

2.2.8 林業

(1) 研究開発領域の定義

林業とは主として森林で樹木、とくに針葉樹を伐採し、木材を生産、供給することを一般に指している。林業に関わる科学的な研究開発は木質バイオマスの利用、加工、用途に関するもの、木質バイオマスの生産に関するもの、さらにはデジタル化した森林情報やICTを活用したスマート林業に大別される。本稿では木質バイオマスの生産とスマート林業に焦点を当て概説する。

(2) キーワード

木質バイオマス、バイオリファイナリー、リグニン、バイオインフォマティクス、ゲノム編集、遺伝子組換え、ゲノミックセレクション、スマート林業、オープンデータ

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

木質バイオマスの利用は、最近提唱されている「バイオエコノミー」の考え方の浸透や新興諸国の経済発展とともに年々拡大している一方で、世界の森林面積は2000年以降毎年500万ha程度ずつ減少しており¹⁾、地球温暖化、気候変化の問題を悪化させている。こうした状況にゲームチェンジをもたらすため、また、人類の持続可能な成長を継続させるため、林業分野での研究開発は世界レベルで喫緊の課題となっている。

林業上で利用可能な木質バイオマスについては森林蓄積としてその賦存量が評価されているが、現在、世界全体での森林蓄積は約4,300億m³（比重を0.4として乾燥重量換算すると約1,700億トン）と見積もられている。世界全体での林業活動による年間あたりの丸太生産量²⁾は約37億m³中の建材やパルプを生産する用材利用量や、建材やパルプ等を製造する過程での木質バイオマスの副産を考慮すると、世界全体の林業と関連産業の活動の中で、少なくとも乾燥重量として年間あたり10億トン以上の木質バイオマスが存在すると推定される。

我が国は国土の7割が森林で覆われており、木材の利用期に達した約1千万haの人工林を持つ世界有数の資源国である。その人工林からは年間あたり約3,000万m³の丸太が生産され、今後2025年までに丸太の生産量として、さらに約1,000万m³（比重を0.4として乾燥重量換算で約400万トン）の増産を目指すことが森林・林業政策に盛り込まれている³⁾。一方で、木材生産額は平成30年度約2,262億円⁴⁾で国内総生産額GDP（547兆円）に占める林業の比率は0.04%⁴⁾であり、豊富な森林資源が活かされずに、手入れがされずに放置された森林が増え、産業としての林業は衰退産業となっている。そこで、低い労働生産性や高い労働災害率といった我が国特有の林業課題を解決するとともに、再生可能エネルギーや建築資材としての利用の拡大、バイオ新素材やバイオプラスチック等の有用物質の製造など、多面的に木質バイオマスの需要拡大を図っていくことが望まれる^{5), 6)}。これらの木質バイオマス利活用はバイオエコノミーに基づく持続性のある地域社会の実現化にも貢献でき、このことは「バイオマス利活用基本計画（2016）」、「バイオ戦略2020」、「統合イノベーション戦略2020」、未来投資会議^{7), 8), 9)}等の指針とも合致している。

[研究開発の動向]

【木質バイオマスの生産】

木質バイオマスの生産性の向上にあたっては、木質全体の生産性を上げる他、木質バイオマスの用途に合

わせた形質を持つよう植物を改良することや木質バイオマスを効率よく利活用することが挙げられる。

・植物の育種

育種法には遺伝子組換え技術を使用するものとししないものがある。非遺伝子組換えでの育種は、変異原処理を行うものと選抜や掛け合わせ（交配）を基本とするものとに大別される。変異原処理の場合、処理世代では変異がヘテロでしか導入されていないため、自家受粉した後代を得る必要があるが、スギやマツの仲間を含む多くの実用植物では自家受粉の場合種子が発芽しにくいことが知られており、容易ではない。わが国では重イオンビームによるスギの変異原育種が試みられている。量的形質（QTL）の選抜・交配育種においては、樹木でも一塩基多型（SNP）やSSR（Simple sequence repeat）マーカーなどのDNAマーカーを利用する育種（Molecular marker-assisted selection：MAS）が試みられ始めている。MASの基本は表現型と連鎖しているDNAマーカーをQTLマッピングまたはゲノムワイドアソシエーション解析（GWAS）によって同定し、以後はDNAマーカーを頼りに植物が小さくて形質を判断できないうちに選抜し、何らかの世代促進技術（開花促進）と組み合わせて育種期間を短縮する。QTLマッピングでは人為交配によって得られるF2集団の形質とDNAマーカーとの連鎖を解析する。様々な形質に関して効果のある変異座位（QTL）と連鎖したDNAマーカーが特定されつつあるが、偽陽性も多く、効果の大きいQTLしか捉えられない。そうした中で近年登場した新技術「ゲノミックセレクション」（GS）は、形質と利用可能な過半のDNAマーカー（典型的にはSNPs）の計測値がそろっている集団において、形質の予測モデルをたて、次に、形質が不明な集団においてDNAマーカーの計測値をもとに形質の予測値を算出して個体選抜を行う手法である。最近では、マツ赤斑葉枯病抵抗性について高い確度で形質を予測し個体選抜できるようになったという報告がなされている¹⁰⁾。予測モデルの構築には近年深層学習の手法も使われており、GSでは比較的寄与の小さいQTLも拾うことができるとされており、今後樹木の育種においても活用が期待される。

一方、遺伝子組換えを含む育種は、自然変異のバリエーションに縛られることはない点、他の生物の遺伝子を導入して品種改良可能な点が非遺伝子組換えによる育種とは異なる特長である。ただし現状では、遺伝子組換えが可能な樹種や系統は限られている。また社会受容への対応が必要である。

・木質をターゲットとする植物の改良

木質バイオマスの生産性向上にあたっては、用途に応じた植物木質バイオマスの用途に関わらず、木質の生産性自体を向上することは重要であり、育成しやすさ、成長の早さ、材密度（比重）高さなどが共通して求められる。

木質生産性や材密度、強度の向上に直結する技術としては、二次細胞壁の形成の制御があり、日本のグループによって同定されたマスター転写因子^{11), 12)}の働きを制御することで、より厚い二次細胞壁を堆積させることができる^{13), 14)}。また、植物のアーキテクチャ（樹形、組織構造など）の制御¹⁵⁻¹⁷⁾、二次成長（茎・幹が太くなる成長）の制御^{18), 19)}、環境ストレス、すなわち乾燥、高温、低温などの非生物ストレス²⁰⁾と微生物、ウイルスによる病気、害虫による食害など生物ストレス²¹⁻²³⁾に対する耐性の向上も木質そのものの生産性に関わる要因であり、改良のターゲットとなり得る。

・リグニンをターゲットとする植物の改良

リグニンは木質バイオマスの成分分離、パルプ化、バイオエタノール製造等の主要な阻害要因となることが知られている。リグニンはモノリグノールと呼ばれる芳香環を持つ化合物が多数重合して作られるが、基本と

なるモノリグノールの構造の違いにより、大きく分けてGリグニン、Sリグニン、Hリグニンの3種類がある。植物種ごとにその組成は特徴があるが、一般に木質に含まれる総リグニン量が少ないほど、また、GリグニンよりもSリグニンやHリグニンが多いほど木質バイオマスの成分分離がより容易になるとされている。10種類以上ある酵素遺伝子をノックアウト、ノックダウンもしくはまれに過剰発現してリグニンを改変しようとする試みが非常に多い。リグニン総量を減少させてしまうと道管にも影響が出てしまうことにより生育が阻害されてしまうのが一般的であるが、総量はあまり変化せずに生育阻害を最低限に抑えつつ、セルラーゼによるセルロース糖化性（酵素糖化性）を最大50%程度高められるという報告が多数ある。また、最近ポプラにおいて為された報告では10種類のリグニン合成に関与する酵素遺伝子について21種類のコンストラクトを用いてそれらの発現を変化させ（ほとんどはRNAiに近い手法による抑制）、約2000個体の組換え体を作成して、そのうち221個体について、遺伝子発現や代謝物などの各種オミクスデータ、各種木質バイオマスに関わる形質を詳細に分析し、その結果をもとに特定の形質を特定の方向（たとえばリグニンを増やすあるいは減らす、酵素糖化性を上げるまたは下げる、など）に変化させるにはどの遺伝子をどう操作すればよいかをシミュレーションにより網羅的に提唱している²⁴⁾。

リグニンの改変は操作対象の植物が元来持っている遺伝子进行操作するだけでなく、他の生物の遺伝子を導入する遺伝子組換えが前提となる手法でも多数試みられてきている。たとえば薬用植物カラトウキ由来のフェルラ酸をモノリグノールに付加する酵素遺伝子を発現させたポプラ²⁵⁾、ウコン（ターメリック）由来のクルクミン合成にかかわる酵素遺伝子を発現させたシロイヌナズナ²⁶⁾で、酵素糖化性向上することが報告されている。また、でもこれらの他にも微生物などから様々な酵素遺伝子を導入してリグニン合成系を操作する報告がなされている²⁷⁻²⁹⁾。

リグニン改変の取組みに対してリグニン以外の木質バイオマスの主要成分であるセルロースやヘミセルロースなど、多糖類の合成にかかわる遺伝子进行操作する試みは相対的に少ない^{30), 31)}が、近年の研究により、ヘミセルロース（キシラン）がリグニンとセルロースの双方と強固に相互作用して両者をつないでいることが明らかになってきたことにより^{32), 33)}、ヘミセルロースの重要性³⁴⁾が認識され始め、今後の研究開発が期待される。

・酵素によるバイオリファイナリー技術

木質バイオマスの有効利用には、セルロースに限らない木質バイオマスの全構成成分の利用を目指す必要がある。例えば、一般的な木質バイオマスからは抽出したリグニンは工程に必要なエネルギー以上のエネルギーを供給でき、余剰分は燃焼させるのではなく、高付加価値な化学品として生産した方が全体としての採算性が高まる³⁵⁾。そこで、木質バイオマスのバイオリファイナリーには、リグニンの積極的な活用を目指した考え方が導入されている。化学パルプを製造する方法では、従来の高温下での強アルカリ処理によるクラフトパルプ化（KP）や亜硫酸液処理によるサルファイトパルプ化（SP）に代わって、長年にわたり研究されてきたオルガノソルブ（Organosolvolytic）法³⁶⁾が新たに見直され、この方法を発展させた我改質リグニンの製造法^{37), 38)}（森林総合研究所）やリグノフェノール製造法（三重大学）³⁹⁾が注目される。

ヘミセルロースは、各種ヘミセルラーゼによる酵素分解で可溶性オリゴ糖や単糖に変換することで、機能性糖やバイオ新素材等の原料として利用できる。ヘミセルロースは、リグニンと複雑で強固な複合体を形成していると考えられ⁴⁰⁾、両者の分離が容易ではないことから、酵素を用いた温和な条件下でのリグニン・ヘミセルロース複合体（Lignin Carbohydrate Complexes：LCC）を選択的に分解することが有効であると考えられる。そのためには、LCCを構成する化学結合の解明とLCCの分解に関与する酵素の探索が必要であるが、

LCCの構造については、近年、抽出や精製方法とともに各種NMR等を利用した情報が集められつつある⁴¹⁻⁴⁴⁾。今後、LCC構造中のグリコシド結合やエーテル結合等の分解に関与する酵素についての研究が期待される。

【スマート林業】

研究開発の大きな流れは、北欧のフィンランドとスウェーデン、欧州のドイツとオーストリア、オセアニアのニュージーランド、北米のカナダとアメリカの林業先進国が創り出している。これらの国々は、国内に豊富な森林資源を持ち、経済活動を重視した技術開発を進めており、木材や木製品の輸出により、林業GDPは3～4%と高く、国内の主たる産業として位置づけられている。

①レーザ計測による精密な資源把握

北欧を中心に1990年代から全国の森林資源調査方法を、人手によるサンプリング調査から樹高や材積を計測可能な航空機レーザ計測を活用した森林のデジタル情報による精密な資源調査に変更した。レーザセンサが小型・軽量化されており、ドローン搭載、地上での車両や携帯のモバイル計測技術との統合、3Dデジタルデータからの単木資源管理、品等区分技術へと開発が進んでいる。これら取組みを精密林業⁴⁵⁻⁴⁸⁾という。

②林業機械の開発

労働安全性と高い生産性を目指し、省力化や自動化による林業機械のオートメーションの作業仕組みを目指しており、AIや通信、ロボットなどの最先端技術を取り入れながら林業ビジネスとして取り組んでいる⁵⁰⁾。

③森林情報のデジタル化とオープンデータ

先進林業国では共通して、すべての森林情報は誰でも利用できるよう整備されている^{47), 48), 50)}。精密な航空レーザ計測データや人工衛星データなどのリモートセンシング画像情報や地形情報、林道や傾斜などの地形情報、レーザ計測データから解析された精密な森林資源情報をインターネット上で、自由にダウンロードできる。その基盤情報を政府が支える仕組みになっている。これによって、森林所有者や林業事業者、トラック輸送など伐採時期と収穫予想と収益を判断することができる。

④木材流通のサプライチェーン

森林情報デジタル化とオープンデータを活用して、川上（木材供給者）・川中（木材の運搬と製材業）・川下（工務店や住宅メーカー）が木材流通のサプライチェーンの仕組みをつくり、それを動かすためのソフトウェア^{51), 52)}を開発して、広く運用されている。

我が国は国土面積に占める森林の割合が先進国ではフィンランドの次に高いが、木材自給率36.6%、林業生産額2,262億円で国内総生産GDPの0.04%⁴⁾と極めて低い。伐採・搬出作業はチェーンソーによる伐倒や重い丸太をワイヤで搬出する危険な作業であり、労働災害発生率の死傷年千人率は22.4で全産業平均の9.7倍、林業の生産性（2.2m³/人・日）は林業先進国（20m³/人・日）の10分の1と低い。森林調査や収穫作業など、人力と作業経験を重視した作業仕組みからデジタル化とオープンデータへの変革、関連ベンチャー企業の育成等、産業化への道筋を立てていく必要がある。

フィンランドとスウェーデンは、平地林が多く、直接森林内に入り作業を行えることから高性能多機能林業機械のハーベスタとフォワーダによる丸太（Cut to Length）収穫法で、収穫作業の生産性は約25m³/人・日と高い⁵³⁾。世界最大級の林業機械メーカーも多く、フィンランドには、農機具メーカーのジョンディア（John Deere）傘下の世界最大の林業機械工場ワラタ（Waratah）、ポンセ（Ponsse）、ケスラー（Kesla）が、スウェーデンにはコマツフォレストABがある。ハーベスタで得られる伐採木の位置、丸太の寸法、曲がりの品質、作業工程などの収穫情報データの国際的標準StanForD（Standard for Forest Data and

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
バイオエコノミー

communication) の開発を行い、森林デジタルデータのビッグデータのの一つとして、レーザ計測データとの照合から、より正確な資源管理と収穫予測の技術開発を進めている⁵⁴⁾。

ニュージーランドは、収穫期間 (伐期) が25～30年のラジアータ松の単一樹種による林業であり、伐採するフェラーバンチャーと伐採木を集材するスキッドの全木 (Tree-length) 収穫法を用いている。緩斜地では、生産性を上げるため、多機能のハーベスタを使用せずに、複数の林業機械 (フェラーバンチャー、スキッド、土場で枝払い・丸太切りを行うプロセッサ、丸太の径ごとに山積みするグラップル) の分業による伐採・搬出作業 (Ground-based harvesting) 法を行い、生産性は30-50m³/人・日と極めて高い^{53), 55)}。山岳の急傾斜地においても機械作業による収穫作業のケーブル・アシスト (Cable-Assist) やグラップル搬器を移動して伐採木を牽引するケーブルヤード (Cable Yarding) 作業が確立されている^{55), 56), 57)}。

カナダは、森林面積最大のスケールメリットを生かし、超大型の林業機械を導入して木材生産量を上げている木材輸出国である⁵²⁾。

アメリカは、1989年まで木材生産を増強していたが、資源量の枯渇してきた天然林の伐採減少とマダラフクロウなどの稀少生物・生態系の保全のため、木材伐採量は急減した。現在、技術開発としては、ドローンによる種子散布と計測、森林火災抑止のための防火技術などに取り組んでおり、センサやソフトウェアの開発でドローン (UAV) や空間情報の計測センサ、地図化 (マッピング) とGISの分野はアメリカが牽引している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

・糸状菌類の全ゲノム解析の進捗 (1000糸状菌ゲノムプロジェクト)⁵⁸⁾

米国エネルギー省 (DOE) の傘下にある米国ジョイントゲノム研究所 (Joint Genome Institute; JGI) では、糸状菌類の分子系統解析と比較ゲノム解析を行うためのデータベースとしてMycocosmシステムを立ち上げ、すでに1,000種以上の糸状菌の全ゲノム情報が収録されている。その中には、担子菌類に属する多種の木材腐朽菌も含まれており、木質バイオマス分解に関与する植物細胞壁分解酵素とその関連遺伝子について広く検索を行うことができる。

・バイオマス分解関連酵素に関するCAZYデータベースの充実

CAZYはCarbohydrate-Active enZymesの略称で、糖質関連酵素及びその構造の一部である糖質結合モジュール等をタンパク質構造に基づいて分類したデータベースである⁵⁹⁾。公開は1998年とかなり歴史があるが、近年、Glycoside Hydrolases (GHs)、Glycosyltransferases (GTs)、Polysaccharide Lyases (PLs)、Carbohydrate Esterases (CEs)、Carbohydrate-Binding Modules (CBMs) の5つのカテゴリーに加えて、セルロース系バイオマスの構成成分に作用する酸化還元酵素を取り纏めたAuxiliary Activities (AAs) というカテゴリーを新たに設けてバイオマス分解関連酵素全体をカバーする活用性の高いデータベースとなっている。

・ゲノム編集技術

遺伝子組換え技術の社会受容は林業分野においても大きな課題であり、遺伝子導入を行わずにゲノム編集に必要なコンポーネントをタンパク質・RNA複合体 (RNP) として物理化学的な手法で細胞に導入する技術が注目を集めている。動物ではこのような方法が一般的であるが植物では未だに確実な方法は確立されておらず、日本のグループによって提唱されている遺伝子銃 (パーティクルガン) で植物の茎頂分裂組織にRNP

を撃ち込む手法⁶⁰⁾は今後の展開が期待される。

・一次細胞壁等の活用

一次細胞壁は全ての植物細胞が持っている。スイッチグラスやポプラでは、主に一次細胞壁に含まれる多糖類であるペクチンの生合成を抑制することで酵素糖化性、バイオエタノール生産性が上昇するとともに成長が良くなることが報告されている⁶¹⁾。これまで、木質バイオマス生産に関して一次細胞壁の重要性は見過ごされてきたと言っても過言ではないが、一次細胞壁も草本植物のように量があれば重要な資源になりうる。長年不明であった一次細胞壁形成を制御する転写因子も最近同定されており、一次細胞壁形成をダイナミックに制御することが可能になってきている⁶²⁾。同様に麻の仲間や広葉樹の屈曲部位に形成されるG層と呼ばれる特殊な細胞壁も、応用可能性が高いにもかかわらずいまだその形成メカニズムが遺伝子レベルで明らかになっていないことから注目が集まっている。

・異科接木

栽培技術に関しては、日本のグループによって発見・開発された異科接木の技術(iPAG)が注目される。この技術は中間にタバコの茎を挿入すれば前後に異なる科の植物を継いでも癒合するもので、これまでの常識ではあり得なかった接木の組合せを実現する⁶³⁾。これは、特定の糖質分解酵素遺伝子がタバコで高発現していることによるものであることから、この成果を応用することで将来タバコを介さない異科接木が実現できる可能性があり、今後の研究開発が期待される。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

・米国エネルギー省(DOE)

- ・傘下のBioEnergy Technologies Office(BETO)では、バイオマス原料から、生物的、及び化学的にバイオ燃料、バイオ製品や化学中間体を商業的に実行可能な変換技術を開発する支援を行っている(2016年度実績 約94億円)。
- ・バイオ燃料、バイオマス利活用などのバイオエネルギー研究に関し、ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)が主導するバイオエネルギー共同研究所(JBEI)など4つの研究組織に毎年合計40億円以上を投じるプロジェクトを2017年から5年間の予定で実施している。

・ソーク研究所「Harnessing Plants Initiative」

米国でも有数の私設生物学研究所であるソーク研究所は、民間などから40億円近くを集め、コルクなどの主成分であるスベリンを根に大量蓄積させてCO₂を貯留し、地球温暖化防止に貢献することを提唱しており、革新的な試みとして今後の展開が注目される。

・Forestry4.0

カナダ天然資源省が支援する民間組織FPIInnovationsが事務局となり、林業先進国(北米、北欧、オセアニア)では、林業分野に第4次産業革命のコア技術を活用したスマート林業に取り組んでいる⁹⁾。政府と林産業一体となって、現状の不正確な森林資源調査、林業機械の稼働率の低さ、林業事業体同士の連携の悪さ、柔軟性に欠けるバリューチェーン等の課題の改革を行っている⁴⁹⁾。

・フィンランド 森林のバイオエコノミー

フィンランドでは2014年に次いで、2019年に新たなバイオエコノミー政策を策定した。エネルギー、食糧、木質繊維、木造建築を生物資源へ置き換える仕組み、大学と連携してバイオエコノミーの講義、世界的な新技術を開発してイノベーションを進めている。2030年迄には化石燃料を使用した住居暖房を止め、再生可能エネルギーに変更することを目標としている⁶⁴⁾。

・ Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost-competitive bio-based industry (EFFORTE)

2014年から開始されたEUとバイオベース産業コンソーシアムの37億ユーロ（4,440億円）の共同事業。スマート林業をヨーロッパの森林と林業に適用することにより、EU内の森林のバリューチェーン全体の効率と持続可能性の向上を目指す⁶⁵⁾。

・ NEDO「バイオ燃料製造の有用要素技術開発事業」

セルロース系バイオマスから燃料を製造する技術において、バイオマス資源の生産技術、有用糖化酵素の生産技術、有用微生物を用いた発酵生産技術の開発等を支援した（2013-2016年 約52億円）。

・ 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「地域のリグニン資源が先導するバイオマス利用システムの技術革新（SIPリグニン）コンソーシアム」

木質バイオマスから機能性リグニンを抽出して、高付加価値素材の開発を支援した（2014-2018年、総額約16億円）

・ 新学術領域「植物の力学的最適化戦略に基づくサステナブル構造システムの基盤創成」（2018年～5年間）

植物の構造特性、力学的性質を理解し、それを建築技術に生かそうという研究開発課題。木質バイオマス研究とも関連性が高い。

・ JST未来社会創造事業「「ゲームチェンジングテクノロジー」による低炭素社会の実現」

木質バイオマス生産に関連する研究開発課題として、「雑種強勢の原理解明によるバイオマス技術革新」、「超開花性による高バイオマス雑種オオムギ育種法の開発」、「ゲノム・転写・翻訳統合ネットワーク解析を通じたバイオコール生産のための草本作物の木質化技術開発」、「リグニンからの芳香族ポリマー原料の選択的生産」が進行中である。

・ 木造構想ビル建築プロジェクト

木質バイオマス、特に樹木の最も重要な用途は建築資材および家具資材としての利用である。古くから木造家屋の材料として用いられてきたが、近年では集成材などを使用して高層建築を木造あるいは鉄筋コンクリートとのハイブリッドで建てる動きが先進国を中心に広がっている。こうした木造建築物は鉄筋コンクリート造建築物に比べて炭素を4倍も貯蔵しており、材料製造時の二酸化炭素放出量も4分の1程度であるとされている。日本では、木造（正確には鉄筋コンクリートとのハイブリッド）で350m級の高層ビルを建築する住友林業（株）の「W350計画」が注目を集めている。ケンブリッジ大学の天然素材革新センターではロンドン市と共同して、300m級の木造高層ビルを建築する計画を発表している。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
バイオエコノミー

・林野庁スマート林業構築実践事業（2018年度～）

先進的な取組と国内での普及展開を推進するため、森林施業の効率化・省力化や需要に応じた高度な木材生産等を可能にする「スマート林業」を実現する⁶⁶⁾。

「スマート林業タスクフォースNAGANO」(2018～2020年度)では、

長野県、信州大学、林業事業者などが産学官連携の協議会を構成し、レーザ計測やドローンを使った森林資源の把握や木材の需給状況がネット上で分かるシステム開発を目指している⁶⁷⁾。

・農林水産省革新的技術開発緊急展開事業（林業）「レーザーセンシング情報を使用したスマート精密林業技術の開発」(2016-2019年度)

信州大学、北信州森林組合、アジア航測、長野県、中部森林管理局、長野県森林組合連合会が産学官連携して、森林情報の高度化、作業の省力化と持続的な木材生産性を向上させたスマート精密林業を開発する⁴⁶⁾。

(5) 科学技術的課題

・形質形成メカニズムの解明と応用

QTLマッピングやGWAS解析によって木材の材質、成長性関連性のある遺伝子および遺伝要素（あるいは連鎖したDNAマーカー）が複数提唱されている^{68), 69)}。例えばスギでは樹高、成長速度、材密度、強度に関連していることが示唆されるSNPsがGWAS解析によって見出されている⁷⁰⁾。しかし、関与が示唆されている遺伝子が真正であるかどうか、どのようなメカニズムで形質に関わるかは全くわかっていないケースがほとんどであり、今後の研究開発が期待される。

・酵素を用いたLCCの選択的分解

木質バイオマスを構成する主要なヘミセルロースは広葉樹と針葉樹ではグルクロノキシランとガラクトグルコマンナンとそれぞれ異なるため、両者ではLCCの構造も異なる。そのため、まず対象とする木質バイオマスのLCCの構造を解明しておくことが必要である。LCC分解関連酵素の取得にあたっては、木材腐朽菌を対象にそれらが生産する植物細胞分解酵素を網羅的に探索することが有効と考えられる。その際、JGIの1000糸状菌ゲノム計画により多種の木材腐朽菌の全ゲノム情報が解読されてデータベース化されているので⁵⁸⁾、これを活用した各種オミクスや比較ゲノム解析等を組み合わせることで効率的に探索を進めることが可能である⁷¹⁾。絞り込まれたLCC分解関連酵素は酵母菌や糸状菌の異種発現系を利用することで遺伝子組換え酵素として取得しLCC構造の選択的分解に供することが出来る。

酵素を用いたリグニンの低分子可溶化

高分子成分であるリグニンを低分子化することにより可溶化する技術は木質バイオマスのバイオリファイナリーの構築において克服すべき研究課題の一つである。木材腐朽菌が生産する酸化力の強いペルオキシダーゼ等の酵素によってリグニンを構成するフェニルプロパン単位間のエーテル結合や炭素-炭素結合等を開裂できることは1980年代からの研究によってすでに知られているが⁷²⁾、同時に起こる分解生成物間での再縮合等により必ずしも選択的に反応を低分子化の方向に持って行けないことが未解決な課題となっている。一方、自然界において、木材腐朽菌はリグニンを低分子化して、これを菌体内に取り込み資化しており、木材腐朽菌が生産する多様な菌体酸化還元酵素等⁷³⁻⁷⁵⁾ がリグニン分解に与える効果について広く検討する価値が残されている。

【スマート林業】

・森林情報のデジタル化とオープンデータ

日本では国や自治体が計測した森林の資源調査と収穫調査の現地調査データ、航空機やドローンによるレーザ計測やデジタル画像、樹種分類などの解析画像が、公開されていないか、利用が限定されている。民有林と国有林の地図や森林簿などの履歴に関するデジタル情報の相互利用とデータ統合も未実施である。

海外の林業先進国ではこれらがデジタル化、オープンデータ化され^{47), 48), 50)}、誰もが無償で利用・閲覧できる体制や仕組みがあり、森林情報の共有により林業の高い生産性を支え、新技術開発によるイノベーションに役立っている。

(6) その他の課題

基礎研究の面においては、ジェノタイピングコストが課題となる。非遺伝子組換えによる育種においては、全個体のジェノタイピングが前提となるゲノミックセレクションへのシフトが起こることが予想されるが、コストが十分安くなければ成立しない。また、遺伝子組換え技術の社会受容は大きな問題の一つであり、慎重な対応が必要である。世界的に遺伝子組換え樹木の普及が進まない原因の一つとして、森林認証 (FSC) の問題がある。現在 FSC 認証を取得するには非組換え樹木を植林しなければならない。ゲノム編集により作成した非組換え樹木がどういう扱いを受けるかは今後の林業に重要なポイントとなりうる。

林業との関わりにおいて木質バイオマスの利活用推進を行う場合、当初から、その経済収支と事業性の評価を念頭に置かなければならない。汎用性プラスチックであるポリエチレンやポリプロピレンの1 kgあたりの製品価格はほぼ乾燥正角材の価格166.8円/kg (比重0.4で換算)³⁾に近いが、これらを製造するための原料であるナフサの価格は丸太価格33.8円/kg (比重0.4で換算) よりも一桁オーダーが低い。フィンランドの林産企業UPM キュンメネ社が推進している木質バイオマスの多面的な利用を統合化した取り組み⁷⁶⁾は良い先導的な例と位置付けられる。

わが国ではいまだにスギ、ヒノキへの信仰が厚く、それ以外の木、とくに広葉樹を植林することには心理的抵抗が大きいと思われる。しかし、ここまで山林が単一化したのはここ100年以内のことである。スギ、ヒノキは成長が遅く、材密度が低く強度も低めである。世界的にみるとスギ、ヒノキはマイナーな樹種であり、国際競争力という観点からもスギ、ヒノキだけでなくマツの仲間や日本の風土に合った成長の早い広葉樹もバランスよく植えていくことが必要である。電力の固定価格買い取り制度 (FIT 制度) によりバイオマス発電への木質バイオマスの利用が加速されているが、FIT 制度終了後にもバイオマス発電を成り立たせるためには、原材料費の低減が欠かせない。そういった観点からも用途に合わせて多様な樹種を植林していく必要がある。

木質バイオマスの全構成成分の多面的な高付加価値利用を目指すバイオリファインリーの構築に向けては、バイオマス科学、酵素科学、微生物学、分子生物学、バイオイノフォマティックス等のバイオテクノロジー関連分野からの人材確保と人材育成はもとより、有機化学、化学工学、さらに全体の経済性や事業性の評価を行う社会学や経済学など分野横断的な取り組みが必要であり、研究コンソーシアムの立ち上げ等による人材育成を積極的に進める必要がある。

スマート林業においては、大学における森林教育において、レーザ計測技術、デジタル情報やその共有技術、3次元レーザ計測画像の解析技術等をはじめとする教育を実施する必要がある。また、産学官連携による研究開発とオープンイノベーションの取り組みを進め、魅力ある産業に変えていくことも必要である。フィンランドのヨエンスー市に見られる森林ビジネスのコア拠点作りは、企業や大学が集積した学際的なもので参考となる。

日本の林業にまつわる研究開発は国際化が十分でないことも懸念材料である。アジア随一の森林大国として、スウェーデンの取り組みのように国際的な研究コンソーシアムを構成し、アジアにおける林業研究を国際的な枠組みの下で推進することが求められる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	1914年創立3,000名の会員を有する日本森林学会があり、国立・公設試験場、大学の研究者数は諸外国よりも多く、森林生態系を含めた自然科学、人文科学、社会科学を含む広く多様な分野で活躍している。 - 植物細胞壁に関する研究、バイオリファイナリーやリグニンに関する研究の質は高い。 - 植物細胞壁研究の国際会議は2021年に日本で開催される予定である。
	応用研究・開発	○	↗	- CNFやリグニンの利活用推進に向けた先進的な技術開発やコンソーシアムを立ち上げている。 - JST・ALCA事業や未来社会創造事業において、木質バイオマスに関連する応用研究課題が複数進行していることから、活動・成果のレベルは上昇傾向にある。 - 伝統的育種の応用にかかる分野でスギに関しては日本独自の強みがある。 - スマート林業については、国主導の応用研究・開発の取組みが開始。海外研究機関や国際企業との連携協力は少なく、ビジネス視点での研究開発や海外ジャーナルの論文は少ない。
米国	基礎研究	◎	→	- DOEが中心となりバイオマス変換に関する基礎研究で貢献度の高い多くの成果を挙げているが、近年応用研究によりシフトしている。 - 国有林については、マダラフクロウの生息地保護や原住民の住権利等で伐採量は減少しており、大規模森林所有の林業会社と投資ファンドが林業の担い手となっている
	応用研究・開発	◎	↗	- リグニン工学をはじめとして組換え樹木の野外試験まで幅広く研究開発が行われており、極めて研究開発レベルが高い。 - バイオ燃料製造技術は、商業化に向けて先進的に多数の実証研究を推進してきた。 - スマート林業についても、ベンチャーや企業を中心としたリモートセンシング、レーザ計測、ドローンなどのセンシング機器とGISなどのソフトウェアの技術開発が世界をリードしている。
欧州	基礎研究	◎	→	- 北欧を中心に木質バイオマスのバイオリファイナリーに関する基礎研究について成果を挙げている。 - フィンランド ヨエンスー市、スウェーデン ウメオ市では、企業や大学を集積してR&Dに取り組む拠点が形成されている。 - スウェーデンのウメオ大学とスウェーデン農業科学大学が主導するウメオ植物科学研究センターには森林バイオテクノロジー研究センターが設置されており、世界的に著名な研究者を多数擁する世界の林業研究の中心地のひとつである。産業界との共同研究も多く行われている。同研究センターでは、「木の成長と生産性」(29グループ)、「木材開発と木材品質」(20グループ)、「多年生成長の季節および発達段階による制御」(17グループ)という3つの研究テーマを掲げている。 - リモートセンシングとレーザ計測の被論文引用数で世界3位のフィンランド地理空間研究所(FGI)がある。 - ドイツとオーストリアは持続的な針葉樹人工林による林業経営を実施しており、基礎研究と教育がフライブルグ大学森林学部(UF)、ウィーン農科大学森林学部(BOKU)を中心に行われている。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 バイオエコノミー

	応用研究・開発	◎	↗	・ Horizon2020を中心に先進的な実証研究を推進している。 ・ 世界的な高性能林業機械メーカーのPonsse社、Waratah社、Komatsu Forest社、スマート林業のAlbonaut社がある。 ・ ただし、育種においては、総じて遺伝子組換えに厳しい姿勢をとっている。
中国	基礎研究	○	↗	・ 米国、欧州からの帰国者を中心に近年顕著な成果が多数出始めている。バイオリファイナリーやリグニンに関連する論文数も極めて多い。 ・ 北京林業大学傘下に樹木の分子設計のための先進イノベーションセンターが2016年に設立され、毎年15億円以上の資金が投入されている。ウルシ科植物などアジア特有の林産物に着目し、トランスクリプトーム解析等を精力的に実施している。 ・ 森林については、木材利用できる森林が少ないため、世界一の木材輸入国であり、都市の環境林育成による大気汚染防止、環境林の研究が多い。
	応用研究・開発	○	↗	・ バイオリファイナリーに関連する特許数が米国と同様にずば抜けて多く、増加もしている。 ・ スマート林業のコア技術となるロボット、AI、ドローン、リモートセンシング、レーザ計測などの先進技術について、海外で活躍する中国人研究者の呼び戻しによる国内での人材育成を図っている。 ・ 北京林業大学、南京林業大学などの林業専門大学では、コンピュータ情報処理、スマート林業の基礎的なコア技術が学部段階で習得するカリキュラムに10年前から変更されている。
韓国	基礎研究	○	→	・ 外材の製材と紙パルプ産業が主で、バイオリファイナリーに関する研究論文数は少なくないが、欧州からの帰国者でリグニンの生物学的機能について独創的な成果を出している研究者を除いて、木質バイオマスやリグニンに関連する研究論文は少ない。
	応用研究・開発	△	→	・ 森林資源量が限られており、林業が必ずしも中心産業でなく大きな動きは見当たらない。
カナダ	基礎研究	◎	↗	・ 世界の森林面積の10%を占める豊富な森林資源を活用した林業、木材産業が活発であり、林業分野で世界トップランキングのブリティッシュコロンビア大学（UBC）がある。
	応用研究・開発	◎	↗	・ 広大な国土の森林を管理する人工衛星によるリモートセンシングと航空機レーザ計測による森林管理技術、生産性の高い大型林業機械による伐採システム、世界一高い木造建築物等、世界をリードしている。
ニュージーランド (NZ)	基礎研究	◎	↗	・ 機械化により高い生産性を維持している。 ・ 品種改良により植栽後25～30年で伐採できるラジアータ松が人工林面積の9割を占めている。 ・ スマート林業の基礎研究はカンタベリー大学（UC）林業学部が担っている。
	応用研究・開発	◎	↗	・ 林業機械の開発、急傾斜での伐採・搬出、複数の林業機械による伐採工程のオートメーション研究で世界をリードしている。 ・ 応用研究の開発は民営化された森林研究所（SCION）と林産業の世界的企業TribbleForest社、スマート林業のベンチャー会社Emesen社、Interpine社が連携している。 ・ 大規模森林所有の林業会社があり、実証的な新技術導入の担い手となっている。 ・ NZと豪州、カナダの林業先進国が国際林業技術会議（ForestTECH）を2007年から開催している。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDS の調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ バイオマス発電・利用（環境・エネ分野 2.1.6）
- ・ 農林水産分野における気候変動適応・緩和（環境・エネ分野 2.2.12）
- ・ 農林水産ロボット（システム・情報分野 2.2.10）

参考・引用文献

- 1) FAO Global Forest Resources Assessment (2020)
- 2) 森林・林業統計要覧 2019, 林野庁編 (2019) : pp.216-222.
- 3) 令和元年度森林・林業白書, 林野庁編 (2020) : p.58, p.161, p.165.
- 4) 令和2年度森林・林業白書, 林野庁編 (2020)
- 5) 渡辺隆司「ウッドバイオリファイナー」『材料』61巻7号 (2012) : 668-674. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsms/61/7/61_668/_pdf/-char/ja (2021年2月4日アクセス) .
- 6) NEDO 技術戦略センターレポート TSC Foresight Vol.22 バイオマスからの化学品製造分野の技術戦略策定に向けて (2017)
- 7) 内閣府未来投資会議、成長戦略フォローアップ案、第41回配布資料、(2020)
- 8) 農林水産省、林業・木材産業の成長産業化に向けた取組みについて、未来投資会議構造改革徹底推進会合「地域経済・インフラ」会合（農林水産業）(第14回)、(2019)
- 9) 林野庁、「林業イノベーション現場実装推進プログラム」の公表について、農林水産業・地域の活力創造本部 (2019)
- 10) J. Klápšte et al., “Effect of trait’s expression level on single-step genomic evaluation of resistance to dothistroma needle blight”, *BMC Plant Biol.* 20, no. 1 (2020) : 205. doi : 10.1186/s12870-020-02403-6
- 11) M. Kubo et al., “Transcription switches for protoxylem and metaxylem vessel formation”, *Genes Dev.* 19 (2005) : 1855-1860. doi : 10.1101/gad.1331305
- 12) N. Mitsuda et al., “NAC transcription factors, NST1 and NST3, are key regulators of the formation of secondary walls in woody tissues of *Arabidopsis*”, *Plant Cell* 19 (2007) : 270-280. doi : 10.1105/tpc.106.047043
- 13) K. Yoshida et al., “Engineering the *Oryza sativa* cell wall with rice NAC transcription factors regulating secondary wall formation”, *Front Plant Sci.* 4 (2013) : 704-716. doi : 10.3389/fpls.2013.00383

- 14) H. Wang et al., “Mutation of WRKY transcription factors initiates pith secondary wall formation and increases stem biomass in dicotyledonous plants”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107, no. 51 (2010) : 22338-22343. doi : 10.1073/pnas.1016436107
- 15) Y. Uga et al., “Control of root system architecture by DEEPER ROOTING 1 increases rice yield under drought conditions”, *Nat. Genet.* 45, no. 9 (2013) : 1097-1102. doi : 10.1038/ng.2725
- 16) J. M. Guseman et al., “DRO1 influences root system architecture in Arabidopsis and prunus species”, *Plant J.* 89, no. 6 (2017) : 1093-1105. doi : 10.1111/tpj.13470
- 17) R. C. McGarry and G. Ayre, “Manipulating plant architecture with members of the CETS gene family”, *Plant Sci.* 188-189 (2012) : 71-81. doi : 10.1016/j.plantsci.2012.03.002
- 18) M. E. Eriksson et al., “Increased gibberellin biosynthesis in transgenic trees promotes growth, biomass production and xylem fiber length”, *Nat. Biotechnol.* 18, no. 7 (2000) : 784-788. doi : 10.1038/77355
- 19) H. W. Jeon et al., “Developing xylem-preferential expression of pdGA20ox1, a gibberellin 20-oxidase 1 from pinus densiflora, improves woody biomass production in a hybrid poplar”, *Plant Biotechnol. J.* 14, no. 4 (2016) : 1161-1170. doi : 10.1111/pbi.12484
- 20) A. Polle et al., “Engineering drought resistance in forest trees”, *Front. Plant Sci.* 9 : 1875. doi : 10.3389/fpls.2018.01875
- 21) E. N. Dort, P. Tanguay and R. C. Hamelin, “CRISPR/Cas9 gene editing : an unexplored frontier for forest pathology”, *Front. Plant Sci.* 11 (2020) : 240-255. doi : 10.3389/fpls.2020.01126
- 22) X. Ji et al., “Conferring DNA virus resistance with high specificity in plants using virus-inducible genome-editing system”, *Genome Biol.* 19 (2018) : 197. doi : 10.1186/s13059-018-1580-4
- 23) T. Zhang et al., “Establishing RNA virus resistance in plants by harnessing CRISPR immune system”, *Plant Biotechnol. J.* 16, no. 8 (2018) : 1415-1423. doi : 10.1111/pbi.12881
- 24) J. P. Wang et al., “Improving wood properties for wood utilization through multi-omics integration in lignin biosynthesis”, *Nat. Commun.* 9, no. 1 (2018) : 881-896. doi : 10.1038/s41467-018-03863-z
- 25) C. G. Wilkerson et al., “Monolignol ferulate transferase introduces chemically labile linkages into the lignin backbone”, *Science* 344, no. 6179 (2014) : 90-93. doi : 10.1126/science.1250161
- 26) P. Oyarce et al., “Introducing curcumin biosynthesis in Arabidopsis enhances lignocellulosic biomass processing”, *Nat. Plants* 5, no. 2 (2019) : 225-237. doi : 10.1038/s41477-018-0350-3
- 27) A. Eudes et al., “Biosynthesis and incorporation of side-chain-truncated lignin monomers to reduce lignin polymerization and enhance saccharification”, *Plant Biotechnol. J.* 10, no. 5 (2012) : 609-620. doi : 10.1111/j.1467-7652.2012.00692.x
- 28) A. Eudes et al., “Expression of a bacterial 3-dehydroshikimate dehydratase reduces lignin

- content and improves biomass saccharification efficiency”, *Plant Biotechnol. J.* 13, no. 9 (2015) : 1241-1250. doi : 10.1111/pbi.12310
- 29) S. Sakamoto et al., “Identification of enzymatic genes with the potential to reduce biomass recalcitrance through lignin manipulation in Arabidopsis”, *Biotechnol. Biofuels* 13 (2020) : 97. doi : 10.1186/s13068-020-01736-6
- 30) H. D. Coleman, J. Yan and S. D. Mansfield, “Sucrose synthase affects carbon partitioning to increase cellulose production and altered cell wall ultrastructure”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106, no. 31 (2009) : 13118-13123. doi : 10.1073/pnas.0900188106
- 31) Y. Yang et al., “Overexpression of a domain of unknown function 266-containing protein results in high cellulose content, reduced recalcitrance, and enhanced plant growth in the bioenergy crop populus”, *Biotechnol. Biofuels* 10 (2017) : 74. doi : 10.1186/s13068-017-0761-x
- 32) X. Kang et al., “Lignin-polysaccharide interactions in plant secondary cell walls revealed by solid-state NMR”, *Nat. Commun.* 10, no. 1 (2019) : 13118-13123. doi : 10.1038/s41467-018-08252-0
- 33) N. J. Grantham et al., “An even pattern of xylan substitution is critical for interaction with cellulose in plant cell walls”, *Nat. Plants* 3, no. 11 (2017) : 859-865. doi : 10.1038/s41477-017-0030-8
- 34) A. G. Brandon, D. S. Birdseye and H. V. Scheller, “A dominant negative approach to reduce xylan in plants”, *Plant Biotechnol. J.* 18, no. 1 (2020) : 5-7.f. doi : 10.1111/pbi.13198
- 35) Y. Liao et al., “A sustainable wood biorefinery for low-carbon footprint chemicals production”, *Science* 367, no. 6484 (2020) : 1385-1390. doi : 10.1126/science.aau1567
- 36) 飯塚堯介 (監修)『ウッドケミカルの技術』(東京：シーエムシー出版, 2000) : 11-31, <https://www.kinokuniya.co.jp/f/dsg-01-9784882319283>.
- 37) Eri Takata et al., “Acidic solvolysis of softwood in recycled polyethylene glycol system”, *BioResources* 11, no. 2 (2016) : 4446-4458, doi : 10.15376/biores.11.2..
- 38) Thi Thi Nge et al., “Isolation and characterization of polyethylene glycol (PEG) -modified glycol lignin via PEG solvolysis of softwood biomass in a large-scale batch reactor”, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, no. 6 (2018) : 7841-7848. doi : 10.1021/acssuschemeng.8b00965
- 39) 船岡正光 (監修)『木質系有機資源の新展開』(東京：シーエムシー出版, 2005) : 33-44, <https://iss.ndl.go.jp/books/R1000000002-I000007651679-00>.
- 40) 日本木材学会『木質の化学』(東京：文永堂出版, 2010) , http://shop.ruralnet.or.jp/b_no=05_83004118/.
- 41) D. Tarasov, M. Leitch and P. Fetihi, “Lignin-carbohydrate complexes : properties, applications, analyses, and methods of extraction : a review”, *Biotechnol. Biofuels* 11 (2018) : 269. doi : 10.1186/s13068-018-1262-1
- 42) Nicola Giummarella et al., “Nativity of lgnin carbohydrate bonds substantiated biomimetic synthesis”, *J. Experiment. Botany* 70, no. 20 (2019) : 5591-5601. doi : 10.1093/jxb/erz324
- 43) Yong Zhao et al., “Lignin-carbohydrate complexes (LCCs) and its role in biorefinery”, *J.*

Cleaner Production 253 (2020) : 120076. doi : 10.1016/j.jclepro.2020.120076

- 44) Danila Morais de Carvalho et al., “Enrichment and identification of lignin-carbohydrate complexes in softwood extract”, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 8 (2020) : 11759-11804. doi : 10.1021/acssuschemeng.0c03988
- 45) Petronela Kovacsova and Maria Antalova, “Precision forestry-definition and technologies”, *Sumarski List* 134, no. 11 (2010) : 603-611.
- 46) 加藤正人「レーザセンシングによるスマート精密林業」『精密工学会誌』85巻3号 (2019) : 232-235. doi : 10.11519/jfsc.131.0_86
- 47) Mikko Vastaranta, “Precision forestry in Finland, ICT Smart Precision Forestry with Laser Scanning, Finland-Japan Joint Symposium (3rd edition) , Tokyo”, University of Eastern Finland, <http://www.shinshu-u.ac.jp/institution/ims/topics/035e2e3ede79e2458d18f983cfd b3ce6.pdf> (2021年2月4日アクセス) .
- 48) Håkan Olsson, “Precision forestry in Sweden, ICT Smart Precision Forestry with Laser Scanning, Finland-Japan Joint Symposium (3rd edition) , Tokyo”, Shinshu University, https://www.shinshu-u.ac.jp/english/topics/research/finland-japan_joint_.html (2021年2月4日アクセス) .
- 49) FPIInnovations Forestry4.0 (2017) <https://www.youtube.com/watch?v=r4vhLQ8OEP0> (2021年2月4日アクセス) .
- 50) Jari Kinnunen, “Forest digitalization in Finland : Efficiency for forest planning and resource management”, 『次世代森林産業展2019「ICTスマート精密林業報告会」』, <http://www.forestrise.jp/2019/contents/seminar.php#same> (2021年2月4日アクセス) .
- 51) Trimble Forestry Logistics、<https://forestry.trimble.com/solutions/cflogistics/> (2020年9月14日アクセス)
- 52) Juha Kappi, “Increasing log value with collaborating harvest planning”, ForestTECHX, Vancouver, Canada (2018) , <https://foresttechx.events/ft18/> (2021年2月4日アクセス) .
- 53) Mikael Lund back, Carola Haggstrom and Tomas Nordfjell, “World trends in the methods and systems for harvesting, extraction and transportation of roundwood”, 6th International Forest Engineering Conference, Rotorua, New Zealand (2018) , <https://www.itto.int/events/event/id=5468> (2021年2月4日アクセス) .
- 54) John Arlinger and Johan Moller, “Effective use of harvesting machinery data”, ForestTECHX, Vancouver, Canada (2018) , <https://foresttechx.events/ft18/> (2021年2月4日アクセス) .
- 55) Rien Visser and Karl Stampfer, “Expanding ground-based harvesting onto steep terrain : A review”, *Croat. J. For. Eng.* 36, no. 2 (2015) : 321-331.
- 56) Keith Raymond, “Steep terrain harvesting developments including cable-assist and advanced yarder applications”, FEC2018, Rotorua, New Zealand (2018) , <https://www.itto.int/events/event/id=5468> (2021年2月4日アクセス) .
- 57) Hunter Harrill, “Cable Yarders and Rigging Configurations in New Zealand : A 2018 Update”,

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
バイオエコノミー

- 6th International Forest Engineering Conference, Rotorua, New Zealand (2018) , <https://www.itto.int/events/event/id=5468> (2021年2月4日アクセス) .
- 58) <http://1000.fungalgenomes.org/home/> (2021年2月4日アクセス) .
- 59) <http://www.cazy.org/> (2021年2月4日アクセス) .
- 60) H. Hamada et al., “An in planta biolistic method for stable wheat transformation”, *Sci. Rep.* 7 (2017) : 11443. doi : 10.1038/s41598-017-11936-0
- 61) A. K. Biswal et al., “Sugar release and growth of biofuel crops are improved by downregulation of pectin biosynthesis”, *Nat. Biotechnol.* 36 (2018) : 249-257. doi : 10.1038/nbt.4067
- 62) S. Sakamoto et al., “Complete substitution of a secondary cell wall with a primary cell wall in *Arabidopsis*”, *Nat. Plants* 4, no. 10 (2018) : 777-783. doi : 10.1038/s41477-018-0260-4
- 63) M. Notaguchi et al., “Cell-cell adhesion in plant grafting is facilitated by b-1,4-glucanases”, *Science* 369, no. 6504 (2020) : 698-702. doi : 10.1126/science.abc3710
- 64) Dana Michell, “USDA Forest Service Research to Assist the National Forest System”, 6th International Forest Engineering Conference, Rotorua, New Zealand (2018) , <https://www.itto.int/events/event/id=5468> (2021年2月4日アクセス) .
- 65) EU-EFFORTE <https://www.bbi-europe.eu/efforte> (2020年9月14日アクセス)
- 66) 林野庁のスマート林業構築実践事業令和元年度スマート林業構築普及展開事業事例集 https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/smart_forestry.html (2020年9月14日アクセス)
- 67) https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/attach/pdf/smart_forestry-33.pdf (2020年9月14日アクセス)
- 68) M. Lamara et al., “Genetic architecture of wood properties based on association analysis and co-expression networks in white spruce”, *New Phytol.* 210 (2016) : 240-255. doi : 10.1111/nph.13762
- 69) Q. Du et al., “Genome-Wide association studies to improve wood properties : challenges and prospects”, *Front Plant Sci.* 9 (2018) : 1912. doi : 10.3389/fpls.2018.01912
- 70) Y. Hiraoka et al., “Potential of genome-Wide studies in unrelated plus trees of a coniferous species, *cryptomeria japonica* (japanese cedar) ”, *Front Plant Sci.* 9 (2018) : 522-550. doi : 10.3389/fpls.2018.01322
- 71) Chiaki Hori et al., “Multi-omic Analyses of Extensively Decayed *Pinus contorta* Reveal Expression of a Diverse Array of Lignocellulose-Degrading Enzymes”. *Appl. Environ. Microb.* 84, no. 20 (2018) : e01133-18. doi : 10.1128/AEM.01133-18
- 72) L. Pollegioni, F. Tonin and E. Rosini, “Lignin-degrading enzymes”, *FEBS J.* 282, no. 7 (2015) : 1190-1213. doi : 10.1111/febs.13224
- 73) 梅澤究「糸状菌のセルロース分解系における酸化還元酵素に関する新知見」『木材保存』43巻3号(2017) : 120-130. doi : 10.5990/jwpa.43.120
- 74) Angel T. Martinez et al., “Oxidoreductases on their way to industrial biotransformation”, *Biotechnol. Advances* 35, no. 6 (2017) : 815-831. doi : 10.1016/j.biotechadv.2017.06.003
- 75) Bastien Bissaro et al., “Oxidoreductases and reactive oxygen species in conversion of

lignocellulosic biomass”, *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 82, no. 4 (2018) : e00029-18. doi : 10.1128/MMBR.00029-18

- 76) Sari Mannonen, “Wood-based biorefineries pave the way to successful bioeconomy, FAO, AFCSI meeting, Room (2018) ”, The Biofore Company : UPM, <http://www.fao.org/forestry/47194-096cb11406eb00e44a2712a059f89ee49.pdf> (2021年2月4日アクセス) .

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
バイオエコノミー