

海底表面で起こっていること

JAMSTEC 小栗一将

海面付近で生産された植物プランクトンは、寿命を終えると凝集してホコリのような物体に成長する。この物体は重力の影響を受け、1日に18～200mというゆっくりとした速度で水中を沈降しはじめる¹。この様子を潜水艇から観察すると、まるで地上の降雪のように見えることから、この物体はマリンスノーとよばれる(図1)。マリンスノーは有機物の固まりでもあるため、降下中にはカイアシ類や繊毛虫といった微生物や、さらに小さなバクテリアによって、水中の酸素を消費しながら二酸化炭素や硝酸塩、リン酸塩などの栄養塩類へと分解される。分解で生じる栄養塩類は十分な強さの太陽光が到達する深度に戻ると、新たに生産される植物プランクトンの増殖によって再利用される。マリンスノーは海底に到達するまでに大部分が好気分解を受けるため、深海に到達する量は、海面での生産量のわずか数%でしかない²。しかしながら海洋全体の深海底に降り積もる炭素の総量は莫大で、年間あたり0.2ギガトンにも達する³。海底に降り積もるマリンスノーの量は、植物プランクトンの生産量の影響を受ける。春先から初夏にかけ、植物プランクトンが一時的に大量発生するブルーミングという現象が起きると、少しの時間差を伴って海底に大量のマリンスノーが堆積する³。これらは底生生物にとって貴重な餌であるためすぐ消費されるが、水中で生じたのと同じようにバクテリアによる好気分解も受けるため、海底直上における酸素の消費も一時的に増加する⁴(図2)。

水中や堆積物表層部で好気分解を免れた有機物は堆積物の内部にも存在するが、堆積物中では酸素が消費されつくし、無酸素環境となる。通常、沿岸や陸に近い大陸縁辺部の海底では、酸素が浸透する深さは海底表面から深さ数mm～数cmまでであり、そこから下は無酸素の世界が広がる。一方、有機物の供給量が少なく、海底付近の海水に酸素が多く溶存する遠洋の深海底では、数十センチから数十メートル、あるいはもっと深くまで酸素が浸透する環境が存在する⁵。堆積物内部の酸素が溶存しない場所では、好気性バクテリアにかわり硝酸、マンガニオン、鉄イオン、さらには硫酸イオンなどを利用して有機物を分解する嫌気性バクテリアの出番となる(図3)。そして、海底下数百mといった深部では、ついには二酸化炭素も利用され、メタンが生成する。

一方で植物プランクトンの生産量が高くなる内湾などの環境では、海底付近の水中に溶存する酸素までもが消費され尽くし、無酸素水塊が発生することもある。このようになると硫酸還元バクテリアの代謝によって、酸素に替わり水中の硫酸イオンなども消費され、我々人間を含む、好氣的な代謝を行う生物にとって有毒な硫化水素が発生することになる。

酸素は堆積物の中に、分子拡散という現象によって浸透する。海底面で物理的な攪乱の無い定常状態であれば、酸素が供給される速度と好気分解によって消費される速度は等しいと考えられる。しかし、実際の海底には大小様々な底生生物が生息する。彼らが巣穴を掘って呼吸のために海水を取り込み、また餌を食べるために海底を耕すと、酸素などの溶存物質は海底へより多く供給される。すなわち海底の環境を維持している本質は、化学と生物の相互作用にあるといえる。図4は、酸素の分布を可視化することのできる「二次元酸素オプトード」とよばれる装置を海底に持ち込み、海底の断面と、その酸素濃度分布を可視化した例である。この分布図からは、相模湾水深1170mでは、酸素は海底からわずか5～8mmの深さで枯渇するが、生物の巣穴付近では、生物活動に伴う海水の導入などによってより深くまで酸素が浸透していることが分かる。この結果は、底生生物は海底に酸素を導入することで、海底表面付近を好氣的な環境に維持する役割を担っていることを示唆している。

海底における好気分解の速度を知ることは、海底が海洋環境に与える影響を知る上でも重要な情報である。二酸化炭素が海底から水中にどれだけ放出されるか、という疑問は、そのまま地球温暖化や海

洋酸性化といった問題につながるためである。現在、海底現場において微小領域を測定できる二酸化炭素センサはほとんど存在しないが、酸素の鉛直分布から求められる酸素の消費速度に、植物プランクトンの平均元素組成を適用することによって、およそその好気分解速度を求めることができる。そのためには、まず微小酸素電極を使って、酸素濃度の高解像度鉛直分布を海底の現場で測定する必要がある。図5は、微小電極装置、二次元酸素オプトードと、微小電極測定装置を海底に持ち込むのに使用される「ランダー」とよばれる水中昇降装置である。海底の環境を理解するために、このような大型の装置が活躍している。

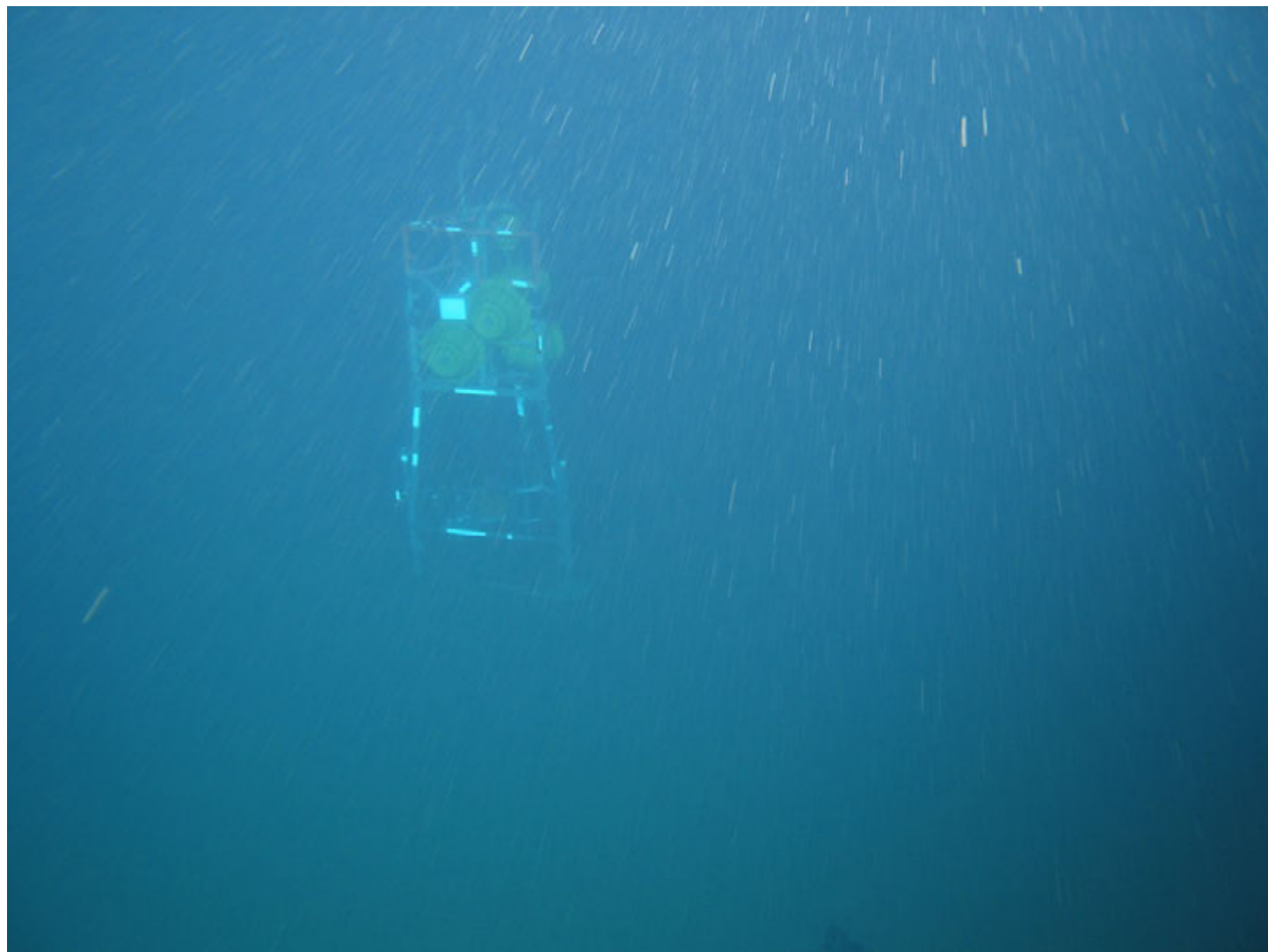


図1 海底付近で観察されたマリンスノー。名前の通り、海底に降り積もる雪のような姿をしており、前方の海底観測装置が霞んで見えている。この写真は2006年3月25日、相模湾の水深1500m付近において、無人探査機（ROV）ハイパードルフィンのデジタルカメラによって撮影された。

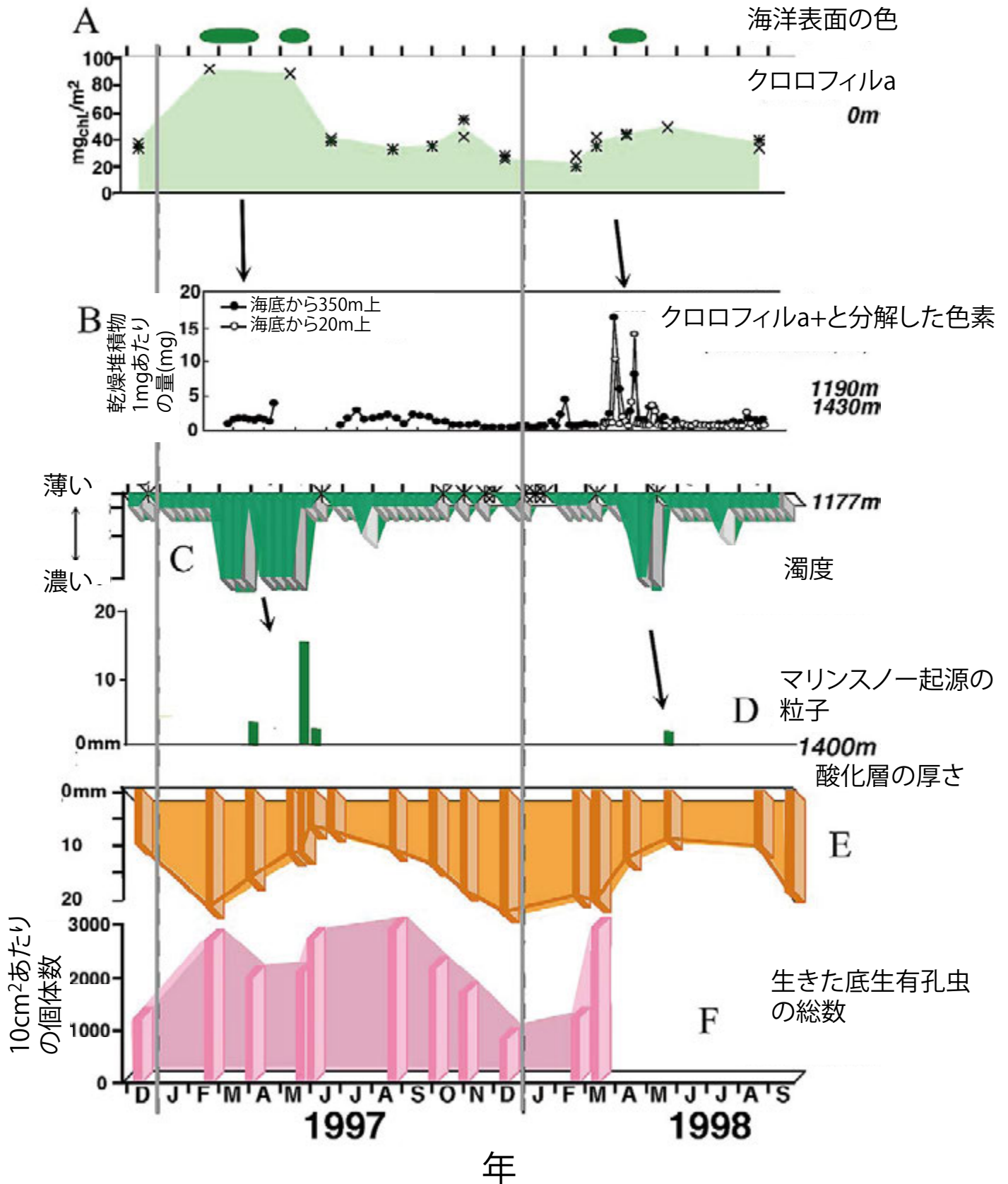


図2 相模湾、湾中央部の季節変化。

(A)海面の色とクロロフィルa濃度(水深0m)。これらは植物プランクトンの量を示す。

(B)水深1190m, 1430mでそれぞれ採取された沈降粒子のクロロフィルaとその分解色素の濃度。

(C)濁度層の定性的な密度(水深1177m)。

(D)堆積物表層に見られた、マリンスノー起源の物質(海底：水深1400m)。

(E)堆積物表層に見られる酸化層の厚さ。

(F)堆積物中に生息する生きた底生有孔虫の総数。これらの図はKitazato et al. (2003)を加筆して作成した。

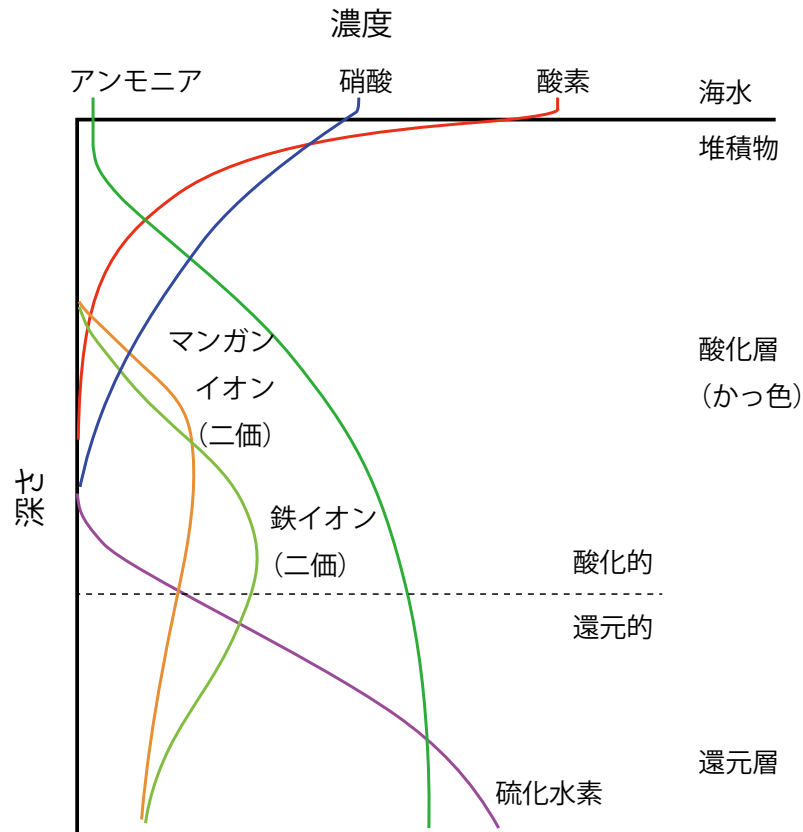


図3 海底における代表的な生元素の分布. 酸化的な状態では, 堆積物はかっ色を呈し, この部分は酸化層とよばれる. 酸素の分布と酸化層の深さは必ずしも一致しない.

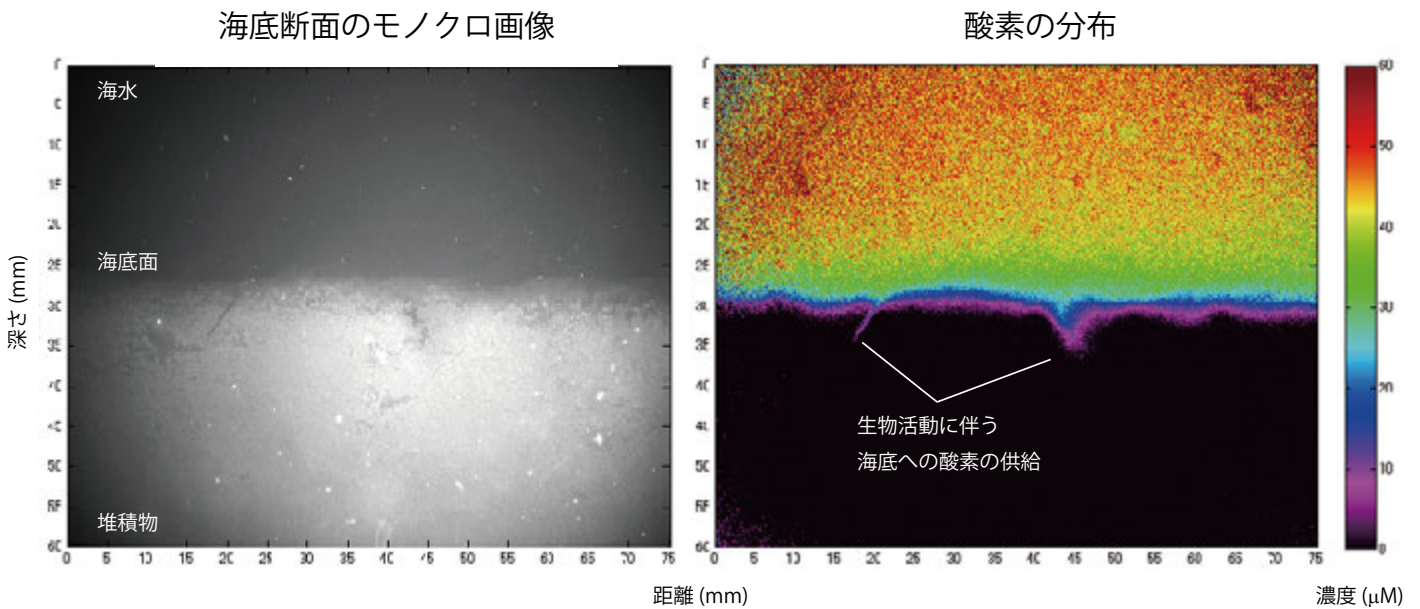


図4 堆積物-水境界における酸素濃度の分布. 画像の撮影範囲は60mm×75mm. これらは2006年12月10日, 午前2:21に相模湾・初島沖水深1170mの海底において, 二次元酸素オプトードによって取得された. 堆積物中に酸素が浸透する深さは微地形や生物活動の有無によって異なり, 時間・空間的に変動している.

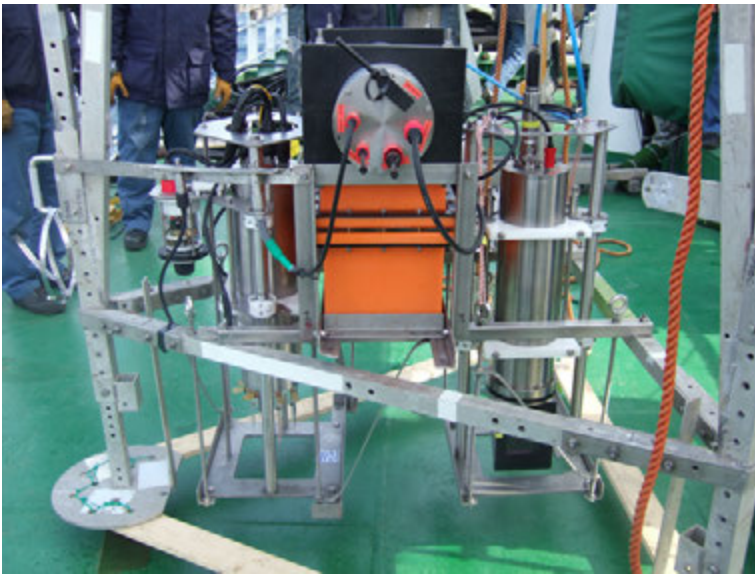


図5(A)ランダーに実装された微小電極装置(左)と二次元酸素オプトード(右).

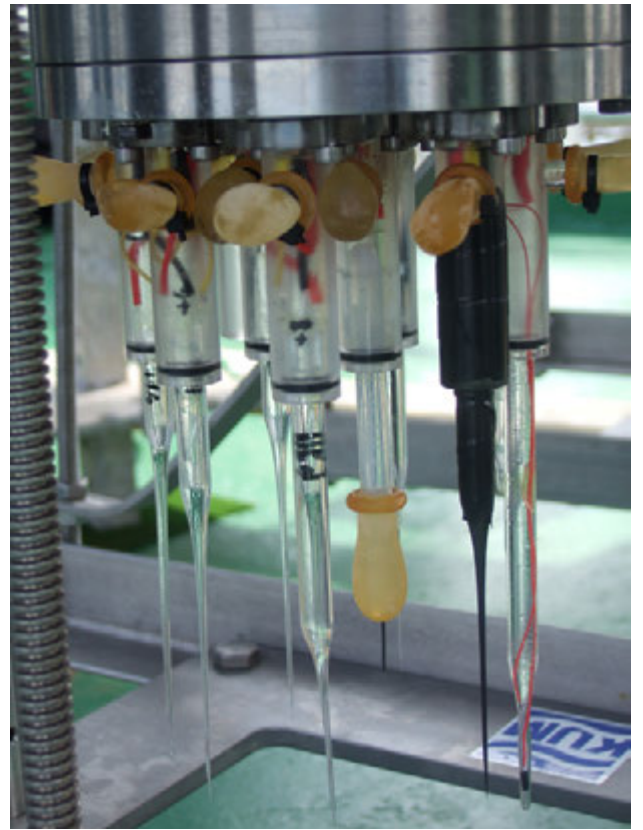


図5(B)微小電極. ステッピングモーターを使った精密制御によって海底に電極をゆっくり挿しながら, $50 \sim 100 \mu\text{m}$ という細かな間隔で酸素などの分布を測定する.

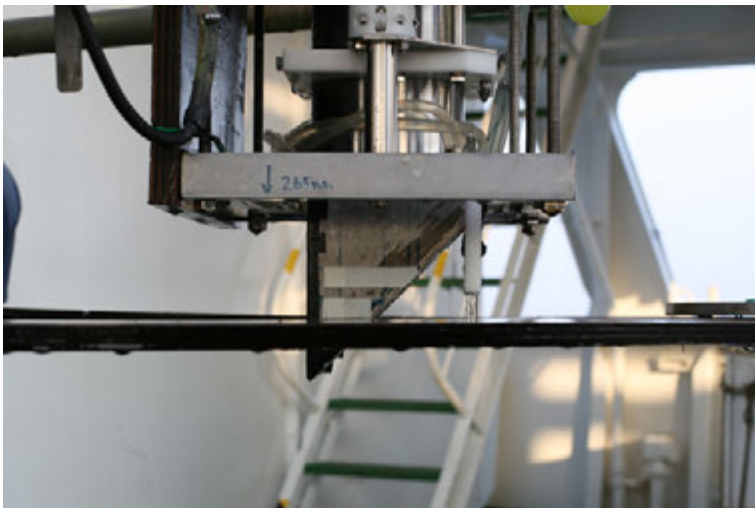


図5(C)二次元酸素オプトード. センサ面には, 酸素濃度によって発光寿命が変化する物質をコーティングしたフィルムが貼ってある. センサ内部には特殊なCCDカメラと励起光源が組み込まれており, 海底断面の写真と酸素濃度分布を同時に取得する.

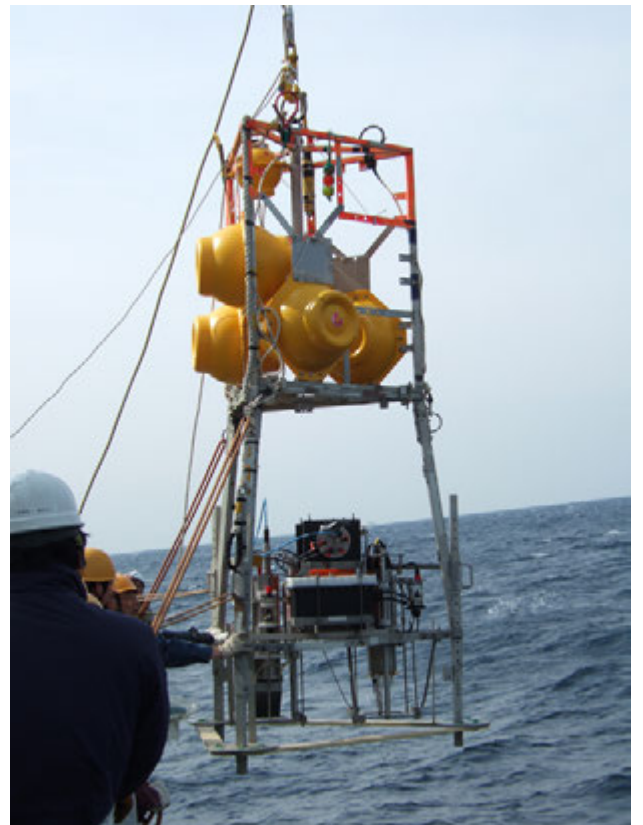


図5(D)ランダー全体. 船上から海底にフリーホールで落下させる. 写真のものはROVで回収を行うが, 浮力材, 錘と切り離し装置を取り付けることで, 測定終了後, 海面に浮上させ回収することもできる.

引用文献

1. Buesseler, K.O. et al. Scavenging and particle deposition in the southwestern Black Sea—evidence from Chernobyl radiotracers. *Deep-Sea Research*, 7, 413–430 (1990).
2. IPCC, The carbon cycle and the climate system. In: *Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007* (eds. S. Solomon, Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L.). Cambridge University Press. pp. 511–538, ISBN: 978 0 521 70596 7 (2007).
3. Lampitt, R. S. Evidence for the seasonal deposition of detritus to the Deep-Sea floor and its subsequent resuspension. *Deep-Sea Research Part A*, 32, 885–897 (1985).
4. Kitazato, H., Nakatsuka, T., Shimanaga, M., Kanda, J., Soh, W., Kato, Y., Okada, Y., Yamaoka, A., Masuzawa, T., Suzuki, K., Shirayama, Y. Long-term monitoring of the sedimentary processes in the central part of Sagami Bay, Japan; rationale, logistics and overview of results. *Progress in Oceanography*, 57, 3–16 (2003).
5. Røy, H., Kallmeyer, J., Adhikari, R. R., Pockalny, R., Jørgensen B. B. and D'Hondt, S. Aerobic microbial respiration in 86-million-year-old deep-sea red clay. *Science*, 336, 922–925 (2012).