
攪拌装置の設計とスケールアップ

—Excelテンプレートによる計算実習付—

川瀬義矩

SAMPLE

SAMPLE

序文

攪拌操作は数多くのプロセスで使われている。その利用は化学工業、食品工業など非常に多様である。攪拌の対象は液体や固体の一相系だけではなく気体や液体を含む多相系も含む（本書では固体一相の混合は除いてある）。攪拌槽内では混合と同時に物質移動、熱移動そして反応が起こっている場合も多く、現象は複雑である。そのため攪拌装置の目的にあった設計、スケールアップは難しくなる。経験主義が支配している分野であり合理的な設計法が確立していない。合理的な設計法を構築するためには、現象の数学モデルによる定量化が重要となる。本書では、攪拌装置内の現象を定量化し設計に結び付けるアプローチを解りやすく解説した。従来の攪拌に関連する書籍と異なり、Excelによる計算問題を数多く用意して、実際の設計、スケールアップ計算が具体的に理解出来るよう構成されている。

第1章では、攪拌の基礎として攪拌の目的、攪拌方法、攪拌装置の基本構成について解説した。第2章では、攪拌翼の選定に関連して、攪拌翼の種類と選定基準について解説した。第3章では、攪拌槽の設計、スケールアップにおいて重要となるパラメーター（攪拌所要動力、混合時間、吐出流量など）について計算に使う相関式を含めて解説した。第4章では、異相系の攪拌として、気液系、液液系、固液系、気液固系の攪拌について解説した。第5章では、攪拌と反応の関係を解説した。第6章では、攪拌装置の設計法と実際の設計計算について解説した。第7章では、攪拌装置のスケールアップ手法とスケールアップ計算をCFD（数値流体力学）を含めて解説した。第8章では、攪拌装置のトラブルと解決法として非ニュートン流体と泡沫層形成を取り上げて解説した。第9章では攪拌装置の設計とスケールアップの今後の課題として、CFDの使い方とAIの利用について解説した。付録では、Excelを使った問題の解答で使用するゴールシートとソルバーの使い方について簡単な例題を使って解説した。

Excelによる設計とスケールアップ計算の例題を付けて解りやすく解説したので、添付のCD-ROMに入っているExcelテンプレートファイルを使って実習し理解を深めて頂きたい。テンプレートには実習シートのほかに解答シートが付いているので、それを参照にしながら実習し本書の内容を具体的に理解出来る様になっている。テンプレートは是非実務にも使って頂きたい。

本書の出版にあたり大変お世話になりました株式会社R&D支援センター金子哲哉氏と亀山翔氏に心から感謝申し上げます。

2022年2月
川瀬義矩

目次

序文	3
第1章 攪拌の基礎	11
1 攪拌の目的	11
2 攪拌方法	14
3 攪拌装置の基本構成	15
第2章 攪拌翼の選定	20
1 攪拌翼の種類	20
2 攪拌翼の選定基準	20
3 目的に合った攪拌翼	23
第3章 攪拌装置の重要なパラメーター	29
1 攪拌所要動力	29
1.1 測定法	30
1.2 相関式と線図	30
2 混合時間	39
2.1 測定法	39
2.2 相関式と線図	39
3 吐出流量	44
3.1 測定法	44
3.2 相関式と線図	44
4 剪断速度	46
4.1 測定	47
4.2 実験データ	47
4.3 相関式	50
(追加資料) 層流域と乱流域の動力 P と動力数 N_p	53

第4章 異相系の攪拌	54
1 気体の分散	54
1.1 攪拌所要動力の低下	56
1.2 フラッディングと完全分散	58
1.3 混合時間、ガスホールドアップ、物質移動容量係数、熱移動係数の相関式	60
1.3.1 混合時間	60
1.3.2 ガスホールドアップ	60
1.3.3 物質移動容量係数	62
2 液体の分散	66
2.1 液滴の挙動	69
2.2 乳化	70
2.3 液滴径	70
2.4 転相	74
3 固体の分散	75
3.1 最小粒子浮遊速度	76
3.2 粒子の均一分散	78
3.3 気 - 液 - 固3相の攪拌	79
3.4 攪拌槽内における固体粒子 - 液体間物質移動	81
3.5 浮遊粒子の分散	83
(追加資料) 商業規模の攪拌槽バイオリアクターの比較	89
第5章 攪拌と反応	90
1 反応速度式	90
2 反応操作形式	93
2.1 回分操作	95
2.2 半回分操作	96
2.3 連続操作	98
2.3.1 完全混合 (CSTR)	99
2.3.2 ピストン流	101
2.3.3 実際の混合	103
第6章 攪拌装置の設計	108
1 設計手順	108
2 実際の設計計算	110

2.1	完全混合攪拌反応装置の設計：酵素反応の反応装置体積と攪拌速度	110
2.2	攪拌槽型好気培養槽の設計：酸素消費速度	112
2.3	気液攪拌槽型反応装置の設計：反応ガス吸収における気液間物質移動	115
3	温度制御のための伝熱	119
3.1	伝熱装置	119
3.2	相関式	121
	(追加資料) 設計パラメーターの翼径 (D_I) と攪拌速度 (N) の依存性	126
第7章	攪拌装置のスケールアップ	127
1	スケールアップの基準	127
2	相似則	127
3	流動解析	137
4	実際のスケールアップ計算	142
第8章	攪拌装置のトラブルと解決方法	146
1	高粘性非ニュートン流動によるトラブル	146
1.1	高粘度流体	149
1.2	非ニュートン流動特性	149
1.3	塑性流動	153
1.4	粘弾性流体	154
2	発泡などのトラブル	157
2.1	泡沫層の形成	157
2.2	破泡	158
2.2.1	物理的・機械的破泡法	159
2.2.2	化学的破泡法	160
2.3	微細気泡の脱泡	161
3	原料供給と抜出	161
4	スケールアップのトラブルの対策	163
4.1	スケールアップの見直し	164
4.2	スケールダウン	165
	(追加資料) 高粘度流体攪拌翼の選定	167

第9章 攪拌装置の設計とスケールアップの課題	168
1 プロセス強化.....	168
2 AIの活用.....	170
付録 Excelゴールシークとソルバーの使い方	178
1 収束計算の設定.....	178
2 ゴールシークの使い方.....	178
3 ソルバーの使い方.....	180
3.1 ソルバーのアドイン.....	180
3.2 ソルバーのオプションの設定.....	181
索引.....	188

Excelテンプレートリスト (CD-R収録内容)

template 3 1 攪拌所要動力の計算
template 3 2 混合時間の計算
template 4 1 気体分散 攪拌所要動力の減少
template 4 2 気体吹込みによるフラッディングと完全分散
template 4 3 ガスホールドアップの計算
template 4 4 物質移動容量係数の計算
template 4 5 攪拌槽とスタティックミキサーにおける液液分散の液滴径
template 4 6 液滴径分布から平均液滴径の計算
template 4 7 粒子浮遊限界攪拌速度の計算
template 5 1 反応速度定数の決定
template 5 2 ミカエリス-メンテン式
template 5 3 回分操作による排水中の農薬の分解
template 5 4 半回分操作
template 5 5 CSTR 反応装置の体積と攪拌速度の決定
template 5 6 混合状態と反応装置体積
template 5 7a 攪拌槽 デッドゾーンとバイパス
template 5 7b 攪拌槽 デッドゾーンとバイパスと反応
template 6 1 完全混合攪拌反応装置の設計
template 6 2 攪拌槽型好気培養槽の設計

- template 6 3 シクロヘキサンの部分酸化プロセス
- template 6 4 攪拌槽型バイオリアクターの伝熱面積
- template 6 追加問題1 攪拌槽における固体粒子の溶解
- template 6 追加問題2 晶析装置の攪拌
- template 7 1 攪拌槽スケールアップ計算 (1)
- template 7 2 攪拌槽スケールアップ計算 (2)
- template 7 3 晶析装置のスケールアップ
- template 7 4 攪拌槽の操作範囲 スケールアップ
- template 7 5 単位液体積あたりの攪拌所要動力 P_v 一定のスケールアップ
- template 7 6 混合時間or P_v 一定のスケールアップ
- template 7 7 攪拌槽スケールアップ計算 1バイオリアクター
- template 7 追加問題1 スケールダウン 熱移動基準 P_v 基準
- template 7 追加問題2 ヘリカルリボン翼 層流域 混合時間or
 P_v 一定のスケールアップ
- template 8 1 非ニュートン流体の混合
- template 付録1 ゴールシークの使い方
- template 付録2 ソルバーの使い方

攪拌装置の設計とスケールアップ—Excelテンプレートによる計算実習付—

SAMPLE

SAMPLE

第1章 攪拌の基礎

攪拌装置は数多くのプロセスで広く使われているが、その目的が多様であるため、多くのエンジニアが個々の攪拌装置の設計とスケールアップの実務において、多くの課題に直面している。それをブレイクスルーするには論理的なアプローチで攪拌装置の現象を定量的に把握する必要がある。この章では、攪拌操作の基礎を解説する。

1 攪拌の目的

攪拌の目的は多様で、その目的に最適な攪拌翼の選定と運転条件である攪拌速度を決定するのが攪拌装置の設計で最も重要なポイントである。しかし、最適の攪拌翼の選定は非常に難しい問題である。検討しているプロセスと類似したプロセスがある場合にはそこで使われていた攪拌翼の情報を参考にすることも出来るが、それらが最適な選定とは限らないので、鵜呑みでその攪拌翼を選定するのは危険である。参考に来る類似したプロセスが無い場合は、選考の手掛かりが無いため選定は特に難しいと言える。しかし、新たに攪拌翼の選定をすることになるので、従来の明確でない経験に左右されずに本当に最適な選択をするチャンスでもある。実際のプロセスで使われている攪拌翼についての情報はノウハウの部分が多いため公表されている情報は非常に限られている。かなり特殊な攪拌翼が使われている場合も多く、それらが何故選定されたかの情報はほとんど出されていない。それゆえ、最適な攪拌装置の設計とスケールアップは技術者の実力が問われる。参考に来るプロセスの情報が無いことは決して悪いことではない。とかく経験に頼り最適でもないのに以前から使われているという理由だけで採用されている攪拌翼を論理的に最適な設計に変更するチャンスである。

攪拌装置は単にかき混ぜて濃度や温度を均一にするだけではなく、反応を行なう反応装置や結晶を生成する晶析装置などとしても広く使われている。例として、高分子重合、微生物培養、ポリエステル原料製造そして晶析操作に使われている攪拌装置を図1に示した。攪拌の目的にとって重要な攪拌作用を理解して攪拌装置の設計をする必要がある。

攪拌により、混合だけではなく物質移動、熱移動、反応速度を促進させる目的を持っている場合が多く、攪拌速度と物質移動、熱移動、反応のそれぞれの速度との兼ね合いが攪拌槽の設計を難しくしている。攪拌翼の回転により作り出される流動や応力が攪拌槽内の混合や気泡、液滴そして固体粒子の分散を支配する。濃度や温度を均一化する混合には攪拌翼の回転による吐出流が作り出す循環流が重要な役割を果たす。気泡、液滴、固体粒子を含む系の混合の場合には、攪拌翼の回転による剪断力（場所によって変化する速度の大きさを表す剪断速度 $(\Delta v/\Delta y)$ によって作り出される力）も

第1章 攪拌の基礎

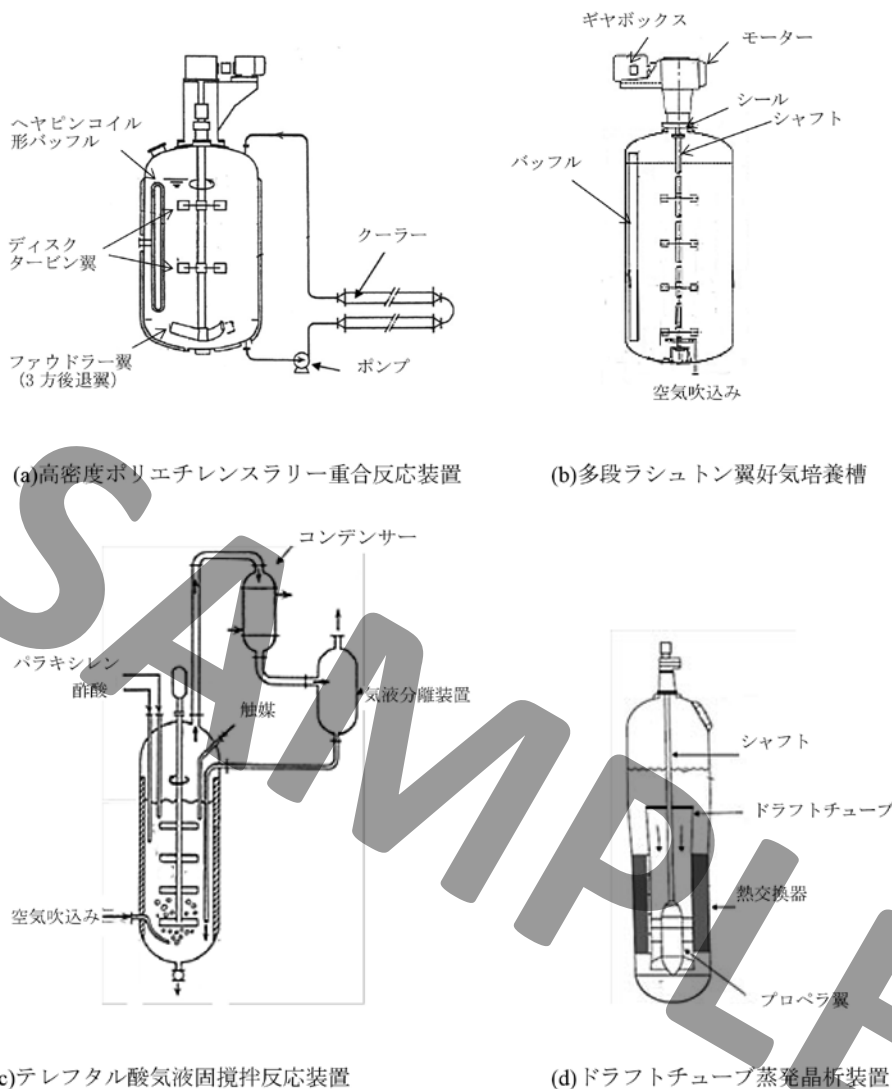


図1 工業規模の攪拌装置の例^{1,2)}

気泡、液滴、固体粒子の分散にとって重要な要素となる。気泡と液滴の場合はそれぞれの生成にも関連するため気泡径と液滴径に大きく影響する。固体粒子の場合も溶解、凝集を通して粒子径に影響する。懸濁物が微生物の場合は攪拌で生じる剪断応力による細胞の剪断損傷を起こす場合もある。表1は攪拌の目的と重要となる攪拌作用（吐出流力と剪断力）をまとめたものである。攪拌の目的に沿った攪拌作用を理解した上で攪拌装置の設計を行なう必要がある。

目的の混合状態を得るためには、攪拌翼の選定だけでなく、攪拌槽の形状（槽径に対する槽高の比、槽底の形状など）、内部構造（バフルの設置など）、運転条件（攪

表1 攪拌の目的と重要となる攪拌作用

攪拌の目的	重要となる攪拌作用
均相液系の攪拌	
濃度、温度の均一化	吐出流力（流動による物質移動、熱移動の促進で濃度あるいは温度の均一化を行う）
固液分散系の攪拌	
粒子の分散（沈降あるいは浮上の防止）	吐出流力（流動による運動量移動の促進で重い粒子の浮遊と分散あるいは軽い粒子の分散と自由表面を覆う粒子層の形成を防ぐ）
触媒粒子の分散（反応物質の触媒表面との接触促進）	吐出流力（流動による運動量移動の促進で触媒粒子を分散し反応物質との接触を強化する）
粒子凝集（粒子の浮遊、粒子同士の接触促進、凝集を強化）	吐出流力（適度な流動による運動量移動で粒子同士の衝突を促進し凝集を強化する） 剪断力（凝集体を破壊しないように剪断力は抑える）
粒子の溶解（粒子の分散と溶解の促進）	吐出流力（流動による運動量移動により固液界面の更新を促進し溶解を強化する）
気液分散系の攪拌	
気泡の分裂と分散	剪断力（攪拌翼による剪断力でスパージャーにおける小さい気泡の生成と気泡の分裂を促進する） 吐出流力（気泡の分散を促進する）
気液間の物質移動と反応（気体の吸収あるいは放散）	剪断力（小さい気泡の生成による気液接触界面積を増大する） 吐出流力（運動量移動の促進による気泡の分散と気液界面の更新と物質移動を強化する）
液液分散系	
液滴の分裂と分散	剪断力（乳化においては攪拌翼による高剪断力で微小な液滴のエマルジョン生成を促進する） 吐出流力（液滴の分散を促進する）
液液間の物質移動と反応	剪断力（小さい液滴の生成による液液接触界面積を増大する） 吐出流力（運動量移動の促進による液滴の分散と液液界面更新と物質移動を強化する）
伝熱促進	
伝熱面（ジャケット、コイル）における液体の更新	吐出力（運動量移動の促進による伝熱面における固液界面の更新と伝熱速度を強化する）

第1章 攪拌の基礎

拌速度など)を目的に合致する様に決めなければならない。攪拌装置の混合状態は攪拌翼だけではなく攪拌槽の構造も大きく関係するからである。

2 攪拌方法

一般的には攪拌翼を攪拌槽の中心軸に垂直に投入し攪拌するが、傾斜させて投入する場合、側面あるいは底面から投入する場合もある (図2)。本書では最も一般的な中央攪拌を中心に解説する。

攪拌翼を用いないでポンプにより噴流を槽内に吹き込むことによる攪拌もある (図2e)。

また、配管内に混合を促進するためのエレメントを入れるだけのラインミキサーによる混合も攪拌翼を用いない攪拌である (図3)。その特異性によりその活用が最近注

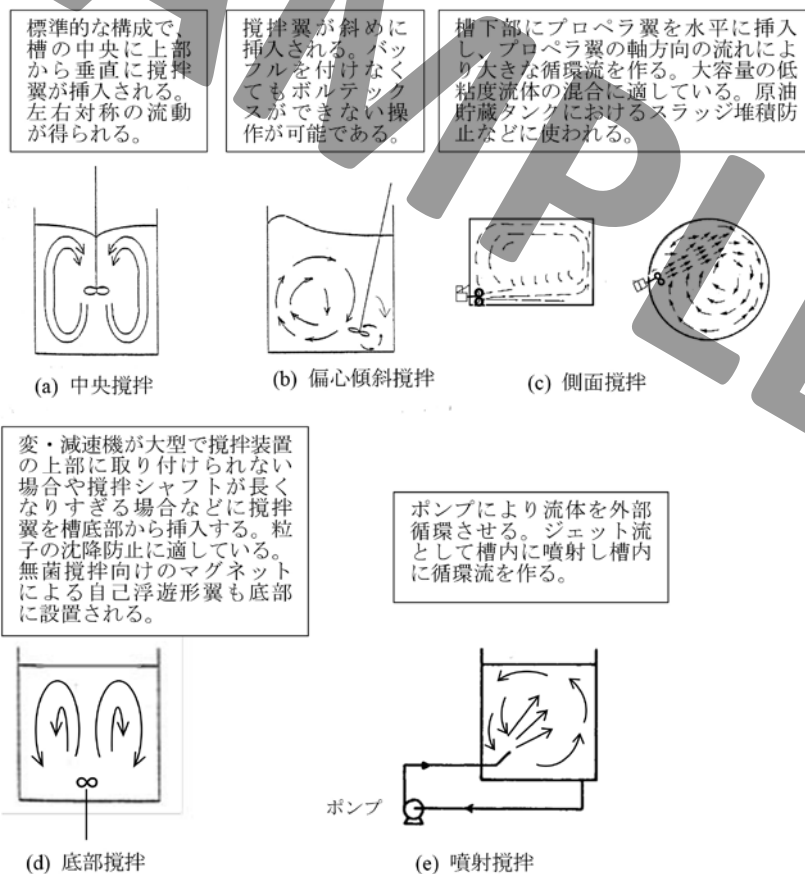


図2 攪拌方法の種類³⁾