

## 微細藻類による二酸化炭素固定、その能力と条件

都筑幹夫\*<sup>1,2</sup>、岡田克彦\*<sup>1</sup>、藤原祥子\*<sup>1</sup>

### 1. はじめに

地球環境の保全は今や重要な社会問題であり、人類の経済活動がその主な原因と考えられている(1-3)。そこで、生物による光合成二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の固定能力は地球の温暖化に対抗できないのだろうかという疑問が生じる。その有効性が期待できればいいのであろう。光合成生物の中で微細藻類と呼ばれる下等な生物群は多様で増殖も速く可能性を示唆する論文も出されている。しかし、微細藻類は環境対策として本当に役立つのだろうか。また、その点ではどんな情報や工夫が必要なのだろうか、こうした質問に対する答えが今求められているのかもしれない。一方、これまでに研究室でつくられた基礎的なデータが社会に伝えられていなかったり報告された光合成に関する結果でも複数の論文に散らばっていたりしているため、微細藻類の光合成に関連しての知識が専門領域以外の方々には理解しづらい状況になっているのではないだろうか。情報をまとめた形にすることが今求められているだろうと思われる。

微細藻類の研究は、まず培養して増殖させ、実験によって生理現象や生化学的性質などその生物の理解を深めることが多い。地球環境対策としての利用研究も基本は同じであるが、用いる量が桁違いに大きいので、オープンポンドなどの池型培養を利用することが一般的である。微細藻類のCO<sub>2</sub>の吸収・固定の研究は進められているが、多くの場合具体的な情報はそれぞれの部署で保管され、社会に情報として発表されにくい状況であることも確かである。これまでに発表された論文では細胞の増殖速度が約20 g・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup>で、CO<sub>2</sub>固定速度は約1.7 g・L<sup>-1</sup>・day<sup>-1</sup>とされてきた(4-6)。しかし、これらの数値は十分な値なのか。より高い値を生み出すことはできないのであろうか。こうした視点はそもそも微細藻類の能力はどれだけなのか、培養装置は工夫するべきことができればそれは何かなど問題点を明らかにすることが微細藻類の研究者に託された仕事なのかもしれない。これまでに得られた微細藻類の数値が他の分野の方々にも理解できる形にし、人間の経済活動からのCO<sub>2</sub>排出抑制や太陽エネルギー利用によるCO<sub>2</sub>吸収技術によって微細藻類を利用したCO<sub>2</sub>吸収システムの拡大が現実化できるための契機となることが望まれる。

基本的な数値をまとめ、微細藻類を専門としないの方々にも微細藻類の利用を検討していただくための術になれば素晴らしいことである。これまでは専門領域での数値や単位を伝えるように報告してきたのに対し、ここでは単位を変えたり換算しなおしたりして、広く重要点が明確になるようにした報告である。通常データ測定では同じ条件を繰り返すことにより、その平均値や分散値を表して確実性を重要視するが、本報告では重要と思える数値を絞り込んで全体の把握がしやすいことに重点を置く。微細藻類利用の可能性と改良すべき点とが明らかになれば今後の開発方向も見出せるであろうと思われる。ここでは微細藻類の一つとしてパラクロレラで発表した論文や基礎データから微細藻類の能力と課題について述べる。

\*<sup>1</sup> 東京薬科大学環境応用植物学

\*<sup>2</sup> 合同会社フォトシンテック・ラボ

## 2. 日本からのCO<sub>2</sub>放出量と太陽光量

今日、山火事や氷河の縮小、洪水や干ばつなど世界各地で地球の温暖化による異常気象が報じられている。こうした現象は人類の活動によるCO<sub>2</sub>やメタンなどの温室効果ガスの排出が大きな原因となっている。CO<sub>2</sub>の吸収にどれだけの微細藻類生産が必要なのであろうか。その規模を明確にするためには化石資源の利用とそれによるCO<sub>2</sub>放出量を確認することが大切である。日本は化石資源の大半を輸入し、また、世界全体の規模も推測しやすいから日本の状況を知ることは重要である(4-6)。日本は原油換算にして年間約4億トンを入力している(7-9)。CO<sub>2</sub>の放出は約11億トンである。その約9割は電力や燃料への利用、残り数千万トンがプラスチック製造などの原料としての利用である。ジェット燃料への利用はさらに一桁下の量と思われる。微細藻類がそのまま燃料等にはできないが、これまで通りの経済を続けるには、同等レベルの微細藻類が光合成を行ってCO<sub>2</sub>吸収をする必要がある。エネルギーの値では一次エネルギー供給として年間  $2.2 \times 10^{19}$  Jである。食事によるCO<sub>2</sub>放出量は  $5.6 \times 10^{17}$  Jである。森林等によるCO<sub>2</sub>回収能力も人間の経済活動による放出量には及ばない。世界のエネルギー消費量は石油37億トン、石炭50億トンに達し、 $3.9 \times 10^{20}$  Jである。日本のエネルギー消費量の10倍強ということになる。なお、日本に再生可能エネルギーは十分あるのかどうかについては、国の調査などから化石資源の利用に対応できるだけの量は存在すると見なされている。微細藻類の利用を日本の規模で対処できれば、世界全体としても重要な視点になると考えられる。

次に、光エネルギー源としての太陽光であるが、光合成で利用するのは地上に到達する可視光の長波長部分である。太陽光は地球上空には全部で174 PWの光が到着するが、地上に達するまでにかかりが吸収され可視光線と赤外線になる。東京の可視光は $285 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ という値や日射量(10)からの計算で日平均は国内では概ね $5.4 \text{ M J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ であり、報じられる値とほぼ同じである(11、12)、1日12時間を昼間として赤色光(660 nm)の部分を計算すると約 $130 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる。

## 3. 生物に関する基本情報 — 光合成や微細藻類の分類 —

まずは基本的な情報整理であるが、光合成とは緑色植物等の有色生物による光エネルギー利用の酸素発生およびCO<sub>2</sub>の吸収・固定という生理現象である。CO<sub>2</sub>は有機物へと変換され生命活動に使われる。地球上のほとんどの生物は光合成生物の作った有機物を利用して生命現象を営んでいる。人類もその一つであり、衣食住すべての面で直接間接に植物などの光合成生物を利用しているのである。石油や石炭等の化石も、もともとは過去の光合成生物と見なすことができ、時間を超えて光合成の生物現象に依存してきたと言えよう。

次に、微細藻類とは微小な真核光合成生物の総称である。進化の早い時期から今日に至る多様な水界中心の生物群と言えよう。利用の可能性という視点からは、たとえば紅藻、緑藻、トレボキシア藻、ブラシノ藻、真眼点藻、珪藻、ユーグレナ藻、ハプト藻などの分類群があげられる。最近では原核細胞のシアノバクテリアも“微細藻類”とする非生物系の研究者もいて、従来の分類学的な考え方とは異なってとらえられようとしてきた。生育場所も海や湖水、河川、陸上などさまざまである。また、海でも沿岸と大洋では温度や塩濃度の変化など性質も異なる。赤道から極地までの緯度や季節によっても多様である。さらに、サンゴの共生藻はサンゴの体内に存在する。微細藻類のこのような多様性は蓄積物質にも影響し、炭水化物や脂肪などの物質にも多様性が生じている。EPAやDHAなどの人間に有用な物質も分

類群による多様性が認められる。ここで述べるパラクロレラは単細胞、淡水性で生育速度が速いなどの特徴があるが、他の微細藻類を利用する場合には生息状況等を検討することによって結果は応用できるものと思われる。

筆者らが用いてきたパラクロレラ *Parachlorella kessleri* 11h は以前 *Chlorella kessleri* 11hとされていたが、さらにその前は *Chlorella vulgaris* 11hであった。分類学領域の研究が発展してトレボキシア (Trebouxia) 藻綱が誕生し、緑藻の一部がトレボキシア藻綱に移されたのである。この株はもともとドイツのゲッティンゲン大学の藻類コレクションからいただいた系統で、そこでは211-11hと表現されている(13)。

この生物はほぼ球形の1細胞からなる。大きさは4~16 μmほどであり、成長とともに拡大する。細胞数は母細胞の中で2または4、あるいは8細胞がつけられる。その後、母細胞の細胞壁を溶かして飛び出していく。このように細胞1個の大きさや重さは生育条件によって変化する。ほとんど攪拌しない条件で培養を続けると、はじめは浮遊性の細胞が大半を占め、次第に沈降する細胞が増えていく。葉緑体内でデンプンが蓄積されるからであろう。

#### 4. 光合成によるCO<sub>2</sub>固定能力 —パラクロレラの最大光合成活性—

光合成は光エネルギー、特に赤色光を利用して酸素を発生し炭素を固定する。酸素発生と二酸化炭素吸収とはそれぞれ異なる複雑なメカニズムからできているが、本報告での目的からモル当たりで考えると概ね同じ量としてよさそうである(14)。さて、研究者が微細藻類の光合成活性を正確に測定しようとする、ふつう細胞濃度を低めにして酸素電極を用いて測定することが多い。細胞が生理能力を最大に発揮させるためである。パラクロレラの光合成速度は複数の論文に記載したが(15-17)、低めの値で60~90 μmol·mg<sup>-1</sup> chl·h<sup>-1</sup>、通常示される値として100 μmol·mg<sup>-1</sup> chl·h<sup>-1</sup>である。理想的にはさらに高い値も測定され報告した(18)。光合成研究の領域ではクロロフィル(chlorophyll, chl)を基準に光合成速度を求めることがある。他の研究結果と比較しやすいからである。微細藻類に限らず、緑色植物の多くも同程度の値といえる。クロロフィル量は、パラクロレラでは1 g DCW (乾燥重量; Dry Cell Weight) で55-60 mg chl である。炭素の質量12 g·mol<sup>-1</sup>なので1 g DCW存在のもとでは約0.07 g·g<sup>-1</sup> DCW·h<sup>-1</sup>固定されることになる。この考え方は、酸素とCO<sub>2</sub>の変換やクロロフィル当たりを細胞重量当たりへと変換するなど、光合成速度式の表現項目を次式のように変換した。

$$\begin{aligned} 100 \mu\text{mol O}_2 \cdot \text{mg}^{-1} \text{chl} \cdot \text{h}^{-1} &\cong 6 \text{ mmol O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{DCW} \cdot \text{h}^{-1} \cong 6 \text{ mmol CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{DCW} \cdot \text{h}^{-1} \\ &\cong 72 \text{ mg C} \cdot \text{g}^{-1} \text{DCW} \cdot \text{h}^{-1} = 0.072 \text{ g C} \cdot \text{g}^{-1} \text{DCW} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

即ち、CO<sub>2</sub>固定速度は炭素として1 g DCWに対して概ね0.07 gが固定されることになる。“CO<sub>2</sub>”では質量が44なので0.26 g CO<sub>2</sub>·g<sup>-1</sup> DCW·h<sup>-1</sup>固定されることになる。光合成速度の値を広く捉えて50~150 μmol O<sub>2</sub>·mg<sup>-1</sup> chl·h<sup>-1</sup>としても0.03~0.1 g C·g<sup>-1</sup> DCW·h<sup>-1</sup>となる。これがパラクロレラの最大光合成速度と言える。次に細胞数が2倍に増殖するための時間、倍加時間は7~8時間であることから0.07に7時間を掛けるとほぼ0.5となる。細胞の炭素量はほぼ半分(測定では48~51%)なので一致する。別の表現では、炭素の固定速度は1時間あたり細胞乾燥重量の約7%で、細胞量の増加速度は2倍の約14%となる。クロロフィル量に関してはやや低い値も報告されているが、大きな差ではない(20)。

また、光合成速度に及ぼす光についてであるが、最大光合成速度を示す条件で光強度は概ね70 μmol·

$\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、赤色光のみでもエネルギー源として利用できることから、660 nmの光部分で計算すると  $7 \times 10^{-5} \text{ mmol光子}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} \doteq 13 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  となり、光合成速度の飽和状態ではたらく時の光エネルギー概算値という形で捉えることができる。光強度に関しては光合成速度が最大になるまでは強度に依存するが、それ以上の光強度では、光合成速度は一定あるいはしだいに低下する。飽和光強度以上の光は不要ということになる。また、パクロレラの場合、LEDによる赤色光だけの照射でもあるいは糖などの有機物だけでも増殖可能である。 $13 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  は7時間で $330 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 必要ということになる。パクロレラ 1 gのエネルギーは約 $3.7 \text{ kcal}\cdot\text{g}^{-1}$  ( $=15 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DCW}$ )なので、ある時点の細胞分裂から次の細胞分裂までは約20倍のエネルギーを受けることになる。なお、照射光と光合成速度との関係を受光した後すぐに0.1秒以上暗くなると光合成酸素発生は抑えられることから(16)、照射された光は連続的に当たる光であることが必要と考えられる。以上をまとめると、細胞が示す $\text{CO}_2$ 固定速度は最適条件で約 $0.07 \text{ g C}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DCW}\cdot\text{h}^{-1}$ であり、光強度は太陽光の概ね十分の1程度ということになる。

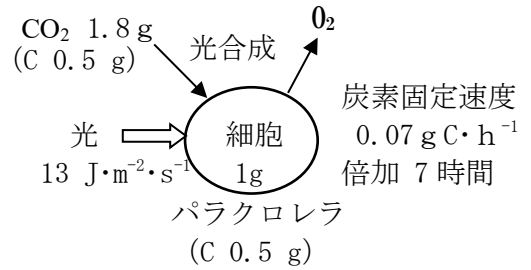


図1 パクロレラ細胞における光合成の時の炭素の流れ

5. 藻類の光合成能力は培養でも活かされているのか —培養における細胞増殖と $\text{CO}_2$ 利用—

パクロレラの炭素固定能力は培養でどの程度利用されているのであろうか。中ガメと称するガラス製扁平フラスコを横の平たい面の片方から人工光を照射した場合の細胞増殖の結果を記載していた(図2、文献15の図1の修正)。そこでは細胞の記載をpacked cell volume (pcv)で表しているが、1 ml pcvは約0.25 g DCWである。図2が細胞量 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ で描き直した図である。培養による増殖を時間で見るとまず細胞の増殖が見られない初期の時間部分があり、0.1~1 g DCW $\cdot\text{L}^{-1}$ で概ね直線的な増殖となり、その後次第に速度は低下する。元の文献では、1.8 g DCW $\cdot\text{L}^{-1}$ 程度まで測定してあり、その後の培養でまだ少し細胞増加は継続する(15)。直線的な増殖期における増殖速度は約 $0.01 \text{ g DCW}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ である。炭素量は細胞の半分なので、炭素吸収としては $0.005 \text{ g C}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ということになる。直線増殖期は新たに細胞ができていくにもかかわらず、増殖速度が一定(つまり直線的)ということは、新たに作られる細胞の光合成能力は発揮されていないことを意味する。おそらく光の当たる細胞の量は一定で変わらないということなのであろう。

細胞の濁度は、分光光度計(ベックマン社製)で730 nmの吸光度OD値を測定すると値が1の時、細胞濃度は $0.35 \text{ g DCW}\cdot\text{L}^{-1}$ であった。OD値が1というのは測定光路1 cmで光量が10分の1であることを意味する。培養の時の直線増殖期が0.1~1 g DCW $\cdot\text{L}^{-1}$ ということはOD値が高い細胞での生育ということになり、培養液中で新たにつくられている細胞が実は光を受けとれない状況にあるという考え方と一致する。中ガメの厚さが約2.5 cmで片側からの照射 $18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ の光のもとでは、見かけ上は培養

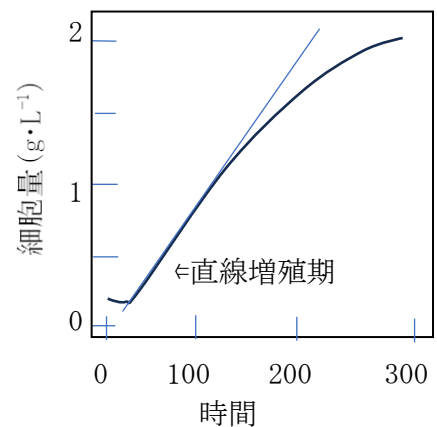


図2 細胞量を明記するため文献15の図1から修正

装置に光が十分当たっているように見えるが、細胞にとっては光を受けとれていない状況にあると推測される。このことは通常の池型培養でも細胞濃度が高まると光利用効率が不十分になるということである。

また、文献15の図に戻って、0.04 %のCO<sub>2</sub>での直線増殖 ( $0.0025 \text{ g DCW} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) と2%のCO<sub>2</sub>の時とを比較すると約4倍の差がみられ、CO<sub>2</sub>の供給が抑えられていることが明らかである (15)。通常の液体培養では、細胞の真の能力を発揮できていないということが明確になったのである。

筆者らはこれまで、布などの固相表面上で培養する方法 (固相表面連続培養系、Solid Surface Continuous Culture, SSCC) を示してきた (17, 19)。SSCCで十分な細胞増殖が認められ、液体での培養に劣らずと言っていいようである。特に文献17では、CO<sub>2</sub>濃度を測定する方法でクロロフィル当たりの光合成活性が測定でき、その値は液体中酸素電極で求めた値とほぼ同程度の結果になっている。上記の  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \text{ chl} \cdot \text{h}^{-1}$  は妥当であると結論できる。なお、布の種類は綿ブロードが適当であるが、数か月の使用で一部破壊される。おそらく細胞分裂後に母細胞の壁を溶かす際セルラーゼが排出されているのであろう。綿でなくレーヨンやアクリル等の布でも可能のようであるが、水分や細胞の保持が関係している。SSCCは立体的なシステムが可能なので施設面積あるいは土地面積当たりの増殖速度は数値化しづらいが、太陽光の光強度が最大光合成に必要な量より高いことも含めて、受光部となる布の面積を広げた並べ方が可能である。布面積を広げて光の分散化ができれば太陽光の有効利用システムができると考えられる。液体培養でも、池型の培養よりチューブ型等の方が少しだけ高い値が報告されていたが (19)、そこに液体量と受光面積との関係が示されていたのかもしれない。そして、人工光であればSSCCの場合  $250 \text{ g DCW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  の値が得られているので、液体か固体かに関わらず、太陽光の光分散化による効率的な培養が重要と思われる。なお、文献18の図1で“mg”と記載してしまい、“g”の誤りであったので訂正する。結論として、液体培養の場合、直線増殖期のパラクロレラでは能力に合うだけの光合成活性 ( $0.07 \text{ g C} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DCW} \cdot \text{h}^{-1}$ ) が得られていないことが判明した。

## 6. CO<sub>2</sub>固定におけるその他の条件

パラクロレラが高いCO<sub>2</sub>固定速度を示すには、温度、光強度、CO<sub>2</sub>濃度、必要な元素類、pH、攪拌条件などの環境要因が適していることも必須である (16)。温度は34℃くらいが最適であるが、38℃で行った結果も報告されている (21)。25℃から38℃が適当としていいであろう。CO<sub>2</sub>濃度は大気も可能であるが、2~5%の濃度が望まれる (15-18)。経験からCO<sub>2</sub>濃度20%でも可能であった。生体内の成分にはタンパク質やアミノ酸など化合物中に窒素Nが含まれ、リン酸化合物やATP、ポリリン酸などのリンPも必要である。KやNa、S、MgやCaなどのほか、Fe、Zn、Mn、Mo、Co、Cuなども必要である。用いる微細藻類の種によって共通に必要な元素と、種特異的に必要とされる元素もある。パラクロレラ生産1gに対し炭素Cが0.5g、CO<sub>2</sub>にして気体0.94Lが必要である。窒素Nは55-60mgでKNO<sub>3</sub>ならば0.42g、リンPは約17mg、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>では66mgである。しかし、生物体内での量と培養液中での濃度は同じとは限らない。細胞が積極的に蓄積するものもある一方で、必要ではあるが高濃度では毒となるものもある。経験からCuやCo、Moは2.5nMの濃度で毒性を示した。こうした値は生物種ごとに、あるいはEDTAなどのキレート剤があると変化する。例えば、珪藻は珪素Siを必須とするが、パラクロレラには不要である。詳細な検討から、パラクロレラにおいてはリンの濃度は  $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  でもいいようである (16)。生育

条件によってポリリン酸が少なく、細胞の持つリン含量が変化することが原因なのかもしれない。また、シアノバクテリアのスピルリナではNaを多く用いる。pHや浸透圧、塩濃度なども同様に種によって異なるが、パラクロレラの室内培養では、植物組織培養用の混合試薬ガンボーク(Gamborg) B5の1/5希釈液を用いてきた。この場合、窒素Nの量から約1.2 g DCW・L<sup>-1</sup>の細胞生産にあたる。なお、培養液の中でホウ素Bとヨウ素Iは必要なさそうである。分子レベルで見直すと、Nに関しては硝酸カリウムKNO<sub>3</sub>は安全性が高いため利用することが多いが、アンモニウムイオンや尿素を用いることも検討していいかもしれない。この場合、毒性と価格の両方に注意して選択することになる。硝酸イオンを利用した場合、培養液にカリウムイオンが残るのであろう。培養液のpHが上昇するので、継続的に硝酸イオンだけを加えることは可能かもしれない。なお、培養液のpHは5~7が適当と思われる。

プラスチックの原料生産を目的とする開発であれば、生産量は多く、価格は安くというのが基本になるであろうし、人工光より太陽光を使うことが望まれる。光合成速度の解析から明らかになったようにCO<sub>2</sub>固定には細胞量に関係する。また、太陽光量を考えると培養システムの工夫が必要であろう。

表1 パラクロレラのさまざまな性質 (概要)

項目	性質	数値など
細胞の性質	クロロフィル含量	55-60 mg・g <sup>-1</sup> DCW
	炭素C含量	0.5 g・g <sup>-1</sup> DCW
	他の元素含量 (HとO以外)	窒素N 0.6 g・g <sup>-1</sup> DCW; リンP 0.17 g・g <sup>-1</sup> DCW K、Na、S、Fe、Mg、Ca、Mn、Zn、Co、Cu、Mo
	倍加時間	7-8 時間
	細胞の重量	1.5 x 10 <sup>-11</sup> g DCW
	環境因子	温度、CO <sub>2</sub> 、pH
	光透過度	0.35 g DCW・L <sup>-1</sup> が分光光度計にて730nmのOD値=1
光合成速度	100 μmol O <sub>2</sub> ・mg <sup>-1</sup> chl・h <sup>-1</sup> ≒ 0.07 gC・g <sup>-1</sup> DCW・h <sup>-1</sup> (赤色光 13 J・m <sup>-2</sup> ・s <sup>-1</sup> にて)	
液体培養	直線増殖速度	0.01 g DCW・L <sup>-1</sup> ・h <sup>-1</sup> (細胞濃度0.1~1 g DCW・L <sup>-1</sup> )
	到達細胞量	上限 2 g DCW・L <sup>-1</sup> 以上
固相表面培養 (SSCC)	光合成速度	液体中での測定とほぼ一致
	一層の細胞量	120 mg chl・m <sup>-2</sup> ≒ 2 g DCW・m <sup>-2</sup>

## 7. 社会の視点から考える微細藻類の生産規模と重要点

これまで生産量が20 g DCW・m<sup>-2</sup>・day<sup>-1</sup> から年間6 kg DCW・m<sup>-2</sup>・year<sup>-1</sup> ほどである。日本において化石燃料が年間4億トンであることから、仮にパラクロレラを4億トン生産するとすると10<sup>10</sup> m<sup>2</sup> = 1万km<sup>2</sup>の土地利用が必要となり、国内の陸地だけでは不可能な生産規模である。太陽光が10倍利用できるのなら生産面積を縮小できるかもしれないが、プラスチック生産の原料として供給できるというのが現実的な可能性であろう。

細胞生産のための細胞量の確保は重要である。1日のCO<sub>2</sub>固定速度が10倍ならそれだけの細胞量が必

要となる。しかし、細胞量が増すと今度は、培養液中の細胞濃度が高まり光の透過を抑えてしまうという流れであることも明らかになった。そこで、オープンポンドのような平面的な培養形態でなく、SSCCを利用した立体的な培養や、液体でも装置を薄くした立体化によって生産量を高める可能性もある。さらなる発展が期待されるし利用土地面積の効率化がさらに高まるものと思われる。

既に健康食品や化粧品などへ利用されており、その領域は今以上に発展していく可能性が高い。その他の産業、とくに飼料や餌料、そして、工業原料としての利用にも目が向けられよう。大量の微細藻類生産は経済社会で重要なものと考えられる。さまざまな利用へ広がる可能性や太陽光以外の再生可能エネルギーの利用、海上の利用などへの可能性もあり、将来の工業形態になりうる場所である(22)。多様な微細藻類を利用することにより多様な利用や産物が可能となれば、プラシノ藻などの多様な糖類、珪藻などの油性物質等、特殊かつ有用な化合物など他の領域への利用につながる事が予想される。当面の目標をプラスチック原料やジェット燃料に視点を置くとすれば、微細藻類の生産量は現実可能などころであろう。

結論として、①炭素量はパラクロレラ乾燥重量の半分であり、②光強度は太陽光の1割程度でよく、③液体培養は容器や深さが通常の厚さでは光供給が不十分になるということである。倍加時間が約7時間なので概ね細胞量の約7%の炭素が毎時固定される。通常の液体培養では直線増殖期以降は細胞による光透過遮蔽によって細胞増加効率が抑えられてしまうのである。細胞に光を当てる前に当てる光を分散させられればこれまでに報告された以上の生産性が得られると思われ、規模拡大から利用範囲の広がりへと発展することが願いである。平面的な培養からSSCCや立体的な培養系により炭素固定を高めることができると願うところである。

## 謝辞

研究室での基礎情報と既報のまとめ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. Khan, M.I., Shin, J.H., Kim, J.D.: *Microb Cell Fact* 17: 36 (2018)
2. Siddiki, S.Y.A., Mofijur, M. 他9名: *Fuel* 307: 121782 (2022)
3. Babu, S.S., Gondi, R. 他3名: *Sustainability* 14: 15070 (2022) [10.3390/su142215070](https://doi.org/10.3390/su142215070)
4. Hallenbeck, P.C., Grogger, M. 他2名: *Appl Energy* 179: 136 (2016)
5. Adamczyk, M., Lasek, J. 他3名: *Appl Biochem Biotech* 179: 1248 (2016)
6. Cho, C., Nam, K. 他7名: *Scientific Reports* 9(1): 18999 (2019)
7. 全国地球温暖化防止活動推進センター (JCCCA): *グリラボ* (2023)
8. 資源エネルギー庁: *日本のエネルギー2022年度版* (2023)
9. *EU-Japan Centre for Industrial Corporation* (2016)
10. 気象庁、過去の気象データ: *日射量の月平均値 (AmeDAS)* (2023)

[https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly\\_s3.php?prec\\_no=48&block\\_no=47610&year=&m](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3.php?prec_no=48&block_no=47610&year=&m)

onth=&day=&view=p3

11. Limbu,F., Tiwari,B.R, 他4名 : *Himalayan Physics* 10: 100 (2023)
12. Keya,D.R., Farangis, B, 他2名 : <https://www.researchgate.net/publication/362505137> (2022)
13. *Sammlung von Algenkulturen*, Univ. Göttingen, Germany (2023)
14. Kaplan,A., Björkman,O.: *Z Pflanzenphysiol* 96: 185-188 (1980)
15. Tsuzuki,M., Miyachi,S.: *Can J Bot* 69: 1003-1007 (1991)
16. Tsuzuki,M., Okada,K. 他7名 : *Marine Biotechnol* 21: 406-415 (2019)
17. Miyauchi,H., Okada,K. 他2名 : *Algal Research* 46: 101814 (2020)
18. Tsuzuki,M., Miyachi,S., Berry,J.A.: *Inorganic Carbon Uptake by Aquatic Photosynthetic Organisms*, eds by W.Lucas & J.A.Berry, ASPB, p 53 (1985)
19. 都筑幹夫: *東京薬科大学研究紀要* 15: 9 (2012)
20. Miyauchi,H., Ishikawa,T. 他7名 : *Front Plant Sci* 14: 1175080 (2023)
21. Nakamura,Y., Miyachi,S.: *Plant Cell Physiol* 233: 333 (1982)
22. 都筑幹夫: *光合成研究* 27: 172-179 (2017)