

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540469
 研究課題名（和文）大気海洋結合モデルを用いた ENSO における
 バリアレイヤー振動モードの役割の解明
 研究課題名（英文）Analysis of the barrier layer oscillation associated with ENSO
 using the coupled ocean-atmosphere model
 研究代表者
 藤井 陽介（FUJII YOSUKE）
 気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官
 研究者番号：60343894

研究成果の概要（和文）：海洋データ同化及び準結合同化システムを用いた解析から、エルニーニョやラニーニャに伴う貿易風の強弱の変化により、南からの高塩分水の移流や海面での蒸発量が変化し、その結果、太平洋赤道域の塩分量はエルニーニョ前に最大に、後に最小になることが明らかになった。また、塩分量の変化と相関して、表層の鉛直混合も変化し、水温変動に影響を与えていた。しかし、この変動の大気への影響を調べるには、大気・海洋結合モデルの更なる精緻化が必要であった。

研究成果の概要（英文）：This study analyzed ocean data assimilation and quasi-coupled data assimilation results, and found that the variation of trade winds associated with El Niño and La Niña causes change of saline water advection from south and evaporation in the equatorial Pacific, and results in the salinity variation. This variation induced the change of vertical mixing and affected the near-surface temperature. Improvements were required for the evaluation of the influence of the salinity variation on the atmospheric fields.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	900,000	0	900,000
2009年度	900,000	0	900,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	0	3,500,000

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：(1) バリアレイヤー (2) ENSO (3) エルニーニョ (4) 海洋塩分

(5) 海洋データ同化 (6) 大気海洋結合同化システム (7) 季節予報 (8) 大気海洋相互作用

1. 研究開始当初の背景

ENSO (El Niño-Southern Oscillation, エルニーニョ南方振動) とは、太平洋熱帯域で 3～5 年毎にエルニーニョ・ラニーニャといった異常海面水温現象を周期的に引き起こす、

大気と海洋が一体となった変動を指す。ENSO の影響は地球全体に及び、世界各地の異常気象を引き起こす原因の一つとなる。従来、ENSO に対する海洋の塩分変動の影響は小さいとされていたが、近年、海洋観測網の発展

に伴い、太平洋熱帯域では、想定以上に塩分変動が大きく、バリエイヤー（高塩分の重い水が低塩分の軽い水の下に潜り込むことで形成される重力的に安定な層）が頻繁に形成されていることが確認された。バリエイヤーは、海面付近の温かい水と海洋内部の冷たい水との混合を妨げ、海面水温の上昇を招くことが明らかとなっており、その ENSO との関係が近年注目されている。

研究代表者らは 2006 年度まで実施の科学研究費補助金（若手研究（B））で、気象研究所海洋データ同化システム（MOVE）（データ同化システムとは、観測データを利用しながら数値モデルを動かすことにより、現実の変動を再現するシステム）を用いて、太平洋赤道域の塩分量は、エルニーニョの前に最大、後に最小となるような変動をしていること、及び、その変動に関係しバリエイヤーも周期的に変動していることを示し、このバリエイヤーの周期的な変動が ENSO に影響を与えているというメカニズムを提唱した。これは、海洋の塩分変動が気候変動の中で大きな役割を担っていることを示唆する特色のある結果であった。

しかし、どのようなメカニズムによって ENSO に伴う塩分変動が生じているのかは未解明であった。また、MOVE は海洋モデルのみを扱っており、大気と海洋との相互作用を表現するシステムにおいても同様のことが言えるのか、検証されていなかった。MOVE 以外の海洋データ同化結果との整合性についても未確認であり、ENSO と太平洋赤道域の塩分変動との関係を解明するためには、これらの点を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、ENSO に伴う太平洋赤道域の塩分変動の要因とそのバリエイヤーの消長に対する影響、さらにバリエイヤーの水温場に対する影響を、海洋モデル、又は、大気海洋結合モデルの結果と海洋観測データを統合した（データ同化を行った）データセットを用いて解析する。また、国内外の海洋データ同化システムにおける塩分の観測データ、及び、モデル塩分場の取り扱い方法について比較し、どのような同化手法が海洋塩分変動を再現するのに適しているのか調査する。これらを踏まえて、ENSO に伴う太平洋赤道域の塩分変動の実体とそのメカニズムを明らかにし、ENSO に対する影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 気象研究所海洋データ同化システム（MOVE）の最新のバージョンにより作成された海洋データ同化結果と太平洋赤道域の観測データを利用して、ENSO に伴う塩分変動の詳細について解析を行い、また、MOVE による

塩分場の再現性について検証する。また、データ同化結果について、塩分量、及び、熱量の収支解析を行い、塩分変動の要因と共に、塩分場の熱収支に対する影響を検証する。

(2) 先行研究で開発した準結合同化システム（MOVE-C）（大気・海洋結合モデルに海洋データを同化することにより、現実の大気・海洋の変動を再現するシステム）を、長期変動の再現のため改良し、1950 年以降の気候変動再現実験を行う。その結果の精度について、既存の大気、海洋の同化結果や、大気モデルによるシミュレーション結果との比較による検証を行う。

(3) MOVE-C の同化結果を用いて、塩分変動とその要因を解析し、(1)の結果との共通点、相違点について解析する。また、MOVE-C の同化結果を初期値として用いて大気海洋結合モデルによるエルニーニョ予測実験を行い、そこで、塩分の与え方を変えることにより、塩分場の大気に与えるインパクトの調査を行う。

(4) 国内外の研究機関の海洋データ同化結果について、特に、太平洋赤道域の塩分場に注目して、その比較をすることにより、同化手法が塩分場に与える影響、及び、その水温変動の再現やエルニーニョ予測に対する影響について評価する。

4. 研究成果

(1) 太平洋赤道域西部への高塩分水の流入経路の解析

2007 年度に MOVE の最新バージョンにより作成したデータ同化結果を用いて、太平洋赤道域西部（160°E 付近）に見られる高塩分水が、どのようなルートを移流されて来るのかを解析したところ、密度 $23.5\sigma_{\theta}$ より軽い高塩分水については、西向き南赤道海流により東から移流されており、また、 $24.5\sigma_{\theta}$ 程度の密度を持つ高塩分水は、ニューアイルランド沿岸潜流によって、152°E 付近へ南から移流された後、赤道潜流で東へと移流されていることがわかった。これらの高塩分水は、曳航式電気伝導度水温水深計（CTD）により観測された 3 つの塩分極大層のうち、最も軽い層と、真ん中の層に対応していた。また、最も重い層の高塩分水についても、今回の解析結果では、ニューアイルランド沿岸潜流の影響が強いことが示唆されたが、他の同化結果には、ニューアイルランド沿岸潜流により 135°E 付近へ南から移流された後、赤道潜流で東へと移流された高塩分水であることを示すものもあり、今後、観測データや同化結果を用いた解析を継続して、その経路を明らかにする必要がある。

また、曳航式CTDの観測結果から、最も軽い塩分極大の層と海面付近の低塩分水との間に、中間的な特性を持った一様な水の層が形成され、その層がバリエイヤーとなっていることが明らかになった。同化結果によると、この中間的な水は赤道の塩分フロント付近で形成されており、また、この水がフロントの西に特に多く移流されている時に、海面水温が30℃近くと、特に高くなっている。これは、この中間的な水の層がバリエイヤーとして海面水温の上昇に寄与することを示している。この水は海面付近の低塩分水と東から移流される一番軽い密度層にある塩分極大の水とが混合してきており、その塩分極大の水が、バリエイヤーや海面水温の変動に影響を与えることが示唆される。この結果は、観測データとデータ同化結果を合わせて解析することにより、高塩分水の変動とバリエイヤーとの関係を推定したものであり、塩分変動の気象への影響を考える上で重要である。

(2) ENSO に伴う塩分・水温変動の収支解析

2007年度に作成した同化結果を用いた太平洋赤道域の表層・亜表層の塩分、及び、熱の収支解析を行い、ENSOに先行する塩分変動の主因と、塩分変動が熱収支に与える影響について解析を行った。その結果、塩分の変動は、南からの移流と海面からのフラックスにより説明されることが明らかになった(図1)。ラニーニャの時期には、貿易風が強いため、赤道湧昇に伴う鉛直循環も強化され、南からの高塩分水の移流も多くなる。また、強い貿易風は蒸発を促し、更なる高塩化を促進する。一方、エルニーニョの時は、貿易風が弱くなるので、上記の鉛直循環も弱くなり、蒸発も抑制される。その結果、塩分量は、エルニーニョ発生前に最大になり、収束後に最小になる。この変動は、係留ブイやCTD、曳航式CTDなどの観測結果とも一致していた。なお、(1)でバリエイヤーとの関係が示唆された23.5σ_θ以下の高塩分水の層については、海面フラックスの影響が大きいことがわかった。しかし、特に変動が大きかった1997年のエルニーニョ前後の塩分上昇、低下については、いずれの密度層においても、移流による効果大きい。

また、熱収支解析からは、エルニーニョ後の表層水温の低下には、その時期の熱の鉛直混合・拡散の強化が、強く影響していることが示唆された。エルニーニョ後は、高塩分水の量が最も低下する時期であり、厚いバリエイヤーもほとんど見られなくなる。そのため、鉛直成層の安定度が低下して、鉛直混合・拡散が強化されているものと考えられる。これは、先行する塩分量の低下がエルニーニョ後の水温低下に寄与していることを示唆

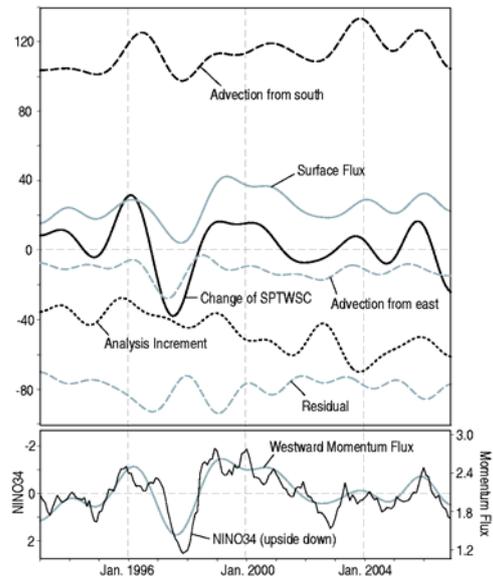


図1：太平洋赤道域(2°S-2°N, 125°E-120°W)の塩分35.2以上の海水中の塩分量の収支解析の結果。20ヶ月のスージングをかけた。塩分量の変化傾向(黒太実線)は、南からの移流(黒太点線)、及び、海面フラックス(灰太実線)によりよく説明される。さらに、これらの変動は、エルニーニョの指標となるNINO3海域海面水温指数(黒細実線)、及び、貿易風の強さの変動(灰細実線)とも、良く相関している。

するものであり、塩分場の影響について考慮されていない従来のENSOに伴う水温変動のメカニズムの理論と比べると、特色のある結果である。

(3) 準結合同化システムの開発とそれを用いた解析

本研究では、準結合同化システム(MOVE-C)において大気中の二酸化炭素濃度の変動(増加)を考慮できるようにスキームを改良した後、同システムを用いて大気・海洋の気候変動再現実験を行った。その結果、海洋変動については、大気モデルの解像度が粗いため、大気の季節内振動等に伴う短周期の変動は再現できなかったものの、季節変動や経年変動は、従来の海洋データ同化システムと同様に再現された。また、MOVE-Cで再現された大気の変動を、大気モデルに観測された海面水温を与えてシミュレーションを行った結果(以下、AMIPと記す)と比較したところ、熱帯の降水分布やそれに伴う風の分布について、MOVE-Cの方が良く再現していることがわかった。特に、モンスーントラフや夏期のフィリピン沖の降水の改善は、顕著であった。解析の結果、AMIPでは再現できない、高い海面水温により促進された大気の対流活動が海面水温を低下させるという負のフィードバック効果を、MOVE-Cでは再現しているために、上記の改善が見られることがわかった

(Fujii et al. 2009)。また、MOVE-C で再現されたインド洋の降水や大気放射の長期トレンドなどについても、気象再解析データと比べ、観測データとの良い相関が見られた。

MOVE-C によって再現された太平洋赤道域の海洋変動について、(2)と同様の解析を行った。その結果、塩分量がエルニーニョに先行して増加し、エルニーニョ時に急激に低下することなど、従来と同様の結果を得ることができた。しかしながら、バリエイヤーの消長に伴う鉛直混合の大きさの変動は小さかった。また、MOVE-C で再現された大気・海洋の状態を初期値とした大気海洋結合モデルによるエルニーニョ予測計算で塩分場の感度を調べたところ、予測結果は塩分場にはあまり依存しないという、期待と異なる結果を得た。これについて検討したところ、MOVE-C や結合モデル内で、海面塩分を強くナッジングしている（気候値に強制的に近づけること）ことに問題があるという結論に至った。そこで、MOVE-C について海面塩分のナッジングを緩めるように改良し、再び、気候再現実験を行った。その結果、鉛直混合の変動が大きくなり、塩分の寄与を正しく表現することが可能となった。

現在の気候海洋結合モデルには、海洋の混合スキームの精緻化が不十分である、降水の再現性が悪いなどの問題点があり、海洋の塩分変動を正確に表現するには十分では無かった。そのため、本研究では、塩分変動の大気へのインパクトを検証するという当初の目的の一つを、十分に達成することができなかった。今後は、大気海洋結合モデル、及び、データ同化システムの精緻化を行いながら、ENSO に関係した塩分変動の大気に対するインパクトの検証を続けていく予定である。

(4) データ同化における塩分の取り扱いとバリエイヤーとの関係

データ同化システムによる太平洋・赤道域の塩分場の違いについて、国際会議における情報交換や文献調査を通して比較検討した。その結果、一般に、観測データによりモデル水温のみを修正して、塩分場に手を加えない同化手法では、亜表層の塩分が異常に低下してしまうこと、また、この問題はデータ同化において、水温と整合するようにモデル塩分も修正することにより解決することがわかった。

このことについて、より詳細に調べるため、MOVE を用いて、水温のみを修正する同化実験と水温と塩分を同時に修正する同化実験を行い、両者の結果を比較した。その結果、水温のみを同化した結果では、亜表層の塩分が異常に低下することに加え、バリエイヤーの厚さも全体的に小さくなり、その結果、水温 28°C 以上の暖水域における蓄熱量も低下

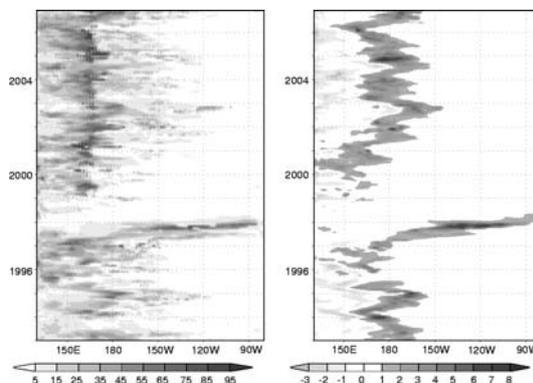


図2：左) 太平洋赤道域におけるバリエイヤーの厚さの時間経度断面図。右) モデルの水温場のみを観測データで修正し、モデル塩分場の修正を行わなかった場合と、モデルの水温場と塩分場の修正を整合的行った場合の、28°C 以上の海水中の蓄熱量の差の時間経度断面図。両者の分布はよく似ており、特にバリエイヤーが厚い海域で、蓄熱量の差が大きくなっている。これは、水温のみを修正した場合、バリエイヤーがうすくなり、鉛直混合による水温低下が促進されるためである。

することがわかった (図2) (Balmaseda et al. 2009, Fujii et al. 2010)。また、上記の問題は水温と塩分を同時に修正することによって解消された。上記の結果は、水温変動を精度良く再現するためには、バリエイヤーの再現が重要であることを示しており、バリエイヤーが表層水温を上昇させるという説の傍証と考えられる。また、暖水域での熱の蓄積は、エルニーニョ発生の一つの要因であると考えられることから、塩分の同化手法の違いは、エルニーニョ予測の精度にも影響を与えると考えられる。

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6件)

- ① Yosuke Fujii, Satoshi Matsumoto, Masafumi Kamachi, Shiro Ishizaki, Estimation of the equatorial Pacific salinity field using ocean data assimilation system, *Advances in Geosciences*, 印刷中, (2010), 査読有
- ② Yosuke Fujii, Toshiyuki Nakaegawa, Satoshi Matsumoto, Tamaki Yasuda, Goro Yamanaka, and Masafumi Kamachi, Coupled climate simulation by constraining ocean fields in a coupled model with ocean data, *Journal of Climate*, 22, 5541-5557, (2009), 査読有
- ③ Magdalena A. Balmaseda (1番目), Yosuke Fujii (7番目), 他9名, *Ocean initialization for seasonal forecasts*,

- Oceanography, 22, 154-159, (2009), 査読有
- ④ Goro Yamanaka, Tamaki Yasuda, Yosuke Fujii, Satoshi Matsumoto, Rapid termination of the 2006 El Nino and its relation to the Indian Ocean, Geophysical Research Letters, 36, L07702, doi:10.1029/2009GL037298, (2009), 査読有
- ⑤ 藤井陽介、松本聡、蒲地政文、安田珠幾、仲江川敏之、大気海洋準結合同化システムの開発、平成19年度全国季節予報技術検討会資料、51-59, (2008), 査読無
- ⑥ Tamaki Yasuda, Yuhei Takaya, Chiaki Kobayashi, Masafumi Kamachi, Hiroataka Kamahori, Tomoaki Ose, Asian Monsoon predictability in JMA/MRI Seasonal Forecasting System, CLIVAR Exchanges, No. 43, 28-24, (2007), 査読無
- [学会発表] (計 17 件)
- ① 山中吾郎、安田珠幾、藤井陽介、松本聡、2006 エルニーニョの衰退過程、日本海洋学会 2010 年春季大会、2010 年 3 月 27-29 日、東京都品川区
- ② Yosuke Fujii, Masafumi Kamachi, Norihisa Usui, Satoshi Matsumoto, Tamaki Yasuda, Shiro Ishizaki, Observing System evaluation using the ocean data assimilation and prediction system, MOVE/MRI.COM, OceanObs' 09, 2009 年 9 月 22-24 日, イタリア, ベニス
- ③ Magdalena A. Balmaseda (1 番目), Yosuke Fujii (6 番目), 他 10 名, Initialization for Seasonal and Decadal Forecasts, OceanObs' 09, 2009 年 9 月 22-24 日, イタリア, ベニス
- ④ 藤井陽介、仲江川敏之、松本聡、安田珠幾、山中吾郎、蒲地政文、準結合同化システムによる降水場の改善、2009 年データ同化夏の学校、2009 年 8 月 25 日、青森県むつ市
- ⑤ Yosuke Fujii, Satoshi Matsumoto, Tamaki Yasuda, Masafumi Kamachi, Kentaro Ando, OSE Experiments Using the JMA-MRI ENSO Forecasting System, 2nd GODAE Ocean System Evaluation Workshop, 2009 年 6 月 5 日, フランス, トゥールーズ
- ⑥ Yosuke Fujii, Taizo Soga, Shiro Ishizaki, Norihisa Usui, and Masafumi Kamachi, Quality Control and Diagnostic of Observation Data in Operational Ocean Data Assimilation Systems in JMA, 2nd GODAE Ocean System Evaluation Workshop, 2009 年 6 月 4 日, フランス, トゥールーズ
- ⑦ Magdalena A. Balmaseda (1 番目), Yosuke Fujii (7 番目), 他 9 名, Ocean Initialization for Seasonal Forecasts, GODAE Final Symposium, 2008 年 11 月 14 日, フランス, ニース
- ⑧ Yosuke Fujii, Satoshi Matsumoto, Norihisa Usui, Hiroyuki Tsujino, Tamaki Yasuda, Masafumi Kamachi, OSE-OSSE activities using the ocean data assimilation and prediction system MOVE/MRI.COM, GODAE Final Symposium, 2008 年 11 月 12-15 日, フランス, ニース
- ⑨ Yosuke Fujii, Tamaki Yasuda, Toshiyuki Nakaegawa, Masafumi Kamachi, Coupled Ocean and Atmosphere Analysis by Assimilating Ocean Observation Data to a Coupled Model, The Third CLIVAR/GODAE Meeting on Ocean Synthesis Evaluation, 2008 年 10 月 17 日, 東京都港区
- ⑩ 藤井陽介、松本聡、安田珠幾、蒲地政文、安藤健太郎、気象庁エルニーニョ予測システムによる観測システム評価 (OSE)、日本海洋学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 26 日、広島県呉市
- ⑪ 山中吾郎、藤井陽介、安田珠幾、最近のインド洋海面水温トレンドにおける観測とモデルの不一致、日本海洋学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 25 日、広島県呉市
- ⑫ 藤井陽介、MOVE システムの最近の開発と準結合同化による大気の解析、2008 年データ同化夏の学校、2008 年 8 月 23 日、青森県むつ市
- ⑬ Yosuke Fujii, Tamaki Yasuda, Toshiyuki Nakaegawa, Masafumi Kamachi, Coupled Ocean and Atmosphere Analysis by Assimilating Ocean Observation Data to a Coupled Model. Asia-Oceania Geosciences Society 2008, 2008 年 6 月 17 日, 韓国, プサン
- ⑭ Yosuke Fujii, Satoshi Matsumoto, Toshiya Nakano, Tamaki Yasuda, Masafumi Kamachi, Salinity variability in the tropical and subtropical Pacific in the MRI Multivariate Ocean Variational Estimation (MOVE) System, 2008, 2008 Ocean Sciences Meeting, 2008 年 3 月 5 日, アメリカ合衆国, オーランド
- ⑮ Goro Yamanaka, Tamaki Yasuda, Yosuke Fujii, Hiroshi Ishizaki, Mixed layer heat balance on seasonal to interannual timescales in the western tropical Pacific: An OGCM study, 2008 Ocean Sciences Meeting, 2008 年 3 月 5

日, アメリカ合衆国. オーランド

- ⑩ Yosuke Fujii, Tamaki Yasuda, Toshiyuki Nakaegawa, Masafumi Kamachi, Coupled Ocean and Atmosphere Analysis by Assimilating Ocean Observation Data to a Coupled Model, Third WCRP International Conference on Reanalysis, 2008年1月31日, 東京都目黒区
- ⑪ 藤井陽介、安田珠幾、松本聡、仲江川敏之、山中吾郎、蒲地政文、結合モデルと海洋観測データの統合(準結合同化)による気候変動の再現、日本海洋学会2007年秋季大会、2007年9月28日、沖縄中頭郡

[その他]

ホームページ等

<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/oc/fujii/KakenBL2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 陽介 (FUJII YOSUKE)

気象庁気象研究所・海洋研究部・研究官

研究者番号：60343894

(2) 研究分担者

山中 吾郎 (YAMANAKA GORO)

気象庁気象研究所・海洋研究部・主任研究官

研究者番号：60442745

(H19→H20：連携研究者)

安田 珠幾 (YASUDA TAMAKI)

気象庁気象研究所・気候研究部・主任研究官

研究者番号：80354471

(H19→H20：連携研究者)

(3) 連携研究者

上記の山中吾郎、安田珠幾の2名