

平成21年 6月 30日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2006 ～ 2008  
 課題番号：18710021  
 研究課題名（和文） 「メイオベントスは海底への酸素供給に重要な役割を果たす」仮説の検証  
 研究課題名（英文） Study on distributions and bioirrigation by meobenthic organisms

研究代表者  
 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

研究成果の概要：深海底における酸素濃度プロファイルの可視化を行う装置「二次元オプトード」を開発し、相模湾初島沖と下北半島沖において観測を行った。この結果、酸素は海底に、拡散によって定常的に広く浅く、生物攪乱によって短時間に深く狭い領域にもたらされること、前者による深さは3～8mm程度であることが明らかになった。相模湾海底では、酸素が検出されない深度（深さ1-3cm）において、活発に活動する底生有孔虫類（*Globobulimina* sp.）を発見した。この有孔虫は、酸素に依存しない呼吸システムを獲得している可能性がある。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	800,000	0	800,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,500,000	150,000	3,650,000

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：堆積物-水境界、酸素、二次元酸素オプトード、底生有孔虫

## 1. 研究開始当初の背景

海底には、水中からの酸素が拡散によって浸透する。干潟や半遠洋性堆積物のように有機物が多い海底では、酸素は好気分解でただちに消費されるため、浸透する深さはミリメートルオーダーときわめて浅い。実際の海底には、大小様々な生物が生息している。彼らのなかには海底を攪乱し、穴を掘る生活様式を持ったものが存在するが、このような活動によって、酸素は拡散でもたらされるよりも深い深度まで浸透する。従来は、酸素をもたらすバイオターベーション、バイオリゲーションを行う生物としてメガベントスに注目が集まっていたが、堆積物内に非常に多く存在するメイオベントスの活動については、

ほとんど無視されてきた。酸素濃度の勾配が生じている堆積物-水境界で、メイオベントスはどのように分布し、生物地球化学的のどのような役割を担っているのか？メガベントスに対して、メイオベントスについてはほとんど知られていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は、海底における物質循環過程で最も重要な分子である、酸素に着目し、酸素のプロファイルとメイオベントス（とくに底生有孔虫）の生活様式の間関係を明らかにすることを目的とする。測定には、二次元酸素オプトードと呼ばれる、光を使って酸素濃度プロファイルを測定、可視化する装置を用いる。

この装置は市販されていないため、まず(1)装置の開発・試験を行う。そして、(2)実際の深海底で二次元酸素濃度プロファイルと、海底断面撮影の時系列観測を行い、酸素濃度プロファイルの変動と、メイオベントスの活動の関係を明らかにする。観測場所には、(a)物質循環過程がよく調べられている、(b)底生有孔虫の分布や季節変化が明らかになっている、(c)海底ステーションなど、観測のためのファシリティ（とくに電源供給機能）が揃っている、という点から相模湾初島沖（水深1180m）を選ぶ。

### 3. 研究の方法

(1)現場観測型二次元酸素オプトードの開発  
 本体：市販のマルチゲート CCD カメラと小型 PC を基にして、シャッタータイミングと励起光源の発光タイミング信号を発生させるトリガボードを開発する。また、深海の現場で人間の代わりに PC を操作するためのスクリプトプログラムを開発する。

ランダーシステム：二次元酸素オプトードを海底に持ち込むためのプラットフォームとして、ランダーシステムを開発する。また、装置を海底の測定位置にセットするための機構も開発する。

(2)観測により、海底の二次元酸素濃度プロファイルの時系列測定する。同時に、底生有孔虫の分布、動きなどにも注目し、酸素濃度と有孔虫の生活様式との関係を明らかにする。

### 4. 研究成果

(1)オプトードによる酸素濃度測定には、ライフタイムイメージングと呼ばれる撮影方法が用いられる。この方法は、酸素消光性色素が塗布されたセンサが光励起されることで発する燐光の発光寿命を酸素濃度に換算する方法である。センサに使われる色素には、従来はルテニウム錯体が使われてきたが、相模湾のように酸素濃度が低く、変動も少ない領域では高精度の測定ができないことが分かったため、低酸素濃度領域で高い酸素消光性を示す、白金オクタエチルポルフィリンを使ったセンサと、このセンサに対応する励起光源を開発した（図1）。

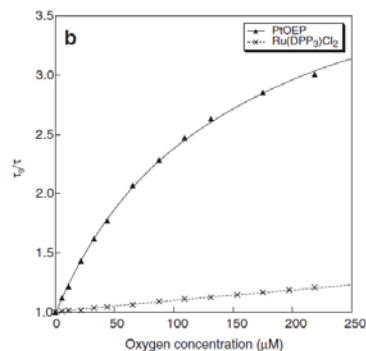


図1 従来のルテニウム錯体 ( $\text{Ru}(\text{DPP})_3\text{Cl}_2$ ) と白金オクタエチルポルフィリン ( $\text{PtOEP}$ ) の感度の違いを示す Stern-Volmer プロット。白金オクタエチルポルフィリンの方が、特に低酸素濃度領域において酸素濃度に対する発光寿命の変化が大きい。

励起光の発光タイミングと、マルチゲート CCD カメラのシャッタータイミングを正確に合わせる必要がある。このため、新たにワンチップマイコンを使った回路を開発した。これによって、従来は大型のファンクションジェネレーターが必要だった測定装置を大幅に小型化することに成功した（図2）。



図2 開発した小型タイミングジェネレーター。

開発された装置は、ふたつの耐圧容器に納められた。また、酸素濃度画像を時系列で取得するためのカメラの制御とデータ保管は、スクリプトプログラムによって自動処理されるようになっている。これらの開発によって、二次元酸素濃度プロファイルを海底で時系列測定できる装置となった（図3）。

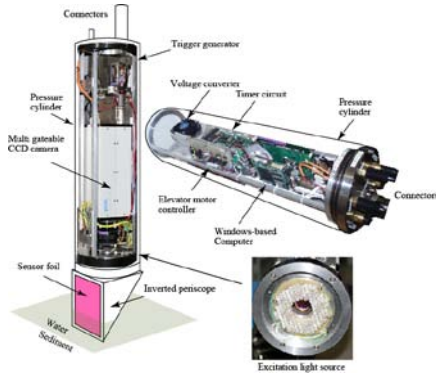


図3 二次元酸素オプトードシステム。

開発された二次元酸素オプトードシステムを海底に運ぶためのランダーシステムは、ELINORタイプとし、上部にフロートラックを搭載し、下部の三脚の内部に装置を搭載する形とした(図4)。



図4 ランダーシステムに搭載した二次元酸素オプトードシステム

なお、二次元酸素センサは、カメラ耐圧容器の前面に取り付けた潜望鏡窓に貼り付けている。実際の観測では、潜望鏡部分を海底の正しい位置に設置する必要があるため、カメラ耐圧容器を上下に移動させるモーターシステムには、新たに開発したフォトインタラプタ型海底検出センサを取付け、センサ部分が正しい位置に降りたときにモーターを止めるようにした。

(2) 開発を終えた二次元酸素オプトードシステムを使い、相模湾(2006年12月と2008年1月の2回)と下北半島沖(2007年8月の1回)の海底において、酸素濃度イメージを取得し、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。また、下北半島沖では、ランダーシステムに別途搭載したリファレンス酸素センサを使った、水中における現場校正法を確立した。これにより、船上から投入するだけで、校正まで含めた一連の観測を行えるようになった。これらの観測を通し、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、ゴカイの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(1cm以深)まで酸素が供給されることが明らかになった(図5)。

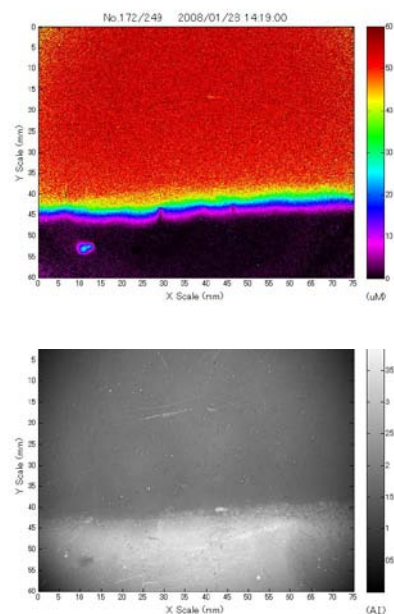


図5 観測された相模湾初島沖海底の酸素濃度画像とモノクロのプロファイル画像。生物によって掘られた巣穴に酸素が供給されている様子が分かる。

相模湾の海底では、酸素が供給されない深度においても、底生有孔虫が活発に活動している様子が明らかになった。この有孔虫は、同じ場所で得られた柱状試料中の生物分類と、画像のサイズから *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6)。相模湾の海底では、酸素に依存せずに代謝を行うマイオバントスが、物質循環に影響を与えている可能性がある。これは、従来考えられてきた、真核生物は酸素呼吸を行う、という概念を覆すも

のであり、実際に深海底で、酸素の検出されない海底で有孔虫が動く姿が捉えられたのは世界初である。

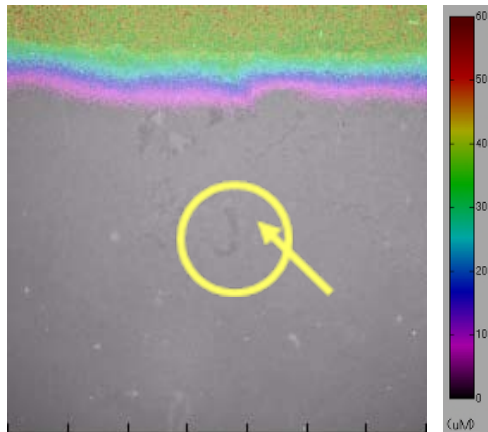


図 6 酸素が検出されない深度（深さ 15mm）で見られる底生有孔虫。移動によって生じた空隙も確認できる。

一方、下北半島沖の海底では、大量のクモヒトデが確認された。彼らは移動や摂食行動の際に海底を攪乱するものの、ゴカイや二枚貝類のように、酸素を積極的に海底に供給しないことが分かった（図 7）。

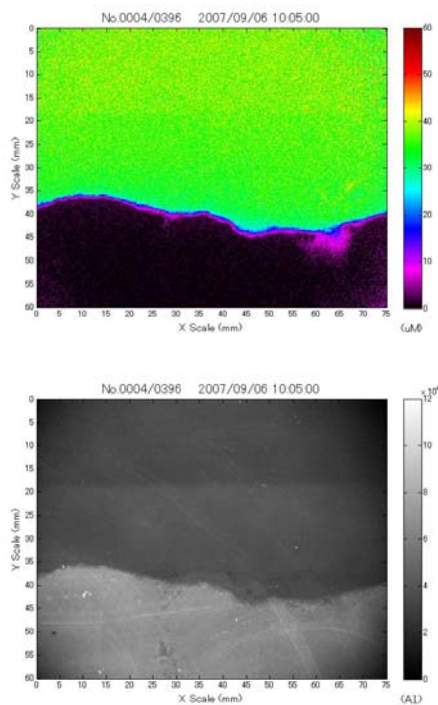


図 7 下北半島域、水深 975m における海底の酸素濃度プロファイルとモノクロのプロファイル画像、右側の、酸素が海底に供給されている部分にはクモヒトデが確認された。

下北半島沖では、短期間の観測ということもあってか、相模湾で見られたような底生有孔虫の動きは確認できなかった。

## 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 8 件）

- ① Glud, R.N., Stahl, H., Berg, P., Wenzhöfer, F., Oguri, K., and Kitazato, H. Microscale patchiness in distribution and consumption of O<sub>2</sub>: A detailed in situ microsensor study of an ocean margin sediment. *Limnol. Oceanogr.*, *Limnol. Oceanogr.*, 54, 1-12, 2009a, 査読有
- ② Glud, R.N., Thumdrup, B., Stahl, H., Wenzhöfer, F., Glud, A.N., Nomaki, H., Oguri, K., Revsbech, N.P. and Kitazato, H. Nitrogen cycling in a deep ocean margin sediment (Sagami Bay, Japan). *Limnol. Oceanogr.*, *Limnol. Oceanogr.*, 54, 723-734, 2009b, 査読有
- ③ 北里 洋、小栗一将、野牧秀隆、豊福高志. 深海低層生態系変動のリアルタイム観測. 月刊地球、30、8、396-402、2008、査読無
- ④ 豊福高志、Lennart Jan DeNooijer、野牧秀隆、小栗一将、土屋正史、北里 洋. 有孔虫細胞内の環境可視化手法の開発と応用—バイオミネラリゼーションの解明を目指して—. 月刊地球、3、7、346-351、2008、査読無
- ⑤ DeNooijer, L.J., Toyofuku, T., Oguri, K., Nomaki, H., and Kitazato, H. Intracellular pH distribution in foraminifera determined by the fluorescent probe HPTS. *Limnol. Oceanogr. Methods*, 6, 610-618, 2008, 査読有
- ⑥ Oguri, K., *In situ* measurement of time-series two dimensional O<sub>2</sub> distributions at sediment-Water interface using a planar O<sub>2</sub> optode system connected with a submarine cable, *Proc. International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, 1, 2007, 367-370, 査読無
- ⑦ Oguri, K., Kitazato, H. and Glud, R.N. Platinum octaethylporphyrin based planar optodes combined with an UV-LED excitation light source: an ideal tool for high-resolution O<sub>2</sub> imaging in O<sub>2</sub> depleted environment. *Mar. Chem.*, 100, 95-106, 2006, 査読有
- ⑧ 小栗一将、二次元酸素オプトードセンサ、月刊海洋、438、883-890、2006、査読無

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① 小栗一将、相模湾海底の堆積物—水境界にお

- ける親生物元素の時空間分布、その変動とメ  
イオベントスの活動について、ブルーアース  
09、立教大学池袋キャンパス、2009年3月  
13日
- ② 小栗一将、酸素極小層に位置する海底におけ  
る二次元酸素濃度プロファイルの時系列測定  
-YK08-11 アラビア海航海における測定結果  
速報、ブルーアース 09、立教大学池袋キャン  
パス、2009年3月13日
- ③ Oguri, K., Oxygen distributions,  
fluctuations and bioirrigation processes in  
deep sea sediment: a case of Sagami bay  
sea floor, 7th International symposium for  
subsurface microbiology, 静岡市、グランシ  
ップ静岡、2008年11月21日
- ④ Oguri, K., Long term monitoring of O<sub>2</sub>  
distributions at deep-sea floor,  
Japan-Germany Joint Seminar on New  
Prospects of Molecular Imaging Technology  
for Interdisciplinary Research, 東北大学流  
体科学研究所, 2008年9月3日
- ⑤ 小栗一将、下北沖表層堆積物の酸素濃度分布  
と底生生物群集について、ブルーアース 08、  
横浜市立大学、2008年3月14日
- ⑥ Oguri, K., Geochemical observations and  
seafloor network(s), International  
Workshop: What can be done with seafloor  
observation networks? 海洋研究開発機構東  
京事務所、2008年3月11日
- ⑦ 小栗一将、堆積物-水境界における酸素濃度分  
布イメージからみた海底環境: 古海洋学と現  
行堆積学の接点をさぐる、2007年度古海洋学  
シンポジウム、東京大学海洋研究所、2008年  
1月7日
- ⑧ 小栗一将、市販のデジタルカメラで水環境の  
酸素濃度を可視化できるか? 第三回学際領域  
における分子イメージングフォーラム、早稲田大  
学国際会議場、2007年11月13日
- ⑨ Oguri, K., *In situ* measurement of  
time-series two dimensional O<sub>2</sub>  
distributions at sediment-water interface  
using a planar O<sub>2</sub> 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
- ⑩ 小栗一将、小型・低消費電力マルチゲートカ  
メラを用いた燐光の寿命測定装置の開発-海  
底における二次元酸素濃度分布の現場観測に  
向けて-、第二回学際領域における分子イメ  
ージングフォーラム、早稲田大学国際会議場、  
2006年11月16日
- ⑪ 小栗一将、Planar optode: 光を使った酸素や  
pH の二次元計測センサー原理と生物地球化  
学分野への適用-、日本地球化学会年会、日  
本大学文理学部、2006年9月13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

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

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし