パルプ製造を取り巻く諸問題

Surrounding Conditions for Pulp Production

飯 塚 堯 介

1. 緒 言

E・ジャーナル、E・新聞、E・メール等、コンピューター技術の進展によって私達の回りには、これまではない情報通信の網が張り巡らされつつあるように感じる今日この頃である。膨大な量の情報が、瞬時に、また否応なく配信されるE・システムにおいては、地域的な隔たりに関係なく、最新の情報を共有することが可能であり、海外の研究者との実質的な共同研究を行うことも格段に容易になって来ている。このような新しい形の情報伝達システムの発達の中で、情報媒体としての紙の意義が再確認されていることも最近の特徴であろう。我々は情報の性質によって、多様な媒体を使い分けていくことになるとともに、このことによって情報の伝達が一層活発となり、結果的に紙の需要も一層増大することが予想される。紙パルプ産業の今後の発展にとって重要なことは、その原料面、製造工程面、製品の性質面からみた環境に及ぼす影響であり、資源の持続性である。本稿では、このような認識のもとに、今後の製紙用パルプの生産について原料、製造技術および環境の視点から概観してみたい。

2. 原料問題

世界的にパルプ製造原料を見ると、その約90%が木材であり、中国を中心として約10%が草本などの非木材を使用して製造されている。世界の木材資源量は約3300億立米と見積もられており、2000年にパルプ製造に消費された木材の量が4.8億立米であることを考えると、そのために木材資源が世界的に不足することは考えにくい。なお、この量は世界の用材生産量の約30%に相当している。森林における植物生産が平均して年率4%程度であることを考慮すると¹⁾、上述の程度の木材消費は十分に森林における生長量の範囲内にあるといえる。すなわち、適切な管理

のもとに森林資源を利用するならば、我々は森林を劣化させることなく、森林資源を持続的に利用していくことが可能であると考えられる。北米、ヨーロッパにおける森林資源量が現在でもなお増加しつつあることが、これを裏付けている。一方、南アジアを中心とした発展途上国においては、膨大な面積の天然林が毎年消失しているとされる。不適切な森林伐採と利用により森林の破壊が進行していることに、大きな懸念が寄せられている。貴重な生態系として守るべき森林、木材資源の生産用森林、食料油、ゴムなどの生産に転換すべき森林などに分けたいうで、これ以上の天然林の減少を食い止めるための努力が続けられているが、その成果が順調に得られることを心から期待したい。

パルプ製造原料を今後とも持続的に確保していくためには、樹木育種によって開発された最も生産性の高い林木の積極的な造林を進め、計画的に、かつ短伐期で原料木材を得ることが重要である。現在、我が国の紙パルプ産業界では、海外に適地を求め、いわゆる早生樹造林を積極的に進めている。ユーカリ、アカシア、松類の造林が、世界各地において進められており、その総面積は2003年末現在35.6万haに達しており、近い将来には47万haにまで拡大することが計画されている。表1にその主要なものを示す²⁾。このような海外造林から生産された木材チップが2001年実績で280万立米輸入されている。この量は総輸入チップ量の11・12%に相当しているが、近い将来には25%程度まで増大することが見込まれている。

いずれにしても、これらの造林は今後とも荒地や耕作忌

表1 我国製紙業界による海外造林

x 1000 ha

Country	Australia	Brazil	Chili	New Zealand
Operated	112.2	123.7	50.3	43.0
Planned	78.3	0	13.2	11.4
Total	190.5	123.7	63.5	54.4

Vietnam	Ecuador	South Africa	P.N.G.	Total
9.2	3.0	4.2	8.4	356.4
1.3	7.5	5.8	1.6	122.7
10.5	10.5	10.0	10.0	479.1

Operated and planned areas : at the end of 2003

Total : includes the project in China.

GYOSUKE MESHITSUKA
東京大学大学院農学生命科学研究科
教授
〒113-8657 東京都文京区弥生1-1-1
Tel : 03-5841-5261 Fax : 03-5802-8862
E-mail : agmeshi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp
専門 木材化学、天然高分子化学
趣味 旅行、ドライブ、スポーツ鑑賞

避地など、他の用途に不向きな地域を中心に、地域社会との連携のもとに進められることが必要である。持続的な原料木材の確保には世界的な視点が重要であるが、アジアについてみると中国との関係がとりわけ重要となる。我が国を含む紙パルプ先進国における生産量の伸びが着実ではあるが低率で推移しているのに対し、中国のそれは製品売り上ベースで年率 16% と極めて大きな値となっている。

既に世界第 3 位のパルプ生産量であるが、国民一人当た

表 2 世界のパルプ生産(2001 年)

Country	U.S.A.	Canada	China	Finland
Production, 10 ³ ton	52,795	24,918	17,570	11,169
%	29.4	13.9	9.8	6.2

Sweden	Japan	Brazil	Russia	Indonesia
11,000	10,813	7,450	6,225	4,326
6.1	6.0	4.1	3.5	2.4

りの紙使用量が我が国の 8 分の 1 程度の中国では、今後ともその需要が増大することは疑いがなく、必要とされる原料木材の急速な増大が予測される。これに関連して、紙・板紙の生産量では中国は既に世界の第 2 位となっている。

中国においては製紙原料の 47% が古紙(国内 31%、輸入 16%)によって、また 15% が輸入木材パルプによってまかなわれており、残り 38% が国内産パルプによっている。そのうち、32% が非木材パルプ、6% が木材パルプである。国内で生産されたパルプに限ってみると、実にその 84% が非木材を原料としてることになる³⁾。これらの非木材パルプは、麦わらを中心に、稲わら、葦、竹などのいわゆる非木材を原料としており、中国におけるパルプ生産の最大の特徴であるといえる。しかし、広大な農地に分布し、容積比重の小さいわら類は集荷することが容易ではないことに加えて、これらの原料の集荷が年間の特定の時期に集中すること、得られる紙質が木材由来のものに比較して劣ることも、工業原料としての問題点となっている。加えてこれらに多量に含まれるシリカに起因する廃水処理の難しさと、結果としての水系の汚濁も未解決の問題である。このため中国ではパルプ製造原料の非木材資源から木材資源への転換の動きが急であるといわれる。国内に十分な森林資源を持たない中国では、国内の緑化のための植林とともに、工業原料としての利用を意図した植林も積極的に進められている。黄河と揚子江に挟まれた平原地域を中心に進められている早生樹ボブラ造林⁴⁾では、10 年伐期での木材生産

表 3 熱帯プランテーションから排出される未利用資源(目的生産物以外は絶乾重量表示)

Plantation	Biomass	Unit	World	Asia
Rubber	Latex	× 10 ⁶ t	6.53	6.08
	Waste wood	× 10 ⁶ m ³	100.0	94.2
Oil palm	Palm fruits	× 10 ⁶ t	98.1	76.4
	Waste wood	× 10 ⁶ m ³	80.8	65.8
	Fronde	× 10 ⁶ t	18.0	14.6
	Coir	× 10 ⁶ t	28.0	22.8
Coconut	Coconut oil	× 10 ⁶ t	47.5	40.7
	Waste wood	× 10 ⁶ m ³	157.6	133.5
	Shell	× 10 ⁶ t	8.32	7.05
	Coir	× 10 ⁶ t	13.3	11.3
	Coir dust	× 10 ⁶ t	4.82	4.08
Sugar cane	Sugar	× 10 ⁶ t	1,275	569
	Bagasse	× 10 ⁶ t	1,530	683
Rice	Rice crop	× 10 ⁶ t	596	541
	Rice straw	× 10 ⁶ t	358	325
	Rice hull	× 10 ⁶ t	107	97
Wheat	Wheat crop	× 10 ⁶ t	584	261
	Wheat straw	× 10 ⁶ t	934	418
Maize	Corn	× 10 ⁶ t	600	167
	Bagasse	× 10 ⁶ t	1,020	284
Cassava	Cassava	× 10 ⁶ t	168	46
	Bagasse	× 10 ⁶ t	275	75
Sweet potato	Sweet potat	× 10 ⁶ t	135	123
	Bagasse	× 10 ⁶ t	202	185
Total of waste materials		× 10 ⁶ t	4,468	2,274

数値は FAO Year Book および各国政府機関・生産者団体提供データからの推定値

が始まっており、主にこれを利用した合板生産は、2001年には世界第2位の1200万立米、MDF(中密度繊維板)は世界1位の730万立米に達しており、今後も急速に増大することが予想される。このように早生樹造林の主体であるポプラ材資源の多くは現状ではボード類など木質材料製造の原料として利用されているが、今後造林の進行にともなって資源量が増大するならば、パルプ原料としての利用も十分に予想される。しかし、それが中国におけるパルプ製造原料のニーズを十分に満たすことは考えにくく、海外からの多量の木材の輸入は不可欠となるであろう。いづれにしても、このような中国の動向は、世界の森林資源、とりわけアジアの森林資源の持続的利用に大きな影響をもたらすことは疑いがない。それだけに、非木材資源のパルプ化に関する研究開発は、我が国においても、積極的に行われるべき課題であると考えている。筆者らは稲ワラの化学パルプ化過程における脱シリカ挙動について検討し、アルカリ系蒸解においてはシリカのほぼ全量が脱離して廃液中に溶出するのに対し、pH 11以下の温和なアルカリ性下、あるいは中性、弱酸性下での蒸解では、シリカの約70%をパルプ中に安定的に保持した状態でパルプ化を進めることが出来ることを見出している⁵⁻⁷⁾。このような技術の実用化は、廃液処理の問題を軽減するのみならず、資源の有効利用にもつながるものと考えている。蒸解中におけるシリカの挙動については、他にも多くの報告が認められるが⁸⁻¹⁰⁾、部位特異的な脱離挙動については明らかとなっていない。今後、シリカの脱離を適切にコントロールした蒸解法をさらに発展させるためには、この点についての早急な検討が必要であると考えている。

非木材資源・未利用木質資源の利用に関連して更に補足するならば、FAO統計によれば農産廃棄物として取り扱われているバイオマス資源の年間発生量が実に 89×10^2 Mm³立米と見積られることである¹¹⁾。この量は世界の木材消費量の3倍に相当する。ゴム廃材、オイルパーム廃材は、ゴムあるいはオイルの生産性が樹齢とともに減退するため、これらのプランテーションから継続的に発生するものであるが、その量はそれぞれ1億立米、8000万立米と膨大である。現在、家具、建築用材などとして一部利用されているにすぎないこれらの資源の有効利用がはかられるならば、地域社会にとっても極めて有益であると考えられる。いづれにしても、非木材資源は木材以上に組織構造的に、あるいは化学構造的に多様であり、その利用には、木材の利用にはない特異な技術開発が必要である。関連研究者による集中的な検討が待たれるところである。

3. パルプ化技術

パルプ化技術に関する近年の進歩は、一定量の木材からより多量のパルプを得るための技術開発、換言すれば木材から効果的に脱リグニンを進めるための技術開発に集中されているといえる。脱リグニンの促進を意図した助剤の開発では、アントラキノン類の触媒量が画期的な効果を示す

ことが、日本、カナダでほぼ同時期に見出され^{12,13)}、現在ではパルプ製造工場の多くで使用されているといわれる。アントラキノン類(AQ)の利用に関連しては、AQ添加ポリサルファイド(PS)蒸解の導入が注目される¹⁴⁾。AQおよびPSそれぞれが持つ脱リグニン促進効果、すなわち一定脱リグニンレベルでの収率アップの効果が、両者が共存した場合に相乗的に現れることによるが、その機構については不明の点も多い。いづれにしても、PSの効率的な製造技術の開発、新たなAQ添加蒸解の開発に留まらず、一層優れた脱リグニン助剤の開発は今後とも極めて重要な研究課題であろう。パルプ化の終盤における脱リグニンを効果的に進めるには、パルプ中の残存リグニンの性状を正確に把握することが重要であるが、現状では依然として未解明の点も多い。例えば、未晒パルプではないが、酸素晒針葉樹クラフトパルプに対して温和なアルカリ処理(pH13, 90, 10分間)を行った場合、アルカリ性ニトロベンゼン酸化によるバニリン生成が明瞭に増加する現象が認められる。既に蒸解過程で過酷なアルカリ処理を履歴しているパルプ中の残存リグニンの性状が、このような温和なアルカリ処理で明らかに変化することは理解しにくいところである。一方、完全晒針葉樹クラフトパルプを同様にpH13, 90, 10分間の条件で希アルカリ処理することで、パルプを含む処理系全体の銅価が著しく増加する現象を見出している。これはこのように温和なアルカリ処理においても完全晒パルプ中の成分、恐らくは多糖の変質によって、銅価の定量に使用される過マンガン酸カリウムを消費する構造が生成することを示唆しているが、具体的な構造については不明である。パルプの性状には未知の部分も多く残されており¹⁵⁾、既存の常識にとらわれない視点からの基礎的検討が必要であるといえる。

パルプ化プロセスの最適化に関連して、1)蒸解過程の全体を通じたアルカリ濃度プロファイルの均一化、2)蒸解初期の硫化度を高く設定すること、3)蒸解温度を可能な限り低く設定すること、4)蒸解終期の溶存有機物濃度を低くすること、を満たすことが重要であるとされている¹⁶⁾。これらの条件を満たす蒸解プロセスとして、バッチ法ではスーパーバッチ、連続蒸解法ではMCC, EMCC, ITC, Lo-solid等のプロセスが提案され、実施されている。今後ともこれらを考慮した蒸解プロセスの最適化に関する研究は続けられ、新たな改良蒸解法が提案されてくると思われる。

4. 漂白技術と環境問題

紙パルプ産業の環境問題を考えるうえで漂白法の変遷は極めて重要である。従来、最も主要な漂白薬剤として使用されてきた塩素は、その使用に際して塩素化ダイオキシン類およびその他の多様な塩素化フェノール類が副成するところから、それを使用しない漂白法に移行しつつある。この動きは今後一層急速になり、近年中には国内のほぼ全ての漂白パルプ製造ラインで移行が完了するものと期待される。また、これによって懸念されているクロロホルムの生

成についても劇的に低減することが予想される¹⁷⁾。もちろん、従来の塩素漂白においても、適切な漂白条件と適切な廃水処理がなされるならば、工場施設から環境中に排出される排水の環境に対する影響は問題とならないレベルであることは確かである。しかし、現実には漂白パルプ製造プロセスから問題物質が生成しているとするならば、何らかの事情により適切な廃水処理が施されることなく放出される事態が生じた場合、環境に好ましくない影響を与えることとなる。このように考えると従来の塩素漂白を使用している限り、環境にとって危険な施設となる可能性を否定できない。一旦生成した危険物を取り除くことに多大の費用をかけるよりも、危険物の生成を伴わないか極めて低レベルのシステムへの移行にこそ費用をかけるべきであり、その意味で、紙パルプ業界において非塩素漂白(ECF 漂白)への移行が急がれていることは、誠に意義あるものであるといえる。

さらに言うならば、ECF への変換は廃水中のダイオキシン類を始めとした有機塩素化合物量を劇的に減少させるものの、COD あるいは BOD 負荷量が減るわけではない。また、ECF 漂白の主要な薬剤である二酸化塩素由来のクロレートの水系に対する影響も指摘されている。そのように考えると、究極的には排水を全く出さない(トータルエフルエント・フリー、TEF)工場を志向することが必要であり、ECF 漂白に留まることなくシステムの改善に取り組むことが求められているといえる。なお、我が国におけるパルプ製造の用水原単位を 1975 年当時と比較すると、節減率は 60% 程度にも達しているとされる。工程別にみて最も大きな用水原単位を示すのが漂白工程である。紙パルプ一貫工場についての 1998 年の米国での調査によると、古いタイプの工場では 77.6 立米/トン・パルプ程度であった用水使用量が、新しい工場では 44.2 立米/トン・パルプに、また最新設計の工場では 12.2 立米/トン・パルプに減少しているが、その減少の大きな部分は漂白工程での用水の節減によっている。同年の我が国の調査によると、漂白工程の用水原単位は最大 95 立米/トン・パルプ、最少 11 立米/トン・パルプ、平均 32 立米/トン・パルプであった¹⁸⁾。また、最近の ECF Mill における用水原単位についての報告によると、蒸解、漂白、抄造の全工程を通じてのそれが、14 ないし 15 立米/トン・パルプに安定して保たれることが示されていることは極めて興味深い事実である¹⁹⁾。

再生可能な資源である木材、あるいはその他の植物資源を原料とする紙パルプ産業は、生態系に配慮した原料の確

保と適切な紙パルプ製造工程の確立によって、地球に優しい、典型的な環境共生型産業になりえる条件を備えている。今後の技術開発によって、真にそのような産業となることを祈念している。

引用文献

- 1) 飯塚堯介、“バイオマス資源概論”、木質バイオマスの利用技術、日本木材学会編、3、文永堂(1991)
- 2) 海外植林プロジェクト、紙・パルプ、No.668, 24、日本製紙連合会編(2004)
- 3) 中国国家统计局資料
- 4) 森 正次、“熱帯林今昔：破壊から再生への歩みを検証する”、No.4、7(2002)
- 5) 朴 承栄、幸田圭一、松本雄二、飯塚堯介、飯山賢治、紙パルプ技協誌、53、214(1999)
- 6) 朴 承栄、幸田圭一、松本雄二、飯塚堯介、飯山賢治、紙パルプ技協誌、53、1492(1999)
- 7) 朴 承栄、幸田圭一、松本雄二、飯塚堯介、飯山賢治、紙パルプ技協誌、54、1245(2000)
- 8) 中野準三、津田裕子、北仲由美子、紙パルプ技協誌、50、692(1996)
- 9) 李 兵、岡山隆之、大江礼三郎、木材学会誌、41、170(1995)
- 10) 李 兵、岡山隆之、大江礼三郎、木材学会誌、42、272(1996)
- 11) K. Iiyama, M. E. Flavie, E. B. Rodriguez, and R. Wititsuwannakul, TBT. Lam, Proc. Intern. Symp.: Can biological production harmonize with environment, p 109(1999)
- 12) 野村芳禾、若井 誠、佐藤晴雄、特願昭 49-115486(1974)
- 13) H. H. Holton, Pulp Paper Mag. Canada, 78, 218(1977)
- 14) O. Pekkala, Paperi ja Puu, 64, 735(1982)
- 15) I. Tomoda, Y. Matsumoto and G. Meshitsuka, J. Japan Tappi, in printing.
- 16) B. Johansson, J. Mjoberg, P. Sandstrom and A. Teder, Svensk. Papperstidn., 87, 30(1984)
- 17) 大井 洋、中俣恵一、紙パルプ技協誌、57、985(2003)
- 18) 岩崎 誠、紙パルプ技協誌、55、1064(2001)
- 19) 佐藤武志、第 10 回パルプ技術セミナー要旨集、48(2004)