

令和元年6月23日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03725

研究課題名(和文) 琉球海流の力学過程と物質輸送過程の解明

研究課題名(英文) Dynamics of the Ryukyu Current System and its role in the material circulation in the North Pacific

研究代表者

中村 啓彦 (Nakamura, Hirohiko)

鹿児島大学・農水産獣医学域水産学系・教授

研究者番号：50284914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：以下の成果を示した。1) 日中韓の国際共同観測により、源流域で組織的に琉球海流が観測され、約500m深に~20cm/sの流速コアをもつ恒常的な潜流(琉球海流)が確認された。流速コアの強度は西進してくる中規模渦の衝突と無関係であり、西進する中規模渦は琉球海流の形成原因ではないことが示唆された。この点は、中規模渦トラックデータの解析結果とも整合的であった。2) 黒潮と琉球海流では流量の季節変動が逆位相であるという事実について、再解析データの解析と数値実験より、黒潮表層流速の季節変動は北東アジア季節風に対する沿岸海洋応答、黒潮下層と琉球海流のそれは偏西風/貿易風に対する沖合海洋応答であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

琉球海流の形成理論については、筆者らが提案した陸棚波理論(Nakamura et al., 2007)は存在するものの、中規模渦が琉球海流の形成に寄与しているか否かという基本的な問いは未解決であった。本研究の結果は、源流域の琉球海流の形成に、同緯度帯を西進してくる中規模渦は寄与していないことを示しており、形成理論を確立する上で大きな前進をもたらしたと言える。さらに、黒潮と琉球海流の流速の季節変動研究から、黒潮の表層流速の季節変動に対する東アジアモンスーンの重要性が指摘され、黒潮研究の新たなパラダイムを開拓した。これらの2点は、海洋物理学における大きな学術的意義と言える。

研究成果の概要(英文)：The main results are as follows: 1) The Ryukyu Current was observed in its upstream area through the Japan, China and Korea joint collaboration research. As a result, a quasi-permanent undercurrent with a ~20 cm/s velocity core was identified at ~500 m depth. The intensity of this velocity core was not affected by impingements of westward-propagating mesoscale eddies, suggesting that the undercurrent, i.e., the Ryukyu Current, is not an organization of such eddy impingements. This result was supported by the analysis of a mesoscale eddy trucking dataset. 2) Based on data analysis and numerical experiments, the reason why seasonal velocity variations of the Kuroshio and Ryukyu Current are out of phase was clarified. Namely, the local process due to the East Asian Monsoon is responsible for the seasonal velocity variation of the upper-layer Kuroshio, while the remote process due to the curl of interior wind stresses is responsible for that of the lower-layer Kuroshio and Ryukyu Current.

研究分野：海洋物理学

キーワード：琉球海流 黒潮 中規模渦 季節変動 北太平洋中層水 栄養塩

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

琉球列島の太平洋側を北上する琉球海流は、北太平洋中層水（オホーツク海を起源域として北太平洋の西部亜熱帯域を南下する水塊）を、北太平洋の西岸沿いに北へ回帰させる輸送経路の起点に位置する。そのため、その実態の把握は北太平洋の熱や物質輸送を理解する上で必要不可欠である。しかし、琉球海流の流動構造と水塊構造の実態は、琉球列島北部の沖合では、2000年代前半の集中観測によりある程度把握されたものの、琉球列島南部の沖合では、これまで組織的な係留観測や現場観測がされておらず、不明な点が多い。また、琉球海流の形成理論については、筆者らが提案した陸棚波理論（Nakamura et al., 2007）が存在するものの、その後研究は進展しておらず、中規模渦が琉球海流の形成に寄与しているか否かという基本的な問いが未解決のまま残された状態である。さらに、琉球海流の季節・経年変動の実態およびその力学は明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究は、琉球海流の流動構造と水塊構造の実態を把握するために、日中韓の国際共同観測として、2015年6月～2017年6月まで琉球列島南部（宮古島）の沖合で現場観測を実施するとともに、既存観測データの解析と数値計算を組み合わせ、琉球海流の形成・変動力学、さらに琉球海流が北太平洋中層水の子午面循環に果たす役割を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、(1)鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」を用いた日中韓の国際共同観測、(2)海洋再解析データなどの既存観測データの解析、(3)海洋大循環モデルを用いた数値実験の3つのアプローチにより研究を行った。それぞれについて方法を述べる。

(1)「かごしま丸」による国際共同観測

2015年6月～2017年6月の2年間、中国国家海洋局第二研究所（SIO）（研究代表者：Dr. Xiao-Hua Zhu）および韓国海洋科学技術院（KIOST）（研究代表者：Dr. Hong Sik Min）と共同して、宮古島周辺の黒潮と琉球海流を観測するために、大規模な係留観測網（12地点に観測機材を設置）を展開した。この観測は、鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」の3年生乗船実習の一環として、実習学生と協働して実施した。この研究プロジェクト（Joint Kuroshio-Ryukyu Current System Study: JKRYCSS）の概要を紹介するリーフレットを図1に示す。当該研究課題の計画書で掲げた観測目的は、琉球海流の実態把握であるが、計画申請後、韓国チームが研究費獲得に成功したため、国際共同観測の目的を黒潮と琉球海流の同時観測に拡張した。

係留観測では、SIOとKIOSTのPIES（Pressure-sensor-equipped Inverted Echo Sounder）（図1）を8台利用した。PIESの生データは、複雑な処理手順を経て流速の鉛直分布に変換されるので、高度なデータ処理技術が必要となる。したがって、取得データの主となる処理担当機関を琉球海流域についてはSIO、黒潮域についてはKIOSTとした。それぞれについて国際共著論文を作成した後、両者を合わせて黒潮と琉球海流の比較解析を実施する予定にした。国際共同観測の目的は、黒潮と琉球海流の同時観測に拡張されたが、当該研究課題の達成目標は、当初計画通り琉球海流の実態把握とした。

大規模係留観測網の維持と並行して、2015年～2018年の各6月の「かごしま丸」航海で水塊構造の観測を実施した。これらの観測では、宮古島東方沖の琉球海流の水塊構造と、それがケラマ開裂から沖縄トラフに流入した後の水塊変質に注目した。「かごしま丸」航海の最優先課題は係留観測網の維持であっ

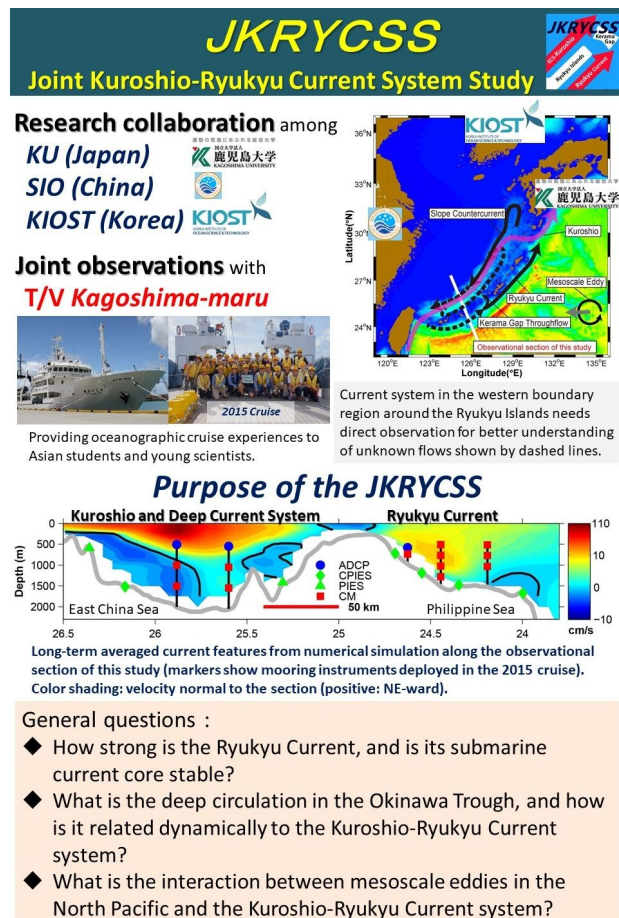


図1. JKRYCSS リーフレット

たため、台風等の天候不良により、水塊観測が十分満足に実施できない年があった。しかし、2017年5~6月に、「かごしま丸」と海洋研究開発機構（JAMSTEC）の海洋地球研究船「みらい」のジョイント航海により、琉球海流と沖縄トラフを網羅する広範囲の観測が実施できた。

(2) 既存データ解析

人工衛星で観測された海面流速データ、気象研究所が開発した海洋再解析データ（MOVE、および FORA-WNP30）を利用して、1）黒潮と琉球海流の季節変動特性、2）黒潮と琉球海流の長周期変動特性（> 経年変動）、3）琉球海流の長周期変動に中規模渦が果たす役割を調べた。1）の研究では、観測データ解析で明らかになった事実から力学仮説を立案し、それを数値実験で検証することによって、黒潮と琉球海流の季節変動の力学を明らかにした。3）の研究では、西部北太平洋の中規模渦トラックのデータセットを独自に作成し、新しい事実の発見に繋がった。

(3) 数値計算

黒潮と琉球海流の季節変動特性に関して、既存データセットの解析から明らかになった観測事実の力学を調べるために、現実的な海岸・海底地形を模倣した海洋大循環モデル（基盤モデルは Princeton Ocean Model）を作成して、数値実験を実施した。

4. 研究成果

(1) 観測

直接流速観測

宮古島の南東方沖に設置した係留観測網の記録に基づいて、琉球海流の横断面の流速分布が再現された（図2）。この観測結果より、2年間の平均的状态として、深度500m付近に19.4 cm/sの最大流速をもつ琉球海流が確認された。2年間の流量の平均値は、9.0 Sv（1 Sv = 10⁶ m³/s）であった。約100日周期で到来する中規模渦の影響を受け、その標準偏差は7.8 Svであった。しかし、中規模渦の影響は表層に限定されており、最大流速を持つ潜流のコアには及んでいなかった。

この観測から、琉球海流の中心を形成する潜流のコアは、中規模渦の直接的な影響を受けていないことがわかった。このことは、少なくとも琉球列島南部の沖合の琉球海流については、主要な形成原因は中規模渦ではないことを意味している。では、主要な形成原因が何であろうか？この疑問については、4-2-3節の中規模渦トラックデータセットの解析結果を説明した後に議論する。

水塊構造観測

琉球海流は、北太平洋の亜熱帯西部を南下してきた北太平洋中層水を、西岸境界に沿って北へ回帰させる主要な輸送経路である。しかし、約500-1000m深にある中層水を、同一深度で水平方向に輸送するだけでは中層水の南北対流循環を維持することはできない。そのため、西岸境界域のどこかに中層水と表層水の強混合域が存在し、中層から表層へ中層水が湧昇している場所があると考えられている（中層水が表層へ湧昇する仕組みは、鉛直混合により中層水に浮力が与えられるからである）。その有力な候補地として、沖縄トラフが挙げられている（Nakamura et al., 2013）。これまでの研究では、主に塩分分布を用いて、鉛直混合と湧昇の分布域や強度が推測されてきた。しかし、物質循環（特に基礎生産に寄与する栄養塩供給）の観点からは、栄養塩分布について理解することが重要である。しかし、これまで、沖縄トラフ周辺の栄養塩の詳細なマッピングはされていない。

このような背景から、2017年の「かごしま丸」と「みらい」のジョイント観測データを用いて、硝酸塩濃度の深さ別の分布図を作成した（図3）。中層水が存在する層（ $\sigma_t = 26.7$ ）では、琉球列島の太平洋側で硝酸塩濃度が高く、沖縄トラフ側で低い。一方、それより表層の温度躍層内（ $\sigma_t = 26.0$ ）では、沖縄トラフ側で硝酸塩濃度が高く、太平洋側で低い。この理由は、太平洋から沖縄トラフに流入する中層水（高硝酸塩濃度）が、沖縄トラフ内で表層水（低硝酸塩濃度）とよく混合しているからである。

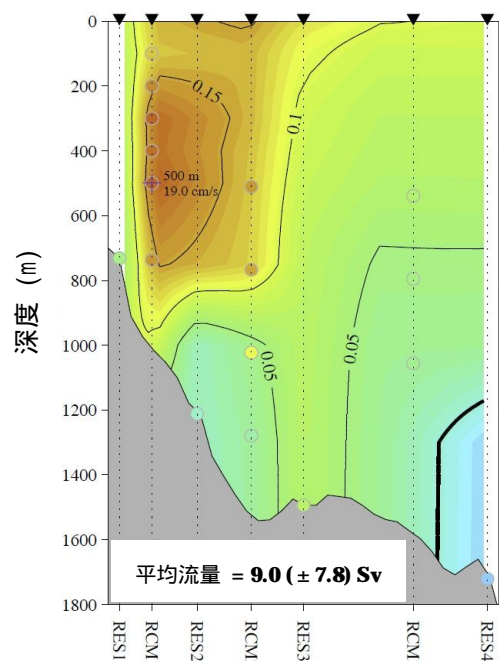


図2. 琉球海流の断面直交流速分布。全係留観測期間（2015/06-2017/06）の平均値。（投稿中の論文から改変して引用）

上述した事実は、塩分分布の解析から予想されたことであるが、本研究ではじめて証拠を示すことができた。この証拠は、数値モデルによる栄養塩分布の再現性を評価する上で、重要な資料となる。今後の課題は、中層水に含まれる硝酸塩は、沖縄トラフ内でどの程度表層まで影響を与えているか、また、どの程度の量が湧昇しているかを見積もることである。

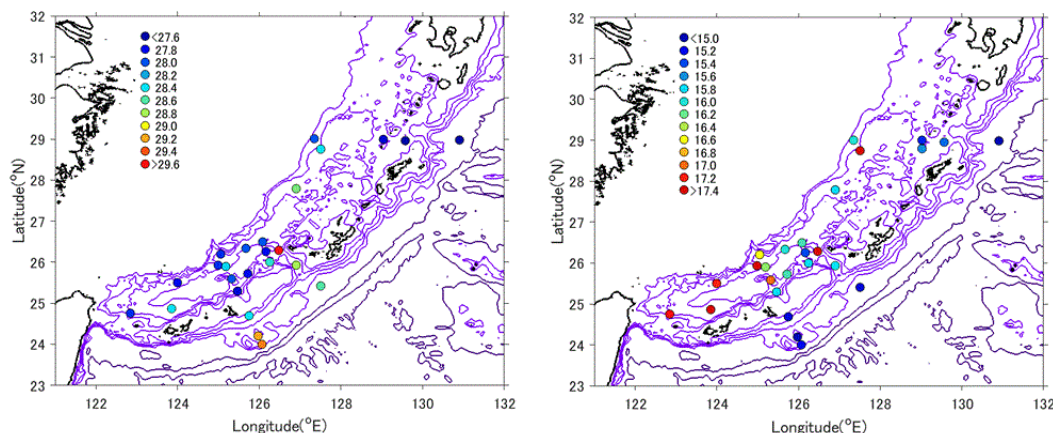


図3. ポテンシャル密度 26.7 (左)と 26.0 (右)の面上の硝酸塩濃度分布. 2017年5-6月に実施された鹿児島大学水産学部附属練習船「かごしま丸」(KG1708)と海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」(MR17-03C)のジョイント観測結果.

(2) 既存データ解析と数値実験

季節変動特性

黒潮と琉球海流の強度の季節変動を議論するとき、従来の研究では主に流量が解析されていた。しかし、流量の季節変動の議論には、観測結果と理論予測で変動の位相が逆になるという本質的な矛盾があった。本研究では、流量を考察する代わりに、深さ毎に流速の季節変動を調べることにより、この矛盾の原因を明らかにした。まず、海洋再解析データの解析から、黒潮流速の季節変動は、表層(0-500m深)では夏に最大になり冬に最小になるが、下層(500m以深)では逆に冬に最大になり夏に最小になることを示した。琉球海流は、黒潮下層と同様に、冬に最大となり夏に最小となる。この結果は、黒潮の表層と下層では季節変動の力学が異なることを示していた。

次に、この原因を調べるために、季節変動を駆動している風の与え方を様々に変える数値実験を行った。その結果、黒潮表層流速の季節変動は、黒潮直上の季節風(北東アジアモンスーン)によって励起されているが、黒潮下層と琉球海流の季節変動は、北太平洋の内部領域(伊豆-小笠原海嶺の西側)の風によって励起されていることがわかった。

この研究では、観測事実を明らかにするために海洋再解析データを利用した。海洋再解析データは、観測と数値予測のハイブリッドデータセットなので、完全に観測事実と言い切れない弱点がある。しかし、その後、中国SIOとの共同研究より、トカラ海峡の黒潮の表層と下層では季節変動の位相は逆であることが、2003-2012年にトカラ海峡を横断するフェリー「なみのうえ」に搭載した超音波多層流向流速計(ADCP 38KHz: 2日間隔, 2km間隔の高時空間分解能データ)による観測から示された(Liu et al., 2019)。

この研究結果は、以下の2点で重要である。1) 表層と下層では流速の季節変動の原因が異なるので、2つを積分した流量で黒潮と琉球海流の季節変動を議論することは適切ではない、2) 表層流速の季節変動は、従来の理論(スベルドラップ理論)と異なり、黒潮直上の風で駆動されているので、アジアモンスーンが黒潮に与える影響の新理論の構築が必要である。この新理論については、現在、引き続き研究している

中規模渦の影響

海洋再解析データ(FORA WNP30, 期間: 1982年~2014年)を利用して中規模渦トラックデータセット(渦の誕生から消滅までの移動経路データ)を作成して、西部北太平洋における中規模渦の変動特性を把握し、それが琉球海流に与える影響を明らかにした。

図4に示す通り、その変動特性は、高気圧性渦と低気圧性渦で著しく異なることがわかった。高気圧性渦では、亜熱帯反流域で発生した渦が、琉球海流域に向かって西進している。一方、低気圧性渦では、黒潮続流南部で発生した渦が、その後黒潮に沿うように琉球海流域に南下している。低気圧性渦では、亜熱帯反流域で長期的に持続する渦は少ない。

次に、高気圧性渦と低気圧性渦が琉球海流に衝突する頻度の違いによって、琉球海流の流速に経年変動が生じるかどうかを調べた。仮説として、高気圧性渦(低気圧性渦)の到来が多い期間は、琉球海流の流速は増加(減少)するシナリオが成り立つ。解析の結果、琉球海流の北部(沖縄島より北)では、高気圧性渦(低気圧性渦)の通過数が増えると、流速が強化(弱体化)することがわかった。一方、南部(沖縄島より南)では、明瞭な関係性が見られなかった。

この研究結果は、琉球海流の経年変動について、以下の2つの力学を示唆している。1つは、南部琉球海流の経年変動については、中規模渦は主たる原因ではない点である。これは、4-1-1節（直接流速観測）で明らかになった事実（琉球海流の中心を形成する潜流のコアは、中規模渦の直接的な影響を受けていない）と整合的である。一方、北部琉球海流については、中規模渦の到来経路が陸棚波の伝搬経路（陸棚斜面）にほぼ一致することから、Nakamura et al. (2007)で示された陸棚波理論との関連性が伺える。すなわち、経年変動周期で起こるような、群を成す中規模渦の移動は、陸棚波として理解できる可能性がある。さらに、この議論は、地球流体に特徴的な現象である東西帯状流と、形成理論において関連するかもしれない。この点を掘り下げることが今後の課題である。

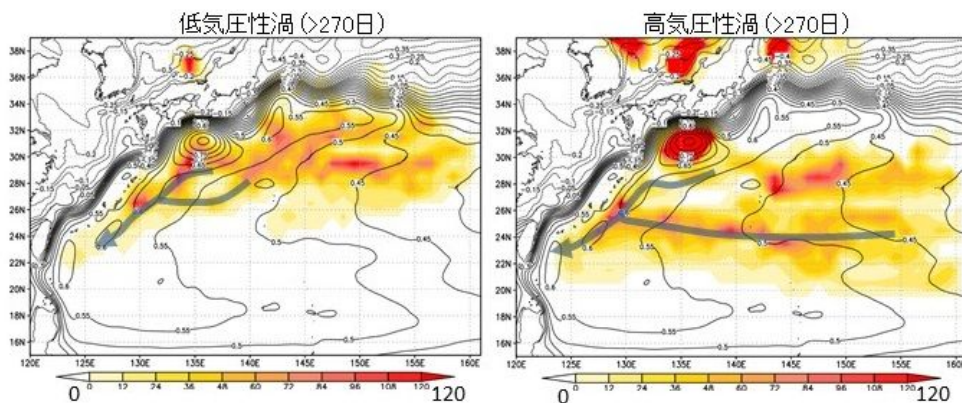


図4. 低気圧性渦と高気圧性渦の通過経路。当該研究で開発された中規模渦トラッキングデータセット（1982–2014）の解析結果。

(3) まとめ

本研究では、琉球海流の実態を把握するために、日中韓の国際共同観測（JKRYCSS）を主軸として研究を進めてきた。観測データの整理には時間を要するため、最終年度が終了した現在、主要な論文の多くは投稿中もしくは準備中である。しかし、JKRYCSSで得られた成果、並びに当該研究課題で得られた成果については、それを広く公表するために、日本地球惑星科学連合の2019年大会（JpGU2019, 2019/05/26-30）で国際セッション（ECS-Kuroshio and Ryukyu Current System -Observation, modeling and theory-）を企画した（代表コンピナーは筆者、共同コンピナーは研究協力者）。このセッションでは、この研究成果報告書に書かれている内容が、当該研究の分担研究者および研究協力者によって報告された（5節：主な発表論文[学会発表]参照）。

JKRYCSSプロジェクトは、現在、第2期目としてpost-JKRYCSSに移行している。今のところ、post-JKRYCSSは日韓の国際共同観測として、東アジアモンスーンが黒潮の流路・流量・安定性に与える影響をマルチスケール（乱流過程から長周期変動まで）で調べる方向で発展している。この先も、日中韓の国際共同研究に基づいて、東シナ海周辺の海流系の理解がさらに進むことが期待される。

参考文献

- Liu, Z., Nakamura, H., Zhu, X.-H., Nishina, A., Guo, X., & Dong, M. (2019): Tempo-spatial variations of the Kuroshio current in the Tokara Strait based on long-term ferryboat ADCP data, *J. Geophys. Res. Oceans*, (in review).
- Nakamura, H., Ichikawa, H., & Nishina, A. (2007): Numerical study of the dynamics of the Ryukyu Current system. *J. Geophys. Res. Oceans*, 112(C4).
- Nakamura, H., Nishina, A., Liu, Z., Tanaka, F., Wimbush, M., & Park, J.-H. (2013): Intermediate and deep water formation in the Okinawa Trough. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6881-6893.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

- 中村啓彦, 黒潮の流路・流量変動の研究 源流域から九州東岸まで 海の研究 査読有 26(4), 2017, 113-147, <http://kaiyo-gakkai.jp/jos/uminokenkyu/vol26/26-4/26-4-nakamura.pdf>.
- Liu, Z.-J., H. Nakamura, X.-H. Zhu, A. Nishina, and M. Dong, Tidal and residual currents across the northern Ryukyu Island chain observed by ferryboat ADCP, *J. Geophys. Res. Oceans*, 査読有, 122, 2017, DOI:10.1002/2017JC012876
- Zhu, X.-H., H. Nakamura, M. Dong, A. Nishina, and T. Yamashiro, Tidal currents and Kuroshio transport variations in the Tokara Strait estimated from ferryboat ADCP data, *J. Geophys. Res. Oceans*, 査読有, 122, 2017, DOI:10.1002/2016JC012329
- Nishina, A., H. Nakamura, J.-H. Park, D. Hasegawa, Y. Tanaka, S. Seo, and T. Hibiya,

Deep ventilation in the Okinawa Trough induced by Kerama Gap overflow, J. Geophys. Res. Oceans, 査読有, 121, 2016, DOI:10.1002/2016JC011822
Nakamura H., R. Hiranaka, A. Daisuke, and T. Saito, Local wind effect on the Kuroshio path state off the southeastern coast of Kyushu, J. Oceanogr., 査読有, 71, 2015, 575-596, DOI:10.1007/s10872-015-0309-1

〔学会発表〕(計 13 件)

Jeon, C., J.-H. Park, H. Nakamura, A. Nishina, X.-H. Zhu, D.-G. Kim, H.-S. Min, S.-K. Kang, H. Na, N. Hirose, and Y. Choi, Near-inertial waves advected by the Kuroshio from observation and simulation, JpGU Meeting 2019, 2019
Kako S., and H. Nakamura, Impact of the mesoscale eddies on the western boundary current over the entire western North Pacific, JpGU Meeting 2019, 2019
Liu, Z., H. Nakamura, X.-H. Zhu, A. Nishina, X. Guo, and M. Dong, Structure and variability of the Kuroshio current in the Tokara Strait, JpGU Meeting 2019, 2019
Min, H.-S., C. Hwang, D.-G. Kim, H. Nakamura, A. Nishina, X.-H. Zhu, J.-H. Park, C. Jeon, H. Na, and N. Hirose, Relationship of the Kuroshio with the current fields in the East China Sea from observations and model results, JpGU Meeting 2019, 2019
Nishina, A., H. Nakamura, J.-H. Park, X.-H. Zhu, H.-S. Min, and H. Na, Characteristics of water in the southern Okinawa Trough, JpGU Meeting 2019, 2019
Qiao, Y., H. Nakamura, and A. Nishina, Temporal and spatial velocity variations over the Kuroshio Extension, Kuroshio and Ryukyu Current System in 1982-2014, JpGU Meeting 2019, 2019
Zhang, Z.-L., H. Nakamura, and Zhu X.-H., A numerical study on the dynamics of seasonal velocity variation in the East China Sea, JpGU Meeting 2019, 2019
Zheng, H., X.-H. Zhu, H. Nakamura, J.-H. Park, C. Jeon, R. Zhao, A. Nishina, C. Zhang, H. Na, Z.-N. Zhu, H.-S. Min, Bottom Pressure in the East China Sea -Observation and modeling, JpGU Meeting 2019, 2019
Zhu, X.-H., H. Nakamura, J.-H. Park, R. Zhao, A. Nishina, C. Zhang, C. Jeon, H. Na, Z.-N. Zhu, H.-S. Min, The Joint Kuroshio-Ryukyu Current System Study and a rapid report about mooring observations southeast of Miyakojima, JpGU Meeting 2019
Zhang, Z.-L., H. Nakamura, and X.-H. Zhu, Seasonal velocity variation over the entire Kuroshio path -Data analysis and numerical simulation -, 日本海洋学会 2018 年度秋季大会, 2018
仁科文子, 中村啓彦, 横川太一, 川口慎介, 沖縄トラフ中深層の栄養塩輸送, JpGU Meeting 2018, 2018
中村啓彦, 仁科文子, 南西諸島周辺海域の海水循環, 乱流混合と物質循環, 水産海洋シンポジウム, 2016
Nakamura, H., Studies on the current system around the Okinawa Trough using Training Ship Kagoshima-maru, Workshop on Typhoon-Ocean Interaction in the Northwest Pacific, Isabu Typhoon/Ocean Program, 2016

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 仁科 文子
ローマ字氏名: **Nishina Ayako**
所属研究機関名: 鹿児島大学
部局名: 農水産獣医学域水産学系
職名: 助教
研究者番号 (8 桁): **80311885**

研究分担者氏名: 加古 真一郎
ローマ字氏名: **Kako Shinichiro**
所属研究機関名: 鹿児島大学
部局名: 理工学域工学系
職名: 助教
研究者番号 (8 桁): **60709624**

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: Xiao-Hua Zhu
研究協力者氏名: Jae-Hun Park
研究協力者氏名: Hong Sik Min
研究協力者氏名: Hanna Na