

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2013

課題番号：21241012

研究課題名(和文) 連続プランクトン観測システムによる地球規模環境変動の海洋生態系への影響評価

研究課題名(英文) Study on marine ecosystem responses to global environmental variation using the continuous plankton monitoring system

研究代表者

千葉 早苗 (CHIBA, Sanae)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー

研究者番号：40360755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円、(間接経費) 10,680,000円

研究成果の概要(和文)：国際協力に基づき、北太平洋亜寒帯域において連続プランクトン採集器(CPR)による広域観測を実施し、2001-2014年のプランクトンの種組成データセットを作成した。データに基づき植物/動物プランクトン群集構造の時空間変動メカニズムを調べた結果、北太平洋十年規模変動と関連する水温や鉛直混合といった海洋の物理環境の変化が、植物プランクトンのブルームのタイミングや動物プランクトンのサイズ組成の経年的変動に影響を与える過程が明らかになった。また、国際CPR観測ネットワーク(GACS)の設立に貢献し、その活動を通じて、大西洋や南極海の生態系変動と比較研究する事により、研究を地球規模に展開した。

研究成果の概要(英文)：Through International collaboration, we conducted ecosystem monitoring over subarctic North Pacific using Continuous Plankton Recorder (CPR) and archived plankton data set for 2001-2014. We studied the link between North Pacific Decadal Oscillation (PDO) and spatio-temporal variation of the lower trophic level ecosystem. Our analysis on plankton community structure revealed the mechanism how PDO-related seasonal and/or interannual variations in physical environments, such as sea temperature and vertical water mixing, significantly influenced timing of phytoplankton seasonality and size structure of zooplankton community. We also contributed to the establishment of Global Alliance of CPR Survey (GACS), which are operating CPR survey in various areas including North Atlantic, Southern Ocean, etc. Through the activities of GACS, we expanded the CPR network world wide to enable us to conduct global comparison of long-term marine ecosystem change.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境影響評価・環境政策

キーワード：CPR 北太平洋 動物プランクトン 広域モニタリング 長期変動 生態系変動

1. 研究開始当初の背景

(1) 西部北太平洋生態系の長期変動研究

研究代表者の千葉は、1960年以降の物理、化学、生物データを用いて西部北太平洋生態系の長期変動研究に取り組んできた。その結果、北太平洋十年変動や温暖化傾向と関連のある低次生態系の生産力低下や、分布の変化、生産タイミングのずれを見いだした。また、国際海洋研究科学委員会 (SCOR) 等の活動を通じてそうした過去の変動パターンの海域比較研究を実施してきたことから、地球規模生態系変動研究における、海洋生態系モニタリングの継続と国際協力の重要性について訴えてきた。一方、日本では蓄積された生物サンプルを迅速にかつ継続的にデータ化するシステムが確立しておらず、上記の国際的動向にどう対応するかが懸念されていた。

(2) 北太平洋 CPR プロジェクト

英国ハーディ研究所は 1950 年代より連続プランクトン採集器 (Continuous Plankton Recorder: CPR) を用いて北大西洋における広域モニタリングを続けてきた。その結果、北大西洋振動や温暖化といった気候変動の影響と見られる低次生態系の量的/質的变化を検知し、2007 年の IPCC 第 4 次報告書においても大きく貢献した。同研究所は 2000 年より、PICES (北太平洋海洋科学機構) MONITOR 委員会の推奨を得て、カナダ海洋漁業省との協力のもと北太平洋横断 CPR プロジェクトを開始し、東部北太平洋に関しては 2000-2007 年のデータに基づき生態系の経年変動についてすでに成果を発表している。しかし、資金及び人材の不足から、これまで採集した西部北太平洋のサンプル分析は手つかずの状態になっており、同プロジェクトにおける西側カウンターパートとしての日本側研究者の積極的な参入が待たれていた。

以上(1)(2)の背景より、日本側研究チームが北太平洋 CPR プロジェクトに参入して西部北太平洋の解析を行うことは、日本周辺海域の生態系変動評価に資するのみならず、地球規模の環境/生態系変動メカニズムの理解およびその将来予測に取り組む国際コミュニティにとって大きな貢献となると考え、本課題の申請に至った。

2. 研究の目的

(1) 北太平洋における海洋生態系の気候変動への応答評価

本研究では、国際協力に基づき北太平洋におけるプランクトン広域連続観測により得た 2001~2013 年にわたるデータを用いて、プランクトン群集構造の時空間変動パターンを明らかにすることにより、経年的気候変化が北太平洋の海洋環境及び海洋生態系に与える影響を評価することを目的として実施した。特に共通の気候のフォーシングに対する海域毎に異なる生態系の応答過程に着目した。

北太平洋にはアリューシャン低気圧の強

弱と関連のある水温や風力の十年規模変動があり、その変化は太平洋十年変動指標 (PDO) で表される。十年以上の長周期変動に加え PDO は数年規模でも変動し、とくに 2000 年以降の経年的変化は顕著である。よって、本研究では、動物プランクトン群集構造の時空間変動パターンを生物多様性、生産タイミング、生物地理分布の変化等に注目して多角的に明らかにし、衛星データ及び海洋環境モニタリングデータとあわせて解析することにより、PDO に駆動される気候—海洋環境—低次生態系の変動リンクを明らかにすることを目指した。

(2) 国際 CPR 観測ネットワークの展開

近年、海洋生態系の変動を取り扱う IGBP/GLOBEC 等の国際共同研究計画では、各海域において蓄積した成果を集めて再解析し、大洋~地球規模の変動の実態とメカニズムを統合的に理解しようという動向がある。CPR データは北大西洋において 70 年の蓄積がある他、南大洋でもオーストラリア南極局の主導で 30 年あまり CPR 観測が継続している。よって本共同研究により北太平洋 CPR プロジェクトの推進が実現すれば、他海域との比較研究を通じて、気候のテレコネクションに対するよりシステムチックな大洋~全球スケールの生態系応答機構が明らかになると期待できる。

そこで、本研究では CPR というローテク/ローコストな手法を用いた効率的な次世代生態系観測システムの構築に資することにより、全球観測システムの発展にあたりネックとなっている海洋生態系モニタリングのあり方に関して新たな視点を提供することを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 研究基盤の立ち上げ

本研究では、英国ハーディ研究所が実施している北太平洋横断 CPR 観測で採集した西部北太平洋プランクトンサンプルを分析/変動解析し、東部北太平洋、さらには他海域の CPR 観測研究の結果を比較する計画であった。異なる海域で得たデータの比較を可能にするためには、ハーディ研が定めたプロトコルに厳密に従って分析/解析を進める必要がある。よって、研究開始とともに、まずハーディ研究所代表者等が現地滞り、CPR 観測/研究に係る一連のプロトコルを習得し、また共同研究の取り決めを交わし、取得データの取扱いについて合意を得た。

(参考) CPR 観測とは (図 1)

船尾より毎時十数ノットの速度で水面下 5~10 m を曳航しつつ、入水口から入ってきた動物プランクトンを指定距離毎 (1 サンプルユニット=18.5 km) に区切られたシルクメッシュ上に挿んで捕獲する仕組みになっている。メッシュ上のサンプルは曳航中に自動的に巻き取られ機械内部でホルマリン保存

される。一度のセッティングで約 800 km の連続曳航が可能である。高速で長距離の連続曳航が可能なることから、多くは貨物船やフェリー等定期航路を走るボランティア船に搭載およびオペレーションを依頼して観測している。

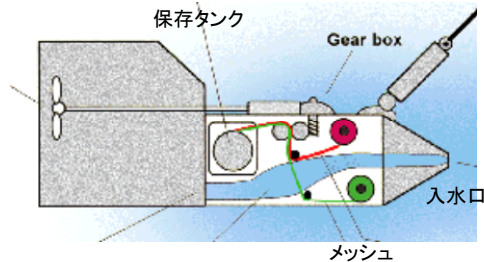


図1 CPRの構造概略

(2) 分析／解析

本課題に先立ち、北太平洋 CPR プロジェクトに基づき、2000～2008 年までに年 3 回（主として 4 月、6 月、10 月）に北太平洋の CPR 横断観測がボランティア船により実施されてきている（図 2）。そこで、これまでに採集されハーディ研究所が保管しているサンプルのうち西部北太平洋海域のもの（東経 170 度以西を目安とする）最大約 1000 点を選定し、CPR 顕微鏡を用いて分析し、植物プランクトン及び動物プランクトンの種組成データセットを作成した。また、研究開始後 2009～2013 年度に新たに採集したサンプルについても順次分析を進め（毎年約 160 点）、研究終了までに 14 年間のデータセットを得た。

それらのデータセットを用いて、まずは解析が遅れている日本周辺海域である西部北太平洋における、植物／動物プランクトンの群集構造変動解析を主成分分析等により行い、ブルームタイミングのずれといった生物季節的変化、生物地理分布の変化（例：暖水種と冷水種の分布の変化）、多様性の変化を調べた。また、プランクトンの変動要因を調べるため、2000 年以降に諸環境モニタリングプログラムで得られた物理、化学データ及び、衛星観測による表面水温、クロロフィルデータの季節／経年変動パターンと比較した。

西部北太平洋の変動パターンを明らかにした上で、すでに解析の進んでいる東部及び中央部北太平洋の結果と比較する事により、PDO に関連した気候のフォーシングに対する海域毎に異なる低次生態系の応答メカニズムを調べ、海盆スケールの気候—海洋—生態系変動のリンクを明らかにした。

4. 研究成果

(1) 植物プランクトンの生物季節的変化

CPR 観測で得た植物プランクトン群集組成のデータ、衛星クロロフィルデータと表面水温 (SST) データを用いて親潮域における 2001～2009 年の植物プランクトンの経年変動を調べた結果、PDO に関連する寒暖の経年的変化が、春季ブルームのタイミングや群集構造

に影響する過程が明らかになった。

植物プランクトンの春季ブルームのタイミングは、2～8 月の衛星クロロフィルの値を日々積算し、8 月 31 日の値を 100% とし、40% に達する日にちをブルームピークの指標として求めた。ブルームのタイミングは、寒冷年に遅れ、温暖年には早期化しており、その差は最大一ヶ月以上になった。親潮域では、PDO が正の年は寒冷年、負の年には温暖年になることから、寒冷（温暖）年には冬季鉛直混合が深く（浅く）、光合成に適した光条件になるのが遅く（早く）なることが示唆された（図 2）。

また、群集組成の変化からは、夏季の珪藻にたいする渦鞭毛藻の割合が、PDO と類似した経年変動パターンを示した。しかし、この結果からは、5～7 月にかけての、水温上昇の度合いが夏季の群集組成を決定することが解った。すなわち、水温の季節変化から示唆される混合層深度の季節変化が急激な（緩やかな）年には、珪藻の優先度が低下（上昇）することが分かった。

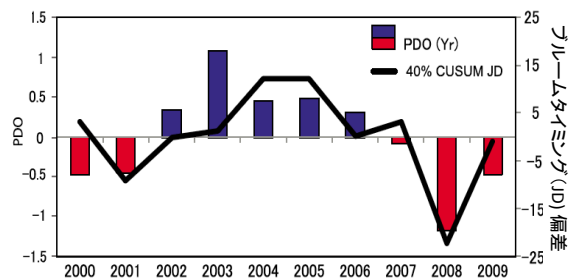


図2 春季ブルームのタイミング (Julian Day) と PDO (上)

(2) 動物プランクトンの生物地理分布

CPR 観測で得た 2001～2010 年の動物プランクトンの種組成データに基づき、西部北太平洋亜寒帯域における暖水性種と冷水性種の分布や種の多様性の経年変動を調べ、PDO と関連する水温偏差の影響を明らかにした。冷水性種は暖水性種と比較して大型で脂肪が豊富であり、サンマやイワシ、サケ等の有用水産魚種の重要な餌資源となる。よって、その変動要因を調べる事は、水産資源の持続的利用の上で重要である。

解析の結果、PDO が顕著に正から負に反転する 2006 年以降、海域の温暖化傾向に伴い暖水性種が増加していることが分かった。暖水性種の分布は、2006 年以前は調査海域中低緯度（北緯 44 度以南）に限られていたが、2006 年以降は、北緯 50 度まで分布が北上していた（図 3）。2006 年以降暖水性種の分布の拡大に伴い、調査海域全域の種の多様性 (Shannon Index H') も上昇した。一方で、冷水性の個体群密度も、2006 年以降顕著に増加しており、暖水種と冷水種の共存が多様性上昇の要因であることが分かった。PDO は冬季の鉛直混合の指標となるのみならず、黒潮統流軸の緯度方向の経年変化とも関連があり、

PDO が負の年には黒潮続流軸は北上することが報告されている。よって、本研究で見いだされた暖水種の分布の北方への拡大は、黒潮続流軸の北上にともなう移流の影響が大きいと考えられた。

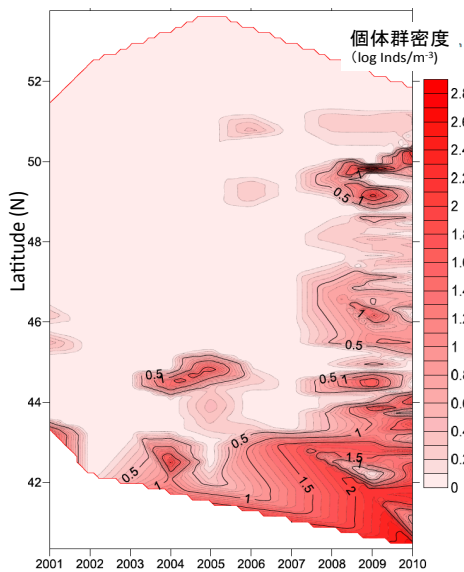


図3 暖水性種の個体群密度の経年変化

(3) 東西北太平洋における動物プランクトン多様性変動機構の海域比較

東西北太平洋亜寒帯域における動物プランクトンの中で最優先するカイアシ類のサイズ組成や経年変動と PDO との関係と比較研究した結果、従来の報告と異なる水温とサイズ組成の関係を見いだした。この結果は、温暖化の海洋生態系への影響を地球規模で見積もる上で重要となる。

PDO と関連した水温偏差は、東西で逆になることが知られており、2006 年以降の PDO が負に転ずると西部は温暖傾向、東部は寒冷傾向となった。一方カイアシ類のサイズ組成は東西どちらの海域においても 2006 年以降大型化の傾向を示し、つまり水温とサイズの関係が逆であることが分かった (図4)。

過去の長期変動研究の多くが、海域の温暖化により、動物プランクトン群集は小型化することを報告しており、西側で観察された結果は、温暖化=大型化という従来の説に反するものであった。その要因を調べるため、大型種の出現表面水温の範囲を調べると約9度が分布の上限であることが分かった。9°C の等温線の位置の変化を東西で比較してみると、2006 年以降寒冷化した東部では、9°C の境界が南東方向にはりだしているのに対し、西部では温暖化してはいるものの、9°C の等温線は 2006 年以前と殆ど変わらなかった。つまり、東部では PDO に関連した水温変化により、サイズの大きい冷水種と小さい温暖種の優占度が変わることにより、サイズ組成が変化することが考えられたが、一方西部においては、2006 年以降の温暖化は、冷水種の

生息に適した範囲内で起こったため、それらの種の成長/生産に有利な環境をもたらしたサイズ組成が大きくなったことが考えられた。

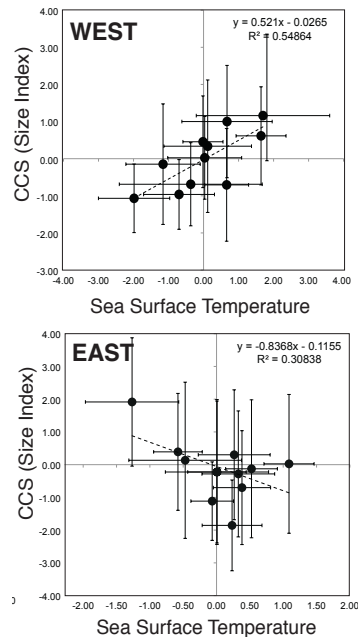


図4 動物プランクトンのサイズ組成指標 (CCS) と表面水温の関係
上図：西部北太平洋 下図：東部北太平洋

(4) 国際的展開

2011 年にハーディ研究所の主導で、CPR 観測研究を実施している、日本を含む 8 カ国 (後に 9 カ国) の研究所/研究者により、CPR を用いて海洋生態系変動研究を地球規模に展開するための国際ネットワーク、Global Alliance of CPR Survey (GACS)が発足した。当研究課題では、GACS の活動を通じて、CPR 観測データから生態系変動指標 (例：カイアシ類サイズインデックス、珪藻—渦鞭毛藻比率等) を設定し、生態系変動の海域比較研究を実施した。その成果を、Global Ecosystem Status Report Vol. 1 として出版した他、UNESCO の政府間海洋科学委員会 (IOC) 等が主導する海洋環境アセスメントに関するプロジェクト (Transboundary Water Assessment Program, TWAP) に情報を提供した。GACS 及び CPR 観測研究は、全球海洋観測システム (GOOS) 科学委員会の推奨プロジェクトであり、今後の CPR 観測網の充実が期待されている。

(5) 今後の展望

今日の地球環境変動研究の分野では、全球的観測システムの構築により、物理・化学データと同時に生物データの蓄積が求められている。しかし、フロートによる自動観測を全球的に展開し大量データの取得と迅速な解析が可能になった物理過程と異なり、生物過程はその複雑さのため同様の手法による全球観測が技術的、コスト的に困難である。

そのような状況において、ローテクで篤志

船舶により広域観測が可能である CPR 観測への期待は大きく、近い将来設立が予定されている GOOS の生物/生態学部会、Bio/Eco-GOOS のパイロット観測プロジェクトの一つになる見込みである。今後は、ハイテク自動観測装置を用いた定点観測、衛星観測と組み合わせる CPR による広域モニタリングを実施することにより、効率的な次世代生態系観測システムの構築が可能になると期待できる。

本研究課題は5年間で終了したが、日本のみならず世界の海洋科学コミュニティに貢献するため、今後も西部北太平洋において CPR 観測研究を継続する方策を立てる必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 34 件うち主要 7 件)

- ① Chiba S, Di Lorenzo E, Davis A, et. al, Large-scale climate control of zooplankton transport and biogeography in the Kuroshio-Oyashio Extension region, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 40 巻, 2013, 5182-5187
doi:10.1002/grl.50999.
- ② Yatsu A, Chiba S, Yamanaka Y, Ito S, Shimizu Y, Kaeriyama M, Watanabe Y, Climate forcing and the Kuroshio/Oyashio ecosystem, *ICES Journal of Marine Science*, 査読有, 70 巻, 2013, 922-933, doi:10.1093/icesjms/fst084.
- ③ T. M. Yoshiki, S. Chiba, H. Sugisaki, et. al, Interannual and regional variations in abundance patterns and developmental timing in mesozooplankton of the western North Pacific Ocean based on Continuous Plankton Recorder during 2001-2009, *Journal of Plankton Research*, 査読有, 35 巻, 2013, 993-1008, doi:10.1093/plankt/fbt047
- ④ S. Chiba, 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*, 査読有, 39 巻, 2012, L15603, doi:10.1029/2012GL052912
- ⑤ S. Chiba, Pan-North Pacific comparison of long-term variation of Neocalanus copepods based on stable isotope analysis, *Progress in Oceanography*, 査読有, 2011, doi:10.1016/j.pocean.2011.11.007
- ⑥ K. Sasaoka, Climatic forcing and phytoplankton phenology over the subarctic North Pacific from 1998 to 2006, as observed from ocean color data, *Geophysical Research Letters*, 査読有, 38 巻, 2011, 1-6, doi:10.1029/2011GL048299
- ⑦ S. Chiba, Pan-North Pacific comparison of long-term variation of Neocalanus copepods based on stable isotope analysis, *Progress in Oceanography*, 査読有, 2011, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079661111100125X>

[学会発表] (計 58 件うち主要 17 件)

- ① Sanae Chiba, Climate driven variation in the basin scale zooplankton community structure in the North Pacific, *PICES 2013 Annual Meeting*, 2013. 10. 15, Vancouver Island Conference Centre, Nanaimo, Canada
- ② Tomoko. M. Yoshiki, Geographical shift of warm water species distribution in western subarctic North Pacific based on CPR sample during 2001-2010, *PICES 2012 Annual Meeting*, 2013. 10. 11-20, Vancouver Island Conference Centre, Nanaimo, Canada
- ③ Sanae Chiba, Contrast of the lower trophic level responses to climatic forcing over the eastern and western North Pacific, *PICES 2012 Annual Meeting (招待講演)*, 2012. 10. 12, International Conference, Hiroshima, Japan
- ④ Sanae Chiba, Lower trophic level linkage and cool-warm cycle based on the North Pacific CPR survey 2001-2009: An implication for the future warming ocean, *Effects of Climate Change on the World's Oceans*, 2012. 5. 15, Yeosu Ocean Expo, Yeosu, Korea
- ⑤ Tsunee Ono, Relating long-term nutrient trends to North Pacific subsurface oxygen declines, *Ocean Science Meeting 2012*, 2012. 2. 21, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, 米国
- ⑥ Kosei Sasaoka, Climatic forcing and phytoplankton phenology over the subarctic North Pacific from 1998 to 2006, as observed from ocean color data, *2012 Ocean Sciences Meeting*, 2012. 2. 20, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, 米国
- ⑦ Sanae Chiba, Trophic link between Neocalanus copepods and pink salmon in the western subarctic North Pacific based on long-term nitrogen stable isotope analysis, *NPAFC International Workshop on Explanations for the High Abundance of Pink and Chum Salmon and Future Trends (招待講演)*, 2011. 10. 31,

- Vancouver Island Conference Center,
Nanaimo, Canada
- ⑧ T. M. Yoshiki, Interannual variability of zooplankton community structure based on Continuous Plankton Recorder in the western subarctic North Pacific during 2001-2009, PICES 2011 Annual Meeting, 2011. 10. 20, Official Reception House, Khabarovsk, Russia
- ⑨ Sanae Chiba, Phytoplankton phenology and community changes in the western subarctic North Pacific 2000-2009 based on the satellite and CPR observation, PICES 2011 Annual Meeting, 2011. 10. 17, Official Reception House, Khabarovsk, Russia
- ⑩ Hiroya Sugisaki, Long term monitoring of zooplankton collected around Japan, Plankton 2011, 2011. 9. 20, Guildhall, Plymouth, 英国
- ⑪ Sanae Chiba, PDO and Lower trophic level phenology in the western subarctic North Pacific during 2001-2009, Plankton 2011, 2011. 9. 19, Guildhall, Plymouth, 英国
- ⑫ Sanae Chiba, Changes in community structure, trophic link and phenology in lower trophic level ecosystem in the western subarctic North Pacific during 2001-2009, 5th International Zooplankton Production Symposium, 2011. 3. 19, Gran Hotel Pucon, Pucon, Chile
- ⑬ Hiroya Sugisaki, Long-term variation of plankton community of Kuroshio warm current area, the spawning ground of Japanese sardine, 5th International Zooplankton Production Symposium, 2011. 3. 18, Gran Hotel Pucon, Pucon, Chile
- ⑭ Sanae Chiba, An overview of ecosystem state variability in the subarctic North Pacific- east-west synchrony and contrast (招待講演), PICES 2010 Annual Meeting, 2010. 10. 29, Oregon Convention Center, Portland, 米国
- ⑮ Hiroya Sugisaki, Interdisciplinary monitoring for the ecosystem of Kuroshio warm current area in relation to climate change, International Symposium on Climate Change Effects on Fish and Fisheries, 2010. 4. 27, 仙台国際センター, 仙台市
- ⑯ Tsuneo Ono, Ecosystem responses to ocean stratification and early-bloom occurrence in the future western subarctic North Pacific: A speculation from retrospective analyses, International Symposium on Climate Change Effects on Fish and Fisheries, 2010. 4. 27, 仙台国際センター, 仙台市

- ⑰ Sanae Chiba, Bottom-up control of multi-decadal variation of the western North Pacific ecosystem revealed by stable isotope ratio analysis, PICES 17th Annual Symposium, 2009. 10. 28, Center, Jeju, Korea

[図書] (計8件うち主要5件)

- ① 杉崎 宏哉, 講談社, 気候変動と生物資源変動 In 水産海洋学会編水産海洋学入門-海洋生物資源の持続的用, 2014, pp. 165-170
- ② Chiba S, Kodansya Scientific, 6. 2 Climate influence on the lower trophic level marine ecosystem, In Introductory of Fisheries Oceanography, Sustainable Use of Fisheries Resources, 2014, p. 319
- ③ 笹岡 晃征 他, 朝倉書店, 第6章生態系 6. 16 海洋と陸域の生態系の生産力, 図説地球環境の辞典, 野田彰, 吉崎正憲編, 2013, p. 378
- ④ Chiba S, Asakura Shoten, Basic knowledge on marine ecosystem, In Illustrated Guide of Global Environment, 2013, p. 400
- ⑤ Sanae Chiba (他23名), PICES, Victoria, Canada, Marine Ecosystems of the North Pacific, 2003-2008, PICES Special Publication No. 4, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 早苗 (CHIBA, Sanae)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー
研究者番号: 4 0 3 6 0 7 5 5

(2) 研究分担者

市川 忠史 (ICHIKAWA, Tadafumi)
独立行政法人水産総合研究センター・中央水産研究所・グループ長
研究者番号: 5 0 3 7 1 8 8 6

(3) 連携研究者

杉崎 宏哉 (SUGISAKI, Hiroya)
独立行政法人水産総合研究センター・研究推進部・研究開発コーディネーター
研究者番号: 5 0 3 7 1 7 9 5

笹岡 晃征 (SASAOKA, Kousei)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究技術専任スタッフ
研究者番号: 2 0 3 7 1 1 4 8

小埜 恒夫 (ONO, Tsuneo)
独立行政法人水産総合研究センター・中央水産研究所・グループ長
研究者番号: 4 0 3 7 1 7 8 6