ヘッドボックスモデル流路内パルプ液流れの繊維濃度分布*

角田 勝¹⁾, 藤本 太郎²⁾

Fiber-Concentration Distributions of Pulp Suspension Flowing in a Modeled Headbox of Papermaking Machines

Masaru SUMIDA and Taro FUJIMOTO

ABSTRACT

This study explored the feasibility of improving the hydraulic headbox of papermaking machines by studying the flow of wood-pulp suspensions behind a flat plate inserted in a convergent channel. Pulp fiber concentrations of the wake downstream of the plate were investigated by flow visualization and optical measurements. Changes in the time-average and fluctuation of the fiber concentration along the flow direction were examined under typical flow velocity conditions. In addition, the control of the flow characteristics was investigated. The behaviors of the pulp fibers and the wake flow were found to be strongly related to the flow states in the upstream passages partitioned by the plate. The distribution of the fiber concentration was complex because of the formation of a thin water layer on the plate and the generation of Karman's vortices at the trailing edge of the plate. Compared with the flow in a parallel channel, fluctuations in the fiber concentration decreased in the convergent channel. However, at low flow velocities, the convergent channel has a weak effect on equilibrating the time-averaged fiber concentration.

Keywords: Multi-phase flow, Pulp suspension, Fiber concentration, Wake, Convergent channel, Hydraulic headbox

1. 緒 言

本研究は、抄紙機ヘッドボックスの改善資料を得るために、ヘッドボックスをモデル化した狭まり流路内のパルプ繊維濃度の分布特性を調査したものである。

紙類は、新聞や書籍などの印刷用紙、情報用紙、包装材料、建築の内装材、家庭用品、学用品などで広く使用されてきており、その種類と量はますます増大している。これらの紙類は、抄紙機という大型機械で製造されている。抄紙工程においては、水と木材繊維を混合させたパルプ液を厚さの薄い高速噴流として噴出させるヘッドボックス内の流れが、紙製品の品質に最も大きく影響を及ぼすことが知られている¹⁾。一方、近年ではパルプ液への薬品投入と乾燥に要するエネルギーを削減するために、製紙

機械にも省エネルギー化が叫ばれ、できるだけ高濃度抄紙の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、パルプの繊維分散と整流作用を併せ持ち、かつ高濃度仕様を目指した努力や改善が様々な形で試行^{1)~6)}されている。現在では抄紙性能の高速化に應えるため、通常洋紙向けの製紙機械のヘッドボックスには、ハイドロリック型ヘッドボックスが用いられている⁶⁾。

Fig. 1 に、ハイドロリック型ヘッドボックス内部の流路概要を示す。ヘッダーから供給されたパルプ液は、多孔管からなるチューブバンクを経て抄紙機幅方向に均一な流れとなつて分散部へ導かれる。分散部は多数枚のフローシート（分散板）で構成されており、パルプ液には適度な乱れが与えられて繊維分散が促進される。その下流部では再ブロック化を防ぎつつ整流され、スライス部で噴出厚さが調整されてワイヤーパートへ噴出する。実機では、ヘッドボックス高さ方向の多孔管の段数に応じてシート形状を変えるのみではなく、異なる形状のシートを組み

* 原稿受付 2016 年 8 月 31 日

1) 正会員 近畿大学 工学部 (〒739-2116 広島県東広島市高屋うめの辺 1 番, E-mail: sumida@hiro.kindai.ac.jp)

2) MHI ソリューションテクノロジー (株)

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

合わせるにより繊維分散能力の向上を目指している^{6), 7)}。しかし、パルプ液は流速が遅い場合はビンガム流体に類似した挙動を示し、流動中には繊維同士が絡まってブロックを形成するという凝集性も有している。したがって、パルプ液流れは水とは異なった複雑な挙動を呈し、最も単純な直線流路内の流れの挙動さえ不明な点が多い⁸⁾。ましてや、本研究課題である繊維分散性能に大きな影響を及ぼすシート間出口付近から整流部における繊維濃度の分布に関しても、対象領域のパルプ液の流れが低流速から高流速に至ることやパルプ液が低濃度であっても不透明であることなどから、ほとんど扱われていない⁹⁾。

ちなみに本研究課題に関連した狭まりチャンネル内のパルプ液流れに関する研究については、Parsheh ら¹⁰⁾や Hyensjö ら⁹⁾の数値解析的研究が散見される程度である。これらの研究では、二次元狭まりチャンネル内乱流における繊維の配向状態について、CFD シミュレーションが試行されている。しかし、解析では濃度がかなり低くて繊維間での干渉が弱い硬質棒状繊維の流れを対象としており、さらに実際のパルプ繊維流れに適用できる数学モデルの開発が唱えられている^{11)~13)}。このように凝集性を有し、分解・結合を繰り返しながら流動する軟質繊維であるパルプ液流れの挙動を知るには、今日においてもまだ遠い状況である^{8), 14)}。したがって、実用抄紙機ヘッドボックスの分散部から整流部に至る流路形状の改善に繋がる情報は、極めて少ないのが現状である。

このような現況から、著者らは作動流体に空気を用いた分散板（内挿板）後流の流動パターン of の可視化解析¹⁵⁾につづいて、実際のパルプ液を用いて真直ぐなチャンネル内に挿入された内挿板の後流におけるパルプ繊維の分散特性および整流の様子を調査してきた¹⁶⁾。その結果、後流領域のパルプ液流れは、上流の分割流路内での流れパターンに強く依存して複雑な繊維挙動を呈することを見出している¹⁶⁾。

本研究では、さらに抄紙機ハイドロリック型ヘッドボックス内での分散部後流のパルプ液挙動を調べるために、内挿板後縁部から狭められた、より実機に近いモデル流路を用いてパルプ繊維濃度の分布を調べた。そして、内挿板が真直ぐなチャンネル内に挿入された場合¹⁶⁾と比較しつつ、繊維分散特性に及ぼすチャンネルの狭まりの影響を明らか

にした。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本研究で用いた実験装置の概略を Fig. 2 に示す。実験装置は循環流路、ヘッドボックスモデル流路（テストチャンネル）および可視化・濃度計測装置で構成されている¹⁶⁾。¹⁷⁾ 供試パルプ液はタンク内で攪拌（攪拌機：新東科学製、BL300Z）され、また温度調節器（トーマス科学器械製、TRL-117C）で温度 20℃ に保たれて、循環ポンプ（イワキ製、MDH-401）から流量調節弁を通してテストチャンネルに供給される。流量は電磁流量計（東芝製、LF420）で測定される。

2.2 試験流路

テストチャンネルの概略を Fig. 3 に示す。テストチャンネルは透明アクリル製で、これらの諸元はある実用抄紙機ヘッドボックスの分散部および整流部の形状をモデル化したもので、後述する濃度測定も考慮して大きさが決められている。その長さは約 2000 mm、入口部の断面形状は一边 $d = 20$ mm の正方形である。このチャンネル入口より 730 mm の位置の断面中央に、内挿板として長さ 1000 mm、厚さ $t = 3$ mm の平板を挿入し、その後端より前方 8 mm から高さを狭まり角が 15° で縮小させた狭まり流路となっている。内挿板の後縁は、はく離せん断層が形成

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

Detail of convergent section

Fig. 3 Test convergent channel and coordinate system.

されやすいように直角に切り落とされている。本研究では、チャンネル内に挿入された内挿板の後流特性に及ぼす流路の狭まり効果をみるため、真直な平行チャンネル¹⁶⁾でも同様の実験を行った。

座標系は内挿板後端の中央（チャンネル中心軸）に原点をとり、主流方向を x 軸、主流および内挿板に垂直な方向を y 軸とする（Fig. 3）。

2.3 濃度の測定方法および実験条件

供試パルプ液は、実際の抄紙機で広く使用されている上質紙用クラフトパルプ（LBKP）である。主に広葉樹を原料としている。パルプ繊維濃度 C の測定および流れの観察には光切断による可視化計測法¹⁷⁾を用いた。すなわち、可視化光源から平行スリット光を作成し、照らし出されたチャンネル中心軸と y 軸を含む水平面内の流れを上方からハイスピードカメラ（Photron FASTCAM-1024PCI）およびデジタルカメラ（Nikon D-100）で撮影した。得られた画像から、あらかじめ求めておいた輝度値と濃度の関係から C の値を算出した¹⁷⁾。

実験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 と流速を参考に、 $C_s = 0.2 \sim 0.8 \text{ wt\%}$ 、チャンネル入口での断面平均流速 $U_a = 0.020 \sim 3.5 \text{ m/s}$ で行った。内挿板の厚さ t を代表長さとするレイノルズ数では $Re_t = U_a \cdot t / \nu = 60 \sim 10500$ (ν : 水の動粘度)、チャンネル水力直径に基づくレイノルズ数では $Re_d = U_a \cdot d / \nu = 400 \sim 70000$ である。

3. 結果および考察

著者らは、先の報告¹⁶⁾において、平行チャンネル内に設置された内挿板後流部のパルプ液流れは、上流の分割流路内での流れパターンに依存して複雑な繊維濃度の分布特性を示すことを明らかにしている。また、これに先立ち、直管路内流れについてみてもパルプ繊維挙動の特性は5つに大別されるなど、パルプ液の流れ様式はパルプ繊維濃度 C_s と平均流速 U_a によって複雑に変化することを見いだしている¹⁷⁾。Fig. 4 に直管路内の流動パターンの模式図¹⁷⁾を示す。圧力損失と流量の関係による従来からの3つの分類法^{14), 18) ~ 20)}とは、パターン A と B が栓流、C および D が混合流、E が乱流に対応している¹⁷⁾。さらに、層流と乱流という分類ではパターン A~C が層流、D が概ね遷移流、E が乱流に対応している。

以下では、上述の各パターンを有するパルプ液流れが、分割流路を経て狭まりチャンネル内の内挿板後方の領域ではどのような繊維濃度分布特性を示すか、 $C_s = 0.6 \text{ wt\%}$ のパルプ液を取り上げて考察することにする。

3.1 後流の流れパターンと濃度分布に及ぼす平均流速の影響

Fig. 5 に、前述したパターン（Fig. 4）を有するパルプ液流れが内挿板で分割された流路から狭まりチャンネルを

Fig. 4 Typical flow patterns of pulp suspensions¹⁷⁾.

(a) Pattern A: Plug flow with strong interaction between fiber and channel wall. (b) Pattern B: Plug flow with hydrodynamic shear and fiber-wall interaction. (c) Pattern C: Plug flow with the water annulus in laminar shear. (d) Pattern D: Mixed flow with fiber/water annulus and transitional flow from laminar to turbulent. (e) Pattern E: Turbulent flow with distributed pulp fibers.

を経て出口に至る濃度分布を、代表的な流速条件（Case 1 ~ 5）について示す。狭まり部内の濃度（左列）は添付されている濃度バーで示されており、白い部分が高濃度、黒い部分が低濃度であることを表している。また Fig. 5 中の中列は、出口下流部（右列）と併せて4値化して表示されている。さらに Case 2 と 4 の流速条件については、 x 軸上における瞬時濃度の時間的变化を Fig. 6 と Fig. 7 に、濃度の時間平均値 C_{ta} および変動値 C' の y 軸上における分布を Fig. 8 と Fig. 9 にそれぞれ示している。

低流速で分割チャンネル内をパルプ繊維がブロック状となって流れる（パターン A）ような場合（Fig. 5(a): Case 1, $U_a = 0.03 \text{ m/s}$ ）、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、濃度の低いよどみ領域を形成する。しかしながら、分割流路内の栓部のパルプ繊維塊が流路の狭まりによってチャンネル中心軸側に寄り、後縁部のよどみ領域は平行チャンネルの場合¹⁶⁾と比べて小さくなり尖り状に変形する。そして内挿板後縁直後の $x = 0 \sim 2 \text{ mm}$ では、 C_{ta} および C' の値は平行チャンネルの場合よりも高くなり、これらの y 軸上分布は $y \approx 0$ で極大値をもつ形状となる。一方、よどみ領域内の双子渦の後縁部からは低濃度流体が浸出し、分割流路からはパルプ繊維ブロックが中心軸側へ交互に寄り合う。そのため、濃度変動は x 軸に沿ってチャンネル中央部で増大する。なお、平行チャンネルに見られた低濃度流体からなる斑点模様の濃度パターン¹⁶⁾は、狭まりチャンネル内では明瞭には形成されない。

Fig. 5 Influence of average velocity on the distribution of fiber concentration in convergent channel ($C_s = 0.6$ wt%). Left figures show the distribution of fiber concentration in wake region. Middle and right figures show the four-leveled distributions of fiber concentration in wake region and downstream channel, respectively.

平均流速がやや増すと、分割流路内の壁面上には濃度の低い薄い層（水環）が形成されるようになる（パターン B）^{17), 21)}。平均流速 U_a の増加に伴って、内挿板後縁部に流れ込む低濃度水環流体の量が増大し、低濃度流体はよどみ領域から x 軸に沿って細い筋状となって流れ出る（Fig5. (b) : Case 2, $U_a = 0.063$ m/s）。他方、狭まり部内でチャンネル中心軸に寄ってくる上流栓部のブロックは、分割流路内で濃度の低い水環部が形成されることによって濃度が高まっているため、濃度変動は狭まり部の半ほど ($x = 10 \sim 35$ mm) で急増する（Fig. 6, Fig. 8）。 y 軸上の濃度分布（Fig. 8）についてみると、時間平均濃度 C_{ta} は狭まり部半ば ($x \leq 22$ mm) までは低濃度流体からなる中

央部でくぼむ形状を示すが、後半から出口流路にかけては次第に膨らんだ形状に変わる。一方、 C' は内挿板後縁直後 ($x = 0 \sim 10$ mm) の流路中央部では値の小さい分布を示すものの、狭まり部半ほど ($x \approx 15$ mm) で凸な形状に変わり、ブロックが列状をなす出口下流部に至っては分布形状はあまり変化しない。なお、平行チャンネル内では、狭まりチャンネル内の場合と比べて C_{ta} 分布のくぼみ形状は相当下流部まで残り、 C' 分布のくぼみは $x \approx 25$ mm でほぼ平坦な形状に変わっている¹⁶⁾。また、平行チャンネルでは低濃度流体による筋状の流れが相当下流部まで残存するので、分割流路内のパルプ繊維は狭まりチャンネルの場合より混合しにくい。

Fig. 6 Changes in local fiber concentration on the x-axis with time (Case 2: $U_a = 0.063$ m/s).

Fig. 7 Changes in local fiber concentration on the x-axis with time (Case 4: $U_a = 0.40$ m/s).

このように、比較的流速の低い狭まりチャンネル内のパルプ液流れは、ブロック化したパルプ繊維が分割流路内から流路の狭まりによって寄り合っ一列状に移行し、出口付近からは剛体的に流下している。

平均流速が増し中程度の流量になると、内挿板壁面上の水環は厚くなる（パターン C）。一方、内挿板後方では、カルマンの渦列の発生が明瞭となり、分割流路内栓部の水環寄りのパルプ繊維塊は渦運動に巻き込まれて解れ始める（Fig. 5(c) : Case 3, $U_a = 0.20$ m/s）。しかし、狭まりチャンネル内の流体には加速度係数（ $K = (\nu U_m^2) \cdot dU_m/dx, dU_m/dx$: 断面平均流速の流れ方向変化）の値で 6.6×10^{-5} 程度の強い加速（縮流）作用が働いて、内挿板後縁で発生した乱れは抑制されて層流化が起り、パルプ繊維は再ブロック化しつつ流下する。このとき、高繊維濃度の二列状分布は狭まり部後半では管軸に沿って低濃度流体を波形状に挟む分布に変わる。つづく出口流路部では、Case 2 と同様一列状の濃淡模様のパターンとなるが、濃度の差は小さくなり、濃度変動 C' は Case 2 に比べて 4 割近く減少する。

平均流速をさらに増すと壁面上の速度こう配が急峻となり、分割流路内では水環部に接する栓部のブロックから解れ始める（パターン D）。そして解れたパルプ繊維は内挿板後縁部に流れ込み、他方、分割流路内中央のパルプ

Fig. 8 Distributions of time-averaged and fluctuating fiber concentration on the y-axis (Case 2: $U_a = 0.063$ m/s). Upper and lower figures show C_{ta} and C' , respectively.

Fig. 9 Distributions of time-averaged and fluctuating fiber concentration on the y-axis (Case 4: $U_a = 0.40$ m/s). Upper and lower figures show C_{ta} and C' , respectively.

繊維はカルマン渦列と流路の狭まりによって速度欠損部であるチャンネル中心軸寄りに輸送される（Fig. 5(d) : Case 4, $U_a = 0.40$ m/s）。そのため、流れ中心軸上の濃度は時間的ならびに管軸方向にも変化は小さくなり（Fig. 7）、 C_{ta} および C' の y 軸上分布は狭まり部の半ほど（ $x \approx 20$ mm）でほぼ平坦な形状を示す（Fig. 9）。

さらに高流量になると、チャンネル内全体で乱流化した流れ（パターン E）が狭まり部に流入するようになり、パルプ繊維はほぼ一様に分散する（Fig. 5(e) ; $U_a = 3.13$ m/s）。 C_{ta} および C' の y 軸上分布は内挿板後端の角部直後でわずかに凹凸のある形状を示すものの、以降の狭まり部から出口流路ではかなり平坦な形状となる（ $x \geq 5$ mm）。なお、狭まり部出口（ $x \approx 45$ mm）での濃度変動の大きさは $C'/C_s \approx 0.035$ で、平行チャンネルの 6 割程度の値を示す。

3.2 濃度むら

実機の抄紙機では、原料パルプ液をヘッドボックスから流速および濃度とも幅方向に一様な分布で、しかもそ

の変動の少ない状態で噴出させてワイヤーパートに送出することが重要である。そこで本研究では、濃度についての均一性を y 軸上における C_{ta} と C' の分布を用いて、次式で評価して濃度むらの度合い¹⁶⁾を調べた。

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

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

Fig. 10 および Fig. 11 に、式(1)と(2)の結果をそれぞれ示す。両図中には、Case 2 および 4 と同じ流量で流れる平行チャンネル内の結果¹⁶⁾を比較のため図示している。 $E_{c,ta}$ および $E_{c'}$ は、その値が小さいほど濃度分布の均一性が高く、濃度変動が小さいことをそれぞれ示している。

$E_{c,ta}$ は狭まり部では内挿板後縁部から小さくなって、 C_{ta} 分布の平坦化が進んでいる (Fig. 10)。しかし、流速の低い Case 1 と 2 では、出口から下流部では C_{ta} 分布が次第に膨らむ形状となるため、 $E_{c,ta}$ は x 軸に沿って漸増する。他方、高流速の Case 5 では平行チャンネルと同程度の値を取る。次に、Fig. 11 の $E_{c'}$ についてみると、内挿板後縁部からの低濃度流れがカルマン渦列の狭まりによって波形状に変わり、 C' の y 軸上分布が凸形となる狭まり部

Fig. 10 Influence of velocity on uniformity of time-averaged fiber concentration along the channel axis.

Fig. 11 Influence of velocity on fluctuating fiber concentration along the channel axis.

出口付近から下流でやや増大する。しかし、その値は平行チャンネル内の場合¹⁶⁾と比べ1割程度小さい (Case 2)。さらに $E_{c'}$ は、乱流状態では平行チャンネルの場合の6割程度までに減少している。

以上のことから、後縁を直角に切り落とした平板が挿入されたヘッドボックス狭まりチャンネルでは、濃度変動の低減は幾分図れるものの、フロックが生じている流速が低い流れについては時間平均濃度の十分な均一化は難しいと言えよう。

4. 結 言

抄紙機ヘッドボックス流路をモデル化した狭まりチャンネル内における内挿板後流のパルプ液濃度分布について実験的研究を行い、以下の結論を得た。

- (1) 狭まりチャンネル内の内挿板後流領域の流れは、上流の分割流路内でのパルプ液流れ状態はもちろんのこと、内挿板後縁では離渦やカルマン渦の流路狭まりによる軸方向変化によって複雑な繊維濃度分布特性を示す。
- (2) 平均流速が低い場合、内挿板壁面状の水環からの低濃度流体で隔てられていた高濃度パルプ繊維は、狭まりチャンネル内で一列状となり、濃度差のある流れに移行する。濃度分布は時間平均値については管軸に沿ってやや膨らみ、変動値は尖った形状となる。
- (3) 中流速では内挿板後縁部からの筋状の低濃度流体はカルマン渦によって波形状となって流下するようになり、濃度の C_{ta} および C' 分布はやや平坦な形状になる。さらに高流速になると、パルプ繊維は解れて濃度分布形状は流速の増加につれて平坦化する。
- (4) 濃度むらに及ぼすチャンネルの狭まり効果は、変動値の減少については幾分あるものの、時間平均値の均一化に対しては流速が比較的低い流れではその効果はやや小さい。

このように、後縁を直角に切り落とした単純な内挿板では、流路を狭めることによっても濃度の整流 (均一化と変動の低減) を十分果たすことは難しい。今後は内挿板の後縁形状の影響についても、引き続き調査することが必要である。

謝 辞

本研究に援助頂いた三菱重工業 (株)、試験パルプ液を提供頂いている王子製紙 (株) 越前和広氏、また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)) 鈴木節夫氏に謝意を表す。なお、本研究の一部は科学研究費補助金 (課題番号 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。

参 考 文 献

- 1) Lundell, F., Söderberg, L. D., Alfredsson, P. H. : Fluid mechanics of papermaking, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 43 (2011), pp. 195-217.
- 2) 高濃度抄紙技術編 : 研究開発報告書, 製紙技術研究組合 (1990).
- 3) Hauptmann, E., Vyse, R., Mardon, J. : The wake effect as applied to modern hydraulic headboxes Part 2 : Design and operation of perforated roll headboxes, hydraulic or filled headboxes, *Pulp & Paper Canada*, Vol. 91, No. 10 (1990), pp. 369-377.
- 4) 飯島秀昌 : 抄紙機高速化技術の適用, 紙パルプ技術協会誌, Vol. 57, No. 4 (2003), pp. 481-488.
- 5) 佐藤幹晃 : 最新板紙用ヘッドボックス, 紙パルプ技術協会誌, Vol. 58, No. 12 (2004), pp. 1675-1684.
- 6) 高野行範 : ヘッドボックスからプレスパートまで (洋紙抄紙機部門 ; 体系・歴史・最新鋭設備), 紙パルプ技術協会誌, Vol. 69, No. 9 (2015), pp. 920-936.
- 7) Linnala, M., Ruotsalainen, H., Madetoja, E., Savolainen, J., Hämäläinen, J. : Dynamic simulation and optimization of an SC papermaking line; Illustrated with case studies, *Nord. Pulp Paper Res. J.*, Vol. 25, No. 2 (2010), pp. 213-220.
- 8) Cui, H., Grace, J. R. : Flow of pulp fibre suspension and slurries; A review, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 33 (2007), pp. 921-934.
- 9) Hyensjö, M., Dahlkild, A., Krochak, P., Olson, J., Hämäläinen, J. : Modelling the effect of shear flow on fibre orientation anisotropy in a planar contraction, *Nord. Pulp Paper Res. J.*, Vol. 22, No. 3 (2007), pp. 376-382.
- 10) Parsheh, M., Brown, M. L., Aidun, C. K. : Variation of fibre orientation in turbulent flow inside a planar contraction with different shapes, *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 32 (2006), pp. 1354-1369.
- 11) Olson, J. A., Friggard, I., Chan, C., Hämäläinen, J. P. : Modeling a turbulent fibre suspension flowing in a planar contraction; The one-dimensional headbox, *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 30 (2004), pp. 51-66.
- 12) Krochak, P. J., Olson, J. A., Martinez, D. M. : The orientation of semidilute rigid fiber suspensions in a linearly contracting channel, *Phys. Fluids*, Vol. 20, 073303 (2008).
- 13) Cotas, C., Asendrych, D., Garcia, F., Faia, P., Rasteiro, M. G. : CFD Simulation of a turbulent fiber suspension flow; A modified near-wall treatment, *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, Vol. 9, No. 1 (2015), pp.233-246.
- 14) Derakhshandeh, B., Kerekes, R. J., Hatzikiriakos, S. G., Bennington, C.P.J. : Rheology of pulp fibre suspensions; A critical review, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 66 (2011), pp. 3460-3470.
- 15) 角田勝, 鈴木節夫, 伊澤明峰, 杉原正浩 : 抄紙機ハイドロリック型ヘッドボックス模型内の流動特性 (可視化と流速測定), 日本機械学会論文集 (B), Vol. 73, No. 729 (2007), pp. 1175-1183.
- 16) 角田勝, 藤本太郎 : 分散板後流領域における製紙用パルプ液の流れ特性, 混相流, Vol. 30, No. 3 (2016), pp. 296-304.
- 17) 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), Vol. 76, No. 761 (2010), pp. 35-41.
- 18) Robertson, A. A., Mason, S. G. : The flow characteristics of dilute fiber suspensions, *Tappi*, Vol. 40, No. 5 (1957), pp. 326-334.
- 19) Duffy, G. G., Titchener, A. L., Lee, P. F. W., Moller, K. : The mechanisms of flow of pulp suspension in pipes, *Appita*, Vol. 29, No. 5 (1976), pp. 363-370.
- 20) 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, No. 8 (2008), pp. 20-26.
- 21) 角田勝, 藤本太郎 : 製紙用パルプ液の円管内流動特性, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823 (2015).