

平成22年5月26日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540456

研究課題名（和文） 斜面上を流れる深層流の力学的考察とパラメータ化の研究

研究課題名（英文） Study on dynamics of deep ocean currents above slopes and its parameterization

研究代表者

藤尾 伸三 (FUJIO SHINZOU)

東京大学・海洋研究所・准教授

研究者番号：00242173

研究成果の概要（和文）：日本周辺の高層斜面上に存在する強い深層流の成因について、細かな海底地形を持つ層モデルを使って調べた。深層での湧昇は海溝内に閉じた低気圧性循環を形成するが、大洋底部分を流れる南太平洋からの深層流の方がはるかに強い。一方、変動する風は、日本海溝で観測された変動流と似た周期での変動流を深層に作った。大陸棚斜面上では変動流から平均流への転換が起きて定常流を作ったが、海溝部分には見られなかった。モデルの変動流が弱いことなどが原因と考えられる。

研究成果の概要（英文）：Strong deep currents exist above the slopes of trenches around Japan. Their causes are investigated using layer models with high resolution bottom topography. Deep upwelling generates anticyclonic circulations within trenches, but it is quite weaker than the deep currents originating from the South Pacific. Fluctuating wind generates fluctuating deep currents that have similar spectra to the observation at the Japan Trench. Conversion from eddy to mean flows occurs along continental shelves but not along trenches. One reason is that the magnitude of fluctuation in the model is only a fifth of the observation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：海洋物理学、地球流体力学、深層流、海溝、変動流

1. 研究開始当初の背景

日本列島の東に南北に連なる海溝列（伊豆小笠原海溝、日本海溝、千島カムチャツカ海溝）には、海溝西斜面に南向き、東斜面に北向きの流れがあることが近年の係留流速計

よる観測で明らかになった（Fujio et al., 2000; Owens and Warren, 2000; Fujio and Yanagimoto, 2005）。特に、東斜面の流速は、大洋底上に比べ、数倍大きく、推定される流量は $10 \times 10^6 \text{m}^3/\text{s}$ を越える。また、海溝内に

溶存酸素の高い水があることから、海溝内で閉じた循環ではなく、南大洋からの深層水が海溝内を通して素早く北向きに輸送されている。これまで、海溝内の輸送は、深層水や物質の循環において考慮されなかったが、重要な流路となりうることが示唆された。

しかし、地球温暖化予測などに使われる気候モデルなどでは、モデルの水平解像度が粗いため、もともと海溝は含まれていない。気候モデルに限らず、ほとんどの海洋モデルでは海溝のように深く、狭い地形を分解することは難しく、従来のモデルでは海溝の重要性やそこに形成される深層流の研究は難しい。

深層循環の研究は、さまざまな点で大西洋を対象としてなされてきた。しかし、大洋の西岸境界に連なる海溝は、大西洋に無い地形的な特徴であるため、これまで考慮されておらず、海溝内の輸送は新たな着眼点である。

2. 研究の目的

海溝をはじめとする斜面上に強い深層流が形成されるメカニズムに焦点をあて、その力学的特徴を調べる。

海溝内に深層流ができる原因として、二つ提唱されている。

ひとつは深層での湧昇である (Johnson, 1998)。全球的な熱塩循環の一部として、海洋深層から上層へ湧昇する弱い流れが存在し、この湧昇によって水柱が伸張され、低気圧性循環が形成される。海溝のような凹み地形では、浅い側を右手に見る流れとなる (北半球)。循環は湧昇に比例するため、海溝に強い流れを作るためには、そこに局所的に強い湧昇が必要となる。

もうひとつは、風による変動流が斜面上で非線型結合により定常流を作るとするものであり、ネプチューン効果 (Holloway, 1992) として知られている。海上を低気圧が通過することで、順圧的な変動流が形成される。実際、深層流は強い時間変動成分を持つことが観測でも明らかになっている。海底が平坦であれば、低気圧通過後、何も運動は残らないが、斜面では地形的なポテンシャル勾配があるため、周期的な運動から定常流が生じる。変動流が強く、斜面の勾配が大きいほど、定常流への変換は大きい。

本研究では、これらによって斜面上の流れの観測結果を説明できるか数値モデルを使って検証する。

3. 研究の方法

本研究では数値モデルによるケーススタディを行い、モデルパラメータの違いによって、深層流がどう変わるかを見る。斜面上の力学を再現できるようにするには、細かな水平格子が必要であり、このため、層モデルを用いる。本研究では、湧昇による循環と風変

動による循環の両方を調べるため、二通りのモデルを使用する。

(1) 湧昇モデル

深層から上層への湧昇によって駆動される Stommel-Arons 型の循環を調べるため、単純な 1 層線形モデルによる数値計算を行った。領域は南端を北緯 18 度とする北太平洋であり、地形データセット ETOPO2 (version 2、緯度・経度 2 分、約 3~4km) により約 11km 格子で与える。深層は 5000m 以深とし、海底と層境界面の交差を避けるため、4900m 以深の領域のみを扱う。

Kawabe et al. (2003) の観測に基づき、領域南端の西半分で流入 $3.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え、全領域で一様な湧昇速度 $1.9 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ により流出させる。モデル深層の置換時間が 100 年になる。海底摩擦を与え、静止状態から定常に達するまで時間積分を行う。

なお、対象が定常流であるため、海底と層境界面が交差を許容するモデルを用いても結果は変わらない。

(2) 風変動モデル

深層においては等密度面が海底にぶつかることが一般的であるが、通常の層モデルは、この状況を扱えない。本研究では、Arakawa and Hsu (1990) と Hsu and Arakawa (1990) は、ポテンシャル渦度を保存し、海底と層境界面の交差を許すスキームを採用した。

水平の格子幅は 22 km とする。計算の簡便さのため、球座標系ではなく、ベータ平面とした。鉛直は 2 層とし、静止状態での境界面の深さは 500m である。海底地形は ETOPO2 の水深を与える。海底摩擦と水平粘性を与えるが、層間の摩擦や海水の移動はない。よって、非線形相互作用を考えなければ、下層に流れは生じない。

海面風は、観測データからの再解析によって求められた NCEP reanalysis-2 (緯度約 2 度、経度 2.5 度) の風応力データを水平方向に 2 次元スプライン補間して各格子点に与える。時間方向は、日平均値が世界協定時 0 時にあるとして、各時刻を線形補間により与える。NCEP でデータが公開されていた 1979 年から係留観測を実施した 2008 年までを計算した。

4. 研究成果

(1) 湧昇による循環

湧昇モデルの結果を図 1 に示す。

モデル南西端から流入させた深層水は、モデルの東岸に沿って北上する。5000m 等深線では、ハワイ海嶺とヘス海膨の間、天皇海山列とシャツキー海膨の間にギャップがあり、流入した深層水はこれらのギャップを経て北東太平洋海盆に流出し、日本近海に至らな

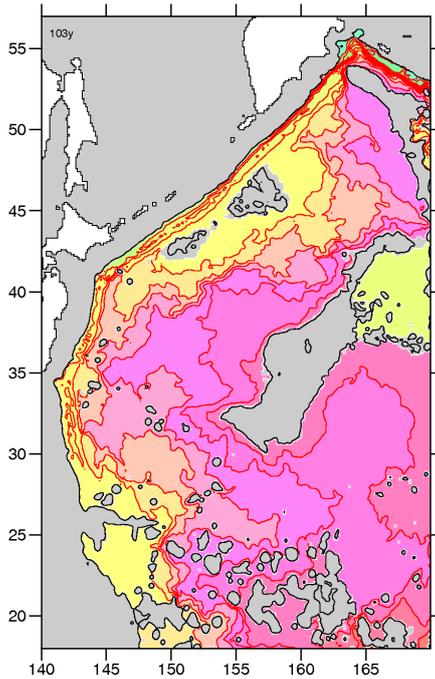


図 1. 湧昇によって形成される深層循環。領域の西端部分のみ示す。等値線は圧力分布（赤色が高い）、灰色は 5100m より浅く、モデルの側壁となる領域。

い。このため、これらのギャップを人為的に閉じ、さらに天皇海山列の北部で浅くなっている部分を深くすることにより、観測された深層循環像にあうようにアリューシャン列島まで北上させた。

海溝部分の流れに注目すると、弱い反時計回りの低気圧性の循環が形成されており、湧昇による循環である。しかし、強さはその東側の循環に比べて弱く、特に係留観測で示されたように東斜面で強くなる傾向も見られない。

南からの流入させた深層水が西岸境界流として海溝付近を北上する結果も予想したが、海底斜面によりむしろ海盆東にトラップされ、東岸境界流的である。今回は、東岸のギャップをすべて閉じたが、部分的に深層水が通過するギャップもありえるので、今後、考察が必要である。

底摩擦係数をなるべく小さくしたケースでも、全体の循環パターンは大きな変化がなく、海溝上の循環が強まることもなかった。このモデルは水平には一様な湧昇を仮定しているが、もし海溝部分が他よりも湧昇が強ければ、低気圧性循環も強くなる。しかし、よほど湧昇が強くない限り、斜面の深層流が大洋底上の流れに比べて、優勢になることはないと考えられる。

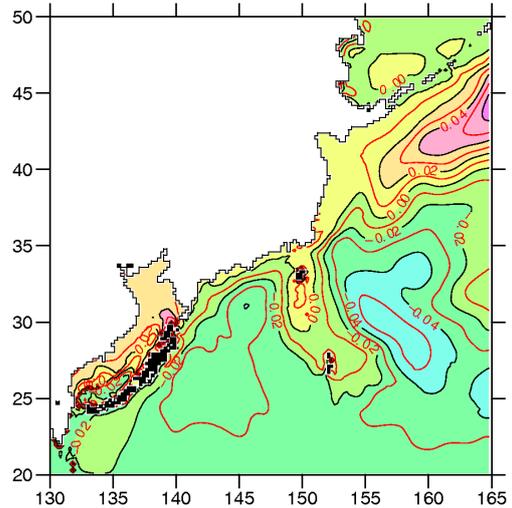


図 2. 風変動によって深層に形成される深層循環（平均流）。領域の西端部分のみ示す。等値線は圧力分布（赤色が高い）。

(2) 風変動による循環

日平均の風応力を与えて得られたモデル結果を時間平均した循環を図 2 に示す。平均期間は、係留観測を行った 2006~2008 年の 3 年間である。

東北地方の東岸から伊豆小笠原海嶺を回って、四国南岸へ南下する流れが現れている。浅い側を右に見る流れであり、大陸棚斜面におけるネプチューン効果の結果と考えられる。しかし、海溝斜面には平均流は形成されなかった。原因としては、海溝斜面が層境界面と交差するようなモデル構成にできなかったためであろうと思われる。海溝付近で交差するような非常に薄い最下層を作ると、場所によって孤立した層を作り、数値計算がうまくできなかった。また、モデルの計算コストも大きく、水平解像度を高くできていない。これらの点が今後の課題である。

上層の結果は示さないが、亜熱帯風成循環である。また、深層における変動流は、図 2 で示す平均流に比べると 10 倍以上の大きさを持つ。

図 3 は、三陸沖日本海溝東斜面での深層流速を観測とモデルで比較したものである。観測は北緯 38 度、東経 144 度 30 分（水深 6000m）に設置した係留系により 4000m の流速を 1000 日強（3 年弱、2007 年 5 月に再設置）の測定結果である。

観測ではほぼ真北に 3.3cm/s の平均流を持つが、モデルでは平均流が得られなかったため、変動流成分のみ図示した。また、流速もモデルは観測の 1/5 程度しかないので、図の矢印の大きさを変えている。変動のパターンについて、モデルは観測と比較的よく一致を示している。

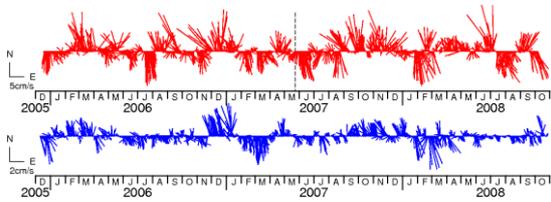


図 3. 日本海溝東斜面で観測された変動流成分 (赤) とモデル (青) の変動流成分のステイク・ダイアグラム。ベクトルの長さは左端に示し、両者で異なる。観測の 2007 年の破線は係留系の再設置を表す。

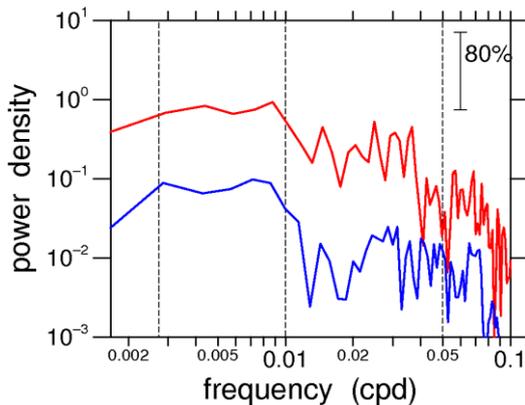


図 4. 日本海溝東斜面 (図 3 の時系列) の北向き流速成分のスペクトル。観測 (赤) とモデル (青)。

図 4 は図 3 の時系列のスペクトルである。両者とも似た構造を持つ。特に 100 日付近にエネルギーのスペクトルを持つ。したがって、深層の変動流は風変動に伴うものと推論できる。しかし、大きさが弱いことについては、与えた NCEP の風が 200km 程度の格子値であることから、風速が弱まっていることなどが考えられる。なお、年周期の変動は、モデルも観測も卓越していない。

(3) まとめと議論

海溝内への定常流の成因とされる湧昇と風変動の両方について、数値モデルでシミュレーションを行ったが、いずれの場合も観測されたほど強い定常流は形成されなかった。このため、定常流の成因を特定することはできなかった。

湧昇は鉛直拡散係数や成層構造に依存し、その空間的な分布はわかっていないため、本研究では水平に一律な湧昇を仮定した。一方、観測や理論では鉛直拡散係数は海底地形が複雑な場所では局所的に大きいとされており、海溝内では湧昇も強い可能性がある。拡散係数の推定には海洋の微細構造の測定が

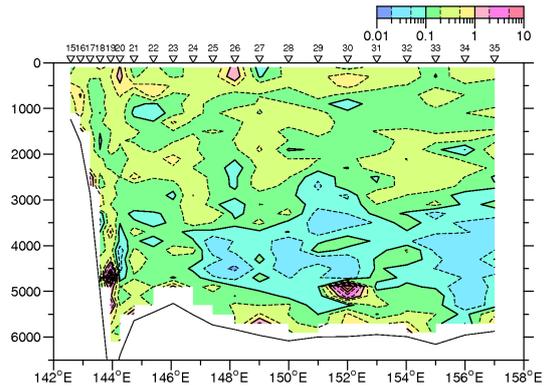


図 4. 鉛直拡散係数の北緯 38 度の鉛直断面図。係数は cm^2/s 単位で、対数で等値線を表示している (赤色が大きい)。白鳳丸 KH-07-1 航海で取得した CTD から推定した。左端が日本海溝。

必要であり、海溝での算出はない。しかし、計測が容易な CTD データから推定する手法が Kunze et al. (2006) により提唱されたため、鉛直拡散係数を算出した。図 4 はその一例である。CTD ノイズによる極大値があるが、東方の大洋底部分に比べて、海溝で大きくなる傾向はない。他の観測でも同様であった。このため、海溝に強い湧昇があり、強い定常流が作られている可能性は低いと考えられる。

風変動モデルでは、深層で観測されているものの成因が明らかでなかった数ヶ月周期の変動流と似た周期の変動流を再現することができた。しかし、強さは観測に比べて弱く、弱い原因は不明である。また、大陸棚斜面でネプチューン効果は再現できたものの、海溝部分に定常流は現れなかった。

計算スキームやコストにより、必ずしも海溝を十分に分解できる設定とすることができなかったため、さらにモデルの改良を進めることで、観測結果がより再現できるようになるかもしれない。そして、観測されるような強い変動流がモデルで再現できれば、それが斜面上で生成する変動流も、より強くなると思われる。

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 4 件)

- ① Kawabe, M., and S. Fujio, Pacific Ocean circulation based on observation, *Journal of Oceanography*, 査読有, Vol. 66, 2010, pp. 389-403
- ② Yanagimoto, D., M. Kawabe, and S. Fujio, Direct velocity measurements of deep circulation southwest of the Shatsky

Rise in the western North Pacific,
Deep-Sea Research I, 査読有, Vol. 57,
2010, pp. 328-337

- ③ Kawabe, M., S. Fujio, D. Yanagimoto and
K. Tanaka, Water masses and currents of
deep circulation southwest of the
Shatsky, Deep-Sea Research I, 査読有,
Vol. 56, 2009, pp. 1675-1687

〔学会発表〕(計3件)

- ① 藤尾伸三・川辺正樹、CTD と LADCP によ
る鉛直拡散係数の推定、日本海洋学会春
季大会、2009/4/8、東京都・品川
- ② 藤尾伸三、柳本大吾、北川庄司、日本海
溝周辺における深層流の時間変動、日本
海洋学会秋季大会、2008/9/27、広島県・
呉
- ③ 小牧加奈絵・川辺正樹・藤尾伸三、LADCP
反射強度データの水塊分析への利用、日
本海洋学会秋季大会、2007/9/28、沖縄
県・那覇

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤尾 伸三 (FUJIO SHINZOU)
東京大学・海洋研究所・准教授
研究者番号：00242173