

木粉-プラスチック混合物の流動特性 (第2報)[†]

キャピラリ流動試験による流動特性の解析と評価^{*1}

今西祐志^{*2}, 相馬奈歩^{*3}, 竹内和敏^{*3}, 杉野秀明^{*4}, 金山公三^{*3}

Flow Properties of Wood Powder-Plastic Mixture II.[†]

Analysis and evaluation of flow properties by capillary flow tests^{*1}

Hiroshi IMANISHI^{*2}, Naho SOMA^{*3}, Kazutoshi TAKEUCHI^{*3},
Hideaki SUGINO^{*4} and Kozo KANAYAMA^{*3}

Capillary flow tests were conducted on wood powder-plastic mixtures, and the analysis and evaluation of flow properties were performed based on a generally steady state. Apparent viscosity and slip velocity at the capillary wall were found analytically, and flow velocity distribution and details of the flow state were considered.

Consequently, it was inferred that the flow of the wood powder-plastic mixture was a composite of significant non-Newtonian flow and slip at the capillary wall. The proportion of flow attributed to the existence of slip at the capillary wall was sizeable among the entire flow. It was suggested that the rate would be large when the capillary diameter was small and the shear stress was high.

Keywords: wood powder-plastic mixture, capillary flow test, flow property, apparent viscosity, slip velocity.

木粉-プラスチック混合物についてキャピラリ流動試験を行い、おおむね定常状態と考えられる流動挙動について流動特性の解析及び評価を試みた。見かけの粘性係数および管壁におけるすべりを解析により求め、流速分布および流動状態の詳細について考察を行った。

その結果、木粉-プラスチック混合物の流動は、顕著な非ニュートン流動と管壁におけるすべりが複合したものであることが推察された。流れ全体のうち、管壁におけるすべりに由来するものの割合が大きく、その割合は、キャピラリ径が小さくなるほど、せん断力が大きくなるほど大きくなる傾向が示唆された。

1. 緒 言

木粉と熱可塑性樹脂（プラスチック）とを複合した成形材料の開発に関する研究は、これまでに数多くなされてきており¹⁾、環境保護や資源問題といった観点から将来性のある技術として注目されている。当初は、プラスチックを成形する際の増量剤と

して木粉が添加されていたが、環境負荷低減や循環型資源の有効利用を目的として、さらに高木粉比率での成形技術が検討され、現在では、高木粉比率での異形押出成形が可能となっており²⁻⁵⁾、木粉-プラスチック複合体という新しい木質材料分野が市場に開拓されつつある。

木粉-プラスチック複合体の更なる用途拡大のた

[†] Report I: This journal 51, 166-171 (2005).

^{*1} Received June 16, 2004; accepted October 13, 2004. 本研究の一部は第53回日本木材学会大会（2003年3月、福岡）、第52期日本材料学会学術講演会（2003年5月、東京）、2003年度日本木材学会中部支部大会（2003年8月、静岡）、第53期日本材料学会学術講演会（2004年5月、岡山）で発表した。

^{*2} 日本学術振興会 Japan Society for the Promotion of Science, Tokyo 102-8471

^{*3} 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Nagoya 463-8560

^{*4} 新エネルギー・産業技術総合開発機構 New Energy and Industrial Technology Development Organization, Tokyo 170-6028

めの課題の一つとして、高木粉比率での射出成形が挙げられる。射出成形は、材料を成形機内で溶融・混練して金型に射出・充填し、冷却・固化させて取り出すものであり、実用されているプラスチック成形品の約30%はこの方法によるものである。射出成形時の温度や圧力、速度などの条件を最適化するためには材料の流動特性の把握が必要であるが、木粉-プラスチック混合物の流動特性を解析的に評価した例はこれまでにない。

溶融状態にあるプラスチックの典型的な流動挙動は非ニュートン流動であり、プラスチックに木粉を混合した材料についても同様であると考えられる。しかしながら、木粉比率を高くすることで木粉同士の相互作用が大きくなり⁶⁾、木粉の寸法形状や物理特性などの影響が多分に現れると考えられる。真の流動状態を記述するためには、木粉粒子間及び木粉粒子-プラスチック間の相互作用を考慮しなければならないが、通常の流動試験で見られるような定常流れにおいては、その測定結果は、上記相互作用が平均化されたものと解釈できる。

本報では、射出成形における諸条件の最適化のための基礎的検討として、キャピラリー流動試験により得られた木粉-プラスチック混合体の流動挙動をもとに、その流動特性の解析及び評価を試みた。

本報で取り上げる木粉-プラスチック混合物は、前報⁷⁾で詳述したように、アスペクト比が比較的大きい木粉粒子を高い比率で含んだものである。木粉粒子同士の複雑な相互作用が混合物の流動現象に大きく影響すると考えられる。本報に示すキャピラリー流動についての解析手法は、基本的には高分子溶液体のような連続体の流動現象を扱うものであり、固体粒子分散系への適用範囲が問題であるが、今回は、前報⁷⁾で確認されたキャピラリー流動現象に対して解析を試み、一つの適用の可能性を示すこととした。

2. 理 論

Fig. 1は、キャピラリー流動試験装置の模式図である。キャピラリー流動試験では、シリンダ部に試料を充填し、ピストン上部に荷重をかけてキャピラリーから試料を押し出し、その時のシリンダ内圧と押出速度から粘性係数を算出する。

2.1 見かけ粘性係数

ニュートン流体が管壁ですべることなく円管を流れる時、壁面におけるせん断ひずみ速度 Γ_w と壁面におけるせん断応力 τ_w は次式で表される。

$$\Gamma_w = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1)$$

$$\tau_w = \frac{\Delta PR}{2L} \quad (2)$$

ここで、 Q は体積流速、 R はキャピラリー半径、 L はキャピラリー長、 ΔP は L の間での圧力降下(キャピラリー入口での圧力が十分に大きい場合、 ΔP はシリンダ内圧とほぼ等しい)である。ニュートン流体では、 Γ_w と τ_w の比(粘性係数 η)は一定で、次の関係が成り立つ。

$$\tau_w = \eta \Gamma_w \quad (3)$$

非ニュートン流体の場合にも、同様にして見かけの粘性係数 η_a を計算できるが、この場合、 η_a は一定ではなく Γ_w の関数となる。

2.2 末端補正

Fig. 1のようなキャピラリー流動試験の場合、キャピラリー入口付近においては、縮小流れによる圧力損失が生じている。このため、式によって求めたせん断応力 τ_w は実際の値よりも大きくなる。圧力損失を考慮した計算式として、末端補正項を導入した次式が提案されている⁸⁾。

$$\tau_w^* = \frac{\Delta PR}{2(L + e_{ent}R)} \quad (4)$$

ここで、 τ_w^* は十分に発達した流れに対する管壁での補正されたせん断応力、 e_{ent} は入口補正值である。 Γ_w と τ_w^* とが1対1であるとの仮定に基づき、一

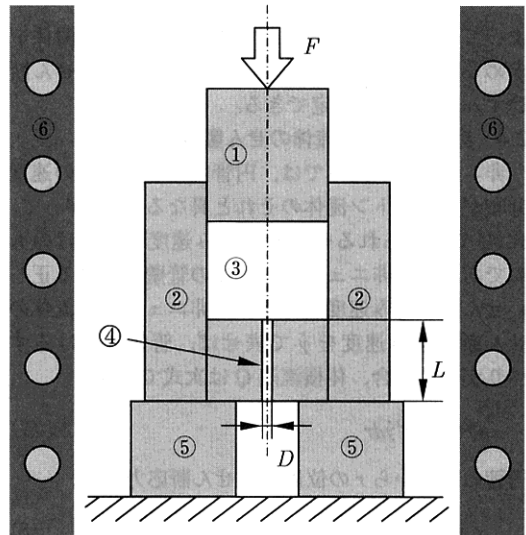


Fig. 1. Schematic illustration of the capillary flow test.
Legend: ①: Piston, ②: Cylinder, ③: Wood powder-plastic mixture, ④: Capillary, ⑤: Jig, ⑥: Heater.
Notes: L : Capillary length, R : Capillary radius, F : Load.

定の Γ_w のもとで様々な L/R の円管を用いた実験を行うことにより, 入口補正值 e_{ent} が決定できる。この補正方法は, ΔP と L/R の関係が線形であることが前提であり, また一定の R について求めた ΔP と L/R の関係に対して適用すべきとの報告がある⁹⁾。また, キャピラリ入口での圧力損失と同様に, 出口でも圧力損失が生じるが, 入口でのそれに比べるとかなり小さい。

2.3 管壁におけるすべり

Fig. 1 のような円管を試料が流れる際, 管壁においてすべりが生じて, セン断流れとすべりに由来する流れが組み合わさった複合流れとなっていることがある¹⁰⁾。この場合, 式(1)の Γ_w は管壁でのすべりに由来する流れを含んだ見かけのセン断ひずみ速度である。材料の真の流動曲線を得るためには, 複合流れを二つの流れ成分に分離する必要がある。円管内での定常流れにおいて, Fig. 2 に示すように, 管壁ですべり速度 v_s が存在し, v_s が管壁におけるセン断応力 τ_w のみの関数であると仮定すると, 管壁すべりに由来する体積流速 Q_s は,

$$Q_s = \pi R^2 v_s \quad (5)$$

と表される。複合流れに由来する体積流速を Q_c , Q_c から求めた見かけのセン断ひずみ速度を $\Gamma_{\text{cw}} (= 4Q_c / (\pi R^3))$ と書けば, Q_c は管壁すべりとセン断流れのそれぞれに由来する体積流速の和 ($= Q_s + Q$) であることから, 次式が導かれる。

$$\Gamma_{\text{cw}} = \frac{4v_s}{R} + \Gamma_w \quad (6)$$

よって, 一定の τ_w のもとでの $1/R$ と Γ_{cw} の関係を求めることにより, 管壁すべり速度 v_s 及びセン断ひずみ速度 Γ_w が決定できる。

2.4 非ニュートン流体のセン断ひずみ速度

非ニュートン流体では, 円管内の半径方向の速度分布がニュートン流体のそれと異なる。したがって, 式(1)で求められるセン断ひずみ速度は見かけのものであって, 非ニュートン流体の管壁における正しいセン断ひずみ速度ではない。非ニュートン流体のセン断ひずみ速度を $\dot{\gamma}$ で表せば, 管壁におけるすべりが無い場合, 体積流速 Q は次式で表せる。

$$Q = \pi \int_0^R r^2 \dot{\gamma} dr \quad (7)$$

円管の中心から r の位置でのセン断応力 τ は,

$$\tau = \frac{r}{R} \tau_w \quad (8)$$

で, $r|_{0 \rightarrow R}$ のとき $\tau|_{0 \rightarrow \tau_w}$ であるので, 式(7)は式(8)を用いて次のように書きなおせる。

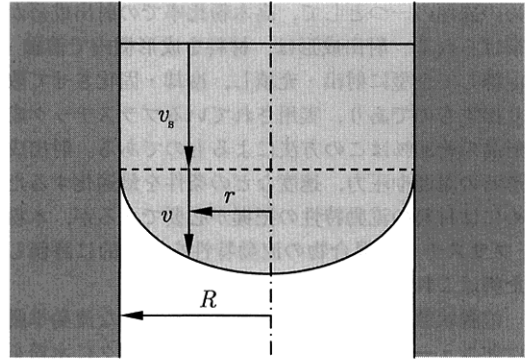


Fig. 2. Schematic illustration of flow velocity distribution in case there is slip at the capillary wall.

Notes: v_s : Slip velocity, v : Shear flow velocity, r : Distance from the center of the capillary, R : Capillary radius.

$$Q = \pi \frac{R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau \quad (9)$$

これを τ_w に関して微分すると, 非ニュートン流体の管壁でのセン断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_w$ が次式で与えられる。

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3}{\pi R^3} Q + \frac{\tau_w}{\pi R^3} \frac{dQ}{d\tau_w} \quad (10)$$

式(10)はラビノビッチ式¹¹⁾として知られる補正式である。非ニュートン流体が定常流れの状態であれば, ニュートン流体と同様に, 式(1)により管壁における見かけのセン断速度が求められる。式(1)を用いて式(10)を書き直すと, 次のようになる。

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3}{4} \Gamma_w + \frac{\tau_w}{4} \frac{d\Gamma_w}{d\tau_w} \quad (11)$$

これにより, Γ_w と τ_w の関係を実験的に求めれば, 非ニュートン流体の管壁におけるセン断速度 $\dot{\gamma}_w$ が決定できる。

3. 実 験

3.1 供試材料

使用した木粉及び熱可塑性樹脂, 両者の混合方法及び混合割合, ペレットの製造方法はすべて前報⁷⁾と同様である。

3.2 試験方法

Fig. 1 は, キャピラリ流動試験の方法を模式的に示したものである。使用した金型, 加熱方法, 加熱開始からピストンを押し込み始めるまでの時間は前報⁷⁾と同様である。ピストンの押し込み速度を1.51~58.2 mm/min で様々な変化させて, シリンダ部の粉体体積と荷重との関係を調べた。目標荷重は190 kN である。キャピラリの長さ (L) は10, 20, 30

mm, 直径(D)は1, 3, 5 mmである。

4. 結果と考察

4.1 見かけの粘性係数及び管壁におけるすべり

Fig. 3は, キャピラリ流動試験で得られた, シリンダ内部の試料体積と荷重との関係を示したものである。ここでは, (L, D) = (30, 3)の場合を例示した。前報⁷⁾と同様に, いずれの負荷速度の場合にも, キャピラリ出口から試料が流出し始めた後に荷重値の急激な低下が見られ, さらにその後, 試料の流動に伴う抵抗と荷重との巨視的な動的平衡状態が確認できた。このような現象は, 今回行った全てのキャピラリ流動試験で同様であった。

巨視的な動的平衡状態における荷重の平均値を動的平衡荷重 (F_{DE}) として求め, F_{DE} と負荷速度との関係を示したものが Fig. 4 である。 $D = 1$ については, 動的平衡状態が現れる前に目標荷重 (190 kN) に達してしまっただため, 負荷速度が比較的小さい場合にのみ F_{DE} を求めた。Fig. 4 から明らかなように, 両対数軸にプロットした F_{DE} と負荷速度の関係は, いずれのキャピラリ寸法の場合にも良好な直線性を示しており, 両者の関係はべき乗関数で表現されるものであることが推察された。これは, 動的平衡状態において, F_{DE} から算出したシリンダ内圧で代用

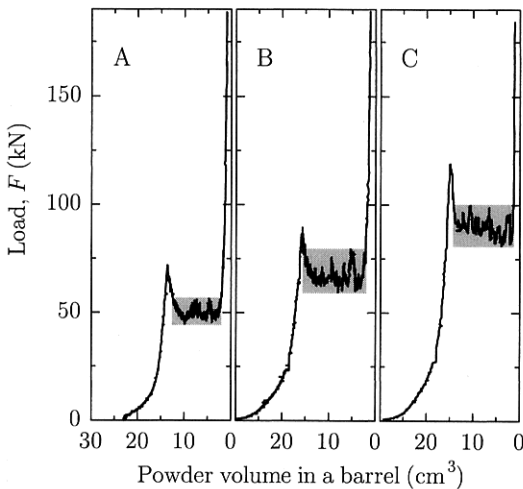


Fig. 3. Relationship between volume of wood powder-plastic mixture in the cylinder and load in capillary flow tests.

Legend: [shaded area] : Area showing the dynamic equilibrium state.

Notes: Capillary length : 30 mm, capillary diameter : 3 mm. Press speed : A : 1.70 mm/min, B : 9.19 mm/min, 55.9 mm/min.

した ΔP と, 負荷速度をもとに式(1)より算出した Γ_w の関係がべき乗関数で表現されるものであり, 試料の流動が非ニュートン流動によるものであることを意味している。Table 1は, それぞれのキャピラリ寸法における ΔP と Γ_w の関係を表す回帰式と決定係数をまとめたものである。いずれのキャピラ

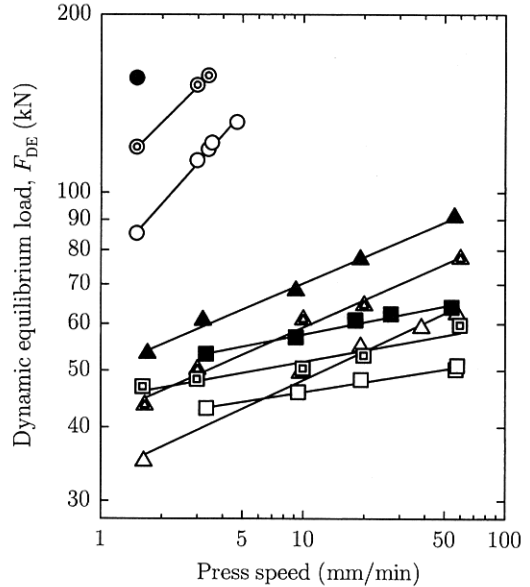


Fig. 4. Relationships between press speed and dynamic equilibrium load, F_{DE} .

Legend: ○ : (L, D) = (10, 1), ◎ : (L, D) = (20, 1), ● : (L, D) = (30, 1), △ : (L, D) = (10, 3), ▲ : (L, D) = (20, 3), ■ : (L, D) = (30, 3), □ : (L, D) = (10, 5), ◻ : (L, D) = (20, 5), ◼ : (L, D) = (30, 5).

Notes: L : Capillary length (mm), D : Capillary diameter (mm).

Table 1. Relationships between apparent shear rate, Γ_w , and ΔP , for which the inner pressure in the cylinder was substituted.

L	D	Regression equation	Coefficient of correlation
10	1	$\Delta P = 16.2 \Gamma_w^{0.388}$	0.997
20	1	$\Delta P = 32.6 \Gamma_w^{0.318}$	0.996
30	1	—	—
10	3	$\Delta P = 36.8 \Gamma_w^{0.162}$	0.993
20	3	$\Delta P = 49.5 \Gamma_w^{0.144}$	0.992
30	3	$\Delta P = 56.6 \Gamma_w^{0.148}$	0.997
10	5	$\Delta P = 57.2 \Gamma_w^{0.0559}$	0.993
20	5	$\Delta P = 62.1 \Gamma_w^{0.0690}$	0.962
30	5	$\Delta P = 69.6 \Gamma_w^{0.0689}$	0.990

Notes: L : Capillary length (mm), C : Capillary diameter (mm), ΔP : Pressure in the cylinder in the dynamic equilibrium state (MPa), Γ_w : Apparent shear rate (1/s).

リ寸法の場合にも相関係数が非常に高い。

Table 1 の回帰式をもとに、様々な Γ_w に対する ΔP を求め、 ΔP と L/R の関係を示したものが Fig. 5 である。Fig. 5 より、一定の R 及び Γ_w のもとでは、 ΔP と L/R との関係は良好な直線性を示していることが分かる。よって、式(4)によるせん断応力の補正を行ったところ、それぞれのキャピラリ径に対して Fig. 6 に示すような Γ_w と τ_w^* の関係を得た。これらの Γ_w と τ_w^* の関係はキャピラリ径 R に依存しており、同一の τ_w^* に対する Γ_w は R が小さいほど大きくなっている。これは、 R が小さいほど(材料と管壁との接触面積が小さいほど)材料の見かけ粘性係数が小さくなることを意味しており、管壁との接触抵抗がキャピラリ内の材料の流動に影響を及ぼしていることを示唆している。すなわち、材料と管壁の間にすべりが生じており、せん断流れとすべりに由来する流れが組み合わさった複合流れとなっていることが考えられる。よって、Fig. 6 に示した Γ_w と τ_w^* の関係は、 Γ_{cw} と τ_w^* の関係であると考えられる。

Fig. 6 より、様々な τ_w^* に対する Γ_{cw} を求め、式(6)

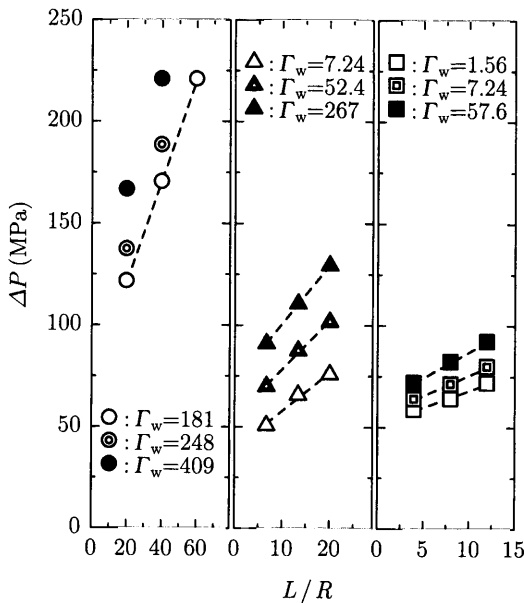


Fig. 5. Relationships between length-radius ratio, L/R , and ΔP , for which the inner pressure in the cylinder was substituted.
 Legend: \circ, \odot, \bullet : $R=1/2$, $\triangle, \blacktriangle, \blacktriangle$: $R=3/2$, $\square, \square, \blacksquare$: $R=5/2$.
 Notes: L : Capillary length (mm), R : Capillary radius (mm), ΔP : Pressure in the cylinder in the equilibrium state, Γ_w : Apparent shear rate (1/s).

に従い Γ_{cw} と $1/R$ の関係を図示したものが Fig. 7 である。さらに、Fig. 7 のそれぞれの τ_w^* に対する直線の傾きと切片からすべり速度 v_s とせん断ひずみ速度 Γ_w を求めたところ、Fig. 8 に示すような Γ_w と τ_w^* の関係及び v_s と τ_w^* の関係が得られた。Fig. 8 から明らかのように、これら二つの関係は両対数ゲ

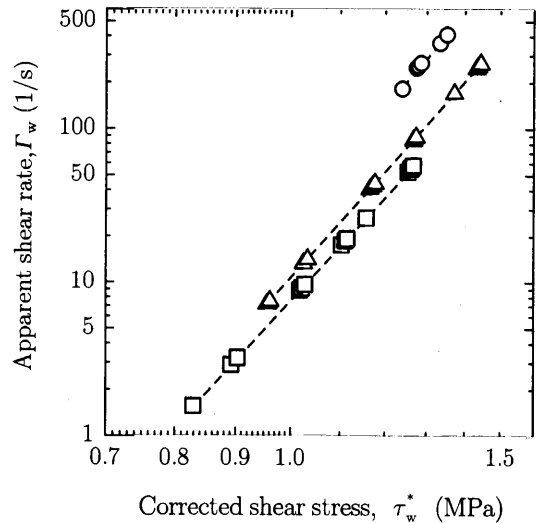


Fig. 6. Relationships between corrected shear stress, τ_w^* , and apparent shear rate, Γ_w .
 Legend: \circ : $R=1/2$, \triangle : $R=3/2$, \square : $R=5/2$.
 Notes: R : Capillary radius (mm).

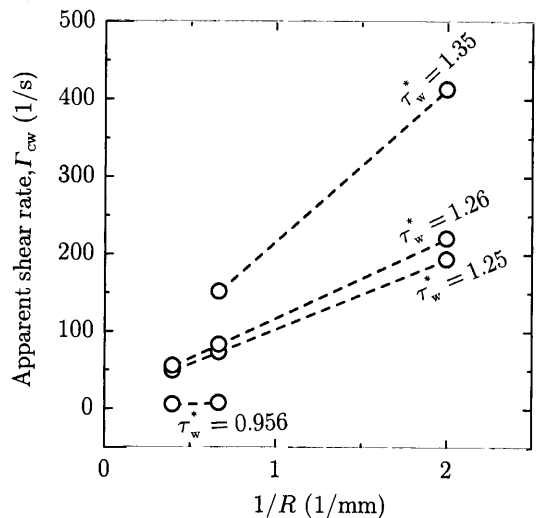


Fig. 7. Relationships between apparent shear rate, Γ_{cw} , and the reciprocal of R , $1/R$, at several corrected shear stresses.
 Notes: R : Capillary radius (mm), τ_w^* : Corrected shear stress (MPa).

ラフ上で良好な直線性を示しており、これら二つの関係はそれぞれべき乗関数で表現されうるものと考えられる。 Γ_w と τ_w^* の関係及び v_s と τ_w^* の関係の回帰式として次式を得た。

$$\Gamma_w = 2.85 (\tau_w^*)^{6.74} \quad (12)$$

$$v_s = 2.97 (\tau_w^*)^{9.28} \quad (13)$$

式(12)は、ニュートン流動を仮定した見かけのせん断ひずみ速度 Γ_w とせん断応力の関係であるので、式(11)によって補正を行うことにより、非ニュートン流体の管壁でのせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_w$ とせん断応力の関係を得て、さらに見かけの粘性係数 η_a を表す式として次式を得た。

$$\eta_a = 0.750 \dot{\gamma}_w^{-1/6.74} \quad (14)$$

一方、PEOのみについて全く同様な流動性試験を行い、その解析を行った結果、見かけの粘性係数は次式で得られた。

$$\eta_a = 0.119 \dot{\gamma}_w^{-1/4.71} \quad (15)$$

多くの高分子溶融体の流動においては、式(14)、式(15)と同様に、

$$\eta_a = k \dot{\gamma}_w^{n-1} \quad (16)$$

のような関係式が成り立ち、ほとんどの場合 $n = 1/2 \sim 1/3$ である。しかし、本研究における試験条件下では、木粉-プラスチック混合物で $n = 1/6.74$ 、PEO単体で $n = 1/4.71$ と小さく、非ニュートン挙動がかなり顕著であることが分かる。また、式(13)を見ると、 v_s と τ_w^* の関係は単純な比例関係にない。これは、試料と管壁との接触面付近で、複雑なすべ

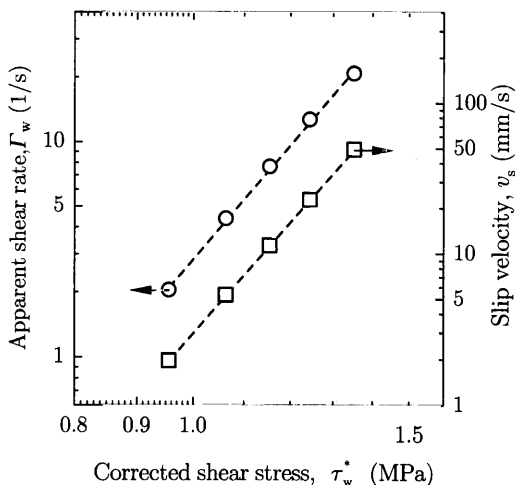


Fig. 8. Apparent shear rate, Γ_w , and slip velocity, v_s , as a function of corrected shear stress, τ_w^* .

りのメカニズムが存在することを示唆している。

4.2 流速分布

Fig. 9は、式(12)、式(13)から求めた $D = 1, 3, 5$ mmの各キャピラリ内の流速分布である。ここでは、体積流速が $20 \text{ mm}^3/\text{s}$ の場合を例示した。実線で示した試料の複合流れの流速分布は、いずれのキャピラリ径の場合にも、管壁付近においてはせん断流れが生じているものの、管の中央付近では流速分布がほとんど平坦な形になっており、せん断流れがごくわずかであることが分かる。破線で示した流速分布は、複合流れと同じ体積流速 ($20 \text{ mm}^3/\text{s}$) で、管壁ですべることなく流れるニュートン流体を仮定して求めたものである。いずれのキャピラリ径の場合にも、両者の流速分布は大きくかけ離れており、本研究で取り上げた木粉-プラスチック混合物は顕著な非ニュートン挙動を示していることが分かる。非ニュートン挙動が現れる原因として、次の三つの機構が考えられる。すなわち、プラスチックの分子レベルでの“絡み合い”と呼ばれる高分子鎖間での相互作用に基づくものと、木粉粒子間の相互作用に基づくもの、さらには木粉とプラスチックの間の相互作用である。関連する因子として、プラスチックの種類や分子量、溶融温度、木粉粒子の寸法形状、木粉混合

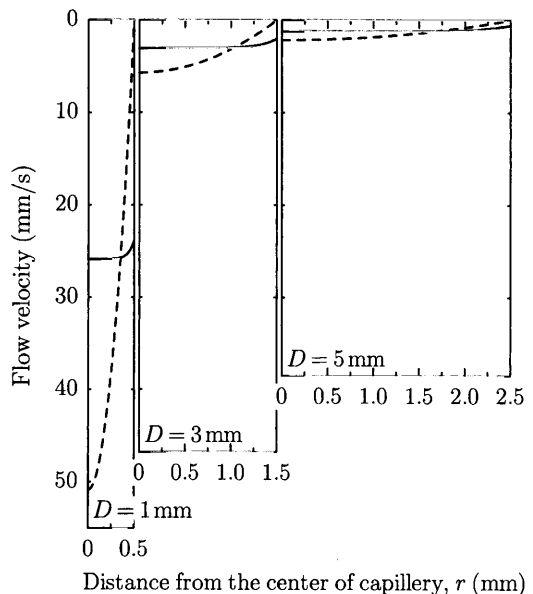


Fig. 9. Flow velocity distribution.

Legend: Solid line: flow velocity distribution of composite flow, Dashed line: flow velocity distribution that assumed a Newtonian fluid which flows at the same volumetric flow rate as the composite flow.

Notes: Volumetric flow rate: $20 \text{ mm}^3/\text{s}$.

率, 相溶性などが挙げられ, 実際の射出成形ではこれらの因子が複雑に混在することが予想される。そして, 各因子は成形体の諸特性にも多大な影響を及ぼすと考えられるので, 両者の関連性に基づいた材料設計を行うため, 今後, さらなる実験データの蓄積及びその解析が必要である。

4.3 流れ全体に占めるせん断流れの割合

ところで, 木粉は繊維質の木材を粉碎したものであり, その形状は細長く, 一般にアスペクト比が大きい。また, プラスチックの基本構成単位は, 分子量がおよそ1万以上の鎖状高分子である。よって, 木粉-プラスチック混合物が射出成形や押出成形などの何らかの方法で成形される時, その成形過程で作用するせん断力によって材料中にはせん断流れが生じ, 成形体中の木粉粒子や高分子が配向する。配向の程度によって成形体の諸特性は様々に変化すると考えられるので, 材料設計においては, せん断力と配向の関係を把握することが必要である。さらに木粉-プラスチック混合物においては, その流動は前述のようにせん断流れとすべりが複合したものである。Fig. 10は, 本研究で取り上げた木粉-プラスチック混合物が, 異なる径のキャピラリーを流動するときの, 流れ全体に占めるせん断流れの割合 Q/Q_c とせん断応力 τ_w^* の関係を示したものである。Fig. 10から, せん断応力が同じで

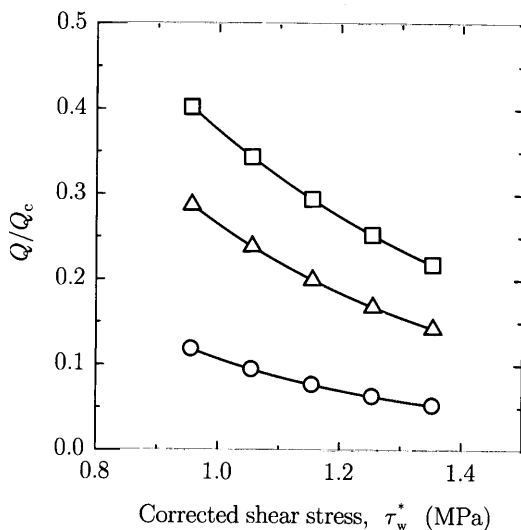


Fig. 10. Relationships between the ratio of Q to Q_c , Q/Q_c , and corrected shear stress, τ_w^* .

Legend: \circ : $R=1/2$, \triangle : $R=3/2$, \square : $R=5/2$.

Notes: Q : Volumetric flow rate based on shear flow, Q_c : volumetric flow rate of composite flow, R : Capillary radius (mm).

あっても, キャピラリー径が小さいほど全体の流れに占めるせん断流れの割合は小さく, また, いずれのキャピラリー径においても, せん断応力が大きくなるにつれてせん断流れの割合は小さくなるのが分かる。すなわち, 同一のせん断応力での成形を行った場合にも, 材料の流動経路の大小によって材料の配向の程度に違いが生じて, 成形体の諸特性に違いが生じることを示唆しており, 金型の設計において注意を要するものと思われる。

5. 結 論

木粉-プラスチック混合物についてキャピラリー流動試験を行い, その流動特性の解析及び評価を試みた。キャピラリー流動においておおむね定常状態と考えられる流動挙動に着目し, 見かけの粘性係数および管壁におけるすべりを解析により求めた。また, 解析結果をもとに, 流速分布および流動状態の詳細について考察を行った。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) 木粉-プラスチック混合物は顕著な非ニュートン挙動を示し, 見かけの粘性係数はせん断ひずみ速度が大きくなるにしたがって著しく低下した。
- 2) 木粉-プラスチック混合物のキャピラリー流動は管壁でのすべりをともなったもので, そのすべりは, せん断応力に比例しない, 複雑な機構によるものであることが推察された。
- 3) 流速分布についての解析の結果, 木粉-プラスチック混合物の流動はほとんどが管壁におけるすべりによるものであり, せん断流れは壁面近傍で生じているのみであることが推察された。
- 4) 流動状態についての解析の結果, キャピラリーを流れる材料のうち, せん断流れによって流動しているものの割合は, キャピラリー径が小さくなるほど, せん断応力が大きくなるほど小さくなる傾向が示唆された。

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(特別研究員奨励費)により行われた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) 岡本 忠: 木材学会誌 49, 401-407 (2003).
- 2) Rowell, R.: 木質プラスチック研究会 第3回研究会要旨集, 奈良, 2002, pp. 1-7.
- 3) 柏山晃毅, 前田直実: プラスチックス 52(5),

- 26-31 (2001).
- 4) 長谷川正: ポリマーダイジェスト **53**(4), 45-55 (2001).
 - 5) 沢田慶司: ポリマーダイジェスト **54**(1), 79-88 (2002).
 - 6) 明石光弘, 大沼加茂也: 木材学会誌 **21**, 22-28 (1975).
 - 7) 今西祐志, 相馬奈歩, 竹内和敏, 杉野秀明, 金山公三: 木材学会誌 **51**, 166-171 (2005).
 - 8) Bagley, E. B.: *J. Appl. Phys.* **28**, 624-627 (1957).
 - 9) 完戸俊助, 伊藤良夫: 材料 **17**(175), 35-38 (1968).
 - 10) Blyler, L. L., Hart, A. C.: *Polym. Eng. Sci.* **10**, 193-203 (1970).
 - 11) Tadmor, Z., Gogos, C. G.: “プラスチック成形加工原論”, 大柳 康 訳監修, シグマ出版, 東京, 1991, pp. 517-520.