

令和 7 年 10 月 17 日
愛 媛 大 学
東 京 農 工 大 学

発光するバイオ素材を樹木で創る 分子生物学×光化学による新たな挑戦

愛媛大学大学院農学研究科高田 昌嗣准教授と東京農工大学大学院農学研究院生物システム科学部門梶田 真也教授の研究グループは、遺伝子組換え技術を用いて、樹木細胞壁を構成する成分である「リグニン」に新たな発色団構造を導入することに成功しました。本研究では、ポプラにおいて特定酵素の発現を制御して発光特性を持つ化合物「スコポレチン」をリグニン分子内に組み込むことで、発光性・光応答性を持つリグニンを樹木内で生成することに初めて成功し、持続可能な機能性バイオ素材の開発に向けた新たな道を拓きました。得られたリグニンは、高強度かつ消光しにくい発光特性に加え、pH 応答性や可逆的な光二量化反応など、特徴的な光機能を示しており、環境センシングやスマート材料への応用が期待されます。

【研究成果のポイント】

- ・ 遺伝子組換えにより、リグニンに新規発色団構造を導入
- ・ 高強度かつ消光しにくい発光特性、pH 応答性も示す
- ・ 可逆的な光二量化反応による光応答性の付加に成功

※ぜひ取材くださいますよう、お願いいたします。

本件に関する問い合わせ先

愛媛大学大学院農学研究科

生物環境学専攻森林資源学コース

准教授 高田 昌嗣

TEL : 089-946-9876

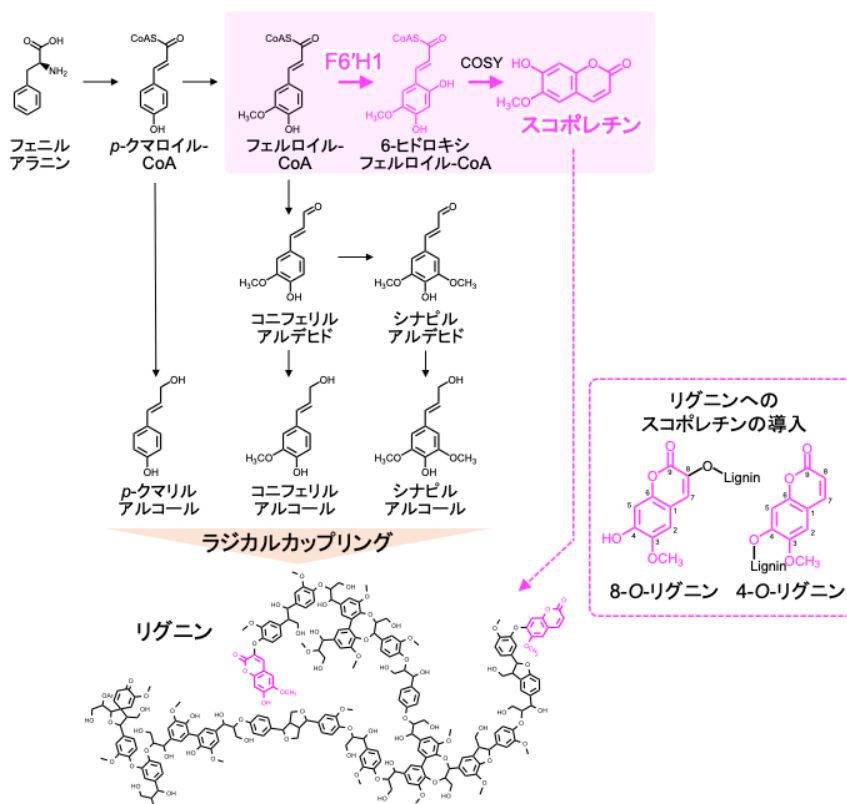
Mail : takada.masatsugu.qb@ehime-u.ac.jp

※送付資料 6 枚（本紙を含む）

1. 背景

リグニンは、樹木の細胞壁を構成する芳香族高分子であり、地球上で最も豊富な天然高分子の一つです。これまで、リグニンはセルロースやヘミセルロースとともにバイオマス資源として注目されてきましたが、その複雑な構造と難分解性のため、大半が熱源としての利用にとどまっており、より高付加価値な物質への変換が求められています。このような背景のもと、私たちの研究グループでは、リグニンが有する発光特性に着目し、局所的な濃度や硬さといった発色団周辺の環境を制御することで、発光強度や波長（色）を自在に調整する技術の開発に取り組んできました。発光特性の高度な制御が可能になれば、リグニンを原料とした微量センシング、バイオセンサー、波長変換材料など、天然由来の機能性材料の創製が期待されます。しかし、実用化に向けては、さらなる発光強度の向上、多彩な発光色の実現、消光しにくい特性の付与などが課題となっています。

近年では、リグニンの構造改変によって分解性や加工性を向上させる研究が進展しており、遺伝子工学を用いた構造制御も実現されています。たとえば、シリリングル（S）ユニットの比率を高めることでパルプ収率や糖化効率を向上させる技術や、分解されやすい結合を分子内に導入することで分解性を高める手法などが報告されています。しかし、これらの改変は主に「分解しやすさ」や「加工しやすさ」に焦点を当てたものであり、リグニンそのものを機能性材料として活用する視点はほとんどありませんでした。特に、リグニンの光学特性（紫外線吸収や発光）を活かした応用は未開拓であり、私たちはこの点に着目しました。



具体的には、リグニン生合成経路の中間体であるフェルロイル-CoA を、クマリン類の一種である「スコポレチン」に変換する酵素「Feruloyl-CoA 6'-hydroxylase (F6'H1)」の遺伝子をポプラに高発現させることで、リグニン分子内にスコポレチン構造を導入しました(図 1)。スコポレチンは優れた発光特性と特徴的な光反応性を有しており、これをリグニンに組み込むことで光機能の大幅な向上が期待されます。本研究では、得られたリグニンの光学的特性を詳細に解析しました。

図1 リグニン前駆物質の生合成経路とF6'H1高発現によるリグニンへのスコポレチンの導入

2. 実験方法

本研究では、発光性を持つ化合物「スコポレチン」をリグニン分子内に導入するため、スコポレチンの前駆体であるフェルロイル CoA を水酸化する酵素「F6'H I (Feruloyl-CoA 6'-hydroxylase)」の遺伝子を、ポプラ (*Populus tremula* × *P. tremuloides*) に導入しました。得られた遺伝子組換え植物からリグニンを抽出し、各種溶媒およびポリマー中での発光特性を評価しました。

3. 実験結果

3.1) スコポレチン導入による発光特性変化

F6'H I 遺伝子を導入したポプラ由来のリグニンは、明瞭な発光を示し、発光波長が長波長側へシフトしました。特に、F6'H I を高発現した系統 (#6) では、通常のリグニンが示す紫外域 (約 367 nm) から、可視光域 (約 450 nm) へのシフトが確認されました。これは、スコポレチン構造がリグニン分子内に組み込まれたことによるものであり、単なる添加では得られない構造的変化を示しています (図 2)。また、蛍光寿命測定により、波長シフトがエキシマー形成によるものではなく、分子内に新たな発色団構造が形成されたことが示唆されました。これは、リグニンの発光特性を分子設計レベルで制御できる可能性を示す重要な知見です。

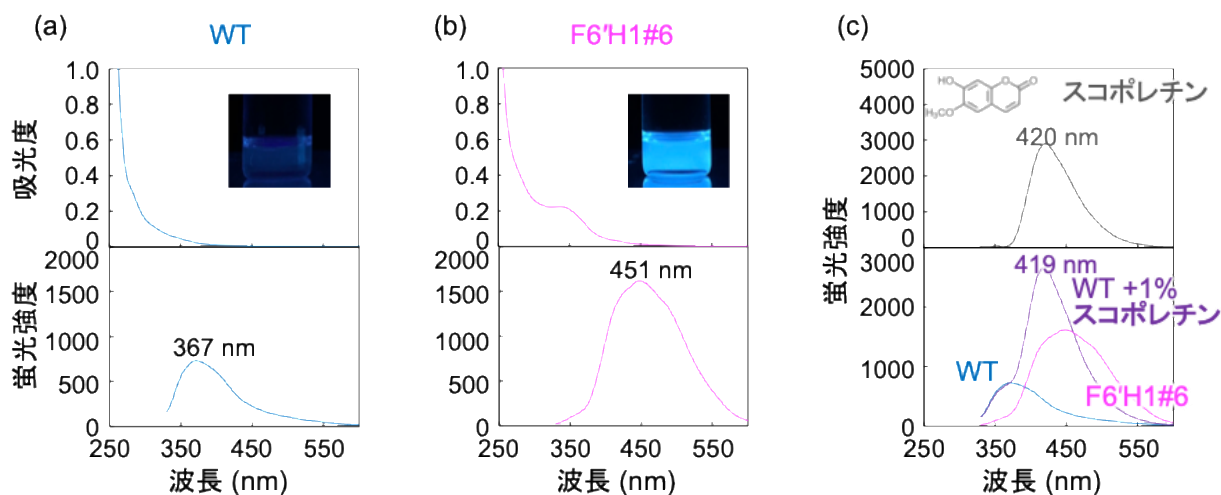


図 2 (a) 通常のポプラ (WT) および (b) F6'H I 高発現系統ポプラから単離したリグニンの DMSO 溶液中での紫外線吸収スペクトルおよび蛍光スペクトル (励起波長 320 nm)。 (c) スコポレチン単体および、WT リグニンにスコポレチンを添加した際の DMSO 溶液の紫外線吸収スペクトルおよび蛍光スペクトル

3.2) 溶媒依存性と分子内分布：限定的な消光

従来のリグニンは、疎水性溶媒中で凝集し、蛍光が消失する「消光現象」が課題とされてきました。しかし、F6'H I 導入リグニンは、非極性溶媒 (例: *n*-ヘキサン) 中でも明瞭な発光を維持し、スコポレチンが分子内に均一に分布していることが示唆されました。また、サイズ排除クロマトグラフィーによる解析では、発光団構造が広範な分子量分布に存在しており、特定の低分子に偏っていないことが確認されました。これは、スコポレチンがリグニンの末端構造としてランダムに導入されていることを示し、分子内での距離が保たれることで消光が抑制されていると考えられます (図 3)。

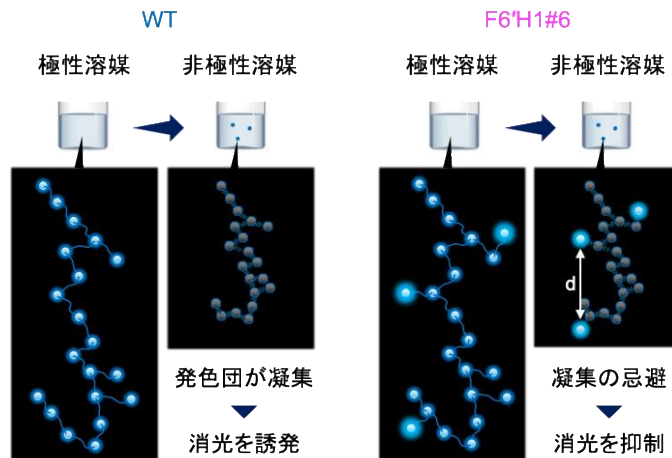


図3 WT および F6'H1 高発現系統における発色団分布のイメージ

3.3) ポリマー中での発光：実用材料への展開可能性

F6'H1 導入リグニンは、高濃度条件下でも発光を維持し、さらにポリ(メチルメタクリレート)やポリビニルアルコールなどのポリマー中に分散させた透明フィルムでも発光が確認されました。特に、スピンコート法により作製した超薄膜では、溶媒が除去された状態でも明瞭な発光が得られ、実用的な光材料としての応用可能性が示されました。また、フィルム作成時の溶媒(DMF と CHCl_3)によって発光強度が変化することも確認され、ポリマーとの相互作用や分散状態が発光特性に影響を与えることが明らかになりました。これは、材料設計において溶媒やポリマーの選択が重要な因子となることを示しています。

3.4) pH 応答性：環境応答型発光材料としての可能性

スコポレチンはフェノール性水酸基を持つため、pH によって吸収・発光特性が変化します。実験では、アルカリ条件下 ($\text{pH}=11$) で発光強度が約 10 倍に増加し、酸性条件下 ($\text{pH}=3$) では減少することが確認されました。これは、スコポレチンの脱プロトン化に起因するものであり、環境応答型蛍光材料としての応用が期待されます (図 4)。

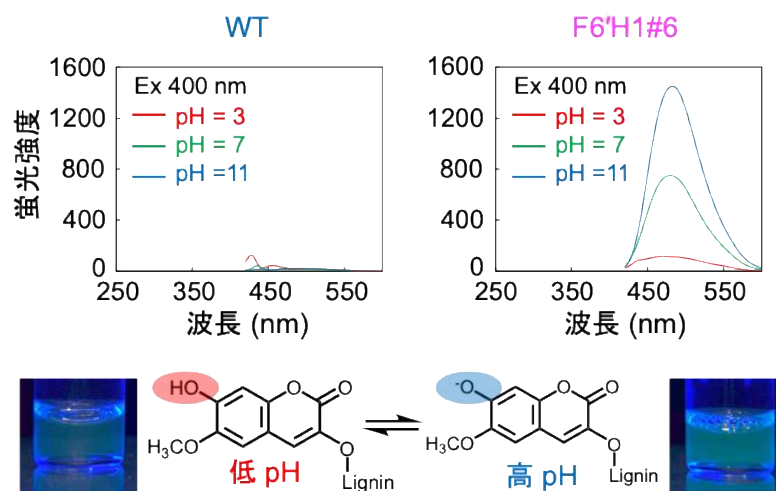


図4 WT および F6'H1 高発現系統から単離したリグニンの pH が異なる水溶液中での発光特性

3.5) 光二量化反応特性：光応答性構造の獲得

スコポレチンは、特定波長の光照射（365 nm）により光二量化し、254 nm の光で元の構造に戻る可逆反応を示します。この現象は、F6'H I 導入リグニンにおいても確認され、天然高分子であるリグニンが光応答性を獲得した初の報告となりました（図5）。この可逆反応は、形状記憶材料、光制御型ゲル、蛍光タグ、さらには3Dプリンティングなど、先端材料分野への応用が期待されます。今後、異なるクマリン誘導体の導入によって反応性や選択性を制御することも可能であり、分子設計による機能性材料開発の新たな道が拓かれます。

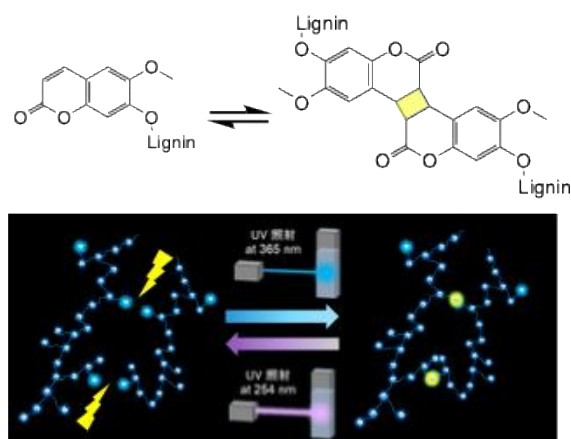


図5 可逆的な光二量化反応のイメージ

4.まとめ：未利用バイオマスの高機能化と光材料への展望

本研究は、リグニンに新たな発光性構造を遺伝子工学的に導入することで、未利用バイオマスの高機能化を実現した世界初の試みです。これにより、リグニンは単なる副産物ではなく、光機能を持つ高付加価値材料としての利用が可能となります。今後の展望として、以下の応用が挙げられます。

- ・ 蛍光センサーやスペクトル変換材料への応用：リグニンの発光特性を活かした蛍光センサーや、太陽光の波長変換材料としての利用が期待されます。
- ・ 光応答性ポリマーの開発：スコポレチンの光二量化を利用した光応答性ポリマーや、形状記憶材料への応用が可能です。
- ・ 環境負荷の低い光機能材料の創出：木質バイオマス由来のリグニンを活用することで、持続可能な社会に貢献する環境調和型材料の開発が進むと考えられます。

本研究は、バイオマス資源の新たな価値創出に貢献するものであり、今後の材料科学、環境技術、バイオテクノロジー分野において大きな波及効果が期待されます。

【論文情報】

掲載誌：Plant Biotechnology Journal

題名：Photoluminescence properties of lignin with a genetically introduced luminophore in a transgenic hybrid aspen that overproduces feruloyl-CoA 6-hydroxylase (フェルロイル CoA 6'-ヒドロキシラーゼ遺伝子高発現により発色団を導入したポプラリグニンのフォトルミネッセンス特性)

著者：Masatsugu Takada, Shota Horinouchi, Naning Wang, Mikiko Uesugi, and Shinya Kajita

DOI：10.1111/pbi.70390

URL：<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pbi.70390>

【研究サポート】

本研究は、科学研究費補助金(22K14927、25K00088)、創発的研究支援事業(JPMJFR2277)、JST 共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)(JPMJPF2104)の助成を受けました。

【本件に関する問い合わせ先】

(研究に関するお問い合わせ先)

愛媛大学大学院農学研究科

准教授 高田昌嗣

電話：089-946-9876

E-mail：takada.masatsugu.qb@ehime-u.ac.jp

(報道に関するお問い合わせ先)

愛媛大学 総務部広報課

TEL：089-927-9022

E-mail：koho@stu.ehime-u.ac.jp

東京農工大学 総務課広報室

Tel：042-367-5930

E-mail：koho2@cc.tuat.ac.jp