

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2012～2016

課題番号：24121007

研究課題名（和文）生元素循環および生態系の長期変動解明

研究課題名（英文）Long-term change study of marine biogeochemical cycle and ecosystems

研究代表者

千葉 早苗（CHIBA, Sanae）

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・主任研究員

研究者番号：40360755

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 52,500,000円

研究成果の概要（和文）：現場観測及び衛星観測データを用いて、北太平洋において海域毎に異なる生物地球化学的、生態学的な特徴を明らかにし、その長期変動メカニズムと気候変化の関係について調べた。得られた知見に基づき 3つの新海洋区系「生元素海洋区系」「クロロフィル海洋区系」「植物プランクトン多様性海洋区系」を提案し、また生態系モデルを用いて温暖化に伴う海洋区系の変化を将来予測した。本研究の結果は、より良い海域保護管理の策定に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：Using ship-based time-series data, satellite observation data, and by ecosystem modelling, we investigated regionally specific spatial and temporal variations of biogeochemical and plankton biodiversity over the North Pacific. Based on the regional differences, we developed three new ocean provinces: “Biogeochemical Provinces”, “Chlorophyll a Provinces” and “Phytoplankton Diversity Provinces”. We particularly focused on the annual variation of boundary areas of each provinces as the regions which are potentially sensitive to environmental variations. Model projection on “Phytoplankton Diversity Provinces” suggested hot spots of biodiversity changes that are potentially induced by global warming in the end of 21st century. We expect that the outcome of this study can suggest better conservation and management options for marine special planning.

研究分野：生物海洋学 プランクトン生態学 気候変動に関する海洋生態系の応答機構研究

キーワード：海洋区系 長期変動 生元素 生態系 温暖化予測 北太平洋

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の長期変動研究により、数年~数十年スケールの気候変化等、共通の外的要因に対する海洋生態系の変動プロセスは海域毎に異なることが明らかになりつつあったが、その違いをもたらす物理・化学・生物学的要因については不明の点が多かった。現在海洋生態系は、温暖化、酸性化、貧酸素化に代表される地球規模の海洋環境変化に人間活動の影響を加えた複合的環境ストレスにさらされている。そうしたストレスに対する生態系の応答を海盆~全球スケールで正しく評価、予測し、水産資源の供給や海洋の温暖化ガス吸収といった生態系サービスの持続的利用を将来にわたり可能にするためには、生態系の変動プロセスやその炭素循環との関わりを、海域ごとに正しく理解する必要があった。

2. 研究の目的

本研究班の目的は、生元素や海洋生物の観測データ及び、衛星観測データを用いて、気候変動に対する応答過程の海域比較や、生態系・物質循環のリンクを研究することにより、海域毎の生物地球化学的、生態学的な特徴を解明し、領域研究課題「新海洋像」の目標である、新海洋区系の提案に寄与することを目的とした。また、気候の周期変動、温暖化、酸性化等の地球規模の環境変化に対し、海洋区毎に異なる長期変動パターン及び変動プロセスを調べ、将来予測するとともに、表層の低次生態系の質的变化(種組成、多様性、食物網構造)と炭素の鉛直輸送等の物質循環プロセスの関係を明らかにすることを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 海洋区の開発と将来予測

2012-2015年度までに、北太平洋を主なターゲットに、「生元素海洋区系」、衛星海色データの季節変動解析により「クロロフィル海洋区系」を、モデルで求めた優占プランクトン種とその制限栄養塩の分布から「植物プランクトンの多様性と制限栄養塩からみた海洋区系(以下「植物プランクトン多様性海洋区系」)を開発、改良や感度実験を行った。

① 生元素海洋区系

2000年代に篤志船舶観測により得た栄養塩と炭酸系観測データの季節変動解析により、生物活動に関係の深い化学成分である主要栄養塩(硝酸、リン酸、ケイ素)と全炭酸(分子状CO₂、炭酸イオン、重炭酸イオンの和)について、表層の時空間分布を高解像度グリッドデータとして算出し、それらの平均的な濃度分布と季節変化に基づき、北太平洋を区分し、各区分の経年変化を調べた。

② クロロフィル海洋区系

NASAが打ち上げたAqua衛星に搭載されている可視・赤外放射計(MODIS)から推定された2003年から2012年までのクロロフィルa(植物プランクトンの指標)データを用い

て、その季節変化に基づき、北太平洋を区分し、各区分の経年変化を調べた。

③ 植物プランクトンの多様性海洋区系

植物プランクトンは分類群により必要とする栄養塩の種類・量に違いがあり、海洋中に存在する各種栄養塩の濃度にも時空間的に大きなばらつきがある。よって、生物の変動と、物理・化学環境の変動の間をつなぐ海域区分として、植物プランクトン多様性と栄養塩制限に注目した海域区分を開発した。

手順として、①海色衛星のアルゴリズムを利用し、各海域で優占する植物プランクトン分類群(サイズ組成)を推定し、②海洋生態系モデルの方程式系から植物プランクトンの分類群ごとに栄養塩制限の時空間分布を推定し、③両者の組み合わせとして、各海域で優占する分類群が、海域毎にどのような栄養塩制限を受けるのかを明示する海洋区分を示した。

さらに、温暖化シナリオに基づくCMIP5(国際的な気候モデルの相互比較プロジェクト)の12のモデルの中央値を用いて、21世紀末の、植物プランクトンの優占分類群の分布および栄養塩分布の変化を求め、両者の組み合わせから、同海洋区系の分布の変化を将来予測した。

(2) 長期変動解析

① 栄養塩長期変動

生元素海洋区系を特徴づける各栄養塩の時空間的長期変動について、海洋区系の作成に用いた2000年以降のデータに、新たに60年代以降の観測データを加えて北太平洋表層栄養塩の長期変動特性を明らかにし、同海域気候場の長期変動に卓越するPDO(Pacific Decadal Oscillation; 北太平洋10年規模変動)等との関連を調べた(使用データ: World Ocean Database 2009, PACIFICA: PACIFIC ocean Interior Carbon 収録データ、国立環境研/カナダ海洋科学研究所/JAMSTECによる観測データ)。

② 生態系長期変動

連続プランクトン採集器(CPR)による北太平洋広域モニタリングで得た、植物/動物プランクトンの種組成データ(2001-2015年)を用いて、PDO等に関連する環境変化に対する表層プランクトン多様性の経年変動について調べた。さらに、植物/動物プランクトン種組成データと、JAMSTECの定点におけるセジメントトラップ観測で得た沈降粒子組成の時系列データを比較することにより、表層のプランクトン多様性が、深海への物質輸送に質的/量的に与える影響評価を試みた。

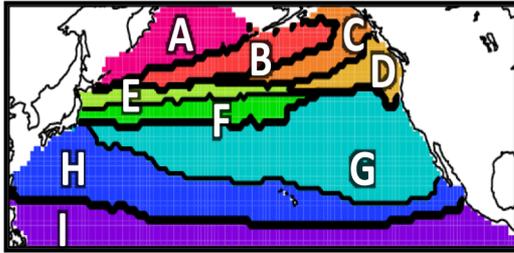
4. 研究成果

(1) 海洋区の開発と将来予測

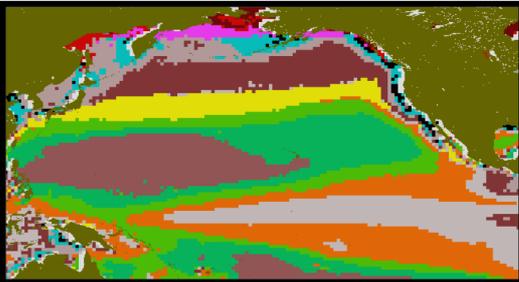
開発した3つの海洋区系を図1に示す。「生元素海洋区系」では、北太平洋を栄養塩や炭酸系の季節変動パターンが異なる9つの区分に分類した。「クロロフィル海洋区系」で

は、植物プランクトンの季節変動パターンの違いにより 18 の区分が得られた。「植物プランクトン多様性海洋区」では、植物プランクトン分類群とその栄養塩制限の組み合わせにより（全球で）23 の区分が得られた。

a) 生元素海洋区系



b) クロロフィル海洋区系



c) 植物プランクトンの多様性と制限栄養塩からみた海洋区系

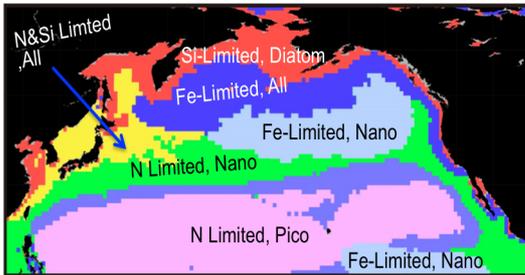


図 1 本研究で開発／提案した 3 つの海洋区系の原型。c) は全球分布を作成したが、ここでは比較のため北太平洋のみを示す。

本課題のアプローチの特徴として、従来の海洋区に代表されるような、固定された境界を設定するのではなく、経年的な気候変化や海洋環境変動に応じて変化する「動的」な境界を持つ海洋区の開発に重点を置いた。「生元素海洋区」と「クロロフィル海洋区」においては、海洋区境界の経年変動が大きい海域を明らかにした（図 2）。年により異なる区に分類される頻度の高い海域は、生元素や生物生産の季節変動パターンが変わりやすい海域を示している。

「植物プランクトン多様性海洋区」の結果は、一見同種のプランクトンが優占しているバックグラウンドの生物地球化学的なメカニズムには海域間で大きな違いがある可能性を示唆した。例えば北太平洋亜寒帯の沿岸域では珪藻類を含むマイクロ植物プランクトンが優占しているが、ベーリング海では窒素とケイ素が成長を制限し、カムチャツカ半島南

岸域では鉄制限が、オホーツク海北部では鉄と窒素の制限が重要であることがわかった。これらの知見は、将来の栄養塩分布が変化した場合の海域の生態系構造の変化を予測する上で有用な情報となる。同海洋区の将来予測実験の結果からは、温暖化により鉄制限の緩和される南大洋や北太平洋亜寒帯域、リン制限となる西部北太平洋亜熱帯域等で植物プランクトンの優占種のシフトに伴い、その機能的多様性が顕著に変化することが示唆された（図 3）。

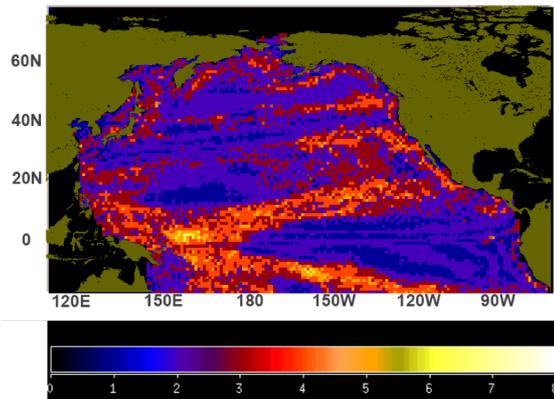
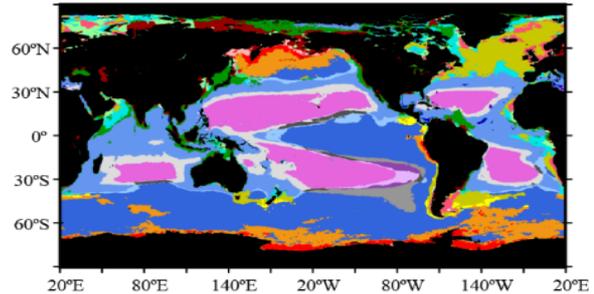


図 2 図 1b のクロロフィル海洋区系において、2003-2012 年の間に異なる海洋区に分類された頻度（カラーバー）を示したマップ。頻度の高い海域は、クロロフィルの季節変動パターンが年により変化しやすい海域である。

(a) Present-day Experiment (Y1998-2007)



(b) Global Warming Experiment (Y2091-2100)

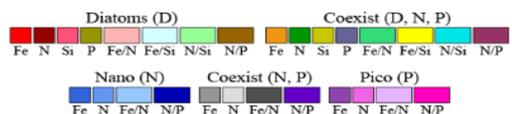
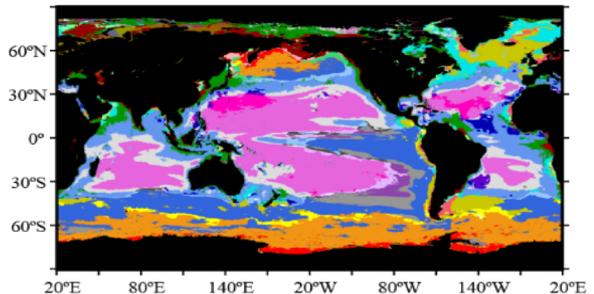


図 3 植物プランクトンの栄養塩制限に基づく海洋区。優占種とその栄養塩制限の組み合わせとして全球を 23 の海洋区として定義。(a) 現在の海洋区（1998 年から 2007 年の平均）(b) 将来の海洋区（2091 年から 2100 年の平均）。

(2) 長期変動解析

① 栄養塩長期変動

表層のリン酸、ケイ酸、硝酸の周期変動とPDOを比較すると、3成分とも同様のパターンを示した。PDOに対する栄養塩濃度の変化は、海面密度や海上風の変化とよく対応しており、PDOに伴う混合層深度や水平移流の変化で、栄養塩濃度が変化したと考えられた。一方、長期変化のトレンドに関しては、鉛直混合の弱化に伴い長期的に減少傾向にある表層リン酸やケイ酸と異なり硝酸には長期変動が認められず、異なる変動メカニズムがあることが示唆され、大気降下窒素が、硝酸塩のみ異なるトレンドを示す要因である可能性が示唆された。また、上記の栄養塩濃度の長期変動特性に伴う生元素海区の境界位置の変化についても調べた結果、PDOが正（アリューシャン低気圧が強い）である年は、亜寒帯東部の海区が西へ変位し、亜熱帯の海区が西部で南下、中部で北上することがわかった。

さらに、亜硝酸とアンモニアの表層広域分布の変動機構を初めて実データを用いて詳細に調べた結果、経年変動の海域特性と、生物活動による短期の生成・消費サイクルとの関連が示唆された。

② 生態系長期変動

動物プランクトン多様性が、PDOに関連する東西北太平洋における水温偏差のシーソーパターンに伴い経年的に変化し、水温とサイズとの関係が西部（暖＝小型種優先、冷＝大型種優先）と東部（冷＝小型種優先、暖＝大型種優先）と逆になることを明らかにした（図4）。一般的には温暖な環境では小型で栄養分の乏しい動物プランクトン種が優先し、海域の高次生産に負の影響を与えることが報告されているが、本研究の結果は温暖化と小型化の関係が必ずしも適応されるわけではなく、海域によりまた種により異なる分布の閾値となる水温を考慮する必要であることを示唆した。PDOに伴う水温や混合層の経年変動が植物／動物プランクトン多様性や季節変動に与える影響を、CPRという標準化した観測／分析手法により得た実データを用いて海盆スケールで明らかにした例は北太平洋では初めてである。

プランクトン多様性変化と物質鉛直輸送の関係に関する研究では、大型植物プランクトン密度とセジメントラップで得た深層の炭素／ケイ素量の経年変化に類似したパターンが見られたものの、両者の関係を明確に示すにはさらなるデータ及び解析が必要であることが示唆された。また、動物プランクトン組成と生物量から、深層に輸送される炭素量を見積りその経年変化について調べた結果、北大西洋亜寒帯域の先行研究と比較して、北太平洋亜寒帯域では、動物プランクトンによる炭素輸送量が約2倍であり、生物ポンプ機能における動物プランクトンの役割が非常に大きいことがわかった。

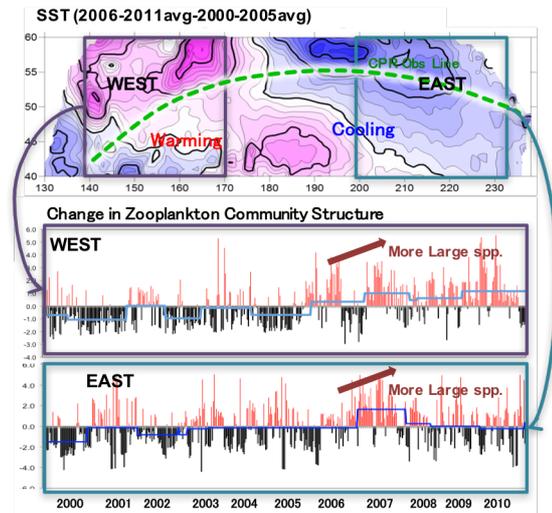


図4 (上) 連続プランクトン採集器 (CPR)。(中) PDOが正の年(2006-2011)と負の年(2000-2005)の水温偏差の分布、緑線はCPRの観測線を、四角は解析に用いたCPRデータの範囲を示す。(下) 東西海域における動物プランクトンサイズ組成の経年変化。東西で水温の変化に対して逆の傾向を示す。

(3) 総括

本課題で採用した「動的」な海洋区を開発することの意義として、境界海域の経年変動が少ない生物地球科学的に「安定した」海域と変動の大きい「不安定な」海域の特定により、外洋における観測海域の設定や頻度を設定する上で有用な情報が提供可能となることがあげられる。また、同様の情報は、生物に対する環境負荷変動の大きさを示すことから生物多様性保護区の設置や、海域管理手法の開発に有用である。

本研究班の成果が示すように、地球環境や生態系変動研究の発展において、長期モニタリングデータは非常に多くの科学的知見の蓄積に貢献しており、その重要性は疑いもない。一方で、多くのモニタリングプロジェクトが資金難のため観測の縮小や中止を余儀なくされている。モニタリングの継続なくしてグローバルデータの蓄積もシェアもありえないのは明らかである。報告書の最後に、本研究の成果を持って、モニタリング観測継続の重要性を社会や政策者にむけてよりアピールすることが将来の地球／生態系変動研究において肝要であると改めて主張する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (27件)

- ① YASUNAKA, S., T. ONO, Y. NOJIRI (他4名) 2016. Long-term variability of surface nutrient concentrations in the North Pacific. *Geophysical Research*.

- Letters*, 43, 3389-3397, doi:10.1002/2016GL068097. (査読有)
- ② XIIONG, X., Y. MASUDA, T. Hashioka, T. Ono and Y. Yamanaka. 2015. Effect of seasonal change in gas transfer coefficient on air-sea CO₂ flux in the western North Pacific, *Journal of Oceanography*, 71, 685-701. doi: 10.1007/s10872-015-0313-5. (査読有)
- ③ CHIBA, S., S. D. BATTEN, T. YOSHIKI, Y. SASAKI, K. SASAOKA, H. SUGISAKI, and T. ICHIKAWA. 2015. Temperature and zooplankton size structure: climate control and basin-scale comparison in the North Pacific. *Ecology and Evolution*. 5(4), 968-978. doi:10.1002/ece3.1408. (査読有)
- ④ YOSHIKI, T., S. CHIBA, H. SUGISAKI, T. ICHIKAWA, and S. BATTEN. Northerly shift of warm-water copepods in the western subarctic North Pacific: Continuous Plankton Recorder samples (2001-2013). *Fisheries Oceanography*. 24(5), 414-429. doi:10.1111/fog.12119. (査読有)
- ⑤ YASUNAKA, S., Y. NOJIRI, S. NAKAOKA, T. ONO, H. MUKAI and N. USUI. 2014. North Pacific Dissolved Inorganic Carbon Variations Related to the Pacific Decadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 41, 1005-1011, doi: 10.1002/2013GL058987. (査読有)
- ⑥ YASUNAKA, S., Y. NOJIRI, S. NAKAOKA, T. ONO, F. A. Whitney, and T. MACIEJ. 2014. Mapping of Sea Surface Nutrients in the North Pacific: Basin-wide Distribution and Seasonal to Interannual Variability. *Journal of Geophysical Research*, 119, 7756-7771. doi:10.1002/2014JC010318. (査読有)
- ⑦ CHIBA, S. and T. ONO. 2014. Long term change in biogeochemical properties and lower trophic level ecosystem in the subarctic western North Pacific, *Coastal Oceanography Research*. 52, 59-65 (in Japanese with English abstract). (査読有)
- ⑧ HIRATA, T., S. SAUX-PICART, T. HASHIOKA (他 5名) 2013. A comparison between phytoplankton community structures derived from a global 3D ecosystem model and satellite observation, *Journal of Marine System*, 109-110, 129-137. doi:10.1016/j.jmarsys.2012.01.009. (査読有)
- ⑨ YASUNAKA, S., Y. NOJIRI, S. NAKAOKA, T. ONO, H. MUKAI and N. USUI. 2013. Monthly maps of Sea Surface Dissolved Inorganic Carbon in the North Pacific: Basin-wide Distribution and Seasonal Variation. *Journal of Geophysical Research*, 118, 3843-3850, doi: 10.1002/jgrc.20279. (査読有)
- ⑩ YOSHIKI, T., S. CHIBA, H. SUGISAKI, K. SASAOKA, T. ONO and S. BATTEN. 2013. Interannual variations and regional differences in the developmental timing of mesozooplankton in the western North Pacific Ocean based on Continuous Plankton Recorder data from 2001 to 2009. *Journal of Plankton Research*, 35, 993-1008. doi:10.1093/plankt/fbt047. (査読有)
- ⑪ BUITENHUIS, E., T. HASHIOKA and C. LE QUÉRÉ. 2013. Combined constraints on global ocean primary production using observations and models, *Global Biogeochemical Cycles*. 27 (3), 847-858, doi:10.1002/gbc.20074. (査読有)
- ⑫ CHIBA, S. (他 6名) 2013. Large-scale climate control of zooplankton transport and biogeography in the Kuroshio-Oyashio Extension region. *Geophysical Research Letters*. 40, 5182-5187 doi:10.1002/grl.50999. (査読有)
- ⑬ HASHIOKA, T. (他 11名) 2013. Phytoplankton competition during the spring bloom in four plankton functional type models, *Biogeosciences*, 10, 6833-6850. doi:10.5194/bg-10-6833-2013. (査読有)
- ⑭ CHIBA, S., S. BATTEN, K. SASAOKA, Y. SASAI, AND H. SUGISAKI. 2012. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on phytoplankton phenology and community structure in the western North Pacific based on satellite observation and the Continuous Plankton Recorder survey for 2001-2009. *Geophysical Research Letters*. 39, L15603, doi:10.1029/2012GL052912. (査読有)
- [学会発表] (計 59件)
- ① YASUNAKA, S. Surface nutrients in the North Pacific from ship-of-opportunity observations, Station Papa 60th Anniversary Symposium, Sidney, Canada. 2016年11月30日. 基調講演
- ② CHIBA, S. Discovery of the new through scrutiny of the old: Odate Collection and future of zooplankton monitoring in the global observation initiatives. 6th International Zooplankton Production Symposium. Bergen, Norway. 2016年5月9日. 基調講演

- ③ CHIBA, S., Timing is everything? - Climate control on the North Pacific ecosystem phenology. Effects of Climate Change on the World' s Ocean, Santos City, Brazil, 2015年3月23日. 招待講演
- ④ CHIBA, S., Contrast of the lower trophic level responses to climatic forcing over the eastern and western North Pacific. PICES 2012 Annual Meeting, 広島国際会議場、広島県広島市. 2012年10月12日. 招待講演

[図書] (計4件)

- ① CHIBA, S. 2014. 6.2 Climate influence on the lower trophic level marine ecosystem, In *Introductory of Fisheries Oceanography, Sustainable Use of Fisheries Resources* (Wada T. et al. eds.) pp. 319, Kodansha Scientific, Tokyo. ISBN978-4-06-153738-5.
- ② CHIBA, S. 2013. Basic knowledge on marine ecosystem, In *Illustrated Guide of Global Environment* (M. Yoshizaki et al. eds.) pp.400, Asakura Shoten, Tokyo, ISBN 978-4-254-16059-8.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 早苗 (CHIBA, Sanae)
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・主任研究員
研究者番号：40360755

(2) 研究分担者

虎谷 充浩 (TORATANI, Mitsuhiro)
東海大学・工学部・教授
研究者番号：90246075

小埜 恒夫 (ONO, Tsuneo)
国立研究開発法人水産総合研究センター・中央水産研究所・研究室長
研究者番号：40371786

安中 さやか (YASUNAKA, Sayaka)
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：80620393

橋岡 豪人 (HASHIOKA, Taketo)
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：00463092

(3) 連携研究者

本多 牧生 (HONDA, Makio)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・上席技術研究員
研究者番号：20359160

(4) 研究協力者

野尻 幸宏 (NOJIRI, Yukihiro)
市川 忠史 (ICHIKAWA, Tadafumi)
中岡 慎一郎 (NAKAOKA, Shinichiro)
吉木 朝子 (YOSHIKI, Tomoko)