
スタンパブルシート製造における補強用繊維配向制御技術

Method of Controlling In-Plane Orientation of Reinforcing Fiber in the Manufacture of Stampable Sheet with Paper Making Process

内田 祐一 (Yuichi Uchida) 吉川 文明 (Fumiaki Yoshikawa) 花谷 誠二 (Seiji Hanatani)

要旨：

抄紙法スタンパブルシートの補強用繊維の配向状態を抄紙工程において調節し、望みの品質のシートを得るための製造方法を、モデル設備を用いて実験的に検討した。原料液の吸引量分布、抄紙面の傾斜角、原料液の供給方向およびライン速度が、繊維配向の形成に強く影響した。特に、原料液速度のマシン方向成分とライン速度の比が、ランダムから高配向におよぶ広範な繊維配向の形成を支配するパラメータとして重要であることが示唆された。抄紙面上に原料液が充満しない場合、上記の比が大きいほど、繊維はマシン方向に配向化した。実験結果を基に、操業因子を適切に制御することで、実用上有用な高配向シートおよび反りのないシートを試作した。

Synopsis：

In order to obtain a desired in-plane orientation of reinforcing fiber in a stampable sheet manufactured with a paper making process, experiments were carried out using a model web making apparatus. Operating parameters, such as the distribution of drainage amount of slurry containing reinforcing fibers and thermoplastic resin particles, the tilted angle of the apparatus, direction of the slurry feeding, and the velocity of the moving meshbelt, were widely varied and examined. Most of the experimental results concerning the in-plane orientation were correlated to the ratio of the velocity of slurry to that of the meshbelt. As the velocity ratio increased, the fiber tended to orient parallel to the flow direction. The combinations of operating conditions for desired in-plane orientations were optimized on the basis of the present experimental results. Consequently, stampable sheets with unidirectional orientation and with no warpage, which are of practical importance in commercial manufacturing, were produced using the model web making apparatus.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

スタンパブルシート製造における 補強用繊維配向制御技術*

川崎製鉄技報
29 (1997) 4, 189-195

Method of Controlling In-Plane Orientation of Reinforcing Fiber in the Manufacture of Stampable Sheet with Paper Making Process



内田 祐一
Yuichi Uchida

技術研究所 化学研究
部門 主任研究員(掛
長)



吉川 文明
Fumiaki Yoshikawa

川鉄フェライト(株)
水島工場長・工博



花谷 誠二
Seiji Hanatani

化学事業部 樹脂部
主査(課長)

要旨

抄紙法スタンパブルシートの補強用繊維の配向状態を抄紙工程において調節し、望みの品質のシートを得るための製造方法を、モデル設備を用いて実験的に検討した。原料液の吸引量分布、抄紙面の傾斜角、原料液の供給方向およびライン速度が、繊維配向の形成に強く影響した。特に、原料液速度のマシン方向成分とライン速度の比が、ランダムから高配向におよぶ広範な繊維配向の形成を支配するパラメータとして重要であることが示唆された。抄紙面上に原料液が充満しない場合、上記の比が大きいほど、繊維はマシン方向に配向化した。実験結果を基に、操業因子を適切に制御することで、実用上有用な高配向シートおよび反りのないシートを試作した。

Synopsis:

In order to obtain a desired in-plane orientation of reinforcing fiber in a stampable sheet manufactured with a paper making process, experiments were carried out using a model web making apparatus. Operating parameters, such as the distribution of drainage amount of slurry containing reinforcing fibers and thermoplastic resin particles, the tilted angle of the apparatus, direction of the slurry feeding, and the velocity of the moving meshbelt, were widely varied and examined. Most of the experimental results concerning the in-plane orientation were correlated to the ratio of the velocity of slurry to that of the meshbelt. As the velocity ratio increased, the fiber tended to orient parallel to the flow direction. The combinations of operating conditions for desired in-plane orientations were optimized on the basis of the present experimental results. Consequently, stampable sheets with unidirectional orientation and with no warpage, which are of practical importance in commercial manufacturing, were produced using the model web making apparatus.

1 緒 言

スタンパブルシートは長い補強用繊維と熱可塑性樹脂からなる複合材料で、プレス機を用いた大型部品の成形に適するシート状の素材である。スタンパブルシートの製法は乾式法(ラミネート法)と湿式法(抄紙法)の2種類に大別される。乾式法は、連続繊維マットと熱可塑性樹脂シートを積層し、熱プレスしてシート化する技術である。一方の湿式法は製紙抄造技術を応用したもので、補強用繊維のチョップドストランドと熱可塑性樹脂粒子から不織布状の中間製品(ウェブ)を抄造し、これを熱プレスしてシートを得る技術である。川崎製鉄は住友化学工業(株)、伊藤忠商事(株)、タキロン(株)との共同出資で1990年2月にケーブラシート(株)を設立し、英国のArjo Wiggins社から抄紙法技術^{1,2)}を導入し、スタンパブルシート(商品名「KPシート」、「KPボード」)の製造と販売を行っている。

スタンパブルシートは軽量かつ高剛性、加えて成形性が良いという特徴を有し、自動車、土木、建築分野での用途展開が積極的に進められている。

スタンパブルシートの実用においては、用途に応じて力学特性や衝撃特性の方向性についての要求が異なる³⁾。たとえば、自動車のバンパービームのように特定方向に高い力学強度を必要とする部品から、一体成形の天井内装基材のように力学強度の方向性に偏りの小さいことを求められる部品まで、その要求は広範である。スタンパブルシートのような繊維強化複合材料において、補強用繊維の配向が、特性の方向性を支配する重要な因子であることが知られている^{4,5)}。抄紙法は、製造過程で補強用繊維の2次元方向の配向状態を制御することが原理的に可能なプロセスである。ここでいう2次元方向とは、シート厚み方向に垂直な面内で規定される方向であり、以後シート面内方向と称する。補強用繊維のシート面内方向の配向状態を制御できるということは、乾式法や、従来の射出成形法による繊維強化熱可塑性樹脂複合材の製造に比べて、有利な特徴の一つである。この特徴を活かして、特性値の方向性の少ないランダム配向品から、特定方向の強度を高めた高配向品までを自在に作り分け

* 平成9年8月25日原稿受付

ていく技術の開発は、お客様のさまざまな要求に応じていくための大きな鍵となる。

一方、スタンパブルシートのようなシート状素材の製造において、シートの反りという品質問題は極めて重要であり、製紙業界においても完全には解決されていない難しい問題である。反りは、シートの表裏の状態が異なることに起因する。この要因の一つとして、繊維配向が重要であることが指摘されており、適切な配向調節により、反りの問題を解消する技術が強く望まれている。

本報では、抄紙法スタンパブルシートの製造において、補強用繊維のシート面内方向の配向を制御する方法についての検討結果を述べる。繊維の配向形成過程に強く影響すると考えられる操業因子について、その影響をモデル抄紙装置によるウェブ試作実験により、系統的に調査した。得られた結果を利用して、実用上有益な高配向シートおよび反りのないシートの製造を、モデル抄紙装置において行った。

なお、本報の内容はすべてケーブラシート(株)との共同実験の成果に基づいている。

2 抄紙法スタンパブルシート製造における補強用繊維の配向制御指針

紙の場合、繊維配向は抄紙機の構造、あるいは抄紙条件の違いによってそれぞれ異なるものの、その決定要因として原料液とメッシュベルトの相対速度を挙げている⁶⁻¹⁰⁾。抄紙法スタンパブルシートの製造プロセスは、製紙抄造技術を応用したものではあるが、異なる要素も多々ある。ここで、当プロセスにおける補強用繊維の配向制御を考える上で、配慮すべき特徴について述べる。

抄紙法スタンパブルシートの製造工程の概要を Fig. 1 に示す^{11,12)}。この製造工程はウェブ抄紙部と熱プレス部とから構成される。

ウェブ抄紙部においては、まず攪拌機を備えた分散槽中で界面活性剤水溶液が攪拌され、発泡液となる。ここに補強用繊維のチョップドストランドと粉末、ペレットもしくはフレーク状の熱可塑性樹脂が投入され、繊維と樹脂が泡中に均一に分散した原料液が調製される。原料液は抄紙機に送られ、一般的な製紙抄造法と同様にメッシュベルトを介してろ過され、中間製品のウェブが調製される。ウェブは抄紙機から熱風乾燥機に送られ、乾燥される。乾燥後のウェブはリールに巻き取られる。

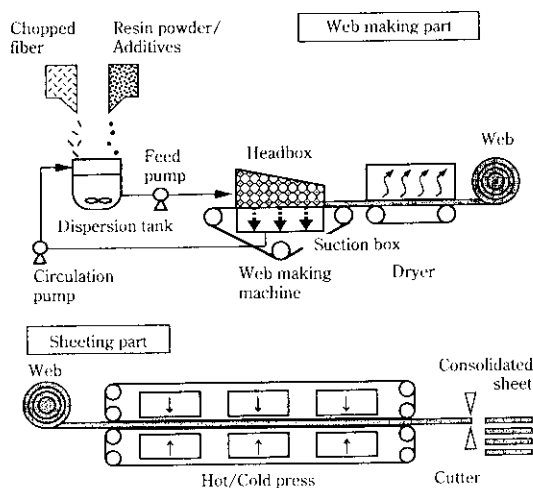


Fig. 1 Schematic illustration of the manufacturing process of stampable sheet with paper making method

熱プレス部でウェブはリールから繰り出され、加熱プレスにて加熱され、熱可塑性樹脂が溶融された後に圧縮される。この過程で補強用繊維間への熱可塑性樹脂の十分な含浸が図られる。続いて冷却プレスで冷却固化されて緻密なスタンパブルシートとなる。この状態の製品はコンソリシートと呼ばれる。通常の用途には、このコンソリシートが成形材料として使用される。

本プロセスは、原料液の媒体として泡液を用いる点に特徴がある。これにより、形状および比重が大きく異なる補強用繊維と熱可塑性樹脂粒子を泡間に保持し、両者を分離させることなく均一に輸送することが可能になる。一方、泡という不安定な媒体を用いるため、送液過程で極端に流速を低下させると、固体の分散した水溶液と泡沫とに分離してしまうという難点がある。また、繊維と樹脂粒子を含む原料液の粘度は水の 100 倍以上に達し、その流動は層流である。

また本プロセスにおいては、構造材に供し得るまでの高目付の製品を製造することもある。目付とはシートの単位面積当たりの重量である。このような要求を満たすため、下記のように一般の製紙とは異なる点がある。

- (1) ライン速度が原料液速度に比べてかなり低い。
- (2) 抄紙面のライン方向に広い範囲にわたってウェブが形成される。
- (3) 原料液中の固形分の濃度が高く、繊維相互の交絡が不可避^{13,14)}である。

当プロセスにおいて、まず原料液とメッシュベルトの相対速度の観点から、繊維の配向形成に影響を与える可能性のある操業因子として、特に原料液の供給方向が挙げられる。原料液の供給方向を変化させる操作は、抄紙面上の原料液速度のライン方向成分の値を変化させることが主眼である。具体的には、抄紙機の傾斜および原料液供給口の位置によって変わる。原料液の供給速度自体の変化は、前述のような泡液の分離によるウェブ品質の低下、操業の不安定化などの悪影響が懸念されるため¹⁵⁻¹⁷⁾、検討の対象から除いた。

また当プロセスでは、抄紙面のライン方向の広い範囲にわたって徐々にウェブが形成される。この点に着目し、原料液の吸引量分布をライン方向に変化させる操作も、配向形成に影響すると考えた。

これらの操業因子の影響を実験的に把握することが、本報で述べる実験の第一の目的である。そのために、モデル抄紙装置において上記因子を積極的に変化させてウェブ試作実験を行った。

また本報のもう一つの目的は、モデル実験で獲得する繊維配向の制御手段を駆使して、実用上有益である高配向シートと反りのないシートを試作することである。

3 実験

3.1 供試材

補強用繊維として長さ 13 mm、直径 10 μm のチョップドストランドのガラス繊維 (GF) を使用した。熱可塑性樹脂はポリプロピレン (PP) を使用した。界面活性剤はアルキルベンゼンスルホン酸ナトリウムを使用した。

3.2 原料液の調製

水に 0.07 質量%の界面活性剤を添加し、分散槽内で攪拌して液を約 3 倍に発泡させた。この中に、水に対してそれぞれ 1 質量%の GF と PP を投入し、分散させて原料液とした。GF と PP の質量比率は 4:6 とした。

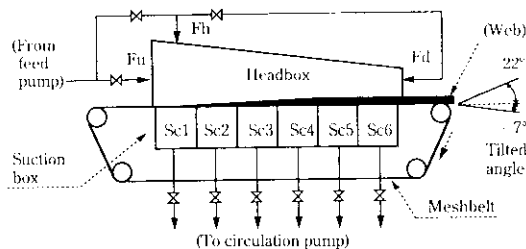


Fig. 2 Schematic illustration of the model web making apparatus

3.3 モデル抄紙装置

本実験に用いたモデル抄紙装置の概要を Fig. 2 に示す。本装置は、一方向に連続的に移動するエンドレスのメッシュベルトと、その裏面に接して配置された6室からなるサクシジョンボックスと、これらに上置するヘッドボックスから構成される、いわゆる長網型抄紙機に分類される。

原料液はヘッドボックスを通じて一定速度で移動するメッシュベルト上に送られる。サクシジョンボックス直上のメッシュベルト面（抄紙面）において、原料液中の泡液のみがサクシジョンボックスに吸引除去される。このときメッシュベルト上に補強用繊維と熱可塑性樹脂がシート状に抄き取られ（ろ過され）、ウェブが形成される。ヘッドボックスを出たウェブはリール状に巻き取られる。本報では、形成されたウェブをメッシュベルトによって搬送していく方向をマシン方向（MD）と称する。さらに、ある抄紙面におけるマシン方向の前方側を下流側、後方側を上流側と称する。

原料液の供給口は Fig. 2 に示すように、ヘッドボックス上の3ヶ所の位置に配設できる。本報では特にことわらない限り、原料液をヘッドボックス最上流側からマシン方向に供給するものとする。

サクシジョンボックスは第1～6室の6個の小室に分割され、各室とも独立に減圧にできる。各室には減圧度により泡液吸引量を制御するためのバルブが設置してある。各室で吸引された泡液は、配管を通して排出される。このときの配管内の泡液の液面高さから、各室の吸引量を求める。

ヘッドボックスは内部の原料液の流動状態の観察ができるように、上板部および側壁部がアクリル製である。

本設備は全体の鉛直方向への傾斜角を、 $+22^{\circ}$ ～ -7° の範囲で変えられる構造となっている。ここで傾斜角は、抄紙面が上向き（勾配を有する状態を正（仰角）、下向きを負（俯角）と定義する。

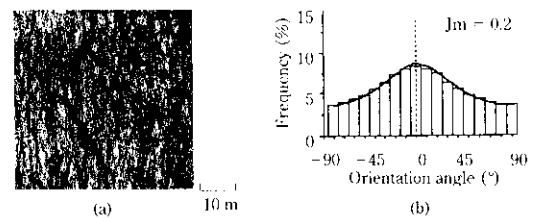
3.4 ウェブのシート化

所定量のウェブを積層し、 210°C で予熱してポリプロピレンを溶融させた後、 $1 \times 10^6 \text{ Pa}$ の圧力でプレスし、緻密なシートを得た。

3.5 ウェブおよびシートの分析方法

3.5.1 補強用繊維の配向の測定

ウェブの面内方向の補強用繊維の配向測定は、濃淡法を用いて行った^{18,19)}。これは、試料の軟X線透過撮影像の濃淡情報を基に、繊維配向角分布を求める方法である。スタンパブルシートウェブの軟X線透過撮影像の一例を Fig. 3 (a) に示す。この像を画像処理して、Fig. 3 (b) に示すような繊維配向角分布が求められる。なおこの方法では厚み方向への透過像を用いるため、得られる配向の情報は、2次元すなわちウェブ面内方向の成分である。


Fig. 3 (a) Soft X-ray photograph of the web (b) An example of orientation angle distribution and curve fitting for estimation of orientation index J_m

$$f(\theta) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\left(\frac{1-J_m}{1+J_m} \right) \cos^2 \theta + \left(\frac{1+J_m}{1-J_m} \right) \sin^2 \theta} \quad (1)$$

実測の配向角分布に、繊維材料の繊維配向角分布の表示式として知られる (1) 式を適用することにより、繊維配向状態を一義的に定量化する指標 J_m が求められる。 θ は基準軸に対する配向角である。 $J_m = 1$ は全ての繊維が基準軸方向に配列している状態、 $J_m = 0$ は完全ランダム配列の状態、 $J_m = -1$ は全繊維が基準軸に対し垂直方向に配列している状態を意味する。なお繊維配向角分布の基準軸 (0°) は、常に繊維の主配向方向である MD とした。

3.5.2 ウェブ積層構造の調査

抄紙法スタンパブルシートは薄層が積層した構造を取っている。各薄層は、抄紙工程における補強用繊維の堆積過程を時系列的に反映していると考えられる。本報においては、薄層ごとの繊維配向を観察し、配向形成の過程を知る手がかりとした。ウェブを 625°C で焼成して樹脂を除き、GF が相互に絡み合った組織を取り出した。この組織の表面から順に GF の薄層をはく離して、繊維配向状態の観察を行った。

3.5.3 シートの反り量の測定

シートを 200 mm 角に裁断して試験材とした。この試験材を水平板上に置いて片端を押さえ、他方の端の浮き上がった高さを測定した。この操作を4辺すべてについて行い、最も大きい値をそのシートの反り量とした。

3.5.4 シートの力学特性の測定

シートの力学特性を曲げ試験 (JIS K7055)、引張試験 (JIS K7054)、圧縮試験 (JIS K7056) およびノッチ付きアイゾット衝撃試験 (JIS K7110) によって評価した。

4 結 果

本報で操作した因子は、抄紙面の傾斜角、原料液の供給方向、メッシュベルトの進行速度（ライン速度）および泡液の吸引量分布である。特に原料液とメッシュベルトの速度について、ヘッドボックスへの供給直後の原料液の速度のマシン方向成分（原料液初速）に対する、ライン速度の比による表記を採用した。

4.1 吸引量分布の影響

泡液の吸引量の分布が Table 1 に記載の条件で、ウェブの試作を行った。抄紙面の傾斜角および原料液初速とライン速度の比は一定にした。得られたウェブの配向度 J_m を Table 1 に併せて示す。サクシジョンボックス第1室での吸引量が小さいときほど、配向度は高くなることわかれる。

得られたウェブを焼成して GF 組織を取り出し、薄層にはく離して観察した。Photo 1 に、異なる吸引量分布において製造された 2

Table 1 Effect of distribution of drainage amount on fiber orientation

Distribution of drainage amount (vol%)						Jm
Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	
70	23	4	2	1	0	0.25
40	33	18	7	2	0	0.29
16	20	26	32	5	1	0.34
7	15	23	42	10	1	0.39

Tilted angle of the web making apparatus: 0°

Ratio of inlet velocity of slurry to that of meshbelt: 36

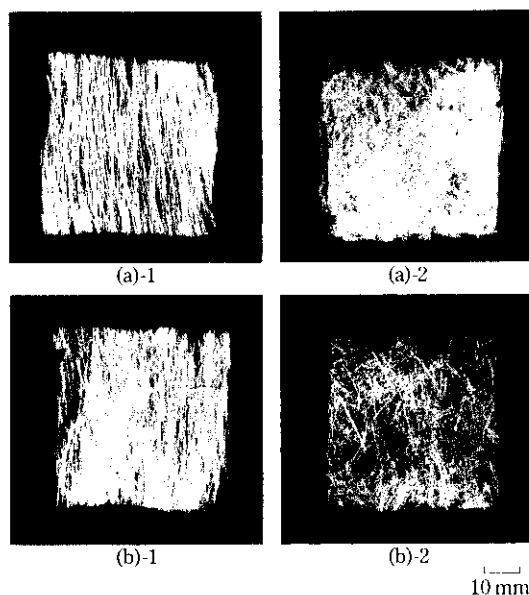


Photo 1 Thin GF layers peeled off from the web (a) Manufactured under the condition that drainage amount of the foam is large at the 1st suction box (1; upper layer 2: lower layer) (b) Manufactured under the condition that drainage amount of the foam is small at the 1st suction box (1: upper layer 2: lower layer)

種類のウェブを薄層にはく離した例を示す。抄紙時のウェブ上面側の層は、おおむね各層内で GF が MD に主配向していた。他方、抄紙時にメッシュベルトに接していたウェブ下側（ワイヤ面）の層の繊維の配向状態は、抄紙時の吸引条件によって違いが認められた。第 1 室での吸引量が大い条件では、GF が強く絡み合い、配向の低い層が認められた。一方、第 1 室での吸引量が小さい条件では、そのような層は観察されなかった。

4.2 抄紙面の傾斜角の影響

抄紙面の傾斜角を、22° から -7° の間で変化させてウェブを試作した。原料液初速とライン速度の比および吸引量分布は一定にした。得られたウェブの配向度 Jm を Fig. 4 に示す。傾斜角を低くするほど、配向度の高くなる傾向が観察された。

またアクリル製のヘッドボックスの側面および上面から、内部の原料液の流動状況を観察した。その様子を Fig. 4 に併せて模式的に示す。ヘッドボックスを上向きに傾斜させた場合（傾斜角 > 0°）は、抄紙面上流部では原料液の速い流れが認められたものの、原料液の到達する最下流部付近では、原料液が失速して緩やかに渦を巻いていた。一方ヘッドボックスを水平ないし下向きに設置した場合（傾斜角 ≤ 0°）には、そのような渦は観察されず、原料液の到達する全長にわたってスムーズな速い流れが保たれていた。

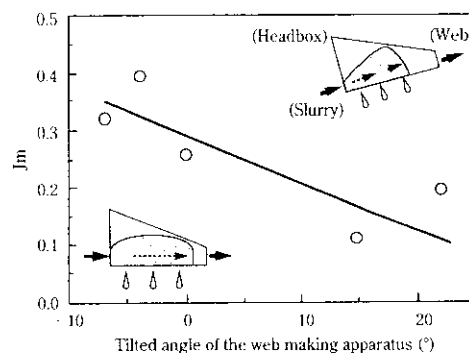


Fig. 4 Effect of the tilted angle of the web making apparatus on fiber orientation

Table 2 Effect of feed location of slurry on fiber orientation

Feeding position of slurry	Ratio	Jm
Upstream side (Fu)	30	0.25
Upper side (Fh)	0	0.10
Downstream side (Fd)	25	0.05

Tilted angle of the web making apparatus: 0°

Distribution of drainage amount: 70:23:4:2:1:0 (vol%)

Ratio: The ratio of inlet velocity of slurry to that of meshbelt

4.3 原料液供給方向の影響

原料液の供給口 1 の位置を移動させて、原料液初速を広範に変える実験を行った。すなわち、原料液を抄紙面の最上流部に向けて、サクシオンボックスの第 1 室の直上から垂直に供給した条件 (Fu)、抄紙面の最も上流側から供給した条件 (Fu)、抄紙面の最も下流側から供給した条件 (Fd) で、それぞれウェブの試作を行った（供給口位置を Fig. 2 に示す）。ライン速度、抄紙面傾斜角および泡液吸引量分布は一定にした。得られたウェブの配向度 Jm を Table 2 に示す。なお、条件 Fh では、原料液初速は 0 と考えた。また条件 Fd では、原料液を MD と反対に供給するため、初速は負の値とした。

供給位置が Fu, Fh, Fd と下流側になり、速度比が正から負になるにしたがい、Table 2 に示すようにウェブの繊維配向度は低くなった。特に条件 Fd では、ランダム配向のウェブを得ることができた。

ヘッドボックス内では、供給方向が Fu の場合は原料液が滞留することなく流動し、供給条件が Fh, Fd の場合は原料液が充満している様子が観察された。

4.4 ライン速度の影響

ライン速度を変化させて、原料液初速とライン速度の比を変える実験を行った。

まず抄紙面の傾斜角を 0° に設定し、ライン速度を変化させてウェブを試作した。原料液のヘッドボックスへの供給速度および泡液の吸引量分布は一定にした。得られたウェブの配向度 Jm を、原料液初速とライン速度の比に対して Fig. 5 に示す。速度比の大きい、すなわちライン速度が小さいほど、配向度が高くなった。ヘッドボックス内部では、ライン速度の小さいほど、原料液流がスムーズに抄紙面の下流側まで到達している様子が観察された。

一方、抄紙面の傾斜角を 20° に設定し、ライン速度を変化させてウェブを試作した。原料液のヘッドボックスへの供給速度および泡

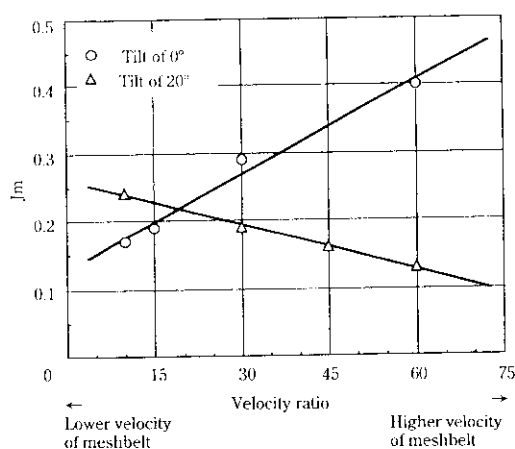


Fig. 5 Effect of the ratio of the inlet velocity of the slurry to that of the meshbelt on fiber orientation

液の吸引量分布は一定にした。得られたウェブの配向度 J_m を、上と同様に Fig. 5 に示す。この場合は速度比が小さい、すなわちライン速度の大きいほど、配向度が高くなる傾向が認められた。

4.5 高配向シートの試作実験

前節までの結果から、補強用繊維の配向を高める条件を総合して、高配向シートの試作を行った。操業の要点は以下の通りとした。

- (1) ウェブ下部に低配向層を発生させない吸引量分布
- (2) 傾斜角の低下により形成される、抄紙面下流にわたる原料液の層状流動
- (3) 原料液初速とライン速度の比の増大

これらにより、配向度 J_m が 0.43 の高配向ウェブを得た。このウェブをシート化し、力学特性を測定した。結果を、従来の高強度スタンパブルシートのカatalog値と比較して Table 3 に示す。非常に高い特性を発揮するシートであることがわかる。

4.6 反り抑制実験

シートの反り低減を目的として、ライン速度および吸引流量分布を変化させて、ウェブの試作を行った。抄紙面の傾斜角は 20° に設定した。原料液初速とライン速度の比、および泡液の吸引量分布の設定は Table 4 に記載した。

ウェブをシート化し、反り量を測定した結果を Table 4 に示す。

Table 3 Mechanical properties of stampable sheets

	Sheet by this work	Stampable sheet 1 (wet process)	Stampable sheet 2 (dry process)
Glass fiber content (mass%)	40	40	45
Tensile strength (MPa)	200	150	—
Flexural strength (MPa)	300	200	220
Compressive strength (MPa)	170	120	—
Izod strength (kJ/m ²)	100	70	140

吸引量分布が同じ条件では、速度比の小さいほど、試験材の反り量は小さくなった。また速度比が同じ条件では、サクシオンボックス第1室の吸引量が小さいほど、試験材の反り量は小さくなった。

次いでウェブを焼成し、上下に2分割して配向度 J_m を求めた。結果を Table 4 に併せて示す。速度比およびサクシオンボックス第1室の吸引量が小さいほど、上下の J_m の差も小さかった。

反り量の最小値は、200 mm 角のサンプルサイズのシートで 2 mm であった。FEM を用いて自重を考慮した板変形の解析により、このシートの 1 m 角程度の製品サイズにおける反り量は、実用製品として問題にならないレベルであることが確認された。すなわち反りのないシートと見なすことができる。

5 考 察

5.1 抄紙極初期における繊維配向の形成

ウェブ焼成後の GF 組織のはく離観察結果から、ウェブの配向形成に吸引量分布が強く影響することが示唆された。サクシオンボックス第1室での吸引量が大いほど、抄紙初期に形成されるウェブ下面側に配向度の低い層が発生していた。これらの結果を基に、Fig. 6 に模式的に示すようにウェブの堆積機構を推定した。

抄紙面の最上流部には、絶えずウェブの堆積していないメッシュベルト面（バージン面）が繰り出される。バージン面は吸引抵抗が低いため、ここで原料液は急激な吸引を受ける。この時、高濃度の原料液中の GF はメッシュベルトに押しつけられ、強く絡み合うと

Table 4 Effect of distribution of drainage amount on fiber orientation and warpage of sheets

	Distribution of drainage amount (vol%)						Velocity ratio	J_m		Warpage (mm)
	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6		surface side	reverse side	
A	70	23	4	2	1	0	60	0.29	-0.03	19
	70	23	4	2	1	0	45	0.31	0.04	18
	70	23	4	2	1	0	30	0.34	0.09	11
	70	23	4	2	1	0	10	0.35	0.15	10
B	40	33	18	7	2	0	60	0.24	-0.03	11
	40	33	18	7	2	0	45	0.25	0.06	10
	40	33	18	7	2	0	30	0.27	0.10	9
	40	33	18	7	2	0	10	0.34	0.21	7
C	16	20	26	32	5	1	60	0.20	0.05	8
	16	20	26	32	5	1	45	0.20	0.12	7
	16	20	26	32	5	1	30	0.21	0.16	5
	16	20	26	32	5	1	10	0.25	0.24	2

Tilted angle of the web making apparatus: 20°

Velocity ratio: The ratio of inlet velocity of slurry to that of meshbelt

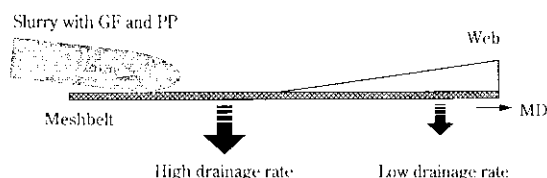


Fig. 6 The schematic illustration of web formation in the early stage

推定される。この GF 相互の絡み合いのため、GF はバージン面近傍においては流れに沿って配向することができず、配向度の低い層が形成される。一方、原料液の一部は積層途上のウェブに向かって流動していく。ある程度ウェブの形成した抄紙面では、ウェブ自体が吸引抵抗体になり、急激な吸引を妨げる。そのため強い絡み合いの構造は発生せず、GF は流れ方向と平行に堆積する。

このように、ウェブ形成の極初期における原料液の急激な吸引が、ウェブ下側の低配向層の形成、並びに表裏の不均一化を引き起こすと考えられる。したがって、繊維を高配向化するためには、上述の急激な吸引を緩やかにして、低配向層の発生を阻止することが有効である。また、反りに関しても、同様の考えから、低配向層発生の阻止による表裏の配向差の解消が有効といえる。

5.2 液速度とライン速度の比による繊維配向の形成

2 章で述べたように、製紙における繊維配向の決定要因として、原料液とメッシュベルトの相対速度が重要とされている。換言すれば、原料液速度およびベルト速度（ライン速度）により生じるせん断場で、繊維の配向状態が形成されると説明される。現象的には、液速度とライン速度の比が大きいと、繊維に作用するせん断力が大きくなり、繊維は液流れ方向に強く配向する。逆に、上述の速度比が小さいと、繊維を配向化する力は弱い。本報での実験において得られたウェブの配向状態についても、この速度比の見地からの定性的な考察を試みた。なお本実験においては、メッシュベルトの極近傍の液流速に関する情報は得られていない。したがって、ここでは速度比の定義に前述のように原料液初速を採用した。

まず、抄紙面の傾斜角を変える操作は、原料液に加わる重力の影響を変えることと等価である。ヘッドボックス内に供給された原料液は、初めは流速が高く、ライン速度との比が大きいため、ウェブ形成の前期（極初期を除く）においては、繊維は MD に強く配向する。抄紙面の傾斜角が低い場合、原料液は失速しにくく、Fig. 4 のように滞留することなく下流までスムーズに到達する。つまり、せん断場が広範囲にわたるため、繊維は最後まで MD に向けたまま堆積できる。これにより全体的に高配向なウェブが形成される。

ところが抄紙面を上向きに傾斜させた条件では、粘稠な原料液は重力および吸引の影響を受けて、徐々に減速する。原料液の到達する最下流部付近では、流れが停滞しており、ウェブ形成の終盤においては、液速度とライン速度の比はかなり小さいと推測される。したがってウェブ全体の配向度はそれほど高くならないと考えられる。

次に原料液の供給方向を変える操作は、原料液速度とライン速度のうち、原料液の速度のマシン方向成分を変えるための手段である。供給位置が Fu、Fh、Fd と下流側になり、速度比が正から負になるにしたがい、ウェブの繊維配向度は低くなった。この結果は、前述の順にせん断場が弱くなり、繊維の MD 配向度が抑制されたためと考えられる。Fh では、ヘッドボックス内に原料液が充満している様子が観察されたように、サクシオンボックス第 1 室のみでウェブ

が形成されたとはいえず、第 2 室以降でも吸引が行われている。したがって抄紙面上ではわずかながら下流側に向けての液流れが発生していると考えられる。これにより、MD 配向を有するウェブが生成する。Fd では、MD への流動はほぼ抑制されていたと推定される。したがって得られたウェブは、ランダム配向に近くなったと考えてよい。

最後に、原料液速度とライン速度の比を、ライン速度の操作によって変えた実験では、抄紙面の傾斜によって異なる結果が得られた。抄紙面が水平の場合、原料液は抄紙面下流側まで滞留することなく屑状に到達する。このような状況ではライン速度の低いほど、液速度とライン速度の比は大きくなる。これにより、繊維の MD への配向化が促進され、配向度が增大する。一方抄紙面の傾斜角が仰角で、抄紙面上に原料液が充満している条件では、逆の傾向が観測された。すなわちライン速度の高いほど、液速度とライン速度の比が小さくなるにも関わらず、繊維配向度は大きかった。この結果は、原料液初速とライン速度の比のみでは説明できない。充満した原料液内に流入した原料液の初速が急激に減衰し、メッシュベルト極近傍において、ライン速度が液速度を上回るような流動場が発生していると推定される。本報の実験において、抄紙面上の各部位の流速を測定していない。そのため、原料液が充満するような条件下での配向形成の機構を明らかにすることができない。これらの結果をより詳細に検討するには、局所的な流速に関する情報が必要であろう²⁰⁾。

5.3 配向制御手段の応用

各種操業因子の操作で得られた知見を、実用的な特性である高配向化とシートの反り解消に応用すべく実験を行い、所期の成果を得た。前者については、4.4 節に挙げたような、高配向化に寄与する操作因子を抽出した。特筆すべき点は、大幅な設備改造なしに高配向化が実現可能になったことである。後者の反りについては、次に補足説明を加える。

スタンパブルシートのような繊維強化熱可塑性樹脂複合材料において、シートの反りは、シートが固化する際の表裏の熱収縮（熱膨張係数）の差に起因する。この熱収縮の差を生み出す要因として、補強用繊維の配向、繊維と樹脂の比率、繊維間への樹脂の含浸度合いなどが挙げられる。本報で述べた結果は、純粋に補強用繊維の配向調節によるものであり、繊維と樹脂の比率や樹脂の含浸度合いが影響していないことを別途確認している。

繊維の配向制御によるシート反りの解消は、シート表裏（上層と下層）の繊維配向度の一致により達成される。Fig. 7 にシートの反り量と上下配向差 ΔJ_m の相関を示したが、 ΔJ_m の小さいほど、反

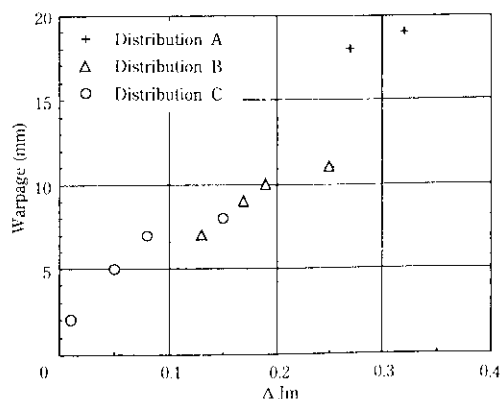


Fig. 7 Relationship between warpage of the sheets and ΔJ_m

り量の低下する様子がよくわかる。反りの大きいシートは、上層が高配向、下層が低配向という構造をとる。

本報では、吸引量分布とライン速度の制御により、反りの解消を図った。サクションボックスの第1室での吸引量を低くすることとライン速度を上昇させることという2つの手段を組み合わせで、ウェブ下部の低配向層の配向度を高めるという方針で、ウェブの製造を行った。これにより、実用上問題ないレベルまで反りを低下させることができた。

6 結 言

モデル抄紙設備によるスタンパブルシートのウェブの試作実験を

行い、以下の結果を得た。

- (1) 原料液の吸引量分布が、ウェブ下側の層の繊維配向形成に影響する。ウェブが形成し始める部分における吸引量が大きいと、繊維配向度は低くなる。
- (2) 原料液速度とライン速度の比が、ウェブの繊維配向度に強く影響する。抄紙面上に原料液が充満しない場合、原料液速度とライン速度の比が大きいほど、繊維はマシン方向に配向化する。
- (3) ウェブ面内方向の繊維配向を調節するための、適切な操業因子の制御指針を得たことにより、高配向シートおよび反りのないシートの製造が可能になった。

参 考 文 献

- 1) 竹原亜生、杉辺英孝：川崎製鉄技報，**24**(1992)2, 102
- 2) 吉武裕幸、西村 治、瀬 宏一、荒木 豊、久保秀穂：プラスチックスエージ，**42**(1996)9, 124
- 3) 的場 哲：日本複合材料学会誌，**19**(1993)1, 3
- 4) D. Hull：「複合材料入門」，(1982)，[培風館]
- 5) L. Nielsen：「高分子と複合材料の力学的性質」，(1976)，[化学同人]
- 6) 阿部裕司、坂本 祥：紙パルプ技術協会誌，**45**(1991)6, 64
- 7) 阿部裕司、轟 英伸、岡崎 和、稲留太治、坂本 祥：紙パルプ技術協会誌，**47**(1993)7, 17
- 8) 江口 晃、末岡靖裕、倉ヶ崎六夫、牧野哲夫：紙パルプ技術協会誌，**47**(1993)3, 76
- 9) 江口 晃、牧野哲夫、藤田得生、田島俊美：紙パルプ技術協会誌，**47**(1993)7, 77
- 10) 江口 晃、田島俊美、藤田得生、牧野哲夫：紙パルプ技術協会誌，**47**(1993)11, 79
- 11) ウィギンス・ティープ・リサーチ・アンド・デベロップメント・リミテッド：特開昭 49-13403
- 12) ザ・ウィギンス・ティープ・グループ・リミテッド：特開昭 60-158227
- 13) 横川 明、鈴木基光、清水 徹：日本機械学会論文集（B 編），**50**(1984)457, 2104
- 14) 清水 徹、横川 明、鈴木基光、中村育雄：日本機械学会論文集（B 編），**51**(1985)469, 2908
- 15) 村井 操、中西 篤：「製紙工学」，(1964)，[工学図書]
- 16) 井上 聡、藤田得夫、坂本一秀、久野広明、岩田 弘：三菱重工技報，**28**(1991)4, 336
- 17) 岩田 弘、蓮池牧雄、足立武司、坂東貴司、坂本一秀：三菱重工技報，**29**(1992)6, 537
- 18) 矢口 仁、北条英典、鬼海英夫、玉川規一、越本 勝：塑性加工連合講演会要旨集，**39**(1988)，259
- 19) 矢口 仁、北条英典、鬼海英夫、玉川規一、越本 勝：塑性加工連合講演会要旨集，**39**(1988)，263
- 20) 清水 徹、和田 清：紙パルプ技術協会誌，**47**(1993)1, 102