

## 画像処理を用いた紙の物性解析手法

Novel techniques for analyzing physical properties of paper using image processing

東京大学大学院農学生命科学研究科  
生物材料科学専攻製紙科学研究室  
江前敏晴

*Toshiharu Enomae*

*Paper Science Laboratory, Department of Biomaterial Sciences  
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, the University of Tokyo*

### Abstract

---

Latest trends on quantitative analyses of paper physical properties by using novel techniques of image processing are reviewed. The file structure of a bitmap (BMP) file is systematic and the file header, info header, palette data, pixel color data etc. are stored in an orderly manner. Therefore, the RGB color data of each pixel of images can be obtained even using a simple program which a nonprofessional person writes and converted to demanded physical parameters. Several examples of applying image processing to paper-related images are demonstrated. Thermal video images obtained from infrared radiation were converted to temperature changes in a specified area of the images. This procedure permitted to distinguish the drying rates of coatings containing different water-soluble polymers. Similarity between two images is judged in terms of a correlation coefficient calculated between them when they are regarded as multidimensional vectors. Surface roughness profile images of a paper sheet before and after printing were compared and the similarity depended on the surface roughness. This image correlation technique was applied to the in-plane deformation distribution of paper and nonwoven sheets. Fast Fourier transform (FFT) is a popular method to extract periodicity included in images. Wire marks left on Japanese paper of the historical document after papermaking wires made of bamboo splints were analyzed by using FFT. The pitch of bamboo splints was calculated. The amplitude of the Fourier coefficients averaged in every radial direction enables to examine fiber orientation when FFT is applied to micrographs of paper surfaces. Traditional Japanese paper manufactured by the flow-forming method assumes intense fiber orientation in the back-and-forth direction from the craftsman. The intensity and direction of fiber orientation calculated with the historical document helped estimate the method of papermaking.

---

### 1 一般的な画像処理

#### 1.1 画像処理による定量的測定

画像処理には、見やすさ、美観を目的とするフォトタッチと計測を目的とする画像解析がある。この講義では顕微鏡画像などから定量的な測定データを得る画像解析法を考える。

定量的な解析例として、インクジェットプリンタで印字したドットの顕微鏡写真からドットの面積を測定した例を示す。2 値化によりドット部分だけを抽出し、面積と周囲長を測定した。不規則な形状の面積を測定する場合に非常に有効である。

## 1.2 画像解析ソフトウェアの例

- PopImaging Ver.3.40 (有)デジタル・ビーイング・キッズ)

<http://www.dbkids.co.jp/popimaging/>

10,290 円。試用期間があり、総利用時間が 60 分以内で、最初にソフトウェアを立ち上げた時から 30 日以内であれば無料で使える。

- Scion Image Beta 4.02 for Windows 95 to XP (英語版のフリーソフト) もある。

[http://www.scioncorp.com/frames/fr\\_download\\_now.htm](http://www.scioncorp.com/frames/fr_download_now.htm)

## 1.3 そのほか画像解析に役立つソフトウェア

- BMP 画像 $\longleftrightarrow$ JPEG 画像の相互変換- Bmp2Jpg 1.3

<http://www.vector.co.jp/soft/dl/win95/art/se231528.html>

- ビデオファイルをビットマップに変換 - AVI2BMP, WAVE 1.50.0

<http://www.vector.co.jp/soft/dl/win95/art/se156008.html>

- 画像ファイルのバイトデータの表示と編集- Stirling 1.31

<http://www.vector.co.jp/soft/dl/win95/util/se079072.html>

## 1.4 画像解析ソフトウェアの使い方

Scion Image Beta 4.02 (図 3 参照) で簡単な粒子解析の方法を説明する。解析例にある「顕微鏡写真からインクジェット印字のドットの面積と周囲長を測定」は、まず該当する画像ファイルを開き (File-Open) 2 値化のレベルを自動で決め (Options-Threshold) 求めたいパラメータを決定する (Analyze-Options) このとき、(必要に応じて) Area と Perimeter/Length にチェックを入れておく。解析を始める (Analyze-Analyze particles...) と、さらに設定を聞いてくるので Min. Particle Size (最小検出サイズをピクセル数で表現した面積で例えば) 200 に設定し、Ignore Particles Touching Edge にチェックを入れ (エッジにかかったドットは除外するため) Digits Right of Decimal Point を 0 (例えば) にして OK をクリックする。ドットにラベル番号を振って計算が完了する。解析データを見たり (Analyze-Show results) テキストデータとして保存したりする (Results ウィンドウをアクティブにしておき、File-Export) ことが可能である。なお、この粒子解析では黒部分を粒子だと仮定して計算を行う。

## 2 bmp (ビットマップ) からデータの取得

### 2.1 bmp ファイルの構造

パソコン上のファイルはすべてバイト単位で記述されている。1 バイトのデータは  $2^8$  の数値 (0 ~ 255 又は 16 進数で 00 から FF) のどれかである。

1.3 節で紹介した Stirling 1.31 など、ある画像ファイル (512 pixel×512pixel のカラー画像) の先頭から順に 1 バイトごとに読み込んだところ、

42 4D	36 00 0C 00	00 00 00 00	36 00 00 00	28 00
00 00	00 02 00 00	00 02 00 00	01 00	18 00
00 00	00 00 0C 00	C4 0E 00 00	C4 0E 00 00	00 00
00 00	00 00 00 00	5F 83 89	5B 82 8A	5B 82 8A
				5C ...

であった。

bmp ファイルはファイルの構造が決まっており、

ファイルヘッダ ( bmp ファイルであることやファイルサイズなどのファイルの情報 )

情報ヘッダ ( 画像サイズなどの画像情報 )

パレットデータ ( 色の割り付け、24 ビットカラーでは省略される )

画像データ ( 実際の各座標の色 )

の順でデータが格納されている。

ファイルの最初には、ファイルの情報部分であるファイルヘッダがある。

BITMAPFILEHEADER は、先頭から順に、

2 バイト	bfType	42 4D	このコードを文字に変換すると “ BM ”
4 バイト	bfSize	36 00 0C 00	ファイルサイズ。バイトごとに逆順にして 00 0C 00 36 = C0036 ( 16 進数 ) を 10 進数にすると 786486 バイトとなる。
4 バイト	...		
4 バイト	bfOffBits	36 00 00 00	何バイト目から bitmap の画像情報が始まるか。同じく逆順にして 36 ( 16 進数 ) を 10 進数にすると 54 バイト。54 バイトとは限らない。

次に、画像情報ヘッダ BITMAPINFOHEADER がある。ファイルヘッダに続き、順に

4 バイト	biSize	28 00 00 00	画像情報ヘッダのサイズ、28 ( 16 進数 ) = 40
4 バイト	biWidth	00 02 00 00	画像の横 pixel 数
4 バイト	biHeight	00 02 00 00	画像の縦 pixel 数
2 バイト	...		
2 バイト	biBitCount	18 00	使用色ビット数 18 ( 16 進数 ) を 10 進数にすると 24 ビット。RGB 各色 8 ビットのカラー。
4 バイト	...		
4 バイト	biSizeImage	00 00 0C 00	画像のバイト数。C0000 ( 16 進数 ) を 10 進数にすると 786432 バイト。bfOffBits の 54 バイトを足すとファイルサイズの 786486 バイトとなる。
4 バイト	...		

このあと、画像データである輝度情報がある。( 間にパレットデータが入る場合もある )

3 バイト	座標 ( 0, 511 )	5F 83 89	青輝度 B 95 / 緑輝度 G 131 / 赤輝度 R 137
-------	---------------	----------	----------------------------------

3 バイト	座標 ( 1, 511 )	5B 82 8A	青輝度 B 91 / 緑輝度 G 130 / 赤輝度 R 138
3 バイト	座標 ( 2, 511 )	5B 82 8A	青輝度 B 91 / 緑輝度 G 130 / 赤輝度 R 138
...	...	...	...
3 バイト	座標 ( 511, 511 )	...	...
3 バイト	座標 ( 0, 510 )	...	...
...	...	...	...
3 バイト	座標 ( 511, 0 )	...	...

画像の座標は図 4 のように左上を ( 0, 0 ) とする。色情報は左下から右下、次に下から 2 段目左から右、最後は左上から右上の順で記録されている。つまり上下が反転した情報が記録されている。

## 2.2 bmp からの色 (輝度) 情報の取得

bmp ファイルから色や輝度の情報を得るには簡単なプログラミングで可能だが、画像処理ソフトウェアでも可能である。例えば、Scion Image Beta 4.02 では、画像を読み込んだ後、Info ウィンドウ上にカーソルをおいた pixel の輝度 (色) 情報が示される。また、File-Export で Text ファイルを出力するように指定すると、左上の座標 (0, 0) の点から右方向の順に輝度レベルを保存することができる。

## 2.3 赤外線画像からの温度変化記録

bmp ファイルから画像情報を読み込み、計測に応用した例として、サーモグラフィ (熱画像法) による温度変化の測定を示す。熱画像は、特定領域の赤外線放射を検知するもので、輝度が温度に比例している。通常 0.2 秒 ~ 数秒おきに画像が連続したビデオとして撮影する。図 5 にある bmp 画像は温度が認識しやすいようにカラー化されているが、実際にはグレーの濃淡画像の各グレーレベルに特定の色を当てはめただけである。この熱画像カメラでは 3 点の温度変化は数値として記録されるが、任意の点あるいは任意の領域の平均値として温度を計測することはできない。測定したビデオ画像 (連続した bmp 画像) の同じ座標位置の領域の輝度を読み取り、温度に換算し、時間変化を見た。

実験では炭酸カルシウム粉末にエマルジョンタイプのバインダである SB ラテックスを加え、さらに種々の水溶性高分子を配合して固形分が 50% となるように調製した。図 6 は、紙に塗布した直後から表面の温度を熱画像法で測定した結果である。各塗工層とも初めの 10 秒間は表面温度の上昇が遅く、10 秒から 20 秒の間で急速に表面温度が上昇し、その後 45 ~ 50 °C 程度で一定となる傾向を示した。乾燥初めの 10 秒間程度で多くの水分が蒸発することがわかった。配合した水溶性高分子の中で、デンプン (Starch)、ポリビニルアルコール (PVA) は、温度上昇が速く、カルボキシメチルセルロース (CMC) のようなセルロース系高分子は遅い特徴があった。

## 3 画像の類似性

### 3.1 画像の相関

2つの画像が同じものかどうか、あるいはどの程度類似しているかを知る必要がある場合がある。そのときは画像間の相関係数を計算する方法がある。相関係数の計算方法はいくつかある。横  $X$  pixel×縦  $Y$  pixel の2つのグレイレベル画像  $f(x, y)$  と  $g(x, y)$  があるとすると、ここで  $f$  及び  $g$  は、座標  $(x, y)$  でのグレイレベル（輝度）である。ここで、各画像がすべての座標の輝度を成分に持つ  $XY$  次元のベクトルだと考える。 $X=512$ 、 $Y=512$  なら 262144 次元ベクトルとなる。

平面上の二次元ベクトルを思い出そう。2つのベクトル  $a$  と  $b$  の類似性は2つのベクトルのなす角  $\theta$  を使って、 $\cos\theta = \frac{a \cdot b}{|a| \cdot |b|}$  と表すことができる。ベクトル間の距離  $|a - b|$  でもよいが、画像間では異なる物性値を表す画像では濃淡の強さは重要ではないので  $\theta$  を用いる方がよい。2つの画像の各座標の輝度からそれぞれの画像の全ピクセルの平均輝度を引いたもの  $f(x, y) - \overline{f(x, y)}$  及び  $g(x, y) - \overline{g(x, y)}$  を考えたとき、同様に  $\cos\theta$  を計算すると、次のピアソンの相関係数になる。

3.2 ピアソンの相関係数

ピアソンの相関係数  $R$  は右式で定義される。

$$R = \frac{\sum_x \sum_y \{ (f(x, y) - \overline{f(x, y)}) \times (g(x, y) - \overline{g(x, y)}) \}}{\sqrt{\sum_x \sum_y (f(x, y) - \overline{f(x, y)})^2 \times \sum_x \sum_y (g(x, y) - \overline{g(x, y)})^2}}$$

となる。平均値を引かなくても同じような相関係数が得られるが、引かない場合は、相関係数の値が小さくなり、視覚的にかなり類似していると判断される場合でも相関係数は 0.1 程度になってしまうが、ピアソンの相関係数は視覚的に類似しているような場合は 0.5 程度になる。

図 7 は印刷前の紙表面と印刷後の同じ位置での紙表面の形状（三次元的な形状を示す。10 $\mu$ m の高さを 256 階調に分割して表現。）を示す。この2枚の画像のピアソンの相関係数を計算したところ、0.88 であった。

#### 4 画像相関法による移動計測

画像の相関を利用し、動画（ビデオ画像）のある画像の1部分がその後どこに移動したかを計測することが可能である。またその移動速度を測ることも可能である。このような手法を画像相関法あるいはパターンマッチングと呼ぶ。

解析の手順を、図 8 に示すような新聞用紙の引張変形を例にとって示す。紙面の各部分が引張応力を受けてどの方向にどのくらいの距離だけ変位したかを、透過光画像から探し出した。左が引張変形前の、右が破断寸前の透過光画像で、新聞用紙で撮影した例である。引張試験装置の後方に拡散光照明のライトボックスを置き、手前から CCD カメラで連続撮影した内の2枚である。まず、左図の変形前の画像上で、変位分布を調べたい範囲を決め任意の数のブロックに区切る。その中の、ある1つのブロック（テンプレート画像）に相当する部分がどこに移動したかを、そのブロックと同じ大きさの枠を右図の応力下の画像上において 1 pixel ずつずらしながら、テンプレート画像と最も類似したブロック画像を捜し出していく（この操作をテンプレートマッチングと呼ぶ）。ここで類似性を調べる時は、画像の相関係数（例えばピアソンの相関係数）を計算し、一定範囲でテンプレートマッチングを行った中からもっとも類似性の高い位置に移動したと判定する。図の例では赤線枠のブロックが下方にブロックサイズの 10% 程度移動したことがわかる。

この方法の応用例として、不織布の引張変形解析を示す。不織布とは、「繊維どうしを接着剤や熱溶融による自己接着を利用して結合するか、又は摩擦を利用して抜けにくい絡み合せを行って製造した繊維集合体」で、通常の布と紙の中間的な構造を持つ。マニラ麻の繊維とレーヨンの繊維を 25:75 の割合で混合して抄紙し、ウォータージェット法で交絡（直径 1mm の多数の穴から噴き出すジェット水流の下をワイヤごと通過させて繊維同士を絡める）させて製造した不織布の引張変形を同様の方法で調べた。図 9 の左上の画像は引張試験機に取り付けた不織布の一部で縦方向の溝はウォータージェットが通過した後である。幅 15 mm、スパン 50 mm、10 mm/min の速度で引っ張り、荷重が 0.5kgf に達したところを時間 0（変位 0）とした。これが右上図である。この状態で約 140 μm 四方のブロックからなるメッシュを画像上に重ねた。引っ張り始めてから 5 秒後（伸び 1.7%）及び 10 秒後（伸び 3.3%）の画像を左下及び右下に示す。時間 0 での各ブロックが 5 秒後及び 10 秒後にどちらの方向にどのくらいの距離を動いたかを画像相関法で決定した。

計算結果を矢印でそれぞれ画像上に示した。矢印の長さは矢印の根元位置での変位の大きさを 5 倍に拡大して表示している。矢印の向きは変位の向きを示す。なお、試料全体の位置が平行に移動する場合もあるので、中央上部位置を変位が 0 となるように合わせた。変位が大きくなると正しく変位した位置を計算できなくなるが、近傍のブロックの変位とかけ離れた変位を示すものは除外し、妥当な計算ができていると判断された矢印だけを残した。矢印の動きからこの不織布は縦方向の変位以上に横方向での収縮が大きいことがわかる。

## 5 二次元フーリエ変換の応用

### 5.1 周期性

フーリエ変換は、科学技術分野では振動、音、光、結晶構造などをはじめとしてさまざまな周期性を持った信号の解析に広く用いられる手法である。周期的な変化の解析以外にもいろいろな目的で用いられているものの、最も一般的な応用はパワースペクトルのピークから求める周期性である。フーリエ変換を変数  $x$  及び  $y$  の二次元で適用する場合は、画像に対するフーリエ変換と考えるとわかりやすい。 $N \times N$  画素の大きさの画像  $f(x, y)$  についてのフーリエ変換  $F(k_x, k_y)$  は次式で表される。なお、 $f$  は座標  $(x, y)$  における輝度である。

$$F(k_x, k_y) = \sum_{y=0}^{y=N-1} \sum_{x=0}^{x=N-1} f(x, y) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{N} (k_x x + k_y y)\right\}$$

$$(k_x = 0, 1, \dots, N-1 \quad k_y = 0, 1, \dots, N-1)$$

この式で計算される  $F(k_x, k_y)$  は一般に複素数であり、 $|F(k_x, k_y)|^2$  はパワースペクトルと呼ばれる。このパワースペクトルを  $k_x$  軸と  $k_y$  軸の画像としてプロットしたものが二次元のパワースペクトル図であり、その図でピークを示す位置が元の画像  $f(x, y)$  の持つ周期性を示している。図 10 は、一番左が明確な周期性を持った画像で画素数は  $N \times N$  である。フーリエ変換を行ってパワースペクトルを求めると中央の図のようになる。中央付近のピーク（黒のスポット）は波長の長い粗い周期性を、辺に近い周囲部のピークは波長の短い細かい周期性の存在を意味している。 $N=512$  であるとする。中央付近（枠内）だけを拡大したものが右の図で、座標  $(35, 77)$  にあるピークを例にとって考える。このピークの原点からの距離は図中の計算にあるとおり約 84.6 である。一辺の長さである 512 をこの距離で割った商 6.1 がこのピークが示す周期性の波長になる。原点からこのピークまでの方向は、この周期性が繰り返される方向を意味する。この周期性は右図の 5 本の平行線で示され、この平行線を元の画像（左図）に重ねれば確かにそのような周期性が存在すること

に気づく。この例では、非常に多数のピークがあり、それぞれに対応した周期性がある。

紙への応用として、ワイヤーマークの解析とそれによる紙の異同識別、ボコツキ感の解析、印刷網点の規則性解析などがあるが、古文書料紙に残るワイヤーマーク、すなわち簀の目の間隔の解析に応用した例<sup>1, 2)</sup>を示す。なお簀の目の解析に画像処理を利用したのは加藤ら<sup>3)</sup>が最初である。

図 11 の左上図は、京都の大徳寺に保管されている文書（大徳寺文書）の中の一点の料紙（りょうし = 書写用紙）の透過光像（512 × 512 画素）である。水平方向の平行線は、現代の抄紙ワイヤに相当する竹ひごを束ねた簀の目の跡で、一部を拡大して重ねてある図を見ると濃淡が繰り返されていることがはっきりわかる。右上図はそのパワースペクトル図で、座標  $a(0, 37)$  にピークをもち、先の図の説明にあるとおり、 $x$  軸に平行な線で、 $y$  軸方向に  $14(= 512 \div 37)$  ピクセル（画素）おきに濃淡が繰り返されていることを意味する。この画像の一辺の長さから、実際の紙では単位長さあたり何本の目があるか（目数 = めかず）を計算できる。通常は 1 寸（= 3.03 cm）あたりの本数で表現するのでこの料紙の例では目数が 12.8 本/寸であることがわかる。目数は古文書を修復するときの補修紙の選択の際に紙を規定する一つの要素となる。古文書料紙の虫食い部分に当てる紙の目数を合わせることは、視覚的な違和感をなくし、また縦横を合わせて膨潤収縮の方向を同じにすることにより保存性がよくなる。慣用的な目数の求め方は、簀の目が目立つ箇所に定規を当てて目測で数える方法である。しかしそれでは測定対象にした狭い部分の目数だけで、全体の平均的な目数にはならない。中世以前の木工技術では簀の目の数をそれほど正確には一定にできなかったと想像されるので、フーリエ変換を使って全体の平均の目数として算出することは望ましい方法であると言える。

左下図は、また別の一点で、はめ込み画像を見ても簀の目がはっきりとはわからない。フーリエ変換により右下図として示すパワースペクトル図を求めると、座標  $b(-1, 56)$  にピークをもち、これが目数 19.3 本/寸に相当する。目視では簀の目がほとんど認識できないような場合でも、このようにフーリエ変換によって周期成分が強調されることもある。

## 5.2 繊維配向性<sup>4 8)</sup>

二次元フーリエ変換が適用できるのは規則性のある画像だけではない。例えば紙表面の顕微鏡写真には多数の繊維が写し込まれるが、そのような繊維の向き（繊維配向）を調べることができる。繊維だけではなく、向きや流れが見えるすべての画像にその方向や方向性の強さを調べることができる。

図 12(a)は、デジタルマイクروسコープを用い、100 倍で表面を撮影した写真である。画像の中心部分  $1024 \times 1024$  画素分の画像に対し  $41 \times 41$  画素のブロックごとに動的閾値による 2 値化を行って(b)を得た。これをフーリエ変換するとパワースペクトル(c)が得られる。動的 2 値化は照明のムラなどを排除するためであり、また上下及び左右の濃淡の差を大きくし過ぎないようにするためである。フーリエ変換は画像が上下左右に無限につながった画像を仮定して計算するため、上下及び左右で極端な画像のずれがあると高周波数成分に多数のピークが表れてしまい、本来の周期性と重なって簀の目の判別を難しくするためである。2 次元フーリエ変換後、 $0 \sim 180$  度の角度を 2048 等分して  $0 \sim 2047 \times 180 / 2048$  度までの 2048 個の各角度  $\theta$  について距離  $r$  ( $r=2 \sim 511$  の範囲)に位置するフーリエ係数の振幅  $A(r \cos \theta, r \sin \theta)$  を求め、 $r$  に関してその平均値  $\overline{A(\theta)}$  を求めた。これは次の式で表される。

$$\overline{A(\theta)} = \left( \frac{N}{2} - 1 \right)^{-1} \sum_{r=2}^{\frac{N}{2}} A(r \cos \theta, r \sin \theta)$$

なお、極座標に変換するときは  $xy$  座標の周囲 4 点から距離で按分した値を用いた。ただし、距離  $r=0$  及び  $r=1$  の点を除外したのは、方向性とは関係のない全画素の平均値  $A(0, 0)$  ( $r=0$  での振幅) が計算結果に影響するためである。

図 13 は、平均振幅  $\overline{A(\theta)}$  を角度  $\theta$  について極座標で表示したもので繊維配向分布を表している。この図にある 2048 個 ( $y$  軸の負側を入れれば 4096 個) のプロットについての楕円近似を細線で図中に示し、その長軸と短軸を鎖線で示す。繊維配向分布はパワースペクトル図の比較的強いパワーを示す部分だけを抽出した図になっている。長軸はそちらの方向に濃淡の起伏が大きいことを示しており、言い換えれば繊維を多く横切る方向である。反対に短軸方向は濃淡の起伏が最も少ない方向であるから短軸方向が繊維の主配向の方向であることを意味している。

## 6 三次元画像化<sup>9)</sup>

紙同士あるいは他材料と積層化したり、マイクロチップを埋め込んだりする技術が今後見込まれ、この意味では紙を二次元的なシートではなく三次元的なバルク材料として扱う必要がある。したがって紙の三次元的な構造を明らかにする分析技術が重要となる。紙の内部構造を三次元的に可視化する方法には、共焦点型レーザー走査顕微鏡 (Confocal Laser Scanning Microscope = CLSM)、角度を変えて照射した X 線の透過像から計算により内部構造を画像化する X 線 CT 法<sup>10)</sup>、走査電子顕微鏡内ではほぼ完全なシリコン結晶を一種のレンズとして用いた得た硬 X 線を利用する位相差顕微鏡による方法<sup>11)</sup>などがある。この中で CLSM を使う方法を紹介する。CLSM は共焦点機構を用いて厚さ方向に光学的スライスを行って三次元像を構築する機能を有する。“共焦点”とは、検出器の前にピンホールを設けて、試料内部から来る反射光のうち焦点の合った極めて薄い層から来る光以外をカットしてしまう機構を意味する。また、その結果として光量が不十分になりがちなので照明光に強度の大きいレーザー光を使用する。

三次元化された画像に対しては三次元的に画像処理を行うのが適切な処理であるが、共焦点方式により得られた画像は  $xy$  方向と  $z$  方向に解像度の差があるため完全な等方性の画像とは言い難い。そのためここでは  $xy$  平面にある繊維の配向性を 5.2 節で用いた方法により計算し、それが  $z$  方向にどう変化して行くかを調べることに応用した。

試料調製は次のように行った。レーザー光が照射された部分から十分な光量を得るために観察試料を蛍光染料であるアクリジンオレンジのエタノール溶液に 12 時間浸漬して染色した。スライドガラス上に移し乾燥しないようにすぐカバーガラスをかけ、縁の部分からアニリンを滴下し反対側からエタノールを吸い取って浸漬液の置換を行った。染色に水溶液を使用しなかったのは膨潤による紙層の変形を防ぐため、屈折率がセルロースにほぼ等しいアニリンへの置換は、照射光と蛍光の散乱を抑え、底面側の繊維も鮮明に観察するためである。カールツァイス製共焦点レーザー走査顕微鏡 LSM 510 上に載せて、接眼レンズ、対物レンズとも 10 倍で観察した。照射レーザー光は 488 nm で、520 nm 付近の蛍光を受光した。0.92 mm 角の視野で  $512 \times 512$  の画素数、5  $\mu\text{m}$  厚さの層を、約 15 秒/面のレーザー走査速度で画像を取り込んだ。観察試料ごとに 5 箇所の積層画像を取り込んだ。

流し抄きで作られる和紙は抄き手の前後方向に繊維が配向する特徴がある。薄い 2 枚のシートを湿紙の段階で直交するように重ねて乾燥して製造した和紙を試料とし、この手法の有効性を検

討した。この和紙は、650 mm 角の寸法で、坪量 24.3 g/m<sup>2</sup>、厚さ 55 μm である。シート内の離れた 2 箇所から 10 mm × 20 mm の大きさの観察試料を採取した。図 14 はこの直交抄き合わせ和紙の共焦点スライス画像である。5 μm ずつの厚さで連続して取り込んだ一連の画像のうち、3 枚おきに示している。左側の元画像は、蛍光強度に関してどの画像も同一のスケールの輝度で表現しているが、右側は、5.2 節にあるように自動 2 値化した画像で繊維だけを抽出してある。5.2 節にある方法で繊維配向の角度と強度を計算した。図 15 に 5 箇所の部位の平均値を厚さ方向の相対位置に対して示す。厚さ 40 μm 位置で最も配向の強度が低くなり、この層を境に上部側は繊維が(画像の)上下方向に、下部側は左右方向に配向していることを意味している。なお、図 14 はある部位での画像であるので、これらの画像と図 15 での平均値とは完全には一致していない。この結果から CLSM の手法を用いることにより紙の繊維配向の厚さ方向変化が求められることが確認できた。

図 16 は同じく厚さ 51 μm の市販中質紙の共焦点スライス画像である。厚さ方向のどの位置でも繊維は左右方向に配向していることが視覚的に明らかである。図 17 は 2 値化画像から繊維配向を計算した結果である。配向角度及び配向強度とも 5 枚の画像の平均値ではなく、角度ごとの積算値として計算したため画像間のばらつきは示していない。紙層内のどの厚さ位置でも繊維は 0 度付近、すなわち画像の左右方向に配向している。厚さ 40 μm 付近の配向強度が 1.30 で最も大きかった。1.30 という値は非常に高い値で顕著な繊維配向を意味する。コピー用紙の繊維配向強度はこの方法で計算すると約 1.15 程度であり、やや繊維配向が見られるという程度である。熱ロールを通過する際の収縮によるシワの発生を防止するために製造上繊維配向を抑えるという紙の三次元構造的な特徴を捉えることができる。

## 7 おわりに

画像解析法の進歩と様々な分野での活用はいまや常識的であり、普遍的な技術となっている。また昨今のハードウェア技術の進歩から解像度の高い画像が得られるようになってきており、そこからの解析結果もまた精度の高いものとなっている。今後、紙の分野では繊維や添加剤、シート構造等をナノオーダーで制御して新しい特性を付与するような技術が発展していくと思われるが、ナノオーダーでの画像化技術と 3 次元画像解析技術は、そのような微細構造を制御した紙の解析技術として重要な部分を占めていくと思われる。

1. 保立道久ら, “ 禅宗寺院文書の古文書学的研究 宗教史と史料論のはざま ”, 2002 年度～2004 年度科学研究費補助金 ( 基盤研究(A)(2) ) 研究成果報告書 pp.139-159(2005)
2. 韓允熙, 江前敏晴, 磯貝明, 保立道久, “和紙の簀の目解析 - 古文書の分析結果を中心に - ”, 第 55 回日本木材学会大会(京都)研究発表要旨集, 114(2005)
3. 加藤雅人ら, 文化財保存修復学会第 25 回大会研究発表要旨集 pp.70-71, 京都(2003)
4. 韓允熙, 江前敏晴, 磯貝明, “和紙の抄紙技法と繊維配向の関係”, 第 55 回日本木材学会大会(京都)研究発表要旨集, 114(2005)
5. 江前敏晴, 韓允熙, 磯貝明, “紙の繊維配向をフーリエ画像解析により求める手法”, 文化財保存修復学会第 26 回大会研究発表要旨集, 44-45(2004)
6. 韓允熙, 江前敏晴, 磯貝明, “韓紙及び和紙の漉き方に由来する繊維配向の違いについて”, 文化財保存修復学会第 26 回大会研究発表要旨集, 200-201(2004)
7. 韓允熙, 江前敏晴, 磯貝明, “画像処理から求めた表面繊維配向分布による和紙の特徴抽出”, 平成 16 年度繊維学会年次大会研究発表会(繊維学会予稿集 2004), 72(2004)
8. Enomae, T., Han, Y.-H. and Isogai, A., "Fiber orientation distribution of paper surface calculated by image analysis", Proceedings of International Papermaking and Environment Conference, Tianjin, P. R. China (May 12-14), Book2, 355-368 (2004)
9. 江前敏晴, 韓允熙, 磯貝明, “共焦点レーザー顕微鏡による積層画像から求めた紙の繊維配向の Z 方向分布”, 第 54 回日本木材学会大会 ( 札幌 ) 研究発表要旨集, 289(2004)
10. 近藤祐介, Cyrus Aidun, “コート紙内部構造の解析手法の開発～X 線マイクロトモグラフィーを用いて～”, 第 72 回紙パルプ研究発表会要旨集, 20-23(2005)
11. Gureyev, T. E., Evans, R., Stevenson, A. W., Gao, D., and Wilkins, S. W., “X-ray phase-contrast microscopy of paper”. TAPPI J. 84(2), 52-65(2001)

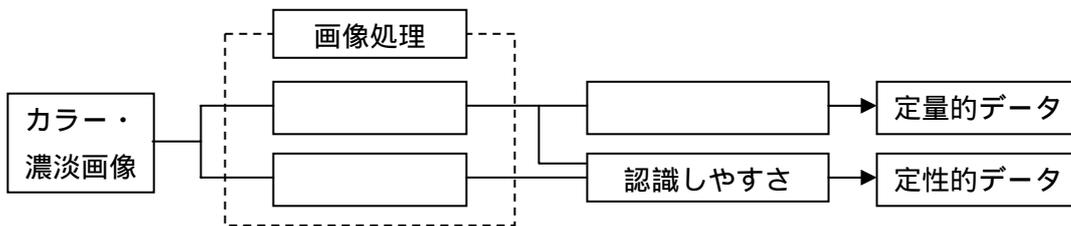


図1 フォトレタッチと画像解析の違い

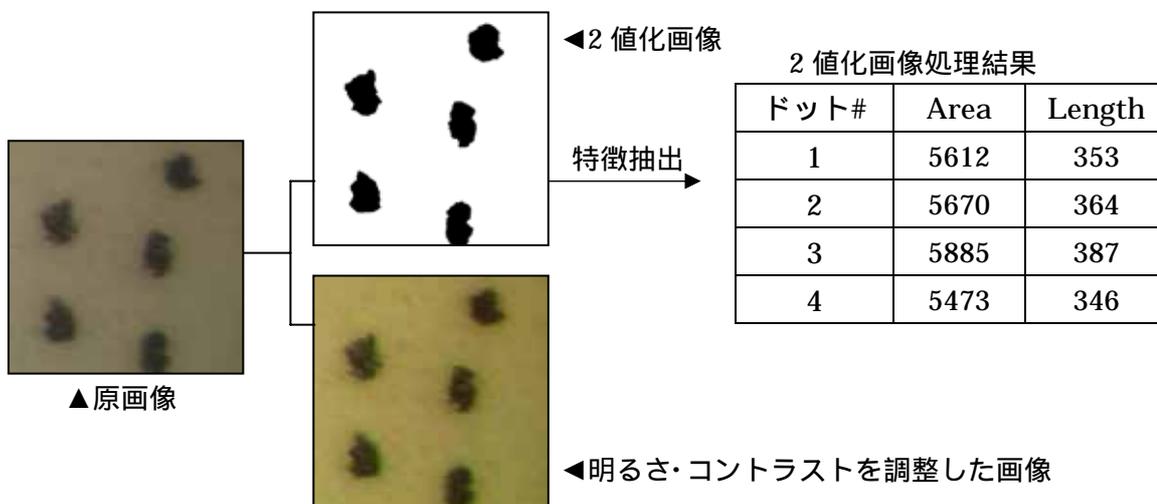


図2 画像解析の例 (顕微鏡写真からインクジェット印字のドットの面積と周囲長を測定)

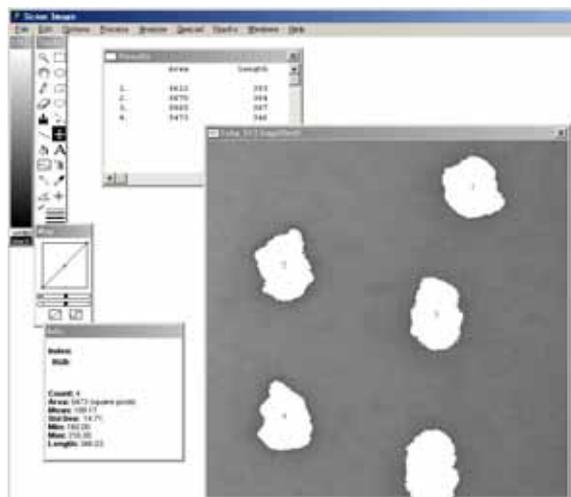


図3 画像解析ソフトウェア上での処理例

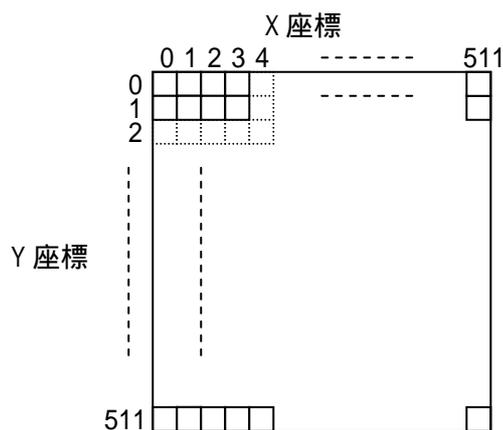
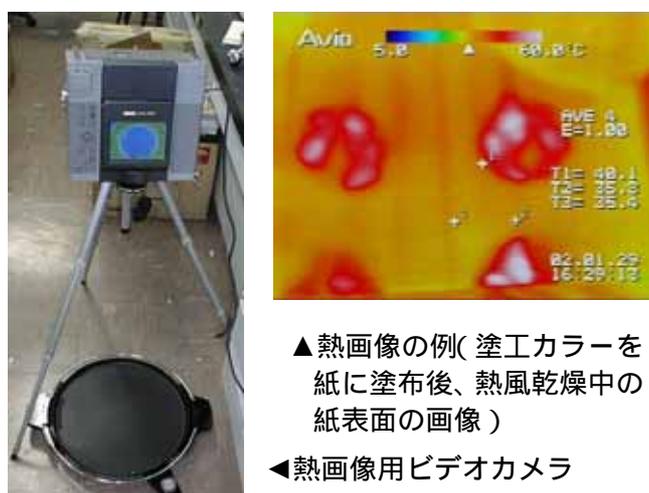


図 4 画像の座標



▲ 熱画像の例( 塗工カラーを紙に塗布後、熱風乾燥中の紙表面の画像 )

◀ 熱画像用ビデオカメラ

図 5 画像解析ソフトウェア上での処理例

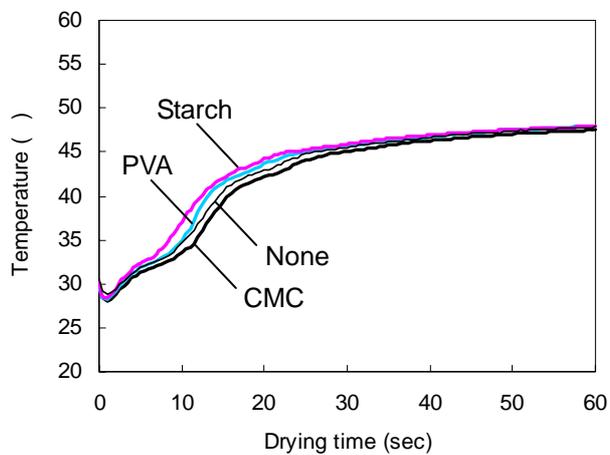


図 6 乾燥中の塗工層表面温度

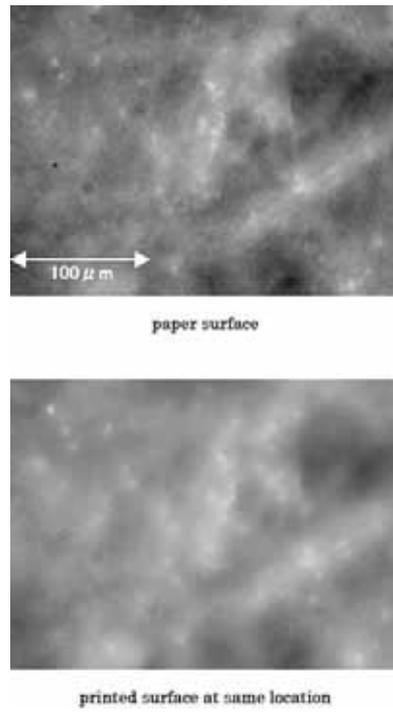


図 7 画像相関の計算

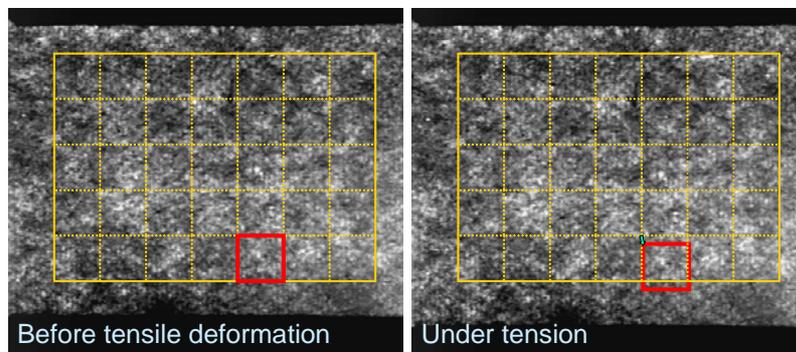


図 8 画像相関法による新聞用紙の引張変形の解析例

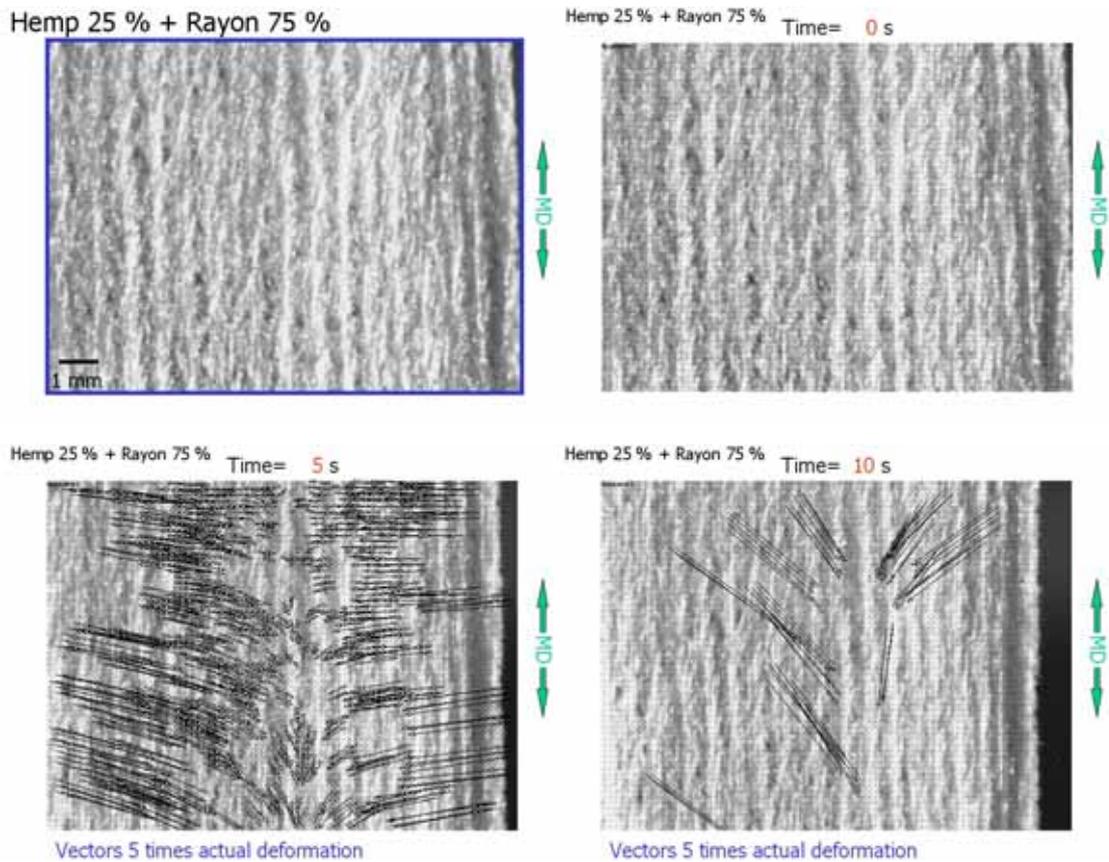


図9 画像相関法を応用による不織布の引張変形

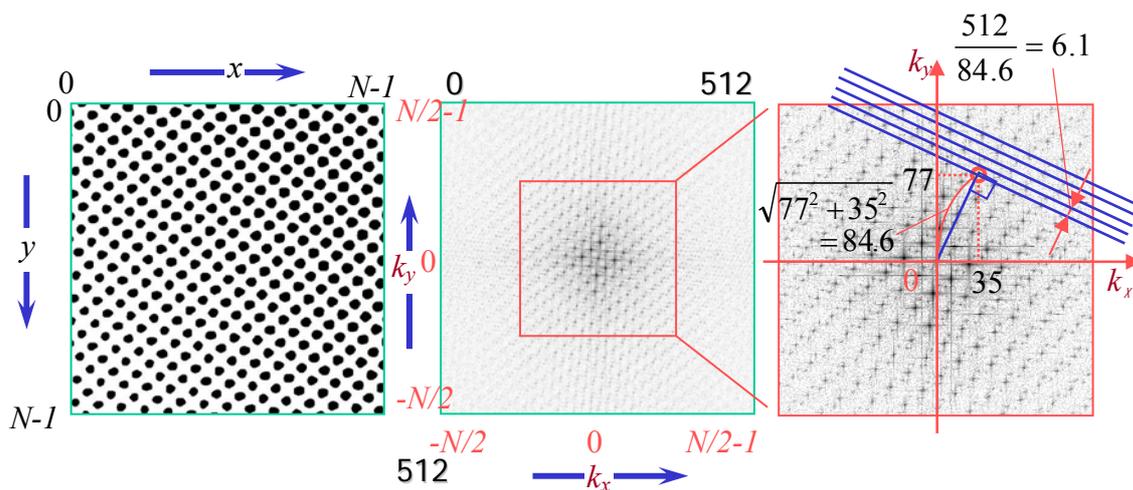


図10 二次元フーリエ変換によるパワースペクトル図に表れるピークの意味

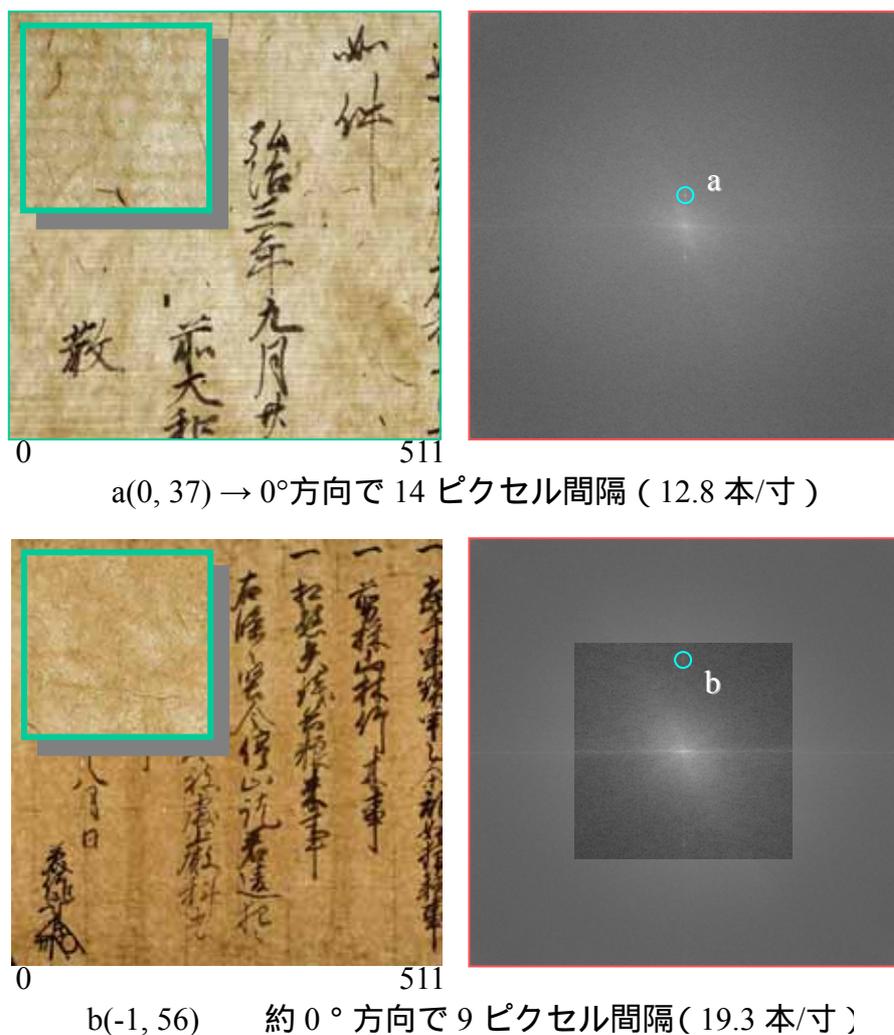


図 11 古文書の料紙に残る周期性である簀の目の間隔をフーリエ変換により求める方法

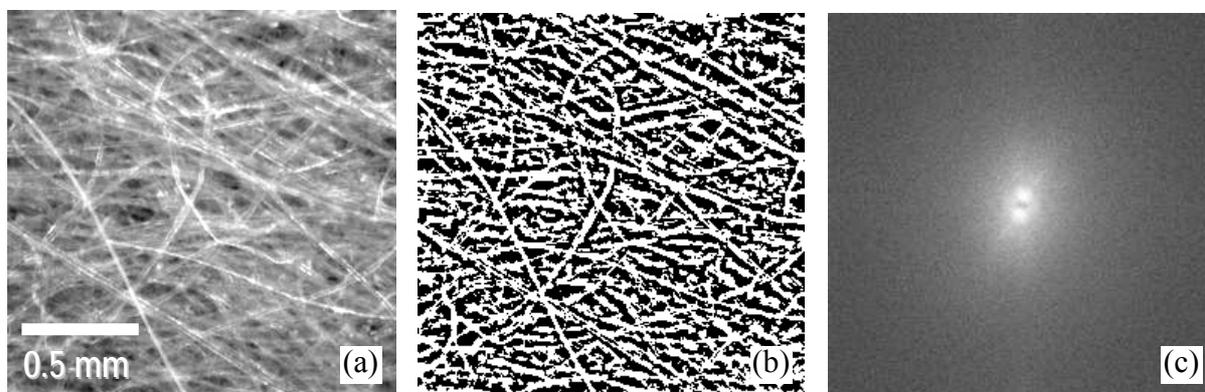


図 12 紙表面の光学顕微鏡写真(a), 二値化画像(b) 及びパワースペクトル(c)

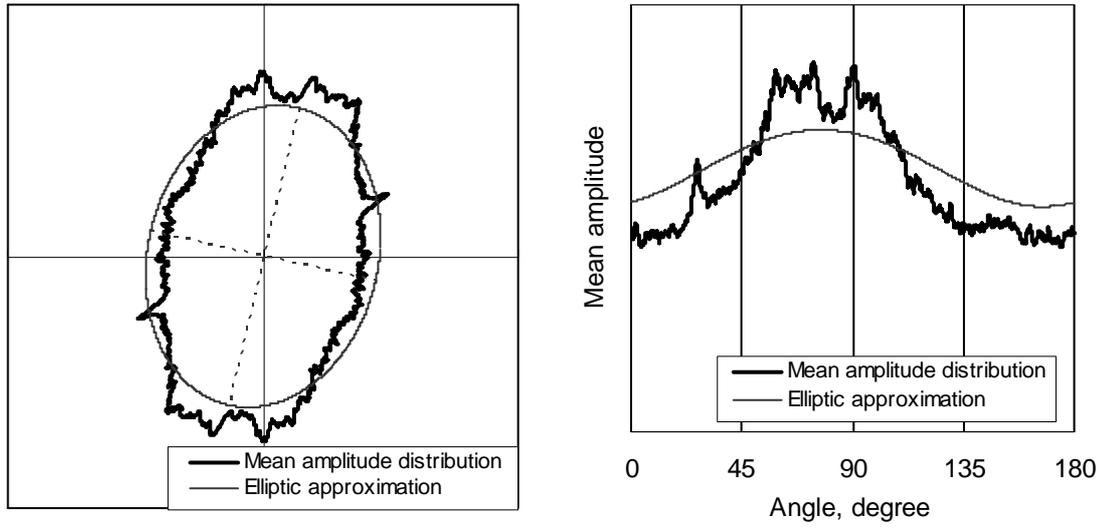


図 13 繊維配向分布とその楕円近似(左)及び角度 $\theta$ の関数としての表示(右)

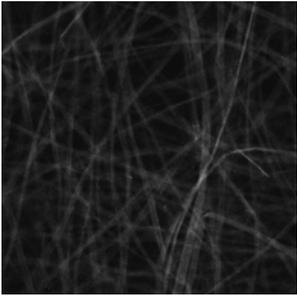
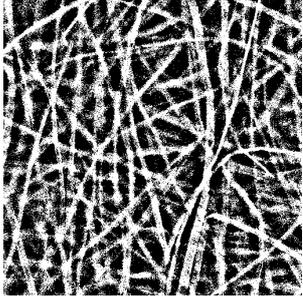
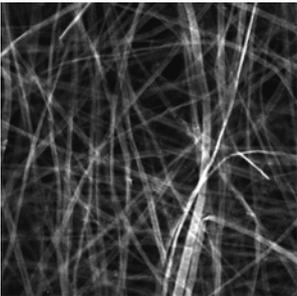
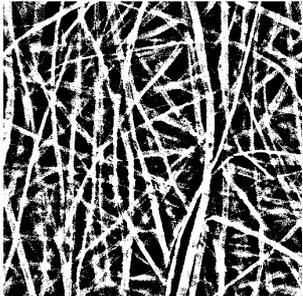
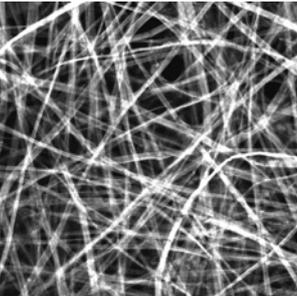
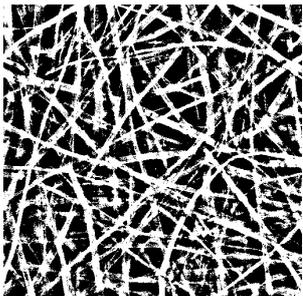
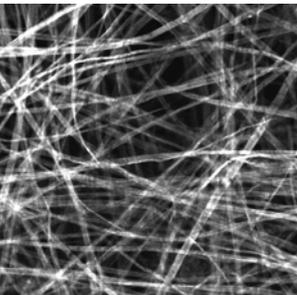
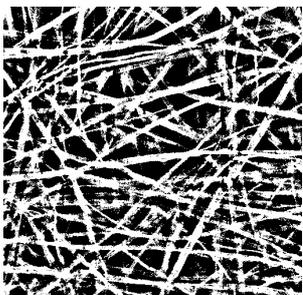
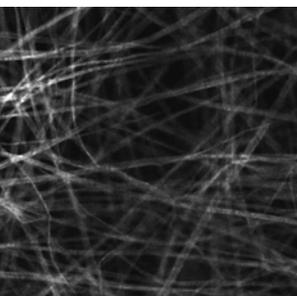
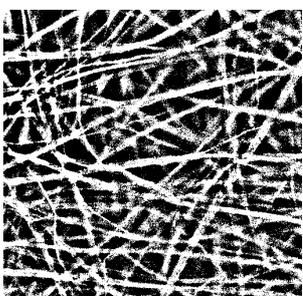
Depth from surface	Original slice image	Binary slice image
(a) 25 $\mu\text{m}$		
(b) 40 $\mu\text{m}$		
(c) 55 $\mu\text{m}$		
(d) 70 $\mu\text{m}$		
(e) 85 $\mu\text{m}$		

図 14 直交抄き合わせ和紙の共焦点スライス画像とその2値化画像

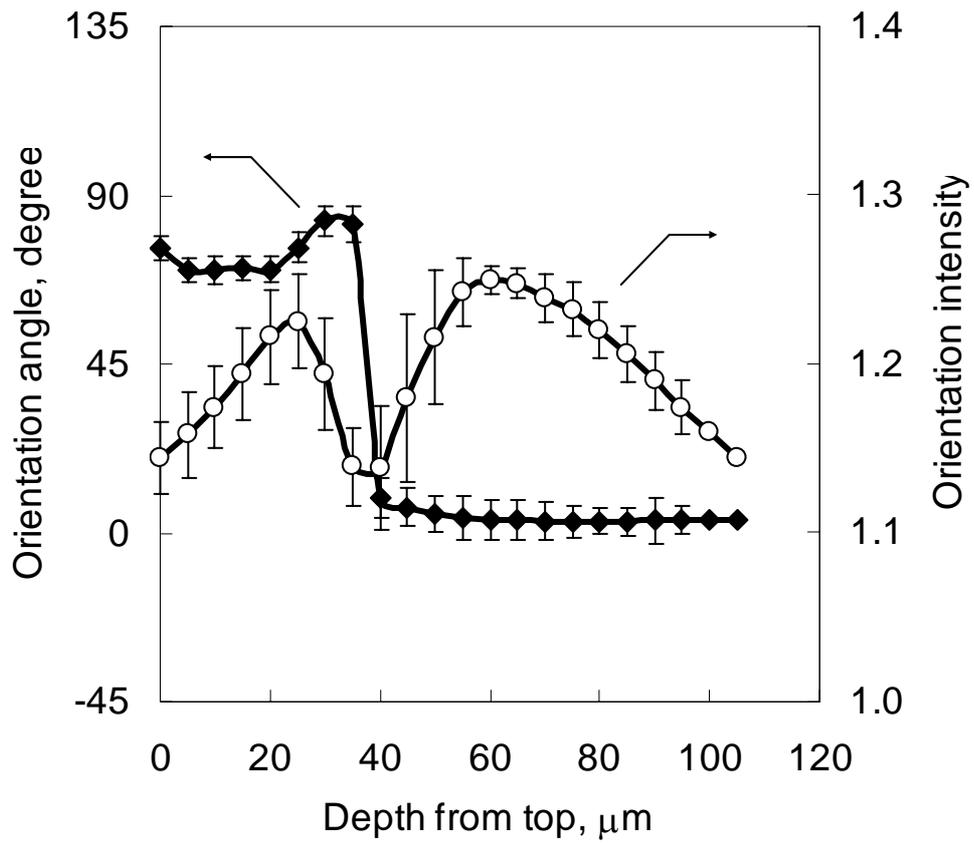


図 15 直交抄き合わせ和紙の繊維配向の角度と強度の厚さ方向変化

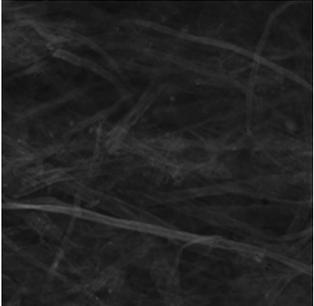
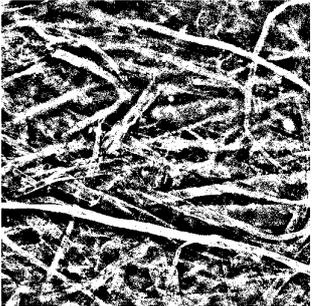
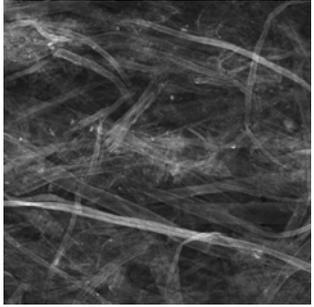
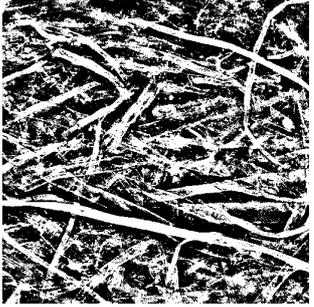
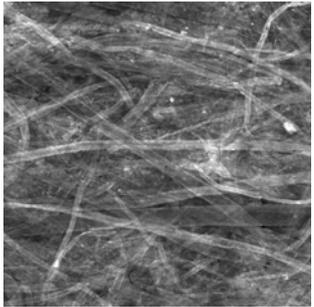
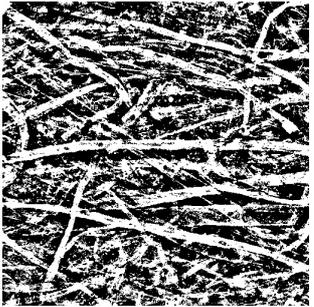
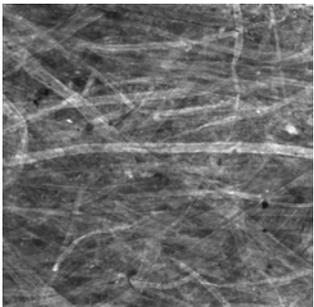
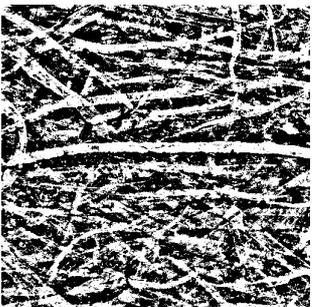
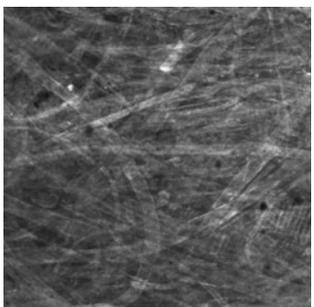
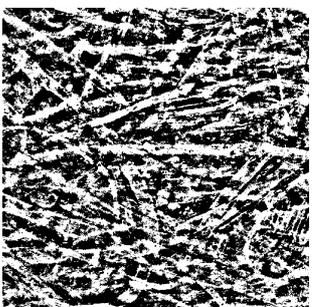
Depth from surface	Original slice image	Binary slice image
(a) 25 $\mu\text{m}$		
(b) 40 $\mu\text{m}$		
(c) 55 $\mu\text{m}$		
(d) 70 $\mu\text{m}$		
(e) 85 $\mu\text{m}$		

図 16 市販中質紙の共焦点スライス画像とその 2 値化画像

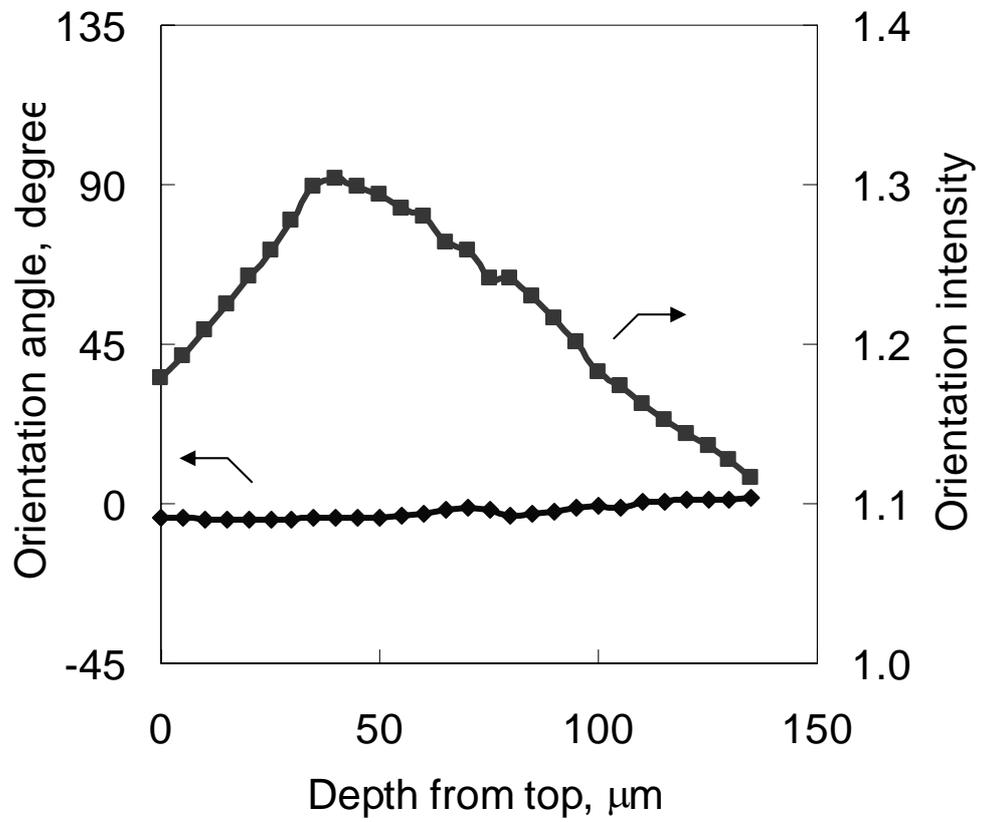


図 17 市販中質紙の繊維配向の角度と強度の厚さ方向変化