紙の繊維配向生成メカニズムに関する研究

山陽国策パルプ(株)*商品開発研究所 阿部裕司, 轟 英伸, 岡崎 和
稲留丈治, 坂本 祥

Fiber Orientation Characterized by the Relative Movement of Stock Flow to Wire

Y. Abe, H. Todoroki, W. Okazaki,
T. Inadome and A. Sakamoto

Research Laboratory of Products Development, Sanyo-Kokusaku Pulp Co., Ltd.

Stock flow velocity was measured with a jet velocity meter system in various operating conditions of industrial headboxes. Edge flow made the flow directions of both machine sides more inner, and side bleed made them more outer. Larger recirculation inclined the flow direction to the overflow direction. Slice opening profile affected the flow direction, too. These flow behaviours were reflected in fiber orientation of paper. Experiment was performed with changing the differential vector between stock flow velocity and wire velocity. It was suggested that fiber orientation of paper is mainly determined by the relative movement of stock flow to wire at $J/W \neq 1$ rather than by the fiber orientation in jet. Furthermore, the z-directional profiles of fiber orientation in x-y plane in papers made by commercial paper machines were measured by a newly developed method. The information of the differential vectors on sheet forming can be obtained from these z-directional profiles.

Keywords : Fiber Orientation, Jet Velocity, Differential Vector, Z-direction

1. 緒 言

地合や繊維配向の様な紙の構造は抄紙機のウェットパートで決定される。特に繊維配向は紙の力学的性質や寸法安定性に大きく影響するため、ノンインパクトプリンター用紙の斜傾、シート製品のカール等の紙ぐせや、ロール紙の塗工、加工、印刷工程での走行適性に関係する。

繊維配向はヘッドボックス内あるいはワイヤー上の紙料内に存在するせん断力により生成され则认为られている。例えば、染色繊維を数える手法により、コンバーフローヘッドボックス内の繊維が強く配向していることが示された¹⁾。しかしながら、一般的にはどのような紙であろうともこの様に強い配向は観測されない。

これは、一方でジェットがワイヤーに着地する際、もしくは脱水過程等での乱れにより繊維配向が破壊されることを示している。

さらに、繊維配向がジェットワイヤー比(以下J/W比)により変化することや、ワイヤーシェイキングが配向強度を低下させることは良く知られている。これらの事実から、ワイヤーパートでの繊維配向生成において、ワイヤーと紙料の相対速度が非常に重要な役割を果たしていることも容易に推察できる。

紙の繊維配向は様々な要因が作用し合って決定される。我々はこの生成メカニズムについて以下に示す三つの観点よりその解明を試みた。

- (1) 紙料流れ挙動
- (2) ワイヤーと紙料の相対運動
- (3) 繊維配向の厚さ方向プロファイル

紙料流れ方向は後述の速度差ベクトルの角度がJ/W比と紙料流れ角度により決定されるという意味において、紙の繊維配向角に大きな影響を与える。マシ

*'92 PAN-PAC PPTC ('92.9.8~10, 於東京)で講演したものに一部加筆した。

* 現日本製紙(株)

Fig. 1 Method of measuring stock flow velocity.

ン幅方向各点における繊維配向角の違いは主にマシン幅方向における紙料速度ベクトルの不均一性に起因する。その不均一性はヘッドボックスの構造やその運転条件により決定される。

実際の抄紙機での紙料流れ状態を知ることが繊維配向の制御において重要である。我々はマシン幅方向各点での紙料流れ速度と角度を計測できる流速計システムを開発した²⁾。このシステムを用いて、幾つかの抄紙機にてヘッドボックスの運転条件変更時の紙料流れ挙動および紙料流れと繊維配向の関係について調査した。

次にワイヤー上での繊維配向生成についての検討を行った。Finger³⁾はワイヤーシェイキングによる波動性について、また Weissshuhn⁴⁾⁵⁾は配向角と相対運動の向きの相関性について報告している。しかしながら、実際に紙の繊維配向の決定メカニズムについては言及していない。我々はパイロットマシンにてワイヤーと紙料の相対速度を変更して、ワイヤー上の紙料中に存在するせん断力の指標である速度差ベクトルと、紙の繊維配向の関係についてモデル的に調査し、繊維配向生成メカニズムについて考察した。

ところで、紙はウェットパートにおける紙層形成の結果であり、紙自身、紙層形成時の情報を多く含んでいるはずである。数層に分割された紙のゼロスパン引張り強度の縦横比の厚さ方向のプロファイルが Kallmes⁶⁾により測定された。紙の繊維配向の厚さ方向プロファイルはカーン解析において本質的な情報である。しかし、ワイヤー上での紙層形成メカニズムを知りたい場合、それはさらに重要となる。我々は以前、粘着テープによる紙層分割法とレーザー回折により繊維配向の厚さ方向プロファイルを測定した⁷⁾。この方法を用いることにより、厚さ方向のすべての紙層に関して繊維配向の情報を得ることができる。さらに、我々は新たな繊維配向測定法を開発した⁸⁾。この報告ではレーザー回折法の代わりにこの方法を用い、繊維配向の厚さ方向プロファイルより紙層形成の様子について

の考察を試みた。

2. 実験

紙料流れ速度を直接測定するために、我々は市販の車速計 (LC-760 S; 小野測器(株)) を用いたシステムを開発した。センサーヘッドをスキャンすることにより、紙料速度ベクトルのマシン幅方向のプロファイルが測定できる。センサーヘッドはマシン方向速度を計測するセンサーとクロスマシン方向速度を計測するセンサーから構成されている (図 1)。速度ベクトルはこの 2 つの速度成分から算出する。流速計を幾つかの抄紙機に設置し、抄紙条件を変更して紙料流れを測定した。エッジフロー、サイドブリード、再循環量、およびスライス開度プロファイルの紙料流れに対する影響について調査した (図 2)。

ワイヤーと紙料の相対運動を表す速度差ベクトルと、繊維配向の関係を当社のパイロットマシンにて調査した。J/W 比変更はジェットの状態を一定にする目的でワイヤー速度変更によりのみ行った。ジェット角度変更はヘッドボックスの据付角度変更により行い、また流速計で確認した。

Fig. 2 Schematic diagram of a headbox.

紙の繊維配向の厚さ方向プロファイルはテープ剥離による紙層分割法、および文献8に示される方法に偏光処理を施した繊維配向測定法を用いて求めた。

非分割品の繊維配向は分子配向計 (MOA-2001 A; 神崎製紙㈱) とソニックシートテスター (SST-100; 野村商事㈱) を用いて測定した。配向角 (α) および配向指数 (η) は次式によるフィッティングから算出した。

$$f(\theta) = C\{1 + \eta \cos 2(\theta - \alpha)\} \quad \cdots \cdots (1)$$

また、紙料流れ角度や紙の繊維配向角はマシン方向に対して時計周りの回転を (+) と定義した。

3. 結果と考察

3.1 紙料流れ挙動

ヘッドボックス条件の小さな変更が紙の性質に大きな変化を引き起こすことは良く知られている。紙料流れ方向を決定するヘッドボックス条件は紙の繊維配向と密接な関連がある。現代の抄紙機において、紙料流れ方向のマシン方向からのずれは小さいが、その偏差は紙となり増幅される。したがって、より均一な紙料流れの達成が望まれる。また、抄紙上の最適条件をつかむためにも、実際の紙料流れを知ることは重要である。

最近の抄紙機は紙料流れの制御が考慮されつつある。我々は流れを制御する装置の1つである Sym-Flo ヘッドボックスのエッジフローの紙料流れ角度に対する効果について流速計を用いて調査した。

図3は抄紙機左側におけるエッジフローバルブを閉じつつある時の紙料流れ角度の経時変化を示している。エッジフロー流量が減少するにしたがい、紙料流れ角度は0°に近づいた。エッジフローはヘッドボックス側面での流量を増加させる。したがって、側面付近の紙料流れ角度はより内向きとなる。このヘッドボックス

Fig. 3 Effect of edge flow on stock flow angle. Measurement was performed on the left side of the paper machine.

内の紙料流れ挙動は紙料ジェットにも引き継がれる。このエッジフローの効果は抄紙機幅方向の広い範囲で観測された。

サイドブリードはエッジフローと正反対の働きをする。サイドブリードを使用することにより、図4に示された紙料流れ角度はより外開きに变化した。通常、サイドブリードはエッジフローの流入口よりスライスリップ近くに設置されているので、この効果の及ぶ範囲はエッジフローの場合より狭い。

ほとんどすべての抄紙機において、紙の水中伸びの幅方向プロファイルは下に凸の端部で大きく中央で小さいパターンを示す。特に水中伸びは紙の乾燥過程での収縮量と高い相関を示すので⁹⁾、乾燥時のクロスマシン方向の収縮量も端部で大きいといえる。これは、紙とドライヤーキャンバス間の摩擦力に起因するクロスマシン方向の収縮抑制力が中央で最大値をとり、端部に向かって0まで減少するパターンを持っていることによる(補遺1参照)。簡単にいうと、中央部の紙がクロスマシン方向に収縮するためには、その隣から端までの広幅の紙を動かさなければならないが、端部付近の紙は端までの狭幅の紙を動かすだけで良いからである。

さて、この乾燥収縮量の幅方向での違いは端部の坪量を増大させてしまう。そこで、通常の操業では端部のスライス開度を狭くして、坪量プロファイルを均一にしている。

このスライス開度プロファイルも紙料流れ角度に影響を及ぼす。この効果を調べるために、パイロットマシンの流れに対して左側のスライス開度がより大きくなるように、変形した上スライス板を用意した(図5)。その変形量は200 mmの幅に対し0, 2, 5 mmとした。スライス開度は中央の値を代表させた。

図6はスライス開度の変形量を変更したときの紙料流れ角度を示している。その変形量が大きくなる程、

Fig. 4 CD profiles of stock flow angle with and without side bleed.

Fig. 5 Experiment with a tapered upper slice.

Fig. 6 Stock flow velocity angle with the tapered upper slice lips. Average slice opening was 11 mm constant.

紙料流れの傾きが大きくなっているのが分かる。その変化方向は反時計周り、つまりスライス開度の大きい側に向いている。紙料ジェットの流れは、よりスライス開度の大きい部分で多いので、ヘッドボックス内の紙料の流量もスライス開度の大きい部分とその反対側より多い。このディストリビューターとスライスの間の紙料流れ挙動は、ヘッドボックス内の紙料流れをよりスライス開度の大きい方へ傾ける。このヘッドボックス内の傾いた流れは、紙料ジェットにも引き継がれる。

適切な再循環はヘッドボックスのマシン幅方向での均一な流れを得るために必要である。図7はスライス開度プロファイルを変えずに再循環量を減少させたときの紙料流れ角度の幅方向プロファイルを示している。大きな再循環量が再循環方向へ流れを傾けていたことが分かる。再循環量は特に再循環側のマシン半幅に大きく影響した。

図8はスライス開度の自動制御下での場合を示している。同じ再循環量の減少に伴う反時計周りの紙料

Fig. 7 CD profiles of stock flow angle in two recirculation conditions.

Fig. 8 CD profiles of stock flow angle in two recirculation conditions under the automatic control of slice opening.

流れ角度の変化量は、スライス開度を固定した場合と比較すると小さくなっている。より大きい再循環量は再循環側の坪量を増加させる。均一な坪量プロファイルを得るために、再循環側のスライス開度は閉じられるであろう。この操作は紙料流れ方向を再循環側と反対の方向に傾ける。図8の結果は上に述べたことの逆の場合である。より小さい再循環量は再循環側の坪量を減少させるので、再循環側のスライス開度は開けられた。このスライスの操作は紙料流れを時計周りの方へ回転させる。その結果、再循環量の変化に伴う紙料流れへの効果が少なくなったと考えられる。

以上の結果を表1にまとめる。エッジフローは紙料流れを内向きにし、サイドブリードは外開きにした。再循環量をより多くすると再循環側に紙料流れが傾いた。スライス開度プロファイルも紙料流れに影響を与えた。また、これらの紙料流れ挙動は紙の繊維配向にも反映された。

実機抄紙機において測定された紙料流れ角度はどれも1°以下であった。しかしながら、繊維配向は次節で述べるようなメカニズムにより生成されるので、一連

Table 1 Effect of Headbox Conditions on Stock Flow Angle

Headbox Conditions	Stock Flow Angle
Control	
Larger Edge Flow	
Larger Side Bleed	
Larger Recirculation	

の流速調査において得られたすべての紙の繊維配向角は、紙料流れ角度の10倍程度であった。したがって、この小さな紙料流れ角度は紙の製造においてはまだまだ大きなものであるといえる。

流速測定システムは 1° 以下の紙料流れ角度を検出することができる。このシステムは紙料ジェットの流れの適性化に使用することができるであろう。

3.2 ワイヤと紙料の相対運動

J/W 比は紙の各種性質に大きな影響を与える。ワイヤと紙料の相対運動は、ワイヤ上の紙料内にせん断場を生じさせる。図9は $J/W > 1$ における紙料流れ速度の厚さ方向分布を示している。紙料流れ速度はワイヤに向かって徐々に減速する。上層の速度は中間層の速度より速く、また下層の速度は中間層より遅い。繊維はこの層間の速度差によるせん断力を受ける。繊維は偶力が無くなるせん断力の向きまで回転する。この様に繊維配向はせん断場内で生成される。

ワイヤ速度ベクトルと紙料速度ベクトルの差ベクトルはワイヤ上の紙料内に存在するせん断力の指標となる。この差ベクトルを単に速度差ベクトルと呼ぶことにするが、紙の繊維配向と速度差ベクトルの関係を調べるために、パイロットマシン上で速度差ベクトル

ルを種々変更して実験を行った。この実験では、 J/W 比とヘッドボックスの設置角度を変更した(図10)。流速計により測定されたジェット速度は97 m/minであった。

図11はワイヤ速度に対する紙の繊維配向を示している。繊維配向は分子配向計を用いて測定した。ジェット速度がワイヤより速い押し側($J/W > 1$)では、繊維配向角はジェット角度と同符号であった。しかしながら、引き側($J/W < 1$)においては、それらは互いに逆符号となった。また、ジェット角度の増大に伴ない繊維配向角も大きくなった。配向角に関する最大の特徴は、押し側と引き側でその符号が変化したことにある。

図12は本実験での速度差ベクトルの角度を示している。押し側においては、速度差ベクトルの角度はジェット角度と同符号である。一方、引き側においてはそれらの符号は逆転している。また、ジェット角度が大きくなれば、速度差ベクトルの角度も大きくなっている。

以上の繊維配向角および速度差ベクトルの角度の相似性は、紙の繊維配向角が速度差ベクトルの角度の影響を強く受けていることを示している。この様な押し側と引き側での配向角の符号の逆転は、速度ベクトル以外の考え方では説明できず、速度差ベクトルの効果が、いかにワイヤ上での繊維配向生成において支配

Fig. 10 Method of changing the jet angle. **Fig. 11** Fiber orientation angle on the conditions of various jet wire ratio and jet angle.**Fig. 9** A fiber rotates in shear field.

Fig. 12 Angle of the differential vector on the conditions of various jet wire ratio and jet angle.

的であるかが分かる。

次にこれらの図をさらに詳しく見てみる。角度の絶対値に関しては、繊維配向角は速度差ベクトルの角度より概ね小さかった。図 13 にはそれらの比をプロットしてあるが、大きな引き側においては繊維配向角は速度差ベクトルの角度に近づいた。また、ジェット速度とワイヤー速度が等しい条件では繊維配向角はマシン方向に近づいた。

ワイヤーパートにおいて、紙料中に存在する速度差に起因するせん断力により繊維配向はつくられる。そのせん断力は偶力がなくなるまで繊維を回転し続ける。一方、繊維配向は流れの乱れにより破壊され、繊維配向はランダムになる。もし、繊維配向がワイヤーパートでのせん断力によりのみ生成されるのならば、繊維配向角は速度差ベクトルの角度と一致するであろう。しかしながら、そのようなことは、ここでの実験では観測されなかったし、また多くの抄紙機で行われた流速調査での繊維配向角と速度差ベクトル角度の比較に

おいても見られなかった。繊維配向角は速度差ベクトルの角度とマシン方向の間の値をとった。

マシン方向は紙料ジェット角度がほとんどマシン方向と一致しているという意味において特別な方向である。紙料ジェット中の繊維は紙料中のせん断力により流れの方向に向けられる。ワイヤー上での紙層形成においては、ジェット内に存在する元の繊維配向は、ワイヤー上で速度差ベクトルにより引き起こされるもう 1 つのせん断力により変化する。したがって、紙の繊維配向角は紙料ジェット角度と速度差ベクトルの角度の間の値をとるのである。特にジェットとワイヤーの速度が等しい条件下では、紙料ジェット内の繊維配向が紙に反映されるようになる。

次に繊維配向強度の結果について述べる。図 14 はワイヤー速度に対する紙の繊維配向強度を示している。繊維配向強度は分子配向比 (MOR) で表示した。ワイヤー速度が 105 m/min でその配向比は最小となった。

図 15 は本実験での速度差ベクトルの大きさを示している。速度差ベクトルの大きさは、ワイヤー速度が 105 m/min で最小であり、J/W 比が 1 から遠ざかるにしたがって大きくなっている。

これらの結果より、速度差ベクトルが大きくなると紙料内のせん断力が増大し、繊維配向強度も上昇することが分かる。

なお、ここまでの速度差ベクトルの算出において、ジェット速度は 105 m/min と仮定した。これは図 14 における配向強度がその速度で最低値をとっており、平均的なジェット速度が 105 m/min とみなせるからである。この仮定は流速計が内部より速度の遅い表層の速度を測定していることから妥当と思われる¹⁰⁾。

次に繊維配向強度の挙動について詳しく見てみる。図 14 ではジェットとワイヤーの速度が等しい条件に

Fig. 13 Ratio of the orientation angle to the differential vector angle.

において配向強度は最も低くなった。ここでの繊維配向は、前述の紙料ジェット内の繊維配向を表しており、タービュレンスやクロスマシン方向に向いた速度差ベクトルに打ち負かされなかったジェット内の繊維配向の生き残りを示している。事実、クロスマシン方向のせん断力が最も大きいジェット角度が -4° の場合、配向強度の最小値は、それより小さいジェット角度である他の場合の値より小さくなっている。

J/W 比が1から遠ざかるにしたがって、速度差ベクトルの大きさは単調に増加し、それに伴ない配向強度も上昇した。しかしながら、配向強度の増加の割合は、大きな押し側および引き側共に顕著でなくなった。この結果は、大きな押し側、あるいは引き側において、タービュレンスの効果が極めて大きくなることを示している。特にそれは図14の押し側で顕著であり、これは、押しと引きでタービュレンスの様子が異なる事を示唆している。

Fig. 14 Fiber orientation intensity on the conditions of various jet wire ratio and jet angle. (MOR : Molecular Orientation Ratio)

Fig. 15 Differential velocity on the conditions of various jet wire ratio and jet angle.

以上の結果を図16にまとめる。J/W 比が1付近では、紙の繊維配向決定に関してジェット内の繊維配向の影響が最も大きく、それ以外の条件では速度差ベクトルの影響が支配的である。さらに、J/W 比が1から大きく離れるにしたがって、タービュレンスの影響が大きくなり、それは特に押し側で顕著になる。

速度差ベクトルにより引き起こされる繊維配向挙動のもう1つの例を次に示す。ワイヤーシェイキングの効果である。ワイヤーシェイキングは速度差ベクトルの周期的変化を引き起こす(補遺2参照)。

SST による配向測定をマシン流れ方向連続して14 m 行った(図17)。SST の配向角は周期的に変化し、その周期はシェイキングの周期と一致した。この結果はワイヤーシェイキングによる速度差ベクトルの周期的な変化が繊維配向に影響を与えることを示している。

この測定例においては SST 配向角の絶対値の最大値は速度差ベクトルのそれより小さな値をとった。ワイヤーは、ワイヤー面側からフェルト面側までの紙層形成において数回揺られる。シェイキングマシン抄きの紙において、ワイヤー面側の繊維配向強度はフェル

Fig. 16 Main factors for the determination of fiber orientation.

Fig. 17 SST orientation angle for paper made with wire shaking. Measurement was performed in 14 m of the machine direction. (SST : Sonic Sheet Tester)

ト面側のそれより強配向である⁷⁾。そして、繊維配向角は厚さ方向ある程度の厚さまで周期的に変化している。SST 配向角は1周期以内のシェイキングの間に生成したワイヤー面側の平均的な繊維配向を主に反映したと考えられる。さらに、音速より算出する SST 配向角は紙の乾燥時の収縮異方性の影響も受ける。一般に SST 配向角は真の繊維配向角からマシン方向に引きずられた値をとることも原因の1つと考えられる。

なお、ワイヤーシェイキング未使用時の速度差ベクトルの効果は、SST 配向角のマシン流れ方向平均値に反映されている。

3.3 繊維配向の厚さ方向プロファイル

前節まで紙層形成時に速度差ベクトルが一定であるとして話を進めてきた。実際はワイヤー上の紙料速度はマシン流れ方向にそって変化している。おおまかにいうと、紙料速度は粘性やタービュレンスによる速度緩和に十分な時間経過後、ワイヤー速度と同じになるはずである。

さらに、ヘッドボックスから出たジェットの水速は鉛直方向について分布を持っている。一般には紙料ジェットの表層の水速が内部より遅い。紙料ジェット速度とワイヤー速度の間の速度差ベクトルは紙層形成中に変化しており、それは紙の繊維配向の厚さ方向におけるプロファイルの変動の原因となる。

ワイヤー上の紙料流れ速度の厚さ方向における分布をマシン流れ方向すべての地点で測定することは困難である。紙の厚さ方向における繊維配向プロファイル測定により、速度差ベクトルの変化や紙層形成時のタービュレンスに関する情報を知ることができると考えた。

図 18 は長網抄紙機による J/W 比変更時の紙の厚さ方向における繊維配向強度プロファイル例を示している。J/W=1.04 において、繊維配向強度を示す配向指数はワイヤー面で大きく、フェルト面に向かってだ

んだん小さくなっていった。一方、J/W=1.00 においては配向指数の挙動は逆であった。その中間の J/W 比では配向指数はワイヤー面から中央に向かって減少し、中央からフェルト面に向かって再び上昇した。

この結果を解釈するために図 19 のような紙料中の厚さ方向における速度分布を仮定してみた。さらに、紙層形成中にその形が不変であるとした。分割前の紙の繊維配向強度を示す MOR 値は J/W=1.01 で最小であった。これはこの J/W 比で厚さ方向平均の紙料速度がワイヤー速度と等しいことを示している。

紙料速度とワイヤー速度の差が大きくなれば繊維配向はより強配向になる。J/W=1.04 においてすべての紙層は押し側で形成され、紙料とワイヤーの速度差は上の紙層が形成されるにしたがい減少した。J/W=1.00 ではすべての紙層が引き側で形成され、紙料とワイヤーの速度差は上の層が形成されるにしたがい大きくなった。中間の J/W 比では下側の紙層が押し側で形成され、上側の紙層が引き側で形成された。中央の紙層は速度差の最も小さいときに形成された。以上、厚さ方向の繊維配向強度プロファイルはこの様に理解することができる。

押し引きの判定は、紙層形成中に紙料流れ角度の符号が不変であるならば、繊維配向角の符号を見れば良い。図 20 は繊維配向の厚さ方向プロファイルのマシン幅方向各位置でのプロット結果である。特異な例であるかもしれないが、紙層形成時に J/W 比が押しから引きに変化したことを示唆している。

以上の様に、抄紙機や抄紙条件の違いにより、紙の厚さ方向の繊維配向プロファイルは様々に変化するが、紙の面内繊維配向性の厚さ方向プロファイルを測定することにより、紙層形成中の速度差ベクトルに関する情報を得ることができるのである。

Fig. 18 Z-directional profiles of fiber orientation index for paper made by a Fourdrinier machine.

Fig. 19 Assumed model of the z-directional distribution of stock velocity. Broken lines show the relative position of wire speed at each jet wire ratio.

4. 結 論

様々なヘッドボックス条件下での紙料流れ速度を流速計システムにより測定した。エッジフローは紙料流れを内向きにし、サイドブリードは外開きにする。再循環量をより多くすると再循環側に流れが傾く。スライス開度プロファイルも紙料流れに影響を与える。

この紙料流れ挙動は紙の繊維配向性に反映される。繊維配向は J/W 比が1以外の領域では、紙料ジェット内に形成された繊維配向よりも、主に紙料とワイヤーの相対運動を表す速度差ベクトルにより決定される。

紙料速度とワイヤー速度の差ベクトルは紙層形成中

に変化し、その結果、面内の繊維配向性は厚さ方向で変化する。紙の繊維配向の厚さ方向プロファイルを測定することにより、紙層形成中の速度差ベクトルに関する情報を得ることができる。

様々な要因が絡み合って紙の繊維配向は決定される。今後は、ここで述べたアプローチをさらに発展させてその要因を詳細に調査し、繊維配向の決定メカニズムを明らかにしたい。

謝 辞

この報告は抄紙実験における長尾一志、岑畑和明両氏、流速計システムの製作における多々良保、遠藤誠一両氏、配向測定における西本美千代、長屋聡美両氏、流速測定における山陽国策パルプ(株)各工場の方々、さらには、報文作製における竹内伸夫、南里泰徳両氏の協力の賜物であります。お礼を申し上げます。

引用文献

- 1) Yamada, M., Takeuchi, N. and Senda, S., in 1985 Pulp and Paper Technology Conference, Japan Tappi and CPPA, Tokyo, 1985, pp. 67-74
- 2) Tatara, T., Abe, Y., Inadome, T. and Sakamoto, A., in 1992 Pulp and Paper Conference, Japan Tappi, Tokyo, 1992, pp. 82-85
- 3) Finger, E. R. and Majewski, Z. J., Tappi 37 (1954) : 5, 216-224.
- 4) Weissshuhn, E. and Dahl, H., Das Papier 40 (10 A) : 151-164 (1986)
- 5) Dahl, H., Holik, H. and Weissshuhn, E., Tappi

Fig. 20 Z-directional profile of fiber orientation in paper at each cross machine position.

- 71 (2) : 93-98 (1988)
- 6) Kallmes, O. J., Tappi 52 (3) : 482-485 (1969)
- 7) Abe, Y. and Sakamoto, A., Japan Tappi 45 (6) : 694-701 (1991)
- 8) Todoroki, H. and Abe, Y., 公開特許公報 (A) 平 4-113205
- 9) Watanabe, M., Sawa, Y. and Abe, Y., Appita 44 (3) : 205-208 (1991)
- 10) Reiner, L. and Wahren, D., Sv. Papperstidn. 74 (30) : 225-232 (1971)

【補遺 1】

まず, x 軸方向にシートを十分引張り, 次に静止摩擦係数 μ の物体を介して, シートに対して垂直方向から圧力 n を加え, x 軸方向の力を解放することを考える。力を緩めるとシートは縮み, 摩擦力とシートの張力が釣り合った所で平衡状態となる。その時のシートの長さを $2L$ として, 位置 x とそこから近いほうのシート端との間にあるシートが受ける最大静止摩擦力を $f(x)$ とすると, $f(x)$ は次式の様になる。ただし, B はシートの幅である。

$$f(x) = \mu B n (L - |x|) \quad \cdots \cdots (2)$$

さらに, シートのヤング率を E , 厚みを d とすると, 歪 $\varepsilon(x)$ は次式の様になる。

$$\varepsilon(x) = \frac{f(x)}{EBd} = \frac{\mu n}{Ed} (L - |x|) \quad \cdots \cdots (3)$$

また, 元のシートの長さを $2L_0$ とすると,

$$\begin{aligned} L - L_0 &= \int_0^L \varepsilon(x) dx = \int_0^L \frac{\mu n}{Ed} (L - |x|) dx \\ &= \frac{\mu n}{2Ed} L^2 \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

であり, L についての二次方程式を解くと,

$$L = 2L_0 / \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2\mu n}{Ed} L_0} \right) \quad \cdots \cdots (5)$$

となる。したがって, $\varepsilon(x)$ は次の様に求まる。

$$\varepsilon(x) = \frac{\mu n}{Ed} \left(2L_0 / \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2\mu n}{Ed} L_0} \right) - |x| \right) \quad \cdots \cdots (6)$$

紙が乾燥時に収縮を拘束されている場合は, 水分の減少に伴ってシートは引張り状態になる。したがって, シートは動かないが, シートの歪 $s(x)$ は上昇する。また, 水分減少に伴ないヤング率 E も上昇する。これらの結果より, シート内の応力 $Es(x)$ も上昇する。ここでは, x 方向をクロスマシン方向と考えているが, 仮に x 方向における乾燥速度に差がないとする

と, $Es(x)$ は一定値となる。

次に $y=f(x)$ と $y=Es(x)Bd$ を紙の乾燥過程において比較する。実際の紙の乾燥過程においては, 初期の張力 $Es(x)Bd$ は 0 である。そして, 乾燥に伴って, その値は大きくなる。端部の紙は乾燥の早い段階で, $Es(x)Bd$ が拘束力 $f(x)$ より大きくなるため, $Es(x)Bd$ が $f(x)$ に等しくなるまで収縮する。一方, それより内側の紙は $Es(x)Bd < f(x)$ であるので拘束されたままである。その領域は乾燥が進むにしたがって狭くなる。

この様に, 端部の紙は乾燥の早い段階で収縮を始め, 中央の紙は端部の紙より長時間拘束状態が続く。したがって, 乾燥収縮率のパターンは, 端部で大きく, 中央部で小さくなるのである。

実際のドライヤー内では, 乾燥速度は幅方向で一定ではなく, またフリーランでの水分蒸発もある。しかしながら, クロスマシン方向での乾燥収縮抑制は, ドライヤーキャンバス等による摩擦力以外ではなく, 上で述べたキャンバスによる乾燥収縮抑制が支配的であるといえる。

【補遺 2】

シェイキング条件はワイヤーを揺する回数である振数 (ν) とその振幅 (A : ストロークの半分) で規定される。クロスマシン方向に x 軸をマシン方向に y 軸をとり, それぞれの方向のワイヤーの動く速度を w_x, w_y とする。ワイヤーの動きは単振動と仮定し(7)式の様に表した。

$$x = A \sin(2\pi\nu t) \quad \cdots \cdots (7)$$

$$w_x = \frac{dx}{dt} = 2\pi\nu A \cos(2\pi\nu t) \quad \cdots \cdots (8)$$

ジェット速度を $\vec{v} = (v_x, v_y)$ として, 速度差ベクトル ($\Delta\vec{v}$) を求めると次の様になる。

$$v_x = |\vec{v}| \sin \theta \quad \cdots \cdots (9)$$

$$v_y = |\vec{v}| \cos \theta \quad \cdots \cdots (10)$$

(紙料流れ角度: θ , 紙料流れ速度: $|\dot{v}|$)

$$\begin{aligned} \Delta\vec{v} &= (w_x - v_x, w_y - v_y) \\ &= (2\pi\nu A \cos(2\pi\nu t) - |\dot{v}| \sin \theta, \\ &\quad w_y (1 - v_y/w_y)) \\ &\doteq (2\pi\nu A \cos(2\pi\nu t) - w_y \cdot J/W \cdot \sin \theta, \\ &\quad w_y (1 - J/W)) \quad \cdots \cdots (11) \end{aligned}$$

以上の様に, 速度差ベクトルはシェイキングと同周りで変動する。