

## パルプ繊維分散促進プロモータ後流領域における繊維濃度分布

角田 勝<sup>\*1</sup>, 藤本 太郎<sup>\*2</sup>

### Fiber-Concentration Distributions of Pulp Liquid in the Wake of Dispersion Promoter

Masaru SUMIDA<sup>\*1</sup> and Taro FUJIMOTO<sup>\*2</sup>

The flow characteristics of a pulp liquid in the wake of a dispersion promoter were investigated to explore the feasibility of improving the hydraulic headbox of a papermaking machine. This research was undertaken as a basic test of a screen-type model, in which a circular cylinder has been inserted in a channel. The test was performed using a pulp liquid with a fiber concentration ranging from 0.3 to 1.0 wt% under flow velocity conditions of  $U_a = 0.016 \sim 0.74$  m/s. The distributions of the fiber concentration were measured by transmitted light attenuation method. The obtained results are illustrated, and the influence of the flow velocity on the characteristics of the wake behind the cylinder are argued with reference to findings previously reported (Sumida and Fujimoto, 2010). The fiber-concentration distribution changes in the flow direction were large in the section from the cylinder to four times its diameter. The findings provide useful information for the development of hydraulic headboxes.

Keywords: Pulp Liquid Flow, Fiber-Concentration Distribution, Wake, Dispersion Promoter, Headbox, Flow Visualization

#### 1. はじめに

紙の原料であるパルプ液は木材物質を水に懸濁したもので、抄紙機では木材繊維をより分散させた状態で紙幅方向に均一に流速と流向を揃えてヘッドボックス(図1参照)から噴出させることが求められている。また、エネルギー大消費産業である製紙業界には一層のエネルギー削減が叫ばれ、出来るだけ高濃度抄紙可能なヘッドボックスの開発が強く望まれている。そのため、ヘッドボックスの流路構造については、パルプの繊維分散を高めるための努力や改善が様々な形で試行されている<sup>(1)-(4)</sup>。しかしながら、パルプ液は低濃度であっても流動中には繊維同士が絡まってフロックを形成するという凝集性を有しており、高濃度仕様に向けての改善は難しいのが現状である<sup>(5)</sup>。

そこで、ヘッダーから供給されるパルプ液を多孔管

からなるチューブバンクを経てヘッドボックス内の分散部へ導く過程においても、繊維分散を向上させようとする取り組みが1990年代に行われている<sup>(1), (6)</sup>。Hauptmannらの研究<sup>(6)</sup>では、物体後流での乱れを利用することへの概念図が空気流での既往の結果を基に提示されている。しかし、その後、彼らの概念案をフォローアップした研究例は、残念ながら現在においても見あたらない。

このような現況に鑑み、本研究では流路入り口前にスクリーン(格子状の隙間)を通すスクリーン型を念頭に、まずは最も基本的な格子形状である円柱を繊維分散促進プロモータとして矩形断面チャンネル内に単一設置した流れ場について、実際のパルプ液を用いてその濃度分布特性を調査した。

原稿受付 2018年4月5日

\*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 東広島市高屋うめの辺1番)

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

\*2 元近畿大学大学院 システム工学研究科 システム工学専攻 博士前期課程 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番)

連絡先: 角田 勝 (研究代表者)

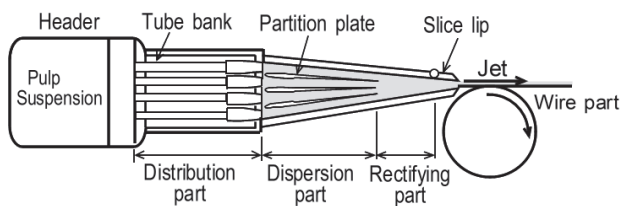


図 1. ハイドロリック型ヘッドボックス

## 2. 実験装置および方法

本実験で用いた装置の概略<sup>(7), (8)</sup>を図 2 に、またテストセクションの概略及び座標系を図 3 にそれぞれ示す。試験流路は透明アクリル製の幅  $B=70$  mm, 高さ  $H=20$  mm の矩形断面を有する長さ約 2000 mm のチャンネルである。このチャンネルには、入り口より 1200 mm の断面中央に単一格子として直径  $d=15$  mm の円柱型の分散プロモータが挿入されている。これらの諸元は、ある実用抄紙機の形状を基にしている。

パルプ液流れの可視化には、光透過減衰法を用いた。可視化用平行光線の光源としては液晶プロジェクタ (150W) を用い、試験流路の下方から測定部に均一に照射し、透過減衰した光をチャンネル上方からハイスピー

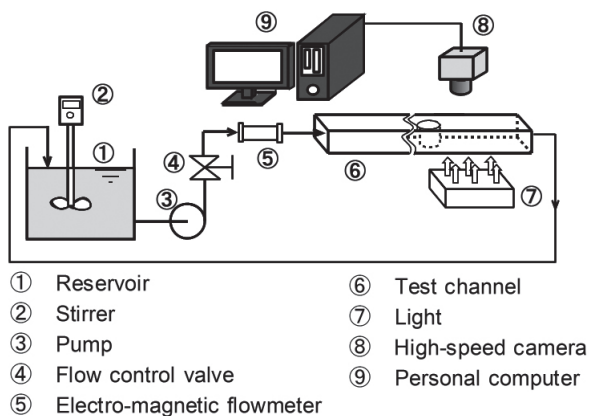


図 2. 実験装置概略図<sup>(7), (8)</sup>

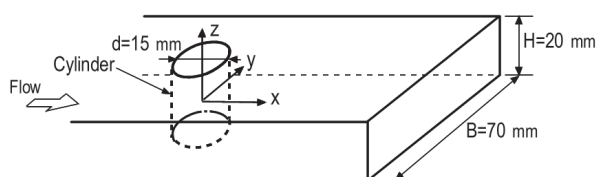


図 3. 試験流路と座標系

ードカメラ (Photoron 製, FASTCAM-1024PCI) およびデジタルカメラ (Nikon 製, D100) で撮影した。撮影画像は PC によって記録されるとともに、後述する方法によってパルプ繊維濃度  $C$  が算出される。

供試パルプ液には、一般的な上質紙用のクラフトパルプ (LBKP) を使用した。実験条件は、実際の抄紙機で使用されているパルプ繊維重量濃度  $C_s$  を参考に  $C_s=0.3\sim 1.0\text{wt}\%$ , チャンネル入口での断面平均流速  $U_a=0.016\sim 0.74$  m/s で行った。チャンネル内に設置されているプロモータの円柱直径  $d$  に基づくレイノルズ数では,  $Re_d=U_a \cdot d/\nu=240\sim 11000$  ( $\nu$ : 水の動粘性係数) である。

## 3. 光透過法によるパルプ繊維濃度分布の評価方法

本章では、透過光減衰法によってパルプ流れ液中の繊維濃度を評価する簡便な方法について述べる。この方法は、光路中に存在するパルプ繊維の散乱と吸収による減衰特性に基づいており、透過した光の強度を輝度として測定することによって、その光路にわたる重量濃度が得られる。

図 4 は、チャンネル中心軸を含む  $x-y$  面内に幅 60 mm x 長さ 100 mm の検査領域をとって、充分攪拌された供試パルプ液濃度  $C_s$  と検査領域内の輝度値  $I$  の平均値  $I_A$  との関係を示したものである。図は  $C_s=0.3\text{wt}\%$  の平均輝度の値  $I_{A,0.3}$  でもって除して示されている。この関係は、供試パルプ液濃度の測定範囲 ( $0.03 \leq C_s \leq 3\text{wt}\%$ ) においては、図中の実線で示す次式のような簡単な実験式で表されることが分かる。

$$I_A/I_{A,0.3}=(C_s/C_{s,0.3})^b \quad (1)$$

なお、 $b$  の値は測定系および光路長などに依存する係数である。

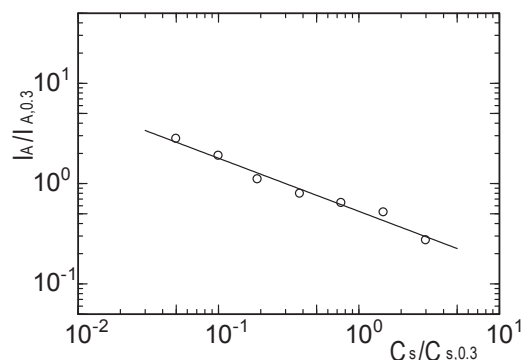


図 4. 光透過減衰法による輝度と濃度の関係

本評価方法においては、ある点 $(x, y)$ での局所濃度 $C(x, y)$ と輝度値 $I(x, y)$ との関係には、上式と全く同じ関係が成り立つものとして

$$C(x, y)/C_s = \{I(x, y)/I_s\}^{-1/b} \quad (2)$$

とおく。ここで、 $I_s$ は $C_s$ 値に対応する計算領域内の輝度の平均値である。ちなみに、図4に示す $C_s = 0.3\text{wt}\%$ の場合、 $b$ の値は0.53である。

#### 4. 結果と考察

著者らは先の報告<sup>(7)</sup>において、真直なチャンネル内のパルプ液の流れ特性は、繊維挙動の観点により5つのパターン(Pattern I~V)に大別できることを明らかにしている。図5は、一辺の長さが20 mmの正方形断面チャンネル内の流れを大別したものである。チャンネル内におけるパルプ液の流れ様式は、断面平均流速 $U_a$ と供試パルプ液の濃度 $C_s$ に依存して変化する<sup>(8)</sup>。

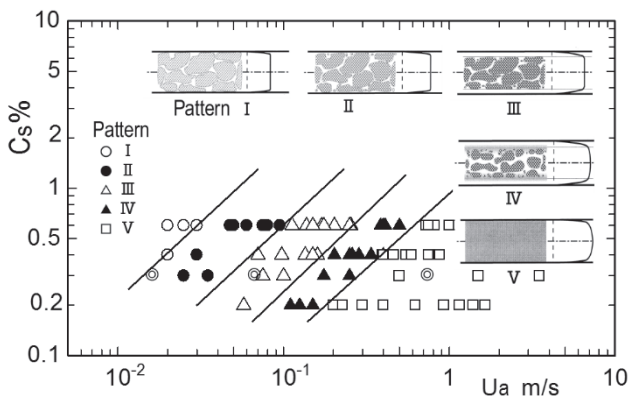


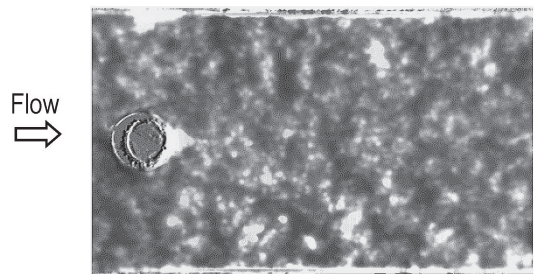
図5. チャンネル内パルプ液の流れパターンのモード<sup>(7)</sup> (◎: 図示条件)

##### 4.1 後流の濃度分布に及ぼす平均流速の影響

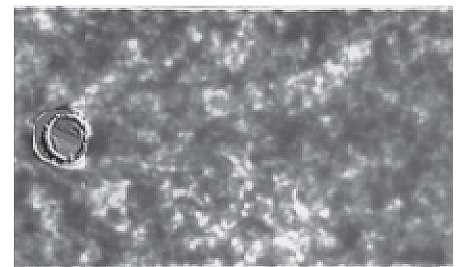
本報告では、 $C_s=0.3\text{wt}\%$ のパルプ液を取り上げ、特徴的な後流パターンが生じた3つの平均流速 $U_a$ についての結果を図示する。これらの流速条件は、図5中には◎の記号で示されている。図6および図7は、これらの条件下における濃度分布ならびに $y$ 軸上における濃度の時間平均値 $C_{ta}$ の分布を示したものである。

まず、チャンネル内を低流速でパルプ繊維がフロックとして一体となって流れるような場合(図6(a), 7(a):  $U_a=0.016\text{ m/s}$ ,  $Re_d=250$ ; Case A), プロモータ円柱前方ではパルプ繊維塊がやや詰まってパルプ液濃度は高くなる( $x/d=-1$ )。この高濃度パルプ液は円柱前面では表面に沿って流れ、 $y$ 軸上円柱側面壁近くで

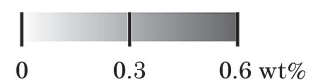
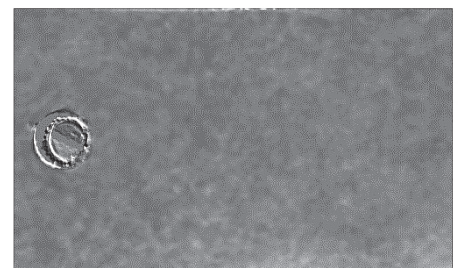
$C_{ta}/C_s$ の分布は突出した形状( $x/d=0$ )を示して流下する。一方、円柱表面の前方からは濃度の低い水環部の流体が、円柱の後縁部に流れ込んでよどみ領域を形成する( $x/d \approx 0.5 \sim 1$ )。そのため、円柱直後では $C_{ta}$ はかなり低い値を示し、 $y$ 軸上の分布は大きく窪んだ形状となる(図7(a))。このよどみ領域の周辺では、凝集した高濃度パルプ繊維塊がチャンネル中心軸に寄り合っ流下するため、 $C_{ta}$ 分布形状はやや平坦化する(図7(a),  $x/d=1.5$ )。しかし、低濃度のよどみ流体は筋状となって $x$ 軸に沿って揺らぎながら流れ、 $x/d > 2$ の $x$ 軸上では $C_{ta}/C_s$ はほぼ0.9の値を取って流れ方向変化は小さくなる。



(a) Case A ( $U_a=0.016\text{ m/s}$ )



(b) Case B ( $U_a=0.067\text{ m/s}$ )



(c) Case C ( $U_a=0.74\text{ m/s}$ )

図6. 後流の濃度分布



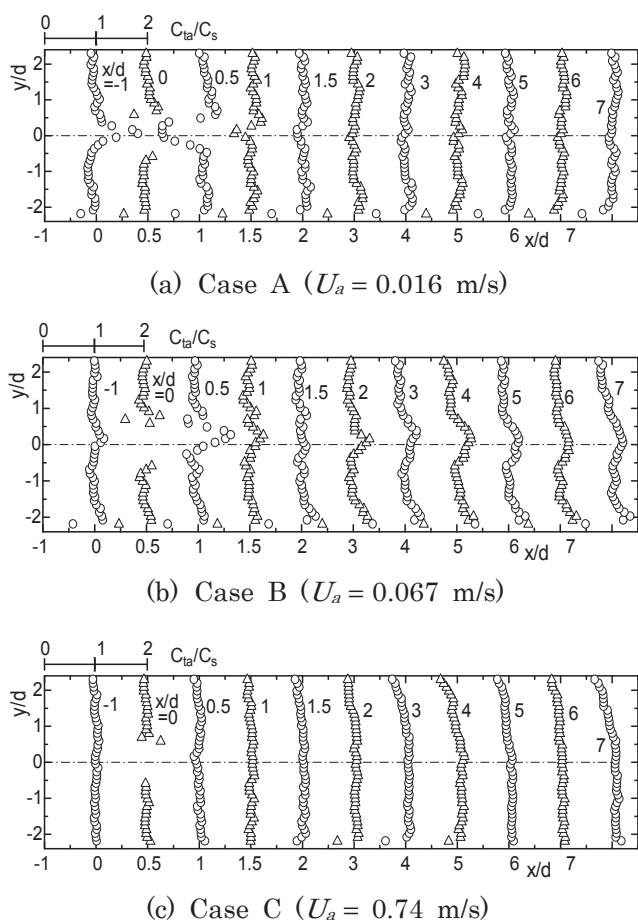


図 7. 時間平均濃度  $C_{ta}$  の  $y$  軸上分布

平均流速を次第に増すと、円柱前側表面上の水環部の低濃度流体量も増大し、流れは円柱表面から剥がれてくる。と同時に、側壁寄りの高濃度パルプ繊維は水環流体の剥離流れに沿って後方へ運ばれ、ある種の剥離流線（筋線）を形成するようになる ( $U_a = 0.027 \sim 0.044$  m/s,  $Re_d = 400 \sim 700$ )。そして、円柱後方の筋線は後流領域を形成し、その幅は  $x = 4d$  付近までは約  $1d$  とあまり広がらないが、 $4d$  以降の下流では大きく広がる (図 6(b), 7(b) :  $U_a = 0.067$  m/s ; Case B)。この筋線は状況を円柱後流領域と外側のチャンネル主流とに二分化するようになる。すなわち、円柱後縁にはパルプ繊維が堆積した高濃度よどみ領域が形成され、 $x/d = 0.5$  では  $C_{ta}$  が  $C_s$  の 1.5 倍を超す値を示す。以降の下流部では渦列が発生しており、この渦運動はパルプ繊維を巻き込んでゆっくり流下し、流れ中心軸上の  $C_{ta}$  は他の流速条件に比べて最も大きい値を示す。したがって、 $y$  軸上の  $C_{ta}$  の分布は、円柱の直後で筋線が水環流体からなる  $x/d \approx 0.5 \sim 1$  では  $y/d = \pm 0.6$  で局所的に窪み、中心軸上で突出した形状を示す。そして、その下

流部では筋線の領域が高濃度流体と混ざり合っ、濃度の  $C_{ta}$  は  $C_s$  値に近づいて後流部の外側では比較的平坦な、内側の中央部では膨らんだ形状に移行する ( $x/d = 3.5$ )。さらなる下流部での分布は、発達したチャンネル内の濃度分布<sup>(7)</sup>に次第に変わる。

さらに流量を増すと (図 6(c), 7(c) :  $U_a = 0.74$  m/s,  $Re_d = 11000$  ; Case C), チャンネル全体の流れは乱流化するとともに、パルプ繊維はチャンネル内ではほぼ一様に分散するようになる。したがって、 $x$  軸上の  $C_{ta}/C_s$  の値は、円柱後縁直後 ( $x/d \approx 0.5$ ) では 1 よりわずかに小さい値を示すが、 $1d$  下流ではほぼ 1 に近い値を示し、 $y$  軸上の  $C_{ta}$  は平坦な形状となる。

## 4.2 濃度むら

実機の抄紙機においては、紙の品質向上のためにはパルプ液を濃度むらの小さい状態で、しかも流速を幅方向に一様な分布でヘッドボックスからワイヤーパートへ送出することが望ましい。そこで、チャンネル内に円柱を設置したことによるこれらの幅方向のむらの度合いについて検討する。その度合いを  $y$  軸上の  $C_{ta}$  分布を用いて、次式で評価する。

$$E_c = \frac{1}{BC_s} \int_{-B/2}^{B/2} |C_{ta} - C_s| dy \quad (3)$$

図 8 に、上式の結果を示す。  $E_c$  は、その値が小さいほどチャンネル幅方向の均一性が高いことを示している。  $E_c$  の流れ方向変化は円柱後方  $x \approx 4d$  までの区間で大きく、以降の下流ではその変化は小さいことが分かる。まず、低流速の Case A では流体は剛体的に流下する栓流となっており、円柱後方直ぐに  $E_c$  は急減し、分布は平坦化する。中流速の Case B では、円柱直径に相当する幅の後流がかなり後方まで存在し、他の流れ Case と比べて  $E_c$  はもっとも大きい値をとる。流速の高い Case C では、  $E_c$  は本実験の場合  $C_{ta}$  分布に偏りが生じて  $x = 3d$  下流では発達したチャンネル内の値<sup>(7)</sup>よりも大きい値を示している。

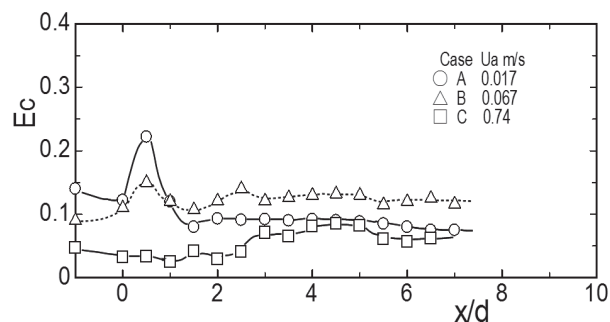


図 8. 濃度分布の一様性

## 5. おわりに

抄紙機ヘッドボックス流路で繊維分散を図るために設けるスクリーン型のモデル基礎実験として、円柱型プロモータを設置したチャンネル内パルプ液流れについて光透過減衰法による濃度分布速度測定によって後流特性を調査した。その結果、フローシートからなる分散部入り口に設置するスクリーン型の場合、適度な乱れ作用で繊維フロックをまずは分解し、フローシート間で分散状態と流速を整えることを考えると、流れ方向変化が比較的緩やかな Case B のような流れ条件下で効果が高いであろうと推察される。

また、本研究ではスクリーン型の基礎研究として単一円柱を挿入した後流特性を調査したものであるが、今後は複数の円柱を設置した流路についても、引き続き調査することが必要である。

## 謝辞

本研究に当初、援助を頂いた三菱重工業(株)広島研究所、試験パルプ液を提供頂いた王子製紙(株)越前和広氏ならびに王子マテリア(株)平尾君生氏、有益な助言を頂いたValmet(株)鈴木節夫氏をはじめ赤澤貴志・藤木恵一の両氏に謝意を表す。また、本実験に携わった当時の研究室学生の太田潤・阿部征史の両君にも感謝します。なお、本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)地域イノベーション創出総合支援事業「シーズ発掘試験」ならびに科学研究費補助金(課題番号 26420127)の助成によって実施されたものであることを記し、感謝の意を表す。

## 参考文献

- (1) Hauptmann, E., Vyse, R. and Mardon, J., “The Wake Effect as Applied to Modern Hydraulic Headboxes: Part 2”, *Pulp & Paper Canada*, Vol. 91 (10), 369-376 (1990)
- (2) Lundell, F., Söderberg, L. D. and Alfredsson, P. H., “Fluid Mechanics of Papermaking”, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 43, 195-217 (2011)
- (3) Cotas, C., Asendrych, D., Garcia, F., Faia, P. and Rasteiro, M. G., “CFD Simulation of a Turbulent Fiber Suspension Flow: A Modified Near-Wall Treatment”, *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, Vol. 9 (1), 233-246 (2015)
- (4) Takano, Y., “History and State-of-the-Art Technology of Paper Machine Wet Section”, *Japan Tappi J.*, Vol. 69 (9), 920-936 (2015)
- (5) Hämäläinen, J., Lindström, S. B., Hämäläinen, T. and Niskanen, H., “Papermaking Fibre-Suspension Flow Simulations at Multiple Scales”, *J. Eng. Math.*, Vol. 71, 55-79 (2011)
- (6) Hauptmann, E., Vyse, R. and Mardon, J., “The Wake Effect as Applied to Modern Hydraulic Headboxes: Part 1”, *Pulp & Paper Canada*, Vol. 91 (9), 357-364 (1990)
- (7) Sumida, M. and Fujimoto T., “Measurement of Fiber-Concentration and Flow Characteristics of Pulp-Suspension in a Duct”, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B*, Vol. 76 (761), 35-41 (2010)
- (8) Sumida, M. and Fujimoto T., “Flow Properties of Wood Pulp-fiber Suspensions in Circular Pipes”, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 81 (823), (2015) (doi: 10.1299/transjsme.14-00242)