紙 の 地 合 評 価

繊維集合構造特性化へのアプローチ

京都大学農学部 蓮 池 牧 雄

Formation Analysis of Paper

—An Approach to the Characterization of Fiber Flocs—

Makio Hasuike

Faculty of Agriculture, Kyoto University

This review article covers the evaluating methods of the formation with a special reference to the structure of fiber flocs.

Soft x-ray imaging can be used for the analysis of both macro-scale floc structure and micro-scale network structure on mass basis.

For describing the floc structure, the mass co-occurrence matrix parameters, indicatives of the intensity and size of flocs, are suitable.

The simultaneous measurements of the local grammage and the network anisotropy in areas smaller than the floc size reveal the characteristics of the variations of the network structure in machine-made paper.

Keywords : Formation, Floc structure, Network structure, Soft x-ray, Anisotropy, Local grammage, Co-occurrence matrix, β -ray, Spectral analysis, Mass absorption coefficient, MD/CD ratio, Tensile index, Tensile stiffness index, Machine-made paper, Sensory evaluation, Visual ranking, Formation index, Image analysis

製紙に携わる技術者・研究者が紙を手にした時、よくそれを透かして見るが、それは長年紙に係わっている者の習性であり、その行為によって、紙中における繊維の分布・集合の状態を判断しようとする為である。紙の不均一性の尺度である地合は、定性的にはこのようにして評価される。このことは地合の良否が紙の外見的品位に直接関係することを意味する。従って、紙の生産・流通の現場では地合の管理に細心の注意が払われ、経験豊かな技術者の視覚検査によって地合評価が行われる一方、比較参照のための定量的なデータを蓄積するため、各種の地合測定装置による計測が行われている。しかし、これまで視覚検査と地合測定装置による地合の判定結果が一致しなかったり、判定結果と紙の品質が対応しなかったりするケースが度々起こり、地合評価の方法、地合と紙の品質との関係が製紙技術者の間で問題にされる。その主な原因としては、

地合ムラが人間の目の解像力より大きいテクスチャーを問題にしており、繊維の分布・集合の状態の的確な指標となり得る物理量が明確でないことによると考えられる。そこで、地合を紙の2次元的構造の一側面、すなわち紙の局所的質量の不均一性に限定して、その変動を的確に評価する方法について、さらに地合の紙の力学的性質に対する影響について、最近の研究を整理してみることにする。ただし、紙中における繊維の分布・集合の状態は、質量変動のみによって評価できるものではなく、多面的な解析が必要であることは言うまでもない。

1. 地合に関与するシート構造変動量とその検出法

紙は基本的には、多数の繊維が二次元平面に分布して、相互に連結しあって形成されたネットワークが多

層重畳した構造であり、紙の微小面積あたりの質量の均一性は構成ユニットである繊維の質量と寸法、そしてそれら繊維の二次元分布状態によって定まる。繊維が二次元的にランダムに分布している紙の質量の変動特性は、個々の繊維の質量と寸法そして検出スポットの大きさによって表わすことができる^{1),2)}。ただし、実際の抄紙は繊維が懸濁液の中で自由回転できる限界濃度よりはるかに高い濃度で行われており、繊維が相互にもつれ、絡み合って大小のフロックを形成する可能性のもとで紙層が形成される。また、抄紙機ワイヤーの走行速度とスライスジェット速度に差がある場合にはワイヤー走行方向に配向した繊維ネットワークが形成される。このような機械抄き紙の質量変動特性を評価する際には、目的にあった質量の検出方法・変動特性の解析方法を用いる必要がある。抄紙の方式や抄紙用助剤などの地合に対する影響、諸性質のパラツキと地合の関係などを調べるには、繊維フロックやワイヤーマークなどの強さ・寸法などの繊維集合構造を評価することが有効であり、ワイヤー間隔より小さい、人間の目の分解能程度の領域の質量の変動を検出・解析する必要がある(図1 b)。また、原料パルプの異なる紙を対象に、その物理的性質と地合の関係を調べるには、紙を構成する繊維の特性に基づく質量変動や繊維ネットワークの粗密の程度、配向の程度などを評価することが有効であり、そのためには繊維幅より小さい

い微小領域の質量の変動を検出・解析する必要がある(図1 c)。

1.1 光学地合

これまで用いられてきた地合測定装置を模式的に図2³⁾に示すが、透明なステージあるいはシリンダーに固定した紙の一方から細く絞った光をあて、紙を移動あるいは回転させながら透過する光の強度を検出する方式が採られている。このような紙を透過する光の強度の変動を検出・解析する方法は、視覚による地合判定法によく似ており、紙の外観や光学特性に直接関係する情報が得られ、しかも測定が簡便かつ迅速に行えるため現在でも生産現場では多用されている。ここで、光の透過性は紙の色・紙厚・坪量・緊度などに影響されることから、原料パルプや抄紙条件を異にする紙についての結果の解釈や比較が困難になる。そのため、最近の地合測定システムは白色度・不透明度の異なる紙の地合の比較を容易にするため、透過光変動を坪量変動に換算して結果を表示する機能を装備したものが市販されている⁴⁾。なお、換算にはあらかじめ測定対象の紙の坪量 W と光透過率 T を実験的に求めて、次のような関係式を利用する。ただし、 K および P は紙の光学特性、測定光学系によって決まる定数である。

$$T = \exp(-KW^{1/P}) \quad \cdots (1)$$

一般の紙では、この方法によって得られる地合指数が、 β 線法を用いて得られる質量の地合指数によく対

図1 シート二次元構造模式図 (a:シートの地合ムラ, b:繊維集合形態, c:繊維ネットワーク構造)

図2 各種地合測定装置の模式図³⁾

応する^{4),5)}。しかし、光の透過率は紙の密度にも影響される^{5),6)}。例えば、カレンダー掛けした紙の局所的密度は坪量の高いところで高く、低いところで低いので、このような紙の光透過率の変動幅は坪量のそれよりかなり小さくなる⁶⁾。また、高密度の紙の光透過率は密度と表面粗さの影響が大きく、坪量との相関性は低い⁵⁾。従って、光学地合の評価にあたっては密度の変動特性を考慮しなければならない。

次に、光学的方法による地合評価は、地合ムラの検出に0.2 mm程度の検出スポットを用いる場合が多い。光は紙を透過する際に拡散されるため、光透過率には設定した検出スポットより大きい領域の構造変動の影響が加わる(図3⁷⁾)。従って、検出スポットを微小化するほど、光透過率と坪量の対応関係が悪くなる傾向があり、微小な検出スポットの要求される地合測定には不向きである。

図3 晒サルファイトパルプシート(19° SR, 110 g/m²)を透過した光の強度分布⁷⁾

1.2 質量地合

地合と原料特性・操業条件との関係あるいは地合と紙の性質との関係の解析を行う際にはシートの局所的質量の変動による質量地合の測定が行われる。

紙の質量変動を検出する方法としては、これまで β 線、軟X線が用いられてきた。これらの方法は β 線、軟X線が紙を通過するときエネルギーを失う現象が紙を構成する物質とその質量に依存し、他の構成因子に影響されないことに基づく^{8),9)}。

β 線が物質を通過してエネルギーを失う現象は物質の種類による変化が小さく、その平均消失エネルギーは単位面積あたりの質量にほぼ比例する⁸⁾。このことは、木材パルプのみからなる紙はもちろん、紙中に構成原子の異なる填料が含まれる場合でも、透過 β 線量はほぼシートの質量に対応することを意味する。線源

図4 X線フィルム光学濃度と坪量の関係¹⁰⁾

としては⁸⁵Kr, ¹⁴⁷Pm, ¹⁴Cなどの同位元素が有用である。 β 線法を用いて紙の局所的質量変動を検出する方法としては、現在 β 線プラスチックシート法¹⁰⁾が広く用いられている。この方法は、¹⁴Cを含むプラスチックシート(放射線の強さ20 μ Ci/g)、紙、X線フィルムの順に重ね合わせ、坪量60 g/m²の紙で約75時間程 β 線にあて、紙を透過した β 線強度をX線フィルムに転写するものである。 β 線の照射に極めて長い時間を要すること(図4¹⁰⁾)が実施の上での問題点で、高感度のX線フィルムを使用するため解像力は制限される。なお、放射線強度の大きいプラスチックシートの入手も可能であるが、その取り扱いの安全性に特別の配慮が必要である。

次に、電子線を比較的低電圧で加速して発生させた軟X線(波長1 Å以上の透過能の小さいX線)が物質を通過した後の強度Iの照射X線強度 I_0 に対する割合は、物質のX線に対する質量吸収係数 μ/ρ と単位面積あたりの質量wの関数で与えられる。

$$I/I_0 = \exp(-(\mu/\rho)w) \quad \dots\dots(2)$$

ここで質量吸収係数 μ/ρ は、照射されるX線エネルギーに対して物質を構成する原子それぞれに固有の値であり、木材パルプのみからなる紙のように、同一物質を通過するX線の強度は単位面積あたりの質量にのみ依存する。なお、填料を含む紙のように、構成原子の異なる数種類の物質からなる物体では、填料無機物を構成する原子番号が大きく質量吸収係数の大きい物質によるX線透過強度の減衰が著しい。なお、物質の質量吸収係数はそれを構成する原子の重量割合で加成

表 1 紙を構成する物質の質量吸収係数
(波長 2 Å の X 線に対して)

物 質 名	化 学 式	質量吸 収係数	感度比
セルロース	$(C_6H_{10}O_5)_n$	16.5	1.00
水	H_2O	22.9	1.39
タルク	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	66.1	4.01
クレー	$Al_2O_3 \cdot SiO_2$	68.6	4.16
炭酸カルシウム	$CaCO_3$	143.4	8.70
酸化チタン	TiO_2	255.1	15.47

表 2 坪量 60 g/m² の紙の軟 X 線ラジオグラム
作製条件¹²⁾

	地合解析	配 向 解 析
加速電圧(kV)	4.0	5.3
電 流(mA)	4.0	3.5
照射距離(mm)	215	88
照射時間(min)	8	20
試料面積(mm)	90×90	25×25
X 線フィルム	Fuji Softex FG	Kodak Spectroscopic Safety Type 649-0
解 像 力(μm)	25	0.5

性が成り立つ¹¹⁾ので、紙を構成する物質の質量吸収係数は容易に推定できる(表 1)。紙の X 線ラジオグラムは、裏側に X 線フィルムを密着させた紙に軟 X 線を照射してその透過強度を X 線フィルムに転写して得られる。紙の X 線ラジオグラムの調製には、波長 1–2 Å 程度(加速電圧 5–10 kV)の X 線が適当で、照射時間は坪量に応じて設定する¹²⁾。さらに、この方法では解像度や感度を考慮して X 線フィルムを選択・使用できる。個々の繊維レベルと繊維フロックレベルの解像度を持つ軟 X 線ラジオグラム作製条件(坪量 60 g/m²)を表 2¹²⁾に示す。短時間の軟 X 線照射でラジオグラムが得られることが理解できる。

従って、軟 X 線法は無機物を含まないか、低含有率の紙では薄葉紙から板紙まで広い坪量範囲で適用できる上、個々の繊維レベルのミクロな質量変動の検出も可能であり、β 線法に優る。一方、無機物を含む比較的低坪量の紙の質量変動の検出には β 法の適用が有利であり、軟 X 線法を用いた場合には無機物の分散・集合形態に関する情報が得られることになる。

2. 質量変動量の統計的解析法

2.1 スペクトル解析

紙の地合指数としては質量の変動係数がよく用いら

れる。これは一般に、変動量の平均からバラツキの程度が標準偏差(分散の平方根)で表わされ、その平均値に対するバラツキの相対量を示すのに変動係数が用いられることによる。さらに、シートの質量変動を一次元的にとらえ、どれくらいの周波数のものがどれくらいの強さで存在するかを調べるため、スペクトル解析¹³⁾が行われる。この解析で得られるそれぞれの周波数 f の振幅成分の量を表わしたものがスペクトル密度 $S(f)$ であるが、これを周波数全域にわたって積分したものはその変動 $w(t)$ の分散を与える。

$$\int_{-\infty}^{\infty} w^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) df \quad \cdots \cdots (3)$$

従って、スペクトル解析は地合変動の全体的特性を把握するのに適している。

濃度パターンの異なる画像のスペクトル分布を図 5¹⁴⁾に示す。濃度が徐々に変化する画像はスペクトルが周波数の二乗に反比例する $1/f^2$ 型、急激に変化する画像は周波数 f に反比例する $1/f$ 型に近いスペクトル特性を持つことが理解できるが、大抵の濃淡画像は二つの型の特徴を持っている。スペクトル表示に関連して、Norman ら¹⁵⁾は紙中の繊維フロックの大きさとそ

図 5 濃度パターンの異なる画像のスペクトル分布¹⁴⁾

図 6 紙の質量変動の波長スペクトル
(実線：Fourdrinier, 破線：Twin-wire
シート)¹⁵⁾

の強度分布を表わすのに周波数スペクトルの代わりに波長スペクトルを用いた。図 6¹⁵⁾にその一例を示すが、波長 0.5 mm 付近のピークは周期性のあるワイヤマークの質量変動への影響を示している。スペクトル解析はその原理からも変動内の周期成分の検出に有利であることが明らかである。なお、長波長域の勾配がマイナス 2 の補助線と同様の特性を示す波長域は質量変動が白色雑音の性質を持つようになる繊維フロックの大きさを示す。このように、スペクトル表示の方法としては、周波数スペクトルが短波長域、波長スペクトルが長波長域の変動特性を表示するのに都合が良い。最近では高速で二次元フーリエ変換が行えるようにな

り、二次元波長スペクトルを求めて紙のマシン・クロスマシン方向の変動特性を同時に判定できる。図 7¹⁶⁾に市販包装用クラフト紙の二次元波長スペクトルを示す。この図は、スペクトル密度を波長と試料所定方向に対する角度に対してプロットしたもので、ワイヤマークがクロスマシン方向で顕著で、マシン方向で小さいことが明らかである。さらに、このスペクトルの繊維幅オーダーの周波数域のパワーレベルを累積して、その角度分布を求めると、繊維質量で重み付けした繊維のシート中での配向分布が得られる¹⁷⁾。二次元フーリエ変換を含めた画像解析技術の進歩によって今後さらに高度なスペクトル解析技術が出現するものと考えられる。

2.2 同時生起行列による解析

β線および軟X線ラジオグラムにはシート面の二次元的質量変動情報が含まれている。近年、急速に進歩を遂げた画像解析技術の導入は、上記の二次元的フーリエ変換も含めて質量画像の二次元的変動の解析を可能にした。そのため、最近ではスペクトル解析より有効な地合の特徴抽出方法の検討がさかんに行われている。ここでは、地合変動の振幅と広がり程度の表わす特徴量の抽出に有効な方法である質量同時生起行列¹⁸⁾について言及する。

同時生起行列は、ある一定の相対的位置関係を持つ二つの画素の値の数の全体に対する割合を行列の形式で表現したもので、シート中の二点間の質量の同時生起確率を表わす結合密度関数を与える¹⁸⁾。4×4のデジタル画像中の横方向に隣接する二画素から行列要素を推定する手順を図 8¹⁹⁾に示す。行列は、質量レベルの組合わせをレベルの順に行と列にふりわけ、相当する組み合わせの数を行列要素とする。實際上、質量レベ

図 7 市販包装用クラフト紙の二次元波長スペクトル (a: スペクトル密度分布, b: スペクトル密度の角度分布)¹⁶⁾

図 8 デジタル画像横方向の画素対からの同時生起行列要素 (a: 4×4 モデル像, b: 画素対濃度レベルの頻度行列, c: 同時生起確率密度行列)¹⁹⁾

図 9 変動の特性と同時生起行列 (A: 振幅・波長の大きい変動, B: 振幅が大きく, 波長の小さい変動)²¹⁾

ルはその平均値が行列の中心近くになるように規格化する。従って, 行列要素の値は行列の中心付近で最も高く, そして対角軸方向で比較的高いが, その値の分布の特徴は質量の空間分布に依存する^{19), 20)}。

質量変動特性と行列パターンの対応関係を模式的に図 9²¹⁾ に示す。この図で, 大きなうねりのある変動 A は

行列 C の対角軸平行方向に広がった行列パターンになる一方, 隣り合う画素の質量が大幅に変化する変動 B は対角軸から発散する方向に広がった行列パターンとなる。これらのパターンの特徴は表 3¹⁹⁾ のパラメータによって数的に表現できる。次に, シート中の繊維ブロックを平均の質量レベル M を基準にしてそれより高質量の部分とし, 図 10 a の斜線部をブロックとすると, ブロックの大きさ a の平均は図 10 b の (M, M) のペアより高質量のペアの領域 A と (M, 1) から (M, M) までのペアの領域 B に含まれる確率密度の総和を B に含まれる確率密度で除した量と画素の大きさの積によって与えられ, ブロック間距離 b の平均は B に含まれる確率密度の逆数と画素の大きさの積によって与

表 3 同時生起行列の特徴を示すパラメータ¹⁹⁾

全体的分散の程度:

$$f_a = \sum_i \sum_j P(i, j)^2$$

$$f_b = - \sum_i \sum_j P(i, j) \log P(i, j)$$

(Entropy)

対角軸方向の分散の程度:

$$f_c = \sum_{k_1=0}^{N-1} k_1^2 \left\{ \sum_i \sum_j P(i, j) \right\}$$

$$k_1 = |N - i - j + 1|$$

$$f_d = \sum_i \sum_j \{1 / (1 + k_1^2)\} P(i, j)$$

$$k_1 = |N - i - j + 1|$$

対角軸からの分散の程度:

$$f_e = \sum_{k_2=0}^{N-1} k_2^2 \left\{ \sum_i \sum_j P(i, j) \right\}$$

$$k_2 = |i - j|$$

(Contrast)

$$f_f = \sum_i \sum_j \{1 / (1 + k_2^2)\} P(i, j)$$

$$k_2 = |i - j|$$

$P(i, j)$: 同時生起確率密度関数,

N : 質量レベルの分割数

図 10 フロックの大きさと同時生起行列 (a : 質量変動一次元プロフィール, b : 同時生起行列の領域分割)²⁰⁾

図 11 同時生起行列パラメータと地合指数の相関関係 (a : f_b , b : 平均フロック間距離, c : 平均フロックサイズ, d : f_e)²¹⁾

えられる²⁰⁾。

このように、同時生起行列は、地合変動の強さと広がりの特徴を数量的に表現できる利点がある。ここで、クラフト紙の解析結果における同時生起行列パラメータと地合指数（質量変動係数）との相関関係を図 11²¹⁾

に示す。なおパラメータ f_e は質量変動の標準偏差を平均フロックサイズで除した量に良く対応し（図 12²¹⁾）、フロック密度といった特徴量に相当する。

次に、中質紙の光学地合を同時生起行列パラメータで評価した結果と官能評価した結果の対応性をみると、

図 12 パラメータ f_e と変動特微量 (γ =質量標準偏差/平均フロックサイズ) の関係²¹⁾

表 4 同時生起行列パラメータと官能検査・物性試験の相関係数²²⁾

	官 能 検 査				物 性 試 験	
	地 合	手触り	肌 明	暗	密 度	平滑度 (F)
f_a	0.921		0.638		0.861	0.689
f_b	-0.933	-0.838	-0.856	-0.796	-0.956	-0.713
f_e	-0.915	-0.843	-0.852	-0.800	-0.945	-0.720
f_f	0.927	0.837	0.849	0.794	0.957	0.730

マトリックスの全体的広がり の程度を示すパラメータ f_a , f_b そしてマトリックスの対角軸からの広がり の程度を示す f_e , f_f と地合の等級に高い相関性が認められる。これらのパラメータは、物理測定によるシート密度に対しても高い相関性が認められる (表 4²²⁾)。官能評価と地合パラメータの対応性は、地合変動の振幅と波長に関する個別的なパラメータよりも両者を関数とする複合パラメータがより良好であり (図 13²³⁾)、そのようなパラメータが地合の適切な指数になり得ることが他の手法を用いた結果からも示唆される。

以上、地合変動の解析方法について整理したが、スペクトルには変動のあらゆる情報が含まれており、スペクトル解析は地合変動の全体的特性の把握、変動内の周期成分の検出に有利である。一方、同時生起行列解析は、変動のいろんな特性を抽出する技法であり、変動の強さと広がりを数量的に表現するのに有利で、目的に応じた解析手法の選択が望まれる。

図 13 地合特徴量と地合等級との相関性 (a : Grain diameter, b : Contrast intensity, c : 地合等級 ($Y = a + b + \text{constant}$)²³⁾)

3. 紙の地合と力学的性質

印刷あるいは加工工程における操作性に関連して、地合のシート力学的挙動におよぼす影響は折にふれ問題にされる。ここでは紙の地合ムラの影響について考え易い引張特性に限定して整理する。

3.1 引張特性に及ぼす質量変動の影響

紙の引張特性には坪量依存性がある²⁴⁾ことから、地

図 14 引張特性と地合指数の関係 (a : 引張指数, b : 引張剛度指数)²⁵⁾

図 15 試片自由端に低・高質量部があるときの幅方向の応力分布
(スパン中央に 1.5×1.5 mm の低・高質量部 (厚さ 0.12 mm と 0.08 mm) がある厚さ 0.10 mm の試片 15×102 mm に荷重 1.4 kg をかけた時の応力分布)²⁶⁾

合ムラの程度の異なる紙の引張挙動に差異があることは容易に予想される。クラフト紙では、質量変動係数の増加に伴って引張指数は低下する一方、引張剛度指数ではさほど変わらない(図 14²⁵⁾)。そして両指数の試片間のバラツキの程度は平均フロックサイズに依存する²¹⁾。さらに、これまでの紙の引張り変形・破壊と質量変動との関係を有限要素法を用いて追求した報

図 16 応力-ひずみ挙動への低質量スポット位置の影響
(○ : A, ▲ : B, ● : C)²⁷⁾

告^{26),27)}によると、紙が引張られる際にスパン中央の自由端に低質量部が存在するとそこに顕著な応力集中が起こり、逆に高質量部が存在する時には応力の分散効果が期待される(図 15²⁶⁾)。また、引張り試片の幅方向の低質量スポットの存在位置は試片の応力-ひずみ曲線の勾配にほとんど影響しないと推定される(図 16²⁷⁾)。さらにカレンダー処理していない新聞用紙の引張破断した近傍の質量分布および繊維配向度を紙全体のそれらと比較した場合、破断した近傍の質量の分布(累積曲線)は紙全体のそれより低坪量側にシフトしていること、マシン方向から 20 度以内に配向している繊維は紙全体では 30%、破断領域では 50%程度であり、マ

図 17 引張破断した近傍の質量・繊維配向度と紙全体のそれらとの比較
(○：紙全体，●破断領域)²⁸⁾

シン方向への繊維の配向度は紙全体のそれより破断領域で高いことなど (図 17²⁸⁾)。が報告されている。

3.2 引張特性の異方性と繊維フロックの異方性²⁹⁾

図 1 の模式図において、紙の平均フロックサイズ程度の領域の繊維の配向角度 (配向主軸のマシン方向となす角度)・配向度 (MD/CD 比) は地合ムラの程度によって異なると考えられる。微小領域 (1×1 mm) の質量と図 18 に示す繊維セグメントの配向比 (MD/CD 比, 長軸/短軸比) の関係を調べると、図 19 に示すような質量と配向比の回帰直線が得られる (なお、供試シートの平均フロックサイズは 1 mm 以上である)。これはパイロットマシン³⁰⁾に装備された 2 種のツインワイヤーユニット、ロールフォーマ (On Top former タイプ) とブレードフォーマ (Gap former タイプ) によって抄紙濃度 4 g/l と 10 g/l で作製した針葉樹クラフト紙についての結果で、それらの引張り試験結果

図 18 配向分布の MD/CD 比と長軸と短軸比
(MD/CD 比 = $2 \times OM_d / C_d C'_d$, 長軸/短軸比 = OM_j / OM_n)²⁹⁾

図 19 微小領域の質量と繊維配向比 (MD/CD 比と長軸/短軸比) の関係²⁹⁾

表 5 引張特性の異方性²⁹⁾

試料	地合指数 (%)	平均フロック サイズ(mm)	引張指数(kNm/kg)			引張剛度指数(MNm/kg)		
			MD	CD	MD/CD	MD	CD	MD/CD
R-4	13.3	1.25	96	32	3.00	9.3	4.3	2.16
R-10	27.1	1.94	57	27	2.11	8.5	4.7	1.81
B-4	12.5	1.24	106	36	2.94	11.4	5.1	2.24
B-10	26.2	2.19	61	26	2.35	10.4	5.2	2.00

図 20 引張剛度指数と繊維配向の MD/CD 比の相関関係²⁹⁾

を表 5 に、引張剛度指数の MD/CD 比を坪量 60 g/m² の配向比に対してプロットした結果を図 20 に示す。

表 5 の引張指数の MD/CD 比はどのシートでも引張剛度指数のそれより大きく、低坪量部の MD/CD 比の大きいことに関連していること、図 20 の結果から引張剛度指数の MD/CD 比はシートの平均的な繊維配向の MD/CD 比に依存していることが推定される。

図 19 の地合のよいシートでは両フォーマ共に MD/CD 比と長軸/短軸比の違いは小さく、繊維配向の主軸はほぼマシン方向に向いている。一方、地合の悪い R-10、B-10 のシートの質量に対する MD/CD 比と長軸/短軸比の回帰直線を比較すると、ロールフォーマシートでは配向比の大きい低坪量部の MD/CD 比と長軸/短軸比の差が小さく、高坪量部で大きくなる傾向があるのに対し、ブレードフォーマシートでは配向比の大きい低質量部においても両比の差が大きく、繊維配向の主軸のマシン方向からのバラツキに相違がある。このような両シートの配向比の変動特性の違いは、繊維のネットワーク構造が図 21 に示すような特徴、すなわち、ロールフォーマシートでは配向の主軸がほぼマシン方向に一致するのに対して、ブレードフォーマシートでは比較的高い配向度を保ちながら主軸がマシン方向から偏りを持った構造であることを示唆している。そして、このようなネットワーク構造の違いは、さらに、これらの紙に引張応力が負荷される際、切り欠き部の有無によって破壊挙動がかなり異なることを示唆する。図 22²⁹⁾ に両フォーミングユニットによる紙の引張指数への切り欠きの有無の影響を示すが、比較的地合の良いロールフォーマシートでは切り欠きを入れない試片の引張指数が入れたものよりかなり高く、ブレードフォーマシートでは切り欠きを入れた試片が

図 21 繊維フロック形態模式図²⁹⁾

図 22 MD 方向引張強度への試片切り欠きの影響

(○, △: 切り欠き無, ●, ▲: 切り欠き有)²⁵⁾

入れないものより若干高い。この結果は引張破壊に対して切り欠きの無い場合には自由端付近の低質量部に応力が集中するため低質量部の配向比、一方、切り欠きの有る場合には切り欠き部の質量と配向度が関与するため、切り欠き部への存在確率の高い中間質量部の配向比の影響が大きいことを示唆する。

ここでは微小領域の質量と繊維配向の相関性に着目した解析例を示したが、現在では抄紙工程で薬品添加などによる地合の制御²¹⁾が行われており、そのようにして得られた紙の力学的特性は地合指数や配向比によって説明できない場合がある。そのような紙では、繊維ネットワークレベルの質量変動特性を解析して、紙中の繊維フロックの構造をさらに詳細に検討する必要があるものと考えられる。また、質量と密度の変動を同時に検出し解析する方法が考案されれば、さらに興味ある地合と物性の関係の解析が可能になると考えられる。

引用文献

- 1) L. Haglund, B. Norman, D. Wahren ; Svensk Papperstidn. 77, 1 (1974)
- 2) H. Corte ; Das Papier 23, 381 (1969)
- 3) 土田, 半田, 門屋, 村田 ; 紙パ技協誌, 21(6)343 (1967)
- 4) 竹内伸夫 ; 紙パ技術タイムス, 28 (5), 30 (1985)
- 5) A. Komppa ; Paperi ja Puu, 70 (3) 243 (1988)
- 6) A. Komppa, K. Ebeling ; "The Role of Fundamental Research in Paper Making" (J. Blander, Ed.) Mechanical Eng. Pub., p.603 (1983)
- 7) B. Norman, D. Wahren ; "The Fundamental Properties of Paper Related Its Uses" (F. M. Bolam, Ed.) Tech. Sect. B. P. B. I. F., p.7 (1876)
- 8) 飯田博美 ; 放射線物理学 p.65 (1980) 通商産業調査会
- 9) B. Lindstrom ; Acta Radiologica, Suppl. 125 p. 15 (1955)
- 10) 中田, 村田 ; 製紙工学 (門屋, 白田, 大江編) p. 188 (1982) 中外産業調査会
- 11) P. Lange ; Svensk Papperstidn., 57 (15), 533 (1954)
- 12) 湯原, 蓮池, 村上 ; 紙パ技協誌, 40(1), 85(1986)
- 13) 日野幹夫 ; スペクトル解析 p.22 (1976) 朝倉書院
- 14) 武者利光 ; ゆらぎの世界 p.92 (1980) 講談社
- 15) B. Norman, D. Wahren ; Svensk Papperstidn., 75, 807 (1972)
- 16) 湯原, 蓮池, 村上 ; 第 35 回日本木材学会大会要旨集 p.270 (1985)
- 17) 湯原, 蓮池, 村上 ; 紙パ技協誌, 41(6), 523(1987)
- 18) R.M. Haralick, K. Shanumgan, I. Dinstein ; IEEE Trans. System, Man, Cybernetics, SMC-3, 610 (1973)
- 19) 湯原, 蓮池, 村上 ; 繊維学会誌, 42 (5), T-279 (1986)
- 20) 湯原, 蓮池, 村上 ; 紙パ技協誌, 40 (10), 949 (1986)
- 21) M. Hasuie ; STFI Report I, p.16 (1987)
- 22) 岡川章夫 ; 第 52 回紙パルプ研究発表会要旨集 p. 24 (1985)
- 23) R. Daunais, R. G. Garner ; Preprint Int. Paper Physics Conference, p.43 (1987)
- 24) 上坂, 村上, 今村 ; 材料, 28 (7), 629 (1979)

-
- 25) O. Terland, C. Fellers ; STFI-meddelande, C -138, p.14 (1986)
- 26) 木村, 清水, 中田 ; 紙パ技協誌, 39 (9), 859 (1985)
- 27) M. Kimura, H. Shimizu ; Japan TAPPI, 39 (8), 777 (1985)
- 28) J. M. Moffatt, L. R. Beath, W. G. Micheli ; "The Fundamental Properties of Paper Related Its Uses" (F. M. Bolam, Ed.) Tech. Sect. B. P. B. I. F., p.104 (1976)
- 29) M. Hasuike, P-A. Johansson, C. Fellers, O. Terland ; Preprint Int. Paper Physics Conference, p.185 (1987)
- 30) B. Norman et al. ; "The Role of Fundamental Research in Paper Making" (J. Blander, Ed.) Mechanical Eng. Pub., p.809 (1983)
- 31) A. Friman ; SPCI-meddelande nr 52, p.121 (1987)
-