

紙の基礎と 防錆包装に使われる加工紙

防錆材技研 清水良直 | (株)イーバック 會田敬三

Vol.1

はじめに

日本産業規格 JIS P 0001「紙・パルプ用語」では加工紙を『紙を抄造した後、コーティング、含浸、はくはり（箔貼り）などの加工をして特性を持たせた紙』と定義している。この定義によればアート紙やコート紙のような印刷用紙も加工紙に含まれることになるが、この解説では対象を防錆包装に使われている防錆紙などに焦点を当てて解説する。第1章は包装紙に的を絞った紙のつくり方と紙の品質について、第2章で防錆紙について、第3章として防錆包装に必要な高度な複合化の技術について解説する。

第1章 紙のつくり方

1-1 紙の製法の原理

紙は植物から繊維状の物質（パルプ）を取りだしてそれをシート化（抄紙）してつくられる。紙が発明されたのはB.C. 2世紀の中国であるが、当時の原料は麻布などのボロであった。その後、木の皮も使われるようになり、19世紀になってヨーロッパで木材を原料とする技術が開発された。木材を化学的、機械的に処理してつくったパルプを水に分散して網の上に広げ、水を濾過して乾燥させると紙になる。この作業を手作業で行なうのが「手漉き」である。紙の製法が近代化される19世紀までは紙はもっぱら手漉きでつくられており、和紙などの工芸品はいまでも手漉きによるものが多い。手漉きに対して、工業的に行うのを「機械漉き」と呼ぶが、原理は同じである。

1-2 木材の化学

パルプを取りだす木材など植物の成分のほぼ50%は表1に示したようにセルロースであり、セルロースはグルコース（ブドウ糖）が連なった高分子物質である。これが紙の材料となる。紙を顕微鏡で見ると繊維が絡まっているようすがわかる。図1にマクロの世界である繊維の構造にはじまって、徐々にコロイドの世界である微細な構造になり、ついにはナノスケールのグルコースにいたるまでのようすを(a)から(f)まで6段階に分けて図示した。繊維（パルプ）1本を見ると(a)に示したように中空のパイプ状になっているが、もっと細かく調べると繊維を構成する細胞膜が集まって層状構造をとっていることがわかる（(b)を参照）。その細胞膜をつくるのがミクロフィブリルの集合体（(c)を参照）でセルロース分子が束のように並んでいる。セルロース分子は2,000～10,000個のグルコース分子が縮重合して繋がり、紐のようになった天然高分子である。ここまで微細になると電子顕微鏡を使っても容易には見ることはできないコロイドの世界である。（c）の結晶部分から直線3本を取りだして模式図で表すと(d)のように黒い丸（酸素原子）が直線（酸素原子と炭素原子の結合、あるいは炭素原子どうしの結合）を介して上下に繋がっているように描ける。これがセルロース分子であり、分子構造式で表すと(e)となってグルコース分子2つが縮重合している（(f)を参照）。なお分子構造をわかりやすくするため

表1 木材の成分（%）

	針葉樹	広葉樹
セルロース	56	53
ヘミセルロース	13	23
リグニン	30	22
その他	1	2

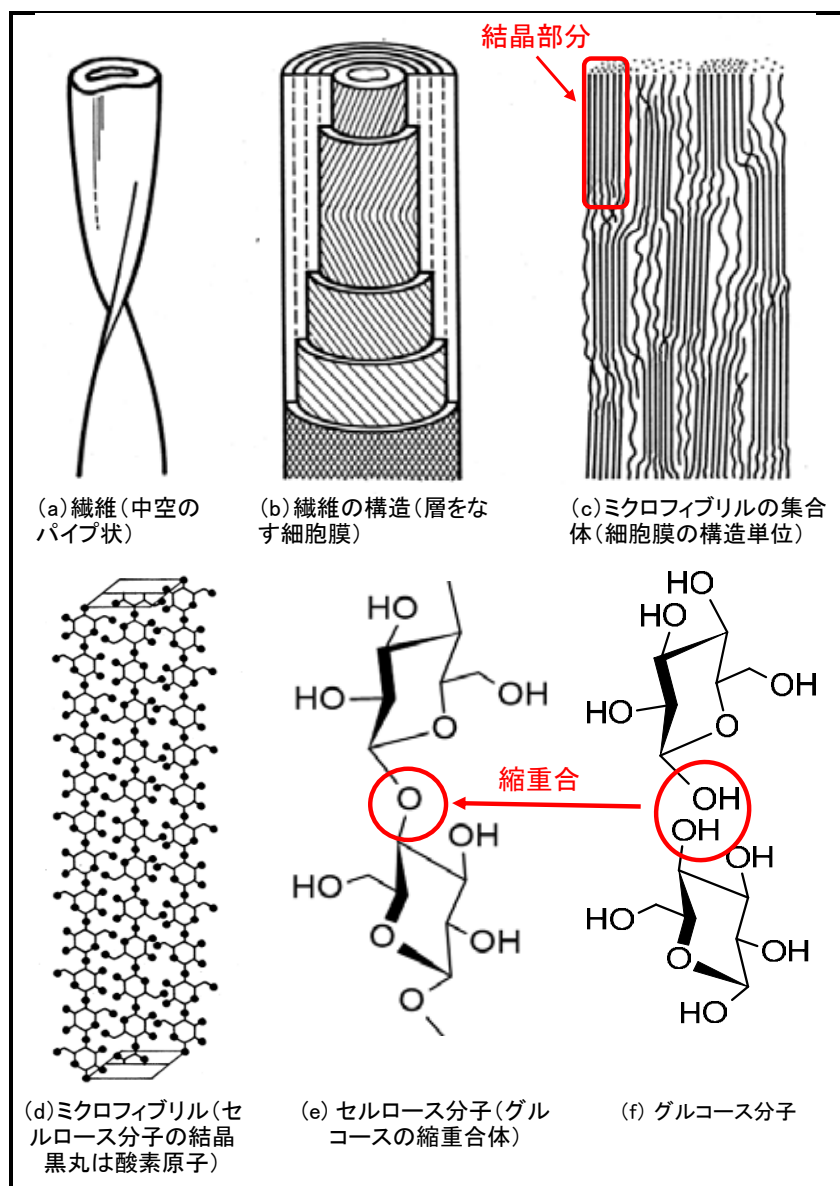


図1 パルプ (植物繊維) の構造

にメチレン基($-\text{CH}_2-$)を省略して描いている。

(f)に示したように1個のグルコース分子には5つの水酸基($-\text{OH}$)があり、そのためグルコースには水に溶けやすい性質がある。グルコースが縮重合して上下に繋がってセルロース分子になってもまだ3つの水酸基が残っており ((e)を参照)、隣のセルロースとの間に無数の水素結合をつくる。隣同士のセルロースが水素結合で結びついて束状 ((c)を参照) になると水に溶けない状態になる。紙にとっては、木材の基本単位であるグルコース分子が水酸基をたくさんもっていて、繊維の表面でも水素結合が可能であることが重要である。繊維が紐のように細くて長い構造をしていることに加え、水素結合は紙の機械的な強さの源である。水に濡れると強度が低下するのは水素結合が切れることが原因であり、トイレトペーパーが水に溶けるのは水素結合が切れてセルロースがばらばらになるからである。紙が吸湿性など水分や湿気の影響を受けやすい性質をもっているのも繊維の表面に水酸基が存在するからである。

1-3 木材のパルプ化

表1に示したように、木材にはセルロース以外にヘミセルロースとリグニンが含まれている。ヘミセルロースはグルコースといろいろな糖が結合した複雑な構造の高分子であり、セルロースと水素結合によって密接に混合して細胞膜を形成する成分である。化学的には水に溶けやすく、溶けると粘性のある液体になるから、パルプを固定して紙にするときには糊の働

きが期待できる。一方のリグニンは網目状の高分子で水には溶けない性質をもっており、針葉樹で30%、広葉樹で22%も含まれている。リグニンは木にとって重要なはたらき、すなわち木材の繊維同士を強固にくっつける接着剤の役目を果している。樹木が雨に打たれてもその姿を保って地面に立っていられるのも、木がそれなりに硬いのもリグニンのおかげである。しかしリグニンは紙にとって邪魔のものであり、リグニンが残っていると紙は変色し紫外線によって劣化しやすくなる。邪魔者のリグニンを除去する手段としては物理的な方法では無理があり、近年になって化学的に処理する方法が確立したことで近代化が進んだ。

木材から取り出したセルロース繊維はそのままではパルプとして不適当である。セルロース繊維をばらばらにほぐすために叩解と呼ばれる作業が必要で、文字通り繊維を叩く。繊維を叩くことで繊維の空洞がつぶれて組織が緩みはじめ、細胞壁も破壊されて柔らかくなって毛羽立ってくる。ただし叩くことで繊維の切断も起きるから、適当な破壊状態で操作を止めて次の工程、手漉きに移していた。和紙の製造では今でもこの工程がたいへん重要である。洋紙ではこの作業を機械化して皮をはいだ丸太を砥石に押し付けて機械的にすりおろして繊維を取り出していた。すりおろすことで繊維が短く切られてしまうので、材料となる丸太は繊維の長い針葉樹に限られていた。この方法でつくられたパルプはグランドパルプ（GP）と呼ばれ、新聞紙など保存性を要求されない用途に使われている。その後の技術改革で丸太を事前にチップ（木材を数cmほどの大きさにした細片）に加工した後にリファイナーと呼ばれる装置（歯の付いた2枚の円盤によってすりつぶす）を用いる方式に発展し、いまでは連続的に叩解を行っている。

近代になって一般化したパルプ化の手段が化学的方法である。チップを原料に用い、これに水酸化ナトリウムと硫化ナトリウムを加えて煮ることによってリグニンを化学分解して繊維をばらばらにほぐしている（蒸解という）。繊維を機械的に壊すことがないので繊維の切断が起きにくく、針葉樹に限らず繊維の短い広葉樹も使うことができる。現代はこの方法が主流であり、KP（クラフトパルプの略）法と呼ばれ、得られたパルプが化学パルプである。化学パルプにはリグニンが除去しきれずに残っているために茶褐色をしている。白い紙にするために漂白が必要となり、漂白したパルプを晒パルプと呼び漂白しないパルプを未晒パルプと呼んでいる。防錆包装で多用されているクラフト紙が茶色を呈しているのは未晒パルプを使っているためである。

GPは丸太の木質部のほとんどを利用できるが化学パルプは収率が50%と悪い。そこで両者の中間の製法が開発され、この方法でつくられたパルプをセミケミカルパルプ（SCP）あるいはケミグランドパルプ（CGP）と呼んでいる。

パルプの原料である針葉樹と広葉樹は繊維の長さが異なることはすでに述べたが、それを含めて原料それぞれの特徴を表2にまとめた。耐折強さ（折り曲げに対する抵抗の強さ）と比引裂き強さ（引裂強さを坪量で除した値）をみると、針葉樹からつくった紙の強度は広葉樹を用いるよりも大きい。長／径比（繊維長を繊維径で除した値）でわかるように繊維が細長いことの結果である。参考までに載せた和紙は木質部ではなく木の皮の部分を原料としており、その長／径比は針葉樹の3～10倍と非常に細長い特徴がある。紙の原料となる繊維が細長いということは繊維の絡み合いがより多くなることを意味し、それだけ丈夫な紙となる。しかし、繊維が細長いと繊維の分散は不均一になりやすく、部分的な厚さのむらを生じることになる。これを「地合が悪い」という。強度を必要とする包装用紙が針葉樹を用い、地合の良さを求める印刷用紙が広葉樹を主原料に選ぶのはこれらの理由による。

ここまでパルプがどのようにしてつくられるか解説してきたが、紙の製造にはパルプ以外に古紙が使われている。紙は再生利用が進んでおり、回収された古紙は選別されたのちに繊維をばらばらにして塵を取り除き、パルプに混ぜられて再び紙

表2 パルプ繊維の特徴

繊維原料		主な紙製品	耐折強さ (回)	比引裂強さ (mN・m ² /g)	繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	長/径 比
木材	針葉樹	未晒クラフト紙	500	16	3.3	0.045	73
	広葉樹	上質紙	200	8	1.3	0.03	43
じんび 鞆皮	こうぞ 楮	和紙	2500	44～52	18	0.023	780
	みつまた 三桮		—	24	3.7	0.016	230

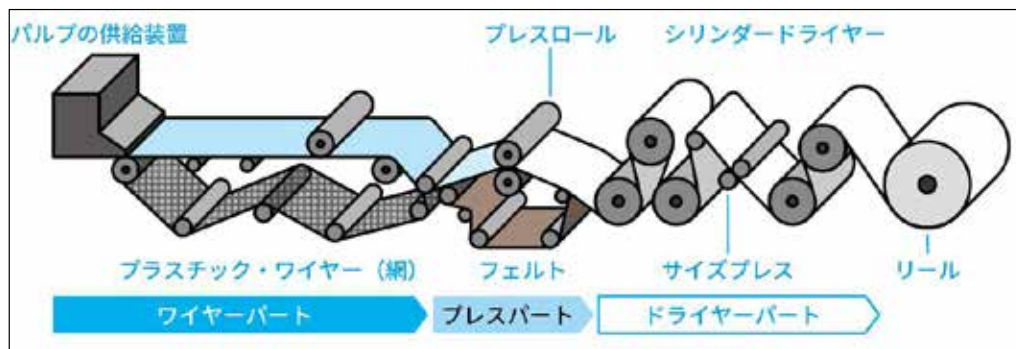


図2 長網抄紙機

に生まれ変わる。さまざまな紙製品を平均すると古紙利用率は60%にもなり¹⁾、板紙や段ボール用途に限れば原料のほとんどが古紙である。そのなかで包装用紙における古紙利用率は4.7%と他の紙製品に比べて極端に低い²⁾。その主な理由は古紙を用いることによって紙の強度が低下するのを避けるためである。

1-4 抄紙

パルプを並べて紙にする工程が抄紙である。それを工業的に行う装置を抄紙機と呼び、大きく2つのタイプ^{ながあみ}長網抄紙機と^{まるあみ}円網抄紙機とがある。

(1) 長網抄紙機

長網抄紙機は図2に示したようにワイヤーパート、プレスパート、ドライヤーパートの3部分からできている。最初のワイヤーパートはエンドレスのプラスチック・ワイヤー（網）を時速100kmの高速で水平に走らせ、そこに水に分散したパルプを流して網目から水だけを落下させる構造になっていて99%あった水分は80%にまで下がる。またワイヤーには振動機構がついていてパルプができるだけ均一に広がるようにしているが、それでもパルプが走行方向（紙の縦方向）に並ぶ傾向は皆無にはできず、できあがった紙の縦方向と横方向とで品質差が生じる。

ワイヤーパートのつぎはプレスパートと呼ばれる部分である。ワイヤーパートを出た時点ではまだ多くの水分を含んでいるので、水分をさらに下げるためにワイヤーに接していないパルプ面にエンドレスのフェルトを当ててパルプを支え、プレスロールで絞る。このパートで水分は55%にまで下がり、パルプは支持しているフェルトがなくても自立できるようになる。

最後のパートがドライヤーパートで、蒸気で加熱した鉄鋼製の円筒（ドライヤー）表面に紙を押し当てて乾燥させる。紙を両面から乾燥させるために、ドライヤーは数本を連続して設置する多筒式が一般的であるが、ヤンキードライヤー（1本の大径のドライヤー）を設置することもある。ドライヤーパートを通った紙の水分は8%前後であり、通常はこの値が製品としての紙の水分値となる。このような工程で抄紙された紙は自動的に坪量・厚さ・水分値が計測され、所定の長さに巻き取られる。なお、このドライヤーパートの途中にサイズプレスと呼ばれる箇所があり、サイズ剤や紙力増強剤といった薬品を紙に浸みこませているが、これらの薬剤については次節で説明する。

長網抄紙機は高速で運転されるので大量生産に向いており、書籍などの印刷用紙をはじめ、包装用紙など幅広い用途に向けた紙が生産される。また、さまざまなパルプに対応できる特徴があり、クラフトパルプを原料として製造された紙を長網クラフト紙という。多筒式ドライヤーで乾燥させて表裏差を少なくするようにつくられたクラフト紙が両更クラフト紙で、ヤンキードライヤーを使って片面に光沢をもたせたクラフト紙が片艶クラフト紙である。また、クラフト伸張紙（クルパック紙ともいう）と呼ばれる特殊な紙があるが、これは抄紙しながら微細な伸縮をもたせるように加工した紙で、大きい強度をもつ特徴がある。

なお、抄紙機の最初のパートでワイヤーに接している面が紙の裏になるが、網目の跡がつくことからワイヤー面とも呼ばれる。一方フェルトに接している面が紙の表になり、フェルト面とも呼ばれる。

(2) 円網抄紙機

長網抄紙機と同じくワイヤーパート、プレスパート、ドライヤーパートの3部分からできているが、長網抄紙機との大き

な違いはワイヤーパートにあり、エンドレスのプラスチック・ワイヤー（網）の代わりに図3に示したように円筒形になったワイヤーを使っている。具体的には円筒形のシリンダーに網が張られており「円網」の名前の由来はそこにある。

パルプを分散した水槽に回転する円筒形の網を半浸漬させてパルプの分散液をすくいとり、網の目をくぐって水だけがシリンダーの中に吸い込まれることで網の外側にはパルプだけが残る構造になっている。これにフェルトを当ててパルプを移し取り、プレスして水分を絞った後にドライヤーで乾燥させる工程は長網抄紙機と同じである。円網抄紙機でつくったクラフト紙を円網クラフト紙と呼ぶ。

円網抄紙機ではパルプを幅方向に均一に分散しにくいため、パルプは極端にシリンダーの回転方向（紙の縦方向）に揃ってしまう。その結果できあがった紙の品質は縦横の差が非常に大きく、縦方向にはたやすく引き裂けるのに横方向には引き裂きにくい性質となる。一方、引き裂きの強さとは逆に引っ張るときの強さは縦方向が強くなり、その特徴を生かして和紙粘着テープ用の原紙として重宝されている。表3³⁾に長網紙と円網紙の品質を比較して示した。

円網抄紙機は構造上スピードを出せず大量生産には向かないが、その分コンパクトであり薄い紙から厚い紙まで幅広い厚さの紙を小ロットで製造するのに向いている。ワイヤーパートを複数とした漉き合わせの円網抄紙機は板紙の製造に使用される。包装紙の分野ではクレープ紙（第3章の3-5（p.23）で改めて解説する）の製造に使われることが多く、日用品ではトイレットペーパーなどが代表的な製品である。トイレットペーパーが横方向にきれいに切れないことを体験したことがあるだろうが、それは円網抄紙機でつくられた紙だからなのである。

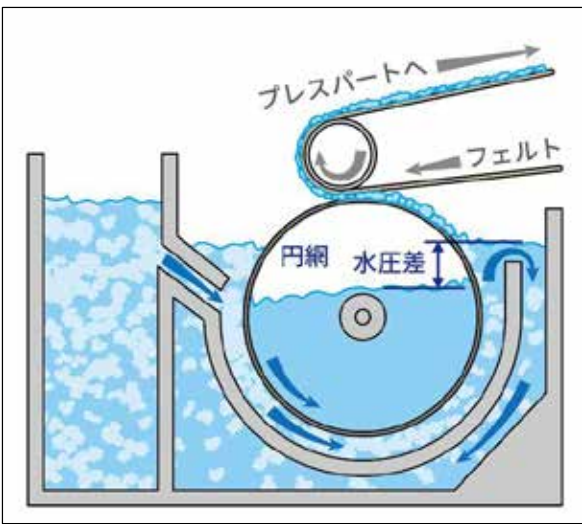


図3 円網抄紙機

表3 長網紙と円網紙の比較

項目	単位	方向	長網紙	円網紙	測定方法
坪量	g/m ²	—	60.3	60.8	JIS P 8124
厚さ	mm	—	0.088	0.085	JIS P 8118
引張強さ	kN/m	縦	4.31	5.42	JIS P 8113
		横	2.40	0.82	
伸び	%	縦	1.5	2.8	JIS P 8116
		横	6.8	3.0	
引裂強さ	mN	縦	750	482	JIS P 8116
		横	818	882	
破裂強さ	kPa	—	198	222	JIS P 8112

1-5 サイズ剤と紙力増強剤

先に紙の原料はセルロースと解説したが、よい紙をつくるためにはサイズ剤などの添加剤が必要である。サイズ剤を添加せずに抄紙された紙は水を吸いやすいため、水性インキなどで筆記するとインキはにじんでしまう。サイズ剤をどの程度の量にするかはその紙の用途や後加工の内容によって決まり、さまざまなレベルに設定される。水性の液を浸みこませる加工を行うならば、サイズ剤の量はある範囲内に入れることが大切であり、サイズ剤が少ないと含浸過多となり、多いと含浸不良になる。

以前はサイズ剤といえば松脂まつやにをベースにしたロジンサイズのみであり、紙への吸着を助けるために定着剤として硫酸アルミニウムが併用された。硫酸アルミニウムが使われることにより紙の pH は 4 ～ 5 と酸性になり、いわゆる酸性紙となる。硫酸アルミニウムは徐々に分解して硫酸を生じ、その硫酸が紙を分解してボロボロにする欠点がある。また、加工の目的が防錆用途であるならば発錆因子となる硫酸を生じることは欠点である。そこで、これらの欠点を解決するために、いまは定着剤を必要としない中性サイズ剤が使用されるようになっていて pH は 7 前後であり、中性紙と呼ばれる。

一方、紙力増強剤は文字どおり紙の機械的強さを増強させるための薬剤であり、紙の繊維の絡み合いを補強するはたらきをする。使用目的によって 2 種類あり、ひとつは紙の表面強度を高めるもので、印刷時にインクの粘性によって紙面の繊維が脱落するのを防ぐことが目的である。もう一方は湿潤紙力増強剤で、湿った紙の紙力を向上させるために用いられるものである。加工紙にとっては後者の機能が重要である。水性液の含浸加工を行なうときにサイズ剤の使用量を極端に少なくするかまったく使わない紙を用いると、水性液を含浸させたときに紙の強度が低下して紙が切れてしまい加工が困難となる。

そのような場合、湿潤紙力増強剤を使用することで水分をたくさん含んだ状態でも紙の強度低下を抑えることができ、加工適正や作業性を向上させることができる。

1-6 クラフト紙の種類と品質

防錆包装に使用される加工紙の原紙として多用されるのは未晒クラフト紙であり、クラフト紙の規格として JIS P 3401「クラフト紙」がある。この規格は JIS の適用範囲に明記されているように紙袋用のクラフト紙について定めたものであり、加工紙用の原紙としての位置づけにはなっていない。しかし、後述 (p.20) する加工紙の 1 種であるポリラミ紙の規格 JIS P 1514「ポリエチレン加工紙」には、『原紙には JIS P 3401を用いる』となっているから、実質的に加工紙用原紙の規格にもなっているとみてよいであろう。

表 4 に JIS P 3401 に規定されている種類と品質規定について示した⁴⁾。クラフト紙は重袋用未晒クラフト紙 (1 種)・湿潤紙力増強剤を浸みこませた未晒クラフト紙 (2 種)・軽袋用未晒クラフト紙 (3 種)・重袋用晒クラフト紙 (4 種)・流れ方向に細かな伸縮を持たせた未晒クラフト伸長紙 (5 種 1 号)・横方向に伸縮を持たせた未晒クラフト伸長紙 (5 種 2 号) の 6 種類に分類されているが、すべて長網クラフト紙である。円網クラフト紙についての規定はない。これらの中で防錆包装分野に関係するクラフト紙としては 1 種、2 種、3 種が代表的であるが、4 種や 5 種の紙を原紙に使うこともある。坪量は表に示されたものに限定されず、加工紙の使用目的に応じて任意に設定されている。この JIS で規定されている品質項目は引張強さ・伸び・引裂強さ・サイズ度などわずかであるが、包装用加工紙の原紙として必要と考えられる品質はさらにあり、それらを合わせると表 5 に示したように 15 種類になる。包装作業上や物流で必要不可欠な強度がもっとも重要な品質であり、具体的には引張特性 (引張強さと伸び)・引裂強さ・破裂強さ・耐折強さである。また、厚さやこわさは包装作業性にとって必要な品質と言え、平滑度は包装作業性や加工適性に関係する。また透気度とサイズ度は加工適性に大きくかわる品質で

表 4 クラフト紙 (JIS P 3401 : 2007) の種類と品質

種類	主な用途	坪量 (g/m ²)	引張強さ (kN/m)		伸び (%)		引裂強さ (mN)		湿潤引張強さ (kN/m)		サイズ度 (s)	厚さ (mm)	白色度 (%)
			縦	横	縦	横	縦	横	縦	横			
1種	重袋用未晒クラフト紙	75.0	4.5	2.2	2.0	4.0	760	810	—	—	10	—	—
		78.0	4.6	2.3	2.1	4.2	810	860			15		
		81.0	4.8	2.4	2.2	4.5	860	910					
		84.0	4.9	2.5	2.3	4.7	910	960					
2種	湿潤強力剤を滲み込ませた重袋用未晒クラフト紙	78.0	4.9	2.5	2.2	4.5	670	710	1.2	0.6	15	—	—
		81.0	5.1	2.6	2.3	4.6	710	760	1.3	0.7			
3種	軽袋用未晒クラフト紙	50.0	2.5	1.0	—	—	440	480	—	—	5	0.069	—
		60.0	3.0	1.2			530	570			8	0.084	
		70.0	3.5	1.4			620	670			10	0.094	
		80.0	4.1	1.7			710	760			13	0.109	
		100.0	5.1	2.1			900	990			20	0.139	
		120.0	6.2	2.5			1090	1190			30	0.169	
		4種	重袋用晒クラフト紙	75.0			4.4	1.8			1.3	3.5	
78.0	4.5			1.9	3.6	760	810						
81.0	4.6			2.0	1.4	3.7	810	860	15				
84.0	4.8			2.1		3.8	860	910					
5種1号	抄紙機で流れ方向に微細な伸縮を与えた重袋用未晒クラフト紙	70.0	2.9	1.9	5.9	4.9	730	760	—	—	10	—	—
		73.0	3.1	2.0			780	830					
		78.0	3.4	2.1			880	940					
		83.0	3.7	2.3			970	1050					
5種2号	抄紙機で横方向に微細な伸縮を与えた重袋用未晒クラフト紙	72.0	3.9	1.9	2.3	6.3	870	960	—	—	10	—	—
		75.0	4.0	2.0	2.4	6.4	940	1030					
		78.0	4.3	2.1	2.5	6.7	980	1070					
		81.0	4.6	2.3	2.7		1050	1140					
		84.0	4.9	2.5	2.8		1100	1190					

注)坪量の許容差は± 2.5。それ以外の品質の数値はいずれも下限値

表5 JIS に定められた包装紙に必要な品質

項目		単位	JIS	試験方法の概略
坪量		g/m ²	JIS P 8124:2011	0.1m ² の大きさの質量を測定し1m ² 当たりの質量に換算
厚さ		mm	JIS P 8118:2014	マイクロメーターを用い100kPaの圧力で200mm ² の面を計測
引張特性	引張強さ	kN/m	JIS P 8113:2006	幅が15mmの短冊を破断するまでゆっくりと引っ張って破断したときの最大荷重を1m当たりに換算した値
	伸び	%		同一の操作で増加した長さの元の寸法に対する百分率
引裂強さ		mN	JIS P 8116:2000	切れ目を入れた後に43mmの長さを引き裂くのに必要な力
破裂強さ		kPa	JIS P 8112:2008	紙面に低速で圧力を加え破れたときの圧を測定
耐折強さ		—	JIS P 8115:2001	一定の張力下で折り曲げ操作を繰り返し、破断するまでの往復回数の常用対数
こわさ		—	JIS P 8143:2009	短冊の一端をつかんで左右に1回転/分の速さで回転させたとき90度で反転するときの長さをcm単位で計測しその3乗を100で除す
平滑度		s	JIS P 8119:1998	100kPaの圧でガラス面に押し付けたとき、ガラス面との隙間から10mLの空気が通過するのにかかる時間を計測
透気度		μm/(Pa・s)	JIS P 8117:2009	一定条件下で、単位面積・単位圧力差・単位時間で透過する空気の量を計測
サイズ度		s	JIS P 8122:2004	2%のチオシアン酸アンモニウム水溶液がしみ込んで紙層を通過するのに要した時間
水分		%	JIS P 8127:2010	105℃で乾燥させたときの減量の元の質量に対する百分率
pH	冷水	—	JIS P 8133-1:2013	質量2gの細片を100mLの冷水か熱水で抽出した液をpH計で計測
	熱水	—	JIS P 8133-2:2013	
塩化物イオン量		ppm	JIS P 8144:2006	質量2～5gの細片を23℃の水250mLで抽出した液をイオンクロマトで分析
硫酸イオン量		ppm	—	

ある。表の最後に示した塩化物イオン量と硫酸イオン量は防錆性能に影響を与える。ここでは個々の試験方法について説明する余裕はないから、具体的な測定方法については表5の中に示したそれぞれのJISを見て欲しい。ちなみに包装用に限定せずすべての紙が持っている品質を評価する試験方法は60以上もありそれぞれの日本産業規格が定められている。

ところで表5に示した品質を測定するとき、塩化物イオン量と硫酸イオン量を除いて、決められた温度と湿度に管理された環境で実施しなければならない。とくに湿度は紙に吸湿性があるため品質に大きく影響し、おなじ条件下で試験しないと比較検討ができない。湿度すなわち紙に含まれる水分の影響については次節で詳しく説明する。

また未晒クラフト紙以外にも片艶クラフト紙が防錆包装に用いられる。この紙は紙の片面に光沢があることから「片艶」と名づけられていて、1-4の(1)で述べたように抄紙機のドライヤーパートでヤンキードライヤーに紙を押し当てて乾燥させることによって製造される。防錆包装では金属合紙向けが主な用途である。

1-7 湿度によって変わる紙の物性

紙は温湿度に応じて吸湿（水の吸収）と乾燥（水の放出）を常に行っており物性に影響を与えている。これは紙の強さの源が水素結合によるためである。異なる湿度環境における物性値と湿度変化による品質の変化を筆者（會田）が測定した結果を以下のいくつかの図で示す。

23℃で50% RHの環境で調湿した50g/m²と75g/m²の未晒クラフト紙を200mm×200mmのサイズに切り出し、絶乾（湿度0%）から完全湿潤（飽和するまで水を含ませた状態）までのさまざまな湿度における平衡水分（平衡状態にしたときの水分量）と湿度の関係は図4のようになり、当然ながら湿度が高いほど水分量が増え吸湿が盛んにおこなわれていることがわかる。しかし、完全湿潤での増加量は極端であり、液体の水に触れることによっておこる毛細管現象で紙の吸水が起きた結果である。水蒸気による吸湿とは大きく異なる。また厚さと湿度の関係は図5のようになり、湿度が高くなっても厚さはあまり変わらないが、完全湿潤では極端に厚くなる。

一方、寸法の変化は図6のようになり、50% RHを基準にそれよりも低湿度では乾燥が、高湿度では吸湿が生じる。このとき縦よりも横の寸法変化が大きいことがよくわかる。これは、セルロース繊維が円柱状（p.2の図1を参照）になっていて、水分を含むと縦方向ではなく横方向に大きく膨張することによる。セルロース繊維が縦方向に並ぶ傾向の強いクラフト紙は吸湿により縦方向よりも横方向に大きく膨らむのである。なお1本のセルロース繊維は横方向に30%伸びるが、繊維の絡み

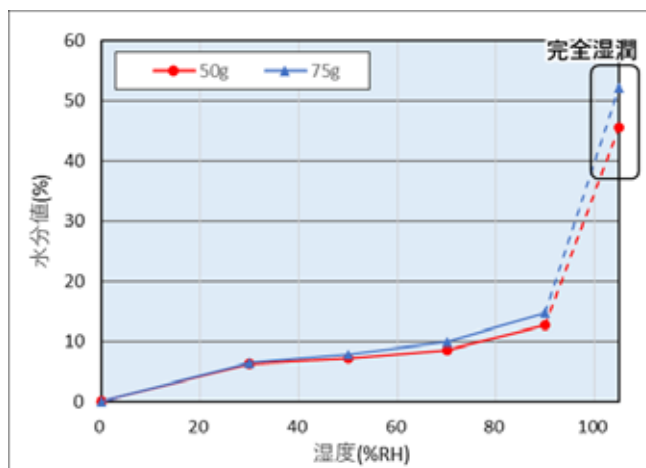


図4 湿度と水分値

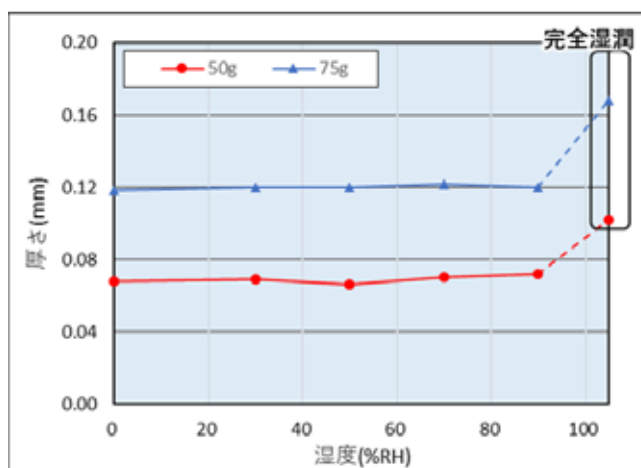


図5 湿度と厚さ

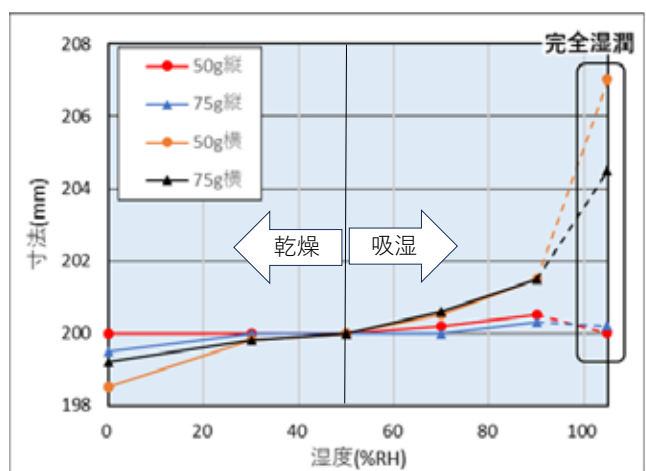


図6 湿度と寸法

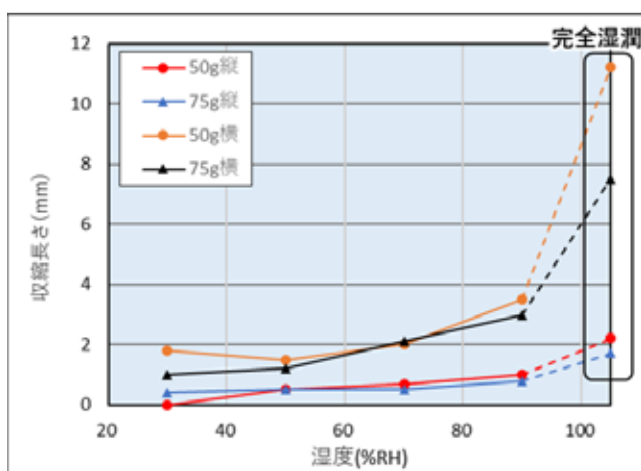


図7 調湿環境から絶乾燥状態への収縮長さ

合った紙ではそれほどの大きな動きにはならず、一般的に縦方向が0.1～0.5%で、横方向が2～3%と言われている。筆者（會田）が試みに実測した結果でも図6に示したように最大で縦が0.3%、横が3.3%伸びた。さらに調湿環境から絶乾状態に曝して乾燥させたときの収縮長さを図7に示す。当然ではあるが、これも横の方が大きな数値となる。

乾燥と吸湿を繰り返すと最終的には繊維の絡みが強固となり、寸法変化が著しくにくい紙となる。とくに完全湿潤状態から絶乾状態になる場合は、水を含んで膨張した繊維が水を放出することで収縮するため、もとの状態よりも繊維の絡みは強固となり、より大きな寸法変化を生じる。たとえば50g/m²クラフト紙の場合は、もともと200.0mmの幅が完全湿潤により207.0mmに伸び、それが乾燥により195.8mmにまで縮んでいる。これほどまでに紙の動きはダイナミックなのである。実際に水性液などの塗工作業を実施する場合はこの動きは無視できず、しっかりと管理されている。

未晒クラフトの引張強さについて湿度との関係を示すと図8のとおりであり、吸湿するにつれて強度は低下していく。これはセルロース繊維間をつないでいた水素結合の切断が進んだからである。紙の水分量変化の影響は紹介しただけにとどまらない。防錆紙などを製造するときの塗工工程で起こるカールの原因にもなるが、カールについては第3章で詳しく説明する。

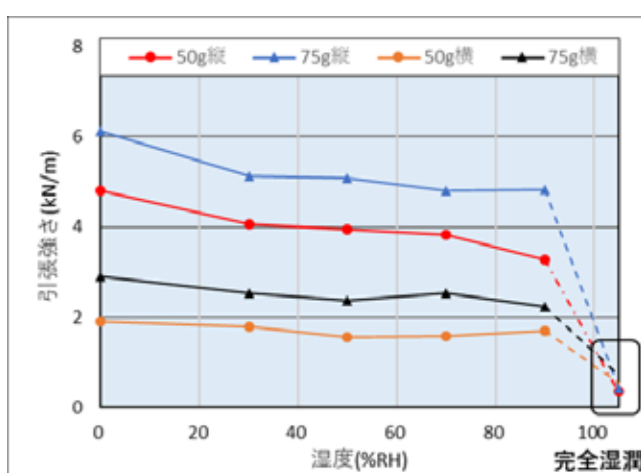


図8 湿度と引張強さ

以上のように、紙は平衡水分のみならず紙の吸湿と乾燥が起こる加工工程での水分変化によって寸法や強度などは大きな影響を受ける。これはプラスチックにはない紙に独特の性質と言えるであろう。