

解説

微細藻類ユーグレナの特徴と食品・環境分野への応用[‡]株式会社ユーグレナ
嵐田 亮^{*}

1. はじめに

微細藻類を原料としたバイオ燃料化技術の開発は、近年アメリカを中心に急速に進展している。2008年にビル・ゲイツ氏所有の投資会社が米国の藻類系ベンチャー企業 Sapphire Energy 社に100億円規模の出資をしたことを契機に、藻類系ベンチャー企業に対する投資が活発化したと考えられている。2009年7月には、米石油最大手企業のエクソンモービルが、ヒトゲノムの解読に貢献した著名科学者クレイグ・ベンター博士が設立した藻類系ベンチャー企業 Synthetic Genomics社に、6億ドル規模の投資を行ったことは大きな注目を集めた。これほどまでに微細藻類に注目が集まった理由は微細藻類の生産性ポテンシャルの高さにあり、同じ土地面積でも他のエネルギー作物に対して10倍以上のバイオマス生産が可能であると言われている¹⁾。

バイオ燃料の原料としての微細藻類は、第三世代バイオマスと呼ばれている。バイオ燃料が本格的に普及し始めた当初、その原料はトウモロコシやサトウキビであったが、これらは食糧と競合するため食糧価格の高騰を引き起こし、バイオ燃料に対する批判が噴出した。そこで、食糧と競合しないジャトロファ（バイオディーゼル）、スイッチグラス（セルロース系エタノール）、木質チップ、稲わら等が第二世代バイオマスとして注目されるようになった。しかし、第二世代バイオマスの中には、確かに食用には適さないものの、栽培する土地が作物と競合する場合もあり、間接的に食糧と競合すると指摘する声もあった。微細藻類は耕作不適地でも生産することが可能であるため、第二世代バイオマスの欠点を補うものとして、第三世代バイオマスと呼ばれるようになった。

バイオ燃料化技術の開発において、生物種を選択は

最初に直面する重要な課題である。一般的には候補となる複数の種の中から、増殖速度、油脂含有率、油脂組成、温度・pH等の環境耐性等の様々な観点から総合的に判断し、目的に合った種を選択することになる。条件に適合する種が見つからない場合は、遺伝子組換え技術や品種改良を既存の種に対して行い目的の形質に近づける工夫も検討する必要がある。

著者らは会社名に示す通りユーグレナ（属名：*Euglena*、和名：ミドリムシ）を選択して食品用途およびバイオ燃料化技術の開発を進めている。本稿ではユーグレナの生物学的特徴と、食品・環境分野の両面においてユーグレナを選択した理由について概説する。

2. ユーグレナの特徴

2.1. ユーグレナとは

ユーグレナは光合成をして増殖する微生物であり、0.1ミリメートル程の大きさである（図1）。*Euglena*属には多くの種が含まれるが、生化学実験等で一般的に使われるのは増殖が速く扱いやすい*Euglena gracilis*という種である。以下本稿において単に「ユーグレナ」と呼ぶときは*Euglena gracilis*のことを示すものと

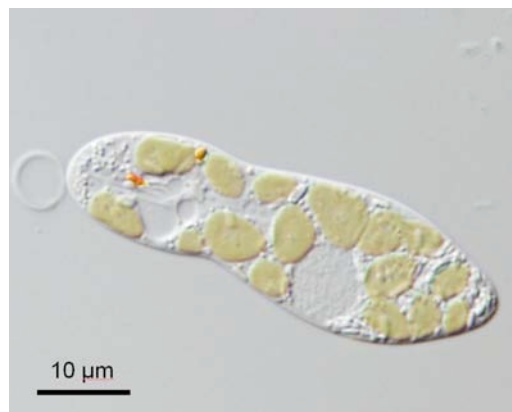


図1 *Euglena gracilis*の光学顕微鏡写真。

[‡] 解説特集「植物、藻類等を利用した物質生産の新しい展開とその課題」

^{*} 連絡先 E-mail: arashida@euglena.jp

する。

多くのユーグレナ近縁種は池・沼・水田等の淡水域に広く分布し、海水・汽水域にも生息する。ユーグレナは葉緑体を持ち、光合成をおこなう植物的特徴と、鞭毛と体のねじりによる運動性を持つ動物的特徴を併せ持つユニークな生物として知られる。原生動物であったユーグレナの祖先が、真核光合成生物である緑色藻類を細胞内に取り込む二次共生と呼ばれる現象によって植物化したことが進化的要因と考えられている²⁾。

2.2. 食糧・飼料としてのユーグレナ

ユーグレナは栄養価が高いことから、将来の食糧・飼料として活発に研究が行われてきた³⁾。過去には飼料として実用化もされており、近年では機能性食品としての利用やクッキー等の一般食品に添加する形で利用がなされている。ユーグレナに含まれるタンパク質は、必須アミノ酸のバランス評価指標であるアミノ酸価で80以上の高い値を示し、他の藻類、酵母と比較して優れた栄養価を有する⁴⁾。同じ微細藻であるクロレラのアミノ酸価は63、スピルリナは51であるが、これらに比較してユーグレナのアミノ酸価が高いのは他の微細藻では律速因子となっているメチオニンやシステインといった含硫アミノ酸の割合が高いためである⁴⁾。

ユーグレナは培養液に含まれる脂肪酸を取り込む性質がある⁵⁻⁷⁾。培養液にドコサヘキサエン酸(DHA)を添加することで総脂肪酸中の約60%をDHAが占めるユーグレナ細胞も作成可能である⁷⁾。このDHA強化ユーグレナをワムシ等の動物プランクトンの餌として与えることで、プランクトンを介してDHAがマダイ仔魚にも蓄積し、生存率の向上が認められた⁷⁾。脳卒中易発症性高血圧自然発症ラット(SHRSP)にDHA強化ユーグレナを飼料として与えると、血圧上昇抑制作用、脳血管病変の発症抑制および延命作用が認められた⁸⁾。

2.3. パラミロン (炭水化物) の代謝

高等植物の場合、光合成によって獲得した炭水化物を葉から根に輸送し、デンプンとして蓄えるが、ユーグレナの場合はパラミロン (paramylon) と呼ばれる独自の貯蔵多糖を蓄える。増殖の時期や培養条件によっては、パラミロン含有率が乾燥重量あたり50%を

超える場合もある⁹⁾。パラミロンはデンプンと同じグルコースの重合体 (重合度 700-750) で、 β -1,3-結合のみで構成されるという特徴を持つ¹⁰⁾。グルコースが β -1,3-結合で構成された多糖は一般に β グルカンと呼ばれ、酵母の細胞壁、アガリクス、靈芝等に含まれることが知られている。作用機序において未知の点が多いが、 β グルカンには抗酸化作用、免疫賦活作用、抗腫瘍効果等の機能性があるといわれている。ラットにパラミロンを経口投与した実験では、四塩化炭素による肝臓障害からの肝保護作用があることがわかり、パラミロンが抗酸化作用を有することが示唆された¹¹⁾。皮膚炎を自然発症するマウス (NC/Ngaマウス) に対してパラミロンを経口投与した実験では、血中 IgE、interleukin-4 等がパラミロン非投与の対照群に対して有意に低下しており、見た目にもアトピー性皮膚炎の症状が改善されていることから、パラミロンにはアトピー性皮膚炎の改善効果があることが示唆された¹²⁾。以上のように、ユーグレナに含まれるパラミロンにも他の生物由来の β グルカンと同じような機能性を有することが示唆されているため、主に食品用途としてパラミロンの研究開発が進められている。これまでの研究は動物実験が主体であるため、ヒトに対する有効性があるか否かを判断するにはさらなる研究結果の蓄積が必要である。

2.4. ワックスエステル発酵

一般に、生物は嫌気条件下におかれると呼吸によるATP生産ができなくなり、解糖系等の基質レベルのATP生産系を働かせてATPを獲得する。ユーグレナの場合は他の生物とは異なり、嫌気条件下においては脂肪酸と脂肪アルコールがエステル結合したワックスエステルを最終産物とする代謝系を働かせてATPを獲得する。この代謝系はユーグレナ独自のものであり、ワックスエステル発酵と命名された¹³⁾。

ユーグレナは嫌気条件下におかれると、パラミロンをグルコース単位まで分解し、解糖系によってピルビン酸を合成する。ピルビン酸はミトコンドリアに輸送されアセチル-CoAになる。アセチル-CoAはミトコンドリアにおいて C_2 供与体として働き、還元力供与体であるNADHと協働して炭素数14のミスチン酸を主成分とする脂肪酸が合成される⁹⁾。脂肪酸の一部はアルコールまで還元を受け、脂肪酸と縮合することによりワックスエステルが生成する (図2)。ワックス

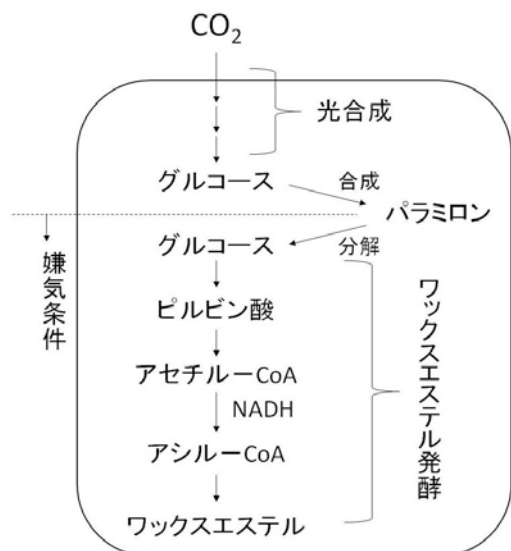


図2 ワックスエステル発酵の簡略図。

エステルを構成する脂肪酸等の炭素数が14主体である理由は、ユーグレナのミトコンドリアに存在するエノイル-CoAレダクターゼの酵素活性に鎖長特異性があるためである¹⁴⁾。詳細は後述するが、「炭素数14が主体」であることがユーグレナ油脂の大きな特徴である。

3. 発電所排ガスを利用したユーグレナの培養

ユーグレナは優れた光合成能力を持ち、15~20%の高濃度の二酸化炭素（以下、CO₂）環境下でも生育することができる¹⁵⁾。一般的な火力発電所の排ガス中には15%前後のCO₂が含まれているため、火力発電所の排ガスを用いてユーグレナを培養すれば、CO₂排出削減につながると考えられていたが、これまで実際に火力発電所の排ガスを用いてユーグレナの生育を確かめた例はなかった。そこで著者は電力会社のご協力のもと、石炭火力発電所の排ガスを利用したユーグレナ培養の実証実験を行った。火力発電所敷地内にユーグレナ培養槽（容量500リットル）を設置し、発電所の煙道に配管をつないで排ガスをユーグレナ培養槽に通気する実証試験装置を構築した。ボイラで石炭を燃焼することにより発生した排ガスは、脱硝装置、電気集塵器、脱硫装置を経ることにより、硫酸化物、窒素酸化物、煤塵等の量が排出基準値以下に抑えられる。本実証試験では、煙突に向かう直前の煙道にバルブを設置し、配管を通じてユーグレナ培養槽に排ガスを引き込んだ。煙道付近の排ガスは高温のため、培養槽の水温上昇が懸念されたが、

配管を通る過程で冷却され、ユーグレナ培養槽の通気口付近では常温程度になっていた。

ユーグレナの排ガス培養試験は4週間実施した。最初の3週間は排ガスを通気し、4週間は対照区として空気を通気した。その結果、排ガスを通気した培養では、培養初日には薄い黄緑色だった培養液が7日目には濃い緑色になっており、細胞数の計測や結果からもユーグレナが増殖していたことが確認できた（図3）。一方で、空気を通気した4週間目の培養では、培養4日目から細胞数が減少に転じていた。培養液を顕微鏡観察したところ、ワムシ等の原生動物にユーグレナが捕食されていることが確認された。高濃度CO₂ガスを含む排ガスの通気を止めたことによって培養液のpHが上昇し、原生動物が繁殖しやすい環境になったためと考えられる。以上より、火力発電所の排出ガスを通気してもユーグレナは増殖可能であること、空気を通気して培養した場合よりも火力発電所の排出ガスを通気して培養した場合の方がユーグレナの増殖が速いこと、高濃度の二酸化炭素を通気することによって培養液中のpHが低下すること等により、ユーグレナ以外の他の生物の増殖が抑えられることが示された。

このように、火力発電所等から排出される高濃度のCO₂を含むガスを、ユーグレナのような微細藻類の培養に利用し、有機物資源として固定化することでCO₂排出削減効果が期待できる。しかし、その実用化にはいくつかの解決すべき課題がある。一般的な火力発電所が一日当たり約4900トンのCO₂を排出し、藻類の炭素含量が45%と仮定する。この場合、排ガス中の1%のCO₂を削減するとしても一日当たり約30トンの藻類が生産されることになる。そのため、大量に生産された藻類を食糧にするのか飼料にするのか、販

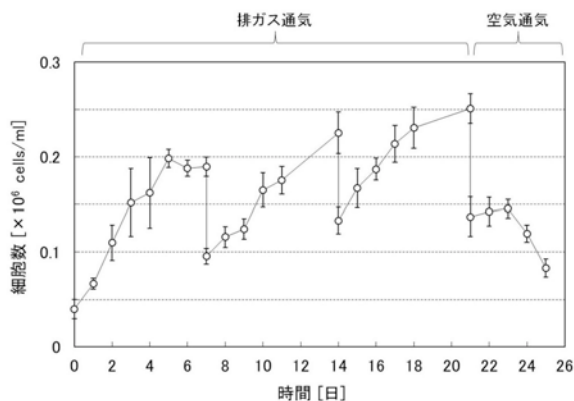


図3 排ガスを用いて培養したユーグレナの増殖曲線。

路をどう確保するのか等、予め十分に検討しておくことが必要である。また、藻類の生産には膨大な土地面積が必要になる。一日当たり30トンの藻類を生産するためには、1 m²当たりの藻類の生産量を30 g/dayとすると、1 km²の土地が必要となる。発電所等の周辺に藻類培養のための広大な土地面積を確保しなければならない。最も懸念される点は、CO₂排出削減によって得られる利益が小さいことである。CO₂の排出量取引が行われているヨーロッパでは、CO₂の取引価格は2005年から2008年の間、1トン当たり20ユーロ前後で推移している¹⁶⁾。仮に1ユーロ110円として計算すると1トンのCO₂排出削減当たり2,200円となる。上記の例で1日49トンのCO₂を微細藻によって固定化したとしても、107,800円の売上げにしかない。これでは採算性のある事業は成り立たない。発電所等に微細藻の培養槽を設置する場合は、排ガスに含まれるCO₂を固定化するためというより、高濃度CO₂ガスの排出源として利用するためと考えた方が良いと思われる。

4. ユーグレナを原料としたバイオジェット燃料の開発

4.1. バイオ燃料の製造プロセス

微細藻由来バイオ燃料の製造は、一般に培養、分離・濃縮、乾燥、油脂抽出、燃料化の工程から成る。各工程で高難度の技術開発が必要であり、例えば培養工程では単位面積当たりの生産性向上、油脂含有率の向上、コンタミネーションの防止、培養液成分の低コスト化等が挙げられる。培養より下流の工程では共通して低コスト化が主な課題となる。微細藻の培養方法には、光合成のみによって行う光独立栄養培養と有機炭素源を利用した従属栄養培養の2通りがある。光独立栄養培養の場合、培養槽の水深は光が届く距離に制限されるため広大な土地面積が必要になる。プール型のオープン培養であれば培養槽の建設コストは比較的安価であり、工場の排ガス等の高濃度二酸化炭素を用いればCO₂の排出削減にもつながることが期待できる。従属栄養培養の場合、光の影響を考慮する必要がなくなるため培養槽の設置面積が小さくできることに加え、光独立栄養培養の10倍以上の増殖速度を示す。しかし、グルコース等の有機炭素源を加えると細菌やカビ等の目的とする微細藻以外の生物が増殖しやすくなるため対策が必要になる

こと、有機炭素源の調達コストが藻類バイオマスの生産コストを圧迫すること、藻類バイオマスの生産可能性が有機炭素源の調達可能性に律速されること等のデメリットがある。

ユーグレナからバイオ燃料を製造することを考えた場合、グルコース等の有機炭素源を利用した従属栄養培養も可能であるが、有機炭素源の調達コストや閉鎖型培養槽の設備コストを計算すると採算性のある事業にすることは難しいと著者らは考えた。独立栄養培養でも、蛍光灯やLED等の光源を使って補光することにより増殖速度を高めることも可能であるが、光源の調達コスト、電力コスト、照明のための電力を生み出すのにCO₂を排出すること等を考慮し、太陽光のみを光源とした独立栄養培養を主軸にバイオジェット燃料の研究開発を行なっている。

4.1. バイオジェット燃料の必要性

地球温暖化が社会問題化している昨今において、二酸化炭素を始めとする温室効果ガスの排出削減が世界的に急務となっている。温室効果ガス排出削減に向けて、欧州連合（E U）は域内排出権取引制度（EU-ETS）を2005年から開始した¹⁷⁾。2006年末には温室効果ガス排出規制を航空部門にも導入するという指令案を欧州委員会が発表し、2012年1月1日から排出規制が導入された。その規制とは、航空各社はEU域内の空港を発着する全ての便について、2004年～2006年の3年間におけるCO₂排出量の平均値を基準に3%削減するというものであり、超過分は排出権取引によって調達しなければならない¹⁷⁾。航空会社は機体や貨物の軽量化による燃費向上も進めているが、燃料面からはバイオジェット燃料の導入がCO₂排出削減として唯一の対策である。なぜならジェット燃料は単位体積当たりの熱量が大きく搭載性に優れた「液体」燃料が必須だからである。上空を飛行するジェット機はマイナス40℃以下の外気温にさらされるため、ジェット燃料の品質として凍結しにくい低温性能が求められる。化石燃料由来の既存のジェット燃料は灯油に近い組成であり、炭素数分布10～16のパラフィン又はナフテンが中心となる。植物油脂や一般的な藻類の成分は主骨格の炭素分布が16以上であり、軽油あるいはそれよりも重質な石油留分に相当するが、ユーグレナに含まれる油脂は炭素数14を中心とした脂肪酸及びアルコールで構成されるため、

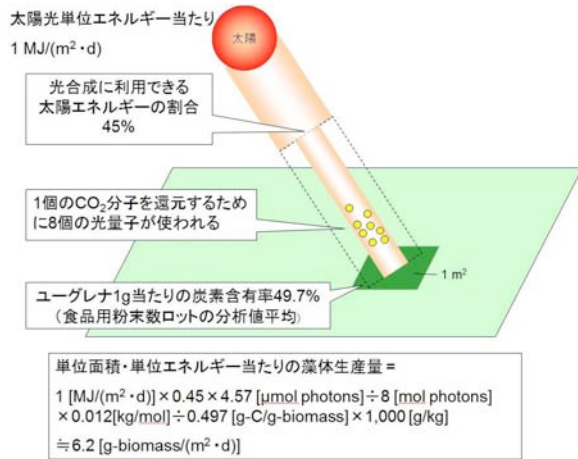


図4 独立栄養培養の考え方。

容易にジェット燃料に精製可能である。このように、バイオジェット燃料の開発には社会的な要請があり、少なくとも油脂組成の面においてユーグレナは他の植物、微細藻よりもジェット燃料化に適したバイオマスである。加えてユーグレナはその生産性においても高いポテンシャルをもっている。

4.3. 太陽光の光エネルギーを基準にした目標値設定の考え方

屋外における光独立栄養培養を想定する場合、微細藻の生産性は単位面積当たりに照射される太陽光エネルギーに律速されるため、その生産性は単位面積当たりの乾燥重量増加 (g/m²) で評価しなければならない。光合成に利用できる光の波長は400~700 nmの範囲であり、この範囲に入るエネルギーは太陽光全体の45%になり、1個のCO₂分子を還元するために8個の光量子が使われる¹⁸⁾。ユーグレナの場合、乾燥藻体1g当たり49.7%の炭素が含有されていることを考慮すると、太陽光1 MJ/(m²·d)当たり6.2 g/(m²·d)のバイオマスが生産されることになる(図4)。

上記計算方法を元に沖縄付近の標準的な日射量として18 MJ/(m²·d)を想定し、増殖速度の目標値を設定した。18 MJ/(m²·d)の太陽光エネルギーから生産されるバイオマスは約112 g/(m²·d)となるが、この数値には光の散乱や光呼吸による減少分を考慮していないため、高等植物の例を参考に57%の損失があると仮定したところ、48 g/(m²·d)となった。著者らはこの値の約80%にあたる38 g/(m²·d)を増殖速度の目標値に設定した。

4.4. 小型培養槽を用いた屋内培養実験

上記の考え方をもとに、屋外培養に近い環境条件で増殖速度を評価できる実験装置を考えた。光源は太陽光の波長組成に近く、晴天時の屋外に相当する光量を照射できるメタルハイドランプを使用した。培養槽はアクリル製の容器(幅10 cm×奥行10 cm×高さ30 cm)を用い、水面の一方のみから受光するように側面をアルミフォイルで遮光して光源の直下に置いた。光照射エネルギーが18 MJ/(m²·d)になるようにするため、光照射時間は1日12時間とし、照射強度は光合成有効波長領域で約900 μmol/(m²·s)程度となるように培養液の水面とメタルハイドランプとの距離を調節した。攪拌は6 cmの磁気攪拌子を用い、300 rpmの回転速度で行った。水温を一定に保つため、培養槽は温度制御可能な水槽の中に設置した。このような設備を用いて、CO₂ガスの通気濃度、培養液の水深をパラメータとし、バッチ培養方式で培養実験を行った結果、通気CO₂濃度15%、水深20 cmの条件で終濃度が200 g/m²以上を示し、区間値では目標を超える40.0 g/(m²·d)のデータも得られた(図5)。

ここで紹介した屋内培養実験は、平成23年度 独立行政法人新エネルギー産業技術総合開発機構「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業(次世代技術開発)」に係る研究開発委託事業の成果の一部である。

5. おわりに

原油価格の高騰や脱原発・自然エネルギー回帰の流れから微細藻由来バイオ燃料の早期実用化が望まれ

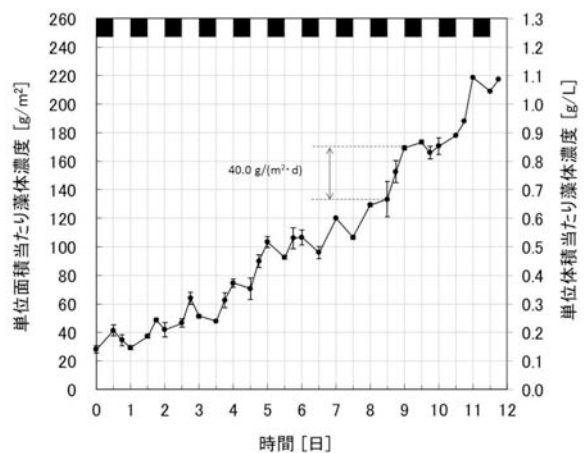


図5 屋内小型培養槽におけるユーグレナの増殖曲線。水深20 cm、通気CO₂濃度15% (通気流量0.1 vvm)、上部の黒線は暗期を示す。

るが、技術課題が山積しているため、長期的視点で取り組まなければならない。微細藻由来バイオ燃料は化石燃料の需要の一部を補うことはできても完全に置き換えることは難しいということも理解する必要がある。微細藻類は単位面積当たりの生産性が高く、必要な土地面積が陸上植物よりも小さくてすむといわれるが、高い生産性を屋外環境で発揮させることは非常に難しい。季節や天候による気温・日射量の変動、コンタミネーションの影響その他予期しない様々な要因により、生産性が大きく低下してしまうためである。現在のところ、技術開発は微細藻の新種の探索、遺伝子組換え・品種改良の検討、実験室レベルの培養技術開発に集中しているが、今後は実証規模の屋外培養を通年で実施し、失敗経験も含め、屋外における生産性向上に向けたデータを蓄積していくことが重要だろう。

過度の期待は禁物であるが、微細藻由来バイオ燃料が実用化した際には、CO₂の排出量削減、化石エネルギー依存からの一部脱却、エネルギー自給率の向上だけでなく、新たな産業・雇用の創出も期待できる。「光合成」を応用した一大産業の創出に向けて、今後も技術開発に取り組んでいきたい。

Received March 7, 2012, Accepted March 26, 2012,
Published April 30, 2012

参考文献

1. Chisti, Y (2007) Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances* 25, 294-306.
2. 井上勲 (2004) 生物進化と共生説, 遺伝 58, 29-35.
3. 北岡正三郎, 細谷圭助 (1977) *Euglena gracilis* タンパク質の栄養価決定のための培養条件の検討と細胞の一般成分およびアミノ酸組成, 日本農芸化学会誌 8, 483-488.
4. 林正弘, 榎本俊樹 (2004) 未来飼料・食糧・新素材の可能性を求めて, 遺伝 58, 71-76.
5. 林雅弘, 戸田享次, 三澤嘉久, 北岡正三郎 (1993) エイコサペンタエン酸およびドコサヘキサエン酸強化 *Euglena gracilis* の調製, 水産増殖 41, 169-176.
6. Masahiro H., Tsugiyo, Y. and Bong-Sun P. (2002) Distribution of docosahexaenoic acid in DHA-enriched *Euglena gracilis*, *Fisheries Science* 68, 1002-1003.
7. 林雅弘, 戸田享次, 米司隆, 佐藤修, 北岡正三郎 (1993) ユーグレナ *Euglena gracilis* による生物飼料の栄養強化とマダイ仔魚に対する飼料価値, 日本水産学会誌 59, 1051-1058.
8. 村上哲男, 小川博, 林雅弘, 吉栖肇 (1995) 脳卒中易発症性高血圧自然発症ラットの血圧, 脳血管病変および寿命に及ぼすDHA強化ユーグレナ (*Euglena gracilis* Z) の影響, 日本栄養・食糧学会誌 48, 209-215.
9. 北岡正三郎 編 (1989) 「ユーグレナ生理と生化学」学会出版センター
10. 宮武和孝, 竹中重雄, 山地亮一, 中野長久 (1995) 原生動物の作り出すバイオ粒子, パラミロンの性質と利用, *J. Soc. Technol. Japan.* 32, 566-572.
11. Sugiyama, A., Suzuki, K., Mitra, S., Arashida, R., Yoshida, E., Nakano, R., Yabuta, Y. and Takeuchi, T. (2009). Hepatoprotective Effects of Paramylon, a β -1,3-D-Glucan Isolated from *Euglena gracilis* Z, on Acute Injury Induced by Carbon Tetrachloride in Rats, *J. Vet. Med. Sci.* 71, 885-890.
12. Sugiyama, A., Hata, S., Suzuki, K., Yoshida, E., Nakano, R., Mitra, S., Arashida, R., Asayama, Y., Yabuta, Y. and Takeuchi, T. (2010) Oral administration of paramylon, a beta-1,3-D-glucan isolated from *Euglena gracilis* Z inhibits development of atopic dermatitis-like skin lesions in NC/Nga mice, *J. Vet. Med. Sci.*, 72, 755-763.
13. Inui, H., Miyatake, K., Nakano, Y. and Kitaoka, S. (1982) Wax ester fermentation in *Euglena gracilis*, *FEBS Lett.* 150, 89-93.
14. Inui, H., Miyatake, K., Nakano, Y. and Kikaoka, S. (1984) Fatty acid synthesis in mitochondria of *Euglena gracilis*, *Eur. J. Biochem.* 142, 121-126.
15. 中野長久, 浜崎和恵, 竹中重雄, 宮武和孝, 谷晃, 相賀一郎 (1995) . CELSS学会誌, Vol. 7, No.2, 15-18.
16. European Commission (2009) EU action against climate change, The EU emissions Trading Scheme, http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/ets_en.pdf
17. European Commission (2011) Allocation of aviation allowances in an EEA-wide Emissions Trading System http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/aviation/allowances/index_en.htm
18. 山崎巖 (2011) 「光合成の光化学」, 講談社.

Characteristics of the microalgae *Euglena* and its applications in foods and ecological field

Ryo Arashida*
euglena Co.Ltd.