

和紙抄紙時に用いられるトロロアオイ澱粉の デジタルマイクロスコープ画像（速報）

澤山 茂

Digital Microscope Images of Tororo-aoi Starch Used in Washi Paper Making (Preliminary Report)

Shigeru Sawayama

I had the opportunity to visit the Craft Museum in the village of Udatsu Washi in Echizen City, Fukui Prefecture, a renowned area for traditional Japanese paper production. During the visit, we observed and discussed the papermaking process at several washi studios, encompassing the 9th Living National Treasure Ichibei Iwano Studio. We were able to hear firsthand insights from local craftspeople, perspectives that could not be obtained through literature alone. The primary objective of this field survey was not restricted to understanding the manufacturing methods of washi but also to explore the presence and significance of auxiliary materials such as adhesives (Tororo-aoi) and rice flour and to assess the meaning and technical value of these additives. We observed the Tororo-aoi stock solution used in handmade washi demonstrations at the Craft Museum and the suspension of ryogami during papermaking under a digital microscope. Tororo-aoi starch particles were identified in both samples, and their particle size distribution was explored. The findings exhibited that the largest Tororo-aoi starch particle size was $19.7\ \mu\text{m}$, with the particle size distribution concentrated in the $0\text{--}5.5\ \mu\text{m}$ range, similar to rice flour starch. Nonetheless, it is currently challenging to identify the origin of the starch based on particle size alone. While the presence of Tororo-aoi starch particles in Japanese paper was verified, the low concentration of Tororo-aoi and the diffuse reflection of light from the thick Japanese paper made it impossible to clearly identify the particles.

1. はじめに

日本の伝統的な和紙生産地である福井県越前市の和紙の里を訪問する機会を得た。本学国文学科佐藤悟教授を中心として、国文学研究資料館山本和明教授、松原哲子特任准教授、大井三代子本学文芸資料研究所客員研究員、同じく澤山が参加した。現地のコーディネイトは、山根折形礼法教場宗主の山根一城氏、石川製紙(株)の石川浩社長の尽力によった。現地では、第9代人間国宝岩野市兵衛工房をはじめ数カ所の和紙工房において紙漉き工程の現場での見学と意見交換を行った。文献調査などでは得られない現地での職人技術者の生のご意見を伺うことができた。

今回の現地調査の最大の目的は、和紙の製造法に限らず、粘剤（トロロアオイ）、米粉などの添加副材料の有無と添加する意味や技術的価値について知見を求めることにあった。

2. トロロアオイの高分子粘質物の機能と効果

トロロアオイは、「黄蜀葵(おうしょっき)」ともいわれるアオイ科トロロアオイ属の植物である。手漉き和紙の抄紙時に欠かせない粘剤の一つであるが、糊料、緩和粘滑薬、鎮咳薬等の漢方の生薬としても用いられる。トロロアオイの根には、親水性の食物繊維の一種であるガラクトチュロン酸を主成分とする複合多糖類が含まれており、通称「ねり」と称されている。トロロアオイの根を叩き潰して水に漬けると粘度のある液体が溶出してくるのでこの液を袋に入れて濾過して夾雑物を除き漉き舟に入れて原料と一緒に攪拌する。すると「ねり」は多糖類で繊維と同化し、一本一本の繊維を粘質物で包み込み、繊維は互いに絡みあうことなく分散する。漉き舟中の繊維は簡単に沈むことなく、長時間水中に浮くようになる。しかし、この「ねり」の粘度はいつまでも続かず、気温の高い夏場では粘度がなくなりやすいので、漉き舟に原料を補給するたびに「ねり」も補う。これらの高分子物質間の静電反発によって互いの位置を電荷の＋－の割合によって確保するため、適度な距離感で分子自身の位置を安定化している。

和紙の植物学的分類による学名は、楮 (*Broussonetia* × *kazinok*) (コウゾ)・

三桠(*Edgeworthia*) (ミツマタ)・雁皮(*Diplomorpha sikokiana*) (ガンピ)などの植物の韌皮(ジンピ)繊維が主原料である。漉き舟(スキブネ:和紙を漉く時に使う水槽)に、水と各種の紙繊維原料にトロロアオイ抽出液(天然の分散剤)を入れてよく掻き回し、漉き簾と漉き桁(二尺×三尺、約63×95cm)が一般的)を用いて漉桁に原料液を汲み込み、よく縦横に揺すって韌皮繊維同士を絡み合わせるような動作を行う。[2024 大川昭典] の、古代和紙の漉き方の再現を研究した研究によれば、粘剤であるトロロアオイは、平安時代の国の紙漉き場所であった紙屋院では、用いられておらずもっぱら紙の漉き方は「溜漉き」(和紙原料を漉き簾に汲み入れた後そのまま水切りを行う方式)であったと考察している。従って極薄手の和紙を得ることは困難であったと思われる。

3. 和紙抄紙の技術と粘質物の効果

流し漉きという漉き方は、ほぼ3段階の動作に分かれている。1)初水(うぶみず):少量の原料を含んだ水を救い上げ、すばやく漉き手の向こう側に流して捨てる操作を3~4回行い、漉き簾の表面を形成する。2)調子:次にやや多めに原料を汲み取り、ゆっくりと縦横に漉き簾を揺する操作を3~4回行い、紙の厚さを作る。3)捨て水:目的の厚さが得られた後、1)と同様に少量の原料を汲んで漉き手の向こう側に流し様子を見る。(1~2回)。漉き簾上の原料を紙床(しと)に移動させ、紙漉きの動作が終了する。これまでの漉き舟中では粘剤であるトロロアオイの効果について[石川 1978]は次のような効果を指摘している

韌皮繊維が適度に水中に均一に分散し、1)から3)の操作を容易にするばかりではなく、原料の脱水を緩やかにして漉き簾の上に和紙の原型を形成する効果をもたらしている。その後、圧縮による脱水工程を経た後一枚ずつ乾燥板に張られ、しわを刷毛で延ばされ乾燥工程に至る。

トロロアオイ抽出液の濃度は0.02~0.2 g/L 程度とされており、和紙制作技術者は、漉き舟の温度を考慮して適宜トロロアオイの添加量を加減しているようである。トロロアオイの収穫期が10月以降であることと、粘質物の粘性挙

動に温度依存性があることが知られており、温度が高いほど粘性が失われる現象が見られることから、気温の低い冬場に紙漉きが行われる要因になっている。

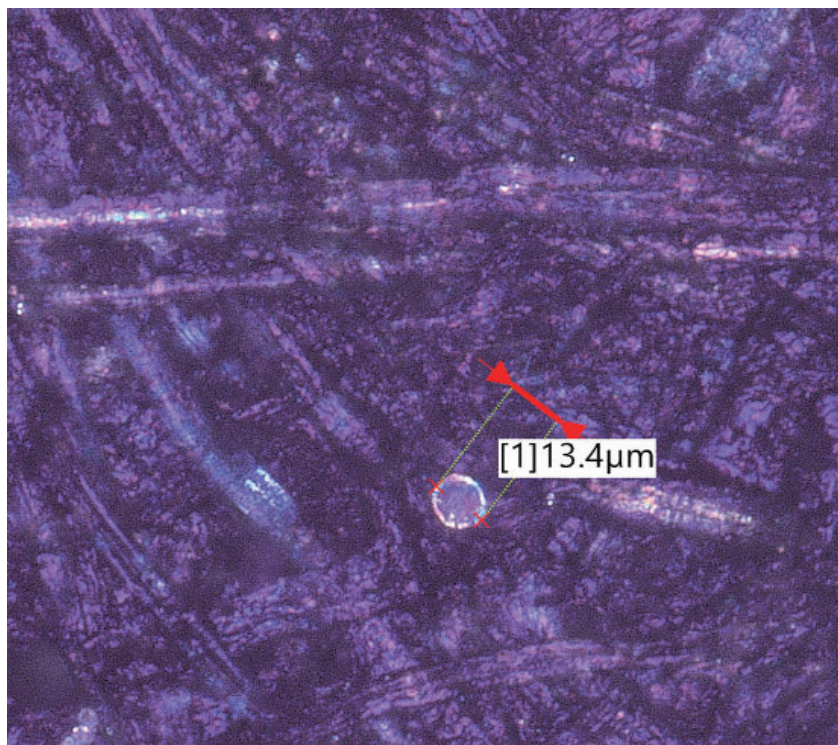
和紙抄紙過程におけるトロロアオイ粘質物の機能や効果を明らかにした先行研究は多くあり参考文献にまとめて記述した。詳細な研究報告が多いが、要約すると以下のである。トロロアオイ粘質物の機能は、1) 繊維の分散：トロロアオイの粘液は、水中で繊維を均一に分散させる。2) 繊維が凝集することなく、紙料全体に均等に分布させ、紙の強度と均一性を高める。3) 絡みの促進：靱皮繊維同士の摩擦を減少させ、滑りやすくすることで、繊維が絡みやすくなる効果が期待される。4) 沈殿の抑制：トロロアオイの粘性により、繊維が漉き槽の底に沈殿するのを防ぎ、紙料を均一な状態に保つ。5) 抄紙された和紙同士の接着を防止し、脱水。乾燥工程に至る過程で和紙の剥離を容易にする。

4. トロロアオイ由来のでん粉様物質の観察

東京文化財研究所の西田典由博士から恵与されたトロロアオイ根茎乾燥物の表層を摺おろし、表面を VHX-8000 高精細デジタル顕微鏡（キーエンス（株）社製）の同軸落射である偏光モードで観察した。同軸落射照明法は、2枚の偏光フィルタが組み合わせられており、一定方向に振動する光のみを透過させるフィルタである。偏光された光は、拡散反射すると偏光が崩れ、不規則な方向の移動になるが、正反射すると偏光したまま反射する。この原理を利用して、偏光された光を照射し、90度違う角度の偏光フィルタを通して受光することで、正反射した光のみをカットすることができる。この機能を使用してでん粉を観察すると明瞭な偏光十字が現れるので非破壊で生でん粉を同定することができる。偏光十字が見られなければでん粉の結晶構造が糊化やアルカリ変性など他の原因で構造が変化していることが想像される。

【図1】は、トロロアオイ根茎表面を x500 倍で鋭敏色板 (530nm) を光路に入れて観察した画像である。偏光十字を示すでん粉粒子が観察され、粒径は大きいもので 13.4 μm と計測された。根茎中に含まれるでん粉粒子は根茎の肥大

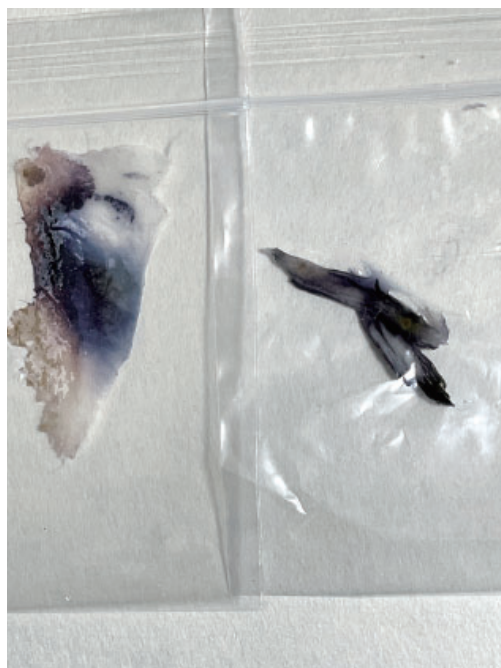
とともに成長する。今回恵与されたものはやや細身のものであり、でん粉粒子径も大きなものは観察されなかった。



【図1 トロロアオイでん粉粒子 x500、鋭敏色板使用 (一部拡大)】

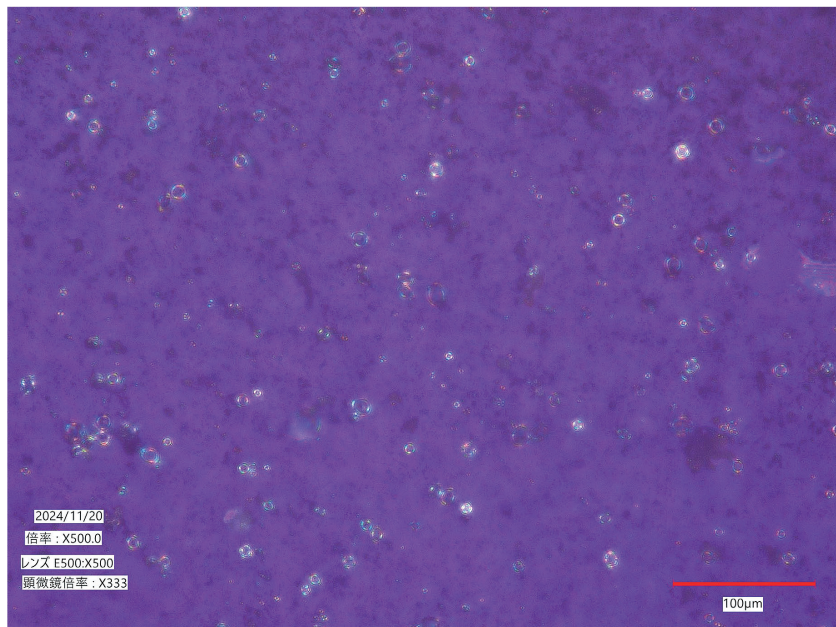
越前和紙の里である9代目人間国宝岩野市兵衛工房では、和紙原料処理と粘剤であるトロロアオイの実態を明らかにするため、よく肥大したトロロアオイ根茎を叩き潰した原料から抽出された粘質物の一部を採取させていただいた。さらに漉き舟中の紙料とトロロアオイが存在する液体も採取させていただいた。また、漉き舟底部の残留物を板干しした厚手の和紙(商品にはならない)もいただくことができた。トロロアオイの粘剤抽出液中には、でん粉が存在しているかをVHX-8000で観察した。植物体のでん粉のサイズは大きいジャガイモ

でん粉で長径 $60\text{ }\mu\text{m}$ 以上、小さいサイズの穀物でん粉が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることが各種文献において示されている。VHX-8000 によるトロロアオイ粘質物をガラスプレパラート上で観察したところ、楕円状で核（へそ）といわれる位置がジャガイモでん粉に類似していた。その後プレパラート上の試料は乾燥したため再度観察したところでん粉の3次元構造は失われ2次元平面での観察になり、一部楕円からほぼ円形画像で観察され、でん粉のサイズには変化はなく、2次元平面の計測値が得られた。また、漉き舟底部の残留物に、ヨウ素・ヨウ化カリウム溶液を滴下したところ、紫色の反応を示したことから、生でん粉の存在も確認した。でん粉は糊化やアルカリ変性を受けると赤紫に変化する。写真は、ヨウ素—ヨウ化カリウムによる呈色反応で、濃厚な紫色に呈色された。トロロアオイ生でん粉が確認された。これまでの課題がある程度解決されたのであるが、しかし、まだ課題は残されていると思われる。



【図2 漉き舟底部残存和紙中のトロロアオイでん粉のヨウ素—ヨウ化カリウム反応】

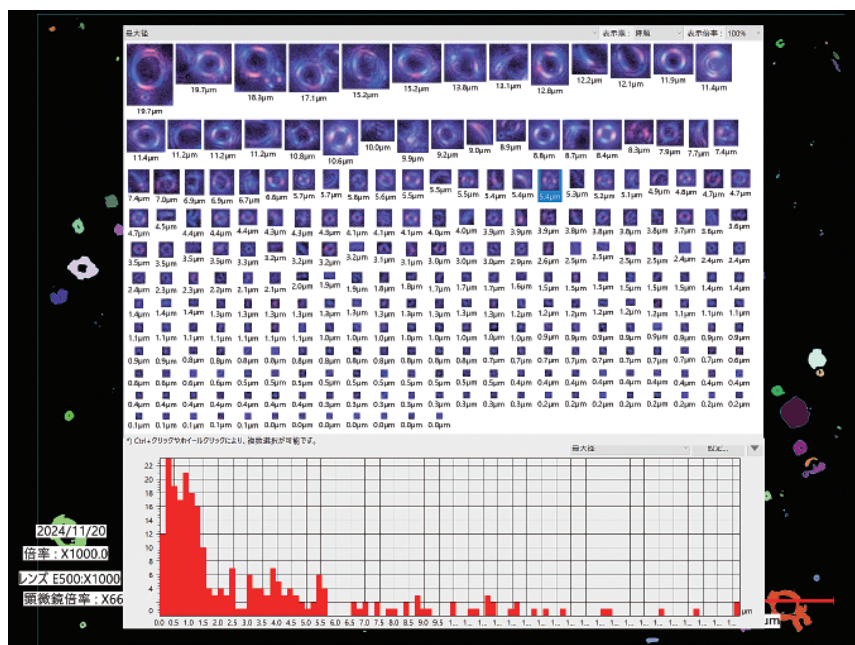
濃紫色の呈色が見られることからでん粉であることが確認できた。



【図3 トロロアオイ粘質物のでん粉粒子 x500、鋭敏色板使用】

工芸館で採取したトロロアオイ原液を VHX-8000 の同軸落射法で鋭敏色板 (530nm) を併用して観察した結果である。偏光十字が鮮明に観察されている。

トロロアオイでん粉の形態は、全てが完全な円形ではなく楕円形も見られる。この原図を VHX-8000 の自動面積計測 (粒子カウント) 機能を用いて詳細を表示させた。この機能は明度、彩度、色相の三要素の値を調整し、でん粉粒子の外観を細線法で図示した後自動的に最大径などを計測し粒度分布をヒストグラムとしてレポートする機能である。計測に使用された全ての画像と最大径を図4に示した。



【図4 x1000で観察したトロロアオイでん粉粒子の形態と粒度ヒストグラム】

自動面積計測（粒子カウント）機能を用いてトロロアオイでん粉の最大径順に並べた結果とヒストグラム画像を合成した。VHX-8000の偏光フィルタ機能を用いると、でん粉の存在だけではなく、和紙原料の結晶構造を反映することをすでに報告した。すなわち植物分類上クワ科に属するコウゾの韌皮繊維とチンショウゲ科に属するガンピ、ミツマタ韌皮繊維の偏光観察に大きな表面観察結果が見られる。これらのことは、先行研究からは情報を得ることができなかったが、非破壊で韌皮繊維の結晶構造に由来すると思われる色調変化を定量解析ができれば和紙原料の混ぜ渡し割合の判明も将来可能になると考えられる。

筆者らの室町時代に書写された源氏物語の古筆観察から、和紙の表面には大量の添加物である米粉様の存在が確認されている（観察条件は墨部）。しかし、今までの観察結果からは米粉由来のでん粉なのか、他の添加物由来の物質であ

るかについて、デジタル顕微鏡による非破壊観察では同定することは困難であった。しかし、一例として、上述のような粒子計測機能があることを応用し、トロロアオイ粘質物のでん粉粒子の形態を観察し、画像処理してでん粉様物質の追跡を行った。その結果、最も大きなトロロアオイ粘質物中粒子径は $19.7\mu\text{m}$ であった。粒度分布は $0\sim 5.5\mu\text{m}$ に集中しており、米粉でん粉に近似しており現在のところ粒子サイズのみからは、でん粉の起源を特定することは難しい。

越前紙漉き図絵によれば、一晩水に漬けた米を一粒ずつ石臼に入れ入れ米粒と水を少量加えながらゆっくりとした操作で米粉汁を作るのが越前の女、子供の仕事とも言われていた。木綿布で濾されて和紙製造時に添加されていた。和紙の強度増強、白度増加、和紙重量の増加などの利点に寄与していたと考えられる。欠点としてはシバンムシなどによる虫害によって和紙が損傷する。越前の現代和紙には米粉の添加は行われておらず、高い光沢度と平滑度、白色度、不透明度、インキ受理性のためカオリン：カオリナイト ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) の添加が行われているようである。トロロアオイ粘質物は、抄紙原料の分散を均一にする高分子物質に備わっている水溶液中の高分子同士の静電反発による靱皮繊維の分散作用に寄与しているものと思われる。

最期に、卯立越前和紙の里で取材やサンプル採取、貴重な紙料を拝見させていただいた方々、コーディネートしていただきました皆様に感謝の意を表します。

参考文献：

- [松前睦郎 1952]「和紙製造用ネリに関する研究 (第一報)」、パルプ紙工業雑誌、121-128
- [猪川三郎、後藤良造 1955]、「手漉和紙に関する研究 (第2報)」、「ネリ」のコロイド性について」木材研究：京都大学木材研究所報告 14号、50-57
- [町田誠之 1963]「製紙の歴史より見たガンピ紙について 一化学者のみた粘剤の沿革」- 紙パ技協誌、17、143、115-120
- [石川久雄 1978]「トロロアオイ粘質物が和紙抄造に及ぼす効果について、紙パ技協誌、32 巻 7 号 p. 389-395

- [上嶋 晃智、後反 克典、大堂 充、小泉 貞之 2015]「和紙製造時に使用される粘性物質及びその保存に関する研究和紙製造時に使用される粘性物質及びその保存に関する研究」、*J. Technology and Education*, Vol.22, No.2, pp.41-48
- [大川昭典、増田勝彦 1981]「製紙に関する古代技術の研究」、保存科学、第 20 号、43-56
- [澤山茂 2024]「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—」、実践女子大学文芸資料研究所、年報第 43 号、1-14
- [澤山茂・横井孝 2024]「手漉き和紙、とくにコウゾの製造から紙へ—デジタル顕微鏡でどこまで分かる—「紙のレンズがひらく古典籍・絵画の世界」勉誠社、2024 年 11 月）
- [錦織錦 織禎徳、上野 正、町田 誠之 1963]「和紙抄造用粘液に関する研究」、紙パ技協誌、501-504
- [上嶋 晃智、後反 克典、大堂 充、小泉 貞之 2015]「和紙製造時に使用される粘性物質及びその保存に関する研究」電気化学会技術・教育研究論文誌、41-48

付記：

本稿は、文部科学省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—」（研究課題番号 23H00604 研究代表者澤山茂）による研究成果の一部である。

澤山 茂（東京農業大学名誉教授・文芸資料研究所客員研究員）