

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

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

やさしい教室「楽しい紙の科学」は、筆者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うために、東京都北区王子にある紙の博物館¹において開いているものです。大学で使用している実験機器類を利用したり、手作りの実験装置を用いたりして、紙の性質がわかるような実験を工夫して実演しています。2001年8月4日(土)に第1回を、2002年8月3日(土)に第2回を開きました。毎年夏休みに開催しており、今年は2003年8月23日(土)に第3回を開催する予定です。対象は小学生低学年以上で、毎回50~100人前後の親子連れの方に来て頂いております。夏休みの自由研究などの参考に紙の博物館を訪れる子供たちも多いので、何かそのヒントになるような実験も取り入れています。

若い世代に、紙の科学を知ってもらおうと考えたのは、紙が非常に身近な素材でありながら小中学校においてもその原料や製造法が教科書等で解説されることは少なく、特に紙という材料の特性を科学

的に調べるといことは、理科の時間でも全く取り上げられていない事情があったからです。紙のリサイクルや産業としての製紙は、環境問題や産業の一環として取り上げられることはあるでしょうが、材料学的な視点で捉えられることはほとんどないでしょう。実用的な材料の科学を知ってもらうことは、科学を身近に感じる近道だと思います。

私が10年ほど前に2年間滞在していたアメリカのメイン州立大学の化学工学科は、製紙関係のあらゆる学問を扱う学科ですが、高校生を対象としたオープンハウスが毎年夏に行われていました。パイロットマシンのあるプラントの見学や、紙の作り方の講義、大学における研究紹介、実験装置の見学などを高校生が十分理解できる内容に噛み砕いて説明していました。筆者もそのときに環境制御型走査電子顕微鏡や触針式の表面粗さ計の説明を行い、アメリカの高校生が熱心に聞き入る姿を今でも覚えています。大学の教授が自主的に開くというよりは、パイロットプラント専属の技術スタッフが中心となって行う施設公開の行事ではあるものの、これから大学に入学する高校生にとっては、大学での研究内容の一端を知り、また産業の入り口を見る絶好の機会でもあります。

日本の小中学校では、各種産業の工場見学などの社会見学は定着していますが、国立大学での高校生向けオープンハウスは、まだ非常に少ないと思います。大学の現状を見聞しないまま、受験指導を受けて入学し、学生が5月病となる原因の1つは、大学の広報活動の貧困さではな

¹ <http://www.papermuseum.jp/>

いかと感じています。

高校生などと言わず、もっと若い世代に向けて、自分が取り組んでいる研究分野のごく一部でも紹介し紙の科学を楽しく学んでもらえれば、紙への親しみも湧き、将来的には製紙関連の学問を究め、製紙関連の仕事についてくれる可能性もあります。そのような期待もあり、筆者から紙の博物館にお願いして、ボランティアでやらせて頂いております。また大学の人間が積極的に社会に向かってアピールすることも、これからますます重要なことになっていくと思われまます。

2 実演した実験について

2.1 第 1 回「楽しい紙の科学」

2001 年 8 月 4 日(土)

紙の博物館では実験設備がないため、演題の前に長テーブル 3 つを横一列に長く並べ、必要な器具類をそのテーブル上に並べておきました。液晶プロジェクタを利用してスライドによる説明をしながら、実験等のデモンストレーションを行いました。また、ビデオにより実験の様子や会場の反応を記録しました。その様子の一部を、ホームページ²にて公開しています。当日の実演内容などを順に記していきます。

2.1.1 紙の概要

紙が木材から取り出されたパルプ繊維によって作られることを説明しました。間伐材や廃材などを利用したり、植林したりしていることや、最近では最もたく

さん使われている原料は古紙パルプであることも忘れずに付け加えます。木材から取り出される繊維の形状や 1~3 mm 程度の長さであることを説明しました。ここでの使用機材は、液晶プロジェクタ (博物館備品)、ノートパソコン (自前で持込)。

2.1.2 紙の観察

ビデオ型の顕微鏡で紙の表面を観察しました。新聞紙、ティッシュペーパー、ノートの紙などを試料として取り上げました。新聞紙では、印刷された文字を見ながらさらに拡大してみたところ紙の繊維が見えてきたので、繊維の大きさと印刷された文字の大きさを比較できてわかりやすかったと思います。新聞の 1 文字の大きさは約 3.2 mm 角で、新聞紙を破いたときに毛羽立って見える原料の針葉樹パルプ繊維の長さと同程度であることが理解できました。

使用機材は、(株)キーエンス製ビデオマイクロスコープ VH-5910 (大学から持込)、ビデオ出力を、ビデオキャプチャボードを介してパソコン及び液晶プロジェクタに表示しました。

2.1.3 紙風船で料理

ここで紙の用途について、会場の子供たちに質問しました。「書く」、「包む」、「拭く」といった基本的な機能は、すぐに答えが返ってきました。それ以外にこちらで用意した答えは「遊ぶ」でした。子供たちが工作をしたりする材料としての使い方を想定してこの回答を期待していましたが、とうとう出てきませんでした。実は次の実演の道具が紙風船で、紙風船と電子レンジを使ってお料理すると

²

<http://psl.fp.a.u-tokyo.ac.jp/hp/enomae/Kids/seminar/>

いう遊び道具にもなっているためこの答えを用意していました。演台の上に置いておいた紙製スーツケースから、板紙製の CD パッケージを取り出しました。包装機能を持った紙製品のユニークなアイデアの紹介です。販促用に CD を店頭に並べる目的で考案された包装用品で、パッケージを広げると同時に中の CD が徐々に顔を出してくるものもあり、飛び出す絵本のような遊び心が感じられます。次に、ケースから紙風船を取り出しました。これを、おもむろに電子レンジに入れ、加熱をはじめました。紙を使った伝統的な遊び道具の代表である紙風船の説明をしながら、1 分ほど待つと、ポンポン音がし始め、レンジのドアの外から見ると紙風船が丸く膨らんできました。そして何やら香ばしい香りがしてきました。実は、ポップコーンを作っていたのです。あらかじめ、スーパーなどで手に入るポップコーンの粒を折りたたまれた紙風船の中に 30~50 粒程入れておき、500W で 1 分ほど加熱すると、次々とコーンが破裂して膨らみ、それが紙風船を膨らませます。調理後は、写真 1 に示すように、



写真 1 紙風船にコーンの粒を入れ、電子レンジで加熱するとポップコーンができる

吹き込み部分の穴を中心にバナナの皮をむくように半分だけ紙風船を開き、中にあるポップコーンを見せ、さらに順送りにして、ポップコーンを食べてもらいました。家庭でも簡単にできるこのお料理ですが、加熱しすぎると焦げるので、あらかじめ、何回か途中で止めて様子を見ながら適度な加熱時間を調べておく必要があります。

CD パッケージと紙風船で作るポップコーンのアイデアは(株)システムクリエイツの小杉博俊氏の御提供によるものです。使用機材は、紙風船、電子レンジ (博物館備え付け)、コーンの粒。

2.1.4 紙鍋で料理

次も紙を使ったお料理になります。上質の板紙を折り紙の本で紹介されている「籠」の形に折り水を半分程度入れます。化学実験用の三脚にセラミック金網を乗せ、その上にこの紙の籠を乗せます。写真 2 に示すように、アルコールランプに火をつけて、加熱を始めます。紙は燃えることなく、やがて湯気が上がりお湯が沸きます。使用した紙は、専用の紙鍋用紙ですが、水を通さず丈夫であればどんな紙でも大丈夫です。セルロースの熱分



写真 2 紙鍋でお湯を沸かす

解は、220 度くらいから始まり、完全に分解するのは約 350 度に達してからです。ガスコンロやアルコールランプの青白い炎は 1700 度くらいの高温ですが、中の水は 100 度以上にはならないため紙鍋用紙を冷却する効果があり燃え出さないのです。実演では沸いたかどうかを確かめるのが難しいので、温度計で温度を測ればよかったのでは、という指摘をあとで受けました。

紙鍋用紙の代わりに牛乳パックなどでも可能で、家庭のガスコンロの直火でも簡単に実験できますが、あまり火を強くすると、水に接していない部分の紙が焦げたり、燃え出したりすることもあるので注意が必要です。弱火で時間をかければパックの外側の一部は温度が上がって多少焦げますが、やがてブクブクと泡が出てきて沸騰します。旅館の夕食などで使われる固形燃料を用いた卓上コンロと紙鍋を使ってお料理すれば、風流ですね。

紙鍋の歴史は古く、江戸時代に誕生したと言われており、今でも湯豆腐や寄せ鍋に使われています。また、丈夫な和紙である奉書紙を濡らしてスズキや甘鯛など白身の魚を包み、天火などで蒸し焼きにした奉書焼という料理もあります。奉書紙はある程度焦げるものの完全に燃えることはありません。

紙鍋用紙はリンテック株の西村光男氏の御提供によるものです。使用した機材は、スレート板、アルコールランプ、三脚、セラミック金網、紙鍋用紙。

2.1.5 紙の力比べ

セロテープでつないだ 2 種類の紙を引っ張り合って力比べをします。紙の種類

及び縦横による強度の違いなどを実感してもらうためにやってみました。

実演では、まずコピー用紙を使って、縦方向に切り出した試験片と横方向に切り出した試験片で力比べしてもらいました。写真 3 の手順で行いました。あらかじめ幅 1cm 長さ 8cm となるようにあらかじめこちらで線を引いておきます (A)。お手伝いのために前に出てきてもらった子供たちに線に沿って切り取ってもらい、長手方向に接ぐ要領で、セロテープで巻くように貼り合わせます (B)。二人の子供に指でしっかり持って左右に引っ張ってもらいます。幅 1cm でもかなり力が要ります。結果は、通常横方向が弱く先に切れますから、縦方向の勝ちとなります (C)。繊維が並んでいる縦方向に強いことが理解してもらえました。

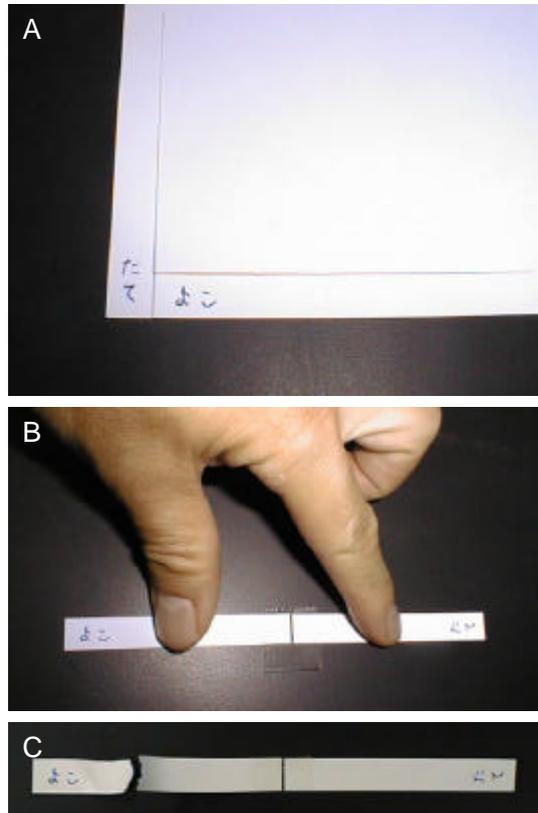


写真 3 紙の力比べで試験片を採取

次に、新聞用紙、コピー用紙、封筒（再生紙）について 1 対 1 で力比べをしてみました。異種の紙を比較する場合、坪量に反比例にした試験片の幅で採取してもらった必要があります。比引張強さが引張強さを坪量で除算することにより求めるのと同じことです。新聞紙の坪量 (g/m^2) は、コピー用紙や封筒の約半分であったため、新聞紙だけを幅 2cm としました。不思議なことにどれも同程度でした。再生紙であっても用途が包装であるだけに、製造工程では紙力剤などを添加し、紙力を上げる工夫をして製造されているためでしょう。再生紙は弱い、という従来の常識を技術でカバーしているようです。子供たちは、一生懸命になり紙を歪めながら引っ張ることもあるので、紙の持ち手の部分を補強して、まっすぐに引っ張ってもらう工夫をするのも、正確な力比べをするのに必要ではないかと感じました。

使用した機材は、ハサミ、セロテープ、新聞紙、封筒の紙、ノートの紙。

2.1.6 紙の呼吸

ピンと張った紙片に息を吹きかけたり、濡らしたりして紙の水分を多くすると、紙は伸び、乾燥すると反対に紙は縮みます。観察だけではこの様子がわからないので、レーザー変位計を使って正確に紙の長さの変化を測定し、パソコン上で即座にグラフ化してみせる実験を行いました。写真 4 に示すように、スチールのアングル材を使った固定具を組み立て、幅 4cm 長さ 40cm 程度の紙を吊り下げ、先端には 50g 程度のアルミの板をぶら下げてピンと張ります。このアルミ板の側面



写真 4 紙の呼吸用固定具

に、上から変位計のレーザー光を当て、位置を計測し、伸びた長さを表示します。湯沸しポットの湯気を当ててみたのですが、意外なことに伸びた長さはわずかでした。部屋の湿度が予想以上に高かったせいだと思われ、逆にヘアドライヤーを当てて乾燥させるべきでした。日本の夏は本当に高湿度です。

使用した機材は、紙を固定する装置（自作）、湯沸しポット（博物館）、キーエンス製レーザー変位計 LC-2450（東大から持込）、ソフトウェア（自作）。

2.1.7 紙の膨潤

紙は、吸水すると面方向に伸びますが、厚さ方向には、もっと膨潤して大きく伸びます。このときの膨潤の圧力はかなり大きく、重いものを浮かせることができるほどです。実演では次のように行いました。コンテナに 35cm 程度の高さに積み重ねた新聞紙を入れました。写真 5 に



写真 5 紙の膨潤用台

示すような天板が上下に可動の台を、新聞紙を入れたコンテナが内側に入るように置き、台の脚はコンテナの中の 4 隅に入るようにしました。写真 6 に示すように、2 リットル入りペットボトル 6 本に水を入れ、台の天板上に置きました。これは、約 12kg の重さです。会場からの 2 名の子供に手伝ってもらい、新聞紙にしみ込むように両側からコンテナの中にペットボトルから水を注いでもらいました。徐々に膨潤して天板が持ち上がる距離をレーザー変位計で測定し、グラフの変化



写真 6 新聞紙を膨潤させると 12kg のペットボトルを持ち上げる力が出ます

性質をもつセルロースの非晶部分やヘミセルロースが、吸水して分子間に水が入り込んでくると、体積が大きくなります。特に繊維の幅方向にそれが顕著です。紙はパルプ繊維が横になって積み重なっていますから、特に厚さ方向に大きく膨潤するわけです。

使用した機材は、台 (自作) とコンテナ (購入)、束ねた新聞紙 (博物館で用意)。台はスチールのアングル材で組み立て、可動部分は、引き出し用のレールを東急ハンズで購入して取りつけました。レーザー変位計 (同上) とソフトウェア (自作) は、「紙の呼吸」と同じものを使用。

2.1.8 プレゼント

最後に、会場の子供たちに紙製品のプレゼント。燃えない紙 (リンテック株の西村光男氏 御提供) とプラスチックケース内蔵ハガキ “モスモスパッケージ” (有齋藤敏樹デザイン室の齋藤敏樹氏 御提供) をプレゼントしました。燃えない紙は、水酸化アルミニウムなどのように熱分解したときに水を放出する物質を内添し、加熱したときに紙の温度を下がるように製造しています。モスモスパッケージは、小物の中に挟んで郵送できるハガキです。

2.2 第 2 回「楽しい紙の科学」

2002 年 8 月 3 日 (土)

2 回目は、子供たちが夏休みの自由研究のネタ探しにやって来ることを意識しながら、ところどころに自由研究のヒントをはさみました。同じく、当日の実演内容などを紹介します。

2.2.1 紙の概要

紙の作り方、用途などの基礎を説明したのは第 1 回と同じですが、木材から取り

出した繊維がどのようなものであるか漂白パルプシートを見せました。百聞は一見に如かずで、物の説明は実物を見せながらやるのが一番です。

2.2.2 紙の観察

第 1 回目と同じくビデオ型の顕微鏡で表面を観察しました。ビデオ型の顕微鏡を、通常の光学顕微鏡の鏡筒部分に取り付け操作性をよくしました。針葉樹パルプシートの端を破いたものは繊維の一本一本がわかりやすかったです。一般の家庭では、パルプシートが手に入らないのでディッシュペーパーが見やすそうです。新聞紙表面の観察は、写真 7 に示すように、クワガタの角を写した写真画像を拡大しました (A)。拡大すると、背景の部分を網点になっていることがよく

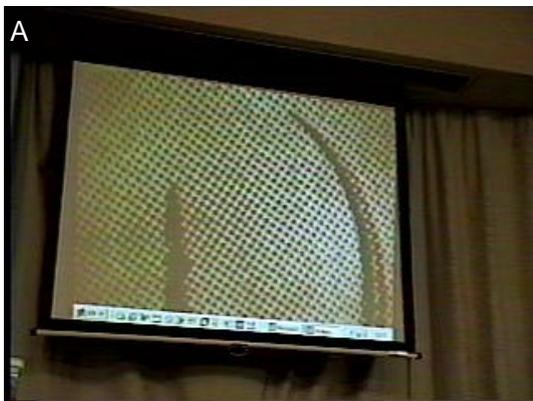


写真 7 新聞の写真を拡大

わかりました (B)。

使用した機材は、キーエンス製ビデオマイクروسコープ VH-5910 (持込)、顕微鏡用のスタンド、パルプシート、新聞紙です。

2.2.3 紙容器の応用

紙の用途を、「紙って何に使いますか？」と子供たちに問いかけながら、説明したところは、第 1 回と同じですが、このときに紹介した目玉作品は、“包む”機能と“遊ぶ”機能を合体させた箱です。写真 8 にあるようなケーキの箱をゆっくりと取り出し、テーブルにおきます。この箱には小窓がいくつか作ってあるのですが、子供にそれを開けてもらい中を覗いてもらいます。「何か見えませんか」

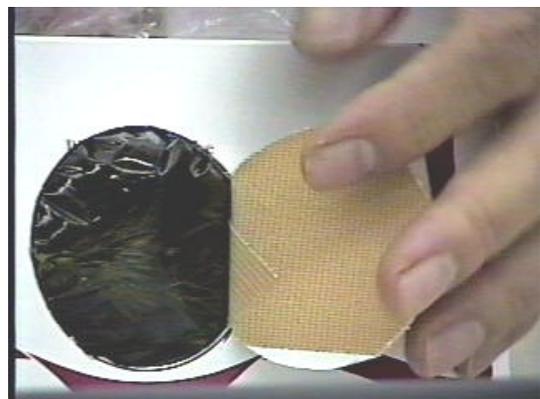


写真 8 ケーキの箱を使った金魚鉢

と質問したところ、「金魚!？」との答えが返ってきました。この箱の中には、水を入れたポリエチレンの袋が入っており、中に小さな金魚 3 匹を泳がせていました。小窓のところに近づいた金魚が突然大きく見えます。ポリエチレンの袋が小窓のところだけ外に向かって膨らむので、レンズ効果で大きく見えるのです。楽しめる金魚の包装容器です。

ケーキの箱による金魚鉢のアイデアは(株)システムクリエイツの小杉博俊氏の御提供によるものです。使用機材は、ケーキの箱、ポリエチレンの袋、金魚 6 匹。やさしい教室終了後に子供たちにプレゼントを申し出ましたが、親御さん同伴だったせいか、受け取ってくれる子供たちがいなくて、結局金魚は今も我が家のペットになっています。めだかより小さかった金魚も体長 8cm くらいにまで大きくなりました。

2.2.4 紙の厚さ

紙 1 枚の厚さは何 mm くらいだろう



写真 9 毛髪湿度計を改造した紙の伸縮測定装置

か? この紙を何回くらい折ると富士山の高さくらいになるのだろうか? といったお遊びの計算をやってもらいました。まずコピー用紙 500 枚の束の厚さを子供に定規で測ってもらいます。このときは約 4.8cm でした。1 枚あたりを計算してもらいましたが、これはスライド用のアプリケーションであるマイクロソフト社のパワーポイントの中で、マクロ機能を利用したプログラムを準備しておき厚さを入力するだけで自動計算するようにしておきました。時間の節約と、見ている人たちにも計算の様子が理解しやすいように工夫しました。このプログラムでは“折る”と書いたコマンドボタンをクリックするたびに、2 つ折で 2 倍、3 回折りで 4 倍、4 回折りで 8 倍... のように計算できる機能も用意し、計算の結果、25 回折り重ねると富士山の高さに近い 3200m くらいになることがわかりました。たった 25 回の折り重ねといっても 2 の 25 乗ですから 3355 万枚もの紙を重ねることになります。

使用した機材は、定規、500 枚入りコピー用紙 1 包み、厚さ計算プログラム。

2.2.5 紙の呼吸

加湿と乾燥による紙の伸縮を見せる実験です。第 1 回では、レーザー変位計を使いましたが、ここでは、写真 9 に示すような、毛髪湿度計の毛髪部分に紙片を取りつけられるように改造した装置を自作して用意しました。紙の伸縮長さを“てこ”の要領で拡大して針で示すものです。子供に手伝ってもらい、ノートの紙を長さ 20cm ほどに採取し、ヘアドライヤーと加熱式の加湿器で、乾燥と加湿を交互

に行ってもらいました。第 1 回の実験でわかったように、部屋の湿度が高いことが予想されていたのでヘアドライヤーで先に乾燥させて見たところ、紙は、0.3mm ほど縮み、加湿すると 1mm ほど伸びました。針の動きにより紙の伸び縮みを非常にわかりやすく示すことができました。

使用した機材は、紙の伸びを測定する装置 (自作) 加湿器 (持込) ヘアドライヤー (持込) キーエンス製レーザー変位計 LC-2450 (持込) レーザー変位計もセットしましたが、何ゆえか動作しませんでした。

2.2.6 紙の断熱性

紙がどの程度の熱を伝えやすいかは、熱転写やレーザー方式のプリンタでは重要な特性になります。ゴム、プラスチック、布と比較して、紙がどのくらいの速さで熱を伝えるかを、焼肉などに使う家庭用のホットプレートと赤外線カメラを使って実演しました。事前に、試料を準備しておきます。写真 10 に示すように、新聞紙、コピー用紙、綿の布、ゴム、塩ビの板の各材料を、厚さが 1mm 位になるように重ねて、スチールパイプを固定するための金具の底に両面テープで留めます。



写真 10 断熱性測定用に発泡スチロールを挟んで材料を固定した金具

金具に直接材料が接すると熱が逃げるので、間に 1cm ほどの厚さで、中央に穴を開けた発泡スチロールを挟みました。ホットプレートのスイッチを入れます。写真 11 に示すように、赤外線カメラで見ると同心円状に色が変わりました。電熱線が入っている部分から温度が上昇している様子がよくわかります。温度変化が敏感になるように 20 ~ 60 の狭い範囲を表示する設定にし、ホットプレート表面が 60 を少し下回るくらいの温度で均一になるのを待ちます。子供に手伝ってもらおうのですが、火傷の危険が少しあったので、高学年の小学生に出てきてもらい、軍手をしてもらいました。まず、新聞紙とコピー用紙の金具に固定した試料



写真 11 ホットプレートのスイッチを入れた直後の赤外線カメラの画像

を同時に置きます。赤外線カメラは試料の真上に設置し、ちょうどホットプレート面と反対側を撮影することになります。この画像を液晶プロジェクタで見ながら色の变化に注目していると、新聞紙の方がコピー用紙より色の变化が遅く、熱が伝わりにくいことがわかりました。次に、コピー用紙を除く、4 種の材料で同様に比較しました。このときは赤外線カメラでビデオ撮影し、再生しながら温度上昇の速さを比べました。その結果、布が最も熱が伝わりにくく、ついで、新聞紙、ゴム、プラスチックの順でした。内部に多数の細かい空隙を持つものは断熱性が高いようです。実演後は、この実験を行うときには、手袋をすることの注意をし、赤外線カメラの代わりに、液晶を利用して温度表示ができるサーモテープを貼り付けて、家庭用ビデオカメラで撮影しながら比較もできることを紹介しました。

使用した機材は、ホットプレート(持込)、温度画像測定用赤外線カメラ(持込)、軍手、ほぼ 1mm となるように重ねた新聞紙、コピー用紙、ゴム、プラスチック及び布を金具に固定した試料。

2.2.7 プレゼント

水溶紙を配布しました。これは、パルプ繊維の一部をカルボキシメチルセルロースにして、繊維間の水素結合を水によって切断しやすくした紙です。水溶紙とトイレトペーパーを用意し、写真 11 に示すように、2 人の子供にそれぞれヨーイドンで水の入ったコップに入れてもらいました。水溶紙は、みるみるふやけるように解けていきますが、トイレトペー

パーはすぐに形態が変わることはありません。



写真 12 水溶紙とトイレトペーパーを水に入れて溶け方を比較

せん。棒でかき混ぜると水溶紙はあっという間に繊維がばらばらになってしまいましたが、トイレトペーパーは、ゆるいかき混ぜ方では元の紙片のままでした。トイレトペーパーは水に溶けるという先入観があるので、意外に解けるのが遅いことに皆さん驚かれた様子でした。なお、ここで言う“溶ける”は、正確には繊維が水に分散するという意味での“解ける”です。

水溶紙は、三島製紙(株)の吉村隆重氏の御提供によるものです。使用した機材は、ポリスチレン製の透明なコップ 2 個、かき混ぜ棒 2 本、水溶紙、トイレトペーパー。

3 おわりに

以上、筆者が過去 2 年間行ってきた“やさしい教室「楽しい紙の科学」”についてご紹介しました。いろいろな紙製品やアイデア作品の紹介では、上でご紹介したたくさんの方たちにお世話になりました。この誌面をお借りして御礼申し上げます。また、実演の場をご提供いただいた、紙の博物館の方々に感謝いたします。特に

学芸員の丸尾敏雄氏には、打ち合わせ段階で毎回色々ご指導を頂いており、大変お世話になっております。これまでわずか 2 回であり、私自身この企画に夢中で挑戦しているわけで、子供たちの様子を観察している余裕はありませんが、あとでビデオを見ていると、子供たちは、非常に興味津々でテーブルの周りに集まって観察しているのがわかります。好奇心を持って色々な現象を観察するかわいい目が、やがて、紙の科学者の目になってくれればよいと、教室が終わった日の夜、我が家にてビール片手に一人で反省会を開いております。

さて、この子供向けセミナーは、ご要望があればどこにでも出かけて開催するつもりであります。“紙の科学”を小中高生（大人も）に、楽しみながら理解してもらうためにボランティアで行っております。ご興味のある方は電話・メール³等で筆者までお気軽にお問い合わせください。また、ここで紹介させて頂いた実験の内容などにつきましても、ご質問・ご感想など是非お聞かせください。

³ 03-5841-5270(東京大学製紙科学研究室) enomae@psl.fp.a.u-tokyo.ac.jp