

繊維質系流動抵抗軽減剤添加水の直管内流動抵抗および熱伝達特性*

稲葉英男^{*1}, 春木直人^{*2}
堀部明彦^{*1}, 尾崎公一^{*1}

Flow Drag Reduction and Heat Transfer Characteristics of Water Flow with Fibrous Material in a Straight Pipe

Hideo INABA, Naoto HARUKI,
Akihiko HORIBE and Koichi OZAKI

Some kinds of surfactants are useful to reduce flow drag in a turbulent pipe flow by Toms effect. However, it needs a lot of cost to make these surfactant harmless material to the environment. On the other hand, the fibrous substance such as pulp fibers and cellulose are harmless additives to the environment. This paper has dealt with the flow drag reduction and heat transfer characteristics of the water suspension flow mixed with fine fibers in a straight pipe. Measurements of velocity and temperature profile in a circular pipe flow were made in order to examine the flow drag and heat transfer characteristics of the turbulent and laminar flow. The nondimensional equations of pipe flow resistance and heat transfer were derived in terms of various nondimensional parameters.

Key Words: Flow Drag Reduction, Convection Heat Transfer, Fibrous Substance, Toms Effect, Fiber Suspension Flow

1. 序論

近年, 効率的な熱エネルギーの管内輸送に関して, 乱流抑制可能な添加剤を熱輸送媒体に添加することにより, その管内流動抵抗軽減効果を利用する研究開発が注目されている. 特に, ある種の鎖状高分子や棒状ミセル構造を有する界面活性剤の微量添加水溶液は, 管内流動抵抗を著しく減少させる. この現象をトムズ効果と呼び, 多くの研究がなされている.

現在も盛んに行われているトムズ効果に関する研究は, 例えば, 富田によるポリエチレンオキサイド添加水溶液の流動抵抗および速度分布に関する研究^{(1)~(2)}や, 薄井らによる陽イオン性界面活性剤(塩化セチルトリメチルアンモニウムや, 塩化オレイルビスヒドロキシメチルアンモニウム)添加水溶液の熱媒輸送系に関する研究⁽³⁾などがある. さらに, Park らも塩化セチルトリメチルアンモニウムを用いた乱流構造に関する研究⁽⁴⁾を行い, 界面活性剤による乱流エネルギーの散逸効果を詳細な速度分布測定により明らかにしている. Fossa らは, 高分子を用いた流動抵抗と熱伝達の実験を行った⁽⁵⁾. 筆者らも, 前報^{(6)~(7)}において, 鎖状高分子(ポリエチレングリコール)や陽イオン性界面活性剤(臭化セチルトリメチルアンモニウム, そして塩化ドデシルトリメチルアンモニウム)を添加した水溶液の流動抵抗や熱伝達特性, 管内速度分布に関する測定を行い, 一般性のある無次元整理式の提案を行った. その結果, 低温熱エネルギー輸送媒体として, 界

面活性剤添加水溶液を利用することで, 流動ポンプ動力の低減, 流量増加による装置全体の小型化や低コスト化, 熱損失の低減効果などが可能であることを定量的に明らかにした.

しかしながら, 界面活性剤添加水溶液を実際に熱媒体として利用するには, 様々な問題点が指摘されている. 特に, 界面活性剤添加水溶液の廃棄による周囲環境への汚染は深刻な問題となる. このため, 活性炭などの投与による界面活性剤の吸着除去法などの対応策が提案されている⁽³⁾. 基本的には, 界面活性剤添加水溶液と同じ流動抵抗軽減効果を有し, かつ環境負荷の少ない添加剤の使用が好ましい.

従来の研究より, 界面活性剤や鎖状高分子以外に流動抵抗軽減効果を示す添加剤として, ファイバあるいは石綿などの微細繊維, 微細固体粒子の存在が報告されており, 微細繊維懸濁液については加藤ら⁽⁸⁾や Daily ら⁽⁹⁾が, 微細固体粒子懸濁液については渡辺ら⁽¹⁰⁾による研究報告がある. しかしながら, これらの懸濁液の流動抵抗や熱伝達特性にわたる広範囲な機構を詳細に検討した研究報告は少ないようである.

本研究では, 界面活性剤以外のもので, その水溶液が流動抵抗軽減効果を示し, かつ環境負荷の少ない添加剤として繊維質系添加剤を選定し, 熱エネルギー輸送媒体としての管内流動抵抗及び熱伝達特性の測定検討を行った. さらに, 管内速度分布および管内温度分布の測定から, 流動抵抗と熱伝達特性のメカニズムの解明を試みている. 最終的には, 環境負荷の少ない繊維質系添加剤添加水溶液による熱エネルギー輸送に関する基礎資料の提供を行った.

* 原稿受付 1997年8月19日.

^{*1} 正員, 岡山大学工学部(〒700-0082 岡山市津島中3-1-1).^{*2} 正員, 岡山大学大学院.

主な記号

A : 伝熱面積, a : 比せん(栓)半径, C : 質量濃度, C_p : 比熱, d_i : 管内径, d_o : 管外径, d_p : パルプ繊維直径, L : 平均長さ, ℓ : 長さ, N : 個数, Nu : ヌセルト数, ΔP : 圧力損失, Pr : プラントル数, Q : 熱量, R : 管半径, r : 半径, Re : レイノルズ数, S : 標準偏差, T : 温度, ΔT : 試験部出入口の温度差, U_m : 管内平均流速, u : 局所流速, u^+ : 無次元速度, v^* : 摩擦速度, y^+ : 無次元距離

ギリシア文字 α : 平均熱伝達率, γ : せん断速度, δ : 壁面からのせん(栓)部距離, η : 粘性, η_a : みかけ粘度, η_b : 塑性粘度, η_{spT} : 比粘度, κ : カルマン定数, λ : 管摩擦係数または熱伝導率, ν : 動粘度, ρ : 密度, τ : せん断応力, τ_y : y の位置におけるせん断応力, τ_w : 壁面せん断応力

添字 H : ヒーター, i, in : 試験部入口, m : 平均, p : パルプ繊維, w : 水または水の粘性による無次元数, 1: 分断されていない長繊維, 2: 分断された短繊維

2. 使用した流動抵抗軽減低減剤

本研究では、鎖状高分子や界面活性剤に代わる流動抵抗軽減剤として、パルプ微細繊維を選出した。パルプ繊維は、紙等を形成する植物繊維であるため、自然界での分解が容易である。このため、環境に与える影響は極めて少なく、有望な流動抵抗軽減剤であると考えられる。パルプ繊維は、水に難溶性性質を持つ多糖類のセルロース (Cellulose) を主成分とするため、水に溶解しない。そのためパルプ繊維を分散させた液体は、通常、懸濁液として扱われる。

図1は、水中に分散混合するパルプ繊維を、マイクロ스코プによって撮影したビデオ映像を示したものである。図1より、パルプ繊維直径 d_p は、 $d_p=6.45\sim 29.0\ \mu\text{m}$ 以内に分散している、一方、パルプ繊維の長さの測定を行った結果、パルプ繊維直径に対して1~2倍程度の長さを持つ短繊維群と、それ以上の長さ(50倍程度)を持つ長繊維群の2種類に大別されることが判明した。この2種類の繊維群が生成された原因としては、パルプ繊維を水に分散混合させる際に使用した攪拌器(回転部12mm, 回転数8,000~24,000ppm)によって、一部のパルプ繊維が分断されたためと考えられる。

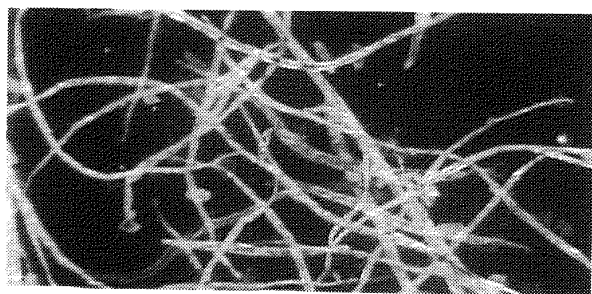


Fig. 1 Photograph of pulp fibers suspension

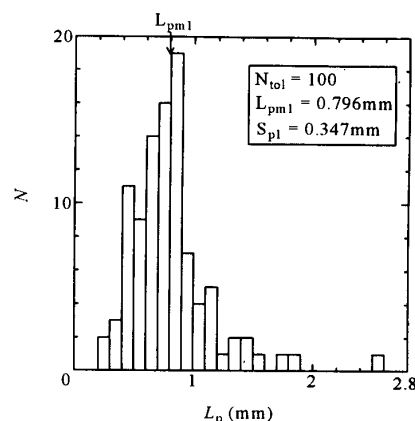


Fig. 2 Long pulp fiber distribution

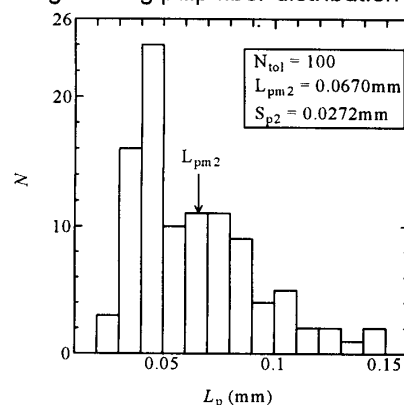


Fig. 3 Short pulp fiber distribution

図2, 3は、分断される前と、分断されたそれぞれの繊維群に対しての繊維長さの度数分布図を示したものである。図2, 3より、分断されていないパルプ長繊維群は、平均長さ $L_{pm1}=0.796\text{mm}$ 、標準偏差 $S_{p1}=0.347\text{mm}$ であり、また分断されたパルプ短繊維群は、平均長さ $L_{pm2}=0.0670\text{mm}$ 、標準偏差 $S_{p2}=0.0272\text{mm}$ である。また、図1において確認される分断されていないパルプ長繊維個数(113個)と分断されたパルプ短繊維個数(148個)とそれぞれの平均繊維長さ、および繊維直径より、長繊維群と短繊維群の体積割合を計算した結果は、89.9:9.58であった。この体積割合は本実験後再度測定してもほとんど変化がなかったことより、実験期間中は両繊維の劣化はほとんどないことが明らかであった。

3. 実験装置及び実験方法

図4に、本実験で使用した実験装置の概略図を示す。実験装置は基本的に、前報^{(6)~(7)}での界面活性剤添加水溶液において使用した実験装置と同一であるため、本報告での詳述は省略する。図4に示すように、実験装置は、流動抵抗・熱伝達測定試験部、流動用ポンプ、貯水タンクと、これらを接続する配管から構成されている。さらに、貯水タンク内には温度制御装置(冷凍機、ブライントーク及びブラインポンプ)が組み込まれており、流動する試験流体を任意温度に制御可能である。また流動抵抗・熱伝達測定試験部は、様々な管

内径と長さを持つ試験部に交換可能であり、さらに管内速度分布測定用試験部も交換可能である。一方、管内温度測定時には、温度分布測定用熱電対を組み込んだトラバース装置を熱伝達測定試験部出口直後に設けて、管内流動水の温度分布を測定した。

流動抵抗測定用試験部には、長さ $\ell=2.0\text{m}$ 、管内径 $d_i=16\text{mm}$ の塩化ビニル製の滑らかな円管を使用した。各試験部上流には、同一管内径でかつ十分な長さを有する助走区間部を設置することで、試験部入口において、流動する試験流体を十分に発達した流れ状態にしてある。この場合の試験部を流動する際の管摩擦係数 λ の測定は、試験部出入口に設けた圧力タップ（穴径 2.5mm ）に接続された水柱マンメータ（最小目盛 0.1mm ）と、差圧発信器（測定精度 $\pm 0.5\%$ ）を使用して行い、測定された試験部における圧力損失の値（ ΔP ）から次式(1)によって求めた。

$$\Delta P = \lambda \cdot \ell / d_i \cdot 0.5 \rho U_m^2 \quad (1)$$

流動抵抗測定実験は、様々なパルプ繊維濃度において、パルプ繊維懸濁液の試験部入口における流体温度を $11 \sim 16^\circ\text{C}$ に保持した後、管内平均流速 U_m に対する試験部の圧力損失の測定によって行った。

図5は、熱伝達測定用伝熱試験部の詳細を示したものである。伝熱試験部も、前報^{(6)~(7)}における界面活性剤添加水溶液時と同一のものであり、熱伝達測定実験時に図4の実験装置に組み込まれて使用された。伝熱試験部は、管内径 $d_i=16\text{mm}$ 、管外径 $d_o=20\text{mm}$ 、長さ $\ell=2\text{m}$ の銅管で、管外側にガラス繊維被覆マンガニン電気線ヒータが均一に巻き付けられている。電気ヒータを伝熱試験部の長さ方向に12区間（上流側5区間

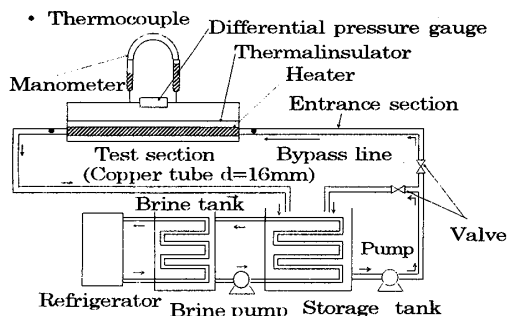


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

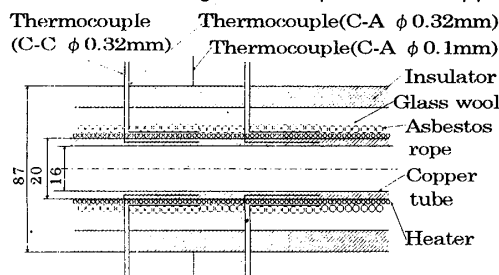


Fig. 5 Schematic diagram of heat transfer test section

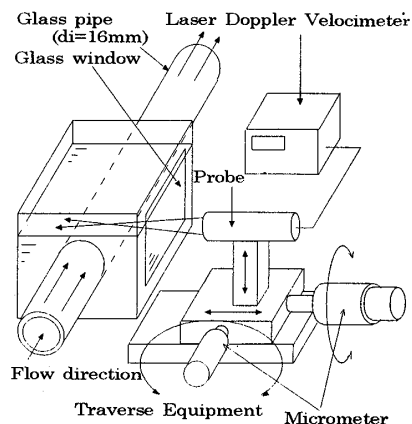


Fig. 6 Schematic diagram of LDV test section

は 12cm 、下流側7区間は 20cm ）毎に巻き付け、各区間毎のヒータ出力を調整することで、伝熱試験部全体の管壁温度を一定に調節可能である。これにより、熱伝達測定実験の熱伝達条件は、管壁温度一定とした。なお、電気ヒータ外部に保温剤と断熱材を設置することで、伝熱試験部全体の熱損失は 4.6% 以内である。熱伝達測定実験は、パルプ繊維懸濁液の試験部入口での流体温度を $12 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に保持すると共に、伝熱試験部管壁温度を $13 \sim 14 \pm 0.2^\circ\text{C}$ に維持した後、様々な管内平均流速における平均熱伝達率を測定して行った。この時の伝熱試験部における平均熱伝達率 α は、次式(2)によって求めた。

$$\alpha = \frac{1}{A \cdot \Delta T} \sum_{i=1}^{12} Q_i \quad (2)$$

図6は、LDVによる管内速度分布測定試験部の概略図を示したものである。使用したLDVプローブは、焦点距離 285.00mm 、交差角 11.33° のHe-Neレーザ（ 10mW ）を発振するもので、LDVプローブを、水平、垂直方向にそれぞれ 0.01mm 単位での移動が可能なトラバース装置上に設置することにより、 0.01mm の位置測定精度を得た。また、速度分布測定用試験部にはガラス製円管（内径 $d_i=16\text{mm}$ 、外径 $d_o=20\text{mm}$ ）を使用し、さらにこのガラス製円管を、ガラス製測定窓（厚さ 1.0mm ）を有する貯水槽内に設置することにより、測定窓から入射されたレーザービームが円管の曲面にて受ける屈折を極力抑制しながら、管内速度分布の測定を行った。また管内速度分布の測定には、管内径 1.5mm のピトー管による測定も併用している。

さらに管内温度分布測定では、熱伝達測定用試験部の出口直後に、測定用熱電対を設置して測定を行った。使用した熱電対は、素線径 0.1mm の銅・コンスタンタン熱電対であり、予め標準温度計による検定を行い、 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ の測定精度で測定可能である。熱電対は、測定位置が流れによって振動ないようにステンレス管内

を通し、ステンレス管ごとコンプレッションフィッティングによって試験部に固定されている。さらに、熱電対先端部をステンレス管から流れ上流側 15mm の位置に設置することで、ステンレス管挿入による流れの乱れの影響を防いでいる。また熱電対の移動量は、マイクロメータ（最小目盛 0.01mm）によって測定した。

4. 管内速度分布に関する実験結果

4.1 パルプ繊維懸濁液の管内速度分布

薄井ら⁽³⁾、そして Park ら⁽⁴⁾によると、流動抵抗軽減効果を示す流体（高分子、界面活性剤の添加水溶液）の管内速度分布の測定結果からは、一般に粘性底層厚さが増大する傾向を示す。筆者らも、前報^{(6)~(7)}において界面活性剤添加水溶液の管内速度分布の測定をレーザードップラー流速計（LDV）を用いて行い、同様の結論を得た。しかしながら、パルプ繊維は水に溶解せずに分散混合して流動するため、パルプ繊維懸濁液は従来の添加水溶液と異なった流動状態であると予想される。そのため、流動抵抗、熱伝達実験に先立ち、まずパルプ繊維懸濁液の管内速度分布の測定を行い、パルプ繊維懸濁液の管内流動状態の把握を行った。

あらかじめ、本実験装置における水の管内速度分布の測定を行った結果、測定データは、ニュートン流体の円管内速度分布に関する層流の Poiseuille 流れの式(3)、及び乱流の 1/7 乗則の式(4)と±2.0%以内の範囲で良く一致したことより、本実験装置の実験精度は十分であると判断される。

$$u/U_m = 2 \left\{ 1 - (r/R)^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$u/U_m = 1.224 (1 - r/R)^{1/7} \dots\dots\dots (4)$$

図 7 は、パルプ繊維懸濁液（パルプ繊維濃度 $C_p=0.65\%$ ）の管内速度分布の測定結果を、半径比 r/R と、その位置において測定された局所流速の平均流速に対する比 u/U_m の関係で示したものである。なお、 $U_m=2.44\text{m/s}$ の $r/R=0\sim0.8$ における LDV による測定は、懸濁液中のパルプ繊維がプローブのレーザー光を遮断するため、測定値を得ることができなかった。そのため、この範囲の局所流速の測定には、ピトー管（管内径 1.5mm）によって行った。ピトー管は、温度分布測定部での、熱電対の挿入位置に設置し、局所流速を示す圧力差をマンメータによって測定した。この場合、ほぼ同じ平均流量において、 $r/R=0.8$ での LDV とピトー管の各測定値がほぼ同じ値を示すこと、および両測定データを積分して計算される平均流量が、±3.0%以内で設定平均流速と等しい結果を得たことから、両測定方法の整合性、精度は十分であると判断した。

図 7 において、 $U_m=2.44\text{m/s}$ の乱流域での測定では、

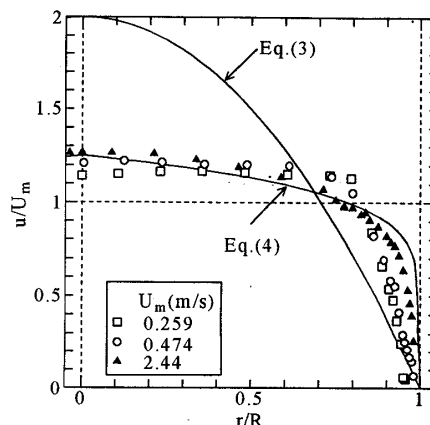


Fig. 7 Relationship between u/U_m and r/R

後述する流動抵抗測定実験から流動抵抗軽減効果があることが確認されている。この場合の管内速度分布の示す傾向は、まず管中心部（ $r/R=0\sim0.75$ ）においての局所流速の測定値は、乱流の 1/7 乗則の式(4)より少し大きくなる傾向を有する。逆に管壁部（ $r/R=0.75\sim1$ ）では、式(4)よりも小さな値を示している。この傾向は、前報で測定した界面活性剤添加水溶液における流動抵抗軽減効果時の速度分布の傾向とほぼ同じである。

一方、図 7 の $U_m=0.474, 0.259\text{m/s}$ の層流域におけるパルプ繊維懸濁液の測定データは、通常の Poiseuille 流れの傾向を示しておらず、 $r/R=0\sim0.75$ の管中心部において一定流速域を示し、プラグ（Plug）流れに近い傾向を示している。この傾向は一般にビンガム（Bingham）流体で観測される傾向と類似している⁽¹¹⁾。一般に、ビンガム流体のレオロジー式は

$$\tau_w = \tau_y + \eta_b \gamma \quad (\tau_y: \text{降伏応力}, \eta_b: \text{塑性粘度}) \dots\dots (5)$$

と定義され、降伏応力と塑性粘度が物性定数である。しかしながら、パルプ繊維懸濁液において一定流速範囲を示すプラグ流の半径 r_y は、何れの流速においても $r_y/R=a=0.75$ であるため、パルプ繊維懸濁液の降伏応力（ $=a \times \tau_w$ ）は壁面せん断応力（ τ_w ）によって変動することになる。このため、パルプ繊維懸濁液は、正確には降伏応力が物性定数であるビンガム流体でないと考えられる。本来、物質定数である降伏応力が、パルプ繊維懸濁液において一定値を示していないのは、円管内を流動するパルプ繊維の分散状態が、管壁からの距離や、局所流速の増減によって不均一になるためと考えられる。

4.2 パルプ繊維懸濁液の無次元管内速度分布

パルプ繊維懸濁液の乱流速度分布に関して、加藤らは、管壁からの無次元距離を壁領域（ $0 \leq y^+ \leq \delta^+$ ）、対数層（ $\delta^+ \leq y^+ \leq R$ ）に分けた場合の、繊維懸濁液に関する無次元速度分布式を提案している。本報告では、加藤ら⁽⁸⁾の速度分布式が本実験に適用できるかどうかの

検討をまず行った。

加藤らによると、摩擦速度 v^* を用いて定義される壁領域の無次元厚さ δ^+ を用いるとき、ニュートン流体の無次元速度分布を、式(6)、(7)と仮定している。

壁領域： $u^+ = F_1(y^+, \delta^+, \kappa) =$

$$y^+ - \delta^+ \left(1 - \frac{1}{\kappa \delta^+}\right) \left\{ \left(\frac{y^+}{\delta^+}\right)^4 - 0.6 \left(\frac{y^+}{\delta^+}\right)^5 \right\} \dots (6)$$

対数層： $u^+ = F_2(y^+, \delta^+, \kappa) =$

$$\frac{1}{\kappa} \ln y^+ + 0.60 \delta^+ - \frac{\ln \delta^+ - 0.40}{\kappa} \dots (7)$$

例えば、式(6)、(7)を水に適用するとき、未定数は $\delta^+ = 20$ 、 $1/\kappa = 2.5$ となる。

式(6)、(7)をパルプ繊維懸濁液に適用する場合、パルプ繊維懸濁液の水に対する比粘度を $1 + \eta_{spT}$ とし、さらに無次元距離として、水の粘性を用いた y_w^+ を用いることで、パルプ繊維懸濁液の無次元管内乱流速度分布が式(8)、(9)で示される。

$$\text{壁領域：} u^+ = F_1 \left(\frac{y_w^+}{1 + \eta_{spT}}, \frac{\delta_w^+}{1 + \eta_{spT}}, \kappa \right) \dots (8)$$

$$\text{対数層：} u^+ = F_2 \left(\frac{y_w^+}{1 + \eta_{spT}}, \frac{\delta_w^+}{1 + \eta_{spT}}, \kappa \right) \dots (9)$$

図8は、図7の測定結果を、摩擦速度 v^* および水の粘性によって整理したパルプ繊維懸濁液の無次元速度分布を示したものである。なお図8中の式(10)～(12)は、von Kármán によるニュートン流体の粘性底層、遷移層、乱流域の普遍的乱流速度分布である。

$$\text{粘性底層：} u^+ = y^+ \dots (10)$$

$$\text{遷移層：} u^+ = 5.0 \ln y^+ - 3.05 \dots (11)$$

$$\text{乱流域：} u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5 \dots (12)$$

図8に示されるように、乱流域 ($U_m = 2.44 \text{ m/s}$)、層流域 ($U_m = 0.474, 0.259 \text{ m/s}$) の両測定データとも、壁近傍 (y_w^+ の小さい領域) における測定値は、式(10)より下回る。これは、無次元化の際のパルプ繊維懸濁液の粘性係数として、水の粘性係数の値を使用したためと考えられる。このため、実際のパルプ繊維懸濁液の粘性係数は、水よりも大きいものと思われる。さらに管中心 (y_w^+ の大きな領域) になるにつれて、低流速域の測定データは、プラグ流の領域になるため、一定の u^+ の値を示す。このとき u^+ の一定値は、管内平均流速 U_m の値の増大に伴って増加する傾向を示す。一方、高流速域の測定データでは、 $y_w^+ = 50$ 付近にて u^+ の傾きが管壁近傍よりも低下するが、 u^+ の値は増加傾向を示す。

図8の一点鎖線で示される曲線は、本実験条件におけるパルプ繊維懸濁液の乱流の無次元速度分布式(8)、

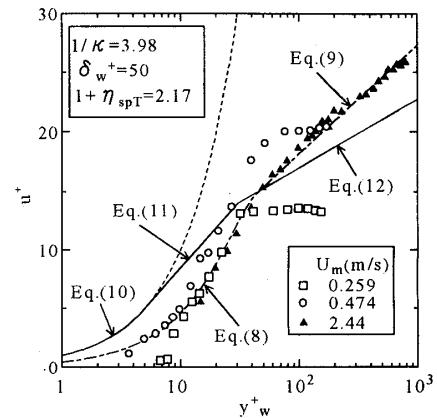


Fig. 8 Relationship between u^+ and y_w^+

(9)の計算結果を示したものである。計算に際して、本実験ではパルプ繊維懸濁液の粘性特性をまだ正確に現す関係式を得ていないため、比粘度の値が不明である。そのため、パルプ繊維懸濁液の無次元速度分布式中の3つの未定数である比粘度 $1 + \eta_{spT}$ 、 δ_w^+ および κ の値を、以下のようにして求めた。 $U_m = 2.44 \text{ m/s}$ の場合、まず図8の測定データの傾きが $y_w^+ = 50$ 付近において小さくなることから、壁領域の厚さを $\delta_w^+ = 50$ と定めた。その後、対数層 ($\delta_w^+ \geq 50$) における測定データから u^+ と y_w^+ に関する実験整理式を求め、得られた実験整理式と式(9)を比較することで、未定数 ($1 + \eta_{spT}$ および κ) の値を算出した。なお、図8中に求めた未定数の値を示してある。これらの値を式(8)に代入することで、パルプ繊維懸濁液の壁領域における無次元速度分布式を求めることが可能である。本実験において、壁領域で計算された無次元速度分布式と実験データの値の比較を行ったところ、 $\pm 9.8\%$ 以内で一致する結果を得た。これにより、加藤らによる無次元乱流速度分布式(8)、(9)によって、本実験のパルプ繊維懸濁液の予測が可能である。

5. 管内流動抵抗に関する実験結果

5.1 パルプ繊維懸濁液の見かけ粘性

パルプ繊維懸濁液の流動抵抗実験結果の無次元整理において、通常、平均流速の無次元数として用いられる Re 数を計算するには、パルプ繊維懸濁液の粘性係数の値が必要である。しかしながら、パルプ繊維懸濁液の円管内速度分布の測定結果 (図7) により、層流域におけるパルプ繊維懸濁液の流れは、通常の Poiseuille 流れではなく、管中心部に一定流速域を有するプラグ流れに近く、パルプ繊維懸濁液は、層流域にてビンガム流体に類似した流動状態を示すと考えられる。このため、前報^{(6)~(7)}で示した粘性係数の測定法である細管式粘度計によるパルプ繊維懸濁液の粘性測定は、使用細管の管径に影響されるため不適当である。また、回転粘度計による測定では、粘度計内のパルプ繊維が

沈殿し、均一な分散状態にならないため、正確な値を示さないと考えられる。このため、パルプ繊維懸濁液の粘性係数としては、富田⁽¹¹⁾が提示したビンガム流体における見かけ粘度 η_a の値を用いることとした。

ビンガム流体において、管長 l 間の圧力損失 ΔP は、ビンガム流体のレオロジー式(5)を用いることで、式(13)として定義される。その際、式(13)が Newton 流体の Hagen - Poiseulli の式と同形になるようにすることにより、見かけ粘度 η_a は式(14)にて求められる。これにより、見かけ粘度による無次元整理を行うと、低流速域における測定データは層流の理論式(15)と一致する。

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{8Q\{\eta_b/(4a\alpha)\}}{\pi R^4} \quad (13)$$

$$\eta_a = \eta_b/(4a\alpha) \quad (14)$$

ここで、 a は比せん（栓）半径であり、 $\alpha = (a^4 - 4a + 3)/(12a)$ として表される。

前章において述べたように、本実験で使用したパルプ繊維懸濁液は、正確には、降伏応力と塑性粘度が物性定数として表されるビンガム流体ではないが、本研究では、擬似的ビンガム流体として取り扱った。表 1 に、図 7 から求められたパルプ繊維懸濁液の各濃度における見かけ粘性の値を示す。この場合のパルプ繊維懸濁液の測定データは、せん（栓）部を示す領域のみを使用し、 $a=0.75$ である。なお、表 1 に示す測定温度 T_p は、パルプ繊維懸濁液温度である。

Table 1 The pulp suspension viscosity

$C_p(\%)$	0.15	0.30	0.52	0.55	0.60	0.70
$T_p(^{\circ}\text{C})$	12	12	12	12	15~18	12
$\eta_a(\text{mPa}\cdot\text{s})$	2.38	3.08	3.48	4.41	3.79	5.67

5. 2 パルプ繊維懸濁液の無次元整理

図 9 は、パルプ繊維懸濁液の管摩擦係数 λ （式(1)で定義される）と、見かけの粘性（表 1）を用いて定義されるレイノルズ数 Re の関係を示したものである。なお、図 9 に示される式(15)、(16)は、円管内を流動する流体の流動抵抗に関して、それぞれ、層流域における理論式(15)、乱流域における Blasius の式(16)である。

$$\lambda = 64/Re = 64/(U_m d_i / \nu) \quad (15)$$

$$\lambda = 0.316 Re^{-0.25} = 0.316 (U_m d_i / \nu)^{-0.25} \quad (16)$$

図 9 より、 $Re \leq 2000$ におけるパルプ繊維懸濁液の管摩擦係数 λ は、何れのパルプ繊維濃度 C_p においても、見かけの粘性の定義通り、層流式(15)と良く一致している。一方 $Re \geq 2000$ での $C_p=0.15\%$ の λ は、 $Re=2000$ 付近において増加を示した後、乱流式(16)より約 15~20%程度低下しているが、乱流式(16)と同じ Re 数に対する変化割合を示している。なお、平均流速 U_m と単位長さ当たりの圧力損失 $\Delta P/l$ の有次元整理によって乱流域の測

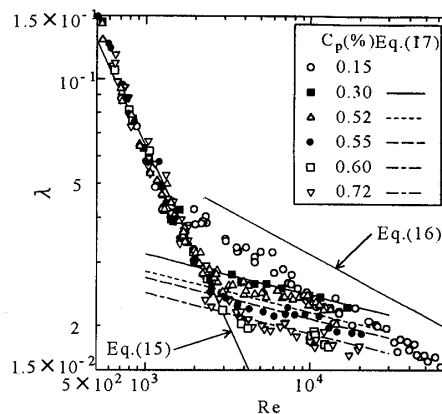


Fig. 9 Relationship between λ and Re

定データの比較検討を行った結果では、測定データは式(16)で示される水の圧力損失と一致していることより、流動抵抗軽減効果は発生していないものと考えられる。このように、パルプ繊維懸濁液においては、乱流構造がニュートン流体とは異なるなどの理由により、圧力損失特性もニュートン流体とは異なる傾向を示す。

一方、パルプ繊維濃度 $C_p=0.30\%$ 以上の λ のデータは、 $Re=3000$ 付近まで層流式(15)と一致した後、 Re 数の増加と共に、式(15)から離れ、式(16)で表される λ 値へ向かって僅かに減少する傾向を示している。これらの実測値の観察の結果、濃度 $C_p=0.30\%$ 以上では、乱流域において、パルプ繊維懸濁液の λ が、水の乱流状態における管摩擦係数よりかなり低くなることより、流動抵抗軽減効果を確認できる。すなわち、濃度 C_p の増加と共に、 λ の値は低下し流動抵抗軽減効果を示すことになる。しかしながら、 $C_p \geq 0.60\%$ 以上の高濃度領域では、濃度を増大しても λ はほぼ同じ値を示すことより、 λ 値の濃度依存性は無くなることがわかる。

パルプ繊維懸濁液が流動抵抗軽減効果を示す領域に関して、管摩擦係数 λ と見かけ粘度により定義される Re 数の実測値を最小自乗法により、最大偏差 9.5%以内で、以下に示すような実験整理式(17)を得た。図 9 中に式(17)の計算結果も示す。

$$\lambda = A \times Re^{-0.114} \quad (17)$$

$$C_p \leq 0.609 \text{ に対して } A = 0.0702 - 0.203 \times C_p^5$$

$$C_p \geq 0.609 \text{ に対して } A = 0.0530$$

$$\text{適用範囲: } \left(\frac{64}{A}\right)^{1.13} \leq Re \leq \left\{ \left(\frac{0.316}{A}\right) \left(\frac{\eta_w}{\eta_p}\right)^{0.25} \right\}^{7.35}$$

また、6. 2 章に示す図 1 2 の温度境界層の大部分が壁近傍の領域 I, II に限られていることより、本提案の整理式(17)は、管径 $d_i=16\text{mm}$ 以上に関しては十分適用できると思われるが、管壁近傍の影響が相対的に大きな小管径については、今後検討する必要がある。

6. 管内熱伝達に関する実験結果

6. 1 パルプ繊維懸濁液の熱伝達実験の結果

図10は、図5で示した熱伝達測定用試験部を用いて測定された、管壁温度一定条件におけるパルプ繊維懸濁液の管内平均流速 U_m と平均熱伝達率 α の関係を示したものである。なお図10中の式(18), (19)で示される直線は、それぞれ壁温一定条件の十分発達した円管内流動における層流熱伝達実験式(18), および乱流熱伝達実験式(19)から導かれる管内平均流速 U_m と平均熱伝達率 α の関係を示したものである。

$$Nu = 1.86(Re \cdot Pr \cdot d_i / \ell)^{1/3} (\eta / \eta_w)^{0.14} \quad (18)$$

$$Nu = 0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} (\eta / \eta_w)^{0.14} \quad (19)$$

なお、式(18), (19)における η は、流体の平均温度での粘性係数、 η_w は管壁温度基準での粘性係数である。流動流体として水を用いた熱伝達実験の測定結果は、式(18), (19)と良く一致しており、本実験装置の実験精度は十分である。

図10に示されるように、圧力損失の測定(図9)から層流域と仮定した低流速域 ($U_m \leq 0.4 \text{ m/s}$) での平均熱伝達率 α は、何れのパルプ繊維濃度 C_p においても、層流熱伝達式(18)より得られた α 値の2倍程度高い値を示している。一方管内平均速度 U_m が増加し、乱流に遷移すると、パルプ繊維懸濁液の α は $C_p \geq 0.52\%$ の場合、乱流熱伝達式(19)より得られる α 値よりも低い値を示した後、 U_m の増加に伴って式(19)より得られる α 値に漸近する傾向を示している。このことから、パルプ繊維懸濁液は乱流域において熱伝達の減少効果があることが判明した。なお図9から乱流域での流動抵抗軽減効果を示さないパルプ繊維濃度 ($C_p=0.15\%$) の α は、 $U_m \geq 0.6 \text{ m/s}$ にて他の濃度の α 値よりも高く、式(19)から得られる値とほぼ同じ値を示すことより、熱伝達減少効果は現れていないものと思われる。

図11は、 Re 数、平均ヌセルト数 Nu 、プラントル数 Pr を用いて、図10の熱伝達実験の無次元整理結果を示したものである。 Nu 数、 Pr 数は、それぞれ次式(20), (21)によって計算した。

$$Nu = (\alpha d_i) / \lambda_w \quad (20)$$

$$Pr = (\eta C_p) / \lambda_w \quad (21)$$

なお、式(20), (21)における熱伝導率 λ_w 、比熱 C_p には、溶媒である水の物性値を用い、さらに η は、パルプ繊維懸濁液の見かけ粘度を用いて計算を行った。

図11に示すように、 $Re \leq 2000$ におけるパルプ繊維懸濁液の $Nu/Pr^{1/3}$ の値は、図10と同じように層流熱伝達式(18)よりも大きくなる。逆に、 $Re \geq 2000$ の乱流域におけるパルプ繊維懸濁液の $Nu/Pr^{1/3}$ の値は、図10と異

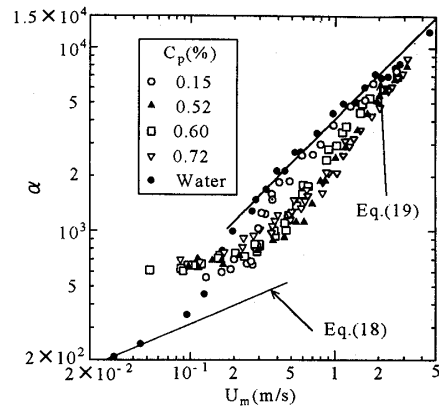


Fig. 10 Relationship between α and U_m

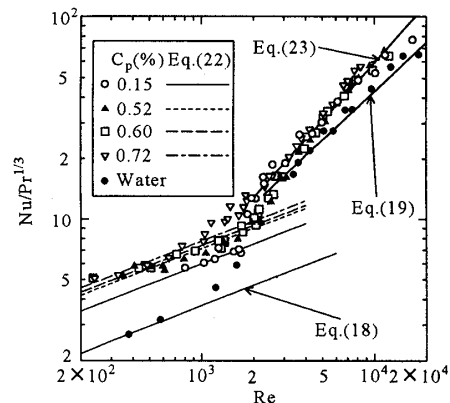


Fig. 11 Relationship between $Nu/Pr^{1/3}$ and Re

なり乱流熱伝達式(19)よりも大きな値を示している。この場合には、パルプ繊維濃度 C_p の増減によって、 $Nu/Pr^{1/3}$ の値に大きな変化は観察されなかった。図11の無次元整理において、パルプ繊維懸濁液の $Nu/Pr^{1/3}$ が式(19)のニュートン流体の関係式より増大する傾向は、 Re 数の粘性に、層流域におけるビンガム流体を基準とした粘性を採用していることに起因する。今後、乱流域におけるパルプ繊維懸濁液の見かけ粘性の評価に関する検討が必要である。

6. 2 パルプ繊維懸濁液の管内温度分布

図10及び11で示すように、パルプ繊維懸濁液の熱伝達は、層流域での熱伝達が水の場合よりも促進されるという特異な傾向を示す。このパルプ繊維懸濁液の特異な熱伝達特性を引き起こす原因を明らかにするため、管内温度分布測定部を試験部出口直後に設置して、等温加熱壁条件(壁温 $22.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$)におけるパルプ繊維懸濁液(液温 $19.9 \pm 0.1^\circ\text{C}$, $C_p=0.63\%$)の管内温度分布の測定を行った。図12は、管内温度分布の測定結果を示したものである。なお、予め水に対する管内温度分布の測定を本温度分布測定部によって行い、その結果を数値計算によって求めた温度分布と比較した結果、両者は最大 0.1°C 以内で一致し、十分な測定精度であることを確認してある。

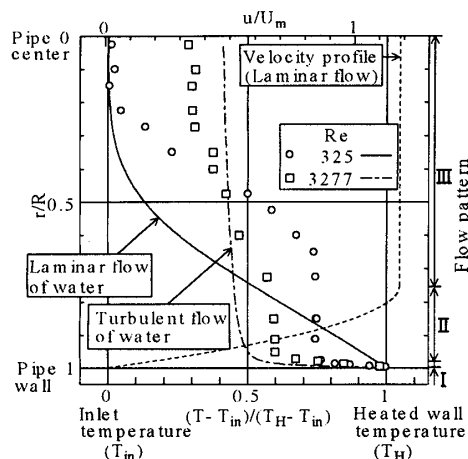
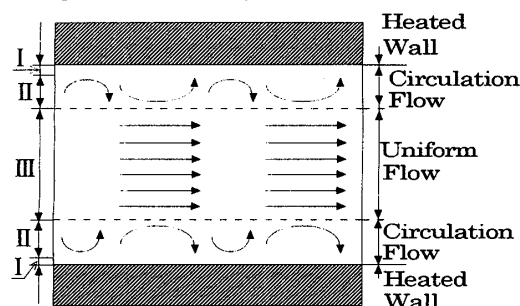
Fig. 12 Relationship between T and r/R 

Fig. 13 Model of pulp fiber movement

図12に示すように、層流 ($Re=325$) のパルプ繊維懸濁液の温度分布は、まず管壁近傍 (領域I, 図12の右側に示す) で水よりも急激な温度変化を示した後、逆に管壁近傍から $r/R=0.75$ 付近 (領域II) までそれ程大きな温度変化を示さない。一方、管中心部 ($r/R=0 \sim 0.75$, 図8のプラグ流範囲, 領域III) の温度分布は、管中心に向かって放物線に似た温度分布を示す。このためパルプ繊維懸濁液の層流熱伝達においては、領域I, IIでの懸濁液中のパルプ繊維、又は繊維の塊がせん断応力による変形や移動を受けた結果、図13の流れのスケッチに示すような繊維塊の循環による2次流れが発生し、このような2次流れによる熱量輸送が加わるため、管壁近傍の温度勾配が水の温度勾配より増加し、層流熱伝達の増加を引き起こしているものと判断される。なお、管中心部の領域IIIにおいては、パルプ繊維は凝集したまま流動するが、管壁近傍の領域I, IIにおいては、半径方向へ循環する2次流れによって、凝集した塊が分裂したり、また再び凝集する様子が観察された。

一方、乱流 ($Re=3277$) のパルプ繊維懸濁液の温度分布では、管中心部と管壁との局所温度の差が小さく、乱流時の水の場合の温度分布に近づいている。しかしながら、水の場合の管壁付近の温度勾配と比較すると、パルプ繊維懸濁液の管壁近傍の温度勾配の方が小

さくなっており、結果として乱流熱伝達の軽減効果を示すことになる。

これら熱伝達に関する実験データより、 Nu 数と Re 数及び Pr 数の関係を、最小自乗法により最大偏差 $\pm 9.5\%$ 以内で以下に示す実験整理式(22), (23)を得た。図11に、計算結果を示す。なお、遷移領域は除かれる。

$$\text{層流: } Nu/Pr^{1/3} = (0.550 + 0.315 \cdot C_p) \times Re^{1/3} \quad (22)$$

$$\text{乱流: } Nu/Pr^{1/3} = 9.21 \times 10^{-3} \times Re^{0.952} \quad (23)$$

7. 結論

流動抵抗軽減効果を利用可能にする熱エネルギー輸送媒体に関して、新たにパルプ繊維を水に添加した場合の流動抵抗、熱伝達特性、及び円管内速度・温度分布の測定を行い、以下の結論を得た。

- (1) パルプ繊維懸濁液の管内流動に関する速度分布の測定結果より、層流域において管内にプラグ流的流れの存在を明らかにし、界面活性剤添加水溶液の流れ状態と異なることを解明した。さらに、乱流域の無次元速度分布に関する従来の解析手法を本実験に適用し、十分な相関関係があることがわかった。
- (2) パルプ繊維懸濁液の流動抵抗実験から、流動抵抗軽減効果が現れることを確認し、層流域をビンガム流体と仮定することで得られる見かけ粘性による無次元整理式の提案を行った。
- (3) パルプ繊維懸濁液の熱伝達実験から、層流域の熱伝達の促進効果、および乱流域の熱伝達減少効果を観察した。さらに層流熱伝達の促進現象を、管内温度分布の測定結果と流れの可視観察より、繊維の塊の循環による2次流れから明らかにした。

今後は、パルプ繊維懸濁液粘性の評価に対する詳細な検討や、パルプ繊維の管内濃度分布の測定、流動抵抗や熱伝達特性に及ぼす管径等の影響に関する実験を継続して行う予定である。

参考文献

- (1) 富田侑嗣, 機論, **35**-279, (1969), 2243
- (2) 富田侑嗣, 機論, **35**-279, (1969), 2251
- (3) 薄井洋基・ほか3名, 化学工学論文集, **21**-2, (1995), 248
- (4) S.R.Park, H. K. Yoon, Y. Kawaguchi, Proc. 3rd KSME-JSME, (1996), III-221
- (5) M. Fossa, L. A. Tagliafico, Exp. Them. Fluid Sci., **10**, (1995), 221
- (6) 稲葉・尾崎・春木・浅野, 機論, **61**-589, B, (1995), 3304
- (7) 稲葉・春木, 機論, **63**-589, B, (1997), 1336
- (8) 加藤・水沼, 機論, **48**-430, B, (1982), 1066
- (9) J.W. Daily・ほか1名, Ind. Eng. Chem., **51**-7, (1959), 887
- (10) 渡辺・大平・加藤, 機論, **58**-548, B, (1992), 1056
- (11) 富田幸雄, レオロジー, (1975), 166, コロナ社