

閉鎖性海域におけるクロロフィルaの中期変動

MEDIUM-TERM VARIATION OF CHLOROPHYLL-A IN A SEMI-ENCLOSED SEA

長尾正之¹・橋本英資¹・吉田みゆき²・神徳優子²・高杉由夫³
Masayuki NAGAO, Eisuke HASHIMOTO, Miyuki YOSHIDA,
Yuko JINTOKU and Yoshio TAKASUGI

¹正会員 産業技術総合研究所 海洋資源環境研究部門 (〒737-0197 呉市広末広2-2-2)

²広島大学大学院 生物圏科学研究科 (〒739-8528 東広島市鏡山1-4-4)

³産業技術総合研究所 海洋資源環境研究部門 (〒737-0197 呉市広末広2-2-2)

In order to control water quality in a polluted semi-enclosed sea, it is important to monitor the amount of biomass especially based on phytoplankton. To investigate fluctuation of this biomass, we have carried out a long-term field measurement of chlorophyll-a in the Kaita Bay from 1999 to 2001, and examined data by using time-series analysis. The results indicated that the amount of chlorophyll-a from April to September fluctuate periodically in from 5days to 10days cycle, and the deviation of this fluctuation could influence the estimated biomass significantly. Also according to classification of phytoplankton in the Kaita Bay, diatoms seem to play the important role in this medium-term variation.

Key Words : Semi-enclosed sea, chlorophyll-a, diatoms, Kaita Bay, biomass, POC

1. はじめに

閉鎖性海域で大量に発生した植物プランクトンは赤潮の原因となり, 沿岸域の漁業や景観に悪影響を与えることがある. また, 大量発生したプランクトンが死滅し微生物の作用で分解される過程において海水中の溶存酸素が消費されることで, とくに海底付近は貧酸素化が進行することもある. したがって, これらの被害を予測するには, 植物プランクトンの変動特性を把握しておくことが必要である. ただし, 実海域において植物プランクトンが異常増殖し消滅にいたる過程はまだ十分に解明されているとは言えないため, 現状では植物プランクトン現存量を常時モニタリングし, 知見の蓄積を図ることが第一である.

このため, 著者らは, 1999年2月から閉鎖性の強い広島県海田湾をモデル海域とし, 同湾に設置した海上浮体実験室(マリンラボ)において, 植物プランクトン量や流動, 塩分・水温および気象変化をモニタリングしている. そして, それらの観測データから海田湾における植物プランクトン鉛直分布および塩分・水温成層が, 海陸風に伴って日変化をすることを明らかにした¹⁾. 本研究では, 1999年から2001年までのマリンラボで観測された

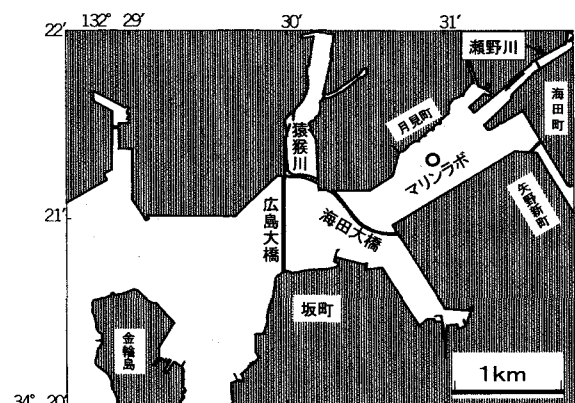


図-1 海田湾平面図とマリンラボ設置位置.

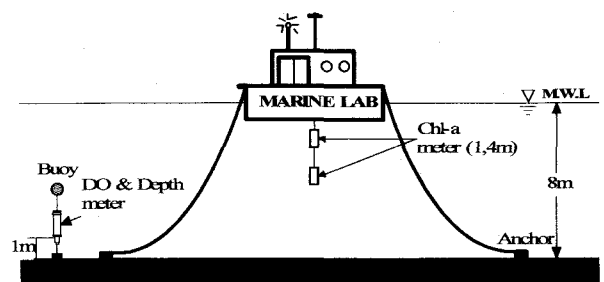


図-2 マリンラボと測定装置の設置位置.

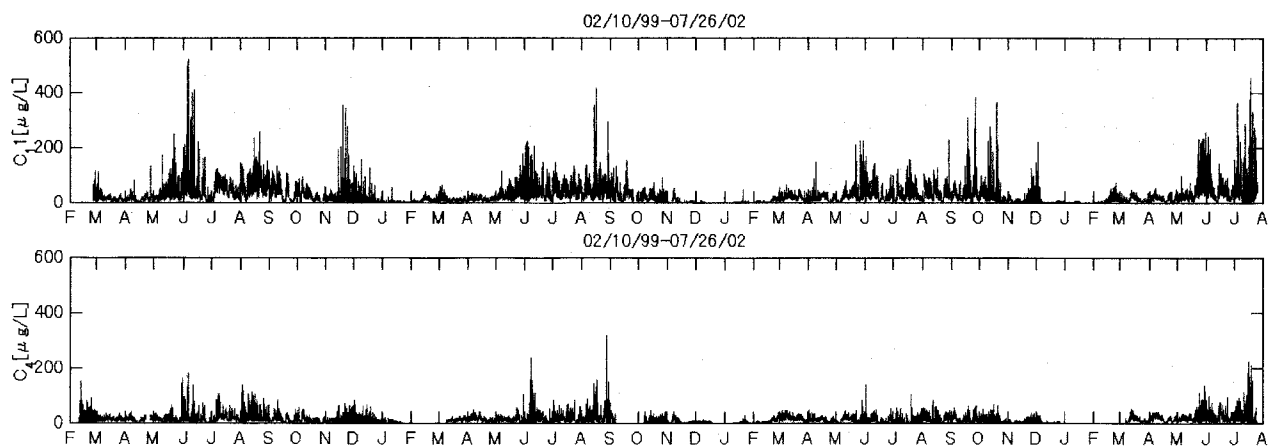


図-3 1999年2月から2002年7月までの水深1mと4mのクロロフィルa量 C_1 , C_4 .

クロロフィルa量の時系列データを解析し、クロロフィルa量の中期変動（5～10日）について調べた結果を報告する。

2. 観測方法

クロロフィルaの長期モニタリングは、広島県海田湾に設置されているマリナラボで行った。図-1に海田湾平面図とマリナラボ設置位置を示す。また、後述する測定装置の設置位置を図-2に示す。マリナラボ設置位置の平均水深は8mであり、同湾における大潮時の干満差は3mを超える。クロロフィルaの測定は、マリナラボ設置位置の水深1mと4mで行った。さらに、水深1mのデータは1999年2月25日から2002年7月25日まで、水深4mのデータは1999年2月10日から2002年7月25日までの期間に取得された。ただし、本研究では4月から9月の時期に注目しているため、2002年のデータは現時点では解析に使用していない。

観測には、蛍光を利用したワイパー付きクロロフィルa・濁度計（ACL104-8M, アレック電子製）を利用した。本装置は、水温、濁度、クロロフィルaの値を計測し、メモリパックに記録する。また、測定毎にワイパーが動作し、センサーガラス面の汚れを落とすことができる。今回の観測では、測定は毎正時10分ごととした。なお、一回の観測ごとに1秒間隔で10個のデータを取り、それらの値を平均して毎回の観測値とした。また、ほぼ2ヶ月に1回ごとにリチウム電池とメモリパックを交換した。なお、ワイパーだけではセンサーガラス面の生物付着を完全には防止できなかったため、定期的に手作業で装置全体を洗浄した。

このほか、本研究では、海田湾における以下の観測結果を用いる。すなわち、マリナラボで定期的に水質計（ACL208-DK, アレック電子製）により測定しているクロロフィルa量の鉛直分布データを用いる。このデータは、水深1mと4mのクロロフィルa量から推定した単位

断面積を持つ水柱当たりのクロロフィルa積分量との比較に利用する。次に、海底に設置された溶存酸素計（ADO-8M, アレック電子製）の深度データを用いる。この値は、クロロフィルa量の時間変動と潮汐との対応関係を調べるために利用する。また、2002年8月2日に、クロロフィルa・濁度計の設置深度（1mと4m）で採水を行い、植物プランクトンの種類と細胞数を調べた。

3. 解析方法

(1) 前処理

はじめに以下の手順でクロロフィルa量時系列の欠測処理を行う。まず、洗浄のため海中から海面上に装置を引き上げていた時間帯の値を欠測とする。また、大きな洪水が起こった日は測定装置が流出したゴミに埋もれてしまったりすることが多かった。このため、大雨の日を気象月表（広島地方気象台）より調べ出し、該当する日にクロロフィルa量とその前後の値よりも異常に高い値を取った場合は、これを欠測とする。

ところで、蛍光を利用した現場型クロロフィル計の値は標準色素（ウラニン）の濃度に換算されている。この値から海水中に含まれるクロロフィルa量を求めるには、現場海水中のクロロフィルa量を採水分析して求め、クロロフィル計の値との相関式を作っておく必要がある。ここでは、三島ほか²⁾が海田湾で求めたクロロフィル計の値（A/D変換値）とクロロフィルa量との相関式（式（1））を利用することにした。

$$C = 0.233 \cdot N - 10.67 \quad (1)$$

ここで、 C は海水中のクロロフィルa量（ $\mu\text{g/L}$ ）、 N はA/D変換値（0～4095）である。

また、標準色素換算のクロロフィルa量 C_U （ $\mu\text{g/L}$ ）と N との関係は、

$$C_U = A + B \cdot N \quad (2)$$

で表される。ここで A と B は校正係数である。 A , B を標準

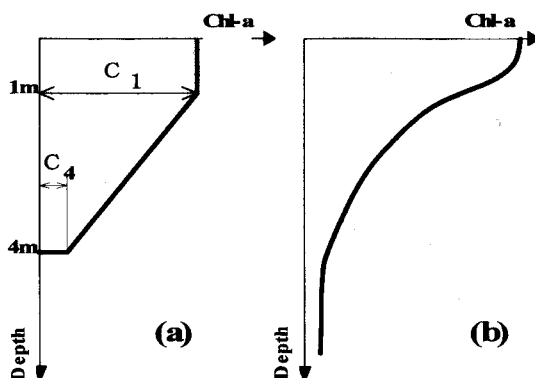


図-4 推定に用いたクロロフィルaの鉛直分布。(a)水深1mと4mのクロロフィルa量を使った仮想的なクロロフィルa鉛直分布で鉛直積分に用いる。(b)水質計で測定された典型的な夏期のクロロフィルaの鉛直分布。

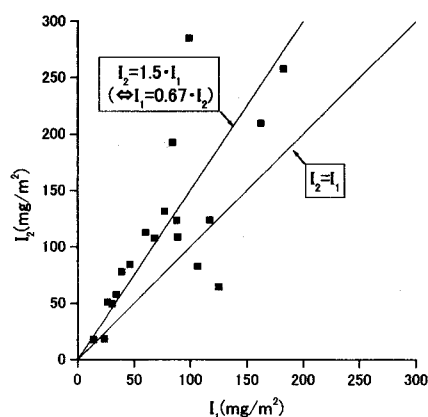


図-6 クロロフィルaの総量 I_1 と I_2 の比較(2001年4月から9月まで)。 I_1 は図-4(a)、 I_2 は図-4(b)に相当するクロロフィルa鉛直分布をそれぞれ積分した量。

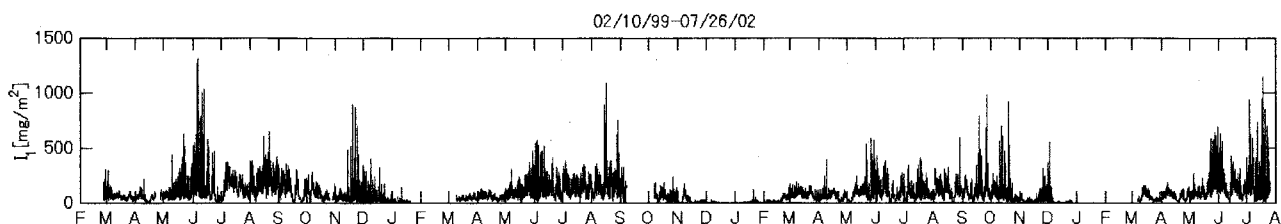


図-5 1999年2月から2002年7月までのクロロフィルa総量 I_1 の時系列。

的な校正値(ここでは、 $A=-2.0$ 、 $B=0.066$)に固定し、式(2)を式(1)に代入すると、 C_0 と C の関係式は式(3)で表される。

$$C = 3.530 \cdot C_0 - 3.609 \quad (3)$$

式(3)を使って求めた水深1mおよび4mのクロロフィルa量を図-3に示す。

(2) クロロフィルa総量の計算

次に、マリンラボ設置場所におけるクロロフィルa量の総量を見積もるために、水深1mと4mのクロロフィルa量の時系列データから、単位面積を持つ水柱当たりのクロロフィルa総量(単位： mg/m^2)を推定する。推定に用いたクロロフィルa量の鉛直分布を図-4に示す。図-4(a)は、水深1mと4mのクロロフィルa量を使った仮想的なクロロフィルaの鉛直分布である。一方、図-4(b)は水質計で測定された典型的な夏期のクロロフィルa量の鉛直分布である。図-4(a)の分布を鉛直積分したクロロフィルaの総量 I_1 (mg/m^2)は、次式で表される。

$$I_1 = (2.5 \cdot C_1 + 1.5 \cdot C_4) \quad (4)$$

ここで、 C_1 と C_4 は、それぞれ水深1mと4mにおけるクロロフィルa量($\mu\text{g/L}$)である。また、図-4(b)の分布を海底から海面まで積分したクロロフィルaの総量を I_2 (mg/m^2)とする。図-5は I_1 の時系列を示す。図-6は、

2001年4月から9月の観測データを対象に、同時刻の I_1 と I_2 とを比べたものである。図-6より、水深4m以浅のクロロフィルa総量の概算値である I_1 は、海底から海面までのクロロフィルa総量である I_2 のほぼ70%であることが読みとれる。

(3) 時系列解析

クロロフィルa量 C_1 、 C_4 およびクロロフィルa総量 I_1 の時間変動特性を調べるために、以下の手順で時系列解析を行った。

まず、データが欠測している時間帯の値をすべて0とおいた。これは、欠測期間が長い部分を線形補間すると、長い周期の変動成分に影響が現れると考えられるためである。また、非常に高い値を除くために、 C_1 、 C_4 、 I_1 の最大値を、それぞれ $300 \mu\text{g/L}$ 、 $300 \mu\text{g/L}$ 、 600 mg/m^2 と設定した。続いて、毎年4月から9月までのデータだけを取り出し、そのデータから線形トレンドを求めて差し引いた。最後に、線形トレンドを除いたデータに対してパワースペクトル密度を計算した。計算結果の例を図-7に示す。解析に当たっては、Matlab 5.3 Signal Processing Toolboxの関数pwelchを使用した。関数pwelchに与えたパラメタは、FFTをかけるウィンドーのサイズを8192点(約57日)、使用ウィンドーをHanning(点数8192点)、隣り合うウィンドーのオーバーラップ

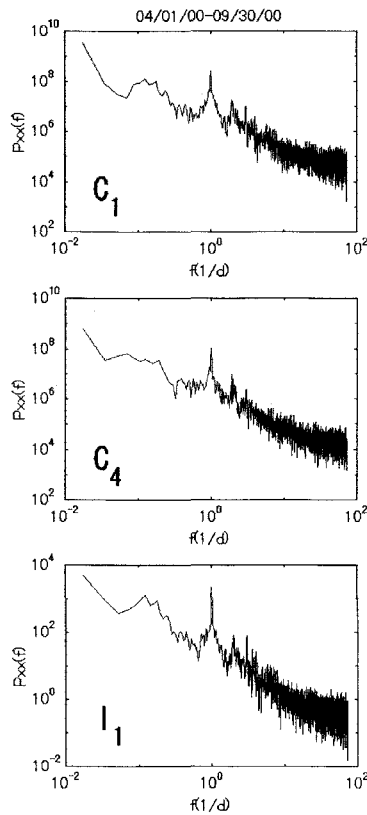


図-7 水深1mと4mでのクロロフィルa量 C_1 (上), C_4 (中), および総量 I_1 (下) のパワースペクトル密度。解析期間は2000年4月から9月。

数を4096点とした。

4. 結果と考察

図-7に示すクロロフィルa量 C_1 , C_4 およびクロロフィルa総量 I_1 のスペクトルから、以下のようなことが分かる。まず、第一に、周波数が 1d^{-1} , つまり周期が1日のパワーが卓越している。 C_1 , C_4 ともに周期が1日の変動成分が卓越しているのは、表層は日射による光合成が、また中層では海陸風による成層変動¹⁾が、それぞれ卓越しているためである。一方、クロロフィルa量の鉛直積分値である I_1 でも日変動が卓越している。この理由は、図-4(a)のプロファイルを積分して I_1 を求める際に、 I_1 に対して C_1 の影響が C_4 に比べて相対的に大きく表れるため、結果として C_1 の日変動特性が I_1 に反映されるためと考えられる。なお、図-8は、海底に設置した溶存酸素計付属の深度計の値と I_1 の値とを比べたものである。これらから、 I_1 の日変化と潮汐による深度変化との間に直接の対応関係は認められない。したがって、クロロフィルa量の1日変動は、潮汐が原因ではないことが確認できる。

さらに、図-7の低周波数帯域には、パワーの集中が認められる。そこで、この部分を詳しく考察するために、クロロフィルa総量 I_1 の毎年4月から9月のスペクトルをアンサンブル平均してみたものが、図-9である。図-

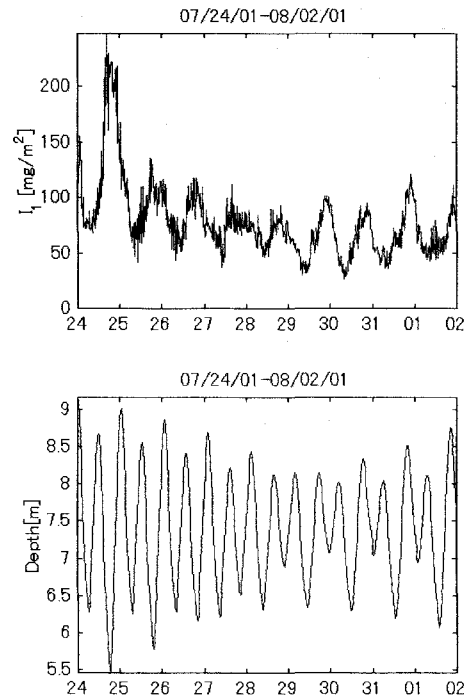


図-8 2001年7月24日から8月2日までのクロロフィルa総量 I_1 の値(上)と海底に設置した溶存酸素計付属の深度計の値(下)。

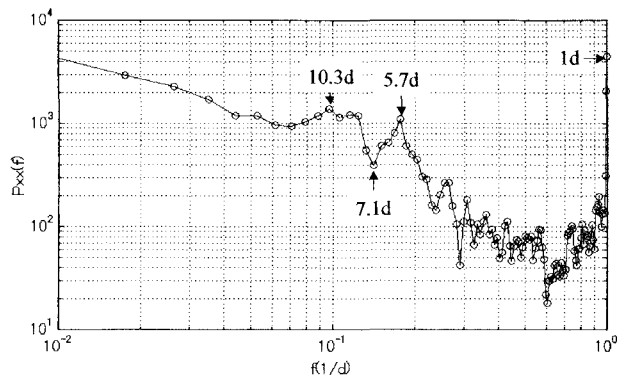


図-9 4月から9月までのクロロフィルa総量 I_1 のスペクトルをアンサンブル平均したもの。解析年は1999年から2001年まで。

9において、パワーが極大となっている周波数を周期に換算すると、5.7日から10.3日の間である。ただし、5.7日から8.3日の周期に挟まれた7.1日の周期ではパワーが極小となっている。ここでは、この5日から10日程度の周期的な変動を、クロロフィルa総量の中期変動と呼ぶことにする。

この中期変動だけを時系列上で見るために、毎年4月から9月の I_1 の時系列に対して周期が2日以下の変動がカットされるように、ローパスフィルターをかけた。その結果が図-10である。ここでローパスフィルターは5次のButterworthフィルターを採用し、カットオフ周波数 f_c は $(50\text{h})^{-1}$ とした。図-10によると、5月から9月にかけて、変動幅が $\pm 100\text{ mg/m}^2$ の範囲で、周期が5日

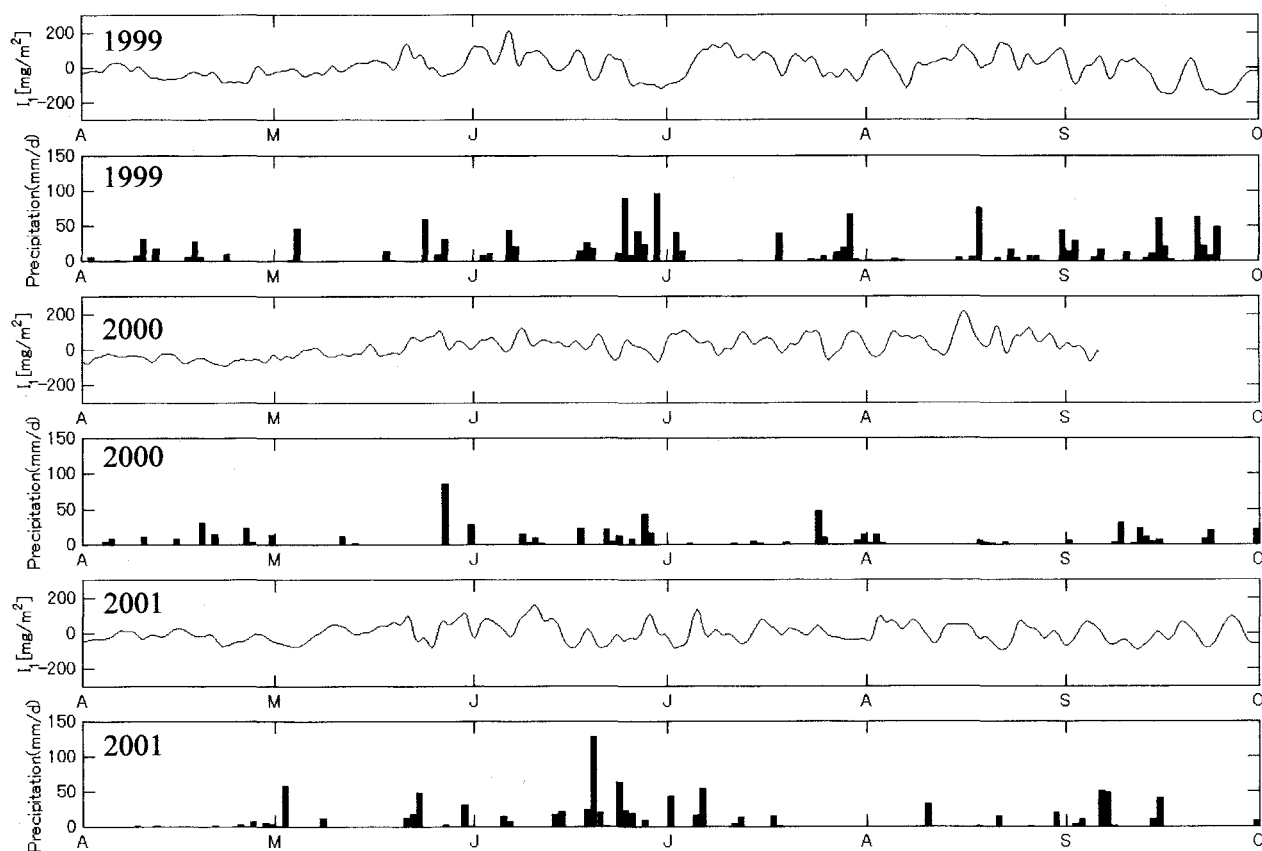


図-10 4月から9月のクロロフィルa総量 I_T の時系列に対してローパスフィルターをかけたものと広島の日降水量³⁾との比較。解析年は1999年から2001年まで。

から10日程度の I_T の変動があることがわかる。

このようなクロロフィルa量の増減の理由は、植物プランクトンを取り巻く増殖条件が変わっているためと考えられる。増殖条件としては、光、水温、塩分、栄養塩や他生物との関係が挙げられる。増殖条件を大きく変化させる外力要因は複雑で、より詳細な分析が必要ではあるが、ここでは5日から10日程度の I_T の変動をもたらす外力要因の一例として、同程度の変動周期を持ちうる降雨による洪水流入を考えてみる。図-10には、広島地方気象台で観測された日降水量も併記されている³⁾。大雨の降った直後に、クロロフィルa量が急に落ち込むのは、洪水により湾の表層の植物プランクトンが海田湾の外に排出されるためと考えられる。しかし、日雨量50 mmを超える日がほとんど存在しなかった2000年の場合を見ると、5日から10日の周期でクロロフィルa量が変動していることが確認できる。同様の特性は、1999年と2001年の、日雨量が無かったか、少なかった期間にも認められる。したがって、降雨出水とは別の要因で、クロロフィルa量が5日から10日の周期で増減している可能性が示唆される。

なお、表-1は2002年8月2日に海田湾で実施した植物プランクトン調査の結果であり、マリンラボの水深1 mと4 mの海水に含まれる植物プランクトンの種類と、その単位体積中の細胞数を示している。確認された植物プ

ランクトンは、水深1 mでは22種、水深4 mでは28種、全体では29種だった。また、単位体積中の合計細胞数は水深1 mで581.53細胞/mL、水深4 mで534.25細胞/mLであり、ほぼ同じ値であった。網別でみると、単位体積中の細胞数の多い順は、水深1 mでは珪藻 (365.71細胞/mL)、渦鞭毛藻 (211.7細胞/mL)、プラシノ藻 (2.8細胞/mL)、黄金色藻 (1.38細胞/mL) で、水深4 mでは珪藻 (514.09細胞/mL)、渦鞭毛藻 (16.34細胞/mL)、黄金色藻 (2.85細胞/mL)、プラシノ藻 (1.03細胞/mL) であった。珪藻の中でも特にタラシオシーラ科 *Cyclotella* sp. が多く、水深1 m、4 mでそれぞれ240.30細胞/mLおよび382.73細胞/mLであり、ついでニッチア科 *Nitzschia pungens* が水深1、4 mでそれぞれ69.53および78.30細胞/mLであった。一方、渦鞭毛藻に着目すると、水深1 mでは、ギムノディニウム科 *Gymnodinium mikimotoi* が167.40細胞/mL、ついでプロロセントルム科 *Prorocentrum triestinum* が35.78細胞/mLと多かった。しかし、水深4 mの細胞数は、両者ともそれほど多くはなかった。以上のように、夏季の海田湾では表層と中層のいずれにも珪藻が最も多く存在し、また一般に珪藻の増殖速度のほうが渦鞭毛藻よりも大きいとされている⁴⁾ことから、クロロフィルaの中期変動の主体となる植物プランクトンは珪藻と考えられる。

最後に、図-10が示しているクロロフィルa量の変動幅

表-1 海田湾の植物プランクトン調査結果 (2002年8月2日) . 種名の記載は優先種のみ.

門	綱	目	科	種	細胞数 (細胞/mL)	
					水深 1m	水深 4m
渦鞭毛植物	渦鞭毛藻			合計	211.7	16.34
		プロセントルム	プロセントルム	<i>Prorocentrum triestinum</i>	35.78	2.40
		ギムネニウム	ギムネニウム	<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	167.40	11.05
不等毛植物	黄金色藻			合計	1.38	2.85
	珪藻			合計	365.71	514.09
		円心	タシシラ	<i>Cyclotella</i> sp.	240.30	382.73
				<i>Thalassiosira</i> sp.	0.30	20.25
		羽状	ニッチア	<i>Cerataulina pelagica</i>	43.88	11.48
				<i>Cylindrotheca closterium</i>	4.73	11.48
				<i>Nitzschia pungens</i>	69.53	78.30
		緑色植物	プラシノ藻		合計	2.80
総合計細胞数				581.53	534.25	

が懸濁態有機炭素 (POC) に換算してどの程度の量に相当するのかを試算してみた. 三島ら²⁾は海田湾の懸濁態有機物の動態解析のため, クロロフィルa濃度C ($\mu\text{g/L}$) とPOCの関係を1998年9月から1999年7月までのデータで回帰し, 次式を得ている.

$$POC (\mu\text{g/L}) = 33.9 \cdot C (\mu\text{g/L}) + 248.6 \quad (5)$$

今, I_1 (mg/m^2) は海面から水深4mまでの積分値であるので, I_1 を層厚4mで除算すると, 層内の平均クロロフィルa量は $I_1/4$ ($\mu\text{g/L}$) となる. これを式(5)にあてはめると, POCの平均値を求めることができる. したがって, I_1 の変動幅が $\pm 100 \text{ mg/m}^2$ というのは, 層内平均クロロフィルa量の変動幅では $\pm 25 \mu\text{g/L}$ に相当し, これは式(5)の傾きを乗じるとPOC換算で約 $\pm 850 \mu\text{g/L}$ の変動幅に相当する. すなわち, 今回指摘したクロロフィルa量の中期変動を考慮するか否かによって, 懸濁態有機物, 言い換えればバイオマス量の見積りに大きな違いが生じることがわかる.

5. まとめ

本研究は, 海田湾におけるクロロフィルa量の長期計測結果から, 5日から10日程度でクロロフィルa量が増減していること, 植物プランクトン調査結果からこの変動

の主体が珪藻であること, そして特に現場海域のバイオマス量を見積もる場合は, この変動が無視できない量であることを示すに留まった. なお, この変動の原因は, 降雨に伴う洪水とは違う別の要因が寄与しているらしいが, はっきりとした原因を指摘するには, 他の環境モニタリングデータとの比較や, 場合によっては, 筆者らがやっている測定機洗浄を含めた定期メンテナンスによる人為的影響の考慮も必要である. 以上は, 今後の課題としたい.

参考文献

- 1) 長尾正之, 朱 小華, 橋本英資, 吉田みゆき, 高杉由夫: 閉鎖性海域での海陸風とクロロフィルaの応答関係, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1173-1178, 2000.
- 2) 三島康史, 星加 章, 谷本照巳, 上嶋英機: 海田湾の水・底質環境—海田湾における底質環境修復技術の研究 (I)—, 中国工業技術研究所報告, No. 56, pp. 1-39, 2001.
- 3) 広島地方気象台編: 広島県気象月表, 日本気象協会中国センター, 1999-2001.
- 4) 山口峰生: 赤潮, 沿岸の環境圏 (平野敏行監修), フジ・テクノシステム, pp. 181-190, 1998.

(2002. 9. 30受付)