

## 製紙用パルプ液のレオロジー特性

### Rheological Properties of Wood Pulp Suspensions

研究代表者 工学部機械工学科<sup>\*1</sup> 教授 角田 勝

Masaru Sumida

共同研究者 MHIソリューションテクノロジーズ(株)<sup>\*2</sup> 藤本 太郎

Taro Fujimoto

Rheological properties of wood pulp suspension flow in circular pipes have been investigated experimentally. In studying the flow mechanism, we mainly consider the yield stress that represents fiber network strength of flocculation of pulp fibers. The experimental results for five regimes, into which the flow had been classified on the basis of the behavior of pulp fibers and flow characteristics in the author's recent work (2010), were correlated with the fiber consistency  $C_s$  in equation of the form  $\tau = AC_s^m$  where  $\tau$  is the shear stress on the pipe wall and  $A$  and  $m$  are constant. The yield stresses are not dependent so much on the pipe diameter and become large with increase of the pulp-fiber consistency. The flocculation of pulp fibers starts to get loose near the pipe wall when a shear stress in excess of about four times the yield stress acts on the flowing fluid. The pressure loss in turbulent region becomes smaller than that for water as the pulp-fiber consistency increases.

Keywords: Pulp Suspension, Flow Characteristics, Fiber Consistency, Rheological Properties, Yield Stress

#### 1. はじめに

製紙用パルプ液の管路内輸送時の流動特性を知ることは、抄紙工程でも極めて重要である。パルプ液は木材繊維を水に懸濁したもので、原料木材の種類や製造法の違いによって数多くの種類がある。これらのパルプ液の流動特性については、古くから実験的<sup>(1)~(3)</sup>に調べられてきており、管路内輸送時における圧力損失についてみても多く<sup>(4)</sup>の報告がある。

パルプ液流れは固液二相流とはいえ、流動中は繊維同士が絡まってフロック（繊維塊）を形成するという凝集性を有している。そのため、パルプ液の流れは極めて低濃度であっても水とは異なった複雑な挙動を呈し、流速が遅い場合はビンガム流体に類似した挙動を示す。このような非ニュートン性はパルプ繊維濃度が高くなるほど顕著となり、降伏応力は極めて増大する。また、濃度が約1%を超えると流速  $U_a$  の増加に対して圧力損失  $\Delta P$  が極大・極小値を示すようになり<sup>(5)</sup>、さらに高流速では单相水流の場合よりも圧力損失がやや減少するようにも

なる<sup>(6)</sup>（図1<sup>(5)</sup>参照）。このような流れ特性についてはパルプ繊維を直線棒状にモデル化した解析<sup>(7),(8)</sup>も試行されてはいるが、断片的な定性的説明に止まり、実際のパルプ液流れにおける流量—圧力損失の関係を説明するにはかなり遠い状況である<sup>(4)</sup>。

このような現況から、本研究では円管内パルプ液流れについて既報の成果<sup>(5)</sup>を参考に流れを分類した各パターンに及ぼすパルプ繊維濃度と平均流速や管路径の影響を明らかにするとともに、流動特性についてのレオロジー的考察を工学的立場から行った。

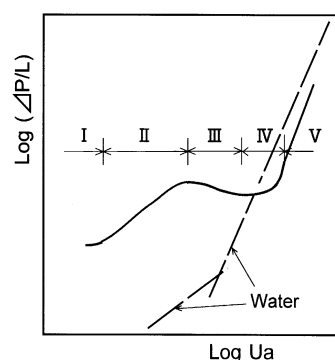


図1. 圧力損失  $\Delta P/L$  と平均流速  $U_a$  の関係の模式図<sup>(5)</sup>

\*原稿受付 2013年5月10日

\*1 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

E-mail sumida@hiro.kindai.ac.jp

\*2 〒676-0008 高砂市荒井町新浜2丁目1番1号

E-mail taro\_fujimoto@mhisoltech.tmw.mhi.co.jp

## 2. 実験装置および方法

### 2.1 実験装置および供試流体

本実験で使用した実験装置の概略を図2に示す。実験装置は、作動流体であるパルプ液を供給する管路系と供試管路および測定部から構成されている。作動流体は循環用ポンプ③により、攪拌機②と温度調節器が備えられた溶液タンク①から流量調節弁④を通過して供試管路内⑥に送られた後、再び溶液タンク①に戻る。この間、体積流量が電磁流量計⑤によって測定される。

供試管路には、内径  $d (=2a)$  が 8, 10, 21, 22 および 40 mm の 5 種類の透明アクリル製管路およびガラス製管路を用いた。座標系は、管中心軸から半径方向に  $r$  とした。

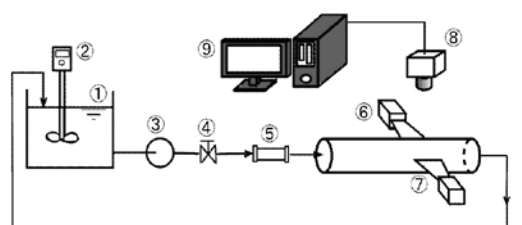
供試パルプ液には、現在最も多く使用されているクラフトパルプ(LBKP: Laubholz bleached kraft pulp)を用いた。原料は主に広葉樹である。

実験は、実際の抄紙機で使用されている繊維重量濃度  $C_s$  が 1.0% 以下から高濃度使用へ向けて、 $C_s = 0.2 \sim 3.0\%$  のパルプ液を使用した。

### 2.2 測定方法

パルプ液流れの測定は圧力損失、濃度分布および速度分布について行い、併せて可視化して流れの様相を観察した。

圧力損失の測定では、アクリル製の供試管路に直径 0.8 ~ 1.5 mm の圧力測定孔を設けて計測した。可視化はガラス製供試管路を箱形水槽に収めて光切断法で行い、撮影された画像からは既報の計測法<sup>6)</sup>に従って管路内の濃度分布を算出した。他方、管軸方向速度については、非接触で測定できる超音波流速計(UVP)、画像流速計(PIV)およびレーザ・ドップラー流速計(LDV)という 3 つの方法を適宜併用して計測し、各速度データを補完して速度分布を求めた。



- |                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| ① Reservoir                  | ⑥ Test pipe         |
| ② Stirrer                    | ⑦ Slit light        |
| ③ Pump                       | ⑧ High-speed camera |
| ④ Flow control valve         | ⑨ Personal computer |
| ⑤ Electro-magnetic flowmeter |                     |

図2. 実験装置概略図

## 3. 結果と考察

著者らは先の報告<sup>6)</sup>において正方形ダクト内パルプ液流れの繊維濃度分布を求め、パルプ繊維挙動の観点から、流れは図3の模式図に示すような五つのパターンに大別できることを見出している。図3中のパターンI~Vは、図1の圧力損失と平均流速の関係を示した模式図のそれと対応している。従来、管路内パルプ液流れについては圧力損失と流量の関係から栓流、混合流および乱流の3つに大別<sup>1)~3)</sup>されており、パターンIとIIが栓流、IIIとIVが混合流、さらにVが乱流に対応している。

まず、円形断面管路内の圧力損失の測定結果の一例( $d = 22$  mm)を図4に示す。圧力損失と平均流速の関係は、諸家<sup>1)~3)</sup>の実験に用いられている管路内径やパルプ原料の違いはあっても、類似した曲線で表されている。緒言でも述べているように、とりわけ濃度が1%を超えるパルプ液では、水の場合に比べて圧力損失は大幅に増大し、中流速においては平均流速の増加にもかかわらず圧力損失が減少するというパターンIIIの特徴が際だって顕著となる。しかも、平均流速が水流の場合の乱流圧力損失を表す流速より大きくなると、パルプ液流れも乱流状態に遷移する。

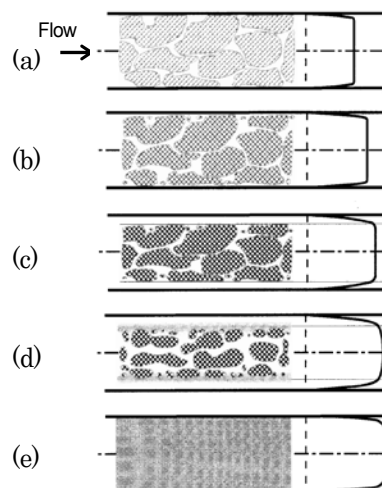


図3. パルプ液の流れパターン<sup>6)</sup>

- (a) パターンI: パルプ繊維と管路壁の間に強い摩擦力が働いている栓流, (b) パターンII: 壁面には繊維による摩擦力と流体の粘性力が同時に働いている栓流, (c) パターンIII: 壁面上に薄い水環が形成されている流れ, (d) パターンIV: 水環には繊維が含まれ遷移状態にある混合流, (e) パターンV: パルプ遷移は一様に分散している乱流

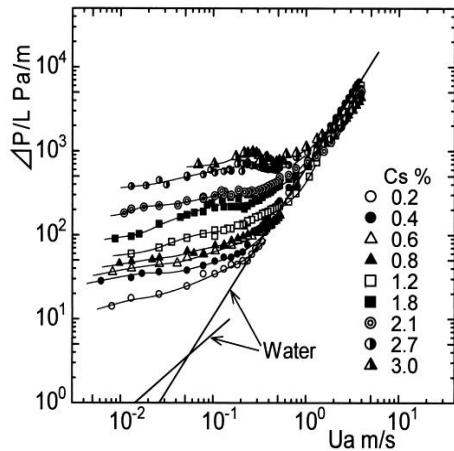


図 4. 圧力損失 $\Delta P/L$  ( $d=22$  mm)

このような流れ挙動の変化がどのような条件下で発現するかは、いまだ不明な点が多い<sup>(4)</sup>。それらの点を明らかにするためには、パルプ繊維の凝集力と形成されたフロック（繊維塊）が解れるのに要する流れ場を把握する必要がある。著者らは、繊維塊が解れ始めるためには凝集力に打ち勝って塊を解せん断応力が必要で、その凝集力を表す評価指標としては降伏応力が有用と考えている。

以下では、図 1 の $\Delta P/L-U_a$ 曲線で示される流動特性について、上述の観点から考察を進めることにする。

### 3.1 管路壁面上の粘度について

パルプ液流れでは、せん断応力とせん断速度との関係は均一のニュートン流体の場合とは異なり、半径方向に変化する。図 5 に、断面平均流速  $U_a$  と管路壁面上の粘度  $\mu_w$  の関係を  $d=22$  mm の場合について示す。図 5 中の破線は  $C_s=0.8\%$  についての流れパターンを区分する線である。

壁面上の粘度  $\mu_w$  はニュートン流体である水の場合よりも大きく、パルプ液濃度  $C_s$  の増加につれて増大する。しかし、パターン I ~ III の層流では  $U_a$  の増加につれては減少していることが分かる。

### 3.2 低流速（パターン I および II）の流れ特性

管路内のパルプ液は降伏応力を有しており、流動状態を保つためにはある大きさ以上の圧力降下が必要である。先出の図 4 は、流動状態が保持されている下での $\Delta P/L-U_a$ 曲線である。このときの降伏応力  $\tau_0$  は、極低流速で間欠的な流れが生じた時の圧力損失から、

$$\tau_0 = \frac{d}{4} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

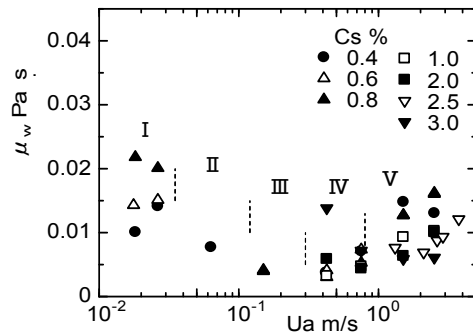


図 5. 壁面上の粘度 $\mu_w$  ( $d=22$  mm)

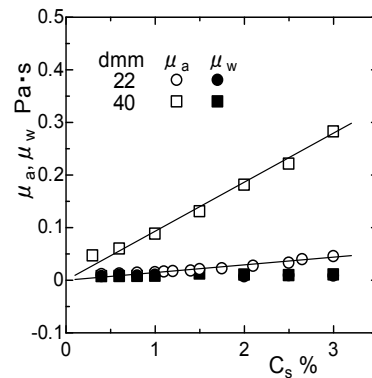


図 6. パターン III の領域における壁面上の粘度 $\mu_w$  と見掛けの粘度 $\mu_a$  ( $d=22$  mm). 実線: 式(4)

と求められる。降伏応力  $\tau_0$  はパルプの種類や管路内径に関係することも考えられるが、概ね濃度  $C_s$  のみの関数として、

$$\tau_0 = A C_s^m \quad (2)$$

で表されることが経験的に知られている<sup>(9)</sup>。本実験結果では  $A=0.28$  Pa,  $m=1.6$  ( $d=10\sim 40$  mm,  $C_s=0.3\sim 3\%$ ) である。パターン I では、パルプ繊維は塊状（フロック）となって剛体的に移動し、管路壁面とパルプ繊維の間にはこの降伏応力  $\tau_0$  に相当する動摩擦力が発生する。

流量がやや増加すると流れ状態はパターン II となり、管路壁面上には水からなる非常に薄い環状層が形成され始める<sup>(6)</sup> (図 3 参照)。したがって、管路壁面には繊維塊の降伏応力に対応する動摩擦力に水環流体の粘性力が同時に働くことになり、圧力損失は  $U_a$  に比例して増大する。壁面上の粘度  $\mu_w$  はパターン I の値に比べて小さくなる (図 5)。

### 3.3 中流速（パターンⅢ）の流れ特性

図6はパターンⅢの領域における $\mu_w$ と管路内における見かけの粘度 $\mu_a$ を示す。ここで、 $\mu_a$ はパルプ液が均質な粘度をもって流動するニュートン流体とみなした場合の粘度で、次式で示される。

$$\mu_a = \frac{a^2}{8U_a} \left( \frac{\Delta P}{L} \right) \quad (3)$$

流れが環状層と断面中央の栓部からなるパターンⅢでは、平均流速 $U_a$ が大きくなるにつれて繊維塊は中央の栓部へ押しやられて水環層が厚くなる（図3）。そのため、 $\mu_w$ は $U_a$ に対して極小値を示す（図5）。このようにパターンⅠからⅢまでの層流状態では、Shear-Thinning性が認められる。 $\mu_a$ は $\mu_w$ よりもかなり大きく、測定結果から次の実験式で表すことができる。

$$\mu_a = 2010 C_s d^{3.1} \quad (4)$$

( $\mu_a$ : Pa·s,  $C_s$ : %,  $d$ : m)

環状層は水に近い低濃度の層である。したがって、繊維濃度が高い $C_s$ のパルプ液が管路内を流れていても、この層内の壁面近傍の繊維濃度にはあまり変化がなく、また管路内径 $d$ にも依存していない。ちなみに、パターンⅢの壁面せん断応力 $\tau_w$ は、大雑把ではあるが、

$$\tau_w \approx (0.46 \sim 1.1) C_s^{1.7} \quad (5)$$

( $\tau_w$ : Pa,  $C_s$ : %)

で表わされる。このとき管路壁面上のせん断速度 $\gamma_w$ を水環の厚さ $\delta$ を用いて、

$$\gamma_w = (-dU/dr)|_{r=a} \approx U_a/\delta \quad (6)$$

と近似すると、 $\delta$ は約1~2mm程度と見積もることができる。

### 3.4 高流速（パターンⅣ、Ⅴ）の流れ特性

パターンⅢにおいて平均流速がある程度まで大きくなると栓部の濃度は高まり、水環層の厚さは増加しにくくなる。そのため、水環層内は高せん断流れとなるパターンⅣに変わり、栓部の水環層寄りの繊維塊は解れ始めるとともに壁面上の粘度 $\mu_w$ は $U_a$ につれて増大する（図5）。しかし、壁面せん断応力 $\tau_w$ はあまり変化がなく、

$$\tau_w \approx 1.1 C_s^{1.7} \quad (\tau_w: \text{Pa}, C_s: \%) \quad (7)$$

の値をとり、繊維塊は降伏応力 $\tau_0$ の約4倍のせん断応力を受けると解れ始めていることが分かる。

さらに平均流速を増すと、パルプ液流れは乱流化する（パターンⅤ）。乱流状態における圧力損失 $\Delta P$ は、水の場合よりも小さい（図4）。そこで、乱流領域における圧力

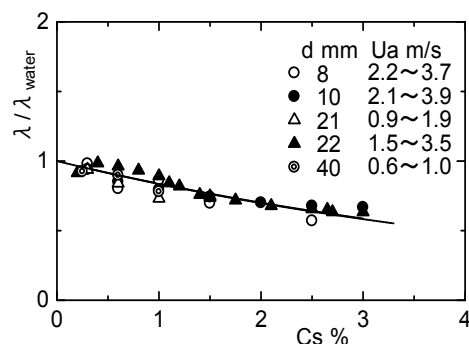


図7. 乱流状態における抵抗係数比と濃度の関係。実線：式(8)

損失のデータから抵抗係数（管摩擦係数） $\lambda$ を求め、水の管摩擦係数 $\lambda_{water}$ と比較した。その結果( $\lambda/\lambda_{water}$ )を図7に示す。乱流域では抵抗係数比は管内径 $d$ に係わらず

$$\lambda/\lambda_{water} = \Delta P/\Delta P_{water} = \exp(-0.18 C_s) \quad (8)$$

( $C_s$ : %)

で表すことができる。

壁面付近ではパルプ繊維により乱れが抑制されるため、抵抗係数比は $C_s$ の増加につれて減少するものと考えられる。また、壁面せん断応力 $\tau_w$ は

$$\tau_w > 3.1 C_s^{1.7} \quad (\tau_w: \text{Pa}, C_s: \%) \quad (9)$$

で、管路内のパルプ繊維は降伏応力 $\tau_0$ の約10倍のせん断応力で一様に分散するといえる。

## 4. まとめ

製紙用パルプ液の円管路内の流れについて、既報の流れパターンの分類にもとづいて流動特性を考察した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 円管内パルプ液流れは、管路内径やパルプ液濃度が異なっても、その流動特性は五つのパターンに分類して説明できる。
- (2) パルプ液はビンガム性を有しており、その降伏応力 $\tau_0$ は式(2)で表され、パルプ液濃度が高いほど大きくなる。
- (3) パルプ液の管路壁面上の粘度 $\mu_w$ はパターンⅢからⅣにかけて最小値を取り、さらに平均流速を増して降伏応力の約4倍を越すせん断応力を受けるとパルプ繊維のブロックは解れ始める。
- (4) 実用上重要な乱流域の圧力損失は式(8)で近似でき、濃度が高くなるほど水の場合よりも小さくなる。

## 謝辞

本研究にご協力いただいた鈴木節夫氏（メッツオペーパージャパン(株)）および試料のパルプ液をご提供頂いている越前和広氏（王子製紙(株)）に感謝の意を表す。また、本研究の一部は、JSPS 科研費(20560173 および 23560212)の助成によって行われた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- (1) Robertson, A. A. and Mason, S. G., “The flow characteristics of dilute fiber suspensions” , *TAPPI*, Vol. 40, No. 5 (1957), pp. 326-334.
- (2) Forgacs, O. L., Robertson, A. A., and Mason, S. G., “The hydrodynamic behaviour of paper-making fibers” , *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Vol. 59 (1958), pp. 117-128.
- (3) Duffy, G. G., Titchener, A. L., Lee, P. F. W. and Moller, K., “The mechanisms of flow of pulp suspensions in pipes” , *Appita*, Vol. 29, No.5 (1976), pp. 363-370.
- (4) Cui, H. and Grace, J. R., “Flow of pulp fibre suspension and slurries: A review” , *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 33 (2007), pp. 921-934.
- (5) 角田勝・藤本太郎, “ダクト内パルプ液のパルプ繊維濃度の測定と流れ特性” , 日本機械学会論文集(B編), 76巻761号(2010), pp. 35-41.
- (6) Lee, P. F. W. and Duffy, G. G., “An analysis of the drag reducing regime of pulp suspension flow” , *TAPPI J.* Vol. 59, No. 8 (1976), pp. 119-122.
- (7) Dinh, S. M. and Armstrong, R., “ A rheological equation of state for semiconcentrated fiber suspensions” , *J. Rheol.*, Vol. 28 (1984), pp. 207-227.
- (8) Dong, S., Feng, X., Salcudenan, M. and Gartshore, I., “Concentration of pulp fibers in 3D turbulent channel flow” , *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 29 (2003), pp.1-21.
- (9) Bennington, C. P. J., “The yield stress of fibre suspensions” , *Canadian J. Chemical Engineering*, Vol. 68 (1990), pp.748-757.