

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月10日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740345

研究課題名（和文） 現実的な鉛直乱流拡散の分布を組み込んだ深層海洋大循環像の提示

研究課題名（英文） Semi-prognostic calculation of the meridional overturning circulation with a realistic vertical diffusivity

研究代表者

遠藤 貴洋（ENDOH TAKAHIRO）

九州大学・応用力学研究所・学術研究員

研究者番号：10422362

研究成果の概要（和文）：海洋大循環モデルにおける水温・塩分の観測値からのずれを運動方程式の圧力傾度力項を通して補正する、semi-prognostic 法を用いて深層海洋大循環のシミュレーションを行った結果、現実的な鉛直乱流拡散のもとで、観測された密度分布を再現する深層海洋大循環は弱いことが明らかとなった。従来の子午面循環の推定流量が過大評価である可能性や、これらの推定流量が鉛直乱流拡散以外の力学過程により実現されている可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：The semi-prognostic method, which introduces a correction term for potential temperature and salinity to the horizontal momentum equation, is applied to an idealized three-dimensional model of buoyancy-driven flow in a single hemisphere. The magnitude of the meridional overturning circulation (MOC) with realistic stratification as well as vertical diffusivity is small, suggesting that the magnitude of the MOC might be overestimated by the previous measurements, and/or that a substantial part of the MOC might be driven by dynamical processes other than vertical diffusion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：深層海洋大循環・子午面循環・鉛直乱流拡散・海洋大循環モデル・semi-prognostic 法

1. 研究開始当初の背景

約 1500 年の歳月をかけて全球海洋を巡る深層海洋大循環は、表層海洋大循環に匹敵する熱輸送を伴っており、大気との相互作用を通じて長期の気候変動を支配している。その循環像は、主に船上観測により蓄積された水温・塩分、化学トレーサーの分布に基づいて

推定されたものである。特に、極向きの熱輸送を担う子午面循環の流量は、大洋を横切る測線上のデータを用いた地衡流計算やインバース法に基づいて見積もられてきた。この全球規模の深層海洋大循環の強度や空間パターンを支配している重要な物理過程の一つが、海洋の物理現象の中で最も時空間スケ

ールの小さい鉛直乱流拡散である。鉛直乱流拡散は、表層に加えられた熱を深層に伝達して浮力を与えることで、密度成層を維持しつつ深層水を上層へと引き上げる働きをしている。

この海洋の物理現象で最も時空間スケールがかけ離れた、「深層海洋大循環」と「鉛直乱流拡散」との不整合が、現在の海洋物理学が抱える最大のパラドックスの一つとなっている。従来、鉛直乱流拡散のみで深層海洋大循環を維持するには、全球平均で $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度の鉛直乱流拡散係数が必要であると見積もられてきた。しかしながら、投棄式流速計や深海乱流計による最新の観測結果に基づく密度躍層内の鉛直乱流拡散係数の全球平均値は、これよりも1オーダー小さい $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度である。

研究代表者は、この最新の観測結果に基づく鉛直乱流拡散係数の全球分布を海洋大循環モデルに組み入れて数値実験を行い、深層水を引き上げる働きとして鉛直乱流拡散のみを考慮した場合、子午面循環の流量が従来の地衡流計算に基づく見積もりと比較してはるかに小さくなることを示した。しかしながら、子午面循環の流量だけでなく密度成層もまた、鉛直乱流拡散係数に依存して変化してしまうため、「現実的な鉛直乱流拡散のもとで、観測された密度分布を再現する深層海洋大循環がどのようなものであるか」という問題は依然未解決のまま残されている。

2. 研究の目的

観測された密度分布を海洋大循環モデルで再現するためには、一般的に、水温・塩分の観測値からのずれを、それぞれの移流・拡散方程式に加えたソース項を通して補正する手法がよく用いられている。しかし、鉛直乱流拡散係数が小さい場合にこの手法を適用すると、水温・塩分のソース項が鉛直移流項とバランスすることによって定常状態が達成され、実質的に大きな鉛直乱流拡散係数を仮定しているのと変わらない結果となってしまう。

そこで本研究では、水温・塩分の観測値からのずれを、鉛直乱流拡散の影響が現れる水温・塩分の移流・拡散方程式ではなく、運動方程式の圧力傾度力項を通して間接的に補正する semi-prognostic 法を用いた深層海洋大循環の数値シミュレーションを行って、「現実的な鉛直乱流拡散のもとで、観測された密度分布を再現する深層海洋大循環がどのようなものであるか」を明らかにすることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 海洋大循環モデルへの semi-prognostic スキームの組み込み

海洋大循環モデルのソースコード中、運動方程式の圧力傾度力項に関する部分に semi-prognostic スキームを組み込んでテスト計算を行う。深層海洋大循環の数値シミュレーションには、1 ケースあたり約 4000 年分と長い数値積分が必要であるため、テスト計算は、数値積分の期間が比較的短い黒潮の流路変動を対象とする。

(2) 深層海洋大循環の数値シミュレーション

Semi-prognostic スキームを組み込んだ海洋大循環モデルを用いて、深層海洋大循環の数値シミュレーションを実施する。まず、観測された水温・塩分の分布を維持するために必要と考えられている鉛直乱流拡散係数 $1 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のもとで、semi-prognostic 法を適用せずに数値積分を行う。こうして得られた定常状態の水温・塩分場を参照値として semi-prognostic 法を適用し、乱流微細構造の観測結果から示されている鉛直乱流拡散係数 $0.1 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のもとで深層海洋大循環の数値シミュレーションを行うことにより、「現実的な鉛直乱流拡散のもとで、観測された密度分布を再現する深層海洋大循環がどのようなものであるか」を考察する。

(3) 深層海洋大循環の感度実験

(2) で用いた海洋大循環モデルと同様の設定のもとで、semi-prognostic 法の適用強度やその空間分布、鉛直乱流拡散係数の値を様々に変えた感度実験を行うことにより、(2) で得られた数値シミュレーション結果の有効性について検証する。

4. 研究成果

(1) 海洋大循環モデルへの semi-prognostic スキームの組み込み

Semi-prognostic スキームを組み込んだ海洋大循環モデルを、日本南岸沖、および、台湾北東沖における黒潮の数値シミュレーションに適用した。両数値シミュレーションともに、外洋域で観測される程度の小さな鉛直乱流拡散係数を仮定し、温度風バランスから導かれる密度場を伴う黒潮の流入・流出のみでモデルを駆動した。数値シミュレーションの結果は非常に良好で、2004 年に起こった黒潮大蛇行の形成過程のみならず、周期 90~120 日で西方伝播してくる中規模渦と黒潮との相互作用によって引き起こされる、台湾北東沖での黒潮流軸・流速変動の再現にも成功した。比較的単純化したモデル設定のもとで、黒潮の流速場が良好に再現されたことから、水温・塩分の観測値からのずれを運動方程式の圧力傾度力項を通して間接的に補正する、semi-prognostic 法が有効に機能することが確認された。

(2) 深層海洋大循環の数値シミュレーション

(1)でその有効性が確認された semi-prognostic スキームを、研究代表者が所属している九州大学応用力学研究所 (RIAM) において開発された海洋大循環モデル RIAMOM (RIAM Ocean Model) に組み込み、深層海洋大循環の数値シミュレーションを実施した。鉛直乱流拡散の影響に注目するため、中規模渦による水平拡散の影響が大きい南極周極流域はモデル領域から除き、海表面での水温・塩分フラックスのみでモデルを駆動した。

まず、semi-prognostic 法を適用せずに、鉛直乱流拡散係数の値を、観測された水温・塩分の分布を維持するために必要と考えられている $1 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ から、乱流微細構造の観測結果から示されている $0.1 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ まで段階的に小さくして、各係数についてそれぞれ定常状態まで数値積分を行った。その結果、研究代表者による過去の数値実験などから示唆されたように、子午面循環の流量だけでなく、密度躍層の深さもまた、鉛直乱流拡散係数の $2/3$ 乗、 $1/3$ 乗に従ってそれぞれ減少してしまうことが明らかとなった。

次に、鉛直乱流拡散係数 $1 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ のもとで得られた、定常状態における水温・塩分場を参照値として semi-prognostic 法を適用し、鉛直乱流拡散係数 $0.1 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ のもとで深層海洋大循環の数値シミュレーションを行った。その結果、鉛直乱流拡散係数 $0.1 \times 10^4 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ のもとでは、semi-prognostic 法を用いて密度躍層の深さを参照値に近づけた場合においてもなお、子午面循環の流量が減少し、「現実的な鉛直乱流拡散のもとで、観測された密度分布を再現する深層海洋大循環は弱い」ことが示された。

上記の結果から、①地衡流計算、インバース法、診断・同化モデルにより従来推定されてきた深層海洋大循環の流量が過大評価である可能性や、②これらの推定流量が、本研究では考慮しなかった、南極周極流域での活発な渦運動に伴う水平拡散など、鉛直乱流拡散以外の力学過程によって実現されている可能性が示唆された。

(3) 深層海洋大循環の感度実験

(2)で用いた海洋大循環モデルと同様の設定のもとで、semi-prognostic 法の適用強度やその空間分布、鉛直乱流拡散係数の値を様々に変えた感度実験を行い、(2)で得られた数値シミュレーション結果の有効性について検証した。

Semi-prognostic 法に使用する参照値を作成する際に用いた鉛直乱流拡散係数と、数値シミュレーションで用いる鉛直乱流拡散係数が等しい場合には、子午面循環の流量が適用強度にほとんど依存せず、semi-prognos-

tic スキームそのものがもたらす誤差は小さいことが確認された。ただ、密度成層の非常に弱い底層に semi-prognostic 法を強く適用すると、水温・塩分の参照値からのごくわずかのずれに対して非現実的な補正がかかり、その結果、底層に参照値よりも密度の大きい水塊が形成されてしまうことが判明した。この問題については、semi-prognostic 法の適用範囲を密度躍層よりも浅い海域に限定することで解消されることがわかった。

(2)のように、参照値を作成する際に用いた鉛直乱流拡散係数と、数値シミュレーションで用いる鉛直乱流拡散係数が異なる場合には、semi-prognostic 法の適用強度を大きくするほど、水温・塩分の分布が参照値に近づく一方、子午面循環の流量は小さくなることが示された。この結果より、本研究で得られた子午面循環の流量について定量的な議論はできないものの、「現実的な鉛直乱流拡散のもとで、観測された密度分布を再現する深層海洋大循環は弱い」という結論そのものは変わらないことが検証された。

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. Endoh, Takahiro, Hiroyuki Tsujino, and Toshiyuki Hibiya, The effect of Kosu Seamount on the formation of the Kuroshio large meander south of Japan, *Journal of Physical Oceanography*, 査読有, vol. 41, pp. 1624-1629, doi:10.1175/JPO-D-11-074.1, 2011.
2. 市川 香, 遠藤 貴洋, 台湾北東沖の黒潮変動, *月刊海洋*, 査読無, vol. 42, pp. 501-506, 2010.
3. Endoh, Takahiro and Toshiyuki Hibiya, Interaction between the trigger meander of the Kuroshio and the abyssal anticyclone over Kosu Seamount as seen in the reanalysis data, *Geophysical Research Letters*, 査読有, vol. 36, L18604, doi: 10.1029/2009GL039389, 2009.

[学会発表] (計 8 件)

1. 遠藤 貴洋, 市川 香, 増田 章, 中規模渦との相互作用によって引き起こされる黒潮流軸の変動に関する数値実験, 九州大学応用力学研究所研究集会「地球温暖化と急激な経済発展が東アジア域の海洋・大気環境に及ぼす影響の解明」, 2012年3月12日、九州大学応用力学研究所.

2. Endoh, Takahiro, Takeshi Matsuno, Yutaka Yoshikawa, and Eisuke Tsutsumi, Estimates of the turbulent kinetic energy budget in the convective boundary layer, 2012 Ocean Sciences Meeting, 2012年2月20日, Salt Palace Convention Center, ソルトレイクシティ.
3. 遠藤 貴洋, 市川 香, 増田 章, 中規模渦との相互作用によって引き起こされる黒潮流軸の変動に関する数値実験, 第65回西日本海洋調査技術連絡会, 2011年12月6日, 長崎海洋気象台.
4. 遠藤 貴洋, RIAMOM への semi-prognostic 法の導入, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会「宗谷暖流を始めとした対馬暖流系の変動メカニズム」, 2011年11月9日, 北海道大学低温科学研究所.
5. Endoh, Takahiro, Hiroyuki Tsujino, and Toshiyuki Hibiya, The effect of Koshu Seamount on the formation of the Kuroshio large meander south of Japan, American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, 2010年12月17日, Moscone Convention Center, サンフランシスコ.
6. Endoh, Takahiro and Kaoru Ichikawa, Numerical study of the penetration of the subsurface Kuroshio water onto the continental shelf northeast of Taiwan, 2010 Ocean Sciences Meeting, 2010年2月24日, Oregon Convention Center, ポートランド.
7. 遠藤 貴洋, 松野 健, 吉川 裕, 九州西沖における乱流微細構造の時系列観測, 2009年度日本海洋学会秋季大会, 2009年9月28日, 京都大学吉田キャンパス北部構内.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 貴洋 (ENDOHI TAKAHIRO)

九州大学・応用力学研究所・学術研究員

研究者番号：10422362

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：