

大村湾および佐世保湾における拡散係数

宇 都 幸 一*・栗 須 正 登*
中 根 重 勝**

The Diffusivity Coefficient in Omura and Sasebo Bay

by

Kouicou UTO

(Department of Mechanical Engineering)

Masato KURISU

(Department of Mechanical Engineering)

Shigekatu NAKANE

(Fisheries)

In this paper, the diffusion cloud method by dyes and the velocity correlation method are used to calculate the diffusion coefficients in Omura and Sasebo Bay.

In case of the dyes, Uranine is very cheap for dyes, clear green color, and keeps clear clouds for about two hours in a sea. Accordingly we can trace easily edges of the clouds by boats. When we calculated the increment ratio of the cloud area, we used two different ways. They are instant gradient ($\Delta A/\Delta T$) and mean gradient (A/T).

In mean gradient way, the gradient of diffusion coefficient was smaller than that of the rule of $4/3$ (by Richardson), and the diffusion coefficients were $1.4 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in Omura Bay and $1.6 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in Sasebo Bay at 900m-scale.

When we apply the instant gradient way, we must be careful to measure the area of the dyes clouds.

The gradient of the diffusion coefficient by the velocity correlation method was smallest among the those we applied, but the value was greater than the other during about 2-3 hours.

The diffusion coefficients of the correlation and the dyes methods were same $2.4 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ at near 1 hour time-scale.

昭和54年4月25日受理

* 機械工学科

** 水産学部

1. 緒言

海洋の水質汚濁に関する数値シミュレーションについては、拡散係数が重要な課題となっており、拡散係数を推定するために、現地での染料投入、および潮流観測が数多く行なわれている。著者らは昭和49年以来大村湾および佐世保湾に関して潮流および水質汚濁シミュレーションを行っており、昭和50年には大村湾、昭和52年には佐世保湾について染料投入による拡散の現地観測を行いデータを得ている。染料投入による拡散係数の解析には種々の方法があり、大村湾では拡散雲を円形パッチとみなし等濃度法を用いた解析を既に行っているが、ここではそれに加えて分散による解析および、佐世保湾では潮流観測による拡散係数の解析を行った。後者はもっぱら Lagrange の相関から求めなくてはならないが、潮流計によって測定された Euler 速度が Lagrange の速度と1対1に対応していると仮定し解析を行っている。また大村湾に対しては別に県都市計画課が同様の解析を行っている。本報ではまず染料投入による上記2方法を用いた佐世保湾での拡散係数の算出およびその検討、佐世保湾および大村湾での値の比較、拡散雲の面積測定法および数値シミュレーションに対する適用についてのべ、次に潮流観測により求めた佐世保湾でのエネルギースペクトラム、相関係数、および拡散係数について検討を行った。

2. 染料および拡散雲の観測方法

海洋に関する拡散実験で投入される染料としては、ローダミンBやウランinが多く用いられる。ローダミンBは濃度分析が容易であるが、拡散の最も目安となる分散を濃度分布より求めるためには多くの労力を必要とする。したがって著者らは濃度分布をやめ観測による拡散雲の面積測定法を用いた。この方法は濃度分析に比べ非常に容易であり、染料もローダミンBに比べ安価なウランinを用いることができ、かつその水溶液が明るい緑色をしていることから拡散雲の拡がりを容易に追跡できる。また拡散雲の面積積出の方法として著者らは昭和50年の大村湾における観測を初めとして以下に述べる方法を試みた。拡散雲の観測においては初期拡散による誤差、染料と海水の比重差による染料の降下による誤差が大きな問題となる。このため船のプロペラ等の外乱による初期拡散を少なくするため、手こぎのボートによって染料を運搬し、比重差をなくすため大量の海水でウランinを溶かし、その溶液をドラムカンやバケツにより静かに投入した。次に一定時間間隔で拡散雲の外縁を6隻の手こぎのボートにより追跡し、それぞれのボートの位置を陸上の2定点

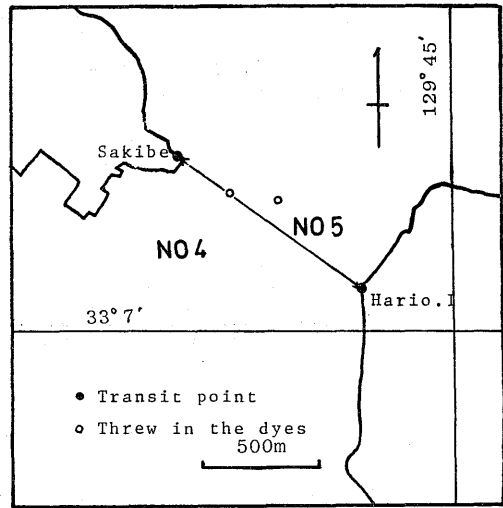


Fig. 1 Measuring Points

Table 1 Condition of Measurement

NO	Measuring Point	Day and Time	Number of Measurement	Quantity of Uranin	Velocity of the wind and the direction of the wind
1	Omura bay Kuro.I, Hata.I	S50. 9.25 10: 9-11:39	4	5Kg	
2	Omura bay Kuro.I, Hata.I	S50. 9.25 11:15-14:45	6	5Kg	2-4(m/sec) WSW
3	Omura bay Kano.I, Take.I	S50. 9.26 11: 1-12:31	6	5Kg	
4	Sasebo bay Sakibe-oki	S52. 8. 2 10: 6-12: 8	6	10Kg	2-3(m/sec) S-W
5	Sasebo bay Sakibe-oki	S52. 8. 2 15: 2-16:34	8	10Kg	3-3.5(m/sec) W

に設置したトランシットで測定した。図1は佐世保湾における染料投入地点および陸上観測点を示す。6隻のボートは拡散雲の面積を精度良く算出できるように配置されており、ボートの形成する六角形の面積を拡散雲の面積として求めた。また同時に観測地点での風向、風速および潮流の観測も行った。大村湾および佐世保湾における観測諸元を表1に示す。

3. 拡散雲による拡散係数

3.1 等濃度法による解析

平野、杉浦によると染料域縁辺の濃度が常に等しいと考え、拡散係数を次式により求めている。

$$K_1 = \frac{\Delta A_i}{4\pi \Delta t_i} \quad (1)$$

ここで ΔA_i は Δt_i 時間の経過時間に対する拡散雲の増加面積である。またスケールに対しては拡散雲の相当半径 R をとっており、 R は次式で示される。

$$R_i = \frac{1}{2\sqrt{\pi}}(\sqrt{A_{i+1}} + \sqrt{A_i}) \quad (2)$$

3.2 分散による解析

分散 σ を拡散雲の相当直径 D とみなし, 相対拡散を適用すると拡散係数は次式で示される.

$$K_2 = \frac{\sigma^2}{4t} = \frac{D^2}{4t} \quad (3)$$

ここで t は投入時からの経過時間であり, そのスケールは次式で示される.

$$D = 2\sqrt{\frac{A_1}{\pi}} \quad (4)$$

4. 拡散雲による拡散係数

4.1 大村湾について

表 2 および図 2 は式(1)より求めた拡散係数であり縦軸は拡散係数 K_1 , 横軸は拡散スケール R を示している. 図の中の実線は実験結果より最小自乗法を用いて求めたものであり, 次式で示される.

$$K_1 = 0.03235 R^{\frac{4}{3}} \quad (5)$$

一方, 表 3 および図 3 は式(3)より求めた拡散係数であり, 図の中の実線は次式で示される.

$$K_2 = 0.0347 D^{\frac{4}{3}} \quad (6)$$

Table 2 Diffusion Coefficient in Omura bay

NO	T	t(sec)	S(m ²)	s(m ²)	R(m)	K(cm ² /s)
1	10:24	900	1402	2507	28.2	2247
	10:39	1800	3909	5537	45.0	2440
	11:09	1800	9441	5533	61.9	2460
	11:39	1800	14974			
2	13:24	900	2321	1329	30.6	1175
	13:45	960	3650	3844	41.3	3123
	14:01	960	7493	2099	51.9	1784
	14:17	960	9593	6096	62.9	5082
	14:33	720	15689	5002	75.9	5538
	14:45	720	20691			
3	11:16	840	1548	1804	27.5	1716
	11:30	840	3352	2317	37.6	2193
	11:44	1020	5669	2570	46.9	1998
	12:01	900	8239	2745	55.2	2420
	12:16	900	10984	2079	61.8	1854
	12:31	900	13063			

4.2 佐世保湾について

佐世保湾における第一回, 第二回の拡散雲の移動状況をそれぞれ図 4, および図 5(a), (b)に示す. 表 4 および図 6 は大村湾と同様に式(1)より求めたものであり, 図中の実線は次式で示される.

$$K_1 = 0.05963 R^{\frac{4}{3}} \quad (7)$$

表 5 および図 7 は式(3)より求めたものであり, 図中の実線は次式で示される.

$$K_2 = 0.04040 D^{\frac{4}{3}} \quad (8)$$

Table 3 Diffusion Coefficient in Omura bay

NO	T	t(sec)	S(m ²)	D(m)	K(cm ² /s)
1	10:24	900	1780	42.3	4993
	10:39	1800	4984	70.6	6922
	11:09	3600	12056	109.8	8341
	11:39	5400	19099	138.2	8842
2	13:30	900	2959	54.4	8220
	13:45	1800	4651	68.2	6460
	14:01	2760	9448	97.2	8557
	14:17	3720	12188	110.4	8190
	14:33	4680	19994	141.4	10680
	14:45	5400	26373	162.4	12210
3	11:16	900	1971	44.4	5476
	11:30	1740	4277	65.4	6145
	11:44	2580	7225	85.0	7000
	12:01	3600	10486	102.4	7281
	12:16	4500	11707	108.2	7761
	12:31	5400	16641	129.0	7704

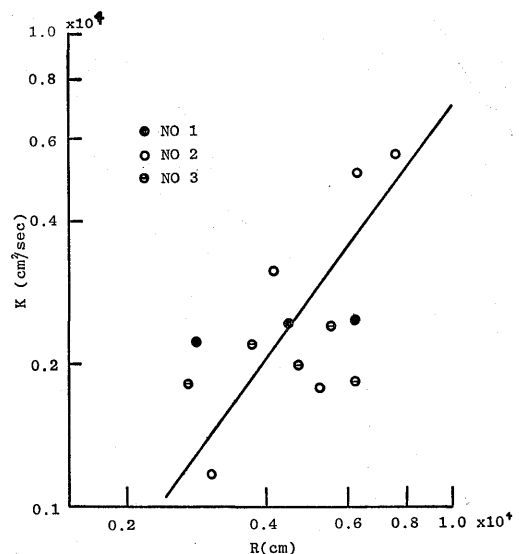


Fig. 2 Relation between Coefficient of diffusion (K) and R in Omura bay

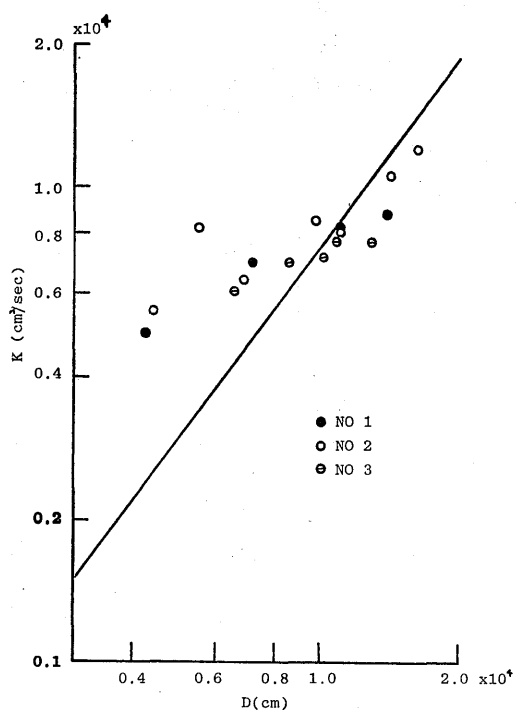


Fig. 3 Relation between Coefficient of diffusion (K) and D in Omura bay

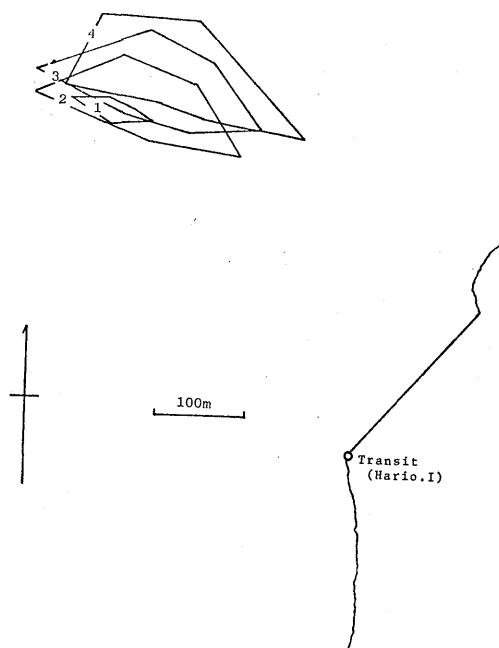


Fig. 5 (a) Diffusion of dyes in Sasebo bay

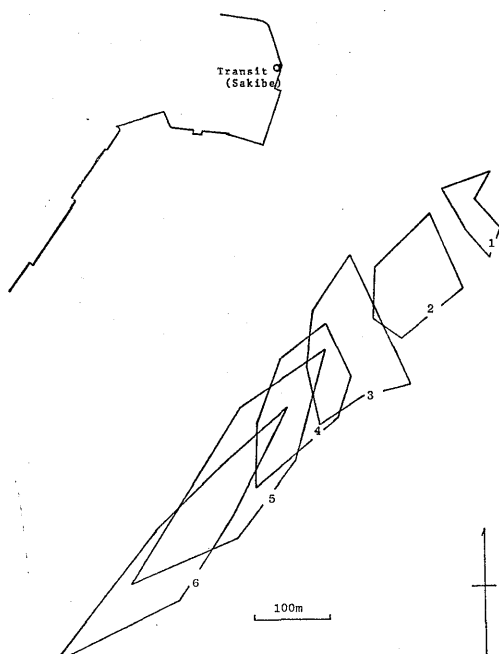


Fig. 4 Diffusion of dyes in Sasebo bay

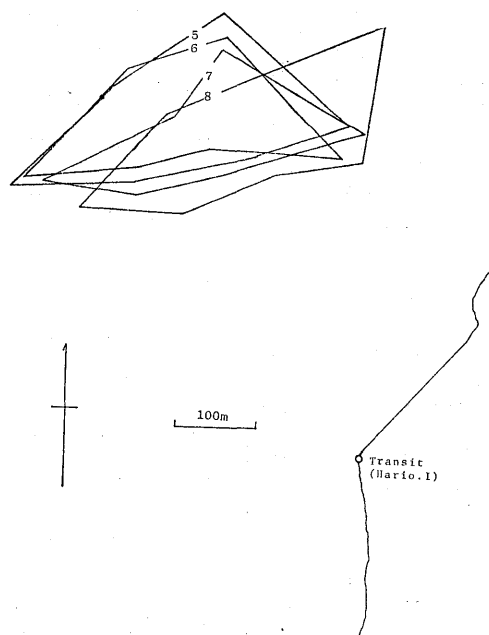


Fig. 5 (b) Diffusion of dyes in Sasebo bay

Table 4 Diffusion Coefficient in Sasebo bay

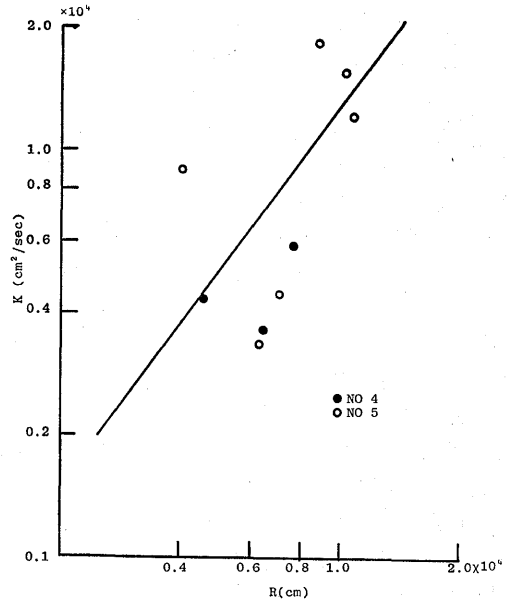
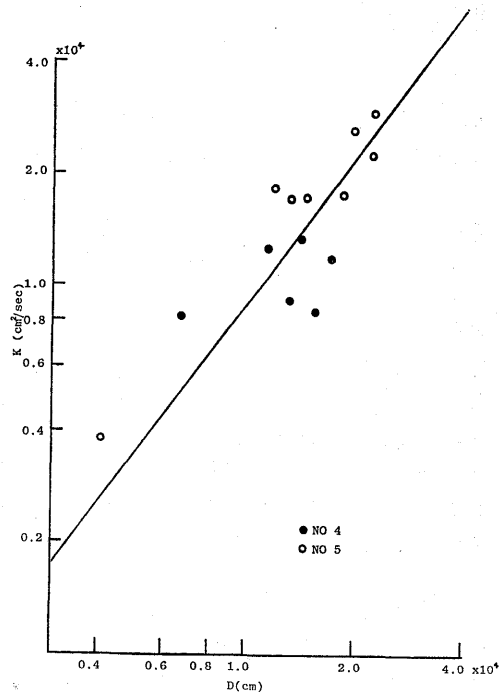
NO	T	t(sec)	S(m ²)	ΔS(m ²)	R(m)	K(cm ² /s)
4	10:29		3584			
		1290		7040	45.9	4341
	10:50		10624			
		1097		4992	64.3	3634
	11:03		15616			
		1128				
	11:27		13824			
5		1211		8960	75.7	5876
	11:47		22784			
		1204				
	12:08		19328			
	15:10		1280			
		892		9984	40.0	8878
	15:34		11264			
		588		2432	62.9	3316
	15:44		13693			
		600		3324	69.8	4420
	15:54		17024			
5		608		13952	86.4	18263
	16:04		30976			
		601		9088	106.1	12013
	16:14		40064			
		586				
	16:24		27008			
		596		11648	101.8	15528
	16:34		38656			

Table 5 Diffusion Coefficient in Sasebo bay

NO	T	t(sec)	S(m ²)	D(m)	K(cm ² /s)
4	10:29	1391	4543	67.4	8170
	10:50	2681	13502	116.2	12590
	11:08	3778	19881	141.0	13155
	11:28	4906	17583	132.6	8959
	11:48	6117	28968	170.2	11839
	12:08	7321	24586	156.8	8395
5	15:20	1078	1632	40.4	3792
	15:35	1968	14304	119.6	18177
	15:45	2556	17424	132.0	17046
	15:55	3156	21667	147.2	17168
	16:05	3764	39442	198.6	26200
	16:15	4365	50986	225.8	29212
	16:25	4951	34373	185.4	17368
	16:34	5547	49195	221.8	22178

4.3 大村湾および佐世保湾の拡散係数の比較と K_1 , K_2 の比較

大村湾と佐世保湾の拡散係数について比較すると、式(1)、式(3)を通じて佐世保湾での値が大きな値を示しており、 K_1 では約84%、 K_2 では16%大きい。両湾の潮汐の特徴を述べると、佐世保湾は外洋に通じる湾口が比較的広く、潮位の変化は外洋とほぼ同じであり、 M_2 潮位は86cmに達している。このため湾内の潮流

Fig. 6 Relation between Coefficient of diffusion (K) and R Sasebo bayFig. 7 Relation between Coefficient of diffusion (K) and D Sasebo bay

も大きな値を示している。一方大村湾は外洋、佐世保湾、西海橋付近の針尾瀬戸を通じて潮位が伝播するため、潮位差は減少しており M_2 潮位は22cmでしか

い、このため西海橋付近の一部を除いた殆んど湾内において潮流は非常に小さい。拡散係数は乱れの強さに関係し、また乱れの強さは流体の速度、つまり潮流と関係があることから考えると、潮流が非常に小さい大村湾において拡散係数が小さい値を示すことが推測できる。次に式(1)および式(3)から求めた拡散係数を比較すると、式(1)から求めた K_1 は式(3)より求めた K_2 に比べばつぎが大きい、式(1)の ΔA_1 がばらつく原因としては染料投入時における染料の沈下および三次元的な拡散による拡散雲中心の変化、また三次元的流れによる浮上、降下などの影響が主な原因であり、その他には各測定者による個人誤差が考えられる。要するに K_1 を算出することは測定時刻における局所的な面積増加割合すなわち微係数を実験データから求めることとなり必然的にある程度の散らばりは避けられない。一方 K_2 と算出することは投入時から測定時刻までの平均的な面積増加割合を求める操作であるからデータもまとまり安し、また信頼性も増すと考えられる。

5. 数値シミュレーションに対する適用

潮流および拡散に関する数値計算は対象とする海域の大きさ、計算精度および計算時間によって、離散化量の規準（すなわちメッシュの大きさ ΔS ）が決められる。また拡散計算に対して差分法を使用する場合、離散距離 ΔS は先に述べた拡散スケールに当たる。著者が行っている潮流および拡散の数値計算では大村湾に対して $\Delta S=900\text{m}$ 、また佐世保湾では $\Delta S=300\text{m}$ であるため、それぞれの ΔS に対する拡散係数が必要となる。これに対して本拡散実験では前述のように拡散スケール D が $40\sim 200\text{m}$ の場合の拡散係数しか求められない。

しかし数値計算に用いる ΔS と拡散実験の拡散スケール D はほぼ同じオーダーであるから図6、および図7の実線を外挿して求めた値を用いることができる。この場合大村湾の 900m に対しては $1.4 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ 、佐世保湾の 300m に対しては $3.7 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$ となる。

6. 潮流観測による佐世保湾での拡散係数

6.1 潮流観測

図8に観測位置を示す。また図9に流速計の設置状況を示す。流速計はプロペラ式の小野式流速計で行った。測定日時および測定位置については拡散係数が場所および時間により変化することから、拡散雲より求めた拡散係数と潮流解析による結果を比較するため、拡散雲とほぼ同一地点である St8、観測時間は昭和52年7月26日より8月3日までの約2週間である。

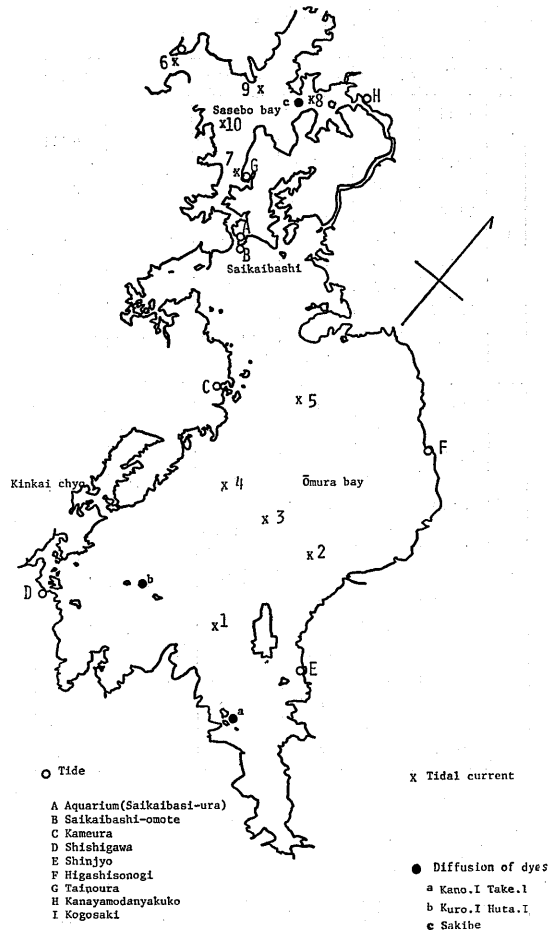


Fig. 8 Measuring Points

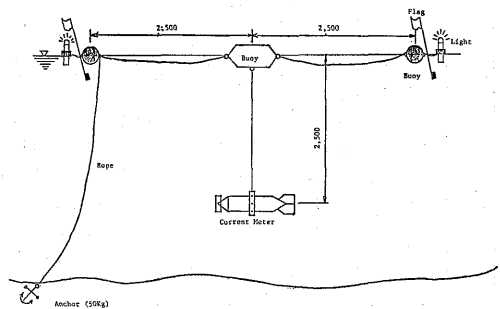


Fig. 9 Setting of Velocity meter

6.2 解析方法

6.2.1 エネルギースペクトラム

まず拡散係数を求める前に半日より短い周期をもつエネルギー分布を調べた。図10は南北方向のエネルギー分布であり縦軸にエネルギー、横軸に cph を示した。この図からわかるようにエネルギー分布は $-5/3$ の勾配を示

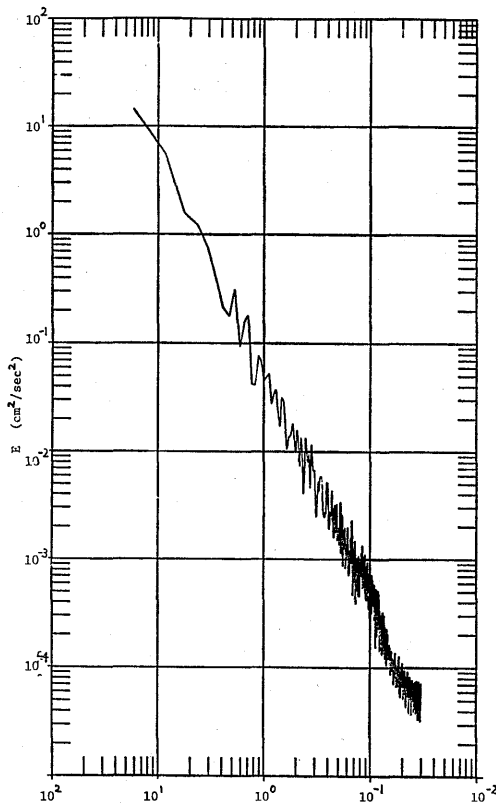


Fig. 10 Energy spectram in Sasebo bay (N-S)

している。図11は東西方向のキネルギ分布を示している。両者についてのエネルギー分布はほぼ同じぐらいの値を示しており、ほぼ半日より短い周期の流速成分は等方的だと考えられ、また分布の傾向から乱流拡散を支配している領域がこの範囲に存在していることがわかる。

6.2.2 自己相関関数

潮流は日周期、半日周期等潮汐の他に乱れが存在する。拡散はこの乱れの成分より生じると考えられるので、乱れの成分を潮流の観測値からとり出すためには潮汐流を除外しなければならない、このため次の2方法を試みた。

a) 移動平均

潮流計のデータに対して移動平均を行うと、ある周期以下の現象は除去され、潮汐のような長い周期成分を求めることが出来る。この成分を元のデータから除いたものを乱れとした。

b) 最小自乗法 (調和分解)

潮汐流は M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , 等種々の頂により成り立っているが、この内大きな割合をしめるものは半日

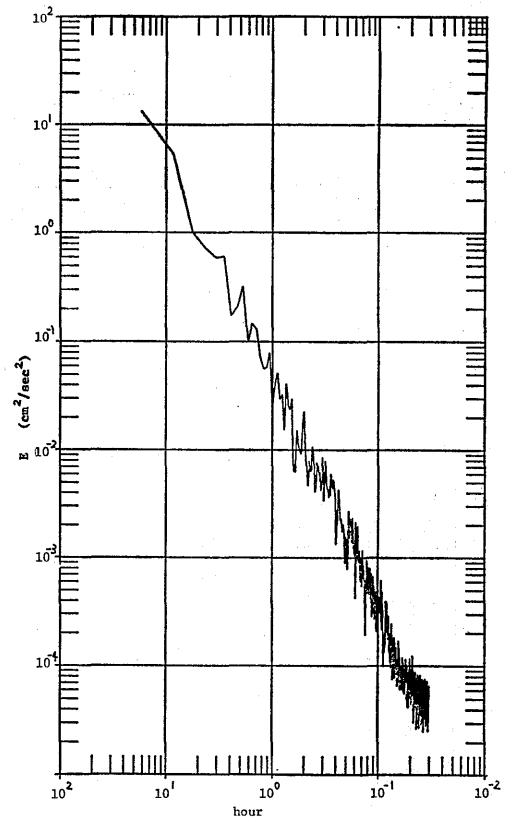


Fig. 11 Energy spectram in Sasebo bay (E-W)

周期の M_2 , S_2 , と一日周期 K_1 , O_1 , である。よってこの項を最小自乗法により求め、潮流の値から除いたものを乱れとした。

以上の方法により求めた乱れ $u'(t)$ を用いると自己相関関数 $R'(\tau)$ は次式で求められる。

$$R'(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u'(t)u'(t+\tau)dt \quad (9)$$

式において $u'(t)$ はLagrangeの速度であるが、Eulerの速度と1対1に対応していると仮定した。図12は移動平均の幅を6時間として求めた相関関数であり縦軸は正規化した $R(\tau)$ 、横軸は $\tau(\text{sec})$ である、実線は南北成分、破線は東西成分である、この図に示すように23,000secおよび45,000secで大きな値を示している、これは約半日周期の成分である。このように移動平均はその手法が簡単ではあるが、生データを歪ませる性質をもっている。図13は最小自乗法によって求めた相関関数である。図12と比べてわかるように6,000sec以上の時間では係数が小さい値しかもっていない、また両者を比べた場合いずれも6,000secまでに急激に値が零に近づきランダム変動の性質をもっており、今回

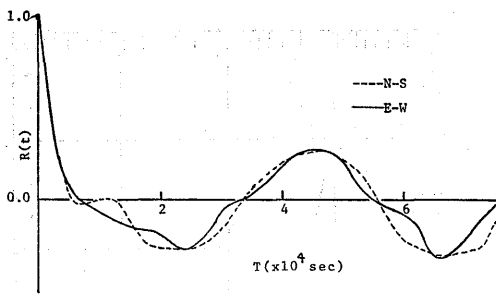


Fig. 12 Correlation Function

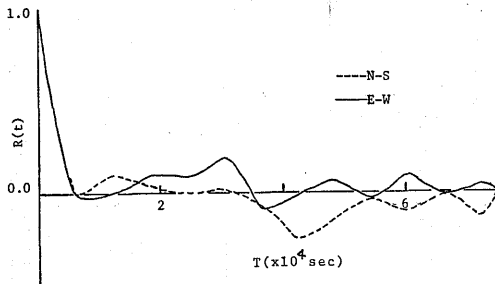


Fig. 13 Correlation Function

のようにせいぜい1, 2時間のスケールでの拡散係数を求める場合あまり両者の優劣はつけがたいが, 移動平均が歪ませる性質をもつこと, また最小自乗法による方法は潮汐成分を取り除く物理的意味が明白であることから, 最小自乗法による方法を用いて以後の計算を行った。

6.2.3 拡散係数と相関関数

乱れ u' による流塊の位置を $Y(t)$ とすると $Y(t)$ は次式で示される。

$$Y(t) = \int_0^t u'(t') dt' \quad (10)$$

拡散幅は $Y(t)$ の分散 Y^2 の平方根で示される。

$$l(t) = \sqrt{\overline{Y(t)^2}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_i(t) - \bar{Y}(t))^2} \quad (11)$$

ここで $l(t)$ は拡散幅である。

また分散 Y^2 と拡散係数 $K(t)$ は次の式で示される関数である。

$$\begin{aligned} K(t) &= \frac{1}{2} \frac{d\overline{Y(t)^2}}{dt} = \overline{Y \frac{dY}{dt}} = \overline{Y \cdot u'(t)} \\ &= \overline{u'(t) \int_0^t u'(t') dt'} = \int_0^t \overline{u'(t) u'(t')} dt' \\ &= \int_0^t R(t-t') dt' \end{aligned} \quad (12)$$

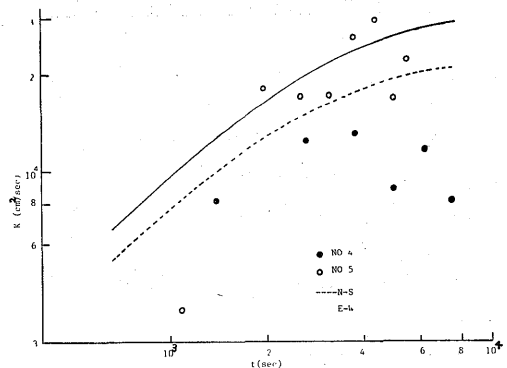
ここでLagrangeの相関係数 $R(\tau)$ を用いると, 拡散係数は次式で示される。

$$K(t) = \overline{u'^2} \int_0^t R(\tau) d\tau \quad (13)$$

ここで u'^2 は乱流強度である。

6.3 計算結果および拡散雲よりの値との比較

図14は式(13)により求めた拡散係数である。縦軸は拡散係数, 横軸は経過時間である。実線および破線で結んだものが潮流より求めた値であり, ○および●印に示したものは(3)式により求めた値である。経過時間が2,000sec以上の場合には両者はほぼ一致しているが, 2,000sec以下では潮流による値は大きな値を示している, これは乱流強度も時間とともに変化していると考えられるが全ての時間スケールにおいて一定として計算しているためだと考えられる, このことは句配が拡散雲から求めた値に比べて小さいことからわかる。また経過時間が6,000sec以上では潮流による拡散係数はほぼ一定値に近づいている, これは図13に示される相関関数からもわかるように潮汐による拡散を除いているためである, 一方拡散雲による拡散係数は拡散雲が潮汐により移動しかつ染料の相対位置が大きくなるにつれ, 特に佐世保湾のような地形の場合には潮汐流の差が拡散効果を生じるためと考えられる。

Fig. 14 Relation between Coefficient of diffusion (K) and T in Sasebo bay

7. 結 言

大村湾および佐世保湾の水質濁潮に関するシミュレーションを進めるため, 染料投入および潮流観測による拡散実験を行ったがその結果次のことが判明した。

(1) 拡散雲による実験について

i ポートによる拡散雲の面積測定は, 大村湾や佐世保湾のような比較のおだやかな海洋において有効である。

ii 染料としてウランを用いることはその価格が安価であり, また2時間程度の観測では測定誤差も少

ないと考えられる。

iii 等濃度法による拡散係数の解析には拡散雲の面積に十分注意して測定しなければならない。

iv 分散による拡散係数は比較的ばらつきの少ない値となるがその勾配は等濃度法よりゆるやかな傾向を示す。

(2) 潮流による拡散実験について

i 潮流による拡散係数はスケールに対する勾配がゆるやかであり、染料実験に比べ小さいスケールで大きな値を示す。

ii 時間のスケールが大きくなるにしたがい、拡散雲の値とは傾向が異なる一定値に近づく。

(3) 両者の拡散係数について

i 拡散雲の分散による解析では900mのスケールにおいて大村湾で $1.4 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ 、佐世保湾では $1.6 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ である。

ii. 1時間のスケールでは、ほぼ一致し約 $2 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$ である。

謝辞：本研究を行うに当たり、長崎県環境部、佐世保市、SSKの諸氏、また佐世保高専の野中稀平氏、本学工学部機械工学科石田、田中、琴浦氏、昭和52年度卒論生、またプログラムを提供していただいた土木工学科中村氏の諸氏に対して、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 海洋物理1 東海大学出版会
- 22 長崎大学工学部 大村湾水質汚濁対策報告書昭和51. 3
- 3) 日本下水道公団 大村湾水質汚濁解析調査