

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04250

研究課題名（和文）溶存有機物と光学特性から探る亜寒帯海域の水塊構造と生物生産環境

研究課題名（英文）Water mass structure and primary productivity in the sub-Arctic seas revealed from dissolved organic matter and optical properties

研究代表者

平譚 享 (Hirawake, Toru)

国立極地研究所・先端研究推進系・教授

研究者番号：70311165

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：様々な特徴を持つ海水が近接・混合する三陸沖やベーリング陸棚域およびそれら縁辺海において、海水中に溶存する有機物(CDOM)の光吸収量や蛍光強度を測定し、それらの特性に基づいて幾つかの同じ特徴を持つ海水（水塊）に分類し、水塊を蛍光センサーや衛星センサーによる光吸収データから3次元的に区分することが可能となった。また、沿岸堆積物の影響を受けた水塊や植物プランクトンの生産に寄与する水塊を判別できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

水塊の判別には水温と塩分が使われることが通例であるが、CDOMの情報を利用した本研究結果は、水温・塩分だけでは判別困難な沿岸堆積物の影響や、生物生産を促進させる水塊の生成過程の理解を大きく前進させるものである。今後、これらのプロセスを海洋生態系モデルに組みこむことで、我が国の持続的な海洋生物資源利用と管理および日本列島を含めた亜寒帯の生態学的研究と炭素循環研究の基礎情報として役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：Light absorption and fluorescence of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) were investigated in the waters off Sanriku coast, the shelf region of the Bering Sea, and adjacent seas where seawaters with various characteristic distribute nearby each other and mixing. Using these optical characteristics of CDOM, we classified seawaters with the same characteristics (water masses) and succeeded to discriminate the water masses three dimensionally from data of fluorescence sensors and ocean color satellite sensors. Our results also suggested that water masses affected by coastal sediments and contributing to phytoplankton production could be discriminated.

研究分野：海洋光学

キーワード：CDOM FDOM 水塊 光吸収 蛍光 基礎生産

1. 研究開始当初の背景

親潮と黒潮が近接・混合する三陸沖では、栄養塩と物理特性が顕著に異なる海水が、渦を形成しながら複雑な水塊構造を形成する。その結果として豊かな生物生産力と多様性を生み出し、日本の水産業にとっても大変重要な海域となっている。今後の海洋生物資源動態を知る上で、海洋循環はもとより基礎生産や物質循環を理解することは必須である。そのためには水塊の判別が「鍵」となるが、温暖化による水温上昇や日本を襲う極端な気象現象の頻発は、今まさにこの海域の水塊構造を著しく変化させようとしている。

水塊は一般的に水温と塩分で区分するが、海洋生産の基盤となる表層水は様々な水が複雑に混合し、太陽放射による加熱や降水によって水温・塩分が容易に変質する。そのため、表層水塊の同一性と起源を水温・塩分のみで判断することは困難であり、物理分野では表層水塊を通常扱わないため、水塊と物質循環や基礎生産を初めとする海洋生態系の関係を描き出すことは難しい。一方、過去の我々の研究により、有色溶存有機物 (CDOM) が水塊指標として利用できる可能性が示された。CDOM はセンサーや衛星リモートセンシングによる観測が可能であるため、それらを利用することで、海洋表層水の連続・広域な評価が可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、西部北太平洋を対象海域とし、特に三陸沖に注目して水温・塩分に加えて溶存有機物の光吸収分光特性や蛍光分光特性の光学的情報を新たなトレーサーとする事により、水塊の起源や混合過程を3次的に明らかにすることを目的とした。

また、海色リモートセンシングや光吸収センサーを利用することによって、海洋表面の水塊特性と基礎生産力や植物プランクトンサイズの水平分布を同時に連続的かつ広範囲に評価し、さらに、両者の相互関係を明らかにすることで、今後の気候変動が海洋生態系に与える影響を推察することを目指した。

3. 研究の方法

当初は北海道大学水産学部所属練習船「おしよる丸」航海を毎年実施する予定であったが、2020年以降はコロナウイルス感染拡大により航海が中止となったため、代替として国立研究開発法人水産研究・教育機構所属漁業調査船「若鷹丸」の航海により沿岸域の観測を実施した。黒潮と親潮の混合域や北海道沿岸では2つのおしよる丸航海(OS073 および OS077)、宮城県および福島県沿岸域では2つの若鷹丸航海(WK21-07 および WK22-07)において、CTDによる水温・塩分の観測、採水、蛍光性有機物 (FOM) センサ (ECO-FL(RT)D、WET Labs) を用いた観測を実施した。FOM センサはCTD センサに直接繋ぎ、水温、塩分、クロロフィル *a* 蛍光、溶存酸素濃度と同じ鉛直解像度でデータを取得した。さらに、採水バケツまたはニスキンボトルにより FOM センサ校正用の海水を、それぞれ塩酸洗浄したスピッツ管に直接採取し、冷凍保存した。CDOM 光吸収係数 (a_{CDOM}) 分析用の海水はカプセルフィルター (ミリポア 0.2 μ) で濾過後、ガラスバイアルに採取し冷蔵保存した。冷蔵保存したサンプルは陸上研究室に持ち帰り、Yamashita et al. (2015, Mar. Chem., 177, 298-305) に従って、励起波長 370 nm、蛍光波長 460 nm における蛍光強度 (RU_{370}) を求めた。分析した蛍光強度を用いて、Yamashita et al. (2015) に従って、FOM センサ値の校正を行った。冷蔵保存したサンプルは陸上研究室において、2 m 光路長の分光光度計 Ultra Path を使用して波長 250-720 nm の吸光度を測定し、 a_{CDOM} (m^{-1}) を計算した。波長 350 nm の値 $a_{CDOM}(350)$ を CDOM の量、波長 257-295 nm 間および 350-400 nm 間のスペクトル勾配 ($S_{275-295}$ および $S_{350-400}$) をそれぞれ、紫外線による分解および微生物による分解 (または深層に存在する水塊) の指標とした。

水塊区分の一般性と衛星による水塊推定アルゴリズムの堅牢性を向上させるため、新規観測データに加えて、過去の航海 (おしよる丸 OS40, OS56、マルタノフスキー号 Mu14, Mu18、クロモフ号 Kh06) のデータを利用した。

4. 研究成果

(1) a_{CDOM} による水塊分類

OS73 および OS77 航海で取得した $a_{CDOM}(350)$ は亜熱帯で低く、亜寒帯で高いという一般的分布であるが、基礎生産量が低く日射量の多い南方では $S_{275-295}$ が高く、紫外線による分解の影響が見られた。過去のデータと組み合わせ、 $a_{CDOM}(350)$ 、 $S_{275-295}$ および $S_{350-400}$ によりクラスタリング (階層的クラスタ分析) を行ったところ、大きく 5 つの水塊に分類され

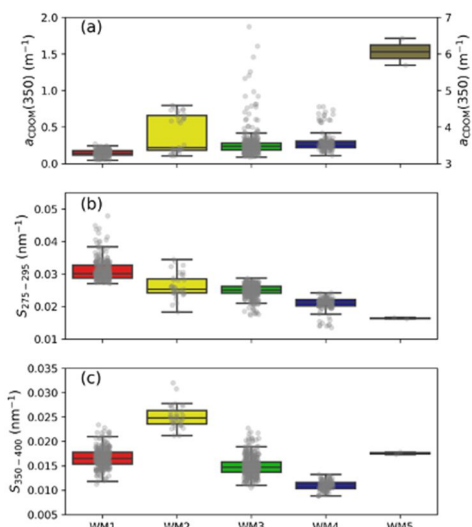


図 1 各水塊の a) $a_{CDOM}(350)$ 、b) $S_{275-295}$ および c) $S_{350-400}$ 。WM5 の $a_{CDOM}(350)$ は右軸を参照。

た(図1)。最も $a_{CDOM}(350)$ が高い水塊(WM)は、河口域などに局在する WM5 であり、その栄養塩は他の水塊よりも高濃度であった。WM1 は外洋の表層で多く見られる水塊であり $S_{275-295}$ が高く紫外線の影響を受けていると示唆される。WM4 は WM1 とは逆に $S_{275-295}$ が低く、深層で多く見られた。WM3 は日本近海の深層、ベーリング海盆表層、ベーリング海峡陸棚域など沿岸域で幅広く観測された。WM2 は襟裳岬沖やベーリング海峡など限られた海域で見られ、 $S_{350-400}$ が高く深層から表層に輸送された可能性を示唆している。これらの CDOM の光学的な特徴と分布する深度や地理的分布は過去の知見と概ね一致しており、 a_{CDOM} から得られる情報は複雑な水塊構造の分類に利用できると考えられた。

(2) FOM による鉛直的な水塊分類・沿岸の影響を受けた水塊の特定

ここでは、おしよ丸 OS077 航海と若鷹丸 WK21-07 航海の解析結果について述べる。図2に OS077 航海で得られた水温、塩分、FOM の水深 500 m 以浅における南北断面分布図を示す。また、図3に同航海の観測点 NS1-NS8 で得られた Z 軸を FOM 存在量で示した T-S ダイアグラムを示す。FOM の存在量は表層で低く、中層で高い傾向にあった。また、FOM の存在量は <500 m の水柱全体を通して、南で低く、北で高い傾向にあった。なお、表層における緯度に対応した FOM 存在量の変化は、先行研究 (Yamashita et al., 2017, Limnol. Oceanogr. 62, 2360-2374) で得られた結果と同様であった。また、このような FOM の空間分布パターンは、水温や塩分の空間分布パターンと類似しており、高温・高塩分・低 FOM で特徴付けられる暖流の黒潮と低温・低塩分・高 FOM で特徴づけられる寒流の親潮が分布・混合している結果を反映していると考えられた。最北端の観測点である NS8 の 200 m 以浅では、その南にある観測点 NS7 と比べて高温・高塩分・低 FOM であり、津軽暖流水が流入している事が考えられた。

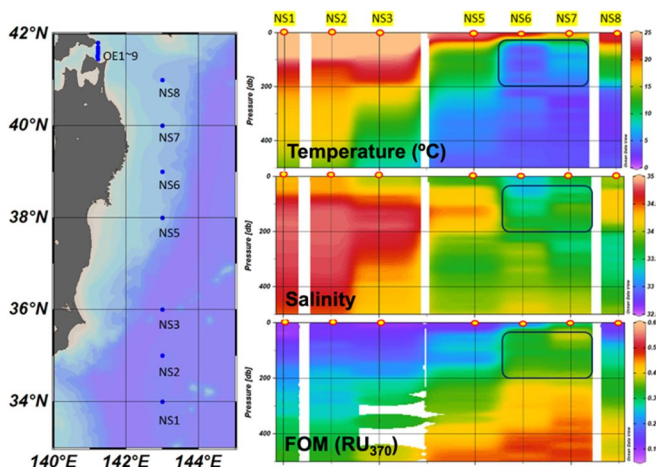


図2 おしよ丸 OS077 航海の NS1-NS8 において観測された 500 m 以浅における水温、塩分、FOM の南北断面分布。

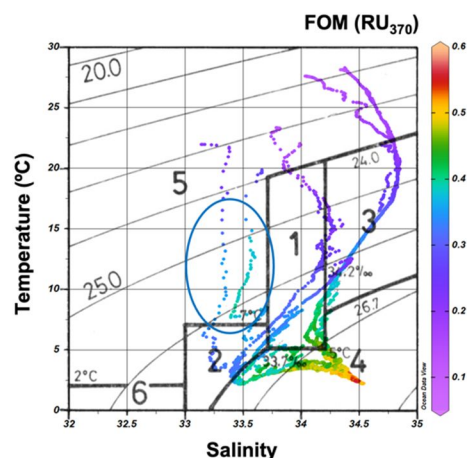


図3 おしよ丸 OS077 航海で観測された NS1-NS8 の 500 m 以浅における T-S ダイアグラム。色は FOM 存在量を示す。T-S ダイアグラム内の水塊区分は Hanawa and Mitsudera (1986, J. Oceanogr. 42, 435-446) による。1: 津軽暖流, 2: 親潮, 3: 黒潮, 4: 深部冷水, 5: 表層水, 6: 親潮沿岸。

親潮が分布している観測点 NS6 と NS7 の 50-200 m に着目してみると、基本的には低水温・低塩分・高 FOM の親潮系水塊が分布していたが、NS7 の 50-100 m では、NS6 と比べて比較的高温・高塩分ながら高 FOM を示した。NS8 の 200 m 以浅に津軽暖流が分布していた事を考えると、NS7 の 50-100 m には津軽暖流の影響を受けた水塊が分布している事が考えられる。一方、NS7 の 50-100 m における水塊は、暖流系にも関わらず比較的高 FOM であり、津軽暖流がその物理的特徴(水温と塩分)を大きく変化させずに、FOM の供給を受けた事が考えられる。高 FOM で特徴的な水として河川水や堆積物間隙水が考えられるが、河川水の影響は低塩分化を伴う。従って、NS7 の 50-100 m における水

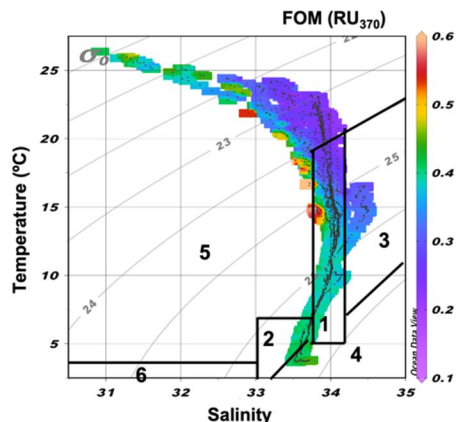
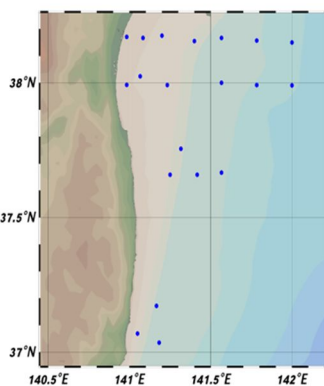


図4 若鷹丸 WK21-07 航海において宮城県および福島県沿岸域で観測された T-S ダイアグラム。色は FOM 存在量を示す。T-S ダイアグラム内の水塊区分は図3と同じ。

塊は、津軽暖流が沿岸を通過する際に、堆積物からの FOM 供給を受けて、高 FOM 化したと推察された。

沿岸域の堆積物から高 FOM が供給され、外洋域に輸送されている可能性を評価するため、WK21-07 航海において宮城県および福島県沿岸域の観測を行った (図 4)。観測された水塊の多くは、Hanawa and Mitsudera (1986, J. Oceanogr. 42, 435-446) で報告された表層水と津軽暖流水であった。表層水の中では、OS077 航海では観測されなかった低塩分水塊が観測された。この水塊は、比較的高 FOM であったことから、河川水の影響を受けた水塊であると考えられた。一方、最も FOM 存在量が高かった水塊は、比較的高塩分領域 (~33-34) で観測された。この水塊は、T-S ダイアグラム上では、特徴的な水塊として認識できず、低層付近で観測されたことから、海底堆積物から FOM の供給があった事が考えられた。OS077 航海で観測された比較的高 FOM 水塊は、このような沿岸で堆積物の影響を受けた水塊が外洋域に輸送された結果である事が考えられる。すなわち、水温と塩分の観測に FOM の観測を加えることにより、水温と塩分からは判断することのできない、沿岸堆積物の影響を受けた水塊を判別できる事が示唆された。

(3) 海色衛星リモートセンシングを利用した海洋表層の広域水塊分類

(1) で使用したデータセットと水塊分類 (水塊番号) を用い、海色リモートセンシングによって推定された a_{CDOM} から水塊番号を特定するアルゴリズムを開発した。最終的なデータセットのデータ数は 811 となった。前述の通り、水塊分類に利用する a_{CDOM} の波長帯は紫外域であるため、可視域リモートセンシングの一つである海色衛星センサーでは観測していない。そのため、衛星から紫外域の a_{CDOM} を推定するのではなく、現場試料の紫外波長帯の a_{CDOM} により分類した水塊番号を、同じ試料の可視波長帯の a_{CDOM} から推定するアルゴリズムを構築した (図 5)。分類には当初、可視波長帯の各波長の a_{CDOM} 平均値を用い閾値を決めて分類したが、十分な精度が得られなかった (判定精度 67%)。そこで、機械学習 (ランダムフォレスト) を用いた推定を行ったところ、衛星データから推定された a_{CDOM} を用いた場合でも 80% 以上の精度で水塊を正しく識別することができた。

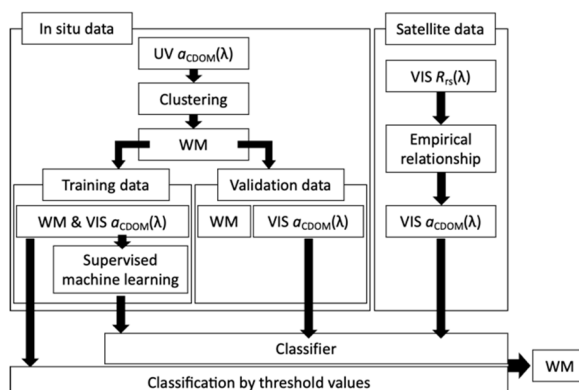


図 5 海色衛星データから水塊进行分类するためのデータと処理・手法を示したフローチャート。VIS は可視域、UV は紫外域、 R_{rs} はリモートセンシング反射率。

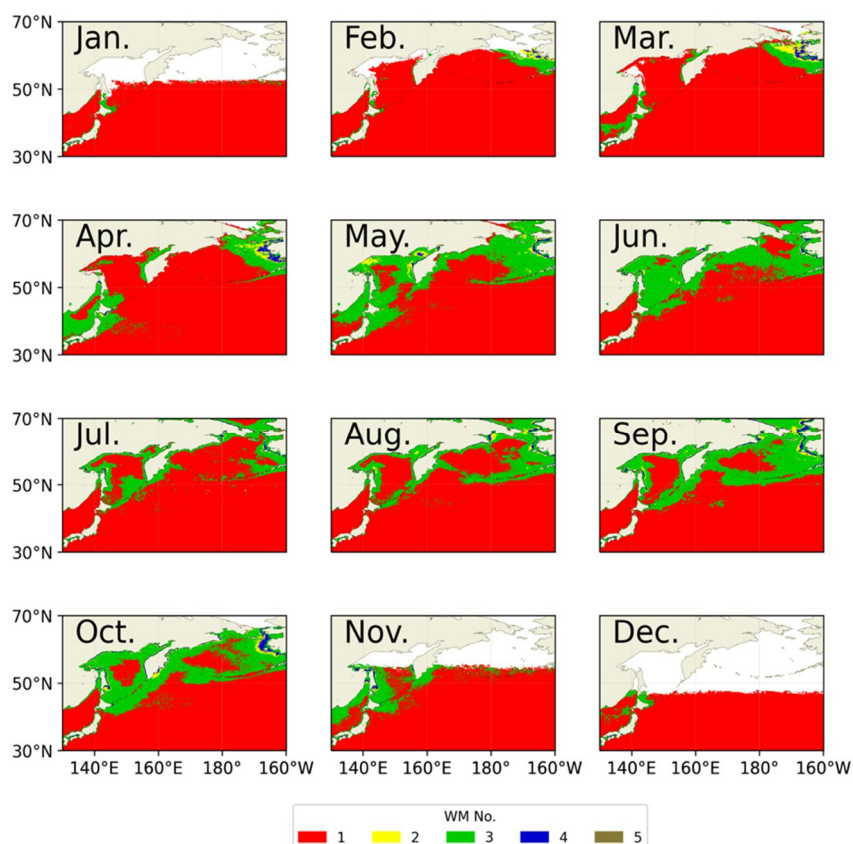


図 6 各月の MODIS データ気候値に水塊分類アルゴリズムを適用した例。

本アルゴリズムを NASA の衛星海色センサーMODIS/Aqua の気候値データに適用した(図 6)。植物プランクトンの春季ブルームや秋季ブルームが発生する時期に、特に水塊 WM2、WM3、WM4 が現れていた。大規模なブルームが発生する前またはその時期には WM2 が現れていた。WM2 は深層から表層に水塊が湧昇すると報告されている海域でも局所的に見られ、高い栄養塩の供給を示唆すると考えられる。

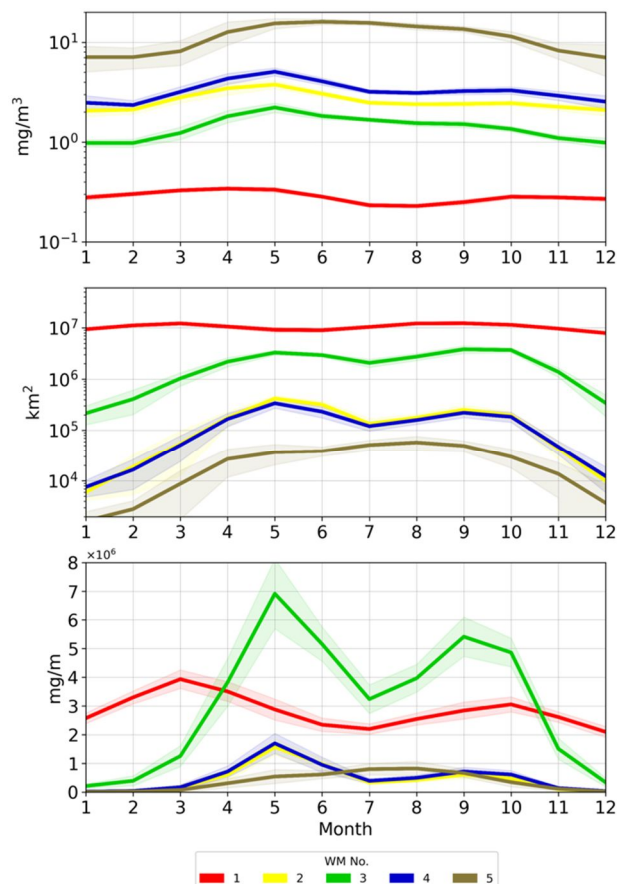


図 7 各水塊の平均海面クロロフィル a (chl.a)濃度、各水塊が占める面積、および海面 chl.a 水平積算量。

さらに、植物プランクトンの基礎生産にとって重要な水塊とその分布を知るため、各水塊の平均海面クロロフィル a (chl.a)濃度、各水塊が占める面積、および海面 chl.a 水平積算量(chl.a 濃度と面積の積の積算値)を計算した(図7)。平均海面 chl.a 濃度は WM5、4、2、3、1 の順に高かったが、水平積算量は WM3 が最も高かった。WM3 は三陸沖のみならず、北太平洋の沿岸部に広く分布しており、研究対象海域における生物生産にとって重要な水塊であると考えられる。

本研究では、衛星による推定方向の水塊観測と FOM センサーによる鉛直的な水塊観測により 3 次元的な水塊構造を知る手法が確立された。今後、より高時空間解像度の衛星データで推定した水塊と FOM センサーデータを用い、環境変化と水塊の消長との関係、さらには海洋低次生産との関係をトレースするためのツールとして利用できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirawake Toru, Oida Joji, Yamashita Youhei, Waga Hisatomo, Abe Hiroto, Nishioka Jun, Nomura Daiki, Ueno Hiromichi, Ooki Atsushi	4. 巻 197
2. 論文標題 Water mass distribution in the northern Bering and southern Chukchi seas using light absorption of chromophoric dissolved organic matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102641 ~ 102641
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2021.102641	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 Matsuoka Atsushi, Campbell Janet W., Hooker Stanford B., Steinmetz Francois, Ogata Kazunori, Hirata Takafumi, Higa Hiroto, Kuwahara Victor S., Isada Tomonori, Suzuki Koji, Hirawake Toru, Ishizaka Joji, Murakami Hiroshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance of JAXA 's SGLI standard ocean color products for oceanic to coastal waters: chlorophyll a concentration and light absorption coefficients of colored dissolved organic matter	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/s10872-021-00617-2	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 Nishioka Jun, Yasuda Ichiro, Hirawake Toru, Nakamura Tomohiro, Kondo Yoshiko, Volkov Yuri N.	4. 巻 203
2. 論文標題 Biogeochemical and physical linkages between the Arctic Ocean and Sub-Arctic Pacific through marginal seas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102768 ~ 102768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2022.102768	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 Ueno Hiromichi, Komatsu Mizuki, Ji Zhaoqianyi, Dobashi Ryo, Muramatsu Miaki, Abe Hiroto, Imai Keiri, Ooki Atushi, Hirawake Toru	4. 巻 181-182
2. 論文標題 Stratification in the northern Bering Sea in early summer of 2017 and 2018	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography	6. 最初と最後の頁 104820 ~ 104820
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr2.2020.104820	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 Hirawake Toru, Hunt George L.	4. 巻 181-182
2. 論文標題 Impacts of unusually light sea-ice cover in winter 2017-2018 on the northern Bering Sea marine ecosystem - An introduction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography	6. 最初と最後の頁 104908 ~ 104908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dsr2.2020.104908	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 Yamashita Youhei, Tosaka Tetsu, Bamba Rise, Kamezaki Ryuichi, Goto Shuji, Nishioka Jun, Yasuda Ichiro, Hirawake Toru, Oida Joji, Obata Hajime, Ogawa Hiroshi	4. 巻 191
2. 論文標題 Widespread distribution of allochthonous fluorescent dissolved organic matter in the intermediate water of the North Pacific	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102510 ~ 102510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2020.102510	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 Yamashita Youhei, Yagi Yuki, Ueno Hiromichi, Ooki Atsushi, Hirawake Toru	4. 巻 124
2. 論文標題 Characterization of the Water Masses in the Shelf Region of the Bering and Chukchi Seas With Fluorescent Organic Matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 7545 ~ 7556
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JC015476	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 Waga Hisatomo, Hirawake Toru, Ueno Hiromichi	4. 巻 46
2. 論文標題 Impacts of Mesoscale Eddies on Phytoplankton Size Structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 13191 ~ 13198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019GL085150	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toru Hirawake, Takuro Kaneko, Jun Nishioka, Hajime Obata, Ichiro Yasuda
2. 発表標題 The nutrient supply and mixing control the primary production seasonality in the subarctic Pacific
3. 学会等名 Ocean Carbon From Space Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toru Hirawake, Jun Nishioka, Hajime Obata
2. 発表標題 Geographical distributions of primary production phenology and nutrient/iron supply in the subarctic North Pacific Ocean
3. 学会等名 JpGU 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平譚享, 山下洋平, 鈴木光次, 西岡純
2. 発表標題 衛星海色リモートセンシングによる沿岸域の観測
3. 学会等名 JpGU 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大井田穰示, 平譚享, 山下洋平, 阿部泰人, 西岡純, 和賀久朋, 野村大樹
2. 発表標題 有色溶存有機物(CDOM)から見る西部北太平洋及び北部ベーリング海の水塊構造と栄養塩分布
3. 学会等名 JpGU 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下洋平, 森雄太郎, 遠坂哲, 亀崎龍一, 後藤周史, 西岡純, 馬場梨世, 安田一郎, 藤尾伸三, 平譚享, 大井田穰示, 小畑元, 小川浩史
2. 発表標題 北太平洋における中層水循環に伴う外来性溶存有機物の輸送
3. 学会等名 JpGU 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toru Hirawake, Takuhei Shiozaki, Hisatomo Waga, Koji Suzuki
2. 発表標題 Improvement of absorption-based primary production model for SGLI/GCOM-C
3. 学会等名 JpGU 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toru Hirawake, Jun Nishioka, Hajime Obata
2. 発表標題 Geographical distributions of primary production phenology and nutrient/iron supply in the subarctic North Pacific Ocean
3. 学会等名 JpGU 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平譚享, 山下洋平, 鈴木光次, 西岡純
2. 発表標題 衛星海色リモートセンシングによる沿岸域の観測
3. 学会等名 JpGU 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大井田穰示, 平譚享, 山下洋平, 阿部泰人、西岡純、和賀久朋、野村大樹
2. 発表標題 有色溶存有機物(CDOM)から見る西部北太平洋及び北部ベーリング海の水塊構造と栄養塩分布
3. 学会等名 JpGU 2020
4. 発表年 2020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	山下 洋平 (Yamashita Youhei) (50432224)	北海道大学・地球環境科学研究所・准教授 (10101)	

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