

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 5 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21740336

研究課題名（和文）

高解像度海洋モデルを用いた渦熱輸送の解析

研究課題名（英文） An estimation of oceanic eddy heat transport in a high resolution Ocean General Circulation Model

研究代表者

青木 邦弘（KUNIHIRO AOKI）

北海道大学・大学院地球環境科学研究所・博士研究員

研究者番号：70507178

研究成果の概要（和文）：本研究では、地球シミュレータで運用されている全球渦解像海洋モデルを用いて、中規模渦に代表される中規模擾乱による南北熱輸送量を、世界で初めて、全球に渡って推定する。解析の結果、低解像度モデルを用いた過去の研究と同様に、西岸境界流および南極周極流域において卓越した極向きの渦熱輸送量が見られ、また、赤道域において卓越した赤道向きの渦熱輸送量が見られた。この中緯度帯の極向き渦熱輸送は、渦が背景場の南北の水温勾配を緩やかにする働きを持つことを示唆しており、これは線形傾圧不安定の描像に一致する。しかし、興味深いことに、特に黒潮続流および湾流において、それらの南腹の亜表層に顕著な赤道向きの渦熱輸送が生じている。この亜表層の赤道向きの渦熱輸送の成因は、黒潮続流と湾流とは異なるようである。黒潮続流では、続流南腹に定常的に存在する暖水が、イベント的に生じる続流の赤道向きの蛇行によって赤道方向に移流されることが、赤道向きの渦熱輸送の実態である。一方、湾流では、湾流流軸上に形成される暖水渦が南側再循環によって南に移流されることが赤道向きの渦熱輸送を引き起こしている。

研究成果の概要（英文）：The present study, for the first time, estimates meridional heat transport induced by oceanic mesoscale variability such as mesoscale eddy in the World Ocean using a global eddy-resolving Ocean General Circulation Model (OGCM) conducted by the Earth Simulator. Poleward eddy heat transports are generally predominant for the Western Boundary Currents and the Antarctic Circumpolar Current, and along with equatorward eddy heat transport in the equatorial region, as similar to the results from previous studies with coarser resolution OGCMs. Such a significant poleward eddy heat transport in mid-latitude oceans suggests that the eddies act to weaken strong meridional background temperature gradients as expected from the linear baroclinic instability theory. However, interestingly, especially for the Kuroshio Extension and the Gulf Stream, equatorward eddy heat transport occurs in subsurface layer along the southern flank of these currents. The dominant mechanism of the equatorward eddy heat transport is different between these currents. For the Kuroshio Extension, warm water originally distributed on the current path is advected equatorward by equatorward current in the event of equatorward meandering of the current path. For the Gulf Stream, warm eddies with circular shape formed on the Gulf Stream migrates equatorward along eastern rim of the southern recirculation gyre.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋・陸水学

キーワード：海洋中規模渦，熱輸送，高解像度海洋数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

古くからその存在が知られていた海洋中規模渦に関する研究は、まさに今新しい段階に入ろうとしている。これまで全球規模の海洋中規模研究を引っ張ってきたのは、最近10数年蓄積された海面高度の衛星観測である。衛星観測によって、海は中規模渦に満ちており、特に黒潮など大洋の西岸で渦活動が強いことが判明している。しかし、渦の挙動と渦の役割の定量的な理解は全く不十分である。

海洋中規模渦が果たす役割は多岐に渡るが、興味深いターゲットの一つは、海洋中規模渦による熱輸送である。大気の高気圧が中緯度の南北熱輸送に支配的な役割を果たしていることはよく知られており、海洋中規模渦の熱輸送が注目されるのは当然である。

過去の研究でも海洋中規模渦による熱輸送を推定する試みは、不十分ではあるもののいくつかなされている。観測からの推定では、渦活動を解像するには表面の情報しか得られない衛星データを用いなくてはならないため、いくつかの仮定を用いることが必要であり、その仮定に起因する系統的な推定の偏りが大きい可能性がある問題がある。実際に異なる推定方法を用いた、Stammer et al. (1998)と Qiu and Chen (2005)の結果は全く異なるものとなっている。数値計算での渦熱輸送量の全球での推定は、1/4度という中規模渦が存在できる渦許容モデルでの算出がなされたのみである(Jayne and Marotzke 2002)。数値計算では仮定を置くこと無しに直接渦熱輸送量を推定できるものの、この上の数値計算は解像度が低いために渦エネルギーが観測の1/4度程度でしかなく、したがって推定された渦熱輸送量も1/4度程度に過小評価されていると考えられる。しかし、最近利用可能となった渦解像数値モデルの計算結果を用いれば、過去の研究の欠点を克服し、十分に高い解像度で渦熱輸送量を仮定な

しに求めることができる。

2. 研究の目的

海洋熱輸送は、地球の気候を支える重要な機構である。中規模渦に代表される海洋に広く分布する小さな時空間スケールを持った擾乱（以降、渦と呼ぶ）は、海洋熱輸送の一機構として注目されてきたが、渦の挙動を十分に解析可能なデータが無かったために、その輸送量は十分に明らかにされていない。本プロジェクトの目的は、渦を解像できる海洋数値シミュレーションを用いて渦熱輸送量を推定し、その背後にある物理過程を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、地球シミュレータセンターによって開発・運用されてきた高解像度の海洋大循環モデル（OFES）による数値シミュレーション結果を解析する。本データは水平解像度が1/10度と渦を解像するに十分な解像度を有している。OFESには、いくつかの設定の基にシミュレーションが行われたものがあるが、本研究では、現実性を考慮して、人工衛星 Quik/SCAT で推定された海上風を外力として与えた経年変動実験のシミュレーション結果を用いている。

渦による南北熱フラックスは、 $\rho C_p \langle v_e T_e \rangle$ で定義される。ここで、 ρ は海水の標準密度、 C_p は比熱、 v_e は南北流の渦成分、 T_e は水温の擾乱成分である。 $\langle \rangle$ は時間平均を表す。本研究では、使用しているデータの制約のため、2003年-2007年の5年間の平均を取った。渦成分は、3か月平均値からの偏差として定義した。これは、渦の時間スケールが100日程度であるという過去の研究の指摘に基づいている (Stammer et al. 1998, Volkov et al., 2008)。また、3か月平均値の流速 (v_3) およ

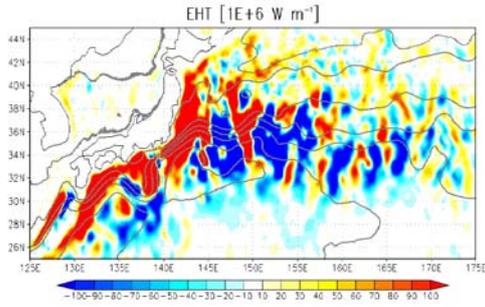


図 1. 黒潮続流域における鉛直積分された渦熱輸送量

び水温 (T_3) で構成される熱輸送: $\rho C_p \langle v_3 T_3 \rangle$ を, ここでは大規模場による熱輸送と呼ぶ. なお, 南北総熱輸送量は, $\rho C_p \langle v T \rangle = \rho C_p \langle v_3 T_3 \rangle + \rho C_p \langle v_e T_e \rangle$ と定義される.

4. 研究成果

本研究の初年度 (平成 21 年度) は, 黒潮続流域に焦点を当てて渦熱輸送の解析を行った. 黒潮続流は, 日本南岸を流れる黒潮が銚子沖で離岸した後の強い東向流を指す. この海域は渦活動の盛んな海域であり, その強い渦活動によって黒潮続流の南側の亜熱帯の暖水とその北側の亜寒帯の冷水が激しく混合されている (Mizuno and White 1983). この過程では, 暖水 (冷水) が北 (南) へ移動するので, 熱輸送は北向き (=極向き) となる. この渦による熱輸送を定量評価することが本研究の中心課題である.

OFES における中規模渦による熱輸送は, 西岸境界流域において顕著であり, 特に黒潮・親潮続流域 (35-40N) において, 大きな極向きの輸送域が東西に広がって分布している (図 1). この極向きの渦熱輸送は, 傾圧不安定理論と整合的で, 南北の水温勾配を緩やかにするように働いている. 極向きの渦輸送は海面付近で最大で, 深さと共に急激に減少する (図 2). 極向き渦熱輸送が見られなくなる深さは, 最大でも水深 500m までで, 北に向かって浅くなるサーモクライン深度と対応する. また, 黒潮・親潮続流域では, 総熱輸送に対する渦輸送の寄与は 50%にも達し, 渦による熱輸送が支配的であることが明らかとなった. これは, 黒潮・親潮続流域の位置する緯度帯においては, 平均流は東向きとなるために, 平均流では十分な南北輸送ができないことと関係している.

興味深いのは, 黒潮続流のすぐ南 (34N) において赤道向きの渦熱輸送が生じていることである (図 2). この赤道向きの渦熱輸送量は, 黒潮続流北側の極向きの渦熱輸送量と同程度と無視できない. この赤道向きの渦熱輸送は, 深度 100-600 m の亜表層において見られ, 黒潮続流北側の極向き渦熱輸送と異なる

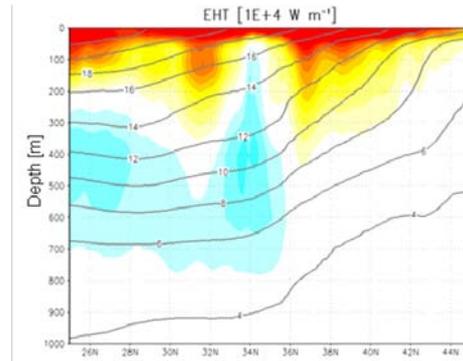


図 2. 北太平洋における渦熱フラックスの東西積分値.

る鉛直構造を持っている.

平成 22 年度は, 渦熱輸送量の空間分布の詳細な解析を行った. 渦熱輸送量の内, 水温場に影響するのは, その発散・収束量である. しかし, 東西および南北渦熱輸送量で構成されるベクトルは, 発散に寄与しない成分が含まれているため, 前年度に解析した南北渦熱輸送量の空間分布からは実際の程度その熱輸送が水温場に影響するかを判断できない. そこで, 渦熱輸送量の発散成分を計算し, その空間分布を調べた.

渦熱輸送量ベクトルの発散域は, 大規模流による水平熱収束が生じる場所とよく対応する (図 3). 特に, 渦活動は黒潮続流のほぼ全域で大きいにも関わらず, 渦熱輸送量の発散と大規模流による熱収束との対応関係は, 黒潮続流が離岸して直ぐの, およそ 145°E 以西の領域において顕著である. そこでは, 渦熱輸送量の発散成分のベクトルは, 外に向かって放射状に広がっており, 渦が熱を黒潮続流の外部に輸送している様子が伺える. このことから, 離岸直後の黒潮続流域において, 大規模場から中規模渦に熱の受け渡しが行われていると推測される. すなわち, 渦熱輸送は, 大規模場で運ばれてきた熱を黒潮続流の外に逃がす機構である.

大規模場から受けた熱の渦による南北輸送は, 極向きと赤道向きとでその卓越する場所は必ずしも一致しない. 極向き渦熱輸送は, 三陸沖 500 km 程度の黒潮続流の西側 (140E-145E) において卓越する. 黒潮続流を挟んで, この南側においては, 赤道向きの渦熱輸送も大きな値を示す. しかし, 赤道向き渦熱輸送は, さらに, 150E 付近にも極大を持っており, 黒潮続流の広範囲において生じる傾向がある.

この解析に加えて, 平成 22 年度は, 南北渦熱輸送の解析を全球に拡張した. まず注目すべきは, 北太平洋の黒潮および黒潮続流のカウンターパートである北大西洋の湾流における渦熱輸送である. 湾流周辺における東西積分での渦熱輸送量は, 黒潮続流のそれと

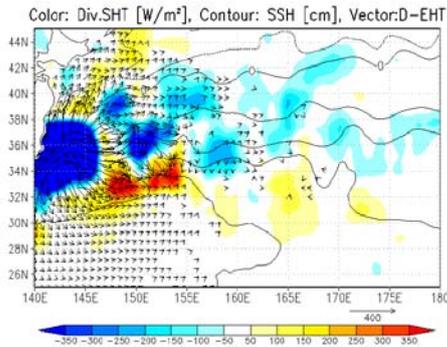


図3. 渦熱輸送量の発散成分（ベクトル）と大規模流による熱輸送の発散（カラー）。

同程度あるが、北大西洋では大規模場による北向きの熱輸送が北太平洋に比べて大きいため、トータル南北熱輸送における渦熱輸送の寄与は北太平洋よりも低い。南大洋では、60S-30Sにおいて東西積分で0.3 PWもの渦熱輸送量があり、これはトータル南北熱輸送量と同程度である。この顕著な東西積分渦熱輸送量は主にアグラス反流およびブラジル・マルビナス海流における渦熱輸送量による寄与が大きく、東オーストラリア海流およびアグラス海流それぞれの海域では、岸に沿って生じる赤道向き渦熱輸送とその東側に平行して生じる極向き渦熱輸送は打ち消し合う。このような顕著な渦熱輸送量は、南北の急激な水温勾配を緩和するべく、渦が温暖な亜熱帯から寒冷な亜寒帯に熱を輸送する役割をすることを示唆している。

特筆すべきことに、黒潮続流域と同様に、南北渦熱輸送の高い寄与の見られた湾流、ブラジル・マルビナス海流、および、アグラス反流においては、その赤道側の亜表層において赤道向きの渦熱輸送が生じている。顕著な赤道向きの渦熱輸送の見られる深さは、湾流で100-800 m、ブラジル・マルビナス海流およびアグラス反流で100-300 mである。生じる深さに多少の差はあるが、赤道向きの渦熱輸送は、各海盆の強い東向流域に共通の事象であることが分かった。

最終年度（平成23年度）は、各海盆の中緯度の強い東向流域（黒潮続流、湾流、ブラジル・マルビナス海流、アグラス反流）の南側の亜表層に共通して見られる赤道向きの渦熱輸送の発生機構の解明を試みた。

結論から言うと、赤道向きの渦熱輸送は、強い東向流上の暖水を赤道側への移流である。比較的広いスケールで見れば、亜熱帯循環と亜寒帯循環の境界に位置するこれらの東向流周辺は、その赤道側（極側）が暖水域（冷水域）となっている。しかし、より小さいスケールで見ると、これらの東向流上は局所的な暖水域となっている。この暖水は、大規模流（特に平均流）による西側からの移流

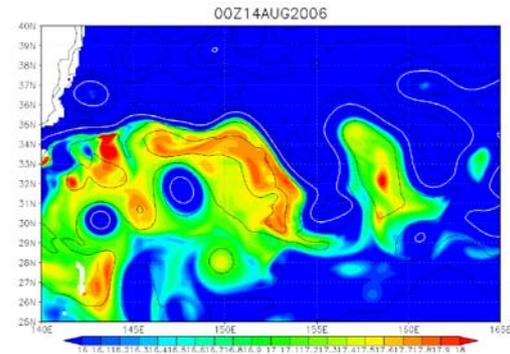


図4. 黒潮続流域における深度350mにおける水温場（カラー）のスナップショット。等値線は、海面高度を示す。

によって供給されている。

強い東向流上にできた暖水の赤道向きの輸送には、主に二つの過程が関係している。一つは、イベント的に表れる東向流の赤道向きの蛇行による移流である（図4）。この移流過程は、黒潮続流、ブラジル・マルビナス海流、および、アグラス反流において顕著である。もう一つは、東向流上で形成された暖水渦が、その南側における時計回りの再循環によって南に移流される過程である。これは、湾流において良く見られる。

本研究の結果は、海洋における渦熱輸送についての新たな描像を提示する。従来、中規模擾乱による熱輸送は、黒潮続流等の赤道側の亜熱帯循環と極側の亜寒帯循環の境界に生じた急激な南北の温度勾配を緩和する機構であると考えられている。しかし、実際には、強い東向流上に暖水帯が存在する。この暖水は、東向流の西側において、平均流によって赤道側から運ばれてきたものである。中規模擾乱による熱輸送は、循環境界における急峻な南北勾配を緩和するだけでなく、赤道側から運ばれてきた暖水の余剰分を赤道側に戻す役割も併せ持つのである。

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 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

青木 邦弘（代表）、OFES および人工衛星データによる北太平洋の渦熱輸送量推定、2009年度日本海洋学会秋季大会、2009年9月27日、京都大学（京都市）

青木 邦弘（代表）、North Pacific oceanic eddy heat transport estimated by a hig

h resolution ocean GCM simulation and satellite data, 2010 Ocean Sciences Meeting, 2010年2月22日、Portland Convention Center (アメリカ合衆国)

青木 邦弘 (代表)、渦解像海洋モデルにおける渦熱輸送量、「魚種交替の予測・利用技術の開発」研究成果統合ワークショップ、2010年7月2日、鳴子観光ホテル (宮城県大崎市)

青木 邦弘 (代表)、An Estimation of Eddy Heat Transport in the Western Boundary Currents Using a Global Eddy-Resolving Ocean, 2011 IUGG General Assembly, 2011年6月27日、Merbourn Convention Center (オーストラリア)

青木 邦弘 (代表)、OFES で再現された黒潮続流における渦運動量輸送とその基本流への影響、2012年度日本海洋学会春季大会シンポジウムE、2012年3月30日、筑波大学(つくば市)

[図書] (計 0 件)

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 邦弘 (AOKI KUNIHIRO)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・博士研究員
研究者番号：70507178

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：