

〔醸工 第43巻, 第12号, p.948~958, 1965〕

非ニュートン流体の混合時間

合葉 修一・鈴木 邦威・北井 須美

(東京大学応用微生物研究所)

Mixing-Time Studies on Non-Newtonian Fluids

Shuichi Aiba, Kunitaka Suzuki and Sumi Kitai

(Institute of Applied Microbiology, University of Tokyo)

Using a paddle type impeller whose ratio of width to span was larger than usual, an axial dispersion coefficient in a mixing vessel of a clay suspension was measured by radioisotope technique (P^{32}). The clay suspension studied was assumed to be a Bingham fluid judging from the flow curve determined with a concentric double-cylinder type viscometer.

The experimental results of dispersion coefficients were arranged based on dimensional analysis. Values of the mixing time in the clay suspension were calculated therefrom. The effect of rotational speed of the impeller used on the mixing time seemed to be markedly large compared with that for Newtonian fluids.

As control experiments, aqueous solutions of glycerine and water were also used. The empirical formulae which have been reported by other workers on the mixing time of Newtonian fluids were reviewed carefully. It was found, then, that the Non-Newtonian fluid studied here approximates the Newtonian, if the plastic viscosity is used in lieu of the Newtonian viscosity in expressing the Reynolds number of the clay suspension.

緒 言

従来、攪拌槽における液相混合については、H. Kramers⁷⁾ら、J.G. van de Vusse¹⁶⁾、E.A. Fox²⁾ら、永田ら¹²⁾によって興味ある結果が発表されている。これらの報告はニュートン流体を用いて混合時間を実験的に測定し、混合時間におよぼす諸因子——液の物性、攪拌装置の寸法、形状および攪拌条件など——の影響を実験的に考察しそれぞれ定量的な相関々係を提出している。

さて、混合時間とは、ある定常状態で攪拌されている液に、その液と同質または異質の液をトレーサーとして少量投入した場合、投入時を起点として両者が均一にまざり合うまでの時間で定義することが多いが、この定義による混合時間は理論的には無限大となるはずである。しかし、実験的には完全混合達成率をたとえば98%というように一定の水準に定めて求めるか、もしくは、ある実験に用いた混合度測定法(後述)による混合程度がトレーサー投入後、もはや変化しなくなりはじめの時間までを単に混合時間とする例が多いようである。

混合時間の測定は攪拌槽に酸あるいはアルカリを注入し指示薬によって中和反応をみる方法^{2,12)}、電解質を注入し攪拌液の電気伝導度の変化を電極によって追跡する方法⁷⁾、シュリーレン法¹⁶⁾などいくつかの実験方法が多くの研究者によって用いられている。これら多くの研究者により、ニュートン流体の混合時間については大方判明しているようである。しかしながら、これらの研究者による報告は各自各様の実験方法でその混合時間もそれ

それぞれの測定方法に依存することが多く、多くの実験結果について相互の比較検討が不十分のような状態である。そこで著者らはニュートン流体および非ニュートン流体について放射性同位元素 P^{32} を用い攪拌槽内における攪拌軸方向の分散係数 E をまず測定し、混合時間はその測定した E の値を用い計算によって求め、ニュートン流体については前記研究者らの結果と本実験結果とを比較検討し、非ニュートン流体については E に影響をおよぼす各因子について次元解析し、各無次元項についての相関関係を示して実験式を求めた。攪拌条件が一定のとき粘度の大きい液は混合が遅く混合時間が大きくなるので粘度の小さい液に比して問題点が多く、また攪拌度合が同じでも攪拌槽の幾何学的寸法の大小により混合時間の値が異なる。したがって實際上重要なことは混合時間の絶対値ではなくて、混合時間に影響をおよぼす諸因子を含む mixing-time factor ϕ の値である。 ϕ は流体の混合の度合を示すのに便利な表現であり、その概念は相似な、あるいは相似でない攪拌槽の流体混合度合が同程度のものであるかどうかを判定するためにスケールアップに際して用いることができる。結局、ニュートン流体については多くの研究者らによる研究結果より ϕ と流体の物性を含まる変数との相関関係を求めておくと、これらの相関関係よりニュートン流体の混合時間を逆に推定することは困難ではない。しかしながら、非ニュートン流体については従来より混合時間に関する研究報告がほとんど見当たらないのでここでは ϕ によるニュートン流体と非ニュートン流体との比較および非ニュートン流体混合のスケールアップに関連した混合時間をそれぞれ実験的に検討したので報告する。

実験装置および実験方法

(a) **試料** 実験に用いた試料は日本特殊窯業株より購入した蛙目粘土で、その蛙目粘土の種類も 2 種類についておこなった。その一つは予備実験に用いた蛙目粘土でわずかに外観が黄色がかっており、他の一つは本実験で用いた蛙目粘土で外観が灰色がかっているものである。蛙目粘土中に含まれている水分は乾燥器により蛙目粘土 5~10 g を約 120°C で 2~3 時間加熱しその重量減少を測定して求めた。その結果、湿量基準含水率（以下含水率とよぶ）は 4~6% であった。実験には蛙目粘土と水とをある割合で混ぜて泥漿を調製して用いた。泥漿の物性は 18°~24°C の各実験範囲についてピクノメーター（5 cc）および円筒型回転粘度計によって測定した。Fig. 1 に泥漿の密度についての実験結果を示す。

(b) **泥漿の流動特性測定法** 実験に用いた円筒型回転粘度計の寸法は、内部円筒の直径 = 22.00 (mm)、外部円筒の直径 = 34.00 (mm)、内部円筒の有効長さ = 49.50 (mm) で内部円筒と外部円筒との間に泥漿をいれ、外部円筒を一定速度で回転し、内部円筒の振れを戻すに必要なトルクを測定し粘度を計算した。この粘度計では振れをひき戻すには磁石、鉄心コイルを用いて磁力でおこなう。鉄心コイルに通ずる電流の強さはスライダックで調節し mA 計で電流を測定する。

電流の強さとトルクとの関係は内部円筒とバネの動きをしている弾性金属板に直結したトルクテーブルを用いてあらかじめ分銅で検定しておく。内部円筒に直結した上記の金属板には磷青銅を使用した。測定にさいしては内部円筒の可動部分が十分泥漿に浸るように注意し、粘度計の端面の影響がないようにした（底部の端面の影響は構造上ないように設計した）。外部円筒の回転数は 1~100rpm まで連続的に変えられる。Fig. 2 は流動特性測定結果の一例で横軸には外部円筒の回転数、縦軸には内部円筒面に作用したトルクをとっている。Fig. 2 以

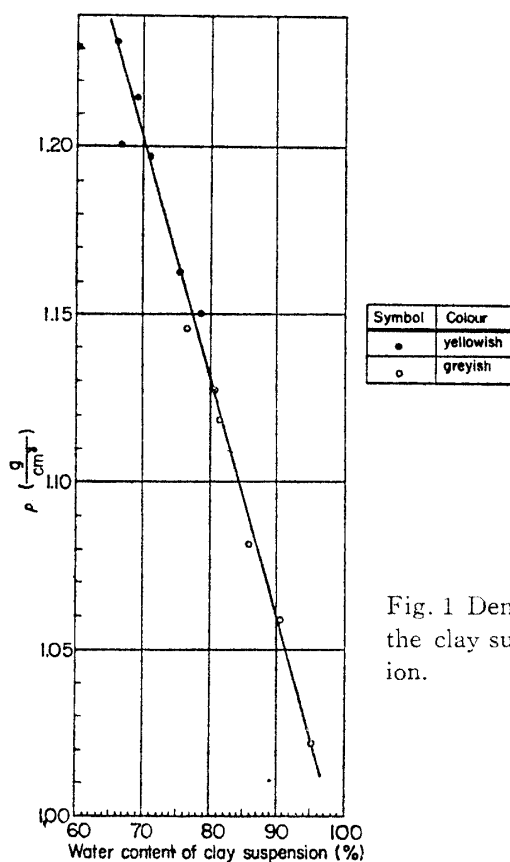
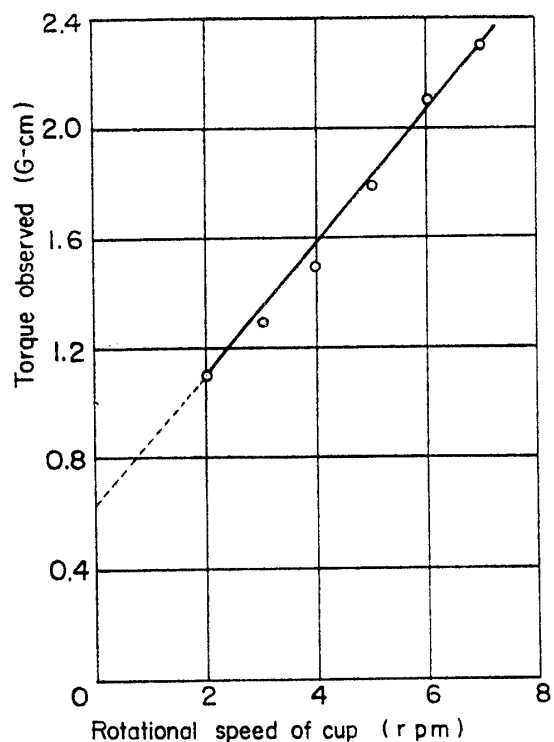


Fig. 1 Density of the clay suspension.



Water content of clay suspension = 69.92(%)

Calculated values of $\eta = 20.4 \left(\frac{g}{cm \text{ sec}} \right)$

$$\tau_v = 8.93 \times 10^{-3} \left(\frac{G}{cm^2} \right)$$

Fig. 2. Determination of (η , τ_v) values.

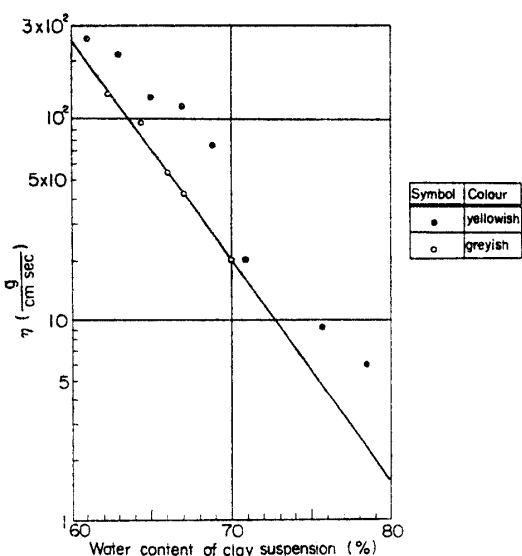


Fig. 3. Values of η of the clay suspension.

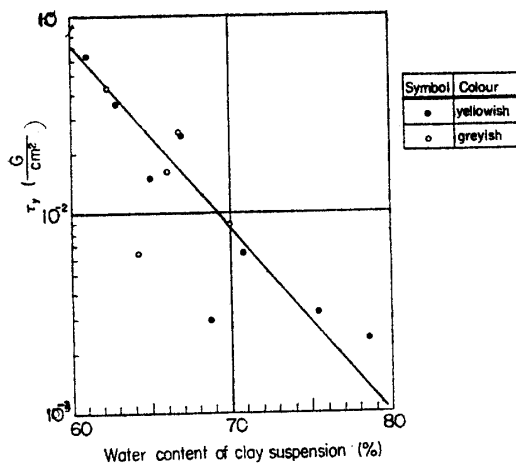


Fig. 4. Values of τ_v of the clay suspension.

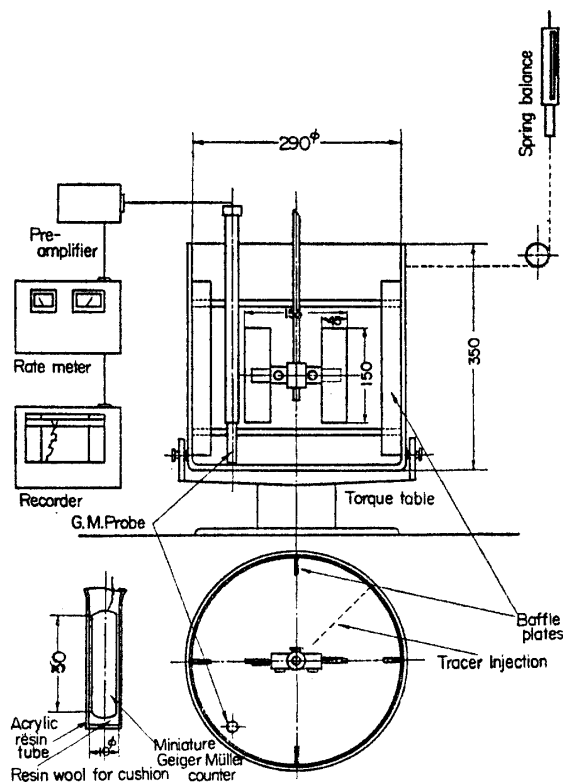


Fig. 5. Experimental apparatus.

外の多くの流動曲線をも検討した結果、実験に用いた泥漿については Fig. 2 にみるようにトルクと回転数との間に直線関係がほぼみとめられたので、ここでは泥漿をビンガム流体として解析した。泥漿の塑性粘度 η および剪断応力降伏値 τ_v は外部内筒の回転数対内部円筒に作用するトルクの実験結果より試行法によって計算することができる⁹⁾。以上の方法で測定、算出した結果は Fig. 3 に η 対泥漿含水率、Fig. 4 に τ_v 対泥漿含水率の関係で示すとおりである。ニュートン流体として用いたグリセリン溶液の密度と粘度は混合時間測定の実験と

並行してそれぞれピクノメーター (5 cc) およびオストワルド粘度計で測定した。水の密度と粘度は慣用されている値を物性定数表³⁾より引用した。

(c) **実験装置および実験方法** 実験装置略図を Fig. 5 に示す。実験に用いた攪拌槽は内径 29cm、高さ 35cm のガラス製で幅 3 cm、長さ 28cm の邪魔板2枚をつけ、中心に槳型攪拌羽根 (攪拌羽根の直径=155(mm)、羽根の幅=150×45(mm)) を槽底より 15cm の位置に取りつける。液として含水率67~74%の蛙目粘土泥漿を用い、これを深さ 30cm まで満たした。各実験条件について泥漿の攪拌状態が定常になった後、トレーサーとして放射性同位元素 P³² 約 1 mC、4~5 ml をすばやく液表面に槽の半径方向にそってなるべく一様に注射器で注入し (Fig. 5 参照) 注入後の P³² の経時的濃度変化を槽底より 2 cm、槽壁より 2 cm の位置にあらかじめ設置した小型 G.M. 管 (10φ×30) で検出し、Pre-amplifier, Ratemeter を経て Recorder で記録した。この経時的濃度変化がなくなるまで実験を続け記録した。この濃度変化がみられなくなった際にはあらためて液を激しく攪拌して槽内が均一に混合されたかどうかを確認する。各実験で注射器によって P³² を注入するのに要した時間は 4~5 秒である。小型 G.M. 管は薄いアクリル樹脂製の管に封じて槽内に設置した。小型 G.M. 管の安定性については十分注意し、実験にさいしては毎回プラトーを測定し P³² の濃度の読みが荷電圧によって変らないようなプラトーの荷電圧 600 volt を用いた。攪拌羽根の回転数はハンドタコメーターによって測定した。実験終了後 P³² で汚染された泥漿は貯槽に一定期間ため放射線強度が十分に減衰した後、下水道に棄てた。また各実験で P³² によって汚染された攪拌槽は汚染部分が検出できなくなるまで洗剤を用い十分に洗滌した。

実験結果および考察

(a) **攪拌軸方向 (縦方向) の分散係数算出方法** 攪拌槽内の流体の混合は半径方向には一様であると仮定すると、縦方向の分散係数 E は(1)式で示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots \dots \dots (1)$$

t = 時間
 C = トレーサー濃度
 E = 縦方向の分散係数
 x = 縦方向の距離

初期条件および境界条件は

$$\left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=s} = 0$$

$$C(x,0) = 0 \quad \lambda < x < s$$

$$C(x,0) = C_0 \quad 0 < x < \lambda$$

$$C_E S = C_0 \lambda$$

C_0 = 注入トレーサーの濃度
 C_E = 混合完了後の攪拌槽内のトレーサー濃度
 S = 攪拌槽中の液深さ
 λ = 注入トレーサー量のパルス巾

(1)式を上記の条件で解くと

$$C(x,t) = C_E \left\{ 1 + \frac{2S}{\pi\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi\lambda}{s}}{n} \cdot \cos \frac{n\pi x}{s} \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{s}\right)^2 E t} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

$S \gg n\lambda$ とすると(2)式は

$$\frac{C}{C_E} = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi x}{S} \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{S}\right)^2 E t} \dots \dots \dots (3)$$

(3)式に実験条件 $x = 28$ (cm), $S = 30$ (cm) を代入すると

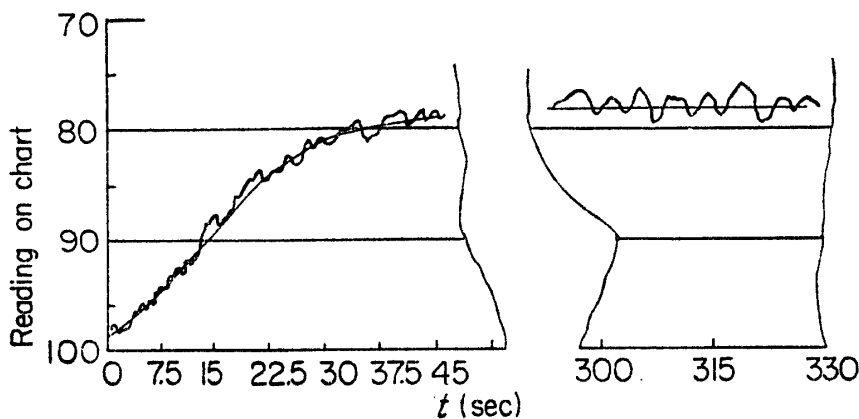
$$1 - \frac{C}{C_E} = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{28\pi n}{30} \cdot e^{-kn^2} = -2(-0.9781e^{-k} + 0.9135e^{-4k} - 0.8090e^{-9k} + 0.6812e^{-16k} - \dots) \dots \dots \dots (4)$$

ただし $\left(-\frac{\pi}{S}\right)^2 Et = k$

(4)式より $(1 - C/C_E)$ 対 k の関係が計算で求められるから (Fig. 6 参照), $x=28(\text{cm})$, $S=30(\text{cm})$ のときの

Table 1. Example of determining E values from the experimental results.

- (1) Experimental data, Run No. 274
 - Water content of clay suspension 69.92%
 - Rotational speed of impeller 170 rpm
 - Temp. of Fluid 23°C, High Tension 600 volts., Chart speed 80mm/min. Radioisotope P^{32} about 0.9mC. 4ml, Time required for injection about 5 sec.



(2)

	t (sec)	Reading on chart	$C_E - C$	$1 - C/C_E$	k (From Fig. 6)	k/t (1/sec)	E (cm^2/sec)
	0	98.0	20.0	1.000			
$C_E \propto$ Reading, 20 on chart	11	92.3	14.3	0.715	0.95	0.0864	7.89
	15	89.0	11.0	0.550	1.26	0.0840	7.67
	19	86.0	8.0	0.400	1.58	0.0832	7.60
	23	83.8	5.8	0.290	1.91	0.0830	7.58
	26	82.3	4.3	0.215	2.20	0.0846	7.72
$C=0$, " " at $t=0$	30	81.4	3.4	0.170	2.43	0.0810	7.39
	34	80.5	2.5	0.125	2.75	0.0809	7.39
	38	79.9	1.9	0.095	2.93	0.0772	7.05
	41	79.3	1.3	0.065	3.40	0.0829	7.57
	45	78.8	0.8	0.040	3.70	0.0822	7.50
	∞	78.0	0				

av. $7.53\text{cm}^2/\text{sec}$

(3) Take, $k=4.1$ in Fig. 6, $C/C_E=0.97$

Time θ required for this degree of mixing, $\theta = \frac{k \cdot S^2}{\pi^2 \cdot E} = \frac{(4.1)(30)^2}{(3.14)^2(7.53)} = 50(\text{sec})$

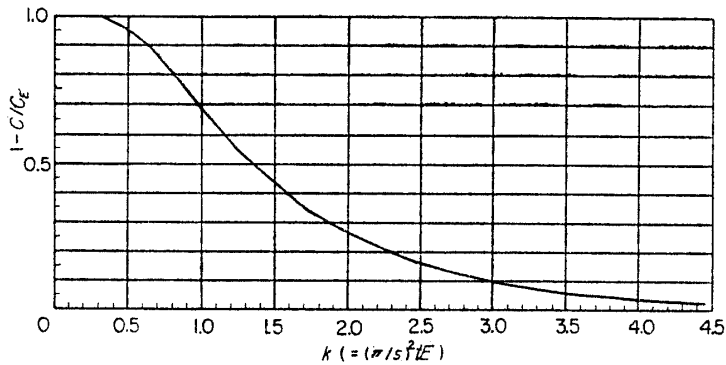


Fig. 6. $(1-C/C_E)$ vs. k , $x=28(\text{cm})$, $S=30(\text{cm})$.

$(1-C/C_E)$ 対 t の実験データより Fig. 6 を用いて E の値を求めることができる. Table 1 に実験データより E の値を求めた一例を示す. 混合時間 θ は $C/C_E=0.97(k=4.1)$ になるまでの時間として $\theta=ks^2/\pi^2 E$ に E の実験値を代入して算出した.

(b) 次元解析 泥漿に関する実験データを整理するために, E が攪拌羽根の直径 D_i , 攪拌羽根の回転数 n , 泥漿の塑性粘度 η , 剪断応力降伏値 τ_v , 密度 ρ の関数であると仮定して次元解析すると

$$E = f(D_i, n, \eta, \tau_v, \rho) \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{E}{nD_i^2} = K' \left(\frac{D_i^2 n \rho}{\eta} \right)^d \left(\frac{\tau_v g_e}{n \eta} \right)^e \dots \dots \dots (6)$$

K' = 比例定数

d, e = 指数

$$\frac{1}{N_{pe}} = K' (N_{Re})^d (N_{Hm})^e$$

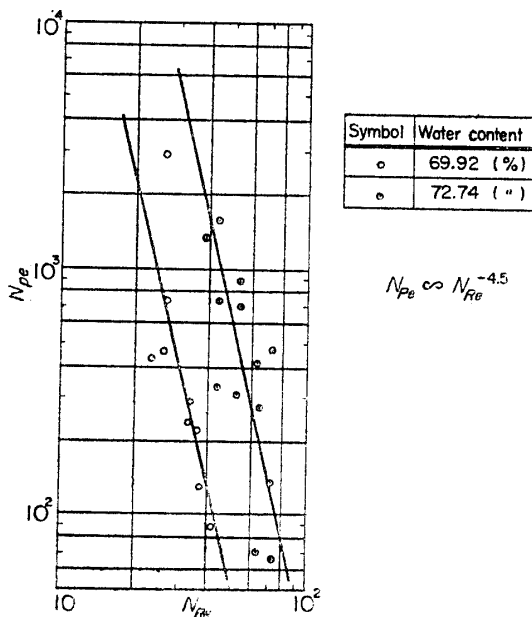


Fig. 7. N_{pe} vs. N_{Re} (clay suspension).

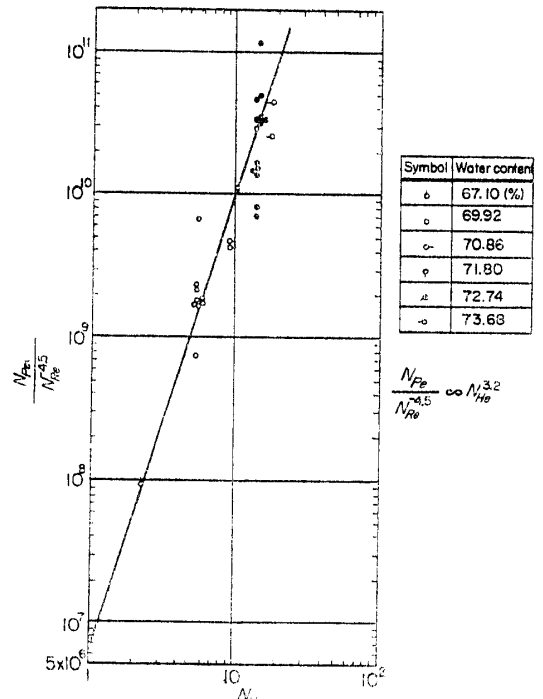


Fig. 8. $\frac{N_{pe}}{N_{Re}^{-4.5}}$ vs. N_{Re} (clay suspension).

$$= K'(N_{Re})^d (N_{He}/N_{Re})^e$$

$$= K'(N_{Re})^{d-e} (N_{He})^e$$

$$N_{Pe} = K(N_{Re})^l (N_{He})^m \dots\dots\dots (7)$$

ここに

- g_c = 重力換算係数
- N_{Bm} = ビンガム数^{1,5,14)}
- N_{Pa} = ペクレ数
- N_{Re} = レイノルズ数¹⁰⁾
- N_{He} = ヘッドストロム数^{10,17)}
- K = 比例定数
- l, m = 指数

泥漿の E に関するデータから, Fig. 3 および Fig. 4 を用いて, N_{Re} , N_{Pe} , N_{He} の値がそれぞれ算出できる。ついで求められた N_{Re} , N_{Pe} , N_{He} から Fig. 7 および Fig. 8 に示したような手続きを経て(7)式の指数 l, m および比例定数 K が定まる。かくして求められた実験式は

$$N_{Pe} = 6.4 \times 10^6 (N_{Re})^{-4.5} (N_{He})^{3.2} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式を用いて逆に E を算出した場合と E の実測値との一致の程度を Fig. 9 に示した。

(c) 考 察 混合時間 θ におよぼす攪拌羽根の回転数 n の影響はこの実験結果と他の研究者らの結果とをあわせて Table 2 に要約した。グリセリン溶液と水の場合の E の算出方法は泥漿の場合と同じで、それらの E および θ に関する実験結果の一部を Table 2 および Fig. 10 に示した。本実験における θ は前述のように $C/C_E = 0.97$ に対応する値であるが、他の研究者らの場合、 θ に対する C/C_E は明確でない。しかし、ここでは便宜上、他の研究者による θ の測定結果も $C/C_E = 0.97$ の程度に対応するものと仮定する。Table 2 によるとニュートン流体に関しては θ におよぼす n の影響は N_{Re} に依存していることが明らかであり、非ニュートン流体に関しては指数“ a ”がニュートン流体の場合よりもかなり大きいようである。非ニュートン流体の場合に用いた N_{Re} はニュートン流体における N_{Re} の分母の粘度 μ の代わりに塑性粘度 η を用いた。 θ についての本実験結果と他の研究者らの研究結果の比較を Fig. 10 に示した。Fig. 10 の縦軸には Norwood ら¹³⁾ が提唱している mixing-time factor ϕ をとり、横軸には N_{Re} をとってデータをプロットした。Fig. 10 中の実線は Norwood ら¹³⁾ によって発表されたデータの平均値を示し、永田ら¹²⁾ のデータは流体密度を 1.0g/cm^3 として計算したものであり、そ

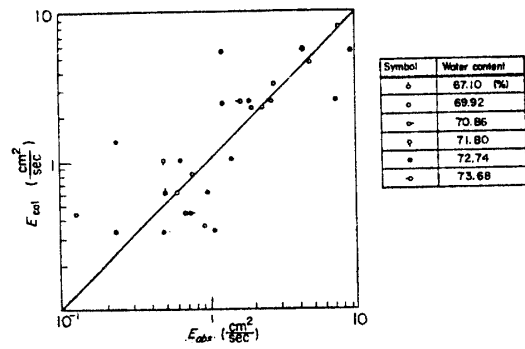


Fig. 9. Fitness of E_{obs} . to E_{cal} .

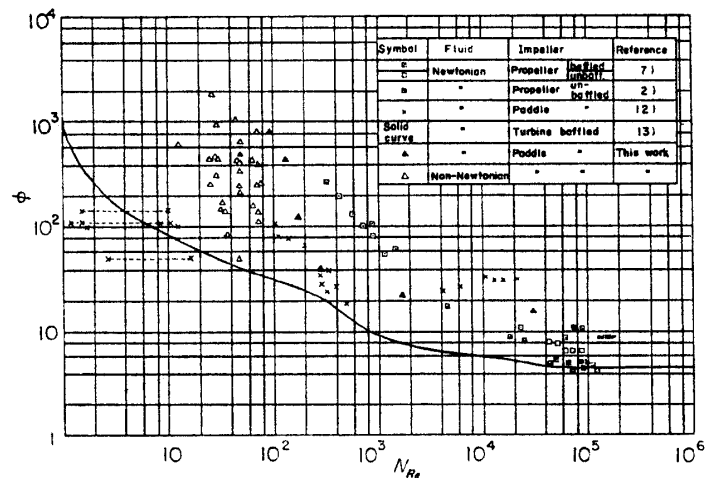


Fig. 10. Comparison of mixing-time data in terms of ϕ vs. N_{Re} .

$$\phi = \frac{\theta \cdot (n D_i^2)^{2/3} \cdot g^{1/6} \cdot C_i^{1/2}}{S^{1/2} \cdot D_i^{3/2}}$$

$$N_{Re} = \frac{n D_i^2 \rho}{\mu} \quad \text{for Newtonian fluid}$$

$$N_{Re} = \frac{n D_i^2 \rho}{\eta} \quad \text{for Non-Newtonian fluid}$$

Table 2. Effect of n on θ .

Fluid	Type of Impeller	Baffling Conditions	"a" values in $\theta \propto n^{-a}$	$\frac{nD_i^2\rho}{\mu}$	Procedures of measuring mixing time	References
Newtonian	Propeller	daffled & unbaffled	1	4.5×10^4 $\left\{ \begin{array}{l} < 250 \\ > 10^3 \sim 10^4 \end{array} \right.$	Conductivity (platinum electrode)	7)
	Paddle	unbaffled	4.6	< 250	Schlieren method	16)
	Turbine		1.6	$> 10^3 \sim 10^4$		
	Propeller	unbaffled	4.5	< 250		
			1.5	$> 10^3 \sim 10^4$		
	Propeller	unbaffled	1.7	$< 10^4$	acid-base neutralization (visual) and iodine value methods	2)
			0.8	$> 10^4$		
	Turbine (dual & unshrouded)	baffled	3	$< 40 \sim 50$	soluble dye injection (visual)	8)
			1	$> 40 \sim 50$		
	Paddle	unbaffled	1.4	Laminar	$I_2 + Na_2S_2O_3$ (visual)	12)
Turbine	baffled	> 0.7	$< 10^4$	acid-base neutralization (visual)	13)	
		0.7	$> 10^4$			
Paddle	baffled	3.4	$< 10^2 \sim 10^3$	Radio isotope P ³²	This paper	
Non-Newtonian	Paddle	baffled	5.5	$\frac{nD_i^2\rho}{\eta}$ $= 10 \sim 10^2$	Radio isotope P ³²	This paper

の点線は ϕ の変化なしに N_{Re} がその間の値もとりうることを示す。すなわち、原報¹²⁾によれば θ の値が流体の粘度の変化 ($9 \sim 57 \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$) によって影響されていないからである。Fig. 10 の各研究者らのデータが図中に示した実線からへだたっている主な原因は攪拌装置がことなること特に攪拌羽根の型式がそれぞれちがっていることによるものであろう。またこの図で非ニュートン流体に関するデータもニュートン流体のデータの中に加えられ、統一されて相関関係が一応示されていることは興味あることと考えられる。ここでいう ϕ 対 N_{Re} の相関に関するかぎりニュートン流体と非ニュートン流体の差はみられないように思われる。ここで非ニュートン流体の N_{Re} について考察してみよう。本実験における蛙目粘土泥漿の η および τ_y の値と他の研究者の報告している蛙目粘土泥漿の η および τ_y の値を泥漿の含水率 72.74% を例にとって Table 3 に示したが、その物性値はそれぞれ大巾に異なっている。これは同じ蛙目粘土でもさらにその種類が異なっているためにこのように物性値にいちじるしい差が生じたとも考えられるが、この点についてはさらに多方面からの検討をすすめている。言う

Table 3. Comparison of (η, τ_v) values with the published data.

$\eta \left(\frac{\text{g}}{\text{cm sec}} \right)$	$\tau_v \left(\frac{\text{G}}{\text{cm}^2} \right)$	Measurement	Reference
10.0	4.65×10^{-3}	Rotational viscometer	This work
7×10^{-1}	7×10^{-2}	" "	6)
6×10^{-2}	2×10^{-1}	Flow through round pipe	4)

Water content of clay suspension 72.74%

までもなく Fig. 10 の相関関係を求める際必要な η (および τ_v) は直接本実験で測定した値を用いた。攪拌槽における剪断速度の平均値 $(dv/dr)_{av.}$ はニュートン流体⁹⁾についても非ニュートン流体についても(9)式で表わすことができるとされている。

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_{av.} = k'n \dots\dots\dots (9)$$

ただし n = 羽根の回転数 (rps)

つきにビンガム流体としての泥漿の流動式は(10)式であらわされる。

$$(\tau - \tau_v)_{gc} = \eta \left(\frac{dv}{dr} \right) \dots\dots\dots (10)$$

さて、非ニュートン流体における攪拌動力推定法でしばしば用いられるような便法、つまり攪拌槽内の平均剪断速度と回転粘度計内の剪断速度とを仮りに等しいとすると*

$$\left(\frac{dv}{dr} \right)_{av.} = \left(\frac{dv}{dr} \right) \dots\dots\dots (11)$$

したがって非ニュートン流体としての泥漿の見掛け粘度 μ_a は

$$\mu_a = \frac{\tau_{gc}}{\left(\frac{dv}{dr} \right)_{av.}} = \eta + \frac{\tau_v g_c}{\left(\frac{dv}{dr} \right)_{av.}} = \eta + \frac{\tau_v g_c}{k'n} \dots\dots\dots (12)$$

(9)式の比例定数 k' は攪拌槽中の流体の物性および攪拌羽根の幾何学的寸法などによって変化するが大体のところ $k' = 9 \sim 15$ とされている¹¹⁾。

本実験で測定した η および τ_v に関するかぎり(12)式の右辺の第2項が第1項に比べて小さいので η はほぼ μ_a に等しいといえよう。換言すれば本報で用いた非ニュートン流体のレイノルズ数 N_{Re} は、ニュートン流体で用いる粘度 μ に対して見掛け粘度 μ_a を用いたことに匹敵するともいえよう。

要 約

権型攪拌羽根 (150(mm)×45(mm)) を設置した攪拌槽で蛙目粘土の泥漿を攪拌した場合、攪拌軸方向の液分散係数 E を放射性同位元素 P^{32} を用いて実験的に測定した。 E の実験結果を次元解析によってまとめ、実験式(8)式を得た。泥漿の混合時間 θ は E をもとにして計算で求めた。ビンガム流体の θ におよぼす攪拌羽根回転数 n の影響は本実験の範囲内についてはニュートン流体と比較してかなり大きいようである。グリセリン溶液および水 (ニュートン流体) についての比較実験の結果は他の研究者らの実験結果と著しく隔っているときは言えず、この事実は本法による混合時間測定法および測定結果が一応受け入れられてよいことを示す一つの証左であろう。ビンガム流体として用いた泥漿の混合実験に関するデータは泥漿の N_{Re} 計算に塑性粘度 η を用いるとニュートン流体の場合の相関関係とはほぼ同じ傾向がみられた。 *Actinomycetes* などの培養液はしばしば非ニュートン流体 (ビンガム流体あるいは擬塑性流体) としての特性を示すことが知られているが、本報告の結論をさらに上記の

* (11)式を設定することが本報告の実験結果を検討するうえに重大な誤りをもたらすとは考えられない。

ような非ニュートン液体の場合にも拡張できるか否か検討中である。

使用記号

a	= empirical exponent (Table 2)
C	= tracer concentration
C_0	= tracer concentration injected
C_E	= tracer concentration after completion of mixing
d	= empirical exponent, Equation (6)
D_i	= impeller diameter (cm)
D_t	= vessel diameter (cm)
e	= empirical exponent, Equation (6)
E	= axial dispersion coefficient (cm^2/sec)
g_c	= conversion factor ($\text{g}\cdot\text{cm}/\text{G}\cdot\text{sec}^2$)
g	= acceleration due to gravity (cm/sec^2)
K	= proportionality constant, Equation (7)
K'	= proportionality constant, Equation (6)
k	($=(\pi/S)^2Et$), dimensionless
k'	= proportionality constant, Equation (9)
l	= empirical exponent, Equation (7)
m	= " "
n	= rotational speed of impeller (1/sec) or integer in Equation (2)
N_{Bm}	($=\tau_y g_c/n\eta$) Bingham number
N_{He}	($=\tau_y g_c D_i^2 \rho/\eta^2$) ($=N_{Bm}\cdot N_{Re}$) Hedström number
N_{Pe}	($=nD_i^2/E$) Péclet number
N_{Re}	($=nD_i^2 \rho/\mu$) Reynolds number or ($=nD_i^2 \rho/\eta$) for Non-Newtonian
S	= distance between fluid free surface and vessel bottom (cm)
t	= time (sec)
dv/dr	= shear rate (1/sec)
x	= axial distance from free surface of fluid (cm)
η	= plastic viscosity (g/cm. sec)
θ	= mixing time (at $C/C_E=0.97$) (sec)
λ	= width of tracer pulse (cm)
μ	= viscosity of Newtonian fluid (g/cm. sec)
μ_a	= apparent viscosity (g/cm. sec)
ρ	= density of fluid (g/cm^3)
τ_y	= yield value of stress (G/cm^2)
ϕ	= mixing-time factor

文 献

- 1) Boucher, D.F., Alves, G. E.: *Chem. Eng. Progress*, **55**, (No. 9) 55 (1959).
- 2) Fox, E.A., Gex, V.E.: *A.I.Ch. E. Journal*, **2**, 539 (1956).
- 3) 化学便覧 (日本化学会編) : p. 416, 478 (丸善) (1958).
- 4) 長谷川: 化学機械技術, **10**, 83(1958).
- 5) Hedström, B.O.A.: *Ind. Eng. Chem.*, **44**, 651 (1952).
- 6) 伊藤, 最近の化学工学 : p. 39(1953).
- 7) Kramers, H., Baars, G.M., Knoll, W.H.: *Chem. Eng. Sci.*, **2**, 35 (1953).

- 8) Lee, R.E., Finch, C.E., Woledge, J. D. : *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 1849 (1957).
- 9) Metzner, A.B., Taylor, J.S. : *A. I. Ch. E. Journal*, **6**, 109 (1960).
- 10) Metzner, A.B.: *Non-Newtonian Technology, Advances in Chem. Eng.* (Drew, T.B., Hoopes, J.W., Jr.), p. 77 Academic Press Inc., N.Y. (1956).
- 11) Metzner, A.B., Feehs, R.H., Ramos, H.L., Otto, R.E., Tuthill, J. D.: *A. I. Ch. E. Journal*, **7**, 3 (1961).
- 12) 永田, 柳本, 横山 : 化学工学, **21**, 278 (1957).
- 13) Norwood, K.W., Metzner, A.B.: *A. I. Ch. E. Journal*, **6**, 432 (1960).
- 14) Prager, W. : *Finite Plastic Deformation, Rheology* (Eirich, F.R.) p. 95 Academic Press Inc., N.Y. (1956).
- 15) Siemes, W., Weiss, W. : *Chemie-Ing.-Techn.*, **29**, 727 (1957).
- 16) van de Vusse, J.G.: *Chem. Eng. Sci.*, **4**, 178, 209 (1955).
- 17) Wilkinson, W.L.: *Non-Newtonian Fluids*, p. 112, Pergamon Press, N.Y. (1960).

(昭 40. 7. 16. 受付)