

地球生物圏における二酸化炭素固定量に関する研究

Study on CO₂ Fixation of Global Bio-sphere

村 井 俊 治*・後 藤 真 太 郎**・本 多 嘉 明*

Shunji MURAI, Shintaro GOTO and Yoshiaki HONDA

温室効果ガス、二酸化炭素の大気中濃度上昇による地球温暖化はもっとも注目されている地球環境問題である。本研究では陸上植物、植物プランクトンによる二酸化炭素の固定量を人工衛星 NOAA および NIMBUS 7 のデータから推定した。推定の結果、陸上植物による二酸化炭素固定量が約48億 t、植物プランクトンによる二酸化炭素固定量が約31億 t という結果が得られた。このほかに海洋の化学的二酸化炭素累積固定量約119億 t がある。

1. はじめに

人間活動の拡大が地球環境に多大な影響を与えている。特に化石燃料の使用による大気組成に与える影響は地球温暖化と深い関わりがあり重大な問題である。化石燃料の使用により年間約50億 t の炭素が大気中に放出されている。大気中の CO₂ 濃度増加分は、約27億 t であり、残りの炭素がどこに蓄積されているのか明確にされていない。これは、「ミッシングシンク」として問題になっている。

地球規模で CO₂ のマスバランスを考える場合、大気、陸域、海域における各種のデータが必要となる。大気中の CO₂ 濃度については、世界各地で観測されている。また、陸上においては、CO₂ の固定場所として最も可能性が高い森林の面積は FAO による各国の統計データの集計等により、定期的に調査が行われている。一方で海域においては、植物性プランクトンの光合成機構について、詳細な研究成果が蓄積されているにもかかわらず、CO₂ の固定場所としての可能性が高い植物性プランクトンの分布に関する地球規模のデータは入手しにくいのが現状である。今後は、これら個々の研究成果を基に海洋全体の季節変動を含めた動的な変化を把握する必要があるものと思われる。

本研究では、これらの現状を踏まえて、人工衛星 NOAA の AVHRR および人工衛星 NIMBUS7 の CZCS のデータより、グローバルな陸域の植生分布および植物性プランクトン分布を把握する。さらに、これを用い陸

域、海域における CO₂ の固定場所を抽出し、人間活動に伴う開発行為等による CO₂ 放出と地球環境への影響を評価するためのモデルを作成し、今後、改良を加えるための第一次のモデルとするものである。

2. CO₂ の固定量の算出方法

図1のフローに従い、陸域および海域における CO₂ の固定量を算出した。詳細は以下の通りである。

(1) 陸域における CO₂ の固定量の算出

以下の前提条件に基づき、陸域における CO₂ 固定量を算出した。

- ① 陸域における CO₂ 固定量は陸上植物の純一次生産量で評価する。
- ② 陸域における CO₂ は、植物以外に地表面および土壌中の腐植物により固定されるが、前者は総量が少なく、後者は量的な推定が困難である¹⁾ ことから、植物以外の CO₂ 固定量は考慮しない。
- ③ CO₂ 固定量は現状の植生において評価し、森林伐採等による CO₂ の放出は考慮しない。
- ④ CO₂ の固定は本来長期的なものであり、時間的な積分値で議論する必要がある。ここでは、年間を通じ CO₂ のマスバランスが一定であることを前提とし議論をするのが目的であるため、時間積分を行わず1年単位の固定量で評価する。

植生と一次生産力を結び付けるパラメータとして Whittaker¹⁾ のものを使用し、Honda and Murai²⁾ の植生分布図から大陸別陸域における一次生産量を算出した。また、植生分布図の分類にない項目に関しては、類似の分類の一次生産の速度を使用した。表1に本研究で使用

*東京大学生産技術研究所 第5部

**金沢工業大学

表 1 植生別一次生産速度

植 生	純次生産速度 g/m ² /年
熱帯林	2200
常緑樹林	1300
落葉樹林	1200
ツンドラ	140
草 原	900
半砂漠	90
砂 漠	90

した植生別一次生産速度を示す。

(2) 海域における CO₂固定量の算出

以下の前提条件に基づき、海洋における植物性プランクトンおよび pCO₂分圧差による CO₂固定量を算出した。

① 海域における CO₂の固定量は、固定に要する時間を数10年~100年のオーダーとすると、植物性プランクトンによる一次生産力による生物的固定と pCO₂による化学的固定とを考慮すれば十分である。海藻や草類による一次生産量による固定や、CaCO₃による長期的な固定は対象外とする。

② 一次生産力は、植物性プランクトンに含まれるクロロフィル濃度との相関が高く、CZCS によるクロロフィル濃度と一次生産力との相関式より算出する。しかしながら、クロロフィル濃度と一次生産力との相関式は Epply ら³⁾の南北アメリカ大陸周辺を対象に作成したものしか存在しない。このため、Epply らの相関式の傾向がどの海域にも適用可能とし、別の海域の相関式は、Ryther⁴⁾により作成された海域別一次生産量で補正したものを使用する。

③ CO₂の固定は本来長期的なものであり、時間的な積分値で議論する必要がある。ここでは、年間を通じ CO₂のマスバランスが一定であることを前提とし議論するのが目的であるため、時間積分を行わず1年単位の固定量で評価する。

④ 大気中の CO₂濃度は350 ppm (1991年値) であるとする。図 1 (b)における潜在植物性プランクトンマップは、Nimbus-7に搭載された CZCS の Lebel⁵⁾のデータの内、クロロフィル濃度分布 (Gordon ら⁶⁾のアルゴリズムによる) のデータを使用し、図 2 にフローに従って作成する。

図 3 に本手法による潜在植物性プランクトンマップを示す。

海洋性植物性プランクトンの時空間的変動は物理過程に起因するものが多く⁷⁾、各点のクロロフィル濃度の日変動は月別に平均化されることで除去できるものの、植物性プランクトンの分布を求めるには以下のような問題がある。

① CZCS のデータが必ずしも同一領域をカバーしているわけではない。

② CZCS により計測されるデータより得られたプランクトン濃度の値が濃度の季節変動のどこに位置するかわからない。

この問題点に対しては、月平均のクロロフィル濃度のピーク値を取ることで潜在的に生じ得る月平均のプランクトン濃度の最大値を採用し、潜在プランクトンマップとした。

CZCS-lebel 3 のデータにおいては、プランクトン濃度の算出の際に、Gordon ら¹⁰⁾のアルゴリズムを適用しているが、日本周辺のようにエアロゾルの多い地域では大気補正の手法がまだ確立されておらず、クロロフィル濃度にバイアスがかかっている可能性がある。しかしな

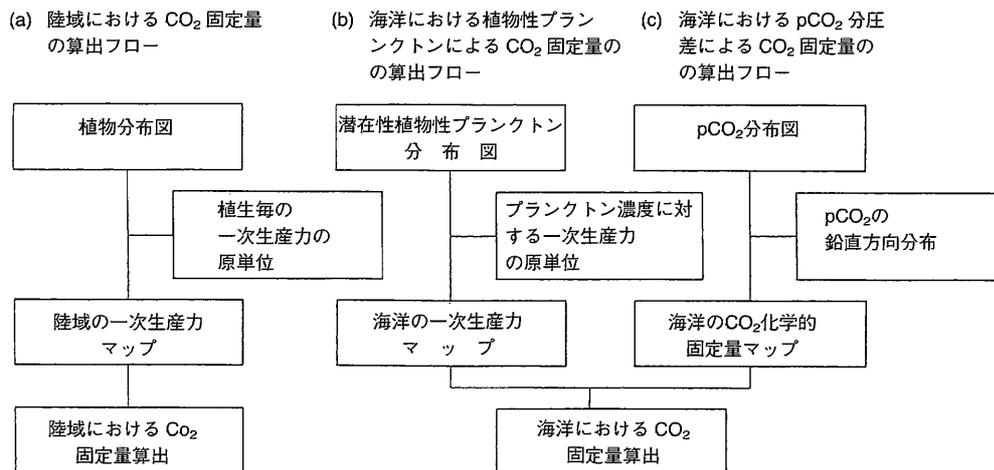


図 1 CO₂の固定量算出フロー

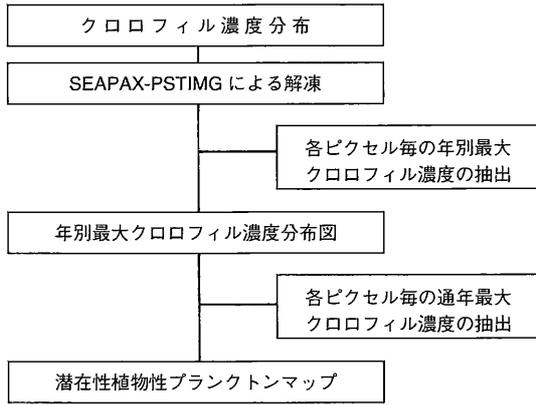


図2 潜在植物性プランクトンマップの作成フロー

がら、海域別のようなあるブロックにおける相対値は有効であると判断される。したがって、本研究では、プランクトン濃度の絶対値を直接用いるのではなく、海域別に、クロロフィル濃度と純一次生産力との関係を以下のように求め、海洋における生物的固定量を算出した。

クロロフィル濃度と純一次生産力とを関係づける方法として、Epplyらの相関式

$$\log(\pi) = 3 + 0.51 \log(C_k) \quad (1)$$

(ここに、 π : 一次生産力 ($\text{mgCm}^{-2}\text{d}^{-1}$) および C_k : クロロフィル濃度 C_k (mgm^{-3}) である.)

があるか、式1)は南北アメリカ大陸周辺で作成されたものであり、全海域に適用するには問題がある。そこで、Ryther⁴⁾の分類に従い海域別のプランクトン濃度の最大値の平均値に対応する一次生産力が、Rytherの一次生産力の最大値となるように相関式を修正した。また、Rytherの分類にない海域に関しては、Koblentz-Mishke⁸⁾の一次生産速度マップより抽出し、Rytherの値の代わりに相関式を修正する値として採用した。表2はRytherにより作成された一次生産力の速度の海域別の値と相関式との関係を示した。

また、化学的固定において CO_2 は pCO_2 の高い方から低い方に向かって移動する。この特質を金森・池上⁹⁾の方法を拡張し以下のようにモデル化する。

① pCO_2 のグローバルな平面分布としてBroecker¹⁰⁾のものを使用する。 pCO_2 の平面分布には、Keeling¹¹⁾, Tans, Fung, and Takahashi¹²⁾のものがあるが、現在も pCO_2 の計測が続けられていることから、最終的なものではないと考える。従って、データのデジタル化が容易であり、精度を保持していると考えられるBroeckerのものを使用した。このBroeckerの pCO_2 分布図はこれまでの観測値を平均化したものである。図4にこれを示す。

② 海水の pCO_2 の分布を図5のように単純化し、この横線で囲まれた面積が、大気中の pCO_2 が上昇して以

ThatMap-1

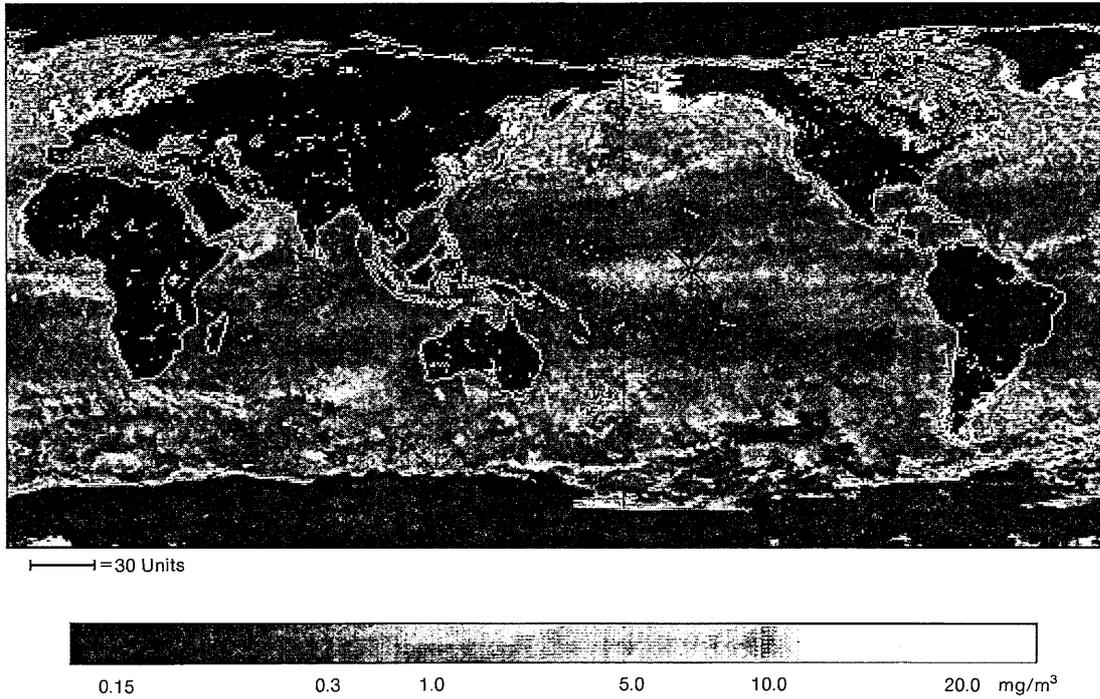


図3 潜在植物性プランクトンマップ(1978-1981年)クロロフィル濃度(単位: mg/m^3)

表 2 海域別一次生産の速度と相関式

海 域	海域の範囲	純一次生産力 注1) (gC/m ² /day)	相 関 式
熱帯水域	S20 -N30	0.05 - 0.15	$\log(\pi) = 2.287 + 0.51 \log(C_k)$
亜熱帯水域	S30 -N20	0.1 - 0.2	$\log(\pi) = 2.580 + 0.51 \log(C_k)$
	N30 -N20		$\log(\pi) = 2.343 + 0.51 \log(C_k)$
温帯水域	S50 -S30	0.33	$\log(\pi) = 2.543 + 0.51 \log(C_k)$
	N40 -N30		$\log(\pi) = 2.406 + 0.51 \log(C_k)$
亜熱帯水域	N60 -N40	0.50 注2)	$\log(\pi) = 1.685 + 0.51 \log(C_k)$
北 海	—	0.1 - 1.0	$\log(\pi) = 2.516 + 0.51 \log(C_k)$
北大西洋北部	—	0.1 - 2.4	$\log(\pi) = 3.142 + 0.51 \log(C_k)$
北 極 海	N60	0.01	$\log(\pi) = 0.625 + 0.51 \log(C_k)$
南 極 海	- S50	0.01 - 0.15	$\log(\pi) = 2.171 + 0.51 \log(C_k)$

注1) Ryther による海域別純一次生産力速度の一般的なレベル値。

注2) Ryther による海域分類にない領域であり、Koblentz-Mishke の純一次生産速度マップより抽出した。

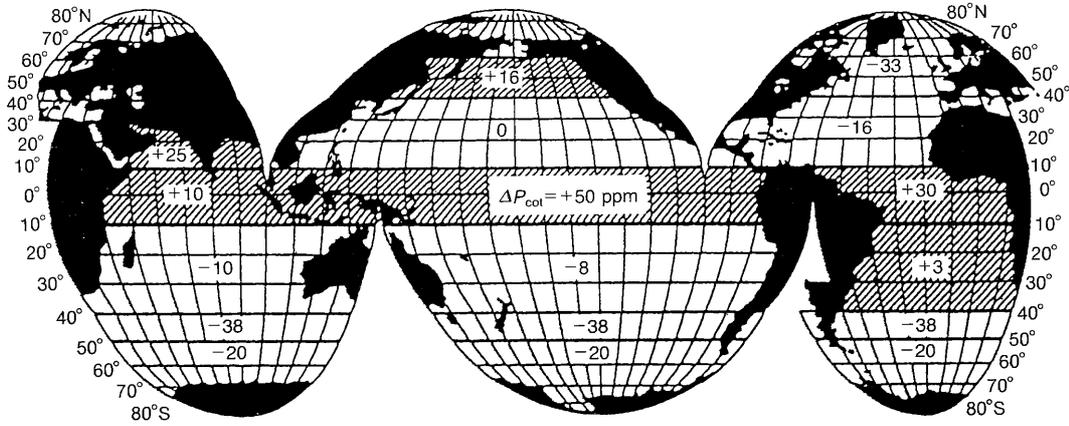


図 4 大気—海洋間の CO₂分圧差の平均値の分布¹⁰⁾
(+は海洋から大気へ、-は大気から海洋への CO₂の移動を示す。)

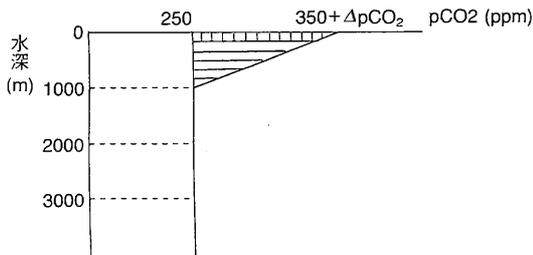


図 5 pCO₂に基づく単位面積当たりの CO₂固定量推定モデル

来、海洋が固定した CO₂の量 (単位面積当たり) であるとした。実際の海水中の pCO₂の鉛直分布は図 6 に示したようなプロファイルを示している。これは、大気の水表面の pCO₂の値は現在の大気 pCO₂の値 (350 ppm)

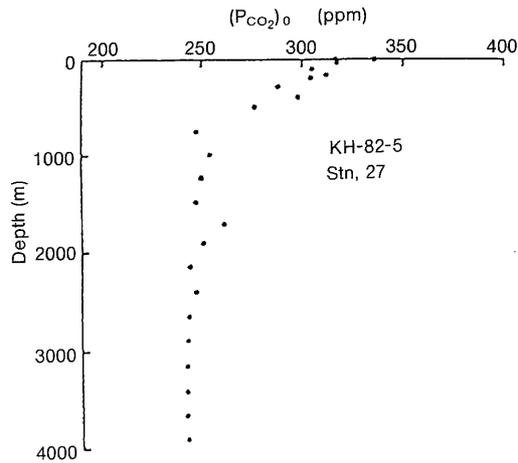


図 6 北太平洋における pCO₂の鉛直分布

に近い値を示すが、深さと共に低下し約1000mでは250 ppmに達し、それ以深ではほぼ一定値を示す。

③ pCO₂によるCO₂の化学的固定の速度は、一様に300年で1000mの水深に達するとする。これは、水深1000mの海水の年齢は約100年~500年であり¹³⁾、以前海表面にあったものが沈降したものであり、水深1000mでのpCO₂の値はpCO₂が増加し始める前(産業革命以前)の約250 ppmに相当するという観測結果に基づいて設定した。

以上に基づき、pCO₂の上昇が直線的であり、これまでの一番上昇の高い割合で今後もCO₂が固定され続けるとしてモデル化した。年間の固定量は図5の縦線部分に相当する。

3. 陸域におけるCO₂の固定量

表3に本手法で算出した陸域における大陸別の一次生産量(年当たり)を示す。

陸域のCO₂の固定量に関し、既往の研究との比較結果を表4に示した。本研究の算出結果は、既往の結果とほぼ同様の結果を示しているが、少なめであるのは、リモートセンシングより得られるのが植生の表面積であるのに対し、一次生産に関するパラメータは葉面積であり、この面積は植生の生体量に深く関係しているためである。

表3 陸域における大陸別一次生産量
(単位:上段:10⁹tDW/年,下段:10⁹tC/年)

	アジア・ヨーロッパ	オセアニア	北米	南米	アフリカ	合計
純一次生産量	39.7 (18.0)	4.6 (2.1)	19.7 (9.0)	23.5 (10.7)	1807 (8.5)	106.2 (48.27)

表4 陸域のCO₂固定量に関する既往の研究結果との比較(単位:10⁹tC/年)

	Whittaker & Linker ¹⁶⁾	Box ¹⁶⁾	Lieth ¹⁶⁾	Whittaker ¹⁾	本研究
純一次生産量	109.0 (49.5)	104.9~124.5 (47.7~56.6)	121.7 (55.3)	115 (52)	106.2 (48.27)

注:単位は乾重量であり、10⁹t/年である。下段の数字はWhittaker¹⁾の係数(1/2.2=0.45)による炭素換算値(単位:10⁹tC/年)を示す。

表5 全海域における純一次生産量の既往研究との比較(単位:10⁹tC/年)

	Rywher ¹⁵⁾	Koblentz-Mishke ⁸⁾	Box ¹⁶⁾	Whittaker ¹⁾	半田 ¹⁴⁾	本研究
純一次生産量	20.0	23.0	43.8 注 19.9	55.0 注 25.0	32.0	31.1

注:単位は乾重量であり、10⁹t/年である。下段の数字は炭素換算値(単位:10⁹tC/年)を示す。
(Whittaker¹⁾の係数(1/2.2=0.45)による換算値)

4. 海域におけるCO₂固定量

本手法に従って算出した海域におけるCO₂の固定量は、植物性プランクトンによる生物学的なものが31.06×10⁹t/年であり、pCO₂による化学的なものが0.0942×10⁹t/年であり、合計31.15×10⁹t/年である。

植物性プランクトンによるCO₂の固定量は、半田¹⁴⁾によれば、現在、全海域における純一次生産量について、32×10⁹t/年という値が受け入れられているとしており、ここでの計算結果はこの値に極めて近い。

表5に全海域における純一次生産量と既往研究における結果との比較結果を示す。表6に大陸棚別pCO₂による固定量を示した。pCO₂による化学的固定量は、累積値としては116.533×10⁹t/年と多いが、固定の速度が小さいため年間の固定量は小さい。

表6は大陸棚別の純一次生産量CO₂の年間および累積の化学的固定量を示す。

ここで、CO₂の年間固定量が-の値を示す海域は、CO₂の分圧差の平均値(図3)が-の値を示す海域であり、海表面と海洋との間で分圧差が平衡に達するためにCO₂を放出する領域である。しかしながら、長期的には海洋のCO₂の分圧差はその時期における大気中のものと平衡状態に達するため、+の値となっている。

5. ま と め

本研究では、以下の内容を明らかにした。

- (1) 陸域においては、NOAA-AVHRRより作成された植生分布図より、陸域の純一次生産力マップを作成し、これより陸域におけるCO₂固定量は48.27 Gt/年(炭素換算)であることを明らかにした。また、既往研究との比較からも良好であると判断された。
- (2) 海域において、生物学的固定、化学的固定による

表 6 大陸棚別 CO₂ 生物的・化学的固定量 (単位: 10⁹tC/年)

海域	新相関式による 純一次生産力	Eppley の相関式 による 純一次生産力	CO ₂ 化学的固定 (年 間)	CO ₂ 化学的固定 (累 積)
アフリカ大陸棚	0.31	1.13	0.001	0.069
北アメリカ大陸棚	2.33	4.51	0.002	0.293
南アメリカ大陸棚	0.56	2.11	0.002	0.102
アジア大陸棚	0.7	3.34	0.018	0.231
ヨーロッパ大陸棚	1.09	2.15	-0.003	0.130
オセアニア大陸棚	0.39	1.5	-0.003	0.117
ソ連大陸棚	0.03	1.4	0.005	0.183
グリーンランド大陸棚	0.01	0.18	-0.001	0.028
南極大陸棚	0.02	0.12	-0.003	0.038
大陸棚以外の海域	25.62	82.24	0.078	117.634
合 計	31.06	96.68	0.0942	118.825

CO₂の固定量を算出した。詳細を以下に述べる。

i) 生物的固定量を算出するため、まず、NIMBUS7-CZCSより潜在植物性プランクトン分布図を作成した。さらに、別途求めた海域別クロロフィル濃度に対する純一次生産力の相関式から、海洋の純一次生産力マップを作成し、海洋のCO₂固定量は炭素換算で31.06 Gt/年であることを明らかにした。また、既往研究での算出結果との比較から、良好であると判断された。

ii) 化学的固定量を算出するため、まず、既往研究の結果から、pCO₂ (二酸化炭素分圧) によるCO₂固定のメカニズムをモデル化した。さらに、pCO₂分布図を前述のモデルに適用しCO₂固定量を算出した。海洋において、pCO₂により固定されるCO₂は、単年では0.1 Gt/年と少量であるが、100~500年のスケールでは118.8 Gt/年と多いことを明らかにした。また、i)と同様、既往研究との比較からも良好であると判断された。

(3) 全体を通しては、地球環境問題を構成する諸現象のどれ1つとっても検討課題が残されていることは周知の事実である。しかしながら、人間活動の地球環境に対する影響を評価するためには、これまでの要素技術を統合したツール (データベース、アプリケーションモデル) が必要である。本研究ではこの試案を提案にすぎないが、衛星データの有効性は地球環境の変化をモニタリングする上で有効であることを明らかにした。

(1992年5月25日受理)

参 考 文 献

- 1) Whittaker, H.: 生態学概説, 培風館, pp. 205, 1974.
- 2) Yoshiaki Honda and Shunji Murai: Vegetation Map-

ping Using Global Vegetation Index and Weather Data., Proc. on the 10th Asian Conference on Remote Sensing, P.A-2-4-1~P.A-2-4-6, 1989.

- 3) Epply, R. W., Stewart, E., Abbot, M. R., and Heyman, U.: Estimating ocean primary production from satellite chlorophyll. introduction to regional differences and statistics for the Southern California Bight, Journal of Plankton Research, vol. 7, no. 1, pp. 57-70, 1985.
- 4) Ryther, J. H.: The Seas. 11. (ed. Hill, M. N.), Interscience Publ., pp. 347-380, 1963. (有賀祐勝: 水界植物群落の物質生産—植物プランクトン—, 共立出版株式会社, pp. 73, 1973. に引用)
- 5) Feldman, G., N. Kuring, C. Ng, W. Esaias, C. McClain, J. Elrod, N. Maynard, D. Endres, R. Evans, J. Brown, S. Walsh, M. Carle and G. Podesta: Ocean color: Availability of the global data set. EOS, 70, pp. 634-641, 1989.
- 6) Gordon, H. R., and A. Y. Morel: Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery, Springer-Verlag, New York, 1983.
- 7) 高橋正征: グローバルに見た基礎生産量の時間的変動, 1991年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, pp. 385, 1991.
- 8) Koblenz-Minske, O. J., V. V. Volkovskiy, and J. C. Kabanova: Plankton primary production of the world ocean, in Scientific Exploration of the Southern Pacific, edited by W. S. Wooster, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 183-193, 1970.
- 9) 金森 悟, 池上 尚: 海洋による大気中の二酸化炭素の吸収, 気象研究ノート, 第160号, pp. 147-160, 1987.
- 10) Broecker, W. S. et. al.: J. geophys. Res., vol. 91. pp. 10517, 1986. (角皆静男: 炭素などの物質循環と大気環境, 科学, vol. 59, no. 9, pp. 593-601 に引用)
- 11) Keeling, C. D.: Geophysical Res., vol. 73, pp. 4543-4553, 1968.

- 12) Tans, P. P, Fung, I. Y., and Takahashi, T: Observational Concentrations on the Global Atmospheric CO₂ Budget, *Science*, vol. 247, pp. 1431-1438, 1990.
- 13) 角皆静男・乗木一郎：海洋化学, 産業図書, pp. 26, 1983.
- 14) 半田暢彦：海洋生物の活動と二酸化炭素収支, 現代化学, vol. 11. no. 224, pp. 35-40, 1989.
- 15) Ryther, J. C: Photosynthesis and Production in the sea, *Science*, 166, pp. 72-76, 1969.
- 16) Box, E.: Quantative Evaluation of Global Primary Productivity Models Generated by Computers, *Primary Productivity of the Biosphere* (ed. Lieth, H and Whittaker, H.), Springer-Verlag New York Inc., pp. 265-283, 1975.