

大気－海洋－波浪－水質結合モデルの構築と 東海豪雨時における伊勢湾の水質構造解析

Development of Atmosphere-Ocean-Wave-Water Quality Coupled Model and
Numerical Analysis of Water Quality Structure in Ise Bay at Tokai Heavy Rain

川崎浩司¹・村上智一²・大久保陽介³・金 昌勲⁴・水谷法美⁵

Koji KAWASAKI, Tomokazu MURAKAMI, Yosuke OKUBO, Chang-Hoon KIM and Norimi MIZUTANI

Water quality structures in a semi-enclosed water area are influenced by not only meteorological disturbances but also freshwater inflow from rivers. Large floods, in particular, have a great impact on ecosystem. In this paper, an atmosphere-ocean-wave-water quality coupled model was developed so that the primary production of phytoplankton, the decomposition of organic matters and the circulation of nitrogen and phosphorus can be estimated. The coupled model was applied to elucidate water quality structure in Ise Bay at the Tokai heavy rain. As a result, the model was found to be capable of reproducing water quality structure during the Tokai heavy rain. Furthermore, it was revealed that the abrupt change of the water quality structure during the Tokai heavy rain is mainly dominated by river load.

1. はじめに

半閉鎖性水域の流動・密度構造の短期的変動には、風による吹送流、風波砕波による海水混合、日射による成層化、降水・蒸発等の気象場ならびに河川からの淡水流入の影響が支配的である。よって、流動・密度構造と密接な関係にある水質構造を精緻に評価するためには、気象擾乱と河川の影響を十分に考慮して海象場を再現することが必須である。特に、出水時は海域の環境を大きく変化させることから、出水時の激しい気象擾乱や、河川から多量の淡水流入の影響を適切に考慮して水質構造を再現できるモデルが必要である。

近年、海洋場の再現に対して気象擾乱の影響を適切に考慮するために、気象モデルが積極的に利用されている。瀬戸内海を対象とした大気海洋モデルを開発し、局地風の風況特性やそれに伴う吹送流の応答特性を明らかにした陸田ら(2003)の研究、MM5・WW3・POMの結合モデルを並列計算する数値計算システムを構築し、台風9918による八代海・有明海および周防灘における高潮・高波の追算を行った金・山下(2004)の研究、高潮の再現計算において、気象モデルを用いた計算手法は、従来の台風

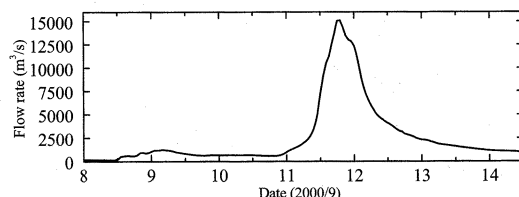


図-1 東海豪雨時の木曽三川(揖斐・長良・木曽川)の流量

モデルを用いた方法よりも高精度で潮位変動を再現できることを明らかにした村上ら(2007)の研究等が存在する。著者らも大気－海洋－波浪結合モデルを構築し、春夏秋冬や東海豪雨時を対象に伊勢湾海域の再現計算を実施し、モデルの有用性を実証している(村上ら, 2006; 2007)。

しかしながら、大気－海洋－波浪結合モデルを活用し、水質計算への展開を図った研究例はほとんどないのが実状である。大気－海洋－波浪結合モデルに簡易水質モデルを組み込み、夏季伊勢湾における貧酸素水塊の挙動の再現計算を行った鶴飼ら(2006)の研究があるのみである。しかし、使用した簡易水質モデル(佐々木ら, 1997)では、溶存酸素、有機物、無機栄養塩の3要素を代表変数として計算を行っており、植物プランクトンを有機物に含めていることや、窒素・リンの循環を考慮していないなどといった問題が残されており、水質モデルの更なる高度化が必要である。

また、伊勢湾は木曽三川からの淡水流入の影響が大きく、特に2000年9月の東海豪雨時(図-1参照)においては、河川流量の増加に伴いエスチュアリー循環が卓越し、湾内の流動・密度構造が大きく変化することが明らかとなっている(村上ら, 2007)。しかしながら、東海豪雨時の水質構造の再現計算は行われておらず、水質特性についてはまだ十分な検討が行われていない。よって、出水によ

- 1 正 会 員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
- 2 正 会 員 博(工) 豊橋技術科学大学産学官連携研究員 工学部建設工学系
- 3 正 会 員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社大阪本社水工技術部港湾・海岸グループ
- 4 修(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
- 5 正 会 員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

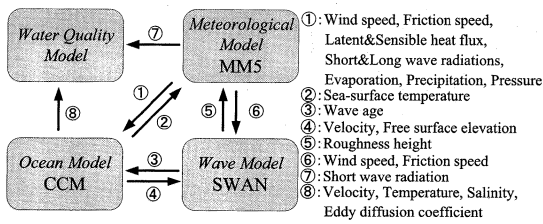


図-2 大気-海洋-波浪-水質結合モデル

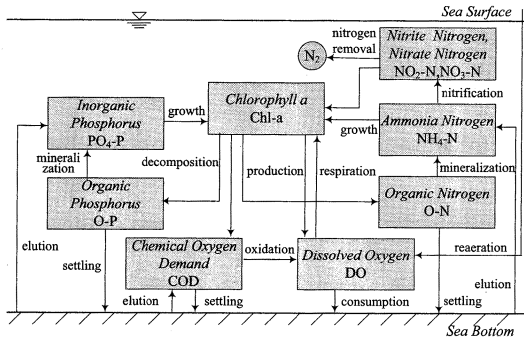


図-3 水質モデルの概要

り急変する水環境について詳しく議論を行うためにも、東海豪雨時の水質構造を明らかにする必要がある。

本研究では、大気-海洋-波浪結合モデルに、植物プランクトンの一次生産、有機物の分解、窒素・リンの循環を考慮した高度な水質モデルを導入した大気-海洋-波浪-水質結合モデルを構築し、伊勢湾海域の流動・密度構造が一変した東海豪雨時を対象に、水質構造の再現計算を実施する。そして、東海豪雨の出水前後における各水質項目の時空間変化について解析することにより、東海豪雨時の伊勢湾における水質特性について議論することを目的としている。

2. 大気-海洋-波浪-水質モデルの概要

本研究では、大気-海洋-波浪結合モデルとして、気象モデルMM5(ペンシルベニア州立大学・米国気象研究センター)、海洋モデルCCM(村上ら, 2004)、波浪モデルSWAN(デルフト工科大学)を採用した。大気-海洋-波浪結合モデルは、海面境界において、風速、摩擦速度、短波・長波放射、海面温度、流速、水面変位、波浪による粗度高さおよび波齡など、各モデルの計算結果を互いに影響させることにより、高精度な海水流動計算を可能とするモデルである。

本研究では、上記の結合モデルで計算した海水流速、水温、塩分、渦拡散係数、日射量を介して、結合モデルと水質モデルを連結し、新たに大気-海洋-波浪-水質結合モデルを構築した。構築した大気-海洋-波浪-水質結合モデルの概要を図-2に示す。本研究で導入した高度な水質モデルは、溶存酸素(DO)、化学的酸素要求量

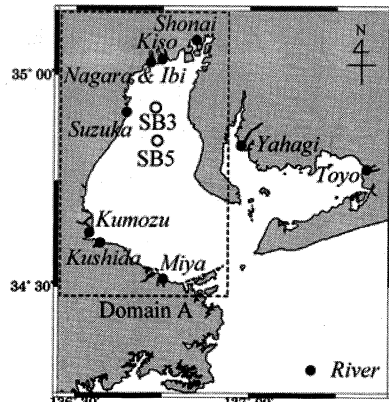


図-4 計算領域および観測点

(COD)、有機態リン(O-P)、リン酸態リン(PO₄-P)、有機態窒素(O-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、亜硝酸・硝酸態窒素(NO₂-N・NO₃-N)、クロロフィルa(Chl-a)の8つの水質項目の生化学的過程を考慮した入江ら(2004)のモデルに基づいている。この水質モデルでは、植物プランクトンの成長や呼吸・枯死、有機物の分解・生成、再曝気による酸素増加などを考慮しており、夏季の大阪湾における貧酸素水塊分布を精度よく再現できることが確認されている。図-3に水質モデルの概要を示す。

大気-海洋-波浪結合モデルは、気象擾乱の影響を考慮可能で、植物プランクトンの増殖する過程に影響を及ぼす日射等の気象場および各水質項目の移流・拡散過程に大きく関係している海洋場が適切に評価できるモデルである。よって、上記の結合モデルと水質モデルを連結することにより、高精度な水質構造の計算が可能と考えられる。また、水質モデルでは、CCMと同様、多重座標系の計算格子を用いているため、河川からの流入負荷や日射などの影響を強く受ける表層付近の計算を高精度に行うことができるモデルとなっている。

3. 東海豪雨時における伊勢湾の水質構造解析

(1) 計算条件

本研究では、東海豪雨の前後を含む2000年9月8日0時～14日12時(UTC)の期間における伊勢湾海域を計算対象とした。計算領域は図-4に示すとおりである。図-1に例示される伊勢湾に流入する主要10河川の1時間毎の河川流入量(国土交通省中部地方整備局)に各種水質項目の濃度を乗じたものを流入負荷量として水質モデルの河川境界値とした。ただし、クロロフィルaについては、長良川以外のデータがないため、長良川で観測されたクロロフィルaを各河川に与えている。水質構造計算の初期値には、中部国際空港株式会社・愛知県企業庁によって観測されたDO、クロロフィルaおよびCODのデータ、三重県科学技術振興センターの観測から得られた窒素、リン

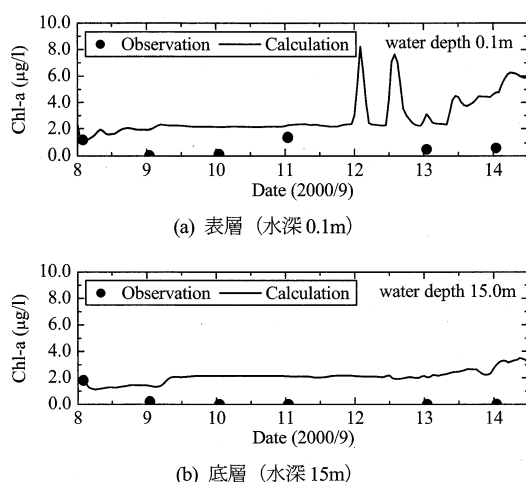


図-5 SB5におけるクロロフィルaの時系列

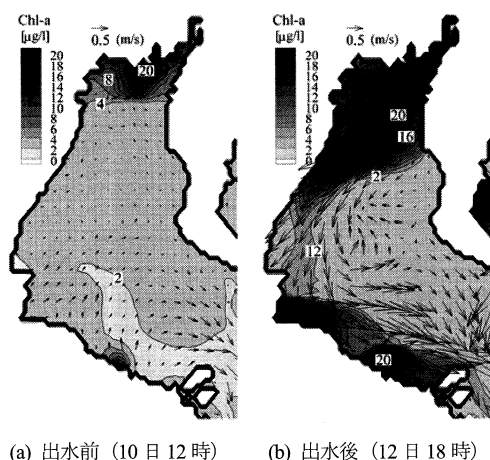


図-6 出水前後の領域Aにおける表層クロロフィルaおよび表層流速の空間分布

のデータに基づいて作成した。

また、DOに関しては、本研究で導入した水質モデルによる計算をCase1、鶴飼ら(2006)が用いた溶存酸素、有機物、無機栄養塩の3要素を代表変数とした簡易水質モデルの計算をCase2とし、2つの水質モデルによる計算結果の比較も行った。

(2) 水質構造の解析結果

まず、赤潮発生の重要な指標となるクロロフィルaの解析結果について検討する。図-5に、SB5におけるクロロフィルaの時系列を示す。観測値をみると、東海豪雨時である12日のデータが欠落しているものの、それ以外の期間においては、両水深とも $5\mu\text{g/l}$ 以下であることが確認できる。計算値は11日までは観測値とほとんど一致しているものの、12日以降には、水深0.1mにおいて計算値が上昇していることがわかる。13日以降にも計算さ

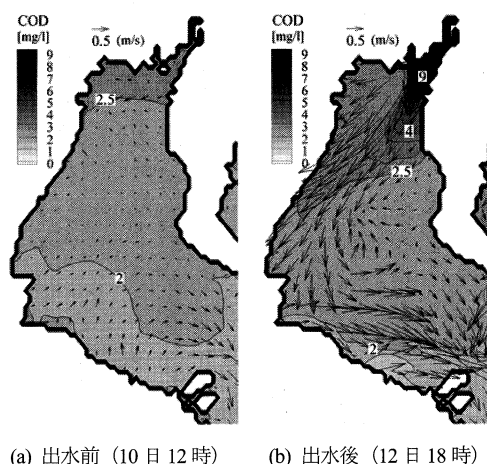
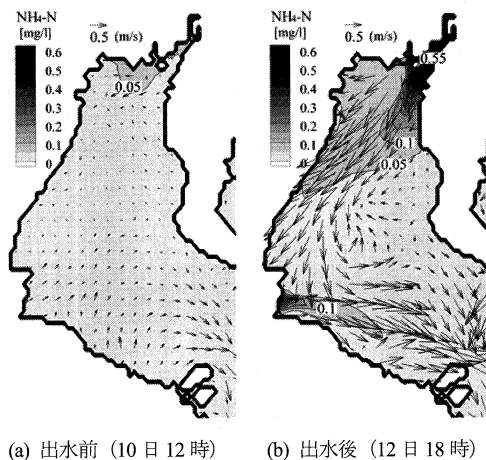
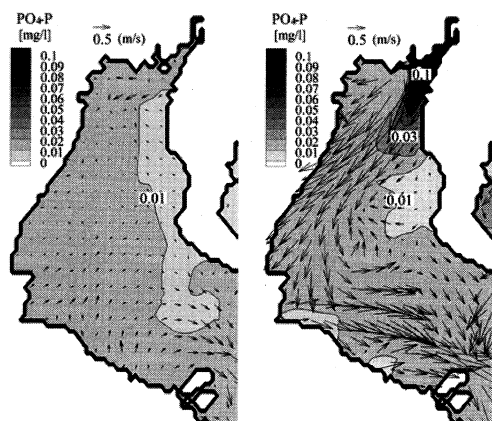


図-7 出水前後の領域Aにおける表層CODおよび表層流速の空間分布

図-8 出水前後の領域Aにおける表層NH₄-Nおよび表層流速の空間分布

れたクロロフィルaは増大しており、約 $10\mu\text{g/l}$ まで達している。この急激なクロロフィルaの上昇は出水による河川からのクロロフィルaの流入の影響であり、計算値は出水時の河川からのクロロフィルaの流入を過大評価していると考えられる。計算結果と観測結果の差異の一要因として、取得できたデータの関係上、長良川で観測されたクロロフィルa濃度を全河川の河川境界値として用いていることが挙げられ、河川からの流入負荷の設定については更なる検討が必要である。

図-6は出水前後の領域A(図-4参照)における表層クロロフィルaおよび表層流速の空間分布を示したものである。同図より、出水前には表層流速が小さく、木曽三川の河口付近にのみ高いクロロフィルa値の分布がみられる。出水後には、湾全域で湾口部に向かう強い流れが発生しており、その影響を受けて、河川から流入するクロ



(a) 出水前 (10日12時) (b) 出水後 (12日18時)

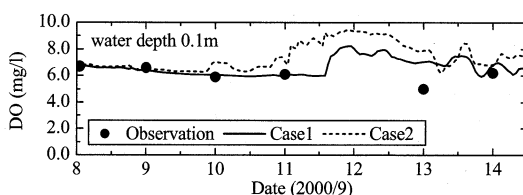
図-9 出水前後の領域Aにおける表層 $\text{PO}_4\text{-P}$ および表層流速の空間分布

ロフィルaの高い水塊が湾中央部を除く湾全域に広がっていることがわかる。今回の計算では、流入するクロロフィルa濃度の河川による違いがないと仮定しているため、出水後のクロロフィルaの分布が東海豪雨の出水後の塩分分布(村上ら, 2007)とほぼ同様な結果となっていると考えられる。

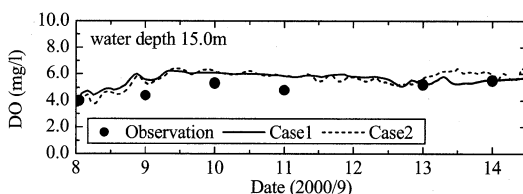
次に、東海豪雨時における有機物および栄養塩の変化について着目する。図-7は出水前後の領域Aにおける表層CODおよび表層流速の空間分布を示したものである。出水前には、湾全域で $2.0 \sim 2.5 \text{ mg/l}$ とほぼ一定値となっていることがわかる。出水後には、クロロフィルaと同様、湾奥部から湾口部に向かう流れの影響を受けて、湾奥部から湾中央部までのCODが上昇していることが確認できる。特に、湾奥部東側の名古屋港付近においては 9 mg/l と特に高い値を示していることがわかる。これは、庄内川から流入するCODの濃度が他の河川と比較して高かったためであると考えられ、CODは河川からの流入負荷の影響を強く受けると推察される。これは、現地観測データを解析した川崎ら(2006)の結果と一致している。

図-8、図-9はそれぞれ出水前後の領域Aにおける表層アンモニア態窒素、表層リン酸態リンと表層流速の空間分布を示したものである。これらの図をみると、出水前には湾全域でほぼ同様の値を示しており、出水後には、名古屋港付近で特に高い値となっていることがわかる。CODと同様、流入負荷の濃度の高い庄内川からの栄養塩流入の影響が大きかったものと推察される。

さらに、貧酸素水塊や青潮の発生に大きく関わっている溶存酸素に対する東海豪雨の出水による変化特性について考察する。図-10、図-11は、SB3およびSB5におけるDOの時系列を示したものである。同図から、Case1、

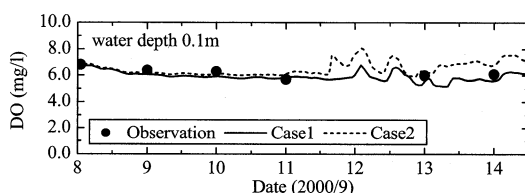


(a) 表層 (水深0.1m)

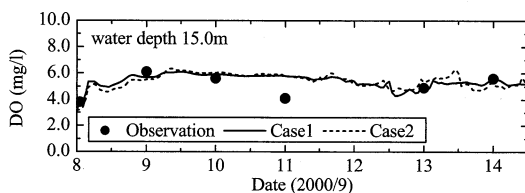


(b) 底層 (水深15m)

図-10 SB3におけるDOの時系列



(a) 表層 (水深0.1m)

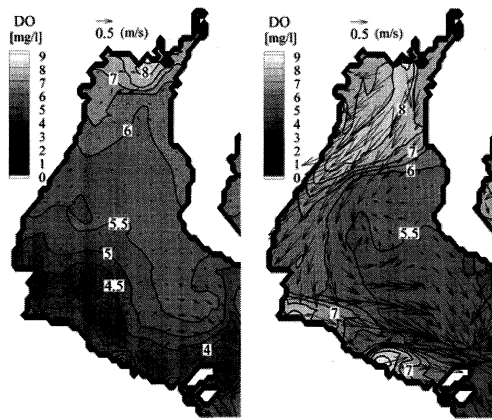


(b) 底層 (水深15m)

図-11 SB5におけるDOの時系列

Case2ともに、出水前後の表層および底層におけるDOをよく再現できていることがわかる。今回の計算では、東海豪雨による出水の影響が大きく、水質モデルの生物化学的過程よりも移流・拡散過程が卓越しているため、両モデルの計算精度に顕著な差が現れなかった。しかしながら、Case1の水質モデルの方がより高度な生物化学的過程を考慮しており、精度よく計算可能であるといえる。また、木曽三川の河口付近であるSB3と湾中央部付近のSB5の両観測点ともによく再現できていることから、本水質モデルはDOに対する東海豪雨時の河川流入の影響を適切に評価しているものと考えられる。

図-12に示すのは、出水前後の領域Aにおける表層DOおよび表層流速の空間分布である。同図をみると、出水後には溶存酸素の高い河川水の影響により、表層のDO濃度は上昇しており、伊勢湾湾奥部の表層DOは $8 \sim 9 \text{ mg/l}$ と特に高くなっていることがわかる。一方、図-13



(a) 出水前 (10 日 12 時) (b) 出水後 (12 日 18 時)

図-12 出水前後の領域Aにおける表層DOおよび表層流速の空間分布



(a) 出水前 (10 日 12 時) (b) 出水後 (12 日 18 時)

図-13 出水前後の領域Aにおける底層DOの空間分布；灰色トーンはDOが3mg/l以下の貧酸素水塊を示し，コンターは10m間隔の水深を示す。

に出水前後における底層DOの空間分布を示す。同図より，出水後において湾西部の水深が10m～20mと比較的浅い海域において，貧酸素水塊が解消していることがわかる。また，湾中央部の底層に発達している貧酸素水塊には，出水の影響がほとんど及んでいないといえる。その要因としては，夏季は密度成層が発達しているため，海水の鉛直混合が抑制されていることが挙げられる。

4. おわりに

本研究では，植物プランクトンの成長や呼吸・枯死，

有機物の分解・生成，窒素・リンの循環，再曝気による酸素増加などを考慮した水質モデルを大気-海洋-波浪結合モデルと連結し，新たな大気-海洋-波浪-水質結合モデルを提案した。そして，同結合モデルを用いて，東海豪雨時の伊勢湾海域を再現し，その水質構造を解析した。その結果，東海豪雨の出水後には，湾西部の水深が10m～20mと比較的浅い海域において，貧酸素水塊が解消していることが判明した。しかし，水深の深い湾中央部においては，出水後も貧酸素水塊が停滞しており，出水の影響は小さいといえる。

今後は，結合モデルの更なる高精度化を図るとともに，貧酸素水塊の挙動や赤潮・青潮の発生に着目し，様々な条件下の計算を行うことで，伊勢湾の水質構造について詳細に検討を進めていく予定である。

謝辞：海洋観測データは中部国際空港株式会社・愛知県企業庁より，河川流量データは国土交通省中部地方整備局よりそれぞれご提供頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 入江政安・中辻啓二・西田修三(2004)：大阪湾における貧酸素水塊の挙動に関する数値シミュレーション，海岸工学論文集，第51巻，pp.926-930。
- 鶴飼亮行・村上智一・安田孝志(2006)：気象場による擾乱を受けた伊勢湾・三河湾の貧酸素水塊の挙動の再現計算，海洋開発論文集，第22巻，pp.823-828。
- 川崎浩司・村上智一・大久保陽介(2006)：長期観測データに基づく伊勢湾の密度・水質構造の季節変動特性，海岸工学論文集，第53巻，pp.946-950。
- 金 庚玉・山下隆男(2004)：大気・波浪・海洋結合モデルによる台風9918号の高潮・高波の追算，海岸工学論文集，第51巻，pp.236-240。
- 佐々木淳・今井 誠・磯辺雅彦(1997)：内湾における溶存酸素濃度予測モデル，海岸工学論文集，第44巻，pp.1091-1095。
- 陸田秀実・市位嘉崇・秋山佳明・土井康明(2003)：局地気象モデルを用いた瀬戸内圏の風況解析と吹送流の応答特性，海岸工学論文集，第50巻，pp.436-440。
- 村上智一・川崎浩司・大久保陽介・金 鎮勲(2007)：東海豪雨時における伊勢湾海域の流動・密度構造の数値解析，海岸工学論文集，第54巻，pp.371-375。
- 村上智一・川崎浩司・山口将人・水谷法美(2006)：気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証，海洋開発論文集，第22巻，pp.103-108。
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫(2004)：気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重σ座標モデルの開発，海岸工学論文集，第51巻，pp.366-370。
- 村上智一・安田孝志・吉野 純(2007)：気象モデルおよび多重σ座標系海洋モデルを用いた台風0416号による広域高潮の再現，土木学会論文集B，Vol.63，No.4，pp.282-290。