OA 古紙の断裁処理

東京農工大学農学部 大江礼三郎, 豊田 芳久*

Effect of Shredding on Paper-making Properties
of Waste OA Paper

Raysabro Oye and Yoshihisa Toyoda

Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

Significance of recycling waste paper discharged out of offices, especially so-called waste Office Automation (OA) papers such as Xerographic copied or computer printed paper, is getting more importance from the view points of saving forest resources and fossil fuel as well as managing municipal garbage.

However, considerable portion of these papers are cut into thin stripes by shredders at offices to keep confidentiality. And it is widely referred that the paper-making properties of such shredded waste paper are deteriorated mainly because of pulp fiber cutting.

The authors have investigated the effect of shredding on fiber length and mechanical strengths of recycled handsheets from Xerographic copied papers and obtained the following results.

(1) The weight average fiber length was decreased by shredding as much as several percentage in case of 3—6 mm shredding width, and 18% in case of 1 mm width.

(2) Tensile strength of handsheets from shredded papers in 3—6 mm width showed little difference compared with unshredded. However, a significant drop was found in case of shredding of 1 mm width. Similar tendencies were conceived in tear resistance and folding endurance.

(3) The decrease in fiber length of shredded paper was smaller than that calculated from a simulated cutting of a random sheet of model fibers. It was implied that shredding of paper was partly carried out by pulling fiber out, not breaking it. This was confirmed from observation on the edge of cut paper by electron micrographs.

Keywords : Waste paper, Shredding, Strength, Fiber length, Random sheet

1. 緒 言

都市環境の保全からオフィス古紙の回収が社会的課題として大きく取り上げられている。その背景には情報社会の発展に伴い、印刷・情報用紙の著しい需要増がある。これまで情報・印刷用紙は新規パルプを原料として製造されてきた。従ってこれら印刷・情報用紙を回収、再利用することは森林資源の節減となり、地球環境の保全に大きく貢献することになる。

さてオフィスで使用される書類は機密性の高いものが多く、約2割がそれに相当すると言われている。そのためオフィス古紙を裁断することが行われているが、裁断によって再生紙原料として適さないのではないかと危惧をもつ向きがある。その実態を解明することは、オフィス古紙の再利用に大きな意義があるものと考えられる。

2. 目 的

オフィス古紙をシュレッダーによって裁断する場合の製紙適性の変化を検討することにした。

* 現在 日本アイ・ビー・エム(株)

紙を湿潤、離解して抄造、乾燥すると再生紙が得られる。このような処理によってリサイクル繊維の製紙適性が変化することは、これまでの研究で明らかになっている¹⁾。

紙を再生するのに先だって、シュレッダーによって幅細に、一定の長さに裁断する場合、パルプ繊維の切断を生じ、再生紙の強度が低下することが懸念される。

しかし断裁処理によってパルプ繊維がどの程度切断されるか。また切断によって繊維長が短小化した場合、紙の強度にどの程度影響するか、定量的な研究は行われていない。

本実験では、市販 PPC 用紙を用い、実機シュレッダーによって断裁した場合のパルプ繊維長の変化を測定し、再生紙の強度に及ぼす影響を検討した。さらにモデルシートについて、断裁のシミュレーションを行い、実際の結果と比較を行った。また断裁面を電子顕微鏡によって観察した。

3. 実験方法

3.1 供試試験紙

供試試験紙としては上質紙系複写用紙と市販再生紙複写用紙とを用いた。以降、前者を PPC 用紙、後者を OA 用紙と呼ぶ。

3.2 断裁処理

断裁処理は明光商会製の MS シュレッダーを用いた。断裁の幅を変化させ、断裁の幅、大きさの違いによる繊維長等の差異を検討するために 4 種類の機器を使用した。使用機器は MSO-9000 Auto, 4400 ME, 4310 MU, 4310 MC とした。

PPC 用紙は 6 mm×12 mm と 3 mm×12 mm に断裁した。その各々について、紙の縦方向 (以後 M. D. とする) が断裁方向に平行になるものと、紙の横方向 (以後 C. D. とする) が断裁方向に平行になるものの 2 種類の断裁を行った。また OA 用紙には断裁の幅 18 mm, 15 mm (いずれも長さ 5 mm 以上)、および 6 mm×12 mm, 3 mm×12 mm, 1 mm×9.3 mm に断裁を行った。また断裁を行わず供試試験紙を約 3 cm 角に手でちぎったものを未断裁試料として比較に用いた。

3.3 繊維長測定

篩分け試験には熊谷理機製のパルプ篩分け試験機 2590-I を用い、投影法による繊維長測定には日本光学製の万能投影機 MODEL 6 C を用いた。使用篩分け金網は 20 メッシュ, 35 メッシュ, 65 メッシュ, 150 メッシュとした。

繊維の篩分け試験方法は JIS P-8207 (製紙用パルプの篩分け試験方法) に従った。

重量平均繊維長測定は上記の篩分け試験によって得た各篩分け槽の繊維の絶乾重量を基にして TAPPI 標準試験法 T 233 (篩分け法によるパルプ繊維長測定) により次式によって算出した。

平均繊維長を l , 個々の繊維長を A , その繊維長の頻度を B とすると

$$l = \frac{\sum (A^2 \times B)}{\sum (A \times B)}$$

3.4 手抄きシートの調製

3.4.1 離解

3.2 のように断裁処理した試料と手でちぎった未断裁試料を標準離解機によって解繊した。離解に先だって試料を 24 時間水に含浸させ、離解しやすくした。この時、OA 用紙は 24 時間水に含浸させても離解が十分行われなかったため、絶乾パルプに対して 1% の水酸化ナトリウムを添加して 60°C, 1 時間処理したのち一昼夜放置してから離解を行った。

3.4.2 抄紙

JIS P-8209 (パルプ試験用手抄き紙調製方法) に従って抄紙した。

3.5 紙の物理試験

紙の物理試験はいずれも常法によった。

3.6 電子顕微鏡による観察

紙の断裁表面の観察には日本電子製走査電子顕微鏡 JSM-T 330 A, および日本電子社製イオンスパッタリング装置 JFC-1500 を使用した。加速電圧は 10 kV で行った。

4. 実験結果

4.1 篩分け試験および繊維長測定結果

断裁処理試料 5 種類、未断裁試料の篩分け試験を行った。表 1, 2 に PPC 用紙と OA 用紙の各試料について各篩分け槽に残留したパルプの重量の割合 (篩分け度) と各残留分の平均繊維長を示した。

第 1 槽と第 2 槽の長繊維部分が残留するフラクションの重量は断裁の幅が 6 mm×12 mm (以後 6×12 mm と略す) から 3 mm×12 mm (以後 3×12 mm と略す), 1 mm×9.3 mm (以後 1×9.3 mm と略す) と小さくなるにつれて減少する。断裁によって長繊維部分は減少する。特に 1×9.3 mm については未断裁試料の第 1 槽と第 2 槽の残留分が合わせて 15.6% であったのに対し、3 分の 1 以下の 4.3% まで低下している。特に第 1 槽残留分は 0.0% になった。このように 1×9.3 mm では明らかに他の断裁処理では見られない繊維の短小化が顕著に表れている。

PPC 用紙についての結果では断裁方向の違いによ

Table 1 Fiber classification of shredded papers and average fiber length in each fraction (PPC Parer).

	ON 20 mesh	ON 20/35 mesh	ON 35/65 mesh	ON 65/150 mesh	Through 150 mesh
Unshredded	0.0%	16.0%	41.5%	18.8%	23.7%
6×12 mm M. D. shredded	0.0	17.1	36.8	19.7	26.4
6×12 mm C. D. shredded	0.0	14.1	41.6	19.4	24.9
3×12 mm M. D. shredded	0.0	11.9	41.8	22.2	24.1
3×12 mm C. D. shredded	0.0	9.3	41.7	22.4	26.6
Fiber length (mm)	—	1.16	0.88	0.56	0.16

Table 2 Fiber classification of shredded papers and average fiber length in each fraction (OA Paper).

	ON 20 mesh	ON 20/35 mesh	ON 35/65 mesh	ON 65/150 mesh	Through 150 mesh
Unshredded	1.4%	14.2%	35.0%	17.7%	31.7%
18 mm wide shredded	1.4	15.7	34.7	17.9	30.3
15 mm wide shredded	1.6	15.1	35.0	17.5	30.8
6×12 mm shredded	0.8	13.8	34.9	19.3	31.2
3×12 mm shredded	0.1	10.6	35.3	21.7	32.3
1×9.3 mm shredded	0.0	4.3	35.8	24.0	36.0
Fiber length (mm)	3.40	1.42	0.94	0.66	0.14

り繊維の短小化に差が表れている。6×12 mm 縦方向断裁 (M. D.) に比べて 6×12 mm 横方向断裁 (C. D.) では第 2 槽の重量の割合が低下している。同様に 3×12 mm M. D. と 3×12 mm C. D. の間にも同様な傾向が見られる。これは機械抄紙の紙には繊維の配向性があるため、紙の縦方向に断裁すると長繊維の切断が僅かであるが抑えられることが分かった。

また OA 用紙では 18 mm 幅断裁と 15 mm 幅断裁の場合、第 1 槽や第 2 槽留分が未断裁試料に比べて増加、もしくは同じ値を示している。この理由は 18 mm 幅断裁と 15 mm 幅断裁が一般の断裁処理とは異なるために、断裁後の試料が圧縮されて容易に離解されずに繊維の固まりが存在したためであろう。この繊維の固まりが第 1 槽や第 2 槽の金網に残留したので、OA 用紙では 18 mm 幅断裁と 15 mm 幅断裁の 2 種類が増加もしくは同じ篩分け量となった。

6×12 mm や 3×12 mm 断裁では第 3 槽と 150 メッシュ通過分には変化がなかった。このことは逆に 1×9.3 mm が 150 メッシュ通過分が増加したと際だっている。つまり 6×12 mm や 3×12 mm の場合と

異なり、1×9.3 mm のように狭い断裁幅の場合に 150 メッシュを通過する微小繊維の増加が生じることが知られた。

各試料の重量平均繊維長の計算結果を表 3 にまとめた。試料ごとに重量平均繊維長をグラフにした。図 1 は PPC 用紙、図 2 は OA 用紙である。PPC 用紙の未断裁試料の重量平均繊維長は 0.698 mm であった。断裁試料で最も繊維長の短いものは 3×12 mm C. D. の 0.647 mm であった。この最も短い 0.647 mm は未断裁試料の 0.698 mm に対して重量平均繊維長の低下は 7.3% であった。

OA 用紙について測定値を検討すると、18 mm 幅断裁と 15 mm 幅断裁が未断裁に比べて重量平均繊維長が上昇している。これは上記したように完全には離解されなかった繊維が第 1 槽や第 2 槽の重量の割合を増加させ、重量平均繊維長を高くした結果である。

断裁処理による重量平均繊維長の低下傾向は、PPC 用紙と同様、断裁幅が狭くなるにつれて未断裁試料との差が大きくなる。未断裁試料の繊維長は 0.740 mm であり、最も短くなったのが 1×9.3 mm の 0.606 mm

Table 3 Weight average fiber length of shredded papers.

PPC Paper	Weight average fiber length (mm)	OA Paper	Weight average fiber length (mm)
Unshredded	0.698	Unshredded	0.740
6×12 mm M.D. shredded	0.678	18 mm Wide shredded	0.757
6×12 mm C.D. shredded	0.683	15 mm Wide shredded	0.757
Average of 6×12 mm shredded	0.680	6×12 mm shredded	0.722
3×12 mm M.D. shredded	0.673	3×12 mm shredded	0.672
3×12 mm C.D. shredded	0.647	1×9.3 mm shredded	0.606
Average of 3×12 mm shredded	0.660

Fig. 1 Weight average fiber length of shredded PPC papers

Fig. 2 Weight average fiber length of shredded OA papers

であった。この場合、未断裁試料に対して18.1%低下したことになる。しかし3×12 mmの繊維長は0.672 mmであって、未断裁に対して9.2%の低下となっている。6×12 mmでは2.4%の低下であったことを考慮すると1×9.3 mmの18.1%の低下は極めて大きいものである。繊維の篩分け試験結果で考察した通り、1×9.3 mmの場合に繊維の極端な短小化が見られる。断

裁処理によって重量平均繊維長の低下は確かに存在するので、紙の物理的特性を測定し、断裁処理による繊維長低下が強度に及ぼす影響を検討することにした。

4.2 紙の物理試験結果

4.2.1 坪量、厚さ、密度および比容積

表4に坪量、厚さおよび比容積(嵩)の結果を示した。比容積(嵩)は元の紙に対していずれの断裁試料も上昇している。

4.2.2 引張り強さ

表5に比引張り強さ、裂断長、比引裂き強さと耐折強さをまとめる。図3、4に各試験試料ごとの比引張り強さをプロットした。PPC用紙についてみると、断裁処理試料はいずれも元の紙試料に比較して比引張り強さは低下している。PPC用紙試料については、断裁の幅を変化させても未断裁に対しての差は見られなかった。OA用紙試料については、PPC用紙試料と同様に断裁の幅が3×12 mmまでは断裁の幅を狭くしても未断裁試料に対しての差はほとんど見られなかった。しかし1×9.3 mmの断裁試料になると強度はかなり低下することが知られた。

Fig. 3 Tensile index of shredded PPC papers

Table 4 Physical properties of hand sheets from shredded papers.

	Basis weight (g/m ²)	Caliper (mm)	Bulk (cm ³ /g)
PPC Paper			
Sample Paper	58.2	0.086	1.48
Unshredded	59.1	0.096	1.62
6×12 mm M.D. shredded	58.0	0.090	1.55
6×12 mm C.D. shredded	54.5	0.090	1.65
3×12 mm M.D. shredded	57.8	0.092	1.59
3×12 mm C.D. shredded	58.4	0.094	1.61
OA Paper			
Sample Paper	61.0	0.078	1.28
Unshredded	56.3	0.088	1.56
18 mm wide shredded	58.3	0.092	1.58
15 mm wide shredded	59.8	0.096	1.61
6×12 mm shredded	58.3	0.092	1.58
3×12 mm shredded	57.5	0.092	1.60
1×9.3 mm shredded	59.3	0.094	1.59

Fig. 4 Tensile index of shredded OA papers

4.2.3 引裂き強さ

図5, 6に各試験試料ごとの値をプロットする。これによると比引裂き強さの値は供試試験紙に対して未断裁試料と大きな変化は見られなかった。断裁幅を変化させた試料については、供試試験紙の強度の値を20.7に対して6×12 mm M. D. は14.6に低下している。この低下の割合は29.5%で最も大きかった。その他の断裁幅ではおおむね供試試験紙と同程度の強度を示した。

4.2.4 耐折強さ

耐折強さは元の供試試験紙に対して全ての再生試料は大きく低下している。図7, 8に各試験試料ごとの値をプロットした。しかし引張り試験と同様に、PPC用紙試料では未断裁の試料と断裁試料との間にはほとんど

ど差は見られなかった。OA用紙試料については3×12 mmまでは断裁幅を狭くしても未断裁試料との間に差は見られなかったが、引裂き試験と同様に1×9.3 mmの断裁試料になると、低下することが知られた。

4.3 重量平均繊維長と物理的強度の相関

JAMES d'A CLARKによると、裂断長は重量平均繊維長(L)の0.5乗に比例し、比引裂き強さは1.5乗に比例し、耐折強さは5.0乗に比例する^{2,3)}。つまり重量平均繊維長が1割低下したとき裂断長は5.1%低下するはずであり、比引裂き強さは14.6%、耐折強さは41.0%の低下をもたらす。今回の強度測定値についても線形回帰を行った⁴⁾。ただし回帰計算に供試試験紙の強度の値は含まない。表6は重量平均繊維長と各強度の回帰計算の結果である。PPC用紙とOA用紙の各断裁試料について回帰式と相関係数を算出した。

ここで回帰係数と相関係数を算出するためにBASICによるプログラムを作成した⁵⁾。

OA用紙試料の引張り強さの場合、回帰式の相関係数が0.809で最も高い値だった。回帰式は全体的に良い値を示しているとは言えないが、これは重量平均繊維長の値が0.606から0.757という極めて狭い範囲であったことが原因であろうと思われる。引張り強さと耐折強さについて、元の供試試験紙に対して再生紙の強度低下の割合が大きいが、未断裁試料と断裁幅を変化させたものの間には差があまりなかった。引裂き強さでは供試試験紙と比べ変わらないものもあり、この場合には断裁処理が強度を低下させるとは言えない。

Table 5 Strength properties of hand sheets from shredded papers.

	Tensile index (N·m/g)	Breaking length (km)	Tear index (mN·m ² /g)	Folding endurance (回)
PPC Paper				
Sample Paper	63.7	6.50	20.7	285
Unshredded	35.4	3.60	18.8	24
6×12 mm M.D. shredded	37.8	3.85	14.6	24
6×12 mm C.D. shredded	40.0	4.08	21.1	30
3×12 mm M.D. shredded	36.0	3.67	18.1	20
3×12 mm C.D. shredded	33.6	3.42	19.1	19
OA Paper				
Sample Paper	54.1	5.52	18.6	104
Unshredded	42.1	4.29	18.4	48
18 mm wide shredded	39.6	4.05	17.0	29
15 mm wide shredded	40.3	4.11	20.6	52
6×12 mm shredded	39.1	3.99	16.7	39
3×12 mm shredded	39.8	4.06	15.5	36
1×9.3 mm shredded	33.1	3.37	17.3	15

Fig. 5 Tear index of shredded PPC papers

Fig. 7 Folding endurance of shredded PPC papers

Fig. 6 Tear index of shredded OA papers

Fig. 8 Folding endurance of shredded OA papers

Table 6 Linear correlations of strength properties of handsheets from shredded papers.

Sample Paper	Strength properties	Linear correlation	Coefficient, R
Shredded PPC Paper	Tensile index	Tensile = 5.946 $L^{1.197}$	0.037
	Tear index	Tear = 19.590 $L^{0.186}$	0.483
	Folding endurance	Folding = 128.08 $L^{4.365}$	0.656
Shredded OA Paper	Tensile index	Tensile = 5.148 $L^{0.742}$	0.809
	Tear index	Tear = 21.025 $L^{0.520}$	0.490
	Folding endurance	Folding = 129.34 $L^{3.810}$	0.771

これらの結果から断裁によって重量平均繊維長は変化しても強度が大きく低下するとは言えない。ここで考慮する必要があるのは、紙はリサイクルすると強度が低下することである¹⁾。今回の実験では未断裁試料を離解し抄紙したものと、断裁処理を変化させたものを離解し抄紙したものの間には、OA 用紙を 1×9.3 mm に断裁したもの以外に大きな強度の低下は見られなかった。つまり断裁幅が 1 mm といった狭いものでなければ断裁処理による強度の低下は問題になるようなものではないことが結論できる。

4.4 モデル繊維シートによる断裁処理シミュレーション

1) ランダムシートの作成

まず繊維細胞壁 $2 \mu\text{m}$ 、繊維幅 $20 \mu\text{m}$ 、ルーメン内径 1、長さ $1,000 \mu\text{m}$ の図 9 のようなモデル繊維を仮定すると、1 g あたり 7.69×10^6 本の繊維が存在することになる。

繊維の断面積は

$$20 \times 2 \times 2 + 2 \times 1 \times 2 = 84 \mu\text{m}^2$$

体積は

$$\begin{aligned} 84 \times 1,000 &= 8.4 \times 10^4 \mu\text{m}^3 \\ &= 8.4 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \end{aligned}$$

質量はセルロースの比重を 1.55 として

$$1.55 \times 8.4 \times 10^{-8} = 1.3 \times 10^{-7} \text{g/本}$$

よって 1 g 当たりに

$$1 / 1.3 \times 10^{-7} = 7.69 \times 10^6 \text{本/g}$$

次いで厚さ 0.07mm 、坪量 60g/m^2 の紙を調製したとすると、この紙には繊維が 14 層あり、この層 1cm^2 当たり 3,400 本の繊維が存在することになる。

紙の厚さを 0.07mm とすると、

$$\frac{0.07 \text{mm}}{5 \mu\text{m}} = 14 \text{層/枚}$$

紙の坪量は 60g/m^2 であるから、

$$\begin{aligned} 8.00 \times 10^6 (\text{本/g}) \times 60 (\text{g/m}^2) &= 4.8 \times 10^8 \text{本/m}^2 \\ &= 4.8 \times 10^4 \text{本/cm}^2 \end{aligned}$$

Fig. 9 Model fiber (μm)

Fig. 10 Random sheet

$$\frac{4.8 \times 10^4}{14} = 3,400 \text{本/cm}^2/\text{層}$$

次いで XY 軸各 1cm の面に BASIC プログラムによって 3,400 個の点をランダムにとり、その点から同じくランダムな角度 1mm の線分を描き、これをモデル繊維によるランダムシートとした。図 10 はその一部分を拡大したものである。

2) 断裁線による繊維の切断

ランダムシートを 30 倍に拡大し、直線を引き、単位長さ当たり何本の繊維を切断するか数えた。その結果 60, 58, 67, 53, 55, 61 となり平均して 10cm 当たり 58.8 本の繊維を切断した。

裁断線1本について簡略化して60本の繊維を断裁すると考えると、この1cm四方のランダムシート上では断裁線は1cm当たり180本の繊維を断裁すると仮定することができる。

3) 断裁処理による重量平均繊維長低下の試算
次にモデル繊維を用いてそれぞれの断裁幅ごとに重量平均繊維長を試算する。

3-1) ランダムシート内の断裁線
6×12 mm 断裁による1cm四方のランダムシート内の断裁線の総延長は、 $1/0.6 + 1/1.2 = 2.5$ cm

3×12 mm 断裁では $1/0.3 + 1/1.2 = 25/6$ cm

1×9.3 mm 断裁では $1/1 + 1/0.93 = 1,030/93$ cm

3-2) 繊維断裁本数

6×12 mm 断裁

繊維断裁本数は1cm当たり180本だから、1cm四方のランダムシート内では $2.5 \times 180 = 450$ 本の繊維を断裁する。

3×12 mm 断裁においては750本、1×9.3 mm 断裁においては1,994本断裁する。

3-3) 重量平均繊維長の試算

平均繊維長が l mm であった時、断裁後の重量平均繊維長を試算する。

単位面積当たりにM本存在し、そのうちN本が断裁によって切断するならばその切断のされ方はN通り存在する。繊維の長さが元の l/N になるのが1本、ふたつに分かれた残りの $l(N-1)/N$ の長さになるのが1本、と考えると切断された繊維は全て合わせて l/N の長さになるものが2本・・・、 $l(N-1)/N$ の長さになるものが2本、 l の長さのままだが1本となる。すなわち切断後の繊維繊維長とその本数は表7に示すようになり、その結果、重量平均繊維長の算出式を得た。

$$\begin{aligned}\Sigma(AB) &= (M-N)l + 2l/N + \dots \\ &\quad + 2l(N-1)/N + l = Ml \\ \Sigma(AB^2) &= (M-N)l^2 + 2l^2/N^2 + \dots \\ &\quad + 2l^2(N-1)^2/N^2 + l \\ &= l^2 \{M - (N+1)(N-1)/3N\}\end{aligned}$$

重量平均繊維長 (L) が

$$\begin{aligned}L &= \Sigma(AB^2) / \Sigma(AB) \\ &= l \{1 - (N-1)(N+1)/3MN\}\end{aligned}$$

実際に重量平均繊維長を計算すると、

6×12 mm 断裁

l は1mm、Mは3,400本、Nは450本であるから $L = 0.956$ mm

3×12 mm 断裁 : $L = 0.926$ mm

1×9.3 mm 断裁 : $L = 0.805$ mm

平均繊維長の変化の割合は1.000 mmの繊維が6×

Table 7 Fiber length and frequency after shredding.

Frequency A	Fiber Length B
M-N	l
2	l/N
2	$2l/N$
.	.
.	.
.	.
2	$l(N-2)/N$
2	$l(N-1)/N$
1	l

M : Number of original fiber

N : Number of cut fiber

l : Fiber length

12 mm 断裁の場合、0.956 mm に低下した、低下の割合は4.4%であった。3×12 mm 断裁の場合、0.926 mm に低下した、低下の割合は7.4%であった。1×9.3 mm 断裁の場合、0.805 mm に低下した、低下の割合は19.5%であった。

4) 重量平均繊維長の実測値との検討

以上の結果から、PPC用紙の場合6×12 mm 断裁試料では実測した繊維長の低下は2.6%であるのに対して、ランダムシートによって試算した値は4.4%となった。また多くの場合、試算した重量平均繊維長の低下の割合は実測による繊維長低下より大きかった。

この検討はモデル繊維の重量平均繊維長を便宜的に1mmとして試算したものである。重量平均繊維長の断裁処理による低下の割合はいずれの場合も試算したものより実測した繊維長の低下のほうが低い値を示した。このことは断裁処理によって裁断面における繊維の短小化が鋭利な刃物によって起こるものとは異なる挙動を示している。

ここでモデル繊維とした繊維は重量平均繊維長を1mmとした。実測重量平均繊維長はPPC用紙の場合が0.698 mm、OA用紙の場合が0.740 mmである。そこで同じ断裁幅でも切断される本数が異なってくるとも考えられるので、実測重量平均繊維長の値を用いて断裁処理による繊維長の短小化を検討した。

モデル繊維の繊維長を1mmとしていたものを、実測重量平均繊維長である0.698 mmと0.740 mmに代えて上記と同じ操作を行った。

PPC用紙は重量平均繊維長が0.698 mmであるから、1g当たりに約1,100万本の繊維が存在する。紙の

Table 8 Comparison of decrease in calculated and determined weight average fiber length by shredding.

	Determined fiber length (mm)	Decrease (%)		
		Determined* ¹	Simulation 1* ²	Simulation 2* ³
PPC Paper				
Average of 6×12 mm shredded	0.680	2.6	4.4	3.2
Average of 3×12 mm shredded	0.660	5.4	7.4	5.3
OA Paper				
6×12 mm shredded	0.722	2.4	4.4	3.4
3×12 mm shredded	0.672	9.2	7.4	5.7
1×9.3 mm shredded	0.606	18.1	19.5	15.1

*¹: Decrease (%) of fiber length to that of the original.

*²: Decrease (%) of fiber length by simulated shredding from the model handsheet of the fiber length 1 mm.

*³: Decrease (%) of fiber length by simulated shredding from the model handsheet of the fiber length as determined.

坪量を 60/m² とし、1 cm 四方のランダムシート 1 層当たり約 4,700 本の繊維が存在すると仮定した。また試料を OA 用紙としたときには繊維長が 0.740 mm であり、1 層当たりには計算より 4,400 本の繊維が存在すると仮定した。4,700 (4,400) 本の繊維を含むランダムシート上に直線を引き、単位長さ当たり何本の繊維を切断するか数えた。

その結果は 10 cm 当たり PPC 用紙の時、54, 58, 61, 58, 62, 57 となり平均して 58.3 本、OA 用紙の時 63, 51, 63, 56, 56, 57 となり平均 57.7 本のモデル繊維と交差した。このランダムシート上で、裁断線は 1 cm 当たり 180 本の繊維を裁断すると仮定できる。

次にそれぞれの裁断幅ごとに繊維長を試算し、供試験紙の繊維長に対する低下率を表 8 にまとめた。表より繊維長を実測値に置き換えて行った試算では、繊維長を 1 mm とした場合より実測値による繊維長の低下の割合に近づいたが、まだ実測値に対しては大きいものがある。このことから、断裁処理を行うとき、断裁面においては 1 本 1 本の繊維が切断されているとは考え難い。一部の繊維が切断されずに、引き抜かれるため、シミュレーションで計算したものより実際の方が繊維長の低下が小さいものと結論された。

4.5 走査電子顕微鏡による断裁面の観察

繊維の短小化を繊維長から検討したところ、断裁面においてその断裁面にかかる全ての繊維が切断されているとは考えにくいことが分かった。実際に紙の断裁面で繊維がどのように切断されているかを電子顕微鏡によって観察した。試料は PPC 用紙の 6×12 mm 縦

Photo. 1 The cut edge of shredded paper **Photo. 2** The cut edge of shredded paper

方向断裁試料を用いた。

写真 1 は紙片の角の部分拡大したものである。写真の中の左側は鋭利な刃物によって切断した面、右側は断裁面である。左側の刃物によって切断した面では

繊維がきれいに切断されている。引きちぎられるように切断されているところが一部みられ、繊維の太い部分では切断は起こらずに、繊維の先端部などの細い部分が切断されている繊維が存在することが確認できる。明らかに断裁面において一部の繊維の引き抜きが生じていることが知られる。写真2は上下方向にその断裁面がのびているが、ここでも断裁面で一部の繊維が引き抜かれていることが確認できる。

5. 結 論

1) 断裁処理によって重量平均繊維長は低下する。低下の度合いは断裁の幅が狭いほど大きい。縦方向に断裁すると長繊維部分の切断が抑制される。

2) 断裁処理試料による再生紙の強度は、 6×12 mm および 3×12 mm 断裁と未断裁試料との間には、引張り強さに差はなかった。しかし 1×9.3 mm 断裁試料では強度の低下がみられた。耐折強さについても引張り強さと同様なことがみられた。

3) 重量平均繊維長の低下は、供試試験紙に対して PPC 用紙 6×12 mm 断裁試料では 2.6%, 3×12 mm 断裁試料では 5.4% であった。繊維長 1 mm のランダムシートについての断裁シミュレーションでは、繊維長低下は 6×12 mm 断裁試料では 4.4%, 3×12 mm 断裁試料では 7.4% であった。また繊維長を実測重量平均繊維長の値 0.698 mm として再び計算したところ、 6×12 mm 断裁試料では 3.2%, 3×12 mm 断裁では 5.3% の低下となった。 6×12 mm 断裁試料では PPC 用紙、OA 用紙とも繊維長の低下の実測値はシミュレーションの場合よりも小さい。このことは断裁面で繊維の引き抜きが生じていることを示唆している。

4) 走査電子顕微鏡による断裁面の観察により断裁の過程で、繊維の引き抜きが生じていることを確認した。

業調査会, 東京, (1982)

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), 787-797, (1981)

岡山隆之・北山拓夫・大江礼三郎: リサイクルによる木材パルプ繊維の変質 (第2報) リサイクルによる細孔容積の変化, 紙パ技協誌 35 (12), 1057-1062, (1981)

岡山隆之・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3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), 787-797, (1981)

岡山隆之・岡田喜仁・大江礼三郎: リサイクルによる木材パルプ繊維の変質 (第4報) リサイクル時の脱水条件の影響, 紙パ技協誌 36 (3), 388-399, (1982)

岡山隆之・朝倉秀美・大江礼三郎: リサイクルパルプ繊維シートの強度的性質, 東京農工大学農学部演習林報告 22, 33-43, (1986)

岩田珠美・岡山隆之・大江礼三郎: リサイクル木材パルプ繊維の染色性, 東京農工大学農学部演習林報告 22 (1986)

2) James d'A Clark: Effects of fiber coarseness and length, TAPPI, 45 (8), (1962)

3) James d'A Clark: Pulp technology & treatment for paper, Miller Freeman Pub., Sa. Franc., (1978)

4) 山崎秀彦: 基本物性による手抄きシートの強度的性質の評価, 紙パ技協誌, 43 (7), 697, (1989)

5) 脇本ほか: パソコン統計解析ハンドブックII, 共立出版社, 東京, (1983)

(受理: '91.5.17)

参 考 文 献

1) 大江礼三郎ほか編: “製紙科学”, 309-344, 中外産