

微細有機懸濁物の沈降特性について

堀江 毅*・三好英一**・関根好幸**・宮原祐二***

1. ま え が き

沿岸海域における海水中の微細有機懸濁物は、陸域からの流入、内部生産によるプランクトン、プランクトンの排泄物または死骸等によ来し、これらは水中で分解しつつ沈降しその残渣は海底に堆積する。海底ではバクテリアの作用によって分解する。沿岸域の水質解析を行う上において、このような有機懸濁物質の沈降特性を現場海域で把握することは重要である。これまでに内湾域における沈降測定が各種の方法により行われている。しかし、沈降物の採集法、沈降過程での分解、海底での舞い上がりの影響を受け、得られる実測値は大きくばらつくのが普通である。したがって、沈降過程をとり込んだ水質モデルによる解析においては、水質再現のための調節機能を沈降速度にもたせ、幅広い数値をあてはめることが多くの例で見られる。このため、沈降物質の鉛直方向のフラックスがあいまいとなり、海水～底泥間の物質収支が不均衡になっている。

本研究は、このような不合理に着目し、現場沈降物捕集試験によって得られた捕集物の有機物組成から沈降過程での分解、および底泥からの舞い上がり効果を考慮して有機物の沈降速度を算定し、一方、同地点の溶出速度を用いた物質収支の観点からその妥当性を確認したものである。

2. 内湾における懸濁物質の沈降速度の測定法

懸濁物質の沈降速度は、懸濁物質を含む海水を採水し、沈降筒内で測定する方法と、直接現場にて測定する方法とがある。

前者は、採水した試料を実験室内に持込んで、懸濁濃度、温度等を一定条件に保ち、多くは静水状態で測定する。繰り返し試験が可能であり、土質試験法（JISA 1204）を準用したり、沈降筒内の残留濃度等から求めたりすることができる¹⁾。しかし、実験室においては、小

規模な静水状態での沈降筒内で行うため、実海域の乱れの中での分解を伴う有機物の沈降特性を把握するにはいくつもの困難が伴う。したがって、実海域で起こっている沈降現象を正確に把えるためにはできる限り自然に近い条件で測定する必要がある。

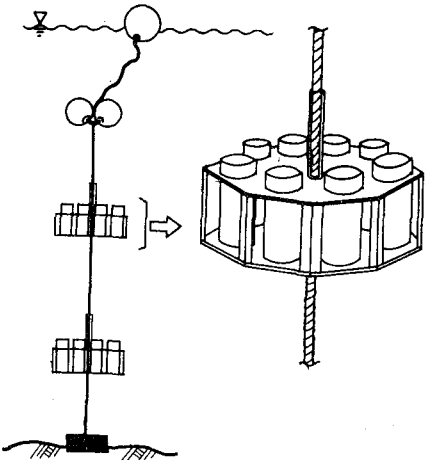
現場海域で直接沈降速度を測定する方法の一つとして、ある測点における水質の鉛直分布から求めるラウスの法がある。これは、水質の鉛直分布の定常性を仮定し、

$$cw + K_z \frac{dc}{dz} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、
$$c_z = c_a e^{-w/K_z(z-a)}$$

または、
$$\ln \frac{c_z}{c_a} = -\frac{w}{K_z}(z-a) \dots\dots\dots (2)$$

を利用する。水深 z （平均海面より下方に正）における懸濁物濃度 c_z を各層で採水法によって測定し、 $\ln(c_z/c_a)$ を z に対してプロットしてその傾きに鉛直拡散係数 K_z を乗ずることにより沈降速度 w が求められる。ここに、 c_a は $z=a$ における懸濁物濃度である。この方法では、底層付近をはじめ、採水層間隔を密にすることは困難であり、また、 K_z を別の手法により推定して与えなければ



図一 懸濁物捕集装置

* 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)
** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 海水浄化研究室
*** 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部 海水汚染水理研究室

ばならないところに適用性の限界がある。

一方、現場海域において各層で直接捕集した沈降物の捕集量をもとにして測定する方法がある。これは、図-1に示すように、広口ビンおよびその架台、ブイ、アンカーなどをワイヤロープで連結して現場の所定海域に固定し、一昼夜程度の間に広口ビンの中に捕集される沈降物を採取後、沈降量、捕集ビン口断面積、捕集時間などから沈降フラックス、周辺水質をもとに次式により沈降速度を求める方法である。

$$w = \frac{F}{c_0} = \frac{R - c_0 V}{ATc_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 F : 沈降フラックス、 c_0 : 周囲水水質、 T : 捕集時間、 R : 捕集筒内の捕集量、 V : 捕集ビン容積、 A : 捕集ビン口断面積である。

式(3)による沈降速度の現場測定法はもっとも広く使われている。しかし、底層付近では採水法の場合と同様、サンプラーを層間で密にすることは難しく、また、底泥からの舞い上がり分も捕集されるため、底層付近での測定値からは沈降物の底泥への堆積を把握し難い。このため、底層付近で捕集される沈降物については舞い上りを考慮した適当な補正を施す必要がある。

3. 分解速度を考慮した有機懸濁物の沈降速度の解析

(1) 沈降速度と沈降量の計算法

海域での有機物による水質汚染の解析を行う場合、沈降物として海水から底泥などの系外に放出される正味の量、あるいは、底泥側から見れば海水から底泥系に供給される量を精度よく把えることが重要である。このような意味から、有機物の分解を利用して、2層間の粒子の滞留時間と層間の距離から沈降速度を算出し、より合理的な物質沈降量の設定方式について検討した。

海水中の沈降物の有機態リン(O-P)の含有量は時間の経過とともに分解して減少していく。また、底層付近では底泥内で分解の進んだO-Pの低含有沈降物が舞い上がっており、この層で捕集されるリンの沈降量は実際のものに比べて見かけ小さく測定される。このような問題点を避けるため、舞い上がりの影響を受けていると思われる底層近傍を除いた中～中下層における沈降捕集物に対する以下の解析からO-P(または全リン(T-P))の沈降速度および沈降量を計算した。

すなわち、図-2において、全水深 $z=h_b$ の測点に対し、舞い上がりの影響を受けないと思われる2層($z=h_u, h_i$)で捕集された沈降物のO-P含有量(mg/g-SS)をそれぞれ p_u, p_i とすると、次の関係式を与えることができる。

$$p_i = p_u \cdot e^{-kt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

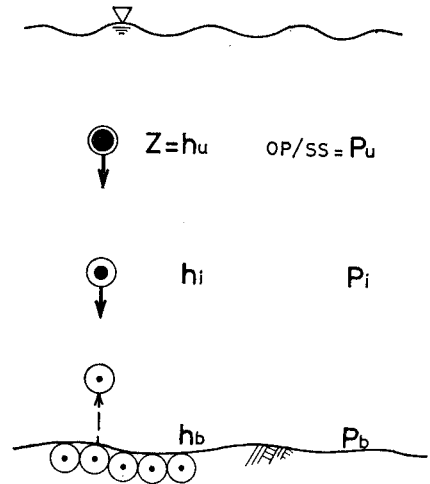


図-2 沈降速度算定模式図

ここに、 k : $z=h_u \sim h_i$ における O-P の水中分解速度、 t : $z=h_u \sim h_i$ 間の沈降物の滞留時間である。

式(4)より滞留時間 t は

$$t = -\frac{1}{k} \ln \left(\frac{p_i}{p_u} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、沈降速度 w は

$$w = \frac{h_i - h_u}{t} = -\frac{h_i - h_u}{k} \ln \left(\frac{p_i}{p_u} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

として求めることができる。

つぎに、この沈降速度 w が底面に達するまで一定に保たれると仮定すると、 $z=h_i \sim h_b$ 間の沈降物の滞留時間は

$$t = \frac{h_b - h_i}{w} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。したがって、底面に到達するときのO-P含有量 p_b は

$$p_b = p_i \cdot e^{-k \cdot t} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。いま、底面におけるSS沈降量を SS_b とすると、底面に供給されるO-P量 S_p は

$$S_p = p_b \cdot SS_b \quad \dots\dots\dots (9)$$

として求めることができる。

(2) 水中有機懸濁物中のO-P分解速度(k)

昭和54～57年度にわたって大阪湾湾奥で得られた試料をもとに行われた25°Cにおける水中有機物の分解試験結果から PO_4 -P生成速度(r)とO-P含有量(OP/SS)の関係を図-3に示した。この結果から r と OP/SS との一次回帰式を求めると、

$$r = 0.0655 \times (OP/SS - 0.389) \quad \dots\dots\dots (10)$$

が得られる。

したがって、25°CにおけるO-Pの分解速度定数 k は式(10)を用いて

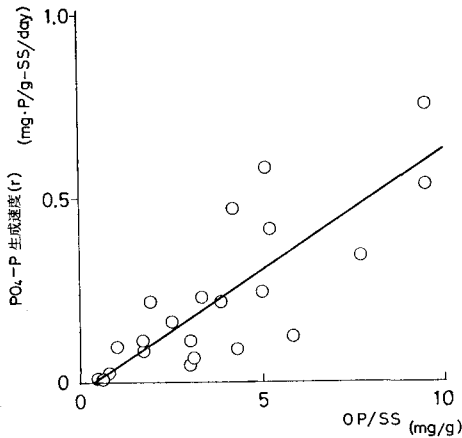


図-3 PO₄-P 生成速度と O-P 含有量

$$\begin{aligned} & (OP/SS)_0 - 0.0655 \times \{(OP/SS)_0 - 0.389\} \\ & = (OP/SS)_0 e^{-k \times 1} \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

すなわち,

$$k = -\ln \left\{ 0.934 + \frac{0.0257}{(OP/SS)_0} \right\} \dots \dots \dots (12)$$

(OP/SS)₀: 初期 O-P 含有量

より求められる。

一方、同じく昭和 54, 55 年度に採取された試料に対する水温 8°C, 18°C における O-P 分解試験結果は図-4 のようになり、これらの平均値をとって水温 T に対する温度補正係数を $(1.05)^{T-25}$ と設定することができる。

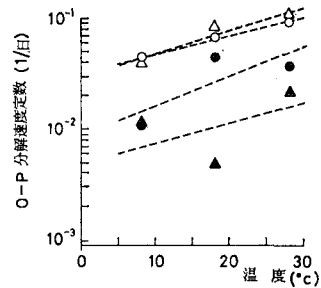
したがって、式 (12) を用いて任意の初期 (OP/SS)₀ および水温に対する O-P の分解速度定数 k は

$$k = -(1.05)^{T-25} \ln \left\{ 0.934 + \frac{0.0257}{(OP/SS)_0} \right\} \dots (13)$$

として与えられる。

(3) 懸濁態リンの沈降速度および堆積速度の測定結果

O-P による水質汚濁および有機汚泥の堆積が顕著な場所として大阪湾湾奥部に注目し、図-1 に示すような西宮防波堤沖 No. 1 および周辺 3 地点の No. 3, No. 5, No. 7 において沈降物の捕集が行われた。捕集装置は図-1 に示したものと同様で、捕集筒は外径 100 mm, 高さ 500 mm の硬質塩ビ製のものを用い、これを架台一基につき 6~8 本載せ、アンカーと水中ブイにより垂下ロープを直立させて水中で水平になるように設置する。設置して約 24 時間後に捕集筒にフタをして回収し、冷暗状態を保ちつつできるだけ早い時期に分析に供する。沈降物に対し、SS, T-P, O-P, リン酸態リン (PO₄-P), 水温, その他を分析する。得られた結果から O-P/SS, PO₄-P/SS, SS 沈降量について捕集層位置、調



- 上層 (海面下 1 m, 昭和54年度)
 $Y = 0.083 \times (1.04)^{T-25}$
- 上層 (海面下 1 m, 昭和55年度)
 $Y = 0.040 \times (1.06)^{T-25}$
- △ 下層 (海底上 0.5 m, 昭和54年度)
 $Y = 0.098 \times (1.05)^{T-25}$
- ▲ 下層 (海底上 1 m, 昭和55年度)
 $Y = 0.014 \times (1.03)^{T-25}$

図-4 O-P 分解速度定数の温度依存特性

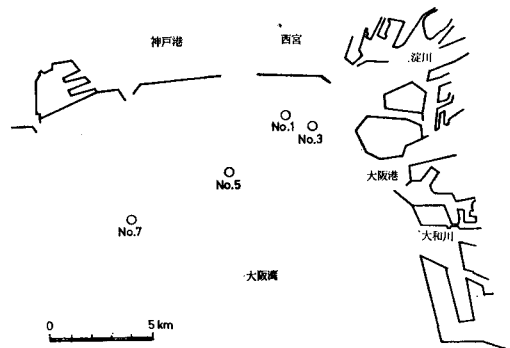


図-5 沈降物捕集地点

査時期、水温とともに整理すると表-1 のようになる。

表-1 の結果から底上 8 m および同 7 m の測定値を用いて底上 7.5 m 層の平均 T-P/SS, 平均 O-P/SS を求めると 6.2 mg/g-SS, および 3.1 mg/g-SS となる。同様に、底上 3 m の平均 T-P/SS, 平均 O-P/SS はそれぞれ 2.0 mg/g-SS, 1.6 mg/g-SS となる。さらに、底上 1.5 m ~ 同 1 m 層においてはさらに低下し、それぞれ 1.9 mg/g-SS, 0.92 mg/g-SS となる。また、O-P の T-P に対する比は全層平均で約 0.60 となる。

つぎに、表-1 の中から 55 年 2 月 20~21 日より 57 年 2 月までのデータに対して、式 (13), (5), (6) を用い分解速度定数、層内滞留時間および沈降速度を各層について計算すると表-2 のようになる。この計算から求められた沈降速度は 0.03 m/日から 0.63 m/日の範囲であり、この中からさらに底層近傍を除く中層における O-P の平均沈降速度は 0.34 m/日となる。したがって、底面までの 7.5 m を沈降するに要する時間は式 (7) よ

表-1 沈降捕集物の分析結果 (O-P/SS, PO₄-P/SS, T-P/SS は mg/g-SS, SS 沈降量は g/m²/日, 水温は °C)

調 査 日		昭和55年 2月14~ 16日	2月 20~ 21日	5月 14~ 16日	7月 5~ 7日	9月 12~ 14日	9月 15~ 16日	昭和56年 2月9~ 11日	6月 4~6日	8月 13~ 15日	昭和57年 2月	9月20~21日			12月16~17日		
層	調点 項目	No. 1										No. 3	No. 5	No. 7	No. 3	No. 5	No. 7
底上 8m	O-P/SS			1.6	6.3	0.7		1.0	2.7	5.0	1.9						
	PO ₄ -P/SS			2.8	5.5	1.2		1.0	2.4	1.5	0.34						
	SS 沈降量			2.5	1.1	20		3.0	0.32	0.93	0.69						
7	O-P/SS	6.64	8.0				3.6						2.55	6.98	2.45		1.42
	PO ₄ -P/SS		6.2				10.5										
	SS 沈降量	13.7	8.1				1.42					1.32	0.63		13.0	27.2	
5	O-P/SS						6.3					3.45	5.31	1.43	2.25	1.08	0.86
	PO ₄ -P/SS						15.3										
	SS 沈降量						1.36					1.12	0.62	5.74	17.5	34.6	49.7
4	O-P/SS		7.0				6.1										
	PO ₄ -P/SS		6.4				13.8										
	SS 沈降量		9.2				1.42										
3	O-P/SS		9.8				2.1		0.5	3.2	1.0	2.60	4.62	0.96	1.18	0.98	0.92
	PO ₄ -P/SS		5.8				4.8		1.2	1.2	0.005						
	SS 沈降量		18.8				5.80		1.75	1.70	36.0	2.65	1.34	30.6	48.2	129	114
2	O-P/SS						3.2										
	PO ₄ -P/SS						32.8										
	SS 沈降量						1.51										
1.5	O-P/SS	1.7	5.1	0.37	1.2	0.44		1.1	0.65	1.7	1.0						
	PO ₄ -P/SS	8.1	5.1	0.61	1.2	0.59		0.66	0.75	0.98	0.0004						
	SS 沈降量	112	84.7	317	13	97		35	22.7	5.56	137						
1.0	O-P/SS		3.2				1.9					0.20	3.16	0.63	1.12	0.55	0.41
	PO ₄ -P/SS		4.5				12.3										
	SS 沈降量		110				5.93					1410	2.74	94.9	197	638	5060
	水 温	7.4	7.4	14.7	19.9	24.3	24.5	7.6	19.7	24.7	8.2	24	24	24	16	16	16

表-2 沈降速度の計算

沈降物 捕集年月日	底上 (m)	水温 (°C)	(OP/SS) ₀ (mg/g)	k (1/日)	滞留日数 (日)	沈降速度 (m/日)	沈降層
55年2月 20~21日	7→4	7.4	8.0	0.028	4.77	0.629	中層
	4→1.5	7.4	7.0	0.027	11.7	0.214	下層
	1.5→1.0	7.4	5.1	0.027	17.3	0.029	下層
5月 14~16日	7.5→1.5	14.7	1.6	0.030	48.8	0.123	中層
7月 5~7日	7.5→1.5	19.9	6.3	0.050	33.2	0.181	中層
9月 12~14日	7.5→1.5	24.3	0.7	0.029	16.0	0.375	中層
9月 15~16日	4→2	24.5	6.1	0.062	10.4	0.192	下層
	2→1	24.5	3.2	0.059	8.84	0.113	下層
56年6月 4~6日	7.5→1.5	19.7	2.7	0.045	31.6	0.190	中層
8月 13~15日	7.5→3	24.7	5.0	0.062	7.20	0.625	中層
	3→1.5	24.7	3.2	0.059	10.7	0.140	下層
57年2月	7.5→1.5	8.2	1.9	0.024	26.7	0.225	中層

り 22 日(=7.5m/0.34m/日) となる。

一方、この測点における年平均水温は 16.6°C であるから、式 (13) により (OP/SS)₀=3.1 mg-SS に対する沈降物分解速度定数 *k* は 0.039 1/日となる。それ故、式 (8) から底面に到達するときの O-P 含有量 *p*₀ は 1.3 mg/g-SS と推定される。さらに、先に述べた O-P/T-P=0.60 より、T-P 含有量に換算すると 2.4 mg/g-SS となる。

松本・横田²⁾によると、大阪湾底泥中の過剰 ²¹⁰Pb 含有量の鉛直分布から SS の堆積速度 *H* は同湾湾奥部で 0.18~0.61 cm/年、年平均 0.41 cm/年となっている。堆積速度 *H* と海底面における SS 沈降量 SS₀ との間には

$$H=SS_0 \times \frac{1}{\text{含泥率}} \times \frac{1}{\text{単位体積重量}} \times 10^{-4} \times 365$$

.....(14)

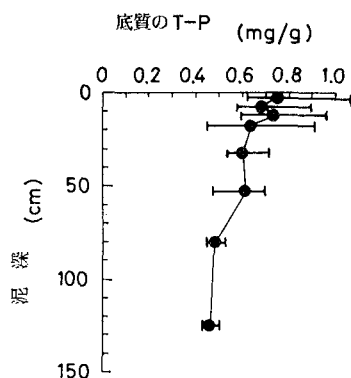


図-6 底質 T-P の鉛直分布

の関係があることから、式 (14) に $H=0.41$ cm/年、含泥率 0.356、単位体積重量 1.33 g/cm³ を代入することにより $SS_0=5.3$ g-SS/m²/日が得られる。

さらに、この測点近傍における底泥からの PO_4 -P 溶出速度は冬季約 1 mg/m²/日、夏季約 25 mg/m²/日となり年間 $3\sim 4$ g/m² 程度と推定される⁹⁾。また、同地点の底泥表層部の T-P 鉛直分布は 図-6 に示すように底泥表層で 0.68 mg/g-SS、 50 cm 深で 0.60 mg/g-SS と漸減し、 80 cm 以深では 0.47 mg/g-SS でほぼ一定となっている。この底泥の溶出試験によると 80 cm 以深ではほとんど溶出しないことが確認されている。いま、新たに堆積する SS 中の T-P 供給量 (底泥に堆積する T-P 含有量を x mg/g-SS、溶出が停止する T-P 含有量を 0.47 mg/g-SS とする) と年間平均溶出量 3.5 g/m²/年とが等価であると仮定すると、

$$(x-0.47) \times 5.3 \times 365 = 3.5 \times 100$$

すなわち、 $x=2.3$ mg/g-SS となり、先に滞留時間を考慮して求めた沈降物の T-P 含有量 2.4 mg/g-SS とほぼ一致する。したがって、底泥への T-P 堆積量は 13 mg/m²/日 ($=2.3$ mg/g-SS $\times 5.3$ mg-SS/m²/日) と算出される。

以上、現地における捕集沈降物の解析から、大阪湾湾奥西宮沖における懸濁有機物 (O-P) の沈降速度と海底に堆積する T-P 量を求めた。これらの量は現地の溶出速度を説明し得る値であることが確認された。

なお、懸濁有機物の沈降速度はその実態が把握し難いことから、これまで数値モデルにおいては種々の範囲の値をあてはめているのが実状である。表-3 はそれらの中の一部を示したものである。モデルの中の沈降速度はモデル構成にも依存するけれども、水質濃度や物質の鉛直フラックスに及ぼす影響は大きいので慎重に扱う必要がある。

本文にて取り扱った現場海域における沈降特性の解析は、流れ、乱れや海底付近での底質の舞い上がりなどの

表-3 数値モデルにおける沈降速度設定例

対象海域	沈降速度 (m/日)	備 考
東京湾	上層 0.03 中層 0.03 下層 0.028	二 港 建 (1984)
	0.83~1.0	東 京 都 (1984)
	0.96	千葉県・横浜市 (1978)
	0.35~1.27	木 更 津 市 (1984)
三 河 湾	上層 0.214 中層 0.448 下層 0.488	五 港 建 (1984)
	上層 0.10 中層 0.53 下層 1.21	三 港 建 (1984)
	上層 0.40 中層 0.40 下層 0.05	四 港 建 (1984)

注) 上層: 海面~海面下 5 m, 中層: 海面下 5~10 m,
下層: 海面下 10 m 以深

影響下でも自然に近い条件で適用できる有効な手段であることが明らかとなった。

4. ま と め

以上、海域における懸濁有機物の沈降特性に関する解析結果をまとめると次のようになる。

(1) 現場海域における採水法または捕集沈降物の沈降フラックスより求める従来法では、鉛直拡散係数または舞い上がり等の算定が難しいため沈降特性の把握には適用限界がある。

(2) 懸濁有機物の含有量および同分解速度より算出される有機物の滞留時間、さらに、沈降距離から求められる大阪湾湾奥部での平均沈降速度は 0.34 m/日である。

(3) SS 堆積速度、O-P 含有量を乗じて得られる底面への T-P 堆積量は大阪湾湾奥で 13 mg/m²/日となり、これは、同地域における年間平均リン溶出速度 (3.5 g/m²) を維持するのに要する T-P 含有量に相当する。このことから、分解と舞い上がりを伴う有機懸濁物の沈降に関する本解析法の妥当性が確認された。

参 考 文 献

- 1) 細川恭史・堀江 毅・三好英一・加藤道康: 沿岸海域におけるけん濁粒子の沈降速度測定法について—数種の測定法の比較—, 港湾技研資料, No. 433, 26 p, 1982. 11.
- 2) 松本英二・横田節哉: 大阪湾底泥の堆積速度と重金属汚染, Journal of Oceanographical Society of Japan, Vol. 34, pp. 108-115, 1978.
- 3) 堀江 毅・細川恭史: 海域底泥のリン挙動モデルについて, 港湾技術研究所報告, 第 23 巻, 第 2 号, pp. 49~74, 1984. 6.