

内湾における有機微細粒子の沈降速度の実測

細川 恭史*・三好 英一**・関根 好幸**・堀江 毅***

1. ま え が き

閉鎖性内湾における水質の変動は、流れ・拡散・粒状物の沈降・底泥からの溶出・プランクトン増殖・有機物の分解など水域内の諸作用によって引き起こされる。沈降・溶出・増殖・分解等のいわゆる非保存項の諸作用についても、作用機構の解明が進み定式化がなされてきている¹⁾。各作用による水質変化速度の大略が、表示できるようになってきた。

これら諸作用のうち卓越して水質に影響を与える因子は、各内湾の水理条件や水質の状況によって変わってくる。諸作用の水質へ及ぼす影響の大きさは、定式化された水質変動モデルを用い感度解析の手法で比較することができる。東京湾などの閉鎖性内湾を仮定した簡易なモデルによる検討例では、水の流動状況・分解とともに沈降の感度が比較的高いことが示されている^{1,2)}。

一方、上記諸作用の速度を表わすパラメーターの測定値の変動幅を比較してみる。流れ等の水理現象では、躍層や風による変動が大きいものの潮汐流は良い精度で測定でき予測もできる。プランクトン増殖・分解の現象は、生物学的データが比較的蓄積され、温度・濃度などの関数として速度が示される³⁾。速度測定値の幅は、高々数倍～数分の1程度である。溶出速度は、直上水質に依存して2オーダー程度の変動が測定されるが、直上水質の関数として速度を表示する⁴⁾と変動は増殖・分解と同程度となる。沈降速度は、ストークス式等で示されるが、水質上問題となるプランクトンやその遺骸など有機微細粒子では比重が海水に近く速度が小さい点、フロック化の影響がある点等により同式でうまく表示できない事が多い。室内での沈降速度の測定値は測定方法によっても変動⁵⁾し、なるべく現地に近い条件での測定が望ましい。

現場海域での実測方法としては、セジメントトラップを用いる方法が知られている。この方法での測定例¹⁾を表一に示す。内湾域での測定値は0.01～1 m/dのオー

表一 有機微細粒子の沈降速度測定例

海域	項目	沈降速度(m/d)	測定層	捕束装置	機関
東京湾	COD	1.84～0.06	3層	ポリビン	二建
東京湾	COD	1.52～0.01	3層	広口ビン	二建
湾奥	T-P	1.43～0.14			
大阪湾	COD	0.59～0.33	3層	2 l 塩ビ管	三建
	O-P	0.97～0.26			
播磨灘	COD	4.4～2.2	2層	同上	三建
	T-P	4.0～1.9			
燧灘	COD	1.4～0.004	2層	—	環境庁
	O-P	1.1～0.009			

ダーで大きくばらついている。水質への影響が比較的大きいものの精度良い測定が難しい作用であることが理解できる。

筆者らは、従来より粒状物の性状の差異を1種のトレーサーと見たて、より精度良く沈降速度を測定する方法を検討してきた⁶⁾。本研究は、粒状物の有機物組成のうち安定なものに注目し、有機微細粒子の沈降速度を実測したものである。

2. セジメントトラップ法の検討課題

上面を開口し、上からの沈降物を捕集・貯留する装置をセジメントトラップと呼ぶ。現場海域の水中に一定期間鉛直に垂下し、捕集粒状物量より単位時間・単位面積あたりの平均沈降フラックス(F)が求められる。

$$F = \frac{R - C_0 V}{AT} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R ：捕集器内の粒状物量、 C_0 ：周辺環境水中に含まれる浮遊粒状物濃度、 V ：捕集器容積、 A ：捕集器開口部断面積、 T ：垂下時間である。通常 F の値は、粒状物乾重量(SS)で測られるが、有機物や栄養塩の鉛直輸送の解析には、 R 、 C_0 ともそれぞれ有機物量、有機物濃度等で測られ評価される。垂下期間中の水中浮遊粒子濃度 C_0 を別途測定し、沈降フラックスを浮遊濃度で除せば、平均沈降速度(w)が求められる。

$$w = \frac{F}{C_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

表一の値はこうして算定されたものである。

セジメントトラップ法の誤差要因を検討してみる。 R

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部沿岸防災研究室長
 ** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水浄化研究室
 *** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海水浄化研究室長

は捕集器内に累積された粒状物である。流れの存在下では捕集器形状により捕集効率が減少する恐れがある。ここでは、二次元水路を用いた捕集実験により、筒長/口径比5の円筒を用いている。20 cm/s 程度の流れであれば、捕集が安定しており、筒口からの吸出しはない。また、有機粒状物は垂下期間中に分解を受け、 R の損失をまねくとされている。 A は、流れや波で投影断面積が変化すれば誤差となる。通常、あまり表層には設置しないが、大き目のブイを用いて鉛直垂下に心掛ければほとんど誤差要因とならない。 T は、通常1～数日であり、作業に伴う十数分程度のずれは、誤差として小さい。 R の値が小さい場合、 C_0 の影響が大きくなる。小さな捕集量 R しか期待できない時は、できるだけ T を長くとり工夫が必要である。 w 算定には、 C_0 の変動の影響が大きい。

また、捕集筒は筒口を下方輸送される粒状物をほとんどすべて捕集するため、筒口付近で上下運動をくり返す粒状物があると見かけ上大きなフラックス値として測定される。特に底泥面付近では、底泥粒子の混入により表層からの微細粒子の沈降フラックスが隠されてしまうこととなる。このように、異なる粒子が混在している場合、 R としては各粒子の分別計量が困難であったため各粒子の沈降速度が区別できない点が従来より問題とされていた。

そこで、ここでは有機粒子の増殖・分解の大きさを把握するため、現場で同時に増殖・分解速度を測定することを試みた。また、異なる粒子の混入を把握するため、現場で水柱を囲い込み、隔離水塊（マイクロコズム）内の粒子の様子と比較することを試みた。セジメントトラップに付随して実施したこれらの測定をもとに、粒状物

の有機物組成から混在粒子の分離とフラックスの分画を試みた⁷⁾。

3. 現地観測方法

図-1 に示す東京湾口久里浜沖の水深 9m の地点に、図-2 に示すようなセジメントトラップを設置した。捕集筒は、-1.2m、-3.7m、-6.2m の3層の深さに垂下した。同時に、図-2 のような径 1m・長 5m の透明ビニル製の円柱 2 基を下から立ちあげ、水塊を囲い込んだ。ビニル側壁を通して周辺水の動揺は、隔離水塊内に若干伝わる。観測は、昭和59年7月23日～27日の4日間とした。隔離水塊内と周辺環境海水とについて、捕集

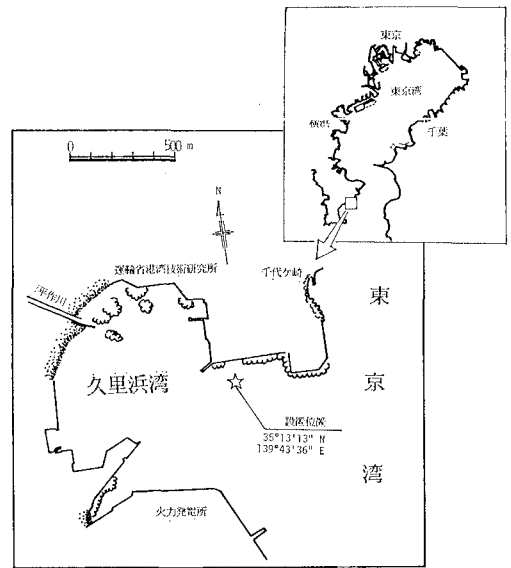


図-1 捕集装置等の設置位置

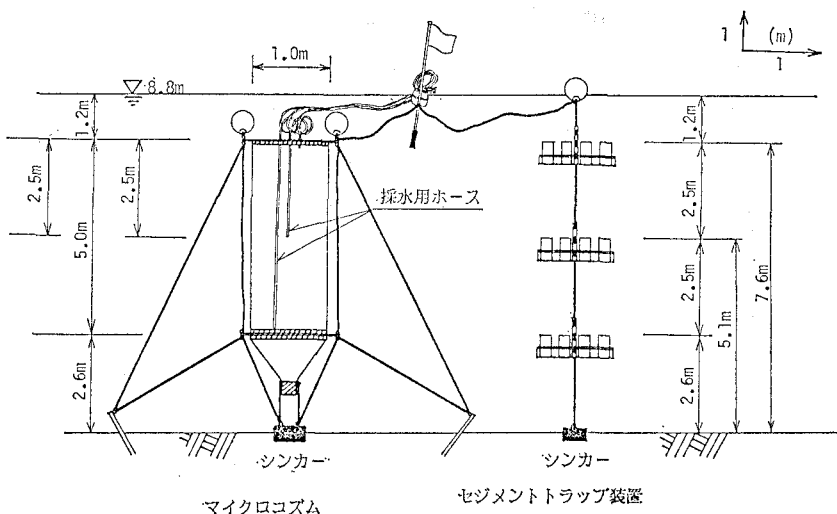


図-2 セジメントトラップおよび隔離水塊（マイクロコズム）装置の設置概念図

筒水深と同一の深さ3層から毎日採水し、粒状物濃度(SS), 有機物濃度(COD), 粒状有機炭素(POC), 粒状有機窒素(PON), 粒状有機リン(POP), クロロフィルa色素(Chl-a)などとともにプランクトンの種と量, 栄養塩類濃度を測定した。4日後には, 捕集筒をダイバーにより回収するとともに, 隔離水塊底部の捕集器からも堆積粒状物を回収し, 粒状物量や性状を水中の浮遊粒状物と同様に分析した。

さらに, 図には示していないが, -1.2m , -6.2m の各深さに, 別小ビニル袋を垂下し, 有機物の分解・増殖の様子を毎日の採水により測定した。

4. 観測結果

4.1 海域の状況

設置2日前に13mmの降雨があり, その後晴れた静穏な海況が続いた。温度成層の発達につれて設置時には単一種の珪藻(*Cerataulina pelagica*)による赤潮状況を呈していた。Chl-a濃度は, 設置時表層(-1.2m)で $80\mu\text{g/l}$ を超えた。その後徐々に藻細胞数・Chl-a濃度が減少していったが, 表層の粒状物の主体は有機物に富む珪藻体もしくはその遺骸であった。4日間を通じて, 沖合での有義波高は30cm程度であった。

4.2 粒状物の状況

小ビニル袋中の水質測定によると, 溶解栄養塩の欠乏と, Chl-aの減少とがみられ, 典型的な赤潮末期の状況であった。有機物は $0.05\sim 0.08/\text{d}$ の分解速度と見積もられ, 4日間では2~3割の減少をもたらすことがわかった。捕集物量 R の損失も同程度と思われる。

隔離水塊内の浮遊粒状物質は, 囲い込み時には $45\sim 55\text{g/m}^2$ であった。主体は, 表層で増殖した珪藻であった。その後, 隔離水塊内で光合成と分解との作用を受けながらゆっくり沈降していった。4日後には, 隔離水塊の水柱部に $33\sim 41\text{g/m}^2$ の粒状物質が浮遊し, $5\sim 7\text{g/m}^2$ が底部に堆積していた。堆積量と浮遊量とを加えると, 隔離した水柱内では粒子量が4日間に3割程度減少したことになる。

周辺環境水中の粒子濃度は, 設置後1~2日で中・底層部の濃度が減少し, 次いで表層濃度もゆっくり減少している。

4.3 沈降フラックスの測定値

セジメントトラップによる捕集量より, 式(1)を用いて算定した見かけの沈降フラックス値を表-2に示す。隔離水塊中の沈降フラックスに比して, 捕集装置では1ヶ塔高い値となっており, 表層での値より底層での値が2倍程大きい。囲い込んだ5m深の水柱内のすべての粒子が4日間で沈降したとしても, 捕集装置での大きな値を説明できない。捕集筒上に粒子が供給されている可能性が高い。

表-2 見かけの沈降フラックス測定値

(単位: $\text{mg/m}^2/\text{d}$)

装置 水深	隔離水塊(A)		セジメントトラップ		
	$l=5\text{m}$	$l=5\text{m}$	-1.2m	-3.7m	-6.2m
SS	1270	1740	12300	22700	24400
POC	185	204	780	1310	1500
PON	32.6	34.3	135	217	252
POP	0.93	1.21	7.18	23.8	30.0

沈降フラックスの鉛直分布と周辺環境水中の濃度とを同一グラフ上にプロットすると図-3のようになる。濃度は4日間の平均値と標準偏差とで示してある。乾重量

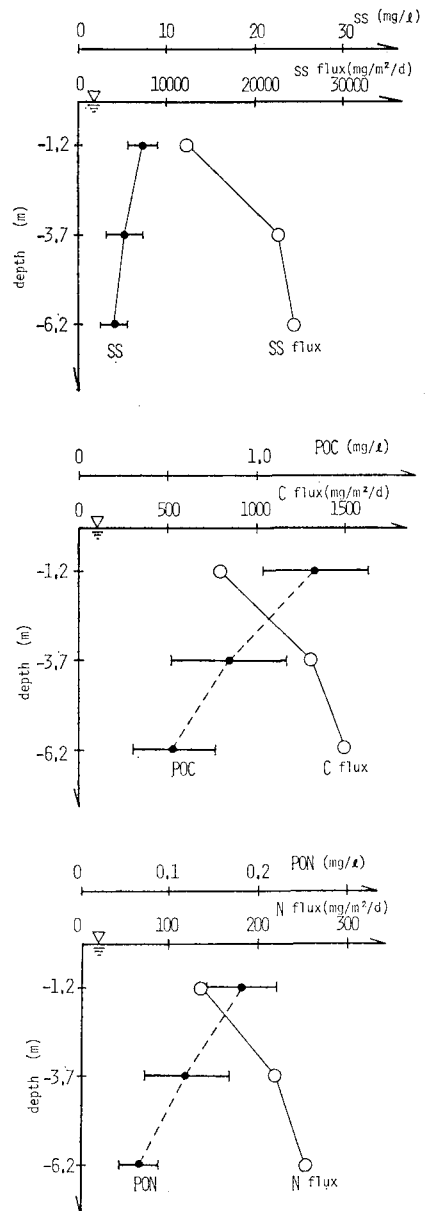


図-3 粒状物濃度とフラックスの鉛直分布

表-3 各粒子の有機物含有組成の比較

(単位: mg/g)

採取場所	卓越底泥					現場海域				隔離水塊(B)				セジメントトラップ		
	珪藻	-9 m	-1.2 m	-3.7 m	-6.2 m	-1.2 m	-3.7 m	-6.2 m	底部器	-1.2 m	-3.7 m	-6.2 m	底部器	-1.2 m	-3.7 m	-6.2 m
POC/SS	235	34.1	181	157	131	194	166	168	117	71.4	60.6	63.1				
PON/SS	47.1	4.87	24.8	22.1	16.4	25.4	22.8	23.1	19.7	11.9	10.0	10.5				
POP/SS	11.0	0.21	6.6	6.4	5.0	4.4	4.3	5.7	0.70	1.01	1.20	1.31				
Chl-a/SS	15.4	0.07	8.6	7.5	6.5	6.5	6.1	5.9	1.3	1.32	0.96	0.84				

(SS) 以外に POC, PON についても掲げてある。いずれも、底層ほど低濃度で高フラックスとなっている。浮遊粒子が単一の沈降速度で沈降しているとすると、濃度分布からはフラックス分布が説明できない。

さらに、捕集粒子の有機物等の含有量(組成)の測定結果を表-3 に示す。表中には、卓越珪藻・現場底泥表面の各粒子と周辺海水中浮遊粒子・隔離水塊底部の堆積粒子についても示してある。粒子の乾重量 1g 当りの有機炭素含有量(POC/SS) などを見ると、隔離水塊中や周辺海水中では類似の値であるが、セジメントトラップ捕集物では1/2~1/6に低下している。有機物をあまり含まない無機的な粒子が、海水中的浮遊粒子としては目立たないが選択的にトラップされていることを示唆している。

5. 捕集粒状物の分画

5.1 分画方法

対象海域の粒子について以下の仮定をおく。(1) 浮遊けん濁粒子は、表層の有機的な珪藻およびその遺骸と、底泥からの巻き上がり粒子との2者のみから構成されている。(2) 2者ともに、4日間程度の垂下期間中は、粒子中の有機物組成は一定で変化せず、また両粒子濃度も変化しない。

すると、浮遊濃度も沈降フラックスも2者の混合とし

て、以下の式で表わせる。

$$S = S_p + S_d \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C = C_p + C_d \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 S : 観測された SS 濃度、 C : 観測された POC, PON 等濃度、 S_p, C_p : 表層粒子の SS 濃度と POC, PON 等濃度分、 S_d, C_d : 底泥粒子の SS 濃度と POC, PON 等濃度分である。

各粒子の有機物組成を α, β とすれば、

$$\alpha = C_p / S_p \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = C_d / S_d \quad \dots\dots\dots (6)$$

今、 S_p, S_d, C_p, C_d は不明であるが、 S, C, α, β は測得されており、これより S_p, S_d は次式のように解ける。

$$S_p = (C - \beta S) / (\alpha - \beta) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$S_d = (\alpha S - C) / (\alpha - \beta) \quad \dots\dots\dots (8)$$

C_p, C_d は、式 (5), (6) により算出できる。 C としては、どのような有機物であろうと α, β が求められれば分画が可能である。しかし、前記仮定 (2) の条件を満足する安定なものが望ましく、小ビニル袋での分解実験より POC, PON を選ぶこととする。表-3 に見られるように、POC, PON は、珪藻と底泥とで α, β の値が大きく異なり、式 (7), (8) に対し誤差が小さい。

5.2 分画結果

式 (7), (8) をフラックス、濃度のどちらにも適用し、2 粒子に分画した結果を表-4 に示す。表-4 には、 C

表-4 各粒子に分画されたフラックス・濃度および沈降速度

装 置	セジメントトラップ					
	-1.2 m		-3.7 m		-6.2 m	
分 画 粒 子	表層粒子	底泥粒子	表層粒子	底泥粒子	表層粒子	底泥粒子
C/SS 比法						
C/SS (α, β) (mg/g)	235	34.1	235	34.1	235	34.1
POC flux (mg/m ² /d)	420	360	630	680	780	720
SS flux (g/m ² /d)	1.80	10.5	2.67	20.0	3.33	21.1
POC 濃度 (g/m ³)	1.261	.069	.774	.071	.460	.087
SS 濃度 (g/m ³)	5.36	2.61	3.29	2.08	1.96	2.14
沈降速度 (m/d)	0.34	5.2	0.81	9.6	1.70	9.8
N/SS 比法						
N/SS (α, β) (mg/g)	47.1	4.87	47.1	4.87	47.1	4.87
PON flux (mg/m ² /d)	84	51	119	98	149	104
SS flux (g/m ² /d)	1.78	10.5	2.52	20.2	3.15	21.2
PON 濃度 (g/m ³)	.162	.019	.103	.016	.051	.015
SS 濃度 (g/m ³)	3.44	3.94	2.20	3.18	1.07	3.03
沈降速度 (m/d)	0.52	2.7	1.2	6.4	2.9	7.0

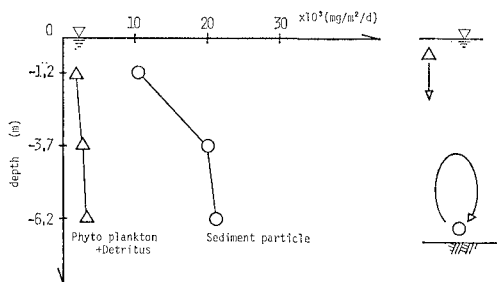


図-4 各粒子の沈降フラックス鉛直分布 (C/SS 比法)

として POC を用いた C/SS 比法と, PON を用いた N/SS 比法とを同時に掲げてある. 分画結果は両法ともよく似ており, この手法が無理なく適用できていると思われる.

フラックスの分画値を見ると, 有機物の鉛直輸送は表層の有機微細粒子が主体となっているが, SS の輸送は底泥粒子が卓越している事がわかる. 分画後の SS のフラックスについて, 鉛直分布をプロットすると図-4 のようになる. 表層の微細粒子は $2.5 \text{ g/m}^2/\text{d}$ を中心に 3 割程度のばらつき幅の中で一様に分布している. 底泥粒子の底面付近での巻き上げの様子もうかがえる. 浅い内湾では, 底泥巻き上げの影響に配慮しないと, 正味の沈降フラックスを過大に評価する恐れがある事がわかる.

分画フラックスと分画濃度とから各粒子の沈降速度を算出し, 表中に示してある. 表層粒子で $0.3 \sim 3 \text{ m/d}$, 底泥表面の粒子で $3 \sim 10 \text{ m/d}$ となる.

6. 考 察

SS 分析用の濾紙上の残留物からは, 無機成分が捕集筒内粒子の主体を占めていることが観察できたが, 定

量的な確認はできていない.

分画後の沈降速度値は, 未だばらつきはあるものの, より妥当な値となっている. ただし, 式(2)で求められる沈降速度は, 流れの中での値であり, 鉛直流の効果などが加味されている速度である. 式(6), (7)による分画は, α , β の特定が必要である. 底泥の組成 β は, 季節によらずあまり大きな変化がないようである. α は, 表層での有機物の生成分解により変動が予想される. ここでは, 赤潮末期の単一で安定な粒子性状のおかげでうまく分画されているが, α 値によっては不安定となることも考えられる.

今後, 室内実験とも対応づけを考慮し, 動物の糞粒の役割などについても更に評価・検討をしてゆきたい.

参 考 文 献

- 1) 堀江 毅: 海域の物質循環過程のモデル化と浄化効果の予測手法について, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第4号, pp. 57~123, 1987.12.
- 2) 細川恭史: 沿岸域物質循環ボックスモデルによるパラメーターの感度解析, 第16回水質汚濁学会講演集, pp. 268~269, 1982.3.
- 3) 堀江 毅・細川恭史: 海域における物質循環モデルの水質支配要因について, 港湾技術研究所報告, 第22巻, 第3号, pp. 159~205, 1983.9.
- 4) Horie, T. and Y. Hosokawa: Mathematical model for the prediction of phosphorus release, Rep. of Port and Harbor Res. Inst., Vol. 24, No. 1, pp. 43~68, 1985.3.
- 5) 細川恭史ら: 沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について, 港湾技研資料 No. 433, 26 p., 1982.9.
- 6) 堀江 毅ら: 微細有機懸濁物の沈降特性について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 337~341, 1986.
- 7) 細川恭史ら: マイクロコズムとセジメントトラップを用いた沿岸域での浮遊粒子挙動の観測, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 第2号, pp. 297~368, 1987.6.