

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2023

課題番号：16K05562

研究課題名(和文) 上層傾圧循環の謎：南東インド洋表層循環を例として

研究課題名(英文) Mysteries of baroclinic circulation in the upper ocean: Eastern South Indian Ocean

研究代表者

古恵 亮 (Furue, Ryo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門(アプリケーションラボ)・グループリーダー代理

研究者番号：30311640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：海盆規模の上層大循環は伝統的な風成循環力学の中で比較的良好に理解されているが、沿岸流と大循環の相互作用にはまだ良くわからない点が残されている。豪州西海岸沿いには南向き表層流(ルーイン海流)が知られているが、本研究では、南東インド洋の東向表層流がルーイン海流に流れ込み、沈み、亜表層で西向きに流れるという鉛直・水平循環の構造を明らかにした。亜表層のルーイン潜流の流路も明らかにした。また、豪州北西の大陸斜面に沿った浅い季節的潜流を発見し、また、豪州大陸斜面を反時計回りに伝播する変動が上層下部に存在することも見つけた。このような変動は西向きにも伝播することが予測され、将来の研究の面白い課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、豪州を例に取り、海盆の大循環とその東側の沿岸流の相互作用の一形態を明らかにし、また亜表層の大陸斜面に沿う季節変動流を二つ見つけたものである。ルーイン海流は密度駆動であるが、同様に密度駆動だと思われる他の沿岸流(ポルトガル沿岸など)にも応用できるかも知れない。ルーイン潜流は大陸斜面に沿うことをやめ急に沖に出てなくなってしまうことがはっきりしたが、この力学は不明である。一方、大陸斜面上の季節変動は、その励起源が不明であり、またどこまで伝わりどこで消散するのか・どの程度海盆内部へ伝わるのかも不明である。このような新しい研究題材を発見したといえる。

研究成果の概要(英文)：The dynamics of the basin-scale circulation of the upper ocean is generally well understood in the classical framework of wind-driven general circulation. There are still knowledge gaps in the interaction of the general circulation with the coastal flows. This study has clarified how the Leeuwin Current, a surface, southward-flowing coastal current along the west coast of Australia, is a part of a shallow overturning circulation connecting the broad surface eastward flow and a matching subsurface westward flow. The pathway of the Leeuwin Undercurrent is described. In addition, a new shallow seasonal undercurrent is discovered on the continental slope of Northwest Australia and a new deeper seasonal variability is found that propagates counter-clockwise along the west, south, southwest, and east coasts of Australia. These variabilities potentially propagate westward from the coast. This issue will be an interesting subject for future studies.

研究分野：海洋力学

キーワード：沿岸流 亜熱帯循環 波動力学 南東インド洋

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海盆規模の上層大循環の力学は風成循環としてかなりの程度までよく理解されている。そこでは、東岸(大陸の西海岸)の圧力構造が惑星ロスビー波として西向きに伝わるという仕組みが基本となっている。しかし、東岸に境界流が生じている場合は、境界流が風成で東岸が鉛直壁の場合(McCreary 1981)しかよくわかっていない。

それに関して、豪州西海岸には、南北密度勾配が駆動源となっていると思われる南向きの表層沿岸海流、ルーイン海流、が存在している。海洋大循環モデルの流れ場に仮想粒子を流した過去の研究(Domingues et al 2007)では、東向きの南インド洋表層流に乗りルーイン海流に合流する粒子や、ルーイン海流付近で沈降し西向きに戻っていく粒子が数多く見つかった。

本研究の代表研究者(古恵 亮)は、Furue et al (2013) と Benthuisen et al (2014) によって、南北密度勾配がルーイン海流を駆動するという理想モデルを提出しており、海面の東向流がルーイン海流に合流し沈降するという解を得たが、亜表層での西向き流は解に含まれていなかった。

沖合とルーイン海流には、Domingues et al が見つけたような鉛直・水平循環が存在するのだろうか？

また、ルーイン海流の下部、大陸斜面には、ルーイン海流と反対に北向きに流れるルーイン潜流が知られている。この潜流は上記の鉛直水平循環と関係があるのだろうか？ 沖合とつながっているのだろうか？

2. 研究の目的

本研究では、東岸の海底地形を考慮した場合や、沿岸流の駆動源が風でない場合に、内部領域と境界流がどのように関係するかを調べることを目的とした。具体的には、ルーイン海流・ルーイン潜流と内部領域の関係を詳しく記述し、その力学を調べることである。当初の計画ではタスマニアの南でのモード水の沈み込みと豪州南岸の沿岸流の関係を調べる項目も含まれていたが、「4. 研究成果」で説明するように、豪州南岸の沿岸流の構造を調べるに留まった。(一方で、当初の計画になかった、亜表層の季節変動沿岸流を調べた。)

3. 研究の方法

豪州の周りの高解像な現場観測を取り込んだ特殊な温度塩分気候値格子データ CARS Aus8 (Ridgway et al 2002) から豪州周りの沿岸流を再現する。また、海洋研究開発機構で開発している OFES 渦解像海洋大循環モデル(Sasaki et al 2020; <https://www.jamstec.go.jp/ofes/>) から気候値データを作成し、その中の沿岸流を解析する。

4. 研究成果

(1) ルーイン海流系

CARS Aus8 に地衡流計算を施し、その際、海底を横切る流量が出ないよう順圧流を各格子点ごとに調整する手法を開発した(Furue et al 2017)。このことによって、流量収支が完全に閉じた三次元流速場を観測から求めることができた。この流動場は、表層の東向流がルーイン海流に合流し、南向きにながれつつ沈降し、亜表層でルーイン海流を離脱し西に向かって流れるという(Figure 1)、Domingues et al の粒子追跡に合致する結果を得た。

また、流量収支からは、沈み込んだ流体が、ルーイン潜流の上部に加わっているように見えた。さらに、ルーイン潜流が豪州北西の角のところで急に大陸斜面を離れ沖に流れていく様子が見えた。OFES の気候値からも同様の結果を得た。

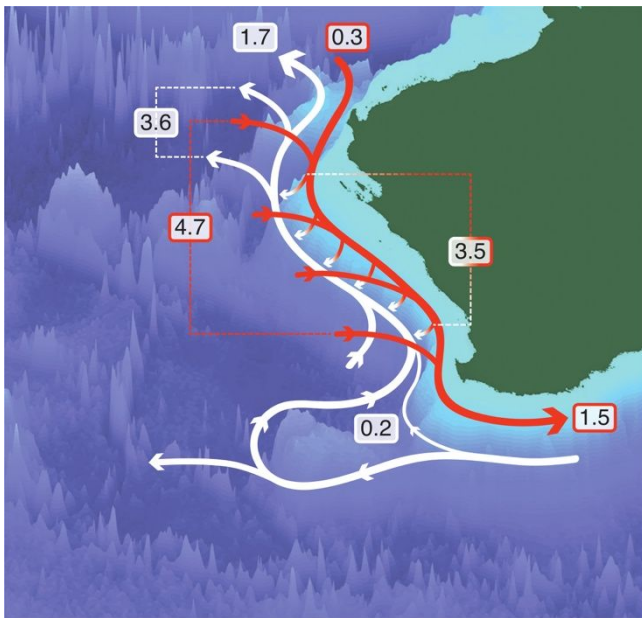


Figure 1: ルーイン海流系の質量収支 (Sv)。観測 (CARS Aus8) に基づく。

上の結果は、気候値のオイラー平均描像であり、流体粒子や水塊の移動を記述するには、中規模渦の時間変動を解像した流動場が必要である。そこで、Furue (2019) では、渦解像の OFES version 1 (OFES1) 大循環モデルの三日ごとのデータから、密度座標平均の流動場を構築し、流量を厳密に保存する当密度面座標での流量収支計算法を開発した。OFES1 では、混合層より深いところの鉛直拡散は非常に小さく、そこから予想されるように、ルーイン海流に合流する流体粒子は混合層内で密度を増やし、混合層の下では当密度面に沿うようにルーイン海流系を離れ西に出る。つまり、これはいわゆる subduction のいち形態であるといえる。南北太平洋・南北大西洋のような「普通の」亜熱帯循環では、subduction は岸から離れた内部領域で起こるが、インド洋では subduction 域が豪州近くまで伸びていると言われていた (Schott et al 2004)。本研究が示すのは、ルーイン海流自身もその subduction に貢献しているらしいということである。

この subduction は、ルーイン潜流の密度よりは浅いところまでには達しないこともわかった。Furue et al (2017) の流量収支解析で沈んだ水がルーイン潜流上部に取り込まれているように見えたのは、オイラー平均であったため、時間変化まで考慮すれば、流体粒子がルーイン潜流の上部に加わっているわけではなさそうである。ルーイン潜流に含まれる水塊の起源が南大洋であるという観測結果 (Woo & Pattiaratchi 2008) と整合的である。

一方、Furue et al (2017) と同じ地衡流計算を豪州南海岸に施すと、南海岸にもルーイン海流・ルーイン潜流と同様な構造があることがわかった (Duran et al 2020)。表層の北向き流が東向きの表層沿岸流に合流し、沈降し、亜表層の西向き沿岸流に合流するという描像である。亜表層の西向き流は、以前から知られている鉛直スケールも水平スケールも大きいフリンダース海流に紛れる場所もあるが、鉛直構造の違いから、別の力学に支配されている沿岸流なのかも知れない。ルーイン海流と違い、豪州南海岸の表層東向き流は密度勾配に駆動されているわけではなく、ルーイン海流系と共通の構造があるのは不思議である。

以上のように、沿岸流と、それに伴う水平・鉛直循環の構造はかなり明らかにできたが、その力学が完全に理解できたとは言えない。新しい問題を将来の研究に向けて提出できたと言える。

(2) 大陸斜面に沿った季節変動波動

北西の大陸棚には、Holloway 海流という南西向きの表層海流が存在するが、その鉛直構造や、ルーイン海流系との接続はよくわかっていない。

OFES version 2 (OFES2) から五日気候値を作成し、豪州の沿岸波動を調べた (Furue et al 2022)。すると、Holloway 海流の下方、大陸斜面上部に、季節変動する潜流が見つかった。(渦解

像海洋再解析 HYCOM (Cummings et al 2013)に同じ解析を施すと、同様な潜流が見える。) 平均成分は弱く年変動が卓越するが、1/2 年、1/3 年成分も寄与しており、5 月に北東向きの最大値をとるものの、反対向き(南西向き)の最大値は11月ではなく、2月となる。表層の Holloway 海流の変動と連動しているかどうかははっきりしない。

年を通して、この変動には南西方向の位相伝播がみられ、沿岸捕捉波であることが示唆される。位相速度も妥当な大きさである。ただ、豪州北西の角で位相の不連続がみられ、また、鉛直構造がずいぶん違うことから、ルーイン潜流と直接つながっている訳ではなさそうである。

沿岸捕捉波という解釈を試すために、非常に理想化された沿岸捕捉波の理論モデルを年周期の風で駆動した解を得た。その理想モデルでも大陸斜面上端に潜流が生じるため、それを力学的説明として提出したが、理論モデルで説明できない部分も無視できないし、励起の場所も特定できていないし、なぜルーイン潜流域に伝播していかないのかもわからない。面白い将来の課題である。

観測は非常に少ないが、その目で過去の観測研究の論文の図を見ると、この潜流を捉えていると思しきものが三篇見つかった。その論文の著者たちは、潜流に言及はしていない。将来の観測研究が待たれる。

最後に、2023 年度末の時点で投稿論文を改訂している研究を紹介する(Han et al 2024)。OFES の気候値の中に、800 m 程度の深さに極値をもつ、等密度面深度の変動が年周期で伝播しているのが見つかった。豪州北西端から反時計回りに豪州東海岸の北部まで連続的に伝播している。伝播速度・鉛直構造・水平スケールから、ケルヴィン波的な沿岸捕捉波であると推察されるが、惑星ベータ効果を取り入れた沿岸捕捉波の理論が存在しないため、この沿岸捕捉波が臨界緯度を持つのか(ロスビー波として沿岸から剥がれていくのか)どうかははっきりしない。また、信号の深さからして、西太平洋か赤道インド洋で励起されたものと推定できるが、はっきりとは分からない。

<参考文献>

- Benthuyssen, Jessica, Ryo Furue, Julian P. McCreary, Nathaniel L. Bindoff, and Helen E. Phillips. 2014. "Dynamics of the Leeuwin Current: Part 2. The Role of Mixing and Advection in a Buoyancy-Driven Eastern Boundary Current over a Continental Shelf." *Dyn. Atmos. Oceans* 65:39-63.
<https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2013.10.004>.
- Cummings, James A., and Ole Martin Smedstad. 2013. "Variational Data Assimilation for the Global Ocean." In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)*, edited by Seon Ki Park and Liang Xu, 303-43. Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13.
- Domingues, Catia M., Mathew E. Maltrud, Susan E. Wijffels, John A. Church, and Matthias Tomczak. 2007. "Simulated Lagrangian Pathways between the Leeuwin Current System and the Upper-Ocean Circulation of the Southeast Indian Ocean." *Deep Sea Res. II* 54:797-817. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.10.003>.
- Duran, Earl R., Helen E. Phillips, Ryo Furue, Paul Spence, and Nathaniel L. Bindoff. 2020. "Southern Australia Current System Based on a Gridded Hydrography and a High-Resolution Model." *Prog. Oceanogr.* 181 (February):102254.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102254>.
- Furue, Ryo, Julian P. McCreary, Jessica Benthuyssen, Helen E. Phillips, and Nathaniel L. Bindoff. 2013. "Dynamics of the Leeuwin Current: Part 1. Coastal Flows in an Inviscid, Variable-Density, Layer Model." *Dyn. Atmos. Oceans* 63:24-59.
<https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2013.03.003>.
- Furue, Ryo, Kévin Guerreiro, Helen E. Phillips, Julian P. McCreary, and Nathaniel L. Bindoff. 2017. "On the Leeuwin Current System and Its Linkage to Zonal Flows in the South Indian Ocean as Inferred from a Gridded Hydrography." *J. Phys. Oceanogr.* 47 (3): 583-602. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-16-0170.1>.
- Furue, Ryo. 2019. "The Three-Dimensional Structure of the Leeuwin Current System in Density Coordinates in an Eddy-Resolving OGCM." *Ocean Modell.* 138 (June):36-50.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.03.001>.

- [投稿中] Han, Lei, Jay P. McCreary, Ryo Furue, Qihua Peng, Xuhua Cheng. 2004. "Coastally-trapped and offshore-spreading signals along the continental slope south of Australia."
- McCreary, Julian P. 1981. "A Linear Stratified Ocean Model of the Coastal Undercurrent." *Phil. Trans. Roy. Soc. A* 302 (September):385-413. <https://doi.org/10.1098/rsta.1981.0176>.
- Ridgway, K. R., J. R. Dunn, and J. L. Wilkin. 2002. "Ocean Interpolation by Four-Dimensional Weighted Least Squares-Application to the Waters around Australia." *J. Atmos. Oceanic Tech.* 19:1357-75. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<1357:OIBFDW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<1357:OIBFDW>2.0.CO;2).
- Sasaki, Hideharu, Shinichiro Kida, Ryo Furue, Hidenori Aiki, Nobumasa Komori, Yukio Masumoto, Toru Miyama, Masami Nonaka, Yoshikazu Sasai, and Bunmei Taguchi. 2020. "A Global Eddyding Hindcast Ocean Simulation with OFES2." *Geosci. Model Devel.* 13 (7): 3319-36. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3319-2020>.
- Schott, Friedrich A., Julian P. McCreary, and Gregory C. Johnson. 2004. "Shallow Overturning Circulations of the Tropical-Subtropical Oceans." In *Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, edited by C. Wang, S.-P. Xie, and J. A. Carton, 261-304. Geophysical Monograph. Washington, D.C. <https://doi.org/10.1029/147GM15>.
- Woo, Mun, and Charitha Pattiaratchi. 2008. "Hydrography and Water Masses off the Western Australian Coast." *Deep Sea Res. I* 55 (9): 1090-1104. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.05.005>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ryo Furue	4. 巻 8
2. 論文標題 A seasonal undercurrent along the northwest coast of Australia	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2021.806659	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 E.R. Duran, H.E. Phillips, R. Furue, P. Spence, N.L. Bindoff	4. 巻 181
2. 論文標題 Southern Australia Current System based on a gridded hydrography and a high-resolution model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 なし
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pocean.2019.102254	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ryo Furue	4. 巻 138
2. 論文標題 The three-dimensional structure of the Leeuwin Current System in density coordinates in an eddy-resolving OGCM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ocean Modelling	6. 最初と最後の頁 36-50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ocemod.2019.03.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 R. Furue, K. Guerreiro, H. E. Phillips, J. P. McCreary, and N. L. Bindoff	4. 巻 47
2. 論文標題 On the Leeuwin Current System and its linkage to zonal flows in the South Indian Ocean as inferred from a gridded hydrography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Physical Oceanography	6. 最初と最後の頁 583-602
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JPO-D-16-0170.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 古恵 亮
2. 発表標題 豪州北西岸の季節的潜流
3. 学会等名 日本海洋学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Furue
2. 発表標題 Residual-mean circulation of the Leeuwin Current System in an eddy-resolving general circulation model
3. 学会等名 JpGU 2018 at Makuhari
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Furue
2. 発表標題 Residual-mean Circulation of the Leeuwin Current System in an Eddy-resolving General Circulation Model
3. 学会等名 AOGS 2018 at Honolulu (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Furue
2. 発表標題 The three-dimensional structure of the South Australian Current System
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryo Furue
2. 発表標題 The Leeuwin Current System and South Australian Current System based on a climatological, high-resolution gridded hydrography
3. 学会等名 The 6th Argo Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古惠 亮 , K. Guerreiro, H.E. Phillips, J.P. McCreary, N.L. Bindoff
2. 発表標題 On the Leeuwin Current System and its linkage to zonal flows in the South Indian Ocean
3. 学会等名 AOGS 2017 at Singapore (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古惠 亮 , K. Guerreiro, H.E. Phillips, J.P. McCreary, N.L. Bindoff
2. 発表標題 On the Leeuwin Current System and its linkage to zonal flows in the South Indian Ocean
3. 学会等名 JpGU/AGU 2017 at Makuhari (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古惠 亮
2. 発表標題 Leeuwin Currentと海底地形の役割・鉛直構造についての考察
3. 学会等名 海洋力学理論の研究会 (九州大学 応用力学研究所)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 E. Duran, H.E. Phillips, R. Furue, P. Spence, N.L. Bindoff
2. 発表標題 Northern boundary circulation properties of the South Australian Current System based on a gridded hydrography
3. 学会等名 AMOS-ICSHMO 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Tian, H.E. Phillips, R. Furue
2. 発表標題 Seasonal Forcing of the Leeuwin Current
3. 学会等名 AMOS-ICSHMO 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古惠 亮
2. 発表標題 ルーイン海流系の力学
3. 学会等名 この10年の海洋物理学を振り返る(杉ノ原伸夫・川辺正樹記念シンポジウム)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古惠 亮, Kevin Guerreiro, Helen E. Phillips, Julian P. McCreary, Nathaniel L. Bindoff
2. 発表標題 格子化水温塩分資料に基づくルーイン海流系の構造
3. 学会等名 日本海洋学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Ryo Furue, Kevin Guerreiro, Helen E. Phillips, Julian P. McCreary, Nathaniel L. Bindoff
2. 発表標題 On the Leeuwin Current System and its linkage to zonal flows in the South Indian Ocean as inferred from a gridded hydrography
3. 学会等名 Meeting on Perspectives in Computational Atmosphere and Ocean Science and 8th OFES International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Helen Phillips's Profiles http://www.utas.edu.au/profiles/staff/imas/helen-phillips Julian McCreary's Profiles http://iprc.soest.hawaii.edu/people/mccreary.php Kevin Guerreiro's Profiles https://www.researchgate.net/profile/Kevin_Guerreiro
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------