

攪拌技術

Mixing Technology

化工機事業部 技術部 化工機設計課
岡本 幸道
Yukimichi Okamoto

Although a mixing vessel is a rather simple equipment, it is used for a variety of operations. So, the mixing technology could be defined as an engineering method of various chemical processes using mixing vessels.

In this paper, the mixing technology is outlined through its classification into three categories, that is, flow and basic characteristics, operational characteristics, and application to chemical processes. Some of our researches on mixing operations are also represented.

攪拌槽は比較的簡単な装置であるが、それを用いる操作は多様にわたる。それ故、攪拌技術を、攪拌槽を用いる化学プロセスの工学手法であると考えることができよう。

本稿では、攪拌技術を流動および基礎特性、操作特性、そして化学プロセスへの応用技術の3種に分類して概説する。また、攪拌に関する当社の研究内容の一部を紹介させていただく。

1. 攪拌技術の位置付け

攪拌槽の計画から設計、製作、運転に至るまでの工程は複雑であり、数多くの技術が介在する。攪拌技術は、この間の前半において主要な役割をはたす技術であり、製作される装置に必要な機能と性能を判断し、それを実現するための基本的な設計を行う段階に対応する技術である。

今、第1表に示す反応系において、製品Dを得ることが目的である槽型の連続反応器を考える。この反応器に必要な機能は、液Aを水相に分散する液液接触、ガスBを水相に分散する気液接触、反応熱除去の伝熱、そして円滑な連続操作を可能とする混合の4機能である。各機能に必要な性能値は反応速度、各物性、物質収支、熱収支により決定される。この段階がプロセス計画と呼ばれる。

続いて、これらの要求性能を実現しうる攪拌槽の形状と攪拌仕様を決定する。液液接触、気液接触に対しては物質移動の容量係数 $k_L a$ を、伝熱に対しては伝熱係数と伝熱面積の積 UA を、混合に対しては液液系の分離防止限界、ガス吹抜防止限界、供給液の滞留時間と循環時間の比 $\theta_{resid}/\theta_{circ}$ を目安として攪拌槽の主要な寸法と攪拌仕様を決定する。この段階が基本設計と呼ばれる。

上記の説明の中で、プロセス計画と基本設計は無関係に見えるが、プロセスの効率という要請がある以上、プロセス計画の段階で攪拌槽の能力とプロセスの効率の関係が未検討で放置されることはありえない。むしろ、具体性のあるプロセスを計画し、その技術評価を行うためには、反応系と攪拌槽の能力に関する広範な知識が必要になる。もちろん、既設のプロセスを解析し、改良の可能性を検討する場合にも、同様のことがいえる。

このように、攪拌技術を「攪拌槽を使用するプロセスの工学手法」として位置付けるなら、攪拌技術が攪拌槽のユーザーにとって有用な知識であることがおわかりいただけよう。

第1表 反応系の一例

Table 1 An example of chemical reaction system

Reaction
$A + B \xrightarrow{C} D + \Delta H$ (exothermic)
A: reactant (organic liquid, slightly soluble to water)
B: reactant (gas)
C: catalyst (soluble in water, insoluble to liquid A)
D: product (soluble in water, insoluble to liquid A)

Note

- Reaction in water phase.
- Continuous vessel type reactor, under constant temperature and pressure.

2. 攪拌技術の分類と現状

第2表に攪拌技術の分類を示す。ここでは機械力学的な動荷重や振動の特性を除外し、化学プロセスとしての機能に関係する技術を分類している。本表に示す通り、攪拌技術は、流動および基礎特性、操作特性、そして化学プロセスへの応用技術の3項から成る。流動特性と操作特性は、本来、不可分であり、操作特性は流動特性の一面を反映する特性と考えてよい。この2項目をさらに細分化した項目は個々の特性であり、それぞれが装置形状、物性、処理量に依存する。応用技術は、これを展開する一般的なステップに分けて示す。このステップの前半はほとんどの化学装置に共通する。テスト・データの解析以降では、流動特性や操作特性の知見を駆使して、より適した装置をめざすことになる。つまり、流動特性や操作特性に関する知見は道具であり、応用技術はこの道具を使いこなす方法にあたる。以下、主要な項目について説明する。

2.1. 流動および基礎特性

攪拌槽内の流動は層流と乱流に分けられ、この間に遷移域がある。すべての攪拌特性はこれらの各領域に応じて表示されるべきであるが、現状では遷移域の扱いが明確でない場合が多い。

流動および基礎特性の中では動力特性が最も重要である。これは、設備動力を決定するという本来の目的のためではなく、動力特性が流動状態を反映する鋭敏な指標となるためである。攪拌動力に関しては永田ら^{1,3)}の著名な動力式がある。この式の利点は、理論的背景の緻密さ、適用

第2表 攪拌技術の分類
Table 2 Classification of mixing technology

Mixing Technology		
1. Flow and Basic Characteristics	2. Operational Characteristics	3. Application to Processes
i) <u>Flow Pattern</u> • laminar and turbulent • circulation ii) <u>Power</u> • power number, iii) <u>Pumping</u> • flow number iv) <u>Shear</u> • equivalent shear rate (laminar) • turbulent shear head v) <u>Baffle Effect</u> vi) <u>Others</u>	i) <u>Mixing</u> • mixing time • residence time distribution ii) <u>Heat Transfer</u> • jacket • coil or internals iii) <u>Solid Suspension</u> • off-bottom • uniform suspension • fluidization • mass transfer iv) <u>Liquid Dispersion</u> • uniform dispersion • droplet size • mass transfer, $k_L a$ v) <u>Gas Dispersion</u> • flooding point • aspiration point • gas hold-up • mass transfer, $k_L a$ • power decrease vi) <u>Others</u>	i) <u>Analysis to Operations</u> (see left) ii) <u>Decision of Required Performance</u> • property data • reaction kinetics • mass balance • heat balance • transfer rate • test data iii) <u>Basic Design</u> • mixing vessel • utilities iv) <u>Evaluation of Efficiencies</u> v) <u>Design Check</u>

範囲の広さ、および豊富なデータにある。使用上の注意としては層流域で翼と槽またはバブルとのクリアランスに留意すること、乱流域で翼枚数、バブル効果、液深、翼位置の影響に関する適切な補正を考慮することの2点である。

吐出特性に関しては種々のデータが発表されているが、これを統一して表現することは難しいようである。

剪断特性については幾つかの定義がある。よく用いられる特性は、層流時に非ニュートン流体での動力を算出する際の装置定数として規定される平均剪断速度と、乱流時に翼近傍の攪拌状態を表現する乱流剪断速度頭である。後者は過剰攪拌を防止する必要がある操作、例えば、担持触媒やラテックスの攪拌で有効な指標となる。

2.2. 操作特性

混合時間それ自体が重要である操作は希であり、例えば粘度比がきわめて大きい2液の混合のような特殊な操作に限られる。むしろ混合時間の相対的な変化によって操作や装置の問題点を評価する機会が多い。乱流時の混合時間の推定には山本²⁾の研究が役立つ。

伝熱特性に関しては、その実用面での必要度から、多く

の報告があり、永田・西川³⁾の一連の研究は適用範囲が広い。

固液系の攪拌では、浮遊化限界 (off-bottom), 均一化限界, 流動化限界の各特性が重要である。浮遊化限界は堆積した粒子がなくなる状態を、均一化限界は槽内の粒子濃度がほぼ一樣になる状態を表し、前者は回分操作での、後者は連続操作での攪拌条件選定の目安となる。流動化限界は翼が完全に埋没するような沈降粒子層がやや膨張し流動化する状態を表す。これらはいずれも沈降性のスラリーに関する特性であるが、浮上性のスラリーについても同様の特性があると考えてよい。

相互に不溶の液液系攪拌についても固液系と類似の特性がある。軽液重液の分離防止限界と均一化限界である。固液系では浮遊化限界と均一化限界が攪拌速度で2倍程度異なる場合があるのに対し、液液系では分離防止限界と均一化限界の攪拌速度に10%程度の差しかなく、事実上は同じと見なせる。

固液系、液液系の上記の特性については、永田³⁾、大山⁴⁾、Tweitering⁵⁾、Skelland⁶⁾の報告を参照された。

気液系攪拌にはガス吹込と液面からの吸引による2方式があり、通常はガス吹込が用いられるが、プロセスによっては液面からの吸引に頼る場合もある。それぞれの操作下限は吹抜限界と吸引限界にあたる。この操作はほとんどの場合にガス吸収を目的とするため、実際の攪拌条件はガス吸収速度に関する性能値 $k_L a$ を基準として決定することが望ましい。ガス吹込の $k_L a$ については通気線速と攪拌動力による相関式⁷⁾が、液面からの吸引による $k_L a$ については吸引限界を基準とする相関式⁸⁾がある。

なお、固液系、液液系でも溶解速度や抽出速度が主要な因子となる場合は、気液系と同様 $k_L a$ を基準に考える必要がある。

以上で攪拌槽の主要な特性を説明し終えたが、公表された報告のみを頼りにこれらの特性を算出する際、障害となる問題は少なくない。例えば、装置形状や物性の影響が表示されていないとか、流動上遷移域に入っても推定可能かどうか、さらには、必要な特性に関する報告自体がないという事態もありうる。このような場合に有効な方法は、その特性を支配する現象と流動状態の関係を考えることである。この関係から求める特性の相関式が直ちに規定できる場合もあり、あるいは、類似の現象において他の特性と攪拌条件の関係が明確にされているなら、それを利用することも可能である。実際、混合時間、伝熱係数および溶解、抽出、ガス吸収などの物質移動に関する操作特性の相関式は上記の観点から一般化されたものが多い。このような方法はテスト・データの解析にも有効である。

2.3. プロセスへの応用

前章に示した反応例を再び扱うことにし、ここでは実機での反応実績がないという前提をとる。既に反応プロセスを各操作に分解する手順は前章に示した。

ビーカースケールでの実験により反応速度上の特性が解明され、この反応が原料A、Bの2次の合成反応と製品Dの1次の分解反応から成る平衡反応であったとする。A、Bの水相への飽和溶解度 $[A]^*$ 、 $[B]^*$ 、反応速度定数 k_1 、

第3表 反応プロセスの解析

Table 3 Rate analysis of reaction process

1. Reaction rate in water phase

$$A + B \xrightleftharpoons[k_1]{k_2} D$$

$$\frac{d[D]}{dt} = k_2[A][B] - k_1[D]$$
2. Mass transfer rate

$$\frac{d[A]}{dt} = \psi_w k_L a_{LL}([A]^* - [A])$$

$$\frac{d[B]}{dt} = \psi_w k_L a_{GL}([B]^* - [B])$$
3. Operational characteristics

$k_L a_{LL} = \text{func. (agitating conditions, related properties, ratio of feed rates A and water)}$

$k_L a_{GL} = \text{func. (agitating conditions, related properties, feed rate of gas B)}$
4. Overall reaction rate

Mass balance equations to be solved

$$\frac{d[A]}{dt} = \psi_w k_L a_{LL}([A]^* - [A]) - k_2[A][B] + k_1[D]$$

$$-\frac{[A]}{\theta_{resid}} = 0$$

$$\frac{d[B]}{dt} = \psi_w k_L a_{GL}([B]^* - [B]) - k_2[A][B] + k_1[D]$$

$$-\frac{[B]}{\theta_{resid}} = 0$$

$$\frac{d[D]}{dt} = k_2[A][B] - k_1[D] - \frac{[D]}{\theta_{resid}} = 0$$

Solution
 $[D] = \text{func. } ([A]^*, [B]^*, k_1, k_2, \theta_{resid}, \psi_w k_L a_{LL}, \psi_w k_L a_{GL})$
5. Heat balance

$$Q = \frac{V\psi_w[D]}{\theta_{resid}} \cdot \Delta H + \text{Feed enthalpy} - \text{Effluence enthalpy}$$

$$= UA \Delta T$$
6. Performance required

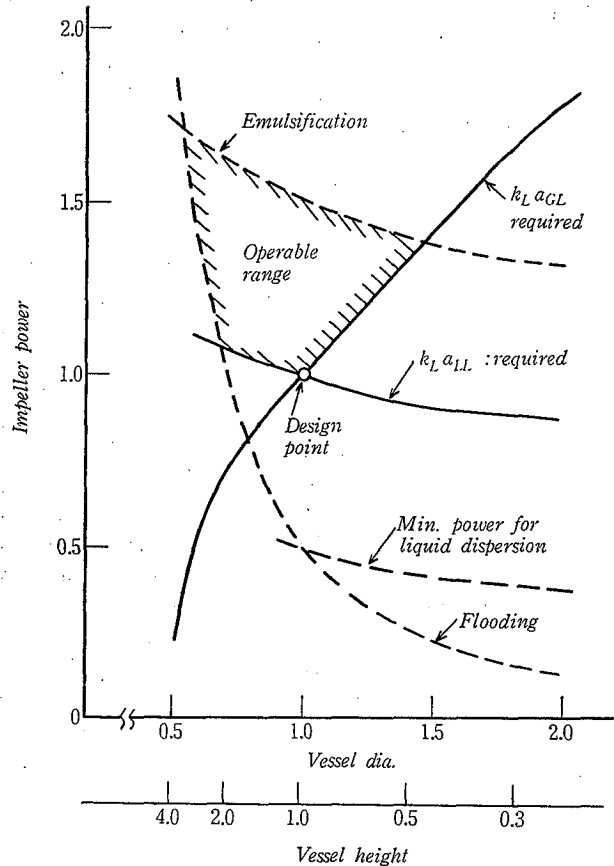
$\theta_{resid}, k_L a_{LL}, k_L a_{GL}, UA$: decided above

Note: 1) Prevent liquid A from emulsification, upper limit of $k_L a_{LL}$ is given
 2) Uniform dispersion of liquid A
 3) No flooding of gas B
 4) No short passing of water phase feed
7. Nomenclature

A: heat transfer area, k : reaction rate constant, k_{LA} : capacity coefficient of mass transfer, ΔH : reaction heat, Q : heat, t : time, ΔT : temperature difference, U : heat transfer coefficient, V : effective reactor volume, ψ_w : volume fraction of water phase, θ_{resid} : mean residence time, $[]$: concentration, $[]^*$: solubility, GL : gas-liquid, LL : liquid-liquid

k_2 の温度特性から収率を考慮した反応温度と圧力が設定される。

次に、反応条件が規定されたとすれば、反応速度と生産量から物質収支が組み同時に反応容積が決まる。連続操作の定常反応系ではAの溶解速度とBの吸収速度は反応速度に等しいから、反応条件におけるA、Bの水相濃度[A]、[B]と飽和溶解度の差から、液液分散におけるAの溶解操作の $k_L a_{LL}$ とガス分散におけるBの吸収操作の $k_L a_{GL}$ が決まる。これらの装置性能は、攪拌条件だけでなく、溶解では液Aの存在比、ガス吸収ではガスBの供給量にも依存する。したがって、実際の操作条件は液AやガスBの循環利用に対する経済評価をも含めて決定される。



第1図 分散の可能操作域と設計点

Fig. 1 Operable range and design point for dispersions

第3表は上記の関係を反応工学の手法によって表現した例である。この解析の流れは、滞留時間 θ_{resid} の反応器である運転条件で反応させれば、生産量(製品濃度[D])がどれだけになるかを求める方向で解かれているが、実際には所定の反応を遂行するのに必要な反応容積 (θ_{resid})、装置性能 ($k_L a_{LL}, k_L a_{GL}, UA$) および供給速度の相互関係を表す。この解析により上記の反応の律速因子が、反応、溶解、ガス吸収、伝熱のいずれであるかを判断でき、その判断に応じた運転条件の決定と各要求性能値の決定が可能になる。さらにベンチ・テストとの照合、計画プロセスの操作性や経済性の評価を通じて反応プロセスの仕様——反応容積、供給量、各要求性能値——が固められる。

次いで反応器の基本設計が行われる。要求仕様から各操作の難易を判断し、攪拌槽の形式を絞る。例えば、通気量が多く比較的高いガス吸収性能の要求に着目してタービン翼と板バップルの組み合わせとする。槽径と槽高の比を変えて各分散性能と攪拌動力の関係を求めると、第1図のような操作可能域と設計点を得る。各分散性能の推定誤差、他の要求性能、操作の柔軟性、製作上の検討などを考慮して、必要なら、槽径と槽高、攪拌動力の選定値を変更する。こうして決められた製作仕様案について、再度、各操作特性を求め操作上の問題がないことを確認する。さらに反応器まわりを含むプロセス全体の効率を評価し、改善の余地の有無を確認する。

以上がプロセスへの応用の概略である。現実の反応は必ずしも上記の例のように解析できるわけではない。先の例

で本当に必要なことは、第1図のような操作可能域が存在するというイメージを描くことであり、この操作可能域の中の操作により適した設計点を定める上で重要な因子が何であるかを判断することである。それが判断できれば、本当に必要な情報を適切な実験によって確認することも可能である。要はポイントとなる操作について、設計しようとする装置が必要かつ十分な機能を持つことを確かめればよいのである。もちろん、この間、絶えず推定という作業が入るので、推定誤差を正當に評価し、その範囲内の性能変動に対応可能な柔軟性を持たせることも必要になる。

なお、先の例を詳細に検討すれば、プロセス計画と反応器の設計を切り離して扱うことが不合理であることに気付かれるはずである。これは、第3表で総括の反応速度を扱った式が装置性能項を含む点によって端的に示される。つまり、装置性能が決まらなければ運転条件が決定できないということになる。見方を変えれば、反応条件、運転条件、装置条件は同時に決定されるはずであり、かつ、無限の組み合わせの中から選定されるはずである。真に合理的な決定のためには、この決定過程に評価の導入が必要になる。このような手法による決定が最適化設計と呼ばれる。

3. 当社研究内容の紹介

本章では流動および基礎特性と操作特性に関する実験研究の内容を主として紹介する。

3.1. 流動および基礎特性

1) 高粘度翼のクリアランス

高粘度液の攪拌では翼と壁のクリアランスの小さな翼を使用することが多い。第2図はヘリカル・リボン翼とスクリー翼について動力定数($N_p \cdot Re$)とクリアランスの関係調べた結果である。クリアランスがある値以下になると動力定数の増加がなくなる。永田ら³⁾の伝熱実験の結果も比較してあるが、スクレーパーの有無による差異から伝熱についても同じ傾向があると考えられる。

2) 遷移域の攪拌

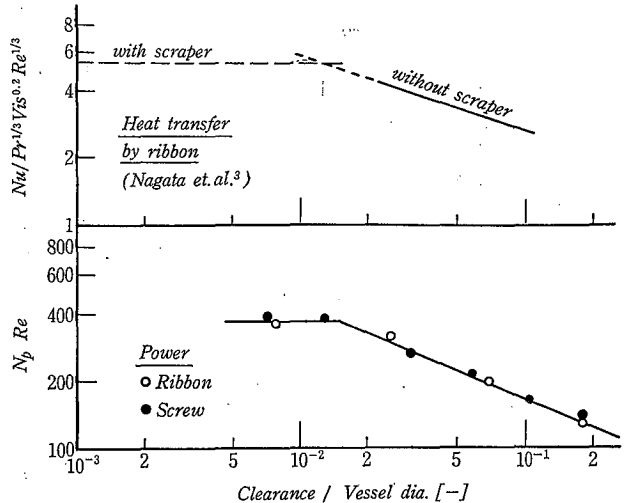
層流用あるいは乱流用の翼が遷移域での攪拌に対しどの程度有効であるかを判断する材料として、それぞれの翼の混合時間特性を目安とする方法がある。第3図はリボン翼、ループ翼(ゲート翼の変形)、フアウドラー翼について、動力数 N_p と混合時間 $n\theta$ を測定した結果である。 $n\theta$ が急激に変化する Re 域での操作は難しいと考えた方がよい。本図の中ではゲート翼の一種であるループ翼が遷移域での攪拌に比較的適する。

3) 乱流翼の動力・吐出特性比較

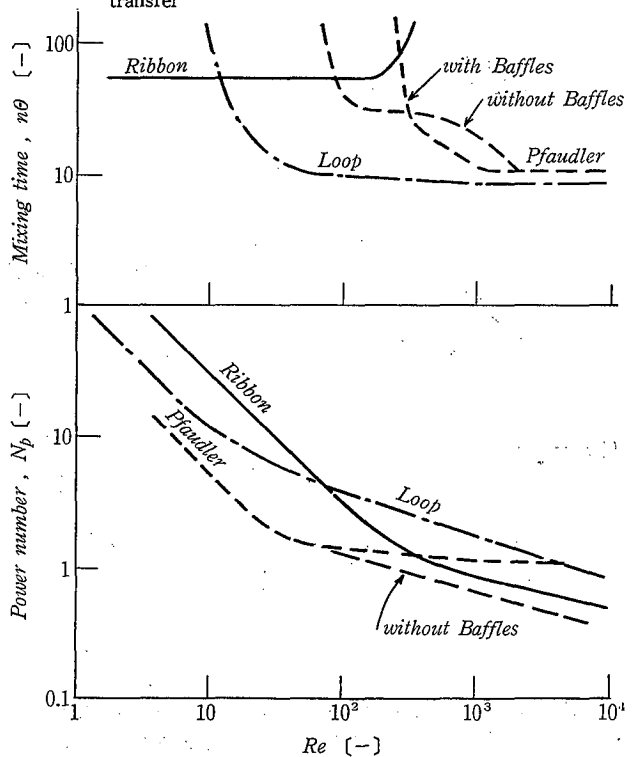
乱流攪拌には多様な攪拌翼が用いられる。これらの翼を使いわけると基本になる特性は動力数と吐出流量係数の比 N_p/N_q である。第4図は種々の乱流翼について N_p/N_q の相互関係を調べた結果である。傾斜翼や後退翼は攪拌動力を吐出循環動力として利用する効率を高めるのに有効である。ただし、これが実際の操作の動力効率向上に結び付くか否かは、既報⁹⁾に示したように別途検討を要する。

4) バッフル効果と多段翼の動力推定

乱流攪拌での流動はバッフルの存在に対し敏感である。バッフル自体に流れを制御する機能があり操作によっては過剰なバッフルが有害になることもある。バッフルの過剰



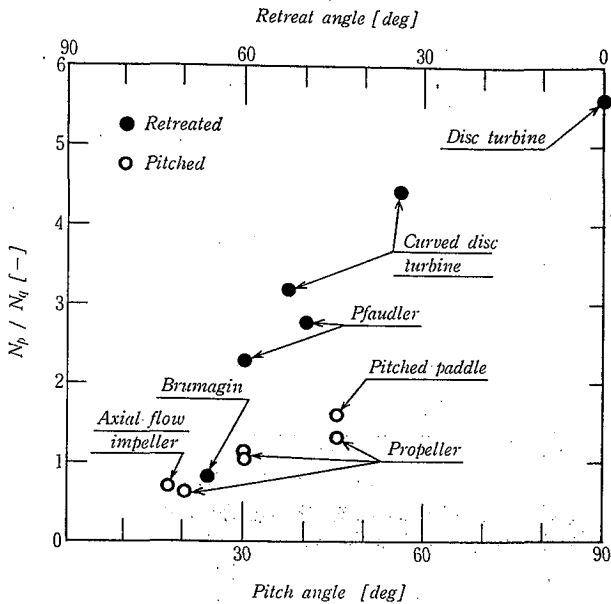
第2図 動力および伝熱に対する翼と壁のクリアランスの影響
Fig. 2 Effects of impeller-wall clearance on power and heat transfer



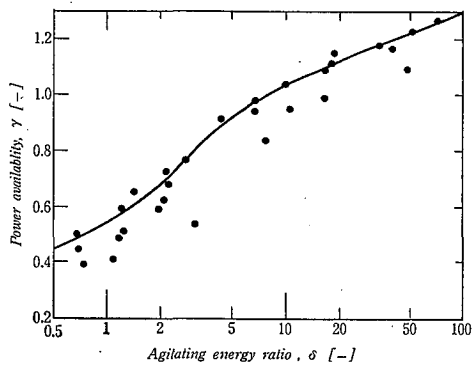
第3図 遷移域の動力数と混合時間
Fig. 3 Power number and mixing time in transition region

を判断する目安として、動力と液深の関係を調べる方法がある。液深の増加による顕著な動力増大が認められる間はバッフルを追加して差し支えないが、動力増大傾向が極端に弱まる時点でのバッフル追加は混合に悪影響を及ぼす。

上記の方法は間接的に液面近辺の攪拌流動の強さを判断していることになる。当社の多段翼の動力推算式はこの考え方を応用したものである。多段翼攪拌での補助翼の動力はその翼が単独で消費する動力とは大幅に異なる場合が多い。両者の動力の比を動力有効度 γ とする。次に、着目する補助翼による攪拌流動の強さと主翼による攪拌流動の強さとの比を δ とすると、第5図に示すように、 γ と δ の間に強い相関がある。この相関関係を図の曲線で近似すれば δ から γ が推定できる。 δ は個々の翼の動力と液深の関係



第4図 各種乱流翼の N_p/N_q
Fig. 4 N_p/N_q of various turbulent impellers



第5図
補助翼の動力有効度と攪拌流動の強さの比との相関
Fig. 5
Correlation of power availability and agitating energy ratio

によって決まるので、個々の翼の動力特性がわかりさえすれば、多段翼攪拌での動力が実用的な精度で推定できる。詳細は既報¹⁰⁾を参照されたい。

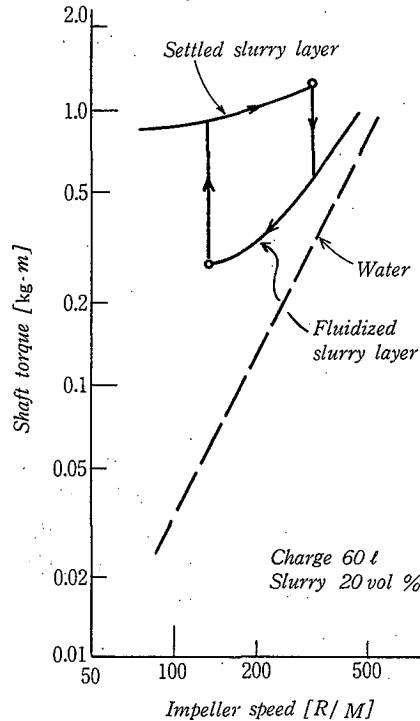
3.2. 操作特性

1) 伝熱

伝熱は最も一般的な操作であり、攪拌伝熱の能力推定を必要とする場合が少なくない。一方、この推定には非常に煩雑な手順がある。装置形状の影響をより適確に評価しようとするれば、それに応じて算出過程がより複雑になる。これを円滑に運ぶために汎用の攪拌伝熱プログラムを作成した。このプログラムは通常の縦型円筒槽であれば当社で製作したほとんどの攪拌槽に適用可能であり、ジャケット、コイル、伝熱管パツフルの総括伝熱係数が計算できる。現在このプログラムは電算機での試用段階に入っている。その出力例を第4表に示す。

2) 固液系

スラリーの流動状態はその濃度と粒径によって大幅に変化する。通常の懸濁攪拌の概念は、粒子の自由沈降が生じ得る比較的低濃度スラリーの低い範囲を対象とする。微粉の高濃度スラリーでは擬塑性流体としての挙動が見られる。この場合の扱いは層流域や遷移域での攪拌に準じる。一方粒径が比較的大きい高濃度スラリーは、攪拌速度を増すに



第6図
高濃度スラリーの流動化トルク
Fig. 6
Fluidization torque of high-concentration slurry

伴ない、沈降粒子層、流動層、そして流体としての挙動を示す。第6図は、流動化の前後での攪拌速度と攪拌トルクの関係測定した結果であり、明瞭なヒステリシスが認められる。流動化という現象については、液体の攪拌と粉体の攪拌¹¹⁾を重ね合わせることでより定量的な説明が可能になるが、ヒステリシスの下限を予想することは難しいようである。

自由沈降が生じる通常の懸濁系で留意すべき点は連続操作である。特に、沈降速度が5cm/sec以上の粒子を均一に懸濁することは事実上困難であり、粒子の滞留時間が液のそれと異なる、すなわち、容積効率が異なると考えた方がよい。この問題に関する定量的な扱いは一部既報¹²⁾に報告した。この場合の容積効率は、攪拌機の懸濁能力に強く依存すると同時に、抜き出し位置にも依存する。

3) 液液系

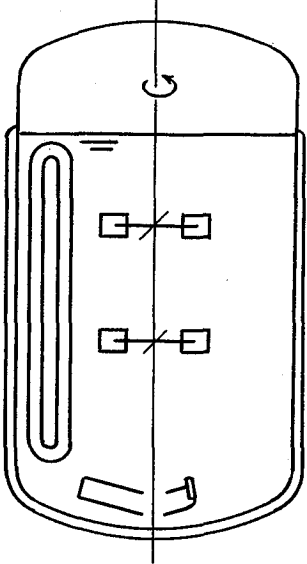
相互に不溶な液体を混合する場合、少なくとも軽液が液表面に分離層を形成する事態を防止することが望ましい。第7図は種々の形状の攪拌機についてこの条件を調べたものであり、縦軸の混合度が0.95に達した時、軽液分離層が消滅する。軽液分離防止の動力低減にはトルクの大きい翼や多段翼が有効である。なお、軽液分離防止条件のスケールアップ基準は、動力と流速の複合形となる。これは、モデル解析によって導出することが可能であり、また、運転結果もそれを裏付けている。単位液量当りの動力を基準とする従来のスケールアップ基準は、軽液分離の防止という観点ではやや安全側にある。

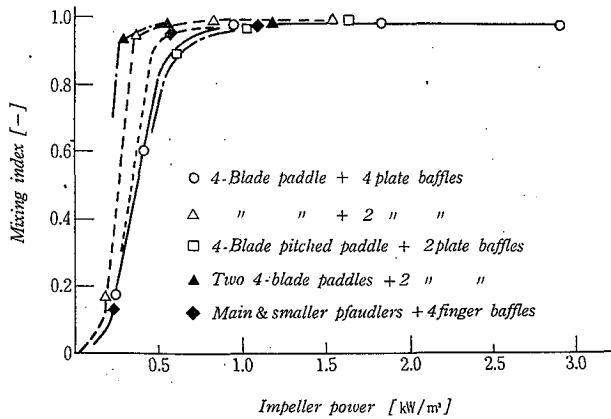
4) 気液系

通気攪拌にも実用操作域という概念が成立する。攪拌強度上のその下限は吹抜点であり、上限はガス・ホールドアップの飽和状態として現われる。吹抜点は通気時の動力低下特性およびガス吸収性能線図に現われ、通気係数、フル

第 4 表 伝熱計算プログラムの出力

Table 4 Output of heat transfer computation

OVER ALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF AGITATED VESSEL				DATE 1985. 1. 30		
<E. or O. No.> EXAMPLE <SKELTON>		<VESSEL>				
		I. D.	:	4.65	[m]	
		LIQUID DEPTH	:	6.7	[m]	
		BAFFLE WIDTH, w/D	:	.13	[—]	
		WALL THICKNESS	:	SUS 304. 003 + SM 50 B. 05	[m]	
		<JACKET>				
		TYPE	:	SPIRAL BAFFLE		
		AREA	:	100	[m ²]	
		JACKET I. D.	:	4.85	[m]	
		BAFFLE PITCH	:	.5	[m]	
		BAFFLE-WALL GAP	:	.002	[m]	
		FLOW PATHS	:	1	[WAYS]	
		<INTERNAL COIL>				
		TYPE	:	VERTICAL BAFFLE		
		AREA	:	149	[m ²]	
		TUBE O. D.	:	.2163	[m]	
		TUBE THICK.	:	SUS304 ; .0082	[m]	
		No. OF COILS	:	10		
		FLOW PATHS	:	2	[WAYS]	
		TUBE LENGTH	:	22	[m/coil]	
<FLOW RATE>		JACKET SIDE	:	200	[m ³ /hr]	
		COIL SIDE	:	350	[m ³ /hr]	
<AGITATOR>						
ROTATING SPEED	:	60	[RPM]			
TYPE	:	FLAT PF.	TURBINE	TURBINE		
SPAN [m]	:	2.6	2	2		
No. OF BLADES	:	3	6	6		
BLADE WIDTH [m]	:	.4	.4	.4		
PITCH [deg]	:	90	45	45		
RETREAT [deg]	:	50	0	0		
IMP. HEIGHT [m]	:	.4	3.2	5.2		
<FLUID PROPERTIES>						
	TEMP. [°C]	PHASE [—]	DENS. [kg/m ³]	VIS. [cP]	SPEC. HEAT [kcal/kg·°C]	HEAT CONDUCT. [kcal/m·hr·°C]
TANK	: 80	LIQ.	650	.5	.6	.15
JACKET	: 35	LIQ.	994	.696	.997	.533
COIL	: 35	LIQ.	994	.696	.997	.533
<RESULTS>						
		JACKET SIDE	COIL SIDE			
TANK LIQUID FILM	:	h _{ji} =1010	h _{co} =1450	[kcal/m ² ·hr·°C]		
TANK LIQUID SCALE	:	h _{jis} =—	h _{cos} =—	[kcal/m ² ·hr·°C]		
TANK or TUBE WALL	:	h _{jw} =740	h _{cw} =1710	[kcal/m ² ·hr·°C]		
H. T. MEDIA SCALE	:	h _{jos} =2500	h _{cis} =2500	[kcal/m ² ·hr·°C]		
H. T. MEDIA FILM	:	h _{jo} =2390	h _{ci} =3660	[kcal/m ² ·hr·°C]		
OVER-ALL U	:	U _j =317	U _c =494	[kcal/m ² ·hr·°C]		
FLUID VELOCITY	:	V _j =.895	V _c =1.55	[m/sec]		
PRESSURE LOSS	:	ΔP _j =.241	ΔP _c =.458	[Kg/cm ²]		



第7図 各種の攪拌機による液液分散
Fig. 7 Liquid-Liquid dispersion by several agitator systems

イド数、動力低下率によって表現される。そして、ガス吸収性能が攪拌動力 P_V [kW/m³] と通気線速 u_{gas} [cm/sec] によって

$$k_L a \propto P_V^\alpha u_{gas}^\beta \quad \alpha, \beta = \text{const.}$$

と単純に表示しうるのは実用操作域の内部のみである。詳細は既報¹³⁾を参照されたい。

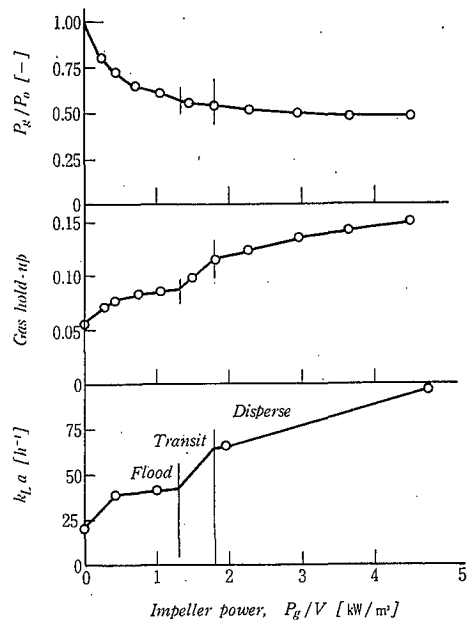
中粘度域(100~1,000 cP)での通気攪拌はその取り扱いが比較的難しい。吹抜を防止する攪拌動力が増大すると同時に、ガス・ホールドアップが飽和する程に攪拌してもガス吸収性能の大幅な増大は望めない。第8図にその様子を示す。本図は200~250 cPの液を通気攪拌し、動力低下特性(P_g/P_o)、ガス・ホールドアップ、 $k_L a$ を測定した結果である。1.8 kW/m³以下の動力では局所的な吹抜がある。一方、ガス・ホールドアップが飽和に漸近する5 kW/m³の攪拌でも $k_L a$ は1.8 kW/m³ 時の1.5倍でしかない。

4. むすび

以上、攪拌技術の位置付け、分類と現状、研究内容の紹介を説明し、前半ではプロセスとして捕えることの重要性、後半では装置としての特性を主として取り上げた。

攪拌槽は0.05 kW/m³から10 kW/m³の動力を液に伝え混合を促進する比較的単純な装置である。大半の操作は難しく考えずとも無難にこなすことができる。しかし、その操作の難易を判断し適正に使うことは、また別の問題である。そして、そのためにこそ攪拌技術があると考えられる。現実の攪拌操作には二つの典型がある。一つは、標準的な装置を使ってプロセスを組む方向であり、他方は、特殊な専用の装置を使ってプロセスを組む方向である。当社の攪拌技術は、主に後者の要請から発展してきた背景を持つが、むしろ、標準的な装置をプロセスに応じて柔軟に使い分けることに技術の利用価値がある。この意味でプロセスとして捕えることの重要性を指摘させていただいた。

装置の特性、すなわち、流動特性や操作特性は攪拌槽を選定する際の重要な目安になる。この方面の情報は、今後ますます細分化することが予想される。一方、現状の操作特性に関する知見は、多くの場合、装置形状や物性への依存性が充分には表現されてない。ユーザー各位が必要な操作特性を算出される際に悩まれるのもこの点であろうと思われる。先に、操作特性は流動特性を反映する一断面であ



第8図
200~250 cPの
粘度でのガス分
散
Fig. 8
Gas dispersion
at the viscosity
200-250cP

ると説明した。この観点に立てば、すべての操作特性は流動特性によって表現されるはずであり、装置形状や物性の影響も包括して表現されるはずである。現在まで、多くの方が上記の方向での体系化を試みられている。攪拌を真の意味で制御するために、我々もこのような体系化を前進させたいと考えている。

攪拌技術は化学工学の一分野であり、机上で個々のプロセスに適用すれば不確かさが生じることは避け得ない。工学的な技術の進歩によってのみこの不確かさを除くことは難しい。その不確かさを評価し適切な対策を講じることが要求される。これもまた実用的な技術である。現実の問題に直面された時、不確かさへの対応ということも忘れていただきたい。

引用文献

- 1) 永田進治: 新化学工学講座, 攪拌機の所要動力, (1957), 日刊工業新聞社
- 2) 山本一夫: 学位論文, 攪拌槽内の流動状態に関する研究, (1961), 京都大学
- 3) S. Nagata: *Mixing*, (1975), Kōdansha, p. 1, 85, 99, 249, 341
- 4) 大山・遠藤: 化学工学, 20巻(1956), p. 666
- 5) T. N. Tweiting: *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 8 (1958), p. 244
- 6) A. H. P. Skelland et. al.: *IEC Process Des. Dev.*, Vol. 17 (1978), p. 56, 473
- 7) M. Nishikawa et. al.: *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 14 (1981), p. 219
- 8) L. L. Van Dierendonck et. al.: *Chem. React. Symp.*, (1968), Pergamon, p. 205 (This literature is quoted in detail by Nagata³⁾)
- 9) 岡本: 神鋼ファウドラ-技報, 28巻, 3号(1984), p. 13
- 10) 平井: 神鋼ファウドラ-ニュース, 24巻, 1号(1980), p. 1
- 11) 平井: 神鋼ファウドラ-技報, 27巻, 2号(1983), p. 25
- 12) 平井: 同上, 26巻, 1号(1983), p. 7
- 13) 岡本: 同上, 26巻, 3号(1982), p. 8