

論文内容の要旨

論文題目：

Interannual modulation of intraseasonal upper-ocean variability in the Indo-Pacific warm water region

(インド洋-太平洋暖水域における海洋上層の季節内変動の経年変調)

氏名： 尾形 友道

1. はじめに

インド洋南東部から西太平洋熱帯域にかけての暖水域は、熱帯起源の大気海洋系気候変動の駆動域として知られているとともに、この海域での海洋変動は、全球規模の海洋大循環や気候変動にも大きく影響を及ぼしていると考えられている。中でも熱帯インド洋南東部 (SETIO) は、インド洋熱帯域の主要な気候変動モードであるインド洋ダイポールモード現象 (IOD) の東側の作用中心として、海洋上層および大気の変動が大きいことが知られている (Saji et al., 1999 など)。さらに SETIO は、海流系の不安定に伴う季節内擾乱として中規模渦が活発に励起される海域でもあり、最近の研究によって、この渦活動の季節的な変動過程が明らかにされてきた (Feng and Wijffels, 2002)。しかし、気候変動モードの影響による渦活動の経年的な変調の度合いや、渦活動が IOD などに及ぼす影響のような相互の関連性については未だ明らかにされていない。

一方、熱帯太平洋西部域においても湧昇活動が活発な領域としてミンダナオドーム (MD) 域がある。この海域においても、活発な渦活動とともに、エルニーニョ/南方振動現象 (ENSO) に伴う経年変動も顕著に現れることが知られている (Tozuka et al., 2002)。しかし、時空間規模の異なるこれらの現象はこれまで独立に議論されることが多く、両者の関係に関する研究はほとんど行われていない。

このような時空間規模の小さな渦活動が、より時空間規模の大きな気候変動モードの発展に影響を及ぼしていることも考えられる。気候変動モードの消長における中規模渦の役割を調べることは、今後の高解像度モデルによる気候変動予測の精度向上にとっても非常に重要である。そこで本研究では、高解像度海洋モデルの結果を詳細に解析することにより、熱帯インド洋南東部および西部熱帯太平洋における中規模渦活動の経年的な変調と熱帯域の気候変動との関係を明らかにするとともに、渦活動が気候変動モードの発展に及ぼす影響について詳しく調べた。

2. データ

本研究では、高解像度の海洋大循環モデルであるOFES（OGCM for the Earth Simulator）の1950~2007年のハインドキャスト実験結果を主に用いた。OFESは極域を除く全球海洋を水平0.1度、鉛直54レベルの解像度でカバーし、インド洋内の循環やインドネシア通過流などの大規模場の変動とともに、中規模渦も十分再現することができるモデルである。

気候値の水温、塩分場を初期値とし、NCEP/NCAR再解析データの季節変動気候値を外力として50年間駆動した後、1950年から2007年まで、再解析データの日平均値を外力として与えた。1950年からの3日毎に出力されたデータを用い、各変数の時系列を、18~96日周期の季節内変動、平均的な季節変動気候値、および経年的な変動場の3つの変動要素に分け、季節内変動の経年変動とその要因について調べた。

3. 熱帯インド洋南東部における季節内擾乱の経年変動

はじめに、OFESにより再現された渦擾乱の妥当性を確認するため、渦擾乱の発生機構や構造に関して平均的な季節変動の視点から検証した。エネルギー収支解析や線形不安定解析の結果から、渦擾乱のエネルギーが傾圧変換項により供給されていること、励起される擾乱が現実的な構造をもつことが示された。次に、SETIOにおける中規模渦活動度の経年変動の指標として、海洋上層における水平流速場から渦運動エネルギー偏差の空間平均値を求めた。これを用い、渦活動が活発な場合と不活発な場合として、渦運動エネルギー偏差がその標準偏差を越える18イベントを抽出した。一方、ダイポールモード指数を別の指標として、経年的な変動場の偏差が大きい年を選択した。渦活動度偏差が大きい18イベントについて、さらに顕著なIODを伴っていた場合（8イベント：IODケース）とそうでない場合（10イベント：No-IODケース）に分類し、それぞれでコンポジット解析を行った（図1）。その結果、IODケースにおいてはインドネシア南岸域での顕著な負の表層蓄熱量偏差がSETIOにおける南北水温勾配を強化していることがわかった（図1a）。一方、No-IODケースにおいては、インドネシア南岸域の弱い負偏差とともに14°S付近に東西に広がった正の蓄熱量偏差がみられ、この両者が南北水温勾配の強化に重要であることがわかった（図1b）。蓄熱量偏差のラグ相関解析の結果、この14°S付近の正偏差は熱帯太平洋西部域を起源とし、インドネシア多島海を通過してオーストラリア沿岸から14°Sに沿って西方伝播していることが示唆された。

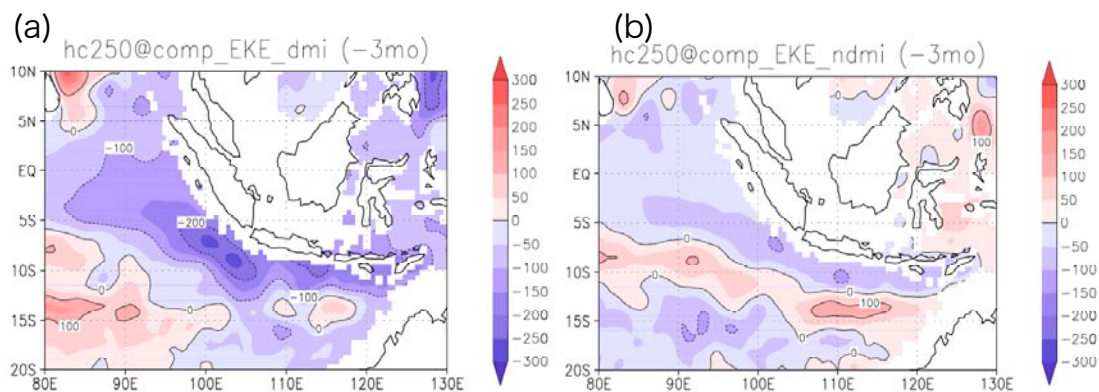


図1：SETIOでの渦活動度偏差極大時の3ヶ月前における250m以浅の蓄熱量偏差（単位：°Cm）。(a) IODケースおよび (b) No-IODケース。

また、渦擾乱活動度の経年的な強弱をもたらすメカニズムを検討するため、SETIOにおけるエネルギー収支解析を行った。その結果、IODケースとNo-IODケースのどちらの場合でも、傾圧エネルギー変換項の増加が大きく寄与していることがわかった。すなわち、SETIOにおける南北温度傾度の強化を通じ、傾圧的に擾乱が強化されていることが明らかとなった。

4. 熱帯インド洋南東部における季節内擾乱がIODの発展に及ぼす影響

各IODイベントの際に渦擾乱の強化に関連する海洋上層の変動過程を詳しく調べるため、またそれらの渦擾乱が基本場の経年変動であるIODに与える影響を調べるため、1990年以降のIODイベント（特に1994年および1997年）に着目して熱収支解析を行った。

1994年のIODイベントでは、経年変動場にみられるSETIOの負の蓄熱量偏差は8月に極大を示し、太平洋ではエルニーニョ現象は同時発生していなかった。また、季節変動に伴うインドネシア南岸域の湧昇も8月に極大となるため、これらの要素がSETIOの上層における正味の南北水温勾配の強化に好都合な環境を生み、渦活動度が強化されていた。

季節内変動としての渦活動に伴う熱輸送の効果を考慮した場合と考慮しない場合のSETIOにおける蓄熱量変動を図2に示す。渦活動を考慮した場合には、1994年夏季にみられる顕著な渦活動に伴う南北熱輸送によりIODに伴う負の蓄熱量偏差が弱められている。一方、渦活動を考慮しない場合には、負の蓄熱量偏差が1995年後半になっても維持されており、IODの衰退過程に対して中規模渦擾乱が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

一方、1997年のIODイベントでは、SETIOにおける経年変動としての負の蓄熱量偏差は1994年のものと比べて大きかったが、その極大値は12月に発生しており、季節変動の位相と異なっていた。また、太平洋ではエルニーニョ現象が発生しており、西太平洋での正の蓄熱量偏差もみられなかった。このような状況下でSETIOにおける南北水温勾配は1994年程には強化されず、その結果、渦活動とそれによる南北熱輸送も強められなかった。このことは、1997年のIODの衰退過程に対してSETIOにおける中規模渦活動が有意に寄与しなかったことと整合的である。

このようなIODの衰退過程における中規模渦の影響をより明確にするため、中規模渦を再現できない低解像度（水平 2.5° ）モデルの結果とOFESの結果とを比較した。その結果、低解像度モデルでは、1997年のIODではSETIOの蓄熱量変動をよく再現していたが、1994年のIODでは夏～秋季における蓄熱量の衰退を再現できなかった。これらの結果は、IODのような気候変動モードを適切に再現するには中規模渦の影響も適切に取り入れる必要があることを示唆している。

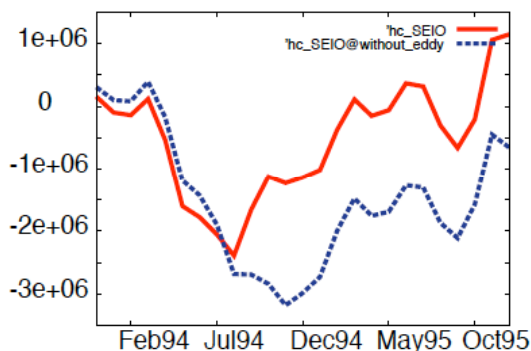


図2：1994年1月から1995年12月までの、SETIO領域（ $12^\circ\text{S}\sim 3^\circ\text{N}$ 、 $95^\circ\sim 115^\circ\text{E}$ ）での250m以浅の蓄熱量偏差の変動。赤線は渦に伴う熱輸送を含めて見積もった変動、青線は渦に伴う熱輸送を除いて見積もった変動（単位：PJ）。

5. ミンダナオドーム域における季節内擾乱の経年変調

OFESによる再現実験結果では、西太平洋の暖水域に存在するミンダナオドーム周辺においても活発な季節内擾乱が存在し、ミンダナオドームの北縁で東西波長600km程度の渦活動が西方伝播していることが示された。この渦運動に伴うエネルギーの経年的な偏差に対する表層水温の経年偏差場のラグ回帰解析を行った結果、渦活動度の極大期の2ヶ月前に、ミンダナオドームの東側（5~10°N, 150~160°E）で顕著な冷水偏差がみられることがわかった。渦擾乱の発生メカニズムを検討するため、特に偏差の大きかった1993年の春～夏季に着目してエネルギー収支解析を行った結果、SETIOでの渦擾乱の発生機構と同様に、傾圧エネルギー変換項が支配的であることがわかった。

また、渦活動に伴う熱輸送がミンダナオドーム域の表層蓄熱量変動に与える影響を調べるため、渦擾乱に伴う熱輸送の効果の有無による蓄熱量変動を比較した。その結果、SETIOでのIODに対する渦活動の寄与と同じように、ミンダナオドーム域での負の蓄熱量偏差の衰退過程に対して中規模渦擾乱が重要な役割を果たしていることが明らかになった。さらに、中規模渦を再現できない低解像度（水平2.5°）モデルの結果とOFESの結果を比較したところ、低解像度モデルでは1993年の冷たいエピソードに関して、春～夏季における蓄熱量の衰退を再現できていないことも示された（図3）。また、ミンダナオドーム域の渦擾乱は、ミンダナオドームの消長のみならず、SETIOの14°S付近での変動にもインドネシア多島域を通して寄与する可能性が示唆された。

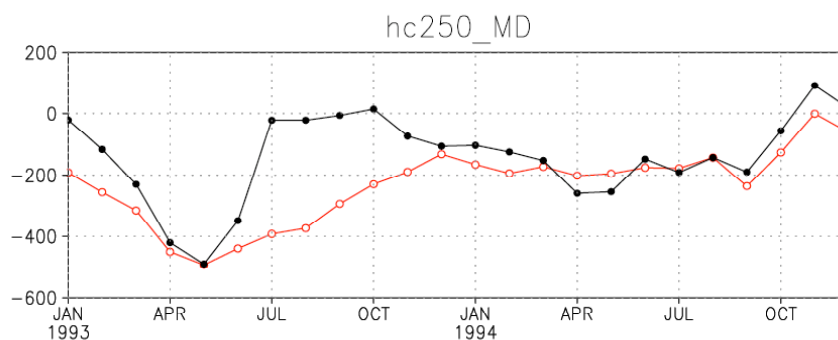


図3：1993年1月から1994年12月までの、ミンダナオドーム域（5~10°N, 140~150°E）での250m以浅の蓄熱量偏差の変動。赤線は低解像度OGCMの結果、黒線はOFESの結果（単位：°Cm）。

6. まとめ

高解像度海洋大循環モデルの結果を用いて、熱帯暖水プール域における中規模渦活動の経年的な変調過程とその大規模場の経年変動への影響を調べた。その結果、南東部熱帯インド洋やミンダナオドーム域で励起される渦擾乱は、典型的な気候変動モードであるエルニーニョ／南方振動やインド洋ダイポールモード現象などに大きく影響を受けて経年的に変調し、その渦活動度が非常に活発な場合には、気候変動モードの衰退過程にも影響を与える可能性のあることが示された。

これらの結果は、エルニーニョ／南方振動やインド洋ダイポールモード現象などの気候変動モードを適切に再現するためには中規模渦の影響も適切に取り入れる必要があることを示しており、今後の気候変動予測研究にとって重要な示唆を与えるものである。