

山村 寛 Yamamura Hiroshi

中央大学 理工学部 人間総合理工学科
教授

三谷 啓志 Mitani Hiroshi

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
特任教授
2018年～24年 OPERA 領域統括

河野 重行 Kawano Shigeyuki

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
名誉教授・特任研究員

エネルギーの低炭素化を進める上ではバイオマス資源がカギとなる。今、日本で期待されているのが、光合成で育ち、多様な製品の素材として活用できる微細藻類だ。これまで機能性食品や化粧品材料として使われてきたが、現在は日本国内で微細藻類からバイオジェット燃料(SAF)を生産するための一連の技術開発が急ピッチで進められている。産学連携でその可能性を追求する東京大学大学院新領域創成科学研究科の三谷啓志特任教授と河野重行名誉教授、中央大学理工学部人間総合理工学科の山村寛教授に話を聞いた。

特集
OVERVIEW 2

国産バイオジェット燃料の生産実現へ 産学連携で広げる微細藻類の可能性

航空燃料の低炭素化の切り札 SAFの生産体制確立が急務

2024年、計画だった国際線の新規就航や増便が断念されたというニュースが報じられた。十分な航空燃料が国内で確保できないことが理由の一つだ。資源に乏しい日本ではエネルギーは輸入頼みだが、世界的なエネルギー争奪戦が激化する中、日本は円安もあって他国に買い負ける状況が続いている。航空燃料については、二酸化炭素(CO₂)排出量の削減も不可避の課題だ。航空燃料の低炭素化が急がれる中、切り札として注目されるのが「SAF(サステナブル アビエーション フューエル: 持続

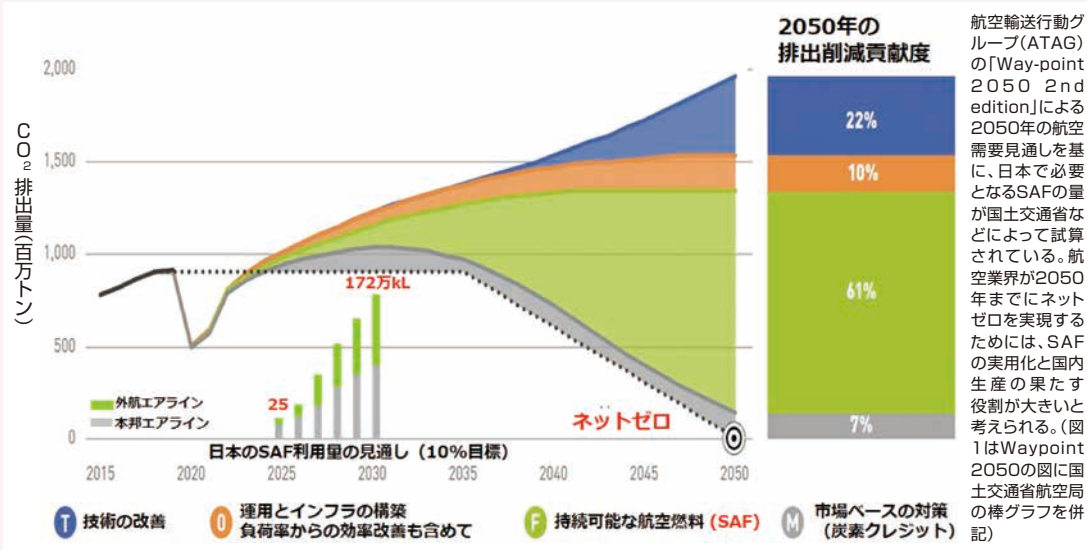
可能な航空燃料)」と呼ばれる、バイオマスや廃食油などからつくるバイオジェット燃料だ。

民間航空会社から成る国際航空運送協会(IATA)は、2021年の年次総会で「2050年までにCO₂排出量を正味ゼロにする」という新しい目標を承認し、その後22年には、各国政府によって構成される国際機関である国際民間航空機関(ICAO)が、50年までにCO₂の排出を実質ゼロにする長期目標を採択したことで事情は大きく変わった。日本でも30年時点で日本国内のエアラインによる燃料使用量の10パーセントをSAFに置き換えるとの目標を設定した。そのため、SAFの生産体制の確立は日本に

とって急務である。

日本でもSAFの商用化が少しずつ始まっている。経済産業省が示す日本のSAF利用の見通しは2030年に172万トン(図1)で、SAF供給目標としては19年度に国内で生産・供給されたジェット燃料の温暖化ガス排出量の5パーセント相当以上を提案している。これを実現するには飛躍的な生産量の拡大が求められる。JSTのOPERAで、14大学、4国立研究機関、24民間企業と共にこの難題に挑んできた東京大学大学院新領域創成科学研究科の三谷啓志特任教授と河野重行名誉教授は、SAFの生産体制を早急に構築するには、個々の企業の努力だけでは間に合わないと言鐘を鳴らす。

図1 航空業界のCO₂排出量と持続可能な航空燃料「SAF」への期待



「リファインリー」とは、例えば石油精製であれば、原油という一つの原料から石油を精製する過程でさまざまなものをつくり出す手法だ。原油からトータルで生産効率を上げる手法を「オイルリファインリー」という。これと同様にバイオマスからSAFだけではなく、より付加価値の高い

「リファインリー」で効率UP 機能性食品から飼料・燃料まで

現在、世界で流通するSAFはサトウキビやトウモロコシ由来のバイオエタノールが中心だが、日本はバイオマス資源も豊富とはいえず、廃食油などの脂質原料についても自国で賄うことが難しい。そこで、微細藻類を原料とした有用物質の生産とそれらを統合したバイオリファインリー・プロセスの創出を目指すこのプロジェクトでは、直近2年間、微細藻類からSAFを生産する研究開発を重点的に進めてきた。

微細藻類とは、ユーグレナやクロレラなどの5~50マイクロ(マイクロは100万分の1)メートルほどの小さな藻類のことだ。葉緑体を持っているため、太陽光と水、CO₂があれば光合成して有機物を生み出せる。また、面積当たりの収穫量が種子植物より桁違いに多いことから、有用なバイオマスとして注目を集めている。三谷さんは、プロジェクトの全体構想について「私たちは微細藻類で機能性食品や化粧品・衣料品素材から飼料・肥料、そして燃料までのリファインリーが可能だと考え、総合的に取り組んできました」と説明する(図2)。

機能性食品や化粧品材料も併せて製造することで全体の採算性を確保し、SAFの製造コスト低減につなげようというわけだ。プロジェクトではSAFの早期実現を目指し、微細藻類の育種から培養、回収、油の抽出、残渣の活用まで、幅広い技術開発を展開した。

テンサイの廃糖蜜を栄養源に 油含有率7割のクロレラ培養

そもそも微細藻類から油が取れるのか。これについて三谷さんは「植物油には、ゴマ油やナタネ油など多様な種類があります。藻類も光合成をする生物なので、油やでんぷんなど、植物がつくれるものは基本的につくれます」と説明する。藻類は環境に応じて、大気中のCO₂から生産する栄養素をでんぷん・油のいずれで貯めるか選択しており、これをうまくコントロールすると、油を多量に蓄積する株が育種できるという。

プロジェクト後半では、SAF製造のスケールアップを目標に掲げ

図2 バイオマスのリファインリー体系

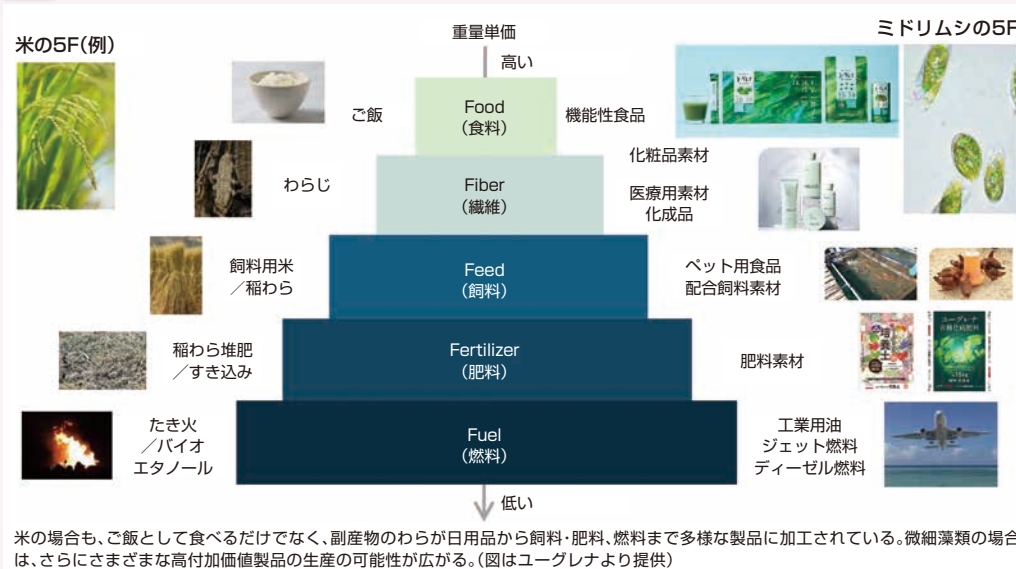
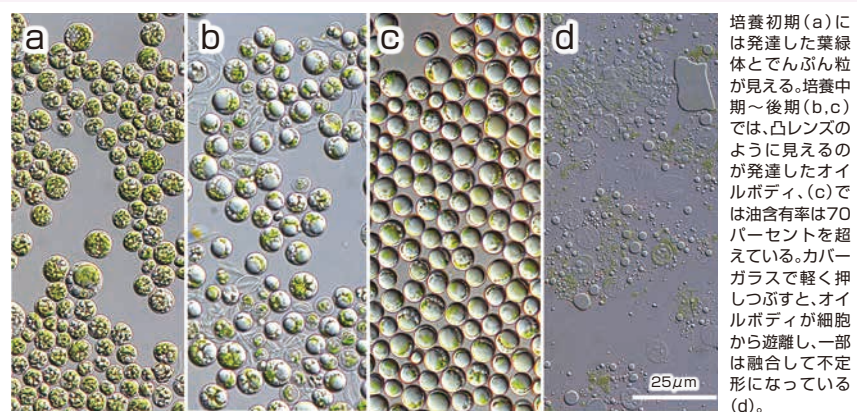


図3 従属栄養培養したクロレラの顕微鏡写真



た。まず、国立環境研究所微生物系統保存施設(NIESコレクション)が中心になって集めた微細藻類3000株のライブラリーから選抜した株を基に、重イオンビーム照射やゲノム編集などのさまざまな手法で油の生産性の高い株の育種を行った。育種したクロレラ株を屋外の施設で大量培養したところ、クロレラ株の油生産量は2024年6月現在、バイオマス当たり油含量は66パーセント、油の生産性は培養液1リットル当たり1日0.59グラムとなり、微細藻類の屋外での独立栄養培養では世界1位となっている。

これらの株も用いて生産効率をさ

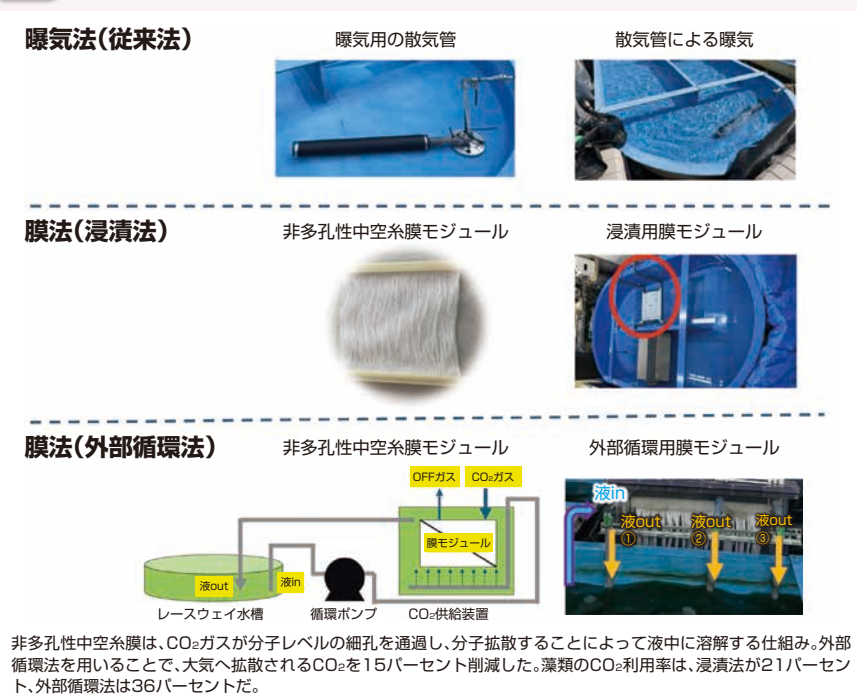
らに高めるため、河野さんは光合成で育てる独立栄養培養だけでなく、バイオマス起源の糖を添加して育てる従属栄養培養も検討した。この糖源として河野さんらが注目したのが「テンサイ」だ。砂糖の原料となる植物で、ビートあるいはサトウダイコンとも呼ばれ、国内では北海道でのみ栽培されている。その生産量は400万トンで、道内2位のジャガイモの2.4倍もの生産高を誇る。精糖工程では砂糖として結晶化されない糖蜜が出るため「この廃糖蜜(モラセス)をどうにか有効活用できないか」と河野さんは考えたという。

微細藻類が糖源として使える糖類

は主にブドウ糖と果糖で、砂糖の主成分であるショ糖をそのまま利用できる藻類は少なく、クロレラもショ糖は分解できない。そこで河野さんは、ショ糖を酸性水で加水分解して、得られたブドウ糖と果糖でクロレラを培養してみた。すると、市販の廃糖蜜に比べて収穫量が2倍以上に増えた。こうした糖源を加えた従属栄養培養では、クロレラの油含有率が70パーセントになることがある(図3)。含有量が多すぎるとクロレラが水に浮いてうまく藻体を回収できないので、細かな調節が重要だ。

また、イカダモは油含有率が少ないながら、培養液1リットルあたりバイオマスが286グラムにもなったという報告もあり、微細藻類の従属栄養培養のポテンシャルの高さが感じられる。河野さんは「SAF製造には、安定的に大量に培養できる従属栄養培養と低コストの独立栄養培養を組み合わせて進めることが現実的だと確認できました」と語る。テンサイは、生産性もCO₂吸収量も高い上に、精糖の過程で廃糖蜜は必ず出る。現在、ホクレン農業協同組合連合会および日本甜菜製糖と、テンサイの廃糖蜜を糖源とした微細藻類の従属栄養培養に関する共同研究を進めている。

図4 非多孔性中空糸膜によるCO₂の利用効率向上



「非多孔性中空糸膜」を開発 CO₂の拡散抑制でコスト減

独立栄養系での生産性向上や生産コストの削減を図るため、膜を使って光合成に必要なCO₂を、無駄なく水に溶かす技術開発に三菱ケミカルと共に取り組んでいるのが、中央大学工学部人間総合理工学科の山村寛教授だ。藻類を屋外で培養する際には、大気から自然にCO₂を取り込むだけでは生産性が上がらないため、CO₂ボンベや工場の排ガスを用いてCO₂を水槽に溶解することが一般的である。しかし、山村さんを中心とした研究により、吹き込んだCO₂の80～95パーセントは吸収されず大気に戻っていることがわかった。

「これでは藻類の培養がカーボンニュートラルに貢献すると言えるか疑問になりますし、CO₂ポンプなどのコストも余分にかかってしまいます」と山村さんは語る。さらに2030年以降は、国内の石油化学プラントの稼働停止もあってCO₂の供給が減り、価格が上がると考えられる。CO₂の効率的な活用は、環境面・コスト面の双方にメリットがあるため、山村さんらはCO₂ガスをしっかり水に溶かし、大気に戻さずに無駄なく使い切る技術の開発に取り組んだ。

CO₂は水中に溶けにくい上、液体濃度が高いほど大気に拡散されやすくなる特徴がある。目標はこれらの物理法則を克服するモジュールや供給システムの開発だ。開発中、微細藻類の株の種類によって培養に適したCO₂濃度が異なることが明らかになり、CO₂量の制御も開発目標に加わった。その結果誕生したのが、細い繊維の集合体のような非多孔性中空糸膜だ。水槽にこの膜を沈めてポンプからCO₂の供給を行ったところ、大気への拡散が抑えられることを確認した。

具体的には、藻類が吸収したCO₂量が従来の約4倍に向上し、外部循環法の採用で最大で36パーセントまで吸収率を上げることができた(図4)。これだけで、微細藻類の生産量1トン当たり約30万円のコスト削減になると試算される。実際に工場排気ガスを使った屋外試験も実施しており、効果は実証済みである。現在では、さらにCO₂を大気中に逃がさずに無駄なく使うために、閉鎖系の培養装置の開発も進めている。

コンソーシアムで株を配布 飼料開発などでの活用を期待

燃料に適した微細藻類を効率良く培養する技術に加え、河野さんらは培養した藻類から油を効率的に抽出する研究も進めた。その結果、搾油やメタノールとメチルtert-ブチルエーテルを用いた抽出、ヘキサンを用いた抽出という三つの手法を確立

した。また、抽出した油の成分がSAFの原料となり得る品質であることが確認できた。OPERAのコンソーシアム内で、微細藻類に関する応用研究を希望する機関や企業に国立環境研究所が保有する株を2次配布する仕組みも構築。これにより、機能性食品や家畜用飼料、水産物用飼料の開発など、多様な成果につなげることができた。

微細藻類の搾油残渣や抽出残渣の有効利用法では、残渣を可塑剤と混ぜた強固なバイオプラスチックや機能性ナノファイバー化成品を作る技術なども開発した。微細藻類からとれる油脂は、実はSAFだけでなく食用としてのポテンシャルも高い。現在、オリーブ油の価格が高騰していることから、食用としても活用が期待される。「クロレラ油の脂肪酸はパーム油とオリーブ油の中間の組成なので、クロレラ油をまずは食用とし、その廃食油からSAFをつくる道筋も考えられるでしょう」と河野さんは述べる。

三谷さんも「微細藻類産業のスケールアップは、下水や廃水の浄化や排ガスの処理への展開が期待されており、また、飼料などに向くたんぱく質を生成する微細藻類に転換することも可能です」と利用例を示す。また、河野さんは「海藻のヒトエグサの

図5 スジアオノリの陸上養殖



2021年に理研食品は、近年国内主要産地での生産量が激減したスジアオノリやヒトエグサの陸上養殖施設を岩手県陸前高田市に開設した。スジアオノリの製造販売はすでに始まっており、ヒトエグサも大いに期待されている。また、22年度の実績では屋外の季節変動に応じてタンクの肥料濃度・海水供給量・エアレーションをコントロールしながらスジアオノリを乾重量3.1トン生産できた。これはCO₂固定換算をすると1トンの炭素または3トンのCO₂を固定したことになる。

単細胞培養を種株とする海藻の陸上養殖の成功は日本の水産業に新風を吹き込むものです」と強調する(図5)。今後は非多孔性中空糸膜によるCO₂供給などの技術革新によってさらなる増産が望まれるが、そうした増産はCO₂削減に寄与するだけでなくブルーカーボン研究にも新たな視点を提供することになるだろう。

2024年3月にOPERAは終了したが、OPERAで築き上げたコミュニティの維持を目指し、三谷さんと河野さんらは新たに「光合成ものづくりコンソーシアム」を発足した。継続的かつ戦略的に研究開発を行い、実績を積み重ねることで、微細藻類の活用に向けた研究の裾野を広げていく考えだ。SAFの早期の実用化はもちろんのこと、微細藻類を有効活用する技術のさらなる開発が期待される。

(TEXT: 桜井裕子、PHOTO: 石原秀樹)



コンソーシアムでは横のつながりを生かし、積極的に新たな挑戦ができる雰囲気と環境をつくりたいと考えています。一つ課題を解決すれば、また次の課題が出てくるのが明らかな挑戦です。新たなプレーヤーの参入を大いに期待しています。