

報道関係各位

2025年 9月 8日
茨 城 大 学

【プレスリリース】

**窒素欠乏条件下におけるシアノバクテリアと根粒菌の共培養によるバイオマス増加に成功
～新たな共培養システムの開発・評価により経済的・持続的なバイオフィナリーを可能に～**

茨城大学 学術研究院 応用生物学野の朝山 宗彦教授の研究グループは、シアノバクテリア SZ2 と根粒菌 ST1 という、自然環境において共生関係にある微生物ペアを用いた新規共培養システムを開発し、バイオマス生産性の向上に成功しました。

これまで、微細藻類の単一培養では窒素欠乏条件下でのバイオマス生産が課題となっていました。それに対し、共培養システムのほとんどは人工的に組み立てられた微生物の組み合わせに依存しており、安定性や屋外培養の拡張性に懸念がありました。本研究ではこれらの課題を克服し、天然のペアによる共培養によりバイオマス生産の増加に成功しました。特に根粒菌 ST1 が生成するアンモニウムイオンがシアノバクテリア SZ2 の成長を促進する因子 (BIF: biomass-increasing factor) として機能することを示しています。

このシステムは、バイオ燃料やその他の有用な物質（糖質、脂質、タンパク質、色素等）生産のための、より経済的で持続可能なバイオフィナリープロセスへの応用可能性を提示しています。

この研究成果は、国際科学誌『*Applied Biochemistry and Biotechnology*』（Springer Nature 社）に採択され、2025年 9月 1日にオンライン掲載されました。

■背景

微細藻類やシアノバクテリアは、その高い光合成能力からバイオフィナリーの資源として広く利用されています。特に、シアノバクテリアや緑藻は、ジェット燃料や軽油の原料となるアルカン（炭化水素）やバイオディーゼルの原料となるトリアシルグリセロール (TAG: triacylglycerol, 中性脂肪) の合成に貢献します。しかし、藻類は有用な脂質や炭水化物などの高価値化合物の費用対効果の高い生産には有用である一方、単一培養においてバイオマス生産性が窒素欠乏条件下で低下するという大きな制約がありました。

そこで注目されてきたのが、微細藻類と非光合成微生物の共培養システムです。共培養システムは、バイオマス、脂質、糖、タンパク質、色素、水素ガスなどの生産を促進し、バイオレメディエーション技術を支援するなど、バイオフィナリーの応用において効果的なアプローチとして報告されています。しかし、これらのシステムのほとんどは人工的に組み立てられた微生物の組み合わせに依存しており、大規模な屋外運用における安定性や拡張性に懸念がありました。そのため、自然に共存する菌株に基づいた共培養システムの確立が、バイオフィナリーの効率向上と実用化に伴うリスク低減につながると考えられています。

また、アグロバクテリウム、アゾトバクター、リゾビウム、シノリゾビウム、エンシファーといった根粒菌は、窒素固定能力を持ち、植物にアンモニウムイオンを供給する「土壌」細菌として知られています。しかし、水生環境における根粒菌のアンモニウム生産能力やシアノバクテリアとの相互作用については、これまで報告がありませんでした。

このような背景のもと、研究グループは、自然環境から得られた「天然のペア」である糸状性のヘテロシスト非形成シアノバクテリア SZ2 と根粒菌 *Ensiferum Sinorhizobium* sp. ST1 を用いた新規な「水生」共培養システムを開発してきました（[特許参照](#)）。これまで細胞同士の相互作用に関する因子などについては不明でしたが、本研究ではその一端を明らかにしました。これは、同じ環境由来のシアノバクテリアと根粒菌の天然のペアの特定と相互作用のメカニズムに関する初めての報告です。

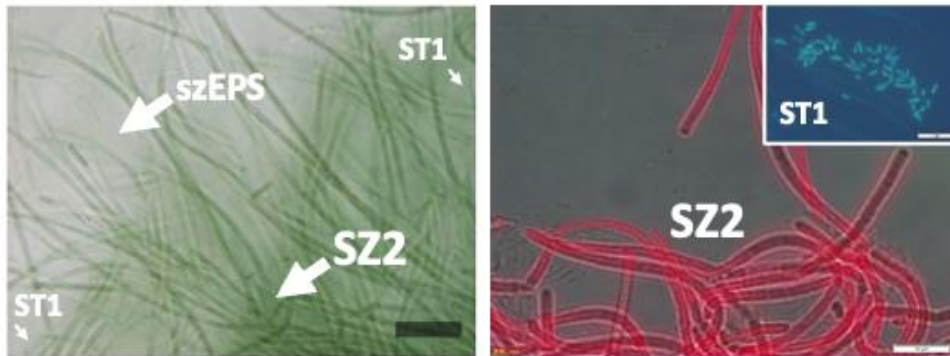


図1. シアノバクテリア SZ2 と根粒菌 ST1. 左:細胞の光学顕微鏡観察 (szEPS, SZ2 の細胞外多糖); 右:細胞の蛍光顕微鏡観察 (挿入図, ST1 は UV フィルター使用). 棒はそれぞれ 10 μm .

■研究手法・成果

本研究では、静岡県修善寺の石垣から湿った土壌サンプルを採取し、そこから糸状性のヘテロシスト非形成シアノバクテリア *Halomicronema* sp. SZ2 と根粒菌 *Ensifer/Sinorhizobium* sp. ST1 を「天然のペア」として単離しました (図1)。SZ2 はオリジナルで、ST1 細胞が共存するシアノバクテリア画分で混積重層法により一度プレート上で単離を試みて得られた SZ2 を SZ2*、更に、もう一度同様の方法で単離を試みて得られた SZ2 を SZ2-3* としましたが、SZ2*、SZ2-3* のいずれも ST1 が少量共存していました。これは、SZ2 と ST1 同士が強い絆で結ばれており、容易には分離できないことを意味しています。

SZ2 と ST1 の「天然のペア」を用いて、混合栄養条件 (coMC: co-culture under mixotrophic condition) と独立栄養条件 (coAC: co-culture under autotrophic condition) の両方で「水生」共培養システムを開発しました。coMC では、SZ2* と ST1 を、窒素欠乏培地 (BG11-N) と酢酸ナトリウムを含む 5L のタンクで 22 日間培養しました。coAC では、SZ2* または SZ2-3* と ST1 を、BG11 または BG11-N 培地 (50mL) で 7 または 10 日間、連続光照射下で静置培養しました。それぞれの培養条件下で生産されたバイオマスならびに各種物質の測定と分析を行い、結果を評価しました。

その結果、窒素欠乏条件下において、以下の重要な成果が得られました。

【① 共培養の種類】 coMC および coAC いずれにおいても共培養は可能でした。

【② バイオマス減少の克服】 coAC において、窒素が枯渇した状況下でもバイオマス増加が確認されました。

【③ 高価値化合物の生産増加】 coAC において、バイオマス生産を損なうことなく、ヘプタデカン ($\text{C}_{17}\text{H}_{36}$) を含む脂質、細胞外多糖 (EPS) を含む炭水化物、タンパク質、およびクロロフィル *a* 色素の生産が増加しました。特に、窒素欠乏条件下で ST1 が存在することで、 C_{17} -アルカンの生産量が約 1.3 mg/L-培養から約 4.3 mg/L-培養へと増加しました。

【④ SZ2 の細胞外多糖 (szEPS)】 SZ2 細胞は窒素欠乏下で大量の szEPS を生産し、SZ2 バイオマス (糖生産) 増加に貢献していることが明らかとなりました。

【⑤ アンモニウムイオン (BIF) の役割】 根粒菌 ST1 がアンモニウムイオン (NH_4^+) を生産し、これが SZ2 のバイオマス増加に寄与するバイオマス増加因子 (BIF) として機能することを発見しました。窒素欠乏条件下では、ST1 は培養液中の溶存 N_2 ガスを窒素固定によってアンモニウムイオンに変換している可能性が示唆されました。 さらに共培養上清 (coBG11-N) を SZ2 培養に添加することで、バイオマスが 1.64 倍、クロロフィル *a* が 2.32 倍増加し、BIF 効果が確認されました。アンモニウムイオンは BIF として硝酸イオンよりも優れた効果を示しましたが、至適濃度 (約 1~5 ppm) を超えて高濃度 (約 > 20 ppm) になると、かえって成長阻害因子となる可能性も示されました。

【⑥ 共存メカニズムへの洞察】 窒素固定をする場合、ニトロゲナーゼという酵素が活躍しますが、この

酵素は酸化的条件下を嫌うので、より嫌気的な条件が必要とされます。通常、根粒菌は植物の根に共生する時に“根粒 (root nodule)”を形成し、その中の嫌気的な条件下で窒素固定をしてアンモニウムイオンを生産します。本共培養では、シアノバクテリア SZ2 側から発生する酸素は、根粒菌 ST1 のニトロゲナーゼ能を低下させる要因となりますが、窒素飢餓下では細胞外多糖 (szEPS) が豊富に生産されて SZ2 の細胞表面が覆われることで、SZ2 側から発生する酸素の水中拡散を防ぎ、ST1 のニトロゲナーゼ酵素の窒素固定能への悪影響を緩和する可能性が考察されました。一方、SZ2 から放出される有機化合物 (szEPS を含む) が、ST1 のアンモニウム生産活動を促進するエネルギー源となる可能性も考えられます。

このように、本共培養システムでは、これまで知られていなかったシアノバクテリアと根粒菌の水中でのユニークな相互作用により、窒素欠乏条件下でもバイオマス増産が可能になることが明らかになりました (図 2)。

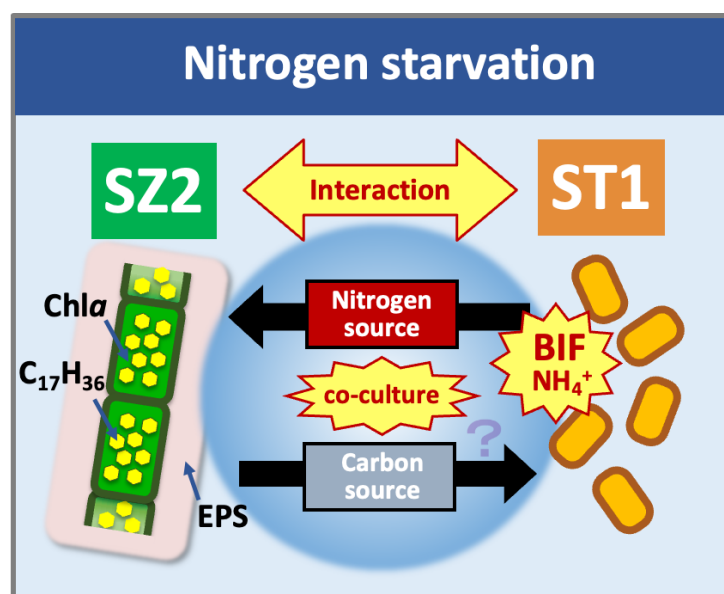


図 2. シアノバクテリア SZ2 と根粒菌 ST1 の共培養によるバイオマス増加の効果

■今後の展望

本研究で明らかにされた共培養生産システムは、窒素欠乏条件下での従来の単一種細胞培養の欠点を克服し、将来の経済的かつ実用的なバイオリファインリーに適した基盤情報を提供しています。今後は、ST1 の窒素固定能力の評価ならびに、窒素枯渇条件下での SZ2 の窒素固定能力の有無について検証し、より一層の窒素固定メカニズムの解明が望まれます。また、アンモニウムイオン生産経路を強化する戦略を追求するとともに、アンモニウムイオン以外のバイオマス増加因子 (BIF) についても探究していきたいと考えています。これらの取り組みを通じて、共培養ダイナミクスへの理解を深め、より効率的で持続可能な次世代バイオリファインリー技術開発へ貢献していきたいと願っています。

■論文情報

タイトル: Co-Culture of Cyanobacteria and Rhizobia, Increasing Biomass Under Nitrogen-Starvation Conditions

著者: Akari Takagi†, Nanako Machida†, Misato Nagao, Yu Kanasaki, Munehiko Asayama*
 (†Contributed equally, *Correspondence)

雑誌: Applied Biochemistry and Biotechnology

公開日: September 1, 2025 (Online publication)

DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-025-05353-7>

■関連特許

- (1) 発明の名称 「混合液混合種培養によるバイオ燃料生産技術」
特許第6603305号
登録日 2019. 10. 18

■研究グループ

茨城大学：

住所：〒300-0393 茨城県稲敷郡阿見町中央 3-21-1

応用生物学野（農学部）分子遺伝学研究室 教授 朝山宗彦

URL：<https://www.agr.ibaraki.ac.jp/search/researcher/?id=49&ls=dd>

本件に関するお問い合わせ先

< 報道関係のお問い合わせ >

茨城大学 広報・アウトリーチ支援室

TEL：029-228-8008 FAX：029-228-8019

E-mail：koho-prg@ml.ibaraki.ac.jp