

## 微細藻類を用いたバイオ原料・燃料用オイル生産技術開発への挑戦

### The Challenge for Development of Technology toward Microalgal Oil Production for Energy and Chemicals

松本 光史<sup>1,3\*</sup>, 田中 剛<sup>2,3</sup>

MITSUFUMI MATSUMOTO and TSUYOSHI TANAKA

<sup>1</sup> 電源開発株式会社若松研究所 〒808-0111 福岡県北九州市若松区柳崎町一番

<sup>2</sup> 東京農工大学大学院工学研究院・生命機能科学部門 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

<sup>3</sup> 独立科学行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究事業 〒102-0075 東京都千代田区

\* TEL: 093-741-0942 FAX: 093-741-0959

\* E-mail: mitsufumi\_matsumoto@jpower.co.jp

<sup>1</sup> Electric Power Development CO., Ltd. Wakamatsu Institute,

1, Yanagasaki, Wakamatsu, Kitakyusyu, Fukuoka 808-0111, Japan

<sup>2</sup> Tokyo University of Agriculture and Technology, Department of Biotechnology and Life Science,

2-24-16, Naka, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

<sup>3</sup> JST CREST, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0075, Japan

キーワード: 微細藻類, ソラリス株, 屋外培養, オイル生産, エネルギー生産

Key words: Microalgae, Solaris strain, Outdoor culture, Oil production, Energy production

(原稿受付 2012年5月10日/原稿受理 2012年5月31日)

#### 1. はじめに

昨今, “微細藻類 (若しくは藻類) は, もしかしたら日本が産油国になれるほどのポテンシャルを持っている” というようなホットな話題が色々な紙面やインターネット上を賑わせている。世界では猛烈な勢いで微細藻類を用いたバイオ燃料に関する研究開発が続けられ, 米国では 100 ha 規模での実証プラントの建設が進んでいる。アジアやヨーロッパについても各国の進捗は異なるが多額の補助金やプロジェクトが立ち上がり, 研究開発が進められている。日本では, 大学や民間企業において着実に検討が進められている。しかしながら, 微細藻類に対する“過熱ぎみの期待感”からか, 地に足が着いた議論を伴わない情報が散見されるようになってきている。出る情報の質によっては, 多くの人々を間違った方向へ向かわせてしまう恐れがある。これは, 実に不幸な兆候であると感じている。

あの 3.11 の悲劇を境にして私たちのエネルギーに対する意識や考え方が大きく変化した。エネルギーは私たちの普段の生活や産業, 引いては日本の国力維持や地球環境問題にまで直結している大きな事柄だけに安易に可能性を拾い上げて, 綺麗な数字を並べてすぐにでも実現できるかのような議論は, 投資や時間, 資源のロスではない。可能性を実現するための冷静な議論のもと, 方向性 (ビジョン), 目標 (マイルストーン) と計画 (プラン) を策定し, 時間軸 (タイム) を調整しながら, 研

究開発を進めて行かなくてはならない。

筆者らは現在, 文部科学省所管の科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (以下, CREST 研究) 「海洋微細藻類の高層化培養によるバイオディーゼル生産 (H21 年度~H25 年度)」として採択を受け, 東京農工大学を代表者とする研究チームの中で, 微細藻類による用いたバイオディーゼル燃料生産に関する研究を実施している。そこで今回, 微細藻類によるバイオ原料・燃料用オイル生産の開発状況やポテンシャルについて正面から精査し, 筆者らが行ってきた研究成果をもとに学術面よりも特に, 実用化に向けた側面から微細藻類によるバイオ原料・燃料生産技術について解説したい。

#### 2. 理想 VS 現実

多くの論文や論評で, 微細藻類によるバイオ原料・燃料生産に対するポテンシャルについて議論されている。ここで議論されている藻体やオイル生産性の実用化に対する数値根拠はどこまで信憑性があるだろうか。オイル生産性が ~100 t/ha/year などの公表されている数値 (論文値) は, ラボ内や屋外でも小スケール, 短期間での実験で得られた数値を用いたりし, 実際の藻体 or オイル生産性を過大評価してはならないだろうか<sup>1,2)</sup>。それは, 多くの人々を間違った方向へミスリードしてしまう可能性が大きい。最終的にはある一定規模 (ha 単位) で, 年間を通じた実証研究で証明する必要があるだろう。

一方で微細藻類の生育に必要なエネルギーは基本的に太陽光である。地表に届く光合成に必要なエネルギー量は限りがあることから、微細藻類の藻体生産性は限界がある。つまり、単位面積当たりで換算される藻体生産性はおのずと決まってしまうことである。現在、バイオマス変換効率の理論値は、文献にも寄るが概ね7~10%（自然界では0.1%以下）と言われている。実際の微細藻類の藻体生産性についても20 g/m<sup>2</sup>/day, 0.1 g/L/day程度といわれている<sup>3)</sup>。また、屋外バッチ培養で到達する藻体濃度についても、屋外培養の実績があるクロレラやスピルリナなどの藻種で培養期間はそれぞれ異なるが、特段人為的操作を加えない限り、最大で1.0~1.5 g(乾物)/L (~1ヶ月程度培養が必要か)が確認されている。実の所、筆者はこの当たりが太陽光を使った屋外培養時の“実際”の藻体生産性レベルであろうと推測している。また、使用する微細藻類の性能を比較する場合、年間を通じた藻体生産量(回収量)比較や、地域差(太陽エネルギーの照射)なども考慮する必要があるだろう。このため、用いる微細藻類の能力比較に共通の評価法を確立すべきである。

図1に微細藻類による生産物価格と培養スケールのイメージを示した。縦軸を事業が成立する生産物コスト、横軸を対数で培養スケール規模を表した。この図は培養スケールと生産物コストが交わる点が、事業性を有する培養規模を意味するものと考えてもらいたい。よって、高付加価値から低価格物質のカーブ毎に必要な培養規模

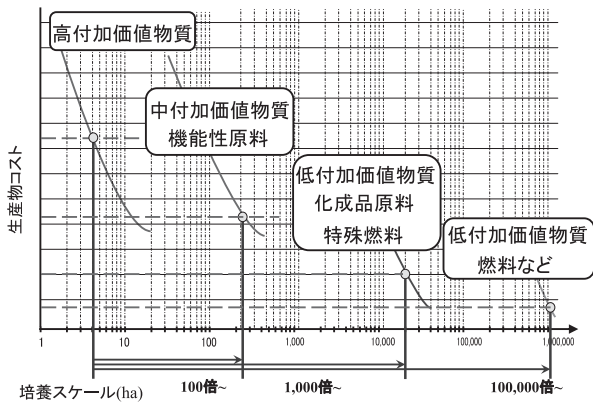


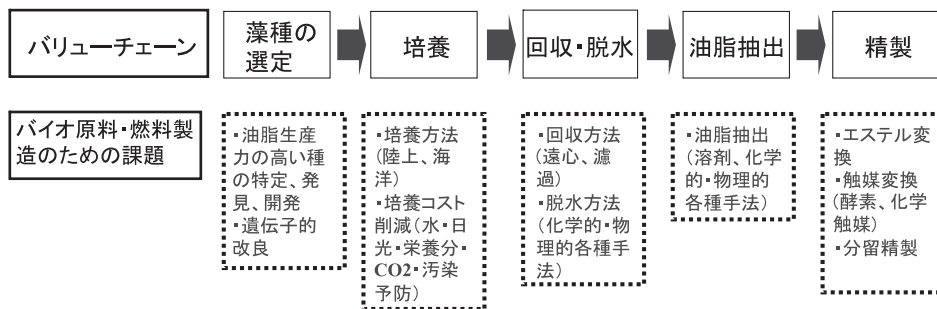
図1. 培養スケールと生産コスト関係のイメージ

がイメージできるかと思う。高付加価値物質については、価格が高い、流通量が少ないことから“小規模・少量生産”の小規模培養スケールで対応できる。また、マーケット規模が大きく、低価格物に向かうほど対数的に培養スケールが上がるのが理解できる。低価格である燃料ともなれば、数十~数百万 ha 規模の培養スケールが必要となる。クロレラ、スピルリナなど現行の培養規模が数十 ha 規模であることから桁違いのスケールになることが想像できる。最も開発が進んでいる米国のベンチャー企業では、多額の資金を得て、100 ha クラスの実証試験へ移っている段階である。微細藻類のオイルはパーム油と同質であるが、パーム油はマレーシア、インドネシアの両国で、800万 ha ほどの栽培面積をもって世界市場の需要を満たしている。しかし微細藻類の大量培養について人類は、いまだ100 ha クラスもオペレーションしたことがない。つまり、実験室や小規模規模では想像できない課題が出てくるということである。ステップバイステップで培養規模を上げ、培養経験とオペレーションノウハウを習得しながら、生産技術を獲得していく必要がある。

### 3. 一貫プロセス開発の必要性

微細藻類によるバイオ原料・燃料用オイル生産プロセスのバリューチェーンを示した(図2)。使用する藻種の選定から大量培養技術、低エネルギーで環境負荷の低い藻体回収技術、オイル抽出技術など多岐にわたる。この一貫プロセスを完成させるには、それぞれの技術を上手く噛み合わせる必要があり、特に使用する藻種により後段のプロセスの技術仕様が変わる可能性がある。藻体回収やオイル抽出技術があらゆる藻種に対しても利用できる汎用性を目指した技術であれば問題ないが、入りの藻種が変われば使えない技術となってしまうこともある。つまり、微細藻類を用いたバイオ原料・燃料用オイル生産プロセスでは、各プロセスの個別検討をプロセス全体の視点から思考することが重要であると考えている。

筆者は特に最初の工程である藻種の選定と培養プロセスが重要と考えている。なぜならば、安定的にコストパフォーマンスが成立するように微細藻類(又は、オイル)を生産する大量培養技術が無ければ、一連のバ



プロセス全体の投入エネルギー低減化も重要課題

図2. 微細藻類によるバイオ原料・燃料生産プロセスと技術的課題

リユースチェーンを成立させることができないからである。つまり、バイオ原料・燃料生産プロセスを完成させるには、目的の微細藻類を大量に安定的生産できる大量培養技術が要となる。また、逆説的であるが、安定的に大量培養ができる藻種が無ければまた、大量培養技術も意味をなさないものとなることから、この2つの工程が、バイオ原料・燃料用オイル生産実用化の成功を握る大きな鍵となるプロセスとなる。

バイオ原料・燃料用オイル生産に利用する微細藻類は、高い生育、高いオイル蓄積など一定の能力を保有すべきであると考えている。その保有すべき能力について、筆者が考える必要能力について表にしてみた(表1)。表1に示した内容は殆どの読者が納得されると思う。筆者がそれぞれの項目の中で特に注目したいのは、前項で述べたように屋外培養できるか否かであると考えている。バイオ原料・燃料用オイル生産を見据えた場合、図1に示したように、はっきり言えば屋内培養では対応できない。さらに、オイル製造コストを考慮しても屋外培養の手段しかない。つまり、再々述べているように、屋外で安定的にオイルを生産できる微細藻類でない限り、極端ではあるがプロセスを成立させることができないことを意味する。また、表1の右に示した図

は、利用できる微細藻類数をイメージしたものであるが、すでに実用化して利用されているクロレラやスピルリナに関しては、経済性コストの議論の範疇であることから、生み出される高付加価値物質の価値と経済性比較で事業が成立するものであれば、今後も様々な藻種が見出される可能性は高いだろう。しかし、エネルギー生産用オイルとなれば、経済性だけでなく、エネルギー収支も評価にはいることから、このような微細藻類は世の中にどれくらい存在するかと言えば、非常に稀である可能性が高い。

#### 4. ソラリス株 (*Fistulifera* sp. JPCC DA0580 株) の獲得とポテンシャル

ソラリス株 (*Fistulifera* sp. JPCC DA0580 株) は、オイル(中性脂質)を大量に蓄積することができる微細藻類として J-POWER が保有する微生物コレクション ([www.oceanquest.jp](http://www.oceanquest.jp)) 見出された海洋珪藻の一つである<sup>4)</sup>。ソラリス株は、実験室の一定環境下で7日間培養することで、乾燥藻体当たり 60 wt% のオイルを作り出すことができる(図3)。産生オイルの中性脂質を構成する脂肪酸組成を調べたところ、9割以上が C16 の炭素

表1. オイル産生微細藻類が保有すべき能力

内容 (関連するプロセス)
1. 速い生育 (培養)
2. 高いオイル含有量 (抽出)
3. 高い光合成活性 (培養)
4. 強光, 温度耐性 (培養)
5. 塩濃度適用性 (培養)
6. せん断応力耐性 (培養)
7. 付着性無し (培養)
8. 酸素耐性 (培養)
9. 重く, 大きい細胞 (回収)
10. 細胞壁が弱い (抽出)
11. オイル組成 (精製)
12. 雑菌汚染耐性 (培養)

藻種選択時の微細藻類、コスト、エネルギー生産の3要素の関係性イメージ

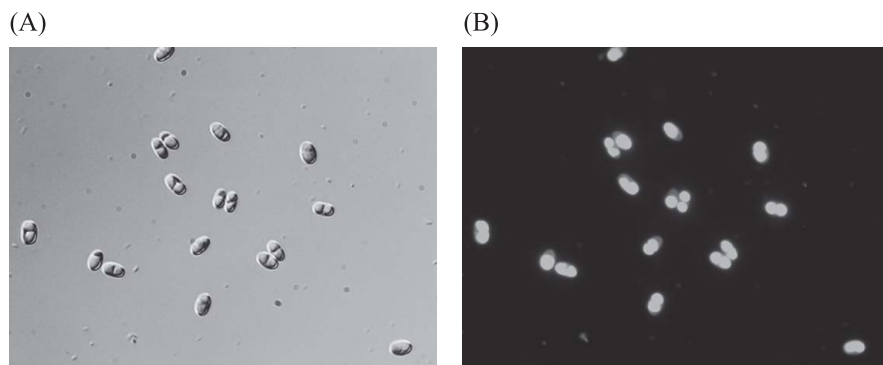


図3. 新たに大量にオイルを生産する微細藻類として見出された *Fistulifera* sp. JPCC DA 0580 株  
 (A) 光学観察下  
 (B) 蛍光観察下 (油滴が白色部位)

数を有する脂肪酸 (C16:0 パルミチン酸, C16:1 パルミトリン酸) で占められ、極めて均一な脂肪酸組成であった。通常、微細藻類の脂肪酸組成は、生育条件により大きく変動するが、ソラリス株は、脂肪酸総量の変化するものの、どの生育条件においても常に9割以上がC16系の脂肪酸であった。このことからソラリス株は、短い培養期間、高オイル蓄積能、シンプルなオイル組成などの特徴から、バイオ原料・燃料用オイル生産に用いる微細藻類の候補藻類としてCREST研究の検討株となっている。現在、ソラリス株の全ゲノムシークエンスが終了し、オイル蓄積の制限因子、育種技術の検討と各種培養装置による屋外培養試験を進めている所である。

### 5. ソラリス株の屋外培養 (ベンチ) 試験評価

ソラリス株をバイオ原・燃料用オイル生産へ適用する際には、屋外で安定的に培養 (生産) できるかが重要である。そこで、CREST研究において、北九州市にあるJ-POWER若松総合事業所内に培養温室 (130 m<sup>2</sup>) を設置し、200 Lクラス (ベンチスケールレベル) の2種類の培養装置 (レースウェイ型, カラム型) を用いて、実環境下で通年を通した屋外培養試験を行っている。また、屋外培養試験では、将来の実用化を見据えて使用する培養装置、培地などすべての培養操作について滅菌操作は行わず、また、培養期間中の水温、pH調整も行わない形で培養試験を実施している (図4)。

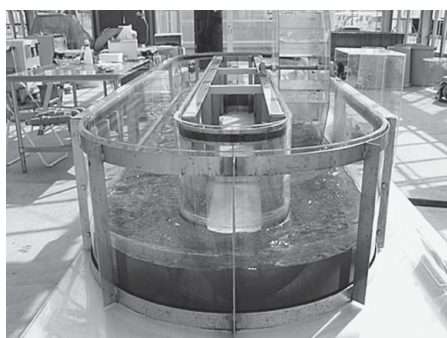
H23年度の屋外培養試験期間は、平成23年4月から11月の7ヶ月の期間で実施した。各培養試験の培養期間は、各試験項目によるが凡そ、7日から10日間で行った。尚、カラム型培養装置は装置導入が9月であったこともあり、平成23年9月から11月までの期間で実施した。両培養装置を用いた培養試験について、培養時期を季節ごとに区分けし、各期間でのソラリス株の藻体濃度

や藻体・オイル生産性、オイル含有量を表2にまとめた。その結果、レースウェイ型培養装置を用いた培養試験では、各季節において安定的に屋外で培養が行えた。藻体収量は通年を通して平均0.3 g (乾物) /Lが得られ、藻体生産性 (g/m<sup>2</sup>/day) についても通年で4~6 g/m<sup>2</sup>/dayと3季節通じてほぼ一定の収量が得られる結果となった。また、カラム型培養装置は秋季だけの試験期間であったが、平均藻体収量が0.3 g/Lとレースウェイ型培養装置と同じであった。オイル含有量については、培地中の栄養塩 (N, P) が残っていた為、実験室で得られるような数値は確認できなかった。一方で、藻体のオイル含有量がレースウェイ型培養装置よりも高くなることが確認された。今後は、両装置での培養期間と生育、栄養塩消費の関係から、高オイル含有藻体が得られる条件検討を行う予定である。

また、ソラリス株が培養装置などの壁面、底面などへ付着する現象は培養期間を通じて見られなかった。さらに、9月からは培養液の1部 (50 L分) を次の培養へ利用した反復回分培養についても、レースウェイ型、カラム型培養装置で1ヶ月間の連続培養が可能であった。また、8月などは水温が36°C以上 (カラム型では45°C) になる状況下でも安定的に培養が行えることが確認された。

今回のH23年度における7ヶ月間の屋外培養試験では、ソラリス株が持つ有効な特徴を明らかにすることができた。表1で示したようにバイオ原・燃料用オイル生産に利用する際に微細藻類が具備すべき能力を示したが、ソラリス株はその殆どの項目をクリアしていた。培養装置や培地を滅菌する必要もなく屋外培養ができるソラリス株は、バイオ原・燃料用オイル生産用藻類の有望株として期待できると考えている。

H24年度は、H23年度に使用した2つの培養装置 (カラム型は2台追加: 全体で600 L) と新たに100 Lのバ



レースウェイ型培養装置

培養条件 (レースウェイ培養)  
培地: 未滅菌 f/2 改培地 (塩濃度 3.7%)  
培地量: 200L  
温度調整: なし  
通気: なし  
攪拌: パドル  
pH: 調整なし



カラム型培養装置

培養条件 (カラム培養)  
培地: 未滅菌 f/2 改培地 (塩濃度 3.7%)  
培地量: 200L  
温度調整: なし  
通気: あり (空気)  
攪拌: スターラー  
pH: 調整なし

図4. 屋外培養試験に用いた培養装置

表 2. 屋外培養装置による *Fistulifera* sp. JPCDDA0580 株の年間培養結果

培養時期 (培養回数)	藻体濃度 (g/L Dry)	藻体生産性 (g/m <sup>2</sup> /day)	オイル含有量 (wt%)	オイル生産性 (g/m <sup>2</sup> /day)
レースウェイ型培養装置				
平成 23 年 4 月 ~6 月: 春季 (5 回培養)	0.19±0.04	4.32±1.51	10.8±5.7	0.41±0.16
平成 23 年 7 月 ~9 月: 夏季 (7 回培養)	0.32±0.09	6.80±1.52	12.4±2.4	0.81±0.18
平成 23 年 10 月 ~11 月: 秋季 (5 回培養)	0.31±0.08	5.30±1.23	15.4±4.5	0.80±0.30
カラム型培養装置				
平成 23 年 9 月 ~11 月 (8 回培養)	0.30±0.07	6.85±1.74	33.6±6.3	2.28±0.70

レースウェイ型培養: 未滅菌 f/2 培地 200 L, 受光面積 1 m<sup>2</sup>, 通気なし, パドル攪拌, 培養期間 4~10 日間  
 カラム型培養: 未滅菌 f/2 培地 200 L, 受光面積 0.8 m<sup>2</sup>, 空気が通気, スターラー攪拌, 培養期間 7 日間

ネル型培養装置, プラスチックバック培養装置 (100 L×5 台) を用いて評価を進める予定である。

## 6. ま と め

今回筆者らが見出したソラリス株は, ベンチスケールである 200 L 規模の培養装置で, 屋外で通年を通して安定的に培養できることが確認できた。しかし, ソラリス株は, 培養水温が低下する冬季などは培養が行えないといった課題も明らかになっている。年間を通じて安定的にソラリス株を培養するには, 冬季の加温に必要な熱源などの確保が必要と考えている。ソラリス株の培養に必要な最低温度は 15°C 以上あればよく, 低品位の熱源で十分であり, 排熱などの利用が考えたシステムや地中熱などの自然エネルギーの活用が 1 つの解決策と考える。また, H23 年度の結果では藻体生産性が 4~6 g/m<sup>2</sup>/day と理想とする 20 g/m<sup>2</sup>/day に届いていないが, H24 年度では, 培養期間 7~10 日, 藻体生産性 20 g/m<sup>2</sup>/day, 回収時の藻体濃度 1.0~1.5 g/L, オイル含有量 30 wt% 以上を屋外培養のベンチマークとして諸条件を決定することを目標として取り組んでいる。H24 春期現在の状況は, レースウェイ・カラム培養装置において, 10 日間の培養で回収時の藻体濃度が 0.6 g/L, 12~13 g/m<sup>2</sup>/day 及び 35wt% 以上の藻体生産性, オイル含有量を達成するに至っている。

一方で, 微細藻類からバイオ燃料 (エネルギー) を生産する時, そのエネルギーの位置づけを明確にしておく必要がある。エネルギーとして“質 (低価格, 高エネルギー密度)”の良好な原油のような物質はともかく, バイオ燃料はエネルギーを生み出す基 (バイオマス) を, “エネルギーを投入して生産”しなければならない。微細藻類を用いたエネルギー生産で, 先ず考えないといけないのが, エネルギー収支 EPR (Energy Profit Ratio: Input energy/Output energy  $\geq$  1) である。付加価値物質や原料用のオイル生産などは, 主に経済的な収支を考えれば良いが, エネルギー生産では, 投入したエネルギーに対してどれだけエネルギーを生み出せるかが重要となる。これまでの微細藻類によるエネルギー生産議論では, 欠落していた重要な部分であるが, 評価できる年間を通じた培養データが殆どなかった。実際の所, 筆者は今回得られた屋外培養試験結果を基に“培養時のみ”の EPR

を計算しているが, EPR をクリアするには, もう一段の努力が必要であることが判明した。具体的な数値は今回控えるが, 意味するところは, 出来る限りのプロセスの低エネルギー化 (特に培養プロセス) を図り, 投入エネルギーに対する藻体収量を上げる必要がある。また, 培養時に人工光源を少しでも使用すると, EPR の課題をクリアすることは殆ど不可能ということがはっきりした (日本に安価で捨てるほどのエネルギー資源があれば問題はないが, 現実には不可能)。この課題解決に向けては, プロセスの一層の低エネルギー化や投入エネルギーの“質”を変え, 化石燃料では無く, 出来る限り未利用エネルギーや自然エネルギーを投入するなど色々な手段を考えないといけない。そこで先ずは, H24 年度から太陽光発電から得られるエネルギーを培養時のエネルギーとして利用することで, どれだけ EPR 向上に貢献できるか, 年間を通じて評価する予定である。

以前から筆者らは, 以前から微細藻類によるバイオ原料・燃料用オイル生産を実際に事業化するには, 安定的にオイルを大量生産する技術 (一貫プロセス), オイル用途ごとのコストバランス, エネルギー分野であればエネルギー収支を上手くバランスを成立させる必要があると訴えてきた。そういった議論が最近やっと出来てきた<sup>35)</sup>。一方で, 現実性を加味しない安易な議論が未だに多い気がする。今後は, これらの現実的な結果の積み重ねにより多くの知見を蓄積し, また微細藻類の持つ可能性を加味し, 現実的な技術へと導くよう当事者として肝に銘じている。

今回筆者らが見出したソラリス株は幸いにして, 日本の気候に合わせて屋外で安定的に培養できる株であった。また, 藻体回収やオイル抽出技術についても既存技術で対応できることを確認しており, 一貫プロセスの基本的な技術はほぼ確立出来ている。今後は各プロセスのブラッシュアップを進めながら, 年間を通じたベンチスケールでの培養技術の評価, すべての技術を組み合わせた一貫プロセスを採用した ha 単位のパイロット試験段階へ移らなければならない。また筆者は, 微細藻類を用いたバイオ原料・燃料用オイル生産技術の実用化時期を 2020 年頃と見据えている。エネルギーに関する課題は, 私たちの生活や産業, 国力, 地球環境問題まで及ぶ大きな事柄で, 安易な議論は避けるべきであることは既に述べた。微細藻類が社会に対してどれだけ貢献できるか,

今後の研究開発に掛かっていると感じている。

最後になるが、今回本稿の執筆に当り、ソラリス株と共にバイオ原料・燃料用オイル生産技術構築を目指している当事者として、“次世代に先送りせず、我々の世代で完成させる”との新たな決意をこの機会にした次第である。

### 謝 辞

本研究は、科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業（以下、CREST 研究）の「海洋微細藻類の高層化培養によるバイオディーゼル生産」実施したものである。

### 文 献

- 1) Yusuf Chisty. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*. 25: 294–306.
- 2) Melinda J. Griffiths and Susan T.L. Harrison. 2009. Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *J. Appl. Phycol.* 21: 493–507.
- 3) 小俣達男, 藤田祐一, 前田真一. 2010. 光合成微生物は資源・エネルギー分野で人類に貢献できるか?—生産性を規定する諸要因の分析—. *光合成研究*. 20(2): 65–71.
- 4) Matsumoto, M., H. Sugiyama, Y. Maeda, R. Sato, T. Tanaka, and T. Matsunaga. 2010. Marine Diatom, *Navicula* sp. Strain JPCC GA0580 and Marine Green Alga, *Chlorella* sp. Strain NKG400014 as Potential Sources for Biodiesel Production. *Appl. Biochem. Biotech.* 161: 483–490.
- 5) 藤田朋宏. 2012. 日本の国益に資する藻類燃料開発とは. *バイオインダストリー*. 29(5): 60–64.