

ミッション2：「太陽エネルギー変換・高度利用」

三谷 友彦

京都大学 生存圏研究所

1. 研究組織

代表者氏名：三谷友彦（京都大学 生存圏研究所）

共同研究者：今井友也（京都大学 生存圏研究所）

岸本崇生（京都大学 生存圏研究所）

篠原真毅（京都大学 生存圏研究所）

飛松裕基（京都大学 生存圏研究所）

畑 俊充（京都大学 生存圏研究所）

渡邊崇人（京都大学 生存圏研究所）

西村裕志（京都大学 生存圏研究所）

2. ミッション概要

本ミッションは、図1に示すように太陽エネルギーを変換して高度利用するために、マイクロ波応用工学やバイオテクノロジー、化学反応などを活用して、太陽エネルギーを直接に電気・電波エネルギーや熱などに変換する研究を進め、さらに、光合成による炭素固定化物であるバイオマスを紹介して、高機能な物質・材料に変換して有効利用する研究にも取り組む。期間内においては、特に高機能物質への変換を重点化し、要素技術のみでなく全体システムへの展開を目指す。

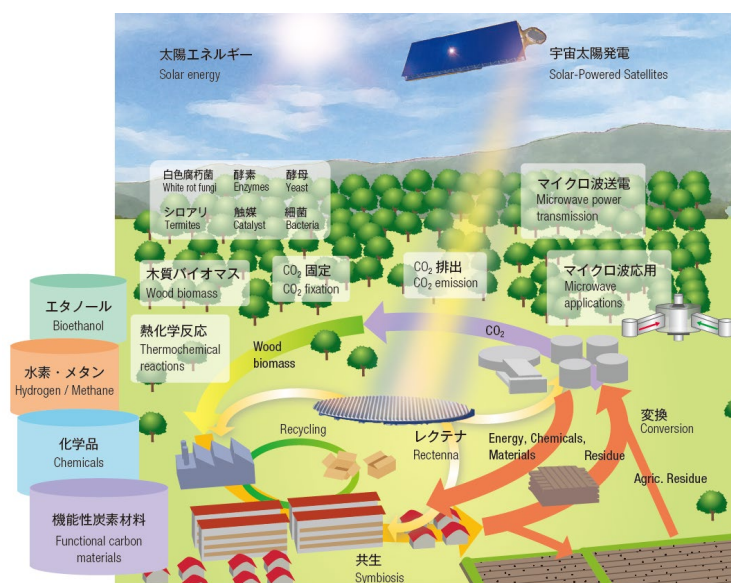


図1：ミッション2概要図

3. 今年度の取り組み

昨年度から継続して、「太陽エネルギー変換・高度利用」に資する、基礎的あるいは萌芽段階の研究課題の育成に主眼を置き、ミッション2活動の推進を図った。

主要テーマ① マイクロ波を利用した化学プロセスに関連する融合研究

- ・化学反应用マイクロ波加熱容器の研究開発

主要テーマ② : バイオマス生物変換に関連する研究

- ・PET リサイクル技術革新
- ・リグニン構造単純化によるイネ科バイオマスの高付加価値化
- ・バイオマスの資源化を志向したアシル化リグニンの化学構造解析
- ・環境汚染物質分解細菌の芳香族エステラーゼ系酵素の機能解析

4. 今年度の研究成果

1) 化学反应用マイクロ波加熱容器の研究開発

三谷友彦、勝田慎平、高原麦、篠原真毅（京大生存研）

昨年度に引き続き、電磁界結合と呼ばれる物理現象を利用した、マイクロ波加熱装置の設計開発を行った。今年度は、2周波数帯で活用できる電磁界結合型マイクロ波加熱の研究を実施した。915 MHz 帯／2.45 GHz 帯共用装置および 2.45 GHz 帯／5.8 GHz 帯共用装置を電磁界シミュレーションに設計し、試作実験により評価した。評価の結果、どちらの装置も蒸留水が室温から 80℃まで効率よく加熱できることを確認した。また、加熱領域の拡張を目指した 0 次モード共振器を利用した導波管内でのマイクロ波加熱装置を試作し、加熱範囲が一次元方向に伸長されることを実証し、本研究成果は原著論文として発表した。

成果発表：論文発表 1 件

B. Takahara, T. Mitani, N. Shinohara, Uniform Microwave Heating via Electromagnetic Coupling Using Zeroth-Order Resonators, IEICE Trans. Electronics., vol. E107-C, no.10, pp.340-348, 2024.

学会発表 3 件（国際会議 1 件、国内 2 件）

2) PET リサイクル技術革新

田所大輔、今井友也（京大生存研）

ポリプロピレンやポリエチレンテレフタレート（PET）などの合成高分子の難分解性は、マイクロプラスチックや海洋プラスチック問題の本質的な原因となっている。こ

れら汎用高分子の分解性は、持続可能な高分子利用にとって大変重要な観点だが、近年、PET を加水分解する酵素（PETase）が発見され、その PET 廃棄物処理への応用研究が盛り上がってきている。しかしその実用化のためには、分解効率のさらなる向上が求められている。

本研究では、PET 廃棄物処理法として PETase を利用するシステムの実用化を目指して、PET と同様の固体高分子であるセルロースの生分解システムを参考にして研究を進める。生存圏研究所マテリアルバイオロジー分野研究室では、セルラーゼやキチナーゼによりセルロースやキチンの高分子固体構造が崩壊する過程について研究を進めてきた実績があり [1-5]、セルラーゼと PETase の比較により、本質的な研究を進める。

二年度目となる今年度は、Fast-PETase [6]) による処理で PET の固体構造がどのように崩壊するのか、各種構造解析手法に基づき分析を行った。またセルロースの生分解では、特性の異なる複数の酵素が協調してセルロースの固体構造を壊すことが知られているため、Fast-PETase に加えて複数の PETase 酵素の発現系を構築した。次年度以降でこれらの PETase について、同様に PET 構造崩壊過程を分析する予定である。

成果発表： 国際学会発表 1 件、国内学会発表 1 件（the International Union for Pure and Applied Biophysics 2024、繊維学会年次大会）

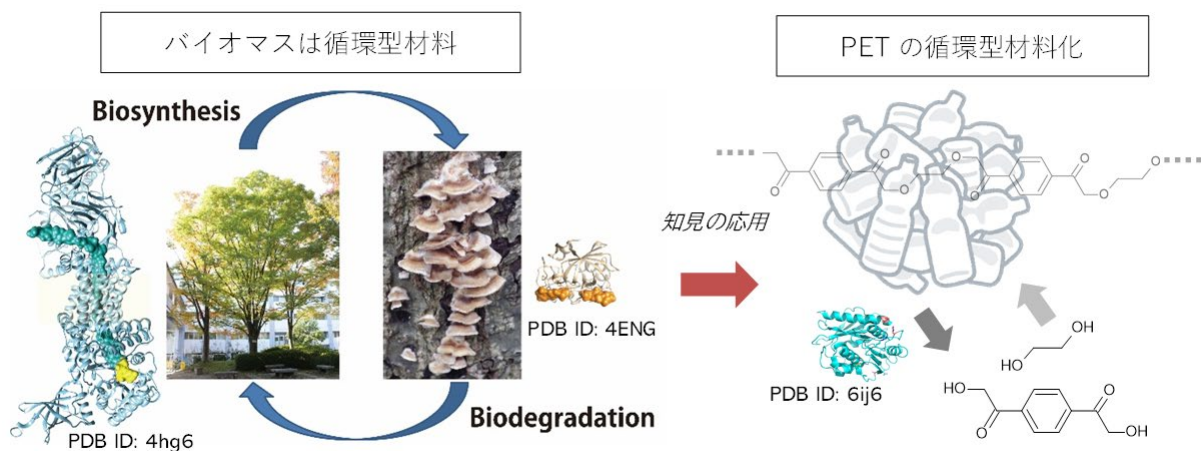


図 3 生物にまなぶ PET の循環型材料化

- [1] T. Imai, C. Boisset, M. Samejima, K. Igarashi, J. Sugiyama, Unidirectional processive action of cellobiohydrolase Cel7A on Valonia cellulose microcrystals, FEBS Lett. 432(3) (1998) 113–116. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(98\)00845-X](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(98)00845-X)
- [2] T. Imai, T. Watanabe, T. Yui, J. Sugiyama, Directional degradation of β -chitin by chitinase A1 revealed by a novel reducing end labelling technique, FEBS Lett. 510(3) (2002) 201-205. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(01\)03249-5](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(01)03249-5)
- [3] Y. Horikawa, N. Konakahara, T. Imai, A. Kentaro, Y. Kobayashi, J. Sugiyama, The structural

changes in crystalline cellulose and effects on enzymatic digestibility, *Polymer Degradation and Stability* 98(11) (2013) 2351–2356. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.08.004>

[4] Y. Horikawa, T. Imai, J. Sugiyama, Visualization of cellulase interactions with cellulose microfibril by transmission electron microscopy, *Cellulose* 24(1) (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1105-9>

[5] P.A. Penttilä, T. Imai, J. Hemming, S. Willför, J. Sugiyama, Enzymatic hydrolysis of biomimetic bacterial cellulose-hemicellulose composites, *Carbohydrate Polymers* 190 (2018) 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.051>

[6] H. Lu, D.J. Diaz, N.J. Czarnecki, C. Zhu, W. Kim, R. Shroff, D.J. Acosta, B.R. Alexander, H.O. Cole, Y. Zhang, N.A. Lynd, A.D. Ellington, H.S. Alper, Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization, *Nature* 604(7907) (2022) 662–667. [10.1038/s41586-022-04599-z](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04599-z)

3) リグニン構造単純化によるイネ科バイオマスの高付加価値化

Pingping Ji、山本千莉、梅澤俊明、飛松裕基（京大生存研）

大型イネ科植物は、その高いバイオマス生産性から各種バイオ化成品製造のためのリグノセルロース供給源として期待されている。しかし、イネ科植物のリグニンは、他の植物種と比較して、より多様な芳香核構造を持ち、このことがリグノセルロース利用の重要なボトルネックとなっている。当研究室では、リグニン生合成経路の代謝制御により、リグニンの芳香核組成を単純化した種々の形質転換イネ株の作出に成功している。本研究ではこれらのリグニン改変イネバイオマスの各種利用特性を解析し、リグニン構造単純化の効果を実証する。本年度は、リグニン中の G 型芳香核及び S 型芳香核含有率を高めた形質転換イネ株（図 3）のバイオマスについて、各種化学前処理を組み合わせた酵素糖化試験及びリグニン酸化分解試験を行い、各イネ株から、野生型と比較して高収率で目的とする分解産物が得られることを示した。得られた成果については、学会発表を行うとともに投稿論文の準備を進めている。

成果発表： 国際学会発表 3 件、国内学会発表 1 件（2024 Lignin Gordon Research Conference, 2024 Lignin Gordon Research Seminar, 2nd International Lignin Symposium, 第 75 回日本木材学会大会）

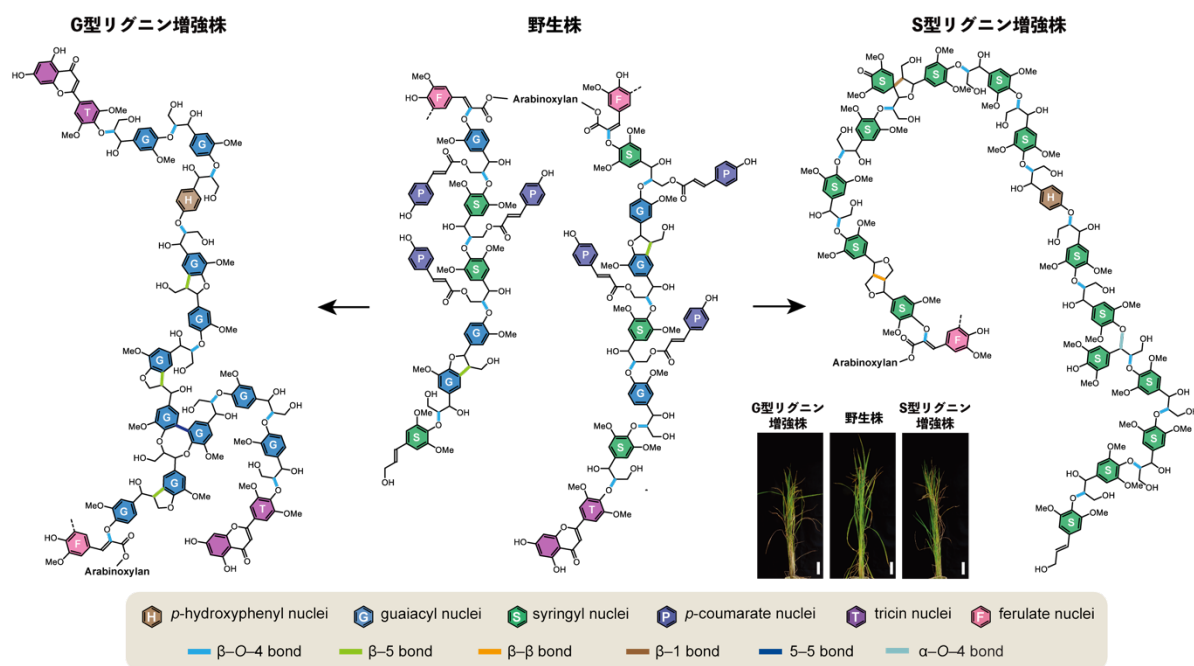


図 3：G 型及び S 型芳香核含有率を高めた形質転換イネのリグニン

4) バイオマスの資源化を志向したアシル化リグニンの化学構造解析

塩田 和樹¹、占部 大介¹、岸本 崇生²

(¹：富山県立大学工学部、²：京都大学生存圏研究所)

ケナフなどの非木材繊維やトウモロコシなどのイネ科植物のリグニンは、 γ 位の多くがアセチル基や *p*-クマロイル基などでアシル化（エステル化）されていることが知られている¹⁾。特にケナフの靱皮リグニンは、 γ 位の大部分がアセチル化されており、シリングル/グアイアシル比（S/G 比）や β -O-4 構造の割合が非常に高いという特徴がある²⁾。本研究では、これらのアシル化リグニンの特徴を生かしたリグニンの資源化や有用物質への変換につなげるため、モノリグノールの重合とリグニンの化学構造に及ぼすアシル基の影響の解明を目的とする。

西洋わさびペルオキシダーゼ（HRP）を用いて、アシル化モノリグノール（シナピルアセテートやコニフェリルアセテートなど）の脱水素重合を行い、HSQC NMR や化学分解法により、反応初期段階の脱水素重合物(人工リグニン:DHP)を解析し、配列（シーケンス）の解明を含め、形成されやすい部分構造の解明などに取り組んでいる。さらに、ケナフを栽培し、収穫時期の違いや、幹の先端部や根元部など部位の違いによるリグニンの構造の違いの解析を通じて、 β -O-4 構造などの化学構造とアシル基との相関の解明に向けて研究を続けている。

成果発表： 学会発表 1 件（国際会議 1 件）

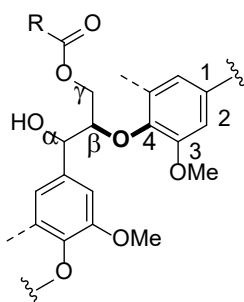


図 4 アシル化された β -O-4 構造

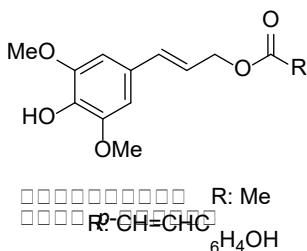


図 5 アシル化モノリグノール

1. Rio, C, J. et al. Highly acylated (acetylated and/or *p*-coumaroylated) native lignins from diverse herbaceous plants *J. Agric. Food Chem.*, **56**, 9525-9534 (2008).
2. Ralph, J. An unusual lignin from kenaf. *J. Agric. Food Chem.* **59**(4), 341-3342 (1996).

5) 環境汚染物質分解細菌の芳香族エステラーゼ系酵素の機能解析

渡邊崇人（京大生存研）

ポリエステル系プラスチックは、エステル結合を介してモノマーが重合することでポリマーを形成する。このポリマー中のエステル結合を切断する酵素（エステラーゼ系酵素）があれば、ポリエステル系プラスチックの分解に関与できる可能性がある。そこで、本研究では、申請者が保有する土壌細菌（環境汚染物質分解細菌 12 株，宇治キャンパスでスクリーニングしたテレフタル酸資化性細菌 7 株）にエステラーゼ系酵素を有する株が存在するかを調査した。その結果，*Pseudomonas* 属細菌ではポリブチレンアジペートテレフタレート (PBAT)，*Rhodococcus* 属細菌ではポリエチレンテレフタレート (PET) の分解に関与すると推定される酵素遺伝子を有していることが明らかになった。これらの酵素遺伝子の一部を対象に，クローニングおよび *Rhodococcus* 属細菌を用いた異種発現系での発現を試み，さらに，精製した発現酵素の活性測定を行った結果，芳香族エステラーゼとしての活性が確認された。今後は，基質特異性や酵素反応速度論的解析を行うとともに，裁断した廃プラスチックの分解能についても検討する予定である。

成果発表：学会発表（国内）2 件

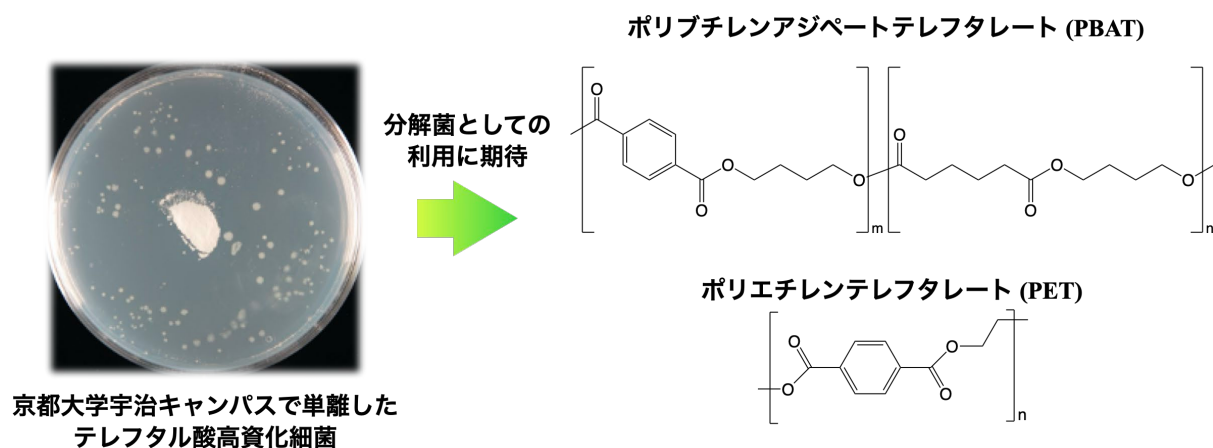


図 6：土壤環境に広く存在する菌にもプラスチック分解に利用できる酵素を有する可能性がある。

5. まとめと今後の展開

ミッション 2 では基礎研究から応用研究までを幅広く実施し、ミッション 2 が着目する研究領域を多面的に捉えてミッション研究を推進した。太陽エネルギーの高度利用は、生存圏科学を醸成する上でも重要なミッションであるとともに、持続可能な開発目標(SDGs)においてもエネルギー、インフラ・産業・イノベーション、陸上資源等に貢献する。