

平成21年 6月30日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2005 ～ 2008
 課題番号：17204046
 研究課題名（和文） 微量元素-同位体比マルチプロキシによる堆積物-水境界の pH
 プロファイルの復元
 研究課題名（英文） Reconstruction of pH profile at sediment-water interface by use of
 trace elements-stable isotopes multi-proxies
 研究代表者
 北里 洋 (KITAZATO HIROSHI)
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・プログラムディレクター
 研究者番号：00115445

研究成果の概要： 海底の堆積物-水境界 (SWI) の pH プロファイルを、底生有孔虫殻に含まれる同位体比と微量元素組成に基づいて復元し、物質循環の議論を行うことを目的に研究を行った。1) 深海における SWI の pH, DO プロファイル取得手法開発と現場観測に成功。2) 未攪乱堆積物表層の化学プロファイルと有孔虫生息分布との相関を解明。3) 精密培養装置を作成し、培養・観察。4) 以上から得られた有孔虫殻の安定同位体比 (炭素、酸素、ホウ素) および微量元素測定に基づき、pH proxy を提案。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	22,600,000	6,780,000	29,380,000
2006年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
総計	38,600,000	11,580,000	50,180,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・層位・古生物学

キーワード：pH, 現場計測, 深海環境変動, 化学指標, 堆積物-水境界, 層位・古生物学, 有孔虫, 飼育実験

1. 研究開始当初の背景

海底表層部の堆積物—水境界 (Sediment-water Interface; 以下SWIと略す) は地層形成の場である。そこでは、水中を沈降してきた碎屑物や生物源物質 (有機物や殻) が化学的あるいは底生生物によって分解され、リサイクルし、また残った粒子は堆積物中に保存される。このとき、粒子の分解速度や割合は SWI に存在する化学的な環境勾配が左右する。地層に残っている過去の環境や生物の記録は粒子が海底表層部の SWI で分解・変質を受けた結果である。したがって地層から過去の環境や生物活動を復元する場合、SWI で起こっている現象を把

握する必要がある。SWI の化学的な環境勾配のうち、間隙水中の溶存酸素量、pH, Eh, pCO₂ などは底生生物の活動を規定し、また生物源物質の分解反応を支配する重要な因子である。いずれも海底表面から堆積物の中に向かって減少するが、pH と pCO₂ は酸化還元境界以深で増加する。これは堆積物中の有機物がバクテリアによって分解を受けるためであると考えられている。

研究の背景となるアイデアは2つある。一つ目は、海生生物が炭酸カルシウムを形成する時に微量元素や安定同位体の分配や化学平衡は温度、pH と相関していることである。ホウ素同位体比が顕著な例であるが、Mg・

Srなどの微量元素の分配そして炭素・酸素同位体比も pH の変動に伴って変化する。実験的に pH と炭酸カルシウム形成時の各種同位体や微量元素の分配係数との相関を明らかにし、温度と pH に関する二元相関方程式を解くことによって、pH のプロキシーを作成することができる。二つ目は、底生有孔虫類は SWI の異なった深度に生息している (Corliss, 1985) ことを利用する。異なった深度に生息する有孔虫はそれぞれ特定の間隙水環境で殻形成を行っていると考えられている (Fontanier, 2003) のでそれが正しければ、同じ地層に含まれている異なった深度種の殻の安定同位体や微量元素を測定することによって、過去の堆積物表層部の化学勾配とくに pH のプロファイルを一層明らかにすることができる。

2. 研究の目的

本研究は海底の SWI の pH プロファイルを底生有孔虫殻に含まれる同位体比と微量元素組成を用いて復元し、物質循環とタフオノミーの議論を行うことを目的とする。SWI の pH プロファイルを知ることは、SWI における炭素循環を明らかにするためにも、また生物源粒子のタフオノミーを考える上でも重要である。pH は炭素循環を律速する生物源物質の分解反応をコントロールしているとともに、有孔虫やココリスなどの過去の海洋環境情報を持った粒子を選択的に溶解するからである。その結果、 $p\text{CO}_2$ 勾配が変動して、SWI を通る炭素フラックスが変わるのである。過去の SWI の間隙水にみられる溶存酸素量プロファイルはいくつかのプロキシーが提案されている。しかし pH プロキシーは浮遊性有孔虫殻のホウ素同位体比から海水中の pH を推定する研究 (Spivack et al., 1993) 以外、提案されていない。また、pH に注目して物質循環を論じたり、古海洋学研究を行った例はほとんどない。

3. 研究の方法

本研究では 1) 深海における SWI の pH, DO プロファイル取得手法開発と現場観測 2) 表層未攪乱堆積物試料を用いた間隙水化学 (pH, DO, 水の酸素同位体比, 無機炭素同位体比, 栄養塩量) プロファイルの測定と有孔虫群集および同位体比の相関 3) 精密培養実験・細胞内環境の観測手法開発と観察 4) 有孔虫殻のホウ素同位体測定手法の最適化を行った。

(1) SWI の pH, DO プロファイル取得手法開発

酸素濃度の可視化は、オプトードと呼ばれる、光を使った酸素の定量方法を基にして行

われる。センサーには、光励起によって波長の長い燐光を放出し、燐光の発光寿命が酸素濃度に反比例するという特徴を持つ、酸素消光性色素を使用する。一方、深海で測定を実施するために、分析装置を自作した。装置はマルチゲート CCD カメラ、励起光源、これらを制御するタイミングジェネレータのほかに、制御 PC とスクリプトプログラムからなる。これらの装置は耐圧容器にそれぞれ組み込まれ、深海での現場観測を可能にした (図 1)。また、様々な酸素濃度に対応できるように、塗布物質を変え、発光特性の異なるセンサーを開発した。

pH の二次元分布を可視化するために、蛍光色素、8-hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonic acid (HPTS) を使った可視化法を開発した。実際の測定では、HPTS を溶かした海水と堆積物を懸濁させ、水槽内に一日間放置することで形成した海水と堆積物の境界面を、波長 400nm と 470nm の発光ダイオードアレイ (自作) でそれぞれ励起し、波長 540nm の蛍光を高感度 CCD カメラで撮影した。得られた画像は行列演算ソフトウェアによって、取得画像を pH 分布画像に変換した。

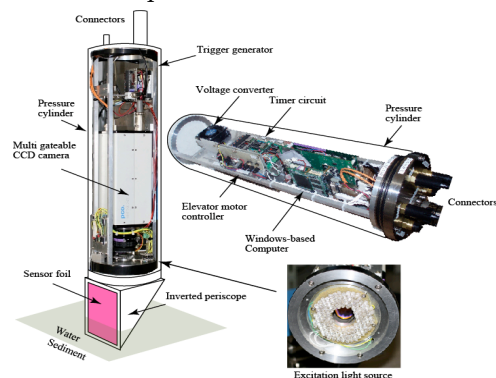


図 1 深海用オプトードシステム

(2) 表層未攪乱堆積物試料を用いた間隙水化学 (pH, DO, 水の酸素同位体比、無機炭素同位体比、栄養塩量) プロファイルの測定と有孔虫群集および同位体比の相関

本研究では、不攪乱試料を採取し、有孔虫の群集組成、酸素・炭素同位体比を測定した。試料はマルチプルコアラー、プッシュコアラーを用い、相模湾湾央部で採取した。採取したコアは、記載した後、上位から 0.5cm、または 1.0cm 間隔でサブサンプリングを行った。堆積物試料はローズベンガルホルマリンで固定した後、実験室に持ち帰り 32 μm の篩を用いて水洗、乾燥し、実体顕微鏡下で有孔虫試料を拾いだした。また、一部の有孔虫試料は秤量した後に、dual inlet 搭載の GV Instrument 製同位体比質量分析計 Isoprime を用いて安定同位体比を測定した。有孔虫殻の同位体比を議論するため、間隙水を絞り出

し、水の酸素同位体比、無機炭素同位体比測定を合わせて行った。

(3)精密培養実験装置の開発

底生有孔虫の殻の各種同位体比・微量元素と海水の化学組成を直接比較するためには、実験室内で環境を制御した培養実験を行うのが最適である。本研究では pH を制御するための環境自律制御システムを構築した(図2)。システムは閉鎖系で、化学環境制御のための20リットルの海水タンクを備えている。水温、pH、DOについては各センサーで常に監視・記録すると共に、定期的に塩分、アルカリ度を手動で測定する。有孔虫は別の容器内で培養されている。この培養用容器はTYGONチューブで海水タンクと相互に接続されており、ペリスタポンプで海水が循環する仕組みである。DOは窒素ガス単独、もしくは空気と混合し、エアストーンを介して海水タンクに送られ、目標値に制御する。海水タンクでは記録用とは別に、pHコントローラーによってpHを監視している。pHコントローラーは、設定値になればAC100Vを自動的にオン/オフできる機構が組み込まれており、二酸化炭素ポンプに設置した電磁弁や、塩酸や水酸化ナトリウムなど任意の溶液タンクと接続したポンプを制御できる。なお、二酸化炭素でpHを変化させる場合pHは5.5-8.4の範囲で制御可能である。

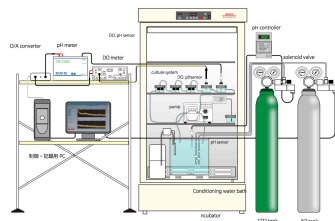


図2. 培養装置概略図

(4)炭酸塩のホウ素同位体比精密分析法

海水中に溶解しているホウ素の化学種には、3配位である $B(OH)_3$ と4配位である $B(OH)_4^-$ の2つがある。3配位のホウ素と4配位のホウ素の存在比率は海水のpHの関数であり、酸性側では3配位が、塩基性側では4配位が多くなる(図3)。

一方、ホウ素には ^{10}B と ^{11}B の2種類の同位体があり、平衡共存する3配位のホウ素と4配位のホウ素とを比べると、3配位のホウ素の方が同位体比($\delta^{11}B$ 値)が常に約20‰高い(図3)。海水中から炭酸塩が形成される場合、専ら4配位のホウ素が炭酸塩骨格に取り込まれるため、炭酸塩のホウ素同位体比は海水のpHの関数となる。このことは、炭酸塩のホウ素同位体比が海水の古pHのプロキシとなりうることを示している。海水の古pHの変動を知ることは、過去の海水の酸性度、ひいては大気中の CO_2 分圧の変動を知ることであるため海成炭酸塩のホウ素同位体

比は注目されており、Spivack *et al.* (1993)以来、多くの研究がなされている。本研究においては、堆積物—水境界のpHプロファイル復元への適用を目指している。

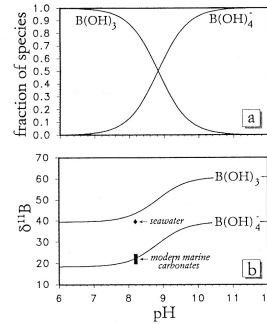


図3 海水中のホウ素の存在種・同位体比とpHの関係 (Hemming and Hanson, 1993)

しかしながら、現状では炭酸塩のホウ素同位体比を用いたpHの復元には技術的に大きな問題がある。それは、ホウ素同位体比の測定精度および、測定値の確度の問題である。

本研究では、より精度・確度の高い同位体測定を行うために、ホウ素を陽イオン($Cs_2BO_2^+$)として表面電離質量分析法(P-TIMS)で分析する方法を検討した。この方法は、イオンの質量数が非常に大きい($^{133}Cs_2^{10}B^{16}O_2^+$, $^{133}Cs_2^{11}B^{16}O_2^+$ の質量数がそれぞれ308, 309)のために測定中の同位体分別が小さく、測定精度・確度ともに最良であることが知られている(Swihart, 1996)。しかしながら、この方法では従来1000 ng程度のホウ素が測定に必要であり(炭酸塩中のホウ素含有率が50 ppmであれば20 mgが必要)、微量の炭酸塩の分析法としては不適であった。本研究では、P-TIMSを用い、100 ng以下のホウ素の同位体比を高精度・高確度で測定できる新たな手法を開発することとした。測定に用いた試料は、アメリカ国立標準技術研究所(NIST)のホウ素同位体標準物質(ホウ酸)SRM 951、および産業技術総合研究所地質調査総合センター(GSJ)の地球化学標準試料(サンゴ)JCp-1である。ホウ素同位体比の分析は高知コアセンターの表面電離型質量分析計(ThermoFinnigan Triton)を用いて行った。

4. 研究成果

(1)in-situにおけるpH、DOプロファイル

相模湾・下北半島沖およびアラビア海酸素極小層の海底において、二次元酸素オプトードを用いて、SWIにおける酸素濃度の断面イメージを取得し、生物活動と酸素濃度分布の比較を行った。とくに相模湾では、海洋研究開発機構の初島観測ステーションから電力供給を受けることで、4日以上にわたり、2-4分間隔で海底の酸素濃度を測定することに成功した。観測を通し、海底の酸素濃度変化と生物活動について、多くの新しい知見が得られた。相模湾初島沖の海底では、拡散によ

って酸素が海底にもたらされる深さは5-8mmほどであったが、ゴカイによるポンピングや巣穴の掘削などによる生物活動に伴い、狭い範囲で、短時間に、より深いところまで、酸素が供給されることが明らかになった。また、驚くべき事に、酸素が供給されない堆積物深度においても、底生有孔虫が活発に活動している様子も明らかになった。この有孔虫は、サイズから *Globoburimina* sp. と思われ、酸素を使わない呼吸システム（硝酸を使った脱窒の可能性が高い）を獲得していると考えられる。観測の結果、彼らは酸素を検出しない深度の堆積物中を、36時間以上にわたり移動していた（図5）。相模湾の海底では、酸素に依存せずに代謝を行うマイオベントスが、物質循環に影響を与えている可能性がある。

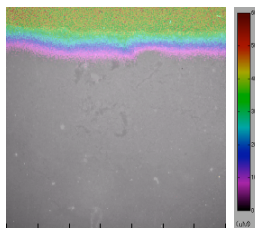


図4 酸素が検出されない深度（深さ15mm）で見られる底生有孔虫。移動によって生じた空隙も確認できる。

図5に本実験で得られた堆積物・水境界のモノクロ画像、対応するpH画像と、pH画像の中心部分から抽出したpHプロファイルを示す。この図によれば、HPTSを使用すると、きわめて高い精度、解像度でpH分布を可視化できることが分かる。電極によって測定した水中と堆積物中のpH値をそれぞれ用いて二点検量を行った。なお、水中のpH濃度が実際の海洋環境よりも低いのは、懸濁状態から放置したために、CO₂が発生したためと考えられる。

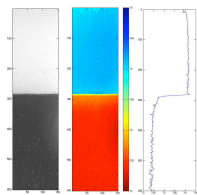


図5 左より、モノクロ画像、対応するpH画像、pHプロファイル（赤；pH=7.2、青；pH=7.5）

(2)底生有孔虫の安定同位体比

これまでに相模湾湾央部から得られた *Cibicidoides wuellerstorfi*, *Bolivina spissa*, *Uvigerina akitaensis*, *Globobulimina affinis*, *Chilostomella ovoidea* の各生息深度毎の炭素・酸素同位体比を測定した。これらの種は群集解析の結果から、主要構成種であることがわかっている。測定の結果、炭素同位体比は 0.09‰_{VPDB} から -2.92‰_{VPDB} の範囲に分布した（図6）。採集された深度に寄らず、おおむね深い生息深度を示す種の方が¹³Cに枯渇した値を示した。ただし、*G. affinis* は *C. ovoidea* に近い生息深度を示すが、得られた炭素同位体比は、むしろより浅いところに

生息する *U. akitaensis* や *B. spissa* に近い値を示した。酸素同位体比は 1.73‰_{VPDB} から 3.16‰_{VPDB} の範囲に分布し、水温が殆ど一定であるはずなのにも関わらず、大きなばらつきを示した。これは、有孔虫が石灰化するときには、種ごとに好ましい環境に移動して石灰化していることを示唆している。

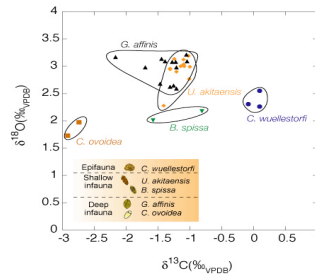


図6 相模湾湾奥部における底生有孔虫の酸素・炭素安定同位体比

(3)精密培養実験

培養装置を用いて、水温・塩分を一定にすることはもとより、これまで制御の難しかった、DO、pH環境を安定に保って培養を行うことができるようになり、pHを 7.50±0.02 の範囲でコントロールすることに成功した（図7）。そこで、まずは、成長の早い浮遊性有孔虫と浅海生の底生有孔虫を用いた培養実験を行った。その結果、制御した培養環境下で沈着した殻を得ることができた（図8）。しかし、深海生有孔虫では新たなチャンバーの付加を確認することができなかった。今後は深海からの試料回収方法や、培養環境へ慣らす手順などを工夫していく必要がある。

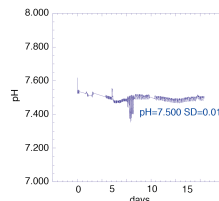


図7(←) 実験期間中のpH記録

図8(↑) 一定のpHで成長した有孔虫

(4)ホウ素同位体比

炭酸塩では従来のP-TIMSを用いた、少量のホウ素の同位体比を測定する方法は、処理中の同位体分別が大きすぎるため、そのまま応用することができない。そこで本研究では、タンタルフィラメント上に塗布したホウ酸セシウム（ホウ素試料に炭酸セシウムを加えたもの）-マンニット-グラファイト混合物を蒸発乾固させた後、空気中でさらに加熱してマンニットを酸化分解させることにより、マンニットの影響を取り除く新手法を導入した。マンニットが試料から取り除かれることでCs₂BO₂⁺イオンの生成効率は劇的に向上し、100 ngのホウ素に関しても、従来の1000 ngのホウ素と同等の1×10⁻¹¹ Aのイオン電流値（¹³³Cs₂¹¹B¹⁶O₂⁺）が得られるようになった。図9は、NIST SRM 951の測定結果の一例である。現時点で100 ngのホウ素について

±0.15%の測定再現性が得られている。これまでに 100 ng のホウ素で十分に高いイオン電流値が得られていることから、10-20 ng 程度のホウ素であっても高精度の同位体測定が可能であると考えられる。

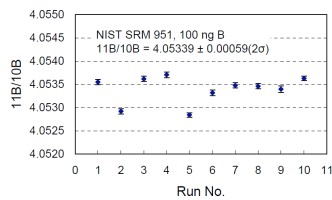


図9 ホウ素同位体標準試料 NIST SRM 951 の分析結果

一方、炭酸塩のホウ素同位体比測定を行うためには、試料中のホウ素を化学的に分離する必要がある。本研究では、試料を希塩酸で溶解した後、陽イオン交換樹脂 (AG 50W X12) でカルシウム等の陽イオンを除去し、次に陰イオン交換樹脂 (AG 1-X4) でホウ素を単離した。

図 10 は、GSJ JCp-1 (サンゴ) のホウ素同位体測定結果の一例である。測定時には十分に高いイオン電流値が得られており、ホウ素の化学分離は良好であったと考えられる。100 ng のホウ素に対する測定再現性は、NIST SRM 951 よりもやや悪く、±0.21%であったが、現段階でも、炭酸塩のホウ素同位体比の測定精度としては世界最高レベルである。

炭酸塩のホウ素同位体比については、従来 N-TIMS による測定値の確度に問題があったため、試料間の同位体比の差を pH の相対的な差に換算することしかできなかった。本研究により、測定値の確度が最も高い P-TIMS を用いて炭酸塩中の 100 ng 以下のホウ素の同位体比を精密測定する道が拓かれた。今後は、炭酸塩のホウ素同位体比から pH の絶対値を高精度で求めることが可能になると考えられる。

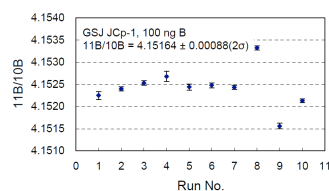


図10 サンゴ標準試料 GSJ JCp-1 の分析結果

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 12 件)

*この他に 20 件 (総件数 32 件)

1. Glud R.N., Thamdrup, B., Stahl, H., Wenzhöfer, F., Glud, A.N., Nomaki, H., Oguri, K., Revsbech, N.P., Kitazato, H., Nitrogen cycling in a deep ocean margin sediment (Sagami Bay, Japan). *Limnol Oceanogr*, 54, 723-734, 2009 (査読有)
2. Glud R.N., Stahl, H., Berg, P., Wenzhoefer,

F., Oguri, K., Kitazato, H., In situ microscale patchiness in distribution and consumption of O₂: A case study from a deep ocean margin sediment (Sagami Bay, Japan). *Limnol Oceanogr* 54, 1-12, 2009 (査読有)

3. Nagaishi, K. and Ishikawa, T., A simple method for the precise determination of boron, zirconium, niobium, hafnium and tantalum using ICP-MS and new results for rock reference samples. *Geochem J* 43, in press. (査読有)

4. de Nooijer, L., Toyofuku, T., Oguri, K., Nomaki, H., Kitazato, H., Intracellular pH distribution in foraminifera determined by the fluorescent probe HPTS. *Limnol Oceanogr-Meth*, 6, 610-618, 2008. (査読有)

5. Toyofuku, T., de Nooijer, L., Yamamoto, H., Kitazato, H., Real-time visualization of calcium ion activity in shallow benthic foraminiferal cells using the fluorescent indicator Fluo-3 AM. *Geochem Geophys Geosy* 9, doi:10.1029/2007GC001904. 2008 (査読有)

6. Tsuchiya, M., Tazume, M., Kitazato, H., Molecular characterization of the non-costate morphotypes of buliminid foraminifers based on internal transcribed region of ribosomal DNA (ITS rDNA) sequence data. *Mar Micropaleontol* 69, 212-224, 2008 (査読有)

7. Nomaki, H., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., Suga, H., Toyofuku, T., Shimanaga, M., Nakatsuka, T., Kitazato, H., Foraminifera as trophic links between phytodetritus and benthic metazoans: carbon and nitrogen isotopic evidence. *Mar Ecol Prog Ser*, 357, 153-164, 2008. (査読有)

8. Grimm, G.W., Stoegerer, K., Ertan, K.T., Kitazato, H., Kucera, M., Hemleben, V., Hemleben, Ch., Diversity of rDNA in *Chilostomella*: Molecular differentiation patterns and putative hermit types. *Mar Micropaleontol*, 62, 2, 75-90, 2007. (査読有)

9. Nomaki, H., Yamaoka, A., Shirayama, Y., Kitazato, H., Deep-sea benthic foraminiferal respiration rates measured under laboratory conditions. *J Foramin Res*, 37, 281-286, 2007 (査読有)

10. Middelboe, M., Glud R.N., Wenzhöfer, F., Oguri, K., Kitazato, H., Spatial distribution and activity of viruses in the deep-sea sediments of Sagami Bay, Japan. *Deep-sea Res I*, 53, 1-13, 2006 (査読有)

11. Oguri, K., Kitazato, H., Glud R.N., Platinum octaethylporphyrin based planar optodes combined with an UV-LED excitation light source: an ideal tool for

high-resolution O2 imaging in O2 depleted environments. Mar Chem, 100, 95-107, 2006 (査読有)

12. Glud, R.N., Wenzhöfer, F., Tengberg, A., Middelboe, M., Oguri, K., Kitazato, H., Distribution of oxygen in surface sediments from central Sagami Bay, Japan: In situ measurements by microelectrodes and planar optodes. Deep-sea Res I, 52, 1974-1987, 2005 (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

*この他に 62 件 (総件数 67 件)

1. 豊福高志, 環境自律制御システムを用いた有孔虫飼育実験. MRC2009 研究集会. 国立科学博物館新宿分館 2009 年 3 月 3 日

2. 小栗一将, Oxygen distributions, fluctuations and bioirrigation processes in deep sea sediment: a case of Sagami bay sea floor. 7th International symposium for subsurface microbiology. グランシップ静岡 2008 年 11 月 21 日

3. Kitazato H., Dynamic depositional process of organic carbon at continental margin: toward understanding sustainable process of microbial ecosystem at slope basin. 7th International Symposium for Subsurface Microbiology. グランシップ静岡 2008 年 11 月 21 日

4. Oguri, K., In situ measurement of time-series two dimensional O2 distributions at sediment-Water interface using a planar O2 optode system connected with a submarine cable. 7th International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. 東京大学生産技術研究所 2007 年 4 月 19 日

5. Kitazato, H., Foraminifera as paleoceanographic proxies; biological constraints both from in situ and laboratory culture experiments. The Micropalaeontological Society's Foraminifera and Nannofossil Groups Joint Spring Meeting, Southampton Oceanography Centre, UK, 2005 年 6 月 16 日

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 観測装置

発明者: 小栗一将

権利者: 独立行政法人海洋研究開発機構

種類: 特許

番号: 2008-54891

出願年月日: 2008 年 3 月 5 日

国内外の別: 国内

名称: Observation Apparatus

発明者: 小栗一将

権利者: 独立行政法人海洋研究開発機構

種類: 特許

番号: 09153416.4

出願年月日: 2009 年 2 月 23 日

国内外の別: 国外(欧州)

名称: Observation Apparatus

発明者: 小栗一将

権利者: 独立行政法人海洋研究開発機構

種類: 特許

番号: 12/398.526

出願年月日: 2009 年 3 月 5 日

国内外の別: 国外(米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北里 洋 (KITAZATO HIROSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・プログラムディレクター

研究者番号: 00115445

(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・地球内部変動研究センター・技術研究主任

研究者番号: 10359177

豊福 高志 (TOYOFUKU TAKASHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・研究員

研究者番号: 30371719

石川 剛志 (ISHIKAWA TSUYOSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー

研究者番号: 30270979

中塚 武 (NAKATSUKA TAKESHI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 60242880

野牧 秀隆 (NOMAKI HIDETAKA)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・ポストドクトラル研究員

研究者番号: 90435834

土屋 正史 (TSUCHIYA MASASHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・技術研究副主任

研究者番号: 00435835

(3) 連携研究者

ロニー グルード (Ronnie Glud)

Scottish Association of Marine Sciences