

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24241010

研究課題名(和文) 沿岸域における海洋酸性化の進行の特徴と微細藻類への影響

研究課題名(英文) Characteristic feature of ocean acidification in coastal area and its effect on microalgae

研究代表者

濱 健夫 (HAMA, Takeo)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：30156385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,900,000円

研究成果の概要(和文)：下田沖の定点において、4年間にわたり炭酸系を含む炭素循環に関連する項目について月1～2回の頻度で観測を実施した。二酸化炭素分圧は10月から3月にかけて増加し、4月から9月にかけて減少した。有機炭素濃度、光合成生産量などの変動から、微細藻類を中心とした微生物群集の代謝と水塊の鉛直混合が、分圧の変化を引き起こす主要な要因であることが明らかとなった。また、この分圧の年間の変動幅は、外洋域の2～3倍に達した。微細藻類の培養実験を通して、酸性化が進んだ条件下ではハプト藻 *Chrysochromulina* の増殖が阻害される可能性が見いだされた。

研究成果の概要(英文)：Various parameters concerning geochemical cycle of carbon such as carbonate system have been observed at coastal station off Shimoda, Shizuoka, Japan for 4 years. Partial pressure of carbon dioxide in the surface layer increased from Oct to Mar, and decreased from Apr to Sep. Seasonal changes in concentration of organic carbon and photosynthetic production rate indicates that microbial metabolism including microalgae and vertical mixing of water masses are the most important factors causing the seasonal variation of pCO₂. The magnitude of seasonal variation in the coastal water was revealed to be higher than those in open ocean by 2 to 3 times, due to high abundance of microbial biomass. Microalgal culture experiments revealed that *Chrysochromulina* sp. (Haptophyceae) is sensitive to the decrease in pH, indicating the growth of *C. sp.* will decrease in the acidified condition.

研究分野：生物地球化学

キーワード：海洋酸性化 炭酸系 沿岸域 微細藻類 炭素循環

1. 研究開始当初の背景

(1) 化石燃料の消費等、人為起源の二酸化炭素放出量の増加により、大気二酸化炭素濃度は上昇の一途をたどっている。海洋は人為起源二酸化炭素の重要な吸収源として知られており、人間活動により放出される二酸化炭素の約 25% を吸収していると推定されている。海洋により吸収された二酸化炭素は、炭酸水素イオンや炭酸イオンに解離する際に、水素イオンを水中に放出するため、海水の pH を低下させる。これが海洋酸性化である。産業革命以降、海洋表層の水素イオン濃度は 30% 程度増加したと見積もられ、その結果、pH 値は 0.1 低下した。大気二酸化炭素濃度が現在の 2 倍に増加すると推定される今世紀末には、pH は更に 0.3 程度低下すると予想されている。

(2) 外洋域では pH の精密分析を含む炭酸系の観測は、近年になり各国により実施されるようになった。しかし、沿岸域では、センサーによる pH の測定例は多くあるが、炭酸系全体を含めた研究例は少ない。沿岸域では外洋域に比較して微生物現存量も多いため、外洋とは異なった炭酸系の変動があり、これが酸性化の進行にも関連しているものと予想される。

(3) 海洋酸性化の進行は、炭酸カルシウムの殻を有する生物群だけでなく、殻を保有しない生物群にも影響を与えたと考えられる。このため、酸性化が有利あるいは不利に働く生物群を特定し、海洋酸性化が進行した状況における生物群集の変動とその物質循環に対する影響を評価することが必要である。

2. 研究の目的

(1) 沿岸域における酸性化の進行を解析するために必要となる各種パラメーターの詳細な情報を、毎月の観測により得る。これにより、沿岸における炭酸系の季節変動の特徴とそれを支配する要因について明らかにする。

(2) 沿岸域に特徴的に発達する藻場における炭酸系変動の特性を、連続モニターすることにより明らかにする。

(3) 自然微生物群集を用いて、異なった pH 条件下で培養を行うことにより、微細藻類組成に対する海洋酸性化の影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 沿岸域における炭酸系の季節変動

観測は、下田大浦湾沖の水深 48 m の測点を定点として、月 1 回の観測を行った。採水深度は光の透過をもとに決定し、海表面の光量子量の 100、54、30、16、8 および 5% の 6 層からニスキン採水器により採取した。得られた試料について、全炭酸濃度、二酸化炭素分圧 (pCO₂)、pH、懸濁態有機炭素 (POC)・窒素 (PON) 濃度、栄養塩濃度、クロロフィル a および光合成生産量の測定を実施した。

(2) 藻場海域における炭酸系変動の特徴

下田市大浦湾の志太ヶ浦に発達するカジ

メ・アラメ場の水深 3-5 m の点に、pH の連続測定センサーを設置した (海底から 50 cm)。センサーでは 30 分毎に pH と水温を記録した。また、センサーで得られる pH 値を補正するため、炭酸測定用試料も随時採取し、測定を行った。

(3) 微細藻類組成に対する酸性化の影響に関する培養実験

500 L の大量培養器を用いた培養実験は、2012 年および 2013 年に、筑波大学下田臨海実験センターにおいて実施した。2012 年は、二酸化炭素分圧を 400、800、および 1200 μatm の 3 種類で (各条件 2 培養器)、2013 年は 400 および 1000 μatm の 2 種類で (各条件 3 培養器) 実施した。実験開始時に栄養塩 (硝酸塩、リン酸塩、珪酸塩) を添加した後、2012 年は 34 日間、2013 年は 25 日間実験を継続した。培養器から円柱状の採水器を利用して試水を鉛直的に採取し、得られた試料から pH、全炭酸などの炭酸系の情報および植物色素濃度、懸濁態有機炭素濃度など、生物学的情報の分析を実施した。本報告書では、2012 年の結果について述べる。

また、以前の研究において、酸性化条件下で増殖速度の低下が確認されたハプト藻の *Chrysochromulina* に関しては、室内実験により酸性化の影響を評価した。

4. 研究成果

(1) 沿岸域における炭酸系の季節変動

① 物理化学的要因

CTD センサーによって測定した下田沖における水温は、2013 年 9 月の表層で最大値 25.1°C を示し、その後 2014 年 3 月まで低下した。最小値は 2014 年 3 月の表層において 13.3°C が観測され、以降は上昇傾向となった (図 1)。本研究では、混合層の定義を、深度 10 m を基準とし、ポテンシャル密度の差が 0.125 以内の深度までと定義した。その結果、2013 年 11 月~2014 年 4 月にかけては混合層の深さが約 40 m に達していた。一方、2013 年 7~9 月では 6-8 m、2014 年 6~8 月では 7-12 m と、夏季において混合層は浅くなった。観測期間中の有光層における水温の平均値は $20 \pm 3.5^\circ\text{C}$ であり、pCO₂ と pH は水温 20°C によって規格化することとした。

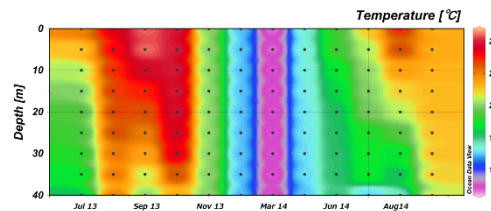


図 1 下田沖定点における水温の変化

② 生物学的要因

Chl. a 濃度は、2013 年 9 月~2014 年 1 月まで大きな変動はなく、全ての層において $0.500 \mu\text{g L}^{-1}$ 以下であった (図 4)。2014 年 3 月以降、Chl. a 濃度は増加する傾向が確認され、

2014年6月の深度14mにおいて最大値7.02 $\mu\text{g L}^{-1}$ が観察された。また3月以降は、深度によるChl.a濃度の差も生じていた。表層よりも深い層においてChl.a濃度は高くなる傾向が認められ、その差が最も大きくなった2014年6月では3.79(0m)~7.02 $\mu\text{g L}^{-1}$ (14m)の範囲で変動した。有光層におけるChl.a濃度の積算値は、2013年9月に最小値2.04 mg m^{-2} 、2014年6月に最大値101 mg m^{-2} を示し、観測期間中に最大99.0 mg m^{-2} の変動が観察された。

③ 炭酸系

溶存態無機炭素(DIC)濃度は、2013年7月から2014年3月にかけて増加し、その後減少する季節的な変動が観察された。塩分35‰で規格化し、蒸発や降雨の影響を除いたnDICは、2013年10月の9m(相対光量子16%)において最小値1982 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 、2014年3月の23.5mにおいて最大値2072 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ を示した(図2)。観測期間中、nDICの鉛直平均値の変動幅は97.2 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ であり、DICの変動幅よりも14.8 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 低い値となった。また、nDICの鉛直積算値は、現場で観察されたDICの変動と同様、春から夏に減少、そして秋から冬にかけて増加する傾向を示した。



図2 nDIC濃度の変化

二酸化炭素分圧($p\text{CO}_2$)は、2013年7月の0mで最小値265 μatm 、2013年11月の28mにおいて最大値433 μatm を示した。観測期間中、 $p\text{CO}_2$ は深い層において値が大きくなる傾向が認められ、2013年11月では表層(0m)と28mの間で79.6 μatm の差が生じた。水温20度によって規格化することにより、水温の影響を除いた $np\text{CO}_2$ には、 $p\text{CO}_2$ よりも明確な季節変動が認められ、2013年7月~2014年3月まで増加傾向、その後2014年10月まで減少傾向を示した(図3)。 $np\text{CO}_2$ の最大値は2014年3月の23.5mで457 μatm 、最小値は2013年7月の0mにおいて240 μatm となった。全期間を通して、 $np\text{CO}_2$ は深層ほど値が高くなる傾向であり、2014年の7月では、深度0~20mにおいて315~387 μatm の変動が確認された。

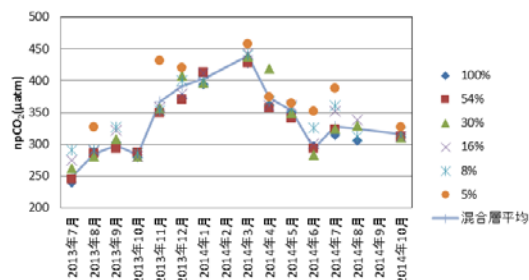


図3 $np\text{CO}_2$ の変化

pHは $p\text{CO}_2$ と逆の変動が認められ、2013年7月0mで最大値8.19、2013年11月の28mにおいて最小値8.01を示した(図4)。pHの鉛直平均値は、2013年7月に最大値8.18、2013年12月に最小値8.05を示し、その変動幅は0.13であった。pHは表層よりも深層で低くなる傾向があり、2013年11月では0~28mにおいて、pH8.01~8.09の変動を示した。水温20°Cで規格化したpHTは2013年7月~2014年3月まで減少傾向、その後2014年10月まで増加傾向となった。pHTは2013年7月の0mにおいて最大値8.23、2014年3月の23.5mにおいて最小値8.00を示した。pHTはpHと同様、深層ほど値が低くなる傾向が認められ、2014年7月では0~20mにおいて8.13~8.01の変動を示した。

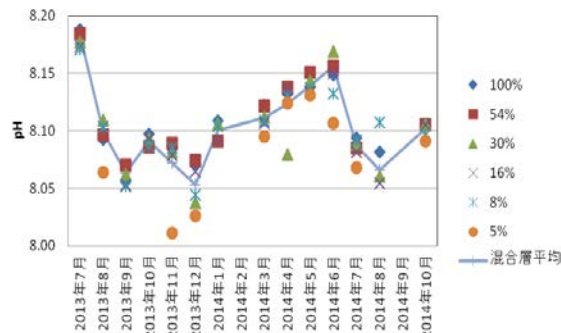


図4 pHの変化

④ 大気-海洋間 CO_2 フラックス

大気-海洋間 CO_2 フラックスは、大気、海洋の $p\text{CO}_2$ と風速の値を用いて算出した。 CO_2 フラックスの正の値は海洋から大気への CO_2 放出、負の値は海洋の大気 CO_2 吸収を表す。大気 CO_2 の値として用いた綾里における大気 $p\text{CO}_2$ の月平均値は390~407 μatm の変動を示し、3~8月頃にかけて減少、その後9~2月頃にかけて増加する傾向であった。下田沖の表層で観察された $p\text{CO}_2$ から大気 $p\text{CO}_2$ を差し引いた $\Delta p\text{CO}_{2\text{sea-air}}$ は、-7.54~-126 μatm となり、2013年10月に最大値、2013年7月に最小を示した。また、常に海洋表層の $p\text{CO}_2$ は大気値を下回っており、観測期間中 $\Delta p\text{CO}_{2\text{sea-air}}$ の値は負の値となった。

一方、算出に用いた静岡県石廊崎における風速の月平均値は $2.8\sim 6.5\text{ m s}^{-1}$ であった。これらの値から求めた下田沖のフラックスは、 $-2.2\sim -0.1\text{ mol m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ と算出され、春に減少するが夏では増加傾向となることが示唆された。また、フラックスは常に負の値であり、年間を通して海洋が大気中の CO_2 を吸収していることが明らかとなった。さらに、下田沖における 2013 年の年間平均値は $-1.09\text{ mol m}^{-2}\text{ yr}^{-1}$ となった。

⑤ まとめ

沿岸域における炭酸系の変動の季節変化を明らかにすることにより、秋季から冬季における鉛直混合と、春季から夏季における生物生産が、DIC および pH 等の季節変化を生ずる主要な要因である事が明らかとなった。また、季節的な変動幅は、従来外洋域で認められていた変動幅より大きいものであった。これは、沿岸域における微生物代謝量の大きさを反映している。また、研究対象とした下田沖では、年間を通して大気二酸化炭素の九州行きである事が明らかとなった。

(2) 藻場における炭酸系変動

① 藻場における pH の変化

藻場内の海底近くに設置した pH センサーによる連続測定の結果について、水温 (25°C) で標準化した。また、センサーのドリフトの影響を排除するため、センサー測定で得られた値は、DIC の実測値を用いて補正した。1 月から 4 月に関しては、pH 値 7.9 から 8.3 の間で規則的な日周変化を示した。また、7 月はやや高めの数値で変動したが、8 月においては、全体に pH 値は低くなり、7.8 から 7.9 の間で変動した。

② pH の日変動

pH の日変動は観測中すべての月において確認されており、各月の代表的な測定結果を図 5 に示す。測定値は 1 月を除いて、午前 6 時頃に最低値を示し、午前中増加した。極大値は 12 時から 14 時に認められ、それ以降は翌朝の 6 時にかけて減少を示した。pH の日周変化は藻場内で測定した光量子の増減と対応しており、海藻類の光合成が pH の日周変動を引き起こす原因である事が示唆される。

光合成量を規定する要因である光量子量と、光合成量を示すパラメーターである DIC の極小値と極大値の差との関係について検討した。その結果、比較した時間帯における積算光量子量が増加するにつれて DIC の減少量も増加する傾向にあった。しかしながら、その関係は年間を通して一定ではなく、季節により大きな変化が認められた。一般に、夏期 (8、9 月) においては、光量子量の増加に対する DIC 変化量の増加は緩やかであったのに対して、冬期 (1、2 月) は少ない光量子量の条件下でも大きな DIC の減少が認められた。

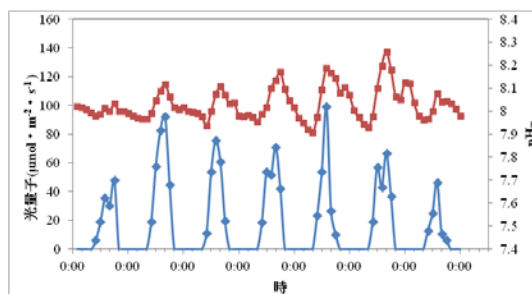


図 5 藻場における pH (赤) と光量子 (青) の日周変化

③ まとめ

多くの海洋沿岸域では、海藻あるいは海草の群落が発達しているが、海藻 (草) の光合成および呼吸は海水中の炭酸系の短期的な変動を引き起こしていることが明確となった。この昼夜における代謝系の変化は、pH 値として 0.3 程度の変化を伴っていた。つまり、沿岸域では外洋域において半世紀から一世紀を通して生ずる酸性化が半日周期で繰り返されていることになる。沿岸域に生息する微細藻類はこのような短い周期の炭酸系の変動が生ずる状況で生息していることになる。従来の海洋酸性化が微細藻類に与える影響の評価に関する研究では、このような短期的な変動の影響は考慮されてこなかった。今後の研究においては、沿岸域特有の短期的な炭酸系の変動も含めて解析する必要がある。

(3) 微細藻類群集組成に対する酸性化の影響に関する培養実験

① pH と二酸化炭素分圧の変動

培養期間中の pH 値は 400、800 および 1200 μatm の条件下で、それぞれ、7.9-8.1、7.6-7.8、および 7.4-7.6 の間で維持することができた (図 6)。実験開始後 2-4 日においては、 pCO_2 が減少し、pH が上昇する傾向が各培養器において認められたが、これは、微細藻類の光合成による二酸化炭素の取り込み量が増加したためと考えられる。栄養塩濃度は添加直後から数日で急速に減少し day3 付近で枯渇状態となった。

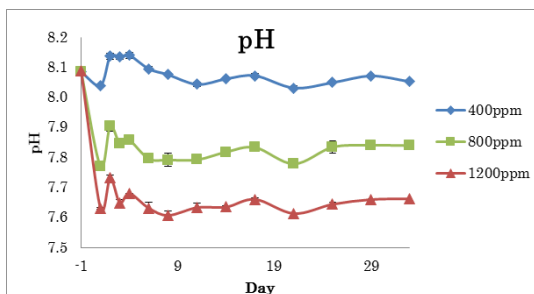


図 6 実験期間を通した pH の変化

② 細胞数の変化

フローサイトメータにより微細藻類の細胞数およびサイズの測定を行った。全微細藻類の密度は培養開始後急激に増加し、全ての条

件下で day 2 でピークを迎えた後減少した (図 7)。4 日目以降は低い値で終始した。

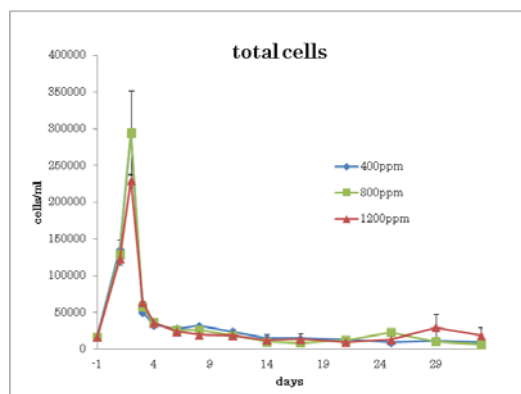


図 7 実験期間を通した全微細藻類細胞数の変化

微細藻類についてサイズごとに 4 つの画分 (2 μm 以下、2~6 μm 、6~10 μm 、10 μm 以上) に分画して細胞密度を求めた結果、一部で条件による顕著な差がみられた。2 μm 以下の細胞は day 2 のピーク時に 1200 μatm で低い傾向を示した一方で、2~6 μm の細胞は同時期に酸性化条件ほど高い傾向となった。なお、全細胞数においてピーク時にみられた差は、2 μm 以下の細胞の細胞密度が他と比べて非常に高いため、その差を反映したものであった。6~10 μm の細胞は day 2~day 4 にかけて、酸性化条件ほど高い値を示したが、その後 day 8 では逆転が生じた。最も顕著な差を示したのが 10 μm 以上の細胞数であり、day 3、4 のピーク付近では通常条件に対し酸性化条件で高い値であったが、その後 day 6~day 17 まで継続的に酸性化条件下で低い値を記録した。

③ 色素濃度の変化

群集全体のバイオマスの指標である Chlorophyll *a* 濃度は栄養塩添加後急速に増加し day 2 でピークを迎えたのち減少した。その後はほぼ横ばい状態であった。条件間での顕著な差は示さなかったが、ピーク時など一部において、酸性化条件で高い傾向も認められた。

④ ハプト藻 *Chrysochromulina* の増殖と酸性化

培地の pH を塩酸と水酸化ナトリウムにより 8.2、7.8 および 7.6 の 3 種類に調整し、それぞれにおいて、*Chrysochromulina* sp. の増殖速度を比較した。その結果、対数増殖期に相当する 4 日目以降で、pH の違いによる増殖速度の差が確認された。最大の速度を site したのは pH 8.2 であり、pH 7.8 さらに 7.6 の条件下では、増殖速度の低下が認められた (図 8)。この結果は、濱ら (Hama et al., 2012) が微細藻類の自然群集を用いて得た同属の海洋酸性化に対する脆弱性を、室内培養実験を通して確認することができた。同属は、海洋

の一次生産者として重要であることから (Liu et al., 2010)、今後の酸性化が海洋微細藻類に与える影響を評価する際に、非常に重要な藻類グループであることが、改めて確認された。

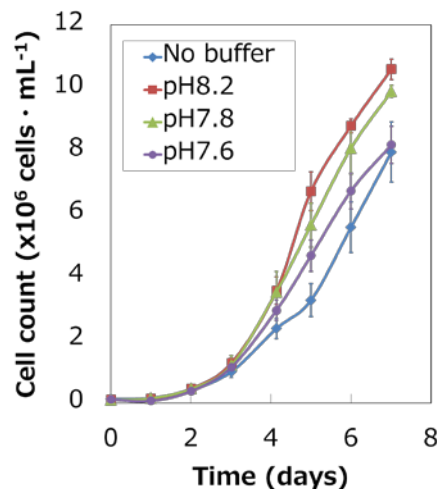


図 8 ハプト藻 *Chrysochromulina* sp. の異なる pH 条件下における増殖

⑤ まとめ

自然微生物群集を用いた酸性化の影響評価実験を複数回実施したが、常に同一のグループの増殖が阻害される、あるいは促進されることは認められなかった。これは、微生物群集の構成や各グループの生理状態が、実験により変化していたことなどが考えられる。

〈引用文献〉

① Hama, T, Kawashima, S, Shimotori K, Satoh Y, Omori Y, Wada S, Adachi T, Hasegawa S, Midorikawa T, Ishii M, Saito S, Sasano D, Endo H, Nakayama T and Inouye I (2012) Effect of ocean acidification on coastal phytoplankton composition and accompanying organic nitrogen production. *Journal of Oceanography*, 68, 183-194.

② Liu, H, Probert I, Uitz J, Claustre H, Aris-Brosou S, Frada M, Not F, des Vargas C (2009) Extreme diversity in noncalcifying haptophytes explains a major pigment paradox in open oceans. *PANS*, 106, 12803-12808.

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 2 件)

① Takeo Hama, Tomoki Inoue, Risa Suzuki, Hiroto Kawarazaki, Shigeki Wada, Daisuke Sasano, Naohiro Kosugi, Masao Ishii: Response of a phytoplankton community to nutrient addition under different CO₂ and pH conditions. *Journal of Oceanography*,

査読有、72巻、2016年、207-223.

② 濱 健夫：100年後の海は？ 海洋酸性化—もう一つの二酸化炭素問題—、筑波大学環境報告書 査読無、2013年、13-17.

[学会発表] (計 9件)

① Takeo Hama, Tomoki Inoue, Risa Suzuki, Wakana Matsushita, Shigeki Wada, Daisuke Sasano, Naohiro Kosugi, Masao Ishii: Predominance of picoplankton in coastal phytoplankton population under acidified condition. Estuarine Coastal Sciences Association 54, 2014年5月15日, Sesimbra 会議場 (セジンプラ・ポルトガル) .

② Wakana Matsushita, Shigeki Wada, Masao Ishii, Daisuke Sasano, Naohiro Kosugi, Takeo Hama: Seasonal change in carbonate system and controlling factors off the coast of Shimoda, Japan. Ocean Science Meeting, 2014年2月25日, University of Hawaii (ホノルル・米国) .

③ Tomonki Inoue, Shigeki Wada, Daisuke Sasano, Takeo Hama: Effect of Ocean acidification on coastal phytoplankton community structure. Ocean Science Meeting, 2014年2月25日, University of Hawaii (ホノルル・米国) .

④ 松下幼奈、和田茂樹、石井雅男、笹野大輔、小杉如央、濱 健夫、下田沖における炭酸系の季節変動とその支配要因、2013年日本海洋学会秋季大会、2013年9月19日、北海道大学 (北海道・札幌市)。

⑤ 井上幸樹、濱 健夫、鈴木莉紗、松下幼奈、柏崎啓人、和田茂樹、笹野大輔、石井雅男、小杉如央、海洋酸性化が沿岸植物プランクトン群集に及ぼす影響 2. サイズ組成、2013年日本海洋学会秋季大会、2013年9月19日、北海道大学 (北海道・札幌市)。

⑥ 濱 健夫、鈴木莉紗、井上幸樹、松下幼奈、柏崎啓人、和田茂樹、笹野大輔、石井雅男、小杉如央、海洋酸性化が沿岸植物プランクトン群集に及ぼす影響 1. 光合成生産、2013年日本海洋学会秋季大会、2013年9月19日、北海道大学 (北海道・札幌市)

⑦ 柏崎啓人、鈴木莉紗、井上幸樹、和田茂樹、笹野大輔、濱 健夫、海洋酸性化が微生物群集組成および機能に与える影響 3. 蛍光性溶存態有機物生産過程、2012年度日本地球化学会年会、2012年9月11日、九州大学 (福岡県・福岡市)。

⑧ 井上幸樹、鈴木莉紗、柏崎啓人、和田茂

樹、笹野大輔、濱 健夫、海洋酸性化が微生物群集組成および機能に与える影響 2. 植物プランクトン群集組成、2012年度日本地球化学会年会、2012年9月11日、九州大学 (福岡県・福岡市)。

⑨ 鈴木莉紗、柏崎啓人、井上幸樹、和田茂樹、笹野大輔、濱 健夫、海洋酸性化が微生物群集組成および機能に与える影響 1. 一次生産過程、2012年度日本地球化学会年会、2012年9月11日、九州大学 (福岡県・福岡市)。

[図書] (計 1件)

① 濱 健夫、生物と地球環境の変化 「現代人のための統合科学—ビッグバンから生物多様性まで—」、筑波大学出版会、2012年、385ページ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱 健夫 (HAMA, Takeo)
筑波大学・生命環境系・教授
研究者番号：30156385

(2) 研究分担者

笹野 大輔 (SASANO, Daisuke)
気象庁気象研究所・海洋・地球化学部・研究員
研究者番号：10462524

中山 剛 (NAKAYAMA, Takeshi)
筑波大学・生命環境系・准教授
研究者番号：40302369

和田 茂樹 (WADA, Shigeki)
筑波大学・生命環境系・助教
研究者番号：60512720

大森 裕子 (OMORI, Yuko)
筑波大学・生命環境系・助教
研究者番号：80613497

(4) 研究協力者

石井 雅男 (ISHII, Masao)
小杉 如央 (KOSUGI, Naohiro)
井上 幸樹 (INOUE, Tomoki)
鈴木 莉紗 (SUZUKI, Risa)
柏崎 啓人 (KASHIWAZAKI, Hiroto)
松下 幼奈 (MATSUSHITA, Wakana)
菅 優里 (SUGA, Yuri)