

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 6 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 6 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、巽奏; 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] Supatmi et al., Essential yet dispensable: the role of CINNAMATE 4-HYDROXYLASE in rice cell wall lignification, *bioRxiv* (<https://doi.org/10.1101/2024.10.08.617307>). [2] Takeda-Kimura et al., Altered development and lignin deposition in rice *p-COUMAROYL ESTER 3-HYDROXYLASE* loss-of-function mutants, *Plant J.* in press (<http://doi.org/10.1111/tbj.70039>). [3] Yamamoto et al., Disruption of aldehyde dehydrogenase decreases cell wall-bound *p*-hydroxycinnamates and improves cell wall digestibility in rice. *Plant J.* 120, 2828–2845 (2024). [4] Ishida et al., Expression of laccase and ascorbate oxidase affects lignin composition in *Arabidopsis thaliana* stems. *J. Plant Res.* 137, 1177–1187 (2024)
その他関連論文発表 3 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：棟方涼介、杉山暁史）

植物は、脂溶性の物質を細胞と細胞の隙間に分泌し、蓄積する。柑橘類を含むミカン科植物は分泌腔という球状の細胞間隙を果皮や葉表面に無数に発達させ、またセリ科植物は油管と呼ばれる管状の細胞間隙を植物体全体に有する。分泌腔や油管には植物が病害虫から身を守るための化学防御物質、また人の健康に資する生理活性物質が蓄積する。そのため、植物が蓄積に特化した細胞間隙を作る能力を明らかにすることは、作物や薬用植物の病害虫抵抗性の向上や生理活性物質の高蓄積に繋がる。しかしながら、分泌腔や油管といった細胞間隙の形成、また細胞間隙を囲う細胞で行われる脂溶性成分の生合成や間隙への分泌といった一連の現象を司る分子メカニズムの多くが未解明である。そこで、今年度はミカン科柑橘類及びセリ科ハーブを実験材料として、分泌腔や油管に蓄積する成分の生合成酵素遺伝子の解析を行った。特に、セリ科油管に蓄積する化学防御物質フラノクマリン類について、生合成上のカギ酵素であるプレニル化酵素を多様なセリ科植物種から単離・解析し、それらの触媒機構の一端を明らかにした。

論文発表：Han, J., Munakata, R., Takahashi, H., Koeduka, T., Kubota, M., Moriyoshi, E., Hehn, A., Sugiyama, A., Yazaki, K., Catalytic mechanism underlying the regioselectivity of coumarin-substrate transmembrane prenyltransferases in Apiaceae, *Plant and Cell Physiology*, 66, 1-14 (2025) (DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcae134>).

3. 革新的バイオマス変換技術

課題 5-2-4. リグノセルロースの分岐構造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；共同研究先：京都大エネルギー理工学研、京都大化研 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イ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ナ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 未来社会創造事業、NEDO 事業、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きた。2024年度は新たに JST ディープテック・スタートアップ国際展開プログラム、NEDO 官民若手事業、複数の民間企業との共同研究等を開始し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.* 38, e9716, 2024. [2] Kashimoto, R., Ohgitani, E., Makimura, Y., Miyazaki, T., Kimura, C., Shin-Ya, M., Nishimura, H., Pezzotti, G., Watanabe, T., Mazda, O. (2024). Lignin Isolated by Microwave-Assisted Acid-Catalyzed Solvolysis Induced Cell Death in Mammalian Tumor Cells by Modulating Apoptotic Pathways. *Molecules*, 29, 5490. 招待依頼講演 8 件、著書(依頼分担)2 件.受賞他：Innovation Research Award 2024 (IkedaSenshu bank), 9th FASTAR Award(Suntory) 2024.7 (SMRJ), Guest in a radio program @ Osaka MBS 2024.4.21, 2024.4.28.

4. バイオマスをベースとした先端機能材料

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）

バイオマス由来の活性炭をエネルギー貯蔵デバイスとして応用するため、木質ペレット由来のガス化残渣に賦活処理を施し、CO₂吸着能の向上を評価した。その結果、K₂CO₃を用いた細孔構造の最適化が、吸着効率および蓄電機能向上に寄与する可能性が示唆され、今後は賦活条件の最適化を進め、高い CO₂吸蔵能力と優れた放電容量を兼ね備えた電気二重層キャパシタ(EDLC)電極の開発を目指す。また、関連研究のレビューを行った結果、バイオマス由来活性炭の高効率合成法の開発と CO₂吸蔵能力の向上を進めるとともに、吸着-光触媒複合システムの構築による環境浄化とエネルギー貯蔵の両立が持続可能な炭素電極材料の応用展開に重要であることを確認した。

論文発表：[1] Fauzi, A.A.B., Chitraningrum, N., Budiman, I., Subyakto, Widyaningrum, B.A., Maheswari, C.S., Jalil, A.A., Hassan, N.S.B., Hata, T., Azami, M.S. B.M, A state-of-the-art review on lignocellulosic biomass-derived activated carbon for adsorption and photocatalytic degradation of pollutants: a property and mechanistic study. Environ Sci Pollut Res 31, 64453–64475 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35589-5>

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）

バイオマス由来の炭素材料を低地球軌道（LEO）環境下で応用するため、透過型電子顕微鏡（TEM）像と画像解析を用いてリグニン炭の微細空隙構造を解析し、原子酸素（AO）照射の影響を評価した。その結果、広葉樹由来のミルドウッドリグニン(H-MWL)は、酸素含有官能基の濃度が高いため、AOによる浸食耐性が相対的に高い一方、針葉樹由来のMWL(S-MWL)は、グアイアシル構造に起因してAO照射による空隙形成が顕著であり、劣化を受けやすいことが示唆された。TEM像の解析により、AO照射後のリグニン炭の層間距離の変化が確認され、特にS-MWLでは層状構造の乱れと微細空隙の増加が顕著に見られた。さらに、画像解析による空隙サイズ分布の評価から、AO照射後の空隙の拡大傾向が明らかとなり、AOがリグニン炭のナノスケール構造に与える影響が定量的に示された。今後は、TEM像のさらなる微細構造解析を進め、木材種の選定と炭化条件の最適化を行うことで、LEO環境での耐久性向上を目指した炭素材料の開発を推進する。

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：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、2024年6月の段階で14か所(建物内)262局の920MHz帯WPT基地局が設置され、運用されている。その一部は生存圏研究所と共同研究をしていたパナソニックによるものである。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いる、2024年度は次のWPTの展開を考えて携帯電話5Gと同じ周波数の28GHz帯でのビームフォーミング送電器の開発を行い、実証実験にも成功した。

論文発表：*Kawai, K., et al.*, “Design of a Second Harmonic Reradiating Rectenna Using Harmonic Source Pull”, IEEE Trans MTT, vol.72, no.10, pp. 6164-6173, 2024, 等 21 本；国際招待講演 10 件；国際会議 20 件；受賞（学生，国際等）9 件；メディア発表：8, '24.12.4, Nikkei Asia (web)「Japan takes first step toward space-based solar power supply」, など。

以上