

2D-Optode による堆積物 - 水境界における酸素濃度分布の可視化法と観測

Two-dimensional imaging of oxygen concentrations at sediment-water interface using an optode system.

小栗 一将[1]; 北里 洋[1]; Glud Ronnie[2]
Kazumasa Oguri[1]; Hiroshi Kitazato[1]; Ronnie Glud[2]

[1] 海洋科学技術センター・IFREE; [2] コペンハーゲン大
[1] IFREE, JAMSTEC; [2] MBL, Univ. Copenhagen

はじめに

有光層内で生産された有機物は分解を受けながら水柱を降下し、やがて堆積物 - 水境界 (Sediment-Water Interface; 以下 SWI) に到達する。ここでは、有機物の多くが底棲生物やバクテリアなどの活動によって分解されるが、このとき、SWI 付近の水中や間隙水中に拡散する酸素を消費するため、溶存酸素濃度プロファイルは、堆積物中の深さわずか数 mm ~ 数 cm の間でゼロになるという傾向を示す。この分布は単純な酸素の拡散過程だけでなく、有機物の供給過程、分解過程と、底棲生物によるミキシング過程などの相互関係によって成り立っている。従って海底は酸化的、還元的というように単純に区分できるものではなく、酸化環境にも様々な環境が存在すると考えるべきである。また、水中の沈降粒子情報、堆積物表層部の底棲生物の情報、そして SWI の酸素濃度プロファイルを明らかにできれば、堆積物と生物との関わり合いについて詳細な情報を得られるだけでなく、地層や堆積物コアなどから得られる生物・化学情報を基に、SWI の環境や水中の情報をより正しく復元することにもつながる。

SWI における酸素濃度プロファイルの測定は従来から行われてきた。しかしその手法は茶色く観察される「酸化層」の厚さから酸素が浸透していると考えられる深さを見積もるか、あるいは微小電極装置などを用いてサブミリメートルスケールで濃度プロファイルを定量するなどしか無く、定性的であったり、あるいは高精度であっても一点のデータを代表値とせざるを得ないなどの問題があった。

原理・測定方法

近年、酸素濃度分布を二次元的に描き出す 2D-optode システムが開発され、このような問題が克服されつつある。2D-Optode とは、ルテニウム錯体など、光励起状態から基底状態に戻る際に放出する燐光の強度と持続時間が、周囲の酸素濃度によって異なるという特徴を持った物質を分子センサとして用い、酸素濃度分布を可視化する装置である。実際の測定は、ルテニウム錯体を埋め込んだ optode フィルムを SWI に挿し、 $\lambda = 455\text{nm}$ の青色光によって励起したのちライトを切り、錯体が基底状態に戻る際、数 μs だけ放出される $\lambda = 613\text{nm}$ の燐光をマルチゲート CCD カメラによって撮影し、保存された画像に処理を施して燐光のライフタイムを算出したのち、ライフタイムの面分布を酸素濃度の画像に変換することで行われる。この手法はルミネッセンスライフタイムイメージング法と呼ばれるもので、ライティングやフィルム面の不均質性をキャンセルできる利点を持つ。

実験内容

ルテニウム錯体をポリスチレンに埋め込み、PET フィルム上に塗布した optode フィルムを用い、燐光ライフタイムの特性評価と可視化アルゴリズムの構築を行った。実験は水槽に optode フィルムを入れ、微小電極を用いながら水中の酸素濃度を 0 ~ 100% の間で任意に設定し、青色 LED アレイによって optode フィルム中のルテニウム錯体を光励起させた。そして、任意の酸素濃度条件において、浜松ホトニクス製マルチゲート CCD カメラにより 512×672 ピクセルの画像を撮影し、PC に記録した。一枚のライフタイム画像は、励起光遮断後 $0.5 \mu\text{s}$ 、 $3.5 \mu\text{s}$ 、そして $6.5 \mu\text{s}$ (シャッター速度はいずれも $3 \mu\text{s}$) の計 3 枚の画像から得た。撮影時には燐光以外の光をカメラに入れないため、レンズ前面には $\lambda = 610\text{nm}$ 前後のみの光を透過させるバンドパスフィルタを設置した。さらに、Stern-Volmer の式 ($I/I_0 = a + (1 - a) \cdot (1 / (1 + K_{sv} \cdot [O_2]))$)、 I/I_0 : 任意酸素濃度、無酸素におけるライフタイムの商、 $[O_2]$: 酸素濃度、 K_{sv} : Stern-Volmer 定数、 a : 定数, Glud et al., 1996) から各ピクセルの K_{sv} 値を求め、ライフタイム画像と K_{sv} 画像を得た。これらの画像と、他の濃度におけるライフタイム画像を基に、水槽内における酸素濃度分布の可視化を行った。次に、水槽内に堆積物を敷き、SWI 環境の酸素濃度を撮影し、同様の手法によりライフタイム画像と酸素濃度画像を得た。また、撮影間隔を定めて酸素濃度の時系列変化をアニメーションとして保存する試みを行った。本発表では、可視化法の詳細と、室内実験によって得られた SWI の酸素濃度画像について論ずる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、コペンハーゲン大学の Frank Wenshoefer, Anders Tengberg, Lars Rickelt, Michael Kuehl 各博士には、optode システムやフィルムの作成について貴重な助言を頂きました。ここに謝意を表します。