

2次元フーリエ変換を用いた クラフトテープの異同識別

2012 年

佐々岡 沙羅

目次

| | |
|------------------------|----|
| 要旨 | 1 |
| 緒言 | 8 |
| 実験の部 | 12 |
| 結果・考察 | 17 |
| 第一章 2次元パワースペクトルを用いた識別 | 17 |
| 第1節 2次元のパワースペクトル | 17 |
| 第2節 2D-PSの鮮明化処理 | 20 |
| 第3節 同一ロール内の2D-PSの比較 | 26 |
| 第4節 ロール間の2D-PSの比較 | 28 |
| 第二章 1次元パワースペクトルを用いた識別 | 32 |
| 第1節 マクロプログラムの校正 | 32 |
| 第2節 クラフトテープの1D-PSの算出 | 34 |
| 第3節 同一ロール内の1D-PSの比較 | 38 |
| 第4節 ロール間の1D-PSの比較 | 40 |
| 第三章 機械学習 | 44 |
| 第1節 統計処理方法の検討 | 44 |
| 第2節 機械学習によるロール間識別能力の検討 | 46 |
| 第四章 汚染損傷の影響 | 49 |
| 結語 | 56 |
| 参考文献 | 57 |
| 謝辞 | 61 |
| 論文目録 | 62 |
| 審査委員 | 63 |

要旨

【はじめに】

粘着テープは、身体及び手足の拘束や梱包など、殺人・強盗等様々な犯罪に用いられるため、犯罪捜査において重要な証拠試料となる。粘着テープは主に粘着剤と支持体で構成されており、支持体が紙であるものがクラフトテープである。クラフトテープは国内粘着テープ類生産量の約 40%を占めているにも関わらず、外観的特徴が乏しく、異同識別の報告は少ない。また、報告されている方法の識別能力は低く、さらに破壊分析であったり、前処理に時間を要したり、また血液、繊維、土砂、指紋検出試薬等の汚染の影響を受けやすいという欠点がある。

2次元フーリエ変換は画像上の特徴を得るための一般的な手法であり、画像処理の手法としても広く用いられている。法科学分野では、2次元フーリエ変換を用いた紙の異同識別の報告があり、これは紙の抄紙工程で使用されたワイヤーの痕跡等の周期性に着目したものである。2次元フーリエ変換を用いた紙の分析は、スキャナで取り込んだ画像について2次元高速フーリエ変換(2D-FFT)を行い、得られたパワースペクトルを目視比較、または数学的に照合するという非破壊、簡便、迅速な手法である。本研究では、クラフトテープの支持体である紙に注目し、2次元フーリエ変換をクラフトテープの識別に応用するための検討を行った。また、本法の識別能力を客観的に評価するため、かつパワースペクトルの変動を考慮した比較を目的として、パターン認識に有効とされる機械学習の応用についても検討を行った。最後に、模擬現場試料を用いて汚染・損傷の影響を含めて、本法の有用性について検証した。

【実験方法】

試料：国内で購入又は提供を受けたクラフトテープ 50 銘柄 56 ロールを用いた。各ロー

ルにつき異なる箇所から採取した 10 試料合計 560 試料を分析に使用した。模擬現場試料として、8 ロールを手足に巻いたり、引きちぎったり、水に浸す等の方法により汚染・損傷させたもの合計 97 試料を用いた。

周波数解析：スキャナで試料の支持体側の透過画像を取り込み、画像処理ソフト ImageJ を用いて 2D-FFT を行い 2 次元のパワースペクトル (2D-PS) を得た。2D-PS の鮮明化処理及び 1 次元のパワースペクトル (1D-PS) の算出は、ImageJ を用いたマクロプログラムを使用した。

統計処理：各ロールにつき 10 試料分の 1D-PS を用いて、各ロールの特徴を学習させた。機械学習の学習方法は、ランダ-2-ムフォレストを使用し、本学習法の予測精度の検証は 1 個抜き交差検証法で行い、統計処理ソフトは R を使用した。

【結果及び考察】

2次元のパワースペクトル

2D-PS 上の各ポイントは、画像中に存在する周期性成分の波長と方向を示している。また、濃淡は、その周期性成分の強さを示している。

Fig. 1 にモデル画像を用いた 2D-PS の例を示す。左側がモデル画像で、右側がその画像

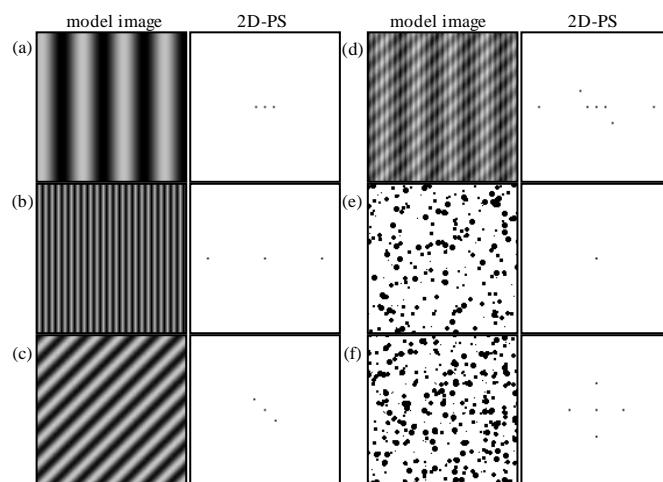


Fig. 1 Examples of 2D-PSs obtained from model images (a)–(f)

の 2D-FFT により得られた 2D-PS である。画像(a)、(b)、(c)は各々単一波長の sin 曲線に従って濃淡をつけた画像である。画像(a)、(b)、(c)から得られた 2D-PS には、中心ピーク以外に各周期性を反映した点対称の 1 組のピークが認められた。画像(d)は、(a) + (b) + (c)の合成

画像である。よって、画像(d)から得られた 2D-PS には、画像(d)中に存在する(a)、(b)、(c) の 3 種類の周期性に由来する 3 組のピークが認められた。これらの画像(a)から(d)については、目視で周期性の存在が認識可能である。一方、画像(e)及び(f)は、目視では周期性の有無の判断が困難な画像である。画像(e)から得られた 2D-PS には、中心ピークのみ認められた。このことは、画像(e)には周期性が存在しないことを示す。一方、画像(f)から得られた 2D-PS には、2 組のピークが認められた。このことは、2 種類の周期性成分の存在を示しており、これらのピークから、画像中に存在する周期性成分の波長、方向、強さの情報を得ることができる。本研究の試料であるクラフトテープは、画像(e)または(f)と同様の状態、つまり目視では周期性の有無の判断が困難な試料である。よって、2D-FFT により、従来の目視検査とは異なる情報が得られる可能性がある。

2D-PS の鮮明化処理

クラフトテープの透過画像について 2D-FFT を行ったところ、得られた 2D-PS 上には、コピー用紙の 2D-PS 上に認められるような鮮明なピークは認められなかった(Fig. 2)。そこで、クラフトテープから得られる 2D-PS のピークの鮮明化を目的として、画像中で複数箇所の 2D-FFT を行い、得られた複数の 2D-PS を加算した。通常 2D-PS の強度は対数変換した値を用いる。しかし、本法では、加算処理をより

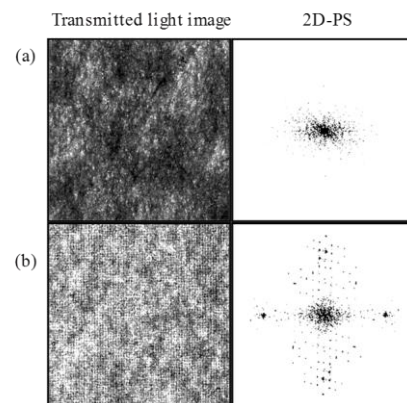


Fig. 2 Comparison of transmitted light images and 2D-PSs between (a) kraft tape and (b) common copy paper

効果的にするために、強度の対数変換を行わない 2D-PS を用いた。鮮明化処理の結果、目視でピークが確認可能となり、各ロールから特徴的なピークパターンが得られた(Fig. 3)。2D-PS の加算箇所数を 5、50、5000 箇所と増やして比較を行った結果、約 30 秒という所要時間も考慮し、50 箇所の加算処理が適切と考えられた。

2D-PS の比較

同一ロールから得た 2D-PS は、同様の位置にピークが認められ、中心ピーク周辺の低周波数領域のパターンも同様であった。しかし、ピークの濃淡、つまりピークの相対強度については、同一ロール内において変動が認められた。そこで、ロール間の 2D-PS の比較は、目視で確認可能なピーク

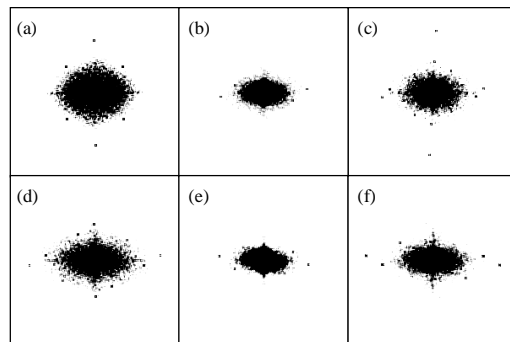


Fig. 3 Comparison of 2D-PSs of different kraft tapes (a)-(f)

の波数と方向及び低周波数領域のパターンに基づいて行った。その結果、50 ロールは 26 種類の 2D-PS type に分類できた。

2D-PS の鮮明化処理で行った加算処理は、鮮明な 2D-PS を得ることを可能とするだけでなく、試料の局所的な特徴を排除することから、信頼性の高い評価にもつながる。また、試料の大きさ、周期性の強さ、汚れの度合い等試料の状態に応じて、加算箇所数や 2D-FFT 範囲を最適化することが可能である。法科学分野の実際の鑑定では、汚染・損傷した試料を扱うことが多いため、これは大きな利点である。

1D-PS の算出及び比較

2D-PS は 2 次元イメージで情報量が多い反面、画像取り込み時に試料の置き方の角度がずれるとピークパターンもずれ評価が難しくなる(Fig. 4)。

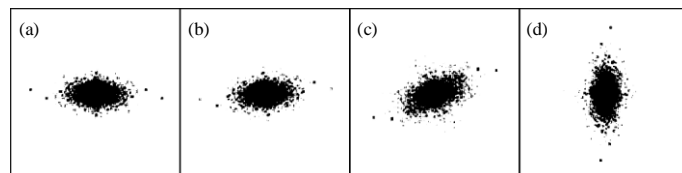


Fig. 4 2D-PSs of kraft tape (a) before, and after angle rotation of (b) 10 degrees, (c) 30 degrees and (d) 90 degrees

また、2D-PS は、ノーマライズ処理を行うため、ピーク強度の絶対値は識別に利用できない。そこで、加算処理後の 2D-PS から波長とピーク強度のみを抽出することにより、1D-PS を

算出した。1D-PS は試料画像の取り込み誤差の影響を受けず、ピークパターンだけでなくピーク強度も識別に利用できる。よって、1D-PS は 2D-PS とは異なる情報で識別を行うため、2D-PS では識別できなかったロール間でも識別できる可能性がある。Fig. 3 で示したロールの 1D-PS を Fig. 5 に示す。50 ロールから算出した 1D-PS は、目視比較で 29 種類の 1D-PS type に分類できた。

1D-PS では、ピークの波数が容易に確認でき、2D-PS では、大きなピークの影響で隠されていたピークが、確認可能となった。また、2D-PS では 10 cm-1 周辺のピークの確認はできなかったが、1D-PS ではプロファイルとして表示されるため、ピークの確認が可能となった。

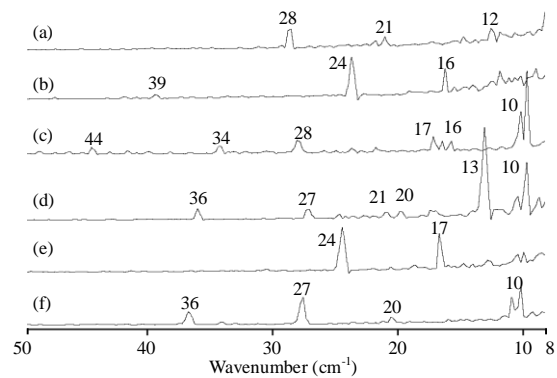


Fig. 5 Comparison of 1D-PSs of different kraft tapes (a)-(f)

以上より、2D-PS と 1D-PS の併用がクラフトテープの識別には効果的と考えられた。

機械学習によるロール間識別能力の検討

同一ロールから得た 1D-PS の目視比較を行ったところ、ロール内でピーク強度の変動が認められた。この変動は、ロール内において周期性の強い部分と弱い部分があることを示唆している。よって、クラフトテープの識別を行うに当たっては、ロール内の変動を考慮する必要があると考えられたが、目視評価では困難であった。そこで、ロール内の変動を考慮した上で、本法の識別能力を客観的に評価するために、機械学習を用いて検討を行った。

1D-PS を用いたクラフトテープのロール間識別能力の検証のため、50 ロール各 10 試料から算出した 1D-PS を用いて、ロール間 1 対 1 の比較を行った。検証は、異なるロールのペ

ア 1 組 20 試料において、ランダムフォレストを用いた 1 個抜き交差検証法による正解率が 95% 以上のペアを識別可能とすることにより行った。その結果、50 ロール間の全組み合わせ 1225 通り中 1179 通り(96%)が識別可能なペアであり、本法は高いロール間識別能力があることが示され

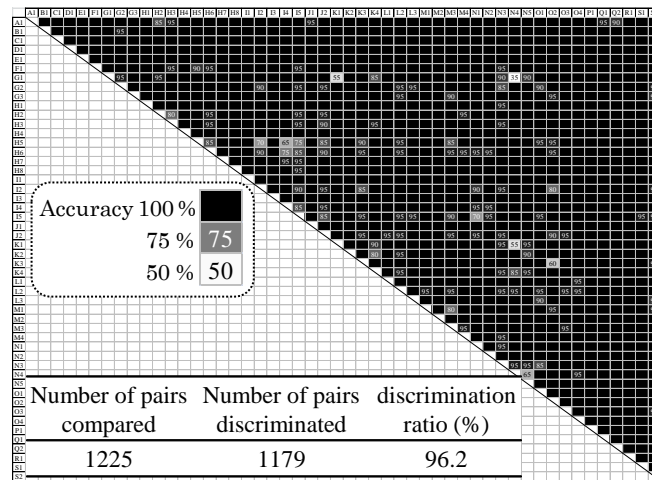


Fig. 6 Comparison scores and results of pairwise comparisons of 50 kraft tapes

た(Fig. 6)。また、得られた結果は目視評価と整合性が高く、目視評価に統計的処理を加えることにより、客観性が加わり、本法の信頼性が向上すると考えられた。

汚染損傷の影響

模擬現場試料には、多数の繊維片等の付着が認められたが、2D-PS や 1D-PS への影響は認められなかった。引きちぎるような行為により一部破れた試料においても、顕著な影響は認められなかった。しかし、粘着面同士がくっつき粘着面が大きく剥がれた試料や、大きく破れた試料では、2D-PS や 1D-PS において、目視でのピークの確認は困難になったが、汚染損傷の影響で、新しいピークが現れることはなかった。また、機械学習を用いることにより、これらの試料でも識別可能な場合もあった。よって、本法は汚染損傷した試料にも適応可能と考えられた。

【結論】

本研究では、2次元フーリエ変換を用いたクラフトテープの識別のために 2D-PS の鮮明化方法を開発した。その結果、2D-PS のピークパターンにより異同識別が可能となった。また、

2D-PS の欠点を補うために、試料画像の取り込み誤差の影響を受けない 1D-PS を算出した。2D-PS と 1D-PS の併用により、多くの情報を得ることが可能となり、識別能力が上がり、信頼性も高上した。ロール内の変動を考慮し、客観的な識別を目的として、機械学習によるロール間識別能力の検討を行った結果、本法は高いロール間識別能力があることが示された。本法は、試料中の周期性成分のみを評価するため、血液、毛髪、繊維片等の汚染の影響は少なく、試料の状態に応じて、分析条件の変更も容易である。以上より、本法は、非破壊、簡便、迅速であり、法科学分野の実際の鑑定でも十分有効であると考えられた。

【参考文献】

Sasaoka S, Saito K, Higashi K, Limwikrant W, Moribe K, Suzuki S, Yamamoto K.,
Discrimination of paper-based kraft tapes using Fourier transform of transmitted light images,
Forensic Sci. Int., 220, 59-66 (2012)

緒言

我が国における犯罪の状況は年々多様化・複雑化が進み、かつ巧妙なものとなりつつある。そのため、近年の刑事裁判では、厳密かつ客観的な検査を経た科学的な証拠が重要視され、科学捜査の果たす役割は益々大きくなってきている。

事件現場より回収された試料は、主に異同識別を目的として様々な分析が行われる。すなわち、事件現場より回収された試料と、被疑者に直接結びつく試料とに類似性が認められれば、被疑者と犯行を結び付ける有力な手がかりとなる。また、この類似性が高ければ高いほど証拠価値は高いものとなる。事件現場では、繊維片・塗膜片・ガラス片・紙・油質・プラスチック片・金属片・土砂等、多種多様なものが回収される。粘着テープも、身体及び手足の拘束や梱包などの用途で、殺人・強盗・強姦等様々な犯罪に用いられるため、事件現場で回収される試料の一つである。粘着テープは、犯行前に被疑者自身が購入したり、犯行現場で使用後の残りを被疑者が持ち去ったりすることも多く、犯罪捜査において重要な証拠試料となることが少なくない。

粘着テープは主に粘着剤と支持体で構成されており、主要な支持体としては、クラフト紙等の紙、ポリプロピレン・セロハン・ポリ塩化ビニル等のプラスチックフィルム、スフモスリン等の布がある[1]。支持体がプラスチックフィルムや布である粘着テープについては、これまでに熱分解ガスクロマトグラフィ質量分析法[2-5]、フーリエ変換赤外分光法[2、4]、蛍光 X 線分析法[6, 7]、糸密度測定[7]、高周波誘導結合プラズマ質量分析法[8]、偏光顕微鏡法[9]、マトリックス支援レーザー脱離イオン化質量分析法[2, 10]、安定同位体質量分析法[11, 12]等、多くの分析法が報告されている。

しかし、支持体が紙であるクラフトテープは、国内粘着テープ類生産量の約 40%を占めているにも関わらず、外観的特徴が乏しく、異同識別の報告は少ない。これまでに、雲岡は、アクリル系粘着剤を使用したクラフトテープについて、粘着剤成分の熱分解ガスクロ

マトグラフィ質量分析法と、粘着面の全反射法フーリエ変換赤外分光法を併用することにより、17 ロールのクラフトテープを、(13 ロール、3 ロール、1 ロール) の互いに識別可能な3 グループに分類した[13]。肥田らは、クラフトテープからポリエチレンラミネートフィルムを分離し、その偏光画像を用いたクラスター分析および主成分分析によって、26 ロールを(17 ロール、7 ロール、2 ロール) の3 グループに分類した[14]。また、支持体全体の色情報を用いたクラスター分析によって、41 ロールを(6 ロール、19 ロール、16 ロール) の3 グループに分類した[15]。これらの方法は、クラフトテープの識別に有効だが、破壊分析であったり、前処理に時間を要したり、また血液、繊維、土砂、指紋検出試薬等の汚染の影響を受けやすいという欠点がある。法科学的な試料は、事件現場から回収してくることが多いため、汚染されていることが多い。また、再度の入手が困難である場合が多く、再鑑定や他の検査に用いることを想定し、非破壊的もしくは試料の消費が少ない分析手法が望まれる。同時に、犯罪捜査においては迅速性も要求される。そのため、これらの条件を可能な限り満たす分析法の開発が求められている。

クラフトテープについての分析法の報告は少ないが、クラフトテープの支持体である紙については、元素分析[16, 17]、熱分解ガスクロマトグラフィ[18]、X線回折法[19-21]をはじめとして様々な分析法が報告されている[22-25]。また、非破壊かつ操作が迅速な手法として、試料画像の2次元フーリエ変換を用いる方法が紙の異同識別に有用との報告がある。

フーリエ変換は、振動・音・結晶構造等さまざまな周期性を持った信号の解析に広く利用されている。また、2次元フーリエ変換は画像上の特徴を得るための一般的な手法であり、画像処理の手法としても広く用いられている。2次元フーリエ変換を用いた紙の分析は、フラット・ベット・イメージスキャナで取り込んだ透過又は反射画像について、2次元高速フーリエ変換(2-dimensional fast Fourier transform: 2D-FFT)を行い、得られたパワースペクトルを目視で比較、または数学的に照合する手法である。これは、紙の抄紙工程で使用されたワイヤーの痕跡であるワイヤーマーク等の周期性に着目したものであり、紙の地合い評

価[26, 27]や、手すき紙[28, 29]・コピー用紙[29-31]・新聞紙[29]・ティッシュペーパー[32]の異同識別への応用が報告されている。そこで本研究では、クラフトテープの支持体である紙に注目し、紙類の異同識別への有用性が報告されている 2 次元フーリエ変換をクラフトテープの異同識別に応用するための検討を行った。また、2 次元フーリエ変換により得られるパワースペクトルの客観的な比較を目的として、パターン認識に有効とされる機械学習の応用についても検討を行った。

機械学習とは、人間が種々のパターンを学習していく過程をコンピュータで実現し、データの分類や予測に役立てるものである。パターン認識とは、試料データから、それが予め想定されている対象のうちのいずれのカテゴリに属するかを判断することであり[33]、音声・手書き文字・顔画像・X 線画像・CT 画像等様々なものが対象となる。パターンの学習方法に、線形判別分析・k-近傍法・サポートベクターマシン(support vector machine: SVM)等が用いられている。なかでも SVM は精度が高く、よく利用されている方法である。SVM は、線形分離が可能な高次元の仮説空間で、線形的なアプローチで学習を行う方法である[34]。また、高次元の分類問題が得意と言われており、精度が高く、近年注目を集めている方法の一つである [35-37]。近年、計算量の増大と汎化能力の低下を避けるための手法として集団学習が注目されている。集団学習とは、決して精度が高くない複数の結果を組み合わせ、精度を向上させる機械学習方法であり、典型的な方法として、バギングとブーティングがあり、今世紀に入って、ランダムフォレスト(random forest: RF) [38]が報告され、計算が速く、精度も高いことが実証されている[36, 37, 39-42]。

第一章では、まず、試料画像の 2D-FFT により算出される 2 次元のパワースペクトル(2-dimensional power spectra: 2D-PS)上のピークの鮮明化方法について検討を行った。次に、開発した方法を用いて、同一ロール内及びロール間の 2D-PS の比較を行った。第二章では、2D-FFT により得られる情報から、波長とピーク強度のみを抽出することにより、1 次元のパワースペクトル(1-dimensional power spectra: 1D-PS)を算出した。そして、1D-PS を用いて、

同一ロール内及びロール間の比較を行った。第三章では、機械学習の方法を検討した後に、1D-PS を用いて本法の識別能力の検討を行った。第四章では、実際の鑑定への応用を踏まえ、模擬現場試料を作成し、試料の汚染・損傷の影響について検討を行った。

実験の部

試料

国内で購入又は提供された幅 50mm、茶色のクラフトテープ 50 銘柄 56 ロールを用いた。内訳を Table 1 に示した。なお、製造元が不明な試料については、販売元を示した。

各ロールについて、長さ約 12 cm の試料、合計 10 試料をはさみで切り取り、食品用ラップに貼った後に分析に使用した。ロール番号 1~50 の 50 ロールについては、1 ロールにつき、約 120 cm を切り取り、それを 10 等分したものを試料とした。ロール番号 51~56 の 6 ロールについては、ロールの外側部分 (Fig. 1(a) : 長さ 50 m のロールでは、外側から約 0 m ~20 m を示す) より 4 試料、中間部分 (Fig. 1 (b) : 長さ 50 m のロールでは、外側から約 20 m~40 m を示す) より 3 試料、内側部分 (Fig. 1 (c) : 長さ 50 m のロールでは、外側から約 40 m~50 m を示す) より 3 試料の合計 10 試料を採取した。

模擬現場試料として、ロール番号 1、2、6、18、26、43、44、45 の 8 ロールを用いて、手足に巻いた後に引きちぎった試料、手足に巻いた後に丸めた試料、水中静置した試料、手足に巻いた後に引きちぎり、その後水中静置した試料から、合計 97 試料を採取した。

周波数解析

透過ユニット付フラット・ベット・イメージスキャナ (Seiko Epson, Japan GT-8700F) のガラス面に試料の背面 (支持体側) を当て、取り込み解像度 300 dpi で、45 mm x 95 mm 範囲の透過画像を取り込んだ。取り込んだ画像は、BMP 形式で保存した。取り込んだ画像について、オープンソースの画像処理ソフト ImageJ[43]を用いて、2D-FFT を行い 2D-PS を得た。2D-FFT 処理範囲は、256 x 256 pixels (300 dpi の画像において約 22 mm 角に相当)で行った。得られた 2D-PS は、白黒反転処理後に明るさとコントラストを調整したものを示した。

2D-PS の比較

クラフトテープから得られた 2D-PS の比較は、鮮明化処理後の 2D-PS を用いて目視で行った。鮮明化処理後の 2D-PS とは、具体的には 50 箇所から算出した 2D-PS を強度の対数変換は行わずに加算処理を行った後に、2D-PS の中心から半径 15 ピクセルのパワー値を 0 とし、ノーマライズ処理を行った結果得られた 2D-PS を示す。なお、加算処理では、2D-FFT 範囲は無作為に選択し、2D-FFT 範囲の部分的な重複は可とした。同一ロール内の比較は、各ロールにつき 10 試料分の 2D-PS を比較することにより行った。ロール間の比較は、50 銘柄 50 ロール（ロール番号 1～50）を用いた。2D-PS の比較は、2D-PS 上の目視で確認可能なピークから算出した波数と周期性の方向、及び中心ピーク周辺の低周波数領域のパターンを用いて行った。

1D-PS の算出

加算処理後の 2D-PS から波長とピーク強度を抽出することにより 1 次元のパワースペクトル（1D-PS）を算出した。1D-PS の算出時には、取り込み画像中の全ピクセル値の平均を 128、標準偏差を 30 に規格化した画像を用いた。

マクロプログラム

2D-PS の鮮明化処理及び 1D-PS の算出は、ImageJ を用いたマクロプログラムを使用した。マクロプログラムは、強度の対数変換を行っていない 2D-PS の加算処理後に、まず、波長とピーク強度を抽出し 1D-PS を得る。ピーク強度は、各波長での最大値を用いた。その後、2D-PS の中心からの半径 15 ピクセルのパワー値を 0 にし、ノーマライズ処理を行うことにより、鮮明化処理後の 2D-PS を得るプログラムとした。よって、1D-PS の強度はノーマライズ処理なし、2D-PS の強度はノーマライズ処理後のものとなる。

統計処理

50 銘柄 50 ロール（ロール番号 1~50）各 10 試料合計 500 試料から算出した 1D-PS を用いて、機械学習を行い、各ロールの特徴を学習させた。機械学習の学習方法は、RF[38]を用いて、木の数：3000、分岐に用いる変数の数：20 に指定した。RF のアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 与えられたデータセットから、 n セットのブートストラップサンプル B_1, B_2, \dots, B_n を作成する。
- (2) 各々のブートストラップサンプルデータを用いて、未剪定の最大の決定・回帰木を作成する。ただし、分岐のノードは、ランダムサンプリングされた変数の中の最善のものを用いる。
- (3) すべての結果を統合・組み合わせ（回帰の問題では平均、分類の問題では多数決）、新しい予測・分類器を構築する。

本学習法の予測精度の検証は 1 個抜き交差検証法[34]で行い、統計処理ソフトはオープンソースの R[46]を使用した。

Table 1 List of kraft tapes analyzed

| Roll number | Brand name | Manufacturer | Roll number | Brand name | Manufacturer |
|-------------|------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| 1 | A1 | A* | 31 | L3 | L |
| 2 | B1 | B* | 32 | M1 | M |
| 3 | C1 | C* | 33 | M2 | M |
| 4 | D1 | D* | 34 | M3 | M |
| 5 | E1 | E* | 35 | M4 | M |
| 6 | F1 | F | 36 | N1 | N |
| 7 | G1 | G | 37 | N2 | N |
| 8 | G2 | G | 38 | N3 | N |
| 9 | G3 | G | 39 | N4 | N |
| 10 | H1 | H | 40 | N5 | N |
| 11 | H2 | H | 41 | O1 | O |
| 12 | H3 | H | 42 | O2 | O |
| 13 | H4 | H | 43 | O3 | O |
| 14 | H5 | H | 44 | O4 | O |
| 15 | H6 | H | 45 | P1 | P* |
| 16 | H7 | H | 46 | Q1 | Q* |
| 17 | H8 | H | 47 | Q2 | Q |
| 18 | I1 | I | 48 | R1 | R |
| 19 | I2 | I | 49 | S1 | S |
| 20 | I3 | I | 50 | S2 | S |
| 21 | I4 | I | 51 | A1 | A* |
| 22 | I5 | I | 52 | B1 | B* |
| 23 | J1 | J | 53 | C1 | C* |
| 24 | J2 | J | 54 | C1 | C* |
| 25 | K1 | K | 55 | F1 | F |
| 26 | K2 | K | 56 | O4 | O |
| 27 | K3 | K | | | |
| 28 | K4 | K | | | |
| 29 | L1 | L | | | |
| 30 | L2 | L | | | |

* Distributor. The manufacturer is unknown.

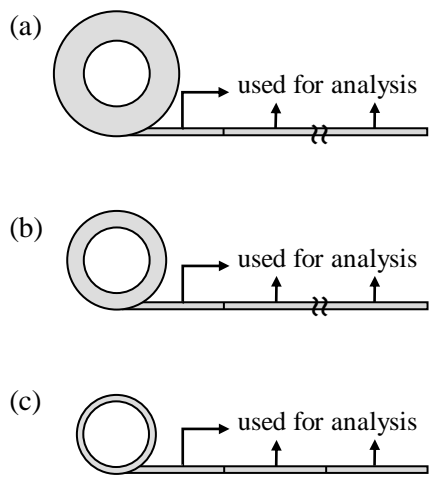


Fig. 1 Samples of kraft tape collected from (a) beginning, (b) middle, and (c) end sections of the roll

結果・考察

第一章 2次元パワースペクトルを用いた識別

2次元フーリエ変換をクラフトテープの識別に用いるために、まず、2D-PS上のピークの鮮明化方法について検討を行った。次に、開発した方法を用いて、同一ロール内及びロール間の2D-PSの比較を行い、国内で入手可能なクラフトテープ50銘柄50ロールから得られた2D-PSの分類を行った。

第1節 2次元のパワースペクトル

各画像中に存在する周期性成分の波長・方向・強さの情報は、2D-PSに示される。つまり、2D-PS上の各ポイントは、各画像中に存在する周期性成分の波長と方向を示す。中心からピークまでの距離は波長に反比例し、中心に対するピークの方法は周期性の方向を示す。よって、中心に直流成分由来のピークがあり、その他のピークは中心に対して点対称となる。また、各ピークの濃淡は、その周期性成分の強さを示す。

Fig. 2にモデル画像を用いた2D-PSの例を示す。左側がモデル画像で、右側がその画像の2D-FFTにより得られた2D-PS (128 x 128 pixels) である。なお、各2D-PSは、主なピークのみが確認できるように、明るさとコントラストを調整したものを示した。画像(a)、(b)、(c)は各々単一波長の正弦曲線に従って濃淡をつけた画像である。画像(a)、(b)、(c)から得られた2D-PSには、中心ピーク以外に各周期性を反映した1組のピークが認められた。これは、各画像中に1種類の周期性が存在していることを示す。画像(d)は、(a) + (b) + (c)の合成画像である。よって、画像(d)から得られた2D-PSには、画像(d)中に存在する(a)、(b)、(c)の3種類の周期性に由来する3組のピークが認められた。画像(a)から(d)については、目視で周期性の存在が認識可能である。一方、画像(e)及び(f)については、目視での周期性の有無

の判断が困難である。画像(e)から得られた 2D-PS には、中心ピークのみ認められた。このことは、画像(e)には周期性が存在しないことを示す。一方、画像(f)から得られた 2D-PS には、2組のピークが認められた。これらの2組のピークは、画像(f)中に2種類の周期性成分が存在していることを示しており、これらのピークから、画像中に存在する周期性成分の波長、方向、強さの情報を得ることが可能となる。本研究の試料であるクラフトテープは、画像(e)または(f)と同様の状態、つまり目視では周期性の有無の判断が困難である。よって、2D-FFTにより、従来の目視検査とは異なる情報が得られる可能性があると考えられる。

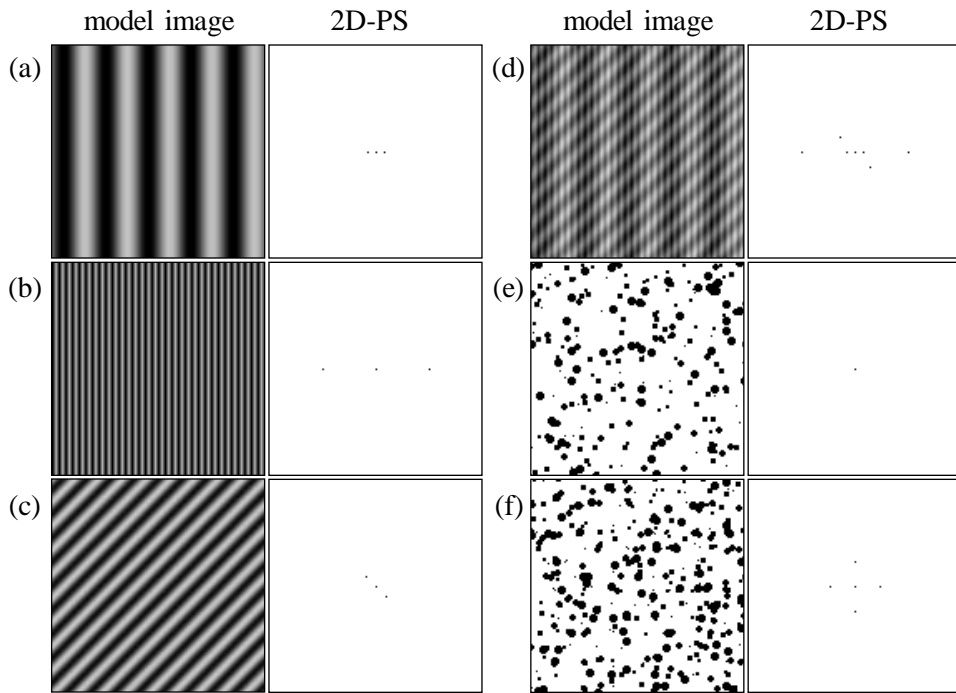


Fig. 2 Examples of 2D-PSs obtained from model images (a)–(f)

第2節 2D-PSの鮮明化処理

Fig. 3には、クラフトテープとコピー用紙の透過画像及び、これらの画像の2D-FFTにより得られた2D-PS(中心部分200 x 200 pixels)を示した。コピー用紙から得られた2D-PS上には、鮮明なピークが多数認められたが、クラフトテープから得られた2D-PS上には、コピー用紙の2D-PS上に認められるような鮮明なピークは認められなかった。しかし、クラフトテープの支持体はクラフト紙である。紙には抄紙工程で使用されたワイヤーの痕跡が残っているため、紙から得られた2D-PS上には、これらのワイヤーに由来するピークが認められるという報告がある[29, 30, 47]。よって、クラフトテープにもワイヤーマークが存在する可能性があると考えられる。クラフトテープは粘着剤と支持体の層状構造であり、さらに支持体の表面は、ロールからテープの剥離を容易にするために、剥離剤でコーティングされている。これらの構造がワイヤーの痕跡の検出を困難にしている可能性があると考えられたため、ピークの鮮明化処理について検討を行った。

Fig. 4(a)に、クラフトテープの透過画像及び、画像中の正方形で2D-FFT範囲を示した。2D-PSのピークの鮮明化を目的として、Fig. 4(a)上の複数の正方形のように、画像中で無作為に選択した複数箇所で行い、Fig. 4(b)のような1箇所の2D-PSを複数算出し、それらを加算した。その結果、Fig. 4(c)に示すように目視でピークが確認可能となった。なお、2D-FFT範囲の部分的な重複は問題ないが、同一箇所のみから得られた2D-PSの加算処理では、ピークの鮮明化は認められなかった。これは、同一箇所から得られる2D-PSは常に同一パターンを示すためである。

2D-PS上の各ピークの濃淡は、その周期性成分の強さを示している。Fig. 4(b)及び(c)の強度は、対数値に変換した値を用いている。対数変換は、広いダイナミックレンジを表現するのに適している。2D-PS上では直流成分値がとて大きな値であり、他の成分ピークを目視で確認可能にするために、2D-PSには対数変換した強度がよく用いられる。しかし、対数変換をすることにより、実際の差は過少評価される。一方、対数変換を行わない場合は、

広いダイナミックレンジを表現することができない。よって、2D-PS 上では直流成分のみが目視で確認できる唯一のピークとなるが、生の値が表現されているため、値の差を過少評価することはない。

本報で行う加算処理における対数変換の影響は、以下のように示される。「シグナル>ノイズ」の場合に、 $\{\text{シグナル/ノイズ}\} > \{\log(\text{シグナル})/\log(\text{ノイズ})\}$ となる。」よって、本報で行っている 2D-PS の加算処理において、強度は対数変換を行わない方が、シグナルの鮮明化に対する加算処理の効果は大きくなると考えられた。

Fig. 4(d) は、1 箇所での 2D-FFT により得られた強度の対数変換を行っていない 2D-PS である。これは対数変換を行っていないため、直流成分のみが目視で確認できる唯一のピークである。強度の対数変換を行っていない 2D-PS を 50 箇所加算した結果が Fig. 4(e) である。加算処理により、2D-PS の強度幅はさらに大きくなり、1 箇所での 2D-FFT の結果と同様、直流成分のみが目視で確認可能である。そこで、ピークの可視化のために以下の処理を行った。はじめに、パワー値の大きな直流成分周辺の半径 15 ピクセルのパワー値を 0 にし、ノーマライズ処理を行った。その結果、Fig. 4(f) に示すように、直流成分の影響で隠されていたピークが目視で確認可能となった。さらにピークを認識しやすくするため、以下の処理を行った。まず、スムージング処理、具体的には、隣り合う半径 3 ピクセル分のピクセル値の平均で、ピクセル値を置き換える処理[43]を行った。その後、コントラストを強調するフィルターを使うことにより先鋭化を行った[43]。最後に Fig. 4(f) でパワー値を 0 にした部分を塗りつぶした。これらの処理により、Fig. 4(g) に示すようにピークが鮮明になった。

Fig. 5 には、加算箇所数の増加による 2D-PS の変化の様子を示した。Fig. 5 の 2D-PS は、全て Fig. 4(d) から Fig. 4(g) までの処理を行っており、加算箇所数のみを変化させた。1 箇所での 2D-FFT により得られた 2D-PS では、ノイズとピークの判断が困難であったが、加算箇所数を 5 箇所、50 箇所と増加させるに従って、矢印で示したピークが鮮明になった。この結果より、加算処理は 2D-PS 上のピークの鮮明化に効果的な手法であることが明らかとな

った。また、加算箇所数を 5000 箇所まで増やしたが、50 箇所加算の 2D-PS と比較して顕著な違いは認められなかった。所要時間は、50 箇所加算では約 30 秒、5000 箇所では約 50 分であった。よって、ここでは 50 箇所の加算処理で分析を実施した。

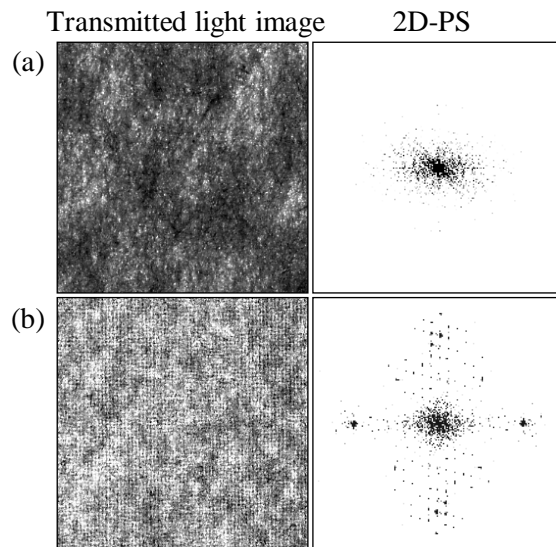


Fig. 3 Comparison of transmitted light images and 2D-PSs between (a) kraft tape (roll number 18) and (b) common copy paper

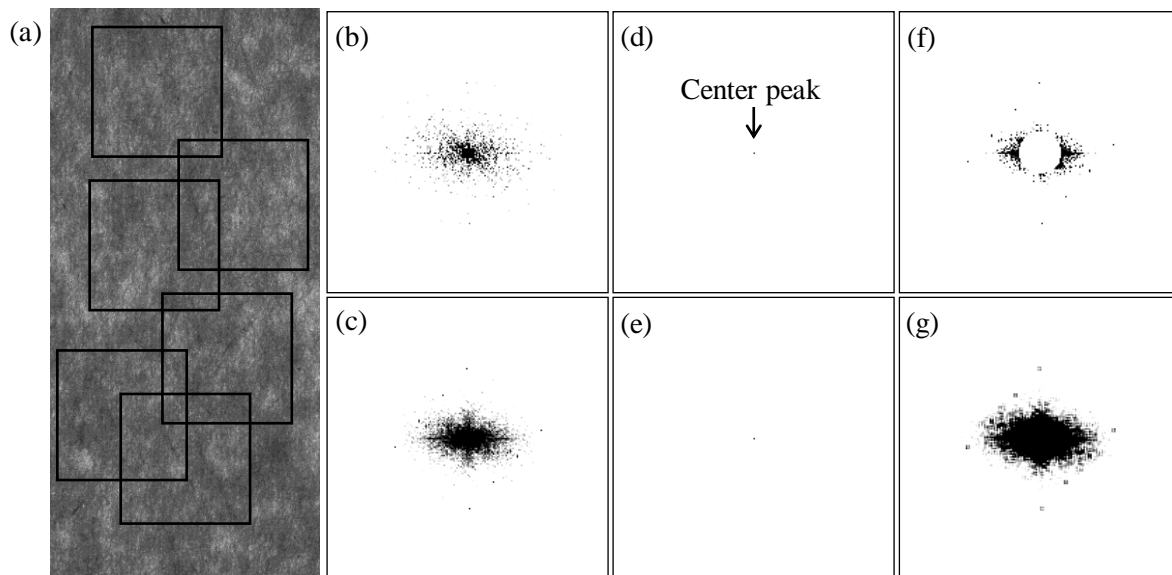


Fig. 4 Transmitted light image of kraft tape and 2D-PSs of areas with 2D-FFT applied: (a) Transmitted light image of kraft tape, (b) 2D-PS at one point with logarithmic scale intensity, (c) accumulated 2D-PS at 50 points with logarithmic scale intensity, (d) 2D-PS calculated with linear scale intensity, (e) accumulated 2D-PS at 50 points with linear scale intensity, (f) accumulated 2D-PS with a removal of the area around the center and normalization of the power value, and (g) accumulated 2D-PS after smoothing, sharpening, and filling in with black. Applied 2D-FFT areas are indicated by the black squares in (a).

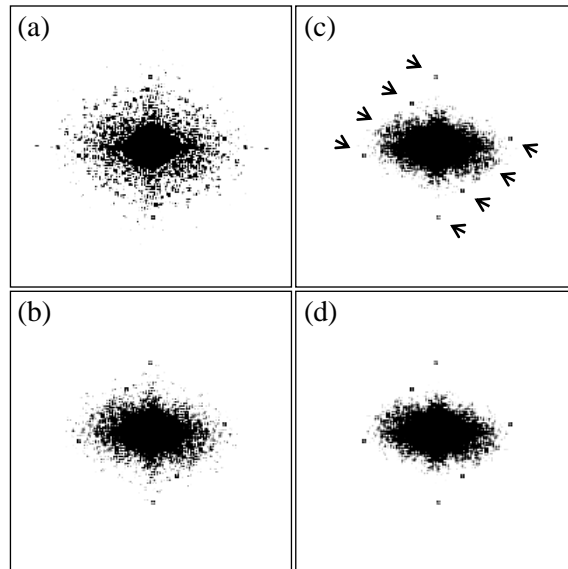


Fig. 5 2D-PSs of kraft tape (roll number 18) with different accumulation numbers of (a) 1 point, (b) 5 points, (c) 50 points, and (d) 5000 points

第3節 同一ロール内の2D-PSの比較

Table 1 中の試料56ロール全てを用いて、同一ロールから得られた2D-PSの比較を行った。例として Fig. 6 にはロール番号18及び51から得られた10試料分の2D-PSを示した。いずれの試料を用いた場合でも、試料の採取方法に関係なく、同一ロールから得た2D-PSは、同様の位置にピークが認められ、直流成分周辺の低周波数領域のパターンも同様であった。しかし、ピークの濃淡、つまりピークの相対強度については、同一ロール内において、変動が認められた。その結果、周期性成分の波数と方向は同一ロール内で同様だが、ロール内に周期性の強い部分と弱い部分が存在する可能性があると推測された。

以上より、目視で確認可能なピークの波数と方向情報を用いて、2D-PSの比較を行うことは可能と考えられた。また、低周波数領域のパターン比較も有用であり、特に、ピークが認められない2D-PSにおいては、重要な情報になると考えられた。

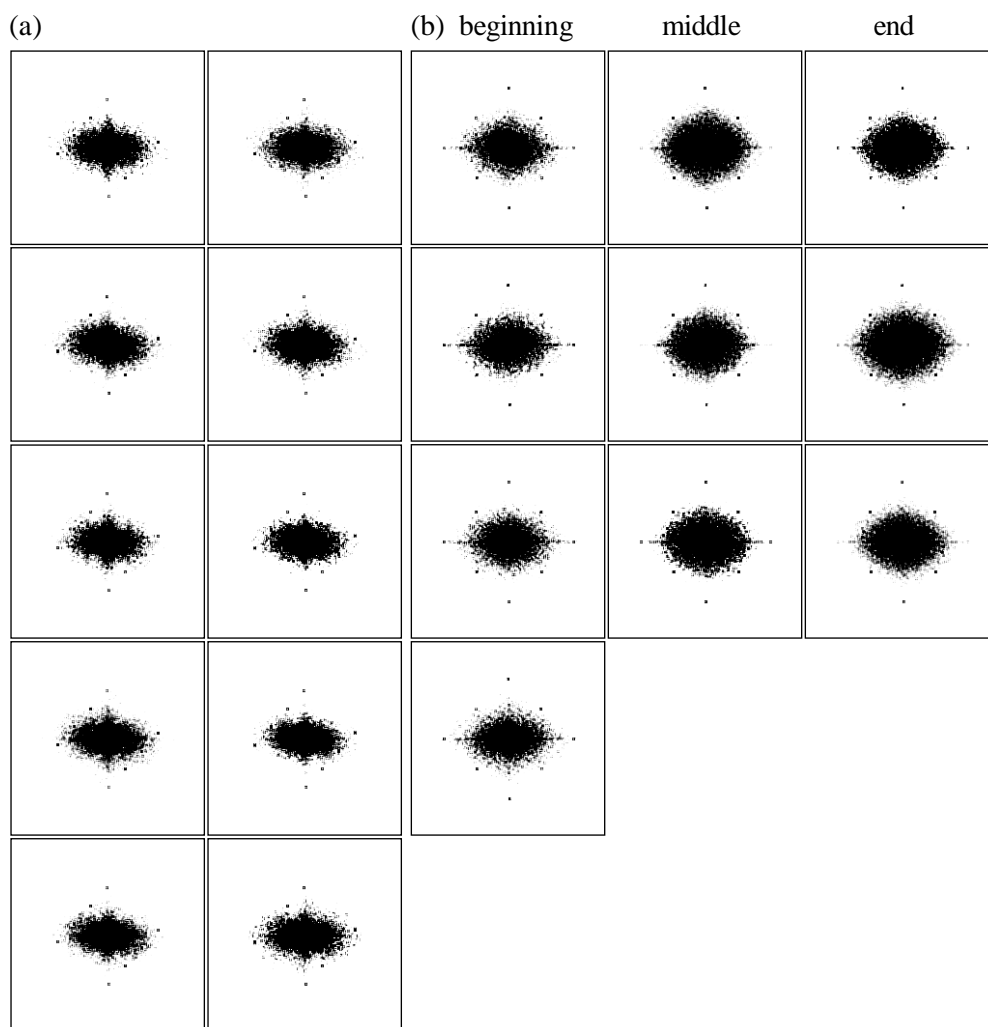


Fig. 6 Improved 2D-PSs of kraft tapes within each single roll, collected from (a) 10 samples from the beginning of roll number 18, and (b) 10 samples from the beginning, middle, and end of roll number 51

第4節 ロール間の2D-PSの比較

ロール間の比較は、50 銘柄 50 ロール各 10 試料合計 500 試料 (Table 1 のロール番号 1～50) を用いて行った。2D-PS の比較は、2D-PS 上で確認可能なピークの波数と方向及び低周波数領域のパターン比較に基づいて行った。その結果、50 ロールは 26 種類の 2D-PS type に分類できた。分類結果を Table 2 に、各 2D-PS type の代表的な 2D-PS を Fig. 7 に示し、2D-PS 上のピーク付近にはピークの波数 (cm^{-1}) を表示した。なお、2D-PS type 24～26 は、目視でピークが確認できないグループであり、これらは低周波数領域のパターンのみで識別を行った。

クラフトテープから算出された 2D-PS より、ピークの波長は、 0.26 mm (37 cm^{-1}) ～ 0.77 mm (13 cm^{-1}) の範囲にあることがわかる。これらの値は、紙や紙の製造に用いるワイヤーから得られた 2D-PS 上のピークの波長と一致しているため[29, 30, 48]、クラフトテープから得られたピークは、支持体であるクラフト紙由来と考えられた。

今回比較を行った 50 ロール中、32 ロールは同一ロールから得た 10 試料全てが同じ 2D-PS type に分類され、残りの 18 ロールは 2 つ以上の 2D-PS type に分かれた。2 つ以上の 2D-PS type に分かれたロールとは、例えば 8、22、38、39、40 の 5 ロールが、 24 cm^{-1} の共通ピークがあるにも関わらず、 16 cm^{-1} のピークの有無で 2D-PS type 6 と type 7 に分かれたということである。この結果は、ロール内における相対強度の変動が、目視でのピーク有無の判断に影響を与えたためであり、相対強度の小さなピークほどグループ分けへの影響が大きかった。

小括

クラフトテープの透過画像から得られる 2D-PS のピークの鮮明化を目的として、画像中で複数箇所の 2D-FFT を行い、得られた複数の 2D-PS を強度の対数変換を行わないで加算する方法を開発した。その結果、目視でピークが確認可能となり、各ロールから特徴的なピ

ークパターンが得られ、2D-PS の目視評価でロール間の識別が可能となった。

鮮明化の目的で行った複数箇所から得られた 2D-PS の加算は、鮮明な 2D-PS を得ることを可能とするだけでなく、試料の局所的な特徴を排除することから、安定した信頼性の高い評価にもつながると考えられる。また、試料の大きさ、周期性の強さ、汚れの度合い等試料の状態に応じて、加算箇所数や 2D-FFT 範囲を最適化することが可能である。また、加算処理を行うに当たって、2D-FFT 範囲の部分的な重複が可能であることは、小さな試料に適応するに当たって、とても有効である。法科学分野の実際の鑑定では、汚染・損傷した試料を扱うことが多いため、これらは大きな利点と考えられる。

Table 2 Classification of 50 kraft tapes according to 2D-PS type

| 2D-PS type | Roll number |
|------------|--|
| 1 | 1 |
| 2 | 2, 10, 47 |
| 3 | 3 |
| 4 | 4, <u>16</u> , 49 |
| 5 | 5 |
| 6 | <u>7</u> , <u>8</u> , <u>22</u> , <u>25</u> , <u>30</u> , <u>38</u> , <u>39</u> , <u>40</u> , 44 |
| 7 | <u>8</u> , <u>22</u> , 26, 28, 29, <u>38</u> , <u>39</u> , <u>40</u> |
| 8 | 9, <u>19</u> , <u>41</u> |
| 9 | <u>14</u> , <u>19</u> , <u>21</u> , <u>27</u> , <u>37</u> , <u>41</u> , 42 |
| 10 | 15 |
| 11 | 18 |
| 12 | 20 |
| 13 | 23 |
| 14 | <u>27</u> , 35 |
| 15 | <u>30</u> |
| 16 | <u>31</u> |
| 17 | 32, <u>34</u> , 50 |
| 18 | 33, <u>48</u> |
| 19 | <u>34</u> |
| 20 | 43 |
| 21 | 45 |
| 22 | 46 |
| 23 | <u>48</u> |
| 24 | 6 |
| 25 | <u>7</u> , 11, 12, 13, <u>14</u> , <u>16</u> , 17, <u>19</u> , <u>21</u> , <u>22</u> , 24, <u>25</u> , <u>27</u> , 36, <u>37</u> , <u>39</u> |
| 26 | <u>31</u> |

Note: Kraft tapes that are classified into two or more 2D-PS types were shown by underline. Samples with no visual peak were categorized as 2D-PS type 24-26.

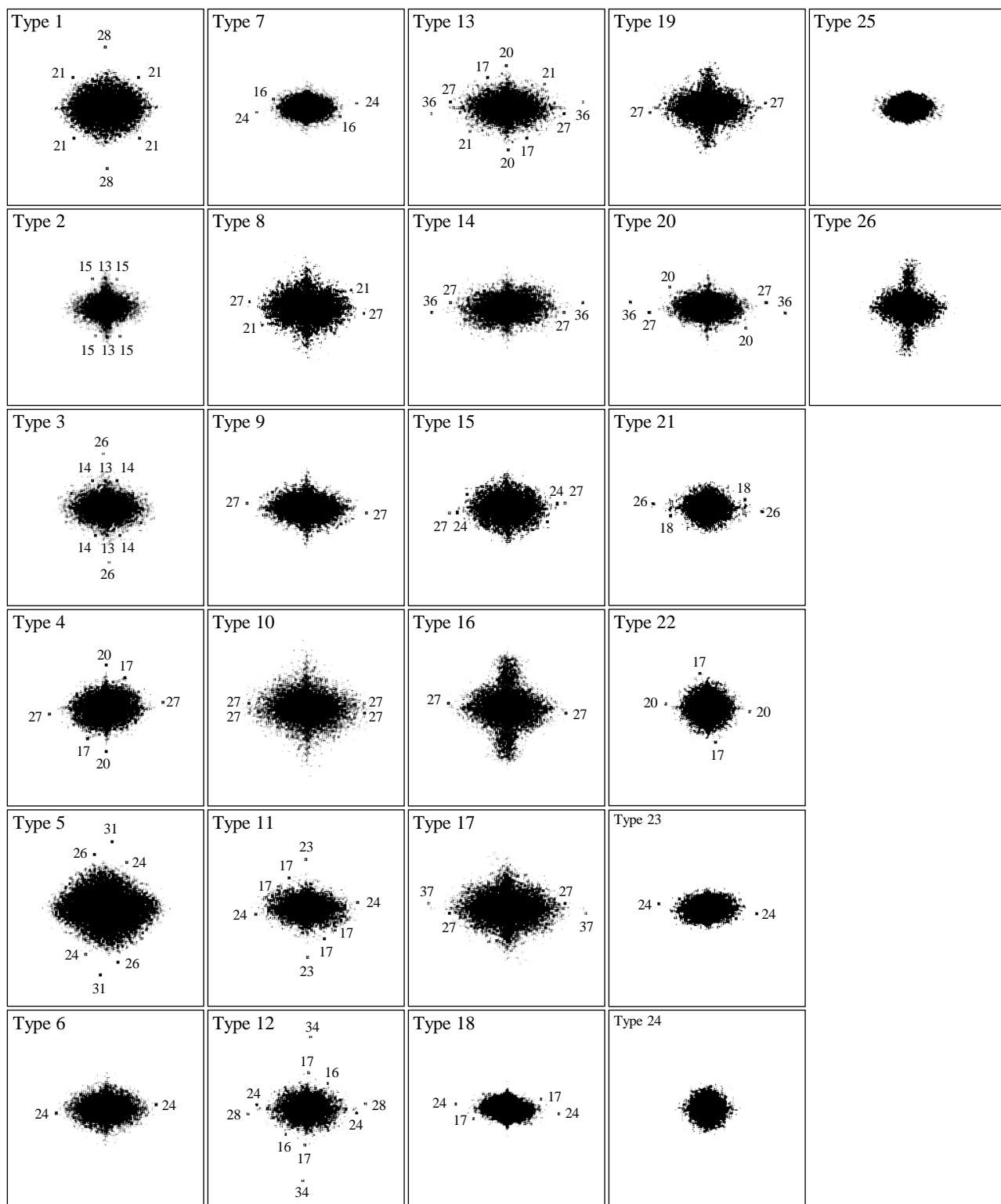


Fig. 7 Typical improved 2D-PSs belonging to different 2D-PS types
Numbers near the peaks correspond to the wavenumber (cm^{-1}).

第二章 1次元パワースペクトルを用いた識別

第一章で、2D-PS がクラフトテープの異同識別に有効であることが示された。しかしながら、2D-PS は、2次元イメージで情報量が豊富な反面、画像の取り込み時の試料の置き方の影響を受ける。また、ピークの絶対強度及び 10 cm^{-1} 周辺のピークの比較ができない。そこで、これらの欠点を補うために、第二章では、2D-PS の持つ情報から、波長とピーク強度のみを抽出することにより、1D-PS を算出した。そして、算出した 1D-PS を用いて、同一ロール内及びロール間の比較を行い、クラフトテープ 50 銘柄 50 ロールから得られた 1D-PS の分類を行った。

第1節 本法による検出波長の信頼性の確認

0.1 mm 間隔の格子模様 (Perkin Elmer, 0.1 mm GRID) を用いて、本法による解析を行った結果を Fig. 8 に示す。1600 dpi で取り込んだ格子模様の反射画像 (Fig. 8(a)) に対して、本マクロプログラム (2D-FFT 処理範囲 : 128×128 pixels、加算箇所数 : 50 箇所) を適用することにより、2D-PS (Fig. 8(b)) 及び 1D-PS (Fig. 8(c)) 得た。

格子模様の画像から得られた鮮明化処理後の 2D-PS には、格子の方向と同じ方向、つまり水平及び垂直方向に 2 組ずつ、合計 4 組のピークが目視で認められた。1D-PS では、直流成分を中心とした同一円周上のピークは、1 つのピークとなり、2D-PS 上の 4 組のピークは、 100 cm^{-1} 及び 200 cm^{-1} の 2 つのピークとして 1D-PS 上に認められた。1D-PS 上の最大ピークである 100 cm^{-1} は、格子模様画像中に、1 cm 当り 100 周期、つまり 0.1 mm 間隔の周期性が存在することを示す。この間隔は、格子幅の 0.1 mm と一致しており、本法により得られた波数は、正確な値を算出していることが示された。

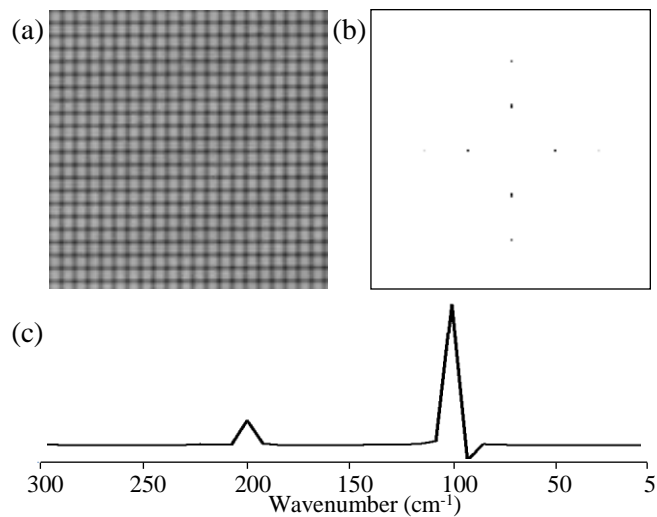


Fig. 8 (a) Reflected light image, (b) improved 2D-PS, and (c) 1D-PS of 0.1 mm grid using a macro program
Improved 2D-PS is calculated through the accumulation of 50 point 2D-PSs without applying a logarithmic transformation.
1D-PS is a plot which shows the maximum intensity values at each wavenumber of accumulated 2D-PS.

第2節 クラフトテープの1D-PSの算出

Fig. 9には、(a)を基準として、スキャナに試料を置く角度を10度、30度、90度とずらして取り込んだ画像から得られた2D-PSを示した。取り込み画像の角度は、2D-PS上に反映されるため、ピークパターンもずれ、このような試料では評価が難しくなる。また、2D-PSは、鮮明化処理の過程でノーマライズ処理を行うため、2D-PSの比較ではピーク強度の絶対値は識別に利用できない。そこで、加算処理後の2D-PSから、ノーマライズ処理前に波長とピーク強度を抽出することにより、1D-PSを算出した。

Fig. 10に、クラフトテープの透過画像と鮮明化処理後の2D-PS及び波長とピーク強度のみを抽出した1D-PSを示した。1D-PSのピーク強度に、各波長のパワー値の平均値を用いたところ、Fig. 10(c)で示したように目視でのピークの確認が困難であった。これは、平均値を用いたため、バックグラウンドの影響が大きくなったためと推察された。そこで、ピーク強度に各波長のパワー値の最大値を用いたところ、Fig. 10(d)のようにピークの確認が可能となった。

本法を用いて、Fig. 9の元画像から算出した1D-PSをFig. 11に示した。2D-PSでは、画像取り込み時の試料の置き方の影響を受けて、ピークパターンの方向が異なっていたが、1D-PSでは同様のピークパターンを示した。また、1D-PSはプロファイルとして得られるため、ピークの波数が容易に確認でき、ノーマライズの必要がないため、ピークパターンだけでなくピーク強度の絶対値も識別に利用できる。以上より、1D-PSは2D-PSとは異なる情報で識別を行うため、2D-PSでは識別できなかったロール間でも識別できる可能性があると考えられた。

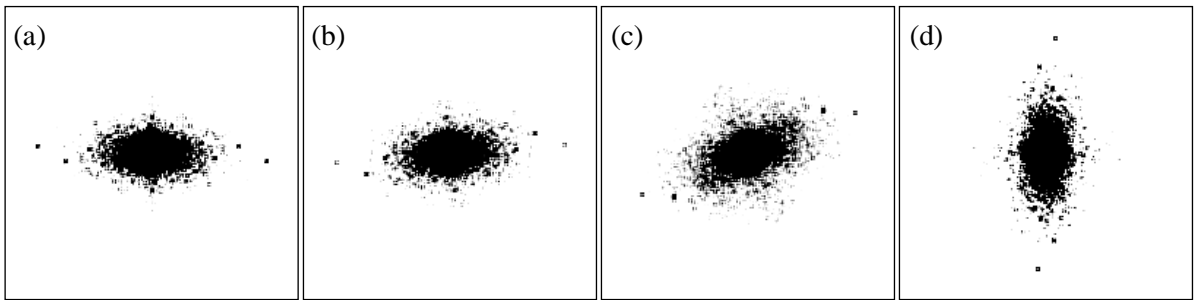


Fig. 9 Improved 2D-PSs of kraft tape (roll number 43); (a) before, and after angle rotation of (b) 10 degrees, (c) 30 degrees, and (d) 90 degrees

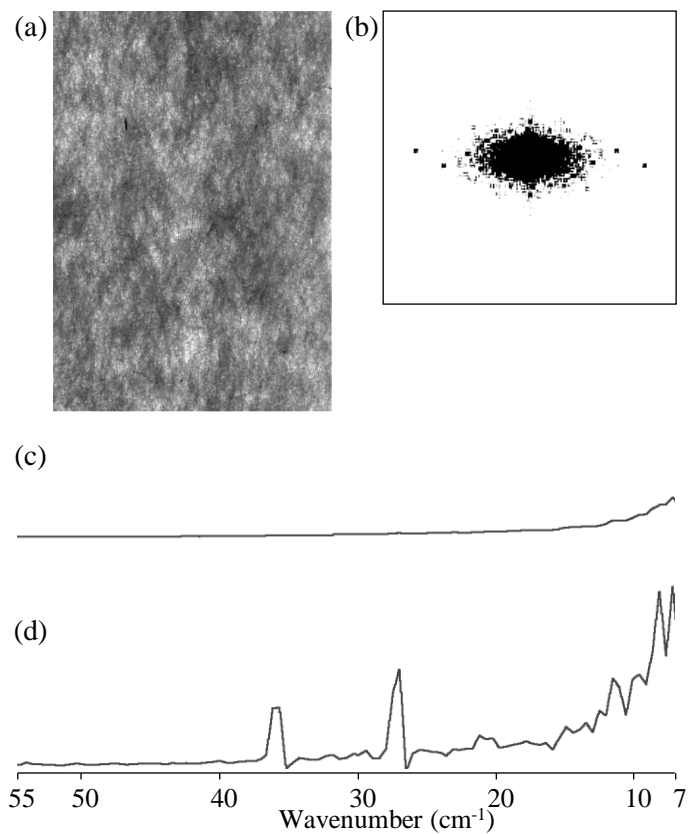


Fig. 10 Transmitted light image, 2D-PS, and 1D-PSs of kraft tape (roll number 43) (a) transmitted light image, (b) improved 2D-PS, (c) 1D-PS plotted the average of intensity values at each wavenumber of the accumulated 2D-PS at 50 points, and (d) 1D-PS plotted the maximum intensity values at each wavenumber of the accumulated 2D-PS at 50 points

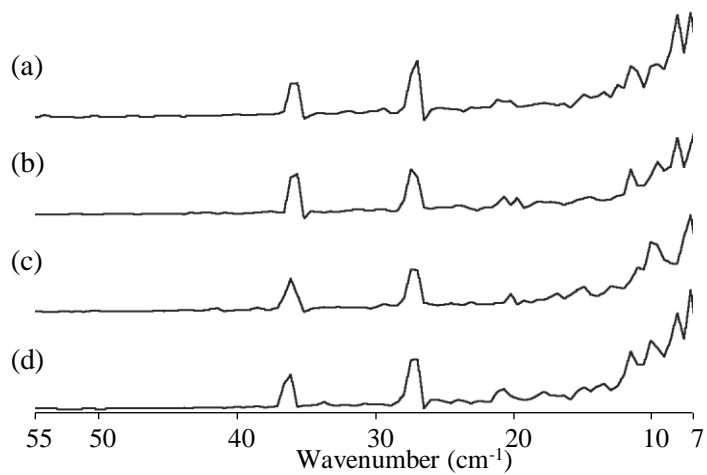


Fig. 11 1D-PSs of kraft tape (roll number 43); (a) before, and after angle rotation of (b) 10 degrees, (c) 30 degrees and (d) 90 degrees

第3節 同一ロール内の1D-PSの比較

2D-PSと同様に1D-PSについても、Table 1中の試料56ロールを用いて同一ロール内の1D-PSの比較を行った結果の例をFig. 12に示す。いずれの試料を用いた場合でも、試料の採取方法に関係なく、同一ロールから得た1D-PSは同様の位置にピークが認められた。しかし、ピーク強度については、安定しているロールと変動が認められるロールが存在した。例えば、Fig. 12(a)の強度は、比較的安定しているが、Fig. 12(b)は、 28 cm^{-1} と 31 cm^{-1} で、強度の変動が認められた。2D-PSと異なり、1D-PSでは、ピークは絶対強度を示すため、この変動は、ロール内において周期性の強い部分と弱い部分があることを示唆している。よって、ピーク強度に関しては、同一ロール内で変動があることを考慮する必要があると考えられた。

また、 10 cm^{-1} 周辺の低周波数領域のパターンは、高周波数領域と比較して、変動が大きく、ロールによっては、Fig. 12(b)のようにベースラインが上がり、ピーク形状も異なって見えることがあった。そのため、 10 cm^{-1} 周辺の低周波数領域のピークの比較は、同一ロール内で安定して認められるピークのみを比較に用いることにした。

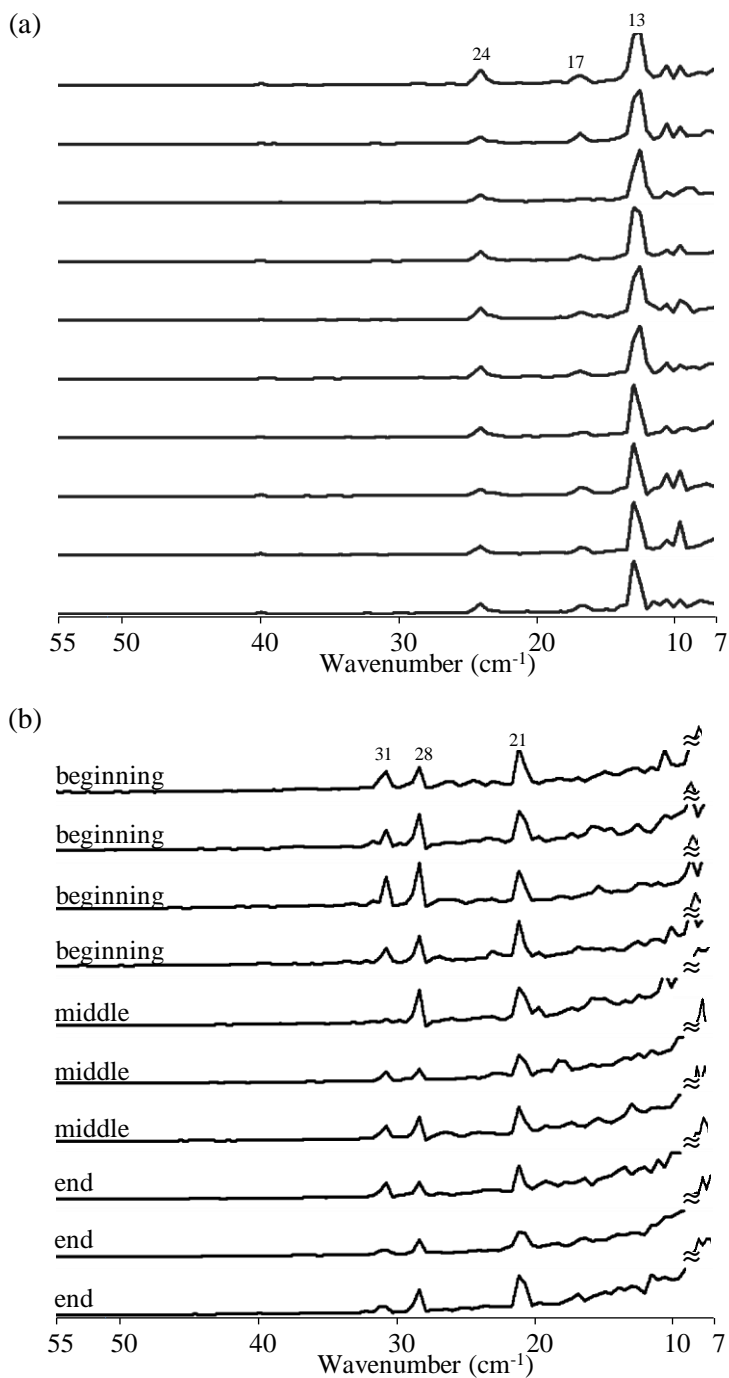


Fig. 12 1D-PSs of kraft tapes within each single roll, collected from (a) 10 samples from the beginning of roll number 18, and (b) 10 samples from the beginning, middle, and end of roll number 51. Numbers near the peaks correspond to the wavenumber (cm^{-1}).

第4節 ロール間の1D-PSの比較

ロール間の比較は、2D-PSと同様に50銘柄50ロール各10試料合計500試料（Table 1のロール番号1～50）を用いて行った。1D-PSの比較は、1D-PS上で確認可能なピークの波数と強度に基づいて行った。ピークの波数に関しては、 $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$ 程度の差は同一グループとし、ピーク強度に関しては、同一ロール内の変動の様子を基準に、顕著な差以外は同一グループとした。その結果、50ロールは29種類の1D-PS typeに分類できた。分類結果をTable 3に、各1D-PS typeの代表的な1D-PSをFig. 13に示し、1D-PS上のピーク付近にはピークの波数（ cm^{-1} ）を表示した。

2D-PSでの分類では、ピークが確認できない2D-PS type 24～26に分類したロールも、 $8 \sim 12 \text{ cm}^{-1}$ の低周波数領域に認められるピークや、大きなピークの影響で隠されていたピークが確認可能になったことによって、識別が可能となった。例えば、2D-PS type 25に分類されていたロール番号11、12、13、17、24、36の6ロールは、1D-PS type 8、type 11、type 14、type 15、type 29の5つの1D-PS typeに分類した。Type 8、type 11、type 29は、 $8 \sim 12 \text{ cm}^{-1}$ 間のピークの有無で識別を行った。Type 14には、2D-PS上では確認できなかった 24 cm^{-1} のピーク、type 15には、 12 cm^{-1} 及び 27 cm^{-1} のピークが確認可能となったことにより識別した。また、Fig. 13ではわかりにくいですが、type 5の 11 cm^{-1} やtype 15の 12 cm^{-1} のように、ピーク強度が他のピークと比べて顕著に大きいロールも存在し、ピーク強度も顕著な差異が認められた場合には、識別の有力な情報となると考えられた。

今回比較を行った50ロール中、27ロールは同一ロールから得た10試料全てが、同じ1D-PS typeに分類され、残りの33ロールは2つ以上の1D-PS typeに分かれた。2つ以上の1D-PS typeに分かれたロールのうち、多くのロールは2D-PSの場合と同様に、 27 cm^{-1} の共通ピークがあるにも関わらず、 36 cm^{-1} のピークの有無で、1D-PS type 6とtype 7に分かれたり、 $9 \sim 10 \text{ cm}^{-1}$ 及び 27 cm^{-1} の共通ピークがあるにも関わらず、 37 cm^{-1} のピークの有無で、1D-PS type 12とtype 13に分かれたものであった。ただし、ピーク強度の変動が特に大きく、識別時に注意

を要するロールも存在した。例えば、ロール番号 12 は、1D-PS type 8、type 14、type 29 に分かれており、 11 cm^{-1} のピーク強度の変動が大きかった。また、ロール番号 30 は、1D-PS type 19 と type 24 に分かれており、 24 cm^{-1} のピーク強度の変動が大きかった。このようにピーク強度の変動が大きなロールが存在することから、識別判断時にピーク強度の変動の様子の情報を得た後に、判断する必要があると考えられた。

小括

2D-FFT により得られる情報から、波長とピーク強度のみを抽出することにより、1D-PS を算出した。1D-PS は、試料画像の取り込み誤差の影響を受けず、ピーク強度の絶対値も識別に利用できる。また、1D-PS では、ピークの波数が容易に確認でき、2D-PS では 10 cm^{-1} 周辺はピークの確認はできなかったが、1D-PS ではピークの比較が可能となった。以上より、2D-PS と 1D-PS を併用することにより、クラフトテープの識別の信頼性が向上すると考えられた。

Table 3 Classification of 50 kraft tapes according to 1D-PS type

| 1D-PS type | Roll number |
|------------|--|
| 1 | 1 |
| 2 | 2, <u>3</u> , 47 |
| 3 | <u>3</u> |
| 4 | 4, 49 |
| 5 | 5 |
| 6 | <u>6</u> , <u>35</u> |
| 7 | <u>6</u> , <u>21</u> , <u>35</u> |
| 8 | <u>7</u> , <u>11</u> , <u>12</u> , <u>25</u> |
| 9 | <u>7</u> , <u>25</u> , <u>39</u> , 40 |
| 10 | <u>8</u> |
| 11 | <u>8</u> , 10, <u>14</u> , <u>19</u> , <u>22</u> , <u>31</u> , 36 |
| 12 | <u>9</u> , <u>15</u> , <u>27</u> , 32, <u>34</u> , <u>41</u> , <u>42</u> , 50 |
| 13 | <u>9</u> , <u>14</u> , <u>15</u> , <u>19</u> , <u>27</u> , <u>31</u> , <u>34</u> , 37, <u>41</u> , <u>42</u> |
| 14 | <u>12</u> , 38, 48 |
| 15 | 13 |
| 16 | 16 |
| 17 | 18 |
| 18 | 20 |
| 19 | <u>22</u> , <u>30</u> |
| 20 | 23 |
| 21 | 26, <u>28</u> |
| 22 | <u>28</u> , <u>29</u> , <u>39</u> |
| 23 | <u>28</u> , <u>29</u> |
| 24 | <u>30</u> , 44 |
| 25 | 33 |
| 26 | 43 |
| 27 | 45 |
| 28 | 46 |
| 29 | <u>6</u> , <u>11</u> , <u>12</u> , <u>14</u> , <u>17</u> , <u>21</u> , 24 |

Note: Kraft tapes that are classified into two or more 1D-PS types were shown by underline.

第三章 機械学習

第一章及び第二章で、クラフトテープの透過画像から算出した 2D-PS 及び 1D-PS の目視評価を行うことにより、クラフトテープの分類を行ってきた。そこで、主観的な目視評価の結果に客観的な評価を加えることができれば、本法の信頼性は高まると期待される。また、1D-PS を算出することにより、ピーク強度に絶対強度を用いることが可能となり、ピーク強度の比較も識別において有用な情報となること、ロール間の識別で明らかになった。しかしながら、1D-PS の目視比較の結果、同一ロールから得た 1D-PS は同様の位置にピークが認められるものの、ピーク強度の変動が認められた。変動の様子はロールごとに異なっており、ロールの特徴の 1 つと考えられる。目視比較では、強度差が顕著な場合のみ識別が可能だが、強度の変動を客観的に考慮して、識別を行うことは困難である。そこで、本法の識別能力を客観的に評価するため、かつ強度の変動を客観的に考慮した識別を行うため、統計処理を用いる検討を行った。

第 1 節 統計処理方法の検討

統計処理方法は、パターン認識に有効とされる機械学習を用いた[33, 34]。Table 1 のロール番号 1~50 の 50 ロール各 10 試料から算出した 1D-PS を用いて、ロール間 1 対 1 の比較を行い、得られた結果から、パターンの学習方法の検討を行った。検討を行った学習方法は、線形判別分析、RF、SVM である。識別能力の検証は、1 個抜き交差検証法を用いた[34]。具体的には、異なるロールのペア 1 組 20 試料から、1 試料を抜き出し、残りの 19 試料でパターン学習を行った。その後、抜き出していた試料について識別を行った。これらの検証を 1 組につき 20 試料分、つまり 20 回行うことにより、正解率を算出した。上記の操作を 50 ロール間の全組み合わせ 1225 通りについて行った。

その結果、RF と SVM による学習では、多くの結果が共通であり、ともに高い予測精度を示し、また、目視により 1D-PS を比較・判断した結果との整合性が高かった。さらに詳

細な比較で、**RF**による学習の方が予測精度及び目視との整合性がともに高いと判断した。

よって、以下の統計処理の学習方法として**RF**を選択した。

第2節 機械学習によるロール間識別能力の検討

Table 1 のロール番号 1~50 の 50 ロール間の全組み合わせ 1225 通りについて、RF を用いた 1 個抜き交差検証法を行った結果を Fig. 14 に示した。Fig. 14 中の各セルの数値は 1 個抜き交差検証法による正解率を示し、正解率 100%のみ数値は省略した。各セルの色は正解率 0%を白、100%を黒としたグラデーションで示した。正解率が 95%以上（20 試料中 19 試料正解）の組を識別可能とした結果、全組み合わせ 1225 通り中 1179 通り(96%)が識別可能であった（Table 4）。以上より、本法は高いロール間識別能力があることが示された。

目視での違いが顕著ではないために、目視比較では同一のグループとしたロールでも、機械学習を用いた識別では、識別されていた。その理由として、ピークの波数及び強度の変動を考慮可能であるため、有意差があれば識別可能であること、目視ではベースラインと判断する部分も全て比較に用いることが可能であることが考えられた。一方、1 個抜き交差検証法で識別できないと判断した 46 組のうち、41 組については目視でも識別はできなかったが、残りの 5 組については、目視で識別が可能であった。これらの 5 組は、ピーク強度が小さなロールとの組み合わせであった。ピーク強度が小さなロールでは、目視評価においても、2つ以上の 2D-PS type 及び 1D-PS type に分かれることが多かった。よって、ピーク強度が小さなロールで比較を行うときには、目視の場合と同様に、機械学習においても、ロール内の変動が識別に大きな影響を与える可能性が高いため、より多くの対照試料を用いる等注意が必要である。

小括

本法の識別能力を客観的に評価するため、かつ 1D-PS の変動を考慮した比較を目的として、パターン認識に有効とされる機械学習の応用について検討を行った。RF を用いた 1 個抜き交差検証法を用いて、クラフトテープのロール間識別能力の検討を行った結果、本法は高いロール間識別能力があることが示された。また、得られた結果は目視評価と整合性

が高く、目視評価に統計的処理を加えることにより、本法に客観性が加わり、信頼性が向上すると考えられた。

第四章 汚染損傷の影響

法科学分野の実際の鑑定では、犯行現場より回収された試料と、被疑者近辺より押収された試料や販売されている試料との異同識別を行うことが多い。つまり、クラフトテープは身体や手足の拘束や梱包等に使用され、血液・毛髪・繊維片・土砂等の汚染をうけている可能性が高い。また、引きちぎられたり、丸められたり、水中に沈められたりしている可能性もある。

そこで、模擬現場試料合計 97 試料を作成し、試料の状態が 2D-PS 及び 1D-PS に与える影響について検討を行った。

第 1 節 汚染損傷した試料の外観形状

模擬現場試料として、手足に巻いた試料、手に巻いた後に引きちぎった試料、手に巻いた後に丸めた試料、水中静置した試料、手に巻いた後に引きちぎり、その後水中静置した試料の合計 97 試料を作成した (Fig. 15)。写真には写っていないが、試料には、多数の繊維片等の付着が認められ、その他に、皺、折れ目、裂け目、粘着面同士がくっついたための粘着面の剥離が認められた。また、水中に沈めた試料では、表面に凸凹が生じている試料が多数あった。

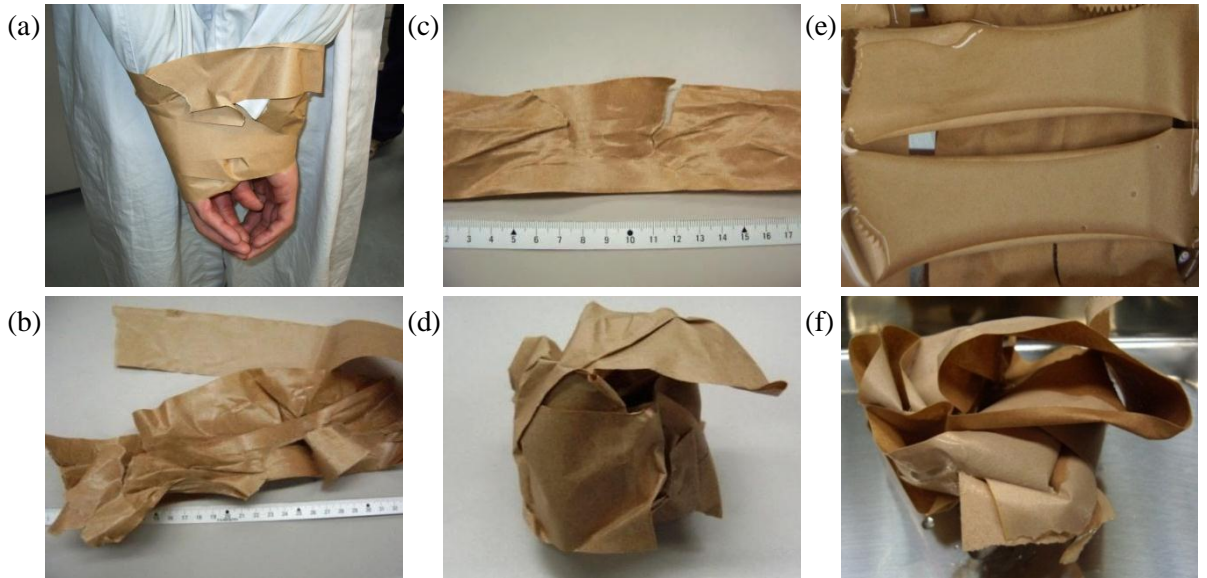


Fig. 15 Simulated kraft tapes as used in the criminal cases; (a) wrapped kraft tapes on hands, (b)-(c) unfolded kraft tape, (d) balled kraft tape, (e) soaked kraft tapes in water, and (f) unfolded and soaked kraft tape

第 2 節 汚染損傷した試料の 2D-PS

Fig. 16 及び 17 には、ロール番号 1 及び 18 で作成した模擬現場試料から得られた反射画像、透過画像、2D-PS 及び 1D-PS を示した。Fig. 16(a)及び Fig. 17(a)は、汚染損傷のない状態の試料、Fig. 16(b)及び Fig. 17(b)は、繊維片が付着し、皺が認められた試料、Fig. 16(c)及び Fig. 17(c)は、水に約 24 時間浸し、表面に凸凹が認められた試料、Fig. 16(d)及び Fig. 17(d)は、皺が認められ、粘着面同士がくっつき粘着面が一部剥がれた試料である。

2D-PS について汚染損傷前後で比較を行った結果、繊維片等の付着による影響は認められなかった。また、Fig. 16(b)のように、皺、破損もそれほどひどくない試料及び Fig. 16(c)及び Fig. 17(c)のように、水にぬれて表面が凸凹になった試料でも、ピークパターンに顕著な影響は認められなかった。しかし、皺、破損の程度によっては、Fig. 17(b)のように、ピークが見えにくくなる試料や、Fig. 16(d)のように、ピークの一部又は全てが目視で認められなくなった試料があった。特に粘着面が剥離した範囲が広い試料は、Fig. 17 (d)のように、ピークの他に水平垂直方向に線が増え、ピークの一部又は全てが目視で認められなくなった試料もあった。

模擬現場試料 97 試料中、84 試料から得られた 2D-PS は、ピークが見えにくくなった試料はあったが、汚染損傷前の試料と同様のピークパターンを示した。97 試料中 5 試料については、Fig. 17 (d)のように、ピークの他に水平垂直方向に線が増えたが、ピークの認識は可能であった。97 試料中残りの 8 試料は、ピークの一部又は全てが認識できなくなった。しかし、汚染損傷の影響による新たなピークの発現は認められず、別の 2D-PS type に変化することはなかった。

第3節 汚染損傷した試料の 1D-PS

1D-PS について汚染損傷前後で比較を行った結果、2D-PS と同様に、繊維片等の付着による影響は認められず、皺、破損がひどくない試料では、ピーク強度の減少は認められるものの、ピークパターンに顕著な影響は認められなかった。一方、水にぬれて表面が凸凹になった試料では、Fig. 16(c)のように、ピークの波数が $0.3\sim 0.5\text{ cm}^{-1}$ 程度高波数側へシフトする現象が認められた。これは、水の影響で表面に凸凹が生じたためと推察されるが、Fig. 17(c)のように、シフトが認められないロールも存在した。よって、水に濡れることによる影響は、ロールによって異なっており、その原因として、支持体表面の剥離剤成分に依存する可能性もあると考えられたが、今後検討が必要である。皺、破損の程度によっては、Fig. 16(d)や Fig. 17(d)のように、ピーク強度が急激に減少し、ピークの一部又は全てが目視で認められなくなった試料があった。これは、Fig. 16 (c)のように損傷の影響で周期性が検出しにくくなった試料と、Fig. 17 (d)のように水平垂直方向の線が影響した試料があった。

模擬現場試料 97 試料から得られた 1D-PS 中、81 試料は、ピークが見えにくい試料はあったが、汚染損傷前の試料と同様のピークパターンを示した。しかし、そのうち 22 試料は水の影響で波数シフトが認められた。97 試料中 7 試料については、損傷前でもピーク強度が低い 30 cm^{-1} 以上のピークが認められなくなったが、その他のピークパターンは同様であった。97 試料中残りの 9 試料は、Fig. 16 (d)や Fig. 17 (d)のようにピークの一部又は全てが目視で認められなくなった。しかしながら、1D-PS においても、汚染損傷の影響による新たなピークは発現せず、別の 1D-PS type に変化することはなかった。

今回用いた模擬現場試料 97 試料においては、2D-PS 及び 1D-PS とともに約 90%の試料は、汚染損傷を受けても、ピークパターンの比較は可能であった。また、汚染損傷の影響でピークが認められなくなることはあったが、新たなピークが出現し、別のピークパターンになることはなかった。以上より、本法は汚染損料した試料にも適応可能と考えられた。

小括

2D-FFT を用いたクラフトテープの異同識別においては、繊維片や指紋等の汚染の影響はほとんどないことが示された。これは、2D-FFT では試料中の周期性成分のみを評価するため、周期性を生じない汚染の影響が無視できることが理由と推察された。また、皺が入ったり、一部破れたり、水に濡れて凹凸になった試料においても、ピーク強度の減少や多少のピークシフトは認められたが、ピークパターンへ顕著な影響は認められなかった。粘着面が大きく剥がれた試料や、大きく破れた試料では、2D-PS や 1D-PS において、目視でのピークの確認は困難になったが、汚染損傷の影響による新たなピークの発現により、全く異なるピークパターンになることはなかった。以上より、本法は汚染損傷した試料にも適応可能であることが示された。

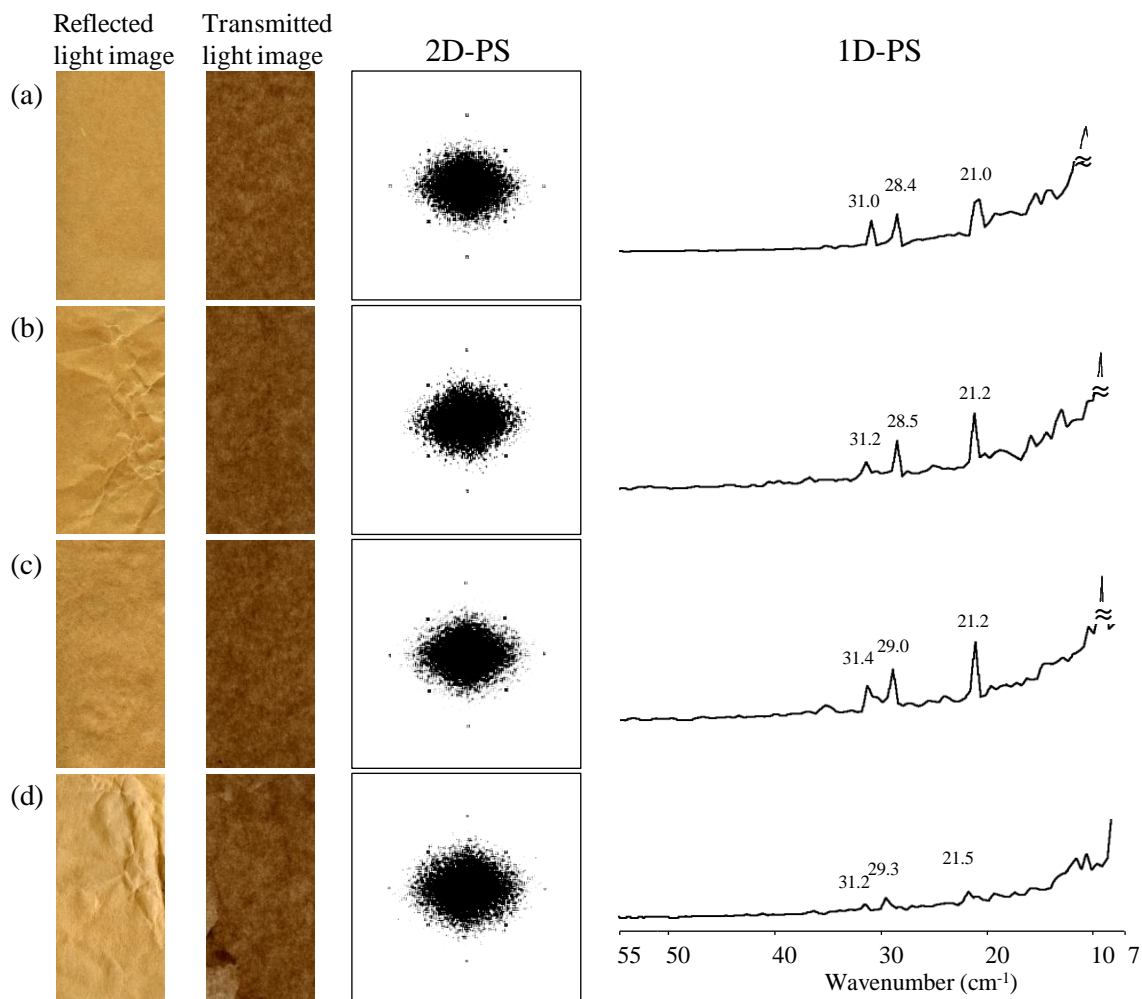


Fig. 16 Reflected light images, transmitted light images, 2D-PSs, and 1D-PSs of kraft tapes (roll number 1) at various conditions; (a) reference, (b) kraft tape with wrinkle and dirt such as fibers, (c) kraft tape after soaked in water, and (d) wrinkled kraft tape where some parts are adhered together

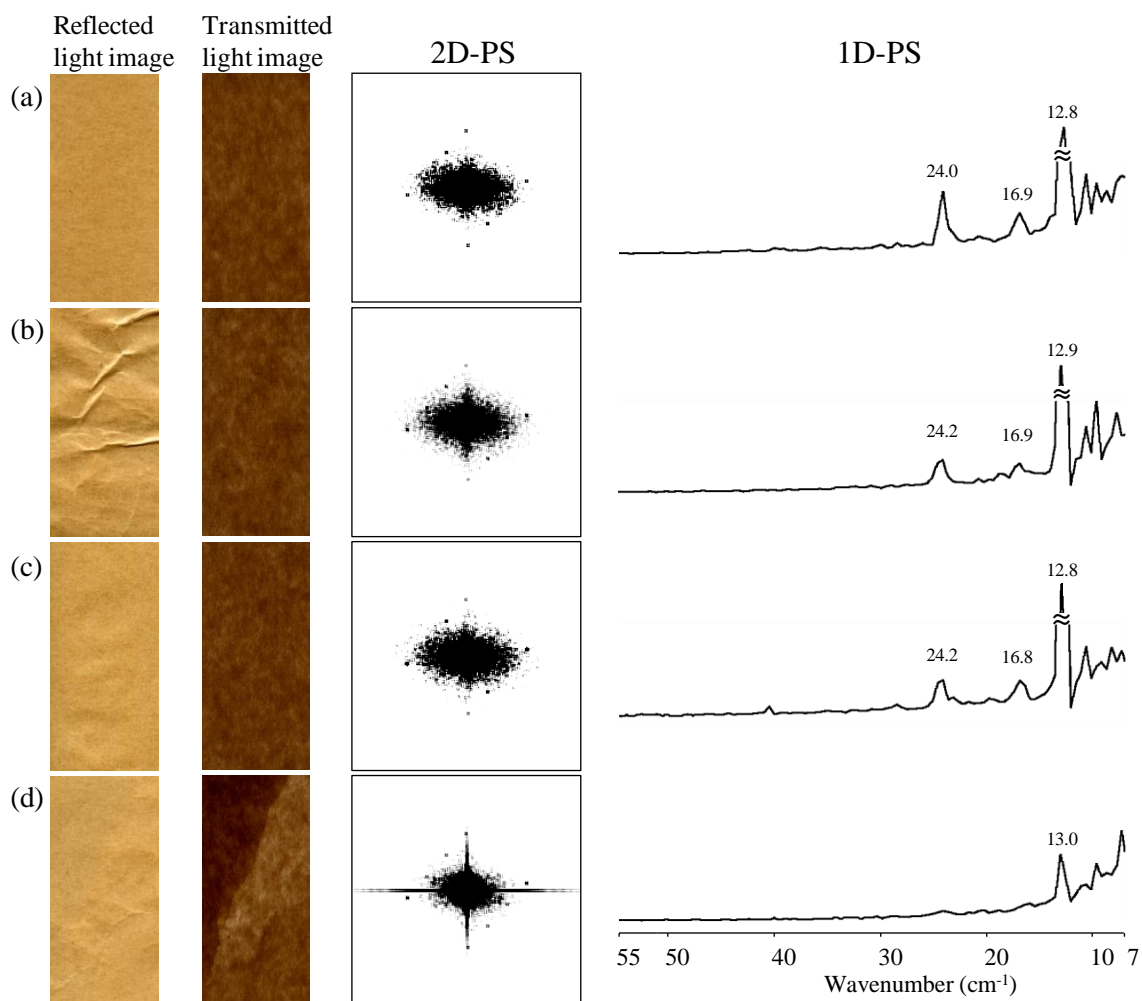


Fig. 17 Reflected light images, transmitted light images, 2D-PSs, and 1D-PSs of kraft tapes (roll number 18) at various conditions; (a) reference, (b) kraft tape with wrinkle and dirt such as fibers, (c) kraft tape after soaked in water, and (d) wrinkled kraft tape where some parts are adhered together

結語

本研究では、2次元フーリエ変換を用いたクラフトテープの識別のために2D-PSの鮮明化方法を開発した。その結果、2D-PSのピークパターンにより異同識別が可能となり、クラフトテープ50ロールは26種類の2D-PS typeに分類できた。次に、2D-FFTにより得られる情報から、波長とピーク強度のみを抽出することにより、1D-PSを算出した。1D-PSは、2D-PSの目視評価では得られない情報を持っており、50ロールは29種類の1D-PS typeに分類できた。クラフトテープの識別を行うに当たっては、これらの併用により、識別能力が上がり、信頼性も向上すると考えられた。また、客観的かつロール内の変動を考慮した識別を目的として、機械学習によるロール間識別能力の検討を行った結果、本法は高いロール間識別能力があることが示された。本法は、試料中の周期性成分のみを評価するため、血液・毛髪・繊維片等の汚染の影響は少なく、損傷等試料の状態に応じて、分析条件の変更も容易であり、汚染損傷した試料でも応用可能であった。以上より、本法は、非破壊、迅速、識別能力も高く、法科学分野の実際の鑑定でも十分有効であると認められた。

本法で用いた鮮明化処理や1D-PSの算出は、クラフトテープのみならず、布粘着テープ、コピー用紙をはじめとした紙製品等、周期性を持っている試料の分析に有用である。特に、コピー用紙に関しては、偽造通貨や脅迫文のように印刷されていることが多いため、印刷及びプリンター由来の周期性の影響も考慮する必要がある。このような試料において、本法で用いた鮮明化処理や1D-PSの算出は強力な手法となる。また、本法を実行するために必要なものは、パーソナルコンピュータ、スキャナ、無料のソフトのみと安価であり、誰でも手軽に利用することが可能である。

以上より、2D-FFTを用いた分析は、汎用性も高く、非破壊、迅速であることから、法科学分野において、今後益々利用されていくと期待される。

参考文献

- [1] Japan Adhesive Tape Manufacturers Association, *Nenchaku Handobukku (Handbook of Pressure Sensitive Technology)*, third ed., Japan Adhesive Tape Manufacturers Association, Tokyo, 2005.
- [2] Y. Kumooka, Classification of OPP adhesive tapes according to pyrogram of adhesives, *Forensic Sci. Int.* 206 (2011) 136–142.
- [3] Y. Kumooka, Hierarchical cluster analysis as a tool for preliminary discrimination of ATR-FT-IR spectra of OPP acrylic and rubber-based adhesives, *Forensic Sci. Int.* 189 (2009) 104–110.
- [4] S. Nakamura, M. Takino, S. Daishima, Analysis of pressure sensitive adhesives by GC/MS and GC/AED with temperature programmable pyrolyzer, *Anal. Sci.* 16 (2000) 627–631.
- [5] S. Kurata, Analysis of tackifiers in adhesives of pressure-sensitive adhesive poly(vinyl chloride) tapes, *Bunseki Kagaku*, 47 (1998) 429–436.
- [6] T. Ninomiya, S. Nomura, K. Taniguchi and S. Ikeda, Applications of a glazing incidence X-ray fluorescence analysis to forensic samples, *Anal. Sci.* 11 (1995) 489–494.
- [7] A. Goto, A. Hokura, I. Nakai, Analysis of trace element compositions in adhesive cloth tapes using high-energy X-ray fluorescence spectrometer with three-dimensional polarization optics for forensic discrimination, *Bunseki Kagaku*, 57 (2008) 699–706.
- [8] A. M. Dobney, W. Wiarda, P. de Joode, G. J. Q. van der Peijl, Sector field ICP-MS applied to the forensic analysis of commercially available adhesive packaging tapes, *J. Anal. At. Spectrom.* 17 (2002) 478–484.
- [9] M. Hida, H. Satoh, T. Mitsui, Comparative study of a cluster analysis and a principal-component analysis using a polarized imaging technique for discriminating adhesive cloth tapes, *Anal. Sci.* 18 (2002) 717–722.
- [10] Y. Kumooka, Classification of OPP adhesive tapes according to MALDI mass spectra of adhesives, *Forensic Sci. Int.* 197 (2010) 75–79.
- [11] J. F. Carter, P. L. Grundy, J. C. Hill, N. C. Roman, E. L. Tetterton, R. Sleeman, Forensic isotope ratio mass spectrometry of packaging tapes, *Analyst* 129 (2004) 1206–1210.
- [12] M. Horacek, J.-S. Min, S. Heo, J. Park, W. Papesh, The application of isotope ratio mass spectrometry for discrimination and comparison of adhesive tapes, *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 22 (2008) 1763–1766.
- [13] Y. Kumooka, Pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry of acrylic adhesives of cloth and kraft adhesive tapes, *Jpn. J. Forensic Sci. Tech.* 10 (2005) 11–18.
- [14] M. Hida, H. Satoh, T. Mitsui, Classification of adhesive paper tapes by polarization character of polyethylene-laminated film in the tapes with multivariate analysis, *Anal. Sci.* 17 Supplement (2001) i1507–i1509.

- [15] M. Hida, H. Satoh, S. Okuyama, Discrimination analysis of adhesive paper tapes with scanned digital images, *Bunseki Kagaku*, 60 (2011) 853–858.
- [16] J.A.W. Barnard, D.E. Polk, B.C. Giesses, Forensic identification of paper by elemental analysis using scanning electron microscopy, *Scanning Electron Microsc.* 8 (1975) 519–527.
- [17] D. E. Polk, A. E. Allard, Forensic characterization of papers. II: Determination of batch differences by scanning electron microscopic elemental analysis of the inorganic components, *J. Forensic Sci.* 22 (1977) 524–533.
- [18] H. Ebara, A. Kondo, S. Nishida, Analysis of coated and non-coated papers by pyrolysis gas-chromatography, *Rep. Natl. Res. Inst. Police Sci.* 35 (1982) 88–98.
- [19] H.A. Foner, N. Adan, The characterization of papers by X-ray diffraction (XRD): measurement of cellulose crystallinity and determination of mineral composition, *J. Forensic Sci. Soc.* 23 (1983) 313–321.
- [20] R. Sugita, S. Suzuki, Y. Marumo, Trend of filler in paper for plain paper copy (PPC) and its validity for the discrimination, *Rep. Natl. Res. Inst. Police Sci.* 53 (2000) 23–25.
- [21] V. Causin, C. Marega, A. Marigo, R. Casamassima, G. Peluso, L. Ripani, Forensic differentiation of paper by X-ray diffraction and infrared spectroscopy, *Forensic Sci. Int.* 197 (2010) 70–74.
- [22] J. Andrasko, Microreflectance FTIR technique applied to materials encountered in forensic examination of documents, *J. Forensic Sci.* 41 (1996) 812–823.
- [23] A.H. Kuptsov, Applications of Fourier transform Raman spectroscopy in forensic science, *J. Forensic Sci.* 39 (1994) 305–318.
- [24] L.D. Spence, A.T. Baker, J.P. Byrne, Characterization of document paper using elemental compositions determined by inductively coupled plasma mass spectrometry, *J. Anal. At. Spectrom.* 15 (2000) 813–819.
- [25] S. Okuyama, E. Kaneko, M. Hida, H. Satoh, Simple discrimination of fine paper using bromochlorophenol blue solution, *Bunseki Kagaku*, 59 (2010) 1029–1034.
- [26] M. Shinozaki, Y. Tajima, S. Miyamoto, An evaluation method for paper formation based on light transmission distribution and its spatial frequency analysis, *J. Soc. Fiber Sci. Technol. Jpn.* 55 (1999) 383–392.
- [27] M. Shinozaki, Frequency analysis of paper formation, *Jpn. TAPPI J.* 53 (1999) 914–925.
- [28] H. Miyata, M. Shinozaki, A discrimination method of paper by Fourier transform and cross-correlation, *Jpn. TAPPI J.* 54 (2000) 396–401.
- [29] H. Miyata, M. Shinozaki, T. Nakayama, T. Enomae, A discrimination method for paper by Fourier transform and cross correlation, *J. Forensic Sci.* 47 (2002) 1125–1132.

- [30] M. Shinozaki, H. Miyata, T. Nakayama, T. Enomae, A discrimination method of paper by Fourier transform and cross-correlation (Part2) –Application to commercial xerography papers, *Jpn. TAPPI J.* 55 (2001) 514–521.
- [31] C. E. H. Berger, Objective paper structure comparison through processing of transmitted light images, *Forensic Sci. Int.* 192 (2009) 1–6.
- [32] H. Miyata, M. Shinozaki, Discrimination of paper by two-dimensional Fourier transform -Periodicity seen in light-reflected images of sheets in boxed facial tissue-, *Mokuzai Gakkaishi* 51 (2005) 118–124.
- [33] 金森敬文, 竹之内高志, 村田昇, パターン認識, 共立出版(2009)
- [34] 金明哲,Rによるデータサイエンス,森北出版(2007)
- [35] M. M. Rahman, B. C. Desai, P. Bhattacharya, Medical image retrieval with probabilistic multi-class support vector machine classifiers and adaptive similarity fusion, *Computerized Medical Imaging and Graphics* 32 (2008) 95–108.
- [36] J. Mingzhe, M. Murakami, Authorship identification using random forest, *Proceeding of the institute of statistical mathematics* 55 (2007) 255-268.
- [37] L. Zheng, D.G.Watson, B.F. Johnston, R.L. Clark, R. Edrada-Ebel, W. Elseheri, A chemometric study of chromatograms of tea extracts by correlation optimization warping in conjunction with PCA, support vector machines and random forest data modeling, *Anal. Chim. Acta* 642 (2009) 257–265.
- [38] L. Breiman, Random Forests. *Machine Learning.* 45 (2001) 5–32.
- [39] Y. Qi, J. Klein-Seetharaman, Z. Bar-Joseph, Random Forest Similarity for Protein-Protein Interaction Prediction from Multiple Sources, *Pacific Symposium on Biocomputing* 10 (2005) 531-542.
- [40] V.F. Rodriguez-Galiano, B. Ghimire, J. Rogan, M. Chica-Olmo, J.P. Rigol-Sanchez, An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 67 (2012) 93–104.
- [41] J. Ramírez, J.M. Górriz, F. Segovia, R. Chaves, D. Salas-Gonzalez, M. López, I. Álvarez, P. Padilla, Computer aided diagnosis system for the Alzheimer’s disease based on partial least squares and random forest SPECT image classification, *Neuroscience Letters* 472 (2010) 99–103.
- [42] A. Verikas, A. Gelzinis, M. Bacauskiene, Mining data with random forests: A survey and results of new tests, *Pattern Recognition*, 44 (2011) 330–349.
- [43] Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997–2009.
- [44] Nizar Bouguila, Mukti Nath Ghimire, Discrete visual features modeling via leave-one-out likelihood estimation and applications, *J. Vis. Commun. Image R.* 21 (2010) 613–626.
- [45] Gavin C. Cawley*, Nicola L.C. Talbot, Fast exact leave-one-out cross-validation of sparse least-squares, *Neural Networks* 17 (2004) 1467–1475.

[46] R Development Core Team, <http://www.r-project.org/>

[47] H. Praast, L. Goettsching, Analyse der siebmarkierung im durchlicht, Das Papier
41 (1987) 105–120.

[48] H. Miyata, M. Shinozaki, Studies on changes of wire-marks on paper, J. Soc. Fiber Sci. Technol.
Jpn. 59 (2003) 311–318.

謝辞

本研究に際し、終始懇切なる御指導ならびに御鞭撻を賜りました千葉大学理事・千葉大学大学院薬学研究院教授 山本恵司先生に深甚なる謝意を表します。

本研究に際し、数々の有益なる御指導ならびに御助言を賜りました千葉大学大学院薬学研究院准教授 森部久仁一先生に謹んで厚く御礼申し上げます。

本研究に関し、終始御親切な御指導、御協力を賜りました千葉大学大学院薬学研究院助教 東頭二郎先生に厚く御礼申し上げます。

本研究に関し、終始御親切かつ詳細なる御助力を賜りましたタイ王国マヒドン大学薬学部講師 Warea Limwikrant 先生に厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、マクロプログラムの作成をはじめとして、終始御親切かつ有益なる御指導、御助力を賜り、研究を導いてくださいました宮城県警察科学捜査研究所研究職員 齋藤弘一研究官に厚く御礼申し上げます。

論文投稿に際し、有益なる御指導ならびに御助言を賜りました科学警察研究所附属鑑定所主任研究官 鈴木真一先生に謹んで厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり御協力頂きました、宮城県警察科学捜査研究所化学科員並びに千葉大学薬学部製剤工学研究室の在校生、修了生、卒業生に感謝致します。

最後に、本研究を遂行する機会を与え、終始援助と励ましを下さり、また暖かく見守って下さりました両親、姉弟妹に心よりの感謝を致します。

論文目録

本学位論文内容は、下記の発表論文による。

Sasaoka S, Saito K, Higashi K, Limwikrant W, Moribe K, Suzuki S, Yamamoto K.: Discrimination of paper-based kraft tapes using Fourier transform of transmitted light images, Forensic Sci. Int., 220, 59-66 (2012)

本学位論文の審査は、千葉大学大学院医学薬学府で指名された下記の審査委員により行われた。

主査 千葉大学大学院教授（薬学研究院） 工学博士 根矢 三郎

副査 千葉大学大学院教授（薬学研究院） 薬学博士 堀江 利治

副査 千葉大学大学院教授（薬学研究院） 薬学博士 佐藤 信範