

はじめに

昭和61年度外国派遣研修により、2月中旬から45日間の日程で、西ドイツ、スウェーデン、カナダ、アメリカにおける木材の成分利用に関する研究状況を視察する機会に恵まれました。

御承知のように、木材は建築、家具材料として製材、合板、パーティクルボード等の形で用いられて来ましたが、この基調は今後も基本的には変わらないものと思われまます。

しかし、木材の最大の利用途である建築材料も住宅着工数の減少により需要が伸び悩み、木質製品間の競争は激化するとしても、木質全体の需要増は期待しにくく、林業、林産業は極めて厳しい局面に立たされていると言えます。このような状況の中で、木材の需要拡大を図るためには、今まで木材の使われていなかった分野での新たな用途開発を行う必要があります。

新たな木材利用の分野になり得るものと考えられるものには種々あると思われまますが、今回の研修に際しては、次の3点を主たる研修課題として調査を行うことにいたしました。すなわち、

- 1) 木材の脱臭材料としての利用の可能性に関する調査
- 2) 爆砕法による木質系飼料の製造技術と実用化の実態に関する調査
- 3) 木材成分すなわちセルロース、ヘミセルロース、リグニンの利用技術です。

その他、訪問先の街の中や、バス、汽車の窓から、建築、土木工事現場で使われている木材や、

ベンチ、遊具等の公園施設、個性豊かな住宅群、延々と続くガードレール用の木柱等、欧米における木材の実際の使われ方等も見聞して来ましたが、これらについては別の機会に譲り、今回は上記3つの課題のみについて紹介することにいたします。

1. ピートモスの脱臭材料としての利用実状調査

し尿処理場、畜産施設等から排出される悪臭は残された公害として大きな関心を集めています。これらの悪臭を除くため、薬液洗浄、活性炭吸着、燃焼などの、物理、化学的方法が用いられていましたが、運転経費が大きいと、これらに代わるものとして、より安価な生物脱臭が注目を集めています。

生物脱臭剤として、従来は土壌、都市ごみコンポスト等が用いられていましたが、最近ミュンヘン工科大学のツァイツヒ教授は、繊維質泥炭（ピートモス）を用いて、大変良好な成績を収めたということです。これはピートモスの中に微生物を繁殖させ、吸着されたにおいの成分をその微生物で分解し、無臭、無害化するという、極めて簡単なものです。現在西ドイツ南部を中心に畜産施設、し尿処理場、獣骨処理場など数百か所で実用化されているとのこと。

もし、木材を繊維化し、吸着物質を分解する機能を付与できれば、脱臭を必要とする諸施設での利用が可能となり、従来木材の使われていなかった分野での新たな需要に寄与することになります。

このため、ミュンヘン工科大学のツァイスヒ教授を訪れ、ピートモスによる脱臭の研究成果を詳しく調査し、さらに養豚農家、獣骨処理場を訪問したので、その概要を紹介いたします。

ピートモスの脱臭材としての特徴

ピートモスは西ドイツはもちろん、オランダ、フィンランド、スウェーデンからも産出され、これらの脱臭剤（バイオフィルター）としての性能にはほとんど差はないものの、現在は主に価格の点からソ連産のものを用いているとのことです。このピートモスの繊維は糸のように細くかつ長いものですが、泥、細かい部分を篩い落とすのみで、リファイナーで解繊する等の2次処理は全く施していません。

さて、ピートモスにしろ、土壌、都市ごみコンポストにしろ、脱臭層（バイオフィルター）として必要な性質は、フィルターの通気抵抗が小さいこと、およびフィルターの含水率変化に対する微生物の活動範囲が広いことです。

通気抵抗とは、臭気を含んだ空気を、脱臭層を強制通気させるときの抵抗で、この値の大きいものほどファンをまわすための電力消費が大きく、エネルギーコストが高つくこととなります。

ピートモスは、腐食土に通気性を改善するためにポリスチレンフォーム粉砕物を混合したものや、都市ごみコンポストに比較して、通気抵抗は $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{20}$ と小さく、非常にすぐれた性能を持っています。

また、微生物の活動できる水分範囲も、ピートモスは他材料に比べてすぐれています。このことを示したものが図1です。

図から明らかとなり、ピートモスは含水率20～80%の広い範囲にわたり大きな空げき率を保持し、微生物の活動し得る水分範囲が、都市ごみコンポスト等、他材料より大きいことが分かります。このことは微生物の活性保持のために行う水分管理は、ピートモスをはるかに容易であることを示すものであり、この点からもピートモスはすぐれた脱臭剤と言えるとのことです。

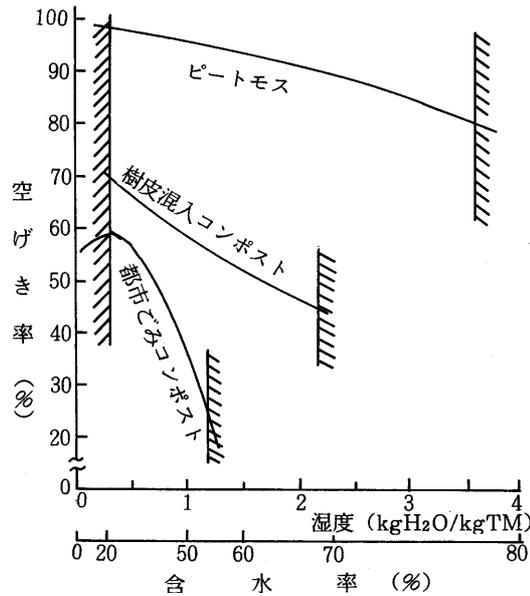


図1 ピートモスおよびコンポストの含水率と空げき率の関係

畜舎への適用例

西ドイツでは、先にも述べたように、ピートモスを用いたバイオフィルターは、畜舎、獣骨処理場、し尿処理槽、あるいは鶏糞乾燥工場、ビール醸造工場等で実用化されているとのことです。筆者はそれらのうち、ミュンヘン郊外の豚舎および獣骨処理場を見学しましたが、10～20cmのピートモス層を通過するだけで、強い不快感をもよおす悪臭が、ほとんど無くなっていることに感銘を覚えました。

ここでは、平均体重70～75kgの肥育豚 220頭を飼育している畜舎に設置されたバイオフィルターについて、簡単に紹介いたします。

写真1は実際の施設、図2はその畜舎のバイオフィルターの概略図です。

図から明らかのように、畜舎から吸収してきた悪臭空気を、プレッシャーチャンパーのフィルターマットでごみを除去し、フィルター層底部から木製の床格子を通し、フィルター層を通過させるという極めて簡単なものです。当初、バイオフィルターへの通気は孔のあいた配管を用いて行っていたようですが、冬期に排気中の水分の凝結や土砂



写真1 ミュンヘン郊外豚舎のバイオフィルター

を容易に作り出すことが可能です。したがって、もしピートモスに繁殖してにおいを分解する微生物が、木質ファイバーにも繁殖可能とすれば、木材をバイオフィルター原料として使用することが可能となり、新たな需要拡大に役立つと思われます。

2. 爆砕法による木質飼料の製造と実用化の実態に関する調査

木材の飼料化については、当林産試験場においても、いわゆる蒸煮法により研究を行い、主要道

産広葉樹についての最適蒸煮条件を明らかにしております。

しかし、木質飼料の先進国であるカナダにおいては、蒸煮法すなわち蒸煮-解繊ではなく、爆砕法を採用しています。爆砕法にはIotech社がパテントを持つバッチ法と、Stake Technology社がパテントを持つ連続法とがありますが、カナダオンタリオ州オークビルに

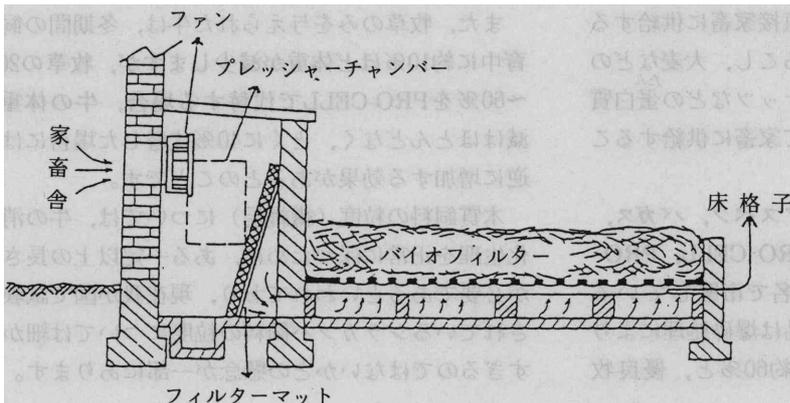


図2 畜舎のバイオフィルター概略図

で目詰まりを起こすことがあり、現在の床格子タイプに変えたとのことです。

フィルター層は外気にさらされているため、特に夏期における乾燥が問題になるそうです。先に述べたように、含水率20%でも脱臭能力が認められますが、通常35~40%で運転しています。そのため、夏期にはフィルター層内に水分計を埋め込み、自動的に散水加湿するようにしているとのことです。

このピートモスを用いた脱臭装置の投資額は、薬液洗浄の場合と比較すれば最良の条件で約半額、最も悪い場合でもほぼ同額と推定しています。更に、ランニングコストだけを考えると、このピートモスを用いた生物脱臭法は、従来の物理、化学的方法の数十分の一で済むとされています。

木材からピートモスと同様の形状のファイバー

あるStake Technology社を訪問し、テラー博士の説明を受ける機会を得ましたので、連続爆砕による木質飼料の製造システム、牛の飼養試験結果、木質爆砕物のパルプ、ボード原料としての特徴などについて紹介いたします。

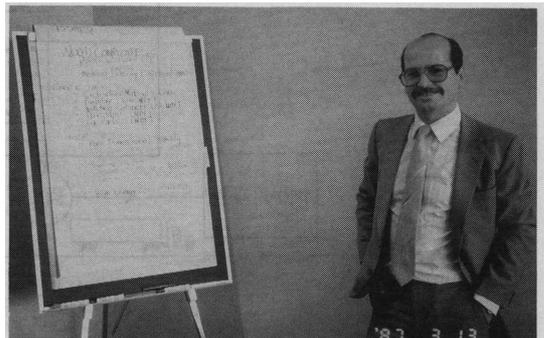


写真2 ステーク・テクノロジー社のテラー博士

連続爆砕システムによる木質飼料の製造

蒸煮法、爆砕法を問わず、これらの方法は木材のみならず、バガス、もみ殻、稲ワラ等の飼料価値を向上するだけでなく、セルロース、ヘミセルロース、リグニンを分離し、それらを更に有用な物質に変換するための前処理の役割も果たします。したがって、Stake Technology社の爆砕装置はその後接続する工程によって、飼料、食品、薬品を取り出すことができますが、ここでは飼料の製造工程のみを図3に示します。

図から明らかなように、爆砕された木材はサイレージタイプの飼料として、直接家畜に供給するほか、ペレット化し、とうもろこし、大麦などのエネルギー飼料、大豆、ピーナッツなどの蛋白質飼料と混合し、完全飼料として家畜に供給することが可能です。

Stake Technology社では、アスペン、バガス、ワラの爆砕物をそれぞれPRO-CELL, PRO-CANE, PRO-STEMの商品名で市販しているとのことですが、これらの製品は爆砕処理により消化率が向上し、TDNの値は約60%と、優良牧

草に匹敵するエネルギー飼料となっています。

また、アスペン、バガス等の爆砕飼料は、数百頭の牛を用いた飼養試験により、飼料価値、安全性に全く問題ないことが実証されています。

例えば、北アメリカでは搾乳牛の飼料はほとんどコーンサイレージでまかなわれているのですが、牛乳中の脂肪分を保持するために、繊維質飼料分を補給する必要があります。このため、コーンサイレージの10~20%をPRO-CELLで置換したところ、脂肪分は保持されながらミルク収量が増大するという効果が得られたとのこと。

また、牧草のみを与えられた牛は、冬期間の飼育中に約10%ほど体重が減少しますが、牧草の20~60%をPRO-CELLで代替する場合、牛の体重減はほとんどなく、とくに40%代替した場合には逆に増加する効果があるとのこと。

木質飼料の粒度（繊維長）については、牛の消化生理を正常に保つために、ある一定以上の長さが必要であるといわれており、現在我が国で試験されているシラカンバ飼料の粒度については細かいのではないかとの懸念が一部にあります。

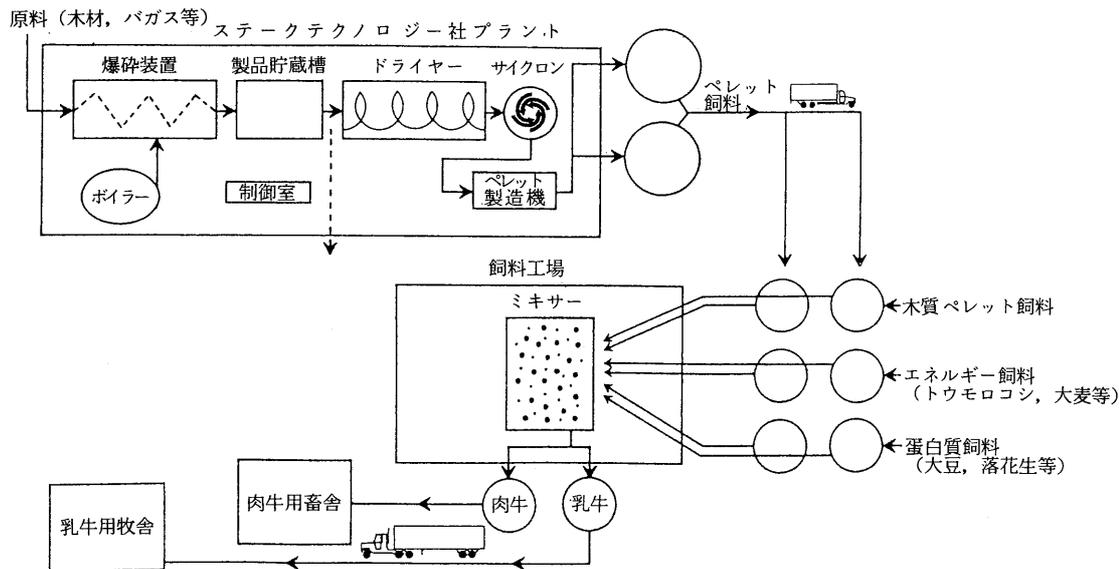


図3 飼料製造工程

しかし、筆者がStake Technology社で見せていただいたアスピンの爆砕飼料は、粉末と混同するほど細かいものでした。テラー博士の話では、この粒度でも粗飼料効果は保持されており、過去数百頭の牛による飼養試験でも、全く問題はなかったとのことでした。

木質飼料の製造方法には蒸煮法と爆砕法とがありますが、リファイナーの設備費および解繊動力費をカットできるため、爆砕法の方が安くなるということです。特に解繊動力費はばかにならず、プラントを設置するとすれば蒸煮法ではなく、連続爆砕法にすべきとのことでした。木材の成分利用のための前処理法として、爆砕法を用いるハンブルグのニムツ教授、ストックホルムのクリングスタート教授、カナダのサドラー教授、ペース博士もすべて、蒸煮法より爆砕法の方が良いとの意見でした。

なお、Stake Technology社は飼料や薬品を製造する会社ではなく、プラントの製造販売メーカーです。1979年からStake Technology社の連続爆

砕プラントを設置した例としては8社、9か所があります(表1)。テラー博士の話によると、この表にリストアップされているプラントは、Finnish Sugar Co. が2度目に設置した年産67,000トンのものを除いて、すべてパイロットプラントであるとのことでした。

また、製品がケミカルとなっているものは、アルコールの製造を目的としている場合が多いとのことでした。さらに、現在はバガスの方が木材より安いいため、実際に牛に食べさせる爆砕飼料の原料には、木材ではなくバガスを用いるとのことでした。

木質爆砕物のパルプとしての利用

Stake Technology社はカナダのForintek Co. との共同研究により、爆砕処理木材はすぐれたパルプおよびボード原料になることをつきとめたとのことでした。つぎに、まず爆砕パルプについて簡単に紹介いたします。

数種の樹種の爆砕パルプと通常のパルプ(TMP)の性質を比較した結果、爆砕パルプの利点を次の

表1 連続爆砕プラント設置例

会社名	場所	生産規模		原料	製品	設置年
		トン/時	トン/年			
Stake Technology Co.	移動式	1		種々	飼料	1977
Enfor Feeds Inc.	アメリカメイン州	2	10,000	アスペン	飼料	1979
Secane Feeds	アメリカフロリダ州	4	25,000	バガス	飼料	1980
Fiber Feeds Inc.	アメリカミネソタ州	6	40,000	アスペンチップ、樹皮、のこくず	飼料	1981
Univ. of Sherbrooke	カナダ	2~4	デモンストレーション用	種々	多目的	1985
Finnish Sugar Co. Ltd.	フィンランドヘルシンキ	2~4	デモンストレーション用	種々	薬品	1985
" a)	"	8.4	67,000	もみ殻、木材チップ、ワラ	飼料 薬品	1987
Alivaca	ベネズエラ	6.0	48,000	バガス	飼料	1987
Bio-Regional Energy	アメリカバージニア州	2~4	デモンストレーション用	木材	飼料 薬品	1987
Inst. Francais du Petrol	フランスサウストン州	2~4	デモンストレーション用	種々	薬品	1986

注 a) コマーシャルプラントで1987年10月操業

ように強調していました。

高収率（90～92%）が得られる。

低コストである。針葉樹で5～10%、広葉樹で10～15%安くなる。

CTMPに比し、種々の性質のパルプを得るための条件設定の幅が大きい。

物性値が向上する。特に強度は30%、明るさは5%向上する。

廃水量が少ない。

小規模プラント（50～150トン/日）が可能である。

特に、カバ、アスペンについては、漂白処理せずに70%の明度が得られること、また解繊動力を50%以下に落とせること、2次解繊工程を省略できることは、注目に値すると思われま

中比重ファイバーボード(MDF)としての利用

MDFはパーティクルボードに比し、加工性、木口の鋭利性のため、家具材、自動車内装材としての用途が広がりつつあります。MDF原料として、高圧（17kg/cm²）で爆砕処理されたファイバーを用いることにより、解繊動力は従来の50%減、接着剤の添加量も5%以下で、寸度安定性にすぐれたボードを製造し得ることが分かりました。その一例を表2に紹介いたします。

以上のように、爆砕繊維を用いることにより、接着剤の使用量を¹/₂ないし¹/₄に低下し得ることは極めて大きな魅力と言えら

表2 フェノール接着剤の添加量とボード物性

	接着剤添加量 (%)	ワックス添加量 (%)	吸水率 (%)	吸水厚さ膨脹率 (%)	吸水長さ膨脹率 (%)
コントロール	10.0	2	12.6	8.1	0.23
爆砕ファイバー	2.5	2	10.8	5.3	0.11
〃	5.0	2	9.3	3.2	0.12
〃	10.0	2	8.2	3.4	0.09

注 1) 爆砕条件：17kg/cm²、2分
2) 吸水試験：24時間冷水浸せき

3. 木材成分の利用技術

戦後2度にわたる石油危機は、代替資源開発にインパクトを与えましたが、再生産可能な木材は種々考えられる代替材料の中でも、主要な一翼を担うものと期待されています。

木材の主要成分はセルロース、ヘミセルロース、リグニンですが、これらの成分を有効に利用し、石油製品に代わるケミカルス、エネルギーを取り出そうとする研究は、欧米の大学、研究機関で活発に行われ、知識、技術の集積が図られています。筆者はこれらの大学、研究機関の訪問を通じて、木材成分の有効利用研究は大きく2つの流れに大別される印象を受けました。すなわち、

新たなパルプ化技術開発を基軸に据えた研究

爆砕処理を前処理法とした成分利用技術開発研究

です。

しかし、どの研究者、研究機関も、現在直ちに経済的に石油製品に代わり得る製品を、木材から作り出すことは、極めて困難との認識を持っています。しかし、パルプ工業との併産、効率的で安価な酵素の開発を考えながら、できるだけ早くフィージビリティを持ち得る可能性を模索している姿に深い感銘を覚えました。

新たなパルプ化技術開発を基軸に据えた研究

新たなパルプ化技術開発研究は、米国ウィスコンシン大学のヤング教授、カナダブリティッシュコロンビア大学のパスナー教授、西ドイツ連邦林産研究センターのニムツ教授を中心に活発に行われておりました。

パルプ化技術はSP法、KP法としてすでに確立されておりますが、これら従来の方法は河川、大気等の汚染問題をかかえたり、パルプ廃液に含まれるヘミセルロースやリグニンの変質が激しく、分離も困難なため、新たなパルプ化プロセスが無公害、省エネルギー、全木材成分の利用の観点から要請されていました。

こうした観点から、新たなパルプ化技術開発競



写真3 米国ウィスコンシン大学農学部建物

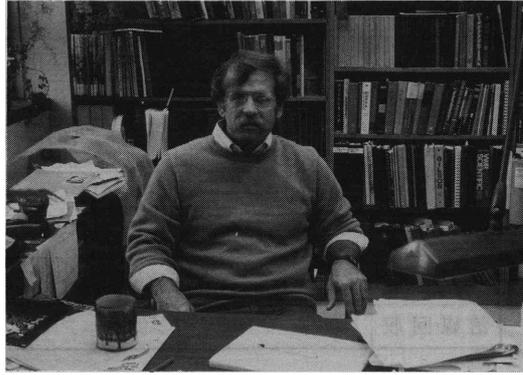


写真4 ウィスコンシン大学ヤング教授

争が世界的に行われておりますが、ヤング教授を中心としたエステルパルプ化法と、パスナー教授を中心とした触媒添加オルガノソルブ法がマスコミの注目を集めておりましたので、簡単に紹介いたします。

まずエステルパルプ化法についてですが、この方法の蒸解液組成は酢酸、酢酸エチル、水の等量混合液、蒸解温度は170～180℃、蒸解時間は1～3時間です。このパルプ化の特徴は、高品質、高収率であること、使用溶媒、リグニン等の副産物の安価な回収が可能であること、ヘミセルロースやリグニン等の変質が少ないこと、環境汚染を防止し得ることなどです。

図4にエステルパルプ化の構成溶媒である酢酸、酢酸エチル、水の相図を示しました。図の上部は3種の溶媒が混り合った単一相になっておりますが、下部の斜線部分は温度を下げると有機溶媒（酢酸、酢酸エチル）と水の2相に分離します。このため、極めて容易にしかも経済的に、蒸解溶媒を回収することができるわけです。

また、パルプを分離した後のヘミセルロース、リグニンはそれぞれ水相、有機溶媒相に溶解しているため、これらの分離も大変容易に行うことができます。

リグニンについては、溶媒の組成比を変えることによって、粉末状の沈殿物として取り出すことができるそうです。

リグニンを分離、回収するための液-液分離シ

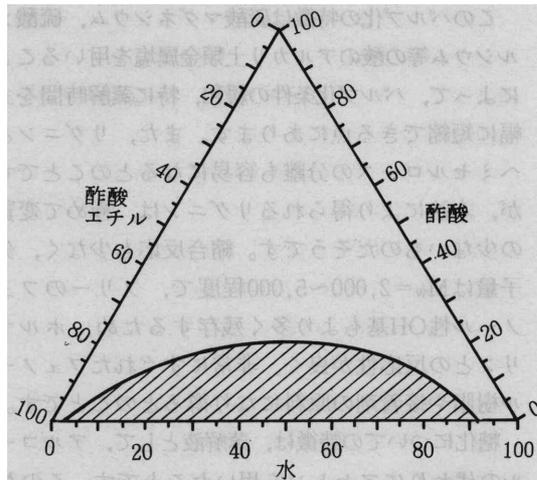


図4 酢酸、酢酸エチル、水の相図

ステム、ろ過あるいは遠心分離法等について、またアルコールやエステル、酢酸等を分離、回収する方法、糖の取り扱い方法等、最適な回収システムについて検討したとのことですが、この成果はノウハウに関する部分が多いため、まだ公表できないとのことでした。

なお、この方法についてはすでに米国ウィスコンシンの Biodyne Chemicals Inc. が10トン/日のパイロットプラントを設置して稼働しているとのことでした。

次に、パスナー教授らの行っている触媒添加オルガノソルブ法について、簡単に紹介いたします。

パスナー教授の技術は溶媒の種類により、表3

表3 オルガノソルブ法によるパルプ化と糖化

	パルプ化	糖化
原料	木質チップ	木質廃材
蒸解液	メタノール80% +水20%	アセトン70~80% +水20~30%
温度	180~200°C	200~210°C
時間	15~20分	15~20分
触媒	酸のアルカリ土類 金属塩	硫酸0.005~0.1N
溶媒回収	>98%	>95%

に示すとおりパルプ化と糖化に分けられます。

このパルプ化の特徴は硫酸マグネシウム、硫酸カルシウム等の酸のアルカリ土類金属塩を用いることによって、パルプ化条件の緩和、特に蒸解時間を大幅に短縮できる点にあります。また、リグニンとヘミセルロースの分離も容易になるとのことでありますが、本法により得られるリグニンは、極めて変質の少ないものだそうです。縮合反応も少なく、分子量は $M_w=2,000\sim5,000$ 程度で、フリーのフェノール性OH基もより多く残存するため、ホルマリンとの反応性が良く、非常にすぐれたフェノール樹脂や接着剤の原料になり得るとのことです。

糖化についての特徴は、蒸解液として、アルコールの代わりにアセトンを用いたことです。このため、わずかの硫酸を用いるだけで、200~210という厳しい温度条件で蒸解しても、酸加水分解された糖類のOH基がアセトンでブロックされるため、フルフラールへの2次分解が防止されて糖収率が向上します。さらに、リグニンもアセトンに溶解するため、木材といっても広葉樹のみの場合ですが、完全に均質な溶液状態になるとのことです。しかも、アセトンを蒸発させて回収することによりリグニンは沈殿するが、糖類は水に溶解したままなので、これらを容易に分離することが可能になるとのことです。

パスナー教授のこの方法は、木材からアルコールを作るための前処理法の一つと思われますが、この方法で南アメリカのブラジルにプラントを設置し、エタノールを製造するとのことでした。

爆砕処理を前処理法とした成分利用技術開発研究

この分野の研究に力点を置いている機関は、オタワのフォリンテック、モントリオールの紙パルプ研究所、マジソンの林産試験場、ハンブルグの連邦林産研究センター、ストックホルムの林産試験場です。

しかし、先にも述べたように木材成分を利用した製品については、石油から作られる製品と現在直ちに経済的に競合し得る製品を特定することは困難なため、暗中模索しているのが実態のようです。このため、長期的視点に立って、酵素によるセルロース、ヘミセルロース等の分解に関する基礎的研究にウエートを置いている傾向がうかがえました。

これらの中で、特にフォリンテックのサドラー教授の「木材からアルコールを作ることは、現時点では確かにデンプンなどを原料とする場合に比してコスト高になる。しかし、1986年をスタートとして5年計画で木材からの方が安価に製造できるよう仕事を進めている。このような努力をすることは木材化学の研究者に課せられた使命である。」との言葉には深い感銘を受けました。

彼らはまず、爆砕処理の効率を上げる方法を検討しました。その方法として、亜硫酸ガス1.6%あるいは硫酸0.58%をアスペンに処理することにより、糖収率を無処理に比し、大幅に増大することが可能になるとのことです。

次に、酵素加水分解反応槽(バイオリクター)の効率アップについても検討していました。従来はバッチシステムが用いられていたそうですが、5に示すような酵素のリサイクルが可能な連続分離カラムシステムを開発したとのこと。この反応システムにより、セルロースの酵素分解率がバッチシステムの57%から90%以上の効率に上昇し、流出液中の糖濃度も6.8%に達するようになったとのこと。また、還元糖の生産速度もバッチシステムの1.33g/l/hから1.98g/l/hに増大し、更にセルラーゼ活性もバッチ法の21.2mg/Uから69.1mg/Uと大幅に増大したとのことです。

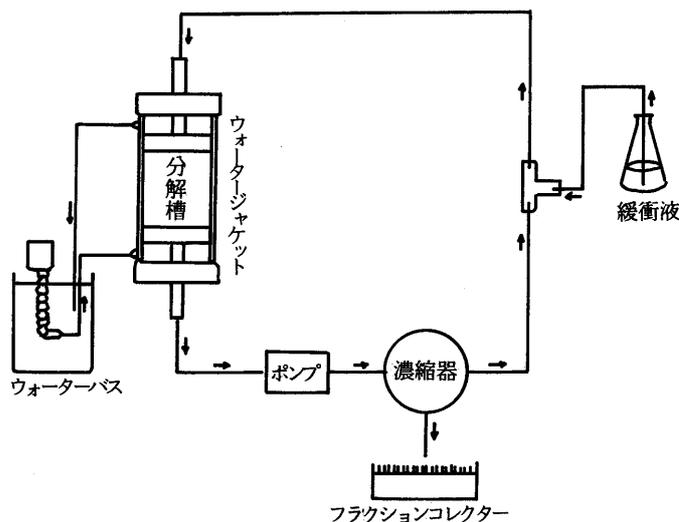


図5 セルロースの酵素分解反応装置図

残された最大の課題は、より活性の高い酵素を開発することにあると考えていました。この点については、高度の専門的、基礎的知識と技術を要するため、オタワにあるカナダ国立研究センターNRCにセルロース分解酵素を持ち込み、なぜ酵素活性が発現されるのか等の検討を含めた共同研究にゆだねていました。現在、ある特定のアミノ酸が2～3個配列した部分のみで酵素活性が発現されることが明らかになりつつあるとのことです。このことはpH、熱に対して安定なポリマーを、そのアミノ酸配列に結合させることによって、反応系の温度を上昇させたり、触媒を添加できることが可能となり、酵素活性を大幅に高めることも可能になることを意味します。サドラー教授は特にこの新しい酵素の開発に夢を託しているようでした。

むすび

以上、欧米の大学、研究機関を中心に、研究の状況を述べてきました。始めにもふれたように、林業、林産業の発展のためには、既存の建築、家具材料における技術革新はもちろん大切ですが、その限りにおいては木質材料どうしの競争が激化するだけで、木材の需要量の増大にはつながりま

せん。今まで木材の使われていなかった領域を、いかに開拓するかが需要拡大の鍵になっていると言っても過言ではありません。

新たな需要拡大につながる可能性のあるものとして、

- 1) 脱臭材料としての利用可能性
- 2) 爆砕法による木質飼料の製造
- 3) 木材成分の利用技術を中心に、大まかな紹介を行ったわけですが、ど

の課題についても、現在すでに使われている他材料との競合関係において、直ちに経済的にフィジビリティを持ち得るものは少なく、木材成分の利用についても、最終製品を模索しているのが実状です。

しかし、欧米の公設研究機関は国の資金が20～25%、民間資金が75～80%ということですが、木材成分の利用のような長期的研究には、2～3年で結果が出なくても、研究としてすぐれた仕事を続ける限り、どこからもクレームはつけられないとのことです。我が国においては、現実に対象企業が存在しない研究に対しては、テーマの設定、予算の投資等について冷淡であると言われていることを考えると、研究に対する哲学の大きな相異を感じました。

いずれにしても、欧米においては、将来の有効利用を目指して、研究者の養成を兼ねながら技術の蓄積を図ろうとしている点、また各研究者、研究機関どうしの交流が大変活発で、互いの情報を交換しながら研究を進めている点などは、特に学ぶべき点として、今後の研究活動に生かしていくつもりです。

(林産試験場 化学利用科)