

平成 2 6 年 6 月 2 3 日現在

機関番号 : 1 7 7 0 1

研究種目 : 基盤研究(C)

研究期間 : 2011 ~ 2013

課題番号 : 2 3 5 4 0 5 1 6

研究課題名 ( 和文 ) ケラマギャップ通過流と黒潮擾乱の組織化が駆動する沖縄トラフ中深層循環の研究

研究課題名 ( 英文 ) Study on circulation and water mass formation in the intermediate and deep layers of the Okinawa Trough

研究代表者

中村 啓彦 ( Nakamura, Hirohiko )

鹿児島大学・水産学部・准教授

研究者番号 : 5 0 2 8 4 9 1 4

交付決定額 ( 研究期間全体 ) : ( 直接経費 ) 3,700,000 円、( 間接経費 ) 1,110,000 円

研究成果の概要 ( 和文 ) : 沖縄トラフの約1000m以深の海域は、南西諸島 ( 海嶺 ) に遮られて北太平洋中深層から孤立しているため、そこには固有の海水循環システムがある。本研究では、主に船舶を利用した海洋観測と歴史的データ解析により、沖縄トラフの中深層水の循環と水塊形成を調べた。その結果、琉球列島の東側を流れる琉球海流 ( 500 ~ 1000m深にある潜流 ) を経由して、ケラマギャップから沖縄トラフへ流入する中深層水は、沖縄トラフ内で強い鉛直混合を受けて湧昇し、黒潮下層に取り込まれて日本南岸へと流出することが示された。この事実は、北太平洋中層水の子午面循環の湧昇過程を、沖縄トラフの海水循環システムが支配していることを示唆している。

研究成果の概要 ( 英文 ) : Circulation and water mass formation in the intermediate and deep layers of the Okinawa Trough were investigated using comprehensive datasets for 1) water properties on the minimum salinity surface mainly derived from Argo float profiles, 2) velocity data in the Kerama Gap measured by moored current-meters from 2009 to 2011, and 3) CTD/LADCP data over the southern Okinawa Trough measured in June 2011 and 2013.

Intermediate-water properties are largely modified in the Okinawa Trough due to strong diapycnal diffusion ( $6.8\text{--}21.5\text{ cm}^2/\text{s}$  based on an advection-diffusion equation). Deep water below the sill depth of the Kerama Gap ( $\sim 1100\text{ m}$ ), is ventilated by the bottom-overflow in the Kerama Gap down to the deepest layer ( $\sim 2000\text{ m}$ ) in the southern Okinawa Trough. A box model predicts that this bottom-overflow ( $0.18\text{--}0.35\text{ Sv}$ ) causes strong upwelling in the southern Okinawa Trough, which must be maintained by buoyancy gain of the deep water due to strong diapycnal diffusion ( $4.8\text{--}9.5\text{ cm}^2/\text{s}$ ).

研究分野 : 数物系科学

科研費の分科・細目 : 気象・海洋物理・陸水学

キーワード : 沖縄トラフ ケラマギャップ 北太平洋中層水 琉球海流系 ハイドロリック・コントロール 鉛直拡散係数 湧昇流 深層循環

## 1. 研究開始当初の背景

沖縄トラフの約 1000m 以深の海域は、南西諸島（海嶺）に遮られて北太平洋中深層から孤立しているため、固有の海水循環システムを有する。たとえば、北部沖縄トラフの大陸側の海底斜面上には、表層を流れる黒潮の直下に、斜面反流と呼ばれる逆向きの流れがある。私たちは、これまでの研究で、斜面反流の形成要因として、黒潮前線から出現する渦が海底斜面に作用して平均流を生む効果（Neptune 効果）が影響していることを示した（Nakamura et al., 2008）。一方、南西諸島（海嶺）には、沖縄本島の南にわずか幅約 50km であるが水深 1100m に及ぶケラマギャップ（海裂）がある。したがって、もしギャップを通過する組織的な流入があれば、沖縄トラフ中深層の海水循環は大きな影響を受けると予想される。私たちは、米国ロードアイランド大学（URI）と共同して、2009 年 6 月から 2 年計画でケラマギャップ内の詳細な流速分布を観測した。1 年目（2009 年 6 月～2010 年 6 月）の観測の予備的解析から、ギャップの北側斜面上に、深層で強化された北太平洋から沖縄トラフへ向かう持続的な流れがあることがわかった。しかし、これらの事実以外に、沖縄トラフ中深層の海水循環に対する知見は得られていない。

海水循環と同様に、沖縄トラフ中深層の水塊形成過程もよくわかっていない。塩分極小の海水特性をもつ北太平洋中層水は、ケラマギャップの深度 600～700m から沖縄トラフ内へ流入するが、沖縄トラフ内での移流と変質過程はわかっていない。さらに、南部沖縄トラフには、最大水深 2200m に及ぶ深海域が広がるが、このケラマギャップの最大水深より深い海域の水塊はどのように形成されているかも不明である。

## 2. 研究の目的

前節で述べられた事実に基づいて、沖縄トラフの中深層循環は、表層を流れる黒潮の擾乱が海底斜面上で組織化する効果と、ケラマギャップからの組織的流入が及ぼす効果によって形成されていると仮定できる。本計画では、黒潮擾乱の組織化とケラマギャップ通過流という 2 つの強制力に対する沖縄トラフ中深層の海水循環応答の理論を構築することを主目的とした。さらに、それを検証するための次期観測計画を立案することを目的とした。

## 3. 研究の方法

研究目的を達成するために、（1）沖縄トラフ中深層の海洋観測と歴史的観測データの解析、（2）沖縄トラフの中深層循環の数値実験と理論の構築、（3）次期観測計画の立案と国際共同観測体制の組織化を行うことにした。以下に詳細を述べる。

### （1）海洋観測と歴史的観測データの解析

### 1-a) 海洋観測

鹿児島大学と URI による共同観測は、ケラマギャップの断面流速分布の時間変化を把握することを目的としていたもので、ケラマギャップを通過する海水の水塊特性を把握する観測は行われていなかった。そこで、ケラマギャップ通過流の水塊特性と沖縄トラフ内での水塊変質過程を把握すること为目标とした海洋観測を行った。海洋観測は、鹿児島大学附属練習船「かごしま丸」の海洋観測乗船実習 I の一環として、2011 年～2013 年の毎年 6 月に実施した。海水特性の分析には、水温・塩分の他に、溶存酸素を用いた。以下、各年の航海概要を示す。

[2011 年 6 月]

ケラマギャップに設置されていた係留観測機器（7 台）を回収し URI との共同観測の全行程を終了した（技術報告書として、Liu et al. (2012) を参照）。同時に、ケラマギャップ周辺の中深層での海水特性を把握するために、全 14 観測点において CTD による水温・塩分の鉛直分布観測を行った。ただし、溶存酸素の測定は事前準備が必要なため、次年度から実施することにした。

[2012 年 6 月]

ケラマギャップ周辺の CTD（酸素センサー付き）による水温・塩分・溶存酸素観測を行うとともに、ケラマギャップで起こることが予想される hydraulic jump の後流で起る活発な乱流混合を測定するため、東京大学（日比谷研究室）と共同で深海乱流計（VMP5500）による乱流測定を行う予定であった。しかし、観測期間中、台風 4 号と 5 号が立て続けに東シナ海上を通過したため、ほぼ全日程を台風避難に割かれ当初計画した全観測が実行できなかった。したがって、この観測課題は次年度に持ち越されることになった。

[2013 年 6 月]

前年度実施できなかった観測課題に関連して、太平洋側からケラマギャップを縦断して沖縄トラフ南部の最深部まで、全 35 観測点において、酸素センサー付き CTD による水温、塩分、溶存酸素、硝酸塩センサーによる硝酸塩（約 2000m 深以浅の海域のみ）、LADCP による流速、VMP5500 による深海乱流（約 1000m 深まで）の鉛直分布観測を実施した。酸素センサーで計測された溶存酸素は、採水分析された溶存酸素でキャリブレーションされた。さらに、観測期間内の 6 月 10 日～18 日までケラマギャップ直上での潮汐流を把握するため、流速計（3D-ACM）の係留を行った。この年度の観測は、ほぼ全行程を実施することができた。

### 1-b) 歴史的観測データの解析

これまでの東シナ海やフィリピン海にお

ける中層水の研究は、CTD の断面観測を基に行われており、観測が存在する海域については詳細に調べられているものの、海域どうしをつなぎ中層水の移流経路を連続的に追跡する解析はなされていなかった。本研究では、歴史的 CTD データとともに、近年その数が著しく増加した Argo フロートのプロファイルデータ (2004 年～現在) を使用することで、中層水の詳細な移流経路と変質過程を明らかにする解析を行った。そのために、沖縄トラフ周辺において水温・塩分の高空間解像度気候値データセット (水平解像度:  $1/3^{\circ} \times 1/3^{\circ}$ ) を作成し解析した。

## (2) 沖縄トラフ中深層の海水循環理論の構築

海洋大循環モデルを用いて、ケラマギャップ通過流と黒潮擾乱の組織化という 2 つの強制力に対する沖縄トラフ中深層の海水循環応答を数値実験的に確かめる試みをした。数値実験には、以前の研究 (Nakamura et al., 2007) で用いた海洋大循環モデル (Princeton Ocean Model) を修正して使用した。

このモデルは、理想化された海岸・海底地形のモデルである。北太平洋の西部亜熱帯循環域を模倣する主海盆 (2000km $\times$ 2400km の矩形海) に、沖縄トラフを模倣する縁辺海 (400km $\times$ 800km の矩形海) が隣接する。両者の間は、琉球列島を模倣した南北バリア (400km $\times$ 20km) で仕切られており、バリアの北側にトカラ海峡 (200km)、南側に台湾と石垣島間の海峡 (200km)、中央部にケラマギャップ (50km) がある。主海盆の内部領域は水深 4000m で平坦であり、西岸境界域は線形に水深 500m まで浅くなる陸棚斜面 (幅 200km) をもつ。一方、縁辺海の内部領域はケラマギャップより北部は水深 1000m で平坦であるのに対し、南部は水深 2000m まですり鉢状に深くなる。

数値実験では、ケラマギャップと縁辺海南部の海底地形、縁辺海内の鉛直拡散係数をパラメーターにして、ケラマギャップを通過する海底強化流の強度について感度を調べた。この数値実験結果に基づいて、循環理論を提案する計画であったが、パラメーターに対するモデル応答の感度が悪かったため、この数値実験からは循環理論に結び付くような成果を研究期間内に得ることはできなかった。このため、本成果報告書ではパラメーター実験の結果についての報告を割愛する。

これを補い、ケラマギャップでの観測結果をより広範囲な海洋構造と結びつけて解釈するために、Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) によるデータ同化結果—the Global Ocean Forecast System Version 3 (GOFS V3, 米国海軍研究所)—を解析した。GOFS V3 の同化データは、観測データと定性的にかなりよく一致しており、解釈に用いるのに大変有効であった。

## (3) 次期観測計画の立案と国際共同観測体制の組織化

本研究で得られた結果に立脚して、沖縄トラフの中深層循環に関わる次期観測計画を立案する。その計画は、東シナ海の大陸棚上および沖縄トラフ内の海水循環に対して強い関心を持つ、米国、台湾、中国、韓国などの研究者との協力体制の下に組織する。本計画の最終年度には、各国研究者へ次期観測計画への参加を呼びかけ、国際共同観測体制の組織化を図る。

## 4. 研究成果

### 4-1. 1 年目の成果

2011 年 6 月に実施した「かごしま丸」航海で、それまでの 2 年間にわたり URI と共同で行なってきたケラマギャップ通過流の係留観測を成功裏に終了させた。この 2 年間の流速データの解析から、ケラマギャップの北東側斜面に沿って 10cm/s を越える安定した北上流が中深層に存在することが明瞭になった。GOFS V3 のデータ同化結果を解析した結果、この安定した流れは南西諸島の東側斜面に沿って北上する琉球海流 (500~1000m 深に流速コアをもつ潜流) がケラマギャップの入り口 (北東斜面) で分岐したものであることがわかった。なお、ケラマギャップ通過流の流量の年平均値と時間変化については、URI グループによって詳細に解析された (Na et al., 2013)。

一方、「かごしま丸」航海によりケラマギャップ周辺の 14 観測点で得られた CTD データと、沖縄トラフ全体を覆うアルゴフロートのプロファイルデータ (6415 個) を解析した結果、北太平洋の中層 (約 1000m 深) の海水がケラマギャップの海底上を這うように流れ、沖縄トラフ南部の深層 (1000~2000m 深) に潜り込むよう様子が炙り出された。この様子は、internal hydraulic jump の特徴と一致しており、ケラマギャップ通過流は hydraulic control されている証拠と考えられた。このような特徴は、GOFS V3 のデータ同化結果にも認められた。

これらの結果より、以下のような沖縄トラフ中深層の海水循環像が示唆された。ケラマギャップから琉球海流の分岐流が中深層に沿って流入する。この通過流は、海底付近である程度 hydraulic control されている可能性がある。さらに、ケラマギャップのシル水深より深い沖縄トラフ南部の中深層水は、hydraulic jump による海水の潜り込みと、その後の鉛直混合によって涵養されている。さらに、その後の解析より、この鉛直混合には hydraulic jump に伴う内部波の碎波の他に、琉球列島周辺で顕著な M2 内部潮流の碎波も関係していることが指摘された。

### 4-2. 2 年目の成果

沖縄トラフ周辺の中層水の詳細な移流経路と変質過程を明らかにするために、歴史的

CTD データと Argo フロートデータを用いて水温・塩分の高空間解像度データセットを作成し解析した。その結果、沖縄トラフ中深層の海水循環像を構築する上で要となる以下の研究結果が得られた。1) 北太平洋中層水と南シナ海中層水が台湾沖で水平多層貫入により効率的に水平混合し新しい中層水が形成され、2) 台湾・与那国島間とケラマギャップから沖縄トラフに流入したあと、3) 沖縄トラフ内では鉛直混合により高塩分化する。

一方、これまでの観測で取得したデータの解析から、沖縄トラフ深層の海水循環と水塊形成に対しては、ケラマギャップの底層通過流の役割が明確になった。つまり、1) 琉球海流系の分岐に由来するギャップ通過流は、ギャップの海底で hydraulic control されてギャップのシル深度より深い沖縄トラフ南部の深層へ入り込むこと、2) 深層へ入り込んだ海水は、活発な鉛直混合によって浮力を得て湧昇すること、3) この鉛直混合の渦拡散係数をボックスモデルで見積もったところ、外洋の深海の標準的な値 ( $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) に比べ 10 倍程度大きいことが分かった。

この2つの結果は、沖縄トラフは北太平洋中層水が湧昇する海域として北太平洋の南北循環に大きな影響を及ぼすことを示唆している。つまり、沖縄トラフは北太平洋の中層循環に対して湧昇域としての重要な役割を果たしているという、新しい海洋観を提示している。この海洋観とその基盤となる研究成果は、申請者を筆頭著者として Journal of Geophysical Research-Oceans の 2013 年 11 月号に掲載された (Nakamura et al., 2013)。

#### 4-3. 3年目の成果

2013年6月に実施したかごしま丸観測により、2つの重要な成果が得られた。その1つは、CTD 密度鉛直分布から Thorp scale を介して鉛直拡散係数を見積もったところ、ケラマギャップシルの沖縄トラフ側斜面で、外洋深海の標準的な値 ( $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) に比べ 100~1000 倍も大きな鉛直拡散係数が得られたことである。この現象は、hydraulic jump に伴う内部波の碎波の証拠とみなせる。もう1つは、LADCP 観測により、ギャップシルの海底直上で 50cm/s を超える底層強化流が観測されたことである。この底層強化流は、下げ潮時の観測結果であり、長期平均値としてはさらに大きい可能性がある。沖縄トラフ南部の 1000m より深い海域は、この底層強化流によって涵養されているとみなせるので、その滞留時間を見積もったところ約9年と見積もられた。この値は、Nakamura et al. (2013) で提唱した値 (4.7~9.4 年) とほぼ一致している。2013年6月のかごしま丸観測の結果は、私たちが本研究課題の主要成果として論文公表した成果 (Nakamura et al., 2013) を裏付けるものである。現在、かごしま丸観測の成果をまとめた論文を準備中である。

4月に中国杭州で行われた国際学会 (2014 PAMS Meeting) において、中国の Xiao-Hua Zhu 博士 (国家海洋局・第二海洋研究所)、韓国の Jae-Hun Park 博士 (海洋科学技術院) と次期観測計画を協議した結果、現在の東シナ海を巡る国際情勢を考慮すると、沖縄トラフ南部の海洋循環の国際共同観測は困難と判断し、琉球列島東方沖の琉球海流系の国際共同観測が有意義であるという結論に至った。そして、2014年度中に中国、韓国、日本の各国で研究費獲得を目指し、2015年度からかごしま丸を利用して観測を実施する計画を立案した。

#### 4-4. 全体のまとめ

図1は、沖縄トラフ周辺の海洋循環像を模式的にまとめたものである。この図は、これまでの知見に本研究で得られた成果を加えて作成された。この循環像では、琉球海流を経由してケラマギャップから沖縄トラフへ流入する北太平洋中層水は、沖縄トラフ内で強い鉛直混合を受けて湧昇し、黒潮下層に取り込まれて日本南岸へと流出する。特に、1000m より深い沖縄トラフ南部の深層水形成過程を表す模式図を図2に示す。

以上をまとめると、本研究の含意として次の仮説が提案できる。北太平洋中層水は、沖縄トラフ内で湧昇して黒潮に取り込まれ、その形成域へ回帰する。その湧昇量は、トカラ海峡のシル水深 (690m) を考慮すると、北太平洋中層水の子午面循環の流量 (約  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) に対して、約 30~40% に及ぶと推定される (Nakamura et al., 2013)。この事実は、北太平洋中層水の子午面循環の湧昇過程を、当該海域が強く支配していることを示唆している。

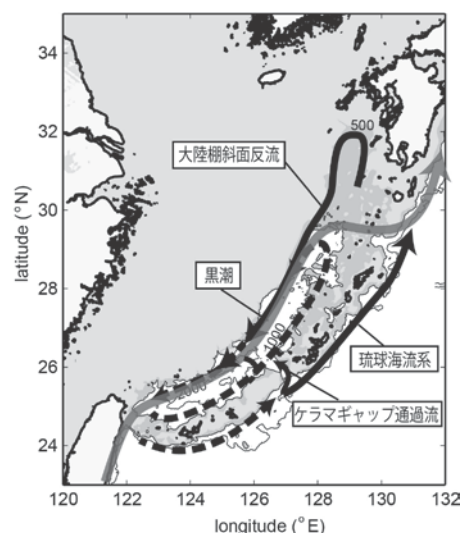


図1. 沖縄トラフの海底地形とこれまでに観測された海流系。灰色線は表層の海流を、黒色線は中深層の海流を示す。破線は、流速計による実測結果ではなく、水塊分析や数値シミュレーション結果より推測した部分を示す。中村など (2012) の図を修正して引用。

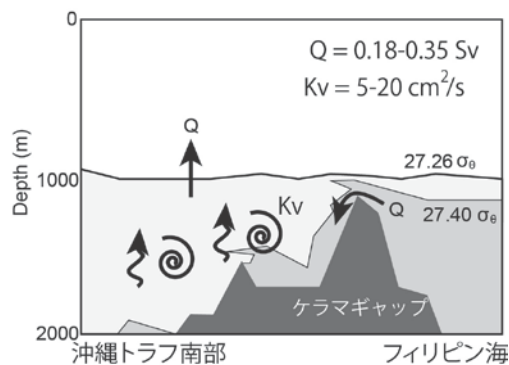


図 2. 沖縄トラフ南部の深層水の形成過程。Q はケラマギャップでの底層通過流の流量，Kv は簡単なボックスモデルで見積もった鉛直拡散係数を示す。Nakamura et al. (2013) の図を修正して引用。

#### 参考文献：

Na, H., M. Wimbush, J.-H. Park, H. Nakamura, and A. Nishina (2014), Observations of flow variability through the Kerama Gap between the East China Sea and the Northwestern Pacific, *J. Geophys. Res.*, 119, 689–703. doi:10.1002/2013JC008899

Liu, Z., H. Na, H. Nakamura, A. Nishina, J.-H. Park, K. Tracey, and M. Wimbush (2012), Kerama Gap 2009–2011 data report, GSO Tech. Rep. 2012–02, Graduate Sch. of Oceanogr., Univ. of R. I., Narragansett.

Nakamura, H., A. Nishina, Z. Liu, F. Tanaka, M. Wimbush and J.-H. Park (2013), Intermediate and Deep Water Formation in the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res.*, 118, 6881–6893. doi:10.1002/2013JC009326

中村啓彦・仁科文子・東政能・内山正樹・幅野明正・市川洋(2012), 沖縄トラフの海水循環の物理プロセス研究, 月刊海洋, Vol. 44, No. 12, 642–647.

Nakamura, H., A. Nishina, H. Ichikawa, M. Nonaka, and H. Sasaki (2008), Deep countercurrent beneath the Kuroshio in the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res.*, 113, C06030, doi:10.1029/2007JC004574.

Nakamura, H., H. Ichikawa, and A. Nishina (2007), Numerical study of the dynamics of the Ryukyu Current system, *J. Geophys. Res.*, 112, C04016, doi:10.1029/2006JC003595.

#### 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 3 件)

1. Na, H., M. Wimbush, J.-H. Park, H. Nakamura, and A. Nishina (2014), Observations of flow variability through the Kerama Gap between the East China Sea and the Northwestern Pacific, *J. Geophys. Res.*, 119, 689–703. (査読有)

2. Nakamura, H., A. Nishina, Z. Liu, F. Tanaka, M. Wimbush and J.-H. Park (2013), Intermediate and Deep Water Formation in the Okinawa Trough, *J. Geophys. Res.*, 118, 6881–6893. (査読有)

3. 中村啓彦・仁科文子・東政能・内山正樹・幅野明正・市川洋(2012), 沖縄トラフの海水循環の物理プロセス研究, 月刊海洋, Vol. 44, No. 12, 642–647. (査読無)

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 仁科文子, 中村啓彦, 朴在勲, 長谷川大介, 日比谷紀之, 田中祐希 (2014 年 3 月 28 日): 沖縄トラフ南部中深層水塊の形成過程, 日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学

2. Nishina, A., H. Nakamura, J.-H. Park, D. Hasegawa, T. Hibiya (2014 年 2 月 26 日): Deep water formation process in the Okinawa Trough, The 2014 Ocean Science Meeting, Honolulu, USA

3. Nakamura, H., A. Nishina, F. Tanaka, Z. Liu, M. Wimbush, and J.-H. Park (2013 年 4 月 22 日): Formation processes of intermediate and deep waters in the Okinawa trough, The 17th PAMS (Pacific-Asian Marginal Seas) Meeting, Hangzhou, China

4. 田中史代, 中村啓彦, 仁科文子 (2013 年 3 月 22 日): フィリピン海から東シナ海へ流入する中層水の移流経路と変質過程, 日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学

5. Liu, Z., H. Nakamura, A. Nishina, J.-H. Park, and, M. Wimbush (2012 年 12 月 4 日): The Influence of Topographic Control on Deep Overflow of the Kerama Gap, the AGU 2012 Fall Meeting, San Francisco, USA

6. Liu, Z., H. Nakamura, A. Nishina, J.-H. Park, and M. Wimbush (2012 年 9 月 14 日): The Influence of Topographic Control on Deep Overflow of the Kerama Gap, 日本海洋学秋季大会, 東海大学/清水校舎

7. 中村啓彦, 仁科文子 (2012 年 8 月 2 日): 沖縄トラフの海洋物理プロセス研究の紹介と将来展開, 東京大学海洋研究所共同利用



研究集会「アルゴ時代の海洋物理船舶観測」,  
東京大学大気海洋研究所/柏キャンパス

8. Nakamura, H., Z. Liu, A. Nishina, M. Wimbush and J.-H. Park (2012 年 2 月 22 日): Deep Overflow Through the Kerama Gap Connecting the East China Sea and the Philippine Sea, The 2012 Ocean Science Meeting, Salt Lake City, Utah, USA

9. 中村啓彦, 劉昭君, 仁科文子, Mark Wimbush, Jae-Hun Park (2011 年 9 月 28 日): ケラマギヤップ通過流の観測, 日本海洋学会秋季大会, 九州大学/筑紫キャンパス

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fish.kagoshima-u.ac.jp/fish/academic/homepage/toppage.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 啓彦 (NAKAMURA HIROHIKO)

鹿児島大学・水産学部・准教授

研究者番号: 50284914

### (2) 研究分担者

仁科 文子 (NISHINA AYAKO)

鹿児島大学・水産学部・助教

研究者番号: 80311885

山城 徹 (YAMASHIERO TORU)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 20158174