

特集

気泡塔・エア／ガスリフト型装置の設計と応用

気泡塔研究の現状と課題

太田 光浩

Current Status and Challenges in Bubble Column Research

1. はじめに

「気泡塔」と言う単語は、化学工学分野で長く活動されている方は、一度は見聞きしたことがあるものと想像する。粒子流体プロセス部に所属している方には馴染みがあり、少し古いイメージを持たれている方がいるかも知れない。一方、化学工学会での活動が長くない方には、「気泡塔」と言う単語を初めて聞く方がいるかも知れない。気泡塔は、多相反応器として、化学産業、生化学産業、石油化学産業、冶金産業等において幅広い用途で使用されている化学反応装置で、生物反応、発酵、廃水処理、アルキル化、オゾン分解、水素化、塩素化、酸化、Fischer-Tropsch (FT) 合成、液相メタノールおよびジメチルエーテル合成などが主な用途である¹⁾。気泡塔は、優れた熱・物質移動特性をもつこと、複雑な可動部を持たないこと、建設・操作が容易であること、またメンテナンスコストを低く抑えられるなどの長所を有する。これらの長所は他の反応器よりも優れた点であるが、装置設計、スケールアップに難しさがあり、装置性能を最適化できるほど設計・操作に関する知見の体系化が十分にできていない¹⁾。そのため、気泡塔に関する研究・開発は今も非常に活発に行われている。それを裏付けるように、近年でも研究論文、レビュー論文は多数発表されており²⁻⁹⁾、気泡塔への注目度の高さが伺える。また、気泡塔の応用用途の広さや装置設計・操作を行う上で解決すべきことが多くあることを示している。

このような世界の流れの中で、日本における気泡塔研究は時代の変化を経て、大きく変わってきていると感じている。本稿では、気泡塔研究の総論として、日本を中心とし

た気泡塔研究・開発の流れ、気泡塔の概要、現状の課題と今後の展望について述べる。

2. 気泡塔研究の歴史

化学工学会において、気泡塔に関する研究は非常に古くから行われているが、組織的な研究会活動は、1984年に「気泡塔・懸濁気泡塔装置設計研究会」が設置され開始されている¹⁰⁾。その後、1994年に「気泡塔・懸濁気泡塔装置設計特別研究会」と名称変更され、2002年には化学工学会の部会制の発足とともに粒子流体プロセス部会 気泡塔分科会へと変遷している。さらに、2009年には粒子流体プロセス部会 気泡・液滴・微粒子分散工学分科会へと名称変更され、研究対象を気泡塔から分散工学一般に拡大して、現在にいたる。国際研究活動も活発で、第1回日独気泡塔シンポジウムが1998年にドイツで開催されている。この日独シンポジウム（正式には、ドイツ開催時は日独気泡塔シンポジウム）は、3年毎に開催地を日本とドイツで交互に変えて、2006年まで行われている。その後、日独気泡塔シンポジウムは、時代に合わせて研究対象領域を拡大し、マルチスケール混相プロセス工学に関する国際シンポジウム (MMPE) へと名称変更して継続的に開催されている。本年9月には第5回MMPEが松江で開催される予定である。筆者と気泡塔との関わりは、20年程度であり古くはない。ニュートン流体／非ニュートン流体中での気泡・液滴運動の直接数値解析の研究に注力し、その成果を2002年の化学工学会第35回秋季大会（神戸大学）で発表した際に、気泡塔分科会の研究会にて講演する機会を得た。その際に気泡塔分科会に入会したことが気泡塔研究を知る契機となった。分科会の活動を通して、気泡塔を勉強させて頂いたが、特に装置工学に立脚した気泡塔研究は、華やかさはないものの、実プロセスの設計・操作の最適化・高度化を目指す化学工学の思想を肌で感じ取り、自分の研究スタンスを初心に立ち返って見つめる機会にもなった。ここ最近では、装置工学的な気泡塔研究の発表は、日本では減り続けているが、これは気泡塔研究で取り組むべき課題がなくなっているということではなく、近年、大きな問題として認識され



Mitsuhiro OHTA (正会員)
1996年 東京工業大学大学院 理工学研究科
原子核工学専攻 博士過程終了
現在 徳島大学 大学院 社会産業理工学
研究部 機械科学系 教授
連絡先；〒770-8506 徳島市南常三島町2-1
E-mail m-ohta@tokushima-u.ac.jp

2024年11月8日受理

ている大学から化学工学科がなくなり、それに伴い化学工学系教員が減少している¹¹⁾ことが要因であると考えている。

3. 気泡塔

1章で述べたように世界的には気泡塔研究は、いまだに活発であり、研究意欲を掻き立てるチャレンジングな課題は多い。ここでは、気泡塔を概説する。

3.1 気泡塔の特徴

図1に気泡塔の代表例を示す。図1の(A)は通常の気泡塔、(B)は多孔板つき気泡塔、(C)は垂直邪魔板つき気泡塔である。工業用気泡塔では、塔内流れの構造や逆混合を制御するために塔内に内部構造物を取り付ける場合が多い。内部構造物に関しては、図で示した以外にも多数のタイプがあり、気泡塔の種類は非常に多くなる。また、気泡塔の構造だけでなく、気液混合様式(気液流入方式)も多様となる。液相を流入せず気泡だけを流入する形式(バッチ操作)から、気液並流で流入する方式、気液向流で流入する方式、気液を塔上部から並流流入する方式などである。また、気泡の流入に着目すると、スパージャー(Sparger)による気泡生成操作も非常に重要となる。スパージャーにより均一な大きさの気泡を生成し、気泡塔底部に均一分散させる必要がある。スパージャーは、静的スパージャーと動的スパージャーに大別され、物質移動の観点からは、小さい気泡を塔内に均一分散させた方が物質移動を促進できる。液相にスラリーを用いるスラリー気泡塔もあり、この場合は、気液固三相系の反応装置となる。このように気泡塔は、構造の点からも種類が多い上に操作変数が多いため、最適な設計・操作の方法論を構築し、体系化することが難しい。また、次節で述べるように、塔内の流動状態が塔のサイズ(スケール)にも影響されるためスケールアップ

も簡単ではない。

3.2 気泡塔内の流動特性

塔内の気液二相流の状態は、塔のスケール、気液相の流入速度に依存するが、通常の気泡塔では3種類の流動状態が一般的に観察される¹²⁾。図2に気泡塔の3種類の流動様式を示す。図2の(A)は気泡流(均質流)、(B)はチャン流(不均質流)、(C)はスラグ流である。気泡流状態では、上昇速度が小さい小気泡が塔の断面全体にわたり均一に分布する。気泡の合体や分裂はほとんど起こらないため、気泡径はスパージャーの設計によりほぼ決まる。チャン流は、見掛けのガス速度(ガス空塔速度)が高い場合に形成される流動状態で、工業スケールの大口径の気泡塔で頻繁に観察される。ガス流量が多いために気泡合一によって滞留時間の短い大きな気泡が形成され、不安定な流れとなる。気泡合一とともに気泡分裂も生じるため、幅広い気泡径分布が形成される。チャン流では、均質気泡流と比較して物質移動係数が低くなることが示されている。スラグ流は、見掛けのガス速度が大きい小口径の気泡塔でのみ観察されており、工業スケールではスラグ流は問題にならない。気泡塔内の流動状態が塔のサイズに影響されるため、流動状態を系統的に整理する方法論は提案されておらず、気泡塔のサイズ毎に見掛けの気液速度に応じた流動状態が整理されている。したがって、流動状態を決定する明確な見掛けの気液速度の定量的条件はなく、気泡塔と操作条件に依存して、各流動状態の境界領域と遷移領域は異なったものとなる。それぞれの流動状態間で遷移領域が存在するが、気泡流からチャン流への流動状態遷移の把握は非常に重要となる。これは、遷移が発生すると、塔内の流動場が大きく変化するからである。チャン流では、塔中央付近では上向き速度分布を持つが、塔壁近傍では下降流が生じ、その結果、横方向のガスホールドアップ(ボイド率)分布が形成されて液体循環が促進されることになる。液体循環や気相の滞留時間は、混合と熱および質量移動において重要な

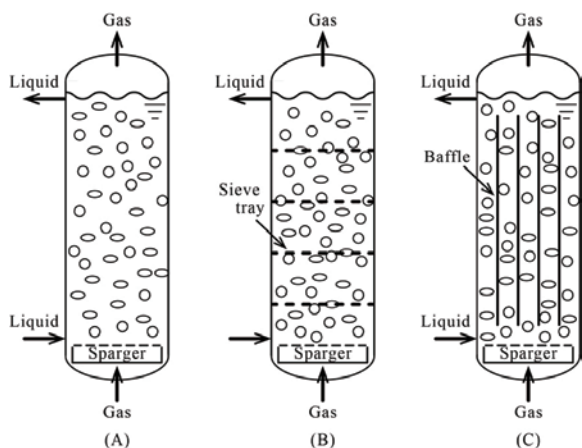


図1 気泡塔

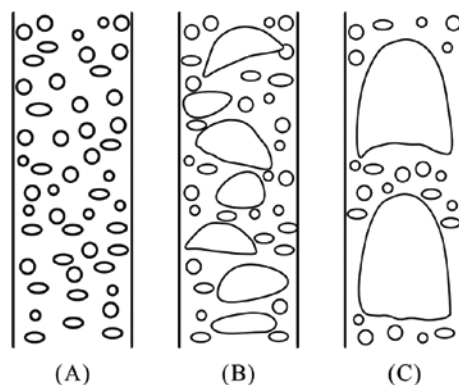


図2 気泡塔内の流動様式

役割を果たすため、半径方向のガスホールドアップ分布を予測することが非常に重要となる。ガスホールドアップは、見掛けのガス速度、液体物性、塔サイズ、操作条件など大きく依存し¹³⁾、気泡塔の設計において重要な知見となる。

4. 気泡塔研究での課題

気泡塔の設計・操作に関する知見は、非常に多く蓄積されているが、まだ解決すべき課題は多い。移動現象論の観点から気泡塔を考えると、気泡塔内ではさまざまな複雑な移動過程が混在し、その複雑移動過程が相互に絡み合っているため、詳細な説明や知見を得ることは簡単ではない。例えば、流動に関すると、気液二相流系あるいは気液固三相流系の混相流れとなり、操作条件によっては乱流場の混相流れとなる。さらに複雑流動場の中で界面を通しての熱・物質移動を把握する必要がある。このように気泡塔内の気泡運動とそれに付随する移動現象は非常に複雑となるが、これらの移動過程をマルチスケールで検討する必要がある。すなわち、単一気泡に関する知見から始まり、相互作用を伴う複数個気泡の運動と移動現象(メソスケール)、ラボスケールの気泡塔内流動と移動現象、実スケール気泡塔内流動と移動現象(マクロスケール)へと展開する必要がある。マルチスケールの対応が問題を難しくする。スケール間の橋渡しにはモデルが必要であり、化学工学的センスが最も発揮されるところである。最新研究により得られた詳細な物理・化学メカニズムをベースにして、既存のモデルより有用なモデルを構築できる余地はある。

単一気泡の上昇運動は素過程として、気泡塔流動を考える上で最も基本となるが、単一気泡の上昇運動でさえ知見が不足している。図3に単一気泡に作用する気液相間力の

概略図を示す¹⁴⁾。抗力(Drag force)は、良く知られているように形状による抵抗と流体の粘性抵抗により流れ方向に作用する抵抗力である。非抗力として、揚力(Lift force)、仮想質量力(Virtual mass force)、壁面潤滑力(Wall lubrication force)、乱流拡散力(turbulent dispersion force)がある。せん断流体中を移動する気泡は、その運動方向と垂直な力を受ける。これが揚力であり、気泡表面への圧力と応力の作用によって生じる。仮想質量力は、気泡が液相中で加速される際の慣性による力を表す。この力は連続相の密度が分散相の密度よりもはるかに高い場合に顕著になるが、定常流の場合、二流体モデルでは通常は無視される。壁面潤滑力は表面張力によって発生し、気泡が壁面に接触するのを防ぎ、垂直壁面付近のホールドアップがゼロになることを保証する。乱流拡散力は、液体速度の乱流変動により生じる力で、高ホールドアップ領域から低ホールドアップ領域への気泡の拡散をもたらす。抗力、揚力、壁面潤滑力も流路内の乱流構造と密接に関係しているため、気液相間力は独立しているのではなく相互に影響し合っており、結果として、これらの力が組み合わさって、気液二相流れでのマクロ的な相分布が決まることになる。気液相間力は二流体モデルによる気泡塔内の流動解析で特に重要となり、最終的に運動量交換を担う全気液相間力(界面運動輸送量)はおのおの気液相間力の線形結合で与えられる⁵⁾。抗力に関する研究は多いが、非抗力に関する知見の蓄積は多いとは言えず、研究の余地が多く残されている。

ここまで気泡塔研究に関して一般的に知られている成果や知見を概説したが、これらは水-空気系の知見であり、低粘性液体系の気泡塔であれば、その知見は適用可能である。しかし、中~高粘性流体系の気泡塔に関する知見は乏しい。特に、今後、装置設計にますます活用されると考えられる数値シミュレーションでは、二流体モデルの使用が現実的であるが、そこで必要となる気泡に作用する気液相間力に関しての知見やモデルは非常に乏しい。さらに中~高粘性系での熱・物質移動特性の評価も不可欠である。また、液体が非ニュートン性を有した場合は、局所粘度変化や弾性特性に気泡は大きく影響を受けることが予想できるが、まだ手つかずの領域であり、研究対象としては興味深い。特に単一(分散)気泡での運動と気泡群としての運動では非ニュートン性の発現の様相が大きく異なるなど、非ニュートン流体が持つ固有の複雑特性が、より複雑流動系を生み出すことになる。

5. おわりに

本稿では、気泡塔研究の総論として、化学工学会における気泡塔研究・開発の流れ、気泡塔の概要、現状の課題と

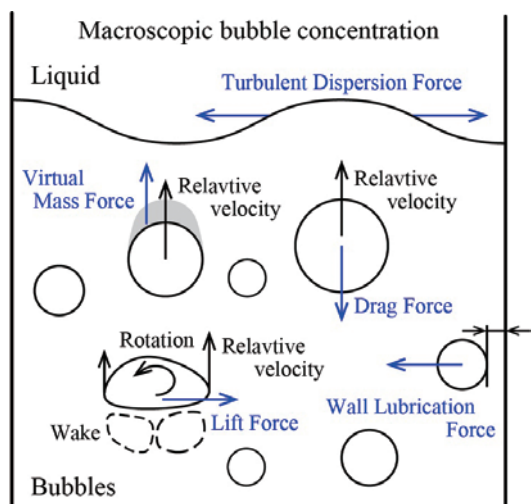


図3 気液相間力の概略図

今後の展望として取り組むべき基礎的な研究課題について述べた。気泡塔の用途は、非常に多岐に渡り、本特集記事でも様々な観点からの気泡塔についての興味深い記事が掲載されている。化学工学の使命である合理的で高効率なプロセスの設計・操作やスケールアップ手法の体系化のためには、気泡塔の種類やサイズ、またマルチスケールによる検討とスケール間を合理的に結びつける方法論（高度モデル化）の構築が必要である。基礎研究としては、気泡塔内で気液界面を介在して輸送される複雑な移動現象過程の詳細説明が重要となる。液相が中～高粘性系である場合や非ニュートン性を持つ場合、実用的に必要な多くの知見が非常に不足しており、チャレンジする価値のある研究課題が

沢山ある。特に若手の研究者・技術者には、これらのチャレンジングな研究・開発課題へ積極的に取り組んで頂きたい。気泡塔研究のドラスチックな展開・発展を期待する。

参考文献

- 1) Youssef, A. A. et al. : *Int. J. Chem. React. Eng.*, **11**(1), 169-223(2013).
- 2) Besagni, G. et al. : *ChemEngineering*, **2**(2), 13(2018).
- 3) Mühlbauer, A. et al. : *Chemie Ingenieur Technik*, **91**, 1747-1765(2019).
- 4) Shu, S. et al. : *Renew. Energy*, **141**, 613-631(2019).
- 5) Khan, I. et al. : *Prog. Nucl. Energy*, **125**, 103360(2020).
- 6) Mahmoudi, S. and Hlawitschka, M. W. : *ChemBioeng. Rev.*, **9**, 63-92(2021).
- 7) Besagni, G. et al. : *Fluids*, **8**, 91(2023).
- 8) Mahmood, A. N. et al. : *Fluid Dyn. Mater. Proc.*, **20**(2), 239-256(2023).
- 9) An, M. et al. : *Particuology*, **91**, 176-189(2024).
- 10) 室山勝彦編集：気泡塔研究史，気泡・液滴・微粒子分散工学分科会 発行(2011).
- 11) 伊東 章：化学工学，**79**(1), 2-15(2015).
- 12) Kantarci, N. et al. : *Process Biochem.*, **40**(7), 2263-2283(2005).
- 13) Wu, Y. et al. : *Chem. Eng. Sci.*, **56**(3), 1207-1210(2001).
- 14) Wang, Q. and Yao, W. : *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **98**, 799-813(2016).