東京湾底層DO分布の短期予測システムの水産分野への活用に向けた実証的研究

A Methodology for Application of a Nowcast/Forecast System for Bottom Layer Dissolved Oxygen (DO) to Fisheries in Tokyo Bay

石井光廣¹・古川恵太²・佐々木淳³・柿野 純⁴・増田修一⁵
小森明裕⁶・桃井幹夫⁷・麻生晃也⁷

Mitsuhiro ISHII, Keita FURUKAWA, Jun SASAKI, Jun KAKINO, Syuichi MASUDA
Akihiro KOMORI, Mikio MOMOI and Akiya ASO

Eutrophication is a serious problem in Tokyo Bay environment. As a result, hypoxic water mass occurs every year from spring to autumn. Since sea bass, caught in a trawl fishery in the bay, try to avoid hypoxic water mass, spatial distribution of DO in the bottom layer is the key information for the fishery. We thus developed a nowcast/forecast system for the bottom layer DO distribution coupling a coastal circulation model and an ecosystem model. We then enhanced the system with the assimilation of monitoring data, which is validated through the comparison between computation and measurements. Positions of sea bass catch and border of hypoxic water mass matched and the usefulness of the system have been confirmed.

1. はじめに

東京湾は、漁業の生産性が高く、浅海域ではのり養殖業およびアサリなどの貝類漁業、沖合域では底びき網・まき網・あなご筒などの漁船漁業が現在も盛んにおこなわれている重要な海域である。しかし、著しい富栄養化のために春から秋にかけて底層に貧酸素水塊が発生し(石井, 2003; 石井・大畑, 2010など), 水産生物に大きな影響を与えている(石井, 1992; 風呂田, 1998; 石井・庄司, 2005など)。特にまき網、底びき網漁業が漁獲対象とするスズキは、貧酸素水塊内には分布せず、その外側もしくは縁辺部の底層の溶存酸素量(DO)が2~3ml/l付近で多く漁獲される(石井・加藤, 2005)。そのため、底層のDO分布図は漁船の操業位置を決定するのにとても重要な情報であり、日々の情報提供が要望されていた。しかし、従来は、現地観測により得られたモニタリングデータをオフラインで図化し提供してきたことから、千葉県水産総合研究センター(以下、千葉水総研セ)では週1回の情報提供(「貧酸素水塊速報」); <http://www.pref.chiba.lg.jp/lab-suisan/suisan/suikaisokuhou/>

図-1 システムの概要

1	千葉県水産総合研究センター
2 正会員	博(工) 国土技術政策総合研究所 室長
3 正会員	博(工) 横浜国立大学教授 大学院都市イノベーション研究院
4	博(水) (株)東京久栄技術顧問 元千葉県水産総合研究センター東京湾漁業研究所長
5	千葉県水産総合研究センター 前千葉県水産課
6	千葉県館山水産事務所 前千葉県水産課
7	(株)中電シーティーアイ

index.html) が限度であり、モニタリングデータの活用という面からも、利用者のニーズの充足という面からも十分ではない状況にあった。東京湾の流動場の予測については、実際の気象・海象条件を時系列的に与える、いわゆるリアルタイムシミュレーションが有効性であることを田中ら（1997）が指摘しており、鯉渕ら（2005）などでは3次元数値モデルによるナウキャストシミュレーションの検討もされているが、実際にリアルタイムに計算し、情報を提供した例はない。Furukawa・Ishii(2004)は海域を平面的にボックス分割し、傾圧的な（バロクリニックな）循環を再現できるよう鉛直に多層化したMEL1D-MBモデル（古川ら、2001）により、貧酸素水塊の短期的な消長の再現の支配要因についてリアルタイム

シミュレーションを用いて検討した。その結果、気象条件や河川からの流量などを正確に入力することがモデルの再現性向上のために有効であることが明らかとなったが、短期的な溶存酸素の変動パターンを再現するには至らなかった。また、DOの鉛直分布を実測値を用いて同化すると、再現精度が向上することも確かめられた。

そこで本研究では（1）「毎日更新される短期予測（ナウキャスト）情報として底層DOの分布を配信する」ことを目標としたシステム開発、（2）モニタリングデータを活用した予測精度向上効果の検証、および（3）ニーズに合ったモニタリングデータの提供システムとしての適性についての検証を研究の目的とする。

表-1 シミュレーションの基本条件

項目	流動計算	貧酸素計算
対象範囲	東京湾を含む50km×70kmの領域格子幅1km 幅	
鉛直層区分	鉛直20層（0～30mは2mごと、～50mは5mごと）	
タイムステップ	6.0秒	60秒
潮汐条件	東京湾口（間口、金谷）の理論潮位に「横須賀」の実測の潮位偏差を加算して設定。	-
境界条件	千葉県の調査データ（St.23）の水温・塩分観測値を年周期の調和解析したものを境界条件として設定。	国総研の水質調査結果を年周期の調和解析したものを境界条件として設定。
河川の流量・水温・塩分 負荷	国総研の流量観測データと水位観測データ（国交省）より、水位と流量との関係式を作成。水位に応答した流量を設定。 水温は、各河川の気温-水温の関係式を作成し、時々刻々の気温データより推定。 塩分は全河川0とした。	各河川別にT-P、T-N、COD、SSの流量-負荷量の関係式（L-Q式）を作成し、流量に応じた負荷量を設定。
風向・風速	・AMeDAS 地点（木更津・船橋・新木場・羽田・千葉・東京・横浜） ・東京湾海象情報システム（行徳・金田・新富津） ・第二海堡 ・千葉灯標 の11地点の測定値を、3次元スプライン補間法によって1時間毎の風系マップを作成し、その風速を1.5倍したものを入力条件とする。	
降水量	AMeDAS（木更津・船橋・新木場・羽田・千葉・東京・横浜・日吉・佐久間） 以上の9地点の測定値を、3次元スプライン補間法により1時間毎の空間マップを作成し設定。	
気温	AMeDAS 地点（木更津・船橋・新木場・羽田・千葉・東京・横浜） 東京湾海象情報システム（行徳・金田・新富津）より設定。	
日射量・相対湿度	東京湾海象情報システム（行徳・金田・新富津）より設定。	
雲量	気象官署地点（千葉・東京・横浜）の月別平年値を与えた。	
コリオリのパラメータ	$8.45 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ （北緯35°30'）	
水平粘性・拡散係数	$2.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$	
鉛直粘性・拡散係数	乱流モデルより設定	
水平拡散係数	-	0.1 cm ² /sec
海面摩擦係数	0.0013	
層間摩擦係数	0.0013	
海底摩擦係数	0.0026	
水平拡散係数	-	0.1 cm ² /sec
生物パラメータ	-	中田（1993）より設定。

表-2 インターネットから収集する観測データ一覧

ホームページ	観測点	項目
アメダス (気象庁) http://www.jma.go.jp/jp/amedas/	千葉・東京・横浜・木更津・船橋・新木場・羽田・佐久間・日吉	降水量・風向・気温・相対湿度・日照時間
東京湾リアルタイム水質データMonitoring Post (海上保安庁海洋情報部) http://www4.kaiho.mlit.go.jp/kaihoweb/index.jsp	千葉灯標	風向・風速・水温・塩分・クロロフィルa・DO
リアルタイム験潮データ (海上保安庁) http://www.kaiho.mlit.go.jp/	横須賀	潮位・気圧
気象海象リアルタイム情報 (東京湾環境情報センター) http://www.tbeic.go.jp/	第二海堡	風向・風速
東京湾海象情報システム (千葉県漁業協同組合連合会) URL は非公開	行徳・金田・新富津	降水量・風向・風速・気温・相対湿度・日射量
水文水質データベース (国土交通省) http://www1.river.go.jp/	江戸川水系 (流山・野田・東金野井) 荒川水系 (治水橋・太郎右衛門橋・大芦橋) 多摩川水系 (石原・日野橋・調布橋)	水位

図-2 水質調査点。左図は計算精度の検証とパラメータのチューニングに使用する (●; 千葉水総研セ, □; 国土技術政策総合研究所, ◆; 海上保安庁海洋情報部のモニタリングポスト)。右図は同化データに使用する (□; 内湾底びき網研究会連合会, ▲; 神奈川県水産技術センター, ◆; 東京都環境局, ●; 千葉県環境研究センター)。左図の●, ◆は同化にも使用する。

2. 方法

(1) システム

システムの概要を図-1に示す。基本的には週1回取得される海域モニタリングデータや気象データで数値モデルを同化するシステムである。数値モデルには、三次元マルチレベル流動モデル (Leendertse ら, 1973; 中田ほか, 1983) と低次生態系モデル (中田, 1993) を使用した。

シミュレーションの基本条件は表-1に示す。計算領域は、東京湾を含む50km×70km、水平方向1kmメッシュ、鉛直20層 (0~30mは2mごと、~50mは5mごと) とした。インターネット上から気象情報や河川水位などのデータを自動収集し (表-2)、データベース化 (DB化) して境界条件 (入力データ) を作成し、計算をおこなう。水質データは、千葉水総研セの調査データのほかに、漁業者、

関係自治体 (内湾底びき網研究会連合会, 海上保安庁海洋情報部, 東京都環境局, 神奈川県水産技術センター, 千葉県環境研究センターなど) から提供されたデータ (図-2) を登録 (DB化) して、同化用データを作成する。

同化は、DOの観測値で観測点を中心とする半径10kmの当該計算領域の計算値を補正するナッジングにより行った (式 (1))。

$$\Phi = \Phi_{\text{計算値}} + \alpha(\Phi_{\text{観測値}} - \Phi_{\text{計算値}}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Φ は同化後の水質項目, $\Phi_{\text{計算値}}$ はモデルで予測された値, $\Phi_{\text{観測値}}$ は観測値, α はナッジング係数 (0.0~1.0の間の値) を示す。なお、ナッジング係数 α については、観測地点からの距離に応じて設定した (式 (2))。

$$\alpha = \cos\left(\frac{2\pi}{4 \times R} \times L\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

α はナッジング係数, R は同化半径, L は観測地点からの距離を示す。なお、同化半径 R については試行計算により10kmとした。同化時間は観測時刻より1時間とした。

なお、同日に湾全体の観測値が得られた場合には、全領域において初期値の更新を行う。

(2) 計算結果の検証

システム構築のためのモデルパラメータのチューニングには、2002~2004年に千葉水総研セが、2002~2003年に国土技術政策総合研究所が実施した東京湾水質データ (ともに、水温、塩分、DO、栄養塩濃度) と海上保安庁モニタリングポストの連続観測データ (水温、塩分、DO) を用いた (図-2)。また、システム運用開始後の精度検証は、環境省が東京湾貧酸素水塊発生機構解明調査において2006年5~10月に千葉港口第1号灯標近傍 (北緯35° 32' 15", 東経139° 57' 15", 水深18~20m) で連続観測したDOデータ (システムの同化には使用していない) を用いた。

図-3 システムの予測精度 (モニタリングポスト)

図-4 同化なしと同化ありの底層DO分布の予測図

(3) 底層DO分布と底びき網漁船のスズキ漁獲位置

東京湾の底びき網標本漁船5隻(船橋, 富津)の操業日誌から, 曳網位置とスズキ漁獲量を緯度経度1分間隔で集計し, 本システムで配信される底層のDO分布予測図と比較した。

3. 結果と考察

(1) 予測の精度

同化による本システムの精度向上効果について, 予測全地点・全区間における観測値と予測値の相関をとり, 決定係数 (R^2) を計算したところ, 観測値による同化を行わない場合には, 観測値と予測値の決定係数 (R^2) が水温で0.95, 塩分で0.73, DOで0.71であったが, 観測値で同化した場合, DOの決定係数は0.73であり, 大きな精度の向上はみられなかった。

一方, 2003年7月のモニタリングポストにおける底層DOについて実測値, 計算値(同化あり, なし)の時系列変化を比較すると, 11日のDO増加や13日のDO減少など計算値自体は実測値をよく再現していたが, 同化による補正は15日のように数時間で戻ってしまう状況もみられることから, 局所的・短期的な精度改善はみられるが, 全体に及ぼすような精度向上ではなかったと考えられた(図-3)。

(2) 同化なしと同化ありの予測図の比較

図-4に東京湾で水質調査が実施された日の本システム

図-5 実測値と計算値の比較 (千葉港口)

による同化をしなかった場合のDO分布予測図と同化した場合の予測図(2011年6月20日17:00)を示す。同化をすることによって, DOの低い貧酸素水塊がやや南側に移り, 湾奥ではDOが増加して貧酸素水塊が解消した海域が広がったことがわかる。毎回の調査を同化することで予測図が大きく変化することはなく, 前項で指摘した「局所的・短期的な精度改善はみられるが, 全体に及ぼすような精度向上ではない」という推察が確かめられた。

(3) 運用開始後の予測精度

運用開始後のシステムの予測精度について千葉港口の2006年5月～10月の連続観測データと同地点の予測値の時系列変化を用いて検証した結果, 底層水温では5～8月にやや高め, 9月以降はやや低めであり, 底層塩分では7月前半までは低めで推移したが, 概ね季節変動を再現しており, 底層DOは実測値と良好に一致する精度を有していることがわかった(図-5)。

(4) 底層DOの予測分布図と底びき網漁船のスズキ操業位置の関係

図-6に観測値による底層DO分布(左)と数日後のDO予測分布図およびその日の底びき網漁船によるスズキ操業位置を示す。2007年6月18日観測の6日後(6月24日)には, 貧酸素水塊が南偏して北東部のDOの上昇がみられた海域に, スズキが多く漁獲され, 8月6日観測の4日後(8月10日)には, 貧酸素水塊が内湾の広範囲に拡大し, 湾東部の沿岸と南東部の貧酸素水塊の縁辺部で操業がおこなわれ, スズキが多く漁獲されている状況が示され, 漁船は予測図を参考に操業位置を決定しスズキを漁獲している可能性が示唆された。

4. 結論

上記のように, ①貧酸素水塊(底層のDO分布)をリアルタイムに情報提供するシステムが開発され, ②必要

図-6 底層DO分布の予測図とその日のスズキ漁獲位置 (●; kg/曳網)

な境界条件を適正に与え観測値による同化を行うことで必要な予測精度を持って底層DO分布が予測され、③底びき網漁船の漁場探索の効率化などニーズに合った活用が図られた。

富栄養化の著しい東京湾における水産生物の分布や移動に対する影響は、生物の生活史(季節変動, 日周変動, 産卵行動, 適水温など)より, DO分布の方が大きいと考えられる。この中で, これまで広範囲の現地観測でしか得られなかった底層のDO分布を低次生態系モデルにより精度の高い予測が可能となった意義は, 観測結果の有効活用, ニーズに合った情報提供の面からみて決して小さくない。

なお, 同化により, DO予測分布が大きく変化しない事例もあり, 同化による精度向上効果が顕著でない場合も見られたが, 湾外から外洋水が侵入したり, 台風や大型低気圧の通過などにより, モデルによる計算結果が観測値と大きくずれてしまう可能性があることを考慮する

と, システムの堅牢性を確保するためにも同化を取り入れて, 運用していくことが有効であると考えられる。

謝辞: 本システムを開発, 運用するに当たり, 気象庁 (AMeDAS), 国土交通省河川局, 海上保安庁海洋情報部, 国土交通省関東地方整備局港湾空港部, 千葉県漁業協同組合連合会のwebデータを使用させていただきました。データ同化, 初期値の作成のためのデータについては, 東京都環境局, 海上保安庁海洋情報部, 海上保安庁第三管区保安本部海洋情報部, 神奈川県水産技術センター, 内湾底びき網研究会連合会, 千葉県環境研究センターのみなさまから貧酸素水塊速報の発行に引き続き, 観測データを提供していただいています。計算結果の検証については, 環境省水・大気環境局の観測データをご提供いただきました。

参考文献

- 石井光廣 (1992): 東京湾におけるマコガレイの分布・移動, 千葉水試研報, 50号, pp.31-36.
- 石井光廣 (2003): 東京湾に発生する貧酸素水塊の規模の評価方法について, 千葉水研研報, 2号, pp.29-37.
- 石井光廣・大畑 聡 (2010): 東京湾の水質と貧酸素水塊の変動, 沿岸海洋研究, 48号, pp.37-44.
- 石井光廣・加藤正人 (2005): 東京湾の貧酸素水塊分布と底びき網漁船によるスズキ漁獲位置の関係, 千葉水研研報, 4号, pp.7-15.
- 石井光廣・庄司泰雅 (2005): 東京湾における2003年のアカガイ大量発生, 千葉水研研報, 4号, pp.35-39.
- 鯉淵幸夫・磯部雅彦 (2005): 2004年の東京湾西岸横浜港周辺における青潮の発生要因, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.896-900.
- 田中昌宏・稲垣 聡・八木 宏 (1997): 東京湾成層期の流動のリアルタイムシミュレーション, 海岸工学論文集, 44号, pp.386-390.
- 中田喜三郎 (1993): 生態系モデルー定式化と未知のパラメータの推定法ー, 海洋工学コンファレンス論文集, Vol.7/8, pp.99-138.
- 中田喜三郎・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史 (1983): 追波湾の3次元潮流シミュレーション, 公害資源研究所集報, 12号, pp.17-36.
- 古川恵太・中山恵介・岡田知也・宮野 仁 (2001): 環境施策に資する内湾域の総合的な環境把握を目指したMEL1D-MBモデルの構築, 国総研研究報告, 1号, pp.1-16.
- 風呂田利夫 (1998): 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について, 沿岸海洋研究ノート, 25号, pp.104-113.
- Furukawa K and M. Ishii(2004): Collaborative bay watch program-Monitoring and Modelling of anoxic water in coastal zone. OCEAN '04 MTS/IEEE/TECH-NO-OCEAN'04, pp.1781-1786.
- Leendertse J. J. , R. C. Alexander and S. K. Liu (1973): A three dimensional model for estuary and coastal seas. Principle of computation vol. 1, The Rand Corporation, R-1417-OWPR.,71p.