

簡易分散型の多重効用蒸発濃縮・造水器の開発

野底 武浩

琉球大学工学部工学科機械工学コース

概要 蒸気拡散式の多重効用蒸留器は、並行して水溶液の濃縮と造水が可能であり、また省エネ性能の高い機器である。その構造が簡便であることから、小規模工場など広い範囲の普及が期待されており、CO₂ 排出削減に大いに寄与し得る機器である。本研究では、蒸気拡散式蒸留器の実用化を目指して、実機レベルの蒸留器を製作しその性能試験を行うとともに、数値シミュレーションのプログラムを構築して性能を予測した。これらの実験結果とシミュレーション結果を比較検討したところ、実用化に向けて 5 つの課題が抽出された。また、実験において各々の課題に対し複数の対策が実施され、それらの結果より今後の展望が明確になった。5 つの課題と対策および今後の展望は、次のようにまとめられる。

- ① 各効用段における蒸発面から凝縮面への蒸気の拡散抵抗は蒸発速度を著しく低下させる。その対策として、蒸気拡散距離を 10 mm から 5 mm に短縮させ、安定した運転を行うことができた。この短縮により蒸発速度が約 45% 増加する。今後、3 mm への短縮が望まれる(下記の「今後の展望」参照)。
- ② 各効用段から濃溶液と凝縮水が持ち出す熱量は損失であり、蒸発倍率を著しく低下させる。その最も簡便な対策として、原溶液の供給量を減少させて濃縮度を高める必要がある。そのためには、水溶液に対する蒸発ウィックの濡れ性を高く保つことが肝要である(下記の④参照)。
- ③ 蒸発ウィックにおける固形成分の析出と乾き面の発生は、蒸発を阻害する。対策として、原溶液を均一に供給できる、より簡便な方法を実施した。
- ④ 接着剤を用いた蒸発ウィックの金属平板への接着は、ウィックの濡れ性を低下させる。接着剤を用いない、液の表面張力の作用による蒸発ウィックと金属板の密着においては、蒸発の進行とともにウィックと金属板の間に空気泡が形成され、蒸発を阻害する。対策として、両面テープを用いて蒸発ウィックを金属板に貼り付けて実験を行い、ウィックの濡れ性の低下が限定的であることを確かめた。高い濃縮度による高い蒸発倍率(今後の展望)参照)を実現するため、今後、ウィックの濡れ性が低下しない両面テープの開発が必要である。
- ⑤ 各効用段において濃溶液と凝縮水が一部混合し、性能を低下させる。対策として、濃溶液と凝縮水を混合することなく回収する構造を実施し、その効果を確かめた。また、スペーサーの表面や金属平板の一部を疎水性に改質する必要があることを示した。

今後の展望

両面テープからの化学物質の溶出を考慮すると、直近では、飲料水以外の造水と工業溶液の濃縮を目的とした蒸留器の開発が現実的である。また、上述の対策を講ずれば、約 4.8 倍の高蒸発倍率が可能な、蒸気拡散距離 3 mm、3 倍濃縮(濃縮度 3)の 10 段効用蒸留器の実用化が十分期待できる。

1. はじめに

1.1 CO₂削減対策と造水

地球温暖化防止対策は喫緊の世界的な課題であり、そ

れを定めたパリ協定は、日本を含む世界各国で批准が進んでいる。協定に定められたCO₂削減を順守するため、我が国においても様々な計画が立てられている。その重要

な柱の一つに、様々なエネルギー消費形態における省エネ技術革新の促進がある。

近年の地球温暖化の悪化は、地球規模での降水の偏在化と、その偏在化の不規則な年変動を引き起こしている。そのため、造水技術の進展が望まれているが、特に簡便な構造で安価な地域分散型の造水技術の開発が求められている。

水溶液の蒸発は、各種の工業溶液や食品溶液の濃縮、製塩における採かん工程において、広く活用されている。一方、水蒸気の凝縮は比較的簡便な造水技術として、現在でも広く利用されている。水溶液の蒸発と水蒸気の凝縮の両過程を含み、両者が同時に進行する過程が蒸留である。

水の蒸発熱は50°Cにおいて約2,400 J/gであり、水の比熱が4.2J/(g・K)であることを考慮すると水溶液の蒸発には多量の熱を要する。従って、上述の溶液濃縮と造水の工程においては多量の熱が消費され、それに比例して多量のCO₂が排出される。従って、これらのエネルギー消費形態におけるCO₂排出削減は重要な課題である。

1.2 蒸気拡散式多重効用蒸留

上述のエネルギー消費形態におけるCO₂排出削減の一助となる蒸留法に、省エネ性能の高い多重効用蒸留法がある。多重効用蒸留法の原理は、Fig.1 に示されるように、蒸発/水蒸気の移動/凝縮がセットとなった蒸留工程を複

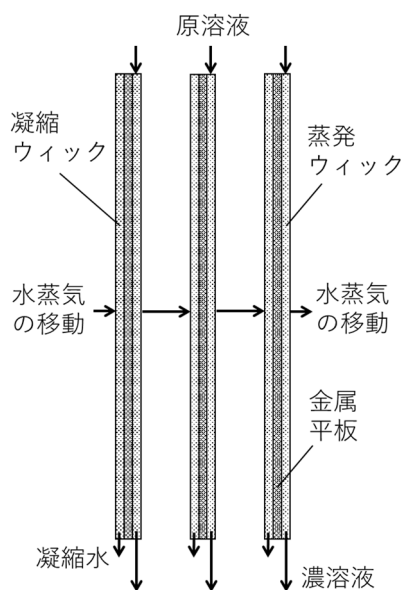


Fig.1 多重効用蒸留の原理を示す模式図

数回カスケード式に生じさせて高い蒸発倍率(付録参照)を実現するものである。多重効用蒸留は、真空式と蒸気拡散式の二つに分類される。真空式は既に実用化されている多重効用法であるが、その特徴は大型構造で高価という点であり、真空式の装置は拠点集中型の設備といえる。そのため、その導入は大規模な工場に限られる。

蒸気拡散式は、構造が簡便であり安価であることから、地域分散型ともいえる特徴を有しており、小規模工場など広い範囲での利用が望める多重効用蒸留器である。それが実用化されその普及が進めば、CO₂の大幅な排出削減に寄与するものと期待される。しかし、蒸気拡散式多重効用蒸留器には、実用化に向けていくつかの課題(次節参照)がある。

1.3 本研究における取り組み

本研究では、蒸気拡散式の実用化を目指して、蒸留器内の熱と物質の移動をシミュレーションする計算プログラムを構築し、種々の条件における蒸留器の性能を予測してきた。並行して、実機レベルの蒸留器を作製して稼働実験を行い、実用化に向けての検討を行ってきた。それらの取り組みの中で、蒸気拡散式の実用化に向けて重要な知見が得ることができた。本稿では、その取り組みと成果および得られた知見について報告する。

2. 実用化に向けての5つの課題

蒸気拡散式の実用化に向けての課題は、本研究における数値シミュレーションによって明らかにされたものが2件、実機レベルの蒸留器を作製し稼働実験を行う中で判明したものが3件である。前者によるものが以下の課題の1と2であり、後者によるものが以下の課題の3と4および5である。

課題1 蒸気拡散抵抗

真空式とは異なり、蒸気拡散式では平板間の狭い湿り空気層を水蒸気が通過する(水蒸気の移動の際に、拡散抵抗が存在する。この拡散抵抗は、蒸留器の蒸留速度を著しく低下させる。

課題2 濃溶液と凝縮水による熱損失

常温で蒸留器に供給された原溶液は、加熱・蒸発されて高い温度の濃溶液と凝縮水に分離・流出するが、両者が持ち出す熱量は損失となる。蒸気拡散式と真空式の蒸留器下端部の温度分布の比較を Fig.2 に示す。蒸気拡散

式の方がより高い温度分布を示すため、より多くの熱が持ち出される。蒸気拡散式と真空式における各効用段での蒸発量を Fig.3 に示す。蒸気拡散式においては、濃溶液と凝縮水が持ち出す熱量のために蒸発量の減少が顕著であり、蒸発倍率は低い。

課題3 蒸発ウィックの金属板への密着

蒸留器においては、金属平板に密着させた蒸発ウィックの全面にわたって水溶液を均一に流下させる必要がある。蒸発ウィックの密着が不十分で、金属板との間に気泡等が存在すると、それが大きな伝熱抵抗となってウィック中の水溶液の蒸発を阻害する。

課題4 蒸発ウィックの閉塞と乾き面の発生

各段の蒸発ウィックにおいて水溶液の流量に大きな不均一が生じると、以下の2点のトラブルを引き起こす。それらを防止するため、原溶液を蒸発ウィックの上端に均一に供給すると共に、下流域においても均一に流下させる必要がある。

- ① **乾き面の発生:** 蒸発ウィックに乾き面が発生し、その乾き面からは蒸発は生じないため、蒸留速度の大幅な低下を引き起こす。
- ② **固形分の析出による蒸発ウィックの閉塞:** 水溶液の流量の多い箇所では供給濃度に対する流出濃度の割合(以下、濃縮度、付録参照)が低く、流量の少ない箇所では濃縮度が高くなる。流下とともに水溶液の濃縮が進み溶解度を超えると、濃溶液中の固形分が結晶などの形で蒸発ウィックに析出してウィックを閉塞してしまうことがある。閉塞した領域では蒸発が低下するので、蒸発速度の大幅な低下を引き起こす。

課題5 濃溶液と凝縮水の混合

蒸気拡散式多重効用蒸留器では、以下の3つの点において、濃溶液と凝縮水が混合しやすい。

- ① 蒸気拡散式においては、広い面積の蒸留面と凝縮面がわずか3 mm~10 mm程度の隙間を介して向かい合う構造であり、濃溶液と凝縮水が混合しやすい。
- ② 蒸留面と凝縮面の間の隙間はスペーサーにより保持されており、そのスペーサーの表面を伝って凝縮水が濃溶液側へ、またはその逆の方向へ移動し両者が混合する恐れがある。
- ③ 特に、蒸留器の下端の濃溶液と凝縮水の回収部では、両者が混合しやすい。

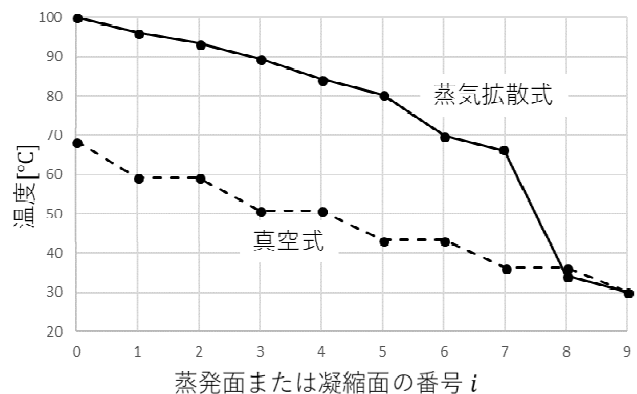


Fig.2 真空式および蒸気拡散式の蒸留器下端の温度分布の比較(横軸の奇数番号は蒸発面, 偶数番号は凝縮面)

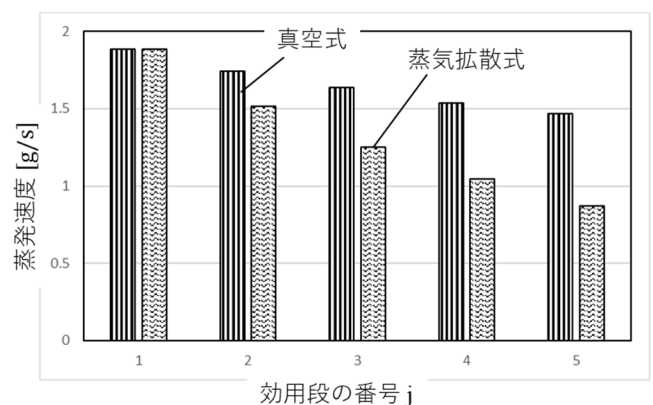


Fig.3 真空式および蒸気拡散式の蒸留器の各効用段における蒸発量の比較

3. 課題解決に向けた取り組み

3.1 蒸気拡散抵抗の低減

蒸留器内の全ての効用段の蒸気拡散抵抗を低減することは、蒸留器の性能向上に直結する課題である。各効用段の蒸気拡散抵抗について、以下のことが分かっている。

「蒸気拡散抵抗は蒸発面と凝縮面の距離(平板の間隔)に比例する。」

6段効用の蒸留器における平板の間隔の影響について、数値シミュレーションの結果を Fig.4 に示す。平板間隔を10 mmから5 mmへ、さらに3 mmに狭くすることにより、総蒸発速度(付録参照)は45%増さらに82%増と大いに向上する。蒸発倍率は2.6%増および4.1%増であり、変化は小さい。

従来の実験研究においては、平板間隔 10mm 程度の蒸留器が多かったが、本研究では平板間隔 5 mm の狭い蒸留器を作製して安定した稼働実験を繰り返している。実用化を考えた場合、平板間隔 3 mm まで狭くする必要があり、本研究ではそれに向けて改良を進めている。しかし、平板間隔を狭くすると、濃溶液と凝縮水が混合する恐れが高まることから、課題 5 と関係する。

3. 2 濃溶液と凝縮水による熱損失

濃溶液と凝縮水により持ち出される熱量(以下、流出熱量)は次式で与えられる。

$$\text{流出熱量} = \text{流出流量} \times \text{比熱} \times (\text{流出温度} - \text{供給温度}) \quad (1)$$

上式から導かれるように、流出熱量を減じる簡便な手段は、各効用段への原溶液の供給流量を減じることである。原溶液の供給流量を減ずれば、濃溶液と凝縮水の流出量が低下し、持ち出される熱量も減少する。なお、供給流量の減少に伴って、水溶液の濃縮度(付録1参照)は高くなる。

6 段効用の蒸留器の蒸発倍率に対する水溶液の濃縮度の影響を数値シミュレーションにより求めた。その結果を Fig.5 に示す。2 倍濃縮を基準としたとき、3 倍および 4 倍の濃縮においては、蒸発倍率は 14% 増および 20% 増となり、改善される。一方、総蒸発速度は 1.1% 減および 3.1% 減であり、大きな変化はない。

各効用段における蒸発量を m_e 、濃溶液の流出量を m_{out} とすると、2 倍濃縮のとき、 $m_{out}/m_e = 1$ であり、3 倍および 4 倍濃縮のとき $m_{out}/m_e = 1/2$ および $1/3$ となる。つまり原溶液の供給量を減少させると、蒸発ウィックの downstream において、濃溶液の流量が少なくなり、蒸発ウィックの閉塞や乾き面の発生(課題 4)の恐れが高くなる。その対策については後に述べる。

3. 3 蒸発拡散式蒸発器の最適な姿勢

平板群から構成されている蒸発拡散式の蒸発器の姿勢には、以下の三つがある。

- ① 平板群を鉛直に立てた姿勢(鉛直姿勢)
- ② 蒸発ウィック貼付面が下向きになるよう平板群を傾斜させた姿勢(下向き傾斜姿勢)
- ③ 蒸発ウィック貼付面が上向きになるよう平板群を傾斜させた姿勢(上向き傾斜姿勢)

本稿著者らは、上記の三つの姿勢について、実際に実

機レベルの蒸発器を作製し、性能試験を繰り返し行った。その一つである上向き傾斜姿勢の模式図を Fig.6 に示す。三つの姿勢にはそれぞれ長所と短所があるが、それらを総合的に検討して、上向き傾斜姿勢が最も適しているとの結論に至った。上向き傾斜姿勢の特徴は、以下の通りである。

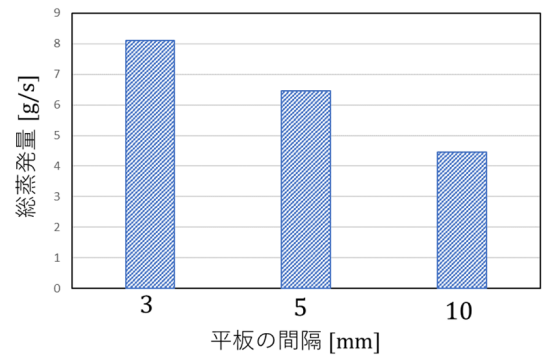


Fig.4 総蒸発速度に対する平板間隔(拡散距離)の影響

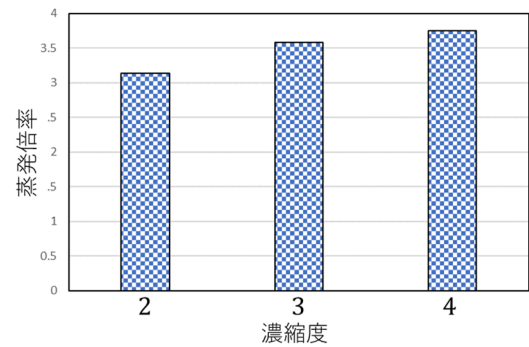


Fig.5 蒸発倍率に対する濃縮度(原溶液の供給量)の影響

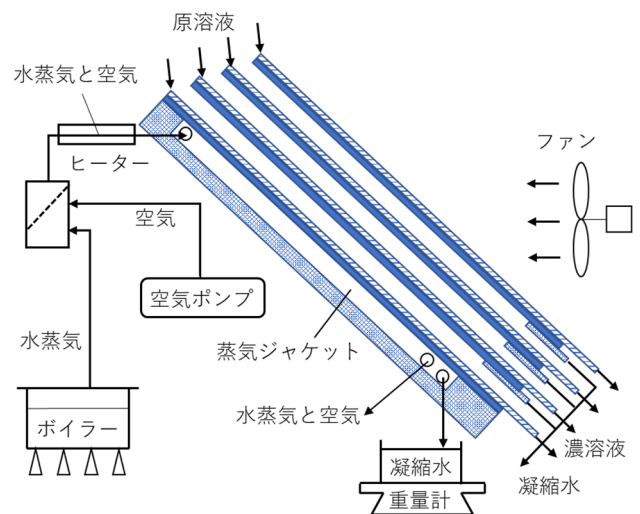


Fig.6 上向き傾斜姿勢の蒸発器と加熱装置

上向き傾斜姿勢の特徴

- ①中を流れる水溶液が自重により蒸発ウィックが平板に密着しやすく、また、自重の作用により蒸発ウィックと平板の間に気泡を作りにくい(長所)。
- ②蒸発ジャケットの上に、スペーサーとウィックを貼り付けた平板を交互に積み重ねていくだけであり、蒸発器の組み立てが簡便である(長所)。
- ③熱応力により平板が湾曲するが、自重により強制されてその湾曲が解消する(長所)。
- ④凝縮水は、蒸発ウィックの上方にある平板の下面を流下するので、滴下またはスペーサー表面を伝うなどして、濃溶液に混入しやすい(短所)。

本稿著者らは、上向き傾斜姿勢の最適な傾斜角度についても実験を行い、検討した。水平面から約 20°傾斜させた姿勢と 45°傾斜させた姿勢に対して実験を行った。傾斜角度が小さい姿勢においては、上述の①と③の長所が強調されるが、その短所④も強調される。そのため、平板下面にウィック(以下、凝縮ウィック)を貼り付けて、短所の緩和を試みた。水への濡れ性の良いウィックは、凝縮水をウィック内に保持しながら流下させる作用がある。一方、重力は凝縮水を平板下面から下方の蒸発ウィックに移動させようとする作用がある。実験を行ったところ、前者の作用が後者の作用に勝って、凝縮水の濃溶液への混入を防止することができた。

傾斜角度が大きい姿勢においては、その短所が緩和され、平板全面に凝縮ウィックを貼り付ける作業を省くことができるので、より簡単な構造になる。傾斜角 45°の姿勢の蒸留器を用いた実験の結果については後述するが、その結果を総合すると、以下のように結論できる。

「上向き傾斜姿勢の傾斜角度の最適値:45°」

3.4 原溶液の供給方法

各効用段の蒸発ウィックの上端に、原溶液を均一に供給する必要がある。本稿著者らは、二つの供給方法について検討した。その一つの供給方法を Fig.7 に示す。簡単のため、図では一つの効用段の蒸発ウィックへの供給のみを示している。ウィックの数だけ液溜めがあり、各々の液溜め部にはヘッドタンクから適量の流量で原溶液が供給されている。蒸発ウィックの上端は液溜め部の原溶液に浸されており、原溶液は、毛管作用により蒸発ウィックに吸い上げられ、ウィック全面を流下する。実験観測により、次の

ことが明らかとなった。

- ①原溶液の均一な供給が可能である。
- ②原溶液の非常にわずかな汚染やウィック素材の汚染により、原溶液吸い上げ能力が著しく低下し、強い汚染の場合には、吸い上げが不十分になり、液溜め部から原溶液が溢れるというトラブルが生じる。

この第一の供給方法は諦め、第二の供給方法を試みた。その模式図を Fig. 8 に示す。図では、一つの効用段の蒸発ウィックへの供給のみが示されている。原溶液はヘッドタンクからローラークランプを経て、蒸発ウィックの上端に水平に設置されている分散管(ステンレス管)に一定流量で流入する。分散管には、直径 0.5 mm の細孔が多数 40 mm 間隔で空けられており、分散管に流入した原溶液はそれらの細孔から蒸発ウィックの上へ散布される。原溶液は散布点からスパン方向に広がりつつ流下する。実験

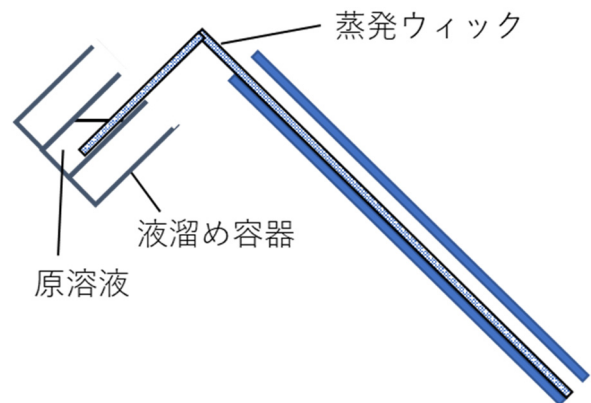


Fig.7 ウィックの毛管作用を利用した原溶液の供給部

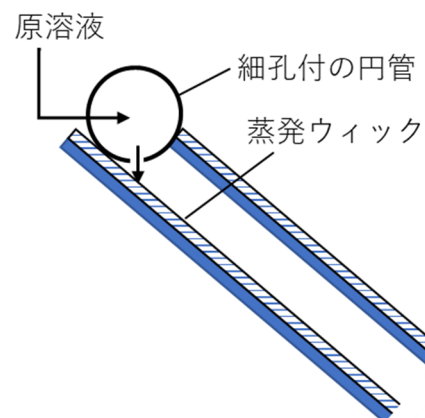


Fig.8 細孔を有する散布管を用いた原溶液の供給部

操作や観察から以下のことが明らかとなった。

- ① 散布点から比較的短い距離においてほぼ均一な流れが形成される。
- ② 安定して一定の量の原溶液が供給できる。
- ③ 供給方法が簡便である。

以上の知見から、本稿著者らは後者の方法を採用して実験を進めることにした。

3.5 濃縮溶液と凝縮水の回収方法

金属平板の間隔が 5 mm の蒸留器において、二つの回収方法を試みた。最初に試みた第一の方法を Fig.9 の(a) および(b)に示す。蒸発ウィックは平板の上の面に貼り付けられており、凝縮ウィックは平板の下の面に貼り付けられている。両ウィックの下端は鋸歯状に切断されており、濃溶液は蒸発ウィックの鋸歯の先端に、凝縮水は凝縮ウィックの鋸歯先端に集められて別々に回収される。実験観察より、以下の問題点が明らかになった。

「濃溶液または凝縮水の流量が多い場合、液が鋸歯先端に集められる途中において、液がウィックの斜めの辺から離脱して平板の裸面に筋を作って流下し、両液が混合する。」

この問題を解消する方法として、蒸発ウィックと凝縮ウィックの素材の濡れ性を良くすると共に、ウィックが貼り付けられていない平板の三角形の裸面を疎水面に改質する方法が考えられる。今後、これについて検討する予定である。

第二の回収方法の模式図を Fig.10 の(a)および(b)に示す。この方法では、二つの樋を用いて濃溶液を中央の一点に集めて回収する。一方、凝縮水回収ウィックは、濃溶液との混合を避けるため中央部に切り欠きがあり、凝縮水はその左と右の広い面を流下して回収される。実験より以下の知見が得られた。

樋とウィックを用いた回収方法の特徴

- ① 濃溶液と凝縮水の流量が比較的多い場合においても、両者が混合することなく回収できる。
- ② 狭い間隔の平板間に、低い高さの樋を設ける必要がある。

現在、本稿著者らの蒸発器においては第二の方法を採用している。今後、平板の間隔を約 3 mm に狭くして蒸発器の性能向上を目指しており、平板間隔 3 mm においても、この方法が有効か検討する予定である。

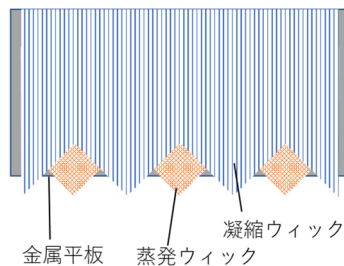


Fig.9(a) 鋸歯状ウィックを用いた濃溶液と凝縮水の回収部 (正面図)

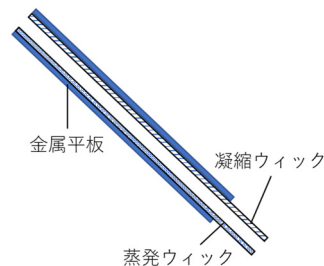


Fig.9(b) 鋸歯状ウィックを用いた濃溶液と凝縮水の回収部 (断面図)

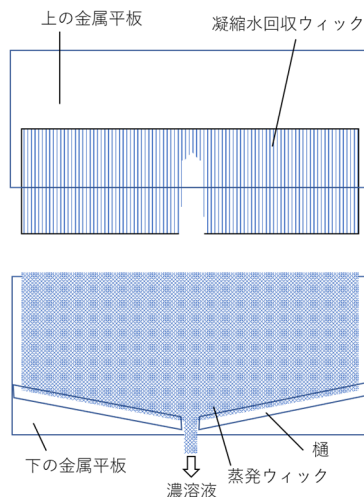


Fig.10(a) 濃溶液の回収樋と凝縮水の回収ウィック (両者を分離した際の図)

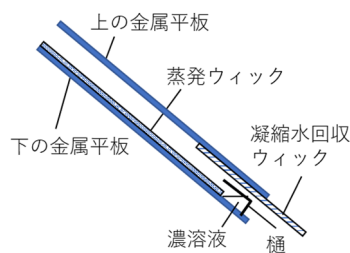


Fig.10(b) 濃溶液の回収樋と凝縮水の回収ウィックを用いた回収部 (断面図)

3.6 蒸発ウィックの金属板への密着の方法

本研究では、蒸発ウィックを金属平板に密着させるため、次の三つの方法を試み検討した。

- ①接着剤を用いた接着
- ②液の表面張力の作用を利用した密着
- ③両面テープを用いた接着

それぞれの方法を用いた場合の結果は、以下のようまとめられる。

3.6.1 接着剤を用いた接着と濡れ性の観察実験

本研究の目的には、ウィックが水を含んだ状態で 100°C までの高温に耐え得る接着剤のみが利用できる。そのような市販の接着剤の種類は限られているが、入手可能な種類の接着剤を用いて蒸発ウィックを金属平板に接着した。そして、金属板に接着されたウィックに水を含ませる実験を行った。その結果、水に対するウィックの濡れ性は著しく低下し、供給された水を十分には含まなかった。供給された水の多くは、ウィックの表面を、筋を作って流下した。また、ウィックまたは金属板に均一に接着剤を塗布するのは困難であり、塗布量にムラができた。塗布量の多い個所では濡れ性の低下が顕著であった。接着剤の成分がウィックの内部まで浸透し、ウィックの濡れ性を低下させたものと推察される。いずれの接着剤を用いた場合でも同様であった。

3.6.2 液の表面張力の作用を利用した密着と観察実験

液の表面張力の作用を利用した密着の方法

上述の接着剤を用いた実験の失敗から、接着剤を用いない方法を考案した。水溶液の表面張力の作用のみを利用して蒸発ウィックを金属板に密着させる方法である。具体的には、金属板の上に蒸発ウィックを設置して、それに原溶液を供給して全面を濡らし、ヘラでウィックの上面を掃くようにしてウィックと金属板の間の気泡をウィックの端に移動させ、大気に逃がした。濡れたウィックと滑らかな金属面が直接接触した状態においては、表面張力の作用が働き両者が密接することが確かめられた。

実験結果その1

毎回の蒸留器稼働の前に、全ての金属平板を蒸発装置から取り外し、再度組み立てる際に初段から順に蒸発ウィックを金属板に密着させる操作を行った。蒸留器を稼働して測定された蒸発倍率と総蒸発速度は、数値シミュレ-

ーションによる結果に近い値が得られた。そのことから、蒸発ウィックと金属板の間には、気泡等はほとんど形成されなかったと判断された。但し、実用化を考慮した場合、毎回蒸留器を分解して蒸発ウィックを金属板に密着させる作業を行うことは、人件費の高騰を招き現実的ではない。

実験結果その2

蒸発ウィックを金属板に密着させる操作を毎回行わず、一回の密着操作の後に複数回の蒸留器稼働実験を行った。その後に蒸留器の金属平板を取り外して初段かそれに近い段の蒸発ウィックを観察したところ、蒸発ウィックと金属板の間に気泡が発生しているのが分かった。それらの気泡の写真を Fig.11 に、気泡の模式図を Fig.12 に示す。気泡の発生を詳しく観察したところ、以下の知見が得られた。

- ①気泡の発生は、温度の高い初段において最も顕著であり、第2段、第3段の順に低減する。
- ②原溶液(実験では海水)の流下とともに大きな温度上昇が生じる領域において気泡の発生は顕著である。

気泡発生機構と気泡による伝熱の阻害

蒸発ウィックと金属板の間における気泡発生機構は次のように考えられる。水溶液への空気の溶解度は温度上昇とともに減少する。例えば、水 1.0 Lは 20°Cにおいて 19 cc の空気を溶解するが、80°Cでは 11 cc である。つまり 20°Cから 80°Cへの昇温により 8 cc の空気が液相から排除



Fig.11 金属板との間に多数の空気泡が形成された蒸発ウィックの写真

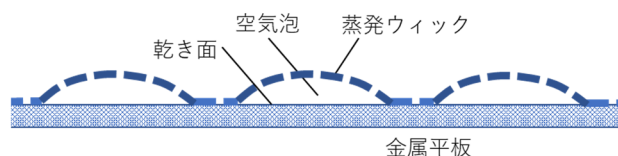


Fig.12 金属板と蒸発ウィックの間に形成された空気泡の模式図

される。蒸発ウィックにおいては、常温で供給された原溶液が加熱され昇温する。それに伴って液相から排除された空気がウィックと金属面の界面に小さな気泡核を形成し、それが成長してより大きな気泡が形成される。そのため、原溶液の温度上昇が著しい初段の蒸発ウィックにおいて、中でも温度上昇の著しい個所において気泡の発生が顕著である。

気泡形成部においては、金属平板からウィック中の水溶液に直接には熱が伝導しない。Fig.12 に示すように、気泡の底部の金属面は乾き面である。その金属面から気泡中の空気を介して気泡を覆うウィックに伝導で熱が伝わり、ウィック中の水溶液を蒸発させることになる。このように、気泡中の空気を介して間接的に、金属平板からウィック中の水溶液に熱が伝導する。水溶液に較べて空気の熱伝導率は 1/20 以下であり非常に低いので、気泡は大きな伝熱抵抗となって蒸発速度を大幅に減少させる。

3. 6. 3 両面テープを用いた接着と観察実験

蒸発ウィックと金属平板の間に気泡を形成させないようにするには、ウィックと金属板を接着する必要があることが判明した。しかし、上述の通り、接着剤の利用は不可である。そこで、両面テープを利用することにした。まず、両面テープの片面を金属平板に貼り付け、その上にシワを作らないように慎重にウィックを張りつけた。

観察結果

まず、金属平板に貼り付けたウィックに常温の水を供給して流下させた。ある程度の供給流量においては、水は主としてウィック中に浸透して流下した。このことから、両面テープを用いても、水に対するウィックの濡れ性の低下は許容範囲内であることが判明した。

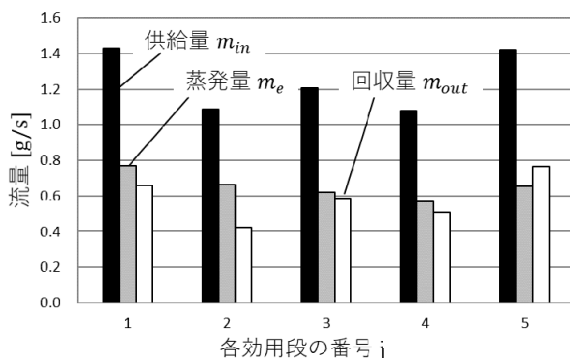


Fig.13 蒸気拡散式蒸留器の各効用段における海水供給量と蒸発量および濃海水回収量

次に、金属平板を加熱し約 100°C に保持しつつ、それに張り付けられたウィックに水を供給し流下させた。ウィックの濡れ性は常温の場合と差はなかった。また、加熱によるウィックの剥れは観察されなかった。以上の観察は、以下のようにまとめられる。

両面テープを用いたウィックの貼り付けの特徴

- ①金属平板に貼り付けられたウィックに、水を浸透させ加熱してもウィックの剥がれは生じない。
- ②水に対するウィックの濡れ性の低下は限定的であり、ある程度の流量までは水がウィックに浸透し流下する。
- ③ウィックを貼り付ける作業において、ウィックにシワが生じないように細心の注意を要する。

以上の結果より、両面テープを用いた接着が本研究の目的に利用可能であるとの結論を得た。

4. 実験

蒸留器の概要

本研究においてはこれまでいくつかの蒸留器を製作し、また改良を加えるなどしてきた。今回の実験で用いた蒸留器を Fig. 6 に示す。蒸留器のスペックは以下の通りである。

- ・ 姿勢: 上向きの 45° 傾斜
- ・ 蒸発ウィック: 両面テープを用いた貼り付け
- ・ 凝縮面: 金属平板の裸の下面
- ・ スペーサー: 高さ 5mm, 幅 11 mm のアルミアングル材
- ・ 平板間の間隔(拡散距離): 5 mm
- ・ 原溶液の供給: 水平円管の直径 0.5 mm 孔(ピッチ 40 mm) から散布
- ・ 濃溶液の回収: 蒸発ウィック下端の樋
- ・ 凝縮水の回収: 金属平板下端の下面に貼り付けたウィック
- ・ 加熱の手段: 蒸気ジャケット
- ・ 加熱面積: 幅 1.0 m × 長さ 1.6 m
- ・ 下流の断熱部面積: 幅 1.0 m × 長さ 0.6 m (うち蒸留面積 0.52 m²)
- ・ 最後尾の段の蒸発ウィック: ファンによる蒸発の促進

スペーサー

各効用段において、スペーサーとして、高さ 5 mm 幅 11

mm のアルミアングル材を 4 本用い、それぞれを水溶液の流れる方向に設置した。左右両端の 2 本は蒸発ウィックの外の金属板と金属板の間に、中央の 2 本は蒸発ウィックと金属板の間に挟まれるように設置した。従って、アングル材がウィックの蒸発面積を覆う割合は 0.022 である。

断熱部

蒸気ジャケットの加熱部に隣接する下流に、長さ 0.6 m の断熱部を設けた。加熱部を経て高温になった水溶液が断熱部に流入しそこを流下する際に、溶液自身の顕熱を消費して蒸留が進行する。その結果、流出温度が低下して持ち出される熱が減少するという効果がある。

加熱装置

蒸気ジャケットから成る加熱装置を Fig.6 に示す。ボイラーからの蒸気は、デミスターに流入し、空気ポンプからの空気と混合する。デミスターからの混合気は電気加熱された円管を経て蒸気ジャケットの上部に流入する。ジャケット内で蒸気の大部分は凝縮し、残った蒸気を含む混合気はジャケット下部から流出する。ジャケット下部から流出する凝縮水は容器に溜められ、その重量の時間変化が測定される。その測定から単位時間当たりジャケット内で消費された蒸気量が求められる。なお、混合する空気量を調節することにより、蒸気ジャケット内の加熱温度を変化させることができる。

試料液として 3.5% の海水を用いた。蒸留器の稼動がほぼ定常になった後、測定を開始した。

5. 実験結果および考察

5.1 各効用段における海水供給量と蒸発量および濃海水回収量

5 段効用の蒸留器を組み立て、定常運転時に各効用段における単位時間当たりの濃海水回収(流出)量 m_{out} 、供給濃度 S_{in} 、回収(流出)濃度 S_{out} を測定した。各効用段への海水供給量 m_{in} と蒸発・凝縮量 m_e は、質量収支の関係から導かれる次式により求めた。

$$m_{in} = m_{out} \frac{S_{out}}{S_{in}} \quad (2)$$

$$m_e = m_{out} \left(\frac{S_{out}}{S_{in}} - 1 \right) \quad (3)$$

これらの測定値と計算値の一つの例を Fig.13 に示す。各効用段への海水供給量の調節が大まかであり、供給量

m_{in} に凹凸がある。また、その供給量に対応して、回収量 m_{out} にも凹凸が生じる。しかし、蒸発量 m_e においては、次のような規則性がある。

- ① 蒸発量は初段から第 4 段(最後尾一つ前の段)にかけて減少する。
- ② 最後尾の段の蒸発量は、その前の段(第 4 段)の蒸発量より多い。

いずれの実験 run においても、上記の規則性は観察された。蒸発器の最後尾の段の蒸発ウィックは、周囲空気に露出しており、そのウィックからの水蒸気は周囲空気に拡散する。

5.2 各効用段における蒸発量の測定値と理論値の比較

本稿著者らが開発した数値シミュレーションプログラムに測定値の条件を入力して、蒸発器の効用段における蒸発量を求めた。蒸発量のシミュレーションに結果(以下、理論値)と測定値の比較の一例を Fig.14 に示す。数値シミュレーションにおいては、最後尾の段(5 段目)の蒸発量は測定値に等しいとにおいて計算した。蒸発器内の初段から第 4 段(最後尾一つ前の段)において、測定値は理論値より低い値である。その理由は次のように考えられる。

第 1~4 の効用段において、凝縮水の一部(理論値と測定値の差に相当する量)が凝縮面からその下方に位置する蒸発ウィックに移動し濃海水に混入した。観察によれば、凝縮水に対する金属板の裸面(凝縮面)の濡れ性は良好であり、凝縮面の中から直接滴下したとは考えにくい。スパーサーに用いたアルミニウム材の表面は、水に対する濡れ性が良好であり、凝縮水がスパーサーの表面を伝って蒸発ウィックに移動した可能性が最も高い。

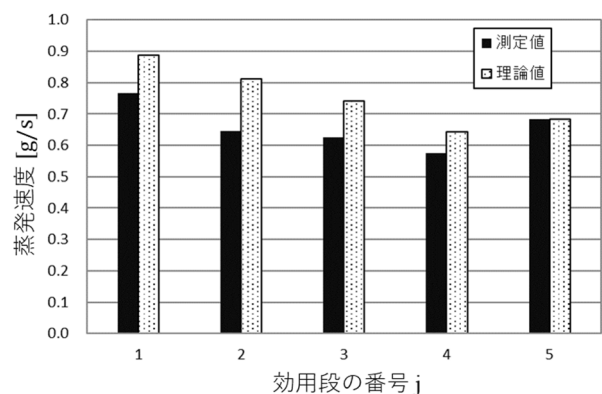


Fig.14 各効用段における蒸発量の測定値と理論値の比較

この問題は、スパーサーの表面を改質して凝縮水に対する濡れ性を低下させれば解決すると考えられる。現在、この対策を進めているところである。

5.3 第一平板加熱温度による総蒸発量の変化

各効用段における蒸発量を合計した総蒸発量と第一平板加熱温度の関係を Fig.15 に示す。図には各々の測定値に対応した理論値もプロットされており、図中に示した直線は、それらの理論値の最小二乗近似である。第一平板の加熱温度の上昇に伴って、総蒸発量の測定値も理論値も直線的に増加している。総蒸発量の測定値は、平均して理論値より 12% 低い。

5.4 第一平板加熱温度による蒸発倍率の変化

蒸発倍率は、蒸気ジャケットで消費されたボイラー蒸気量に対する多重効用部での総蒸発量の比であると定義で

きる。その蒸発倍率と第一平板加熱温度の関係を Fig.16 に示す。Fig.15 と同様に、各々の測定値に対応する理論値もプロットされており、理論値の最小二乗近似の直線も図中に示されている。第一平板加熱温度の変化に対し、蒸発倍率の理論値はほぼ横ばいである。蒸発倍率の測定値も同じ変化を示すと考えられるが、高い温度域における測定値の数が少ないので明言はできない。Fig.15 の総蒸発量の測定値に比べると蒸発倍率の測定値はバラツキが大きくなっている。これは、蒸発倍率の分母である蒸気ジャケット内の消費蒸気量の測定値のバラつきが比較的大きいことに起因する。蒸発倍率の測定値は、理論値に比べて平均して 13% 低い。

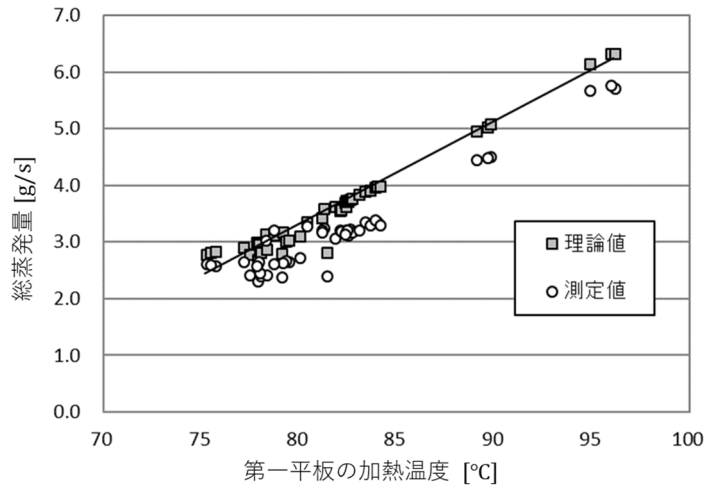


Fig.15 第一平板加熱温度変化に伴う総蒸発量の変化(理論値と測定値の比較)

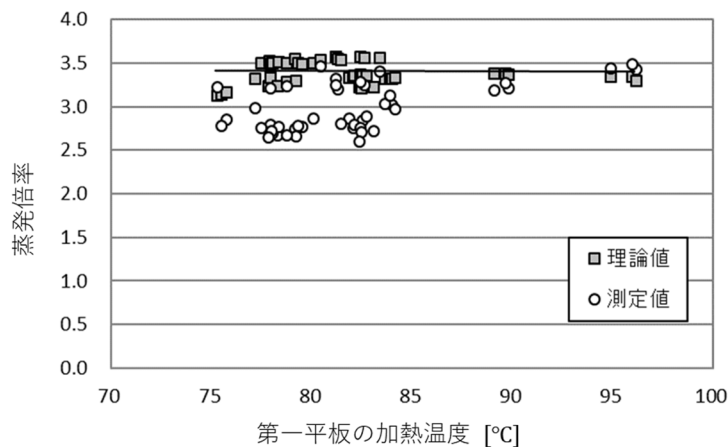


Fig.16 第一平板加熱温度変化に伴う蒸発倍率の変化(理論値と測定値の比較)

6. まとめと今後の展望

公益財団法人ソルト・サイエンス研究財団から3年間の助成を受けて、蒸気拡散式の蒸留器の実用化を目指して開発研究を続けてきた。上述の通り、蒸気拡散式蒸留器の開発には5つの課題があるが、その多くは解消または改善されつつある。本研究で得られた成果や知見をもとに、今後の課題と展望は以下のようにまとめられる。

今後の課題と展望

① 金属板へのウィックの接着

本研究で開発中の上向き傾斜姿勢の蒸留器においては、両面テープを用いて蒸発ウィックと凝縮水回収ウィックを金属板に張り付けており、その両面テープから微量の化学物質が濃溶液と凝縮水に溶け出す恐れがある。そのため、飲料用の造水や食品溶液の濃縮を目的として本蒸留器を利用する際には注意を要する。直近の目標としては、飲料用以外の造水や工業溶液の濃縮を目的とした蒸留器の実用化が推奨される。長期的には、化学物質が溶け出さない両面テープの開発が望まれる。それと共に、貼り付けによってウィックの濡れ性が低下しない両面テープの開発も望まれる。濡れ性が低下しなければ、濃縮度を高めて蒸発倍率を向上させることができる。

② 平板間隔3mmの蒸留器

Fig.4 に示すように、平板の間隔(蒸気拡散)距離を現行の5mmから3mmにすることにより、総蒸発量が著しく増加する。また、平板間隔を狭くすることにより、より多くの効用段を組むことができるので、蒸発倍率も向上する。濃縮

度を高めると蒸発倍率はさらに向上する。一例として、2倍濃縮(濃縮度2)の平板間隔5mmの6段効用に対し、3倍濃縮の平板間隔3mmの10段効用においては、総蒸発量が16%、蒸発倍率が53%向上し、後者の蒸発倍率が約4.8であるとする数値シミュレーションの結果が得られている。本稿著者らのこれまでの経験からも平板間隔3mmの実現は十分可能であり、近い将来には実現したい。

付録 多重効用蒸留器の性能指標および濃縮度

多重効用蒸留器の性能指標は、以下の式で定義される蒸発倍率と総蒸発速度である。

$$\begin{aligned} & \text{蒸発倍率} \\ &= \frac{\sum(\text{各効用段における蒸発量} \times \text{蒸発熱})}{\text{初段効用への入力熱量}} \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{総蒸発速度} \\ &= \frac{\sum(\text{各効用段における蒸発速度})}{\text{初段効用への熱入力面の面積}} \quad (5) \end{aligned}$$

蒸発倍率は蒸留器の省エネ性能の指標であり、総蒸発速度は蒸留器の生産性を示す指標である。

本稿では、水溶液の濃縮度を以下の式で定義する。

$$\text{濃縮度} = \frac{\text{流出濃度}}{\text{供給濃度}} = \frac{\text{原溶液供給流量}}{\text{濃溶液流出流量}} \quad (6)$$

参考文献

- 1) 野底, 儀間, 水口, 車田, 非加熱蒸留部を有する拡散式多重効用蒸留器の数値解析, 日本海水学会誌, 72巻(2号)pp. 109-119

Development of Decentralized Simple Multiple-Effect Evaporator for Liquid Concentration and Distillation

Takehiro Nosoko

Mechanical Engineering Course, Department of Engineering,
Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

Summary

The multiple-effect vapor-diffusion still can be used to concentrate various kinds of solution as well as to produce pure water. Because of its simple structure and high energy-efficiency, it has a great potential to be introduced into many factories and workshops, and to reduce CO₂ emission drastically. With the aim to put the still to practical use, we constructed stills of this type and a numerical simulation program to investigate their performance in various conditions. The experimental and numerical results show that there are five difficulties in putting the still to practical use. We worked out several measures to each of them and experimentally and numerically examined how the measures work. These examinations improved the prospects of putting the still to practical use. Our finds are summarized as follows.

- ① Vapor-diffusion resistance between an evaporating surface and a condensing one decreases the evaporation rate in every effect. We reduced the distance between the surfaces from 10mm to 5mm, and this increased the total evaporation of the still by 45%. We are planning to reduce the distance to 3mm for the higher performance of the still
- ② Concentrate and condensate carry some heat out of the still, and the heat greatly decreases the ratio of the total amount of evaporation to the steam spent in heating the still. The simplest measure is to decrease the flow rate of the solution flowing into every effect to increase the ratio of the effluent concentration to the influent one. This decreases the heat carried out by the concentrate and the condensate.
- ③ Uneven flow rate of solution in the evaporating wicks might cause deposition and/or dryout which decrease the evaporation from the wicks. We constructed a simple device to feed every wick with the solution evenly.
- ④ The evaporating wick became less wettable after gluing it onto the metal plate, and it caused dryout on the wick. Without gluing, many bubbles appeared between the metal plate and the wick soaking solution with the progress of the evaporation. Then we used double-sided tape to stick the wick onto the plate and found that the wick was wettable enough not to bring about dryout. To achieve the higher concentration ratio, we need a new double-sided tape which keeps the wick wettable more highly.
- ⑤ The condensate is partly mixed with the concentrate in the effects. We constructed a new collecting device at the end of the still, and found that it worked well. There are the spacers between the evaporating wick and the metal plate in every effect, and we need to change the hydrophilic surfaces of the spacers into hydrophobic ones to prevent the mixing completely.

Prospects of the development of the still

The multiple-effect vapor-diffusion still will be put to practical use in the near future, but the produced water will not be used for drinking since the water might contain slight chemicals from the double-sided tape. A high-performance still will be constructed, which has 10 effects with 3mm diffusion distances and with the effluent concentration three times as large as the influent one, and achieve the total evaporation 4.8 times as much as the consumed steam.