

平成 22 年 6 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19310018
 研究課題名 (和文) ベーリング海東部陸棚域における過去 100 年にわたる生態系変動
 研究課題名 (英文) Changes in *Emiliana huxleyi* production recorded in surface sediment on the eastern continental shelf of the Bering Sea over the past 100 years.
 研究代表者
 原田 尚美 (HARADA NAOMI)
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー
 研究者番号：70344281

研究成果の概要 (和文)：近年、ベーリング海東部陸棚域において、円石藻 *Emiliana huxleyi* のブルーム (大增殖) が出現している。本研究ではブルームがいつから発生するようになったのかや、メカニズムの解明を目的とした。その結果、1970 年代半ばには既に生じており、優占種であった珪藻も 1970 年代以降、群集組成が変化していた。また、ブルームは太平洋十年規模振動の温暖期に発生するようになったことも明らかとなった。

研究成果の概要 (英文)：We have investigated temporal development of *Emiliana huxleyi* bloom on the continental shelf in the Bering Sea by a biomarker of *E. huxleyi*, C_{37} alkenones flux recorded in the sediments. As a result, the bloom had already been prominent since the middle of 1970' s. We also found the *E. huxleyi* bloom would be promoted by active Aleutian low, positive anomaly of Pacific decadal oscillation and lowering of salinity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	15,400,000	4,620,000	20,020,000

研究分野：理工系 (化学海洋学、古海洋学)
 科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析
 キーワード：化学海洋、生物海洋、極域環境

1. 研究開始当初の背景

ベーリング海は、冬季、海氷の張り出す高緯度に位置する縁辺海である。高緯度縁辺海における海氷の張り出しの盛衰は、現在進行しつつある温暖化を反映するグローバルな地球表層環境変動の敏感なバロメータとなる。加えて、冬場に発達するアリューシャン低気圧の盛衰は、ENSO 発生との関連が報告されており (Schwing et al., 2002)、低緯度

–高緯度間の大気を通じた気候変動のテレコネクションを解析する上でも重要な海域である。また、ベーリング海の植物プランクトンの優占種は珪藻であり「珪藻の海」と呼ばれるほどの高い生産量を誇る。春から初夏にかけて生じる珪藻のブルームは、海水中の二酸化炭素分圧を $150 \mu\text{atm}$ まで下げるほどであり (Sambrotto et al., 1986)、二酸化炭素の吸収域として非常に重要な海域である。

ところが、最近注目されているのが 1997 年以來報告されるようになった東部陸棚域における円石藻 (*Emiliania huxleyi*, 図 1) のブルームである (Vanse et al., 1998)。円石藻は、炭酸塩の殻を持ち、*E. huxleyi* の場合、炭酸塩殻を作る際には、光合成による二酸化炭素の吸収量に匹敵するほどの二酸化炭素を発生させる。従って、円石藻のブルームはそれまで二酸化炭素の吸収域であったベーリング海を発生域 (吸収域ではなくなるという意味で) に変えるという意味を持つ。

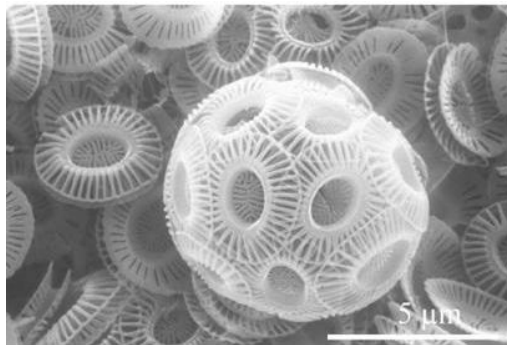


図 1 *Emiliania huxleyi* の電子顕微鏡写真

(1) 一体いつから発生するようになったのか?

ベーリング海陸棚域における表層堆積物 (30cm 長; 63°30' N, 165°30' W にて採取) を用いた本研究代表者による予察的な研究によると、*E. huxleyi* のバイオマーカーである長鎖不飽和アルキルケトンは、12cm 深度より上部で検出されることがわかった (Harada et al., in prep)。ベーリング海に生息する *E. huxleyi* はアラスカ海流によって常に太平洋から運ばれて来るが、堆積物から検出するには、ブルームなどの大規模発生による高濃度の沈降量が必要となってくる。12cm の深度は ²¹⁰Pb や ¹³⁷Cs によって推定される堆積速度から年代に換算すると 1960 年代に相当し、1997 年に報告されているより以前から *E. huxleyi* のブルームが発生していたことが示唆された。1997 年は Sea-viewing Wide Field-of-view (SeaWiFs) という高解像度の海色センサーを搭載した衛星の運用が始まった年であり、新規衛星の運用によって 1997 年にブルームを検出するところとなったことがわかる。1960 年代以降のブルーム出現がベーリング海陸棚域全域によるものなのかどうか、広範囲に表層堆積物を採取して精査し、この海域全体として生態系の変化が既に数十年前から始まっていた事を確認する必要がある。

(2) 他のプランクトン種はどう変化している

のか?

さらに古くまで遡ると、過去 7 万年を通じてベーリング海南部では生物起源粒子の 80% までが生物起源オパールで構成され、珪藻がその主要種であることがわかっている (堀・高橋, 2003)。従って、珪藻、鞭毛藻など円石藻以外の群集組成が 1960 年代以降の *E. huxleyi* ブルームの発生とともにどう変化してきているのか、二酸化炭素の吸収発生に直接関わる基礎生産者である植物プランクトン群集を中心にその生態系変動を把握する必要がある。

(3) その発生メカニズムは?

1997 年の *E. huxleyi* ブルームの発生は、穏やかな天候による表層水塊の成層化と高温化、それにもなう貧栄養塩状況がもたらした結果であると報告されている (Napp and Hunt, 2001)。また、2000 年の「みらい」航海によって観測された *E. huxleyi* ブルーム海域 (57-59°N, 166°W) においてもその直下の陸棚上に存在した冷水塊が表層まで含めて水塊を安定させていたことがわかっている。このように成層化した水塊が長期間保持されるというのは、穏やかな天候と密接に関係していると考えられ、その前の年の冬場のアリューシャン低気圧が弱いためであることも考えられる。一方、冷水塊の分布はどこで海水が融解したのかと関連していることがわかっており (Schumacher and Staben, 1998)、海水分布の変動も大気変動と密接に関連すると考えられる。従って、アリューシャン低気圧の変動や太平洋十年規模振動など、どのような気候と関連して発生しているのかを明らかにする必要がある。

(4) 発生の規模は?

ベーリング海陸棚域は、珪藻ブルーム後の死骸粒子やユーコン川から流れてくる陸起源粒子の存在などにより懸濁態粒子が多く存在し、それが衛星画像に白く映るために円石藻ブルームとの見分けが必要である。従って、1997 年以降の SeaWiFs 衛星画像の波長の違いなどから確実に円石藻ブルームを検出するとともにその分布面積を把握し、現場水塊の水温、塩分、栄養塩などとの関連性から発生メカニズムを探る必要がある。また、発生の時空間分布を積算することでおよその陸棚域全体における二酸化炭素の発生量の推定も行う事が可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、ベーリング海東部陸棚域において発生する円石藻ブルームが (1) 一体いつから発生するようになったのか (1997 年なのか?)、(2) 他のプランクトン種はどう変化しているのか? (3) その発生メカニズム

は？気候変動との関連性、(4) 発生の規模は？それから想定される二酸化炭素発生量（吸収しなくなってしまった量）はどの程度なのか？について明らかにする事を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究試料

試料は、海洋地球研究船「みらい」によってMR06-04航海において採取された表層堆積物を用いた（図2）。ベーリング海の陸棚域において12測点で約10~30cm長の表層堆積物が採取されている。これらがカバーする年代は予察的研究から想定して過去100年程度と考えられ、今回の研究に適した試料である。またSeaWiFsの衛星画像も本研究に使用した。

(2) 方法

表層堆積物試料に含まれる過去の環境復元を行うため、年代軸を挿入しなければならない。すべての堆積物試料の ^{210}Pb および ^{137}Cs を測定し、堆積速度の推定を行った。また、これらの放射能のプロファイルを利用して堆積環境の推定を行い、過去の復元に適した試料を選択した。選択された堆積物試料について、代替指標（パレオプロキシー）の分析を行った。*E. huxleyi*のバイオマーカー（アルケノン）の濃度からブルームの規模を推定した。

4. 研究成果

(1) 円石藻ブルームの変遷

^{210}Pb プロファイルから推測された堆積環境からSt. 22, 25, 26, 32の4測点の堆積物が過去を復元するのに適していることがわかった。図3にこの4測点の堆積物試料に含まれるアルケノンの濃度プロファイルを示す。堆積物中の有機化合物量は、堆積物内で微生物によって合成されるバイオマーカーを除き、一般的には続成作用を受けるため、濃度はバイオターベーション層以深で減少していく。アルケノンは有機化合物の中でも抗分解性であることから、アルケノン濃度変化における続成作用効果は小さいと考えられるが、分解によって失われているであろうアルケノン量を見積もり測定値の補正を行った。その結果、分解によって失われている可能性のあるアルケノン量は小さく、堆積物の濃度変化は、ほぼ*E. huxleyi*の生産量の変化を示すものと考えることができ、図3では濃度補正をしていない結果を示している。この結果から、場所によってアルケノンの濃度分布は不均質であることがわかる。ベーリング海東部陸棚斜面域近傍は特に植物プランクトンの生産が盛んに行なわれる海域であり、グリーンベルトと呼ばれるほどであり、この海域近傍のSt. 22, 32で特にアル

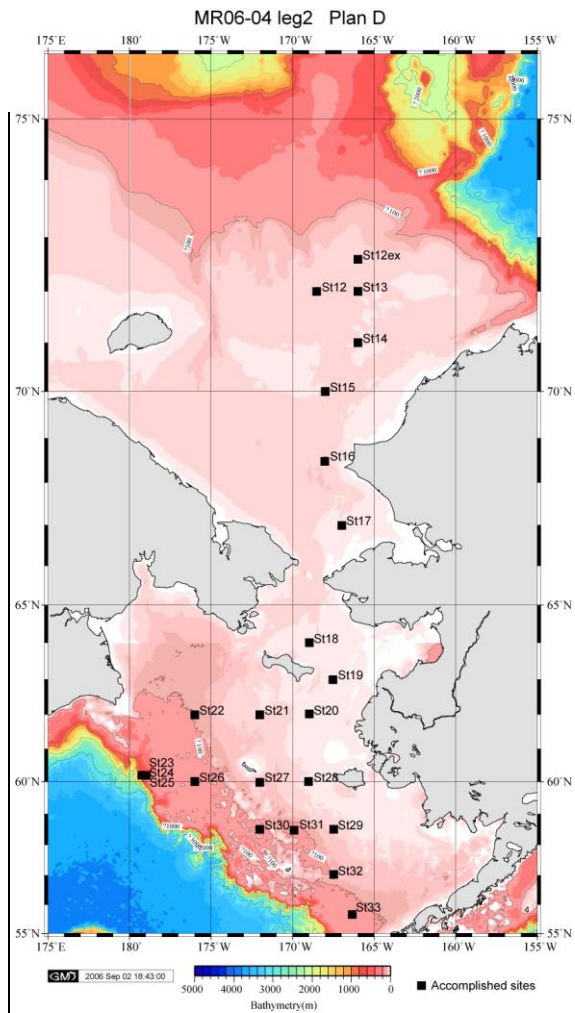


図2 表層堆積物採取点 (■)

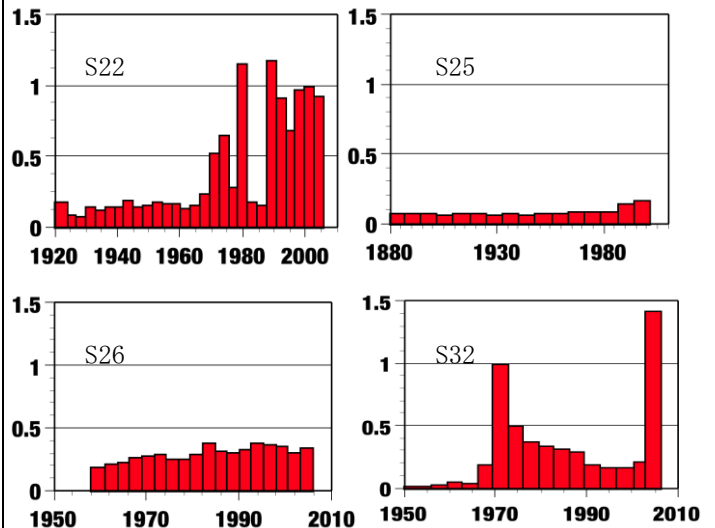


図3 堆積物に含まれるアルケノン濃度（縦軸は $\mu\text{g/g}$ で、横軸は年を表す）。各表の中の数字は図2に標記された観測点番号。

ケノン濃度も高く検出された。特筆すべきは、1970年代以降、急激に濃度が上昇している点で、恐らくこの頃から円石藻ブルームが顕著になってきたのではないかと考えられる。

(2) 円石藻ブルームのインパクト

補正後のアルケノン量、培養によって求められている単位細胞あたりのアルケノン量と炭素量から *E. huxleyi* が合成する有機炭素量を見積もり、衛星写真画像と *E. huxleyi* がブルームを生じる際の光波長特性アルゴリズムから確実に *E. huxleyi* がブルームを起こしている平均面積の推定値（1998-2002年の平均値）とから、*E. huxleyi* ブルーム時に合成される炭素量を計算により見積もった。その結果、1998年～2002年に発生した *E. huxleyi* ブルームによって合成された有機態炭素は、2,400～43,800tonC/yr、炭酸カルシウム態炭素は、1,900～35,000tonC/yr と見積もられた。この値は、サンゴや有孔虫など全世界の炭酸カルシウム合成生物によって合成される炭酸カルシウム態炭素の推定量 1Gton (10⁹ton)/yr (Archer and Maier-Reimer, 1994) に比して大変小さいものであり、*E. huxleyi* ブルーム時に合成される炭素量（或は発生する二酸化炭素量）のインパクトは小さいことがわかった。

(3) 円石藻ブルームの出現と気候変動の関係

堆積物に記録されたアルケノンの濃度は、1977年以降の太平洋十年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO) と連動して変化し、PDO が正のアノマリ（ベーリング海は温暖フェーズになる）の時にアルケノン濃度が高くなる傾向が見られた。つまり PDO でベーリング海が温暖モードになった時に、ブルームが発生してきた可能性がある。一方で、その前の正のアノマリの時代 (1920～1940年代) にはアルケノン濃度は低いままであり、ブルームは発生していないようであることがわかった。従って、*E. huxleyi* ブルームの発生は、PDO だけでは説明がつかない事がわかってきた。そこで、1920年代以降の8～9月のCTDや栄養塩の観測値を調べた結果、表層塩分に変化が見られ、1920～1940年代 (32～33.5) に比較して1977～2000年では31～32といった低塩環境が出現する頻度が高まった傾向が見て取れた。1977年以降の表層低塩傾向は、Argo ブイ観測からも報告されている (Hosono et al., 2009)。我々は、昨今の低塩環境が *E. huxleyi* ブルーム出現と関係しているのではないかと考え、塩分を変えた培養実験の結果 (萩野恭子私信) (図4) と合わせて考察を行った。培養実験の結果は、塩分のやや低い環境下 (30.5) で培養した株の方が塩分のやや高い環境下 (33.5) での培養よりも単位時間あたりの細胞密度の増加が

大きく、低塩環境が円石藻の生産を促進することがわかった。なぜ、低塩環境で生産が促進されたのだろうか？低塩環境の方が、細胞内における浸透圧調整物質の合成やナトリウム/水素アンチポーターを駆動するためのエネルギー消費が少なく済むこと、一方で、周辺の塩濃度が高くなると、それに合わせて細胞内でも塩濃度上昇がおり、タンパク質変成を生じて細胞の活性が低下するなど細胞レベルで塩分変化に反応することがわかる。この生理機能変化の理由から、低塩環境の方がより生産効率が高まるのではないかと考えられる。

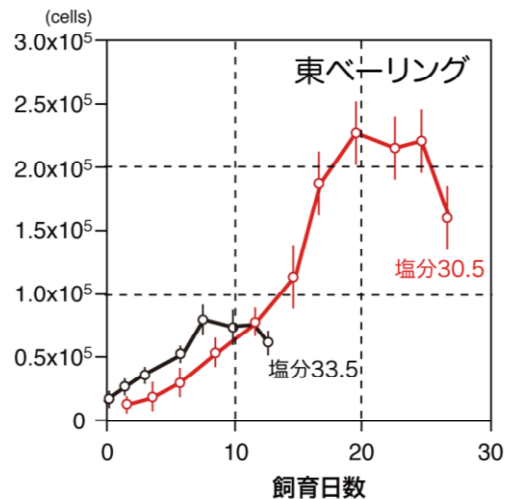


図4 東ベーリング海の *Emiliana huxleyi* 株を2種類 (30.5 と 33.5) の塩分環境下で培養した結果 (萩野私信)

(4) 今後の研究

本研究で採取されたベーリング海の *E. huxleyi* の遺伝子解析の結果、この株は大西洋アイスランド沖で1970年代からよく大発生している円石藻の遺伝子と非常に近縁種であるという結果を得た。この結果は、北極海を介して太平洋から大西洋へとプランクトンがダイナミックに移動している可能性を示唆するものである。また、北極海では海水の急激な消失による酸性化や低塩化など、プランクトンの生産に大きく影響を及ぼす環境の激変が起きており、ベーリング海から北極海へのプランクトンの移動のみならず、気候変動に伴う北太平洋-北大西洋間の海盆スケールでの海洋生物の移動や極域を含めた生態系の応答研究を実施していくことが重要であろう。新しい研究費を獲得して実施したいと考えている。

参考文献

- 堀・高橋 (2003) 月刊海洋, 35, No.6, 407-413.
Napp and Hunt (2001) Fisheries

Oceanography, 10, 61-68.
 Osterman (2001) In Woods Hole Oceanography Institute Annual Report, pp.17-18.
 Sambrotto et al. (1986) Cont. Shelf Res., 5, 161-198.
 Schwing et al. (2002) Progress in Oceanogr., 54, 459-491.
 Schumacher and Stabeno (1998) In The Sea, Vol.11, A.R. Robinson and K.H. Bring (eds.), John Wiley and Sons, 789-822.
 Vanse et al. (1998) EOS, Transactions AGU, 79, 122 and 126.
 Hosono et al. (2009) Journal of Oceanography, 65, 579-586.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Mizobata, K., K. Shimada, R. Woodgate, S.-I. Saitoh and J. Wang (2010) Estimation of heat flux through the eastern Bering Strait, Journal of Oceanography, 査読有 (in press).
- ② Katsuki K., Khim B.-K., Itaki T., Harada N., Sakai H., Ikeda T., Takahashi K., Okazaki Y. and Asahi H. (2009) Land-sea linkage of Holocene paleoclimate on the Southern Bering Continental Shelf, The Holocene, 査読有 19, 745-754.
- ③ Wang, J., H. Hu, K. Mizobata, and S.-I. Saitoh (2009) Seasonal variations of sea ice and ocean circulation in the Bering Sea: A model-data fusion study, Journal of Geophysical Research, 査読有, 114 doi:10.1029/2008JC004727.
- ④ Harada N. (2008) Ecological change of coccolithophorid influenced by climate change (in Japanese) Japan Geoscience Letters, 査読無, 4(3), 3-4.
- ⑤ Mizobata K., Saitoh S.-I., Wang. J. (2008) Interannual variability of summer biochemical enhancement in relation to mesoscale eddies at the shelf break in the vicinity of the Pribilof Islands, Bering Sea, Deep-Sea Res. II, 査読有 55, 1717-1728.
- ⑥ Konno, S., Ohira, R., Komuro, C., Harada, N. and Jordan, R.W. (2007) Six new taxa of subarctic siliceous nannoplankton (Palmalles, Chrysophyceae). Journal of Nannoplankton Research. 29 (2), 108-128 査読有
- ⑦ Konno, S., Harada, N., Narita, H. & Jordan, R.W. (2007) Living Braarudosphaera bigelowii (Gran &

Braarud) Deflandre in the Bering Sea. Journal of Nannoplankton Research. 査読有, 29 (2) 78-87.

[学会発表] (計 15 件)

- ① Saitoh, S.-I., I. N. Radiarta, T. Hirawake : An operational use of remote sensing and marine-GIS for sustainable fisheries and aquaculture (Invited), International Symposium on Remote Sensing and Fisheries, 2010年2月17日, Kochi, India.
- ② 原田尚美、佐藤都、岡崎裕典、小栗一将、多田井修、萩野恭子、今野進、R. W. Jordan、香月興太、S.-K. Hoon、成田尚史: ベーリング海東部陸棚域における円石藻 *Emiliana huxleyi* ブルームの発生要因, 日本海洋学会春期大会, 2010年3月29日, 東京海洋大学
- ③ 原田尚美、佐藤都、長島佳菜、岡崎裕典、小栗一将、多田井修、今野進、Richard W. Jordan、齋藤誠一、香月興太、Shin Kyung Hoon、成田尚史: 気候変動と海洋生態系-円石藻の海と珪藻の海-. 日本植物学会, 2009年9月19日, 山形大学 (招待講演)
- ④ Harada N., M. Sato, K. Nagashima, Y. Okazaki, K. Oguri, O. Tadai, K. Hagino, S.-I. Saito, S. Konno, R. W. Jordan, K. Katsuki, K.-H. Shin, H. Narita: Changes in C₃₇ alkenones flux on the eastern continental shelf of the Bering Sea -the record of *Emiliana huxleyi* bloom over the past 100 years-, PAGES 3rd Open Science Meeting, 2009年7月8日, Oregon State Univ., Corvallis, USA
- ⑤ Harada N., Oguri K., Tadai O., Konno S., Jordan R. W., Katsuki K., Shin K.-H., Narita H., Honda M., Kikuchi T. : Changes in C₃₇ alkenones recorded in sediment on the continental shelf of the Bering Sea: record of *Emiliana huxleyi* bloom (in Japanese). 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 2009年5月19日, 幕張メッセ国際会議場, 千葉
- ⑥ Harada N., Sato M., Nagashima K., Okazaki Y., Oguri K., Tadai O., Hagino H., Saitoh S.-I., Konno S., Jordan R. W., Katsuki K., Shin K.-H., Narita H. : Changes in C₃₇ alkenones flux on the eastern continental shelf of the Bering Sea -the record of *Emiliana huxleyi* bloom over the past 100 years -, Korea-Japan Jointed Workshop on Paleoceanography: Global Processes and Variability, 2009年4月24日, Jeju National University, Jeju, South Korea.
- ⑦ 浅原良浩、竹内ふみ、長島佳菜、原田尚美、

小栗一将、多田井修、山本鋼志：ベーリング海堆積物中の陸源碎屑物の Sr, Nd 同位体組成：過去 100 年間のアラスカ・シベリアの環境変動の記録 JAMSTEC ブルーアースシンポジウム 2009, 2009 年 3 月 13 日、立教大学

- ⑧ Harada N., M. Sato, Y. Okazaki, K. Oguri, O. Tadaï, S.-I. Saitoh, S. Konno, R. W. Jordan, K. Katsuki, K.-H. Shin, H. Narita: Changes in C₃₇ alkenones flux on the eastern continental shelf of the Bering Sea - the record of *Emiliana huxleyi* bloom over the past 100 years - AGU fall meeting, 2008 年 12 月 15 日, San Francisco, USA
- ⑨ 小栗一将、原田尚美、多田井修：ベーリング海東部陸棚域・表層堆積物の ²¹⁰Pb 濃度と堆積速度について、日本海洋学会春季大会, 2008 年 3 月 28 日, 東京
- ⑩ 原田尚美、佐藤都、長島佳菜、岡崎裕典、小栗一将、多田井修、齋藤誠一、香月興太、Shin Kyung Hoon、成田尚史：ベーリング海東部陸棚域における円石藻 *Emiliana huxleyi* ブルーム-過去 50 年の記録-, 日本地球化学会 2008 年会, 2008 年 9 月 17 日, 東京大学
- ⑪ 原田尚美: 気候変動が海洋生態系にもたらすもの, 第 49 回科学技術週間サイエンスカフェ, 2008 年 4 月 17 日, 東京
- ⑫ 原田尚美: 気候変動が海洋生態系にもたらすもの-太平洋と大西洋の結びつき-, 日本学術会議シンポジウム, 2008 年 3 月 21 日, 東京 (招待講演)
- ⑬ 原田尚美: 今、海洋生態系には何が起きているか?-ベーリング海の観測から-日本地球惑星科学連合 2008 年大会地球惑星科学トップセミナー, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日, 千葉 (招待講演)
- ⑭ 原田尚美、岡崎裕典、香月興太、小栗一将、多田井修、今野進、Jordan W. Richard, Shin K.-H.、成田尚史: ベーリング海東部陸棚域堆積物に記録された C₃₇ アルケノンフラックス変動-*Emiliana huxleyi* ブルームの記録-日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 27 日, 千葉
- ⑮ 原田尚美、佐藤都、岡崎裕典、小栗一将、多田井修、今野進、R. W. Jordan、香月興太・Shin K.-H.、成田尚史: ベーリング海東部陸棚域における円石藻 *Emiliana huxleyi* ブルーム-過去 50 年の記録-, 日本海洋学会春季大会, 東京海洋大学, 2008 年 3 月 28 日, 東京
- ⑯ 原田尚美、佐藤都、岡崎裕典、小栗一将、多田井修、今野進、R. W. Jordan・香月興太・K.-H. Shin、成田尚史: ベーリング海東部陸棚域における円石藻 *Emiliana*

huxleyi ブルーム-過去 50 年の記録-, JAMSTEC ブルーアースシンポジウム 2008, 2008 年 3 月 13 日, 横浜

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 尚美 (HARADA NAOMI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・チームリーダー

研究者番号：70344281

(2) 研究分担者

小栗 一将 (OGURI KAZUMASA)

独立行政法人海洋研究開発機構・海洋・極限環境生物圏領域・技術研究主任

研究者番号：10359177

齋藤 誠一 (SAITOH SEI-ICHI)

北海道大学・水産科学研究院・教授

研究者番号：70250503

木元 克典 (KIMOTO KATSUNORI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・技術研究主任

研究者番号：40359162 (H19→H20: 連携研究者)

岡崎 裕典 (OKAZAKI YUSUKE)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員

研究者番号：80426288 (H19→H20: 連携研究者)

長島 佳菜 (NAGASHIMA KANA)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境変動領域・研究員

研究者番号：90426289 (H19→H20: 連携研究者)