パドル翼付攪拌槽内におけるスラリー流体の流動—淀み領域の熱的判定法[†]

上和野満雄・上ノ山周^{††}・仁志和彦・水島彩子*

横浜国立大学工学部物質工学科, 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

固体微粒子が高濃度に懸濁した光不透過なスラリー液を対象としてパドル翼のような小型翼を用いて攪拌した場合には、槽内において翼廻りの流動域とその外側に流動が不良でその流速が無視小となる淀み領域とが形成される。本報では両領域の境界を熱的に決定する手法を提示する。同手法は以下のことを測定原理としている。即ち翼直下に熱源を設置し、これよりステップ的に流体を加熱した状況下で、流動域内にある翼先端に設定した基準点と槽内の任意のもう1点との温度を熱電対で経時的に計測する。翼廻りの流動域では対流伝熱支配となり、速やかにこれら2点の温度差が減少するのに対して、その外側の淀み域では伝導伝熱支配となり、この温度差が経時的に増大する。これより槽内任意の測定点が流動域か淀み域であるかが判定される。同手法によれば翼廻りで良好に流動している領域と流動不良の淀み流域、さらにその中間的な境界領域の3者に判別されることが判った。同結果を着色法を用いた可視化実験やモデル的な数値計算による結果と照合したところ、境界領域を含めた領域が他の手法での流動領域にほぼ相当することを検証し、同手法の信頼性を確認した。

緒 言

固体微粒子が液中に高濃度な状態で懸濁したスラリーを、攪拌型装置を用いて取り扱う操作は、バイオや触媒反応、ペイントやセラミックスさらには化粧品や製薬の工業分野等で広範囲かつ頻繁に利用されている。同流体は降伏値を超える応力が付与されたとき初めて、流体内にずり流動が生起する塑性的なレオロジー特性をもつものと考えられる。このような流体を、工業的に多用されているように、槽径と比較して短い翼径をもつパドル翼のような小型翼で攪拌するときには、次のような問題が生じる。すなわち攪拌翼廻りのように強い剪断が作用し、降伏応力を超える領域では、ずり流動を生じるが、それより離れた位置で降伏応力に達しない領域では、静止ないしは流動が不良で流速が無視小となる淀み領域（以降淀み域と称する。）となるか、栓流的に共回りをする（Bird *et al.* 1960; Arai *et al.*, 1990）。同現象は槽内を均一に混合あるいは伝熱するという操作を著しく困難なものとし、均質な製品を製造するという観点からは、極めて好ましくないことである。従って、装置形状や操作条件が決められた段階で、槽内にもどのように流動の良好・不良の領域が形成されるのかを把握しておくことは、装置を適切に設計する上で、第一に必要なこととなる。

このような塑性流体における流動域形成状況の問題に対して、光透過性の疑似液を対象とすることにより、LDVを用いて計測を行ったり（Hirata and Aoshima, 1996）、同疑似液を着色して可視化することによる測定例も報告されている（Wichterle and Wein, 1981）。しかし、このような光透過性の疑似液、例えばカルボキシビニルポリマー水溶液などは粘弾性が発現するなど、本報で問題とするスラリー系の塑性流体と厳密にはレオロジーを異にしており、塑性流体で光透過なものは全く見当たらない状況にあ

る。従ってこのような光学的手法を使用することはできない。また流動域を球形（Solomon *et al.*, 1981）ないしは円筒形（Elson *et al.*, 1986）に近似することによるモデル理論的なアプローチ法も報告されているが、同手法にはこのような単純化を行うことによる精度の信頼性に疑義が残る。さらには、金属トレーサ粒子を投入し、これをX線を用いて可視化する方法も報告されているが（Elson *et al.*, 1986）、装置が大掛かりとなる上に、安全面での管理対策を施す必要が出てくるなど、およそ工学的に実用的なものであるとは云えない。

著者らはこれまでに1つには、同流体の流動状況を数値解析により解明する試みを行ってきたが（Kaminoyama *et al.*, 1990）、流動・淀みの領域を同法により求めることは現在の処、困難である。また歪みゲージを用いた測定法や着色法ならびに電気伝導度法を用いた計測法等を種々試み報告してきた（Arai *et al.* 1990）。電気伝導度計測法は電解質溶液を注入する電極針を中心に、球面上に8本の電極を配し、中心電極と各電極との電位差を計測し、流動が有る方向の電極では電解質溶液の流入により電気伝導度が増大することを利用したものである。しかしながら同計測法を用いた場合には、流動・淀み域を判定する分解能の向上に限界があったり、電解質の注入による影響を校正するための曲線をそのつど求める手間を要した。これらのことから被測定流体への化学物質トレーサの注入による影響をなくし、繰り返し測定が簡便に可能となる新たな計測手法が所望されてきた。

本報では以上に述べたことを背景に、流動域と淀み域とは熱伝達を支配する機構が大きく異なるという点に着眼し、両領域を熱的な測定から判定する手法の確立を試みた。同手法による計測結果は従来の着色法や、熱伝達のモデル的な数値計算結果と照合することにより十分に信頼できるものであることを検証したので以下に報告する。

1. 計測原理

本報で提案する熱的測定手法の原理を以下に述べる。Fig. 1に示すように槽中心に設置した攪拌翼（同図①）の直下に設置された熱源（同図②）から、ある時刻以降、ステップ的に槽内のスラ

[†] 2000年1月12日受理

化学工学会群馬大会（水上，1997年7月）および化学工学会第30会秋季大会（福岡，1997年9月）にて一部発表

^{††} kaminoyama@chemeng. bsk. ynu. ac. jp

* 住友ベークライト(株)

Fig. 1 Conceptual diagram of measuring device

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

り流体に対して熱を与える。翼先端位置は後述する操作条件下では、必ずずり流動を生じているものとしてこれを基準点（同図③）とする。一方槽内の他の任意の1点*を測定点（同図④）として、これら2点の温度の槽内加熱後における経時変化を、銅-コンスタンタン系熱電対をセンサーとしたリアルタイム多点温度計測器（Kamiwano *et al.*, 1995）により測定する。これらの測定結果を基にして、基準点の温度 T_0 と測定点の温度 T との差 $\Delta T (= |T_0 - T|)$ をとり、 ΔT の時間的な変化率 $\partial \Delta T / \partial t$ の符号を調べる。

$$\begin{aligned} \partial \Delta T / \partial t > 0 & : \text{淀み領域} \\ \partial \Delta T / \partial t \leq 0 & : \text{流動領域} \end{aligned} \quad (1)$$

Eq. (1) に示すようにこれが正であるときには、2点間の温度差が経時的に増大していることから、熱伝達は緩慢に進行し、主として伝導によって行われているものと判断し、この位置では流体の流動が無視できる淀み領域**と判定する。一方、同変化率が正でないときには、熱伝達は迅速に行われていることから、主として対流によって熱は伝達されているものと判断し、同測定位置はずり流動が明確に生じている流動域であるものと判定する。

2. 実験および方法

2.1 実験装置

Fig. 2 に実験に用いた装置の概略を示す。槽径は 200 mm のものを基準槽とし、一部これを幾何学的相似に 2 倍にスケールアップ

* 実際には測定点は1点である必要はなく、本報では著者らが開発したリアルタイム多点温度計測器を用いていることから、基準点を別として最大 31 点の同時測定が可能である。

** 槽中心部でパドル翼のような小型の攪拌翼を回転させる場合には槽壁側の降伏応力以下の領域において、栓流を生じるような場合はない。一方アンカー翼のような大型翼を槽壁近傍で回転させるような場合には、軸近傍で栓流を生じる可能性がある（Kaminoyama *et al.*, 1990）。

Fig. 3 Examples of flow characteristic curves fitted by Casson model

プした系も対象としている。翼については、6枚パドル翼を用い、翼径槽径比 $d/D=0.5$ とする。また翼形状の違いによる流動域形状の相違を比較する目的で4枚傾斜パドル翼も用いる。熱源については前節でも触れた通り、槽中心、翼の真下に設置し、計測開始後は 100 W で一定に加熱するものとした。なお熱源のリード線は攪拌軸を中空パイプとし、その内部に通している***。冷却コイルについては、設置しない場合を標準とし、一部設置した場合についても検討する。

2.2 実験試料とその物性値

試料は 55.6 wt% ~ 67.4 wt% の炭酸カルシウム懸濁水であり、そのレオロジー特性は、Eq. (2) に示す Casson モデル（Casson, 1959）を用いて表示する。

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \eta_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} \quad (2)$$

ここで τ_c [Pa], η_c [Pa·s] は Bingham モデルにおいては降伏応力、塑性粘度に相当するもので、それぞれ Casson 降伏値、Casson 粘度と呼ばれる。同モデルを用いれば、剪断速度に対する応力値の非線形性のある程度考慮することができ、微小粒径の固体粒子を含むスラリー系のレオロジーを表現するのに多用されている（Onogi, 1994）。また同モデルによれば、Metzner らの手法（Metzner and Otto, 1957）を用いての代表剪断速度を用いることなく、代表の粘度値を η_c として決める（Nagata, 1975）ことができる。

Fig. 3 には同流体のレオロジー特性をコーンアンドプレート型レオゴニオメータ（日本レオロジー機器（株）、型式 RGM-152-SD）にて測定し、Casson モデルの2定数 τ_c [Pa], η_c [Pa·s] を求めるために、横軸を $\dot{\gamma}^{1/2}$ とし縦軸を $\tau^{1/2}$ としてプロットした例を示す。これらのプロットを、最小2乗法で直線近似した切片から τ_c が、その勾配から η_c が求まる。Table 1 にはこのようにして求めた試料のレオロジー特性値と他の物性値を纏めて示す。

Fig. 3 には、測定場での上限と考えられる温度 323 K における炭酸カルシウム懸濁水のレオロジー特性値も一例として併せて示している。濃度が同じであれば、常温時 298 K のものとはほとんど変化がなく、本報に示した測定手法により計測中、流体温度が変化した際でも、そのレオロジー特性の変化は無視して差し支えないことが確認される。

測定領域は、これまでの可視化実験等での経験から、標準の6枚パドル翼については、翼を中心とした流動域の左右上下で対称的であると仮定し、翼上部側の槽4半分を対象とし、4枚傾斜パドル翼では、左右の対称性のみを仮定し、槽右側半分を対象とする。

*** 槽径 $D=400$ mm の場合には、攪拌軸を中空として、リード線をその内部に通すことが強度的な問題から困難となるため、基準点と正反対の翼吐出部の位置に熱源を設置した。なお熱源の設置位置の違いにより、測定結果に相違が生じないことについては 200 mm 槽を用いて確認している。

Table 1 Rheological properties of sample fluids (298 K)

Sample No.	Concentration C_v [wt%]	Density ρ [kg/m ³]	Casson yield stress τ_c [Pa]	Casson viscosity η_c [Pa·s]
1	57.7	1574	5.42	0.057
2	58.0	1579	8.52	0.079
3	60.5	1620	10.8	0.161
4	67.4	1742	16.7	0.694

Table 2 Thermal properties of calcium carbonate and water

	calcium carbonate	(293K)	water (303K)	(323K)
Density ρ [kg/m ³]	2720	998.2	995.7	988.1
Thermal conductivity λ [W/(mK)]	2.25	0.593	0.611	0.641
Heat capacity C_p [J/(kg·K)]	818	4182	4178	4182
Mean diameter d_{p50} [μ m]	3.1	—	—	—

また測定点については、直径0.8 mm という熱電対の感熱部の大きさを勘案し、鉛直断面において、半径方向、高さ方向とも5 mm 刻みで行うものとした。なお Eq. (1) に基づく判定は、熱源の立ち上げに伴う時間遅れや熱電対の同流体に対する熱的応答時間が問題とならないよう、加熱開始から3分程度の経時変化の計測結果を基に行った。

後述のモデル計算に必要な、試料の熱物性値である熱容量 C_p と熱伝導度 λ は、Table 2 に示す固相および液相の各物性値*を用いて Eqs. (3), (4) から求める (Kurpier *et al.*, 1985)。

$$C_p = (1 - \phi_w) C_{pL} + \phi_w C_{pS} \tag{3}$$

$$\lambda = \lambda_L \{ 2 + (\lambda_S / \lambda_L) - 2 \phi_v (1 - \lambda_S / \lambda_L) \} / \{ 2 + (\lambda_S / \lambda_L) + \phi_v (1 - \lambda_S / \lambda_L) \} \tag{4}$$

ここで下付の添え字 L, S はそれぞれ液相, 固相の物性値であることを示す。また ϕ_w と ϕ_v は固体粒子のそれぞれ重量分率, 体積分率を表す。

2.3 伝導伝熱シミュレーション

本報で提案する熱的計測手法の原理が、成り立つことを確認するためにモデル計算を行う。その手順について以下に述べる。ここで行うモデル計算とは、流動域内は対流により伝熱が理想的に行われている完全混合領域と仮定し、その外側の淀み領域へは領域境界面を温度境界として伝導により伝熱されるとして、淀み領域における温度の経時変化を数値的にシミュレーションするものである。

まず本熱的測定法により流動-淀みの境界を求める。Fig. 4 には、こうして求めた境界を、計算のためのメッシュ分割にて表現した図を示す。本計算においては、2次元 r - z 垂直断面で円筒座標系を用いる。流動・淀み域の境界における温度は、基準点における実測値を基に、時間に対して線形化した関数として与える。槽蓋、槽壁ならびに槽底は、温度を初期温度に固定する温度境界条件を適用する。以上の境界条件の下に、淀み域における温度の経時変化を、Eq. (5) に示す伝導伝熱のエネルギー式を差分化したものをSOR法にて求解することにより、数値解析する。

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) = (\lambda / r) \partial (r \partial T / \partial r) / \partial r + \lambda (\partial^2 T / \partial z^2) \tag{5}$$

* 同物性値は特に液相については温度依存性を示すが、後述のモデル計算の温度変化範囲では、その影響は小さいことから、常温での値を用いた。

Fig. 4 Conception and mesh division in model calculation for validation

Fig. 5 Procedure of visualizing flow and stagnant regions by coloring method

2.4 着色可視化法

本熱的計測法による結果の妥当性を検証するために行う、既に報告した着色可視化法 (Arai *et al.* 1990) の概略手順をここでは模式的に Fig. 5 に示す。まず縦方向に2分することのできる槽を準備し、炭酸カルシウム懸濁水を仕込む。同流体を攪拌している状態で、翼近傍に着色剤を注入する (同図 (a))。着色剤には、母液の懸濁物に黒色の酸化銅粉末を良く混合させたものを用いる。約10分間攪拌させた後、翼を静かに抜き上げる。直ちに、槽内中央に透明の仕切板を縦に差し込み、槽を2つ割りにする (同図 (b))。流動域は着色剤により色に変化し、淀み域は元の白色のままであることから、両領域が可視化、識別される (同図 (c))。

3. 結果ならびに考察

3.1 測定結果

Fig. 6 に $n = 3.33 \text{ s}^{-1}$ における温度の経時変化の測定結果を一例として示す。同図は付図に示した①から②までの測定点における、加熱開始後からの温度の経時変化を示している。第1節で述べた測定原理に従い、流動-淀み領域の判定を行うが、熱電対の温度分解能が0.2度であること、また測定には2つの熱電対を同時に用いていることを勘案し、常時0.4度以上となる温度差が生じ

Fig. 6 Example of dynamic changes of temperature measured ($n=3.33 \text{ s}^{-1}$)

Fig. 7 Examples of determining flow and stagnant regions

ない場合を流動域, 0.4 度よりも温度差が大きくなっていく場合を淀み領域とする。これより①から④までと⑦から⑨までは流動域, ⑤, ⑥, ⑪および⑫は淀み域と判定される。⑩は 0.4 度前後で温度差が変動しているため, 流動域とも淀み域とも言い難く, ここでは仮に境界領域とする。

Fig. 7 には, 測定点をトラバースして同様の測定を繰り返した結果を基に, 流動域, 境界域, 淀み域をそれぞれ●, ○, ○で区別して表示している。回転数は 3 段階に変えた結果について示している。同結果より, どの回転数においても境界領域を含めた流動域は高さ方向に扁平で, 軸近傍には窪みのある回転体であり, 回転数の増加に伴い両領域を合わせた体積は増加していることが判る。従って既往の文献に見られるように (Solomon *et al.*, 1981; Elson *et al.*, 1986), 円筒形や球形で同領域を表現するのは, 定量性に欠けるものであることが判る。翼先端から槽壁方向に吐出した流れが槽壁に達する前に, 槽中心側に回帰する結果, このような流動領域を形成するものと推察される。

3.2 検証実験

Fig. 8 には伝導伝熱のモデルシミュレーションと本法による実測の結果を示す。同図より淀み域と判定される③, ④, ⑤において, 実測値の方がモデル計算での結果より温度は高くなる*が, 両

* この違いは, 後述の可視化実験では認められないほどの, すなわち混合への寄与という点からは無視すべき大きさの流動によるものと推測される。

Fig. 8 Comparison of calculated temperature with experimental values at various measuring points (sample-3, $n=2.50 \text{ s}^{-1}$)

Fig. 9 Comparison of the result determined by thermal method with that by visualization method (sample-3, $n=3.33 \text{ s}^{-1}$)

者は傾向として一致しており, 同領域では基準点との温度差が明確に増大している。これらのことから伝熱機構の違いにより流動一定みの境界を判定する本測定原理の妥当性が確認される。なお本伝熱シミュレーションでは, 熱的計測法で流動一定みの境界域と判定される領域は, 流動域として取り扱った。

Fig. 9 には, 着色可視化法と本熱的測定法による流動域の計測結果を比較したものを示す。付図には着色法による実際の写真も一例として示している。

同図より, 本測定法による結果の方が, 若干全体的に小さな領域として判定されているが, 本熱的手法での境界領域を流動領域とみた場合, 可視化法の結果と十分な精度で一致していることが判る。ここで流動一定みの境界は, 翼の通過により, 実際は脈動しているものと考えられる。熱的判定法ではその平均的な境界を計測するのに対して, 着色法では一旦, 着色されると消えないことから, 脈動する最大の領域を観測することになる。このことから同図における両者の差異が生じるものと推察される。以上に述べたことにより, 以降の結果については, 境界領域は流動域として取り扱う。なお, 着色可視化法では, 翼の引き抜きを行うために, 軸近傍の流動域の窪みについてはこれを確認することはできない。

3.3 種々のケースにおける計測結果

以下の結果については Casson モデルの定数 τ_c と η_c を用いて Eqs. (6), (7) でそれぞれ定義される修正レイノルズ数 Re_c ならびに修正ビンガム数 Bi_c を用いて考察する。

$$\text{修正レイノルズ数: } Re_c = \frac{\rho n d^2}{\eta_c} \quad (6)$$

$$\text{修正ビンガム数: } Bi_c = \frac{\tau_c}{\eta_c n} \quad (7)$$

Fig. 10 には, 装置形状の違いによる流動・淀み域形成状況の違いを示す。同図 (a) に示す 6 枚パドル翼でコイルなしの標準的な結果と比較して, 同図 (b) に示すように翼外側にコイルを設置した場合には, 同コイルにより翼からの吐出が阻害される一方, コイル内側では槽上部に向かって, 流動域の発達している様子が判

Fig. 10 Examples of determining flow and stagnant regions in various apparatus

Fig. 11 Examples of determining flow and stagnant regions

る。また同図 (c) に示すように 4 枚傾斜パドル翼を用いた場合には、やはり流動・淀みの両領域は形成されるが、より剪断作用が大きいと推測される槽上部側に偏奇した形状となっている。

以下には標準的な装置形状を対象とした結果について考察する。

Fig. 11 には、(a) 翼回転数の変化 (sample-3)、(b) 槽のスケール比 (sample-2) さらには (c) 試料のレオロジー変化に伴う流動域形成状況の違いをそれぞれ示す。同図 (a) より同一試料で回転数を増大させると、 Re_c は増大し、逆に Bi_c は減少する。この変化に伴い、流動域は拡大していく様子が明瞭に判る。しかしながら流動域形状の変化は必ずしも単純ではなく、流動域体積 V_c の全体積 V に対する比 $V^*(=V_c/V)$ も、回転数の増大に対して非

線形に増大している。同図 (b) より、試料ならびに回転数を同一とし、槽のスケール比を 2 倍に変えた場合、 Bi_c の値は同じであるが、 Re_c はスケール比の 2 乗で慣性力が増すため、 V^* は増大している。これとは逆に同図 (c) から、試料を変えることにより、 Re_c をほぼ一定として、 Bi_c を変化させると、 Bi_c の増大により、 V^* は減少の傾向を示すことが判る。これは Fig. 7 でも述べた通り、降伏力が粘性力に比べ相対的に大きくなると、翼近傍の剪断が強く作用する領域は必ず流動が生じるが、槽中心側に回帰する大きな循環流を形成するには至らなくなるためと推測される。

以上のことにより、この無次元化流動域体積 V^* を修正レイノルズ数 Re_c ならびに修正ビンガム数 Bi_c 等を用いて相関する定式化が可能であるものと考えられる。

結 言

固体微粒子が高濃度に懸濁した光不透過なスラリー液を対象として小型翼を用いて攪拌した場合に、翼廻りの流動域とその外側に形成される流動不良の淀み域との両領域の境界を熱的に決定する手法を提示した。同手法は、翼直下に設定した熱源を用い、ステップ的に流体を加熱した状況下で、流動域内にある基準点と槽内の任意のもう 1 点との温度を熱電対で経時的に計測し、流動域では対流伝熱支配となり、速やかにこれら 2 点の温度差が減少するのに対して、淀み域では伝導伝熱支配となり、この温度差が経時的に増大することを測定原理とする。同手法によれば翼廻りで良好に流動している領域と無視小の流速となる淀み領域、さらにその中間的な境界領域の 3 者に判別されることが判った。同結果を着色法を用いた可視化実験やモデル的な数値計算による結果と照合したところ、この境界領域を含めた領域が他の手法での流動領域に相当することを検証し、同手法の原理ならびに結果の信頼性を確認した。

【謝 辞】 本研究を遂行するに当たりご協力頂きました現、三井化学(株)、関間麻人氏ならびに佐々木豊明氏に感謝致します。

Nomenclature

Bi_c	= modified Bingham number ($= \tau_c / \eta_c n$)	[—]
b_w	= impeller width	[m]
C_p	= heat capacity	[J/(kg·K)]
C_v	= concentration	[wt.%]
D	= vessel diameter	[m]
d	= impeller diameter	[m]
dp_{50}	= mean diameter	[μ m]
H	= liquid height	[m]
h	= impeller height	[m]
n	= rotational speed of impeller	[s ⁻¹]
Re_c	= modified Reynolds number ($= \rho n d^2 / \eta_c$)	[—]
T	= temperature	[K]
T_0	= temperature at standard point	[K]
t	= time	[s]
V	= volume of vessel	[m ³]
V_c	= volume of flow region	[m ³]
V^*	= dimensionless volume of flow region ($= V_c / V$)	[—]
$\dot{\gamma}$	= shear rate	[s ⁻¹]
η_c	= Casson viscosity	[Pa·s]
λ	= thermal conductivity	[W/(m·K)]
ρ	= density	[kg/m ³]
τ	= shear stress	[Pa]

τ_c = Casson yield stress [Pa]
 ϕ_v = volume fraction [—]
 ϕ_w = weight fraction [—]
 <subscripts>
 L liquid phase
 S solid phase

Literature cited

- Arai K., K. Akabane, M. Kaminoyama, F. Saito and M. Kamiwano ; "A Method for Determining the Boundary between Stagnant and Flow Regions of High-concentration Slurry in a Stirred Vessel using an Electric Conductivity Method," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **16**, 946-952 (1990)
- Bird, R. B., W. E. Stewart and E. N. Lightfoot ; Transport Phenomena, p. 104, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A. (1960)
- Casson, N. ; Rheology of Disperse Systems, ed. C. C. Mill, p. 84, Pergamon Press, London, U. K. (1959)
- Elson T. P., D. J. Cheesman and A. W. Nienow ; "X-ray Studies of Cavern Sizes and Mixing Performance with Fluids Possessing a Yield Stress," *Chem. Eng. Sci.*, **41**, 2555-2562 (1986)
- Hirata Y. and Y. Aoshima ; "Formation and Growth of Cavern in Yield Stress Fluids Agitated under Baffled and non-Baffled Conditions," *Trans. IChemE*, **74** (part A), 438-444 (1996)
- Kaminoyama, M., K. Akabane, K. Arai, F. Saito and M. Kamiwano ; "Numerical Analysis on Flow Behaviour of Bingham Fluid in an Anchor Impeller Mixer," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **16**, 939-945 (1990)
- Kamiwano, M., M. Kaminoyama and K. Yamamoto ; "Trial Manufacture of a Real Time and Multi-Point Temperature Measuring Instrument —Application for measuring the heat transfer condition of high viscous fluids in a stirred vessel—," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 760-765 (1995)
- Kurpiers, P., A. Steiff and P.-M. Weinspach ; "Heat Transfer in Stirred Multiphase Reactors," *Ger. Chem. Eng.*, **8**, 48-57 (1985)
- Metzner A. B. and R. E. Otto ; "Agitation of non-Newtonian Fluids," *AIChE J.*, **3**, 3-10 (1957)
- Onogi, S. ; *Kagakugijyutsuyano tamenno Rheology*, p. 37, 203, Kagakudojin, Tokyo, Japan (1994)
- Nagata, S. ; *Mixing —Principles and applications—*, p. 66-83, Koudan-sha Ltd., Tokyo, Japan (1975)
- Solomon J., T. P. Elson and A. W. Nienow ; "Cavern Sizes in Agitated Fluids with a Yield Stress," *Chem. Eng. Commun.*, **11**, 143-164 (1981)
- Wichterle K. and O. Wein ; "Threshold of Mixing of non-Newtonian Liquids," *Int. Chem. Eng.*, **21**, 116-120 (1981)

Method of Thermally Determining the Flow and Stagnant Regions of a Slurry Fluid in a Stirred Vessel Equipped with Paddle Impellers

MITSUO KAMIWANO, MEGURU KAMINOYAMA, KAZUHIKO NISHI, and AYAKO MIZUSHIMA*

Department of Material Sciences and Chemical Engineering, Yokohama National University Yokohama, 240-8501

Key words: plastic fluid, yield stress, Casson model, cavern, thermal measurements.

When slurry liquids with suspension of high concentration of fine solid particles are stirred with a small-diameter impeller like a paddle in a vessel, the flow region around the impeller and the outer stagnant region, where the flow velocity is negligibly small, are formed in the vessel, due to the yield stress of the liquids.

In this study, we present a method of thermally determining the boundary between both regions. The measuring principle of the method is as follows ; Under the condition of heating the liquids in a stepwise way with the heat source set just below the impeller, we measure dynamic changes of temperatures at two points with electrical thermocouples ; one is a standard point set in the vicinity of the impeller tip in the flow region, and the other is an arbitrary measuring point in the vessel. The temperature difference in the two points decreases rapidly at the flow region around the impeller where the convection is dominant in heat transfer, while the difference increases dynamically in the outer stagnant region where the conduction is superior. We can, therefore, judge from the dynamic change whether arbitrary measuring point in the vessel is in the flow or stagnant region, even for opaque slurry liquids.

It was found as a result that the region in the vessel can be differentiated, by this thermal method, into three regions, a complete flow region, a stagnant region, and an intermediate boundary region.

We ascertained that the flow regions involving the boundary region are in good agreement with the results by coloring visualization experiments, as well as numerical calculation results using a simplified model and, thereby, verified the reliability of the method proposed in this study.

* Sumitomo Bakelite Co., LTD