

透過光画像に画像相関法を応用した紙の物性解析技術  
(東大院農生命) 中山智仁、江前敏晴、尾鍋史彦

## 和文要旨

紙の特性を解析するために透過光画像にパターンマッチングの手法を適用し、この手法の有効性を示した。透過光画像を得るために試作した装置は、CCDカメラ、試料後方から照らす拡散照明及びソフトウェアから構成される。パターンマッチングでは、比較する2つの画像のうちの1つを任意の数のブロックに区切る。このブロック画像をテンプレート画像とみなし、これに類似したブロック画像をもう一方の画像から1画素ずつずらしながら探し出す。類似度は2つの画像をベクトルと考えたときの内積の大小で判断する。高分解能2分割3次スプライン補間関数を使って補間を行うことにより10倍の分解能で変位分布を求めることができた。引張変形の面内分布は地合のよい紙に対しても十分測定できた。濡らしたPPC用紙の拘束乾燥過程での収縮挙動の面内分布測定に応用した。試料を鉛直方向に拘束したとき、中央部のすべてのブロックは上に移動することがわかった。水が重力によって下に移動し、上から順にすぐ下の濡れた部分を引っ張りながら乾燥していったためであり、熱画像法によっても水が残る(蒸発熱による)低温領域が下の部分にだけになって行く様子が捉えられた。これに対し、水平方向に固定すると拘束方向での移動はなくCDにだけ収縮したが、CDにだけ収縮した点では鉛直方向の固定の場合と同様であった。PPC用紙の自由乾燥ではフラットベッドイメージスキャナを利用して透過光像を取り込んだ。CDだけでなくMDでの収縮が組み合わされてひずむように変形することがわかった。

## 透過光画像に画像相関法を応用した紙の物性解析技術\*

(東大院農生命) 中山智仁、江前敏晴、尾鍋史彦

**Techniques for analyzing paper properties by applying image processing to light transmission image**

*Tomohito Nakayama, Toshiharu Enomae and Fumihiko Onabe*

*Graduate School of Agricultural and Life Sciences*

Contact e-mail address: enomae@psl.fp.a.u-tokyo.ac.jp

### **Abstract**

The pattern matching technique is applied to light transmission images to analyze paper properties and its versatility is demonstrated. A prototype system developed for obtaining light transmission images consists of a CCD camera, diffuse illumination from the backside of a specimen and software. In pattern matching, one of the two images to be compared is divided into small rectangular blocks. The other image is searched for a block with a similar pattern to one of the blocks of the first image taken as a template block while the block frame is moved pixel for pixel. The similarity is judged based on the inner product of the two block images as a vector. Ten-fold interpolation with the high-resolution bi-cubic spline interpolation function is successfully applied to estimate the deformation distribution with ten-fold precision. In-plane distribution of tensile deformation is measured well even for paper with good formation. This technique is applied to in-plane distribution of restraint drying shrinkage of wetted copy paper. When a paper specimen is set and constrained vertically, every block around the center of the specimen totally shifted upward. It is because water moves downward by gravitational force, resulting in that the top part that dries and shrinks earlier draws the fiber network mostly from the flexible wet part immediately below. Thermography proves the water movement as a portion of low temperature due to absorption of evaporation heat remains to the last moment around the bottom part. On the contrary, when set

---

\*本研究の一部は、第67回及び第68回紙パルプ研究発表会(2000年6月及び2001年6月、東京)で発表した。

horizontally, the specimen does not exhibit any total shift in the restraint direction, but shows shrinkage only in CD as well as observed with the specimen set vertically. For free drying of the copy paper, a flatbed image scanner was used to acquire images. The shrinkage tends to occur in a complicated manner, distorted by mixture of CD and MD shrinkages.

**Keywords** : drying shrinkage, Image correlation method, in-plane deformation, pattern matching, template matching, thermography

## 1 緒言

引張応力下や乾燥過程において紙は変形する。その変形は、必ずしも均質なものではなく、繊維配向性や地合いなどに影響される。紙の面内変形の分布を、画像相関法を用いて高精度に求める方法を検討した。

Peters ら<sup>1)</sup>は、材料表面の特徴的な画像パターンがどのように変化したかを解析することにより材料の面内変形を求める画像相関法を考案した。この方法では、変形前の全体画像を細かいブロック画像に分けて、各ブロックが変形後にどの場所に移動したかをパターンマッチングの手法によって探し出すという手順を繰り返す。様々な分野でのこの技術が応用され、Choi ら<sup>2)</sup>はコピー用のカーボントナーを付着させた木片や板紙のひずみを光学顕微鏡下で測定した。中村ら<sup>3)</sup>は、木材の圧縮変形の解析に木口面で観察される組織の特徴的な配列パターンを利用して行った。紙の変形解析の分野への応用はさらに古く、Sutton と Chao<sup>4)</sup>は、コピー機を用いて紙表面にランダムなパターンを与え、変形解析を調べるシステムを考案し、引張試験に応用した。同様の方法で Wong<sup>5)</sup>らは、局所的な坪量が局所的な引張ひずみと逆相関することを見出した。ただし、コピーによるパターンの付与は、加熱によってカールなどが発生するなど試料を損なうおそれがあり、元の試料と同じとは言えない。また、類似した解析法として、レーザー光を紙表面に照射することで得られるスペックルパターンの変化を画像相関法によって解析する方法があり、面内での紙の変形を解析できることが示されている<sup>6)</sup>。この方法は、試料を汚損しない長所を持つ反面、面内変形のみならず紙の表面形状の変化によっても得られるスペックルのパターンが変化する上、測定を通してレーザー光源とサンプルの位置関係が常に一定であることが必要とされるので振動の影響を受けやすく、実験に困難が伴う。

本研究では、紙に光を透過させることで得られる透過光画像の地合パターンを画像相関法に応用できるのではないかと考え、試験的なシステムを構築した。湿潤シートがどのように変形しながら乾燥するかを調べることに利用し、サーモグラフィによる水の移動との関係を考察したので

それらの結果について報告する。

## 2 理論

### 2.1 パターンマッチングのやり方

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す手法は次の通りである。図 1 は、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。写真の上下にある黒い部分は試験片のつかみ部分である。まず、図(A)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 ピクセルずつずらしながら、探し出して行く。変形前後で面積の小さな領域であるブロック画像もひずみを受けているのでまったく同一の画像にはならず、実際にはテンプレート画像と最も類似したブロック画像を探し出すことになる(テンプレートマッチング)。類似性は、式(1)に示される類似度  $S_{fg}$  が最大となるときに最も類似していると判定される。

$$S_{fg} = \frac{\iint f(x, y)g(x, y)dxdy}{\sqrt{\iint |f(x, y)|^2 dxdy \iint |g(x, y)|^2 dxdy}} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $f(x, y)$ ,  $g(x, y)$  は、2 つの画像の各座標  $(x, y)$  にあるサブピクセルのグレーレベルを表しており、両画像をベクトルとみなしたときの正規化内積の大きさを判定することに相当する。

### 2.2 補間による分解能の向上

上記の方法では 1 ピクセル以下の変形を捉えることはできず、紙の変形量が非常に微小である場合にその変形を解析することが困難である。そこで画像の補間を試みた。応力下の画像の各ピクセル間を 10 分割し、9 個のサブピクセルで補間することにより仮想的に解像度を  $10^2$  倍にしておく。テンプレートマッチングでブロックの枠を 1 ピクセルずつずらす代わりに、 $1/10$  ピクセル (= 補間された画像での 1 ピクセル) ずつずらしていけば、変位の方向と距離の分解能も 10 倍向上する。高分解能 2 分割 3 次スプライン補間関数 (High resolution bi-cubic spline interpolation function<sup>7)</sup> 単にバイキュービック法とも呼ばれる) を用いて補間を行った。この関数は、理想低域通過フィルタ関数である  $\frac{\sin px}{px}$  で与えられる sinc 関数をスプライン補間して得られた式(2)で表

される。

$$\begin{aligned} f(x) &= (a+2)x^3 - (a+3)x^2 + 1 \quad 0 \leq x \leq 1 \\ f(x) &= ax^3 - 5ax^2 + 8ax - 4a \quad 1 < x \leq 2 \end{aligned} \quad \text{式(2)}$$

ただし、 $-1 \leq a \leq -\frac{1}{2}$  で適当な値を選択する。本研究では  $a = -1$  とした。なお、 $-2 \leq x \leq 0$  の

範囲では、 $x$  を  $|x|$  と置き換えて計算する。この関数は、点広がり関数であり、あるピクセルについて、自分自身の場所を  $x = 0$  とし 2 ピクセルはなれた点 ( $x = -2$  及び  $x = 2$ ) の間で式(2)の  $f(x)$  を 0.1 ごとに計算する。すべてのピクセルについて  $f(x)$  を計算したあと、各ピクセル及びサブピクセル位置でその総和を求める。このようにして計算された補間例を、図 2 に示す。類似度を計算する際には、補間された画像を 10 ピクセルごとに再サンプリングし、ピクセル数を合わせる。

### 3 実験

#### 3.1 装置

図 3 に示す試験的なシステムを構築した。引張試験機(エイアンドデイ製オリエンテック UTM-100)によって試験片を引張りながら、後方からライトボックスを利用した拡散照明光を試験片に当て、CCD カメラ(ソニー製 XC-77)で透過光画像を撮影し、出力されるビデオ画像信号をキャプチャボード装着のパーソナルコンピュータにより画像データとして連続的に記録した。カメラは、撮像素子に 2/3 型インターライン方式 CCD を使用しており、有効画素数は 768(横)×493(縦)、CCD 上のピクセルサイズは 11  $\mu\text{m}$ (横)×13  $\mu\text{m}$ (縦)、水平解像度はノンインターレースの 570TV 本である。S/N 比は 60dB でノイズが少ない仕様となっている。引張試験機のクランプは圧縮空気を利用したエアチャック方式で、試料を挟む部分はゴム板が貼ってある。引張過程で試料が滑る可能性があるが、クランプ付近の画像からは滑りは観察されなかった。ロッドとプレートで挟みつける構造のクランプと可動側のクランプが 2 本のガイドロッド上を滑らかに動くメカニズム<sup>8)</sup>が理想的であるが、本研究では使用していない。撮影された画像は平面座標(x, y)の 2 変数関数として表現され、その値は位置(x, y)における 256 階調の輝度レベル(グレーレベル)である。画像の大きさは、640×480 ピクセルであるが、解析には 256×256 ピクセル程度の領域を使用し、ブロック画像は主に 16×16 ピクセル又は 32×32 ピクセルの大きさとした。

#### 3.2 補間法を用いた解析

画像の補間を行うことによりサブピクセルレベルでの解析が実際に可能であるかどうかを調べた。試料には新聞用紙を用い MD 方向に引張り試験機を用いて引張り、変形を解析した。このとき画像に対してピクセル間に 9 点の標本点を取り 10 倍の補間を行った場合と、全く補間を行わなかった場合の解析結果を比較した。

### 3.3 地合の影響

この手法では、紙の地合むらに起因するパターンによって解析を行うので、非常に均一でむらのパターンが目立たない紙でも解析が行えるのかという問題が存在する。この問題について検討するために、攪はん後ろ水までの静置時間であるリテンションタイムを 0 秒として地合をよくした手すき紙と 120 秒として地合を悪くした手すき紙を調製し、それらの変形画像について解析を行った。

### 3.4 湿潤シートの拘束乾燥過程での面内変形

乾燥過程における水分と紙の収縮の関係を調べた。図 4 に試料や装置の配置を示す。左図は引張試験機で試験片を固定したときの配置である。幅 40 mm に採取した再生 PPC 用紙 (坪量約 60 g/m<sup>2</sup>) を挟み、紙がピンと張るまで数 N の張力を加えてクロスバーを止めた。全ての機器が固定されたこの状態で試験片の透過光画像を撮影した。この後、霧吹きで試料を十分に濡らし、標準調湿条件下 (23 °C、50 %RH) で試料を乾燥させた後に、再度試料の透過光画像を撮影した。右図は、同様に幅 40 mm の試験片を手すき紙用の角型乾燥リングに挟んで、試料を濡らす前後の透過光画像を撮影した配置の模式図である。このとき試験片は水平に寝かせて固定されている。試験片の乾燥過程で過剰の水が重力で下方に流れて行くと、異なった収縮挙動が予想されるので鉛直方向 (左) と水平方向 (右) の 2 つの試料固定法を採用した。なお、試料のマシン方向 (MD) を拘束方向とし、試験片の中央部付近を撮影した。

### 3.5 湿潤シートの拘束乾燥過程での温度分布の変化

図 4 左と同様に PPC 用紙の試料を固定し、サーモグラフィ (日本アビオニクス TVS-100) を用いて 23 °C、50 %RH で乾燥したときの試料表面の温度分布画像を記録した。最小検出温度差は黒体温度 30 °C において 0.2 °C である。

### 3.6 湿潤シートの自由乾燥過程での面内変形

再生 PPC 用紙から 50 mm×50 mm の試料を採取し、フラットベッドスキャナ (エプソン ES-2000) と透過原稿ユニット (同 ESA4FLU) を使ってその透過光画像を撮影した。霧吹きで試験片を濡らした後、張り付かないよう注意してポリスチレン製のシャーレの上に置き、31 °C に保持したオープンで乾燥した。試料を濡らす前と同じ位置と角度をなるべく保つように注意しながら再度フラットベッドスキャナを使って、透過光画像を撮影した。

## 4 結果と考察

### 4.1 地合の異なる紙での解析

リテンションタイムを変えて調製した地合の異なる手すき紙の透過光画像を図5に、面内変位分布の解析結果を図6に示す。変位の距離を示す矢印の長さはどの図も実際の10倍にしてあるが、図7の左の図に示す矢印だけは実際の変位の距離に相当する。

地合のよい試料の変形も十分解析が可能であることがわかった。したがって、紙の地合の良し悪しに関わらず、透過光画像により紙の変形解析が可能であることが分かる。画像からの推察だが、当然のことながら地合のよい紙でも微視的に見れば局所的なむらが存在しており、これを手掛かりにして解析が行われているのではないかと考えられる。

#### 4.2 補間法を用いた解析

図7は、補間を全く行わなかった場合と、ピクセル間に9点の標本点を取り10倍の補間を行った場合の解析結果を示す。補間を行った場合は、紙の変形挙動を解析できる分解能が向上したことがわかる。これは、この方法による補間を行うことでサブピクセルレベルでの解析が十分可能であることを示すものである。

#### 4.3 湿潤シートの拘束乾燥過程での面内変形

再生PPC用紙の乾燥過程での面内変位の分布状態を図8に示す。図中の矢印の長さは実際の変位よりも大きくして示してある。左図は鉛直方向に試験片を固定して拘束した場合で、全体に上方に移動していることがわかる。過剰の水は下方に流れて行くため上部から順に乾燥して行く。含水率が一定値以下になると収縮が始まるが、そのときにまだ湿潤状態にある下側部分が伸張しやすいために上方に引っ張られたことが予測される。CDでは、左下付近に寄るように左右から収縮していることがわかる。左に偏っているのは紙全体がわずかに左方に動いたためと考えられる。右図は水平方向に固定して拘束した場合で、拘束方向であるMDには変位がほとんどなく、CDにのみ収縮していることがわかった。また、湿潤シートは乾燥シートに比べて光の透過量が大きい、パターンマッチングに必要とされるフロックなどによる特徴的パターンは十分に保持されていることがわかった。

#### 4.4 湿潤シート内の拘束乾燥過程での水の移動

鉛直方向に拘束した場合のように水の移動に伴って不均一な乾燥が起こるときに、鉛直方向に特異な収縮挙動を示すことがわかったが、水の移動が実際に起きているのかどうかを知るためにサーモグラフィを利用して試験片表面の温度分布を調べた。湿潤部分は、水の蒸発により吸熱するため周囲より低温になるはずである。図9にサーモグラフの時間変化を示す。霧吹きで試験片を濡らした直後はほぼ均一な温度を示したが時間の経過とともに低温領域は下に移動しており、水が重力のために下に移動して行くことがわかった。

#### 4.5 湿潤シートの自由乾燥過程での面内変形

PPC 用紙の湿潤シートを自由乾燥した場合の面内の変位分布を図 10 に示す。試料をフラットベッドスキャナに置く位置のずれの影響も若干見られるが、試料の変位分布を測定することができた。乾燥の状況にもよるが、CD だけでなく MD での収縮が組み合わされて、ひずむように変形が起きていることが分かる。自由収縮では紙が立体的にうねったり波打ったりするので撮影が難しい。

#### 5 結論

紙の引張変形や乾燥収縮で生じる変形はごくわずかであり、また試料内の各部分の変位の方向と距離は必ずしも均一ではない。そのような変位の分布を、可視化し、かつ定量的に測定する目的で、パターン認識によく使われる画像処理の手法（パターンマッチング）を紙の透過光画像に応用して解析する方法を提案した。パターンマッチングでは紙の地合むらに基づく特徴的なパターンが利用されている。紙の透過光画像を撮影する手段として CCD カメラの他、イメージスキャナーなどが利用できる。ビデオ型のマイクロスコブを利用して微小領域を拡大して解析することも可能である。またこれらの画像入力機器で通常の反射画像を撮影して解析に供することも可能である。

上記の物性解析法を用いることにより、ここでは次のことが分かった。

1. 地合の均一な紙でもパターンマッチングに必要な特徴的なパターンが透過光像に存在し、変形解析が可能であった。
2. 画像の補間により、変位の距離及び方向の分解能を 10 倍にすることが可能であった。
3. 湿潤シートの拘束乾燥過程で、試料のマシン方向を鉛直方向に固定して拘束したときは、過剰の水が下方に移動することにより、上部から順に乾燥して行き、乾燥箇所の収縮によって紙匹はまだ湿潤状態にあって伸びやすい下部から上部へと収縮していくことがわかった。水分の移動はサーモグラフィ（熱画像法）によっても確かめられた。水平に保持したときはクロスマシン方向に収縮するだけであった。
4. 湿潤シートの自由乾燥過程では、イメージスキャナーで透過光画像を得た。マシン方向とクロスマシン方向の収縮が複雑に作用し、全体にひずむように変形することがわかった。

#### 引用文献

- 1) W. H. Peters, W. F. Ranson: Optical Engineering 21(3), 426(1982)
- 2) Choi, D., Thorpe, J. L. and Hanna, R. B.: Wood Science and Technology 25, 251(1991)

- 3) 中村匡司, 増田稔: 木材学会誌 45(3), 222(1999)
- 4) Sutton, M. A. and Chao, Y-J: Tappi J. 71(3), 173(1988)
- 5) Wong, L., Kortschot, M. T. and Dodson, C. T. J.: J. Pulp Paper Sci. 22(6), J213(1996)
- 6) Lif, J. O, Fellers, C., Soremark, C. and Sjodahl, M.: J. Pulp Paper Sci. 21(9): J302(1995)
- 7) Parker, A., Kenyon, R. V. and Troxel, D. E.: IEEE Trans MI-2 1(3) 31 (1983)
- 8) Seth, R. S.: Tappi J., 78(10), J177(1995)

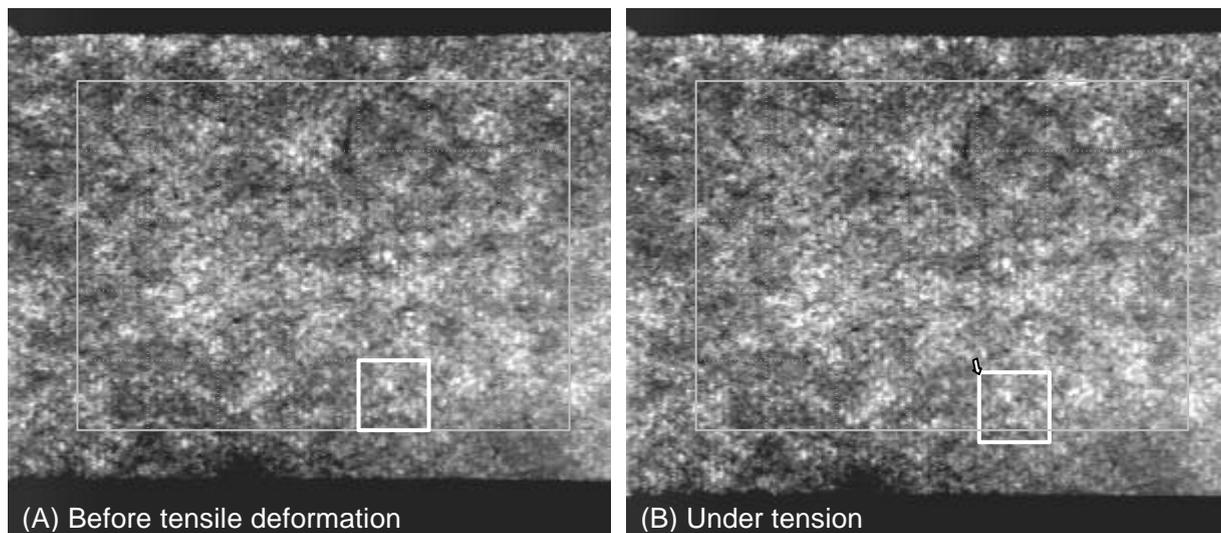


Fig.1 Schematic diagram of pattern matching. Image B is searched for the most similar image block to the target one in image A by scanning pixel for pixel.

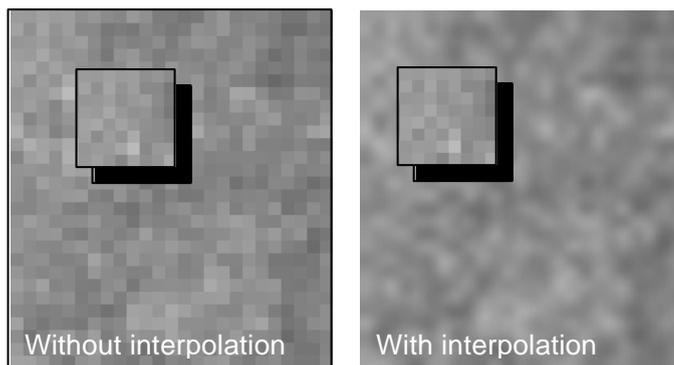


Fig.2 Improvement in resolution by interpolation function.  
Tenfold interpolation makes a tenfold sensitivity of  
direction and distance of displacement

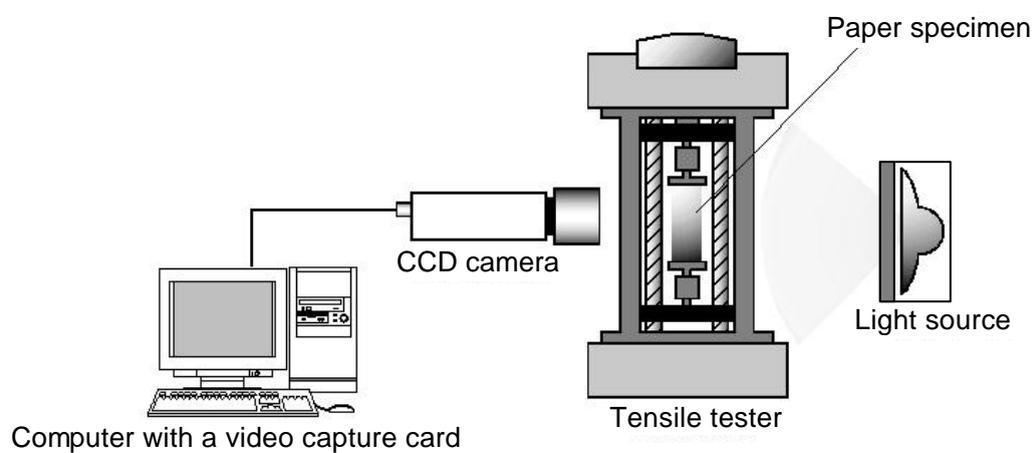


Fig.3 Experimental system for measuring distribution of tensile deformation of paper

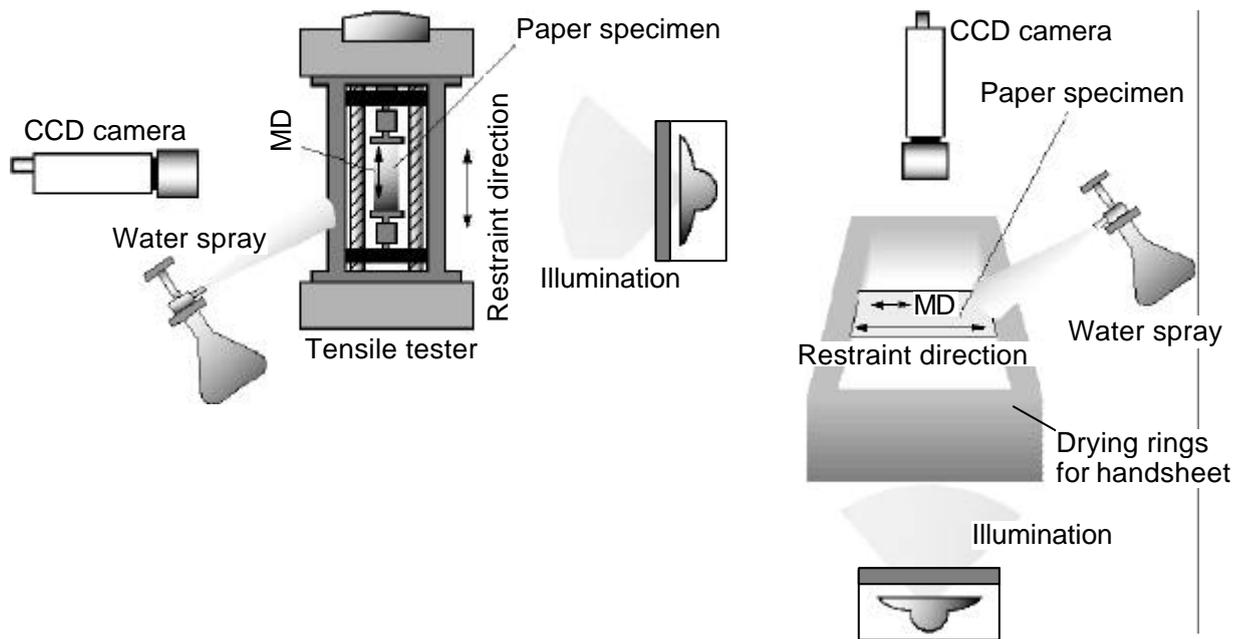


Fig.4 Vertical (left) and horizontal (right) paper specimen settings to obtain light transmission images for distribution of in-plane deformation during drying

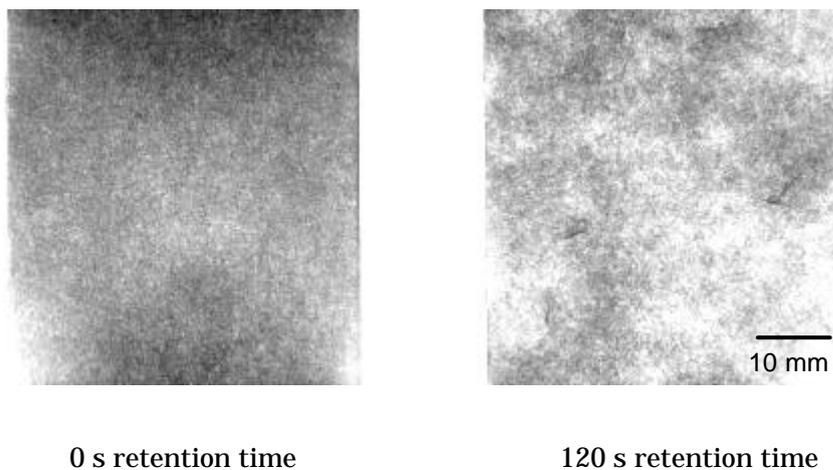


Fig.5 Light transmission image of handsheets with different retention time

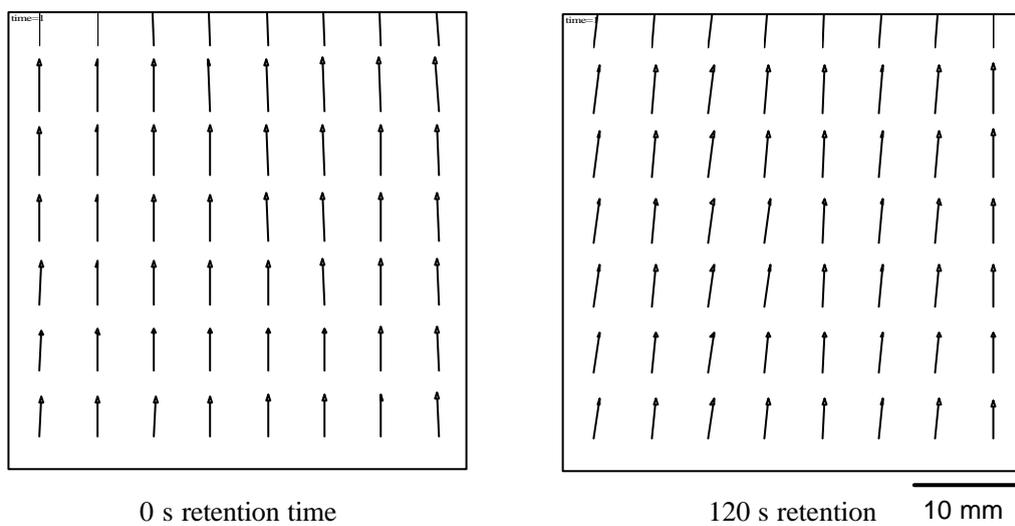


Fig.6 Distribution of tensile deformation of paper with different levels of formation

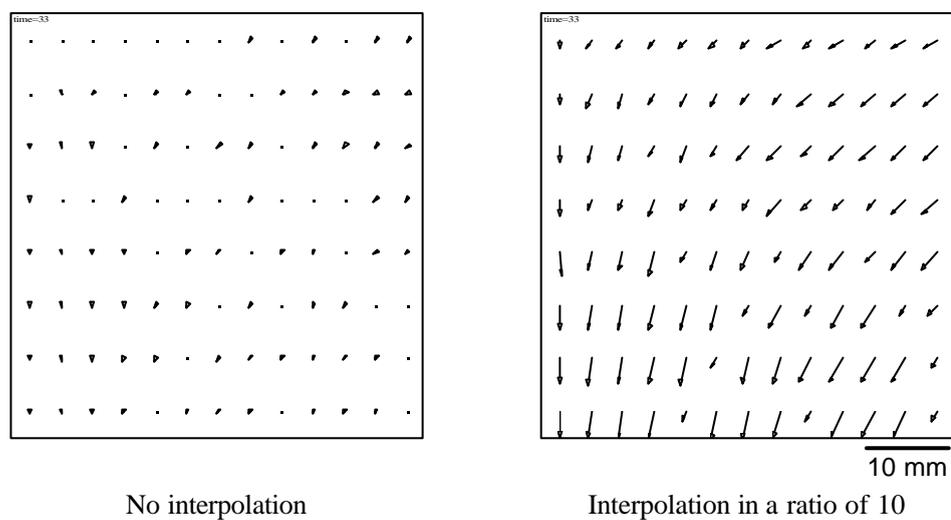


Fig.7 Distribution of in-plane deformation compared between interpolation and non-interpolation analyses

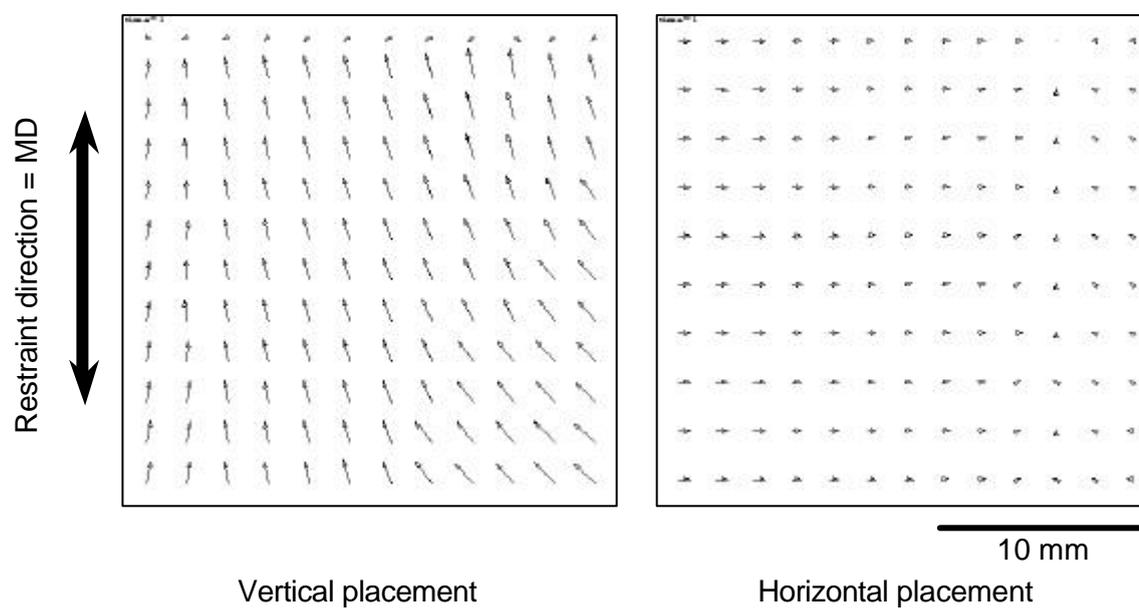
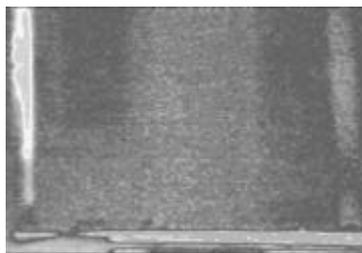


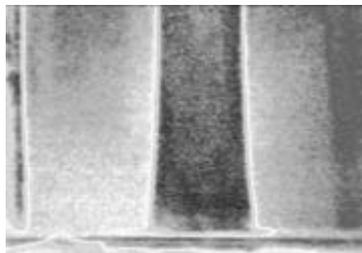
Fig.8 Distribution of in-plane deformation of recycled PPC paper during restraint drying.

Time after wetting

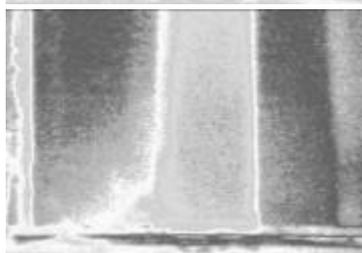
Before



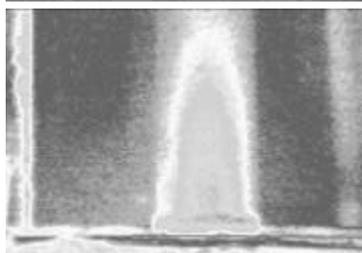
0 minute



10 minutes



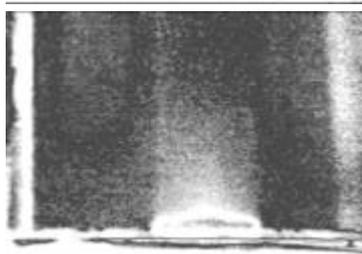
15 minutes



20 minutes



25 minutes



60 minutes

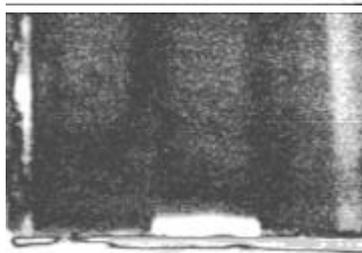


Fig.9 Thermographs of PPC paper in vertical placement during restraint drying.

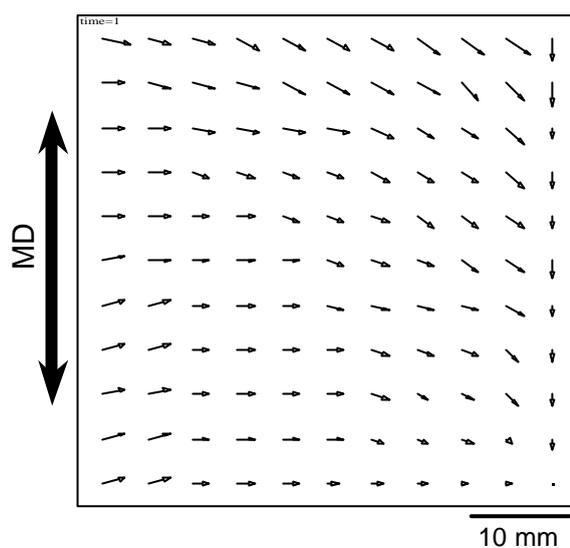


Fig.10 Distribution of in-plane deformation of recycled PPC paper during free drying.

- 
- 1) W. H. Peters, W. F. Ranson, "Digital imaging techniques in experimental stress analysis", *Optical Engineering* 21(3) 426(1982)
  - 2) Choi, D., Thorpe, J. L. and Hanna, R. B., *Wood Science and Technology* 25,251-262(1991)
  - 3) 中村匡司, 増田稔, *木材学会誌* 45(3),222-229(1999)
  - 4) Sutton, M. A. and Chao, Y-J, *Tappi J.* 71(3), 173-175(1988)
  - 5) Wong, L., Kortschot, M. T. and Dodson, C. T. J., *J. Pulp Paper Sci.* 22(6), J213-219(1996)
  - 6) Lif, J. O, Fellers, C., Soremark, C. and Sjodahl, M., *J. Pulp Paper Sci.* 21(9): J302(1995)
  - 7) Anthony Parker, Robert V. Kenyon and Donald E. Troxel "Comparison of interpolating methods for image resampling" *IEEE Trans MI-2* 1(3) p31-39 1983
  - 8) Seth, R. S., *Tappi J.*, 78(10): J177-183(1995)