

潮流による拡散の水理模型実験について (VI)

樋口 明生・柳 哲雄・柏井 誠

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

By *Haruo HIGUCHI, Tetsuo YANAGI and Makoto KASHIWAI*

Synopsis

The diffusion phenomena due to the tidal current are studied in a hydraulic model. The effect of density, wind and waves are not considered.

A model of the Mikawa Bay, with horizontal and vertical scales of 1/2000 and 1/160 respectively was used and a semidiurnal tide was provided for it. The diffusion of dyed water discharged from continuous point sources was investigated by dye concentration analysis.

The patterns of dye spreading are dominated by the residual current. The diffusivity calculated from the distribution of the dye concentration in the model, is about $2.7 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ in the Mikawa Bay. It has the same order as the dispersion coefficient of the tidal residual current in the Mikawa Bay.

1. ま え が き

沿岸海洋における保存物質の分布は、移流と拡散によって決まるあるバランスの状態に在ると考えられる。しかし、沿岸海洋のメソスケールの現象に関して、物質分布と同程度の密度で流速の水平・鉛直分布、時間的变化を直接測定することには非常な困難を伴う。

そこで、まず種々の測定が容易に行なえる水理模型内での拡散現象について研究することは、原型での現象を理解するための有力な視点を与えるものと考え、そのような観点から前報¹⁾にひきつづき、潮汐・潮流が再現された水理模型内で tidal excursion 以上、 10^2 潮汐周期の拡散現象について考察を進めたのでここに報告する。

2. 分散の考え方

前報において1次元の拡散係数は潮汐混合による拡散係数より1桁大きいことを明らかにした。Fig. 1 に box model を使って求めた、恒流による移流 flux と潮汐混合による拡散 flux の大きさを示す。この図からも拡散 flux より移流 flux の方が大きいことがわかる。

Fischer²⁾ にならって流速を次のように分解する。

$$u(x, y, t) = u_0(x) + u_1(x, t) + u_s(x, y) + u'(x, y, t) \quad \cdots \cdots (1)$$

u は流速、 x は湾口に向かってとった水平方向の距離、 y はその直角方向の距離、 t は時間を表わす。 u_0 は染料水の断面平均速度で $u_0 = \langle \bar{u} \rangle$ である。ここに $\bar{}$ は断面平均、 $\langle \rangle$ は1潮時平均を表わす。 u_1 は断面平均潮流で $u_1 = \bar{u} - u_0$ である。 u_s は潮流に起因する恒流を表わし $\bar{u}_s = 0$, u' は偏差で $\bar{u}' = \langle u' \rangle = 0$ である。

濃度 C も同様にして次のように分解する。

$$C(x, y, t) = C_0(x) + C_1(x, t) + C_s(x, y) + C'(x, y, t) \quad \cdots \cdots (2)$$

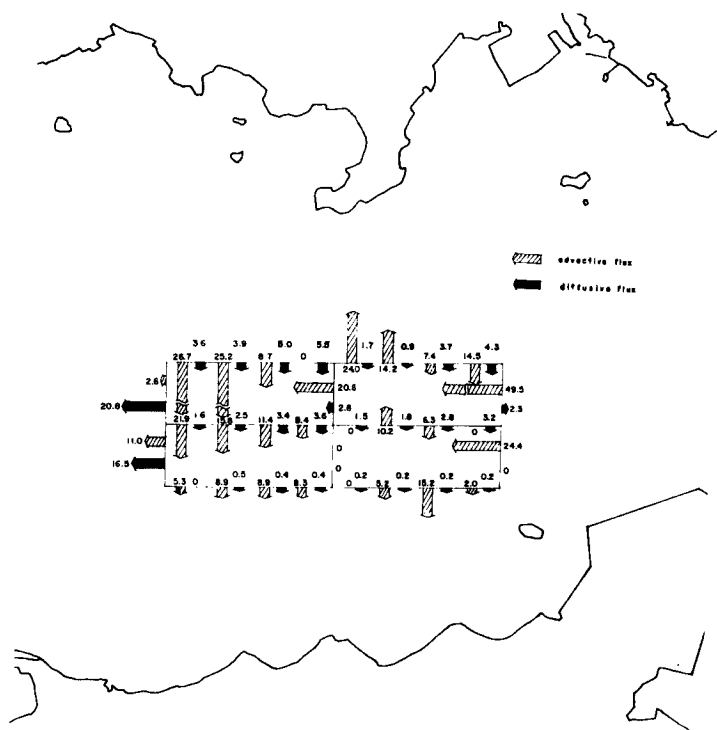


Fig. 1. Dye fluxes in the box model.

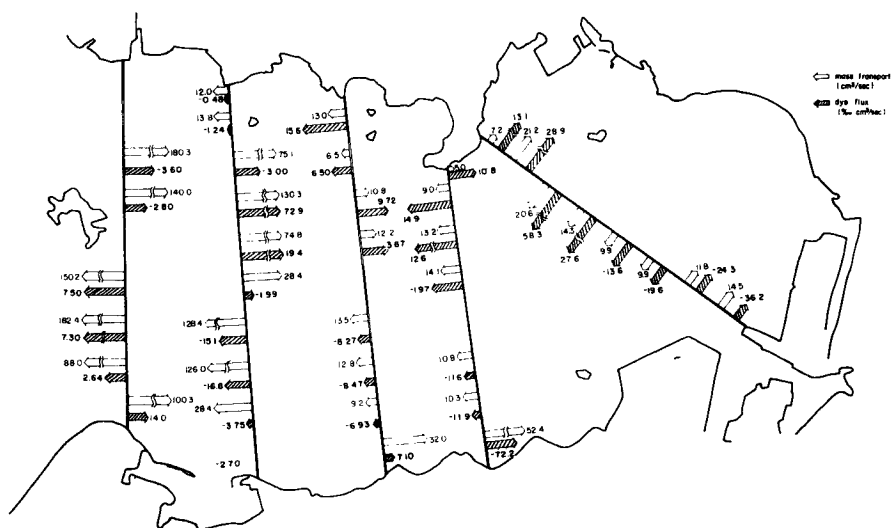


Fig. 2. Mass transport and dye flux.

単位時間に断面を通過する染料 flux は次式によって計算できる。

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T \int_A (uC) dA dT \dots\dots\dots (3)$$

ここに T は 1 潮汐周期, A は断面積を表わしている。ここで潮汐による断面積の変化は小さく, かつ $\langle u_1 C_1 \rangle \approx 0$ とすると,

$$M = C_0 Q + A_0 (\bar{u_s C_s} + \langle u' C' \rangle) \dots\dots\dots (4)$$

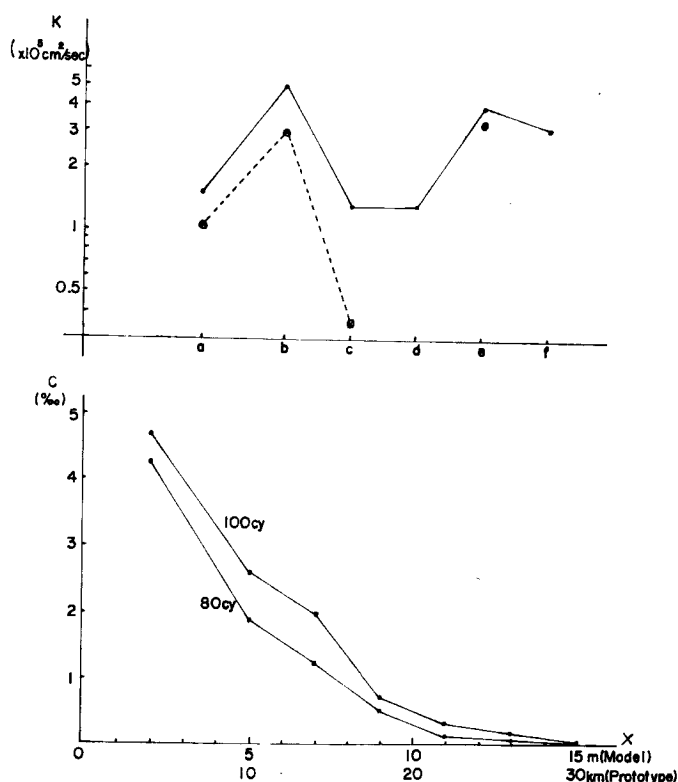


Fig. 3. Diffusivity and dispersion coefficient.

Table 1 Diffusivity and dispersion coefficient

Section	A cm ²	$A \cdot \Delta x \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}$ ‰·cm ³ /sec	$Q \cdot \Delta x C$ ‰·cm ³ /sec	$A \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x}$ ‰/cm	K		$\bar{u_s C_s}$	D	
					model cm ² /sec	prototype × 10 ⁵ cm ² /sec		model cm ² /sec	prototype × 10 ⁵ cm ² /sec
a	3340	102	1.56	17.4	5.95	1.49	71.3	4.10	1.03
b	4120	109	0.43	5.44	20.1	5.03	63.6	11.7	2.93
c	5740	98.2	0.68	19.4	5.10	1.28	21.4	1.10	0.28
d	6020	41.5	0.27	8.31	5.03	1.26	—	—	—
e	5330	28.2	0.07	1.76	16.1	4.03	23.8	13.5	3.38
f	5880	18.6	0.05	1.49	12.5	3.13	—	—	—

となる。 Q は染料水の投入量, A_0 は 1 潮時の平均断面積を表わす。 C_0Q は 1 次元拡散方程式中の移流 flux に相当するものである。

恒流による分散は Fischer が D_1 と記している分散係数を用いて表わされ, 次式によって求めることができる。

$$D_1 = 1/(dC_0/dx) \cdot \overline{u_s C_s} \dots\dots\dots (5)$$

各断面での恒流による染料 flux ($Au_s C_s$) を Fig. 2 に, それから求めた D_1 を Fig. 3 に示す。図中点線で結んだ④がそれである。この図から d 断面を除いて 1 次元拡散方程式から求めた拡散係数は恒流による分散係数としてほぼ説明できることがわかる。拡散係数・分散係数の計算数値を Table 1 に示す。この結果は Fischer が Mersey Estuary に対して理論的に求めた結果とよく一致している。

3. その他の実験結果と考察

a) 連続点源拡散実験

模型に大潮・小潮を与え Fig. 4 に示した④⑥⑦の各点から 75 ppm のウラン溶液を連続投入し, 5 周期毎に満・干潮時に採水し, 濃度の時間的変化を調べた。80 周期, 100 周期目には各測点で, 上げ潮・満潮・下げ潮・干潮時に同時採水を行ない, 濃度の水平分布を調べた。Table 2 に実験一覧表を示す。

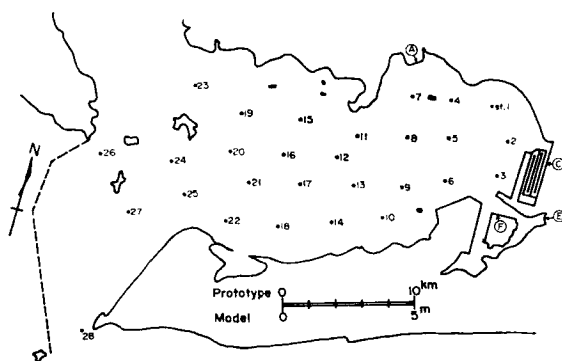


Fig. 4. Discharging points and sampling stations.

Table 2 List of experiments

Run No	Date	Discharging		Tidal Range (Katahama) m
		point	Rate cc/sec	
49	'72.10.18	A	0.69	2.24
50	" 10.20	C	0.25	2.49
51	" 10.23	E	0.79	2.53
52	" 10.25	F	1.35	2.66
53	" 10.27	A	0.64	0.82
54	" 10.30	E	0.80	0.82

大潮の④点から投入した実験結果については前報で述べたので, ここでは他の実験結果について述べる。濃度の時間的変化を Fig. 5~Fig. 9 に示す。大潮を与えた場合の濃度の上昇 pattern は A 点から投入した場合とはほぼ同様であるが, 投入量に比例して各点での濃度に高低ができる。小潮を与えた場合には投入点近くの濃

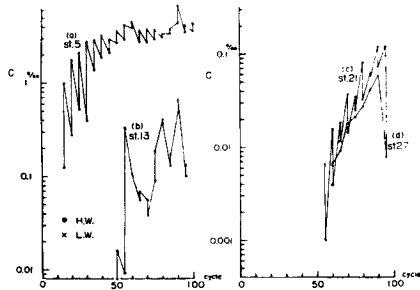


Fig. 5 Time change of dye concentration, discharging point *C*, Spring tide.

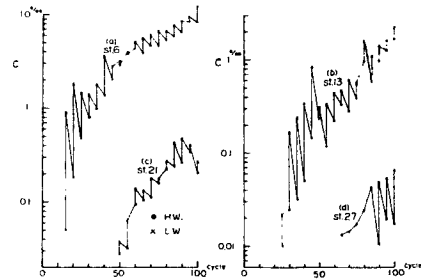


Fig. 6 Time change of dye concentration, discharging point *E*, Spring tide.

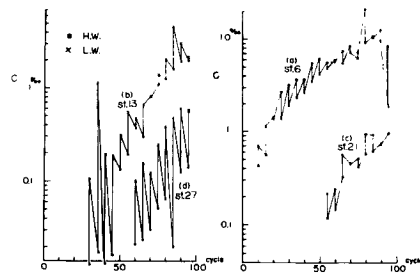


Fig. 7 Time change of dye concentration, discharging point *F*, Spring tide.

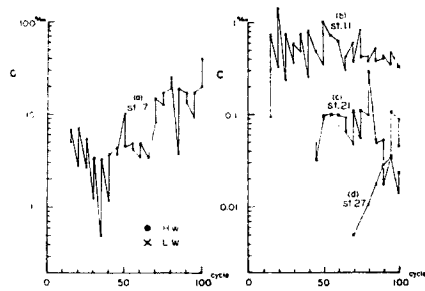


Fig. 8 Time change of dye concentration, discharging point *A*, Neap tide.

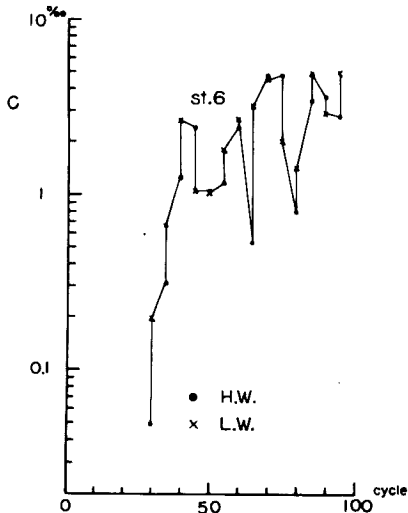


Fig. 9 Time change of dye concentration, discharging point *E*, Neap tide.

度が非常に高くなり、投入点から離れるにしたがって濃度の減少が大きく、染料が拡がりにくいことを表わしている。

80周期と100周期目の測定値を平均して得られた90周期目の濃度の水平分布を Fig. 10~Fig. 14 に示す。

現象の法則性を探るため両対数グラフ上で、等濃度線と海岸線によって囲まれる面積と濃度との相関を調べてみた。その結果を Fig. 15 に示す。図の縦軸は投入原液との千分率 (%) で表わした濃度、横軸は面積である。大潮と小潮の場合を比較すると、小潮の方が勾配が大きく、染料が拡がりにくいことを示している。大潮の場合の各ケースを比較してみると、いずれもある濃度・面積の所でおれまがっている。これを屈折点とすると、屈折点以前の勾配より屈折点以後の勾配は大きく、染料はある面積までは拡がりやすいが、その後は拡がりにくいことを示している。又、屈折点以前と以後の勾配は各ケースについてほぼ等しく、この勾配は場所的に異なった拡散のメカニズムを示唆しているものと考えられる。そこで前報の Fig. 10 で示した大潮の恒流図上にこの屈折点の等濃度線を書きこんでみると Fig. 16 のようになる。これを見ると屈折点にあたる等濃度線は湾奥にあ

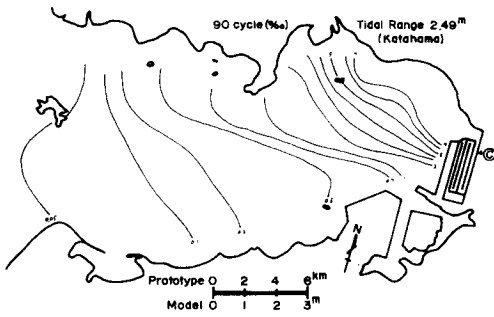


Fig. 10 Horizontal distribution of dye concentration, discharging point C, Spring tide.

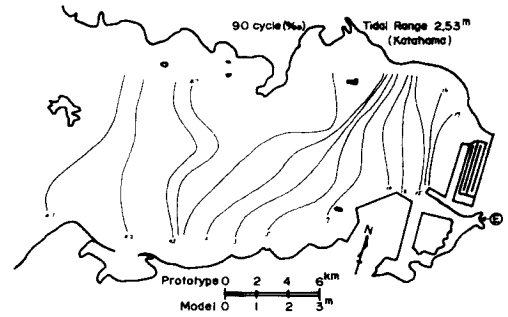


Fig. 11 Horizontal distribution of dye concentration, discharging point E, Spring tide.

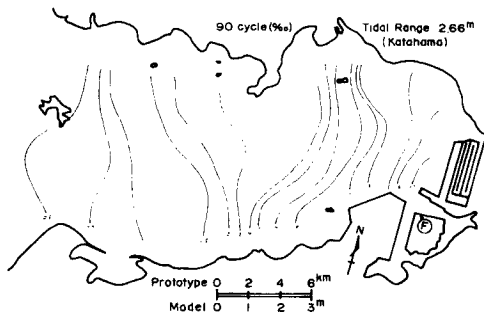


Fig. 12 Horizontal distribution of dye concentration, discharging point F, Spring tide.

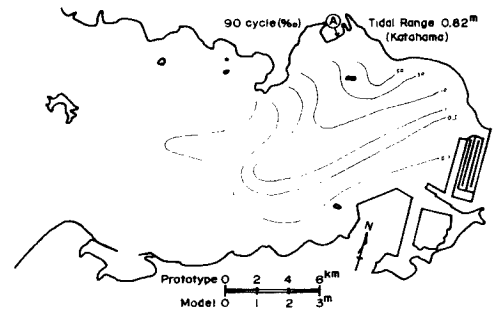


Fig. 13 Horizontal distribution of dye concentration, discharging point A, Neap tide.

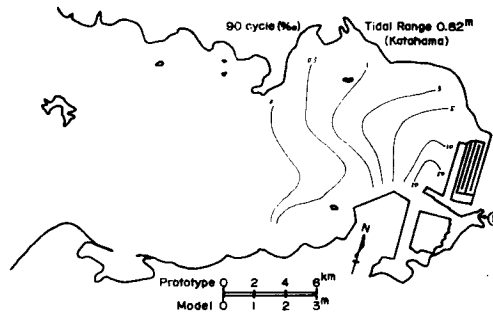


Fig. 14 Horizontal distribution of dye concentration, discharging point E, Neap tide.

る恒流による環流系の境界とよく一致していることがわかる。すなわち、投入された染料はまず湾奥の環流系の中で一定の拡散様式にしたがって拡がり、湾中央の恒流停滞域を経て別の拡散様式にしたがって拡がると考えてもよいであろう。

b) 恒流

前報で述べたように恒流は河川水の流入や潮差によって変化するものと考えられる。そこで模型に大潮を与え、豊川の平均流量 ($25.2 \text{ m}^3/\text{sec}$) に相当する河川水を流入させ、恒流の pattern を調べてみた。結果を Fig.

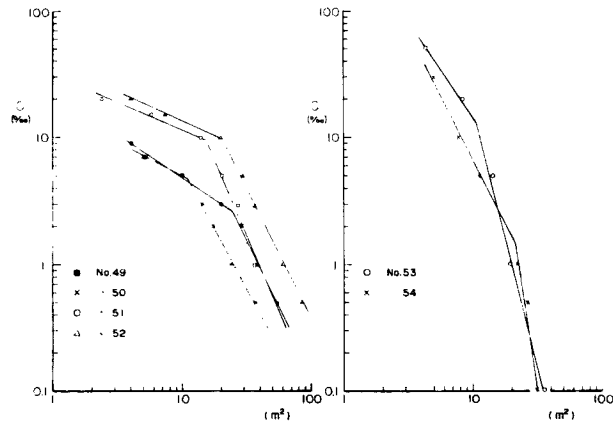


Fig. 15 Dye concentration versus the area enclosed by contour line, Spring tide (left) and Neap tide (right)

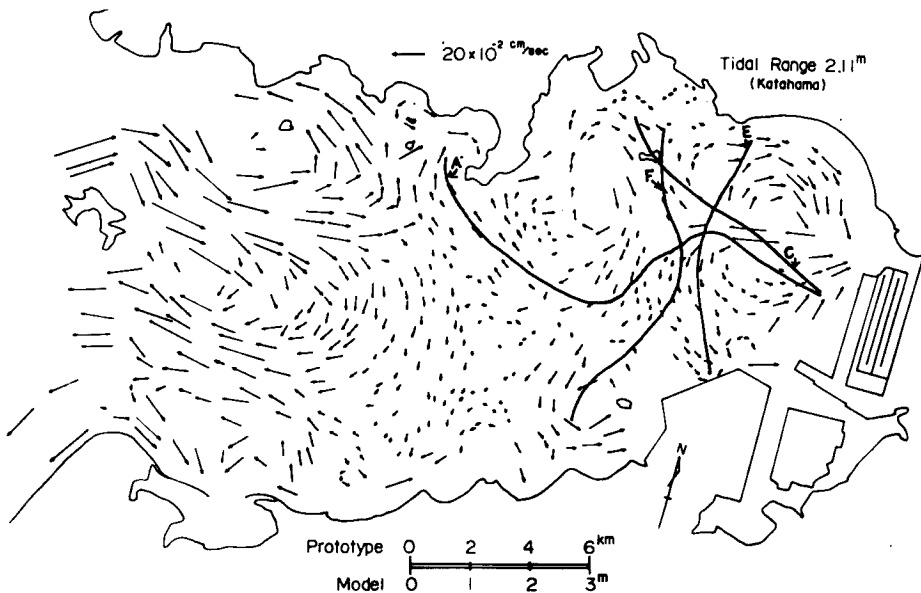


Fig. 16 The contour lines corresponding to the flecn point of C-S curve (Fig. 15)

17 に示す。恒流の大きさ、pattern とも前報の Fig. 10 で示したものとほとんど変わらず、豊川河口南の環流がやや湾口に移動する程度である。これは河川水の流入により河口での flushing が強まるためと思われる。しかし実際の河川水は海水との密度差から gravitational circulation をひき起こすから、この実験結果からただちに、三河湾の場合河川水の流入は恒流にあまり影響しないと結論することはできない。

模型に小潮を与えて恒流の pattern を調べてみた結果を Fig. 18 に示す。湾奥部では pattern は大体似ているが、流速は弱くなっている。湾中央では pattern, 強さとも異なっている。湾奥部の pattern の一致は前報

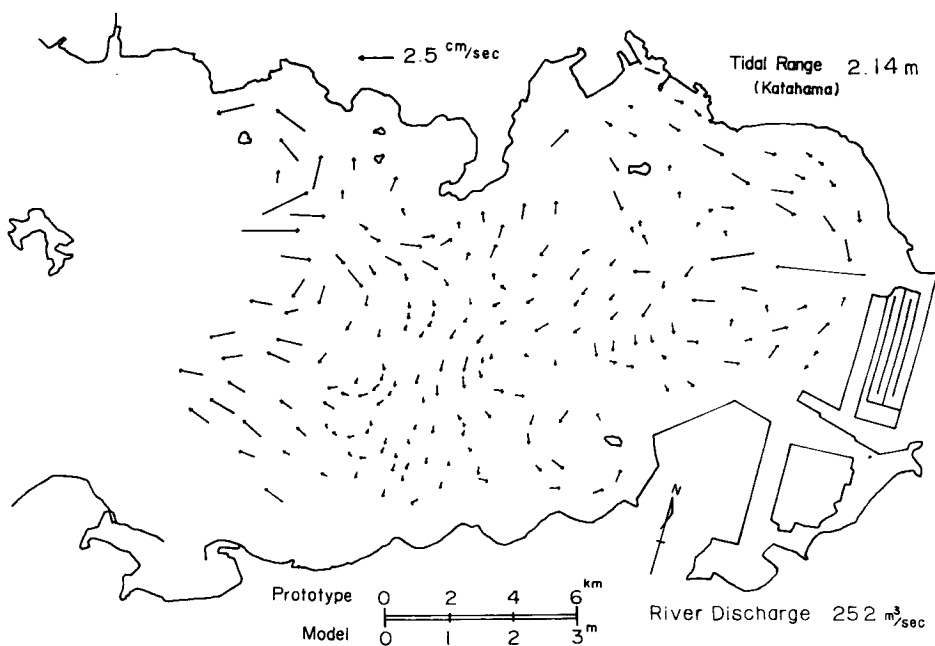


Fig. 17 Residual current with river discharge (model)

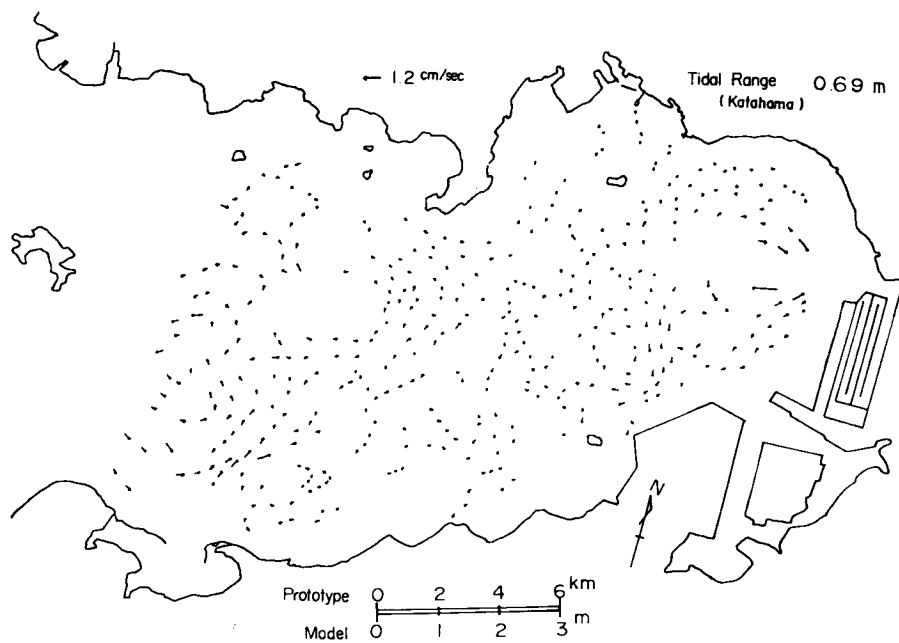


Fig. 18 Residual current in the neap tide (model)

Fig. 14 で示した A 点から投入した大潮の濃度水平分布と、本報の Fig. 13 に示した A 点から投入した小潮の濃度水平分布が似ていることからもうかがえる。

恒流の発生・維持機構は不明の点が多く、現在基礎的な研究を行なって考察を進めている。

4. あ と が き

以上著者らは水平縮率 1/2000、鉛直縮率 1/160 の水理模型を使って、三河湾海域における模型実験を行ない、現在までに次の事が明らかになった。ただし、ここでは半日周潮のみを対象とし、密度、波浪、風などの影響は考慮していない。

(1)～(4)は前報で述べた。

(5) (3)に述べた 1 次元の拡散係数は恒流の分散係数としては説明できる。

(6) 湾奥部の恒流による拡散様式と湾中央部の恒流による拡散様式は異なっている。

今後、模型で得た視点をもとに現地観測を行なって、原型でもこのような考え方が妥当であるかどうか検討していきたいと考えている。

最後にこの研究を進めるにあたって実験並びに資料の整理に協力していただいた北川吉男技官、および中国工業技術試験所の安田秀一氏に謝意を表する次第である。

なおこの研究は一部愛知県の実験委託によって行なったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 樋口明生, 柳 哲雄, 柏井 誠: 潮流による拡散の水理模型実験について (V), 京大防災研究所年報第 16 号 B, 619～629, 昭 48.
- 2) Fischer, H. B.: Mass Transport Mechanisms in Partially Stratified Estuaries, J.F.M., Vol. 53, 1972, pp. 671～687.