紙の面内ひずみ分布計測としての画像相関法の適用

東京大学大学院農学生命科学研究科 江前敏晴

Application of image correlation technique to determination of in-plane deformation distribution of paper

Toshiharu Enomae Graduate School of Agricultural and Life Sciences The University of Tokyo

キーワード

画像処理、非破壊検査、材料試験、ひずみ測定試験、サーモグラフィ、紙、乾燥、不織布

1. 緒言

紙は、安価でありながら適度な強度をもち、また生分解性があるため環境にやさしい材料とし ていたるところで使用される。印刷や包装材料が典型的な用途であるが、そこでは搬送過程や内 容物を運搬中に引張応力が作用し、紙は変形する。金属や分子レベルのポリマーが集合したプラ スチックのような変形の均質性はなく、紙の変形は紙を構成するパルプ繊維の配向や凝集むらで ある地合("じあい"と読む)などに強く影響を受ける。したがって、紙の面内変形には不均一な 分布が生じ、その分布を調べるには、紙が受ける力の大きさや方向だけでなく、紙の組織構造を 考慮しなくてはならない。本稿では、画像相関法を用いて面内変形の分布を高精度に求める方法 を紹介する。

ここで用いる画像相関法を一言で定義するならば、"材料表面にある指紋のような特徴的パター ンが変形後にどこに動いたか探し当てる手法"となる。Peters ら¹⁾が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。紙の分野では、Sutton と Chao²⁾ が、コピー機を用いて紙表面にランダムなパターンを印刷し、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 Wong³⁾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。Choi ら⁴⁾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⁵⁾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。トナーを用 いず、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⁶⁾。試料を汚損し ない長所を持つものの、紙の表面形状の変化の影響を受け、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、実験に困難が伴う。

我々が行った紙の面内変位分布測定では、トナーではなく、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の対象とした⁷⁾。引張変形以外にも、濡れた紙が乾燥す る過程で拘束力の有無によりどのように変位の分布が異なるかを測定した。また紙とは違って、 繊維間に水素結合がほとんどない不織布の変位分布を調べることにも応用した。

2. 理論

2.1 パターンマッチングのやり方

変形前後の画像から、ある特定の部位がどこに動いたかを探し出す手法は次の例に示す通りで 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、新聞用紙を撮影した例である。 写真の上下にある黒い部分は試験装置のクランプである。まず、引張前の画像A上で、変位分布 を調べたい範囲を決め任意の数(この場合35)のプロックに区切る。その中の、ある1つのプロ ック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。この例では、画像Aの太線で示さ れたプロック画像を探したいとき、このプロック画像のことをテンプレート画像と呼ぶ。小さな 領域であるブロック画像も、正確にはわずかな変位の不均一が生じることになりまったく同一の 画像ではない。そのため実際には最も類似したブロック画像を探し出すことになる。この作業が テンプレートマッチングである。このためには客観的に類似性の大小を判定する必要がある。式 (1)に示す類似度 S_{fg} はその例で、この値が最大となるときに最も類似していると判定する。

ここで、f(x, y), g(x, y)は、比較対象となる2つのブロック画像の各座標(x, y)における輝度 レベルを表し、両画像を画素数分の次元をもつベクトルとみなしたときの方向余弦の大小を判定 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となる。このような場合、画像の補間が有効である。探し 出される方の画像(図1では応力下の画像B)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(面積換算)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(=1サブピクセル)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。補間には、高分解能2分割3次スプ ライン補間関数(High resolution bi-cubic spline interpolation function⁸⁾単にバイキュービック法とも 呼ばれる)を用いた。この関数は、理想低域通過フィルタ関数である $\frac{\sin \pi x}{\pi x}$ で与えられる sinc 関

数をスプライン補間して得られる式(2)で表される。

$$f(x) = (a+2)x^{3} - (a+3)x^{2} + 1 \quad 0 \le x \le 1$$

$$f(x) = ax^{3} - 5ax^{2} + 8ax - 4a \quad 1 < x \le 2$$

$$\vec{x}(2)$$

ただし、 $-1 \le a \le -\frac{1}{2}$ の範囲で適当な値を選択する。本研究ではa = -1とした。なお、 $-2 \le x \le 0$ の範囲では、 $x \in |x|$ で置き換えて計算する。補間例を、図2に示す。類似度の計算では、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. 引張応力による紙の面内変位分布

3.1 引張装置

引張応力による紙の変形分布を測定する試験装置例を図 3 に示す。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)、水平解像度はノンインターレスの 570TV 本である。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。撮影 画像は 256 諧調の輝度レベルである。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 透過光像を利用した手法に与える地合の影響

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 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。実験室で地合が異なる紙を調製し た。撹はん後ろ水(脱水)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秒間静置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。なお、リテンションタイムが長いと水中でパルプ繊維同士が凝集し、フロック(大 きさ数 mm~数 cm の緩い凝集体)が生じて地合が悪くなる。

それぞれの手すき紙の透過光画像を図4に示し、面内変位分布の解析結果を図5に示す。変位 の距離を示す矢印の長さは実際の10倍にしてある。地合のよい試料の変位分布の方でも、位置に 関わらずほぼ同一の変位を示しており、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。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 ているのである。

3.3 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点のサブピクセルをとり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。

図6は、補間を全く行わなかった場合と、ピクセル間に9点の標本点をとり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、変位の大きさにいくつかの誤りがあるものの、 方向が連続的に変化していることが分かるなど、紙の変形挙動を解析できる分解能が向上したこ とを示唆する。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意味して いる。なお、変位の距離を示す矢印の長さは、補間した場合(右図)は実際の10倍で、左図に示 す矢印は実際の変位の距離に相当する。

4. 乾燥過程における紙の面内変位分布

4.1 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。過剰の水が重力のために流れることを考慮し、試料を鉛直に立てる場合と紙面が水平になるように置いた場合を比較した。鉛直の場合は、図3の引張試験機を用いた。標準調湿条件(23、50%RH)の環境で、幅40mmに採取した再生コピー用紙(坪量約60g/m²)の試験片を挟み、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 吹きで試料に水をかけ十分に吸水させ、乾燥させる過程で試験片の透過光画像を撮影した。水平 に置く場合は、試験片を手すき紙用の角型乾燥リングに挟んで乾燥させた。いずれの置き方でも 試料のマシン方向(MD)を拘束方向とした。試験片の中央部付近を撮影した。なお、マシン方向 とは、パルプ縣濁液をベルトコンベアのように動く網に噴出させて脱水する工程において網や繊 維が流れる方向のことであり、繊維はこの方向に配向するので、紙の強度や弾性率はマシン方向 に大きく、伸びはクロス(=クロスマシン)方向(CD)に大きい。

面内変位の分布を図7に示す。図中の矢印の長さは実際の変位よりも5倍大きくして示してあ る。鉛直に試験片を置いた場合は、全体に上方に移動している。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。画像の横方 向、すなわち紙のクロス方向では、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。右図は水平方向に置いた 場合で、拘束方向であるマシン方向には変位がほとんどなく、クロス方向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が、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分かった。

鉛直に置いた場合について、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(日本アビオニクス TVS-100)を用いて、乾燥中の試料表面の温度分布画像を記録した。精 度は0.2 である。図8に温度分布画像の時間変化を示す。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。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証明された。 4.2 湿潤シートの自由乾燥過程での面内変形

再生コピー用紙から 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。霧吹きで水 をかけ試験片が吸水した後、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 に保持したオーブンで乾燥した。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。

面内の変位分布を図9に示す。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. 不織布の面内変位分布

紙系素材を利用した介護用不織布の開発を目指した研究を行ったことがある。その引張変形を 画像相関法で解析した⁹、不織布は、まずマニラ麻の繊維(繊維長 3.0 mm、幅 15 µm)とレーヨ ン繊維(繊維長 6.0 mm、幅 10 µm)を混合して湿紙(未乾燥の紙)を調製した。ウォータージェ ットを使って交絡(繊維同士を絡ませること)させ、約 120 の金属製ドラムに巻きつけて連続 的に乾燥させた。マニラ麻だけの場合は交絡させなければ通常の紙のようになるが、あえて交絡 させて乾燥した。幅 15 mm の試験片を採取し、スパン 50 mm となるように引張試験機に取り付け 10 mm/min の速度でマシン方向に引っ張った。張力が 1.96 N となったところでいったん伸張を止 め、引張変形前の画像を撮影した。再度伸張を開始してから 5 秒後に引張変形を示す画像を撮影 した。図 10 及び 11 は、5 秒後の引張変形の面内変位(矢印の長さは実際の変位量の 5 倍)の分 布を画像に重ね合わせて示している。画像は、透過光像ではなく表面の反射光像である。それぞ れマニラ麻 100%及びマニラ麻 25% + レーヨン 75%の繊維組成をもつ不織布である。下方のクラ ンプだけを動かしているため、下方向に全体的な試料の移動があるため、上辺中央部の変位が変 位量0 となるように全変位を補正した。引張変形量が大きくなると、変位を示す矢印が少なくな るが、変位量が大きいと移動先を誤って検出するため、明らかに誤っていると考えられる変位ベ クトルを消去したためである。誤っているかどうかの判断基準は、ある点のベクトルが近傍8 点 のベクトルとどの程度変位の量と向きが類似しているか、によって決めた。

マニラ麻 100%不織布の場合(図 10)、左右から中央部に寄って来るような変位を示すことがわ かった。中央部やや右側を中心にして前後(紙面に垂直な方向)に褶曲して座屈が生じている。 CD(左右)方向だけの変位で MD(上下)方向に変位が見られないが、実際には亀裂が入り破断 している個所が別の場所にあり、ここでは全体に下に移動しただけである。MD 方向に均一は伸 びが起こらずに最も弱い個所で破断がおきていた。マニラ麻 25%とレーヨン 75%配合の不織布の 場合(図 11)、左右から収縮が大きくなり、波打つような褶曲がなくなる。しかし実際は横方向 の剛度がマニラ麻 100%の場合に比べて小さいために、座屈が狭い間隔で多数起きていると考え られる。変位分布図からは中央部だけが下に下がったような印象を与えるが、変位ベクトルを分 解して MD 方向だけの成分を考えると、どこもほぼ同じ程度であることが変位分布から読み取れ た。

6. 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ープ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。
- 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。
- 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。
- 5. MD 方向に不織布を引っ張ると、CD 方向に座屈しながら収縮し、レーヨンの比率が高い と細かいシワのような座屈になった。

なお、面内のひずみ(変位)分布の測定自体は試料に荷重をかけることはまったくなく非破壊 であるが、引張試験機を用いて試料を引っ張る過程で試料が自ずと破壊するという意味では非破 壊検査というより非接触検査と呼んだ方が正確かもしれない。いずれにしろ、紙が弾性的に挙動 する領域での変位も捉えることができることを付け加えておく。

引用文献

- Peters, W. H. and Ranson, W. F.: Digital imaging techniques in experimental stress analysis, Optical Engineering, 21(3), p.426, (1982)
- Sutton, M. A. and Chao, Y-J: Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation Part 1: Data acquisition and image analysis system, Tappi J. 71(3), pp.173-175, (1988)
- 3) Wong, L., Kortschot, M. T. and Dodson, C. T. J.: Effect of formation on local strain fields and fracture of paper, J. Pulp Paper Sci. 22(6), pp.J213-219, (1996)
- 4) Choi, D., Thorpe, J. L. and Hanna, R. B.: Image analysis to measure strain in wood and paper, Wood Science and Technology, 25, pp.251-262, (1991)
- 5) 仲村匡司, 増田稔: 住宅内装画像における木材領域の自動抽出, 木材学会誌, 45(3), pp.222-229, (1999)
- 6) Lif, J. O, Fellers, C., Soremark, C. and Sjodahl, M.: Characterizing the In-Plane Hygroexpansivity of Paper by Electronic Speckle Photography, J. Pulp Paper Sci., 21(9), pp.J302, (1995)
- 7) 中山智仁, 江前敏晴, 尾鍋史彦: 透過光画像に画像相関法を応用した紙の物性解析技術, 紙パ 技協誌, 56(11): pp.1646-1652, (2002).
- 8) Parker, A., Kenyon, R. V. and Troxel, D. E.: Comparison of interpolating methods for image resampling, IEEE Trans MI-2, 1(3), pp.31-39, (1983)
- Enomae, T., Asakawa, R. Onabe, F., Yoshizaki, M., Fukasawa, H., Hiyoshi K. and Kurata, T.: Development of Nursing Care Sheets of Cellulosic Nonwoven Fabrics for Ageing Society, Textile Research Journal, 76(1), pp.41-48, (2006).



図 1 パターンマッチングの基本的なやり方. 画像 A の特定のブロック画像に最も類似した 画像を、1 画素ずつ動かして画像 B の中に探し出す.



図 2 補間関数による分解能の向上.10 倍補間により、 変位の距離と方向も 10 倍となる.



図3紙の引張変形における変位分布を測定する試験装置



10 mm リテンションタイム 0 s リテンションタイム 120 s

図 4 異なるリテンションタイムで調製した手すき紙の透過光像. Os では地 合がよく、120 s では地合が悪い.



リテンションタイム 0 s

リテンションタイム 120 s

図5異なるリテンションタイムで調製した手すき紙の引張による面内変位分布



補間なし

10倍補間

図6 引張による面内変位分布の補間の有無による比較



鉛直に置いた場合

10 mr 水平に置いた場合

図7 コピー用紙を濡らして拘束乾燥させたときの面内変位分布



図8 鉛直に立てたコピー用紙の拘束乾燥過程における温度分布画像



図9 自由乾燥過程におけるコピー用紙の面内変位分布



図 10マニラ麻 100%不織布の表面画像と面内変位分布図(引張5秒後). 矢印の長さは実際の変位量の5倍を示す.



図 11 マニラ麻 25% + レーヨン 75% 不織布の表面画像と面内変位分布図 (引張 5 秒後). 矢印の長さは実際の変位量の 5 倍を示す.

- W. H. Peters, W. F. Ranson, "Digital imaging techniques in experimental stress analysis", Optical Engineering 21(3) 426(1982)
- Sutton, M. A. and Chao, Y-J, "Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation Part 1: Data acquisition and image analysis system", Tappi J. 71(3), 173-175(1988)
- 3) Wong, L., Kortschot, M. T. and Dodson, C. T. J., "Effect of formation on local strain fields and fracture of paper", J. Pulp Paper Sci. 22(6), J213-219(1996)
- 4) Choi, D., Thorpe, J. L. and Hanna, R. B., "Image analysis to measure strain in wood and paper", Wood Science and Technology 25,251-262(1991)
- 5) 中村 匡 司, 増 田 稔, "住 宅 内 装 画 像 に お け る 木 材 領 域 の 自 動 抽 出 "木 材 学 会 誌 45(3),222-229(1999)
- Lif, J. O, Fellers, C., Soremark, C. and Sjodahl, M., "Characterizing the In-Plane Hygroexpansivity of Paper by Electronic Speckle Photography", J. Pulp Paper Sci. 21(9): J302(1995)
- 7) 中山智仁,江前敏晴,尾鍋史彦,"透過光画像に画像相関法を応用した紙の物性解析技術",紙 パ技協誌,56(11):1646-1652(2002).
- 8) 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
- Enomae, T., Asakawa, R. Onabe, F., Yoshizaki, M., Fukasawa, H., Hiyoshi K. and Kurata, T., "Development of Nursing Care Sheets of Cellulosic Nonwoven Fabrics for Ageing Society", Textile Research Journal, 76(1): 41 - 48 (2006).