

エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構 (2)

鷺 見 栄 一*

要 旨 海洋での物質輸送機構の解明という課題は重要であるにもかかわらず、現在において非常に遅れている。理論および測定器ともに他の実験科学に比べて発展段階が遅れているためである。そのために理論を裏づけたり、理論を再構成するためのデータの集積がない。ここでは、流れという力学的観点より海洋の諸現象に種々の相似性の仮説を適用し、その妥当性と適用限界の解明に努めた。おもに、(1) 境界層近似、(2) 輸送の相似性、(3) 懸濁物質の分布則の三点についてである。

1. ま え が き

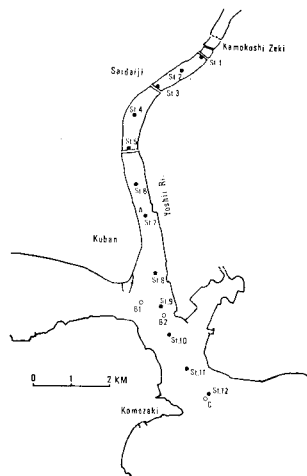
沿岸海洋という方法論も、観測システムも脆弱な所で、種々の現象を解明することが、現在、急務となっている。しかし、フィールド現象は物理化学的作用以外に生物作用が卓越している。体系化された学問を背景にその諸法則の成立を実証するものひとつの方法であろうし、その諸法則をフィールド現象にあった時間・空間スケールに拡大して再体系化するのもひとつの方法である。また、フィールド現象そのものから新たに再構成することも本来がひとつの物質状態である水科学の課題でもあると思われる。

ここでは、まず流体力学で得られている諸法則を沿岸海洋に適用することにする。ひとつは、「境界層近似」という概念で、河川・海洋・大気・管路というある固定された境界付近の流れの相似性を主張するものである。歴史的には、管路での理論、実験結果がいち早く集大成されたので、その諸結果を単純に適用することが多い。しかしながら、大気と同じく海洋は成層した流れであり、それとの比較で論じるのが妥当であろう。

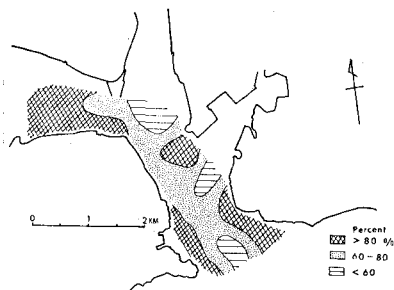
他のひとつは、輸送現象における「輸送の相似性」という概念で、海水中に含まれる種々の物質の流れによる輸送過程が流れに一次的に支配されていることを示すものである。

他方、懸濁物質は非保存性・沈降性物質であり、対象とする時間・空間スケールによっては拡散近似ができない。現在、そのような意味での懸濁物質の輸送機構とい

う観点から、フィールドを図一1の岡山水道の吉井川感潮域を選び、その輸送・堆積現象を解明しようと試みている。図一2は湾口近くの底質分布図であるが、より長い時間スケールで形成された結果である底質分布と海水中的懸濁物質との対応関係を解明するために図一1の各測点で懸濁物質の重量濃度、粒度分布を測定した。しかしながら、物質形態に時間スケールが入れられない現在、存在量を表現するのに場所的表現が多く用いられている¹⁾。たとえば、種々の現象を含んだ表現としての Turbidity maxima, Nepheloid layer, Resuspension area, Pycnocline 等である。ここでも、錯綜した現象を



図一1 岡山水道と吉井川感潮域の測点図



図一2 岡山水道の湾口部の底質分布図 (62 μ 以下の silt-clay の百分率)

* 正会員 工業技術院 公害資源研究所

実測データから類推することにとどめ、定性的な側面を報告する。

2. 境界層構造としての相似性について

流体力学におけるひとつの大きな分野である境界層理論をフィールドに適用し測定することは、実験の煩雑さも手伝って、組織的にデータを収集している所は非常に少ない。測定器の立ち遅れもあって断片的に行われているにすぎない。そこで、管路からの類推から、海底付近の問題を解明しようとしている試みがあるが²⁾、境界層としての構造が違うことが指摘され、誤った結果を導くことがある³⁾。理論が先行する時に応々にしてあることだが、後年の実験データの集積による変更あるいは修正は、科学の精緻化という点でやむを得ないことでもある。ここでは、密度流としての境界層として、大気と海洋の境界層の相似性を検証してみる。これは、より進んでいる大気境界層の知識を、より遅れた海底境界層に適用することによって、ある一定程度において理解を深める手掛りになると思われるからである。Wimbush と Munk による review⁴⁾ は、深海底ではあるが、スケールとオーダーの差異を認めながら、そのような考え方でまとめられている。

前報⁵⁾でも述べているとおり、海底付近の流れは、‘Constant stress layer’ と解釈することができ、境界層理論が適用できることが解明している。海底を境界条件とした種々の物質の分布を説明するのに使われる対数境界層の考え方の根拠でもある⁶⁾。しかしながら、非定常な密度流場で、地形的にも非一様な海域で常に成立するとは限らず、深さ方向とともに適用限界は明確にしなければならない。

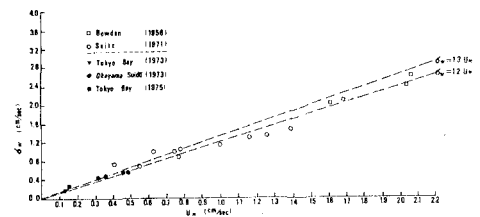
表—1 は、著者の得たデータのうち、東京湾⁷⁾と岡山水道⁸⁾の例である。表のなかの $\bar{u}_{*d}$ は、 $\bar{u}_{*d} = \sqrt{-\bar{u}w}$ から求めたものであり、 $\bar{u}_{*l}$ 、 $\bar{U}_{100}$ は流速の対数則から

求めたものである。 $\bar{u}_{*d}$ に比べて $\bar{u}_{*l}$ が非常に大きい、これは密度流場における流速の対数分布則の妥当性に再考を促すものである。懸濁粒子によるカルマン定数の変化という課題から説明することもあるが⁹⁾、塩分および懸濁物を含めた広義の密度流場としての速度分布則を考えるべきであろう。摩擦係数 γ は $\bar{u}_{*d}$ から求めたものであり、海底面の粗度との関係でまとめられることが望まれる。

一方、図—3 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る。Bowden¹⁰⁾ は電磁流速計、Seitz¹¹⁾ はドップラー型超音波流速計を使用している。境界層の特性速度 u_* ($\bar{u}_{*d}$) と鉛直方向の乱れ強さ ($\sigma_w = \sqrt{\bar{w}^2}$) との一次関係が成立している。実験定数について、中立状態の大気境界層では、Hanna¹²⁾ は 1.3、Yokoyama¹³⁾ は 1.16、海洋境界層では McCave¹⁴⁾ は 1.2 を求めている。これは、中立状態の成層乱流の機構の解明が未解決な今日、データの集積以外にないであろう。この関係によって、ほぼ密度流場としての大気と海洋の境界層としての構造が相似であると言えるだろう。

3. 輸送の相似性について

海洋における物質輸送機構を解明するための第一歩として、流れによる物理拡散近似がどこまで有効であるかを知っておくことは、物質分布を説明する時に第一次近似解として有効性がある。特に、海水中の種々の物質



図—3 大気と海洋の境界層構造の相似性

表—1 乱れ特性と摩擦係数

RUN NO.	HEIGHT	$\bar{W}$ (cm/sec)	$\bar{U}$ (cm/sec)	$\bar{\theta}$ (°)	$\bar{u}^2$ (cm ² /sec ²)	$\bar{v}^2$ (cm ² /sec ²)	$\bar{w}^2$ (cm ² /sec ²)	$\sigma_w = \sqrt{\bar{w}^2}$ (cm/sec)	$\bar{u}w$ (cm ² /sec ²)	$\bar{u}_{*d}$ (cm/sec)	$\bar{u}_{*l}$ (cm/sec)	$\bar{U}_{100}$ (cm/sec)	γ
T1-1	Z=1.5 m	0.0	5.0	246	0.55	0.41	0.04	0.19	-0.0204	0.14	0.62	4.4	0.0321
	Z=0.5 m	0.0	3.3	264	0.46	0.41	0.05	0.22	-0.0195	0.14			
T1-2	Z=1.5 m	-0.1	6.7	279	0.55	0.24	0.05	0.23	-0.0137	0.12	0.88	5.8	0.0218
	Z=0.5 m	0.2	4.3	300	0.53	0.43	0.06	0.25	-0.0183	0.14			
O1-E12	Z=1.5 m	0.4	13.2	168	0.77	0.85	0.22	0.47	-0.0974	0.31	1.86	11.3	0.0300
	Z=0.5 m	0.3	8.1	120	1.08	0.61	0.22	0.47	-0.1319	0.36			
O1-F17	Z=1.5 m	-0.4	10.6	353	1.87	0.80	0.29	0.54	-0.2382	0.49	0.73	9.9	0.0474
	Z=0.5 m	-0.1	8.6	299	2.90	0.47	0.23	0.48	-0.2090	0.46			
T3	Z=0.5 m	-1.4	5.2	87	0.56	1.11	0.09	0.30	-0.0238	0.15	—	—	—

は、輸送過程中に形態も組成も、物理・化学・生物的作用を受け変化する。そのような非保存性物質でも、変化する過程の時間スケールによっては保存性物質と見なすことができる。海洋の諸現象に時間スケール（あるいは、空間スケール）の概念が入れられない現在、手法として、流れによる物理拡散近似がどこまで有効性があるかを検証することが第一歩であると思われる。アプローチの方法として、流体力学での基本的な考え方である Euler 的方法と Lagrange 的方法を採用する。

Euler 的方法とは、定点で流れてくる物質を連続記録させる種々の測器（濁度計、蛍光光度計等）で検出する方法である。

図-4 は、1974 年 9 月 15 日に岡山水道での 図-1 の測点 5 で行った観測結果である。クロロフィル-a を測定すると言われている蛍光光度計と超音波流速計を同時に測定した¹⁵⁾。鉛直方向ではなく、流れ方向で流れとの対応性がほぼあるといえる。潮汐流の卓越するエスチャリーであるので、鉛直輸送項よりも水平輸送項の方が変動量に対して寄与が大きいと思われる。

図-5 は、1973 年 10 月 12 日に岡山水道での 図-1 の測点 C で蛍光光度計で測定した結果であり、この場合には、乱流理論でいう $-5/3$ 乗則に従っている。しかし、流体力学でいう Intermittency と同じく、その時系列データには 図-6 のような特異部分が存在する。植物性プランクトンのパッチ現象として説明されているものであり、拡散近似だけでは説明できない。

他方、流水とともに測定する方法を Lagrange 的方法というが、図-7 は濁度計で測定した結果である¹⁶⁾。2 ケースともに乱流理論でいう -2 乗則にはほぼ従っている。

以上のように、各種の測器の検出限界の問題はあるにしても、対象とした時間スケールでは第 1 次的に物理拡散近似ができるとと思われる。しかし、図-6 のように微

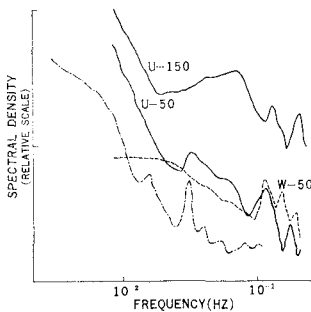


図-4 流速とクロロフィル-a 濃度のスペクトル図 (U-150 と U-50 は底上 150 cm と 50 cm の流れ方向の、W-50 は鉛直方向の速度スペクトルであり、一点鎖線はクロロフィル-a 濃度のスペクトルである)

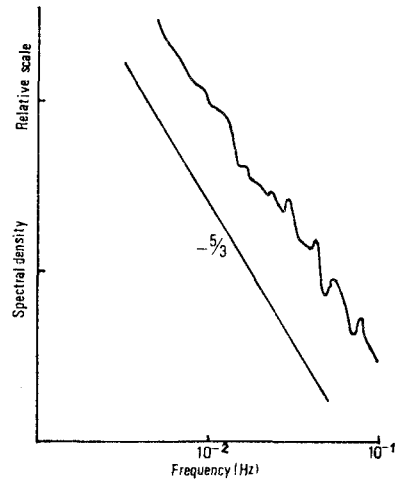


図-5 クロロフィル-a 濃度のスペクトル図

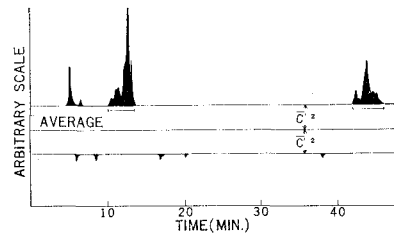


図-6 パッチ現象 (クロロフィル-a 濃度の時系列データとその分散値との関係)

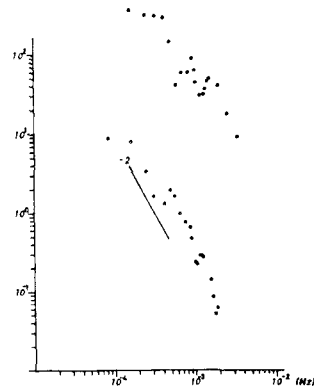
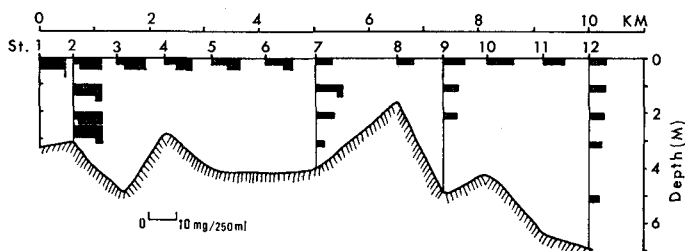


図-7 濁度変動の Lagrange 的特性 (KT 74-13 淡青丸航海より)

細にみた場合、その時空間スケールによってはそれに近似できない現象が存在する。

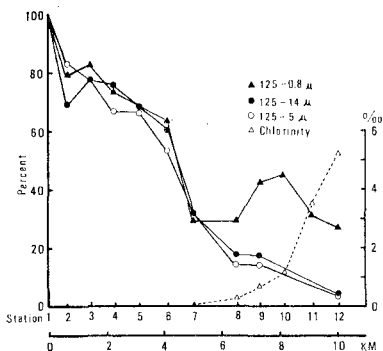
4. 懸濁物質の輸送・堆積現象について

懸濁物質は非保存性・沈降性物質であり、海域での存在量を説明することが非常に困難である。また、物質形態も物理的・化学的・生物的作用を受け、多くの現象がからみあっており、統一的にその分布を説明するのに

図—8 各測点における懸濁物質 (125~0.8 μ) の重量

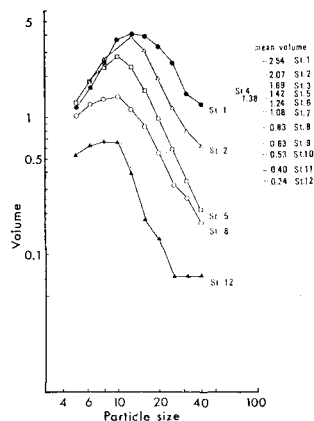
は、バック・データの集積を待つより仕方のないのが現状である。ある現象の一側面を説明することが多い。ここでも、沿岸域という流れの卓越した領域ということで、懸濁物質の輸送・堆積現象を類推するために、その重量濃度、粒度分布を測定した。測定方法の詳細についてはここでは述べないが、粒度分布はコールター・カウンター TA 型を用いた¹⁷⁾。

図—1 の吉井川感潮域で、1975 年 8 月 7 日に観測した。測定点は鴨越堰から湾口部までの約 10 km を 0.7~1 km 間隔で 12 点とった。各測点での 125~0.8 μ の懸濁物質の重量と地形を示したのが 図—8 である。観測日は、岡山で 7 ミリ、津山で 14 ミリの雨天の後なので、河川流量は 47.5 t/sec であり、河川からの懸濁物質の流入は多い。表層水については、測点 1 の 20.6 mg/250 ml から、測点 12 の 5.6 mg/250 ml と減少し、鉛直的には測点 2 の水深下 1 m, 2 m の 20.8 mg/250 ml, 18.3 mg/250 ml から測点 12 の 5.1 mg/250 ml, 4.2 mg/250 ml に減少する。堰から湾口までの表層水の懸濁物質のサイズの違いによる重量の変化を示したのが 図—9 である。測点 1 の各サイズの重量を 100% にした時の各測点の割合である。堰からの距離に従って減少しているが、125~0.8 μ については測点 9, 10 で再び増加した後に減少している。これは旭川水系からの流入と考えられる。一方、測点 6, 7 の間で急激に減少しており、塩分濃度の検出ということとの関係で凝集反応による沈降現象とも考えられるが、定性的にしか述べられない。図—

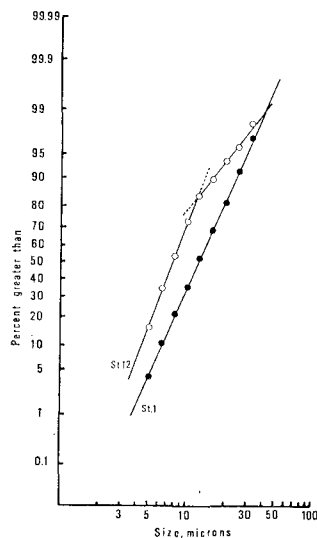


図—9 堰から湾口までの懸濁物質のサイズ別重量変化

10 は、各サイズの各測点における体積比率の代表例である。その平均値は、堰からの距離に従ってほぼ減少している。以上の諸結果から、懸濁物質は測点 1 から測点 12 の間で、輸送されながら種々の作用を受けているが、その分布の変化は沈降現象によるものと考えられる。図—11 は、体積比率の頻度を対数確率で表現したものである。測点 1 は対数正規分布をしており、順次に変形し



図—10 各測点の粒子体積のスペクトル図



図—11 測点 1, 12 の頻度分布図

ながら測点 12 の分布に移行する。測点 12 の分布は $10 \sim 12 \mu$ を屈折点とした二つの直線部に区分される。これは、完全混合状態である初期条件としての対数正規分布から、沈降現象等により、二つの分布形に別れていく過程を示し、河川水から海水中への懸濁物質の流入過程を解明する一例であると思われる。

海水中の懸濁物質の分布は、その組成が複雑であり、定式化した分布式を適用する妥当性¹⁸⁾はないが、沈降・浮遊という力学条件が卓越した領域では一定程度に有効であると考えられる。特殊な条件下での変化過程であるので一般論として考えられないが、力学現象としての輸送・堆積過程の適用の有効性を示す事例と思われる。

5. あとがき

フィールド現象にあたる場合に、実験室の論理といわれる多くの諸理論をその時空間スケールに翻案して解明していくことが多い。本報告でも、種々の相似性を考えながらまとめた。実証された仮説も一定程度の有効性しかないことはいうまでもない。しかしながら、海洋の中で生起する諸現象を解明するための一布石になれば幸いである。

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他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) D' Anglejan, B.F. and E.C. Smith: Distribution, transport, and composition of suspended matter in the St. Lawrence Estuary, Can. J. Earth Sci., Vol. 10, pp. 1380-1396, 1973.
- 2) Bagnold, R.A.: An approach to the sediment transport problem from general physics, U.S., Geol. Surv., Profess. Papers, 422 I, 37p., 1966.
- 3) McCave, I.N.: Sand waves in the North Sea off the coast of Holland, Marine Geol., Vol. 10, pp. 199-225, 1971,
- 4) Wimbush, M. and W. Munk: The benthic boundary layer, The Sea, Vol. 4, Wiley-Interscience, New York, pp. 731-758, 1970.
- 5) 鷺見栄一: エスチャリーにおける懸濁物質の浮遊機構(1), 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 453-458, 1974.
- 6) 梶原昌弘: 海底面上1m層内の溶存酸素量の垂直分布, 北大水産彙報, Vol. 23, No.1, pp. 9-16, 1972.
- 7) 鷺見栄一: 二層型超音波流速計の測定結果について, 公害資源研究所彙報, Vol. 4, No.1, pp. 21-31, 1974.
- 8) 鷺見栄一・石川公敏: 浅海底における境界層構造について, 公害資源研究所彙報, Vol. 5, No. 1, pp. 23-31, 1975.
- 9) McCave, I.N.: Some boundary-layer characteristics of tidal currents bearing sand in suspension, Mem. Soc. R. Sci., 6th Series, Liege, Vol. 6, pp. 187-206, 1973.
- 10) 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.
- 11) Seitz, R.C.: Results of a field study using the 3-axis doppler shift current meter, Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins Univ., Technical Report 72, 1971.
- 12) Hanna, S.R.: A method of estimating vertical eddy transport in the planetary boundary layer using characteristics of the vertical velocity spectrum, J. Atmos. Sci., Vol. 25, pp. 1026-1033, 1968.
- 13) Yokoyama, O.: An experimental study on the structure of turbulence in the lowest 500 meters of the atmosphere and diffusion in it, Reports of the Nat. Res. Inst. Pol. & Res., No.2, 118 p., 1971.
- 14) 前出 3)
- 15) 中田喜三郎・石川公敏: 沿岸海域における植物プランクトン量の変動について, 日本生態学会誌, Vol. 25, No.4, pp. 201-205, 1975.
- 16) 阪本 亘: 私信
- 17) 吉田陽一: 私信
- 18) McCave, I.N.: Vertical flux of particles in the ocean, Deep Sea Research, Vol. 22, pp. 491-502, 1975.