

スジアオノリによる二酸化炭素固定

誌名	水産増殖 = The aquiculture
ISSN	03714217
巻/号	424
掲載ページ	p. 515-520
発行年月	1994年12月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



スジアオノリによる二酸化炭素固定

小松精二¹⁾・石田 豊¹⁾・川嶋之雄²⁾・徳田 廣²⁾

(¹⁾株式会社四国総合研究所, ²⁾日本エス・ユー・エス株式会社)

Photosynthetic CO₂ Fixation by a Marine Green Macroalga,
Enteromorpha prolifera (MÜLLER) J. AGARDH

Seiji KOMATSU¹⁾, Yutaka ISHIDA¹⁾, Yukio KAWASHIMA²⁾, and Hiroshi TOKUDA²⁾

Abstract

Experiments on photosynthetic CO₂ fixation by *E. prolifera* were carried out outdoors in 500 l FRP tanks with a surface area of 1 m² each. When a cultivation tank containing sea water was aerated with CO₂ gas (1 l min⁻¹), the pH of the sea water decreased to 6.5 whereas the growth of this alga was stimulated as much as 1.5~1.7 times. Maximal CO₂ fixation rate (12 g-C m⁻² day⁻¹), photosynthetic efficiency (4 %) and CO₂ fixation efficiency (9 %) were induced through CO₂ aeration at a rate of 74 g-C day⁻¹. Photosynthetic CO₂ fixation rate during outdoor cultivation of this alga was maximal under solar radiation of 10~15 MJ m⁻² day⁻¹. Based on these results, the annual CO₂ fixation rate of this alga in the Shikoku district was estimated to be 2 kg-C m⁻².

近年、大気中の二酸化炭素濃度は増加の一途をたどり、これが地球温暖化の主たる要因といわれている。火力発電所から排出される二酸化炭素量は、1基当たり年間約200万トン-C (100万kW級石炭火力)といわれ¹⁾、多くの研究者により、火力発電所等から排出される二酸化炭素を固定・回収し、有効利用するための研究が進められてきている^{1,2)}。特に光合成を利用した二酸化炭素固定は、地球に優しい技術として注目されている。高濃度の二酸化炭素を培養液に供給し、各種の微細藻類を使用した二酸化炭素固定研究が実施されているが、人工光を利用した室内実験例が多く、太陽光を利用した屋外実験例は少ない³⁻⁵⁾。著者らは二酸化炭素固定後の生物体の収穫や有効利用のしやすさなどの面から、大型緑藻であるスジアオノリを使用した屋外での二酸化炭素固定実験を行った。

材料および方法

1. 室内実験 高知県の四万十川河口付近で採取したスジアオノリ, *Enteromorpha prolifera* (MÜLLER) J. AGARDH を PES 培地⁶⁾中で培養温度8℃、培養照度3,000 lux (1日10時間照明, 白色蛍光灯使用: 以下同様)で保存培養した藻体を実験材料として用いた。屋外実験に先立ち、スジアオノリの生長に及ぼす培養液のpH、塩分、培養温度、培養照度などの影響を検討するため、培養庫内での室内実験を行った。培養液にはASP₁₂培地⁶⁾を使用した。

培養液のpHと生長量の関係 高濃度の二酸化炭素を供給しながらスジアオノリを培養する際には、培養液のpH低下が生長に与える影響が懸念される。pHを塩酸および水酸化ナトリウムで2.0~10.6に調製

受領日: 1994(H6)年9月30日

索引語: スジアオノリ/二酸化炭素固定/屋外培養

連絡先: 〒761-01 香川県高松市屋島西町2109 (株)四国総合研究所 小松精二

Address: S. KOMATSU, Shikoku Research Inst. Inc., 2109 Yashima-Nishi, Takamatsu, Kagawa 761-01, Japan

した培養液を満した200 ml容フラスコにスジアオノリ約50 mgを入れ、13℃、3,000 lux（1日10時間照明）の培養条件で静置培養を行い、培養開始時に対する21日後の湿重量比を求めた。

培養液の塩分と生長量の関係 屋外での実験に際しては降雨による培養液の塩分低下が生長に与える影響が懸念される。塩化ナトリウムを添加して塩分を4～30の範囲に調製した培養液を満した200 ml容フラスコにスジアオノリ約50 mgを入れ、13℃、3,000 lux（1日10時間照明）の培養条件で通気培養を行い、培養開始時に対する7日後の湿重量比を求めた。

二酸化炭素供給時の光合成特性 屋外での実験に際しては日射による培養液の温度変化および日射量の変化が生長に与える影響が懸念される。5 mM 重碳酸カリウムを培養液に添加した後、水温および照度を調整してスジアオノリの光合成量を測定した。測定にはプロダクトメーター⁷⁾を用い、側室付き25 ml容フラスコに培養液10 mlとスジアオノリ0.1 mgを入れ、定法により実施した⁷⁾。

2. 屋外実験 愛知県渥美町の屋外実験場に500 l容FRP水槽を5基設置し、培養面積1 m²でスジアオノリの培養実験を平成5年8～11月に実施した。培養装置の概要をFig. 1に示す。スジアオノリを着生させた種糸を塩ビ枠に固定し、FRP水槽の底に水平に設置した。種糸の調製には、保存培養していたスジアオノリを、PES培地中で23℃、4,500 lux（1日10時間照明）の条件下で7日間培養後、遊走子を直径2 mmのクレモナ糸に着生させ、これを同培地中、18℃、3,000 lux（1日10時間照明）で16日間培養し、顕微鏡観察により発芽を確認後、種糸として使用した。培養には海岸から約20 m離れた井戸より昼夜連続して汲み上げた海水を用いた。純度99.9%の二酸化炭素ガスを圧力0.2 kgf cm⁻²、流量1 l min⁻¹（37 g-C h⁻¹）で溶解させた海水を流量24 l min⁻¹でスジアオノリ種糸に雨天時を除き毎日供給した。スジアオノリ種糸を通過する際の供試海水の流速は、ホンダワラ⁸⁾やサビノリ⁹⁾の実験例を参考に、1.2 cm sec⁻¹（水深約4 cm）とした。1日当りの二酸化炭素供給量がスジアオノリの生長に及ぼす影響を検討するため、二酸化炭素供給時間を1日当たり1、2、4、8時間に設定し、培養実験を行った。この際の二酸化炭素供給量は、それぞれ37、74、148、296 g-C h⁻¹に相当した。供給開始時刻を1 h day⁻¹および2 h day⁻¹の場合、正午、4 h day⁻¹の場合、午前11時、8 h day⁻¹の場合、午前9時とした。実験時の溶存二酸化炭素濃度はTOCメー

ター（島津製 TOC-5000）で測定した。スジアオノリの種糸付着部から藻長5 cmまでの部位を種糸に残すように藻体の生長部分を回収し、湿重量を測定した。回収は5～10日毎に実施した。

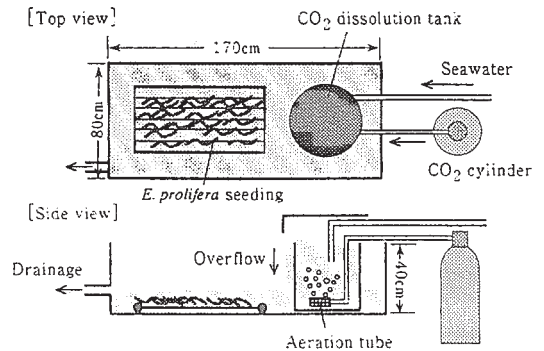


Fig. 1. Schematic diagram of the cultivation equipment for *E. prolifera*.

二酸化炭素固定量、光合成効率、二酸化炭素固定効率の算出 スジアオノリの光合成による培養液からの二酸化炭素の固定量をスジアオノリの生長量から算出した。二酸化炭素固定量は、単位面積あたり1日に固定される二酸化炭素量として定義し、炭素量換算で表した。スジアオノリ中の炭素含量は、湿重量の5.6%として算出した。これは、80℃で2時間の乾燥処理で得られる乾燥物の重量が湿重量の平均15%で、かつ元素分析計（Perkin Elmer 製 2400 CHN）を用いて測定した乾燥物中の炭素含量が平均37%であることに基づいた。光合成効率は、全年平均日射量のうちスジアオノリの光合成に使用されたエネルギーの割合と定義し(1)式に基づいて算出した。全年平均日射量は、屋外培養槽の脇に設置した日射量計で毎日測定した。1 gの炭素を海藻の有機物として固定する際に必要なエネルギー量を0.0451 MJ¹⁰⁾とした。

$$\text{光合成効率 (\%)} = \frac{A \times 0.0451 \text{ (MJ g-C}^{-1}\text{)}}{B} \times 100 \quad (1)$$

A: 二酸化炭素固定量 (g-C m⁻² day⁻¹)

B: 全年平均日射量 (MJ m⁻² day⁻¹)

二酸化炭素固定効率は、供給した二酸化炭素量に対するスジアオノリに固定された炭素量の比と定義し、(2)式により算出した。

$$\text{二酸化炭素固定効率 (\%)} = \frac{C-D}{E} \times 100 \quad (2)$$

C: 二酸化炭素供給下での固定量 (g-C m⁻²)

D: 二酸化炭素非供給下での固定量 (g-C m^{-2})

E: 培養期間中に供給した二酸化炭素量
(g-C m^{-2})

年間固定量の試算 屋外における二酸化炭素供給下でのスジアオノリ周年培養により1年間に固定される炭素量を推定するために本実験で得られたスジアオノリの二酸化炭素固定量と全天平均日射量の関係をもとに、スジアオノリの特産地である四国を例に年間炭素固定量を試算した。平成4年度に松山地方気象台で観測された全天平均日射量¹¹⁾から月別の炭素固定量を求め、これを合計して年間炭素固定量を算出した。

実験結果および考察

1. 室内実験

培養液のpHと生長量の関係 実験結果をFig. 2に示す。pH 4.0以下では、培養を開始して2日後には藻体が白化し、枯死した。pH 5.0以上では良好な生長を示し、pH 8.5で最大生長速度を示し、pH 9.0以上では生長が抑制された。

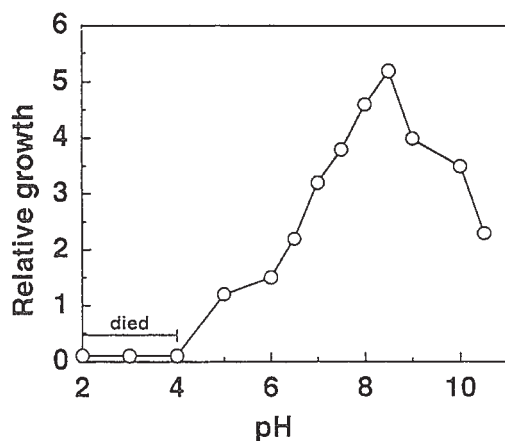


Fig. 2. Relation between pH and the growth of *E. prolifera*. Growth shown as relative growth (ratio of final wet weight after 21-day culture to initial wet weight).

培養液の塩分と生長量の関係 結果をTable 1に示す。湿重量比はいずれの塩分に於いても1.6~2.0で、塩分の生長に及ぼす影響は少ないと判断された。

二酸化炭素供給時の光合成特性 結果をFig. 3およびFig. 4に示す。培養照度を一定とした場合(15,000 lux), 培養温度の上昇と共に光合成速度は増加し、約30℃で最大値を示し、さらに温度が上昇すると急激に減少した。培養温度を一定とした場合(18

Table 1. Relation between salinity and the growth of *E. prolifera*

Salinity	Relative growth ^{*)}
4	2.0
10	1.6
23	1.6
30	2.0

*) Ratio of final wet weight after 7-day culture to initial wet weight.

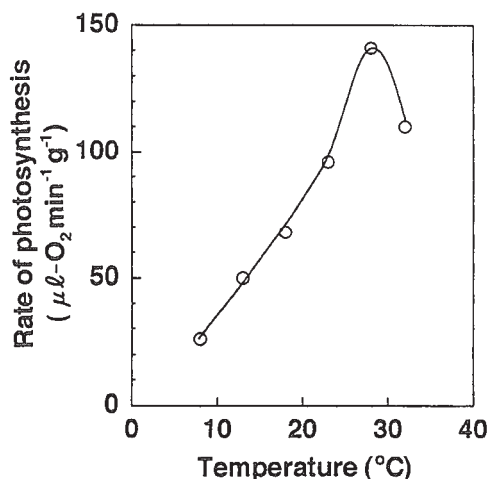


Fig. 3. Relation between cultivation temperature and the rate of photosynthesis of *E. prolifera* under a light intensity of 15,000 lux.

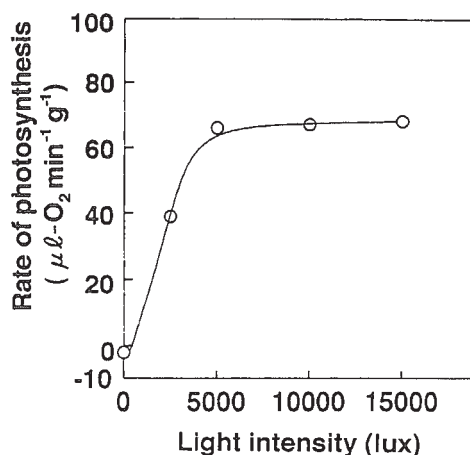


Fig. 4. Relation between light intensity and the rate of photosynthesis of *E. prolifera* at 18 °C.

℃), 培養照度が上昇すると共に増加し、5,000 lux以上ではほぼ一定となった。

2. 屋外実験 Table 2 に示すように実験期間中の全天平均日射量は $2.7 \sim 22.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 供試海水の水温は, $16.5 \sim 20.2^\circ\text{C}$ であった。湿重量約 300 g のスジアオノリを材料として培養実験を行った際の供試海水の pH および溶存二酸化炭素濃度の変化を Fig. 5 に示す。二酸化炭素供給前の供試海水の pH が 7.4 , 溶存二酸化炭素濃度が 27.0 mg-C l^{-1} であったときに二酸化炭素を供給した場合, 溶解槽内で pH は 6.4 に低下した。この値は, 室内実験結果からスジアオノリの生長には顕著な影響が認められない範囲にあった。スジアオノリ種糸通過後は光合成に伴って pH は約 0.3 上昇し, 二酸化炭素を供給しない場合に比べて変化が大きかった。二酸化炭素を供給した場合の溶存二酸化炭素濃度は, 溶解槽内で供試海水より約 6 mg-C l^{-1} (供試海水濃度の 23% 増) 高くなり, その後一部大気に放出され減少した後, 光合成によって 0.8

Table 2. Culture conditions

Period	Aug. 2~Nov. 30, 1993
Solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	$2.7 \sim 22.8$ (mean 10.7)
Temp. of sea water ($^\circ\text{C}$)	$16.5 \sim 20.2$ (mean 18.8)
Mean Salinity	29
Mean conc. of Nutrient (mg l^{-1})	$\text{NH}_4\text{-N}$ 0.03 $\text{NO}_2\text{-N}$ 0.01 $\text{NO}_3\text{-N}$ 0.35 $\text{PO}_4\text{-P}$ 0.05

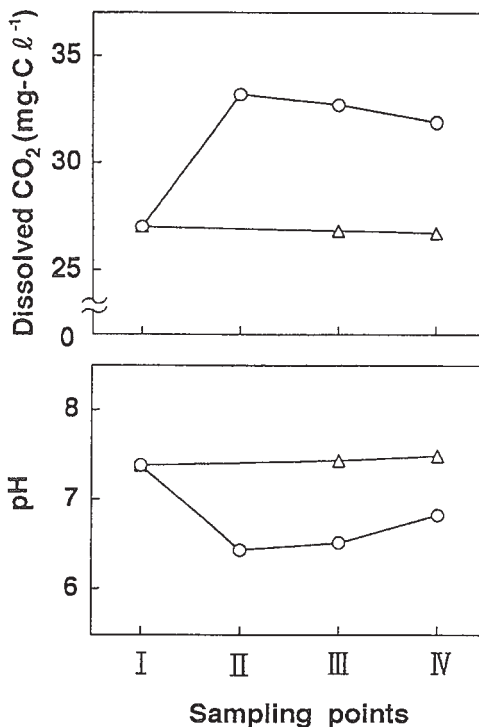


Fig. 5. Distribution of pH and dissolved CO_2 concentration in the cultivation tank of *E. proliferans*: (○) with CO_2 aeration at the rate of 37 g-C h^{-1} ; (△) without CO_2 aeration. Sampling points: (I) Initial seawater; (II) CO_2 dissolution tank; (III) before seeding of *E. proliferans*; (IV) after seeding of *E. proliferans*.

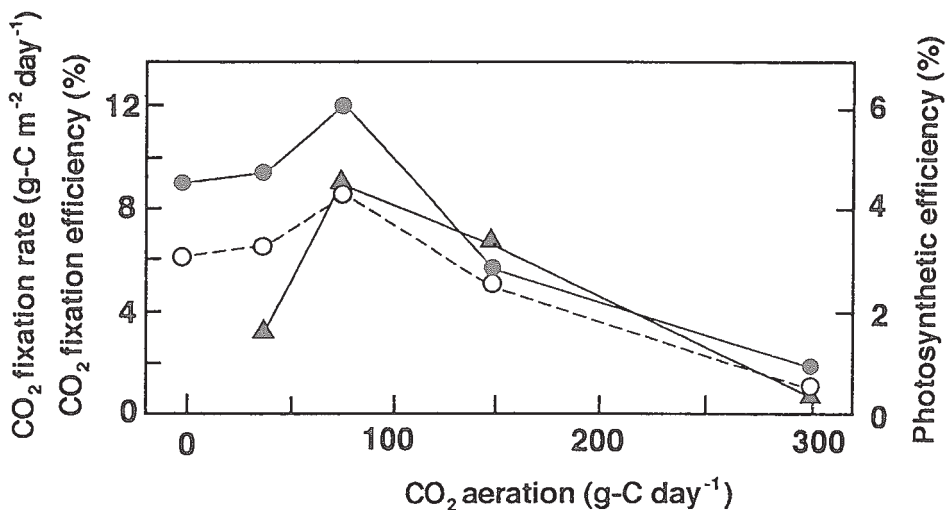


Fig. 6. Effects of CO_2 aeration on (●) CO_2 fixation rate, (○) Photosynthetic efficiency and (▲) CO_2 fixation efficiency of *E. proliferans* under solar radiation of $12 \sim 14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

mg-C l⁻¹消費された。これに対して二酸化炭素無供給の場合の二酸化炭素消費量は、0.1 mg-C l⁻¹であった。これらの値は、スジアオノリに供給された総二酸化炭素量のそれぞれ2.4% (供給量の13%) および0.4%に相当し、二酸化炭素の供給により二酸化炭素固定量が増加したことが予想された。Fig. 6に全年平均日射量が12~14 MJ m⁻² day⁻¹であった実験期間に得られたスジアオノリの最大二酸化炭素固定量、最大光合成効率、最大二酸化炭素固定効率と二酸化炭素供給量の関係を示す。二酸化炭素固定量、光合成効率、二酸化炭素固定効率は二酸化炭素を74 g-C day⁻¹供給した場合に最も高く、その値は二酸化炭素固定量12 g-C m⁻² day⁻¹、光合成効率4%、二酸化炭素固定効率9%であった。148 g-C day⁻¹以上供給した場合においても藻体の変色や枯死等の外観上の顕著な変化は認められなかった。296 g-C day⁻¹供給時における二酸化炭素固定量、光合成効率、二酸化炭素固定効率の低下については、日射が弱まり呼吸量が光合成量を上回る時間帯にまで二酸化炭素が供給されたためと考えられた。スジアオノリの二酸化炭素固定量と全年平均日射量との関係をFig. 7に示す。二酸化炭素供給の有無に依らず全年平均日射量が10~15 MJ m⁻² day⁻¹において二酸化炭素固定量が最大となる傾向が推測された。この傾向は、ハワイで実施されたアオノリ、*Enteromorpha flexuosa*を用いた培養結果¹⁰⁾と同様であった。同一日射量で二酸化炭素供給効果を二酸化炭素固定量と比較すると、供給により1.5~1.7倍固定量が増加することがわかった。

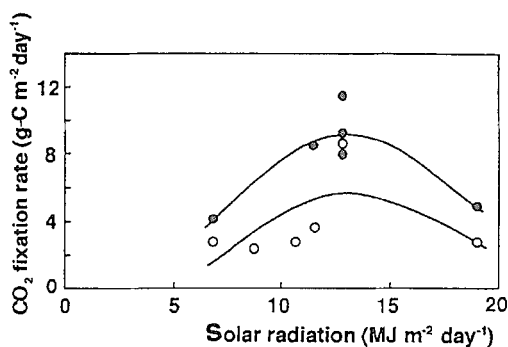


Fig. 7. Relation between solar radiation and CO₂ fixation rate of *E. prolifera*: (●) with CO₂ aeration at the rate of 74 g-C day⁻¹; (○) without CO₂ aeration.

年間固定量の試算結果をTable 3に示す。スジアオノリの生長に適した全年平均日射量である10~15

MJ m⁻² day⁻¹が得られる2~3月および8~10月には185~236 g-C m⁻² month⁻¹と固定量が多く、日射量が多くなる4~7月および少なくなる11月~1月には、105~161 g-C m⁻² month⁻¹に減少すると推定された。年間固定量は約2 kg-C m⁻² year⁻¹と見積られた。この推定値は、微細藻類の*Chlorella*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis*, *Spirulina*などの推定年間炭素固定量1~2 kg-C m⁻² year⁻¹^{12,13)}とほぼ同等で、熱帯多雨林、温帯常緑・落葉樹林、亜寒帯林の推定年間炭素固定量0.4~1.0 kg-C m⁻² year⁻¹¹⁴⁾を上回った。

本研究は、四国電力株式会社の委託を受けて実施したものである。

Table 3. Estimation of annual CO₂ fixation amount of *E. prolifera* cultivated in the Shikoku district

Month	Solar radiation (MJ m ⁻² day ⁻¹)*	Rate of CO ₂ fixation (g-C m ⁻² day ⁻¹)	(g-C m ⁻² month ⁻¹)
Jan.	7.5	4.5	140
Feb.	11.3	6.6	185
Mar.	10.3	6.2	192
Apr.	17.9	5.2	156
May	18.8	4.0	124
Jun.	17.8	5.2	161
Jul.	18.7	4.0	124
Aug.	15.3	7.2	223
Sep.	15.2	7.2	216
Oct.	13.3	7.6	236
Nov.	9.0	4.7	141
Dec.	7.1	3.4	105
Annual CO ₂ fixation amount		2.0 kg-C m ⁻² year ⁻¹	

*1) Observed at Matsuyama, 1992.

要約

地球温暖化の一要因とされている大気中の二酸化炭素を生物学的に固定するため、スジアオノリを用いた培養面積1 m²の屋外実験を行った。海水に二酸化炭素を供給することで供試海水のpHは6.4まで低下したが、スジアオノリの生長に顕著な影響は認められなかった。二酸化炭素を供給した場合のスジアオノリの二酸化炭素固定量は、無供給例と比較して約1.5~1.7倍多くなった。二酸化炭素を74 g-C day⁻¹供給した場合に最大二酸化炭素固定量(12 g-C m⁻² day⁻¹)、最大光合成効率(4%)、最大二酸化炭素固定効率(9%)が得られた。二酸化炭素固定量は、全年平均日射量10~15 MJ m⁻² day⁻¹で最大値を示した。スジアオノリの特産地である四国地方でスジアオノリを屋外培養した場合の年間炭素固定量は、2 kg-C m⁻²と

推定された。

文 献

- 1) 福澤 久 (1991) : 二酸化炭素資源化利用技術の調査, 電力中央研究所報告, W90029, 33pp.
- 2) 財新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1990) : 炭酸ガス固定化・利用技術に関する調査, NEDO P-8919, 170pp.
- 3) 渡部良朋, 大村直也, 齋木 博 (1992) : 微生物による CO₂ 固定. 2. 高濃度 CO₂ 条件下で機能する *Chlorella* 属微細藻類の検索とその培養, 電力中央研究所報告, U92014, 21pp.
- 4) 渡部良朋, 嶋 盛吾, 齋木 博 (1993) : 微生物による CO₂ 固定. 3. クロレラと水素細菌の高密度培養条件の検討ならびに微生物体の栄養価評価, 電力中央研究所報告, U92058, 39pp.
- 5) Nishikawa, N., K. Nonami, A. Hirano, Y. Ikuta, Y. Hukuda, M. Negoro, M. Kaneko, and M. Hade, (1992) : Reduction of carbon dioxide emission from fuel gas with microalgae cultivation, *Energy Convers. Mgmt.* 33, 553-560.
- 6) 原 慶明, 千原光雄, 市村輝宜, 有賀祐勝 (1979) : 藻類の分離と培養法, 藻類研究法 (西澤一俊, 千原光雄編), 共立出版 pp.15-316.
- 7) 横浜康継 (1986) : 改良型プロダクトメーター (差動式検容計) とその海藻の光合成測定への応用. 藻類, 34, 37-42.
- 8) 高 坤山 (1991) : 海水の流速が褐藻ホンダワラの光合成による酸素発生に及ぼす影響, 藻類, 39, 291-293.
- 9) 高 坤山 (1992) : 流水条件下における紅藻スピノリの CO₂ 固定の促進効果, 藻類, 40, 397-400.
- 10) Electric Power Research Institute (1990) : Mass culture of algae using carbon dioxide from stack gases, EPRI Report GS-7029, 87pp.
- 11) 日本気象協会松山支部 (1992) : 愛媛県気象月報
- 12) Benemann, J. R. (1984) : Fuels from microalgae: Cost estimates and research up date, Symp. Pap. *Energy Biomass Wastes*, 8th, 133-162.
- 13) Vonshak, A. (1990) : Recent advances in microalgae biotechnology, *Biotech. Adv.*, 8, 709-727.
- 14) 新田義孝 (1990) : 陸上植物利用 CO₂ 固定化技術, 砂漠の緑化, 地球温暖化問題ハンドブック (小宮山宏監修) アイビーシー, pp.491-496.