

一次生産量の時空間分布の算定手法

藤原建紀*・山尾理**・高橋鉄哉**
笠井亮秀***・杉山陽一****・原田一利*****

1. はじめに

内湾域の生態系モデルにおいて一次生産はその核となる部分である。しかしながら、これまで海域における一次生産量は現場での実測により求めるしかなかった。この方法では、測定に多大な労力・時間が必要であるため、広範囲にわたる観測や長期間の測定ができず、一次生産量の空間分布や時間変動をとらえることはきわめて困難であった。一方、生態系モデルでは、一次生産量の分布を計算できるものの、その基礎となる光・栄養塩濃度の分布も計算値であり、その結果を検証することは困難であった。

本研究では、植物プランクトン増殖を制限する要因および一次生産量の空間分布、時間変動を求めることのできる可能な、現地観測と数値計算モデルを組み合わせた新たな方法を開発した。

2. 一次生産量の空間分布の算定手法

本研究で用いた方法は、生態系モデルにおいて使用される一次生産を記述する関数（以下これをモデル関数と呼ぶ）を用い、この関数のすべての引数を実測値によって与え、一次生産量を推定するという方法である。

2.1 現地観測

伊勢湾において1997年6月18日、7月22日、8月2日、9月7日、10月2日に水質の詳細な鉛直分布調査をおこなった。測点図を図-1に示す。伊勢湾内に湾奥(名古屋港)から湾口(伊良湖水道)に至る縦断線と、三重県白子沖から愛知県野間沖に至る横断線を設定し、この線上に19測点を設けた。これらの測点において水温・塩分・溶存酸素濃度・クロロフィルa濃度・栄養塩濃度の鉛直分布を測定した。栄養塩の項目は、アンモニア態窒素、硝酸・亜硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態全リン、全リンである。また、一次生産量を炭素量で表すために

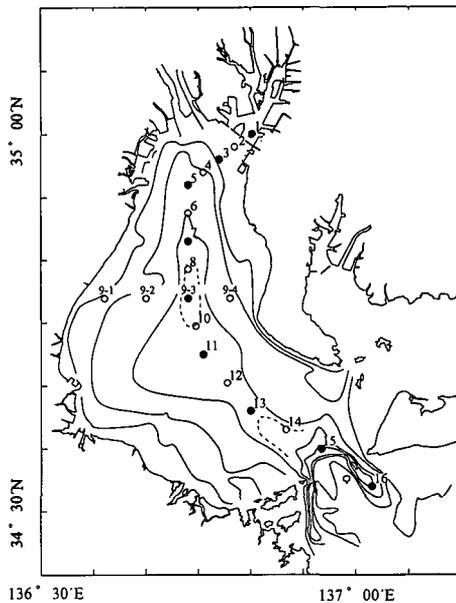


図-1 伊勢湾の地形および等深線と測点の位置

6月に測点3, 9-3, 16において、粒状態の炭素濃度を測定した。粒状態炭素濃度の分析は、中国工業研究所に依頼し、測っていただいた。

図-1の全測点において、水温・塩分・密度・クロロフィル蛍光はクロロテック((株)アレック電子製, ACL1180-DK)を用いて海面から海底まで0.1m毎に測定した。同じく全測点において、溶存酸素濃度をD.O.メーター((株)YSI社製, YSI-58)を用いて、海面から海底まで2~5m毎に測定した。図-1の黒丸の測点において、溶存態の栄養塩(アンモニア態窒素、硝酸・亜硝酸態窒素、リン酸態リン、溶存態全リン)を測定した。試水は北原式またはバンドーン採水器によって採水し、GF/Fフィルターで濾過した後、分析まで冷凍保存した。アンモニア態窒素はインドフェノール法(気象庁, 1970)、硝酸・亜硝酸態窒素は、カドミウム-銅カラム法(Wood et al., 1967)、リン酸態リンはアスכולピン酸法(Strickland and Parsons, 1965)、溶存態全リン・全リンは加水分解した後アスכולピン酸法により、オートアナライ

* 正会員 農博 京都大学大学院助教授 農学研究科海洋生物環境学

** 農修 京都大学大学院農学研究科海洋生物環境学

*** 農博 京都大学大学院助手 農学研究科海洋生物環境学

**** 正会員 工博 中部電力(株)電力技術研究所 水理グループ

***** 生修 (株)テクノ中部 環境部

ザーII (テクニコン社製) を用いて測定した。クロロフィル a 濃度は、GF/F フィルターで濾過した濾紙を、蛍光光度法 (気象庁, 1970) によりフィールド蛍光光度計 (ターナーデザイン社製, 10-AU 005) を用いて測定した。各月ごとに、クロロテックによって測定したクロロフィル蛍光と、採水によって測定したクロロフィル a 濃度の相関をとったところ、よい相関が得られた。この回帰式を用いて、クロロテックのクロロフィル蛍光値をクロロフィル a 濃度に換算した。測点 1, 3, 9-3, 16 において水中の光強度を測定した。測定は光量子計 ((株) 盟和商事社製, LI-1000 データログ) を用いて、上向き光量子量を海面から海底まで 1~5 m 毎におこなった。また、中部電力 (株) によって 1997 年 6 月から 1998 年 3 月までの期間、伊勢湾北部で全天日射量が 10 分間隔で連続観測されている。

2.2 数値計算

6 月から 10 月の伊勢湾縦断面における一次生産量を計算した。計算に必要な栄養塩濃度・水温・光強度には実測値を用いた。まず、1 時間あたりの全天日射量を 1 日の各時間ごとに 1 月分平均し、その月の代表的な 1 日の日射量変動を求めた。その値と、水中光量子量から求めた光の減衰率との積を水中光強度として用いた。6 月には水中光量子量の測定は行っていないが、7 月の減衰率を用いて計算を行った。計算には縦断面を水平 2 km、鉛直 1 m のメッシュに区切り、各データをメッシュごとに補間して用いた。これらの値を用いて、1 時間ごとに計算を行い、1 日分の一次生産量を算出した。以下に計算手法を説明する。

まず Steele (1962) の式を用いて光・温度による植物プランクトン増殖の制限項を表した：

$$F_I = \frac{I}{I_{opt}} \times \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$F_T = \frac{T}{T_{opt}} \times \exp\left(1 - \frac{T}{T_{opt}}\right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 F_T は増殖の水温による制限項であり、 T は水温、 T_{opt} は最適水温、 F_I は光による制限項、 I は光強度、 I_{opt} は最適光強度を表す。

次に Michaelis-Menten 形の栄養塩制限の式：

$$F_N = DIN \times (K_N + DIN)^{-1} \dots\dots\dots (3)$$

$$F_P = DIP \times (K_P + DIP)^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

を用いて一次生産の溶存態無機窒素による制限項 F_N 、溶存態無機リンによる制限項 F_P を求めた。 DIN は無機窒素濃度、 DIP は無機リン濃度、 K_N 、 K_P はそれぞれ窒素、リンの半飽和定数を表す。無機窒素濃度には、アンモニア態窒素濃度と硝酸態・亜硝酸態窒素濃度の和を用いた。無機リン濃度には、リン酸態リン濃度を用いた。窒素、リンによる制限項のうち値の小さい方を、栄養塩に

表-1 一次生産の計算に用いた記号とパラメーター

記号	意味	単位	値
PP	一次生産量	$gC \cdot m^{-3} \cdot day^{-1}$	
chl	植物プランクトン現存量	$\mu g \cdot chl \cdot l^{-1}$	
G	増殖速度	day^{-1}	
F_T	温度制限項		
F_I	光制限項		
F_N	栄養塩制限項		
F_P	窒素制限項		
F_P	リン制限項		
T_{opt}	最適温度	$^{\circ}C$	25
I_{opt}	最適照度	$MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$	8.56
K_N	窒素の半飽和定数	$\mu M (\mu g \cdot l^{-1})$	1.7 (24)
K_P	リンの半飽和定数	$\mu M (\mu g \cdot l^{-1})$	0.19 (6)
G_{max}	最大増殖速度	day^{-1}	2.4

よる制限項 F_N とした：

$$F_N = \min(F_N, F_P) \dots\dots\dots (5)$$

植物プランクトンの増殖速度 G は 3 種の制限項と最大増殖速度 G_{max} の積

$$G = G_{max} \times F_I \times F_T \times F_N \dots\dots\dots (6)$$

とした。そして、一次生産量 PP は増殖速度 G とクロロフィル a 濃度 (chl)、クロロフィル a から粒状態炭素への変換定数 C の積

$$PP = C \times chl \times G \dots\dots\dots (7)$$

とした。 C には粒状態炭素とクロロフィル a の比

$$C/chl = 102.6 \times 10^{-3} \quad (gC \cdot m^{-3} / \mu g \cdot chl \cdot l^{-1})$$

を用いた。

式中のパラメーターには、環境庁による大阪湾の水質管理計画に用いられ、水質予測モデルにおいて再現性が確認された値を用いた。式中の記号および定数の値を表-1 に示す。

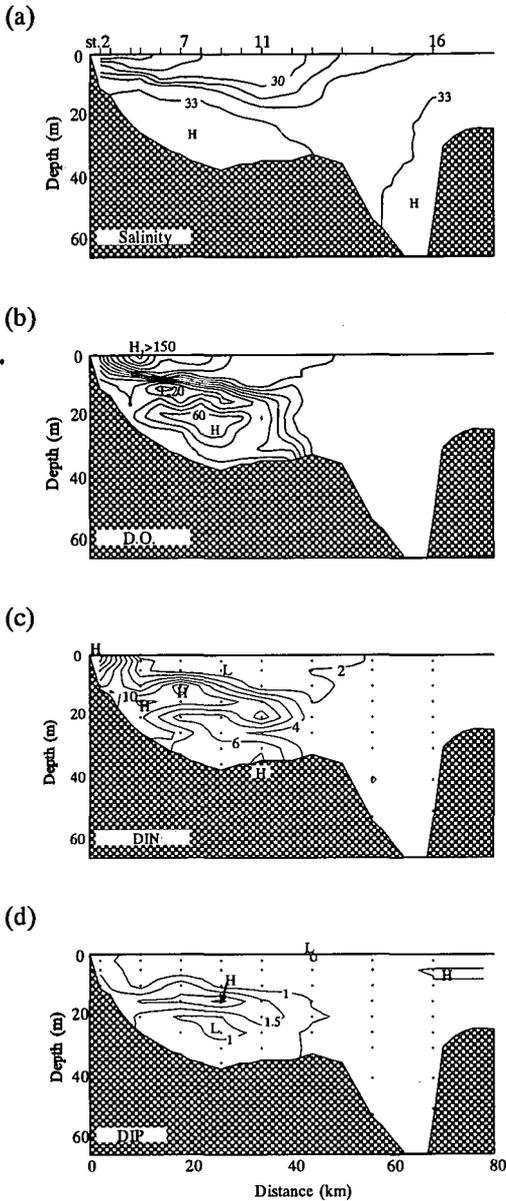
3. 溶存酸素・栄養塩濃度の空間分布

10 月の縦断面における塩分 (psu)、溶存酸素濃度 (%), 溶存態無機窒素 (DIN) 濃度、および溶存態無機リン (DIP) 濃度の鉛直分布を図-2 に示す。

塩分の分布から、湾奥部では成層が強く、湾口部では成層が弱いことがわかる。これは伊勢湾では湾奥部で河川流入量が多く、湾口部では地形の影響により潮流が速いことによると考えられる。

溶存酸素濃度は、湾奥・表層で高く、過飽和になっている。酸素濃度 40% 以下の貧酸素水塊は、主に湾奥から湾中央にかけての中層に見られる。湾口部では鉛直混合が強いいため、溶存酸素は表層から底層まで豊富に存在する。

湾奥以外の表層 5 m 以浅において DIN 濃度はほぼ 0 になっており、この水域ではすでに植物プランクトンによって DIN が使い尽くされていると考えられる。DIN



図一 10月の伊勢湾縦断面における (a) 塩分 (psu) (b) 溶解酸素濃度 (%) (c) 溶解態無機窒素濃度 (μM) (d) 溶解態無機リン (μM) 濃度分布図 横軸は名古屋港からの距離 (km)

濃度の最大値は湾奥表層で観測された。湾奥以外の極大は、湾中央の中層にみられる。どの月においても湾奥以外における DIN 濃度極大の位置は酸素濃度の極小付近でみられ、DIN 濃度の高い水塊と貧酸素水塊とは非常に似た形状をしていた。この DIN 濃度の分布から、有光層への DIN の輸送には、河川からの流入と底層からの湧昇という 2 種の機構が考えられる。

DIN と同様に、表層の DIP 濃度はほぼ 0 であり、すで

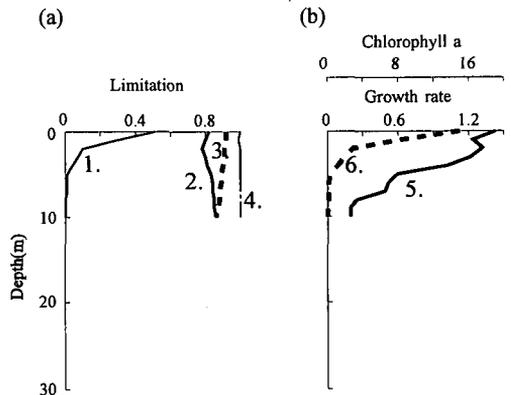
に植物プランクトンによって DIP が使い尽くされると考えられる。DIP は 10 月には中層で高濃度である。これら高濃度の DIP がみられる水塊は貧酸素水塊とほぼ一致している。DIN でみられた湾奥表層の濃度極大は DIP 濃度ではみられない。DIP は主に底層からの湧昇によって有光層へ輸送されると考えられる。

4. 伊勢湾で見られる 3 種の一次生産機構

湾奥を代表する測点として測点 2、湾中央部を代表する測点として測点 7、湾口を代表する測点として測点 16 をそれぞれ選んだ。10 月の光・栄養塩・温度による一次生産の制限項、植物プランクトンの増殖速度、クロロフィル a 濃度の鉛直プロファイル、測点 2、7、16 についてそれぞれ図一 3、4、5 に示す。

湾奥の測点 2 (図一 3) では水面から海底まで光制限である。また湾口、湾中央の測点よりも光の減衰が早いことが分かる。すなわち、測点 2 において一次生産に対する制限は、高濁度域形であるといえる。河川からの栄養塩流入量が大きく、水柱全体で栄養塩制限にはなっていないということもこの制限形の特徴である。光制限を受けるため、植物プランクトンの増殖速度は水面でもっとも高く、水深と共に小さくなる。水深 5 m 付近では、光制限項がほぼ 0 になり、増殖速度もほぼ 0 になる。これは湾中央、湾口に比べて浅い。クロロフィル a 濃度の分布も水面付近でもっとも高く、水深が深くなるにつれて減少するが、海底においても $2.61 \mu\text{g l}^{-1}$ 存在する。

湾中央の測点 7 (図一 4) においては、表層約 5 m で栄養塩制限、それ以降で光制限になっている。また表層において栄養塩濃度が 0 であるため、増殖速度は 0 である。このため増殖は 5 m 以深だけで起こっている。この層で



図一 3 10月の湾奥 (測点 2) における (a) 光・栄養塩・水温による増殖制限項の鉛直分布: 1. 光制限, 2. リン制限, 3. 窒素制限, 4. 温度制限, (b) 5. クロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$), 6. 増殖速度 (day^{-1}), の鉛直分布

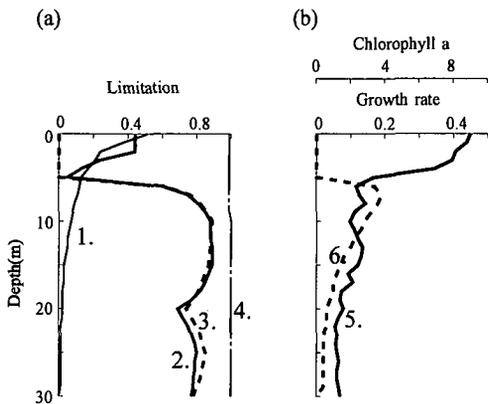


図-4 10月の湾中央(測点7)における(a)光・栄養塩・水温による増殖制限項の鉛直分布:1. 光制限, 2. リン制限, 3. 窒素制限, 4. 温度制限, (b) 5. クロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$), 6. 増殖速度 (day^{-1}), の鉛直分布

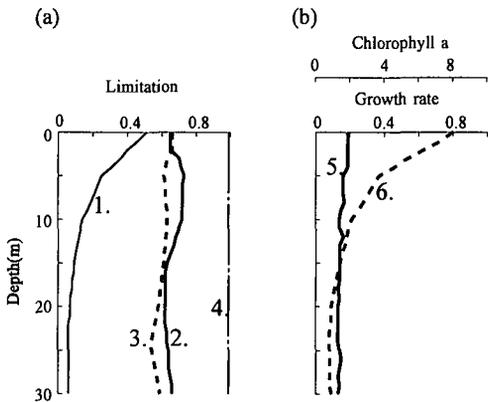


図-5 10月の湾口(測点16)における(a)光・栄養塩・水温による増殖制限項の鉛直分布:1. 光制限, 2. リン制限, 3. 窒素制限, 4. 温度制限, (b) 5. クロロフィル a ($\mu\text{g l}^{-1}$), 6. 増殖速度 (day^{-1}), の鉛直分布

は、光制限になっていることが分かる。つまり、有光層のうち、下層からの栄養塩輸送によって栄養塩制限の解除された水深で、一次生産が起こっている。そのため、測点7の増殖制限は湧昇域形であるといえる。この制限形は月によって湾奥から湾口にかけての様々な場所で見られる。この制限形の水域において、クロロフィル a 極大は増殖速度極大と同じ水深もしくはそれより浅いところにしかみられない。

湾口部の伊良湖水道に位置する測点16(図-5)では、水柱全体で光制限項が最も小さい制限項となっている。しかし、光自体は湾奥や湾中央より多くある。栄養塩濃度は水柱全体でほぼ一様であり、栄養塩による一次生産の制限項 F_n も水柱全体で約0.6~0.7であり、変化が小さい。この海域は潮流の速い海峡部であり、鉛直混合が

強い。鉛直一様な栄養塩濃度の分布からも、測点16付近では強い鉛直混合によって、一次生産が起こるために十分な量の栄養塩が下層から有光層へと供給されていることが分かる。すなわち、測点16における増殖制限は混合域形であるといえるだろう。混合域形の増殖制限を受けた結果、植物プランクトンの増殖速度は水面でもっとも高く、水深と共に小さくなる。しかし、クロロフィル a 濃度は鉛直的にほぼ一様かつ低濃度である。強い鉛直混合によって表層で生産されたクロロフィル a が下層へ輸送された結果、この分布が得られたと考えられる。一次生産に対して、強い鉛直混合は下層からの栄養塩の供給という正の影響と、植物プランクトンの有光層外への輸送という負の影響とを同時に与えていることが分かる。

5. 外洋水の流入と一次生産量の増大

各増殖制限形における一次生産量を比較するために、単位面積あたりの一次生産量を求めた。単位面積あたりの一次生産量は、単位体積あたりの一次生産量を水面から海底まで積分することにより求めた。6~10月の各計算格子におけるこの結果を図-6に示す。7月にはそれぞれの制限形について、高濁度域形では $5.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、湧昇域形では $2.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ という観測期間中最大の一次生産量が示された。

6月18日と7月22日の間には、湾外から湾内底層へ

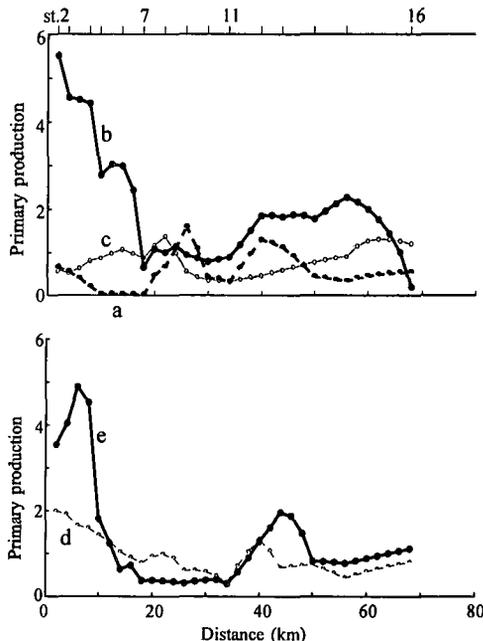


図-6 (a) 6月17日, (b) 7月22日, (c) 8月7日, (d) 9月2日, (e) 10月7日の伊勢湾縦断面における一次生産量 ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$)

外洋水が進入し、元々底層に存在していた高栄養塩水が上層へ湧昇するという現象が起きた。(山尾・藤原, 1998) このイベント後の7月22日には湾内のほぼ全域で、一次生産量が他の月の2~4倍になっていた。

6. 実測値との比較

運輸省第五港湾建設局(1977)は、伊勢湾、三河湾において、1976年から1977年にかけて明暗瓶を用いた溶存酸素法によって一次生産量を測定している。それによると、伊勢湾北部で $0.4\sim 3.5\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 、南部で $0.5\sim 2.0\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 、三河湾で $0.7\sim 2.1\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 程度の値となっている。また、田中・佐野(1980)は、三河湾の中央部ならびに蒲郡沖で1977年から1979年にかけて、溶存酸素法で一次生産量を測定している。彼らは、1978年6月の珪藻赤潮時に $13.6\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ という最大値を観測し、それ以外には春、秋のブルーム時に $4.5\sim 9.8\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ 、夏の成層期には $1.2\sim 2.9\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ という値を得ている。本研究の結果とこれらの値を比較すると、7月の湾奥で得られた $5.5\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ という値は、1979年の三河湾におけるブルーム時の値に匹敵する。また7月の湾中央部で得られた $2.3\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ という値も、伊勢湾、三河湾で成層期に得られた値に匹敵する。本研究において得られた結果は現場法によって実測された値と同程度である。

7. まとめ

このモデル関数を用いることにより、一次生産の空間分布だけでなく、時間変化も推定できた。本研究のモデル関数法を用いることで、従来の数値モデルを検証することや、場所的な水質の違いを考慮して高い精度で一次生産量を定量することが可能となり、次世代の生態系モデルを構築することにつながると思われる。

参考文献

- 運輸省第五港湾建設局(1977): 伊勢湾環境対策調査報告書, 昭和52年度報告, 195 p.
- 気象庁編(1970): 海洋観測指針, 日本海洋学会, pp. 193-194, 252-254.
- 田中庸央・佐野方昂(1980): 三河湾における植物プランクトンの一次生産動態に関する一考察, 日本プランクトン学会報, Vol. 27, pp. 75-85.
- 山尾 理・藤原建紀・高橋鉄哉・杉山陽一・原田一利(1998): 強成層の伊勢湾における中層貧酸素水塊, 1998年度海洋学会春季大会要旨集, p. 72.
- Steele, J. H. (1962): Environmental control of photosynthesis in the sea, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 7, pp. 137-150.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons (1965): A manual of sea-water analysis (2nd. ed., revised). Fish. Res. Board of Canada Bull., Vol. 125, pp. 83-87.
- Wood, E. D., F. A. J. Armstrong and F. A. Richards (1967): Determination of nitrate in seawater by cadmium-copper reduction to nitrate. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, Vol. 47, pp. 23-31.