海洋波浪結合モデルを用いた瀬戸内海の長短期物理環境場の再現

Long and Short-Term Simulations of Seto Inland Sea by Coupled Ocean-Wave Model

田中悠祐¹・森 信人²・二宮順一³・杉松宏一⁴・八木 宏⁵・安田誠宏⁶・間瀬 肇⁷

Yusuke TANAKA, Nobuhito MORI, Junichi NINOMIYA, Koichi SUGIMATSU
Hiroshi YAGI, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

Seto Inland Sea is the largest semi-enclosed sea in Japan. The operational numerical hindcasts have been conducted by Fishery Research Agency since 2006 by POM oriented FRA-JCOPE model. Since the development of POM, the numerical model and scheme of ocean models have been developed in the last decade. Specially the modeling in strong mixing condition has been improved. This study applied ROMS both annual ocean climate hindcasts and short-term impact due to typhoon in the Seto Inland Sea. The numerical results are compared with ROMS and FRA-POM model and the difference of results is discussed in detail.

1. 序 論

瀬戸内海は、日本の閉鎖性水域の中でも最大の面積を持ち、西日本の主要なエリアをカバーする重要な海域である。このため、環境保全や水質保全の観点から、海水の流動を正確に評価できる高精度の海洋モデルを開発することが求められている。しかし、瀬戸内海の物理環境は、太平洋からの流入・流出と複雑な地形を持つ閉鎖性水域特有の複雑な潮流、また地形性の風や波浪の影響を受けるため、非常に複雑な様相を持つ。現在、POMをベースに瀬戸内海の流動と水質を推算する数値モデル（以下ではFRA-POMと表記）が、実際に運用されている（杉松ら、2011）。POMの開発以降、近年の数値計算法の発達により、様々な強風時の鉛直混合のパラメタリゼーションや移流の差分スキームが提案されている。このような新しい物理モデルや数値スキームが、年スケールの長期積分場や台風等における強混合時にどの程度の影響を与えるのかについては不明である。

一方、高潮や潮汐の計算では、静水圧近似と水深方向の流速分布を仮定した浅水方程式が用いられ、これに水平方向及び鉛直方向の渦粘性項が加わり、水塊の流動が解かれる。瀬戸内海のような内湾では、通常時は潮汐による海水交換と水平渦による混合が主要な外力として環境場に働くが、年に数回訪れる台風などによる強混合が、環境場へ大きなインパクトを与えることが知られている。

そこで本研究では、Regional Ocean Modeling System (ROMS) (Shchepetkinら、2005) をベースに、瀬戸内海の長期積分を行い、基本物理量に関して観測値およびFRA-POMと比較を行い、両モデルの性能について検討する。ついで、瀬戸内海に襲来した台風を対象とし、波浪を結合したより高度なモデルを用いて短期追算計算を実施し、その影響評価を実施する。

2. 数値計算の概要

数値計算は、静水圧を仮定した準3次元モデルROMSを用いて行った。水平方向には直交座標、鉛直方向にはσ座標を用い、解像度は水平1 km、鉛直10層とした。また、計算座標は、太平洋の大水深海域を避けるために、時計回りには約30度回転させ、四国の太平洋側が入らないように設定した。図-1に対象領域を示す。

瀬戸内海の物理環境は、閉鎖水域特有の複雑な潮流と比較的浅い水深に起因する波浪の影響を受ける。このような状況下において、モデルの再現性の向上のために、様々な気象条件を考慮し、計算を行った。本章では、本研究で使用した海洋モデルおよび海洋・波浪結合モデルに用いた境界条件、気象外力条件、気象同化条件、初期条件について説明を加える。設定した各条件は、杉松ら（2011）のFRA-POMを用いた計算と比較するため、可能な限り同一のデータを用いて計算を行った。表-1に示すのは、計算条件であり、外境界条件には、潮位等のデータを与え、短波放射以外の気象条件にはJMA-GPVデータを用いた。地形を含めた基本的な計算条件はFRA-POMとROMSで同じである。また、台風の推算計算ではメソ気象モデルWRFによる高解像度の計算を実施し、これを気象条件として与えた。河川については、瀬戸内海に流入する243河川（1、2級河川）からの1時間毎の流入量、水温、塩分を与えた。

1	修(工)	(株)電通
2	正会員	博(工) 京都大学准教授防災研究所
3	学生会員	修(工) 京都大学大学院工学研究科
4		博(理) (独法)水産総合センター水産工学研究所
5	正会員	博(工) (独法)水産総合センター水産工学研究所
6	正会員	博(工) 京都大学助教授防災研究所
7	正会員	工博 京都大学教授防災研究所

図-1 計算で用いた地形データ

表-1 計算条件

Grid ($x \times y \times z$)	414 × 185 × 10
水平解像度	1 km
潮汐条件	TPXO ver 7.0
気象条件	全日射量：気象観測所 風，気温，気圧，相対湿度，雲量，雨量：GPV-データ
河川データ	1, 2級河川 (243河川)
側方境界条件	塩分，水温，流速 FRA-JCOPE (1日ごと)
気象同化条件	塩分，水温，流速 FRA-JCOPE (28日ごと)

3. ROMSを用いた長期推算のパフォーマンス比較

2004年を対象とした長期年間計算を行い，ROMSとFRA-POMと気候値および瞬時値の比較を行った．水位・水温・塩分・流速といった基本物理量に関して比較を行った．以下，各物理量に関しての比較考察を述べる．

(1) 水位

図-2はROMSと天文潮位の比較図を示す．対象期間は7月1日から7月8日の7日間とした．一例として図-2に示すように，概ね水位の時間変動に関しては良好な再現性が得られ（相関係数0.97），側方境界から遠ざかると精度が低下する傾向が見られた．燧灘等の瀬戸内海内部においても0.92以上の相関係数が得られた．

(2) 海表面水温

図-3に示すような月平均水温の再現性について，比較を行った．観測値との比較については，気候データが整備されている燧灘と大阪湾を選定した．観測値はそれぞれ香川県水産試験場が設置している観測ブイのデータ（毎日午前9時に測定）と大阪湾環境データベースの浅海定線調査データを用いた．浅海定線調査データは大阪湾表層の20点で季節ごと（2月，5月，8月，11月）に行われたものである．

時空間平均した海表面水温の月変化を図-4に示す．両

図-2 天文潮位と計算結果の時間変化に関する比較：大阪府大阪市沖（赤：推定天文潮位，青：計算結果）

図とも点線は瀬戸内海全域における時空間平均値を示し，実線は対象領域付近における平均値である．赤色がFRA-POMの結果，青色がROMSの結果，黒色が観測値を示す．瀬戸内海全域の比較に注目すると，FRA-POMの方がROMSよりも変動幅が大きいという結果になった．FRA-POMの月平均値は，冬季ではROMSよりも低く，夏季ではROMSよりも高くなるという結果が示されている．次に，燧灘については，図-4(a)に示すように，夏季・秋季に関してはROMSの方が再現精度が高いという結果が得られた．対して，冬季では両モデルとも観測値との大きな乖離が目立ち，再現性が良いとは言えない．大気温度の精度に比べて，モデルのSSTが暖かく，表層の熱収支もしくは水塊の沈降に原因がある可能性がある．

一方，図-4(b)に示す大阪湾については，観測値は4点しかないために精度検証としては不十分であるが，燧灘について示した季節による変化に注目して考察する．大阪湾についても，ROMSの方がFRA-POMの結果より再現性が高い．特に冬季に関しては，こちらの海域でも両モデルの再現性は低い，他の3つの季節についてはROMSの結果の方が観測値とよく一致していた．

以上より，夏季・秋季に関してはモデルの差が顕著であり，ROMSの方が良い精度を示した．一方，冬季の平均水温は，両モデルで再現性が悪く，改良の必要性が示唆された．

(3) 塩分の再現性について

海表面塩分の年変化に関して，水温と同様に各海洋モデルの結果と観測値比較により，精度の検証を行う．塩分に関しては大阪湾のみを対象として比較を行った．観測データは水温と同様に大阪湾環境データベースの浅海定線調査データを用いて比較を行った．

図-3 8月平均海表面水温の水平分布

(a) 燧灘における定点観測との比較

(b) 大阪湾における観測20点平均との比較

図-4 月別空間平均水温の時間変化

図-5に示すように、瀬戸内海全域で空間平均を行った結果（点線）について見てみると、FRA-POMの方がROMSの結果より、年間を通して低いという結果になった。特に秋季でその傾向が顕著に表れた。一方、大阪湾の比較では、FRA-POMのデータはROMSの結果より低い傾向が一層強まった結果が得られた。絶対値の差にして大体2PSUほど違うことが分かる。また、再現性に関

図-5 月別空間平均を行った塩分の時系列変化

してはFRA-POMの方がROMSよりも良好であると言える。8月の塩分のみROMSの結果の方が観測点に近いという結果であるが、他の3つの季節で比べると概ねFRA-POMの方が観測値に近い。大阪湾の塩分は淀川による河川の流入が大きく影響する。両モデルの淡水の流入量は同じであり、塩分が保存量であることを考えるとFRA-POMの方が淀川の河川による淡水流入・拡散の挙動を良く反映していることが示唆される。

紙面の関係上、流速については図示しないが、宇和海湾、佐多岬周辺などで、局地的にROMSの方が速い流速が形成されることもあるが、全域においてFRA-POMの方がやや速い流速分布となった。燧灘内部で見られる反時計まわりの流速分布は両モデルで確認されるなどの類似点も見られるが、豊後水道や紀伊水道などの境界付近では分布が異なる結果が得られた。

4. 海洋結合モデルを用いた台風の追算計算

2004年に来襲した台風16号を対象に、瀬戸内海の強混合の短期追算計算を行った。短期追算は、海洋モデルROMSに波浪モデルSWANを結合させ、双方向カップリングを行った。両モデルの情報量の交換は3分とし、ROMSからSWANには水位上昇と流速、SWANからROMSには波高・波長・波向・波浪エネルギー散逸をやりとりしている。以下では、ROMSのみの計算モデルや結果を単独モデル、ROMS-SWAN結合モデルの計算モデルや結果を結合モデルと表記する。また、追算計算時の気象条件は、別途GPVデータを外力としてWRFを用いて追算した結果を30分ごとに与えた。WRFの計算条件および台風の詳細情報に関しては、安田ら（2009）および気象庁等の資料を参考にされたい。

(1) 水温・塩分について

台風16号最接近時刻における結合モデルと単独モデル

図-6 台風0416号最接近時の海表面水温の空間分布 (結合モデルと単独モデルの差)

のSSTの差を図-6に示す。図のように、モデル間で水温の水平分布に大きな差が認められ、さらに海域毎に大きな差が見られる。周防灘や燧灘、播磨灘では結合モデルの方がSSTが1度程度高く、とくに沿岸部では1.5度ほど高い海域も見られた。また、伊予灘や豊後水道では、上述の海域ほどではないが、結合モデルの出力結果の方がSSTが高いという結果が得られた。

台風16号の最接近時刻での塩分の表層と底層で差をとった水平分布を図-7に示す。図から分かるように、結合モデルの結果の方が表層と底層の差が小さい。内部では差が見られず、佐田岬および伊予灘付近で差が顕著となり、外境界に近づくほど差が増加する。また、豊後水道の水深が深いところでは、単独モデルの結果で確認された1.0PSU程度の差が、結合モデルでは0.3PSU程度の差となる。これらの結果より、波浪を考慮した結合モデルの方が台風を起因とする強風下での鉛直混合が強くあらわれることが分かる。

(2) 流速について

台風接近時での豊後水道における流速の鉛直分布を図-8に示す。青線が結合モデルの結果を表し、赤色が単独モデルの結果である。図-8(a)が最接近時刻の3時間前の結果を表し、図-8(b)が最接近時刻の鉛直分布を表す。図-8に示すように、流速の鉛直分布に関しては、単独モデルと結合モデル間に大きな差は見られない。台風最接近時刻の瞬時値では、表層に関しては結合モデルの方がやや速くなるという結果が得られた。

(3) TKEについて

一般的に海洋モデルでは、表層でのTKEフラックスを以下のCraig-Bannerの式で与える事が多い。(Craig and Banner, 1994; CB式)

$$K_v \frac{\partial k}{\partial z} = \alpha_{CB} u_*^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K_v は鉛直拡散係数、 u_* は摩擦速度、 k は乱流エネルギー、 α_{CB} は係数である。式中の α_{CB} の係数は、理想条件下での解析結果より100と与えられるが、任意の

(a) 結合計算：再接近時

(b) 単独計算：再接近時

図-7 台風0416号通過時の空間分布 (表層・底層)：塩分

(a) 3時間前

(b) 再接近時

図-8 豊後水道における台風0416号接近時の流速鉛直分布 (点線：0, 右：瀬戸内海へ流入, 左：瀬戸内海から流出)

条件で成り立つ保証はない。一方、海洋・波浪結合モデルでは、TKEフラックスは、碎波のエネルギー散逸率からTKEフラックスを求める以下の式 (Feddersenら、

2005) が用いられることが多い。

$$K_k \frac{\partial k}{\partial z} = \alpha_{wdiss} \epsilon_{wdiss} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ϵ_{wdiss} は碎波エネルギー散逸率、 α_{wdiss} はTKEフラックスに関する係数を表す。Feddesenらは経験的に $\alpha_{wdiss} = 0.25$ としている。本研究は、表層でのTKEフラックスのバルク式の影響について検討を行った。

豊後水道における台風16号通過時のTKE鉛直分布を図-9に示す。単独モデルと結合モデルでは、TKEフラックスに影響を与える説明変数が異なる。単独モデルの結果では、赤色点線が風速、赤色実線が計算結果を示している。また、結合モデルでは、青色点線が有義波高を表し(値を5倍に拡大)、青色実線が計算結果を示している。図-9(a)が台風最接近時刻の結果を示し、(b)が通過後3時間後の結果を示す。図-9の時間変化について注目すると、単独モデルでの結果による鉛直分布が表層で非常に大きく、下向きに急激に減少している。一方、結合モデルの表層でのTKEは、単独モデルの半分以下であり、鉛直方向に均一な部分を経て、単調に減少している。底層部においては、各モデル間に差は認められないが、表層部において大きな差異が存在する。外洋と比べて、瀬戸内海のようなフェッチ制限下では、波齢が若く、CBの式との乖離が大きいことがわかる。上記の結果は、波浪結合モデルにおけるTKEフラックスのバルク式の妥当性について検討が必要である。

5. 結 論

本研究では、モデルの性能比較に関して長期計算と短期計算を行った。長期計算ではROMSとFRA-POMの比較検討を行い、短期計算に関しては台風の追算計算を行い、強風下での波浪の影響について検討を行った。

長期積分で得られた結果として、SSTについては夏季・秋季ではROMSの方が良好な結果が得られた。また、台風を対象とした短期追算計算結果より、塩分の鉛直分布に大きな差が見られ、波浪の影響を考慮した結合モデルの方が混合が進むという結果が得られた。さらにTKEは、表層部において大きな差があり、特に波浪結合モデルにおける強風下によるTKEフラックスの依存式の選定には注意が必要であることが示唆された。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金および京大防災研共同研究費による成果である。

参 考 文 献

内山雄介・栗山貴生・宮澤泰正 (2012)：外洋影響を考慮した瀬戸内海周辺海域の流動再現と黒潮流路変動の効果につ

(a) 台風0416号の再接近時

(b) 台風0416号の3時間後

図-9 豊後水道における台風0416号通過時のTKEの鉛直分布

いて、土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No. 2, pp.I_441-I_445.

杉松宏一・中山哲蔵・八木 宏・佐野朝昭・藤井良昭・清水学 (2011)：数値モデルにおける瀬戸内海へ進入する外洋性水塊の再現性, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp.841-845

安田誠宏・山口達也・金 洙列・森 信人・間瀬 肇 (2009)：気象モデルにおける4次元データ同化およびネスティングが高潮推算精度に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 65, No. 1, pp.381-385.

Craig, P.D. and M.L. Banner (1994)：Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer, Journal of Physical Oceanography, Vol.24, No.12, pp.2546-2559.

Feddersen, F. and J. H. Trowbridge (2005)：The effect of wave breaking on surf-zone turbulence and alongshore currents, JPO, Vol.35, pp.2187-2203.

Shechepetkin, A.F., and J.C. McWilliams (2005)：The regional oceanic modeling system, Ocean Modelling, Vol.9, pp.347-404.