

# 多層抄き板紙における異方性の研究

—多層抄き板紙の繊維配向が物性の異方性に与える影響—

北村 貴則 (大和板紙株式会社, tak@ecopaper.gr.jp)  
 伊藤 幹太 (大和板紙株式会社, ito@ecopaper.gr.jp)  
 寺村 卓 (大和板紙株式会社, teramura@ecopaper.gr.jp)  
 張 志遠 (大和板紙株式会社, edward.521@hotmail.com)  
 北井 啓介 (キタイ製作所, keisuke.kitai@kitai-mfg.co.jp)  
 鈴木 陽 (株式会社鈴木松風堂, akira2@shofudo.co.jp)  
 田中 則彰 (丸一興業株式会社, info@bolda.jp)  
 濱田 泰以 (京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科, hhamada@kit.ac.jp)

## The study of anisotropy on multilayer paperboards

Takanori Kitamura (Daiwa Itagami Co., Ltd., Japan)  
 Kanta Ito (Daiwa Itagami Co., Ltd., Japan)  
 Suguru Teramura (Daiwa Itagami Co., Ltd., Japan)  
 Zhiyuan Zhang (Daiwa Itagami Co., Ltd., Japan)  
 Keisuke Kitai (Kitai Seisakusyo Co., Ltd., Japan)  
 Akira Suzuki (Suzuki Shofudo Co., Ltd., Japan)  
 Noriaki Tanaka (Maruichi Corporation, Inc., Japan)  
 Hiroyuki Hamada (Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Japan)

### 要約

抄紙機によって製造される紙、板紙には縦目と横目が存在する。新聞紙やコピー用紙そしてパッケージなどに用いられる厚紙において、裂きやすい方向（縦目）と裂きにくい方向（横目）は抄紙機の進む（流れ）方向MD（Machine Direction）と抄紙機の幅方向TD（Transverse Direction）に対応する。本研究では、多層抄き板紙の縦目と横目における物性の測定とSEMによる多層抄き板紙各層での繊維配向の測定により、多層抄き板紙における異方性の確認および異方性の原因の解明を行った。また実用上の異方性の効用と欠点を加筆し、考察でも製造上と実用性の関連を記述した。

### キーワード

板紙, 異方性, 繊維配向, 多層, 破壊

### 1. 緒言

現在紙、板紙の生産量は約2,600万トン/年、その内板紙は約1,130万トン/年である。板紙の内訳は段ボール原紙が約920万トン/年、紙器用板紙が約160万トン/年、雑板紙が約50万トン/年である。板紙は元々2層以上の多層抄きが多いが、この中でも特に多層の紙器用板紙（おもに紙箱、書籍の表紙等）について研究する。

紙における繊維の方向性の違いは、手の感覚または強度試験等によって判別できる。例えば、紙を縦や横に曲げたとき、曲がりやすい方向を一般的に縦目、曲がりにくい方向を横目と呼ぶ。また紙を裂いたとき、裂けやすい方向が縦目、裂けにくい方向が横目となる。これは紙を抄紙機で抄く事によって、紙の繊維配向が機械の進行方向と平行になる（すべての繊維が平行ではない）ことが原因である。またその特性を活かし、製品の強度や製本、製函適正などを向上させることも可能であり、紙の目すなわち縦目、横目を選定することは重要である。

紙の繊維の強さを示す指標としての破壊強度の事例についてみると、Stenbergら (Stenberg, 2002) は、MD（抄紙機の進む方向 Machine Direction）の破壊強度がTD（抄紙機の幅方向 Transverse Direction）の2～3倍になり、ZDの約100倍に

なることを示した。厚さのせん断強度について、Allaouiら (Allaoui et al., 2009; Nygård et al., 2009; Nygård et al., 2010) は、ノッチのせん断強度から異なる厚さの強度を、またAllaouiら (2009) は紙内部の粘弾性影響と塑性破壊を調べている。Ericらは大異方性を評価できる連続モデルを考察し、発見した。そして紙外部のせん断塑性変形は繊維のずれと関連していることを明らかにした (Eric et al., 2015)。現状として、紙異方性に関する論文は多数存在するが、紙異方性のメカニズムを解析した論文は少ない。

紙器用板紙は主に木材パルプと古紙で構成されるが、本研究では古紙のみである。2015年の日本における古紙回収率は81.3%、利用率は64.3%であり、世界でもトップクラスである (経済産業省, 2015)。そこで本論文では、異なる古紙からなる三種類の多層抄き板紙の繊維配向を走査型電子顕微鏡 (SEM) で分析し、各層でのMDとTDでの引張り弾性率、強度の評価および破断面の比較から、多層抄き板紙における異方性の特徴を検討した。

### 2. 材料の準備と実験方法

#### 2.1 多層抄き板紙の製造方法

実験に使用した三種類の板紙a、b、cは、9層構造で各層において異なる古紙を使っている。古紙の種類として、菓子箱などのパッケージ、封筒の裁落古紙、段ボール古紙、新聞そしてチラシ古紙がある。それらの古紙を水と一緒にパル

パーという大きなミキサーに入れ、紙の繊維が細くなるまで攪拌させる。(パルパーでは16 m<sup>3</sup>の水に800 kgの古紙原料を投入(5%濃度)) 続いて、細くなった繊維を押し潰し、切りほぐして、その繊維をシート状に成形していく。

以下に三種類の板紙a、b、cの構成を示す。

- (a) 1～9層目：段ボール古紙(紙管原紙：茶色)
- (b) 1、2層目：封筒の裁落、3層目：パッケージ古紙、4～7層目：パッケージ・雑誌・段ボール・その他古紙、8層目：パッケージ古紙(クラフト：黄色)
- (c) 1、9層目：新聞・チラシ古紙、2～8層目：パッケージ・雑誌・段ボール・その他古紙(チップボール：ねずみ色)

図1で板紙の成形の原理を説明する。細くなった繊維がバットという槽に溜まり、その槽の中にシリンダーと呼ばれる長い円柱状の網が回転している。その網が細くなった繊維をすくい、緑色の線で示したフェルト状の毛布と接する箇所で繊維が毛布に移行し、シート状になって毛布に付着することで、次の工程に移っていく。同様に次の回転する網では、先ほど付着したシートの下に更にシートが付着し、層が重なっていく。このとき、シリンダーの回転速度に引っ張られて繊維が配向する。これを9回繰り返すことにより、9層の薄い紙が重なって1枚の厚い積層紙が出来上がる。シート状に成形した積層紙を乾燥させると板紙が出来上がる。

来上がる。

## 2.2 板紙の物性

板紙は多層材料であり、各層の異方性が重要となる。本研究では、板紙の各層の弾性率と引張強度を調べた。紙の弾性率の分析には、動的粘弾性分析(DMA)を用いた。試験片のサイズは30 mm×6 mm、各層の紙の厚さは0.1 mmから0.2 mm、振動周波数は0.1 Hz、常温で試験を行った。また試験片の力学的特性を検討するため、JIS K7017に基づき、静的引張試験を実施した。用いた試験機はインストロン万能試験機(Model:55R4206インストロン株式会社)であり、引張のクロスヘッドスピードを1.0 mm/minとし、引張の試験片の長さとは幅は200 mm×20 mmであった。

## 2.3 SEMによる繊維配向の観察

紙繊維配向の計算方法を図2に示す。紙の異方性を解析するために、紙の各層をSEM(150倍)で観察した。紙は複雑に絡み合った繊維で構成されることを示した。また、各層の画像を撮影し、画像処理ソフト(Photoshop)により組み合わせ(組み合わせ後の画像の大きさは約4mm<sup>2</sup>)、繊維の方向を識別できるように繊維をマークし、図を作成した。撮影画像では、太い繊維や細い繊維があるため、太さの違いを繊維の本数で表現した。(図2の点線)

さらに解析ソフト(ImageJ)を使って、図2の線図から方向

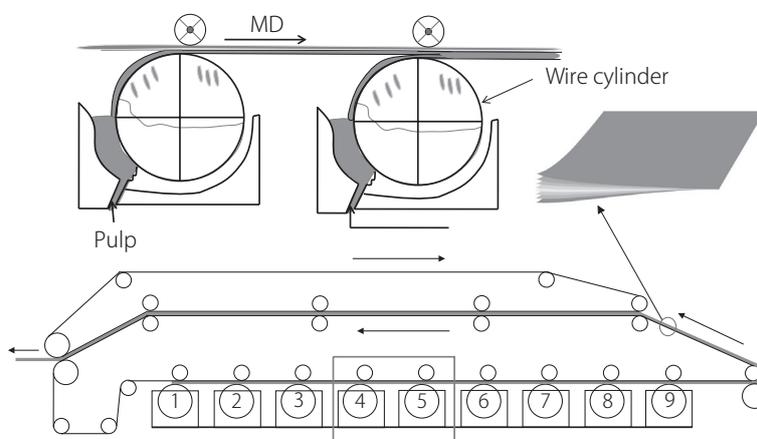


図1：多層抄き板紙の作り方

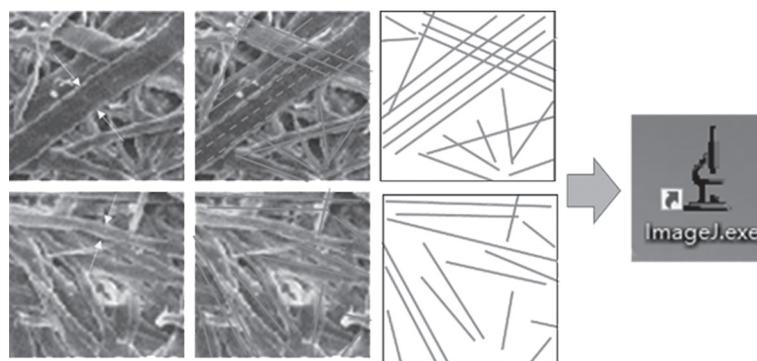


図2：紙繊維配向の計算

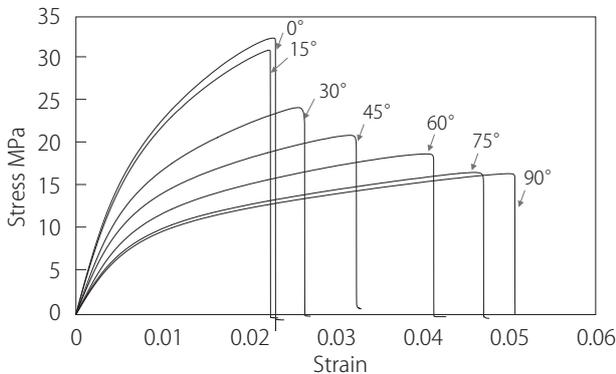
別の繊維本数を算出した。

### 3. 実験結果および考察

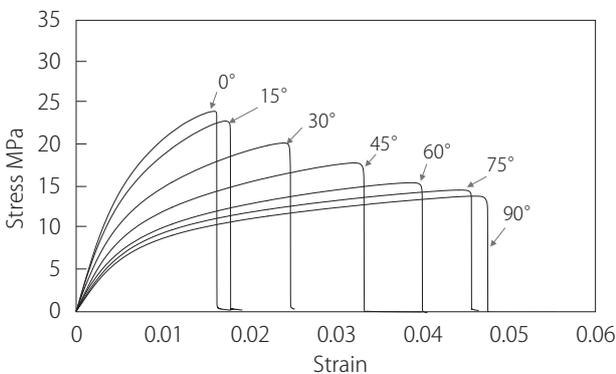
#### 3.1 紙の引張試験

(a)、(b)、(c)三種類の多層抄き板紙における引張方向別の引張特性を表す曲線を図3に示す。図3より、0度方向では強度が一番高いことが明らかにされた。90度方向では引張による破断ひずみが大きくなった。0～15度方向では材料物性の変化は小さいが、15度～75度方向では材料物性の変化は大きい。これは引張方向が0度より高くなるにつれて、紙を構成する繊維の変形が引張からせん断変形へと変化することが考えられる。

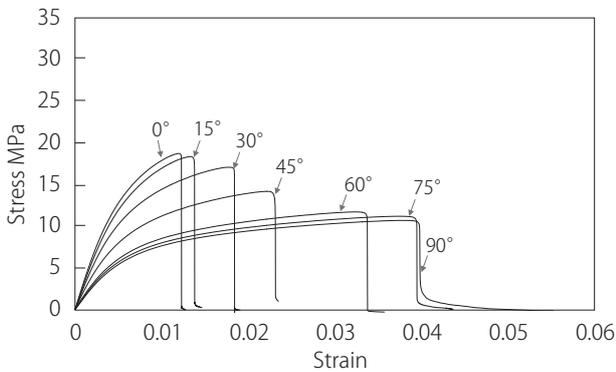
(a)、(b)、(c)三種類の多層抄き板紙の引張方向別弾性率および強度を図4に示す。図4より、弾性率と強度ともにa、b、



(a) ア紙



(b) イ紙



(c) ウ紙

図3：三種類多層抄き板紙の引張方向別応力-ひずみ曲線

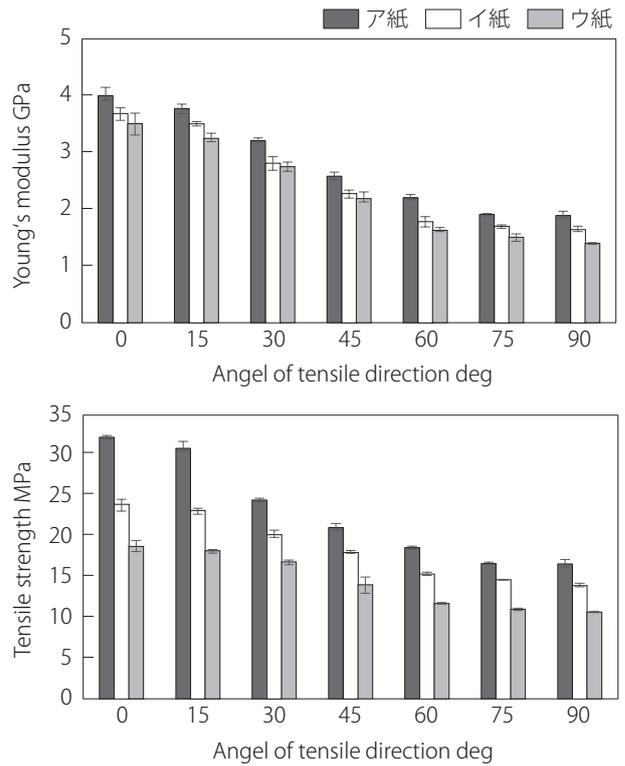


図4：三種類多層抄き板紙の各引張方向（MDからTD）における弾性率と強度

cの順に高いことが明らかにされた。紙の物性は繊維の配向および繊維の種類と関係があることが示された。同じ角度で比較すると、三種類紙の弾性率の差は小さいが、強度の差は大きい。これは紙を構成する繊維の種類の違いとの関連が考えられる。

#### 3.2 紙各層の引張

(a)、(b)、(c)三種類の多層抄き板紙各層における引張強度を図5に示す。各層毎で比較すると、多層板紙の場合と同様にMDとTDではMDの方が強く、種類によって板紙を構成する各層の材料が異なるため、各層の物性にも違いを確認でき、同じ原料でも層によって有意な差が存在する場合があった。

#### 3.3 多層抄き板紙各層の動的粘弾性分析（DMA）

三種類の多層抄き板紙各層の弾性率をDMAにより測定した結果を図6に示す。各層において異方性があり、TDよりMDでの弾性率の方が高いことが明らかにされた。よって、各層の繊維はMDに配向している傾向にあることが示された。引張強度同様各層の繊維の種類が異なるため、同じ層でも弾性率に有意な差があり、同じ原料でも有意な差を確認できる場合があった。

#### 3.4 紙各層の DMA

紙各層をSEMで観察し、約1,000本の繊維をマークし、繊維の本数をImageJで計算した結果を表1に示す。三種類の板紙各層ごとに6つの角度範囲に分けた。各層における6つ

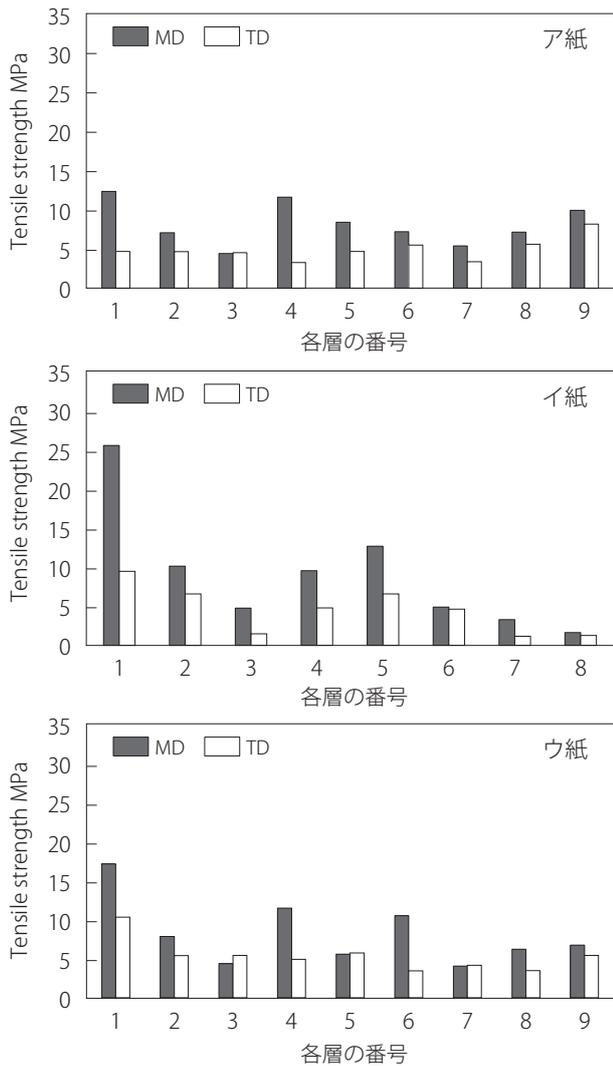


図5：三種類多層抄き板紙各層でのMDとTDにおける引張強度

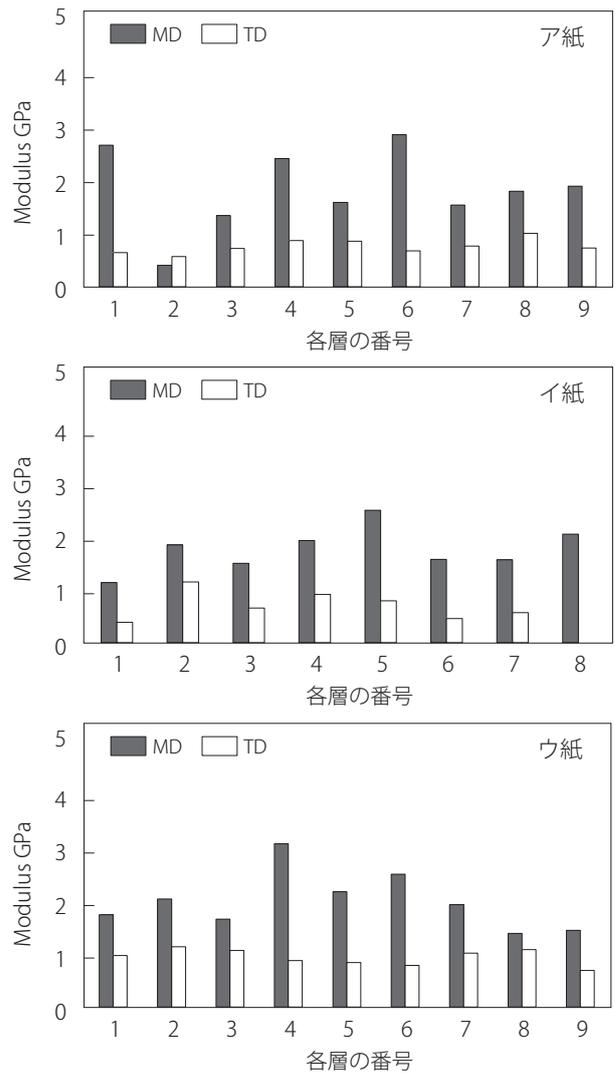


図6：三種類多層抄き板紙各層でのMDとTDにおける弾性率

の範囲毎に本数を計算した。これより、繊維は0度(MD方向)に分布が多いことが明らかになった。0度～30度の範囲で、全体の約50%の繊維が分布してる層が多いことが示された。これは多層板紙と各層紙の異方性の原因と考えられる。

### 3.5 SEMによる破断面の観察

引張試験をした1層の破断面をSEMで観察した。観察写真を図7に示す。

MD方向は繊維間の空間が少ないことから、繊維の引き抜けよりも繊維そのものの破壊が多いと考えられる。TD方向は繊維間の空間が大きく見えることから、繊維そのものの破壊よりも繊維同士が引き抜けたものが多いと考えられる。

### 3.6 紙異方性の検討

紙の異方性は紙の抄紙工程中に形成される。その理由を図8で説明する。円筒周りの水は円筒の回転方向に流れる。円筒に近いところで水の流れる速度が速く、円筒から遠いとこ

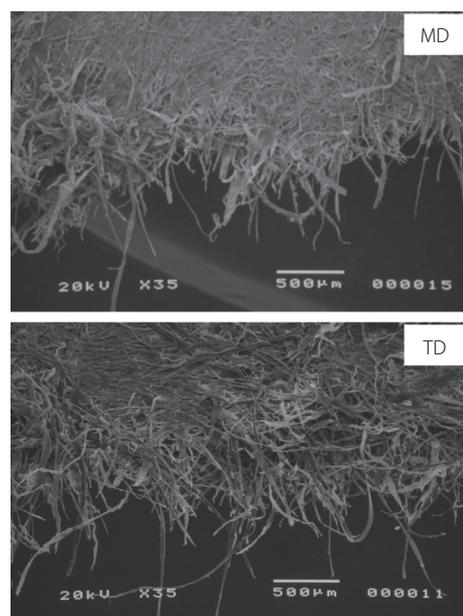


図7：引張破壊のSEM観察画像

表 1: 紙繊維配向の計算結果 (%)

	Angle	1st ply	2nd ply	3rd ply	4th ply	5th ply	6th ply	7th ply	8th ply	9th ply
a	0°-15°	25.8	18.8	29.7	39.8	31.2	24.7	27.7	17.2	30.8
	15°-30°	18.4	15.2	22.8	21.0	26.6	22.3	24.8	21.1	21.9
	30°-45°	16.3	16.5	12.9	14.7	18.6	19.5	16.1	19.7	20.0
	45°-60°	18.3	19.2	15.5	10.0	10.4	13.9	14.0	13.8	13.7
	60°-75°	11.0	16.4	10.0	6.1	6.6	11.1	8.8	14.2	6.4
	75°-90°	10.3	13.9	9.1	8.3	6.6	8.5	8.5	14.0	7.2
b	0°-15°	33.6	26.6	37.2	29.1	21.9	32.4	23.6	35.8	/
	15°-30°	23.2	27.0	26.7	22.1	21.1	28.2	20.7	22.4	/
	30°-45°	12.0	16.4	13.5	15.1	21.8	14.8	18.9	15.3	/
	45°-60°	13.8	10.9	8.7	12.0	14.0	9.9	12.2	11.7	/
	60°-75°	8.2	11.4	7.3	11.0	9.1	7.0	11.9	7.1	/
	75°-90°	9.2	7.6	6.6	10.7	12.1	7.8	12.7	7.7	/
c	0°-15°	26.5	31.9	26.7	22.8	20.9	15.2	27.3	30.6	29.4
	15°-30°	21.7	22.2	19.8	21.4	18.3	17.7	22.1	25.3	23.2
	30°-45°	18.4	14.7	16.1	18.2	14.8	20.2	19.3	12.7	15.1
	45°-60°	11.1	14.7	15.1	14.9	17.7	17.2	12.4	11.6	12.1
	60°-75°	12.7	10.4	11.2	14	18.0	18.3	10.6	11.9	11.9
	75°-90°	9.6	6.1	11.2	8.7	10.2	11.4	8.3	7.9	8.2

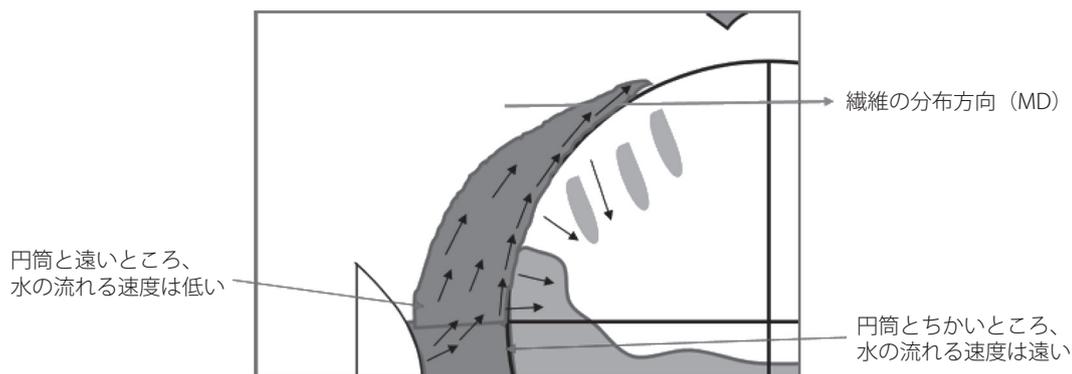


図 8: 水の流れる方向と紙繊維方向の関係

ろでは水の流れる速度が遅いため、水の流れる速度の差により繊維は水の流れる方向(MD)に並ぶ傾向にある。

#### 4. 結言

本研究では、板紙の各層の物性を測定し、異方性について検討した。異方性のメカニズムを解析するため、紙の繊維の配向を調べた。そして繊維配向と板紙の物性との関係をSEMによる結果において説明した。

- 紙各層での強度と弾性率はTDよりMDの方が高く、異方性が確認できた。
- 異方性の計算により、繊維はMDと近い角度に配向する傾向が高いことが明らかにされた。SEMの写真からMDとTDでの破壊が異なるため、繊維配向に違いがあることを確認できた。
- 紙繊維の配向は紙を作るとき、円筒周りの水の流れる速度

と関係があると考えられる。

- 層によって同じ原料でも強度及び弾性率に違いが見られた。

#### 引用文献

- Stenberg, N. (2002). On the out-of-plane mechanical behaviour of paper materials (Ph.D. thesis). Royal Institute of Technology.
- Nygårds, M., Fellers, C., and Östlund S. (2009). Development of the notched shear test. *Advance in Pulp and Paper Research*, 887-898.
- Nygårds, M. and Malnory J. (2010). Measuring the out-of-plane shear strength profiles in different paper qualities. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, Vol. 25, 366-371.
- Allaoui, S., Aboura, Z., and Benzeggagh, M. (2009). Phenomena governing uni-axial tensile behaviour of paperboard and

---

corrugated cardboard. *Composite Structure*, Vol. 87, 80-92.  
Eric, B., Mathias, W., Matti, R. and Johan, T. (2015) An anisotropic  
in-plane and out-of-plane elasto-plastic continuum model  
for paperboard. *Composite Structures*, Vol. 126, 184-195.  
経済産業省 (2015). 紙/パルプ統計. <http://www.meti.go.jp/>.

(受稿：2016年5月18日 受理：2016年8月22日)