

太平洋赤道上の深い循環を駆動するエネルギー供給プロセスの解明

寺田 雄亮

東京大学 大学院理学系研究科

1. はじめに

赤道太平洋の中層（深さ 500–2000m）では Equatorial Intermediate Current (EIC) が数十年平均した場として赤道に沿って西向きに流れており、西岸から東部まで広い東西幅を持っていることが知られている（図 1a）[1,2]。EIC やその変動は海中の酸素などの物質循環[3]や気候変動[4]に影響を及ぼしている可能性が指摘されているが、EIC を駆動するメカニズムが未解明であるため、物質循環や気候変動の研究で広く用いられる海洋大循環モデル内で適切に再現されていないのが現状である。

EIC のような赤道上の東西流の駆動源としては赤道を跨ぐ流速を伴う数ヶ月周期の変動（季節内変動）が提案されており[5]、赤道太平洋の深さ 1000m では海盆の東部に集中して存在していることが報告されている（図 1b）[6]。しかしなが

ら深さ 1000m には季節内変動の直接的な起源となりうるものが存在しないため、季節内変動がどこからもたらされるのかは未解明であった。さらに離れた場所からもたらされた季節内変動が、深い場所に存在する太平洋の EIC の形成にどれだけ寄与するのかも不明であった。

そこで本研究では理想化海洋モデルを用いて数値実験を行い、太平洋東部における深い季節内変動の起源を検証する。さらにこの季節内変動の EIC 駆動への寄与を定量的に評価する。

2. 海盆東部における深い季節内変動の起源

赤道太平洋東部、深さ 1000m で観測された深い季節内変動については、その直上の海面付近に存在している活発な季節内変動が起源であると予想されてきた[7]。しかしながら海面付近と中層との間には密度が深さと共に大きく変化する

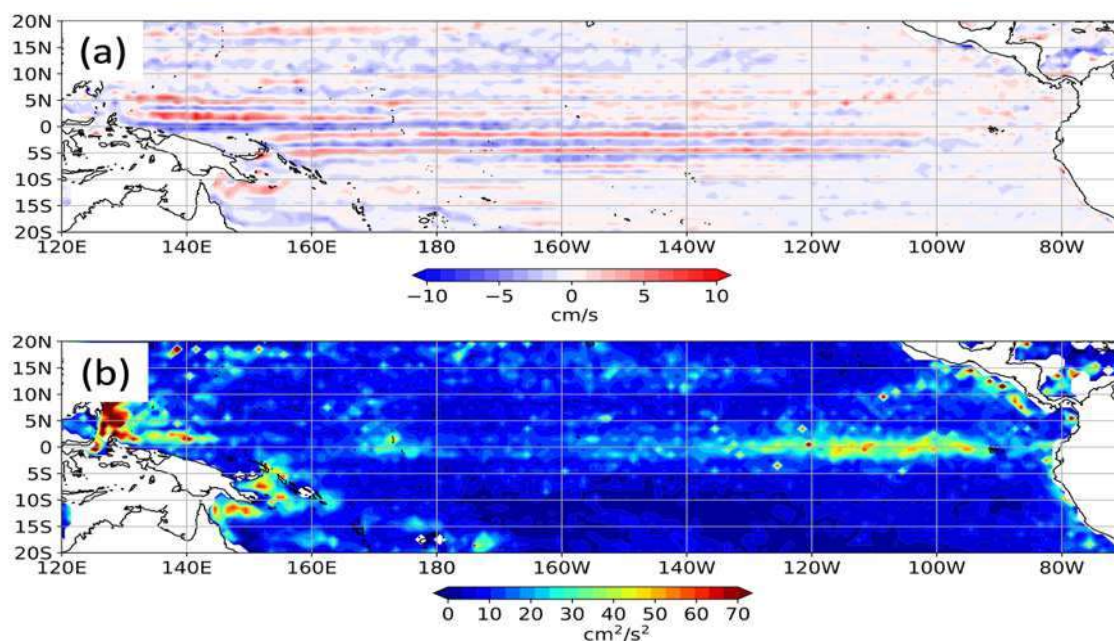


図 1：1997 年から 2022 年の深さ 1000m における流速推定データ[2]を使用し、1 度格子ごとに計算された(a)東西流速(東向きが正)と(b)eddy kinetic energy (EKE)の南北成分。赤道付近では EKE の南北成分は季節内変動のエネルギーに対応する。

る密度躍層が存在し、密度躍層の上下で海洋は異なる振る舞いをする。そこで密度躍層を超えて海面付近から中層に季節内変動をもたらすメカニズムについて数値実験を用いて検証した。

2.1 矩形海洋モデルを用いた数値実験

流体の基本方程式であるナビエ-ストークス方程式を有限要素法で解くために、MIT General Circulation Model (MITgcm)[8]を使用して太平洋赤道域を模した深さ 5000m、南緯 20 度から北緯 20 度、東経 130 度から西経 80 度の矩形海洋モデルを構築した。また現実的な密度躍層を再現するために観測された赤道太平洋の水温の鉛直分布[9]を初期値、及び側面境界条件として与えた。このような設定のもとで、海面付近の季節内変動を海面応力強制に近似して赤道上の西経 140-100 度を与え計算を行った。なお水平格子間隔は 0.25 度、鉛直方向は 100 層とし、300MPI プロセスを用いた空間分割で並列計算し、2 年分の積分を実施した。また計算結果は 3 日ごとに 3 日平均値を出力した。

2.2 計算結果

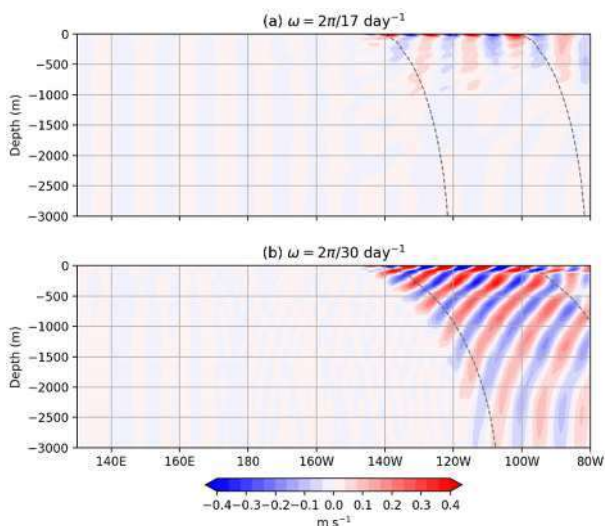


図 2：(a)17 日周期と(b)30 日周期の強制を与えた場合の積分開始後 183 日目の赤道上の深さ・経度断面における南北流速分布

図 2a は強制の東西波長を 12 度、周期を 17 日

とした場合の結果を示している。強制を与えた経度帯(140-100W)では直下に南北流速の縞状構造がみられ、波動が励起されていることがわかるが、励起された波動は深さ 500m 付近にある密度躍層で反射されて 500m 以深の中層に到達できていない。一方強制の周期を 30 日とした場合には下向き、東向きの波動のビームが形成され、中層に到達している(図 2b)。これは海面付近で励起された波動が下・東向きにエネルギーを輸送していることを意味し、理論的に計算されるエネルギーの輸送経路(図 2 中の破線)とも矛盾しない。

東赤道太平洋の海面付近の変動はさまざまな周期の成分を含んでいることが報告されている[10]ため、さらに異なる周期の強制を与えた場合についても実験し、各実験において中層に供給されたエネルギーを計算して比較を行った(図 3)。結果は中層へのエネルギー輸送効率が強制の周期に依存することを示すものであった。特に周期が短いと赤道波動を励起できないか励起できても波動の鉛直波長が長すぎて密度躍層で反射され、周期が長すぎると励起される波動の鉛直波長が短く散逸されやすいことで中層にエネルギーを供給できていなかった。以上のような周期選択性から 20-30 日程度の周期をもつ変動のみが密度躍層を超えて中層にエネルギーを供給することが判明した。

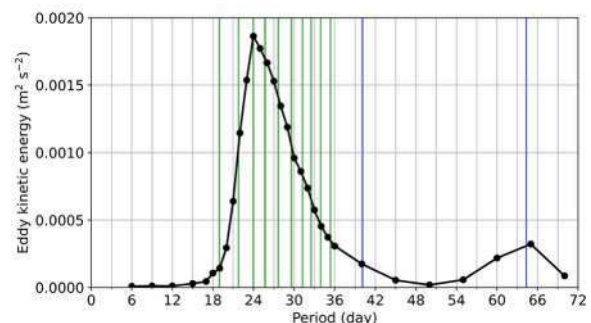


図 3：与えた強制の周期ごとの深さ 1000-2000m に到達した季節内変動のエネルギー。緑・青線は赤道波動が応答可能な周期を示す。

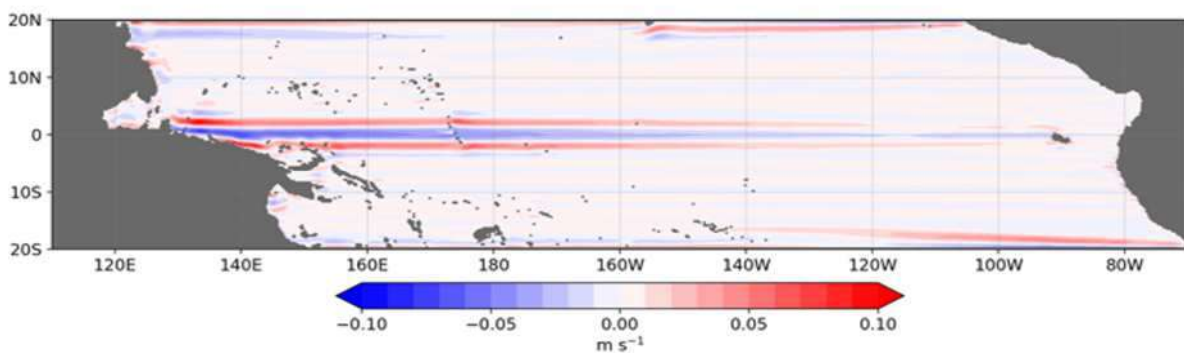


図 4：積分開始後 50-100 年目の深さ 1000m における東西流速の平均値

3. 赤道太平洋中層における西向き海流の形成

前節で明らかになった赤道太平洋東部で波動伝播を通して中層にもたらされる季節内変動と、赤道上を西向きに流れる EIC との関係明らかにするため、これら 2 つの要素を再現する理想化海洋モデルを構築し、数値実験を実施した。

3.1 赤道太平洋の領域海洋モデル

ここでは前節より現実的な状況を考えるため、前節で使用したモデルを東西に東経 110 度から西経 70 度まで拡張し、図 4 のように海岸線を側面境界として与え、時間平均した一定の貿易風を海上風強制として与え続ける実験を行った。ここでは空間分割を 450MPI プロセスとし、100 年分積分を実施した。計算結果は 5 日ごとに 5 日平均値を出力した



図 5：モデルの計算領域

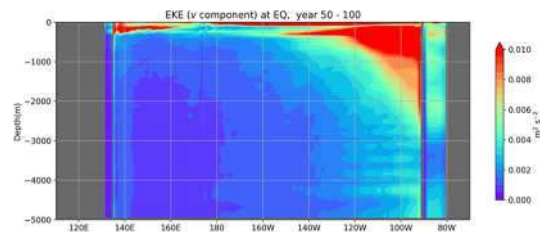


図 6：積分開始後 50-100 年目の赤道上、深さ・経度断面上の季節内変動のエネルギー分布。

計算の結果、図 5 のように海盆東部で下向き・東向きのエネルギー輸送が再現された。さらにこの輸送を担う波動の周期は 30 日であり、前節の結果と矛盾しないものであった。また 50 年平均した流速場は中層において赤道上で西向きであり EIC が現実的な構造と流速で再現された(図 6)。さらに EIC の南北にある東向きの流れも再現され、これら流速も観測(図 1a)と矛盾しないものであった。

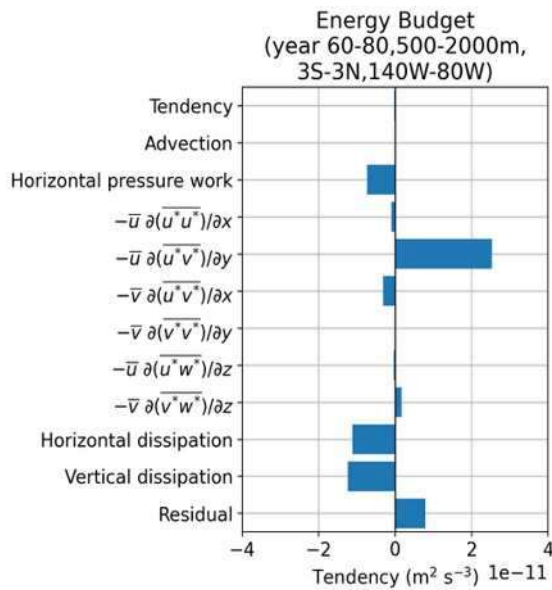


図 7：積分開始後 60-80 年目の結果を用いて評価された EIC のエネルギー方程式の各項。正の値が EIC に対するエネルギー供給に対応する。

3.2 季節内変動と EIC の関係

季節内変動と EIC の関係を調べるため、計算された流速場(u, v, w , それぞれ東西、南北、鉛直成分)を 75 日の時間フィルターを用いて季節内変動(u^*, v^*, w^*)と EIC($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$)に分解し、EIC のエネルギー方程式の各項を評価することで EIC の形成過程を調べた(図 7)。

その結果 EIC にエネルギーを最も多く供給する項は $-\bar{u} \partial(\bar{u}^* \bar{v}^*)/\partial y$ であることが明らかになった。この項は中層の季節内変動(図 5)が東西運動量を南北方向に収束させる[11]ことで西向きに流れる EIC をさらに西向きに加速していることを意味する。すなわち実験結果は海面付近から供給されてきた季節内変動が EIC の形成・維持に最も重要な役割を果たしていることを示している。

4. おわりに

本研究では赤道太平洋の深い循環に注目し、理想化海洋モデルを用いた数値実験を用いてエネルギー供給プロセスの検証を行った。その結果、東部における海面付近の活発な変動が新た

に海洋波動を励起し、密度躍層を越えるために適切な周期を持った波動のみが中層まで到達し、深い循環にエネルギーを供給していることが明らかになった。本研究ではエネルギーの供給に注目したが、最終的になぜ西向きの流れが選択されるかなど詳細な力学メカニズムを解明するため、計算結果のさらなる解析を計画している。

参考文献

- (1) S. Cravatte, et al., Journal of Physical Oceanography 47.9, 2305-2324, (2017).
- (2) K. Lebedev, et al., IPRC Technical Note, 2(4), 20, (2007).
- (3) L. Stramma, et al., Journal of Geophysical Research: Oceans, 115(9), 1-12, (2010).
- (4) P. Brandt, et al., Nature, 473(7348), 497-500, (2011).
- (5) B.L. Hua, et al., Journal of Fluid Mechanics, 610, (2008).
- (6) A. Delpech, et al., Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(8), 1-23, (2020).
- (7) F. Ascani, et al., Journal of Physical Oceanography, 45(6), 1709-1734, (2015).
- (8) J. Marshall, et al., Journal of Geophysical Research: Oceans, 102(C3), 5753-5766, (1997).
- (9) J.R. Reagan, et al., WORLD OCEAN ATLAS 2023 Product Documentation National Centers for Environmental Information, (2024).
- (10) M. Wang, et al., Journal of Physical Oceanography, 50(10), 3009-3024, (2020).
- (11) R.J. Greatbatch, et al., Geophysical Research Letters, 28(5), 819-822, (2018).