

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

概要 真空式の多重効用蒸発濃縮器と比較することにより、蒸気拡散式の蒸発器の問題点を明らかにし、蒸気拡散式蒸発器の開発において次の2点が課題であることを示した。

①各々の効用段の蒸発面と凝縮面の間隔(蒸気拡散距離)を5 mmかそれ以下に保って蒸発・凝縮を行わせる技術の開発

②各々の効用段から排出される凝縮水と濃縮液が持ち出す熱量を低減する技術の開発

第2の課題を解決する方法として、蒸発器の加熱部の下流側に断熱部を設け、その断熱部において凝縮水と濃縮液の顕熱を利用して蒸発・凝縮を進行させるという案を提示した。これに基づいて、加熱部の0.318倍の面積の断熱部を有する、蒸気拡散距離5 mmの蒸発器を製作し、海水を濃縮する実験を行った。また、実験と同じ条件下における、断熱部を有しない蒸発器の性能を、定常一次元理論モデルを使って計算した。両者の結果の比較より、以下の知見が得られた。

1. 蒸気拡散距離が5 mmの全ての効用段において、凝縮水と濃縮海水が混合することなく蒸発・凝縮が進行した。
2. 断熱部を設けることにより、全ての効用段から流出する濃縮海水と凝縮水の温度と周囲温度との差が約半分に減少した。
3. 断熱部を設けることにより、全ての効用段において蒸発速度が増加した。
4. 総蒸発速度と蒸発倍率の両方において、断熱部を有する蒸発器の実験値は、蒸発部を有しない蒸発器の理論値より10%増加した。

1. はじめに

海水などの水溶液の濃縮は、製塩をはじめとする食品工業の重要な一つの工程である。この工程は、水溶液から水を分離する工程であり、濃縮とともに真水の製造または淡水化を伴い、一つの装置で濃縮と造水が可能である。

現在では、規模の大きな工場を中心に、イオン交換膜や逆浸透膜を利用して海水などの水溶液の濃縮が行われるようになった。一方、水溶液を加熱蒸発させて分離する方法(蒸留法)は、古くから現在まで広く利用されている。水溶液を蒸発させるには多量の熱量を要することから、水蒸気が有する高いエンタルピー(熱エネルギー)を繰り返し再利用する方法が開発されている。これは、真空式多

重効用蒸発法と呼ばれ、その原理による装置が大きな工場を中心に導入されている。

1961年に、簡易な構造の多重効用蒸発器が、オーストラリアのR. P. Dunkle氏によって考案され⁽¹⁾、その後各国の研究者により研究が進められている⁽²⁻⁵⁾。それは、水溶液を浸透させたシート(ウイックと呼ばれる)を片面に貼り付けた薄い平板を、複数枚狭い間隔で平行に並べた構造である。蒸発器内では、各ウイックに含まれる水溶液から蒸発した水蒸気は、平板と平板の間の湿り空气中を拡散して次の板の裸面に凝縮する。その原理については後述するが、本稿では、これを「蒸気拡散式」と呼ぶことにする。

著者の研究室では、この蒸気拡散式の多重効用蒸発

器(以下、蒸発器と呼ぶ)の実用化を目指して、研究を進めてきた。本稿では、これまで得られた知見を整理するとともに、本助成研究により得られた結果と知見について報告する。

2. 真空式と蒸気拡散式の比較および蒸気拡散式の課題

本節では、真空式多重効用蒸発装置と蒸気拡散式多重効用蒸発器を比較することによって、後者の特徴とその実用化に向けての課題を明らかにする。

2.1 真空式多重効用蒸発器

真空式多重効用蒸発装置の一例を、Fig. 1 に模式的に示す。装置は、複数の蒸発缶を連結したもので、各々の蒸発缶内は真空に引かれ、内部の空気が排除されている。なお、Fig. 1 には、途中の二つの蒸発缶のみが示されているが、実際には4つ以上、場合には10以上もの蒸発缶が連結される。水溶液が前段の蒸発缶から当該缶の頂部に供給されて、缶内の多数の円管の内壁に液膜を形成して流下する。その管群の外側には、前段からの水蒸気が供給されて、管群の外壁で凝縮する。その際に発生する凝縮熱が管壁を通過して内壁面を流下する液膜に伝わり、それを蒸発させる。発生した水蒸気は次段の缶へ移動し、そこで凝縮して水溶液をさらに蒸発濃縮させる。Fig. 2 においては、このような凝縮と蒸発、水蒸気の移動を模式的に示した。このように、水蒸気を持つ高エンタルピー(熱エネルギー)は、連結した缶の数に等しい回数だけ再利用されるので、次式で定義される、蒸発装置の性能指標である蒸発倍率が、連結する蒸発缶の数の増加とともに増大する。

$$\text{蒸発倍率} = \frac{\sum(\text{各々の缶における蒸発量} \times \text{蒸発熱})}{\text{装置への入力熱量}} \quad (1)$$

もう一つの性能指標は、次式で定義される総蒸発速度である。

$$\text{総蒸発速度} = \sum(\text{各々の缶における蒸発速度}) \quad (2)$$

個々の缶における蒸発速度は、Fig. 2 に示す凝縮面と蒸発面の温度差に比例し、関係する複数の伝熱抵抗に反比例する。伝熱抵抗の一つは、Fig. 2 に示す凝縮液膜と管壁と水溶液膜の3層の伝熱抵抗であり、それに水溶液の沸点上昇に対応する伝熱抵抗が加わる。条件によ

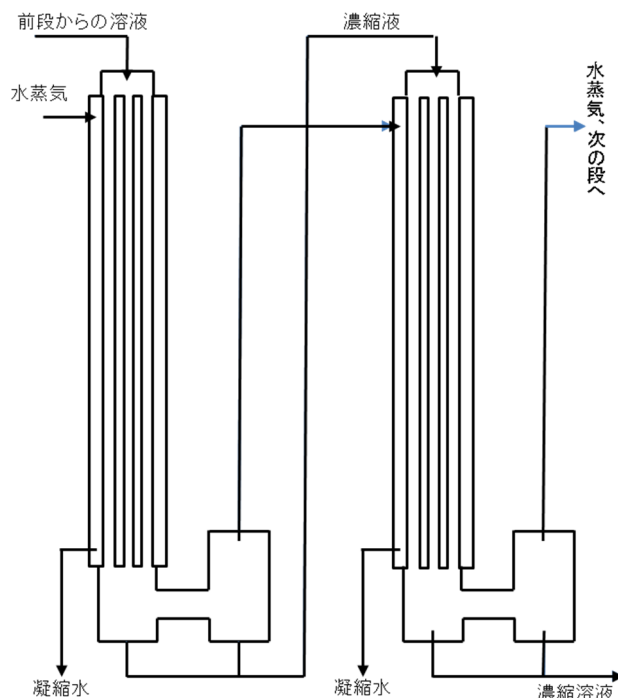


Fig. 1. 真空式多重効用蒸発濃縮装置

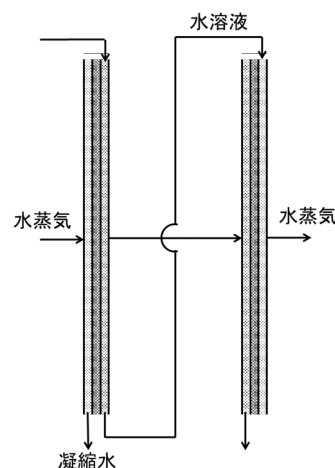


Fig. 2. 真空式蒸発装置内の蒸発と凝縮、水蒸気の移動

ては、缶内の蒸発面から次の缶内の凝縮面までの水蒸気の移動抵抗が加わる。水蒸気の移動の空間に空気などの不凝縮性ガスが存在すると、水蒸気はその不凝縮性ガス中を拡散移動することになり、それが大きな移動抵抗になる。この抵抗が、蒸発速度を著しく低減し、蒸発装置の性能を低下させる。缶内を真空に引いて内部の空気を排除することにより、水蒸気の移動抵抗が大幅に低減されるのである。

蒸発缶内の気圧(水蒸気の圧力)は、初段の缶におい

て最も高く、段が進むとともに気圧は減少し、最終の缶において最も低くなる。各々の缶内の気圧の値によって、蒸発温度と凝縮温度は缶ごとに異なり、気圧が最も高い初段において最も高く、段が進むとともに低下して、最終段では、最も低く周囲温度に近い値になる。このようにして、各々の缶において、3層の凝縮面と蒸発面の間に温度差を生じさせ、凝縮と蒸発を行わせる。

このように、全ての蒸発缶から空気を排除する必要があるが、空気だけの排除でなく空気と水蒸気の混合気の排除であるため、通常の真空ポンプではなく、スチームエジェクターが利用されている。また、最終段の缶内の温度を周囲温度と近い温度に保つため、最終段で発生した蒸気をバロメトリックコンデンサーに導き凝縮させている。

円管内の内壁を完全に濡らして液膜を形成させることは、実際にはかなり困難である。そのため、実用化されている多くの蒸発装置では、管群部を水溶液の加熱用に用い、それに接続して沸騰蒸発部を設けている。その場合、管群の円管内を水溶液で満たしてそれを流動させて加熱し、その水溶液を蒸発部に導き、そこで沸騰蒸発させる。この方式では、円管の内壁と流動する水溶液との間に新たな伝熱抵抗が生じ、それが凝縮温度と蒸発部の蒸発温度の差を大きくする。この伝熱抵抗を低減するために、ポンプを用いて、比較的高い流速で水溶液を流動させる必要がある。

各々の缶内での凝縮温度は、周囲温度(気温)よりも高い値をとることから、凝縮水は、周囲温度よりも高い温度で各々の缶から排出される。その凝縮水とともに缶外へ熱が排出されるが、その熱量は次式で表される。

$$\text{排出熱量} = \text{比熱} \times \text{排出される質量} \times \text{気温との温度差} \quad (3)$$

これに加え、各々の缶の缶壁から周囲空気への熱損失もある。ある段の蒸発缶から次の段に移動し再利用される熱量は、その段から凝縮水とともに排出される熱量と缶壁からの熱損失の和の分だけ減少する。これが全ての缶において生ずるため、外部から初段の缶に入力された熱量(消費熱量)は、段が進むとともに減少し、最終段で利用できる熱量は最も小さくなる。従って、蒸発缶内の温度をできるだけ低く保つことは、高い蒸発倍率を保持するために重要である。

真空式の多重効用蒸発装置の特徴についてまとめると、

次のようである。

真空式の特徴

- ①缶内を真空に引くことにより、水蒸気の拡散移動の抵抗が低下またはゼロになる。
- ②缶内を真空に引くことにより、各効用段において、蒸発温度と凝縮温度が低下し、凝縮液が持ち出す熱と缶壁から周囲への熱損失が低減する。
- ③これらの効果により、蒸発装置の性能指標である蒸発倍率と総蒸発量が増大する。

2.2 蒸気拡散式の多重効用蒸発濃縮器

蒸気拡散式の多重効用蒸発器は、水蒸気の高いエンタルピーを繰り返し再利用するという点では真空式のものと同じであるが、大きな相違点が存在する。蒸気拡散式の多重効用蒸発器を Fig. 3 に示す。水溶液を浸透させるウィックを貼り付けた薄い平板(鋼板など)を複数枚、狭い間隔で平行に並べた構造である。(Fig. 3 では途中の二枚の平板のみが示されている。)各々の平板のウィックにその頂部から水溶液を供給し、全体に浸透させる。平板の裸面は前段からの水蒸気の凝縮によって加熱され、その熱が平板を通過して平板の右面のウィック中の溶液を蒸発させる。そこで発生した水蒸気は、平板と平板の間の湿り空気層を拡散して、次段の平板の裸面(左面)に凝縮する。この凝縮熱によって次段の平板のウィック中の溶液が蒸発する。このようにして、凝縮熱がウィックの数に等しい回数だけ再利用され、蒸発倍率が増大する。Fig. 2 と Fig. 3 を比較すると、蒸気拡散式におけるウィックを貼り付けた一枚の平板が、真空式における一つの蒸発缶に相当し、

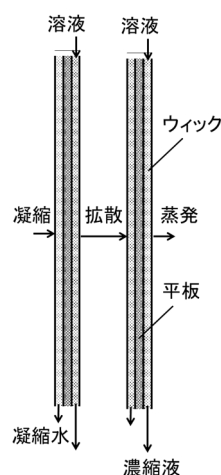


Fig. 3. 蒸気拡散式の多重効用蒸発器

また、平板と平板の間の空間は、缶内の蒸発面から次段の缶の凝縮面までの水蒸気の移動経路の空間に相当することが分かる。

蒸気拡散式では、器内を真空に引かないため、水蒸気は平板と平板の間の静止湿り空気層を拡散により移動する。これが、蒸気拡散式が真空式と異なる点の一つである。この静止湿り空気中の水蒸気の移動は、一方拡散と呼ばれる現象であり⁶⁾、水蒸気の流束は次式で表される。

$$m_v = \frac{p_F D}{RTL} \ln \frac{p_F - p_d}{p_F - p_v} \quad (4)$$

蒸発面と凝縮面の水蒸気分圧の差 $p_v - p_d$ が小さい場合には、次の近似が成り立つ。

$$m_v \cong \frac{p_F D}{RTL} \times \frac{p_v - p_d}{p_F - p_v} \quad (5)$$

上式を展開すると、水蒸気の拡散に伴う伝熱抵抗 θ_H は、次式で与えられる。

$$\theta_H = \frac{RTL}{h_v D} \left(1 - \frac{p_v}{p_F} \right) \frac{dT}{dp_v} \quad (6)$$

ここに、 m : 単位伝熱面積当たりの流量又は流束、 T : 絶対温度、 p : 圧力、 h_v : 水蒸気のエンタルピー、 D : 拡散係数、 R : 水蒸気の気体定数、 L : 水蒸気の拡散距離、添え字 v : 水蒸気又は蒸発、蒸発面、 d : 凝縮面、 F : 全圧である。この伝熱抵抗は、拡散抵抗に比例する。

凝縮液膜と平板とウィックの 3 層の伝熱抵抗を $3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ とし、それを基準にして、上式から求めた

拡散に伴う伝熱抵抗の比と湿り空気層の温度の関係を Fig. 4 に示す。同図では、水蒸気の拡散距離(蒸発面と凝縮面の距離)をパラメータにとっている。温度が低い場合には、拡散に伴う抵抗は大きく、3 層の抵抗の数倍に達する。温度が大きくなるとともにその抵抗は急減し、 100°C でゼロになる。この抵抗は、各々の段における蒸発速度を低下させ、ひいては総蒸発速度を低下させる。

この拡散に伴う伝熱抵抗は、蒸発倍率を低下させる。平板の温度は、最終段において周囲温度の近いが、最終段から初段の方向に累積的に上昇する。そのため、凝縮水および濃縮液とともに排出される熱量も多くなる。ある段の平板から次段の平板に移動する熱量は、その排出される熱量の分だけ減少する。これが初段から最終段の方向に生ずるので、蒸発倍率が低下するのである。拡散に伴う伝熱抵抗は、この低下を大きくしてしまう。

以上より、真空式に比較した場合、蒸気拡散式の問題点は次のようにまとめられる。

蒸気拡散式の問題点

- ① 各々の段の平板間に水蒸気の拡散抵抗が存在し、蒸発速度を低下させる。
- ② この水蒸気の拡散抵抗により各段の平板の温度が上昇し、凝縮水および濃縮液とともに排出される熱量が増大する。
- ③ これらのことにより、総蒸発速度と蒸発倍率が低下する。

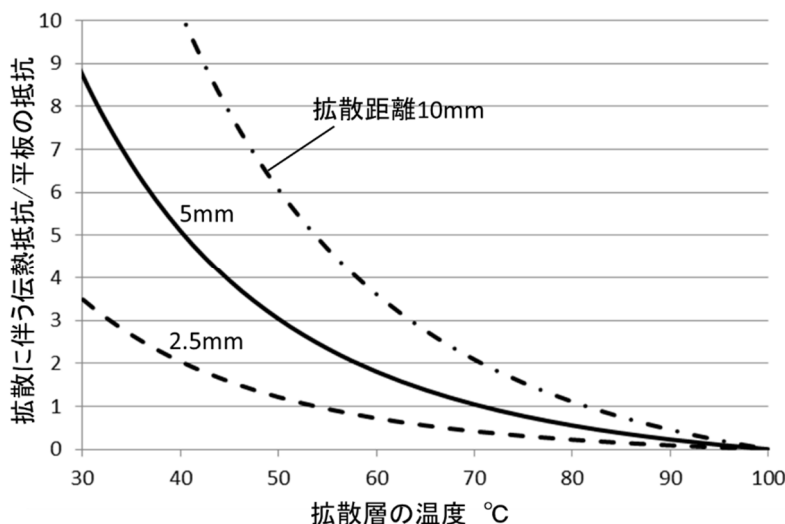


Fig. 4. 拡散層の温度と拡散に伴う伝熱抵抗の関係

2.3 蒸気拡散式における課題

蒸発面と凝縮面の間隔の縮小

式(6)によれば、水蒸気の拡散距離(蒸発面と凝縮面の間の距離) L を小さくすれば、それに比例して水蒸気の拡散抵抗は減少する。しかし、蒸発面と凝縮面の間の間隔を狭くすることは、広い面積において濃縮水と凝縮水を接近させることであり、上流域で分離された濃縮水と凝縮水が下流域で接触して混合してしまうリスクを高めることになる。従来の開発研究においては、蒸発面と凝縮面の間の間隔の最小値はおおむね 10 mm であった。しかし、Fig. 4によれば、10 mm の間隔では十分でなく、5 mm かそれ以下に保って問題なく蒸発・凝縮を行わせることが出来る技術を開発する必要がある。

凝縮水と濃縮液とともに排出される熱量の低減

熱交換器を用いて供給前の水溶液と熱交換を行わせ、凝縮水と濃縮液から熱を回収すると、凝縮水と濃縮液の排出温度が低下し、それらとともに排出される熱量も減少する。しかし、蒸気拡散式の利点は、簡便で安価、かつ分散配置の利用が可能という点であり、熱交換器の利用という案は、構成を複雑にし、価格を上昇させるため、蒸気拡散式の利点を減じてしまう。より簡便な方法により、凝縮水と濃縮液とともに排出される熱量を低減できる技術を開発する必要がある。

なお、本稿の著者は、流出する凝縮水と濃縮液の温度を低下させる簡便な方法を考案し、その考えに基づく蒸発器を作製し、実験を行った。これについては、後の節において説明する。

2.4 鉛直設置 vs 傾斜設置

本稿では、実機レベルの蒸気拡散式の蒸発器として、各々の平板の蒸発面積が1 m × 2 m程度のを想定している。これまでの研究で用いられた、そのような寸法の蒸発器においては、蒸気拡散距離(平板の蒸発面と次段の平板の凝縮面の距離)を 10 mm 以下にすることが出来なかった。第一の原因は、平板のたわみであった。

蒸気拡散式が R. P. Dunkle 氏によって考案された後、平板群を鉛直に設置した蒸発器についての研究が多く進められてきた。その後、平板群を傾斜させて設置した蒸発器についての研究も始められ、両方の蒸発器についての研究が続けられている。著者の研究室でも、これまで両方の蒸発器についての研究を行っており、得られた知見を

以下に整理する。

鉛直設置の蒸発器の特徴

鉛直設置の蒸発器では、Fig. 3 に示すように、片面にウィックを貼り付けた平板を複数枚鉛直に立てて等間隔に並べる。平板は、それを通過する熱の抵抗を減らすため、0.5 mm 程度かそれ以下の薄い銅板等を使用することが多い。それを鉛直に立てた場合、自重によるたわみが生じるので、平板を支持する構造物(枠のようなもの)が必要になる。また、平板間をほぼ均一な間隔に保つためには、個々の平板間にスペーサーを挿入し、その平板群を前後の面から挟むように力がかかるための構造物も必要である。平板に熱を加えた場合には、自重によるたわみに加え、熱ひずみも生ずるため、強い力で均一に平板群を挟むための構造物が必要である。

傾斜設置の蒸発器の特徴

傾斜設置の蒸発器では、Fig. 5 に示すように、両方の面にウィックを貼り付けた平板を複数枚傾斜させて等間隔に並べる。鉛直設置のものとは異なり、平板の両方の面にウィックを貼り付ける必要がある。平板の上面のウィックは、水溶液を浸透させて蒸発させるためのものであり、本稿では「蒸発ウィック」と呼ぶ。一方、平板の下面のウィックは、蒸気が平板下面で凝縮して生じた凝縮水を滴下させることなく保持し、平板下端まで流下させて回収するためのものであり、本稿では「凝縮ウィック」と呼ぶ。このように、傾斜設置の蒸発器では、蒸発ウィックに加え、凝縮ウィックを平板に貼り付ける必要がある。

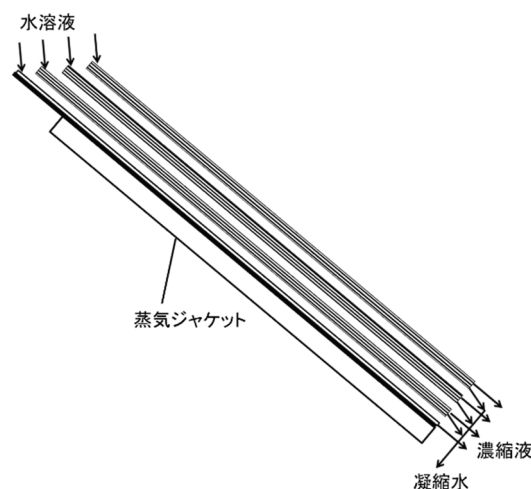


Fig. 5. 傾斜設置の蒸気拡散式の多重効用蒸発器(断熱部無し)

傾斜設置の蒸発器の組み立ては、鉛直設置の蒸発器に比べてはるかに容易である。外部から熱を入力する装置(蒸気ジャケットなど)の傾斜させた平面の上に、スパーサーと両面にウィックを貼り付けた平板をセットとし、複数のセットを積み重ねるだけである。平板と液を含んだウィックの自重によって、平板群を挟む力が均等にかかるため、平板を支持する構造物や平板群を挟むための構造物を必要としない。そのため、総合的に見れば、傾斜設置の蒸発器の方が、鉛直設置のものより簡便な構造であると言える。本稿の著者の研究室では、最近では、傾斜設置の蒸発器について研究を進めている。

3. 実験に用いた蒸気拡散式の多重効用蒸発濃縮器

本研究においては、2 台の蒸発器を制作し、実験に用いた。Fig. 5 に、1 台目の蒸発器を示す。加熱装置として、傾斜させた蒸気ジャケットを用いた。傾斜させた天板の上に蒸発ウィックを貼り付け、その上にスパーサーと凝縮ウィック/銅板/蒸発ウィックを1つのセットとしたものを複数セット載せる(本実験では3セット、蒸発ウィックは4枚の4段効用)。各々の蒸発ウィックの上端において海水を供給し、全面にわたって浸透・流下させる。濃縮された海水と凝縮水は、各々のウィックの下端から回収される。蒸発器の寸法等を Table 1 に示す。

2 台目の蒸発器を新たに製作した。1 台目と異なる点は、蒸気ジャケットの加熱部の下流側に断熱部を設けたことである。2 台目の蒸発器の寸法等を Table 2 に示す。加熱部と断熱部の面積比は、1:0.318 である。また、両蒸発器において、水蒸気拡散距離は、5 mm である。

Table 1. 断熱部無し蒸発器の寸法と効用数

加熱面積	0.902 × 2.02m ²
断熱部	無し
4段効用	
水蒸気拡散距離	5mm

Table 2. 断熱部付き蒸発器の寸法と効用数

加熱面積	0.978 × 1.6m ²
断熱部面積	0.978 × 0.508m ²
4段効用	
水蒸気拡散距離	5mm

断熱部の役割

蒸気ジャケットの加熱部の下端において、濃縮海水と凝縮水は、温度が高く顕熱を多く有している。それらが断熱部を流下する間に蒸発・凝縮が進行するので、温度が低下し、低い温度で排出される。すなわち、器外に排出される熱量が低減し、蒸発倍率が向上する。

4. 理論解析

4.1 熱収支と質量収支の式

理論解析モデルを構築し、それを用いて、実験と同じ条件における蒸発器の性能を予測した。本理論解析モデルの主要な仮定は以下の通りである。

- ①温度や濃度などの変数は、最下部の平板から最上部の平板の方向にのみ変化し、海水の流下方向とスパン方向に均一である(定常次元モデル)。
- ②蒸発ウィックと凝縮ウィックに挟まれた湿り空気層は十分狭く、対流は生じない。
- ③スパーサーによる閉塞は無視できるほど小さく、蒸気拡散を阻害しない。

蒸発面*[i = 1~(n - 1)]*における熱収支

任意の*i*段において、凝縮ウィック/平板/蒸発ウィックの3層を通過して熱 $q_{p,i}$ が蒸発面に伝わり、水蒸気のエンタルピー $q_{v,i}$ と伝導熱 $q_{c,i}$ とふく射熱 $q_{r,i}$ が湿り空気層を通過して次段へ移動し、一部の熱 $q_{fc,i}$ が濃縮液とともに排出される。よって、ウィックの伝熱面の単位面積当たりの熱収支は次式で与えられる。

$$q_{p,i} = q_{c,i} + q_{r,i} + q_{v,i} + q_{fc,i} \quad (7)$$

ここに、 q :熱流束、添え字 i :蒸気ジャケット天板上の蒸発面とそれと面する凝縮面を第1としそれから順につけた番号、 p :ウィック/板/ウィックの3層、 fc :流出する濃縮液、 c :熱伝導又は対流熱伝達、 r :ふく射である。

凝縮面*[i = 2~n]*における熱収支

任意の*i*段において、下方の蒸発面から水蒸気のエンタルピー $q_{v,i}$ と伝導熱 $q_{c,i}$ とふく射熱 $q_{r,i}$ が凝縮面に伝わり、熱 $q_{p,i+1}$ が凝縮面から3層を通過し、一部の熱 $q_{fd,i}$ が凝縮水とともに排出される。よって、熱収支は次式で与えられる。

$$q_{v,i} + q_{c,i} + q_{r,i} = q_{p,i+1} + q_{fd,i} \quad (8)$$

ここに、添え字 fd :流出する凝縮水である。

最上面の蒸発ウィック($i = n$)の熱収支

最終の n 段において、熱 $q_{p,n}$ がウィック/平板/ウィックの3層を通過して蒸発面に伝わり、水蒸気のエンタルピー $q_{v,n}$ と周囲空気への対流伝達熱 $q_{c,n}$ と周囲壁へのふく射熱 $q_{r,n}$ が放出され、一部の熱 $q_{f,c,i}$ が濃縮液とともに排出される。よって、ウィックの伝熱面の単位面積当たりの熱収支は次式で与えられる。

$$q_{p,n} = q_{c,n} + q_{r,n} + q_{v,n} + q_{f,c,n} \quad (9)$$

関係する式群

以上の熱収支式(7)～(9)中の各々の熱流束は、以下の式で与えられる。

$$q_{p,i} = K_p(T_{d,i-1} - T_{v,i}) \quad (10)$$

$$q_{f,c,i} = m_{f,c,i}c_p(T_{v,i} - T_a) \quad (11)$$

$$q_{f,d,i} = m_{v,i}c_p(T_{d,i} - T_a) \quad (12)$$

$$q_{c,i} = \frac{\lambda}{L}(T_{v,i} - T_{d,i}) \quad (13)$$

$$q_{c,n} = k_H(T_{v,n} - T_a) \quad (14)$$

$$q_{r,i} = \frac{\sigma}{(2/\varepsilon) - 1}(T_{v,i}^4 - T_{d,i}^4) \quad (15)$$

$$q_{r,n} = \varepsilon\sigma(T_{v,n}^4 - T_a^4) \quad (16)$$

$$q_{v,i} = h_{v,i}m_{v,i} \quad (17)$$

$$m_{v,i} = \frac{DM_v p_F}{LRT} \ln \frac{p_F - p_{d,i}}{p_F - p_{v,i}} \quad (18)$$

$$m_{v,n} = M_v k_D \left(\frac{p_{v,n}}{R_0 T_{v,n}} - \frac{p_a}{R_0 T_a} \right) \quad (19)$$

ここに、 K_p :ウィック/板/ウィックの3層の熱通過率、 c_p :海水又は凝縮水の比熱、 λ と L :湿り空気の熱伝導率と層の厚さ(拡散距離)、 k_H と k_D :熱伝達率と物質伝達率、 ε :ウィックのふく射率、 σ :ステファンボルツマン定数、 M_v :水のモル質量、 R_0 :一般気体定数、添え字 a :周囲空気である。

溶液の質量収支

各々の蒸発ウィックの溶液の質量保存は次式で表される。

$$m_{in,i} = m_{f,c,i} + m_{v,i} \quad (20)$$

溶液中の溶質の質量保存は次式で表される。

$$S_{in}m_{in,i} = S_{f,c,i}m_{f,c,i} \quad (21)$$

上の2式より、次式が得られる。

$$m_{in,i} = m_{v,i}S_{in}/(S_{f,c,i}-S_{in}) \quad (22)$$

ここに、 S :濃度、添え字 in :流入溶液、である。

4.2 物性値

実験では、溶液として海水を用いた。水蒸気と空気の物性値は、文献⁽⁷⁾からの値を補間して求めた。湿り空気の物性値は、水蒸気と空気の物性値から推算式⁽⁷⁾を用いて求めた。その他に、以下の数値を用いた。

海水および凝縮水の比熱: $c_p = 4.18 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$

ウィックの放射率: $\varepsilon = 0.9$

ウィック/平板/ウィックの3層: $K_p = 320 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

海水の飽和蒸気圧⁽⁸⁾:

$$p_{v,i} = (1 - 0.546S - 1.264S^2) \times \exp\left(16.29 - \frac{3816.5}{T - 46.15}\right) \quad (23)$$

ここに、 $p_{v,i}$ の単位は[kPa]である。

以上の式群を連立させて、ニュートン法を用いて解いた。ニュートン法の解法には、コンピュータプログラムを用いた。

5. 結果および考察

5.1 断熱部を有しない蒸発器について

断熱部を有しない4段効用の蒸発器(**Table 1**)を用いて、海水濃縮の実験を行った。実験条件を**Table 3**に示す。実験では、ファンなどを用いることなく、自然風と自由対流による蒸発により蒸発器の最上面の蒸発ウィックが冷却されるにまかせた。また、実験と同じ条件における蒸発器の性能を、上述の定常一次元モデルを用いて計算した。

Table 3. 断熱部無し蒸発器を用いた実験の条件

気温	30.8°C
湿度	75.60%
初段への熱入力	4.51kW
供給海水温度	31.0°C
供給海水濃度	3.20%
海水供給量	
第1段	113.2g/min
第2段	100.8g/min
第3段	94.8g/min
第4段	103.4g/min
自然風と自由対流による最終段の蒸発面冷却	

蒸発器の最上面である、周囲空気に曝されている蒸発面の温度分布を Fig. 6 に示す。横軸は、蒸気ジャケット天板の加熱面の上端を原点とする加熱部下端までの流下方向の距離である。「左」と「右」は、蒸発ウィックの左と右の端から 15 cm 内側の線上の分布である。同図によれば、供給された海水は、初め大きな勾配で温度上昇した後、非常に緩やかな勾配の温度上昇になり、下端に達する。定常一次元モデルから得られた初段から最終段の方向の温度分布を Fig. 7 に示す。横軸は、各々の段の蒸発面と凝縮面の番号であり、1, 2, 3, 4 は、初段から最終段に至る蒸発ウィックの番号であり、1.5, 2.5, 3.5 は凝縮ウィックの番号である。蒸発面と凝縮面の温度落差は、温度が高い 1-1.5 間の蒸気拡散層において最も小さく、その温度が低くなるとともに温度落差は大きくなる。この結果は、Fig. 4 と一致する。つまり、蒸発面と凝縮面の温度落差は、蒸気拡

散に伴う伝熱抵抗におおよそ比例する。

実験における各々の蒸発ウィックの海水の供給量と蒸発量、流出量(回収量)を Fig. 8 に示す。横軸は、平板の番号を示し、蒸気ジャケットの天板を 1 とし、それから順に番号を付けた。供給量と回収量を測定し、その差から蒸発量を求めた。各々の蒸発ウィックにおける蒸発量の実験値と理論値の比較を Fig. 9 に示す。実験値と理論値の両方も、初段で最も高く、2 段、3 段の後段ほど低くなっている。実験値では、最終段において蒸発量が増加しているが、理論値では減少している。これは、実験では、加熱部の下端からさらに蒸発ウィックが伸びており(濃縮海水回収のため)、そこから追加の蒸発があったことと、理論で見積もった熱・物質伝達率が実際より小さかったためであると考えられる。2 段と 3 段における蒸発量の減少は、濃縮海水と凝縮海水により熱が持ち出されるため、後方の段ほど蒸

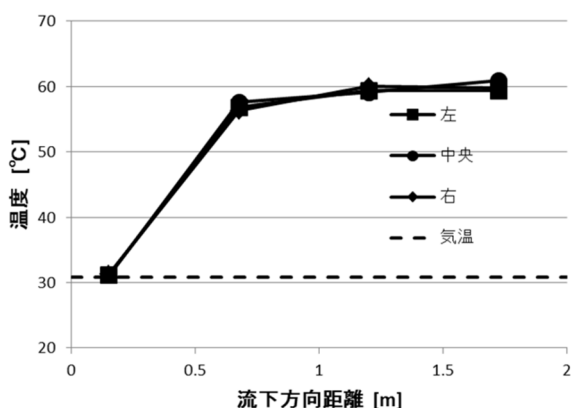


Fig. 6. 最終段の蒸発面の温度分布(断熱部無し蒸発器)

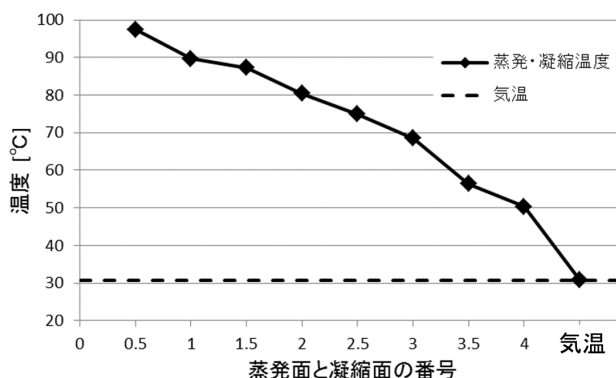


Fig. 7. 初段から最終段の方向の温度分布の理論値(断熱部無し蒸発器)

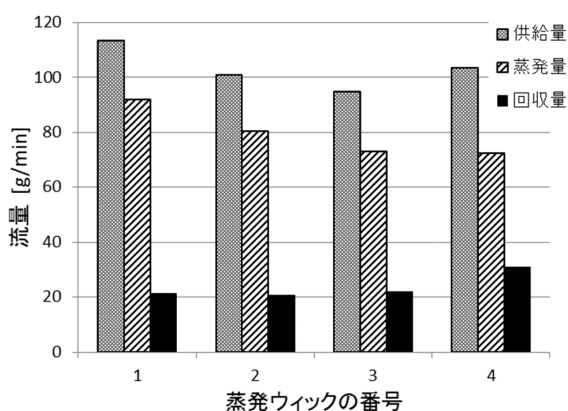


Fig. 8. 各蒸発ウィックの海水供給量と蒸発量, 流出量(断熱部無し蒸発器)

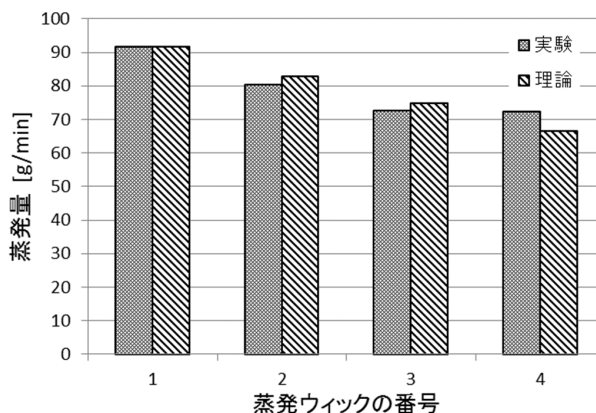


Fig. 9. 各蒸発ウィックからの蒸発量の実験値と理論値の比較(断熱部無し蒸発器)

理論値はほぼ一致した。2 段目と 3 段目において実験値は理論値より小さいが、その差は 3%程度であり、実験において、発に利用できる熱量が減少するからである。個々の蒸発ウィックにおいて実験値と理論値を比較すると、2 段目と 3 段目において実験値は理論値より小さく、最終段において逆に大きい。それらの総和である総蒸発量は、実験値と蒸気拡散距離が 5 mm でも、濃縮液と凝縮水が接触して混合することはなかったか、あったとしてもその量は少なかったと結論できる。

5. 2 断熱部を有する蒸発器について

加熱部の 3.18 倍の面積の断熱部を有する 4 段効用の蒸発器を用いて海水濃縮の実験を行った。実験条件を Table 4 に示す。実験では、蒸発器の上面にファンにより風を当てて、最終段の蒸発ウィックから蒸発を促進してその面を冷却した。また、実験と同じ条件下における断熱部を有しない蒸発器の性能を、上述の定常一次元モデルを用いて計算した。両者の結果を以下に示す。なお、断熱部では、凝縮水や濃縮液の温度低下(顕熱の減少)によって蒸発・凝縮が生じる仕組みなので、上述の定常一次元モデルは断熱部を有する蒸発器には適用できない。

蒸発器の最上面である、周囲空気に曝されている蒸発面の温度分布を Fig. 10 に示す。横軸は、加熱部の上端を原点とする断熱部下端までの流下方向距離である。「左」と「右」は、Fig. 6 と同じである。Fig. 10 によれば、供給された海水は、初め比較的大きな勾配で温度上昇した後、緩やかな勾配の上昇になり、加熱部の下端で最大値に達した後、断熱部において大きな勾配で温度降下し、低い温度で流出する。定常一次元モデルから得られた初段から

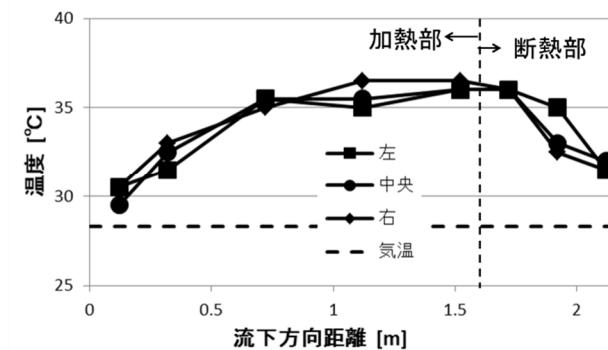


Fig. 10. 最終段の蒸発面の温度分布(断熱部付き蒸発器)

最終段の方向の温度分布と、実験から得られた各々の段から流出する濃縮海水の温度を Fig. 11 に示す。横軸は、Fig. 7 と同じである。蒸発面と凝縮面の温度落差は、温度が高い 1-1.5 間の蒸気拡散層において最も小さく、その温度が低くなるとともに温度落差は大きくなる。この傾向は、Fig. 7 と同様である。Fig. 7 と比較すると、最終段の 4 段目の蒸発面の温度と周囲温度(気温)との差が大きく減少している。これは、ファンによる風により、その蒸発面からの蒸発とそれによる冷却が促進されたためである。周囲温度を基準にすると、断熱部付き蒸発器の各段から流出する濃縮海水の温度は、断熱部無し蒸発器(定常一次元モデル)に比較して、いずれの段においてもほぼ半分減少している。これは、断熱部を設けることが、濃縮液と凝縮水とともに排出される熱量の低減に有効であることを示す結果である。

Table 4. 断熱部付き蒸発器を用いた実験の条件

気温	28.3°C
湿度	84.80%
初段への熱入力	1.66kW
供給海水温度	28.5°C
供給海水濃度	3.70%
海水供給量	
第1段	73.7g/min
第2段	75.7g/min
第3段	71.7g/min
第4段	71.5g/min
ファンを用いた最終段の蒸発面冷却	

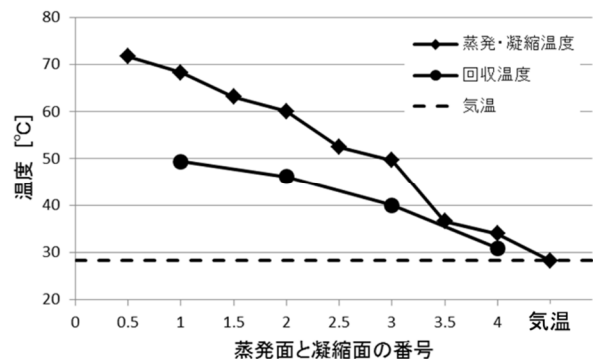


Fig. 11. 初段から最終段の方向の温度分布の理論値と流出する濃縮海水の温度の実験値(断熱部付き蒸発器)

実験において、各々の蒸発ウィックから流出した濃縮海水の濃度を Fig. 12 に示す。いずれの段においても2倍弱の濃縮度であった。今回の実験においては、濃縮海水の流出量とその濃度を測定し、以下の式を用いて蒸発量を求め、さらに両方の和を供給量として求めた。

$$\text{蒸発量} = \text{回収量} \times \left(\frac{\text{濃縮液の濃度}}{\text{供給液の濃度}} - 1 \right) \quad (24)$$

このようにして求めた、各々の蒸発ウィックの海水の供給量と蒸発量、流出量(回収量)を Fig. 13 に示す。横軸は、Fig. 8 と同じである。各々の蒸発ウィックにおける蒸発量の実験値と理論値の比較を Fig. 14 に示す。実験値と理論値の両方とも、初段で最も高く、2 段、3 段の後段ほど低くなっているが、最終段においては増加している。2 段と3 段における蒸発量の減少は、濃縮海水と凝縮水により熱が持ち出されるため、後方の段ほど蒸発に利用できる熱量が減少するからである。最終段における蒸発の増加は、ファンの風により、最終段からの蒸発が促進されたためである。なお、この実験で用いた蒸発器においては、ウィックを蒸発器の下端から延長することなく濃縮海水を回収した。

蒸発量の実験値と理論値を比較すると、全ての蒸発ウィックにおいて、実験値は理論値より大きい。それは、実験に用いた蒸発器が断熱部を有し、それにより凝縮水と濃縮海水とともに排出される熱量が減少したためである。それらの総和である総蒸発量と蒸発倍率は、断熱部付き蒸発器の実験値が断熱部無しの蒸発器の理論値より10%大きい。理論値は、理想的な条件での値であるので、仮に断熱部付き蒸発器と断熱部無しの蒸発器を用いて実験をすれば、断熱部の有無による差はさらに大きく現れると考えられる。蒸発倍率の実験値は、3.1 倍であった。

参考文献

- 1) R. V. Dankle, *International Heat Transfer Conference, Part 5, University of Colorado*, pp.895-902 (1961).
- 2) T. L. Chong, B. J. Huang, P. H. Wu, Y. C. Kao, *Desalination*, **347**, pp. 66-76 (2014).
- 3) 野底武浩, 儀間悟, 水口尚, 松田昇一, *日本海水学会誌*, **66**, pp. 221-228 (2012).
- 4) 儀間悟, 水口尚, 野底武浩, 押川渡, 中野敦, *日本海水学会誌*, **67**, pp. 283-288 (2013).

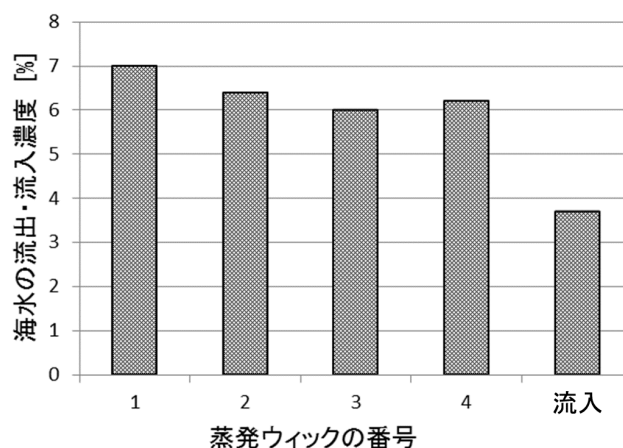


Fig. 12. 各蒸発ウィックから流出する濃縮海水の濃度(断熱部付き蒸発器)

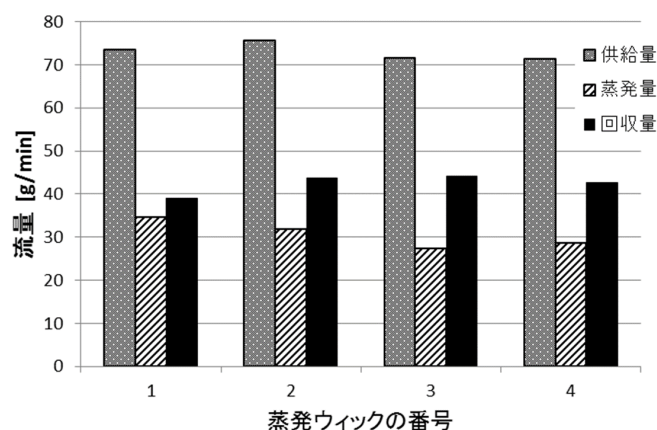


Fig. 13. 各蒸発ウィックの海水供給量と蒸発量, 流出量(断熱部付き蒸発器)

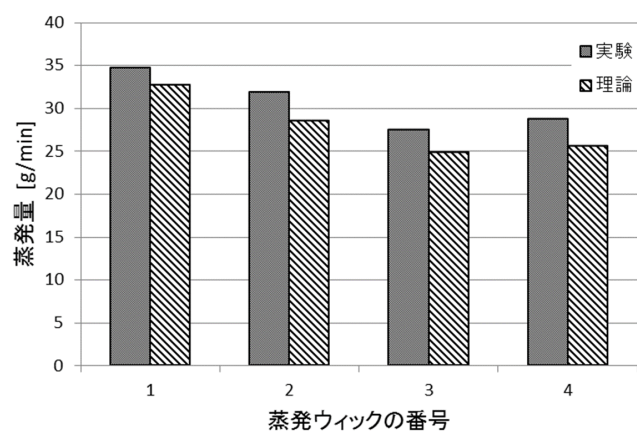


Fig. 14. 各蒸発ウィックからの蒸発量の実験値(断熱部付き)と理論値(断熱部無し)の比較

- 5) 水口尚, 儀間悟, 野底武浩, 日本海水学会誌, **68**, pp. 180-187 (2014).
- 6) J. R. Welty *et al.*, "Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer 5th ed.," John Wiley & Sons, Inc., pp. 452-453(2008)
- 7) Japan Society of Mechanical Engineers, "JSME Data Book: Thermal properties of fluids," Japan Society Mech. Eng. Tokyo, pp. 328-331, 356-365(1985) (Japanese)
- 8) 日本海水学会編, 海水利用ハンドブック, 日本海水学会(1974)

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

Takehiro Nosoko

University of the Ryukyus

Summary

Comparing with a vacuumed multiple-effect evaporator, it was found that there are two requirements to develop a multiple-effect evaporator with vapor diffusion between flat plates. One is to decrease the vapor diffusion distances to 5mm or less, and another is to decrease the amount of heat carried with condensate and concentrate flowing out of the evaporator. The present author proposed extending plates and wicks of the effects downstream from the heating area and insulating the bottom of the extended area of the first effect. As the condensate and concentrate flow down the extended area, more evaporation and condensation occur with decreasing their temperature, and the amount of total evaporation increases.

An evaporator with the extensions 0.32 times as long as the heating area was constructed, and experimentally explored in evaporating seawater. The evaporator had 5mm diffusion distances through humid air layers between flat plates and four evaporating wicks on the plates. An evaporator without such extensions was theoretically analyzed to find its performance under the same conditions as the experiments. The results of the experiments and theoretical analysis may be described as;

1. Mixing of concentrate and condensate did not occur in any effects with 5mm diffusion distances through humid air layers.
2. The extensions of the effects on insulation decreases temperature of concentrate and condensate, and decrease the amount of heat carried by them flowing out of the evaporator.
3. Comparing with the theoretical results for the evaporator without the extensions, the extensions increase the amounts of evaporation in all effects.
4. Comparing with the theoretical results for the evaporator without the extensions, the extensions increase the total amount of evaporation and the performance of coefficient by 10%.