

ゼロカーボンバイオ産業創出の基盤となるタンパク質繊維試作品の完成

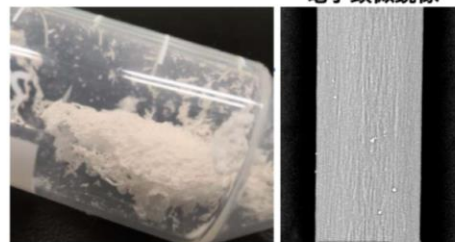
○概要

京都大学大学院工学研究科の沼田圭司教授（理化学研究所環境資源科学研究センターバイオ高分子研究チーム・チームリーダー）は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）「共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）「研究開発型スタートアップ支援事業／シード期の研究開発型スタートアップに対する事業化支援(STS)」の支援を受け、Spiber 株式会社、Symbiobe 株式会社と協同で、海洋性紅色光合成細菌をもとにゼロカーボンタンパク質繊維（Air Silk）の作出に成功しました（図1）。安価で大量生産される化学繊維は、石油等を原料に合成され、製造から廃棄までの過程において多くの二酸化炭素を排出します。紅色光合成細菌は、大気中の二酸化炭素と窒素を固定します。今回、遺伝子組み換え技術によりクモ糸シルクタンパク質を合成する海洋性紅色光合成細菌をつくりだすことに成功しました。さらに、その海洋性紅色光合成細菌を効率良く培養する方法を確立し、細菌から抽出・精製したタンパク質を部分的に利用することで、繊維化することに成功しました。主原料を化石資源に頼らず、二酸化炭素を固定しながら生産することができるタンパク質繊維は、化学繊維に代わる新たな選択肢として、持続可能な次世代繊維産業に貢献することが期待されます。

クモ糸シルクタンパク質生産 (海洋性紅色光合成細菌培養)



クモ糸シルクタンパク質 精製・紡糸



新素材の開発
Air Silk



図1 | 光合成細菌を使用した Air Silk の開発

1. 背景

私たちの生活において、繊維は不可欠な素材であり、衣類のみならず様々な用途に使用されています。安価で大量生産が可能な化学繊維は石油を原料として合成され、その製造から廃棄までの過程において多くの二酸化炭素を排出します。他方、ウールやコットンなどの天然繊維は、飼育・栽培に土地や飼料・肥料、農薬、水などの資源を必要とし、供給量にも限りがあるため、希少かつ高価になりやすいという欠点もあります。これらの課題を解決する持続可能な繊維生産の実現に向けて、様々な微生物の培養によりタンパク質等の原料を生産し、それを利用して繊維化・製品化する研究開発・実用化が進められています。タンパク質は、その主鎖骨格に炭素と窒素を含むため、生産過程において、炭素源と窒素源を安定的に供給するシステムが必要となります。

海洋性紅色光合成細菌は、光合成により二酸化炭素 (CO_2) を固定し、同時にニトロゲナーゼにより大気中から固定した窒素 (N_2) と海水中のミネラル成分を利用しながら増殖します (図2)。また、形質転換法の開発・実証も進められており、様々なバイオ高分子の生産への利用が見出されてきたことから、大気中の CO_2 と N_2 を利用した環境負荷の低い物質生産システムとして期待されています。沼田圭司教授の研究室では、海洋性紅色光合成細菌を用いて様々なバイオ高分子を生産する研究を進めてきており、クモ糸シルクタンパク質の生産にも成功しています。クモ糸シルクは、軽量かつ強靱で、生分解性や生体適合性にも優れていることが知られていますが、クモの大量飼育は、技術的にも困難なため、微生物培養によるクモ糸シルクタンパク質の生産を目指しています。今回、紅色光合成細菌の特性を生かして、大気中の CO_2 (炭素源) や N_2 (窒素源) を資源として活用しながら、主原料を化石資源に頼らないゼロカーボンベースのタンパク質繊維を生産できることを見出しました。

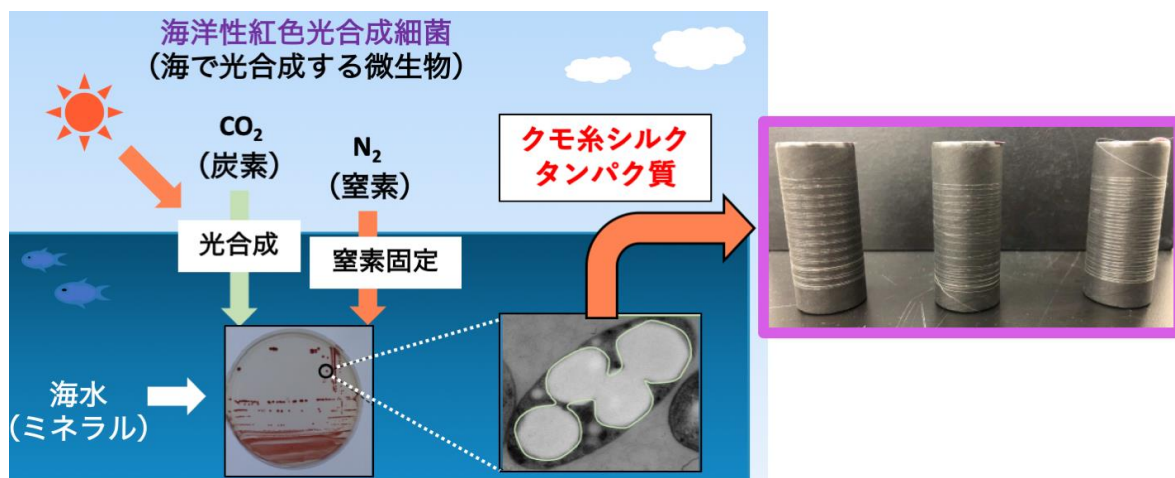


図2 | 海洋性紅色光合成細菌の特徴とタンパク質繊維

京都大学が代表機関を務め、京都府が幹事自治体を務める JST COI-NEXT「ゼロカーボンバイオ産業創出による資源循環共創拠点」事業では、天然資源である大気中の CO_2 や N_2 を固定する海洋性紅色光合成細菌を有効利用する技術を基盤に、温室効果ガスの削減と同時に様々な製品や有用物質を生産する資源循環型物質生産プラットフォームの構築を進めることで、地球環境の保全及び持続可能な開発目標 (SDGs) に貢献することを目指しています。また、地域に根ざしたゼロカーボンバイオ産業の創出を進めています。

2. 研究手法・成果

JST 戦略的創造研究推進事業 ERATO（京都大学大学院工学研究科材料化学専攻沼田研究室及び理化学研究所環境資源科学研究センターバイオ高分子研究チームが参画）、Symbiobe 株式会社で培った技術を応用し、海洋性紅色光合成細菌の最適な培養条件を確立しました。また、紅色光合成細菌の光合成に適した人工光を照射しながら、海水条件下での培養を可能にしました。

まず、紅色光合成細菌内で、クモ糸シルクを構成するタンパク質の合成を試みました。遺伝子組換え技術により、ジョロウグモのシルク成分である MaSp タンパク質をコードする遺伝子を最適化し、発現用遺伝子ベクターに挿入したのち、紅色光合成細菌の細胞内に導入しました。次に、実際にクモ糸シルクタンパク質が紅色光合成細菌の細胞内で発現することを生化学的手法で確認しました。10L 量の連続培養を行い、クモ糸シルクタンパク質を発現する紅色光合成細菌を安定して生産しました。複数回の集菌、破碎、抽出精製を繰り返し、高純度のクモ糸シルクタンパク質を生成しました（図3）。

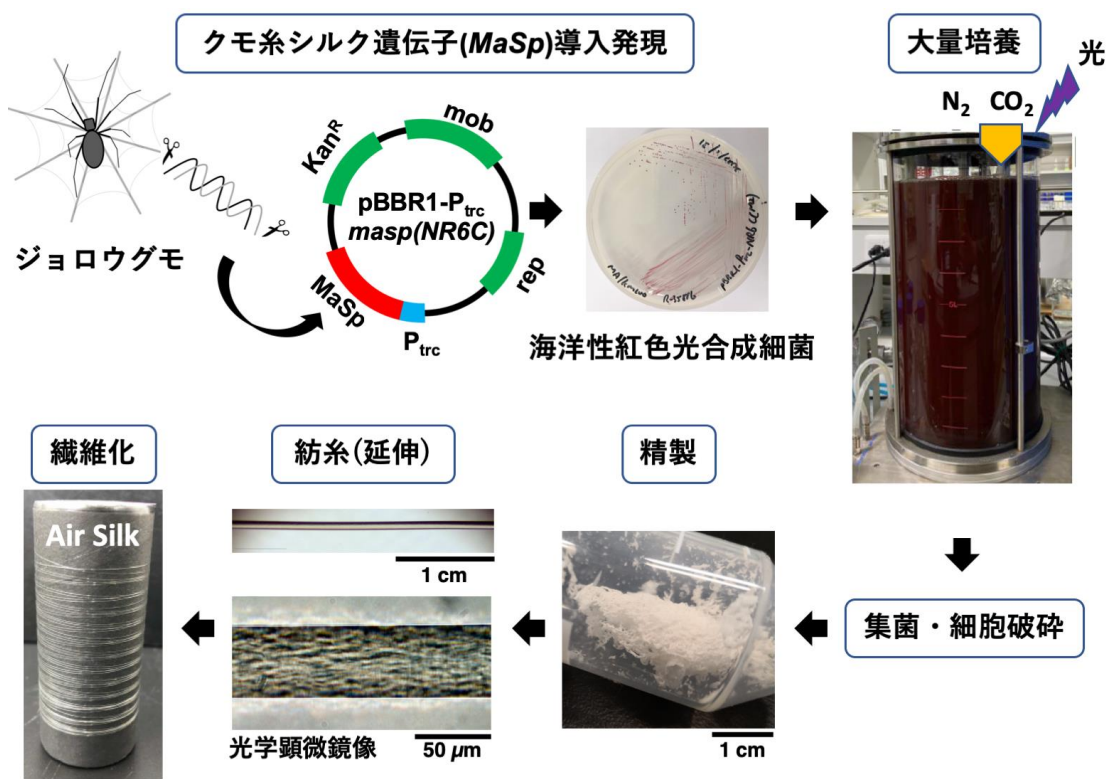


図3 | 光合成細菌から生成されたクモ糸シルクタンパク質

この手法を用いて生産したクモ糸シルクタンパク質を、Spiber 株式会社で製造した人工タンパク質と混合した上で、Spiber 株式会社の紡糸装置を用いて紡糸（繊維化）し、これを Air Silk と名付けました（図4）。これらの結果は、大気中の二酸化炭素と窒素から生産した紅色光合成細菌由来のゼロカーボンタンパク質繊維が、石油等から生産される化学繊維の代替品となる可能性を示唆しています。



図4 | 紅色光合成細菌由来タンパク質を用いて紡糸した繊維

3. 波及効果、今後の予定

今回、海洋性紅色光合成細菌をベースにした環境に優しいタンパク質繊維の生産に成功しました。これまで主流であった石油から生産された化学繊維に代わるサステナブルな繊維の新たな選択肢として、次世代繊維産業への貢献が期待されます。今後、海洋性紅色光合成細菌の培養スケールの拡大を進めることで、ゼロカーボンタンパク質繊維の生産拡大とそれを用いたものづくりが可能になります。今後も、産学官の連携のもと、地域に根ざしたゼロカーボンバイオ産業創出による資源循環共創拠点の形成が進展していくことが期待されます。

4. 研究開発プロジェクトについて

本プロジェクトは、主として以下の事業の支援のもと進められました。

(1) 国立研究開発法人科学技術振興機構

共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT) 地域共創分野・育成型

「ゼロカーボンバイオ産業創出による資源循環共創拠点」

- ・代表機関 京都大学
- ・幹事自治体 京都府
- ・幹事企業 株式会社島津製作所

<https://www.zero-carbon.saci.kyoto-u.ac.jp/>

https://www.jst.go.jp/pf/platform/file/r3_kyotengaiyou_2114.pdf

(2) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構

研究開発型スタートアップ支援事業／シード期の研究開発型スタートアップに対する事業化支援(STS)「光合成細菌を用いたバイオ高分子・農業用窒素肥料生産技術の開発」

<用語解説>

- ・海洋性紅色光合成細菌

約 1-2 μm ほどの大きさで、赤紫色の楕円形を示す非硫黄型紅色光合成細菌。近赤外光のもと二酸化炭素を利用して非酸素発生型の光合成を行う。また、大気中の窒素をニトロゲナーゼで固定して生育する。