

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0020

研究課題名（和文）画像処理技術と生物光学を融合した新型海洋一次生産者別基礎生産算出アルゴリズム（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Estimation of marine primary production by integrating a bio-optical principle into satellite remote sensing image processing (Fostering Joint International Research)

研究代表者

平田 貴文 (Hirata, Takafumi)

北海道大学・北極域研究センター・特任准教授

研究者番号：80576231

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,300,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：リモートセンシングによる海洋の浮遊性藻類別の一次生産を推定し、その制御要因に注目してデータ解析を行ったところ、日本近海の珪藻類の基礎生産はその現存量に強く依存するが、藍藻類の基礎生産はその生理活性に強く依存する可能性が示唆された。これらの結果を利用して、各群集の基礎生産と数値モデルから得られる各藻類の多様性との間の関係を調べた結果、珪藻類ではその基礎生産に比較的多くのモデル種の貢献が必要であるのに対し、藍藻では少ないモデル種の貢献で済んだことから、珪藻では基礎生産とその多様性との間の関係が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋における浮遊性藻類の基礎生産（光合成）と多様性は水産生物を含めた海洋生物生産において極めて重要であるが、どの浮遊性藻類によってどれだけの基礎生産が行われているかを広域海洋で効率的に測定しえる技術はなかった。本研究では、衛星リモートセンシングを用いた広域海洋観測から浮遊性藻類別の基礎生産を推定する手法を生物学的原理と衛星リモートセンシングで得られる画像処理技術を融合することで新規開発し、その結果を利用して基礎生産と多様性との間の関係の存在を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Group-specific primary production in marine environment was estimated using satellite remote sensing. Results show that diatom-specific primary production is highly dependent on its total chlorophyll abundance while cyanobacteria-specific primary production is much less dependent on its total chlorophyll abundance.

Thus, it was found that the diatom-specific chlorophyll could be used for estimation of its primary production, while the cyanobacteria-specific chlorophyll might not. Using a numerical model, group-specific diversity was estimated and compared to the chlorophyll derived from the satellite remote sensing. Many sub-species were required to explain the diatom-specific chlorophyll while much less sub-species were required to account for cyanobacteria-specific chlorophyll. As a result, we conclude that a certain relationship exists between the diatom-specific primary production and its diversity.

研究分野：海洋生態

キーワード：基礎生産 一次生産 浮遊性藻類 多様性

様式 F - 19 - 2

1. 研究開始当初の背景

国際地球圏生物圏共同計画(IGBP)は人類が直面する環境問題のうち、地球が安全に機能し、人類生存のための生態系サービス維持に対する喫緊の問題として、(1)生物多様性、(2)窒素循環、(3)気候変動などを挙げていた(Rockström et al., 2009)。これには、空間的に規模の小さい領域における効果が影響もあることが; Steffen et al., 2015)。一方、環境問題対策を考える上で、環境問題の間での相互関係はその存在すら不明であり明らかにする必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、最終的に(1)生物多様性と(2)窒素循環との間の関係の有無を明らかにすることをねらいとして、窒素循環と関連がある基礎生産と生物多様性との間の関係の存在の有無を明らかにすることを目的とする。特に、比較的観測も少ない海洋について焦点を置く。

3. 研究の方法

人工衛星を用いた海洋観測を中心に、数値モデリングも取り入れて解析を行う。人工衛星から得られる海色情報から浮遊性藻類分類群別の基礎生産を推定するアルゴリズムを開発する一方で、数値モデルを用いて浮遊性藻類の多様性を推定する。人工衛星から得られる情報と数値モデルから得られる情報を比較し、基礎生産と多様性の関係を調査する。本研究では水深 200m 以下の海域は解析対象外とする。

(1) 衛星リモートセンシングデータ

1998年から2010年までの NASA SeaWiFS Level 3 の空間解像度 9 km および時間解像度 monthly のデータを利用した。SeaWiFS データのうち、海色データ(波長別リモートセンシング反射率、 $Rrs[1/sr/nm]$ 。波長は 412, 443, 490, 510, 555 [nm])を基にインバージョンモデル(Smyth et al., 2006)を用いて浮遊性藻類全群集の波長別光吸収係数 $a_{ph}[1/m/nm]$ を求めた。また、SeaWiFS データのうち、クロロフィル a 濃度($Chla[mg/m^3]$)を用いて Hirata et al. (2011)および平田と鈴木(2014)の手法を用いて、珪藻類、渦鞭毛藻類、ハプト藻類、緑藻類、クリプト藻類、藍藻類などに対する群集別 Chla 濃度 $Chla_i[mg/m^3]$ をそれぞれ算出した。上記のインバージョンモデルにより得られた a_{ph} と $Chla_i$ を用いて、群集別光吸収係数 $a_{ph,i}[1/m/nm]$ を Hirata and Suzuki(2017)に基づいて算出し、さらに Westberry et al (2005)から得られる全群集基礎生産速度 $PR[moIC/m^2/day]$ と $a_{ph,i}$ を用いて、Hirata and Suzuki(2017)の手法を用いて群集別基礎生産速度 $[moIC/m^2/day]$ および光合成量子収率 $[moIC/molQuanta]$ を算出した。

(2) 数値モデルデータ

Masuda et al(2017)による海洋 3 次元生態系モデル(物理・化学・生物結合モデル)を全球海洋に適用した。モデルの水平解像度は 0.1 度であり、深度 2000m まで考慮してある。物理部は、気象研究所の MRI.COM(Tsujino et al.2010)を利用している。これに Masuda et al (2017)により生物地球化学変数および生態系変数を加え、合計 240 グループの浮遊性藻類の窒素換算濃度 $[\mu molN/L]$ を算出した。これらのグループの違いは、海水温 $[]$ 、栄養塩濃度 $[mol/L]$ 、光強度 $[W/m^2]$ に対するそれぞれの応答か、あるいは、それらの組み合わせの違いによる。実際にモデルを実行すると 36 のモデル種が「生き残った」。本研究ではこれらを解析に用いた。

(3) 基礎生産と多様性の関係解析

Artificial Neural Network(ANN)および重回帰分析を用いて、衛星リモートセンシング により得られた基礎生産と数値モデルによって得られた多様性を比較評価した。また、数値モデル解析に用いる変数 ha

対数換算してから解析を行った。ANN の構造は、ニューロンの数を変えた感度解析をすることにより、得られる結果が最良となるニューロン数を求めて決定した。感度解析では、ニューロン数を増加させると結果は良くなる傾向であったが、ニューロン数が 18 以上で、ほぼ結果が変わらなくなったことから、ニューロン数は 18 とした。

4. 研究成果

図 1 に衛星リモートセンシング によって得られた珪藻類、ハプト藻類、藍藻類の基礎生産速度を示す。珪藻類やハプト藻類では大陸周辺や、西部北太平洋、北大西洋で高かった。これらの結果と、藻類別基礎生産速度の算出過程で得られる 1)浮遊性藻類別光吸収係数の波長平均値(藻類別現存量指標)と 2)藻類別光合成量子収率(光生理活性指標)が、藻類別基礎生産速度に与える寄与を調査した結果、特に日本近海では、珪藻類では周年で現存量の寄与が光生理活性の寄与を上回っているのに対し、藍藻類ではその逆であった(図 2)。ハプト藻類では月によって(または季節によって)、現存量の寄与と光生理活性の寄与の大きさが逆転することがわかった。以上の結果から、珪藻類では基礎生産速度の変化は現存量の変化によって説明できるが、藍藻類では光生理活性によって説明できることがわかった。

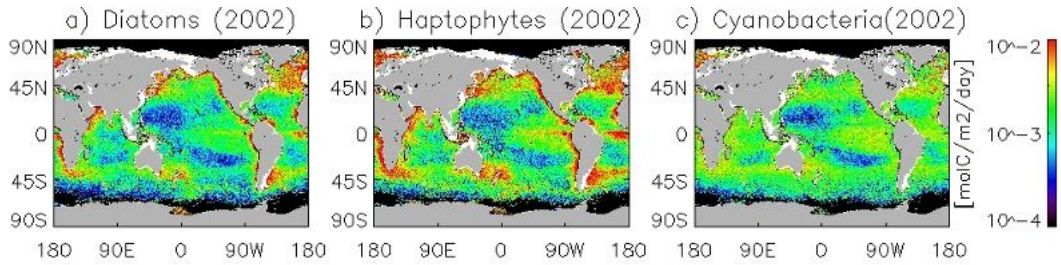


図1. 衛星リモートセンシングにより推定された2002年における群集別基礎生産速度の年平均: a)珪藻類、b)ハプト藻類、c)藍藻類

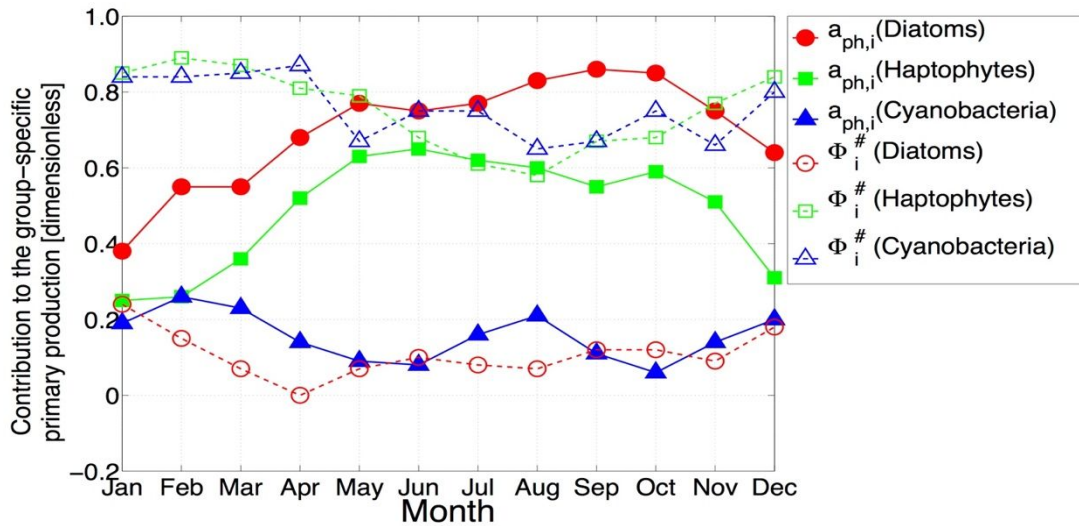


図2. 日本近海における、各浮遊性藻類群集別の光吸収係数 $a_{ph,i}$ [1/m]と光合成量子収率 (Φ_i [molC/molQuanta])が、それぞれ群集別基礎生産速度に与える影響: 赤)珪藻類、緑)ハプト藻類、青)藍藻類。

次に各浮遊性藻類群集別の現存量指標が数値モデルで得られた各モデル種の窒素換算濃度で説明できるかを調査したところ、どの藻類でも両者はよく一致していたことから、数値モデルの妥当性が示された。この結果を踏まえ、衛星リモートセンシングによる群集別濃度は、どのモデル種でよく説明されているかを調べた結果を、珪藻を例にして図4ならびに表1に示す。図4中の黒線は、18あるニューロンに対してANNで得られた重み係数を示している。ニューロン番号1、2、3、7、10、18において重み係数が大きくなっており、それらのニューロンが衛星リモートセンシングで得られる群集別濃度の結果を再現するのに貢献していることがわかる。さらに、これらニューロン群が、どのモデル種で説明されているのであろうかを調べた結果 (=各ニューロンに対し、入力となる浮遊性藻類群集別濃度への重み係数が大きいものを調べた結果)を図4の右図と表1に示す。珪藻を例にとると、上記の各ニューロン(1、2、3、7、10、18)に対し貢献するモデル種も異なる一方で、モデル種のID番号が1、2、3、4、5、6、8、9、10、21、23、26、27、32、33、36である16モデル種が、1、2、3、7、10、10の各ニューロンへ、つまり衛星リモートセンシングより得られる珪藻へ、貢献していることがわかった。

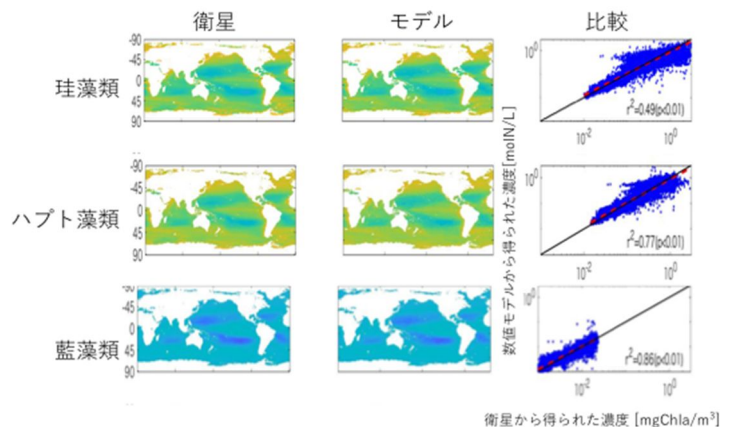


図3. 衛星リモートセンシングから得られた各浮遊性藻類群集別濃度(左)と数値モデルから得られた群集別濃度(中)の全球分布と、それらの数値対比(右): 上段)珪藻類、中段)ハプト藻類、下段)藍藻類。

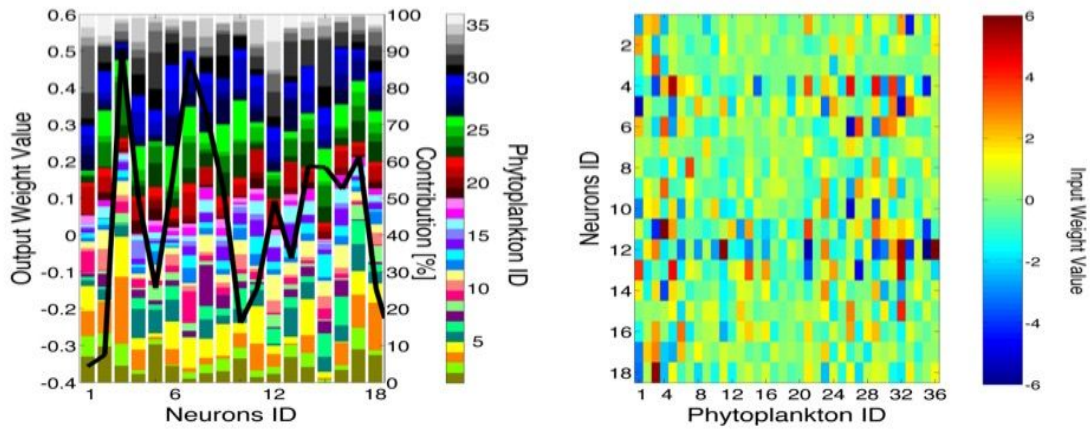


図4. (左) 各ニューロンに対する重み係数 (黒線) と (右) 各ニューロンに対する重み係数

表1. 図4右において、各ニューロンに対する重み係数が (正負を問わず) 大きいモデル種 ID 番号

ニューロン番号	モ		デ		ル		種	番		号
1	1	2	3	4	9	21	27	32	33	
2	1	2	3	24	26	36				
3	2	3	4	24						
7	4	9	26							
10	1	3	5	6	10	23	26	29		
18	1	3	4	5	8	21	23	26	33	36

同様な解析をハプト藻や藍藻に対し繰り返した結果、ハプト藻類では珪藻類と同様に16モデル種でほぼ説明されるのに対し、藍藻類は10モデル種でほぼ説明された。このことから衛星リモートセンシングによって得られる珪藻類やハプト藻類の現存量は、藍藻類と比べて、より多様な種で構成されている可能性が示唆された。また、これら種数は、月(または季節)により変化していた。前述したように珪藻類(とハプト藻類)の現存量はその基礎生産に影響していることから、本研究の結果より、珪藻類とハプト藻類の基礎生産と多様性の間の関係が示唆された。

< 引用文献 >

Smyth, T. J., Moore, G. F., Hirata, T., and Aiken, J.: Semianalytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties: description, implementation, and performance assessment, *Applied Optics*, Vol.45, 2006, 8116-8131

Hirata, T., Hardman-Mountford, N. J., Brewin, R. J. W., Aiken, J., Barlow, R., Suzuki, K., Isada, T., Howell, E., Hashioka, T., Noguchi-Aita, M., and Yamanaka, Y., Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types, *Biogeosciences*, Vol.8, 2011, 311-327.

平田貴文、鈴木光次、衛星から見る黒潮域の植物プランクトン群集別一次生産速度、*海洋と生物*, 220号、2014、478-485

Hirata and Suzuki, Seasonal effects of photophysiology and chlorophyll a abundance on phytoplankton group-specific primary production in the Kuroshio region as revealed by SeaStar/SeaWiFS, *Biogeosciences Discussion*, 2017, <https://doi.org/10.5194/bg-2017-164>

Westberry, T., Behrenfeld, M. J., Siegel, D. A., and Boss, E.: Carbon-based primary productivity modelling with vertically resolved photoacclimation, *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, doi:10.1029/2007GB003078.

Masuda, Y., Y. Yamanaka, T. Hirata, H. Nakano, Competition and community assemblage dynamics within a phytoplankton functional group: Simulation using an eddy-resolving model to disentangle deterministic and random effects, *Ecological Modeling*, 343, 2017, 1-14

Tsujino, H., Motoi, T., Ishikawa, I., Hirabara, M., Nakano, H., Yamanaka, G., Yasuda, T., Ishizaki, H., 2010. Reference manual for the meteorological research institute community ocean model (MRI.COM) version3. Techn. Rep. Meteorol. Res. Inst., 59, 2010

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Toratani, M., S.B. Hooker, Y. Kiyomoto, H. Murakami, Y. Kurihara, M. Hori, H. Waga, Y. Yamashita, A. Tanaka, K. Ogata, K. Suzuki, J. Ishizaka, T. Hiratake, T. Hirata, T. Isada, H. Higa, V.S. Kuwahara	4. 巻 なし
2. 論文標題 GCOM-C/SGLI Ocean Standard Products and Early Validation Results	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium	6. 最初と最後の頁 4741-4744
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IGARSS.2019.8899897	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 Groom, S.B., S. Sathyendranath, Y. Ban, S. Bernard, R. Brain, V. Brotas, C. Brockmann, P. Chauhan, J.-K. Choi, A. Chuprin, S. Ciabatta, P. Cipollini, C. Donlon, B.A. Franz, X. He, T. Hirata et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Satellite Ocean Color: Current Status and Future Perspective	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 なし(online)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2019.00485	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 Hoshiba Yasuhiro, Hirata Takafumi, Shigemitsu Masahito, Nakano Hideyuki, Hashioka Taketo, Masuda Yoshio, Yamanaka Yasuhiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Biological data assimilation for parameter estimation of a phytoplankton functional type model for the western North Pacific	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Ocean Science	6. 最初と最後の頁 371,386
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） dx.doi.org/10.5194/OS-14-371-2018	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 Alabia Irene D., Garcia Molinos Jorge, Saitoh Sei-Ichi, Hirawake Toru, Hirata Takafumi, Mueter Franz J.	4. 巻 24
2. 論文標題 Distribution shifts of marine taxa in the Pacific Arctic under contemporary climate changes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Diversity and Distributions	6. 最初と最後の頁 1583,1597
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） dx.doi.org/10.1111/DDI.12788	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 Aiken, J., R.J.W., Brewin, F. Dufois, L. Polimene, N. Hardman-Mountford, T. Jackson, B. Loveday, S. Hoya, G. Dall'Olmo, J. Stephens, T. Hirata	4. 巻 158
2. 論文標題 A synthesis of the North and South Atlantic Sub-Tropical Gyres and their response to environmental change during two decades of AMT	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 236,254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2016.08.004	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 Masuda, Y., Y. Yamanaka, T. Hirata, H. Nakano	4. 巻 343
2. 論文標題 Competition and community assemblage dynamics within a phytoplankton functional group: Simulating using an eddy-resolving model to disentangle deterministic and random effects	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Ecological Modelling	6. 最初と最後の頁 1,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecolmodel.2016.10.015	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 Kostadinov, T.S., A. Cabre, H. Vedantham, I. Marinov, A.Bracher, R.Brewin, A. Bricaud, T. Hirata et al.	4. 巻 190
2. 論文標題 Inter-comparison of phytoplankton functional type phenology metrics derived from ocean color algorithms and Earth System Models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Remote Sensing of Environment	6. 最初と最後の頁 162,177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rse.2016.11.014	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 Mouw, C.B., N. J. Hardman-Mountford, S. Alvain, A. Bracher, R. J. W. Brewin, A. Bricaud, A. M. Ciotti, E. Devred, A. Fujiwara, T. Hirata, T. Hirawake, T. S. Kostadinov, S.Roy and J. Uitz	4. 巻 4
2. 論文標題 A Consumer's Guide to Satellite Remote Sensing of Multiple Phytoplankton Groups in the Global Ocean	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 なし(online)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2017.00041	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 Bracher, A., H. A. Bouman, R. Brewin, A. Bricaud, V. Brotas, A.M. Ciotti, L. Clementson, E. Devred, A. Di Cicco, S. Dutkiewicz, N.J. Hardman-Mountford, A. E. Hickman, M. Hieronymi, T. Hirata et al.	4. 巻 4
2. 論文標題 Obtaining Phytoplankton Diversity from Ocean Color: A Scientific Roadmap for Future Development	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 なし(online)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/FMARS.2017.00055	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

〔学会発表〕 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Takafumi Hirata
2. 発表標題 A key spot and timing to monitor chlorophyll-a in the Kuroshio western boundary current
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirata, T., Y. Masuda, J. Garcia Molinos, I. Alabia, T. Hirawake, S.-I. Saitoh
2. 発表標題 Potential Vulnerability of the Arctic Marine Ecosystem due to Environmental Changes
3. 学会等名 PICES 2019 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takafumi Hirata
2. 発表標題 Fine-scale temporal variation of chlorophyll-a in the Kuroshio waters observed from the Advanced Himawari Imager onboard the meteorological satellite Himawari-8
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takafumi Hirata, Koji Suzuki
2. 発表標題 Effects of photo physiology and chlorophyll-a abundance on phytoplankton group-specific primary production in Japanese waters using remote sensing
3. 学会等名 PICES 2018 Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hirata, T., Y. Masuda, K. Suzuki, Y. Yamanaka
2. 発表標題 Phytoplankton size diversity from satellite observation
3. 学会等名 JAMSTEC-ZMT Workshop "Plankton biodiversity, dynamic eco-physiology, and ecosystem function" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirata, T.
2. 発表標題 Global size diversity of phytoplankton communities observed from space
3. 学会等名 Japan Geoscience Union 2017 meeting (国際学会)
4. 発表年 2017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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ブラハー アストリッド (BRACHER Astrid)	ブレーメン大学 ・ 環境物理研究所 ・ 教授	Alfred Wegener Institute (AWI)にも研究員として所属

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	メリコ アゴスティーノ (MERICICO Agostino)	ライプニッツ熱帯海洋生態研究センター・理論生態およびモデリング部門・研究員（グループリーダー）	Jacobs University にも教授として所属
その他の研究協力者	増田 良帆 (Masuda Yoshio)		