

## 紙の科学余話

東京大学 大学院農学生命科学研究科  
生物材料科学専攻 製紙科学研究室  
江前敏晴

### 1 はじめに

紙の特性を科学的に探索することは、大学や企業の研究者にとっては日常の業となっている。しかし、紙の研究者の方々が紙を科学的に見るようになるのは、ご自分にとっていつ頃からであろうか。多くの方は大学の専門課程あるいは企業の研究所に入ってからと思われる。自分の場合も確かに大学4年のときに東京大学のパルプ学製紙学研究室(当時)に入室してからである。しかし、なぜそのときに紙パルプ関係の分野を選んだのかというのを思い出してみると、小学校6年のときに行った夏休みの自由研究にさかのぼる。

そのときのテーマは「紙の吸水速度」であった。現在も私の研究テーマの1つとして吸水関連のことを扱っているので、これに関してキャリアだけはやたらと長い。学習雑誌からヒントを得て自由研究を始めたが、実験手順のほとんどは自分で工夫しながら行った。記憶するところでは次のように測定した。新聞紙、ノートの紙、ちり紙など身の回りにあった数種の紙を幅3cm程度に切り出す。コップにほぼ一定深さとなるように水を入れ、コップのふちに紙片の上端を折り曲げて引っ掛けた。当時はストップウォッチもなく目覚し時計の秒針を見ながら、紙を入れてから一定時間経過後に吸い上がった水の高さをコップの横に立てた定規と見比べて測定した。今思えば、定規は紙片のすぐそばには置けないので吸い上げ高さはかなりいい加減な目分量となる上、湿度条件の制御もなく水の蒸発を防ぐような工夫すらもしていなかった。小学生であるから不正確極まりないのは致しかたない。また今なら紙の縦と横で比較したら面白いだろうと考えるが、紙に方向性があることに当時は全く気づいていなかった。結果は、新聞紙が意外と吸水が速かったこと程度しか覚えていないが、棒グラフくらいは描いて比較していたように思う。紙パルプ技術協会の紙パルプ試験規格委員会で一昨年度クレム吸水度を審議した際に、その試験方法を読みながら、自分が子供のときにやった実験と原理的にはまったく同じ方法であったため苦笑してしまった。試験規格は誰でもが簡単な装置で測れるということが確かに重要であり、その素朴さにじみ出ているような試験法である。なお、クレム吸水度は2004年3月にJIS P 8141 紙及び板紙 - 吸水度試験方法 - クレム法 として制定・発行された。

それにしてもなぜそのとき自分は紙を自由研究のテーマに選んだのだろうか。思うに、身近にありながらティッシュのような薄くて柔らかいものから牛乳パック(当時はテトラパックだけしか出回っていなかったと思う)のような堅いものまで種類の異なった試料が簡単に手に入る、切って大きさを変えたり形状を自由に変えたりできる、やろうと思えば自分でも手作りできる、吸液性・吸湿性がある、白くて不透明のものから半透明のものま

である、といったような入手しやすさと変化に富んだ特性を持つ材料であるのが紙の魅力だからと言えよう。この魅力は現在の子供たちも同じようである。私が紙の博物館で毎年夏に開いている子供向けセミナー「やさしい教室『楽しい紙の科学』」のときにある母子から質問を受けた。紙に色々な液体を吸収させてその速度を測ったところ、お酒でやってみると水よりも速いようだが、なぜか、と聞かれた。回答の前にまず自分が子供の頃にやった実験と同じような実験をしていることにこれまた笑ってしまった。この回答は、おそらくお酒に入っているアルコールが表面張力を下げ、紙を濡れやすくしているからだと考えられる。そう考えれば、ビール<ワイン<日本酒<ウイスキーの順でどんどん吸収が速くなりそうだが、私自身は試したことはない。子供たちがこのような実験を家庭で繰り返すと、お父さんからいい加減にしてくれ、と言われるかもしれない。

さて、前述の子供向けセミナー「やさしい教室『楽しい紙の科学』」であるが、そもそもきっかけは、2001年の夏に私が大学で研究の対象としている「紙の科学」を、子供たちにも楽しみながら理解してもらおうと、東京都北区王子にある紙の博物館<sup>1)</sup>にお願いしてボランティアで開かせもらったのが最初である。以降継続して毎年8月に開催しており、これまでに3回行った。数種類の実験を組み合わせ、1回40分程度のスケジュールで行っている。来場者の子供たちに手伝ってもらいながらデモンストレーションを行っているので、実際には1時間前後かかってしまうことも多い。最初の第1回と第2回の教室での実演内容については、製紙連合会発行の雑誌「紙・パルプ」に掲載<sup>2)</sup>させていただいたので、本稿では2003年8月の第3回目についてご紹介したい。

## 2 実演した実験について

### 1.0 準備

紙の博物館には、紙抄き場以外の実験設備がないため、集会スペースの演壇の前に長テーブルを横に3つ並べてビデオ顕微鏡などの機材を置いておいた。実験に際しては、まず液晶プロジェクタでスライドを投影して手順を説明した。実験後はなぜそのような結果になったのかを解説した。最後の解説がないと実験の面白さが理解できないこともあるので、前2回では省略していた詳細な説明を第3回では重視した。またすべての実演では、来場者の子供たちに機器の操作や実験の操作を行ってもらった。

### 1.1 紙の概要

紙の製造方法について簡単に説明した。木材からのパルプを原料としているが、大きな丸太ではなく間伐材や建築廃材などを用いていることを説明した。最近では古紙が原料の60%を占めていることも付け加え、紙パルプ産業は決して環境を破壊する産業ではないことを言い忘れてはいけない。チップや漂白パルプシートの実物を見せた。ここでの使用機

<sup>1</sup> <http://www.papermuseum.jp/>

<sup>2</sup> 江前敏晴, 次世代をになう子供たちへの“紙の科学”のススメ - やさしい教室「楽しい紙の科学」@紙の博物館 -, 紙・パルプ, 製紙連合会発行, 2003年6月号 No. 657, p7-14

材は、液晶プロジェクタ、ノートパソコン、パルプ数種、チップ。

## 1.2 紙の観察

ビデオ型の顕微鏡で紙の表面を観察した。カメラを近づける部分は子供に手伝ってもらった。顕微鏡の映像は、ビデオキャプチャケーブルを介して直接スクリーンに映し出した。針葉樹のさらしクラフトパルプシートを裂いてみると裂け目にある一本一本の繊維がよく見えてわかりやすかった。ノートの紙は、表面がかなり平滑でサイズプレス処理を施しているため繊維の判別が難しかった。漫画雑誌の本文に使われる印刷せんか紙（再生紙）も観察した。印刷された文字を見ながらさらに拡大すると繊維の大きさが理解できる。使用機材は、ビデオ型顕微鏡、スタンド、パルプシート、ノートの紙、漫画雑誌（再生紙）

## 1.3 紙と水(1) - 紙のポンプ

ここから紙と水に関する話題に入る。紙は吸水性が高く、毛細管吸収の原理で水を吸い上げることを示す実験を行った。水のいっぱい入った足の長いワイングラスと空の細めのコップを並べて用意する。水に手を触れることなく、一枚のティッシュペーパーで水を全て空のコップに移す方法はありませんか、と問いかけると、一部の子供たちはわかったようである。前に出て来てもらった子供にティッシュペーパーを渡し、巻き寿司のように丸めてグラスとコップの間を橋渡しするように引っ掛けてもらうと、毛細管吸収により水はティッシュペーパーの内部を通してグラスのふちの頂上まで吸い上がり、次いで下降を始めた。水が下端まで達するとコップの壁に沿って流れ落ち始めた。ここまでは、3分程度しかかからない。あとはサイフォンの原理で水はどんどん移っていった。遠くから見ても移動がわかるように赤インクなどで着色してみた。見た目がきれいになる予定であったが、赤インクを入れすぎたのでちょっと汚く見えてしまった。薄めでも十分確認可能である。水はそれほど速くは移動しないので、結果は他の実演が終わった最後に確認した。写真1は最後に確認したとき様子である。この実験のポイントは2つのガラス容器の落差を十分大きくすることであろう。落差が大きければ移動は速い。ラボジャッキで片方を持ち上げることもできるが意図的な操作を避けようと思えば本番では使用しなかった。だが落差を大きくすれば速く移ることも科学的で面白いかもしれない。実演前に予備実験で紙の種類を変えてみた。紙はサイズの効いた上質紙でも可能だが、完全に濡らしてから始めても空隙が小さいため水の移動は極めて遅かった。使用した機材は、足の長いワイングラス、細めのコップ、ティッシュペーパー1枚、赤インク。



## 1.4 紙と水(2) - 紙が踊る

紙は、水により膨潤するが、オイ

写真1 着色した水が30分ほどでこの通り移動

ルには膨潤しないことを示す実験である。これを何か動きのある実演になるよう考えた。無サイズのクラフト紙である紙ナプキンを使ってこよりをまず 3 つ作った。この段階ですでに子供に手伝ってもらったが、小学校 1 年であったためやや難しかったらしく、結局私が作る羽目になった。なぜこの子の学年がわかったかという、子供たちに助っ人を頼んだとき誰も手を上げなかった場合に備えて連れてきた私の息子だったからである。こよりの動きを撮影したときに見やすくするため、それぞれを黒いゴム板の上に置いた。あらかじめ用意しておいた 3 種類の透明な水をそれぞれスポイトで滴下し、紙の様子を観察した。3 種類の水とは、水、(実際は水ではなく)シリコンオイル、ポリビニルアルコールの水溶液(文具の糊と同じ成分)である。結果は、は速く踊り、は踊らず、はゆっくり踊った。「踊った」というのは、水が繊維間の水素結合を切り、また繊維を膨潤させることにより繊維同士が押し合い、その力でよりが戻って動き出したことをそう呼んでみた。シリコンオイルは速く吸収するが、膨潤や繊維間結合には関与しないため形態の変化を起こさない。ポリビニルアルコール水溶液は粘度が高いため吸収が遅く動き出すのも遅かった。こよりの動きは比較的小さく平面的であるので客席の後ろにいる来場者にも変化がわかるようにパソコンに USB で接続する小型のビデオカメラで撮影し、スクリーンに投影しながら行った。このカメラは PC カメラなどと呼ばれており、ビデオチャット(テレビ電話)などに使われるもので、安価なものは 3000 円程度である。手元にある小さなものを大きな会場で見せたいときに便利である。写真 2 は

の水を吸い込ませたときの画像である。本稿では動きをお見せできないが、ホームページ(URL は文末に)ではビデオ画像を公開しているのでご覧いただきたい。使用機材は、黒色のゴム板、紙ナプキン数枚、水 3 種類、スポイト 3 個、PC カメラ、スタンド。



写真 2 紙ナプキンで作ったこよりは吸水すると踊りだす

### 1.5 紙と水(3) - 紙が溶ける

水にさっと溶けてしまう面白い紙を、機能紙の 1 つとして紹介する実験を行った。水に溶ける紙があるのを知ってますか、と問いかけるとまず間違いなく「トイレトペーパー」という答えが返ってくる。しかし実際には「溶ける」ではなく「解ける」であり、紙が個々の繊維にばらばらに分かれるだけである。一般にトイレに流してよい紙はトイレトペーパーだけとの表示をよく見かけるので、それは本当に溶けるからだと誤解されているようである。一方、カルボキシメチル化したセルロース(CMC)は本当に水溶性であり、人体にも安全なため粘度の調整や食感のために練り歯磨きやアイスクリームなどにも使用され

る。置換度の低い繊維状の CMC でも親水性が高いので完全に水可溶ではなくても水によく分散する。また通常のパルプ繊維に CMC を多めに混合して抄紙すれば水中で繊維がよく分散する。このようにして作られたのが水溶紙である。子供 3 人にそれぞれ、水溶紙、トイレトペーパー、ノートの紙の紙片を渡し、水の入ったコップにそれぞれ同時に入れてもらった。水溶紙はすぐに膨潤し出したが他の 2 つは変化がない。しばらくしてガラス棒でかき混ぜてもらったところ、水溶紙はすぐに繊維がばらばらになった。トイレトペーパーはよく吸水してある程度断片化するが、シート状のままである。ノートの紙は形態にほとんど変化がない。この水溶紙は全繊維が完全に溶解するわけではないが、意外にも解けにくいトイレトペーパーに比較すれば、解けるのはあっという間であった。図 1 に示すカルボキシメチル化の説明を行ったものの子供にはとても理解できないであろうが、見た目の差がはっきりしていてわかりやすい上に、トイレトペーパーに対する自分の認識が打ち砕かれたインパクトがあったのではないかと思う。使用した機材は、水溶紙、トイレトペーパー、ノートの紙、プラスチック製コップ 3 つ、かき混ぜ棒 3 つ。

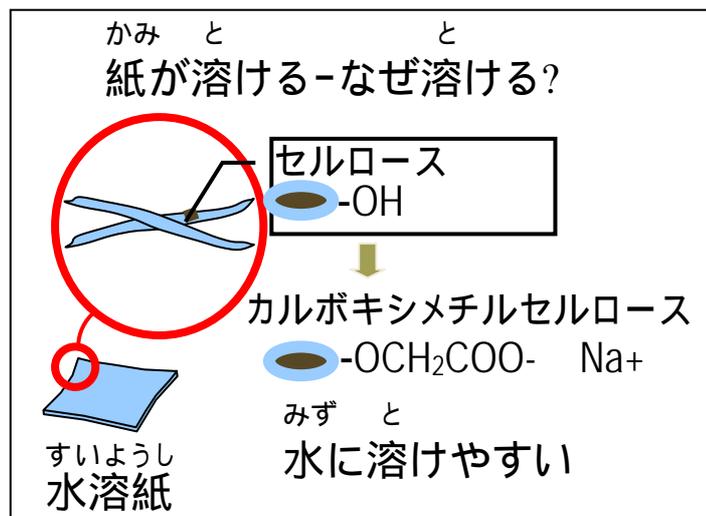


図 1 カルボキシメチル化した繊維の水溶性を説明

### 1.6 紙と光 - 紙の透視

反射光に対する透過光の比率が上がってコントラストがつくことにより、2 枚の紙を隔てた向こう側の字が見えるようになることを示す実験である。これは、かなり前にテレビ番組の「笑っていいとも」の中でタモリが手品として実演し、客席が沸いていたネタをアレンジしたものである。手品といっても何も仕掛けはない。子供に前に出てきてもらい、コピー用紙に何か文字を書いてもらう。これを、あとで透視してもらう別の子には見えないようにして何の字を書いたかわかるように客席にはっきりと見せる。次にこの紙を 1 回折って、字の上に紙 1 枚分が乗るようにしてから小さい封筒に入れてもらった。さらにこの封筒を一回り大きい別の薄青の封筒に入れた。結局字の上には 3 枚の紙が載っていることになる。この辺の紙の枚数や封筒の色などは、事前に適切な条件を検討しておかなくてはならない。この封筒をイーゼルに立てかけた乳白色のプラスチック板上に置いてもらい、上から眺めても字が見えないことを確認する。このとき封筒を手で押さえて紙同士をしっかりと密着させても見えないことを示すのが 1 つのポイントである。さて、ここからである。魔法の覗きめがねをおもむろに取り出した。といっても、実は単なるトイレトペーパー

の芯である。これを透視役の子供に手渡して封筒の文字が書いてある場所付近を覗いてもらう。覗き方は、筒の一方を目にあて、他方は封筒の上にしかりと置いて外部の光が入らないようにして見てもらう。しばらくして字が見えたようで、何と書いてありますか、と尋ねると元気よく「『B』と書いてあります。」と答えてくれた。透視役は私の息子でなくてよかった。見えても読めないか、「変な 8」と答えそうだから。さて、普通に上から見てもよく見えなかった字が何とトイレトペーパーの芯で覗くと何と見えるようになるのである。こんな簡単なことで見えるのは、紙が光を拡散反射する特性と関係がある。図 2 はこの理由を説明する模式図で、文字を書いた紙を入れた封筒にはあらゆる方向から光が当たって反射または透過している。反射光の 1 及び 5 は、紙が白く見えることからわかるようになりに強く、一方裏面から照らされる光は一部封筒を透過するが 6 枚分の紙を通

てくるため非常に弱くなる。そのうち文字のある部分を通る透過光 2 は、文字がない部分の透過光 4 に比べてさらに弱い。結局、この封筒を正面から見たときに目に入る光は、文字のある部分が光 3 (反射光 1 + 透過光 2) となり、文字のない部分では光 6 (反射光 5 + 透過光 4) となるが、反射光 1 と 5 が強いため肉眼では光 3 と 6 の差をほとんど感じる事ができない。トイレトペーパーの芯で外光を遮断すると透過光 2 と 4 だけが目に入るの、弱い光といえどもそのコントラストははっきりしており、文字を認識できるわけである。乳白色のプラスチック板を使ったのは、適度な量の透過光が裏面から入るようになるため、完全に透明だと透けて見えてしまう可能性があり、完全に不透明な板では何も見えない。教室終了後に、何人かの子供たちが、本当に字が見えるのかどうか半信半疑でやって来てトイレトペーパーの芯で熱心に覗いていた。それに混じって是非見せてほしいと確認にやってくるお父さんもいた。写真 3 は

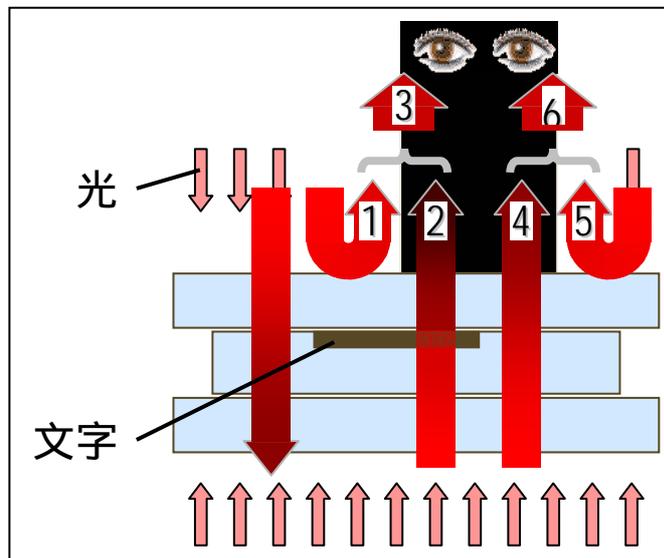


図 2 トイレトペーパーの芯で文字が見えるようになる理由



写真 3 教室終了後本当に透視できるかどうか確認するお父さん

その様子である。また、紙を透視する代わりにプラスチックフィルムでやろうとしても、光の散乱が少ないためうまくいかない。この透視実験は、紙ならではの材料特性を体感できるものと言えよう。やり方は多少違うが、厚手の紙の裏面に書いた文字は見えにくい。裏面に白い紙を当てると字がよく見えるようになる。手前から当たった光が反射して戻ってくる時にコントラストがつくためであり、裏面から入射する光が増えたのと同じことである。この現象も実演に使えるようである。使用した機材は、小型のイーゼル、乳白色の半透明プラスチック板、コピー用紙、封筒 2 種大小 1 枚ずつ、やや太目のマジック、トイレットペーパーの芯。

## 2 おわりに

やさしい教室「楽しい紙の科学」を開催するに当たり、紙の博物館の職員の方々には大変お世話になっている。なかでも学芸部長の丸尾敏雄氏には、打ち合わせ、機材、試料の準備などに大変ご協力いただいている。また、実演のアイデアや紙製品の準備は決して独力で行ったのではない。小杉博俊氏（㈱システムクリエイツ）には、紙風船で作るポップコーンや紙箱とポリ袋を利用した大きく飛び出して見える金魚鉢など、小さな子供でも楽しめるアイデアをご提供いただいた。吉村隆重氏（三島製紙㈱）には水溶紙を、西村光男氏（㈱リンテック）には紙鍋用紙をご提供いただいた。この場を借りて御礼申し上げたい。

毎年すべての実験を入れ替えるわけではないが、年に 3 つほどは新しい実験を取り入れている。1 年に 1 度とはいえ簡単な装置の試作をすることもあるので準備は決して楽ではない。日頃から紙に関する情報に注意を払い、実験形式で見せることができないかどうか常時考えるようになった。実演の台本を練るときには、紙がもっている、単なるトリビアではない何らかの特性を、参加していただく人たちに理解してもらえよう心がけている。また、教室の終了後に来場者から実演内容とは関係のない質問を受けることも多く、それが次回の教室のヒントになることもある。

過去 3 回の実演内容の詳細や当日の様子を記録したビデオをホームページ<sup>3)</sup>上で公開しているので是非ご覧頂きたい。第 4 回にあたる今年の教室は 8 月 21 日(土)に開催することになっている。11 時 30 分からと 14 時 30 分からの 2 部に分けて行うが、内容は 2 部とも同じである。

## 3 興味をもたれた方へ

ところで、本稿を読まれた特に若手技術者や研究者の方々に、御自分も何かやってみたいと思われる方はいらっしゃるだろうか。こんな実演のアイデアを持っている、というような方でも結構で、いっしょに活動してもよいという方は是非江前までご連絡いただきたい。ゆくゆくは NPO 法人などとして組織化し、東京・王子の紙の博物館だけでなく各地の紙の博物館や科学館、あるいは小中学校の特別授業を請け負ったりできれば素晴らしいと考えている。

<sup>3</sup> [http://psl.fp.a.u-tokyo.ac.jp/hp/enomae/Kids' seminar/](http://psl.fp.a.u-tokyo.ac.jp/hp/enomae/Kids%20seminar/)