

F315

攪拌技術における基本特性および操作方法

(佐竹化学機械)○(正)吾郷健一

1. はじめに

製品製造や処理のプロセスにおいて、攪拌工程はどこかに組み込まれており、また、攪拌操作ひとつで生産対象物の生産能力に大きく影響する。本講演では、攪拌機を選定・設計をする際に知っておくべき基本特性および評価方法について簡単に述べた後、最新の攪拌技術の実例についても少し触れる。

2. 基本特性

まず、対象とする化学プロセスの内容、特性をよく把握する、少なくとも攪拌装置に要求される諸機能をはっきり認識しておくことが大切である。次にその目的を達成するためにどのような攪拌作用が必要か検討する。図1に示すように攪拌翼の種類としては、流動作用に優れているもの（主にプロペラなどの軸流タイプ）とせん断作用に優れているもの（主にディスクタービンなどの輻流タイプ）の二つに大別できる。これら二つの作用の分配割合によって攪拌目的を達成すると考えてよい。

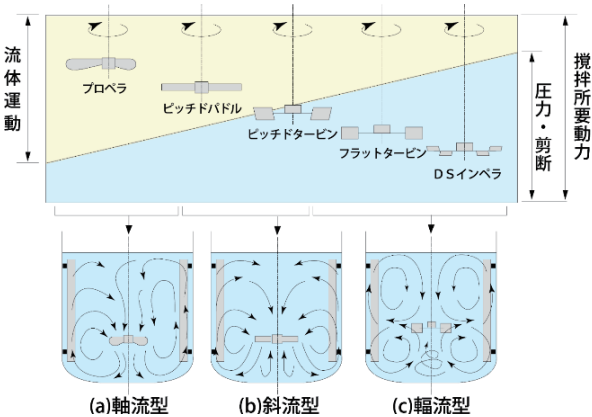


図1 攪拌作用

設計に際して重要な情報として、まず攪拌の対象となる液物性があり、攪拌 Reynolds 数 Re を指標とする。一般に Re が $10 \sim 100$ 以下では層流域と呼ばれ、粘性力が支配的な領域となる。一方、 Re が約 $1000 \sim 10000$ 以上の乱流域では、慣性力が支配的な領域となる。層流と乱流では、流動の性質が全く異なるので、流動を論じる際は、区別して検討しなければならない。慣性が働きにくい層流域（高粘性流体）では、槽径に対して大きい翼径を有する攪拌翼（リボン翼やアンカー翼など）で、液自体を強制的に動かすことで攪拌する。

図2に Re に対する各特性指標を示す。図中の N_p , N_{qd} , N_{tm} は、それぞれ攪拌動力数、吐出流量係数、無

次元混合時間であり、流動を検討する上で重要な指標となる。

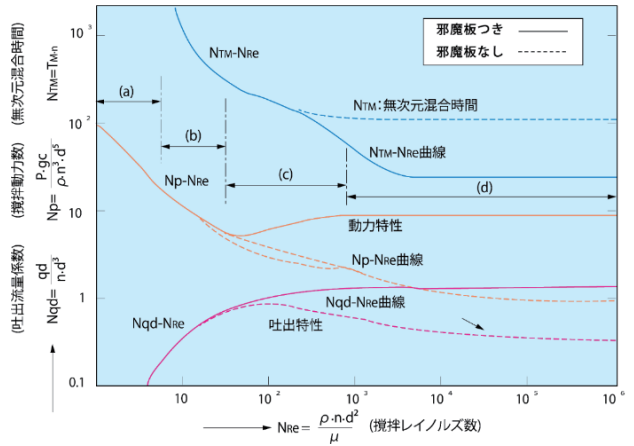


図2 流動特性線図

流動状態と攪拌作用の関係、攪拌槽と攪拌翼などの装置形状と、それによって生じる液流動状態の関係、当然コストなどさまざまな条件を考慮して、攪拌翼を選定する（図3）。

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 $3000 < Re$	均一系 $1000 < Re$	スラリー系 $3000 < Re$	気液系 $1000 < Re$	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
高効率インペラ	吹米	A100	A310	KT-3	コングリーブ(SCC)	PARAVISC
	国内	ISO JET	INTER MIG	EPAL	PHASE JET	MAXBLEND
	HR100	HR320	ツインスター	H'S600	H'S100	フルゾーン
					ログボーン	Hi-F
					L'R500	MR205

図3 各種攪拌翼

3. 評価方法

攪拌翼を選定しても実際に要求される流動状態を示しているかについては、流動を可視化する必要がある。粒子懸濁法やヨードハイポによる脱色法などの簡易的な方法から PIV/PTV などかなり高度な技術を要するものまでいろいろとある。

また、トルクメータにより攪拌時のトルクを測定し、動力特性を把握しておくことも大切である。モータ動力に対する負荷状況を確認できるとともに、動力数 N_p を算出することができる。この N_p は動力の選定をする際に必要であり、スケールアップにも適用できるためとくに重要な因子である。トルクメータが設備されていない場合は、パワーアナライザー等で消費電力より動力を算出する。

近年、CFD の精度や機能が向上し、その利用法も多様化しており、流動状態を再現するだけでなく、スケールアップツールとしても活用している。しかし、その場合はCFDの結果が実際の現象を再現できていることが大前提である。検証がなされていない計算結果は、データとしての信頼性が不明となる。また、設計後、実機を据付時に、再度バリデーションをとって確認することも重要である。

4. 最新攪拌技術の実例

要求される攪拌目的は高度化しており、従来の考え方だけでは対応できない場合もある。そこで、最新の攪拌装置についていくつか例をあげて紹介する。

まずは、水処理分野の分野について述べる。最近、実績を上げつつあるのが、RB ミキシングシステムである。図4に攪拌装置の概要図を示す。本装置はパドル翼と槽下部に設置した底面静翼により構成されるシステムである。パドルの回転により槽内に旋回流を生じさせ、槽壁付近では旋回流を伴う緩やかな下降流を発生させる。この流れが、槽底部では槽中心部へ集まり、軸中心部の静翼により強力な竜巻状の上昇流が液面付近まで達し、大循環流が形成される。水処理施設のように低動力で長期間運転するのに適しており、消化槽²⁾はじめ、急速混和槽³⁾など水処理のさまざまな工程に適用されている。

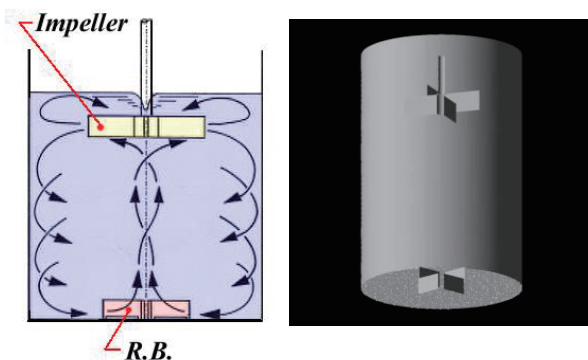


図4 RB ミキシングシステム

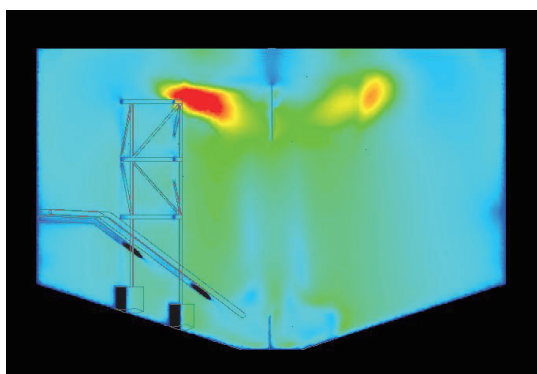


図5 RB ミキシングシステムによる消化槽のCFD結果 (槽径 18 m)

最後にバイオ分野について述べる。バイオといっても対象がさまざまであり、微生物培養においては、高

せん断、高 OTR を要求される。

一方、動物細胞培養においては、せん断力を抑制しながら均一混合を要求されるこの。相反する作用を実現するには、従来の回転式では限界があり、上下動式の攪拌翼を採用することとした。⁴⁾ 図6に同一 P_v 値における培養槽内のせん断応力分布を示す。回転式に比べ、せん断応力が小さいのが分かる。

今後、確度の高いスケールアップ可能な技術開発を進めていく。

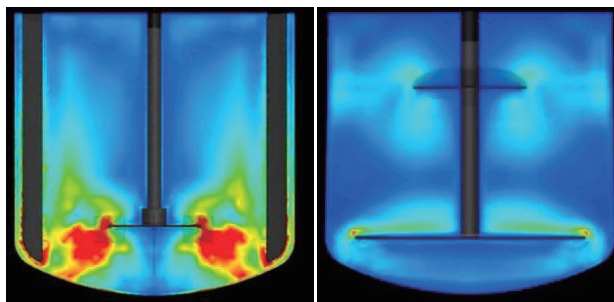


図6 攪拌方式別における槽内のせん断応力のCFD シミュレーション結果

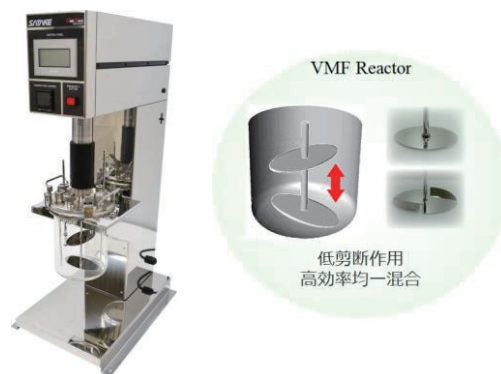


図7 上下動式培養装置 (Versus Reactor)

5. おわりに

攪拌に関して求められる要求はさまざまである。それらを満足させるためにはできるだけ最適な選定・設計を行う必要がある。今回は、設計に最低限必要だと思われる基本特性、設計指標、評価方法等を中心に述べた。業務においては積極的に CFD を利用しているが、これはあくまでツールであり、実際の流れが再現できてはじめて利用可能となる。

参考文献

- 1) 山本, 西野監修, 攪拌技術, 佐竹化学機械工業 (1992)
- 2) 根本, 栗波, 化学装置, 62 (8), 43-46 (2020)
- 3) 根本, ケミカルエンジニアリング, 64 (11), 24-29 (2019)
- 4) Ito *et al.*, *Cell*, 60 (7), 23-34 (2018)