

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：62611

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14894

研究課題名（和文）海氷タイプに着目した植物プランクトン増殖過程の変化：これまでとこれからの北極海

研究課題名（英文）Evaluation of phytoplankton bloom dynamics focused on sea-ice types

研究代表者

和賀 久朋（Waga, Hisatomo）

国立極地研究所・国際極域・地球環境研究推進センター・特任助教

研究者番号：30869805

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年の北極海では、海氷融解から数週間後に発生する開放水面ブルームが頻繁に観測されており、氷縁ブルームから開放水面ブルームへと移行している可能性が示されている。本研究は、海底堆積物を含む海氷「Dirty Ice」と含まない海氷「Clear Ice」を区別することに初めて着目し、Dirty IceとClear Iceがそれぞれ開放水面ブルームと氷縁ブルームを促すことを示した。以上の結果は、本研究は北極海をはじめとする海氷域における植物プランクトン、ひいてはそれを基盤とする海洋生態系の研究において、海氷タイプに着目した取り組みの重要性を提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷縁ブルームから開放水面ブルームへの移行を正しく評価するためには、氷縁ブルーム・開放水面ブルーム発生プロセスを理解することが不可欠である。本研究は、Dirty IceとClear Iceを区別し、それぞれの海氷が植物プランクトンの増殖過程に及ぼす影響に初めて着目する先駆的な取り組みである。さらに、植物プランクトンの増殖過程に対してDirty IceとClear Iceが異なる影響を及ぼすことが明らかとなったことで、単に海氷として扱うのではなく、Dirty IceとClear Iceを区別することの重要性を新たに提示した。

研究成果の概要（英文）：Typical phytoplankton bloom type in the Arctic has been characterized as a single bloom associated with sea-ice retreat along the ice edge (ice-edge bloom). However, recent studies have identified potential increment of phytoplankton blooms in open water (open-water bloom). This study focused on sediment-laden sea ice and sediment-free clean ice and their influences on phytoplankton bloom types in the Arctic. Our results indicate that sediment-laden ice and clean ice foster development of ice-edge bloom and open-water blooms, respectively. These findings clearly demonstrated that sea-ice type (e.g., sediment-laden or sediment-free sea ice) could be an important factor for diverse studies in the Arctic, particularly research on phytoplankton communities and, therefore, marine ecosystems where phytoplankton play an important role as a primary producer.

研究分野：衛星海洋学

キーワード：植物プランクトン 北極海 海氷

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

季節的に海氷に閉ざされる北極海において、海氷の融解は海中への光透過量の増大を促す。加えて、海氷の融解水は豊富な栄養素を含むため、光・栄養素が潤沢な海氷融解直後の海氷縁で植物プランクトンが活発に増殖する(氷縁ブルーム)。海氷融解直後は海水温が低いため、動物プランクトンの活性が低い。そのため、氷縁ブルームで増殖した植物プランクトンの大部分は動物プランクトンに捕食されずに海底に沈降し、世界でも有数の豊かな生物生産性を誇る北極海の生態系を支えている。

近年、北極海で卓越する植物プランクトンの増殖過程が、氷縁ブルームから開放水面ブルームに移行している可能性が示されている。日射を遮る海氷が消失した開放水面では、時間とともに海水温が上昇する。そのため、海氷融解から数週間後の温かい環境で発生する開放水面ブルームでは、大部分の植物プランクトンが活発化した動物プランクトンに捕食され、海底に沈降する植物プランクトンは氷縁ブルームよりも著しく減少する。つまり、氷縁ブルームから開放水面ブルームへの移行は、海底に沈降する植物プランクトン量を激減させ、それを基盤とする北極海の生態系に大きな影響を及ぼすと予想される。しかしながら、北極海における開放水面ブルームは、最近まで観測されていなかった現象であり、その発生プロセスは良く分かっていない。

Dirty Ice の融解水は濁度が高く、海中への光透過を妨げる。そのため、Clear Ice が放出する低濁度の融解水とは性質が異なる。植物プランクトンは光制限環境では光合成が行えず、栄養素が豊富でも増殖できない。したがって、高濁度な融解水を放出する Dirty Ice は氷縁ブルームを阻害し、Dirty Ice 融解水が海水と混ざり濁度が下がるにつれて開放水面ブルームが発生すると予測される。Dirty Ice が北極海の高氷全体に占める割合は経年的に増加しているため、北極海の植物プランクトン増殖過程に対する Dirty Ice の影響を評価することの重要性は年々高まっている。

2. 研究の目的

異なる性質を持つ海氷である Dirty Ice と Clear Ice を区別して取り扱うことで北極海の植物プランクトンブルーム発生プロセスに対する理解を深め、現在および今後の北極海における氷縁ブルームから開放水面ブルームへの移行を正確に評価・予測することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) Dirty Ice および Clear Ice 分布のモニタリング

上空から海氷域を視視した場合、海氷面は白く、水面は黒く見える。これは、海氷面の太陽光反射率(アルベド)が水面よりも大きいためである。春季の海氷融解は数日で著しく進行するため、衛星を用いたモニタリングが有効である。衛星が観測する地表面反射光(R)は、各表面の割合(F)と各表面のアルベド(r)の積の合計値である。つまり、各表面のアルベドと衛星が観測する地表面反射光から、各表面の割合を推定できる。この手法は、雪氷学分野で広く用いられている。本研究では、衛星光学センサー-MODIS が観測した地表面反射光および放射伝達モデルで再現した各表面のアルベドを用いて各表面の割合を推定し、Dirty Ice と Clear Ice 分布を把握する。

(2) 植物プランクトンブルームタイプのモニタリング

植物プランクトンバイオマスは数日間で大幅に増減するため、広範囲を毎日繰り返し観測する衛星を用いたモニタリングが有効である。そこで、衛星光学センサー-MODIS が観測した植物プランクトンバイオマスの指標(クロロフィル a)に対してガウス関数を当てはめ、植物プランクトンブルームの規模や期間、発生日を推定する。さらに、衛星マイクロ波センサー-AMSR2 を用いて推定した海氷融解日と、植物プランクトンブルーム発生日を比較し、植物プランクトンブルームのタイプを同定する。

(3) 海氷タイプと植物プランクトンブルーム形態の評価

Dirty Ice と Clear Ice の割合が異なる複数の検証海域を設定し、各検証海域で卓越する植物プランクトンブルームのタイプを同定する。Dirty Ice および Clear Ice が植物プランクトンブルームに与える影響の違いを調べることで、氷縁ブルームから開放水面ブルームへの移行に対する海氷タイプの影響を評価する。

4. 研究成果

放射伝達モデルを用いて、Dirty Iceをはじめとする様々な海氷タイプのアルベドスペクトルを算出した。海氷面のアルベドスペクトルは、[その海氷面を占める各海氷タイプの比率] × [それぞれのアルベドスペクトル]を積算したものであるため、各海氷タイプのアルベドスペクトルと海氷面のアルベドスペクトルから各海氷タイプの比率を推定できる。この関係式に基づき、本研究では、衛星光学センサーMODISが観測したアルベドスペクトルから各海氷タイプの比率を推定する手法を構築した。この手法を用いて、日平均・500mの解像度で2000年から現在までの20年以上の長期間をカバーする大規模なデータセットを構築した。

上記の海氷タイプデータセットに加えて、同じく衛星光学センサーMODISを用いた北極海全域の植物プランクトンバイオマスのデータセットも構築した。さらに、2021年に国際学術誌PLoS ONEに発表した手法を用いて、植物プランクトンバイオマスの時系列から春季・秋季ブルームの有無とそれらの規模・期間・時期をガウス関数に基づいて推定した。なお、使用した植物プランクトンバイオマス推定アルゴリズムは、複数の観測航海で取得した合計249観測点のデータセットを用いて、北極海で最も精度が高いものを選出した。また、海氷に由来するエラー(adjacency effectとsub-pixel contamination)を最小限に抑えるために衛星マイクロ波センサーAMSR2の海氷密接度を参照し、海氷密接度20%を基準にマスク処理を施した。

これまでの研究期間中に構築した衛星リモートセンシングデータ(sediment-laden iceおよび植物プランクトンバイオマス)に基づき、海氷タイプ(sediment-laden ice or sediment-free clean ice)が植物プランクトンの増殖過程に与える影響を評価した。まず、sediment-laden iceが卓越する海域で顕著に高い植物プランクトンバイオマスが観測された。一方で、sediment-free clean iceは外洋域に広く分布しており、それらの海域では植物プランクトンバイオマスは一様に低い傾向にあった。これらの傾向は衛星リモートセンシングがカバーする春から秋にかけて共通しており、海氷タイプと植物プランクトン群集に密接な関係があることが示唆された。また、ガウス関数を用いた植物プランクトンバイオマス時系列変化のモデリングによって統計的に導かれた植物プランクトンブルームの主な特徴は、sediment-laden iceが卓越する海域ほどブルームの規模が大きく、かつ長期間にわたって継続する傾向が捉えられた。海氷融解後のブルーム形態は、sediment-laden iceが分布する海域で開放水面ブルーム、clean iceが分布する海域で氷縁ブルームがそれぞれ卓越する傾向にあり、ブルーム形態の移行に関して海氷タイプが大きく影響することが明らかとなった。

以上の結果は、北極海をはじめとする海氷域における植物プランクトン、ひいてはそれを基盤とする海洋生態系の研究において、海氷タイプに着目した取り組みの重要性を提示した。加えて、sediment-laden iceの面積は研究対象期間(2003年から2022年)を通して有意に増加しており、sediment-laden iceに着目した研究は益々重要な課題となっていくことが予想される。これらの成果は複数の国際学会で報告されており、近日中に査読付き国際ジャーナルに投稿する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Futsuki Ryosuke, Hirawake Toru, Fujiwara Amane, Waga Hisatomo, Kikuchi Takashi, Nishino Shigeto, Isada Tomonori, Suzuki Koji, Watanabe Yutaka W.	4. 巻 78
2. 論文標題 Performance of primary production algorithm using absorption coefficient of phytoplankton in the Pacific Arctic	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 311 ~ 335
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-022-00646-5	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 Park Jung-Woo, Kim Yejin, Kim Kwan-Woo, Fujiwara Amane, Waga Hisatomo, Kang Jae Joong, Lee Sang-Heon, Yang Eun-Jin, Hirawake Toru	4. 巻 14
2. 論文標題 Contribution of Small Phytoplankton to Primary Production in the Northern Bering and Chukchi Seas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 235 ~ 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/w14020235	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 該当する
1. 著者名 Waga Hisatomo, Eicken Hajo, Light Bonnie, Fukamachi Yasushi	4. 巻 270
2. 論文標題 A neural network-based method for satellite-based mapping of sediment-laden sea ice in the Arctic	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 112861 ~ 112861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rse.2021.112861	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 該当する
1. 著者名 Waga Hisatomo, Eicken Hajo, Hirawake Toru, Fukamachi Yasushi	4. 巻 16
2. 論文標題 Variability in spring phytoplankton blooms associated with ice retreat timing in the Pacific Arctic from 2003-2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0261418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0261418	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 該当する

1. 著者名 Oida Joji, Hirawake Toru, Yamashita Youhei, Abe Hiroto, Nishioka Jun, Waga Hisatomo, Nomura Daiki, Kakehi Shigeho	4. 巻 208
2. 論文標題 Classification of optical water groups in the subarctic pacific and adjacent seas using satellite-derived light absorption spectra of chromophoric dissolved organic matter	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers	6. 最初と最後の頁 104313 ~ 104313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr.2024.104313	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

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Waga, H., Eicken, H., Light, B., Fukamachi, Y.
2. 発表標題 A neural network-based method for satellite mapping of sediment-laden sea ice in the Arctic
3. 学会等名 International Circumpolar Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Oida, J., Hirawake, T., Yamashita, Y., Abe, H., Nishioka, J., Waga, H., Nomura, D., Kakehi, S.
2. 発表標題 Detection of biologically productive water mass from ocean color satellite using chromophoric dissolved organic matter (CDOM)
3. 学会等名 ESSAS Annual Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Waga, H.
2. 発表標題 Satellite-based monitoring of phytoplankton phenology using a parametric modeling approach in the Northern Gulf of Alaska
3. 学会等名 ESSAS Annual Science Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Waga, H., Eicken, H., Light, B., Fukamachi, Y.
2. 発表標題 A neural network-based method for satellite-based mapping of sediment-laden sea ice in the Arctic
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Waga, H., Eicken, H., Hirawake, T., and Fukamachi, Y.
2. 発表標題 A parametric modeling approach for satellite-based monitoring of phytoplankton bloom features in the Pacific Arctic
3. 学会等名 Alaska Marine Science Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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