

# 木質バイオマス利活用の今後の展望

大 原 誠 資

## 一 はじめに

農林水産省は二〇〇七年二月二十七日、国産バイオ燃料の生産拡大工程表を発表した。本工程表では、さとうきび糖蜜等の糖質原料や規格外小麦等のでんぷん質原料に加えて、木質バイオマスからのエタノール生産を進めることの重要性が明記されており、二〇三〇年の木質バイオマスからのエタノール生産可能量を二〇〇〇〜二二〇万klと試算している。また、木質バイオマスからバイオエタノールを生産する際に多量に副生するリグニン利用の重要性が再認識され、高付加価値なマテリアル利用を目指した技術開発が行われている。さ

らに、林地残材中の枝葉や製材工場残廃材の中で最も未利用率の高い樹皮の有効利用技術の開発が進められている。本稿では、日本の木質バイオマスの利用の現状及び化学成分特性を概説した後、木質バイオマスからのエタノール製造技術、リグニンの高付加価値マテリアル利用技術、精油や樹皮の利用技術の現状と今後の利活用の展望について述べる。

## 二 木質バイオマス利用の現状

二〇〇六年度の日本の木材供給量は八、六七九万 $m^3$ である。そのうち国産材が一、七六二万 $m^3$ 、外材が六、九一七万 $m^3$ であり、自給率は二〇・三％になっている。

利活用を推進すべき主な木質バイオマス資源としては、林地残材、工場残廃材、建設発生木材が挙げられる。林野庁の推計によれば、林地残材、工場残廃材、建設発生木材の発生量は、各々八六〇万 $m^3$ 、一、〇八〇万 $m^3$ 、一、一八〇万 $m^3$ である。中でも林地残材はその九九％が未利用であり、利用可能量としては最大である。スウェーデンやフィンランド等の北欧諸国では林地残材等の森林バイオマスの活用が盛んであり、収集・輸送機械による効率的な作業システムが展開されている。一方、日本では、林地残材を収穫する機械や作業システムが未構築の段階にあり、現状ではフォワーダ等、既存の用材生産のための機械を流用しながら収穫作業システムを構築している状態である<sup>1)</sup>。

工場残廃材の大部分はマテリアルあるいはエネルギーとして利用されており、未利用資源は六％程度である。特に工場残廃材の中でも発生量の多い背板や鋸屑は、ほぼすべてがチップや家畜敷料に利用されている。一方、樹皮は主に家畜敷料、堆肥、燃料等として利用されているが、背板や鋸屑に比べて未利用率がかなり高く、ダイオキシン対策のために焼却施設の規制が強化されて以来、日本の製材工場の多くでは樹皮の有効利用法の開発が重要な問題となっている。

木質バイオマスは、その九〇％以上が細胞壁成分で占められている。木材の細胞壁構成成分の約五〇％がセルロース、二〇〜二五％がヘミセルロース、二五〜三〇％がリグニンである。樹皮には柔組織、繊維組織、コルク組織があり、各々の発達程度が樹種によって異なるため、材部に比べて肉眼的な樹種差が大きい。樹皮の形成段階において最新の二次周皮より外側を外樹皮、内側を内樹皮と呼ぶ。外樹皮と内樹皮の違いは心材と辺材の違いよりも大きく、例えばシラカバでは外樹皮は白色、内樹皮は茶褐色の外観を呈する。一般に樹皮は、材部に比べて抽出成分含有量が高いという特性を有する。例えば、ラジアータ松材の抽出成分含有量は一・八％であるが、同樹皮には二四％もの抽出成分を含んでいる。

## 四 バイオエタノール製造技術

木質バイオマスからのバイオエタノール生産は、木質バイオマスの収集・運搬、粉碎・乾燥、脱リグニン前処理、糖化、発酵および蒸留・脱水工程から成る(図1)。このうち、木質バイオマスに特有なエタノール変換工程は脱リグニン前処理および糖化工程であり、これまでに主に三つの方法(酸加水分解法、酵素糖化法、亜臨界水法)が開発されている。

酸加水分解法は世界的に先行して行われてきた方法であり、日本でも岡山県真庭市、大阪府堺市で実証プラントが建設さ

## 三 木質バイオマスの化学成分特性

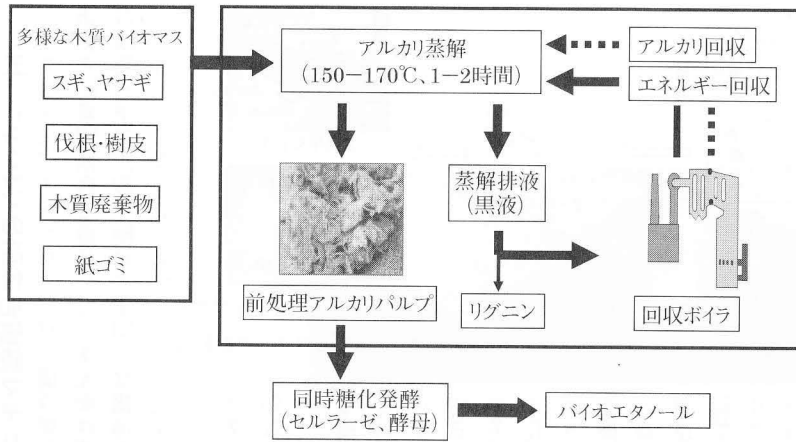


図2 アルカリ蒸解・前処理によるバイオエタノール製造

亜臨界水法は、木粉を高温高圧水で処理して多糖類を糖化する方法である。温度が三七四℃以上、圧力が二二MPa以上の水のことを超臨界水と言います。超臨界水よりもやや高温の低い高温高圧水のことを亜臨界水と呼ぶ。これまでに、反応温度三一〇―三二〇℃、圧力二五MPa、水供給量毎分六

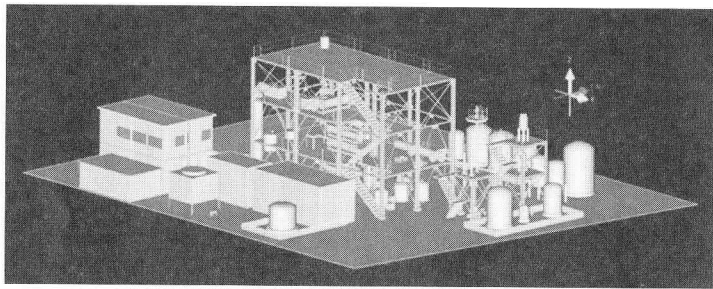


写真1 木質バイオマスからのエタノール製造実証プラントの完成予定図

熱利用が可能な中小規模施設での生産に適した方法と言える。

○一六五g、反応時間一〇分程度の亜臨界水処理でスギ木粉からの糖収率七〇%を達成している。<sup>(4)</sup>  
 亜臨界水法は水のみを使用し、短時間で単糖やオリゴ糖の生成が可能な低環境負荷性変換法である。選択的にグルコースのみを生産することは難しいが、水溶性オリゴ糖を高速、多量に生産する手法として優れている。問題点としては、水を亜臨界状態にするのに要する消費エネルギーが高いことが挙げられる。水の量を減らすこと等によるエネルギー消費の低減が今後の大きな課題である。アルカリ前処理法とは異なり、廃

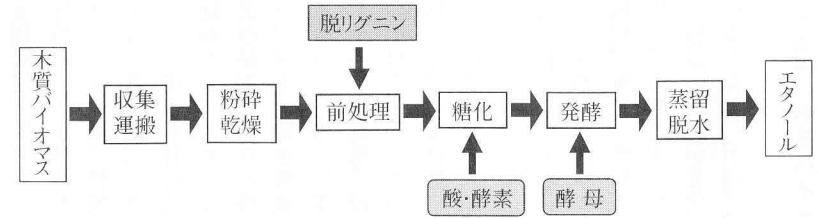


図1 木質バイオマスからのエタノール生産工程フロー

れた。酸加水分解法ではリグニン共存下で多糖類の糖化が可能であるため、脱リグニン前処理を行う必要がない。NEDO実用化開発助成事業(二〇〇一―二〇〇五年)で実施された濃硫酸法の実証試験では、年産一〇万klの生産規模で、一tの建築解体材から二〇八kgのエタノールが製造できることが報告されている。<sup>(3)</sup> 硫酸法には、硫酸の中和が必要、反応容器の耐酸性、残渣リグニンのマテリアル利用が困難などの問題点があり、最近では酵素糖化法に研究開発の焦点が移行している。  
 酵素糖化法は多糖類の加水分解に酵素を使用する方法で、低環境負荷性、温和な条件で糖化が進行する等の長所がある。しかし糖化酵素が巨大なタンパク質分子であり、細胞壁中のリグニンの網目構造を透過できないことから、糖化

前処理としてリグニンの分解、除去が必要である。森林総合研究所では、これまでに幾つかの酵素糖化前処理法を検討した結果、針葉樹材に適した前処理としてアルカリ蒸解法を選定した。  
 アルカリ蒸解法は、木質バイオマスを高温(一七〇℃)のアルカリ水溶液で処理してリグニンを除去させる方法で、針葉樹を含む様々な種類の木質バイオマスに効果的な前処理法である。得られたアルカリパルプは、次の同時糖化発酵工程でセルラーゼと酵母によってエタノールに変換される。蒸解排液(黒液)中のリグニンは回収ボイラで燃焼してエネルギーとして回収するとともに、使用したアルカリ薬剤も回収して再利用できる(図2)。アルカリ蒸解法の大きな利点の一つは、排液からの回収エネルギーがパルプ製造の蒸解エネルギーより大きいことである。このことにより、同法によるエタノール製造エネルギー収支が大幅に改善される。  
 現在、秋田県北秋田市にアルカリ蒸解・酵素糖化法を採用した木質バイオエタノール製造実証プラントを建設中である(写真1)。同プラントではスギ材を原料とし、一日当たり一・五tのスギ材を連続アルカリ蒸解装置で蒸解し、洗浄・精選後、酵素糖化、発酵してエタノールを製造する。最終製品は九九・五%エタノール、最大の生産可能量は年間一二五klである。

### 五 リグニンの高付加価値マテリアル利用

リグニンは、フェニルプロパン構成単位が種々のエーテル結合や炭素間結合で重合した三次元網状構造を有する天然芳香族高分子である。極めて不均一な構造を有しており、その化学構造は現在でも完全には解明されていない。

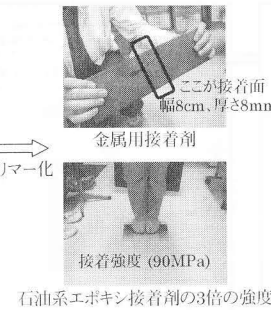


図3 リグニン、茶殻、オイルバームからのバイオプラスチックの製造

リグニンが燃料以外に有効な利用法が見出されなかった原因は、このような構造の不均一性によると思われる。リグニンをアルカリ条件下で酸化分解すると、リグニンを種々の芳香族低分子フェノール化合物（バニリン、バニリン酸等）の混合物に変換することができる。森林総合研究所では、東京農工大学、長岡技術科学大学との共同により、リグニンの酸化分解物を分解代謝できる組換え微生物

生物の機能を活用したバイオリアクターを構築し、リグニンを2-ピロン-4,6-ジカルボン酸(PDC)という単一の物質に効率的に変換できることを見出した。これまでに、市販の石油系エポキシ接着剤の三倍の接着強度を有するPDCベースのポリエステル系接着剤の製造に成功している(図3)。また、茶殻やオイルバーム幹、樹皮の蒸煮処理で得られるガリク酸やパラヒドロキシ安息香酸をPDCに変換する組換え微生物の構築にも成功している。

### 六 樹木精油の健康増進機能

精油とは、植物試料を水蒸気蒸留して得られる揮発性の液体のことである。多くの精油の主成分はテルペン類で、中でも炭素数一〇個のモノテルペン、一五個のセスキテルペンが主成分であることが多い。木材の精油は抗菌活性などの生理活性を持つことから、その生物活性の利用が様々な分野で注目されてきた。これまでに木材の精油の生理活性に関する研究としては、谷田貝らのヒノキ、トドマツ材の精油を揮散させた中のマウスの運動量の測定が行われており、低濃度の香り雰囲気下では運動量が増大することが報告されている。

最近大平らは、樹木精油がラットの自律神経活動に及ぼす影響を調べ、タイワンヒノキ材油が腎臓の交感神経活動を抑制することにより、血圧下降および消化吸収能の向上をもた

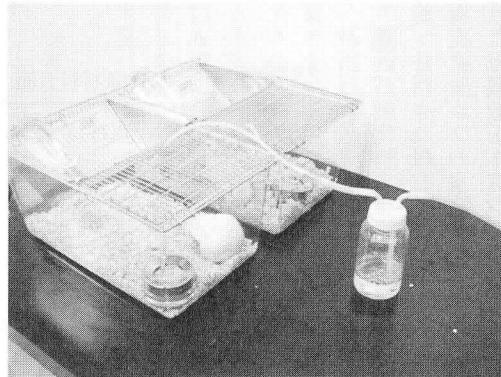


写真2 精油吸引マウスの飼育実験(光永徹、グリーンズピリッツ、4(3)、3-7(2009))

進資材としての利用に繋がる貴重な成果として注目される。

### 七 樹皮の利用技術

樹皮は製材工場残廃材の中で最も未利用率が高く、有効利用法の開発が期待されているバイオマス資源である。樹皮はパーク堆肥として使われており、また最近では、樹皮ボードやポリウレタン原料としての利用技術の研究が行われている。

本稿では、樹皮のエネルギー利用と樹皮タンニン利用に絞って概説する。

岡山県勝山市にある銘建工業株式会社では、スギ、ヒノキ樹皮、端材を原料として燃焼発電を行い、電気を自工場や発電所に供給している。秋田県能代市の能代バイオ発電所は、能代森林資源利用協同組合が二〇〇一年五月に総事業費一四億円で設立したもので、スギ樹皮と端材を原料として燃焼発電を行い、電気と蒸気を製造している。最近では、原料のスギ樹皮の調達が充分でないという問題点を抱えており、マツクイムシ被害材を使用するなど対応している。

岩手県の葛巻林業株式会社では、一九八〇年代から樹皮ベレット燃料の開発に着手している。ブナ、ナラ等の広葉樹樹皮が原料として用いられ、一九九九年には九〇〇tの樹皮ベレットが生産された。葛巻林業の取り組みは、政府がバイオマスエネルギーの方針を打ち出す以前からのものであり、先駆的な樹皮利用の取り組みとして注目された。岩手県では二〇〇一年に岩手・木質バイオマス研究会が民間企業経営者を中心に設立され、「脱化石燃料」を目指すスウェーデン・ヴェクショー市と交流し続けるとともに、木質バイオマスを地域振興策の重点施策に据えてきた。二〇〇一年に国産初の量産ベレットストーブを発売している。

最近では、木材乾燥へのスギ樹皮の燃料利用が検討されて

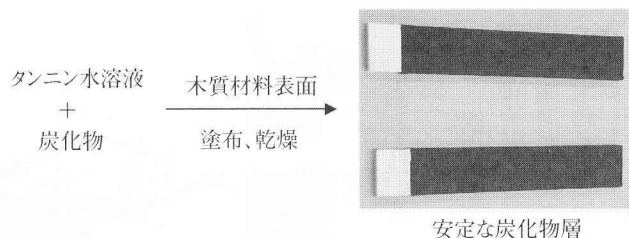


図4 タンニンによる木質材料表面への炭化物の固定化

いる。樹皮は採取季節によって含水率が変動するため、燃料としての評価も変動することになる。その低位発熱量は含水率一六・〇%で三、四九〇kcal/kg、含水率八三・二%で一、二二〇kcal/kgである。

樹皮には縮合型タンニンと総称されるポリフェノール成分が広く分布している。縮合型タンニンはカテキン類のポリマーであり、カテキンと同様、強い抗酸化能を示す。フランス海岸松の樹皮抽出物（フラバンジェノール）は縮合型タンニンを主成分とし、ビタミンEの五〇倍の抗酸化能を有する健康飲料として市販されている。

最近、炭化物の有する人間の健康維持・増進に効果的な機能が注目されはじめ、住環境改善への利用が模索されている。樹皮タンニンの水溶液を木質系炭化物と混合、攪拌して得られた懸濁液を木質材料表面に塗布・風乾すると、表面に安定

な炭化物層が形成される（図4）。得られた木質材料は、調湿作用、消臭作用、ホルムアルデヒド吸着能等の効果を示す。

### 八 今後の展望

現在、世界で生産されているバイオエタノールやバイオプラスチックは農産物を主原料としている。農産物をこれらの目的に用いることは食糧生産との競合、食糧価格の高騰を引き起こすことになる。一方、木質バイオマスからのエタノール生産等は、食糧とは無関係に地球温暖化軽減に貢献できる。国産バイオ燃料の生産拡大工程表には資源作物の育成が明記されている。木質バイオマスでは早生樹であるヤナギに注目したい。ヤナギは挿し木による増殖が容易で萌芽による繰返し栽培が可能なることから、バイオマス資源作物として急速に注目を集め始めた。アルカリ蒸解法によるリグニン除去もスギより容易であり、樹皮には多量の樹皮タンニンが含まれているなど、利活用の面でも非常に魅力的な樹種である。

現在、北海道下川町でヤナギ超短伐期栽培による新たな木質バイオマス資源の作出の研究が実施されているが、本研究の着実な進展が望まれるところである。

木質バイオマスはリグニンを多量に含むことから、酵素糖化を進めるためにはリグニンの除去が必要となり、多くの消費エネルギーが必要となる。しかし一方で、リグニンを回収

してエネルギー利用することが可能であり、またリグニンから高性能なバイオプラスチック製造の可能性が見えてきている。リグニンの存在が有利になるような木質バイオマス全体の利用技術の開発が重要である。

林地残材の収集・運搬については、今後は、用材の造材作業とチップ粉砕作業の二工程処理が可能なチップ機能付きプロセッサ等の開発や、末木枝条・端材を圧縮して減容化する運搬機械の開発が不可欠である。また、林地に放置されている葉に含まれている精油の健康増進機能に着目し、「葉の香りを嗅いで健康になる」という今までには無かった新たな木質バイオマスの有用性を活かした実用化が期待される。

### 参考文献

- (1) 今富裕樹・大原誠資（二〇〇七）木質バイオマスからのエタノール生産技術の現状と今後の展望、週刊農林、一九九四、六一七
- (2) 種田大介（二〇〇六）濃硫酸法バイオマスエタノール製造プロセス、Cellulose Communication、一三巻、四九一～五一
- (3) 池田務・杉元倫子・野尻昌信・真柄謙吾・細谷修・二島田謹爾（二〇〇七）木質系バイオマスを原料としたバイオエタノール生産のためのアルカリ前処理（第一報）、紙パ技協誌、六一巻、一一〇～一一二

- (4) 松永正弘（二〇〇六）木質バイオマスのエネルギー変換最先端技術について、フォレストコンサル、一〇三巻、一三〇～一三〇六
- (5) 中村雅哉・大塚祐一郎・大原誠資・片山義博・重原淳孝・政井英司（二〇〇八）微生物機能を用いた木質系芳香族バイオマス資源からのプラスチック原料の開発、木材工業、六三巻、二九六～三〇〇
- (6) 鈴木和夫・中牟田潔・山本幸一・大原誠資・中村雅哉・大塚祐一郎（二〇〇八）植物体からエポキシ樹脂の三倍の強度をもつ接着剤を開発、森林総合研究所プレスリリース、八月二十九日
- (7) 大平辰朗・松井直之・永井克也（二〇〇八）樹木精油のラットに対する自律神経系調節作用、森林総合研究所平成二十年度研究成果選集、五二～五三
- (8) 光永徹（二〇〇九）サイプレス材精油によるマウス・ラットの脂肪蓄積抑制効果、グリーンスピリッツ、四巻三号、三十七
- (9) 大原誠資（二〇〇七）樹皮の利用、ウッドケミカルの新展開、二二七～二三二

（森林総合研究所・研究コーディネータ）

（木質バイオマス利用研究担当）