

微細藻類活用の今、そして未来

大森正之

東京大学名誉教授

Practical use of microalgae: Now and future

Masayuki Ohmori

Professor Emeritus, The University of Tokyo

1. はじめに

微細藻類というと私たちは何を一番初めに思い浮かべるだろう。東京上野公園の不忍の池の表面をべっとり覆うアオコ、水田や溜池を緑に染めるイカダモ、東京湾の海水を緑がかった褐色にする珪藻、今時だからテレビのコマーシャルでおなじみのミドリムシ（ユーグレナ）やクロレラかもしれない。私自身は藍藻研究者だから、ネンジュモやスピルリナが目につく。いずれの微細藻類も社会をその基盤から支える生物という感じではない。しかし、今これらの微細藻類を活用して人類社会の安定した維持継続に役立てようという試みが全世界的な規模で展開されている。その大きな理由の一つとして、微細藻類がとても高い光合成能力をもっていることが挙げられる。光合成とはご存知のように、光のエネルギーを利用して二酸化炭素を固定し、有機物を作る反応であり、その際生じる酸素ガスは私たちが生きていくのに必須である。人類の産業活動から発生する二酸化炭素の増加による諸問題の解決にも、光合成の有効活用はわれわれにとって緊急の課題となっている。では、どのような戦略の下に微細藻類の光合成能力を活用すべきなのか。まず、微細藻類の特徴をよく知るとともに、目的に合った微細藻類の利用の仕方を工夫せねばならない。ここでは、微細藻類の産業利用の現状と微細藻類の特性を生かした利活用の未来を考えてみたい。

2. 微細藻類を利用したエネルギー生産

化石燃料の大量使用による、大気中二酸化炭素の増加と、結果として予想される地球の温暖化は、人類が直面した深刻な問題である。それを避けるべく期待された原子力の利用は2011年の東北大地震でその弱点

をさらけ出し、事故の処理については、いまだに解決の見通しが立っていない。そのような状況のなかで、自然エネルギーの利用が緊急の取り組み課題として浮上してきており、微細藻をエネルギー源として利用しようとする研究も、その一つとして開始されている。すなわち、微細藻類の高い光合成能力により、太陽エネルギーを利用して、有機物のなかでもエネルギーとして利用しやすい脂質を大量に生産しようというものである。実はこの発想、第二次世界大戦時のドイツで誕生し、珪藻類から油脂を抽出しようという研究が開始されたともいわれている。その頃日本でも航空燃料が不足しており、松の根から抽出した松根油の利用が考えられたとか。いつの時代も、人間が頼る燃料は身の回りにある植物や動物なのかもしれない。薪や炭はいうに及ばず、クジラの体脂肪がロウソクの原料として大量に使われていたことは私たちがよく知っていることである。

微細藻類は高い光合成能力に支えられて増殖速度が速いため、単位面積当たりのバイオ燃料生産性が高等植物の数倍になると予想されることや、食料生産と競合しないこと、作物栽培に適さない土地の利用も可能であることなど、生物資源としていくつかの利点をもつ。微細藻類を燃料資源として利用しようとする場合、まず第一に微細藻類の細胞中に燃料となる物質が大量に蓄積されている必要がある。表1に現在利用可能と考えられている主な微細藻類の細胞内含有物の量を示す。一般的に、微細藻類の主要な貯蔵炭素化合物はデンプンおよびその類似物質であり、脂質を主に溜め込むのは、ラビリンチュラ類、ラフィド藻、それと珪藻くらいである。エネルギー資源としてより適しているのは、脂質含有量の多い藻類であり、エネルギー資源としての産業利用を目指して研究が行われているのは脂質含量が高く、かつ大量培養が可能な藻類であ

表1 産業利用可能な主な微細藻類とその貯蔵物質*

系統群	生物群	主要貯蔵物質
藍藻 (シアノバクテリア)	スピルリナ	グリコーゲン
	アナベナ	
	ノストック	
紅藻	シネコキステイス	グリコーゲン
	シアニジウム	
	シアニディオシゾン	
トレボウキシア藻	クロレラ	デンプン
	ボトリオコッカス	
緑藻	ドナリエラ	デンプン
	クラミドモナス	
	イカダモ	
ラビリンチュラ類**	オーランチオキトリウム	脂質
	ラビリンチュラ	
珪藻	フェオダクチラム	クリソラミナリン 脂質
	スケルトネマ	
ラフィド藻	ヘテロシグマ	脂質
	シャットネラ	
ユーグレナ類 (ミドリムシ類)	ユーグレナ	パラミロン

*川井, 中山 (2012) のデータを参考に作成. **非光合成生物

る。もっとも、ボトリオコッカスのように、細胞周辺に脂質を分泌する藻類も、魅力的なエネルギー資源といえる。まず、これらの脂質貯蔵型藻類について、次にデンプン貯蔵型藻類について検討してみよう。

1) 脂質貯蔵型微細藻類

多くの藻類は二酸化炭素を炭素源として、硝酸塩のような無機態窒素を窒素源として、好気条件下で培養されるが、脂質の蓄積は窒素源やリンの枯渇条件下で増加することが知られている。しかし、栄養源の枯渇した状態ではバイオマスの増加は当然ながら停止する。これでは通常の産業の大量培養には使えない、増殖させるだけ増殖させておいて栄養分の供給を止め、脂質を蓄積させてから収穫するという方法も考えられるが、それではあまりに手間が掛かる。そこで産業利用に適した株、すなわち高い脂質含量を保ちながら、高い増殖能をもつ株の選択、あるいは遺伝子工学的作出が必要となる。松本らは、通常の増殖培養条件下でも、乾燥重量当たり約40~60%の脂質を含有する海洋性珪藻の単離に成功した(Matsumoto *et al.*, 2014)。その後、さまざまな実験を経て、現在、北九州市において屋外培養による脂質の生産が実施されている(松本, 2016)。細胞外に大量の脂質を分泌するボトリオコッカスは早くから、燃料資源として着目されてきており、大量培養も始められている。また、従属栄養的

に増殖するオーランチオキトリウムは排水処理も兼ねた脂質生産をする藻類として利用が期待されている。自然界には、まだまだ私たちの役に立つ微細藻類は数知れずあるみたいで、これからも新規な機能をもつ微細藻類の探索を怠ってはいけない。もし、運良く目的の機能をもっていることが判明したならば、次に行うべきことは、最新のオミクス解析技術を駆使して、遺伝子解析、代謝経路解析を行い、その機能の具体的な仕組みを解明すること、さらに、より機能を増進するための遺伝子改変などに取り組んでいくことが必要がある。すでに田中らは、珪藻のトリグリセリド生産にかかわるゲノム解析、遺伝子発現解析に成功している(Tanaka *et al.*, 2011, 2015)。

2) 炭水化物貯蔵型微細藻類

デンプン様の物質を蓄積する微細藻類としては、最近ジェット燃料用資源としてよく話題になるユーグレナが知られている。ユーグレナは細胞中にパラミロンと呼ばれるβ-1,3グルカンの重合体を多量に蓄積することが知られている。このパラミロンを代謝変換した株を用いて燃料となるワックスを合成する試みがなされている。その他にも、細胞内にグリコーゲンを蓄積する藍藻を遺伝子変換して脂質燃料トリグリセリドを生成しようとする試みが、日本の若手研究者を中心に盛んに行われている(日原ら, 2017)。また、空中窒素の

固定能をもつ糸状性藍藻は水素産生能力ももつため、窒素固定藍藻を利用した水素生産の研究も進められている。さらに、スピルリナから単離した光合成膜を利用して、バイオ燃料電池を構築しようとする試みも行われている（日原ら，2017）。藍藻はゲノムの解読の最も進んだ藻類であり、遺伝子変換法も確立しており、形質転換によって、目的の機能を付与することが比較的簡単である強みをもつ。今後、研究の進展によって、世界をリードする技術が開発されることが期待される。

3. 微細藻類を利用した食品および化学物質の生産

日本における食糧源としての微細藻類の利用は、第二次大戦後の食糧不足を何とか解決しようと、徳川生物研究所を中心に始められたクロレラの大量培養の研究にその端緒がある。クロレラはその後、いわゆる健康補助食品（サプリメント食品）として広く世間に受け入れられ、その生産は微細藻類産業として発展した。次に産業化されたのが、糸状性藍藻のスピルリナである。なぜスピルリナなのか。そもそもスピルリナは16世紀以前にメキシコの湖で収穫され、食料として利用されていたようである。1940年にはフランスの藻類学者が、アフリカのチャド湖周辺の村の住民が湖に繁茂したスピルリナを収穫して乾燥させ、日常の食糧として利用していることを紹介している。このスピルリナに着目したのが、日本の藻類学者 中村 浩博士である。博士はエチオピアの湖でスピルリナ (*Arthrospira platensis*) を採取するために渡航し、それを日本に持ち帰って培養法の確立に専心した。現在は生物多様性条約によって海外で採取した生物試料を持ち帰るのは簡単ではなくなったが、アフリカの人たちをも含む全人類の食糧危機を救うために、中村博士の研究はとても大きな意味をもつといえる。もっともアフリカ産スピルリナの培養は、その当時フランス国立石油研究所もたいへん熱心に推進していたようである。その後、中村博士は大日本インキ化学工業株式会社との共同事業として、大変な苦労の末、スピルリナの大量培養法を確立し、そこから工業生産が始まった。私自身、アメリカ、カリフォルニア州の現地法人を訪れ、砂漠の中の広大な開放型培養施設を見学したことがあるが、微細藻類の産業化とはこれほど壮大なものであるのかと感慨にふけった記憶がある。スピルリナは現在、乾燥藻体そのものが錠剤として市販されているが、 β -カロテンやフィコシアニン（天然着色材として利用）の原料としても利用されている。ほかに健康食

品として市販されているのは、日本では歴史を誇るクロレラ、最近ではユーグレナであろうか。アスタキサンチンの原料としてのヘマトコッカスも知られるようになった。日本で古くから知られている食品としては熊本の水前寺海苔がある。これは単細胞性藍藻 (*Aphanizomenon sacrum*, 和名：スイゼンジノリ) の凝集体であるが、今は人工的に生産され、食品としてだけでなく化粧品の原料としても利用されている。藍藻は、遺伝子変換技術を利用して、エタノール、イソプロパノール、脂肪アルコール、生分解性のポリエステルであるポリヒドロキシ酪酸、アンモニアなど、多くの有用物質の生産のために、今後ますますその利用が期待される（日原ら，2017）。

4. 微細藻類の大量培養

微細藻類を産業利用しようとした場合、大量に培養生産できなければならない。すなわち実験室規模の培養では到底産業利用はできない。実験室の延長ともいえる、閉鎖型屋内大量培養は、タンク培養が中心となる。この方法では光合成を行う必要がない従属栄養生物が主な培養対象である。しかし、太陽エネルギーの利用による独立栄養的な培養をするとすると、光照射の効率化などの問題から、屋内培養はとても難しくなり、施設建設のコストの面からも、屋外での数千 m^2 にも及ぶ巨大な開放池型の培養系を使わざるをえなくなる。もっとも、ヘマトコッカスは閉鎖型の屋内培養法により生産されているが、これは生産されるアスタキサンチンの市場価値がきわめて高いためである。コストの高い閉鎖系で培養される微細藻類は、高付加価値をもつ有用物質の生産能力があることが必須ということになる。

開放型大量培養では、培養池の形状も大事な検討課題となる。実用的には円形池型、あるいはレースウェイ（陸上競技のトラック）型が多い。培養池の攪拌はパドル類や水平回転翼によって行われるが、それらの作動に大きなエネルギーを消費しないような工夫がなされている。屋外環境は実験室内とは全く異なり、光の照射、温度の安定性に格段の難しさが生じる。また、雑菌や他の藻類の混入、アメーバなどの捕食動物の混入も大きな問題となる。日本のように降雨量の多い地域では、雨が降るたびに培養液の希釈も問題となる。現在の微細藻類の屋外大量培養の成功は、すべて利用藻類の生育特性に依存している。クロレラのようにきわめて高い増殖速度をもつことで他の混入藻類との生存競争に勝てること、スピルリナのように至適生育

pHが9~11と強いアルカリに傾いているため、他の微生物の混入が防がれていること、ドナリエラのようにきわめて高い塩濃度で培養できるため、他の微生物が混入しにくいこと、などが例として挙げられる。海水を用いた珪藻の屋外大量培養では、寒い時期には低温でも増殖する種類が利用されているが、これなども微細藻類の特性の利用の例といえることができる（松本, 2016）。また、酸性環境で生育する紅藻類の産業利用が提案されているが、屋外での雑菌の混入防止の視点からは頷けるところである。逆に、中性のpH、低塩分濃度など多くの微細藻類の増殖する一般的な培養条件では、屋外大量培養は難しいということになる。

近年、全く新しい発想に基づき微細藻類の大量培養法が提案された（都筑ら, 2012）。固相表面培養法と呼ばれるこの方法では、クロレラを縦に吊るした布の表面でわずかな水の供給で培養するものであるが、布表面1m²当たりの生産量は開放培養系の1m²当たりの生産量にほぼ匹敵するという。計算上は年間1m²当たり1トンのクロレラを生産は、1m²に幅1m高さ15mの布を10枚吊るせば良いことになるという。ほかに大げさな装置も必要なく、微細藻類の工業生産系として期待がもてる。緑の布がぎっしり並んで吊られた藻類生産工場を想像するのも楽しいことである。

5. 微細藻類と環境問題

微細藻類は、水中の生物と考えられがちであるが、陸上にもさまざまな微細藻類が生息している。その中でも、藍藻のイシクラゲ (*Nostoc commune*) は日本各地で大量に発生し、細胞外多糖がぬるぬるするので、うっかり踏むとつると滑るため、ゴルフ場などでは嫌われ者のようである。中国の砂漠地帯にも似た種類（中国名ファーツァイ）がおり、食用に利用されているようであるが、砂漠の湿潤化の維持に役立つと考えられ、現在採取は禁止されていると聞く。イシクラゲのような陸棲藍藻は乾燥に強く、1年や2年の乾燥には全く影響されることなく、再び雨が降れば窒素固定能があるため窒素栄養なしで増殖を開始する。このような藍藻を大量培養し、砂漠に撒けば、砂漠緑化に貢献してくれるかもしれない。

しかし、藍藻には毒性をもつものもあり、人や家畜が藍藻の繁茂した水を飲んで健康被害にあったとの話がよくある。日本でもアオコを形成する単細胞性藍藻のミクロキスティスが有毒であることはよく知られている。このような、社会に害を及ぼす微細藻類を駆除するための方策を考えることも現代では必要となって

いる。そのためにも微細藻類の生理化学的、分子生物学的特徴をより深く知る必要があり、さまざまな角度からの研究が求められている。

6. 微細藻類のカルチャーコレクション

現在、国内の微細藻類の大半は、つくば市の国立環境研究所微生物系統保存施設（NIES藻類コレクション）に集められている（図1）。この機関は環境研究の推進を目的に1983年に設立されたもので、2002年よりナショナルバイオリソースプロジェクト（NBRP）のなかで、藻類コレクションの中核機関として、微細藻類だけでなく、大型藻類の保存も担っている。2011年の東北大震災を受けて、現在、神戸大学と北海道大学で全凍結保存株（神戸大）と重要継代培養株（北海道大）をバックアップしている。現在の保存株数は4,859株で、世界のトップクラスである。保存株のうち凍結保存が38%、継代培養が62%となっている。ホームページ上で815種、2,748株を公開している。平成24~28年全体では1,988件、株数にすると5,889株を分譲提供している。利用目的としては基礎研究46%、応用研究25%、教育16%、環境11%となっている。これまでの利用者は年平均300人であり、成果論文は累計1,730報（年平均50報）となっている。株の分譲は基本有償であるが、教育目的であれば無償となっている。当施設としても糸状性藍藻46株のDNA情報の整備と系統解析に基づく分類の検証や、フローサイトメトリおよび単細胞分離によるスクリーニング、無菌化（無菌株は全体の1/5）を積極的に推進している。微細藻類の効率的な利用には、それぞれの微細藻類のもつ、生理学的、生化学的、生態学的、また分子生物学的特性の把握が不可欠であり、利用目的に合った微生物



図1 国立環境研究所微生物系統保存施設

物を取得するためには、藻類株の特性を情報として蓄積、それを社会に発信しているカルチャーコレクションの存在はきわめて重要である。他国から簡単に新規な株の入手が難しくなりつつある今日、NIESカルチャーコレクションの重要性はますます増している。私たちがきちんとその必要性を理解し応援するとともに、積極的に利用し続けることが大事であろう。

7. 微細藻類の宇宙利用

微細藻類の利用は、人類社会の持続的な発展の不可欠なものとなったといえる。その持続的な発展のなかに、人類の宇宙への展開も含まれる。たとえば、人類が火星に探査基地を建設し長期にわたって維持していくためには、火星における農業の確立は不可欠なものとなる。地球から大量の食料を定期的に輸送するのはあまりにコストも掛かり、危険も伴う。しかし現在知られている火星の表面環境は地球とはあまりにも異なっており、すぐに地球の植物が生育できる環境ではない。火星表面の大気は地球表面の約0.75%しかなく、しかも酸素は非常に少ない。気温もきわめて低く、地球の陸地を覆う土壌層は全く存在しない。土壌とは岩石の粉に有機物と微生物の混在したものであり、地球の長い歴史の中で形成されてきたものである。この土壌なくしては作物の生産は不可能である。地球太古の時代に土壌生成に最も寄与したと考えられるのは、水中から陸に進出した藍藻類やその後の緑藻類であると考えられる。その土壌基盤の上にコケ類やシダ類が陸上で栄えるようになったのである。高等植物が現れるのはその後のことである。つまり火星で作物生産を始めるためには、高等植物の生育可能な土壌を創生しなければならない。一番簡単なのは、陸棲藍藻のような光合成微細藻類を火星の表面の岩石粉末（レゴリス）上に播種し、次に他の何種類かの微生物を増殖させて、地球の土壌に似た環境を創出することである。現在、筑波大学を中心とした研究グループは、地球を周回している国際宇宙ステーションを利用して、宇宙における陸棲藍藻の生存に関する研究を開始している。また、長期にわたる宇宙船滞在を快適にさせる手段の一つとして、船内環境の維持や食料の供給を目的とした微細藻類の研究が世界的規模で開始されている。私たちも、インドの人工衛星を利用して、スピルリナの宇宙における光合成活性の測定を試みているが、ロケットの事故等もあり残念ながらいまだ実現していない。いずれにしても、宇宙環境で人類が生きていくためには、微細藻類の利用は欠かせないとの認識

が宇宙生物学者の間で広まっている。

8. 終わりに

これまで述べてきたように、微細藻類は地球上のどこにでも生育し、地球環境の維持や人類の食糧として大事な役割を果たしている割には、実に地味な存在である。しかし、これから先予想される地球規模の環境の悪化や食糧危機を救うためには、これまで地球環境を形成し、それを支えてきた微細藻類の多様な能力を再認識し、有効活用することが間違いなく重要である。地下資源や耕作地に恵まれていないわが国こそ、微細藻類の利用を積極的に推進すべきであろう。そのためにも、少しでも多くの微細藻類を確保し、維持し、その特徴をファイリングし、それを広く世の中に発信していくことが、わが国にとって必須の事業である。今後の微細藻類利用の研究のさらなる発展とそれを支えるカルチャーコレクションの充実を期待したい。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、国立環境研究所微生物系統保存施設に関する情報を提供していただいた河地正伸博士に感謝いたします。

文 献

- 日原由香子, 朝山宗彦, 蘆田弘樹, 天尾 豊, 新井宗仁, 粟井光一郎, 得平茂樹, 小山内崇, 軯 達也, 成川 礼, 蓮沼誠久, 増川 一 2017. 多彩な戦略で挑むシアノバクテリア由来の燃料生産—持続可能な第三世代バイオ燃料の最前線—. 化学と生物 **55**: 88-96.
- 川井浩史, 中山 剛 2012. I. 微細藻類の基礎 1. 分類と系統解析, 竹山春子 (監修), 微細藻類によるエネルギー生産と事業展望, p.1-9, シーエムシー出版, 東京.
- Matsumoto, M., Mayama, S., Nemoto, M., Fukuda, Y., Muto, M., Yoshino, T., Matsunaga, T. & Tanaka, T. 2014. Morphological and molecular phylogenetic analysis of the high triglyceride-producing marine diatom, *Fistulifera solaris* sp. nov. (Bacillariophyceae). *Phycol. Res.* **62**: 257-268.
- 松本光史 2016. 微細藻類によるグリーンオイル生産技術の実用化に向けて—藻類探索から、オミックス解析, プロセス設計まで—. 化学と生物 **9**: 181-190.
- Tanaka, T., Fukuda, Y., Yoshino, T., Maeda, Y., Muto, M., Matsumoto, M., Mayama, S. &

- Matsunaga, T. 2011. High-throughput pyrosequencing of the chloroplast genome of a highly neutral-lipid-producing marine pennate diatom, *Fistulifera* sp. strain JPCC DA0580. *Photosynth. Res.* **109**: 223-229.
- Tanaka, T., Maeda, Y., Veluchamy, A., Tanaka, M., Abida, H., Maréchal, E., Bowler, C., Muto, M., Sunaga, Y., Tanaka, M., Yoshino, T., Taniguchi, T., Fukuda, Y., Nemoto, M., Matsumoto, M., Wong, P. S., Aburatani, S. & Fujibuchi, W. 2015. Oil accumulation by the oleaginous diatom *Fistulifera solaris* as revealed by the genome and transcriptome. *Plant Cell* **27**: 162-176.
- 都筑幹夫, 白武琢磨, 鈴木美穂, 西條広隆, 朝山宗彦, 宮坂裕司, 岡田克彦, 今村信和, 小西 淳 2012. 人工光利用による微細藻類の生産技術開発. 東京薬科大学研究紀要 **15**: 9-16.