

和紙素材の新しい判別方法について

—高精細デジタル顕微鏡 VHX-8000 を用いて—

A New Discrimination Method for Washi Paper Materials

—Using a High-Resolution Digital Microscope VHX-8000—

澤山 茂

Shigeru Sawayama

ABSTRACT

Since the characteristics of plant ligament fibers are directly related to the properties of paper, it is important to identify the characteristics of each ligament fiber. However, it is difficult even for skilled people to identify washi from its external characteristics, and it is thought that washi was judged by qualitative evaluation methods such as looking through it as a texture of the washi surface, identifying the paper's non-uniformity, and visually evaluating its surface irregularities, luster, color, and tactile feel. After the development of optical technology, quantitative evaluation methods based on measured values became possible by measuring fiber shape, cell wall thickness, lumen, cell wall-like patterns, parenchyma cells, fiber width, fiber length, presence of fiber knots, luster, and color tone, etc., and more accurate discrimination became possible. However, most of these objective evaluation methods involve physical or chemical destruction of the specimen, and not all of them are applicable to classical manuscripts, old brush cuttings, literary works, and works of art, which are used as specimens by the author. Taking advantage of optical nondestructive observation, we have confirmed that the application

of polarized light observation as one of the new ways to use observation equipment, which has been overlooked in the past, can yield new findings not obtained by conventional observation, and we report our findings in this preliminary report.

1. はじめに

光学的非破壊観察の利点を生かし、従来見落とされていた観察機材の新しい利用方法の一つに偏光観察を応用すると、従来の観察では得られなかった新しい知見が得られることが確かめられたので、速報的にその知見を報告する。

我が国の代表的な和紙原料であるコウゾ、ミツマタ、ガンピ等の植物が普遍的に使われることになった背景には、多くの歴史上の変遷があった。古来、麻、コウゾ、フジなどの靱皮繊維から、麻製品の廃物を利用した敝布(ふるぎれ)や漁網等が紙の原料に用いられてきた。靱皮繊維(師部繊維)を原料とする和紙は、木部を原料とする洋紙に比較すると、強靱性、保存性が特徴である。正倉院宝物にある古代和紙類は、8世紀から11世紀にかけて宮廷や官庁で使われた紙がそのまま残存している。1千年以上を経過して現在まで存在している。

和紙の種類が多彩なのは、その原料、製造過程、用途、そして産地による違いがあるためである。主な原料には、コウゾ、ミツマタ、ガンピがあるが、これらの原料の違いや多彩な抄紙法により、和紙の質感や特性が変わるため多くの紙名がある。また、補助原料として、桑、麻、藁なども使用されている。繊維の種類や繊維長の違いを生かして、紙質強度の改良や機能性を目的に、いわゆる「混ぜ漉き」の技術も考案されていた。

繊維原料と用途について簡単にまとめておく。

コウゾ [*Broussonetia kazinoki* × *B. papyrifera*] は桑科の植物で、繊維の長さは5mmから20mmの長さがあり、強度も高いため、漉くときに繊維同士が絡みやすく、薄くとも容易には破れない丈夫な和紙を漉くことができるため、古くから重要な文書や帳簿に使用されてきた。コウゾを原料とした紙は楮紙

(ちよし)と呼ばれ、最も普及している原料である。その理由は、栽培が容易であり、繊維を取り出しやすく、収量が多いことがあげられる。書画用以外に障子、番傘、表具、提灯、行灯、合羽、紙子(衣類)などがあり、用途は非常に広い。

ミツマタ [*Edgeworthia chrysantha*] は、ジンチョウゲ科で、繊維はコウゾに比べて柔軟で細く、光沢がある。滑らかでしなやかな紙質が金箔や銀箔を出荷するときの箔合紙、書画、写経料紙、紙幣などの用途がある。

ガンピは、ジンチョウゲ科 [*Diplomorpha sikokiana*] で、奈良時代から和紙の原料として使用されてきた。繊維は、緻密で光沢と粘り気があり、独特の紙音 (Rattle) がある。ガンピは栽培が困難であることから、自生種に頼っているため栽培地域も限られ生産量は少ない。変色、虫害に強く、高級な書画用紙(かな料紙、写経料紙)、金箔製造時の箔打紙、以前は謄写版原紙、コピー紙などの用途があった。比較的特性が似通っているミツマタを混ぜ漉きすることにより相対的にガンピの使用量を抑制することを目的に使用されていた時期もあった。

一般に、植物韌皮繊維の特性が紙の性質に直接関わってくることから、それぞれの韌皮繊維の特徴を明らかにすることが重要である ([澤山 2022]、[澤山 2023])。しかし、和紙を外観上の特性から判別する方法は、熟練者でも困難であり、和紙表面の質感として、透かして見る、紙の不均一性の判別、表面の凹凸、光沢、色、触感などの目視による定性的評価法で判断していたものと思われる。

光学的技術が進歩してからは、繊維の形状、細胞壁の厚さ、内腔、細胞壁状の文様、柔細胞、繊維幅、繊維長、繊維の節の有無、光沢、色調などの様々な測定法により、測定数値による定量的な評価法により正確な判別が可能になった。しかし、これらの客観的な評価法の多くは、試験片の物理的あるいは化学的に破壊を伴う測定法が多く、稿者が試料として用いている古典籍、古筆切、文学作品、美術品などにすべて適応できる測定法ではない。光学的非破壊観察の利点を生かし、従来見落とされていた観察機材の新しい利用方法の一つに偏光観察を応用すると、従来の観察では得られなかった新しい知見が得られるこ

とが確かめられたので、速報的にその知見を報告する。

2. 試料および測定機器

本稿では、原料に余分な填料がないピュアな和紙として、成子紙工房製（滋賀県大津市桐生）の特選「さざなみ紙譜」を標準紙として用いた。

その他の試料用紙の一覧を【表1】に示した。上段の3種は、コウゾ、ミツマタ、ガンピの原料が単独の試料であり、下段はガンピとコウゾの混ぜ漉き試料である。混ぜ漉き試料として、コウゾとミツマタの混合比が異なった試料は、自作した。すなわち、市販のコウゾ100%およびミツマタ100%書道様半紙を重量比で混合した試料を抄紙した。

また、漉き返し紙は、江戸時代の刊本から自作した再生紙であるが、原料に使用した刊本には、コウゾとミツマタが原料として使用されており、多くの墨点が観察される再生紙であることを確認した。ただし、コウゾとミツマタの混合割合は現在のところ不明である。漉き返し紙は、[関義城 1943]、[會田 2002]を参考にして作成した。

【表1】 使用試料一覧

試料名		重さ	適 要
08	純コウゾ紙自然色	3 匁	国内産コウゾ使用
23	純ミツマタ紙未晒	6 匁	板張乾燥
01	純ガンピ紙未晒	3 匁	板張乾燥
混ぜ漉き試料		比率	摘 要
20	ガンピ：コウゾ	8：2	未晒し
21	ガンピ：コウゾ	4：6	未晒し
22	ガンピ：コウゾ	3：7	未晒し
自作1	コウゾ：ミツマタ	1：1	書道半紙混合抄紙
自作2	コウゾ：ミツマタ	9：1	書道半紙混合抄紙
自作3	コウゾ：ミツマタ	1：9	書道半紙混合抄紙
漉き返し紙	コウゾ、ミツマタ混合		江戸時代刊本

使用する測定器は、試料に極力ダメージを与えない測定法を選択する必要がある。現在、高精細デジタル顕微鏡 VHX-8000 ((株) キーエンス社製)、OPTELICS HYBRID +コンフォーカル顕微鏡(レーザーテック(株))社製を用いて観察を行っている。これらの測定器は、ともに光源に白色 LED を用いているため、測定試料に物理的なダメージを与えず、試料の微細構造を非破壊で観察できる特徴を持つ光学測定機材である。

本稿は VHX-8000 を用いた解説である。この機材の特徴は、通常の光学的測定のほか、多くの観察オプションを有するデジタル顕微鏡である。光源には白色 LED を用いており、観察試料にかかるダメージは極力軽減される。しかし、万一のことを考慮して、光源の照射が極力短時間で観察することを心掛けた。

観察倍率は、通常観察モード以外に光学的拡大として×20 から×6000 倍で 4K 高解像度(HR: High Resolution)での非常に高精細な観察が可能な測定装置である。それに加えて、光学的観察に照明機能が豊富である。

試料全面を照明するリング照明、試料の観察面に与える光量を上下左右に設定できるリング片射照明、同軸落射または同軸片射照明、試料表面の形状を走査型電子顕微鏡像的に擬似観察できる Opt-SEM モード (Optical - Shadow Effect Mode) などがあり、それぞれの観察モードで、2次元および3次元の画像から各種の測定値の算出が可能で、従来からの定性的な観察結果と比較すると、得られる情報量が格段に増えている。

本稿では、VHX-8000 の測定特性のほか、オプションとして偏光観察時に 530nm の鋭敏色板を加え観察条件を拡大した。

一般に、手鑑形式や軸装の古典籍、裏打ちのある古筆切、装丁の異なる刊本などは、試料の形態を破壊することになるため、表面の形状を観察することが唯一の観察方法となる。従って、VHX-8000 のような機材は、高精細で試料表面の 2次元および3次元構造が観察できる性能が、観察に求められる所以である。別のオプションとして、透過光源による観察も可能であり、この場合も偏光板を通しての観察も可能である。一枚物で裏打ちや軸装ではない試料の観察に適している。

VHX-8000の透過光による偏光観察時には通常は鋭敏色板が付属しない。透過偏光観察には、鋭敏色法検査板、波長570nm（鋭敏色法偏光歪計用検査フィルターと直交ニコル法の両用フィルターが兼用になっているMLPH-R570：美館（株）製）を試料上に重ねることによって、簡単に透過光による鋭敏色板法で観察が可能である。

3. 偏光観察による標準見本紙の光学的特性

【図1】に、【表1】の原料が単一であるコウゾの観察結果を示した。観察時には、色調調整として「明るさ」「テクスチャ」「コントラスト」「色彩」の調整が可能である。デフォルトはすべての項目が50である。従来の試料観察方法では、試料が有する経年劣化による色合いなども観察するため色調調整を行わなかった。【図1】の左は、反射明視野法の観察図で、色調を調整しないデフォルトの50で観察した結果である。従来、このモードで観察した多くの研究発表がある。通常透明感のある靱皮繊維が観察され、「節」も観察されることがある。

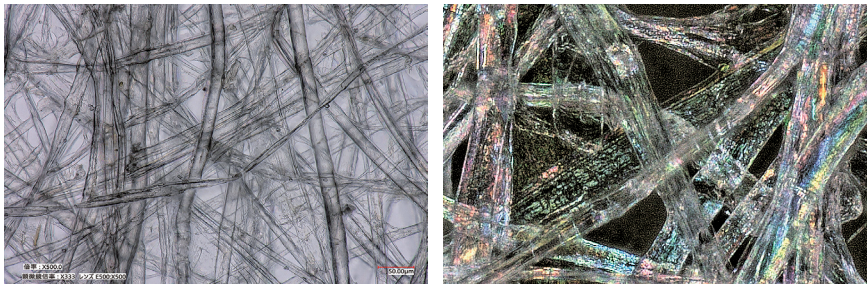
【図1】の右は、同軸落射（反射暗視野法の観察図で、偏光観察モードとする）で色調パターン「明るさ」を増減、「テクスチャ」を最大約70程度、「コントラスト」を最大約70程度、「色彩」を最大100に調整した。この数値を（色調パターン1）として観察した。コウゾ靱皮繊維の表面が、ザラついて観察され、濃い褐色で透明感がない。波紋状模様や「節」が観察される。また、一部虹色状の複屈折が観察されている。試料は同一靱皮繊維であるが、以上のように観察モードの数値を変化させ、色調などを調整することにより、デフォルトの設定とは全く異なった微細な表面構造が観察されている。

【図2】は、【表1】の原料が単一であるミツマタの観察結果である。【図1】と同様に、左は、反射明視野法の観察図で、色調を調整しないデフォルトの50で観察した結果である。【図1】に比較して靱皮繊維の重なりが多く観察されるのは、【図1】のコウゾ紙の重さが3匁であったのに対し、【図2】のミツマタの重さは倍の6匁であるためである。すなわち、重さが増加するという事は和紙の厚さに比例しており、靱皮繊維量がより多く重なっていることを示してい

る。右は同軸落射の(色調パターン1)における観察図である。やはり、靱皮繊維の重なりが緻密であることが観察される。【図1】のコウゾと比較すると表面は滑らかで、波紋状模様は観察されず、明るく、繊維に平行な筋状が観察される。

【図3】は、【表2】の原料が単一の純ガンピの観察画像である。【図1】と同様に、左は、反射明視野法の観察図で、色調を調整しないデフォルトの50で観察した結果である。重量は3匁であるが、靱皮繊維が細く密集しているように観察される。【図1】のコウゾと比較すると、表面は滑らかで、繊維に平行な筋状構造が観察される点はミツマタと同様であった。すなわち、チンチョウゲ科のミツマタとガンピの観察画像には特徴が近似する傾向があり、桑科のコウゾには表面にある種の有機物が付着しているように思われる。繊維の精製度と不純物の関係は極めて重要であり、堅く引き締まった紙となり、色も黄褐色になりやすい([増田 1995])。

和紙原料から靱皮繊維を取り出す工程中の組織変化について、[世良 1954]は、ミツマタ原料の分析を行い、エーテル抽出物(3.00%)、アルコール抽出物(2.81%)、リグニン(2.34%)、ペントザン(16.03%)を報告している。リグニンとペントザンは、植物組織中で化学的に結合して天然の3次元ネットワークを構成に寄与している化合物である。また、ヘミセルロースとも共重合して和紙の強靱性に寄与する化合物であることが示唆される。([榊原 1974]、[世良 1955])。

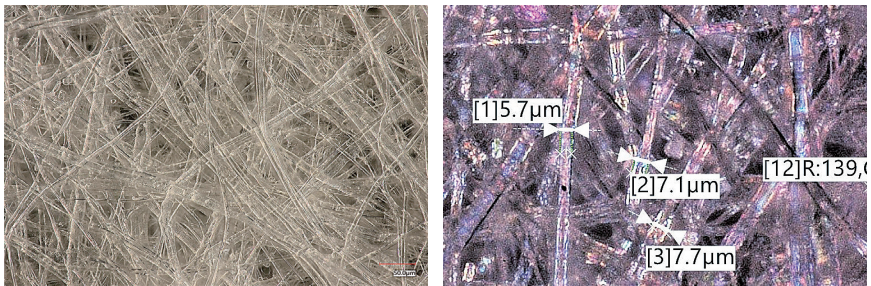


【図1】 純コウゾ(さざなみ 08)左:色調パターン 0_×500
右:同軸落射_色調パターン 1_×300_一部光学的に拡大

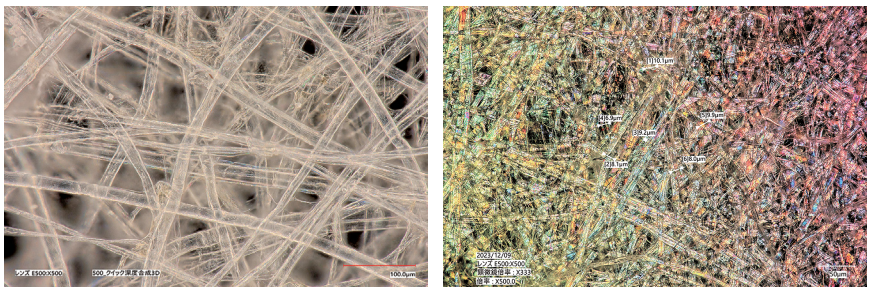
これらの成分は、特殊な染色液で染色することにより光学顕微鏡下で観察されるが、稿者らが観察している方法では観察が不明である。原料の処理法の微妙な相違が、これらの成分値に影響を与えていることが考えられ、注意すべきであろう。何らかの化合物が表面構造の結晶状態の観察に寄与している可能性があるからである。

【図4】に【表1】に示した試料のさざなみ 20（ガンピ：コウゾ＝ 8：2 の割合で混ぜ漉き）の偏光観察結果を示した。画像左は、主にガンピの繊維幅を計測したもので（緑マーカ）、画像右は、同一画像の内主にコウゾの繊維幅を計測したものである（赤マーカ）。計測繊維幅は、ガンピの平均が $8.37\ \mu\text{m}$ 、コウゾの平均が $16.35\ \mu\text{m}$ であった。

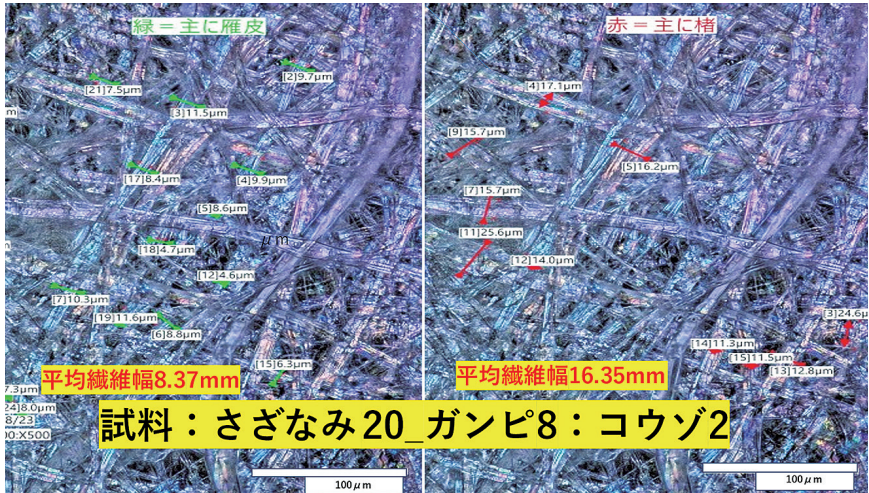
【図5】はさざなみ 21 で、混合比率がガンピ：コウゾ＝ 4：6 である。画像左



【図2】 純ミツマタ(さざなみ 23)左：色調パターン 0_×500
右：同軸落射_色調パターン 1_×300_一部拡大



【図3】 純ガンピ(さざなみ 01)左：色調パターン 0_×500
右：同軸落射_色調パターン 1_×500

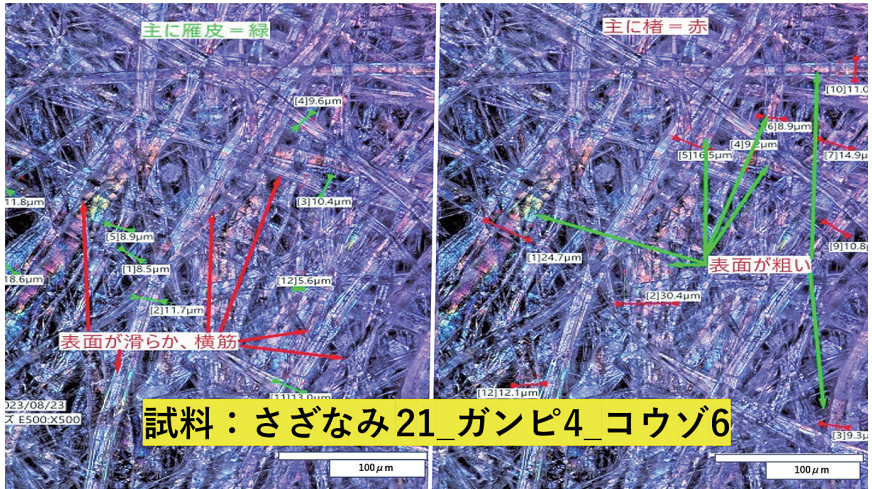


【図4】 ガンピ：コウゾ（8：2）の混ぜ漉き試料の偏光観察と繊維幅計測

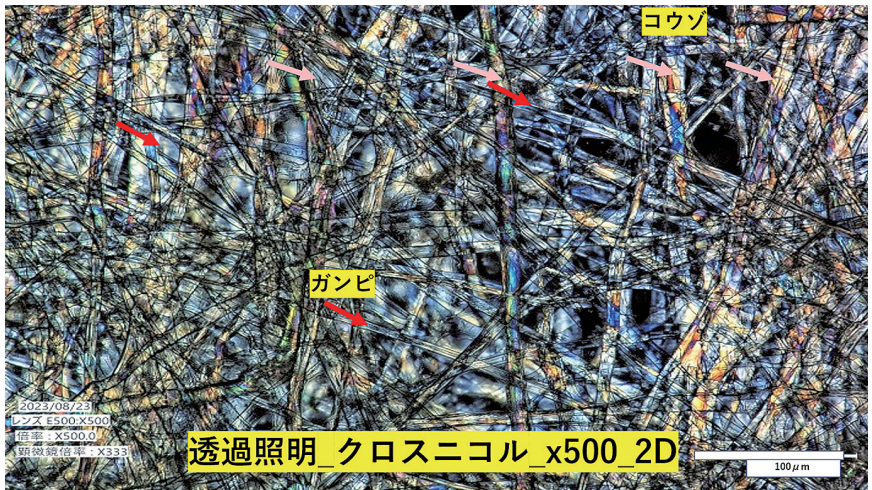
のガンピは、繊維表面が平坦で、透明感があり、繊維に平行な筋が観察されている。一方、画像右のコウゾは、繊維表面に不規則な波様模様の凹凸物が付着し、ザラついたように観察される。色はほぼ褐色で透明感がなく観察された。混ぜ漉きである原材料の比率は、現在のところ数値として表すことができていないが、画像の外観観察から見かけのガンピとコウゾの割合が示唆される。

【図6】は、ガンピとコウゾが混在したさざなみ22の透過照明における偏光観察の結果である。ガンピ(赤色矢印で示した箇所)は、透明感があり、繊維に平行な筋が観察されている。コウゾ(ベージュ色矢印で示した箇所)は、褐色で繊維表面に光沢がなく、褐色である。【図7】は、【図6】の一部を拡大したもので、鋭敏色版(570nm)を併用した結果である。セルロースの化学構造は、植物組織によって大きな違いはないが、分子の集まりである結晶構造やマイクロフィブリルの大きさや形によって差があると云われている(〔飛松 2017〕)。

〔西野 2008〕は、ケナフ韌皮に由来する細胞壁を電子顕微鏡で観察し、細胞壁とセルロースマイクロフィブリルの模式図を作成した。マイクロフィブリルが集合して細胞壁を形成し、マイクロフィブリル間の隙間がヘミセルロース、リグニ



【図5】 ガンピ：コウゾ（4：6）の混ぜ漉き試料の偏光観察と表面観察

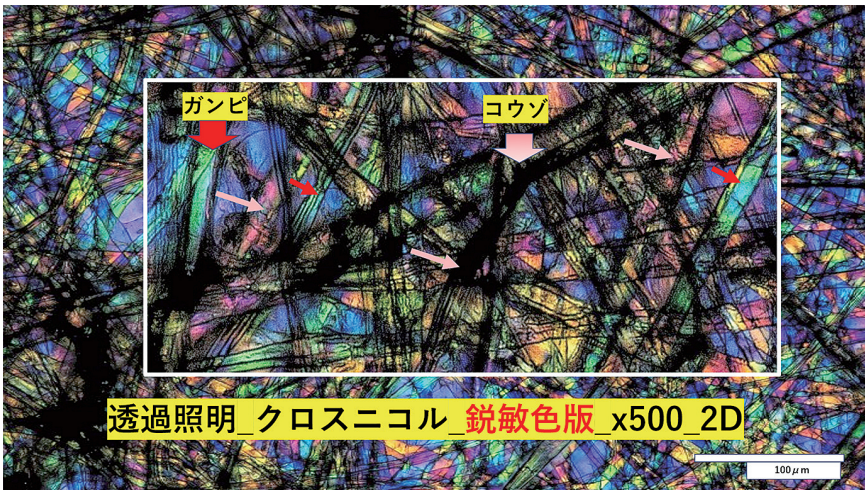


【図6】 透過照明における偏光観察（さざなみ22、ガンピ：コウゾ = 3：7）

ン等で満たされた一種の複合化合物であり、マイクロフィブリルの結晶配列角が植物組織の稠密性に関与し、多彩な物理的な性質を与えると説明している。

またマイクロフィブリル構造は、結晶領域と非晶領域とからなり、均一ではない。これらの違いから、ガンピとコウゾのセルロース結晶構造に変化が生じている可能性が示唆される。偏光観察によりこれらの光学的変化が生じている可能性が高い。偏光観察によりでん粉の成長(形成)に基づく偏光十字が観察されることから([日比谷 2023])、靱皮繊維の結晶構造に由来する現象として観察されている可能性がある。また、今後の課題として、和紙原料の結晶構造を反映すると考えられる屈折率、屈折率分布、複屈折等が古典籍や古筆切、美術品等の多くの和紙に適応されるか否かを確認する必要がある。

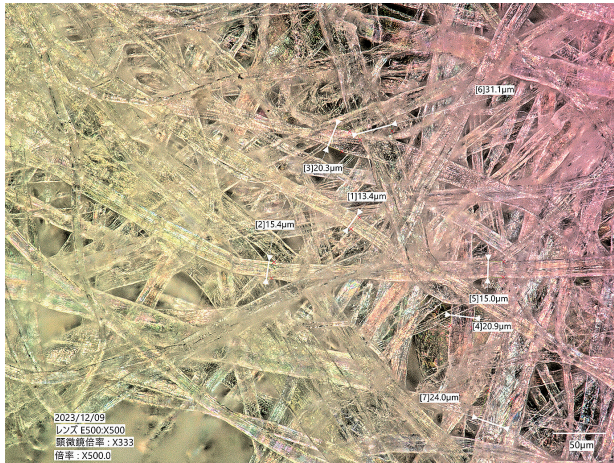
【図8】は、市販書道用半紙の混合割合をミツマタ：コウゾ=9：1の割合で混合して細分化し、ブレンダーを用いてよく混合した紙料を希釈して手漉きした。乾燥後偏光観察した自作2の画像である。多くのミツマタ繊維は、光沢があり透明感があるように観察される。紙色は、ややクリーム色がかっており、指先での触感は、ミツマタ100%の半紙の特徴が強く表れていた。【図9】は、



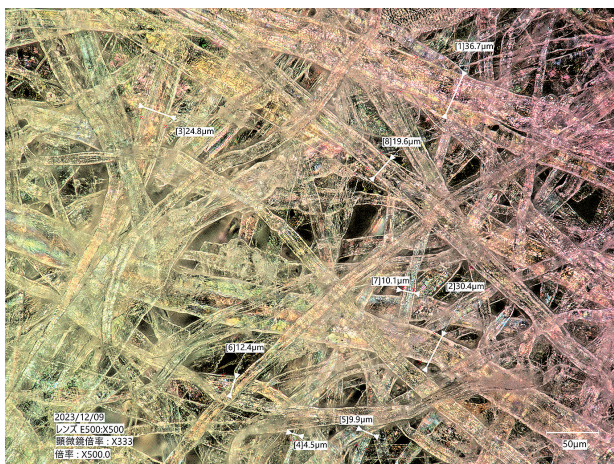
【図7】 透過照明における偏光観察(さざなみ22、ガンピ：コウゾ=3：7)に鋭敏色版を併用

ミツマタ：コウゾ = 1：9 の割合で混合して手漉きして偏光観察した自作3の画像である。前述したように、繊維表面が波状であり、ザラついたコウゾ繊維の特徴が多く観察されている。

【図10】の観察試料は以下のように調製した。江戸刊本を裁断し、真水で煮



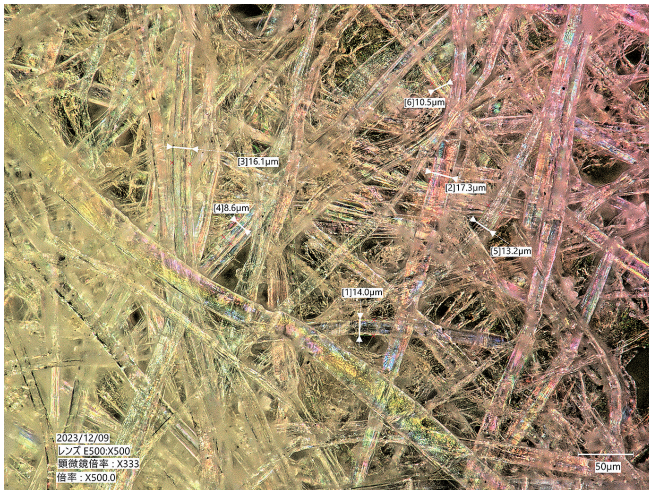
【図8】 自作2 ミツマタ：コウゾ = 9：1



【図9】 自作3 ミツマタ：コウゾ = 1：9

熟3時間後に再度指先で繊維をほぐし、ブレンダーで細分化し、メッシュの袋に入れ流水中でもみ洗いして脱墨を試みた。大量の墨が浮遊して洗液中に流出しなくなるまで、もみ洗いを繰り返した。初期状態はやや薄黒い料紙であったが、直射日光下で数日乾燥することにより、やや白さが増した。その後、紙料を希釈し粘剤などは使わずに手漉きした。コウゾ特有の繊維表面が褐色でざらついている繊維が多く観察され、正確な割合は不明であるが、透明感があり、繊維に平行な筋が観察されるミツマタが数割混在する、いわゆる混ぜ漉き状態が観察される。

従来から、主に靱皮繊維の幅、繊維の形状、節、原料由来の異物などの情報も基づき和紙の定性を行ってきたが、すべての和紙の特定や判定には困難性が伴ってきた。まもなく AI による機械学習を利用し、画像判別が可能になると思われるが、現在のところ和紙の画像判別に使う汎用のデータベースがないのが現状である ([舟見 2023])。本稿で試行した現存の光学測定装置の観察方法による利用拡大は、AI による画像判定が稼働するまでの繋ぎとして、有効に使用できる方法と思われる。



【図10】 江戸刊本漉き返し紙

引用文献

- [澤山茂 2022] 「和紙のモルフォロジー解析—伝統的技術と非破壊計測の融合から」
〔『書物学』第 19 卷、勉誠出版〕
- [澤山茂 2023] 「手漉き和紙、とくにコウゾの製造から紙へ」(江南和幸・佐藤悟・横井孝編『紙のレンズがひらく古典籍・絵画の世界』勉誠社)
- [関義城 1943 「江戸東京紙漉史考(富山房)』
- [會田隆昭 2002 「浅草紙の三百年」(百万塔 113 号 67-95)]
- [世良明 1954 「手漉和紙について」木材研究、京都大学木材研究所報告、13、457-477]
- [榊原彰 1974 「リグニンとその構造」化学と生物、12、8、508-518]
- [世良明 1955 「手漉和紙に関する研究(第 1 報)製造過程中に於ける組織の組成変化に就いて」京都大学木材研究所報告、14、42-49]
- [増田勝彦 1995 「繊維と副成分による紙の性質」(「古文書料紙原本にみる材質の地域的特質・時代的変遷に関する基礎的研究」平成 4～6 年度科学研究費補助金成果報告書(総合研究 A)、(研究代表者 = 富田正弘)]
- [飛松裕基 2017 「植物と人を“支える”細胞壁の科学」生存圏研究、13、10-18、2017]
- [西野孝 2008 「セルロース系材料における基礎と応用」材料、2008 年 57 卷 1 号 97-103]
- [日比谷孟、澤山茂、大和あすか 2023] 「国文学・美術とハイテク分析機器」(江南和幸・佐藤悟・横井孝編『紙のレンズがひらく古典籍・美術の世界』勉誠社)
- [舟見一哉 2023] 「工学的観点に基づく料紙解析から古筆切おツレを認定する際の課題と対策」(江南和幸・佐藤悟・横井孝編『紙のレンズがひらく古典籍・美術の世界』勉誠社)

付記

本稿は、科学研究費助成事業基盤研究(B)「古典籍の料紙、用紙の研究 —紙資源のリサイクルが支える文学と出版システム—」(課題番号 23H00604 研究代表者：澤山茂)による成果の一部である。

(東京農業大学名誉教授)