

特集

マイクロ化学プロセスの最前線

近年マイクロ化学プロセスは幅広い分野で応用が進んでおり、ものづくりの手法として重要な技術の一つになりつつある。実際に、近年マイクロ化学プロセス技術を用いた材料合成、単位操作の実用化事例も発表されている。

そこで、最近の実用化・商品化事例について、また、従来プロセスと比べたときの優位性は何か、という視点から、マイクロの特徴を活かした材料合成、単位操作、更には、マイクロ化学プロセスを構成する装置などを紹介する。

(編集担当：頼実 剛)†

生産ツールとしてのマイクロ化学技術の最近の動向と今後の展望

武藤 明德

1. はじめに

数年ぶりにマイクロリアクターに関する特集を化学工学誌で組む機会をえることができ、ここまで注目されるようになったことを素直に喜び、この分野に関わり研究を進めてきた皆様に敬意を注ぎたいと思う。わが国での、生産ツールとしてのマイクロリアクターの研究開発は、既ね、2000年ごろから始まり¹⁾、そろそろ実用化され始めている。今回の特集はマイクロ化学プロセス分科会のメンバーと相談して、化学工学プロセス(生産プロセス)としてのマイクロリアクターに焦点をあてての特集とすることにした。本特集では実用化に近い生産用マイクロリアクターの開発動向、さらにそれを支える基礎研究の成果^{2,3)}をも合わせて紹介する。なお、最後に化学工学会マイクロ化学プロセス分科会の活動も合わせて紹介したい。

2. マイクロリアクターに関する論文の推移

マイクロリアクターに関する論文や特許の数はますます



Trend and Near Future of Micro Chemical Technology as a Production Tool

Akinori MUTO (正会員)

1984年 大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程応用化学専攻修了

現在 大阪府立大学大学院工学研究科物質・化学系化学工学分野 教授

連絡先：〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1

E-mail amuto@chemeng.osakafu-u.ac.jp

2013年8月5日受理

増えており、日米欧はもとより、最近ではアジアからの投稿も増えている。キーワードも増えているので、全てを網羅できているわけではないが、「マイクロリアクター(microreactor)」をキーワードとして、SCOPASにて検索しヒットした論文数を、1990年から2012年まで各年毎に整理した結果を図1に示す。1990年には20報しかなかったがその後徐々に増え続け、2000年には100報に達し、2004年には200報、2011年にはついに300報に達した。この推移から想像するとまだまだ増えそうな勢いである。この分野が発展するにつれ有力なキーワードとなる“slug flow”や“micro fluid”なども含めると相当な数にのぼる。また、化学工学関連はこの分野の国際会議としてIMRET (The International Conferences on Microreaction Technology) が著名であるが、すでに開催12回を数えている。最近のIMRETに関する特集号として *Chemical Engineering Journal*, **227**, 1-214 (1 July 2013) が発行され、24報が掲載されている。

3. マイクロな化学プロセスの意義

「マイクロリアクター」と言えば、文字通り小さな反応器のことである。よく聞く意見としては、「そんな小さい反応器を作ってどうするの？ 生産量が小さすぎるね。」とか「ギネスブックにのせてもらうつもりですか？」などである。マイクロリアクターの当初のコンセプトが、従来のスケールアップ(大きいことはいいことだ)に対する新規な軸と

† Yorzane, T. 平成24、25年度化工誌編集委員(11号主査) DIC(株)生産技術開発センター

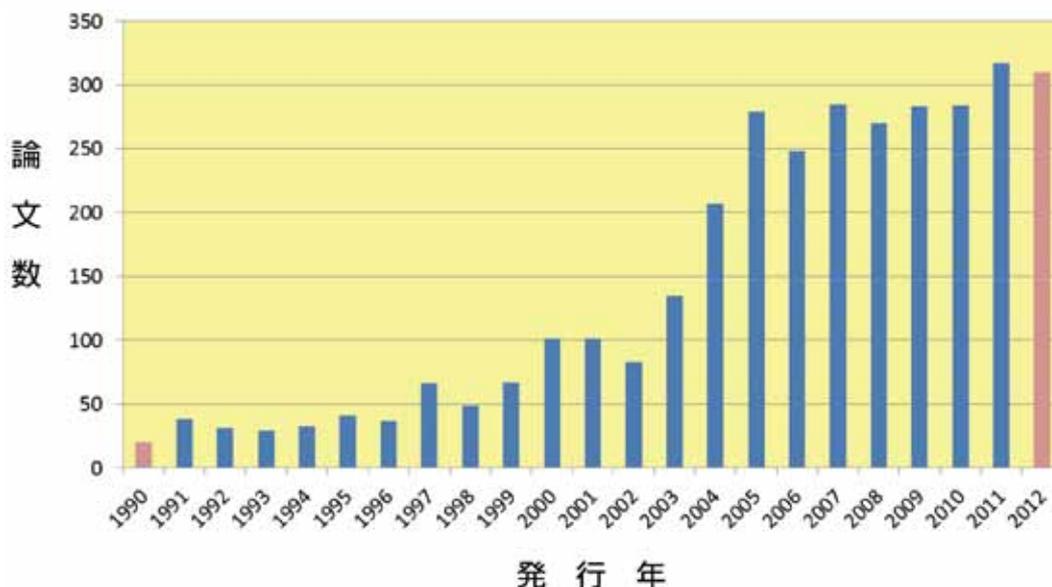


図1 「microreactor」で検索してヒットした発行年ごとの論文数

して「小さいこと」の特徴を強調した点が原因であろう。生産量(スループット)の小さいことへの対策として、ナンバリングアップという手法がある。簡単に言えば、マイクロリアクターとして同じデバイスを複数個、並列に準備する方法である。数個のマイクロリアクターの並列は実用可能だが、その数が多くなると現実の操作を考えた場合、いろいろな問題が予想され、スループットの課題が依然残るとい印象を与える。

マイクロリアクターの工業製品の生産用ツールとしての特徴と期待できる点および課題を図2に示す。分析および研究用でなく、工業製品生産用のマイクロリアクターとなると、その原料および製造物の体積は、マイクロリアクターよりも大きくなるのが普通である。原料をマイクロリアクターに供給するポンプも精度、安定運転のために特注品よりも従来品をできるだけ使いたいとなるので、マイクロリアクターの周辺部品は寸法からしてマイクロリアクターよりも大きくなり、何も変わらないように見える場合もあるかもしれない。

マイクロリアクター内の反応空間は当然ことだが微細空間で、大きな空間と異なる流動および伝熱、物質移動現象が見られる。それは、(1) 微細流体セグメント内およびセグメント間の現象が主体である、(2) 反応管壁からの影響を大きく受ける、点に起因する。マイクロリアクターの特色がよく発揮される系は、異相界面が関わる反応系である。気・液、液・液が代表的であり、さらにその異相が並行に流れる場合(parallel flow)、交互に流れる場合(slug flow)、一方の相が反応器の円管の壁いっぱい広がってその円管表面を流れ、他方の相が、円管の中心部分を流れる場合(annual flow)についての報告例が多い。これらの流れの流動状態は、

基礎的な解明から応用に至るまで研究がなされている。異相を合流するときの流路形態、経路の形状(曲がり方)および経路の材質による影響も受けやすく、2次流れ(Taylor流、Dean流、循環流など)が反応効率に大きく影響することが知られている。これらを上手く反応系に取り入れることができれば、これまでにない新しい反応プロセスの構築が可能

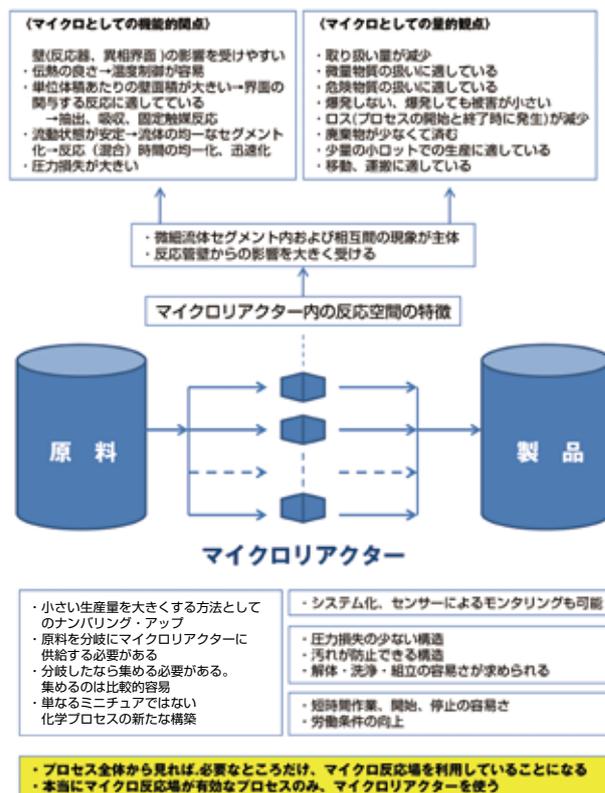


図2 生産ツールとしてのマイクロリアクターの意義

である。

反応工学的な観点から、この微細空間の機能的な面としては、壁(反応器、異相界面)の影響を受けやすいことから
○伝熱の良さ→温度制御が容易：ホットスポットが発生しにくい、副生成物ができにくい、反応速度制御が可能
○単位体積あたりの壁面積が大きい→界面の関与する反応に適している：抽出、吸収、固定触媒反応に適している

また、流動状態も安定なため、

○流体の均一な微細なセグメント化→反応(混合)時間の均一化、迅速化：均一溶液反応、固体発生反応に適している
ただし、細い管内を流動させるため圧力損失が大きいことが懸念される。

次に、サイズが小さいことによる利点を考えると次の点があげられる。

- ・取り扱い量が少量
- ・微量物質の扱いに適している
- ・危険物質の扱いに適している
- ・爆発しない、爆発しても被害が小さい
- ・ロス(プロセスの開始と終了時に発生)が減少
- ・廃棄物が少なく済む
- ・少量の小ロットでの生産に適している
- ・移動、運搬に適している

もともとサイズを小さくする効果もあるが、小さくすることにより反応効率が加速する効果も合わさって、反応器自身の容積は桁違いに小さくなることも可能である。そうになると、リサイクルプロセスなどで、全国的に散らばっている原料を回収する場合も、集中大型処理設備を使って運搬費のかさむプロセスの代わりに、分散型小型処理設備として各事業所において、あるいは都道府県単位で実用化できる可能性がある。

さて、工業的な生産あるいは処理量は、マイクロリアクター1台でできないこともないがそれを超える要求もある。そのときは、サイズを大きくする(いわゆるスケールアップ)ことができないので、その大きさのまま数を増やすスケールアップの手法が考えられる。管型反応器の1種なので、原料の供給量を大きくし反応管の長さを長くすればよいように思えるが、そう単純ではない。原料流体の流速が変化すると、マイクロリアクターで重要な流動状態が大きく変わる可能性があるからである。そこまで変化しなくても2次流れが影響を受けるので、反応速度は変化する。今のところ、その影響は研究過程にあり、実験する以前に全てをシミュレーションすることは、現在のところ難しく今後の研究の進捗が期待されるところである。そこで、ナンバリングアップに戻るが、数台程度なら、原料流体の供給装置(ポンプ)をマイクロリアクターの数だけ用意すれば問題は少ない。どれか1つぐらい余裕を持たせることができるな



図3 Facebookによる情報発信

ら、生産しながらメンテナンスも可能で、反応システムとしては定常状態で操業可能であるし、需要に合わせて細かく生産量の調整も可能である。

しかし、ナンバリングアップもその数が多くなると容易ではない。原料流体の供給装置(ポンプ)をマイクロリアクターの数より少なくして、供給は原料貯蔵タンクからマイクロリアクターまでの途中で分岐し、各リアクターに所定流量で供給する方法をとることとなる。ここで、分岐点において均一もしくは所定流量で各マイクロリアクターに正確に供給することは難しい。どれかの流路が閉塞、あるいは閉塞まで行かなくても供給流量が落ちることがあれば、他の流路への流量も必然的に影響を受け、流動状態、および反応時間が各マイクロリアクターで変化する。変動の修正も難しいので、おそらくは操作全体を停止することになるであろう。最近のセンシング技術の進歩もあり、経路の要所をモニターすることにより、経路全体の診断をおこなう研究も始まっている。

マイクロリアクター自身に求められる特性としては、試薬、使用する温度に耐性があるのは当然として、圧力損失をいかに低減できるか、反応液の付着による汚れを防止するか(付着物による経路の物理的変化、例えば、径の減少、溶液の濡れ性の変化による流動の変動を防ぐ)が重要である。時に定期的な洗浄が必要であり、簡単に解体、洗浄、組立ができる構造体にすることも重要である。

このような特徴を有するマイクロリアクターを使う化学プロセスでは、起動と終了が比較的迅速であり、時間および物質的な無駄が少ない。このことは、24時間操業をおこなうことが困難な条件において有効である。特に、操業に関わる運転者の労働負担の軽減につながり、労働集約型反応プロセスの構築も期待できる。

このようにマイクロリアクターとその周辺全体を見渡した時、マイクロリアクターを除く部分は、「マイクロ」ではなく、そのマイクロでない部分からマイクロリアクターをつなぐ部分が重要であること、また、マイクロな反応空間が有効に機能するプロセスへの適用が本筋であろうと思われる。マイクロリアクターは小さいゆえに処理量が小さいと判断するより、既存のプロセスのどの部分をマイクロ化することで、プロセス全体の効率が向上できるかと考えるのが適切である。

マイクロリアクターは新しい分野でしかも流動、反応、センサー、材料、精密加工、プロセス設計など多岐に関わる分野横断的な知見と研究が必要である。当然、異分野融合となり、多分野の専門研究者・技術者が協力する必要があるし、他の研究成果も大いに参考になる。ところが、マイクロリアクターが生産ツールとして実用化に成功した場合、それがなかなか表に出てこないのが実情である。大学の研究は、他に例がないなら研究してみようとテーマにで

きるが、企業における実用化の決断は簡単なことではない。「ほんとうにマイクロリアクターは実用化可能なのか」と心配されるのではないかと、特に経営者にとっては、ほんとうに大きな決断を迫るものと想像される。また、研究の最前線で開発されている研究者・技術者にとっても苦勞の多いところであろう。そこで、マイクロ化学分科会では、化学工学会反応工学部会内の正式ホームページの他に、準公式ページとしてFacebookによる情報発信を2012年4月から始めている。図3に、そのFacebookを使ったHPの基本的な考え方や発信の内容などを簡単にまとめた。企業・大学の研究者、技術開発者、学生にとって有益な情報提供と、面談し交流する機会を多く提供したいと手作りで活動している。ご関心のある方は、ぜひご覧いただきたく願いたい。

URL <https://www.facebook.com/scej.org.cre.mcp?ref=hl..>

参考文献

- 1) 前一廣監修：マイクロリアクター技術の最前線，シーエムシー出版(2012)
- 2) マイクロリアクターテクノロジー，NTS出版(2005)
- 3) 化学工学会編：化学工学便覧，pp.1013-1019，丸善出版(2011)

「化学工学誌」の創刊号から最新号までを、電子図書館で閲覧できます

化学工学会のホームページから
会員専用ページ→会員専用ログイン→化学工学会 電子図書館
で閲覧できます。