

分離技術シリーズ 26

分離・混合操作の新評価手法

—情報エントロピーの視点に立って—

小 川 浩 平 著

分 離 技 術 会

「分離技術シリーズ」の継続刊行に当たって

研究開発とは、新しい原理や現象を発見することばかりではなく、原理・現象は既知であっても新しい方法を案出するとか、あるいは新しい組み合わせを創案することによって、新しい技術、商品、品質、機能、用途、方法等々を創出することである。

本会は主に化学品の製造に関わる分離技術を包括的に扱う専門の学会であるが、研究者・技術者を糾合して正に関連分野の研究・開発の進展を目指し、急激な変化に対応しようと心がけている。

すでに何冊か刊行された本シリーズのなかには、本学会誌「分離技術」誌に掲載された論文によっているものもある。しかし、論文に記載された技術を取捨選択し、それらの組み合わせを考えて執筆されたものであるから、上述の視点から成書としての価値は高いといえるであろう。

さて、最近あらたな構想のもとに、本委員会よりいろいろな分野の権威者に執筆を依頼し、本シリーズに書き下ろしの著作物が加えられることになったのは誠に慶賀に堪えない次第である。分離技術の益々の発展に寄与することは勿論、読者諸兄姉に研鑽のお役に立つものと信じている。

分離技術シリーズ出版委員会
委員長 小島博光

序

1908年にアメリカで American Institute of Chemical Engineers (AIChE) が創立され、1936年にわが国で化学機械協会が創立された。化学工学が工学の一分野として認識されてほぼ1世紀が過ぎた。この間の先人の汗と努力の積み重ねによって今日の化学工学がある。その化学工学の守備範囲は、その発展段階から大きな役割を果たしてきた単位操作、原料から製品に至るまでのプロセスと装置のすべて、そして昨今のバイオや新素材と極めて広く、物質をとり巻く現象のすべてを対象としているといっても過言ではない。今後さらにその範囲を広げていくことであろう。化学工学は方法論の学問であると主張されつづけてきた。さて、本当に化学工学は方法論の学問であったのであろうか。著者が見聞きしてきた化学工学は、それぞれ対象とする現象ごとに別々に組み立てられ、それぞれに別々の方法を開発・利用してきたとしか思われぬ。その結果、同じ化学工学でありながらも、異なる現象に対する異なる方法への関心はほとんど払われてこなかったのではないだろうか。化学工学は一貫した考え方に基づく方法論の学問ではなかったと著者は考える。

化学工学が対象とする現象には、微分方程式などによって記述でき確定できる現象と、確率論的手法によってしか確定できないランダムな現象とがある。このうち微分方程式などによって記述でき確定できる現象は、ニュートン力学をはじめとする基礎的概念に基づいて説明することができ、何らそのとり扱いに対する特別の方法論を導入する余地はない。問題になるのは、微分方程式などで確定できない不確定でランダムな現象である。化学工学においても、確率論的手法によってしか確定できないランダムな現象が多い。それらのとり扱い方は各操作で異なる。化学工学が他の学問と大きく異なる点、すなわち化学工学のアイデンティティといえる点は、分離現象と混合現象を対象としていることにあるが、その分離現象と混合現象も、一般的には確率論的手法によってしか確定できない現象である。分離現象と混合現象とは互いに表裏の関係にある現象でありながら、しかし、それぞれまったく別の視点から議論されてきた。例えば、分離操作/装置と混合操作/装置の評価指標の定義はそれぞれ別々に定義されてきており、それら評価指標間には密接な関係は何も認められない。化学工学が方法論の学問であるといい切るには、少なくとも、この互に表裏の関

係にあるこれら評価指標が共通の視点で定義されている必要がある。それぞれの現象を共通の視点でとらえて、“一貫した方法論”でそれらの評価指標を再構築することが不可欠である。

このような確率論的手法によってしか確定できない現象を“一貫した方法論”によりとり扱うためには、“一貫したメガネ”をかけて現象をとらえる必要がある。筆者はこのメガネとして、化学工学にとっては異分野の考え方である“情報エントロピー”というメガネを選んだ。このメガネをかけることにより、前記の分離操作/装置と混合操作/装置の評価指標の定義を同じ視点で行うことができるかもしれない。化学装置内の乱流構造も推定することができ、これに基づいた装置のスケールアップ手法の確立も可能かもしれない。また、装置内で生じる分散粒子の粒子径分布や晶析などによって生じる結晶の粒子径分布の推定もできるかもしれない。さらには、人が持つ不安の程度を定量的に表すことができ、各装置を操作する際の最適運転条件等に関する意思決定の方法に切り込めるかもしれない。つまり、化学工学が対象とする確率論的手法によってしか確定できないランダムな現象を、一貫して“情報エントロピー”というメガネをかけて見直すことにより、一貫した視点ですべて話ができることを期待した。そうすることにより新たな化学工学の展開が拓けるかもしれないし、そうすることが化学工学を高度に体系化してゆくための第一歩であると考えた。

筆者は一貫して情報エントロピーという視点を守って本書を書いた。本書では、情報エントロピーというメガネをかけることによって多少はつじつまの合った一貫した話ができ、また多少なりとも化学工学にとって有用な新しい知見が得られることを示すつもりである。

最後になるが、本書を執筆するに当たって温かい励ましとご協力をいただいた分離技術会の小島博光・神奈川工科大学教授、川口洋一技術士、そして三澤忠則・化学工業社社長に心からの感謝を申し上げる。また、私どもの研究室で博士論文研究、修士論文研究、学士論文研究にとり組み、多くの貴重な実験データを得てくれた多くの学生諸君にも謝意を表明したい。さらには、筆者が情報エントロピーに接する最初の機会を与えていただき、ご指導を賜った故伊藤四郎名誉教授に衷心よりお礼を申し上げる。

2012年11月

目 次

第1章 情報エントロピー	1
1.1 はじめに	1
1.2 情報	3
1.3 情報量	3
1.4 結果が知らされる以前に持っている平均の情報量	4
1.4.1 単一事象系を対象とする場合の平均情報量—自己エントロピー	4
1.4.2 複数事象系を対象とする場合の平均情報量	5
1.5 連続変化量にたいする情報エントロピー	7
1.6 情報エントロピーが最大値をとる確率密度関数	7
1.6.1 変数 t の変化範囲が $-R \leq t \leq R$ と定まっている場合	8
1.6.2 変数 t が正でかつその平均値が A と定まっている場合	8
1.6.3 変数 t の分散値が σ^2 に定まっている場合	10
1.7 人間の数量に対する感覚と情報エントロピー	10
1.8 まとめ	12
第2章 分離効率	13
2.1 はじめに	13
2.2 従来の分離操作/装置の分離特性評価	14
2.3 多成分を対象とする装置全体としての分離性能評価指標	
—分離完了時における各成分の存在状態が定まっている場合	15
2.3.1 多成分を対象とする装置全体としての分離度の定義	15
2.3.2 新たな分離度とニュートン効率との比較	20
2.3.3 新たな分離度の蒸留操作/装置への適用	20
2.4 多成分を対象とする装置内の局所領域の分離性能評価指標	
—分離完了時における各成分の存在状態に制約がない場合	23
2.4.1 多成分を対象とする装置内局所領域の局所分離性能指標の定義	23
2.4.2 蒸留塔の場合の局所分離性能指標と総括分離性能指標への	

適用	26
2.4 まとめ	28
第3章 分離性能を支配する装置内の混合と粒子径分布	29
3.1 はじめに	29
3.2 従来の混合操作/装置の混合特性評価	30
3.3 ミキサーセトラーの混合槽内の混合状態 ー流通系混合槽の混合特性の評価法	31
3.4 分離装置としての流通系混合槽内の混合	35
3.4.1 完全混合等体積槽列モデルで表される流通系混合槽	35
3.4.2 流入口, 流出口の位置と混合槽内の混合	37
3.5 気-液, 液-液, 固-液接触装置内の混合状態 ー回分系混合槽の混合特性の評価法	39
3.5.1 過渡応答法に基づく混合度	39
3.5.2 新たな混合度の分離装置として利用される回分攪拌槽への 適用	43
3.5.3 装置内の物質の各領域間移動に基づく混合特性の評価法	52
3.5.4 新たな性能指標の分離装置として利用される回分混合槽への 適用	58
3.5.5 多成分を対象とする装置全体としての混合性能評価指標 ー混合開始時における各成分の存在状態が定まっている場合	63
3.5.6 多成分を対象とする装置内の局所領域の混合性能評価指標 ー混合開始時における各成分の存在状態に制約がない場合	76
3.6 気泡, 液滴の一般粒子径分布表示式	81
3.6.1 粒子径分布 (PSD) 表示式	83
3.6.2 新たに定義された PSD 表示式の汎用性	85
3.6.3 分離操作に現れる粒子径分布	88
3.7 まとめ	92
第4章 分離機のスケールアップ	95
4.1 はじめに	95
4.2 分離機内の乱流構造	97

4.2.1	エネルギースペクトル確率密度分布関数 (ESF)	97
4.2.2	新たに定義された ESF の実測値への適合性の確認	101
4.3	分離機のスケールアップルール	102
4.3.1	攪拌槽の槽内径と ESF の関係	103
4.3.2	従来の攪拌槽スケールアップ則の信頼性	105
4.3.3	非ニュートン流体の場合のエネルギースペクトル密度関数	108
4.4	まとめ	110
第5章	分離操作における期待と不安	112
5.1	はじめに	112
5.2	期待と不安の評価指標	112
5.3	分離操作/装置に対する新たな指標の有用性	116
5.3.1	Tversky らの既報の結果との照合	116
5.3.2	改善すべき箇所の優先順位の決定	119
5.3.3	分離操作/装置に改善策を実施すべきか否かの決定	120
5.3.4	人間味を加味した分離操作の最適操作条件の決定法	121
5.4	まとめ	127
むすび	129
索引	130

