

## 第5期 第1回創発セミナー

### 「地球環境を支える植物と微生物の共生」報告

大隅基礎科学創成財団 理事

大谷清

大隅基礎科学創成財団は2021年10月21日午後4時から、「地球環境を支える植物と微生物の共生」という統一テーマのもと、オンライン（Zoom）方式で創発セミナーを開催しました。

冒頭、大隅良典理事長が「現在、地球環境、地球温暖化の問題は人類の未来を左右する大きな問題として国際的に広く関心を持たれています。地上の生態系は窒素と炭素の循環の上に成り立っています。今回は窒素循環で最も重要な窒素固定過程と、炭素循環に焦点を当て、お二人の講師から植物と微生物の関わりについてお話を伺って議論を深め、地球環境と生命の関わりについて考えていきたい」と挨拶、約150人の登録参加者との間で2時間にわたって講演と討論がおこなわれました。以下にその要旨を報告します。

#### 講演1

#### 陸上生態系を支える2つの共生

川口正代司

基礎生物学研究所共生システム研究部門 教授

地球は78%、窒素に覆われた惑星だ。火星や金星は95-96%がCO<sub>2</sub>、木星は93%が水素で覆われている。つまり窒素が生命に必須の元素ということが分かるが、これを直接利用できる生物、厳密にいうと真核生物はいない。利用できるのは原核生物、バクテリアだ。たとえばマメ科植物は根の中の細胞に根粒菌を取り込むことで大気中の窒素分子をアンモニアに変換することができる。



人類はおよそ100年前にハーバー・ボッシュ法という画期的な技術を開発して空気中の窒素を固定、アンモニアを作ってきた。この技術によって大量の窒素肥料が作られ、穀物生産が飛躍的に伸び、人類を飢饉や貧困から救ってきた。しかし残念ながらこの方法は高温高压（400-600℃、200-400気圧）のエネルギーを大量に消費することで大量の温室ガスを排出してしまう。

ハーバー・ボッシュ法を工業的窒素固定とすると、これと対照的なのがマメ科植物とバクテリアの共生による生物学的窒素固定だ。常温常圧のもとで窒素固定が行われる。田植え前の田に咲くレンゲソウは根に根粒菌を共生させ、これが窒素固定を行うことで土壌を肥沃にしてくれる。ただこの生物学的窒素固定も多量の光合成産物が必要で、レンゲソウやクローバーは葉で活発にCO<sub>2</sub>を吸収するために日当たりのいい場所に育つ。

マメ科植物は土壌細菌である根粒菌の感染によって「根粒」と呼ばれるコブ状の器官を根に形成、その中に共生するバクテロイドと呼ばれる根粒菌が窒素固定して生育する。根粒菌が感染するプロセスはまず根毛に根粒菌がくっつくと、それを根毛がカール状にとりこんで感染ポケットをつくり、そこから感染糸を伸ばして細胞内に取り込まれ共生が始まる。ちなみに根粒が赤いのは感染細胞にヘモグロビンが詰まっているからで、この植物ヘモグロビンは約80年前に日本の久保秀雄先生が発見した。

われわれはこの根粒共生のメカニズムをミヤコグサを使って分子レベルで探った。ミヤコグサはカルスからの個体再生能力が高くゲノムも比較的小さいので、分子遺伝学解析には優れた形質を持つマメ科のモデル植物。特に岐阜県に生息するものが世界的な標準になっている。1990年代当時、ミヤコグサで分子遺伝学解析を行うには分子遺伝地図が描けていないこと、栽培には大型の屋外温室が必要なこと、などが課題としてあった。そこで私は岐阜のミヤコグサの交配パートナーになる別の地域のミヤコグサを探し、宮古島に自生する早咲きミヤコグサを系統化し使うことにした。

そしてミヤコグサの共生変異体や窒素固定変異体を単離、根粒菌を感染させて窒素固定や根粒形成の全身制御にかかわる遺伝子を特定した。マメ科植物は根粒菌との共生により大気中の窒素を利用することができるが、それには多くの生体エネルギーが消費されるため、根粒の数を適正に制御している。つまり根粒の数を制御することが成長には重要であることが分かった。根粒過剰着生変異体を用いて、根粒の数が根と葉の間の遠距離コミュニケーションにより制御される分子メカニズムも解明した。ただ植物が根の感染や窒素情報をあえて「葉」に伝達する理由は分かっていない。

もう一つの共生としてアーバスキュラー菌根菌 (AM 菌) との共生を調べてみた。根粒形成のごく初期にかかわる宿主遺伝子の多くは、植物にリンを与える AM 菌との共生にも必須であることがわかった。AM 菌は陸上植物の科の約 80%が共生する最も普遍的な共生菌だ。リンは ATP (アデノシン 3 リン酸) に代表されるように生体エネルギーのもとになるもので、AM 菌はそのリンを集めて植物に与えてくれる重要な役割を果たしている。

AM 菌は 4 億年前の化石から発見されており、そのルーツは植物が海から陸上に上がる時に AM 菌の支援を受けたのが始まりではないかといわれている。また AM 菌には宿主特異性がなく、菌糸で植物個体をつなぐことができるのも特徴だ。

残念ながら AM 菌は植物に共生しない限り次世代を残せず、培養できないが、培養容器内 (in vitro) では近年、特に日本でいくつかの先端研究がされている。我々の研究室でも植物ホルモンと脂肪酸による AM 菌の次世代胞子の誘導に成功し、研究を進めている。

以上、根粒菌では窒素分子が常温常圧でアンモニアに変換され、根粒菌の共生モデルはミヤコグサであること、AM 菌との菌根共生を基盤として窒素固定共生が進化してきたこと、AM 菌根菌の単独培養技術開発が進んでいることなど、陸上生態系を支える 2 つの共生を紹介した。

注) アーバスキュラー菌根菌 (AM 菌、arbuscular mycorrhizal fungi) : 根の細胞内に侵入した菌糸がサンゴに似た樹枝状体 (アーバスキュール) に分化することから命名された。

バクテロイド : 根粒菌はマメ科植物と共生することで細胞内共生に特異な形態 (=バクテロイド) に分化する。

カルス : 植物体の組織の一部を切り取り、適当な条件下で培養、増殖してできる無定形な細胞の塊

## 講演 2

### 温室効果ガスの炭素循環を担う C1 微生物はどのようにして葉面で生きていくのか？

阪井康能

京都大学農学研究科 教授

動物や人は CO<sub>2</sub> を排出し、その CO<sub>2</sub> を植物が光合成で固定する。一方、メタン生成菌により CO<sub>2</sub> はメタン (CH<sub>4</sub>) に変換され、再び、メタノール (CH<sub>3</sub>OH)、ホルムアルデヒド (HCHO) を経て CO<sub>2</sub> に戻る。メタン、メタノール、ホルムアルデヒドなど炭素原子 1 つを持つ分子のことを C1 化合物と呼び、このメタンサイクルと呼ばれる炭素循環を駆動しているのが C1 微生物と呼ばれる細菌や酵母たちだ。



CO<sub>2</sub> とメタンは 2 大温室効果ガスとされ、温室効果への寄与度は CO<sub>2</sub> が 60%、メタン (CH<sub>4</sub>) は約 20% だ。そのメタンは、牛のゲップや水田などの農業、湿地帯のみならず、陸上植物からもメタンが放出され、地球温暖化にも大きな影響を与えている。また植物の葉からは大量のメタノールが大気中に放出されている。地球上の植物の葉の面積は地球表面の 2 倍もある。

そのメタンやメタノールを食べるのが C1 微生物で、土中や植物表面に住んでいて、葉面には細胞数にして 10<sup>26</sup> もの微生物群が存在し、温室効果を抑制している。C1 微生物はその炭素源の利用性から大きく二つに分けられる。メタンだけを食べるメタン資化性微生物 (偏性 C1 微生物) と、メタノールや C1 化合物以外の化合物も炭素源として利用できるメタノール資化性微生物 (通性 C1 微生物) で、メタノール資化性微生物には細菌と酵母がある。「資化性」とは細菌が炭素源または窒素源を利用してタンパク質や核酸、多糖や脂質などを合成し、自らの細胞に必要な物質を合成する能力のことだ。

ウキクサなどの水生植物にはメタン消費活性の高い C1 微生物が共生している。

一方、メタノール資化性微生物は植物の表層に住み、メタノールを食べて生きている。そこで我々はメタノール濃度に応答して蛍光を発する「メタノール細胞センサー」を開発し、モデル植物であるシロイヌナズナを使ってメタノール濃度を直接計測した。その結果、メタノール量は日周性を持って変動しており、夜に増えて昼間は減ることが分かった。

メタノール資化性酵母がメタノールを食べるためにはそれに関わる遺伝子と細胞内小器官 (ペルオキシソーム) が必要だ。それらの動きを調べてもやはり夜昼で増減していた。つまり C1 微生物は夜にメタノールを飲んで生活している。まさに「独り酌 (く) んで相親しむもの無し、杯を挙げて名月を迎え」と李白が歌った「月下独酌」だ。

このような C1 微生物は植物との間でどのような相互作用で生きているのか、我々はメタノール資化性細菌 (PPFM: pink pigmented facultative methyloph) で調べてみた。PPFM はメタノールを酸化してそのエネルギーを利用し、酸化プロセスで生じる化合物 (ホルムアルデヒド) を固定する細菌の総称だ。

植物はメタノールを PPFM に与え、PPFM からは植物ホルモンを得て成長に役立てる。PPFM は種子から葉へ垂直伝播するが、葉上では地上の苛烈な環境にさらされる。その環境に適応する仕組みが KaiC1、KaiC2 と呼ばれる時計遺伝子と紫外線抵抗性 (TDR) だ。

時計遺伝子を持たない変異体では葉上での定着率が落ちた。また日光が照射して気温の高い日は TDR 遺伝子が発現して生存率は高くなった。つまり時計遺伝子は日常の環境温度に合わせて

TDR を制御し、PPFM が葉上で生存するために重要な働きをしている。

我々は研究室で稲の収穫を増大させる PPFM を選び、実際に酒造メーカーの協力を得て酒米にその菌をまいて栽培してみた。その結果、収穫量は 16% あがった。PPFM が植物の生育促進に効果があることが確認された。

メタノール資化性微生物は植物の葉から大量に放出されるメタノールを回収して炭素源とし、植物に対しては成長促進効果を与えて植物と相利共生関係を持つ。メタン消費も助けている。一方、水生植物の表面には大量のメタン消費活性を持つメタン資化性微生物が生息している。

このように C1 微生物は、メタンサイクルと CO<sub>2</sub> 循環サイクルを連動させ、地球の温室効果を抑制している。

以上