

# 霞ヶ浦の富栄養化に関する研究 - II

## 底泥からの窒素回帰について

佐々木 道也・浜田 篤信・赤野 誠之

湖沼の物質環境のなかで底泥の役割は極めて大きいものと考えられている。特に霞ヶ浦のように水深の浅い湖では底泥を湖全体の系のなかで評価する必要がある。しかしながらその評価の方法が確立されていないので、多くの調査研究は底質調査の域を脱していないように思われる。私どもの試験場でも霞ヶ浦全域で多くの採泥を行ない粒度組成や全窒素量を中心とする底質分析を行なってきたが、これを湖全体のなかでの底泥の役割として結びつける必要性を痛感していた。

普通、底泥からの栄養塩の回帰量の測定は一定量の底泥に水を添加し、攪拌し一定時間後に溶出量を測定する方法がとられる。しかしながら実際には湖沼系全体のなかでの沈澱層としての湖底泥の役割は面として水界に働きかけているものであるから現場での測定が望ましい。ところが実際問題としては仲々困難であるから採泥された底泥を実験室に持ち帰り、可能な限り自然の状態に近づけて再現し測定する必要がある。普通採泥器で採取された湖底泥は採集された段階では水界に対する面としての要素を失ない単なる泥塊として存在するから、自然状態に近いかたちで面としての要素をもたせるためには一定容器に収納し、それに水をはり実験する必要がある。本研究はこのような考え方にたち、実験条件を吟味し、更には若干の測定を行ない、これに基づいて霞ヶ浦での底泥の役割について考察を加えることにした。

### 実験の方法

供試泥：供試泥は茨城県内水産試験場地先の霞ヶ浦においてエックマン・バージ採泥器を用いて採取した。採取された底泥はそのまゝ実験室に持ち帰り実験に供した。

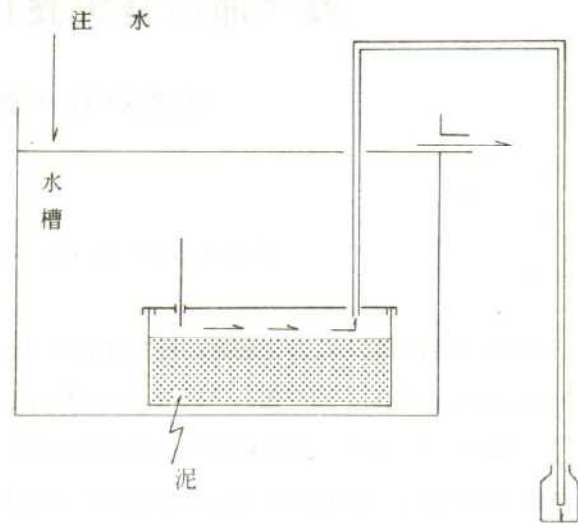
実験方法：供試泥は実験室において一定容器に収納し、泥表面を水平な面とし、水をはり止水方式あるいは流水方式で溶出窒素量・酸素消費量を測定した。

流水方式の測定では、第1図に示すように密閉されたポリエチレン製容器の底に泥の表面が水平になるように敷き、泥の表面から上方5~20 cm位のところに水が流れ込むように小孔をあけ、他方から一定水量がとり出せるようにした。酸素消費量や溶出窒素量は流入口と流出口の濃度差に流量を乗じて求めた。

なお、窒素量の測定は常法により $\text{NH}_4\text{-N}$ はネスラー法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ はグリシユロミン法、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はブルシン法を用い、酸素量の測定はウインクラー法を採用した。

## 実験条件の検討

第1の実験として採泥器で採取された泥塊に面としての要素を再びもたせるための検討を行なった。すなわち直径3~8 cmのガラス製管瓶に一定量の湖底泥を入れ、蒸溜水200 ccを添加し、室温に22時間放置後溶出してきた窒素量を測定した。この場合一定量の泥を使用しているのに用いた管瓶によって泥の深さは当然変化することになる。このような条件で測定した結果は第1表・第2図に示したが、一定量の底泥でも面のつくり方では溶出窒素量は異なり、径の小さい容器では全体の溶出量は少ないが、単位面積当りでは大きい。



第1図 実験装置

反対に径の大きい容器では全体の溶出量は大きいですが、単位面積当りの溶出量は小さい。

いゝかえれば底泥を面として実験室で評価するには、容器に敷きつめる泥の厚さの問題を考慮する必要がある。

第1表 泥表面積の差異によるN溶出量

泥表面積 $cm^2$	泥の深さ $cm$	溶 出 量				
		$NH_4 - N$ $\mu g/h$	$NO_2 - N$ $\mu g/h$	$NO_3 - N$ $\mu g/h$	Total N $\mu g/h$	Total N $\mu g/h \cdot cm^2$
7.7	4.2	3,968	0,074	0.341	4,383	569
15.5	2.4	5,599	0,090	0.318	6,007	388
29.0	1.4	7,654	0,124	0.264	8,041	277
38.5	1.1	7,499	0,090	0	7,589	197
51.8	0.8	8,424	0,184	0	8,607	166

泥重量 9.99g (乾泥)

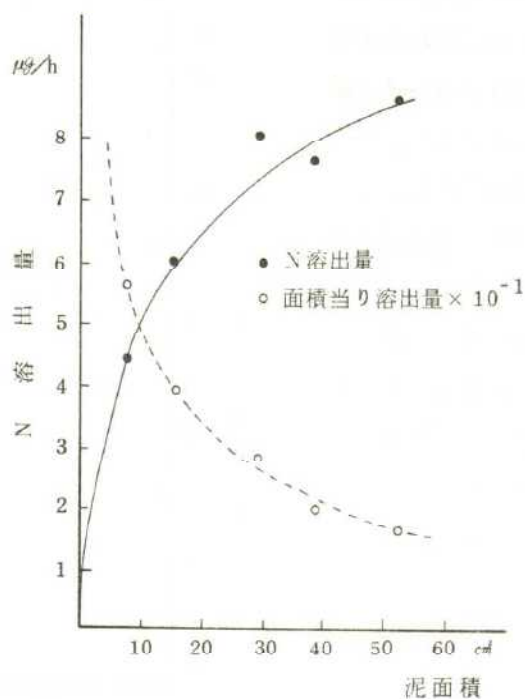
この点を確認するために第2の実験を行なった。直径7 cmのガラス製管瓶に泥の深さを変化させ窒素の溶出量を23時間後に測定した。この場合表面積は同一であるが泥の深さが異なるので使用した泥の量が異なるのは当然である。結果は第2表・第3図に示したが、9 mm~37 mmの間では泥の深さが深くなるにしたがって(泥の量が増加する)溶出窒素量は増大してゆくが、泥深が52 mm以上では泥深が増え、泥の量が増大し

でも溶出窒素量は増大せず、ほぼ一定の数値を示している。したがって底泥の評価を面としてとらえるには泥の深さを5 cm以上にして実験する必要がある。

以上の実験は止水方式で行なったものであるが、止水方式では環境水の水質が時間の経過とともに変化する。したがって環境水との関連で底泥の役割を考える場合には流水方式で測定するのが望ましい。

第3の実験では流水方式で実験条件の検討を行なった。実験は第1図に示す装置で行い、一定量の水を流しながら、底泥の表面からの酸素消費量を25℃で測定した。結果は第4図に示したが、酸素消費量は実験

を開始してから30分後では $9.6 \text{ ml/hr} \cdot \text{m}^2$ であるが、その後時間の経過ともなって増加し、8時



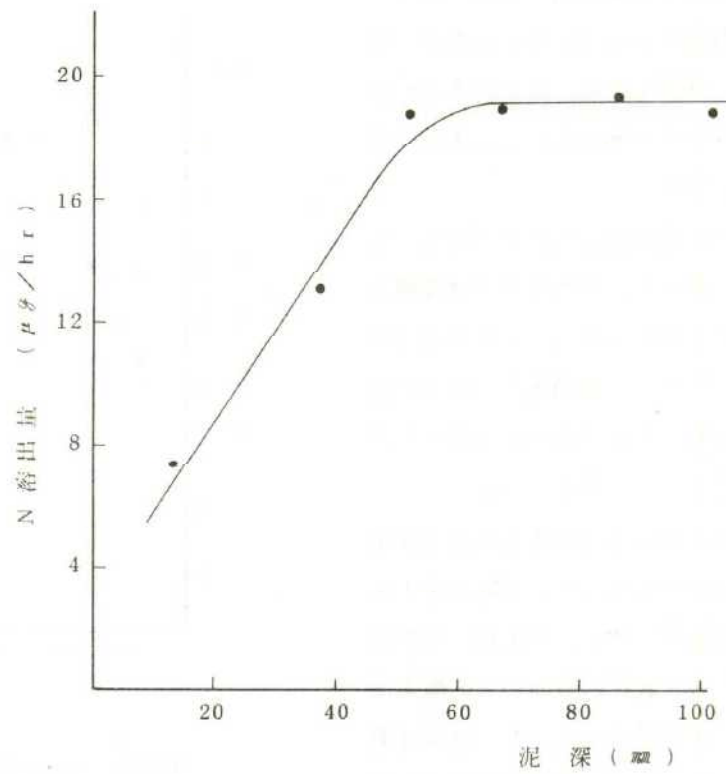
第2図 泥面積の差異によるN溶出量

第2表 泥深とN溶出量

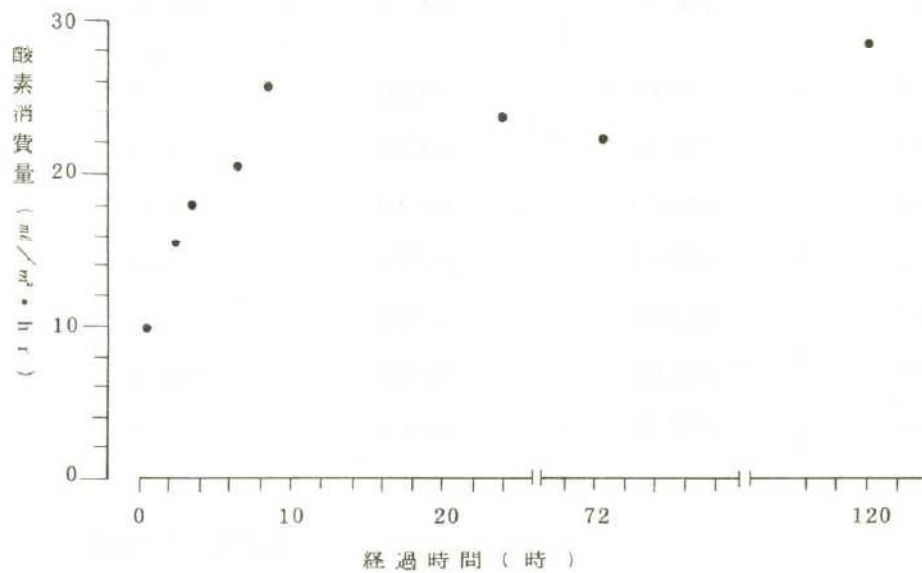
泥深 mm	NH <sub>4</sub> - N μg/h	NO <sub>2</sub> - N μg/h	NO <sub>3</sub> - N μg/h	Total -N μg/h
9	4,963	0,191	0,348	5,502
13	7,125	0,191	0,174	7,490
37	12,873	0,249	0,035	13,156
52	17,884	0,220	0,070	18,174
67	18,769	0,204	0	18,973
86	19,162	0,232	0,017	19,411
105	18,779	0,214	0	18,992

泥面積 38.5 cm²

間後には  $25.8 \text{ ml/hr} \cdot \text{m}^2$  に達している。それ以後は  $20 - 30 \text{ ml/hr} \cdot \text{m}^2$  の範囲を変動しているが、増加する傾向はみられない。したがって流水方式で測定するには注水を始めてから10時間を経過したものについて測定すれば安定した値が得られ底泥の役割を評価できると考えられる。



第 3 図 泥深と N 溶出量



第 4 図 時間経過にともなう底泥の酸素消費量の変化

## 実験及び調査の結果

### 1 溶存酸素が底泥からの窒素溶出量に及ぼす影響

溶存酸素量の異なる蒸留水を調整し、流量を変化させながら溶存酸素量の異なる条件での窒素溶出量を測定した。泥面積は  $34 \times 26 = 884 \text{ cm}^2$ 、泥深は  $68 \text{ mm}$  で水温は  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  で行ない結果を第3表、第5図に示した。溶存酸素量が  $4 \sim 10 \text{ P P m}$  の範囲ではN溶出量は  $0.4 \text{ mg/h M}^2$  以下と比

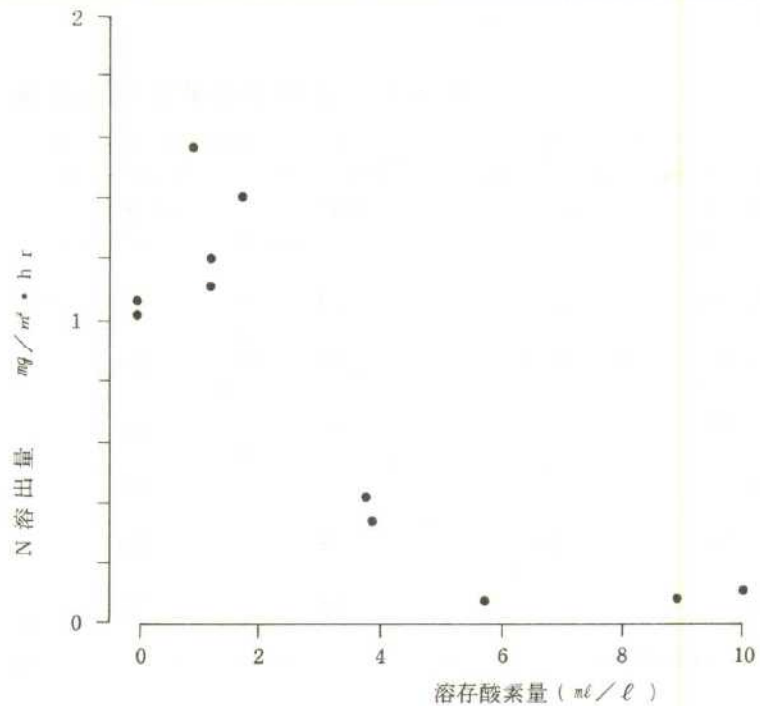
第3表 溶存酸素量とN溶出

溶存酸素量 $\text{ml/l}$	流 量 $\text{ml/hr}$	$\text{NH}_4 - \text{N}$ $\text{mg/l}$	$\text{NO}_2 - \text{N}$ $\text{mg/l}$	$\text{NO}_3 - \text{N}$ $\text{mg/l}$	Total -N $\text{mg/h} \cdot \text{M}^2$
0	57.9	1.582	0	0.033	1.058
0	85.7	0.989	0	0.080	1.036
0.91	272.8	0.509	0.003	0	1.572
1.21	357.0	0.310	0.003	0	1.212
1.25	395.0	0.248	0	0	1.108
1.67	246.0	0.508	0.003	0	1.414
3.81	625.0	0.057	0	0	0.403
3.96	600.0	0.051	0	0	0.346
5.70	625.0	0.009	—	—	0.064
8.83	517.0	0.015	—	—	0.088
10.10	600.0	0.018	0	0	0.122

較的低い値であるが、溶存酸素量が低下して  $2 \text{ ml/l}$  以下になるとN溶出量は急増し  $1 \sim 1.6 \text{ mg/h} \cdot \text{M}^2$  となる。

### 2 水温が底泥の酸素消費量に及ぼす影響

水温を  $15.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $19.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $24.2 \text{ }^\circ\text{C}$  および  $30.0 \text{ }^\circ\text{C}$  の4段階に変化させて流水方式で測定した。 $15 \text{ }^\circ\text{C}$  では酸素消費量は  $25 \text{ ml/h} \cdot \text{M}^2$  であったが、水温の上昇にともなって急増し  $19.2 \text{ }^\circ\text{C}$  では  $35 \text{ ml/m}^2 \cdot \text{hr}$ 、 $24.2 \text{ }^\circ\text{C}$  では約  $50 \text{ ml/hr} \cdot \text{m}^2$ 、 $30 \text{ }^\circ\text{C}$  では  $80 \sim 90 \text{ ml/hr} \cdot \text{m}^2$  であった。結果は第6



第5図 溶存酸素量がN溶出におよぼす影響

図に示したが、両者の関係は次式で示される。

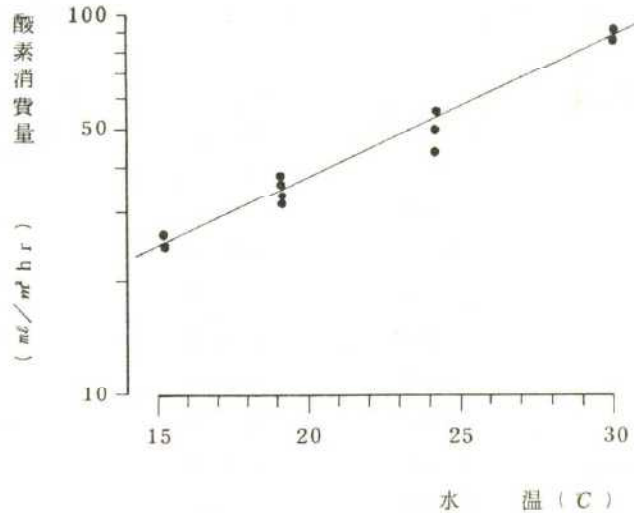
$$\text{Resp (ml/h} \cdot \text{M}^2) = 6.65e^{0.085 T}$$

(T: 水温)

すなわち、水温が10℃上昇する毎に酸素消費量は2.34倍に増加する。したがってN溶出量も水温の上昇にともなってこの割合で増加するものと考えられる。

### 3 底泥中のN含有量とN溶出量

4.4 mg/gのNを含有する底泥に砂を加えてよく混合し、N含有量の異なる試料をつくり5日間20.5℃の水中に放置したのちN溶出量を測定した。測定は止水方式で行ない泥面積32.2 cm<sup>2</sup>、泥深2.6 mmであった。結果は第4表、第7図に示したが、泥のN含有量は2



第6図 水温と底泥の酸素消費量の関係

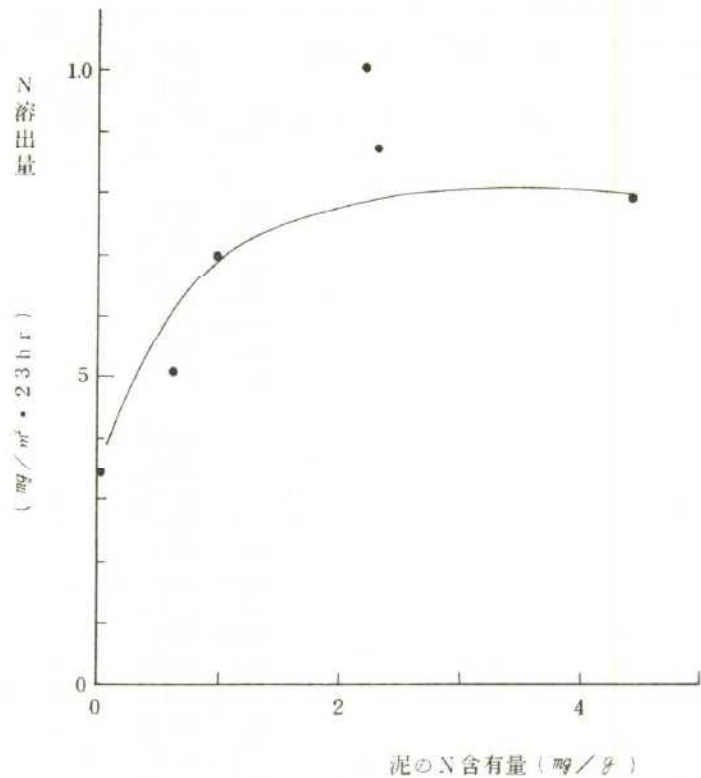
mg/g以下ではN含有量に比例して溶出量が増加するが、それ以上に泥中のN含有量が増加しても溶出量は増加しない。

第4表 含有窒素量と窒溶出量

泥のN含有量 (mg/g)	水容積 (ml)	NH <sub>4</sub> -N (μg)	NO <sub>2</sub> -N (μg)	NO <sub>3</sub> -N (μg)	Total (mg/h <sup>2</sup> · 23 hr)
0.068	100	14	1.2	9.8	• 34
0.662	100	28	1.6	8.6	• 51
0.940	150	42	1.8	8.0	• 71
2.22	150	59	1.6	8.7	1.02
2.29	200	54	1.1	8.8	• 87
4.43	200	49	1.5	8.8	• 80

#### 4 霞ヶ浦の底質

霞ヶ浦の湖底から回帰してくる栄養塩を推定するには、これまで検討してきたように水温や水質が問題となるが、もう一つは底質を明らかにしておかなければならない。こゝでは霞ヶ浦のTotal N (Kjeldahl-N) と粒度担成をとりあげ昭和43~45年にエックマン、バージ採泥器で採取した試料について分析を行なった結果を第5表に示した。また採泥地点を第8図(A)にTotal-Nの結果を分布図で示したものが第8図(B)である。Total Nがもつとも高い部分は湖の中心部附近で6 mg/gで湖岸に近い砂質の部分に2 mg/g以下の値が見られる他は2-5 mg/gである。



第7図 N含有量と溶出量

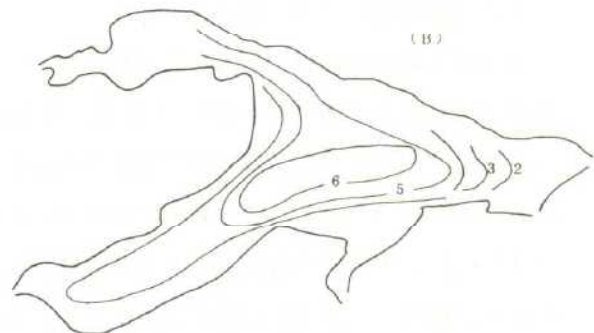
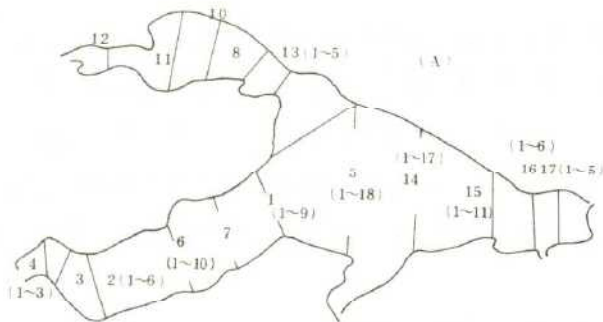
#### 考 察

底泥からの栄養塩の回帰が湖沼の物質代謝の中で非常に重要な役割を果していることはすでに菅原<sup>1)</sup>によって指摘されているところである。霞ヶ浦に流入するNは別報<sup>2)</sup>で述べるように約9トン/dayと見積られるが、このうちの一部は直接植物によって利用され、他は湖底へ沈澱し、さらに一部は生物によって分解され水中に回帰し他は堆積してゆく。しかしこれらの量的な検討は霞ヶ浦ではまだ行なわれていないようである。こゝでは、まず第一段階として微生物による底泥からの溶出量をこれまでに得られた実験結果から導いてみる。

24℃で好氣的條件で行なった実験では、N溶出量は約0.5 mg/h·m<sup>2</sup>であった。これは1日当りで換算すること1.2 mg/m<sup>2</sup>·dayである。溶出量は底泥中のN含有量によって異なるが、前述したように2 mg/g以上の底泥ではほぼ一定とみなされる。また霞ヶ浦の底泥中のN含有量は2 mg/g以下の部分は少ないから、こゝでは簡単に霞ヶ浦の面積200 Km<sup>2</sup>を1.2 mg/m<sup>2</sup>dayに乗ずると全体で2.4 ton/dayを得る。この値は水温が30℃では4.3 ton/day、20℃では1.6 ton/dayに相当し、流入負荷量と対比すると大きな数字であると言える。また嫌氣的条件ではN溶出量は好氣的な条件下の3倍にも達するから、最近のひんぱんな溶存酸素量の低下は、さらに回帰量の増大をもたらしているものと考えられる。

第 5 表 霞ヶ浦の底質

Mesh No. m 観測 点番 号	8	16	32	65	270	>0.053	全空 素量 PPm	Mesh No. m 観測 点番 号	8	16	32	65	270	>0.053	全空 素量 PPm
	22,380	1,000	0.500	0.210	0.053				22,380	1,000	0.500	0.210	0.053		
1-1	%	%	%	%	%	%	4,740	4	—	%	%	%	%	%	5,390
2			0.3	1.3	32.2	66.2	4,740	5	—	—	0.3	3.2	10.1	86.4	6,250
3			—	0.4	8.9	90.7	5,100	6	—	—	—	1.8	7.2	91.0	6,090
4			0.1	0.2	11.5	88.2	6,450	7	—	—	—	2.7	16.8	80.5	6,020
5			0.5	1.1	8.9	89.5	6,400	8	—	—	—	1.0	9.4	89.6	6,590
6			—	0.2	7.8	92.0	7,060	9	—	—	—	1.4	7.0	91.6	5,240
7			—	0.4	13.9	85.7	5,700	10	—	—	—	0.3	1.5	98.2	6,290
8			—	0.2	7.0	92.8	4,330	11	—	—	—	0.3	4.1	95.6	4,900
9			0.3	1.6	22.2	75.9	4,200	12	—	—	—	0.5	15.7	83.8	6,230
2-1	—	—	0.9	2.1	19.3	77.7	3,330	13	—	—	—	2.9	16.5	80.6	5,890
2	—	—	0.2	2.4	20.8	76.7	4,180	14	—	—	—	1.2	15.9	82.9	4,860
3	—	—	0.3	17.6	23.7	58.4	4,400	15	—	—	—	0.8	9.4	99.8	3,960
4	—	—	—	2.5	3.9	93.6	4,670	16	—	—	—	1.5	0.8	97.7	4,880
5	—	—	—	1.2	7.5	91.3	5,310	17	—	—	—	0.3	14.7	85.0	4,160
6	—	—	0.6	3.7	11.2	84.5	4,710	18	0.4	2.4	5.4	54.3	34.2	33	130
3-1	—	—	0.1	1.1	11.8	87.0	3,570	6-5	—	—	1.0	20.8	16.7	71.5	120
2	—	—	0.2	3.1	15.1	81.6	4,680	7-3	—	—	1.6	86.7	10.6	11.7	460
3	—	—	0.4	2.3	20.0	77.3	3,870	8-3	8.4	10.4	23.0	52.5	5.4	0.3	2,790
4	—	—	—	6.0	12.5	81.5	2,550	13-2	—	—	0.1	0.8	18.3	80.8	160
5	—	—	0.2	5.5	15.6	71.3	320	15-3	—	—	0.2	2.4	47.4	50.0	220
6	—	—	11.3	43.8	26.8	13.9	880	6	—	—	0.1	2.2	38.9	5.88	10
4-1	1.3	2.9	14.1	33.3	40.1	8.3	2,620	9	—	—	0.1	2.2	37.1	60.6	90
2	—	0.5	1.6	4.5	12.6	80.8	1,100	16-3	—	—	0.1	9.7	83.9	6.3	220
3	—	0.8	0.9	1.80	6.36	16.7	180	5	—	—	0.2	9.7	87.1	3.0	110
5-1	13.9	1.5	3.2	57.5	22.7	1.2	320	17-3	—	—	0.1	7.0	80.8	12.1	110
2	0.1	5.3	24.9	57.4	9.7	2.6	180	4	—	—	0.2	46.0	51.8	2.0	225
3	—	—	1.3	2.6	17.6	78.5	5,210	14-11	—	—	0.4	10.4	16.7	2.25	



第 8 図 (A) 採泥地点 (B) 底泥の含有量の水平分布



以上は、主に微生物が関与する回帰であるが、比較的大型の動物も回帰に関係することが指摘されており<sup>2)</sup>、富栄養化の機構をとき明かすなかで、回帰の評価が重要な意味をもつものと考えられる。

文 献

- 1) 菅原 健：陸水誌 vol 5 46～56 (1935)
- 2) 浜田 篤 信：本誌 No 13 (1976)