総説

森林総研における最近の木質バイオマス利用研究（２） —木質バイオマスのマテリアル利用技術—

木 口 実*

はじめに

前号では、森林総研で行っている木質バイオマス利用研究のうち、バイオマスの安定供給技術とエネルギー利用技術について紹介した。今号では、セルロースナノファイバーやリグニン、抽出成分等からの機能性材料や高付加価値素材等のマテリアル利用技術について紹介する。

写真1 原料となる林地残材（タンコロ）

1. 林地残材の利用技術

1.1 木製単層トレイ^{1)~6)}

林地残材のうち、切り株などの大径で短尺の材から単板を切削により取り出し（写真1, 2）、これを湿熱加工により接着剤等一切使用しない単層のトレイを成形する技術を開発した（写真3）。我が国では、食品等トレイのほとんどが化石資源

写真2 スライスして得られる単板

写真3 スギからの木製単層トレイ

写真4 日産5,000枚生産可能な量産型装置

* 国立研究開発法人 森林総合研究所
Corresponding author : Makoto Kiguchi (mkiguchi@ffpri.affrc.go.jp)

図1 「小売店等で木製トレイを使って欲しいか？」に対する消費者への調査結果例

由来のポリスチレンを原料とする発泡成型品であるため、製造や廃棄に多くの二酸化炭素（CO₂）が排出されている。カーボンニュートラルな木材を用いた木製単層トレイでプラスチック食品容器の一部を代替することにより、地球温暖化防止対策に貢献するとともに、地域産木材の新たな需要の創出に寄与できると考えている。本研究では、トレイの原料として建築用材等に使えない樹木の根に近い部分（通称：タンコロ（端ころ））から角材（フリッチ）を切り出し、スライサーにより厚さ1～2mm程度の単板を調製する。これを熱と水分により可塑化させ、金型成型して単層のトレイを製造する3次元成型技術を開発した。現在、日産5,000枚の製造能力を持つ量産機を開発して実証試験を行っている（写真4）。モニタリング市場調査を行った結果、消費者の多くは環境配慮型製品として木製トレイの使用に好意的であった一方（図1）、流通業者へのヒアリング調査では、衛生面、匂い、価格等により実際の使用には否定的な意見も見られた。しかし、消費者、流通業者共に木製トレイの質感および環境に対する貢献への評価が高いことから、実用化のためには木製トレイの更なる性能向上や、これに適した用途開発と環境面のアピールが重要と考えている。

1.2 木粉・プラスチック複合材（WPC）⁷⁻¹¹⁾

木粉とポリエチレンやポリプロピレンなどの熱可塑性プラスチックを加熱下で混練し、成型させた木粉・プラスチック複合材（Wood-plastic Composite；混練型WPC、以下WPCと称す）は、建築廃木材や林地残材などの木質バイオマスと再生プラスチックを原料にできることから、環境型資材として注目されている。WPCの用途は、デッキ材などの屋外製品と玩具や文具、日用品等の汎用プラスチック製品の代替を目指した製品に大別される。森林総研では、①屋外でも長期間性能

が保持できるエクステリア用WPCの耐久性向上技術の開発、②木質含有率が高く射出成型が可能な木質高充填WPCの製造技術を確立し、熱帯産木材や石油系プラスチックに代わる高耐久性あるいはCO₂排出を低減させた新しい成形材料としての研究を行っている。

WPCは、疎水性のプラスチックが木粉を包み込むカプセル効果により高い耐水性や耐久性を示し、デッキ材等のエクステリア分野で期待される材料である。しかし、屋外での使用において変色や粉ふき（チョーキング）等の問題が生じることが報告され、最近では腐朽などの生物劣化例も報告される等、長期の耐久性の面で懸念が生じている。木粉含有率が異なるエクステリア用WPCについて、土中埋設試験により耐朽性を評価した結果、腐朽によると思われる質量減少は木粉含有率の増加とともに増大し、試験3年後では木粉含有率40%以上の試験片において12～20%の減少率を示した。一方、木粉含有率30%以下ではほとんど質量減少は生じなかった（図2）。これは、木粉含有率が多いWPCでは、地面に接する接地環境のような過酷な使用条件では表層部の耐朽性に留意する必要があることを意味する。

耐候性では、木粉含有率が多い程チョーキングが増加する傾向を示し、含有率を30%程度に低下させることでチョーキングを大幅に抑制できることが分かった。また、紫外線吸収剤（UVA）の種類によってチョーキング抑制効果が異なり、UVAとヒンダートアミン系光安定化剤とを組み合わせることによって相乗的にチョーキングの発生が抑制できた。

木質高充填WPCでは、木粉の湿熱処理あるいは膨潤処理によって熱可塑性を向上させ、木粉含有量が80%以上のコンパウンドによる射出成型可能なWPCを製造した。

図2 つくば、八丈島および鹿兒島における WPC の土中埋設試験結果
(木材%は、各々木粉含有率27%, 42%, 47%, 56%を示す)

農水省の異分野融合共同研究（H26～28）において、産総研等と共に「農林系廃棄物を用いたバイオマスファイラー製造および複合材料開発」の課題に取り組んでいる。林地残材等未利用木質バイオマス由来のセルロースナノファイバーを含むバイオマスファイラー（BF）表面を、バイオマス由来のナノシリカにより改質することにより、有機素材と無機素材が融合した新規なBFを製造する。また、これをプラスチック等と複合化することで、バイオマス系複合材料の抱える問題点（プラスチックへの分散性、強度、成形性、耐熱性）を解決すると共に、実用化が容易な高性能・高機能のバイオマス系複合材料を開発することを目標に研究を進めている。

2. バイオリファイナリーと成分利用技術

2.1 セルロースナノファイバー¹²⁻¹⁴⁾

日本再興戦略改訂版2014において、林業の成長産業化のキーテクノロジーとしてセルロースナノファイバー（CNF）による機能性材料の製造が挙げられた。CNFは、今年6月30日に閣議決定された改訂版2015においても「国際標準化に向けた研究開発とマテリアル利用への取組を推進する」とされ、引き続き国家プロジェクトとして推進されている（<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/dailjp.pdf>）。

森林総研では、農水省の革新的技術創造促進事業（異分野融合共同研究；H26～28）において、国産木質系バイオマスをアルカリ蒸解によりパルプ化し、これを物理的破碎の際に酵素処理を併用することで、特別な試薬等を使用せずに安全で低エネルギーかつ低環境負荷なCNFの製造技術を検討している。このようなCNFは、食品などの新しい分野への利用が期待されている（図3、4）。一方、CNFの多くは製紙会社から供給される輸入チップを主原料とするクラフトパルプを用いているため、国産木質資源からのCNFの製造技術及びその利用技術が求められている。そのため、林野庁事業において国産CNFの製造技術実証事業を開始した。これは、中山間地域において小規模な施設でスギ等国産木質バイオマス資源を原料にしてアルカリ蒸解によりパルプを製造し、酵素と物理的処理の併用によりナノセルロース化するものである。このようにして製造されるCNFは安全性が高く、またヘミセルロースを比較的多く含んでいるため他材料との高い相溶性が期待できる（<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/koufu-pro/documents/seikasyu57.pdf>）。現在、森林総研内に製造実証プラントを建設しており、本年7月より平成28年2月末日までの期間において国産材から製造したCNFサンプルの試験配布を開始した。詳細は以下のURLを参照されたい（<http://>

図3 セルロースナノファイバーの森林総研における取組

www.ffpri.affrc.go.jp/news/2015/20150709nanofiber/index.html。

2.2 機能性リグニンの調製と高付加価値製品の開発¹⁵⁻¹⁷⁾

林地残材からの高付加価値製品への転換において、最大の難関であり、かつボトルネックであったのが、木質の30%程度を占め複雑な不定形網目構造を有するリグニンである。一方で、この強固な芳香族ポリマーである化合物の特徴は、強度、耐熱性に優れた新素材を生み出す大きなポテンシャルを持っている。リグニンのマテリアル利用において重要な事項をまとめると以下のようなる。

①植物系バイオマスの3大主成分の一つの天然高分子。②地上の有機化合物の中で2番目に多い物質。③基礎骨格が芳香核で構成されている。④水との親和性が比較的弱い。⑤針葉樹、広葉樹、草本系植物で化学構造等が異なるので材料特性が異なる。⑥植物体に存在するオリジナルの構造のまま取り出すことはできず、取り出すための処理（分解方法や度合い）に応じて材料特性が異なる。

森林総研では、親水性高分子のグリシジルエーテル系化合物を用いて、親水基をリグニンに容易に導入することに成功した。これにより親水性溶媒にも疎水性溶媒にも溶解する両親媒性を発現すると共に、導入親水基の種類を変えることで界面活性作用等の性能をコントロールすることも可能となった（図5）。両親媒性リグニンを、年間400

図4 森林総研におけるセルロースナノファイバー製造技術（機械処理によって生じる微細な亀裂に酵素が作用し、セルロースの凝集がほぐれてCNFが生産される）

～500億円の市場規模と言われているコンクリート用化学混和剤としての利用を目指して開発を進めているが、この新規コンクリート混和剤は市販の天然物系混和剤と比較して非常に高い流動性を示す結果を得ている。また、「加溶媒分解法」により、これまで困難であった針葉樹材から溶融紡糸可能なリグニンを直接取り出すことに成功した。この「加溶媒分解リグニン」は、針葉樹リグニンであるにもかかわらず熱成形性に優れ、容易に溶融紡糸することが可能となった。

一方、リグニンを低分子に分解した後、微生物の代謝を用いて均一で単一の化合物である2-ピロ

図5 両親媒性リグニンの製造

ン-4,6-ジカルボン酸（PDC）を高収率で変換することに成功している（図6）。PDCは、二つのカルボキシル基を持つためポリマー化が可能なプラットフォームケミカル（基礎化学製品）であるが、有機合成で製造することが困難な物質であることがわかっている。このPDCからエポキシ誘導体を合成して強力な金属接着を示す接着剤を開発したが、その強度は市販の石油系エポキシ接着剤の接着強度（約30MPa程度）の約3倍の強度を持つものである。

2.3 戦略的イノベーション創造プログラム

リグニンの利用研究では、平成26年度に発足した内閣府総合科学技術会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP:エスアイピー）において、「木質リグニン等からの高付加価値素材の開発」の課題が採択された。これは、森林総研を中心に産総研や理研、農研機構を始めとする国立研究開発法人及び大学、企業等を含む22機関からなるコンソーシアムにより、林地残材等の農山村のバイオマスから改質リグニン及び副産多糖類を効率のかつ安定品質で取り出す技術の開発を行う。さらに、新たな反応媒体や触媒等を用いてリグニンを低分子化し、有用なプラットフォーム化合物群を製造する技術開発を行うものである。本年度、森林総研内に加溶媒分解処理による針葉樹からの改質リグニン製造のためのベンチプラントが完成し、製造実証及び分離・精製技術の高効率化の研究が開始した。この改質リグニンを用いて、粘土等の無機材料と組み合わせた機能性ハイブリッド材料の開発や、モノリグノール等の低分子リグニンから石油由来では合成困難なエンジニアリング

図6 土壌微生物の代謝により製造される基礎化学製品としてのPDC

プラスチック等を製造する技術開発を行っている。これにより、世界初となるリグニン産業を中山間地域に創出して地域の活性化を目指している。詳細は、以下のSIPリグニンHPを参照されたい（<http://lignin.ffpri.affrc.go.jp/>）。

2.4 抽出成分からの有用製品¹⁸⁻²⁰⁾

林業や林産業の現場では、伐採時の残材や製材屑、乾燥廃液などが大量に排出されるが、燃料としての利用以外に特に有効な利用法が無いのが現状である。しかし、それら未利用資源の中には含有量は少ないが、付加価値が非常に高い「機能性成分」が含まれている。数種の樹種を用いてこれら成分を調べた結果、その中には抗ウイルス活性や花粉症の原因となるアレルゲン活性低減効果、気分改善・ストレス低減、有害物質の浄化など、私たちの健康増進に役立つ成分が数多く見つっている。森林総研では、これら有用成分の実用化

図7 トドマツ精油の二酸化窒素除去効果（空気浄化作用）

を図るための応用研究を進めている。その内の一つに、トドマツの枝葉からの抽出成分を利用した空気浄化剤がある。排気ガス等から出る二酸化窒素等の環境汚染物質は、我々が毎日吸っている空気に微量ながら含まれており、様々な疾病の要因になると言われている。森林総研では、環境汚染物質を効率的に浄化する画期的な方法として、トドマツ精油の強力な汚染物質除去機能とそこに含まれる有効成分を発見し、その利用技術を開発した(図7)。実用化のために、企業と共同で原料(未利用資源の枝葉)の収集・運搬システムを確立すると共に、マイクロ波減圧水蒸気蒸留装置を開発して(写真5)、低温かつ低エネルギーで目的の成分を効率的に抽出することに成功した。これによって、トドマツ精油を活用した革新的な「空気浄化剤」の製品化が実現した。現在は、竹や広葉樹にもその研究対象範囲を広げ、大学や企業との共同研究によって抽出成分の機能性の把握とこれを利用した製品の開発を行っている。

3. おわりに

林地残材等の林地に残されている未利用な木質バイオマスは、エネルギー原料を始め、多くの有用なマテリアル製品として利用できる可能性が明らかになってきており、未利用木質バイオマスはわが国の貴重な資源となることが期待されている。しかし一方では、川上におけるバイオマス発電所の建設ラッシュによる原料木材の供給不足、

写真5 マイクロ波減圧水蒸気蒸留装置

価格の高騰、焼却灰の処理、強度収穫による林地の劣化、広葉樹やヤナギ等の新たな資源の供給技術等の問題があり、エネルギー利用における熱の利用技術の開発、バイオマスの供給と経済性の評価によるバイオマスエネルギーの安定的な供給システム等の問題に対してその解決に緊急を要している。川下技術においては、CNFや機能性リグニン製品の実用化が重要であり、これによる中山間地域への新たな産業の創出という成果の具体化が求められている。

森林総研では、次期中期計画において、先に挙げた問題の解決に向けて木質バイオマスの有効利用研究を加速化させ、実証試験等を通じて社会実装できる技術の開発を目指している。これまでの森林総研におけるバイオマス利用研究については、以下の「季刊森林総研」が森林総研のホーム

ページで紹介されているので、本解説と併せてご覧頂きたい。

季刊森林総研 創刊号「特集 木質バイオマスの利活用」(<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kanan/documents/kananffpri-1.pdf>)

季刊森林総研 第10号「特集 木質バイオマスの新たな利用」(<http://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kanan/documents/kananffpri-10.pdf>)

季刊森林総研 第25号「特集 未利用バイオマス資源の有効利用技術」(<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kanan/documents/kananffpri-25.pdf>)

参考文献

- 1) 久保島吉貴, 片岡厚, 庄内豊, 藤本清彦, 村田光司, 木口実, 高野勉, 秦野恭典: 木製単層トレイの成型成功率における単板スギ品種の影響, 木材工業, **69** (12), 584-588 (2014).
- 2) 久保島吉貴, 片岡厚, 庄内豊, 藤本清彦, 村田光司, 木口実, 高野勉, 秦野恭典: 木製単層トレイの製造における単板含水率の影響, 木材工業, **67** (2), 56-60 (2012).
- 3) 高野勉: 木製単層トレイ—新しい木製容器の製造技術, 生物資源, **6** (4), 12-20 (2013).
- 4) 高野勉, 久保島吉貴, 村田光司, 藤本清彦, 木口実, 片岡厚, 秦野恭典, 庄内豊: 林地残材を原料とした木製単層トレイの量産化に成功!, 森林総合研究所平成25年版研究成果選集, 28-29 (2013).
- 5) 藤本清彦, 村田光司, 庄内豊, 久保島吉貴, 片岡厚, 秦野恭典, 木口実, 高野勉: 木製単層トレイの製造におけるエネルギー消費量およびCO₂発生量(第2報)—製造機械の改良・開発によるエネルギー消費量およびCO₂発生量の削減—, 日本木材加工技術協会第30回年次大会要旨集, 33-34 (2012).
- 6) 秦野恭典, 木口実, 高野勉: 木質バイオマスからの新規成型材料の開発 1. 木製単層トレイの製造技術の開発, 独立行政法人森林総合研究所 イノベーションでリードする木材需要の創出—国産材・木質バイオマス利用拡大戦略のための研究開発—要旨集, 63-66 (2010).
- 7) 木口実: 木材・プラスチック複合体の技術動向と評価, 植物由来ポリマー・複合材料の開発, サイエンス&テクノロジー社, 東京, pp121-132 (2011).
- 8) 木口実, 片岡厚, 松永浩史, 桃原郁夫, 川元スミレ, 小林正彦, 大友祐晋: 木粉・プラスチック複合体(混練型 WPC)の耐久性 (2)土中埋設試験による耐朽性評価, 木材保存, **36** (4), 150-157 (2010).
- 9) 木口実: 木材・プラスチック複合体(混練型 WPC)の規格動向, 木材保存, **38** (3), 94-104 (2012).
- 10) 小林正彦, 久保智史, 木口実, 片岡厚, 松永正弘, 川元スミレ, 大友祐晋: 示差走査熱量法および赤外分光分析法による木材-プラスチック複合材料(混練型 WPC)の定量分析, 木材保存, **39** (1), 7-15 (2013).
- 11) 小林正彦, 木口実, 片岡厚, 石川敦子, 川元スミレ, 松永正弘: 混練型 WPC の耐候性に及ぼす加溶媒分解木材の添加効果, 木材保存, **40** (1), 8-16 (2014).
- 12) 林徳子: 酵素加水分解を用いたセルロースナノファイバーの生産法, 日本ゴム協会誌, **85** (12), 394-399 (2012).
- 13) 林徳子: 酵素によるセルロースのフィブリル化, セルロース利用技術の最先端(磯貝明監修), シーエムシー出版, pp320-327 (2008).
- 14) N. Hayashi, T. Kondo, M. Ishihara: Enzymatically produced nano-ordered short elements containing cellulose I_β crystalline domains, *Carbohydrate Polymers*, **61**, 191-197 (2005).
- 15) 山田竜彦: ポリマー原料用リグニンの製造, 未利用バイオマスの活用技術と事業性評価, サイエンス&テクノロジー社, 東京, pp124-132 (2010).
- 16) 山田竜彦: 機能性リグニン材料の可能性, 工業材料, **62** (1), 78-79 (2014).
- 17) 山田竜彦: リグニン由来の機能性バイオマテリアルの開発, *BIO INDUSTRY*, **32** (2), 7-11 (2015).
- 18) 大平辰朗: 樹木精油成分による空気質の改善, 木材学会誌, **61** (3), 226-231 (2015).
- 19) 大平辰朗: 未利用林地残材を活用した森林ニュービジネスの可能性—枝葉から生まれた空気浄化剤—, 山林, 1569, 23-32 (2015).
- 20) 大平辰朗: 森林の香り, 木材の香り, 八十一出版, 東京, pp 1-62 (2007).

(2015.7.7 受付)

(2015.7.13 受理)