

紙の特性と評価方法及び規格の動向

江前敏晴*

Paper properties and their evaluation methods with latest relevant testing standards

Toshiharu Enomae

英文要旨

When image information is conveyed with paper media, the information is greatly altered by the paper properties. Printing-related properties of paper and their definition and testing methods were described with reference to JIS specifying the testing methods. Paper is hygroscopic and the standard atmosphere for testing paper is specified to be 23 and 50 % relative humidity. Basis weight, thickness and density were described as structural parameters. Illuminant C diffuse illumination / normal view is the standard optical condition, and details of brightness, opacity, color and gloss were explained. High opacity peculiar to paper is ascribed to its high specific light scattering coefficient. Then, its calculation method and difference between paper and plastic sheets were demonstrated. For mechanical properties, tensile strength, folding endurance, tear strength and paper-to-paper friction were described. Finally, it was reported as a recent trend of ISO standard that new testing standards about recycled pulp and paper are being established.

Keywords

Basis weight, Brightness, JIS, Recycled pulp, Tensile strength

和文要旨

画像がもつ情報を印刷メディアである紙を使って伝達する場合には、その情報は紙の特性にも大きく左右される。印刷に関係すると考えられる主な紙の特性について、定義とその測定方法を解説し、それらを規定する規格である JIS を付記した。紙は吸湿性が高く、紙の調湿及び試験のための標準状態は 23 / 相対湿度 50% と規定されている。構造的な特性としての坪量、厚さ、密度の定義と測定方法を解説した。光学特性はイルミナント C で拡散照明 / 0° 受光で測定するのが標準であり、白色度、不透明度、色、光沢度の意義を示した。紙の不透明性は比散乱係数の高さ由来のものでその計算による求め方及び紙とプラスチックの比較を示した。力学特性として、引張、耐折、引裂の各強度と紙間摩擦係数の測定方法について述べた。最後に、ISO 規格の最近の動向として古紙パルプ、再生紙についての規格が整備されていることを報告した。

Keywords

坪量、白色度、JIS、古紙パルプ、引張強度

* 東京大学 大学院農学生命科学研究科

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1 (E-mail: enomae@psl.fpl.a.u-tokyo.ac.jp)

* Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan (E-mail: enomae@psl.fpl.a.u-tokyo.ac.jp)

1. はじめに

画像を表現する最も身近なメディアが紙である。画像がもつ情報をいかに忠実に人に伝えられるか、あるいは人がどのようにその情報を読み取るかは、印刷メディアである紙の特性にも大きく左右される。例えば、ある商品の印刷がその実物をどのくらい忠実に再現できるかによってその印刷物が読者に与える印象は変わるわけだが、その再現性の程度は、インクや印刷方式の精度のみならず、紙の平滑性や光学特性などの物性によっても大きく異なってくる。つまり、紙の特性は、本来その画像が持つ情報の伝達に大きく影響するわけである。本稿では、印刷に関係すると考えられる主な紙の特性について、定義を述べ、その測定方法や評価方法について議論することにする。また商取引での表示のために測定が必要となる物性値も数多くあり、それらは紙の試験規格になっている。そこで、それぞれの物性値について JIS 及び ISO 規格を付記することにする。これらの試験方法は、紙をあまり扱っていない方でも参照しながら測定することが可能であり、規格本文の記述から、それがどういふ意味合いのある測定なのかもある程度理解することができるので、本誌の読者にも有用と考えられる。

2. 印刷に関連した紙の物性

2.1 調湿及び試験のための標準状態

JIS P 8111 パルプ、紙及び板紙 - 調湿及び試験のための標準状態 が 1998 年に改正され、その標準状態が 23 / 相対湿度 50 % になった。紙は吸湿性が高いため一定の標準状態で試験を行わなければならない。従来の条件 20 / 相対湿度 65 % は現在では認められていない。

2.2 紙の構造

2.2.1 基本物性 - 坪量、厚さ及び密度

ある紙の特性を表現するとき最も基本となるのは、坪量、厚さ及び密度である。坪量は 1m^2 あたりの質量 (g) のことで、標準状態における紙の質量から計算する。単位は g/m^2 である。以前は比引張り強さなどの力学的特性値の計算に、105 度で恒量となるまで乾燥したときの質量から求める絶乾坪量を用いたが、現在では調湿及び試験のための標準状態における質量から求めた気乾坪量を用いる。厚さと密度の測定法に関しては、JIS P 8118:1998 紙及び板紙 - 厚さ及び密度の試験方法 に規定されている。厚さの測定は、一方の直径が 16 mm の 2 つの平行な円形加圧面で挟む構造のマイクロメータを使用し、 μm 単位まで測定する。紙を挟む圧力は日本や北米では 100 kPa で行い、欧州では 50 kPa が主に用いられ、どちらも ISO 規格で認められているが、通常の印刷用紙ではほとんど差がない。1 枚ずつ測定する厚さの方が 10 枚を束ねて測定し平均した厚さ (“バルク厚さ”) よりも通常大きくなる。坪量が異なる紙を同じ工程で製造した紙数種 (密度がほぼ一定) について坪量と厚さを測定すると直線関係にあるが、外挿すると坪量 0 でも数 μm の厚さを示す。これは、微視的に見れば紙の表面が粗いため、マイクロメータによる測定では表面の凸部を結ぶ面を表面とみなすからである。マイクロメータの平行板を金属ではなく柔らかいゴムにしたり¹⁾、水銀に沈めて浮力から体積を測ったりする方法²⁾を使うと真の厚さを測定できる。密度は、坪量を厚さで除すことにより求められ、 g/cm^3 単位で表す。ここで定義される密度は、厚さの測定からもわかるように空隙部分も含めた見かけの密度 (“apparent density”) であり、物質

に固有の真密度とは異なる。また厚さの測定条件により, “バルク密度” も定義される。

表 1 は, 広葉樹さらしクラフトパルプから各処理を経て調製した試験用すき紙の密度を示す³⁾。叩解は繊維を毛羽立たせ, また柔軟にするために機械的にすり潰す処理で, これによって繊維がよく絡み合い密度が上昇することがわかる。ウェットプレスは湿紙の状態, カレンダは乾燥した状態のシートを圧力をかけて潰す処理であるが, いずれも密度を上げる。鉱物性の紛体を繊維に混ぜて抄き込むのが填料の内添であるが, 炭酸カルシウムの密度がパルプ繊維の密度より大きいにもかかわらず, 繊維間結合を阻害するために内添量の増加とともに密度が下がる。

2.2.2 表面粗さ

紙の表面粗さ又は平滑度は, オフセットなどの接触型の印刷方式では極めて重要な物性で, インキ量の少ない場合は紙の凸部だけにインクが転移する。紙の表面粗さ測定法は大きく分けて, 空気漏洩 (エア・リーク) 式と表面プロファイル測定方式に分類できる。空気漏洩式では, 平滑な金属面で紙を一定の圧力で接触させ, 紙表面と金属面との間にできる間隙を通して空気が漏洩する速度を測定する。空気は金属面に作られた同心円状の溝の中の孔から吹き出し, 同じく環状の凸部を横切って隣の溝の孔から出て行く。そのときの凸部の幅, 空気の圧力, 紙を押さえる圧力などによって数種類の装置が使用されている。ISO 規格だけでも 4 種類の装置が規定されているが, その中で, JISP8151:2004 紙及び板紙 - 表面粗さ及び平滑度試験方法(エア・リーク法) - プリント・サーフ試験機法 が日本では広く使われつつある。プリント・サーフ粗さでは, 図 1 に示す模式図の平均間隙 (あるいは平均深さ) G_3 を式(1)から計算する^{4, 5)}。

$$G_3 = \left(\frac{12mbQ}{w\Delta P} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{式(1)}$$

ここで, m 空気の粘度, b : 空気流出距離, Q : 単位時間あたりの空気流出体積, w : 空気流出幅, DP : 間隙を通過する前後の空気の圧力差, である。凸部の幅が通常の紙よりも薄いわずか $56 \mu\text{m}$ であるため空気が紙を透過して裏面から漏洩する分は無視でき, 紙を押さえる圧力も印刷方式に合わせて 3 段階に変えられる点が優れている。また, 表面粗さを紙表面と平滑な金属面との間にできる平均的な間隙距離 (μm) として求めるので表面プロファイルの測定結果と比較しやすい。この方式以前から日本で広く使われている方法に, JAPAN TAPPI 紙パルプ試験方法として規定されている王研式平滑度試験機がある⁶⁾。これは, 非常に古くから世界的に使用されているベック法を迅速に測定できるよう改良したものである。凸部の幅がやや広い 1mm であるのと, 結果を 500ml の空気が漏洩するまでに要する時間を秒単位で報告するため物理的な意味が不明瞭である。空気の漏洩はいずれもポアゼイユの流れ (層流) とみなせるので, 紙を押さえる圧力の違いと裏面からの漏洩を無視すればどの機種を使用する方法でも結果に互換性がある。換算式に関する理論的な議論は文献⁷⁾を参照されたい。

表面プロファイル測定方式は, 紙の凹凸の形状を正確に測定し, 粗さのパラメータを計算から求める⁸⁾。測定方法はいくつかある。針で表面を走査しその上下動を記録する触針式が古くからありデータの安定性は高い。最近では, レーザー光を使った光学顕微鏡の 1 種とも言える共焦点式及び干渉式⁹⁾などがよく使用される。非接触式で分解能が高いという点で優れており, 平滑度の高い塗工紙などには適している。しかし, 反射光量が不十分な粗い紙などの場合はデータに欠損箇所ができる。走査型プローブ顕微鏡は, さらに高い分解能を有する

が、高さ方向も面方向も測定範囲を十分に広く取ることができないため、紙の印刷適性として粗さを測定した例はほとんどない。また走査型電子顕微鏡に対称に位置する複数の検出器を取り付けて出力の演算により電子線照射箇所の傾きを求め、積分して表面プロファイルを計算する方法もある¹⁰⁾。

紙の表面形状を考えると、パルプ繊維の大きさ、繊維の凝集体（フロック）に起因する紙の不均一性、さらにはしわや反りなど、小さい領域から大きい領域まで様々なレベルの粗さを考慮しなくてはならない。しわや反りのような大きな変形は“うねり”であり、通常表面粗さとして扱うよりもはるかに大きなレベルになる。空気漏洩式の場合は、圧力をかけて紙を押さえることによってうねりをなくす。表面プロファイル測定方式の場合は紙を押さえる圧力が全くないか又は非常に弱い。しかし、フーリエ変換を使った数学的処理によってうねり成分を除いて中心線平均粗さ（基準線又は基準面からの平均的な距離）などを求めることが可能である¹¹⁾。

2.2.3 透気度

透気度は、紙の一方の面から他方の面に空気が抜ける速さで、測定機によって仕様が異なるが、ISO 透気度 P ($\mu\text{m}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$) を式(2)で定義することにより、機種に依存しない透気度が得られるようになっている。

$$P = \frac{V}{1000 \times A \Delta p t} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 V : 試験面積を透過する空気の量 (mL)、 A : 試験面積 (m^2)、 Δp : 透過前後の空気の圧力差 (kPa)、 t : 透過時間 (s) である。測定装置としては JIS P 8117:1998 紙及び板紙 - 透気度試験方法 - ガーレー試験機法 がよく使用されているが、結果は、 642mm^2 の紙を空気 100mL が通過する時間 (秒) として定義される“透気抵抗度 (ガーレー)” で表す。また、平滑度と同じく同一の原理で測定時間が短くなるように工夫された王研式透気度試験機でも透気抵抗度は秒数で示される¹²⁾。紙の物性値で、透気度を秒数で表現している場合があるが、これらは規格の上で透気抵抗度と最近呼び改めた。今後混乱を避けるため、ISO 規格への整合化からすべて ISO 透気度に換算して表記する方が主流になっていくと思われる。

2.3 光学特性

2.3.1 反射率計

光学物性として、白色度、不透明度、色を測定対象とする紙の試験規格が最近大きく改正された。従来は、図 2(A) に示すような 45° 照明 / 0° 受光のハンター形装置を光学物性測定のために国内で使用してきたが、この装置での測定にはいくつかの欠点がある。本や新聞など印刷物を読む場合、必ずしも一方からの照明ではなく、周囲からの反射光全体を照明光とするのが普通であること。そして紙のもつ異方性のために、照明及び受光の光軸を含む面を試料の縦方向と横方向のどちらに平行に合わせるかによって反射率係数が異なること。さらに白色度測定の場合、波長 457nm の青色光領域の反射率係数を測定するが、照明光に青色のフィルタを入れること。これは、紫外領域の光で励起し、青色の蛍光を発する蛍光増白剤を含む紙の実際の白さを反映しない。このような欠点のために、この装置はかなり昔から ISO 規格の標準装置ではなくなっていたが、日本だけが長く標準装置として使用してきた。しかし、JIS でも 2003 年 3 月をもってハンター形反射率計を使用する規格を廃止した。代わりに標準の反射率計として現在規定されている (JIS としては 2005 年 3 月までに、紙、板紙及びパルプ - 拡散反射率係数の測定方法 が発行される予定) のが、図 3(B) に示すような積分球を使用したエルレ

フォ形である。積分球内面は反射率の高い白色顔料が塗布されており、内部で拡散反射を繰り返すことにより、全方向に等価な光が紙を照射し、 0° 方向で受光する。分光フィルタを入れる場合は反射光に対してである(実際にはフォトダイオードアレーを使って分光反射率から計算する装置が多い)。

2.3.2 光源

印刷用紙をはじめとする比較的高級なグレードの紙には必ずといってよいほど蛍光増白剤が含まれる。紙に使われる蛍光増白剤は、通常 $350\text{ nm} \sim 400\text{ nm}$ 域の紫外光エネルギーを吸収して、 $400\text{ nm} \sim 450\text{ nm}$ 域の青色光を発光する。黄味を帯びた色調を取り除く効果があり、白色の紙では白さを強調することになる。本や新聞など印刷物を読む場合、蛍光灯や窓から差し込む太陽光が照明となるが、それらには多くの紫外線が含まれる。したがって紙の色や白色度を測定する場合、測定値を現実的な色調に合わせるためには、照明光源に紫外光が含まれていなければならない。この観点から、紙の光学物性を測定する場合の光源として CIE (International Commission on Illumination = 国際照明委員会) イルミネント C (C 光源) を採用することが決められた (ISO 2470:1999)。イルミネント C は、屋内昼光を模して規定されているが、自然光に近く紫外光成分をさらに多く含んだ合成昼光イルミネント D65 が他分野では多用されている。紙の場合は、自然光が強い窓際よりも電灯を併用した室内で紙や印刷物を見ることが多いためイルミネント C が選択されたと考えられる。光源選択の経緯は次のとおりである。従来の ISO 規格 (ISO 2470:1977) では蛍光を考慮に入れていなかったため光源の種類には影響を受けないという前提であった。だが、蛍光増白剤の影響を無視しては人が感じる白さとかげ離れた測定結果になってしまっていたため、光源としてイルミネント D65 を使用することを暗黙のうちに標準としてきた。しかし、結局書籍や印刷物を読む環境を考えたときに最も適切と考えられるイルミネント C を使うことが規定されたのである。これに対し習慣的にイルミネント D65 を使用してきたヨーロッパ側から、蛍光増白剤の効果をはっきりと知るための手段としてイルミネント D65 を照明光とする白色度及び色の規格も制定しようとする動きが出た。賛成国数が多いため制定されるのは時間の問題となりそうである。ただし、この白色度を D65 白色度と呼び、紙の標準の ISO 白色度とは区別される。

2.3.3 ISO 白色度

ISO 白色度は、規定の反射率計と光源を用いて有効波長 457 nm 半値幅 44 nm となる分光条件で測定したときの固有反射率係数 R を意味する。固有とは、反射率係数が変わらなくなるまで十分な枚数を重ねた場合を意味する。ISO 2470:1999 に整合化した JIS P 8148:2001 紙、板紙及びパルプ - ISO 白色度 (拡散青色光反射率) の測定方法 の特徴は、前述の反射率計とイルミネント C を用い、反射率計の校正には、従来の IR3 標準無蛍光白色面に加え、IR3 (ISO reference standard level 3) 標準蛍光白色面も使用すること、などである。その結果、同一品種の紙の白色度が多少変わる (ハンター形に比べて高くなり、D65 照明に比べ低くなる)。

図 3 は各種塗工紙のイルミネント C による分光反射率係数の測定例で、インクジェット用紙は 440 nm 付近に強いピークをもち明らかに蛍光増白剤による励起効果と考えられる。A2 コート紙は 460 nm 付近に緩やかなピークをもつが、蛍光増白剤を含まないラボ調製塗工紙との比較から、量は少ないものの蛍光増白剤が含まれていると考えられる。 457 nm の波長付近の分光反射率係数から ISO 白色度を計算するので、たとえばインクジェット用紙は、ISO 白色度が 92.4 と高い値を示す。

JIS にはないが、白度 (ホワイトネス) に関する紙の ISO 規格があり、ISO 11475:1999 Paper and board -

Determination of CIE whiteness, D65/10 degrees (outdoor daylight) に規定されている。これはイルミナントD65で照明し、視野10°の条件で測定する場合について規定している。また、波長範囲は457nm 付近の青色光の領域ではなく、555nm 付近の緑色光の領域である。

2.3.4 不透明度

JIS P 8149:2000 紙及び板紙 - 不透明度試験方法 (紙の裏当て) - 拡散照明法 で規定する不透明度は、同一試料について、単一シート視感反射率係数 R_0 の固有視感反射率係数 R に対する比率を百分率で表した値と定義される。この定義は従来から印刷不透明度と呼ばれていた値でもある。なお、視感度は、視覚的に明るさの感度のもっと高い緑色光領域での測定をさす。以前使用されていたハンター不透明度の定義は、黒色板を裏当てした単一シートの反射率係数を反射率係数 89% 白色板を裏当てした単一シートの反射率係数 $R_{0.89}$ で除した値であった。図 4 にこの定義の比較を模式的に示す。また有彩色の強い紙及び板紙は R が小さくなり不透明度計算の誤差が大きくなるので適用範囲外となった。

2.3.5 比散乱係数

紙の白さや高い不透明性は、比散乱係数が大きいという特性によるところが大きい。本来透明なはずの砂糖や雪が白く見えるのと同様に、紙には繊維内部や繊維間に無数のポア (空隙) があるため、光を屈折する繊維と空気の界面が無数にできる。このような光の屈折を繰り返すために、紙の正面に直進して来た光も紙の内部では四方八方に散乱することになる。この散乱の程度を評価する式としてクベルカムンク (Kubelka-Munk) の式が知られている。

式(3)及び式(4)は、それぞれ測定対象である紙の反射率係数 R と透過率 T に関するクベルカムンクの基本式である¹³⁾。なお R_∞ : 同種の紙を十分厚く重ねて裏当てして測定したときの固有反射率係数 (0 ~ 1), R_g : 測定対象の紙に裏当てするための材料について裏当てだけで測定した反射率係数 (0 ~ 1), S : 比散乱係数 (m^2/kg), K : 比吸収係数 (m^2/kg), W : 坪量 (g/m^2) である。

$$R = \frac{R_\infty(1 - R_g R_\infty) - (R_\infty - R_g)e^{-2bSW}}{(1 - R_g R_\infty) - R_\infty(R_\infty - R_g)e^{-2bSW}} \quad (\text{反射率係数}) \quad \text{式(3)}$$

$$T = \frac{(1 - R_\infty^2)e^{-bSW}}{(1 - R_g R_\infty) - R_\infty(R_\infty - R_g)e^{-2bSW}} \quad (\text{透過率}) \quad \text{式(4)}$$

ここで、 $b = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_\infty} - R_\infty \right)$ である。

比散乱係数 S はその紙の単位坪量あたりの散乱能力を示す指標になる。 S が大きいほど紙は不透明になる。 S を求めるには、反射率係数 R_g を持つ材料 (通常 $R_g=0$ の光トラップ) を測定したい紙に裏当てして反射率係数 R を測定し、式(3)に代入して S を計算する¹⁴⁾。

同種の多数の紙で裏当てして測定した固有反射率係数 R_∞ が計算に必要であるが、同種の紙が手に入らない場合がある。このような場合は、試料 1 枚に対し 2 種類の裏当てを用意して測定することにより R_∞ を計算することが可能である。まず光トラップあるいはきわめて白色度の低い紙などの裏当てを用意し、その反射率係数を測定しこれを R_{g1} とする。次に反射率係数の高い標準板 (あるいは白色度の高い紙) を用意し、その反射率係数を測定し R_{g2} とする。測定対象の紙にそれぞれを裏当てして測定した反射率係数を R_1, R_2 とする。この 4 つの測

定値を式(5)に代入し試料の固有反射率係数 R_{∞} を計算して求める¹⁵⁾。さらに式(3)で R_{∞} , R_1 , R_2 , R_{g1} , R_{g2} のように置

$$R_{\infty} = \frac{c - \sqrt{c^2 - 4}}{2} \quad \text{式(5)}$$

ここで, $c = \frac{(R_{g1} + R_2)(R_1 R_{g2} - 1) - (R_1 + R_{g2})(R_2 R_{g1} - 1)}{R_1 R_{g2} - R_2 R_{g1}}$ and $R_1 < R_2$

き換えて比散乱係数 S も計算できる。 R_{g1} と R_{g2} の差が大きいほど精度が高くなる。また、塗工印刷用紙などの塗工層だけについて比散乱係数を求めたい場合がある。片面塗工紙でその原紙を手に入れる必要があり、実験的に調製した紙などに限られるが、原紙1枚とそれぞれの裏当てについて測定した反射率を R_{g1} 及び R_{g2} とみなしてやれば、試料は塗工層だけになるので、その塗工層の比散乱係数を測定できる¹⁶⁾。塗工層のみの固有反射率係数と比散乱係数を求めることは塗工量とは無関係にその塗工層の光学特性を決定できるほか、同種の塗工層の塗工量が異なる場合の塗工紙全体の固有反射率係数を予測できる点で有用である。ケベルカムクンの式を用いて比散乱係数と比吸収係数を求める方法は、ISO 9416:1998 Paper - Determination of light scattering and absorption coefficients (using Kubelka-Munk theory) に規定されているが、測定法自体は白色度や色の測定法と同じであり、実際には計算方法だけを規定しているに過ぎない。したがってJIS化する予定は今のところない。

図5はトレーシングペーパーと半透明のプラスチックフィルムをそれぞれ重ねていき、2種類の反射率の異なる裏当て(光トラップと白色の標準面)を置いたときの反射率からケベルカムクン式を利用して計算した光学濃度(透過率の逆数の常用対数)と比散乱係数である。プラスチックフィルムの光学濃度()は重ねる枚数に比例して増加していく。これはランベールの法則に一致するが、比散乱係数が0の時に成り立つ法則で、このプラスチックフィルムの比散乱係数()は約0.5と、非常に小さい。一方、トレーシングペーパーは、比散乱係数()が約8.0であり、光学濃度()もシート枚数には比例しないことがわかる。一般に上質紙の比散乱係数は、この単位では30~40であり、また塗工層は150程度である。

2.3.6 色

国内では、JIS P 8150 2004 紙及び板紙 - 色 (C/2°)の測定方法 - 拡散照明法 が紙の色測定法としてよく規定された。イルミナントCを照明光源として用い、2度視野に相当する等色関数を使って三刺激値X, Y, Zを求め、 $L^*a^*b^*$ 表色系で結果を示すことになっている。これとは別に、白色度と同様にイルミナントD65/10°視野を使用する色測定に関するISO規格の制定作業が動き出した。いずれは発行されそうであるが、あくまでも蛍光増白剤の効果を見積もるための補助的な規格となる。2°又は10°は、視野の角度を指すが、人間の目は視野角によって、すなわち像を結ぶ網膜の位置によって色の見え方が違うことが知られており、異なった等色関数を用いる。

2.3.7 光沢度

光沢とは、表面の選択的な方向特性によって、物体の明るい反射がその表面に写り込んでいるように見える見え方のことで、(鏡面)光沢度は、一定の光学的及び幾何学的な条件のもとで、基準となる平滑なガラス面の鏡面反射率に対する百分率で定義する。JIS P 8XXX 紙及び板紙 - 75度ISO鏡面光沢度の測定方法(収束光法)が発行予定で、現行の光沢度に関する規格JIS P 8142:1993 紙及び板紙の75度鏡面光沢度

試験方法は 2008 年 3 月に廃止される予定である。世界的には TAPPI 法と DIN 法 (ドイツの規格) のどちらかが使われており, どちらも ISO 規格となっている。JIS P 8142:1993 では両者のよいところを採用した優れた測定条件を提案したが, ISO への整合化の流れで, JIS では日本での使用実績が多数ある TAPPI 法を結局採用することにした。日本電色株製の VG-2000 がおそらく唯一の JIS P 8142: 1993 準拠の光沢度計であるが, かなり普及しているので注意されたい。入射光は, JIS (TAPPI Standard T480) では収束光で DIN 法では平行光である。光沢度の標準は, JIS では屈折率 1.54 のガラス面を光沢度 100 とするが, DIN では屈折率 1.567 のガラス面を光沢度 100 とする。分光特性に関して TAPPI は, 反射光がイルミネント A と緑色フィルタ (等色関数 $\bar{y}(I)$) の組み合わせに相当する光であればよいとの考え方であるが, DIN 法にははっきりとした規定がないようである。受光器の開き角では, DIN 法は $1.9 \times 3.5^\circ$ (四角形) を採用し, 他の規格に比べて極端に小さい。光沢度の低い非塗工紙では反射光のピークが入射角よりも大きい受光角に来る事実から, 日本はこの仕様では正しい評価ができないと主張している。今後 ISO 規格として, 両方法が並列して使用されて行くが, DIN 法の方が低い光沢度になる傾向があるため製紙産業側から見れば不利であり, ヨーロッパ側は何らかの策を講じてくると思われる。

2.4 力学関係の規格について

2.4.1 引張 (ひっぱり) 試験

引張試験は, 包装用紙分野だけでなく, 新聞のような高速輪転印刷において紙切れが重大な支障をきたすことから印刷用紙分野においても重要な試験となっている。JIS P 8113:1998 紙及び板紙 - 引張特性の試験方法 が規定されている。クロスバー型の定速引張試験機を用いる。求める特性値を表 2 に示す。どれだけの長さ紙を垂らしたら破断するかを示す裂断長 (km) が以前はよく使われたが, 現在は比引張強さで結果を表す。コピー用紙で約 $30 \text{ N} \cdot \text{m/g}$ である。

ISO 規格は現在, 定速伸張形引張試験機法 (100 mm/min) を新たに策定中であり, ISO/DIS 1924-3 としての審査/投票が既に 2004 年 2 月に終わっていることから, 2005 年 ~ 2006 頃に制定されると予想される。ISO 1924-2 では, 180 mm/min の引張速度を標準とし, その応用として 100 mm/min を認めているので, 試験用手すき紙での正確な測定方法を規定しようとする意図があるものと見られる。ISO/DIS 1924-3 では, 新たな物性値として引張こわさ (tensile stiffness) で, 引張弾性率 E^* に試験片の厚さ t をかけたもの) 及び比引張こわさ (引張こわさを坪量で除した値) の定義を盛り込んでいる。引張弾性率では, 単位断面積あたりの荷重/伸び比を求めているが, マイクロメータによる厚さ測定法から考えて断面積が表面粗さに影響されやすいことや引張過程で断面積が変化することなどを理由に, 単位坪量あたりの荷重/伸び比に移行させようという意図と思われる。図 6 に示すような傾きの最大値を求めるときは, コンピュータによって測定したデータを使って正確に求めることなどにも言及している。ISO 制定後すぐに JIS 化されることが予測される。

2.4.2 耐折 (たいせつ) 試験

耐折試験では, 所定の条件で往復折曲げを行ったときに試料が破断するまでの往復折曲げ回数 (耐折回数) を測定する。以前は, “耐折回数” の平均値を報告するよう規定されていたが, 現規格 JIS P 8115:2001 では, “ISO 耐折回数” を報告するよう規定した。“ISO 耐折回数” とは, 個々の破断までの往復折曲げ回数の常用対数 (耐折強さ) をそれぞれ求め, その “耐折強さ” の平均値の真数であると定義される。この定義に従えば, 同じ

測定データから計算される「耐折回数」及び「ISO 耐折回数」が異なることは、JIS P 8115:2001 の解説¹⁷⁾にもあるとおりで、実際には「ISO 耐折回数」は以前の方法に基づいて計算した「耐折回数」以下になる。ゆくゆくは、「ISO 耐折回数」を単に「耐折回数」と呼び変える可能性があるので混同しないように十分注意が必要である。

2.4.3 引裂 (ひきさき) 試験

引裂試験は、切れ目が入った紙片の強度を測定する。主に包装用紙を対象に規定された方法と考えられるが、印刷用紙として紙を搬送する工程でも起こりうるのでここで取り上げる。測定方法は次の通りである。引裂方向の長さが 64 mm の試験片を約 20mm だけクランプにはさむ。これは一対になった左右別々のクランプから成り、片側は固定、もう一方は紙の厚さ方向に可動である。試験片の左右のクランプの真ん中に位置する部分に、装置に取り付けられたナイフを使って 24mm 分だけ切れ目を入れる。可動クランプは、一定質量の扇形振り子の先端に取り付けられており、ストッパーをはずすと、振り子は試験片を 40mm だけ裂いて勢いよく反対側に振れる。このとき振り子は指示用の針を持ち上げ、その針は反対側に振れたときの最高位置で止まったままになるので振り上げ高さがわかる。試験片がないときの振り上げ高さとの差は、試験片の引裂に要したエネルギーを位置エネルギーに変換した値に相当する。指示値は、引き裂き続けたときの平均的な力 (N) となるように換算されている。JIS P 8116 紙 - 引裂強さ試験方法 - エルメンドルフ形引裂試験機法 が 2000 年に改正された。試験方法そのものは 1952 年の初版からまったく変わっていない。計算で、比引裂強さ (引裂強さを坪量で除した数値) を求める点は従来規格と同じであるが、引裂強さ (1 枚の紙を引き裂き続けるのに必要とする力) の計算方法の明示を復活させたことなどが変更点である。なお、当然のことであるが、板紙の場合は引裂強さが一定の範囲内にある軽量の板紙に限定された。

2.4.4 摩擦試験

摩擦試験は、複写機やプリンタなど紙を搬送する装置が組み込まれた機器での重送の問題から近年重要視されている。日本では、1994 年に JIS P 8174 紙及び板紙の摩擦係数試験方法が既に制定されていたが、ISO でも 1999 年に初めて ISO 15359 紙及び板紙 - 静及び動摩擦係数試験方法 - 水平板法 が制定された。どちらの規格も基本的には、水平架台に試料を置き、もう一方の試料を下面に固定した金属ブロックのおもりを載せ、定速でおもりを滑らせたときにおもりにかかる摩擦力をロードセルで測定する方法である点では一致している。しかし、細かい条件に違いがあり、これを表 3 に示す。JIS P 8174 はおもりの移動速度を、引張試験機が利用できるような遅い速度 (0 mm/min) に規定しており、精度は高くなるものの、いずれは ISO 15359 で規定している移動速度 (20 mm/s) に整合化されると思われる。JIS を ISO に整合化して改正する予定は決まっていないが、プリンタメーカーなど関連団体の要望があれば取りかかるとなるであろう。

摩擦係数に影響する紙の特性は種々ある。物性的には、表面粗さの大きい紙、叩解によって緊密化し弾性係数の大きい紙の方が動摩擦係数が大きくなる傾向にある¹⁸⁾。紙表面の凸部同士が噛み合って変形する程度に依存すると考えられる。また、中質紙 (薬品によって脱リグニンして作られたクラフトパルプ以外に、砥石や刃のついたディスク板で摩砕して製造した碎木パルプやサーモメカニカルプルが約 8 割を占める) では、上質紙 (クラフトパルプだけから製造) に比べて動摩擦係数をはるかに大きく、またおもり走行中の摩擦力変動が大きいという特徴を示す。化学的にはある程度以上の長さを持った炭化水素鎖を持つ物質が紙に添加されると摩擦係数が下がることが知られており、測鎖の長い飽和脂肪酸や脂肪

族アルコール類は摩擦係数を下げる¹⁹⁾。紙には水性を付与するサイズ剤に AKD (Alkyl ketene dimer) を用いると紙が滑りやすくなり、荷崩れなどの問題を引き起こすことがあるが、これはその例である。

2.4.5 曲げこわさ

紙にこしがないと印刷機内の走行中に紙詰まりを起こす。こしを物理量として表現する曲げこわさ (曲げ剛性) は、ヤング率 E に断面 2 次モーメント I を乗じた EI で表され、材料の曲げに対する抵抗性を表す。測定では曲げモーメントに曲率半径を乗じて求める。測定装置は曲げこわさの大小や原理によって数種類あるが、ISO 規格では、一義的に曲げ抗力として計算することを規定しており、幅 38 mm の片持ちばりの長方形試料を曲げ長さ 50 mm で 15° 曲げるのに要する力²⁰⁾と定義している。JIS P 8125:2000 紙及び板紙 - こわさ試験方法 - テーバーこわさ試験機法 が ISO 規格に整合化されているが、厚手の紙に適した試験法である。一般の印刷用紙やコピー用紙では、JIS P 8143:1996 紙のクラークこわさ試験機によるこわさ試験方法 が測定しやすい。ただし、一点への集中荷重ではなく、はり全体にかかる自重であるので、曲げ抗力の計算にはさらに複雑な理論式を導入する必要があり、換算式が導かれている²⁰⁾。試験装置がない場合でも、はかりと物差しだけを使って片持りのたわみからこわさを求める方法がある。図 8 は、坪量 W (g/m^2) の紙を幅 b (cm) に切り出し、テーブルの端から長さ L (cm) だけ張り出させ、テーブルの端にあたる部分が浮かないように固定用のおもり又は磁石を使って固定したときに、紙のたわみが d (cm) であることを示す。厚手の紙で、自重だけではたわみが不十分なときは、おもり F (g) を先端にぶら下げる。このとき曲げこわさ S ($N \cdot m^2$) は、式(6)のようになる。おもりをぶら下げない場合は $F=0$ とおけばよい。はじめから反っているような紙は表裏のたわみの平均値を使う。

$$S = \left(\frac{W L b}{8} \times 10^{-4} + \frac{F}{3} \right) \frac{L^3}{d} \times 9.81 \times 10^{-7} \quad \text{式(6)}$$

3. 試験規格の最近の動向

ISO の TC6 (Technical Committee 6=紙パルプ)では現在も様々な新しい規格が次々に制定されている。再生紙の印刷用紙がごく当たり前になってきた昨今、再生紙や古紙パルプに関連した規格がISO でも整備されつつあり、JIS もこれに関連した規格がいくつか制定されつつある。

3.1.1 残留インキ粒子測定

JIS P 8XXX:2005 古紙パルプ - 反射光を用いた計測器による異物の評価方法 (制定予定) では、古紙パルプに残る残留インキ粒子の大きさ、数及びその分布を計測するためパルプシートをスキャナや CCD カメラで取り込み画像解析により求める。目視で計測する場合は、JIS P 8208:1998 パルプ - きょう雑物測定方法 が使用できる。最近は脱墨技術向上で残留インキ粒子も細くなっており、測定の迅速化という意味からも、視認より画像処理の方が主流になっていくと考えられる。脱墨工程でのリジェクトを画像解析で調べるための規格 ISO 15360-2:2001 "Recycled pulps - Estimation of stickies and plastics - Part 2: Image analysis method" に対応する JIS も 2006 年頃の制定の予定で現在素案を作成中である。

3.1.2 繊維特性の測定

また古紙パルプ繊維の品質を詳しく調べることを目的にしていると考えられる繊維特性の測定方法がいくつか ISO 規格として近々制定されそうである。ISO/CD 23713 Pulps - Determination of fiber coarseness by

automated optical analysis - Polarized light method (繊維粗度), ISO/CD 23714 Pulps - Determination of Water Retention Value (パルプの保水度), ISO/NP 23715 Pulps - Determination of fibre charge (Total acidic-group content) (繊維荷電), ISO/CD 16065-2 Pulps - Determination of fibre length by automated optical analysis - Part 2: Unpolarized light method (非偏光による繊維長測定), ISO 16065-1:2001 Pulps - Determination of fibre length by automated optical analysis - Part 1: Polarized light method (パルプ-自動光分析法による繊維長の測定-第1部:偏光法)である。繊維粗度とは、単位長さあたりの繊維の絶乾質量 (g/m^2) で、保水度は、遠心機にかけたときにパルプが保持できる水の量を測定し、繊維荷電は繊維表面にある主にカルボキシル基量を定量する。

4. おわりに

印刷適性として重要な紙の物性を紙パルプ関連の JIS を紹介しながら網羅したつもりである。誌面の頁数の関係上、インクジェットに関連した液体吸収性については割愛させて頂いた。

参考文献

- 1) TAPPI (アメリカ紙パルプ技術協会) TEST METHODS T 551 om-98 : Thickness of paper and paperboard (soft platen method) .
- 2) 江前敏晴, 濱田仁美, 居福健司, 野田貴治: 水銀浮力法による紙及び塗工層の空隙率測定, 繊維学会予稿集 2003 (京都), 174 .
- 3) 佐々木潔, 江前敏晴, 尾鍋史彦, 金鳳庸: 紙の表面ラフニング機構に関する研究 (第2報) 面外 (厚さ) 方向に生成する内部応力の影響とその評価, 紙パ技協誌 **54**(5), 685-692(2000) .
- 4) Parker, J. R. : Development and applications of a novel roughness tester, TAPPI J, **54**(6), 943-949(1971) .
- 5) Parker, J. R. : The measurement of printing roughness, TAPPI J, **64**(12), 56-58(1981) .
- 6) 山本健太郎, 海田喜八, 岩崎岑子, ベックの平滑度について, 紙パ技協誌, **20**(2), 81-88(1966) .
- 7) Enomae, T. and Onabe, F. : Characteristics of Parker Print Surf roughness as compared with Bekk Smoothness, Sen'i Gakkaishi (繊維学会誌), **53**(3): 86-95 (1997) .
- 8) 山内龍男: 紙の表面形状とその測定法, トライボロジスト, **46** (10), 747-752(2001) .
- 9) 岡内主器: 白色光干渉型顕微鏡による紙の表面形状測定, トライボロジスト **46** (10), 759-764(2001) .
- 10) Enomae, T., Onabe, F. and Usuda, M. : Application of new profilometry using topographic SEM to paper surface topography, Tappi J., **76**(1), 85-90(1993) .
- 11) Enomae, T. and Onabe, F. : Evaluation of stylus profilometry using topographic scanning electron microscopy, IS&T's 47th Annual Conference Proceedings, Vol 2, Soc of Imaging Sci and Tech, 841-844 (1994) .
- 12) 山本健太郎, 岩崎晶彦, 宮城善一, 岩崎岑子, 原七男, 紙の透気度測定機の開発, 精密機械, **51**(4), 199-203(1985) .
- 13) Kubelka, P. : New contribution to the optics of intensely light-scattering materials. Part I, J Optical Soc of America **38** (5), 448-457 (1947) .
- 14) Enomae, T and Kuga, S : Methodology to use flatbed image scanner for formation analysis of paper, Japan

Tappi J., **56**(4), 97-104(2002) .

- 15) Robinson, J. V. : A summary of reflectance equations for application of the Kubelka-Munk theory to optical properties of paper, Tappi **58**(10), 152-153(1975) .
- 16) Hamada, H., Enomae, T., Onabe F. and Saito Y. : Characteristics of hollow sphere plastic pigment (Part) - Optical properties of coated paper and colorimetric control in printing -, Japan Tappi J., **55**(11), 79-86(2001) .
- 17) JIS P 8115:2001 紙及び板紙 - 耐折強さ試験方法 - MIT 試験機法 解説, p2 .
- 18) 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) .
- 19) Fellers. C., Backstrom M., and Htun, M. : Paper-to-paper friction - paper structure and moisture, Nordic Pulp Paper Res. J. **13**(3), 225-232(1998) .
- 20) 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) .

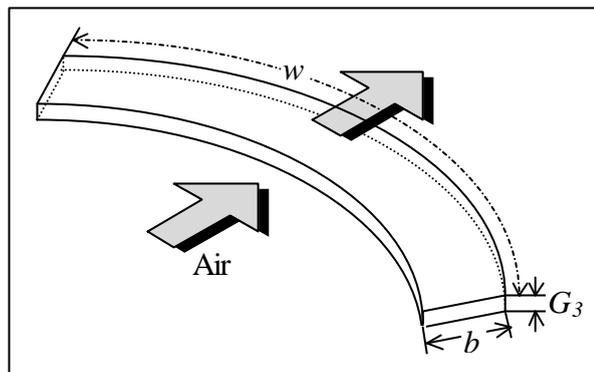


Fig.1 Air flow in Print-surf method

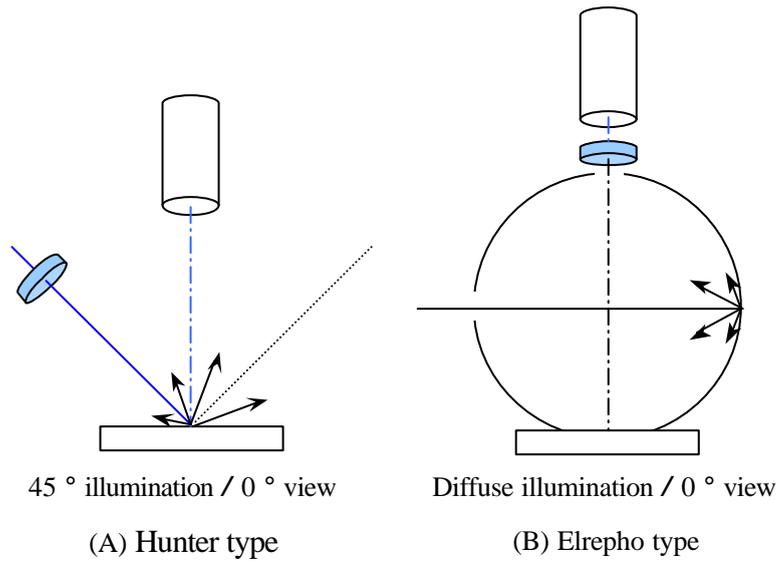


Fig. 2 Illumination/detection system used for reflectometer

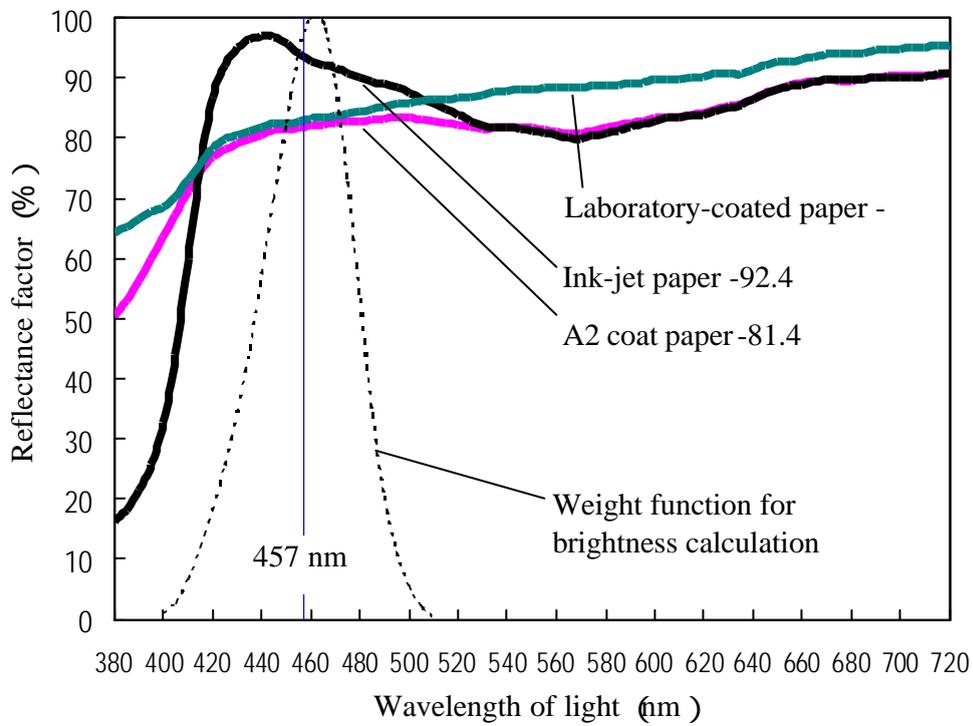


Fig.3 Spectral reflectance with ISO brightness for several kinds of coated paper

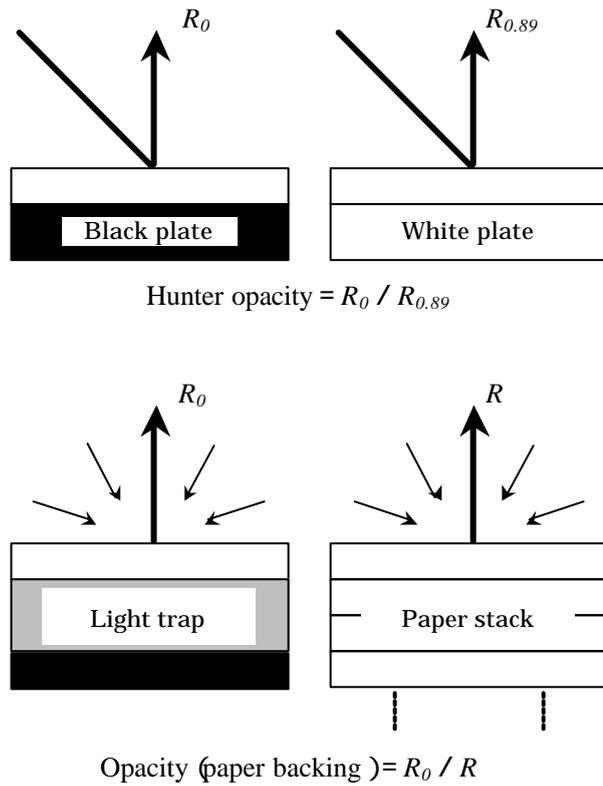


Fig.4 Difference in sample stack for opacity

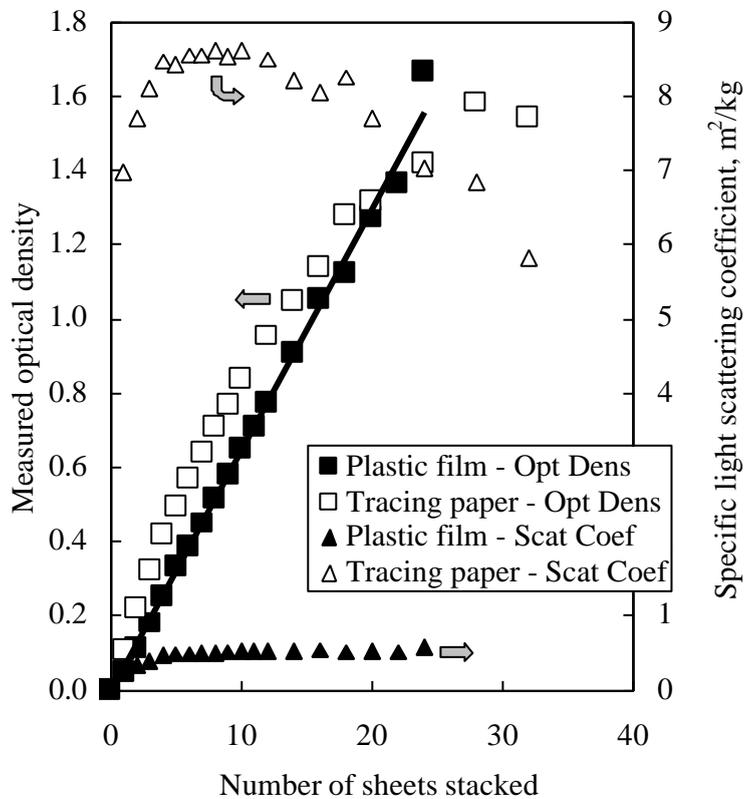


Fig.5 Difference in optical density and light scattering coefficient between paper and plastic film

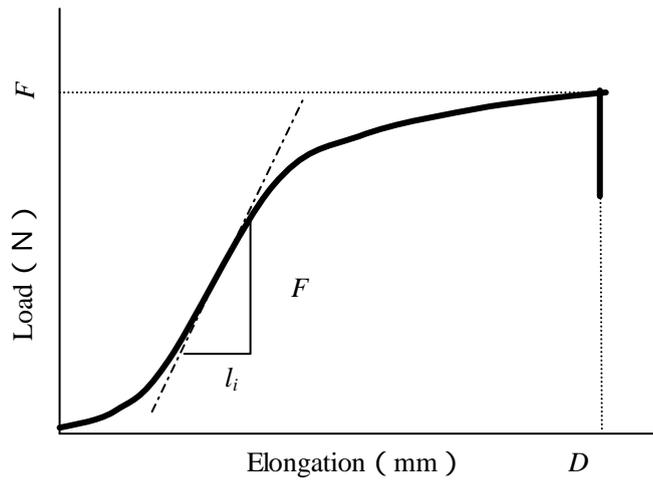


Fig.6 Schematic diagram of load-elongation curve

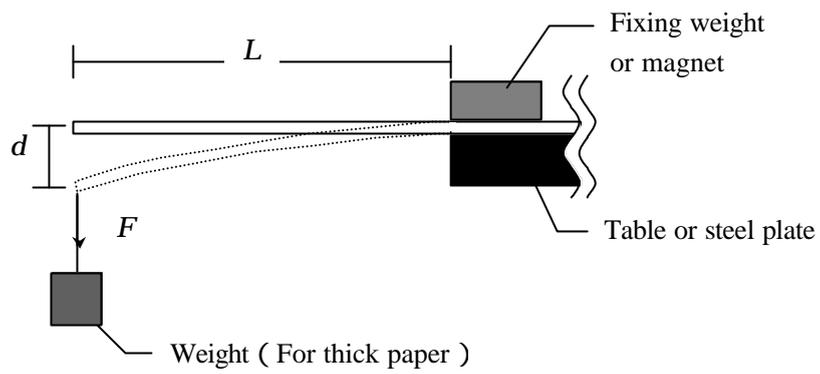


Fig.7 Cantilever deviation for determining bending stiffness

Table 1 Density of handsheets varied with papermaking processes

Process	Condition	Density, g/cm ³
Beating	Unbeaten	0.463
	5000 rev. (PFI mill)	0.592
	20000 rev. (PFI mill)	0.722
Filling (calcium carbonate)	Unfilled	0.615
	10 % on dry pulp	0.614
	30 % on dry pulp	0.606
Wet-press	49 kPa for 1 min	0.521
	343 kPa for 5 min	0.595
	686 kPa for 20 min	0.647
Calendering	Uncalendered	0.540
	Linear pressure 29 kN/m	0.588
	Linear pressure 49 kN/m	0.624

Table 2 Parameters specified in JIS P 8113: 1998 Paper and board – Determination of tensile properties

Parameter	Equation
Tensile strength (S)	$S = \frac{F}{w}$ (kN/m)
Tensile index (I)	$I = \frac{S}{g} \times 10^3$ (N · m/g)
Tensile energy absorption (Z)	$Z = \frac{E}{l_i \times w} \times 10^3$ (J/m ²)
Tensile energy absorption index (I_z)	$I_z = \frac{Z}{g} \times 10^3$ (N · m/g)
Stretch at break (e_B)	$e_B = \frac{D}{l_i} \times 10^2$ (%)
Modulus of elasticity (E^*)	$E^* = \frac{\Delta F \times l_i}{w \times t \times \Delta l_i} \times 10^9$ (GPa)

where, F Breaking load (N), w Sample width (mm), g Basis weight (g/m²), E Energy required for break (J), l_i Initial sample span (mm), D Elongation at break (mm), t Sample thickness (mm) and refer to Figure 6 for F and l_i .

Table 3 Difference between JIS and ISO standard for coefficient of friction

Condition	JIS P 8147: 1994	ISO 15359:1999
Pressure by sled (kPa)	1.64 ± 0.24	2.2 ± 0.6
Bottom size of sled (mm)	No specification (100 long, 60 wide for example)	60 ± 5 long, 60 ± 5 wide
Mass of sled (g)	No specification (1000 for example)	800 ± 100
Sliding velocity of sled (mm/s)	0.167 ± 0.003 (10.0 ± 0.2 mm/min)	20 ± 2
Repeated measurement	1st data adopted	3rd data adopted for dynamic friction 1st and 3rd data adopted for static friction