セラミックス成形助剤混合材料のキャピラリー内面のすべりと粘度測定法に関する研究

加藤 和典^{*1}・鄭 湧皓^{*2}・大竹 尚登^{*1}

Method of Measuring Capillary Surface Slip Property and Viscosity of Ceramic-Binder Compound

KATO, Kazunori^{*1}/CHUNG, Yongho^{*2}/OTAKE, Naoto^{*1}

Capillary flow experiments were performed to evaluate the slip property of injection moldable ceramic compounds of Al_2O_3 , and the following results were obtained. Firstly, slip velocity u_s was obtained by applying the Mooney method, and the effects of material temperature, particle size and binder composition on the slip velocity were evaluated. Secondly, it was found that the slip velocity changed significantly, when counter pressure was applied at the exit of the capillary. Then, the slip velocity was expressed by an empirical equation considering the pressure effect. Thirdly, an accurate viscosity equation was obtained, based on the pressure dependent slip behavior. Lastly, the flow behavior in a capillary was discussed in consideration of the slip behavior, and the application of counter pressure was found to be effective for realizing high strain rate flow.

Key words : Ceramic-binder compound/Measurement of viscosity/Slippage at capillary surface/Pressure effect

1. 緒 言

セラミックスの射出成形において、金型内の材料の流動挙動は粘度により大きく変わる。また条件によって金型壁面ですべりを生じる可能性がある。一方、材料の粘度を測定する場合通常キャピラリー方式の粘度計が用いられるが、この粘度測定においては金型温度が高いためすべりの可能性はさらに高い。そしてすべりが無いものとして粘度を求めた場合大きな誤差を生じる^{1)~4)}。

金型面における材料のすべりの存在についてはすでに塩化ビニル、ポリエチレンなどのプラスチック材料の高速流れにおいて指摘されている^{5)~10)}。一方、セラミックスとバインダーの混合材料については、通常の射出成形の条件下で生じる現象¹¹⁾であるにもかかわらずまだ十分な検討が行われていない^{12)~14)}。

本研究ではまず標準的なセラミックス材料のすべり特性についてキャピラリー内の流れに関する実験により検討し、すべりは低いせん断ひずみ速度下においても発生すること、およびこれがキャピラリー方式の粘度測定における粘度の値に大きく影響することを示す。ここで、すべりが発生する場合のすべりと粘度の測定には Mooney の方法¹⁵⁾を用いる。この方法は、すべりがある場合材料の速度分布がキャピラリーの大きさに対して相似的ではないという現象を利用して、すべり速度を分離、抽出するもので、すべり速度がキャピラリー壁面のせん断応力にのみ依存し圧力によらないことを前提としている。しかし実際にはすべりは圧力にも依存する^{16)~19)}。そして特に射出成形では条件により

^{*1} 東京工業大学 工学部 機械科学科
東京都目黒区大岡山 2-12-1 (〒152-8552)
Department of Mechanical Engineering and Science,
Tokyo Institute of Technology
O-okayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo 152-8552 Japan

^{*2} 東京工業大学 大学院理工学研究科
東京都目黒区大岡山 2-12-1 (〒152-8552)
Department of Mechanical Engineering and Science,
Tokyo Institute of Technology Graduate School
O-okayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo 152-8552 Japan
1998.8.10 受理

部分的には高圧を生じるため、その影響を考慮することが必要である。

そこで、本研究ではキャピラリーの流れの出口側に背圧を加えることによりすべり特性に対する圧力の影響を定量的に求める。そして、圧力の影響を補正したすべりを考慮して精度の高い粘度式を求める方法を示す。

2. 実験装置および材料

実験装置としては Fig.1 に示すような自家製のキャピラリー式粘度計を用いる。材料は混練し破碎したものをシリンダー内に投入し所定の温度まで加熱する。この材料を種々の寸法のキャピラリーに通して流量および圧力損失を測定する。ここでキャピラリーと材料とのすべりがある場合に対しては後述の Mooney の

方法を用いるが、この場合内径を変えた結果が必要になる。そこで本研究では内径 $D=1.0\text{ mm}$, 1.5 mm , 2.0 mm で長さと同径の比 $L/D=10, 15, 20, 25$ の 12 種類のキャピラリーを用いることとする。圧力および温度はシリンダー内部に設置した圧力センサー (NP 465 X, ダイニスコ社製), およびシース形熱電対 (T-35-1, 坂口電熱社製) により測定する。流量はピストンの変位より求める。ただし材料の圧縮性による誤差を除くため定常流動時の値を用いる。なお、シリンダー部およびキャピラリー支持ブロックにはそれぞれ別個にヒーターを挿入し独立に制御することにより実験中の材料温度の変動が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下になるようにしている。

本研究の後半の、キャピラリーの出口側に背圧を加える実験では、出口側に小室を設けその圧力を回転式のバルブにより調節する (Fig.1 参照)。出口側圧力はその小室の圧力とする。

本研究で用いる材料は、体積率で 57 vol.% のアルミナと 43 vol.% の成形助剤の混合物である。その詳細は Table 1 に示す。ここで、本研究で検討対象としているすべりについてはワックスの量が影響すると思われるため、その量を 3 水準に変化させる。またアルミナの粒径が細くなると流動性が低下するので、その影響についても調べる。

3. Mooney の方法によるすべり特性の評価

3.1 Mooney の方法によるすべり速度算出の原理

キャピラリー内面にすべりがある場合、すべり速度を u_s , 実際の速度分布から u_s を減じた速度による流量を Q , 全流量を Q_a とおけば,

$$Q_a = Q + u_s \frac{\pi D^2}{4} \tag{1}$$

D : キャピラリー内径

Newton 流体の壁面すべりなしの流れに対しては、流量 Q_a と見かけの壁面せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_a$ との間に

$$\dot{\gamma}_a = 32 Q_a / \pi D^3 \tag{2}$$

の関係式が成立するが、ここで流量 Q に対しても同様の流れを想定しその壁面せん断ひずみ速度を $\dot{\gamma}_{a,c}$ とおけばこれらの間にも (2) 式と同様の関係式が成立する。よって、(1) 式より次式が得られる。

$$\dot{\gamma}_a = \dot{\gamma}_{a,c} + \frac{8 u_s}{D} \tag{3}$$

ここで一般の非 Newton 流体に対して (1) 式の Q を厳密に求めれば、(3) 式の右辺第 1 項の $\dot{\gamma}_{a,c}$ を

$$\frac{4}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau$$

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Material composition

Type	Al ₂ O ₃ * (vol.%)	Organic components (43 vol.%)		
		Polystyrene	Wax	Stearic acid
A	57	32.3	6.5	4.2
B		36.6	2.2	4.2
C		19.2	19.6	4.2

*Two kinds of alumina are used : ALS-43 (3.7 μm), AES-11 (0.4 μm).

によって置き換えた式が得られる。ただしこの項は τ_w にのみ依存し、(3) 式と同様 D は含まない。

さて、すべり速度 u_s および粘度が圧力に依存しないと仮定すれば、(3)式は τ_w 一定の条件下で $1/D$ の 1 次式になる。よって、 τ_w 一定として D を変化させた実験を行い、見かけの壁面せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_a$ と $1/D$ の関係をプロットすれば、これを直線近似したときのこう配が $8u_s$ となり、 u_s が求められる。なお、この結果は一般の非 Newton 流体に対しても成立するものである。

すべり速度 u_s は通常

$$u_s = a\tau_w^m \tag{4}$$

の形で近似される。本研究においてもまずこの式に従って整理する。

ところで、すべり速度 u_s が得られれば (3) 式より

Fig.2 Apparent flow curves for various dies

Fig.3 Mooney plot for determining slip velocity ($L/D=25$)

$\dot{\gamma}_{a.c}$ を求め、これを用いてすべりの影響を除いた粘度を求めることができる。特に非線形流体の粘度が指数型の式

$$\eta = A\dot{\gamma}^{n-1} \tag{5}$$

で表される場合、壁面せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ と Newton 流体を想定したときの値 $\dot{\gamma}_{a.c}$ との間に次の関係式が成立する。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{a.c} \frac{3n+1}{4n} \tag{6}$$

よって、

$$\eta = \eta_{a.c} \frac{3n+1}{4n} \tag{6}'$$

$\eta_{a.c}$: すべりの影響を修正した粘度 (Newton 流体) となる (Rabinowitsch 補正²⁰⁾)。

3.2 標準条件におけるすべり速度および粘度の測定

Table 1 の配合 A の材料と材料温度 $T_M=180^{\circ}\text{C}$ を標準として、まずこの条件下のすべり特性と粘度を求める過程を示す。

Fig.2 は種々の D と L/D のキャピラリーに対する壁面せん断応力 τ_w と見かけの壁面せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_a$ の関係の線図である。ここで τ_w は種々のキャピラリー長さ L に対する全圧力損失の結果より入口部での圧力損失の補正 (Bagley 補正²¹⁾) を行って求めたものである。また $\dot{\gamma}_a$ は Newton 流体の壁面すべりなしの流れに対応するもので、測定される流量 Q_a より (2) 式によって求められる。この図において線図が D によって変わることは壁面すべりがあることを示すものである。

次に、Fig.2 の線図群と τ_w 一定の線との交点の横軸の値を読みとり、それらの $\dot{\gamma}_a$ と $1/D$ との関係を Fig.3 にプロットする。ここで各線図はそれぞれ τ_w の種々の値に対応するものである。これらのこう配より

Fig.4 Slip corrected and uncorrected viscosity

すべり速度 u_s が得られる ((3) 式参照)。この結果の τ_w と u_s を改めて両対数プロットすれば (省略) 直線関係を示すことより、(4) 式の係数 a と指数 m が次のように求められる。

$$u_s = a\tau_w^m, \quad a = 415.9, \quad m = 1.877 \quad (7)$$

$$[u_s] = \text{cm/s}, [\tau_w] = \text{MPa}$$

すべり速度 u_s が近似式 (7) で与えられるとすれば、各実験点について (1) 式より Q , (2) 式に対応する式より $\dot{\gamma}_{a.c}$ が得られる。この τ_w と $\dot{\gamma}_{a.c}$ の両対数プロットを直線近似し指数型の式で表示した上で、これより求められる $\eta_{a.c} (= \tau_w / \dot{\gamma}_{a.c})$ の式に (6)' 式の補正を加えれば η が得られる。この値を用いて $\tau_w - \dot{\gamma}$ の関係式を求め整理すれば、

$$\tau_w = K \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^n$$

$$K = 0.4164, \quad n = 0.6114, \quad \dot{\gamma}_0 = 1000 \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

$$[\tau_w] = \text{MPa}, [\dot{\gamma}] = \text{s}^{-1}$$

個々の実験値 $\eta_{a.c} (= \tau_w / \dot{\gamma}_{a.c})$ について (6)' 式の補正を加え再度プロットした結果が Fig. 4 である。ここで参考のためにすべりの補正をしない場合の粘度 (Newton 流体とする) を Fig. 4 に付記する。補正の影響は大きく、すべりの考慮の有無が求められる粘度の結果に大きな影響を及ぼすことがわかる。また、補正前の見かけ粘度の線図は D の値により若干異なっているが、すべりの影響を補正した粘度については D の値にかかわらず一定の線図になる。これはすべりの影響を除く処理が適切なものであることを意味している。

3.3 材料温度がすべりに及ぼす影響の検討

種々の材料温度について同様の実験を行って Mooney の方法によりすべり速度 u_s を求め、 τ_w を横軸にとってプロットすれば Fig. 5 が得られる。これを

Fig. 5 Effect of material temperature on slip velocity ($L/D=25$, Material A)

近似式で表せば、

$$u_s = A_0(1 + a_1\Delta T) \tau_w^m$$

$$\Delta T = T - T_0, \quad T_0 = 180^\circ\text{C}$$

$$A_0 = 415.9, \quad a_1 = 0.0060, \quad m = 1.815 \quad (9)$$

$$[u_s] = \text{cm/s}, [\tau_w] = \text{MPa}$$

また、このすべりの影響を補正して求めた粘度が Fig. 6 である。近似式で表せば、

$$\tau_w = K_0(1 + k_1\Delta T) \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^n, \quad \dot{\gamma}_0 = 1000 \text{ s}^{-1}$$

$$K_0 = 0.4164, \quad k_1 = 0.0024, \quad n = 0.6114 \quad (10)$$

$$[\tau_w] = \text{MPa}, [\dot{\gamma}] = \text{s}^{-1}$$

ところで、(1), (3) 式によればすべりが大きくなると $\dot{\gamma}_{a.c}$ は小さくなり、これが極端になれば $\dot{\gamma}_{a.c}$ (または $\eta_{a.c}$) の有効桁数が低下する。そこで、すべりによる流

Fig. 6 Effect of material temperature on viscosity ($L/D=25$, Material A)

Fig. 7 Effect of slip velocity on total flow rate ($L/D=25$, $\tau_w=0.21 \text{ MPa}$)

量, すなわち (1) 式の右辺第 2 項を Q_s とおき, その全体に対する比 Q_s/Q について検討する. 結果は Fig.7 の通りで, すべりによる流量は極めて大きい.

特に材料温度 T_M の影響に注目すると, Q_s/Q は T_M が高いほど大きくなる. これは以下のような理由による. すなわち, (7) および (8) 式より一定の τ_w に対する u_s および $\dot{\gamma}_{a.c}$ を求めれば Fig.8 が得られるが, 一定のせん断応力下で材料温度が上昇したとき $\dot{\gamma}_{a.c}$ より u_s の増大が急であるためである. なお (9), (10) 式を用いれば $Q_s/Q \sim T_M$ の関係を解析的に求めることは可能である.

また, Fig.7 において D の増大に対して Q_s/Q は低下しているが, これは, τ_w 一定の条件下では u_s は一定であるのに対して速度の変化分すなわち $u-u_s$ の半

Fig.8 Variation of $\dot{\gamma}_{a.c}$ and u_s with material temperature ($L/D=25$, $\tau_w=0.21$ MPa)

Fig.9 Effect of binder composition on slip velocity ($L/D=25$, $T_M=180^\circ\text{C}$)

径 r にわたる分布は相似的事であることによるものである.

3.4 成形助剤の組成の影響の検討

成形助剤中のワックスは融点が高いためキャピラリー壁面に流出して潤滑効果を示すことが予想される. そこでワックス量の異なる Table 1 の 3 種類の材料について実験を行った. そのすべり特性を Fig.9 に実線で示す. u_s は予想の通りワックスの量とともに増大する.

またすべりの影響を補正した粘度は Fig.10 の通りである. 粘度 η はワックス量によりいくらか低下する. 参考のためすべり補正前の見かけ粘度を付記する.

セラミックス粉末の粒度がすべりおよび粘度に影響すると思われるため, 粒子径が 10 倍のアルミナについて実験を行った. その結果を Fig.9, Fig.10 に点線で記入する. 標準条件の線図と比べると u_s への影響は小さいが η への影響は比較的大きい.

以上の実験結果についてすべり速度 u_s および粘度 η を (4), (5) 式と同様の近似式で表し, その定数を Table 2 にまとめて示す.

Fig. 10 Effect of binder composition on viscosity ($L/D=25$, $T_M=180^\circ\text{C}$)

Table 2 Values of constants in Eq. (4) and (5) ($L/D=25$, $T_M=180^\circ\text{C}$)

Material (wax %)	Constants in Eq. (4)		Constants in Eq. (5)	
	a	m	$A (=K\dot{\gamma}^m)$	n
A (6.5 %)	415.9	1.815	0.4164	0.6114
B (2.2 %)	338.0	1.815	0.4419	0.6114
C (19.5 %)	500.3	1.815	0.3921	0.6114
ALS-43 (6.5 %)	425.2	1.815	0.4058	0.6114

4. すべり特性の評価における圧力効果の導入

4.1 すべり速度式におよぼす圧力効果の導入方法

粘度測定または射出成形において金型内圧力は条件により大きな値に達するため、すべり特性に対する圧力の影響を把握しておくことが重要である。本研究では上述の実験に加えてキャピラリー出側に背圧を付加した実験を行い、圧力の効果について検討する。ここで温度は標準値 180℃ に固定し、材料は Table 1 の A を用いる。

a. 圧力のすべり速度への影響の近似的導入

まず種々の背圧に対してキャピラリー直径 (D) および長さ/直径比 (L/D) を変えた実験を行い Mooney の方法によりすべり速度 u_s を求める。その結果を u_s - τ_w 面上にプロットする。次にこれらの実験点をキャピラリー内の平均圧力、すなわち入側と出側の平均値 $\bar{P}$ のレベルによって分類し、それぞれのグループの点の分布を Fig.11 に示すように直線近似する。この結果によれば、すべり速度は圧力 $\bar{P}$ のレベルによって大きく変わることがわかる。ここで各グループ内でかなりのばらつきがある理由は、 $\bar{P}$ の値にかなりの幅があるためである。

このすべり速度を近似式 $u_s(\tau_w, \bar{P})$ で表せば、次式が得られる。

$$u_s = c_1 e^{c_2 \bar{P}} \tau_w^{c_3 + c_4 \bar{P}}$$
$$c_1 = 505.1, \quad c_2 = 0.1207,$$
$$c_3 = 1.978, \quad c_4 = 0.1142$$
$$[u_s] = \text{cm/s}, \quad [\tau_w] = \text{MPa}, \quad [\bar{P}] = \text{MPa}$$

(11)

b. 粘度式の修正

さて、すべり速度と粘度がそれぞれ (11), (8) 式と

して与えられれば数値計算により任意の出側圧力に対する入側圧力を求めることができる。そこでまず u_s が (11) 式により与えられたとして、一連の出側圧力および流量に対する入側圧力 P_i を数値解析によって求め、これらが実験結果と良く一致するように材料の粘度式 (8) の定数 K, n を決定する。得られた結果は次式の通りで、定数に若干の修正が生じている。

$$\tau_w = K \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^n, \quad \dot{\gamma}_0 = 1000 \text{ s}^{-1}$$
$$K = 0.3219, \quad n = 0.7772$$
$$[\tau_w] = \text{MPa}, \quad [\dot{\gamma}] = \text{s}^{-1}$$

(12)

以上の定数 K, n の修正計算においては、バインダーの成分である樹脂の粘度の圧力依存性は本研究で対象としているひずみ速度の範囲では小さいので省略する。また K, n の最適化の計算では Newton-Raphson 法を用いる。

c. 圧力のすべり速度への影響の修正

以上の数値解析に用いたすべり速度 u_s は平均圧力レベルが同程度のグループの実験結果を用いてキャピラリー長さにわたる平均的すべり速度として求めたものである (Fig.11 参照)。そこで、次に粘度式を固定してすべり速度の (11) 式の定数を改めて未知数と考え、前項 b と同様の計算を行って実験値との残差最小化の条件より (11) 式の定数を求める。ただし、(11) 式では圧力に関係する定数の精度が低いと思われるため、ここでは c_3, c_4 は正しいものとして c_1, c_2 のみを修正する。修正計算の結果を次に示す。

$$c_1 = 505.1, \quad c_2 = 0.2965$$

(13)

Fig.11 Pressure effect on slip velocity (Material A, $T_M=180^\circ\text{C}$)

Fig.12 Comparison of inlet pressure calculated by using the pressure dependent slip equation and associated viscosity with that in experiment

d. すべり速度式および粘度式の実験値との比較

以上のプロセスによって得られた粘度式 (12) と (13) 式の定数に基づくすべり速度式の精度の検証のために、数値解析によって求めたキャピラリー入口圧力と、ここで用いた一連の背圧と流量に対する実験結果のキャピラリー入口圧力（キャピラリーの端末補正を加えたもの）との相関図を Fig.12 に示す。相関は良好で、c 項における (11) 式の定数の修正にあたって採用した c_1 , c_2 のみの修正が妥当なものであったことが確認できる。

比較のために基本的な Mooney の方法によるすべり速度式 (4) とこの補正を加えた粘度式 (5) を用いて数値解析したキャピラリー入口圧力と実験結果との相関図を Fig.13 に示す。Fig.12 と Fig.13 を比較すれば前者の相関のほうが格段によく、これよりすべり速度への圧力の影響を示す (11) 式に対する本節の修正法が有効であることを確認することができた。

なお、これらの中間的な方法として、すべり速度に対する圧力の影響を平均圧力について求めた (11) 式と粘度式 (8) を用いた場合の結果は両者の間に入る。この方法は本節の方法には及ばないが、結果は本節のものに近く、実用的には簡便な方法として利用できる。

4.2 キャピラリー内部の材料の流動挙動

キャピラリー壁面での材料のすべり速度が圧力によらず壁面せん断応力にのみ依存することを仮定すれば、壁面せん断応力とすべり速度がキャピラリー長手方向にわたって一樣になる。Mooney の方法はこのような単純化によりすべり速度と粘度を近似的に求めるもの

Fig.13 Comparison of inlet pressure calculated by using the slip equation from the Mooney method and associated viscosity with that in experiment

であるが、4.1 節における検討よりこのような仮定が一般的には成り立たないことは明らかである。本節では上述の圧力依存型のすべり速度式とこれを考慮して求めた粘度式を用いて、代表的な条件の下でのキャピラリー内のすべり速度、壁面せん断応力などの分布を求め、すべり、圧力損失についての上述の評価法の有効性について検討する。

キャピラリー長さの異なる 2 つの場合について、壁面せん断応力 τ_w , 圧力 P , すべり速度 u_s および壁面せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を Fig.14 (a)~(d) に示す。ここで破線および実線は $L/D=10, 25$ に対する結果である。横軸はいずれも入口からの距離を L で無次元化したものである。図より、 L が小さい場合 u_s , τ_w は一樣に近く、圧力分布 P は一定こう配の直線に近い。一方、 L が大きくなると u_s , τ_w の分布はこう配をもつようになり、 P はある程度の曲率をもって変化するが、曲率は比較的小さい。この結果は、4.1 節末尾に述べた「中間的な方法」、またはさらに単純化した「平均圧力に対応するすべり速度が一樣に分布すると仮定する方法」がすべりの効果の導入の第 1 近似法として妥当な

Fig.14 Flow behavior in a capillary : $D=0.15$ cm, $\dot{\gamma}_a=819.4 \text{ s}^{-1}$ (P_c : Counter pressure (MPa), Z : Distance from capillary inlet)

ものであることを裏付けている。ただし一般には本研究で採用した数値解析併用による定数修正法を用いることが必要である。

次に、背圧を付加する場合の一例を Fig. 14 に一点鎖線で示す。この結果より、背圧付加によってすべりが大幅に低減し、かつすべり速度の変化も小さくなることがわかる。よって、背圧付加法は上述の平均圧力を用いる方法の利用を容易にすると同時に、実験可能なせん断ひずみ速度の範囲を拡張するためにも有効であることがわかる。

5. 結 言

セラミックス粉末と成形助剤の混合材料のキャピラリー内の流れにおける壁面すべりについて実験により検討し、圧力の影響を考慮したすべり特性式を求め、そのすべりの影響を補正した高精度の粘度式を求める方法を示した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 射出成形に通常用いられる材料ではキャピラリー壁面で大きなすべりを生じることが明らかにした。この結果より、粘度を求めるためにはその影響を考慮する必要があることがわかった。

(2) すべり速度は材料温度の上昇により増大する。また、成形助剤中のワックスの量が増すと大きくなる。

(3) すべり速度は圧力によって大きく変化する。そこでキャピラリーに背圧を付加する方法により、すべりの圧力依存特性を求める方法を提案した。

(4) 圧力依存のすべり特性(上記(3))の影響を考慮した精度の高い粘度式を求める方法を示した。

(5) 背圧付加の方法によれば、すべりの低減による高せん断ひずみ速度の試験まで実現できること、およびすべりの一様化により種々の簡易解析法の利用が可能になることを示唆した。

おわりに、本研究を進めるにあたって有益な御討論をいただいた東京工業大学松尾陽太郎教授および応用技術研究所岩橋俊之氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Zhang, T., Jiang, Z., Wu, J. and Chen, Z.: *J. Am. Ceram. Soc.*, **73** (7), 2171 (1990)
- 2) 堀口 浩, 寺川敏郎, 馬場英晃, 高根勝久: セラミックス, **25** (11), 849 (1990)
- 3) Brunn, P.O. and Vorwerk, J.: *Rheol. Acta*, **32** (4), 380 (1993)
- 4) Mutsuddy, B.C. and Ford, R.G.: *Ceramic Injection Molding* (1995), Chapman & Hall
- 5) Jiang, T.Q., Young, A.C. and Metzner, A. B.: *Rheol. Acta*, **25** (4), 397 (1986)
- 6) Hatzikiriakos, S.G. and Dealy, J.M.: *J. Rheol.*, **35** (4), 497 (1991)
- 7) White, J.L., Han, M.H., Nakajima, N. and Brzoskowski, R.: *J. Rheol.*, **35** (1), 167 (1991)
- 8) Mourniac, Ph., Agassant, J.F. and Vergnes, B.: *Rheol. Acta*, **31** (6), 565 (1992)
- 9) Stewart, C.W.: *J. Rheol.*, **37** (3), 499 (1993)
- 10) Kalyon, D.M., Yaras, P., Aral, B. and Yilmazer, U.: *J. Rheol.*, **37** (1), 35 (1993)
- 11) 陳 仁浩, 加藤和典, 石原康一: 塑性と加工, **36** (408), 60 (1995)
- 12) Stedman, S.J., Evans, J.R.G. and Woodthorpe, J.: *J. Mater. Sci.*, **25**, 1833 (1990)
- 13) Tsao, I., Danforth, S.C. and Metzner, A. B.: *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** (12), 2977 (1993)
- 14) Kwon, T.H. and Ahn, S.Y.: *Powder Technology*, **85**, 45 (1995)
- 15) Mooney, M.: *J. Rheol.*, **2** (2), 210 (1931)
- 16) Vinogradov, G.V. and Ivanova, L.I.: *Rheol. Acta*, **6** (3), 209 (1967)
- 17) Lau, H.C. and Schowalter, W.R.: *J. Rheol.*, **30** (1), 193 (1986)
- 18) Kalika, D.S. and Denn, M.M.: *J. Rheol.*, **31** (4), 815 (1987)
- 19) Hatzikiriakos, S.G. and Dealy, J.M.: *J. Rheol.*, **36** (4), 703 (1992)
- 20) Rabinowitsch, R.: *Zts. Phys. Chem.*, **A145**, 1 (1929)
- 21) Bagley, E.B.: *J. Appl. Phys.*, **28**, 624 (1957)