

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800260

研究課題名(和文) 深層熱塩循環を駆動するエネルギー供給源として海洋中規模渦が果たす役割の解明

研究課題名(英文) The role of mesoscale eddies as a possible energy source for diapycnal mixing in the deep ocean maintaining the global overturning circulation

研究代表者

田中 祐希 (Tanaka, Yuki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：80632380

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：赤道太平洋の水温躍層における鉛直乱流混合は、表層から深層への熱輸送を通じて全球の気候に影響を与える重要な物理過程である。本研究では、この乱流混合に寄与する内部波の励起過程を、渦解像海洋大循環モデルを用いて調べた。その結果、約0.5 m/sの速度で西向きに伝播する波長約1000 kmの熱帯不安定波から下向きに内部波が放射されることを発見した。この内部波は、熱帯不安定波のフロント部で生じる水平流の収束域が、海面を動く障害物のように働くことで励起される風下波として説明可能であった。この内部波に伴うエネルギーフラックスは、赤道太平洋の水温躍層における乱流混合に重要な役割を果たしている可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Turbulent mixing in the thermocline of the equatorial Pacific Ocean is an important process that controls diapycnal heat transport and affects the global climate. In this study, using an eddy-resolving ocean general circulation model, we show that tropical instability waves (TIWs), propagating westward at a speed of ~ 0.5 m s⁻¹ with a wavelength of ~ 1000 km, play an important role in inducing turbulent mixing. The front of the TIW is clearly manifested as a narrow strip of strong convergence of horizontal surface flow, from which area downward propagating internal waves are intermittently radiated. These internal waves can be interpreted as lee waves generated by the surface-flow convergence zone, which acts like an inverted obstacle moving along the ocean surface. The associated downward energy flux integrated over the entire equatorial Pacific averaged during January 2011 amounts to ~ 8.1 GW, creating an energy pathway to turbulent mixing in the thermocline of the equatorial Pacific.

研究分野：海洋物理学

キーワード：鉛直乱流混合 エネルギーフラックス 内部波 風下波 熱帯不安定波 赤道太平洋 渦解像海洋大循環モデル

1. 研究開始当初の背景

海洋深層における鉛直乱流混合は、深層熱塩循環と呼ばれる全球規模の海洋循環やそれに伴う水塊の形成・輸送を強くコントロールし、ひいては全球の気候にも影響を及ぼし得る重要な物理過程の一つである。全球海洋の水温・塩分の鉛直分布と深層熱塩循環の流量との観測値に基づいた推定によれば、これらを維持するのに必要な海洋深層の乱流混合へのエネルギー供給量は約 2.1 TW と見積もられている。

この鉛直乱流混合の主要なエネルギー供給源は、これまで、潮汐流-海底地形間の相互作用によって励起される内部潮汐波と、風応力によって励起される近慣性内部波であると考えられてきた。しかしながら、高解像度の数値モデルを用いた近年の研究によって、潮汐流-海底地形間の相互作用によって励起される内部潮汐波エネルギーは約 1.1 TW であり、そのうち深海での乱流過程によって散逸されるものが約 0.6 TW であること、風応力によって励起される近慣性内部波エネルギーは約 0.7 TW であるが、そのうちの大部分は表層混合層で散逸され、深海の乱流過程へと寄与するエネルギーは約 0.1 TW に過ぎないこと、などが明らかになってきた。その結果、海洋深層の鉛直乱流混合に対するエネルギー供給は、この 2 つの物理過程によってだけでは、観測されている深層循環を維持するには不十分であると認識されるようになりつつある。

一方、風応力は、直接的に近慣性内部波を励起するだけでなく、大洋規模の風成循環を形成するのにも約 1 TW に及ぶ多量のエネルギーを供給していると見積もられている。このエネルギーは、傾圧不安定などによって励起される数 100-1000 km スケールの中規模擾乱を通じて最終的に乱流混合過程によって散逸されていると予想されている。しかしながら、どのような過程を経て中規模擾乱から乱流混合へとエネルギーが輸送され、最終的にどこでどの程度のエネルギーが散逸して深層循環の維持に寄与しているのかは現在まで明らかにされてこなかった。

2. 研究の目的

このような背景をふまえ、本研究では、上述した深層循環を維持するのに必要な鉛直乱流混合エネルギーの不足分を補い得る新たなエネルギー供給源の可能性として海洋中規模擾乱に着目した。特に、中規模擾乱から放射される内部波に着目し、その物理特性や放射メカニズム、さらにはこの内部波放射に伴うエネルギーフラックスの全球分布を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的のために、全球渦解像海洋大循環モデル OFES (OGCM for the Earth Simulator) を再駆動し、その結果を、内部波を解像できる高時間分解能 (1 時間) で出力した。モデルの空間解像度は東西・南北方向に 0.1° 、鉛直方向には 54 層である。計算対象期間は 2011 年 1 月の 1 か月間とした。

周期 15 日以上での低周波数成分を TIW や一般流によるものと見なし、ハイパスフィルターによってこれらの低周波数成分を取り除くことで、内部波を含む高周波数擾乱を抽出した。

4. 研究成果

本研究で用いた数値モデルで最も顕著な中規模擾乱およびそこから放射される内部波が見られた太平洋赤道域について、詳細な解析を行った。太平洋赤道域には、熱帯不安定波 (Tropical Instability Wave, TIW) と呼ばれる顕著な中規模擾乱が存在する。TIW は赤道域の複雑な海流系の順圧 / 傾圧不安定不安定によって励起され、0.5 m/s 程度の位相速度で赤道に沿って西向きに伝播する、波長約 1000 km、周期約 30 日の中規模擾乱である。

数値モデルは、北半球で特に顕著な高気圧性の渦構造を持つ典型的な TIW を良く再現できていた (図 1a)。TIW は、水平流の収束域として明瞭に見られる鋭いフロントを、その渦構造の前面に伴っている (図 1b)。

高周波数の傾圧擾乱による鉛直エネルギーフラックスを調べたところ、このフロント域、すなわち水平流の収束に伴う下降流の領域で、表層から水温躍層に向かって下向きに、パッチ状に大きくなっている様子が見られた (図 1c)。このことは、TIW のフロント部から水温躍層に向かって下向きに内部波が放射されていることを示唆している。この下向きエネルギーフラックスは、赤道太平洋全域の積分では、解析対象期間である 2011 年 1 月の 1 か月間平均で 8.1 GW に達していた。また、その空間分布は、TIW 底部のシアによって直接的に励起される鉛直乱流混合が赤道太平洋東部で顕著なものと対照的に、赤道太平洋中央部で特に顕著になっていた (図 2)。

この下向きエネルギーフラックスを引き起こす高周波数擾乱の物理特性を詳細に調べたところ、TIW のフロントにはほぼ平行な等位相面を持ってフロントとともに西向きに伝播する、波長 100 km 程度の水平高波数の内部波であることがわかった。この内部波は、風下波の解析解と良く一致する空間構造を持っており (図 3)、さらにそ

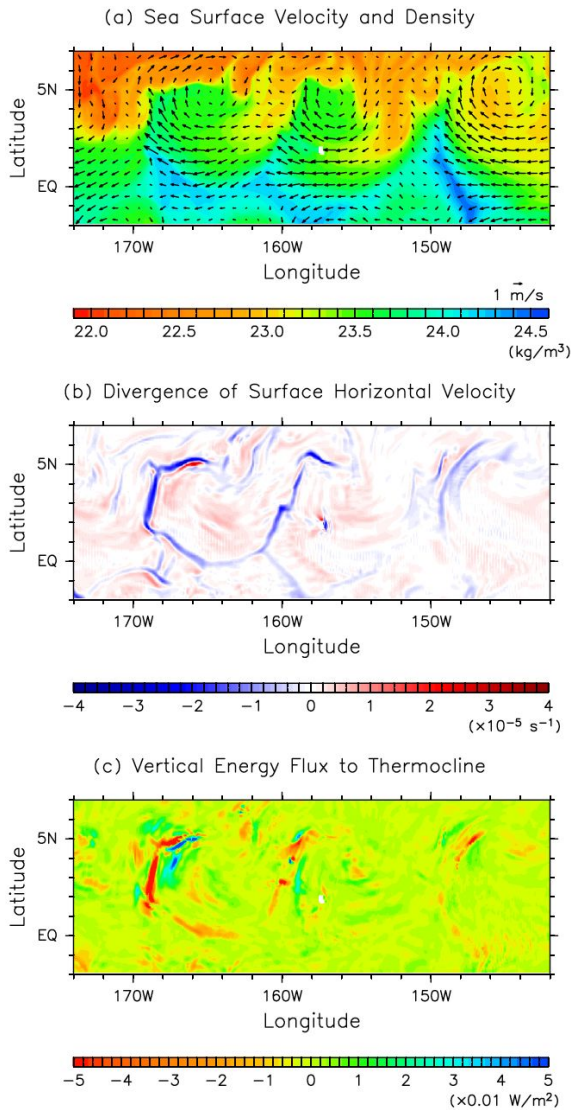


図 1: (a) 海面密度(カラー)と海面流速(矢印)。(b) 表層 50 m における水平流の発散。(c) 高周波数の傾圧擾乱による鉛直エネルギーフラックス。表層混合層底部から水温躍層までの深度帯における平均値を示す。各パネルとも 2011 年 1 月 11 日の 1 日間平均を示す。

の水平波数-周波数スペクトルも、風下波の分散曲線に沿って明瞭なピークを持っていた。これらの結果から、この高周波数擾乱は、TIW のフロント部で表層水平流の収束によって生じる下降流域が、あたかも海面を移動する障害物のように働くことで励起される風下波として説明可能であると結論づけられた。

本研究の結果は、TIW のフロント部から放射される内部波が、赤道太平洋の水温躍層における乱流混合に重要な影響を及ぼしている可能性を示唆するものである。赤道太平洋の鉛直乱流混合は、赤道域の海流系のみならず全球の気候をもコントロールする重要な物理過程である。例えば、大気海洋結合モデル内で再現される工

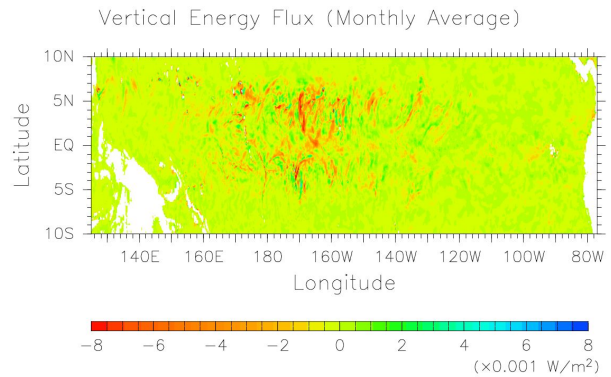


図 2: 2011 年 1 月の 1 か月間にわたって平均した、高周波数傾圧擾乱による鉛直エネルギーフラックス。

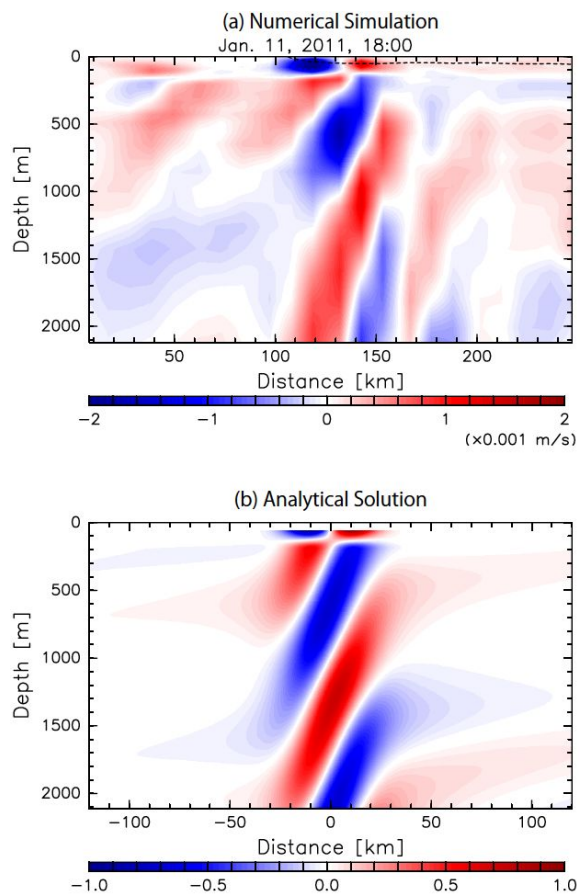


図 3: TIW のフロントに直交する鉛直断面内における鉛直流速の分布。(a) 数値モデルで得られた傾圧高周波数擾乱。(b) 解析的な風下波(最大振幅を 1 に規格化)。適当な水平スケールを持つ下降流の励起源が、表層・密度躍層・深層の 3 層から成る一樣回転・無限水深の海洋の表面を、 x 軸負方向に 0.5 m/s の速さで移動するとして求めた。

ルニーニョ・南方振動の振幅は、赤道太平洋の特に水温躍層付近で仮定される鉛直拡散係数に強く依存することが知られている。今後は、本研究で発見された TIW のフロント部から放射される内部波が、どのような物理過程を経て、最終

的にどの深度帯で散逸して乱流混合を引き起こしているのかを明らかにするとともに、引き起こされた乱流混合が、気候変動を含む大規模場へどのような影響を及ぼしているのかを評価していくことが必要である。

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)

Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki, 2015: Downward lee wave radiation from tropical instability waves in the central equatorial Pacific Ocean: a possible energy pathway to turbulent mixing, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 120, 7137-7149, doi:10.1002/2015JC011017 (査読有).

[学会発表] (計 8 件)

Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki: Downward lee wave radiation from Pacific tropical instability waves: A possible energy pathway to turbulent mixing, *Japan Geoscience Union Meeting 2016*, 幕張メッセ(千葉県千葉市), May 22, 2016.

Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki: Downward lee wave radiation from tropical instability waves in the central equatorial Pacific Ocean: a possible energy pathway to turbulent mixing, *2016 Ocean Sciences Meeting*, New Orleans, USA, February 24, 2016.

Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki: Downward “lee wave” radiation from tropical instability waves in the central equatorial Pacific: a possible energy pathway to turbulent mixing, *26th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly*, Prague, Czech Republic, July 1, 2015.

田中祐希, 日比谷紀之, 佐々木英治: 太平洋赤道域の熱帯不安定波から励起される内部波 -高解像度 OGCM の結果から-, 2015 年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学品川キャンパス(東京都品川区), 2015 年 3 月 24 日.

田中祐希, 日比谷紀之, 佐々木英治: 高

解像度 OGCM で見られる太平洋赤道域の内部波, 2014 年度海洋乱流研究会, 京都大学吉田キャンパス(京都府京都市), 2014 年 12 月 23 日.

田中祐希, 日比谷紀之, 佐々木英治: 高解像度海洋大循環モデルによる地衡流起源内部波エネルギーのグローバル見積もり, 2014 年度日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学品川キャンパス(東京都品川区), 2014 年 3 月 28 日.

Tanaka, Y., T. Hibiya, and H. Sasaki: Global estimates of internal wave energy flux radiating from geostrophic flows based on a high-resolution numerical model, *2014 Ocean Sciences Meeting*, Honolulu, USA, February 24, 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

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:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 祐希 (TANAKA, Yuki)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号: 80632380

(2)研究分担者
()

研究者番号:

(3)連携研究者
()

研究者番号:

(4)研究協力者
()