

ハイドロリック型ヘッドボックスの分散部 における流れ特性

Flow Characteristics in the Dispersion Section of a Hydraulic Headbox

研究代表者 工学部機械工学科 教授 角田 勝
Masaru Sumida
共同研究者 メツオペーパ°ジヤハン 鈴木 節夫
Setsuo Suzuki
共同研究者 MHIソリューションテクノロジーズ 藤本 太郎
Taro Fujimoto

An experimental study was performed for the flow in a modeled hydraulic headbox of paper-making machines. Wakes from the partition plates in the dispersion part were investigated by using the air-flow visualization technique of a smoke wire method. The controls of the wake were explored for several kinds of two channels and four inserted plates different in shape of the trailing edge. As a result, the rectification of the average velocity and the reduction of the wake region by contraction of the channel are effective for the plates with a trailing edge of a tapered and a wavy shape. In addition, visualization and fiber-concentration measurements, in which the trailing edge was a rectangular shape, were executed for real pulp-suspension flow.

1. まえがき

抄紙機は図1に示すように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、脱水し紙層を形成するワイヤーパート、機械的な圧縮力で搾水するプレスパートによって構成されている。そのうち、抄紙機ヘッドボックスには原料液の繊維のフロック（絡み合い）を抑制しながら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。そのため、これまでポンプから吐き出された原料をヘッドボックス内で整流ならびに均等化するための検討が加えられ、その構造は変遷してきている^{(1), (2)}。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。したがって、流路の分散部において、内挿板上に形成される境界層内の縦渦や内挿板後方にできるカルマン渦はもとより、後流中に生成される縦渦などの新たな流れの攪乱要素の生成を抑止し、またワイヤー上に噴出された原料液の表面に生じる表面波の振幅増大や飛散が少なくなるような流れ状

態を作らなければならない。さらに、繊維のフロックやストリークの発生を阻止して紙地合を良好に維持することも必要である。それには流路壁を構成する内挿板上の境界層とその後流の特性を把握し、それらの制御法を解明しておくことが最適なヘッドボックスを設計する上で重要となる。

本研究は、かかる背景のもとに、抄紙機ヘッドボックスを構成する要素のうちの分散部およびその後続く噴出部を対象とし、分散部に挿入される内挿板上に生成される乱流境界層と噴出部に形成される後流の流動パターンについて、まずは空気流を用い

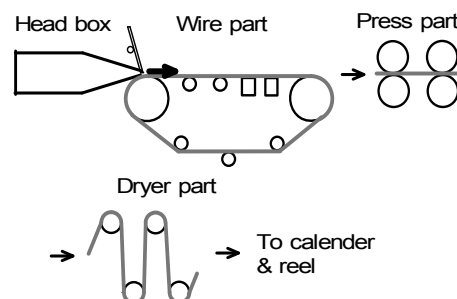


図1. 抄紙機の構成

た可視化実験を行って究明し、かつそれらの制御を流路形状と内挿板の後端部形状を変化させて検討した⁽³⁾。ついで、これらの知見を参考にして、実際のパルプ液について分散板後流におけるパルプ繊維挙動を調べるために、一部正方形断面ダクトを用いた基礎実験⁽⁴⁾、⁽⁵⁾を試行した。

2. 実験装置および方法

2.1 空気を用いた单相流可視化実験⁽³⁾

(a) **実験流路** 空気を用いた実験流路の概略および挿入板の後縁形状を図2、3にそれぞれ示す。これらの諸元は、ある実用抄紙機の形状を基に設計した約3倍の拡大モデル(透明アクリル製)で、その流路の幅は500mm、右端にインバータ制御による排風機を接続した吸い込み形式となっている。また、挿入板の後流特性に及ぼす流路の絞り効果をみるため、平行流路でも同様の実験を行った。挿入板の長さは500mm、厚さ t は5mmである。

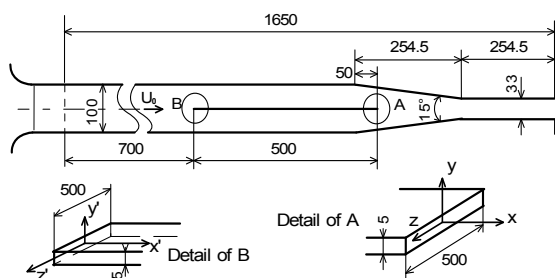


図2. 縮小流路(側面図, 単位 mm)

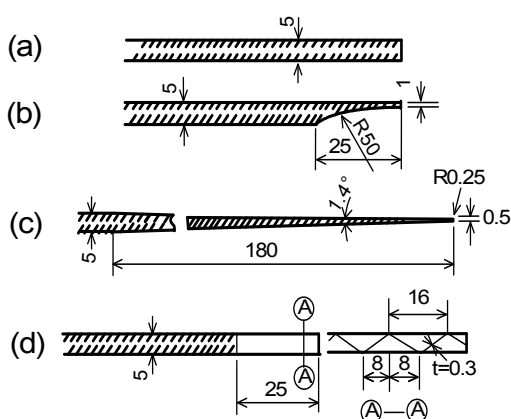


図3. 分散板の後縁形状(単位 mm)

- (a) 単純平板, (b) 片面R整形板,
(c) テーパー整形板, (d) 波形整形板

本研究では、繊維の分散と後流の乱れや渦構造との関わりを調べるため、図3に示す4種の平板後縁形状を用いた。後縁を直角に切り落とした単純平板ははく離せん断層を形成し、片面R整形板は縦渦を発生しやすい形状と考えられる。また、約 1.4° のテーパのついた整形板はほぼ実機に使用されている挿入板に対応しており、波形整形板は三次元的な縦渦の列を誘起して後流の拡散を促進する効果が期待できる。

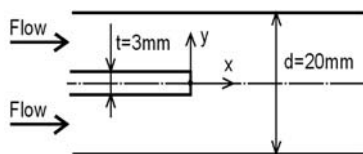
座標系は挿入板後端の中央に原点をとり、主流方向を x 軸、主流および平板に垂直な方向を y 軸、スパン方向(流路の幅方向)を z 軸とする。なお、便宜上平板先端から測った流れ方向を x' 軸とした。流路の絞り開始点は $x' = 450$ mm ($x = -50$ mm)、計測対象域はその上流150 mm以降(平板の先端から $x' = 300$ mm以降)とした。

(b) **流れの可視化** 流れの可視化はスモークワイヤー法で行い、線径0.1 mmのステンレス線に銀粉を添加したオイルを塗布剤に用いた。照明にはパルス光源ストロボを3~6個使用し、ワイドアダプターを装着して幅8 mmのスリット光を作成した。可視化は平板上の境界層および後流についてそれぞれの側面($x-y$ 面)、平面($x-z$ 平行面)、断面($y-z$ 平行面)について行い、Nikon FE2カメラでシャッター速度1/60にて撮影した。なお、可視化測定にあたっては照明効果を上げるために照明スリット窓以外の流路内面の大半部には艶消しの黒色塗膜を施した。

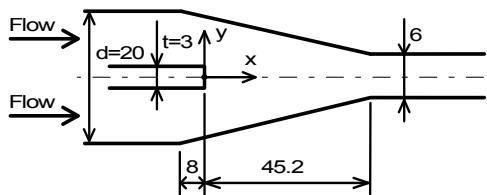
2.2 パルプ液後流の繊維濃度分布の測定

空気を用いた单相流での可視化実験の結果を踏まえて、実際のパルプ液について単純平板後流の繊維挙動を一部調査した。パルプ液流れの実験装置は回流循環式で、ヘッドボックスを構成する分散部のモデル流路についての試験部を図4に示す。試験部は一辺の長さが20 mmの透明アクリル製の正方形断面ダクトで、その中央には厚さ $t = 3$ mmの平板が挿入されている。

パルプ繊維挙動の把握には光切断による可視化法⁽⁶⁾を用い、ダクト中心軸を含む水平面内の流れを可視化・撮影した。撮影された画像からパルプ繊維濃度 C の分布を求めた⁽⁶⁾。供試パルプ液は、現在上質紙に最も多く用いられ、主に広葉樹を原料としたクラフトパルプ(LBKP)である。



(a) 平行流路



(b) 縮小流路

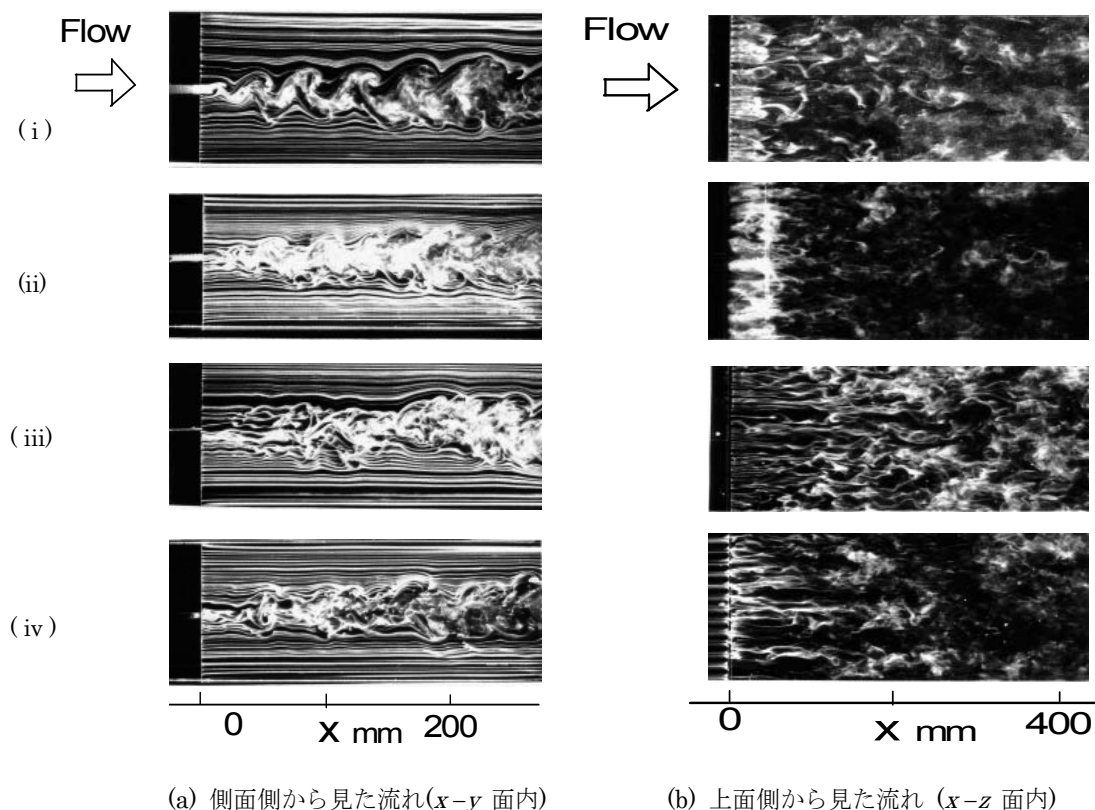
図 4. パルプ液流れ測定用流路

3. 結果と考察

3.1 後流領域の流動パターン

各種後縁形状をもつ平板を、平行流路、絞り流路のそれぞれに挿入した場合の流れの可視化写真を図 5, 6 にそれぞれ示す。後縁直後の $x=1\text{mm}$ に、スモークワイヤーを設置して撮影した。ここで、断面平均流速 U_a は 3m/s 、挿入板の板厚 t を代表長さとするレイノルズ数 $U_a t / \nu$ (ν : 空気の動粘度) は約 10^3 で、その値は実用抄紙機ヘッドボックスの場合とほぼ同じである。以下では平板後縁近傍から後流部での流れパターンに注目する。

まず、平行流路に挿入された場合 (図 5) について見る。いずれの場合もカルマン渦列の形成が見られ、後流はわりあい周期的な非定常流となっているが、そのパターンは後縁形状によって幾らか異なっている。特に、後縁が直角に切り落とされた単純平板では後縁での離渦の生成が容易なことを表



(a) 側面側から見た流れ (x - y 面内)

(b) 上面側から見た流れ (x - z 面内)

図 5. 平行流路内の流れパターン

(i) 単純平板, (ii) 片面 R 整形板, (iii) テーパー整形板, (iv) 波形整形板

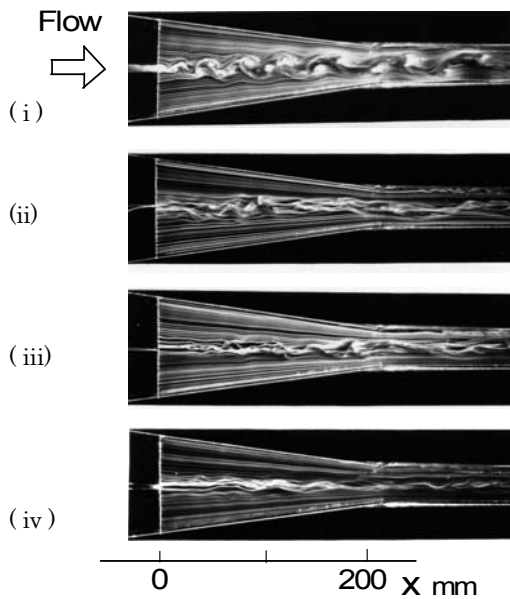
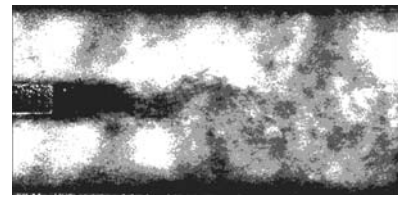


図 6. 縮小流路内の流れパターン（側面側から見た流れ）.

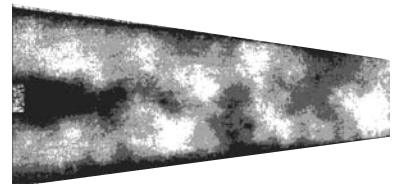
(i) 単純平板, (ii) 片面 R 整形板, (iii) テーパー整形板, (iv) 波形整形板

しており、カルマン渦列が他の後縁形状のものより後端近くからはっきり視認できる。この渦列は、 $x \geq 150$ mm の下流では流路壁の影響を受けて拡がりや抑制され崩壊し始める。片面 R 整形板では、R 面整形部からの渦が弱く上面からの渦が目立つ。テーパー整形板の場合、後端が単純平板の $t/10$ と薄いため後端で生成される渦のスケールは小さく、最初は x 軸に平行な筋状の煙として認められるが ($x \leq 50$ mm)、下流に行くにつれて発達し渦列の形を示す。波形整形板の場合、後縁に規則的に配列された波形の溝が縦渦列を誘起して後流を拡散し、流れの二次元性を裁断して強い横渦列（カルマン渦列）を形成し難くしている。

図 6 は、絞り流路内流れの流脈を平行流路の場合と同じ位置にスモークワイヤーを張って撮ったものである。平板の後縁近傍の乱流境界層は加速作用を受けて煙の y 方向への拡がりや抑制され、境界層厚さの x 方向への増加率が抑制されていることが分かる。後流も全体の流れが縮流されるため、その影響を受けて単純平板の場合を除いて明瞭なカルマン渦列への成長は見られず、波動状流れとなる。単純平



(a) 平行流路に置かれた場合



(b) 縮小流路に行かれた場合

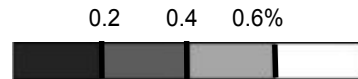


図 7. 後流領域におけるパルプ繊維濃度の分布 ($C_s = 0.4\%$, $U_a = 0.25$ m/s)

板のカルマン渦列の幅は流路が絞られているため x 軸方向にあまり変化せず、渦列は崩壊することなく下流まで存続する。他方、波動状の流れは R 整形板とテーパー整形板では $x \approx 60$ mm、波形整形板では $x \approx 87$ mm で一時的に振幅の増加が認められるが、絞り部流出後は波形整形板の場合後流幅と同程度の波長の短い（約 10 mm）波動運動をしながら流下する。

3.2 後流領域におけるパルプ液の流動特性

パルプ繊維濃度 $C_s = 0.4\%$ のパルプ液の後流の濃度分布の一例を図 7 に示す。ダクト内平均流速は $U_a = 0.25$ m/s で、レイノルズ数は $Re = U_a \cdot t / \nu = 750$ (ν : 水の動粘度) である。図中の濃淡はパルプ液濃度を示しており、白い部分は高濃度、黒い部分は低濃度であることを示している。パルプ液の流れの様相は、空気流での可視化実験の結果と定性的に一致している。挿入平板壁面上では、形成された水環部内の速度こう配が急峻となり、発生する強いせん断応力によって栓部のパルプ繊維のフロックは水環部に接するパルプ繊維から解れはじめていく。そのため、後流領域では明瞭なカルマン渦列が形成され、渦運動に巻き込んだ水環部の流体中にパルプ繊維が

混じって後流領域は広がっている (図 7(a)).

一方, 絞り流路の場合 (図7(b)), 流路の絞りによって二つの渦列の間隔は狭まり, 下流部では低濃度スポットが数珠玉状となった一列流れへと変化している.

4. まとめ

抄紙機ハイドロリック型ヘッドボックス内の分散部における流れについての可視化観察から, 次のような知見が得られた.

- (1) 単純平板のように後縁を直角に切り落とした形状のものから発生する渦列は, 流路を絞ることによってもその発生を抑制することは難しい.
- (2) 絞り流路内での後流の減少効果と整流化作用は, 特にテーパ整形板と波形整形板で顕著である.
- (3) 单相空気流での上述の知見は, パルプ液流れについても有用である.

謝辞

本研究には三菱重工業 (株) 長崎研究所の杉原正浩氏, 同社伊澤明峰氏に助力頂き, また王子製紙 (株) の越前和広氏には定期的にパル液の提供を頂いている. これらの方々の研究支援に対し感謝の意を表す.

また, 本研究の一部は文部省科学研究費 (課題番号 20560173) の補助によって行われた.

参考文献

- (1) Makino, T. et al. “Development of Concept IV-MH Headbox”, *Japan Tappi Journal*, Vol. 48, No. 1 (1994), pp. 42-51.
- (2) Iijima, H. “The Application of High Speed Paper Making Technology”, *Japan Tappi Journal*, Vol. 57, No. 4 (2003), pp. 481-488.
- (3) 角田勝, 鈴木節夫, 伊澤明峰, 杉原正浩. “抄紙機ヘッドボックス模型内の流動特性 (可視化と流速測定)”, *機論*, 73 巻 729 号, B 編 (2007), pp. 1175-1182.
- (4) 角田勝, 造田和蔵, 藤本太郎. “後流領域における製紙用パルプ液の流動特性”, *機構論*, No. 08-1 (2008), pp. 283-284.
- (5) 藤本太郎, 角田勝. “抄紙機ヘッドボックス模型内のパルプ液流れ”, *日本混相流学会年会講演論文集*, (2009), pp. 186-187.
- (6) 角田勝, 藤本太郎. “ダクト内パルプ液の繊維濃度測定と流れ特性”, *機論*, 76 巻 761 号, B 編 (2010), pp. 35-41.