

福島県南相馬市における「土着藻類」バイオマス生産

出村 幹英

はじめに

藻類とは、「酸素発生型光合成を行う生物のうち、コケ植物、シダ植物、種子植物を除く生物」と定義される¹⁾。ジャイアントケルプのような大型海藻から、ナノサイズの単細胞微細藻類まで、多種多様な生物が含まれている。光合成を行う植物的性質を持ちながら、中には鞭毛を持って運動する動物的性質を持った種類もある。

微細藻類はほとんどすべての地球環境に生息するといっても過言ではない。顕微鏡を使用しないと観察できないため、見過ごされているだけである。田んぼや畑で植えもしないのに雑草が生えるように、水たまりや湖沼には微細藻類が自然と発生する。この「雑藻(ぞつも)」(土着藻類)を増殖させ、それを燃料化するというプロジェクトが福島県南相馬市で行われている。2013年度から2015年度にかけて行われた「福島県再生可能エネルギー次世代技術開発事業—土着藻類によるバイオマス生産技術の開発—」,そして、2016年度から始まった「微細藻類燃料生産実証事業」である。

本稿では、これら「福島プロジェクト」で行われてきた土着藻類バイオマス生産技術に焦点をあてて解説する。

藻類バイオマスとは？

「バイオマス」という言葉は、生態学において使用されてきた用語であり、「生物現存量」を表すものである。近年では、エネルギー資源として利用可能な生物体または生物体由来の物質を指す用語としても使用されている。トウモロコシの茎、稲わら、サトウキビの搾りかす、家畜の糞、製材した際に出る木屑など、これまで資源として利用されてこなかったこれらも「バイオマス資源」として認知されつつある。とくに植物系のバイオマスは、光合成によって大気中の二酸化炭素を固定することで生産されているため、たとえ燃料として燃やしたとしても、大気中の二酸化炭素は増加しないというカーボンニュートラルの考えからも注目されている。本稿で取り上げる藻類バイオマス(微細藻類バイオマス)も光合成によって作り出される植物系バイオマスの一種である。

藻類バイオマスがその他の植物系バイオマスと比較し優れている点に、バイオマスの中にオイル(藻類オイル)

を含有していることがあげられる。ボトリオコッカス・ブラウニー (*Botryococcus braunii*) という微細藻類の場合には、バイオマスの50%以上がオイル分となることもある。そのオイル分のほとんどが重油相当の炭化水素である。また、藻類オイルの中には、アスタキサンチンやカロテノイドなどの高付加価値物質も多く含まれる。さらに、多くの藻類が産生するトリグリセリド(中性脂質)は、バイオディーゼルの原料となる。トウモロコシやダイズなどからもトリグリセリドは生産できるが、その生産性は微細藻類の何百分の一に過ぎない²⁾。

藻類バイオマスは、耕作に不向きな土地でも生産できる点も優れた点である。福島プロジェクトでは、津波によって耕作にも居住にも不向きな土地の有効利用の手段として藻類バイオマスの生産を選んだのである。

微細藻類を増殖させる技術

藻類バイオマスを生産するという事は、藻類を育てる(増殖させる、培養する)ということである。金魚用などの水槽に水を入れ、野外に放置しておく、水の色が緑色に変色したり、緑色の糸状の浮遊物が出現したりする。藻類が自然に入り込み増殖したのである。しかし、より大量に増殖させようとすると案外難しく、藻類が増殖しやすい環境を準備する必要がある。

まず、水の成分である。藻類の増殖には、農業用の肥料と同じ成分である、窒素、リン、カリウム、マグネシウムなどの栄養塩類が必要である。その混合割合などは、長年研究され、さまざまな「培地」として発表されている³⁾。

水槽の形状も重要である。光環境や栄養塩濃度を均一にするために水流を起こす必要があり、効率のよい水の循環ができる形状が求められる。微細藻類の培養装置についても数多くの研究例がなされている。表1に代表的な培養装置をあげた。レースウェイと呼ばれる楕円形の池(図1)などに代表される開放型の培養装置は設置コストが比較的安い。雨や他の生物の侵入(コンタミ)の恐れがある。透明なプラスチックを筒状にし、蓋をつけた閉鎖型のチューブリアクターのような培養装置は、コンタミリスクを低減できるが、設置コストが高い。

培養実験を繰り返し、培養する藻類に適した培養装置

表1. 微細藻類の培養装置

	代表的装置	利点	問題点
開放型	レースウェイ 円形池	コスト：小 生産量：大	コンタミリスク：高 気象条件に左右 占有面積：広大
閉鎖型	チューブリアクター フラットパネル	コンタミリスク：低 占有面積：小 室内での管理可能	コスト：大 生産量：小

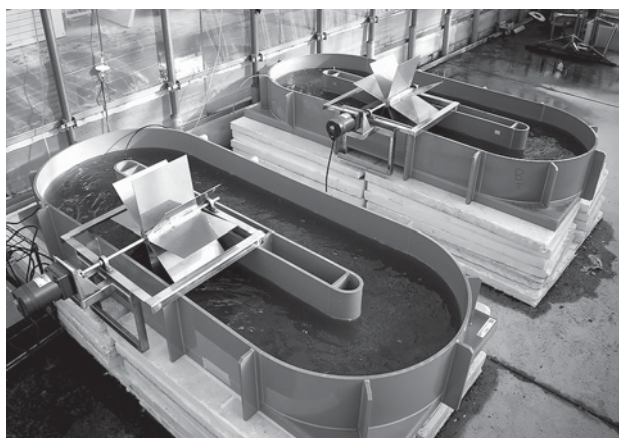


図1. 1 m² レースウェイ. その他さまざまな広さがある.

を選択する必要がある. その他, 光合成に必要な二酸化炭素を効率的に水に溶解させる技術, 光条件をよりよくするための補助光装置などさまざまな技術が研究されている.

単一の種類の微細藻類のみを増殖させる際には, 他の藻類のコンタミは非常に大きな問題となる. ターゲットの藻類より, 侵入した藻類の増殖が早ければ, 藻類が入れ替わってしまう可能性もあるからである. そのため, 閉鎖型の培養装置が望ましい. また, 開放型の培養装置を選んだ場合, 培地のpHを極端に上げたり, 塩分を高くしたり調整して, ターゲットの微細藻類以外が侵入したとしても増殖しにくい状況を作り出す必要がある.

福島プロジェクトでは, 開放型のレースウェイを採用した. 福島プロジェクトの場合, 多種多様な種類を含む「雑藻」(土着藻類)をターゲットにしているため, 藻類のコンタミは逆に歓迎されることである. つまり, 単一藻類の培養の問題点を逆手にとった方法といえよう.

南相馬市の土着藻類培養

南相馬市沿岸部に建設された藻類バイオマス生産開発拠点では, 1 m²から1000 m²までのさまざまなサイズのレースウェイ, また, 実験棟, ビニールハウスなど,

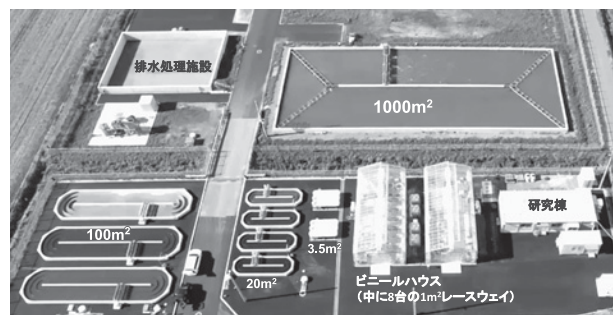


図2. 南相馬市の研究拠点

培養した藻類を収穫する施設が設備された(図2).

2014年10月から, まずはビニールハウス内に設置された1 m²のレースウェイ(図1参照)を使用して土着藻類の培養を開始した. レースウェイに培地を満ちし, 拠点近くの湖沼の水をほんの少し投入し1週間もすると, 水の色は緑色となり, 多種多様な微細藻類が増殖しているのが確認された.

藻類のコンタミは大歓迎であると述べたが, 微細藻類を捕食する大型の動物プランクトンなどが侵入し, 微細藻類を食べ尽くしてしまうのではないかと懸念があった. しかし, ほんの少数の原生動物やバクテリアが確認されたが, 藻類は実験開始から1年以上にわたって優占し続けた.

増殖した微細藻類を顕微鏡で観察すると, 少なくとも20種以上の微細藻類が共存していた. 中でも, 緑藻の「イカダモ」と呼ばれるデスマデスムス属 (*Desmodesmus*) の藻類の存在量が多かった. また, 同じ緑藻のセネデスムス属 (*Scenedesmus*), 糸状体のクレブソルミディウム属 (*Klebsormidium*), デイクチオスフェリウム属 (*Dictyosphaerium*) の微細藻類も代表的な種類であった(図3).

微細藻類の培養方法には, 大きく分けてバッチ培養と連続培養がある. バッチ培養は, 培養開始から終了まで培養液の収穫や追加は行わず, 培養終了時にすべての培

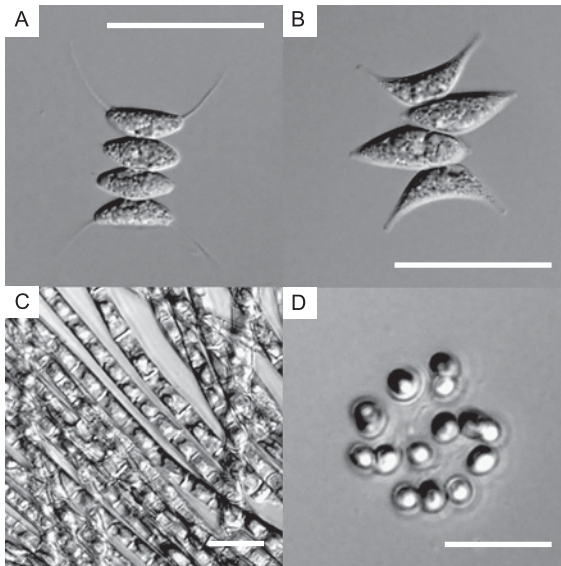


図3. 代表的な南相馬市土着藻類 (A: デスマデスムス属, B: セネデスムス属, C: クレブソルミディウム属, D: ディクチオスフェリウム属). 白線は20 μm を示す.

養液を収穫する培養方法である. 連続培養の場合には, 一定期間ごと,あるいは連続的に培養液の一部を収穫し, 収穫した量だけ新しい培地を追加する. つまり, 培養装置には絶えず微細藻類が培養されている状態にある. 福島プロジェクトでは, 2日に一度, 決まった量の培養液を収穫し, 新しい培地を追加する連続培養を行った.

通常は無機培地を使い, 深さ10 cmの開放系レースウェイポンドで約1年にわたって行った連続培養では, 観察される藻類の種類も少しずつ変化していった. デスマデスムス属の藻類は年間を通じて優占していたが, 当初確認されていたクレブソルミディウム属, ディクチオスフェリウム属の藻類は夏に向かうにつれ, 出現頻度が減少した. 代わりに夏季には, セネデスムス属の藻類の存在量が増加していた. このように入れ替わり立ち替わりでその環境に適した藻類が出現し, 藻類集団が維持されていくことによって, 年間を通じた藻類バイオマス生産が可能であることが確かめられた.

2日に一度収穫した培養液中の微細藻類集団が生産された藻類バイオマスということになる. 藻類バイオマスの生産性を表す場合, 1日あたり1 m^2 あたりで生産された藻類バイオマス量(乾燥重量)が指標となる($\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$). 図4に2014年10月から生産性の月平均を示す(投稿中).

冬季(12月, 1月)の生産開発拠点の外気温は氷点下5°C近くにもなり, ビニールハウス内であっても0°C近くまで低下していた. しかし, 土着藻類は増殖の速度こ

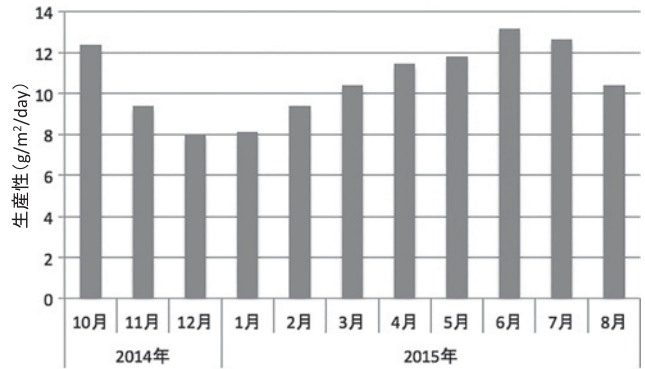


図4. 南相馬市土着藻類のバイオマス生産性

そやや低下したが十分に増殖し, 藻類バイオマス生産が可能であった. 土着藻類にとって増殖しやすい季節は, 秋(10月)や春から初夏(6月, 7月)であり, 大きな生産性が得られた.

年間平均生産性は, 10.6 $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ であった. これまでに大量培養技術が確立し, 商業規模のバイオマス生産が行われている微細藻類として, クロレラ属(*Chlorella*), スピルリナ属(*Spirulina*), ドナリエラ属(*Dunaliella*), ヘマトコッカス属(*Haematococcus*)などがあるが, 生産性は10–25 $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ 程度と報告されている⁴⁾. 南相馬市の土着藻類バイオマス生産性はこれら商業規模の微細藻類に匹敵するものであった.

実は, 土着藻類を増殖させる取組みはニュージーランドでも行われている⁵⁾. HRAPs (high rate algal ponds)と呼ばれる1 ha規模のレースウェイ型の培養池では, 12–20 $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ という生産性が報告されている. 福島プロジェクトにおける当初の生産性の目標値はニュージーランドの研究例の半分程度を得ることであった. しかし, 日照時間や気温などの不利な南相馬市で, 目標以上の生産性を達成することができた.

今後の展開

福島プロジェクトでは, 土着藻類のバイオマスを燃料化することが最終目標である. 生産された燃料がどれぐらいの価格になるのかが, プロジェクトの評価点でもある. 詳細については, 本特集(P. 177)の宮下氏の試算を参照していただくとして, 価格に大きな影響を与えるのが培地の値段であることが判明している. 培地には, 購入した試薬を使用して窒素やリンなどの栄養塩を混合している. そのコストが最終産物の燃料の価格に大きく響くのである.

栄養塩のコストを削減するために, 目をつけたのが下

水である。家庭から排出される下水やさまざまな産業排水中には、多くの窒素、リンなどの栄養塩が含まれている。下水を微細藻類の培養に利用する試みは世界的にも注目されており、さまざまな実証が行われている^{6,7)}。微細藻類の培養に下水を利用する場合、購入すべき栄養塩のコストを削減できるだけでなく、微細藻類が増殖とともに栄養塩を水中から除去するので、水の浄化も可能となる。将来的には下水処理の一部を微細藻類の培養で行い、藻類バイオマス生産、そして燃料生産へという工程が一般化するかもしれない。

現在、福島プロジェクトでは、福島県ならびに南相馬市の許可の下、下水を利用した土着藻類の小規模培養試験も開始されている。下水中に微細藻類の増殖を阻害する物質がないのか、時間や季節によって変動する下水で安定した藻類バイオマス生産が可能なのか、などさまざまな培養実験が進展中である。福島プロジェクトに参画する企業の皆様の技術を持ち寄ることによって、課題を一つひとつクリアできると思っている。

謝 辞

2013年度から2015年度にかけて行われた「福島県再生可能エネルギー次世代技術開発事業—土着藻類によるバイオマス生産技術の開発—」は福島県からの補助金で行われた。2016年度から始まった「微細藻類燃料生産実証事業」は経済産業省からの補助金をいただいている。また、南相馬市からは拠点設置場所の策定をはじめとして多くの支援を受けている。さらに、本稿で紹介した研究は、福島プロジェクト参画企業の方々との共同研究によってなされたものであり、福島プロジェクトのとりまとめ機関である(一社)藻類産業創生コンソーシアムのご協力もいただいた。深く感謝申し上げたい。

文 献

- 1) 千原光雄編：藻類の多様性と系統，裳華房 (1999).
- 2) Chisti, Y.: *Biotechnol. Adv.*, **25**, 294 (2007).
- 3) 国立研究開発法人 国立環境研究所 微生物系統保存施設：<http://mcc.nies.go.jp> (2016/12/18)
- 4) Sing *et al.*: *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, **18**, 47 (2013).
- 5) Craggs *et al.*: *J. Appl. Phycol.*, **24**, 329 (2012).
- 6) Mehrabadi *et al.*: *Bioresour. Technol.*, **184**, 202 (2015).
- 7) 出村幹英：月刊下水道，**37**, 12 (2014).