

総説

リサイクル紙研究 —最新の成果—

山内 龍男*

Study on Paper Recycling —Recent Progress—

Tatsuo YAMAUCHI*

数年来、包装材料における脱プラスチックが大きな流れになり、その代替材料として、紙が再び注目されている。包装分野での紙の多くはリサイクルされた紙であり、ここでは紙のリサイクル研究についての最新の成果を、筆者の研究を中心に説明する。

Recently discontinuance of plastics in packaging material has become a big trend, and paper material is thought to be its substitution.

Taking into consideration that the most of paper used for packaging is made from recycled pulp, recent experimental progress in paper recycling study, mainly that by the author, is explained in this review.

キーワード： 紙リサイクル、角質化、バージンパルプ、リサイクルパルプ、紙物性

Keywords： Paper recycling, Hornification, Virgin pulp, Recycled pulp, Paper properties

1. はじめに

紙およびプラスチックを主とする包装材料において、紙材料が占める割合はかなり長い期間、金額ベースで約 42%であったが、その後徐々に低下し、一時 40%代になった。その後再び増大し、2017 年には約 44%になり、昨今の脱プラの流れを考えると今後も増大するであろう。逆にプラスチック材料は 15 年前の約 25%か

ら、3 年前には 31%代にまで増大したのだが、2017 年には約 28%になり、脱プラの流れから、今後さらに減少すると考えられている。この予測が示すように、包装材料における紙材料は極めて重要であり、また、そこで使用される紙の大半は古紙を原料とするリサイクル紙であることから、本稿では紙のリサイクル研究における最新の成果を中心に解説する。

* 京都大学 大学院農学研究科 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)
Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-Chō, Kyoto 606-8502, Japan
TEL:075-753-9548, Email yamauchi@kais.kyoto-u.ac.jp

2. バージンパルプからの紙か、リサイクル（古紙）パルプからの紙か？

紙では、用途や関連して必要な物性ならびに価格を考慮して、その原料としてバージンパルプと古紙パルプを使い分ける。もちろん混合（混抄と称する）もするし、抄き合わせ技術を利用して、表面はバージンパルプで、中は古紙パルプから成る多層紙も多い。バージンパルプとしてもっともよく生産されているクラフトパルプを想定すると、価格では古紙パルプは安価であるが、そこには少量だが異物が混入しており、強度で比較すると古紙パルプは劣り、またそれぞれの製造に要するエネルギーでは古紙パルプは多く使用する。他方古紙パルプでは、木材資源をより有効に使用していることになり、さらに古紙パルプの利用は自治体が負担する廃棄物処分費用を軽減していることになることも見逃せない。これらの諸点を勘案して、包装関連の用途では、古紙パルプが専ら使用される。

ところで未だ記憶にあるのだが、郵便葉書における古紙混入比率が少ないとして製紙会社が監督官庁からお叱りを受けたことがあった。ではどうようにして発覚したのか当時話題になりました。今でもそうだが、一旦紙になれば、混入率を決定することは不可能であり、恐らく混入率は葉書用紙製造の現場の数値から分かったようです。実際、リサイクル処理回数の異なる一連の紙においては、ある

測定値からそれぞれの紙のリサイクル回数を推定することは可能なのだが¹⁾、リサイクル回数が異なる古紙パルプが混合されるとリサイクル回数ゼロのバージンパルプとの混抄比率は分からないことになる。ただ例外的に、蛍光染料含有繊維は顕微鏡的に判別が可能なので、それを利用して混入比率が計測できるとの意見もある（蛍光染料を加えた紙が古紙になり、それとバージンパルプが混合された場合）。

古紙パルプがバージンパルプと大きく異なるのは、前者では異物が混入しているので、それを除外する工程を経ていることと、リサイクル処理工程を繰り返すと、後述するように繊維が角質化して、紙にした場合の強度が大きく低下する（図 4 参照）ことであり、以下(6.)ではそのリサイクルに伴う紙の強度低下のメカニズムを中心に説明する。

3. 紙材料は何故リサイクル材料の優等生なのか

地球環境を守る 3 R のひとつであるリサイクルであるが、その優等生として紙材料が挙げられる。何故優等生なのでしょう。ご存知のように紙は植物繊維、とくに木材繊維を水中で分散させ、抄きあげることでできる繊維の集合体であり、その繊維は水からの乾燥に際して相互に自着しています。この紙を水中に投じると繊維は分散します。この原理を端的に

応用したのがトイレットペーパーでしょう。逆に水中で分散した繊維を、再度抄きあげ、乾燥すると再び紙になり、このサイクルは無限であり、極めて簡単な原理です。より科学的に見れば、水からの乾燥に際し、繊維やその表面にあるフィブリル表面に存在するセルロース・ヘミセルロースの水酸基間で水素結合が生じ、これの集合が繊維間結合として繊維集合体としての紙の強度を発現するのです。水素結合は可逆的な結合であり、紙製造に要する抄紙や乾燥以外の、正味のリサイクルに際してだけに要するエネルギーは、集荷や異物除去に要する程度なので安価でリサイクルできます。加えて、優れているのは、リサイクルした紙に膨大な用途があるからです。すなわち、上記のように紙のリサイクル抄紙工程はリサイクル前の抄紙工程とほぼ同じなのだが、集荷された古紙には、例えば印刷インキ、接着剤やフィルム、ホッチキスなど様々な異物が混入しており、紙材料としては

原則、それらの除去が必要です。今日、以下(4.)に略記するように、このための様々な技術・装置が発達しました。しかし、完全に除去することは、技術的にもエネルギー的にみても、またコストも考慮すると、困難であり、実際我々が目にする、リサイクルしたコピー用紙が残存インキによりやや黒ずんでいるように、リサイクルした紙には、大なり小なり、これら異物が含まれます。さらに、以下(6.)で示すように、リサイクルを繰り返すとパルプ繊維自身が有する繊維間結合能力が低下し、紙にした際の強度面では劣化します。すなわち原料としては総じて低質化します。このリサイクルに伴う材料の低質化(異物残存、強度低下)は、程度の差はあれ、金属やプラスチックを初め他の材料でも全て同じです。ところが、紙の場合、低質化した原料である古紙を原料にできる、段ボール中芯紙(段ボール断面で見える波型の紙)や紙箱になる板紙等、包装関連で使用する紙

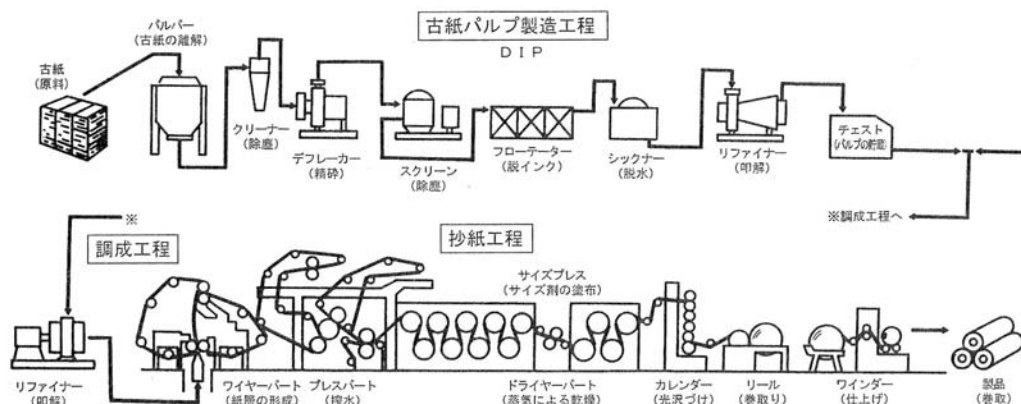


図1 古紙パルプ製造工程と抄紙工程²⁾

材料の大半に利用できる膨大な用途があります。さらに紙には抄き合わせ技術があるので、紙表面は綺麗なバージンパルプからでも、内部は低質化したリサイクルパルプで良いことも、この膨大な用途を支えています。他方プラスチックでは、包装材として商品化されたものの多くが複合化されていて、分別は困難であり、分離されてもリサイクルした低質化プラスチックには、このような大きな用途がないことと対照的です。そうなると、現金なもので、古紙回収業者は多数存在するが、他方プラスチックでは、その一部は地方税で運営される自治体が回収して、その大半はサーマルリサイクルされ、結局地球に埋蔵されていた石油が炭酸ガスとして放出され、地球温暖化の I 因になっています。また回収されず放置されたプラスチックはマイクロプラスチック問題等環境悪化を引き起こしています。

4. 古紙製造工程(古紙パルプ製造工程と、連続して行われるその後の抄紙工程からなる)

工程全体を図 1 に示すが、原料は通常、古紙回収業者から購入した約 1 m 辺の立方体に成形した古紙の塊である。これを大型洗濯機槽のようなパルパー(図 2 参照)に投入し、水と共に攪拌回流することで、繊維を離解する。その後スクリーンやセントリクリーナ(図 3 参照)などを利用して繊維懸濁液中の異物を除去後

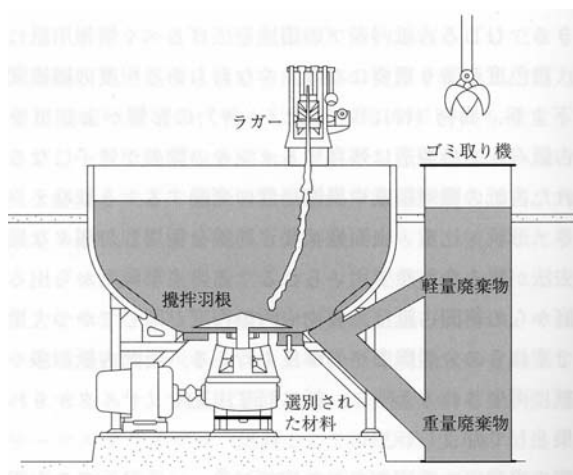


図 2 低濃度パルパー³⁾

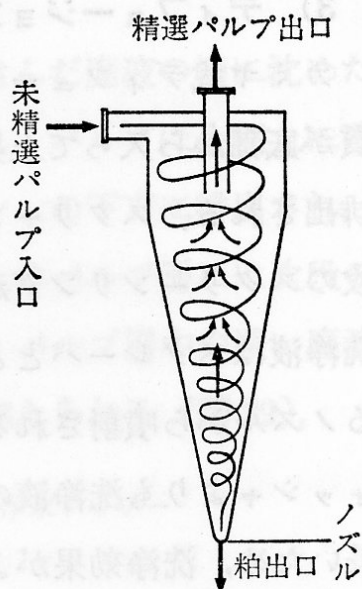


図 3 遠心式クリーナー⁴⁾

(また包装用途では通常しないが、図 1 で示すように、情報用途では脱インク工程を経た後)、バージンパルプと同様に叩解処理ならびに添加剤を加えた(調成工程)後に抄紙工程に移る。

4.1 紙リサイクルにおける異物除去

リサイクルで必要なのは混入している大小様々な異物の除去であり、原料古紙のグレードと完成パルプへの要求品質およびコストに左右されるが、この目的に応じて、個々の異物除去プロセスを適宜組み合わせで行われる。プラスチックと異なり、紙では水中に投与することで、まず繊維はバラバラになり、異物は比較的容易に分離できる。ただし、100%完全な異物除去は困難であり、古紙パルプには多少とも異物が含まれ、この点では低質化している。紙リサイクルでの異物分離の原理として水中での形状差（広葉樹からのパルプ繊維は幅数十ミクロン、長さ約1ミリの細長い形状）、比重差（木材パルプ繊維は約1.5）が主に利用され、加えて脱墨とも言われる印刷インクの分離には、繊維懸濁水中に吹き込んだ細かい気泡に分離したインク片を付着させ、浮き上がった泡を取り除く浮選法がよく利用される。書籍や新聞紙など情報用の古紙の場合、脱墨は極めて重要であるが、包装用の古紙ではインクの分離工程は省くことが多いので、ここでは脱墨の詳細については参考文献⁵⁾を紹介するに留め、以下その他の異物除去についても簡単に述べる。

比重の低いプラスチック、とくに比較的大きいフィルム状のそれは、**図2**で示すように、パルパー中であって攪拌懸濁液に浸かっているラガーと呼ばれる粗い

金属紐に絡まることで、その多くは除去できる。また比重の重い金属片や砂粒などの多くはパルパーの底に集まる。その他プラスチック片や粘着物の過半は、形状差を利用するスクリーンプレートにより分別される。また、セントリクリーナ（**図3参照**）を使用して、遠心力下で、主に比重差を利用することでも金属片や填料など重量異物、さらには軽量異物も分離される。

5. 紙リサイクル研究は難しい

現在では、工業的に工場で大量の紙がリサイクルされている一方で、その研究はラボで行われる。ラボで行う紙研究の多くは、入手したバージンパルプを用いて、実際の紙製造現場での抄紙を再現、あるいは単純化して、例えば JIS P 8222 で決めた方法で紙試料を作成する。ところがリサイクル紙の場合、原料パルプは、そのリサイクル履歴も含め様々であり、そこに含まれる添加剤や填料の種類や量も然りである。さらにリサイクル時でのパルプ繊維離解濃度、処理時間や温度、乾燥温度や時間、リファイナー（叩解）処理条件など紙リサイクルに伴う処理条件も多様であり、実際のリサイクル紙製造現場での再現としての標準的な紙リサイクル研究法、試料作成法は存在しない。そこで、研究者、各人各様にラボでのリサイクル実験をすることになる。既に、かなり以前から多くの研究が文献に見ら

れるのであるが、添加剤や填料なしの状態で数回さらには5回程度までリサイクルした場合が多い⁶⁻⁹⁾。それらの結果を検討すると、上記のように実験条件や使用した原料パルプが様々であることから、統一的な結果や結論は少ない。ただ、機械パルプではリサイクルしても強度低下は殆ど生じないことや、クラフトパルプではリサイクルにより繊維自体の強度はさほど変化しないが、後に述べるように繊維が角質化して、繊維間結合(面積)が低下した結果、紙強度の大きな低下を招くことは共通的に、広く認められている¹⁰⁻¹¹⁾。さらに繊維の角質化は乾燥と湿潤の繰り返しで生じる湿潤繊維壁内の空隙構造の変化でもあり、叩解に伴う繊維壁内での内部フィブリル化とほぼ逆の現象がリサイクルで生じていると考えられている¹¹⁾。(機械パルプではパルプ化に際しても、繊維の中のリグニンはそのまま存在するが、クラフトパルプ化ではリグニンが除かれるので、その後に空隙ができると考えられる。ただし、生成した空隙は乾燥に伴い消失し、再湿潤で復活するが、乾燥と湿潤の繰り返し、すなわちリサイクル処理の間に空隙構造も変化する)

5.1 ラボでのリサイクル研究(その一例)

紙の強度は、主に単繊維強度と繊維間結合強度で決まるのであるが、関連して繊維長やその分布及び溶脱するヘミセルロース等の影響も考えねばならない^{9,12)}。

実際リサイクル工程で含まれる抄紙工程で、微細繊維が抜けていき、リサイクルの間に繊維長分布や平均繊維長が変化すると考えられるからである。そこで、できるだけこれらの因子を事前に除いて研究を進めるのであれば、80 または 100 メッシュ網を装着した篩別機を用いて、微細繊維を予め除去しておく必要がある。また、リサイクルに伴い生じる繊維の角質化は吸・脱水の繰り返しにより生じると考えられているので、できれば、パルプ化後一度も乾燥していない *never-dried pulp* を原試料とするべきであろう¹¹⁾。さらにリサイクルで強度低下した一連の試料を作成するため、リサイクル前の紙は強度に叩解して作製するのが好ましい。

以下、本稿で主に紹介する研究例では、用いた叩解機(リファイナー)は JIS P8221 でラボ用として推奨されている PFI ミルであり、これは使用前後で繊維長分布に変化の生じないことでも知られている。その他のリサイクル条件は任意であろうが、ここで引用する研究例では、1 回のリサイクル毎に一晩常温で水に漬けた後、JIS P 8222 に準拠して標準離解機を用い、繊維濃度約 1% で離解した後手すきした。なお、乾燥は乾燥リングを使用し、60℃ の風乾とした。また、紙の強度に大きく影響する繊維間結合、特にその面積は湿潤時の繊維の柔軟度(コンフォーマビリティ)に左右され、リサイクルすなわち湿潤・乾燥の繰り返しに伴

い湿潤繊維の柔軟性が低下することで（角質化と称される）、繊維間結合（面積）が低下し、その結果紙の強度が低下すると従来考えられていることから、この説明が正しければ、離解せずに単純に乾湿繰り返ししても同じ結果（強度低下）になる？のではと考えて、ここでは離解とそれに伴う手すき操作を省いた湿潤・乾燥の繰り返しも併せ行い、離解あり、離解なし共に 30 回以上の多数回のリサイクル繰り返しを行って、試料とした^{12~14)}。

6. リサイクルに伴い紙強度が低下するメカニズム

6.1 ラボでのリサイクルに伴う紙の引張強度と密度の変化

リサイクル前と比べた、リサイクルに伴う引張強度と密度の低下状況を、**図 4a**:NBKP(針葉樹さらしクラフトパルプ)からの紙、**b**:LBKP（広葉樹さらしクラフトパルプ）からの紙で示す。図中黒印で示す離解ありのリサイクルで共通するのは、以前の研究⁷⁾でも明らかなように、少数回のリサイクルでの強度および密度低下が大きいことで、とくに LBKP からの紙で顕著であった。多数回のリサイクルでも強度および密度低下は見られるのであるが、その程度は次第に小さくなり、強度面だけでみれば、坪量増加などで対処すれば多数回リサイクルしたパルプでも十分利用できることが分かる。他方図中白印で示すが、離解なしの乾湿繰り返し

しによる強度および密度の低下はさほど大きくはなく、とくに NBKP からの紙での密度の低下は極めて少ない。一方で、これら多数回リサイクルした紙のゼロスパン強度は殆ど変わらないことから¹³⁾、これも以前の多くの研究者も指摘しているように¹⁵⁾、リサイクルが単繊維強度に与える影響は軽微と考えられる。

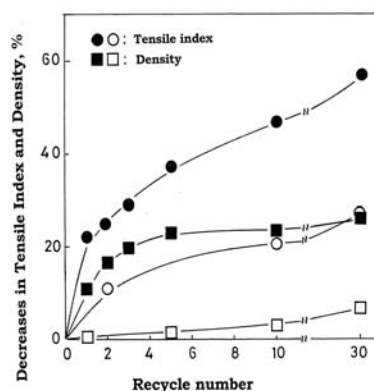


図 4a 多数回リサイクルに伴うNBKPからの紙の引張強度と密度の低下(黒：離解あり、白：離解なし)¹³⁾

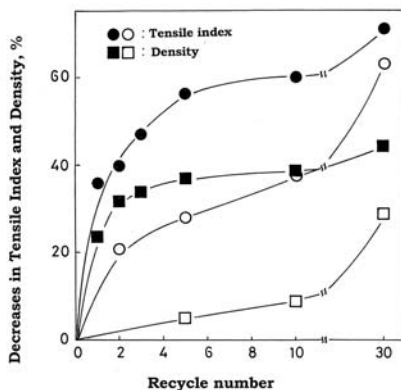


図 4b 多数回リサイクルに伴うLBKPからの紙の引張強度と密度の低下(黒：離解あり、白：離解なし)¹³⁾

6.2 リサイクルにおける紙強度の低下機構の検討

既に述べたように、リサイクルでの大きな問題点は異物の混入と、紙強度の低下である。単繊維強度がリサイクルで殆ど変わらないことから、パルプ繊維が有する繊維間結合能の低下であることは明白で、そこにはリサイクルに伴う繊維の角質化が関わっているのだが、リサイクルパルプからの紙とバージンパルプからの紙の強度発現、とくに繊維間結合において、なにか本質的な差異があるのだろうか？ そこで以下では、離解を含むリサイクル回数により強度の異なる一連の紙と、リサイクル前のバージンパルプを種々の程度に叩解して作製したやはり強度の異なる一連の紙を併せて比較した¹⁴⁾。図5は、NBKP, LBKP 両パルプからのこれらの紙の引張強度と密度の関係である。密度を繊維コンフォーマビリティ(湿潤時の繊維柔軟度)の尺度と考えれば、リサイクルパルプからの紙とバージンパルプからの紙のいずれの紙もほぼ同じ直線群にあり、繊維コンフォーマビリティは繊維間結合面積を支配するものであるから、叩解でもリサイクルでも同じように繊維間結合面積が重要であることが、この関係から分かる。ただ、多数回リサイクルした紙では、この関係でも下方に位置し、繊維コンフォーマビリティ以外、すなわち繊維間結合面積以外に強度を支配する因子のあることが推定される。図6はやはり、NBKP, LBKP 両パルプからのこれらの紙における引張強度と弾性率の関係である。平均繊維長は NBKP, LBKP 両パルプ間で異なるものの、叩解処理で

もリサイクル処理でも繊維強度と繊維長分布に与える影響は軽微であることもあり、これらの間にほぼ統一的な直線群が

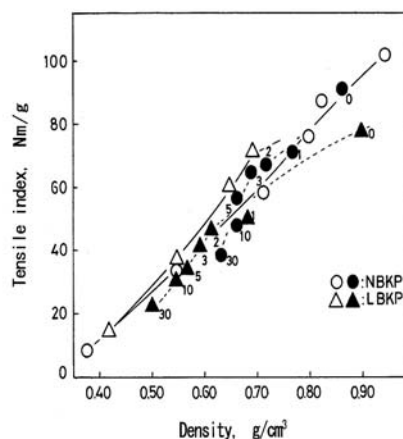


図5 NBKP および LBKP バージン、リサイクル各パルプから作成した手すき紙の引張強度と密度との関係 (白: バージンパルプ、黒: リサイクルパルプ、添え字はリサイクル回数)¹⁴⁾

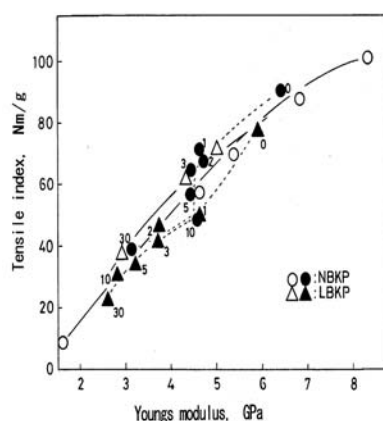


図6 NBKP および LBKP バージン、リサイクル各パルプから作成した手すき紙の引張強度と弾性率との関係 (白: バージンパルプ、黒: リサイクルパルプ、添え字はリサイクル回数)¹⁴⁾

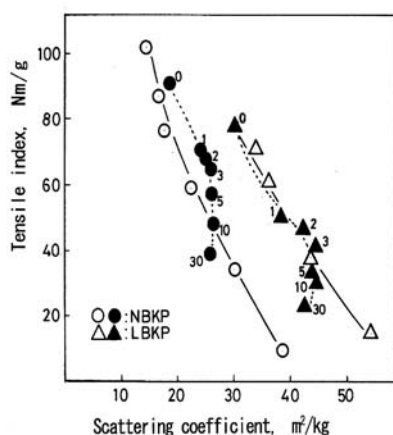


図 7 NBKP および LBKP バージン、リサイクル各パルプから作成した手すき紙の引張強度と散乱係数との関係 (白: バージンパルプ、黒: リサイクルパルプ、添え字はリサイクル回数)¹⁴⁾

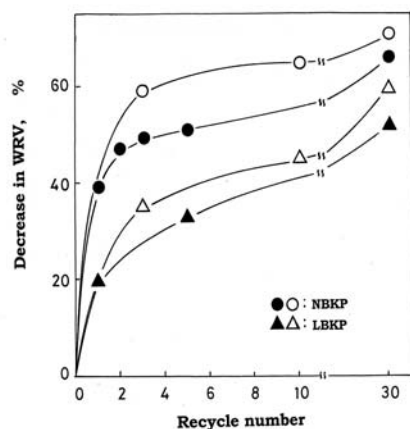


図 8 多数回リサイクルに伴う NBKP および LBKP の保水度 WRV の低下 (黒: 離解あり、白: 離解なし)¹³⁾

認められる。このことは叩解であってもリサイクルであっても、紙の強度を支配するのは繊維間結合であることを示唆する。図 7 はやはり、NBKP, LBKP 両パル

プからのこれらの紙における引張強度と散乱係数、すなわち繊維間非結合面積との関係である。

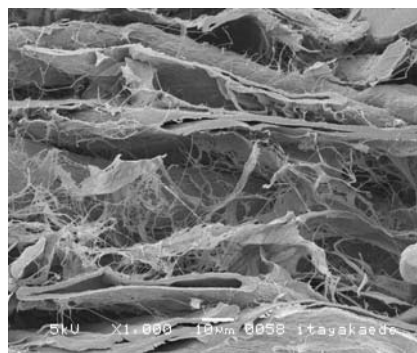
Kubelka-Munk 理論に基づく散乱係数は光学的な意味での繊維間非結合面積であり、繊維間結合面積そのものを測定する手段の無いことから、繊維間結合面積の発達具合をみる時にはよく利用される。また、ここでは一連の研究で同じパルプを原試料としていることから、光学的な繊維間非結合面積と力学的な意味での繊維間非結合面積はほぼ等価的に考えられる。よく知られているように、種々の程度に叩解して作製した強度の異なる一連の紙では、NBKP, LBKP 両パルプそれぞれで、散乱係数の減少は強度の増大としてやや湾曲した直線的関係を示す¹⁶⁾。なお繊維サイズの小さい LBKP は、総じて散乱係数は大きい。では、リサイクル回数により強度の異なる一連の紙はどうだろうか？リサイクル回数が数回と少ない場合、種々の程度に叩解して作製した強度の異なる一連の紙と同じように強度低下は散乱係数の増大すなわち繊維間結合面積の減少を伴うが、リサイクル回数が 5 回以上では、強度が低下しても散乱係数、すなわち繊維間非結合面積はほぼ一定である。これは何を意味するのか？リサイクルが進行すると当初角質化が起き、繊維コンフォーマビリティが低下して繊維間結合面積が減少して強度が低下する。さらにリサイクルが進むと角質化はあま

り生じなくなり、当然繊維コンフォーマビリティの低下もさらに進むことはあまりないので、代わって繊維間結合の質の変化と言うか、単位結合面積あたりの強度低下が起きていると考えられる。これらの説明を補助するべく、**図 8** は内部フィブリル化あるいは繊維コンフォーマビリティの尺度とされる保水度がリサイクルでどのように変化するかを示している。図中黒印は離解あり、白印は離解なしでの結果である。いずれのリサイクル回数でも離解ありの保水度低下はやや少なく、また NBKP での低下の方が大きい。離解ありで比較的保水度が大きいのは、後に述べるように離解ありで外部フィブリル量が少ないことと関連するのであろう。いずれにせよ、保水度を内部フィブリル化と尺度とするのは、概略としては許されるが、厳密には不可であろう。その保水度であるが、リサイクル回数数回までで大きく減少し、それ以後は少しずつの減少になる。また保水度の変化を概略、角質化の進み具合と考えれば、リサイクルに伴う角質化はリサイクル数回まででその大半が生じていることになり、**図 7** で示した、リサイクル数回以後の散乱係数、すなわち繊維間非結合面積が殆ど変化しないことと合致する。とすると、数回のリサイクル以後の強度低下は、やはり主に繊維間結合の質の低下、すなわち単位結合面積あたりの結合強度の低下によると推測できる。多数回での紙リ

サイクルでは繊維間結合の質が低下していることが示されたが、ではどのようにして、繊維間結合の質が低下するのか？この原因はよく分からないが、湿潤時において繊維表面にある多くの外部フィブリルが繊維間結合の発現に大きく関与すると考えれば、リサイクルに伴う離解操作に伴い相当量の外部フィブリルが取り除かれれば、繊維間結合の質の低下につながると考えられる。湿潤時における繊維表面外部フィブリル量の定量法はないのであるが、抄紙工程途中における湿潤状態での紙繊維表面の観察から定性的にはフィブリル量の変化が判断できる。手すき紙作製途中、クーチ後（繊維濃度約 10%）に凍結乾燥し、その断面を観察したのが、**図 9** である。a は NBKP を強度叩解して作製した、リサイクル前の繊維集合状態、b は 20 回リサイクルした後抄紙した際の繊維集合状態を示している。

ここでの繊維の状態は、繊維濃度を考えれば、繊維懸濁液中での繊維の状態とほぼ同じであろうが、とくにリサイクル前で多く見られた強度叩解により生じた外部フィブリルが、多数回のリサイクル後ではかなり減少しているのである。これら外部フィブリルは抄紙後の乾燥により一旦は元の繊維壁に収斂することが知られているので¹⁷⁾、その後のリサイクルでの離解を繰り返すたびに外部フィブリルが減少し、結果として繊維間結合の質の低下を招いていると考えられる。

a)



b)

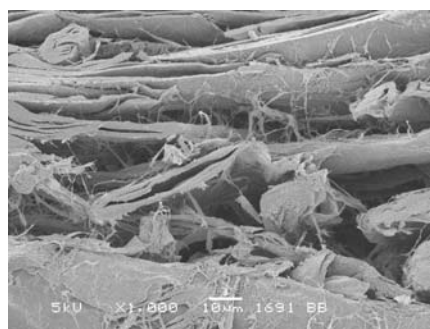


図9 クーチ後に凍結乾燥したNBKPからの紙の断面SEM写真¹³⁾

a: 叩解してリサイクル0回

b: リサイクル20回

7. まとめ

リサイクルに伴う紙強度の低下は、リサイクル回数数回までで顕著であり、そこでの強度低下機構は、乾燥・湿潤の繰り返しに伴い湿潤繊維での内部フィブリルの減少、いわゆる角質化が生じ、繊維コンフォーマビリティが低下して繊維間結合面積が減少したことが主因であろう。リサイクル数が多数回になると、紙強度低下は漸減するが、そこでの強度低下機

構は、角質化の影響も少しはあるが、むしろ湿潤繊維の外部フィブリルが減少した結果、繊維間結合の質とも言うべき、単位繊維間結合面積あたりの強度の低下が主因と考えられる。なお、リサイクルに伴う紙強度低下機構には、副次的ではあるが、ほかにヘミセルロースの溶脱や、平均繊維長低下も考えられる。本稿では省略するが、前者については、ヘミセルロース含量の少ない溶解パルプのリサイクルでもほぼ同じ結果が得られて、間接的ではあるが、ヘミセルロースの溶脱の影響はほぼ無視できると考えている^{18,19)}。後者については、叩解を含まないリサイクルでは繊維長分布は変わらないが、角質化した繊維を叩解すると繊維長分布は短い方にシフトする結果が得られていることを紹介しておく^{20,21)}。

8. おわりに

予想していたことではあったが、昨年は地球温暖化に起因する異常気象が引き起こした風水害が相次ぐことで、日本でも地球温暖化が身近に感じられるようになり、また海洋でのマイクロプラスチック問題から飲料分野でのプラスチックストローの廃止が続々と発表されて、にわかには脱プラの動きが顕在化した。プラスチックは石油化学製品で、その大量使用に伴う廃棄焼却、分解により大気中の炭酸ガス濃度を上げることが地球温暖化の1因になっていると考えられているから

である。ところで、包装・食品分野では、レジ袋をはじめ、プラスチックが大量に使用されており、今後如何に省プラ包装にするのかは大問題であろう。その代替として、植物由来のバイオプラスチックおよび木材由来の紙の利用が叫ばれるようになったが、現時点での LCA 解析からは後者が格段に優れているとされている。紙は歴史の古い材料でもあり、プラスチック全盛時代以前は包装材料の分野でも紙類が広く使用されていたので当然であろう。私事で恐縮だが、紙材料の基礎についてのセミナー講師依頼件数が増えてきたことでも分かるように、紙復権としてにわかに紙が注目を浴びるようになった。ただ、製紙会社に聞くと、脱プラの流れは歓迎だが、具体的にどのように対処するのか戸惑っているとのことであったし、現時点では安価なプラスチックがまだまだ幅を利かせているとのことであった。実際、紙をバリアー性に優れたプラスチックの代替にするのは至難であり、今後、様々な加工や複合化することで省プラ紙製品が現れると考えられる。包装材料における脱あるいは省プラの流れは止められないので、今日、加工した紙のリサイクル技術の一層の進展が必要になるであろう。このような状況下で、紙リサイクルについて総説を依頼されたのだが、膨大な量のリサイクル紙が流通している一方で、ラボで行われた紙リサイクル研究を網羅することは非常に難しい。

そこで、本稿では昨年、“紙リサイクルでの強度低下機構”と題して筆者が纏めた解説²²⁾を基にして紹介することで責を果たすことにした。

参考文献

- 1) 河部千香、斉藤将人、深沢博之：木材パルプから作製した紙のリサイクルに伴う水分変化第 80 回紙パルプ研究発表会講演要旨集、p.158 (2013)
- 2) 紙・パルプ産業の現状 2012 年版 日本製紙連合会、p.5 (2012)
- 3) 山内龍男 紙とパルプの科学、京大出版 p.56(2006)
- 4) 大江他、パルプおよび紙 文英堂出版 p.66 (1991)
- 5) 古紙パルプ、紙パルプ製造技術シリーズ④ 紙パルプ技術協会(2005)
- 6) Eastwood, F.G. and Clarke, B., - Handsheet and pilot machine recycling degradation mechanism, in Baker C.F. (ed) Fibre-water interactions in Papermaking, BPBIF, p.835 (1977)
- 7) 山岸良央、大江礼三郎：リサイクルによる木材パルプ繊維の変質 第 1 報 —リサイクルによるパルプ繊維の諸性質の変化— 紙パ技協誌、35(9):33(1981)8)
- 8) Waterhouse, J.F. and Omori, K. - The effect of recycling on the fines contribution to selected paper properties, in Baker C.F. (ed.) Products

- of Papermaking, Pira, UK, p.1261 (1993)
- 9) Garg, M. and Singh, S.P. - Reasons of strength loss in recycled pulp, Appita J.59(4):274(2006)
 - 10) Laivins, G.V. and Scallan, A.M. - The mechanism of hornification of wood pulps, in Baker C.F. (ed.) Products of Papermaking, Pira,UK, p.1235 (1993)
 - 11) Wang. X., Maloney, T.C. and Paulapuro, H. -Internal fibrillation in never-dried and once dried chemical pulps, Appita J. 56(6): 455(2003)
 - 12) 山内龍男、紙リサイクルの最新研究について (3,4) 紙パルプ技術タイムス 61(5,7) 95,53(2018)
 - 13) Yamauchi. T. and Yamamoto. M. - Effect of repeated drying-and-rewetting and disintegration cycles on fundamental properties of kraft pulp fibres and paper made from them, Appita J. 61(5):396 (2008)
 - 14) Yamauchi. T. and Yamamoto. M. - Relationship between fibre bonding structure and tensile strength for papers made from recycled and virgin kraft pulps, Appita J.68(2):165(2015)
 - 15) Ellis, R.L. and Sedlachek, K.- Recycled vs. virgin fibre characteristics: a comparison, Tappi J. 76(2):143(1993)
 - 16) Rennel, J. Opacity in relation to strength properties of pulps Part IV. The effect of beating and wet pressing Pulp and Paper Magazine of Canada 70, T-151 (1969)
 - 17) Yamauchi, T., Murakami, K. and Imamura, R. Development of the pore structure of paper web during consolidation 木材誌 25,414 (1979)
 - 18) Yamauchi. T. and Amano. Y.-Effects of repeated drying-and-wetting and disintegration cycles on fundamental properties of dissolving pulp fibers and paper made from them, 包装誌、23(5):361 (2014)
 - 19) 山内龍男、紙リサイクルの最新研究について (3) 紙パルプ技術タイムス 61(5)95, (2018)
 - 20) Yamauchi. T.-Effect of paper recycling and beating on fiber length distribution of softwood kraft pulp: 繊維誌、74(3),67(2018)
 - 21) 山内龍男、紙リサイクルの最新研究について (4) 紙パルプ技術タイムス 61(7)53, (2018)
 - 22) 山内龍男 紙リサイクルでの強度低下機構 繊維誌 74(6) p.233(2018)

(原稿受付 2019年7月10日)