rho \cdot b \cdot K)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、空力損失係数 K 、形状・寸法係数 g は一定であり、気体成分が定まれば、空気密度 ρ 、イオン移動度 b が決まり、それらはほぼ定数となる。

本実験でもイオン風の流速 V はイオン電流 I の $1/2$ 乗に比例することが確認できた。このことから、先述した針を正極とした系で確認されている式 (1) は、本系の一對の線電極及び線対円管電極においても同様の傾向になることを実験的に確認した。

この時、線電極対の数 N が大ほど、一箇所当たりのイオン電流 I が小となり、各線電極対を起点とするイオン風の流速 V が小となる。しかし、図 3 はこれと完全に一致しない理由について、以下のように考える。

先述のように、イオン風はイオンの発生による流れ及び流体中の粒子同士の衝突によって形成される。その時、電極付近で直接加速されるイオン及びその加速されたイオンにより間接的に加速される中性粒子に大別される。以降、前者を直接加速粒子、後者を間接加速粒子と呼ぶ。

直接加速粒子は間接加速粒子に比べ、流速が非常に大きいことが知られている⁸⁾。しかし、環状空間内では直接加速粒子の割合は小さく、圧倒的に間接加速粒子の割合が大きいとされている⁷⁾。そのため、直接加速粒子が間接加速粒子に与える影響は小さく、イオン風の流速 V への影響も非常に小さい。

また、この時のイオン電流 I はイオン風における一種の駆動力と見ることができ、イオン風の流速 V の大きさはイオン電流 I と強い相関関係がある。線電極対の数 N が増すと、各対を成す電極当たりのイオン電流 I は小さくなるが、イオン電流 I の総計は一致する。イオン風の流速 V について見ると、各角度位置 4 箇所の測定値の平均値は、1.22, 1.24, 1.24 m/s とほぼ一致する。つまり、線電極対の数 N によらず、見かけ上の運動量の指標とも言えるイオン風の流速 V の平均値はほぼ同等である。先述の各線電極対の数 N によるイオン電流 I が変化しても、エネルギー保存則より、全体の駆動力 (運動エネルギー) はほぼ一定とみなすことができる。

また、図 5 に印加電圧 E - イオン電流 I の特性を示す。印加電圧 E は、線電極間の距離 d_w が短いほど小さく、図 5 上では確認しづらいが、線電極間の距離 $d_w = 6, 9, 12,$

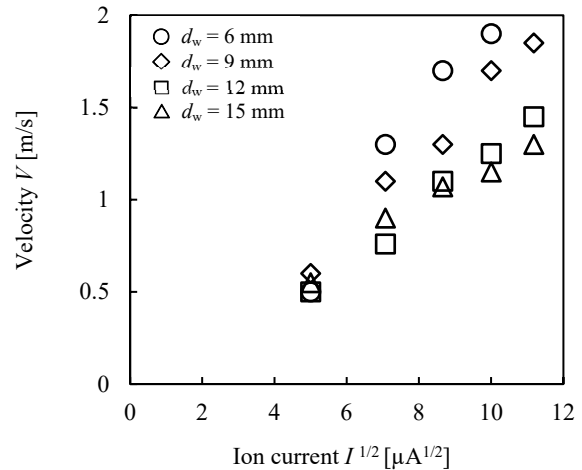


Fig.4 The relationship between the wind velocity of a positive ionic wind developed in an annular space and the $1/2$ square of the ion current at the distance between each line electrode (in case of one pair wire electrode) .

図 4 各線電極間の距離における環状空間内で発達したイオン風の流速とイオン電流の $1/2$ 乗の関係 (線電極一對の場合) .

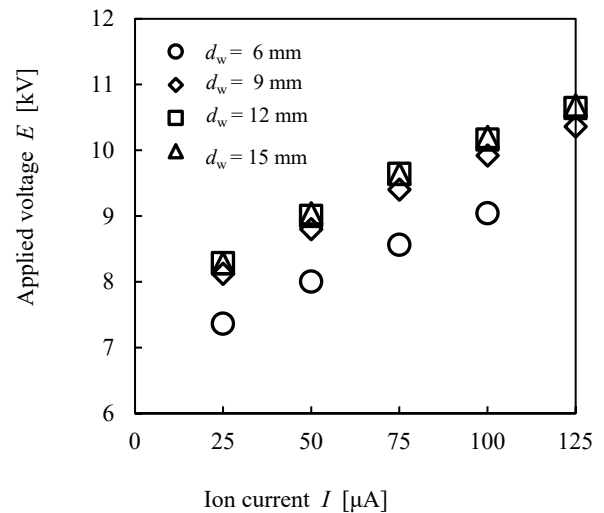


Fig.5 Relationship between of ion current and applied voltage in the distance between each wire electrode when measuring the flow velocity of ionic wind (in case of one pair wire electrode) .

図 5 イオン風の流速測定時の各線電極間の距離における電流と電圧の関係 (線電極一對の場合) .

15 mm の順に大きくなる。 d_w によらず、印加電圧 E とイオン電流 I はほぼ比例関係にあるが、線電極間の距離 $d_w = 9, 12, 15$ mm では、同一のイオン電流 I に対する電圧差が 0.1kV 程度であった。しかし、線電極間の距離 $d_w = 6$ mm では電圧差は 1kV ほど小さくなった。

以上より、イオン風発生に伴う消費電力とイオン風の流速 V は図 4 及び図 5 から、消費電力 $P = 0.2 \sim 1.3$ W 程度

で、イオン風の流速 V は $0.5 \sim 1.9 \text{ m/s}$ となり、環状空間内に強制対流場が形成されている。

3.3 イオン電流と凝縮量の関係

先述してきたイオン風を蒸発・凝縮量測定装置内における物質移動の促進に利用し、その効果について述べる。評価基準とする凝縮促進比 α [-] は電場付与で得られるイオン風による強制対流下で測定した凝縮量 M_a [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], 電場無付与での自然対流下で測定した凝縮量 M_b [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$] として、次式で定義する。

$$\alpha = M_a / M_b \quad (2)$$

表 2 に蒸発面及び凝縮面の設定温度差 ΔT を示す。図 6 にイオン電流 I と強制対流下で測定した凝縮量 M_a 及び凝縮促進比 α の関係を示す。これらの電極間距離は $d_w = 15 \text{ mm}$ である。線電極間の距離 $d_w = 15 \text{ mm}$ を代表値とした理由については後節で述べる。ここで、凝縮量は棒グラフ、黒塗りのプロット●, ■は先述の蒸発及び凝縮の両面の温度差 $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, 白塗りのプロット○, □は同温度差 $\Delta T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。

その結果、イオン電流 I の増加に伴い、強制対流下で測定した凝縮量 M_a が増加し、自然対流下で測定した凝縮量 $M_b = 0.7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $1.6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ と比較し、強制対流下で測定した凝縮量は最大で $M_a = 1.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $2.1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ となった。この時、供給水 900 g/h に対し凝縮水は約 $150 \sim 200 \text{ g/h}$ となる。そのため、現段階での回収率は最大で 20% 程度である。

別途、同一の実験中に、自然対流及び強制対流との蒸発促進比についても評価を行った。原水の供給量から排水量を差し引いて得られた蒸発量をもとに計算した蒸発促進比は、凝縮促進比 α に大差はなく、装置内部は密閉空間であることを考慮すると妥当であると言える。

凝縮促進比 α は、イオン電流 I が大きくなるほど、顕著に増大する。本研究でイオン風の様相を可視化の実験を別途行ったところ、有効長 550 mm 全長において、水平断面で旋回流が確認でき、それによる効果があると推察される。しかしながら、イオン風の流速 V は先述のように、イオン電流 I の値に依存するため、3.1 節で述べたイオン風の流速 V に近い可能性が高い。実際上は、両管の表面性状に依存するため、膜状及び滴状凝縮が混在状態となっている可能性があり、その様相及び熱伝達率の評価は今後の検討課題である。

3.4 線電極間の距離と促進比の関係

線電極間の距離 d_w を変化させた時の凝縮促進比 α に対する効果についてイオン風の影響から考える。本節では、それが与える促進効果を強制対流下で測定した凝縮量 M_a の実測値により検討する。なお、本研究は温帯気候の広範囲な地域での実用化を見据えており、太陽光により加熱される外管の温度を $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 冷却水として流す内管の温度を $20 \text{ }^\circ\text{C}$ と模擬して、両管の温度差 $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ の条件下を対象とした。

図 7 に線電極間の距離 d_w と凝縮促進比 α の関係を示

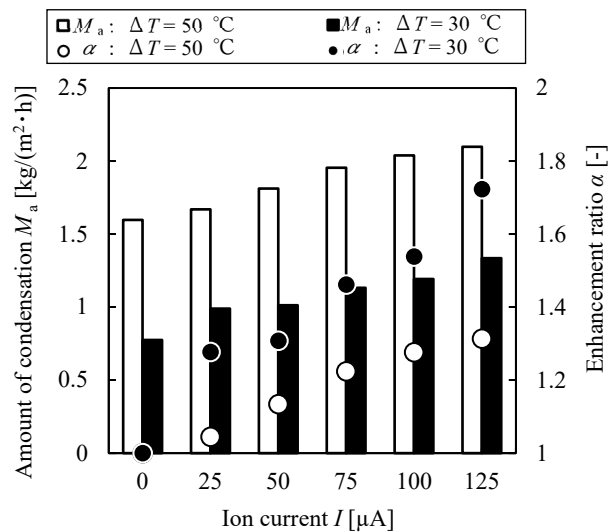


Fig.6 Relationship between ion current, condensation enhancement ratio, and condensation amount at $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ and $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (the distance between the wire electrodes was $d_w = 15 \text{ mm}$, in case of one pair wire electrode).

図 6 設定温度差 $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ におけるイオン電流と凝縮促進比及び凝縮量の関係 (線電極間の距離 $d_w = 15 \text{ mm}$, 線電極一対の場合)。

す。生じる効果の因果関係を明確にするため、最も単純な系として、本実験は、線電極が一対で、イオン電流 $I = 125 \mu\text{A}$ の結果を示す。

まず、線電極間の距離 $d_w = 6 \text{ mm}$ に関して、 1.3 倍程度の促進効果があった。その間、火花放電が複数回繰り返し確認された。本系での線対円管電極の電極系において、線電極間の距離 d_w であるギャップ長が短い場合は、グローコロナから直接火花放電へと移行する²⁰⁾ことが知られている。本系において、その移行が顕著な線電極間の距離 $d_w = 6 \text{ mm}$ 以下では、放電の制御が困難であった。次に、線電極間の距離 $d_w = 9, 12, 15 \text{ mm}$ の内、線電極間の距離 $d_w = 12, 15 \text{ mm}$ がほぼ同程度で、最も促進効果が高いことが確認された。加えて、線電極間の距離が大きい $d_w = 15 \text{ mm}$ の方が放電は安定的であったため、本系での代表値として、採用した。

さらに、3.1 節で述べたイオン風の流速 V の測定の結果から、線電極間の距離 d_w が大きいほど、イオン風の流速 V が小さくなる。このことは、線電極間の距離 d_w に比べ、正極と負極である内管外面及び外管内面への距離が小さくなることで、両管に作用する電場の効果が相対的に小さくなる。この結果、旋回流の流速が減速し、衝突流の流速が増速すると考えられる。従って、環状空間内の熱・物質移動効果は、旋回流の影響と比較し、両管の濃度境界層に直接作用する衝突流による攪拌の影響が大きくなると考えられる。また、線電極間の距離 d_w が大きいほど管壁へと向かう流れに移行することは既に述べた通りであるため、その両者の混在した複合流の影響が大きいと推察できる。

以上のように、強制対流下において、凝縮現象等にもイオン風の効果はあると考えられる。本凝縮現象は、装置内部の水蒸気の濃度分布やウィックの影響があることから、相当のばらつきを持つと考えられるため、今後の検討課題である。

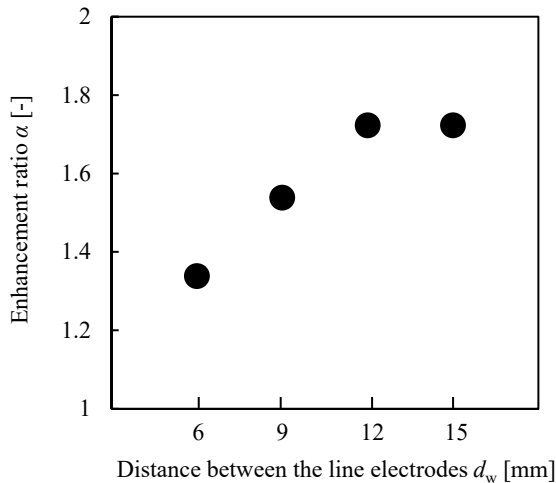


Fig.7 The relationship between the distance between the wire electrodes and the condensation enhancement ratio (Under each condition, ion current $I = 125\mu\text{A}$, temperature difference $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, in case of one pair wire electrode).

図7 線電極間の距離及び凝縮促進比の関係（イオン電流 $I = 125\mu\text{A}$ 、設定温度差 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 、線電極一対の場合）。

3.5 線電極対の数と凝縮促進比の関係

前節で述べたイオン風による物質移動の促進効果をさらに高めるため、線電極対の数 N を増加させて、検証を行った。イオン風の流速 V の測定実験と同様の条件とし、各電極への接続は並列であるため、各線電極対の数 N に対するイオン電流 I が一定となる。

図8に線電極対の数 N 及び凝縮促進比 α の関係を示しており、線電極間の距離 $d_w = 15\text{mm}$ 、イオン電流 $I = 125\mu\text{A}$ で行っている。これによると、線電極対の数 $N = 4$ の場合、凝縮促進比 α は電場無付与の1.9倍で最大となった。したがって、図3のように線電極対の数 N の増加に伴う、環状空間内のイオン風の流速 V の増加はほぼ無いにもかかわらず、凝縮促進比 α は向上した。

これについて、線電極対の数 N の増加によって、線電極から両電極管に対する衝突流の形成箇所が増加し、両管への影響範囲、つまり衝突流が作用する表面積が増加したことで、衝突流の効果が高くなったと考える。凝縮においては、この衝突流の影響で凝縮管に向かう流量が見かけ上増加することで物質移動が促進されたと考えられる。

上述のように、物質移動が行われる面に対して、系内部の連続的な流れとなる複合流の効果は高く、一般的な送風

機等と比較しても、蒸留器内部でのイオン風の援用は有効であると言える。

本報で述べた多重効用ユニットを、Basin型太陽熱蒸留器に付加することは凝縮量増加に有用と考えられ、相当の効果が期待できる。例えば、凝縮促進比 α が最大で1.9倍であったことは、同じ凝縮量を得るのに必要な受光面積が約1/2になることを意味する。実装に向けた詳細な検討・検証については、今後の検討課題である。

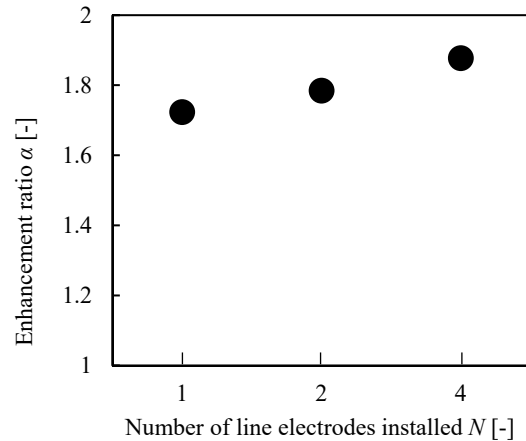


Fig.8 The relationship between the number of wire electrodes installed and the condensation enhancement ratio (Ion current $I = 125\mu\text{A}$, temperature difference $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, the distance between the wire electrodes was $d_w = 15\text{mm}$).

図8 線電極対の数及び凝縮促進比の関係（イオン電流 $I = 125\mu\text{A}$ 、設定温度差 $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 、線電極間の距離 $d_w = 15\text{mm}$ ）。

4. 結論

本研究では、太陽熱蒸留器用多重効用ユニットにイオン風を用いて性能向上を図ることを目標としており、太陽熱蒸留器への適用を見据えて、二重管の外管内面・内管外面をそれぞれ蒸発・凝縮面とした開発的基礎研究である。本報では、一対の線電極及び外管内面や内管外面に対するイオン風による複合的な強制対流を用いて、内部の熱・物質移動の促進を行い、蒸発・凝縮を同時促進させることを目的とした。特に、イオン風の実用化に向けた系での物質移動の促進を明らかにするため、実際の凝縮現象について述べる。そのため、イオン風の流速及び印加電圧-イオン電流の特性を測定し、凝縮量及び凝縮促進比を各電極配置について算出した。実験から得た知見を以下に示す。

- 1) 環状空間内の一対の線電極で発生したイオン風により、線電極の距離により、旋回流や衝突流が発生する。これらを総合した複合流を四箇所線の線電極対の数によって、凝縮促進比1.9倍の凝縮量 $2.0\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 程度に促進できる。

- 2) イオン風の発生による消費電力は 1.0 W 程度で、イオン風の流速は約 2.0 m/s である。このイオン風の流速は電流の 1/2 乗に比例し、線電極間の距離が近いほど大きい。
- 3) 太陽熱蒸留器において、環状空間内でのイオン風の物質移動促進効果は高く、その適用は有効であると期待される。
- 4) Basin 型太陽熱蒸留器に多重効用ユニットを付加することで、同じ凝縮量を得るのに必要な受光面積は約 1/2 になり、コンパクト化が図れる。また、本系を複数個付加することでさらなる凝縮量の増大に対する効果が期待される。

謝辞

本研究は渋谷浩一氏の修士研究（金沢工業大学、平成7年度）に端を発した。また、実験装置の製作には神初美里さんの協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国際連合広報センター, https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/sustainable_development_goals/water_and_sanitation/, (2023/2/7).
- 2) グレタ・トゥーンベリ, 気候変動と環境危機, 河出書房, 186-187 (2022).
- 3) Inge E. M. de Graaf, Tom Gleeson, L. P. H. (Rens) van Beek, Edwin H. Sutanudjaja, Marc F. P. Bierkens, Environmental flow limits to global groundwater pumping, *Nature*, 574, 90-94 (2019).
- 4) Swellam W. Sharshir, Youssef M. Ellakany, Almoataz M. Algazzar, Ammar H. Elsheikh, M.R. Elkadeem, Elbager M.A. Edreis, Abdelrahman S. Waly, Ravishankar Sathyamurthy, Hitesh Panchal, Mahmoud S. Elashry, A mini review of techniques used to improve the tubular solar still performance for solar water desalination, *Process Safety and Environmental Protection*, 124, 204-212 (2019).
- 5) P. Durkaieswaran, K. Kalidasa Murugavel, Various special designs of single basin passive solar still – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1048-1060 (2015).
- 6) Y. Tochitani, T. Taniguchi, Forced-convection Effect of Ionic Wind on Performance of Multiple-effect Unit for Solar Distillation System, *Journal of Japan Solar Energy Society* 20 (6), 33-39 (1994).
- 7) Y. Tochitani, S. Satoh, A Study on Multiple-effect Unit with Forced-convection Induced by Ionic Wind, *Journal of Japan Solar Energy Society* 22 (6), 67-74 (1996).
- 8) The Institute of Electrostatics Japan, *Handbook of Electrostatics*, Ohmsha, 304 (1981).
- 9) Y. Tochitani, K. Shibuya, Flow in Annular Space of Double-pipe Induced by Applying Corona Discharge, *The Japan Society of Mechanical Engineers B*, 66 (648), 2166-2172 (2000).
- 10) H. Kawamoto, H. Yasuda, S. Umezu, Ionic Wind in Pin-to-Plate Corona Discharge System, *The Japan Society of Mechanical Engineers C*, 70 (689), 169-175 (2004).
- 11) H. Miyasita, Y. Ehara, J. Enomoto, T. Inui, Study of Ionic Wind Velocity induced by Electrode System, *Journal of Institute of Electrostatics Japan*, 41 (2), 99-104 (2017).
- 12) K. Tanaka, H. Okamura, M. Kan, K. Watanabe, A Fundamental Study of the Performance of a Multiple Effect Solar Still (Discussion on the Results of Laboratory Experiments), *The Japan Society of Mechanical Engineers B*, 52 (479), 2697-2704 (1986).
- 13) K. Tanaka, H. Okamura, M. Kan, K. Watanabe, A Fundamental Study of the Performance of a Multiple Effect Solar Still (2nd Report, Experimental Analysis on the Upward Heating Type Still under the Actual Outdoor Insolation), *The Japan Society of Mechanical Engineers B*, 53 (496), 3771-3779 (1987).
- 14) H. Tanaka, Increase in Distillate Productivity of Basin Type Solar Still by External Reflect, *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*, 62 (5)215-220 (2008).
- 15) T. Nosoko, M. Kurumada, S. Gima, H. Minakuchi, Numerical Simulation of Multiple-Effect Diffusion Still with a Heated Upstream Surface and an Insulated Downstream Surface, *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*, 72 (2) 109-119, (2018).
- 16) G. Lee, S. Cho, B. Lim, S. Choi, C. Park, Experimental Study on A Novel Multi-effect Diffusion Solar Distiller with Wick-free plate, *Solar Energy*, 230, 250-259 (2021).
- 17) B. Lim, S. Choi, S. Cho, G. Lee, C. Park, Designs and performance analysis of vertical multi-effect diffusion solar distiller: A review, *Desalination*, 527, 115572 (2022).
- 18) T. Taketani, A. Yabe, K. Kikuchi, Y. Mori, K. Hijikata, Augmentation of Condensation Heat Transfer by Applying Non-uniform Electric Fields (2nd Report, Augmentation of Condensation Outside a Vertical Tube by Use of Helical Wire Electrodes), *The Japan Society of Mechanical Engineers B*, 52 (477), 2207-2213 (1986).
- 19) M. Robinson, Movement of Air in the Electric Wind of the Corona Discharge, *IEEE Transactions*, 80, 143-150 (1961).
- 20) 花岡良一, 高電圧工学, 森北出版, 110 (2007).