

海洋深層水による海域肥沃化効果の検証
The effect of ocean fertilization by deep sea water

学籍番号 096648 塩莉 恵

指導教員 多部田 茂 准教授

(平成 23 年 3 月 24 日修了予定)

Keywords: 海洋深層水, 肥沃化, 生態系モデル, 伊豆大島

Keywords: Deep sea water, Ocean fertilization, Ecosystem model, Izu Oshima Island

1. 序論

世界人口の増加に伴う食糧問題の深刻化が懸念されており、その解決策として海洋深層水を利用した海域肥沃化による食糧増産効果について研究が進められている。

海洋深層水には、表層水に比べて窒素やリン等の栄養塩が豊富に含まれており、これを汲み上げて表層に放水することにより、その海域の栄養塩濃度が高まり、植物プランクトンの増殖が促進され、食物連鎖に従い、人間が食糧とするような水産資源の増加につながると考えられている。

先行研究には、一次生産のみに注目し、実験、もしくはシミュレーションのいずれかにより肥沃化の効果を検証したものが存在するが[1, 2]、本研究では、動物プランクトンまで考慮した生態系モデルを用い、モデリングとシミュレーション、実験により、海域肥沃化の効果を検討する上で重要となる要素や生態系プロセス、パラメータを感度解析等によって抽出、それらの要素やパラメータの決定の仕方などのポイントをまとめ、肥沃化効果の評価手法を構築する。

2. 生態系モデル

本研究で使用するモデルは、2種の植物プランクトン(PS, PL)と3種の動物プランクトン(ZS, ZL, ZP)、有機/無機の窒素およびケイ素(PON, DON, Opal, NH₄, NO₃, Si(OH)₄)をコンパートメントとする NEMURO[3]をベースとし、セルクオタ(植物プランクトンの細胞内栄養塩保持量)を考慮した生態系モデル[4]を参考に、NEMURO[3]に3種のセルクオタ(SQNS, SQLN, SQSiL)を加えた合計14のコンパートメントからなるモデルを作成した。このモデルの構成図を Fig. 1, Fig. 2 に示す。

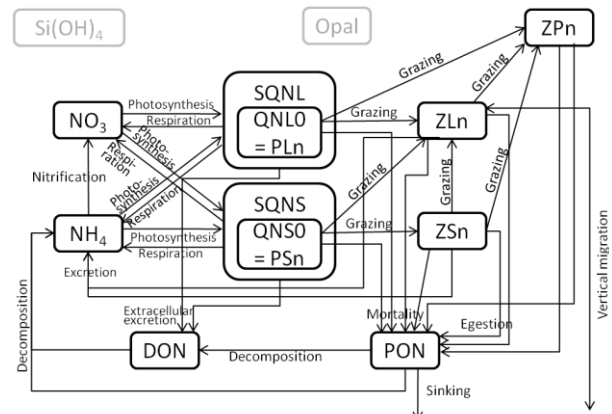


Fig. 1 Schematic view of the ecosystem model. (For Nitrogen flows.)

3. 実験

3.1 実験の概要

2010年10月14日から11月12日の期間に、東京都大島町泉津において実施した実験の概要を説明する。まず、大小2つのタンクを用意し、それぞれにポンプで汲み上げた表層水を入れる。実験開始日の翌日14:30、大きい方のタンク(以下タンク大)には、表層水と深層水が約8:2の割合になるように深層水を加え、もう一方のタンク(以下タンク小)には何も加えず、実験期間の最後まで放置する。両タンクには計測機器を設置し、実験期間中の水温、日照量、クロロフィルa濃度を計測する。また、採水調査によってプランクトン濃度と種の組成、栄養塩濃度、有機物濃度を測定する。

3.2 実験データ

実験で得られたデータは、生態系モデルでの計算条件や、計算結果の比較に利用される。本研究

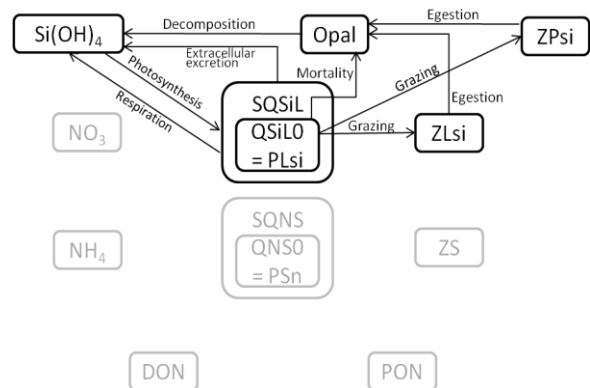


Fig. 2 Schematic view of the ecosystem model. (For Silicon flows.)

で使用した生態系モデルではプランクトン量を窒素量として扱っているため、実験で得たクロロフィル a 濃度は、植物プランクトン中の炭素量とクロロフィル a 濃度の比及び炭素量と窒素量の比を用いて窒素濃度に換算し、プランクトン濃度は文献調査によって 1 L あたりの個体数から窒素濃度に換算した。この結果を Fig. 3 に示す。

4. 生態系モデルによる実験の再現

4.1 計算条件

初期値に実験開始時のプランクトン濃度、栄養塩濃度、有機物濃度を設定し、水温、日照量の時系列データを用いてシミュレーションを行う。セルクオタに関してはデータがなく、初期値を $0.0 \mu\text{mol/L}$ とした。また、計算に用いるパラメータは、採水調査で得られたプランクトンの種組成に基づき、文献調査によって推定した。なお、今回の実験タンク中には、秋には鉛直移動によって表層から姿を消す ZL が含まれておらず、また ZP についても、タンクに入る海水の量から推測するに、今回の実験タンク内にはほとんど存在しなかったと考えられる。よって、本計算では PS, PL, ZS の 3 種の生物のみでシミュレーションを行う。

4.2 計算結果

4.1 の条件で計算したタンク大における結果を Fig. 4 に示す。これはプランクトン濃度の時系列での変化を実験データと比較したものである。植物プランクトン濃度の計算値 (PS+PL) とクロロフィル計による観測値を比べると、全体的に計算値の方がその濃度が高いことが分かる。特に 10 月 20 日ごろからのクロロフィル計による観測値の減少が、計算値では再現できておらず、実験の再現にはこの期間の調整が重要と思われる。このとき、 NH_4 濃度と NO_3 濃度の計算値が観測値に比べて高く、このため、有機窒素濃度の計算値は観測値に比べて低い結果となっている。

4.3 パラメータの感度解析

実験データを再現できるパラメータセットを探すため、各パラメータの感度解析を行い、その結果を基にパラメータを調整する。

各パラメータの変動によるプランクトン濃度への基本的な影響は、 0°C における光合成速度またはその温度係数を大きくすると増加、 0°C における枯死速度またはその温度係数を大きくすると減少する。特に温度係数を大きくした場合の増減が大きく、水温の差によるプランクトン濃度の差も拡大する。また、栄養塩、有機物濃度の調整については、 0°C における有機物分解速度またはその温度係数を大きくすると栄養塩濃度が増加、有機物濃度が減少し、これについては温度係数より 0°C における有機物分解速度を速める方がその効果が大きい。

4.4 パラメータの調整による実験の再現

感度解析の結果を基に各パラメータを繰り返し変化させ、実験を最もよく再現できた結果を Fig. 5 に示す。この計算結果では、PS+PL の濃度がクロロフィル計による観測データをよく再現できており、採水データによる PS と PL の存在比の変化も、完全ではないが表現できている。栄養塩濃度、有機物濃度についても概ね採水データを再現することができた。

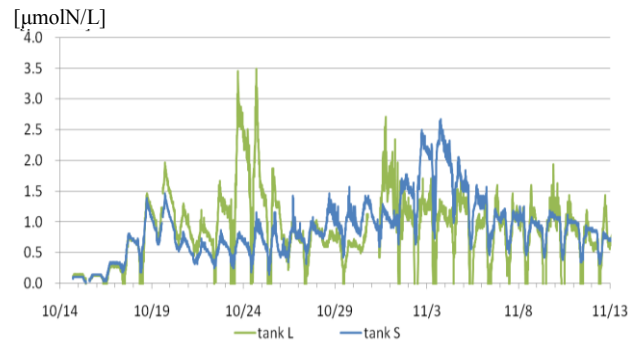


Fig. 3 The changes of the quantities of the planktons in the both tanks. (by the experiment.)

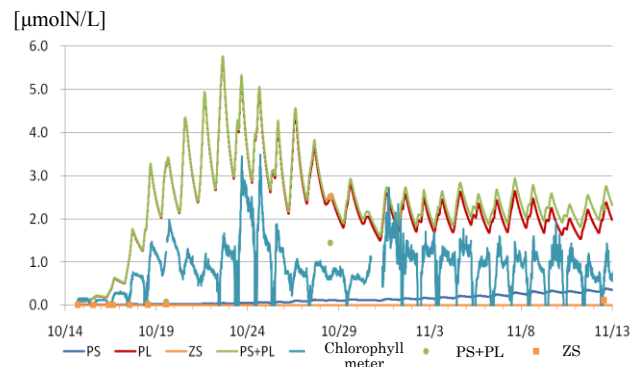


Fig. 4 The changes of the quantities of the planktons in tank L before the parameter fitting.

(The lines of PS, PL, ZS and PS+PL are calculated.
The others are the data by the experiment.)

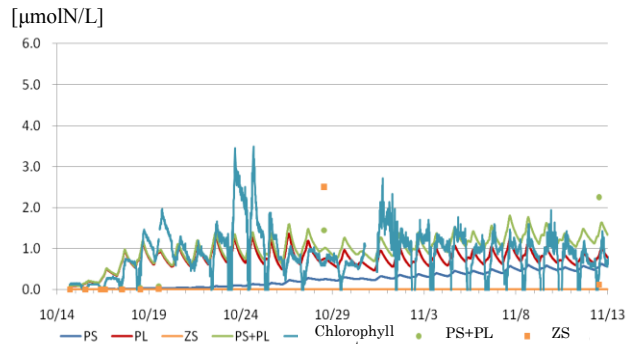


Fig. 5 The changes of the quantities of the planktons in tank L after the parameter fitting.

(The lines of PS, PL, ZS and PS+PL are calculated.
The others are the data by the experiment.)

ただし、これらのパラメータのひとつひとつが、プランクトン濃度、栄養塩濃度、有機物濃度のいずれにも影響を及ぼすため、容易に調整できるものではない。本モデル内にはパラメータが多く、求められたパラメータが最適とは断言できない。また、今回調整のために変化させたもの以外に調整すべきパラメータが存在する可能性もある。

4.5 生態系モデルによる実験結果の検証

今回の実験では、タンク大とタンク小の間に深層水の影響と思われる差異が生じなかった。この原因について生態系モデルを用いて検証した結果、実験に用いた表層水の栄養塩濃度が高いことが原因のひとつであることが分かった。しかし植物プランクトンによる栄養塩摂取速度は最大にはなっておらず、栄養塩濃度が光合成にとって制限要因であることが分かった。これは、タンク内の NO_3 濃度と NH_4 濃度の比によってそれぞれの摂取速度が異なるため、深層水を入れることによって栄養塩濃度の合計が上昇しても、必ずしも無機窒素の摂取速度が速くなるとは限らないためであることが分かった。

5. 生態系モデルによる肥沃化効果の検証

5.1 計算条件

前章において求められたパラメータを用い、生態系モデルで海洋深層水による肥沃化効果を検証する。水温は JODC[5] による実測値、日照量は \cos 関数で与えた。深層水を加えない場合の各プランクトン濃度の 6 年間の変化を Fig. 6 に示す。他の条件は変更せず、各コンパートメントに深層水の放水による影響を式(1)によって与える。

$$C_{i+1} = (C_i V + C_d V_d dt) / (V + V_d dt) \quad (1)$$

ここで、 C_{i+1} : 次タイムステップの濃度($\mu\text{mol/L}$)、 C_i : 現在の濃度($\mu\text{mol/L}$)、 C_d : 深層水中の濃度、 V : 計算ボックスの海水体積(L)、 V_d : 加える深層水の体積(L/dt)、 dt : タイムステップである。実際の計算では、 V を 1.0 とし、 V_d を V に対する比で表現した。

5.2 結果および考察

深層水を 1 日に 1 回、毎日 0:00 に $V_d = 0.4$ で加える場合の計算結果を Fig. 7 に、 $V_d = 0.04$ で加える場合の計算結果を Fig. 8 に示す。Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、Fig. 7 の Total planktons 濃度は夏季には Fig. 6 のそれより増加しているが、冬季には減少しており、年隔差が拡大している。年隔差が拡大するだけでは、魚類の餌量が季節によって大きく変動することになり、食糧の安定供給の面では望ましくない。一方、Fig. 8 を Fig. 6 と比較すると、1 年を通してプランクトン濃度が増加しており、肥沃化効果が認められる。同様の計算を、深層水を加える時刻と V_d の値を変化させて行い、これら 2 つのパラメータと Total planktons 濃度の年平均値との関係を示したものを Fig. 9 に示す。この図から、今回試した組み合わせの中では、毎日 6:00 に 4.0 % の割合で深層水を加える場合に、肥沃化効果が最大となることが分かった。

また、深層水を加える時間間隔を 1 日 2 回にした場合や、連続的に加える場合についても検討したが、これらは深層水を 1 日に 1 回加える場合よりも肥沃化効果が低いという結果になった。

これらの結果から、深層水を加える量が多すぎる場合、またはその頻度が高すぎる場合には、肥沃化効果が現れにくいことが分かった。その理由としては、深層水を対象海域に加えずすぎると、栄養塩濃度の上昇による植物プランクトンの光合成活発化の効果よりも、深層水による希釈の方が優越してしまうためと考えられる。

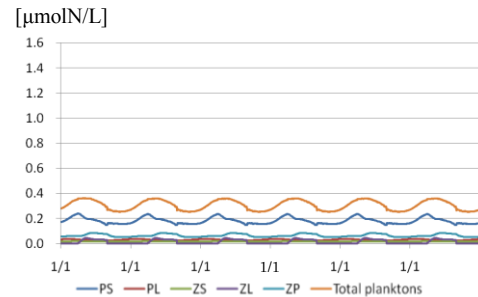


Fig. 6 The changes of the quantities of the planktons without deep sea water.

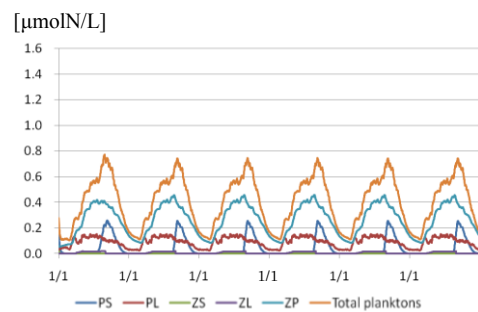


Fig. 7 The changes of the quantities of the planktons with 40.0 % deep sea water at 0:00.

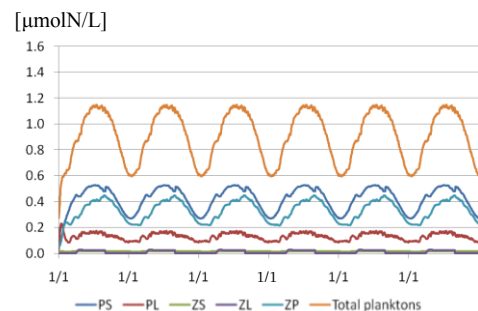


Fig. 8 The changes of the quantities of the planktons with 4.0 % deep sea water at 0:00.

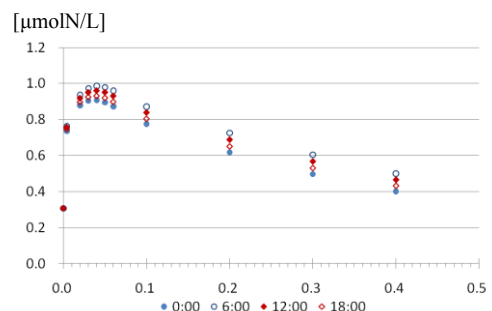


Fig. 9 The relations between V_d and the annual averages of total planktons.

6. 物理-生態系モデルによる肥沃化効果の検証

6.1 計算条件

前章で使用した生態系モデルに物理モデルを結合し、これを用いて肥沃化効果の検証を行う。結合する物理モデルは MEC Ocean Model[6]を使用した。2009年8月から9月の気象条件[7]を使用し、水温、塩分、栄養塩、有機物の濃度の境界条件には JODC[5]のデータより深度ごとに設定し、プランクトン濃度の境界条件は実験データを参考に設定し、深度 100 m までを一定値に、それ以深は $0.0 \mu\text{molN/L}$ に設定した。初期条件も境界条件と同じものを設定した。深層水の添加については式(1)を用いて設定し、 $dt = 2.0[\text{sec.}]$ とした。

6.2 結果と考察

2ヶ月計算後の ZP 濃度の空間分布について、深層水を加えない場合を Fig. 10 に、深層水を $10 \text{ m}^3/\text{h}$ の割合で連続的に加えた場合を Fig. 11 に示す。このとき、深層水を加える位置を Fig. 10 中の白点で示す(以下点 1)。また、点 1 におけるプランクトン濃度の時系列変化について、深層水を加えない場合を Fig. 12 に、加える場合を Fig. 13 に示す。なお、Fig. 10, Fig. 11 において、南西部に位置する扇形状の部分は大島を示している。

これらの結果から、深層水を加えない場合にはほぼ一様なプランクトン濃度分布であるのに対し、深層水を加える場合には、深層水を加えた格子においてその周囲よりプランクトン濃度が高くなっており、肥沃化の効果を確認できる。しかし、深層水を加えた格子のみで濃度が高く、その隣の格子では周囲と変わらないという結果になっており、移流・拡散の様子が上手く計算できていない可能性がある。

7. 結論

実験と文献調査、種の構成を考慮した生態系モデルによるシミュレーションにより、対象海域に存在するプランクトンのタンク内での増減を再現できた。また、生態系モデルによる実験結果の検証によって、これらプランクトンの増殖に関するポイントを明らかにし、実験で肥沃化効果が現れなかった原因を解明した。

生態系モデルによる肥沃化効果の検証の結果、深層水を加える量が多すぎる場合、またはその頻度が高すぎる場合には、栄養塩濃度の上昇による植物プランクトンの光合成活発化の効果よりも、深層水による希釈の方が優越してしまうため、肥沃化効果が現れにくいことが分かった。物理-生態系モデルによる計算結果に対する検討は不十分であるため、今後の課題となるが、ここまでに示した手法により、肥沃化効果の検証が可能であることを示した。

参考文献

- [1] 大内一之, 第 30 回海洋工学パネル論文集, 2004
- [2] Kentaro Mizumukai, Toru Sato, Shigeru Tabeta et. al., Ecological Modelling 214(2008)251-270.
- [3] Michio J. Kishi, Makoto Kashiwai, Daniel M. Ware et al. Ecological Modelling 202(2007)12-25.
- [4] 中田喜三郎, Journal of Adv. Mar. Tech. Conf., 8(1993)99-138.
- [5] http://www.jodc.go.jp/index_j.html
- [6] <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/>
- [7] <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

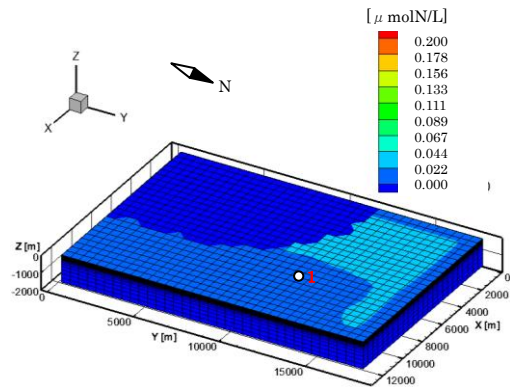


Fig. 10 The distribution of ZP concentrations after 2-month-calculation without deep sea water.

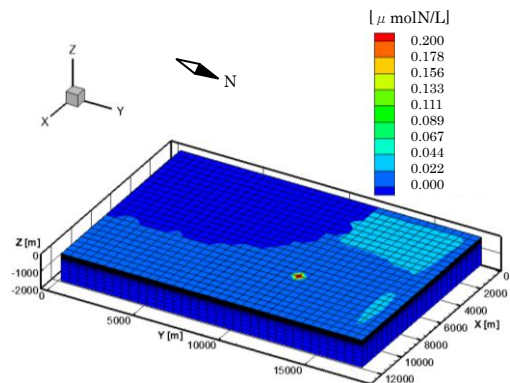


Fig. 11 The distribution of ZP concentrations after 2-month-calculation with deep sea water ($10 \text{ m}^3/\text{h}$).

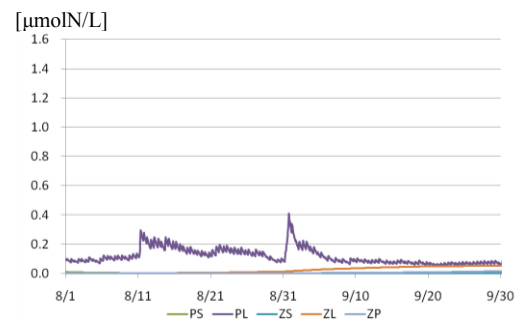


Fig. 12 The changes of the quantities of the planktons without deep sea water.

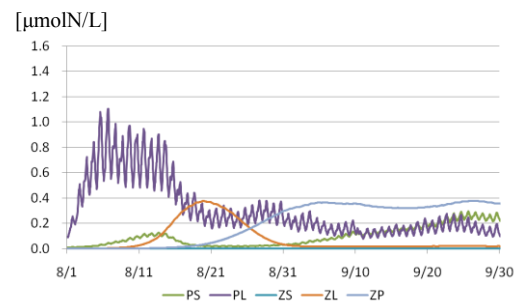


Fig. 13 The changes of the quantities of the planktons with deep sea water ($10 \text{ m}^3/\text{h}$).