

別冊化学工業

VOL. 14

NO. 7

1970

11/1

攪拌装置の設計と操作



化学工業社

攪拌装置の設計と操作

化学工業社

別冊化学工業 第14巻 第7号

攪拌装置の設計と操作

¥1,500 千100

1日 発行

編集兼発行人 原 徹

印刷所 真 珠 社

東京都千代田区神田神保町1-69

東京都千代田区神田淡路町1-11

発行所 電 話 (253) 6451-5 株式 化学工業社

振 替 東 京 1 3 0 6 0

執 筆 関 係 者

京都大学工学部化学工学科教授	永 田 進 治
横浜国立大学工学部化学工学科教授	山 本 一 夫
佐竹化学機械工業株式会社	
専務取締役(執筆責任者)	西 岡 一 茂
研 究 開 発 室 課 長	田 村 晃 一
東京事業所製造部技術課課長	藤 沢 剛
同 技術課参与	古 田 正
同 技術課主任	渡 部 正 志
同 技術課主任	天 野 家 徳
同 技術課主任	今 中 悟 郎
同 技 術 課 員	永 山 弘
大阪事業所技術部設計課参与	山 下 一 雄

81.18 42317 攪拌装置の設計と操作

—目 次—

第1章 攪拌理論の基礎 (横浜国立大学工学部) 山本 一夫..... 1	
1-1 攪拌操作の目的と機能	1-4 攪拌対象物の種類と物性
1-2 攪拌の方法	1-5 攪拌槽内の液流動状態および攪拌効果との関連
1-3 攪拌効果の表示法および測定法	1-6 攪拌操作の各種および特性
第2章 攪拌機の選定 (京都大学工学部) 永田 進治..... 34	
2-1 円筒形攪拌槽内の固体うず部と準自由うず部	2-7 固-液系の攪拌
2-2 攪拌翼の槽径に対する寸法比	2-8 液-液系の攪拌
2-3 攪拌翼の構造とその吐出し性能	2-9 ガス-液系の攪拌
2-4 攪拌槽の構造と混合時間	2-10 攪拌槽のスケールアップ
2-5 高粘度液の混合	2-11 空気の吸込みまたは溢流限界速度
2-6 高粘度液の加熱または冷却	2-12 攪拌式連続反応装置の考え方
第3章 攪拌所要動力と攪拌槽の伝熱 (京都大学工学部) 永田 進治..... 67	
3-1 無邪魔板攪拌所要動力	3-4 ガス-液系の攪拌所要動力
3-2 邪魔板付攪拌槽の消費動力	3-5 動力計算用ノモグラフ
3-3 高粘度液の攪拌所要動力	3-6 攪拌槽の伝熱
第4章 攪拌機の構造設計 (佐竹化学工業㈱) 永山 弘・藤沢 剛・天野家徳・渡辺正志・今中悟郎・田村晃一... 81	
4-1 攪拌槽	4-4 攪拌機回転軸の設計
4-2 材質の選定	4-5 翼の設計
4-3 攪拌機の動力源と駆動装置	4-6 潤滑およびそのユーティリティ
第5章 攪拌機の検査、取扱い、運転および保守 (佐竹化学工業㈱) 山下 一雄... 130	
5-1 攪拌機の検査	5-3 攪拌機の据付け、試運転
5-2 攪拌機の手扱い	5-4 攪拌機の保守
第6章 攪拌機の新しい実用動向 (佐竹化学工業㈱) 田村 晃一... 177	
6-1 ラインミキサー (流系攪拌装置)	6-2 可変ピッチプロペラ攪拌機

42317

24238/23

第1章 攪拌理論の基礎

24238/28

攪拌操作は化学工業のほとんどあらゆる分野にわたりそのプロセスの一部として広く適用されているが、これは化学工業の諸プロセスの本質をなす種々の化学変化の進行が原料成分である諸化学種間の混合接触を前提とするものであり、また原料や製品の配合均質化はもちろんのこと、加熱冷却操作および製品を精製するために行なう抽出やガス吸収などの物理的操作においても混合接触状態の向上を考えないで済むことはほとんどないといってもよいことを考えれば至極当然のことであろう。もっとも、例えば高分子工業や発酵工業のいくつかにみられるように、攪拌装置自体がそのプロセスの主要部をなしている場合もあるが、どちらかといえば攪拌装置はむしろ縁の下の力もちとして不可欠でありながら目立たない存在である場合がきわめて多く、はなはだ地味な性格をもっているといえるであろう。攪拌操作の対象はしたがってすこぶる広範囲、多種多様で、それに応じて装置の直接目的とするところ、構造形態、使用法なども他の単位操作の諸装置にみられない多様、複雑さを示すが、その反面理論的な研究や工学的な体系づけが十分に行なわれ難く、攪拌操作に対する理解や考え方がとかく実地の経験のみに左右されがちなことも事実であろう。

最近、化学工業のいちじるしい発展に伴って攪拌操作や装置に対する技術的な要求はもちろん、経済性についての要求も非常に高度で苛酷なものとなっており、攪拌操作全般について実際の技術と工学的な理論の緊密な連係に基づく合理化が期待されている。

以下、本章では攪拌操作に関するもっとも基礎的な考え方について簡単に述べ、第2章以下の専門的な内容への入門としたい。

1-1 攪拌操作の目的と機能

攪拌操作は、例えば石油工業における異種原油の混合調整や精製ガソリンへの四エチル鉛など添加物の混合など原料液や製品の混合均質化をはじめとし、攪拌槽に加熱冷却のためのジャケットをつけたり、槽内にコイルを挿入して攪拌する伝熱促進の目的や原塩の溶解や石油の洗浄、また発酵槽内で菌培養のために菌の呼吸用酸素を供給する通気などにも広く適用される。後者の3つの場合は、原料液中に固体粒子や液体、気体など他成分原料を注入して攪拌し、溶解、押出あるいはガス吸収などの物質移動速度を高める目的であるが、さらに溶解あるいは吸収された成分が攪拌液内で化学反応を生ずることもあるから反応速度の促進が目的であることもある。また固体粒子の溶解やガス吸収とは逆に過飽和状態の母液から砂糖やグルタミン酸ソーダの結晶を生成させる晶析や原料液中の揮発性成分、その他溶存ガス体を除去する脱気などを目的とする場合もある。このように攪

拌操作は非常に多くの目的に利用されていることがわかるが、これらの内容をもう少し分析してみよう。例えば単に混合と称しても、たがいにまったく可溶な二液を混合して均一濃度の混合溶液をつくる場合のように、もっとも素朴な意味でのいわゆる混合（以下均一化混合と称することにする）、マヨネーズやドレッシングオイル、ペイント類塗料などのようにほとんど溶解し合わない気体や液体、固体微粒子と液との分散質、すなわちいわゆる乳濁剤や懸濁液などといわれるものをつくるための混合（以下均一化分散と称することにする）とがある。そして後者の場合には均一化混合のプロセスとともに分散相たる気泡や液滴を微細化するという力学的な粉碎作用のプロセスがしばしば攪拌によって進行させられる（以下微粒化分散作用と称する）。この微粒化分散作用は、なるべく均質で密な分散質をつくるという混合の目的ばかりではなく、ガス吸収や抽出を目的とする攪拌においても非常に重要な役割を果し、気泡や液泡を細分化して周囲の液との接触界面積を増大することによって吸収や抽出が非常に促進されることになる。さらに一見まったく反対の効果あげる例としては、微細な懸濁物を口過して清浄な液を得るために凝集剤を添加して攪拌混合する場合があるが、これは凝集剤を液中に混合させるためのみではなく、微細粒子が凝集粗粒化するためにはたがいに接近衝突する機会が必要だからで、攪拌による液の相対移動と混合が分散状態の不均質化、成分分離を招来する一例である。これに似た現象は抽出後の液-液分散相の分離プロセスのあるものにもみられる。もちろんこのような場合には適度の攪拌を行なうことが必要で、過度に強い攪拌はせっかく凝集粗大化した懸濁粒子をふたたび破壊、細分化してしまう。また固体粒子の溶解を目的とする攪拌では、固体粒子の表面の液を絶えず流し去って更新させ、粒子表面と接触液との間の溶質濃度差をつねに大きく保つことが物質移動速度、すなわち溶解速度を大にするための条件であるが、このためには固体粒子群が槽底に沈着堆積しないで絶えず液中にばらばらに浮遊化するか、少なくとも槽底上で分散流動化していなければならない。したがってこの場合には、粒子を槽底に沈着させないように流動浮遊化させるという力学的な作用がまず期待される。一方、伝熱攪拌の場合には現象はより簡単で伝熱面は槽壁やコイル壁など装置に固定した面であるのが通常であるから、伝熱面上での熱移動速度、すなわち伝熱速度を高めるには伝熱面上での液流速を極力早くすることがまず第一である。その他、反応を目的とする攪拌例もはなはだ多いが、反応の進行は成分間の混合接触によりはじめて可能であるから、混合均一化あるいは物質移動促進を目的とする攪拌操作と関連が深い。かつ反応速度は温度条件にいちじるしく影響されるので反応温度の調節がきわめて重要で、1つには槽内の温度分布を一様にしたいという場合があるが、これは均一化混合の攪拌の場合と同じと考えてよく、もう1つは絶えず、あるいは迅速に液を希望温度にするために加熱冷却の能力を十分にするという点であるが、これはすなわち伝熱攪拌操作である。ただし、反応はすこぶる変化に富むものが多く、逐次反応、競争反応などの複雑な反応プロセスでは攪拌条件が反応結果に微妙に影響することもあり（例えばわが国では永田らの報告¹⁾などがある）、各場合に応じていろいろな現象の考察解析が必要である。

このように、攪拌操作の目的、さらに攪拌のプロセス中に現われる諸現象は、化学工学でいわゆる単位操作と称せられる伝熱、ガス吸収、抽出等々のほとんどの分野にまたがっており、もちろん

反応工学との関連も密接である。この点、他の単位操作の多くがなにか特長的な単一目的、ないしは単一機能をもっているのに対比して攪拌操作の対象はあまりに広く、そのためにすっきりしない性格がみられる。これがすでに述べたように攪拌の理論的、あるいは工学的な体系化の障害となっているのであろうが、一面には攪拌操作の普遍性と重要さを示すものともいえよう。

純粋に現象解析の立場からみれば、攪拌における諸現象は他の単位操作の場合と同じく、窮極的には物質と熱および運動量の移動に関する諸理論に基づいて分類解明されるべきであろう。しかし現実には即して攪拌操作の特質を考えるならば、攪拌操作とは攪拌翼の回転その他適宜の手段で装置内の流体を適切な流動状態に導くことによって当面の種々の目的を達成することであろう。そして攪拌される流体は他の装置内ではみられないような激しい流動状態を強制されるのが一般である。したがって、攪拌操作の認識は1つは槽内の液の流動状態と、それに加えてもう1つは液の流動状態と種々の攪拌目的がどのような因果関係で結びついているかという2点の解明、いいかえると液の流動状態と熱や物質移動の現象やその他すでに引用した微粒化分散作用などの力学的な現象とがどのように関連しているかという点についての考察理解に基づいてなされねばならない。

このような現象解析の点に留意しながら攪拌操作を考えるが、大まかにはまず従来からの見方にしたがって、便宜的に攪拌の対象物による分類を示し、内容については現象的な面に立入って述べる。

1-1-1 液—液系の攪拌

1) 均相系 (たがいに可溶な液—液系)

濃度や密度、その他の物性、あるいは温度などの均一化が目的である場合の他、最終目的が化学成分間の反応にある場合も含める。

2) 異相系 (たがいに完全には溶解しない液—液系)

分散相側の液滴径をなるべく微細にして、できるだけ均質な分散質を得るのが目的である場合の他、最終目的が液—液抽出による特定成分の移動分離である場合や、抽出された成分と抽剤、あるいは抽剤中に含まれる他成分との反応にある場合も含む。なお、最終目的が特定成分の移動分離であるとか反応である場合には、必ずしも槽内全体が均質な混合分散状態である必要はなく、むしろ槽内のある場所に局部的に攪拌混合作用の激しいところ（一般には攪拌翼内部）があり、槽内の液が循環して順次そこへ送り込まれて強い攪拌作用を受けるということで十分なことが多い。というのは、大きな攪拌槽内の全液をすべて一様に激しく攪拌するということは装置構造、設計や動力消費の点から考えても大変なことであるし、また攪拌操作の事後処理から考えてそのような攪拌の仕方が必ずしも望ましいとはかぎらないからである。例えば、抽出を目的とする場合に液滴があまりに細かくなり安定な分散質を形成してしまうと、抽出終了後に抽残液と溶剤液との分離が困難になる、などである。このように攪拌翼内部を強攪拌部とみなし、攪拌翼からの吐出し流による槽内液の循環作用を合せ考えた攪拌機構については後に1-5節で述べる。

1-1-2 気—液系の攪拌

この場合も、単に微細気泡を液中に分散させて均質安定な分散質を得ることが目的な場合と、攪

拌液中に吹込んだガスを液中に吸収溶解させ、あるいはさらに液中成分と反応させることが目的の場合があり、後者の場合には前記 1-1-1 の後半で述べたと同様なことがいえる場合が多い。

なお、攪拌翼を攪拌液中に挿入して回転するかわりに、吸収させるガスや圧縮空気または不活性窒素ガスなどを槽底から液中に吹込み、気泡の上昇により槽内に流れを誘起させて攪拌を行なうこともあるが、ガス吸収の場合は別として、これは単に攪拌の手段としてガス吹込みを行なっているにすぎない。

1-1-3 固一液系の攪拌

固体微粒子を液中に懸濁させて均質なスラリーを調整する目的や、均質度の調整というよりも単にスラリー中の固体粒子の沈降堆積を防止する程度の目的などで攪拌する場合の他に、固体粒子の溶解、さらに溶解成分の液中での反応、あるいは逆に過飽和溶液からの結晶の析出のように晶析操作における結晶粒度の調整などの目的がある。

固体粒子の溶解を目的とする場合は、粒子を液中に均質に懸濁させる必要はなく、粒子が槽底に沈着堆積しない程度の攪拌で十分である。それ以上の強い攪拌はいたずらに攪拌動力の消費のみ大で、溶解の効果はそれほどあがらない（詳細は第2章参照）。しかし、比重の大きい粗い粒子ではこのような状態も実現がむずかしいことがある。晶析の場合における結晶粒度の調整のための攪拌は非常に微妙困難な問題が多く未解決の点が多い。

1-1-4 伝熱攪拌

これは攪拌対象物の相の形態からいえばもちろん固一液系（伝熱面一液系）であるが、伝熱面は槽壁またはコイル面など装置自体に固定されているのが一般であるから、一応区別してあげる。

攪拌による伝熱性能の向上には伝熱面上の液境膜伝熱抵抗の減少を図ることがもっとも重要であるから、伝熱面に接する液流速の増大がまず第一で、これは面上の境界層伝熱理論からも明らかのように、流れのレイノルズ数 Re を大にすることである。なお、伝熱攪拌では伝熱速度の向上のみならず、槽内の液温の均一化、すなわちすでに述べた均一化混合作用も当然期待されている場合が多いが、低粘度液ではこの要求はそれほど問題なく満足されることが多く、特に強調されることはない。しかし高粘度液では槽内液の温度分布は均一になり難く、十分留意しなければならない。

なお、攪拌系の均一化、物質および熱移動などの現象面から攪拌操作の機能を分類したのが表 1-1 であるが、この分類を通覧しても液滴や気泡の微粒化分散や固体粒子の流動化など力学的作用がいくつもの項にわたって関連しており、それぞれの重要なプロセスとして現象を解析する必要があることがわかる。また液一液および気一液異相系においては、界面現象が主役を演ずることが多いので物理化学的作用を無視することはできないが、この方面に関しては残念ながらあまりに微妙で未知な現象が多い。

表 1-1* には、後述の 1-3 および 1-5、1-6 と関連して攪拌効果の表示法や攪拌効果に強く寄与する操作条件なども併記してある。それらについては順次後節および次章以下の内容を参照された

* 表 1-1 の作成については伊藤の発表²⁾ を参照した

い。

1-2 攪拌の方法

攪拌とは要するに当面の目的を達成するのに有効な流動状態を液体に生じさせてやればよいのであるから、いかなる方法によってこれを行なうかは任意なわけである。しかし経験的、経済的あるいは習慣上の便宜的な面から従来もっとも多く用いられているのは、周知のとおり、種々の形状の攪拌翼を回転して直接槽内の液を流動させる方法である。翼の型式は例えば図1-1に示すようなものが代表的なものであるが、もちろんこの形状にかぎらず、例えば矩形あるいは菱形、短冊形、楕円形などの板、丸棒、三角断面をもつ棒などさまざまで、詳細にいたっては千差万別と称してもよい。流動発生型の型、すなわち翼の運動によって発生するいわゆる液のフローパターンからはごく大まかに、輻流型と軸流型にわけられ、輻流型とはパドル型やタービン型の攪拌翼で代表されるように翼回転の遠心作用で流れが翼の半径方向にも相当強く発生するもの（翼端から出る流れを吐出し流という）、一方軸流型はプロペラ型の攪拌翼で代表されるもので回転軸方向の強い推力により軸方向の流れが相当強く発生するものである。しかしさまざまな攪拌機をこの2つの系列に分類することは明らかに不当で、いわば従来の攪拌翼型式の2つの代表形と考えるべきであろう。

パドル型とタービン型の翼については液のフローパターンに根本的な差はないが、タービン型翼には円板が付随するため、翼を境として上下空間の液の間の混合はパドル型翼よりもわるく、一方ガス吹込み攪拌などの場合には円板下にガスをおる程度保持して分散を安定化する傾向があり、一長

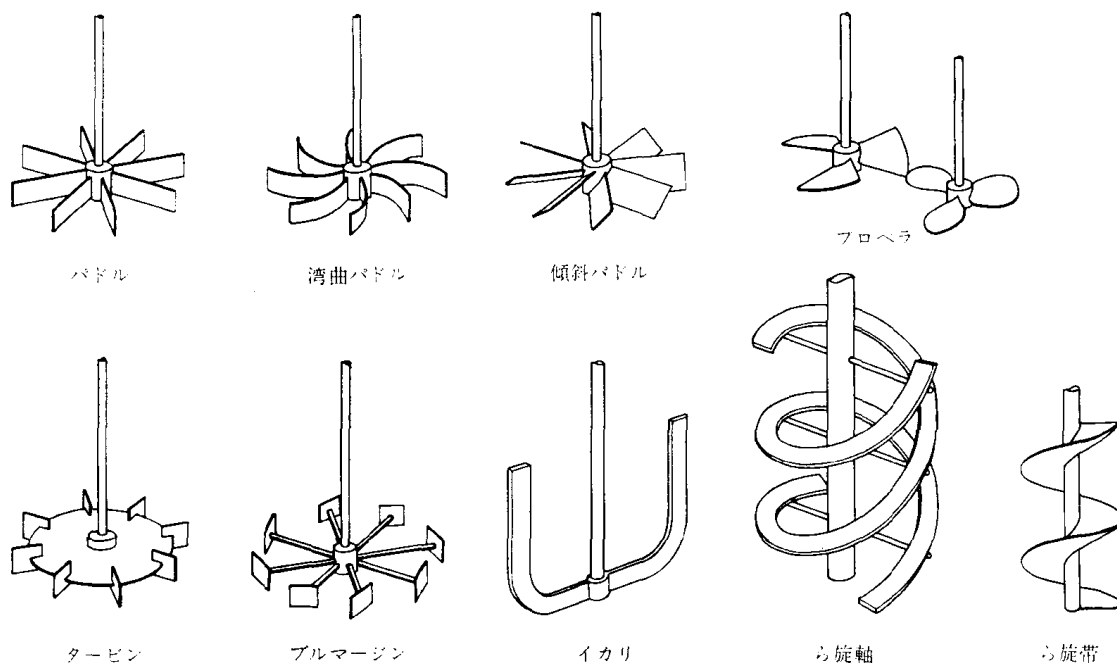


図1-1 攪拌翼のいろいろ

表1-1(1) 攪拌操作の目

目的	操作	系	攪拌効果の表示	攪拌効果に寄与する主因子
〔Ⅰ〕均一化	(1)混合	均相 液-液系 (可溶)	- 混合時間: T_M, またはその無次元化数: $T_M \cdot n$ - デッドスペースの有無 (大小) - 滞留時間分布: $f(t)$	- 対流循環: 攪拌翼吐出し性能 $N_q d, V/qd \propto 1/n$ - 乱流拡散: 乱流拡散係数 $D_{\text{turb}}, D^2/D_{\text{turb}} \propto 1/n$ $T_M \propto 1/n$
	(2)分散	(a)異相 液-液系	- 均一化時間: T_M - 分散相の分散度を示す量. 例えば分散質中の分散相比表面積 a, あるいは分散相の粒径分布など	- 流れの微粒化分散作用: 単位液量当たり攪拌消費動力 P_V $a = F(\rho, \nu, \sigma, \phi, P_V), a \propto 1/d_p$ d_p: 粒径 - 物性, 特に界面の諸性質や現象がいちじるしく影響する
		(b)気-液系	同上	同上
		(c)固-液系	- 浮遊限界攪拌速度 n_c [rps] または N_c [rpm] - 分散度: 濃度 C または比表面積 a の分散の均質さ	槽底 (固体粒子沈着堆積部分) における液流動状態 実際問題として, 関与する因子は複雑で, 槽底の形状, 攪拌方法, 粒子の形状, 性質, 投入量などが重要な影響をもつ 攪拌速度 $n > n_c$ であることが必要である
〔Ⅱ〕物質移動	(1)溶解	固-液系	- 溶解速度: $w = -\frac{dW}{dt} = V \frac{dc}{dt}$, または $w_{\text{mean}} = \frac{c_m - c_0}{t_m}$ - 固体粒子表面における液境膜物質移動係数: k_L $w = A k_L (c_s - c)$ A: 分散相表面積, V: 液容積, c_s: 飽和濃度, c: 濃度	流れの浮遊流動化作用 $\rightarrow$ 〔Ⅰ〕(2)(c) k_L, K に対する攪拌効果は比較的弱く, w は主として a の値に支配される
	(2)抽出	液-液系	- 抽出速度: w - 分散相の分散度 $\rightarrow$ 〔Ⅰ〕(2)(a) - 液滴表面内外部の液境膜物質移動係数: k_{La}, k_{Lc} または総括物質移動係数: K $w = AK(y^* - y), A = aV$ $y^* = mx, \frac{1}{K} = \frac{m}{k_{LR}} + \frac{1}{k_{LE}}$	同上 (m: 分配係数, V: 液容積 x: 抽残相中の被抽質濃度 y: 抽液相中の被抽質濃度 y^*: x に平衡な y の値 k_{LR}, k_{LE}: 抽残相または抽液相の境膜物質移動係数 (k_{LR}, k_{LE} のいずれかがそれぞれ k_{La}, k_{Lc} に相当)

的 お よ び 性 能 表 示

スケールアップ因子 ¹⁷⁾ (処理能力比=体積比)	算 出 式 の 例	文 献
n	(攪拌翼による混合) $\frac{1}{T_M \cdot n} = k_2 \cdot \left\{ \left(\frac{d}{D} \right)^3 \cdot N_{qd} + 0.21 \left(\frac{d}{D} \right) \sqrt{\frac{N_p}{N_{qd}}} \right\} \cdot \{1 - e^{-13(d/D)^2}\}; k_2 = 0.092$	18)
	(噴流攪拌による混合) $\frac{d_n}{T_M \cdot v_n} = k_3 \cdot (Re_n)^\alpha \left(\frac{d_n}{D} \right)^{1.5} \left(\frac{d_n}{H} \right)^{0.5};$ $\begin{cases} 1 \times 10^3 < Re_n < 5 \times 10^3 & \text{で } k_3 = 3.6 \times 10^{-5}, \alpha = 1.0 \\ 5 \times 10^3 < Re_n < 1 \times 10^5 & \text{で } k_3 = 0.18, \alpha = 0 \end{cases}$ $Re_n = \frac{v_n \cdot d_n}{\nu}$, d_n : ノズル内径, v_n : ノズルよりの噴流速度, H : 液深さ	25)
P_V	$a = 72 \frac{n^{1.2} \cdot d^{0.8} \cdot \bar{\rho}^{0.6} \cdot \phi}{\sigma^{0.6} \cdot f_\phi},$ $\begin{cases} \bar{\rho}: \text{液平均密度 [g/cc]} \\ \sigma: \text{界面張力 [dyne/cm]} \\ \phi: \text{分散相の容積分率 [-]} \\ f_\phi: \phi \text{ の函数} \rightarrow \text{図1-25 参照} \end{cases}$	4)
同 上	同 上	同上
ほぼ P_V	$N_c = 60n_c = C \cdot D^{-2/3} \cdot d_p^{1/3} (\Delta\rho/\rho)^{2/3} \cdot \nu^{-1/9} \cdot \lambda^{-1}$ ただし $\lambda = \left(\frac{1}{1.89} \cdot \frac{V_p'}{V_p} \right)^{0.7} = 0.64 \left(\frac{V_p'}{V_p} \right)^{0.7} [-],$ 液平均密度 $\bar{\rho} = 1.07 \sim 1.09$ 範囲, それ以上粒子濃度大のときは $N_c \propto \bar{\rho}^{2.2}$ で増大 C の値: $\begin{cases} \text{邪魔板なし: } C = 190 \sim 250 \\ \text{(偏平底面} \sim \text{球形底面の槽)} \\ \text{邪魔板つき: } C = 250 \sim 350 \\ \text{槽底に特殊邪魔板設置の場合: } C < 200 \end{cases}$ 攪拌翼; パドル形 $\begin{cases} d_{opt}/D = 0.5 \sim 0.35 \\ b/D = 0.5 \sim 0.15 \end{cases}$, 底面よりの挿入高さ $H_p/D = 0.3$ $\begin{cases} D: \text{槽内径 [m]} \\ d_p: \text{粒径 [mm]} \\ \rho: \text{液密度 [g/cc]} \\ \Delta\rho: \text{密度差 [g/cc]} \\ \nu: \text{液動粘度 [c.s]} \\ V_p: \text{粒子の真容積} \\ V_p': \text{粒子の見掛容積} \end{cases}$	19)
P_V (V_L)	$Sh_D \equiv \frac{k_{Lc} \cdot D}{D_f} = 0.16 \cdot \left(\frac{D^2 n}{\nu} \right)^{0.62} \cdot (S_c)^{0.5};$ $\left(\frac{D^2 n}{\nu} \right) > 6.7 \times 10^4$ の場合 $Sh \equiv \frac{k_{Lc} \cdot d_p}{D_f} = 2 + 0.31 \cdot \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot \frac{d_p^3 g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot (S_c)^{1/3};$ $n \sim n_c$ の場合 Sh_D, Sh ; Sherwood No., $S_c \equiv \frac{\nu}{D_f}$: Schmidt No., g : 重力加速度, ρ, ν : 連続相側の液密度および動粘度	20) 21)
同 上	同 上	同上

表1-1(2) 攪拌操作の目

目的	操作	系	攪拌効果の表示	攪拌効果に寄与する主因子
	(3)ガス吸収	気-液系	- 吸収速度: w - 気泡分散度: $a \rightarrow [I](2)(a)$ - 気泡表面内外部のガスおよび液境膜物質移動係数: k_G, k_L, または総括物質移動係数: $K_G(K_L)$ あるいは - 容量吸収係数: K_V $w = AK_G(p - p^*) = AK_L(c^* - c) = VK_V(p - p^*)$ $A = a \cdot V, K_V = K_G \cdot a$ $\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{1}{Hk_L}$ $\frac{1}{K_L} = \frac{H}{k_G} + \frac{1}{k_L}, p^* = C/H$	流れの浮遊流動化作用 $\rightarrow [II](2)(c)$ $\left\{ \begin{array}{l} p: \text{ガス中の被吸収ガス分圧} \\ c: \text{液中の被吸収ガス濃度} \\ p^*: c \text{ に平衡な } p \text{ の値} \\ H: \text{溶解度 (ヘンリー恒数)} \\ k_G: \text{ガス境膜物質移動係数} \\ k_L: \text{液境膜物質移動係数} \\ K_G, K_L: \text{それぞれ分圧および濃度基準の総括物質移動係数} \end{array} \right.$
[III]反応		固-液系 液-液系 気-液系	- 物質移動を前提とするので[II]項参照 - 反応による反応物消費速度 > 攪拌による反応物の物質移動速度, の場合のみ攪拌強化の効果あり - 八田数 など	[II]項参照
[IV]熱移動	伝熱	固-液系	- 伝熱速度: Q - 液側境膜伝熱係数: h_L, または総括伝熱係数: U $Q = AU(\theta_L - \theta_m)$ $\frac{1}{U} = \frac{1}{h_m} + \frac{\chi_w}{\lambda_w} + \frac{1}{h_L}$ ただし, $\left\{ \begin{array}{l} \theta_L, \theta_m: \text{流体および熱媒体側温度} \\ h_m: \text{熱媒体側境膜伝熱係数} \\ \chi_w, \lambda_w: \text{伝熱壁の厚さおよび熱伝導度} \end{array} \right.$	伝熱面上における液更新速度 $\rightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{攪拌レイノルズ数: } Re \\ \text{伝熱面かきとり頻度} \end{array} \right.$ (物性値の影響 (Prandtl No: Pr) については, 伝熱壁面温度と液温度との差を考慮する必要あり)

一短である。この種のいわゆる輻流型攪拌翼を用いた場合の液のフローパターンは図1-2の上方に模式的に示してある。実線で示した流れは強い主流で、点線で示した流れは二次的な流れである。低

的 お よ び 性 能 表 示

スケールアップ因子 ¹⁷⁾ (処理能力比=体積比)	算 出 式 の 例	文 献
P_V (V_G)	(亜硫酸ソーダ水溶液の空気酸化の例) $K_V = (1 \sim 2.5) \times 10^{-5} \cdot V_s^{0.5} \cdot P_V,$ [kg mol of O₂/m³ of liquid, atm of O₂, sec] ただし, $300 \geq P_V \geq 15$ [Kg·m/sec·m³ of liquid] $\begin{cases} H/D = 0.5 \sim 2, & D = 0.15 \sim 2.5 \text{ m} \\ d/D = 1/4 \sim 1/2, & b/D = 1/30 \sim 1/10 : \\ & \text{2枚羽根パドル} \sim \text{16枚羽根円板タービン} \end{cases}$ V_s: ガス吹込み空塔速度 [m/sec]	22)
Re , かきとり速度	• ニュートン流体 (乱流) ジャケット: $Nu \equiv \frac{h_{Lj} \cdot D}{\lambda} = K \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot (\mu_b/\mu_w)^c$ 15) $K \doteq 0.4, a = 2/3, b = 1/3, c = 0.14$ コ イ ル: $Nu \equiv \frac{h_{Lc} \cdot D}{\lambda} = K \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot (\mu_b/\mu_w)^c$ $K \doteq 0.9, a = 0.62, b = 1/3, c = 0.14$ μ_w, μ_b はそれぞれ伝熱壁面温度および液本体温度における粘度値 • 非ニュートン流体: 有効レイノルズ数 Re^*, 有効プラントル数 Pr^* などを 16) (乱流) 用いて上式利用可能 擬塑性液: $\tau = \kappa \dot{\gamma}^m$ で, $8 \times 10^5 > Re^* > 300$ の範囲に対して 見 掛 け 粘 度: $\mu_a = \kappa_b \cdot \left\{ \beta \frac{2\pi}{(D/d) - 1} \cdot n \right\}^m, \beta = 14$ 有効レイノルズ数: $Re^* = \rho d^2 n^{2-m} / \kappa_b \left\{ \beta \frac{2\pi}{(D/d) - 1} \cdot n \right\}^{m-1}$ 有効プラントル数: $Pr^* = \frac{c_p \kappa_b}{\lambda} \cdot \left\{ \beta \frac{2\pi}{(D/d) - 1} \cdot n \right\}^{m-1}$ κ_w, κ_b はそれぞれ伝熱壁面温度および液本体温度における κ の値 • Close-clearance sweeper: $Nu \equiv \frac{h_{Lj} \cdot D}{\lambda} = K_s \cdot Re^a \cdot Pr^b (\mu_b/\mu_w)^c$ 15) $\begin{cases} Re < 300 : K_s = 1.0, a = 1/2, b = 1/3, c = 0.18 \\ Re > 300 : K_s = 0.30, a = 2/3, b = 1/3, c = 0.18 \end{cases}$ • 伝熱面搔取り式の場合: 理論的には $h_{Ls} = 8.75 \sqrt{c_p \cdot \rho \cdot \lambda \cdot N \cdot z} (\mu/10)^{-0.14}$ N: 攪拌翼回転速度 [rpm], z: スクレーパ数 [-]	(実状は 本文第 2章参 照)

粘度液 (攪拌レイノルズ数 $Re \equiv nd^2/\nu$ が大なる乱流範囲, ここに, n, d はおのおの攪拌翼の回転速度および直径, ν は液の動粘度) の攪拌にかぎっているならば, 明らかに輻流型翼の特長が明り

円筒型攪拌槽 8枚羽根バドル(タービン)型

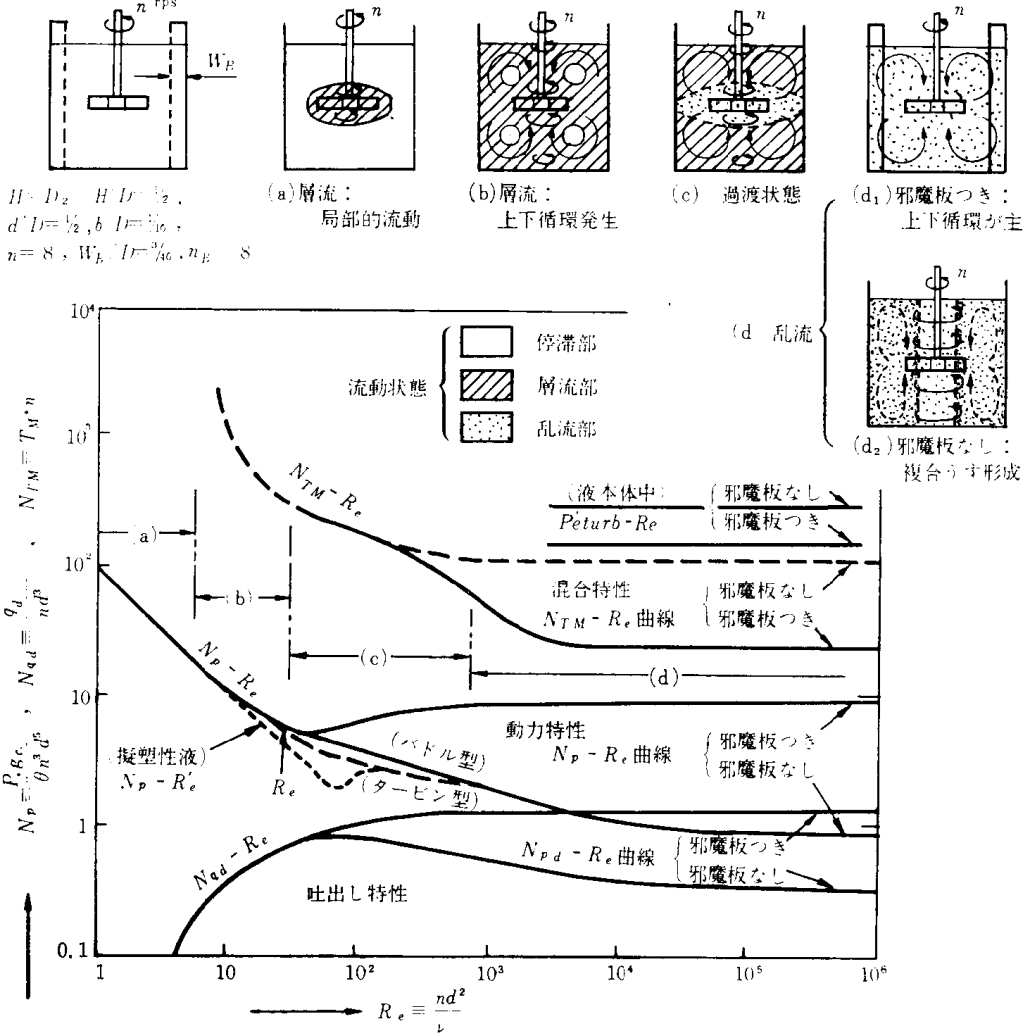


図1-2 攪拌槽内の液のフローパターンと諸性能曲線

ように発揮されるのは邪魔板を挿入した場合で、この場合は翼の回転と同方向に水平回転する液流は翼のごく近くを除いてほとんど消滅し、翼端からの強い吐出し流（幅流）およびこれに吸引同伴される液流が合流して生ずる槽内上下循環流が主流となる。この上下循環流が攪拌効果上重要な意味をもつことは後に 1-5 で述べるとおりである。邪魔板がないときは、水平回転流によりうず状の流れが生じ、それに伴って液面が低下して表面から空気が液中に吸込まれたり、うず部の中心は固体の棒状の回転をしているため攪拌混合作用が弱いなどの不都合が生じ、その防止策として邪魔板が用いられる。邪魔板を用いると図 1-2 から明らかなように強力な上下循環流の発生、また攪拌消費動力の増加などによって攪拌効果が飛躍的に増加することが多い。ただし高粘度液の攪拌（攪拌レイノズル数 $Re = nd^2/\nu$ が小なる層流の流動状態の範囲）には邪魔板の挿入は効果が少なく、むしろ邪魔板背後に液停滞部（いわゆるデッド・スペース）が生ずるなど不都合が多い。

プロペラ型攪拌翼を用いた場合の液のフローパターンは図 1-3 に示すように軸方向の吐出し流が強く、特に邪魔板または導翼を設けてプロペラの回転による回転流の発生を妨げるか、または回転流

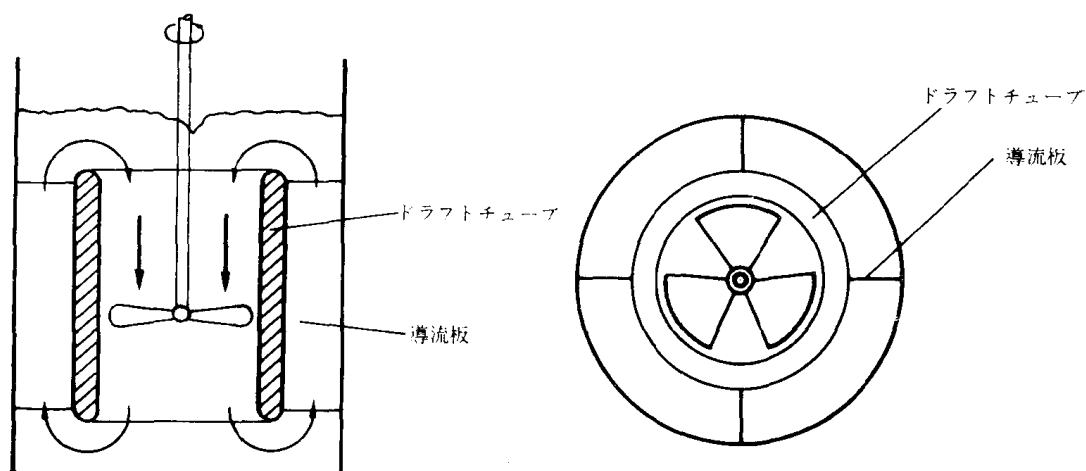


図1-3 プロペラ型攪拌機（ドラフトチューブ付）

の運動エネルギーを軸方向流れの運動エネルギーに転換してやるとこの傾向はきわめて明りょうになる。ドラフトチューブと称する円筒形のガイド（図1-3）を併用すれば、槽内の流れはさらに整然とした循環流の形になる。輻流型の攪拌翼の場合にくらべて、プロペラ型翼は攪拌消費動力の割に循環流量は格段に多く（後述1-5参照）、この点が軸流型翼の大きな特長である。このために、十分に流動させる液量範囲は輻流型翼では翼直径の6～7倍程度の範囲であるが、プロペラ型翼では後に示すように槽へ傾斜挿入したりすることによって、はるかに広範囲の液を流動させることができ、小型翼で大型槽の攪拌が可能である。ただしこれは水溶液のような低粘度液の場合である。

邪魔板は必ずしも槽壁に沿って円周上に攪拌翼の回転方向と直角に挿入する必要はなく、適当な形状と大きさをもった邪魔板、もしくは導流板を槽内の適当な位置へ任意の姿勢で挿入設置してもよく、これによって翼と同方向の回転流と軸流、あるいは輻流の強さの割合を任意に混合調整して液流の状態がもっとも好ましくなるように工夫すればよい。例えばファウドラ型（Faulder）の攪拌機と称せられるものがこの種の形式であり、また普通の邪魔板を液深一杯に槽底まで挿入せずに攪拌翼と同じ深さぐらいまでにとどめれば、槽の上半には強い上下循環流を、下半には強い水平回転流を得ることができるなど、その例はいろいろみうけられる。

また、邪魔板をまったく用いないで、図1-4や図1-5に示すように攪拌翼を攪拌槽の中心からず

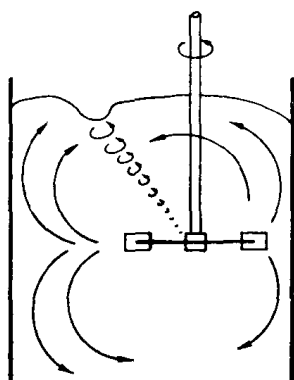


図1-4 偏心攪拌

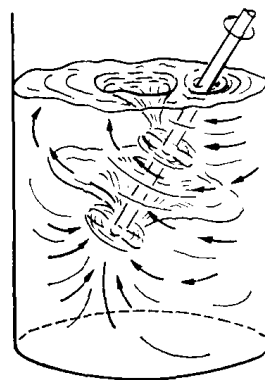


図1-5 傾斜攪拌

らして挿入したり、傾斜挿入したりすることによって翼と液との共回りの傾向を防ぎ、邪魔板挿入と似たような効果を生ずることも行なわれている。

なお、図 1-1 に示した傾斜羽根をもつ攪拌翼はプロペラ型とパドル型の翼の中間的な性格をもち、斜流ポンプのように半径方向と軸方向の中間方向へ流れを吐出する。

図 1-6 は、図 1-1 中に示したらせん帯攪拌機を用いて円筒形槽内の高粘度液を攪拌した場合の液のフローパターンを示す。高粘度液（低レイノルズ数の層流範囲）では翼のごく近傍の液が粘着して動くのみで、翼からわずかに離れた場所でも液の流動速度は急激に低下して攪拌作用がほとんどなくなる。そこで槽一杯の大きさの攪拌翼（例えば矩形板を隙間をあけて配置した作った櫛型や門型、あるいは図

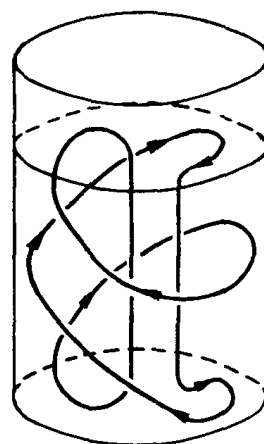


図1-6 らせん帯攪拌機による液のフローパターン

1-1 中にも示したイカリ型および上記のらせん帯型の攪拌翼）を用いるか、または図 1-3 に示したようなドラフトチューブを用いるとともに攪拌翼は図 1-1 に示すらせん軸攪拌機を用いて液を強制的に押し出し循環する。いずれにしても高粘度液の流動攪拌は液の粘着性を利用して固定面（槽やドラフトチューブ）と回転面（翼面）の間の相対運動によるか、圧力をかけて強制流動させるかの方法が主となる

ここでふたたび低粘度ないしせいぜい中粘度の液の攪拌についていろいろの攪拌法を示す。図 1-7 の方法によれば邪魔板を用いずに水平回転流を防止し、強い吐出し流が得られる。往復型では軽くて小さな翼または隙間の多い流動抵抗の少ない翼を用いて高速で往復振動する（図 1-7）ことも、流動抵抗の大きい翼を用いてゆっくり往復振動する（図 1-8）ことも任意で、目的により適宜選択できる。ただし純回転機構と異なり往復振動機構は機械的に非常にやっかいな構造となることが多く、高速化や大型化には限界がある。

図 1-9 ならびに図 1-10 は噴流による攪拌方式を示したもので、ポンプを用いて高速度の噴流が比較的容易に得られることと図 1-10 に示すような同伴流を利用して大きな循環流量が得られるこ

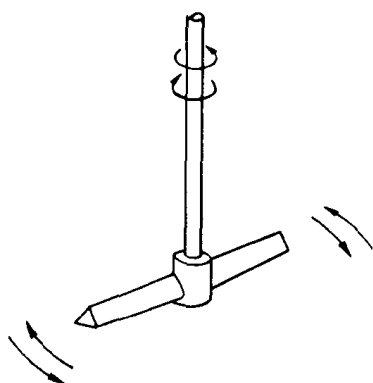


図1-7 往復回転攪拌機

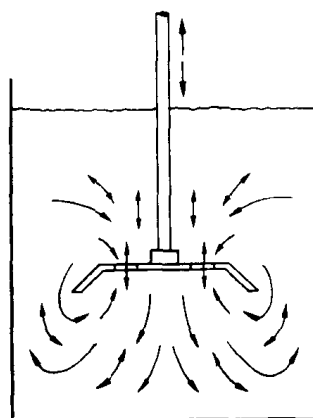


図1-8 往復動攪拌機（上下）