

林産バイオマスの総合利用技術

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	佐々, 木恵彦
巻/号	8巻8号
掲載ページ	p. 10-16
発行年月	1985年8月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



林産バイオマスの総合利用技術

佐々木 恵 彦

わが国の国土の67%は森林であり、莫大なエネルギーを蓄積している。この森林から産出される有機物は木材として利用されているが、利用されずに残されている部分も多い。利用されずに残された部分をいかに効率的に利用するかが林産バイオマスの研究に与えられた課題である。森林を有効に、しかも恒続的に利用する場合、まず、再生力を維持するために、年間の生長量を超えない収穫を計画しなければならない。また、環境保全のために必要な所は残しておかなければならない。したがって、利用可能な量は、これら残すべき量を差引いたものとなる。

現在、ウッドケミカルス、木材の飼料化などの新しい用途が開発されてきたため、これまで用材としては不適であるものにも利用価値が生じ、資源としての森林の範囲が広がってきている。新しい用途に供給可能な資源として、低利用の広葉樹林、針葉樹除間伐材、伐採の際に生じる林地残材、工場残廃材、住宅解体材、林床植生、特にササ類などがあげられる。低利用の広葉樹林は昔薪炭林であり、里山広葉樹林が主体であり、全国に650万ha以上あるといわれている。このうち、半分は利用可能と考えられる。針葉樹除間伐材は戦後の拡大造林地が間伐期を迎え、年々20万ha以上の林地から500万 m^3 以上の間伐材が排出されているが、その利用率は55%にしかすぎない。さらに、森林を伐採する時に生じる梢端部、枝などは年間約1,000万 m^3 と推定される。一方、工場残廃材も実数として2,000万 m^3 以上といわれているが、ほとんどが工場の熱源や家畜の敷料、堆肥に利用されているため、利用可能な部分は無いいってよい。住宅解体材も年間500~700万 m^3 あるが、これも、出現する場所、時期が不定であり、しかも防腐剤が使用されているため、利用面が限られる。一方、有望なのは、ササ類である。北海道には400万

Satohiko SASAKI: Comprehensive utilization of forest biomass.

ha以上のササ生地があり、乾物重量にして7,000万t以上の現存量があるといわれている。チシマザサ、アヅマネザサのような大型ササは100t/ha以上の現存量を示すことが多い。しかし、これらの資源は散在し、密度も低く、不定形で廉価なものが多い。したがって収穫、搬出コストが大きな問題となるため、現在、林地残材の採取と搬出法の検討、ササやバイオマス用小径木の収穫機械の開発をおこなっている。森林バイオマスの利用化には、収穫、搬出技術の開発が大きなカギとなっている。

既存の森林資源の有効利用と同時にバイオマス変換用の木材生産方式を研究している。従来の用材生産と異なり、変換用資源は木質であればよい。したがって、形状、材の品質などは問題とはならず、単位面積当りの生産量の増大のみを追究することになる。このため、生長の速い樹種を短年間栽培し、短期間に面積当りの収穫量を大きくすることが必要である。

1. 森林バイオマスの新しい造成法—集約的超短伐期林

バイオマスを新しく造成するためには、生長の速い樹種や品種が必要であり、選抜の基準として、④量としての生産性が高いこと。特に単位面積当りの生産性が高く、しかも初期生長が速いこと。⑤省力的に再生産するため、再生力が強く、再生産性が高いこと。⑥わが国の生態系に調和するもの。④容易に分解でき、変換しやすいこと。の四つの条件が考えられる。このような条件を満すものとして、寒冷地には、ポプラ、カンパ類、温暖な地域には、ユーカリ、アカシア、ギンネム類の導入を検討してきた。そのほか、ササの恒続的な収穫法、クワ枝条の生産法などを研究しているが、紙面の都合上、ここでは主にポプラ、カンパ類の超短伐期法の研究成果

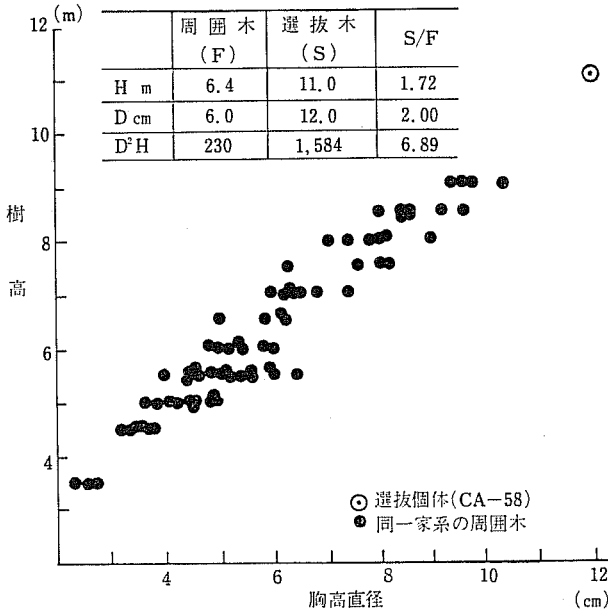
を中心にして解説してみたい。

(1) ポプラ類

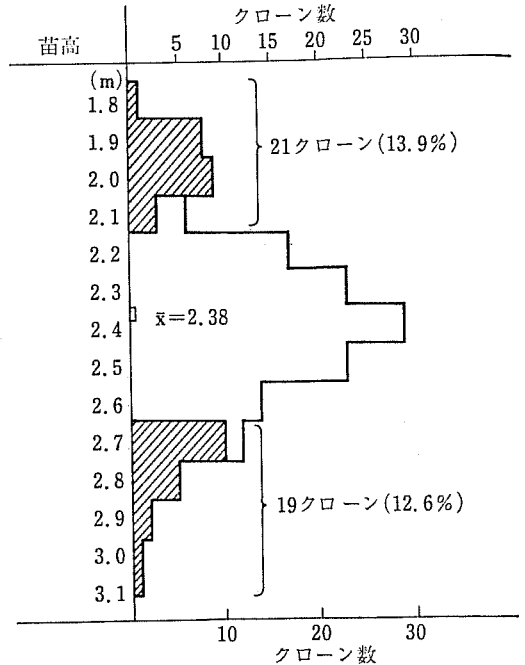
北半球の中緯度に分布するポプラ類のうち、わが国に分布するのはドロノキとヤマナラシの二つの系統であり、両者とも山地に自生し、生長が速い。ドロノキはサシキが容易であり、ヤマナラシは根萌芽で再生する。イタリーポプラ系は平地の生長は良いが、山地では極度に生長が低下する。したがって、山地で生長の良いドロノキ、ヤマナラシの優良個体の選抜と栽培方法の研究が王子林木育種研究所を中心にして進められている。

① 交雑による品種選抜

自然に生えているドロノキの生長の良い個体を選抜し、試植林を作り、さらにその中から29個体を選び、人工交配により3万本の実生を作った。この中から30クローンを選定し、検定林を設け、生長、形質、耐寒性などの点から18個体をクローン化した。これらのうち、特に生長のよいクローンは8種あり、常により成績を示している。この優良クローンを人工交配し、12万本の苗を作り、サビ病罹病性個体を棄却し、検定林を設定した。この検定林の中で生長のよいものは同一家系の中でも優秀である(第1図)。このようにして、生長の良い二次選抜個体151本を苗畑で選抜しているが、特に生長のよいもの、少なくとも19個体を選ぶことができる(第2図)。



第1図 選抜個体と同一家系との比較 (足寄検定林9年生CA-58の例)



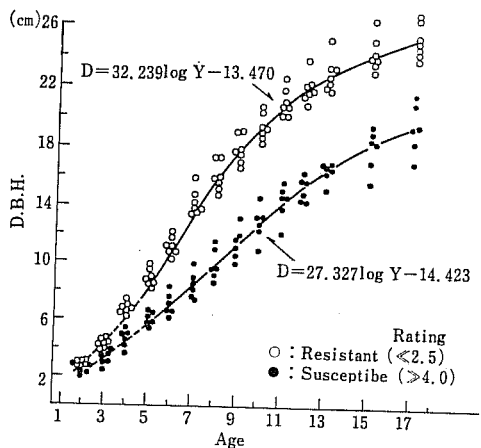
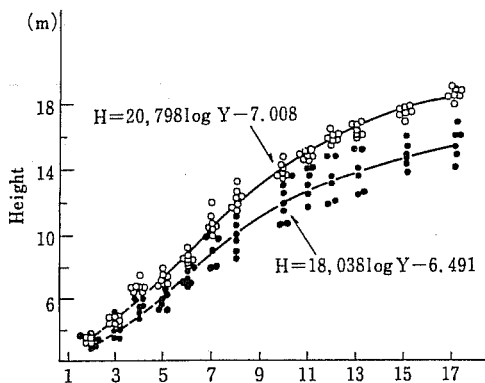
第2図 第2次交雑種選抜クローンの苗高 (サシキ1年生)

ヤマナラシについては、道内のチョウセンヤマナラシを中心にギンドロ、カナダ産のグランディデンタータ、欧州のトレムラなどのヤマナラシ類との雑種を作り、優良個体のクローン化をおこなった。現在、平均以上の生長を示すものが13クローン存在する。

② 適応特性の検定

色々な条件の寒冷地に適応させるため、春先と秋口の耐寒性を調べ、耐寒性クローンを選抜した。このようなクローンは北海道、東北の寒冷地の晩霜、早霜に適応できる。

夏期の乾燥は光合成を低下させ、生長を阻害する。耐乾性クローンを栽培することによって、夏の生長を増大させることができる。また、耐乾性の付与によって、ドロノキの適地範囲を拡大することも可能である。現在、乾燥耐性のあるもの5クローンを選抜している。



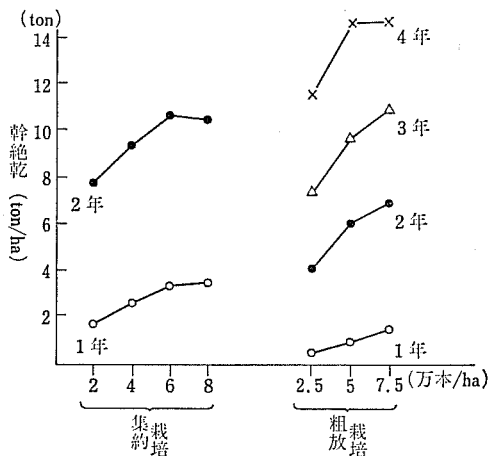
第3図 ドロノキ17年生クローン検定林におけるサビ病耐病性、罹病性クローンの生長比較(○印 耐病性、●印 罹病性)

生長に関与する重要な形質として、葉サビ病抵抗性があげられる。葉サビ病に感染すると光合成が極度に低下し、生長に影響する(第3図)。現在、葉サビ病抵抗性個体が数十個体選抜されており、明らかに個体別の光合成速度と生長との相関が高く、光合成速度の高いもの27クローンが選抜されている。

③ 高密度栽培法

単位面積当りの収量を大きくするためには、ある程度密植しなければならない。密植の程度は個々の大きさによって異なる。短い伐期で収穫する場合には、個体の大きさは小さく、占有する空間が狭いため、高密度の植栽が可能になるが、長期間栽培する場合には、個体が大きくなり、占有空間も広くなるため、植栽密度が低くなる。したがって、最適密度は収穫予定年数によって異ってくる。

現在、4年以内の収穫を目標とする超短伐期法の



第4図 ドロノキマイクロテーションの栽培法別生産量

検討をおこなっている。生長を最大にするため、耕耘、施肥(H_2 号, 120kg/ha/年)、除草などをおこない、2~8万本/haの密度試験を実施中である。植付後2年目には6万本/haの密度が最適になっている(第4図)。この6万本/haの現存量は幹枝材積35.1 m^3 /ha、絶乾重11.7t/ha、葉量を含めて14.9t/haとなっている。今後、さらに生長量の増大と最適密度の減少が期待される。

苗畑において、イタリーポプラ(I-214)を2.0×0.5mの間隔で植栽した後、1年後地上部を15cmで台切りし、翌年の萌芽枝の生長を調査したが、この1年だけの枝条量は乾燥重量で約10t/haとなった。

一方、10年前後の収穫を目標とする短伐期林では、植栽密度をずっと低くしなければならない。植栽後7年目に2,000~6,000本/haの密度の違いはなくなり、全ての密度で40~45t/haの現存量となっている。

③ 更新法

ドロノキはサシキにより繁殖させることができる。また、ヤマナラシ系のクローンは根萌芽により繁殖する。ドロノキの場合、収穫後の再生林は切株からの萌芽によって形成するが、10年生以下の若い林でないと萌芽は期待できない。

一方、ヤマナラシは地表を這う根から萌芽し、再生林の形成はやさしい。但し、林床に下草が繁茂している場合には、根萌芽を促進させるために除草、下刈が必要となる。

(2) カンパ類

① カンパ類の優良系統

わが国における代表的なカンバはシラカンバ、ダケカンバ、ウダイカンバの三種で、このうち、シラカンバは強光利用型で裸地における生長がよく、しかも初期生長が大きい。自然交配種子によって更新するため、品種化がおこなわれている。しかし、地域的系統差が明らかであり、優良個体の接木クローンの家系群の生長がよいことから、品種化の可能性が高い。現在、組織培養によるクローン化と増殖が研究されているが、枝、葉柄を用いたマイクロプロパゲーションの技術がほぼ確立されている。したがって、シラカンバの優良個体を増殖して品種化するのには難しいことではなくなっている。

② 栽培法

ポプラ同様、シラカンバは施肥、耕耘、除草などの効果が大きい。現在、北海道と東北において高密度超短伐期林の実験をおこなっている。施肥はN量にして100kg/haが効率的であり、無施肥の2~5倍の生長量を示している。密度については、5,000本/haから200,000本/haにわたる広範囲な条件で試験をおこなっているが、1年生苗植付2年目では8~10万本/haが最大現存量を示し、最高19t/haに達している。一方、苗畑に播種したシラカンバは162万本/ha成立したが、これを1年目に刈取り、萌芽枝を2年間育てた結果、27t/haという大きな現存量となった。

シラカンバは収穫後、萌芽によって省力的に再生林を作ることに成功した。今後、品種の開発により、さらに生産量の増大が期待される。

(3) アカシア、その他の暖地性樹種

マメ科のアカシア、ギンネムなど暖地性の高生長樹種があるが、耐寒性の点から見て、わが国では限られた地域しか植栽できない。モリシマアカシアは九州の天草地方で、かなりの生長を示すが、高所や風衝地では寒さで枯死する。モリシマアカシアの萌芽枝の最大生長量は1年間で20t/ha近い値となった。

ギンネムは15℃以下では低温障害を起し、0℃付近で枯死する。したがって、わが国では沖縄、小笠原諸島のみしか生存できない。しかも、土壌が中性からアルカリ性でなければ良好な生長は得られない。沖縄の石灰岩地帯に植栽した大型ギンネムは2年目で樹高8m、胸高直径6cmを超えることがある。

以上のように、バイオマス変換用の林木資源の造成では、従来の林業的生産方式とはまったく異なる方式によって「量」の生産をおこなう必要がある。今後、少なくとも年平均生長量15t/ha、5年以内の

収穫を目標に研究を進めていく。さらに、環境保全的な問題点、適地の利用区分などの面も研究しなければならない。

2. 林産バイオマスの新しい利用技術

木質系の資源はセルロース、ヘミセルロース、リグニンの三主成分とそれぞれの樹種に特有な精油、樹脂、油脂、色素、タンニンなどの抽出成分からなっている。最近、バイオマスの有効利用という観点から、木質系成分の分離、抽出、利用という問題が再びとりあげられている。

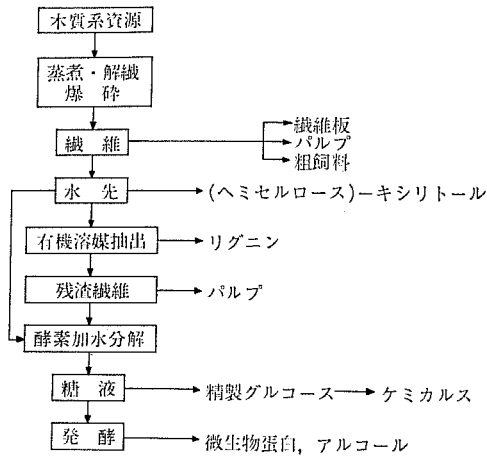
(1) 木材成分の酵素加水分解

セルロース、ヘミセルロースを加水分解してグルコース、マンノース、キシロースなどの可溶性の糖とし、リグニンを残渣として分離する。これらの成分を食、飼料、エネルギー、有機化学工業製品へ転換していく過程を菌や酵素などの生物的手法を用いるのが酵素による加水分解である。この過程の第1段階は難分解性の木質原料を糖化することである。最近、強力なセルラーゼが開発されてきたが、木材のようにリグニンとセルロースが固く結合しているリグノセルロースを分解できる酵素はまだ発見されていない。したがって、木材を前処理して、酵素が作用できるようにする必要がある。

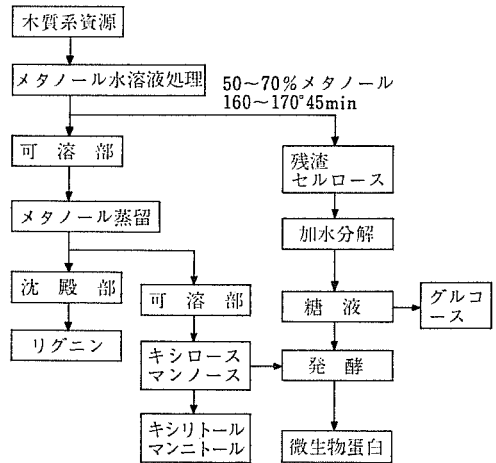
前処理として、現在研究されているものは二つあり、一つは蒸煮又は爆砕であり、もう一つはメタノールなどの有機溶媒を用いて、高温、高圧下でリグニン、ヘミセルロースを溶脱する方法である(第5、6図)。

① 蒸煮・爆砕処理

木材チップを180~200℃またはそれ以上の温度の高圧水蒸気中で煮て、ヘミセルロースを可溶化し、セルラーゼ酵素の反応性を増加させる。蒸煮処理では、処理後水蒸気をゆっくりと放出するのに対して、爆砕は木材チップと高圧水蒸気を急激に大気中に放出することによって木材チップを粉々に粉砕する。これらの処理は薬品を使わず、経済的に有利であるが、樹種によって処理効果が異なり、針葉樹にはほとんど効果がない。邦産広葉樹44種を、180℃、15分蒸煮した場合のセルラーゼ糖化率を第1表に示した。シラカンバ、ポプラは分解性が高く、シノキ、クスノキなど常緑広葉樹は処理温度を高くするか処理時間を長くしなければならない。一般に、温度と



第5図 蒸煮または爆砕前処理による酵素加水分解工程



第6図 有機溶媒による脱リグニンを前処理とする加水分解

処理時間が大きくなると酵素糖化率が向上する。

蒸煮処理の容易なシラカンバ、コナラと難分解性のコジイについて、処理条件、糖化率水抽出キシロース、ジオキサン抽出リグニン、不溶性リグニンなどを調べてみると、高温条件ほどジオキサン抽出リグニンが増加する（第2表）。

針葉樹材のセルロース酵素糖化率の向上を図るには、無機塩類、有機酸をチップに含浸するとよい。

② 有機溶媒による脱リグニン処理

アルコール類、グリコール類、フェノール類などの有機溶媒と触媒として酸、アルカリ、金属塩などが検討されているが、効率的な溶媒と触媒の発見がこの工程の開発のキポイントとなっている。例として、メタノールによる工程を示す。50~70%のメタノール水溶液に少量の塩酸を触媒として加え、木材チップを160~180°Cで処理すると、ヘミセルロースとリグニンが溶出し、セルロースは一残渣として残る。この処理液からメタノールを除くと、リグニンは沈澱し、キシロース、マンノースが水溶液に残る。

③ 生物的前処理

リグニンを分解する微生物の検索も進められた。特に、食用キノコの利用と廃ホダ木や廃床の変換利用は複合的に考えられる。

(2) 成分の利用

前処理を加えた木材チップは酵素糖化率が高くなっているため、そのまま反すう動物の粗飼料として利用可能であり、さらに、ヘミセルロース、リグニンの抽出利用、セルロースの変換利用が考えられる。

① 反すう動物用飼料

蒸煮処理（180°C、20分）したシラカンバ材は牛の粗飼料としての評価はある程度固まってきた。製造コストの試算例を第3表に示す。今後、雑木の利用、効率的な生産システムを開発することによって、コストの低減を図る必要がある。

第1表 各種広葉樹の蒸煮処理（180°, 10kg/cm², 15分）後の残存多糖類の酵素加水分解率

加水分解率(%)	備 考
80以上	ヤマナラシ
70~80	シラカバ、ミズナラ、コナラ、ヤマザクラ、ハリギリ、ミズキ、キリ
60~70	ダケカンバ、マカンバ、ブナ、アカシデ、アサダ、シラカシ、イタヤカエデ、ヤチダモ、アオダモ、オオバヤナギ
50~60	ドロノキ、イヌブナ、クヌギ、イヌエンジュ、ヒメシャラ、コジイ、クリ、ヤマハンノキ、チシマザサ
40~50	オニグルミ、アカガシ、ヤシャブシ、シナノキ、イチイガシ、キハダ
30~40	ハルニレ、ヤマグラ、カツラ、ホオノキ、イソノキ、トチノキ
20~30	シイノキ、ケヤキ、タブノキ
10~20	クスノキ、シオジ

第2表 種々の条件下で蒸煮処理した広葉樹材の分析結果

蒸煮温度 (°C)	時 間 時 間	酵 素 a) 糖化率(%)	温 水 b) 抽出量(%)	キシロース の収率(%)	ジオキサン b) 抽出量(%)	エーテル c) 不溶リグニン(%)
シラカバ						
180	20	100	23.7	15.5	10.3	34.9
200	5	98.0	19.2	12.0	8.1	37.1
	10	96.1	15.6	9.1	8.5	39.0
	15	100	14.5	8.6	10.6	33.2
210	3	96.2	25.4	13.2	14.0	23.2
	6	100	23.9	9.7	29.9	53.5
	9	100	25.7	11.0	34.5	42.6
225	2	99.3	34.2	22.4	20.4	21.8
	4	100	27.1	10.4	25.7	45.4
230	1	100	33.5	19.8	17.5	24.7
	2	100	34.3	19.2	21.9	30.4
コナラ						
180	20	69.3	14.9	5.8	6.6	32.5
200	5	81.3	21.0	12.4	9.5	42.0
	10	92.6	27.4	12.7	15.1	40.6
	15	91.2	19.0	7.4	17.1	41.3
210	3	88.9	23.9	12.9	19.1	51.1
	6	96.5	23.9	10.6	24.1	61.4
	9	100	17.7	4.2	31.3	64.1
225	2	90.0	25.8	14.7	18.3	58.6
	4	95.5	24.3	13.6	23.3	62.7
230	2	90.1	26.2	12.0	19.5	61.9
コジイ						
180	20	47.4	11.5	4.7	8.7	44.8
200	5	40.8	18.4	7.9	8.8	43.6
	10	68.0	18.9	8.7	14.2	43.6
	15	67.7	13.2	5.3	14.3	41.9
210	3	70.5	31.3	15.8	19.6	59.3
	6	93.2	18.3	5.9	30.4	60.4
	9	100				
225	2	81.0	22.4	12.3	20.0	53.2
	4	99.7	18.4	4.3	33.9	58.0
230	2	93.2	23.9	9.7	24.0	57.0

a) 蒸煮処理材中の多糖類に対して b) 蒸煮処理材に対して c) ジオキサン抽出物に対して

② ヘミセルロースの利用

ヘミセルロースから得られる製品の現在の年間生産量と価格、用途を第4表に示した。現在、これらは全て輸入に依存している。広葉樹材から得られるキシロースの収率を15%とすると、年間700tのキシロースは7,800m³の材から得られることになる。この量はきわめて少量であるが、キシロースは低カロリー糖であり、ダイエット食品として利用できるだ

けでなく、還元や脱水によってキシリトールやフルフラールに変換することができ、医薬品や化学工業原料となるため需要の拡大が期待できる。したがって、製造費が安いことが需要拡大には大切である。

③ リグニンの利用

リグニンは接着剤やフェノール系化合物としての利用を開発していく必要がある。蒸煮処理によって得られるリグニンは有機溶媒可溶で重縮合反応を受

第3表 蒸煮処理による広葉樹材からの反すう動物用粗飼料の製造コスト²⁹⁾

A 総建設費 (圧力釜, リファイナー, ボイラー, サージドラム, ベルトコンベヤー, 燃料タンク, 建物を含む)	750,000,000円
B 製造コスト	年間コスト
原料費 (25円/kg・絶乾, 25t/日)	206,250,000
運転要員費 (5人)	20,000,000
運転管理費 (運転要員費の15%)	3,000,000
メンテナンス (総建設費の2%)	15,000,000
蒸気代 (4,000円/t, 12.5t/日)	16,500,000
電力 (20円/KWH, 100KWH/t チップ)	16,500,000
その他	3,300,000
減価消却 (10%, 10年間)	75,000,000
固定資産税 (総建設費の2%)	15,000,000
保険料 (総建設費の1%)	7,500,000
金 利 (総建設費の5%)	37,500,000
合 計	415,550,000
製造コスト	56円/kg

原料木材チップ処理量 25t/日
年間稼働率 330日, 24時間連続運転

第4表 ヘミセルロースから生産しうるケミカルスの生産量と価格

	年生産量(t)	価 格 (円/kg)	用 途
キシロース	700	1,800~2,000	キシリットの原料, 食品着色剤, 甘味料, 培地
キシリトール	600	2,500~2,700	輸液(点滴用), 化粧品, 医薬品賦形剤
フルフラール	10,000	200	フルフリルアルコール, フラン樹脂
マンニトール	1,000	1,000~1,100	食品, 医薬品賦形剤, 利尿剤
ソルビトール	100,000	360	ハミガキ, ビタミンC, 食品一般, 蛋白変質防止剤

けていないため, 反応性に富み, しかもイオウを含まないため, 変換の巾が広い。今後, 抽出されたリグニンの新しい製品開発に力を入れていかなければならない。

④ セルロースの利用

現在, 種々のセルロース誘導体が製造されていて, その総量は65万t/年である。これらの製品の用途は繊維, タバコフィルター, プラスチック, 火薬, 乳化安定剤, サイズなど広い範囲で利用されている。

さらに, セルロースは酵素により糖化すれば, アルコール, アセトン, ブタノール, 油脂, 蛋白などへの変換が可能になる。これらの発酵工程に必要な微生物および酵素の開発をさらに進め, コスト低減

のために工程の単純化, 蛋白とアルコールなどの複合生産方式などを開発していかなければならない。

いずれにせよ, 含有率の最も大きいセルロースをいかに付加価値の高い製品にするかが, 木質資源の変換利用のカギとなると思われる。

付記: この論文は農林水産省農林水産技術会議事務局主催の昭和59年度農林水産業研究成果発表会(昭和60年3月15日)における, 王子製紙林木育種研究所長千葉茂氏と林業試験場微生物化学研究室長, 志水一允氏の発表要旨をもとに「林産バイオマスの総合利用」としてまとめたものである。

(林業試験場造林科長)