

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K06198

研究課題名（和文）日本海表層における懸濁態有機物の炭素・窒素アイソスケープの作成

研究課題名（英文）Isoscape mapping of particulate organic carbon and nitrogen in the Japan Sea

研究代表者

児玉 武稔（Kodama, Taketoshi）

東京大学・大学院農学生命科学研究科（農学部）・准教授

研究者番号：20735899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：助成期間中に1）日本海の懸濁態有機物（POM）の採集とその炭素・窒素同位体比の測定を集中的に行い、それと並行して、2）黒潮域ですでに取得されていたデータの解析、3）日本海での動物プランクトンの10年以上にわたる解析についてもおこなった。1）については、日本海のPOMの安定同位体比は特に窒素で非常に幅を広くとった。培養実験などの理想条件下では報告されている、周辺の硝酸塩濃度との関係性が日本海では認められないことから、様々な窒素源が日本海のPOM形成に関わっていると推定された。2）については、夏季に窒素固定の影響が強いこと、3）については、炭素同位体比が変化していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素・窒素同位体比は生態系の食物網の構造解析や、栄養段階の推定に利用されてきた。日本近海域のうち、大きな面積を占める日本海、黒潮域の生態系の起点となる懸濁態有機物の同位体比の時空間的変動が本研究を通じて初めて明らかになったため、この海域における食物網構造解析に貢献すると考えられる。また、動物プランクトンの長期変動を明らかに、この海域における炭素同位体比が大気中の二酸化炭素濃度の変動の影響を受けている可能性が示されたことから、日本海においても確実に炭素循環が変化し、生物生産に影響を与えていることが明らかになった。以上の結果は、日本海という半閉鎖的な環境の管理に重要な知見を提示できる。

研究成果の概要（英文）：During the grant period, we focused on 1) collecting suspended particulate matter (POM) in the Sea of Japan and measuring its carbon and nitrogen isotope ratios, 2) analyzing data that had already been collected in the Kuroshio region, and 3) analyzing zooplankton in the Sea of Japan for more than 10 years. For 1), the stable isotope ratios of POM in the Sea of Japan, especially nitrogen, varies widely. The relationship between the in-situ nitrate concentration and the isotope ratio of nitrogen has not been observed in the Sea of Japan. This suggests that various nitrogen sources contribute to the production of POM in the Sea of Japan. For 2), we found that nitrogen fixation is highly contributed in the summer. For 3), we found that the carbon isotope ratio is changing as same as the concentration of carbon dioxide in the atmosphere.

研究分野：海洋学

キーワード：日本海 対馬暖流 黒潮 安定同位体比 炭素循環 窒素循環 食物網

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球圏の生態系研究を進める上で、炭素と窒素の安定同位体比を用いた食物網構造解析は一般的な研究手法である。生体内の窒素と炭素の安定同位体比 ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$; $\delta^{15}\text{N}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$; $\delta^{13}\text{C}$) は、栄養段階が1つ上がるたびにそれぞれ 3.3、1.0~1.2‰ ずつ濃縮されていくという経験則があり、研究対象の生物 (動物) の安定同位体比と有機物生産の出発点となる植物のそれを測定することで、動物の栄養段階や食物網構造を定量的に評価できるようになった。

水圏生物の分野でも安定同位体比を用いた研究が、魚などの比較的大きな生物を対象に進み、今尚、最先端の研究で利用されている。例えば、タイヘイヨウクロマグロは生活史の中で北太平洋を東西に渡洋する個体がいることは半世紀前から知られているが、その渡洋する個体の年齢組成などは、太平洋の東西でクロマグロの $\delta^{15}\text{N}$ が異なる (西で低く、東で高い) ことを利用して明らかにされた (Madigan *et al.* 2017, *Science*, 357: 356-357)。日本海においても Tanaka *et al.* (2008) は、カタクチイワシを対象に安定同位体比の測定を行っており、太平洋、東シナ海とともに日本海 (若狭湾) での採集された個体の安定同位体比を測定し、日本海と東シナ海で高い $\delta^{15}\text{N}$ 値となり、海域特性があることを報告している。

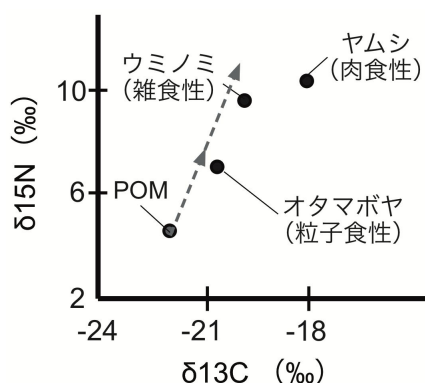


Figure 1 能登半島沿岸域における動物プランクトンおよびPOMの安定同位体測定結果。図中矢印はPOMを出発点とした栄養段階が「1」上がった場合の理論的なプロット位置を示す。

ことが強く示唆される。実際に、分担者である木暮が能登半島沿岸域で日本海の代表的な動物プランクトンおよびPOMの安定同位体比を測定した結果 (Figure 1) を見ると、オタマボヤやウミノミは上記の経験則を基にPOMを出発点とした理論的な食物網の上におおよそプロットされる一方で、ヤムシについては明らかにその食物網から外れた場所にプロットされている。すなわち、測定されたPOMとは異なる安定同位体比のPOMを出発点としている可能性が高く、POMの時空間的変動が強く疑われた。

2. 研究の目的

以上の背景から、本課題は、1) 日本海食物網構造の出発点となる懸濁態有機物 (POM) の窒素・炭素安定同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$) のデータを蓄積すること、2) その変動要因について海洋環境パラメータとの関係を解析し明らかにすること、3) 得られた海洋環境パラメータとの関係から、統計モデルを利用した窒素・炭素安定同位体比の時空間的分布図「アイソスケープ (Isoscape)」を作成すること、を目的として研究を進めた。さらに、研究環境の変化に合わせて、4) 黒潮域のPOMの $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の時空間変動と5) 日本海沿岸域における動物プランクトンの15年にわたる $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の変動について明らかにした。

3. 研究の方法

研究期間中の日本海で実施された21航海でサンプルを収集し $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ を質量分析計 (Isoprime 100, Elementar, Langensfeld, Germany) で測定した。日本海での航海は2月から9月に実施されており、多くの航海で水深10mおよび30mもしくは亜表層クロロフィル極大層 (SCM) で採集した。冬については、混合層が十分に深いため、全てを表層として、春、夏については、10mを表層、30mもしくはSCMを亜表層として、アイソスケープを作成した。同時に、水温、塩分、クロロフィルa濃度、硝酸塩濃度についても測定し、C:N比とともに $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の変動を説明するための説明変数として利用した。一般化線形モデルもしくは一般化加法モデルを構築し、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の変動について統計的に探索した。

4. 研究成果

1) 研究期間中の航海とそれ以前にも収集していた合わせて 516 試料について分析した。一部、C:N 値が明らかに外れていたたり、環境パラメーターが得られていなかったりし、507 試料について、統計解析に回した。以上のデータについては、データベース上におき、公開した (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.949287>)。また、各季節・各層における同位体比の水平分布については以下の Figure 2 のようになった。

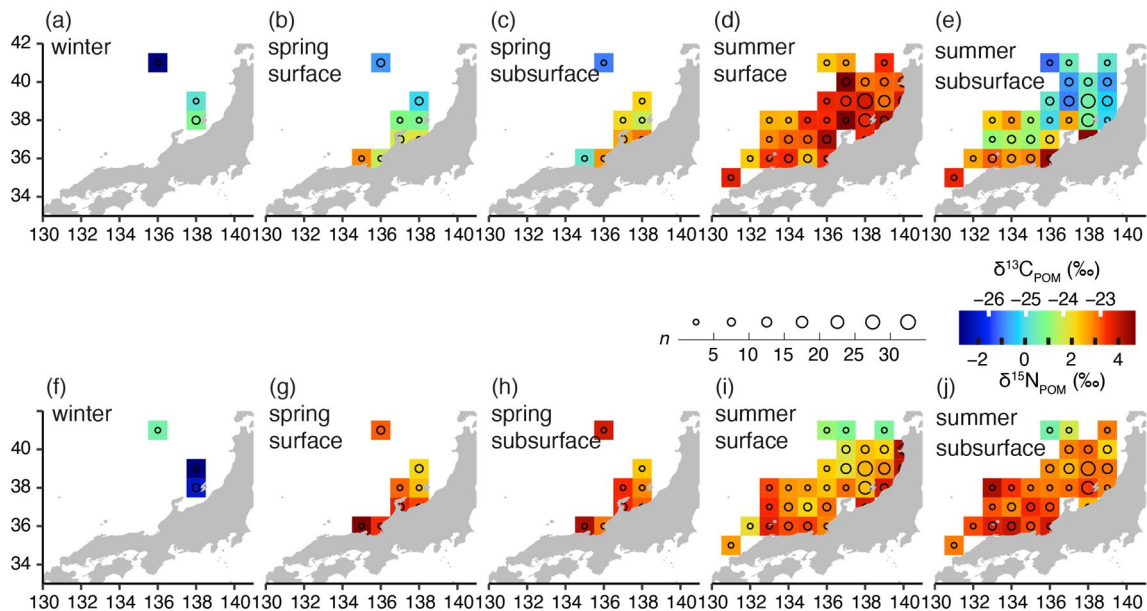


Figure 2 本研究で得られた炭素安定同位体比 (a-e, ^{13}C) および窒素安定同位体比 (f-i, ^{15}N) の季節・水深毎の水平分布。日本海を1度×1度のグリッドに区切り、その中で複数のサンプルが得られている場合は中間値の値を示した。またグリッド内の円の大きさは各グリッドで得られている試料数を示している。

2) 一般化線型モデルを利用した統計学的な環境要因との関係推定を行った。まず、事前に得られた、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ について正規分布をしているか調べたところ、多峰性を示しており、ガウス混合モデルを利用して、いくつかの正規分布を取るようクラスタリングを行った。その結果、4つのクラスターに分かれることが示唆され、I-IV と名付けた。II が最も含まれるサンプル数が多く、それと比較すると I は低 $\delta^{15}\text{N}$ で特徴づけられており、III は低 $\delta^{13}\text{C}$ で、IV は高 $\delta^{13}\text{C}$ で特徴づけられた。I については、冬季にしか観測されず、またほぼ水温-塩分ダイアグラムで見るとほぼ同じ特徴の水塊内にあった。この水塊は既往知見では本州の河川水による影響を受けていると可能性が報告されており、河川水の影響を受けた水塊内では低 $\delta^{15}\text{N}$ になる可能性が示唆された。一方で、他の II-IV については水温・塩分が認められる特徴はなかった。一般化線型モデルの結果から、 $\delta^{13}\text{C}$ は水温、クロロフィル *a* 濃度の上昇とともに高くなり、塩分の上昇、硝酸塩濃度の上昇とともに低下する傾向が認められた。この特徴については、他の海域で報告されている傾向と一致した。一方で、 $\delta^{15}\text{N}$ については、水温上昇、塩分上昇とともに高くなる傾向が認められたが、硝酸塩濃度との関係は赤池の情報基準では選択されなかった。この点については、培養系などでは硝酸塩濃度の低下とともに、 $\delta^{15}\text{N}$ が高まることが報告されており、既往知見と合致しない。現在のところ、日本海には長江希釈水とともに複数の $\delta^{15}\text{N}$ 値を持つ硝酸塩が流入すること、大気からの硝酸塩、アンモニウム塩の沈着があること、窒素固定もそれなりであることが報告されており、これらから形成された POM が複雑に混じり合っているため、硝酸塩濃度との相関関係が見えなくなったと考えている。以上の成果については、現在論文を投稿中であり、プレプリントとして公表している

(<https://essopenarchive.org/doi/full/10.1002/essoar.10512108.1>)

3) 2) の解析から、値が多峰性を示し、かつ、環境要因の説明を加えても多峰性が解消されなかったことから、海洋大循環モデルから得られた水温、塩分や衛星から得られたクロロフィル *a* 濃度からのアイソスケープの作成は困難であると結論づけた。将来的なアイソスケープの作成にはデータの追加だけでなく、各硝酸塩供給源の寄与などを知る必要がある。

4) 追加で進めた黒潮域の POM の $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の時空間変動について、黒潮域では夏季の外側域で $\delta^{15}\text{N}$ の低下が生じることがわかった (Figure 3)。その低下は窒素固定もしくは大気から降下した硝酸塩の寄与と推定された。簡単な仮定のもと計算すると、夏の黒潮外側域

における窒素固定もしくは大気降水物の寄与は 60%と推定され、これは高い窒素固定が報告されているハワイ沖の定点 ALOHA と同程度であった。一方で、他の季節はいずれの海域でも下層から供給されている硝酸塩が大きく寄与しており、年間の生産では下層からの硝酸塩供給が重要であることが示唆された。

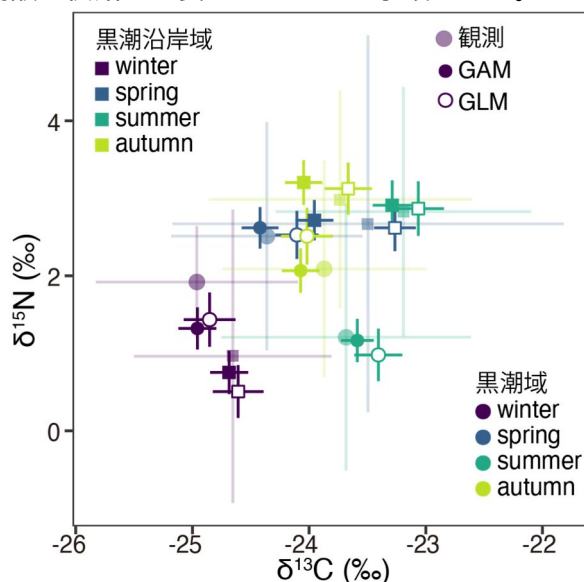


Figure 3 黒潮域におけるPOMの窒素同位体比、炭素安定同位体比の季節的变化。観測値の平均±標準偏差、一般化加法モデル（GAM）による最小二乗平均値±標準誤差と一般化線型モデル（GLM）による最小二乗平均値±標準誤差を示している。

5) 日本海沿岸域における動物プランクトンの 2002 年から 15 年にわたる $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の変動について、日本海沿岸域に春季に卓越し、重要水産資源の餌生物であるカイ足類 *Calanus sinicus* に着目し、分析・解析を行った。3 - 5 月に行われている能登半島周辺でサンプリングされたプランクトンネット試料から対象生物を抜き出し、ステージ、雌雄別に分けた。その結果、まず、成熟個体直前のコペポダイト 5 期で C:N 値が高くなり脂質蓄積が進んでいること、脂質蓄積に応じて $\delta^{13}\text{C}$ が減少することが明らかになった。また、水温の上昇とともに $\delta^{13}\text{C}$ は低下し、クロロフィル *a* 濃度の上昇とともに $\delta^{13}\text{C}$ は上昇した。このような関係について一般化線型モデルを利用してモデル化したのち、予測値との残差と年との関係を見たところ、 $\delta^{13}\text{C}$ の残差については有意な減少が認められた。この減少は $-0.0365\text{‰yr}^{-1} \pm 0.0124\text{‰yr}^{-1}$ であり、Suess 効果や東シナ海—日本海海域における小型浮魚類の筋肉中の $\delta^{13}\text{C}$ の減少と同程度であり、過去 15 年の間であっても十分検出可能な範囲で日本海の炭素循環が変化し、それに伴って生態系内の炭素循環も変化している可能性が示唆された。以上の成果は、論文として公表し、オープンアクセスとなっている (<https://doi.org/10.5194/os-18-295-2022>)。

以上の研究から、日本近海の暖流域における生食食物連鎖の出発点となる懸濁態有機物の安定同位体比の構造が明らかにできた。今後、本研究で得られたデータを元に、高次栄養段階の生物の栄養段階や回遊経路の推定に利用されていくことが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ohshimo Seiji, Kodama Taketoshi, Tawa Atsushi, Tanaka Hiroshige, Tanaka Yosuke, Yasuhara Go, Tokuyasu Michihiro, Minami Yoichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Distribution and geographic differences in stable isotope ratios of diamond squid <i>Thysanoteuthis rhombus</i> (Cephalopoda: Thysanoteuthidae) in Japanese waters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fisheries Oceanography	6. 最初と最後の頁 255 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/fog.12627	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 -
1. 著者名 Kodama Taketoshi, Ohshimo Seiji, Tanaka Hiroshige, Kameda Takahiko, Hiraoka Yuko, Tanaka Yosuke	4. 巻 237
2. 論文標題 Environmental factors controlling zooplankton accumulation in the near-surface layer in the western North Pacific marginal seas	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Marine Systems	6. 最初と最後の頁 103829 ~ 103829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmarsys.2022.103829	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 -
1. 著者名 Ohshimo Seiji, Kodama Taketoshi, Sakamoto Tatsuya, Sakai Takeshi, Saito Mami	4. 巻 55
2. 論文標題 Growth, reproduction, and feeding habits of striped bonito, <i>Sarda orientalis</i> , in the East China Sea	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Regional Studies in Marine Science	6. 最初と最後の頁 102536 ~ 102536
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rsma.2022.102536	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 -
1. 著者名 Nakamura Ken-ichi, Nishimoto Atsushi, Yasui-Tamura Saori, Kogure Yoichi, Nakae Misato, Iguchi Naoki, Morimoto Haruyuki, Kodama Taketoshi	4. 巻 18
2. 論文標題 Carbon and nitrogen dynamics in the coastal Sea of Japan inferred from 15 years of measurements of stable isotope ratios of <i>Calanus sinicus</i>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Science	6. 最初と最後の頁 295 ~ 305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/os-18-295-2022	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 Kodama Taketoshi、Tawa Atsushi、Ishihara Taiki、Tanaka Yosuke	4. 巻 202
2. 論文標題 Similarities of distributions and feeding habits between Bullet tuna, <i>Auxis rochei</i> , and Pacific bluefin tuna, <i>Thunnus orientalis</i> , larvae in the southern Sea of Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102758 ~ 102758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2022.102758	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 -

1. 著者名 Kodama T.、Igeta Y.、Iguchi N.	4. 巻 49
2. 論文標題 Long Term Variation in Mesozooplankton Biomass Caused by Top Down Effects: A Case Study in the Coastal Sea of Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2022GL099037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022gl099037	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 -

1. 著者名 Igeta Yosuke、Sassa Chiyuki、Takahashi Motomitsu、Kuga Mizuki、Kitajima Satoshi、Wagawa Taku、Abe Shoko、Watanabe Chikako、Setou Takashi、Nakamura Hirohiko、Hirose Naoki	4. 巻 32
2. 論文標題 Effect of interannual variations of Kuroshio-Tsushima Warm Current system on the transportation of juvenile Japanese jack mackerel (<i>Trachurus japonicus</i>) to the Pacific coast of Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Fisheries Oceanography	6. 最初と最後の頁 133 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/fog.12622	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 -

1. 著者名 Ohshimo Seiji、Kodama Taketoshi、Yasuda Tohya、Kitajima Satoshi、Tsuji Toshihiro、Kidokoro Hideaki、Tanaka Hiroshige	4. 巻 72
2. 論文標題 Potential fluctuation of 13C and 15N values of small pelagic forage fish in the Sea of Japan and East China Sea	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Marine and Freshwater Research	6. 最初と最後の頁 1811 ~ 1811
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1071/mf20351	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 -

1. 著者名 Igeta Yosuke, Kuga Mizuki, Yankovsky Alexander, Wagawa Taku, Fukudome Ken-ichi, Kaneda Atsushi, Ikeda Satoshi, Tsuji Toshihiro, Hirose Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of a current trapped by a continental slope on the pathway of a coastal current crossing Toyama Trough, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-021-00601-w	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 Kodama Taketoshi, Ohshimo Seiji, Tanaka Hiroshige, Ashida Hiroshi, Kameda Takahiko, Tanabe Toshiyuki, Okazaki Makoto, Ono Tsuneo, Tanaka Yosuke	4. 巻 194
2. 論文標題 Abundance and habitats of marine cladocerans in the Sea of Japan over two decades	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102561 ~ 102561
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2021.102561	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 -

1. 著者名 Kodama Taketoshi, Nishimoto Atsushi, Horii Sachiko, Ito Daiki, Yamaguchi Tamaha, Hidaka Kiyotaka, Setou Takashi, Ono Tsuneo	4. 巻 126
2. 論文標題 Spatial and Seasonal Variations of Stable Isotope Ratios of Particulate Organic Carbon and Nitrogen in the Surface Water of the Kuroshio	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021JC017175	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 -

1. 著者名 児玉武稔	4. 巻 29
2. 論文標題 黒潮・対馬暖流域における栄養塩動態を中心とした低次生態系の解明	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 海の研究	6. 最初と最後の頁 55 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5928/kaiyou.29.2_55	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nagano Akira, Kodama Taketoshi, Ando Kentaro
2. 発表標題 Observations in the Origin Region of the Kuroshio A Pilot Study for Construction of Observation System under CSK-2 Project
3. 学会等名 CSK-2 webinar series (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野 憲、野中 正見、齊藤 宏明、児玉 武稔、安藤 健太郎
2. 発表標題 黒潮と周辺海域の国際観測プロジェクトによるWESTPACへの貢献—CSK-2プロジェクトに向けて—
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020バーチャル大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉武稔、井桁庸介
2. 発表標題 対馬暖流系における動物プランクトン湿重量の長期変動
3. 学会等名 日本海洋学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村 賢一、井口 直樹、森本 晴之、児玉 武稔
2. 発表標題 日本海沿岸域におけるカイアシ類Calanus sinicusの炭素・窒素安定同位体比の時間変動
3. 学会等名 海洋生物シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉武稔
2. 発表標題 黒潮およびその周辺海域の生物生産把握のための観測網-水産研究・教育機構の調査研究紹介
3. 学会等名 今後の黒潮と周辺海域の国際共同観測を考える（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	井桁 庸介 (Igeta Yosuke) (50444138)	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水研機構(新潟)・主幹研究員 (82708)	
研究分担者	木暮 陽一 (Kogure Yoichi) (90371905)	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水研機構(新潟)・主幹研究員 (82708)	

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
---------	---------