



平成 29 年 1 月 16 日

科学技術振興機構（JST）
神戸大学
奈良先端科学技術大学院大学
立命館大学

太古に出現した細菌が植物光合成の仕組みを完成させていた！

ポイント

- 40億年にも及ぶ生物進化の中で、光合成の代謝系がどのように誕生したのか、また、その進化的な原点は何だったのかということは、これまで不明でした。
- 地球誕生後の極めて初期に地球上に出現し、光合成を行わないメタン産生菌に、光合成においてCO₂から糖を合成するための代謝経路の原型を発見しました。
- 進化の過程で、光合成代謝に関わる各遺伝子が現在のものに進化してきた分子機構が明らかになり、さらには光合成機能を活用した食糧やバイオ燃料生産の増産につながることを期待されます。

JST 戦略的創造研究推進事業において、神戸大学の蘆田 弘樹 准教授と河野 卓成学術研究員、立命館大学の松村 浩由 教授らは、光合成でCO₂から糖を合成する生物機能の進化的な原型を、光合成を行わない原始的な微生物に発見しました。

光合成は、太陽光、水、CO₂から糖や炭水化物を作り出す、私たち人間を始めとする地球上の生物が生きていく上で欠かすことのできない生物の営みです。しかし、生物が進化の過程で、光合成の能力をどのようにして獲得したのか、またその進化的な起源については不明で、長い間、科学者の興味を惹いていました。

本研究グループは、光合成が誕生するよりも前に出現したと考えられているメタン産生菌が、光合成で働く遺伝子とよく似た遺伝子を持っていることを発見しました。これらの遺伝子から合成した酵素タンパク質の解析や生体内の代謝物質を調べ、取り込まれたCO₂の行方を明らかにするためのメタボローム解析を行うことで、糖や炭水化物を合成する光合成の代謝経路とよく似た原始経路をメタン産生菌が利用していることを明らかにしました。

本研究により光合成の原始的な代謝が明らかになったことから、今後、生物進化の過程でどのように光合成システムが完成されていったのかという、これまで科学が立ち入ることができなかった進化の謎が明らかになっていくと期待されます。また、さらに光合成の進化が明らかになることで、光合成機能を高度に改良・利用することができ、食糧やバイオ燃料の増産にもつながると期待されます。

本研究は、神戸大学、立命館大学、奈良先端科学技術大学院大学、ビルラ理工大学（インド）、大阪大学、静岡大学と共同で行ったものです。

本研究成果は、平成29年1月13日（英国ロンドン時間）発行のオンライン総合科学誌「Nature Communications」に掲載されました。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

戦略的創造研究推進事業 チーム型研究（CREST）、個人型研究（さきがけ）

研究領域：「藻類・水圏微生物の機能解明と制御によるバイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」（研究総括：松永 是 東京農工大学 学長）

研究課題名：「海洋性アーキアの代謝特性の強化と融合によるエネルギー生産」

研究代表者：跡見 晴幸（京都大学 教授）

研究期間：平成23年4月～平成28年3月

研究課題名：「バイオ燃料高生産のための炭素固定能を強化したスーパーシアノバクテリアの創成」

研究者：蘆田 弘樹（神戸大学 准教授）

研究期間：平成23年4月～平成25年3月

JSTはこの研究領域で、高い脂質・糖類蓄積能力や多様な炭化水素の産生能力、高い増殖能力を持つものがある藻類・水圏微生物に着目し、これらのポテンシャルを活かした、バイオエネルギー創成のための革新的な基盤技術の創出を目指しています。上記研究課題では、アーキアにおけるバイオマス分解およびバイオエネルギー生産に関わる機能の理解、強化および他生物機能との融合を進め、新機能を示す微生物の創成を行う研究を行いました。また、さきがけ研究課題では、光合成CO₂固定酵素の機能強化により光合成機能を改良したシアノバクテリアを創成し、これをバイオエタノール生産に応用する研究を行いました。

<研究の背景と経緯>

光合成は、生命を維持するうえでのエネルギー源になる糖や炭水化物を太陽光、CO₂、水から合成するもので、地球上のほとんどの生物が依存している生物機能です。地球誕生後の生物進化の過程で、光合成システムがどのように誕生し、確立されてきたのか、また、その進化的原点は何だったのか、という疑問には科学はまだ答えておらず、長い間、科学者の大きな興味を惹いていました。われわれはこれまで光合成を行わない納豆菌などの枯草菌がほとんどの光合成生物でCO₂固定^{注1)}を行っている酵素であるルビスコ（RuBisCO）^{注2)}の遺伝子とよく似た遺伝子を持つものの、そのRuBisCO様酵素はCO₂固定は行わず、光合成とは全く関係のない代謝経路中で働いていること、その機能はRuBisCOが担う反応のごく一部とよく似た反応に関わっていることを、世界に先駆けて解明し、2003年に米国の科学誌Scienceに発表しました。この研究成果は、地球上に光合成システムが誕生する以前の生物にまでさかのぼって考える光合成遺伝子進化研究に先鞭をつけました。ただ、枯草菌RuBisCO様遺伝子の由来やCO₂から糖を合成するためのRuBisCOが働く光合成カルビン回路が誕生してきた分子レベルでの説明までは到達しませんでした。光合成進化研究分野を創設する結果となり、今回の研究成果につながりました。

<研究の内容>

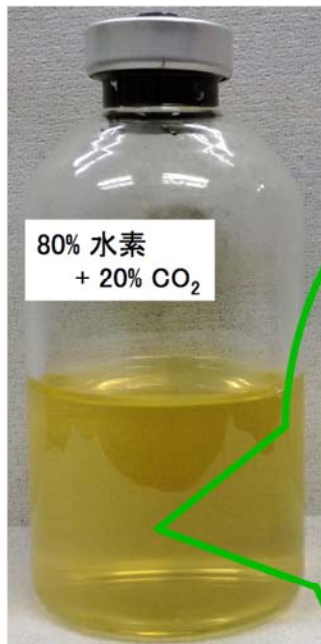
RuBisCOとホスフォリブロキナーゼ（PRK）^{注3)}はカルビン回路^{注4)}に特有の酵素です。蘆田准教授らのゲノムデータベースのバイオインフォマティクス解析から、これらの酵素の遺伝子が地球生命誕生後の極めて初期に出現したと考えられている極限環境微生物であるメタン産生菌^{注5)}（*Methanospirillum hungatei*）に存在していることを見いだしました。メタン産生菌は光合成を行わないにもかかわらず、光合成に特有な遺伝子を持っていたのです。さらに、これらの遺伝子を使って合成した酵素タンパク質はカルビン回路で機能できる性質を持っていました。このメタン産生菌の遺伝子解析や詳細な生化学的解析と¹³C O₂を用いたメタボローム解析^{注6)}から、これら2つの酵素は、

メタン産生菌においては、カルビン回路の一部と多くのメタン産生菌が持つ独自の代謝経路を利用して、新規の還元的CO₂固定経路を作り上げていることを発見しました。この生物の進化的位置から考えて、このメタン産生菌で発見したカルビン回路様CO₂固定経路は、光合成カルビン回路の進化的原型となったものであると考えられます。

<今後の展開>

光合成の起源ともいえる新規で原始的な還元的CO₂固定経路の存在が明らかになったことから、今後の研究で、生物進化の過程でどのように光合成システムが完成されていったのかという、これまで科学が立ち入ることができなかった謎が明らかになっていくことが期待されます。40億年ほど前に地球に出現した初期生物は、500~1,000程度の数の遺伝子しか持ちませんでしたが、その後の40億年の生物進化の過程で、これらの数少ない遺伝子を複製、変異、配列挿入などの改変によって高等動物や高等植物が持つ25,000~35,000程の遺伝子を作り上げ、多様な環境に適応して生命を維持できるようになってきました。しかし、まだ、初期生物の遺伝子がどのような分子的な変化によって多様化したのかは不明です。今回の研究では遺伝子分子進化研究の第一歩として、40億年間のRuBisCOやPRKの進化の過程の関連付けに成功したことになります。今後の研究で、40億年間の遺伝子進化の機構が明らかになることによって、地球生物全体の進化機構、ひいては現在の生物の生存戦略の本質が見えてくると期待されます。さらに、温暖化問題、食糧問題、エネルギー問題などの地球環境問題を解決するために、植物や藻類の光合成機能の改良や利用が期待されています。RuBisCOやカルビン回路は、さまざまな局面で光合成速度を規定しているため、植物や藻類の光合成機能を改良するためのメインターゲットとされています。今回発見したRuBisCOとカルビン回路の進化的原型をさらに研究することで、光合成の機能改良にもつながり、これらの問題の解決に寄与すると期待されます。

<参考図>



メタン産生菌
Methanospirillum hungatei
培養液

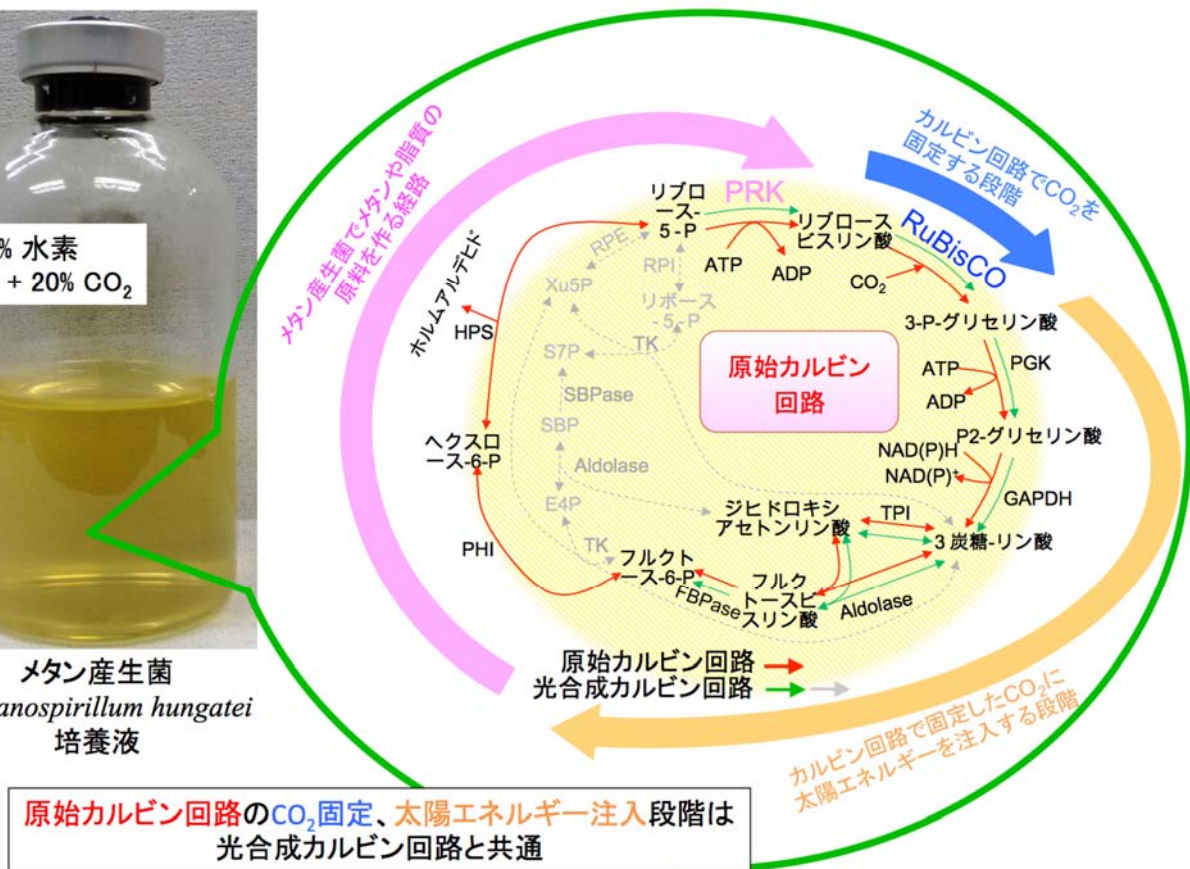


図1 メタン産生菌の原始カルビン回路

<用語解説>

注1) CO₂固定

植物や一部の微生物が空気中から取り込んだ二酸化炭素を有機化合物として生体内で留めておく機能。

注2) ルビスコ (RuBisCO)

カルビン回路において、CO₂の入り口となるCO₂固定段階で働く酵素タンパク質。その機能の悪さから、さまざまな局面で光合成の速度を規定している。

注3) カルビン回路

光合成において、取り込んだCO₂から糖を合成するための代謝経路。カルビン回路の名は、発見したカルビン博士に由来し、この発見によりカルビン博士は、1961年にノーベル化学賞を受賞している。

注4) ホスホオリブロキナーゼ (PRK)

カルビン回路において、RuBisCOがCO₂固定を行う際にCO₂分子の受け取り手として使われるリブローズビスリン酸を合成する酵素タンパク質。

注5) メタン産生菌

動物の消化器官や沼、海底堆積物、海底熱鉱床近傍や地殻内などに分布し、地球上で放出されるメタンガスの大半を生産している。メタンを産生する過程で生命エネルギーを獲得している。

注6) メタボローム解析

生体内の代謝産物を網羅的に検出、定量する実験手法。炭素 (¹²C) の安定同位体 ¹³C を用いて、炭素分子の代謝経路の同定にも利用される。

<論文タイトル>

“A RuBisCO-mediated carbon metabolic pathway in methanogenic archaea”

(メタン産生アーキアにおけるRuBisCOが機能する炭素代謝経路)

doi : 10.1038/NCOMMS14007