

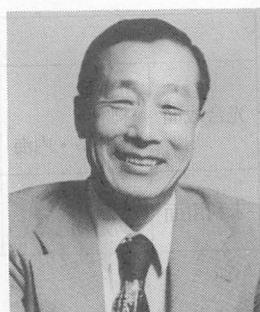
■ 展望・解説 ■

メタグリカルチャー構想

Metagriculture

中山大樹*

Ooki Nakayama



要 旨

今から最大の努力をしても、世界の静止人口は現在の倍見当になり、食糧問題は分配の段階を通り越して絶対的に不足する可能性がある。石油が枯渇すれば有機資源に困り、地球の過熱を防ぐ為には、なるべく太陽エネルギーを活用するのが良い。これらの難題を解決するには、可耕地の倍の面積の砂漠と20倍以上の外洋を受光面として利用するのが良いが、恵まれた環境に適応してしまった高等植物は使えない。光合成活性が高く、苛酷な取り扱いに馴染む微細藻類が良いが、バイオマスを収穫したのでは精密機器である葉緑体を単なる有機資源として扱う事になり、もったいない。そこで、微細藻類を固定化し、増殖を抑制して、光合成産物を細胞外に分泌させて、食糧、有機資源もしくは電力として回収する meta (超) agriculture を提唱し、その為の基礎実験をおこなったところ、Chlorella, Scenedesmus 等多くの藻類は固定化により有機物分泌率が向上し、Pediastrum は、固定化によって全有機物生産量も増加し、構想実現の可能性が示された。

その変曲点は、漸近値の1/2の所である。平たく言えば、人口計画が地球規模で軌道に乗り始めた時から、人口が増殖して、やっと頭打ちになる事を覚悟せねばならない、と云う事である。つまり、人口抑制か、食糧増産かの二者択一と云う呑気な考えは許されず、全力を挙げて人口抑制に努め、しかも食糧を増産させなければならない(図-1)。

現在の食糧危機は分配の問題であり、政治・経済の課題だが、やがて絶対量の不足に発展する事は疑う余地が無い。筆者は幾つもの食糧関係の国際会議に出席して居るが、食糧の将来についての責任ある楽観論は一つも聞かない。現実には、地球規模で砂漠化が進行して居り、農地の拡大どころか、現状確保すらおぼつかないのが真相だ。

(2) 未利用受光面：農業土木や遺伝子工学を駆使しても、農地での生産には限界があり、悲観論は、可耕地の範囲内で物を考える所から来て居る。食糧と云うと、とかく蛋白を思い浮かべがちだが、基本は有機炭

1. 新しい第一次産業開発の必要性

1.1 食糧問題

(1) 人口問題と食糧問題：農業の発明に続く産業革命を通じて、世界人口は、人口増加率を一定と仮定した Malthus (1798) の指数曲線を上回る勢いで増加して来た。現在、人口増加率は、いくらか低下したが、物には惰性があるから、人口曲線が急に寝る事はあり得ない。一つの無理が少い到達目標は、人口増加率の中に、現在の人口に比例するマイナスの項を入れた、Verhulst (1838) -Pearl (1920) の logistic 曲線だろう。これは静止人口を漸近線とするS字を描くが、

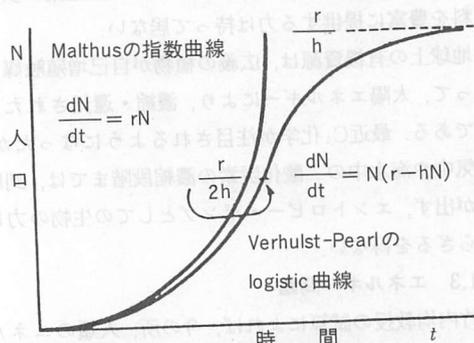


図-1 人口曲線

(Verhulst - Pearl の logistic 曲線の漸近線の高さは変曲点の2倍)

* 山梨大学工学部環境整備工学科教授
〒400 甲府市武田4-3-11

表1 地球の表面

| | | 10 ⁶ km ² | % |
|------|---------|---------------------------------|------|
| 光合成面 | 可耕地 | 32 | 6.3 |
| | 林野 | 45 | 8.8 |
| | 沿岸部・内海 | 40 | 7.8 |
| 未利用面 | 外洋 | 326 | 63.9 |
| | 砂漠 (広義) | 67 | 13.1 |

素であり、カロリーである。二酸化炭素と水に太陽エネルギーを吹き込む事によって得られた高エネルギー炭素化合物が、そのエネルギーを消費しながら、窒素分をまき込んだり、ビタミンや香味が付加された物が食糧であって、その大枠は受光面に支配される。地球の表面は表1の通りで、可耕地の2倍強の広義の砂漠と、10倍を越す外洋がある。これら未利用受光面を活用する事が出来れば、可耕地と云う小さい枠の中で物を考えるよりは、余裕を以って計画をたてる事が可能であろう。

1.2 有機資源問題

無くなると言われ続けながら、何時までもあるのが石油だが、やがて本当に無くなる事は、疑う余地が無い。石油が無くなっても、エネルギーについては後継候補が出揃って居るが、まず困るのは有機資源だろう。今日の有機化学工業は、原料を農林産物から、石炭を経て石油に変える事を通じて発達して来た。今更澱粉や米からプラスチックを作れと言われても無理だろう。産業革命は、所詮、第二次産業の革命であって、第一次産業は、改良を重ねては来たが、革命からは取り残され、高くても買わざるを得ない食糧の生産に辛うじて存在理由を見出して居るが、第二次産業に安い原料を豊富に提供する力は持って居ない。

地球上の有機資源は、広義の植物が自己増殖触媒となって、太陽エネルギーにより、濃縮・還元された炭素である。最近C₁化学が注目されるようになったが、空気中や海水中の二酸化炭素の濃縮段階までは、到底手が出ず、エントロピー・ポンプとしての生物の力に頼らざるを得ない。

1.3 エネルギー問題

竹内均教授の試算によれば、今の所、人類のエネルギー消費量は、10年で倍増して居り、この調子で行くと、1973年から起算して60年後には、太陽エネルギーの内の、気象現象を起こして居る分に匹敵するようになり、150年後には、太陽がもう一つ照ると同じに

なると云う事だ¹⁾。今日、既に異常気象による作物の不作が続いて居り、その一部は石油の燃やし過ぎによるのではないかと取り沙汰されて居るぐらいだから、この警告は重大である。金に糸目をつけず、資源とエネルギーを投入して対策を実行すれば、理論上は、どんな公害も解消する筈だが、使ったエネルギーが、すべて束になって襲いかかって来るとなると、これこそ最後の公害、環境破壊の総決算と言う事が出来よう。核融合の実用化が遅れて居るのは、考えようによっては、むしろ幸いな事だ。

農業や水力発電等の形で人が利用して居る太陽エネルギーは、地上に到達した太陽エネルギーの1万分の1の桁と言われて居る。捨てられたエネルギーは、途中経過に係り無く、最終的には熱になってしまうのだから、どうせ太陽から来た光の残り1万分の9999が、熱になる前に活用する分は、余分に地球を暖める事にならない。身の回りの自給電力用には太陽電池等が便利だが、広大な受光面に降り注ぐ太陽エネルギーを固定したり、厳しい砂漠や外洋の無人工場の電力を賄ったりするには、或る程度の自律性があって、一から十までは人が世話をしないで良い生物法に魅力があろう。

以上、生物の助けにより、食糧、有機資源、エネルギー、3つの方面に未利用受光面を活用する事が期待されるが、これらは、在来の産業とも、原料の調達に責任を持たない所謂ハイテクとも範疇を異にする新しい第一次産業と言う事が出来よう。

2. メタグリカルチャー

2.1 基本構想

(1) 微細藻類の長所と短所：農林産物の主体をなす高等植物は、水に恵まれた陸地の条件に適応してしまった物だから、砂漠や海で使うには適して居ない。微細藻類は、陸地に自立して生活する能力では高等植物に及ばないが、体制が未分化で、培養工学的な取り扱いに馴染み、クロレラやスピルリナの中には、人工の手助けを得れば、高等植物を遥かに凌ぐ生産力を示す物がある。そこで、未来の食糧生産の担い手として囑望された事があるが、実現して居ない。これには幾つもの理由があるが、致命的な難点は個体が小さくて収穫が容易でない事、収穫された細胞には癖がある事だ。

(2) 珊瑚礁の生産力：生産力の算定は、条件によって大きく変わるから絶対的な物ではないが、乾物量をトン/ha・年の単位で表した値として次のようなデータがある。

耕地(平均)4, 水田16.3, 砂糖黍87,
 温帯林13, 熱帯雨林59, 珊瑚礁78.9,
 クロレラ(バンコック)55,
 スピルリナ(バンコック)40.

稲や砂糖黍は葉や根を含んだ値だから、食べられる部分はずっと少い。その点を考慮すれば、捨てる所が無いクロレラやスピルリナ等の微細藻類は、農産物と比べて遥かに有利な事がわかる。ここで注目に値するのは珊瑚礁の生産力だ。海洋生産は植物プランクトン-動物プランクトン-魚と云う食物連鎖によって居り、北洋のようにプランクトンが多く、適度に濁って居る海の方が生産力が大きいと考えるのが常識だが、珊瑚礁の海は美しく澄み切って居る。また藻場と言って、海藻が多い所に魚が群れる物だが、元気の良い珊瑚礁には海藻は殆ど生えて居ない。

珊瑚虫は動物だが、その細胞の中に Zooxanthella と総称される褐色の単細胞藻類が共生して居て、明るい海で、これが盛んに光合成をおこなう。しかし、他人の細胞の中と云う「住宅事情」があるから、そのペースで増殖する訳に行かない。そこで光合成産物の大部分は藻類の細胞の外、つまり珊瑚虫の細胞の中に分泌され、食物連鎖によらない動物生産が達成される。珊瑚虫は夜になるとプランクトンを食うが、これはおおよそ程度であって、主食は昼間、中から供給される訳だ。

(3) 高等植物の知恵：この種の現象は珊瑚虫だけの特殊な物では無く、単細胞、多細胞を含め、水棲無脊椎動物の中には例が多く、鶏の培養細胞に単細胞藻類を共生させた実験もある。それどころか、高等植物の緑色細胞の中で光合成をおこなって居る葉緑体は、構造が藍藻や Prochloron 等、原核性の藻類の細胞とそっくりだし、独自のDNAを持って居て、節度を守っては居るが親の細胞の中で自主的に増殖して居る。そんな事で大昔、光合成能力が無い単細胞生物の細胞の中に原核藻が侵入して居着いてしまっていて現在のクロレラ等に代表されるような真核藻となり、その一派が高等植物へと進化したとの説が有力である。犠牲者をムシャムシャ食べてしまう食物連鎖方式と比べると、捕虜を働かせるような共生方式の方が無駄が少ない。ところが多細胞化した高等植物は、もう一つ大飛躍をした。光合成産物を葉緑体はおろか親の細胞からも外に出して、光合成の邪魔にならない種子の内部や地下部に貯えるようになった。葉緑体は、LSIも遠く及ばない分子細工で成り立って居る超精密機器で、こんな物を使

い捨てにしたのでは勿体無いから、緑の葉はシーズンを通じて大切に使う事が出来るようになった訳だ。

(4) 藻類の活力と高等植物の知恵の結合：クロレラ等は畑を必要とせず、人工的な管理の下で大繁殖するが、その細胞を収穫したのでは、LSIを目方で売買するような物で、賢明な方法とは言えない。微細藻類の活力と融通性に高等植物の知恵を組み合わせる事が出来れば、新しい一次生産方式が生まれるのではないか？

それには微細藻類に光合成産物をなるべく細胞増殖の為に使わず、ともかく分泌させる必要がある。高等植物は、緑色細胞の外に出て来た有機物を自力で胚乳や芋の中に蓄積するが、単細胞藻類は、そんな訳に行かないから、人の助けで何とかしてやれば良い。

この種の方式は農業を超え(meta)た物だが、日本語で超農業と言うと、スーパー農業ととられて大先輩産業である農業に失礼に当たる怖れがあるので、metagriculture と呼ぶ事にする。^{2, 3)}

2.2 分泌物回収方法

固定化した微細藻類に分泌された有機物の回収方法としては、有機資源として回収する直接法、固定化材料を兼ねた生物体として回収する共生法、エネルギーとして回収する燃料法、電力法等が考えられる。

(1) 直接法：微細藻類を固定化して作った人工葉をミネラルを溶かした水に侵し、二酸化炭素を補給しながら光を当て、液をカラムに流して分泌された有機物を回収する。藻の種類としては、回収し易く役に立つ物質をたくさん分泌するような株を選べば良からう。

固定化は生物体の増大を物理的に妨害する事により、光合成産物の分泌を促す作用がある事が期待され、後で述べるように、これは実証されて居る。勿論、固定

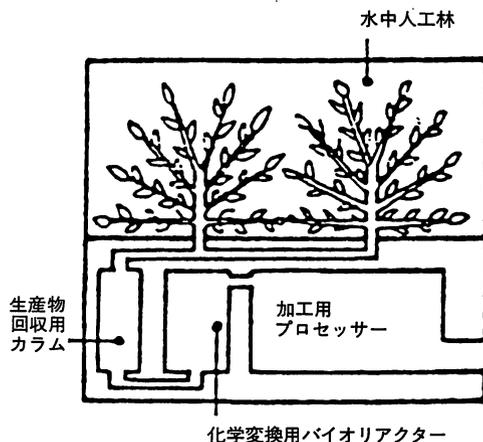


図-2 固定化藻による有機物生産概念図

化は微細藻類の細胞を液から分離する為にも有利だがもう一つ利点がある。クロレラ等が高密度に繁殖すると、水面近くの細胞は10万ルクスを超える強光を受けるが、光合成に利用出来るのは、その2-3割に過ぎないので、折角の光の残り7割以上に対しては遮光の役しか果たさず、有効水深は10cmぐらいになってしまう。一方、森林を見ると、梢では葉が光とほぼ平行に付いて居り、地表近くには葉が水平に広がって僅かな木洩れ日も拾い上げ、10メートルもの深さが有効に利用されて居る。森林を参考にして、太陽の移動を考慮して、コンピュータで計算した、最も効率が良い形と角度に人工葉を配列した水中人工林を設計すれば良い(図-2)。

カラムから直ちに有用物質が出て来れば申し分無いが、一般論としてはプロセッサーを経て製品が出て来る自動工場の形式を採り、プロセッサーの全部または一部にバイオリクターを採用する事になろう。この方式は、砂漠での有機物生産に適して居る。砂漠の緑化には、蒸発と浸透の為に莫大な量の淡水が必要だが、光合成の原料としての水なら、単純計算で、 $18 / (12 + 18) = 0.6$ トンあれば、1トンの澱粉が出来る筈で、海産藻を使えば淡水の必要も無い。砂漠に密閉池を作ったのでは熱湯になりそうだが、比熱が大きい水を持ち込めば良く、水深50cmで、1日の温度差を 10°C ぐらいに押える事が可能であり、どうしても高温での作業が必要なら温泉の好熱藻を使えば良い。

(2) 共生方式：固定化材料も生きて居る型である。例えばの話だが、光エネルギーを使って分子状窒素を固定する藻類をクラゲに共生させ、下水処理の過程で回収された不純な磷酸を仕込んだ自走ブイを浮かべて置けば、窒素固定藍藻 *Anabaena* を仕込んだ青いクラゲや、同じく *Trichodesmium* を共生させた赤いクラゲがブイの回りに群を作るだろう。ブイには磷の他に珪素や鉄等、外洋に不足し勝ちな元素を仕込んで良いし、クラゲの底棲世代の為に水中棚を設けて置くのも良からう。

宿主が繁殖すると、共生藻は子孫に分配されて行くのが通例である。クラゲは高速で泳ぎ回る魚と違って無駄なエネルギーを使う事が無いが、嵐の時、深い所に避難したり、敵を刺したりするぐらいの自主性は備えて居る。澱粉に富むクラゲ、牛肉の味がするクラゲ等を作り出すのも遺伝子工学の楽しいテーマだろう。共生藻に更に生理活性物質生産菌を孫共生させるのも面白い。

(3) エネルギー生産：光エネルギーによる水素生産は、藍藻にも緑藻にも認められて居るが、現在知られて居る限りでは、その速度は極めて小さい。光合成細菌の水素発生速度は、藻類のそれより1桁以上大きい。水を直接分解して水素を出す事は出来ず、有機物が必要である。

そこで、藻類に分泌させた有機物を光合成細菌に合わせるようにすれば、太陽エネルギーによる水からの高速水素生産が可能になる筈である。

即ちバイオマスの構築に必要なミネラルと、スタートの為に二酸化炭素を溶かした淡水または海水に、有

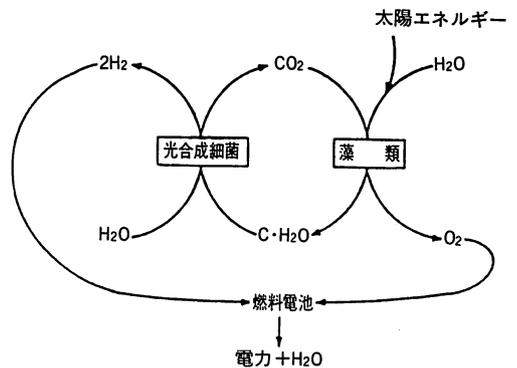


図-3 有機物分泌性の微細藻類・光合成細菌・燃料電池系の概念

機物分泌性の藻類と、有機物と水を用いて水素を発生する光合成細菌をうまく固定化した物を浸して、光を当てれば、炭素やミネラルは循環利用され、図-3に示すように、結局、水が分解されて水素と酸素になる。うまく行けば、石油を掘り尽してしまった砂漠が、究極の燃料としての水素と酸素の供給基地となり、砂漠は唯一で貴重な資源である太陽エネルギーを輸出する事になろう。燃料電池と組み合わせれば、水さえ循環利用され、砂漠の製造にしか使われて来なかった砂漠の太陽が、一定の効率で電力になる。超伝導が実用化されれば、これをそのまま世界に供給すれば良い。

3. 微細藻類に於ける有機物分泌現象

以上の構想は、すべて微細藻類の代謝を増殖型から分泌型に切り替える事が可能だと云う見通しが前提になって居る。

3.1 背景

海や湖の水には、極めて低濃度だが総量の点では無視出来ない有機物が溶けて居て、これは Dissolved

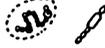
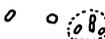
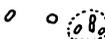
| | | 藍 藻 (31株) | 真 核 藻 (39株) |
|----|---|---|---|
| 誠水 | | Spirulina maxima(2), S.platensis(7)  | |
| 淡 | 糸 | Lyngbya(2), Phormidium(2)  | Chlorella(20)  |
| | | Plectonema, Symploca, Aulosira  | Scenedesmus(3)  |
| | | Anabaena, Anabaenopsis  | Selenastrum  |
| | | Nostoc, Cylandrospermum  | Ankistrodesmus  |
| 水 | 球 | Scytonema(2)  | Stichococcus(2)  |
| | | 好熱 Mastigocladus(2)  | Pediastrum(3)  |
| 水 | 球 | Synechococcus (4), Synechocystis  | Euglena  |
| | | Aphanothece  | |

図-4 供試藻株

Organic Matter (DOM) または Dissolved Organic Carbon (DOC) の単位で表される。DOCの一部は植物プランクトンの分泌物に由来する等の事があって、海洋学や陸水学の方では古くから微細藻類の有機物分泌に興味を持たれて来た。しかし、この関係のデータは殆どすべてが、極く微量の分泌物をありのままに測定した物であった。Goff はイソギンチャクから共生藻を分離したところ、盛んに分裂、増殖した。とこ

ろがこれに宿主のイソギンチャクの汁を入れると、増殖が抑制されて、光合成産物を分泌するようになったと言う。⁵⁾ その後も、これに類する報告が出て来て居る。

3.2 実 験

以上、微量の有機物分泌は藻類一般に見られる現象であり、共生体の中で盛んに有機物を分泌する藻類は、宿主を離れても、条件によっては強い分泌能力を発揮

表2 有機物分泌能力に富む微細藻類の例

| 藻 株 | 培養日数 | PC (mg/l) | TOC (mg/l) | PC+TOC (mg/l) | 分泌率* (%) |
|------------------|--------|-----------|------------|---------------|----------|
| 藍藻 | | | | | |
| Spirulina maxima | 7602 7 | 981 | 525 | 1506 | 34.8 |
| " | " 14 | 936 | 1870 | 2806 | 66.6 |
| S. platensis | 7606 7 | 932 | 610 | 1542 | 39.5 |
| " | " 14 | 762 | 2360 | 3122 | 75.5 |
| 緑藻 | | | | | |
| Chlorella sp. | 5016 7 | 170 | 148 | 318 | 46.6 |
| " | " 14 | 210 | 19 | 229 | 8.5 |
| " | 5021 7 | 44 | 177 | 221 | 80.1 |
| " | " 14 | 110 | 12 | 132 | 9.2 |

*分泌率: 100TCO / (PC+TOC)

表3 固定化及び非固定化力藻の21日培養後の各態有機炭素

| 藻株 | PC | | TOC | | PC+TOC | | 分泌率 | | 固定化による増加率 | | |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|------|------|-----------|--------|-----|
| | 固 | 非 | 固 | 非 | 固 | 非 | 固 | 非 | TOC | TOC+PC | 分泌率 |
| Chlorella sp. 5231 | 327 | 460 | 282 | 114 | 609 | 574 | 46.2 | 19.9 | 2.5 | 1.1 | 2.3 |
| " 5110 | 150 | 172 | 86 | 27 | 236 | 199 | 36.4 | 13.5 | 3.2 | 1.2 | 2.7 |
| Scenedesmus sp. 5043 | 280 | 331 | 162 | 24 | 442 | 355 | 36.6 | 6.7 | 6.8 | 1.2 | 5.5 |
| " 5046 | 300 | 376 | 342 | 25 | 642 | 401 | 53.2 | 6.3 | 13.7 | 1.6 | 8.4 |
| Pediastrum sp. 7655 | 176 | 155 | 399 | 16 | 575 | 171 | 69.4 | 8.4 | 24.9 | 3.4 | 8.3 |
| Stichococcus sp. 7644 | 87 | 93 | 33 | 9 | 120 | 102 | 27.2 | 9.2 | 3.7 | 1.2 | 2.9 |

するのだから、微細藻類の有機物分泌については、広く検討してみる価値がありそうだ。

(1) 予備実験：光合成産物を無条件に分泌する藻があれば、話は簡単なので、色々な形の藍藻計31、各種の真核藻計39、合計70株を無機培地に接種して光を照らしながら25°Cで培養し、経時的に、藻体中の炭素量 (Particulate Carbon, PC) 及び濾液の全有機炭素量 (Total Organic Carbon, TOC) を測定してみた。使用した藻は図-4の通りである。() 中の数字は株数、() 無しは1株とする。

有機物分泌率、即ち100TOC/(PC+TOC)は10台の事が多いが、値の大きい例の幾つかを表2に示す。例外もあるが、藍藻、特に *Spirulina* は、培養1週間めより2週間後の方が有機物分泌率が向上し、PCは減少し、培養濾液はニンヒドリン反応陽性である。これに反し、*Chlorella* 等、緑藻の多くは逆に培養初期に有機物の分泌率が高く、培養が進むと逆転する事が多い。また分泌物には有機酸と、アンスロン陽性物質、即ち糖が多い。乱暴に解釈すれば、*Spirulina* 等は、培養後期にバイオマスが自己消化して、見掛け上の有機物分泌率が高まり、緑藻は、旺盛に分泌した有機物を培養後期に回収して、或程度の歩留まりで、バイオマスを構築するのかもしれない。

これが真実であれば、適当な緑藻を培養して、片っ端から回収・除去すれば、能率の良い有機物生産が可能になるのかもしれない。

(2) 固定化実験：共生藻は、固定化藻の一種と考えるのも良いので、取り敢えず13種の緑藻をアルギン酸カルシウムで小球状に固定化して無機培地中で21日間振盪培養し、濾液のTOC及びポリリン酸ナトリウムでゲルを崩壊させてPCを測定し、固定化しない物と比較して分泌率が著しく向上した例を表3に示す。

Pediastrum の場合、固定化する事により、有機炭素分泌量は約25倍、分泌率は8倍、全炭素固定量は3.4倍に向上して居る。*Pediastrum* をそのまま実用化しようとする訳ではないが、種類を選んで固定化等の方法を施すと、微細藻類の光合成活性も有機物分泌性も向上する可能性がある事が立証され、メタグリカルチャー実現の可能性が示されたと言える。

引用文献

- 1) 竹内均；自然界のエネルギー、33-59 (1974)、東京大学出版会。
- 2) 中山大樹；未来技術メタグリカルチャー上中下、日経産業新聞、4月9-11日 (1985)。
- 3) 中山大樹；微細藻類による有機物分泌と新しい第一次産業の可能性、PPM、19巻、2号 (1988)、47-54。
- 4) 中山大樹；微細藻類による食料生産、醗酵と工業、37巻、11号 (1979)、1032-1040。
- 5) 中山大樹；第1回国際藻類学会大会印象記、醗酵と工業、40巻、10号 (1982)、950-954。