

迫間浦における *Gymnodinium* 赤潮の発生に 及ぼす海水交換の影響

杜 多 哲*・阿 保 勝 之**・本 城 凡 夫***
山 口 峰 生***・松 山 幸 彦****

1. 緒 言

熊野灘北部に位置する五カ所湾の支湾の1つである迫間浦では、魚類養殖が盛んであるが、他の支湾に比べ海水交換が悪く(杜多ら, 1989)、しばしば赤潮が発生する。特に1984年に五カ所湾をはじめとする熊野灘沿岸に発生した *Gymnodinium nagasakiense* の赤潮では迫間浦の養殖漁業は大きな被害を被った。

近年本種の生理的特性に関する実験から多くの知見が得られつつある(山口・本城, 1989)。また海域で細胞密度が増大する時期における、みかけの増殖速度などに関しても多くの測定結果が得られつつある(Honjo et al., 1990)。しかし海域においては海水の流動による拡散や湾外への流出が細胞数の増減に関与するため、みかけの増殖速度はその意味が明確ではない。赤潮発生メカニズムをより詳細に明らかにするには、種の生理的特性による増殖と海水流動による海域外への流出とを分離した研究を行う必要がある。本研究では迫間浦において1989年から1991年の3年間、月に一度の海洋観測を行うとともに、週に一度 *G. nagasakiense* の細胞密度を調べた。そして塩分の測定結果に1層1ボックスモデルを適用して海水交換速度を求めた。次に山口・本城(1989)によって求められた実験式から *G. nagasakiense* の増殖速度を計算し、海水交換速度との比較を行った。最後に水温・塩分から決まる増殖速度と海水交換による流出速度を用いて迫間浦における *G. nagasakiense* の消長を計算し、海域での細胞密度の増減をどの程度説明できるか検討した。

2. *G. nagasakiense* の生態と細胞密度の季節変動

(1) *G. nagasakiense* の生態

渦鞭毛藻類 *G. nagasakiense* Takayama et Adachi (Takayama and Adachi, 1984) は日本、韓国および台

湾で猛威をふるっている有害赤潮生物である。最近、高山・松岡(1991)は *G. nagasakiense* から *G. mikimotoi* Miyake et Kominami ex Oda への種名変更を報告しているが、本論文では従来の種名を用いることとする。わが国においては本種の赤潮は日本の中部および西部日本の半閉鎖的な水域で発生している。

本種は細胞密度が増大している期間、昼間時には2m層を中心とする層に分布することが多い。また日周鉛直移動を行いその移動速度は0.3~1.7 m/hr、一日に遊泳する距離は14 m、到達する最高水深は16 m程度と考えられている(本城, 1987)。本論文で対象としている迫間浦は平均水深10.4 m、最大水深約18 mである。従って本種は容易に栄養塩濃度の高い海底付近に到達できると考えられる。以下では本種は海底付近に到達する夜間でも栄養塩の取り込みを行うことが可能であり、栄養塩濃度は制限要因になっていないと仮定して論旨を進める。

山口・本城(1989)は、光および栄養塩が制限要因になっていない条件下で培養実験を行い、本種が広温・広塩分性種であることを示している。さらに対数増殖期の増殖速度を予測する式として次の実験式を得ている。

$$\mu_2 = 1.05753 - 0.30220\theta + 0.01777\theta^2 - 0.00035\theta^3 + 0.00515\theta S - 0.00010\theta S^2 \dots (1)$$

ここに θ は水温(°C)であり S は塩分である。 μ_2 は増殖速度(divisions/day)であり、 $P = P_0 e^{kt}$ と表した場合の増殖速度 k とは

$$k = \mu_2 \ln 2 = 0.693\mu_2 \dots (2)$$

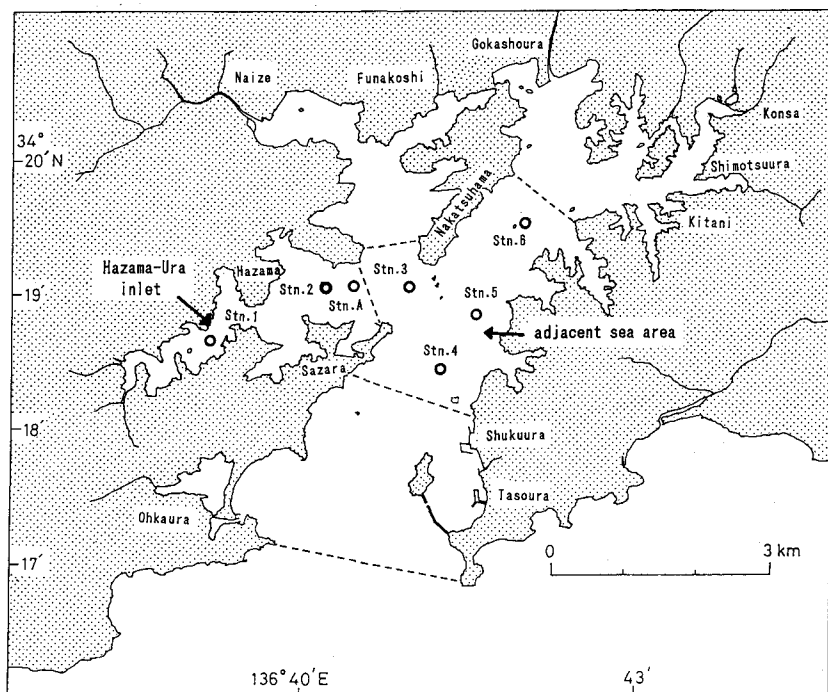
の関係にある($\ln$ は自然対数)。

(2) 細胞密度の季節変動

a) 測定方法

迫間浦に設定した水深18 mの定点A(図-1)において1989年1月から1991年12月まで原則として週に一回、採水を行った。採水層は0 m, 2 m, 5 m, 10 m, 15 mの5層である。500 mlの各層試水を固定せずに常温下で宅配便により広島県の南西海区水産研究所に送り、翌日、層別に *G. nagasakiense* 細胞数を光学顕微鏡で計測した。また水柱平均細胞密度(各層密度の単純平均)が10 cells/ml以下の時、各層の試水を混合して本城式プランクトン濃縮装置(PC 15-S, 日本アクア社製)で約1000

* 正会員 農博 水産庁養殖研究所 環境管理部
 ** 水産庁養殖研究所 環境管理部
 *** 農博 水産庁南西海区水産研究所 赤潮環境部
 **** 水産庁南西海区水産研究所 赤潮環境部



図一1 五ヶ所湾および迫間浦。Stn.1-6で塩分・水温の測定、また Stn.A でプランクトンの採集を行った。

倍まで濃縮して2.5 l中の細胞数を計測し、水柱平均細胞密度を求めた。従って細胞が検出されないことは細胞密度が 4×10^{-4} cells/ml 以下であることを意味する。なお非濃縮あるいは濃縮試水の細胞密度が 10^4 cells/ml を超えたとき、トーマの血球算定盤で計数した。 $1-10^4$ cells/ml の範囲の時、自動ピペットで適切な試水量を Sedgwick-Rafter スライドに採って計数を行った。

b) 細胞密度の季節変動

3年間の *G. nagasakiense* 遊泳細胞の水柱平均細胞密度の変化を図一2に示す。本種の増殖は4月から6月と11月から12月に毎年始まり、7月から8月と12月から1月にかけて1年に2回のピークを生じた。夏季には1000 cells/mlを超える高い細胞密度が、冬にも年によっては100 cells/mlを超えるピークが観察された。このようにピークの高さに差があるとはいえ、本種が二峰性の年間サイクルを示すことは明らかである。本種の細胞密度は春と秋に明らかに低くなり、夏から翌年の夏まで連続して遊泳細胞が観察されたのは1989年から1990年に限られていた。

3. ボックスモデル

G. nagasakiense は迫間浦のほぼ全水深にわたって鉛直移動をされると考えられる。そこで湾全体を1つのボックスとし、各種物質（塩分・細胞密度）の分布も鉛直方

向に均一と仮定して、1層1ボックスモデルを用い湾の海水交換特性および本種の population dynamics を検討する。図一3に示す模式図において湾内の物質収支を考える。湾内を添字1で表し、湾口部を添字0で表す。 V_1 は湾内の容積、 C は物質の濃度、 P_1 は湾内で生成される物質量を表す。添字はボックスの記号に対応する。 Q_{10} および Q_{01} はそれぞれ湾内から湾外へと湾外から湾内への輸送係数を表す。 F_r は湾内への淡水流入量を、 C_r は流入する淡水に含まれる物質の濃度を表す。湾内および湾口部では物質は完全混合していると仮定すると湾内（ボックス1）に関する海水と物質の保存式は次式で表される。

$$Q_{10} = Q_{01} + F_r \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = C_0 Q_{01} - C_1 Q_{10} + F_r C_r + P_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

輸送係数は(3)、(4)より次式で与えられる。

$$Q_{10} = \frac{1}{C_0 - C_1} \left\{ V_1 \frac{dC_1}{dt} + (C_0 - C_r) F_r - P_1 \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_{01} = Q_{10} - F_r \quad \dots\dots\dots (6)$$

また湾の容積 V_1 を輸送係数 Q_{10} で割った

$$T = V_1 / Q_{10} \quad \dots\dots\dots (7)$$

は時間の次元を持ち、湾内での物質の滞留の長さを示す1つの尺度であり、滞留時間とよばれる。

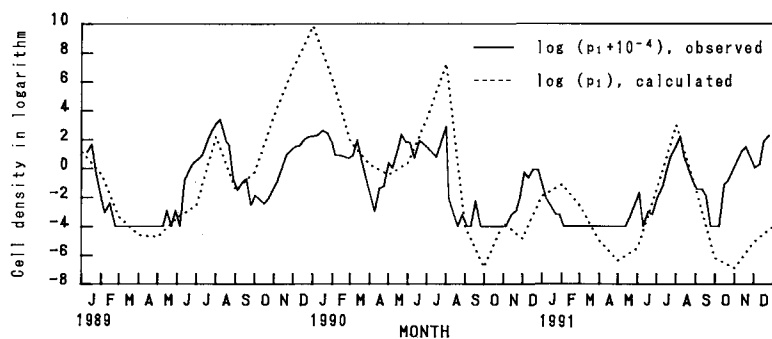


図-2 *G. nagasakiense* 細胞密度 (p_1) の消長。点線は計算値、実線は水中平均細胞密度の計数値を示す。

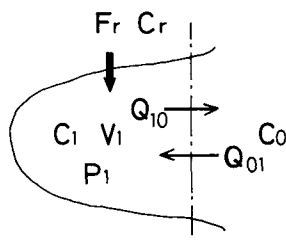


図-3 塩分及び *G. nagasakiense* の収支を示す模式図

4. 塩分収支から求めた滞留時間の季節変動

(1) 観測方法

迫間浦およびその湾口部に相当する観測点(図-1)で1988年12月から1992年1月の間水温・塩分の測定を行った。水温・塩分の測定は各観測点において海面下1mから海底まで1m間隔で行なった。

(2) ボックスモデルによる滞留時間の算定

塩分の保存を考えた場合、(3)から(6)式において $P_1=0$, $C_r=0$ とすることができる。この条件下では(5)式は

$$Q_{10} = \frac{1}{C_0 - C_1} \left\{ V_1 \frac{dC_1}{dt} + C_0 F_r \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と表される。ただし dC/dt は各月間の塩分濃度の平均変化率で表されると仮定した。ここに V_1 は湾内の体積であり、 C_0 , C_1 はそれぞれ湾外および湾内の塩分を示す。 F_r は河川による淡水流入と海面への直接の降雨から海面からの蒸発量を除いた正味の淡水流入量である。 Q_{10} は湾内から湾外へ向かう輸送係数を表す。

湾内および湾外における塩分 C_0 と C_1 が経時的に観測されており、湾内への淡水流出量 F_r が推定できれば式(8)から輸送係数 Q_{10} を求めることができる。また(7)式を用いて滞留時間を計算することができる。

a) 平均塩分と平均水温の算出

各観測点において海面下1mから海底上1mまでの区間で1mごとにその点の代表する体積を求めた。次に

各観測点における1mごとの塩分測定値をその点の代表する体積で加重平均して湾内および湾外の平均塩分を求めた。また観測日が一定していないため前後月の観測値を用いて線形補間により各月1日の平均塩分を求めた。こうして求めた値を(8)式の C_0 と C_1 とした。

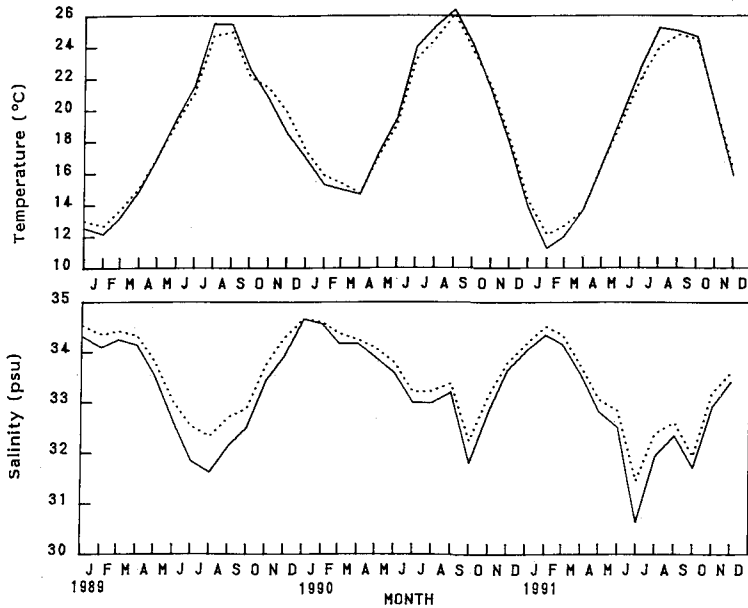
得られた平均塩分の季節変化を1989年1月から1991年12月について図-4に示す。また同様に計算した平均水温も同図に示す。平均塩分は夏季に低く冬季に高い季節変動を示しているが年による差も大きく、例えば1990年には10月1日に極小値をとっている。これは9月の中旬および下旬に台風が和歌山県に上陸し、大雨を降らせた影響によるものである。湾内と湾外の平均塩分差は塩分の小さい時期に大きい傾向を示している。平均水温は5~11月には湾内が湾外よりも高く、12~4月には逆となっている。

b) 淡水流出量の推定

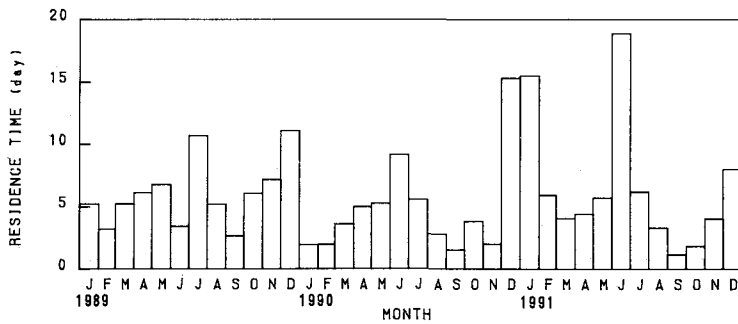
湾内への淡水の流入としては河川によるものと湾内への直接降雨によるものがあり、流出としては蒸散がある。河川流入は降雨量と流域面積および流出係数の積として求めた。また海面からの蒸発量は海面水温に対する飽和蒸気圧と空気の蒸気圧の差に比例し、また風速に比例するとして求めた(杜多ら, 1989)。降雨量と空気の蒸気圧は南勢町船越にある地域気象観測所(AMeDAS 53296, 南勢)で観測された値を用いた。風速については南勢の観測点が山に近く、小さい値となることが多いので鳥羽の観測値を用いた。

(3) 滞留時間の季節変動

上で求めた湾内と湾外の平均塩分、淡水流出量を用いて式(7)、(8)を用いて輸送係数 Q_{10} と滞留時間 T の季節変動を求めた。滞留時間(図-5)は2日から19日の間で変動している。そしていずれの年も9月に小さい値となっており、海水交換が良いことを示している。阿保・杜多(1992)は1991年の5月から7月にかけて迫間浦の流れの観測を行い、この期間には密度流が海水交換に大きな役割を果たしている可能性を示唆している。そこで



図一4 迫間浦の湾内と湾外（隣接海域）の平均水温（上図）と平均塩分（下図）。実線は湾内を点線は湾外を示す。



図一5 迫間浦における滞留時間 T の季節変動

ボックスモデルから得られた滞留時間と、密度成層形成の原因の1つである降雨量との関係を調べた（図一6）。図よりばらつきは大きいが降雨量と $1/T$ （単位時間当り湾の体積の何割が交換するかを示す値で以下では流出速度とよぶ）の間には正の相関がみられる。また滞留時間の季節変動（図一5）で9月に海水交換が良かったのは台風と関連して降雨が多かったことが原因の1つであることがわかる。

5. 水温・塩分による増殖速度の変化と海水交換のみを考慮した赤潮の消長の計算

迫間浦の湾内における *G. nagasakiense* の population dynamics を考える。(4)式において C_0 を湾外の本種の細胞密度、 C_1 を湾内の細胞密度（図一2の p_1 に相当する）とする。流入淡水の細胞密度 $C_r=0$ である。さら

に湾外では細胞密度は無視できるほど低く $C_0=0$ となると仮定する。また細胞密度の増殖速度 k は(1)、(2)式で表される。ただし式中の水温・塩分としてはさきに求めた湾全体の平均水温と平均塩分を用いた。これらの前提のもとで(4)式を変形し $Q_{10}/V_1=1/T$ を用いれば

$$\frac{dC_1}{dt} = C_1 \left(k - \frac{1}{T} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。各月の1日から1ヶ月間、(9)式の右辺の各値が一定であると仮定すれば C_{10} を初期条件として

$$\log C_1 = \log C_{10} + \left(k - \frac{1}{T} \right) \log e \cdot t \quad \dots\dots\dots (10)$$

となり (log は常用対数)、ある月の第1日の細胞密度 C_{10} がわかれば次の月の細胞密度 C_1 が予測できることになる。また対数で表した細胞密度は直線的に変化し、その傾きは(10)式の右辺第2項の係数となることがわかる。

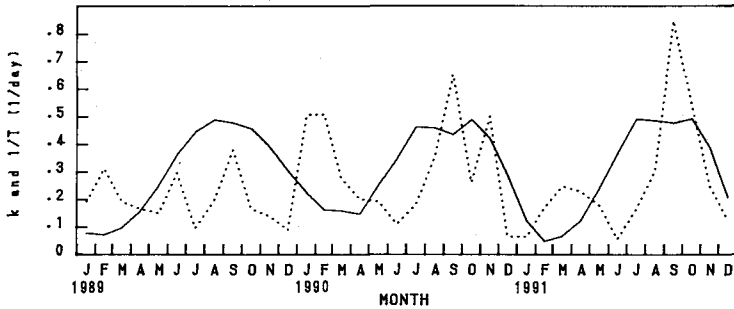


図-7 増殖速度 k (実線) と海水交換および淡水の影響による流出速度 $1/T$ (点線) の比較

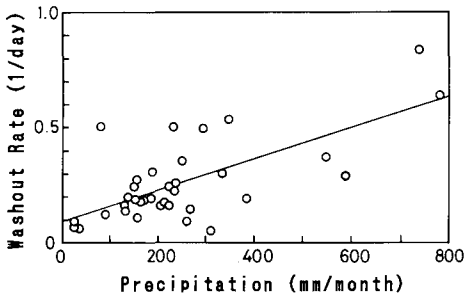


図-6 月間降水量と流出速度 $1/T$ の関係

増殖速度 k および海水交換と淡水流入の影響による減少速度 $1/T$ を図-7 に示す。これらの値を用いて細胞密度の消長を計算した。計算にあたっては1989年1月1日の *G. nagasakiense* の細胞密度として、1月9日の調査で測定された値を初期条件として用いた。この条件のみで計算したところ、細胞密度は変動を繰り返しながら傾向的な増大を示し、3年目の12月には 10^{25} cells/ml という現実にはあり得ない大きな値となった。

一方、測定結果からは3年間とも9月に細胞密度の急激な低下がみられている。そこで現在のところその物理的あるいは生物的機構は不明であるが、ここで考察した以外の要因によって細胞密度が減少すると考えて、各年の9月1日に測定された細胞密度を与えた。図-2の点線はこのような条件のもとで計算された細胞密度と実測値を比較したものである。きわめて単純なモデルと仮定

から計算されたものであるが、*G. nagasakiense* の消長の定性的な傾向をよく再現している。9月に計算以上に細胞密度が減少する原因の検討および図-2で1990年にピーク時の細胞密度のオーダーが大きく異なっている原因の究明を今後行っていく必要がある。

参 考 文 献

- 阿保勝之・杜多 哲・山本茂也 (1992): 五ヶ所湾迫間浦の流れに及ぼす風の影響, 養殖研報, No. 21, 15-24.
- 高山晴義・松岡数充 (1991): *Gymnodinium mikimotoi* Miyake et Kominami ex Oda と *Gymnodinium nagasakiense* Takayama et Adachi の種形質の再評価, 日本プランクトン学会報, 38 (1), 53-68.
- 杜多 哲他 (1990): 五ヶ所湾とその支湾における海水交換の季節変動, 養殖研報, No. 18, 13-29.
- 本城凡夫 (1987): 赤潮種と発生環境, ギムノディニウム, 赤潮の科学 6.3, 岡市友利編, 恒星社厚生閣, 東京, 228-237.
- 山口峰生・本城凡夫 (1989): 有害赤潮鞭毛藻 *Gymnodinium nagasakiense* の増殖におよぼす水温・塩分および光強度の影響, 日水誌, 55 (11), 2029-2036.
- Honjo T., S. Yamamoto, O. Nakamura and M. Yamaguchi (1990): Annual cycle of motile cells of *Gymnodinium nagasakiense* and ecological features during the period of red tide development, in "Toxic Marine Phytoplankton" (ed. by E. Granéli, B. Sundström, L. Edler and D.M. Anderson), Elsevier, New York, pp. 165-170.
- Takayama, H. and R. Adachi. (1984): *Gymnodinium nagasakiense* sp. nov., a red-tide forming dinophyte in the adjacent waters of Japan. Bull. Plankton Soc. Japan, 31, 7-14.