

# 紙物性の基礎：電子写真方式の印刷品質に影響する紙の特性について

江前敏晴

東京大学大学院農学生命科学研究科

〔要旨〕

紙の坪量、地合、厚さ、密度のような基本的物性から、平滑性、透気度、光沢、表面強度（紙粉）、繊維配向性、力学特性、水分の影響、印刷光沢の発現メカニズムなど印刷品質と関係の深い物性について、定義、測定方法、測定データ、印刷との関係について解説する。

## 1 はじめに

電子写真方式であるレーザープリンタや複写機で用いられる紙は従来 PPC 用紙とかコピー用紙と呼ばれ、1980 年代のうちには技術的にはほぼ確立された感があった。しかし、1990 年代のインクジェット用紙との共用化技術の進展とともに、インクジェット専用紙の対比として非塗工 PPC 用紙を普通紙とも呼ぶようになり、2000 年以降の給紙機構のインテリジェント化や印刷のカラー化の進展などとともに、求められる印刷品質や搬送性は、さらに高度化している。

このような電子写真方式の印刷機や複写機（以下、装置と呼ぶ）に供される普通紙について最近の技術を概観するとともに、普通紙の特性を議論したり、新しい普通紙を設計したりする上で基本となる知識を基礎から解説する。

## 2 普通紙の近年の技術

給紙のインテリジェント化は、2005 年頃から急速に進行した。環境保護対策としてコピー用紙の裏面の使用（裏紙の使用）がオフィス等で振興されるようになり、裏紙の保管と給紙に手間をかける必要性が生じたが、最初から両面印刷を行う方が理に適っている。両面印刷では、熱ロールを通した直後の紙に再度印刷するため、含水率（水分）の異なる紙を搬送させることになる。重送や紙詰まりを起こさずにこ

れを円滑に行うには、含水率と紙の収縮やこわさ、摩擦係数の変化、滑りの量や頻度などの関係を知る必要がある。また複数の製紙会社で製造された紙の品質の違いも装置がある程度許容しなくてはならない。

環境保護対策と絡んだ普通紙の近年の技術には、その他、個包装用紙のリサイクル対応技術がある。吸湿による紙品質の劣化を防ぐために、以前はポリエチレンフィルム等をラミネートしたクラフト紙を使用して普通紙を 500 枚などの単位で包装していた。しかし、リサイクル工程で繊維とフィルムを分離することが難しいため、水蒸気透過性の低い水溶性又はエマルジョン系樹脂とともに、摩擦係数を高くする炭酸カルシウムや水酸化アルミニウムなどの顔料を配合して塗布した防湿紙が開発された。

また、環境省主導のグリーン購入の推進により、古紙配合率を 70% 以上にしたコピー用紙の使用が、公共機関のオフィス等では義務付けられたが、必然的にコピー用紙の印刷適性に関連する種々の特性は低下するため、製紙技術や装置技術に対する要求も高度化した。

## 3 紙の物性

### 3-1 基本物性

#### 3-1-1 坪量

紙の性質を理解する上で最も基本的な概念

となるのは、坪量である。これは  $1 \text{ m}^2$  当たりの紙の質量(g)であり、単位は  $\text{g}/\text{m}^2$  である。紙は水分を吸収しやすいセルロースを主体とする繊維から構成されているので、紙が置かれている周囲の大気の相対湿度によって紙の含水率は変化し、坪量もそれに伴って変化することになるが、通常、坪量と言うときは  $23 \text{ }^\circ\text{C}$   $50\%$  r.h. (relative humidity = 相対湿度) における  $1\text{m}^2$  あたりの質量(g)を指す。  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  で恒量となるまで乾燥したときの質量に基づく場合は、これと区別して絶乾坪量と言う。

相対湿度を  $50\%$  r.h. 以外の条件で調湿(紙の吸放湿が平衡に達するまで大気下に置くこと)する場合、紙の質量は変化し、各種物性も変化するが、その場合の紙の水分に関する状態を表すときは、その大気の相対湿度で表現するのではなく、その紙の含水率(水分含有率)を書かなくてはならない。これは、図に示すように吸湿して平衡に達したときと放湿して平衡に達した場合は含水率が異なるからである。基本的には、平衡含水率の  $1/2$  まで低湿度側においてから吸湿させることになっている。なお、パルプによって含水率が異なるのは、

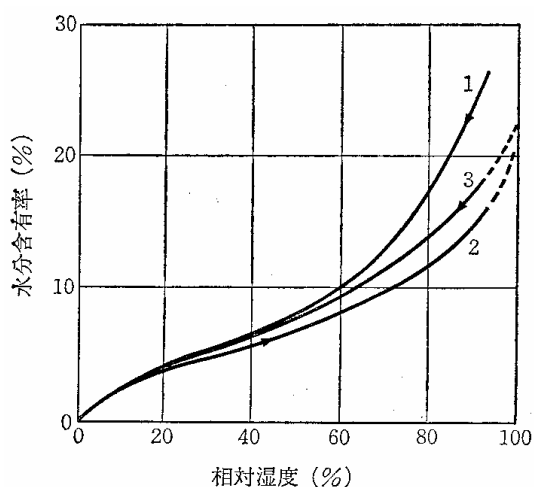


図 98 亜硫酸パルプシートの水分吸着等温線 (Seborg, C. O. et al., 1938)

図 1 相対湿度に対するパルプの水分

結晶化度が異なる場合で、それ以外の要因で紙の含水率が異なるのは、填料などの繊維以外の物質が含まれる量が異なる場合である。

### 3-1-2 厚さ

厚さも基本的な概念の 1 つである。平滑な金属面で紙を挟んで一定荷重 (以前は  $50 \text{ kPa}$  であったが、現在は  $100 \text{ kPa}$ ) をかけたときの金属面間の距離をもって厚さとする (マイクロメータ法)。単位は  $\text{mm}$  で、小数点以下 3 けたに丸める。この方法では、粗い紙は表面に凹凸がある分、平均的な厚さよりも多少大きな値が出る。したがって同じ繊維原料を使い、同じ処理を行って異なる坪量の試験用すき紙を調製した場合、坪量と厚さの間には直線関係があるものの、坪量  $= 0 \text{ g}/\text{m}^2$  に外挿すると厚さは約  $0.20 \text{ mm}$  になる。すき紙を調製する際、一定の粗さを持った紙を当てるため、その粗さが常に転写されるためである。

## 3-2 構造的物性

### 3-2-1 密度

坪量を厚さで除したものが蜜度 (Apparent density) である。セルロース固有の密度は約  $1.5 \text{ g}/\text{m}^3$  であるが、紙は空隙率の大きい材料であるので、通常  $0.5 \sim 1.0 \text{ g}/\text{m}^3$  である。紙にとっては、厚さよりも坪量の方がより基本的な概念となるが、紙の厚さ(及び密度)は空隙量に影響されるため、同じ紙の厚さが製造途中の工程(ウェットプレスやカレンダーリング)で容易に変化してしまうため、坪量の方が商取引も含めて標準として使用される基本量である。密度が顕著に変化する製造工程の例として、叩解、ウェットプレス、カレンダーリングがある。叩解は、機械的なずり応力を与えて、繊維表面を毛羽立たせ、さらに繊維壁に同心円状の緩みを作ることにより柔軟性をあげるこ

とによって、乾燥工程での繊維間結合を数多く生成させるための処理である。これによって紙の強度が増加する。ウェットプレスは、乾燥工程の前に脱水を行うとともに繊維間を強く接触させて乾燥工程において繊維間結合の生成を促進する。カレンダーリングは、鏡面スチールロール相互間、又は片方をコットンあるいは樹脂のロールとして、ロール間で強い圧力かけて挟むことにより、表面を平滑化するとともに密度をあげる処理である。ロールの周速を変えることにより表面を擦り付ける作用もあるため光沢も付与される。カレンダーリングでは、ある程度含水率を上げて処理するものの、いったん乾燥した状態の紙匹(しひつ=ウェブ、裁断前のロール状の紙)に対する処理であるため繊維間結合はほとんど生成しない。

各工程における処理強度と密度の変化を図2に示す。それぞれの処理の中の3水準のうち中間のレベルを標準処理条件とし、注目する処理以外はすべて中間レベルに設定して、処理強度が密度に与える影響を見たところ、叩

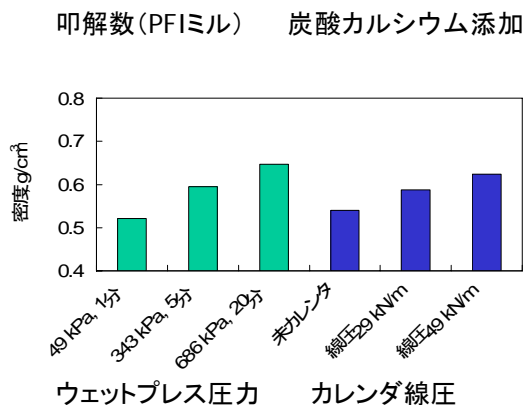
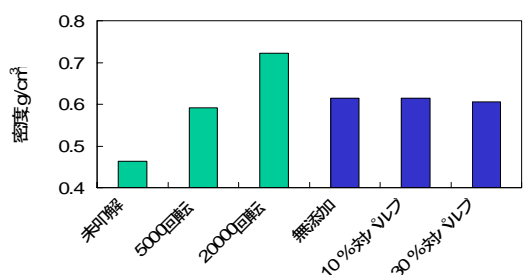


図2 製造工程が紙の密度に与える影

響度を上げたときがもっとも密度を増加させる効果があった。紙層形成以前に繊維を処理することが繊維の特性をもっとも大きく変えると言える。ウェットプレスも大きな効果を持っている。カレンダーリングは繊維間の水素結合には寄与しないが、高密度化の効果はかなり高い。

一方、密度が約  $2.6 \text{ g/m}^3$  の炭酸カルシウムを密度が  $1.5 \text{ g/m}^3$  のセルロース繊維の集合体に添加すれば、当然高密度化するはずであるが、実際には、繊維間結合を阻害して、添加量を対繊維比 30%まで増やしても密度はほぼ一定である。また強度は添加すればするほど低下する。

### 3-2-2 平滑度

紙の平滑度は版との接触が起きる商業印刷やレーザー方式のプリンタでは印刷品質を支配する最も重要な特性である。

平滑性の測定と表現の方法には大きく分けて2種類ある。非常に平滑な金属面と紙表面が接触したときにできる隙間を空気が漏れ出る速度や一定量の空気が漏れ出るのに要する時間(秒)で表現する空気漏洩式がその1つで、装置の仕様によりベック式、シェフィールド式、ベントセン式、王研式、パーカープリントサーフなどがある。空気漏洩式では簡便な操作で迅速に測定ができ、印圧を想定して圧力を変えることができる利点がある。加圧時に平滑なガラス面との接触面積を測定して粗さを算出するマイクロトポグラフと呼ばれる光学的接触法の装置もある。以上が面接触型の測定と言える。もう1つは、触針、光(レーザー)、電子線、プローブ(走査型プローブ顕微鏡)などを用いて表面形状を2次元または3次元のプロファイルとして測定する方法である。曲線や曲面そのものを客観的に比較するのは

難しいのでそのプロファイルデータから色々な粗さ指数を計算する。代表的なものは自乗平均平方根粗さ **RMS** 及び中心線平均粗さ **Ra** である。これは次のようにして求められる。線または面の傾きを補正するために基準直線（2次元）または基準平面（3次元）を定める。これはその基準線（面）の上下で囲まれる面積（体積）のそれぞれの総和が等しくなるように設定する。その線（面）からの各点までの距離  $y$  を求め、それぞれ式(1)及び式(2)で計算する。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2 dy} \quad \text{式(1)}$$

$$R_a = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y| dy \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $\ell$ : 曲線の走査距離である。3次元の場合はこれと直角方向の座標軸にも走査方向があるので式中の積分は二重になる。

図3は、カレンダーリングを行ったときの平滑度の変化を示す。カオリン70部、炭酸カルシウム30部の顔料にデンプン5部とSBラテックスを5~20部配合して調製したカラーを塗工して調製した塗工紙にカレンダーリングを行ったときの王研式平滑度(秒)を横軸に示す。塗工だけを行った場合は、原紙(Basepaper)の平滑度と大きな違いは

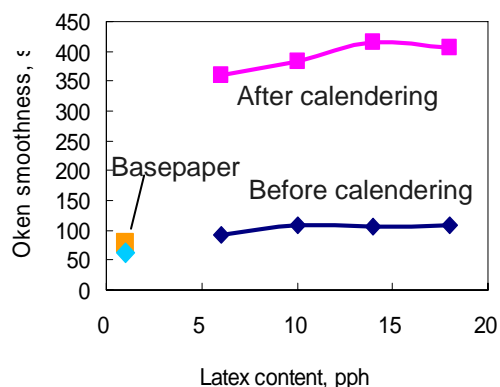


図3 カレンダーリングによる平滑度の変化

ないが、カレンダーリングにより、平滑度は大きく向上することがわかる。ラテックスの配合量が多くなると塗工層が軟化するため、わずかに平滑度は上がる。

### 3-2-3 透気度

透気度は、一定の条件下で紙の厚さ方向に透過する空気の平均流速であるが、一定量の空気が透過するのに要する時間を示すときは透気抵抗度と言う。かつては透気抵抗度を単に透気度と呼んでいたため、現在の定義と区別するには単位で判断すればよい。図4に示すように、透気抵抗度(ガーレー)は、 $A=642 \text{ mm}^2$  ( $\approx 1 \text{ inch}^2$ )の面積を、 $\Delta p=1.22 \text{ kPa}$ の平均圧力差で、 $V=100 \text{ mL}$ の空気が透過する時間  $t(\text{s})$ を測定するものであるが、図中の式からISO透気度  $P$ を計算できる。装置は、空気の透過とともにオイル中を円筒が沈んで行く設計のガーレー試験機が起源であるが、電子センサーを使って圧力差を測定する高速かつ自動化された王研式試験機が現在では多く使用されている。

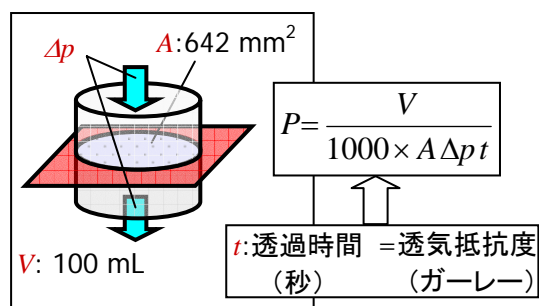


図4 ガーレー透気度の測定とISO透気度

図5は、図3と同じ試料にたいするISO透気度の変化を示す。カレンダーリングではほとんど透気度の低下はなく、ラテックスを多く配合する影響の方が大きい。ラテックスは顔料粒子どうしの隙間を埋めるようにしてフィルム化するためである。透気度はトナー粒子が紙の表面でフィルム化するとき紙の水分が蒸発して抜

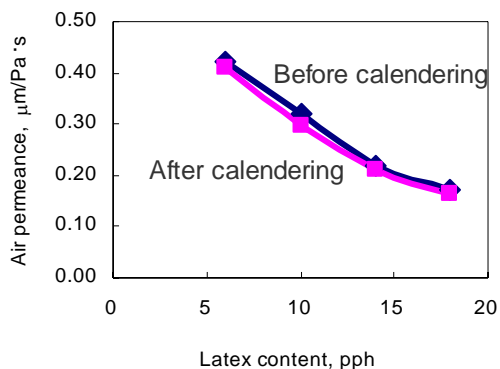


図5 カレンダーリングによる透気度の変化

け出す通路を塞ぐことになるので、プリスター（火ぶくれ）発生のトラブルが起きるかどうかの指標となる。

### 3-2-4 地合

地合むらと呼ばれる紙の2次元的な構造むらが印刷品質に大きく影響する。地合は、白色光を透過させたときに視覚的に感ぜられる均一性と定義することができる。装置による測定では透過光量の面内分布を測定して解析することになる。このような光学的地合は紙のむらとして視覚的に判断でき、印刷物の良否も光学的に決まるという意味でも重要である。

物理的に取り扱いやすいように局所的な坪量の分布であるとする定義もある。光は繊維間の空隙量によって散乱量が異なり、例えば極度のカレンダーリング処理では透過光量を大きくする。しかし、（横方向にわずかに伸びるであろうが）坪量の変化はほとんどないので坪量分布の方がそのシート固有の特性として扱いやすくなる。また、力学的な特性や紙層構造を考える場合に、坪量とその局所的な分布が最も重要である。

測定方法について考えてみる。光学的地合の場合は CCD カメラを使ったビデオシステムやフラットベッドスキャナを使って測定できる。局所坪量分布を測定するには、

散乱の影響がなく透過量と局所坪量に一定の関係があるβ線を通常使う。軟X線も比較的散乱が少ないため使われることもあり、電子線を使うエレクトログラフ法もかつて開発された。

光学的な地合の考え方を図6に示す。紙を2次元的に細かく分けたときの光の透過率は、それぞれ  $I_n/I_0$  となる。光学濃度は、この透過率の逆数（光が透過しにくく暗くなる度合い）の対数である。光が透過しにくいほど、濃度が高く（＝暗く）なるという意味になる。ランベルト-ベールの法則によれば、光学濃度は均質なフィルム状の材料の厚さや、光の散乱がなく密度が一定ならシート材料の局所的な坪量に比例する（紙は必ず光を散乱するので実際には比例しない）量である。この光学濃度のばらつきが地合となるので、標準偏差を求めればよいことになるが、紙が厚い場合は光学濃度が飽和に近づくと、ムラがあっても地合がよいと判断される。また、どの程度の細かさで分割して考えるかも問題となるが、視覚的な解像度は、せいぜい 0.3～0.5 mm 程度と思われるので、例えばフラットベッドスキャナで光の透過率を調べる場合には、解像度を 50～100 dpi (0.254～0.508 mm) 程度に設定すればよいであろう。フラットベッドスキャナは、輝度の出力がリニアではないので、校正用のフィルムなどで補正し、紙のない部分の輝度を  $I_0$  とし、各画素の輝度

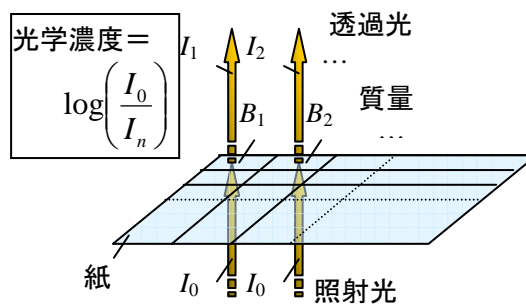


図6 光学的な地合の考え方

を  $I_n$  としてそれぞれの光学濃度を計算すればよい。また標準偏差だけではなく、平均値で除した変動係数の方が視覚的に地合を判断するのに近いであろうし、実際には坪量で除した方がさらによく対応する<sup>1)</sup>。

### 3-2-5 異方性と繊維配向

紙には方向性がある。新聞紙などでは、一定方向に裂きやすくそれと直角方向には裂きにくいことからわかるように、紙には縦と横がある。抄紙機で抄かれる紙の場合、その流れ方向を縦方向 (MD=Machine Direction) とし、これに垂直な方向が横方向 (CD=Cross Direction) である。新聞紙は、記事を読むときの上下方向が紙の縦方向と一致するように印刷されている。そうでないと、手で支えながら読むときに新聞がしおれるように倒れてしまう。抄紙機では、紙料のジェット速度よりワイヤー速度が速いために繊維が引っ張られるようにして配向すること、また紙料を噴き出すスライスの流れの中で MD に繊維が配向することが要因と考えられる。繊維を配向させることによって地合はよくなり、強度や弾性率の高い方向を作る必要があるため敢えて配向させている。しかし、電子写真方式のように CD 方向では、加熱による乾燥によって収縮して皺になるトラブルに繋がる。したがって、コピー用紙の繊維配向は小さくなるように設計されている。

異方性は、前述した引張試験での引張強さ、破断伸び及び弾性率で評価することができるほか、音波の伝播する速さが弾性率に依存する性質を利用し、超音波伝播速度  $v$ 、動的ヤング率  $M_D$  ( $M_D = \rho v^2$  の関係から計算可能。ここで  $\rho$  は密度。)、染色繊維を用いる方法 (染色した繊維を抄き込み、格子

状野線を印刷した透明シートを当て、縦罫と横罫をそれぞれ横切る回数の比)、X線回折を利用し、繊維軸と直行するセルロース結晶格子の (004) 面からの回折ピーク強度比を求める方法などがある。異方性は、繊維の配向そのものに由来する場合と、乾燥工程において特定の方向だけ収縮を抑えることにより弾性率が変化するような場合があり、例えば弾性率の異方性は、繊維配向だけを表しているとは限らないことになる。上に挙げた方法では、染色繊維法と X 線回折法は繊維配向に対応していると言える。

図 8 は、種々の紙の荷重-伸び曲線を MD 及び CD 方向で比較したもので、一般に繊維が配向している MD 方向に引張強度が大きく、引張破断伸びが小さいことがわかる。微塗工紙では、CD 方向の引張破断伸びが特に大きい。これは塗工工程と関係がある。非塗工紙の乾燥は、近接する数十本のドラムに巻き付けて間断なく次々と転移させながら乾燥させるので、紙が宙に浮いている

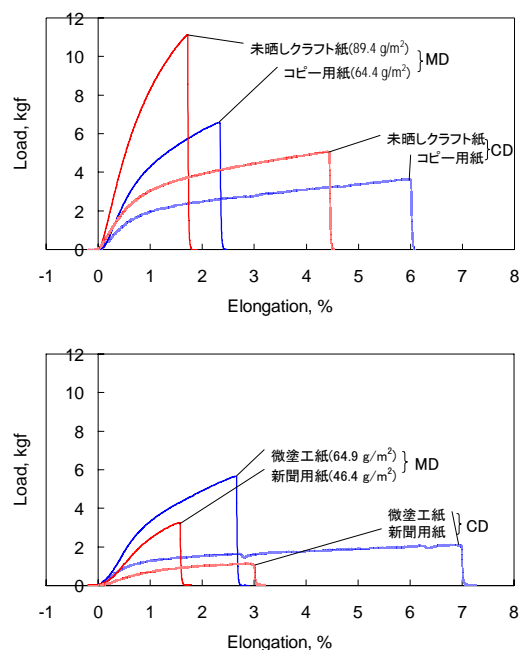


図 8 紙の引張荷重-伸び曲線の MD/CD 比



(オーブンドロー)時間が極めて短くなり、紙の収縮は少ない。塗工紙の場合、乾燥はエアフォイルドライヤーと呼ばれる乾燥機の中を、ドラムに接することなく風で浮かしながら通過させるため、いわゆる自由乾燥となって CD 方向に収縮する。そのため引っ張ったときにはその収縮分だけ余計に伸びるのである。この現象は、図 9 に示す手抄き紙での実験結果からもわかるように、引張破断伸びは、叩解などで決定される一定の伸び量があり、これに乾燥時の収縮量を加えた分だけ伸びることがわかる<sup>2)</sup>。

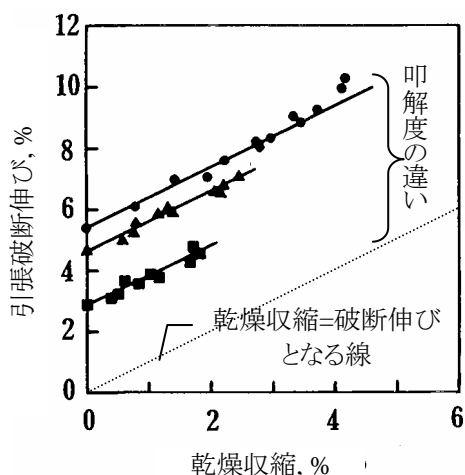


図 9 乾燥収縮量に対する引張破断伸び

コピー用紙などでも環境によって乾湿の繰り返しを受けると、紙の伸びは徐々に大きくなっていくことに注意する必要がある。

紙表面に限定して繊維の配向性を調べる方法として、光の反射方向を調べる方法の他、表面の顕微鏡写真から画像処理によって求める方法がある。図 10 は、左から紙表面の顕微鏡写真、中央がそれを 2 値化した画像、右がフーリエ変換後のパワースペクトルで、中心部分が右上から左下方向に伸びる楕円形状が観察される。この長軸方向と直行する方向に伸びる繊維が多いことを

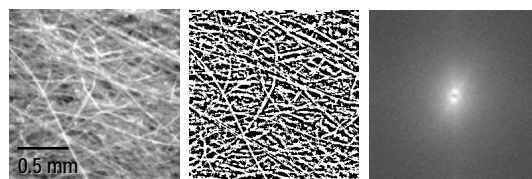


図 10 紙表面, 2 値化, パワースペクトル

示している。左の写真では確かに左上から右下にかけて伸びている繊維が多い。パワースペクトルから全方位に対してフーリエ係数の振幅（パワーの平方根）を積算すると繊維配向度と配向角度を求めることができる<sup>3)</sup>。また共焦点レーザー走査顕微鏡を用いると、内部の繊維の並び具合を画像化できるので、全層についての繊維配向度と配向角度がわかる<sup>4)</sup>。

### 3-3 光学的物性

#### 3-3-1 光沢

光沢とは、物体から来る光の明るい反射がその材料表面に鏡のように写っているかのように見える見え方のことを指す。特に光が入射する角度と同じ角度で反対側に反射する場合には、正反射又は鏡面反射と言う。

紙の光沢は紙の平滑性と密接な関係があり、通常平滑性の指標であるとみなされるが、それは次の理由による

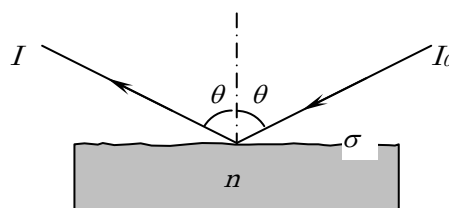


図 11 鏡面反射の光路

図 11 に示すように紙面の法線方向に対し  $\theta=75^\circ$  の入射角で光  $I_0$  を当て、同じく  $75^\circ$  の反射角で反射光  $I$  を検出し、その光の強度の比率  $I/I_0$  を測定して求める。光沢度は相対分光分布と分光視感効率の積を全ての波

長にわたって積分したものに相当する。フレネルの法則によれば光学的に平滑な表面の（分光）鏡面反射率は、入射光の波長 $\lambda$ と入射光の角度 $\theta$ の関数になっている。この関数 $f(\theta, \lambda)$ はフレネル係数と呼ばれる。紙の場合は $\theta=75^\circ$ で照明に収斂光（Converging beam）を使うが、他の材料など一般には、 $\theta=20^\circ, 60^\circ, 85^\circ$ などの角度で平行光を使う。印刷物では白紙より印刷面の光沢度の方が高くなるので、 $60^\circ$ を使う。

### 3-4 力学物性

#### 3-4-1 引張強さ

紙の力学的特性を測定する試験の種類は数多い。JIS規格にあるだけでも引張（ひっぱり）特性の試験、破裂強さ試験、耐折（たいせつ）強さ試験、引裂（ひきさき）強さ試験、圧縮強さ試験（リングクラッシュ法）、印刷での紙むけ試験、湿潤引張強さ試験、耐摩耗強さ試験、こわさ試験、摩擦係数試験がある。このような紙の強度を直接担っているのは個々のパルプ繊維の強度と、繊維間の水素結合の強度である。

引張試験が最も代表的な力学強度試験で、紙の場合は幅 15 mm スパン長 100 mm（切り出す長さは 150 mm 程度以上が望ましい）

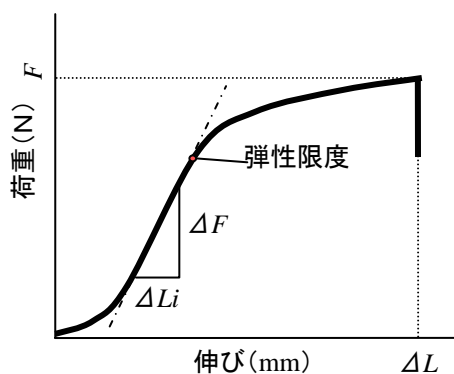


図 12 引張試験における荷重-伸び曲線

となるように引張試験機のつかみ具に挟み、10 mm/min の速度で引っ張る。図 12 は、荷重-伸び曲線で、引張強さ（破壊荷重  $F$  を試験片の幅  $b=15$  mm で除した値）、破断伸び（破断時の伸び  $\Delta L$  を元のスパン長 100 mm で除した値）、引張弾性率（最大の傾き/断面積 $=(\Delta F/\Delta Li)/(bT)$ で、 $T$  は厚さ）などを求める。

図 13 は、紙の比引張強さ（引張強さを坪量で除した値）及び破断伸びに及ぼすパルプ繊維の種類（LBKP は広葉樹漂白クラフトパルプで HBKP ともいう。NBKP は針葉樹漂白クラフトパルプのことで SBKP ともいう。）、叩解の程度及びサイズ剤（AKD=Alkylketene dimer）・填料（二酸化チタン）の添加の影響を調べた結果である。繊維長の長い NBKP の方が比引張り強さが大きく、また破断伸びも大きかった。しかし、叩解の程度を上げると、一般に強度が上がる。また、この図では NBKP と LBKP の差が少なくなった。サイズ剤を加えることにより、比引張強さは多少大きくなったが、助剤によりサイズ剤だけ出なく、繊維の微細成分も歩留（ぶど）まりが上がったためと考えられる。填料は、鉱物性であるため繊維間結合を阻害するだけであるので、比引張強さも破断伸びも小さくなった。

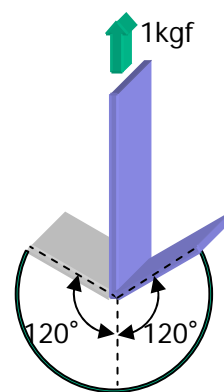


図 14 耐折試験のやり方

#### 3-4-2 耐折強さ

耐折強さは、図 14 に示すように、幅 15 mm



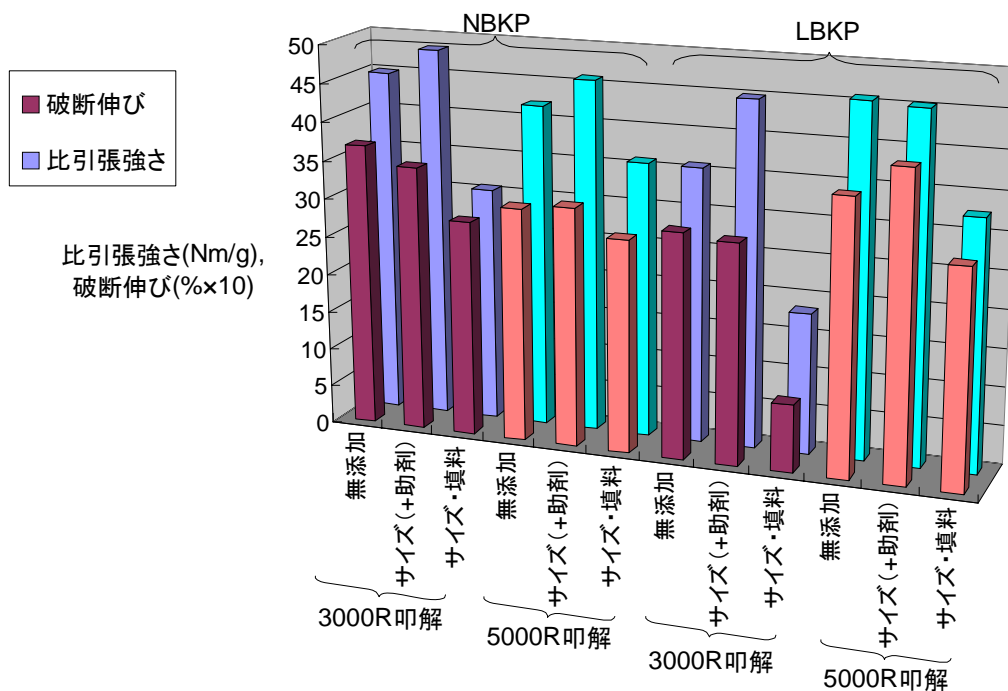


図 13 引張強さに与える、パルプの種類、叩解、サイズ剤、填料の影響

の試験片に 1 kgf の張力をかけた状態で、左右に 120° ずつ折り曲げを繰り返したとき、破断するまでに何往復まで耐えられるかの回数を対数で表す。その対数を試行した試料数で除した平均値が耐折強さである。耐折強さの真数を ISO 耐折回数と呼ぶ。強制劣化試験では、時間とともに耐折強さが直線的に減少することが知られている。

図 15 は、90°C 相対湿度 72% に置いた紙の耐折強さの変化を示す。1 枚の紙を恒温器に入れたとき (Sheet in oven) より、重ねたとき (Stack in oven) 及び密封したとき (Sheet in tube) の方が、耐折強さの減少が速いことを示す。劣化により生じた有機酸が紙の周囲にあると連鎖的に劣化を促進するためである。風通しのいいところに置くと傷みにくいというのは本当である。

### 3-4-3 曲げこわさ

曲げこわさ  $S$  は、材料の曲がりにくさを示す。 $S=Mr=EI$  (ここで、 $M$  はモーメント、

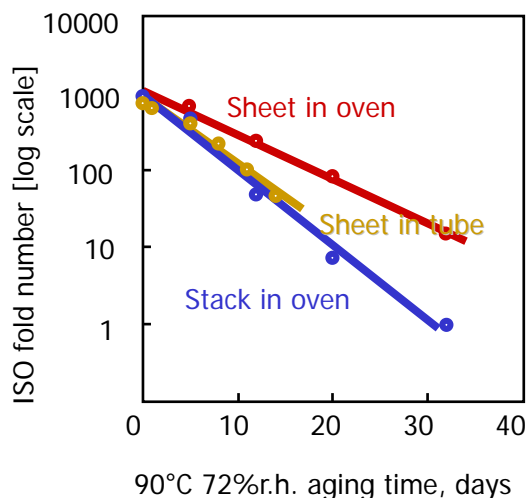


図 15 強制劣化による耐折強さ変化

$r$  は曲率半径、 $E$  はヤング率、 $I$  は断面二次モーメント) と表せる。紙の搬送にとっては非常に重要な性質で、ロール間で宙を走る紙がうまく次のロールに移るかどうかわという特性に関わる。

コピー用紙などの薄い紙では、曲げこわさを測定は、図 16 に示すクラーク試験機で

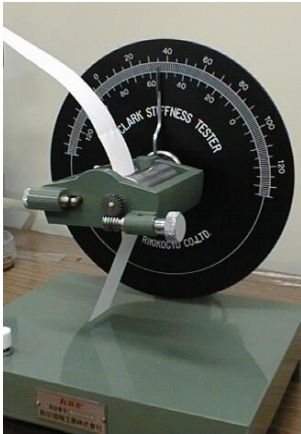


図 16 クラークこわさ試験機

行うのが普通である。試験片を挟んで上に向けて支持する。つかみの回転によりある角度で反対側に反り返る。この角度の左右両側での差が  $90^\circ$  となるよう、つかみから試験片を張り出させる。その張り出し長さ  $L(\text{cm})$  の 3 乗の 100 分の 1 をクラークこわさとする。実際には 100 分の 1 ではなく、式(3)に示すように 203 分の 1 が物理的な意味での曲げこわさを表す<sup>5)</sup>。式(3)では、物理量は  $\text{msk}$  単位系又は  $\text{cgs}$  単位系にすべて統一する。坪量  $W$  については、試験片の自重が荷重として作用するため重力加速度  $G$  を乗じなければならないが、203 という係数は既に  $G$  を考慮した数値になっている。

$$\frac{L^3}{100} \propto \frac{L^3}{203} = \frac{EI}{bW} = \frac{ET^3}{12W} \quad \text{式(3)}$$

#### 3-4-4 引裂強さ

引裂強さは、切れ目を入れて引き裂き続けるのに要する平均的な力のことである。図 17 に示すように、切れ目を入れて、90 度方向に長さ 43 mm を引き裂くときの仕事を測定し、引き裂き続けるのに必要な

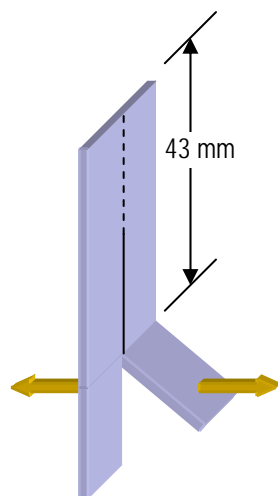


図 17 引裂試験のやり方

力(mN)に換算する。エルメンドルフ形引裂試験機を使う。繊維長が長いと引裂強さが上がる。紙は、繊維間の結合が切れても破壊が伝わりにくいため、プラスチックなどに比べると引裂強さが大きい材料である。

#### 3-4-5 摩擦係数

摩擦の問題もコピー用紙の搬送やトナー転写ロールとの接触などで重要な問題となる。JIS で規定された紙間摩擦係数を測定する方法は次の通りである。水平架台に置かれた紙とブロック状のおもりの下面に固定された紙との間に生じる静摩擦および動摩擦係数は、接触部分の面積が  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  で、圧力  $2.2 \text{ kPa}$  ( $800 \text{ g}$  のおもりに相当) をかけて  $20 \text{ mm/s}$  の速度で引っ張って測定する。摩擦力をおもりによる垂直荷重で除して摩擦係数を求める。紙の特性が摩擦係数に与える要因として、平滑性、弾性率、密度、添加薬品、填料、含水率などがある<sup>6)</sup>。平滑性の影響を調べるには、密度が変わらない条件で紙を調製する必要がある。ウェットプレスから乾燥工程に至るまで、目の粗さの異なるサンドペーパー（粗い方から#800, #1000 及び#1500 で、スチールプレートはさらに平滑）を紙に密着させて試験用すき紙を調製した。図 18 は、紙の平滑度（王研式平滑度を付記した）が紙間動摩擦係数に与える影響を示す。概ね平滑度(s)が高いほど動摩擦係数が減少することがわかる。塗工紙の場合、塗工層に配合する顔料形状の影響が大きく、例えば図 19 に示すように平板状のカオリンと立方体状の軽質炭酸カルシウム (PCC) を混合して使用するとき、PCC を多く配合した方が摩擦係数は大きくなることがわかる。カオリンクレーは平板状で滑りやすい性質がある。

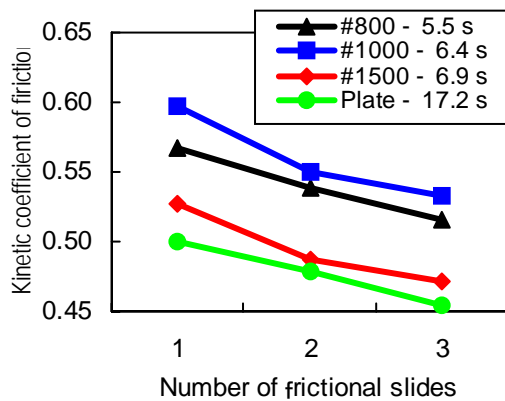


図 18 平滑度が摩擦係数に与える影響

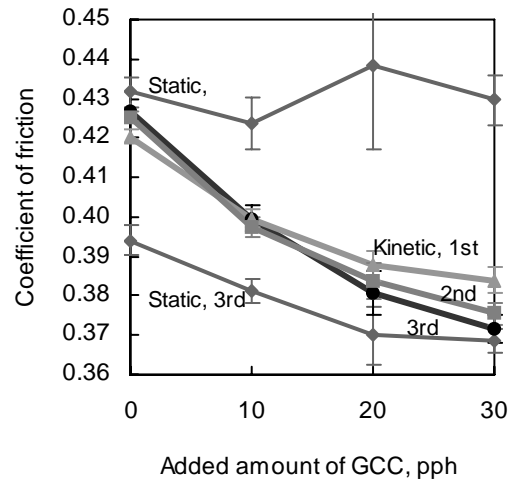


図 20 顔料比 GCC/PCC 比と摩擦係数

図 20 に示すように同じ炭酸カルシウムで

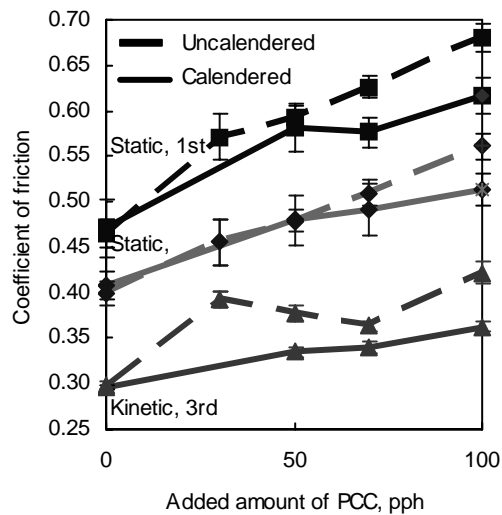


図 19 顔料組成 PCC/Clay 比と摩擦係数

も重質炭酸カルシウム (GCC) を多く配合した方が軽質炭酸カルシウム (PCC) よりも摩擦係数が小さくなる。GCC は大きい粒子を含むので塗工直後では表面が粗いが、摩擦の際に表面が変形しやすく平滑化しやすいためであると考えられる。同一箇所どうしで 3 回の摩擦を繰り返すと、30%の GCC 配合のときは、動摩擦係数が低下していくのに対し、100%PCC 配合では摩擦を繰り返すと摩擦係数がむしろ上昇する傾向にある。表面に生成した傷が堅いためと考えられる。

添加薬品では、サイズ剤として添加される AKD は、長いアルキル鎖をもつため特に滑りやすい (C<sub>14</sub>~C<sub>18</sub> 程度が滑りやすい) ことが知られている。またステアリン酸カルシウム (ステアリン酸は C<sub>17</sub> の飽和脂肪酸) は滑剤として塗工紙の塗工カラーに添加される。

### 3-5 印刷適性

#### 3-5-1 印刷光沢の発現メカニズム

電子写真方式では、印刷面の光沢が用紙の光沢とは無関係に高くなりすぎる問題がある。白紙光沢に応じた印刷光沢が発現するオフセット印刷と比較することによって、そのメカニズムにならない、解決することを試みた。表 1 に示すように、光沢度が異なる 4 種類のコート紙を用いて、印刷前後の 3 次元的な表面形状画像間でピアソンの相

Table 1 Correlation between paper and print surface topographies

	Offset	Elect.
Matte coated	0.88	0.63
Dull coated	0.88	0.61
Gloss coated	0.73	0.32
Cast coated	0.21	0.07

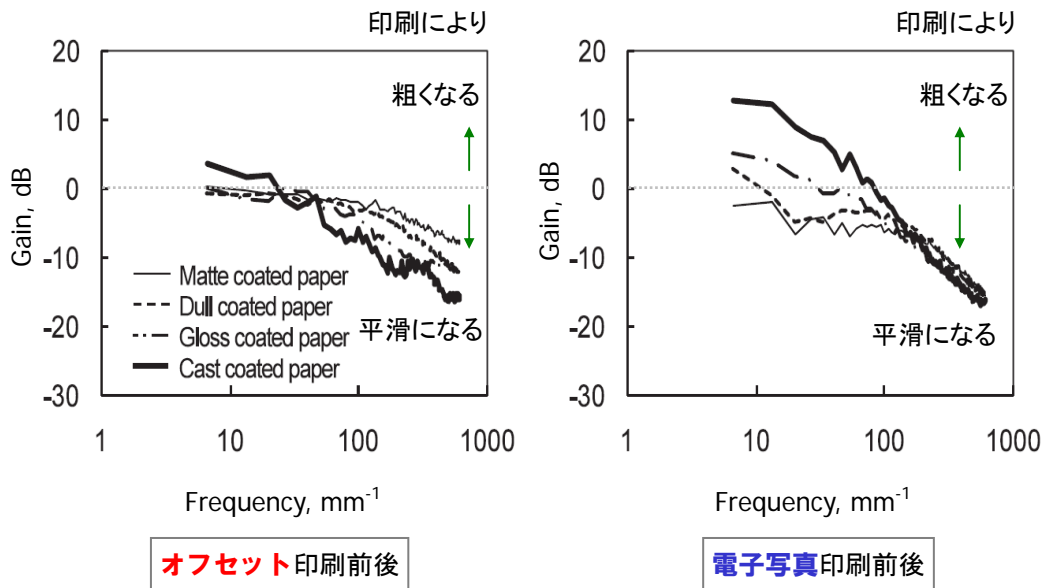


図 21 伝達関数を用いた用紙表面起伏の再現性

関係数を計算した。オフセット印刷 (Offset) ではキャストコート紙を除いては概ね相関が高く、印刷面に用紙面の形状が現れていると言えるが、電子写真方式 (Elect.) ではすべての用紙種で相関が低く、粗い紙ですら、用紙表面の起伏を被覆して高い印刷光沢が発現していることがわかった<sup>7)</sup>。

用紙面の起伏のうち、繊維の凝集状態のような大きなオーダー (サブ mm オーダー) の起伏が現れているだけなのか、繊維幅 (約 20 $\mu\text{m}$ ) のような $\mu\text{m}$  オーダーの起伏も現れているのかを調べるために、用紙表面形状を入力、印刷物表面形状を出力とする伝達関数を粗さ領域別に分けて算出した。図 21 に示すように、用紙種ごとの起伏伝達関数を比較すると、オフセット印刷では低周波数域 (サブ mm オーダー) では用紙に因らず同程度の再現を示すが、高周波数域 ( $\mu\text{m}$  オーダー) では起伏が大きく光沢度が低い用紙 (Matte 及び Dull) ほど 0 dB に近い高い再現性があり、印刷後もその起伏を残す傾向を示した。電子写真方式においては、オフセット印刷と異なり、低周波数域では

用紙種間で異なった再現を示し、起伏が大きく光沢度が低い用紙ほどゲインが低く 0 dB に近い小さい値をとる。一方、高周波数域で用紙種に因らず同程度のレベルの再現を示し、ゲインがオフセットよりも低くなっている。すなわち用紙の起伏の大小に因らず印刷光沢が高くなることを示している。低周波数域での挙動から、オフセット印刷では用紙表面の起伏が印刷物表面に残り、電子写真方式では一様に平滑化されたことがわかる。印刷光沢発現は、10~100  $\text{mm}^{-1}$  (100~10  $\mu\text{m}$ ) の周波数領域での用紙表面の起伏再現性に依存していると考えられる。

マットコート紙の用紙表面形状とオフセット印刷物試料のインキ量分布の関係を確認した結果、転移直後は用紙表面形状に関係なく分布していたインキが、時間経過とともに用紙表面形状に倣った分布に変化していくことがわかった<sup>8)</sup>。このメカニズムにならってトナーの動きを制御できる手法を用いることにより、用紙の光沢度の変化に応じて画像部光沢度が変化する電子写真方式を開発するに至った。

### 3-5-2 表面強度

表面強度は、材料学的な強度と言うより印刷適性の部類に入る概念である。印刷胴から紙が離れる際にインキのタックにより紙表面の一部がはぎ取られる現象が白抜けと呼ばれる印刷トラブルになる。ひどいときは紙の表面すべてが剥ぎ取られる紙むけが起きる。このようなインキとタックの力に対する抵抗力が表面強度である。オフセット印刷が高速に行われるようになって特にクローズアップされてきた問題である。

紙表面に導管 (Vessel) があると平べったい形状のために、繊維との結合が十分ではなく、ベッセルピックが発生しやすい。叩解を十分行えば軟化による結合促進効果がある程度出るが、その効果は、繊維に対しては十分であっても導管には十分ではない。遠心型クリーナーを利用して導管を分離し、導管だけを強く叩解することも行われる。実際には、紙表面にサイズプレス工程<sup>9)</sup>(紙の乾燥工程以降の加工工程の1つで、デンプンや合成ポリマーを塗布することにより、液体の浸透抑制効果を付与したり、表面強度を上げるための処理)でデンプンを塗布することにより表面(ピック)強度を向上させている。また、CMC (Carboxymethyl Cellulose)を抄紙前に添加することにより繊維への結合力を与える方法もある。繊維よりも吸着量が多いためであると推測されており、印刷試験でも白抜け面積が顕著に低下することがわかっている<sup>10)</sup>。電子写真方式ではオフセット印刷ほどには問題視されていないが、最近ではベッセルピックの問題よりも古紙配合率の増加のために微細繊維が多くなっているという点では、やはり表面強度は低下する傾向にある。

#### ダウンロード

本書及び参考文献は、次の URL からダウンロードできます。

そのため紙力増強剤やサイズプレス処理は必須である。また炭酸カルシウムなどの填料もコスト削減のため低価格の重質炭酸カルシウム(摩砕により微細化する)を使用すると、軽質炭酸カルシウム(合成するため粒径が比較的均一)に比べて微細な粒子の割合が多く、紙粉やピックアップが生じやすいのではないかと考えられる。

### 4 おわりに

以上、電子写真方式などで紙による出力を行う場合、高い印刷品質及び搬送やハンドリングに優れた適性を持つ紙はどのようなものかを考えながら、その基礎となる紙の基本的な物性について考えてみた。今後スマートフォンなどの電子媒体の進化に伴って紙出力を行わなくてもよい機会がますます増えると思われる。

人間社会と流通を考えた場合、このような電子媒体は個人の所有するモノであり、社会に流通するのは情報である。電子媒体と情報は切り離されているので、情報は常に動き更新されていくが、モノは個人で更新されなくてはならず、そこで人間と媒体システムとの親和性が問われる。ところが紙は、情報とモノが一体化して流通する。役割を終えれば、モノはリサイクルされ、情報は消える。技術的に優れた紙が情報と一体化しても、人間は高度化したモノを苦もなく手にすることができる。人間が紙を手放せないのは、無意識のうちに高度化した技術を享受できるからではないだろうか。これからも情報媒体としての紙は、社会に融け込み、その役割を担っていくものと考えている。

<http://psL.fp.a.u-tokyo.ac.jp/hp/enomae/publish.htm>

江前敏晴連絡先 : [enomae@psL.fp.a.u-tokyo.ac.jp](mailto:enomae@psL.fp.a.u-tokyo.ac.jp)

## 参考文献

---

- 1) Enomae, T and Kuga, S., "Methodology to use flatbed image scanner for formation analysis of paper", Japan Tappi J., 56(4)97-104(2002).
- 2) 木村実, 学位論文, 東京工業大学, 67-75(1996).
- 3) Enomae, T., Han, Y.-H. and Isogai, A., "Nondestructive determination of fiber orientation distribution of fiber surface by image analysis", Nordic Pulp and Paper Research Journal 21(2): 253-259(2006).
- 4) Enomae, T., Han, Y.-H., Isogai, A., Hotate, M., Hasegawa, S., "Mechanisms of perception of laid lines in Japanese paper", Journal of Wood Science, 56(5), 395-402(2010)
- 5) 大籠幸治, 江前敏晴, 尾鍋史彦, "塗工紙の曲げこわさの評価法と制御", 紙パ技協誌, 51(4): 635-644(1997).
- 6) 江前敏晴, "紙のトライボロジー概説", トライボロジスト 46(10): 741-746(2001).
- 7) Y. Kitano, T. Enomae, and A. Isogai: Analysis of Printed Surface Topography in Electrophotography and Offset Printing, NIHON GAZO GAKKAISHI, 44, 450-456 (2005) [in Japanese].
- 8) Y. Kitano, T. Enomae, and A. Isogai: Post-Printing Micro-Dynamics of Ink Film on Matte Coated Paper, NIHON INSATSU GAKKAISHI, 43(5), 24-33 (2006) [in Japanese].
- 9) 江前敏晴, "塗工及びサイズプレスによる紙の機能化", 日本木材学会第5期研究分科会報告書-21世紀に向けた紙パルプ製造技術-, 日本木材学会(1997).
- 10) Rakkorainen, M., Kontturi, E., Isogai, A., Enomae T., Blomstedt, M., Vuorinen, T. "Carboxymethyl cellulose treatment as a method to inhibit vessel picking tendency in printing of Eucalyptus pulp sheets", Ind Eng Chem Res, 48(4), 1887-1892 (2009).