

## ミッション5：「高品位生存圏」 5-2) 脱化石資源社会の構築 (植物、バイオマス、エネルギー、材料)

飛松裕基、畑 俊充  
京都大学 生存圏研究所

### 1. 概要

本ミッションでは、「脱化石資源社会の構築」をキーワードに、ミッション 1-4 の研究成果をさらに発展・融合させ、生存圏科学の国際化とイノベーション創出を加速する強力な共同研究課題を推進する。令和4年度は、昨年度に引き続き、4つの主要テーマ：「バイオマス植物の分子育種と生物生産」、「革新的バイオマス変換技術」、「バイオマスをベースとした先端機能材料」、「マイクロ波エネルギー伝送技術の社会実装」を設定し、以下の研究課題8件を進めた。

### 2. バイオマス植物の分子育種と生物生産

課題 5-2-1. リグニン代謝工学に基づくバイオマス生産植物のテーラーメイド育種技術の開発（研究代表：梅澤俊明、飛松裕基；共同研究先：徳島大、奈良先端大、北海道大学、理研、産総研、香港大、高麗大学校、ウィスコンシン大、ワシントン州立大、ワーゲニンゲン大学、上海植物生理生態研究所、インドネシア科学院、米国ブルックヘブン国立研究所、仏トゥールース生物工學研究所、スペイン高等科学研究院、他）

本研究では、循環型社会構築を担うバイオマス生産植物の分子育種技術基盤の構築を目指し、リグノセルロース系バイオマスの主要成分であるリグニンを様々に改変した組換え植物の作出と各種バイオマス特性の評価を国内外の研究機関と共同で進めている。本年度は、前年度に引き続き、ゲノム編集等を活用したリグニン生合成遺伝子の発現制御により、リグニンの化学構造や量を改変したイネやポプラ組換え株の作出に成功し、細胞壁（特にリグニン）生合成に寄与する新規遺伝子群の同定に成功するとともに、それらの発現を制御した組換え植物のバイオマスの構造と各種特性を明らかにした。また、リグニン代謝工学に基づくバイオマス生産植物の分子育種に向け、イネやシロイヌナズナにおけるリグニン生合成機構の解析を国内外の研究グループと共同で進めた。

論文発表:[1] Afifi et al., Genome-edited rice deficient in two 4-COUMARATE:COENZYME A LIGASE genes displays diverse lignin alterations. *Plant Physiol.* 190, 2155–2172 (2022). [2] Martin et al., Lignocellulose molecular assembly and deconstruction properties of lignin-altered rice mutants. *Plant Physiol.* 191, 70–86 (2023). [3] Jeon et al., Pathogen-induced autophagy regulates monolignol transport and lignin formation in plant immunity. *Autophagy*, 19, 597–615 (2023). [4] 梅澤俊明、リグニン代謝工学によるイネ科バイオマス植物の育種 -リグニンの量と構造の改変-、*化学と生物*、60、565–572 (2022)。関連論文発表他4件。

課題 5-2-10. 植物の脂質分泌能を利用した物質生産プラットフォームの技術開発（研究代表：矢崎一史、杉山暁史、棟方涼介；共同研究先：理化学研究所）

植物は、脂溶性の物質を細胞外に分泌してアポプラストに蓄積する能力がある。特に表皮細胞は、ワックスなど高脂溶性物質を細胞外に分泌する機能を有するが、これは自らの体を乾燥

から守るために必須の能力でもある。通常、植物は培養細胞にすると、液体培地中で生育するため乾燥から身を守る必要がなくなり、この能力を失うが、ムラサキの細胞はこの脂質分泌能力を維持しており、M9培地中では脂溶性物質のシコニンを経細胞外に大量に分泌する。シコニンは単体で水系に混合すると速やかに結晶化するため、生細胞から分泌される際には何らかのマトリックス脂質と共存することで輸送／分泌されていると予想された。本年度は、そのマトリックス脂質の同定を行った。理化学研究所との共同研究で、ムラサキ細胞でリビドーム解析を行ったところ、153 の脂質分子を検出し、クラスごとに分けて分泌率を算出した。その結果、全脂質分子の中で最も分泌率が高かったのが、貯蔵脂質として知られるトリアシルグリセロールであることが分かった。さらに詳細に GC-FID を用いて TAG を構成する脂肪酸を調べたところ、分泌される TAG は 16:0 と 18:0 を主とする飽和脂肪酸で構成されており、細胞内に貯蔵される TAG は他植物と共通で不飽和度が高いことが判明した。飽和脂質の TAG が分泌されるという性質は、タバコ植物体においても同様に認められ、植物の表皮細胞が持つ共通の性質であることが示唆された。ムラサキは脱分化した培養細胞でありながら、表皮細胞の性質を維持していると考えられ、今後の応用展開が期待される。

論文発表:[1] Tatsumi et al., Excretion of triacylglycerol as a matrix lipid facilitating apoplastic accumulation of a lipophilic metabolite shikonin, *J. Exp. Bot.*, 74, 104-117 (2023). [2] Li et al., Inventory of ATP-binding cassette proteins in *Lithospermum erythrorhizon* as a model plant producing divergent secondary metabolites, *DNA Res.*, 29, 1-12 (2022). [3] Kiyoto et al., Improved chemical fixation of lipid-secreting plant cells for transmission electron microscopy, *Microscopy*, 71, 206-213 (2022). [4] 棟方涼介、矢崎一史、合成生物学を利用したメロテルペン類とアルカロイドの微生物生産、*植物の生長調節*、Vol.57, No.2, 93-99, (2022). 国内学会 3 件。

### 3. 革新的バイオマス変換技術

課題 5-2-3. マイクロ波・生物変換プロセスによるバイオマスの化学資源化（研究代表：渡辺隆司、西村裕志；共同研究先：大陽日酸、日鉄エンジニアリング、京大化研、京大エネ研、タイ国立科学技術開発庁（NSTDA）、チュラロンコン大、LIPI、Al-Azhar 大、ラオス国立大、他）

バイオディーゼルの副産物であるグリセロールをエタノールに高効率で変換する酵母をゲノム編集を利用して組換え株は、グリセロールとグルコースを同時にエタノールに変換するため、グリセロールを用いた植物バイオマスの酵素糖化前処理物からグリセロールと糖を分離することなく、直接エタノールを生産できる。この方法を、サトウキビ収穫廃棄物に適用するプロセスの開発を進め、高効率なバイオエタノール生産と抗ウイルスソルボリシグニンの同時生産に成功した。この研究は、ミッション 5-2 の他、タイ国立科学技術開発庁(NSTDA)、インドネシア科学院(LIPI)、ラオス国立大学、京都大学エネルギー理工学研究所、エネルギー科学研究科と共同実施している e-Asia 研究、未踏科学研究ユニットの持続可能社会創造ユニットの研究として実施している。e-Asia 研究では、サトウキビ収穫廃棄物の前処理、糖化酵素、乳酸およびイソブタノール生産菌の分子育種、リグニン系界面活性剤の合成、微生物によるキシロースからのキシリトールの生産研究を実施した。また、JASTIP プロジェクトでは、東南アジア地域からスクリーニングした白色腐朽菌による環境汚染物質である染料廃棄物の分解研究をインドネシア、マレーシアと行い、論文を発表した [1]。

論文発表:[1] Nurhayat et al., Bioprospecting three newly isolated white-rot fungi from Berbak-Sembilang National Park, Indonesia for biodecolorization of anthraquinone and azo dye. *Biodiversitas J. Bio. Divers.* 23, 613-623 (2022). [2] Nguyen, H. et al., Functional and structural characterizations of lytic polysaccharide monooxygenase, which cooperates synergistically with cellulases, from *Ceriporiopsis*

*subvermispora*, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 10, 923-934 (2022). [3] Chotirotsukon, C. et al., Microwave-accelerated glycerolysis of sugarcane trash using Lewis acid,  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ , for bioethanol production, *Ind. Crops Prod.*, 190, 115849 (2022). [4] Saito et al., Characterization of novel deep eutectic solvent, choline chloride/glutamic acid, as efficient solvent for lignin dissolution, *Chem. Lett.*, 51, 407-411 (2022). [5] Tokunaga Y., Watanabe, T., An investigation of the factors controlling the chemical structures of lignin dehydrogenation polymers, *Holzforschung*, 77, 51-62 (2022).

**課題 5-2-4. リグノセルロースの分岐構解析を基盤とした環境調和型バイオマス変換反応の設計**（研究代表：西村裕志、渡辺隆司；共同研究先：京都大エネルギー理工学研、京成大化研、群馬大学、富山県、他）

リグニンの利活用はバイオマス全体利用の鍵を握るが、現状は変性した低質リグニンの熱回収に留まっている。リグノセルロースの多様な分岐構造を解き明かし、分子構造に基づいてバイオマス変換法を設計することが、植物基礎科学の発展と、植物資源を活かしたサステナブル社会の実現につながる。特にリグニン・多糖間結合の解明は、バイオマスを化学品、材料、エネルギーへ変換する植物バイオリファインリーの構築への貢献が期待される。植物バイオマスを環境低負荷プロセスによって高付加価値素材へ変換するコア技術を国内及び国際特許出願した。これまで JST 戦略的創造研究推進事業 先端的低炭素化技術開発 ALCA (JPMJAL1504)、科研費若手研究 A(16H06210)により推進してきた。2022年度は NEDO 事業、複数の民間企業との共同研究、科研費挑戦的研究(萌芽 20K21333)、科研費基盤研究 B(21H02258)、JST 未来社会創造事業「分子構造に立脚した次世代リグノセルロース素材の創製」などの支援を受け研究開発を進めている。

論文発表：[1] 招待依頼講演：Hiroshi Nishimura, Fourier transform MS and NMR analyses of lignocellulose from forest trees, 2022.12.16, Finland-Japan Joint Seminar-Sustainable Water Management in Forested Catchment 他2件；国内学会等 6 件、国際学会 2 件；西村裕志(依頼分担執筆), バイオプロセスを用いた有用性物質生産技術, 3章5節 植物細胞壁の破碎・溶解法の検討と分析・評価 pp162-170, 技術情報協会 ISBN:978-4-86104-904-0.

#### 4. バイオマスをベースとした先端機能材料

**課題 5-2-5. セルロースおよびキチンナノファイバーを用いた成形品の開発**（研究代表：阿部賢太郎、矢野浩之）

植物から単離されるセルロースナノファイバー(CNF)の多孔質ネットワークで構成される「セルロースナノペーパー」は、軽量でありながら高い強度と靱性を備えた優れた機械的特性を示す。そのため、現在、カーボンナノチューブナノペーパーとグラフェンナノペーパーと並んで広く研究されている。我々も、セルロースナノペーパーの製造法やその詳細な力学特性に関する研究を精力的に行なっている。本年度は CNF とパルプを混抄したシートの湿潤特性について評価し、アルカリ処理で耐水性が大きく向上することを明らかにした。

[1] Liu et al., Reinforcement of dry and wet paper sheets by cellulose nanofibers. *Cellulose*, 30, 1-12 (2022). [2] Yang et al., Multifunctional cellulosic materials prepared by a reactive DES based zero-waste system. *Nano Lett.*, 22, 6128-6134 (2022). [3] Abe et al., Artificial lignification of a cellulose microfibril-based hydrogel and resulting effect on tensile properties. *Holzforschung*, 76, 9, 838-844 (2022).

**課題 5-2-6. バイオマスからのエネルギー貯蔵デバイスの開発(研究代表: 畑俊充、小嶋浩嗣; 共同研究先: リグナイト、インドネシア科学院 LIPI、他)**

CO<sub>2</sub>の吸着と蓄電機能を併せ持つバイオマス炭を製造するために、トドマツ材熱処理物のアンモニアとの反応性、生成物の賦活処理に伴う化学組成変化、および結合した窒素の挙動について検討した。実験により得られた各種活性炭の 0℃における CO<sub>2</sub> 吸着等温線、およびこの吸着等温線を解析したところ、水蒸気賦活を行ったトドマツ材熱処理物の表面積が最も高い値となった。水蒸気賦活 12 分保持、800℃18 分保持のトドマツ材熱処理物サンプルにおいて、電流密度を 20 mA/g, 50 mA/g, 100 mA/g, 200 mA/g に対して 518 F/g, 399 F/g, 323 F/g, および 299 F/g の比較的高い放電容量を示した。水蒸気による賦活条件の最適化により、高 CO<sub>2</sub> 吸蔵材としてリサイクル可能で優れた放電容量をもつ木質系電気二重層キャパシタ炭素電極の開発が可能であることが示された。

講演: 畑 俊充他, “トドマツ炭を原料とした CO<sub>2</sub> 吸着材と電気二重層キャパシタ電極の製造”オンラインとのハイブリッド開催, 第 20 回日本炭化学会研究発表会 2023.9.

**課題 5-2-11. 低地球軌道で利用するためのリグニン炭の微細空隙解析(研究代表: 畑俊充、飛松裕基、小嶋浩嗣; 共同研究先: 神戸大学工学研究科、長野工業高等専門学校、他)**

宇宙圏における木質の利用可能性を検討するため、ブナおよびスギから芳香核構造の異なるリグニン(MWL)を調製した。低軌道宇宙環境下で問題となる原子状酸素(AO)に対する抵抗性の付与を目的として、窒素気流下 1 時間 700℃保持して得られた上記のサンプルに、AO 照射を約 60 分間行った。透過型電子顕微鏡(TEM)観察により、炭化した MWL は均一な細孔径を持つ微細孔で構成されていることが明らかになった。AO 照射により炭素骨格に変化が生じ、微細孔径が大きくなり、孔径の分布幅が広がった。この結果は、含酸素官能基をあらかじめバイオマス炭に付加しておけば、AO 照射による微細孔径や孔径分布の広がりを抑制できることを示唆しており、今後の材料開発に有用な情報を提供するものである。

## **5. マイクロ波エネルギー伝送技術の社会実装**

**課題 5-2-7. マイクロ波無線電力伝送に基づく IoT 技術の実証研究(研究代表: 篠原真毅、三谷友彦; 共同研究先: パナソニック、ミネベアアツミ)**

空間伝送型ワイヤレス給電(WPT)に関し長年の努力が実を結び、2022 年 5 月に電波法の省令改正により 3 周波数帯での WPT が適法となり、社会実装が行えるようになった。省令改正を受け、本年度はこれまでに開発した IoT 用ワイヤレス給電センサーの社会実装を行った。パナソニックが「Enesphere」と名付けたワイヤレス給電センサーは 920MHz 帯での電波免許を取得し、販売を始めている。また今年度の省令改正は第 1 ステップと位置付けられ、屋内限定等の条件があるため、より広い WPT 応用を目指し、第 2 ステップとして屋外(トンネル内インフラ点検センサー)等の法制化の交渉も引き続き行っている。ミネベアアツミとの共同研究ではボルトセンサーの取り付けの小型 WPT 受電整流装置の開発を行っており、第 2 ステップの議論にフィードバックしている。

論文発表: Kawai, K., et al., “Novel Structure of Single-Shunt Rectifier Circuit with Impedance Matching at Output Filter”, *IEICE Trans. C, Vol.E106-C, No.2, pp.50-58, Feb. 2023*, 等 14 本; 英文監修書籍 1 冊, 監修書籍中国語訳 2 冊, 国際招待講演 18 件; 国際会議 18 件; 受賞(学生, 国際等)9 件; メディア発表: 42. '22.3.25 TV KBS 京都「京 bizX」他 24 件など。

以上