

## 堆積物境界面をめぐる諸問題—瀬戸内海—\*

川名吉一郎\*\*, 星加 章\*\*, 谷本照己\*\*

### Several phenomena in the benthic boundary layer of the Seto Inland Sea\*

Kichiichiro KAWANA\*\*, Akira HOSHIKA\*\* and Terumi TANIMOTO\*\*

**Abstract:** Detailed investigations on vertical and horizontal distributions of water quality (dissolved oxygen, nutrients, suspended matter, etc.) and their seasonal variation were carried out in the Seto Inland Sea. In summer, total suspended matter (TSM) concentration near the bottom was significantly influenced by water movement and turbid bottom water was observed in all areas with silty bottom sediments. The high concentration of TSM near the bottom may be caused by the resuspension of the surface layer of sediment. Also in summer, oxygen-deficient bottom water was observed in regions of limited water movement and it contained large amounts of nutrients derived from bottom sediments. The oxygen consumption and fluxes of nutrients across the sediment-water interface were measured with specially designed *in situ* instrument. An *in situ* water quality monitoring system has been developed to make continuous measurements of the vertical distribution of water quality in the bottom water and various parameters of bottom sediments.

#### 1. はじめに

瀬戸内海全域において、夏季と冬季の年2回水質や懸濁物質の調査を行った。その調査で特に目立った現象は、夏季の成層期に、底質が泥質である海域では海底近傍に必ず懸濁物質濃度の異常に高い水塊が生成されること (KAWANA and TANIMOTO, 1984)、および堆積物の分解に伴い生成される貧酸素で栄養塩濃度の高い水塊が種々の海域の海底近傍に認められること (塩沢ら, 1984) である。この事は、海水中にあった物質が海底に沈積し、そのまま堆積物となるわけではなく、堆積物境界面で種々の過程を通じて物質のやりとりがあることを示唆している。

ここでは、瀬戸内海の堆積物境界面で起きている現象を簡単に述べると同時に、これら現象に関して我々の実施している観測法を中心に話題提供したい。

#### 2. 海底近傍の高濁度層

夏季の瀬戸内海において、懸濁物質の鉛直分布を調べると、多くの測点の懸濁物質濃度が海底近傍で急激に増加しているのが認められる。この高濁度層の生成原因としては、底層流による堆積物のまき上げがまず考えられる。高濁度層と底層流の関係を調べるため、周防灘のある測点で観測船を固定し、懸濁物質の鉛直分布を1時間ごとに1潮汐間測定した結果を Fig. 1 に、同時に行った底層流の流速測定結果を Fig. 2 に示す。海面から約 8 m までの懸濁物質は水深に関係しない均一な鉛直分布となり、8~10 m の水深に最小濃度が認められる。10 m より深くなると、濃度は海底に向かって急激に増加しており、流速が大きくなる程、高濃度である。Fig. 1 の各鉛直分布から 8~10 m の水深に認められる最小濃度よりも海底近傍で濁りの増加している部分だけを取りだし海底からの高さの関係にしたのが Fig. 3 である。もし、Fig. 3 の鉛直分布が底層流による堆積物のまき上げに起因しているならば、まき上げ量と流速の間にはなんらかの関係があるはずである。Fig. 3 の各鉛直分布について濃度を海底から濁りの増加が認められなくなる高さまで積分することから、単位面積当りにまき上げられた量

\* 1985年11月25日受理  
Received November 25, 1985

\*\* 中国工業技術試験所環境化学研究室,  
〒737-01 呉市広町 15000  
Government Industrial Research Institute, Chu-  
goku, Hiro-machi 15000, Kure, Hiroshima, 737-01  
Japan

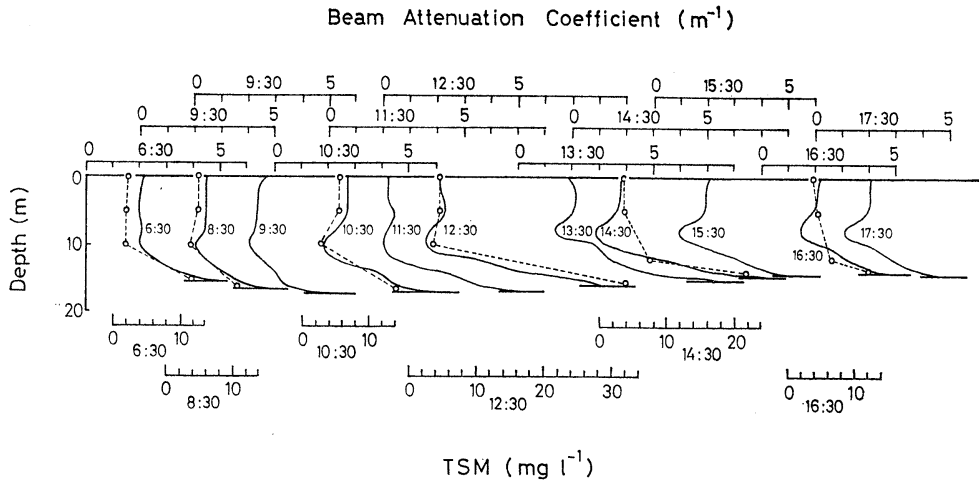


Fig. 1. Temporal variation of vertical distribution of suspended matter. Solid lines: beam attenuation coefficient. Dotted lines: total suspended matter (TSM) concentration.

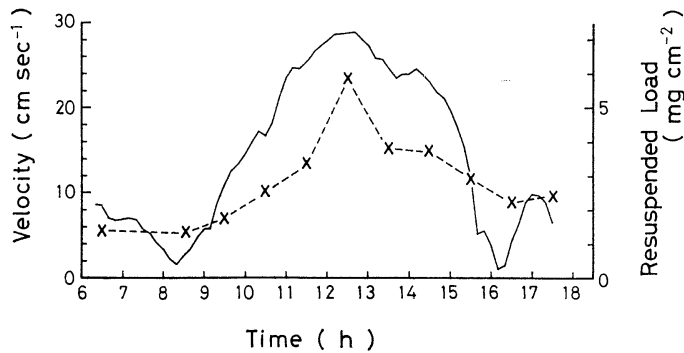


Fig. 2. Time series of the mean velocity (solid line) and the resuspended load per unit area (dotted line).

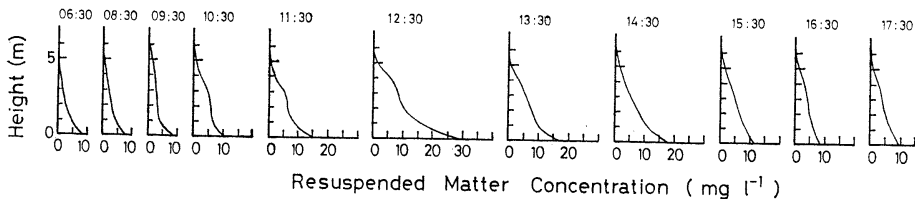


Fig. 3. Vertical distribution of net concentration due to resuspended matter.

( $Q$ ,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) を求めた。 $Q$  の時間変動を Fig. 2 に示す。 $Q$  は底層流の動きに伴って変動しており、流速が大きくなると  $Q$  も増加する。我々が測定したすべての測点で、 $Q$  と流速の間に明確な比例関係が認められているわけではないが、海底近傍の高濁度層は底層流に大きく左右されていることは間違いないであろう。

高濁度層がどの海域に生成するのかを調べるため、夏

季の瀬戸内海全域における表層水中および底層水中の懸濁物質分布を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。調査は、瀬戸内海を大きく 4 つの海域に分けて異なる年に行われたが、8 月上旬から 9 月上旬のほぼ同じ季節に実施された。大阪湾奥部や広島湾などの一部海域を除いて、表層水中の懸濁物質濃度は  $5 \text{ mg}/\text{l}$  以下である。これに対して底層水中の懸濁物質濃度は  $5 \text{ mg}/\text{l}$  以上であり、各灘の中

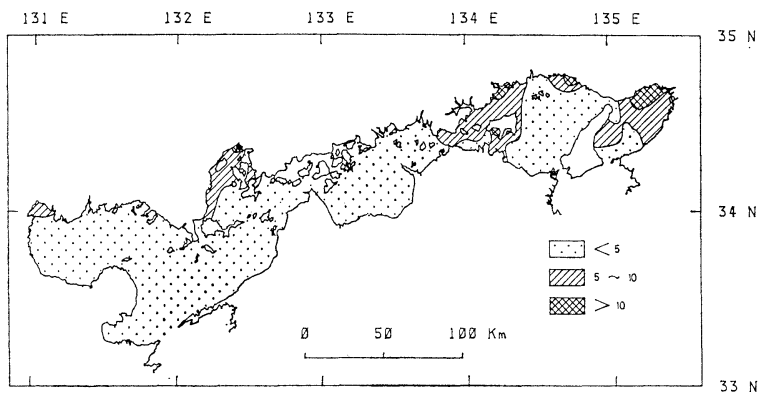


Fig. 4. Horizontal distribution of suspended matter (mg/l) in the surface layer in summer.

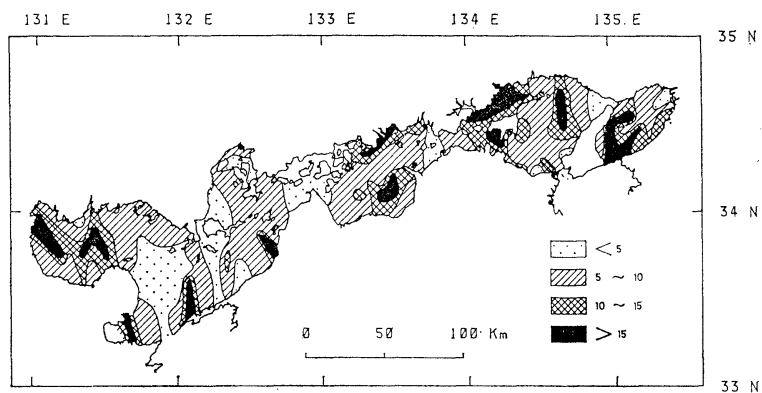


Fig. 5. Horizontal distribution of suspended matter (mg/l) in the bottom layer in summer.

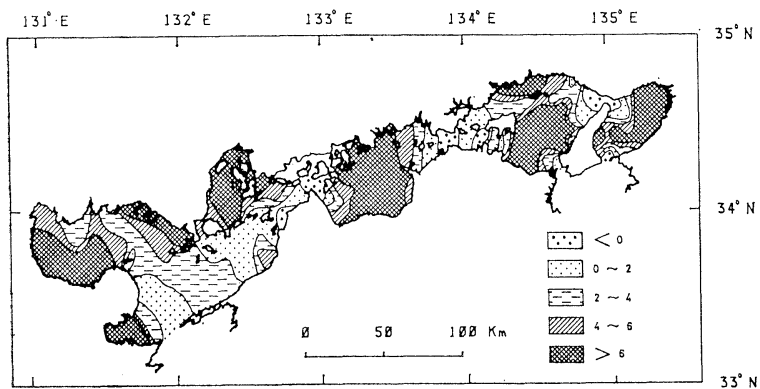


Fig. 6. Distribution of median grain size ( $Md\phi$ ) of the bottom sediment.

中央部では、15 mg/l 以上の所も認められる。高濁度層は海底にそって存在し、その層の厚さは10cmに達する海域もある。高濁度層の生成している海域の堆積物の粒度を調べた。Fig. 6は、ウェトワーススケール( $\phi$ )に従って表示した堆積物の中央粒径値(Md $\phi$ )の分布である(谷本ら, 1984)。海峡部や周防灘の一部海域、伊予灘を除いた広い範囲に Md $\phi$  4 以上のシルト質の堆積物が分布しており、各灘の中央部の堆積物は Md $\phi$  6 以上の細粒シルトである。高濁度層は堆積物の細かな海域に生成する。高濁度の濁りは、海底に向かって増加しており、明らかにその起源は海底にあると考えられるが、高濁度層中の懸濁物質と堆積物は質的に同じ物質であるわけでもない。高濁度層中の懸濁物質に含まれる有機態のリン、窒素、炭素量は、表層や中層に比べて顕著に少なく、かなり分解の進んだものが多いことを示しているが、堆積物組成とは明らかに相違する(KAWANA and TANIMOTO, 1984)。

一方、冬季の懸濁物質は表層から海底まで一様な分布となる場合が多く、海底近傍の高濁度層はなくなるか、あったとしても懸濁物質濃度は低くなる。夏季の高濁度層の生成原因として次の様なことが考えられている(塩沢ら 1985)。春から夏にかけて表層で生物的内部生産が活発におこなわれるようになり、その結果として生産物が海底へ供給されることになる。海底に沈積した沈降物の一部はそのまま堆積物となるかも知れないが、軽い沈積物は底層水の流動に伴って再懸濁すると考えられる。海面近くで生物的内部生産が活発に行われている間は生産物の海底への供給があるが、冬季には、内部生産の減少に伴い海底への生産物の供給も少くなるとともに、鉛直混合が活発になって底層に蓄積されていた懸濁物質も上方へ拡散されてしまい、高濁度層は消滅するのではないか。理由はどうであれ、海水中から海底面に沈積した

懸濁物質がそのまま堆積物へ移行するわけではなさそうである。

### 3. 貧酸素水塊

閉鎖海域である瀬戸内海では、過去に流入した莫大な量の汚染物質が外洋へ容易に移動せず、かなりの部分が堆積物中に蓄積されてきたと予想される(村上, 1976)。こうした汚染物質は、分解、溶出過程を通じて水質環境に種々の悪影響を及ぼす(花岡, 1972; 柳田, 1976)。特に、夏季には堆積物の分解に伴う貧酸素水塊が種々の海域に生成されており、貧酸素水塊の生成機構解明に精力的な研究がなされている(文部省環境科学研究班, 1984)。我々の測定による夏季の瀬戸内海全域における底層水中の溶存酸素の水平分布を Fig. 7 に示すが、停滞性の強いと予想される大阪湾奥、播磨灘中南部、燧灘東部、広島湾と別府湾の奥部に貧酸素水塊が認められ、別府湾奥部の一部底層水は無酸素状態(塩沢ら, 1977)にある。堆積物の分解に伴ない溶出した栄養塩は海底近傍に蓄積される。夏季表層水中の PO<sub>4</sub>-P は、大部分 0.5  $\mu\text{g-at/l}$  以下であり、大阪湾奥部と別府湾等の一部に 1  $\mu\text{g-at/l}$  程度の地点が認められるだけである。一方、底層水中(Fig. 8)では、表層水中と異なり大部分が 0.5  $\mu\text{g-at/l}$  以上と高く、貧酸素水塊の認められた大阪湾奥、播磨灘中南部、広島湾と別府湾奥部は 2  $\mu\text{g-at/l}$  以上となっている。別府湾奥部の無酸素水中では最大 6.1  $\mu\text{g-at/l}$  を示す。貧酸素水塊形成機構解明には、底層水中での酸素消費とそれに伴う溶出量がどの程度であるかを正確に見積る必要がある。堆積物からの栄養塩類等の溶出量の見積りに関しては、湖沼を中心としてかなり行われてきたが、その手法は主に堆積物試料を用いての室内実験と堆積物の間隙水中の濃度分布から推定されるの

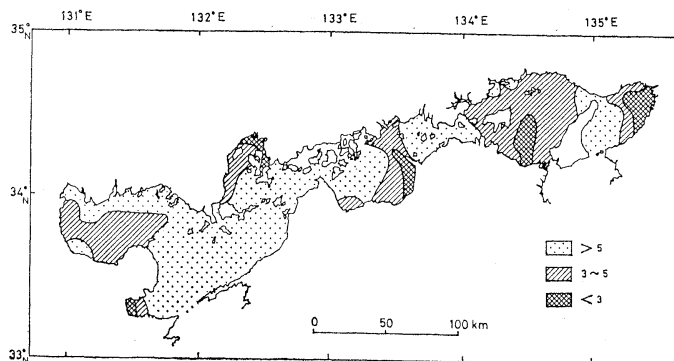


Fig. 7. Horizontal distribution of dissolved oxygen (mg/l) in the bottom layer in summer.

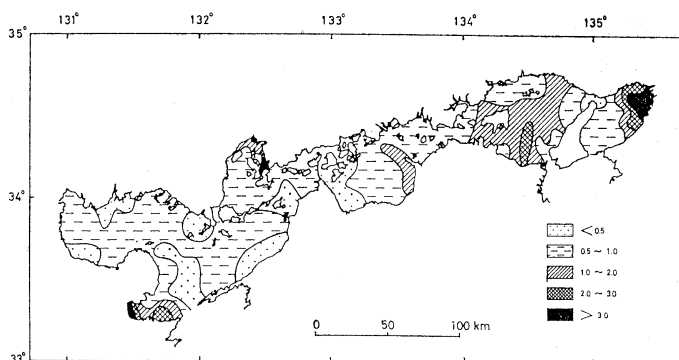


Fig. 8. Horizontal distribution of  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $\mu\text{g-at/l}$ ) in the bottom layer in summer.

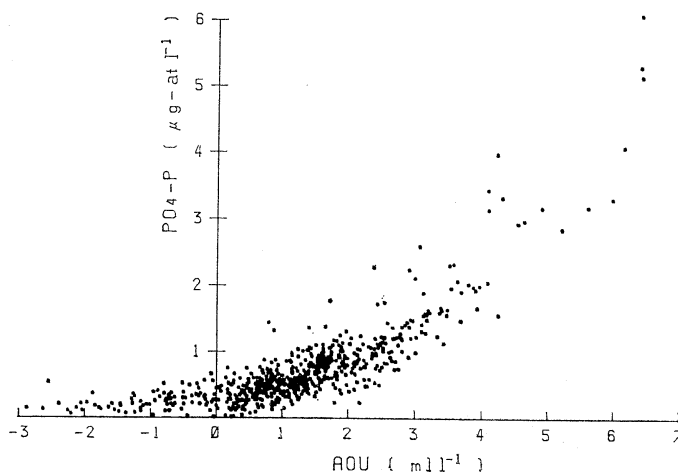


Fig. 9. Relation between AOU ( $\text{ml/l}$ ) and  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $\mu\text{g-at/l}$ ) in summer.

がほとんどである。室内実験の場合、堆積物試料が乱さずに採取されるか、実験条件が現地の物理、化学、生物的環境をどこまで相似しうるかなど難しい問題がある。後者の場合、近年、表層に存在する生物攪乱層とそれにつづくやや圧密された層に区別して考える2層モデルの開発がBERNER (1977) や VANDERBORGHT *et al.* (1977) によってなされ、問題がよく整理されつつあるが、溶出量に直接影響を与える底質中の拡散係数の値がまだオーダー評価程度であり、細かい議論に耐えがたい所がある。また、溶出量は海域によって異なるだけでなく、同じ場所でも海底近傍の環境条件によって異なると考えられる。Fig. 9 は夏季の瀬戸内海全域におけるAOUと $\text{PO}_4\text{-P}$ の関係である。AOUが $3\text{ml/l}$ 以上になると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が急激に増加している。この傾向は、底層水の貧酸素化の度合いが進行すると、有機物の分解に

依存しない $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出、例えばリン酸鉄の還元に伴う溶出が加算されることなどが考えられる。海底近傍の環境条件によっても溶出機構は変化するので、できるだけ現位置において酸素消費や溶出量の測定を行おうとする考えが生れている(PAMATMAT and BANSE, 1969; SMITH, 1974; FISHER *et al.*, 1982; 越知・岡市 1984)。我々もFig. 10に示す現場用溶出量測定装置を試作し(星加ら, 1980), 現位置での測定を試みている。測定手順は次の通りである。アンカーで固定した船上よりロープで海底面に降ろす。下降中は測定容器の蓋が開いており、容器内に底層水が入るようになっている。本体着底時の衝撃により堆積物の表層物質のまき上がり現象が起るが、測定容器内の濁度計と水中カメラによって監視し、濁度が着底前の状態に戻ったことを確認した後昇降用モーターを作動させ、測定容器をゆっくり降し、フリンジ

の部分まで静かに堆積物に慣入させる。その後数時間、容器内の栄養塩濃度の変化と酸素の減少を測定する。夏季の瀬戸内海のいくつかの測点で測定した底層水中の酸素消費速度を Table 1 に示す。それらの測点では、底層流や水温の鉛直分布の測定も併せて行っているため、1潮汐間の平均流速値、底層水中の溶存酸素濃度、水温躍層の強さを表わす目安として表層と底層の温度差を Table 1 に付記する。底層水中の酸素消費速度は、海域によってそれ程大きな差は認められず、貧酸素水塊の生成は水温躍層の存在が大きな決定要因となっている。貧酸素水塊の生成機構解明には、水温躍層の強さと躍層を通過して底層に運ばれる酸素量の関係を調べる必要がある。

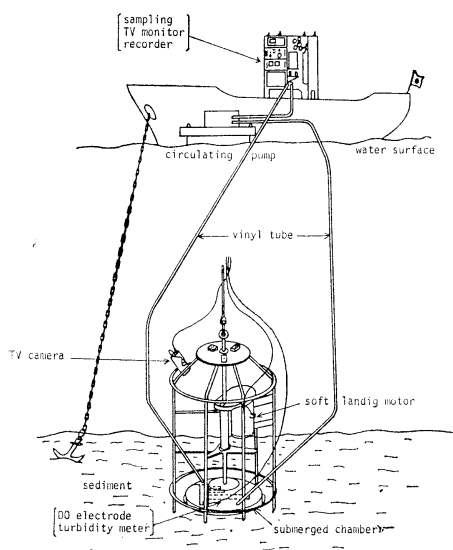


Fig. 10. Schematic diagram of an instrument for *in situ* measuring oxygen up take and nutrient dissolution by seabed.

#### 4. 海底近傍専用の水質測定装置

今まで述べてきた様に、海中にあった物質が海底に沈積し、そのまま堆積物となるわけではなく、まき上げや溶出等の過程を通じ堆積物の境界面で物質のやりとりがある。堆積物境界面での現象を解明するには、海水側の水質や懸濁物質の状態だけ、あるいは、堆積物中の状態だけを取り出して論議しているのでは片手落ちになるのではなからうか。我々の経験でも、夏季の高濁度層が形成されている時期に観測をすると、どこが海底面なのか判断にこまる場合がしばしばあった。海底近傍の水質と堆積物を一体のものとして捕えるような観測手法を工夫する必要があるのではなからうか。Fig. 11 に示す

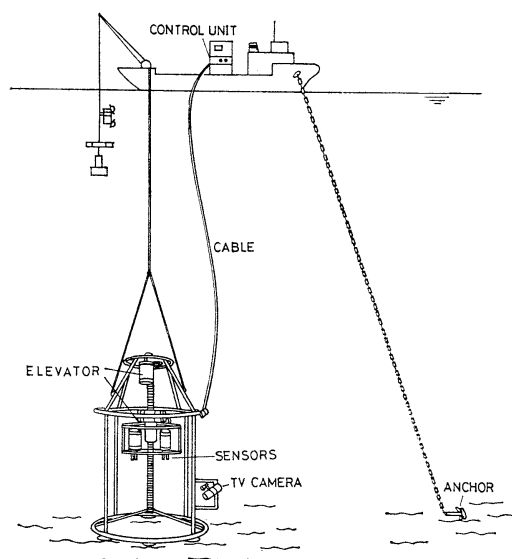


Fig. 11. Schematic diagram of an instrument for measuring water quality in the bottom layer.

Table 1. Consumption rate of oxygen, concentration of dissolved oxygen, mean velocity in the bottom layer and difference in temperature between the surface layer and the bottom layer.

Area	Station	Consumption rate of oxygen (mg/day·cm <sup>2</sup> )	Concentration of dissolved oxygen (mg/l)	Difference in temperature (°C)	Mean velocity in the bottom layer (cm/s)
Osaka Bay	34	1040	5.51	0.70	11.0
	50	900	3.49	2.94	4.5
	54	760	4.32	2.03	9.9
Harima Sound	10	1850	4.81	0.20	6.0
	24	720	3.21	3.25	1.8
	43	1270	4.28	2.25	3.2
Hiuchi Sound	64	1510	1.53	5.30	1.0
	46	1080	3.63	2.61	5.7

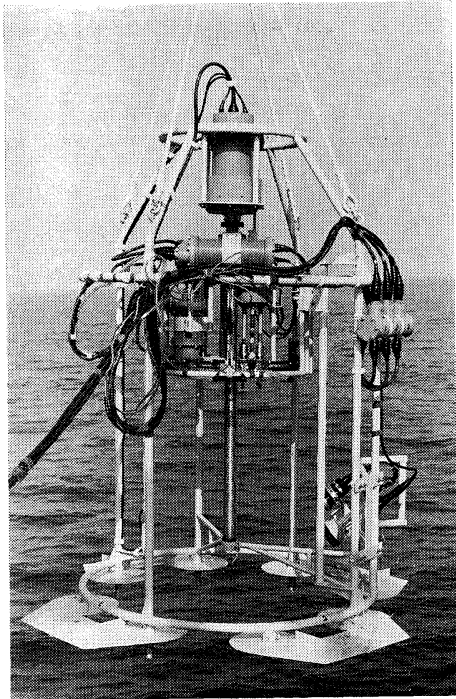


Photo 1. Underwater unit for measuring water quality in the bottom layer.

装置は、海底上約 1 cm 上の海水側から堆積物中の約 30 cm までの種々の環境因子を鉛直的に連続して測定するために開発した海底近傍専用の水質測定装置である。同装置は、水中測定部と船上モニター部から成っており、両者は水中ケーブルで連結している。水中測定部 (Photo 1) は主に本体フレーム、各種センサーおよびこれらセンサーを上下に動かす昇降装置から構成されており、形は円筒形状で、全体の大きさは幅 1 m 30 cm、高さ 2 m 15 cm である。昇降装置は本体フレームの内側に設置し、各種センサーはこの昇降装置にセンサーの測定部の高さが同じになるように取り付けられている。取り付けたセンサーは、塩分、溶存酸素、濁度、温度、pH、酸化還元電位および堆積物の含水率測定センサーである。含水率は堆積物における超音波の減衰率から測定する。測定手順は次の通りである。まず、水中測定部を船上から海底表面に着底させた後、各種センサーを海底表面上から海底表面まで昇降装置によって降ろす。さらに、温度、pH、酸化還元電位および含水率測定センサーを堆積物中約 30 cm の深さまで降下させることにより、各種の環境因子を鉛直的に連続して測定する。同装置には、小型の水中ポンプも組み込まれており、海底表面から正確な高さの海水も採集できるように設計されている。

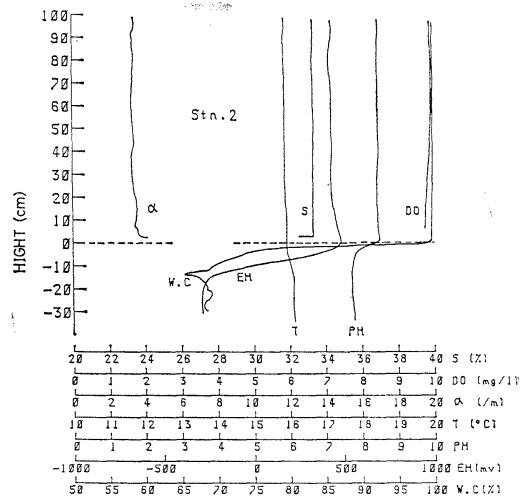


Fig. 12. Vertical distributions of water qualities from the bottom layer into the sediment.

同装置はまた試作されたばかりで、現場での検証実験の最中であるが、その実験例を Fig. 12 に示す。それぞれの測定項目の鉛直分布は、着底感知センサーで求めた海底表面を基準とし、海水側を正、堆積物側を負として図示する。実験は鉛直混合の激しい 12 月に行われたため、海水中の水質は鉛直的にほとんど一様である。しかし、堆積物中で、泥温はわずかに上昇し、pH、酸化還元電位 (Eh) および含水率 (W.C) は深さと共に急激に減少している。

堆積物境界面での観測は多少やっかいな面があるかも知れないが、同装置に改良を加えつつ、現場検証実験をくり返し行うことによって堆積物境界面での現象を精度良く測定しようと試みている。

## 文 献

- BERNER, R. A. (1977): Stoichiometric models for nutrient regeneration in anoxic sediments. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 781-786.
- FISHER, T.R., P.R. CARLSON and R.T. BARBER (1982): Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **14**, 101-116.
- 花岡 資 (1972): 海における異常発生. 生物の異常発生 (生態学講座32), 共立出版, p. 85-124.
- 星加 章, 滝村 修, 塩沢孝之 (1980): 現場用溶出量測定装置の試作. 中国工業技術試験所報告, **11**, 45-52.
- KAWANA, K. and T. TANIMOTO (1984): Turbid bottom water layer and bottom sediment in the Seto Inland Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **40**,

- 175-183.
- 文部省「環境科学」特別研究「燧灘の海洋構造と貧酸素水塊の生成機構」研究班 (1984): 燧灘の海洋構造と貧酸素水塊の生成機構に関する研究 (研究代表者 武岡英隆), B210-R01-3. 185 pp.
- 村上彰男(編) (1986): 瀬戸内海の海域生態と漁場. フジテクノシステム.
- 越智 正, 岡市友利 (1984): 燧灘の海洋環境の化学的特性と酸素消費. 文部省環境科学研究報告集「燧灘の海洋構造と貧酸素水塊の生成機構に関する研究」, p. 49-62.
- PAMATMAT, M.M. and K. BANSE (1969): Oxygen consumption by the seabed. II. *In situ* measurements to a depth of 180 m. *Limnol. Oceanogr.*, **14**, 250-259.
- 塩沢孝之, 川名吉一郎, 星加 章, 谷本照己, 滝村 修 (1977): 別府湾海水中の重金属の鉛直分布とその季節変動. 日本海洋学会誌, **33**, 350-356.
- 塩沢孝之, 川名吉一郎, 山岡到保, 星加 章, 谷本照己, 滝村 修 (1984): 瀬戸内海における海水中的の汚染物質の分布と底質からの溶出. I. リンと窒素. 中国工業技術試験所報告, **21**, 13-43.
- 塩沢孝之, 川名吉一郎, 星加 章, 谷本照己 (1985): 瀬戸内海における懸濁物質と底質. 沿岸海洋研究ノート, **22**, 149-156.
- SMITH, K.L. Jr. (1974): Oxygen demands of San Diego Trough sediments: an *in situ* study. *Limnol. Oceanogr.*, **19**, 939-944.
- 谷本照己, 川名吉一郎, 山岡到保 (1984): 瀬戸内海における底質の粒度組成と有機物. 中国工業技術試験所報告, **21**, 1-11.
- VANDERBORGHT, J.P., R. WOLLAST and G. BILLEN (1977): Kinetic models of diagenesis in disturbed sediments. Part 1. Mass transfer properties and silica diagenesis. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, 786-793.
- 柳田友道 (1976): 赤潮. 講談社. 198 pp.