乱流混合過程を含む生態系モデルによる富山湾クロロフィルaの鉛直分布の変動解明

大橋 充佳¹・松浦 知徳²・黒田 雄斗³・千葉 元⁴

¹富山大学 大学院理工学教育部 (〒930-8555 富山県富山市五福3190)

E-mail:yululu.t@gmail.com

²正会員 富山大学教授 大学院理工学研究部 (〒930-8555 富山県富山市五福3190)

E-mail:matsuura@sci.u-toyama.ac.jp

³富山大学 理学部 (〒930-8555 富山県富山市五福3190)

⁴富山高等専門学校教授 商船学科 (〒933-0293 富山県射水市海老江練合1-2)

富山湾沿岸は陸からの栄養塩に富んだ淡水と沖からの塩分の濃い対馬暖流水 (34.5 psu) が合流し、水産資源の豊富な良い海洋環境が形成されている。しかし、近年海洋環境保全の観点から、湾内の生態系の実態把握と将来予測が急務な課題となっている。そこで、富山湾沿岸域のクロロフィルaの月ごとの観測データを解析するとともに、1次元生態系モデル (NPZモデル) に鉛直拡散項を付加したモデリングを行い、パラメータ (渦拡散係数 K_v , 食植速度 R_m , マクロとミクロ動物プランクトン種) の依存性を定量的に調べた。その結果、富山湾沿岸域の植物プランクトンの鉛直分布には海洋混合過程が影響していることが示された。

Key Words : Ecosystem modelling, Chlorophyll a, Vertical mixing, Toyama bay

1. はじめに

富山湾の水塊構造の季節変動特性は、3月に水温が極小となり、鉛直混合が活発になることで水深50m付近まで一様となる。8月には水温が最大となり、強い成層状態となっている¹⁾。また、多量の河川水流入が成層状態をより強化している。この河川水による陸からの栄養塩供給が、湾内におけるクロロフィルaの変動に大きく影響している²⁾。クロロフィルaの分布に対する研究では衛星画像を使ったものが多く、水平分布の季節的な変動やブルームの存在などが見い出されている³⁾。しかし、実際に湾で観測したデータを使っているものはほとんどない。そこで、本研究では観測データの解析からクロロフィルaの鉛直分布の季節的な特徴を明らかにし、その結果を混合過程を導入した生態系モデル (NPZモデル)⁴⁾を使用し、クロロフィルaの鉛直分布の変動を混合過程との関係から明らかにすることを研究の目的とする。

2. 観測結果

富山湾プロジェクト (富山環境科学センター等) において観測された、CTD (アレック電子製 AAQ1180) データと同時観測しているクロロフィルaのデータを解析

した⁵⁾。解析範囲は東経137度00分から東経137度30分まで、北緯36度45分から37度00分までの海域に含まれる9地点の水深0mから約50mまでを対象とする (図-1)。解析期間は2004年から2008年までの5年間である。観測は、富山高等専門学校 (旧 富山商船高等専門学校) の「さざなみ」を使用して、st. 6, 3, 1, 2, 5, 4, 7, 9, 8の順番で反時計回りに一巡5時間程度で実施された。観測時期は毎月末に1回観測されているが、CTDデータの数が鉛直方向に毎回異なり、統一して解析できるように、0~50mまでを1mごとに平均して、1mに1個の値にしてデータ数を揃え解析した。

図-1 富山湾沿岸におけるクロロフィルaの観測点と5大河川

図-2 2004年から2008年の富山湾沿岸9地点における各月ごとのクロロフィルaの平均値の鉛直分布 (a) と各月の分布を季節的に連ねたクロロフィルa分布図 (b)

2004年から2008年の5年間のクロロフィルaを月ごとに平均したものを図-2aに示す。クロロフィルa濃度は海表面に高い月、海洋内部(数10m深)に高い月、全体に濃度の低い月の3種類に大きく分けることができる。海表面に高いのは6月、7月、9月であり、海洋内部に高いのは2月、3月、4月である。また、全体に低いのは10月、11月、12月、1月である。5月と8月は、海表面に対して全体に濃度の低い月と比べると値は高いが、海表面で高い月と比べると低くなっている。海表面において最もクロロフィルa濃度が高いのは6月であり、海洋内部において最も高いのは3月である。また、内部では水深10m付近で最大濃度となる。図-2bは年間での海洋クロロフィルaの広がりをしており、この図からクロロフィルa濃度の区分がよりはっきりとわかる。夏季は海表面に非常に多く存在しているが、成層が発達している月であるため、他の月よりも水深10m前後でクロロフィルaの濃度が急激に低くなっている。また、春季は水深約40mと深いところまで比較的安定してクロロフィルaが広がっている。このクロロフィルaの季節変化は、海洋の混合過程の季節変化と関連していることが示唆される。

富山県には5つの一級河川があり、流域で年間降水量も多いことから多量の河川水が富山湾に流入している。特に神通川は、流域が多雨地域であるため、県内随一の流量を誇っている。この5つの河川によって富山湾沿岸の表層には、低塩分水塊が存在することが分かっている。流動場との関連で低塩分域は湾東部に広範囲に分布する傾向がある。また、河川流量と低塩分域の面積との間には正の相関がみられることから、低塩分域の面積の大きさには河川流量の大小が関係していることが示唆される。

また、河川水による栄養塩の供給は河川水の影響が強い海域で顕著で、それに伴いクロロフィルaの増加も分かっている。このことは、沿岸域の海面付近において河川水の流入はクロロフィルaの分布に非常に関係がある。

ここで、富山湾への河川流入量が多い4月と7月の二つの月に着目する(図-3参照)。4月においては、富山湾全体の水温がまだ低く、表層付近のみが気象による加熱で温まり始めている時期である。また、密度が鉛直方向にほぼ一定の時期であり、成層が不安定で混合が起きやすい。そこに雪解けの大量の河川水が流入すると、4月の低温低密度である河川水は、鉛直混合が起きている中に流入し、沿岸付近で混合してしまうので沖合まで広がらないと考えられる。7月において4月と比べると、富山湾全体が高温であり、海表面付近に密度躍層が発達しており、成層が安定している時期である。図-2bにおいてクロロフィルaが海表面付近のみで深いところにはほとんど存在していないのは、夏季である湾の水塊が成層状態となっていることと流入する梅雨による淡水が成層をより強めていることから、供給された栄養塩が下層と混ざることなく、表層にとどまるためと考えられる。

図-3 富山の主な4河川の月ごとの流量平均値(2004~2008年)

3. モデリングの概要

(1) 鉛直混合過程の入ったNPZ モデル

混合の影響のみをよりはっきり見るために、使用するモデルは生態系モデルの中では最も単純な、栄養塩 N、植物プランクトン P、動物プランクトン Z の 3 つの要素のみを考慮した NPZ モデル^{4,5)}を採用した。NPZ モデルで使用する基本式は以下の 3 つである。混合過程は (1) と (2) 式の右辺最後の項でパラメータ化している。

植物プランクトン P (μmolNL^{-1})

$$\frac{dP}{dt} = \frac{V_m NP}{k_s + N} e^{k_{ext} z} - R_m Z (1 - e^{-\lambda P}) - mP + K_v \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (1)$$

動物プランクトン Z (μmolNL^{-1})

$$\frac{dZ}{dt} = (1 - \gamma) R_m Z (1 - e^{-\lambda P}) - gZ + K_v \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (2)$$

栄養塩 N (μmolNL^{-1})

$$N + P + Z = N_T \quad (3)$$

ここで、 z : 深さ (m), V_m : P の栄養塩摂取速度 (day^{-1}), k_s : 栄養塩摂取半飽和定数 (μmolNL^{-1}), $1/k_{ext}$: 放射照度限界水深 (m), R_m : 最大植食速度 (day^{-1}), λ : イブレイフ定数 (μmolNL^{-1}), γ : 不同化率, m : P の死亡率 (day^{-1}), g : Z の死亡率 (day^{-1}), K_v : 鉛直渦拡散係数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), N_T : 栄養塩総量 (μmolNL^{-1}) である。

モデルに使用したパラメータの条件は、Edwards *et al.* (2000)⁹⁾ に準じて動物プランクトンの大きさを大型（マクロ）と小型（ミクロ）の二種類に分け、以下の表-1 のように設定した。

(2) 数値解法とパラメータ

モデル方程式の差分にはクランクニコルソン法を使用した。計算に使用した鉛直拡散係数 K_v と植食速度の値 R_m を以下の表-2 に示す。

表-1 マクロとミクロ動物プランクトンの代表的パラメータ

	大型 (Macro)	小型 (Micro)
V_m	2.0	2.0 (day^{-1})
k_s	0.1	0.1 (μmolNL^{-1})
k_{ext}	0.06	0.06 (m^{-1})
R_m	0.5	4.0 (day^{-1})
λ	0.2	0.3 (μmolNL^{-1}) ⁻¹
γ	0.3	0.7
m	0.1	0.1 (day^{-1})
g	0.2	0.2 (day^{-1})
N_T	10	10 (μmolNL^{-1})

表-2 数値実験で実施したパラメータ

鉛直拡散係数 K_v ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	植食速度 $R_m(\text{day}^{-1})$	
	大型(マクロ)	小型(ミクロ)
0	0.5	3.5
10^{-7}	0.7	4.0
10^{-6}	1.0	4.5
10^{-5}	1.1	5.0
10^{-4}	1.2	5.5
10^{-3}	1.3	6.0
10^{-2}	1.5	
	1.8	
	2.0	
	25	
	30	

本研究では、計算範囲は水深 $H=65 \text{ m}$ とし、鉛直の解像度 $dz=1 \text{ m}$ とした。また、数値計算は陰解法の差分法を用い時間ステップは 43.2 s としている。境界条件は海面と底 ($z=0, -H$) で $dP/dz=0, dZ/dz=0$ のフラックスなしのノイマン条件を課した。

4. 鉛直混合の影響

富山湾沿岸におけるクロロフィル *a* の鉛直分布の季節変化の特徴を鉛直乱流混合過程が第一義的に影響していると仮定し、鉛直渦拡散項を入れた NPZ モデル (Edwards *et al.*, 2000)⁹⁾ を数値的に調べた結果をここで示す。パラメータとしてマクロ動物プランクトン ($R_m=0.5, \lambda=0.3, \gamma=0.7$) とミクロ動物プランクトン ($R_m=4.0, \lambda=0.2, \gamma=0.3$) に対し、渦拡散係数 $K_v (\text{m}^2 \text{s}^{-1})$ を $0 \leq K_v \leq 10^2$ の範囲での比較結果を議論する。マクロの上層 ($0 \sim 25 \text{ m}$) では植物プランクトンの活動が活発なため、栄養塩が十分消費され、P と Z の間で安定な状態に落ち着く。一方、ミクロの上層では、栄養塩がマクロの時ほど消費されず富栄養の状態が保たれ不安定となり、N, P, Z の間で振動する。

(1) マクロプランクトンの場合

$K_v=0$ の場合、マクロプランクトン分布の鉛直変動は表層から 25 m までは P と Z が固定点に収束し、 $25 \text{ m} \sim 50 \text{ m}$ で振動 (リミットサイクル) するが、深くなるにつれその周期が長くなる (図-4a)。つまり、浅い水深において栄養塩 N が消費され、P と Z の間で平衡が保たれている。一方、中間水深 (30 m) あたりでは光が弱くなり、P が光合成で栄養塩を消費する量が減る。しかし、N と被食者 P、捕食者 Z のやり取りは不安定であり、その間で振動が起きている。

(a) 拡散なし, $K_v=0(\text{m}^2\text{s}^{-1})$

(b) 拡散あり, $K_v=10^5(\text{m}^2\text{s}^{-1})$

図-4 マクロ動物プランクトン, 植食速度 $R_m=0.5(\text{day}^{-1})$ で拡散なし(a)とあり(b)の場合のP-Zダイアグラム

図-6 マクロ動物プランクトンで植食速度 $R_m=0.5(\text{day}^{-1})$ における拡散係数の違いに対する植物プランクトンの鉛直分布. $\blacktriangleright$ は極大値の深さの位置を示す.

鉛直拡散係数の影響は, 一般的な拡散現象でみられるように, 振動現象を減衰させるように作用する (図-4b と図-5). また, P の鉛直分布における最大値は, 図-6 に示されるように, $10^5(\text{m}^2\text{s}^{-1}) \leq K_v \leq 10^3(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ の範囲で水深 25 m から 15 m の間にあり, K_v の値が大きくなるにつれて上層に移行していく. この P の最大値が現れ

図-5 マクロ動物プランクトンで植食速度 $R_m=0.5(\text{day}^{-1})$, $K_v=10^5(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ の各深さごとの植物プランクトン (P: 赤), 動物プランクトン (Z: 緑), 栄養塩 (N: 青) の時間変化. 縦軸は N, P, Z の量を N_t で無次元化している.

る水深は丁度 N の濃度が急激に上昇し, P が減衰する位置に対応している. また, K_v が $10^4(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ と $10^3(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ になると 35 m 以深でも P と Z の存在が顕著であり, これは下層への強い拡散の影響が現れていると考えられる.

(2) ミクロプランクトンの場合

$K_v=0$ の場合, ミクロプランクトンではマクロプランクトンと異なり, 表層ほど N, P, Z 間での振動が大きく, 周期が短くなる (図-7a). 拡散が入っても図-7 と図-8 に示されるように, 特に上層の方で振幅の大きな変動がみられる. ところで, ミクロの振動の仕方は規則的だがマクロの P-Z アトラクター (図-4) と異なり, その変動はパルス的である (図-7, 図-8 参照). さらに, ミクロでは拡散が入ると下層の周期の長い振動は減衰するが, 拡散係数が大きくなるにつれ上層の変動が下層まで一様に現れる (図省略).

5. 富山湾の観測のモデル結果からの検討

第2章の観測データ解析の結果より, 富山湾のクロロフィル a の分布には, 2-4月の春季と6-7月の夏季で違いがあり, 春季には水深 10 m 付近の内部で最大濃度となることを示した. 富山湾は春季, 特に3月に混合が最も活発になり夏季の7, 8月に成層が強くなる¹⁾. 混合の活

(a) 拡散なし, $K_v=0(\text{m}^2\text{s}^{-1})$

(b) 拡散あり, $K_v=10^5(\text{m}^2\text{s}^{-1})$

図-7 ミクロ動物プランクトン, 植食速度 $R_m=4.0(\text{day}^{-1})$ で拡散なし(a)とあり(b) $K_v=10^5(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ の場合のP-Zダイアグラム

発な春季は深くまで大きなクロロフィルaの鉛直拡散を示している。そこで、富山湾の3-4月(図-2a)を想定して、マクロプランクトンの $R_m=0.7$ で K_v に対し上層 10 m まで大きな値 $10^4(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ とし、それ以深を $10^{-5}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ と一般的に設定される値として計算した結果を図-9 に示す。モデリングのPの鉛直分布は4月の観測されたクロロフィルaの鉛直分布を再現し、10 m 付近に極大値を持ち、さらに 30 m 付近に再度極大値を持つ結果を示している。したがって、本研究のモデリングは、非常に単純化したものであるが、観測結果においてクロロフィルaの鉛直分布に海洋の鉛直混合(乱流混合)過程が本質的に重要な役割を果たしていることを示している。

一般的に海洋の鉛直拡散係数 $K_v=10^{-5}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ と推定されており、これを基準とすると第2章のモデルの結果から鉛直拡散係数が $K_v=10^{-4}$ や $10^{-3}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ と大きな係数をとったとき、マクロでは鉛直分布は海洋内部において最大となることがわかった(図-6)。逆に $K_v=10^{-5}$ や $10^{-6}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ と小さいときはほぼ一定となっており、ミクロでは4パターンの鉛直拡散係数全てで表層が最大となっていた(図省略)。このことから、混合が最も発達

図-8 ミクロ動物プランクトンで植食速度 $R_m=4.0(\text{day}^{-1})$ および $K_v=10^5(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ の各深さごとの植物プランクトン(P: 赤)、動物プランクトン(Z: 緑)、栄養塩(N: 青)の時間変化。縦軸はN, P, Zの量を N_t で無次元化している。

する春季に海洋内部で最大となった鉛直分布は、大きな鉛直拡散で内部が最大となったモデルの結果と対応しており、鉛直拡散係数が重要な要因であると考えられる。

ところで、マクロで植食速度 R_m が大きくなると大きな鉛直拡散係数でも表層が最大となった結果から、富山湾の春季に海洋内部で最大となるためには、動物プランクトンが植物プランクトンを消費する速さが緩やか、つまり R_m の値が小さいことが条件であると考えられる。

富山湾は河川水の流入が多く、表層では栄養塩が豊富であることが明らかになっている。そのため春季であっ

図-9 マクロ動物プランクトンで植食速度 $R_m=0.7(\text{day}^{-1})$ で K_v に対し上層 10 m まで $10^4(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ 、それ以深を $10^{-5}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ に対するN,P,Zの鉛直分布。

でも3~4月は雪解け水による河川水の増加にともない植物プランクトンも表層が最大となるが、モデル結果との対応から春季の富山湾のクロロフィル *a* 鉛直分布が海洋内部において最大となるのは、活発な混合が影響しているためと判断される。また、夏季においては豊富な日射量と栄養塩があり、植物プランクトンは十分に増えることができ、春季と比べると動物プランクトンの活動も活発である。そのことから推察すると、モデル結果では植食速度 R_m 値が大きい場合は4パターンどの鉛直拡散係数でも表層が最大となっており（図省略）、動物プランクトンが活発な場合は鉛直渦拡散係数ではなく植食速度にも依存している可能性も考えられる。

6. まとめ

富山湾のクロロフィル *a* の分布には2~4月の春季と6~7月の夏季で違いがあることがわかった（図-2）。春季は水深10m付近において最大となり、夏季は海表面において最大となることが観測データの解析より示された。そこで、春季の3月は富山湾では最も混合が活発になる時期であることから、混合過程が要因の一つであると予想し、モデルを使って影響を調べるために生態系モデルに鉛直渦拡散係数を導入し、モデル実験を行った。

鉛直渦拡散係数の大きさの影響を調べたところ、適切なパラメータ設定に対し、モデル結果として植物プランクトンの鉛直分布が適切に再現された（図-9）。また、マクロにおける拡散が大きい $K_v = 10^{-4} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ の場合に海洋内部において、鉛直分布は表層ではなく内部で最大となった。そして、ミクロとマクロに関わらず、深部まで表層と近い変動を示していることから、鉛直渦拡散係数が大きいほど深部へと影響することがわかった。

拡散が小さい場合、特にミクロの場合に海面で最大となったが時間変化の鉛直断面図から、植物プランクトンが安定して増加することができるのは、植物プランクトン量の急激な変化や減衰振動を示したおおよそ水深約

35mまでであると判断された。

富山湾沿岸における鉛直渦拡散係数は、混合によって春季は拡散係数が大きくなり、夏季は成層が強化され、混合が抑制されることで拡散係数は小さくなっているの、モデルの結果と対応する傾向を示している。以上より、富山湾沿岸におけるクロロフィル *a* の鉛直分布には混合が大きく影響していると考えられる。

謝辞：本研究は富山大学の高低差4000m富山環境プロジェクトとの一部として実施された。本研究を行う上で富山湾沿岸の観測データを提供していただいた公益財団法人環日本海環境協力センターに対し謝意を表す。

参考文献

- 1) 渡邊良美, 松浦知徳, 千葉元: 富山湾沿岸における夏季海洋鉛直構造の変動特性, *海の研究*, Vol. 22, No.4, pp.97-117, 2013.
- 2) 長田宏, 奈倉昇: 富山湾における河川水の流入とクロロフィル *a* 濃度の季節変動, *日本海区水産研究所研究報告*, 43, pp.55-68, 1993.
- 3) 大西美奈, 石坂丞二, 笠原一世, 長田宏, 白山肇, 内山勇, 寺内元基: 海色衛星によって観測された富山湾における1998年と1999年のクロロフィル *a* 濃度分布, *海の研究*, Vol. 16, pp.7-22, 2007.
- 4) Franks, P. NPZ Models of Plankton Dynamics, Their Construction, Coupling to Physics, and Application, *J. Oceanogr.*, Vol. 58, pp. 379-387, 2002
- 5) Edwards, C. A., Powell, T. A. and Batchelder, H. P.: The stability of an NPZ model subject to realistic levels of vertical mixing, *J. Marine Res.*, Vol. 58, pp.37-60, 2000.
- 6) 千葉元・山下恵・小杉廣彦・内山勇: 富山湾の海水温度・塩分の季節特性—第2報—実習船「さざなみ」による海洋環境計測—: 富山商船高等専門学校研修集録, 第39号, 2006.

(2016.3.16 受付)

A STUDY ON VERTICAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL A IN TOYAMA BAY FROM AN ECOSYSTEM MODEL INCLUDING DIFFUSION PROCESS

Mitsuyosi OOHASI, Tomonori MATSUURA, Yuto KURODA and Hajime CHIBA

In coastal area of Toyama bay, the fresh water with rich nutrient from rivers joins the Tsushima warm water entering from the open sea with high salinity. Thus, the fine oceanic environment is formed and aquatic resources are rich. Recently, however, it becomes important to understand the distributions and variations of ecosystem because of a change for the worse of its environment. Accordingly, we analyzed the observational data of chlorophyll *a* in Toyama bay coastal-area and investigated its vertical distribution and its changing using one-dimensional ecosystem model (NPZ model). As a result, it was found that the turbulent mixing affected the vertical distribution of phytoplankton in Toyama bay significantly.