

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21683

研究課題名(和文) 高緯度域の海洋酸性化と温暖化に対する植物プランクトン多様性の生態系機能の解明

研究課題名(英文) Unraveling the role of phytoplankton in ecosystem functioning under the impacts of ocean acidification and global warming in the higher latitude ocean.

研究代表者

杉江 恒二 (SUGIE, Koji)

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

研究者番号：00555261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：昇温や海洋酸性化の複合的な環境変化生態系サービスに及ぼす影響を把握することは重要な課題である。本研究において昇温や海洋酸性化の複合的な環境変化に対する生物多様性の変化を調査した結果、天然環境における植物プランクトンは、さまざまなニッチを持った植物プランクトンが共存していること、環境変化によって特定のニッチを持った種あるいは分類群が卓越し得ることが明らかになった。すなわち、環境変化は多様性を低下させ、さらなる環境ストレスにさらされた場合に生産性を維持するための生態系の頑強性が低下することを示唆している。

研究成果の概要(英文)：Unraveling the Anthropogenic impacts such as global warming and ocean acidification on marine ecosystem processes are urgent issues. This study examined the effects of temperature and high CO2 conditions on biodiversity of marine phytoplankton communities in the subarctic Pacific and western Arctic Ocean. The major finding of this study is that natural phytoplankton communities consists of many kinds of ecological niche which supports primary productivity under different environmental conditions. However, environmental perturbation especially warming decreases the biodiversity of phytoplankton, indicating that the robustness of marine ecosystem productivity could decrease with the further additive perturbations.

研究分野：生物海洋学

キーワード：亜寒帯北太平洋 北極海 珪藻 植物プランクトン 海洋酸性化 地球温暖化 生物多様性

1. 研究開始当初の背景

人類活動によって過去数千万年の地球史において最も急速に増加し続ける大気CO₂は、海水に溶解し、pHの低下と溶存CO₂と重炭酸イオンの濃度を上昇させる(海洋酸性化)。さらに大気の昇温に伴い、海洋表層は確実に暖められている(温暖化)。植物プランクトンは海水に溶けているCO₂や栄養塩等を取り込み、光エネルギーを利用してバイオマスを生産するため、環境変化の影響を受けやすいことが想定される。近年、国連環境計画(UNEP)やユネスコの政府間海洋学委員会を始めとする国際的な委員会から、将来の生態系サービスの利用可能性を知る上で多岐に亘るストレス要因が生態系に及ぼす影響を把握することは喫緊の課題である声明が出され(IGBP, IOC, SCOR, 2013; Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014)、科学的知見を充足させる必要がある。海洋酸性化や温暖化などの地球環境の変化が植物プランクトンを起点とした海洋生態系に与え得るインパクトは下記のようなものが挙げられる。

(1) 植物プランクトンの生元素(C, N, Pなど)組成の変化 大気CO₂の海洋隔離などの物質循環および動物プランクトンにとっての餌の質の変化

(2) 植物プランクトン群集組成の変化 多様性やサイズ組成の変化の可能性、これに伴う物質循環や食物網構造の変化

(3) CO₂並びに微量元素の利用性の変化 植物Pの生産性の変化を通じて海洋生態系全体に波及

(4) 溶存有機物の生産量や質の変化 微生物食物網の活性や移流・拡散による物質循環の変化

これまでに申請者は、上記(1)、(3)について、海洋酸性化に伴う微量元素の利用性の変化が植物Pの生元素組成比を変える可能性を示し(Sugie et al. 2013)、続いて、海洋酸性化と微量元素の利用性を独立して操作する新規培養法を確立することで、成果を上げている(Sugie & Yoshimura, 2013)。上記(4)については、Yoshimura, Sugie et al. (2014)により、海洋酸性化によって溶存有機物の生産量や質に違いが生じる可能性を示した。しかしながら、海洋酸性化と温暖化の複合影響が生物の多様性に及ぼす影響に関する知見はほとんどない。

2. 研究の目的

本研究は、将来の海洋環境における物質循環の可変性や、それを支配する要因としての生物多様性の機能を明らかにすることを目的とした。天然プランクトンを用いた培養実験を行うことで海洋酸性化と温暖化の複合要因が植物プランクトンに及ぼす影響を把握した。

3. 研究の方法

将来の海洋環境として想定される水温上昇とCO₂濃度上昇の影響に関して、世界で最も海洋酸性化の進行が深刻な西部北極海を含む、外洋域の自然プランクトン群集を用いた培養実験を行った。実験は、(1) 学術研究船「白鳳丸」KH15-01次航海において、2015年3月9日、北緯41度53分、東経145度50分の観測点、(2) 海洋地球研究船「みらい」MR15-03次航海において、2015年9月14日、北緯71度44分、西経155度20分の観測点、(3) 海洋地球研究船「みらい」MR16-06次航海において、2016年9月15日、北緯73度20分、西経160度48分の観測点、の合計3回行った(図1)。

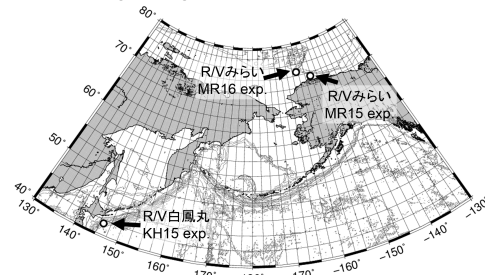


図1. 本研究で培養実験を実施した観測点。

KH15-01次航海における実験の設定は、現場水温(LT)と現場水温+4°C(HT)の2段階、CO₂分圧は現場、高pCO₂-1、高pCO₂-2の3段階設定し、水温並びにCO₂分圧、順列組み合わせの計6実験区とした。MR15-03およびMR16-06次航海における実験では、水温、pCO₂および塩分を、それぞれ2段階変化させ、順列組み合わせの計8実験区設定した。低塩分実験区では、超純水を添加することで塩分を1.5程低下させた。これは温暖化により海水の融解が進行したことを模擬した設定である。KH15-01およびMR15-03における実験は2連で、MR16-06での実験は3連で行った。

試水は、10%の希塩酸で洗浄したNiskin-X採水器を用いて採水し、200-μmのメッシュで大型プランクトンを除いたのち10-Lのポリエチレンバックに分取した。それぞれのポリエチレンバックのCO₂分圧は、1気圧においてCO₂を飽和させた海水を添加することで調整し、水温上昇によるCO₂分圧の上昇は、希水酸化ナトリウム水溶液の添加によって調節した。海水の化学条件を整えた後、ポリエチレンバックを船舶の甲板に設置した水槽に投入し1~2週間の培養を行った。

測定項目は、栄養塩(分節連続流れ分析法)、クロロフィルa(蛍光法)、珪藻(顕微鏡法)、微小植物プランクトン(フローサイトメーター)とした。珪藻類の多様性はSugie & Suzuki (2015)に基づき、Shannon indexを算出した。

4. 研究成果

(1) 結果と考察

KH15-01, 晩冬の親潮域での実験

CO₂分圧の上昇により、珪藻類の比増殖速度が低下した一方で、微小植物プランクトン、

特に、シアノバクテリアとピコ真核植物プランクトン（直径 2 μm 以下）の比増殖速度は上昇していた（図 2）。水温の上昇の効果は、全てのプランクトン群集において正に働いた（図 2）。以上から、晩冬における親潮域の植物プランクトン群集の増殖速度は低水温によって制御されていること、微小植物プランクトンの多くはさらに低 CO_2 濃度によっても増殖速度が制限を受けていることが明らかになった。また、温暖化による比増殖速度の上昇率は、珪藻類よりも小型の植物プランクトンの方が高かった。すなわち、温暖化並びに海洋酸性化の進行に伴い、春季の親潮域における植物プランクトンブルーム（大増殖）では小型の植物プランクトンの優占度が高まることが予想される。これは、高次栄養段階の生産量および大気 CO_2 の海洋隔離効果を低下させる可能性を示唆している。春季の生産は当該海域の生産性に大きく関与しており（e.g. Taniguchi 1999）、将来の温暖化と海洋酸性化の複合影響による生態系サービスの低下が懸念される。

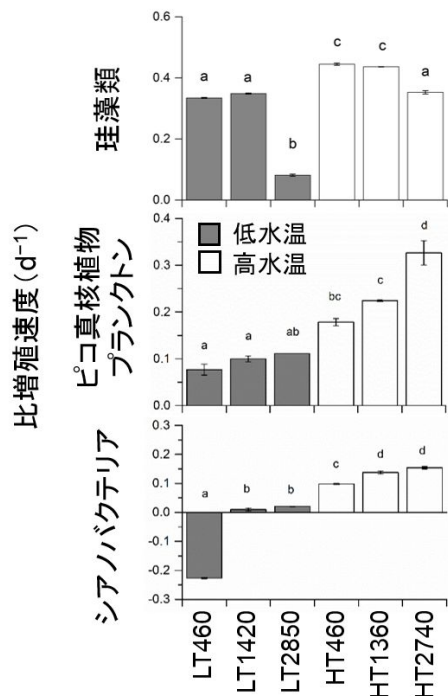


図 2. KH15-01 次航海における植物プランクトンの比増殖速度。LT および HT の後に続く数字は実験開始時の $p\text{CO}_2$ を示す。

MR15-03, 夏季北極海での実験

MR15-03 次航海における実験において増殖したのは珪藻類とナノサイズの真核植物プランクトンであった（図 3）。両グループともに、昇温により有為に比増殖速度を上昇させていた。酸性化の影響は高水温の実験区においてのみ見られ、有為に比増殖速度を上昇させていた。一方、低塩分の実験区では、水温や CO_2 の違いにかかわらず植物プランクトンの比増殖速度に変化は見られなかった。昇温による比増殖速度の加速の程度を、 Q_{10} を指標にし、 $p\text{CO}_2$ および塩分の違いを分けて、

それぞれの実験設定における Q_{10} を算出した（図 3）。昇温による Q_{10} 値はいずれの条件においても珪藻類と比較して小型のナノ真核植物プランクトンの方が大きかった。また、珪藻類の多様性は、昇温により有意に低下していた。これは、高水温の実験区において *Ceratoneis closterium* (Homotypic Synonym: *Cylindrotheca closterium*) が優占度を高めていたことが要因であった。

以上のことから、西部北極海における昇温は、植物プランクトン群集の増殖活性を上昇させ、ことさら、比較的小型のナノ真核植物プランクトンの比増殖速度を加速させることが明らかになった。また、珪藻類の多様性は、昇温に伴う単一種の比増殖速度の加速によって低下することを発見した。その一方で、酸性化や低塩分の影響は小さく、温暖化の進行が、珪藻類以外の小型藻類の優占度を上昇させる可能性を示唆している。また、昇温に伴って多様性指数は低下したが、珪藻群集全体としては比増殖速度を上昇させていたことから、現場の植物プランクトン群集は様々なニッチを有していること、並びに環境じょう乱に対して生産性が堅牢であることを示唆している。しかしながら、さらなる環境じょう乱が生じた際は、脆弱性が高まる可能性がある。

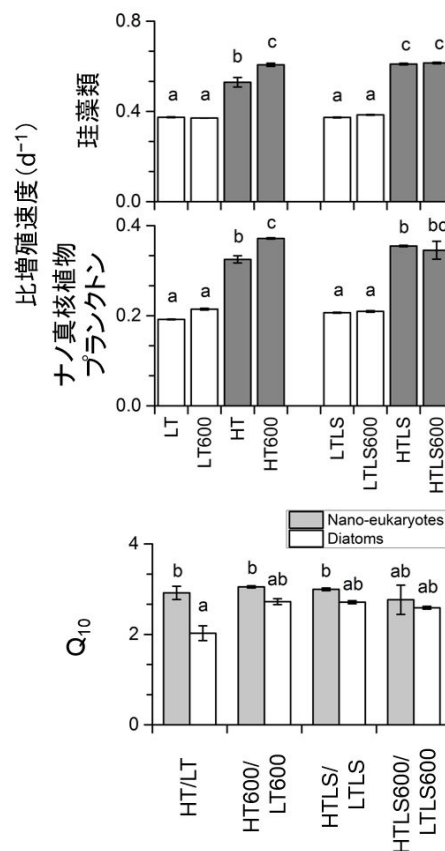


図 3. MR15-03 次航海における植物プランクトンの比増殖速度。LT および HT の後に続く数字は実験開始時の $p\text{CO}_2$ を示す。LS は低塩分の実験区。下図の Q_{10} は、水温が 10°C 上昇したときの比増殖速度の比。

MR16-06, 夏季北極海での実験

MR16-06 次航海における実験において増殖したのは珪藻類, ナノサイズ, およびピコサイズの真核植物プランクトンであった(図4)。一方, シアノバクテリアは正の増殖速度を示さなかった(データ未掲載)。珪藻類およびピコサイズの真核植物プランクトンは温度の上昇によって比増殖速度を上昇させていた一方で, ナノサイズの真核植物プランクトンは昇温の影響を受けていなかった。しかしながら, 酸性化によって比増殖速度を上昇させる傾向が見られた(図4)。昇温に対する感度指標の Q_{10} は珪藻並びにピコサイズの真核植物プランクトンにおいて3前後の高い値を記録した一方で, ナノサイズの真核植物プランクトンは1前後の値をとり, 昇温に対して比増殖速度を上昇させていないことが明らかになった。珪藻類の多様性は実験区間における明確な差は見られなかった(データ未掲載)。また, MR15-03 次航海の時と同様に, 塩分の低下が植物プランクトンの増殖動態に及ぶ影響は見られなかった。

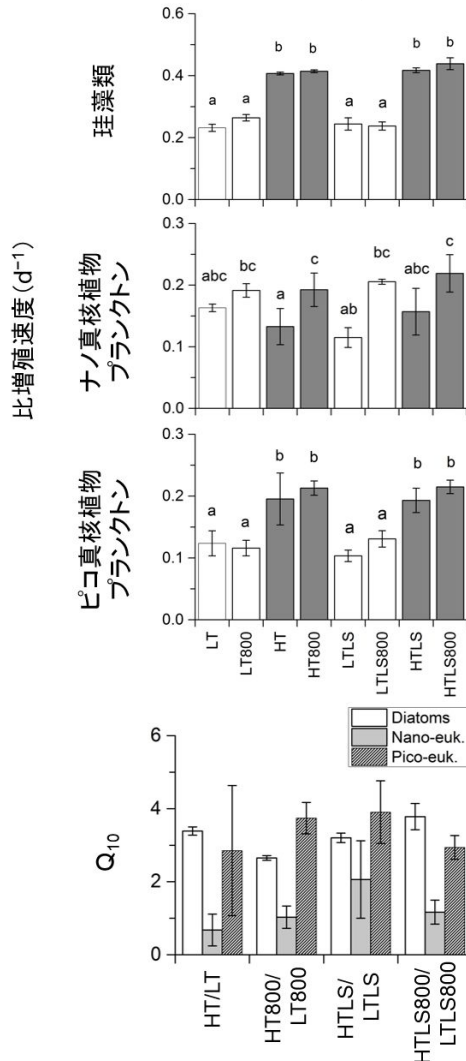


図4. MR16-06 次航海における植物プランクトンの比増殖速度。LTおよびHTの後に続く数字は実験開始時の pCO_2 を示す。LS は低塩分の実験設定。下図の Q_{10} は, 水温が $10^{\circ}C$ 上昇したときの比増殖速度の比。

MR16-06 次航海においても MR15-03 次航海時の実験と同様に, 昇温によって珪藻類の比増殖速度が加速することが確認できた。 Q_{10} を指標としたとき, 珪藻類とピコ真核植物プランクトンの値に違いは無く, また, ナノ真核植物プランクトンは昇温に対して応答していなかったことから, 植物プランクトンのサイズ組成を変えうることが明らかになった。MR16-06 次航海においても MR15-03 次航海と同様に珪藻 *C. closterium* の存在は確認できたが, 温暖化によって優占度を高めることは無かった。ナノサイズの真核植物プランクトンが酸性化に対して比増殖速度を加速させていたことは特筆に値する。これらの結果から, MR16-06 次航海における植物プランクトン群集は環境じょう乱に対して比較的安定していたと考えられる。

(2) まとめと今後の展望

亜寒帯から北極海での3回の実験に共通して, 植物プランクトン群集の比増殖速度は昇温によって上昇することが明らかになった。珪藻類は強度の酸性化によって負の影響を受ける可能性があるものの, 今世紀中に起こり得る範囲ではほとんど影響を受けない可能性が考えられた。一方, 珪藻以外の小型植物プランクトンの応答は実験毎に特徴を持っていた。3回の実験において明瞭な共通性のないものの, 酸性化が微細藻類の比増殖速度を加速させる効果が見られたことは注目に値する。今後は, 希釈実験法と海洋酸性化の実験を組み合わせることで, 微小植物プランクトンに対する捕食者の影響を最小限にすることで, より高精度の結果を出し, 温暖化, 海洋酸性化の影響についての予測精度の向上に資する。また, 水温や pCO_2 の環境は現代の海にいても時空間的に変化する要素であるから, 本研究で得られる成果は海洋生態系を深く理解する上で重要な知見となる。

(3) 参考文献

- IGBP, IOC, SCOR (2013) Ocean Acidification Summary for Policymakers. IGBP programme, Stockholm, Sweden. (*IGBP: International Geosphere-Biosphere Programme; IOC: Intergovernmental Oceanographic Commission; SCOR: Scientific Committee on Oceanic Research)
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) Technical Series No. 75.
- Sugie K. and T. Yoshimura (2013) Journal of Phycology, 49: 475–488.
- Sugie K., Y. Endo, K. Suzuki, J. Nishioka, H. Kiyosawa and T. Yoshimura (2013) Biogeosciences, 10: 6309–6321.
- Sugie K. and K. Suzuki (2015) PLoS ONE, 10 (6): e0131454.
- Yoshimura, T., K. Sugie, H. Endo, K. Suzuki, Nishioka, J. and T. Ono (2014) Deep-Sea Research I, 94: 1–14.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- (1) Sugie K. and K. Suzuki (2017) Characterization of the synoptic-scale diversity, biogeography and size distribution of diatoms in the North Pacific. *Limnology and Oceanography*, 62: 884–897. (査読有り) doi:10.1002/lno.10473.
- (2) Sugie K. and K. Kuma (2017) Change in the elemental composition and cell geometry of the marine diatom *Attheya longicornis* under nitrogen- and iron-depleted conditions. *Diatom Research*, 32: 11–20. (査読有り) doi:10.1080/0269249X.2017.1301999.
- (3) Sugie K. and T. Yoshimura (2016) Effects of high-CO₂ levels on the ecophysiology of the diatom *Thalassiosira weissflogii* differ depending on the iron nutritional status. *ICES Journal of Marine Science*, 73: 680–692. (査読有り) doi:10.1093/icesjms/fsv259.
- (4) Endo H., K. Sugie, T. Yoshimura and K. Suzuki (2016) Response of spring diatoms to CO₂ availability in the western North Pacific as determined by next-generation sequencing. *PLoS ONE*, 11: e0154291. (査読有り) doi:10.1371/journal.pone.0154291.
- (5) Sugie K. and K. Suzuki (2015) A new araphid diatom *Thalassionema kuroshioensis* sp. nov. from temperate Japanese coastal waters. *Diatom Research*, 30: 237–245. (査読有り) doi:10.1080/0269249X.2015.1055339.
- (6) Sugie K. and K. Suzuki (2015) Size of dominant diatom species can alter their evenness. *PLoS ONE*, 10 (6): e0131454. (査読有り) doi:10.1371/journal.pone.0131454.
- (7) Endo H., K. Sugie, T. Yoshimura and K. Suzuki (2015) Effects of CO₂ and iron availability on rbcL gene expression in the Bering Sea diatoms. *Biogeosciences*, 12: 2247–2259. (査読有り) doi:10.5194/bg-12-2247-2015.

〔学会発表〕(計 17 件)

- (1) 杉江恒二・芳村毅・西岡純. Higher temperature accelerate the growth of iron-limited phytoplankton communities in the subarctic Pacific. JpGU-AGU Joint Meeting 2017. 2017年5月25日. 幕張メッセ(千葉県千葉市).
- (2) 亀山宗彦・杉江恒二・藤原周・西野茂人. Response of dimethyl sulfide production by phytoplankton to change in multiple environmental stressors in the western Arctic Ocean. JpGU-AGU Joint Meeting 2017. 2017年5月22日. 幕張メッセ(千葉県千葉市).
- (3) 橋岡豪人・杉江恒二・重光雅仁. Preliminary experiment of ocean acidification in the western North Pacific. JpGU -AGU Joint

Meeting 2017. 2017年5月22日. 幕張メッセ(千葉県千葉市).

- (4) Sugie K., A. Fujiwara, S. Kameyama, N. Harada, S. Nishino. Effects of temperature, CO₂ and salinity on the growth dynamics of Arctic phytoplankton community. The Arctic Science Summit Week (ASSW) 2017. Prague, Czech Republic. 6 April, 2017.
- (5) 矢吹彬憲・浦山俊一・高木善弘・横川太一・杉江恒二・松葉史紗子・西真郎・荒井涉・平井美穂・藤倉克則・布浦拓郎. 環境RNAを利用した真核微生物の群集構造解析. 日本藻類学会. 高知大学朝倉キャンパス(高知県高知市). 2017年3月25日.
- (6) Sugie K., A. Fujiwara, S. Kameyama, N. Harada and S. Nishino. Effects of temperature, CO₂ and salinity on the growth dynamics of Arctic phytoplankton community. Aquatic Science meeting. Hawaii, USA. 27 February, 2017.
- (7) Kameyama S., M. Inagawa, O.T.N. Bui, H. Tanimoto, K. Sugie, S. Nishino, J. Jung, E.J. Yang and S.H. Kang. DMS(P) researches in the Arctic Ocean by collaboration between Japan and South Korea. Network on Climate and Aerosols: Addressing Key Uncertainties in Remote Canadian Environments–Surface Ocean Lower Atmosphere Study (NETCARE-SOLAS) DMS workshop. British Columbia, Canada. 17 January, 2017.
- (8) Sugie K., N. Harada, T. Fujiki, J. Onodera, K. Kimoto, M. Wakita, S. Chiba, M. Kitamura, T. Hashioka and E. Watanabe. Research activities on OA in JAMSTEC. Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) Asia-Pacific Symposium. Plaza Heisei Tokyo International Exchange Center, Koto-ku Tokyo, Japan. 12 January, 2017.
- (9) Sugie K. and N. Harada. What's "GOA-ON"? Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) Asia-Pacific Symposium. Plaza Heisei Tokyo International Exchange Center, Koto-ku Tokyo, Japan. 12 January, 2017.
- (10) Sugie K., S. Kameyama, T. Yoshimura, H. Uchida, J. Nishioka, N. Harada and A. Murata. Effects of high-CO₂ and temperature on the dynamics of plankton communities in the subarctic Pacific. North Pacific Marine Science Organization (PICES) 2016 Annual Meeting. San Diego, USA. 9 November, 2016.
- (11) 杉江恒二・亀山宗彦・芳村毅・橋岡豪人・重光雅仁. 海洋酸性化と温暖化の複合ストレスが春季親潮域の植物プランクトン動態に及ぼす影響. オホーツク海氷融解水が春季親潮域の植物プランクトンブルームと生物地球化学過程に与える影

響に関する研究：研究航海データ検討
WS. 北海道大学低温科学研究所(北海道
札幌市). 2016年7月28日.

- (12) Sugie K., S. Kameyama, T. Yoshimura, H. Uchida, J. Nishioka, N. Harada and A. Murata. Interactive effects of CO₂ and temperature on the dynamics of phytoplankton communities in the subarctic Pacific. 4th International Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World. Tasmania, Australia. 4 May, 2016.
- (13) 杉江恒二・亀山宗彦・芳村毅・内田裕・西岡純・原田尚美・村田昌彦. 海洋酸性化と温暖化の複合ストレスに因る亜寒帯太平洋のプランクトン群集動態の変化. 日本海洋学会春季大会. 東京大学本郷キャンパス(東京都文京区). 2016年3月16日.
- (14) Sugie K., N. Harada and A. Murata. Effects of CO₂ and temperature on the phytoplankton community in the western and eastern North Pacific. Ecosystem Studies of Subarctic and Arctic Seas (ESSAS) Annual Science Meeting. World Porters Yokohama, Kanagawa, Japan. 8 March, 2016.
- (15) Sugie K., A. Murata and N. Harada. Interactive effects of high CO₂ and temperature on growth and elemental composition of the western and eastern subarctic North Pacific phytoplankton communities. Ocean Science Meeting 2016. New Orleans, Louisiana, USA. 22-26 February, 2016.
- (16) Endo H., K. Sugie, T. Yoshimura and K. Suzuki. Taxon-specific responses of diatom assemblages to changing CO₂ availability in the Oyashio region of the western North Pacific during spring. Molecular Life of Diatoms. Seattle, USA. 7-10 July, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

- (1) 2016年 JAMSTEC カレンダー2017 に海洋地球研究船「みらい」MR16-06 次航海で得た画像の提供
- (2) 2016年 時事通信「北極フォトアルバム」に海洋地球研究船「みらい」MR16-06 次航海で取得した画像と説明文の提供
(http://www.jiji.com/jc/d4?p=acs168&d=d4_bbb)
- (3) 2016年 海洋地球研究船「みらい」MR16-06 次航海で実施した海洋酸性化の培養実験に関して, ArCS 通信に画像と実施内容を寄稿
(<http://blog.arcs-pro.jp/2016/11/20164.html>)
- (4) 2016年 JAMSTEC HP「今週の1枚」および JAMSTEC 横浜研究所一般公開において, 海洋地球研究船「みらい」MR16-06

次航海で得た画像とその説明文の提供
(http://www.jamstec.go.jp/j/hot_pictures/?477)

- (5) 2016年 海洋地球研究船「みらい」MR16-06 次航海 航海日誌ブログおよび ArCS ブログの執筆
(<https://ebcrpa.jamstec.go.jp/rcgc/j/act/observation/mr16-06/> および, <http://arctic-climate.com/>)
- (6) 2015年 海洋地球研究船「みらい」MR15-03 次航海 航海日誌ブログの執筆
(<https://ebcrpa.jamstec.go.jp/rcgc/j/act/observation/mr15-03/>)

アウトリーチ活動

- (1) 杉江恒二. CO₂ による海水の酸性化と藻類への影響. 特定非営利活動法人 海の森づくり推進協会 第16回海の森づくりシンポジウム 地球温暖化・海藻への影響と海の森作り - 藻類陸上養殖ビジネスの現状と展開 -. 2017年6月3日.
- (2) 杉江恒二. 海洋酸性化を正しく測る. 笹川平和財団「海洋教育支援制度パイオニアスクールプログラム」神奈川県立海洋科学高校. 2017年3月8日.
- (3) 杉江恒二. FM Azur (むつ市コミュニティFM) において, 北極航海, 海洋酸性化に関して話題提供. 2016年11月29日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉江 恒二 (SUGIE, Koji)

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

研究者番号: 00555261