

海洋循環モデルを反映させた沿岸流動計算の試み

八木 宏*・前田利光**・宮澤泰正***

1. はじめに

最近の現地観測をベースとした研究によって、これまで閉鎖性が強いと考えられてきた東京湾においても、夏季の黒潮系水中層貫入や冬季の暖水波及など、外洋変動が内湾の水質・温熱環境に大きな影響を与えていた可能性が指摘されている(例えば、日向ら、2000)。今後より正確な沿岸の水環境予測を行うためには、黒潮変動など外洋影響を直接反映させた数値モデルの構築が望まれる。そこで本研究では、近年地球フロンティア研究システムによって開発された海洋循環モデルと沿岸流動モデルを組み合わせることによって、外洋影響を直接的に反映させた沿岸流動計算の枠組みを構築し、それを外洋影響が顕著な相模湾周辺海域に適用したのでその結果を報告する。

2. 計算モデルの概要

(1) 流動モデルの概要

本研究では、太平洋全体を対象とした海洋循環モデル(以後外洋モデルと呼ぶ)の計算結果を、ネスティング手法を用いて沿岸域に反映させることで外洋変動を直接取り入れた沿岸流動計算を試みた。外洋モデルは、最近地球フロンティア研究システムによって日本沿岸予測可能性実験(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)のために開発されたJCOPEモデルである。このモデルは、三次元数値流動モデルとしてPOM(Princeton Ocean Model)を用い、太平洋全体を対象とした大領域計算(NEST1)を北西太平洋を対象とした小領域計算(NEST2)にネスティングさせることで、より現実的な日本近海の黒潮の挙動を再現することを目指したものである(Miyazawa et al, 2001)。一方、沿岸モデルは、数値モデルとしては外洋モデルと同じPOMを用い、図-1に示す遠州灘から南房総沖までを含む沿岸海域を対象として、JCOPEモデルの計算結果を沿岸モデルの境界条件に与えることで外洋影響を直接反映させた沿岸流

表-1 計算格子サイズ

水平格子 サイズ	外洋モデル (JCOPE)		沿岸モデル
	NEST1	NEST2	
鉛直層数	48	48	48
水平格子 サイズ	1/2°	1/12°	1/48°

動計算を試みた。計算格子サイズは表-1に示すとおりである。海底地形については、日本海洋データセンター(JODC)の500m格子水深データ(浅野・沖野、1998)を用いたが、POMが採用しているシグマ座標系では海底勾配が大きい場所で圧力傾度力の数値誤差が大きくなるために、それを減少させるためにMellor et al. (1996)にしたがって海底地形の平滑化を行っている。

(2) ネスティング計算における境界条件の与え方

沿岸モデルにくらべ時空間的に粗な外洋モデルの計算結果を沿岸モデルにネスティングさせるために以下の処理を行った。はじめに、10日間隔で出力されている外洋モデルの計算結果を時間的に線形内挿し沿岸モデルの各時間ステップ毎の値を算出した。次にそれを外洋モデルの粗格子と沿岸モデルの細格子の位置関係から線形補間によって沿岸モデルの境界格子点上の流速、塩分、水温、水位の値を算出し、それを沿岸モデルの境界条件として与えた。ネスティングの方法としては、大領域の計算結

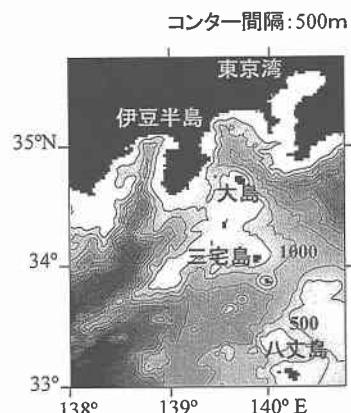


図-1 沿岸流動モデルの対象海域と海底地形

* 正会員 博(工) 東京工業大学大学院 助教授 理工学研究科

** 正会員 修(工) 清水建設(株)土木本部設計部

*** 工 修 地球フロンティア研究システム

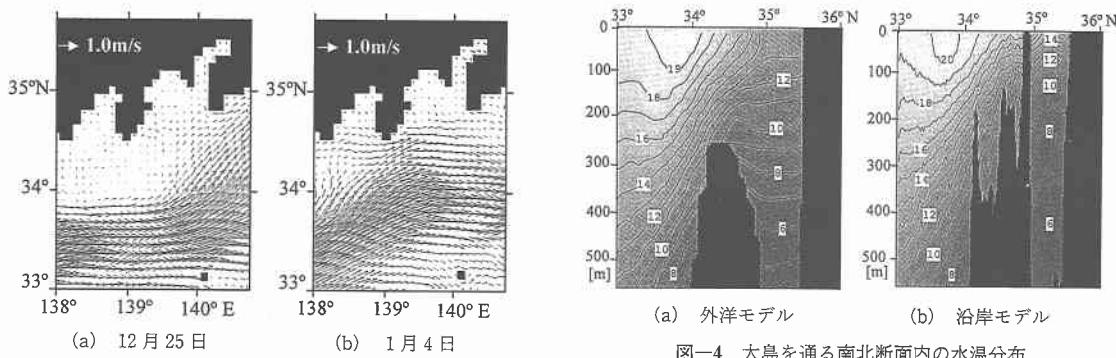


図-2 外洋モデルの計算結果 (表層流速ベクトル)

(a) 外洋モデル (b) 沿岸モデル

図-4 大島を通る南北断面内の水温分布

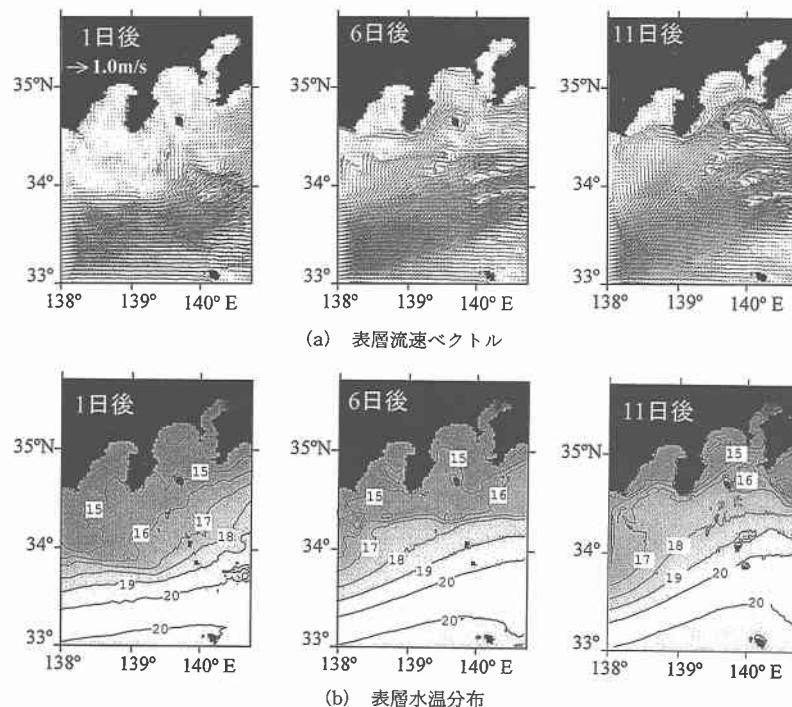


図-3 沿岸モデルの計算結果

果を小領域に一方向的に与える one-way 法と、小領域の結果を大領域計算にフィードバックする two-way 法があるが、ここでは one-way 法を採用した。さらに、上記のような単純な線形補間によって境界流速を与えると、主に外洋モデルと沿岸モデルの海底地形の違いから境界を通過する流量が両者で異なる可能性がある。そこで本計算では、外洋モデルと沿岸モデルの境界通過流量が一致するように郭らの方法 (Guo et al., 2001)に基づき境界域における順圧流量の修正を行った。

(3) 対象とした計算条件

外洋モデル (JCOPE) は、1991 年～1998 年までの 8 年

間の計算を行っているが、データ同化など観測データを直接反映させる処理を行っていないために、大局的な黒潮の挙動を検討することは可能であっても、実現象と具体的に日時を合わせて比較することには意味がない。そこで本研究では、外洋モデルの全計算結果の中から冬季に黒潮流路が沿岸に接近する時期 (1996 年 12 月 25 日～1997 年 1 月 14 日) を選び、冬季の黒潮変動に対する沿岸域の応答を見ることを試みた。図-2 に、今回対象とした期間の外洋モデルの計算結果を示す。これを見てもわかるように、対象期間中に黒潮は直進型流路 (N 型) を示し、初期 (12 月 25 日) に三宅島南を位置していた流軸

が10日後(1月4日)には三宅島北部に移動している。なお、以下では計算開始日(12月25日)からの経過日数で時間を表示する。

3. 計算結果と考察

(1) 広域流動特性

はじめに、沿岸モデルの計算結果が示す広域流動特性を検討した。図-3に、計算開始後1, 6, 11日目の沿岸モデルの計算結果として、(a)表層流速ベクトル、(b)表層水温分布を示す。流速の大きい帶状の部分が黒潮本流を表しており、計算開始直後には三宅島南に位置していた黒潮流路が徐々に北上し、それに伴い高温領域が本州沿岸に接近している様子がわかる。これを図-2に示した外洋モデルの計算結果と比較すると、沿岸モデルにおいては外洋モデルには現れていない伊豆諸島周辺の詳細な流れの構造や大島西水道を通じて相模湾に流入する強い流れが表現されている。図-4は、大島を通る南北断面内の水温分布を計算開始後10日後において外洋モデルと沿岸モデルで比較したものである。北緯34度付近を中心とした水温水平勾配が大きい黒潮本流周辺部分には両者に大きな差異は見られない。一方、黒潮の北縁部分にあたる伊豆諸島北部海域(北緯34.5~35度付近)では、沿岸モデルの結果は表層付近の水温センターが水平に近く表層100m程度の高温部分が沿岸に伸びる分布形となっている。さらに、この南北断面を通過する海表面から水深1000mまでの流量を調べると、伊豆諸島北部海域において沿岸モデルの流量が外洋モデルよりも減少していた。これらの事実は、沿岸モデルにおいてより詳細な海底地形の効果を取り入れたことによって、伊豆諸島北部の浅い海底地形が黒潮周辺の流れの抵抗となり、①黒潮本流部分の伊豆諸島北部への接近が妨げられる、②伊豆諸島北部海域に向かう流れがこの浅海域を回り込むように相模湾に流れ込む強い流れが誘起される、③この流れが表層部分の高温水を相模湾に向かって輸送するなど、外洋モデルと沿岸モデルの結果に違いが現れたものと考えられる。

(2) 相模湾周辺の流動特性

相模湾の流動特性については、急潮現象の解明を主な目的として、現地観測及び室内実験に基づく多くの検討が行われている(例えば、Iwata & Matsuyama, 1989; 秋・杉本, 1992; 杉本・秋, 1992, Matsuyama et al., 1999)。ここでは、外洋モデルを反映させた本モデルの結果から黒潮流軸接近に伴う相模湾周辺海域の流れの特徴について検討を行った。

図-5は、相模湾周辺を拡大して計算開始後11日の(a)表層流速ベクトル、(b)表層水温分布、(c)水位分布を示したものである。沿岸モデルによる計算結果は、

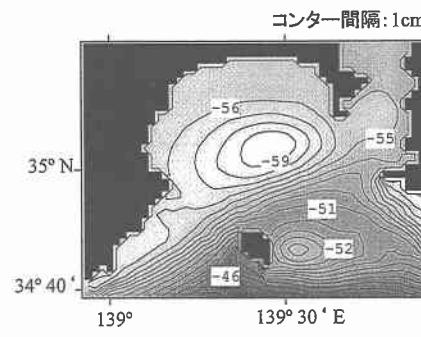
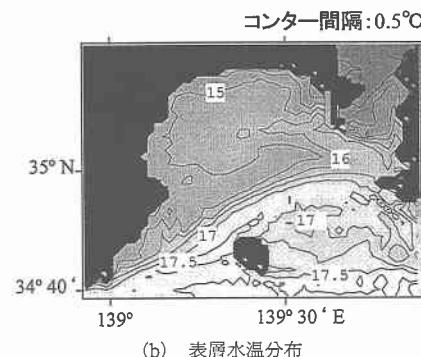
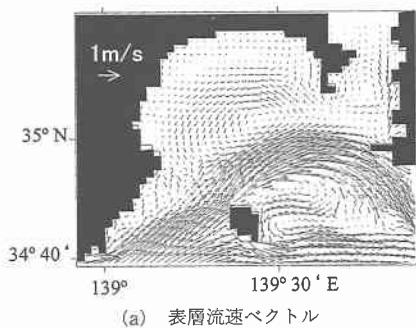


図-5 相模湾周辺の計算結果(計算開始後11日目)

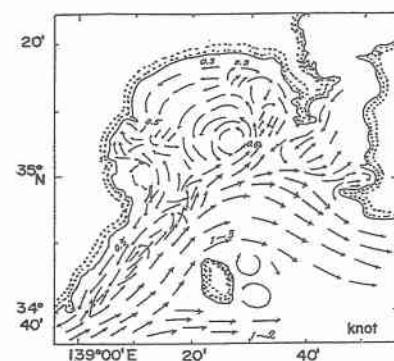
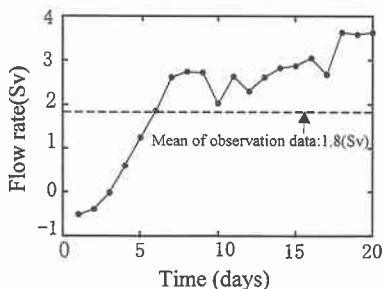
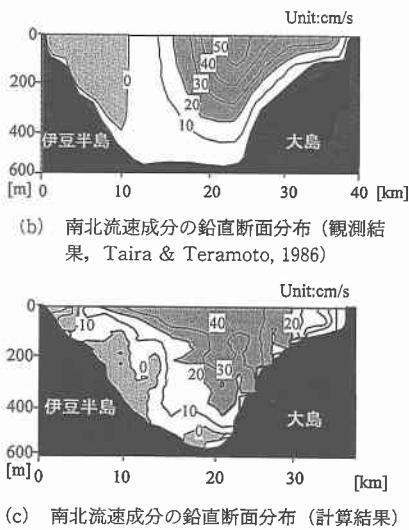


図-6 冬季相模湾流況模式図(宇田, 1937)



(a) 相模湾への流入量の経時変化



(c) 南北流速成分の鉛直断面分布 (計算結果)

図-7 大島西水道における流況

大島西水道を通り相模湾内を大島を回り込むように流れる強い流れや島背後形成される後流域の存在を明確に示している。黒潮系の外洋水が相模湾内に流入する現象は黒潮分岐流として古くから知られており、本計算結果が示すそのスケールや形状は宇田(1937)の冬季相模湾流況模式図(図-6)や人工衛星NOAA/AVHRRの表層水温分布によって捉えられているパターン(Matsuyama et al., 1999)と非常に似たものとなっている。さらに、相模湾内には既往の研究(図-6参照)によって反時計回りの還流が発達することが知られているが、本計算結果においても黒潮分岐流の流入にともなって反時計回り環流が湾中央部に形成されていることがわかる。

図-7(a)は、計算結果に基づき大島西水道(大島を通じ大島と伊豆半島を結ぶ東西断面)から相模湾内へ流入する黒潮分岐流の流量の経時変化を示したものである。黒潮流路の北上に伴って、流入流量が増加し、計算開始後8日目以降は比較的安定した値(2.5 Sv程度)に達している。これはTaira & Teramoto(1981, 1986)が現地観測結果に基づいて算出した流量値(平均値約1.8 Sv,

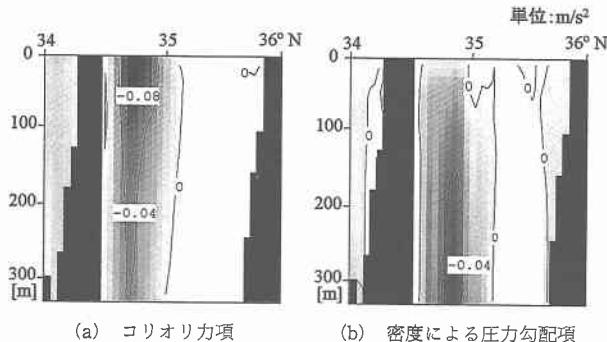


図-8 相模湾南北断面内の力学バランス(運動方程式南北成分中の各項の空間分布)

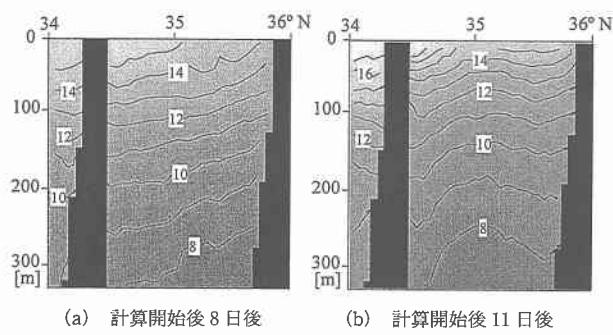


図-9 相模湾内の大島を通る南北断面内水温分布

変動幅0.5~4 Sv)に比較的近いものとなっている。さらに、図-7(b), (c)は、Taira & Teramoto(1986)による大島西水道の南北流速成分断面分布を本計算結果と比較したものである。図中では、20 cm/s以上の正流速(北流)及び負流速(南流)の部分をそれぞれ濃いハッチ薄いハッチで示している。流速レベルや流速分布の特徴、例えば北向き流速が大きい領域が大島に近い領域に偏在していることや伊豆半島付近に流出となる南向き流れが発生していることが両者で一致しており、今回の計算結果に現れた相模湾に流入する黒潮分岐流の構造が現地観測結果に近いことを示している。

次に、相模湾内の流れや密度構造の特徴を検討した。図-8は、相模湾内の大島を通る南北断面に対して、計算開始後11日後の運動方程式中(南北成分)のコリオリ力項と密度による圧力勾配項の大きさを示したものである。これからわかるように、黒潮分岐流の影響を受けた湾内の流れの基本的な力学バランスは、黒潮分岐流の流入に伴い湾内に形成された水位分布(水面勾配、図-5(c)参照)に対して、上層ではコリオリ力が下層では密度による圧力勾配がバランスする形になっている。さらに、図-9には、南北断面内の水温分布を計算開始後8, 10日後について示す。これを見ると、8日後には比較的水平に近

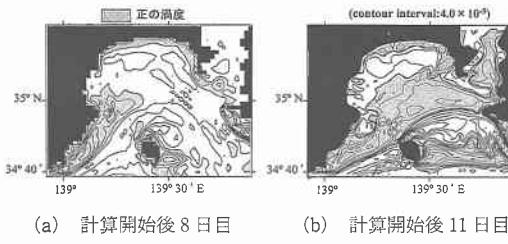


図-10 涡度の空間分布

い水温センターが、10日後には特に湾中央部において低温部分が上昇し湧昇現象が発生していることがわかる。流速構造との関係を調べると、下層水が上昇している部分は先に述べた反時計回り環流の中心に相当しており、これは低気圧性渦が励起する湧昇現象と考えられる。相模湾に反時計回り環流が発生する時に湾中央で湧昇現象が励起されることは現地観測結果によっても指摘されている（日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 1985）。

次に、反時計回り還流の発達過程を計算結果に基づいて検討した。図-10に、反時計回り環流が発達する前にあたる計算開始後8日目と環流発生後の11日目の渦度の空間分布を示す。これを見ると、反時計回り環流発達前に伊豆半島に近い海域に存在していた正の渦度成分が、環流発達後に環流の中心となる湾内中央部を中心に拡がっていることがわかる。還流の形成機構については、急潮現象との関連で密度構造に関連した傾圧的な作用を考えられるが、本計算結果は伊豆半島東岸境界で生成される正の渦度の湾内への供給も環流形成に重要な役割を果たしている可能性を示唆しており、今後は現地観測結果も併せてそれが現象に対してどのように貢献しているかを定量的に検討することが必要と考えられる。

4. まとめ

外洋モデルと沿岸流動モデルを組み合わせることによって、外洋変動を直接反映させた沿岸流況シミュレーションを相模湾周辺海域を対象として試みた。結果をまとめると以下のとおりである。

① 地形解像度の高い沿岸モデルによって、外洋モデルでは不十分であった沿岸への波及現象、具体的には黒潮接岸時の相模湾への黒潮分枝流入現象を表現することが可能となり、計算結果は大島西水道の鉛断面内流速構造や衛星画像などで指摘されている平面流況に近い結果を与えることがわかった。

② 黒潮分枝流の流入とともに相模湾には反時計回りの還流が形成され、i) 還流中心部に湧昇現象を発生させること、ii) 環流形成には急潮現象の発生原因として指摘されている傾圧的な効果の他に、伊豆半島東岸で生成される渦度の供給も重要な役割を果たしている可能性が

あることを示した。

今回の沿岸モデルの計算は外洋モデルの影響を大きく受け、順圧的な流れの特徴が相対的に強く反映される傾向があった。今後、急潮現象なども含めた沿岸への外洋影響予測を行うためには、黒潮流路変動など大局的な外洋変動と同時に黒潮縁辺部の傾圧性の強い微細な流れの構造も同時に表現するモデル開発が必要と考えられる。

謝辞：本論文の図作成にあたっては、東京工業大学大学院のブリ・ラシド君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。本研究は文部省科学研究費基盤研究(c)『開放性海岸に発達する広域沿岸境界層の空間構造計測現地実験と広域漂砂モデルの構築』(代表者：八木 宏)の補助を受けて行われたものであることをここに付記する。

参考文献

- 秋 隆尚・杉本隆成 (1992): 相模湾の循環系における実験的研究(I)一回転系順圧流体模型における循環流パターンのレイノルズ数、ロスビー数依存性一、沿岸海洋研究ノート、第29巻、第2号、179-189.
- 浅田 昭・沖野郷子 (1998): 日本周辺海域の500 m メッシュ海底地形データファイルの作成、海洋調査技術学会研究成果発表会講演要旨集、15-16、1998.
- 宇田道隆 (1937): 「ぶり」漁期に於ける海況及び気象と漁況の関係、水産試験場報告、Vol. 8, 1-50.
- 杉本隆成・秋 隆尚 (1992): 黒潮沿岸域における急潮の発生機構、沿岸海洋研究ノート、第30巻、第2号、45-57.
- 日本海洋学会沿岸海洋部会編 (1985): 第10章、相模湾II物理、東海大学出版会、401-409.
- 日向博文・八木 宏・吉岡 健・灘岡和夫 (2000): 黒潮系暖水波及時における冬季東京湾口部の流動構造と熱・物質フックス、土木学会論文集、No. 656, II-52, 221-238.
- Iwata, S and Matsuyama, M. (1989): Surface circulation in Sagami Bay—the response to variations of the Kuroshio Axis—, J. Oceanogr. Soc. Japan, 310-320.
- Guo, X., H. Hukuda, Y. Miyazawa and T. Yamagata (2001): Triple one-way nested model for the Kuroshio simulation, to be submitted.
- Matsuyama, M., Ishidoya, H., Iwata, S., Kitade, Y. and Nagamatsu, H. (1999): Kyucho induced by intrusion of Kuroshio water in Sagami Bay, Japan. Continental Shelf Research, 19, 1561-1575.
- Mellor, G. L., T. Ezer, and L.-Y. Oey (1994): The pressure Gradient Conundrum of Sigma Coordinate Ocean Models, J. Atmos. Oceanic Tech, 11, 1126-1134.
- Miyazawa, Y., H. Hukuda, Guo, X., and T. Yamagata (2001): Simulation of the Kuroshio meandering: Roles of meso-scale eddies, to be submitted.
- Taira, K. and Teramoto (1981): Velocity fluctuations of the Kuroshio near the Izu Ridge and their relationship to current path. Deep-Sea Res., 28, 1187-1197.
- Taira, K and T. Teramoto (1986): Path and volume transport of the Kuroshio current in Sagami bay and their relationship to cold water masses near Izu Peninsula. J. Oceanogr. Soc. Japan, 42, 212-223.