

## 研究情報

バイオマスとしての竹の利用<sup>\*1</sup>田中良平<sup>\*2</sup>

田中良平：バイオマスとしての竹の利用 九州森林研究 71：137－140, 2018 竹の有効活用が九州各地で課題となっているが、今一つ決め手がないのが現状である。森林総合研究所では4年ほど前に所内プロジェクトとして、バイオリファイナリーを目指して竹の構成成分の特性把握と利用に向けた基礎研究に取り組んだ。その結果、竹に有効な分離方法が確立され、また、分離したセルロースから特徴のあるナノファイバー、抽出水から抗菌性のある有用物質が得られるなど、今後の利活用を広げる可能性が見出された。一方、近年竹はエネルギー源としても注目を集めており、九州でも竹を原料とするバイオマス発電が試験的に始まりつつある。特に、地方公共団体が企業や大学などと協力して、竹材の収集から製品製造に至るまで多段的な利用を目指す取り組みが見られるようになった。このように放置竹林問題の解決や未利用資源の利用開発に向けて、竹を有効活用することに対して様々なアプローチが試みられている。

キーワード：竹、バイオマス、成分分離、セルロース、抽出成分

## I. はじめに

九州をはじめとする日本各地で放置竹林が問題となっているが、竹をいかに利用するかについては、日本国内にとどまらず世界各地（特にアジア）において長年の懸案となっている。その背景として従来の利用法、例えば日本では竹竿や生垣（骨組）、竹細工、竹串などとしての利用は機能的あるいは量的に限界であり、大量にある竹を大量に使うためには新たな利活用方法の開発が求められている。

一方、テレビや新聞、ネットニュースなどで「バイオマス」という言葉が最近頻りに聞かれるようになった。バイオマス用語辞典(6)によると、「バイオマス」とは「太陽エネルギーを蓄積した生物体およびこの量」、「エネルギーや工業原料に利用される生物体資源という意味で使用されることが多い」となっており、竹資源も当然ながらバイオマスに属する。昨今のニュースで耳にする「バイオマス」はエネルギー源のニュアンスが強く、特に竹を含む「木質バイオマス」といった場合には専ら発電やボイラー燃料といった意味で用いられることが多いように感じる。しかしながら、木質系のバイオマスはCO<sub>2</sub>と太陽光によって形成された非常に緻密な天然高分子の塊であり、合成高分子が遥かに及ばない性質や機能を有する貴重な「高分子素材」である。この視点から捉えると、木質バイオマスを単にエネルギー源とすることは極めて「モッタイナイ」ことであり、まずは持ち前の特性を生かした材料として活用し、最終的にエネルギー源とする多段的な利用を目指すべきである。

森林総合研究所（以下、森林総研）ではこうした考えを基に、平成23年度から3年間「バイオリファイナリーによる竹資源活用に向けた技術開発」と題した所内プロジェクトを実施した。本報告ではプロジェクトで実施した研究を紹介するとともに、竹資源の利活用に向けて九州で実施されている研究や事業についても概括する。

## II. バイオリファイナリーと竹成分の分離

「バイオリファイナリー」という言葉はあまり馴染みがないかもしれない。リファイナリーとは主に石油工業で使われる用語で、原油を重油や軽油、ガソリン、灯油など成分ごとに分離して利用するためのプロセスやそれを行う工場のことを指す。ここに「バイオ」が付くと、出発原料が原油ではなく「生物体」、すなわち植物バイオマスを原料に燃料や化成品など多様な製品を製造するプロセスとなる。実際に北欧などでは木質バイオマスを対象としたバイオリファイナリーが一つの産業として確立しつつある(2, 5)。

森林総研のプロジェクトは竹をこのバイオリファイナリーの原料として活用するための技術開発であるが、手法として主に化学的または生物学的な変換を用いることにある。竹も木材と同様に、セルロース、リグニン、ヘミセルロース、抽出物の4成分が中心

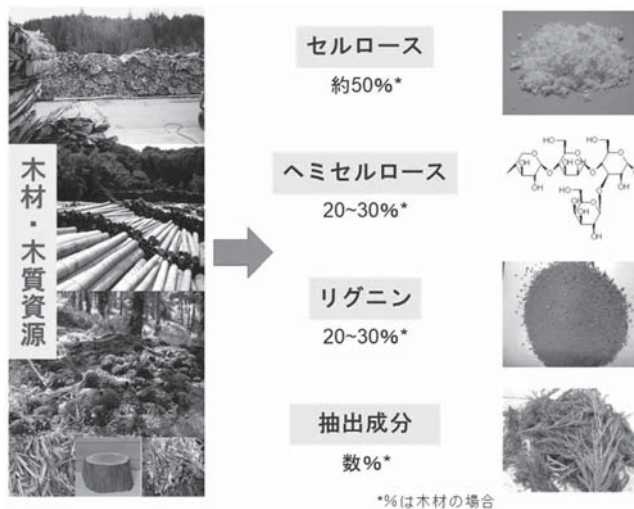


図-1 木質材料の構成成分

\*1 Tanaka, R.: Utilization of bamboo as a biomass material.

\*2 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862, Japan

となって構成される (図-1)。それを化学的・生物的手法により成分分離を行い、引き続き有用物質や製品への化学的変換技術を開発することがプロジェクトのコンセプトである。したがって、研究の第一段階はこれらの成分を分離する技術を確認することであった。

まず初めにセルロース、リグニン、ヘミセルロースを分離する方法である。木材を成分分離する手法にはパルプ製造に用いる薬液蒸解法があるが、竹は木材と成分組成が異なるため、蒸解条件を新たに設定しセルロースなどの成分を使い易い状態で取り出す必要がある。様々な条件を検討した結果、竹チップを比較的マイルドな苛性ソーダを用いた蒸解プロセスを経て、セルロース、リグニン、ヘミセルロースを効率的に分離する技術を確認した。まず、蒸解によってリグニンとヘミセルロースが溶出しセルロースが残る。蒸解液を冷却するとヘミセルロースが沈殿するので、それを回収することによってヘミセルロースとリグニンを分離する。最終的に溶解したリグニンのみが液中に残る。こうして竹の組織を構成する三つの成分を分離・抽出することができた (図-2)。

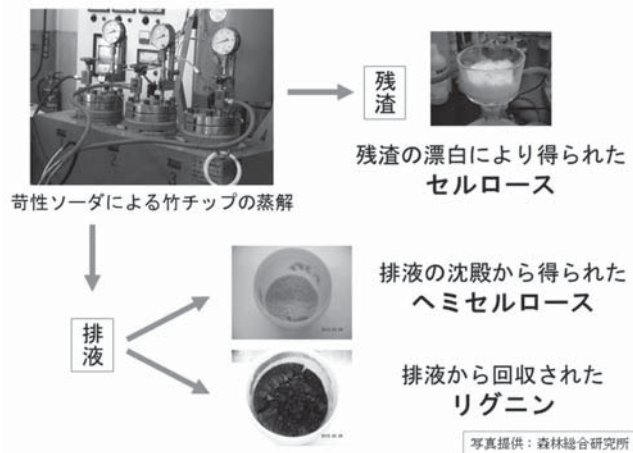


図-2 竹チップのソーダ蒸解と成分分離

一方、竹の抽出物については材に含まれる水分と一緒に取り出す方法を試みた。木材チップなどを電子レンジで使われるマイクロ波を利用して加熱し、原料中の水分を蒸発させその蒸気を回収・冷却する。これは減圧式マイクロ波水蒸気蒸留法といって、木質原料に含まれる特定成分を選択的に回収することができる森林総研独自の手法である (9)。竹をチップ化した後この手法で蒸留し、有用成分が含まれる抽出液を得ることができた (図-3)。

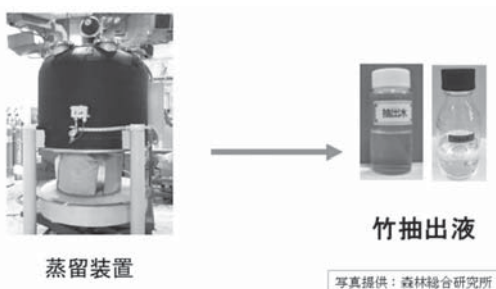


図-3 減圧式マイクロ波水蒸気蒸留

この抽出液には後述するように抗菌性の成分が含まれており、マイクロ波による蒸留方法の有効性を示すものである。

### Ⅲ. 竹分離成分の製品化に向けた技術開発

プロジェクトの第二段階として、このように分離した竹成分からそれぞれの特徴を生かした高付加価値製品を得るための手法について検討した。そのうちのセルロースと抽出液について紹介する。

セルロースナノファイバー (CNF) は最近世の中で注目を集めている新素材で、木質原料から蒸解 (パルプ化) と漂白によって得られたセルロースを、さらにナノメートル ( $\text{nm} = 10^{-9} \text{m}$ ) オーダーにまで微細化した繊維のことである。森林総研では酵素処理と機械処理を併用して CNF を製造する方法を開発しており、本研究ではその技術を竹にも応用した。セルロース繊維に対して機械処理だけではナノファイバー化することは困難である一方、セルラーゼ (酵素) は凝集したセルロースを解きほぐす力がある。そこで粉碎機でセルロースを処理する際にセルラーゼを投入し、ほぐしながら砕いていくことによって微細な CNF が得られるわけである (3)。前述の蒸解により得た竹セルロースにこの処理を施すことにより、アスペクト比 (幅に対する繊維の長さ) の高い竹 CNF を製造することが可能になった。アスペクト比の高い CNF、例えば繊維幅 3~4 nm に対して繊維長が数百 nm ~1  $\mu\text{m}$  になると、樹脂やゴムにこの CNF を均一分散させることにより強度の向上が見込まれる (8)。すなわち、今後は竹由来の CNF がプラスチック等の補強材として、例えば自動車の部材となる複合材料としての活用に繋がるものと期待できる。また、竹に含まれるヘミセルロースが完全にセルロースと分離せず、CNF 化の際にも少量残存することが見出された。その結果、竹 CNF はヘミセルロースの効果により寒天状の凝集物を形成することが明らかになり、この特徴を生かした食品添加物や保湿剤などへの応用により、CNF 用途の拡大にも繋げたいところである。

木材分野で言うところの「抽出物」は本来その植物が有する樹脂や分泌液などに由来する物質を意味するが、その物質を獲得するプロセスからこの呼び名が一般的に使われるようになったと推測される。減圧式マイクロ波水蒸気蒸留法による成分の抽出では、外部からの注水をせずチップや葉などの原料内部に元々含まれている水分を抽出媒体として利用する点が特徴である (9)。この手法によりトドマツ葉から得られる抽出液にはテルペン類が多く含まれ、これが二酸化窒素を浄化する効果が見出されており、空気浄化剤として既に商品化されている (10)。一方、竹に対してこの蒸留方法で抽出液を分取したところ、強い抗菌性のある成分が含まれることがわかった。特に、この有用成分がインフルエンザウィルスを不活化する能力に優れ、また大腸菌などに対する抗菌活性を有することが実験を通して明らかになった。前項ではプロセスとして竹チップを抽出対象として記載したが、実験的には竹の枝葉からの抽出も可能であり、同様の試験を行なったところ、チップ化した竹稈 (ちくかん=竿の部分) と同じように強い抗菌性を有する抽出液が得られた。また、竹チップから抽出液を取り出した後には繊維状の物質が残渣として残る。この残渣に対してアンモニアなどの悪臭成分を作用させたところ、これらを除

去する優れた消臭活性が認められた。その特性を生かして、居住空間を快適にする機能を有するボード類や塗料、フィルム等の研究開発も進められている。すなわち、竹の抽出物及びその残渣から、機能性の高い生活資材の開発に繋がる可能性が見出された。この研究については現在竹資源の高度利用に関する後継プロジェクトを実施中で、竹ならではの特性を生かした素材開発に期待が集まっている。

ここに挙げた竹セルロースと抽出液・残渣のほか、リグニンやヘミセルロースについても高付加価値化につながる研究成果が得られているが、詳細については既報の文献やウェブサイトを参考されたい(16, 17, 19)。本項で説明したバイオリファイナリーについて、成分を分離する第一段階と個々の成分を利用する第二段階を纏めた概略を図-4に示す。この図で重要な点は、左上にあるようにプロセスで排出される二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)は光合成によって竹などの植物体を構成することで炭素が循環する、いわゆる「カーボンニュートラル」な状態にあることである。ここが石油産業におけるリファイナリーと大きく異なるところであり、様々な木質バイオマスに対して環境にも優しいシステムが世界各地で構築されつつある。

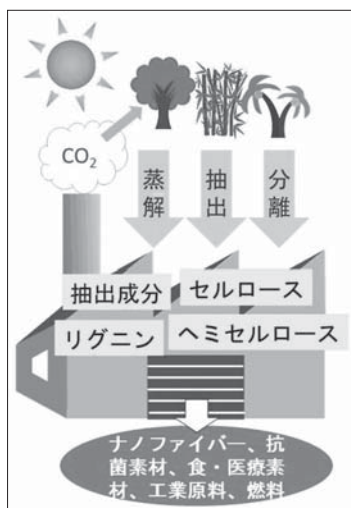


図-4 バイオリファイナリーの概略

#### IV. 竹資源の利活用に向けた研究・事業

それでは現在日本国内にどれだけ竹があるのか。統計によれば、全国の竹林面積は161千ヘクタール、九州に限定すると65千ヘクタールである(11)。全国1~3位を鹿児島、大分、福岡の三県が占め、総竹林面積に対する九州の割合は40%にも上る。柳田らは木質バイオマス発電の原燃料として竹の供給可能性を試算したところ、全国(九州~東北)で100万トン/年(含水率40%)近くに上り、このうち九州だけで37万トンとしている(21)。これらの数値からいかに九州には多くの竹林があり、資源量も大きいかが見て取れる。そのため九州各地では様々な竹利用の取り組みが進められており、筆者の知る範囲のみであるがその一部を紹介したい。

福岡大学の佐藤研一教授らのグループでは竹イノベーション研究会(BIG)を立ち上げ、主に九州の大学、企業、地方公共団体

などがメンバーとなり、竹の利用に向けた様々な活動を行っている。最近、同研究会から活動情報をまとめた冊子(パンフレット)が出版され、土木資材(舗装材、壁面材など)、農業資材(マルチ、堆肥)、吸水材としての利用技術や研究が紹介されている(18)。その中の一つ、雑草対策を施した舗装材が実際に使用されている現場を見る機会を得た(図-5)。ここでは竹短繊維を基盤材(土砂)や吸水骨材、固化材と混合し、3センチ厚の舗装材として遊歩道に施してある。竹の含有量はおよそ3%(乾燥重量)で補強材として役割を担っており、散水後にローラーで固めることにより雑草の生えにくい土舗装が出来上がることであった。また、パンフレットでは地方自治体の取り組みとして薩摩川内市(鹿児島県)が紹介されており、同市では現在「竹バイオマス産業都市構想推進事業」を推進中とのことである。取組の一つとして「竹セルロースナノファイバー活用促進」を挙げており、これは中越パルプ工業(川内工場)が以前から製造している竹パルプ・竹紙の技術と蓄積がベースとなっている(12)。

同じように竹の活用による地域産業の拡大を目指す取り組みも進められている。熊本県南関町では総務省やNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)の事業をベースに、竹資源をエネルギーとマテリアル両方に活用するためのシステムを構築中である(14, 15)。川上に当たる竹の管理と伐採・収集、剥皮・チップ化までを行う会社、川下に当たる熱電エネルギーを併給する会社、建材やボード材を製造する会社の3社を設立し、これを一つの企業グループとして竹利用を「一気通貫」で行おうというプロジェクトである(1)。即ち、このシステムの構築により荒廃竹林の整備、産業の活性化、雇用拡大を同時に達成することを目指し、地方自治体と企業が協力し地域ぐるみで取り組んでいる。



図-5 竹利用の土舗装(久留米市(福岡県))

また、ここでは竹を発電用の燃料に活用することも組み込まれているが、バイオマス発電の原燃料として竹を使う試みも各地で始まっている。荒尾市(熊本県)のバイオマス発電所では製材端材や未利用材などのチップを主燃料とし、そこに竹も一部含まれている(図-6)。現状での竹の発電利用は同様に燃料の一部としての扱いがほとんどと思われるが、その一方で山口県では竹専焼のバイオマス発電事業を計画中である(7, 13)。この場合、年間を通した安定的な燃料供給が確保されていることに加え、従来竹は発電などの燃料に不向きと言われてきた問題が解決されつつあることが大きく関係していると考えられる。竹を炉で燃焼させると内部に無機物がたまり炉を傷めることが大きな問題となっ

いたが、目下技術的な革新により解決する方向にある(4)。設備投資の採算性や原燃料の収集・運搬システムとの連動が不可欠であるが、バイオマス発電の燃料として使えるようになれば九州の竹問題解決にも大きく寄与するものと思われる。



図-6 木質バイオマス発電所(荒尾市(熊本県))

前述の竹のバイオリファイナリーについては、九州大学の堤祐司教授を中心とするグループでも農林水産技術会議プロジェクトとして研究を進めている(20)。同グループでも竹から分離したリグニン、ヘミセルロース、セルロースを様々な有用物質に変換するための手法を開発している。その一環として、宮崎県延岡市で竹材の伐採・収集と一次加工(粉碎など)のシステム化を目指したモデル試験を推進しているとのことである。こちらも薩摩川内市と同じように地域に根差した竹利用システムが出来上がることが期待される。

## V. おわりに

このように竹資源の利活用について様々な方面からのアプローチが試みられている。全体を纏めると竹の利用は次の4つのカテゴリーに分類できる。

- ①そのまま使う(竿、竹細工など)
- ②燃材として使う(炭を含む)
- ③チップや繊維を加工して使う(土木資材など)
- ④成分ごとにバラして使う

今後、竹の特性を活かし、かつバイオマス資源としての需給バランスを考慮しながら、これら4つの利用が効果的に促進されることが望まれる。それによって竹の用途が広がり、いずれは九州各地で問題となっている放置竹林や繁茂の問題を解決する一助になるのではないかと考えている。そのためにはそれぞれの研究開発や事業が益々発展し、利用システムが構築され、恒常的に竹利用が進むようになることを期待したい。

## VI. 謝辞

本稿を執筆するにあたり、資料提供をいただいた森林総研 眞柄謙吾・研究ディレクター、大平辰朗・森林資源化学研究領域長、

横田康裕・九州支所主任研究員、柳田高志・研究企画官に深く感謝する。

## 引用文献

- (1) バンブーフロンティア事業 <http://bamboo-f.com/business/> (2017年12月24日利用)
- (2) ボーレガード社 (Borregaard, ノルウェー) <http://www.borregaard.com> (2017年12月24日利用)
- (3) 林 徳子ほか(2015) 森林総合研究所 平成27年版研究成果選集: 34-35
- (4) ㈱日立製作所(2017) <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2017/03/0309e.html> (2017年12月24日利用)
- (5) 科学技術振興機構・研究開発戦略センター(2017) <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/FR/CRDS-FY2016-FR-06.pdf> (2017年12月24日利用)
- (6) ㈱日本エネルギー学会編(2006) バイオマス用語事典, ㈱オーム社, 東京, 339-340
- (7) 日本木材新聞(2017) 8月31日付記事「竹燃料の発電所12月着工」
- (8) 日本製紙グループ <http://www.nipponpapergroup.com/products/cnf/> (2017年12月24日利用)
- (9) 大平辰朗ほか(2009) 森林総合研究所 平成21年版研究成果選集: 50-51
- (10) 大平辰朗ほか(2016) 森林総合研究所 第3期中期計画成果集: 40-41
- (11) 林野庁(2017) <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/28hakusyo/attach/pdf/sankou-1.pdf> (2017年12月24日利用)
- (12) 薩摩川内市(2016) [http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/b\\_kousou\\_all-22.pdf](http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/attach/pdf/b_kousou_all-22.pdf) (2017年12月24日利用)
- (13) 新電力ネット(2017) <https://pps-net.org/column/43901> (2017年12月24日利用)
- (14) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(2017) 平成27年度～平成28年度成果報告書(管理番号: 20170000000063, プロジェクト番号P14024)
- (15) 新エネルギー新聞(2017) 3月24日付記事「熊本県南関町で日本初・竹を利用したバイオマス熱電併給設備の事業開始」
- (16) 森林総合研究所(2014) 交付金プロジェクト研究成果 57:1-4
- (17) 森林総合研究所(2017) 季刊「森林総研」38:1-9
- (18) 竹イノベーション研究会(2017) 小冊子「竹の利活用技術」
- (19) 田中良平(2017) BIO九州 220:15-20
- (20) 堤祐司ほか(2017) Cellulose Communications 24:168-174
- (21) 柳田高志ほか(2016) 第25回日本エネルギー学会大会講演要旨集: 272-273

(2018年1月10日受付; 2018年1月19日受理)