

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5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: 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、仏トゥールーズ生物工学研究所、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、シロイヌナズナ、ポプラ等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] Lam et al., Disruption of *p*-Coumaroyl-CoA:monolignol transferases in rice drastically alters lignin composition. *Plant Physiol.* in press (<http://doi.org/10.1093/plphys/kiad549>). [2] Dwivedi et al., Simultaneous suppression of lignin, tricetin and wall-bound phenolic biosynthesis via the expression of monolignol 4-*O*-methyltransferases in rice. *Plant Biotechnol. J.* in press (<http://doi.org/10.1111/pbi.14186>). [3] Lui et al., Regioselective stilbene *O*-methylations in Saccharinae grasses. *Nat. Commun.*, 14, 3462 (2023). [4] Zhu et al. SWATH-MS-based proteogenomic analysis reveals the involvement of alternative splicing in poplar upon lead stress. *Genome Res.*, 33, 371-385 (2023). 関連論文発表他 2 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 培地中では脂溶性の二次代謝産物のシコニン^①を細胞外に大量に分泌する。その量は乾重量あたり 10%にも及ぶ。本テーマではこのムラサキの持つ脂溶性物質分泌能力を利用した応用展開を考えている。本年度は、一旦原点に戻り、研究材料としているムラサキという絶滅危惧植物(2n=28)が、繁殖力の強い外来種で交配可能なセイヨウムラサキ(2n=28)との交雑種となっていないかを調べることにした。そこで、来歴の明らかな国内産ムラサキの残存株を全国に求め、そのゲノム解析を行った。そのゲノム情報を利用して、セイヨウムラサキを簡単に区別することができる PCR マーカーの開発を行った。セイヨウムラサキは、脂溶性物質であるシコニンの生産性が明らかに低い。ゲノム情報の整備が進展したことは、脂溶性物質の高生産を支える遺伝的原因を究明のための一助となるため、今後の研究発展につながるものと期待される。

論文発表：[1] Oshikiri, H., Li, H., Yamamoto, H., Yazaki, K., Takanashim K., Comparative analysis of shikonin and alkannin acyltransferases reveals their functional conservation in Boraginaceae, *Plant Cell Physiol.*, in press (doi: 10.1093/pcp/pcad158). [2] Ito, E., Munakata, R., Yazaki, K., Gromwell, a purple link between traditional Japanese culture and plant science, *Plant Cell Physiol.*, 64 (6), 567-570 (2023) (10.1093/pcp/pcad038).

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、金沢大融合研究域、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）

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により作出し、キシロースの代謝能を賦与した酵母との共培養により、サトウキビ収穫廃棄物のマイクロ波ソルボリシス前処理物からバイオエタノールと抗ウイルスソルボリシスリグニンを同時生産し、論文発表した [1]。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)、インドネシア国立研究革新庁(BRIN)、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、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た。BRINとの共同研究では、リグニン系界面活性剤の合成を行い論文発表した [2,3]。また、金沢大学との共同研究で、グリオキシル酸を用いたマイクロ波ソルボリシスにより木材を溶解してバイオマスフィルムを作出し、論文発表した [4]。JASTIP プロジェクトでは、東南アジア地域からスクリー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、マレーシアと行った。

論文発表：[1] Khattab, S. M. R. et al., Efficient integrated production of bioethanol and antiviral glycerolysis lignin from sugarcane trash, *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16, 1-15, (2023). [2] A. Karimah, I. K. et al., Extraction of lignin from sugarcane trash and its potency as biosurfactant, *Bioresource Technology Reports*, 24, 101630 (2023). [3] N.

N. Solihat et al., Synthesis of lignin-based biosurfactant derived from kraft black liquor and its effect on enzymatic hydrolysis of pretreated biomass, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 34 101152-101152 (2023). [4] Nishiwaki-Akine, Y., Watanabe, T., Dissolution and Hydrolysis of Wood Particles in Glyoxylic Acid without Ball Milling, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(6) 2050-2054 (2023).

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、京都大化研、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持続可能な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ナ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。2023 年度は JST 未来社会創造事業、NEDO 事業、複数の民間企業との共同研究、科研費(挑戦萌芽 20K21333, 基盤研究 B 21H02258)、などの支援を受け研究開発を進めている。

論文発表：[1]Nishimura, H., Watanabe, T., Matrix-Free Laser Desorption/Ionization Mass Spectrometry Imaging for Rapid Evaluation of Wood Biomass Conversion, *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2024 in press, DOI: 10.1002/rcm.9716. [2] Nishimura, H. et al., Direct evidence of æster linkages between lignin and glucuronoxylan that reveal the robust heteropolymeric complex in plant cell walls. *Research Square (preprint)*, doi.org/10.21203/rs.3.rs-1327348/v1. 招待講演 6 件、著書(依頼分担執筆)2 件.

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：矢野浩之；共同研究先：京都市産業技術研究所）

近年、プラスチックを取り巻く環境は大きく変化しており、世界的に脱プラスチックが声高に叫ばれている。しかし、プラスチックほど使い勝手の良い素材はなく、代替の利かないものは多い。これらの製品は、より環境負荷の少ないバイオ由来や生分解性プラスチックへの転換が求められている。我々は、いくつかの生分解性プラスチックに対しアセチル化セルロースナノファイバー(CNF)を添加することで、高い補強性を得られることを示した。また、添加した CNF が生分解性に与える影響を室内土壌試験により調査し、分解中において、CNF の存在が樹脂製品の形状の保持に役立っており、また、分解を促進している可能性が示唆された。

国内学会発表：小野和子他, CNF 補強による生分解性プラスチックの土壌試験における分解性, 第 31 回秋季大会 成形加工シンポジウム'23, 2023. 11.; 国際学会発表：Kazuko Ono et al., Effects of CNF Addition on Biodegradation in CNF-Reinforced Biodegradable Plastics, 5th ICC 2022+1, 2023. 9.

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）

CO₂ 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、木質ペレット由来ガス化残渣の賦活活性炭を製造し、二酸化炭素吸着により空孔径分布や表面積について検討した。元のガス化残渣、乾燥後 800°C・5 時間の熱処理、K₂CO₃ を試料重量比で 1:1、炭酸カリウムを加えた試料について 0°C における CO₂ 吸着等温線を得て、この吸着等温線の解析をおこなった。賦活剤を加えて熱処理を行ったガス化残渣、熱処理を行ったガス化残渣、元のガス化残渣の順で、表面積が大きくなった。今後、賦活条件の最適化により、高 CO₂ 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製造を行う予定である。

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）

宇宙環境、特に低軌道宇宙 (LEO) での材料耐性に着目し、木質材料の利用可能性を検討した。ブナとスギからリグニンモデル化合物 (MWL) を抽出し、これらに原子状酸素 (AO) 耐性を試験した。ブナとスギの MWL を 700°C、1 時間窒素気流下で加熱し、炭素化物を生成した。これに対し、フラックス 2×10^{15} atoms/cm²/s の AO 照射を 3Hz、15,002 ショット (約 83 分間) 行い、走査電子顕微鏡で材料表面を観察した。スギ MWL 炭素化物は AO による損傷を受けたが、ブナ MWL 炭素化物は高い耐性を示した。

論文発表：T. Hata, S. Honma, T. Kajimoto, K. Oshida, Y. Tobimatsu, M. Tagawa, H. Kojima, Subyakto, Microstructural changes in carbonized wood-lignin, a potential space material, in response to atomic oxygen irradiation, *Biomass Conversion & Biorefinery*, 2023.

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：ミネベアアツミ）

2022 年 5 月に電波法の省令改正により 3 周波数帯での空間伝送型ワイヤレス給電 (WPT) が適法となり、昨年度まで生存圏研究所と共同研究をしていたパナソニックは 2023 年に 5 件の WPT 商品の認可を受け、ビジネスを始めている。今後のより広い 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) やより高い周波数の利用等の法制化の交渉も引き続き行っており、ミネベアアツミとの共同研究では 24GHz 用レクテナの研究開発を始め、成果を得ている。

論文発表：Tanaka, Y., et al., "Simulation and Implementation of Distributed Microwave Wireless Power Transfer System", *IEEE Trans MTT*, vol.71, no.1, pp.102-111, 2023, 等 14 本; 国際招待講演 10 件; 国際会議 13 件; 受賞 (学生, 国際等) 10 件; メディア発表: 8, '23.8.4, The Government of Japan, "KIZUNA" (web), など.

以上