

気泡塔の面白さと難しさ

Interesting and Difficult Aspects of Bubble Columns

富山 明男



Akio TOMIYAMA

1982年 東京工業大学第1類応用物理学科卒業

1984年 東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学科博士前期課程修了

同年 (株)日立製作所エネルギー研究所入所

1988年 神戸大学工学部機械工学科助手

1990年 工学博士(東京工業大学)

1991年 神戸大学工学部機械工学科助教授

2002年 同 教授

2019年 (公財)神戸市産業振興財団理事長 現在に至る

2024年 神戸大学名誉教授 現在に至る

連絡先; 〒650-0044 神戸市中央区東川崎町1-8-4 6F

E-mail tomiyama-akio@kobe-ipc.or.jp

気泡塔内の熱流動は気泡を含む複雑流れの典型例であり、混相流研究に40年間携わってきた筆者にとっても工学的に極めて興味深い研究対象であった。塔内流動を理解するためには、単一気泡や気泡群の運動特性、気泡-液相間の物質移動特性、気泡及び気泡群が誘起する液相流、気泡の合体や分裂、触媒粒子が流動に及ぼす効果、気泡塔形状が熱流動及びガスホールアップに及ぼす効果など、気泡サイズ以下の現象から装置スケールの現象まで多岐に渡る現象を把握する必要がある。さらに塔内で生じる化学反応も含めると、気泡塔の設計・開発・運転において考慮すべき各種現象の時定数はナノ秒から数十秒に渡るため、極めて制御しにくいシステムといえる。このように広範囲の時間スケール・空間スケールの現象が相互に関連し合いながら混在する複雑系に対して、限られた科学的知見と技術者が積み重ねてきた経験的知見の統合により、多種多様な物質の合成や創生に気泡塔が活用され、かつ安全に運用されているのは、まさに驚異的であり、英智の結晶といえよう。

一方、新たな物質の生成やプロセス強化、スケールアップ等のためには、気泡塔内熱物質移動現象・化学反応過程・構造健全性等に対するさらなる理解が必要不可欠な状況にあり、気泡塔関連の研究、技術開発は近年ますます盛んになっている。例えば、既に16回の会議を開催しているGLS (Int. Conf. Gas-Liquid and Gas-Liquid-Solid Reactor Engineering) や、ドイツを中心とする欧米の研究者と貴学会の気液固分科会、粒子・流体プロセス部会が2011年より継続開催している国際シンポジウムMMPE (Multiscale Multiphase Process Engineering) などにおいて、気泡塔に関する科学技術的知見が急速に蓄積されている。筆者もこれらの会議に参加しつつ、単一気泡の力学、気泡界面での物質輸送、気泡塔内ガスホールアップ等に関する理論的、実験的、あるいは数値的研究を実施してきた。以下では、筆者の研究経験に基づき、気泡塔研究の現状と課題を簡単に述べておく。

ニュートン流体中の単一気泡に作用する抗力・揚力・仮想質量力等に関しては既に実用上問題ないレベルのモデルが構築されているが、非ニュートン流体中の気泡に作用する力に関してはさらなる研究が必要である。また、多くの気泡が存在する乱流場内で個々の気泡に作用する力に関しては、低ガスホールアップ条件の場合を除き有用な知見は得られていない。従って、泡沫状態も含めた高ガスホールアップ条件における気泡力学に関する研究が不可欠で

ある。気泡の合体・分裂に関しても非ニュートン流体中の気泡を対象とした研究や、疎液性ないしは親液性触媒粒子が合体・分裂に及ぼす効果をモデル化した研究は数少ない。気泡内ガス成分の液相への溶解に関しては、物理吸収のみの場合の物質移動係数は乱流場内気泡も含めて評価可能であるが、化学吸収に起因する気泡の物質移動係数増倍因子に関しては利用できるモデルは殆ど無い。精緻かつ体系的な実験研究の推進により、気泡塔内熱物質移動現象に関わるこれらの基本的課題が解決され、適切な無次元数で表された各種相関式や数値モデルを構築できれば、気泡塔のプロセス強化やスケールアップも実現可能といえよう。何故なら、気泡塔内熱物質移動現象を予測するための場の方程式(Field Equations)は既に完成の域に達している。従って、上記の相関式や数値モデル(Closure relations)を多流体モデルと界面追跡法等を結合した場の方程式に組み込めば、気泡塔形状やサイズ、流体物性等の変更によるガスホールアップや反応収率の変化などを合理的に予測可能といえる。気泡塔の安心安全な運用には、気泡塔内の状態変化に応じた操作変数の制御が必要となる。先述したように様々な時定数の素過程を内包する気泡塔の動特性は高次遅れの系となるため、単純な制御系では制御し難い。この問題に対する一つの処方箋として、熟練操作員の運転経験を何らかの方法で制御系に組み込むことが考えられる。あいまい推論に基づくファジー制御系や、熟練者のノウハウを機械学習させたAI操作員が、気泡塔の過渡状態の制御や安全運転に重要な役割を果たしていくように思える。

気泡塔を含めた化学反応装置に関する優れた研究成果を挙げられてきた貴学会において、以上の諸課題が解決され、世界の気泡塔開発と環境親和型機能性物質の創成を牽引されることを祈念し、巻頭の挨拶とさせていただきます。