

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800249

研究課題名(和文) インド洋の赤道を横切る南北循環の力学：数十年周期の気候変動の理解に向けて

研究課題名(英文) Dynamics of the meridional circulation across the equator in the Indian Ocean:  
Towards understanding of multi-decadal climate variability

研究代表者

名倉 元樹 (NAGURA, Motoki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・研究員

研究者番号：10421877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：二つのテーマについて研究を行った。現場観測と数値シミュレーションの結果を解析し、単純化されたモデルで実験を行った。一つ目のテーマは赤道上の流れである。赤道を横切る南北方向の流れに関する研究を行い、東西ジェットがモルジブ諸島に衝突した結果生じることを明らかにした。赤道上の東西ジェットの変動を調べ、波動の力学に関連づけた。二つ目のテーマはインド洋全体の南北循環である。現場観測を収集してインド洋の循環の全体像を描き出した。気候変動に関する政府間パネルの評価報告書に用いられた数値モデルの出力を調べ、循環がモデル内で正しく再現されていないことを明らかにした。上記の結果を4本の論文として国際誌に発表した。

研究成果の概要(英文)：I worked on two issues. In-situ observations and output from a numerical simulation were used, and experiments with a simplified numerical model were conducted. The first theme is equatorial currents. For this theme, I first examined cross-equatorial currents in the central equatorial Indian Ocean and found they were caused by zonal jets impinging the Maldives Islands. Then I examined propagation of zonal jets and discussed wave dynamics. The second theme is the meridional circulation in the whole Indian Ocean. For the second theme, I first collected in-situ observations and depicted the basic features of the basin-wide circulation. Then I examined output from models that were used for the assessment report for the Intergovernmental Panel on Climate Change and investigated how poor those models are in the simulation of the Indian Ocean circulation. These studies are published in four papers from international scientific journals.

研究分野：海洋物理

キーワード：海洋 循環 インド洋

## 1. 研究開始当初の背景

地球上の三大洋のうち、インド洋は約 25°N 以北がユーラシア大陸で閉じられているという点で特殊である。赤道を横切る南北熱輸送およびそれを担う海洋上層 500 m の浅い南北循環はインド洋のユニークな特徴であり、当該海域の気候を理解する上での鍵である。

一方、インド洋は過去 50 年間で急速に温暖化が進んでいる海域であり、有意な数十年周期の気候変動が観測されている海域でもある。これらインド洋の熱的な変化は南北循環による熱輸送の影響を大きく受ける可能性があり、南北循環の力学の解明は気候変動の観点からも重要である。

しかし、インド洋の南北循環に関する研究は、数値モデルを用いた理論的な研究または現場観測を用いた記述的研究に二極化しており、理論と観測の擦り合わせによって精緻な理解を形成するまでに至っていなかった。

## 2. 研究の目的

現場観測による流速データ・海洋大循環モデルを用いて行われたシミュレーション結果・および単純化されたモデルによる数値実験を組み合わせ、インド洋の赤道を横切る浅い南北循環の鉛直・水平構造を調べ、力学について議論した。得られた知見をもとに、温暖化予測で使用されている大気海洋結合大循環モデルの長期積分結果を調べ、赤道を横切る熱輸送がインド洋の気候変動に果たす役割について明らかにした。

## 3. 研究の方法

(1) 音響式流速計によって流れの鉛直プロファイルが高い精度で観測されている 0° 80.5°E と 0° 90°E に絞り、循環の鉛直構造を形成する力学を明らかにする。加えて、力学を解析するため、海洋研究開発機構で開発された大循環モデル OFES の出力を調べると共に、単純化された数値モデルを用いた。

(2) 引き続き平均場および季節変動に注目し、循環の水平構造を形成する要因を明らかにする。単純化された数値モデルを用いた実験によって、形成された循環の水平分布を湧昇域・沈降域に注目して調べた。

(3) 南北熱輸送における西岸境界流(ソマリ・ジェット)の役割を調べる。大循環モデル OFES の結果と線形連続成層モデルおよびレイヤーモデルの結果を比較し、西岸境界流が熱輸送に果たす役割を調べた。

(4) 気候変動に関する政府間パネルの温暖化予測に用いられた大気海洋結合大循環モデルの出力を解析し、インド洋の南北循環が数十年周期の気候変動に果たす役割を定量的に明らかにした。平均場および数十年の時間スケールにおける南北熱輸送の寄与を明らかにした。

## 4. 研究成果

(1) 赤道インド洋の東向きを表層ジェット、ウィルツキジェットがモルジブ諸島に衝突した際に形成される島嶼付近の定在波について研究を行なった。モルジブ諸島東方の赤道上の二点に設置された音響式流速系の現場観測値に南北方向の流れの半年周期変動が見られた。高解像度海洋大循環モデルの出力を調べたところ、これはウィルツキジェットが発生した季節にモルジブ諸島の東側に現れる定在波の一部であることが分かった。現実海洋を単純化した 1.5 層モデルによって実験を行ったところ、モデル領域に東向きジェットを流入させ、モルジブ諸島を模した島に衝突させると、島の東側でジェットが蛇行し、定在波が形成されることが分かった。大循環モデルと 1.5 層モデルの結果の解析から、運動量移流による非線形性がジェットの蛇行に本質的な役割を果たしていることが分かった。1.5 層モデルを用いた感度実験の結果、東向きジェットの速度が上がると定在波の東西波長が長くなること、ジェットが西向きの際には島に衝突しても蛇行しないこと、等が分かった。本研究で見られた赤道上のジェットの蛇行は、中緯度海洋に見られる定在減衰ロスビー波と本質的に同じ力学に従っていると考えられる。この研究は「研究の方法」の(1)に対応する。結果を国際誌から出版した。

(2) 赤道インド洋付近に展開されている 4 基の音響式流速計の観測値と海洋再解析データを用い、赤道インド洋上層 200 m の東西流の鉛直構造および東西方向の伝播傾向を半年周期変動に注目して調べ、東西風による強制力との関連について議論した。その結果、東西流の東西位相速度は深さや季節によつ

て複雑に変化することが分かった。海面近くの東西流は海上の東西風の伝播傾向に追随し、北半球の春季に西へ、秋季に東へ伝播する。一方、密度躍層付近の東西流の伝播傾向は海洋波動の力学に依存する。解析領域の西側（東経 78-83 度）では、躍層の深さにおける東西位相速度は一年を通じて東向きであり、これは赤道インド洋西部で風によって励起された赤道ケルビン波が解析領域に到達したことを表す。解析領域の東側（東経 80-90 度）では、赤道ケルビン波に起因する東向きの位相速度に加え、深さ 50 m から 100 m にかけて北半球の秋季にのみ西向きの位相速度が現れる。西向きの位相速度は東岸での波動の反射によって励起されたロスビー波が解析領域に到達したためであると考えられる。これらの結果は「研究の方法」の (1) と (2) に対応する。結果を国際誌から出版した。

(3) アルゴフロートと船舶による現場観測から得られた水温・塩分プロファイル、およびアルゴフロートの軌跡から推定された 1000 m 深における絶対流速データを用い、統計的手法によってインド洋の循環の平均場を推定した。結果の一例を図 1 に示す。従来の散発的な観測や数値モデリングによって得られていた知見を裏付けるとともに、従来は知られていなかった新しい特徴をいくつか発見した。新しい特徴のうちのいくつかを以下の A) - E) に示す。A) 南インド洋で沈み込んだ海水はマダガスカル島およびアフリカ大陸の東海岸に沿って北向きに流れる西岸境界流によって赤道域へ輸送される。西岸境界層を通過し内部領域だけを通して赤道域に到達する経路は存在しない。B) 亜南極モード水の深度（約 500 m）において、オーストラリア大陸西海岸から西へ渦位の高い領域が伸びていた。このような渦位の分布は循環場に影響を与えることが予想され、A) で述べた流路が形成される原因の一つになっていると考えられる。C) 南インド洋の亜熱帯循環の中心は、深くなるにつれ、より極側に位置する。D) 南極中層水の深度（約 1000 m）の南緯 15 度付近に、帯状の東向きの流れが存在する。このような流れがあることは塩分の分布から予想されていたが、実際に流れの計算によって示されたのは初めてである。E) 南緯 6 度において  $10 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  の南向きの体積輸送、南緯 20 度において  $18 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  の北向きの体積輸送があり、その間で流れが収束し主密度躍層が深くなる。これら A) - E) に関して、海洋再解析データからも整

合性のある結果が得られた。この研究によってインド洋の平均循環場の詳細な構造を高い信頼性で特定することができた。これは「研究の方法」の (2) に対応する。結果を国際誌から出版した。手法の特性上、この研究に西岸境界流を含めることができず、「研究の方法」の (3) に対応する研究は実行できなかった。今後の課題である。

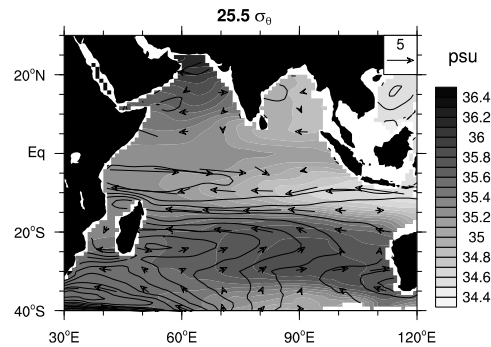


図 1 現場観測から得た  $25.5 \sigma_\theta$  等密度面上における塩分（陰影）、流れ（矢印）と流線（等値線）。Nagura and McPhaden (2018) より。

(4) 各国の研究機関が提供する、気候変動に関する政府間パネルの温暖化予測に用いられた 31 個の大気海洋結合モデルの長期積分結果を入手し、インド洋の平均場の再現性を調べた。アラビア海の温度躍層は通常 100 m 程度の深さに位置するが、多くのモデルでは 200 m から 300 m の深さに温度躍層があった。このような非常に大きなバイアスはモデル内の気候の再現性を悪化させることが予想されるため、本研究でその原因を調べた。モデルを二つのグループに分けて研究を行った。一つ目のグループはペルシャ湾を持たないモデルであり、これらのモデルでは現実海洋でペルシャ湾の存在する位置が陸で覆われている。二つ目のグループはペルシャ湾とそこからアラビア海に流出する高塩分水を再現するモデルである。二つのグループでは形成される水塊やそれらがアラビア海に広がる過程が異なるものの、アラビア海北岸で冬季に形成される混合層の厚さが温度躍層の深さを決める原因となっていることは共通していた。アラビア海北部では冬季に大陸から寒気が吹き出し、海面が冷却されることによって上層海洋に対流が生じ、厚い混合層が形成される。多くのモデルではこの混合層が現実より厚すぎ、そのために温度躍層が深くなりすぎていることが分かった。さらに

解析を進めたところ、ベンガル湾からの流入水が重要な要因であることが分かった。ベンガル湾ではインドモンスーンに関連して降雨が生じるため表層水の塩分が低く、密度が小さい。この低塩分・低密度水はインド亜大陸の西海岸を北向きに流れる沿岸流によってアラビア海北部に輸送される。多くの大気海洋結合モデルはインドモンスーンを十分に再現できず、その降雨量を過小評価するため、ベンガル湾の表層水の塩分が高すぎ、アラビア海北部に侵入する表層水の密度が高すぎる。このため、アラビア海北部の成層が現実より弱くなり、冬季に海面冷却を受けた際に生じる対流が深くなりすぎ、結果として混合層が厚すぎることが分かった。これがアラビア海の温度躍層深のバイアスの原因であると考えられる。この研究は「研究の方法」の(4)に対応する。数値モデルの平均場の再現性が悪かったため、モデル内の数十年周期の気候変動の研究は行わなかった。結果を国際誌から出版した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計4件)

Nagura, M., and M.J. McPhaden, 2018: The shallow overturning circulation in the Indian Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 査読あり, 48 巻, 413-434, DOI: 10.1175/JPO-D-17-0127.1.

Nagura, M., J.P. McCreary, and H. Annamalai, 2018: Origins of coupled model biases in the Arabian Sea climatological state. *J. Clim.*, 査読あり, 31 巻, 2005-2029, DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0417.1.

Nagura, M., and M.J. McPhaden, 2016: Zonal propagation of near-surface zonal currents in relation to surface wind forcing in the equatorial Indian Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 査読あり, 46 巻, 3623-3638, DOI: 10.1175/JPO-D-16-0157.1.

Nagura, M., and Y. Masumoto, 2015: A wake due to the Maldives in the eastward Wyrтки jet. *J. Phys. Oceanogr.*, 査読あり, 45 巻, 1858-1876, DOI: 10.1175/JPO-D-14-0191.1.

### 〔学会発表〕(計7件)

Nagura, M., H. Annamalai and J.P. McCreary, 2017: Origins of biases in the Arabian-Sea climatological state for the CMIP5 models. JpGU-AGU Joint Meeting 2017.

名倉元樹, M.J. McPhaden, 2017: インド洋の浅い南北循環. 日本海洋学会 2017 年秋季大会.

Nagura, M., and M.J. McPhaden, 2016: Zonal propagation of near surface zonal currents in relation to surface wind forcing in the equatorial Indian Ocean. 2016 American Geophysical Union Fall Meeting.

名倉元樹, M.J. McPhaden, 2016: 赤道インド洋東部における東西流の半年周期変動の東西伝播. 日本海洋学会 2016 年度秋季大会.

Nagura, M., M.J. McPhaden, 2016: On semiannual equatorial undercurrents in the eastern Indian Ocean. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会.

名倉元樹, 升本順夫, 2015: ウィルツキ・ジェットによってモルジブ諸島東側に形成される波状構造. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会.

名倉元樹, 升本順夫, 2015: ウィルツキ・ジェットによってモルジブ諸島東側に形成される波状構造. 日本海洋学会 2015 年度春季大会.

### 〔図書〕(計1件)

Masumoto, Y., M. Nagura, S.-P. Xie, P. N. Vinayachandran, T. Miyama, Z. Yu, J. P. McCreary, Jr, R. R. Hood and H. Gildor (2016), Ocean Processes Relevant to Climate Variations in the Indian Sector. Indo-Pacific Climate Variability and Predictability, World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, T. Yamagata and S.K. Behera, eds., World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 312 (25-62).

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

名倉 元樹 (NAGURA, Motoki)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球  
環境観測研究開発センター・研究員

研究者番号：10421877

### (2)研究協力者

升本 順夫 (MASUMOTO, Yukio)