

攪拌・捏和・混合

工場操作シリーズ NO. 11



化学工業社

工場操作シリーズ

攪拌・捏和・混合編

株式会社「化学工業社

別冊ケミカル・エンジニアリング 第2巻 第1号

工場操作シリーズ **攪拌・捏和・混合編**

¥ 1,300 円 100

昭和43年4月15日 発行

編集兼発行人 原 徹

印刷人 杉 田 清

東京都千代田区麹町5-2

東京都千代田区神田淡路町1-11

発行所 電 話 (253) 6451~4

振 替 東 京 13060

株式 化学工業社

会社

工場操作シリーズ 攪拌・捏和・混合編

— 目 次 —

1. 混合・攪拌理論の最近の動向……	明日本合成ゴム(株)	佐藤忠正 谷山巖	…(1)
2. 固体混合について……	帝人(株)	山口巖	…(16)
3. 攪拌・混合装置の設計要領			
3・1 バッチ式攪拌と			
連続式攪拌について……	(株)島崎製作所	技術部	…(24)
3・2 回転容器型混合装置……	佐竹化学機械工業(株)	田村晃一	…(35)
3・3 固定容器型混合装置……	(株)栗本鉄工所	阪中勉	…(51)
3・4 各種捏和装置……	佐竹化学機械工業(株)	浜本政夫	…(58)
4. 操作の実際			
4・1 石油の調合……	ゼネラル石油精製(株)	大原達	…(69)
4・2 医薬の調合……	帝国臓器製薬(株)	出口雅三 古田尚平 砂本勝	…(75)
4・3 コンクリートの混合……	法政大学	高野俊介	…(83)
4・4 化粧品のエマルジョンの生成	(株)資生堂	見矢洋一	…(87)
4・5 ペイントにおける顔料の分散	関西ペイント(株)	沼尾邦雄	…(96)
4・6 ラテックスフォームラバー……	ブリジストンタイヤ(株)	諫山一雄	…(108)
4・7 晶析操作と攪拌……	月島機械(株)	守田稔	…(114)
4・8 糖液の活性炭による脱色……	日本精糖工業会	鴨田稔	…(121)
4・9 微生物培養による			
抗菌性物質の製造……	科研化学(株)	岩瀬克己	…(127)
4・10 チョコレートの捏和……	森永製菓(株)	原惇 森茂雄	…(136)
4・11 アスファルトの混合……	昭和石油アスファルト(株)	平野英作	…(148)
4・12 ゴムの混合……	横浜ゴム(株)	長谷部嘉彦	…(159)
4・13 紙パルプの捏和……	三菱製紙(株)	正垣愛備	…(165)

1. 混合・攪拌理論の最近の動向

われわれは日常生活でもしばしば混合過程を経験するが、化学工場にとっても混合を目的とする操作は不可欠であるといつてよい。ただ混合とか攪拌といった言葉の定義はやや不明瞭であるが、一般に「混合」は目的あるいは過程を意味し、混合を達成する方法あるいは操作として通常粘度の流体を対象とする「攪拌」、高粘性物質を対象とする「捏和」、固体を対象とする「固体混合」があると考えられる。本章では攪拌操作に関する最近の研究を概観したい。捏和については紙数の関係上省略するが、すぐれた成書⁵⁾があるから参照していただきたい。また固体混合の研究については次章でくわしく紹介されるから省略することにする。なお混合攪拌のすぐれたレビューが1963年の化学工学誌⁶⁾に掲載されているから、あわせて御一読願いたい。また混合・攪拌の実用面に重点をおいた総説⁴⁾も有用であろうと思われる。

攪拌操作は化学工場において最も普遍的な操作の1つであり、反応・抽出・吸収・混合などの広範な用途に利用される。したがって攪拌の研究も多方面にわたり、次のように大別される。

- 1) 攪拌所要動力
- 2) 液の流動
- 3) 混合特性
- 4) 異相分散系
- 5) 伝熱

最近スラリーや高分子物質を取扱う工業が盛んになるにつれ、非ニュートン流体に対するこれらの研究も重要課題となりつつある。そこで非ニュートン流体の攪拌にもふれながら順を追って各項目の最近の話題について述べる。なお伝熱については割愛したから化学工学便覧やレビューを¹⁸⁾参照していただきたい。

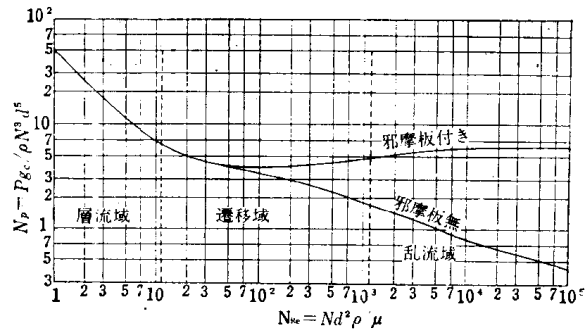
1. 攪拌所要動力

攪拌所要動力は攪拌操作の最も基本的因子であるから、古くから研究が行なわれ、均一相ニュートン流体に対しては特殊な場合を除いて実用上不便を感じないほど実測値が集積され相関式も与えられている。

1.1 ニュートン流体

ニュートン流体の攪拌所要動力は第1図のようにたて軸に動力数 $N_p (=Pg_o/\rho N^3 d^5)$ 、横軸にレイノルズ数 $N_{Re} (=Nd^2\rho/\mu)$ をとり示される⁶⁾。層流域で動力数は邪魔板の有無に関係なく同一値で

レイノルズ数に反比例して減少する。遷移域と乱流域では邪魔板のとりつけにより動力数は異なり、邪魔板のない場合動力数はレイノルズ数の増加に伴いゆるやかに減少する。これに対し邪魔板のある場合の動力数は遷移域より乱流域に達すると増大し、乱流域ではレイノルズ数によらず一定となる。この乱流域における動力数は邪魔板枚数および幅により異なり、最大値を与える条件を完全邪魔板条件とよぶ³⁷⁾。この条件における動力数は邪魔板のない場合のそれにくらべて約10倍にもなる。Rushtonら⁵³⁾は動力数とレイノルズ数の関係を各装置条件に対し図示し、永田ら³⁷⁾はこの関係を一般的な相関式で示し、



攪拌動力数とレイノルズ数 (永田⁶⁾の実測値)

第1図

式中の諸定数と装置寸法の関係を決定した。この相関式は枚羽根パドルに対して得られたものであるが、他の各種の攪拌羽根——タービン、プロペラ、錨型など——の動力数を推算できる。なお後退羽根パドルや角度付パドルではパドルやタービンにくらべ遷移域が高レイノルズ側にひろがるといわれる⁴⁾。

高粘度液の攪拌に使用されるリボンやスクリーユ攪拌機の所要動力は永田ら³⁹⁾や Gray²¹⁾によって求められている。

1.2 非ニュートン流体

非ニュートン流体の攪拌ではレイノルズ数の定義がまず問題となる。1つの方法は非ニュートン流体の粘度と剪断速度の関係にある数式——普通はべき乗法則——で近似し、この式中の物質定数を含むレイノルズ数を定義する⁴⁰⁾。他の方法は攪拌槽内の見かけ剪断速度を求めて、これに対応する見かけ粘度を用いる³²⁾。

後者の方法³²⁾において、攪拌槽と2重円筒の幾何学的類似性から次の関係が仮定された。

$$\dot{\gamma}_a = \alpha_0 N$$

α_0 は次のように決定される。

- i) 目的の攪拌装置をニュートン流体で満し、層流域で動力数とレイノルズ数の関係を測定する
- ii) 同一装置で非ニュートン流体を用い層流域である回転数における動力数を測定する。
 - i) で得たニュートン流体の関係を満足するよう、この動力数に対応するレイノルズ数を決定する。これを一般レイノルズ数と定義する
- iii) 一般レイノルズ数中の粘度を見かけ粘度とよぶ
- iv) 粘度計により粘度と剪断速度の関係を求めておきiii)の見かけ粘度を与える見かけ剪断速度を得る。これを回転速度に対しプロットすれば α_0 が求まる。

第1表 各種攪拌羽根の α_g (擬塑性流体)

パドル		13.0	11.0
タービン	11.0	11.0	10.6
後退羽根パドル			7.1
ブルマージン			10.5
プロペラ		10.0	
文献	20)	34)	60)

この手順の理論的基礎は伊藤により提案された「エネルギーの散逸に関する相似則」²⁵⁾と同一であり、(1)式の仮定の妥当性は佐藤ら⁵⁶⁾により上記の相似則を変形して証明された。この場合レイノルズ数は

$$N_{Re} = \frac{Nd^2\rho}{\mu_a} \quad (2)$$

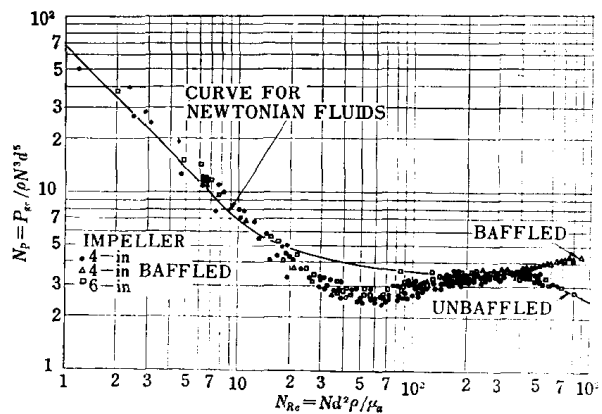
で定義され、粘度として(1)式の見かけ剪断速度における見かけ粘度 μ_a を用いるほかはニュートン流体の場合と同一式である。この方法を使用するには(1)式の α_g を知る必要があり、多数の研究者^{20,32,34,60)}により測定されている。擬塑性流体に対する結果は第1表の通りで、羽根種類とあまり関係なく約10~11としてよい。また直径30cm程度の攪拌槽においては α_g の値は羽根寸法と関係なく一定で、攪拌羽根を2段としても同一であると考えられる^{34,60)}。Hydroxyethyl cellulose 水溶液の攪拌所要動力をレイノルズ数に対しプロットすれば第2図となる²⁰⁾。層流域と遷移域の乱流域寄りではニュートン流体の値と一致する。ただ層流域の直線部分が延長され、層流域が高レイノルズ側にひろがったようになる。これは2の液の流動で述べるとおり非ニュートン流体ではその粘度特性から槽内液すべてを流動させるのにニュートン流体より強力な攪拌を必要とするためであろう。か
い
ず
れ
に
し
て
も
こ
の
一
般
レ
イ
ノ
ル
ズ
数
を
使
う
方
法
は
ニ
ュ
ー
ト
ン
流
体
の
結
果
を
利
用
で
き
て
便
利
で
あ
る。

2. 液の流動

攪拌所要動力とともに槽内液の流動状態に関する研究も攪拌操作の理解に重要である。この方面の研究は比較的新しいが、速度分布が種々の方法で測定され、消費動力分布や乱流拡散に関する知見が得られつつある。また吐出および循環流量の実測値もかなり集積されている。

2.1 速度分布

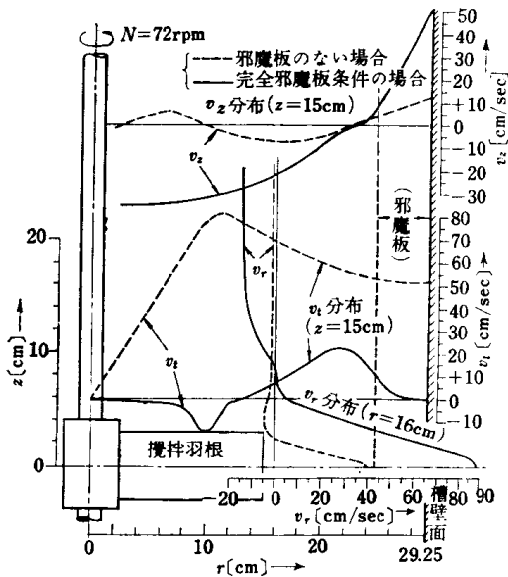
槽内の速度分布はトレーサー微粒子の動きを写真撮影する方法^{41,45)}、ラジオアイソトープを利用する方法^{1,2)}、ピトー管^{30,40)}やサーミスター流速計⁴⁵⁾を用いる方法などによりレイノルズ数の全域にわたり測定されている。流動状態は邪魔板の有無によりまったく異なり、円筒形攪拌槽で中心攪拌を行なった場合の円周方向、半径方向、上下方向の速度分布(それぞれ v_t, v_r, v_z)、の1例は第



第2図 非ニュートン流体の動力数とレイノルズ数の関係²⁰⁾

3図に示す⁴⁰⁾。邪魔板のある場合いわゆる複合渦模型で表わされる流動状態にあり、中心の固体的回転部とその周囲のポテンシャル流類似の部分よりなる。そして円周方向の流れが支配的で、羽根からの吐出流もそれによって引き起こされる上下の循環流——いわゆる2次循環流——も弱い。邪魔板を挿入すると、固体的回転部が消滅するとともに円周方向の流れが抑制され上下方向の2次循環流が増大する。この様子は第4図に示した^{40,70)}。

非ニュートン（擬塑性）流体の槽内流動は Metzner ら⁸³⁾により観察された。そしてニュートン

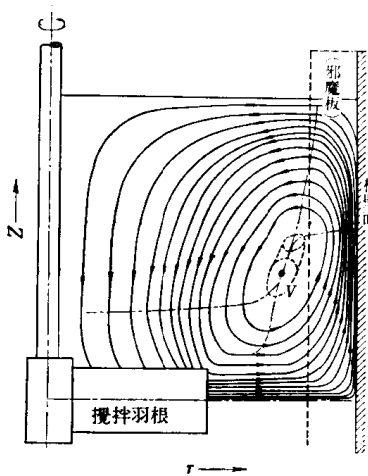


第3図 邪魔板付円筒形攪拌槽内の液の速度分布 ($D=29.25\text{cm}$, $d=0.5D$, $b=0.1D$, 8枚羽根パドル)⁴⁰⁾

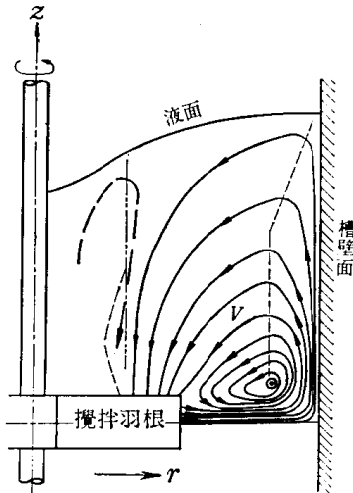
流体の流動状態と比較しながら次のような結論を得た。層流域における非ニュートン流体の流動はニュートン流体より羽根付近に限られ、槽内液がすべて流動しはじめるレイノルズ数はニュートン流体の方が小さい。つまり層流域が高レイノルズ数側に広がるわけで第2図の動力数対レイノルズ数の曲線の結論に一致する。遷移域において羽根付近で乱れが発生しはじめるが、そのレイノルズ数は非ニュートン流体の方が小さい。乱れは羽根付近に限られ、少し離れた位置では急速に消滅する。

2.2 吐出・循環流量

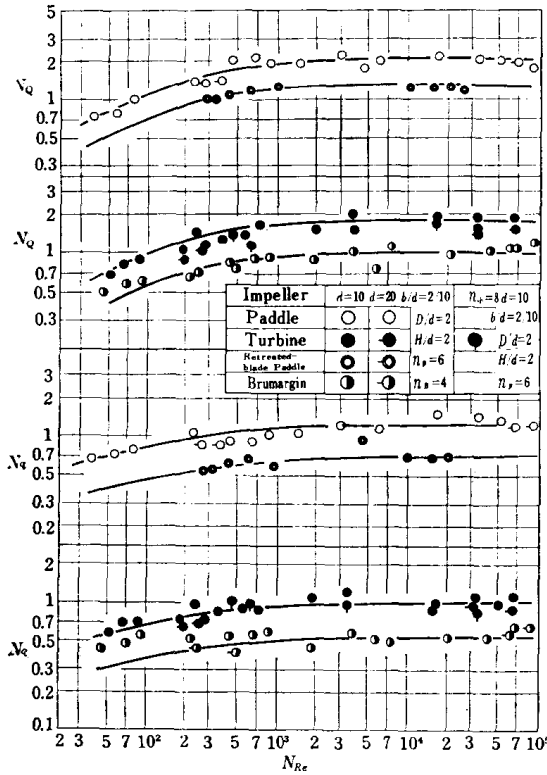
速度分布を知れば数値積分することにより羽根から吐出される液量、それによって誘起される同伴流量、これらの和である循環流量を求めることができる。それ以外に槽内に投入した流れ粒子の循環回数を数えることによって^{48,58)}また投入した濃度突変に



第4-a図 邪魔板付円筒形攪拌槽における二次循環流⁴⁰⁾



第4-b図 邪魔板無し円筒形攪拌槽における二次循環流⁷⁰⁾



第5図 吐出・循環流量数のレイノルズ数による変化⁶²⁾ (完全邪魔板条件)

と与えられた⁶²⁾。ここに $N_{q\infty}$, $N_{Q\infty}$ は乱流域における吐出および循環流量数であり、谷山⁶²⁾によれば

$$N_{q\infty} = K_q n_p^{0.7} \left(\frac{b}{d}\right)^{0.7} \left(\frac{H}{d}\right)^{0.1} \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.5} \quad (5)$$

$$N_{Q\infty} = K_Q n_p^{0.7} \left(\frac{b}{d}\right)^{0.6} \left(\frac{H}{d}\right)^{0.3} \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.1} \quad (6)$$

で K_q , K_Q は相等しい定数で第2表のように与えられる。しかし $N_{q\infty}$, $N_{Q\infty}$ の装置寸法依存性は研究者により意見が異なり、山本は⁷⁴⁾

$$N_{q\infty} \propto \left(\frac{D}{d}\right)^{1.5} \left(\frac{b}{d}\right) \quad (7)$$

$$N_{Q\infty} \propto N_{q\infty} \left[1 + 0.16 \left\{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right\}\right] \quad (8)$$

の関係式を得た。タービンに対する Norwood ら⁴⁵⁾ の相関式は完全な無次元でないが、

$$N_{Q\infty} \propto D^2 \left(\frac{b}{d}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.2} \quad (9)$$

よる濃度変化を羽根の先端で測定することによっても²⁴⁾求めることができる。

吐出・循環流量より吐出流量数 $N_q (=q/Nd^3)$ と循環流量数 $N_Q (=Q/Nd^3)$ を計算しレイノルズ数に対しプロットすれば第5図を得る⁶²⁾。第5図から明らかなように邪魔板のある場合は乱流域で一定値となり、レイノルズ数の減少とともに2つの流量数も小さくなる。これに対し邪魔板のない場合は遷移域中央付近に極大値を持つ⁴¹⁾。完全邪魔板を持つ円筒形攪拌槽でパドル・タービン・後退羽根パドル・ブルマーzinの中心攪拌による流量数とレイノルズ数の関係は羽根種類に関係なく

$$N_q = N_{q\infty} \frac{N_{Re}}{50 + N_{Re}} \quad (3)^*$$

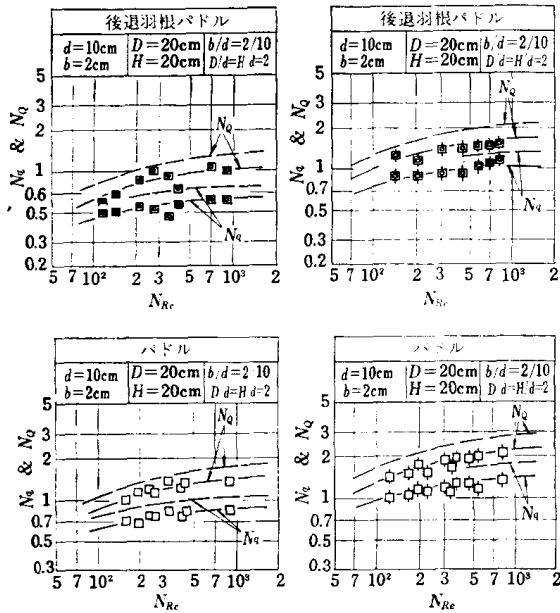
$$N_Q = N_{Q\infty} \frac{N_{Re}}{80 + N_{Re}} \quad (4)^*$$

第2表 K_q と K_Q 値 (=ニュートン流体)

攪拌羽根	$K_q = K_Q$
パドル	1.3
タービン	1.1
後退羽根パドル	0.82
ブルマーzin	0.72

*: 文献58) での相関式は $N_q = N_{q\infty} \frac{N_{Re}}{20 + N_{Re}}$, $N_Q = N_{Q\infty} \frac{N_{Re}}{65 + N_{Re}}$

であったが、実測値との一致をよくするため定数を変更した。



第6図 非ニュートン流体の吐出・循環流量⁶⁰⁾

と整理される。プロペラの吐出・循環流量はPorcelli ら⁴⁶⁾によって測定されている。

以上はニュートン流体についての結果であるが、非ニュートン流体の吐出・循環流量の実測値は少なく、谷山⁶²⁾によれば非ニュートン（擬塑性）流体の値は同一レイノルズ数((1),(2)式で定義される一般レイノルズ数を用いる)におけるニュートン流体のその約0.9倍であるといわれる。

そしてこの場合も(3)~(6)式はそのまま成立するといわれるから、第2表の定数 $K_Q = K_G$ を0.9倍すればニュートン流体の結果がそのまま使用できる。

その1例は第6図に示した。図中の破線

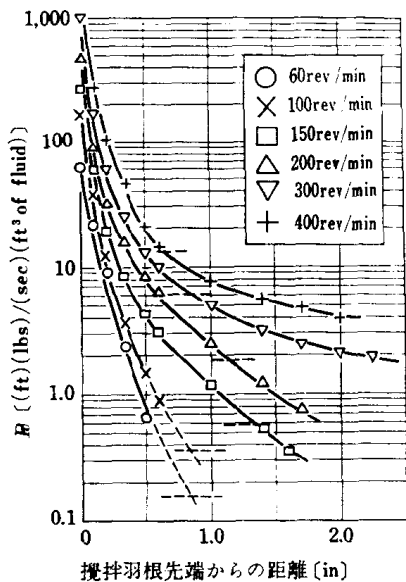
はニュートン流体の計算値で実線は同一式による非ニュートン流体の計算値である。

2.3 散逸エネルギー分布と乱れ

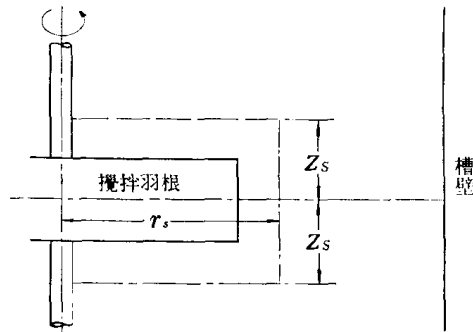
槽内の速度分布が明らかになると、それより単位容積当りの攪拌所要動力 P_0 が計算される。

Metzner ら³³⁾の得た結果は第7図に示す。測定条件は層流域にあると思われるが、羽根付近のエネルギー散逸はきわめて大きく、羽根より少しはなれた位置の約100倍にもなり攪拌作用が羽根付近に限られているのがわかる。山本ら⁷¹⁾は乱流域で液の流動に関するエネルギー収支を解析した。

第8図に示すような検査円筒面を考え、検査面から流出・流入するエネルギー、面内外で散逸され



第7図 単位容積当りの散逸エネルギー分布 (1.2% CMC 水溶液)³³⁾



第8図 攪拌羽根まわりの検査面⁷¹⁾

第3表 攪拌羽根付近のエネルギー収支⁷¹⁾

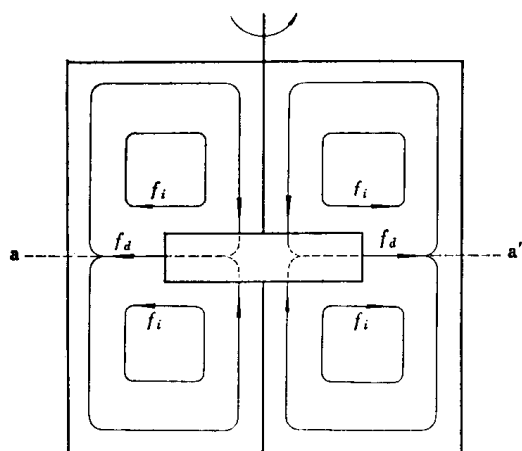
攪拌槽： $D=H=58.5\text{cm}$, $H_p=H/2$
 攪拌羽根：8枚羽根パドル, $d=30\text{cm}$, $b/d=2/10$
 境界面： $r_s=16\text{cm}$, $2z_s=12\text{cm}$

	邪魔板無	邪魔板有
拌攪所要動力, IP	0.95	9.5
検査面から単位時間内に流出するエネルギーの無次元項 N_{Po}	2.42	2.88
検査面から単位時間内に流入するエネルギーの無次元項 N_{Pi}	2.06	-0.77
検査面外で単位時間中に失われるエネルギーの無次元項 $\Delta N_p = N_{Po} - N_{Pi}$	0.36	3.7
検査面内で単位時間中に失われるエネルギーの無次元項 N_{Pimp}	0.59	5.8
$(N_{Pimp}/N_p) \times 100$	62%	61%

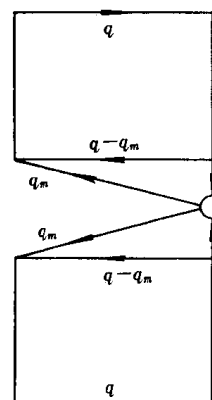
るエネルギーを求め、第3表のとおり攪拌所要動力の約60~70%が槽内全液量の約6%に相当する羽根を含む検査面内で失われることを明らかにした。

攪拌槽内の流れの内部構造すなわち乱れの構造は非常に複雑で乱流理論に基づいた解析も容易でないが、種々の方法で乱流拡散係数の測定が行なわれ^{72,73)} Manningら^{25,29,49)}は濃度変動の強さを測定することにより濃度変動のスペクトル分布を求めた。いずれにしても上述の散逸エネルギー分布とも関連し、乱流拡散係数や濃度変動の強さは攪拌羽根付近で非常に大きく、前者については羽根より離れた位置の約5倍といわれる⁷⁸⁾。乱流拡散に関する理論的研究^{12,13,52)}も発表されているが、実測値に対する適用は今後の問題であろう。なお乱流拡散に関する最近の成果は遠藤ら¹⁷⁾によって紹介されている。

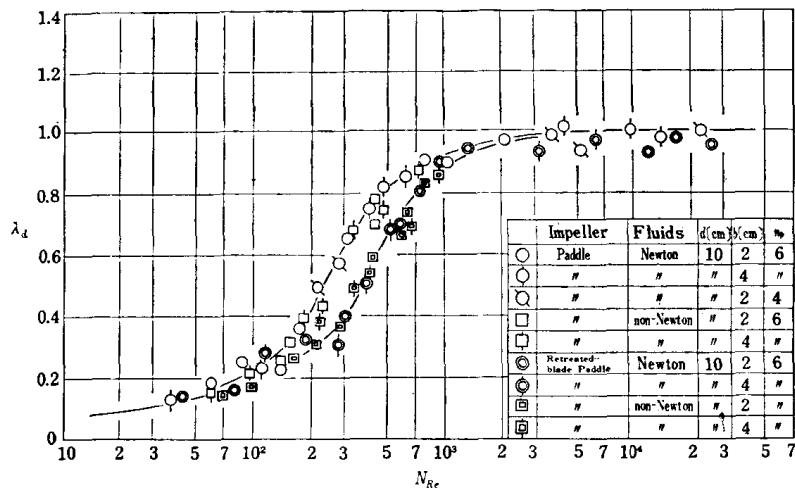
2.4 羽根内含流量比



第9図 邪魔板付き攪拌槽内の流動状態



第10図 吐出流の分割



第11図 吐出流中の羽根内合流量比 ($D=H=20\text{cm}$)⁶⁰⁾

中心攪拌を行なっている邪魔板つき円筒形攪拌槽を遷移域で操作する。このときのフローパターンは第3図から模型的に第9図のように画くことができる。ここに f_a は吐出流を f_s は同伴流を示す。これに液面から墨汁を投入して濃度変化を観察すれば、第9図の $a-a'$ 線すなわち羽根幅中央において明瞭な濃度差を生じる。このことから上下に等分された吐出流 f_t が羽根内でふたたび均一状態に混合されるのではなく、その一部が混じり合うに過ぎないと考えられ、それを羽根内合流量とよぶ⁶⁰⁾。この状態の模型的表現は第10図である。いまこの攪拌槽に流れ粒子を投入し、粒子が羽根の位置にきて吐出される回数を測定すれば、次式で定義される割合 P_m が計算できる。

$$P_m = \frac{(\text{上下}) + (\text{下上})}{(\text{上上}) + (\text{下下}) + (\text{上下}) + (\text{下上})} \quad (10)$$

ここに (上上) は羽根より上にあつた粒子が吐出されふたたび上へ行った回数を示し、他も同様の意味を持つ。一方第10図の流量分割より

$$P_m = \frac{1}{2} \frac{q_m}{q} = \frac{1}{2} \lambda_d \quad (11)$$

$$\lambda_d = \frac{q_m}{q} \quad (12)$$

が得られる。ここに λ_d は吐出流中の合流量比であるから循環流中の合流量比 λ_m は次式のように書ける。

$$\lambda_m = \lambda_d \frac{q}{Q} = \lambda_d \frac{N_q}{N_e} \quad (13)$$

λ_d の実測値の1例は第11図である。遷移域に入ると攪拌羽根中央を境として上下の混合あるいは羽根内の乱れ度合が急激に減少するのがわかる。

また同じ図に非ニュートン (擬塑性) 流体の結果も書き加えたが、(1), (2) 式で定義した一般レイノルズ数を用いればニュートン流体と同一値となり、羽根内の乱れ度合はほぼ等しいといえる⁶⁰⁾。

3. 混合特性

攪拌の目的は根本的には槽内液を均一な状態に保つことにあるから、均一液相の混合速度は攪拌研究の基本的なものの1つである。最近は何分攪拌槽の混合時間と連続操作の混合特性を有機的に関連づけるといふ利点から、流動状態を基礎にした混合モデルを構成し、この問題を解析しようとする試みが多くなされている。

3.1 混合時間

攪拌槽内の1点で瞬間的に少量の濃度突変を投入し、槽内各位置の濃度がふたたび均一になるまでの時間を混合時間と定義するのがふつうである。そして食塩水や墨汁を投入したり^{60,73)}酸と塩基などの色の変る反応を利用して行なわれる^{38,45)}、実測値はかなり集積されているが、その値は研究者によりかなり異なる⁶⁾。それは混合時間の測定に任意性のある因子——濃度突変の投入方法、その量と濃度、濃度検出装置の感度、混合終了の判定など——が多分に含まれるためと思われる。

層流域の攪拌では槽内液全体を流動させるように槽寸法にほぼ等しい大きな攪拌羽根を用いたり、リボンやスクリュウ攪拌機が使用される。これらの攪拌機による混合時間はレイノルズ数に関係なく回転数に反比例し

$$t_M \cdot N = \text{const.} \quad (14)$$

であり、右辺の定数は装置により異なる^{21,38)}。またこの原理を利用し、かきとり機をつけ伝熱効率をよくした Crawford & Russel 社の溶液重合用反応器も開発されている⁴⁴⁾。

乱流域での混合時間に関する研究は第4表のように整理されるが、無次元混合時間項の定義が異なり、装置寸法との関係は明確でない。攪拌槽における混合作用は単に乱流拡散のみによって起きるのではなく、液の循環も重要な因子と考えられる。山本⁷⁴⁾はこの両者を考慮して次式を得た。

$$\frac{1}{t_M N} \sim \left\{ \left(\frac{d}{D} \right)^3 N_q + 0.21 \left(\frac{d}{D} \right) \sqrt{\frac{N_p}{N_q}} \right\} \{ 1 - e^{-13(d/D)^3} \} \quad (15)$$

第4表 乱流域における混合時間⁶⁷⁾

攪拌機	邪魔板	相関式	文献
プロペラ	無	$\frac{t_M (Nd^2)^{2/3} g^{1/6}}{H^{1/2} D} \sim N_{Re}^{-1/6}$	19)
プロペラ・タービン	有	$N t_M \sim \text{const.}$	27)
パドル・タービン	無	$N t_M \sim (N^2 d)^{-1/3}$	63)
プロペラ	有・無	$N t_M \sim N^{1/2} d^{1/4}$	63)
タービン	有	$\frac{t_M (Nd^2)^{2/3} g^{1/6} d^{1/2}}{H^{1/2} D^{3/2}} \sim \text{const.}$	45)
プロペラ パドル タービン	有・無	$\frac{q t_M}{V} \sim \text{const.}$	63)
プロペラ パドル タービン	有	$\frac{t_M N^{2/3} d^{4/6} g^{1/6}}{H^{1/3} D^{3/2}} \sim \text{const.}$	6)
タービン	有	$N t_M \left(\frac{d}{D} \right)^2 \sim \text{const.}$	24)

{ }内第1項は循環流の強さを, 第2項は乱流拡散の効果を, 最後の{ }は循環流の対流範囲を示す。

混合時間はレイノルズ数により第12図のように変化する⁴⁵⁾。無次元混合時間は乱流域で一定であるが, 遷移域に致ると次第に大きくなる。

非ニュートン流体の混合時間は Goldleski ら²⁰⁾ によって測定され, ニュートン流体の約10倍と報告されているが, 十分な議論を行なうには実測値が不足している。

3.2 混合モデル

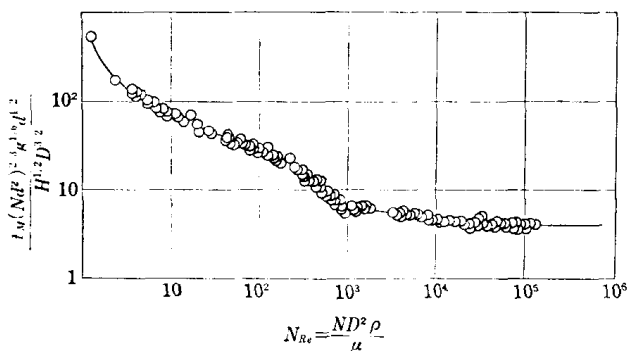
混合モデルを使用すれば, 循環流の強さと流れ中の乱流拡散を共に無理なく考慮でき, 回分操作の混合時間から連続操作の混合特性を合理的に推定できる。混合モデル作製の手順は次のようである。まず槽内流動状態をモデル化し, これに流れ中の拡散過程をつけ加える。混合時間の測定原理は閉ループ回路のある点に δ 関数を加えたときの系の挙動を知ることと本質的に一致しているから, 混合モデルによる解析は動特性の立場により拡散過程も伝達関数として取り扱う。

このような混合モデルは多く提案されたが^{34, 45, 46, 64, 66)} 特に重要なのは van de Vusse⁶⁴⁾ によるプロペラ攪拌機に対する提案であろう。かれはまずプロペラから出てプロペラに帰る循環流を多くの流管に分割した。その分割した流れの混合特性を n 個の完全混合槽列の混合特性で表わし, 濃度変化を求めた。

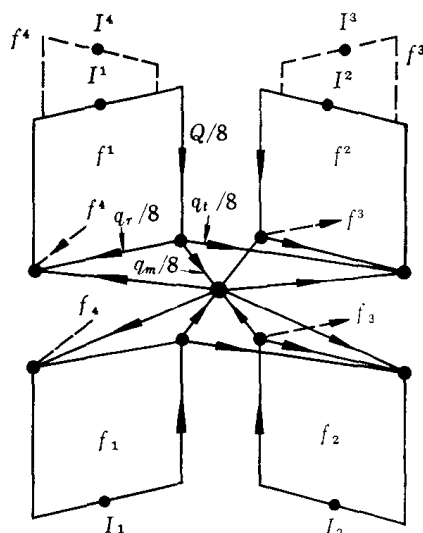
邪魔板つき円筒形攪拌槽で中心攪拌を行なう場合の混合モデルは谷山ら⁶⁰⁾ によって提案された。かれらは先に述べた羽根幅中央における流量分割に加え(第10図) 邪魔板と攪拌軸を含む断面でさらに循環流の分割を行なった。その結果全循環流は邪魔板枚数の2倍個の循環流に分割され4枚邪魔板の場合は第13図のようになる。循環流中の混合特性を n 個の完全混合槽列の混合特性により表わし, 第13図の I^1 点で δ 関数的濃度突変を加えたとき I_3 点での濃度変化を示す伝達関数を求める

$$\bar{G}_B = \frac{\bar{C}_A^s}{\bar{C}_\infty} = \frac{\lambda_m \tau \bar{G}_n}{(1 - \bar{G}_n)(1 - \lambda_s \bar{G}_n)} \quad (16)$$

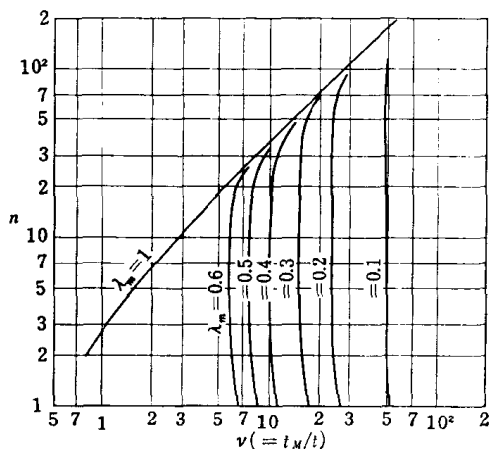
ここに $\bar{G}_n = 1 / \left(1 + \frac{s\tau}{n} \right)^n \quad (17)$



第12図 混合時間とレイノルズ数⁴⁵⁾



第13図 三次元流動模型⁶⁰⁾



第14図 混合循環回数と混合段数⁶⁰⁾

$$\tau = V/Q \quad (18)$$

(17) 式を (18) 式に代入して逆変換すれば $C_{a,3}/C_{\infty}$ と $\phi = t/\tau$ の関係が求まる。

いま

$$C_{a,3}/C_{\infty} = 0.995 \quad (19)$$

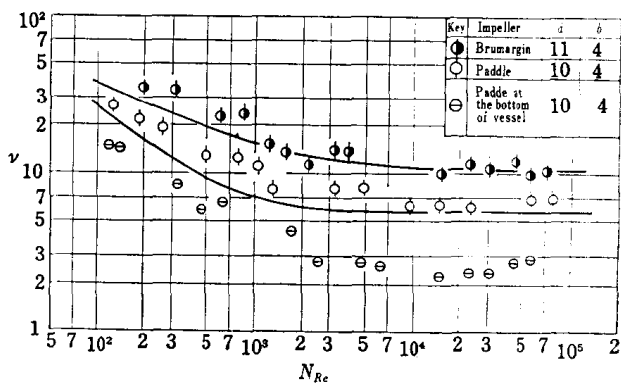
となる時間を混合時間 t_M と定義すれば、その間に循環流が槽内を循環した回数すなわち混合循環回数 ν は

$$\nu = t_M/\tau \quad (20)$$

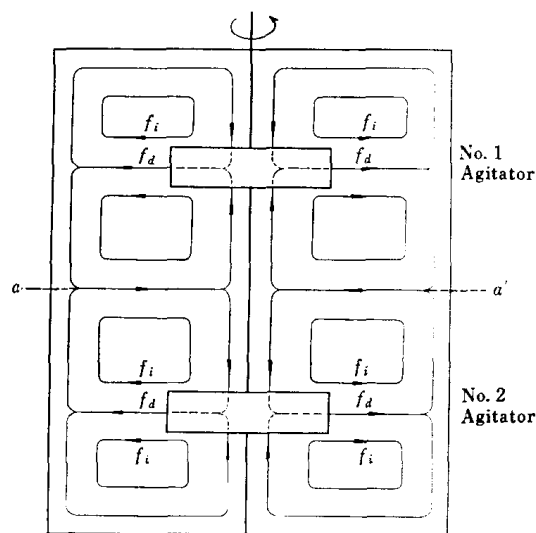
で与えられる。種々の混合段数 n と合流量比 λ_m に対し上記の方法で ν を求めると第14図を得る。このように λ_m が1にきわめて近い場合を除き、混合循環回数は λ_m によって決定される。

したがって循環流量と羽根内合流量比さえ知れば混合時間は予知できることになる。谷山ら⁶⁰⁾による混合循環回数の実測値は第15図のようになる。図中の実線は第11図と (13) 式より求めた羽根内合流量比をもとにして第14図から読みとった理論値である。実測値と理論値の一致は比較的良好で、混合モデルの妥当性を示すと思われる。また攪拌羽根を槽底にとりつけると $\lambda_m = 1$ となり、最小混合循環回数を与える。この点でも混合モデルによる予想は実験とよく一致する。同様にして非ニュートン（擬塑性）流体の混合循環回数を求めると、同一レイノルズ数においてはニュートン流体のそれに等しいことが明らかになった⁶⁰⁾。これは第11図の羽根内合流量比が相等しいことより当然考えられることである。

2段羽根攪拌槽の混合時間も全く同じ原理に基づいた混合モデルにより解析された^{57,61)}。この場合羽根内合流量比に加えて第16図の $a-a'$ 断面における断面合流量比を導入することによって、2段羽根攪拌槽の混合循環回数はこれら2つの合流量比により決定されることが明らかとなった。そしてレイノルズ数の減少に伴ない、断面合流量比は羽根内合流量比より急速に減少し、非ニュートン



第15図 混合循環回数のレイノルズ数による変化 ($D=H=20\text{cm}$)⁶⁰⁾



第16図 3段羽根攪拌槽内のフローパターン⁶¹⁾

ン流体の断面合流量比はニュートン流体のそれより小さいといわれる⁶¹⁾。

4. 異相分散系

異相分散系攪拌の第1の目的は系全体をマクロな均一状態に保つことにあり、第2の目的は物質移動の促進である。したがって固液系では粒子の浮遊化限界が、液液および気液系では分散滴径が主要な因子となり、物質移動速度もこれらの因子に大きく支配される。

4.1 固液系攪拌

粒子の浮遊化限界は古くから行なわれてきた研究の1つであるが、最近では Weismanら⁶⁹⁾ や Porcelliら⁴⁹⁾の研究がある。Weismanら⁶⁹⁾はニュートン流体中でガラス球の浮遊化実験を行ない、懸濁部分と純液のままの部分の間に生じる界面の高さ(最上段攪拌羽根からの)と攪拌所要動力の間に明確な相関性のあることを明らかにした。したがって粒子が槽全体に均一に浮遊するのに必要な最小攪拌所要動力もまた計算できる。

固体粒子表面の液境膜物質移動係数も古くから測定されているが、液の物性あるいは装置寸法との相関関係はまだ十分解明されたといにくい状態である。ただ粒子の浮遊化限界近くまでは攪拌速度の増加により急激に大きくなり、浮遊後は大きな変化をしないといわれる。なおHarriott²²⁾は固液系物質移動に粒子と周囲の流体との速度差によって起こる定常的物質移動と粒子まわりの濃度境界層が更新されて起こる非定常物質移動の2つの機構を考慮すべきことを提案した。そして攪拌槽における物質移動係数を静止液中を自由沈降する場合の値より推算する方法について述べた。

4.2 液液・気液系攪拌

攪拌槽内の単位容積当りの分散相表面積は Vermeulenら⁶⁵⁾の測定以後も多くの報告があり、分散相濃度が低く凝集作用を無視できる条件での相関式は第5表のように整理される。おおよそ単位容積当りの消費動力 P_v の^{2/5}乗に比例するといえよう。凝集作用の無視できないときは^{1/4}乗に比例するという実験結果^{50,59)}や^{2/3}乗でよいとする意見がある⁵¹⁾。またChurchら¹¹⁾は分散液滴に対し安定操作範囲が存在すると述べている。滴径分布は山口ら⁶⁰⁾により測定され、攪拌速度の増加により正規分布に近い状態から対数正規分布に近づくといわれる。また分散液の微粒化に限度があり、低界面張力の液液系に対して攪拌速度上昇の効果が減少すると述べている⁶⁰⁾。なお滴形成の基礎理論は遠藤^{15,16)}によって解説されているし、Levich²⁸⁾の書物にも詳しい。

滴外表面の境膜物質移動係数は液液系では比重差が小さいため攪拌の影響は少なく、物質移動量増加は大部分表面積増加によるといわれる⁴²⁾。また滴が大きい場合は滴内循環による物質移動の促進も考慮する必要がある。さらに最近、物質

移動速度は滴が生成するとき非常に大きく、滴の分散が定常状態に達した後は小さいという説もある¹⁸⁾。液液系の物質移動速度に関して Engelら¹⁴⁾や Rushtonら⁵⁴⁾の研究がある。また通気攪拌装置における物質移動係数

第5表 分散相表面積

液々系	気液系	文献
$(P_v)^{2/5}(\rho'/\sigma^3)^{1/5}(\phi/f_\phi)$	$(P_v)^{1/2}(\mu_d^3/\mu_c)^{1/4}(\phi/\sigma f_\phi)$	65)
$P_v^{2/5}$	—	51)
$(P_v)^{2/5}(\rho_c/\sigma^3)^{1/5}(\mu_c/\mu_d)^{1/4}(1/\phi)^{1/2}$	$(P_v)^{2/5}(\rho_c/\sigma^3)^{1/5}(V_s)^{1/2}$	88)
$(P_v)^{2/5}(\rho_c/\sigma^3)^{1/5}$	—	11)

は多くの研究があり^{9,36,43)}

$$k_s \propto (P_s)^x (V_s)^y \quad (20)$$

の形に実測値が整理されている。なお物質移動に関するレビューにおいて攪拌槽の問題にもふれられているから御参照いただきたい^{7,23,35)}

以上攪拌操作の最近の研究について概観したが、紙数の都合上、個々の問題について詳しく述べることができなかつたので、さらに詳細な内容は原報や個々の題目に関するレビューや解説を併読していただきたい。攪拌研究は今後いっそう基礎的な分野——乱流理論の適用による乱れの構造あるいは乱流拡散機構の解明、異相系分散操作における単位容積あたりの消費動力の重要性の理解など——に重点が置かれ、攪拌操作の全容が明らかにされていくことと思われる。

使用記号

b : 攪拌羽根幅	[cm]
C_∞ : 回分攪拌槽で濃度突変を加えた後 $t = \infty$ における平均濃度	[gr/cm ³]
$C_{d,s}$: 回分攪拌槽で濃度検出点における濃度	[gr/cm ³]
D : 攪拌槽直径	[cm]
d : 攪拌羽根直径	[cm]
f_ϕ : ϕ の関数	
\bar{G}_B : (16) 式で定義される伝達関数	
\bar{G}_n : n 個の直列完全混合槽列の混合特性を表わす伝達関数	
g : 重力加速度	[cm/sec ²]
g_c : 換算係数	[gr·cm/Gr·sec ²]
H : 液深さ	[cm]
H_p : 攪拌羽根高さ(槽底から)	[cm]
K_q, K_Q : (5), (6) 式中の定数	
k_r : 攪拌槽における気液間物質移動係数	[cm/sec]
N : 回転速度	[r. p. s]
N_P : 動力数 ($Pg_c/\rho N^3 d^5$)	[—]
N_q : 吐出流量数 ($=q/Nd^3$)	[—]
N_Q : 循環流量数 ($=Q/Nd^3$)	[—]
N_{Re} : レイノルズ数 ($=Nd^2\rho/\mu$)	[]
n : 循環流中の混合段数	
n_B : 邪魔板枚数	
n_p : 攪拌羽根枚数	
P : 攪拌所要動力	[gr·cm/sec]
P_v : 単位容積あたり消費動力 ($=P/V$)	[gr/cm ² ·sec]
P_m : (10) 式で定義される割合	[—]
Q : 循環流量	[cm ³ /sec]
q : 吐出流量	[cm ³ /sec]
q_m : 合流量 ($Q = q_m + q_r + q_i$)	[cm ³ /sec]
q_r : 回帰流量 ($Q = q_m + q_r + q_i$)	[cm ³ /sec]
q_i : 移行流量 ($Q = q_m + q_r + q_i$)	[cm ³ /sec]
q_s : 定常流量 ($q_s = q_r + q_i$)	[cm ³ /sec]
r_s : 検査円筒面半径 (第8図)	[cm]
S : ラプラス変換パラメーター	
t_M : 混合時間	[sec]
V : 攪拌槽容積	[cm ³]
V_s : 通気線速度(通気量を槽断面積で割ったもの)	[cm/sec]