

海洋にできる暖水渦中のプランクトンの分布のパターンについて

北海道区水産研究所 吉森 明、 東大海洋研 岸 道朗

1. 初めに

一般に海洋における生物の分布のパターンは、大規模な海洋構造の物理過程によってつくられることが多い。特に世界各地でよく見られる海洋構造の暖水渦は、植物プランクトンが、渦の中心と縁辺部に多く集まるといった特徴的な分布パターンを持っている。この研究では、粘性による渦のエネルギーの散逸と2つの渦の融合により観測と似たパターンが得られることをモデルを使って調べている。

海洋における生物の分布は、その食物連鎖を考えれば、光合成を行う植物プランクトンが重要な役割を占めていることが分かる。植物プランクトンが光合成を行うのためには光が必要なので、植物プランクトンは海表面にしか生存できない。また物質の面からは二酸化炭素の他に、窒素 (N) リン (P)

ケイ素 (Si) などの元素が光合成には必要で、これらは栄養塩と呼ばれている。栄養塩は表層に少ないので植物プランクトンの分布を決める要因になっていることが多い。つまり、上向きの水の流れがあって、深層から栄養塩の供給があるところに植物プランクトンは集まる。

一方、海洋には暖水域や冷水域など様々な温度の海域が存在するが、ときたま冷水域に大量の暖かい水が流れ込むことがある。これが暖水塊と呼ばれる水塊で、暖水が広がろうとする圧力傾度とコリオリ力が釣り合う形で北半球では時計回り、南半球では反時計回りの渦が起こる。この様な暖水塊は日本の三陸沖から北海道沖に多くみられる他、北米東海岸、オーストラリアの東海岸でも観測されている。

図1は三陸沖で1982年に観測された暖水塊を南北に切った時の鉛直断面図

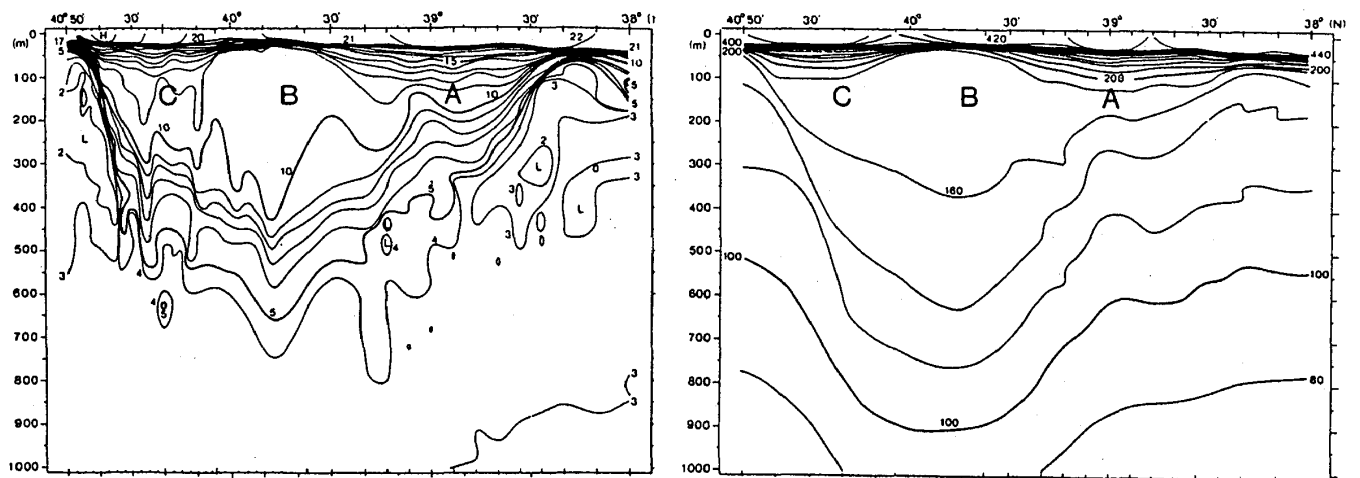


図1.暖水塊の鉛直断面図。左; 温度、右; 比容。(1992 Shin et al.)

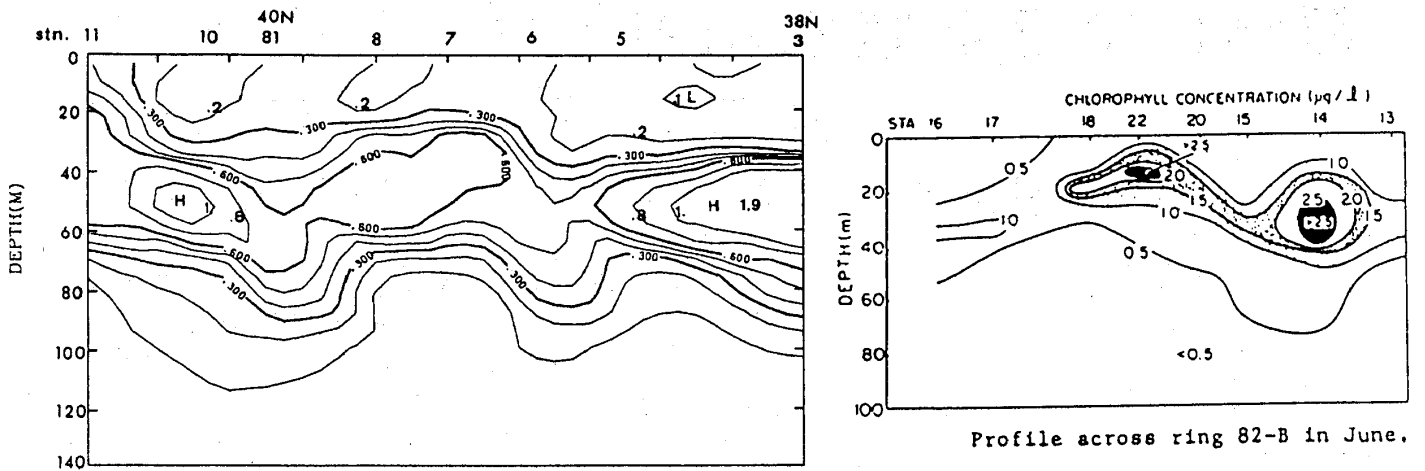


図2.暖水塊における植物プランクトンの鉛直分布。左；日本三陸沖、右；メキシコ湾流。

で、左は温度、右は比容（密度の逆数）の等値線が描かれている（1992 Shin et.al）。単位は温度が摂氏（°C）、比容は基準になる温度塩分における値をひいて、 cl/t で描かれている。比容の図を見ると等密度面が下に凸になっているのが分かるが、これは暖水塊の一般的な性質である。

暖水塊は、1つの海域に単独で存在するほか2個以上の暖水塊が接近して現れることもある。それらのいくつかは融合して1つの暖水塊になっていることが最近の研究ではっきりしてきた（1992 安田・奥田）。また、2つの暖水塊に大きさや流速の違いがあるとき、1つの暖水塊が他の暖水塊の周りを取り囲むように融合することが分かっている。

これらの暖水塊の力学的な構造の他に生物の分布についても幾つかの観測が成されている。図2は北米東海岸のメキシコ湾流の暖水塊（1985 Yentsch and Phinney）と日本の三陸沖の暖水塊（1989 李・杉本）における植物プランクトンの鉛直分布図である。メ

キシコ湾流の暖水塊は中心と渦の縁辺に明確な極大がみられる。日本の暖水塊は中心の極大は弱い、縁辺の極大は明確である。他の海域においてもこれらと同じ様な植物プランクトンのパターンが観測されている。

以下、これらの植物プランクトンの分布を、①渦の融合と②粘性によるエネルギーの散逸に注目してモデルをたてて、調べる。ただし、渦の融合を直接計算するのではなく、渦の融合を仮定して、1つの渦が他の渦を取り囲むとしたら、どれくらい栄養塩が上昇するかを計算し、それを初期値として粘性による鉛直方向の流れを含めた生態系モデルを走らせた。

2. モデル

力学のモデルとして、下層静止の2層モデルを使う。つまり、様々な密度の集まりである海水を2つの密度の水に近似して、しかも、重い方の水の中では流速がゼロになると仮定する。この様な場合には軽い水の流速場と層の

厚みだけで、完全に系が記述できる (1979 Pedlosky)。暖水塊では、中心付近で層が厚くなり、それによる圧力勾配に釣り合うコリオリ力を生み出す渦状の速度分布が生じる。この力学系では、水の体積と渦位 (渦度を層の厚みで割ったもの) が保存される事が知られている (1979 Pedlosky)。

ここでは簡単のため、暖水塊を一様な渦位の水が軸対象に分布していると仮定する。地衡流平衡を考えると、この場合には層の厚みは変形ベッセル関数を使って中心からの距離の関数としてかけ、半径と渦位の大きさだけで記述できる。従って、先の2つの保存則を使うと融合する前の渦の半径と渦位から、融合して出来た渦の半径と層の厚みの形が計算できる。

こうして計算した層の厚みから、融合前後の層の厚みの変化を調べその縮まりに比例して、栄養塩も上がってくると考えれば、融合による栄養塩の供給が計算できる。

これらの栄養塩の分布を初期値として生態系モデルを計算する。ここでは、窒素の循環に注目したFranksのモデル (1986 Franks et al.) を使うことにする。このモデルでは、海水に溶けている窒素 (N) と、植物プランクトン内の窒素量 (P) と動物プランクトン内の窒素量 (Z) の時間変化を次の式で表す。

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dt} &= \nabla^2 P + Fmm - Gr + mP \\ \frac{dZ}{dt} &= \nabla^2 Z + (1-\gamma)Gr - gZ \\ \frac{dN}{dt} &= \nabla^2 N - Fmm + \gamma Gr + mP + gZ\end{aligned}$$

ここで

$$Fmm = VP \frac{N}{K_s + N}$$

$$Gr = R_m Z \lambda P (1 - \exp(-\lambda P))$$

Fmm は植物プランクトンが海水に溶けている窒素を吸い上げる単位時間当りの量を表し、 Gr は植物プランクトンが動物プランクトンに捕食される量を表す。ただし、この内 γ の割合で未消化の部分が生じ、実際に動物プランクトンが取り込む量は $(1-\gamma)Gr$ になっている。その他の項は、減存量に比例した窒素の排出の効果を表している。

d/dt はラグランジュ微分で、渦の減衰による流れは軸対象を仮定して、

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial r} + w \frac{\partial}{\partial z} \\ u &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad w = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r}\end{aligned}$$

$$\phi = 1.4 \times 10^{-5} (1 - e^{-0.01z}) \frac{r^2}{2} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \text{ ms}^{-1}$$

この流れは渦の中心で上向きで、周辺部で下向きに流れるようになっている。

3. 結果

融合する前の渦としては半径が80km、最大流速160cm/sのものを考えた。今、1つの渦が他の渦を取り囲むように融合したとすると、渦位と体積の保存から、中心に位置する渦は半径が75kmに縮まり、融合渦の全体の半径は110kmと計算できる。層の厚みは、融合する前の最大値を1とすると、周りを取り囲むようにして融合した渦は0.67~0.96の厚みになった。

それらの結果から、融合渦は半径110kmで、その内75~110kmの所に層がおよそ0.8縮まった水が分布していると仮定する。そこで、融合する前の窒素の分布を

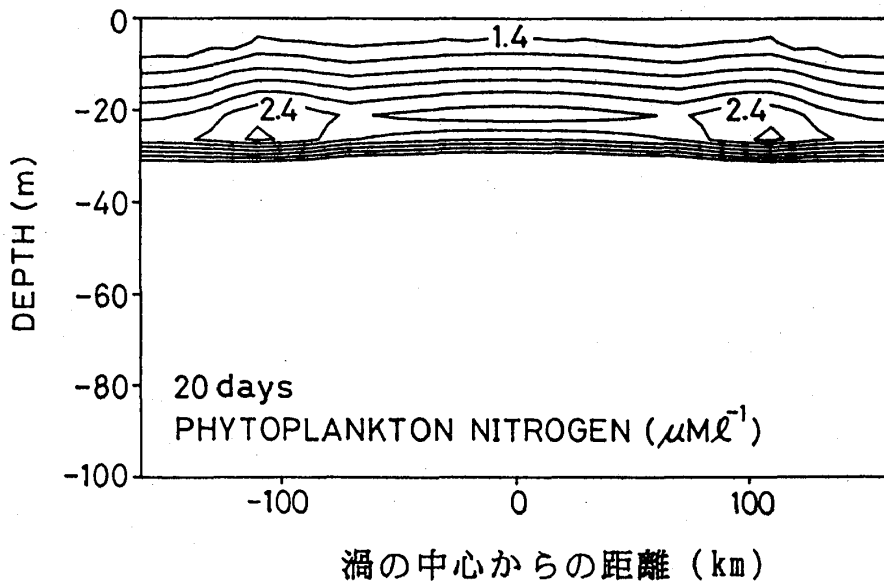


図3.モデルにより計算した植物プランクトン中の窒素量の鉛直分布図。

$$N(z) = N_0(z) \equiv 6.0(1 - e^{-\frac{z}{60m}}) \mu Ml^{-1}$$
と仮定し、層の薄くなった領域 ($75km < r < 110km$) だけ

$$N(z) = N_0(z/0.8)$$

として、Franksの生態系モデルを計算した。図3は20日経った後の植物プランクトン内の窒素の量で、植物プランクトンの量に比例すると考えられる。渦の減衰による上向きの流れによって、中心付近に極大がみられる。また、渦の融合によって、供給された栄養塩のために縁辺部により大きな極大がみられる。

4. 議論

海洋における生物分布における大規模な海洋構造の物理過程の役割を調べるために、暖水塊を例にとり、生態系モデルを計算した。20日計算したところ、植物プランクトンは渦の減衰により中心に極大が生じ、さらに融合により縁辺部に極大がみられた。但し、中

心の極大はこの後増大するのに対して、縁辺の極大は60日くらいで消滅する。

今後の課題としては、渦の融合をもう少し正確な力学モデルで計算し、同時に生態系モデルを走らせる必要があるだろう。さらに、実際に観測されている植物プランクトンの分布との関係もより詳しい検討をすべきだと思われる。

参考文献

- Franks P. J. S., J. S. Wroblenski and G.R. Flierl, (1986), J. Geophys. Res. 91, 7603.
- Pedlosky J., (1979), Geophysical Fluid Dynamics, Springer-Verlag.
- Shin, H.-R., Y. Nagata and J. Yoshida, (1992), Deep-Sea Research, 39, S115.
- 李健・杉本隆成 (1989)、月刊海洋、234、p729
- 安田一郎・奥田邦明 (1989)、月刊海洋、233、p639
- Yentsch C. S. and D. A. Phinney, (1985), J. Geophys. Res. 90, 3237.