

紙資料の劣化と保存

筑波大学 生命環境系 / 江前^{そのまえ}敏晴

0 はじめに

図書館の役割を考えると、一般には社会における知識や情報の記録（出版物等）を保存及び公開することであろう。特に大学図書館であれば、大学の教育や研究に資する必要がある。自分の利用の仕方に限定すれば、オンラインジャーナルで研究論文を読むことがほとんど使い方の全てになる。そうすると web サイトの活用と違いはないし、むしろウェブサイトの方が利用しやすい。図書館特有の機能は紙の図書を保存することではないだろうか？ デジタル保存が場所を取らずに便利ではあるが、実際には、記録のために物としての媒体が必要である。紙という媒体は保存状態が良ければ 1,000 年以上の寿命がある。一方、デジタルの媒体は光磁気ディスク等が通常用いられるが、実際の物質はプラスチックでありその寿命は通常紙には及ばない。

1 紙の基礎科学と記録材料特性

1.1 紙の起源

紙は、一説には蔡倫なる人物が紀元 105 年頃に発明したと言われているが、実際にはそれ以前から紙は存在することから、蔡倫は製紙法の改良、製紙法の確立者であったと言える。当時蔡倫が紙作りに用いた原料は、麻のボロきれや、樹皮、漁網（ぎょうもう）などであった。これらの材料は元をたどれば全て植物の繊維である。

1.2 紙の製造工程

現在の製紙産業における紙の原料は森林から得られる木材である。これを細かいチップに砕き、アルカリを加えて高圧となる蒸解釜を使い、約 150°C で煮る。細かい繊維に分かれるので、これに次亜塩素酸ナトリウムなどを加えて漂白する。この処理によりパルプが製造される。水に懸濁したパルプは、抄紙機上で高速に動いている PET の繊維を編んだワイヤ（メッシュ）に噴出しろ過される。そのあとは連続的に脱水するためのウェットプレス、乾燥を行い、表面が平滑になるように非常に平滑なロールで表面を摩擦するカレンダーリング処理を行ったあと、巻き取られ、所定の幅にカットされる。

1.3 紙の生産量

紙の使用量は文化のバロメーターと言われていたが、それはバブルが崩壊する前の 1980 年代までであろう。その後経済は安定期に入りやがて上向きになったが、2000 年頃に紙の生産量が最高を記録した後は 2008 年のリーマンショックにより激減した。その後は約 2600 万 t の生産量を維持していたが、これは景気の回復と電子メディアの普及による印刷用紙や新聞用紙などの情報関連用紙の生産の減少がバランスしていたためである。しかし、2020 年になって新型コロナウイルス感染症の影響により印刷・情報関連用紙（板紙と対比したときの“紙”）は激減し、一方、宅配の需要が高まったせいで段ボール箱などの容器包装用の板紙の生産は大きく減ることはなく、生産量の統計を取り始めて以来、初めて紙の生産量を上回った。その傾向は 2021 年、2022 年も同様であり、さらに 2022 年は、板紙生産量が過去最高を記録した。紙の主用途は、完全に包装材料となってしまった感がある。

1.4 森と紙のリサイクル

紙の原料は木材から取り出したパルプ繊維であるが、紙の原料全体に占める古紙の割合（古紙利用率）は年々増えており、2022年には66.3%になった。しかし、市場に出回った紙のうち回収された紙の比率（古紙回収率）は79.5%まで増えたものの、この3年では連続して前年を下回った。古紙といえども元をたどれば森林から生産した木材（建築用に製材後の端材などが主）を使用する。木材からパルプを作り、そのパルプで紙をつくる。その後、数回紙としてリサイクルされた後、傷んだ繊維は燃やされてエネルギーに代わる。その時に排出される二酸化炭素は森林に吸収される。したがって紙のリサイクルは森のリサイクルの1部を担っていることになる。又長く古紙繊維を使うことはカーボン（二酸化炭素）の排出を抑えることとなり地球温暖化低減に貢献することに繋がっている。

1.5 パルプ繊維の形状と成分

樹木には針葉樹と広葉樹の2種類があり、針葉樹の場合は仮道管がパルプ繊維になる。一方、広葉樹は木繊維がパルプ繊維であるが、それ以外に含まれる道管も紙の中に残り紙の一部となる。化学成分で言うとセルロース（グルコースが β 1-4結合したもの）が主成分であり、次いでヘミセルロース（グルコース以外の単糖も結合している）と接着剤の役割をするリグニンが多い。パルプ化ではリグニンの大部分が溶出し、ヘミセルロースも減少するがセルロースは分解されにくく、このセルロースがパルプ繊維や紙の主成分はとなる。

1.6 パルプ繊維の処理工程

パルプ繊維は、叩解（こうかい）という処理により引張・圧縮等の力を受け、表面が毛羽立ち内部では層状の剥離が起きる。これらは外部フィブリル化及び内部フィブリル化と呼ばれる。この処理を行うことにより乾燥時に繊維間に多くの水素結合を作られるため、紙の強度は大きく向上し、また紙の密度も大きくなる。

1.7 薬品及び填料の添加

叩解後のパルプ繊維の水懸濁液には様々な薬品等が加えられる。紙の品質を向上させる目的で、サイズ剤（撥（はっ）水性の制御）、填料（白色度・不透明度の向上）、紙力剤、染料・蛍光増白剤などを混合する。生産性の向上のために、凝集剤（アラム[硫酸アルミニウム]などの歩留（ぶど）まり向上剤）を加え繊維同士を早く凝集させたり、微細繊維・填料・サイズ剤の歩留まり（含有率）を上げたりする。そのほか防腐剤なども加える。

サイズ剤や歩留まり向上剤の種類により、紙には酸性紙と中性紙の2種類がある。硫酸アルミニウムを添加した紙は酸性紙であり、使用しなければ中性紙である。その他、抄紙工程中にいったん乾燥した紙に表面サイズ剤と呼ばれる薬品を塗布することがある。デンプンなどである。デンプンは表面で膜状になり、印刷時に紙表面から繊維が引き剥がされるのを防ぐ。

さらに顔料塗工では、白色の鉱物性粉体（炭酸カルシウム、クレーなど）を接着剤と共に紙表面に塗ることにより、白色度、平滑度、液体吸収性が改善される。

1.8 紙の性質

1.8.1 坪量(g/m²)

23°C相対湿度50%における1m²あたりの質量(g)のこと。コピー用紙で約60 g/m²である。

1.8.2 厚さ

2つの平行な円形加圧面で挟む構造のマイクロメータを使い、100 k Pa の加圧下で測定したとき円形加圧面間の距離と定義される。バルク厚さ（10枚重ねで厚さを測定し、10で除したときの厚さ）と単一シート厚さがある。単一シート厚さの測定では、表面の凹凸も含めた厚さであるので真の厚さよりやや厚めに測定される。

1.8.3 密度(g/cm³)

坪量を厚さで除し、所定の単位で表記する。単位として kg/m³ が使われることもある。叩解処理、ウェットプレス、カレンダーリングにより密度は増加するが、填料は通常セルロースより密度が大きいにも拘らずその添加は、紙の密度を下げる。繊維間結合ができるはずのところに填料粒子が割り込んで繊維間に距離ができ、嵩（かさ）が大きくなるためである。

1.8.4 平滑度

平滑度は、印刷にとって重要な性質である。平滑な金属面と紙表面が接触したときにできる隙間を一定量の空気が漏れ出る速度を測定して表現する。日本では王研式平滑度試験機がよく使われ、100 mL の空気が漏れるまでの時間を測るので、平滑度は秒数で表される。コピー用紙で25秒程度、コート紙（表面に顔料塗工を行って平滑にした紙）で1000～5000秒程度である。

1.8.5 サイズ度

紙の親水性や水浸透性はサイズ剤の添加によって制御されるが、水の浸透しやすさをサイズ度と呼ぶ。紙の両面から吸水させたとき、水が紙の内部で接触するまでの時間（秒）をステキヒトサイズ度（秒）とする。5 cm 四方の紙を船の形に折り、チオシアン酸アンモニウム水溶液に浮かべ、すぐ塩化第二鉄水溶液を船の中央に滴下し、計時を開始する。両水溶液が混ざって生じる赤色斑点が3つ現れるまでの時間（秒）を測定する。

1.8.6 引張（ひっぱり）強さ

引張強さは材料の力学的試験の基本となる。幅 15 mm、つかみ具間の距離を 100 mm にして測定するがつかみの部分を確保するため、採取の際はこの長さを十分超えるようにする。10 mm/min の速度で引っ張る。機械抄きの紙は方向性（MD および CD 方向）があるので、試験片の引っ張る方向を区別する（次々節参照）。伸びに対する引張荷重を記録し、立ち上がりの勾配から弾性率を計算する。破断時の荷重を試験片の初期幅で除し、さらに坪量で除して正規化した値である比引張強さ（tensile index）[N m/g] が引張強度である。比引張強さは、繊維の長さが長く（広葉樹より針葉樹繊維のほうが長い）、叩解の程度が大きく、填料の添加が少ないほど向上する。

1.8.7 耐折（たいせつ）強さ

1 kg 重の張力をかけた幅 15 mm の試験片を左右 120° ずつ折り曲げ、破断するまでの往復折り曲げ回数を測定する。その常用対数の平均値を計算する。さらにその真数が ISO 耐折回数である。。繊維長が長いと耐折強度が上がる。

1.8.8 繊維配向

抄紙機で抄かれる紙は、脱水しながら繊維がワイヤ（抄き網）に引っ張られるためワイヤが動く方法に平行になるよう繊維が並ぶ。この方向をマシン方向（MD）または縦方向と呼び、その直交方向がクロス（マシン）方向（CD）又は横方向と呼ばれる。このような性質により、引張強度や伸びなどの異方性（方向性）が生じる。また縦と横では裂けやすさも違う。

1.9 印刷技術

印刷技術の起源は、グーテンベルグ(1395年頃～1468年)による印刷機の発明（1445年頃）が起源である。鉛合金の活字、アマニオイルを煮詰めた油性インク、農作物用絞り機にヒントを得た木製印刷用プレス機を始めて製作した。書籍（印刷物）の大量生産を可能にし、印刷業者及び読者にとっても経済性、実用性に優れた技術となった。グーテンベルグは180部の聖書（42行聖書）を印刷し刊行した。これが現代印刷技術の原型となった。印刷技術の発展によって、同一の版を大量に複製することができるようになり、布教の重要な手段となった。これに伴って紙の需要も増大し、紙の大量生産技術の発展へと繋がった。19世紀の半ばに製紙原料としての木材利用が開始され、連続抄紙機も開発された。

日本では、藤原仲麻呂の乱後の764年（奈良時代）に孝謙天皇が国家安泰を願い、「無垢浄光陀羅尼経」を100万枚印刷させ、これを木製の三重小塔100万基の中にそれぞれ納めて、法隆寺や東大寺など十大寺に分置した。これらは百万塔陀羅尼と呼ばれそのうちのいくつかは現存し、その1つが筑波大学附属図書館 図書館情報学図書館（春日キャンパスの貴重書庫）が所蔵する。

世界最古の印刷物は、グーデンベルグの42行聖書ではなく、新羅（韓国）慶州の仏国寺の釈迦塔で1966年に発見された無垢浄光陀羅尼経であり、釈迦塔創建の751年の印刷とされている。しかし、これらはいずれも木版印刷であり、耐久性に乏しかった。金属活字を使用したグーデンベルグの印刷機は耐久性があり、生産効率は格段に高かった。

2 紙の劣化

2.1 酸性紙の劣化

印刷用紙には、水の浸透制御のためサイズ剤が添加されるが、その定着助剤として19世紀末から酸性を示す硫酸アルミニウム（アラム）が使われ出した。紙に残り続けるアラムは湿気が多いと解離して、酸を発生するためセルロースを酸加水分解するので分子鎖が短くなり繊維強度、ひいては紙の強度を低下させる。1980年代に、次第にアラムは、カチオン性のポリマーに置き換えられ、水存在下で弱アルカリ性を示す炭酸カルシウムの添加が広まった。炭酸カルシウムは、酸性物質が存在しても中和する効果があるため書籍の寿命を長くする。

2.2 中性紙への転換と中性紙を使った図書の劣化

1980年代のうちに図書の書籍用紙は酸性紙から中性紙へと転換した。これは図書館界からの要望に製紙業界が応えたもので、世界中の図書の本文紙は1990年頃には中性紙だけとなった。そこで2000年から2020年に刊行された日本で出版された書籍の本文紙のpH調査を行った。この時期に出版された書籍には全て中性紙が使用されており出版後の経過年数も

短いので本文紙は中性～弱アルカリ性域を示すことが予測された。調査は 2021 年に行い、部位別（書籍の内部か外気に触れやすい天の角などの周囲部かなど）に pH を測定した。pH 試験紙を少量の蒸留水で濡らし書籍の本文紙に強く押し当て、色の変化で pH を判定した。その結果、外気に触れやすい周囲の部位ほど早く pH が低下していた。刊行直後には部位によらず pH は約 7.8 で弱アルカリ性であった（参考：pH7.0 が中性）が、外周部の天の pH は刊行後 4～6 年の間に、頁の上の角は刊行後 7～9 年までの間に pH は大きく低下していずれも pH7.0 程度の中性域に達していた。そして、刊行後約 20 年経過すると、図書の内部にあたる頁の中心部も pH7.1 まで低下し、中性紙であっても僅かずつではあるが確実に pH が低下、すなわち酸性化が進行することがわかった。これは、中性紙が永久に中性であり続けることはなく、いつかは必ず酸性となって、脱酸処理などの処置が必要となることを意味している。

2.3 インク由来成分による紙の劣化

インク由来の酸性物質による紙の劣化もある。没食子(もっしょくし)インクは、タンニン(没食子酸)、硫酸鉄、ゴム、水からなるインクで、20 世紀中頃までの絵画、手紙、地図、公文書などに使われた。没食子酸が鉄イオンと結合し色材を形成すると水やエタノールに浸しても滲まないため、公文書等は没食子インクの使用を義務付ける法律もあった。色材の形成により硫酸が生成するため酸触媒としてセルロースを加水分解し、多くの貴重資料で、没食子インクで書かれた文字の部分だけ抜け落ちる劣化が進行している [保存修復科学センター 近代文化遺産研究室, 2016]。この時期に書かれた文書類の補修が現在でも行われている。

2.4 掛軸日本画の劣化と保存性 [Kang Lee, Toshiharu Enomae, Masamitsu Inaba, 2021]

掛け軸の日本画は絵具として緑青(ろくしょう)を使用する。緑青の主成分は硫酸銅であり、没食子インクと同様に硫酸を生成し、緑青による着色部分だけが劣化する現象が見られる。日本画用の画用紙に硫酸銅水溶液を塗布し、80°C 相対湿度 65%で 14 日間加速劣化させると、初期 pH5.0 のものが pH2.3 に低下した。ニカワ(膠)は、サイズ処理及び接着剤として従来日本画に頻用されるが、硫酸銅とニカワの両方を塗布した試料では、同じ劣化条件でも pH3.0 程度の低下に抑えられた。加速劣化中に生じた酸の量もニカワの塗布によって大きく抑えられた。ニカワは、酸性物質の pH 低下を防ぐ緩衝効果がある。

3 紙資料の保存管理

3.1 曝書(ばくしょ)による脱酸性化 [望月有希子, 逸村裕, 江前敏晴, 2018]

3.1.1 曝書とは

曝書とは、書籍を開いて湿気を除き、虫払いをする作業のことで、奈良時代から社寺、公家、武家で年中行事として実施されており蔵書の点検も兼ねている。明治、大正期の図書館では、和紙、唐紙の和装書籍で実施されていた。また、台湾、中国、韓国等でも実施されていた。今でも足利文庫、宮内庁書陵部、社寺など古典籍資料の多い機関でこの作業が継承されているものの、空調が完備された現代では図書館で曝書を行うことはほとんどなくなった。曝書の最も重要な意義は紙の中で発生する酸性物質を揮散させることである。つまり、セル

ローズが空気中の酸素によって酸化されることによって生じる酸性物質がセルロースを加水分解することで紙が脆弱化するのを防ぐという最も重要な目的があるものと推測される。

3.1.2 漢籍用紙の繊維原料と pH

慶應義塾大学所蔵の漢籍等の料紙(1600~1911年刊行)の pH を調べたところ、漢籍では【竹紙(ちくし) 4.0、宣紙 5.3、パルプ紙 3.9】、和書では【楮紙(こうぞし) 5.8、パルプ紙 4.0】、洋書では【非木材紙 5.3、パルプ紙 4.4】であった。パルプ紙は酸性化しやすいが、パルプ繊維の成分に問題があるわけではなく、硫酸アルミニウムを添加して製造することによって酸性化進んだと考えられる。竹紙は自然劣化により酸性化が進行し、有機酸(ギ酸、酢酸、乳酸など)が生成によるものと考えられた。

3.1.3 加速劣化処理した冊子に対する曝書

竹紙、楮紙、印刷用紙(市販の書籍用紙)を加熱(105°Cで72時間)した。各試料の状態は、ガラス管に封入したもの(封入紙料)、外部から空気を取り込んで循環している中に吊り下げたもの(通風紙料)の両方である。加熱処理後に曝書処理(25°C 相対湿度 60%)を行った。竹紙の封入紙料は、2週間の加熱処理で pH が 7.6 から 4.6 に低下した他の試料では、0.5 程度 pH が低下しただけであった。耐折強さは、16週間の加熱で竹紙の封入試料は、0 になったが他の試料での低下はわずかであった。曝書では、竹紙の冊子体を中央で左右に開いて室内に 24 時間置いておいたところ、pH は中央頁で 5.7 から 7.2 に上昇し、中央頁と表紙頁の中間に位置する頁でも、直接空気が当たらないにもかかわらず 7.0 まで上昇していた。さらに曝書時に扇風機で送風を行ったところ、2倍以上の速度で pH の上昇が見られた。

4 紙文化財保存科学

洪水や津波によって水害被災した紙文書類や紙文化財は、カビの繁殖によってその重要な情報や価値が喪失してしまう。この問題に対して、ペーパータオルによる早期吸水乾燥という対処を行う。これを補完する新しい方法として、紙を塩水に浸漬するという簡便な処置でカビの繁殖を防ぐ緊急保存法を提案した。

塩濃度 3.5%以上の塩化ナトリウム水溶液または人工海水に紙を浸漬することでカビの繁殖をほとんど防ぐことができた。新たに水で洗浄する脱塩処理で効果的に脱塩できること、紙に NaCl や海水塩が多少残存しても過度な強度低下は引き起こさないこと、また、東日本大震災による津波被災紙中の糸状菌の存在の確認および菌種同定を行った [Higashijima, 2012; 東嶋健太, 和田朋子, 五十嵐圭日子, 江前敏晴, 鮫島正浩, 磯貝明, 2012]。

5 古文書材料学

5.1 史料料紙の系統的な識別と分類の試み

古文書史料を構成する料紙を、単なる筆記材料としてではなく、当時の文化社会状況を推定する根拠とするための第一歩として、史料料紙の系統的な識別と分類を試みた。紙に含有する非繊維の粒子状物がどのような物質であるかを分類基準にしようという考えに立って、裏面からの照明した透過光像により紙の内部の顕微鏡観察を行い、写真として記録し、その他の史料情報とともに研究資源として蓄積することを目指した。含有物として想定しているのは、コウゾ等の植物に由来する成分(柔細胞)か、コウゾの靱皮を煮熟する際に残留した

薬剤（カルシウム化合物）又は紙を漉く際に添加された材料（米粉デンプン、白土などの鉱物）である。それらがどのような外観と特徴を持つかを顕微鏡観察により把握する。顕微鏡画像による粒子の形状や外観から物質の種類を同定する。

5.2 非繊維含有物による料紙の分類

中世古文書料紙では一般的な分類基準（白さ、堅さなどの物性評価）を超えて、材料学的な分類視点を導入した。試行的に、①繭紙（純繊維紙＝繊維だけ）、②糊紙（米粉のデンプン粒子含有）、③生漉紙（柔細胞を含む）、④雑紙の4種に分類し、分析科学的な裏づけを持つ定義を決定すること、および非繊維含有物が鮮明に観察できる古文書料紙の透過光顕微鏡画像を撮影し研究資源として蓄積する。大徳寺文書料紙、和紙抄造において、紙打ち（打解、叩解）、紙出し（洗浄）及びネリの添加の3工程の異なる現代の美濃紙を試料として用いた。その中で、画像に写る粒子の外観と粒子の種類を結びつける識別法の確立に重点を置いた。非繊維含有物は、植物組織である柔細胞、米粉デンプン、白土などの鉱物、残留煮熟剤であり、これら含有物の外観や形状の特徴から粒子の種類を判別することで料紙の分類法を確立できる。

5.3 顕微鏡写真撮影

京都紫野大徳寺において大徳寺文書 48 点について料紙の詳細調査を行った。高分解能光学顕微鏡を持ち込み、100、200、400 倍での透過光像撮影、質量、密度、（書記面・非書記面双方の）繊維配向、（縦横の）光沢度、色についての全体的調査を行い、記録した。岐阜県（武義郡）美濃市蕨生（旧町名、下牧村）の長谷川和紙工房（現在の所在地は山形県）において和紙の作製を依頼し、その調査記録を行った。打解、紙出し、ネリの有無を異にする5種類の和紙を作製し、高分解能光学顕微鏡を用いて100、200、400倍での透過光像撮影を行った。

5.4 顕微鏡写真からの考察

大徳寺文書については、(1)繭紙類については引合（上）2点、引合（中）5点（その他類似の料紙2点）、引合（箕肌）6点を確認した。(2)強紙類については強杉原6点を確認し、その他、強杉原に澱粉が大量に添加された料紙3点を確認した。(3)澱粉紙については6点の文書の詳細データを取り、室町幕府奉行人奉書（堅紙）と守護の使用する杉原がほぼ同質の紙であるという結論をえた。(4)柔細胞紙については美濃紙から柔細胞由来と考えられる膜状物の写真を確保した。大徳寺文書料紙に粒子状物質が見られた。米粉のデンプン粒子と何らかの膜状物質である。

岐阜県美濃市蕨生の長谷川和紙工房で保管されている美濃紙及び石州半紙を顕微鏡観察した結果、前者では柔細胞が観察され、後者では透明な膜状物が観察された。この膜状物は、柔細胞内に含まれていたデンプン及びヘミセルロースからなるものであるか、抄紙工程で添加されたネリからなるものかは両者の比較だけでは判別できない。紙の原料繊維となるコウゾの甘皮を煮熟前後で比較すると、直径約10マイクロメートルの柔細胞と2マイクロメートル程度の透明な粒子が前者で観察された。後者では柔細胞のほか、柔細胞と同程度の寸法を有する無機物質の存在が、偏光を使うことによって（結晶性物質のみが光る）確認されたが、この粒子はシュウ酸カルシウムと考えられた。標準的な和紙作製の工程に従って紙を作

製した。紙打ちを行って(木槌で打って)乾燥しただけのコウゾ繊維試料を観察したところ、繊維間に膜状物を確認することができた。偏光下では暗く見えたことから、セルロース(結晶構造を有する)ではなく、柔細胞が破裂して流出したデンプン及びヘミセルロースであると考えられた。この膜は透明な均質フィルムではなく柔細胞の中に含まれている直径1~2マイクロメートル程度のデンプン粒子らしきものが混在していたことから、膜状物は紙打ち工程中の柔細胞の破裂によって形成されることがほぼ結論できた。紙打ち後に紙出し(網に繊維を入れて流水で洗う工程で灰汁の残りや柔細胞が除去される)の工程を経たものは、ほとんど膜状物は観察されないこともこれを支持していた。

6 紙分析科学

6.1 紙文化財の分析方法(非破壊)

紙の物性として、非破壊で測定可能な方法のみが許される。質量、面積、厚さ、密度などの基本物性の他、光学試験(白色度、不透明度、光沢度、赤外線スペクトル)も可能である。分光分析の中で、紫外線スペクトルはわずかながら破壊の可能性があり、またX線の利用(回折と元素分析)も強度が高いため限定的となる。非接触の観察と写真からの分析は非破壊でありながらかなり詳細に紙の性状がわかる。また、破壊しない程度の弾性率(堅さ)の測定は可能であるが、破壊を伴う力学的試験は行えないなどの制約がある。

6.2 和紙の抄紙技法と繊維配向の関係

6.2.1 手漉きの動きと繊維配向

伝統的手漉き技術は、抄紙ワイヤに相当する簀(す)の上での紙層形成の方式により、溜め漉き法、流し漉き法、澆紙法などに分類される。溜め漉きは、名前の通り紙料を簀桁(すげた)に溜めてからその簀桁をまっすぐ上に持ち上げて脱水させる抄紙法である。古代抄紙技法は、現代の流し漉きではなく溜め漉きから始まった可能性が高い。再現実験により古文書料紙の繊維配向からその当時の抄紙技法の推定が可能となる。

6.2.2 手漉きのやり方と画像解析

コウゾの繊維を1日水に漬けたあと、PFIミルで叩解し、トロロアオイの根を1日水につけて得た粘液を加えた。①溜め漉き(簀桁を紙料に入れてそのまま持ち上げる)、②流し抄き+溜め抄き(1層目の紙料を入れてから簀を傾けて流した後、さらに紙料を入れて溜め抄き)、③流し抄き(1層目も2層目も簀桁を傾けて流す)の方式で抄紙を行った。乾燥後表裏面の顕微鏡写真から繊維配向の強度と向きをフーリエ変換による画像解析法によって計算した。

6.2.3 簀の動きと繊維配向との関係

溜め抄き(Still)は表裏とも繊維配向がなく、流し抄き+溜め抄き(Flow and still)では、簀に当たるの面が比較的弱く配向し、上の面は配向がなかった。流し抄き(Flow)では、どちらの面も強く配向していた。配向がある場合、簀の面の配向が強かったが、その理由を次のように推測した。1層目は、紙料の流れの中で配向した繊維の一端が、脱水が速いために簀に接地したあと、流れとともに他端が引っ張られるように伸ばされるため非常に配向しやすい。

2 層目は、簀を揺らしながら繊維の一部を沈降させたあと、残りの紙料を流すが、脱水が遅いために流れの中で配向した繊維のほとんどがそのまま捨て水として排出される、と考えられる。簀の面の配向強度が必ず強くなるので古文書の面の判別に使える。なお、配向の角度はいずれも 90 度（漉き手から見て前後方向）であった。非破壊画像解析である繊維配向分析によって簀桁の動きから見た過去の抄紙技法を推定することが可能となった。

6.3 繊維配向から推定する書状の習慣 [江前敏晴, 2006; 韓允熙, 江前敏晴, 高島晶彦, 保立道久, 磯貝明, 2010]

6.3.1 重紙（かさねがみ）

書状の習慣として本紙が 1 枚で足りた場合でも白紙のもう 1 枚を重ねて出すのが礼儀と現代でもよく言われる。かつては、書状は 2 枚の紙を重ねた状態で手に持って執筆されていたことが知られているが、このような書状の形態を"重紙"と呼ぶ。書きやすいように紙をピンと立てるには 1 枚よりも 2 枚重ねた方がはるかに楽であるためこのようにし、現代の重紙はこのような執筆上の便宜から来た習慣の名残であろう。

1.1.1 和紙の表と裏

重紙は、同じ面を揃えた紙のストックから 2 枚まとめて取る（二枚取）のが普通で、平滑な板目（いため）面から書き始め、2 枚目の裏紙に移るときは重ねたままひっくり返すので、裏紙では粗い方の刷毛目（はけめ）面が書記面になると考えられている。板目面は紙を乾燥させるときに干し板に接触していた面で年輪の跡が残り、その反対側に紙をなでつけた刷毛の跡が残るので、それらの痕跡があれば面の判別ができる。京都にある禅宗寺院大徳寺が保有する大徳寺文書の重紙書状すべてについて板目と刷毛目の有無を観察した結果、"二枚取"が 141 点で、背中合わせとなる"逆取"は 13 点という割合であった。繊維配向を調べれば、このような重紙書状の習慣をさらに詳しく知ることができる。表 2 は大徳寺文書の重紙書状の一部について、本紙及び裏紙の書記面及び非書記面の繊維配向の度合いを調べた結果で、度合いの大きい面、すなわち簀肌面の数値を太字体で示してある。文書番号 593-1 の試料は板目／刷毛目の痕跡を目視で観察できなかったが、繊維配向の度合いから簀肌面（通常は板目面と同一面）が同じ側を向いていることから二枚取と判断した例である。また目視観察から二枚取と判断したものの多くが本紙書記面＝板目面かつ裏紙非書記面＝板目面であるが、繊維配向の度合いによる判断ではそれぞれが簀肌面であるとは限らない。例えば文書番号 247-1 の試料ではいずれも反対側が簀肌面になっている。簀肌面＝板目面となるのが通例であるがこのような反対になることもある、と現代の漉き手の方たちも言われている。このような逆干（ぎゃくぼし）と判断できる場合、重紙の取り方の欄に*印を付し、どちらの紙が逆干かも併せて示した。紙の表裏は、紙の製造から書状として使用されるまでの過程で、少なくとも簀肌面／捨水面、板目面／刷毛目面、書記面／非書記面、の表裏が生じる。料紙の物理的な表裏として定量的な測定とそれに基づいた判別ができるのは高繊維配向面／低繊維配向面だけであるが、簀の上での繊維の流動を考慮すればそれぞれ簀肌面／捨水面にほぼ間違いなく一致する。板目面／刷毛目面の判別は不明であることも多く、また簀肌面又は書記面との関係から推定することも確実ではない。したがって書き手が書記面を選択する場合の習慣を考慮する上で繊維配向測定することは意味がある。

引用文献

Higashijima K., Hori, C., Igarashi, K., Enomae, T., Isogai, A., (2012). First aid for flood-damaged paper using saltwater: The inhibiting effect of saltwater on mold growth. *Studies in Conservation*, 57(3), 164-171. doi:10.1179/2047058412Y.0000000006

Kang Lee, Toshiharu Enomae, Masamitsu Inaba (2021). Comparison of Degradation Behaviour of the Painting Paper in Japanese Scrolls for Moist Heat and Sealed Tube Ageing Methods. *Studies in Conservation*. doi:10.1080/00393630.2020.1846931

韓允熙, 江前敏晴, 高島晶彦, 保立道久, 磯貝明. (2010年11月20日). 中世大徳寺文書に見る和紙の表裏と書状の習慣. *日本史研究*(579), 57-72.

江前敏晴. (2006). 繊維の並びが解き明かす古文書和紙の素性と書状の習慣. *科学*, 岩波書店, 76(2), 193-195.

東嶋健太, 和田朋子, 五十嵐圭日子, 江前敏晴, 鮫島正浩, 磯貝明. (2012年9月). 東日本大震災による津波被災紙中に存在する糸状菌の同定. *紙パ技協誌*, 66(9), 57-74.

保存修復科学センター 近代文化遺産研究室. (2016). 未来につなぐ人類の技 15/用紙の保存と修復. 東京都台東区: 東京文化財研究所. 参照先: <https://www.tobunken.go.jp/image-gallery/conservation/15/HTML5/pc.html#/page/56>

望月有希子, 逸村裕, 江前敏晴. (2018年5月12日). 図書館蔵書の酸性化に対する大気汚染の影響: 慶應義塾大学と筑波大学の図書館蔵書の酸性状態の比較. *日本図書館情報学会 2018年度春季研究集会要旨集*.