

# 潮流による拡散の水理模型実験について (I)

樋口 明生・杉本 隆成

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

By Haruo HIGUCHI and Takashige SUGIMOTO

### Synopsis

The diffusion phenomena due to the tidal current inside and outside a harbor are studied in a hydraulic model experiment, for which the Kashima Harbor area is used as the prototype. The tidal current, the longshore current and the effect of density are taken into account, but the direct effects of wind and waves are not considered.

A model of Kashima Harbor, with horizontal and vertical scales of 1/500 and 1/63 respectively, was constructed and a semidiurnal tide and longshore current were provided for it. The diffusion from instantaneous point sources and a continuous point source was investigated by photographic method and dye concentration analysis.

### 1. ま え が き

近年、産業経済の発展に伴ない、各地に臨海工業地帯が造成されつつあるが、これらの計画が完成すると、多くの工場群から種々の工場廃水が排出されるようになる。計画を合理的に進めるためには、廃水の混合・拡散などについて、現況をよく調査するとともに、計画完成後の状態を事前に把握して、公害の起こる可能性のある場合には十分その対策をたてておかねばならない。

一般に、こうした事前調査を行なう場合の一つの手段として水理模型実験が考えられ、昨年度は有明海大牟田地区を対象として、こうした現象に対する模型実験の適用性に関する研究を行ない、有用な結果を得た。

海中への拡散現象を支配する因子としては、海流、潮流、沿岸流、海浜流、密度成層、波浪、風、その他多くのものがあげられる。有明海の実験の場合には、このうち、現地に則して、潮流が支配的な強混合型の場合を取り扱ったが、より一般的には潮流以外の流れの効果、あるいは密度成層の効果などをも考慮することが望ましい。ここでは、茨城県鹿島工業港付近の海域を対象として、それらをも考えた拡散現象に関する水理模型実験を行なった。

この海域は、直接太平洋に面し、しかも黒潮、親潮などの影響を大きく受ける所で、潮流の影響は有明海の場合ほど大きくはない。また、計画されている港内の水深は大きく、工場廃水による汚染を考える場合には、二層流型の鉛直混合過程にも注意をしなければならない。

現地は、目下港湾および工業地帯を建設中であり、拡散現象に関する資料としては、小規模な瞬間点源染料域の拡散実験の資料があるだけで、実験結果と比較する資料は少ないが、混合・拡散様式の再現性についても若干考慮した。

実験はまだ継続中であり、十分な結果を得るに至っていないが、現在までに得られた結果について述べる。

## 2. 原 型

鹿島灘海岸は Fig. 2.1 に示すような延長約 70 km の南北に伸びる砂浜で、その北端は那珂川を経て日立海岸に連なり、南は利根川と犬吠崎を経て九十九里浜に連なる。海底地形は Fig. 2.2(a) に示すように、水深 20 m までは全域にわたってほぼ一様に 1/150 の勾配である。そこから 20 m 程度の一様な深さが数 km も続いており、水深 40 m までは 1/500 以下の緩勾配となっている。鹿島工業港は 10 万トン級の船舶を対

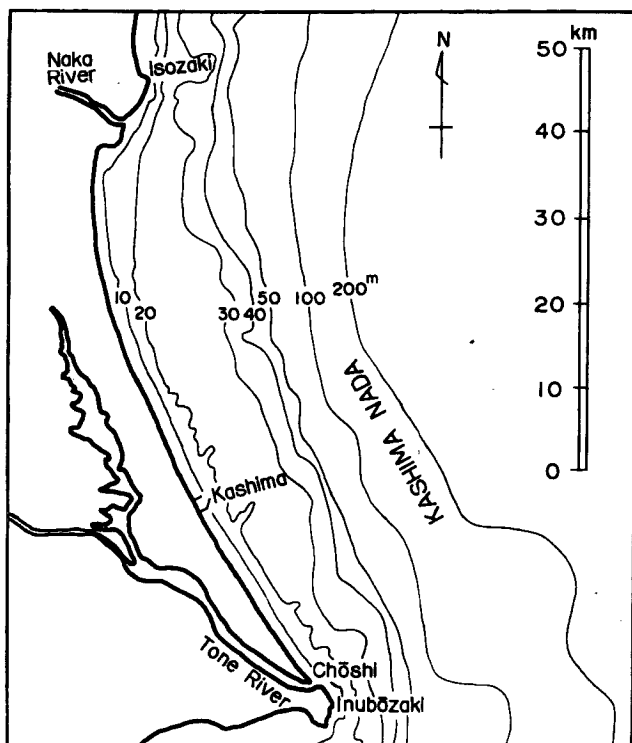


Fig. 2.1 Bathymetric chart of the Kashima Nada.

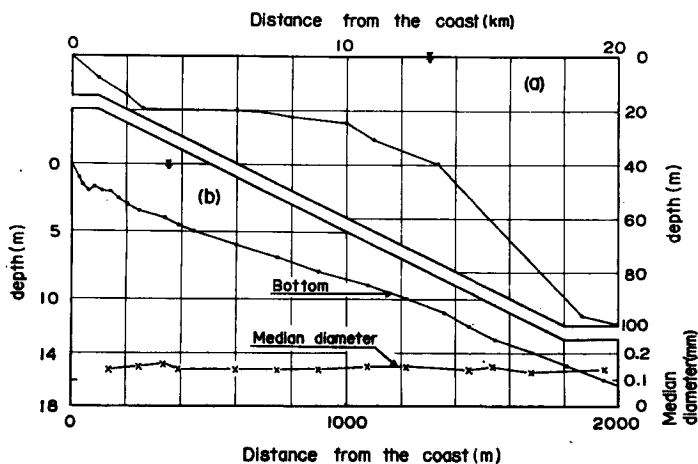


Fig. 2.2 Bottom topography near the coast (a) and median diameter of bottom materials (b).

Table 1(a) Tidal constant in the prototype.

| Con-<br>stituent<br>Station | $M_2$          |                    | $S_2$          |                    | $K_1$          |                    | $O_1$          |                    |
|-----------------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
|                             | $H(\text{cm})$ | $\kappa(^{\circ})$ | $H(\text{cm})$ | $\kappa(^{\circ})$ | $H(\text{cm})$ | $\kappa(^{\circ})$ | $H(\text{cm})$ | $\kappa(^{\circ})$ |
| Onahama                     | 30.2           | 127.2              | 13.9           | 161.2              | 22.4           | 172.6              | 17.3           | 159.3              |
| Choshi                      | 32.2           | 130.7              | 14.6           | 163.4              | 23.0           | 175.8              | 18.6           | 159.6              |
| Mera                        | 35.6           | 141.3              | 16.3           | 171.9              | 21.6           | 175.3              | 16.7           | 158.5              |

(b) Monthly mean sea level at Choshi (1955~1965)

| Month          | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | Mean  |
|----------------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sea level (cm) | 107.9 | 98.5 | 94.3 | 90.0 | 91.8 | 101.6 | 106.8 | 111.4 | 114.6 | 115.1 | 107.2 | 107.6 | 103.9 |

象とした掘込式港湾であり、Fig. 4.1 に示すように港口の水深は 16 m、港奥の水深は 10 m である。またその外郭施設として、延長 2.8 km の南防波堤、延長 1.4 km の北防波堤がある。

鹿島港付近の底質分布は、一例を Fig. 2.2(b) に示すように、近辺全体にわたってほとんど様な平均粒径 0.13~0.17 mm の細砂である<sup>1)</sup>。

一般に工場廃水、温排水の港の内外における拡散を支配する因子としては、潮流、海流、沿岸流、海浜流、密度流、吹送流のほか、波浪、内部波が考えられる。模型実験を行なう場合、これらの自然条件を詳細に検討しておく必要がある。

まず、潮汐に関する資料として、鹿島灘沿岸の潮汐常数を Table 2.1(a) に示す。銚子における月平均潮位の年変化を (b) に示す。これらの表から明らかなように銚子における大潮差  $2(M_2 + S_2)$  は約 94 cm、小潮差  $2(M_2 - S_2)$  は約 35 cm であり、日平均潮位は 4 月に最低、10 月に最高で、その差はほぼ 25 cm である。鹿島港の潮汐もこれに近いと思われる。

鹿島港付近の流れについて、現防波堤の完成以前になされた運輸省の観測がある。1962 年 3 月~5 月に水深 16 m の地点で、小野式流速計を用いて測った流向・流速と、そのときの波浪、潮位、風との間には明瞭な関係を見出すことができない<sup>1)</sup>。

Fig. 2.3 は、1962 年 8 月 4 日~5 日に水深 16 m の地点で発電式流速計を用いて 1 時間毎に測流した結果から出された潮流楕円である。当日は大潮で、静穏な日であった。これによると、恒流は海底上 1 m で北に 3 cm/s、4 m で南東に 6.5 cm/s、9 m で西すなわち沖から岸向きに約 10 cm/s で流れている。1 日周潮の長軸は各水深とも海岸線と平行(NNW-SSE)で、最大流速は海底上 1 m で 5 cm/s、4 m で 7.5 cm/s、9 m で 13.5 cm/s 程度である。半日周潮流は海底上 4 m 以下で日周潮流よりやや大きく、長軸は岸にほぼ垂直 (ENE-WSW ないし NE-SW) で最大流速は

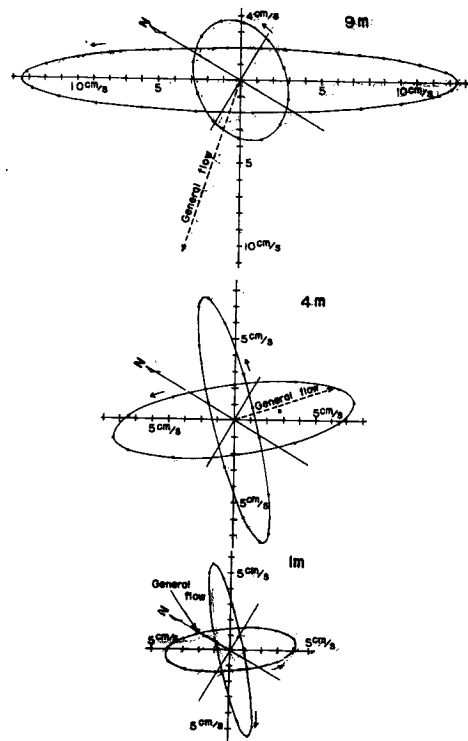


Fig. 2.3. Current ellipse at Kashima (prototype).

1m で 5.5 cm/s, 4m で 8 cm/s 程度であるが, 9m では日周潮よりかなり小さく 4 cm/s である。

鹿島灘沿岸の海流は Fig. 2.4 に示すように, 親潮, 黒潮および対馬暖流が入り乱れて, 極めて複雑な様相を呈している。鹿島灘近くでは親潮の影響が強く, また対馬暖流の影響も無視できない。しかし, これらの海流の流速は明確でないと報告されている<sup>2)</sup>。

鹿島港における風の特徴としては, 年間を通じ N~E の方向からの風が支配的であり, 48.5% を占めている。風の一番強い季節は10月と11月で, 15~20 m/s の風の出現率がそれぞれ48%および39%にも及ぶ。また最も風の弱い季節は7月で, 5 m/s 未満の風が69%を占めている。春期及び秋期は N~ENE の風が1昼夜前後続くこともあるので, 岸あるいは港奥に向って数 10 cm の吹送流が生ずる可能性がある。

さて, 工場廃水や温廃水が潮汐の比較的小さな沿岸海域に放出される場合, つぎのような拡散過程が考えられている<sup>3)</sup>。尾鷲湾における温廃水の拡散稀釈の調査などから, 河水や温廃水の影響領域が明瞭な前線を形成して拡がっている第一次領域とそれに続く第二次領域とに分けられ, 前者では下層からの海水加入による鉛直混合が卓越し, 後者では海域の渦動拡散による水平混合が卓越するものと推定されている。このことから鹿島港内外における廃水拡散を予想すれば, 大雑把にいうと, 港内はほぼ第一次領域に属し, 港外で第二次領域に移ってゆく過程が進行するのではないかとと思われる。

海域の拡散係数を調べるために, 瞬間点源染料域の拡散実験が港外で行なわれた。1966年12月3, 4日に港外の数点に 15 kg のウランを投入して, 空中写真により拡がりを撮影したものである。当日は大潮で, 風はなく, 波高は 0.6 m 程度であった。染料域の拡がりの模様および投入後の経過時間  $t$  と染料域の面積  $S$  との関係それぞれ Fig. 2.5, Fig. 2.6 に示す。この時の流速は南向きに 20 cm/s 程度であった。拡散係数  $K$  は染料域の可視面積の変化率から, 近似的に  $K = \Delta S / 4\pi \Delta t$  として求められる<sup>4)</sup> が, この式を用いて求めた値を, 相当半径  $r$  を横軸にとりて, Fig. 2.7 に示す。相当半径 40m, 100m のときの拡散係数

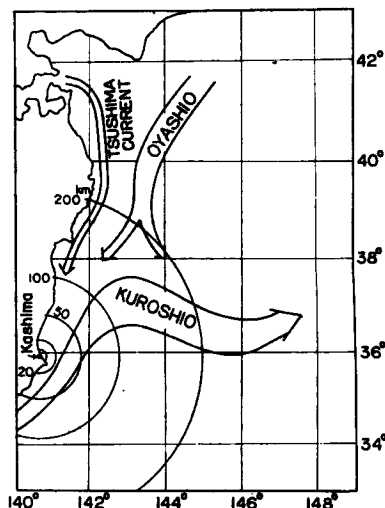


Fig. 2.4 Ocean currents near the Kashima Nada.

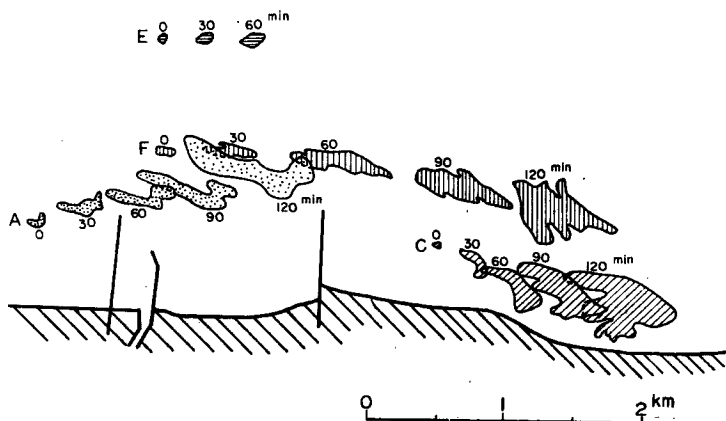


Fig. 2.5 Sketch of change in the area of dye patches from instantaneous point sources (prototype).

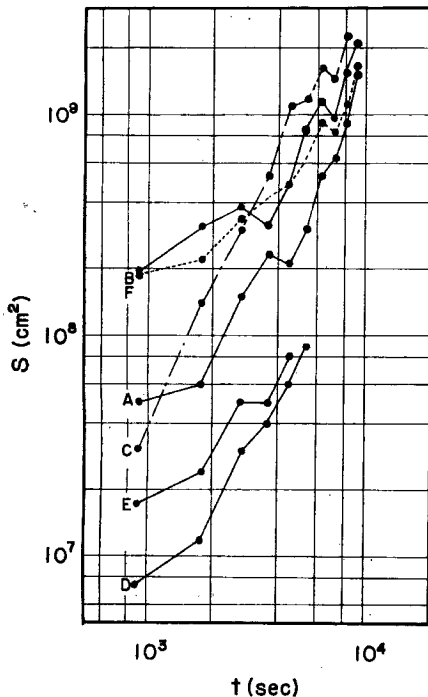


Fig. 2.6 Change of area with time of dye patches from instantaneous point sources (prototype).

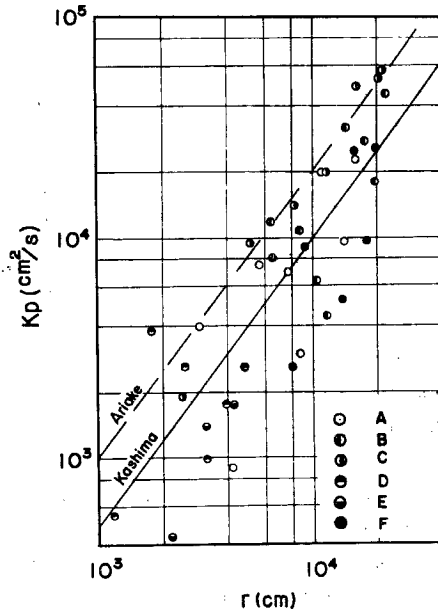


Fig. 2.7 Relation between diffusion coefficient  $K_p$  and equivalent radius  $r$  of the dye patch (prototype).

は、それぞれ  $3 \times 10^3$ ,  $10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$  程度である。

一方、ここより少し北にある東海村の沿岸海域における染料の拡散実験から求められた拡散係数は半径 100 m 規模のとき  $10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$  で、このときの流速は 8 cm/s であった<sup>5)</sup>。また東海村の久慈川の河水拡散の観測によれば、表層の稀釈度はほぼ岸からの距離に比例している。

### 3. 相 似 性

ここで問題としている対象は工場廃水、温廃水による鹿島港内外の海域で想定される汚染状態である。こうした問題は、港の規模や諸因子の相対的な大きさの違いに応じてその取扱いを変えねばならない。港外では沿岸流や潮流を主体とした乱流場における水平拡散が卓越するものと思われ、この模型実験の主眼点も一つはここにある。港内では廃水と海水との密度差にもとづく密度流および内部波による混合が卓越し、これに潮汐混合が重なるものと予想される。しかしながら、模型内でこれらの諸過程のすべてを矛盾なく再現することは難しいので、ここでは、フルード数と密度差とを原型と一致させることにより、潮流と密度流を再現できる模型をつくり、その上で微細な拡散機構を再現させる可能性について考えてゆくことにしたい。

流れが重力と粘性力によって規定されるとき、運動方程式、連続式および拡散方程式はつぎようになる。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + (u \cdot \text{grad}) \rho u = -\text{grad } p + \text{div}(K_m \text{grad}(\rho u)) \quad (3.1)$$

$$p = \int_0^z \rho g dz = \rho_0 g z + \gamma \int_0^z S dz, \quad \rho = \rho_0(1 + \gamma S) \quad (3.2)$$

$$\text{div}(\rho u) = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})S = \text{div}(K_s \text{grad}S) \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに  $t$  は時間,  $\rho$  は密度,  $\mathbf{u}$  は速度,  $p$  は圧力,  $K_m$  は粘性係数,  $K_s$  は物質または熱の拡散係数,  $g$  は重力加速度,  $z$  は水深,  $S$  は物質濃度または温度,  $\gamma$  は  $\rho$  と  $S$  に関する定数である

港外では密度差を無視できるような水平乱流拡散について考えてもよいものとする, 流速は鉛直に平均した水平成分についてのみ考えればよい。運動方程式は近似的に,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + sU \frac{\partial U}{\partial x} + sV \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{C}{2h} U^2 \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + sU \frac{\partial V}{\partial x} + sV \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{C}{2h} V^2 \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

で与えられる。ここに  $x$  と  $y$  とは水平方向の距離,  $\xi$  は水面上昇量,  $h$  は水深,  $C$  は摩擦係数,  $S_x$  は流速の鉛直分布に関係した 1 に近い係数である。原型と模型とで現象が相似であるためには, 原型に関する上式 (添字  $p$  をつける) と, 模型に関するそれ (添字  $m$  をつける) との間で対応する各項の比が等しくなければならない。いま原型に対する諸量と模型に対する諸量との比を添字  $r$  で表わすと, (3.5) 式と (3.6) 式とから,

$$t_r = x_r / h_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$$C_r = h_r / x_r \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

となる。(3.7) 式は重力の効果に関してフルード数をあわせることに相当し, 時間と空間の縮尺関係を与える。(3.8) 式は模型における摩擦係数を模型の歪に応じて規定する関係を表わしている。いま模型における流れも乱流であるとすれば, 摩擦係数  $C$  はマンニングの粗度係数  $n$  を用いて,

$$C = 2gn^2/h^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

と表わされる。したがって (3.8) 式は,

$$n_r = h_r^{2/3} / x_r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

のように書きかえられる。さて, ここでは対象とする海域の広さと実験施設の大きさから, 水平縮尺  $1/x_r = 1/500$  が適当と考えられる。

つぎに, 平均流速場に対する乱流拡散現象を相似にするためには, 乱れが十分発達した場合, 拡散係数のスケールに関する  $4/3$  乗則  $K_r = \varepsilon_r^{1/3} L_r^{4/3}$  が成り立つことと, 次元的には  $K_r = x_r^2 / t_r$  が成り立つことから, 両者を等しいとすると,

$$\varepsilon_r^{1/3} L_r^{4/3} = x_r^2 / t_r \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

となる。 $L_r = x_r$  とすると,

$$U_r = \varepsilon_r^{1/3} x_r^{1/3} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

が得られ, これは根本がエネルギー的な考察から導いた乱流場の相似則<sup>9)</sup> にひとしい。ここに  $\varepsilon_r$  はエネルギーの逸散率の比であり, ほぼ 1 に等しいとする。したがって (3.12) 式と  $U_r = x_r / t_r$  との関係を (3.7) 式と (3.10) 式に代入すると, 時間縮尺, 鉛直縮尺および粗度縮尺はそれぞれつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} t_r &= x_r^{2/3} = 63 \\ h_r &= x_r^{2/3} = 63 \\ n_r &= x_r^{-1/18} = 0.7 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

いま模型においても乱れを十分発達させることができるかどうかを調べるために, 港口での最大流速を用いて検討する。従来の調査によると, 港口予定付近での流速は 10 cm/s 程度であり, 水深が 16m であるから, 原型でのレイノルズ数  $Re_p$  はほぼ  $1.6 \times 10^6$  となる。一方, 模型のそれは,

$$Re_m = \frac{U_m h_m}{\mu} = \frac{U_r h_p}{\mu} U_r h_r = Re_p h_r^{3/2} \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

なる関係から, ほぼ 3200 となる。したがって, 港口付近においては模型でも乱れが十分発達していると考え

えてよいであろう。原型の摩擦係数  $n_p$  はよくわからないが、前述のように、鹿島港近辺の底質粒径は 0.13～0.17 mm とほぼ均一であるから、 $n_p=0.01\sim0.02$  (m-sec) と推定される。したがって (3.13) 式から模型の粗度係数は  $n_m=n_p n_r^{-1}$  を用いてほぼ 0.014～0.028 と決定される。いま  $n_m=0.015$  とすると

$$n = \frac{R^{1/6}}{(6.0 + 2.5 \log_e R / k_s) \sqrt{g}} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

なる関係があるから底面の砂粒の粒径  $k_s$  が求まることになる。ここに  $R$  は径深であるが、本実験では  $R=16\sim30$  cm 程度である。上式に  $n_m=0.015$  を代入すると  $k_s$  が求まり、3 mm の砂を用いて底面をモルタル刷毛仕上すればよいことがわかる。

つぎに港内では密度流および内部波の発生が予想される。こうした問題では、上述の相似条件だけでは模型で原型の現象を再現することはできないで、さらに条件が付加されることになる。いま放流水（上層）に対して添字 1 を付し、海水（下層）に対して添字 2 を付すと、港内水路の二層流に対する運動方程式は、

$$\frac{\partial U_1}{\partial t} + U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} = -g \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{C_i}{2x_1} (U_1 - U_2)^2 \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} = -g \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} h_1 + h_2 \right) - \frac{C_i}{2h_2} (U_1 - U_2)^2 + \frac{C_b}{2h_2} U_2^2 \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

と表わされる。ここに  $U$ ,  $h$ ,  $\rho$  はそれぞれ平均流速、厚さおよび密度であり、 $C_i$ ,  $C_b$  はそれぞれ二層間の摩擦係数および海底摩擦係数である。 $C_i$  は内部フルード数  $U_1 / \sqrt{\left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) g h_1}$  と内部レイノルズ数  $U_1 h_1 / \nu$  との函数になる。レイノルズ数は上述の相似性から決定されるので、内部フルード数に関する何らかの相似性が満足されねばならない。従来のこうした実験では内部フルード数をあわせて行なわれたものが多いが、さらに検討が必要であろう。

最後に水平拡散係数については、相似性が成り立つためには、

$$K_{xr} = x_r^2 / t_r = \varepsilon_r^{1/3} x_r^{4/3}$$

でなければならない。この模型では  $K_{xr}=4000$  となる。現地の拡散現象には、鉛直拡散、密度、Shearing などの影響があるが、それらの効果が明確でなく、実験に十分取り入れることができないので、上述の値を用いて換算した原型の値は厳密な意味で正確ではないかも知れない。Table 3.1 は用いた模型の諸元を示すものである。

Table 3.1 Hydraulic factors in the prototype and the model

| factors               | Scale               | Prototype                          | Model                 |
|-----------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Distance              | 1/500               | 4 km                               | 8 m                   |
| Water depth           | 1/63                | 16 m                               | 25 cm                 |
| Tidal range           | 1/63                | 126 cm                             | 2 cm                  |
| Tidal period          | 1/63                | 12 hr 25 m                         | 11 m 50 sec           |
| Current velocity      | 1/8                 | 10 cm/s                            | 1.3 cm/s              |
| Discharge             | $1/2.5 \times 10^5$ | 5 m <sup>3</sup> /s                | 20 cm <sup>3</sup> /s |
| Diffusion coefficient | $1/4 \times 10^3$   | $4 \times 10^8$ cm <sup>2</sup> /s | 1 cm <sup>2</sup> /s  |

#### 4. 実験施設

この実験の施設・装置の概要は以下に示すようである。その主要部は模型水槽、起潮機、海流発生装置および計測装置より成っている。

##### (a) 模型水槽

Fig. 4.1 および Photo. 4.1 に示すような、鹿島港を含む海域の模型を製作した。水平縮尺は 1/500、鉛直縮尺は 1/63 でほぼ 20 m × 15 m の大きさである。模型の外壁はコンクリートブロックで作った。鹿島港

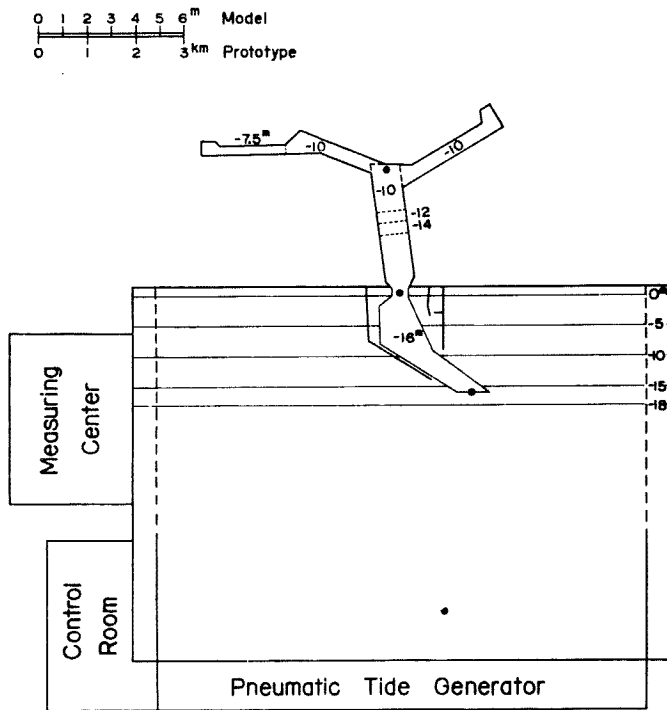


Fig. 4.1 Model of Kashima Harbor.

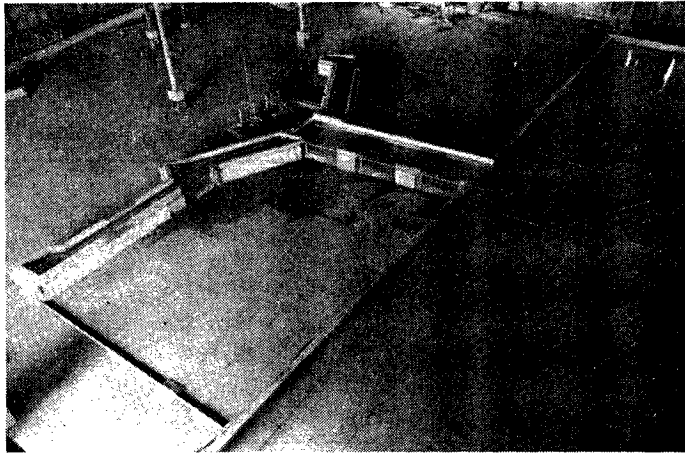


Photo. 4.1 Model of Kashima Harbor.

中央部水路の部分に3カ所ガラス窓を設け、汚水の鉛直拡散状況が観測できるようにした。水槽内側にアスファルト防水を施して漏水を防ぎ、その上に海底地形をモルタルで作り刷毛仕上とした。

#### (b) 起潮機

模型に潮汐を与えるために、幅 20 m にわたって一様な水位変動を与える気圧式起潮機を用いた。この構造は昨年<sup>4)</sup>の年報等に詳述している。この起潮機により本実験では、潮差 2 cm 周期 11 分 50 秒の潮汐を与えた。

### （c） 海流発生装置

模型内に起潮機の空気室に平行な流れを発生させる装置で、 $\phi 200$  mm, 10 HP ポンプ 2 台を用い、配管の一部に取り付けられた電磁流量計の指示計を見ながら、弁を手動操作することにより任意の沿岸流を与えることができる。

### （d） 計測装置

港内 2 点、港外 2 点の水位の時間的变化、港外の表面流速分布、港内の流速および温度の鉛直分布を測定し、さらに瞬間点源染料域面積の時間的变化、連続点源染料域の表層の水平濃度分布、港内 3 点の鉛直濃度分布を測った。

水位、表面流速分布、点源染料域面積の測定方法は前年報<sup>4)</sup>と同様である。流速の鉛直分布は、水面に落した過マンガン酸カリが底に落ちるまでに少しずつ溶けてできる細い線を間欠的に撮影し、その移動から求めた。温度の測定にはサーミスター温度計を用い、水路内の 1 点で鉛直分布を測った。連続点源染料域の濃度の測定は比色によって行なった。表層の濃度の水平分布を調べるときは小型の試験管で採水し、鉛直分布を調べるときには Fig. 4.2 のような吸い上げ式の採水器を使った。瞬間点源に関する実験では濃度 2.5 g/l のメチレンブルー溶液を 2 cc の半球のさじで投入し、連続点源の場合には、中央水路の奥部に設けた幅 1 cm、深さ平均水面より 1 cm（原型で 63 cm）下の溝から濃度 0.025 g/l のものを流した。

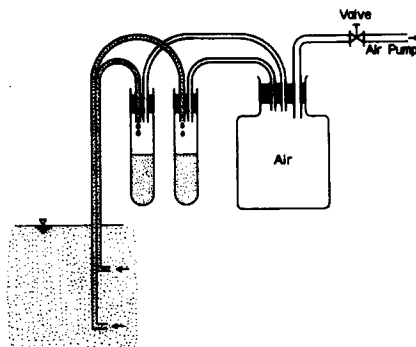


Fig. 4.2 Water sampler.

## 5. 実験経過

第一次の実験は中央水路だけが完成した状態で行なわれた。潮汐に関しては原型において半日周潮、1 日周潮ともほぼ同じ大きさであるが、ここでは半日周潮のみを取扱った。最初に潮汐だけを与え表層の流速分布および港内の流速鉛直分布を調べた。つぎに港奥から水（45 万トン/日）を流して、潮汐のないとき、およびあるときの流速分布を調べた。つぎに港の内外の各所に水槽水温より  $5^{\circ}\text{C}$  ほど高いメチレンブルー溶液を投入し瞬間点源染料域の拡がり調べた。それを潮汐のみの場合、および潮汐と工場廃水とを与えた場合の両者について行なった。最初に港奥より工場廃水 45 万トン/日及び 90 万トン/日に相当する染料を、 $7^{\circ}\text{C}$  程度温度を高くして連続点源の形で投入し、港内外における染料域の前線の形状及び進行速度を調べ、また港内外の濃度の水平分布、港内における濃度、温度の鉛直分布を測定し、さらに二層境界面の安定・不安定状態を目視により調べた。第二次の実験は、全計画が完成した状態で同様に行なわれた。

## 6. 実験結果

### （1） 潮汐

模型内 4 点で電気抵抗式の水位計を用いて水位を測定したが、記録の一例を Photo. 6.1 に示す。記録によれば、水槽内には原型の値に換算して 19 分周期の副振動が発生しており、とくに潮汐を与えないときは大きい。なおこの記録には現われていないが、港外では 8, 9 分周期の副振動も見られる。

### （2） 流況・流跡

上げ潮・下げ潮最盛時の流速分布を Fig. 6.1 に示す。浮標が潮汐の一周期半の間に描いた軌跡の例を Fig. 6.2 に示す。点線は上げ潮時、実線は下げ潮時に関するものである。

港奥から 45 万トン/日の放水を行ない、潮汐を与えた場合には、港奥に時計まわりの強い水平渦が見られる。これはおそらく放出条件によるものと思われるが、この渦は下げ潮時に強調されるように見える。

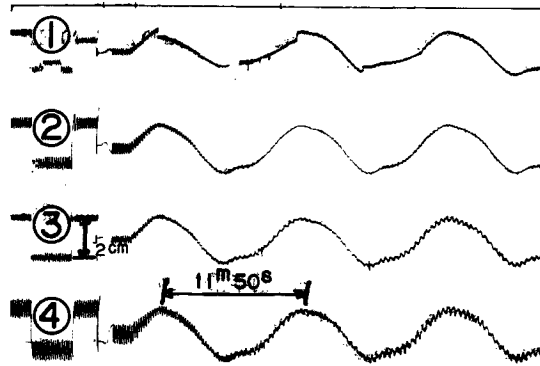


Photo. 6.1 Record of sea level in the model of Kashima Harbor.

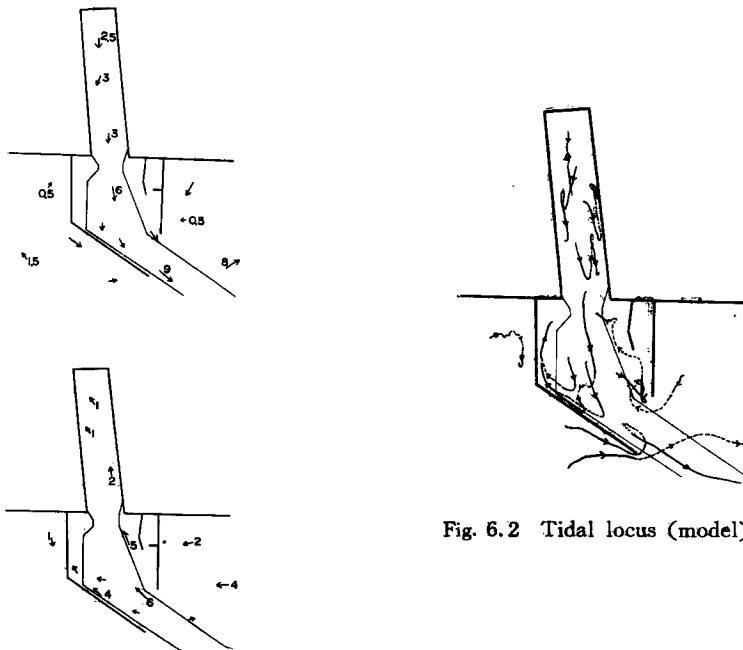


Fig. 6.2 Tidal locus (model).

Fig. 6.1 Flow pattern in the ebb and in the flood in cm/sec (model)

### (3) 港内の流速の鉛直分布

Fig. 6.3 は港奥から45万トン/日の放水だけを与えた場合に、港内の3つの側窓(奥から W(1), W(2), W(3)), の所で測った流速の鉛直分布を示す。実線は水路の中央、破線は中央より 200 m 南寄り、鎖線は同じく北寄りの測点の値である。潮汐だけを与えた場合の流速は、短周期の副振動による流れと重なってしまって、図に示すだけのいい資料が得られていないが、上げ潮、下げ潮最盛期の深さ方向の平均流速が W(3) では 4 cm/s, W(2) では 3, 4 cm/s, W(1) では 2 cm/s 程度である。

### (4) 瞬間点源染料域の拡散

港内および港外においてメチレンブルー溶液を投入し、その面積の時間的変化を調べた。原型と同様にし

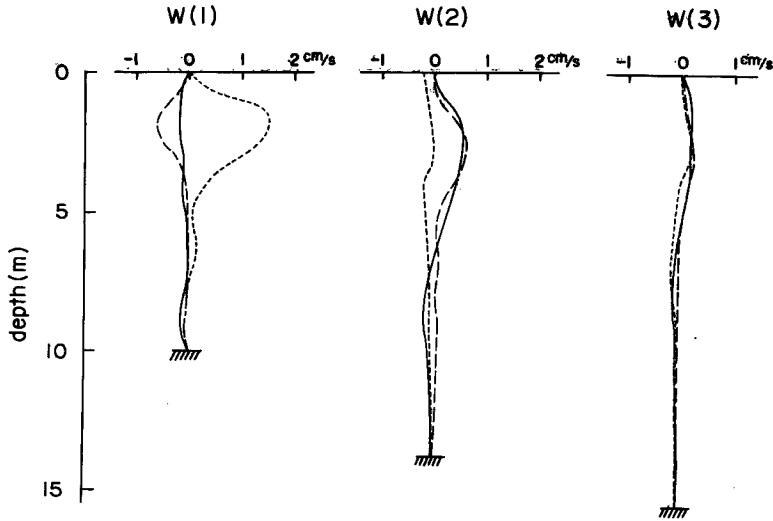


Fig. 6.3 Vertical distribution of the velocity caused by discharge (model).

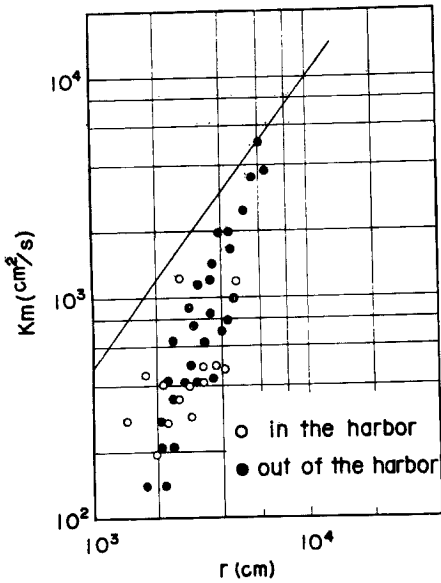


Fig. 6.4 Relation between diffusion coefficient  $K_m$  and equivalent radius  $r$  of the dye patch in the presence of the tide (model).

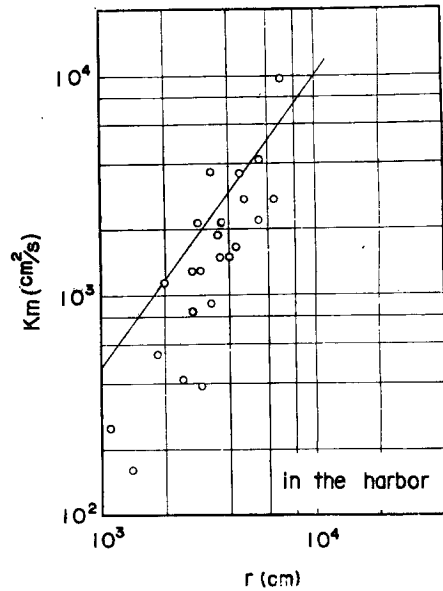


Fig. 6.5 Relation between diffusion coefficient  $K_m$  and equivalent radius  $r$  of the dye patch in the presence of both tide and discharge (model).

て求めた染料域の拡散係数を相当半径を横軸にとりて、潮汐だけの場合を Fig. 6.4 に示し、これに港奥からの放水（45万トン/日）が加わった場合を Fig. 6.5 に示す。経過時間  $t$ ，面積  $S$ ，半径  $r$ ，拡散係数  $K$  はすべて Table 3.1 によって原型の値に換算したものである。なお、港内の実験では、照明の関係で表層が成層していたため鉛直方向の拡がりが大変小さく、円板状に拡がった。港外の実験で、下方への拡がり方

が乱流拡散ではなく、染料域が冷されたため、くらげの足状に一部分が沈むような場合も見られた。

### (5) 連続点源染料域の拡がり

流量が90万トン/日の場合に潮汐を与えないとき(A)と与えたとき(B)との染料域の前線の進行形状を Fig. 6.6 に示す。また、その場合の表層の濃度分布を Fig. 6.7 に示す。図の横軸は港奥からの距離、

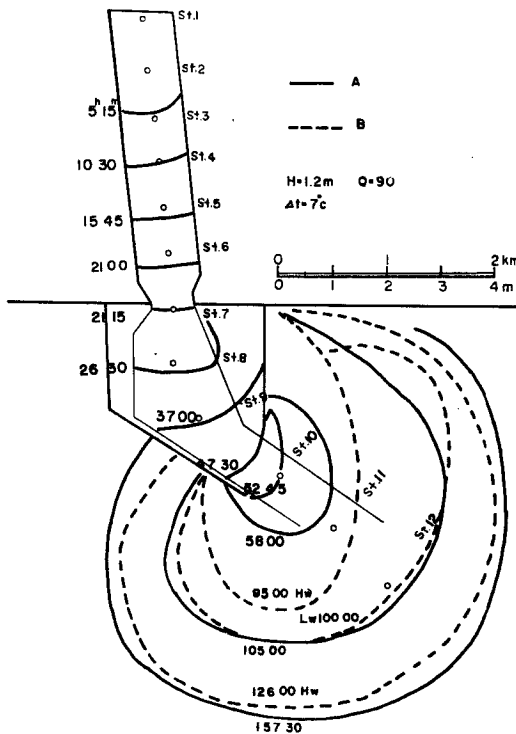


Fig. 6.6 Change of area with time of dye from a continuous point source, unit of discharge:  $10^4 \text{ m}^3/\text{day}$  (model).

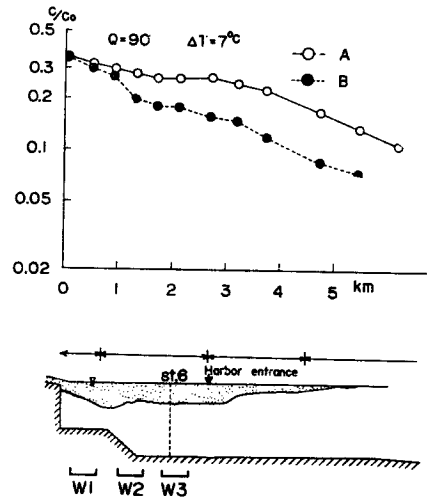


Fig. 6.7 Horizontal distribution of the concentration of dye near the surface discharged from a continuous point source in the innermost part of the harbor and the sketch of the vertical section, with (A) and without tide (B), unit of discharge:  $10^4 \text{ m}^3/\text{day}$  (model).

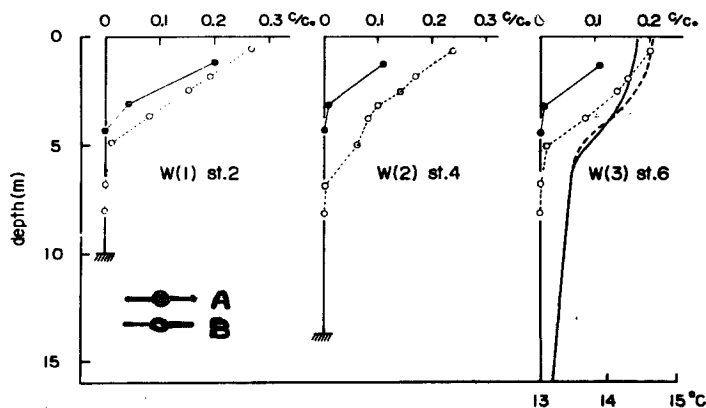


Fig. 6.8 Vertical distribution of the concentration of dye from a continuous point source (model).

縦軸はその地点における濃度と原液の濃度との比を示す。港奥から 1~1.5 km までは放出水自体の不安定さによる鉛直混合が盛んであり、上層の厚さも 1m から 5.6m まで距離とともに大きくなる。1.5km から港口付近までは厚さもほぼ一定になり、濃度もほとんど変わらない。狭さく部を出ると、港の幅が急に広がるため、厚さは減少してゆく。防波堤の外では表層をうすく拡がってゆく。港奥から 1.75 km の所で測った温度の鉛直分布、港奥から 0.5, 1.25, 2.15 km の所、すなわち st.2, st.4, st.6 の所で測った濃度の鉛直分布を Fig. 6.8 に示す。

## 7. 考 察

### （1）潮 汐

Photo. 6.1 によると、潮汐波形および潮差はほぼ再現されている。短周期の 2 つの副振動のうち周期の長い方は模型の起潮機と港奥あるいは海岸線を両端にした静振の周期とほぼ一致する。短かい方は原因不明である。これらは周期が短かいため流速は、潮流と同程度になることがある。

### （2）流況・流跡

Fig. 6.1 によると潮汐による防波堤開口部付近の最大流速は 8 cm/sec 程度である。模型は港の完成後のものであるから、原型との直接の比較はできない。潮汐のみの場合に、港奥部および防波堤内には上げ潮、下げ潮時に右まわりの水平環流が見られるのは地形の影響であると思われる。潮汐および放水流のある場合に、奥部に左まわりの環流が出来るが、全体として表層の流速分布は港口部にゆくにつれて幅方向に一様となっている。

### （3）流速の鉛直分布

放水流だけを与えた場合の上層の流速は流量が 45 万トン/日で海水と放水の温度差  $5^{\circ}\text{C}$  以下のときには Fig. 6.3 によると W(1) の所で最大約 1.5 cm/s であり、W(2), W(3) の所では 0.5 cm/s 以下に落ちる。流量が 90 万トン/日で海水と放水の温度差  $7^{\circ}\text{C}$  のときでは Fig. 6.6 によると W(1) 付近で約 4 cm/s であり、W(2), W(3) の所では 2 cm/s 程度になる。これに対して潮汐による流速の最盛期の最大値は、W(1) で 3 cm/sec, W(2), W(3) では 5 cm/s 以上になる。したがって放水流量が 45~90 万トン/日程度では港奥の放水口の近くを除けば、港内の流れは全体として潮流の支配の方が強い。

### （4）瞬間点源染料域の拡がり

Fig. 6.4 に於て相当半径が 40m 程度の規模の現象についてみると、港外での拡散係数は原型に換算して  $10^3$ , 100m の規模まで延長できるとすれば、 $10^4$  程度となる。これを Fig. 2.7 と比べると、40m 規模では模型の拡散係数が原型の 1/3 であり、100m 規模では同程度になりそうである。港内でもほぼ同程度になる。模型には短周期の副振動があるが、これを除けばもう少し小さくなるのかも知れない。模型でも原型でも一つ一つの例についてみれば、必ずしも一本の直線上に乗っていないが、全体的には、勾配 2 程度の線に沿っているように見える。勾配がなぜ 4/3 でなくて 2 になるかについては、模型の歪あるいは乱れの発達や構造の違いに関係するのかも知れないがよくわからない。これは今後研究すべき問題である。一つ一つの例で、拡散係数が初期において時間とともに小さくなる傾向もあるのは、密度流的な拡がりを示すものかも知れない。密度差とか乱流拡散による鉛直方向への拡がりの効果は、shear の効果と結びついて水平の拡がりに大きな影響を及ぼすので十分注意しなければならないが、ここでは量的に考慮するまでには至らなかった。Fig. 6.5 に見られるように、潮汐と放水の両方を与えた場合の、港内に於ける瞬間点源の拡散係数は半径 40m の規模で  $10^3 \text{ cm}^2/\text{s}$  程度であり、潮汐のみ与えた場合の 3 倍位に大きくなるが、これは放水の流入により表層の乱れが大きくなるためであろう。

### （5）連続点源染料域の拡がり

潮汐がない場合、流量が 45 万トン/日の時は港奥から 0.5km までの範囲で上下層の混合はあるけれども、それより港口側ではほとんど混合せず 4.5 倍に稀釈されたまま港外に出てゆく。これは港内の流速が模型では、いわゆる限界流速に達せず、二層境界面は放水口付近を除いた領域で安定であるためと思われる。そこ

で流量を2倍にして港内の濃度分布を調べてみた。この場合、Fig. 6.7に示すように、放水口付近の不安定な領域は2, 3倍に増大するが、これより港口側ではやはり安定であり、水平方向の濃度変化はほとんど見られない。原型では流速が大きいから鉛直混合の行なわれる領域は防波堤付近まで続くかもしれない。

つぎに、潮汐を与えた場合にどう変化するかを調べてみる。実験が1例しかないので確定的なことは言えないが、濃度の勾配が大きくなるのがはっきりと見られる。

#### (6) 二層境界面の安定度

放水流量が23万トン/日の場合は潮汐を与えても、干潮時前後の港奥に水平環流が強まる時期以外にはほとんど全域で安定である。流量が45万トン/日の場合には境界面が不安定になる領域が広くなり、継続時間も潮汐周期の半分位までに増加する。流量が90万トン/日の場合には、港奥より0.75 km位までは不安定な波があり、それが波長、安定度を増しながら1~1.5 kmの所まで及んでいる。狭さく部近くでは二層の境界面は安定である。

以上は放水と模型内の水との温度差を7°Cにして行なった実験結果であり密度差は比較的小さい。淡水程度密度差をつけるならば、これよりは速やかに、移流によって港外へ運ばれるものと思われる。港外における染料域の拡がり方を見ると、ポテンシャル流の拡がりとりられる。拡散してゆく速さは、潮汐のある場合は速いが、形状はほとんど変わらない。

### 8. あ と が き

以上、著者らは水平縮尺は1/500、鉛直縮尺1/63、時間縮尺1/63の模型を用いて、鹿島港内外の海域における拡散現象に関する実験を行ない、つぎのことがわかった。ただし、模型では放流水の密度と流量、半日周潮、沿岸流などを取り入れたが、波浪、風等の影響は考慮していない。

(1) 潮汐はよく再現できる。実験中、短周期の副振動が見られたが、これは小規模の拡散現象に影響を与える可能性があるので注意を要する。

(2) 鹿島港外の海域に於ける瞬間点源染料域の拡がりから求めた拡散係数は、原型では相当半径の4/3乗に比例するのに対し、模型では相当半径の2乗位に比例する。大きさは、模型では沿岸流を与えていない場合、相当半径が40 m程度のとき、原型の1/3程度であり、100 m程度の規模の時は、原型と同じ程度になる。

(3) 潮汐を与えない場合の港内における連続点源染料域の鉛直混合が及ぶ範囲は、流量によって変わる。鉛直混合の過程を再現するためには、流速がある程度以上大きくなるような流量で行なう必要がある。

(4) 潮汐を与えた場合、鉛直混合が盛んになり、水平方向の濃度勾配が大きくなるのが見られる。

(5) 港外にける連続点源染料域の拡がりは、防波堤開口部の口が広いため、潮汐を与えた場合でもポテンシャル流的な形状を示す。

以上は第一次の実験に関するものであり、鹿島港の中央水路のみが完成した模型に潮汐を与えた場合の結果で、全計画が完成した模型に関する資料は現在整理中である。なお沿岸流のある場合の実験は目下進行中であり、次の機会に述べたい。

今後の課題として、このような場合の相似律を検討するために、より単純な模型によって、実験をすることが必要であると考え。

最後に、この研究をするにあたって、終始適切な御指導を賜った岩垣雄一教授、実験に協力して戴いた北川吉男、多河英雄両氏に深くお礼申しあげる。なお、この研究は一部通商産業省の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) 運輸省第二港湾建設局・港湾技術研究所・茨木県：鹿島工業港の自然条件について（第1報～第4報、漂砂特性）昭37.11～昭39.3.

- 2) 日本原子力研究所・原子燃料公社：昭和39年度海洋調査報告書，再処理低レベル廃液の海洋放出基礎調査，昭40. 8, pp.1～80.
- 3) Hirano, T: On the dilution area of effluent in the sea, Special contribution of the Geophysical Institute, Kyoto University, No.6, Dec.1966, pp.107～112.
- 4) 樋口明生，杉本隆成：潮流による拡散の水理模型実験について，京都大学防災研究所年報第10号B，昭42. 3, pp.343～363.
- 5) Fukuda, M., N.Itoh, and S.Sakagishi: Diffusion phenomena in coastal area, Advance in water pollution research, Vol.3, 1965, pp.193～211.
- 6) 根本茂：大気拡散の模型実験，日本学会議流体模型実験における相似律セミナー前刷集，昭41. 11, pp.27～36.
- 7) 茨木県：鹿島臨海工業地帯造成予定地域における取水・排水に関する調査報告書(要約)，昭41. 3.