



## ミキシングカラムのシミュレーション技術

### Simulation of Mixing Column for Cryogenic Air Separation Unit

江越 信明\*

EGOSHI Nobuaki

橋 博志\*\*

TACHIBANA Hiroshi

木原 均\*

KIHARA Hitoshi

#### 1. はじめに

酸素は、鉄鋼をはじめ、化学、食品など多岐にわたる産業分野で用いられており、国内の年間生産量は約 100 億 m<sup>3</sup> で、その大半が、大気を原料とし極低温で蒸留分離する深冷空気分離装置により生産されている。

近年、省エネルギー化の観点から一般的な高純度酸素 (99.5%以上) に比べて製造動力の低い低純度酸素 (97%程度以下) が注目されている。低純度酸素を製造する深冷空気分離プロセスはいくつか提案されているが、それらの中で設備コストを抑制しつつ、省エネルギー化が可能なミキシングカラムを用いたプロセス (図 1) が適用されることは少なくない。ミキシングカラムは一般的な規則充填物を用いた充填塔で、塔内では塔頂から供給される液体酸素と塔底からの空気ガスとが気液接触するが、塔頂において高沸点成分である酸素濃度が高く、その分離挙動は通常の蒸留操作とは異なる。

本稿では、低純度酸素製造プロセスに用いられるミキシングカラムの分離挙動を予測し、設計を行うためのシミュレーション技術を紹介する。

#### 2. シミュレーション

##### 2.1 モデル

図 2 は、ミキシングカラムでの気液接触を気液界面を通した熱と物質の移動現象としてモデル化したものである。液相は充填物に沿って流下し、蒸気相がそれと向流接触しながら上昇する。これに伴い、気液界面近傍に濃度、温度差が生じ、それらを推進力として拡散  $J$ 、顕熱移動  $q$  が起こる。図の通り、高沸点成分である酸素は、蒸気相よりも液相中に多く含まれ、界面を通して液相から蒸気相に拡散により移動する。一方、蒸留を熱と物質の移動現象としてモデル化した場合、高沸点成分の酸素は蒸気相に多く含まれ、界面を通して蒸気相から液相に移動する。

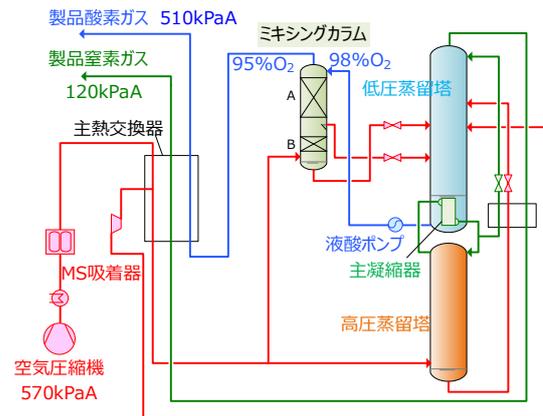


図 1 ミキシングカラムを用いた深冷空気分離プロセス

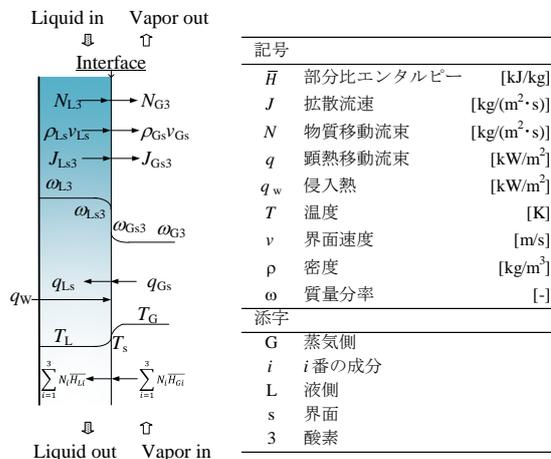


図 2 ミキシングカラムにおける熱と物質の移動現象

このように、ミキシングカラムでの現象を熱と物質の移動としてみると、蒸留とは熱と物質の移動の方向が異なるに過ぎない。当社は熱と物質の移動現象に立脚した蒸留塔のシミュレーション技術<sup>2,3)</sup>を保有しており、本シミュレーション技術がミキシングカラムにも適用できると考えられる。

##### 2.2 計算方法

上記モデルによる基礎式を gPROMS

\* R&D ユニット つくば研究所 深冷分離技術部

\*\* プラントエンジニアリングセンター エンジニアリング部

ModelBuilder® (英国 PSE 社) の MODEL に記述し、シミュレーションを行った。gPROMS ModelBuilder® は、モデル化された各機器 (MODEL) をポートにより接続し、プロセス全体を計算するプロセスシミュレーターであり、MODEL はユーザー自身が作成できる。

ミキシングカラムの設計では深冷空気分離装置の製品仕様に応じて供給液体酸素等の入出量が計算され、同時にそれらが満足するように塔径や充填高さ等が決定される。

### 3. パイロットスケール装置による実測値とシミュレーションの比較

#### 3.1 パイロットスケール装置

図 3 は、パイロットスケール装置の概略を示したものである。装置は、主にミキシングカラム R17 (塔径 400mm, 充填高さ 1456mm, 規則充填物 750Y: t=0.1mm) と、ミキシングカラムに供給する液体の酸素濃度を高めるための酸素濃縮蒸留塔 R18 からなる。

実験では、ミキシングカラム塔頂に酸素濃縮蒸留塔塔底の液体をポンプにより供給し、また塔底には酸素濃縮蒸留塔塔頂からの酸素濃度の低いガスを供給し、塔内でこれら気液を接触させた。定常状態を確認した後、ミキシングカラム塔頂、塔底の気液の流量、酸素濃度、圧力等を測定した。

#### 3.2 実測値との比較

図 4 は、図 1 のミキシングカラム上部の A セクション頂部付近を模擬した条件 (塔頂液体酸素濃度 97%, 塔底ガス酸素濃度 78%, 気液比 L/V 2.0, 圧力 500kPaA) でのミキシングカラム R17 における酸素濃度分布の実測値とシミュレーションによる計算値を比較したものである。

図 4(a)は、縦軸が蒸気相酸素濃度で、横軸が液相酸素濃度であり、窒素-酸素系の平衡線 (破線) とともにシミュレーションで得られた操作線 (実線) と実測値 (点) をプロットしたものである。ミキシングカラム特有なものとして操作線が平衡線に対して外側に位置し、塔底から塔底まで操作線が平衡線とほぼ平行な条件となっている。

図 4(b)は、縦軸が蒸気相酸素濃度で、横軸が塔頂からの充填高さであり、シミュレーションで得られた酸素濃度分布 (実線) と実測値 (点) をプロットしたものである。

これらの図からシミュレーションによる計算値と実測値は良好に一致していることがわかる。

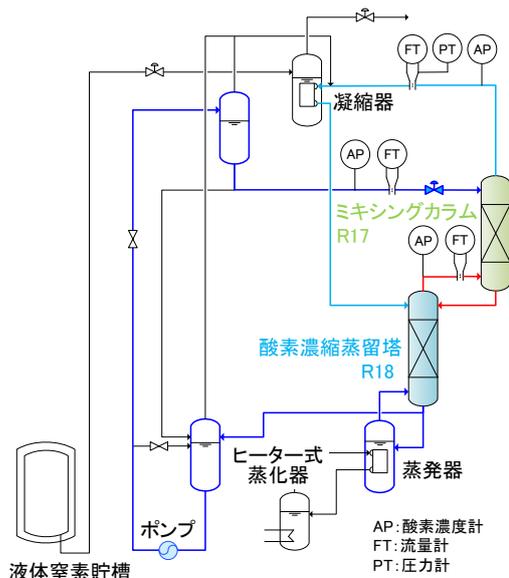


図 3 パイロットスケール装置の概略

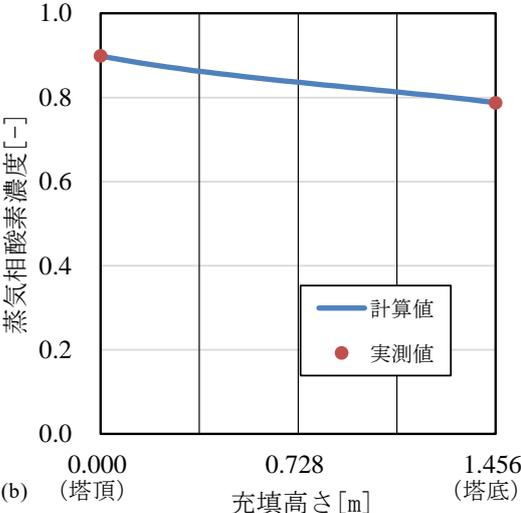
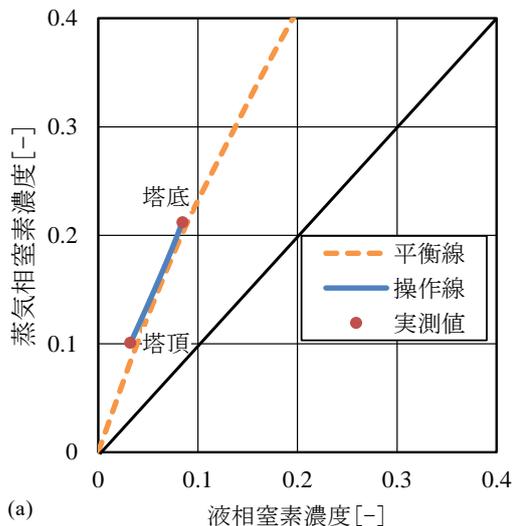


図 4 ミキシングカラムにおける酸素濃度分布の計算値と実測値の比較 (A セクション条件)

図5は、図1のミキシングカラム下部のBセクション頂部付近を模擬した条件（塔頂液体酸素濃度85%、塔底ガス酸素濃度26%、気液比L/V 0.6、圧力500kPaA）でのミキシングカラムR17における酸素濃度分布の実測値とシミュレーションによる計算値を比較したものである。

図5(a)は、図4(a)と同様に、平衡線（破線）とともにシミュレーションで得られた操作線（実線）と実測値（点）をプロットしたものである。塔底において、操作線が平衡線に接近している条件であることがわかる。

図5(b)は、図4(b)と同様に、シミュレーションで得られた酸素濃度分布（実線）と実測値（点）を充填高さに対してプロットしたものである。

図4と同様に、図5においてもシミュレーションによる計算値と実測値は良好に一致しており、当社の保有の蒸留塔のシミュレーションがミキシングカラムにも適用できることを確認できた。

#### 4. シミュレーションによる設計例

表1は、図1のプロセスで製品量35000Nm<sup>3</sup>/h、酸素濃度95.5%の低純度酸素を製造するためのミキシングカラムをシミュレーションを用いて設計したものである。

Case1とCase2は使用する充填物の比表面積が異なる。Case1では比表面積が大きい充填物(750m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)を使用しており、気液接触面積が大きいため充填高さは低い。しかし、充填物の空隙が小さく、圧力損失が大きいため塔径は大きい。各ケースの選択は、深冷空気分離装置として構成される蒸留塔、熱交換器などの各機器の配置を考慮して、これらを格納するコールドボックスがコンパクトになるように行われる。

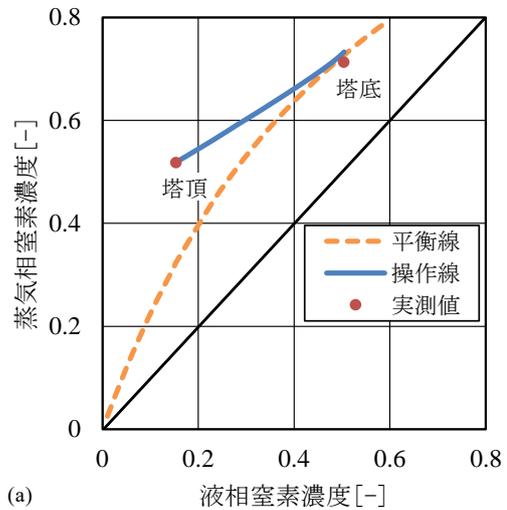
このように、ここで紹介したシミュレーションは蒸留塔で蓄積された知見を利用できるので適用範囲は広い。また、充填物の板厚、流路角度などの影響が理論的に考慮できるようになっており、空気分離装置全体の最適設計が可能である。

#### 5. おわりに

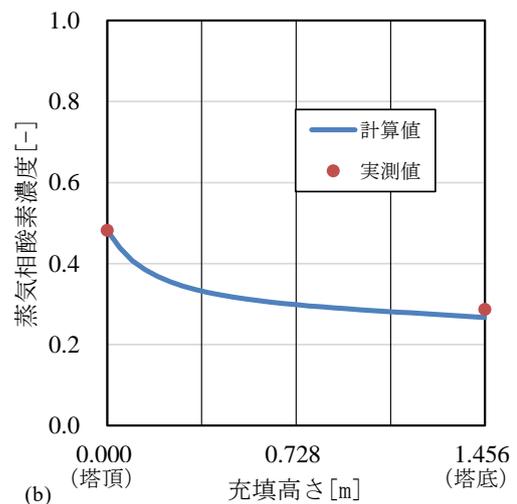
酸素を製造する深冷空気分離装置の蒸留塔を設計するための当社の保有のシミュレーション技術は、熱と物質の同時移動現象に基づくものであり、ミキシングカラムのような通常の蒸留操作とは異なる特殊なプロセスにも適用できる。

当社は、その他、熱交換器等の機器シミュレーシ

ン技術とともにプロセス設計技術を駆使し、ユーザーのニーズに応じて、コンパクトで省エネルギーな深冷空気分離装置を提案可能である。



(a)



(b)

図5 ミキシングカラムにおける酸素濃度分布の計算値と実測値の比較 (Bセクション条件)

表1 ミキシングカラム\*の設計

		Case1	Case2
充填物比表面積	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	750	350
塔径	[mm]	2050	1700
Aセクション 充填高さ	[mm]	3120	4576
Bセクション 充填高さ	[mm]	1872	2704

\*製品酸素ガス 35000Nm<sup>3</sup>/h, 95.5%, プロセスは図1。

参考文献

- 1) 橘博志. 最新深冷分離法による酸素製造技術. 日本エネルギー学会誌, 2010, 89(9), p862-867.
- 2) Egoshi, N., et. al.. Heat and Mass Transfer Model Approach to Prediction of Separation Performance of Cryogenic Air Separation Plant by Packed Columns with Structured Packing. *J. Chem. Eng. Japan*, 2001, 34(1), p 22-29.
- 3) 江越信明. シミュレーションによる充填蒸留塔の設計. 分離プロセスの最適化とスケールアップの進め方. 技術情報協会, 2019, p74-83.