

## 調査航海概要報告書

1. 航海番号 / レグ名 / 使用船舶 : NT06-05 / なつしま
2. 研究課題名 : 「現場計測と現場実験による堆積物 - 水境界の動態と物質循環の解明」

提案者 / 所属機関 / 課題受付番号 : 北里 洋 / 海洋研究開発機構 / S04-15

3. 首席研究者 / 所属機関 : 北里 洋 / 海洋研究開発機構地球内部変動研究センター

4. 乗船研究者 山本 啓之、小栗 一将、野牧 秀隆、多田 洋平

R.N. Glud, M. Middelboe, H. Staahl, B. Thamdup, F. Wenzhoefer

5. 調査海域 : 相模湾中央部および初島沖シロウリガイサイト

6. 実施期間 : 平成 18 年 3 月 22 日 ~ 29 日

### 調査航海概要

(研究目的及び背景)

本研究は、海底の堆積物—水境界を通して物質がダイナミックに循環する姿を、現場計測や現場実験を通じて観測し、定量することを目的としている。とくに、堆積物—水境界に於ける環境勾配を  $\mu\text{m}$  単位で長時間モニターを行うことを通じて、動的な物質循環像を明らかにする。

海底の堆積物—水境界(以降 SWI と呼ぶ)は、海洋の物質循環を最終的に律速する境界である。そこでは、碎屑物と有機物の集積と変質そして消費が起こっている。碎屑物粒子、消費されなかった有機物および SWI で生産された有機物は、堆積物内の酸化-還元境界を越えて埋没すると地層として固定される。また、酸化—還元境界では、化学物質の移動・拡散が盛んに起こる。このとき物質の移動は、海水から堆積物へ向かう拡散方程式で記述できる。これが静的物質循環モデルである(たとえば、Berger and Heath, 1975, Banner, 1980)。しかし、最近の研究は、堆積物が地層となったあとも、堆積物中を水や物質が循環し、構成粒子を分解、あるいは合成していることを明らかにしている(たとえば、Boudreau, 1996)。このことは、地球表層の物質循環が堆積層深部に及んでいることを示している。言い換えると、堆積物は堆積岩になった後も生きていて、地層形成時の環境情報が書き換えられていることを意味する。したがって、地球表層の物質循環の理解は大気—海洋にとどまらず、SWI から堆積岩まで含めたより広範な枠組みで見直し、再構築しなければならない。

そういうわけで、海洋堆積物には海洋の表層から中深層に至る海洋環境情報とともに、堆積層内の環境に関する情報が残されている。たとえば、酸素が欠乏した海底には、微生物そのものあるいは微生物が作用した結果として形成された地層が堆積し、それがサプロペル層や黒色泥岩あるいは泥灰岩となる。また、酸素に富んだ海底には底生生物によって良く攪拌された塊状泥岩が形成される。SWI の生物活動は地層内から水中への物質の還流を引き起こし、堆積物の物性や化学組成を変化させる。底生生物の活動は、表層の基礎生産および中深層の物質循環を反映して変化するため(Stott et al., 2000)、海底の物質循環の様子も環境変動に同期して変化する。このように、堆積物は陸域からの粒子の供給、海洋表層での高い基礎生産物と有機物の沈降、季節的な底層ネフロイドの発達、そして SWI における粒子の捕捉という過程を経て形成されるだけでなく、地層内で起こる物質の分解・変質・移動によってさらに変化する。地層内で分解・変質した物質の一部は堆積物粒子の間隙や地層の割れ目を通して水中へ還流しているらしい。しかし、堆積過程において粒子がどのように分解あるいは変質していくのか、またどのような物質がどれくらい還流するのかという動

的な堆積層の具体的な姿は把握されているとは言えない。

動的な SWI の姿を理解するためには、微小領域の連続的な環境計測が必要である。いまで SWI の環境勾配の測定は、堆積物を採取し、陸上の実験室で堆積物粒子や間隙水の分析を行うことによって明らかにしてきた。この方法では、ミリメートルからセンチメートル単位での測定が標準であり、サブミリメートルあるいはマイクロメートル単位での環境計測は難しかった。また、深海堆積物の場合、実験室と現場環境とがあまりにも異なっているために実験室で測定された値が深海環境を再現しているかどうかを評価できなかった。1980 年代に入ってからマイクロセンサーを用いた SWI の環境計測が行われるようになり、環境の線的なプロファイルが得られるようになってきた (Revsbech et al., 1980)。また、化学錯体フィルムを用いた二次元 optode が開発され、断面に沿った環境要素の分布と動的な変化が見られるようになり、さらに、これらを自立型ランダーシステムに搭載することによって海底現場での直接測定が可能になった (Glud et al., 1996)。しかし、自立型ランダーはヘテロに分布する海底環境をピンポイントで分析することはできないために、環境の平面的なばらつきが少ない浅海の平坦な海底以外での計測に対しては無力であった。潜水船あるいは ROV で海底を観察した上で、適切なところに測器を設置するピンポイント計測は、海底湧水域のようにヘテロな海底環境で効果があるばかりでなく、平坦な海底でも正しく設置した上で計測できる利点がある。

本研究は、コペンハーゲン大学が開発した海底設置型 2D planer optode と microsensor electrode および北里、今井らが開発した現場測定装置を有機的に組み合わせて、海底の堆積層表面を出入りする物質の動態と収支そして循環を海底現場で実測しようとするものである。特に、長時間計測への挑戦が本潜航調査の目玉である。

今回潜航調査を行った相模湾は、湾中央部で 1000 年間に 3 メートルを超える速い堆積物の集積が起こっている場であり (Kato et al., 2003)、多量の有機物と碎屑物が堆積している。一方、湾の東西に存在する断層帯や付加プリズムでは堆積物からメタンや硫化水素ガスを含む水が絞り出されて還流する海底湧水現象がみられ、化学合成生物群集と微生物マットが発達している。湾東部の凹地は、side scan sonar の映像に数多くの pock mark を認めており、堆積物から水中に向かうフラックスがある可能性が大きい。このように同じ海湾でありながら、相模湾には堆積が卓越する場と堆積層から水や化学物質が還流している場が存在しており、海底堆積物と水を巡る大きな循環を観測できる事が期待される。幸いにして、相模湾海域は、1980 年代以降、様々なグループによってさまざまな海洋観測が続けられており、相模湾表層で生産され、沈降し、堆積する物質の経路は把握されている。こういった海域で、現場計測装置と現場培養を組み合わせたより詳細な SWI の観測を行う事によって、今まで見えていなかった堆積物表層部における物質循環の動的でかつ定量的な姿を見ることが出来るはずである。

#### (調査内容と成果速報)

潜航調査は以下のことを行った。

1. Profiling Lander 観測 (Glud, Staahl, Wenzhoefer, 小栗担当): sensor microelectrode, 2D planer optode を搭載した Elinor-type lander system を 24 時間以上、相模湾中央部水深 1450m の海底に設置し、海底の Time-lapse 映像を撮影・記録した。

1-1) Sensor Microelectrode (Wenzhoefer, 小栗担当): SWI における、温度、塩分、酸素、硫化水素濃度、pH を  $\mu\text{m}$  単位でプロファイル観測を行った。各成分のプロファイルから、海底における酸化還元状況、物質の流れを把握する。

1-2) 2D planer optode (Glud, 小栗担当): 堆積物—水境界の酸素、pH の断面観測を複数の地点で行う。また、堆積物表層の物質循環の日変動を明らかにするために、相模湾中央部 OBB II 地点で一日以上の連続観測を行った。データは 30 分ごとの time lapse

photograph として記録し、コマ撮り映像が得られた。予察的な研究では、ゴカイが棲管から嫌気的な間隙水を海底に向かって放出する状況（図1）、貝形虫と思われる生物が堆積物表面を歩行する様子（図2）の連続イメージが得られた。世界で最初の映像である。

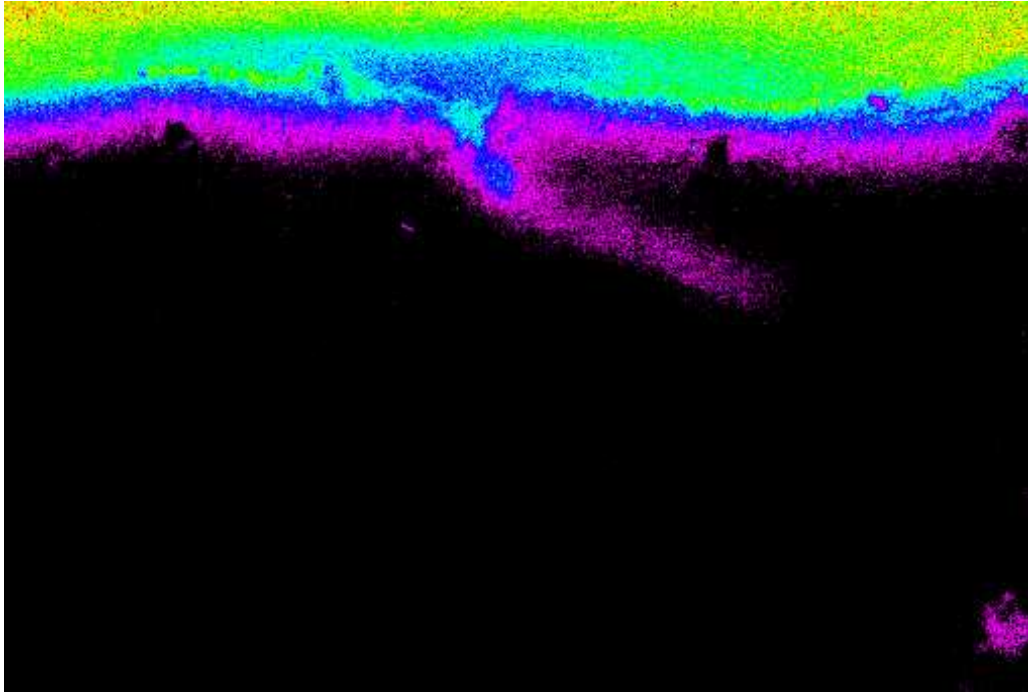


図1、ゴカイの棲管から嫌気的な海水が放出されるさま。横幅4 c m。（Glud, R. and H. Staahl, 提供）

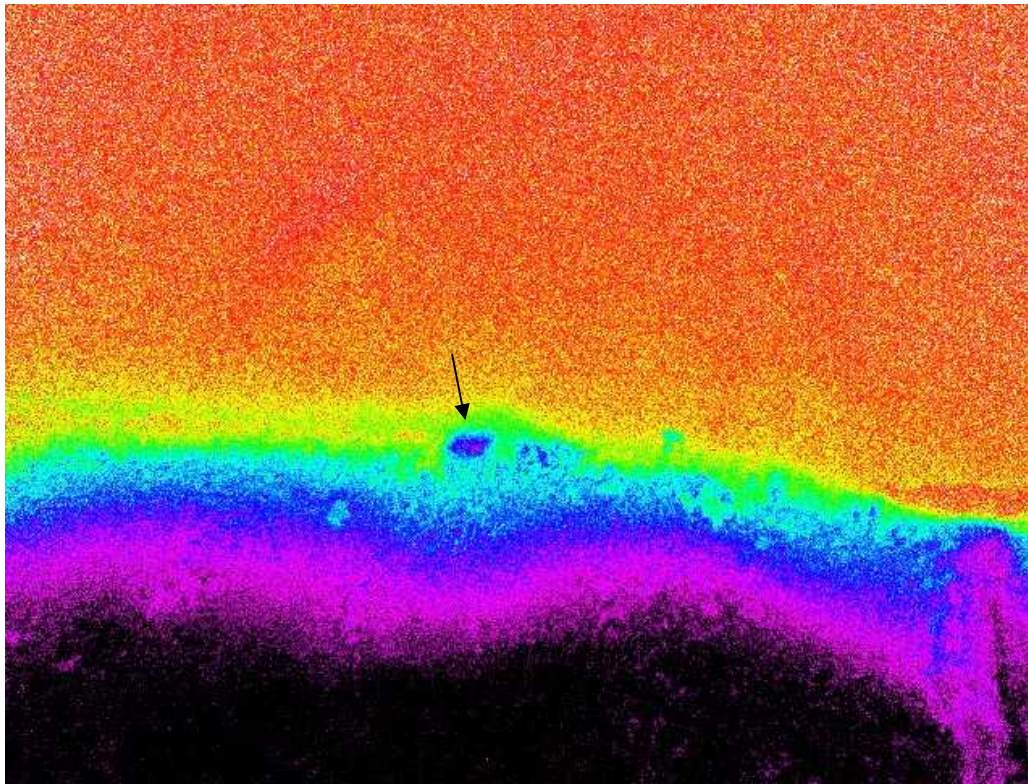


図2、堆積物表面を貝形虫（矢印の先の黒い塊。酸素呼吸を行うため、個体の周りが酸欠状態になっている）が右から左に歩行する様子。イメージの横幅は4 c m。（Glud, R. and H. Staahl 提供）

2. ベンシック・チェンバーによる堆積物酸素消費量の測定 (Wenzhoefer, Glud 担当): 簡易型ベンシックチェンバーを海底に6時間設置し、堆積物表層に於ける総括的な酸素消費量を測定した。測定は2回行い、いずれも成功した。データは海底境界層における炭素循環を見積もる際の基準となる。

3. 安定同位体C-13を用いた現場培養実験 (野牧・北里担当): 炭素13でラベルした餌 (*Dunaliella*, glucose) を現場培養装置内の堆積物表面に散布し、底生生物による時間を追った摂取速度を測定する。また、GC-C-MSを用いて、底生生物細胞の有機分子分画ごとの同位体配位を追跡することを通じて、海底生態系を流れる有機物質の代謝経路を明らかにすることを試みる。実験は0日、2日、9日 (NT06-04の折りに設置) の時間間隔で行った。

4. 採泥試料を用いた船上実験 (Glud, Thamdrup, Middelboe, Staahl 担当)

4-1) 嫌氣的窒素代謝実験 (Glud, Thamdrup 担当): 潜航調査で採集された柱状堆積物に船上の実験室内で  $\delta$ -15N でラベルした有機物を投与し、微生物による嫌氣的窒素代謝 (Anammox) の経路とフラックスを測定する。その結果とバイオマスデータと合わせ、嫌気—好気境界における窒素循環を明らかにする。

4-2) バクテリア—ウィルス相関実験 (Middelboe 担当): 堆積物内の微生物は、さまざまな有機物分解に関与して堆積物—水境界部に有機物懸崖 (カスケード) を作ると共に、有機物の無機化に貢献している。この実験では、既知の有機物を添加した表層堆積物を実験室内で培養し、バクテリアとウィルスの増減を時系列的に定量する。ウィルスがバクテリアの増加に位相がずれながら追従することはデンマーク沿海部における予察的な実験において観察されており、これはウィルスがバクテリアを攻撃してその増加を抑える様子を現していると解釈している (Middelboe et al., 2003)。NT03-10の予備的な実験で、似たような傾向が見られた (Middelboe et al., 2006) ことから、本航海では、深海環境におけるバクテリア—ウィルス動態関係を実験的に検討する。

5. シロウリガイの成長に関する現場マーキング実験 (多田・藤倉・山本・北里担当): 冷湧水にコロニーを作って群生するシロウリガイは、海底湧水に含まれる硫化水素を共生細菌が分解してエネルギーを得る化学合成生物である。その活性と成長速度については議論があるものの、実測した例は少ない。今回、蛍光を発するカルセインと硫酸ストロンチウムをトレーサーとして与え、貝殻に時刻を刻むことを試みた。現場実験は初島沖シロウリガイコロニーにおいて NT06-04 の折りに行き、本潜航調査の折りに回収に成功した。なお、藤倉氏が MBARI と共同開発した藤倉式マーキング装置は、本年12月の NT06-23 航海の折りに回収する。

6. 冷湧水コロニーに伴って生息する有孔虫のバクテリア共生 (北里・岩崎担当): 冷湧水シロウリガイコロニー近傍には、*Bulinmina striata*, *Bulimina subornata*, *Ratherfordioides cornuta* などの底生有孔虫種が優占して生息する。これらの有孔虫がどのようなメカニズムで冷湧水環境に適応しているのかを明らかにする目的で、さまざまな有孔虫種の細胞を TEM 観察し、細胞中への細菌の共生を検討する。シロウリガイコロニー中央部から柱状採泥を行い、表層 1 cm に生息する *Bulimina striata*, *Globobulimina pacifica*, *Chilostomella ovoidea*, *Ratherfordioides cornuta* などを拾い出し、船上でグルタルアルデヒドによる細胞固定を行った。実験室内においてオスミウム酸固定を行った後、TEM で観察を行う。