2次元フーリエ変換による紙の異同識別 箱入りティシュペーパー表面反射画像の周期性*1

宮田 瞳*2, 篠崎 真*3

Discrimination of Paper by Two-dimensional Fourier Transform Periodicity seen in light-reflected images of sheets in boxed facial tissue*1

Hitomi MIYATA*2 and Makoto SHINOZAKI*3

Wire-marks of 13 different boxed facial tissue papers, from 3 manufacturers, with 5 different brand names, sold in 3 areas in Japan, were examined using a fast Fourier transform (FFT) image analysis for forensic comparisons. Each sheet of 2-ply tissue of all of the boxes was scanned to obtain its reflected image using a commercially available flatbed scanner with black Kent paper on its back.

Every sheet in each box, and each sheet of 160 through 200 pairs of 2-ply tissue was examined. Each sheet of 2-ply tissue had a similar power spectrum in all cases. Considerations of manufacturing processes, however, imply both sheets are from different rolls of paper, i.e., scientific criminal investigations would require examination of both sheets.

Tissues of 13 brand names were sorted into 10 types of power spectra. Some boxes contain one type of power spectrum only but other boxes may contain up to 4 different types.

Some facial tissue of the same brand name obtained in different areas showed similar power spectra while some different brand names also showed similar power spectra.

Wire-marks seen in boxed facial tissue paper can be a clue for forensic purposes but will not be a determining factor.

Keywords: facial tissue paper, Fourier transforms, image analysis, wire-mark, forensic science.

「ティシュペーパー」は身近なものであるがゆえに犯罪においても多々遺留され鑑識においてその異同識別が重要となる。本報ではティシュペーパーの各メーカー品について箱の中の紙の種類および販売地域による特徴を比較した結果を述べる。

3地域で購入した13銘柄のティシュペーパーを検討の対象とした。いずれも2枚重ねのもので、それぞれ1枚ずつに剥がし、反射画像とその2次元高速フーリエ変換を施したパワースペクトル(以下PSと略す)図から異同識別を試みた。

13銘柄の箱入りティシュペーパーに含まれる紙は、10種類に分類できた。異なる種類の紙が2枚重ねになっているものはなかった。しかし2枚重ねティシュペーパーを作るためには二つのロール紙を重ねて再度巻き取っているため常に同じ種類のものが組み合わせられるとは限らない。したがって2枚を剥がして検査することが必要である。また一つの箱の中には、1種類の紙が入っているものもあれば、複数種類入っているものもあり、一つの箱の中といっても複数の種類の紙が入っているものがあることがわかった。検査の際には箱の中の全ての紙を検査する方が望ましい。購入地域を変えても同じ銘柄のものには同じPS図を示すものが多く、ある程度の銘柄を推定することができるが、銘柄が異なるもの同士でも同じPS図を示すものが認められたため銘柄の特徴を把握しておく必要があると考えられる。

*1 Received February 25, 2004; accepted August 23, 2004.

*2 警視庁 科学捜査研究所 Metropolitan Police Department, Criminal Investigation Laboratory, Tokyo 100-8929

*3 元王子製紙株式会社 新技術研究所 Oji Paper Co. Ltd., Advanced Technology Research Laboratory, Amagasaki 660-8577

1. 緒 言

筆者らはこれまでに紙の光透過画像についてフーリエ変換と相互相関法を用いた異同識別法を提唱すると同時に¹⁻⁴⁾、紙の法科学的検査の重要性についても報告してきた^{5,6)}。また光を透過しにくい紙として、画用紙を取り上げその表面凹凸画像について同様の照合を行なってきた⁷⁾。

今回は、薄葉紙の中で代表的な家庭紙であるティッシュペーパーを取り上げてメーカー間、あるいは箱の中での違いなどを見た。

「ティッシュペーパー」は身近であるがゆえに犯罪現場に存在することが多く、犯行の裏づけのためにはその異同識別は極めて重要である。

しかしこれまでに提唱されているティッシュペーパーの異同識別法は、熱分解ガスクロマトグラフィーによる熱分解生成物の比較や蛍光X線分析による識別^{8,9)}などいずれも破壊検査であるため犯罪鑑識には適さないことがある。さらにティッシュペーパーは筆記用紙に比べて填料が含まれていないために機器分析では鑑定が困難であることが予想される。また箱の中での折り畳み方の比較による異同識別法を検討したものもある⁶⁾が、一箱の中の紙の折り目の位置が全て同一であるとは考え難い。ティッシュペーパーには柔らかさや滑らかさなどの風合いがもっとも求められるものであるため、その物性を計測する手法も多数報告されている⁹⁻¹²⁾が、鑑定物件自体の汚染や検査による損失を考慮すると鑑定に取り入れるには適切な方法とはいえない。また地合いの比較でどの程度識別できるのか或いは銘柄を特定できるのかを検討した報告はない。

そこで我々は、ティッシュペーパーの表面反射画像

を直接比較することに加えてその2次元高速フーリエ変換（以下FFTと略す）処理により得られたパワースペクトル（以下PSと略す）を比較することにより異同識別ができるのではないかと考え、銘柄間あるいは箱の中でのシートの特徴について検討した。

2. 実 験

2.1 供試試料

供試試料として、平成15年6月から9月の間に関東地方の大手スーパーで購入した箱入りティッシュペーパー（2枚重ね；5箱セット）3社5銘柄（1-N, 1-K, 1-Ea, 1-S, 1-F）、同時期に近畿地方で購入したもの3社5銘柄（2-N, 2-K, 2-Ea, 2-Eb, 2-S）、九州地方で購入したもの3社3銘柄（3-N, 3-K, 3-Eb）を用いた。なおEaとEbは同じ銘柄であるが品質のタイプが異なるものである。

それぞれの大きさ、厚さ、坪量、見かけ密度をTable 1に示す。メーカー名および銘柄は上記のように省略して伏せることとする。

なお、それぞれのティッシュペーパーの厚さは、2枚重ねのものを剥がした1枚についてミットヨ製デジマチックインジケータID-C112BS（測定力1.2N（120 gf）以内、φ10 mm）を用いて測定した。

2.2 使用した機器、ソフトウェア

反射画像の取り込み装置としては、フラット・ベッド・スキャナGT9000WIN（以下、スキャナと略す；セイコーエプソン株式会社製）を用いた。その制御は、スキャナ添付のソフトウェアであるEPSON SCAN! II 32 v.2.00Jを用いて行い、画像ファイルの保存フォーマットはtiff 5.0とした。

FFT処理などの画像解析には画像処理解析装置

Table 1. Basic properties of the facial tissue paper employed in this work.

manufacturer	brands	# of plies	dimensions (mm)	thickness (μm) 1 ply	basis weight (g/m^2) 1 ply	apparent density (g/m^3) 1 ply
I	1-N	2	198×227	57.6	11.0	0.194
	2-N	2	197×226	56.4	11.1	0.197
	3-N	2	199×227	66.5	11.5	0.173
II	1-Ea	2	198×226	75.4	12.6	0.167
	2-Ea	2	196×222	65.0	13.0	0.199
	2-Eb	2	196×227	67.6	12.6	0.189
	3-Eb	2	197×227	67.1	12.4	0.185
III	1-K	2	198×229	71.5	12.4	0.173
	2-K	2	198×228	69.2	12.4	0.180
	3-K	2	197×229	77.1	12.4	0.161
	1-S	2	199×226	64.0	11.2	0.175
	2-S	2	187×233	58.5	11.3	0.165
	1-F	2	198×232	60.7	11.4	0.188

ドットアナライザー DA-5000S v.4.07 およびそのオプションソフトである2次元高速フーリエ変換(ともに王子計測機器株式会社製)を用いた。

スキャナおよび画像処理解析装置をIBM-PC/AT互換コンピュータデルコンピュータ(株)製 OptiPlex GX1 (OS: Microsoft Windows NT4.00, CPU: Pentium III 500 MHz, メモリ: 128 MB) に接続し, 同コンピュータで画像の取り込み制御, 画像ファイルの保存, 画像解析, FFT 周波数解析を行った。

2.3 実験方法

2.3.1 反射画像の取り込み方法

13種類のティシュペーパー各5箱パックの中からそれぞれ2箱を取り出して使用した。それぞれの箱の中の2枚重ねティシュペーパーすべてを2枚に剥がして, 2枚が重なっていたときに外側に面していた面を手前にして背後から光を照明したときの透過像に見られる周期的な模様を目視で比較した。さらにこの周期的な模様が繰り返す方向やその周期が異なるものと分類されたティシュペーパーについて, それぞれが2枚重ねになっていたときに外側に面していた面の反射画像を1枚ずつスキャナで取り込み, さらにそれぞれの反射画像から得たPSを比較した。なお画像の取り込みは紙のMD方向(抄紙機の進行方向)がスキャナの縦方向になるようにスキャナのガラス面にティシュペーパーの外側に面していた面を自然に置きクレープに応力を加えて伸ばすことはせず統一した条件とし, さらにその上に黒色のケント紙(A4サイズ)を裏当てとして載せ, 反射画像を取り込んだ。取り込み条件は輝度分解能256階調(8ビット), 空間分解能400 dpi(1画素が約63.5 μm), 横512画素×縦475画素(順に約32.5 mmおよび約30.5 mm), 露出 ± 0 とした。さらに得られた画像を画像処理解析装置 DA-5000S で読み取り, 縦横各256画素の2次元高速フーリエ変換処理を行いPSを得た。黒色ケント紙はスキャナの光の大部分を吸収するのでティシュペーパーの繊維で反射した光のみの反射画像が得られると考えられ, 加えて試料にダメージを与える可能性が少なく¹³⁾, 地合いが観察しやすい。

2.3.2 PSの比較

2.3.1で示した方法で各ティシュペーパーの反射画像を取り込み, 得られた反射画像とPS図を目視で比較した。

それぞれの反射画像には周期性があると思われる模様がほぼ明瞭に認められたが, 反射画像だけでは識別できないものも存在したためPSをあわせて比較した。

ここでPSの比較はそれぞれのPS図の代表的なピークの位置が示す反射画像の繰り返し軸の方向や波長を比較することにより行なった。

3. 結果と考察

3.1 2枚重ねのティシュペーパーの組み合わせ

13銘柄全ての2枚重ねティシュペーパーをそれぞれ剥がし, 両者の外側に面した面を手前にして背後から光を照明したときの透過像に見られる周期的な模様を目視で比較しさらに周期的な模様の繰り返す方向やその周期が異なる種類であると分類されたものについてスキャナで反射画像を取り込みそのPSを比較したところ, いずれのティシュペーパーについても, 異なるPSをもつものが2枚重ねに貼り合わされていることはなかった。

2枚重ねティシュペーパーは, 2種類の紙のロールをワインダーで重ねて再度巻き取るため¹⁴⁾, 組み合わせたロール紙の種類が異なるものになる可能性が考えられるが, 今回集めた試料に関しては, 2枚重ねの両者には同じPSが認められ違う種類の紙が重ね合わせられていることはないと考えられた。

しかし製造工程を考えると2枚を貼り合わせるためにはロール紙2つを重ねて再度ひとつのロールに巻き取らなければならないため, 貼り合わされた2枚が異なる紙である可能性もあり, 両者を比較することが常に必要であると考えた。

3.2 一つの箱の中でのティシュペーパーの種類

一つの箱の中には160から200組のティシュペーパーが入っているため, 一箱の中での2枚重ねティシュペーパーの組み合わせを比較した。

すべての試料(13銘柄)の透過像を目視で比較し, 異なる種類と分類されたものについてスキャナで取り込んだ反射画像を比較したところ, 周期性成分(ワイヤーマーク)の類似性という観点から10種類の反射画像に分類された(Fig. 1)。

さらにPSを比較したところ, 反射画像同様10種類に分類された(Fig. 2)。

ここでPSの比較はそれぞれの上下の位置にあるピーク(MD方向)と左右の位置にあるピーク(CD方向; 抄紙機の幅方向)で強く現れたスペクトルがそのティシュペーパーの反射画像の周期性の特徴を示すものとしその位置を比較したほか, さらに他の強く現れたスペクトルの位置や配列を比較し分類した。たとえば, タイプ1とタイプ2のPSはその配列の方向が異なるため, タイプ1のティシュペーパーの裏面のPSでそれらの位置を比較した(Fig. 3)。PS図の中心を原点(0, 0), 傾きはPS図の右を0°

Fig. 1. Light-reflected images of commercial facial tissue paper with dimensions of 16.3 mm square.

とし右から反時計回りに角度を表示すると、タイプ1のPSはMD方向では(3, 61), すなわち傾き 87.2° の方向に約0.266 mmの、CD方向では(62, 1), すなわち傾き 1.0° の方向に約0.262 mmの周期を示すスペクトルが強く現れ、これに対しFig. 3の右図に示したタイプ2のPS図は、MD方向では(2, 38), すなわち傾き 87.0° の方向に約0.427 mmの、CD方向では(64, -5), すなわち傾き -6.2° の方向に約0.351 mmの周期を示すスペクトルが強く現れている。さらに他に強く現れているスペクトルの配列を比較し特徴的なスペクトルが異なるものと判断した。

その結果、Table 2に示すように一箱の中に認められたPSは1種類だけのものもあれば多いものでは4種類認められるものも存在する。すなわち、E社のものはいずれも180組全ての紙が同じPSを示しており、1箱の中には同じ種類のものだけが入っているように見える。これに対して、1-Sには4種類のPSを持つ紙が存在し1箱の中に複数の種類のものが入っているものがあつた。

したがって同じ箱の中に入っているものでも同一の紙であるとはいえないため箱詰めの際には2枚重

ねされた一つのロールから切り出されたものが一つの箱に入れられる場合と、複数の2枚重ねされたロールから切り出されて箱詰めされるものが存在することが考えられる。

3.3 銘柄や購入地域によるPSの違い

また同一メーカーのものでも異なるPSをもつ紙があること、銘柄が異なるもの同士でも類似したPSをもつ紙が存在すること、購入地域を変えると同一銘柄同士でも類似したPSをもつ紙と異なるPSをもつ紙が認められた。

たとえばN社のものはいずれの試料も他社のものとは異なるPSを示したため銘柄を識別することができたが、タイプ1には複数の銘柄の紙が分類されているため識別が困難なものもある。また一箱中に多数のPSが認められるものがその銘柄の特徴である場合がある。

ここでTable 1をみると、1-S, 2-S, 1-F, およびN社のものが坪量約 $11.0 \sim 11.5 \text{ g/m}^2$ の範囲に、E社とK社のものが坪量約 $12.4 \sim 13.0 \text{ g/m}^2$ の範囲にあり、大きく二つのグループに分類される。これらのPSについてTable 2の分類表と比較すると、1-S, 1-FのPSは多くの組がタイプ1, 3, 4に共通して見

Fig. 2. 2-dimensional power spectrum images of the light-reflected images of facial tissue paper ; all the sheets of 13 boxed facial tissue papers were assorted into 10 types.

Fig. 3. Comparison of peaks in PS of the specular image of Type 1 and of the original image of Type 2.

られ、2-Sもタイプ1が共通のものといえる。

またN社のものはPSだけでなく、購入地域を変えても坪量には共通する特徴が見られる。E社とK社のものについては3-K以外は全ての組がそれぞれ同じPSを示しており、かつ、K社については主にタイプ1のものが見られる。

銘柄が異なるもの同士でも類似したPSをもつものが存在する原因のひとつとして、類似したワイヤーを使用していることが挙げられる。ここで他社製品をOEMとして使用しているために類似したPS

が見られる可能性を考えたが、メーカー聴取の結果、他社製品を使用することはありえないとのことであった。また同一銘柄同士でも類似したPSを持つものの以外に、地方によって異なるPSを持つものが認められた。このことは製造工場や製造時期の違いによるワイヤーの影響があることが考えられる。メーカー聴取の結果、別工場からのものをあわせて使用することもあるとのことであった。たとえばN社のものはタイプ5が全ての地域に共通して見られるが、タイプ7や8は関東のものには見られない。複数の工場で同じ種類のワイヤーを使用する以外に別工場の紙を使用する可能性も考えられる。またタイプ9はE社だけに存在し、加えてE社にはほとんど1種類のPSしか見られない。同じワイヤーを複数の工場や抄紙機で使用している可能性が考えられる。このようにワイヤーの種類と銘柄の関係はある程度関連性が認められ、また販売地域が異なってもその特徴が現われることがあることがわかった。

3.4 PSの逆転と傾き

3.4.1 1箱の中でのPSの反転について

Table 2に示すタイプ5とタイプ6は、PSのスペ

Table 2. Assortment of FFT power spectra of all sheets in each box.

type	brands	n-th pair counted from the top of the box
1	1-Ea	1-180
	1-F	1-47, 101-148
	1-K	1-180
	2-K	1-180
	3-K	6-10, 16-25, 51-55, 61-90, 96-100, 106-115, 141-145, 151-180
	1-S	1-7, 81-89
	2-S	1-180
2	1-S	8-21, 90-102
3	1-S	22-79, 103-160
	1-F	48-95, 149-196
4	1-S	80
	1-F	96-100, 197-200
5	1-N	1-162, 164-169, 171-200
	2-N	53-164, 166-200
	3-N	5-17, 19-28, 31, 32
6	1-N	163, 170
	2-N	165
	3-N	18
7	2-N	1-52
	3-N	1-4
8	3-N	29, 30, 33-200
9	2-Ea	1-180
	2-Eb	1-180
	3-Eb	1-180
10	3-K	1-5, 11-15, 26-50, 56-60, 91-95, 101-105, 116-140, 146-150

クトルの位置が鏡像関係であり、それぞれ紙の表裏面のPSが現れているように見えるものである (Fig. 4)。すなわちピークが鏡に映したように対称的に現われているため、2枚重ねにするとときにどちらかのタイプが裏面を合わせて巻き取ったものであるとも考えられる。しかし、タイプ6を裏面が貼り合わされているものと考えるところでのN社の試料では全体の中の1組あるいは2組にすぎず、生産効率を考慮してもその可能性は極めて低く、メーカー聴取の結果でもありえないとのことだった。そこで、ツインワイヤーマシンで製造された可能性を考えた。ティシュマシは「円網タイプ」と「ツインワイヤー」タイプの2つが主流であると言われており¹⁴⁾、高速化のためにツインワイヤーの抄紙機がティシュマシにも多く使用されている。そこでティシュペーパーの場合、極めて薄いものであるためにツインワイヤーのボトム側のワイヤーマークが強く現われることがあるものと考えられる。前報⁴⁾においてPPC用紙をツインワイヤー (オントップフォーマー) で抄紙した場合、抄紙工程の初期の段階でボトムワイヤーの痕跡が紙に強く残ると考えた。ティシュペー

Fig. 4. Types 5 and 6 of FFT power spectra are specular images of each other.

パーの場合、より高速であることやその要求される薄さを考えると同様の可能性は否定できない。したがってここでは、ボトムワイヤーがトップワイヤーと同一あるいは類似していてボトム面のワイヤーマークが強調されている紙が重ねあわされたロールが混在している可能性が考えられ、ここでも一つの箱の中には複数の2枚重ねのロールが切り出されて詰め込まれていることが示唆される。

3.4.2 1箱の中でのPSの歪みについて

目視ではほぼ同じとみなされたPSの中に横方向に対してやや傾きのあるものが存在した。たとえばタイプ5の中でも、3-Nでは上から5枚目のものは上から19枚目のものに比べてPS上の輝点が垂直方向に対して右に8度程度傾いている (Fig. 5)。この原因として抄紙時のテンションのむらによるワイヤーの波打ちにより生じる幅方向の歪みが考えられる。テンションむらの影響は前報⁴⁾で述べたように、マシンの幅方向が中心部あるいは操作部、駆動部など異なる位置で切り出した紙が存在しているために一つの箱の中にPSが歪んだものが入っていると考えられる。

Fig. 5. Different tilts of Type 5 of FFT power spectra; the 5th and 19th sheets of box 3-N showed 8 degrees of tilt to each other.

3.4.3 収縮について

同じタイプのPSをもつ紙でも銘柄や地域が変わると、CD方向は殆ど変わらないがMD方向の収縮率がわずかに異なることがわかった。たとえばTable 1の1-Sのタイプ1のPSのMD方向の強いスペクトルは周期が約0.266 mmであるのに対し2-Sのタイプ1のPSのMD方向は0.246 mmであり、わずかな差であるものの、それぞれの箱の傾向が認められる。

このことから乾燥による収縮かあるいは乾燥用のシリンダからドクターブレードでかきとられてはがされるときクレープ付けによって収縮率の差が生じている可能性が考えられる。

しかし、クレープは抄紙工程で紙を流れ方向に収縮させると考えられるためワイヤーに由来するPSのピークの位置をMD方向に若干ずらすという影響はあるものの本報のPS図に現れているピークがクレープの周期性によるものとは考え難い。また本研究では反射画像の取り込みの際にスキャナのガラス面に置いたティシュペーパーの上にさらにケント紙を載せているため、クレープに由来する弱い凹凸は押さえられており、周期性成分としてPS図に現われることはないと考えられる。したがってここでは銘柄、製造時期による収縮率の差が生じている可能性があり、同じワイヤーで製造されたものでも少しの操業条件の違いにより異同識別の糸口になることが示唆される。

4. 結 論

1. 今回集めた試料においては2枚重ねティシュペーパーの重ねあわされた2枚の紙はそれぞれ全ての組のPSがほぼ同一と認められた。しかし製造工程を考えると異なる種類の紙が重ね合わせられる可能性も考えられるため識別の際には両者の比較が必要である。
2. 銘柄や購入地域にかかわらず一箱の中に入っているティシュペーパーの紙の種類は全ての組が同じものもあったが、複数種類入っているものもあり箱詰めの際には一つのロールから切り出される場合と、複数のロールから切り出される場合があると考えられる。
3. 同一銘柄のものであれば購入地域を変えても同一種類の紙が使用されている可能性が高いが、異なる地域間で共通の紙が使用されている可能性も見られる。また、異なる銘柄同士であっても、同じPSをもつ紙が使用されていることもあり、異同識別の際には銘柄の特徴を把握して

おく必要がある。

4. PSから同じ種類の紙と分類されたもの同士でもPSに逆転や傾きが生じるものがある。その原因はティシュペーパーが薄いために裏面のPSが影響したり、紙の切り出し位置の違い、乾燥やクレープ付けによる収縮率の違いなどが影響すると考えられ、これらの違いが異同識別の糸口になることが示唆される。

謝 辞

東京大学大学院助教授江前敏晴博士には有意義な示唆をいただいた。ここにしるして謝意を表する。

この研究の一部は日本鑑識科学技術学会第9回学術集会（平成15年11月、東京）において発表した。

文 献

- 1) 宮田 瞳, 篠崎 真: 紙パ技協誌 54, 396-401 (2000).
- 2) 篠崎 真, 宮田 瞳, 中山智仁, 江前敏晴: 紙パ技協誌 55, 514-521 (2001).
- 3) Miyata, H., Shinozaki, M., Nakayama, T., Enomae, T.: *J. Forensic Sci.* 47, 1125-1132 (2002).
- 4) 宮田 瞳, 篠崎 真: 繊維学会誌 59, 311-318 (2003).
- 5) 宮田 瞳, 篠崎 真: 繊維と工業 58, 172-176 (2002).
- 6) 小林 侑, 宮田 瞳, 工藤雅孝: 紙パ技協誌 46, 1227-1235 (1992).
- 7) 宮田 瞳, 下山昌彦, 篠崎 真: 紙パ技協誌 57, 724-731 (2003).
- 8) 荏原秀介: 科学警察研究所報告 38(2), 87-91 (1985).
- 9) 近藤智史: *ALPHA* 4(9), 47-60 (1990).
- 10) Ampulski, R.S., Sawdai, A.H.: *Proc 1991 Int. Pap. Phys. Conf., Kona, Hawaii*, 1991, pp. 19-30.
- 11) Lyne, M.B., Whiteman, A., Donderi, D.C.: *Pulp & Paper Canada* 85(10), 43-46, 48-50 (1984).
- 12) 鷲山裕厚: 静岡県製紙工業試験場報告 35, 61-66 (1983).
- 13) 加藤雅人, 正司哲朗, 村山健二, 岡田至弘, 江南和幸, 池田和彦, 坂田雅之: 文化財保存修復学会第25回大会研究発表要旨集, 京都, 2003, pp. 70-71.
- 14) 福井勝衛: 紙パ技タイムス臨時増刊号 34(2), 43-44 (1991).