

紙の繊維配向をフーリエ画像解析により求める手法

東京大学大学院農学生命科学研究科 江前 敏晴、韓 允熙、磯貝 明

1. はじめに

古文書、史料、絵画等の紙文化財を保護し、修復していくことは、文化的及び美術的価値を継承していくという観点から重要である。近代的な抄紙法によらない紙文化財の修復には国内外を問わず和紙を使うことが多いが、文化財と同様の紙質を持つ和紙を復元補修紙として自ずと選択することになる。しかし、“同様の紙質”と判断する紙の特性として、繊維の種類、厚さ、密度、堅さ、表面粗さ、地合（じあい=漉きむらの程度）、簀の目及び糸目の間隔と向き、繊維の配向性、色などが主なものと考えられる。ただし色に限っては、後世の再修復を考慮して修復個所が一目でわかるようにある程度色の異なった修復紙を用いることが慣例となっている。ここに列挙した紙の特性は、ごく簡単な非破壊測定又は触感で十分判定できるものもあれば、精度の高い測定方法を必要とするものもある。このような判断と制御は、従来から熟練修復技術者の経験と勘に頼ってきており、文化財修復の件数増大がさらに見込まれる昨今、効率的な修復作業を行うためには、補修紙の効率的製造と選択が求められる。本研究は、紙文化財及び補修紙の特性を科学的なアプローチによって把握・整理することを最終的な目的としているが、今回は特に繊維の配向を非破壊で測定する技術を検討した。

2. 繊維配向

紙の繊維は、細長い比較的剛直な性質があるために一本の繊維内で何重にも屈曲することはなく、簀又は網の上に定着するときには比較的直線的となり、どちらかの方向に向いている。紙全体で全ての繊維を見たとき多くの繊維が特定の方向に向いているときに“繊維配向性がある”とか“繊維が配向している”という言い方をする。繊維の配向は紙の力学的特性などに大きく影響する重要な構造因子の1つである。紙を引っ張った際に破壊に至ったときの荷重が紙の縦と横で異なる、といったような紙の特性の方向性を紙の異方性と言うが、これは主に繊維の配向によって起こる。繊維の配向は抄紙時の紙料の流れによって生じるが、繊維に作用するせん断力の方向や乱流の程度に左右される。伝統的な和紙に見られる流し抄きは、簀を揺らしたり簀を傾けることによって余剰紙料を捨てたりするので繊維配向が顕著である。漉き方によっては同じ紙の中でも配向の強さや方向が表裏で異なったり、面内の位置によって異なったりすることも十分に考えられる。また、韓国の伝統的な紙として知られる韓紙は、溜め抄きによって作られるが、簀の動きが少なく繊維の配向は少ないと予測される。

3. フーリエ変換画像処理

フーリエ変換は様々な関数の周期性を調べる目的などに使用される。和紙の特性解析では加藤ら[1]が簀の目の測定に応用している。図1はこの手法が繊維配向性をどの程度表現できるか調べたシミュレーションで、左図は45度から90度までの傾きを持つ線分を5度ごとに合計10本引いた繊維のモデル図である。なお、角度はx軸正方向を0度とし半時計回りに増加しY軸正方向で90度となる。2番目の図は左図の繊維モデル図をフーリエ変換して得られたパワースペクトル図である。左上から右下にかけて数本の白い直線が見られる。白の部分が大きいパワーを持つ部分を示している。中心角0~180度について放射状に各点の振幅（パワーの平方根）の平均値を計算すると、3番目の図のような分布が得られる。パワースペクトルの白い直線の方向にだけ強いピークを示している。なお、180~360度では0~180度の点対称になる性質がある。これらのピークが何度の中心角に位置するかを調べるために横軸に角度をとり縦軸にその方向での平均振幅をプロットしたのが一番右の図である。135度から5度ごとに180度（0度に等しい）まで10個のピークがあることがわかる。これは元の繊維モデルの方向と直交する方向である。すなわち、45度方向を向いた繊維はフーリエ変換すると135度方向の

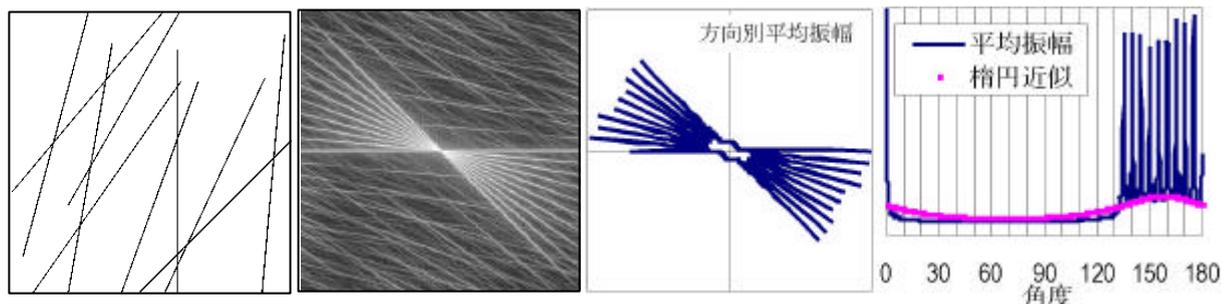


図1 (左から) 10本の繊維モデル、フーリエ変換、方向別平均振幅、平均振幅と角度の関係

振幅が大きくなり、50度方向を向いたものは140度、55度は145度、・・・のような関係がある。この図で薄い色の線は全体を楕円で近似したもので約158度にピークがある。これは直交する約68度の方向に繊維が配向していることを示す。

4. 実験

試料として、コウゾからなる越前和紙、実験室用手すき装置で調製した広葉樹木材漂白パルプシート、市販コピー用紙、古紙パルプ50% / 機械パルプ50%を原料とする市販中質紙を用いた。解析例として韓紙(Iryong 製紙所での手漉き)も用いた。紙表面をデジタルマイクروسコープ(スカラー製 DG-2)を用いて100倍で撮影した。6方向から均等に低い角度で照明して真正面から撮影できる。図2(a)のように、画像の中心部分1024×1024画素部分を切り出し、照明むらを補正する動的2値化により繊維部分を抽出(b)、フーリエ変換によりパワースペクトル(c)を求め、振幅の角度分布(d)を計算した。この計算では0~180度の角度を2048等分して0~2047×180 / 2048度までの2048個の各角度について距離 $r=2 \sim 511$ までのフーリエ係数の振幅の平均を求めた。ただし、 xy 座標を完全に極座標に変換することはできないので周囲の4点の振幅から距離で按分した値で計算した。各試料について、2枚ずつ各10箇所合計20画像について計算し、平均値を求めた。配向強度は、近似した楕円の長軸 / 短軸比とした。

5. 結果と考察

図2の解析例では、上段の和紙では配向角度88度で配向強度1.22、下段の韓紙では167度で配向強度1.34であった。配向強度については、1.1以下なら無配向、1.1~1.2ならやや配向、1.2以上なら強い配向とおおむね判別できる。各試料での解析結果を表1に示す。“±”は95%信頼度区間(100回測定するうちの95回は確率的にこの範囲に入る)を示す。和紙は漉き手から見た前後方向(90度)にほぼ配向しており、配向がはっきりしていた。パルプシートは配向角度のばらつきが大きく無配向、コピー用紙は抄紙機の流れ方向(90度)に配向していたが、配向強度が弱かった。これは表面が平滑で繊維による紙の凹凸が小さく画像でも繊維をはっきりと識別できなかったためと考えられる。中質紙は流れ方向からわずかに傾きを持って配向していることがわかった。ここで示した結果のほか、種々の和紙及び韓紙についての結果はポスターで発表しているのご参照いただきたい。

表1 フーリエ画像解析による和紙及び洋紙の繊維配向性

	和紙	パルプシート	コピー用紙	中質紙
配向角度(度)	88±1	109±7	91±1	93±1
配向強度	1.21±0.01	1.09±0.01	1.09±0.00	1.15±0.01

参考文献

- 1) 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)

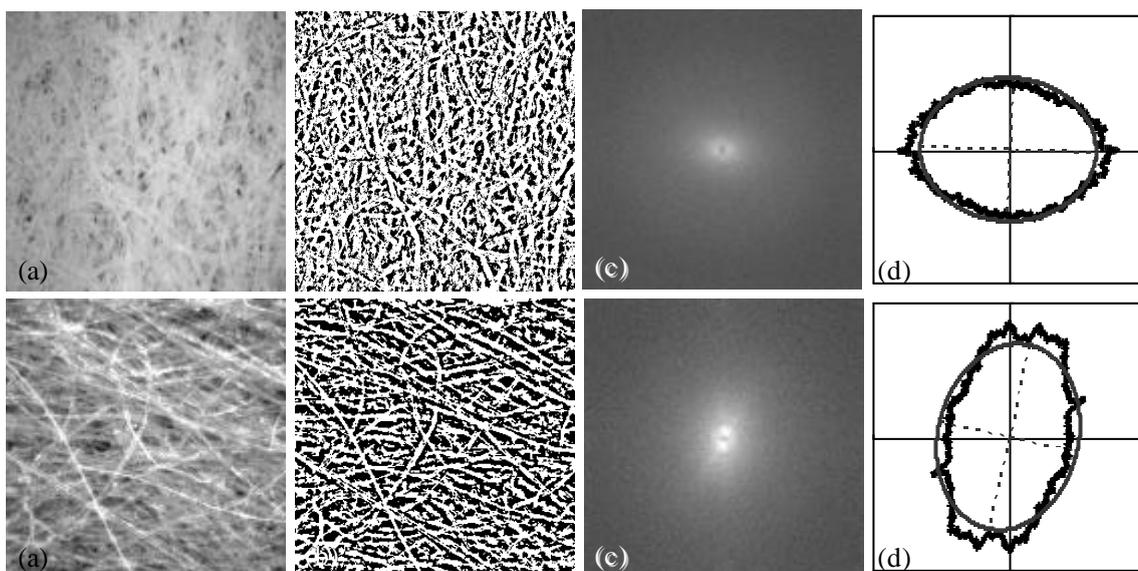


図2 表面の顕微鏡写真(a)、2値化画像(b)、パワースペクトル(c)、平均振幅の角度分布図(d)。繊維配向の主方向は近似楕円の短軸方向である。上段は和紙で、下段は韓紙の例。