研 究 報 文

コンピュータ画像処理によるパルプシートの構造解析(第1報)

2次元的质量変動の定量的評価法について*

京都大学農学部 湯原 隆, 蓮池 牧雄, 村上 浩二

Application of Image Processing Technique for Analysis on Sheet Structure of Paper I. Quantitative Evaluation of 2-dimensional Mass Distribution

Takashi Yuhara, Makio Hasuiki and Koji Murakami

Faculty of Agriculture, Kyoto University

A survey was made to clarify the possibility of image processing technique for the quantitative evaluation of sheet structure based upon its mass density distribution in paper sheet.

Soft X-ray microradiography was applied to obtain image of mass density distribution with high fidelity. Various conditions for preparing the microradiographs were examined with two soft X-ray films (FUJI Softex Film FG and KODAK Spectroscopic Safety Film Type 649-0) considering the digitizing unit size and imaging area in the sheet. A soft X-ray image was transformed into digital image in which each pixel is assigned in one of 256 gray levels having a linear relation to the photographic density of the microradiograph by drum scanner.

The digital image was corrected for a shading effect caused by the point source of X-ray, and then transformed into the image showing mass density distribution of the specimen. Two methods to calibrate mass density with gray level were examined; one is a technique using a reference system such as a stepwedge of Mylar films (Fig. 5) and the other is a method to determine the constant a and b in Eq. [10] by using the mass and gray levels of the specimen. It was confirmed that the latter method is simple and more suitable for image processing technique.

Finally, a mass density distribution map to evaluate sheet formation (Fig. 6) and a DFT image showing fiber orientation of the specimen (Fig. 8) were made successfully by using image processing technique.

Keywords: Image processing, Mass distribution, Soft X-ray, Microradiography

* 本研究の一部は、第34回日本木材学会大会(1984年4月, 名古屋)で発表した。

1. 緒 言

紙はパルプ繊維の集合体で、X-Y 方向にネットワーク構造、Z 方向に層状構造を持つが、その状態は一樣ではなく、様々なスケールの局所的なゆらぎを有する。特に X-Y 方向のそれは地合と呼ばれ、製品の品質を左右する主要な構造因子のひとつであるため、古くから重要な研究対象とされてきた。地合を評価する方法の多くはシートを透過する可視光、 β 線、X線などの1次元的変動の統計量あるいはスペクトル特性によるものであるが^{1)~5)}、これらのうち、 β 線やX線を用いる方法はシート中のマステンシティの変動を計測対象としており、シート中の物理量との対応が明確であるという点で、他の方法より優れている。しかし、(1)個々の繊維に対応する微小領域の質量変動の検出が困難なこと、(2)2次元の変動としての取り扱いがおこなわれていないこと、などさらに改善を要する点が残されている。また、近年コンピュータによる画像処理技術を応用したシート構造および質量変動についての解析が数多く行われている⁶⁾⁷⁾。しかし、上記の2つの問題点を解決するような新しい手法を導入した例はみられない。

本研究では上記2点の改善を目的に、長波長の軟X線と高分解能フィルムを用いる顕微X線法、および2次元的な解析を目的とした画像処理技術をシートのX-Y方向の質量変動解析に応用する手法について検討を行った。その内容とするところは、これらの手法を適用する際に問題となる基礎的事項、すなわち、解析の目的に合った分解能のラジオグラムを得るための撮影条件、X線の照射むらの補正法、シートマステンシティの定量法、および若干の解析例である。

2. 実 験

2.1 試 料

試料には地合の異なる2種の手すきシート(坪量 65 g/m²)および、機械すき紙として市販の重袋用紙(坪量 75 g/m²)を用いた。手すきシートの調製には PFI ミルでろ水度 460 ml まで叩解したスブルースさらしクラフトパルプを使用した。地合を変えするため、パルプ懸濁液を標準シートマシン金網上で10秒あるいは100秒静置したのち脱水、シート形成させた。なお、湿シートは湿圧 3.5 kg/cm² で7分間加圧したのち、乾燥リングに固定して6時間送風乾燥した。これらのシートは含水率を測定したのち、軟X線マイクロラジオグラムの撮影に供した。

2.2 軟X線マイクロラジオグラムの撮影

パルプシートのように質量吸収係数が小さい試料について、高分解能かつコントラストの大きいX線ラジオグラムを撮影するためには、波長の長い軟X線を用いるのが有効である。本研究では軟X線発生装置として SOFTEX-CMR 型を用い、試料シートの密着軟X線マイクロラジオグラムの撮影を行ったが、その撮影条件には、解析の目的および像の定量化条件(3.1.1項参照)を考慮して、以下の2種を設定した。

(1) 撮影条件1 マクロな地合変動を解析する目的

で、撮影領域として 90×90 mm の領域を設定した。坪量 65 g/m² の試料の場合、X線フィルムとしてフジソフテックスフィルム FG (分解能 25 μ m) を使用し、ターゲット〜試料面間距離 21.5 cm、管球電圧 6.0 kV_p、電流 4.0 mA、照射時間 8.0 分とした。現像にはフジソフドールの2倍液を使用し、液温 20°C で10分間処理した。

(2) 撮影条件2 ミクロなマステンシティの変動を

解析する目的で、撮影領域として試料上 30×30 mm の領域を設定した。坪量 65 g/m² の試料の場合、X線フィルムとしてイーストマンコダック社製スペクトロスコーピックセーフティフィルム 649-0 (分解能 0.5 μ m) を使用し、ターゲット〜試料面間距離 8.8 cm、管球電圧 8.0 kV_p、電流 3.5 mA、照射時間 20.0 分とした。現像には D-19 の2倍液を使用し、液温 20°C で10分間処理した。

なお、上記2種の条件のいずれにおいても、撮影の際にはラジオグラムの写真濃度*校正用として、単位面積あたり質量が既知のポリエチレンテレフタレート薄フィルムを階段状に積み重ねたものを、試料と同一視野に入れた。

2.3 ラジオグラム像のデジタル画像化と解析

撮影された軟X線マイクロラジオグラムは画像入力装置、ドラムスキャナ(オプトロニクス社製カラスキャン C-4100、図1)によりデジタル画像とした。この装置は直径 12.5~400 μ m の検出スポットで試料フィルムを走査し、その写真濃度を各画素の透過光強度として読みとり、256階調(グレイレベル)に量子化して磁気テープに記録するものである。例えば、上記撮影条件1で得られた軟X線マイクロラジオグラムの場合、90×90 mm の領域をスポットサイズ 50 μ m で走査し、1800×1800個の画素よりなる画像とした。なお、本装置の出力値は試料フィルム写真濃度(0-

* 一般に露光、現像した感光材料の黒化の程度をあらわす量、すなわち光学濃度を指す。フィルムなどの場合、入射光強度 I_0 と透過光強度 I の比を用い、 $D = \log_{10}(I_0/I)$ で定義される。

Fig. 1 Drum scanner used for digitizing the soft X-ray image of paper sheets.

2.3) と直線関係を持つように調整されている。なお、本研究には京大大型計算機センターの画像処理システム (画像入力、表示装置および PANAFACOM U-1500) とメインシステム (FACOM M-382) を用いた。また得られたデジタル画像の処理と解析に使用したプログラムは3.1項に示す知見をもとに作成した。

3. 結果および考察

3.1 軟X線マイクロラジオグラムの定量的解析法

3.1.1 撮影条件の検討

本研究に使用したドラムスキャナでは、ラジオグラムの写真濃度が0-2.3の範囲にあれば、そのデジタル化が可能である。したがって、写真濃度がこの範囲内にあり、かつコントラストの大きいラジオグラムを供試する必要があるが、さらに、ラジオグラム写真濃度をシートマシデンシティに換算するためには、使用するX線フィルムの感光特性を考慮することも必要である⁸⁾⁹⁾。前述の撮影条件1のX線フィルム (フジソフ

Fig. 2 Relationship between gray level and time of exposure showing characteristic of a X-ray film (FUJI Softex Film FG).

テックスフィルム FG) の特性曲線を図2に示す。グレイレベル110-250 (写真濃度1.0-2.2に相当) の範囲において、X線照射量とグレイレベル値の間に直線関係が成立している。すなわち、このX線フィルムを使用する場合、局部的写真濃度が1.0-2.2の範囲におさまる、かつコントラストの大きいラジオグラムを撮影すれば、質量変動に関する情報量の多い画像を得ることができる。なお、X線フィルム上の吸収像写真濃度は、ターゲットと試料面の距離、管球電圧、管球電流、および照射時間により決まり、特に試料の質量に対するコントラストは管球電圧を下げるほど良好となる。

本研究では、以上の各事項を考慮して撮影条件を検討した結果、2.2項記載の各条件を選んだ。

3.1.2 X線照射むらの補正

軟X線発生装置は点線源であり、線源からフィルム表面までの距離がX線の照射角によって異なるため、得られるラジオグラムにはシェイディングが認められる。例えば、撮影条件1の場合、フィルム上の照射中心と周辺部ではその写真濃度に最大約0.15 (グレイレベル16) 程度の差が生じた。したがって、シェイディング (shading)* 補正が必要となるが、ここではX線照射量とラジオグラム写真濃度の関係を考慮した補正法について検討を行った¹¹⁾。

図3は試料を置かず撮影したフィルム上の2点 (x_0, y_0) と (x_1, y_1) を含む直線上の画像信号をモデル化したものである。それぞれの点のラジオグラム写真濃度に対応するグレイレベル値を G_0, G_1 、X線強度を I_0, I_1 とすると、フィルムの特性曲線 (図2) の直線領域において次式が成立する。

$$G_0 = k \log I_0 + l \quad (1)$$

$$G_1 = k \log I_1 + l \quad (2)$$

Fig. 3 Schematic distribution of gray levels influenced by shading effect.

* 画像中の位置により異なるノイズをいう。これを除去するために行われる種々の補正をシェーディング補正 (shading compensation) という¹⁰⁾。

ここで、 k 、 l は定数である。さて、厚さ d の均一な試料をX線フィルムに密着させ、同一条件で撮影を行った場合、点 (x_0, y_0) と (x_1, y_1) におけるグレイレベル値 G_0' 、 G_1' は試料の質量吸収係数を μ とすると、次式で表わされる。

$$G_0' = k \log[I_0 \exp(-\mu d)] + l \quad (3)$$

$$G_1' = k \log[I_1 \exp(-\mu d)] + l \quad (4)$$

(1)–(4)式より次式が成立する。

$$G_0 - G_1 = G_0' - G_1' \quad (5)$$

すなわち、試料を置かずに撮影したラジオグラムについて、 $G_0 - G_1$ を求めておくことにより、試料ラジオグラム画像中の点 (x_1, y_1) におけるグレイレベル値 G_1' から、シェイディングを受けないグレイレベル値 G_0' を算出することができる。実際に撮影したラジオグラムについて、上記補正を行った結果、シェイディング効果をグレイレベル2（写真濃度約0.02）以内におさえ得ることが判明した。

3.1.3 検量線の作成

顕微X線法において、マイクロラジオグラム像の写真濃度から試料の単位面積あたりの質量（シートマスマスデンシティ）を定量するためには、リファレンスシステム¹²⁾を用いるのが一般的である。すなわち、階段状に重ねあわせた既知の厚さと密度を持つ金属箔や高分子フィルムを試料と同一撮影視野内に入れ、そのラジオグラム像より作成した検量線をもとに試料像の写真濃度をマスマスデンシティに換算する方法である。しかし、この方法では、試料とリファレンスの元素組成が異なる場合、操作が複雑になる。そこで、本研究ではまずリファレンスシステムを用いる検量線作成法について検討し、次により簡便な手法として、秤量により求めた試料質量とラジオグラム像のグレイレベル値との関係から検量線を得る方法について検討を行った。

1) 間接法（リファレンスシステムによる方法）

本研究では質量吸収係数がパルプシートに近く、かつ試料のマスマスデンシティ変動量に対応する厚さのフィルムを入手し得るという理由で、リファレンスシステムの素材としてポリエチレンテレフタレート（PET）の薄フィルム（厚さ12 μ m）を使用した。しかし、吸収係数が近いとはいえ若干の差がみられるため、リファレンスの単位面積あたり質量とそのグレイレベル値の関係をそのまま検量線として用いることはできない。そこで本研究では、動物組織を対象としたLindströmの定量法¹³⁾を参考にして、軟X線の波長分布と試料を構成する元素の質量吸収係数を考慮に入れた検量線の作成法を検討した。

まず、試料に入射する軟X線の強度と、試料のマ

スマスデンシティ、構成元素の割合、各元素の質量吸収係数から、透過軟X線強度 (I') の推定を行った（Appendix 参照）。前項で示したように、透過軟X線強度の対数とラジオグラム像のグレイレベル (G) の間に直線関係が存在する場合（図2）、(1)式と同様に次式が成立する。

$$G = k \log I' + l \quad (6)$$

実際のリファレンスシステムについて推定された透過X線強度と、得られたラジオグラム像のグレイレベル値の間に良好な直線関係が認められた（図4）。これより、そのラジオグラムについての定数 k 、 l を決め

Fig. 4 Correlation of gray level with intensity of transmitted X-ray through the Mylar film calculated by using Eq. (A1)–(A6).

Fig. 5 Calibration curves of mass density versus gray level.

Notes: □: Mylar film.

○: Pulp sheet (calculated by using mass absorption coefficients and gray level of Mylar film).

ることができる。

さて検量線を作成するためには、試料の元素組成を考慮に入れて算出した透過X線強度を用い、(6)式から試料のマスデンスティ m における試料像のグレイレベル値を推定することが必要である。パルプシートがセルロースと水で構成されているとして得られた検量線の例を図5に示す。2つの回帰曲線のうちの曲線は上記の手順で求めたシートの検量線であり、上の曲線はそのもととなったリファレンスシステムの単位面積あたり質量とグレイレベル値の関係を示している。なお回帰式の関数型には従来より用いられている以下の形式を選んだ。

$$G = \exp(a + bm) + c \quad (7)$$

ここで a , b , c は定数であり、 c はフィルムのX線未照射部分の光学濃度に対応するグレイレベル値である。

なお、試料シート(坪量 50~72 g/m²)の平均坪量について、上記の方法による定量結果を坪量による結果と比較すると、両者の差は撮影条件1のラジオグラムの場合、+1.9~-4.9%、撮影条件2のラジオグラムの場合、最大10%程度と推定された。このような両者の差はX線強度の近似誤差、ラジオグラム写真濃度の推定誤差、フィルム特性の差による検量線そのもののずれなどによると推定され、試料と質量吸収係数の異なるリファレンスシステムを用いる場合には避けられないものと考えられる。

2) 直接法(秤量法)

以下に示す検量線作成法は、試料シートの質量とラジオグラム像のグレイレベル値の統計量の関係から推定する方法である。ただし、無試料部を含むラジオグラム像の写真濃度がすべて図2に示した特性曲線の直線部にあることが前提となる。

まず、(7)式について変数の変換を行うと、次式のようになる。

$$y = a + bx \quad (8)$$

ここで、 $y = \log(G - c)$, $x = m$ である。

試料シート画像全体をサンプル空間とし、 x , y を確率変数、 $P_x(x)$, $P_y(y)$ をそれぞれの密度関数と置く。(8)式より次式が成立する。

$$P_y(y)dy = P_x(x)dx \quad (9)$$

次に、 x , y の期待値を $E\{x\}$, $E\{y\}$ とすると、(9)式より以下の式が導かれる。

$$\begin{aligned} E\{y\} &= \int_0^\infty y P_y(y) dy \\ &= \int_0^\infty (a + bx) P_x(x) dx = a + bE\{x\} \end{aligned} \quad (10)$$

なお、 $E\{x\}$ は試料シートの面積と質量(坪量)から

$E\{y\}$ はラジオグラム像中の試料部分および未照射部分のグレイレベル値から、さらに定数 a は画像中の試料のない部分のグレイレベル値から求めることができる。定数 b は(10)式から決定されるので、(7)式に示した形式の検量線を得ることが可能となる。

3.2 軟X線マイクロラジオグラムの解析例

3.2.1 パルプシートの地合(撮影条件1)

地合の異なる2種類の手すきシートを供試し3.1項に示した操作により、各画素のグレイレベル値をマスデンスティに換算して質量分布を表わす画像(以下質量画像と呼ぶ)を得た。ただし、質量画像はラジオグラム中の90×90 mmの領域を1800×1800個の画素に分割した原画像をもとに作成したが、この画像データを用いると、近傍のいくつかの画素の有するマスデンスティを平均化することにより、検出スポットの大きさを任意に設定することができる。

撮影条件1によるセッティングタイム10秒および100秒の手すきシートのラジオグラムの1例を図6A

Fig. 6 Soft X-ray images (A) and contour maps of mass distribution (B, spot size: 1.8×1.8 mm) of handsheets (1: settling time 10 sec. 2: settling time 100 sec.)

に、これらより得た質量画像を等高線と濃淡パターンで表わした図の1例を図6Bに示す。この場合、36×36個の画素(1.8×1.8 mmの領域)のマスデンスティを平均しているが、平均する画素数が少ないほど、すなわち最小検出領域が小さいほど複雑なパターンをもつ質量分布図が得られる。その例を図7に示す。なお図7Aは18×18個の画素(0.9×0.9 mmの領域)、図7Bは9×9個の画素(0.45×0.45 mmの領域)を

Fig. 7 Contour maps of mass distribution of handsheet showing the effect of measuring spot size.

Notes : Spot size : A : 0.9×0.9 mm.

B : 0.45×0.45 mm.

平均した結果である。紙の地合は種々のレベルの質量変動の重なりにより形成されているため、地合を評価する目的により、検出スポットの大きさを選択する必要があると考えられる。なお、マスデンスティの頻度分布における標準偏差の値は、スポットサイズの減少に伴い大きくなる傾向が認められる（図6 B-2 では5.8, 図7 Aでは6.1, 図7 Bでは6.6）。

3.2.2 市販シート質量分布の異方性（撮影条件2）

機械すきシートでは繊維がマシン方向にある程度配向しているが、シート平面内のマスデンスティ分布にも方向性がみられる。本研究では、この異方性を検出する目的で、シートの質量画像についてフーリエ変換による2次元パワースペクトルの算出を試みた。図8 Aには重袋用紙のマイクログラム像、図8 Bに

Fig. 8 Soft X-ray image (A) and DFT (Discrete Fourier Transform) image of mass distribution (B) of a commercial sack paper.

はそのパワースペクトルを光回折像の形式でディスプレイ上に出力した結果を示す。なお、パワースペクトルの算出に用いた質量画像はラジオグラム中 30×30 mm の領域 1200×1200 を個の画素に分割した画像より作成した。本研究で用いた質量画像のフーリエ変換では、得られるパワーレベル値がシート平面内の質量

変動の分散値と対応しており、シート構造を的確に表現し得ると考えられる。これについての詳細は次報で述べる。なお、シート中の繊維配向を形態学的にとらえる方法として、Rudström¹⁴⁾ および Yang¹⁵⁾ はレーザー光を用いた光回折装置を用いてシートの繊維配向度の計測を試みているが、可視光のシート透過率はその層状構造に影響されるため、計測値の意味づけに問題があると考えられる。

3. 結 言

紙の X-Y 方向の構造を定量的に解析する方法として、顕微 X 線法と画像処理技術の応用を試みた。その結果、解析の目的に最適な分解能をもつ X 線フィルムと撮影条件を選択することにより、マクロな坪量変動から、ミクロな個々の繊維に対応した微小領域における質量変動までを定量的に示す質量画像を得た。この画像を用いることにより種々のレベルにおける地合変動を評価し得るが、ここではテクスチャー解析の応用例として、2次元フーリエ変換によって質量変動の異方性を評価し得ることを示した。このような質量画像のテクスチャー解析によって、従来の方法では抽出し得なかったシート構造の特徴の解析、評価が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 土田幸三, 半田美次, 門屋 卓, 村田正男: 紙パ技協誌, 21, 43-50 (1987)
- 2) B. Norman, D. Wahren: Svensk Papperstid., 77, 397-406 (1974)
- 3) 村田正男, 中田幸次郎, 遠藤恭延: 紙パ技協誌, 26, 26-32 (1972)
- 4) P. T. Herdman, H. Corte: Pulp & Paper Mag. Can., 81, T261-T264 (1980)
- 5) 蓮池牧雄, 上坂 鉄, 村上浩二, 今村力造: 木材誌, 24, 473-478 (1978)
- 6) A. Komppa, K. Ebeling: "THE ROLE OF FUNDAMENTAL RESEARCH IN PAPER MAKING" ed. by J. Brander, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1983. P603-633.
- 7) P. Bergh, P. Luner: "THE ROLE OF FUNDAMENTAL RESEARCH IN PAPER MAKING" ed. by J. Brander, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1983. P707-722.
- 8) 内田 勝, 山下一也, 稲津 博: "放射線技術者

- のための画像工学”, 通商産業研究社, 1979, P99-143.
- 9) 藤波重次: “写真計測法”, 共立出版, 1977, P1-33.
- 10) 日本リモートセンシング協会編: “画像の処理と解析”, 共立出版, 1981, P169-172.
- 11) 谷口慶治, 井藤晴久, 酒井孝則: 電気通信学会論文誌, **J67-D**, 234-235 (1984)
- 12) 星野 孝, 須賀昭一編: “顕微X線法”, 医学書院, 1970, P49-57.
- 13) B. Lindström: “Roentgen Absorption Spectrophotometry in Quantitative Cytochemistry”, Acta Radiol., Suppl. (1955)
- 14) L. Rudström, U. Sjölin: Svensk Papperstid., **73**, 121-171 (1970)
- 15) R. E. Mark: “Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard, Volume 2” ed. by R. E. Mark, Marcel Dekker, New York, 1984. P300-306.

Appendix 透過軟X線強度の推定^{8), 12), 13)}

試料物質を透過する白色X線の強度について考えよう。まず, Kulenkampff によれば管球より照射される波長 $\lambda_i(\text{\AA})$ のX線強度 I_i は, 実験的に次式のようになる。

$$I_i = (CZ/\lambda_i)(1/\lambda_0 - 1/\lambda_i) \quad (\text{A1})$$

ここで, C は定数, Z はターゲットの物質の原子番号である。また λ_0 は照射されるX線の最短波長 ($\text{\AA}$) で

あり, Duane-Hunt の法則により次式で示される。

$$\lambda_0 = 12.42/V \quad (\text{A2})$$

ここで, V は管球電圧 (kV) である。このX線は試料を通過する際, 吸収と散乱により減衰するが, これは次式で近似される。

$$I_i' = I_i \exp[-(\mu/\rho)_i m] \quad (\text{A3})$$

ここで, I_i は透過X線強度, $(\mu/\rho)_i$ は波長 λ_i における試料の質量吸収係数, m は試料のマスデンスティ (g/cm^2) である。ところで, 試料が複数の元素で構成されている場合, $(\mu/\rho)_i$ は以下になる。

$$(\mu/\rho)_i = \sum (W_k/100.0)(\mu/\rho)_{k,i} \quad (\text{A4})$$

ここで, W_k は試料物質中の各元素の重量パーセント, $(\mu/\rho)_{k,i}$ は各元素の波長 λ_i における質量吸収係数である。さらに, ターゲットから放射されるX線は管球放射窓の隔膜ベリウム箔, 試料までの空気層などによっても減衰されるので, これらをも考慮すると, 波長 λ_i の透過X線強度は次式で表わすことができる。

$$I_i' = I_i \exp[-(\mu/\rho)_{Be,i} m_{Be} - (\mu/\rho)_{air,i} m_{air} - (\mu/\rho)_i m] \quad (\text{A5})$$

ここで, $(\mu/\rho)_{Be,i}$ と $(\mu/\rho)_{air,i}$ はそれぞれ波長 λ_i におけるベリウムと空気層の質量吸収係数, m_{Be} , m_{air} はその単位面積あたりの質量である。

以上のように得られた各波長におけるX線強度 I_i' を用いると, 白色X線の透過強度 I' は次式で計算することができる。

$$I' = \sum_{i=1}^n I_i' \quad (\text{A6})$$

(受理: 60. 7. 4)