

微細藻類パラクロレラによる CO₂ の固定化

—可能性と改良点—

都筑 幹夫^{1,2} 岡田 克彦¹ 藤原 祥子¹

1. はじめに

世界各地で洪水や水不足、氷河の減少など異常な気象変動が起っている。地球という天体が変化しているととらえるべきなのかもしれないが、海水温の上昇などは人類の活動による温室効果ガスの放出も関係していると思われる。CO₂ の吸収を急がなければならない。しかし、微細藻類は本当に利用できるのか。可能性や問題点、急いですべきことは何かという質問に対して、回答は出されていない。そのためには微細藻類についての確かな情報が必要であろう。社会を見ても微細藻類に詳しい人はごくわずかで、生物学の研究者でさえ微細藻類をよく知っている人は少ない。光合成の専門家が微細藻類について詳しいとは限らない。一方、CO₂ 固定システムの開発は生物学だけでなく、化学や物理学、地球科学などの基礎から農学、工学、そして経済学や廃棄規制の環境科学にいたる応用まで幅広い分野からの支援が必要である。そのためには微細藻類は何が問題なのかどんな開発がポイントになっているのかを明らかにすることが必要である。すでに昨年、微細藻類の能力や限界についてまとめた。¹⁾ かなりの内容を書いたつもりであるが、開発すべきことや解決すべきことが多くの方々に見える形になったかどうか、まだ足りないのかもしれない。より明確な表現が求められているのかもしれない。微細藻類による CO₂ の固定化技術を生物学の視点で明確にすれば研究開発の領域が別の方々からも支援を受けやすくなるかと思われる。また、微細藻類は本当に使えるのか議論すべきという論文も最近出されている。²⁾ しかし、カーボンニュートラルはきわめて重要な問題であり、開発を急がれている。微細藻類で可能な程度や開発すべき内容についての情報を出すことが重要と思われる。開発途中の段階での情報公開は企業などでの経済活動には不利益であるが CO₂ 保全の開発は急がなければならない。また、大学教育の立場からは学生が「CO₂ 固定の生物学」を学ぶための機会にもなるのでここで公表することにした。微細藻類利用開発に役立てばと願うところである。

2. CO₂ 固定の生理学

二酸化炭素は微細藻類のもつ光合成システムによって吸収される。葉緑体のチラコイド膜に存在するクロロフィル分子によって光が吸収される。光化学系 II 複合体のチラコイドルーメン側に結合するマンガンクラスターで水を分解して酸素を発生する。すると、チラコイド膜中の分子内で電位分布が生じ、水素イオンと電位差が発生する。光化学系 I のクロロフィル (P700) でも光を吸収し、光化学系 II からの電位差がさらに進んで酸化還元反応が引き起こされる。その結果、NADP が還元されて NADPH になり、ADP がリン酸化されて ATP が作られる。これらのエネルギーによってカルビン=ベンソン回路が作用し、吸収した二酸化炭素がリン酸化合物に取り込まれる。そして、葉緑体内でデンプンになって蓄積される。その後は細胞質への移動やタンパク質等が合成 (代謝)

¹生命科学部環境応用植物学研究室

²合同会社フォトシンテック・ラボ

され、新しく細胞が作られる（娘細胞）。パラクロレラでは、元となる親細胞内に 2～8 個の娘細胞ができ、最終的に親の細胞壁を破って出ていくのである。

光合成に働いている分子を見るとクロロフィルに Mg があり、酸素発生部分に Mn、光化学系 I と II の間に Fe-S クラスターなど、金属イオンが存在する。光合成には複数の金属イオンが利用されており、また、窒素固定反応に Fe-Mo や、シアノコバラミンとして Co チロシナーゼ、シグナル伝達に Zn が用いられている。低 CO₂ 濃度条件での CO₂ 取り込みに関係するカーボニックアンヒドラーゼも Zn を含む。これらの金属イオンは細胞の増殖に不可欠なものなので培養の時に供給しなければならない。^{3, 4)}

3. 細胞の培養が CO₂ 固定プロセス

光合成で CO₂ が固定されるとそれをもとにして細胞が増殖する。いわゆる培養である。本記述のような CO₂ 固定を目的にする場合は通常の培養と異なり、はじめから十分量の細胞がなければならぬ。培養で必要なものは細胞、水、元素類、CO₂、温度と光である。細胞は必ずしも液体の中でなくても濡れている程度でもよい。培養の開始時に細胞が 1 g あれば 1 日で同程度の細胞が作られる。細胞重量の半分が炭素である。CO₂ は気体であるが、水中に溶けた状態でもまた HCO₃⁻ や CO₃²⁻ でも利用できる。パラクロレラの 11h 株では HCO₃⁻ でなく CO₂ を細胞内に取り込む。⁵⁾ 大気中の CO₂ 濃度は 400 ppm であるができれば 2～5% が望まれ、さらに高い濃度でも可能という経験はある。

光源は太陽光を用いる可能性が高いが、太陽光は地球の表面（大気圏上空）では紫外、可視、赤外の 3 つの波長領域からなる。そのうち紫外部のほとんどは地表に到達する前に消失する。地表面ではごくわずかな紫外線（UV-A）、可視光及び赤外線である。クロロフィルが吸収するのは可視光のみで青色と赤色の光である。青色光と赤色光のエネルギーは異なるが、吸収後は赤色光のエネルギーレベルで上述の電位の伝達現象になる。なお、光源は太陽光に限らず人工光でも可能である。夜間に利用できればむしろ効果的で、また昼間太陽光が当たりにくい場所でも培養が可能となれば利用の可能性はさらに広がる。微細藻類の培養では太陽光が直接当たらないように遮光が必要で、光強度が強すぎることで UV-A の紫外線が増殖阻害となるからであろう。⁶⁾

次に培養の実験結果である。すでに光利用を工夫することが重要であることを述べた。¹⁾ 光合成を行う光強度は太陽光の 1 割でいいので、残り 9 割を何らかの方法で利用することが望まれる。そのためには例えば培養の容器全体に培養液を満たすのではなく、例えば布などを用いてそこに液を流し空気を満たす部分を作る形である。^{7, 8)} 布を複数枚並べてそこに細胞を置いて液を流す。光は斜めから受ける形にすることで、それぞれの布で細胞を増殖させる。そうした培養方法が光の効率的な利用として重要である。たとえば 1 m の間に 10 cm 間隔で布を設置すれば 10 枚の布が並べられ、装置の土地面積当たりでは 10 倍近い細胞増殖速度が得られるからである。数学的には $\sin 6^\circ$ が 0.1 なので 1 m の高さで 10 cm 間隔の布は太陽光を 10 分の 1 ずつに薄めることになる。なお、布の種類は綿布が可能で、細胞の付着しやすい点とたまに切れてしまうことから付着しにくいテフロンなども可能である。増殖した細胞の除去に関しては利用する微細藻類の種類や培養場所、さらに布からや液体中からの細胞回収の方法については現場で検討するのが適当であろう。

培養の元素であるが細胞が持っているさまざまな元素については昨年の報告で説明した。¹⁾ 元素

類は化合物の形で供給し細胞はそれをもとに必要な化合物を合成していく。パラクロレラの成分を調べると、炭素 C が 48~50%、窒素 N は 5~6%、リン P とカリウム K はそれぞれ 1~2%、カルシウム Ca とマグネシウム Mg は 1% 弱、マンガン Mn、亜鉛 Zn、銅 Cu、コバルト Co は細胞 1 g に対してそれぞれ $1\text{ }\mu\text{g}$ 以下であった。元素としてだけでなく化合物の形で検討することがあり、N は NO_3^- や NH_4^+ など安全性や価格、毒性などにより供給方法を検討することになる。P は培養液中の濃度が低い方が増殖速度は高いということも明らかになっている。⁵⁾ また、廃棄にも注意が必要になるので、EDTA などは使用しない方がいいかもしれない。

4. CO_2 固定に関係する数値

ここまでは CO_2 固定のしくみや培養について述べてきた。しかし、放出された CO_2 を微細藻類がどれだけ利用できるのかは答えていない。社会はどのくらいの CO_2 を固定してほしいのか、微細藻類の能力や CO_2 固定システムに関しても述べる必要がある。こうした質問に対する答えを出すためには多方面から得られる数値が必要である。なお、数値は平均値や分散値での記載ではなく、全体をわかりやすくするために概数のみ示した。また、重量の表示は混乱を避けるため炭素を C、二酸化炭素を CO_2 、パラクロレラの乾燥重量を DW として表現した。

まずは人類の CO_2 放出量である。化石燃料からの CO_2 の排出は日本だけでも年間 11 億トン(2022)、世界では 332 億トン (2021) である。^{9,10)} 化石燃料の多くは輸送燃料や電力の原料として使われ、約 1 割がプラスチック等の原料となっている。ジェット燃料としての使用はさらにその 10 分の 1 に当たる 1 千万トンである。¹¹⁾

それでは微細藻類の光合成速度はどのくらいだろうか。パラクロレラの光合成速度から細胞 1 g は毎時炭素として 0.072 g、二酸化炭素として 0.264 g 固定できる。¹⁾ 1 日 7 時間晴天で光が当たるとすると年間約 0.6 kg になる。すなわち細胞 1 g は光合成で年間 0.6 kg の CO_2 を固定できるということになる。パラクロレラ細胞を一層並べると $2\text{ g DW}\cdot\text{m}^{-2}$ なので CO_2 固定量は $1.2\text{ kg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ となる。ジェット燃料による CO_2 の 1 千万トンを固定するには 8000 km^2 が必要となり、細胞は 5.5 百万トン生産することになる。一般的にある生物の生理機能を調べる時には測定された中で最大の値が選ばれやすいので、光合成の値が CO_2 固定の能力と考えていいだろう。陸上植物シロザ陽葉の光合成速度は $28\text{ }\mu\text{mol O}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ と記載されており、¹²⁾ 1 時間あたりの計算値では $4.4\text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ となる。熱帯雨林の生産でも年間 $2200\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ と報告されている。葉の中では細胞が数段積み重なっており、また何 m も高い熱帯森林との比較なので、これらの値は細胞一層だけのパラクロレラと比較するのは難しいところであるが、光合成速度としての大差はないと言える。

微細藻類の培養でも光合成と同じ程度の CO_2 固定速度が得られているのであろうか。参考として用いた培養容器は扁平なガラス製で人工光を側面から当てるものを用いた。厚さが 2.5 cm なので光のあたる平面部分は 400 cm^2 として液量 1 L に相当する。培養中、細胞はしだいに増加するが、細胞濃度が $0.1\sim 1.0\text{ g DW}\cdot\text{L}^{-1}$ の濃度でほぼ直線と見られる増加となり、その後も細胞の増殖は続くが速度は低下する。直線部分の細胞増殖速度は $0.007\text{ g DW}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ で (=最大増殖速度)、¹⁾ CO_2 の固定速度として表すと $0.013\text{ g CO}_2\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ となる。装置面積当たり年間 $740\text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$ となる。これは細胞濃度が $0.1\sim 1.0\text{ g DW}\cdot\text{L}^{-1}$ という細胞増殖中にも関わらず CO_2 吸収は一定の速度で

しか行われていないのである。つまり光が細胞に当たる部分は一定で、培養液の奥にまで達していないことを意味している。人間の目には明るく見えても、細胞どうしで光を取り合っているということである。言い換えると光に面した細胞がほとんどすべての光を受けとってしまい、後ろの細胞には光が届かないのである。上の $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ は上記の 400 cm^2 当たりになると、細胞を一層に並べた時の $2 \text{ g DW} \cdot \text{m}^{-2}$ に近い値である。光はほとんど一層分の細胞にしか当たらないのかもしれない。簡易的に別の容器で光路を $1.5 \sim 5 \text{ cm}$ で調べたところ、湿重量での増殖速度は変わらなかった。参考までに、細胞の大きさは増殖中に拡大するが、直径は平均として $7 \mu \text{m}$ なので光を受ける断面積は $3.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ で、体積は $1.8 \times 10^{-16} \text{ m}^3$ と求められる。

最近発表された報告では液体培養での CO₂ 固定が 1 日当たりで $48 \sim 79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ とされており、パラクロレラで得られた値と変わらない。^{13,14)} オープンポンドでも深さは数 cm 以上が普通で上記の装置の結果と同じと思われる。以上をまとめると、液体培養では一般に深さが数 cm 以上で作られているので、細胞濃度が高まると受光が十分に行われていないと思われる。培養装置の工夫が今後の課題と言える。たとえば布に付着した細胞に斜めから太陽光を当てるならば、施設面積当たりの CO₂ 吸収は上げられる。また縦型の布であれば、装置として高さを 2 m 以上に広げることができる。人工的な建造物の北側部分でも培養は可能なので、土地利用の面積あたりでは効率を数十倍以上に高められるであろう。装置の設計は生物学以外の方々にもお願いできる。

なお、固相表面連続培養 (SSCC) では、綿地ブロード織を用いて 1 週間の培養を行い、毎日の流出量と布への付着量を合わせて平均値をもとめた。1 週間で布面積当たり $50 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{w}^{-1}$ が吸収されている。この数値は年間 $2.3 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ の布面積当たりである。細胞の半分近くが布に付着していたが、さらに長期の培養でも毎日の細胞流出は続けられた。また、使用済みのワイシャツ地、あるいはロープの形状のものでも培養可能であった。扁平型での培養の重要性は、余談になるが「高等植物の葉はなぜ平べったいのであろうか」という質問と同じことになる。答えは「あまり厚くしても光を受けられないから」であろう。また、上の値は縦型の布面積当たりなので、10 枚並べれば施設面積当たりは 10 倍ということになる。

一応、エネルギーも確認すると、パラクロレラ細胞は $3.7 \text{ kcal} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}$ ($=15.5 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}$) であり、光強度 $13 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ は倍加 7 時間と掛け合わせると $328 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ となる。この値は細胞の持っているエネルギーの約 20 倍で、光合成の要求量子数の 8 をこえていた。実験では 20 くらいの値が出ることが多いが、代謝全体を含めて光量は妥当な状況と考えられる。

また、温度の影響も加える必要がある。生理機能を動かすために重要で、パラクロレラでは 34°C くらいが適温である。それ以上の高温ではわずかの温度差で生存できなくなる。表 2 は光合成速度と細胞増殖速度の温度依存性を示しているが、 34°C を 100 として比較すると、温度が下がるにつれて細胞増殖速度は光合成速度以上に低下が顕著であることが明らかである。¹⁵⁾

表1 微細藻類パラクロレラの CO₂ 固定

項目	量（年間）	理由、根拠
目標	1000 万トン	ジェット燃料の消費量（日本）
能力	1200 トン・km ⁻²	光合成速度（0.264 g CO ₂ ・g ⁻¹ DW・h ⁻¹ ） 一層の細胞量（2 g DW・m ⁻² ）
液体培養	1200 トン・km ⁻²	直線増殖時（最大の増殖速度、0.013 g DW・L ⁻¹ ・h ⁻¹ ）
布利用	2500 トン・km ⁻² 布	固体表面（SSCC）（50 g・m ⁻² ・W ⁻¹ ）
課題	①液体培養での細胞増殖は細胞一層分が最大の速度。 ②光合成における最大速度は太陽光の 1 割程度。 ③太陽光の未利用部分を用いた培養系作製が課題。	
対策	装置の改良 例；SSCC の縦型複数並列	
他の条件：1 g DW は 60 mg chl で、0.5 g の C を持ち、1 日 7 時間受光、年 330 日。		

表2 微細藻類パラクロレラの光合成と細胞増殖の温度依存性

	培養温度				
	34℃	30℃	26℃	22℃	20℃
光合成	100	92	77	66	—
細胞増殖	100	80	60	—	2

34℃での光合成速度は 148 $\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}\text{chl}\cdot\text{h}^{-1}$ で
細胞増殖は倍加時間が 5.78 時間であった。

5. 微細藻類の利用、分類、系統

CO₂ を固定して生産されたパラクロレラはどのように利用できるであろうか。成分はタンパク質 50～55%、脂質 10～30%、炭水化物 10～25%であり、アミノ酸が乾燥重量の 40%を占めていた。アミノ酸はグルタミン酸やロイシンが少し多いめで、バリン、プロリンなどもあった。社会ではすでに食品添加用などの食料や化粧品などに使われているが、今後飼料餌料などの農業利用、あるいは工業原料などにも幅広く利用の可能性はある。生産量や純度、価格によって広がることが期待される。これまでは健康食品などが主であったが、微細藻類全体で見ると大量生産が広がって EPA や DHA などさまざまな有用物質としても市販されるようになると思われる。これらの物質は魚介類から取り出すだけでなく微細藻類からも得られるようになり、利用領域は新たに広がると期待される。食に関する場合はオートクレーブ等の利用による無菌的な培養も多くなるとと思われる。

一方、プラスチック原料としての利用は細胞に溜められた油脂の利用や、炭水化物から製造するなど化学反応による化合物の変換もありえ、これは生物より化学の領域となる。このように経済的な検討や必要量などからさまざまな広がりが見られる。

CO₂ 固定をする生物には、陸上では植物、海や川では海藻等さまざまであるが、根や茎、花などは光合成を行わないし、海藻等では生育分布が限られていることなどから、微細藻類の装置利用ができれば便利である。肉眼で見えるのは細胞が集団になっている時だけで、ふつうは色のついた液体である。光の利用方法を工夫したもので産物利用の目的に合ったものが CO₂ 固定化システムとして培養されるであろう。もともとが緑藻や紅藻、珪藻などの真核生物で多様であった。生物の進化・系統の解析や分子生物学の発展で、微細藻類の多様性や系統はさらに増している。陸上植物ではす

べて葉緑体は2枚の膜に囲まれているが、微細藻類では3枚、4枚のものもある。ここで用いているパラクロレラ *Parachlorella kessleri* 11h 株は葉緑体が2枚の膜に囲まれていて高等植物と同じである。以前は緑藻のクロレラとされていたが、トレボウキシア (*Trebouxia*) 藻綱という新たな分類群ができてその中に入り、学名もパラクロレラとなった。別の株ではクロレラの名前のまま緑藻に入っているものもある。また、最近、生物学的な視点でなく、バイオテクノロジーの視点から原核細胞のシアノバクテリアも微細藻類とすることがある。昨年にもお伝えしたとおりである。

微細藻類の分布地域は熱帯から寒帯まで、水のあるところに幅広く分布し、陸上や他の生物と共生しているものもある。それぞれの生息状況により種の違いがあり培養に適した条件が異なる。自然界の多くの地域から集めることができるが、集めた種が分類学的に何なのかを決めるには専門的な解析が必要で、渦鞭毛藻などには毒性を示すものもあるので要注意である。国立環境研究所などの保存施設 (Culture Collection) などから入手するのもいいかもしれない。株の保存だけでなく、その種で報告された情報まで集められている。

例として少しだけ属名を挙げるとナンノクロロプシス、ゲフィロカプサ、プレウロクリシス、シアノバクテリアのスピルリナなどがある。なお、EPA や DHA の生産など種株により異なり、その特徴や生育条件が異なるので培養するところや利用の目的に合ったものを選んでからシステムを作る必要がある。

6. まとめ

微細藻類による CO₂ 固定化技術の開発には、当面の目標値として年間1千万トンの固定が考えられる。我が国のジェット燃料の使用量である。パラクロレラの光合成能力と細胞一層分の細胞量から年間1200 トン CO₂・km⁻² の値が得られる。液体培養でも同程度の値となるが、細胞一層分の CO₂ 固定速度が持続されるにすぎない。原因が光利用効率にあることから、培養システムの改良により十倍以上の速度が得られると思われる。微細藻類の光合成速度だけで現在のところ目標値に8000 km² の土地が必要になるが、太陽光の未利用部分の利用や装置の高さ、建造物の北側利用などによる土地利用と温度管理などで十倍以上の効率化が図れると思われる (表1)。このように土地利用効率をさらに上げれば、微細藻類の CO₂ 固定は実用化の可能性は高い。

謝辞

基礎の情報と既報のまとめをもとにしたものを本研究紀要で発表させていただきましたこと、編集委員の先生方に感謝申し上げます。また、これまで多くの研究者や学生の方々からさまざまな形でご支援を賜りましたこと、この場を借りて心からお礼申し上げます。

文献

- 1) 都筑幹夫, 岡田克彦, 藤原祥子, *東京薬科大学研究紀要*, **27**, 37-44 (2024).
- 2) de Souza M. F., Meers E., Mangini S., *EFB Bioeconomy J.*, **4**, 100067 (2024).
- 3) 佐藤公行編, 光合成, 朝倉書店 (2002).
- 4) 光合成研究会編, 光合成事典, 学会出版センター (2003).

- 5) Tsuzuki M., *Plant Cell Physiol.*, **27**, 1233-1240 (1986).
- 6) Manabe E., Hirose T., Tsuzuki M., Miyachi S., *Physiol. Plant.*, **67**, 598-603 (1986).
- 7) Miyauchi H., Okada K., Fujiwara S., Tsuzuki M., *Algal Research*, **46**, 101814 (2020).
- 8) 都筑幹夫, *光合成研究*, **27**, 172-179 (2017).
- 9) 環境省, “2022 年度の我が国の温室効果ガス排出・吸収量について”,
<https://www.env.go.jp/press/press_03046.html> (2025 年 2 月 20 日)
- 10) JCCCA 全国地球温暖化防止活動推進センター, “世界の二酸化炭素排出量 (2021). ”
<<https://www.jccca.org/download/66920>> (2025 年 2 月 20 日)
- 11) 国土交通省, “航空分野における CO₂ 削減の取組状況”,
<<https://www.mlit.go.jp/common/001403136.pdf>> (2025 年 2 月 20 日)
- 12) 日本生態学会編, 生態学入門, 東京化学同人, 2004, p. 86.
- 13) Chunzhuk E. A., Grigorenko A. V., Chernova N. I., Kiseleva S. V., Ryndin K. G., Popel O. S., Malaniy S. Y., Slavkina O. V., Neves F. F., Leng L., Kumar V., Vlaskin M. S., *Energies*, **16**, 822 (2023).
- 14) Schipper K., Muraikhi M. A., Alghasal G. S., Saadaoui I., Bounnit T., Rasheed R., Dalgamouni T., Al-Jabri H. M., Wijffels R. H., Barbosa M. J., *J. Appl. Phycol.*, **31**, 2231 (2019).
- 15) Tsuzuki M., Okada K., Isoda H., Hirano M., Odaka T., Saijo H., Aruga R., Miyauchi H., Fujiwara S., *Marine Biotechnol.*, **21**, 406-415 (2019).