



分散板後流領域における製紙用パルプ液の流れ特性*

Flow Characteristics of Pulp Suspension in Wake Region behind a Partition Plate in a Channel

角 田 勝**
SUMIDA Masaru

藤 本 太 郎***
FUJIMOTO Taro

Abstract An experimental investigation was performed for the pulp-suspension flow in a channel with a partition plate, which is an extremely simplified model of the dispersion part of the hydraulic headbox of papermaking machines. This study was tried to make the papermaking system most suitable and was conducted to obtain the fundamental findings. To do it, flow visualization and optical measurements of the fiber concentration were made in the wake region of a flat plate. Characteristics of the pulp-suspension flow were examined for five flow cases based on the flow patterns found in the authors' previous report (2010) for a channel. The behavior of the pulp fibers and flow in the wake is strongly related to the flow states in the passages of the partition plate and also depends on the shear layer generated at the trailing edge of the plate. The partition plate is slightly effective for obtaining a uniform time-averaged fiber concentration distribution and for making the fluctuating fiber concentration lower.

Keywords: Pulp suspension flow, Wake, Fiber concentration, Partition plate, Headbox, Flow visualization

1. 緒 言

抄紙機は、木材繊維の懸濁液をより分散させた状態でかつ紙幅方向に均一に流速と流向を揃えて噴出させるヘッドボックス (Fig. 1 [1]参照)、脱水して紙層を形成するワイヤーパート、機械的に搾水するプレスパート、加熱により乾燥させるドライパートによって構成されている。これらのうち、ヘッドボックスは原料液の繊維のフロック (絡み合い) を抑制しつつ出来るだけ濃度むらの少ない状態で噴出させることが求められ、抄紙工程において最も重要な部分である[2-4]。

ところで、パルプ液流れはパルプ繊維の濃度が高くなるにつれて局所的な濃度むらが大きくなり、濃度の均一化が困難となる特徴がある。そのため、ヘッドボックス内の流路構造については、繊維分散を高めるための努力が様々な形で試行

されている[2, 3, 5-7]。その一つであるハイドロリック型は、分岐孔群を経て配分された原料液を内挿板で仕切られた分割流路に流入させて整流し、繊維分散の悪化を防ぐとともに配向の均一化を計って噴出させるものである (Fig. 1 [1])。しかし、ヘッドボックス流路内での繊維挙動を把握することは極めて困難[8-13]で、パルプ液の流れ状態はヘッドボックスから噴出したワイヤー上での繊維分布の性状でもって推し量られているのが現状である[8, 13, 14]。そのため、研究は主に数値シミュレーション[13, 15, 16]によって行われているが、その内容は濃度が比較的薄くて繊維間の干渉が弱い、乱流での配向状態についての試行に止まっている。しかも、繊維が硬い棒状のサスペンションを対象としているため、凝集性を有する軟質繊維である木材パルプ液の流れ挙動を知る

* 2016.5.16 受付

** 近畿大学工学部機械工学科 〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番

TEL: (082)434-7000 FAX: (082)434-7011 E-mail: sumida@hiro.kindai.ac.jp

*** MHI ソリューションテクノロジーズ (株)

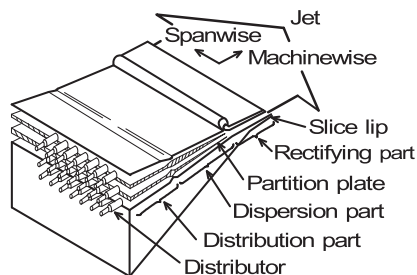


Fig. 1 Structure of the hydraulic headbox of a papermaking machine [1].

には、まだ遠い状況である[9]。したがって、実際のパルプ液を用いてヘッドボックス内の繊維の挙動について言及した研究は、著者らの知る限り見当たらない。

このような現況に鑑み、著者らのグループ[1]はまずは作動流体に空気を用いて、ヘッドボックスを構成する要素のうち分散部に挿入された内挿板上に生成される乱流境界層と形成される後流の流動パターンを可視化実験を主体に究明し、かつそれらの制御を流路形状と内挿板の後端形状を変化させて調査した。

本研究は、既報[1]で得られた単相流での基礎的知見を参考に、実際のパルプ液を用いて抄紙機ハイドロリック型ヘッドボックスを構成する要素のうちの分散部を対象として実験的研究を行ったものである。実験では、分散部に挿入される内挿板後流におけるパルプ繊維挙動を調べるために、ヘッドボックスをモデル化した正方形断面チャンネルを用いた。そして、平板の後流領域について可視化測定を行うとともに、パルプ繊維濃度の時間変化やその分布特性に及ぼす平均流速の影響について調べた。なお、このときのパルプ液流れ特性については、著者ら[17, 18]が管内流れ特性を大別した流動条件について検討した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。実験装置は回流循環式[18]で、流れの駆動装置、流量測定部、試験流路、流れの可視化および計測装置部から構成されている。

ヘッドボックスを構成する分散部のモデル試験流路には、抄紙機での流路がく形断面あるいは平行流路であることから、その基本形状である正

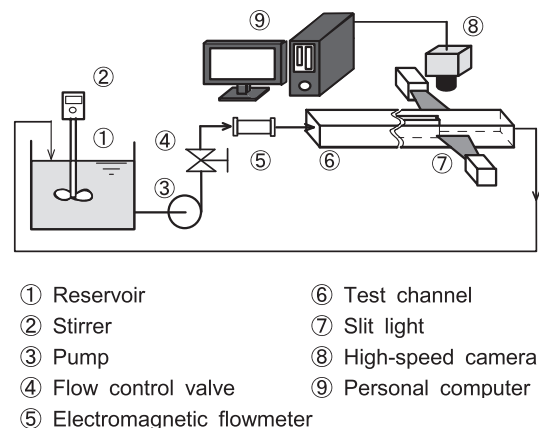


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

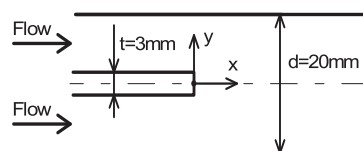


Fig. 3 Test channel and coordinate system.

方形断面を有するチャンネルを用いた。すなわち、Fig. 3 に示すように一辺の長さ d が 20 mm 、長さ 2000 mm の透明アクリル製流路である。その入口より 730 mm の位置の管中心軸を含む中央には長さ 1000 mm 、厚さ $t=3\text{ mm}$ の平板が内挿・設置されている。ここで、 d および t については、実機での内挿板後端付近での大きさを参考に行っている。また内挿板の後縁形状については、研究の初報として後縁を直角に切り落とした基本的な単純平板[1]とし、はく離せん断層を形成しやすい形状を用いた。なお、内挿板の上流・下流部には延長チャンネルが適宜取り付けられるようになっている。座標系は Fig. 3 中に示されているように内挿板後端の中央に原点をとり、流れ方向を x 軸、流路の幅方向を y 軸、高さ方向を z 軸とする。

パルプ繊維濃度の測定および流れの観察には光切断による可視化法[17]を用いた。可視化光源にはメタルハライドランプ (150 W) を用い、その光を幅 1 mm の平行スリット光に作成して、試験流路の両側面からチャンネル中心軸 (x 軸) を含む水平面内の流れを可視化した。そして可視化面内の流れを、上方から高速度カメラ (Photron FASTCAM-1024PCI) およびデジタルカメラ

(Nikon D-100) で撮影した。なお、検査領域は内挿板の後流部分の $x=0\sim 80\text{ mm}$ を主とした。このようにして撮影された画像 (撮影・観測画像) から、光の透過減衰に起因する光源むらを除去し、その画像 (評価画像) からパルプ繊維の局所濃度 C の分布を求めた。以上の手順によるパルプ繊維濃度 C の算出方法の詳細については、既報の文献 [17] を参考にされたい。

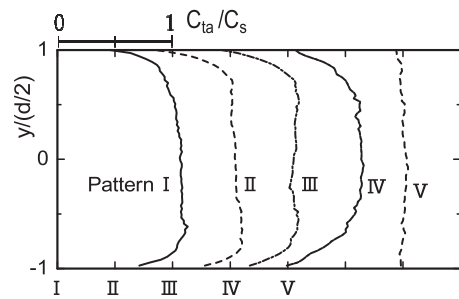
本研究で使用した供試パルプ液は、現在上質紙に最も多く用いられているクラフトパルプ (LBKP) で、主に広葉樹を原料としている。そのパルプ繊維の算術平均長さは 0.50 mm 、重量平均長さは 1.00 mm である。

本実験では、実際の抄紙機で使用されている繊維重量濃度 C_s を参考に、 $C_s=0.2\sim 1.4\text{ wt\%}$ のパルプ液について行った。また、実験時でのチャンネル入口での断面平均流速は $U_a=0.020\sim 3.5\text{ m/s}$ (流量 $Q=8\times 10^{-6}\sim 1.4\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$) で、チャンネル水力直径に基づくレイノルズ数は $Re=U_a\cdot d/\nu=400\sim 70000$ 、また内挿板の板厚 t を代表長さとするレイノルズ数は $Re_t=U_a\cdot t/\nu=60\sim 10500$ である (ν : 水の動粘度)。

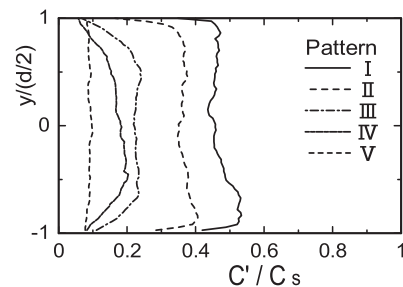
3. 結果と考察

著者らは先の報告 [17] において、管路内パルプ液流れの特性には圧力損失と流量の関係から栓流、混合流、乱流という従来の 3 つの分類 [19-25] のほかに、パルプ繊維挙動の観点から 5 つに大別 (パターン I ~ V) できることを明らかにしている。なお、層流と乱流という区分ではパターン I から III が層流、IV が概ね遷移流、V が乱流に対応している。

Fig. 4 は、 $C_s=0.6\text{ wt\%}$ の場合におけるパルプ繊維濃度 C の時間平均値 C_{ta} と変動値 C' の y 軸上分布を、上述の 5 つのパターンについて示したものである。平均流速 U_a が低いパターン I ではパルプ繊維のブロックが管路壁面に接しており、低濃度の領域が点在する壁近傍で濃度変動が大きい値を示す。やや流速が増すと、壁面上に薄い水環部が形成されるようになり (パターン II)、 C_{ta} と C' の値はこの水環部で小さくなる。さらに平均流速が大きくなるにつれて壁面上の水環部は厚くなり (パターン III)、 C_{ta} の分布は断面中央の栓部でやや膨らみ、 C' は水環部および栓部とも小さくなる。流れが遷移流となるパターン IV では、



(a) Time-averaged fiber concentration C_{ta} .



(b) Fluctuating fiber concentration C' .

Fig. 4 Distributions of C_{ta} and C' on the y -axis for patterns classified for pulp-suspension flow in a square-sectioned channel.

水環部寄りのブロックは解れ始めて C_{ta} の分布は放物形に変わり、 C' は断面内で減少する。乱流状態 (パターン V) になると、 C_{ta} および C' の分布形状は平坦化する。

次節の 3.1 では、まずは内挿板後流領域の流れの概要について述べる。つづく 3.2 節では、上述のようなパターンを有するパルプ液流れが内挿板で仕切られた分割流路を経て、内挿板後方ではどのような挙動を示すか、各ケースの場合について考察することにする。

3.1 流れ場の概況

Fig. 5 に、パルプ液濃度 $C_s=0.6\text{ wt\%}$ における内挿板後方の流れの可視化写真とパルプ繊維挙動の変化の様子を示し、流れの概要を述べる。チャンネル断面平均流速 U_a は、それぞれ $0.16, 0.83\text{ m/s}$ である。各図の上側は観測画像 (可視化写真)、下側は濃度分布を表している。濃度値は添付されている濃淡バーで表され、白い部分が高濃度、黒い部分が低濃度であることを示している。Fig. 5(a) の流れは上流では層流 (パターン III) で、内挿板によって分割された流路内では繊維の塊 (ブロック) がその流路内の中央部に寄って栓部をな

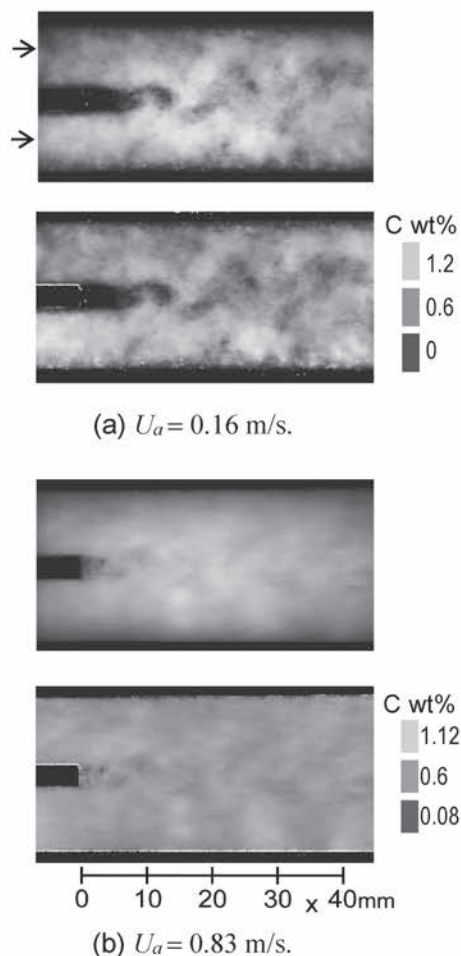


Fig. 5 Examples of flow pattern and behavior of pulp fibers ($C_s = 0.6$ wt%).

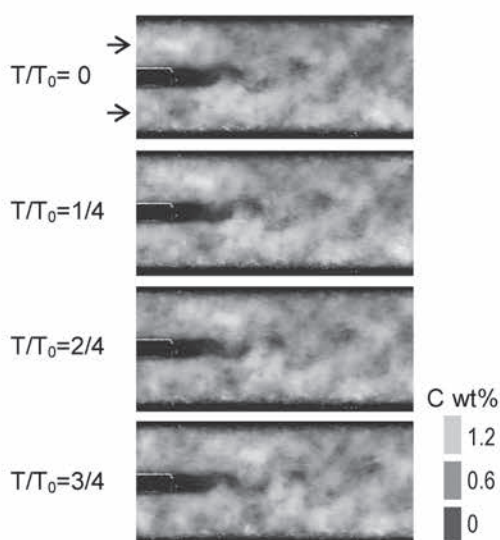


Fig. 6 Karman's vortex street and periodic change in the distribution of fiber concentration over a period ($U_a = 0.16$ m/s, $C_s = 0.6$ wt%).

して流れており、内挿板の壁面上にはパルプ繊維濃度の低い水環が形成されている。一方、Fig. 5(b)の流れは上流部ではパターンVのほぼ乱流状態である。

Fig. 5 から、内挿板後方の流れにはカルマンの渦列が発生しており、パルプ繊維はこの渦運動を取り囲むように凝集してブロックが形成され、流動している様子が見て取れる。後流はわりあい周期的な非定常流れとなっている。特に、低流速の場合 (Fig. 5(a))、内挿板後縁での水環部からはく離渦の生成が容易なことを示しており、カルマン渦列が高流速 (Fig. 5(b)) の場合よりもはっきり視認できる。図示 (Fig. 5(a)) の条件下では、この渦は約 17 Hz で発生しているが、渦列は $x \geq 30$ mm 下流では崩壊し始め、また流路壁の影響を受けて拵がりが抑制されている。Fig. 6 は、この $U_a = 0.16$ m/s の流れでのパルプ繊維の状態を、渦列発生の一周期間 T_0 にわたる時間変化について示したものである。後端部近傍の低濃度領域は、およそ 7 mm の長さで板厚の 2 倍程度である。また、低濃度流体を取り囲む高濃度パルプからなる C 形ブロックの凝集性は、 x が増すにつれて弱まるものの相当下流まで影響が残る。一方、高流速の場合 (Fig. 5(b))、内挿板で分割された流路内では乱れによってパルプ繊維は分散して、濃度は比較的均一化されている。従って、内挿板後流中で形成される C 形ブロックのスケールは小さく、明瞭な渦列状の流れには発達しにくくなることが伺える。

3.2 後流のパターンと濃度分布に及ぼす平均流速の影響

既述のように、内挿板の壁面上には流れが層流の場合、濃度の低い水環部が形成され、内挿板後方の流れには流速の増大につれてはく離せん断層から周期的なカルマン渦列が発生する。したがって、両者相まって内挿板後流中のパルプ繊維の挙動や濃度分布は、流速の変化に伴って複雑な様相を呈する。以下では、内挿板後縁近傍から後流部における繊維濃度分布の変化の様子を調べる。

Fig. 7 に、 $C_s = 0.6$ wt% の代表的な流速条件における繊維濃度の分布を 4 値化して示す。また、Fig. 8 と Fig. 9 には内挿板後流の流れ中心軸上における C_a と C' の流れ方向変化を C_s で除して表した。両図中の実線は、実験結果を滑らかに結んだものである。さらに、後出の Case 2 ($U_a = 0.063$

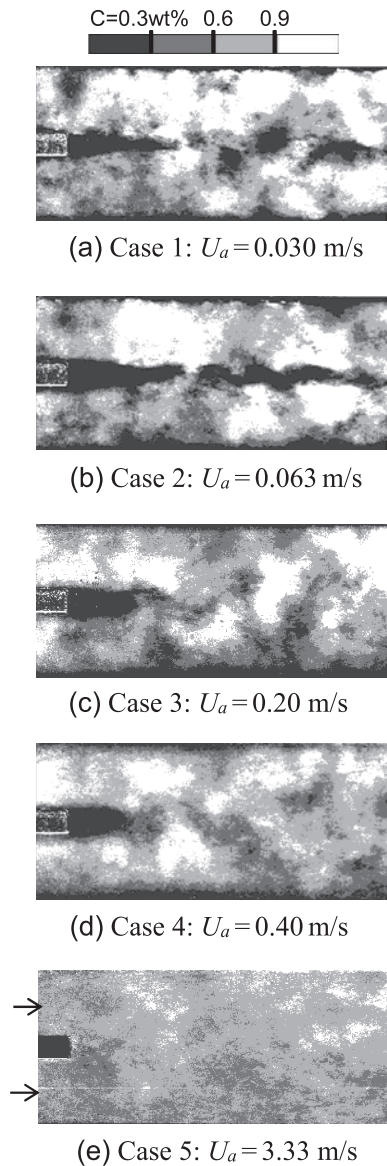


Fig. 7 Flow pattern and fiber concentration in wake region.

m/s) と Case 4 ($U_a = 0.40$ m/s) の流速条件については、 x 軸上における濃度の時間的な変化波形を Fig. 10 および Fig. 11 に、つづいて C_{ta} の y 軸上分布を Fig. 12 と Fig. 13 にそれぞれ示している。

まず、パターン I のように低流速で分割チャネル内をパルプ繊維のブロックが一体となって流下する場合 (Fig. 7(a) : Case 1, $U_a = 0.030$ m/s)、内挿板壁面上のブロック間の低濃度流体は内挿板後縁部に流れ込んでよどみ、 $x = 0 \sim t$ の区間で繊維濃度が最も低い $C_{ta} \approx 0$ wt% の値を示す (Fig. 8)。しかし、その直ぐ下流 ($x = t \sim 2t$) では内挿板で隔てられていたパルプ繊維塊が流路中心側

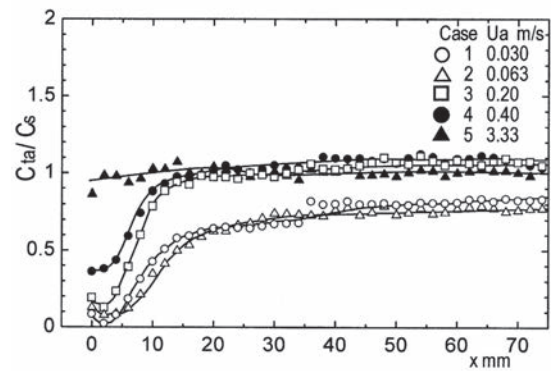


Fig. 8 Time-averaged fiber concentration at the center of the wake.

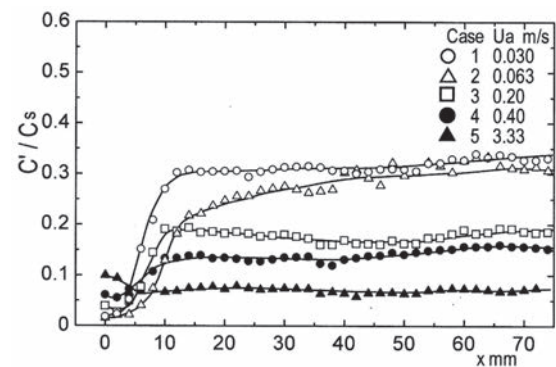


Fig. 9 Fluctuating fiber concentration at the center of the wake.

に寄って来るので、 $C \approx 0$ wt% の流体から成る双子渦の後縁部は揺らいで間欠的に流下する。そのため、後流域での濃度分布は低濃度スポットからなる斑点模様となって、相当下流部まで残存する。したがって、流れ軸上の濃度変動 C' は $x = t \sim 3t$ の区間にかけて急激に大きくなり、低濃度スポット領域の形成が明瞭となる $x = 15$ mm 付近で最も大きな値 $C'/C_s = 0.31$ を示す (Fig. 9)。また、再下流の $x \approx 70$ mm でも低濃度の斑点模様が残るため、濃度の時間平均値 C_{ta} は $0.8C_s$ 程度までしか回復しない (Fig. 8)。

平均流速がやや増すと分割流路内の壁面上には水環が形成され (パターン II)、内挿板後縁部に流入する水環部内の低濃度流体量が増大する。これに伴い、低濃度流体は双子渦の後縁部から x 軸に沿って筋状に流れ出すようになる (Fig. 7(b) : Case 2, $U_a = 0.063$ m/s)。このとき、流れ軸上の C_{ta} およびその軸方向の増加率 $\partial C_{ta} / \partial x$ は、他の流速条件に比べて最も小さい値となる (Fig. 8)。

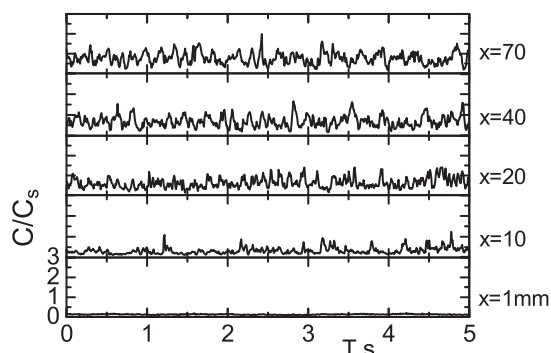


Fig. 10 Changes in local fiber concentration on the x-axis with time.
(Case 2: $U_a = 0.063$ m/s).

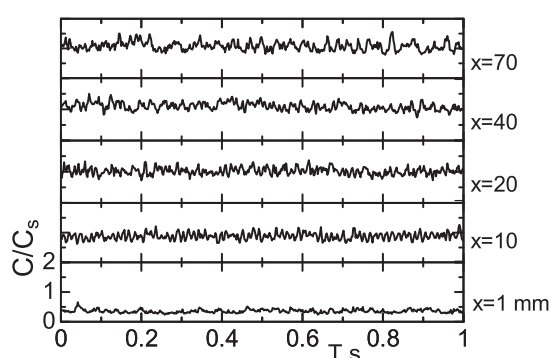


Fig. 11 Changes in local fiber concentration on the x-axis with time.
(Case 4: $U_a = 0.40$ m/s).

一方、濃度変動は $x = 40$ mm 付近までは Case 1 の流れに比べて小さいが、以降では低濃度の筋状の流れが波動状となって揺らぎ始める (Fig. 10) ため漸増し、Case 1 の流れの値に近づいている (Fig. 9)。なお、内挿板で分割されたチャンネル内パルプ液流れは、この筋状の低濃度層で分断されたまま流下するのでパルプ繊維は混合しにくく、 C_{ta} の y 軸上のくぼみ分布はかなり下流まで残る (Fig. 12)。

中流量になると、内挿板壁面上水環部内の速度こう配は急峻となり (パターンⅢ)、つづく後縁直後のはく離せん断層では発生する強いせん断応力によって流路中央寄りの栓部のパルプ繊維塊 (ブロック) が解れはじめてくる (Fig. 7(c) : Case 3, $U_a = 0.20$ m/s)。そして、後流中央部の繊維濃度は、平均流速が大きくなるにつれて次第に高くなる。また、カルマン渦列は内挿板後縁近くからはっきり視認できるようになる。図示の条件

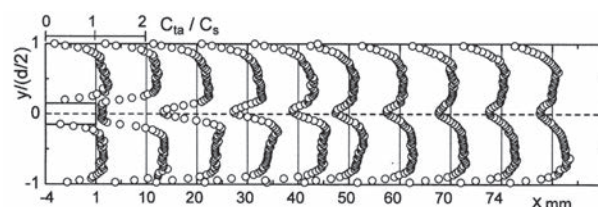


Fig. 12 Distributions of time-averaged fiber concentration on the y-axis.
(Case 2: $U_a = 0.063$ m/s).

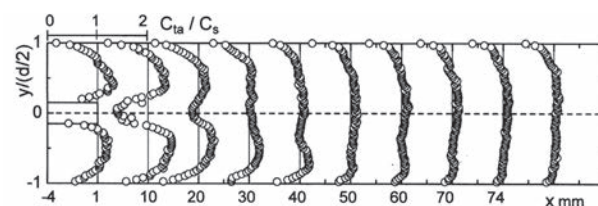


Fig. 13 Distributions of time-averaged fiber concentration on the y-axis.
(Case 4: $U_a = 0.40$ m/s).

下 (Fig. 7(c)) での後流は、約 21 Hz の非定常流れとなっている。このとき後縁ではなく離せん断層内の高濃度パルプ繊維は、解れながら壁面上水環部からの低濃度流体を包むように巻き込まれて凝集し、C 形状に再ブロック化しつつ流れる。そのため、流れ中心軸上の C_{ta} および C' は $x \approx t \sim 3t$ の短い区間で増大するが (Fig. 8, Fig. 9)、 $x = 15$ mm 辺りから下流では各々の y 軸上の分布形 (図略) ともその変化は小さい。なお、さらに下流部ではチャンネル両壁面の水環が次第に厚くなるので [17]、チャンネル断面中央部の C_{ta}/C_s の値は 1 よりやや大きくなる。

平均流速をさらに増すと分割流路壁面近傍の流れは不安定 (パターンⅣ) となり、高濃度の栓部から解れて離脱したパルプ繊維が内挿板後縁部 ($x = 0 \sim t$) に流入するようになる (Fig. 7(d) : Case 4, $U_a = 0.40$ m/s)。そのため、後流中央部の繊維濃度は後縁直後から高くなり (Fig. 8, Fig. 11)、その変動もやや大きくなる (Fig. 9)。一方、分割流路中央部の高濃度パルプ塊は、はく離せん断層で分解されて後流の速度欠損部へと輸送される。このようにして、流れ軸上の C_{ta} および C' は $x \approx 5 \sim 15$ mm で増大し、以降では C_{ta}/C_s は 1 よりわずかに大きい Case 3 と同じような分布を示すようになる。

さらに流量が増してチャンネル内全体で乱流化（パターンV）すると（Fig. 7(e): Case 5, $U_a=3.33$ m/s）、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り、濃度分布は均一化する。後流中心の C_{ta}/C_s は内挿板後縁直後で1より小さい値を取るものの、以降ではほぼ1の値を示す（Fig. 8）。また、 C' は後端近傍の $x=0\sim t$ で C_s の約10%の値を示すが、その下流部では x 軸に沿ってほとんど変化しなくなる。

3.3 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原料液を濃度むらの小さい状態で、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、濃度むらの度合いを計る指標として、 y 軸上の C_{ta} および C' の分布を用いて次の量を定義して検討することにする。

$$E_{c,ta} = \frac{1}{d C_s} \int_{-d/2}^{d/2} |C_{ta} - C_s| dy \quad (1)$$

$$E_{c'} = \frac{1}{d C_s} \int_{-d/2}^{d/2} C' dy \quad (2)$$

Fig. 14 および Fig. 15 に式(1)、(2)の結果をそれぞれ示す。 $E_{c,ta}$ および $E_{c'}$ の値が小さいほど濃度の均一性が高く、濃度変動むらが小さいことをそれぞれ示している。一般に、平均流速が増して上流の流れパターンがIからVに移行するにつれて、 C_{ta} 分布の均一度は増し、濃度変動むらは減少する。とりわけ、パルプ繊維が解れて流れの遷移が始まる Case 4 の流速で濃度の均一化が進んでいる。Fig. 14 から、内挿板後流領域では $E_{c,ta}$ の値は $x \approx 0 \sim 40$ mm ($x/t \approx 13$) で大きく変化していることが確認される。しかしながら、低流速の Case 2 の場合、低濃度流体による筋状の流れがチャンネル中央部に形成されるため、 C_{ta} の均一度は他の流速条件に比べて最も悪い（Fig. 14）。一方、 $E_{c'}$ の値は内挿板の後方およそ $x = 0 \sim 30$ mm の区間で平均流速が低くなるにつれて大きくなっているが、 $x \approx 40$ mm の位置で一旦減少してから下流では漸増している（Fig. 15）。

以上の結果から、内挿板の後方では $x = 40$ mm 付近で断面内の濃度変動は最も小さく、かつ濃度の均一性が高い。以降の下流では後流の広がりや抑制されるとともに、 y 軸上の C_{ta} 分布（Fig. 12、

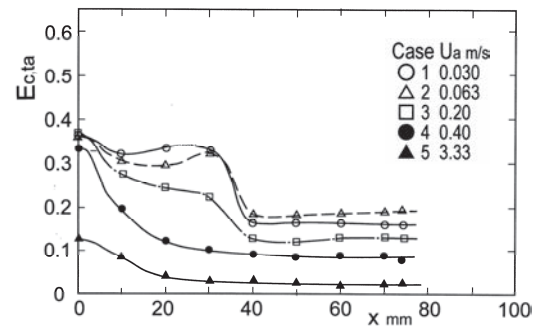


Fig. 14 Changes in uniformity of time-averaged fiber concentration along the x -axis.

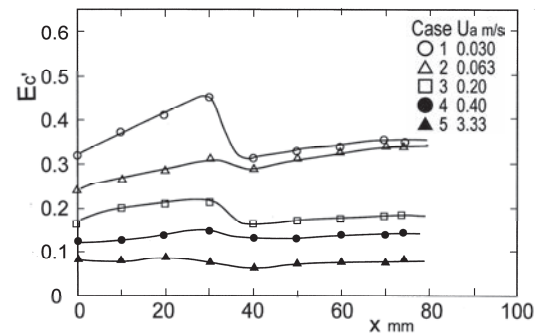


Fig. 15 Changes in degree of fluctuation of fiber concentration along the x -axis.

Fig. 13) は中央部のくぼみ形状が徐々に小さくなって膨らみ、 C_{ta} と C' 分布は発達したチャンネル内流れの形状（Fig. 4）に移行していることが分かる。

4. 結 言

抄紙機ヘッドボックスの最適化を図るための基礎資料を得るために、分散部を模擬した正方形断面チャンネル内に挿入された平板の後流領域について可視化実験を行い、パルプ繊維濃度分布の推移を調べた。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 後流領域のパルプ液流れは、上流分割流路内での流れパターン、とりわけ内挿板壁面上に形成される水環部の流れと後縁ではなく離せん断層との絡み合いで、複雑な繊維挙動を呈する。
- (2) 分割流路内での流れが極低流速の場合、後流領域では低濃度スポットが形成されて珠状となり濃度変動は大きくなる。上流部の流れに水環部が形成されるようになると、低濃度

スポットは筋状に変わり断面内の繊維濃度のむらは大きくなる。

- (3) 中流速では内挿板壁面上の水環が厚くなり、発生したカルマン渦列は後端からの水環流体を核にはく離せん断層内のパルプ繊維を巻き込んでC形状に再ブロック化する。高流速になると乱れ作用によってパルプ繊維は分散されて速度欠損部の濃度回復は早まり、流速が増すにつれて濃度分布は一様化する。
- (4) 内挿板後流の濃度むらについては、内挿板後端より 13*t* 付近で濃度変動が最も低くなり、一様性が高い。以降での流れは次第にチャンネル内流れの状態に移行する。

本研究では、内挿板の後縁形状としては単純平板のように後縁を直角に切り落としたものについてまずは検討した。実機では内挿板の後縁部はテーパ型となっている。その場合、内挿板の後の流れの合流は滑らかになり、濃度の均一化と濃度変動の減少が予想される。本研究で得られた結果は、これらの研究への展開の基礎的知見となる。

謝 辞

本研究に当初、援助頂いた三菱重工業（株）広島研究所、有益な助言を頂いた Valmet（株）（旧メッツオペーパージャパン（株））鈴木節夫氏、また供試パルプ液を提供頂いている王子製紙（株）越前和広氏に謝意を表する。なお、本研究の一部は科学研究費補助金（課題番号 23560212 および 26420127）の助成によって行われたものであることを記し、感謝の意を表する。

Nomenclature

C	: fiber concentration	[wt%]
d	: side of channel	[m]
$E_{c,ta}$: uniformity of time-averaged fiber concentration	[-]
E_c'	: degree of fluctuating fiber concentration	[-]
Re	: Reynolds number	[-]
t	: thickness of plate	[m]
U_a	: cross-sectional average velocity	[m/s]
x, y, z	: co-ordinate	[m]

Subscripts

s	: pulp liquid
ta	: time-averaged value
$'$: fluctuating value

参考文献

- [1] Sumida, M., Suzuki, S., Izawa, A. and Sugihara, M., Flow Characteristics of a Modeled Hydraulic Headbox of Papermaking Machines: Flow Visualization and Velocity Measurements, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. B, Vol. 73 (729), 1175-1183 (2007).
- [2] Sato, M., The Latest Headbox for Board and Packaging Grades, Japan Tappi J., Vol. 58 (12), 1675-1684 (2004).
- [3] Lundell, F., Söderberg, L. D. and Alfredsson, P. H., Fluid Mechanics of Papermaking, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 43, 195-217 (2011).
- [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] 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).
- [6] Iijima, H., The Application of High Speed Paper Making Technology, Japan Tappi J., Vol. 57, 481-488 (2003).
- [7] 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).
- [8] High-Concentration Paper-Making Technology ed., Reports on Research and Development (in Japanese), Research Association of Paper-Making Technology, (1990).
- [9] Cui, H. and Grace, J. R., Flow of Pulp Fibre Suspension and Slurries: A Review, Int. J. Multiph. Flow, Vol. 33, 921-934 (2007).
- [10] Whalley, R. and Ebrahimi, M., Optimum Control of a Paper Making Machine Headbox, Applied Mathematical Modelling, Vol. 26, 665-679 (2002).
- [11] Linnala, M., Ruotsalainen, H., Madetoja, E., Savolainen, J. and Hämäläinen, J., Dynamic Simulation and Optimization of an SC Papermaking Line: Illustrated with Case Studies, Nord. Pulp Paper Res. J., Vol. 25 (2), 213-220 (2010).
- [12] Hämäläinen, J., Madetoja, E. and Ruotsalainen, H., Simulation-Based Optimization and Decision Support for Conflicting Objectives in Papermaking, Nord. Pulp Paper Res. J., Vol. 25 (3), 405-410 (2010).
- [13] 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).
- [14] Lindström, S. B. and Uesaka, T., Particle-Level Simulation of Forming of the Fiber Network in Papermaking, Int. J. Eng. Sci., Vol. 46, 858-876 (2008).

- [15] Hyensjö, M., Dahlkild, A., Krochak, P., Olson, J. and Hämäläinen, J., Modelling the Effect of Shear Flow on Fibre Orientation Anisotropy in a Planar Contraction, *Nord. Pulp Paper Res. J.*, Vol. 22 (3), 376-382 (2007).
 - [16] Krochak, P. J., Olson, J. A. and Martinez, D. M., The Orientation of Semidilute Rigid Fiber Suspensions in a Linearly Contracting Channel, *Phys. Fluids*, Vol. 20, 73303 (2008).
 - [17] 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).
 - [18] 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).
 - [19] Robertson, A. A. and Mason, S. G., Flocculation in Flowing Pulp Suspensions, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, Convention Issue, 263-269 (1954).
 - [20] Robertson, A. A. and Mason, S. G., The Flow Characteristics of Dilute Fiber Suspensions, *Tappi*, Vol. 40 (5), 326-334 (1957).
 - [21] 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, 117-128 (1958).
 - [22] Duffy, G. G., Titchener, A. L., Lee, P. F. W. and Moller, K., The Mechanisms of Flow of Pulp Suspension in Pipes, *Appita*, Vol. 29 (5), 363-370 (1976).
 - [23] Fock, H., Wiklund, J. and Rasmuson, A., Ultrasound Velocity Profile (UVP) Measurements of Pulp Suspensions Flow Near the Wall, *J. Pulp & Paper Sci.*, Vol. 35 (1), 26-33 (2009).
 - [24] Ventura, C. A. F., Garcia, F. A. P., Ferreira, P. J. and Rasteiro, M. G., Flow Dynamics of Pulp Fiber Suspensions, *TAPPI J.*, Vol. 7 (8), 20-26 (2008).
 - [25] Derakhshandeh, B., Kerekes, R. J., Hatzikiriakos, S. G. and Bennington, C.P.J., Rheology of Pulp Fibre Suspensions: A Critical Review, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 66, 3460–3470 (2011).
-