

エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構 (1)

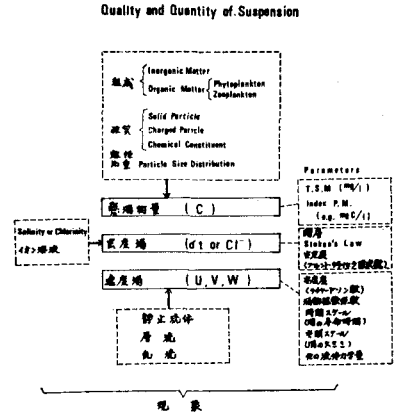
鷲見 栄 一*

要 旨 海洋系のひとつのモデルとして、海洋を混相した巨大な流れと考える。そこに含まれる各相を力学に関係した点で考えると、固相・液相・気相になる。ここでは、流れを各相に対する外力として考え、海洋に生起する種々の現象を各相間のおよび流れとの相互作用と考える。海水中に存在する懸濁物質 (Suspended matter) を固相というカテゴリーの中でとらえ、他の相および流れとの相互作用の解明という点で懸濁物質の輸送機構を把握する。この懸濁物質は、近年の汚染問題に大きく関与しており、その輸送・堆積・再浮上(まき上がり)の諸現象の解明は早急な課題と思われる。現在において、理論および測定器の発展段階により多く制約されているので、懸濁物質の浮遊機構という点に関して、(1) 固相—液相、(2) 固相—液相および流れ、という形で得られた実測データを例示する。

1. ま え が き

海水中の懸濁物質は、海洋の諸科学の中で各分野の観点から研究されてきた。特に、全懸濁物量 (Total suspended matter) は海洋地質学の方面で重要なパートとして研究されている¹⁾。近年、沿岸海域では海洋汚染問題という点から着目されてきている²⁾。海洋の中でもエスチャリーにおける懸濁物質の輸送機構という観点から、Chesapeake Bay Institute (the Johns Hopkins Univ.) では数年前から精力的に研究が進められている。しかし、著者の知見する所では、流速計自体の開発研究³⁾と懸濁物質の輸送機構の研究⁴⁾とが有機的に結びついていない段階のようである。著者は、図—1の概念図により、その量と質を把握し、力学的側面より懸濁物質の浮遊機構をまず解明することを試みた。固相を全懸濁物量(C)、液相を密度場(σ_T or Cl^-)、流れを速度場としてとらえる。扱う現象によって、各表現形式および組み合わせがあるが、現在の理論と測定器の発展段階により多く制約されている。

フィールドとしてエスチャリーを選び、そこにおける浮遊機構を解明するために、二層型の流速計を製作した。特に、エスチャリーでは、強い非定常な流れであり、基本的な流体力学量を得るためには、多くの測点における



図—1 概念図

同時観測が必要とされる。観測塔がないので、底層固定型としたために、現象としては流れによる底質のまき上がり (Resuspension) ということになるが、図—1の概念図より各相間および流れとの相互作用を解明する手掛りが得られると思われる。

現在において、懸濁物質の輸送機構は種々の分野から研究が進められているが、データの集積段階の域を出ていないようである。筆者も、ひとつの試みとして、図—1の概念図にのっとり、データを集積している段階であり、それぞれの例を示すことにとどまっている。そこで、懸濁物質の浮遊機構という点にしばって、(1) 固相—液相、(2) 固相—液相および流れ、という形で得られた実測データを例示し報告する。

2. 定 量 法

採水方法は、(I) 直接にバケツ等による採水、(II) バンドン採水器 (5l) あるいは横型採水器 (2l) による船上からの採水、(III) ポンプによる吸い上げ採水などによる。採水された海水中の懸濁物の定量法は精確には確立されていないが、海洋地質学で使用されている方法による⁵⁾。ただし、各フィルターについて濾過残滓量を全懸濁物量とする。フィルターは 47 mm 径の MF Millipore filter の孔径 5μ あるいは 0.8μ を使用した。プレ・フィルターとしては 125μ フリイを使用した。

* 正会員 工業技術院公害資源研究所

3. 水平分布

図-2は岡山水道の平面図であり、図-3は1973年3月18日の満潮・干潮における懸濁物と塩素量の水平分布である。懸濁物の入力源が多く、複雑な様相を呈している。特に、吉井川河口より湾奥は停滞水域になっている。ただし、旭川および吉井川の河口より上流では、相互に連関があると思われる。そこで、湾口より吉井川の水域をエスチャリーのモデルとして考える。

4. 縦断面分布

図-4は、1973年10月12日の満潮・下げ潮最強流時・干潮における懸濁物と塩素量の縦断面分布である。採水測線は、図-2に示してある。表層について、懸濁物量と塩素量は単純な線型関係にはないが、吉井川河口より湾奥からの入力に影響されているようである。また、A地点では底層付近は停滞水域になっている。各潮時の懸濁物量を比較すると、湾口(E点)までの全域にわたって底質のまき上がりが生じている。湾の外のF地点は潮時に関係なくほぼ一定の分布をしており、定常的な流れが予想される。上げ潮にも同じく、まき上がりが考えられるので、エスチャリーでは潮汐流によって、不断に底質の堆積、まき上がりの現象が続いていると思われる。また、流れ以外にも波によるまき上がり⁶⁾も考えられるが、干潟あるいは強風時以外はあまり影響はないようである。また、E地点に見られるように、躍層で懸濁物量が最小になっている。これは、Schubel⁴⁾も指摘するように、躍層の密度勾配による底質のまき上がり効果の阻止によるものと思われる。明らかに一般的な形状ではないが、外洋で見られる躍層での懸濁物量の最大値という形は見られなかった。

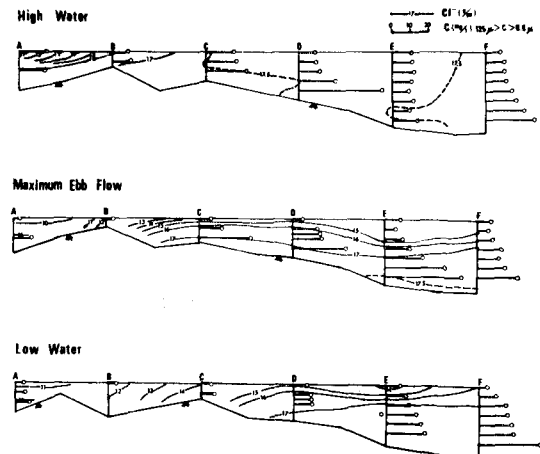


図-4 縦断面分布

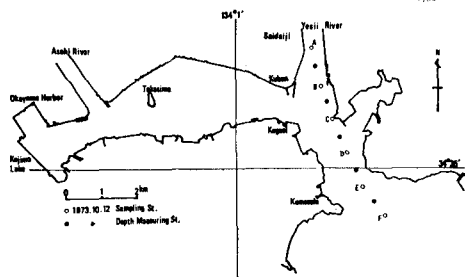


図-2 岡山水道平面図

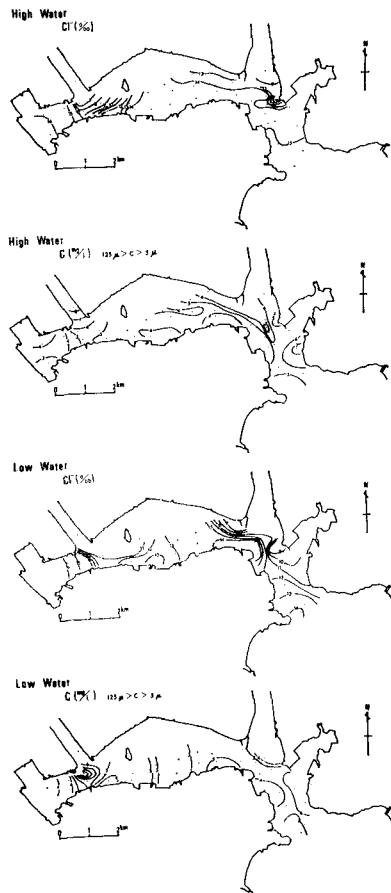


図-3 水平分布

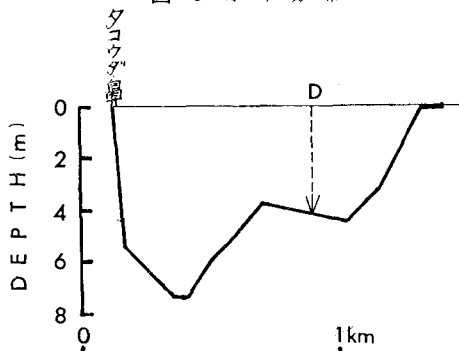


図-5 定点Dの横断面図

5. 流れによる底質の浮遊 (1)

流れによる底質の浮遊機構を把握するために、図-2のD地点で1973年10月9日に定点観測を行なった。D地点は、水深4~5mの平坦な海底面が広がっており、かなりの厚さの堆積層になっている(図-5)。水深が小さいために、採水は横型採水器(2I)により、流速はCM2型流速計(東邦電探社製)によって測流した。

図-6は、懸濁物量・塩素量・流速の時間変化を示している。満潮は10時、干潮は15時であり、両方ともに水面から数mは、懸濁物は一樣に分布している。満潮から下げ潮に向かって、流れによる底質のまき上がりが見られる。まき上がった底質は干潮で再堆積し、上げ潮によって再びまき上がる。ただし、上げ潮の途中までしか観測をしていないので、上げ潮後の満潮時に10時の満潮時と同様の分布をするかどうかの確認はしていない。しかし、初期条件の違い(満潮時と干潮時の水深方向の懸濁物量分布の違い)はある

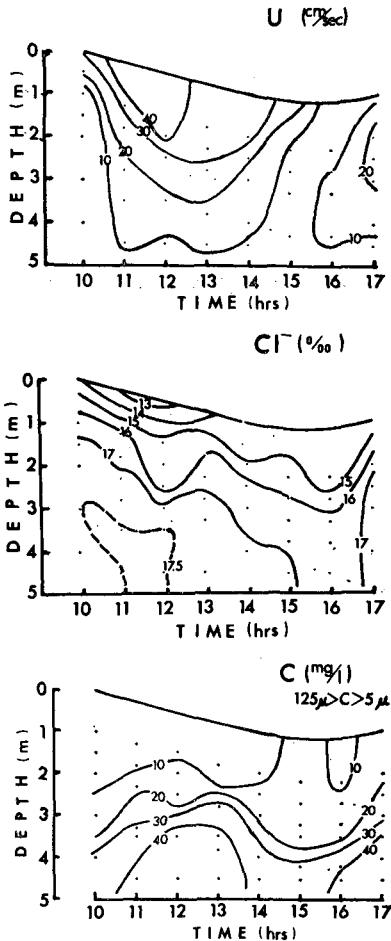


図-6 定点Dにおける時間変化

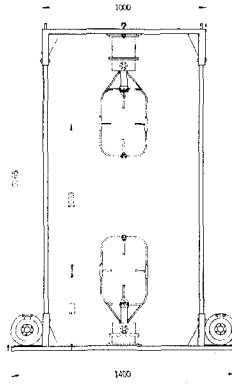


図-7 二層型超音波流速計

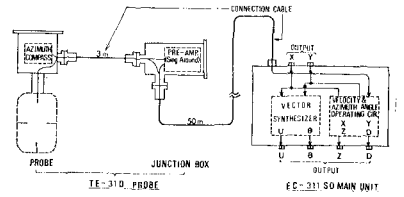


図-8 ブロック・ダイアグラム

が、下げ潮や上げ潮の底層付近の懸濁物量が、流速という力学的条件に支配されているようである。このような現象を説明する理論はあまりない。Bagnoldの“the limit of autosuspension”なる条件⁷⁾が使われているが、実測データの不足もあって完全な理論体系はない。波による底質の浮遊と同じく、流れによる底質の浮遊機構を解明するには、底質の特性と流れの条件との定量的関係を見つける必要がある。

6. 流れによる底質の浮遊 (2)

5.で述べたように、現在、海洋において懸濁物質などの輸送機構を解明するための流体力学量の実測データは乏しい。また、エスチャリーは強い非定常な流れであるので、底層固定の二層型流速計を製作した(図-7)。Bowden⁹⁾も二層を同時に測流しているが、空間的な相関を問題にしている。Seitz¹⁰⁾はドップラー型超音波流速計を使って、海底上の乱流構造を論じているが、まだ、データの集積段階のようである。

二層型超音波流速計は、三方向型流速計を海底から50cmと150cmの二層に取りつけたものであり、方式はシング・アラウンド型である¹¹⁾。上部のプロープには方位計が内蔵されており、流速計自体の磁方位(D)を検出する。プロープのスパン長さは20cmである。簡単なブロック・ダイアグラムを図-8に示す。流速測定は、1/3秒ずつ測定し、それを1秒に平均化して出力する。測定範囲は0~50cm/secのレンジを使用し、記録は自動平衡型6チャンネルのペン書き記録計を使用した。

観測は、5.と同時にに行った。解析は、代表的なものとして、下げ潮の11時と上げ潮の17時の場合について行なった。主流方向 θ は $\theta = \theta + D$ であり、主流に直角の成分(v)の平均値が0になるように定義する。ただし、 θ は流速計自体の座標系での流向である。また、海底から上向きにZを+にする。図-9と図-12は鉛直分布であり、水深1.5m付近に密度躍層がある。図-10と図-13はスペクトル図であり、測定時間は900秒(15分)

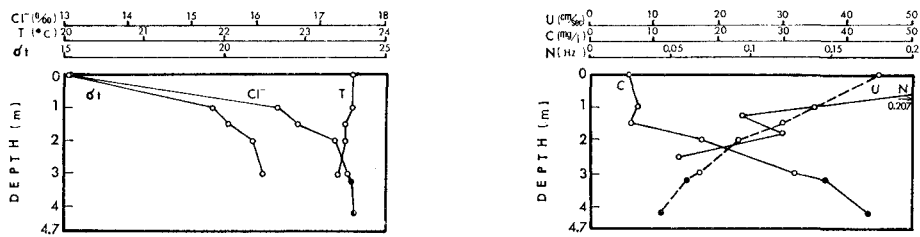


図-9 鉛直分布図(下げ潮11時)

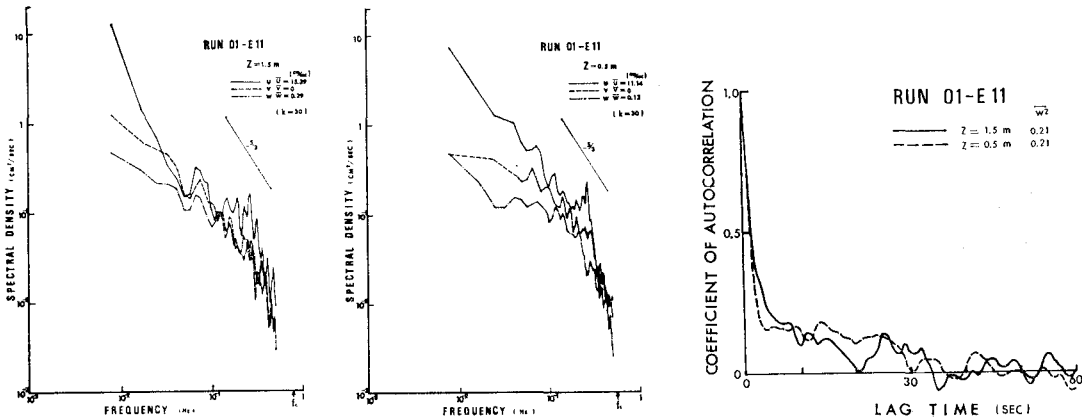


図-10 スペクトル図

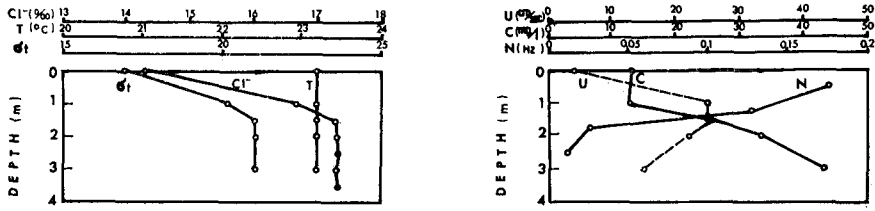
図-11 自己相関係数

表-1 乱れ特性

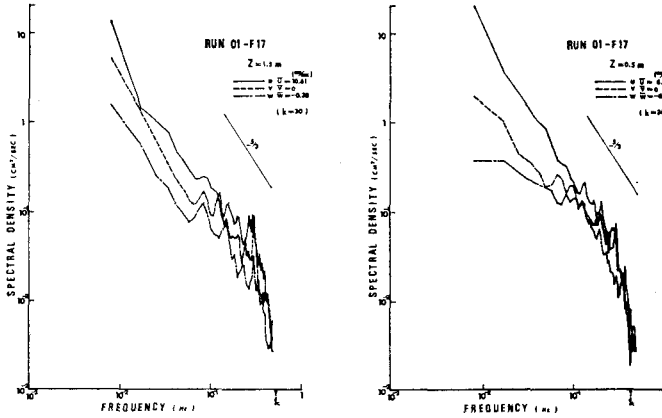
RUN 01-E 11	$\overline{W}$ (cm/sec)	$\overline{U}$ (cm/sec)	θ (°)	$\overline{u^2}$ (cm²/sec²)	$\overline{v^2}$ (cm²/sec²)	$\overline{w^2}$ (cm²/sec²)	$\overline{q^2}=\overline{u^2}+\overline{v^2}+\overline{w^2}$ (cm²/sec²)
Z=1.5 m	0.3	15.4	175	1.82	0.37	0.21	2.40
Z=0.5 m	0.1	11.1	119	1.46	0.34	0.21	2.01
	$\overline{uw}$ (cm²/sec²)	$\overline{uv}$ (cm²/sec²)	$\overline{vw}$ (cm²/sec²)	$\frac{\overline{uw}}{\sqrt{\overline{u^2}}\sqrt{\overline{w^2}}}$	$\overline{q^2w}$ (cm³/sec³)	$\overline{uw} \cdot \overline{U}$ (cm³/sec³)	u_* (cm/sec)
Z=1.5 m	0.0498	0.1711	-0.0017	0.0711	0.1213	0.7661	—
Z=0.5 m	-0.1528	0.1700	-0.0077	-0.0255	-0.1194	-1.7021	0.39

表-2 乱れ特性

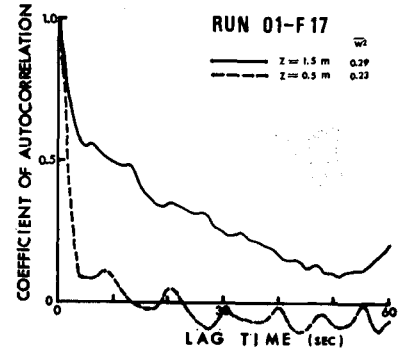
RUN 01-F 17	$\overline{W}$ (cm/sec)	$\overline{U}$ (cm/sec)	θ (°)	$\overline{u^2}$ (cm²/sec²)	$\overline{v^2}$ (cm²/sec²)	$\overline{w^2}$ (cm²/sec²)	$\overline{q^2}=\overline{u^2}+\overline{v^2}+\overline{w^2}$ (cm²/sec²)
Z=1.5 m	-0.4	10.6	353	1.87	0.80	0.29	2.96
Z=0.5 m	-0.1	8.6	299	2.90	0.47	0.23	3.60
	$\overline{uw}$ (cm²/sec²)	$\overline{uv}$ (cm²/sec²)	$\overline{vw}$ (cm²/sec²)	$\frac{\overline{uw}}{\sqrt{\overline{u^2}}\sqrt{\overline{w^2}}}$	$\overline{q^2w}$ (cm³/sec³)	$\overline{uw} \cdot \overline{U}$ (cm³/sec³)	u_* (cm/sec)
Z=1.5 m	-0.2382	-0.5829	0.1995	-0.3392	0.4042	-2.5269	0.49
Z=0.5 m	-0.2090	0.1973	-0.0188	-0.0979	-0.0237	-1.7969	0.46



図—12 鉛直分布図 (上げ潮 17 時)



図—13 スペクトル図



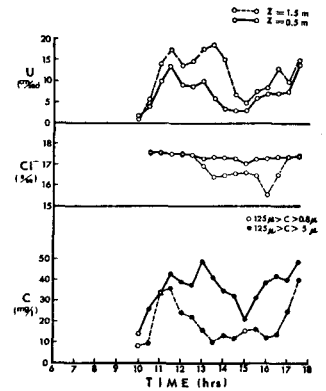
図—14 自己相関係数

表—3 懸濁物量と流れの場合

RUN 01-E 11	C (mg/l)	Cl⁻ (‰)	T (°C)	σ _T
Z=1.5 m	34.6	17.535	23.6	21.273
Z=0.5 m	33.1	17.530	23.8	21.209
	T* (sec)	K _Z =w² · T* (cm²/sec)	L _Z =ŪT* (cm)	l _Z =√w² · T* (cm)
Z=1.5 m	5.0	1.0	77.0	2.3
Z=0.5 m	5.5	1.1	61.0	2.5
	$\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z}$ (1/sec)	N (Hz)	$Ri = \frac{-g\partial\rho}{\rho\partial Z} / \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} \right)^2$	
ΔZ=Z _{1.5m} -Z _{0.5m}	0.043	0.025	-0.33	

表—4 懸濁物量と流れの場合

RUN 01-F 17	C (mg/l)	Cl⁻ (‰)	T (°C)	σ _T
Z=1.5 m	28.5	17.333	23.5	21.027
Z=0.5 m	37.2	17.342	23.3	21.097
	T* (sec)	K _Z =w² · T* (cm²/sec)	L _Z =ŪT* (cm)	l _Z =√w² · T* (cm)
Z=1.5 m	—	—	—	—
Z=0.5 m	2.5	0.6	21.5	1.3
	$\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z}$ (1/sec)	N (Hz)	$Ri = \frac{-g\partial\rho}{\rho\partial Z} / \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial Z} \right)^2$	
ΔZ=Z _{1.5m} -Z _{0.5m}	0.020	0.026	1.60	



図—15 二層の時間変化

である。両方ともに、 $Z=50\text{ cm}$ の方が $Z=150\text{ cm}$ よりも、エネルギーのレベルは大きい。また、 $u > v > w$ の順位で分布している。図中の f_0 はブロープのスパン長さによる高周波数切断を単純移動型伝達関数によって評価したものでこれ以上はまったく信頼性がない。図—11と図—14は w の自己相関係数であり、上げ潮と下げ潮ではかなり違うが、何によるのか現在の所不明である。表—1と表—2は乱れ特性量であり、各成分の乱れの強さ($\bar{u}^2$, $\bar{v}^2$, $\bar{w}^2$)より、海底上の流れが非常に扁平化された異方性(anisotropic)の流れであることがわかる。また、下げ潮時には、レイノルズ応力から導かれる摩擦速度 u_* ($u_*^2 = -\overline{uw}$)がほぼ一定であり、海底付近の流れは、Constant Stress Layerとして解釈して流体力学を適用することが可能であると思われる¹²⁾。

図—15は、二層型流速計とそれに対応してポンプ採水した海水の塩素量と懸濁物量の時間変化である。流速と懸濁物量とは対応して変化している。これは5.で述べたように、底層付近の懸濁物量は流れという力学条件に支配されていることを示している。その対応関係の一般性を述べるのは早急すぎるが、(i) 底質のまき上がり機構と(ii) 懸濁物質の浮遊機構という二つの現象がからんでいるようである。それぞれについて追求していかなければならない問題のようである。

表—3と表—4は、エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構を論じるための基礎的データになると思われるものを求めてみた。時間スケールは、渦の寿命時間という考え方により、図—11と図—14の相関係数が0を切るまでの積分化時間としている。それから求められる乱れ特性量(渦動粘性係数、空間スケール)は、海底上の乱流構造および輸送機構を知るための基本的な力学量になるであろう。

本報告は、代表的な二ケースについて求めてみたが、それらの時間変化は別に報告したいと思っている。

7. あとがき

以上のように、エスチャリーにおける懸濁物質の輸送・堆積・まき上りの諸機構を解明するには、多くのパラメーターが関与しており、そのために多くの困難な問題を持っている。本報告では、それらの諸量を求めてみた段階であり、一般的関係性を論じるまでには到らなかった。とくに、次の諸点を中心に順次解明していきたいと思っている。

- (1) 海底上および全水深にわたる乱流構造を解明すること。
- (2) 懸濁物質の鉛直輸送機構を解明すること。

謝 辞 流速計の製作および観測に多大の協力をして下さった海上電機(株)の方々、データ処理において労をわずらわした日本デジタルソフトウェア(株)の中井氏ならびに C.R.C. の方々に謝意を表します。

なお、本研究は、「沿岸海域における懸濁物質の挙動に関する研究」というテーマの一環として行われたもので、公害第一部第二課のそのグループの方々との共同観測および共同討議によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Lisitzin, A. P.: Sedimentation in the World Ocean, Spec. Publ. 17, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Tulsa, Oklahoma, 1972.
- 2) Folger, D. W., et al.: Sediments and waters of Somes Sound, a fjordlike estuary in Maine, Limnology and Oceanography, Vol. 17, No. 3, pp. 394-402, 1972.
- 3) Wiseman, W. J.: On the structure of high-frequency turbulence in a tidal estuary, Chesapeake Bay Institute, Johns Hopkins Univ., Technical Report 59, 1969.
- 4) Schubel, J. R.: Distribution and transportation of suspended sediment in upper Chesapeake Bay, Chesapeake Bay Institute, Johns Hopkins Univ., Technical Report 60, 1969.
- 5) Beer, R. M. and D. S. Gorsline: Distribution, composition and transport of suspended sediment in Redondo Submarine Canyon and vicinity (California), Marine Geol., Vol. 10, pp. 153-175, 1971.
- 6) Anderson, F. E.: Resuspension of estuarine sediments by small amplitude waves, J. Sedimentary Petrology, Vol. 42, No. 3, pp. 602-607, 1972.
- 7) Bagnold, R. A.: Mechanics of marine sedimentation, The Sea, Vol. 3, pp. 507-528, Interscience, London, 1963.
- 8) Wright, F. F.: Suspension transport in Southern Alaskan Coastal Waters, Paper No. OTC 1349, the Third Annual Offshore Technology Conference, 1971.
- 9) Bowden, K. F.: Measurements of turbulence near the sea bed in a tidal current, J. Geophys. Research, Vol. 67, No. 8, pp. 3181-3186, 1962.
- 10) Seitz, R. C.: Observations of intermediate and small scale turbulent water motion in a stratified estuary, Part I & II, Chesapeake Bay Institute, Johns Hopkins Univ., Technical Report 79, 1973.
- 11) Kaijō Denki Co., LTD.: Instruction manual, Model EC-311 SD ultrasonic current meter, Tokyo, Japan, 1972.
- 12) 鷺見栄一: 二層型超音波流速計の測定結果について、公害資源研究所イ報(投稿中)。