統合型海域環境影響評価モデルの構築と 多摩川河口・羽田空港周辺海域への適用

灘岡和夫¹・八木 宏²・中川康之³・二瓶泰雄⁴・山中亮一⁵
内川直洋⁶・川崎浩司⁷・三島豊秋⁸

¹フェロー会員 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究科情報環境学専攻
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)
E-mail:nadaoka@met.titech.ac.jp

²正会員 防衛大学教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
E-mail: yagih@nda.ac.jp

³正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 沿岸土砂管理研究チームリーダー
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:y_nakagawa@ipc.pari.go.jp

⁴正会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)
E-mail:nihei@rs.noda.tus.ac.jp

⁵正会員 徳島大学講師 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)
E-mail:ryoichi_yamanaka@tokushima-u.ac.jp

⁶正会員 国土交通省関東地方整備局 東京湾口航路事務所 (〒238-0005 神奈川県横須賀市新港町13番地)
E-mail: uchikawa-n83ab@mlit.go.jp

⁷正会員 株式会社ハイドロソフト技術研究所 執行役員兼研究開発センター長
(〒530-6126 大阪市北区中之島3-3-23中之島ダイビル26F)
E-mail:kawasaki@hydro-soft.co.jp

⁸正会員 株式会社ハイドロソフト技術研究所 (〒530-6126 大阪市北区中之島3-3-23中之島ダイビル26F)
E-mail:mishimata@hydro-soft.co.jp

本研究では、「陸域－河口域・浅場－干潟域－湾域－外洋域」連成システムの枠組みの中で、沿岸海域における物理・化学・生物過程を総合的に把握し、高精度で定量的に評価・予測することが可能な統合型海域環境影響評価モデルを構築した。さらに、構築したモデルを多摩川河口・羽田空港周辺海域に適用することにより、新滑走路建設に伴う周辺海域への影響評価を行った。その結果、本モデルにより流況・水質環境に関する観測結果を高い精度で再現することができ、新滑走路建設に伴う周辺海域への影響として、多摩川河道内で塩分が低下する可能性があることなどが予測された。

Key Words : integrated environmental impact assessment model, coastal environment, “land-estuary-inner bay-outer sea” linkage system, Tama River estuary, Haneda Airport

1. はじめに

羽田空港、中部国際空港および関西国際空港等、大規模な海上空港がエスチャリ域に建設されており、このような大規模構造物の建設に伴う周辺海域への影響の評価が大きな課題になっている。特に、河口前面域への大規模構造物の建設は、その周辺での流れ・波および成層構造を変化させることで周辺海域の流動・波動環境に大き

な影響を与える可能性を有している。構造物近傍では、大規模な渦・乱れおよび縮流部・死水域が形成され、流れおよび海水混合特性が大きく変化することが想定される。さらに、これらの変化は、大規模構造物の近傍場での水質環境に影響を及ぼすだけでなく、塩水くさびを通じて河川内への海水侵入挙動、河口域での塩分環境および成層構造、エスチャリ循環の構造を変化させて河口域での物質循環および生態系へ影響を及ぼすことも想定さ

れる。このような沿岸海域での複雑な物理・化学・生物過程を総合的に把握し、定量的に環境影響を評価・予測するうえで、数値シミュレーションの果たす役割は極めて大きい。

汎用性・信頼性の高い環境影響評価モデルの構築に当たっては、①3次元流動－水質－底質－生物過程統合型モデルであること、②「陸域－河口域・浅場－干潟域－湾域－外洋域」連成システムの枠組みの中で対象海域の環境変動を解析可能とするために陸域負荷と外洋影響を合理的に考慮できるモデル体系であること、③その連成システムをアルゴリズム上合理的に数値解析可能とするための多段階スケールカップリングモデルであること、等が重要になる。

本研究では、これらの要件を満たす統合型海域環境影響評価モデルシステムを構築するとともに、多摩川河口・羽田空港周辺海域に適用することにより、対象水域での物理・化学・生物過程を総合的に把握し、羽田空港での新滑走路建設の影響を評価することを試みる。

2. 統合型海域環境影響評価モデルの概要

本研究で開発した統合型海域環境影響評価モデルは、POM (Princeton Ocean Model) ¹⁾を拡張した流況・土砂輸送モデル ECOMSED (Estuarine Coastal and Ocean Modeling System with Sediment) ²⁾をベースに、東京湾・羽田空港周辺海域を対象とする水質・底質環境、土砂輸送、地形変化予測等が可能な統合型海域環境影響評価モデルとして構築されている。モデルは、大きく分けて流動・波浪モデル、水質・底質環境モデルおよび底質輸送・地形変化モデルで構成される。その主な特徴は、①浮遊系－底生系結合型水質生態系モデルをコアモデルとして構築していること、②陸域負荷評価に関しては、二瓶ら ³⁾による実測に基づく最新の評価モデルを導入するなど、陸域負荷・外洋影響を合理的に評価するモデル体系となっていること、③混合粒径および fluid mud モデル ^{4,5)}を組込んだ土砂移動・地形変化モデルが組込まれていること、④モデルシステム全体としての多段階スケールカップリング計算を可能とする 2-way ネスティングモデルとしていること、等である。統合型海域環境影響評価モデルの概念図を図-1に示す。

ECOMSED における流動モデルに導入されている σ 座標系は、その特性上、海底地形が急変する箇所では水平圧力勾配および水平拡散勾配の評価において誤差が生じ、密度成層の形成等に影響を及ぼすことが指摘されている。モデルでは、それを軽減させる方法として、一般 σ 座標系 ⁶⁾へと改良している。さらに、河川流計算と湾内流動計算を合理的に接続するための河川内標高座標の導入、および干出計算のための wet & dry モデルの導入等の改

図-1 統合型海域環境影響評価モデルの概念図

良、羽田空港新滑走路の栈橋部におけるジャケット構造による流況への影響モデル等の改良を行っている。ジャケット構造の流況への影響は群杭密度および群杭の抗力係数を用いた抵抗として、また乱流への影響は群杭の抵抗によって失うエネルギーが乱れのエネルギーへ変換されるとしてモデル化されている。なお、群杭の抗力係数には円柱の抗力係数を適用している。一方、海洋・沿岸域の波浪推算モデルには、デルフト工科大学で開発された第3世代波浪推算モデルである SWAN (Simulating Waves Nearshore) ⁷⁾を用いている。

水質生態系モデルは、有機物を有機態炭素、有機態窒素および有機態リンより構成する低次生態系モデルとして構築されており、底層での溶存酸素の再現性を高めるために還元物質をコンパートメントとして考慮している。また、底泥における窒素、リンおよび有機物の挙動をモデル化した底生系モデルを構築し、水質生態系モデルと統合することにより、底泥における有機態リン、有機態窒素、有機物、無機態リン、無機態窒素、窒素、リン、および有機物の溶出速度などの評価が可能なモデルとなっている。羽田空港新滑走路栈橋部では水塊の停滞により有機物の沈降による負荷が増加して底質環境の悪化が周辺に比べ著しくなることが予想される。新滑走路建設に伴う影響評価では底質環境モデルの導入は必須である。

底質輸送・地形変化モデルは、ECOMSED に組み込まれている底質輸送・地形変化モデルをベースとしているが、ECOMSED のモデルでは粘性、非粘性材料のそれぞれに対して単一粒径として扱っている。そこで、本モデルでは、①粘性材料、非粘性材料それぞれに関して混合粒径での底質輸送モデル、②ならびにそれに対応した混合粒径に対する地形変化モデルとするとともに、③海底での底質の粒度分布変化を表現可能なモデル（多層モデル：底質内を多層分割することにより侵食堆積に

伴う粒度分布変化を表現)を導入して汎用化を図っている。さらに、河口前面のある程度の水深を有する海域では流動泥が存在し得ることから、④fluid mudとしての底泥輸送モデル^{4,5)}を組み込んでいる。

POMにおける計算アルゴリズムでは、External modeとInternal modeの計算がほぼ独立しており、両者はほぼ独立にネスティングすることができる。そこで、2-wayの多段階スケールカップリング計算のアルゴリズムでは、External modeに対しては津波等におけるネスティング・アルゴリズムを参照して、一方Internal modeではExternal modeの大領域および小領域の計算結果に基づいて算出される各物理量をExternal modeとは独立にネスティングさせている。図-2に、多摩川河口・羽田空港周辺海域を対象とした2-way ネスティング計算における広領域(東京湾全体)および狭領域(多摩川河口・羽田空港周辺海域)を示す。また、図-3に2-way ネスティング計算の手順を示す。

3. 多摩川河口・羽田空港周辺海域への適用

構築された統合型海域環境影響評価モデルを、多摩川河口・羽田空港周辺海域へ適用した。対象計算領域は、図-2に示した東京湾全体に対する広領域および多摩川河口・羽田空港周辺海域を対象とする狭領域である。広領域に関しては、格子サイズ500~700m程度で南北方向44メッシュおよび東西方向134メッシュで分割している。狭領域に関しては、格子サイズ20~100m程度で南北方向154メッシュおよび東西方向88メッシュで分割している。また、鉛直方向は、13層である。

対象期間は2011年の7~9月の夏季であり、流況および水質計算に対する助走期間を1ヶ月としていることから、実質的な計算期間は2011年の6月~9月の4ヶ月間である。東京湾湾口での沖合境界条件の設定では、潮位変動には気象庁布良観測所での観測潮位を、水温・塩分

には神奈川県水産技術センターによる浅海定線観測データを、また水質項目には公共用水域データから入手可能であった城ヶ崎沖の1999年4月~2000年3月までの毎月の観測値を準用した。流入負荷等の陸域境界条件の設定には、東京湾の主要9河川および29処理場からの淡水流入および流入負荷を考慮している。その際、河川における負荷量評価には、大出水時を含む数多くの出水時データに基づいた $L-Q$ 式が用いられる³⁾。また、湾内への負荷量の寄与が大きい下水処理場から負荷³⁾を考慮していることも本モデルの特徴である。

図-5に、2011年の図-4に示す地点M6での水位・流速の時系列比較を示す。2011年夏季における地点M6での水位流速観測が8~9月を中心に実施されていることから、図中でこの期間に対する比較を行っている。計算結果における水位の時系列変化は、観測結果を良く再現している。一方、流速に関しては、細かな流速変動に対してはピーク値に若干のずれは見られるが、9月初旬および末での流速の増加傾向は再現されており、全体的な流速変化の傾向は良く再現されている。また、図-6には、2011年地点M6でのホドグラフとしての底層流速の比較を示す。底層流速の計算結果は観測結果を良好に再現している。

図-7に、2011年の図-4に示す地点M4における水温および塩分の時系列比較を示す。図中には、8月のみであるが、1-way ネスティングによる計算結果も示してい

る。2-way ネスティングによる水温の計算結果では、観測結果に見られる9月初旬の上層水温の低下が再現されておらず、下層ではやや低めにはなっているが、全体的には再現されている。また、塩分に関しては、上層、中層および下層ともに良く再現されている。一方、1-way ネスティングによる計算結果では、上層の水温および塩分は良く再現されているが、中層および下層での再現性は2-way ネスティング計算結果に比べ低い。

図-8および9に、2011年地点 M4 および M6 におけるクロロフィル a および溶存酸素の時系列比較を示す。2-

(1)水温

(2)塩分

図-7 2011年地点 M4 での水温および塩分の時系列比較

way ネスティングによる計算結果は、地点 M4 の下層における溶存酸素が観測結果に比べ全体的に低めであることを除けば、観測結果におけるクロロフィル a および溶存酸素の時系列変化の傾向を良好に再現している。羽田空港人工島沖 (地点 M2) に対する同様の比較結果においても時系列変化の傾向を良好に再現していた。下層の溶存酸素については、若干過小評価であるが、9月5日および13日での千葉県貧酸素水塊速報によると溶存酸素は 1mg/L 以下になっていた。一方、1-way ネスティングによる計算結果は上層でのクロロフィル a を除いて全体的に観測結果を過小評価する傾向にあり、2-way ネスティングに比べ再現性は低くなる。

これらの結果により、統合型海域環境評価モデルは多

図-8 2011年地点M4でのクロロフィルa
および溶存酸素の時系列比較

図-9 2011年地点M6でのクロロフィルa
および溶存酸素の時系列比較

摩川河口・羽田空港周辺海域での流況場および水質環境を高精度で再現できることが確認される。

4. 羽田空港新滑走路建設に伴う影響

構築したモデルを用いて、羽田空港新滑走路建設に伴う周辺への影響について検討した。図-10に、新滑走路建設に伴う2011年8月全期間(8/1~8/31)での残差流の比較結果を示す。新滑走路建設後には、空港島により流れが阻害されており、上層では栈橋部においてジャケットによる抵抗により流速の低下傾向が表れている。また、それに伴い河口から栈橋部南側を流れる流速が速くなる傾向が示されている。一方、下層では河口から空港島背後を通して北上する残差流流速が大きくなっている。

2011年8月の全期間(8/1~8/31)、その間の潮汐卓越期間(8/10~8/12)、湧昇流期間(8/23~8/25)、流量大期間(8/26~8/28)の4期間を対象に、塩分環境へ及ぼす新滑走路建設の影響について検討した。図-11に、これら4期間に対する[新滑走路あり-新滑走路なし]の下層塩分の差分を示す。計算結果における塩分は、4期間ともに、河道内において新滑走路建設に伴う低下が認められ、特に湧昇期間における低下が他の3期間に比べ

図-10 新滑走路建設に伴う2011年8月の残差流の比較

大きくなっている。多摩川河口にはヤマトシジミ等の多数のベントスが生息している。このような流速場の変化および河道内での塩分の上昇は、これらのベントスの生息環境および幼生分散に影響を及ぼすと推測される。

新滑走路建設に伴う影響としては、塩分に及ぼす影響

図-11 新滑走路建設に伴う 2011 年 8 月の下層塩分への影響
（〔新滑走路ありー新滑走路なし〕の差分）

が最も顕著であったことから、ここでは塩分環境への影響についてのみ示した。その他、水質環境へ及ぼす影響も重要であるが、その評価には新滑走路栈橋部での付着生物の脱落による負荷の影響評価が必須である。現在、新滑走路栈橋部での付着生物の成長・脱落モデルを組み込んだモデルによる水質環境の評価を実施しているところである。水質環境への影響評価に関しては、付着生物脱落モデルと合わせて改めて公表する予定にしている。

5. おわりに

陸域負荷および外洋影響を強く受ける沿岸域での物理・化学・生物過程を定量的に評価可能な統合型海域環境影響評価モデルシステムを構築した。同モデルを多摩川河口・羽田空港周辺海域に適用した結果、観測結果を高精度に再現することができた。そして、新滑走路建設の影響として、多摩川河道内で塩分が低下する可能性があることが推定された。

なお、本研究の詳細は、羽田周辺水域環境調査研究委員会 HP の最終報告書により参照することができる⁸⁾。

謝辞：本研究は国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所主宰の羽田周辺水域環境調査委員会（委員長：風呂田利夫東邦大学理学部名誉教授）での活動の一部を取りまとめたものである。関係者の方々に深く謝意を表す。また、神奈川県水産技術センターからは東京湾口域の浅海定線観測データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Meller, G. L. : *Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*, Program on Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, Princeton, NJ 08544-0710, 1998.
- 2) HydroQual : *A primer for ECOMSED version 1.3; user manual*, HydroQual Inc., New Jersey, 2002.
- 3) 二瓶泰雄, 大塚 慧, 影山英将, 広瀬久也 : 東京湾における流入負荷の経年変化, 海岸工学論文集, Vol.55, No.2, pp.1226-1230, 2008.
- 4) 中川康之, 灘岡和夫, 八木宏, 有路隆一, 米山治男, 白井一洋 (2010) : Fluid mud 層の存在を考慮した底泥の巻き上げと水平移流のモデル化に関する基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I_461-I_465, 2010.
- 5) 中川康之, 灘岡和夫, 八木 宏, 二瓶泰雄, 木村彰宏, 久保田踊児, 吉田行秀 : 東京湾羽田沖における泥質物の堆積分布特性を考慮した底泥輸送モデルの構築, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 69, No. 2, pp. I_571- I_575, 2013.
- 6) Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. : The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Ocean Modelling*, 9, pp.347-404, 2005.
- 7) SWAN team : *SWAN user manual*, SWAN Cycle III version 40.51, 2006.
- 8) 羽田周辺水域環境調査研究委員会 : 羽田周辺水域環境調査最終成果報告書, 2014 年 3 月, 東京湾環境情報センター羽田周辺水域環境調査研究委員会 HP, <http://www.tbeic.go.jp/haneda-iinkai/index.asp#>.

(2015.3.18 受付)

DEVELOPMENT OF INTEGRATED ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT MODEL AND ITS APPLICATION TO TAMA RIVER ESTUARY AROUND HANEDA AIRPORT

Kazuo NADAOKA, Hiroshi YAGI, Yasuyuki NAKAGAWA, Yasuo NIHEI, Ryoichi YAMANAKA, Naohiro UCHIKAWA, Koji KAWASAKI, and Toyoaki MISHIMA

Integrated environmental impact assessment model that can reproduce and predict the physical, chemical and biological processes in coastal water with high accuracy was developed in the framework of a 'land-estuary-inner bay-outer sea' linkage system. The model was applied to assess environmental impacts of the construction of the new runway at the Haneda Airport on the surrounding water, which is located in the Tama River estuary. The simulation results were found to well reproduce the observed data on the flow and other various physical and water quality parameters. In addition, the salinity was found to decrease in the Tama River channel as one of the impacts of the new runway construction.