

伊勢湾再生への取り組み ～伊勢湾シミュレーターの開発について～

内藤了二¹・澤田玲²

¹名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1丁目57-3）

²名古屋港湾空港技術調査事務所 調査課（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1丁目57-3）

伊勢湾の環境修復事業を評価するために伊勢湾シミュレーターを開発した。伊勢湾シミュレーターは、流動場の三次元非静水圧モデルや最新の浮遊生態系モデルから構築されており、伊勢湾における水の流れや水質を正確に再現できるとともに、干潟・浅場造成や浚渫窪地修復などの環境修復事業を展開する上で有用なツールとなることが確認された。

キーワード：伊勢湾再生，貧酸素水塊，水質，微生物，数値モデル，環境修復事業

1. 背景と目的

(1) 背景

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。海域が富栄養化すると、植物プランクトンの増殖によって水中の有機物が増加して底層に沈降し、有機物の分解に伴い酸素が消費されることによって貧酸素水塊が生じる¹⁾（図-1）。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）現象を引き起こし、漁業に多大な悪影響を及ぼす。

これまで伊勢湾・三河湾では環境改善のため、シーブルー事業（中山水道航路浚渫土砂の活用）において約620 haの干潟・浅場造成や覆砂を実施し、そのモニタリング結果からそれらの事業が三河湾の水質・生態系の改善に大きく寄与していることが示唆されている。また、貧酸素水塊の発生原因の一つとして考えられている浚渫窪地の修復を三河港内の2箇所において実施しており、埋め戻し後は溶存酸素が比較的高濃度に維持されて、苦潮の発生リスクが軽減されるなど一定の効果が確認されている。このような環境修復事業は今後も積極的に取り組むべき課題である。

伊勢湾の環境修復の具体的な取り組みとしては、干潟・浅場・藻場の保全・再生・創出，砂浜の保全・再生，海底に堆積した有機汚泥対策の実施，浚渫窪地の埋め戻し，ゴミや流木の回収等が考えられる。これらの伊勢湾における水質及び生態系の改善・回復の行動計画の策定

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、各シナリオが伊勢湾の水質、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。様々な環境修復事業を評価するには、数値シミュレーションモデルによって検討することが適切である。シミュレーションモデルは既にいくつかのモデルが提案されているものの、それぞれのモデルで長短が異なり、しばしば計算結果がモデルによって大きく異なる場合がある。したがって、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。

シミュレーションでは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。

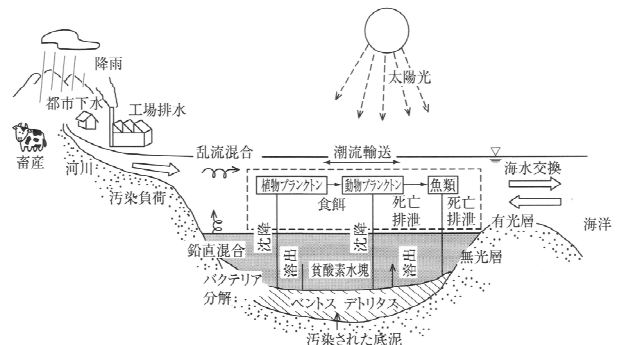


図-1 内湾域における栄養塩の循環と水質環境¹⁾

(2) 目的

伊勢湾における環境修復事業の効果把握を目的とし新しい数値シミュレーションモデルを開発することとした。開発するモデルは伊勢湾における先進的で、統一的な数値シミュレーションモデルとなることを目指して、「伊勢湾シミュレーター」(以下、IS)と呼称する。

ISの開発コンセプトは以下の通りである。

- ① モデルの仮定や計算方法をオープンにすること
- ② 内湾物質循環に関する最新の知見(特に微生物ループ)を導入すること
- ③ 貧酸素水塊の湧昇(苦潮)現象を再現できること
- ④ 数年~数十年の長期計算ができること

本研究では、まず第2章でISの特徴を整理する。次に、第3章でISによる現状再現計算を行い、精度について検証する。第4章ではISによる水質環境の解析事例として、微生物ループの役割について解析する。第5章で本研究の結論を述べる。

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(図-2)。

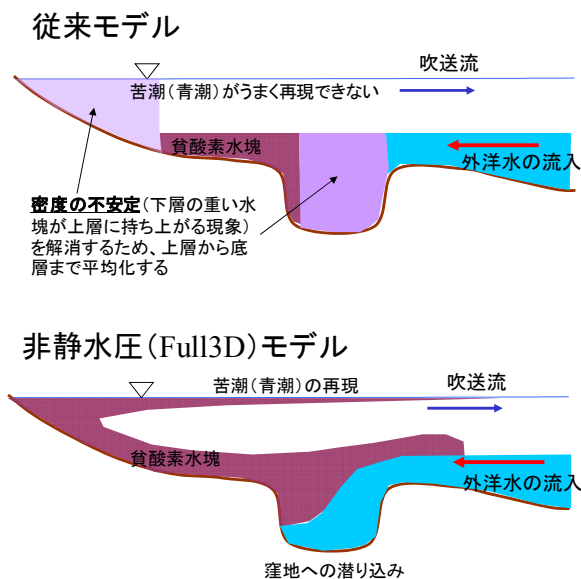


図-2 非静水圧モデルの特徴

そこで、ISでは流動場の計算として非静水圧(Full 3D)モデルを使用した。ただし、一方で数年~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²⁾。

(2) 微生物ループモデル

これまでの沿岸域や海洋での食物連鎖に対する概念は、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(Grazing food chain)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(図-3)の存在が明らかになり、物質循環における役割が議論され始めた。本研究では、微生物ループを考慮し、さらに、従来考慮されてきた動物プランクトンや植物プランクトンだけでなく、細菌の多様性・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-4に本モデルの物質循環フローを示す³⁾。

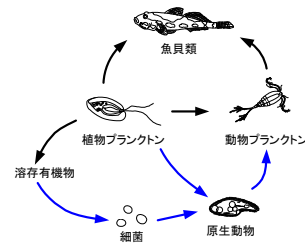


図-3 食物連鎖の概念図: 青い矢印が微生物ループを示す。

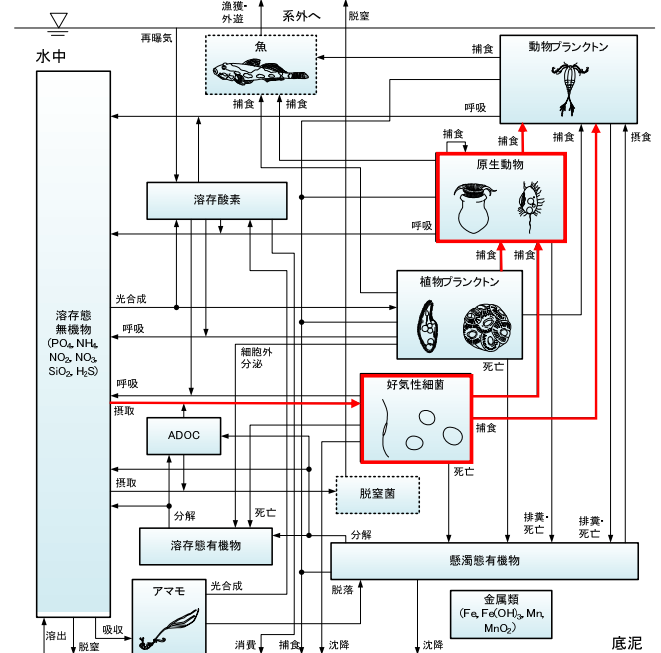


図-4 浮遊生態系モデルの物質循環フロー: 図中の赤い矢印は微生物ループを示す。

(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、分解・無機化速度の違いによって分類するマルチGモデル⁴⁾を採用した。マルチGモデルは、海水中のPOM (Particle organic matter; 懸濁態有機物, 生存している生物は含まない) と、DOM (Dissolved organic matter; 溶存態有機物) は分解・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、赤潮の発生後の急激な貧酸素水塊の発達や、底質からの窒素・リンの長期的な溶出挙動の変化を再現することが可能となった。

3. 伊勢湾シミュレーターによる現況再現結果

(1) 計算条件

計算メッシュは、図-5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・独立栄養性微鞭毛虫 (Autotrophic nanoflagellate; ANF)・シアノバクテリアの4種類に分類した。なお、シアノバクテリアは生物学的には細菌であるが、光合成を行うため、ここでは植物プランクトンに含めた。原生動物は繊毛虫と従属栄養性微鞭毛虫 (Heterotrophic nanoflagellate; HNF)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、ろ過食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(名古屋, 四日市, 鬼崎, 師崎, 武豊, 形原, 蒲郡, 佐久島, 三河, 豊橋, 立馬崎, 福江, 伊良湖, 神島, 鳥羽)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-6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-5) での水質鉛直分布を図-7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。

次に、細菌・原生動物・動物プランクトンの季節変動の比較を図-8に示す(観測値は1995年度)。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、ここでは示さないが、表層付近で細菌が過小評価となる傾向が見られた。なお、計算結果は5年間での全層での平均値であるため、詳細な比較・検討については今後の課題である。

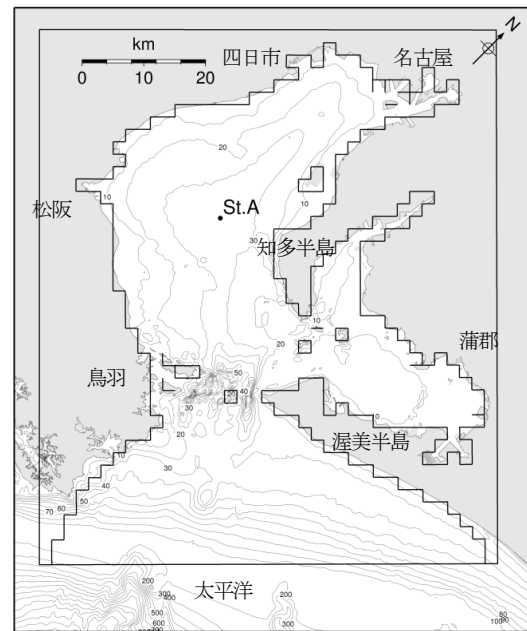


図-5 伊勢湾の計算メッシュ

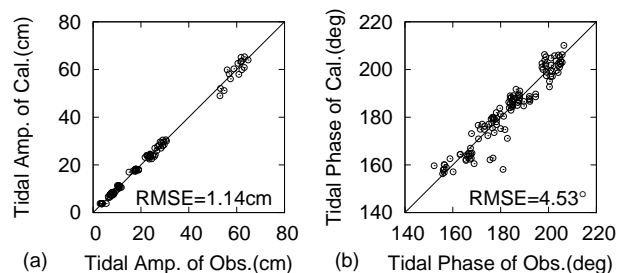


図-6 各検潮所における潮位の観測値と計算結果の比較: 左図(a)振幅, 右図(b)位相の結果。図中の直線は、計算値○印は、観測値を示している。長周期成分は除いた。

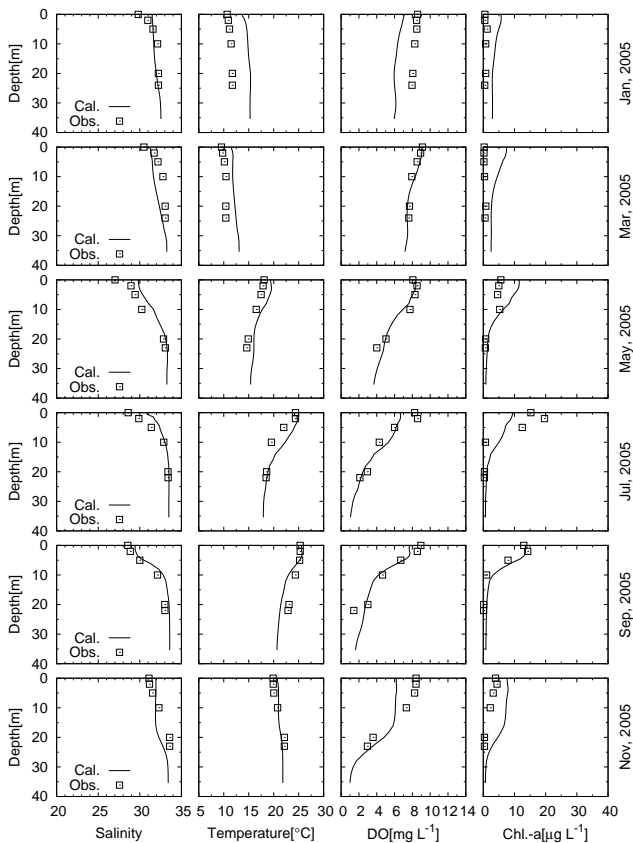


図-7 伊勢湾中央部 (St. A) の水質鉛直分布 (2005年) : 上の図から1月, 3月, 5月, 7月, 9月, 11月の結果, 左の図から, 塩分, 水温, 溶存酸素, クロロフィルaの結果を示す。

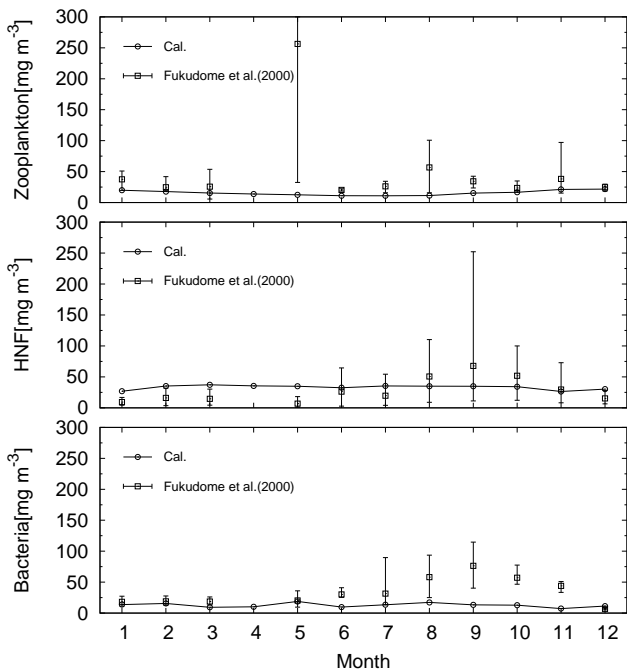


図-8 伊勢湾中央部 (St. A) における細菌・原生動物・動物プランクトンの季節変化 : 計算結果は5年間の平均値, 観測値 (福留ら) のエラーバーは最小値, 平均値, 最大値を表わす。

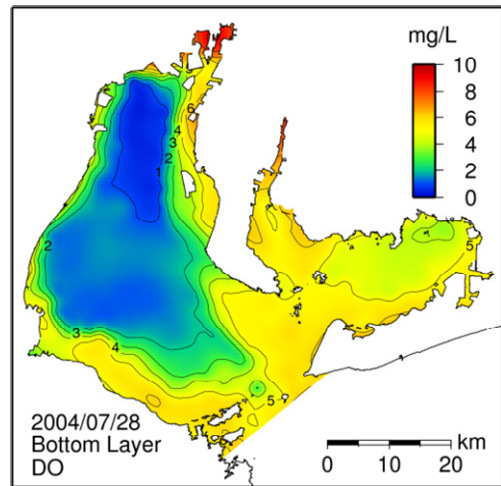


図-9 伊勢湾の底層貧酸素水塊の再現

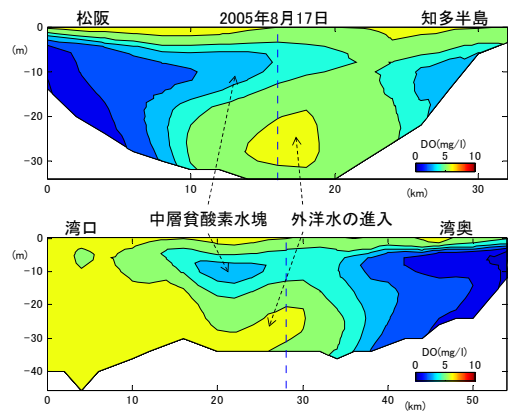


図-10 湾口からの外洋水による貧酸素水塊の中層化の再現: 上図は, 三重県松阪市と愛知県知多半島の断面図, 下図は, 伊勢湾口から湾奥部の縦断面図を示している。

図-9には, 夏季におけるISによる底層の溶存酸素の平面濃度分布を示したものである。浮遊生態系モデルでは, 植物プランクトンや動物プランクトンだけでなく, 細菌や原生動物といった微生物も再現できるモデルを構築したことにより, 貧酸素水塊の発生を正確に再現することが可能となった。

図-10には, 伊勢湾口から外洋水による貧酸素水塊の中層化の再現をしたものである。伊勢湾では, 夏季に大規模な貧酸素水塊が発達するが, 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, 底層に発達した貧酸素水塊を持ち上げて中層貧酸素水塊を発生させる⁹⁾。ISは, このような複雑な現象を流動モデルと生態系モデルの組み合わせにより正確に再現できることが分かる。なお, 中層貧酸素水塊は比較的短時間のうちに消滅することも再現されていた。

4. 微生物ループの役割について

第3章では本モデルの精度検証を行い、本モデルが一定の精度を有していることを確認した。本モデルの特徴の一つは、新たに微生物ループを考慮したことであり、これによって対象海域での細菌や原生動物の役割を定量的に示すことが可能となった。そこで、伊勢湾における微生物ループの役割について、計算結果から検討を行った。

(1) 細菌の現存量

伊勢湾全域における有機物の平均現存量を計算結果から算出した(表-1)。有機物全体としては溶存態有機物が約3/4を占めており、生物量(魚介類を除く)は有機物全体の約15%であった。生物の中では植物プランクトンの現存量が圧倒的に多く、81.5%を占めていた。好気性細菌は生物中の3.9%、有機物全体では0.6%であった。伊勢湾での生物中に占める細菌の割合として、福留ら⁶⁾は5.4%、Uyeら⁷⁾は3.3%であったことを報告しており、計算結果は観測値と概ね一致していた。

表-1 伊勢湾全域での平均有機炭素量

種類	現存量 [mgC m ⁻²]	割合[%]	
		全体	生物
溶存態有機物	35018	74.60	—
懸濁態有機物	4919	10.48	—
植物プランクトン	5707	12.16	81.48
動物プランクトン	345	0.73	4.92
原生動物	680	1.45	9.71
好気性細菌	272	0.58	3.88

(2) 細菌の生産量

伊勢湾の各海域について、水柱の一次生産量(Primary production; PP)と細菌の生産量(Bacterial production; BP)を求めた(表-2)。BP/PP比率は、全域平均で18.2%であり、値は海域によってばらついているが、この理由は、前述したように表層付近では細菌量が過小評価され、水深の浅い地点でBPが低くなったためである。そのため、実際の浅場におけるBP/PP比率はここでの試算より大きいことが示唆される。

一方、観測から見積もった比率として、Coleら⁸⁾は種々の海域におけるBP/PP比率は、平均で約30%であることを報告している。伊勢湾においては、Uyeら⁷⁾が31.8%、および福留ら⁶⁾は10%であることを報告しており、計算結果はこれらの文献値と同程度の大きさであった。従って、細菌が生物循環に重要な役割を担っていることが数値計算からも定量的に明らかとなった。

(3) 生物循環と微生物ループ

伊勢湾全域における水柱平均の生物循環フローを算出

した(図-11)。また、動物プランクトンの飼料源として細菌がどの程度寄与しているか調べるため、古典的生食食物連鎖由来の量と、微生物ループ由来の量の比較を行った。伊勢湾全域における動物プランクトンの正味捕食量(捕食量から排糞量を除いた量)の割合を算出したところ、植物プランクトンの割合(生食食物連鎖由来)は全体の65.5%を占め、原生動物の割合(微生物ループ由来)は全体の1.4%であった。すなわち、動物プランクトンの飼料源のうち、微生物ループ由来は生食食物連鎖由来の2.1%であった。繊毛虫のバイオマス量は珪藻と渦鞭毛藻のバイオマス量の2.3%であり、原生動物の捕食量が少ない理由はバイオマス量が少ないためである。そのため、伊勢湾での動物プランクトンの飼料源は植物プランクトンが主体的であった。

表-2 各海域での一次生産量と細菌生産量

項目	伊勢湾 (広義)	伊勢湾 (狭義)	三河湾
平均水深[m]	18.8	21.6	10.4
PP: 一次生産量 [mgC m ⁻² d ⁻¹]	738.5	762.8	664.9
BP: 細菌生産量 [mgC m ⁻² d ⁻¹]	134.4	166.5	37.4
BP/PP[%]	18.2	21.8	5.6

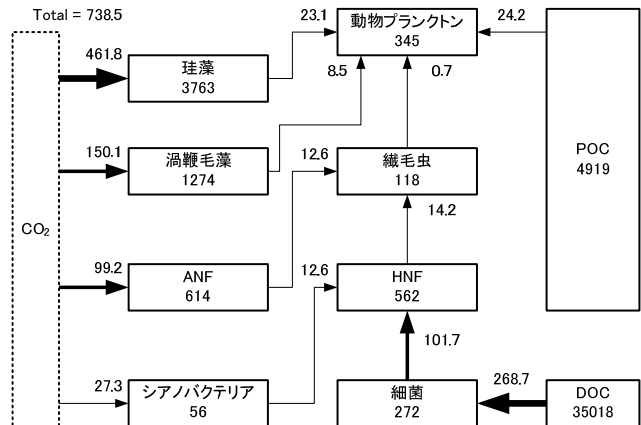


図-11 伊勢湾全域における炭素の生物循環フロー(グロス)およびストック: 矢印中の単位は [mg C m⁻² d⁻¹], ボックス内の単位は [mg C m⁻²].

(4) 酸素消費量に占める細菌の割合

伊勢湾中央部(St. A)において、水中の平均的な生物量、および酸素変化、酸素消費の内訳について、それぞれの鉛直プロファイルを調べた(図-12)。なお、表層での再曝気および、底層での酸素消費は除いている。生物量は植物プランクトンが優占しており、特に水深12m程度までの有光層で生物量が多かった。各水深での細菌量は表層で全体生物量の1%、底層でも12%であり、生物量に占める割合は小さかった。

水中の溶存酸素の変化は、光合成による増加と、呼吸

や化学反応による消費に分けられる。光合成速度は最表層においては強光阻害が発生するため、水深2.5 mで最大の422 [mgO₂ m⁻³ d⁻¹]となり、15 m以下ではほぼ0となっていた。酸素消費速度は生物量の多い表層で最大の151 [mg O₂ m⁻³ d⁻¹]となり、15 m以下では約70 [mg O₂ m⁻³ d⁻¹]で、ほぼ一定値となっていた。酸素増加と消費を合わせた正味の酸素変化速度は7 m以深で減少に転じていた。

酸素消費の割合の鉛直プロファイルにおいて、表層は植物プランクトンによる呼吸が全体の酸素消費の87%を占めていた。しかし、深くなるにつれて植物プランクトンの現存量とともに減少し、底層での酸素消費に占める割合は21%であった。逆に、細菌の呼吸が酸素消費に占める割合は深いほど高くなり、底層では50%を占めていた。底層における貧酸素水塊の形成に、細菌の酸素消費が大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

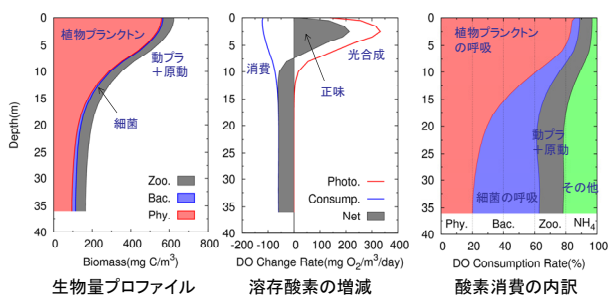


図-12 伊勢湾中央部における微生物量と酸素消費に関するプロファイル

このように、伊勢湾における酸素消費に対する細菌の寄与が定量的に示された。これはISの計算によって始めて明らかとなったことである⁹⁾。ただし、細菌の現存量が過小評価されていることなど、モデルにはまだ改良すべき点が残されているため、より正確な定量化を行うことが今後の課題である。

5. 結論

(1) 伊勢湾シミュレーターの開発

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- ・伊勢湾の水質環境予測を行うための数値シミュレーションモデルである伊勢湾シミュレーターを開発した。
- ・計算結果と観測値を比較し、精度の検証を行った。潮流、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。
- ・モデルの計算結果から、微生物ループの役割について解析を行った。細菌の現存量（ストック）は生物量の

3.8%であるが、細菌生産量（フロー）は一次生産の18%に相当することが明らかとなった。

(2) 今後の取り組み

伊勢湾再生の推進を図るため、伊勢湾・三河湾において環境修復事業を展開することが重要である。環境修復事業を行う上で、複雑な海域環境を再現した伊勢湾シミュレーターを開発し、それをを用いて事業の評価を行うことができるようになった意義は大きい。貧酸素水塊の解消や底質環境改善効果を定量的に予測することにより、効率的に浅場・干潟の造成、浚渫地を修復する適切な場所を選定することが期待できる。今後は、より現実に即した詳細なメッシュでのシナリオ計算を行う予定である。

謝辞： 港湾空港技術研究所の中村由行氏、鈴木高二朗氏、井上徹教氏、田中陽二氏から本論文についてご助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 有田正光、池田裕一、中井正則、中村由行、道奥康治、村上和男 (1998) : 水圏の環境、東京電機大学出版局、p404.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 福留真樹・畑恭子・中田喜三郎 (2000) : 1995年5月～1996年3月の伊勢湾における細菌、*Synechococcus*, ANF, HNF, 動物プランクトン、ネット動物プランクトンの変動と相互の関係、*海洋理工学会誌*、第6巻、pp.59-72.
- 7) Uye, S. et al. (2000): Abundance, biomass, production and trophic roles of micro- and net-zooplankton in Ise Bay, central Japan, in Winter, *J. Oceanogr.*, Vol.56, pp.389-398.
- 8) Cole, J. J. et al. (1988): Bacterial production in fresh and saltwater ecosystems: a cross-system overview, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.43, pp.1-10.
- 9) 田中陽二・中村由行・鈴木高二朗・井上徹教・西村洋子・内田吉文・白崎正浩 (2011) : 微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築と伊勢湾への適用、*土木学会論文集 B2 (海岸工学)*、Vol.67、印刷中.