

## 瀬戸水域における染料拡散実験

中田英昭・平野敏行

(東京大学海洋研究所)

## Dye-diffusion Experiments in A Narrow Passage and Approaches

Hideaki NAKATA and Toshiyuki HIRANO

(Ocean Research Institute, University of Tokyo)

## Abstract

The Seto Inland Sea is surrounded by Honshu, Shikoku and Kyushu. It is about 450 km in length and about 40-50 km in breadth. This part of the sea is very important for fisheries of Japan, because it contributes about 37% of the total coastal fisheries production. But the problem of environmental pollution has come out in this area recently. Many passages and their approaches in the Seto Inland Sea require special mention because spawning and nursery grounds of several commercially important fishes exist in these regions. However, only very little information is available about the hydrographic conditions of such narrow passages, which play important role in the transportation and diffusion processes of fish eggs and larvae originated in the waters adjacent to them.

In order to study the details of the diffusion processes, dye-diffusion experiments were carried out in the Mekari-Seto (Passage) located at the central part of the Seto Inland Sea, during 24 to 26 July, 1975. These experiments made it clear that there were two distinct characteristics which were contrary to each other in the diffusion processes in the passage. One is the horizontal and vertical shear diffusion or the divergence processes caused by upwelling, which dispersed the materials to a broad extent. The other, contrary to the above is the convergence or the stagnation of sea water in the coastal areas, which permits the materials to stay in the passage for a long period of time.

These processes seem to be significant in interpretation of the mechanism of supplying fish eggs and larvae to the nursery grounds.

## 1. はしがき

瀬戸内海は日本の沿岸漁業生産量の約 37% (1974年) を占める重要な海域であるが、近年は汚染負荷の増大に伴い、漁場環境の悪化が深刻な問題となっている(瀬戸内海水産開発協議会1976)。なかでも、芸予多島水域(芸予海峡)など瀬戸水域は、有用魚類の主たる産卵ないし生育の場と考えられているが(矢野ら1969, 菊池ら1971)、これらの水域における魚卵・稚仔の輸送や分布を支配する海水の流動構造に関する詳細はほとんど明らかにされていない。また、藻場の消滅など生物生産に大きな影響を及ぼす環境変化を予測・評価するためには、これらの環境変化をもたらす汚染物質の輸送・拡散等を支配する流況の詳細な分析が必要である。

さらに、瀬戸水域においては海水の交換率から算定した潮汐混合による海水拡散がかなり大きいことが明らかにされているが(川村ら1975, 中田ら1976)、一方では、漂流ハガキの流動からみた表層水の移動速度と拡散の大きさは、瀬戸水域においてむしろ減少することが示されており(中田ら1977)、これらに対応する瀬戸の構造を明らかにする必要があると考えられる。

以上の見地から著者らは、瀬戸内海中央部布刈瀬戸において、1975年7月に染料(ウラン2%溶液)の瞬間点源放出による拡散実験を行い、瀬戸水域における物質の拡散過程について若干の知見を得たので、ここに報告する。

布刈瀬戸は、瀬戸内海中央部芸予多島水域のうち向島

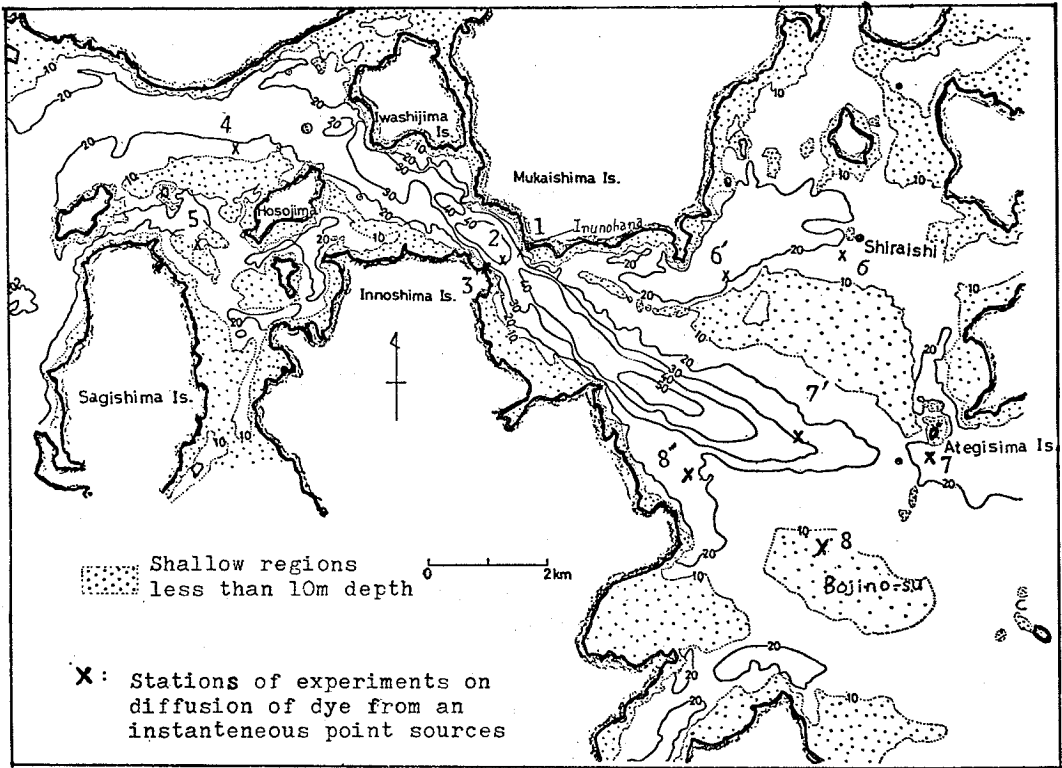


Fig. 1. Bathymetric chart of the Mekari-Seto and stations of experiments on diffusion of dye.

と因島間に位置する幅1キロ程度の瀬戸で、半潮時あたりの流量は約6億トンとかなり多く、多島水域全体の流量の15%近くを占めており(中田ら1976)、主流部の流速は最強時には3ノット以上を示す。Fig. 1には布刈瀬戸の深度図と染料の投入地点を示したが、布刈瀬戸は北西から南東方向に水路が開けており、上げ潮時には南東流、下げ潮時には北西流となり、その流軸に沿って40~50mの等深線が見られる。瀬戸の北西部は比較的狭く細長い形状を有し、島や浅瀬など海底の起伏に富んでいるのに対して、南東部は水路が扇型に広がり、流軸の部分を除けば比較的浅く、大きな州などが形成されている。

なお、本実験は本州四国連絡架橋漁業影響調査の一環として、東京大学海洋研究所、南海海区水産研究所、広島県水産試験場、並びに水産航空株式会社、新日本気象海洋株式会社などの関係諸機関との協同体制のもとに計画・実施したものである。報告にさきだち、南海海区水産研究所高森茂樹技官、広島県水産試験場木村知博資源環境部長はじめ調査関係者諸氏に深く感謝の意を表す

る。また、調査資料を快く提供された本州四国連絡架橋公団の方々にも厚くお礼申し上げる。さらに、本研究のために良き機会を与えられた南海海区水産研究所長花村宣彦博士、並びに、本研究を進めるにあたって数々の便宜をはかっていただいた日本水産資源保護協会の方々にも深く感謝の意を表す。

## 2. 実験の概要

染料の投入は1975年7月24~26日、布刈瀬戸の全域にわたって実施し、Fig. 1に示した11地点においてのべ18回の染料投入を行った。Stn. 1(向島沿岸)およびStn. 3(因島沿岸)は沿岸域における滞留状況を調べるために、また、Stn. 2(瀬戸中央)は瀬戸の主流域の拡散状況を知るために、さらにStn. 4, Stn. 5(いずれも細島周辺)およびStn. 6(白石付近), Stn. 7(当木島付近), Stn. 8(坊地ノ州付近)は、それぞれ瀬戸の北西部と南東部における拡散の特性を明らかにするために設けられた調査地点である。

調査日程の詳細はTable 1に示したが、Stns. 1~3に

Table 1. List of experiments on diffusion of dye patch in the Mekari-Seto.

Date (1975)	Time of Releasing	Tide	Released point	Amount of Release (Uranine 2% sol.)
July, 24	11:52	Slack (flood to ebb)	Stn. 3	200 l
	11:54	"	Stn. 1, 2	200
	12:20	"	Stn. 2	200 (*)
July, 25	10:00	Max of flood current	Stn. 2, 3	300
	10:01	"	Stn. 1	300
	15:24	Max. of ebb current	Stn. 1, 2, 3	300
July, 26	08:30	Flood current (1 hour after turn of tide)	Stn. 4	300
	08:38	"	Stn. 5	300
	13:25	Ebb current (0.5 hour after turn of tide)	Stn. 7	300
	13:30	"	Stn. 6	300
	13:35	"	Stn. 8	300
	15:05	Ebb current (2 hours after turn of tide)	Stn. 8'	200
	15:15	"	Stn. 7'	300
	15:19	"	Stn. 6'	300

(\*) Amount of additional release

おいては染料の拡散状況が潮時によって異なることが考えられるため、転流時（満潮）、上げ潮（南東流）最強時、下げ潮（北西流）最強時の3回にわけて染料投入を行った。また、転流後、沖合から瀬戸に戻ってくる際の拡散状況を明らかにするため、Stns. 4, 5 においては上げ潮時（転流1時間後）、Stns. 6~8 においては下げ潮時（転流0.5時間後）にそれぞれ染料の投入を行った。なお、できる限り長時間にわたる継続的なデータを得るため、Stns. 6~8 については、投入染料の消失点付近で染料の再投入を行った。但し、Stn. 6 においては投入時にまだ完全に転流していなかったため、再投入地点を向島沖（Stn. 6'）に定めた。また、これらの他に、7月24日、Stn. 2 において投入した染料が非常に早く消失したため、ほぼ同様の地点に染料の追加投入を行った。なお、全地点で染料投入と同時に潮流板を投入し、その追跡を行い、染料の拡がりとの関連について調べた。

調査に用いた染料は、ウラニンの2%溶液、投入量は1回に200~300 l (約4~6 kg) とした。染料の投入は底曳船の巻揚機を操作して、染料100~150 l 入りのドラムかん2本を瞬時に海面のベニヤ板の上で転倒させて行った。但し、Stn. 3 だけはクレーンを操作して陸上から投入した。染料投入後は、ほぼ、5, 15, 30, 45, 60, 75, 90分の時間帯の航空写真撮影によって追跡を行ったが、この場合、染料面積の計測および位置測定のため、投入船の他に1隻ずつ追跡船を用意し、追跡船の船尾に標識

板（着色したベニヤ板4枚を連結したもの）を30m長のロープで曳航させこれを長さの尺度とした。

なお、実験期間の気象条件は概ね平穏で、Stn. 4, 5 における投入時はほとんど無風状態、その他の場合は2~5 m/sec の南東風が記録されていた。

### 3. 結 果

#### 3-1 染料の拡散状況

Figs. 2~4 にはそれぞれ Stns. 1~3 において上げ潮最強流時と下げ潮最強流時に投入された染料の拡散分布の概況を示した。また、同様に Fig. 5 には Stn. 4 と Stn. 5, Fig. 6 には Stns. 6~8 および Stns. 6'~8' において投入された染料の拡散分布図を示した。これらはいずれも航空機からの鉛直撮影結果から得られたものであるが、染料の濃度がうすい場合など、斜め写真等を参考にして推定したものはすべて点線で図示した。以下、各投入地点ごとに染料の拡散状況を記述する。

**Stn. 1:** 向島沿岸の犬ノ鼻 (Fig. 1) 付近において投入された染料の拡散状況には、上げ潮時と下げ潮時で顕著な違いがみられた。すなわち、Fig. 2 に示したように、上げ潮時には染料が犬ノ鼻を抜け急速に伸び出し、(photo. 1)、笹島周辺の潮目に沿って瀬戸主流域および向島沿岸のかかなり広い範囲に拡がったのに対して、下げ潮時には、犬ノ鼻周辺が反流域になる傾向がみられ、そのため染料はほとんど拡がらず汀線付近に著しく停滞す

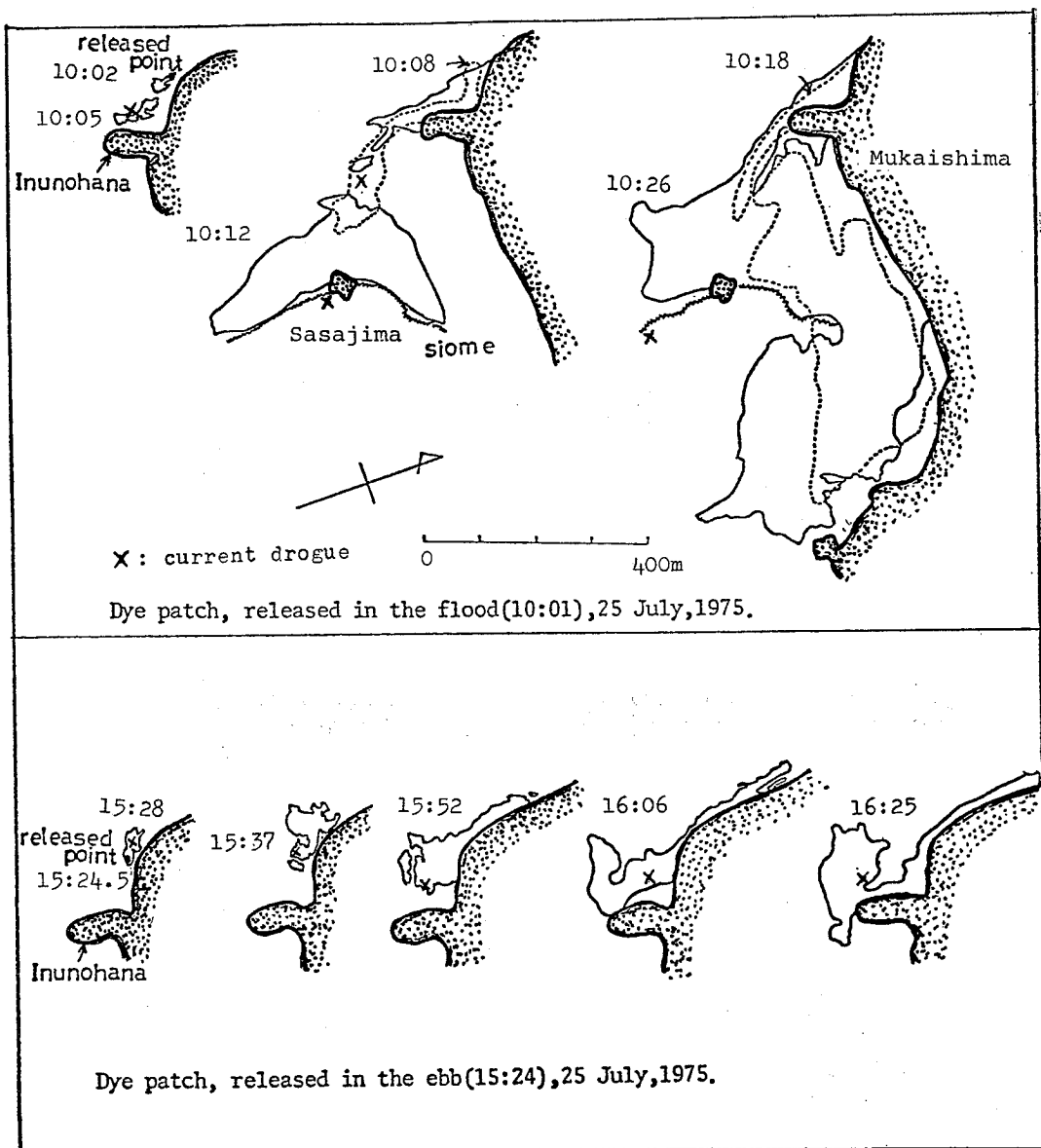


Fig. 2. Sketches of the area of dye patch, uranine 2% sol. 3001 released at Stn. 1.

る状況 (photo. 2) を呈した。

一方、転流時(満潮)に投入された染料は、下げ潮時と類似した傾向を示し、時間の経過につれて徐々に向島沿岸の湾入部に押しこめられ、photo. 3 に示すような状況を呈した。

Stn. 2: 瀬戸中央において上げ潮および下げ潮最強流時に投入された染料は、Fig. 3 に示したようにいずれも 100~150 cm/sec で速やかに移動したが、その拡がり

意外に小さい傾向を示した。しかし、上げ潮の場合は南東沖合の因島寄りに発生する潮目と接触後、また、下げ潮時には、四十島 (Fig. 5) から岩子島にかけての湧きあがり水域の影響を受けて急速に消失してしまった。photo. 4 は染料が北西部の湧きあがり水域に入る直前のもので、染料の前方にうすくパッチ状に見えるのが湧きあがりによる底泥の巻きあがりの状況である。さらに、photo. 5 は染料が湧きあがり水域で、水平方向に大きく

瀬戸水域における染料拡散実験

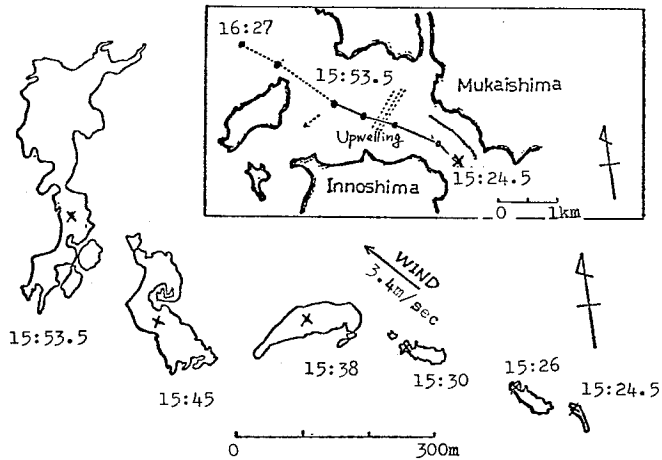
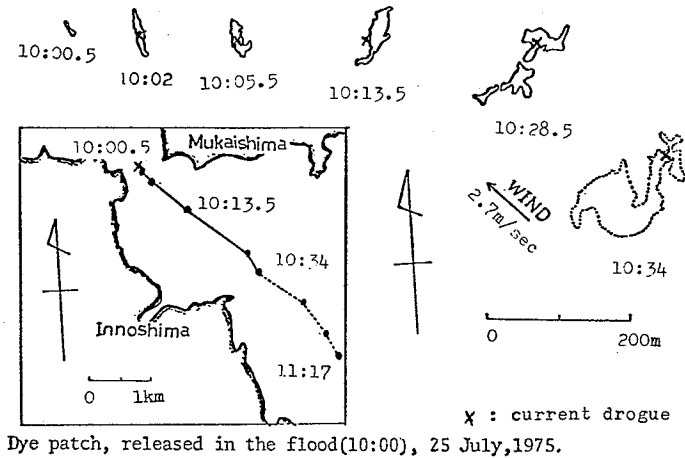


Fig. 3. Sketches of the area of dye patch, uranine 2% sol. 3001 released at Stn. 2.

発散される状況を示したものである。

一方、転流時（満潮）には、photo. 3にみられるように、瀬戸の中央に大きな潮目を生じており、投入した染料がその下にもぐりこみ、ほとんど追跡することができなかった。また、追加投入した染料も急速に消失したが、(photo. 3)、投入1時間後には瀬戸北西部の湧きあがり水域一帯にこれらの染料が浮上する状況が観測された。

**Stn. 3:** 上げ潮時・下げ潮時とも Fig. 4 に示すように、因島沿岸に発達する潮目に沿って染料が細長く伸び取れんして、急速に消失してしまった。とくに、下げ潮時にはその傾向が著しく (photo. 6), 投入15分後にはほとんど追跡ができなくなった。転流時も下げ潮の場合と同様の状況を示した (photo. 3)。

**Stn. 4:** 瀬戸北西部の比較的開けた水域で投入された染料は、Fig. 5 に示したようにほぼ円形に近いパッチを形成し (photo. 7), 上げ潮流によって次第に速度を速めながら布刈瀬戸の方に移動してきた。投入の約1時間後には細島・岩子島間に到達したが、湧きあがり水域の影響をうけて急速に消失してしまった。

**Stn. 5:** 島が散在し海底の起伏の複雑な細島西部の潮目の上で投入された染料は Fig. 5 に示したように、次第に小さなパッチにちぎれ (photo. 8), 水平的にはほとんど拡がらず投入30分後には識別が困難となった。

**Stn. 6:** 瀬戸南東部の沖合、向島側においては転流予定時刻をすぎても、しばらく上げ潮の状態が継続しており、染料は Fig. 6 上欄に示したように、南北方向に細

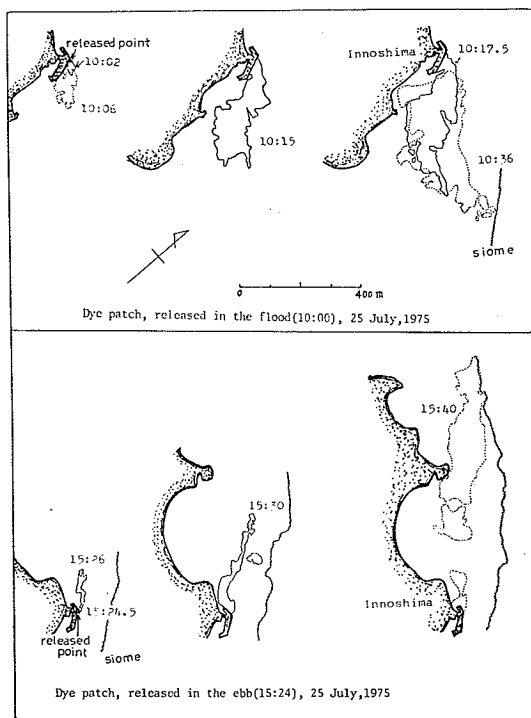


Fig. 4. Sketches of the area of dye patch, uranine 2% sol. 300l released at Stn. 3.

長い楕円形を呈しながら北寄りに移動した (photo. 9)。

**Stn. 6'**: Stn. 6 の染料が次第に瀬戸寄りに向きを変えつつあったことから、向島沖に再投入地点 (Fig. 1) を設け、継続して追跡を行った。再投入後しばらくは染料の拡がりにほとんど変化が見られなかったが、瀬戸近辺に生じている潮目と接触し、急速に消失した。

**Stn. 7**: 瀬戸南東部の主流域において投入された染料は、Fig. 6 下欄右に示したように、南北に細長く伸びた「くの字型」のパッチを形成し (photo. 10)、20~30 cm/sec の速さで次第に瀬戸の中央部に向かって移動した。投入85分後には長さ700~800m、幅20~100mの拡がりを示し、追跡終了後も長時間にわたって (約1時間) 再投入染料の後方に残存していた。

**Stn. 7'**: Stn. 7 の染料の前方において再投入された染料は、パッチの頭を瀬戸中央付近の潮目に接しながら細長い楕円形を呈し、瀬戸の流軸上を西方に移動した。しかし、瀬戸の入口付近では、陸岸に近い水域 (Stns. 6', 8') からの流入が速く、Stn. 7' のパッチは次第に停滞気味になり、再投入50分後には後方の染料パッチ (Stn. 7) と「Y字状」に交叉した。

**Stn. 8**: 瀬戸南東部の沖合、因島側において投入された染料は、Fig. 6 左下に示したように先端部が広く後方にうすい尾をひいた南北に細長い「火の玉状」のパッチを形成した (photo. 11)。因島沿岸を徐々に北上したが、途中、14時前後には染料の中心の位置がほぼ一回転している。

**Stn. 8'**: 因島沿岸の潮目付近で、再投入された染料は、潮目に沿って北上したが、概して拡がりは小さく潮目の内側に停滞する状況を示した (photo. 12)。

なお、すべての地点で染料と一緒に投入された潮流板の推定位置を Figs. 2~6 の中に×印で示したが、精密な追跡は行わなかったものの、ほとんどの場合に染料と挙動をともしていた。染料が潮目と接触する時には、潮流板はその潮目の上を移動することが多く (Fig. 6)、潮目が漂流物の取れんの機能を果たしていることがわかる。また、南東部の沖合 (Stns. 6~8) の染料はいずれも南北に細長く伸びているが、潮流板 (水深2m) の位置がその染料パッチの尾の部分に位置していることから、実験時の南東風による表面のシアの影響が推察される。

### 3-2 拡散係数の推定

一般に、河口域や沖合において実施されてきた拡散実験 (たとえば平野・藤本1969) においては、染料の可視面積の時間的な変化から水平拡散の大小そのオーダーが見積られている。瀬戸水域においては過去に実験例が全くみられないが、複雑な地形や湧きあがり・潮目など種々の流動の影響が大きく、染料の拡散状況は場所ごとに、また、潮時によって複雑に変化しており、いわゆる水平渦動による拡散とはその機構が著しく異なっていると考えられる。したがって、これらに対応した詳細な数量的解析が必要であるが、ここでは他の水域でこれまでに得られている結果との対比を行うための一つの目安として、従来の解析方法によってみかけの拡散係数 ( $K$ ) を推定した。

いま、時刻  $t_{i-1}$ ,  $t_i$  に観測された染料域の面積  $S_{i-1}$ ,  $S_i$  に等しい面積の円を考え、その円の半径 (換算半径) を  $r_{i-1}$ ,  $r_i$  とし、染料域縁辺の濃度 (可視濃度) が常に等しいと仮定すると、

$$K \approx \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})} \quad (1)$$

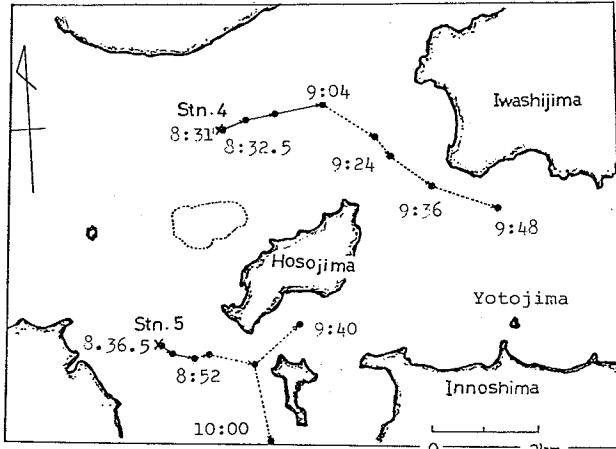
したがって、 $\Delta S_i = S_i - S_{i-1}$ ,  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  とおけば、

$$K \approx \frac{\Delta S_i}{4\pi \Delta t_i} \quad (2)$$

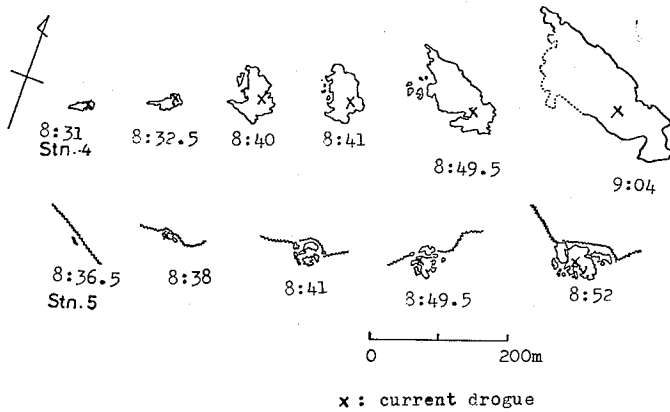
と表わすことができる (平野・杉浦 1958)。

Table 2 は、布刈瀬戸における染料拡散実験の結果に

瀬戸水域における染料拡散実験



Movements of dye patch



x: current drogue

Fig. 5. Sketches of the area of dye patch, uranine 2% sol. 300 l, released in the flood at Stn. 4 and Stn. 5, 26 July, 1975.

Table 2. Estimated values of diffusion coefficient ( $K$ )

Released Tide	Stn. 1	Stn. 2	Stn. 3	Stn. 4	Stn. 5	
Slack	$5.1 \times 10^3$ (1.4~10.7)	—	$12.0 \times 10^3$ (6.1~22.1)			
Flood Current	$42.2 \times 10^3$ (2.0~71.8)	$1.3 \times 10^3$ (0.8~2.4)	$15.1 \times 10^3$ (7.4~22.0)	$4.8 \times 10^3$ (2.5~9.1)	$1.0 \times 10^3$ (0.5~1.4)	
Ebb Current	$2.2 \times 10^3$ (0.5~3.3)	$9.7 \times 10^3$ (0.5~26.6)	$12.8 \times 10^3$ (10.9~14.6)			
	Stn. 6	Stn. 7	Stn. 8	Stn. 6'	Stn. 7'	Stn. 8'
Ebb Current	$6.3 \times 10^3$ (2.9~19.0)	$4.5 \times 10^3$ (0.6~9.5)	$7.3 \times 10^3$ (0.5~18.9)	$3.0 \times 10^3$ (0.7~5.2)	$5.7 \times 10^3$ (2.9~10.6)	$3.7 \times 10^3$ (0.4~5.8)

(~): Range of diffusion coefficient ( $\times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

$$K \approx \frac{r^2 i - r^2 i_{-1}}{4(t_i - t_{i-1})}$$

$r$ : equivalent radius of dye patch  
 $t$ : diffusion time

(HIRANO & SUGIURA, 1958)

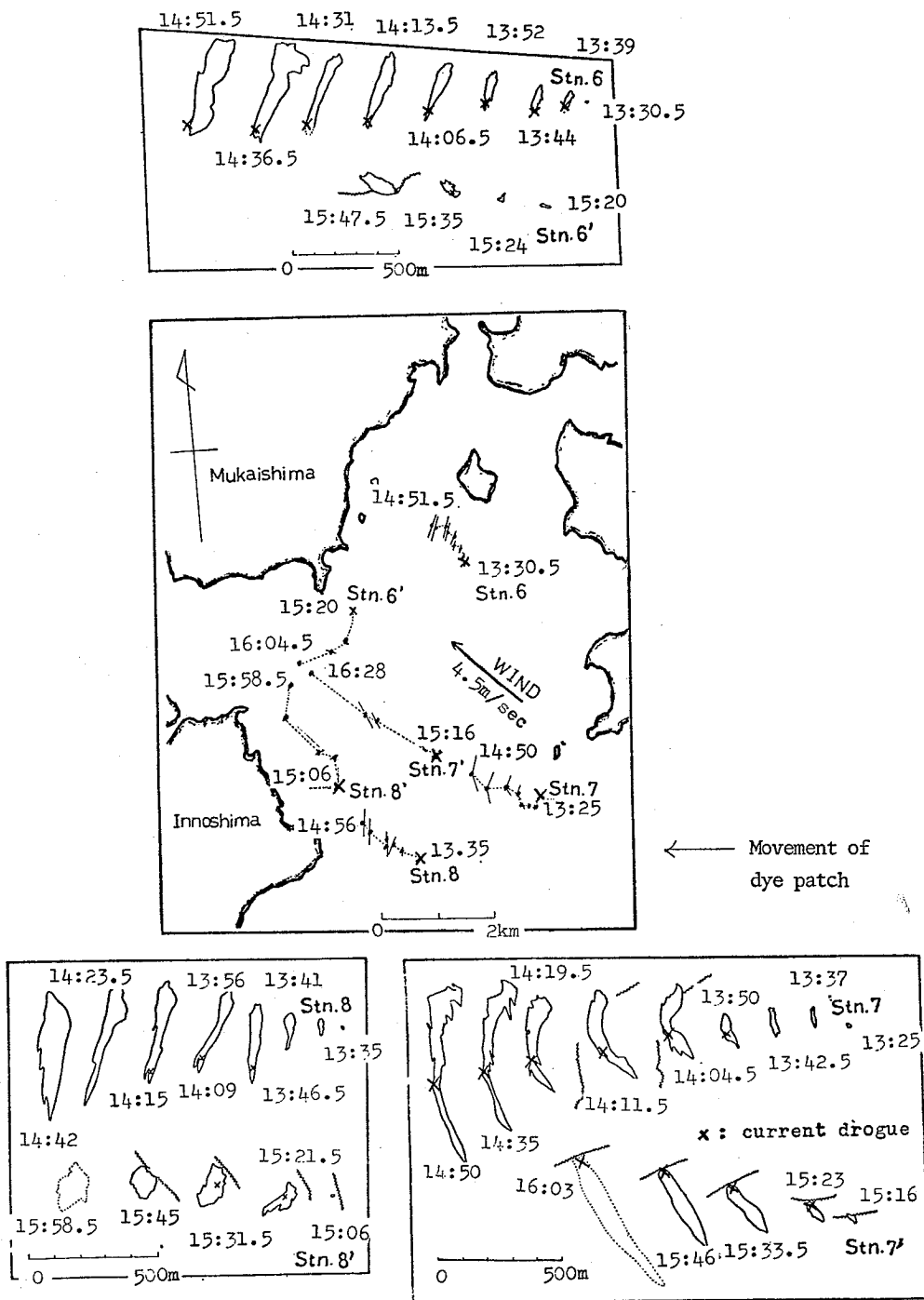


Fig. 6. Sketches of the area of dye patch, uranine 2% sol. 3001, released in the ebb at Stns. 6~8 and Stns. 6'~8', 26 July, 1975. x: current drogue



ついて(2)式から各地点における拡散係数 ( $K \text{ cm}^2/\text{sec}$ ) を求めたものである。上段は得られた拡散係数の平均値、下段にはその変動幅を示した。 $K$ の値は各地点によって異なっているが、大よそのオーダーとして、 $K=10^3 \sim 10^4$  が得られている。先に述べた河口域や沖合における染料拡散実験の解析結果からは、 $K=10^4 \sim 10^5$  が得られており(農林水産技術会議 1964)、布刈瀬戸の場合には、これらより1桁小さい値となっている。

さらに細かい検討を加えると、Stns. 1~3 における拡散係数 ( $K \text{ cm}^2/\text{sec}$ ) の値は染料の拡散状況の潮時による違いをよく示している。すなわち、Stn. 1 においては、上げ潮時に  $K=4.2 \times 10^4$  という大きい値が得られるのに対して転流時、下げ潮時にはほぼ1桁小さな値を示している。これは、Stn. 1 において形成される反流域の影響によるものと考えられる。また、Stn. 2 においては下げ潮時に上げ潮時の7~8倍の値が得られているが、これは、瀬戸北西部の湧きあがり水域における発散の影響を示すと考えられる。これらに対して、Stn. 3 においては潮時によらずほぼ一定の係数值 ( $K=1.2 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4$ ) が得られている。

一方、Stn. 4 および Stns. 6~8 においては瀬戸特有の流動の影響が少なく沖合における従来の拡散実験と類似した拡散状況を示したが、拡散係数はほぼ一定の値 ( $K=4.5 \times 10^3 \sim 7.3 \times 10^3$ ) を示した。

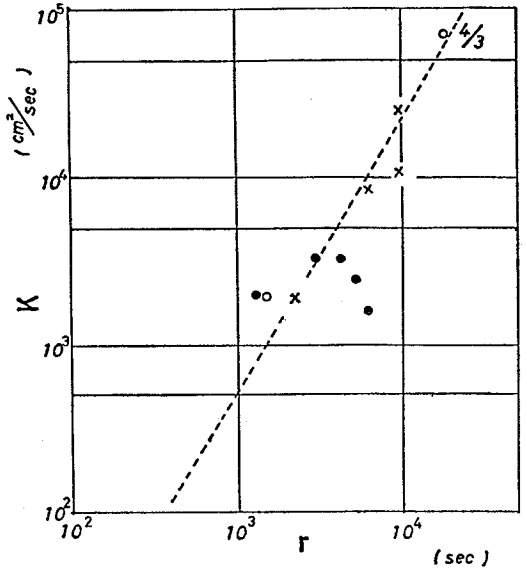
また、陸岸付近で潮目などの影響を受けた Stn. 5 および Stns. 6'~8' における拡散係数は概して小さい値となっていた。しかし、これらの水域においては鉛直的な擾乱の大きさを数量的に把握する必要があると思われる。さらに、転流時における Stn. 2 の染料は、潮目のため下層に急速にもぐりこんだため消滅がはやく、全く解析できなかったが、これは、尋常のオーダーでは考えられないほど鉛直方向の拡散が大きいことを表わしている。

Table 2 には拡散係数の値を平均値として示したが、一般に、拡散係数 ( $K$ ) は現象の規模 ( $L$ ) の  $4/3$  乗に比例するといわれており RICHARDSON 1926, STOMMEL 1949, 井上 (1951) はさらに過去の実験結果をまとめて、

$$K=0.01L^{4/3} \quad (3)$$

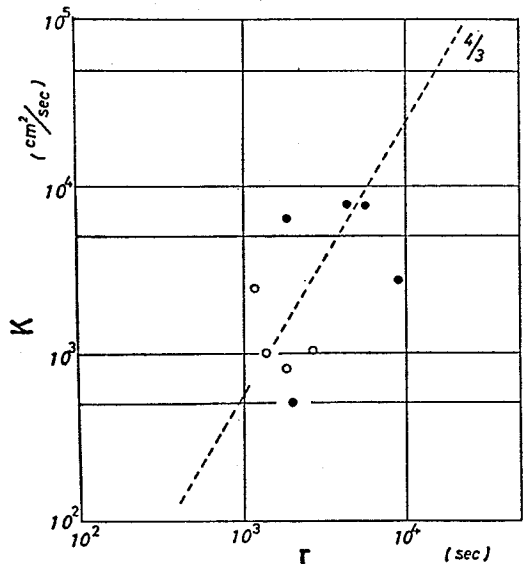
という関係式を導いている。したがって、染料の拡散面積から求めた拡散係数はその拡がりの規模に応じて大きくなることが予想される。そこで、染料の面積と等しい面積をもつ円の半径(換算半径、 $r$ )を現象の規模と考え、 $r$  (cm) と拡散係数  $K$  ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) との関係について

検討してみた。Figs. 7~9 はそれぞれ Stns. 1~3 において得られた、結果を示したものである。部分的には  $K$  と  $r$  の間にさきに述べたような関係がみとめられるもの



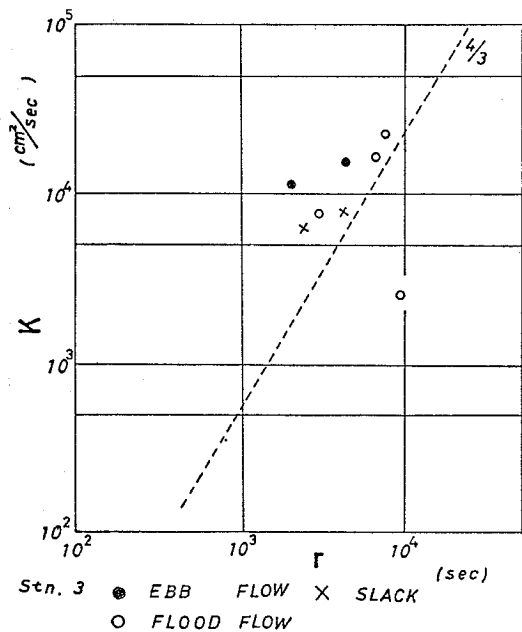
Stn. 1 ● EBB FLOW × SLACK  
○ FLOOD FLOW

Fig. 7. Relation between diffusion coefficient ( $K$ ) and equivalent radius at the dye patch ( $r$ ), released at Stn. 1.



Stn. 2 ○ FLOOD FLOW ● EBB FLOW

Fig. 8. Relation between diffusion coefficient ( $K$ ) and equivalent radius at the dye patch ( $r$ ), released at Stn. 2.



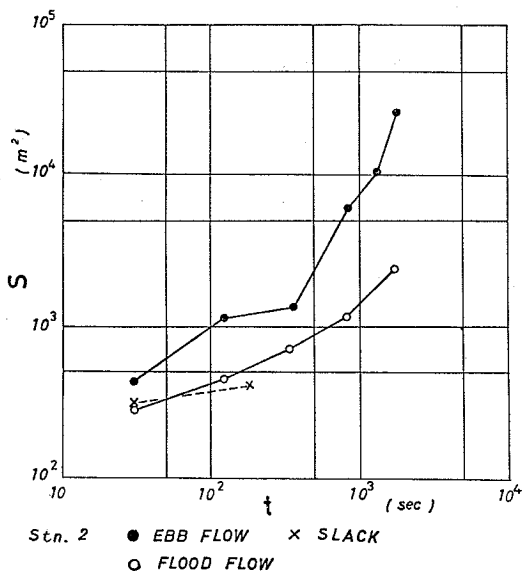
Stn. 3 ● EBB FLOW × SLACK  
○ FLOOD FLOW  
Fig. 9. Relation between diffusion coefficient ( $K$ ) and equivalent radius at the dye patch ( $r$ ), released at Stn. 3.

の、Stn. 1 の下げ潮時 (Fig. 7) や Stn. 2 の上げ潮時 (Fig. 8) の場合には、 $K$  が  $r$  によらずほとんど一定して小さな値を示していることがわかる。これらのことから、瀬戸水域においては現象の規模以外に拡散を支配する他の要因のあることが推察される。

また、Fig. 10, 11 にはそれぞれ Stn. 2 および Stn. 7, 7' における染料の拡散面積  $S$  ( $\text{cm}^2$ ) と拡散時間  $t$  (sec) の関係を示した。一般に、JOSEPH-SENDNER (1958) や OZMIDOV (1958) などの解析結果によれば、染料濃度の統計的分散 ( $\sigma_r^2$ ) は拡散時間 ( $t$ ) の 2 乗ないし 3 乗に比例することが知られている (OKUBO 1962)。一方、FICK の拡散方程式からは  $\sigma_r^2$  は  $t$  に比例することが導かれるが、中田・松尾 (1973) は青森県高瀬川沖における染料拡散実験の結果から、 $\sigma_r^2$  にほぼ対応するものとして染料の面積 ( $S$ ) と  $t$  との関係について検討し、FICK 型の拡散解よりは JOSEPH-SENDNER の解の方が現実の観測結果に近いことを指摘している。

布刈瀬戸の場合について同様の考察を試みると、各地点によって違いがみられるが、染料面積の時間的な変化は概して小さいことがわかる。いま、Fig. 10, 11 において、この傾きを  $\theta$  とすれば、 $\theta$  の値は  $S$  が  $t$  の  $\theta$  乗に比例して増加していることを意味しているが、布刈瀬戸においては、 $\theta=1\sim 2$  を示すことが多く、先に述べた理

論的な解析の結果とはかなり異なっている。投入地点ごとにみると、瀬戸南東部の比較的開けた水域 (Stn. 6~8) においては、 $\theta=1.7\sim 2.5$  とほぼ  $\theta=2$  に近い値が得られるのに対して (Fig. 11), 瀬戸の内部では、ほとんどの地点で  $\theta=1$  程度を示しており、中には、 $\theta=0.5$  という著しく小さい値も得られている (Fig. 10)。JOSEPH-SENDNER や OZMIDOV の解は、いずれも拡散方程式に現象の規模に関連するパラメータを導入して得られたものであるが、瀬戸水域の場合、先に拡散係数 ( $K$ ) と



Stn. 2 ● EBB FLOW × SLACK  
○ FLOOD FLOW  
Fig. 10. Time changes of the area of dye patch ( $S$ ), released at Stn. 2.

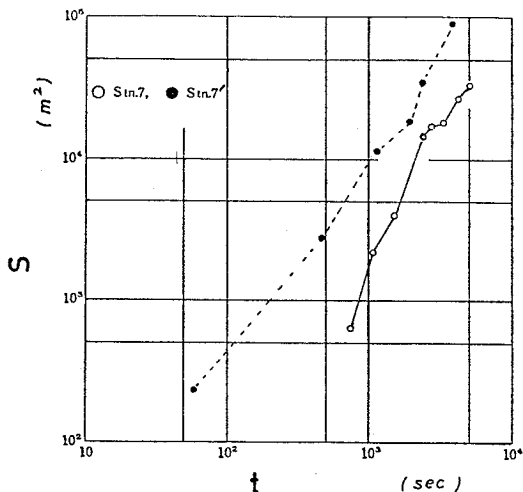


Fig. 11. Time changes of the area of dye patch ( $S$ ), released at Stns. 7, 7'.

換算半径 ( $r$ ) との関係 (Fig. 7~9) から推察したように、現象の規模以外の他の要因が拡散過程に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

一方、BOWLES *et al.* (1958) によって提唱され、BOWDEN (1965), OKUBO (1968) などによって解析が進められているシア拡散の理論は、瀬戸水域における拡散過程の一部を説明するのに有効な手法と考えられるが、現在のところ、解析的に完全に解かれているのは、全く一樣なシアの場における拡散であって、瀬戸水域のように種々のシアが非定常に、しかも地域的に不均一に分布している場合についての解析はきわめて難しい。さらに、瀬戸水域においては、photo. 5, 6, 12 に示したような湧きあがりや潮目による収れん・発散が拡散過程に大きな影響を及ぼしていることが推察される。

したがって、今の段階としては、拡散実験の結果を丹念に調べることによって、瀬戸の各水域における拡散の過程・形態の違いをもたらしている個々の要因を明らかにしていくことが、非常に重要な意義をもつものと考えられる。

#### 4. 瀬戸水域における拡散・集積機構

一般に、水平方向あるいは鉛直方向に乱流を生起する機構としては、i) 海面表層における風の応力、ii) 沿岸境界や海底の摩擦力、iii) 水流中のシアなどが考えられている (江村 1969)。染料を用いた拡散実験は、比較的短い時間スケールにおいて、これらの乱れの複合とし

ての拡散の大きさを推定するものであるが、瀬戸水域においては、複雑な沿岸・海底地形やそれに起因する流動の地域的な変化が著しく、染料の拡散過程を支配する要因が水域によって明らかに異なることがわかった。また、これによって拡散の過程・形態の違いがみられた。それらを整理すると次のようになる。

1) 瀬戸の沿岸付近では沿岸地形や沿岸の摩擦の影響が大きく、瀬戸の主流との間にシアを生じたり、潮時によっては逆流域を形成し、染料を著しく拡散あるいは停滞させた。Fig. 12 は、布刈瀬戸中央部において1974年11月13~14日に実施された定点測流の結果 (本州四国連絡架橋漁業影響調査委員会1975) を進行ベクトル図で示したものであるが、瀬戸の両岸 (Stn. 1, Stn. 3) と中央とで流動の傾向が全く異なっていることがわかる。すなわち、瀬戸中央においてはほぼ半日周期の潮流が卓越しているのに対して、瀬戸の向島側には南東方向、因島側には北向きの流れが発達しており、とくに下げ潮時には向島側の流速がきわめて小さく流れがほとんど停滞する状況を示している。さらに述べた瀬戸の両岸における染料の拡散状況の著しい違いは、これら地域的な流動特性に起因するところが大きいと思われる。

2) 瀬戸の主流域においては、強流時には拡散より潮流の輸送機能の方が卓越し、染料は拡がりの小さいまま速やかに移動した。しかし、転流時には潮目を生じることがあり、この時には染料は急速に消滅した。

3) 島が散在し海底地形の複雑な瀬戸の沿岸において

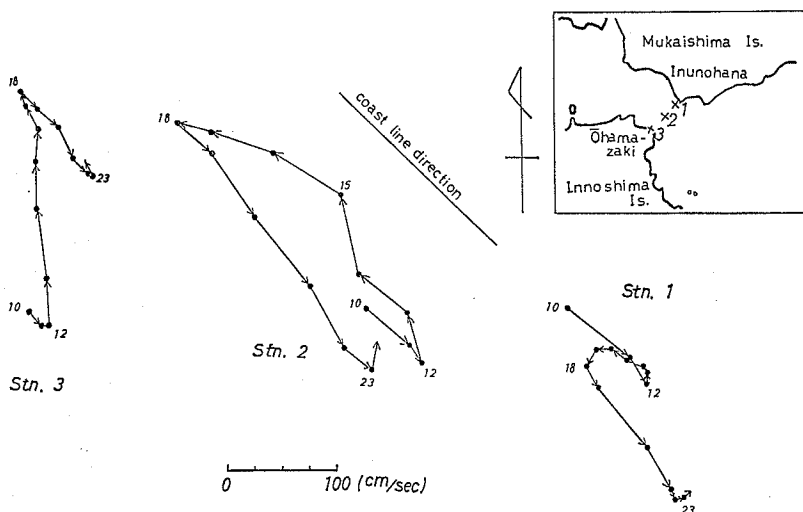


Fig. 12. Progressive vectors of tidal current of 1 m layer, observed at the Mekari-Seto, 100:00-23:00, 13 Nov. 1974.

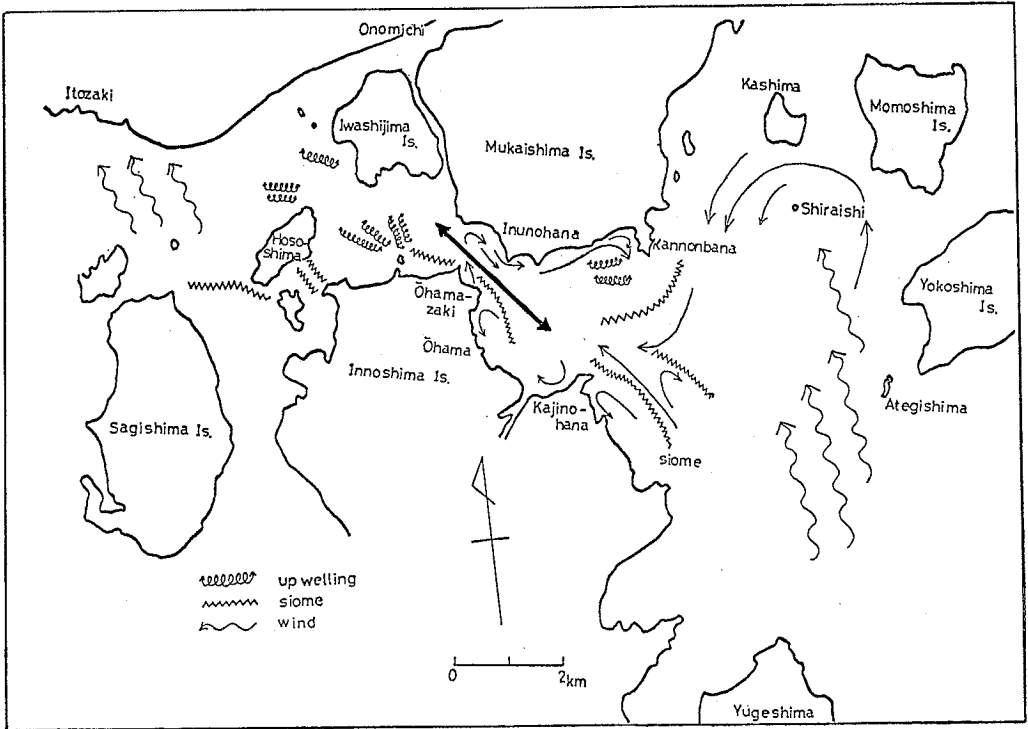


Fig. 13. Schematic diagram of flow pattern in the Mekari-Seto.

は、湧きあがりなどによる鉛直的な擾乱が大きく、染料が急速に消失した。

4) 比較的開けた沖合においては、瀬戸の地形等に起因する擾乱がほとんどみられず、灘や沖合の水域に類似した拡散状況を呈しており、風による表層のシアの影響がみとめられた。

Fig. 13 は、以上に述べてきた布刈瀬戸における流動・拡散の地域的な特性を模式的に表わしたものである。瀬戸の北西部では湧きあがりなどの鉛直的な擾乱が著しいのに対して、瀬戸が急に開ける南東部においては、沿岸に地域的な渦流や環流が形成され、また、主流域と陸岸との間には潮目を生じている。これらを簡単にモデル化して考えることは非常に難しいと思われるが、巻きあげや発散により物質を大きく拡散させる要素と、逆に取れん・海水の停滞等によって物質を集積・滞留させる要素とが共存するような二重性が、瀬戸水域における拡散過程の基本的な特徴のひとつになっていると考えられる。

### 5. まとめ

染料による拡散実験の結果から、瀬戸水域には湧きあがりによる発散や沿岸域に生じるシアによる分散の効果

など物質を大きく拡散させる機能と、それらとは全く逆に、潮目における取れんや地域的な流れの変化による海水の停滞などによって物質を集積・滞留させる機能とが共存していることが明らかになった。

芸予多島水域など瀬戸水域はマダイ、イカナゴなどの主たる産卵の場であるとともに、藻場が多く、餌料が豊富で環境の変化にも富み、幼稚魚の生育場として重要な役割を果たしており、隣接する灘水域から輸送されてくる魚卵・稚仔の瀬戸水域沿岸への補給・定着の過程は、瀬戸内海における資源の再生産・補給を大きく左右すると思われるが、これらは、瀬戸水域に共存する拡散と集積という相反する2つの機能が複合的に作用することによって維持・促進されていることが推察される。

今後、これらの構造の詳細をさらに数量的に把握する必要があると考えられる。また、瀬戸の各水域における拡散の過程・形態の違いと魚卵・稚仔あるいは餌料生物などの分布、移動との関係を実地に明らかにするためには、拡散・集積機構に関する解析と並行して、各水域の拡散特性に対応した生物分布についての詳細な調査あるいは魚卵・稚仔そのものの放流・追跡などの新たな試みが必要と考えられる。

文 献

- BOWDEN, K.F. (1965): Horizontal mixing in the sea due to a shearing current. *J. Fluid Mech.*, **21** (part 2), 83-95.
- BOWLES, P., R.H. BURNS, F. HUDSWELL and R.T.P. WHIPPLE (1958): Sea disposal of low activity effluent. *Proc. 2nd Int. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva*, vol. **18**, 376-389.
- 江村富男 (1969): 産業排水の海洋拡散の問題. *用水と廃水*, **11**(8), 4-9.
- 平野敏行, 杉浦健三 (1958): 河川流入のある小内湾における塩分の分布に就いて. *東海区水研報*, **22**, 1-15.
- 平野敏行, 藤本 実 (1969): 資源再生産機構における環境の役割及びその研究方向. *漁業資源研究会議報*, **9**, 16-33.
- 本州四国連絡架橋漁業影響調査委員会 (1975): 本州四国連絡架橋漁業影響調査報告. 第7号, 1-283.
- 井上栄一 (1951): 海洋の乱流拡散現象について. *日本海洋学会誌*, **7**(1), 1-8.
- JOSEPH, J. and H. SENDNER (1958): Über die horizontale Diffusion im Meere. *Dt Hydrogr. Z.* **11**, 49-77.
- 川村雅彦, 清水浩輔, 小山治行, 中嶋秀夫, 前川 力 (1975): 豊後水道の海況と拡散係数. *海と空*, **50** (2-3), 43-58.
- 菊池泰二, 向井 宏 (1971): 備後灘北部沿岸域の底生生物群集の研究 II. 尾道水道付近の底生動物. *JIBP-PM 昭和45年度報告*, 106-110.
- 中田英昭, 平野敏行 (1976): 瀬戸水域における海水の交流, 交換について. *水産海洋研究会報*, **29**, 7-14.
- 中田英昭, 平野敏行 (1977): 瀬戸内海中央部における表層水の流動 (2) 漂流ハガキの漂着状況 (夏季). *日本海洋学会春季大会講演要旨集*, 102-103.
- 中田喜三郎, 松尾 信 (1973): 沿岸海域における拡散過程の研究. *産業公害*, **10**(1), 45-49.
- 農林水産技術会議 (1964): 水質汚濁に関する研究の成果, 13-34.
- OKUBO, A. (1962): A review of theoretical models for turbulent diffusion in the sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 20th Anniv. vol., p. 286-320.
- OKUBO, A. (1968): Some remarks on the importance of the "shear effect" on horizontal diffusion. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **24**(2), 60-69.
- OZMIDOV, R.V. (1958): On the calculation of horizontal turbulent diffusion of the pollutant patches in the sea. *Doklady Akad. Nank, SSSR*, **120**, 761-763.
- RICHARDSON, L.F. (1926): Atomospheric diffusion shown on a distance-neighbour graph. *Proc. Roy. Soc. London*, **A110**, 709-727.
- 瀬戸内海水産開発協議会 (1976): 瀬戸内海漁業の現状. *日本水産資源保護協会*, 112 p.
- STOMMEL, H. (1949): Horizontal diffusion due to oceanic turbulence, *J. Mar. Res.*, **8**(3), 199-225.
- 矢野 実, 井上 明, 国行一正, 高森茂樹, 仁科重巳 (1969): 瀬戸内海備後灘におけるマダイ幼魚期の分布と生長. *南西海区水研報*, **1**, 75-85.

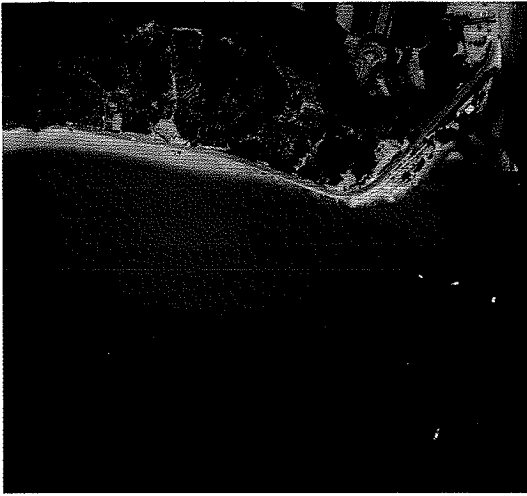
- Photo. 1 Dye patches released in the Mekari-Seto at the max. of flood current, 6 minutes after release.
- Photo. 2 Dye patch released at Stn. 1 at the max. of the ebb current, 27 minutes after release.
- Photo. 3 Dye patches released in the Mekari-Seto at the slack, 48 minutes after release, showing siome in the center of the Seto.
- Photo. 4 Dye patch released at Stn. 2 at the max. of ebb current, 13 minutes after release.
- Photo. 5 Dye patch passing by upwelling region, showing the condition 8 minutes later than Photo. 17.
- Photo. 6 Dye patch released at Stn. 3 at the max. of ebb current, and siome, 5 minutes after release.
- Photo. 7 Dye patch released at Stn. 4 in the flood, 20 minutes after release.
- Photo. 8 Dye patch released at Stn. 5 in the ebb, 8 minutes after released.
- Photo. 9, Photo. 10 and Photo. 11 Dye patch released at Stn. 7 and Stn. 8 respectively, about 40 minutes after release.
- Photo. 12 Dye patch converged to siome. (Stn. 8')



**Photo 1**



**Photo 4**



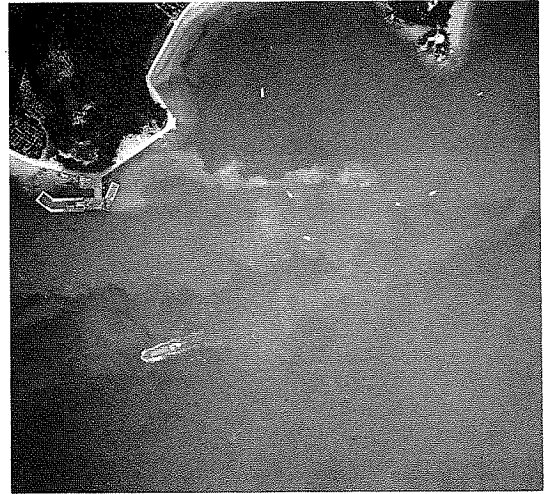
**Photo 2**



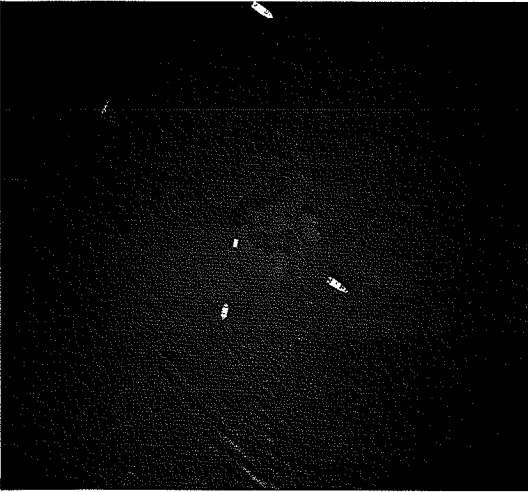
**Photo 5**



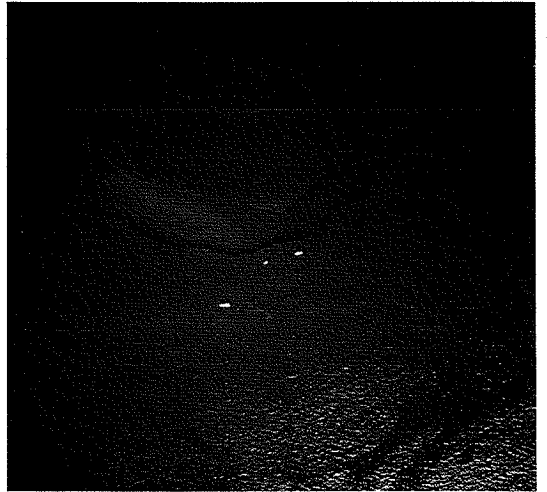
**Photo 3**



**Photo 6**



**Photo 7**



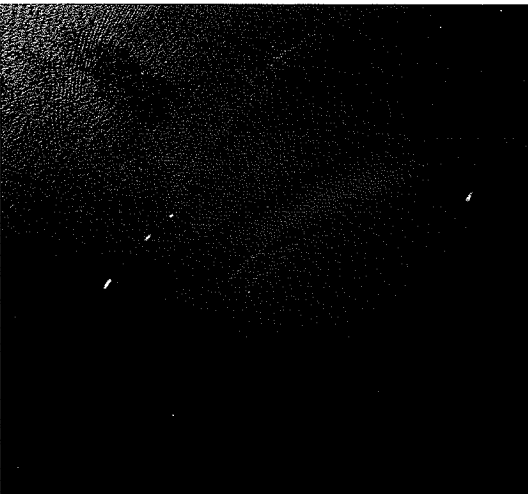
**Photo 10**



**Photo 8**



**Photo 11**



**Photo 9**



**Photo 12**