

## 秋季シンポジウム「海産植物資源の活用—現状と展望—」

## 微細藻類からの有用資源開発

鳥松秀典

元・大日本インキ化学工業 KK

## はじめに

昨今は、宇宙への関心の高まりと共に、太陽系惑星としての水惑星・地球の歴史にも多大の興味が寄せられている。46億年前に誕生したとされる地球星に最初に出現した生物が光合成細菌とらん藻と呼ばれる微細藻の一種で、これが35億年前とされている。これらの光合成活動によって酸素が産生され、これにより、唯一、地球惑星にのみ現在の我々人類や種々の動植物が生を受けている事はもはや常識となっている。

人類と藻類の関わりは深いのであるが3万種を超えと言われる藻類の積極的な利用についてはごく限られたものであった。その中であって特に日本における藻類利用の歴史は古く、海産性藻類を中心として、褐藻の昆布、ワカメ、紅藻の海苔、緑藻ではアオノリ、アオサ等、又らん藻に属する水前寺海苔などが食料として利用されてきた。一方、世界に目を向けるとらん藻の一種である螺旋微細藻スピルリナが食用としての古い歴史を持ち、アフリカのチャドやエチオピア等のアルカリ塩湖に自生するスピルリナが古くから現地の人々の食用として、特に貴重な蛋白資源として利用されてきた事が知られており、同じくアメリカ大陸のメキシコ Texcoco 湖に自生するスピルリナが16世紀に Aztec 民族により食されていた事が記録に残されている。

本稿の主題である微細藻類の積極的利用・量産化については未だその歴史は浅く高々40～50年と新しい未開の分野と言えよう。しかし、この間に光合成機作の解明をはじめ、各種の中広い藻類利用の基礎的研究や開発など目覚ましい進展を遂げており、地球の地下エネルギー資源の有限が叫ばれる中であって無限の太陽エネルギーの有効利用を背景に、今後益々大きな夢を抱かせる分野になるであろう事に疑いはないであろう。本稿では特に微細藻類に限りそれらの開発の現状と課題について簡単に紹介したい。

## 1. 微細藻類利用の歴史

微細藻類を産業として量産化する検討が本格化したのは第二次大戦中ドイツに於ける緑藻 *Chlorella* や珪藻 *Nitzschia* についての研究が端緒とされている。この主な背景は世界の急激な人口増加に対応する食料生産にあり、精力的な研究が継続され1970年代には *Chlorella* より分離回収が容易な *Scenedesmus* についてもタイ国 Kasetsart 大との共同研究などとして行われたが、いずれも実用化には至らなかった。戦後、日本でも *Chlorella* についてその基礎研究、実用化研究が着々と積重ねられ、1960年代には日本、台湾などでその量産化に成功し、1970年代には大きな市場へと拡大したが、その市場は健康食品としてほとんど日本に限られたものであった。

米国に於いても1940年代後半より *Chlorella* 等についての検討が進められたが、その後、微細藻類についての研究の方向は食料生産ではなく廃水処理への応用などへと展開され、これと併行して1950～60年代は海洋農場計画として海産性大型藻類を海洋で生産し、藻体より燃料生産を行うという計画も推進された。しかし、その後1980年代に入り微細藻類の開発へと再びその重点が移されている。らん藻スピルリナについては1960年代に J. Leonard や G. Clement らによりアフリカのアルカリ塩湖に自生する高蛋白藻として紹介され、1970年代に入りフランスの IFP がメキシコ国営 Sosa Texcoco 社でスピルリナの量産化を具体化し、一時、米国市場で特異な Diet 食品として話題を集めた。その後、日本、タイ、米国、台湾、イスラエルなどで人工池による量産化が次々と具体化され、主に、健康食品として世界市場に展開された。

イスラエルでは1970年代に Dead Sea (死海) で採取された鞭毛藻類 *Dunaliella* が glycerol と  $\beta$ -carotene を蓄積する事に着目し、その基礎研究が行われ、その後、 $\beta$ -carotene 生産を目的にしてイスラエル、米国(カリフォルニア、ハワイ)、オーストラリアなどで量産が行われるようになった。

これらの量産化推進に当たっては各々の培養技術に関する基礎研究の進展と共に培養装置(人工池や攪拌装置など)の開発や微細藻類における難点であった培養液からの藻体の分離回収技術の開発なども大きな進展と貢献を見せた。

1980年代に入ると研究対象とする微細藻類も多岐に亘り、また、単に藻体成分の利用のみでなく藻類の持つ幅広い機能を利用する研究など飛躍的な展開を見せている。

## 2. 微細藻類の量産

現時点、微細藻類の中で工業的規模として量産されているものは *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella*, *Haematococcus* など限られている。以下にそれらの概要を示す。

### *Chlorella*

細胞大きさは数ミクロンから10ミクロン程度の球形単細胞緑藻で、増殖における至適のpHは中性付近にあり好適温度は20～30℃の中温性である。その量産計画は日本でも第二次大戦後、食料や蛋白資源として始められたのであるが種々の栄養的・薬理的効果より栄養補助食品・健康食品として日本市場を中心に展開が計られた。量産に当たっては速い増殖速度を目的に炭素源として酢酸を利用する mixotrophic 又は hexotrophic な培養法が通常採られ、培養池の多くは円形開放浅池でアームを回転させる攪拌装置を備えている。一部には閉鎖系のタンク培養も行われている。培養法としては雑藻、雑菌の汚染を避ける為、連続ではなく、回分培養が主流である。培養液からの藻体の回収には遠心分離機が通常用いられ、更に噴霧乾燥機などで乾燥粉末を得る。また、クロレラはその性質として細胞膜が硬く、健康食品を目的とする時、その消化性に難がある為、細胞膜を破碎する工程が組込まれている。主な生産者は日本ではクロレラ工業やサンクロレラなど、台湾では台湾緑藻、青洲緑藻、東海緑藻、遠東緑藻などで生産地としては日本、台湾、インドネシア、中国など東南アジアに限られている、主な市場は日本で、その用途は健康食品が主流であるが各種食品への添加剤、農業における生育調節剤や藻体肥料、畜産・水産養殖の飼料用添加剤、更には医薬品・化粧品への添加剤など広範な応用展開も計られている。

### *Spirulina*

炭酸ソーダ塩の強アルカリ環境でのみ生育する多細胞らん藻で、直列に連なる各細胞間の隔壁が明瞭であることから分類学上は *Arthrospira* とすべきであるが一般的な通称として *Spirulina* と呼ばれている。この *Spirulina* もらん藻の一種として30億年以上もの以前より地球上に出現し変異を起こすこともなく、現存しているとされ、アフリカ大陸のチャド、エチオピア、マダガスカルやアメリカ大陸のメキシコやペルーなどの

アルカリ塩湖に自生している。増殖に好適な温度は25～40℃と熱帯性で、藻体形状はコイル状で長さ300～500ミクロン程度の大型のものが量産には採用されている。

この *Spirulina* の量産に先鞭をつけたのはフランス IFP 技術によるメキシコ Sosa 社で地下から汲み上げるソーダ塩水を利用し、広大な半人工池により過去年産400トンもの生産を行ったが現在は事情により生産を行っていない。メキシコに続きイスラエル Kooris 社、大日本インキ化学の技術によるタイ Siam Algae 社と米国 Earthrise Farms、台湾では青洲緑藻、南方樹脂など、更にはハワイ Cyanotech 社などが次々と *Spirulina* の量産を始め、最近ではインド・マドラスの Parry Agro 社や中国各地でも生産が行われるようになり、世界の総生産量は年間3000トンにも達する規模となっている。

メキシコを除くほとんどの生産工場は *Chlorella* とは異なり、方形ないしは Race way 回遊方式の浅池に水車型攪拌機を備えた開放形培養池で増殖を行い、培養液は多量のソーダ塩を含む為 recycle 使用される連続培養方式が採用され、炭素源としては炭酸ガスが使用される所謂 autotrophic な方式が通常である、培養液よりの藻体の回収は藻体サイズの大きさより濾過分離による方法が一般的である。*Spirulina* の用途としての主役は健康食品であるが、らん藻特有の青色色素 phycocyanin を抽出精製した食品用青色色素や豊富且つ特異な carotenoids を利用する養魚や家畜用の飼料添加剤としても展開されている。

この *Spirulina* についてはアフリカ各地のソーダ塩湖の有効利用と該地での栄養失調や飢餓からの救済手段の一つとして FAO をはじめとする国連の各機関も強い関心を示しており、また、NASA (米国航空宇宙局) では今後の長期宇宙滞在に対処するため閉鎖系生命維持システム (CELSS) に *Spirulina* を組込んだ検討が続いている。

### *Dunaliella*

高い耐塩性を持つ熱帯性の藻で一對の鞭毛を持つ緑藻であるが高塩・栄養源欠・高温などの過酷な条件下で glycerol や  $\beta$ -carotene を藻体中に産生することから天然  $\beta$ -carotene の生産手段として量産が行われている。人工池に水車形の攪拌機を備えた開放型の Race way 培養池で生産を行っているのがイスラエルの日本企業・日健総本社と現在は Amway の傘下となった米国カリフォルニアの元の Microbio Resources 社の二社で、一方オーストラリアでは Betatene (ベタテン) 社が Whyalla で Western Biotechnology 社が Hutt Lagoon で各々海浜に

広大な半天然培養池を設け、海水を効果的に利用し生産を行っている。最近ではインドの Parry Agro 社でも人工池による生産を始めている、商品としては  $\beta$ -carotene を含有する乾燥藻体や  $\beta$ -carotene を抽出し植物油に懸濁した油状品などが市場に出されている。この *Dunaliella* より生産される  $\beta$ -carotene の競争相手は合成法による  $\beta$ -carotene であるが合成品が all-trans 型であるのに対し、*Dunaliella* 由来のものは 9-cis, 13-cis などの cis-型を含み、その吸収性の優位を持って健康食品としての展開を行う一方、食品用天然着色料や養魚・畜産向けの飼料添加剤などとしても販路が展開されている。

#### *Haematococcus*

二本の鞭毛を持ち 40~50 ミクロンの大きさの緑藻で増殖至適 pH は中性ないしは弱アルカリ、至適温度は 25℃ 付近であるが、特殊なストレス環境を与えると xanthophyll 系の色素である astaxanthin を産生する。この色素は年々拡大する養殖漁業、中でも特にサケ・マスなどの色揚げに不可欠の為、非常に大きな市場が期待されている、astaxanthin は合成品も上市されており、他方、*Phaffia* 酵母やオキアミなどよりも得られるが藻類由来の天然 astaxanthin には多大の関心が集っている。故に、このテーマについては多くの研究機関やプロジェクトで具体化の検討が行われているが、藻体の増殖から色素産生までの間に種々の汚染などの問題を生じ易く、特殊な培養技術や培養装置としての閉鎖系システムの開発など新たな工夫が要求されている。

現在、*Haematococcus* による astaxanthin の量産はハワイの Cyanotech 社によってのみ行われており、商品としては 2% 程度の astaxanthin を含有する乾燥藻体として市場に出されている。天然 astaxanthin には大きな市場が控えている事もあり、今後、この量産は益々多くの関心を集めるであろうと思われる。

#### その他

微細藻類の利用の中で異色であったのは、米国・オレゴン州の Upper Klamath Lake に毎年水の華として発生する *Aphanizomenon* が健康食品として 10 年以上の間、米国でかなりの市場を持っていた。しかし、数年前に雑藻汚染の問題からその姿を消した。

なお、日本市場で健康食品などとして販売されている *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella* などの安全性については日本健康食品協会 (JHFA) による自主規格が各々整備されており、この基準は今や世界的にも通用するものとなっている。

### 3. 微細藻類産業のポテンシャル

微細藻類の中で量産化、企業化に至ったものは未だ限られたものであるが今後の可能性についてはより巾広い多くの優れた研究・知見が積重ねられており、近い将来、これらの可能性が次々と具体化されることが期待される。現在までに報告された主なものを表 1 に列挙する。

### 4. 微細藻類量産における課題

微細藻類の量産における基本的な問題は藻体が微細であることから培養過程における雑菌や雑藻による汚染であり、これらは致命傷ともなりかねない。如何なる場合でも純粋単一藻の培養系が維持される技術を必要とし、これ無しには製品の安全性を含み量産化は成立しないであろう。現在までに実用化されている *Spirulina* や *Dunaliella* は通常とは極度に異なる特殊な環境で生育する事から汚染の危険が軽減されていると言えよう。*Chlorella* の場合は mixo 又は hexotrophic な系で、より速い増殖速度を得ることで汚染の最小化を可能にしているであろう。従って、これら特殊な性格を持たない藻類の量産化には開放系での純粋培養は困難を伴うことから、昨今は、種々の閉鎖系の培養装置いわゆる bioreactor が考案されつつあるが、未だ実用化されたものはないのが実状である。

今一つの問題は藻類は植物であり、原則として光合成により増殖する為、細菌や酵母菌などに比しても、その増殖速度が格段に遅いことにある。その上、培養液の藻体濃度が低い為その分離回収には大量の液量処理を必要とし、併せて、食品又はそれに準ずる衛生管理も当然要求される事から量産を行う為には相当の設備投資も必要とされて来た。換言すれば、生産コストが必ずしも安くないのが現状であろう。それ故、*Chlorella* や *Spirulina* 更には *Dunaliella* においても、その市場は一般の食品や飼料としてではなく、高付加価値を引出す様々の努力を払い、より高い価格が受け入れられる健康食品市場など特殊な市場への志向を余儀なくされているとも言えよう。今後とも、コストダウンは微細藻類がより広く、より大きな市場へと展開する為の重要な鍵ともなるであろう。

微細藻類産業が今後益々発展する為には、その安全性や環境への対応を考慮し、如何に汚染のない単一藻培養系を確保するかの確かな技術と、生産効率を考慮し如何に安価に生産出来るかの工夫が重要と思われる。この為には天然の池や湖、更には海洋をもっと利用する事は出来ないだろうか。もっと人工的でなくエ

表1. 微細藻類利用の可能性

目的	市場	微細藻の種
食品・補助食品	栄養	<i>Chlorella, Spirulina, Aphanizomenon</i>
飼料(水産養殖)	魚の色揚げ 餌(二枚貝, ワムシ)	<i>Spirulina, Haematococcus</i> <i>Chaetoceros, Tetraselmis, Isochrysis,</i> <i>Nannochloris</i>
脂質・脂肪酸	EPA, DHA ステロール, ワックス	<i>Porphyridium, Schizochytrium</i> <i>Chlorella</i>
着色料	カロテノイド, キサントフィル クロロフィル フィコビリタンパク質	<i>Dunaliella, Spirulina Haematococcus</i> <i>Spirulina, Porphyridium</i>
酵素	ATP, SOD, 制限酵素	
ポリマー	タンパク質 多糖類	<i>Porphyridium</i>
薬学	抗生物質, 免疫賦活, 診断薬, 毒	<i>Chlorella, Spirulina</i>
燃料	水素 メタン 炭化水素	<i>Chlamydomonas, Anabaena</i> <i>Botryococcus</i>
農業	PGA (植物生長因子) 肥料(窒素固定) 土壌改良剤 殺虫剤	<i>Chlorella</i> <i>Anabaena, Nostoc</i> <i>Anabaena</i>
水質浄化	BOD - 酸化池 重金属吸収	<i>Chlorella, Spirulina</i>
CO <sub>2</sub> 固定	CO <sub>2</sub> 削減	Diatoms, Haptophytes
宇宙	CELSS <sup>1)</sup> , BLSS <sup>2)</sup>	<i>Spirulina, Chlorella</i>

1) CELSS: Controlled Ecological Life Support System

2) BLSS: Biological Life Support System

コロジカルな技術が使えないだろうか。又逆に、遺伝子技術などにより種々の問題の解決が出来ないだろうかなど、今後の研究と工夫に期待するところは大きい。

おわりに

現時点では、微細藻類の利用はごく一部が実用化さ

れているに過ぎないが、当該分野は多大の可能性を秘めた未開拓の宝の山であり、太陽エネルギーの有効利用の観点からも今後の大いなる展開が期待されるところである。

(264-0032 千葉市若葉区みつわ台 5-1-72)