

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20310006

研究課題名（和文） 海洋表層におけるケイ素と炭素の生物地球化学的循環のカップリング

研究課題名（英文） Coupling of silicon and carbon biogeochemical cycles in the surface ocean

研究代表者

武田 重信（TAKEDA SHIGENOBU）

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・教授

研究者番号：20334328

研究成果の概要（和文）：

海洋表層における生物地球化学的な炭素循環が、有光層へのケイ素の移出入とどのようにカップリングしているのかについて、西部北太平洋亜寒帯域と東シナ海を主な対象海域として研究を行った。その結果、鉄や亜鉛などの微量元素の動態がケイ藻群集による粒子状有機炭素と生物ケイ酸の生産ならびに下層への移出と密接に係わっていること、優占する珪藻種の違いがそれらの過程に大きく影響することが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

Coupling of silicon dynamics and carbon biogeochemical cycles in the euphotic zone was studied in the western subarctic Pacific Ocean and the East China Sea. Productions of particulate organic carbon and biogenic silica by phytoplankton assemblage and their export to the subsurface layers were affected by availabilities of trace elements such as iron and zinc. Characteristic of dominant diatom species was another important factor that controls balance between carbon and silicon fluxes in the euphotic zone.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海洋科学、海洋生態、地球化学、環境変動、炭素循環

1. 研究開始当初の背景

ケイ藻は、海洋一次生産の約45%を担っていると見積もられており、炭素・窒素をはじめとする生元素の循環に重要な役割を果たしている。また、ケイ藻が作るケイ酸質の殻の一部は、ケイ藻遺骸として海底堆積物中に保存されるため、古環境の復元や地球環境の変動を解析する上での指標として注目されているが、他の指標と必ずしも一致しないこ

とから炭素循環とケイ素循環の関係解明は大きな課題となっている。

増殖にケイ酸を特異的に要求するケイ藻の生産は、窒素・リンの供給や光環境に加えて、ケイ素の循環および物質収支バランスによる制御を受ける。さらに、ケイ藻細胞に含まれる炭素・窒素・リンとケイ素の元素比は、鉄や亜鉛などの微量栄養素をはじめとする様々な環境要因によって変動する。このため、

多様な植物プランクトン種が関与する海洋一次生産において、ケイ藻が果たしている機能とその重要性を評価するためには、海洋表層におけるケイ素の移出入が有機炭素の生産、分解、移動とどのような形でリンクしているのかを明らかにする必要がある。しかし、ケイ素循環と炭素循環のカップリングについては、これまで定性的な把握に留まってきた。

このような状況を打開する手段の一つとして、ケイ素安定同位体を利用した海洋現場における生物ケイ酸の生産・溶解速度の測定に基づく解析手法がある。これを従来の炭素循環研究と組み合わせて、海洋表層における炭素とケイ素の生物地球化学的な循環を同時に把握することによって、生物により駆動される海洋物質循環の変動機構の定量的な理解が進むものと期待される。

2. 研究の目的

海洋表層における生物地球化学的な炭素循環が、表層（有光層）へのケイ素の移出入とどのようにカップリングしているのかを明らかにすることを主目的として、以下の3項目について明らかにすることを試みた。

- (1) 海洋表層での植物プランクトン群集による有機炭素生産と生物ケイ酸生産の時空間変動
- (2) 主要な珪藻種の遺骸の有機炭素および生物ケイ酸の分解・溶解過程とその速度
- (3) 珪藻による炭素・ケイ素の取り込みに対する微量元素の影響

これらにより、生物活動による海洋表層から深層への炭素移送効率を制御する要因としてのケイ素循環および珪藻生産の重要性を評価し、古海洋環境における生物生産活動の変遷解析ならびに将来の気候変動に対する海洋生態系応答予測の高度化に資することを目指した。

3. 研究の方法

フィールドにおける観測と船上・陸上での培養実験、陸上実験室での同位体分析により研究を実施した。現場観測では、春季から秋季にかけてケイ藻を主体とする植物プランクトンブルームが出現する西部北太平洋亜寒帯域と東シナ海を主な対象海域とした。

(1) 粒子状有機炭素および生物ケイ酸

有光層内の各層からCTD-ニスキン採水を行って海水試料を採取し、ポリカーボネート製メンブレンフィルター（孔径0.6 μm）およびグラスファイバーフィルター（GF/F）上に懸濁粒子を減圧ろ過捕集した。生物ケイ酸濃度と粒子状有機炭素濃度は、それぞれアル

カリ溶解・比色分析法および燃焼式CN元素分析計により測定した。生物ケイ酸濃度の算出に際しては、試料中のAl濃度に基づき鉱物起源ケイ素を補正した。

また、海水中の溶存ケイ酸等の栄養塩濃度については、オートアナライザーを用いて測定した。

(2) 有機炭素・生物ケイ酸の生産速度

海面から有光層直下までの各層から水中光量別に鉛直採水し、¹³Cおよび³⁰Siトレーサー添加培養法により一次生産速度と生物ケイ酸生産速度を測定した。培養は、表面海水かけ流し水槽内で光量を採水層に合わせて24時間行い、培養の開始時と終了時にろ過捕集した懸濁粒子中の炭素およびケイ素同位体比を質量分析計により測定して、有機炭素および生物ケイ酸の生産速度を算出した。

また、珪藻が生物ケイ酸の殻を生成する際、殻と同時に取り込まれる蛍光染色剤（PDMPPO）を用いて船上培養を行い、現場で増殖している珪藻種を蛍光顕微鏡観察により同定した。

(3) 微量元素

CTDマルチ採水システムに取り付けたX型ニスキン採水器を用いて、鉛直的に海水を採取した。表層海水については、曳航体に取り付けたテフロンチューブとテフロンポンプを用いて、連続的にクリーンな海水試料を採取した。海水中の亜鉛については電気化学的手法（カソーディックストリッピングボルタメトリー、CSV）によって分析を行った。海水中の亜鉛の有機錯体については、CSVを用いた金属滴定法を使って測定を行った。

4. 研究成果

(1) 海洋表層での植物プランクトン群集による有機炭素生産と生物ケイ酸生産の時空間変動

① 西部北太平洋亜寒帯域

2008年7-8月の白鳳丸航海において、西部北太平洋亜寒帯域の定点K2の100~0.4%光量の8層から海水を採取し、生物ケイ酸と有機炭素の生産速度を調べた。珪藻群集においては小型の羽状目珪藻が優占していたが、植物プランクトン群集全体の生物量で見ると渦鞭毛藻、クリプト藻、微小鞭毛藻類が卓越していた。このため水柱の有機炭素生産に対する生物ケイ酸生産の割合が相対的に低くなる傾向にあった。同海域では溶存鉄濃度が低く、鉄不足が大型珪藻などの増殖制限要因になっていたと考えられる。但し、有光層下部や有光層直下には大型珪藻が植物プランクトン群集全体に占める割合が比較的大きくなっており、有光層下部における生物ケイ酸の生産過程を把握することが、水柱の有機炭素生産と生物ケイ酸生産のバランスを考

える上で重要になることが示された。

②東シナ海

2010年7月の長崎丸航海において、東シナ海の済州島南方海域の表層水中の溶存ケイ酸と生物ケイ酸濃度、および懸濁粒子中の生物ケイ酸と有機炭素の Si:C 比の分布を調査し、同海域の栄養塩循環や一次生産に果たす珪藻の役割について検討した。済州島南西沖には溶存ケイ酸濃度 2~10 μM の表層水が広く分布していたが、局所的に溶存ケイ酸濃度の低い水塊がいくつか認められた。溶存ケイ酸濃度の低い海域は、生物ケイ酸濃度の高い海域と対応しており、調査期間中にも珪藻のブルームが観測された (図 2)。

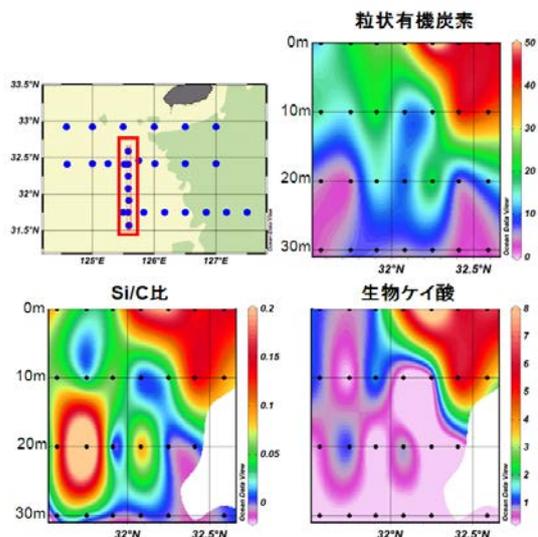


図 2 2010年7月の東シナ海の南北断面における生物ケイ酸と粒状有機炭素の分布と Si:C 比

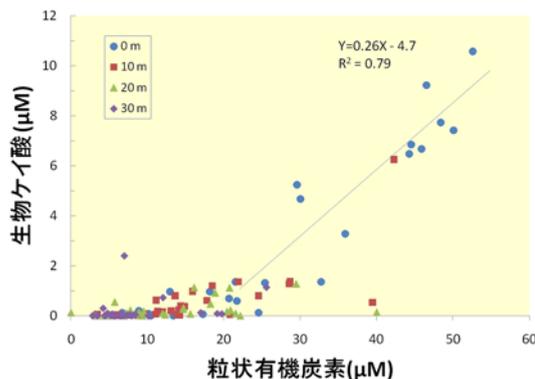


図 3 2010年7月の東シナ海における生物ケイ酸と粒状有機炭素濃度の関係 (回帰式は 0m のデータに基づく)

PDMP0 で染色された珪藻殻の観察結果から、活発に増殖してブルームを形成していたのは、*Chaetoceros* と *Pseudo-nitzschia* 属の珪藻であったことが明らかになった。その表

面水の生物ケイ酸と粒状有機炭素の Si:C 比は約 0.26 であり (図 3)、栄養十分条件で室内培養した珪藻の平均的な Si:C 比 (0.13) と比較してやや高いものの、同海域における有機炭素の下層への輸送に珪藻が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

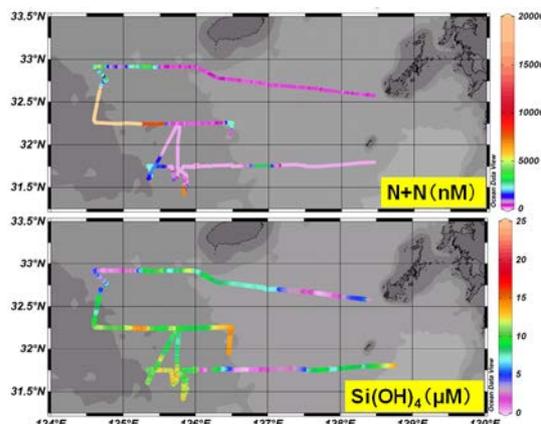


図 4 2011年7月の東シナ海における表層水の硝酸塩+亜硝酸塩 (N+N) および溶存ケイ酸濃度の水平分布

珪藻によって駆動される炭素とケイ素の循環に影響を及ぼす主要な環境要因が、海洋の現場においてどのように機能しているのかを明らかにするため、2011年7月に東部東シナ海において調査を行った。済州島南方海域の広範囲で、長江希釈水の影響を受けた低塩分・高硝酸塩濃度の表層水が認められたが、表層の溶存ケイ酸と硝酸塩の濃度分布の間には明確な違いがあった (図 4)。前年度に同海域で観測されたような明瞭な珪藻ブルームは本航海中に見られなかったが、珪藻の増殖に起因すると考えられる溶存ケイ酸の枯渇域は、済州島の南西および南方の硝酸塩濃度が比較的高かった海域だけでなく、五島列島と済州島との黒潮系水の影響を強く受けた貧栄養海域でも認められ、陸棚縁辺域の鉛直混合に伴う栄養塩供給・珪藻増殖も東シナ海のケイ素循環に深く関わっていると考えられる。また、陸棚上の硝酸塩枯渇海域では、亜表層クロロフィル極大層が顕著に発達しており、そこでの植物プランクトン生産が下層への炭素輸送に大きく寄与していることが示唆された。

(2) 珪藻遺骸の有機炭素と生物ケイ酸の分解・溶解過程

西部北太平洋亜寒帯の表層水に栄養塩を添加培養して珪藻を主体とする植物プランクトンの増殖を促し、得られた高濃度懸濁態有機物を 4°C の冷暗所に保管して生物ケイ酸と有機炭素の濃度変化を 132 日間追跡した。試料中の珪藻は主に小型の羽状目珪藻 *Cylindrotheca closterium* で占められていた。

その生物ケイ酸は、低温環境下においても、約1ヵ月で70-80%が溶解して溶存ケイ酸として速やかに再生することが明らかになった(図5)。また、ケイ素制限下で増殖させた珪藻殻は窒素制限下のものよりも早く溶解する傾向を示すことが分かった。一方、粒子状有機炭素の分解は生物ケイ酸よりも早く進み、最初の4日間で20%以上が分解した。このため分解・溶解した粒子状有機炭素量と生物ケイ酸量のSi:C比(mol/mol)は最初の4日間に約0.06であったが、4-35日目までの間では約0.13に上昇した。この比は栄養十分条件で室内培養した珪藻の平均的なSi:C含量比とほぼ同じであった。1ヵ月経過して以降は、粒子状有機炭素がほとんど分解しなかったのに対して、生物ケイ酸の溶解は引き続きゆっくりと進行することが示された。

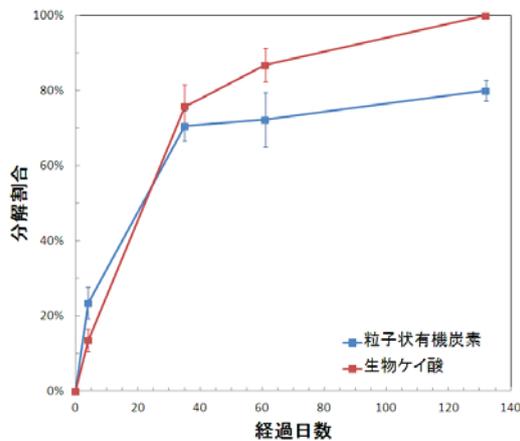


図5 珪藻を主体とする植物プランクトン群集遺骸に含まれる粒子状有機炭素と生物ケイ酸の分解割合の経時変化

西部北太平洋亜寒帯域の定点 K2 で得たプランクトン試料について、珪藻殻の形成時に取り込まれる蛍光色素 PDMP0 による殻の染色の様子を解析した結果、表層において現存量が少なく鉄制限を受けていたと予想された大型の中心目珪藻類も高頻度で細胞分裂していることが明らかになった。表層では小型の羽状目珪藻が卓越しており、その生物ケイ酸殻は薄くて短期間のうちに溶解するのに対して、大型の中心目珪藻、特に比較的溶解速度の遅い堅牢な殻構造をもつ *Thalassiosira* 属珪藻などは、有光層下部や有光層直下で現存量が多くなることから、海洋表層の珪藻類による生物ケイ酸の生産ならびに有機炭素の下層への鉛直輸送を考える上で、小型羽状目珪藻と大型中心目珪藻を区別して解析することが鍵になることが分かった。

(3) 珪藻による炭素・ケイ素の取り込みに対する微量元素の影響

外洋域において亜鉛は 0.1 - 10 nM 程度しか存在せず、海水中では微量元素の一つとして考えられている。外洋域での亜鉛の鉛直分布はケイ酸型を示すことが知られており、その循環過程は海洋生物生産と関係が深いと考えられる。また、亜鉛は炭酸脱水酵素に含まれており、海洋植物プランクトンの炭素固定に密接に関わっている。このように海洋における炭素とケイ素の循環に関わる亜鉛であるが、その挙動に関しては十分に明らかにされていない点が多い。これは、亜鉛が研究船や実験室において最も汚染されやすい金属元素の一つであり、海洋における分布も十分に解明されていないためである。

そこで、亜鉛の汚染なくクリーンな海水を採取する方法を検討した。その結果、観測機器に取り付けられた亜鉛の犠牲電極を取り外すこと等の工夫を施すことにより、汚染なく海水を採取することが可能になった。また、海水試料はテフロンビーカーに入れ、上部から紫外線を照射することによって、汚染なく有機配位子を分解できることが明らかとなった。海水 10mL を用いた場合、この分析法による検出限界は 0.07nM 程度となり、外洋表層水の分析が十分に可能となった。

外洋域および縁辺海における亜鉛の分布とその挙動を解明するために、白鳳丸 KH-10-2 次研究航海に参加し、西部北太平洋亜寒帯域、オホーツク海、日本海において濾過海水試料を採取して、海水試料中の溶存亜鉛濃度を分析した(図6)。

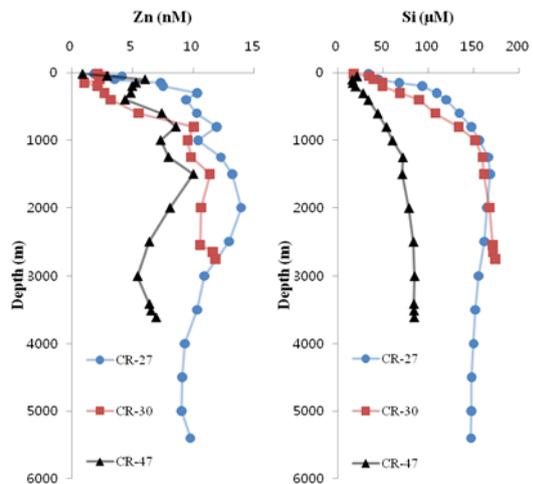


図6 西部北太平洋亜寒帯(CR-27)、オホーツク海(CR-30)、日本海(CR-47)における溶存亜鉛と溶存ケイ酸の鉛直分布

オホーツク海と日本海の中深層において、亜鉛濃度は西部北太平洋亜寒帯よりも低い値を示した。縁辺海の比較的新しい中深層水中では、生物に取り込まれ再生した亜鉛が少な

いと考えられる。しかし、ケイ酸と比較した場合、中深層における亜鉛：ケイ酸比は縁辺海の方が高い(図7)。これは、縁辺海では亜鉛が陸棚堆積物からの供給されるため、ケイ酸と異なる循環過程を示したと考えられる。縁辺海においては亜鉛とケイ酸のデカップリングが存在しており、植物プランクトンの増殖に影響を与えている可能性もある。

また、白鳳丸 KH-08-2 次研究航海では、西部北太平洋亜寒帯域の亜鉛濃度を調べた。珪藻を主体とする植物プランクトンブルームがみられた海域では、海水中の溶存亜鉛濃度の顕著な減少が観測された。一方、海水中の亜鉛に対する有機配位子の濃度・安定度定数については、ブルームが起きた海域と起きていない海域では顕著な差が見られなかった。このことから、植物プランクトンによって無機態亜鉛が取り込まれた後、有機配位子から速やかに亜鉛イオンは解離され、植物プランクトンにとって利用可能な形態になったと考えられる。珪藻ブルームと連動して濃度変化を示す亜鉛は、海洋表層・亜表層における炭素・ケイ素の循環過程のリンクを調べる上で重要な糸口となる可能性がある。

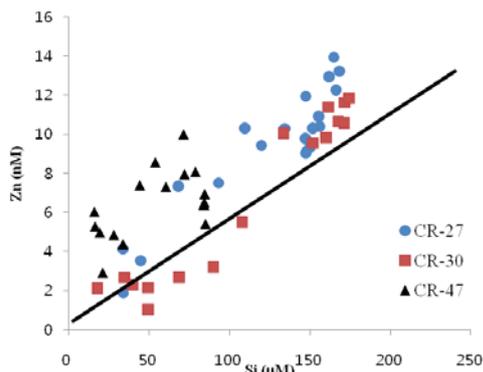


図7 西部北太平洋亜寒帯(CR-27)、オホーツク海(CR-30)、日本海(CR-47)における海水中の溶存亜鉛と溶存ケイ酸の関係(図中の実線は、東部北太平洋における Bruand et al. (1978)・Bruand (1979)の報告値)

(4)まとめ

以上のように、本研究の結果から西部北太平洋および東シナ海の表層におけるケイ素と炭素循環のカップリングについての理解が深まり、生物活動による海洋表層から深層への炭素移送効率を制御する要因としての珪藻生産の重要性が明らかになった。

今後、本研究を通して得られた炭素循環とケイ素循環のカップリングに関する知見を最新の生態系モデル研究などに応用することで、将来あるいは過去の地球環境の変化が海洋表層と下層間の炭素とケイ素の移出入の変動を介してどのように海洋の生物生産や物質循環と連動していたのかについて、定

量的に解析することを試みる。また亜鉛とケイ素の関係については、微量元素元素の供給源に近い縁辺海と外洋域を比較することにより、微量元素元素がケイ素循環に与える影響をより詳しく解明することが可能になると期待される。

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10件)

- ① Takeda, S., Iron and phytoplankton growth in the subarctic North Pacific. Aqua-BioScience Monographs vol. 4, 41-93, 2011, 査読有
- ② Masuda, T., K. Furuya, N. Kohashi, M. Sato, S. Takeda, M. Uchiyama, N. Horimoto, T. Ishimaru, Lagrangian observation of phytoplankton dynamics at an artificially enriched subsurface water in Sagami Bay, Japan. Journal of Oceanography, vol. 66, 801-813, 2010, 査読有
- ③ Saito, H., A. Tsuda, Y. Nojiri, T. Aramaki, H. Ogawa, T. Yoshimura, K. Imai, I. Kudo, J. Nishioka, T. Ono, K. Suzuki, S. Takeda, Biogeochemical cycling of N and Si during the mesoscale iron-enrichment experiment in the western subarctic Pacific (SEEDS-II). Deep-Sea Research-II, vol. 56, 2852-2862, 2009, 査読有

[学会発表] (計13件)

- ① 武田重信、江藤祐輔、迎雄一、夏季の東シナ海済州島南方海域における表層の栄養塩動態、2012年度日本海洋学会春季大会、2012年3月29日、筑波大学
- ② 武田重信、吉国翔一、岡村和磨、迎雄一、夏季東シナ海済州島南方海域における表層水中のケイ素の動態と一次生産、2011年度日本海洋学会春季大会、2011年3月22-26日、東京大学柏キャンパス
- ③ 武田重信、丸川真悟、小畑元、田副博文、小埜恒夫、ケイ素安定同位体³⁰Siを用いた生物ケイ酸の生産・溶解速度の測定、2010年度日本海洋学会春季大会、2010年3月27日、東京海洋大学品川キャンパス
- ④ 柴田直弥、大久保綾子、小畑元、蒲生俊敬、西岡純、武田重信、児玉武稔、谷田巖、鈴木光次、西部北太平洋亜寒帯域における微量元素元素の分布とスペシエーション、東京大学海洋研究所共同利用シンポジウム白鳳丸航海KH-08-2 データシンセシス、2009年12月11日、東京大学海洋研究所

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 重信 (TAKEDA SHIGENOBU)

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究
科・教授

研究者番号：20334328

(2) 研究分担者

小畑 元 (OBATA HAJIME)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：90334309