

化学機械技術

81.18
149.1
:24

化学機械技術

24

化学工学協会
編

丸善株式会社

化学機械技術 第24集

昭和47年5月20日発行

© 1972

編者 社団法人 化学工学協会

発行者 飯 泉 新 吾

発行所 丸 善 株 式 会 社

編者との申合せ
により検印省略

郵便番号 103 東京都中央区日本橋通2丁目6番地

印刷 中央印刷株式会社・製本 切石製本株式会社

3058-1579-7924

目 次

撹拌槽のスケールアップと問題点 (松 本 忠 夫)

1. ま え が き	1
2. 槽	1
3. 材 料	2
4. 撹 拌	2
4・1 撹拌動力について	2
4・2 固体粒子を槽内に分散させる場合	4
4・3 循環回数と翼の吐出量について	5
4・4 混合時間について	6
4・5 撹拌と液滴の関係について	7
4・6 バッフルについて	8
5. 撹 拌 装 置	9
6. 軸 封 装 置	11
7. 加熱冷却面積について	11
8. あ と が き	12
引用文献	12

高粘度反応装置 (梶本彦久寿, 島 田 隆 文)

1. は じ め に	13
2. 高粘度流体装置の特性と性能の評価	14
2・1 エネルギー消散特性	14
2・2 均一化過程とエネルギー効率	17
2・3 移 動 過 程	19
2・4 流通(時間)特性	22

3. 性能評価の具体例（2軸多円板装置）	24
3・1 装置特性	24
3・2 均一化性能	26
3・3 伝熱性能	27
3・4 操作と装置性能	28
4. おわりに	32
引用文献	33

発酵槽の通気・搅拌（田口久治, 吉田敏臣）

1. ま え が き	35
2. 発酵槽における酸素需給	36
3. 発酵槽のスケールアップ	40
4. 培養系における酸素移動機構	45
5. 連続培養における混合の影響	50
6. む す び	52
文 献	52

粉体（主に集塵ダスト）の処理方法（菊池敏之）

1. は じ め に	55
2. 乾燥粉体のかさ比重の増加法	55
2・1 タップ充てん	57
2・1 真空脱気法	58
3. 集塵ダストの造粒	60
3・1 造粒助剤	60
3・2 造粒前処理	61
4. 泥状廃棄物の焼成固化	63
4・1 粉体熱固化のメカニズム：焼結	64
4・2 スラッジ焼結固化への応用	65

5. 下水汚泥焼却灰と粘土スラッジによるペレット焼成実験	66
5・1 原 料	66
5・2 焼成温度と焼成ペレット特性	67
参 考 文 献	69

最近の造粒法とその装置 (関 口 勲)

1. ま え が き	71
2. 造粒法の取扱い	71
2・1 定義および目的	71
2・2 造粒法の分類と取扱い	74
3. 造粒の基礎的事項	75
3・1 粉体の凝集状態と要因	75
3・2 粉体の造粒性	76
4. 造粒の機構と特長	80
4・1 対象材料と造粒系統	80
4・2 自足造粒機構の諸要素	81
4・3 凝集・被覆造粒速度	83
4・4 造粒物の粒度およびその分布	84
4・5 強制造粒における機構	86
5. 各種の造粒装置	88
5・1 転動型造粒装置	88
5・2 流動層型造粒装置	90
5・3 押出型造粒装置	91
5・4 圧縮型造粒装置	92
5・5 噴射型造粒装置	93
6. あ と が き	95
引 用 文 献	95

最近の粉体輸送と貯蔵システム (上 滝 具 貞)

1. 粉体輸送の分類	97
2. 各種輸送機の概要	100
2・1 ベルトコンベヤ	100
2・2 チェーンコンベヤ	102
2・3 スクリューコンベヤ (ねじコンベヤ)	108
2・4 振動コンベヤ	109
2・5 ニューマチックコンベヤ (空気輸送)	111
3. 粉 体 の 貯 蔵	114
4. 貯槽からの粉体の流出	116
4・1 貯槽内のフローパターン	116
4・2 貯槽からの排出法 (供給)	117
引用文献	119

多成分蒸留装置の解析 (山 田 幾 穂, 齊 藤 日 出 雄)

1. は じ め に	121
2. θ 法	122
2・1 Lyster らによる θ 法	122
2・2 収束過程の幾何学的背景	123
2・3 θ 法の非理想系への適用と修正 θ 法	125
3. Matrix 法	128
3・1 Amundson らの方法	128
3・2 Matrix 法その後の発展	130
4. Petlyuk らのシステムに対する計算法	130
4・1 Petlyuk らのシステムの特長	130
4・2 計 算 法	131
5. む す び	136

引用文献	137
------	-----

熱交換器 (板井真人)

1. はじめに	139
2. 熱交換器設計手順	140
2・1 熱交換器設計に必要なデータ (相変化なし多管式熱交換器)	140
2・2 設計基本計算	140
2・3 熱交換器寸法の決定	141
2・4 総括伝熱係数	141
2・5 圧力損失	143
2・6 相変化のある熱交換器	144
3. コンピュータの導入	144
3・1 算術計算	144
3・2 繰返し計算	145
3・3 I/O の工夫	145
3・4 フローチャートの作成	146
3・5 その他の一般的注意	147
4. 熱交換器設計プログラム	148
4・1 プログラムの基本方針	148
4・2 ゼネラルフローチャート	150
4・3 詳細フローチャート	150
5. おわりに	156
引用文献	157

多段フラッシュ蒸発装置 (外山茂樹)

1. まえがき	159
2. 蒸発法による海水淡水化プロセス	160
3. 簡単なモデルによる最適化計算	162

4. 詳細な収支計算	165
5. 計算プログラムの構成	169
6. 最適化計算	169
6・1 直接探索法	169
6・2 ダイナミックプログラミング法	169
6・3 最大原理	173
7. む す び	175
引用文献	176

プロセス設計における物質収支・熱収支のとり方（正野博視）

1. は じ め に	177
2. プロセスのネットワーク	177
2・1 プロセスの表現	178
3. プロセス方程式の解法	179
3・1 EDC プロセスの例	180
3・2 ブロック三角行列	183
3・3 グラフの表現と分割	184
4. 数 式 モ デ ル	186
5. 計 算 例	189
6. プロセスシミュレータ	195
7. お わ り に	197
引用文献	197

プロセスの最適構成——問題の定式化とその解法——（梅田富雄）

1. 緒 言	199
2. プロセス構成問題の定式化	199
3. プロセス構成問題の解法	201
3・1 組織的な試行錯誤法による最適構成	202

攪拌槽のスケールアップと問題点

松 本 忠 夫*

1. ま え が き

攪拌はその機構が単純なために理論の入り込む余地がないものと思われていたのか、翼型式を経験的に選定し攪拌動力、吐出量を計算し検討するのが攪拌機設計の主なものであった。すなわち、翼径、翼板数、攪拌レイノルズ数、邪魔板の有無をパラメータとして実験を行ない攪拌動力については動力数 N_p 、吐出量については吐出流量係数 N_q を中心として考えてきた。また並行して攪拌の目的である均一加熱および物質移動速度の増大の指標としての混合時間、物質移動係数、境膜伝熱係数の実測研究が行なわれてきたが、それだけではスケールアップを行なう場合同一の品質、反応時間を保つことには問題が多く、これらの数値の変化に直接また間接的に影響を及ぼしている混合の過程についての研究が行なわれ、その機構、液のフローパターン、エネルギーの分布、流速の分布等の実測研究、ならびに翼内部におけるエネルギー供給の理論的、工学的な解明がなされつつあるが、まだ化学反応と結びついたスケールアップの方式が確立されるには至っていない。したがってこのような研究結果を参考として個々の項目を検討し、スケールアップを行なっているのが現状である。以下にスケールアップの場合影響すると思われる項目について検討することにする。

2. 槽

槽のスケールアップは、幾何学的相似、槽径一定、槽高さ一定等の方法があるが、一般的には、幾何学的相似形でスケールアップは行なわれている。この場合

* 神鋼ファウドラー（株）

の問題点を上げてみると、

(1) 冷却面積が容量比の $2/3$ 乗に比例するので、増加割合は低下する。これは、冷却面積が反応進行上律速となる場合には重大で、内部コイルまたは外部冷

却器を設ける等の対策が必要である。

(2) 発酵槽のように多量の空気を吹込む場合、槽断面積は容量に比例して増加しないため空塔速度が速くなり、ミストも多くなる。また、翼が分散し得る空気量と翼スパンの関係の一例は図1に示す通りで、相似形でスケールアップした場合空気の分散能力も不足することを示している。

このことから、スケールアップに対して修正しなければならない場合には、テスト装置にこのことも含めたテストを行なえるよう計画しておく必要がある。

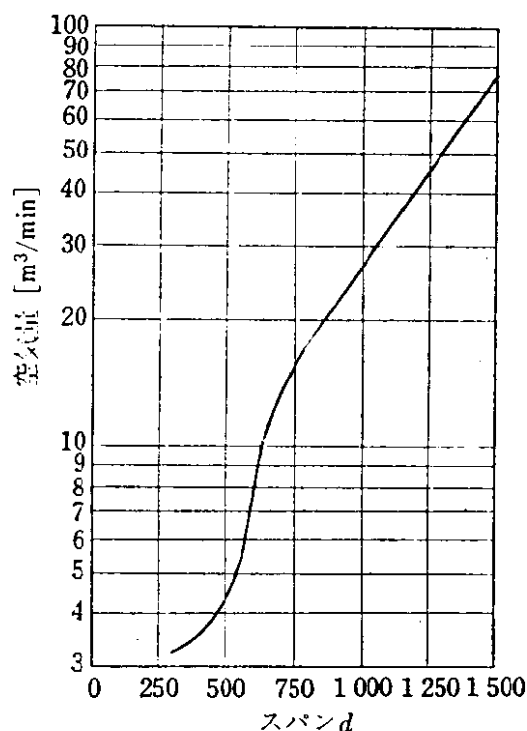


図 1

3. 材 料

材質については、テスト機の場合、コストに占める材料費が少なくまた材料の入手性、加工性の面からスケールアップ後の材料と異なる材料を使用する場合があるが、スケールアップ時に問題になる場合があるので、耐食性、耐付着性、加工性等研究し適切な材料をテスト機に選び材料面のテストも含めておくことがのぞましい。

4. 攪 拌

4.1 攪拌動力について

一般に攪拌装置を計画する場合には反応過程における液の物性およびその攪拌の目的から経験的に攪拌動力、攪拌翼形式、攪拌回転数、バッフル形状、大きさ等を選定している訳であるが、図2ではこのような場合の目安となる一例を示し

たものである。これは攪拌を単純な混合、熱伝達、懸濁、ガス吸収、乳化の目的に沿って5種類、攪拌強度を10段階に分けたもので、基本的には単位容積当りの攪拌動力をどのようにするかを表わしたものである。単位容積当りの攪拌動力を一定としてのスケールアップが適当な場合については、その妥当性が証明されている。たとえば永田らは、2液を混合する場合に同一の液滴径を得るためのスケールアップに際し、攪拌速度は、槽径の $-2/3$ 乗に比例すればよい。すなわち単位容積当りの動力を等しくすればよいとしている。

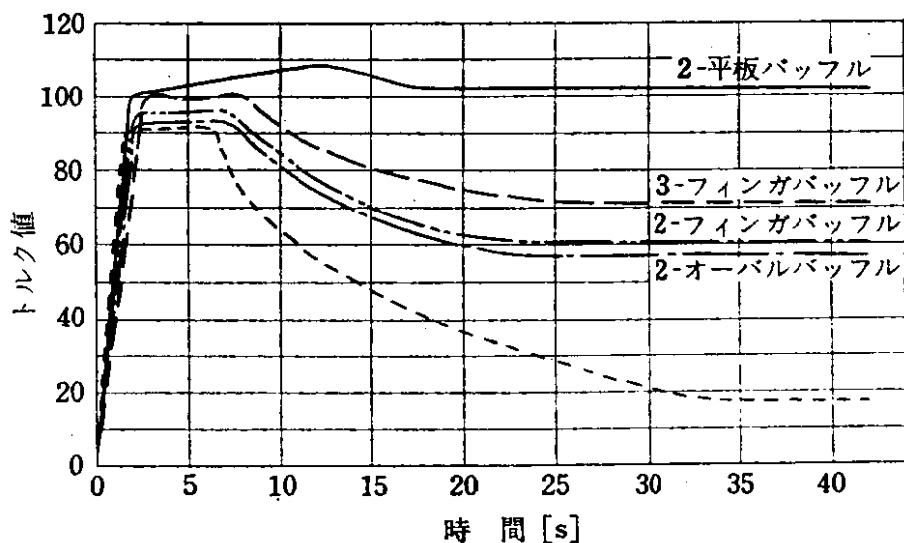
INDEX NUMBER	10				
	9				
	8				
	7		非常に懸濁が困難な溶液	非常に溶解困難なガスの場合	混合が困難な粒子が析出する場合
	6				
	5	強力な混合	速い熱伝達を必要とする場合	懸濁が困難な溶液	比較的溶解が困難なガスまたはガスの量が多い場合
	4				
	3		普通		乳化溶液が不安定な場合
	2	普通	普通	容易に懸濁する溶液	普通
	1	弱い混合		容易に溶解するガスの場合	
		混合	熱伝達	懸濁	ガス吸収
					乳 化

図 2

攪拌動力と起動トルクの関係は、図 3 に示すようにバッフル状態が変わっても起動トルクはほぼ一定、完全バッフルの場合と同一の値を示している。このことより、軸部強度等について、これを考慮した検討が必要ながわかる。

粉体の沈殿する場合の起動力は、翼が粉体中にある場合攪拌起動不可能な場合が多く、もし起動しても大きな起動力を要する。たとえば、容量 100L、攪拌翼スパン 400mm の攪拌槽で IODINE スラリーが翼の上、170mm 沈積している場合、起動トルクは、内容物水の場合に比べて約 5 倍になるという実験結果もあ

る。大型槽の場合にはこのような起動トルクおよび起動時に翼が受ける横荷重に耐える伝導装置を設計することは不経済でもあり、また不可能な場合もある。したがって撹拌翼を沈降面より上に設置するか、粉体をガス吹込等を用いて撹拌起動に先立って浮遊させることが必要である。



撹拌翼：ファウドラ型3枚インペラ，液深さ： $H/D=1.$ ，
回転数：165 rpm

図3 起動トルクの推移例

4.2 固体粒子を槽内に分散させる場合

スラリーの場合においては粉体が浮遊することが必要であるが、永田らによると撹拌翼を用いた固体粒子の浮遊限界撹拌速度を算出する実験式は、

$$N_f = K D^{-2/3} d_p^{1/3} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{-1/9} \left(\frac{V_p'}{V_p} \right)^{-0.7}$$

N_f ：浮遊限界撹拌速度 [r/m]， K ：撹拌条件により実験的に求められる係数 [—]， D ：撹拌槽内径 [m]， d_p ：固体粒子の大きさ [mm]， ρ_s, ρ ：粒子および液の比重 [—]， μ ：液の粘度 [cp]， V_p', V_p ：固体粒子のかさ容積および真容積 [cm³/g]

である。すなわち幾何学的相似条件を満足するスケールアップに当たって、同一の粒子浮遊条件を得るための撹拌速度は槽径の $-2/3$ 乗に比例する。換言すれば単位容積当たりの撹拌動力を一定とすればよい。粉体の比重が大きい場合には、バッフルの効果が弱いと撹拌軸近傍の固体回転部分において沈降が早く、また強

いとバツフル裏面で沈降を起こす場合があるので、それぞれの場合の実験を行ない、最適の状態となるバツフルの形状、大きさを選定することがのぞましい。また、スケールアップによって液の循環回数が低下するので、槽内の均一性の面からも配慮が必要である。

4.3 循環回数と翼の吐出量について

槽内の液が均一に混合されるかどうかの一つの目安として循環回数が用いられる。翼からの吐出量は、表 1 に示すごとくわずか 2 倍のスケールアップにおいて

表 1

V_r	槽 径	冷 却 面 積	翼, スパン	翼先端速度	翼 吐 出 量
	$V_r^{1/3}$	$V_r^{2/3}$	$V_r^{1/3}$	$V_r^{1/3}$	$V_r^{1/3}$
2	1.26	1.59	1.26	1.08	1.72

も吐出量は、1.7 倍となり、したがって循環回数は 0.85 倍に低下する。したがって攪拌の目的によってはスケールアップする場合翼の形状、スパン、回転数、攪拌動力を修正して設計することが必要な場合もある。

循環回数というのは、攪拌翼からの吐出流量とこれに付随する同伴流量が循環量となるが、この量が槽内を単位時間に何回循環するかということである。この

表 2

	d/D	邪 魔 板 な し				邪 魔 板 付			
		N_p	N_{q1}	N_p/N_{q1}	Re	N_p	N_{q1}	N_p/N_{q1}	Re
8 枚バドル $b/D=0.1026$	0.513	0.95	0.34	2.8	1×10^5	9.5	1.34	7.1	1.3×10^5
8 枚後退バドル ($\alpha=60^\circ$)	"	0.71	0.43	1.7	"	3.8	1.2	3.2	"
8 枚ブルマージン	"	0.44	0.34	1.3	"	1.05	0.78	1.3	1×10^5
8 枚 45° 角度付バドル	"	0.72	0.31	2.3	"	2.8	0.87	3.2	1.3×10^5 0.15~0.5
4 枚タービン ファウドラ型	0.35					5	0.48	10.4	$\times 10^5$
3 枚インペラ $b/D=0.0513$	0.489	0.37	0.23	1.6		0.73	0.29	2.5	
8 枚バドル*	0.513	0.95	0.35	2.7	1×10^5	9.5	1.2	7.9	1×10^5
8 枚 45° 角度付バドル*	"	0.72	0.45	2.1	"	2.8	0.44	6.4	"

* 攪拌翼槽底設置

吐出量を求めるための吐出循環流量係数は実験によって確認されている。表 2, 3 は吐出流量係数 N_{q1} および循環流量係数 N_{q2} の値を示したものである。

表 3

	N_{q1}	N_{q2}	N_{q2}/N_{q1}
8 枚パドル	1.34	2.28	1.7
8 枚後退パドル($\alpha=60^\circ$)	1.2	2.2	1.85
8 枚ブルマージン	0.78	1.36	1.75
4 枚タービン	0.46	0.93	1.95

これらは実験によって流速を測定し求められたものであるが、これでは攪拌翼自体の中での液体の加速の状態、すなわち、エネルギー伝達の機構が不明である。攪拌翼の回転する範囲を遠心力の場と考え攪拌する液の微少部分について運動方程式を立て、これを電算機を用いて解いてやると表 4 に示す通りで、これは従来の実験より求めた表 2 の N_p , N_q の値とほぼ一致する。

表 4

n [rpm]	N_p	N_{q1}	n [rpm]	N_p	N_{q1}
30	8.90	1.354	150	8.90	1.354
60	8.96	1.367	180	8.91	1.355
90	8.90	1.354	210	8.91	1.356
120	8.98	1.370			

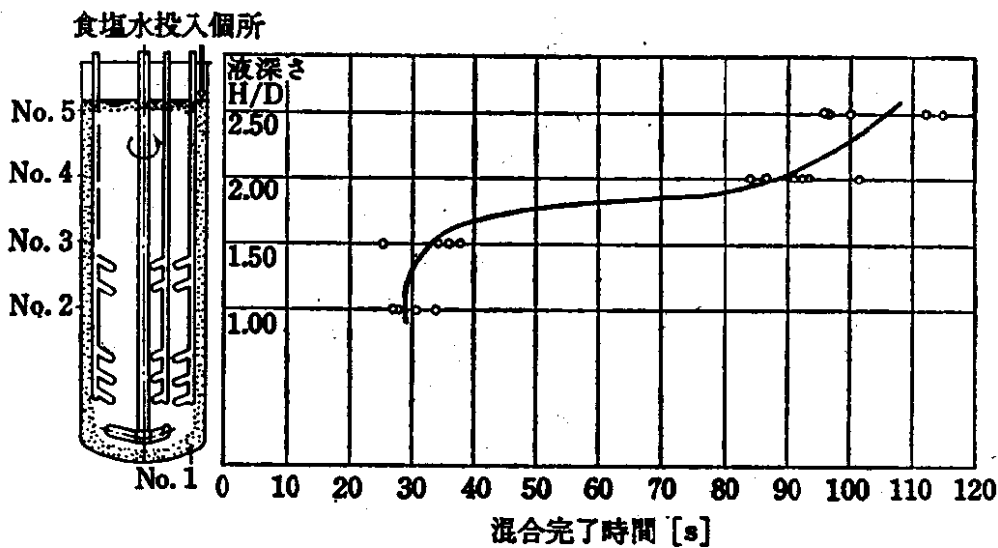
今後攪拌についてたとえばこのような考え方が確立され槽内各部の液の運動状態およびエネルギー分布が明確にわかるようになれば、スケールアップの問題も、もっと理論的に行なわれると思われる。

4.4 混合時間について

攪拌効果の判定尺度の一つとして混合時間がある。翼先端から吐出された液はバブルによって上下方向の流れになるがその速度は流れの抵抗によって次第に低下していく。

攪拌のフローパターン、および各部の流速測定結果はかなり多く発表されている。これらは翼およびバブルの形状によって若干の差異があるが上向きの流れが到達する高さに大きな違いはない。図 4 は食塩水を混用いて混合時間を測定した例であるが液深さと槽径との比 H/D が 1.5~1.7 以上では急に混合時間が長く

なる事を示している。



攪拌翼：フアウドラ型3枚インペラ，バフフル：3-フィンガー，
 回転数：165 rpm

図4 混合完了時間と液高さの関係

このことは、攪拌動力にも表われ H/D に比例して攪拌動力は増加するが、
 H/D が1.5~1.7以上になると攪拌動力の増加割合が小さくなる。したがってス
 ケールアップを行なう時、価格または、冷却面積等の技術面から H/D の大きい
 設計を行なう場合には、このことに留意し多段翼を用いることが必要である。

多段翼にして設計する場合、上下の混合を重視する時には、それぞれの翼の吐
 出流が、十分混合する間隔になるように設計することが必要である。

4.5 攪拌と液滴の関係について

お互いに溶解しない2相の液を攪拌し、分散する場合液滴径がスケールアップ
 の前後において同一であることが要求される。

攪拌と液滴径の関係は、

$$d_p \propto d(n^2 d^3)^m$$

d_p : 液滴径, d : 攪拌翼スパン, n : 攪拌翼回転数

で表わされている。値 m は、実験による係数である。たとえば、図5は $m =$
 -0.6 の場合幾何学的相似形で、単位容量当りの動力を、一定としてスケールア
 ュップすると同一の液滴径が得られることを示したものである。

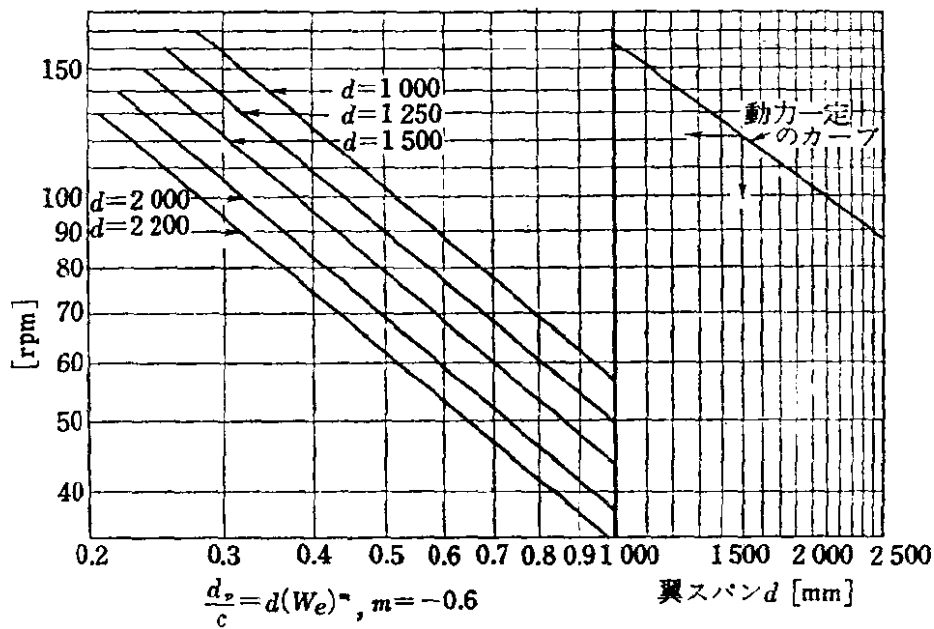
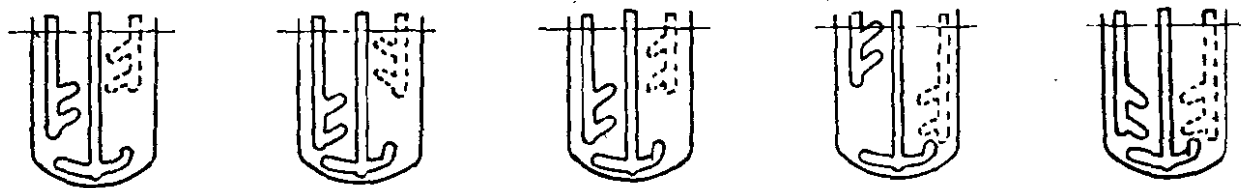


図 5

4.6 バッフルについて

攪拌翼とバッフルは、組合わさって働きをするもので、バッフルは翼からの吐出流を上下循環流に変換し、翼から与えられたエネルギーを槽内に均一に分散させるために必要である。スラリー液または大型の槽の攪拌においては、前項にも述べたごとくバッフルの持たねばならぬ要求を考え形状、大きさ、枚数等を検討すべきである。



混合 熱伝達 懸濁 ガス吸収 乳化

図 6

たとえば図6は、後退翼とフィンガ形バッフルの組合せを攪拌の目的に沿って分類したものである。またこのバッフルは他の翼との組合せにおいても、動力の消費が少なくて有効な上下循環流を得ることができるというその特徴をよく発揮する。バッフルの目的は、単に液の流動抵抗を増加させ反応促進のための強い乱流状態を得ればよい場合と、液の流れを強制的に誘導し効果的に液を循環し反応に対しても好ましい状態を作る場合とが考えられる。とくにスラリー溶液