

製紙用パルプ液の円管内流動特性

角田 勝^{*1}, 藤本 太郎^{*2}

Flow properties of wood pulp-fiber suspensions in circular pipes

Masaru SUMIDA^{*1} and Taro FUJIMOTO^{*2}

^{*1}Kinki University, Faculty of Engineering

1 Takaya Umenobe, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima 739-2116, Japan

^{*2}MHI Solution Technologies Co., LTD.

2-1-1 Niihama Arai-cho, Takasago-shi, Hyogo 676-0008, Japan

Abstract

The flow characteristics of wood pulp suspensions in circular pipes have been investigated experimentally. In studying the flow mechanism, we mainly consider the yield shear stress, which represents the fiber-network strength in the flocculation of pulp fibers. The experimental results for five regimes, into which the flow was classified on the basis of the behavior of pulp fibers and the flow characteristics, as reported in the author's recent work (2010), were correlated with the fiber concentration C_s in equation of the form $\tau = aC_s^b$ where τ is the shear stress on the pipe wall and a and b are constant. The yield shear stresses were determined by the measurement of the pressure loss. They are not dependent so much on the pipe diameter and become large with increase of the pulp-fiber concentration. The flocculation of pulp fibers starts to become loose near the pipe wall when a shear stress exceeding about four times the yield shear stress acts on the suspension. The values of the disruptive and dispersive shear stresses are formulated as simple expressions depending on only the fiber concentration. Furthermore, the corresponding critical and turbulent Reynolds numbers are presented. The pressure loss of the pulp suspension in the turbulent flow becomes smaller than that for water, and the ratio of both can be expressed by a simple empirical equation.

Key words : Multi-phase flow, Pipe flow, Pulp fiber suspension, Flow properties, Pressure drop, Yield shear stress

1. 緒 言

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、抄紙工程においても極めて重要である。パルプ液は木材繊維物質を水に懸濁したもので、原料木材の種類や用途となる紙に対応した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、古くから実験的研究が行われてきており、管路内輸送時における圧力損失についてみても多くの報告 (Robertson and Mason, 1954, 1957; Forgacs, et al., 1958; Duffy, et al., 1976) がある。また、最近では抄紙工程における省エネルギー化を図る (Whalley and Ebrahimi, 2002; Linnala, et al., 2010; Hämäläinen, et al., 2010) うえでもますます重要視されるようになった。

パルプ液流れは固液二相流とはいえず、パルプ繊維は細くて軟らかい固体微粒子であるため網状となり、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。また、これが分解・結合を繰り返しながら流下する。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する。すなわち、流速が遅い場合はビンガム流体に類似した挙動を示し、流速を増すにつれて管壁上に濃度の低い薄層が現れて非均一流体流れとなり、さらに流速が大きくなると乱流化して均一物質としての扱いができるようになる。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。特に、パルプ繊維濃度が約 1 wt% を超えると流速 U_a の増加に対して圧力損失 ΔP が極大・極小値を示すよう

*本論文は日本機械学会論文集 81 巻 823 号 (2015), No.14-00242 の再録である

^{*1} 近畿大学工学部機械工学科 教授, 次世代基盤技術研究所 教授 (〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺 1)

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

^{*2} MHI ソリューションテクノロジーズ (株) (〒676-0008 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-1-1)

連絡先: 角田勝 (研究代表者)

になり (Robertson and Mason, 1957; 角田, 藤本, 2010), さらに高流速では単相水流の場合よりも圧力損失がやや減少するようになる (Lee and Duffy, 1976) [図 1 (角田, 藤本, 2010) 参照]. このようなパルプ液流れの特性については, パルプ繊維を直線棒状にモデル化した解析も試行 (Dinh and Armstrong, 1984; Dong, et al., 2003) されているが, 断片的な繊維挙動の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 (Cui and Grace, 2007).

ところで, 諸家 (Robertson and Mason, 1954, 1957; Forgacs, et al., 1958; Duffy, et al., 1976) による圧力損失に関する結果を概観すると, 流量—圧力損失の関係は管路内径やパルプ原材料の違いはあっても, 類似した曲線で表されている. しかも, 非ニュートン性を強く示す 1 wt% を超えるパルプ液では, 単相水流に対する圧力損失の大きさは降伏応力の大きさにほぼ比例して増大しているようにもみえる. 一方, 形成されたフロックの凝集力については, いまだ適切な評価方法は見いだされておらず, 現況から降伏応力をその一つの指標とすることも考えられる. 加えて, パルプ繊維のフロックが解れ始める流れ条件を見いだすことも, 抄紙工程においては重要な課題 (高濃度抄紙技術, 1990) として残されている.

そこで, 本研究では円管内パルプ液流れについて圧力損失を測定し, 既報の成果 (角田, 藤本, 2010) を参考に流れを分類した各パターンにおける壁面上のせん断応力に及ぼすパルプ繊維濃度と平均流速や管路内径の影響を実験的に明らかにするとともに, 流れ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.

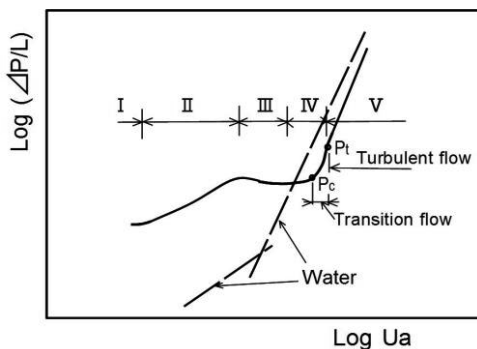


Fig. 1 Schematic diagram of relationship between pressure loss and velocity on logarithm axes and flow regime.

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

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. 各管路の長さは 2~5 m で, 管路壁の厚さは 1~5 mm である. 座標系は, 管中心軸から半径方向に r とした.

2.2 供試流体

供試パルプ液には, 印刷用上質紙の製造に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, その平均繊維長さは 0.74 mm, 濾水性を表すフリーネスは 523 ml である. 参考のため, 供試パルプ繊維の拡大写真を図 3 に示す.

実験は, このパルプ繊維を分散させてできる繊維重量濃度 C_s について実際の抄紙機で使用されている 1.0 wt% 以下から高濃度使用へ向けて, $C_s = 0.2 \sim 3.0$ wt% のパルプ液を使用した.

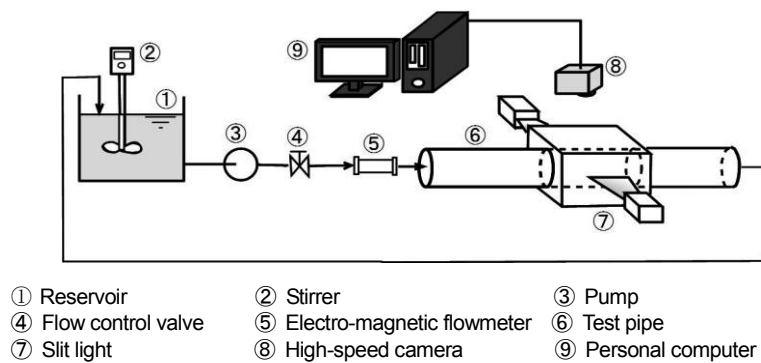


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

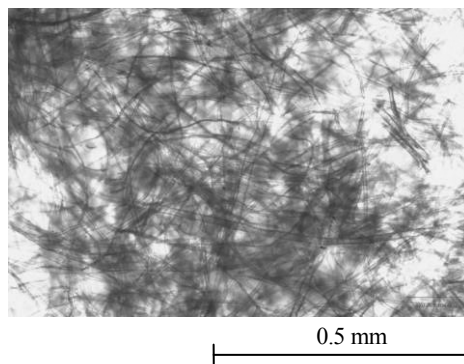


Fig. 3 Photograph of pulp fibers.

2・3 測定方法

パルプ液流れの測定は圧力損失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子を観察した。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、この測圧孔に装着したステンレス管に接続した導圧管を介して 2 点間の圧力差を拡散型差圧変換器あるいはマノメータに導き、計測した。

可視化は、図 2 に示すようにガラス製供試管路を箱形水槽に収めて光切断法で行った。可視化光源には 2 個のメタルハライドランプ (150W) ⑦から幅約 1 mm の平行スリット光を作成して、管中心軸を含む水平面内の流れを上方より高速度カメラ (Photron 社製 FASTCAM-1024 PCI) ⑧で撮影した。

管軸方向速度は、非接触で測定できる超音波流速計 (UVP: Ultrasonic Velocity Profiler)、画像流速計 (PIV: Particle Image Velocimetry) およびレーザ・ドップラー流速計 (LDV: Laser Doppler Velocimetry) という 3 つの方法を適宜併用して求めた。すなわち、局所パルプ繊維濃度の高い管路断面中央部については UVP、低い濃度の場合および管路壁付近については PIV あるいは LDV で計測し、各速度データを補完して速度分布形を求めた。

3. 結果と考察

著者らは先の報告 (角田, 藤本, 2010) 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 4 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 4 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 つに分類 (Robertson and Mason, 1954, 1957; Forgacs, et al., 1958; Duffy, et al., 1976) されており、I と II が栓流、III と IV が混合流、V が乱流に対応している。

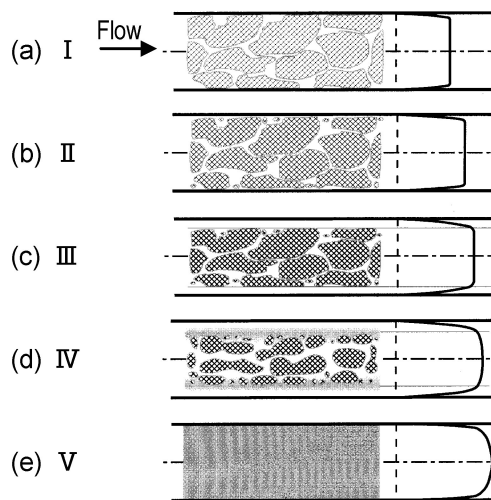


Fig. 4 Typical flow patterns of pulp suspensions (Sumida and Fujimoto, 2010).

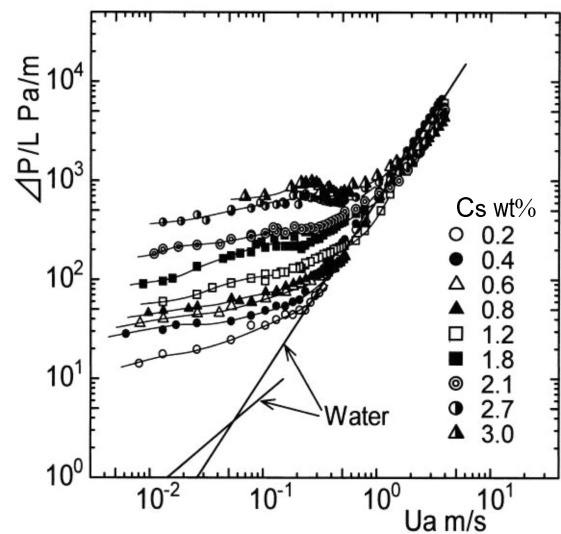


Fig. 5 Pressure loss for several fiber concentrations for $d=22$ mm.

まず，円形断面管路内の圧力損失の測定結果の一例を図5に示す．これらの圧力損失と平均流速の関係は，諸家（Robertson and Mason, 1954, 1957; Forgacs, et al., 1958; Duffy, et al., 1976）の実験で用いられている管路内径やパルプ原材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 wt%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．さらに平均流速が水流の場合の乱流圧力損失を示す流速より大きくなると，パルプ液流れは乱流に遷移する．

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（Cui and Grace, 2007）．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が分解するのに要する流れ場を把握する必要がある．しかしながら，前者についてはフロックの状態を撮影して観察する実験（Robertson and Mason, 1954; Hill and Eriksson, 1976; Davydenko and Unger, 1995）が行われ，後者についてはその試行例（Duffy and Titchener, 1975）が報告されているものの，両者を対象とした研究は著者らの知る限り見あたらない．また，著者らは繊維塊が解れ始めるためには凝集力に勝る流れ場（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， $\Delta P/L-U_a$ 曲線で示される流動特性（図1の特徴）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，図4に示すようにパルプ繊維が管壁近傍ではほとんど存在しない不均一な状態になっている．そのため，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6に管路壁面上の粘度 μ_w と断面平均流速 U_a との関係を $d=22$ mmの場合について示す．図6中の破線は $C_s=0.8$ wt%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 μ_w は，管路壁面上のせん断応力 $\tau \{=(\Delta P/L) d/4\}$ から速度分布の近似曲線 $U=U(r)$ を用いて，

$$\mu_w = \tau / (-dU/dr)_{r=a} \quad (1)$$

なる関係式から算出した．壁面上の粘度 μ_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

水平管路内のパルプ液中のパルプ繊維は、静止状態ではマット状の様相を呈する。パルプ繊維が動き始めるとマット状の上面は波状となって巻き上がり、フロックが形成されてパルプ液は静止・流下の間欠的な運動をする流れとなる。いわゆる、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こう配が必要である。先出の図5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。

降伏応力 τ_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、

$$\tau_0 = (\Delta P/L) d/4 \quad (2)$$

と求められる。その結果を図7に示す。図7中の回印は小川ら(1992)の結果($d=50$ mm, LBKPパルプ:フリーネスは230~470 ml)である。さらに図7中には、後述するように流れが遷移し始めたと思わせる壁面せん断応力 τ_c 、および断面内全体が乱流化したと思わせるせん断応力 τ_t の結果も併せて示している。降伏応力 τ_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、

$$\tau_0 = A C_s^m \quad (3)$$

の形式で表されることが経験的に知られている(Bennington, 1990)。本実験のLBKPパルプ液の結果では、

$$\tau_0 = 0.28 C_s^{1.6} \quad (d=10\sim 40 \text{ mm}, C_s=0.4\sim 3 \text{ wt}\%) \quad (4)$$

である。 τ_0 の値は0.4 wt%以下の低濃度ではバラツキが大きい。管路内径 d への依存性は陽には見られない。なお、べき指数 m はパルプ液濃度 C_s が3 wt%を超えると急増し、約5 wt%では2.5となる報告(Parker, 1961)もある。

パターンIではパルプ繊維は塊状となって剛体的に移動し(図4(a))、管路壁面とパルプ繊維の間にはこの降伏応力 τ_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はパターンIIとなり、管路壁面上に水から

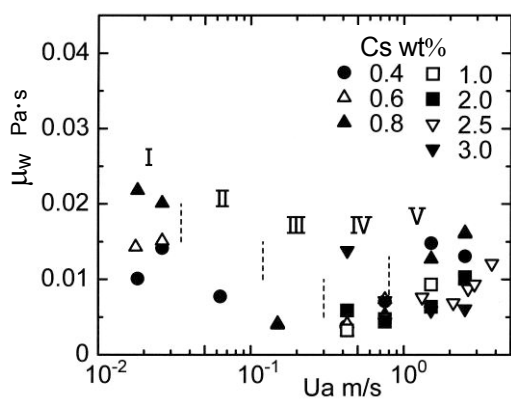


Fig. 6 Relationship between viscosity μ_w at pipe wall and mean velocity U_a . The broken lines in the figure show where the flow pattern of $C_s=0.8$ wt% divides.

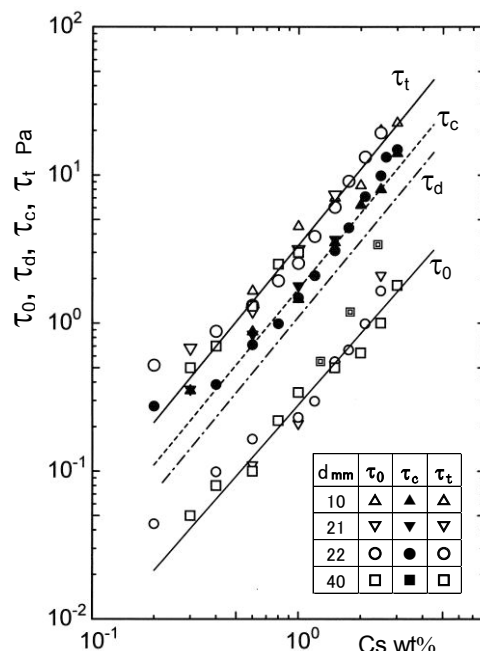


Fig. 7 Relationship between wall shear stress τ and fiber concentration C_s . τ_0 : yield shear stress, τ_d : disruptive shear stress, τ_c : critical shear stress, τ_t : turbulent shear stress. □ τ_0 from Ogawa et al. (1992).

なる非常に薄い環状層が形成され始める（角田，藤本，2010）（図4 (b)）。したがって，管路壁面には繊維塊の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．このように低流速ではパルプ液はビンガム性を有する．そして，このパターンIIでは水環部が形成されるにつれて繊維塊の壁面との動摩擦力が和らげられ，壁面上の粘度 μ_w はパターンIの値に比べて小さくなる（図6）．

3・3 中流速（パターンIII）の流れ特性

図8にパターンIIIの領域内における μ_w と管路内における見かけの粘度 μ_a を示す．図8中には，小川ら（1992）が層流領域で求めた μ_a の結果（ $d=25$ mm，LBKPパルプ）も示している．ここで， μ_a はパルプ液が均質な粘度をもち，放物線形の数値分布をし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．

$$\mu_a = \{a^2 / (8U_a)\} \cdot (\Delta P / L) \quad (5)$$

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，水環層は厚くなる（図4 (c)）．そのため，壁面上のせん断速度 γ_w は U_a の増加に対して変化が少なく， μ_w は U_a に対して極小値を示す（図6）．つまり，壁面付近におけるパルプ液流れには，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．

パターンIIIの流れ領域では，いずれの濃度の場合も μ_a は μ_w よりもかなり大きく，その値は測定結果から C_s と d からなる次の実験式（ $d=10\sim 40$ mm， $C_s=0.4\sim 3$ wt%）で表すことができる．

$$\mu_a \approx 2010 C_s d^{3.1} \quad (\mu_a : \text{Pa}\cdot\text{s}, C_s : \text{wt}\%, d : \text{m}) \quad (6)$$

壁面上の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，この薄層内の壁面近傍の局所繊維濃度にはあまり変化がない．他方，パルプ繊維がフロックをなす栓部の局所濃度は， C_s が高くなるほど高くなる．このことは，管路断面内のパルプ繊維濃度は，管路壁面から管中心に向かって増加していることを示している．また管路内径が大きくなるほど断面内に占める栓部の割合が大きくなるので，栓部の濃度増加は少なくなる．

ちなみに，パターンIIIの壁面せん断応力 τ_{III} は大雑把ではあるが，

$$\tau_{III} \approx (0.46 \sim 1.1) C_s^{1.7} \quad (7)$$

で表わされる．上式の適用範囲は $d=10\sim 40$ mm， $C_s=0.4\sim 3$ wt% である． τ_{III} は τ_0 と同様 d には依存していない．このとき管路壁面上のせん断速度 γ_w を水環の厚さ δ を用いて，

$$\gamma_w = (-dU/dr)_{r=a} \approx U_a / \delta \quad (8)$$

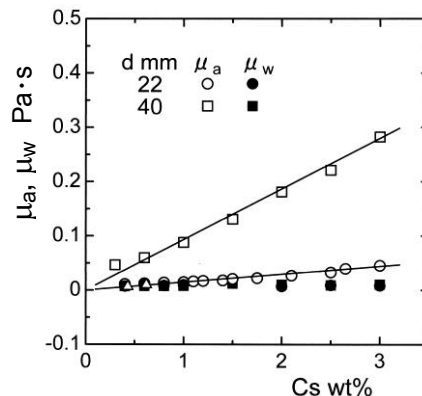


Fig. 8 Effects of fiber concentration on viscosity μ_w at pipe wall and apparent viscosity μ_a in pattern III.
 Δ : μ_a from Ogawa et al. (1992) (LBKP pulp, $d=25$ mm).

と近似すると、 δ は1~1.5 mm程度と見積もることができる。 δ はパルプ液濃度 C_s が高くなるほど、薄くなるものと思われる。

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り、栓部の水環部寄りの繊維塊は解れ始める（パターンIV, 図4(d)）。それに伴い、壁面上の μ_w も増加する（図6）。しかし、壁面上のせん断応力 τ_w の大きさにはあまり変化がなく、ほぼ $\tau_w \approx 1.1C_s^{1.7}$ の値を取る。繊維塊は降伏応力 τ_0 の約4倍のせん断応力 τ_d （図7中の一点鎖線）を受けて解れ始めている。

さらに平均流速を増すと、パルプ液流れは層流から乱流に遷移し始め、圧力損失は U_a の増加につれて急激に増大する（図1の点P_c）。遷移は水環層内のせん断応力がある値 τ_c 以上になると始まるものと考えられ、その遷移速度 $U_{a,c}$ は

$$U_{a,c} \propto (\tau_c / \rho)^{1/2} \quad (9)$$

とおくことができる。遷移開始点せん断応力 τ_c （図7の破線）は、式(3)と同様に C_s のべき乗に比例して大きくなる。すなわち、

$$\tau_c \approx 1.7 C_s^{1.7} \quad (d=10\sim 40 \text{ mm}, C_s=0.4\sim 3 \text{ wt}\%) \quad (10)$$

ところで、パルプ液流れの圧力損失は、ニュートン流体のようにレイノルズ数という一つの無次元数で表現することは難しい（富田, 1959）。さらに、動粘度を取ってみても、これまで述べてきたように濃度や流速によって変化するため、その値を求めること自体が困難である。そこで、本研究では実用上の便利さを考慮して水の動粘度 ν_{water} を用いて、遷移レイノルズ数 Re,c を

$$Re,c = U_{a,c} \cdot d / \nu_{water} \quad (11)$$

と定義して考察する。式(11)に式(9)および(10)を代入し、遷移レイノルズ数が濃度 $C_s = 0$ で $Re,c \approx 2300$ なることを考慮して、次の関係式におく。

$$Re,c = K \frac{\sqrt{\tau_c / \rho} \cdot d}{\nu_{water}} + 2300 = K_1 \frac{C_s^{1.30} \cdot d}{\nu_{water}} + 2300 \quad (12)$$

ここで $d=10\sim 40$ mm, $C_s=0.4\sim 3$ wt%である。 K_1 は定数係数で、測定結果を用いて求められる。図9に Re,c の測定結果を示す。なお、図9中には後出の乱流状態が達成されたレイノルズ数 Re,t の結果も併せて示した（図9(b)）。図9(a)から $K_1=0.75$ と求まり、遷移レイノルズ数 Re,c は実線で表される次式で近似的に表示できる。

$$Re,c = 0.75 \frac{C_s^{1.30} \cdot d}{\nu_{water}} + 2300 \quad (13)$$

これらの結果は、パルプ液の管内流動について水の薄層が存在するとして富田（1959）が示唆した内容と定性的に一致する。

平均流速をさらに増すと、遷移状態は管中心軸まで及び、管路内全体が乱流状態のパターンV（図4(e)）となる（図1の点P_i）。このとき壁面上の μ_w は乱流粘性を表し、その値は急増する（図6）。そして、流れが管断面内全体で乱流化したとみなせる壁面せん断応力 τ_t は

$$\tau_t \approx 3.3 C_s^{1.7} \quad (d=10\sim 40 \text{ mm}, C_s=0.4\sim 3 \text{ wt}\%) \quad (14)$$

と表される。この τ_t の値は降伏応力 τ_0 の約10数倍で、管路内のパルプ繊維はほぼ一様に分散する。このと

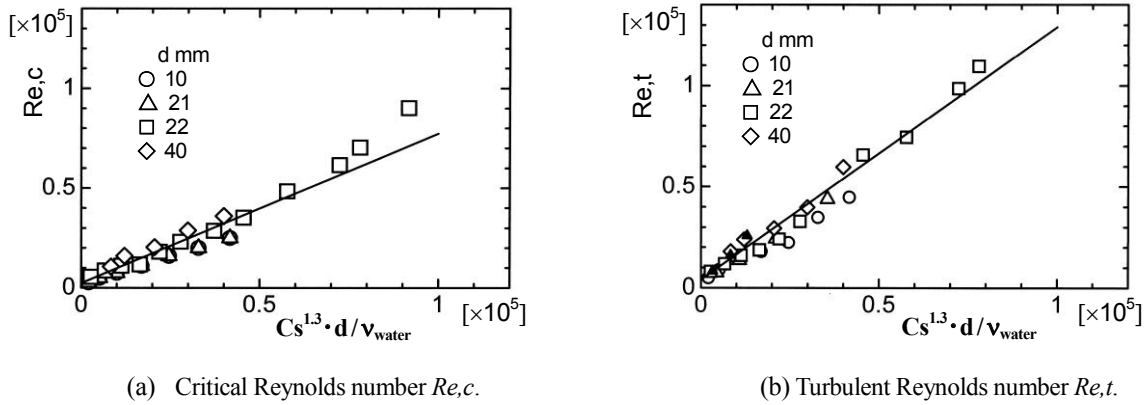


Fig. 9 Critical Reynolds number Re,c and turbulent Reynolds number Re,t . The critical Reynolds number Re,c and the turbulent Reynolds number Re,t can be expressed approximately by the solid lines with Eqs. (13) and (15), respectively. ▲: Re,t from Ogawa et al. (1992) (LBKP pulp, $d=25$ mm).

きのレイノルズ数 $Re,t (= U_{a,t} \cdot d / v_{water})$ は、図 9 (b) から式 (13) と同様な関係式で表示される。

$$Re,t = 1.25 \frac{Cs^{1.30} \cdot d}{v_{water}} + 4000 \quad (15)$$

なお、本実験結果は小川ら (1992) が LBKP パルプ液について測定した圧力損失曲線 ($d=25$ mm) から読み取られる Re,t の値とも大体一致する。

レイノルズ数がこの Re,t よりも大きい流れでは、圧力損失 ΔP は水の場合よりも小さく、その度合いは濃度 Cs が高くなるほど大きくなっている (図 5)。そこで、乱流領域 (パターン V) における圧力損失のデータから抵抗係数 (管摩擦係数) λ を求め、水の管摩擦係数 λ_{water} と比較した。その結果 ($\lambda / \lambda_{water}$) を図 10 に示す。図 10 中には、小川ら (1992) [LBKP パルプ, $d=25$ mm] および Robertson ら (1957) [サルファイトパルプ, $d=22.2$ mm] の測定結果から算出した値も示した。乱流領域では抵抗係数比は管路内径 d に係わらず大略

$$\lambda / \lambda_{water} = \Delta P / \Delta P_{water} = \exp(-0.18Cs) \quad (Cs: \text{wt}\%, Re > Re,t) \quad (16)$$

で表すことができる。

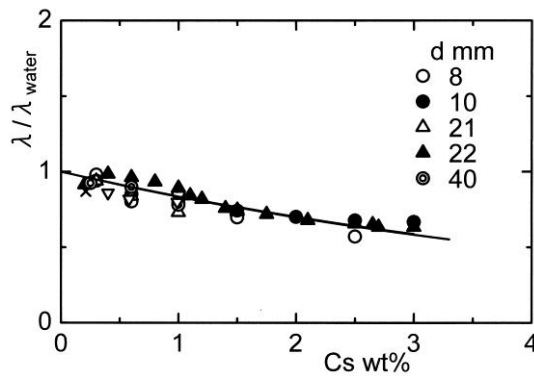


Fig. 10 Effect of fiber concentration on pressure loss in turbulent flow. x: data from Ogawa et al. (1992) (LBKP pulp, $d=25$ mm). ▽: data from Robertson and Mason (1957) (Sulphite pulp, $d=22.2$ mm).

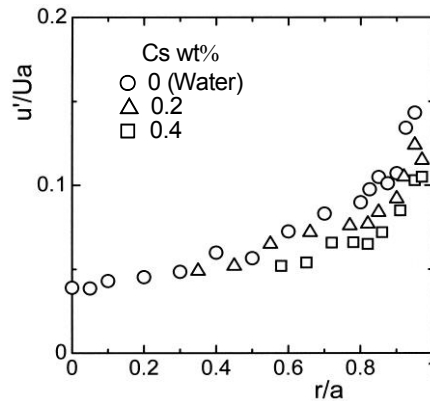


Fig. 11 Distributions of turbulence intensity ($U_a=2.0$ m/s, $d=22$ mm).

図 11 に管軸方向速度 U を LDV を用いて測定した乱れの強さ u' を示す。壁面近傍の乱れ強さは、水流の場合より幾分小さいことが確認できる。このように、壁面付近ではパルプ繊維により乱れが抑制されるため、圧力損失比は C_s の増加につれて減少するものと考えられる。

これまで見てきたように、流量—圧力損失曲線の形状は降伏応力 τ_0 に特徴づけられていることがわかる。そこで、 τ_d/τ_0 および τ_t/τ_0 を取り上げて他のパルプ液の場合の結果とも比較して、一般性について査証する。その結果の例を図 12 に示す。LBKP パルプを用いた本実験結果では $\tau_d/\tau_0 \approx 3.9 C_s^{0.1}$ 、 $\tau_t/\tau_0 \approx 11.8 C_s^{0.1}$ と表され、図 12 中では実線および破線でそれぞれ示されている。○印は、サルファイトパルプ液流れの圧力損失曲線 (Robertson and Mason, 1957) に示されているパターン II における最小流速でのせん断応力の値を τ_0 とみなして算出した τ_t/τ_0 である。さらに△と▲印は、Duffy ら (1975) が管路壁面上のせん断速度が $0.014s^{-1}$ となるせん断応力の値を τ_0 とおいて計算した τ_d/τ_0 の結果で、前者 (△印) は BKPP パルプ液 (Bleached kraft pine pulp)、後者 (▲印) は BHKP パルプ液 (Bleached hardwood kraft pulp) についてのものである。

これらの結果は、パルプ液の種類が異なっても、著者らの結果と概ね一致していることが認められる。したがって、パルプ繊維のフロックは降伏応力 τ_0 の約 4 倍で解れ始め、またその約 10 倍のせん断応力を受けると一様に分散するようになるという関係は一般性を有しており、他のパルプ液についても適用できるものと考えられる。

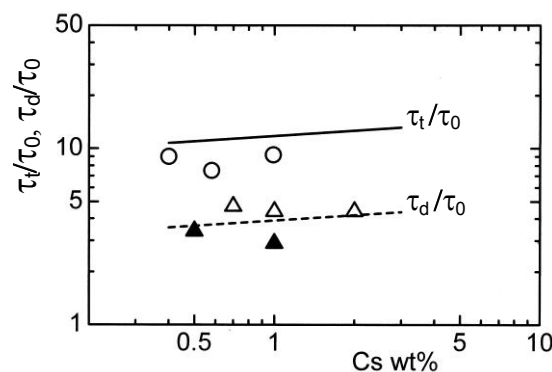


Fig. 12 Ratios of disruptive and turbulent shear stresses to yield shear stress. ○: τ_t/τ_0 from Robertson and Mason (1957) (Sulphite pulp, $d=22.2$ mm). △ (bleached kraft pine pulp, $d=53$ mm) and ▲ (bleached hardwood kraft pulp, $d=100$ mm): τ_d/τ_0 from Duffy and Titchener (1975).

4. 結 言

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) パルプ液はビンガム性を有しており、その降伏応力 τ_0 は管路内径に依存しない式(3)の形式で表され、流量-圧力損失曲線は τ_0 によって概ね特徴づけられる。
- (2) パルプ液の管路壁面上の粘度はパターンⅢからⅣにかけて最小値を取り、このときのせん断応力 τ_{III} は式(7)で表される。さらに、平均流速を増して降伏応力 τ_0 の約4倍を越すせん断応力を受けると、パルプ繊維のフロックは解れ始める。
- (3) パルプ液の遷移レイノルズ数 Re,c および乱流化したと見なせるレイノルズ数 Re,t は、実用上の見地から水の動粘度を用いた式(13)および式(15)でそれぞれ表され、ともに濃度が高くなるほど大きくなる。また、降伏応力 τ_0 の約10数倍のせん断応力がパルプ液に加わると、パルプ繊維はほぼ一様に分散する。
- (4) 実用上重要な乱流域の圧力損失は式(16)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);現 バルメット(株))およびパルプ液をご提供頂いた越前和広氏(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(23560212 および 26420127)の助成によって行われた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- Bennington, C. P. J., The yield stress of fibre suspensions, Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 68 (1990), pp. 748-757.
- Cui, H. and Grace, J. R., Flow of pulp fibre suspension and slurries: A review, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 33 (2007), pp. 921-934.
- Davydenko, E. and Unger, E. -W., New possibilities for evaluation of paper stock suspension flocculation behaviour, Papier, Vol. 49, No. 2 (1995), pp. 51-57.
- Dinh, S. M. and Armstrong, R., A rheological equation of state for semiconcentrated fiber suspensions, Journal of Rheology, Vol. 28 (1984), pp. 207-227.
- Dong, S., Feng, X., Salcudenan, M. and Gartshore, I., Concentration of pulp fibers in 3D turbulent channel flow, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 29 (2003), pp. 1-21.
- Duffy, G. G. and Titchener, A. L., The disruptive shear stress of pulp networks, Svensk Papperstidning, No. 13 (1975), pp. 474-479.
- 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.
- 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.
- Hämäläinen, J., Madetoja, E. and Ruotsalainen, H., Simulation-based optimization and decision support for conflicting objectives in papermaking, Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 25, No. 3 (2010), pp. 405-410.
- 高濃度抄紙技術編, 研究開発報告書 (1990), 製紙技術研究組合.
- Hill, J. and Eriksson, L., Optical analysis of fibre suspensions, Pulp and Paper Canada, Vol. 77, No. 4 (1976), pp. 61-68.
- Lee, P. F. W. and Duffy, G. G., An analysis of the drag reducing regime of pulp suspension flow, TAPPI Journal, Vol. 59, No. 8 (1976), pp. 119-122.
- Linnala, M., Ruotsalainen, H., Madetoja, E., Savolainen, J. and Hämäläinen, J., Dynamic simulation and optimization of an SC papermaking line - illustrated with case studies, Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol. 25, No. 2 (2010), pp. 213-220.
- 小川浩平, 吉川史郎, 小川博久, パルプサスペンション流動への化学工学的アプローチ, 紙パルプ技術協会誌, Vol. 46, No. 4 (1992), pp. 479-489.

- Parker, J. D., Recent theoretical work in the area sheet formation, *Tappi*, Vol. 44, No. 4 (1961), pp. 162-167.
- Robertson, A. A. and Mason, S. G., Flocculation in flowing pulp suspensions, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Convention Issue (1954), pp. 263–269.
- Robertson, A. A. and Mason, S. G., The flow characteristics of dilute fiber suspensions, *TAPPI*, Vol. 40, No. 5 (1957), pp. 326–334.
- 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*, Vol. 76, No. 761 (2010), pp. 35–41.
- 富田幸雄, 製紙用パルプ液の管内流れについて, *日本機械学会論文集*, Vol. 25, No. 153 (1959), pp. 439–443.
- Whalley, R. and Ebrahimi, M., Optimum control of a paper making machine headbox, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 26 (2002), pp. 665–679.