

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 23 日現在

機関番号：16101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656246

研究課題名（和文） 温度分布を持たない蒸留装置の創出による化学工場の省エネルギー化技術の開発

研究課題名（英文） Technology for reducing energy consumption rate of chemical industry through development of distillation apparatus with uniform temperature distribution

研究代表者

外輪 健一郎 (KEN-ICHIRO SOTOWA)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：00336009

研究成果の概要（和文）： 均一な温度分布を有する新規蒸留装置の特性をシミュレーションによって解析し、さらにその分離原理を実証するための実験を行った。提案する蒸留装置はその内部で熱回収が行えるため、高い省エネルギー性を有すると期待される。段数、分離スペックなどが省エネルギー性能に及ぼす影響をシミュレーションによって調査したところ、検討の範囲では従来の蒸留装置に比べて大幅なエネルギー削減が可能であることが示された。また、提案法の原理に基づく分離が可能であることが実験によって証明された。

研究成果の概要（英文）： A study was conducted to analyze the property of a distillation apparatus proposed in our study. The unique feature of the apparatus is that the heat integration within the distillation system can be easily attained. A simulation study was conducted to clarify the effects of number of stages and other design parameters on the energy consumption rate. It was revealed that within the range of the study, the energy cost can be reduced substantially by introducing the proposed system. The separation principle of the proposed system was confirmed to be valid through an experimental investigation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	0	600,000
2010年度	900,000	0	900,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	480,000	3,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー工学

キーワード：エネルギー節約・有効利用、蒸留、熱回収、蒸発潜熱、プロセスシミュレーション、分離工学、省エネルギー

## 1. 研究開始当初の背景

蒸留は化学工場で使用される最も一般的な分離技術であるが、そのエネルギー効率は極

めて低い。蒸留は蒸発と凝縮を繰り返すことで濃縮を進行させる分離手法である。従って、蒸発潜熱に相当する大量のエネルギーを投

入し、凝縮部では再びそれを取り除く操作を行っている。エネルギー効率が悪い原因は、蒸発部(リポイラー)の温度が凝縮部(コンデンサ)の温度よりも高いという点にある。もしも凝縮部の熱を蒸発部で活用できれば大幅な省エネルギー化が実現できることは以前から知られており、さまざまな技術開発が進められている。例えば近年では、HIDiC と呼ばれる蒸留装置が提案され、パイロットプラントを利用した検証も行われている(Nakaiwa et al., Trans. Inst. Chem. Eng., 81, 162, 2003)。これは、蒸留装置の濃縮部と回収部を異なる圧力で運転し、蒸留装置内部で熱統合を図るものである。

我々は、マイクロリアクタ技術の活用を研究していく中で、一段の蒸留を行うことができる小型蒸留デバイスを開発した。科学研究費補助金の支援(若手研究 B、H15-16 年度、代表者：外輪健一郎)を得て、多段蒸留の実現について計算による検討を行った結果、蒸留装置全体の温度を一定にする分離方式の着想を得た(図 1)。すなわち、従来の蒸留装置では、圧力を一定に保ち、装置に温度分布を生じさせて分離を実現しているが、本提案では、温度を一定に保ち、圧力分布を生じさせることで分離を行う。予備的な検討を行ったところ、提案法が高い省エネルギー性能を有する可能性が示された。本研究ではこれを圧力駆動型蒸留システムと呼んでいる。この手法は従来とは全く異なるハードウェアが必要であり、また特性も異なると予想されることから、その性能や特性を解明し、実用化のための装置開発を行う必要がある。

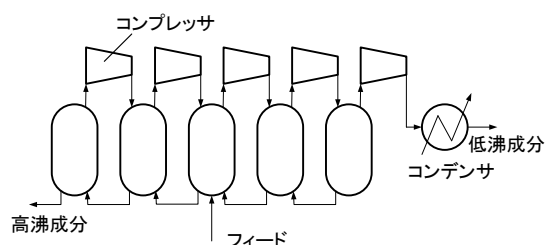


図 1：圧力駆動型蒸留システム

## 2. 研究の目的

圧力駆動型蒸留装置は当研究室の独自の手法であり、過去にその性能を明らかにした検討は皆無である。本研究では、シミュレーションによってその省エネルギー性能を明らかにするとともに、その実現を目指したハードウェアの開発を行うこととした。研究期間内の具体的な目標は次の通りである。

- (1) 圧力駆動型蒸留システムの構成単位として十分な分離性能を発揮するモジュールの開発
- (2) 提案する原理によって多段分離が可能であることの実証

## (3) 多段蒸留の設計条件と省エネルギー性能の関係の解明

### 3. 研究の方法

それぞれの目標を達成するための研究方法を示す。

#### (1) 「構成単位となるモジュールの開発」

モジュールを試作し、流量や温度などの操作条件が分離性能に及ぼす影響を実験によって測定する。いくつかの設計条件でモジュールを試作し、十分な分離性能が得られる条件を明らかにする。分離対象としては水-メタノール混合物を取り上げる。分離性能は次の式で定義される分離効率  $\eta$  を用いて定量化し、評価した。

$$\eta = (y-x)/(y^*-x^*)$$

ここで、 $x$ 、 $y$  はモジュールから得られる液相と気相のメタノール組成であり、 $x^*$ 、 $y^*$  は、操作温度における液と蒸気の平衡組成である。実験では、試作したモジュールを恒温槽内に設置し、定量ポンプで原料溶液を所定流量で供給した。得られた液と蒸気は密度法によって組成を測定した。なお、使用したモジュール内の圧力および液レベルが一定となるように蒸気と液を抜き出す必要がある。このためのコントローラも製作し実験に使用した。

#### (2) 「提案する原理による分離可能性の実証」

上記(1)の検討によって十分な性能を有することが明らかなモジュール数個を複製し、それらを気液が向流接触するように接続した。恒温槽内にシステムを設置し、所定流量で原料をフィードして多段分離の結果得られる蒸気と液の組成を測定した。蒸気を加圧するための加圧装置としてはダイヤフラムポンプを用いた。

#### (3) 「多段蒸留の設計条件と省エネルギー性能の関係の解明」

本項目の検討では、シミュレータを用い、各種の設計条件が所要エネルギー量に及ぼす影響を調査した。対象はベンゼン-エチルベンゼン混合物を取り上げた。蒸留の設計因子は多数あるが、その中でも、段数や分離スเปックなどを取り上げ、所要エネルギー量に与える影響を評価した。圧力駆動型蒸留システムの省エネルギー性は、その所要エネルギー量を、従来型の蒸留装置の所要エネルギー量と比較して評価した。従来型の蒸留装置の所要エネルギー量の計算においては、段数を 100 段として、還流比が最小還流比となる条件を想定した。これは従来型の蒸留装置がもっとも少ないエネルギーで運転できる条件である。また、提案法の所要エネルギー量は、コンプレッサの所要動力と恒温槽の温度を保持するための加熱エネルギー量の和とした。ここではコンプレッサの所要動力の合計が所要エネルギーであると仮定した。その計

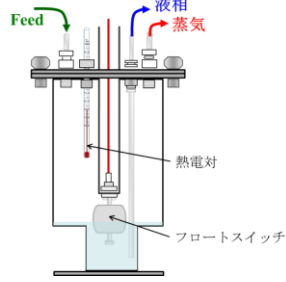


図 2：試作したモジュール

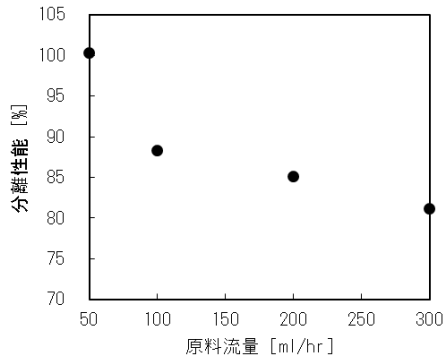


図 3：分離性能と原料流量

算においてはコンプレッサの機械効率を 0.8 として必要な電気エネルギーを求め、さらに発電効率を 0.35 として熱量に換算したうえで比較に用いた。

#### 4. 研究成果

各目的に対する研究成果を以下に示す。

##### (1) 「構成単位となるモジュールの開発」

図 2 に試作したモジュールの一例を示す。容器はステンレスであり、熱電対とフロートスイッチを有し、液レベルと温度を計測できる。上部に複数の継手が設けられているがこのうちの 1 つにデジタル圧力計を接続した。80℃に保った恒温槽内にモジュールを設置し、50mol%のメタノール水溶液を 50～200mL/hr の流量で供給した。圧力を 1.10atm となるように蒸気抜出を制御した場合の分離効率を図 3 に示す。流量が 50mL/hr と小さい場合には分離効率がほぼ 100%となった。また、流量を大きくすると分離効率が低下したが、実験の範囲では 300mL/hr まで流量を増大させても 80%以上の値となった。分離効率の低下は滞留時間の減少によるものと考えられる。また、流量の増大にともなって、装置内温度が低下する様子が確認された。恒温槽は 80℃であったが、装置内温度は 50ml/hr において 78.7℃、300mL/hr において 77.9℃にまで低下した。これは滞留時間が短くなるために熱交換が十分に行われないことが原因とである。

同様の実験により設定圧力が分離性能に

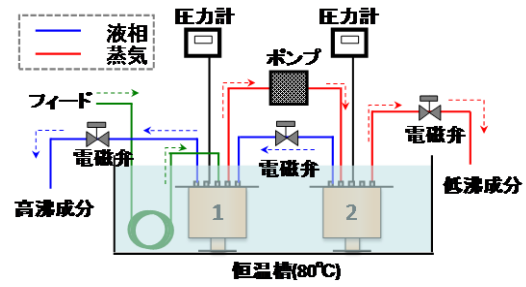


図 4：多段蒸留の実験装置 (2 段)

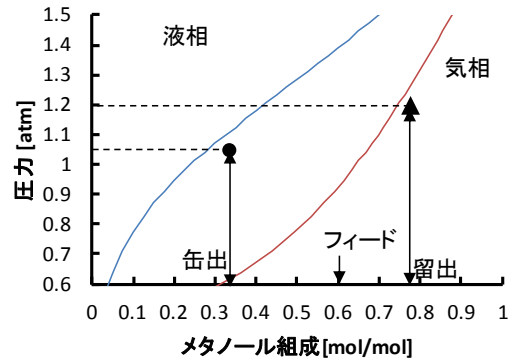


図 5：多段蒸留の実験結果

及ぼす変化について検討した。流量は 300mL/hr で一定とし、圧力を 1.05-1.20atm の範囲で変化させたところ、分離効率は圧力に依存せずおおむね 82-84%となった。

以上のように本検討で開発したモジュールが十分な分離効率を示すことが分かった。一方で、装置と恒温槽の間の熱交換に改善の余地があることが示唆されたため、モジュールの材質を銅に変更して実験を行った。その結果、流量が 50mL/hr のときに 95.8%、300mL/hr の場合であっても 90.3%の分離効率を得られた。これはいずれも図 3 のデータよりも高い値である。以上より、十分な伝熱性能を持たせることが分離性能の向上に有効であることが明らかとなった。

##### (2) 「提案する原理による分離可能性の実証」

前項で十分な性能を有するモジュールの条件が明らかとなった。もっとも良好な性能を示した銅製の装置を用いて、多段蒸留システムを構築した。実験装置の概要は図 4 に示す通りである。フィードとしては 60mol%のメタノール水溶液を用い、100mL/hr の流量で供給した。1 段目と 2 段目の設定圧力はそれぞれ 1.05, 1.20atm とした。恒温槽の温度は 80℃である。

実験によって得られた組成を P-xy 線図にプロットしたものを図 5 に示す。この P-xy 線図は 80℃のものである。プロットが液相線や気相線よりも下に表れている。これは銅製のモジュールを使用したにもかかわらず装置

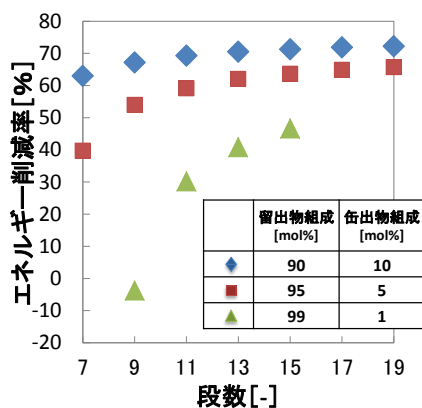


図6：分離性能と原料流量

内温度が80℃に達していないためである。この条件においては、1段目が79.7℃、2段目が79.4℃となった。このため想定よりもより高い濃度において気液平衡が達成された。

また、缶出液と留出液の濃度差に着目すると、一段の気液平衡で達成できる濃度差よりも大きくなっている。これから圧力の分布によって多段の濃縮が可能であることが確認された。

同様の装置を用いて、圧力、流量、原料組成が濃縮挙動に及ぼす影響を調査した。この場合においても流量の増大に伴って装置内温度が低下する傾向が見られた。圧力駆動型蒸留システム全体として良好な分離を行うためにはこれらの操作パラメータに依存せず温度を所望の値に保持できる制御技術の開発が重要であることが明らかとなった。

### (3) 「多段蒸留の設計条件と省エネルギー性能の関係の解明」

プロセスシミュレータを使って、提案法と従来法の所要エネルギー量を比較した。対象はベンゼン-エチルベンゼン系とし、フィードは当モル混合物、分離スペックは90%として、双方の所要エネルギーを求め、比較した結果を図6に示す。提案法の段数を増大させるとともに、所要エネルギー量が少なくなり、高い省エネルギー性を示すことが分かる。段数が13段以上ではエネルギー削減率が増大しなくなることから、13段が最適な段数であると考えられる。分離スペックを99%にまで高くした条件での比較も図6に示す。スペックが厳しくなると省エネルギー効果が小さくなったものの、40%を超えるエネルギー削減効果が示された。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計9件)

- ① 外輪健一郎、藤田卓哉、浅田幸祐、杉山茂、中川敬三、圧力駆動型蒸留システムの省エネルギー性能と実証のための基礎

実験、化学工学会第77年会、2012年3月15日、工学院大学(東京都新宿区)

- ② Kosuke Asada, Ken-Ichiro Sotowa, Keizo Nakagawa, Shigeru Sugiyama, An experimental evaluation of a stage module for pressure driven distillation systems, 24th Symposium on Chemical Engineering, 2011年12月3日、Hyundai Hotel (大韓民国慶州市)
- ③ 外輪健一郎、浅田幸祐、杉山茂、中川敬三、圧力分布を利用した多段蒸留システムの省エネルギー性能、分離技術会年会、2011年6月4日、明治大学(川崎市)
- ④ 浅田幸祐、外輪健一郎、杉山茂、中川敬三、圧力分布を利用した蒸留システム(2) - 従来法との比較 - 化学工学会第76年会、2011年3月22日、東京農工大学(小金井市)
- ⑤ 外輪健一郎、友成喜代美、福森孝典、中澤孝太、浅田幸祐、草壁克己、杉山茂、中川敬三、圧力分布を利用した蒸留システム(1) - 基本的構成 -、化学工学会第76年会、2011年3月22日、東京農工大学(小金井市)
- ⑥ Kosuke Asada, Ken-Ichiro Sotowa, Keizo Nakagawa, Shigeru Sugiyama, Study on the energy consumption rate of pressure driven distillation system, 23rd Symposium on Chemical Engineering, 2010年12月4日、九州産業大学(福岡市)
- ⑦ 浅田幸祐、外輪健一郎、中川敬三、杉山茂、圧力駆動型蒸留装置によるエネルギー削減効果の検討、第3回化学工学3支部合同徳島大会、2010年10月23日、徳島大学(徳島市)
- ⑧ 外輪健一郎、マイクロ空間の視点で眺める化学工学-移動現象、設計、物性-化学工学会第42回秋季大会、2010年9月8日、同志社大学(京都市)
- ⑨ 外輪健一郎、中澤孝太、中川敬三、杉山茂、マイクロ蒸留デバイスの視点に基づく多段蒸留技術の考察、第2回化学工学3支部合同北九州大会、2009年10月30日、西日本総合展示場(北九州市)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

外輪 健一郎 (KEN-ICHIRO SOTOWA)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：00336009

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし