

■ 研究論文 ■

下水汚泥焼却施設におけるクロレラを用いたCO₂固定システムの開発Development of CO₂ Fixation System at a Sludge Incinerator by a Unicellular Green Alga *Chlorella*

御園生 拓*・森本 和之**・鈴木 嘉彦***

Taku Misonou Kazuyuki Morimoto Yoshihiko Suzuki

(原稿受付日1996年5月7日, 受理日10月16日)

Abstract

The increase of CO₂ in the air is one of the most serious problems facing our world today. Though any number of projects aimed at reduce atmospheric CO₂ are being conducted, there has not yet been an example in practical use. We have attempted to construct a small sized CO₂ fixation system with a lessened load on the environment and low cost. In this study, an experimental CO₂ fixation system was tested at a sewage disposal plant in Kofu City, Yamanashi, a central region of Japan. Thus, using drainage water from the plant as a culture medium, the CO₂ in the exhaust gas should be absorbed by a unicellular green alga *Chlorella kessleri* C-531. We have conducted a field experiment at a sewage disposal plant, using exhaust gas from a sludge incinerator. *Chlorella* cells grew satisfactorily with 5.5 L of the enriched drainage water in an acrylic 60 × 30 × 3 cm reactor with gas exchanging reservoir. The CO₂ fix rate of this system was reached up to 300mg CO₂/L/h. From these results, the surface area size of the reactor for the practical plant that absorbs total CO₂ from the incinerator was calculated as 40,000m². However, it became clear that the efficiency of CO₂ fixation and the energy consumption level of the system should be improved for the practical use.

1. はじめに

私たちが現在直面しているさまざまな環境問題の中でも、大気中のCO₂濃度の上昇は異常気象・水不足・食糧不足など、人類に重大な影響をおよぼすような多くの現象を引き起こすことが考えられる。大気中のCO₂濃度は過去1世紀の間約0.05ppm/年という速度で増加しており、2030年には産業革命以前の値である280ppmの2倍に達すると予測されている¹⁾。地球温暖化については世界各所で気候モデルによる予測が試みられている。それぞれの推定値には多少の差異はあるものの、いずれもCO₂などの温室効果ガスの増加による気温の上昇が起こるという点では一致しており、早急に何らかの対策が行なわれるべきであることが指摘されている²⁾。

大気中CO₂濃度上昇の原因の一つとして、産業革命以降の化石燃料の大量消費が挙げられる。そこで近年、

CO₂排出量の少ないクリーンな新エネルギーの開発と同時に、CO₂の除去・固定化技術の開発が推進されるようになった。CO₂排出源である各種の燃焼・焼却施設からの排ガス中のCO₂固定に向けては、物理学的、化学的、生物学的な方面からの研究が行なわれている^{3, 4)}。物理学的な方法の主なものCO₂を海洋に還元するものであるが、海水の酸性化を始めとする海洋生態系への影響など、検討すべき課題は多い。化学的な方法は、触媒を利用してCO₂を他の有用物質に転換させるものであるが、エネルギー変換効率の低さなどの問題がある。生物学的な方法は、生物の光合成反応によって太陽エネルギーを利用するという点で注目されている。しかしいずれの方法も解決すべき問題点が多く、また大規模なプラントを想定していることもあって実用に至ったものは報告されていない。

我々は都市下水処理場に注目し、処理場内の汚泥焼却施設から放出される排ガス中のCO₂を生物学的な方法によって固定することを考えている。焼却施設から放出される排ガス中のCO₂と下水処理行程中の処理排水を用いて単細胞緑藻のクロレラに光合成を行なわせるという、小規模で環境に対する負荷の少ないCO₂固

* 山梨大学教育学部生物学教室助教授

** " 大学院工学研究科電子情報工学専攻

*** " 工学部電子情報工学科教授

〒400 山梨県甲府市武田 4

定システムを構築することを目的として実験を行っている。先に、山梨県甲府市の南部浄化センターと協力し、処理排水を培地に用いた場合にクロレラが効率よくCO₂固定を行なうための培地条件の検討を行なった結果、処理排水に種々の栄養素を添加することにより、クロレラは順調にCO₂を固定し、生長することがわかった^{5, 6)}。

本論文では、この培地と南部浄化センター内の污泥焼却施設から実際に放出される排ガスをを用いてクロレラの培養を行なった実験の結果について報告する。

2. 污泥焼却施設について

共同研究を行なった山梨県甲府市の南部浄化センターでは、下水処理工程で回収された脱水污泥をセンター内の污泥焼却施設において焼却している。焼却施設は50t/day (24時間運転)の焼却能力があり、污泥の量によって1日あたり16時間、あるいは24時間運転が行なわれる。

以下に焼却施設内の各装置の概要を示した。

- 焼却装置：脱水機で脱水された污泥は、流動床式の焼却炉内で800℃で燃焼し、焼却灰ダストと燃焼ガスとして炉外に排出される。
- 熱回収装置：焼却炉からの排ガスは、空気予熱器で流動ブロウからの流動空気によって熱回収され、白煙防止予熱器で更に熱回収される。
- 灰処理装置：排ガス中のダストはサイクロンで乾式捕集され、灰ホップに貯留後、搬出される。
- 排煙処理装置：排ガスは排煙処理塔で洗浄後、湿式電気集塵機において有害物質・灰塵を除去し、白煙防止予熱器で予熱された熱風と混合され大気に放出される。

本研究では、集塵処理を行なう湿式電気集塵機の途

中から排ガスを引き出してクロレラの培養を行なった。なお、表1に湿式電気集塵機出口の排ガス組成の平均値を示した⁷⁾。

3. 実験装置

図-1に実験装置を模式的に示した。本システムは大別して、排ガスの供給系と細胞懸濁液の循環系から構成されており、クロレラ細胞懸濁液のバッチにガスを流入するという構成をとっている。

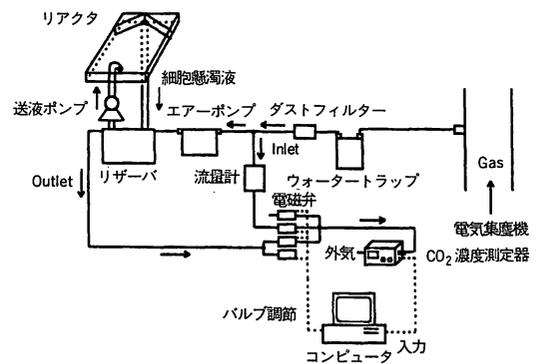


図-1 実験装置の模式図

3.1 排ガス供給系

実験に使用した排ガスは、電気集塵機の途中から直径2cmのホースにより、流量630L/hで引き出した。また、排ガス中の有害ガス成分(NO_x・SO_x他)、およびダストを除去するために、ウォータートラップとダストフィルタを設置した。ウォータートラップは密閉瓶に水道水(pH7.0~7.2)を3L入れ、排ガスを水中に直接通気した。ウォータートラップのpHは、焼却時間に依らず、設置後1日でpH5.8~6.0の範囲で酸性側にかたむいた。これは、排ガス中にCO₂・NO_x・SO_xの他に、水への溶解度の高い塩化水素が0.5ppm程度含まれているためであると考えられる。なお、水道水は1日おきに入れ換えを行なった。ダストフィルタは容量150mLの密閉ポリエチレン製容器で、フィルタに脱脂綿を用いた。しかし、ダスト流量は約2.5mg/h程度であるため、ウォータートラップでその大部分がトラップされ、フィルタは2週間程度交換を行わずに使用することができた。ウォータートラップ、ダストフィルタにより前処理を行なった排ガスは、流入ガスとしてエアポンプにより流量60L/hでリザーバに通気した。なお、エアポンプは焼却が行なわれていない時間は自動的に停止するようになっている。

表1 電気集塵機出口の排ガス組成

成分	濃度
CO ₂ (%)	9.1
O ₂ (%)	10.1
CO (%)	0
N ₂ (%)	80.8
NO _x (ppm)	11
SO _x (ppm)	ND*
排ガス量 (m ³ /h)	4900
ダクト濃度 (mg/m ³)	4
温度 (°C)	20

*NDは測定限界以下

CO₂濃度測定部は通常、外気に接続され、一定時間毎に電磁弁をコントロールしてリアクタ入口および出口のCO₂濃度を測定する。CO₂濃度の測定には赤外線式CO₂濃度測定器(理研計器RI-550A)を用い、測定器の出力をA/D変換器によりパーソナルコンピュータに取り込んでデータ処理を行なった。

3.2 細胞懸濁液循環系

クロレラが光合成を行なう場となるリアクタ (60×30×3 cm, 容量: 5.4L) は、厚さ5 mmの透明アクリル板により製作した。リアクタ上部に夏期の細胞懸濁液の温度上昇防止、および冬期の凍結防止のために流水を流した。この流水は実験装置の付近を流れている焼却炉からの排水(水温: 約20℃)を利用したもので、フィルタを通して不純物を除去して使用した。これにより夏期の細胞懸濁液の温度を40℃程度に抑えることができ、冬期の凍結も防ぐことができた。

排ガス中のCO₂を細胞懸濁液に効率よく混合させるためにリザーバ(ポリエチレン製広口瓶, 容量: 3.5 L)を設けた。リザーバ内には一定量の細胞懸濁液が溜められており、送液ポンプ(東京理化RP-1000)により、細胞懸濁液を流速: 48L/hでリアクタ下部から流入させるようにした。

4. 材料および方法

実験の材料には、東京大学応用微生物学研究所(現分子細胞生物学研究所)から分与された緑藻綱Chlorococcum目の単細胞藻*Chlorella kessleri* C-531株を用いた。前培養^{5, 6)}として200mLの三角フラスコ内に合成無機栄養培地(表2)を150mL入れ、オートクレーブで1 atm, 121℃, 10分間の滅菌を行い、寒天培地上の保存藻株を少量加え、密閉された実験容器内で1週間振とう培養(東京理化SS-80, 振とう速度: 70rpm)を行なった。この間、実験容器内はCO₂濃度4%, 温度25~30℃, 光は実験容器の上面および側面に設置した蛍光灯(40W×15本)によって、光量320 μmol photons/m²/sで連続照射した。光量の測定は光量子計(Pantheon FOGLIA-10)で行った。

南部浄化センターでの実験は、1995年10月17日から11月7日の期間に行なった。実験用培地の組成を表3に示した。使用した処理排水(表4)は、南部浄化センターにおいて活性汚泥法により処理された、最終塩素滅菌を行なう前のものである。この培地を、リアクタに4 L, リザーバに1.5Lの割合で使用し、前培養し

表2 *Chlorella kessleri* C-531 用無機栄養培地

物質名	添加量 (g/L)
KNO ₃	5.0
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	2.5
KH ₂ PO ₄	1.25
K ₂ HPO ₄	0.1
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	0.0028
Arnon A ₅ 溶液*	1.0mL

純水を加えて1000mLにする。*Arnon A₅ 溶液 (100倍液)

物質名	添加量 (g/L)
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ · 4 H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ · 7 H ₂ O	0.222
CuSO ₄ · 5 H ₂ O	0.079
(NH ₄) ₂ Mo ₇ O ₂₄ · 4 H ₂ O	0.015

純水を加えて1000mLにする。濃硫酸 1液

表3 南部浄化センターにおける実験用培地

物質名	添加量 (g/L)
KNO ₃	5.0
KH ₂ PO ₄	1.25
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	0.0028

処理排水を加えて1000mLにする。

表4 処理排水の組成 (pH以外, 単位ppm)

pH	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻
6.9	3.61	0.10	19.49
PO ₄ ³⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
1.69	9.27	46.4	18.3
Mg ²⁺	Fe ^r	Mn	SO ₄ ²⁻
3.96	0.07	0.04	46.5

た細胞懸濁液を50mL加えて培養を行なった。

クロレラの生長は、培養期間中の細胞懸濁液の吸光度、細胞数、乾燥重量、クロロフィルa量、CO₂固定速度、および可視域吸収スペクトルの変化によって測定した。吸光度は、藻細胞による光の散乱をクロロフィル等の色素の吸収のない波長750nmにおける吸収を分光光度計(島津製作所UV-1200)で測定して得た。細胞数の測定にはトーマの血球計を用い、光学顕微鏡(15×10倍)で計1.0×10⁻⁹L中の細胞数を計数した。乾燥重量は、あらかじめ重さを計っておいたグラスファイバーフィルタ(Gelman Sci. タイプA/E61630,

25mm) で細胞懸濁液の濃度に応じて5~15mLをろ過し、フィルタを80°Cで6時間乾燥後、重量を測定することにより求めた。クロロフィルa量は、細胞懸濁液をグラスファイバフィルタでろ過後90%アセトンで色素を抽出し、663nmおよび645nmの吸光度の値から次式に従って求めた⁸⁾。

$$\text{クロロフィルa量} (\mu\text{g/mL}) = 12.7 \times \text{OD}_{663} - 2.69 \times \text{OD}_{645}$$

CO₂固定量は、培養期間中の毎日17:00に、リザーバ入口と出口のガスを容量4.3Lのガス捕集袋に採取し、それぞれのガス中のCO₂濃度(%)の値から次式により求めた。

$$\text{CO}_2 \text{ Fixed (g CO}_2\text{/h)} = 0.01 \times F \times D \times (\text{Inlet CO}_2 - \text{Outlet CO}_2)$$

ここで、Fはリザーバへの排ガス流量で60L/h、Dは採取したガス温度におけるCO₂の密度(g CO₂/LC O₂)である。なお、CO₂濃度(%)の単位を(LCO₂/L)に変換するために0.01倍している。

クロレラ細胞の吸収スペクトルは、1×1cmガラスセルを用いてオパールグラス法により分光光度計によって可視部の吸収を測定して得た。なお、グラフは750nmにおける吸光度で基準化し、相対値で表した。

全測定は少なくとも3回繰り返す、その平均値を示した。

5. 結果および考察

図-2に培養期間中の吸光度、細胞数、クロロフィルa量、およびCO₂固定速度の経時変化を示した。培養開始3日目までは新たな環境に適應するための誘導期と考えられ、クロレラの増殖は緩やかであった。4日目以降に吸光度、およびクロロフィルa量が急激な増加が見られた。CO₂固定速度についてもクロレラの生長に伴った増加が見られ、9日目には供給した排ガスに含まれるCO₂の約15%にあたる、1.661g CO₂/h (302.1mgCO₂/L/h) という値が得られた。なお、細胞数、クロロフィルa量およびCO₂固定速度が9日目にピークを示したのに対し、吸光度が11日目に最大となっているのは、クロレラの生長停止によるフロック形成が原因であると考えられる。細胞の生長は9日目頃にピークを示したが、10日目以降に低下した。これは、培養液中の何らかの栄養素が不足したためだと考え、12日目に培地を1L追加した。培地追加後、クロレラは再び増殖した。しかし、目的とするCO₂固定システムの実用化において、生長停止に伴うCO₂固定

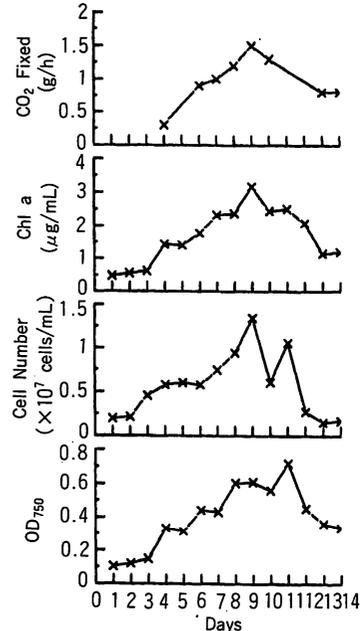


図-2 クロレラ細胞の生長

速度の減少は大きな問題であることから、安定したCO₂固定を行なうためには連続培養系の設計を行なう必要があることが示唆された。

図-3に培養期間中のクロレラ細胞の吸収スペクトルの変化を示した。培養開始からクロロフィルの440nm、680nmの吸収は順調に増加したが、クロロフィルの減少に伴って、両方のピークも減少した。

図-4に吸光度と細胞数、および吸光度とクロロフィルa量の関係を示した。吸光度は、細胞数およびクロロフィルa量と相関があり、回帰分析の結果、以下の式が得られた。

$$\text{Cell Number} (\times 10^7 \text{ cells/mL}) = 1.4394 \times \text{OD}_{750} - 0.0060$$

$$\text{Chlorophyll a} (\mu\text{g/mL}) = 4.1667 \times \text{OD}_{750} + 0.0249$$

なお、標準偏差はそれぞれ、0.2521, 0.3119であった。

これらの式の傾きは培養条件(培養液の循環速度、排ガス流量、リアクタの水深、リアクタとリザーバの培養液の液量比など)により変化し、培養液中に栄養素が豊富に存在し、かつ光とCO₂が十分に供給されると特に高い相関を示すことがわかった。

図-5には培養期間中のリザーバに供給された排ガスのCO₂濃度、リザーバ内の培養液の温度、およびクロレラ懸濁液の吸光度の経時変化を示した。なお、グラフの原点は1995年10月18日0時に基準化してある。図

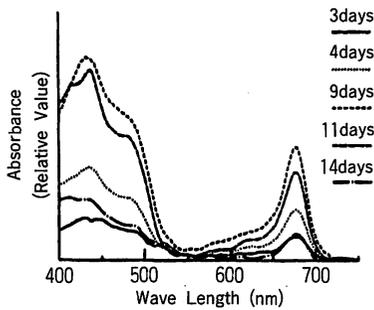


図-3 クロレラ細胞の可視部吸収スペクトル変化

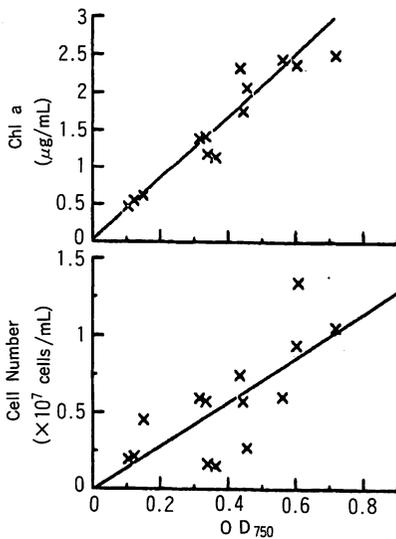


図-4 750nmにおける吸収と、クロレラ細胞数およびクロロフィルa量の関係

中のCO₂濃度の値が落ち込んでいる時期は、焼却停止により排ガス供給が止まった日である。培養液の温度は天候に大きく影響されることがわかった。6-7日目、11-12日目にかけては雨天のため、温度が上昇していない。クロレラの生長は、排ガス供給のなかった4-5日目と雨天の6-7日目に抑えられた。なお、夜間は細胞数にわずかな増加が見られたが、吸光度、クロロフィルa量にはほとんど変化はなかった。

以上より、汚泥焼却施設からの排ガスを用いてクロレラの培養を行なっても、クロレラは順調に生長し、CO₂を固定することが示された。

次に、太陽からの入射エネルギーに対する受光面積あたりに藻体が利用したエネルギーの比を表すものとして、光利用効率を求めた。なお、光利用効率ηを次式で定義する。

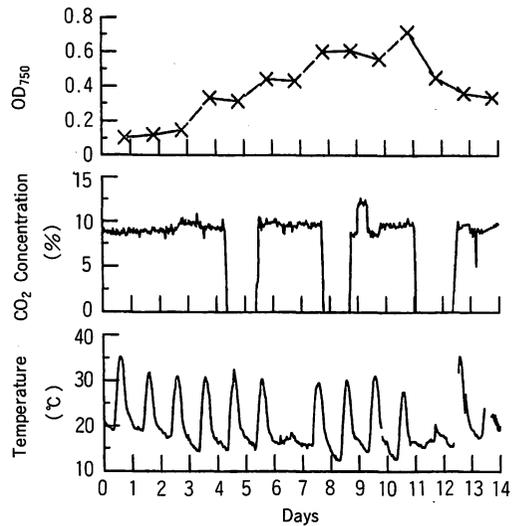


図-5 クロレラ細胞の生長と排ガスのCO₂濃度および培養液の温度変化

$$\eta (\%) = \frac{a \times P}{I} \times 100$$

ここで、*a*は藻体1g(乾燥重量)を燃焼したときに発生する発熱量で、オダム⁹⁾に従って20.5kJとした。Pは藻細胞の生産速度(g/m²/d)である。Iは太陽光の可視部の入射エネルギー(MJ/m²/d)で、光量子計で測定した積算光子数に可視部光子の平均エネルギー、4.19 MJ/mole photonsをかけて求めた。

8-9日に得られた乾燥重量は0.333g/L/dで、リアクタの受光面積0.18m²、および培養液使用量5.5Lから、生産速度Pは10.18g/m²/dと求まる。また、入射エネルギーIは3.85MJ/m²/dであった。これらの数値を用いると光利用効率は約5.4%となる。

以上の結果を用いて、実験を行った甲府市南部浄化センター内にCO₂固定システムを構築するための理論計算を行なう。ただし、光は太陽光のみを利用し、システムは連続操作により、月別の日照時間において平均のCO₂固定速度が300mg CO₂/L/hとなるように運転されたとした。また、夜間のクロレラの呼吸量は考慮しないものとした。その結果、リアクタの水深を5cmとすると¹⁰⁾、焼却炉から放出される全CO₂(836 kg CO₂/h)を固定するためには、リアクタの面積は約40,000m²、培養液は2,800m³必要であると計算された。南部浄化センター(敷地面積:165,900m²)は活性汚泥法により水処理を行なっているので、水処

理施設であるエアレーションタンクの上部を利用して、センター内に40,000m²の敷地を確保することはできる。つまり、理論的にはセンター内にCO₂固定システムを構築することが可能だと計算された。なお、これを実用化した場合、収穫される藻体量は年間平均360 kg/dとなる。

しかし、CO₂固定システムの実用化に際しては、システム運転時の使用電力量とシステムによるCO₂固定量のバランスを考慮する必要がある。鈴木と孫¹¹⁾は、1990年度の産業連関分析より、事業用火力・水力・原子力発電から1 kWhの電力量が生産されると、約1,200 gのCO₂が排出されると計算している。今、CO₂固定システムの1日当りの使用電力量をX kWhとすると、1,200×X g/dのCO₂がシステム運転時に排出されていることとなり、この値以上のCO₂を固定しなければシステム全体としてはCO₂固定の機能を果たさないことになる。本研究の実験系は主に送液ポンプおよびエアポンプによって1日に約3 kWhの電力量を消費しているので、本システムを運転することによって固定されるCO₂量(平均約20g/d)は、運転によって放出されるCO₂量にはるかにおよびないこととなる。現在、電力消費量を軽減するために太陽電池による電力供給システムの開発を行っている。

今後は、使用電力量をできるだけ抑えるような培養システムと同時に、より効率的なCO₂固定を行なえるリアクタの開発を目指さなければならない。また、増殖後の細胞の分離・回収も考慮した場合には更にコストがかかるため、今後の細胞の分離・回収においても新たな技術の開発が期待される。

6. おわりに

本研究では地域的な下水処理場に注目し、小規模で環境に対する負荷を軽減するCO₂固定システムを確立することを目的として、甲府市南部浄化センター内の污泥焼却施設の排ガスを用いてクロレラの培養実験を行なった。更に歩を進めるためには、以下のような課題についての研究が必要である。

・より効率の高いCO₂固定を行える培養条件の検討

・日照/気候変動に対応した装置の運転方法の確立
・藻体の分離/回収技術を考慮したシステムの開発
・回収藻体の利用法(家畜飼料, 土壌改良剤等)の検討

・本システムのCO₂固定により適した細胞株の選抜

CO₂固定システムの実用化に向けては、特に太陽光のような自然エネルギーや、焼却施設の廃熱などを最大限に利用するシステムの開発が望まれる。いずれにせよ、長期的な観点でCO₂固定に関するノウハウを蓄積することが問題解決の近道となるであろう。

最後に、本研究を進めるにあたりご協力頂いた甲府市南部浄化センター、(株)島機械および(株)月島メンテナンスに感謝します。また、クロレラの培養系に関して有益な御助言を下された東京薬科大学生命科学部の都筑幹夫先生に深く感謝します。

参考文献

- 1) 永田勝也; CO₂による地球温暖化, 熱処理, 33巻(1993), 229-235.
- 2) ホワイト, R. M.; 地球温暖化論争, 日経サイエンス, 20巻(1990), 9-17.
- 3) 宮寺博, 市川伸一, 難波勝, 西村正勝; 二酸化炭素削減を目指す分離・固定化技術, 日立評論, 75巻(1993), 41-46.
- 4) 湯浅凶南雄, 星野茂樹, 星野均; CO₂固定化技術の現状と課題, 防災システム, 16巻(1993), 3-10.
- 5) 御園生拓・小林里美・森本和之・鈴木嘉彦; 単細胞緑藻クロレラによる環境CO₂吸収の試み—培養条件の検討—, 作物栄養研究会誌, 45巻(1996), 1-4.
- 6) 御園生拓・小林里美・森本和之・鈴木嘉彦; クロレラによる下水処理場焼却施設のCO₂固定—培養条件の検討, 山梨大学教育学部研究報告, 印刷中.
- 7) 月島機械; 排ガス計量報告書(1992).
- 8) 藤田善彦; 光合成色素の定性と定量法. 藻類研究法, (編)西澤一俊, 千原光男(1979), 共立出版, 東京.
- 9) オダム, E. P.; 生態学の基礎, 三島次郎訳(1975), 培風館.
- 10) 根来正明, 塩地則夫, 金子雅人, 生田義明, 牧田武紀, 平山孝平, 松崎裕之; 微細藻類によるCO₂の固定化技術, 三菱重工技報, 29巻(1992), 1-6.
- 11) 鈴木嘉彦, 孫徳華; 最終需要と総合評価, 第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集(1996), 285-290.