

特集 実用攪拌技術～装置設計指針から課題解決事例まで～

特集

化学工業において化学品、材料等が製品であるが、実際に製品化するためにはその製造・生産を支える要素技術、すなわち単位操作が非常に重要であることは言うまでもない。しかしながらこれらの実用的な技術は現場のノウハウとなっており、実際に役立つ情報を得にくいのが実情である。本特集では化学産業で多用される代表的な単位操作の一つである「攪拌」に着目し、装置メーカーや化学企業、アカデミアの前線の方々から、装置設計、事例、シミュレーションおよびスケールアップ等に関する技術について紹介する。実際の現場で遭遇する様々な課題解決や新たに装置を導入するときのヒントになれば幸いである。
(編集担当：山森義之)†

攪拌技術の基礎と最新実用化技術

西岡 光利

1. はじめに

ここでは総論として、基本的な液体混合技術の考え方や最新の技術動向、実用的技術に焦点を当てて述べる。

さて、ミキシングとは、「省力化」機械である。あるものを大量に混ぜ合わせる時に、小さな容器を数多く用意するより、スケールアップの技術で大型の攪拌容器で一気に処理した方が「省エネ」で「省力化」になる。

また、「時間短縮」機械ともいえる。液体同士の混合でも、液体と固体（スラリーや触媒など）や液体と気体の混合でも、攪拌により液滴や気泡の均一微細化や、固体面や境界面の流速上昇などで界面の拡大や界面での更新が促進されて反応を速やかに且つ均一に進ませ、結果として必要生成物を「時間短縮」して迅速に且つ高品質で生産可能とする。

さらに、「新物質生成」機械でもある。反応による新物質生成や、晶析による新機能物質生成、及び、最近では微生物や動物細胞の拡大培養により、有用物質や再生物質などの新たな物質生成がおこなわれている。

2. 攪拌機の基礎と選定方法

まずは攪拌目的を明確に定めて考える必要がある(図1)。



Fundamental of Mixing Technology and The Latest Practical Applications
Mitsutoshi NISHIOKA (正会員)
1980年 宇都宮大学工学部環境化学科卒業
現在 佐竹化学機械工業(株) 代表取締役社長
連絡先：〒335-0021 埼玉県戸田市新曽66番地

E-mail m.nishioka@satake.co.jp

2017年3月15日受理

目的は1つではなく、複数の場合もあるが、その中で重要な目的に絞って考える。次に槽内の流動状態をどのようにすると効率のかを考え、それに沿ってインペラや槽形状、槽内構造を考える。翼の特性として同じ攪拌動力でも高吐出(低せん断)特性の物から低せん断(低吐出)特性の物までである(図2)。攪拌目的に合わせて槽内の流動状態やせん断力の分布を決めていく。

代表的な攪拌流動状態を決めたら、各種の攪拌翼から、さらに、液特性(粘度や比重、粘性特性)と流動特性(攪拌レイノルズ数 $NRe = \rho \cdot n \cdot d^2 / \mu$: 以降 Re 数)により、槽内の流動状態(図3)が異なることも考慮し、最適な攪拌翼(図4)や、攪拌槽内の邪魔板などの槽内構造を決定する。高 Re 数域では、液の固体的回転渦による攪拌力の低下を防ぐために、邪魔板の設置や偏芯攪拌を検討する。

その後、決定した攪拌機選定結果から、攪拌動力数(Np 値: 永田式¹⁾や亀井、平岡らの改良式²⁾で算出)を計算し攪拌動力を求め、攪拌動力の算出は、攪拌に作用するエネルギー量を把握し、物質移動速度や攪拌軸強度などの諸計算をおこな

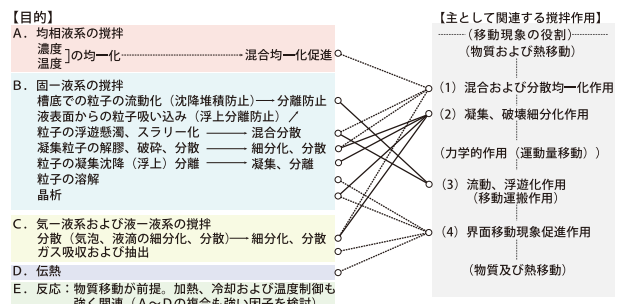


図1 攪拌目的

† Yamamori, Y.

平成27, 28年度化工誌編集委員(7号主査)
住友バークライト(株)

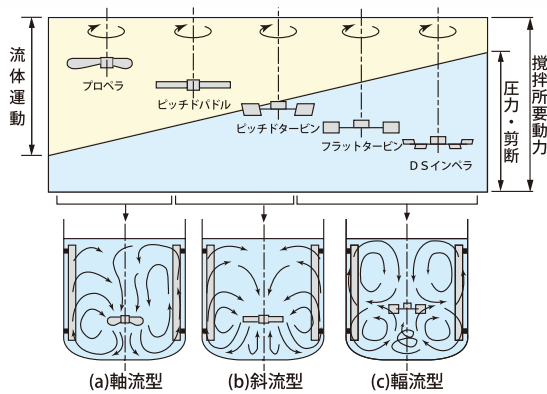


図2 攪拌翼種別の作用

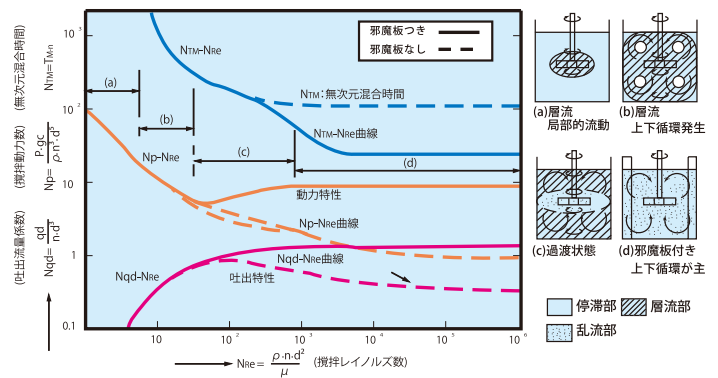


図3 攪拌レイノルズ数と流動特性

青色・・・スーパーミックスシリーズ

翼種別	軸流翼	斜流翼	槽底型翼	輻流翼	高粘度翼	広幅翼
攪拌領域 (主に適用Re数範囲)	均一系 3000 < Re	不均一系 1000 < Re	固液系 3000 < Re	気液系 1000 < Re	不均一系 Re < 100	反応系 10 < Re
従来翼	プロペラ翼	バドル翼	ファウドラ翼	タービン翼(GDT)	リボン翼	アンカー翼/糸巻翼
高効率インペラ	欧米 A100 ISO JET	A310 INTER MIG	KT-3 EPAL	コンゲープ(6CC) PHASE JET	PARAVISC	MAXBLEND フルゾーン Hi-F MR 205
	国内 HR 100	HR 320	ツインスター HS 600	HS 100	ログボーン MR 524	

図4 代表的各種インペラ分類表

う上で重要である。改良式は、広いRe数範囲で、幅広い翼条件に適用できるので、企業での攪拌装置の検討に有益である(各種の計算式詳細は化学工学便覧など参照)³⁻⁵⁾。

特に多用途や多目的な攪拌を望む場合には、日本発の攪拌技術である広幅翼(マックスブレンド翼、フルゾーン翼、スーパーミックスMR205翼、Hi-F翼など)があり、各種の反応装置などで大きな成果を上げている。

もちろん、実液を小スケールで攪拌実験(精密に動力測定が可能なミキシングトルクメーター、インテリジェントスターラーなど)や反応実験(オートケム、リアクトメイト、ブルーラベルなど)により最適な攪拌条件を決める方法や、さらに、攪拌機メーカーが研究施設に用意しているテスト装置で、実際の試料や疑似液でのパイロットスケールの実液攪拌を確認して、より慎重に実機設計に進める方法がある。

最近ではシミュレーションソフトを利用して混合状態の確認やスケールアップ、連成解析による強度検討まで確認して、一気に実機設計に進めていくこともおこなわれている。但し、重要なプロセスの場合には、3Dプリンターで攪拌槽内のスケールダウンモデルを作り、槽内の実際の流動状態を確認し、より精細に検討を重ねることを推奨する。

能増などでの単純なスケールアップなどでは、単位体積当たりの攪拌消費動力一定(P/V値一定)が安全側の方法として多用されてきたが、シミュレーション技術にて流動状況も考慮した検討で、より省エネに実施可能である。

3. 均相系攪拌操作と実用技術動向

「液液系攪拌」の「均一系」は、「省力化」、「省エネ化」が求

められる攪拌領域なので、広幅翼などよりも高吐出な軸流翼(プロペラ翼、A100翼、ISOJET、HR100翼など)や斜流翼(バドル翼、A310翼、INTERMIG、HR320翼など)を1段や多段で用いることが多い。さらに、欧米で研究されている軸流翼と斜流翼や輻流翼を組み合わせる方法が効果的である。最近では下水処理場の嫌気槽で、複翼式縦軸攪拌機を使用することで、従来は7~8 W/m³だったものを1 W/m³と大幅に省エネ化を達成した例もある。一般的な薬液混合でも高効率翼により従来のプロペラ翼やバドル翼よりも2~3割の省エネが期待される。

「不均一系」は、攪拌操作により「時間短縮」が達成される攪拌領域である。3,000 < Re数の乱流領域の場合は液流動が容易で、均一系と同様に高吐出翼が使用されるが、10 < Re数 < 3,000の層流領域の場合、液流動が多少困難から、高吐出翼と斜流翼や輻流翼の組み合わせや、広いRe数の領域に高い攪拌性能を発揮する広幅翼が使われ、「均一混合」が優先される。特に時間とともに粘度が変化するような反応系には広幅翼が最適である。この領域で粘度変化が大きい反応などの重要な攪拌操作に従来型の多段斜流翼やアンカー翼やリボン翼を使用している場合には、広幅翼に代えることで、デットゾーンがなくなり、攪拌効率が大幅にアップし、生産される製品品質の向上が期待される。

さらに高粘度で流動が悪化するRe数 < 10の層流領域の場合、液全体をよどみなく動かすのが主目的となるので、「均一系」も「不均一系」も広幅翼単独では攪拌目的の達成が困難となり、従来型のヘリカルリボン翼や、その欠点を改良した翼(PARAVISCやMR524翼、ログボーンなど)や、リボン翼と広幅翼を組み合わせた翼(スーパーブレンドなど)を使用する。また、こ

の層流領域でも分散や微細化などの機能も持たせたい場合には、アンカー翼、リボン翼、広幅翼とディスペーや分散機を組み合わせた攪拌システム（コンビミックスやハイブリットミキシングシステム、NANOVisK、COAXIALなど）も開発されている。

尚、反応系では、連続式も注目されつつあり、高压のポンプ吐出により、管路上でスタティックミキサーやダイナミックミキサー（ラインミキサーやパイプラインホモミキサー、インライン分散攪拌機など）にて連続処理する場合や、フロー法やマイクロリアクターによる連続合成や微細空間で連続的に合成することが研究されている。

4. 異相系攪拌操作と実用技術動向

「固液系攪拌」では、従来は解析と目視中心の化学工学実験で求められたZwieteringの粒子浮遊限界攪拌速度式が利用されてきたが、最近では、固体粒子と攪拌流速の関係をLDV流速測定やシミュレーション技術を駆使して、詳細に検討し、Zauyah, 吉川らにより、新しい粒子浮遊限界攪拌速度式⁶⁾が提案されているので参照して頂きたい。また、固液攪拌では槽底部に攪拌翼を配置すると、有効に固体粒子に攪拌流を作用させることができ、また、液排出時にも固体粒子の沈降を防ぐことができるので、槽底部配置型で全体流動を考慮した攪拌翼（ファウドラ翼、HS600翼やツインスター翼など）の使用が有効である。

「気液系攪拌」では、従来は6枚ディスクタービン翼（6DT翼）が多用されてきたが、翼背面に気泡のラージキャビティが生成してしまい、極端に気泡分散性が劣化することが判明してきた。そこで、翼背面の負圧部を縮小させてキャビティを最小化する攪拌翼（コンケーブ翼（6CC翼）やPHASEJET翼、HS100翼など）が開発された。これらの翼は、気体の通気時攪拌動力 P_g と無通気時攪拌動力 P の比率（ P_g/P 比）がより1に近く、効率的に気泡分散するとともに、攪拌機に取り付ける電動機もより小さいものとする事ができる。尚、6DT翼と6CC翼とHS100翼のガス吸収性能（ kLa ）と通気時単位体積当たりの攪拌動力（ P_{gv} ）の比較表（図5）を見ると、実験上ではHS100翼は6DT翼に比べて、同じ kLa を得るのに約1/3の攪拌動力で良いことが確認できる。実際に実装置においても約30～50%の動力低減が達成されているし、あるいは、同じ動力にて培養目的での微生物の活性が高まり、2倍の有用成分の収率が報告されている。

5. 新しい攪拌技術の開発動向

ナノ分散をおこなう場合には、より強いせん断力が必要とされるが、翼の回転を速くしていくと大きなキャビテーションが発生し、その空洞により分散力が作用できなくなる。そこで、遠心力場にて処理液を封じ込んで、空洞の発生を抑え、強力なせん断場を与える発想からフィルミックスが誕生している。ナノ粒子領域での新しい攪拌方法である。

一方、旋回流を利用した技術で、大容量の液を緩やかに攪拌する技術も登場している。圧力バランスと境界層効果をうまく利用して、縦長の円筒槽の中心に竜巻状の流れを作り出し、非常に低動力で全体の液循環流れを作り出すRB

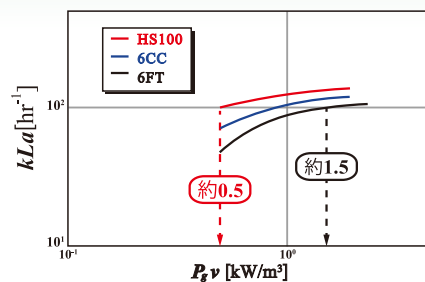


図5 各種翼別ガス吸収性能(kLa)比較

ミキシングシステムである。色々な水処理方式に採用されているが、最近では数千 m^3 の消化槽にも適用されてきている。

医薬品やファインケミカルの分野では、封じ込めして交差汚染や拡散防止のニーズが強い。従来のメカニカルシール方式では限界があるので、完全密閉での攪拌が要求されており、磁気カップリングを利用した完全密閉の攪拌装置が誕生している。槽の上部に取り付けるタイプは、高压オートクレーブ方式やスーパーマグミキサーなどがあり、底部に取り付けて攪拌するタイプは、NovAsepticMixer やフローティングマグミキサーなどがある。

同じ完全密閉だが、従来の回転から異なる動作を利用して、弾性体で外部と遮断したブイムブミキサーやシングルスターが最近登場している。前者は上下動の動きをうまく液体の旋回流に変換して緩やかに攪拌し、後者は外食のスムージー用カップのストローで内部を混ぜるような動作を利用して攪拌している。特に上下動方式は、均一性が高く緩やかな攪拌で、スケールアップ時のせん断力の上昇が少なく、スケラブルでの3D浮遊培養（動物細胞培養やマイクロキャリア、iPS細胞の培養など）に向いている。高濃度培養の場合には、微細な酸素気泡を供給するSPG膜スパージャーを融合したVerSusReactorも開発され、200 L迄の実証を経て、シングルユースにも対応している。

尚、前述のシミュレーションの活用も新しい技術である。一部のソフトウェアでは、代表的なインペラや最新翼のインペラのテンプレート登録もされているので、企業が利用する上で、利便性がさらに向上している。

6. おわりに

これほど多様な攪拌技術を創出している国は世界でも珍しい。シミュレーション技術や流れの可視化技術の向上によって、装置内の流れをコントロールする技術が確立し、最近の技術開発成果につながっている。攪拌機は古い技術と思われがちであるが、これらの進化により、一般の攪拌装置や水処理装置、化学反応装置、培養装置に於いて、革新されたものに見直しが可能な事例も多いので、さらに技術開発を進めて、これらの新しい攪拌技術を普及させたい。（文中に商標等は割愛しました。）

参考文献

- 1) 永田, 山本, 横山ら: 化学工学, **21**, 708-715 (1957)
- 2) 亀井, 平岡, 加藤ら: 化学工学論文集, **21**, 41-48 (1995)
- 3) 化学工学会編: 化学工学便覧, 改訂7版, pp.332-378, 丸善出版 (2011)
- 4) 化学工学会監修: 最新ミキシング技術の基礎と応用, 化学工学の進歩42, 初版, 三恵社 (2008)
- 5) 佐竹化学機械工業編: 攪拌技術, 改訂版, 佐竹化学機械工業 (1995)
- 6) ZAUyah, 吉川ら: *J. Chem. Eng. Jpn.*, **49**(8), 737-746 (2016)