

1.はじめに

紙の構造と物性と題したセミナーはここ数年、相当回数実施し、それらに多くの企業人が参加されている。なんらかの形で紙材料に関与される企業の方が聴講においでになるのだが、紙の補助原料メーカーから文具、包装、印刷、紙搬送等実に幅広い業種にわたっている。どの方も、紙を専門としないが、紙や製紙についての基礎知識を得たいと考えておられる。現在我々の周囲に身近にある材料は、鉄やアルミ等の金属類、ガラスを主とする無機材料、紙およびプラスチック材料であり、その中で紙は鉄などの金属よりは新しいが、プラスチックよりは格段に古い、約二千年の歴史のある材料である。ただ蒸気機関に始まるエネルギー革命に追随する形で、近代的な製紙産業になったのは約150年前であり、期を同じくして、地球温暖化が始まったとも言える。すなわちエネルギー革命および地球温暖化は石炭、石油、天然ガス等の地球に埋没した炭素資源を利用するために生じたのであるが、今後地球温暖化を止めるあるいは遅らせるためには、地球上で循環している炭素資源である木材を上手く利用することが肝要になる。近代製紙産業が始まる前は非木材の植物から繊維を取り出して紙を製造したのであるが、今は木材から紙が作られ、日本における木材需要の約半分は紙である。そのため、紙は地球に優しい材料として見直され、今後なんらかの形で利用され、あるいはむしろその利用が増大する可能性もある。紙は、かつて情報媒体としての利用が大半であったが、通販の利用が増えたこともあり、最近では包装用途が最も大きい。さらに紙の多孔性を利用した用途の拡大も考えられる。ここでは紙の主原料であるパルプを含め、紙材料の基礎を幅広く説明するが、とくに我々人間が長年紙を利用するのは、その物性に由来するのであり、さらに紙においてはその構造が物性と不可分なので、紙の構造と物性、その基本と題した次第である。

1.1 紙の歴史と変遷¹⁾

約二千年前に中国後漢王朝の宦官であった蔡倫が、既に存在していた単に繊維の集合したシート状のいわばプロトタイプの紙の製法に工夫を重ね、筆書に適した紙ができたのである。そのため、彼は紙の発明者として後世知られるようになった。余談だが、北京五輪の開会式では世界の三大発明である紙、火薬、羅針盤がいずれも中国でなされたことをアピールしていた。ただ、中国（文明）は技術の開発には優れていたのだが、その基礎となる科学の発想が乏しく、中国はいまだノーベル賞（科学部門）を獲得できないでいる。同じアジア圏で、中国の思想を基礎とした日本であるが、明治以来科学分野ではギリシャ・ローマ由来の欧米思想（思考）を取り入れることで、湯川博士を端緒として、今日日本にもノーベル賞がもたらされるようになった。ただ、昨年の受賞者の大隅先生が憂いておられたように、最近基礎研究を疎かにしており、今後はあまり期待できないであろうと言われている。

材料に対する人類の歴史をみると、衣料では毛皮が最初であり、次いで麻等から得られ

る植物繊維（長さ：約1cm）を紡いで糸にし、それを織って布にすることは紀元前1万年頃には会得していたと考えられる。以下は私見であるが、これら繊維の屑や使い古しの繊維は、短かすぎて紡糸できず、捨てていたであろうが、たまたま、すのこ状のものに、水とともにこれら短繊維を流し混むとシート状のものができるとはなかば自然発生的に知られて、情報記録媒体ではないが、様々な用途、たとえば土器の蓋とかのように使われていたと想像している（中国では、蔡倫以前の紀元前数百年頃と推定される紙の遺物が発見されている）。以下で述べるように、その後今日でも、その多くが紡糸可能な繊維長を有する天然繊維（たとえば麻や木綿）は紡糸、次いで織布工程を経て衣料になり、紡糸に適さない短繊維は抄紙により紙として利用される。すなわち、紡ぐことと抄くことは繊維利用の2大基本技術である。一方、歴史および文明の進展に伴い文字情報を記録する必要が高まり、古代文明の進んだ各地域ではパピルス、粘土板、木簡等を情報記録媒体として使用していたのであるが、中国で上記の蔡倫が抄紙法や原料等を工夫し、筆記に適した紙を発明して中国国内では一気に紙が広がった。日本へは、当時中国の朝貢国であったためであろうが、5世紀頃までには伝わり、その後平安時代初頭から和紙として独自の発展をし、江戸時代の日本は紙と木の世界と称された。他方、ヨーロッパへは遅く、イスラム圏沿いにジブラルタル海峡からイベリア半島に渡ったのは12世紀初頭である。（余談：糸を紡ぐことを英語圏で **spinning** と称するが、抄くことは元来その概念がないため言葉がなく、今では **sheet making** あるいは **molding** と表記しており、紙抄きがかなり遅れて英語圏に入ってきたことが分かる。他方日本を含め中国文化圏では、それぞれ紡ぐ、および抄くという言葉（文字）で充てられ、古くからこれらの概念があったことが知られる）それまでのヨーロッパは羊皮紙の時代であったが、12・13世紀、あたかもルネサンス期に入り、紙の需要が増えた。さらに15世紀ドイツのグーテンベルグによる凸版印刷術の発明もあり、情報記録媒体としての紙需要は増大する一方になった。当初は、麻等の非木材繊維（主として、衣料ぼろや屑）を主原料とした紙であったのだが、その後生じた産業革命に伴う紙のさらなる需要増に追い付けず、19世紀には大量にある木材から繊維を取り出すパルプ化技術が進み、今日、紙幣等特殊な用途を除けば、紙はすべて木材から作られる。もちろんほぼ同時に抄紙も手すきの時代から機械抄きになり、今日では抄紙速度時速100km/時を超える抄紙機も存在する。ヨーロッパに製紙の概念が伝わったのは遅かったが、凸版印刷、木材パルプの開発および抄紙の機械化の技術を発展させたのがヨーロッパであることは大変興味深い。今もって地域によっては薪炭材として多用される木材だが、現在の先進国では紙としての需要がその約半分を占める。その中には製材時に出る端材や廃材が多く含まれ、また樹木の先端や枝などもチップにしてパルプ化できるので、木材すべてを有効利用することになり、紙はその点でも重要である。今や地球温暖化防止のためもあり、全世界的に見て、紙の使用は今後も増大すると思われる。

昨今情報の電子化が進み、文化情報媒体としての紙の需要が減少している。他方、その穴を埋めるほどではないが、最近の通販の急成長にみられるように、物流包装用途の紙需

要は堅調である。また人口の少子高齢化に関して、乳児用とともに高齢者用おむつの需要は増えており、いずれにしても、紙がもっぱら情報記録媒体であった時代から、紙の他の機能、すなわち包む、吸い取るなどの性格を生かした需要の拡大が検討され、他材料との複合・加工により多様な紙製品群が今日存在する。

産業革命以来のエネルギーや（紙）材料の大量使用は環境問題を引き起こすことにもなった。日本に限定すれば、1960年代、当時は水俣湾沿いで生じた水俣病（工場廃液中の無機水銀が有機水銀になり、それが食物連鎖で濃縮されて人体に入って引き起こされる）など地域的な環境公害問題が初めてクローズアップされた時代であったが、田子の浦のヘドロ騒動（富士地区の製紙工場から出た微細物が田子の浦に溜まり、ヘドロ化した）などで紙パルプ産業も公害産業と位置づけられた。その後、1995年頃、パルプ漂白で使用する塩素系薬品が有害なダイオキシンになるとして新聞を賑わせたことがあった。前者では工場排水処理施設が完備され、後者では脱塩素漂白技術の導入で問題は解消した。ところが21世紀になり、空気中の炭酸ガス濃度の増大に伴う地球温暖化傾向、いわば地球レベルでの環境問題がより明確になり、その阻止のため、石油や石炭の利用を減らすべきであり、代わりにエネルギーでは原子力、材料では木材のさらなる利用が叫ばれるようになった。ただ、原子力発電は福島原発でその欠点を露わにしたので、エネルギーでは太陽光や風力に加え、今後はバイオマスも貢献しなければならない。後に詳しく述べるが、パルプ製造に際して多くのバイオマス由来エネルギーを創生しており、加えて本体の紙材料が木材を主原料とすることから、紙パルプ産業は一転環境産業になった感がある。また地球環境の保全には材料のリサイクル使用も不可欠であるが、この点でも紙はトップランナーである。そのため、バージンパルプ製造とともにリサイクルパルプの一層の利用が図られている。

1.2 紙パルプ産業の特徴、現状と展望^{2, 3)}

紙パルプ産業は、日本の製造業の中でも素材を提供する素材産業で基幹産業である。また大型装置で大量に製造するので装置産業としての性格も併せ持つ。欧米に遅れること数10年で始まった日本の近代製紙産業は、内需中心に発展してきたので、輸出中心の日本の製造業の中では異質である。ただし、最近では国内人口減少や高齢化の波を受け、海外での事業展開による製紙会社の海外比率の増加が目立つ。また、明治の初めからスタートした基幹産業（日本の近代製造業の中では製鉄業とともに最も古い）なので、印刷や機械など関連する産業も多く、またその用途も広いので、図1紙の種類と分類で示すように、多種類の紙が製造されている。

紙パルプの製造における最大の特徴は、最終的には乾燥工程で脱水するのだが、それまでに繊維を分散・懸濁させるために多量の水を使用することである。そのため、用水に便利な土地に工場が作られてきたが、最近では木材チップ輸送船が横付けできる港湾地区での工場も多い。近年事業の多角化として、元来行ってきたバイオマス発電事業（3.2参照）に加え、その広大な敷地を利用した太陽光発電事業も手掛けてエネルギー産業にも参入している。

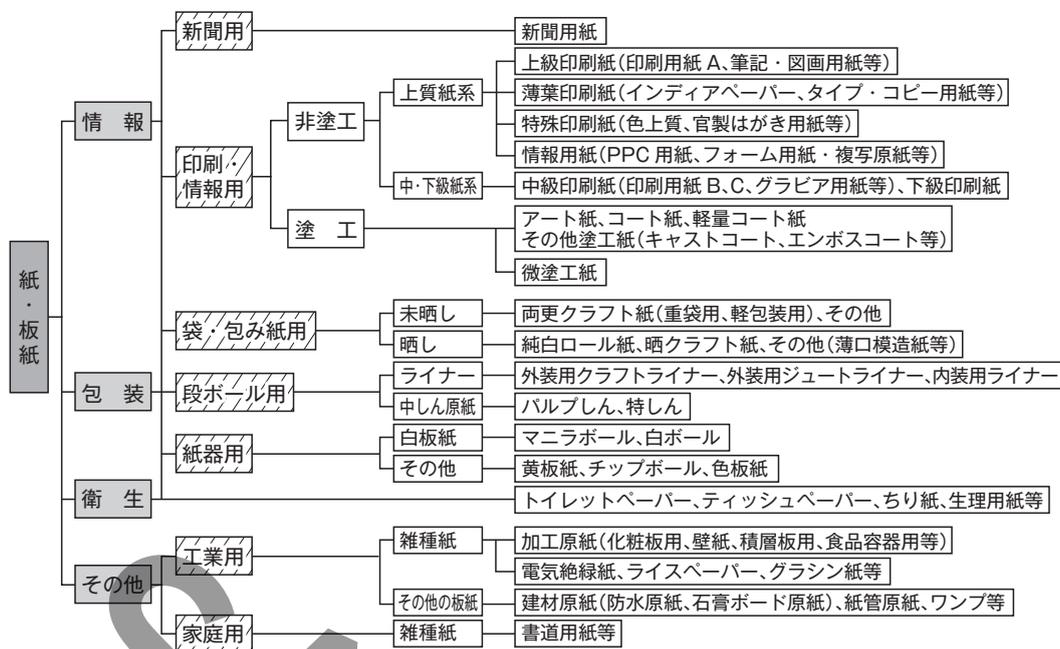


図1 紙の種類と分類³⁾

Q：世界の中で日本の紙・板紙生産量順位は？

A：2015年の統計によると、中国、アメリカに次いで3位で、次がドイツ、韓国の順、ちなみにパルプ生産量の順位は、アメリカ、ブラジル、カナダ、中国、スウェーデン、フィンランド、日本となります。