戦略研レポート

2011.12.5

バイオマス資源としての微細藻類

CONTENTS

Ⅰ．バイオマス資源

（1）バイオマス資源の利用
（2）バイオマス資源の変遷
（3）微細藻類の特徴

Ⅱ．微細藻類の脂質生成とその抽出

（1）微細藻類開発の歴史
（2）日米の微細藻類開発
（3）微細藻類の培養と脂質抽出
（4）微細藻類が生成する脂質の特徴

Ⅲ．微細藻類脂質の用途

（1）グリーンバイオ（食糧・環境関連）
（2）レッドバイオ（医療・健康関連）
（3）ホワイトバイオ（工業・エネルギー関連）

三井物産戦略研究所

バイオマス資源としての微細藻類

グリーン・イノベーション事業戦略室　宇野博志

Ⅰ．バイオマス資源

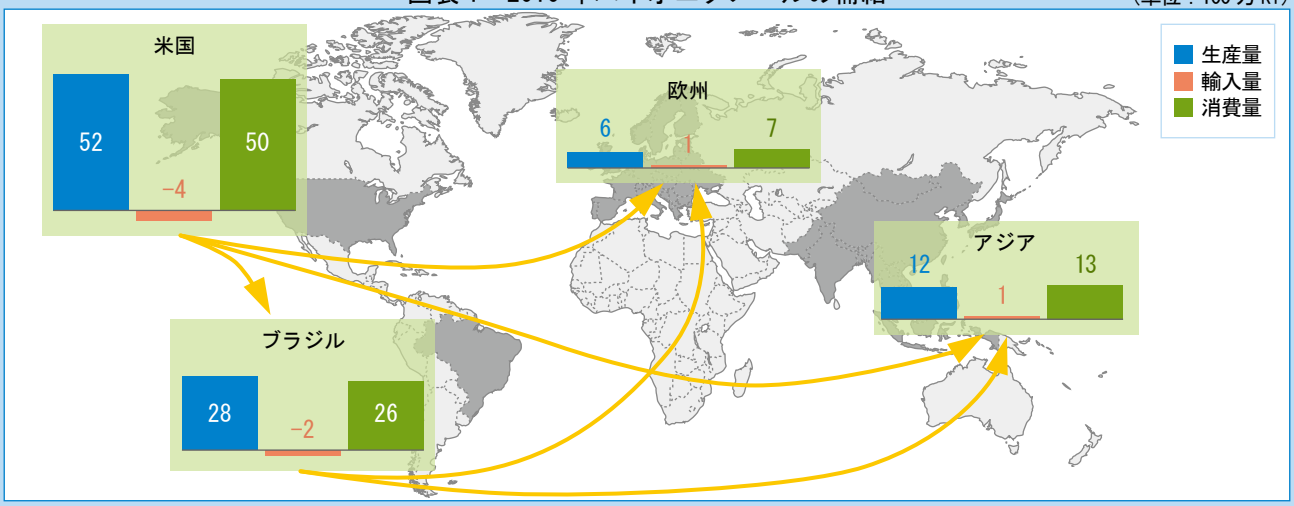
(1) バイオマス資源の利用

原油価格高騰や地球温暖化ガス削減をはじめとした環境意識の高まりなどを背景に、人類の生活を支える燃料や化学品に関して、従来の石油依存の状況から脱却し、非在来型資源やバイオマス利用など原料の多様化を目指す取り組みが進んでいる。

代表的なバイオ燃料としてバイオエタノールがあるが、1970 年代からガソリン代替燃料として本格的に利用され始め、年々消費量も拡大する傾向にある。バイオエタノールに関しては、図表 1 の通り米国とブラジルを中心に生産・消費が行われているが、特徴的なのは、各国のエネルギー政策や農業政策に密接に関連しており、基本的には地産地消型の需給構造であるということである[1]。

また、バイオマス由来の燃料に関しては、ほとんどの場合、既存の化石燃料と比較して生産コストが高いことから、税制優遇などの補助政策や使用義務量などを設定して普及を図っている[2]。一方で、化学品用途としてのバイオマスについては、技術開発に関して政府の補助を得ているケースはあるが、普及のための税制優遇等は特に設けられておらず、企業の自主的な取り組みによって利用が拡大している点がバイオ燃料とは異なる[3]。理由として、化学品の市場は画一的な燃料市場と異なり消費者ニーズが多様で、多少の価格差であれば許容できる場合もあること、また化学品によっては製造プロセスの簡略化によって化石資源よりも安価に製造が可能であることが挙げられる。例えば原料は糖源を用いるために石油系に比べて割高になるものの、糖から直接化学品を製造する効率的なプロセスが開発できれば、原油から石化用ナフサを精製

図表 1　2010 年バイオエタノールの需給　（単位：100 万 kl）



出所：三井物産エネルギー第二本部

1. 米国、ブラジルとも最初にガソリン代替としてエタノール利用が脚光を浴びたのは 1970 年代のオイルショック時である。エネルギーセキュリティーの観点から自国で生産可能なバイオエタノールの開発が進み、2000 年以降の原油価格の高騰を受け、利用が急拡大している。
2. 米国では、エタノールをガソリンに混合する業者に対してエタノール 1 ガロン（約 3.8 リットル）当たり 45 セントの税制優遇措置を設けている。また、エタノール 1 ガロン当たり 54 セントの輸入関税を設けており、国内トウモロコシ生産者を支援している。
3. 米国の大手消費財メーカーの Procter & Gamble（P&G）社は 2020 年までに同社製品の容器の 25%をバイオプラスチックに換える計画。また、トヨタ自動車は 2015 年までに同社が用いるプラスチックの重量比で 20%をバイオ由来とする目標を掲げるなど、多くの企業がバイオマス由来製品の採用に積極的である。

したのち、いくつかの中間体を経て生産するプロセスに、価格的にも対抗できる。

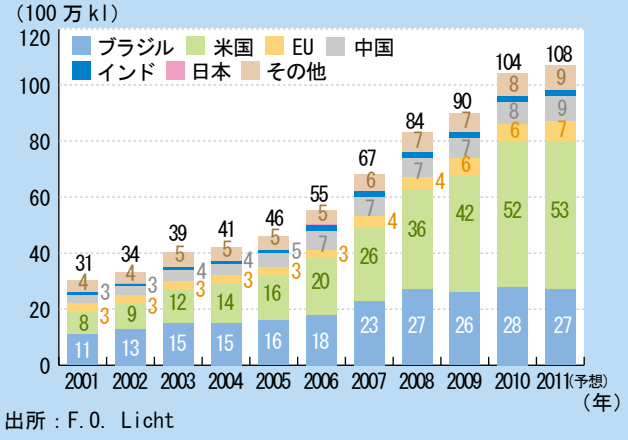
(2) バイオマス資源の変遷

現在、再生可能エネルギーやバイオ燃料・ケミカルとして利用されている代表的なバイオマス資源としては、石炭火力発電設備で石炭と混焼する木質ペレットや木質チップ[4]、バイオエタノール製造に用いられるサトウキビやトウモロコシ、バイオディーゼル製造に用いられるパームや大豆などが挙げられる。

それらの原料の中で、商業ベースでの利用が進んでいるトウモロコシ、サトウキビやパーム、大豆など可食系のバイオマスは第一世代と定義され、市場は拡大傾向にあるが、トウモロコシなどは食糧との競合と持続可能性が課題となっている。例えば米国農務省の発表では、2011/2012 年での国内トウモロコシ生産量の 40%がバイオエタノール生産に使用される見通しで、飼料用を抜いて用途の第 1 位を占めるようになった。米国のエタノール製造と国際的なトウモロコシ価格高騰の因果関係は 2006 年から 2008 年にかけて議論が高まったが、研究者によってその影響度に関する見解はかなりの隔たりがあり[5]、最終的に FAO（国連食糧農業機関）が試算したものでは価格上昇分の 20 ～ 30%程度との結果が出た。この議論自体が主因ではないが、食糧価格に影響を与えない、非可食原料を用いた第二世代のエタノール開発促進のきっかけの一つとなった。また、中国でもトウモロコシからのバイオエタノール製造が急増したため、2008 年以降の新規エタノール工場については小麦とトウモロコシを原料とすることを禁じている。また、パームや大豆に関しては、バイオディーゼル用途への利用が拡大するのに伴って、パーム油の価格上昇とともに主要な生産地であるマレーシアやインドネシアの熱帯雨林伐採が問題となり、持続可能なバイオ燃料のための円卓会議（RSB）でバイオ燃料認証制度[6]が設けられるなどの動きが見られた。

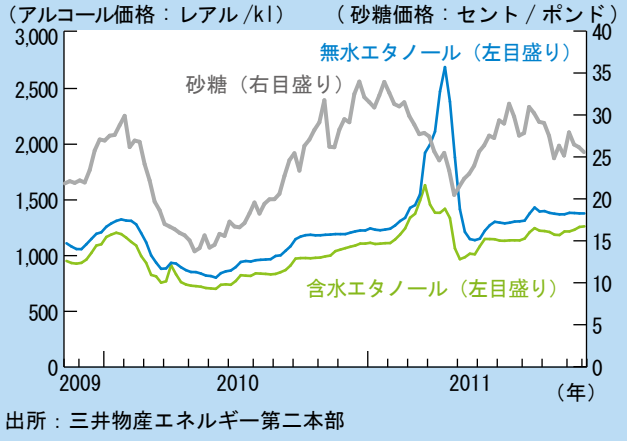
これら課題の顕在化を受けて、1990 年代には第二世代と定義される、食糧と競合しない非可食原料の利用技術の開発が各国で推進された。しかしながら、木質系など強固な構造を有する原料から、エタノールをはじめとする燃料や化学品を生成するプロセス開発が思ったように進展せず、第一世代バイオマスを用いるより製造コストが

図表 2　エタノールの生産量推移



出所：F.O. Licht

図表 3 ブラジルのバイオエタノール / 砂糖価格推移



出所：三井物産エネルギー第二本部

4. 石炭は主要な発電方法の中で、発電単位当たりの CO_2 排出量が最も高いため、CO_2 排出量がゼロと見なされる木質チップや木質ペレットを混焼する取り組みが行われている。
5. 2008 年 5 月に IMF グローバルフード指標ではバイオエタノールのトウモロコシの価格上昇に与える影響は 3%程度にすぎないとの発表がなされ、これを米国農務省などは公的な場で引用した。また米国再生可能燃料協会（RFA）なども比較的低い影響度であるとしている。一方、世界銀行の Mitchell 氏が 2008 年に発表した報告書では、2002 年から 2008 年にかけての食糧価格上昇率のうち、70 ～ 75%がバイオ燃料の製造とそれに伴う土地利用変化などによるものとされていて、国際食糧政策研究所（IFPRI）なども同様の見方をしている。
6. 欧州委員会は、あらゆる種類のバイオ燃料に対し、認証制度を制定するよう、産業界、政府・自治体および非政府団体に呼びかけることを決定。認証には、再生可能エネルギー指令が定める基準に従って生産されたものであること、生産する土地タイプの明確化、地球温暖化ガスの削減効果に関する明確化、が定められた。

割高なのが現状である。加えて、これらの資源はほとんどが陸上の資源作物であることから、代わりに食用作物を栽培した場合との潜在的な食糧競合問題や、成長に水資源を必要とすることによる水資源の枯渇懸念などもあり、さらにメリットの大きい原料の検討が行われた。

その結果、第三世代のバイオマスとして微細藻類がこれらの課題を解決する手段の一つとして注目を集め、2000 年代から急速に研究が進んでいる（図表 4）。

微細藻類は海洋や淡水中に生息する数十ミクロンの微生物で、これを大量に培養し、その体内に蓄えた脂質を抽出してバイオ燃料やバイオ化学品として使用するというものである。

(3) 微細藻類の特徴

分類学上の明確な定義はないが、微細藻類（micro algae）とは一般的には水中に存在する顕微鏡サイズの光合成生物の総称である[7]。微細藻類は、海洋で生息する塩水性、陸上の池などに生息する淡水性、両方の環境で生息する汽水性があり、いずれも陸上植物と同様光合成を行うが、脂質生産能力は陸上植物よりも高い種類が多く、乾燥重量の 30 ～ 50%、種類によっては 70%を超えるものも見つかっている。

バイオマス資源として微細藻類が注目されている主な理由は次の点にある。

- 単位土地面積当たりの収率が圧倒的に高いこと。
- 脂質の蓄積能力が高い。また蓄積した脂質は炭素量の多い脂肪酸エステルが中心であり、化学品用途などへの利用が可能であること。
- 陸上植物と異なり、通年での収穫が可能であること。
- バイオマス資源用の微細藻類は食糧とは競合しないこと[8]。
- 光合成による、CO_2 の固定化能力が高いこと。

単位土地面積当たりの収率に関しては、図表 5 に示す通り、代表的な陸上植物と比較して突出した収率の高さを示す。

図表 4　バイオマス資源の種類と特徴

	第一世代（1970 年代～）	第二世代（1990 年代～）	第三世代（2000 年代～）
原料	・陸生植物由来 ・油脂原料： パーム、大豆、菜種、ひまわり等 ・エタノール： トウモロコシ、サトウキビ等	・非可食原料 ・油脂原料： ジャトロファ、ポンガミア、廃食油等 ・エタノール： セルロース系、都市ゴミ等廃棄物、大型藻類	・微細藻類（淡水系、塩水系）
特徴	・主に食用原料として長期間かつ広域に商業化。 ・燃料用途の拡大によって食糧用途と競合したため、第二世代プロセスの開発が進展。 ・LCA や持続可能性（熱帯雨林伐採等）基準で CO_2 削減効果の少ないものもある。	・醗酵可能糖への変換や、合成ガス（CO, H_2）に転換した上で、各種プロセスによりエタノールや化学品原料を製造。 ・第 1 世代に比べて生産コストが高く、いまだ実用化に至っていない。 ・エタノールや BDF 以外にジェット燃料やブタノールなども開発中。	・微細藻類の種類によっては単位面積当たりの脂質収率が陸生植物に比べて 100 倍以上。 ・健康食品や飼料などでは既に商業化されているが、化学品原料やバイオ燃料用途としてはまだ実証段階。 ・開放型（Open Pond）ないしは閉鎖型（Photo Bioreactor）による培養方法。
課題	・食糧との競合が不可避。 ・灌漑など水資源の大量使用による土地の砂漠化。	・5 炭糖 6 炭糖同時醗酵、酵母の耐性向上などによる生産性向上。 ・セルロース分解酵素の再利用などによる生産コストの低減。	・化学品原料やバイオ燃料用として大量の培養～油分抽出技術の開発。 ・藻類そのものの脂質生成能力の向上。

出所：三井物産戦略研究所作成

7. 藻類（Algae）とは、酸素発生型光合成を行う生物のうち、主に地上に生息するコケ植物、シダ植物、種子植物を除いたものの総称で、真正細菌であるシアノバクテリア（藍藻）から真核生物で単細胞生物である珪藻、黄緑藻、渦鞭毛藻や多細胞生物である海藻類（紅藻、褐藻、緑藻）などを含む。その中で微細藻類という項目はなく、便宜的にミクロ単位の微小な藻を指す。
8. 一部には、サプリメント用途など微細藻類を人類の栄養源として活用する方法もあり、また微細藻類の培養には土地と水を活用するため、究極的には食糧と競合しているという説もあるが、藻類の培養には食用植物の生産には向かない土地の活用を想定しており、食糧との競合は極めて小さいと考えられる。

図表 5　代表的な脂質作物と微細藻類の比較

	油脂生産量（リットル/ha/年）	世界の石油需要を満たすのに必要な面積（100 万 ha）	地球上の耕作面積に対する割合（%）
トウモロコシ	172	28,343	1,430.0
綿実	325	15,002	756.9
大豆	446	10,932	551.6
菜種	1,190	4,097	206.7
ジャトロファ	1,892	2,577	130.0
ココナツ	2,689	1,813	91.4
パーム油	5,950	819	41.3
微細藻類	136,900	36	1.8

出所：『新しいエネルギー藻類バイオマス』渡邉信編集

米国では 2008 年に年間 3 億トン生産されたトウモロコシの約 30%をバイオエタノール用に利用し、4,900 万 kl のバイオエタノールを生産した。しかし、これは米国で消費されるガソリン量 5 億 3,000 万 kl の 9%にすぎず、陸上植物由来のバイオ燃料による石油製品の代替には限界があるとされており、微細藻類が注目を集める大きな要因となっている。

また、微細藻類が蓄える油分は脂肪酸エステルといわれる植物油に近いもので、改質・精製して燃料として使用するだけでなく、界面活性剤や化粧品用途など化学品用原料としての利用も可能な点に特徴がある。脂質含有量の多い微細藻類の種類を選び、効率的な培養方法を開発できれば、陸上植物から得られる脂質生産量の 20 倍から 1,000 倍の生産量が期待できるともいわれている。

さらに、微細藻類は光合成により増殖するが、その際の単位面積当たりの CO_2 固定化能力は森林の 10 倍程度に達すると報告されており、地球温暖化対策の観点からも微細藻類の活用が期待されている [9]。

一方で、自然条件下では微細藻類の増殖速度は遅く、油脂の生産効率も低いため、微細藻類を商業ベースで利用するには、人工的にそれらを向上させる取り組みが必要である。

Ⅱ．微細藻類の脂質生成とその抽出

（1）微細藻類開発の歴史

微細藻類研究の歴史は古く、日本では戦後間もなく、当時の栄養不足を補うため栄養分に優れたクロレラの屋外大量培養の研究が、GHQ の要請を請けた徳川生物学研究所で開始された [10]。

また、エネルギー用途の研究は、オイルショックを契機に 1970 年代から主に米国と日本 [11] で始まったが、原油価格との比較において経済性が見いだせず、石油価格の落ち着きも手伝って研究開発は一時中断した。

その後、2000 年代に入り、石油価格の急激な上昇や地球温暖化問題の表面化などを契機に、再び微細藻類に注目が集まっている。特に米国では、2007 年にエネルギー独立・安全保障法 [12] が制定され、再び研究が活発化した。そのほかにも、電力の大部分を単位発電量当たりの CO_2 排出量の多い石炭発電に依存しているオーストラリアでは、CO_2 固定化を目的として微細藻類の研究に力を注いでいる。

（2）日米の微細藻類開発

微細藻類に関しては、米国を中心に多数のベンチャー企業が主に微細藻類の種の開発を行っているが、特徴的なのは石油メジャーや化学会社が早い段階からこれらのベンチャーと提携ないしは JV を設けて研究を行っていることである。特に注目されるのは、これまでバイオエタノールなどのバイオ燃料に消極的だった ExxonMobil 社が、2009 年から 6 億ドルもの巨額な資金を投入して研究している点で、微細藻類の種の開発から培養・抽出・精製技術に至るプロセス全体について網羅的な調査を進めて

9.　国内では、1993 年より 7 年間実施されたニューサンシャイン計画の中で、「細菌・藻類等利用二酸化炭素固定化・有効利用技術研究開発」が研究された。閉鎖型であるフォトバイオリアクタの活用によって、微細藻類による CO_2 吸収が、森林の 10 倍に当たる 50g-CO_2/m^2/day を達成した。

10.　徳川生物学研究所での研究はすぐには商業化には結びつかなかったが、その後、現在のクロレラ工業（株）に引き継がれ、今日のサプリメントとしてのクロレラの普及につながった。

11.　国内では、経産省が主導したサンシャイン計画（1974 ～ 1993 年）、ニューサンシャイン計画（1993 ～ 2000 年）の中で、微細藻類のエネルギー利用についての研究が行われたものの、実用化の段階までは行かず実験室規模の実証試験にとどまった。

12.　この新たなエネルギー法では、①燃費基準の 40%改善（現行の 1 ガロン当たり 25 マイルから 2020 年までに同 35 マイルへ引き上げ）、②再生可能燃料基準（RFS）の拡大（2008 年の年間 90 億ガロンから 2022 年の 360 億ガロンまで段階的に拡大するとともに、360 億ガロンのうち 210 億ガロンをトウモロコシ以外の新たなバイオ燃料で賄うことを義務付け）、③バイオディーゼル使用基準の設定（2012 年までに 10 億ガロン）、を主な柱としている。

おり、大きな注目を集めている。そのほか、BP（British Petroleum）や Chevron などがバイオディーゼル系の燃料製造の製造実証を行っている。一方で Shell は、ハワイで進めてきた藻類ベンチャーとの JV から撤退して微細藻類の開発からは一旦手を引いており、対応が際立っている。

また、化学会社では Dow Chemical のような総合化学メーカーや P&G や Unilever など消費材メーカー、大手鉱業資源の Anglo American なども研究を進めている。

日本国内では、ニューサンシャイン計画の研究を引き継いだデンソーなどが単独で実証を行っているが、開発体制や資金面で米国には大きく水をあけられている。そのなかで、2011 年に IHI が微細藻類の開発を表明し、2011 年 7 月現在で、燃料油生産効率が最も高い榎本藻 [13] を使ったバイオ燃料製造を目指すとしており、今後の動向が注目される。

各社の研究内容は、培養速度や脂質収率のアップや雑菌に対する耐性の高い微細藻類の開発など、微細藻類そのものの開発が中心で、遺伝子組み換えの手法も多用されている。加えて、培養方法である屋外型の培養池や透明なプラスチック製のパイプを組み合わせたリアクタ（Photo Bioreactor; PBR）の開発、培養後の脂質抽出や精製技術の開発など、周辺技術の開発も盛んである。

（3）微細藻類の培養と脂質抽出

微細藻類は、太陽光と CO_2 の存在下で光合成によって脂質を蓄積する。これに例えば窒素の欠乏など何らかのストレスが掛かると脂質の生成を加速させることができるため、人工的にこの状況を作って商業規模での脂質生産を目指すのが微細藻類の開発である。この仕組みを独立

図表 6　石油メジャー、化学会社の微細藻類への取り組み

石油、化学会社	提携ベンチャー	提携概要	開発状況
ExxonMobil	Synthetic Genomics	・光合成微生物を使った微細藻類からの次世代バイオ燃料開発（2009 年 7 月発表）。	・ガソリンとディーゼルの両立性を持つ高度な燃料開発目標。 ・EM として、全体で 6 億ドル超の投資計画も発表。
BP	Martek Biosciences	・微細藻類から醗酵法によるバイオディーゼル開発（2009 年 8 月発表）。	・複数年の研究。 ・BP は 1st Phase で 1,000 万ドル出資し、技術調査等実施。
Royal Dutch Shell	HR BioPetroleum	・JV（Cellana）を設立し、光合成による次世代バイオ燃料開発（2009 年）。	・ハワイにて小規模パイロットプラント建設実証。 ・Shell が事業計画を見直し、JV から脱退（2011 年 2 月）。
Chevron	Solazyme	・微細藻類から醗酵法によるバイオディーゼル開発（2008 年 1 月）。	・出資等の詳細は公表されていない。
Dow Chemical	Algenol Biofuels	・光合成によるバイオ化学品開発（2009 年 1 月発表）。	・Photo Bioreactor による海水性微細藻類培養からエタノール製造。
Anglo American	MBD	・MBD 株式の 20%取得（2009 年 11 月）。	・CCS 用の実証プラント設置に合意。 ・MBD は数十億豪ドル規模の藻類を使った CCS の開発を計画中。
P&G	MicroAlgae	・米国エネルギー省（DOE）のバイオディーゼルプログラム（総額 2億2,800万ドル）に採用。	
Unilever	Solazyme	・藻類からの油脂開発に関する R&D 合意（2010 年 3 月）。	・石鹸や他のパーソナルケア製品向け。 ・Solazyme の油脂による製品製造の試験は実施済み。

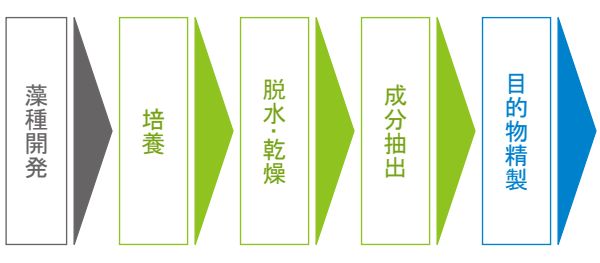
出所：三井物産戦略研究所作成

13. 神戸大学の榎本平教授が保有する微細藻類で、ボトリオコッカスの 1 種。一般的なボトリオコッカスに比較して増殖速度が 1,000 倍になり、また雑菌などが混在する環境でも培養が可能であるなどの特徴を有している。

栄養型と呼ぶが、光合成ではなく別に栄養源を与えて脂質を生成させる従属栄養型の藻類もある。独立栄養型は自然光であれば日中しか脂質生成を行わないので、PBRと人工光を組み合わせて昼夜を通した脂質生成を試みるベンチャーもある。従属栄養型の場合必ずしも光を必要としないので鉄製の汎用的な容器で培養できる。

微細藻類から脂質を製造する工程は①藻種開発：微細藻類の選定、②培養：単一の微細藻類株を増殖させる培養プロセス、③脱水・乾燥：ある程度の濃度に増殖しかつ脂質を蓄積した微細藻類を水中から回収し、次の工程に合わせて脱水・乾燥するプロセス、④成分抽出：微細藻類の体内に蓄積された脂質を抽出するプロセス、⑤目的物精製：混合物である脂質を目的に合わせて分離・精製するプロセス、で構成される（図表 7）。

図表 7　微細藻類からの脂質製造プロセス



出所：三井物産戦略研究所作成

①藻種開発

プロセス全体で最終製造コストに最も影響を与えるのがこのプロセスであり、いかにして脂質分を多く含みかつ培養速度の大きい微細藻類を発見できるかについて、多くのベンチャー企業が取り組んでいる。株種の改良手段として遺伝子組み換えも利用されるが、商業化の際にはそれらの微細藻類が培養地外に飛散した場合の環境影響なども考慮する必要がある。また、培養プロセスで雑菌などの影響を受けやすいものは結果的には大量培養が難しいため、それらに対する耐性の強いものを選ぶ必要もある。

②培養

プロセス全体の中で最も重要で開発が必要な技術が培養プロセスである。

脂質の生産量は、個々の微細藻類に含まれる脂質の含有量と、培養によって増殖する個体数の掛け算で計算

図表 8　閉鎖型と開放型の培養設備比較

	閉鎖型	開放型
	透明なプラスチックパイプを使った Photo Bioreactor (PBR)	Open Pond with Raceway
汚染	・大気からの汚染は問題ないが、一度水質汚染が発生すると影響大。	・雑菌混入等による目的藻類以外の繁殖などが起こり得るが、スピルリナなど一部の藻類で既に実用化。
光合成効率	・高い。ただし PBR 内部の汚れにより光合成効率低下の可能性がある。 ・PBR内に光源を追加して生産性向上も可能。	・自然光が受光する時間帯のみ稼動。また、水温の影響もあり年間稼動日数は 200 日程度。
初期投資、運転コスト	・初期投資、運転コストとも高い。	・初期投資、運転コストとも低い。
生産性	・水平管での培養では生産効率は低いが、垂直型では効率改善は可能。	・深さ方向は通常 30cm 程度。 ・一般的にはPBRでの生産性の10分の1以下に低下する。
今後の展開	・実証研究での培養方法として今後発展か。 ・袋状 PBR（第 3 世代）により、コスト低減が図られつつある。	・製造コストの低減のためには、開放型での培養が必須条件で、PBRの生産性に近づける技術開発が進行中。

出所：三井物産戦略研究所作成（写真提供／上左：筆者、上右：Earthrise Nutritionals LLC）

される。つまり、株種選定により脂質含有量の多いものを選ぶことと、その上で増殖速度が高いところで安定して培養できる培養条件を見つけることの両方を追求する必要があることを意味している。

小規模な生産では閉鎖型の PBR でも事業化ができる可能性はあるが、大規模かつ低コストでの培養には開放型のオープンポンドが望ましいことは自明である。しかし、これまでは、オープンポンドでは PBR でのパフォーマンスとかけ離れたものしか出ていない。例えば、生産性の指標として 1 日 1 ㎡当たりの微細藻類の重量が挙げられるが、これまでのさまざまな実証研究でも PBR での培養で 30g/ ㎡ / 日程度の生産性があっても、それをオープンポンドに移すと 1g/ ㎡ / 日もできないケースも多く、この点を改善することが実用化に当たっての最大の課題となっている。

例えば、脂質分 70%、微細藻類の生産性を 30g/ ㎡ / 日と仮定した場合、国内のガソリン需要を賄うために必要な培養地の面積は、概ね琵琶湖 8 個分と計算できるが、もし生産性が 1 g/ ㎡ / 日しか出ない場合には日本の国土面積の約 40%に当たる培養地が必要になり、実現不可能となる。

図表 8（前頁）に閉鎖型の PBR と開放型のオープンポンドの比較を示すが、燃料用や化学品原料用にはオープンボンドでの実証が中心である。ただ PBR でも従来のチューブ型から袋状のプラスチックを水中に配列する次世代の PBR も開発されつつある。

③脱水・乾燥

培養された微細藻類は、水中での重量比が 0.5%から 0.05%と非常に薄い濃度のため、まず藻類を凝集させた上で遠心分離を行うなどの分離・脱水と乾燥が必要になる。これまで行われてきたのは遠心分離によるものだが、これに化学凝縮や濾過などを組み合わせて最終的にはペースト状のものにする。

今後の技術開発は必要ではあるが、コストインパクトは培養プロセスに比べて小さいと考えられており、また設備自体も既に完成された技術であることから、商業化の際に大きな課題になることはないと考えられる。

④成分抽出

藻類の中には生成した脂質分を体外に排出する種類もあるが、一般的な微細藻類はその体内に脂質分を貯蔵するので、脱水・乾燥した個体から成分を抽出するプロセスが必要になる。菌類を除く単細胞微生物は堅い細胞壁を持つのでこのプロセスは簡単ではない。大量にかつ低コストで、かつ細胞内の脂質をできるだけ多く抽出する技術開発が必要で、従来の微細藻類を破砕して脂質を乳化させるホモジナイザや溶剤抽出などのプロセスが検討されている。

この工程も脂質抽出プロセスと同様それほど大きな課題ではない。

⑤目的物精製

抽出された脂質分はそのまま利用することも可能だが、化学品用途や燃料用途として適したものとするためには、それぞれの目的に合った蒸留・精製など既存の化学プロセスと同様のものが必要となる。また、商業化での採算性を上げるため、有価成分を先に抽出することも検討されている。

（4）微細藻類が生成する脂質の特徴

微細藻類が生成する脂質には、グリセリンと脂肪酸で構成されるトリグリセリド、糖と結合した糖脂質、リン酸エステル部位を持つリン脂質、炭化水素が含まれる。

炭化水素はディーゼル燃料とほぼ同等のものであり、不純物除去など精製プロセスを経て drop in fuel[14] として利用できる。

微細藻類が生成する脂肪酸は、炭素数が 12 程度のものから 30 以上のものまで含む重質の油であり、かつ二重結合を含む不飽和脂肪酸が多いのも特徴である。不飽和脂肪酸は、可食原料であるパーム油や大豆油を使った洗剤や界面活性剤などの代替品として利用できる可能

14. 例えば脂肪酸メチルエステル（FAME）などと異なり、エンジンなどを改造せずにそのまま使用できる燃料。

性がある。また、不飽和部位の化学活性が高いことから、他の化学品製造の原料としての利用も可能と考えられる。

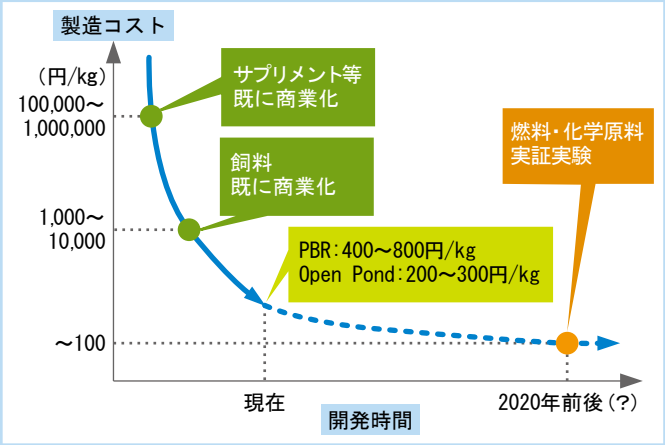
クロレラやスピルリナなどは、DHA や EPA などいわゆるオメガ 3 といわれる脂肪酸を含み、補助栄養剤として既に利用されており商業生産がなされている。また、ワムシと呼ばれる養殖用餌のための飼料などの目的で商業生産されている藻類もある。

これらサプリメントや飼料用途の場合は、価格的には 1kg 当たり千円から百万円程度で、需要量は国内全体で年間数千から数万トン程度であるため、生産効率が低くコストが高くなってもビジネスとして成立するが、化学品用途や燃料用途の場合、既存の化石燃料由来の製品と対抗するには 100 円 /kg 程度の価格と、年間数十万トンから数百万トンの規模での生産が必要となるため、低コストでのプロセス開発のみならず、用地や水源の確保、大量培養に伴う環境対策なども検討される必要があり、商業化までにはまだかなりのハードルがある。

現在達成できている脂質の製造コストについては、種々の見方があって明確ではないが、PBR での製造で概ね 400 ～ 800 円 /kg 程度、オープンポンドではその半分程度のコストで製造可能ではないかとみられている。実用化の見通しも多くの意見があるが、技術開発が順調に進んだとして、2020 年前後に燃料や化学品用途などに使用できるレベルに到達するのではないかと推測される(図表 9)。

図表 10 に代表的な微細藻類の種類と用途などを示す。

図表 9　微細藻類からの脂質製造コストと用途開発



出所：三井物産戦略研究所作成

図表 10　代表的な微細藻類の種類

種類	用途	有価成分	製造メーカー・研究機関
クロレラ Chlorella	健康食品 栄養剤 魚類飼料	高蛋白質 β-1,3 グルカン ビタミン B	クロレラ工業(株)（商業化）
スピルリナ Spirulina	健康食品 栄養剤 魚類飼料	GLA（γリノレイン酸） フィコビリ蛋白質 ビタミン類	DIC& Earthrise（商業化） 高アルカリ性で増殖
デュナリエラ Dunaliella	健康食品 魚類飼料	β カロテン	(株)日健総本社（商業化、Seambiotec 技術）
ヘマトコッカス Haematococcus	健康食品	アスタキサンチン	富士化学工業(株)、富士フィルム(株)（商業化）
ナンノクロロプシス Nannochloropsis	魚類飼料	EPA	スメーブジャパン（Seambiotic 提携、商業化検討中） 低温（水温 18℃以下）での培養可
ボトリオコッカス Botriococcus	バイオ燃料 バイオ化学品原料		筑波大学渡邉教授 淡水系、油脂を体外に排出
オーランチオキトリウム Aurantiochytrium	バイオ燃料 バイオ化学品原料		筑波大学渡邉教授（研究中） ボトリオコッカスの 10 倍の脂質生成能力
シュードコリシスチス Pseudochoricystis	バイオ燃料		デンソー(株)、慶応大学（実証中）
ユーグレナ Euglena	健康食品 魚類飼料 バイオ燃料	ビタミン類 ミネラル アミノ酸	(株)ユーグレナ、東京大学（実証中）

出所：三井物産戦略研究所作成

Ⅲ. 微細藻類脂質の用途

バイオテクノロジー分野では、それぞれの適用範囲に応じて、「グリーンバイオ（食糧・環境関連）」、「レッドバイオ（医療・健康関連）」、「ホワイトバイオ（工業・エネルギー関連）」などの分類があり、微細藻類は、既にグリーンバイオの領域などで商業化されているが、今後の可能性も含めて領域別に俯瞰する。

（1）グリーンバイオ（食糧・環境関連）

グリーンバイオ領域では、畜産や水産養殖の飼料として、また、機能性食材などとして既に微細藻類の利用が商業化されているが、これは微細藻類が高い栄養価を持っていることを利用したもので、今後も拡大する方向にある。利用方法としては藻類を培養後そのまま使うため、成分抽出のプロセスは不要になる。

この領域での代表的な微細藻類は、クロレラ、スピルリナ、デュナリエラなどで、健康食品として 30 年以上の商業生産の実績があり、最も利用が進んでいる分野である。特に培養に関しては日本の技術がかなり先行しており、オープンポンドでの培養経験は欧米に比べてノウハウの蓄積が大きい。

（2）レッドバイオ（医療・健康関連）

レッドバイオ領域では、機能性食材などがグリーンバイオと重なるが、単独の領域としては医薬品や疾患予防として利用されるものがある。これには、微細藻類を補助栄養剤（サプリメント）として直接摂取するほか、カロテノイドや不飽和脂肪酸などの有効成分を抽出して食品や化粧品などに添加するなどして利用されるものも含まれ、この領域も商業化されている。

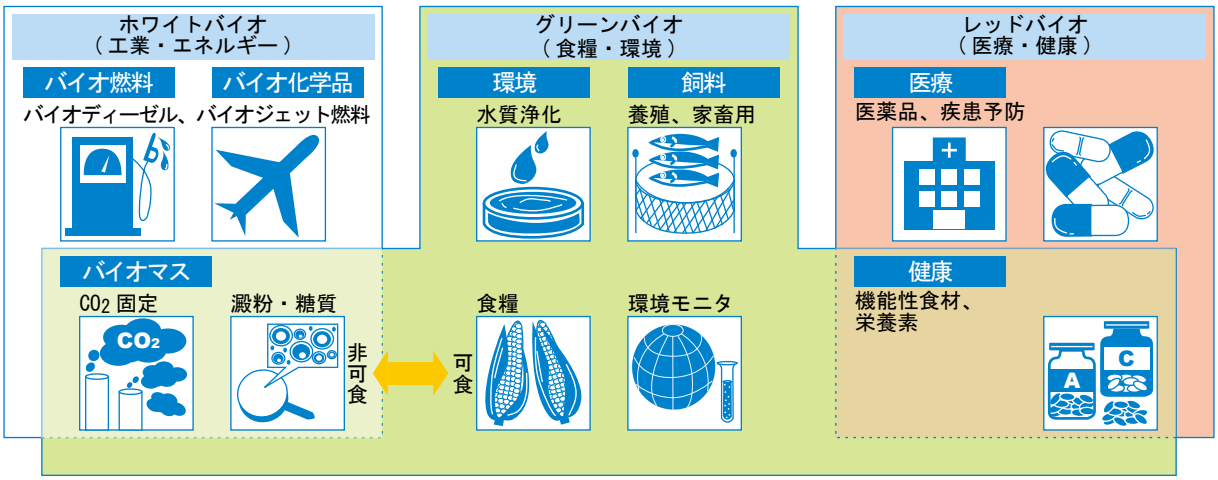
この領域での代表的な微細藻類にはヘマトコッカス、ラビリンチュラなどがある。

（3）ホワイトバイオ（工業・エネルギー関連）

ホワイトバイオの領域では石油やプラスチックなどの化学品原料として、特に非可食原料として第 1 世代バイオマスの代替原料としての期待が高い。

燃料利用としては、特に液体燃料が必須である航空機燃料用に使用できないか検討されており、ボーイング社が行ったバイオジェット燃料の試験飛行では、実際に微細藻類由来のものが使用された。航空業界では国際線を運航する航空会社などが加盟する IATA が 2020 年か

図表 11　微細藻類の利用が期待される領域



出所：科学技術動向（2009 年 9 月）より三井物産戦略研究所作成

ら航空機の CO_2 排出に上限を設け、かつ 2050 年までに対 2005 年比 50％の CO_2 排出量削減を目標とする行動計画を策定しており、またバイオマス由来のバイオジェット燃料規格が米国材料試験協会（ASTM）の認証を取得したこともあり、今後開発が本格化するものと考えられる。

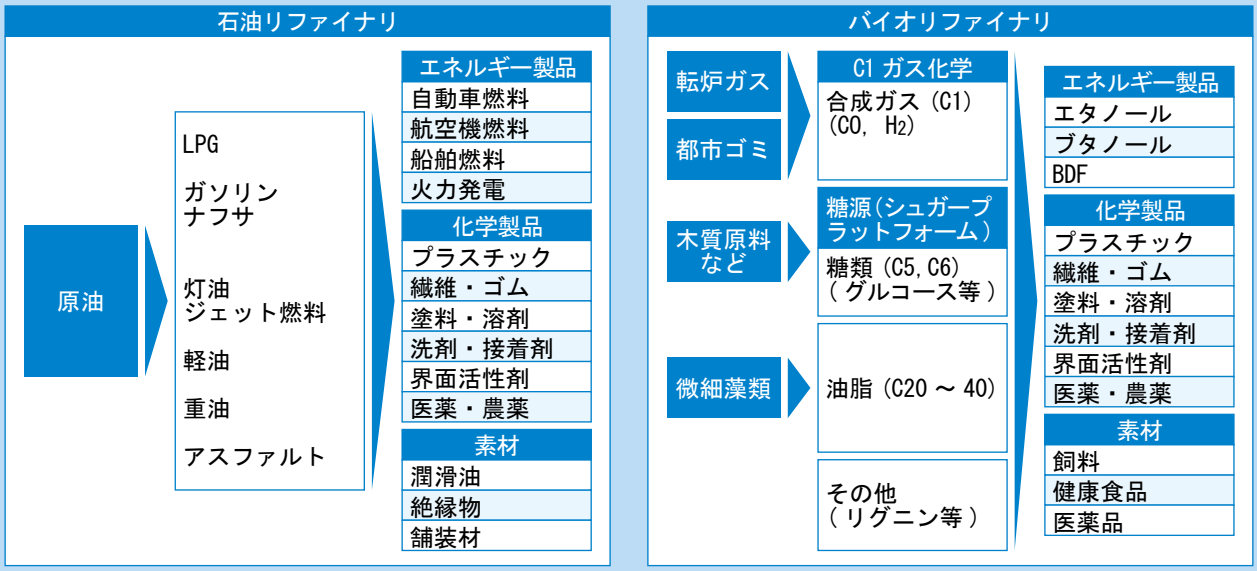
バイオ化学品として微細藻類の脂質を利用する試みはまだほとんどなされていないが、バイオリファイナリでは、バイオマスを原料とした糖源（シュガープラットフォーム）と C1 ガス化学と呼ばれる合成ガスからの重合プロセスが主流になるものと考えられ、重質油を生成する微細藻類の脂質は、油脂原料としてバイオマスとは競合しない分野での展開が期待できる。

ホワイトバイオの領域の開発はまだ緒についたばかりであり、生産性の高い微細藻類を見つける原料開発と、それらの微細藻類の培養から製品に至るまでのプロセス技術開発において今後大きな進展が見込まれる。

微細藻類の CO_2 固定化能力は単位面積当たりで陸上植物の 10 倍以上あり、この点に着目して発電所などから発生する CO_2 を微細藻類に吸収させ、バイオ燃料などに転換することで CCS（Carbon Capture and Storage, CO_2 の吸収貯留）の代替および排出権獲得を目指すプロジェクトもある。

この領域での代表的な微細藻類にはボトリオコッカス、シュードコリシスチス、イカダモなどがあるが、この中ではボトリオコッカスが高い脂質生成能力を持ち、かつ生成した脂質を体外に排出する性質があるので有望とみられている。2010 年筑波大学が発見したオーランチオキトリウムは、ボトリオコッカスの 10 倍の脂質生成能力を持つとされており、今後の研究の成果が望まれている。

図表 12　石油リファイナリとバイオリファイナリ



出所：三井物産戦略研究所作成