

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K00533

研究課題名(和文)北極海の海水減少による海洋環境、プランクトン変動の実態解明

研究課題名(英文)Decadal changes in ocean climate and zooplankton biomass associated with recent sea ice reduction in the Arctic Ocean

研究代表者

伊東 素代 (ITO, Motoyo)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(北極環境変動総合研究センター)・副主任研究員

研究者番号：60373453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：北極海では地球温暖化で急激な海水減少が進行しているが、海洋生態系への影響は未解明である。本研究では、多氷年(2000-03年)と、少氷年(2010-13年)に得られた、バロー海底谷の係留式音響流向流速計のデータから、動物プランクトン量の10年規模変動の解析を行った。その結果、動物プランクトン量は、この10年で1.6倍に増加し、植物プランクトンへの摂餌圧も増加し、有機物のほとんどが底生生物に供給される生態系(pelagic-benthic coupling)から、動物プランクトンによる有機物の消費が卓越する生態系(pelagic-pelagic coupling)への移行が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で示された動物プランクトン量の増加は摂餌圧の変化を通して、海洋生態系の食物連鎖網に影響を与える。動物プランクトンは、太平洋側北極海の主要な魚類である北極タラ、サケの餌となるため、漁業資源の変動にも影響する可能性がある。バロー海底谷で観測された、動物プランクトン量の増加、植物プランクトンへの摂餌圧の増加、底生生物への有機物供給量の減少は、海水減少が発端となって起こっている。そのため、今後も更なる海水減少が予測される北極海での食物連鎖網の変化の端緒を捉えた可能性がある。

研究成果の概要(英文)：Sea ice cover is rapidly declining due to global warming in the Arctic Ocean. However, their influences on marine ecosystems remain unclear because few studies have conducted long-term ecological monitoring at decadal time scales. Mooring-based acoustic backscattering data collected during periods of both high (2000-03) and low sea ice coverage (2010-13) in Barrow Canyon, are used to show that the annual mean zooplankton biomass increased 1.6 fold between the two periods. Our calculations suggest that this biomass change would have increased the grazing pressure by zooplankton, which, in turn, decreased the supply of sinking carbon to benthic organisms during summer, even though phytoplankton production would have increased. Thus, the Chukchi Sea ecosystem is now shifting away from a pelagic-benthic coupled ecosystem towards one that is pelagic-dominated, in which the primary production is not directly connected to the benthic carbon cycle due to increased pelagic zooplankton grazing.

研究分野：極域海洋学

キーワード：北極海 海洋物理 海洋生態 環境変動

### 1. 研究開始当初の背景

北極海では、地球温暖化の影響で、夏季の海氷減少が顕著になっており、2007 年以降はかつての 5 - 7 割まで海氷面積が減り、今世紀半ばには、夏季の海氷域が消滅すると予測されている。海氷減少が特に著しい北極海の太平洋側海域(太平洋側北極海)では、開水期が過去 30 年で、年間 30-60 日も増加している。そのため、海洋の光環境の変化、水温上昇、融氷水による表層低塩分(成層度の強化)、酸性化の加速が起こり、北極海の海洋環境は大きく変わりつつある。この変化は、海洋生態系へも大きな影響を与えると予想されるが、海氷減少が急激に進んだ最近 10 - 15 年の変動を解明できる継続的な生物調査はほとんど無く、影響は未解明である。

### 2. 研究の目的

本研究は、海氷減少が最も顕著な北極海の太平洋側海域で、環境変化が海洋生態系の底辺を担う動物、植物プランクトンに与える影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、時系列係留系で取得したデータを用い、(1)10 - 15 年規模の動物プランクトン量の変動を復元し、環境変化との因果関係を解明する。(2)動物プランクトンの餌となる植物プランクトン量の季節変動を定量的に評価し、少氷年の動物プランクトン増殖のメカニズムを解明する。最終的には、今後も進行する地球温暖化に対して、水産資源の餌となるプランクトンがどう応答するのか、将来予測に資する基礎情報を得ることを目指すものである。

従来、ベーリング海北部と太平洋側北極海では、動物プランクトンや魚類は少なく、植物プランクトンの死骸の多くは海底に沈み底生生物の餌となるため、底生生物が多い海域と考えられてきた(benthic-pelagic coupling)。一方、ベーリング海南部は、動物プランクトンや魚類が多く、底層生物が少ない、異なる食物連鎖網が卓越している(pelagic-pelagic coupling)。しかし近年、ベーリング海北部では、海氷減少の影響で、魚類の増加、底生生物の減少など、南方型の食物連鎖網への移行が観測されている。動物プランクトン量の変動は摂餌圧の変化を通して、海洋生態系の食物連鎖網に影響を与える可能性がある。

### 3. 研究の方法

船舶によるネット調査等の動物プランクトン観測は、年によって海域、時期、手法が異なることが多く、長期変動が解析可能な時系列情報は世界的にも少ない。特に、北極海では海氷、気象状況の厳しさから、海氷減少の進行前の 2000 年初頭までのデータが非常に少なく、その長期変動は未解明である。本研究では、太平洋側北極海のバロー海底谷(図 1)で 2000 年から継続している時系列係留系による音響式流向流速計のデータを用いて、動物プランクトン量の 10-15 年規模の長期時系列データを復元する。更に、係留系、船舶、人工衛星による海洋環境データの解析で、動物プランクトン、海洋環境の変化の実態を把握し、その因果関係を明らかにする。また、従来の係留系観測に加えて、2016 年からクロロフィルの時系列観測を実施し、植物プランクトン量の変動も同時に観測することで、捕食者である動物プランクトンへの影響を調べる。

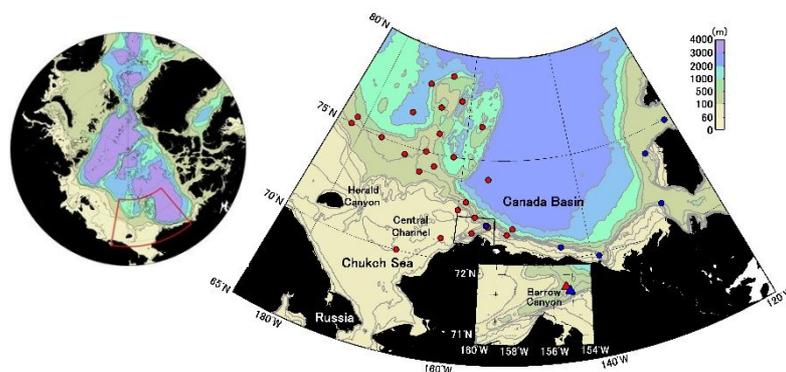


図1 北極海の海底地形図。赤と青の丸印は、2010年、2011年の船舶によるプランクトンネットと ADCP 観測点。赤と青の三角印は、バロー海底谷の係留観測点。

### 4. 研究成果

#### (1) 音響式流向流速計データを用いた動物プランクトン量の定量化

Deines(1999)は音響式流向流速計(Acoustic Doppler Current Profiler; ADCP)から、動物プランクトンバイオマス(動物プランクトン量)の情報が抽出できることを示し、この手法は世界の海洋で用いられつつある。しかし本研究の対象海域である太平洋側北極海での研究例は無かった。そこで、太平洋側北極海バロー海底谷に係留した音響式流向流速計 WorkHorse 300kHz ADCP で得られたエコー強度から、音響散乱強度(SV)を算出し、その短周期変動を調べたところ、動物プランクトンの日周鉛直移動による変動が見られた(図 2)。

更に、太平洋側北極海の広域で、プランクトンネットを用いて採取した動物プランクトン量と、同時に実施した ADCP の SV 値の比較を行ったところ、有意な正の相関が見られた(図 3)。これらの結果は、太平洋側北極海においても、SV の変動を決める主要因は動物プランクトン量であり、図 3 に示した近似式を用いて、ADCP 音響データから動物プランクトン量の推定が可能であることを示唆している。

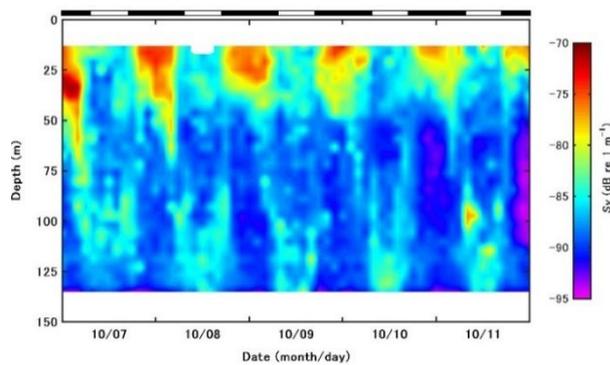


図2 2010年10月7日-11日のパロー海底谷における ADCP による音響散乱強度(SV)。上部の白と黒の棒は、夜間と日中の時間帯。

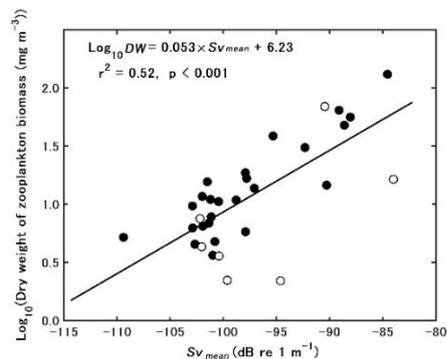


図3 2010年、2011年に、船舶で実施した ADCP の音響散乱強度(SV)とプランクトンネットによる動物プランクトン量の比較。図中に SV から動物プランクトン量を推定する近似式を示す。

## (2) 海水減少に伴う10年規模の動物プランクトン量の増加

本研究で導出した動物プランクトン量の近似式(図3)を用いて、太平洋側北極海パロー海底谷に2000-2003年と2010-2013年に係留した ADCP データから、動物プランクトン量の季節、経年変動を復元した。ここでは、10年規模変動に注目するため、多氷年(2000-2003年)と少氷年(2010-2013年)のコンポジットを作成して、解析を行った。図4aから、2000年代から2010年代に、年平均の動物プランクトン量は1.6倍に増加したことが示された。動物プランクトン量は、冬季も含めて一年を通して2010年代の方が高い。また、2010年代は2000年代に比べると、春先の動物プランクトン量増加のタイミングが早まり、夏季のピークも1ヵ月早くなっている。

一般的には、動物プランクトンの成長や再生産は、水温と餌環境が主要な決定要因である。そこで次に、海洋環境や餌環境の変動の対応を調べるため、海水密度、海面水温(SST)、基礎生産量との比較を行った。図4b、4cに示したように、SSTは7-10月には、海水減少と日射吸収の増加で、2000年代から2010年代に0.5-1.8°Cの上昇が見られた。また、夏季の海水融解促進と冬季の結氷遅延によって、2010年代は2000年代に比べると、海水が完全に融解する開水期間が30日程度増加している。夏季のSST増加と、開水期間が増えて、より多くの日射が入るようになった効果で、基礎生産量は1.4倍に増加している(図4d)。また、2010年代は2000年代に比べると基礎生産量のピークが1ヵ月早い点も動物プランクトン量のピークが早まったことと整合的である。

Hirst et al, (2003)の動物プランクトン成長モデルを元に、観測されたSST増加から見積もられた2000年代から2010年代の動物プランクトンの成長速度の増加は5.1-23.0%であった。また、観測された基礎生産量の増加は、動物プランクトンの餌環境の改善をもたらす。SST増加も基礎生産量の増加も海水減少に起因しており、このことから2010年代に進行した海水減少が、動物プランクトン量の増加の原因であることが示唆された。

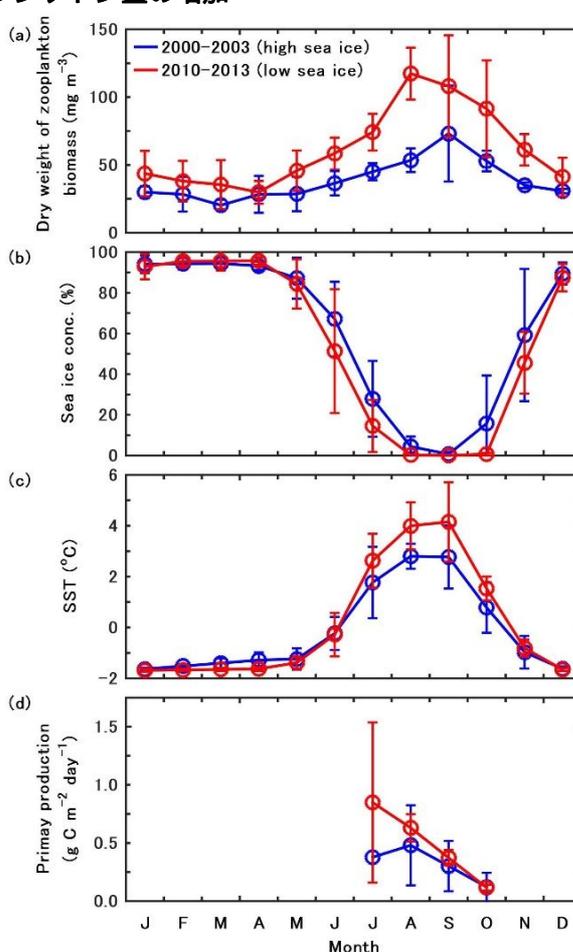


図4 パロー海底谷における動物プランクトン量、海洋環境、餌環境の10年規模変動。青は2000-2003年、赤は2010-2013年の3年平均で、それぞれ多氷期、少氷期に当たる。(a)ADCPから推定した動物プランクトン量、人工衛星による(b)海水密度、(c)海面水温(SST)、(d)基礎生産量。

### (3) 動物プランクトン増加による海洋生態系の変化

本研究で示された動物プランクトン量の増加は摂餌圧の変化を通して、海洋生態系食物連鎖網に影響を与える可能性がある。そこで、音響データから算出した動物プランクトン量から、理論計算した餌要求量と基礎生産量の差から摂餌圧の見積もりを行ったところ、2000年代から2010年代に、7-10月の摂餌圧が増加したことが示唆された。また、この摂餌圧の増加が原因で、基礎生産量の増加にも関わらず、POC(粒子態炭素)フラックスが減少していることも示唆された(図5)。係留系観測はバロー海底谷のみであるが、海水面積の減少、SST上昇、基礎生産量の増加は、チャクチ海広域で観測されているため、動物プランクトンやPOCフラックスの変動も、チャクチ海の広範囲で起こっていることが予想される。動物プランクトンは、太平洋側北極海の主要な魚類である北極タラ、サケの餌となるため、2000年代から2010年代への動物プランクトン量の増加、摂餌圧の増加、POCフラックスの減少は、食物連鎖網の変化の端緒である可能性がある。

この結果を模式的に示したのが図6である。2000年代は、開水期間が短く、低水温で、基礎生産量も少なかった。しかし、動物プランクトン量も少なく、摂餌圧も低かったため、結果としてPOCフラックスは大きく、有機物のほとんどが水柱中で消費されずに沈降して底生生物に供給される生態系システム(pelagic-benthic coupling)であった(図6a)。それに対して、2010年代は、開水期間が長く、高水温で、基礎生産量が増加したが、動物プランクトン量も増加し、摂餌圧も上がったため、結果としてPOCフラックスが小さくなり、動物プランクトンによる有機物の消費が卓越する生態系システム(pelagic-pelagic coupling)(図6b)への移行が示唆された。これらの研究成果は英文論文として投稿中である。

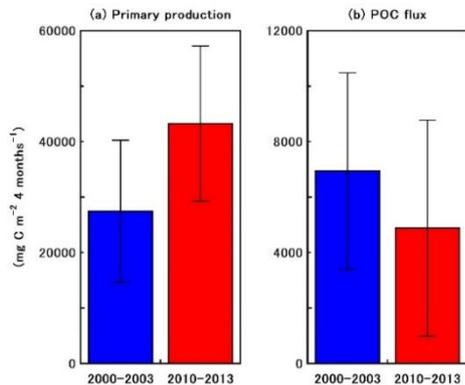


図5 バロー海底谷における開水期間の基礎生産量とPOC(粒子態炭素)フラックスの10年規模変動。青は2000-2003年、赤は2010-2013年の3年平均で、夏季(7-10月)の平均。

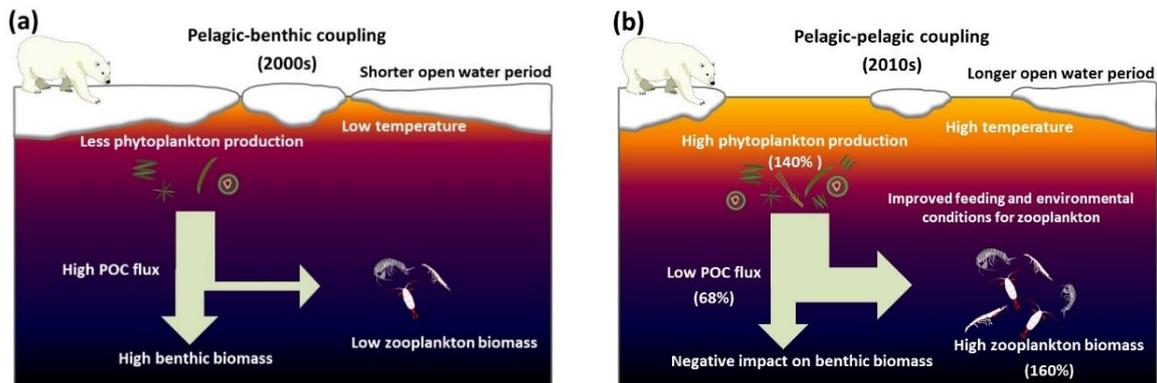


図6 バロー海底谷で観測された(a)2000年代の生態系システム(Pelagic-benthic coupling)と(b)2010年代の生態系システム(pelagic-pelagic coupling)の模式図。数字は、基礎生産量、動物プランクトン量、POC(粒子態炭素)フラックスの2000年代から2010年代への変化。

### (4) 近年のバロー海底谷の植物、動物プランクトンの変動

本研究計画の期間中には、動物、植物プランクトンの変動の関係を調べるために、新たに ADCP とクロロフィル計の通年の同時係留観測をバロー海底谷で実施した。この観測データから、植物プランクトンの増殖は夏季の表層水温上昇の直前から始まり、動物プランクトン量の増加もほぼ同時期に開始していること、夏季の動物プランクトン量のピークは表層水温のピークとほぼ同期していることが示された。この観測は2018年以降も継続しており、これらのデータについては、今後更なる解析を進める。

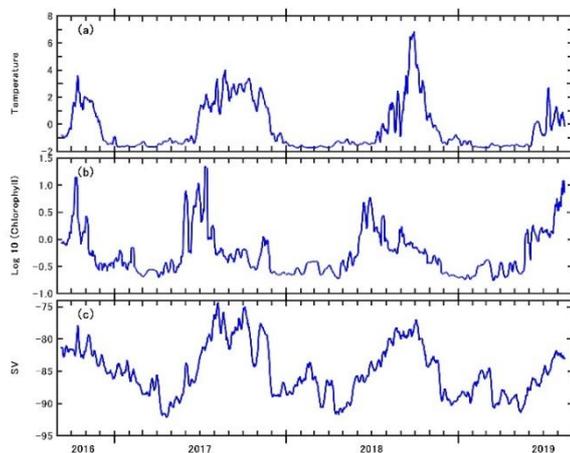


図7 バロー海底谷で2016年-2019年に観測した表層30mの(a)水温、(b)クロロフィル値(mg/m<sup>3</sup>)、(c)動物プランクトン量の指標である音響散乱強度SV。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 Itoh, M., M. Kitamura, A. Fujiwara, E. Carmack, K. Amakasu, K. Ara, M. Uchimiya, T. Hirawake, J. Onodera, S. Nishino, T. Kikuchi
2. 発表標題 Increasing zooplankton biomass associated with sea ice loss in the western Arctic Ocean
3. 学会等名 Alaska Marine Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itoh, M., T. Kikuchi, S. Nishino
2. 発表標題 Long term variability of Barrow Canyon fluxes and its impact on subsurface warming in the western Arctic Ocean
3. 学会等名 Sixth International Symposium on the Arctic Research (ISAR-6) Online Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimura, S., J. Onodera, M. Itoh, T. Kikuchi, S. Nishino, Y. Kawaguchi, E. Watanabe, N. Harada
2. 発表標題 The warming of the Chukchi slope through the Barrow Canyon outflow in the 2016-2017 winter
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Itoh, M., M. Kitamura, A. Fujiwara, E. Carmack, K. Amakasu, K. Ara, M. Uchimiya, T. Hirawake, J. Onodera, S. Nishino, T. Kikuchi
2. 発表標題 Increasing zooplankton biomass associated with sea ice loss in the western Arctic Ocean
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Itoh, M., T. Kikuchi, S. Nishino
2. 発表標題 Long term variability of Barrow Canyon fluxes and its impact on sub surface warming in the Canada Basin
3. 学会等名 17th ASOF- ISSG Meeting and Workshop ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Itoh, M.
2. 発表標題 Brief update of recent activities and results for DBO: Japan DBO results
3. 学会等名 Pacific Arctic Group 2018 Fall meeting ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Itoh, M., Y. Fukamachi, N. Kimura, R.A. Krishfield, T. Kikuchi, E. Moriya, J. Onodera, N. Harada
2. 発表標題 Sea-ice thickness from moored ice-profiling sonar in the Canada Basin, Arctic Ocean
3. 学会等名 Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5) ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Itoh, T. Kikuchi, S. Nishino
2. 発表標題 Interannual variabilities of Pacific Water inflow into the Arctic basin via Barrow Canyon
3. 学会等名 Arctic Science Summit Week 2017 ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Itoh, Y. Fulamachi, N. Kimura, R.A. Krishfield, T. Kikuchi, E. Moriya, J. Onodera, N. Harada
2. 発表標題 Sea-ice thickness from moored ice-profiling sonar in the Canada Basin, Arctic Ocean
3. 学会等名 Arctic Change 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊東素代, 菊地隆, 西野茂人
2. 発表標題 バロー-海底谷における太平洋水のフラックスと北極海の温暖化への影響
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊東素代, 深町康, 木村詞明, R.A. Krishfield, 菊地隆, 守家衣利加, 小野寺丈尚太郎, 原田尚美
2. 発表標題 係留系観測による北極海カナダ海盆の海水厚の季節変動
3. 学会等名 日本海洋学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Itoh, M., T. Kikuchi, S. Nishino
2. 発表標題 Interannual variabilities of Pacific Water inflow into the Arctic basin via Barrow Canyon
3. 学会等名 Alaska Marine Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Itoh, M., T. Kikuchi, Y. Fukamachi, R. Pickart
2. 発表標題 Interannual variabilities of fluxes in Barrow Canyon from 2010-2014 : results from the
3. 学会等名 2016 Pacific Arctic Group Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2016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
連携研究者	喜多村 稔  (Kitamura Minoru)  (00392952)	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・技術研究員   (82706)	
連携研究者	渡邊 英嗣  (Wanabe Eiji)  (50722550)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター・研究員   (82706)	

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		
カナダ	Institute of Ocean Science		
米国	Woods Hole Oceanographic Institution	NOAA	