

超大型浮体構造物の付着生物による溶存酸素濃度の変化に関する研究

環境システムコース・環境海洋工学分野

96603 秋山 圭介

1. 緒言

近年、我が国沿岸都市部での経済活動の発展・人口集中により、沿岸域開発による利用可能な空間の拡大が計られており、超大型浮体構造物・メガフロートの設置もその選択肢の一つである。一般に構造物を設置する際起こる問題として、水質環境への影響・水理的環境の変化・生物の生息場所への影響等が考えられるため、海域の利用・開発が海域環境に与える影響を予測し、これを評価することで、開発の是非を判断する手法の開発が行われてきている。

これらの評価手法の一つに、流動場を記述する物理モデルと生物・化学過程を記述する生態系モデルを組み合わせたモデルが開発されており、物理過程および化学・生物過程内の浮遊生態系の部分に関しては数多く検討がなされ、また底生生物は近年干潟で観測が行われるようになってきている。メガフロートにおいてはこれまでの観測結果より、付着生物が枯死して落下することで、底生生態系に与える影響が重要であることが明らかになりつつある。フジツボ・ムラサキガイ等の付着生物は船舶・海中構造物等に付着し、障害を引き起こす汚損生物として古くから問題とされている。中でも、ムラサキガイは繁殖力が強く、内湾における付着生物の最優占種の一種であるため、分布・成長に関する調査・研究が比較的進んでいる。また、欧米では重要な養殖対象生物であるため生理・生態については研究が行われている。しかしながら、モデル化に際して個別の種の生物学的性質を実験室で計測することは行われているが、対象環境中での生物群を現地計測によって定量化しモデル化し、沿岸域の他の生態系との関連・影響について考察した調査・研究はほとんど行われていない。

2. 目的

本研究では以下のことを目的とする。

- ・ 内湾の付着生物の優占種であるムラサキガイを中心とした付着生態系モデルを構築する。
- ・ 超大型浮体構造物・メガフロートで付着生物の呼吸による溶存酸素濃度変化の計測を行う。
- ・ 計測結果にデータ同化を用いて付着生物のパラメータを推定する。
- ・ 既存の推定されたパラメータとの比較を行う。

3. 付着生態系モデルの構築

付着生物のパラメータをデータ同化を用いて求めるので、Fig.1 の物質循環を考える。なお、ここではデータ同化を用いる関係上モデルを簡易化したため、植物プランクトン、付着生物以外の有機物を一つの状態変数にまとめ、栄養塩は窒素について考えている。また、モデルのパラメータはTable.1 に示す通りである。このうち付着生物に関するパラメータは値が*になっているものである。定式化の際、モデルの過程で付着生物の関係しないものは単に開発されたモデルに従い、以下には付着生物に関する部分についてのみ示す。

・ 付着生物の呼吸

付着生物の呼吸は水温で規定され、次式で計算される。

$$B_5 = \alpha_5 \exp(\beta_5 T) ADH \quad (1)$$

・ 付着生物の自然死亡

付着生物の死亡は生物量に比例するとする。

$$B_6 = m_{ADH} ADH \quad (2)$$

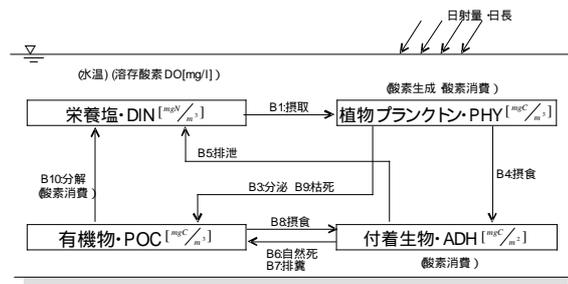


Fig. 1: 付着生物を中心とした物質循環モデル

・付着生物の捕食

$$B_4 = \alpha_4 \exp(\beta_4 T) PHY \cdot ADH \quad (3)$$

$$B_8 = \alpha_4 \exp(\beta_4 T) POC \cdot ADH$$

・付着生物の排糞

排糞の割合は餌料摂取に対して一定とする。

$$B_7 = (1 - \mu_{ADH})(B_4 + B_8) \quad (4)$$

以上より付着生物の時間変化は次式を用いて計算することが出来る。

$$\frac{\partial ADH}{\partial t} = B_4 - B_5 - B_6 - B_7 + B_8 \quad (5)$$

また、DOの時間変化は次のようになる。

$$\frac{\partial DO}{\partial t} = PHY \cdot ([\text{光合成}] - [\text{呼吸}]) - POC[\text{分解}] - [TOD:C]_{ADH} B_5 \quad (6)$$

4. 超大型浮体構造物・メガフロートでの計測

平成10年度より神奈川県横須賀市横須賀港追浜地区において長さ1000m×幅60m×深さ3mの浮体空港モデルを用いたメガフロート実証実験がメガフロート技術研究組合によって行われている。本計測はこの浮体空港モデル上で行った。

計測で用いた計測装置は、構造物の付着生物が行っている酸素消費の実態を現場で計測することを目的として開発したもので、Fig.2のようにアクリル製の覆い(ベルジャー)を浮体底面に取り付け、付着生物を内部に囲い込み、塩分、水温、溶存酸素濃度を内外の海水を交換

| 計測期間 | | 海水交換 | 計測間隔 | ポンプ稼働時間 | 攪拌時間 | 計測地点 |
|-----------------|-----------------|------|------|---------|------|-------|
| 開始 | 終了 | | | | | |
| H12.08.28 10:00 | H12.08.29 08:00 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.N |
| H12.10.12 16:30 | H12.10.19 17:00 | 0:00 | | | | |
| H12.10.19 12:00 | H12.10.30 13:00 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.E |
| H12.10.30 17:00 | H12.11.01 16:00 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.E |
| H12.11.01 16:00 | H12.11.02 13:30 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.E |
| H12.11.02 14:00 | H12.11.13 08:00 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.E |
| H12.12.04 16:00 | H12.12.05 10:00 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.N' |
| H12.12.20 15:00 | H12.12.22 08:00 | 0:00 | 5.0 | 3.0 | 1.0 | St.H |

する事が出来る。

Table.2 に今回行った計測の期間及び設定を示す。表中の計測地点は Fig.3 中に示す各点の水深2m 地点である。また、付着生物の湿重量は8月から11月までは2.4kg、12月の1回目は0.8kg、2回目は0.55kgであった。

| Symbol | Explanation | Value |
|--------------------------------------|------------------|-----------|
| 1 | 0 におけるPHYの最大成長速度 | 7.50E-01 |
| 1 | 温度係数 | 6.33E-02 |
| 2 | 0 におけるPHYの呼吸速度 | 2.00E-02 |
| 2 | 温度係数 | 5.24E-02 |
| 3 | 細胞外分泌率 | 1.35E-01 |
| 3 | | -2.01E-03 |
| 4 | 0 におけるADHの最大摂餌速度 | * |
| 4 | 温度係数 | * |
| 5 | 0 におけるADHの最大呼吸速度 | * |
| 5 | 温度係数 | * |
| 10 | 0 におけるPOCの分解速度 | 2.00E-02 |
| 10 | 温度係数 | 6.93E-02 |
| m _{PHY} | PHYの枯死速度 | 0.00E+0 |
| m _{ADH} | ADHの自然死亡速度 | * |
| μ _{ADH} | ADHの同化効率 | * |
| I _{max} | 海表面最強日射量 | 8.25E+0 |
| I _{opt} | 光合成の最適光量 | 7.63E+0 |
| DO | POC分解のDOの半飽和値 | 1.00E+0 |
| k | 光消散係数 | 1.00E-01 |
| z | 水深 | 2.00E+0 |
| [N:C] _{PHY} | PHYのN/C比 | 6.25E-02 |
| [TOD:C] _{PHY} | PHYのO/C比 | 3.47E-03 |
| [chl _a :C] _{PHY} | PHYのクロロフィルa/C比 | 2.10E-02 |
| [N:C] _{ADH} | ADHのN/C比 | 2.50E-01 |
| [TOD:C] _{ADH} | ADHのO/C比 | 3.33E-03 |
| [N:C] _{POC} | POCのN/C比 | 3.11E+0 |
| [TOD:C] _{POC} | POCのO/C比 | 3.30E-03 |

Table.1:パラメータ

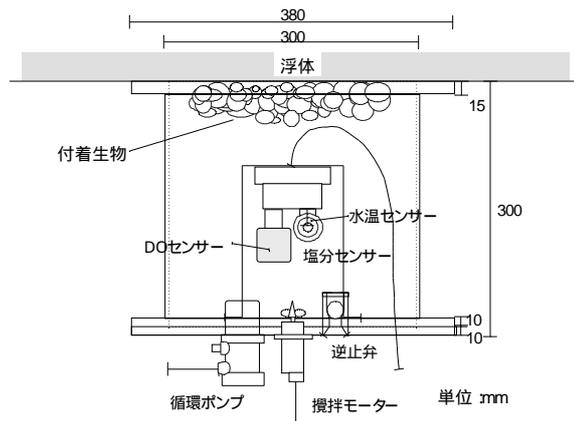


Fig. 2: 計測装置

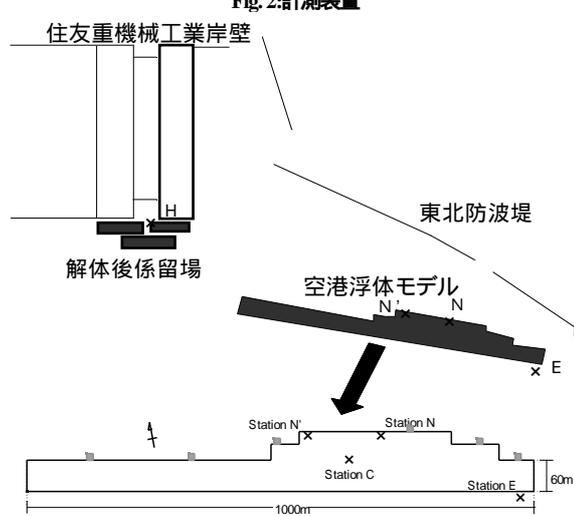


Fig. 3: 計測地点

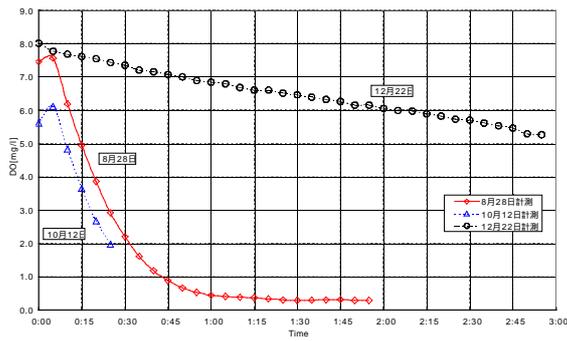


Fig. 4:計測結果1)

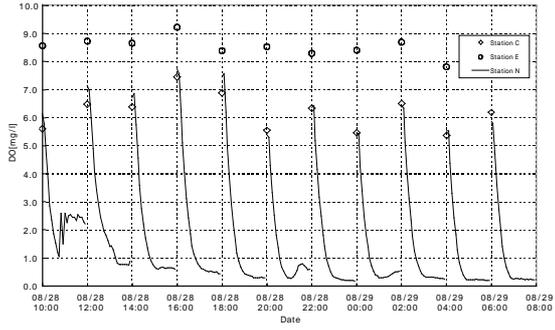


Fig. 5:計測結果2)

Fig.4 に水温の異なる8,10,12月の代表的なDO消費の計測結果を、Fig.5 にDO消費速度計による8月の連続計測結果と同時刻に浮体周辺の別の点で計測された海域のDOを示す。Fig.4 のように異なる条件下で計測した付着生物によるDO変化のデータを用いてモデルパラメータを推定する。また、Fig.5 よりDOが3mg/l付近を境にしてそれより低濃度側での消費速度がDO濃度に大きく依存していることが解る。しかし、本研究では式を用いたモデルを考えるので、データ同化の際にはDO濃度に依存しない部分を用いることにする。

5.データ同化によるパラメータ推定

データ同化とは、観測データを用いて数値モデルによる予報の精度を上げることで、天気予報などで使われている手法である。ここではDO消費速度の観測データを用いてモデルのパラメータの最適値を求めるので、変分法の一つである随伴法を用いる。

随伴法の概要を以下に示す。同化期間 $(0 < t < T)$ 中に時間変化するある物理量 X の測定値の組 $(x_1^{obs}, t_1) \dots (x_N^{obs}, t_N)$ が得られているとき、 X の時間変化を支配する7式 (ただし N は X に関する非線形演算子、 c は演算子に含まれる物理パラメータとする) を定義し、このモデルの出力値 X_i^{cal} と観測値 X_i^{obs} から(8式)の形で評価関数を定義する。ただし $A(t)$ は観測値の信頼性による重みである。

$$\frac{dX}{dt} = N[X; c] \quad (7) \quad J \equiv \frac{1}{2} \int A(t) (X_i^{cal} - X_i^{obs})^2 dt \quad (8)$$

ここで「(7)式を拘束条件として評価関数を最小にするモデルの制御変数 x_0, c の値を求める」という強い拘束条件付きの非線形最適化問題を考慮した時、この条件付き変分問題のラグランジュ関数 L を汎関数とする条件無しの変分問題と考えることができ、これから評価関数の制御変数に関する勾配を求め、これらの値を降下法のルーチンに入れ繰り返し計算することで最適な制御変数の値を求めることができる。ただし x_0 は X の初期値である。なお、変分法の詳細は坂本参考にした。

$$L \equiv \int \lambda \left(\frac{dX}{dt} - N[X; c] \right) dt + J \quad (9)$$

$$J \equiv \frac{1}{2} \int (DO_i^{cal} - DO_i^{obs})^2 dt \quad (10)$$

付着生態系モデルに適用する際、Table.1 で値が*になっているパラメータ及びモデルの各状態変数の初期値を制御変数とし、評価関数は(10)式で定義した。同化用計測データは8月、

10月、12月に計測されたデータの中からそれぞれ6データずつを無作為に抽出した計6個のデータを用いている。制御変数の初期値のうち各状態変数の初期値はHYは同時刻に浮体上C or E点で計測された値を、DOは本計測で用いた装置で計測された値を、ADHはチャンバーを回収したとき

| Case | 同化回数 | 評価関数 | 4 | 4 | 5 | 5 | ManH | ManH |
|------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 0 | 0.58983 | 0.01000 | 0.01000 | 0.00500 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 2 | 39999 | 0.05605 | 0.00309 | 0.00291 | 0.00270 | 0.07889 | 0.00003 | 0.02607 |
| 3 | 0 | 0.35337 | 0.01000 | 0.01000 | 0.00500 | 0.10000 | 0.01000 | 0.80000 |
| 4 | 2626 | 0.05465 | 0.00842 | 0.00924 | 0.00220 | 0.08735 | 0.00889 | 0.74126 |
| 5 | 0 | 0.35557 | 0.01000 | 0.01000 | 0.00500 | 0.03500 | 0.01000 | 0.80000 |
| 6 | 38790 | 0.05608 | 0.00947 | 0.00645 | 0.00270 | 0.07889 | 0.00000 | 0.00258 |
| 7 | 0 | 0.21426 | 0.01000 | 0.01000 | 0.00250 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 8 | 24730 | 0.05613 | 0.02021 | 0.03535 | 0.00271 | 0.07874 | 0.00000 | 0.00200 |
| 9 | 0 | 3.48729 | 0.01000 | 0.01000 | 0.00750 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 10 | 14999 | 0.05616 | 0.00593 | 0.00926 | 0.00272 | 0.07861 | 0.00640 | 0.61586 |
| 11 | 0 | 0.58984 | 0.00500 | 0.01000 | 0.00500 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 12 | 14999 | 0.05609 | 0.00019 | 0.00270 | 0.00272 | 0.07859 | 0.00092 | 0.22569 |
| 13 | 0 | 0.58983 | 0.01500 | 0.01000 | 0.00500 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 14 | 9999 | 0.05623 | 0.00293 | 0.00615 | 0.00274 | 0.07824 | 0.00225 | 0.34034 |
| 15 | 0 | 0.58983 | 0.01000 | 0.00500 | 0.00500 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 16 | 9999 | 0.05622 | 0.00150 | 0.00241 | 0.00274 | 0.07824 | 0.00213 | 0.33948 |
| 17 | 0 | 0.58983 | 0.01000 | 0.01500 | 0.00500 | 0.06930 | 0.01000 | 0.80000 |
| 18 | 19999 | 0.05608 | 0.00068 | 0.00322 | 0.00271 | 0.07875 | 0.00051 | 0.14598 |

Table.3:同化前後のモデルパラメータ

に計測した湿重量より換算した値をDIN は浮体上で採水した海水を分析した値をPOC は過去に計測されている東京湾の一般的な値をそれぞれ用いている。また、モデルパラメータの初期値は既存の推定値を用いている。なお、 μ_5 の初期値のみは収束を早くさせるために推定値の5倍の値を用いている。

Table.3のCase1が上記の条件で同化を行った結果で、上段が初期値、下段が同化後の値を示している。次に μ_4 , μ_5 の初期値をそれぞれ60%ずつ動かし感度解析を行ったのがCase2からCase9である。この結果より、今回は評価関数での観測値のみが考慮されているため、評価関数は呼吸に関するパラメータ以外のパラメータに対して感度が良くなく、それらはほぼ初期推定値に依存しており、また(μ_5 , μ_4)はそれらのパラメータの影響を受けていない。他のパラメータを推定するには、そのパラメータに対応した観測データが必要である。

そこで、これらのパラメータをCase1の結果の値に固定し、 μ_5 , μ_4 のみを動かして評価関数の値を調べたのが、Fig.6である。これより(0.00175,0.097)付近に(μ_5 , μ_4)の最適値があると言える。

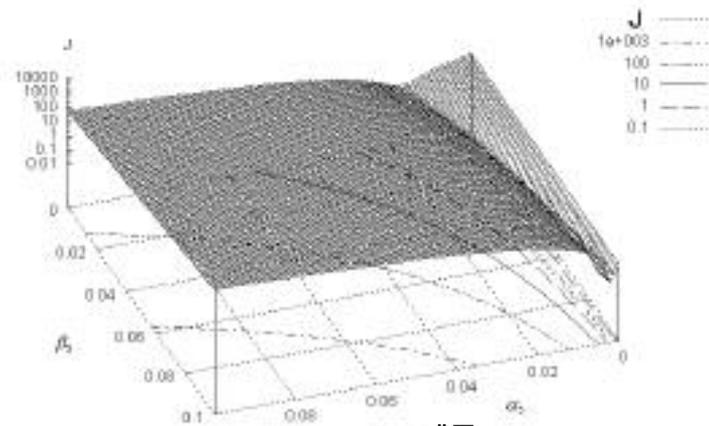
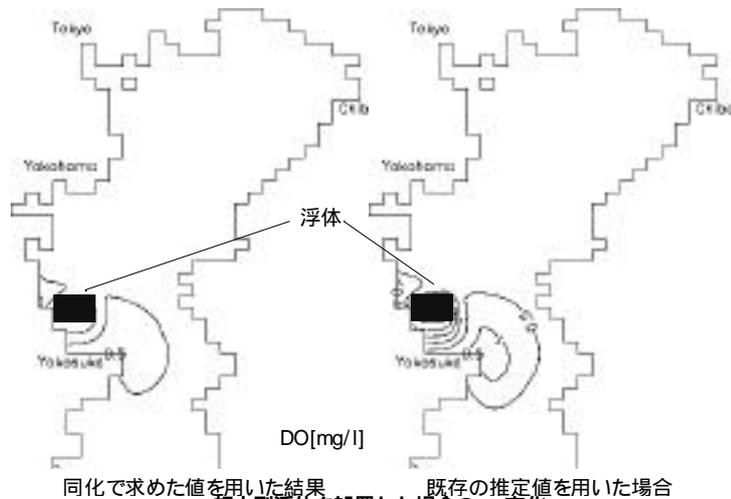


Fig. 6: J 曲面

6. 超大型浮体による環境影響予測

前節で求めたパラメータの値と従来の方法で推定された値を比較するために、付着生態系を考慮した生態系モデル^dで、付着生物の呼吸のパラメータのみをこれら組の値に置き換えて、それら以外の設定は変えずに、東京湾横須賀沖に3km×5kmの超大型浮体を設置したと仮定した場合のシミュレーションを行った。定常状態になったときのDOの海表面での1日の平均値を求め、浮体が存在しない場合の平均値との差を取ったものをFig.7に示す。これよりパラメータが個変わるだけで結果が変わってくる可能性がある。



同化で求めた値を用いた結果 既存の推定値を用いた場合
Fig. 7: 超大型浮体を設置した場合のDO変化

7. 結論

超大型浮体による環境影響予測を行うために付着生物を考慮した生態系モデルを構築した。付着生態系モデルのパラメータによって影響予測が異なってくる可能性もあるので、未知パラメータについては十分な検討が必要である。本研究ではモデルパラメータをフィールドの観測データからデータ同化によって推定を行った。その際パラメータに対応した計測データが存在する項目は評価できるが、計測データが十分でない項目は感度が良くなく不十分であるため、データ同化手法でパラメータを推定するにはそのパラメータに対応した環境因子の変動を計測する必要がある。

^a 中田喜三郎：生態系モデル - 定式化と未知のパラメータの推定法 Adv.Mar.Tech.Conf., Vol.8,1993

^b 坂井伸一：データ同化手法による実海域鉛直渦動粘性係数の評価 - アジョイント法を用いた鉛直次元モデルの開発 中央研究所研究報告U98036,,1999

^c 田口弘一：海藻群落を中心とした護岸生態系の機能と構造に関する調査報告表2000

^d 北澤大輔、藤野正隆、多部田茂：超大型浮体が東京湾の浮遊生態系に及ぼす影響に関する研究 石浜造船学会論文集 188号,2000