

潮流による拡散の水理模型実験について (IV)

樋口明生・杉本隆成

ON THE HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE DIFFUSION DUE TO THE TIDAL CURRENT (IV)

By Haruo HIGUCHI and Takashige SUGIMOTO

Synopsis

The similitude between the prototype and the hydraulic model in the diffusion phenomena due to the tidal current in broad and shallow estuaries or coastal sea waters are studied. The gravitational force and turbulent shear stress are taken as the external forces, but the effect of density, wind and waves, which may influence the diffusion, are not considered. Flow patterns and the diffusion coefficients with horizontal scale of 100 m to 10 km were well reproduced in the distorted Froude models.

The usefulness and some limits of the hydraulic model experiment were discussed.

1. ま え が き

近年、産業経済の発展に伴ない、わが国では鹿島から北九州を結ぶ太平洋沿岸、および瀬戸内沿岸には工業地帯が建設されつつある。このような工業地帯が完成すれば、いわゆる産業廃水による海水汚染が起る可能性があるが、計画を合理的に進めるためには、種々の廃水の流動拡散過程、生物化学的変質過程、水質汚濁の進行に伴なう環境変化などについて、各規模にわたって現況をよく調査して、その構造を明らかにするとともに、計画完成後の状態を事前に把握して、公害を起こす可能性のある場合には、これを未然に防ぐ対策や、計画の修正を行なう必要がある。

本研究は、こうした問題を背景として、上に述べたような事前調査の一手段として水理模型実験をとりあげ、廃水のいろいろな規模における流動・拡散過程や、汚水の濃度分布の局地性などの物理的な側面を明らかにするための適用性を検討しようとするものである。過去3年間、有明海大牟田地区、茨木県鹿島地区、瀬戸内海水島地区を対象として、鉛直に平均した流れに対する海底摩擦効果をあわせた Froude 模型を用いて、潮流および染料拡散等の検証実験を行ない、有用な結果を得てきた^{1),2),3)}。

水理模型実験は、原型との力学的相似性を保ちながら、幾何学的な大きさのみを変えることによって、簡単に答を出そうとする一種のアナログ計算機と考えられるが、これを行なう場合、最も重要なことは、いままでもなく原型における現象と模型における現象との相似性である。ここでは、過去3回の実験結果のほか、港湾あるいは河口付近における流れ、および水平混合の特徴など、流れの微細構造に関する2, 3の実験結果を加えて、水理模型実験の相似則と有用性、およびその適用限界について総括的に考察を加える。

2. 流動および拡散の再現性

(1) 流動の再現性

Estuary を含む沿岸海域では、一般に海流、潮流、局所的な吹送流、陸水の流入に伴なう密度流など各種の流れが存在する。このような流れは、海岸・海底の地形や摩擦の影響を強く受けるため、その中には大小

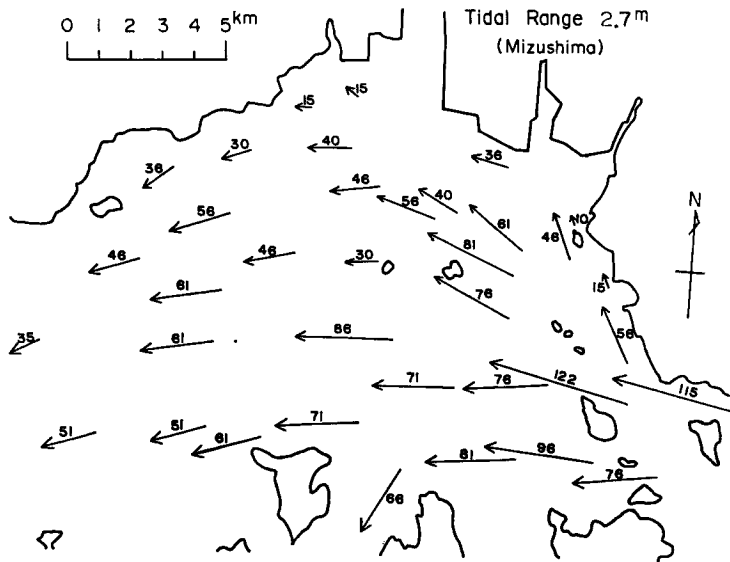


Fig. 1 (a) Flow pattern in the flood in Mizushima Nada, numeral means velocity in cm/sec (prototype).

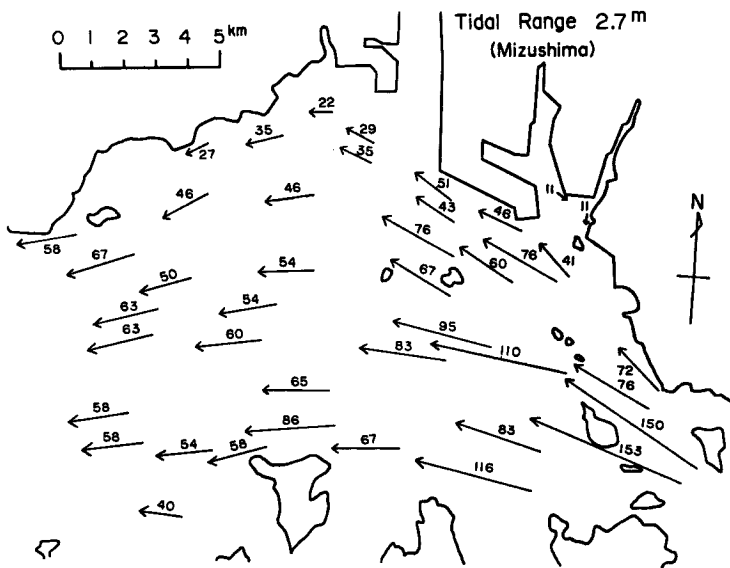


Fig. 1 (b) Flow pattern in the flood in Mizushima Nada, numeral means velocity in cm/sec (model).



Fig. 2 (a) Flow pattern at high water in the Omuta area, numeral means velocity in cm/sec (prototype).

Fig. 2 (b) Flow pattern at high water in the Omuta area, numeral means velocity in cm/sec (model).

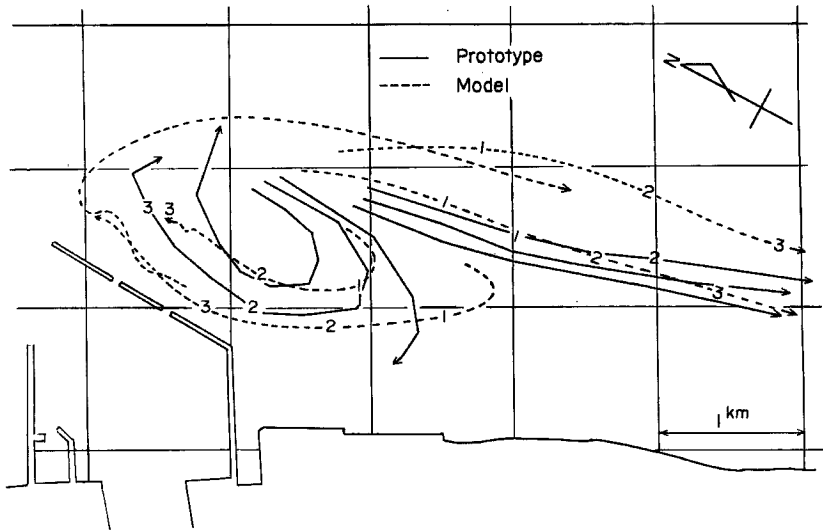


Fig. 3 Locus of float near Kashima Harbor, numeral means lapse time, in hour, after floats were thrown.

の渦流が存在するが、ここでは潮流が支配的な場合にのみ話しを限定する。潮流が支配的となるための条件としては、(i) 水深に比して潮差が大きいこと、(ii) 考えている地点における流水の断面積に比して奥部の水面積が大きいこと、(iii) estuary の場合 tidal prism に比べて、一潮時あたりの河川流量が小さいこと、の3つがあげられるが、そのような場所の例として有明海大牟田地先海域と瀬戸内海水島地先海域があげられる。このような海域における流れは、特徴的な3つの流れ、すなわち(a)潮流そのもの、(b)島や海岸線の凹凸によって起こされる流れ、および、(c)小規模の渦流によって構成されていると考えることができる。このうち潮流そのものに関していえば、各潮時における流速の水平分布は、Fig. 1 (a),(b)を比較すればわかるように、海底摩擦の効果をあわせることによって、かなりよく再現することができる。

湾口や港口、あるいは河口付近などに行ける地形性渦流・逆流についても、Figs. 2,3によるとその形、大きさ、強さともかなりよく再現されているといえる。Fig. 2 は有明海大牟田地先における高潮時の流況を示しており a は原型、b は模型に関するものである。Fig. 3 は鹿島港の防波堤背後に行ける逆流の状態を示したものである。

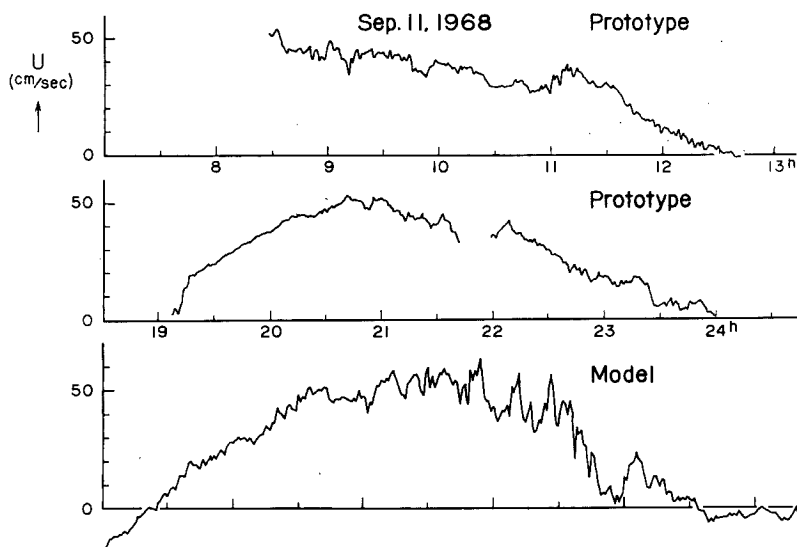


Fig. 4 Variation of velocity of tidal current in Mizushima Nada.

潮流に伴う水平渦としては、海岸・海底地形に由来するものと海底摩擦に起因するものが考えられる。これらの再現性を見るための十分な資料はまだ得られていないが、その一例を Fig. 4 に示す。これは水島灘における上げ潮時の潮流流速の時間的変化を示したもので、上2つは現地で CM2 型流速計により測定した値であり、最下段は模型内でスパン 4 cm の超音波流速計で測定したものである。上げ潮後期が始まる頃から、原型、模型とも大規模で強い乱れが現われるが、これは観測地点の南東約 10 km にある島や下津井半島などの wake の影響と考えられる。詳細を論じられるデーターではないので確かなことは言えないが、卓越している10分~20分程度の乱れは模型の方が2, 3倍強く現われている。

(2) 拡散現象の再現性

有明海北部や、備讃瀬戸、水島灘のように浅くて潮流が強く、夏期でもほとんど成層が見られないような海域では、一般の estuary のように密度分布に伴う鉛直循環流は見られず、水平混合は主として潮汐流に伴う水粒子移動距離以下のさまざまな規模の乱れによって行なわれていると考えられる。

河川あるいは港内から出る河川水あるいは廃水は、一次的には、河口、港口付近の潮流に伴う渦流(反

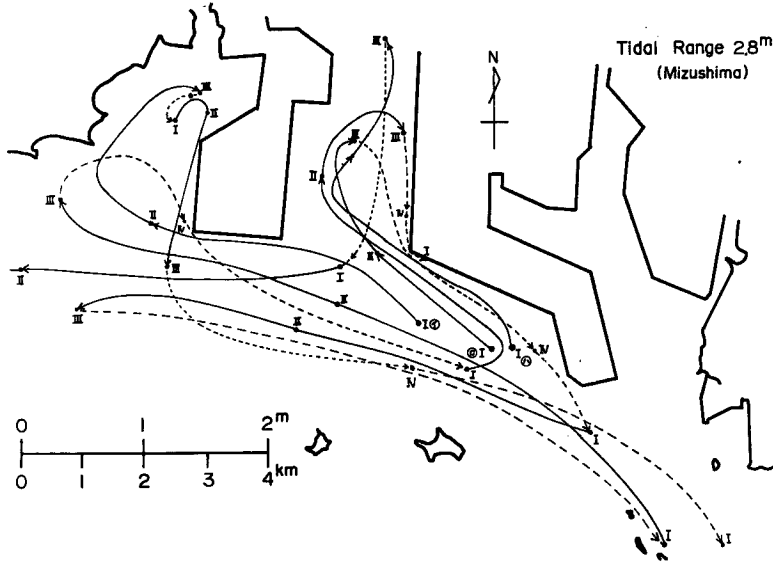


Fig. 5 Locus of float in Mizushima Nada, I: low water, II: flood, III: high water, IV: ebb (model).

流)に乗って分布する。つぎに、それらが種々の規模の分散効果によって拡がると考えられる。このような物質の拡散現象は、前述の特徴的な流動規模に基づいて、現象の規模 l によって3つに分けて考えれば、より簡明に取り扱うことができる。すなわち

- (a) $l \geq$ tidal excursion (10 km 程度)
- (b) $l \sim$ 局所渦流 (数 100 m ~ 1 km 程度)
- (c) $l \sim$ 小規模の渦流 (10 m ~ 100 m 程度)

のように分けて考えることにする。

(a)の tidal excursion 程度の規模の水平混合を問題にする場合には、水平および鉛直 shear に伴う分散のほか Fig. 5 に見られるような海岸地形による流れの取れん発散に起因する水粒子の広域にわたる移動の影響を考える必要がある。また長期にわたる連続固定点源からの拡散を考える場合には、tidal excursion が月令によって変化するから、各周期に放出された拡散物質の重心が分散することや、恒流の影響なども

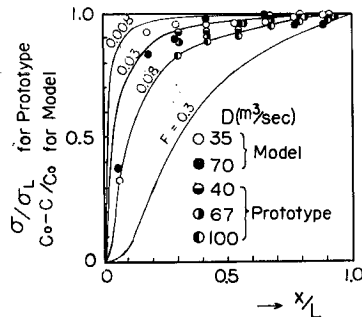


Fig. 6 Density σ/σ_L (prototype), dye concentration $(C_0 - C)/C_0$ (model), and flushing number F along the extension line of Chikugo River.

考慮する必要がある。

さて、こういった拡散現象の再現性に関しては、一潮時あるいは数潮時にわたる平均濃度分布と、それから求めた水平拡散係数を用いて、模型内における拡散現象の再現性を調べることができる。有明海の筑後川河口先における広い舌状の塩分分布の主軸方向に横軸を、河口を原点としてとり、最も沖側の値で除した各地点の塩分、あるいはそれに相当する染料濃度を縦軸にとって図に示すと Fig. 6 のようである。この図によると模型の値と原型の値は、かなりよく一致しているといえる。これから拡散係数 K を $K=2B\zeta_0U$ を用いて求めると $8.2 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。ここに B は混合係数で 0.08 程度、 $2\zeta_0$ は tidal excursion, U は流速の振幅である。

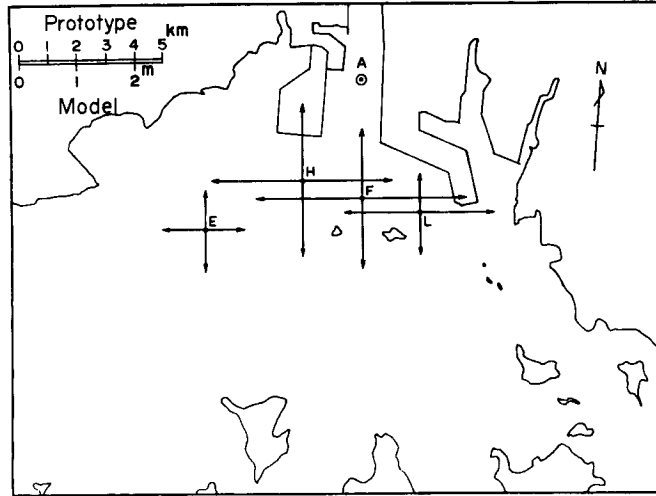


Fig. 7 (a) Dispersion of floats after one tidal cycle thrown at the station A; L: low water, F: flood, H: high water, E: ebb (model).

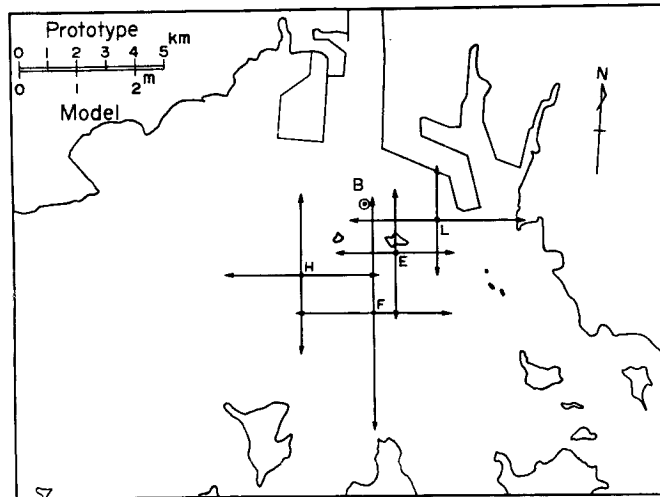


Fig. 7 (b) Dispersion of floats after one tidal cycle thrown at the station B; L: low water, F: flood, H: high water, E: ebb (model).

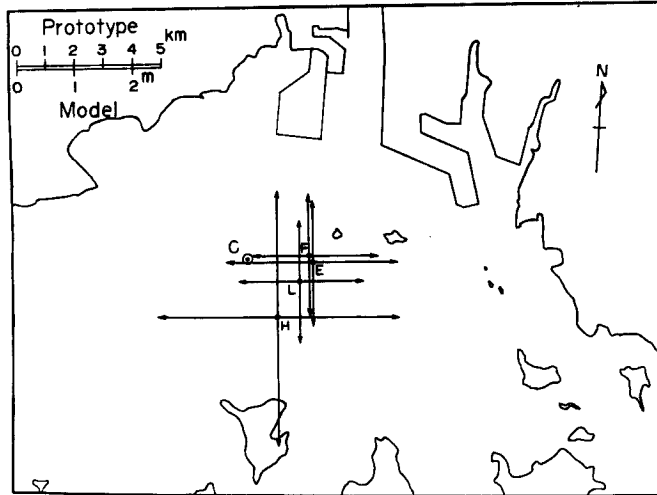


Fig. 7 (c) Dispersion of floats after one tidal cycle thrown at the station C; L: low water, F: flood, H: high water, E: ebb (model).

一方、模型内での浮子の一潮時あたりの分散を、投入地点別に Fig. 7 (a), (b), (c) に示す。ここで L, F, H, E は投入潮時を示しており、L は干潮時、F は上げ潮最強時、H は満潮時、E は下げ潮最強時である。たとえば、Fig. 7 (c) では投入点 C に満潮時に投入した浮子は干潮時には下津井瀬戸の東まで流下するが、つぎの満潮時には図に H で示した地点のまわりに戻ってくることを示している。図にはその場合の偏差が矢印の長さで示されている。この例では、流れが島や海峡の影響を強く受けるために、大きな偏差を生じるものと考えられる。なお、ここで用いた浮子は直径 2.5 cm のコルク板の裏に 1 cm 幅のブリキ

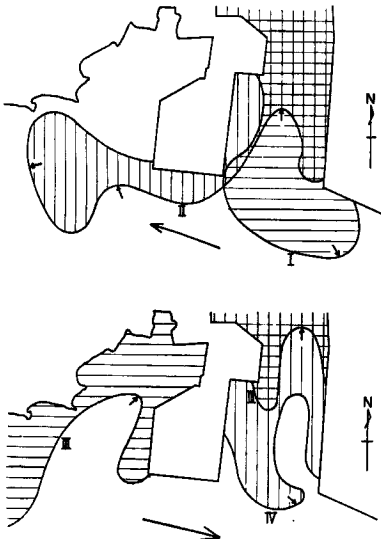


Fig. 8 Movement of water mass near the mouth of Takahashi River; I: low water, II: flood, III: high water, IV: ebb, (model).

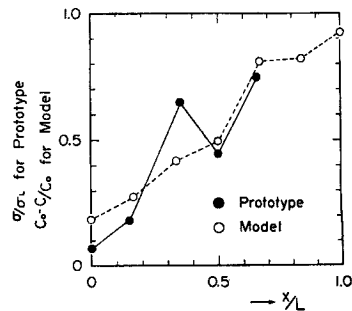


Fig. 9 Chlorinity σ/σ_L (prototype) and dye concentration $(C_0 - C)/C_0$ (model) along the center line of Takahashi River.

製の十字型の抵抗板をとりつけたものである。

(b)の規模の拡散現象は、これを支配する渦流自体が、潮時によって生成消滅することに依存するから、これに乗って移動する廃水塊は、front を形成し変形分散する。原型においてこれを追跡することは非常に多くの労力を必要とする。また、その力学的な取り扱いは困難である。したがってこの現象の再現性は多くの場合、Fig. 3 などに見られるような浮子の流跡による地形性渦流の再現性を調べることで満足しなければならない。

模型における例として、高梁川河口付近における河水と海水との混合状態を模式的に示すと Fig. 8 のようである。図中 I は干潮、II は上げ潮、III は満潮、IV は下げ潮時を示す。この場合にも流水は相似性が保たれていると考えられるから原型においても同様な現象が期待される。事実、岡山県水産試験場の調査によると高梁川河口西寄りに、低塩分の水塊が存在することが報告されている⁴⁾。濃度分布の一例として、高梁川の河口付近の塩分(原型)あるいは染料濃度(模型)の水平分布を Fig. 9 に示す。図の横軸は河口から 6 km 上流の地点を原点ととり下流に向かって測った長さであり、縦軸は、表層濃度の一潮時にわたる幅方向の平均値である。この図は、河口付近の水平渦による flush 効果に伴う濃度分布が再現されていることを示している。

(c)の規模の拡散現象においては、潮流は時間とともに正弦的に変化する一般流として現われる。この流れの中に投入された 10 m~1 km の規模の物質は、同程度の規模の水平渦流や shear によって拡がる。海中に染料を投入して、その可視面積の拡がりから求めた各海域の拡散係数を、相当円の直径を横軸に、一括して Fig. 10 に示す。実線は原型、破線は模型を表す。有明海大牟田地先海域の染料の拡散実験と筑後川河口先の塩分分布(模型では対応する染料の濃度分布)から求めた拡散係数を Fig. 11 に示す。図中●印、○印は染料の拡がりから求めた拡散係数、+印は Fig. 6 から求めた拡散係数である。また、水島地先海域の染料の拡散実験と、Fig. 7 の浮子の分散から求めた拡散係数を Fig. 12 に示す。これらより有明海および水島灘において数 10 m~10 km 程度の規模の拡散係数が、原型と模型とでよい一致を示していることがわかる。

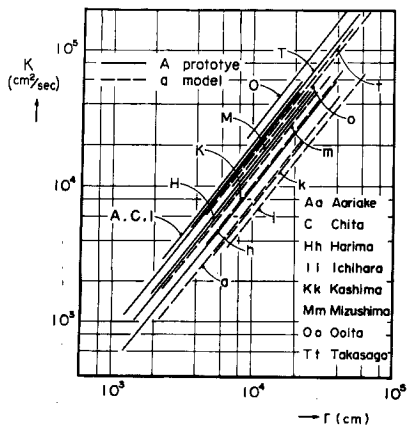


Fig. 10 Diffusivity K obtained from increasing area of floating dye patch versus equivalent radius.

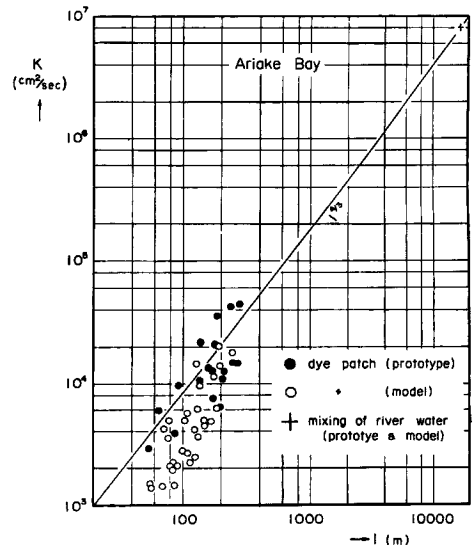


Fig. 11 Diffusivity K obtained from increasing area of floating dye patch and from flushing number shown in Fig. 6 versus scale in Ariake Bay.

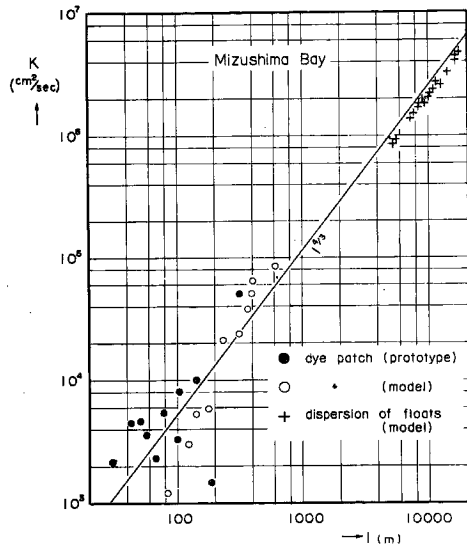


Fig. 12 Diffusivity K obtained from increasing area of floating dye patch and from the dispersion of floats shown in Fig. 7 versus scale in Mizushima Nada.

3. 潮流による拡散の相似性

ここでは、流れは主として重力と海岸・海底摩擦力によって支配され、水平密度分布による影響は無視できるような場合を考えている。したがって、一般には拡散現象と流動とは切りはなせないが、ここでは、一般流およびそれに伴う種々の規模の水平・鉛直渦流によって拡散現象が支配されている場合に限定し、潮流による拡散の相似則を、渦流を含めた流動の相似の問題と、それに伴う拡散現象の相似の問題に分けて考察する。なお、ここでは結果として起こる見かけの水平混合について知りたいという理由から、運動方程式および拡散方程式としては海面から海底まで積分したものについて考える。

(1) 流動の相似性

潮流は水平方向に卓越しており、圧力は静水圧分布をなすとし、底面摩擦だけがあるものと考え、運動方程式および連続式はつぎのように表される。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + sU \frac{\partial U}{\partial x} + sV \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{C}{2h} U^2 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + sU \frac{\partial V}{\partial x} + sV \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{C}{2h} V^2 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uh) + \frac{\partial}{\partial y}(Vh) = 0 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

ここに、 U および V はそれぞれ x および y 方向の平均流速、 t は時間、 ζ は水面昇降量、 C は海底の摩擦係数、 g は重力加速度、 h は水深、 s は流速の鉛直分布に関係した1に近い係数である。

現象が相似であるためには、原型に関するこれらの式と模型に関するこれらの式の、対応する各項の比が等しくなければならないから、原型に関する量との比を添字で表わし、 $s_r \approx 1$ とみなせば、

$$U_r = V_r = h_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

$$t_r = x_r h_r^{-1/2} \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

$$C_r = x_r^{-1} h_r \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

が得られる。(3.5) 式は Froude の相似則であり、(3.6) 式は摩擦抵抗を規定する条件である。

つぎに河口や、港口付近の、潮流に伴なう局所的渦流を相似にする条件を考える。このような流れは、一般に次式に示す Reynolds の相似則によって再現される。

$$Re_r = \frac{U_r L_r}{\nu} \text{ (層流)}, \text{ または } \frac{U_r L_r}{K_{xr}} \text{ (乱流)} = 1 \dots\dots\dots(3.7)$$

この場合には、局所渦流をひきおこす沖側の潮流の流速を代表流速に、地形の大きさを代表長さにとることが妥当と考えられる。また模型における流れも乱流の場合には粘性係数として渦動粘性係数を用いるのが妥当であろう。この局所流（ここでは 1 km 規模）に対する渦動粘性性としては、底面摩擦のほかに、局所流によって誘発される 100 m 程度の渦流による渦動粘性をとることが妥当であろう。100 m 規模の水平拡散係数（渦動粘性係数として代用できるものと仮定する）は Figs. 11 および 12 に示すように染料の拡散実験により、その再現性が確かめられている。したがって、原型と模型とで乱流 Reynolds 数 $Re_r = UL/K_x$ が一致するために、局所流がよく再現されているものと思われる。ここで、最も小さい規模の現象として扱っている 10 m ~ 100 m 規模の渦流（境界層性乱れ、および地形性渦流が cascade down して生成された乱れ）の相似性については確かな議論のできる段階に至っていないが、縦横の縮率が 10 倍程度異なったりいわゆる歪模型における等方に近い乱れは、原型に換算したときに水平に大きく引のばされることになり、相似性は成り立たないと思われる。

ただし、実験は単位質量単位時間あたりの乱れのエネルギー（鉛直成分および水平成分の和）の逸散率をあわせることを試みている。このような模型での歪効果については今後の研究が必要であるが、次節で簡単に触れる。

(2) 拡散現象の相似則

まず最初に、潮流が支配的な沿岸海洋における水平混合、拡散の内部構造の実体を把握することが必要であるが、密度が一樣な場合ですら、それが水平渦流によるのか、流れの鉛直 shear に伴う shear dispersion によるのかはよくわからない。拡散現象の相似則についても、前節に述べたように、3つの規模に分解して考察をすすめることにする。

まず、tidal excursion の規模の拡散現象を支配する機構は、2. (2) の (a) で述べたようであるが、この場合の水平混合は、流跡を含む平均的な流況があつておれば、内部混合をあわせることによってほぼ再現されよう。この際の内部混合としては、とくに転流時前後における水平混合（これには海岸・海底地形、河川、港等の感潮体積とその位相遅れ等の、広い意味での地形の影響が大きい）があげられよう。地形の影響としての水平渦流の再現性は、前項にのべた通り、鉛直に平均した平均流に関する Froude 数と海岸、海底摩擦効果をあわせれば十分満足される。

一方、潮差不いしは、tidal excursion が月令によって変化するために起こる拡散物質の重心の分散は、潮差をあわせれば十分再現することができるであろう。しかし、ここに述べた実験では、この分散の効果は取り入れられていない。地形性水平渦流による水平混合の再現性についてはさきに述べた渦流の再現で満足しなければならない。

つぎに、境界層性乱れによる水平および鉛直混合について、前報では Kolmogorov の仮定が成立つような乱流場を仮定して、水平渦動拡散係数

$$K = \epsilon_h^{1/3} h l^{4/3} \dots\dots\dots(3.8)$$

および海底摩擦をあわせた Froude 模型で再現されると述べた。しかし、ここに ϵ_h は水平乱れに関する単位質量、単位時間あたりのエネルギー逸散率であつて、前報 (3.3) 式でのべた鉛直 shear の場で内部的に逸散する ϵ ではないから、その誤りを訂正しておく。 ϵ_h の実体は、地形性の中規模水平渦流の cascade down により生ずる水平乱れの ϵ_{h1} と、境界層性乱れの水平成分の ϵ_{h2} との和である。

ところで表面に瞬間的に投入された染料域の拡がりについて、われわれが行なった追跡時間 t は 3 時間程度である。染料が鉛直に一樣になる時間 t_1 は密度が一樣な場では、 $t_1 = H^2 / \pi^2 K_x$ で与えられるが³⁾、水深

10 m, $K_z=10$ 程度の場合, $t_1=10^4$ 秒となる。現地実験の際は投入3時間後でも底層には達していないことを考えると, $t_1 \gg 10^4$ 秒である。この場合, 染料の拡散現象には shear による分散の影響は二次的であると考えられる。このことから, この規模の染料の拡がりから求めた拡散係数がよく再現されていることは, 渦動拡散の再現性を示しているといえる。

潮流による shear 分散の効果は, 一潮時以上の時間, tidal excursion 以上の規模で, 意味をもつと考えられる。水深 $h=10$ m, 潮流の振幅 $u=50$ cm/sec の海域で shear 分散の係数 D_x を式 $D_x=0.31 uh$ により求めると, 1.5×10^4 cm²/sec 程度となる。成層している estuary のように K_z が小さい場合, たとえば K_z が2桁小さくなると, D_x は 10^3 cm²/sec 程度になり, 水島灘における 10 km 規模での渦動拡散係数と同程度になるが, 有明海や水島灘のように広がって, 密度が鉛直に一樣な浅い海域では二次的な影響しか持ち得ないと考えられる。この shear 分散については, 4. (3) で述べるように, 歪模型においては, 歪の影響があらわれるため, 拡散現象の再現性は得られない。

4. 潮流による拡散の数理模型実験の有用性と限界

(1) 数理模型実験の有用性

数理模型実験には2つの大きな意味がある, その一つはアナログコンピューターとしての役割である。実験では潮流に伴う地形性渦流の存在に基づく濃度分布の局所性を調べたり, 埋立や浚渫などに伴う海岸・海底地形の変化, 流入地点や流量などの廃水に関する条件の変化に対応して流れや濃度分布の変化を見る, といったことが簡単に行なえるのである。

他の一つは, 支配因子の重要度がよくわかっていない流動, 拡散現象の解明にも十分大きな意味を持ち得ることである。事実, 河川や estuary, 沿岸海洋の水質汚濁等に関する初期の研究において, 大きな貢献をなしてきた。

このほか数理模型の特長として, 水塊の移動や濃度分布などの現象が目よく見え, それまで気がつかなかったメカニズムが数多く発見されるという大きな利点がある。また, とくにメソスケールの現象は, 定常的な取り扱いが困難であり, 観測に際して, 限定した条件で長期間の連続記録を, これに相当する空間的規模で得るということは, 幸運にめぐまれたとしても, 多大な労力と費用を必要とするから, 数理模型実験の利用は, ますます増加するものと思われる。

(2) 数理模型実験の限界

(a) Model limit の影響

港または河口から出る廃水の, 潮流による水平拡散を問題にする場合, 口部付近は下げ潮時に港口または河口から突出す plume によってある時間おおわれる。その領域を第一次影響域と呼ぶことにすれば, それは投入点から tidal excursion 程度 (有明, 水島の場合 10 km 程度) の範囲である。この第一次領域だけを問題にする場合には流れに対する条件からは, model limit として投入点より tidal excursion の2倍程度をとればよいといえる。

潮流による一潮時あたりの分散は 1~2 km であるから, 上のような模型範囲では約10周期後にはその影響が出はじめる。厳密には拡散に対する条件として, model limit における flux を考慮しなければならない。しかしながら, model limit で濃度が0に近く, かつ flux による累積量が対象海域中の量に比べて無視できる程度の時間内では, model limit における flux の影響は小さいと考えられるから, この場合には model limit での flux は考えなくてもよい。

一般に, sink がない模型では染料拡散に対する定常状態というのは実現されない筈である。ある地点から染料を連続的に投入する場合を考えると, 着目する地点では, 初期には潮時に応じて濃淡を繰り返しながら, 漸次その濃度が高まって行く。いま, ある特定の位相たとえば満潮時だけについてみると, 時間の経過とともに濃度の増加率は次第に低下してくる。したがって, ここでは増加率が一定の値を下回った時にこの地点では擬似的に定常状態になったと考えることにする。場所的には投入点に近い所から順次このような定

常状態に達する。実験では、着目する範囲内では放流開始後数10周期で、定常に達したが、地点によっては model limit の影響が現われる可能性もあり、この点からも限界を考えねばならない。これは、本質的には濃度に関する境界条件を考えることによって解決する。

(b) 底面の粘性境界層および表面張力の影響

さて、大体の model limit が決定されると、実験施設の規模から、最小の水平縮尺が決まる。鉛直縮尺を水平縮尺と等しくすると、沿岸海洋の場合には、模型の水深が浅すぎて、底面の粘性境界層と表面張力の影響が現われるから、広範囲の海域を対象とする場合には模型を歪ませなければならない。しかし、歪を大きくすると底面粗度を大きくしなければならなくなるし、また鉛直流の影響が現われるから、10~20以下の歪にするのが普通である。

模型において粘性境界層の影響を除くための条件としては、

$$\frac{H^2}{\nu T} \gg 1 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

があげられる⁶⁾。ここに H は水深、 ν は水の粘性係数、 T は周期である。通常、表面張力の影響を除くためにも、また Manning 式の適用限界からも、模型内の水深は 1 cm 以上は必要である。

水面がほりにおおわれると、表面張力の影響が著しくなるから、きれいな水で実験しなければならない。また、流速測定に使用する浮子には、抵抗板などを取りつけることによって、できるだけ表面張力の影響を除くようにしなければならない。

(c) 拡散現象の再現性に及ぼす模型歪の影響

鉛直拡散係数 K_z は、流速の鉛直分布が、対数で表わされる場合には

$$K_z = k U_* z \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

で表わされるから、原型と模型との比は、次式で与えられる。

$$K_{zr} = C_r^{1/2} U_r h_r = x_r^{-1/2} h_r^2 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

流速が、Van Veen の式 $u = U \zeta^\beta$ (ただし $\zeta = z/H$) で表わされる場合には、

$$\left. \begin{aligned} K_z &= K_0 \zeta^{1-\beta} (1-\zeta), \\ \text{ただし} \quad K_0 &= \frac{C^{1/2} u_* h}{\beta(1+\beta)}, \quad \beta = \frac{1}{5.2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

で与えられる⁷⁾から、

$$K_{zr} = C_r U_r h_r = x_r^{-1} h_r^{5/2} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

となる。

次元的には

$$K_{zr} = h_r^2 t_r^{-1} = x_r^{-1} h_r^{5/2} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

であるから、(4.6) 式で換算した場合には、もし、実際の流速が対数分布なら、 K_z に対する歪の影響は $(x_r/h_r)^{-1/2}$ となる。Van Veen 式で表わされる場合には歪の影響はない。

流れの鉛直 shear に伴う水平分散効果については、 K_z に対する歪の影響が $(x_r/h_r)^{1/2}$ で与えられる場合、Harleman によって指摘されているように、その歪は次式のように導かれる⁸⁾。

$$D_x = 5.9 u_* h \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

$$D_{xr} = C_r^{1/2} U_r h_r = x_r^{-1/2} h_r^2 \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\frac{K_{xr}}{D_{xr}} = \frac{x_r t_r^{-1}}{x_r^{-1/2} h_r^2} = \left(\frac{x_r}{h_r} \right)^{3/2} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

ただし、3. (2) で述べたように、水平の規模および水深が小さい場合に限られる。

水深以上の規模の水平渦動拡散係数についてはまだ検討の必要は多いが 3. (2) で述べたように、水平乱れに関するエネルギー逸散率が、歪模型でも再現されているために、広い領域にわたって、比較的よい再現性が得られているものと解釈できる。

(d) 再現可能な現象の規模

ここで扱っている現象はたかだか 30 km 程度の規模である。それ以上の規模になればコリオリ項が無視できなくなるため、回転系でない模型での実験は困難となる。したがって、これが対象とする現象の規模の上限となるであろう。また、数 10 km 以上の規模の水平混合を支配する因子には、定常流や、gravitational vertical circulation, lateral circulation などによる移流項が卓越することも考えられるし、気象や外海の長周期の擾乱の影響等も含め、現象自体が、まだよく把握されていないため、現在の段階ではそれらを定量的にとり入れることはできない。

他方、現象の規模が小さくなると、模型内では粘性の効果が現われるようになるから、そこに拡散現象の再現可能な下限が存在すると考えられる。そのほか、起潮機等の実験施設や計測の方法から下限が決まる可能性もある。

(3) 実験の拡張の可能性

これまででは、保存性の物質が、密度が一樣な海域で拡散する場合を取り扱ってきた。しかし、現実には沈澱や自浄作用などのため非保存性の場合もあり、また一般には海域に流入する河川水、工場廃水、都市下水などは、海水とは密度を異にするから、拡散には密度差の影響が現われているものと考えられる。ここでは、水理模型実験でこうした条件を取り扱う場合の可能性についてふれる。

(a) 非保存物質への拡張

定常状態における物質の濃度分布を論ずる場合、非保存性あるいは sink の強弱は重要な意味をもってくる。これを実験的に取り扱かうには、たとえば任意の退色速度が選べるような蛍光染料などの開発が必要である。

非保存性物質の拡散を取り扱かう他の方法が、すでに用いられている。すなわち、瞬間点源染料域の拡散による濃度の時間的な変化を知りたい場合は、実験値に減衰率 e^{-kt} を乗じて補正すればよい。ここに k は減衰係数、 t は時間である。

(b) 密度差のある場合への拡張

第 II 報に述べたが細長い港の奥に投入された温廃水の tidal flush の問題を対象として密度差を考慮した実験を行なった。その際形成される 2 層間の混合の相似則として、 $\Delta\rho/\rho$ (ただし $\Delta\rho$ は海水と温廃水との密度差) を模型でも原型と等しく取ることをあげた。

従来の研究によると、tidal estuary の模型で、多数の金属片を試行錯誤的に配置して流れの分布を合わせた場合には、塩分分布は、水平、鉛直方向ともよく再現されるが、廃水などの拡散現象は再現されないことが報告されている⁹⁾。われわれは、鉛直に平均した流れについて、必要な底面粗度を与えることで、議論を進めてきたが密度差のある場合の問題を扱かうためには、流れおよび密度の鉛直分布をあわせるようにする必要がある。

5. あとがき

以上、主として有明海大牟田地先海域、茨木県鹿島港および地先海域、瀬戸内海水島地先海域を対象とした水理模型実験の結果を用いて潮流による拡散現象の相似性について考察した。模型は、鉛直に平均した流れに対する Froude 数と海底摩擦効果をあわせたものであり、縮率は、有明海模型では水平 1/2000、鉛直 1/200、水島灘模型では水平 1/2000、鉛直 1/160、鹿島灘模型では水平 1/500、鉛直 1/63、である。ここでは半日周期のみを対象とし、密度、波浪、風などの影響は考慮していない。ただし、鹿島灘模型では、沿岸流と密度差を与えた実験も行なっている。実験結果と考察を要約すれば

- (1) 潮汐はほぼ再現される。
- (2) 潮流については、tidal excursion 程度の大規模な流れ、および地形性洪流程度の中規模の流れがともに再現される。
- (3) 潮流に伴う水平乱れには、底面境界層性の水深程度の規模のもの、島や半島の後流中の乱れと

が含まれている。後者については、定量的には、まだ確かなことは言えないが、模型の方が幾分大きいようである。

(4) 染料の拡散実験から求めた拡散係数は 100 m~1000 m の規模ではほぼ再現される。水平縮尺 1/2000 の模型では 100 m 以下の規模の拡散係数は、模型の方が小さくなる傾向がある。

(5) 河口先の塩分分布と、模型内でそれに対する染料濃度分布は、かなりよく一致する。

(6) また、(5)から求めた拡散係数、および浮子の一潮時あたりの分散から求めた 10 km 程度の規模の現象に対する拡散係数は(4)の拡散係数からの 4/3 乗則により外挿した値と一致する。

(7) 原型の資料が得がたいので比較は困難であるが、実験によると、潮流に伴う地形性の渦流が、産業廃水などの港口、河口付近の濃度分布、および tidal excursion 程度の規模の水平混合に重要な役割を果たしている。

(8) 潮汐および鉛直に平均した tidal excursion 程度の規模の流動は、これに対する底面摩擦をあわせると再現できる。

(9) 局所的な地形性渦流は(8)に述べた大きな規模の平均流速 U と、渦の原因となる地形の大きさ L とを、それぞれ代表流速、代表長さにとり、地形性渦流より一段小さな規模の渦動拡散係数 K を粘性項にとった、一種の乱流 Reynolds 数 $Re_x = UL/K$ を模型と原型とで一致させることで再現されると考えられる。

(10) 水深の数倍程度以下の乱れについては、その異方性の度合から考えると、歪模型では再現されないはずのものであるが、このような乱れは粘性、および内部混合を通じて、より大きな規模の渦流、および拡散に関係するはずであるから、その構造については検討の必要がある。

ここでは、一工業地帯程度の限られた範囲の海域について、10日ないし半月程度の期間の拡散現象をとり扱ったが、瀬戸内海のように各所で開発が計画されているような場合には、隣接する工業地帯間の相互作用も考えられるから、たとえば瀬戸内海の全域模型を用いて、かなり長期間にわたる拡散の問題を取り扱かうようにしないと、近視眼的な見方に終るおそれがある。このためには、海象観測の時間的・空間的密度を高めて、資料を蓄積し、沿岸海洋における理解を深めるとともに、実験施設、計測装置などの改良・開発によって、実験精度を向上させることが望まれる。また、海中における生物、化学的な自浄作用の影響などに関する研究も重要な課題であろう。

最後に、この研究を進めるにあたって、実験、観測ならびに資料の整理に協力していただいた北川吉男氏、多河英雄氏、川崎博一氏、辻正明氏、佐藤英雄氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水利模型実験について、京大防災研究所年報第10号B、昭和42.3、pp. 343~363.
- 2) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水利模型実験について (II)、京大防災研究所年報第11号B、昭和43.3、pp. 447~461.
- 3) 樋口明生・杉本隆成：潮流による拡散の水利模型実験について (III)、京大防災研究所年報第12号B、昭和44.3、pp. 633~644.
- 4) 千田哲資：稚アユの海中における分布と河川遡上、沿岸海洋研究ノート Vol. 6, No.1, 1967, p.9.
- 5) Okubo, A.: The Effect of Shear in an Oscillatory Current on Horizontal Diffusion from an Instantaneous Source, Int. J. Oceanol. & Limnol. Vol. 1, No.3, 19, p.198.
- 6) Ippen, A. T.: Estuary and coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, 1966, pp.698~700.
- 7) Bowden, K. F.: Horizontal Mixing in the Sea Due to a Shearing Current, J. Fluid Mech. Vol. 21 part 2, 1965, p.88.
- 8) Harleman, D. R. F.: The Significance of Longitudinal Dispersion in the Analysis of Pollution in Estuaries, Advance in Water Pollution Res. Proc. 2 ed Int. Conf., 1965, p.286.
- 9) Bailey, T. E., C. A., Mc Cullough, and C. G., Gunnerson: Mixing and Dispersion Studies in San Francisco Bay, A. S. C. E., SA5, 1966, pp.23~45.