

B-56 伊勢湾における環境修復事業の効果把握を目的とした数値シミュレーションモデルの開発

内藤了二^{1*} 田中陽二² 鈴木高二朗² 井上徹教² 中村由行²
澤田玲¹ 内田吉文¹

¹国土交通省中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3）

E-mail : naitou-r852a@pa.cbr.mlit.go.jp

²独立行政法人 港湾空港技術研究所（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）

1. 研究の背景と目的

伊勢湾などの閉鎖性海域では総量規制等による窒素やリン負荷量の削減にもかかわらず、富栄養化は依然として深刻な状況にある。貧酸素水塊は水中の生物を死滅させるとともに、ときに沿岸域に湧昇する苦潮（青潮）現象を引き起す。伊勢湾の環境修復の取り組みとしては、干潟・浅場・藻場の保全・再生、浚渫窪地の修復が考えられる。これらの水質・底質及び生態系の改善・回復の行動計画策定においては、環境修復事業に関するシナリオをいくつか想定し、伊勢湾の水質・底質、生態系に及ぼす効果を定量的に予測、評価することが必要である。数値シミュレーションを行う上では、根拠となる生態系応答メカニズムや、予測・評価において設定された仮定や不確実性の所在を明確化し、客観的に評価することが必要となる。

貧酸素水塊の形成過程や、外洋水の流入に伴う中層貧酸素化、苦潮の発生などの伊勢湾で発生する複雑な現象を再現した上で、環境修復事業による環境の長期的な変化をより正確に再現することが求められるが、既存の数値モデルではこれらの複雑な現象を全て満足できてはいなかった。本研究では、伊勢湾における環境修復事業の効果把握を目的とし数値シミュレーションモデルを開発し、伊勢湾における流動や水質環境を精度よく再現できることを確認することとした。なお、開発されたシミュレーションモデル名は「LT」であるが、伊勢湾の水質環境の総合解析ツールになることを期待して、「伊勢湾シミュレーター」（以下、IS）という別名を付けた。

2. 伊勢湾シミュレーターの特徴

(1) 流動場の3次元非静水圧モデル

内湾流動場における従来の数値モデルは計算コストの関係から、鉛直方向の流速を正確に解くことを犠牲にした静水圧近似を仮定したモデルが一般的であった。しかしながら、湧昇流や河川水の流入、窪地への外洋水の流入などは静水圧近似では再現が困難であることが指摘されている。例えば、窪地への外洋水の流入現象は、塩分が高く重たい外洋水塊が窪地に潜り込んでいくが、静水圧モデルではそのような現象を忠実に再現することができない。そこで、流動場の計算として非静水圧（Full 3D）モデルを使用した。

一方で、環境修復事業の効果把握を行うためには数年～数十年の長期計算も必要であるため、高速な計算アルゴリズムも流動モデルに組み込んだ。具体的には、自由表面式の計算を陰解法にし、時間刻みを大きく取ることを可能とした。これにより、流動場の精緻な計算と、計算時間の短縮という二律背反する要求を高い次元で達成させた¹⁾。

(2) 微生物ループモデル

これまでの沿岸域や海洋でのモデル化においては、主として植物プランクトンが有機物を生産し、それを動物プランクトンが捕食し、さらに魚介類がそれを捕食する、いわゆる古典的生食食物連鎖が主体的という認識であった。しかし、1980年代になり、微生物ループの存在が指摘され、物質循環における役割が明らかになり始めた。本研究では、従来考慮されてきた植物プランクトンや動物プランクトンだけでなく、細菌の多様な役割をも考慮することによって、より正確な生物循環を再現できる浮遊生態系モデルの構築を目的とした。図-1に本モデルの物質循環フローを示す²⁾。

(3) マルチGモデル

これまでのモデルでは、赤潮の発生にともなって急激に酸素が減少するといった短期的な現象と、30年から50

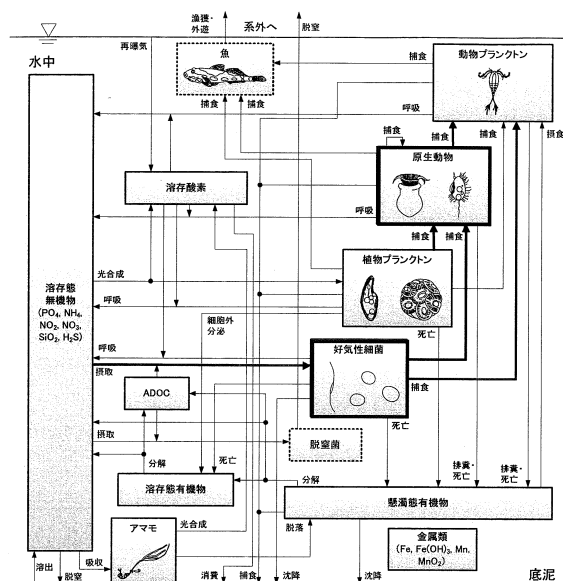


図-1 浮遊生態系モデルの物質循環フロー：図中の太い矢印は微生物ループを示す（田中ら(2011)²⁾より）。

年にわたる底質の変化といった長期的な現象を両立させて再現させることが困難であった。そこで、有機物についてはマルチGモデル³⁾を採用した。マルチGモデルは、海水中のPOM（懸濁態有機物、生存している生物は含まない）と、DOM（溶存態有機物）を分解・無機化速度別に分けて（変数を増やして）計算するモデルである。このマルチGモデルを組み込んだことで、有機物の速やかな分解と、数十年レベルの長期的な分解を同時に表現することが可能となった。

3. 伊勢湾シミュレーターの精度検証

(1) 計算条件

計算メッシュは、図-2に示すように水平2 km格子、鉛直方向に28層（水深41 mまでは1~2 m間隔）とした。

気象データとして、気温・気圧・日射量・降雨量・大気放射量は名古屋気象台の1時間毎の観測値を用いて、空間的に一様に与えた。海上風は伊勢湾周囲にある気象観測所から、風向風速を計算メッシュ上の各点へ空間補間して与えた。河川流入は一級河川（計10本）と、中小河川（計31本）を与えた。開境界での潮位は長周期成分を含む主要14分潮の潮汐を与えた。開境界の水温・塩分は愛知水産試験場の定線観測データを用いて、時空間的に補間して与えた。開境界の水質は観測値を参考にして、COD : 2.5 [mg L⁻¹], TN : 0.4 [mg L⁻¹], TP : 0.043 [mg L⁻¹], SiO₂ : 0.12 [mol Si m⁻³], DOは飽和値、微生物量は0を一定値で与えた。

浮遊生態系モデルの生物構成として、植物プランクト

ンはサイズの大きい順に、珪藻・渦鞭毛藻・独立栄養性微小鞭毛虫・シアノバクテリアの4種類に分類した。原生動物は繊毛虫と従属栄養性微小鞭毛虫の2種類に分類した。好気性細菌は1種類とした。動物プランクトンは1種類とし、POM・珪藻・渦鞭毛藻・繊毛虫を捕食する、ろ過性動物プランクトンとした。また、有機物の分解速度は3種類（易分解、準易分解、難分解）に区分した。

(2) 潮汐の検証

既往の観測結果がある15地点について、潮汐の調和定数を比較した。潮汐の振幅値・位相の比較を図-3に示す。振幅のRMSE（Root Mean Square Errors）は1.14cm、位相のRMSEは4.53度であり、振幅・位相ともに観測値とよく適合していた。

(3) 水質・生態系の検証

伊勢湾中央部（St.A、図-2）での水質鉛直分布を図-4に示す。左の図から、塩分、水温、DO、クロロフィルaを横軸に示し、縦軸には水深を示した。計算結果と観測値を比較したところ、春季、夏季、秋季ともに、計算結果と観測値は良好に一致していた。

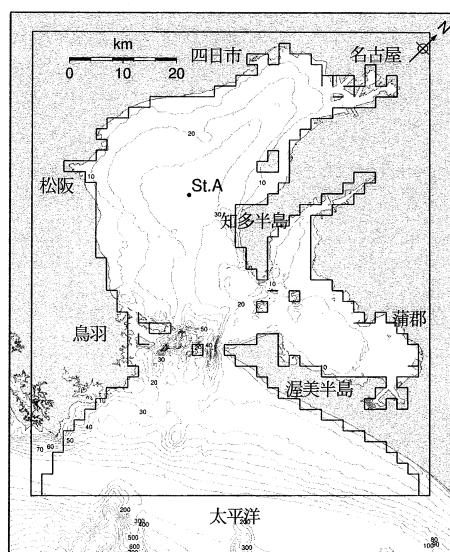


図-2 伊勢湾の計算メッシュ

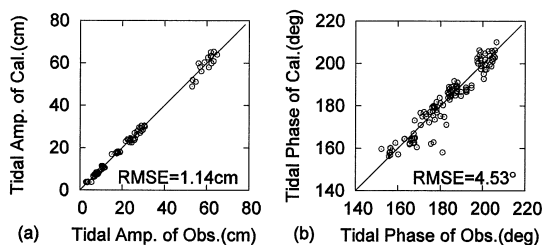


図-3 各検潮所における潮位の観測値と計算結果の比較

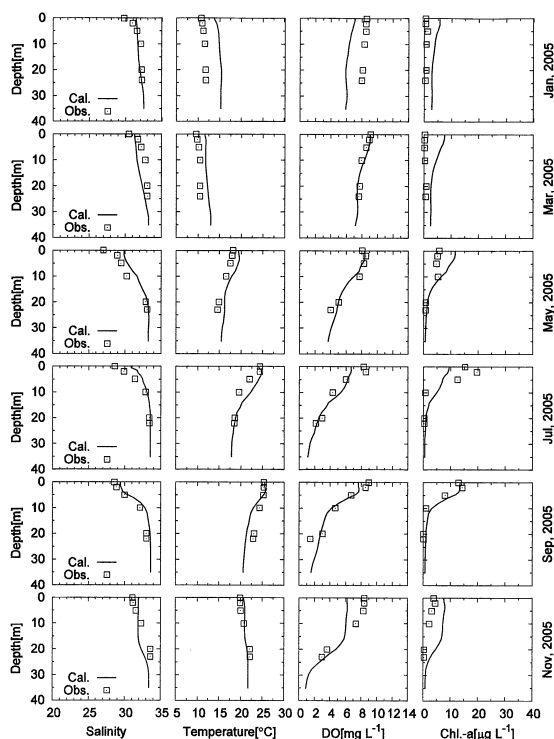


図-4 伊勢湾中央部 (St. A) の水質鉛直分布 (2005年) : 上の図から1月, 3月, 5月, 7月, 9月, 11月の結果, 左の図から, 塩分, 水温, 溶存酸素, クロロフィルaの結果を示す。

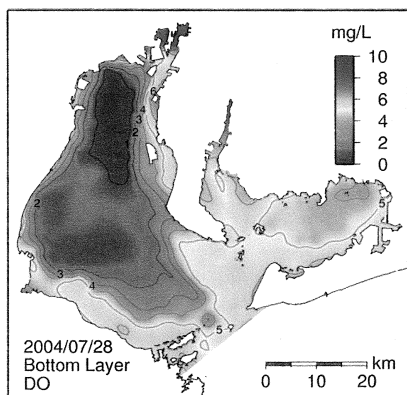


図-5 伊勢湾の底層貧酸素水塊の再現 (夏季)

なお, ここでは示さないが, 原生動物・動物プランクトンについては計算結果と観測値は概ね一致していたが, 7~11月の細菌量は過小評価となっていた。加えて, 表層付近で細菌が過小評価となる傾向が見られた。しかしながら, 細菌・原生動物の全体的な傾向は一致していた。

図-5は夏季 (7/28) における本モデルによる底層での溶存酸素の平面分布を示したものである。伊勢湾で問題となっている貧酸素水塊についても, その発生・広がりを再現できることが確認された。

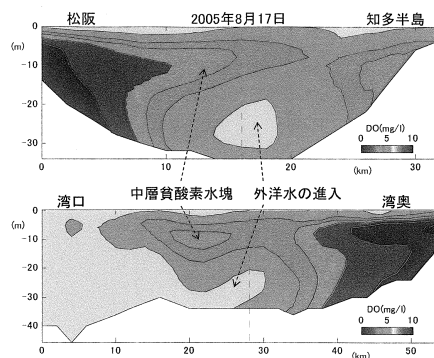


図-6 湾口からの外洋水による貧酸素水塊の中層化の再現

図-6は貧酸素水塊が中層に出現する現象を, 本モデルで再現できたことを示すものである。伊勢湾では, 夏季に大規模な貧酸素水塊が底層で発達するが, 湾口から密度が大きく溶存酸素濃度の高い外洋水が間欠的に底層に進入し, 底層の貧酸素水塊を持ち上げて中層貧酸素水塊を発生させる⁴⁾。ISでは, このような複雑な現象も再現できることが確かめられた。

4. 結論

本モデルでは, 環境修復事業の効果把握を目的としたISを開発した。伊勢湾で検証計算を行い, 潮汐・水温・塩分について高精度な再現結果が得られ, 水質についても植物プランクトンの鉛直分布や, 夏場の底層貧酸素現象について良好な再現結果を得た。細菌や原生動物, 動物プランクトン, 植物プランクトン種の現存量は観測結果と概ね一致していたが, 季節変動や鉛直分布については改良の余地が残された。

今後はISに改良を重ねていくとともに, ISを用いて伊勢湾での環境修復事業の効果把握を行う予定である。

参考文献

- 1) 田中陽二・鈴木高二朗 (2010) : 密度流・湧昇流の計算を目的とした三次元沿岸域流動モデルの開発について, 港湾空港技術研究所報告, 第49巻, 第1号, pp.3-25.
- 2) 田中陽二・中村由行・鈴木高二朗・井上徹教・西村洋子 (2011) : 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築, 港湾空港技術研究所報告, 第50巻, 第1号, pp.3-68.
- 3) Westrich, J. T. and Berner, R. A. (1984): The role of sedimentary organic matter in bacterial sulfate reduction: The G model tested, Limnol. Oceanogr., Vol.29, pp.236-249.
- 4) 藤原建紀 (2007) : 伊勢湾の貧酸素水塊は, どのようにしてできるか, 海洋, 第39巻, No.1 pp.5-7.