

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.433 Sept. 1982

沿岸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—

細 川 恭 史
堀 江 毅
三 好 英 一
加 藤 道 康

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 沈降速度測定の水質上の意味	3
2.1 水質における濃度と速度	3
2.2 沈降速度の各種測定法	4
2.3 沈降速度に影響を及ぼす因子	5
3. 沈降速度測定現地調査	7
3.1 対象海域の特性	7
3.2 捕集筒による沈降速度測定	9
3.3 けん濁濃度鉛直分布による沈降速度測定	15
4. 沈降速度測定室内実験	16
4.1 粒径と比重とから求める方法	16
4.2 沈降筒による方法	18
5. 各方法の比較	24
6. あとがき	24
参考文献	25
使用記号一覧	26

Measurement of Settling Velocity of Fine Suspended Matter in Coastal Area

Yasushi HOSOKAWA*

Takeshi HORIE**

Eiich MIYOSHI***

Michiyasu KATO***

Synopsis

To calculate the concentration of the particulate organic matter in eutrophic coastal area, it is necessary to estimate the settling velocity of the particulates as correctly as the nutrient load.

Measurements of the settling velocity of the fine suspended matter in inner Osaka Bay are made both in the field and in the laboratory. Sediment traps are used in the field observation. The settling velocity of the fine particulate organics in the surface layer is estimated 0.6 m/d, and that of the resuspended sediment in the bottom layer is estimated 3 m/d. Electric particulate counter and settling tubes are used in the laboratory experiments. The settling velocity of the sediment is calculated 1 m/d from the particulate diameter. Because of the difference in coagulation state, which depends on the settling depth of the tube and the initial concentration of the suspended matter, the settling velocity of the sediment by the tube tests varies widely from 0.9 m/d to 5 m/d.

Among many factors effecting to the settling velocity, coagulation process is proved to be very important in the estimation from the laboratory experiments.

* Senior Research Engineer, Marine Hydrodynamics Division.

** Chief of the Purification Hydrotics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

*** Member of the Purification Hydrotics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division.

沿岸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—

細川 恭史*

堀江 毅**

三好 英一***

加藤 道康***

要 旨

沿岸海域—特に富栄養化した沿岸域—の有機物負荷のうち、粒状有機物の占める割合は大きい。海域での微細粒状有機物の挙動を把握するには、その生成・供給とともに消滅についての理解が必要である。中でも沈降は最も重要な過程の一つであるが、確立された測定法はない。

沈降速度は、種々の因子の影響を受けるが、現場海域での影響因子すべてを室内実験で再現することは困難である。そこで、各種の測定法で求めた沈降速度値を現場測定値と比較し、測定法の検討を試みた。

現場では捕集筒を用いて測定し、表層浮遊けん濁物質に対し0.6 m/d、浮泥に対し3 m/dの値を得た。一方、室内では粒度分布より算定する方法、各種沈降筒を用いる方法などにより沈降速度を測定した。相互に比較した結果、けん濁粒子を独立に分散させた状態での沈降速度は、現場測定値よりも小さくなり、室内法としては凝集作用についても考慮する必要があることが解かった。

1. まえがき

沿岸海域内に長期にわたって浮遊けん濁している微細な粒子の沈降は、物理的・化学的に複雑な現象であり、その速度も小さい。従って、沈降速度の測定はむずかしく、その値としては表-1にその例を示すように様々の数値が示されている。^{1)~3)}植物プランクトンに対するSmaydaの研究では、プランクトンの沈降速度を0~30 m/dと幅のある値で見積っている。また、プランクトンの死滅分解産物のデトライタスや、動物プランクトンの排泄した糞粒では数百m/dに達する大きな値として示されている。一方、海域や湖沼に沈降筒を設置しけん濁物質の沈降速度を測定することが近年実施され、沈降速度として1 m/d前後の値が出はじめるようになってきている。また、水質変化の数値シミュレーションに際して用いられてきた粒状有機物の沈降速度としては、モデル

の特性にもよるが、更に小さな値が用いられることが多い。

このように、測定対象、測定方法、目的などにより、沈降速度測定値は大きくばらついている。ばらつきの原因や、粒状物の収支解析に用いるべき値について考察するためには、各種の沈降速度測定法やその測定法で測られる現象などの理解が必要である。

本論文では、沿岸海域での微細粒子の沈降速度の測定法について、その原理・方法と測定値とを比較し、解析方法を例示している。更に、室内で沈降速度を測定する際の問題点を、現地での値と比較し指摘している。

2. 沈降速度測定の水質上の意味

2.1 水質における濃度と速度

汀線変化に影響を及ぼす沿岸漂砂粒子に比して、水質に影響を及ぼす浮遊けん濁粒子は、微細なものがほとん

* 海洋水理部主任研究官（水質解析担当）

** 海洋水理部海水浄化研究室長

*** 海洋水理部海水浄化研究室

表一 植物プランクトン・デトライタス等の沈降速度測定値

対象	研究者 (年)	沈降速度
植物プランクトン		(m/d)
藻 (algae)	Imboden (1974)	0.1 ~ 0.4
植物プランクトン	Smayda (1970)	0 ~ 30
珪藻		
Nitzschia seriata	Smayda (1965)	0.26 ~ 0.5
Skeletonema costatum	Smayda (1966)	0.31 ~ 1.35
Thalassiosira nana	Smayda (1965)	0.10 ~ 0.28
死細胞	Smayda (1970)	< 1 ~ 500
動物プランクトン		
コペポダ類	Gardner (1933)	36 ~ 720
デトライタス		
デトライタス	U.S. Army (1975)	0 ~ 2
糞粒	Smayda (1971)	72 ~ 210
糞粒	Turner (1977)	550 ~ 860
糞粒	Fowlerら(1972)	53 ~ 411
けん濁物質		
新生けん濁物	Burnsら(1980)	
1 ~ 10 μm		0.24
10 ~ 64 μm		1.54
64 ~ μm		2.32
平均		0.6
夏期三陸沖けん濁物	西沢 ²⁾ ら(1981)	1
栄養物質循環モデル		
P循環シミュレーション (東京湾2層)	二建	0.57 ~ 0.77
P, N循環シミュレーション (霞ヶ浦1層)	津野 ³⁾ ら(1979)	0 ~ 0.05

どである。微細けん濁粒子は、海水の比重よりもやや重く沈降性の物質であるが、含水比が高く粒径が小さいためその沈降速度は、砂等に比してかなり小さい。

沿岸域での微細けん濁粒子は、生物体と非生物体とに区別される。生物体としては、有光層で光合成作用の結果増殖した植物プランクトンや、これを捕食している動物プランクトン、更に小動物、魚などがある。一方、非生物体としては、死滅したプランクトンやこの分解途上のもの、舞い上ってきた微細底泥、陸域から降雨などで洗い流されてきた微細土砂などが主たるものである。微細けん濁粒子の存在は、海水中での光の吸収と散乱を増し、透過光量を減少させるばかりでなく、魚のエラ等の呼吸器官の閉塞、有機けん濁粒子の酸化分解による溶解酸素の消費と不足化、粒子含有物の海水への溶解などの影響を及ぼす。

けん濁物質の水質への影響は主にけん濁粒子の濃度によって決定されるため、環境基準などでは浮遊けん濁物質濃度 (SS: Suspended Solid) で規制されている。濃

度値で表わされる水質は、まわりの条件により時々刻々と変化をしている。この濃度変化は、対象とする水塊へ流入する汚染物量と流出する汚染物量のバランスによって決められる。従って、汚染物の流入速度と流出速度、および系内での変質速度を知れば、濃度変化が把握でき、また、どのルートに対策を施し速度を変えれば、濃度がどの程度まで回復するのか判断できるようになる。速度は、一般に単位面積あたり単位時間あたりのフラックス量で表わされる。浮遊けん濁物質の場合、沈降により系から出てゆく(下層水では、上層水からの沈降により系へ入ってゆくものも含め)フラックスは、単位面積あたり単位時間あたりのけん濁物質質量であり、系内濃度を同様とすれば、これは「濃度」と「粒子の沈降速度」との積として表わせる。

夏期の内湾では、有光層で増殖した植物プランクトン及びその分解産物が大きな有機物負荷となり、COD濃度を上昇させることが多い⁴⁾。植物プランクトン及びその分解産物は粒状であり沈降速度を有する。赤潮プランクトンの一部は、自己のペンの運動や体内の空気泡などで浮上・沈降をくり返すとされるものもある⁵⁾が、沿岸域で卓越する珪藻や死滅プランクトン等はゆっくり沈降する。従って、内湾表層の夏期水質にとって、沈降速度の与える影響は小さくないと思われる。

大阪湾湾奥を対象水系とし2層に区切り、有機性粒状栄養塩濃度に及ぼす各種関連速度パラメータの感度を調べた例^{6,7)}では、流入栄養負荷、溶出栄養負荷、潮流による希釈とならび沈降速度が大きな感度を有していることが示されている。このことは、大阪湾湾奥の水質変化を考える際に、流入負荷、溶出負荷と同程度の精度をもって沈降速度を測定・評価する必要があることを示している。

また、港湾工事に伴う濁りの管理にとって、最も問題となるのは、主として海底から舞い上げられ長期にわたって浮遊けん濁する微細粒子である。⁸⁾これらの舞い上がり微細粒子は、沿岸域の流れの遅い場所に沈降堆積した植物プランクトンおよびその分解物が主体を占めている。従って、港湾工事に伴う濁りの管理の上からは、底泥および浮遊けん濁粒子の沈降速度の把握が重要な課題である。

2.2 沈降速度の各種測定方法

浮遊けん濁粒子の定義は、溶解物とけん濁粒子とを分別する手段に依っており、一般には、0.45μmの孔径を有するろ紙を通過しないものとされている。環境基準に定めるSSは、指定するろ紙(ほぼ1.0μmの孔径)に捕捉された物質のことをいい、乾重量で表示している。

0.5 μmとは、極微小プランクトンからバクテリアのレベルの大きさである。環境中での浮遊けん濁粒子のうち、これより小さいものはたとえかなりの個数濃度で存在したとしても質量としては寄与が小さく、水の流れと同一の挙動を示すとみなせるから、細菌による汚染等特殊な場合を除き溶解物として扱う方が便利である。

現存けん濁濃度の測定は、粒状物としてろ紙上に分別された物質の測定のことであり、捕捉物質をどのような側面から見るかにより測定指標が異なる。

最もよく用いられる物性は乾重量である。乾重量の他粒状態炭素 (PC: Particulate Carbon), 粒状態リン (PP: Particulate Phosphate), 粒状態窒素 (PN: Particulate Nitrogen) などの栄養含量, クロロフィル量もしくはクロロフィル分解物のフェオ色素などの色素含量, 更には粒状鉄, 粒状マンガンなどの無機物などの量で各々示されることもある。また, 有機物の挙動に注目し, 粒状COD (P-COD) を測定することもあるが, 乾重量に対する強熱減量 (IL: Ignition Loss) の方が粒子の含有有機物量指標としてはよく用いられる。

各指標の測定法を概説する。SSは, 単位水体积あたりに含有されたけん濁物の乾重量を示し, mg/lの単位で表わされる。測定に適した孔径を有するろ紙を選び, けん濁海水を適量ろ過する。更に蒸留水で容器壁付着物を洗い落とすとともにろ紙に含有されている塩分を洗い落とす。ろ紙を静かにとり出し, 捕捉物を飛散させぬよう注意しながら乾燥器にて2時間加熱乾燥させ, デシケター中で30分放冷させる。化学天秤で重量をひょう量し, そのろ紙につきあらかじめ測定しておいたろ紙自体の重量を差し引き, 捕捉乾重量を求める。この乾重量をろ過に供した海水水体积で除しSSを求める。SSの測定法はJ.I.S.K 0101,⁹⁾ K 0102¹⁰⁾などで公定されているが, 公定法ではけん濁物質としては径が2mm以下の粒子を想定している。

他の指標も多くは, ろ紙上に捕捉された物質を供試試料として分析され, けん濁物質の単位乾重量あたりの含有量 (mg/g) や海水中の濃度 (mg/l) で表示される。PC, PNは, 乾燥させた捕捉物をろ紙ごと元素分析計で燃焼させ発生CO₂, NO_xなどの量より定量する。色素類も, 乾燥後ろ紙ごとすりつぶし有機溶媒に抽出し比色もしくは蛍光分析により定量する。¹¹⁾ P-CODは, ろ過後乾燥させずに直ちにCODの分析を行ない, 別途に対象海水のけん濁物質濃度を測定しておく。ILは, 乾重量測定後, 試料を600℃程度の高熱下で約30分間灰化させた後再び重量を測り, 乾重量に対する差(減量)を測定する。^{9, 10)} また, けん濁海水中の総含有濃度から, ろ液中

の溶解性含有濃度を差し引き, 簡便的間接的にけん濁態の濃度を求めることもある。

SSの測定精度は, 重量を測定する天秤の精度によりほぼ決まってくる。0.1mgまで測定できる天秤がよく用いられる。一方, ろ紙の重量は100mg前後あり, ろ紙の乾燥等による恒量誤差を考慮すると捕捉けん濁物質重量は, 数mg程度は必要である。希薄なけん濁海水に対してはろ過液量をふやせば必要捕捉重量を確保でき, 濃度の精度も向上する。他の指標でも同様にろ過液量をふやせば希薄海水にも対処できる。

けん濁物の特性は, 各指標を比較することにより把握できる。プランクトン起源の比較的新しいけん濁物は色素濃度が高く, C/N/P等の栄養含有比がほぼ安定し, 有機物濃度が高い。分解を受けるにつれ, 色素濃度特にクロロフィル濃度が低下しフェオ色素がふえるが, 更に分解がすすむとフェオ色素も減少する。陸からの流入けん濁物のうち, 土山等の粒子では無機鉱物が主体であり有機物濃度が低い。¹²⁾

一方, 沈降速度は, 単位時間あたりの沈降距離で表わされ, m/dなどの単位で示される。沈降速度は, 鉛直方向に沈降距離を確保した場での粒子の沈降量を, 時間を追って測ることにより求められる。沈降量測定には, ある深さの受け皿上に落下してきた量を測定する方法と, ある深さまでの水柱から落下により取り除かれた量を測定する方法とがある。

沈降場を室内の鉛直筒内とする室内法と, 現場海域とする現場法とが考えられる。初期条件として全層均一状態を作りやすく, 他からの流入・流出がないなど, 室内法は再現性が良く精度が高い。このため室内沈降筒法による沈降速度の測定例は多い。沈降時間をはやめるため, 沈降筒を遠心分離器にかけ大きな加速度をかける装置なども利用されることがある。¹³⁾

現場法による沈降速度の測定法は受け皿のある水深に垂下し, 一定時間に貯った量から求める方法¹⁴⁾や, 濁りの鉛直分布¹⁵⁾から求める方法がある。また現場のけん濁状態をそのまま沈降筒内に採取する装置¹⁶⁾なども考案されている。

いずれの方法にしる, 微細粒子の沈降速度は, 非常に小さいため測定がむずかしくばらつきやすい。また, 他の因子により左右されやすく, 沈降場の設定いかんにより結果に大きな差異を生じやすい, などの困難さがつきまとう, 沈降速度測定の目的に応じ, 方法や規模を考える必要がある。

2.3 沈降速度に影響を及ぼす因子

微細粒子の沈降速度に影響を及ぼす因子を抽出し, 現場水質変化を考える際に考慮しなければいけない要件を

検討する。

(1) 微細粒子が単一粒子として静止水中を落下する場合

静止した液体中を粒子が重力の作用で沈降する場合、重力と流体抵抗が平衡に達して等速運動に到達したときの沈降速度 w は次式で示される。

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot D} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 C_D は粒子の抗力係数、 ρ_s, ρ_w は粒子および液体の密度、 D は粒子径を示す。 C_D はレイノルズ数 R_e の関数として球形粒子の場合次式で近似される。

$$R_e < 2 \quad C_D = \frac{24}{R_e} \quad (2)$$

$$2 < R_e < 500 \quad C_D = 10 \cdot \sqrt{R_e} \quad (3)$$

$$500 < R_e < 1000 \quad C_D = 0.44 \quad (4)$$

これらを式 (1) に代入すると、各 R_e 領域での粒子の終端速度は次式で示される。

$$R_e < 2 \quad w = \frac{g}{18\eta} \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot D^2 \quad (5)$$

$$2 < R_e < 500 \quad w = \left\{ \frac{4}{255} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_w)^2 \cdot g^2}{\rho_w} \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot D^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$500 < R_e < 1000 \quad w = \left\{ 3g \cdot \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot D^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここで η は液体の粘性係数である。式 (5) をストークス式、式 (6) をアレンの式、式 (7) をニュートンの式とよぶ。200 μm 以下の微細粒子に対しては、式 (5) が適用できる。

式 (5) を見ると、沈降速度は、 $\eta, \rho_s - \rho_w, D$ および g によって決まってくるのがわかる。 η は液体の温度、 ρ_w 、含有物質などによって左右されるが、海水の場合、 ρ_w と同様、主に温度と塩分によって決まってくる。温度、塩分が決められた海水中では、沈降粒子の比重 ρ_s と径 D とにより沈降速度が求められる。

(2) 微細粒子が高濃度で静止水中を落下する場合

シルト、粘土などの粒子は疎水性コロイドとしてけん濁している。疎水性コロイドの場合、粒子表面はマイナスに荷電しており、表面のすぐ外側にこの電荷と釣り合うようにプラスのイオン層がある。このイオン層を固定イオン層とよぶ。さらにその外側にプラスおよびマイナスの移動性のイオンにおおわれた拡散イオン層とよばれる層がある。粒子の移動とともに固定イオン層と拡散イオ

ン層の一部が粒子と一体となって移動する。粒子とともに運動する境界面をせん断面とよび、せん断面の電位を ζ -電位 (ゼータ電位) と呼ぶ。 ζ -電位は、固定イオン層の電位より低い $-20 \sim -30 \text{ mV}$ 程度のマイナスの電位となっている。このため、粒子相互の間で電気的な反発力が生じ、粒子間の引力 (ファン・デル・ワールス力) に優っているためけん濁が安定している。

海水のように $\text{Na}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+}$ などの陽イオン電解質を高濃度に含む溶媒中では、電気的な中和作用により反発力が弱まり、平衡が破れて粒子相互の集塊化が起こる。これを凝集とよぶ。粒子相互の集塊化は、粒子間距離が小さい時に生起するから、粒子相互の衝突頻度に左右される。従って、凝集現象のはやさは、粒子の濃度、粒子の運動、溶媒の電解質濃度に左右される ζ -電位の中和度 (絶対値の小ささ) などに関係してくる。

静水中に、ある程度の濃度でけん濁している微細粒子は、粒子径と同程度のスケールの乱れやブラウン運動によって衝突の機会を得ると凝集を起し、粒径を増大させる。粒径が大きくなりフロックを形成すると、沈降速度がはやくなる。

海水の含有イオン組成はほぼ一定であるから、塩分濃度が決まると、海水の流速・乱れなどの水理的条件とけん濁粒子の濃度・径により凝集作用が左右される。凝集作用はかなり希薄なけん濁液でも粒子間の接近・衝突があれば起こり、0.1 μm 径の粘土粒子が 25 mg/l の濃度でけん濁していても、粘土粒子数は衝突合一により 40 秒で半減する¹⁷⁾といわれている。底面境界付近への集積や温度躍層界面付近への集積など、何らかの作用による粒子の収束¹⁸⁾濃度上昇があれば、急激に促進される。従って、けん濁物質の沈降による除去には、希釈拡散のみでなく高濃度集積の工法が有効となる事もある。

ある程度以上の高濃度になると、粒子相互の距離が狭くなり綿毛化構造が大規模に進み、単一粒子の運動とは異なる機構により沈降する。つまり、粒子総体が綿毛化構造を有した一群となり水とは明確な界面を作り、綿毛化構造内に貯留された間隙水を界面上へと押し出しながらみずからは圧密してゆく界面圧密沈降過程に入るようになる。

(3) 微細粒子が流水中を落下する場合

粒子径スケールでの運動により一次的に凝集したマイクロフロックは、さらに衝突をくり返ししながら径を成長させてゆく。静止水中では、成長したフロックがはやい流速で沈降することにより、ゆっくりと沈降する粒子に追いつき衝突する様子が観察される。

流水中では、こうした二次的な成長過程が、流れ場の

表-2 沈降速度に影響をおよぼす因子

機 構	作用過程	影響因子	主な関連環境因子
静水中の 単粒子沈降	重 力	比重差, 粒径	海水の温度, 塩分 粒子の比重, 径
	抗 力	粘性, 速度	海水の温度, 塩分
静水中の 粒子群沈降	凝 集	く電位	海水の塩分
		衝突合一頻度	粒子径, 粒子濃度 海水温度
	分 離	せん断力 フロックの凝集強度	粒子の運動 対海水相対流速 微小スケールの乱れ
流水中の 粒子群沈降	鉛直拡散	鉛直拡散	粒子濃度分布 流速分布, 流速勾配 流れ場・乱れの構造 気象・海象条件

流速差や乱れによって種々の影響を受けている。大きな渦の乱れの場合、フロックはこれに追従して場所的に循環するのみでフロック相互の距離は変化しないであろうし、フロック径より小さな渦に対しては、渦はフロックの表面を削り取る作用を及ぼすであろう。フロック径に近い渦は、フロック相互の離合集散に大きな影響を及ぼし、さらにフロックのせん断や変形などの破壊の効果¹⁹⁾も有するといわれている。海域でのこれらの機構の解析は今後の課題として残されているようである。限られた容積の水槽中での凝集作用を利用した水処理プロセスの設計には、経験的に、フロックの生長を20~40分間のゆっくりした(局所流速60 cm/s以下, 平均流速30 cm/s以下)攪拌¹⁷⁾で得るようにしている。

このように、粒子の沈降速度は、粒子の大きさや置かれた場の特性により種々の因子が作用する。沈降速度の測定も目的に応じた方法・条件で実施されなければなら

ず、各方法の意味・特性をよく理解しておく必要がある。表-2に影響因子をとりまとめておく。

3. 沈降速度測定現地調査

3.1 対象海域の特性

大阪湾湾奥で、けん濁物質の沈降速度の測定を試みた。調査は、昭和57年2月2日から実施し、沈降速度に関連した測定は2月4日に終了している。

対象海域は、西宮沖防波堤の外側約2 km, 淀川河口から西へ約8 kmの平均水深15 mの地点である。東西に500 mほど離れて、東からst. 8, st. 7の2地点を対象点としてあるが、両者の水質・底質の差異はほとんどない。

気象は、晴れから徐々に雲がひろがり、2月4日には小雨であった。2月1日に西風がふき、やや荒れたが、その後2月6日まで波の小さなナギの日が続いている。この調査期間中の現場測定は、毎日午前中に終了させており、午後からの季節風の吹出しに対処している。調査期間中2月1日に小潮となり、神戸での潮差は53 cm, 2月8日に大潮で潮差164 cmと予想されている。

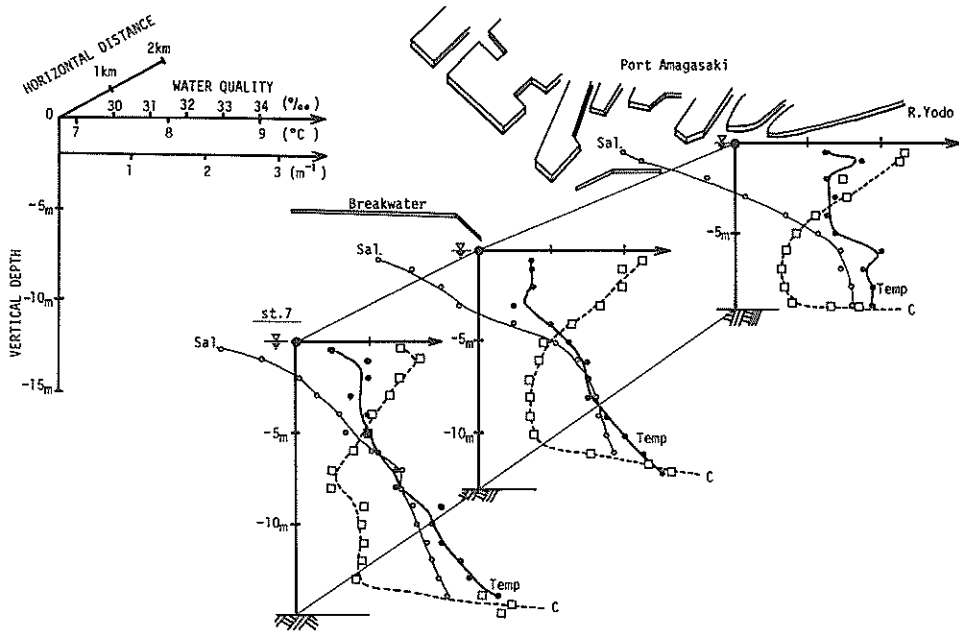
対象海域の底泥の極表層に積もっている浮泥をダイバーが潜水して採取しており、また水面付近の表層浮遊けん濁物質を船上からプランクトンネット(NXX13, 網目1辺の長さ0.09 mm)により捕集している。これらの粒状物質の性状を表-3に示す。両者ともかなり有機物の高い微細粒子であり、特に表層浮遊物は浮泥よりも有機物濃度、栄養塩濃度が1ケタ以上大きい。冬期ではあるが、表層浮遊物は植物プランクトンもしくはその分解途上のデトライタス等が主体となっていると思われる。

対象海域周辺での濁り(C), 水温(Temp.), 塩分(Sal.)の鉛直分布を調べてみると図-1のようになる。図-1では、淀川河口, 西宮沖防波堤東端, およびst. 7の3地点の水質鉛直分布がその位置に示してある。測定は潮差のほとんどない2月4日の昼に実施しており、潮汐流の影響は小さいと思われる。河口部では、表層から-5 m水深まで表層濁りが

表-3 西宮沖浮泥および表層浮遊物質の性状

	採集日	乾泥率	比 重	T-P	T-N	T-C	COD	N/C
			g/cm ³	g/kg	g/kg	g/kg	mg/g	
浮 泥	57. 2. 2	0.236	2.533	0.307	1.542	—	34.9	—
表層浮遊 けん濁物質	57. 2. 2	57.3*	—	—	35.2**	218**	—	0.16
(NXX13(90μm目) ネットによる)	57. 2. 3	64.7*	—	—	41.7**	234**	—	0.18

* 捕集液のSS濃度(mg/l), ** CHNコーダーによる分析値, 他はKjeldahl分解による。



on Feb. 4, 1982

図-1 西宮沖～淀川河口での水質鉛直分布図

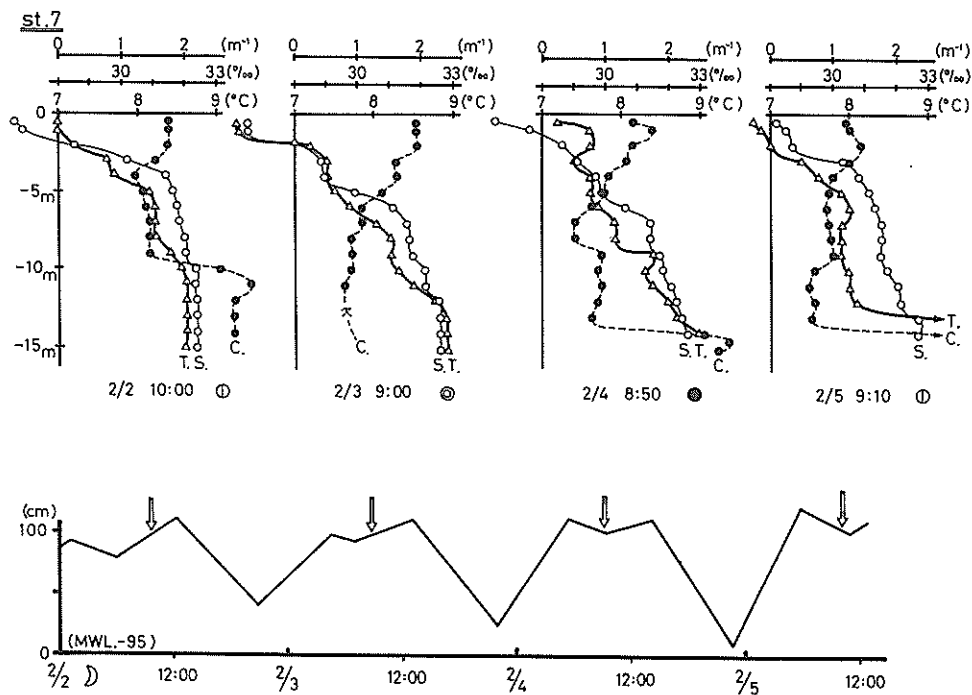


図-2 西宮沖での水質鉛直分布の日変化図

見られ、底泥近くで高い濃度の底層濁りが見られる。防波堤端からst.7へと西に下るに従って、表層濁りの深さが少しずつ深くなりながら濁りの濃度は減少している。両地点とも底層濁りが見られる。また塩分は、河口部表層できわめて低く、防波堤端からst.7と除々に上昇している。水温は表層で低く底層で高い。底層水の水温は、河口部よりも沖合地点で高くなっている。st.7での表層濁りは河口部の表層濁りの影響を受けていると思われるが、他地点での分布や海域への流下濁りの量、広がり等についてのデータがなくこれ以上の判断はできない。

また、対象地点st.7での水質鉛直分布の日変化を図-2に示す。図-2下部には、各日の潮位を潮位表から読みとりプロットし、測定時刻を潮位図上に矢印で示してある。2月3日は温度計の不調により-10m以深の値が測得されていない。濁りの分布は、調査期間を通じてほぼ類似したパターンを示しており、表層濁りは-5~-10mまでの範囲で見られ、表層の水深-1~-2mで最大値となっている。表層濁りの最大値は1.5~2(1/m)であり、あまり大きな変化がない。

対象海域の濁りの分布は、濁りの供給源や広がり、鉛

直混合により影響を受けるが、図-1,2のデータを見る限り、調査期間中はほぼ一定・定常であると考えられる。

3.2 捕集筒による沈降速度測定

(1) 原理

現地海域にけん濁している粒子は、水の動きに動かされながらも徐々に沈降している。海域内の水中に、上部が開いた捕集用円筒を設置し、沈降粒子を捕集すれば、単位時間単位面積あたりの沈降水量（沈降フラックス）が求まる。捕集筒の捕集効率を100%とし粒子濃度と粒度分布が一定で変動がないとすれば、沈降フラックス $[M/L^2/T]$ を粒子濃度 $[M/L^3]$ で除すことにより平均的な沈降速度 $[L/T]$ を求めることができる。

(2) 予備実験—捕集効率の比較

現地に適用するにあたり、沈降物捕集筒の捕集効率をあらかじめ室内実験により検討してみる。

図-3に示すように、長さ22m、幅1m、深さ2mの水路を用い、水深1mまでけん濁水（淡水）を満たしポンプにて廻流させる。水路中央付近の水路床に捕集筒を支持板を用いて直立させ、一定時間後に回収する。捕集

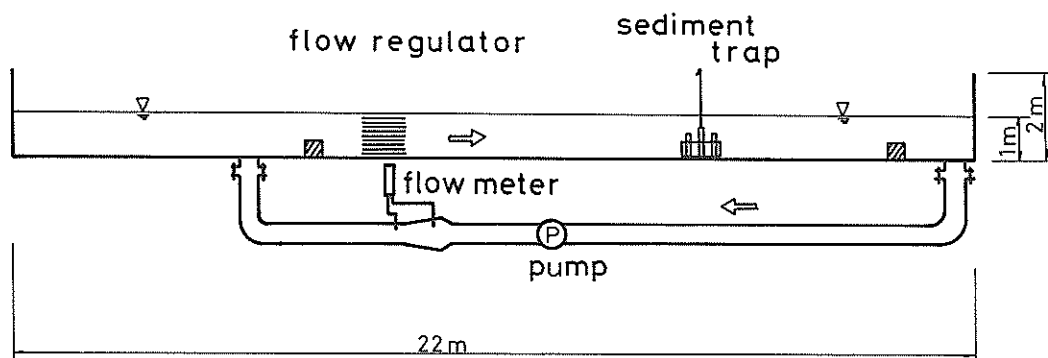


図-3 trapの捕集効率測定のための実験水路図

表-4 筒長/口径比の異なる捕集筒の捕集効率

No.	実験条件			捕集筒内捕集量			見かけの沈降フラックス			見かけの沈降速度			捕集量比 H : M : L
	平均流速	実験時間	けん濁濃度	H	M	L	H	M	L	H	M	L	
	cm/s	h	mg/l	mg	mg	mg	g/m ² /h	g/m ² /h	g/m ² /h	m/h	m/h	m/h	
1	0	17	72.4	337.	364.	248.	2.52	2.73	1.86	0.035	0.037	0.026	1 : 1.08 : 0.74
2	5	5	106.5	297.	355.	228.	2.22	2.66	1.71	0.021	0.025	0.016	1 : 1.20 : 0.77
3	10	5	79.9	159.	179.	91.	1.19	1.34	0.68	0.015	0.017	0.008	1 : 1.13 : 0.57
4	20	5	72.5	125.	121.	29.	0.94	0.91	0.22	0.013	0.013	0.003	1 : 0.97 : 0.23

筒長/口径比 : H=(5:1), M=(2.5:1), L=(1.25:1)

筒内のけん濁物質 (SS) 量, 水路内けん濁 (SS) 濃度, 捕集筒容積を測定し, 捕集筒内に沈降し捕集されたけん濁物質質量を算定する。さらに, 捕集けん濁物質より迴流水路内での沈降フラックスを算定し比較する。捕集筒としては, 円筒形のもので筒長の異なる3種を用いている。いずれも内径10 cmで, 筒長12.5 cm, 25 cm, 50 cmであり, それぞれL型, M型, H型とする。円筒形は, 上から下に徐々に筒径の減ずるロート形や, 逆に筒径の大きくなるツボ形に比べて形状が単純であり, 捕集効率が良い²⁰⁾とされている。また, 筒長/口径比が大きいほど捕集効率が良^{14, 20)}いとされている。

けん濁粒子としては, 東京湾湾奥羽田沖底泥(シルト)を, 間隙水塩分の洗浄による脱塩処理し用いている。けん濁水は水道水を用い, ほぼ80mg/l程度のSS濃度となるように投入粒子量を調整している。

ポンプによる迴流流量を水路内断面積(1m×1m)で除した値を平均流速とし, 平均流速0~20 cm/sの範囲で流速を変えた時の沈降フラックスと捕集量比の結果を表-4に示す。水路内の水平流速がはやくなるにつれ各捕集筒での沈降フラックス値が減っており, けん濁濃度で除した見かけ沈降速度も小さくなっている。筒長50 cmの捕集筒に対する他の長さの捕集筒の比捕集効率を水平平均流速に対しプロットすると図-4のようになる。図-4では, 捕集量の減少は, 水平流速が大きいほど激しく, 右下がりの曲線となっている。筒長の口径に対する比(筒長/口径比)が1.25のL型では, 2.5以上のM, H型の円筒に比して捕集量が著しく減っていることもわかる。M型円筒でも, 水平流速がかなり大きくなると, 水平流速の小さいときより比捕集効率が減少する傾向もつかえる。捕集効率減少の原因としてはいくつか考えられ, ①円筒開口部で発生する円筒内のうずによる円筒内粒子の吸い出し, ②円筒底部の捕集粒子蓄積部と円筒開口部との濃度差による開口部へ向かう拡散, ③捕集粒子蓄積部の濁水濃度上昇に伴う沈降粒子への浮力の増加(沈降速度の減少)などがその主たるものであろう。①の作用は水平流速および筒長に依存し, ②の作用は筒長に依存する。この予備実験では, 捕集濃度と水路内濃度との差があまり大きくなり, ①の作用による捕集効率の変化を測定していると思われる。この他に, 捕集時間が長くなると筒内捕集粒子の変質・分解や海水中の生物(カニ等)による攪拌などの要因も考えられる。

対象海域である西宮沖では, 冬期には一時的に10 cm/s以上の流速が発生する可能性があり, 最も筒長/口径比の大きな円筒を用いることにした。

(3) 方法

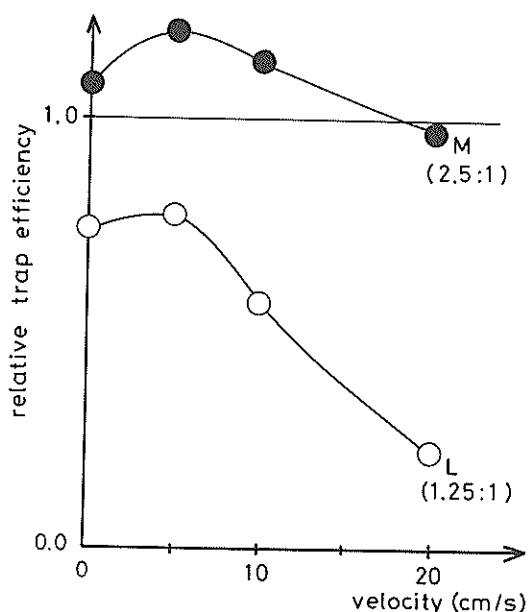


図-4 水平流速によるtrapの比捕集効率の変化図

① 設置および回収

西宮沖の対象海域の相互に約500 m離れた2地点(st.7, st.8)に捕集筒を設置した。設置日は昭和57年2月2日である。設置水深は, 底面上1 m, 2 m, 4 m, 6 m, 14 mの5層である。潮汐により1 m程度の水位の変動はあるが, 平均水深が15 mなので, 水深としては, -14 m, -13 m, -11 m, -9 m, -1 mとなる。最表層(水深-1 m)の捕集筒は, 設置期間の最も潮位の下がる時でも水面に出ないことを確認している。

各層に口径10 cm筒長50 cmの円筒型捕集筒を6本ずつ架台に並べた。したがって, 使用した捕集筒は, 2地点×5層×6本の計60本となる。

捕集筒架台は, 径12 mmのロープに, ロープクリップおよびゴムテープを用いて各深さに強固にとめてある。垂下ロープは, 土のう等を主体にしたアンカーにより底泥面にとめ, 水面下の径50 cmのポンテンブイにより浮力をつけ, 鉛直直立させてある。潮汐流や乱れの影響で架台が横にあおられ, 捕集筒が傾くことがあるが, ここでは, 1地点につき独立した2組の垂下ロープを用いている。つまり, 捕集水深5層のうち2層を1本のロープで, 他の3層をもう1本のロープで受け持ち, 各ロープ毎に十分な浮力をそれぞれ保証することにより, 横からの流れに対する抵抗をへらし傾きを小さくするようにしている。設置概念図を図-5に示している。

捕集筒の設置後ただちにバンドーン採水器により鉛直

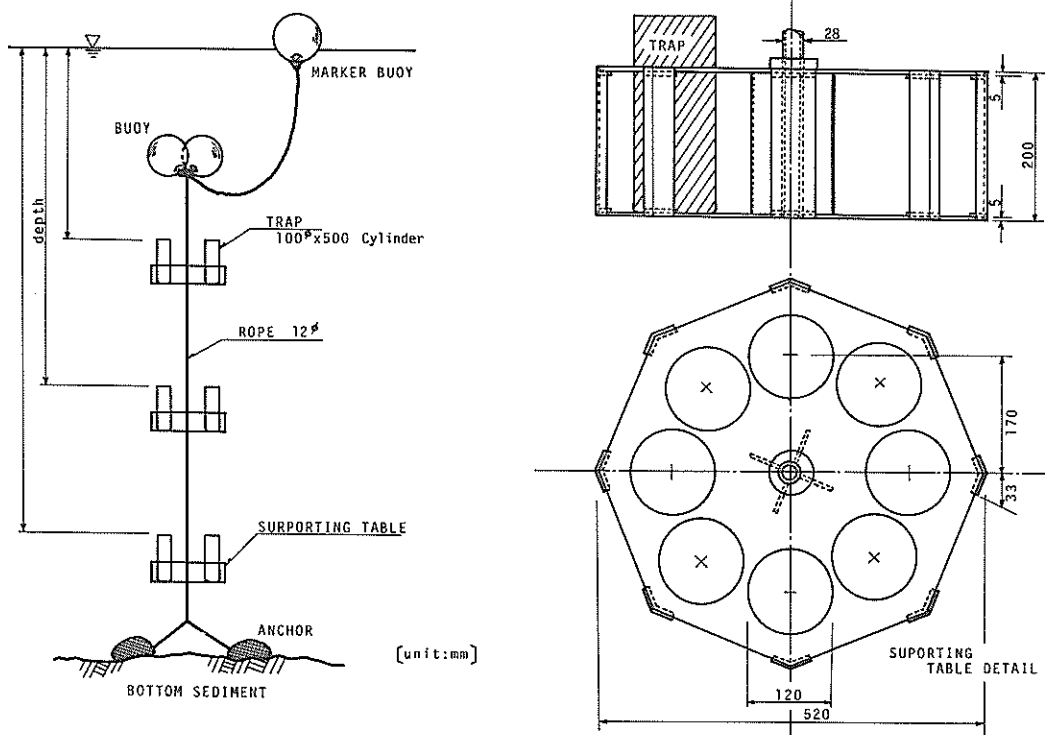


図-5 捕集筒設置概念図

各層での採水を行ない、塩分計、温度計、濁度計、溶存酸素計のセンサーを垂下し、水質の鉛直分布を測定している。採水水深は、必ずしも捕集筒垂下水深とは一致していない。

翌日、捕集筒を回収している。設置時間は、22時間である。回収は、ダイバーが捕集筒上部をフタで密栓し捕集筒内内容物が漏出しないようにした後、船上に引きあげている。回収サンプルは保冷状態で直ちに実験室へ搬入している。

また、設置時と同様に採水し、引き上げ時にも器機を用いて水質鉛直分布を測定している。

② 分析方法

捕集物につき以下の項目を分析している。液量、捕集物質濃度 (SS)、総リン (T-P) および可溶態のリン酸態リン (PO_4-P)、ケルダール分解後のアンモニア濃度 ($Kj-N$)、粒状態の炭素 (PC)、粒状態の窒素 (PN) である。PCとPNは乾燥後の粒子を元素分析計を用いて分析しており、他の項目は、JISK0102¹⁰⁾ 海洋観測指針¹¹⁾等に準じて化学分析している。また、各捕集水深ごとに粒度分布をコールターカウンターを用いて測定し

ている。

バンドーン採水器により採水した各深さの海水試料については、以下の項目を分析している。浮遊物質濃度 (SS)、総リン (T-P)、およびリン酸態リン (PO_4-P) である。

(4) 結果

各物質の沈降フラックスは、次式で算定している。

$$F = (R^p - C_b^0 \cdot V^p) / A / T \quad (8)$$

ここで R^p は捕集筒内の粒状物量、 C_b^0 は環境海水中の現存濃度、 V^p は捕集筒内液量、 A は捕集筒開口部面積、 T は海水中への捕集筒垂下時間である。ほとんどの物質で、捕集筒内の濃度 (R^p/V^p) は C_b^0 に比して1オーダー以上大きい。また、元素分析計で測定した PC 、 PN に対しては $C_b^0 = 0$ としている。 C_b^0 としては、設置時と回収時との2回の測定から求めた水質平均値を用いている。表-5に、粒状物 (SS) とともに粒状の炭素 (C)、窒素 (N)、リン (P) の沈降フラックス ($mg/m^2/d$) を示してある。また海水の平均水質 C_b^0 としてけん濁物質濃度 (SS)、T-P、 PO_4-P (いずれも mg/l) およ

表-5 各捕集筒への沈降フラックスおよび平均水質

st. depth	沈 降 フ ラ ッ ク ス					平 均 水 質						沈降速度		
	SS	PP*	PC	PN	PN*	SS	T-P	PO ₄ -P	O-P	Temp.	Sal.	w _{SS}	w _P	
	m	mg/m ² /d	mg/m ² /d	mg/m ² /d	mg/m ² /d	mg/m ² /d	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	°C	‰	m/d	m/d
7	0						4.1	0.127	0.120	0.007	6.6	26.6		
	1	5330.	12.2	367.	17.3	21.0							1.3	1.7
	3						3.8	0.054	0.054	0.	7.5	29.5		
	6						3.4	0.046	0.046	0.	8.0	31.4		
	9	12400.	12.5	668.	47.8	64.2	3.6	0.031	0.031	0.	8.3	31.9	3.5	—
	11	13000.	11.7	768.	59.0	58.0							3.6	—
	12						8.3	0.025	0.025	0.	8.7	32.5		
	13	16100.	7.8	768.	61.0	26.							2.0	—
	14	36400.	9.9	1642.	144.2	78.8	8.5	0.037	0.037	0.	8.7	32.5	4.3	—
8	0 ^m						—	—	—	—	6.8	25.3		
	1	8080.	4.5	653.	40.6	153.							2.0	—
	3						4.0	0.043	0.043	0.	7.5	30.3		
	6						3.3	0.051	0.051	0.	8.0	31.4		
	9	11700.	6.9	648.	45.8	40.9	4.6	0.045	0.045	0.	8.3	31.9	2.5	—
	11	13000.	9.3	737.	57.8	42.3							2.8	—
	12						4.0	0.028	0.028	0.	8.7	32.5		
	13	18900.	12.5	959.	65.0	69.4							4.7	—
	14	35100.	10.1	1300.	110.	98.9	11.5	0.043	0.043	0.	8.7	32.5	3.1	—

* Kjeldahl 分解後測定。他の C, N は CHN コーダーによる。

び水温(°C)・塩分(0/00)を示してある。

F を C₀ で除すと、平均沈降速度が算定できる。沈降粒子は沈降速度分布をもっているが、沈降フラックスが単一粒径の粒子によっているとした場合の沈降速度が求まるわけである。C₀ としては、SS と PP (T-P から可溶性 P である PO₄-P を差し引いた値を用いている) が測られており、算定した SS と PP の平均沈降速度が表-5 に記されている。これによると、表層で 1~2 m/s、底層で 2~5 m/s の平均沈降速度となっている。水深につれての沈降速度の増大は、底層にゆくにつれ粒子径が大きくなることによる。st.7 での水深-1 m, -9 m, -14 m の 3 層の捕集物の粒子数分布測定例を図-6 に示す。水深が深くなるにつれて径が大きいかつ粒径がそろってくる傾向にあることがわかる。

けん濁物の沈降フラックスの鉛直分布を図示すると、図-7 のようになる。水深 10 m 付近までは沈降フラックスは少しずつふえているが、底泥面に近づくと急に大きなフラックスとなっており、底泥面近くでは上層からの沈降量以上の沈降量があることを示している。海域のけん濁物質濃度の鉛直分布などから考えて、底泥表面でけん濁物が沈降一舞い上りをくり返しているものと思われる。

そこで、けん濁物質の性状、分布について再考し、捕

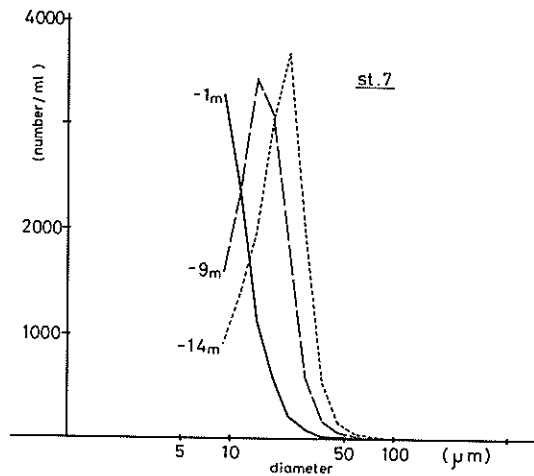


図-6 捕集粒子の粒径分布図(水深-1 m, -9 m, -14 m で捕集されたもの)

集された粒子の起源ごとに分けて考えてみることにする。図-1, 2 でけん濁粒子、温度、塩分の鉛直分布が、場所と時間によりどう変化しているのか見てきた。対象海域では表層付近と底層とに高いけん濁濃度が見られる。表層付近のけん濁物質は水深-5~-7 m まで高濃度で存

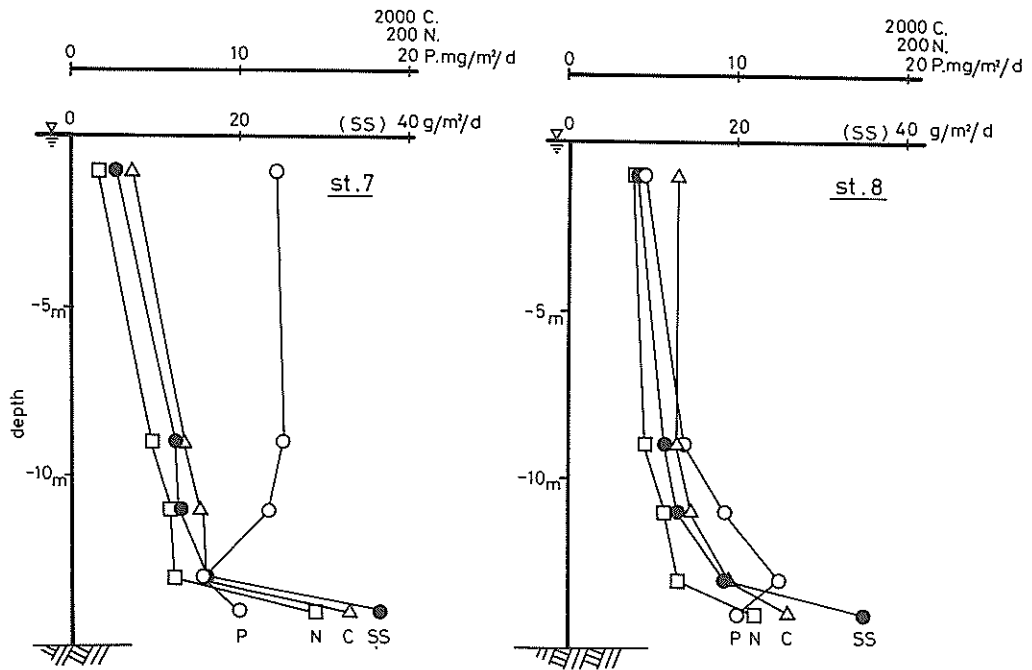


図-7 各物質の沈降フラックス鉛直分布図

表-6 捕集粒子の組成比および表層浮遊粒子の含有比

st. depth (m)	乾重量あたりの組成				沈降物に占める表層浮遊物の割合				組成比			補正沈降フラックス**	
	C/SS mg/g	N/SS mg/g	N*/SS mg/g	P/SS mg/g	r_c	r_N	r_N^*	r_P	N/C	r_N/r_c	r_P/r_c	PC mg/m²/d	SS mg/m²/d
7 Surface	226.	38.5	—	—					0.17				
1 m	68.9	3.25	3.94	2.29	0.27	0.05	0.06	0.7	0.05	0.2	2.3	99	1400
9	53.9	3.85	5.18	1.01	0.20	0.07	0.10	0.3	0.07	0.4	1.5	130	2500
11	59.1	4.54	4.46	0.90	0.23	0.09	0.08	0.2	0.08	0.4	0.9	180	3000
13	47.7	3.79	1.61	0.48	0.17	0.07	0.00	0.1	0.08	0.4	0.6	130	2700
14	45.1	3.96	2.16	0.27	0.16	0.07	0.02	0.	0.09	0.4	—	260	5800
Bottom	(10.)*	(1.2)*	1.54	0.307					(0.12)				
8 Surface	226.	38.5	—	—					0.17				
1 m	80.8	5.02	18.9	0.56	0.33	0.10	0.47	0.1	0.06	0.3	0.3	220	2700
9	55.4	3.91	3.50	0.59	0.21	0.07	0.05	0.1	0.07	0.3	0.5	140	2500
11	56.7	4.94	3.25	0.72	0.22	0.10	0.05	0.2	0.09	0.5	0.9	160	2900
13	50.7	3.44	3.67	0.66	0.19	0.06	0.06	0.1	0.07	0.3	0.5	180	3600
14	37.0	3.13	2.82	0.29	0.12	0.05	0.03	0.	0.08	0.4	—	160	4200
Bottom	(10.)*	(1.2)*	1.54	0.307					(0.12)				
<i>Skeletonema costatum</i>	203.	35.	—	3.					0.17				

* () は S55.9 調査値

** 補正沈降フラックスは、表-5 の沈降フラックスに各水深の r_c を乗じたもの。

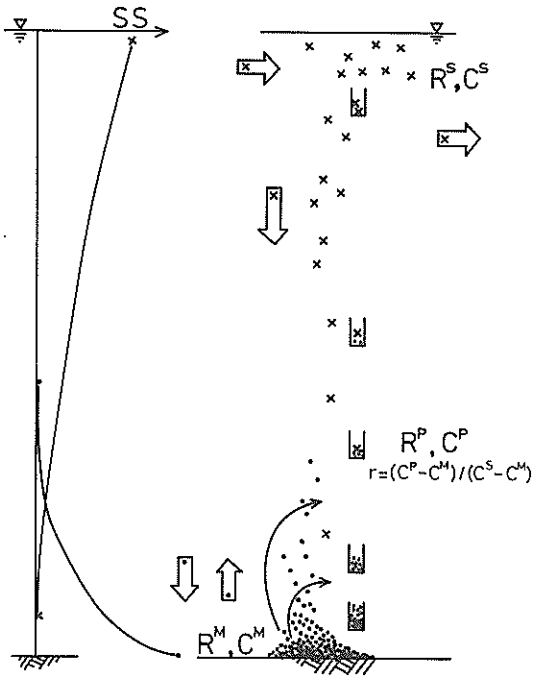


図-8 表層浮遊けん濁物質と舞い上り底泥とを区別して考えたけん濁物質濃度分布および捕集物分布概念図(×表層浮遊けん濁物質、●舞い上り浮泥)

在し、それより深くなるにつれ徐々に減少しており、淀川河口付近での表層～5mまでのけん濁物が沖合に希釈しながら鉛直的にも混合している結果と思われる。一方、底層付近のけん濁物質は、底面上1～2m程度で非常に高濃度で存在し、それより浅くなるにつれ急激に濃度を減少させている。

表層のけん濁物質と底層のけん濁物質の性状のちがいについて調べてみる。各捕集器内の、粒子の乾重量1gあたりの含有組成を比較すると表-6のようになる。表-6には、表層浮遊けん濁物質および底泥表層の組成比を同時にかかげてある。また、当研究室恒温室内で培養した当該海域卓越藻種 *Skeletonema costatum* の組成比をも示している。表層浮遊けん濁物質の組成は、*Skeletonema costatum* の組成によく似ており、プランクトンを主体とした粒状物質であると思われる。各捕集筒内のけん濁物質の組成は、表層浮遊けん濁物質組成と底泥表層組成との中間的な値を示しており、両者が混じり合っているものと判断される。Nの組成比は各捕集筒捕集物とも4mg/gとほぼ一定であるが、C、Pでは組成比に鉛直分布が見られ、表層ほど表層浮遊物の値に近く

なる。

そこで、けん濁物質の海域内存在様態として図-8のようなモデルが考えられる。ここでは、表層浮遊物質の流入(供給)・流出および沈降による×印の粒子の分布、および底泥表層浮泥の舞い上り・沈降による●印の粒子の分布を考えている。SS濃度分布は、両者の鉛直分布を重ね合わせたものとして形成されている。今、表層浮遊物の組成比を C^S 、浮泥けん濁物の組成比を C^M とし、ある水深での捕集物の組成を C^P 、捕集量を R^P とすれば、この捕集物質のうち表層浮遊物の割合 r は、捕集の時間スケール内で C^S 、 C^M が変化しないとすれば次式で与えられる。

$$r = \frac{C^P - C^M}{C^S - C^M} \quad (9)$$

その時、表層浮遊物質の捕集量は、 $r \cdot R^P$ となる。

r は、各組成成分ごとに求められるが、表層浮遊物の捕集量や沈降フラックスを求めるためには、沈降の過程で分解・再溶出してしまわない(C^S の変化の小さい)成分の r を選ぶ必要がある。底泥内の分解においては、一般に分解速度は $P > N > C$ の順であるといわれており、特にリン(P)の分解・再溶出の速度のはやさが知られている。本調査時の水温は8°C前後であり、いずれの成分についても分解速度は小さいと思われるが、ここでは炭素(C)についての割合 r_c を用いている。

各組成ごとの r および、 r_c を用いて算定した表層浮遊物のPC、SS各沈降フラックスなどを表-6に示している。各 r の算定にあたって、表層浮遊物の濃度が測定されていないN、Pは*Skeletonema*の値を用いている。 r により修正した沈降フラックス値にも鉛直分布が残っており、最底層でやや大きい値となっはいるが、表層からのPCの沈降フラックスとして140～160mg/m²/d、SSの沈降フラックスとしてほぼ2500～3000mg/m²/d程度の値となる。

表層の水深-1m～-9mでのSS沈降フラックスは1400～2700mg/m²/dで、平均すると2300mg/m²/dなり、この値を表-5に示す表層の水深0～-3mのSS濃度平均値4.0mg/lで除すると表層浮遊物質の沈降速度として0.6m/dを得る。一方、底上1m付近での底泥浮泥の沈降フラックスは、見かけの値35000～36000mg/m²/dから表層浮遊物の値2500～3000mg/m²/dを差し引いた値となり、ほぼ33000mg/m²/dとなる。これを表-5に示す水深-14mでのSS濃度平均10mg/lで除せば、浮泥の沈降速度として3.3m/dを得る。

表層浮遊けん濁物質と底泥表面の浮泥とを区別して、それぞれの沈降速度を算定してみたが、ここで用いた仮定をまとめ直すと次のようになる。

①水中のけん濁物質は、表層浮遊けん濁物質および舞い上った浮泥の二者で構成されており、これ以外のものはない。

②表層浮遊けん濁物質は、河川からの流出もしくはプランクトンの自己増殖など、何らかの作用で表層に供給されており、また水平流の移流により流出している。供給一流出量は定常であり、表層でのけん濁物質濃度は一定であり、その性状も一定である。

③底泥の極表層にある浮泥は、流れ、波など何らかの作用で舞い上りと沈降をくり返している。舞い上り一沈降量は定常であり、浮泥けん濁濃度および性状は一定である。

④表層浮遊けん濁物質の組成・性状は、表層からプランクトンネットにより採取したけん濁物と同一であり、この組成・性状は、特に炭素含有比に限り、沈降中にも変化、変質しない。

⑤浮泥舞い上りけん濁物質の組成・性状は、底泥表層をすくい取り採取した浮泥サンプルと同一であり、舞い上りや沈降をくり返した後も組成と性状が変化しない。

この⑤の仮定は、次のような定常性を仮定していることに他ならない。浮泥は、表層水からの沈下けん濁物や横からの流入けん濁物により形成されるが、舞い上りや沈降をくり返しながらゆっくりと分解し、底泥に近い組成となってゆく。この例では、表層水から底泥表面への沈降フラックスは、 $2500 \sim 3000 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ であり、毎日この量の粒が底泥表面に供給されている。一方、沈下供給された粒状物は分解を受け、一部は可溶化して再び海水中へ溶解し、一部は変質しやがて安定な化合物を作りながら再浮遊しない底泥となる。そこで、けん濁物質中に含まれる各粒状物の沈積後の経過時間（年令）の分布が一定であり、各年令ごとに組成比が一定であれば、けん濁物質全体の見かけの組成・性状は、異なる組成物の供給を受けながらも常に一定と考えても良いことになる。

3.3 けん濁濃度鉛直分布による沈降速度測定

(1) 原理

底泥表面付近では沈下粒子が集積し、高濃度となっている。直上の少し浅い海水中のけん濁濃度との濃度差により、上向きの粒子の拡散が生じている。水深 z でのけん濁濃度 $C(z, t)$ の時間変化は Kz を鉛直拡散係数、 w を沈降速度として次のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \partial \left(Kz \frac{\partial C}{\partial z} \right) / \partial z - w \frac{\partial C}{\partial z} \quad (10)$$

けん濁濃度が時間によらず定常であれば、上向きの拡散と下向きの沈降とがつり合っていることになる。

$$Kz \frac{\partial C}{\partial z} = w \cdot C \quad (11)$$

これを解くと、ある水深 a から底泥表面までのけん濁物質濃度の鉛直分布は、水深 z の関数として次のように表わせることになる（Rouse 分布）。

$$\ln(C(z)/C_a) = (w/Kz) \cdot (z-a) \quad (12)$$

ここで C_a は水深 a でのけん濁濃度を示す。

すなわち、濃度の対数を深さに対しプロットすると、グラフの傾きから w/Kz がわかり、 Kz を与えれば w が求まる。

(2) 方法

底泥表面付近の微細な鉛直分布は、採水による方法では測定が困難である。そこで、けん濁物質濃度と良い相関がある濁度を、濁度計を用いて垂下水深を少しずつ変えながら測定している。濁度計は、第三港湾建設局が開発した二波長濁度計⁸⁾を用い、波長 $650 \mu\text{m}$ 光路長 10 cm での光束消散係数よりけん濁物質濃度（SS濃度）を算定する方法をとっている。当該海域で、濁度計による光束消散係数値と、SS濃度とを同時に測定した15ケのデータより回帰式を求めたところ次式を得た。

$$SS = \frac{10}{2.8} (C_{650} - 0.21) \quad (13)$$

ここで C_{650} は波長 $650 \mu\text{m}$ での光束消散係数 ($1/\text{m}$)、 SS は、 SS 濃度 (mg/l) を示す。右辺カッコ内の 0.21 は、けん濁物質が全くない時の海水のみが示す光束消散係数である。光束消散係数は、光路長を l (m)、空気中での透過に対する光の透過率を A_{650} とすれば次式で与えられる。

$$C_{650} = -\ln(A_{650})/l \quad (14)$$

(3) 結果

沈降物捕集筒を設置した st.8 で、底泥面から高さ 5 m まで濁度計により光束消散係数を測定した結果を表-7に示す。表-7には、換算した SS 濃度および底面上 5 m での SS 濃度 (SS_5) ($3.5 \text{ mg}/\text{l}$) との比の対数値をもかかげてある。これをプロットすると図-9のようになり、よく直線にのっていることがわかる。 5 m 程度ま

表-7 濁度計による濁りの鉛直分布 (st. 8, 2月2日)

n	底面からの距離 m	光束消散係数 C_{650} 1/m	換算SS mg/l	$\ln(SS/SS_5)$
1	0.1	6.48 ~ 8.48	22 ~ 30	1.84 ~ 2.1
2	0.2	3.98 ~	13.5 ~	1.35
3	0.3	3.47	11.6	1.198
4	0.5	3.19	10.6	1.108
5	1.0	2.85	9.4	0.988
6	1.5	2.62	8.6	0.899
7	2.0	2.32	7.5	0.762
8	2.5	2.11	6.8	0.664
9	3.0	1.85	5.9	0.522
10	4.0	1.26	3.8	0.082
11	5.0	1.20	3.5	0

では、浮泥の上向拡散と下向沈降とでけん濁濃度がほぼ決まってくる影響域内と思われる。 w/K_z は $1.26/5 = 0.25$ (1/m) となり、前節での浮泥の w 値 3.3m/d を与えると、 K_z は $13.2\text{m}^2/\text{d}$ ($15\text{cm}^2/\text{s}$) となる。冬期ではあるが、静穏な時期の湾奥部での値としては妥当なものである。 K_z が、何らかの方法で求められ²¹⁾ば逆に w の推定も可能である。また、濃度の鉛直分布と w の値から底泥からの舞上り量の推定²²⁾も可能である。

4. 沈降速度測定室内実験

現地調査により粒子の現場海中での沈降速度を知ることができた。しかし、その都度現地調査を実施することは経費、人手等の面からむずかしく、また現地調査からは総括的な沈降速度値はわかるが粒子の速度分布については知ることがむずかしい。従って、室内実験によって沈降速度を測定することが多い。室内実験は、簡便であり再現性が良く、速度分布についての情報も与えてくれる。

室内実験は、各種の方法がありまた沈降条件の設定のしかたも種々に変えられる。だから、知りたい現象をよく再現できるように実験実施条件を選ばなければならない。ここでは現地調査値との対比の中で、どのような実施上の条件設定に留意したらよいかを検討し、測定値の意味を考えてみた。

比較した室内実験法は、粒径分布を直接電氣的に測定し沈降速度を求める方法と、沈降筒を用いる方法の二つである。また供試試料としては現地調査で採取した底泥表面の浮泥を共通して用いている。沈降実験に際しては、あらかじめ $74\mu\text{m}$ ふるいにて水ふるいをし、 $74\mu\text{m}$ 目通過試料のみを使用している。

4.1 粒径と比重とから求める方法

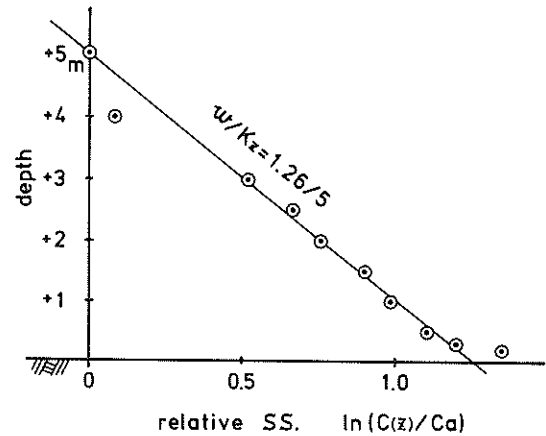


図-9 比SS濃度の鉛直分布

(1) 原理

単粒子の沈降速度は、式(5)に示されるストークス式に従う。粒子の粒径と比重とがわかれば、沈降速度が算定できる。

微細粒子の粒径は、実物を顕微鏡等で拡大し物差しで直接測る方法の他、電氣的に測定する方法がある。電氣的な測定方法としては、コールターカウンター[®]が一般によく用いられている。この装置にはアパーチャーとよばれるガラス製の筒がついており、ガラス壁面の一ヶ所に細孔があげられている。細孔の大きさはアパーチャーを交換することにより変えることができる。アパーチャーを供試海水に浸し、細孔から供試海水を定速で吸い上げる。細孔を非電解粒子が通過すると、従来存在した海水が排除され細孔部体積が減少し、その結果細孔の電氣的抵抗値が一時的に増大する。そこで、粒子通過に伴う抵抗値増加のパルス数とパルス高さから粒子数と粒径とが測定されるというものである。海水の電解性を利用すれば、直接海中での粒子の粒度分布が測定できる。沿岸および海洋でのけん濁粒子の挙動²³⁾やプランクトンの増殖などの解析²⁴⁾に用いられてきている。

比重の測定は、比重ビン法により粒子内含有海水の塩分を洗浄して、粒子の真比重を求めている。

(2) 方法

予め $0.45\mu\text{m}$ 孔径のろ紙にてろ過した清澄海水を用いて、浮泥試料を $SS\ 10\text{mg/l}$ 程度に希釈する。超音波破壊器を用いて粒子を分散させた後、 $100\mu\text{m}$ および $140\mu\text{m}$ 細孔径のアパーチャーを用い、 $2\sim 64\mu\text{m}$ 径範囲の粒度分布をコールターカウンターで調べた。同時に希釈けん濁海水の SS 濃度を測定している。 $74\mu\text{m}$ 以上の径の粒

表-8 コールターカウンターによる沈降速度分布測定結果

粒径分画	代表粒径	代表沈降速度	粒子数分率測定値		粒子体積分率測定値		粒子体積加積率
			100 μm	140 μm	100 μm	140 μm	
	μm	μm	m/s				
* - 2.00							0.22
2.00 - 2.52	2.26	0.4×10^{-5}	0.4963		0.1062		0.30
2.52 - 3.17	2.85	0.6	0.2691		0.1151		0.39
3.17 - 4.00	3.59	1.0	0.1236	0.1110	0.1058	0.0950	0.46
4.00 - 5.04	4.52	1.6	0.0601	0.0600	0.1028	0.1027	0.54
5.04 - 6.35	5.69	2.5	0.0309	0.0343	0.1058	0.1174	0.63
6.35 - 8.00	7.17	4.0			0.0187		0.73
8.00 - 10.08	9.04	6.4			0.0068		0.81
10.08 - 12.7	11.4	10.1			0.0025		0.85
12.7 - 16.0	14.8	16.1			0.0009		0.89
16.0 - 20.2	18.1	25.5			0.0003		0.92
20.2 - 25.4	22.8	40.4			0.0001		0.95
25.4 - 32.0	28.7	64.0			0.		0.97
32.0 - 40.3	36.2	102.0			0.		0.98
40.3 - 50.8	45.6	162.0			0.		0.98
50.8 - 64.0	57.6	256.0			0.		0.98
64.0 - **	74.0	426.0			0.		1.00
(2.00 - 64.0)			1.0000		1.0000		

* 2.00 μm以下はSS分析値より22%とした。

** 64.0 μm以上はふるいわけ試験より2%とした。

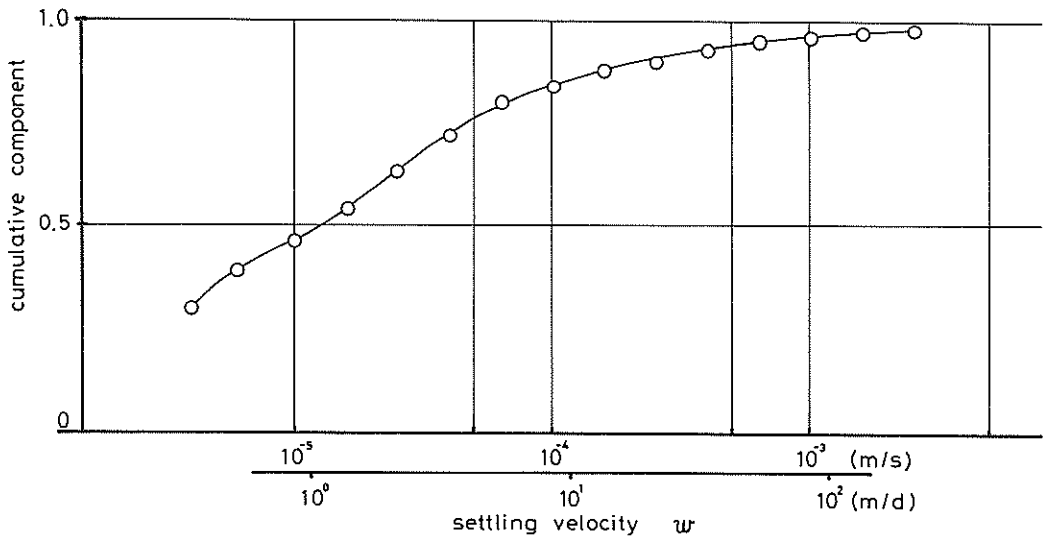


図-10 コールターカウンターによる沈降速度加積曲線

子の割合は、ふるいわけ試験によると重量比で2%である。2 μm以下径の粒子の割合は直接測定できないので、0.45 μm孔径のメンブランろ紙を用いて捕捉した粒子重

量（SS濃度）を別に測得した粒子の比重で除して粒子体積を求め、コールターカウンターにより測得した2 μm以上径の粒子の総体積を差し引き、残余を2 μm以下径

の粒子とし、体積組成比を求めている。この割合は、体積比で22%である。比重は、試料を塩ぬき後比重ビンで測定している。比重は粒径によらず一定とし、ストークス式を用いて沈降速度分布を求めている。溶媒としての海水は32%の塩分・20°C水温を想定し、比重1.022としている。

(3) 結果

各粒径分画ごとの粒子数の割合、粒子体積の割合を表-8に示す。表-8では、100 μm アパーチャーでの値140 μm アパーチャーでの値をそれぞれ示してあるが、粒子体積加積率の算定で、2 μm 以下径、64 μm 以上径の補正とともに両アパーチャーでの値を補正し、つなげてある。粒子加積率を代表沈降速度に対しプロットすると、図-10のような沈降速度加積曲線となる。沈降速度の中央値は $1\text{m}/d$ となる。

(4) 測定方法としての問題点

コーンターカウンターでの粒度分布の測定では、測定する粒径範囲によってアパーチャーの細孔径を選択することになる。測定粒径範囲はアパーチャー径の2~50%とされているが、2%近く、50%近くでの測得値は精度的にやや問題があるようである。ここでは、100, 140 μm の2本のアパーチャーを用いており2~70 μm の範囲の粒度分布が測定できる。表-8からも2 μm 以下径の粒子がかなりの割合で存在すると予想されるが、微小粒子測定のために小さな孔径のアパーチャーを選ぶと、共存する大きな粒子によりアパーチャー孔の目詰まりが生じ、測定値が不安定になりやすい。粒径が広い範囲に分布しているけん濁液に対しては、微小径部分の粒度測定には困難が伴う。また、2 μm 以下径の粒子の割合を知るために、ここで用いたようなSS濃度と粒子比重とから総粒子体積を推算することは、SS濃度分析(コーンターカウンターには10 mg/l 程度の非常に希薄なけん濁液が用いられるため希薄濃度の測定となる)の誤差や粒子比重が粒径によらず一定としたことによる誤差などの要因が多く、ばらつきやすい。

また、ストークス式での算定方法にも、粒子径によらず比重一定とすることなどの仮定がある。表-8に示すように、比重2.53の粒子は、粒径3 μm で $0.7 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (0.6 m/d)、5 μm で $2 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (1.7 m/d)、10 μm で $8 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (7 m/d)の沈降速度を持つことになる。

4.2 沈降筒による方法

沈降筒を用いて沈降速度を測定する方法は、各種ある。初期条件としては筒内に均一にけん濁粒子を分散させておく分散沈降法、水表面からけん濁粒子を一時に投入する方法がある。また筒内のけん濁粒子の変化をはかるに、

ある深さのけん濁濃度の変化を経時的に測定する方法(増分型)、ある深さへの沈降量の累積を経時的に測定する方法(累積型)がある。いずれの方法でも、経時変化の測定から沈降速度分布が求まる。

ここでは、初期濃度均一の分散沈降法による測定を考える。

(1) 原理

沈降筒内を均一に攪拌し、初期のけん濁濃度を C_0 としよう。沈降筒を静置後、時間 t だけ経過すると、沈降速度 w の粒子は、筒の底に達しない限り距離 wt だけ沈降している。従って、時間 t だけ経過後には、沈降速度が L/t より大きい粒子は、水表面から水深 L までの区間 $0 \sim L$ には浮遊していない。また、沈降速度が L/t より小さい粒子は、水深 L 付近の粒子は既に沈降してしまうから、初期に $0 \sim L - wt$ の区間に浮遊していた粒子のみが水深 L までの区間に存在することになる。

従って、 t 時間後に、 $0 \sim L$ 区間に存在する沈降速度 w の粒子濃度または粒子量の初期濃度または量に対する割合 $\phi(w)$ は次のようになる。

$$w \geq L/t \quad \phi(w) = 0 \quad (15)$$

$$w < L/t \quad \phi(w) = (L - wt)/L \quad (16)$$

また、 t 時間後に水深 L にある受け皿上に沈降していた沈降速度 w の粒子量の、受け皿面上の $0 \sim L$ 区間に存在していた初期けん濁量に対する割合 $\phi'(w)$ は次のようになる。

$$w \geq L/t \quad \phi'(w) = 1 \quad (17)$$

$$w < L/t \quad \phi'(w) = wt/L \quad (18)$$

けん濁粒子試料について、沈降速度が $w \sim w + dw$ の区間にある質量分率(重量で表わした割合)を $f(w)dw$ とする。沈降速度分布図は、 w に対し $f(w)$ をプロットすることにより求まる。加積曲線は、 w に対し $0 \sim w$ 区間の $f(w)$ の積分をプロットすればえがける。

① 増分型の測定法

深さ L での時刻 t の濃度 $C(L, t)$ の時間変化を測定することにより次のように解析される。

時刻 t においては、 L/t より大きな沈降速度を有する粒子は存在しなくなり、 L/t より小さな沈降速度を有する粒子は、初期時($t = 0$)と同じ濃度で存在している。従って、 $C(L, t)$ は、 w が $0 \sim L/t$ 区間の粒子についてののみ加え合わせたものとなり、次式を得る。

$$C(L, t)/C_0 = \int_0^{L/t} f(w) dw \quad (19)$$

L/t に対し、 C/C_0 を経時的にプロットしてやれば式 (19) の右辺に示される沈降速度加積図が書ける。

② 累積型の測定法

深さ $0 \sim L$ 区間での平均濃度 $C(L, t)$ の経時変化、または、深さ L に置かれた受け皿上の沈降物量 M の経時変化を測定することにより次のように解析される。

各沈降速度ごとに $0 \sim L$ 区間に存在する粒子の割合、もしくは距離 L を沈降し終えた粒子の割合は、式 (15)、(16) または式 (17)、(18) のように与えられる。この割合 ϕ もしくは ϕ' に各沈降速度粒子の質量分率 $f(w)$ を乗じてその総和を求めれば、 $0 \sim L$ 区間に存在している量もしくは距離 L を沈降し終えた量の当初量に対する比が求められる。 $0 \sim L$ 区間にけん濁している粒子の比濃度 C/C_0 は、次式^{25, 26)} のとおり。

$$C/C_0 = \int_0^{L/t} (L-wt)/L \cdot f(w) dw \quad (20)$$

$$= \int_0^{L/t} f(w) dw - \frac{t}{L} \int_0^{L/t} w \cdot f(w) dw \quad (21)$$

また、深さ L 上の受け皿に沈降してしまっただけけん濁粒子量の最終的に沈降・落下する粒子総量に対する比質量 M/M_{∞} は、次式で与えられる。

$$M/M_{\infty} = \int_{L/t}^{\infty} 1 \cdot f(w) dw + \int_0^{L/t} wt/L \cdot f(w) dw \quad (22)$$

$$= \int_{L/t}^{\infty} f(w) dw + \frac{t}{L} \int_0^{L/t} w \cdot f(w) dw \quad (23)$$

式 (21)、および式 (23) において右辺第二項 $\int_0^{L/t} w \cdot f(w) dw$ を消去する必要がある。両式とも、両辺を t で微分すれば、 $\int_0^{L/t} w \cdot f(w) dw$ が $d(C/C_0)/dt$ の関数で表わせる。例えば、式 (21) について計算してみる。

$$\frac{d(C/C_0)}{dt} = -\frac{L}{t^2} f\left(\frac{L}{t}\right) - \frac{1}{L} \int_0^{L/t} w \cdot f(w) dw$$

$$+ \frac{t}{L} \cdot \frac{L}{t^2} \cdot \frac{L}{t} f\left(\frac{L}{t}\right)$$

$$= -\frac{1}{L} \int_0^{L/t} w \cdot f(w) dw \quad (24)$$

これを式 (21) に代入すれば、

$$C/C_0 - \frac{d(C/C_0)}{d(\ln t)} = \int_0^{L/t} f(w) dw \quad (25)$$

となり、左辺を求めれば、 $f(w)$ の加積曲線が描けるこ

とになる。

式 (23) は、同様に次式のように変形される。

$$M/M_{\infty} - \frac{d(M/M_{\infty})}{d(\ln t)} = 1 - \int_0^{L/t} f(w) dw \quad (26)$$

(2) 方法

増分型のものには、水深 L でのけん濁濃度を、採水により測定する方法と、採水によらず光学的手段等で測定する方法とがある。採水による方法では、沈降筒内の水量に比して採水量を極力小さくし以後の沈降挙動に影響を与えないようにしなければならない。Andreasen ピベットは、このような採水を効率良く行うために考案されたものである。また、可視光、レーザー光等の光学的手段でけん濁濃度を測定する光透過法では、透過率測定用のキュベットを沈降筒として利用し、遠心分離器と組み合わせて沈降加速度をあげ沈降時間を短縮する装置なども考案されている。

累積型のものには、水表面から水深 L までの水を取り出し、この取り出した水の中の平均けん濁濃度を測定する吸い上げ法²⁵⁾と、沈降筒下部の水深 L 面に受け皿を設置し、受皿上に沈降堆積した粒子重量を測定する天秤法とがある。吸い上げ法では、サイホンにより水を取り出し、SSを測定することになる。天秤法では、受皿上の粒子重量を天秤やばね秤で秤量することになる。

沈降筒を用いる方法のうち増分型の方法では、ピベット採水による方法も光透過による方法も、1000mg/l 程度の高濃度でなければ測定できない。また累積型では、沈降筒が小さくなければ 100mg/l 程度までは十分に測定可能である。一方、大阪湾湾奥部での SS 濃度は、表層で常時 5mg/l 程度であり、プランクトン発生時の表層や、底層で 10mg/l 程度である。実験時のけん濁濃度をなるべく現地の値に近づけるためには、大型沈降筒を用いた累積型の方法が都合が良い。ここでは、累積型の吸い上げ法を用いて沈降速度を測定した。

用いた沈降筒は、ガラス製 2 l 生地シリンダー (水深 40 cm, 口径 8 cm) およびアクリル製 200 l 沈降筒 (水深 300 cm, 口径 30 cm) である。L として全水深の 7 割をとり、表層からこの水深 L までの 7 割上層水をサイフォンにて採後、よく混合し平均 SS 濃度を測定している。同時に下層 3 割に残された水の SS 濃度も測定し、当初濃度との比較を行ない、筒壁付着等によるけん濁物のロス量を評価している。溶媒としては、清澄な人工海水⁴⁾を用い塩分濃度 32‰ に調整してある。当初けん濁物質濃度は、約 90mg/l とし、2 l シリンダーでは 30mg/l としたケースについても実施している。

表-9 沈降筒による実験結果

2 l 沈降筒実験						
経過時間 t	当初濃度 C ₀	7割上層濃度 C	C/C ₀	採水水深 L	L/t	水温
	mg/l	mg/l		cm	m/s	°C
7分	86.0	82.3	0.957	28.	6.7 × 10 ⁻⁴	19.0
16分		73.8	0.857	28.	2.9 × 10 ⁻⁴	
30分		70.2	0.816	28.	1.6 × 10 ⁻⁴	
65分		57.3	0.667	28.	7.2 × 10 ⁻⁵	
120分		38.0	0.442	28.	3.9 × 10 ⁻⁵	
242分		23.5	0.273	28.	1.9 × 10 ⁻⁵	

200 l 沈降筒実験						
経過時間 t	当初濃度 C ₀	7割上層濃度 C	C/C ₀	採水水深 L	L/t	水温
	mg/l	mg/l		cm	m/s	°C
69分	88.0	79.8	0.907	202.	4.9 × 10 ⁻⁴	19.0
160分	83.0	40.7	0.490	202.	2.1 × 10 ⁻⁴	19.3
280分	83.2	36.9	0.444	202.	1.2 × 10 ⁻⁴	20.5
553分	87.7	16.6	0.189	202.	6.1 × 10 ⁻⁵	21.0
725分	88.8	9.5	0.107	202.	4.6 × 10 ⁻⁵	21.0
2160分	90.2	5.4	0.060	202.	1.6 × 10 ⁻⁵	21.5

2 l 沈降筒実験						
経過時間 t	当初濃度 C ₀	7割上層濃度 C	C/C ₀	採水水深 L	L/t	水温
	mg/l	mg/l		cm	m/s	°C
15分	28.7	26.6	0.928	28.	3.1 × 10 ⁻⁴	19.0
30分		24.4	0.852	28.	1.6 × 10 ⁻⁴	
75分		19.5	0.680	28.	6.2 × 10 ⁻⁴	
120分		18.4	0.642	28.	3.9 × 10 ⁻⁵	
240分		15.5	0.542	28.	1.9 × 10 ⁻⁵	
360分		11.5	0.402	28.	1.3 × 10 ⁻⁵	

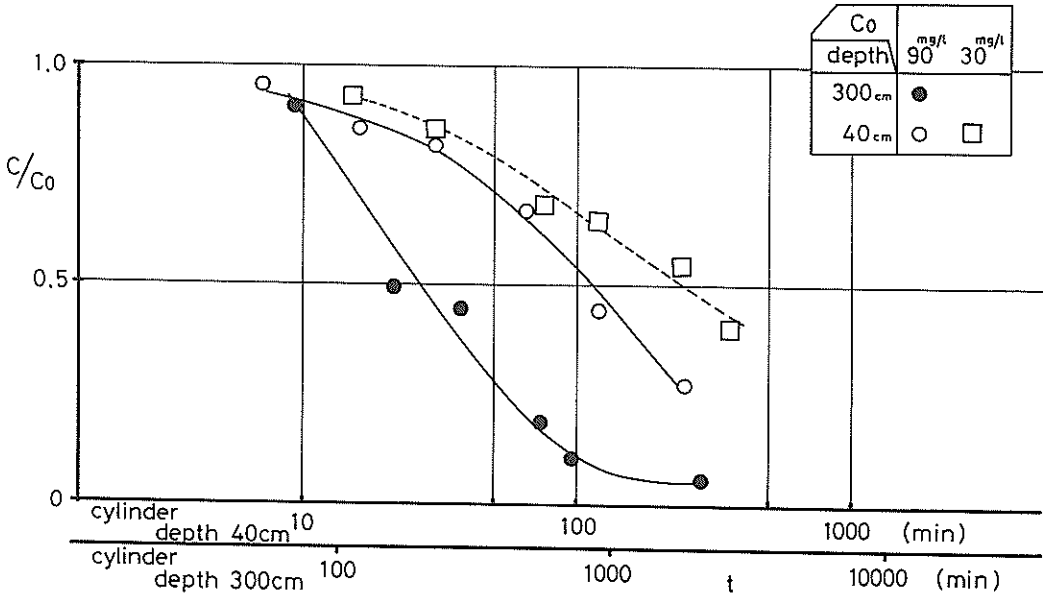


図-11 沈降による筒内濃度の減少図(経過時間 t は沈降筒の高さの比でずらしてある)

(3) 測定結果

静置後の経過時間、サイフォン採水深さ、当初濃度および上層水平均濃度などの測定結果を表-9に示す。SSは同一試水につき3~5検体測定しその平均値を表示してある。海水比重1.022、けん濁粒子比重2.533である。

経過時間に対し、上層水濃度の当初濃度に対する比(C/C_0)をプロットすると図-11のようになり、時間とともに沈降がすすみ上層水が清澄化していることが示される。74 μ m径以上の粒子の重量比2%を考慮し、式(25)に従って、沈降速度の加積曲線を描くと、図-12のようになる。ここで式(25)左辺第二項の微分は、時間の対数に対し濃度比をプロットしたグラフ(図-11)から、中央差分方式により傾きを求めることにより定めている。すなわち t_1 での濃度比 C_1/C_0 、 t_2 での濃度比 C_2/C_0 、 t_3 での濃度比 C_3/C_0 などとすれば、 L/t_2 より小さい沈降速度を有する粒子の質量は次式で求める。

$$\int_0^{L/t_2} f(w) \cdot dw = C_2/C_0 - \frac{(C_1/C_0 - C_3/C_0)}{(\ln t_1 - \ln t_3)} \quad (27)$$

両端の時刻については中央差分方式が適用できないので臨接データとの片側差分方式で得られた傾きの1/2値を便宜上用いている。

また、上層7割水の含有粒子の粒径分布をコールター

カウンターを用いて測定すると図-13のような粒径分布の変化を示し、静置時間とともに大きな粒径から沈降し粒子濃度も減少している様子がよくわかる。このデータを加積曲線に書き直して1枚のグラフにプロットすると図-14のようになる。50%粒径の微小化の様子がよくわかり、時間とともに微小粒径の占める割合が上昇してゆくことが示されている。

図-13の各粒径分布図の右にのせてあるTV値は、粒径ごとの測定体積値の和であり、コールターカウンターで測得された粒子体積を示している。表-9のSS濃度Cを体積Vで除せば見かけの比重が求まる。ほぼ、3~2.3の区間にありtが大きいくほど小さくなる傾向が見られる。コールターカウンターの粒子径測定範囲(3.2 μ m~64 μ m:140 μ mアパーチャー使用)外の大粒子も若干あることがわかる。

(4) 測定方法としての問題点

沈降筒法により測定しているものは、静止水中の単粒子沈降速度である。

図-12に示される沈降速度の加積曲線を見ると、同一けん濁濃度(90mg/l)で実験を開始しても、沈降筒の大きさにより異なる結果になることがわかる。沈降速度の中央値(50%値)は、2l沈降筒実験ケースで 2.3×10^{-5} m/s(2m/d) 200l沈降筒実験ケースで $5.8 \times$

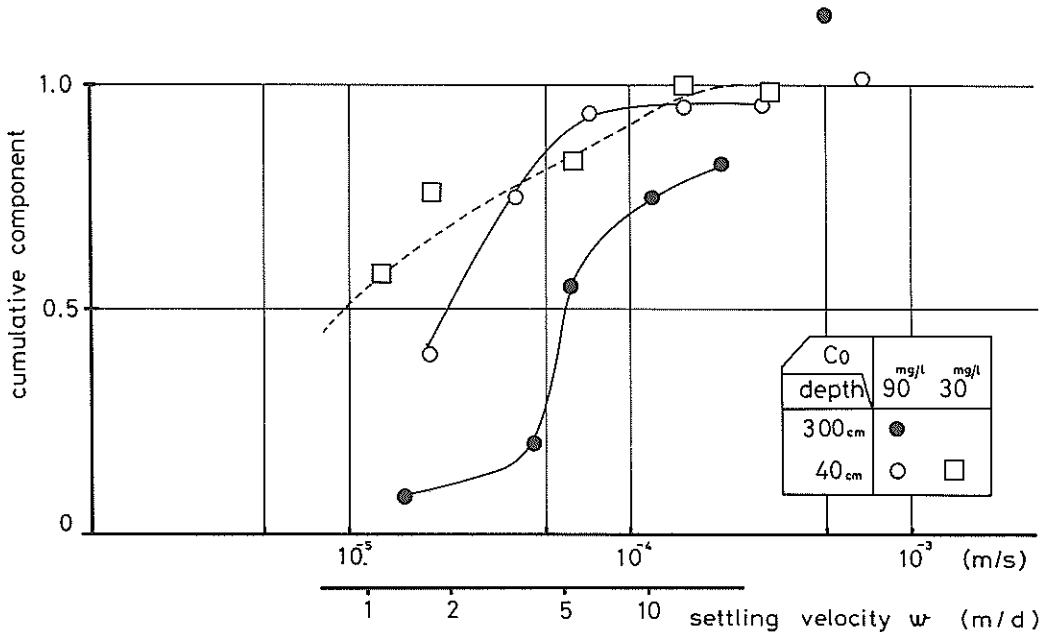


図-12 沈降筒による沈降速度加積曲線

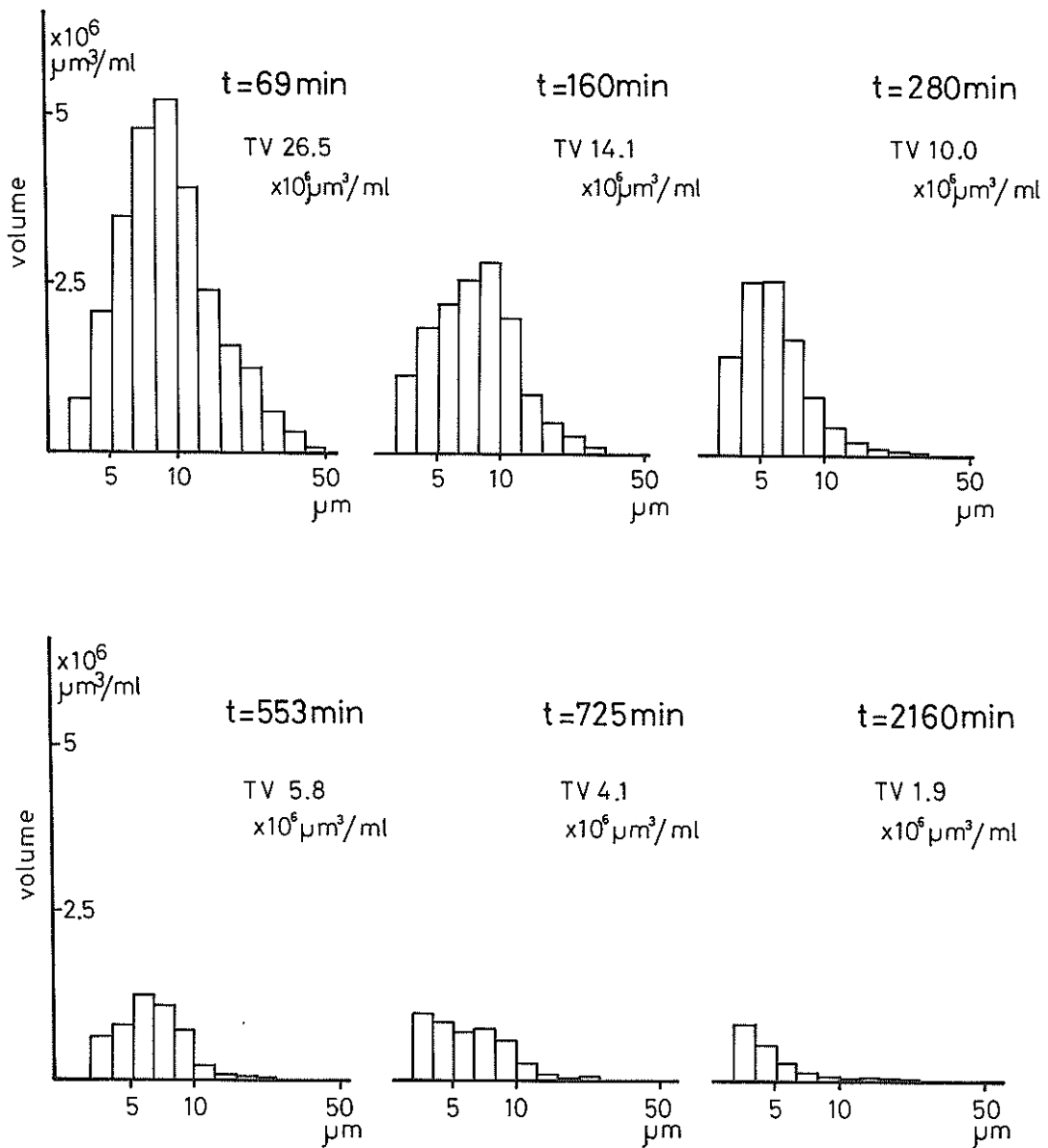


図-13 7割上澄水中のけん濁粒子粒径分画図

10^{-5} m/s (5m/d) と2倍以上異なる。また200 l沈降筒では曲線が立ち、粒径がそろってきている。沈降筒内の目視観察によれば、200 l沈降筒内では静置後1~2時間経過後から粒径のやや大きなマイクロフロックが見られ、他の粒子よりも早い速度で沈降している。2 l沈降筒では、沈降距離・沈降時間も短いため、フロックが形成されにくく、形成されても直ぐに底面に達する

ため、上層水中では目立たない。

また、図-12によれば、同一沈降筒(2 lシリンダー)で実験を開始しても初期けん濁濃度が異なる異なる加積曲線になることもわかる。沈降速度の中央値で、 C_0 90 mg/l の 2.3×10^{-5} m/s (2 m/d) に対し、 C_0 30 mg/l の 1×10^{-5} m/s (0.9 m/d) とほぼ2倍異なる。

図-12に見られる沈降速度の差異は、フロック形成の

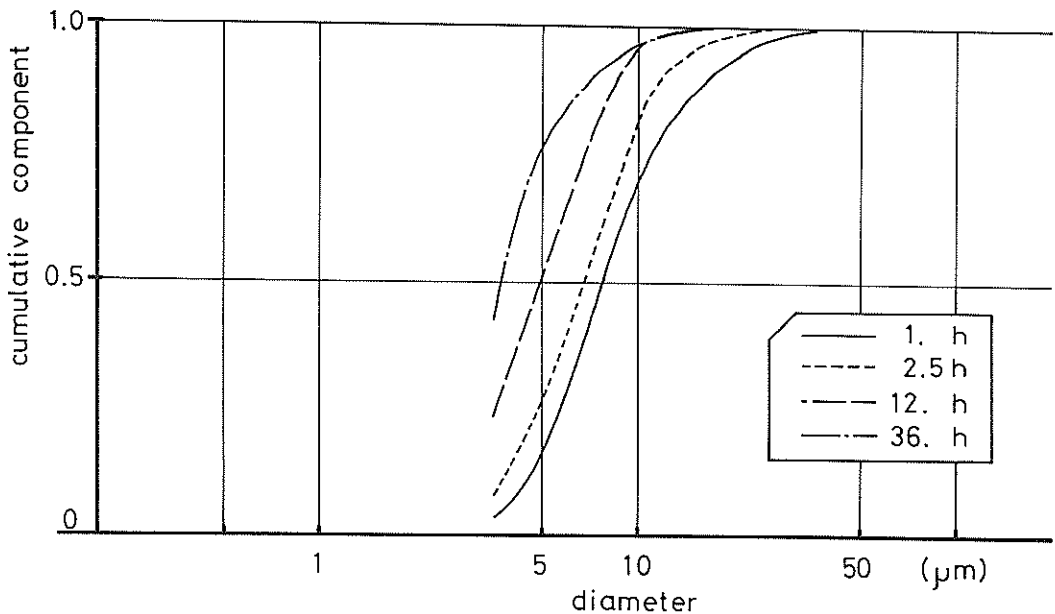


図-14 7割上澄水中のけん濁粒子粒度加積図

差異によるものと思われる。フロック形成と成長は粒子間の衝突頻度と時間との積によっている。このため、図-11で同一 L/t 軸上にプロットされる C/C_0 値でも、沈降筒が高く L 、 t ともに大きい場合は時間の効果により、高濃度けん濁液の場合は衝突頻度の効果により、それぞれ凝集が促進され清澄化が進み C/C_0 値が小さくなるためであろう。

沈降筒の高さ40cmの2lシリンダーを用い、当初けん濁濃度 30mg/l で測定した沈降速度分布は、図-10に示すコールターカウンターによる分布とよく似ており、粒子が分散した時の沈降速度分布に近い分布であると思われる。中央値 0.9m/d は現地の値 3m/d より小さく、微細粒径の割合が高い横にねた曲線となっている。現地での値から考えて、ある程度の凝集作用が海域内でも生起していると思われる。室内実験においても海域内と類似の凝集効果を保証することが望ましい。現場海域での沈降速度見積りのために、沈降筒の大きさ、初期濃度、さらに水の乱れなどの実験条件をどう選べば良いのかについては、実験例が少なくここではこれ以上の議論はできない。沈降速度に影響を与える現場での現象の再現には、なるべく大きな沈降筒が望ましいようである。

大きな沈降筒を用いて沈降速度を測定する際の問題点としては次のような点がある。

①沈降筒の筒長が長いため転倒攪拌がむずかしい。

ここではバドル等による攪拌を行なった。こうした筒内水の機械的攪拌では十分均一に混合するためには時間と労力が多く必要となる。

②装置が大きいため水温の均一性の確保がむずかしくなる。

2l沈降筒は恒温室内に静置したが、200l沈降筒は、温度の日周変化のあまりないコンクリート床の上屋（海水浄化工法開発平面水槽上屋）内に設置した。ここでの実験では、1日間の筒内水温変動は 1°C 以内であった。筒内水温より壁温が高くなると筒内壁に沿った湧昇流渦などができるようであるが、この実験では目視観察によると筒内対流はなかった。

③水深 L までの水量が多いため採水に時間がかかる。

ここでは上に開口した採水口を用い、小型の水中ポンプにより表層から除々に採水し、 L 以深の水を採水しないように気をつけた。沈降時間 t には、採水終了時刻をとったが、採水には10分程度要した。

④ここで用いた沈降筒はアクリル製であるため、ガラス製円筒に比して壁面に粒子が付着しやすい。

ここでは、7割上層水の濃度と、残余の下層水の濃度とから全層平均濃度を算定し付着による減少をチェックした。この値を当初濃度と比較するとほぼ同じ濃度であり、その誤差は当初濃度の5%程度である。加積曲線の

値 $\int f(w) dw$ の誤差も5%程度はあることになるが、

実用的にはほとんど問題ないと思われる。

一回の実験水が大量に必要となり、装置が高価となるため同時に沈降を開始するだけの沈降筒本数を確保できないなど、実験の同時同等性が保証しにくく、各回の実験ごとのけん濁濃度差や、沈降時の水温差、等の誤差要因をかかえることになる。

しかし、大型沈降筒では、 t が長くなる、上澄水がかなり清澄化しても試料水が大量に確保できるためSSなどの分析精度が保証できる、などの利点もある。

5. 各方法の比較

表層の浮遊けん濁物質に対しては、現地調査により0.6 m/dの得を得た。浮遊けん濁物質の収集に季節的制約があり、大量には試料を採取できなかった。このため室内実験での値を求めることができず現場測定値と室内実験値とを比較することができない。現地での値は、海産植物プランクトンの一般的にいわれている沈降速度範囲内にはいっており、妥当な値である。静水中でのデトリスや糞粒の沈降速度はこれより大きい。

一方、底泥面近くで舞い上りや沈降をくり返している浮泥に対しては、現地調査により3 m/dとの値を得ている。底泥面近くでは、表層水からの沈降粒子の沈降フラックスよりも浮泥の沈降フラックスの方が、1オーダーほど高く、底泥面近くの捕集筒では捕集物のほとんどが浮泥である。浮泥も粒径分布をもち、沈降速度分布があるが、現地法では浮泥が均一な粒径とした平均沈降速度が求められることになる。底層で捕集された粒子は、表層に比して粒径が大ききそろってくる傾向がある。

同一浮泥試料を用いて室内実験を行ない、沈降速度を調べてみた。コールターカウンターにより粒度分布を測定し、別途測定した比重値を用いてストークス式より沈降速度分布を算定し、沈降速度の中央値で1 m/dの値を得た。十分に分散された浮泥では、微小径の分面かなりの割合の粒子が存在しており沈降速度加積図は横にねてきている。

また、沈降筒を用い分散沈降法累積型の方法で沈降速度分布を求めた。これは、当初沈降筒内でけん濁物が均一濃度となるように攪拌後、静置し、静置時間に対し上層7割の水の清澄度を測定してゆく方法で、吹い上げ法などと呼ばれている方法である。この方法では、沈降筒の沈降距離、当初けん濁濃度によって結果が大きく変わる。沈降距離200 cm当初けん濁濃度90mg/lで沈降速度の中央値は5 m/d、沈降距離28 cm、当初けん濁濃度30mg/lで0.9 m/dとなった。沈降距離が長いほど、けん濁濃度が高いほど大きな値になることがわかる。こ

表-10 各方法で測得された沈降速度の比較

方 法	底 泥	けん濁浮遊粒子
現地調査		
捕集筒による方法	3	0.6
室内実験 (中央値)		
粒径と比重とから求める方法	1	—
沈降筒による方法		
L = 28 cm C ₀ 30mg/l	0.9	—
L = 28 cm C ₀ 90mg/l	2	—
L = 200 cm C ₀ 90mg/l	5	—

れは、沈降筒内での粒子相互の凝集作用に起因していると思われ、沈降時間と衝突頻度との積で凝集作用の大きさが左右されていることにより説明される。凝集作用の大きい沈降筒では、沈降速度の加積曲線が立ってき、粒径がそろってくる傾向が見られる。

けん濁物質の粒子個々の物理的な実粒径の分布から求めた沈降速度、あるいは粒子相互が分散している状態での沈降筒実験で求めた沈降速度は、現場での沈降速度に対し過少な値を与える可能性がある。現場のけん濁粒子は、ある程度の凝集作用を受けていると思われる。従って、海域での粒子の沈降速度を見積もるためには、室内実験においても沈降粒子の凝集作用を考慮しなければならないことがわかる。各方法の比較のために測得された沈降速度値を表-10にまとめて示しておく。

6. あとがき

沿岸海域の有機物の中で、粒状有機物の占める割合は大きい。海域の有機物濃度の変化を考えるためには、有機物の生成とともに消滅過程についてもよく理解しておく必要がある。なかでも、沈降は、表層有機物濃度を大きく左右する重要な過程である。

沈降速度におよぼす影響因子は多様であり複雑である。室内で沈降速度を求める方法では、現場での因子をすべて再現させることはむずかしく、現場の条件を考え、状況に見合った方法をとる必要がある。そこで、各種の沈降速度測定法を比較することを試みた。

現場では、捕集筒を用いて沈降速度を測定した。けん濁物質の起源を表層浮遊物質と舞い上り浮泥との二者に分け、濃度・組成の定常性を仮定して解析した。一方、室内では、採取した浮泥試料を用い、粒径を直接測定する方法、各種沈降筒を用いる方法などにより沈降速度を測定した。粒子を独立に分散させた状態での沈降速度値

は現場測定値よりも小さくなる。室内法としては、凝集作用について考慮した測定法でなければならないことがわかった。沈降筒の筒長やけん濁濃度としてどのような条件が最もふさわしいのかについては、今後の検討課題として残されている。

本報告は、『海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究』と称された科学技術振興調整費によるプロジェクト研究の一部として当研究所で実施されたもののうち、特に沈降速度に関する部分をまとめたものである。東京大学工学部化学工学科熊谷幹郎助手からは吹上げ法による沈降速度測定の具体的手法などについて助言をいただいた。深く感謝いたします。調査の実施に際し、第三港湾建設局海域整備課から種々の協力を受けた。深く感謝いたします。室内実験における 200 l 沈降筒は、当所土質部土質調査研究室所有の大型沈降筒の一部を借用したものである。また、沈降実験法および比重測定法に対し同土質調査研究室松本一明室長、小川富美子研究官より有益な意見をいただいた。ここに深く感謝いたします。

(1982年6月30日受付)

参考文献

- 1) Jørgensen, S.E. et. al., Ed.: Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters, Pergamon Press (1979), pp. 72 ~ 74, pp. 106 ~ 107
- 2) Sasaki, H. and S. Nishizawa: Vertical flux profiles of particulate material in the sea off Sanriku, Marine Ecology-Progress Series, Vol. 6 (1981), pp. 191 ~ 201
- 3) 津野 洋 他: 霞ヶ浦高浜入における藻類増殖のシミュレーションに関する研究, 国立公害研究所研究報告第6号(R-6-'79), (1979), pp. 273 ~ 280
- 4) 堀江 毅 他: 海水の A.G.P. 試験法とその適用, 港湾技術研究所報告, Vol. 17 No. 2, (1978), pp. 49 ~ 80
- 5) 国立公害研究所水質土壌環境部陸水環境研究室: *Microcystis aeruginosa* (アオコ) による水の華の生成 その発生防止のための基礎的研究, 陸水環境研究室研究資料 FRL/80-1, (1980), 114 p.
- 6) Hosokawa, Y. and T. Horie: Water quality improvement by retardation of nutrient release-Estimation and analysis by a simplified model-, the 6th US/Japan experts meeting on management of bottom sediments containing toxic substances, (1981)
または,
運輸省港湾局: 第6回有害底質の処理処分に関する日米専門家会議会議録, 港湾技術要報 No. 87 (1982), 日本港湾協会, pp. 68 ~ 95
- 7) 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, (1982), pp. 268 ~ 269
- 8) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所: 土砂による海水汚濁の予測方法 手法開発のための調査研究 (通年報告書), (1980)
- 9) 日本規格協会: 日本工業規格 JIS K0101 工業用水試験方法, (1979), 222 p.
- 10) 日本規格協会: 日本工業規格 JIS K0102 工場排水試験方法, (1981), 236 p.
- 11) 気象庁: 海洋観測指針, (1970)
- 12) 細川恭史, 三好英一: 底質 COD 測定法の検討, 港湾技研資料 No. 368, (1981), p. 24
- 13) 福島武彦 他: 湖沼の沈降物質に関する研究, 第18回衛生工学研究討論会論文集 (1982), pp. 9 ~ 14
- 14) 畑 幸彦: 海洋, 主として沿岸域における沈降粒子捕集器とその捕集物, 海洋科学, Vol. 11 (1979) pp. 996 ~ 1002
- 15) Fukuda, M.: Vertical diffusion in coastal areas-I
- on the vertical diffusion of suspended particles from the bottom -, Jour. Ocean. Soc. Japan, Vol. 30 (1974), pp. 67 ~ 76
- 16) 小笹博昭: 英国国立水理研究所におけるエスチュアリーでのシルテーションに関する研究について, 港湾技研資料 No. 354, (1980), pp. 19 ~ 20
- 17) 合田 健: 水質工学 応用編, 丸善, (1978) pp. 7 ~ 27
- 18) 川合英夫: 収束・発散と海の粒々物理学, 海洋物理学 II, 東京大学出版会 (1976), pp. 103 ~ 155
- 19) 松尾反矩: フロックの破壊機構と強度に関する研究, 土木学会論文報告集第229号, (1974), pp. 31 ~ 39
- 20) Hargrave, B.T. and N.M. Burns: Assessment of sediment trap collection efficiency, Limnol. Oceanogr., Vol. 24 No. 6, (1979), pp. 1124 ~ 1136
- 21) 村上和男・森川雅行: 超音波流速計による潮流観測と水平・鉛直拡散係数の算定,
- 22) 堀江 毅: 濁り拡散の予測手法について, 昭和56年度港湾技術研究所講演会講演集, (1981) pp. 71 ~ 72
- 23) 松本英二: 大阪湾における懸濁粒子の分布, 科学, Vol. 45 No. 3, (1975), pp. 177 ~ 181
- 24) Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons: A Practical Handbook of Seawater Analysis, Fisheries Research Board of Canada, Bulletin 167, (1972) pp. 251 ~ 258, pp. 279 ~ 282
- 25) 熊谷幹郎・西村 肇: 海上空港建設に伴う濁りの発生と水中濃度の予測, 1981年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, (1981), pp. 265 ~ 266
- 26) 熊谷幹郎 他: 底層水中の浮遊粒子濃度におよぼす流れの影響, 第25回海岸工学講演会論文集, (1978) pp. 223 ~ 227

使用記号一覧

- A : 捕集筒開口部面積
 A_{650} : 波長 650 μm の光の透過率
 a : 濁りの Rouse 分布を表わす式 (12) で、濃度の基準とした水深
 C : けん濁物質濃度
 C : 沈降筒内で、時刻 t における水面から水深 L までの液中の平均けん濁物質濃度
 C_a : 濁りの Rouse 分布を表わす式 (12) で、水深 a での濃度
 C_D : 粒子の抗力係数
 C^M : 舞い上り浮泥の組成比 (SS 1 g あたりの組成)
 C^P : 捕集筒内に捕集されたけん濁物の組成比 (SS 1 g あたりの組成)
 C^S : 表層浮遊物の組成比 (SS 1 g あたりの組成)
 C_0^P : 捕集筒開口部上面の環境海水中の現存けん濁濃度
 C_0 : けん濁物質当初濃度
 C_0 : 沈降筒内で、けん濁物質の平均当初濃度
 C_{650} : 波長 650 μm の光の光束消散係数
 D : 粒子径
 F : 粒状物の沈降フラックス

- $f(w)$: 沈降速度 w の粒子の、全けん濁粒子量に対する質量割合
 $f(w)dw$ で、沈降速度 $w \sim w + dw$ の粒子の、全けん濁粒子量に対する質量分率。
 g : 重力加速度
 K_z : 鉛直拡散係数
 L : 沈降筒内の沈降距離
 l : 濁度計の光路長
 M/M_0 : 沈降筒内で、時刻 t までに深さ L にある受皿に沈降してきた粒子量と、終極沈降粒子量との比
 終極沈降量とは、受皿面上にある深さ L の水柱内の全粒子量
 Re : レイノルズ数
 R^P : 捕集筒内に捕集された粒子量
 r : 捕集筒内に捕集された粒子のうち、表層浮遊物の占める割合
 SS : けん濁物質 (SS) 濃度
 T : 捕集筒の海水中垂下時間
 z : 水深
 w : 沈降速度
 η : けん濁溶媒海水の粘性係数
 ρ_s : 粒子比重
 ρ_w : けん濁溶媒海水の比重

港 湾 技 研 資 料 No. 433

1 9 8 2 . 9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
 横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.