

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740323

研究課題名(和文) 高解像度日本近海モデルを用いた、沿岸・外洋間の海水交換に関する研究

研究課題名(英文) A study on water exchange between coastal seas and open oceans using a high-resolution Japanese coastal model

研究代表者

坂本 圭 (Sakamoto, Kei)

気象庁気象研究所・その他部局等・その他

研究者番号：60589860

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸海域は、陸の影響により沿岸固有の特徴を持つ一方、海水交換を通じて外洋と密接に関連して変動する。本研究では、日本沿岸の海水交換過程を対象にした、過去に例のない高解像度海洋モデルを開発した。シミュレーション実験では、海域によってその効果は大きく異なるが、10-1000kmスケールの多様な運動が海水交換を引き起こす様子が再現された。さらに、実験結果をもとに日本沿岸全域の海水交換をはじめて包括的に定量評価することができた。本成果は、日本沿岸域における水質環境や気候変動の影響などをモニタリング・予測するうえで有益な基礎データになると期待される。

研究成果の概要(英文)：Though coastal seas have specific characteristics under the influence of the land, they change in a close relation to open oceans through water exchange. In this study, a novel high-resolution ocean model is developed to focus on water exchange processes around Japan. The model simulates water exchange induced by various kinds of motion with a horizontal scale of 10-1000 km, though the activities vary significantly at each location. Based on the model results, a comprehensive quantitative evaluation is for the first time made about water exchange in the entire coastal regions around Japan. This achievement is expected to be useful as basic data for monitoring and prediction of water quality environment and impacts of climate change in the coastal seas of Japan.

研究分野：海洋物理

キーワード：海洋物理 沿岸海洋モデリング 海水交換過程

## 1. 研究開始当初の背景

大陸棚や内湾といった沿岸海域は、陸の影響によって外洋とは異なる特徴を持つ一方、外洋と密接に関連して変動し、特に直接の海水交換によって強く影響を受ける。図1は、この海水交換過程を概念的に示している。沿岸・外洋の境界を横切って流入した外洋水は、河川流入や強い鉛直混合など沿岸固有のメカニズムによって沿岸水へ変質し、その後、再び外洋へ流出する。このような交換過程の全体像は未だ明らかでなく、その解明は、沿岸域が人類社会と直接に接することから特に重要である。実際、福島第一原子力発電所の事故による放射性物質の海洋流出で示されたように、沿岸の海洋汚染の進展を予測するには交換過程の知見が不可欠である。

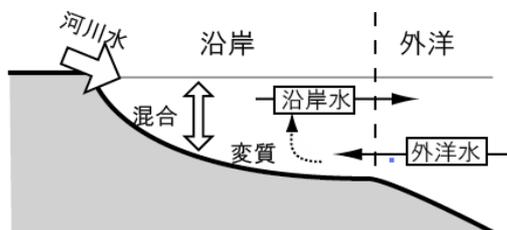


図1 沿岸・外洋の海水交換過程の概念図。

沿岸水と外洋水の密度差が力学的な障害となるため、両者の交換には何らかの運動メカニズムが必要である。湾内の循環流、密度前線の不安定、風による突発的な流れなど様々な力学過程が指摘されているが、とりわけ外洋及び沿岸の大スケールの流れの変動の寄与は大きい。例えば、本州南側の沿岸域では、黒潮で発達した百 km スケールの渦によって外洋水が大規模に流入することが知られている(Isobe et al. 2010)。また、沿岸域では主要な流れである潮流も、海水交換において重要な役割を担う(Imasato 1980)。

大スケールの流れの変動と潮汐という2つの主要な交換メカニズムは、どちらもその空間変動の大きさで特徴付けられる。例えば、上で挙げた黒潮の変動による海水交換は、黒潮と接する西日本の太平洋側でのみ起こる。潮汐の効果も、潮汐自体が日本海側より太平洋側でずっと強いといった局所性を持つため変動が大きい。このように、沿岸・外洋間の海水交換は場所によって大きく変化すると推測される一方で、日本沿岸全域における交換過程の包括的な理解を目指した研究はほとんどなく、その全体像は明らかでない。海水交換過程の包括的な知見が得られれば、日本沿岸域の変動メカニズムの解明は大きく進むと期待される。

## 2. 研究の目的

本研究では、過去に例のない、海水交換過

程の再現性に焦点を当てた「日本近海モデル」を開発し、そのシミュレーション実験をもとに日本沿岸全域の海水交換を定量的に評価する。また、大スケールの流れの変動との関係、及び潮汐の果たす役割に特に注目して実験結果を解析することで、日本沿岸における海水交換過程の全体像の解明に向けて、主要な交換メカニズムの役割を明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究は次の手順で進める。

### (1) 日本近海モデルの開発

気象研究所では、日本近海、北西太平洋、全球という3つの水平解像度の異なるモデルが入れ子構造になった2段階ネスティング・モデルを開発している。このモデルは外洋の100~1000km スケールの変動と日本沿岸域の10km スケールの現象を同時に扱うことが可能であり、多様な海水交換過程を表現するのに適している。本研究ではこのモデルに更なる高度化を施すことで、海水交換過程を十分に表現できる日本近海モデルを開発する。

### (2) 季節変動シミュレーションの実行

日本近海モデルを平年値の大気強制で駆動することで、一年を通したシミュレーション実験を行う。季節変動する現実的な海洋状況を再現したうえで、沿岸・外洋の海流や潮汐など、海水交換を引き起こす多様な運動をモデル中で表現する。

### (3) 海水交換の評価

日本沿岸域に置いた仮想的な染料(パッシヴ・トレーサー)が拡散する過程を計算する「トレーサー流し実験」を行い、シミュレーション実験中の海水交換過程を可視化する。また、海水交換の定量的な評価方法を検討したうえで、トレーサー流し実験をもとに、日本沿岸全域で海水交換量のマッピングを行う。その結果を整理し、海水交換量の地域依存性を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 成果1: モデル開発

気象研究所の高解像度海洋モデルを高度化し、過去に例のない、海水交換に焦点を当てた日本近海モデルを開発した。本モデルの大きな特徴は、高精度な潮汐スキームの組み込みが挙げられる。

このモデルを用いて1年間のシミュレーション実験を行った。その結果、現実的な海洋状況のもとで、海水交換を引き起こす多様な運動が再現されていることを確認した。このことは、潮汐を陽に導入する多くの海洋モデルの高精度化に貢献すると期待され、その成果について論文誌[雑誌論文1]にまとめた。

## (2) 成果 2: 海水交換の評価

シミュレーション実験の結果を用いてトレーサー流し実験を行い、海水交換過程を沿岸域に置いたトレーサーの動態として可視化することに成功した。そこでは、変動に富み複雑な構造の流れによって、沿岸水が外洋に流出すると同時に外洋水が沿岸に貫入する様子が示された。流れの変動には沿岸流と潮流が主に反映されていたが、それに加えて、黒潮や親潮といった外洋の海流が沿岸水を巻き込む様子も見られた。それらの結果として、海水交換には海域によって大きな違いが見られた。

海水交換を定量的・系統的に評価するために、モデル・シミュレーション内で海水の年齢を計算することで(いわゆるエイジ・トレーサー)、海水が沿岸域に滞留する期間を測る手法を新たに考案した。その結果では(図2)、北陸や北海道日本沖といった陸棚が狭い沿岸では海水交換が大きく、沿岸の滞留期間は10日程度しかないことが分かった。一方、大阪湾、有明海、鹿児島湾奥といった閉鎖性の強い湾奥では海水交換は小さく、1年近く滞留していた。日本沿岸の海水交換は地形によって多様であることは過去の研究から示唆されていたが、本研究によって初めて、その全貌を定量的に明らかにすることができた。

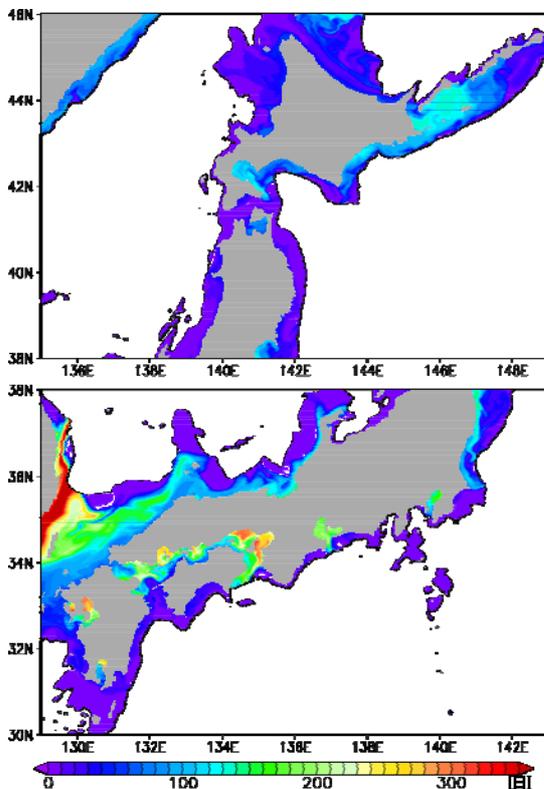


図2 モデル・シミュレーションで得られた、沿岸水の滞留期間。見やすさのために日本沿岸域を2つに分割して示している。白い領域は500m以深の外洋領域である。

さらに、海水交換過程を十分には表現できない低解像度モデル(水平解像度 10km)と比較することで、沿岸域に対する海水交換のインパクトも調べた。その結果、高解像度モデルでは、海水交換が原因と推測される水温変化が見られた。特に瀬戸内海では一年を通して海面水温が2°C近く上昇し、温暖な黒潮水の沿岸流入が原因と考えられる。

## (3) 成果 3: 潮汐の役割

沿岸・外洋の境界領域では潮流が主要な運動であった。結果の一例として、豊後水道における海水交換の進行を図3に示す。これは、成果2で行ったトレーサー流し実験の結果であり、高いトレーサー濃度(暖色系)は沿岸水を、低いトレーサー濃度(寒色系)は外洋水を示している。図中の丸で示すように、満潮時には外洋水が豊後水道の奥へと入り込む一方(図3a, c)、干潮時には沿岸水が沖へ流出する(図3b)。海水は単に南北に移動するだけでなく、満潮時に流入した外洋水が沿岸に残り、また、干潮時に流出した沿岸水が外洋に取り込まれる。このような潮汐振動に伴う海水交換は個別の海域では既に多くの研究報告があるが、日本沿岸全域を現実的に再現したうえでその運動過程をシミュレートした結果はこれまでに例がない。

本シミュレーション実験では、海水交換における潮汐の役割が定性的に示されたが、その定量的評価は今後の課題としたい。豊後水道などの太平洋側では潮汐が強く影響も明瞭であったが、日本海側では潮汐が弱いため海水交換過程に対する影響はほとんど見られなかった。海水交換の地域依存性に対して潮汐の強弱がどの程度に関係しているか、検証が必要である。

## (4) 研究のインパクトと課題

本研究で得られた日本沿岸域全体における海水交換のマッピングは、沿岸域の水質環境の研究に貢献しうる。特に、原発事故による放射性物質の拡散など、海洋汚染に関する研究の今後の進展にとって、本研究で得られた知見が重要となる可能性がある。さらに、将来の気候変動による外洋の変化が沿岸域にどのような影響を与えるかを予測するうえでも重要な知見である。加えて、海水交換は沿岸域に強く影響するため、その過程を精度良く再現することは沿岸モデリングにとって一般に重要であり、本研究の結果を活かしたモデルの高度化が期待される。すでに、気象研究所で開発している気象庁現業運用の日本沿岸モデルについては、本研究結果を踏まえて瀬戸内海中の海水交換の再現性向上が施されている。

以上のように本研究では沿岸海洋モデリングにおいて重要な成果が得られたが、海水交換量と、それを引き起こす運動の関連性については未解明な部分が残っている。例えば、海水交換における潮汐の役割の定量的な評

価など、開発したモデルを用いた研究を今後も進めていく必要がある。

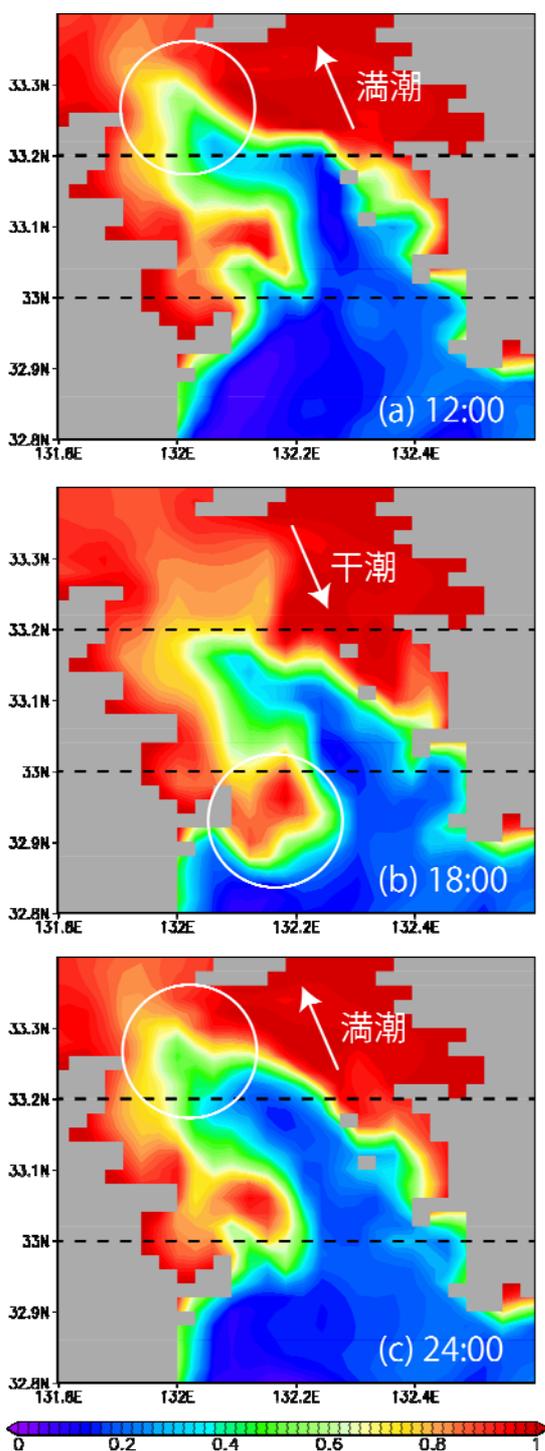


図3 豊後水道におけるトレーサー流し実験の結果。トレーサー濃度は実験開始時に沿岸で1、外洋で0とし、その時間発展をシミュレートした。各図は、実験開始40日後の(a)12時、(b)18時、(c)24時の濃度分布である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

査読あり

1. Kei Sakamoto, Hiroyuki Tsujino, Mikitoshi Hirabara, Hideyuki Nakano and Goro Yamanaka, A practical scheme to introduce explicit tidal forcing into an OGCM, *Ocean Sci.*, 9, 1089-1108, 2013. DOI:10.5194/os-9-1089-2013

[学会発表] (計 7 件)

1. Kei Sakamoto, Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano, Mikitoshi Hirabara and Goro Yamanaka, Development of a high-resolution Japanese coastal ocean model toward operational monitoring and forecasting, PICES Annual Meeting, 2012年10月18日, 広島国際会議場(広島県・広島市)
2. Kei Sakamoto, Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano, Mikitoshi Hirabara and Goro Yamanaka, Development of a high-resolution Japanese coastal ocean model toward operational monitoring and forecasting, GODAE 沿岸海洋・陸棚海タスクチーム第2回国際ワークショップ, 2013年2月5日, レッチェ(イタリア)
3. 坂本圭, 山中吾郎, 辻野博之, 碓氷典久, 平原幹俊, 小川浩司, 日本沿岸海況監視予測システムに向けた瀬戸内海モデルの開発, 日本海洋学会秋季大会, 2013年9月19日, 北海道大学(北海道・札幌市)
4. Kei Sakamoto, Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano, Mikitoshi Hirabara and Goro Yamanaka, A practical scheme to introduce explicit tidal forcing into an OGCM, Ocean Sciences Meeting, 2014年2月26日, ワイキキ(アメリカ)
5. 坂本圭, 山中吾郎, 辻野博之, 中野英之, 浦川昇吾, 碓氷典久, 日本沿岸海況監視予測システムに向けた瀬戸内海モデルの開発 II, 日本海洋学会秋季大会, 2014年9月15日, 長崎大学(長崎県・長崎市)
6. Kei Sakamoto, Goro Yamanaka, Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano, Norihisa Usui and Shogo Urakawa, Development of a Seto-Inland-Sea model toward operational monitoring and forecasting, PICES Annual meeting, 2014年10月21日, ヨス(韓国)
7. Kei Sakamoto, Hiroyuki Tsujino, Hideyuki Nakano and Goro Yamanaka, A practical scheme to introduce

explicit tidal forcing into an OGCM,  
AGU Fall Meeting, 2014年12月18日,  
サンフランシスコ(アメリカ)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂本 圭 (Kei Sakamoto) 気象研究所 海  
洋・地球化学研究部 主任研究官  
研究者番号：60589860