

関義城『古今紙漉紙屋図絵』見本紙の 非破壊化学分析とその考察

渋谷綾子・高島晶彦・山口悟史・平澤加奈子

はじめに

古文書や古記録類など紙を用いた歴史資料「紙文化財」の物質的研究は、近年、用いられた紙（料紙）の素材繊維や添加物に関する科学情報が注目され、古文書学や歴史学の分野にとどまらず、植物学・製紙科学・文化財科学など様々な研究分野で形態情報や物理的性質（物性）に関する検討が、分析手法の開発とともに進展してきている。料紙の自然科学的な性質や構造については、増田勝彦・大川昭典・湯山賢一・富田正弘らの一連の研究成果¹をはじめ、町田誠之²が詳細に説明している。ただし、非破壊での実施を原則とする原本史料調査では、物理化学分析を実施する機会は制限されている。さらに、近年多発する自然災害で被災した紙文化財への修理・保全の要望は極めて高く、保存科学に携わる若手の研究者や技術者の育成も重要な課題である。

筆者らは2022年度から、①古文書等の料紙に対して非破壊の物理化学分析を試行し、計測環境の整備・効率化をどう進めるかを検討すること、②分析の結果にもとづき、史料の現況に即した保存科学の方法の検証とその結果をふまえた実践を行うことを軸として実験的な研究を進めてきた。本稿はその成果を報告するものである。

なお、本研究は、東京大学史料編纂所と大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（以下 KEK）の連携研究事業^{3,4}、AI等の活用を推進する研究データエコシステム構築事業⁵、科学研究費補助金基盤研究（A）⁶の成果である。

1 たとえば、湯山賢一編『古文書料紙論叢』（勉誠出版、2017年）、大川昭典『和紙を科学する—製紙技術・繊維分析・文化財修復』（勉誠社、2024年）などに所収。

2 『和紙の道しるべ—その歴史と化学』淡交社、2000年。

3 令和4年度加速器科学総合育成事業加速器科学育成プログラム、課題名「和紙を科学する」。研究代表者：高島晶彦、研究分担者：渋谷綾子・山口悟史・平澤加奈子（以上東京大学史料編纂所）・丹羽尉博（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所）。

4 令和5年度加速器科学国際育成事業（IINAS-NX）、課題名「史料を科学する」。

5 ユースケース創出事業「異分野共創による史料学DXの確立」。

6 『『古文書科学』の応用実践』（課題番号 JP23H00011）。

1 料紙研究における化学分析の意義

(1) 既存の物理化学分析例

近年、非破壊の環境条件のもと、料紙や紙文化財に含まれる微量元素⁷の分析が試みられている⁸。微量元素は土壌から吸収され、土壌の地域的な特性の影響を受けると考えられる。よって植物原料の産地推定に有効であることから、蛍光 X 線などを用いた測定が行われている。たとえば、(財)若狭湾エネルギー研究センターによる和紙の微量元素分析⁹がある。この分析は、高知県・茨城県・中国で生産された楮を素材とし、同じ和紙製紙工場・同じ製造工程で越前和紙として作られた紙サンプルに対して、PIXE (particle induced X-ray emission analysis)¹⁰を行っている。結果、産地ごとに微量元素の含有量が異なることから産地同定の可能性を指摘した。また、岩田忠久らは、大型放射光施設 SPring-8 の高感度蛍光 X 線分析装置を用いて、古文書等の料紙を対象とした微量元素の測定を行っている¹¹。この測定では、産地や製造時期の明確な違いは確認できなかったが、解析手法・ソフトの改良によって産地別の相関を提示する可能性を示した。

顔料や填料、糊などに対する物理化学分析も行われている。韓允熙¹²は日本と韓国の紙の製造時に加えられる粘剤 (トコロアオイ、ノリウツギ) に対して、サイズ排除クロマトグラフ—多角度光散乱検出システム (Size Exclusion Chromatograph-Multiple Angle Light Scattering System: SEC-MALS) 分析¹³やフーリエ変換赤外分光 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) 分析¹⁴、X 線回析を行い、植物の生産地による成分の違いについて検討した。江前敏晴

7 植物の生育に不可欠な元素のうち、鉄 (Fe)、マンガン (Mn)、ホウ素 (B)、亜鉛 (Zn)、モリブデン (Mo)、銅 (Cu)、塩素 (Cl)、ニッケル (Ni) を指す。繊維の素材植物に由来するため、料紙に含まれている。

8 岩田忠久・加部泰三・寺田靖子「シンクロトロン放射光測定における極微量成分から推定する古文書料紙の起源探究」(『SPring-8/SACLA 利用研究成果集』4 巻 1 号、2016 年)。

9 安田啓介・鈴木達也・多仁昭廣「PIXE による和紙の元素分析」(『平成 11 年度財団法人若狭湾エネルギー研究センター研究成果報告集』2、1999 年)、安田啓介・伊藤慶文・多仁昭廣「PIXE による和紙の元素分析」(『平成 12 年度財団法人若狭湾エネルギー研究センター研究成果報告集』3、2000 年)、安田啓介・伊藤慶文・笹瀬雅人・多仁昭廣「PIXE による和紙の微量元素分析 (その 3)」(『平成 13 年度財団法人若狭湾エネルギー研究センター研究成果報告集』4、2001 年)、安田啓介・伊藤慶文・笹瀬雅人・多仁昭廣「PIXE による和紙の微量元素分析 (その 4)」(『平成 14 年度財団法人若狭湾エネルギー研究センター研究成果報告集』5、2002 年)。

10 粒子線励起 X 線分析の略で、イオンビームを試料にぶつけることで発生する X 線の特性から、色々な元素の含有量を推定できる分析。

11 前掲注 8。

12 韓允熙・柳澤正弘・江前敏晴・磯貝明・石井忠「伝統の手すき紙製造で用いられる粘質物質の分析」(『紙が技協誌』59 巻 7 号、2005 年)。

13 高分子 (分子量が 10000 を超える化合物で構成された分子量の高い分子) の分子量分布を測定する方法。

14 赤外分光法 (infrared spectroscopy: IR) は、物質に赤外線を照射し、その吸光量 (グラフにしたものがスペクトル) を測定する。試料中の物質の濃度、試料がどのような物質か、透過率、反射率などの光学特性を知ることができる。赤外分光法には分散型 IR と FT-IR の 2 種類があり、FT-IR はすべて

は、紙サンプルに含まれた顔料や填料の熱重量分析を行って、熱分解温度に伴う質量減少について検討を試みた¹⁵。古文書や典籍類に用いられた糊の分析には、X線回析¹⁶やFT-IR分析¹⁷の事例があり、「豆糊」の製法を復元するための成分解析が行われている。

(2) 本研究での分析目的

本研究の目的は、既存の成果をふまえ、原本史料の非破壊調査に向けた計測環境の整備・効率化、史料の現況に即した保存科学の方法の検証・実践を進展させることである。料紙の内部構造について、素材繊維の表面構造や填料などの可視化、料紙の成分から植物種 (species) や材料そのものの識別の可能性について検討を行った。

本研究における物理化学分析によって、料紙の製法や地域・時期的特性につながる情報抽出が可能となれば、日本だけでなく海外においても起き得る自然災害に備えた、紙文化財の災害対策に関するヒントを得ることにつながると考えている。

2 料紙サンプルと分析の方法

(1) 『古今紙漉紙屋図絵』と紙サンプル

今回分析の対象とした『古今紙漉紙屋図絵』【図1(1)】は、関義城¹⁸が収集した見本紙をまとめたものである。関は、重要文化財の百万塔陀羅尼を自ら切って見本紙にし、非売品として『古今和紙譜』として出版したほか、光明皇后御願の四分律や浄瑠璃寺阿弥陀仏胎内印仏、江戸時代の備中柳井家大高檀紙など重要文化財級の和紙を、ギロチンカッター (レバー式切断カッター) で切って貼り付け、見本帖に仕立てた¹⁹。これらの見本帖の一つが『古今紙漉紙屋図絵』である。

『古今紙漉紙屋図絵』の見本紙は、天平時代から江戸時代における仏典・書状等の料紙を主体とし、明治大正などの和紙、中国・朝鮮・オランダ・フランス・ドイツ・イギリスの古い手漉き紙を含めた175種、ほかパーチメント (羊皮紙)、タラハ、パピルス茎、乾燥した楮・三桮・雁皮の繊維も添付されている。これらは糊付けされ、通し番号とともに、紙の名称、年代、元の史料の寸法、原料が日本語・英語で記されている。今回の分析では、見本紙に水分を与えて糊付けをはがし、チャック付きポリ袋に入れて中性紙保存箱で保管、分析用サンプルとした。

の波長の光を一度に高速で測定でき、その後フーリエ変換と呼ばれる数学的変換によって、スペクトルが取得される。短時間で高感度の測定ができ、文化財の非破壊調査が可能である。

¹⁵ 江前敏晴「製紙用顔料及び填料の熱重量分析」(『紙パ技協誌』57巻2号、2003年)。

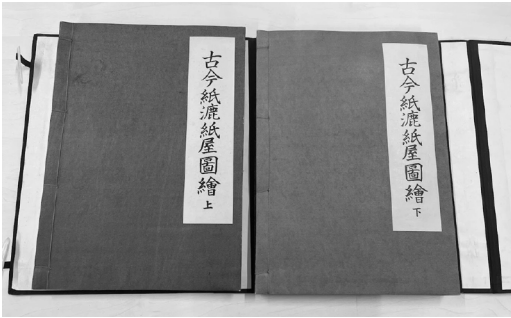
¹⁶ 山田哲也・中野勲・寺西克倫・久松眞「古糊の研究」(『応用糖質科学：日本応用糖質学会誌』43巻2号、1996年)、藤波朋子・飯野久和「古糊製造における熟成」(『マテリアルライフ学会誌』13巻4号、2001年)。

¹⁷ 大橋有佳・大林賢太郎・稲葉政満「古代・中世の典籍類に使用された大豆糊—平安時代後期以降の文献調査と大豆粉糊の試作—」(『文化財保存修復学会誌』59号、2016年)、早川典子「典籍類に使用された『豆糊』に関する赤外分光分析」(『保存科学』53号、2014年)、藤波朋子・飯野久和「古糊製造における熟成」(『マテリアルライフ学会誌』13巻4号、2001年)。

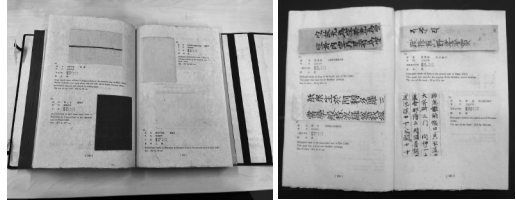
¹⁸ せきよしくに (1892~1979)。

¹⁹ 辻本直彦「我国三大和紙コレクションの一つ「関義城コレクション」が、紙の博物館に寄贈さる」(『紙パ技協誌』70巻12号、2016年)。

(1) 分析した『古今紙漉紙屋図絵』

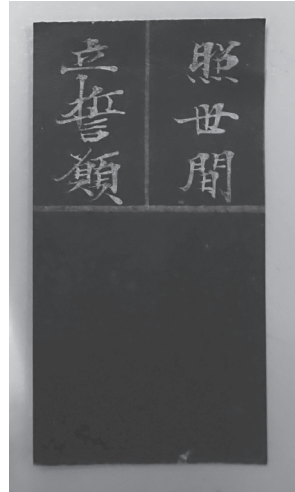
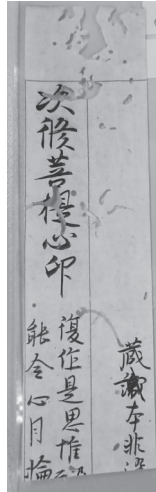
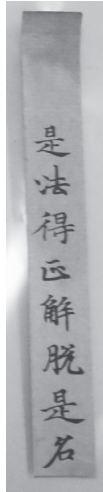
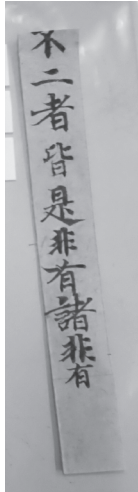


見本紙の貼り込み



(2) 本稿で取り上げる見本紙

- 1 黄穀紙 大般若経 2 黄穀紙 大般涅槃経 4 白麻紙 写経 (聖教) 7 紺紙 金泥妙法蓮華経



18 鳥の子紙 延暦寺灌頂許通用印信

60 きらら紙 京都本願寺出版和讃

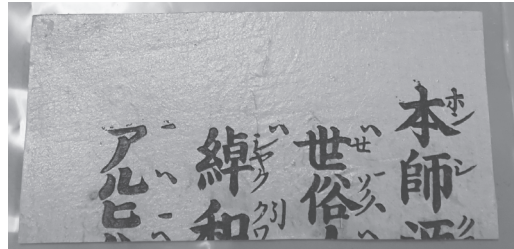
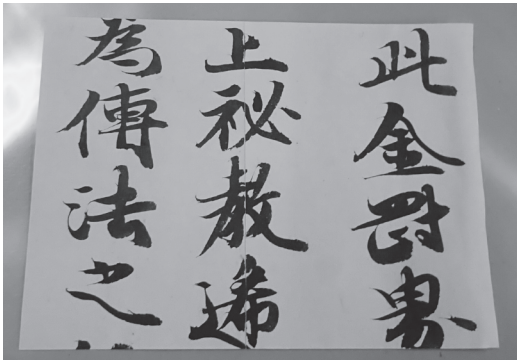


図1 分析した『古今紙漉紙屋図絵』と本稿で取り上げる見本紙1・2・4・7・18・60 (縮尺は任意)

(2) 分析の種類と方法

本研究では、『古今紙漉紙屋図絵』の見本紙111点に対して、3次元X線顕微鏡(X線CT)による解析とFT-IR分析²⁰を実施した。本稿ではそのうち6点の結果を取り上げる【図1(2)、表1】。X線CTは、物体内を透過するX線の透過力を用いて内部構造や状態を観察するもので

〈4〉 関義城『古今紙漉紙屋図絵』見本紙の非破壊化学分析とその考察(渋谷・高島・山口・平澤)

表 1 分析した『古今紙漉紙屋図絵』の見本紙 1・2・4・7・18・60

No.	見本紙の名称 (出典)	暦年	西暦	原料記載 (出典)	原料考察
1	黄穀紙 大般若経	天平 2 年	730	楮	
2	黄穀紙 大般若涅槃経	平安初期	794-800-820	楮	
4	白麻紙 写経 (聖教)	承暦 3 年	1079	楮	
7	紺紙 金泥妙法蓮華経	鎌倉時代 (文治元～元弘 3 年)	1185-1333	楮	楮?
18	鳥の子紙 延暦寺灌頂許通用印信	慶長 6 年	1601	雁皮	
60	きらら紙 京都本願寺出版和讃	江戸末期	1865-1867	楮	きら引

ある。X 線をサンプルに照射し、透過した X 線を検出することで、材質や内部構造を把握することができる。サンプルを 360 度撮影して数百～数千枚の X 線透過像を記録し、それらを逆投影することによって、3 次元的な密度分布を仮想化環境に映し出す。高密度の部分は白色、低密度の部分は灰色、超低密度の部分は黒色で 3 次元画像としてコンピュータグラフィックス化される²¹。本研究での撮影条件は、加速電圧 40 kV、視野 500 μm 、ピクセルサイズ 0.5 μm 、露光時間 10 秒・投影 1601 (長時間撮影) である。X 線装置の操作には、労働安全衛生法にもとづき「X 線作業主任者免許」²² 等の国家資格が必要である。よって今回は、KEK の丹羽尉博氏と石井友弘氏に撮影・解析を依頼した。

FT-IR 分析では、KEK 共通基盤研究施設放射線科学センター所管のフーリエ変換赤外分光光度計 (Thermo Scientific Nicolet iS50) を使用し、1 回反射 ATR 法²³ を用いて、スキャン回数: 32、分解能: 4 cm^{-1} 、測定範囲: 4000~5254 cm^{-1} 、検出器: TGS (Triglycine Sulfate)、アクセサリ: ダイヤモンド ATR (全反射)、補正: ATR 補正・自動大気補正の条件で実施した。機器の取り扱いをはじめ、作業の各工程においては KEK の石田正紀氏の教示を得て、筆者らが行った。

3 分析結果

(1) X 線 CT の分析結果

分析対象としたのは、1「黄穀紙 大般若経」、2「黄穀紙 大般若涅槃経」、4「白麻紙 写経 (聖教)」、7「紺紙 金泥妙法蓮華経」、18「鳥の子紙 延暦寺灌頂許通用印信」の 5 点である【表 1、図 2】。機器のホルダーにあわせて、長さ 5 mm~3 cm、幅 2~3 mm に切断し、撮影を

²⁰ 前掲注 14。

²¹ 中山悠・高杉早苗「3DX 線顕微鏡の原理とメリット、測定例の紹介」(『ぶんせき』11 号、2021 年)。

²² 筆者の渋谷・高島は所持している。

²³ 赤外分光分析には透過法と ATR (Attenuated Total Reflection、全反射測定法) がある。透過法は真に正確なスペクトルが得られ、精密測定・定量測定に適しているが、分析の前処理 (試料のすりつぶしや薄片化処理) に時間を要して、大量検体の測定には向かず、非破壊では実施できない。ATR 法は、サンプル表面で全反射する光を検出することによって吸収スペクトルを測定する方法である。試料の形状によらず分析が可能であり、分析の熟練者でなくても良好なスペクトルを安定して得ることができる。結果の解釈に注意する部分や補正機能を利用する必要性はあるが、非破壊測定が可能である。

1「黄穀紙 大般若経」

表



裏



2「黄穀紙 大般若涅槃経」

表



裏



4「白麻紙 写経（聖教）」（シートで挟んで撮影）

表

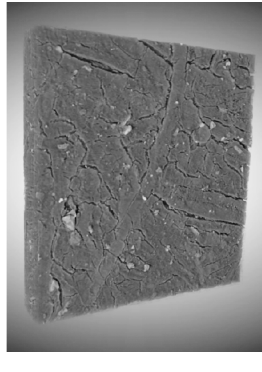


裏



7「紺紙 金泥妙法蓮華経」（シートで挟んで撮影）

表



裏

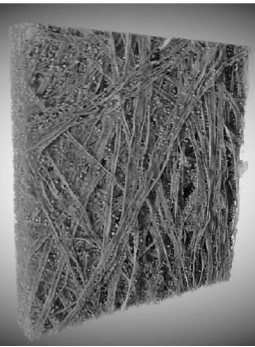


18「鳥の子紙 延暦寺灌頂許通用印信」（シートで挟んで撮影）

表



裏



サンプルの固定方法



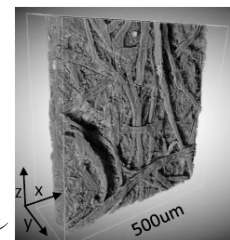
1

2

4

7

18



3D 像の xyz 面とスケール

図2 X線CTによる『古今紙漉紙屋図絵』の3D像（視野500µm）、サンプルの固定方法、3D像のxyz面とスケール（撮影・解析・データ提供：丹羽尉博氏・石井友弘氏）

行った²⁴。

1は出典の記載通り楮である。図2の3D像からは繊維のうねりが確認でき、白色を呈した高X線吸収物質が見られる。この物質はほぼ立方体である【図3(2)】。したがって米粉やネリに由来するデンプン粒などの植物性物質ではなく、鉱物などの無機物である可能性が高い。さらに、繊維の間には柔細胞が詰まっている【図3(1)・(3)】。

2は出典の記載通り楮である。1よりも表面構造の凹凸が少なく、白色を呈した高X線吸収物質も全体的に散らばっている【図2】。繊維断面は扁平につぶれており、繊維間には柔細胞が詰まっている【図3(1)】。

4の名称は「白麻紙」だが、出典の記載通り原料は楮である。1・2に比べて繊維幅が大きく、白色を呈した高X線吸収物質も散らばっている【図2】。繊維断面【図3(1)】は1・2より扁平で全体的につぶれている。

7は全体的に表面構造が非常に平坦で【図2】、繊維もつぶれている【図3(1)】。原料は出典の記載通り楮と思われる。サンプルの内部、繊維の間に潜り込むように白色の高X線吸収物質が見られた【図3(1)】。顔料は料紙を全体的に覆っており、繊維断面からは顔料の薄い層が覆っている状態を確認できた。

18は出典の記載通り雁皮であり、填料の米粉に由来するイネのデンプン粒が大量に確認された【図2】。繊維断面は非常に扁平である【図3(1)】。

(2) FT-IR 分析の結果

分析したのは見本紙111点である。サンプル1点につき表面(図4・図5では文字面と表記)と裏面の各3回、合計6回の測定を行った。表面の文字部分は墨のスペクトル²⁵が出るため、文字以外の箇所を選択した。本稿では、X線CTで分析した5点と60「きらら紙 京都本願寺出版和讃」の合わせて6点を取り上げる【図1(2)】。図4・図5では、現代の手漉き和紙の楮・三桮・雁皮のスペクトル、また各計測ではライブラリ(データベース)にある植物のセルロースのスペクトルを比較データとして示した。

スペクトルは、縦軸が吸光度(Absorbance)、物質が吸収する光の量を示し、横軸が波数(Wavenumber (cm^{-1}))、一定の長さの中に含まれる波の数を示す。4000~1500 cm^{-1} は官能基(有機化合物の性質を決める特定の原子の集まり)ごとにピークが決まった位置に現れる²⁶。たとえば、水酸基(O-H)なら3700~3000 cm^{-1} に、炭化水素(C-H)なら3000 cm^{-1} 以下にピークがくる。1500~600 cm^{-1} は「指紋領域」と呼ばれ、化合物固有のスペクトルとされる²⁷。

現代の手漉き和紙3種【図4・図5】は、植物のセルロースとはピークの形状が異なっている。ただし、楮・三桮・雁皮のスペクトルは非常に類似し、識別は難しい。

1は原料が楮であり【表1】、全体的に楮のスペクトルと同じピークの形状を示すが、指紋領域

²⁴ 4・7・18は、試料をシートで挟み込んで固定し、撮影を行った。

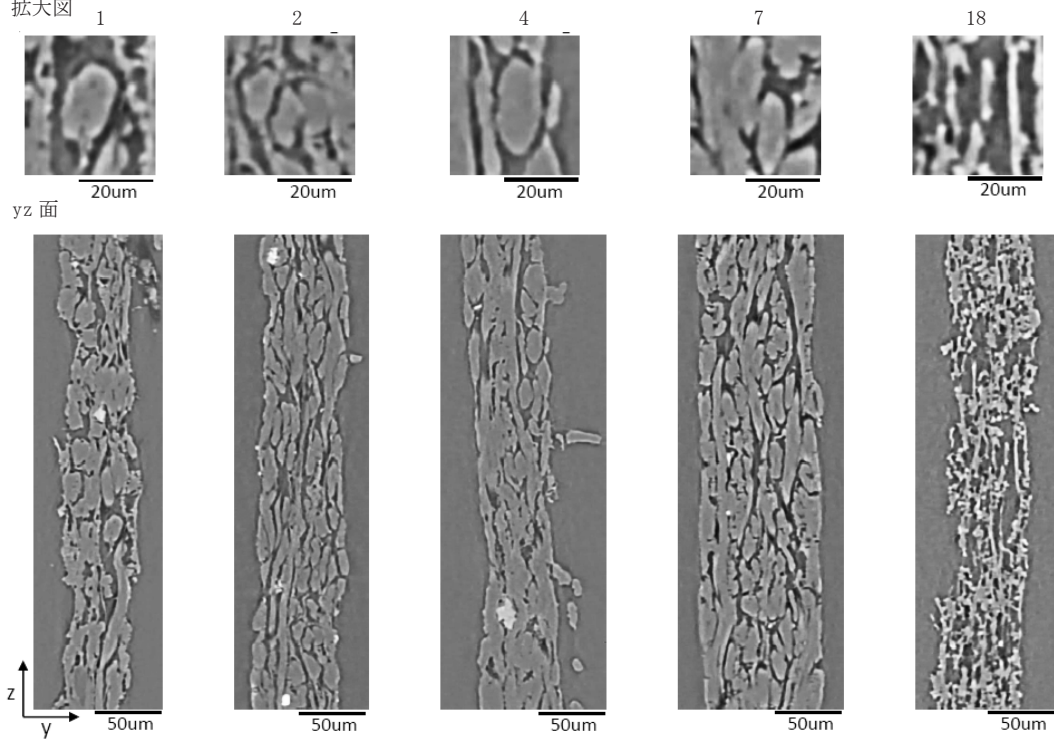
²⁵ 試料が吸収する光量(吸光度)。

²⁶ 川崎英也・中原佳夫・長谷川健編『機器分析ハンドブック1 有機物・分光分析編』((株)化学同人、2020年)、定金豊『イメージから学ぶ分光分析法とクロマトグラフィー 基礎原理から定量計算まで』(京都廣川書店、第11刷、2022年(初版2009年))。

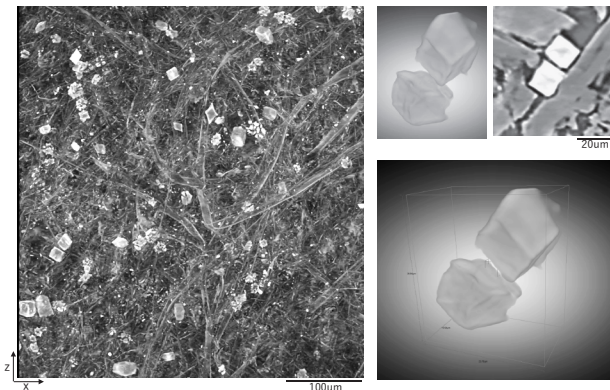
²⁷ 前掲注26。

(1) 繊維断面の比較

拡大図



(2) 見本紙 1 の高 X 線吸収物質 (白色粒子)



(3) 見本紙 1 の柔細胞

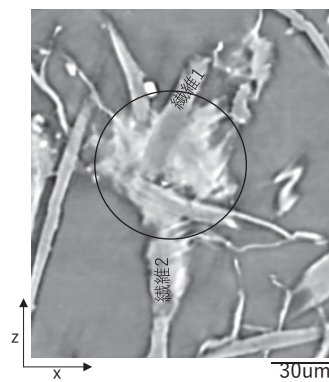


図3 見本紙 1・2・4・7・18 の繊維断面、見本紙 1 に含まれていた高 X 線吸収物質、見本紙 1 の柔細胞 (撮影・解析・データ提供: 丹羽尉博氏・石井友弘氏)

の $1500\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ において高めのピークを示す【図4】。表・裏における明瞭な差異はない。

2 は 1 と同じく原料が楮であり【表1】、スペクトルも楮と同じピークの形状を示す【図4】。指紋領域の $1500\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ では、1 や楮よりもピークの形状が高めである。表・裏における明瞭な差異は確認できない。

4 は既述のとおり原料は楮である【表1】。全体的に楮と同じピークの形状を示し、1・2 よりも楮に酷似している【図4】。表・裏の差異はない。

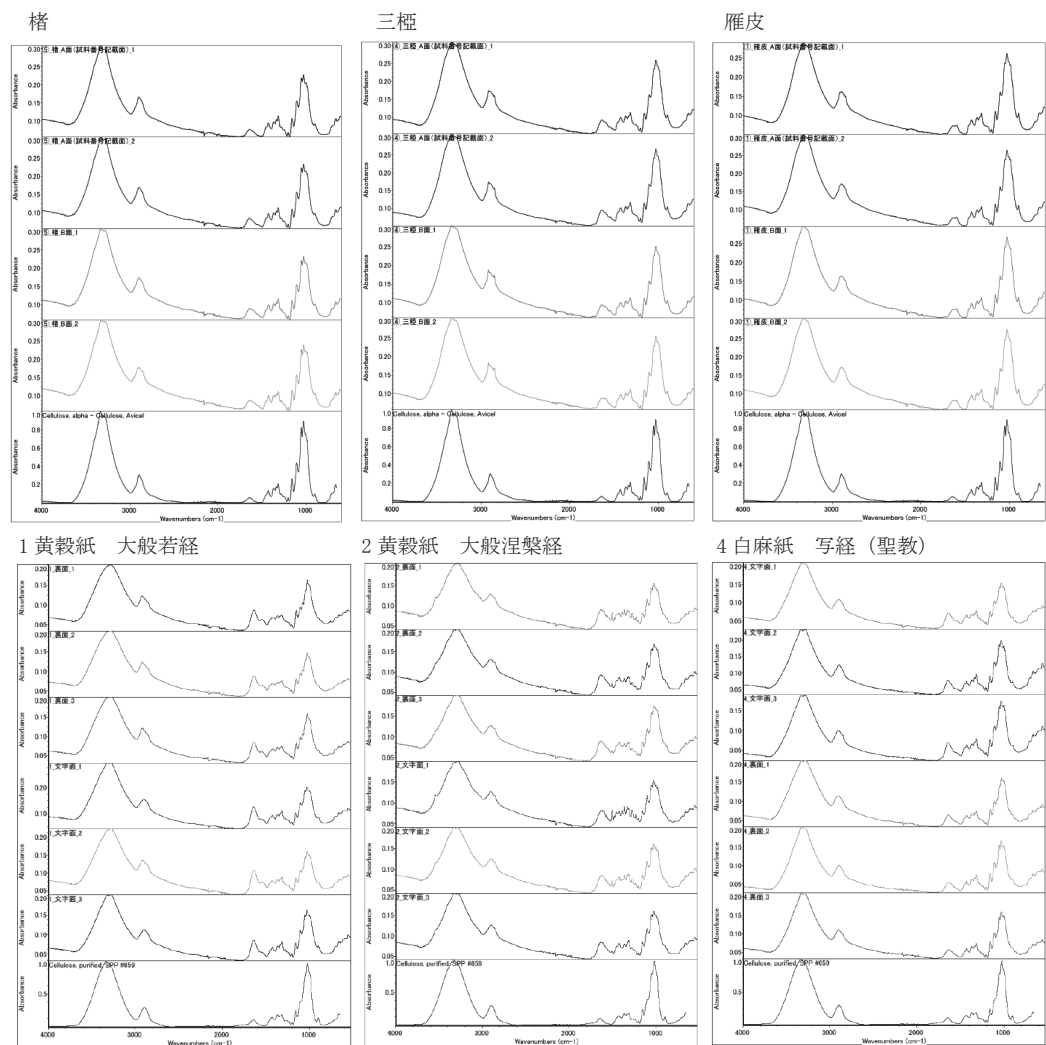


図4 現代の手漉き和紙3種（楮・三桠・雁皮）と『古今紙漉紙屋図絵』見本紙1・2・4のFT-IRスペクトル

7は藍の顔料で染められている。原料は出典では楮とされているが、定かではない。実際、図5に示したスペクトルは $4000\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ の領域に大きなピークがあり、 2000 cm^{-1} 以下で高めのピークが続く。楮やセルロースのスペクトルとは全く異なり、 1500 cm^{-1} 以下の指紋領域の差異が明瞭である。表・裏の差異はない。

18は米粉入り雁皮紙である。雁皮のスペクトルとピークの形状が類似している【図5】。表・裏における差異はない。米粉の影響はピークの形状からは読み取れず、不明である。

60の原料は出典では楮とされているが、きら引、雲母の粉を用いた紙である【表1】。楮・三桠・雁皮のどのスペクトルともピークの形状が異なり、セルロースとも大きな差異が確認できる【図5】。指紋領域のピークは表・裏とも類似しているが、文字面1・2、裏面1と文字面3・裏面2・3の全体的なピークの形状が異なり、雲母の影響を受けていると考える。

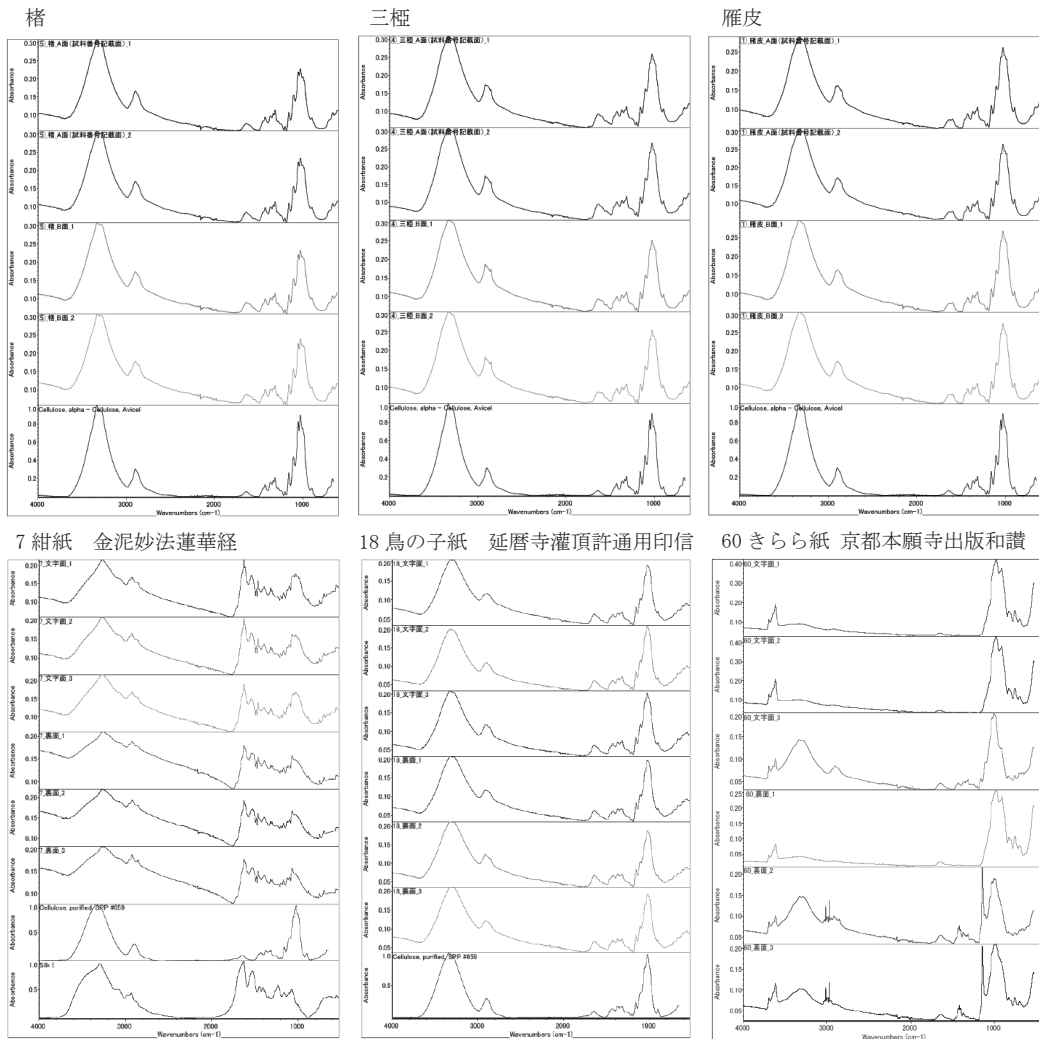


図5 現代の手漉き和紙3種と『古今紙漉紙屋図絵』見本紙7・18・60のFT-IRスペクトル

4 考察

X線CTの分析では、素材繊維の表面構造や繊維の絡み具合、繊維間の柔細胞、含まれる鉱物の有無・種類、填料の米粉に由来するイネのデンプン粒の有無・分散の状態などを可視化し検討することができた。特に、見本紙1・2は繊維間を埋めるように柔細胞が詰まっている状態であること【図3(1)】、7では顔料の層を確認することができた【図3(1)】。いずれの結果も、光学顕微鏡やデジタルマイクロスコープなどの2次元像では確認の難しい、深さ方向の情報である。さらに、今回の計測環境では、どのサンプルにも変色や被熱等の影響は見受けられない。したがって、X線CTの有用性を示すと言える。

一方、検討すべき課題が残っている。たとえば、X線CTに最適なサンプルサイズである。本研究では、どのような形状・大きさであればX線CTによる撮影が可能か、どの程度の情報が

獲得できるのかを検討するため、使用機器にあわせてサンプルのサイズを調整した。結果として、長さ5mm、幅2mm程度で撮影可能であることがわかった。本研究では、約2mm四方の史料修理時の紙片についてもX線CTによる撮影を行っており、料紙の内部構造を確認している。一部の見本紙はシートに挟んでホルダーに固定し撮影する必要があったが、シートによる影響は見られなかった。ただし良好な撮影データを獲得するためには、原本史料の形状や状態に応じた機器の調整方法を考える必要がある。

FT-IR分析の結果、楮・三桮・雁皮のスペクトルはピークの形状が非常に類似しており、識別が容易ではなかった。見本紙6点においては、繊維素材が楮である1・2・4は楮のスペクトル、18は雁皮のスペクトルと同じピークの形状を示した。さらに、60をのぞいて、米粉など植物性物質はスペクトルへ影響しないこともわかった。しかし、7のように顔料が使われているもの、60のように鉱物が用いられているものは、官能基や化合物を示す領域にピークが出現し、植物原料のスペクトルと異なった。よって、料紙の成分分析としてのFT-IR分析では、鉱物などの無機化合物の特定が可能であると考えられる。

だがFT-IR分析にも課題が残る。それは事例の蓄積・拡充である。これについては、測定数を増やすことにより、時代、産地、含有物による差異に対し統計学的な検討が可能である。特に、楮・三桮・雁皮のスペクトルは非常に類似するが、測定結果に対して主成分分析などの統計学的な処理を行うことにより、紙質の特徴を識別できることがすでに指摘されている²⁸。

現在、多種多様な分光計が存在しており、史料の形状や状態にあわせたFT-IR分析が可能である。ただし、FT-IR分析単体では、料紙の成分のすべてを解析することはできない。他の非破壊化学分析・手法を取り入れ、総合的な判断・検討を行うことが重要である。

おわりに

今回、物理化学を用いた料紙の構成物・成分の解析を進めた結果、史料の修理や保存につながる科学的なデータを獲得し、非破壊調査の計測環境の整備を進めることができた。ただし、調査分析にかかる時間的な制約とともに、原本史料については対象が限定された。よって計測環境の効率化に向けて分析事例のさらなる拡充・蓄積が必要であると考えられる。

また、分析事例の拡充とともに、紙の種類ごとの特徴、時代的・地域の特徴、含有物による差異などの解明のため、統計解析を行いデータの標準化を進めることが必要である。これらの成果を紙文化財の修理・保存へと還元できれば、修理材料の選択肢の拡大、修理対象物へのアプローチ方法の効率化に貢献することが可能であると思われる。既存の研究成果をふまえつつ、紙文化財の総合的な科学研究の展開へつなげたい。

【謝辞】 本研究の物理化学分析はすべて、KEKの丹羽尉博・木村正雄・石井友弘（以上物質構造科学研究所）、石田正紀・武智英明（以上共通基盤研究施設放射線科学センター）、広田克也（外部連携推進部）諸氏の助言と協力を得て実施した。深く感謝申し上げます。

²⁸ 武智英明・石田正紀・後藤剛喜・與那嶺亮・高島晶彦・山口悟史・渋谷綾子・平澤加奈子・広田克也・尾上陽介「赤外分光法と機械学習による和紙の識別の検討」（『第39回近赤外フォーラム』、ポスター、2024年）。