

エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構(3)

鷲 見 栄 一*

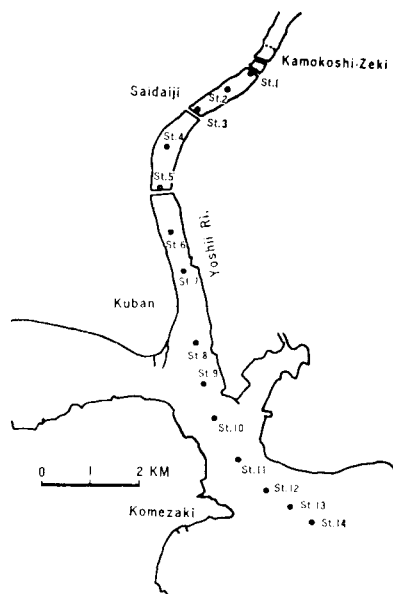
1. ま え が き

沿岸海域における懸濁物質は、海洋の諸現象に大きな役割を持っており、海洋諸科学の各観点から個別に扱うだけでなく統一的に解明されることが望まれる。諸外国においても海洋における懸濁物質の分布形成過程を解明する大規模なプロジェクトやシンポジウムが行われている¹⁾²⁾。しかしながら、対象とする目的・現象関係によって個別化されるのは、種々の現象が生起されて形成された結果としての懸濁物質の分布を考える時には必然的な方法であるとも言える。一方、その存在量を考える時に、流れという力学的側面から局所量についてのコントロール・ボリューム表現をすればその物質分布モデルが考えられる。そして、種々の現象関係を含んだ領域表現がその特殊表現として示される。このような作業を行うのには各専門分野の協力によって、ある作業仮説に乗っかって各専門性の限界と有効性をためさなくてはならないが、そうした作業の成果は数少ない。測器の未開発と方法論の未確定という現状で、最近になって「海底境界層」(benthic boundary layer)という概念でまとめられたレポート³⁾が公表された位である。本報告では、懸濁物質を力学的側面より懸濁粒子(suspended particle)として考え、懸濁粒子の分布形成過程の第一歩としてその輸送・堆積過程について考えてみる。

海域の流れ系の構造によって分類し、それぞれについて力学モデルを立てると、エスチャリー・沿岸海域・大陸棚・外洋と区分される。関与するパラメータの単純化という意味で大陸棚・外洋についてはいろいろな試みがなされている。しかし、エスチャリーや沿岸海域については、種々の現象が錯綜しており、また流れ系の構造が複雑であるということで、フィールドのデータは多く集積されているにもかかわらず体系化されていない。我々が対象としているエスチャリーも、流れ系としては非定常な成層流であり、懸濁物質の分布としては河川及び海洋に起源を持つものが錯綜している所と考えられる。予測モデルの水準も水平二次元モデルが主流であり、鉛直二次元については塩分濃度分布を予測することが試みら

れている段階である⁴⁾。流れの構造および流れの中での物質の挙動が不明確な所が多いためである。

前報⁵⁾に続いて、流れという力学的観点より相似仮説を考え、その妥当性と適用限界の実証を試みる。おもに、(1)境界層構造、(2)懸濁物質の分布則の二点についてである。フィールドは図—1の岡山水道感潮域を選び、地域特性とともにその一般的特性を解明しようと試みている。

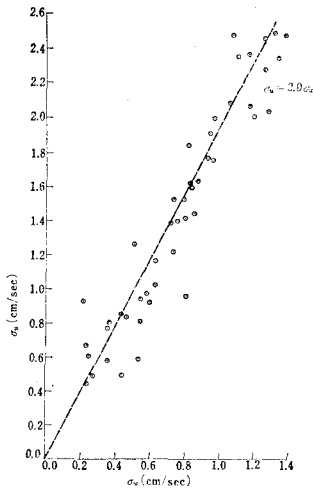


図—1 岡山水道と吉井川感潮域の測点図

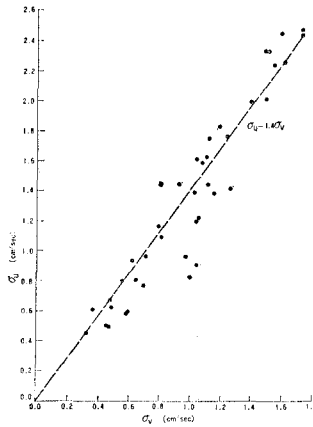
2. 海底境界層の三次元的構造

エスチャリーは非定常な成層流であるが、前報でも述べた通り大気境界層との相似性が考えられる。また境界層理論が適用できることも解明されている。組織的にデータが収集されてきた結果として、諸外国でもシンポジウムが開かれつつあり⁶⁾、大気境界層との対応で論じるものも見うけられる⁷⁾。しかしながら、その実体の解明は乏しく、概念が先行しているのが現状である。図—1のフィールドのように、地形的にも一様でなく深さ方向も変化する所では場所的な差違も大きい⁸⁾。しかしながら、第1近似として中立状態の成層乱流あるいは三次元的構

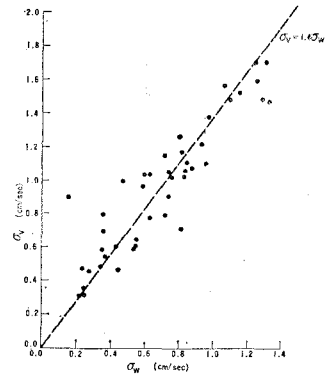
* 正会員 工修 工業技術院 公害資源研究所



図—2 流れ方向の乱れ速度と鉛直方向の乱れ速度の関係



図—3 流れ方向の乱れ速度と横方向の乱れ速度の関係

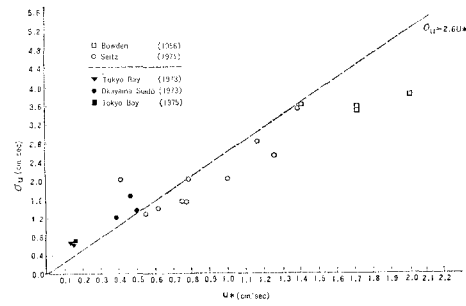


図—4 横方向の乱れ速度と鉛直方向の乱れ速度の関係

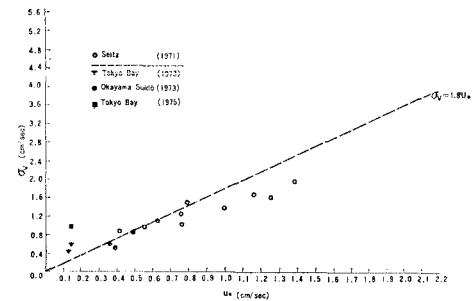
造として相似と思われる大気境界層の実体の集積⁹⁾との対応で、海底境界層の三次元的構造について述べてみる。

図—2, 3, 4 は三次元方向についての乱れ速度の相対比の関係を示したものである¹⁰⁾。測点は図—1の測点14の延長線上500m沖で底質は細砂質(平均粒径160 μ m)である。これは、非定常流である潮流がある時間スケール(この場合は10分間)での擬定常構造を接続した流れに近似できることを示し、三次元であるとともに乱れのTaylor楕円¹¹⁾での各軸の相対比が一定に変化していることを示している。海底境界層でのせん断流れとしての幾何学的イメージが、河川流れ¹²⁾でのそれとは違うことがわかる。その相対比から、 $\bar{u}^2=2\bar{v}^2$, $\bar{v}^2=2\bar{w}^2$ が導かれ、流れ方向の乱れエネルギーが横方向および鉛直方向に1/2, 1/4と伝達されることを示している。このような簡単なモデルをもとにして、摩擦速度との関係を試算してみる。この例でも摩擦速度と各乱れ速度の関係はばらつきが大きい、 $\sigma_w=1.3u_*$ 以下になることは少なく、この実験定数を決定することには議論があるであろうが、この事実を踏まえて $\sigma_w=1.3u_*$ と仮定してみる。各乱れ成分間の相対比から $\sigma_u=2.6u_*$, $\sigma_v=1.8u_*$ が求まる。図—5, 6, 7は過去の代表的な実測例と著者の得たデータを比較したものであり、ほぼ満足していると思われる。実験定数の決定は大気境界層のように多くのデータの収集がある分野でも困難なことであるが、せん断流れの力学モデルとしてTaylor楕円での各軸の相対比の決定から考え直してみることも必要でないかと思われる。しかし、これらが鉛直方向にどこまで適用できるかは境界層厚さの決定の問題になり、これからの研究課題である。

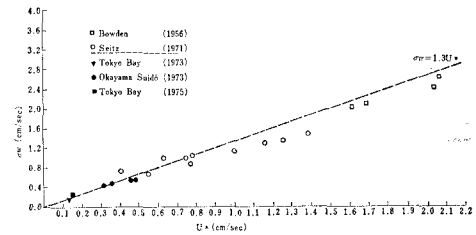
以上の諸結果によって、懸濁粒子の沈降特性等を解明する時に重要なパラメータである鉛直乱れ速度、鉛直渦



図—5 流れ方向の乱れ速度と摩擦速度



図—6 横方向の乱れ速度と摩擦速度



図—7 鉛直方向の乱れ速度と摩擦速度

動粘性係数等の流れの鉛直構造が体系的に解明できる発端になると思われる。

3. 懸濁物質の輸送・堆積現象について

懸濁物質の存在量を説明するための第一段階として、懸濁物質の輸送・堆積現象を解明することは重要な課題

である。典型的な例である前報での洪水時のような大部分が土砂である場合には、その物性値とともに単純な力学モデルで近似できる。あるいは、底質のまきあがり現象の場合も、大部分の粒子の起源が同じような場合も力学モデルで近似できると思われる。しかし、一般的には河川から流入した粒子は過去に形成されてあるバック・グラウンドの中で混合され、堆積したりして沖合へと放出されていく。その中には、河川および海洋に起源を持つ物質が錯綜している。ある水系の擬似定常的な分布を定義する時間スケールの根拠がない現在、必然的に時間性と空間性を含んだ表現としての場所的表現が多く用いられる。以上の観点を踏えて、ある時期の低水時での水域の分布ということで、重量濃度、粒度分布等を測定したので報告する。測定方法の詳細はここでは述べないが、粒度分布はコールター・カウンター TA II 型を用いた^{(13),(14)}。

図-8 と 図-9 は、1976 年 9 月 7 日に観測した満潮時の各測点での $0.8 \sim 125 \mu\text{m}$ の懸濁粒子の重量と塩素量の断面分布図と表層での粒度分布図である。図-10 と 図-11 は、1977 年 9 月 28 日に観測した例である。二つのケースはともに同じ時期であり、ほぼ同じ河川流入量であった。懸濁粒子の重量と塩素量はともにほぼ同じ傾向を示している。測点 9~12 では底層に高濃度の懸濁粒子の分布が見られるが、まきあがり領域と思われる。この領域で

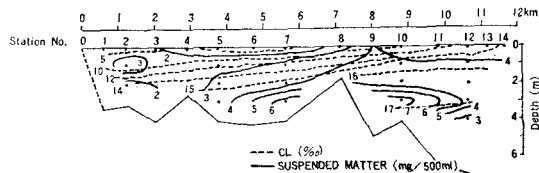


図-8 懸濁粒子 ($0.8 \sim 125 \mu\text{m}$) の重量と塩素量の断面分布図 (1976 年 9 月 7 日)

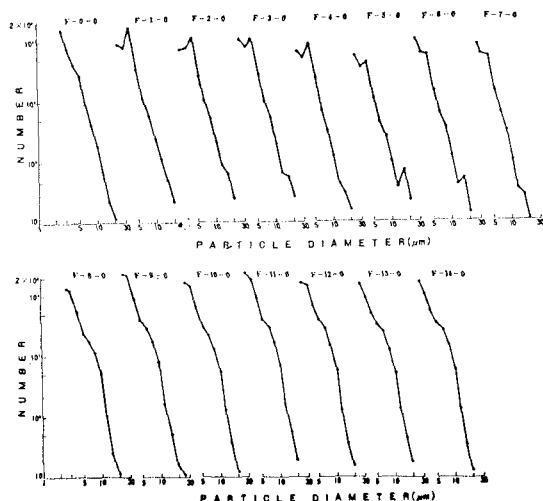


図-9 表層水での粒子数のスペクトル図 (1976 年 9 月 7 日)

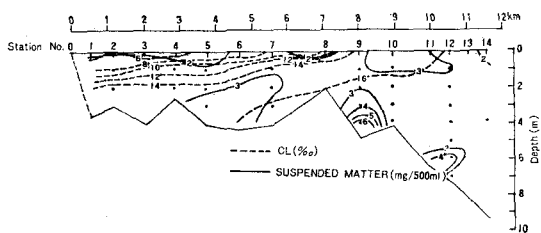


図-10 懸濁粒子 ($0.8 \sim 125 \mu\text{m}$) の重量と塩素量の断面分布図 (1977 年 9 月 28 日)

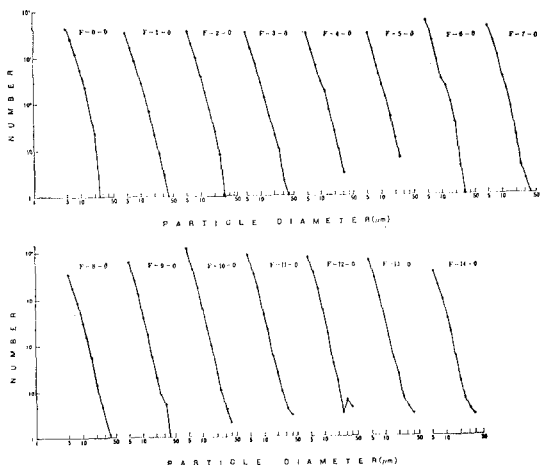


図-11 表層水での粒子数のスペクトル図 (1977 年 9 月 28 日)

は鉛直構造を論じる時には無視できない要因であると思われる。また、旭川水系からの流入ということもあるが、測点 9 より沖合へはある定まった分布形で放出されていくと思われる。また、測点 5, 6, 7 は他の測点に比較して特異な形状を示しているが、どここの感潮域でもあるといわれる Turbidity maximum 領域とも関連して、この水系のある特殊な現象を含んだ領域であるとしか述べられない。粒子の物理化学的挙動とともに生物学的組成としても重要な研究課題にもなり、その粒子の属性の結果から判定すべきものであろう。図-12 は $5 \sim 40 \mu\text{m}$ の 1 個当りの平均粒径の分布図であり、上に述べた底質のまきあがり現象と水面下 1 m 位の躍層上に集積した状態を示している。河川から流入した粒子が順次大きなものから沈降しながら輸送されていき、その第 1 次の集積

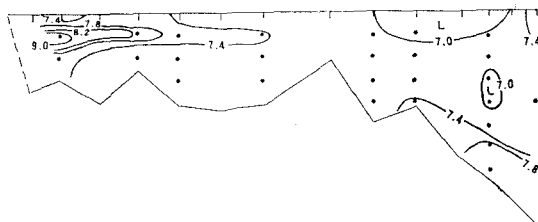
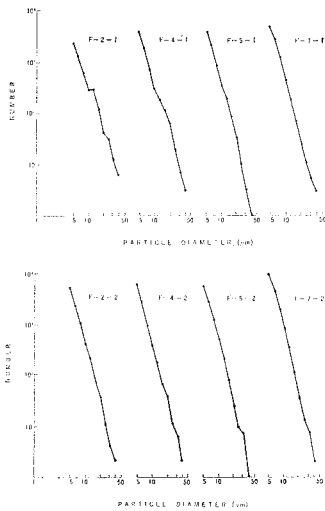
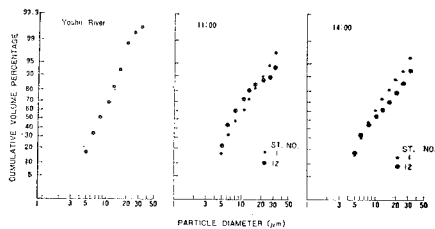


図-12 $5 \sim 40 \mu\text{m}$ の 1 個当りの平均粒径分布図 (1977 年 9 月 28 日)



図—13 粒子数のスペクトルの鉛直分布 (F: 満潮, 2: 測点, 1: 深さ (m))



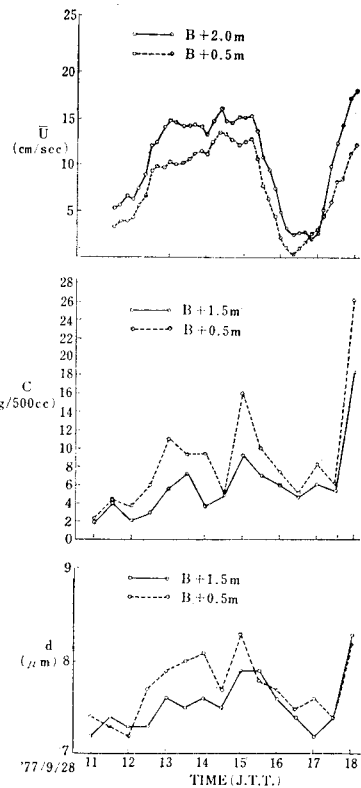
図—14 各潮時における頻度分布図

場所が躍層上である力学モデルが考えられる。図—13は粒度分布の鉛直分布であり、上流の特異な形状から順次にある平衡分布に推移していく状態を示している。

図—14は、流れという力学条件がどの程度に分布形に関係しているかを見たものである。入力 of 河川水はこの図ではかなり急勾配の対数正規分布をしている。潮時に関係なく河川水は表層を流れているが、潮汐との相互作用があるにしても、その分布形は最強流時である 14 時で対数正規分布に近く、流れが相対的に無い満潮時である 11 時では、同じ測点でもその分布形は変化している。

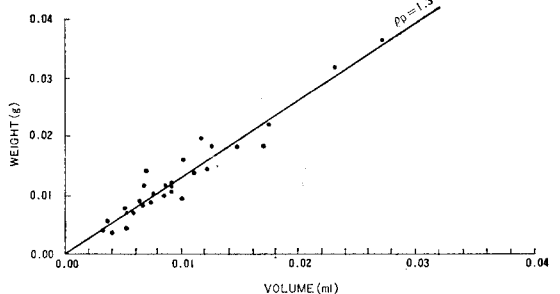
以上の諸結果から、河川水の懸濁粒子あるいはその近くの測点の懸濁粒子は、初期条件として完全混合状態である対数正規分布を仮定することができ、順次に沈降しながら輸送されていく力学モデルが第一次近似的に考えられる。そして、この場合の沖合である瀬戸内海へは、ある一定の分布形に成って放出されている。明らかに、その過程においては、粒子組成の変動、海水の物性の変化、地形の変化等の複雑な挙動を示しているが、一定程度の力学モデルの作成が可能であるだろう。

一方、粒子の物性値としての現場での大まかな比重を測定することは、その物理的な挙動を考える時に重要な



図—15 測点 12 での底質のまきあがり現象 (流速, 懸濁物量, 平均粒径の時間変化)

パラメータである。種々の方法が考えられるが、ここではコーンター・カウンターを用いる方法を取ってみる¹⁵⁾。基本的には比重をその重量と全体積から算定するのであるが、粒子の空孔率、含水率等の困難な性質を持っているので¹⁶⁾、精度的には常に問題がある。オダを見積るとい程度でしかないことは言うまでもない。図—15は、懸濁粒子の起源がほぼ同じであると思われる底質のまきあがり状態の図である。これは測点 12 での図—10と同じ時のデータである。コーンター・カウンターより求められた全体積と重量の関係を 図—16 に示す。最小二乗法により直線の勾配を求めると 1.3 になり、これが



図—16 測点 12 での底層水の重量と全体積との関係

表—1 重量, 粒度分布, 全個数より求めた比重値

測点番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
計算された比重	1.3	1.5	1.6	1.2	1.2	1.1	2.7	1.5	1.4	M	M	M	M	M	M

(注) M: 比重値が 2.7 以上のもの

すなわち比重値になる。1975 年 8 月の例を同じ方法で求めると比重は 2.7 になる。土砂が卓越していたことを裏付けるものである。しかしながら、この方法は同じ組成で最小二乗法を使用できる程に、重量と全体積が順次に変化していないと有効ではない。ひとつのデータからでも求まるが、データが非常にばらつくことが多い。特に、図—8 と 図—10 のような低水時の場合には、場所的な組成の差違が問題になる。また、この方法によれば比重が 1.0 よりも小さくなることが多い。表—1 は、重量と粒度分布を使い全個数を真値として算定したもので、各測点での定性的な差違が見られる。この方法も一定程度の信頼性しかないが、河川水の 1.3, 沖合部のほぼ鉍物質の卓越した部分等、その場所的差違を示していると思われる。種々の問題点を含むが、粒子の属性をある代表的な比重値で表現する上では一定程度に有効ではないかと思われる。

海水中の懸濁物質の分布は、その組成が複雑すぎるほどであるが、ある代表性を表現することは不可能でないと思われる。その代表性をどの水準で考えるかは各専門分野によって異なるかも知れないが、エスチャリーという流れが卓越した領域ということで、流れという外在的な条件でその分布形を考察してきた。しかし、本質的な分布の持つ意味は、粒子の物理化学的なあるいは生物学的な組成という内在的な条件であることは言うまでもない。それには時間スケール等を含めた大問題が山積みされているのが現状である。

4. あとがき

沿岸海域およびエスチャリーにおける懸濁粒子の輸送機構の力学モデルを考える時に、流れという力学的観点から流れの構造と懸濁粒子の動的な分布についてまとめてみた。その有効性と適用限界を明確にしながら、鉛直構造を含めた懸濁粒子の輸送・堆積拡散モデルが開発されるだろう。また、粒子の物理化学的挙動および生物学的組成を含めた海域の存在量予測モデルの開発の発端にもなると思われる。

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の外にも多くの人々の御助力によってなされたものである。氏名は略させて頂くが、その方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Suspended Solids in Water, Marine Science, Vol. 4, edited by R. J. Gibbs, Plenum Press, New York and London, 320 p., 1974.
- 2) Shelf Sediment Transport: Process and Pattern, edited by D. J. P. Swift, D. B. Duane and O. H. Pilkey, Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, 656 p., 1972.
- 3) The Benthic Boundary Layer, edited by I. N. McCave, Plenum Press, New York and London, 323 p., 1976.
- 4) Blumberg, A. F.: Numerical model of estuarine circulation, Proc. A.S.C.E., Vol. 103, No. HY3, pp. 295~310, 1977.
- 5) 鷺見栄一: エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構 (2), 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 199~203, 1976.
- 6) Bottom Turbulence, edited by J. C. J. Nihoul, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 306 p., 1977.
- 7) Soulsby, R. L.: Similarity scaling of turbulence spectra in marine and atmospheric boundary layers, J. Phys. Oceano., Vol. 7, No. 6, pp. 934~937, 1977.
- 8) 辻井雅彦・鷺見栄一: 浅海域における境界層構造について, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, No. 128, 1977.
- 9) Panofsky, H. A.: The atmospheric boundary layer below 150 meters, in Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 6, Annual Reviews Inc., California, pp. 147~177, 1974.
- 10) 辻井雅彦: Tidal estuary における海底境界層の構造, 昭和 51 年度東海大学海洋学部卒業論文, 1977.
- 11) 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.
- 12) Nikitine, I. K.: Hydromecanique des processus du transfert dans les flots turbulents sans pression, A12-1~A12-8, I.A.H.R., 1971.
- 13) 吉田陽一: 懸濁物質および微細生物の分布に関する研究, 京都大学農学部委託研究報告書, 1976.
- 14) 安達六郎: 岡山水道感潮域における懸濁物質の分布の微細構造と植物プラント分布との関連に関する研究, 三重大学水産学部委託研究報告書, 1977.
- 15) Sheldon, R. W. and T. R. Parsons: A practical manual on the use of the Coulter counter in marine science, Coulter Electronics, Toronto, 66 p., 1967.
- 16) 川名吉一郎・山岡到保・谷本照巳: 広湾における海底面近くの懸濁物質分布, 中国工業技術試験所報告, No. 1, pp. 51~60, 1976.