

航空写真と模型実験による某湾汚染の予知実験

京都大学工学部化生工学教室 若井 重久
京都大学工学部化生工学教室 〇井 上 頼 輝

同 防災研究所 桶 口 明 生

最近の我が国工業の急速な伸びに伴って、工場の新設、拡張が盛んに行われているが、多くは工業立地の観点から、海面埋立により工場敷地を獲得している。このような工場群は、廃水、廃気により附近の環境を汚染させる恐れがあるため、海面埋立に際してはあらかじめ汚染の程度を推定して、工場立地に先立って公害防除対策を立てておくことが望ましい。ところでこのような型の汚染は、埋立て等による海岸線の変化があるため、現在の海の汚水拡散等を測定することにより、将来を推定することは困難である。もし汚水の拡散輸送能力を示す基礎式と海底の地形、粗度、海岸線の形状などの境界条件を考慮に入れて解くことができれば、理論的に将来水質を推定することは可能であるが、前論文¹⁾に述べたように、現在では電子計算機を借りて、ごく単純な場合についてのみ解をうることが出来るのみである。そこで海岸線の変化にもとづく附近海面の将来水質の変化の推定は、模型実験に頼らざるを得ない。しかし模型実験にも理論的に限度があり、必ずしも原型海面で起っている現象を、忠実に模型が再現するとは限らない。このため、まず現在の海岸線を有する模型をつくり、模型における汚水の輸送および拡散が現実の湾の水流に合致するかどうかを確かめ、ついで模型に埋立地を附加して汚染状態の変化を観測する。

1. 概 説

〇湾は図-1 に示すように長さ約90km、巾約18km、平均水深約20mで、底質は泥土よりなる。湾奥にはT河が流れて淡水源となっている。またこの地帯一帯は我が国でも有数の潮差の大きい地帯で、満潮位と干潮位との差が4mに及ぶこともめづらしくない。この湾には大きな農田があり、現在も多くの畜産物を産出し、附近には豊富な岩を利用し、石炭化学工業が発達している。この化学工場は1日15~20万 m^3 の廃水を中和、泥殿せしめした後、〇川を通して海に放流しており、附近海面は、かなり古くから汚染されている。一方湾岸一帯は良好な海苔の産地として知られ、年間約4億円の産額である。工場廃水はこの海苔のい(藻)の中を流れるため、海苔のがんしや病(癌腫病)や苦味みどりが発生し、さまざまな紛争が起るばかりで、汚水の拡がりや、海苔、みどりの発病域分布とは図-2 のようによく対応しているといわれる。一方、附近一帯が新産業都市に指

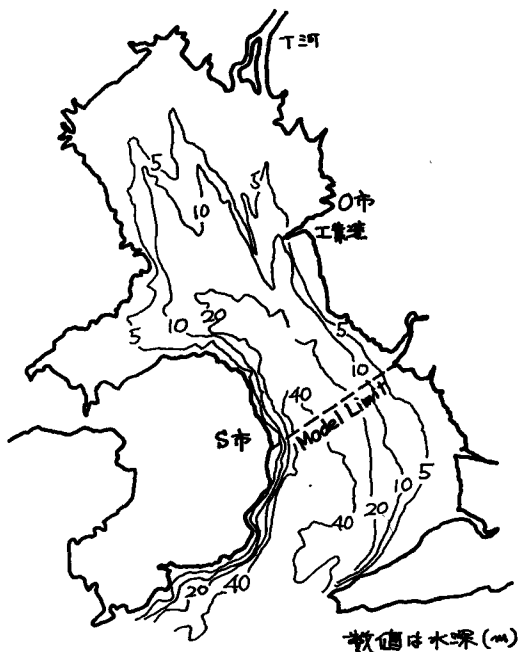


図-1 〇市附近 海図

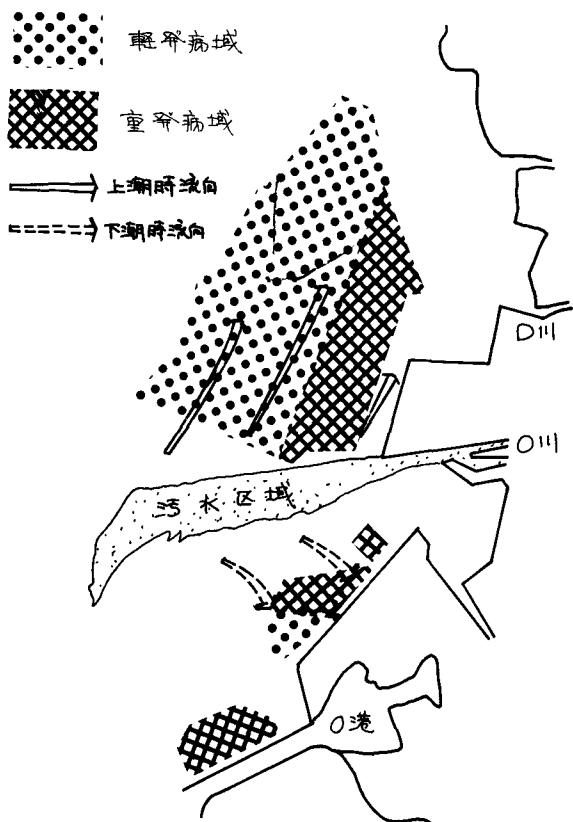
定さ小川に於海岸を埋めて工場
地帯をつくり、工業港を拡張する
計画が存続し、このことが図-2
に示す水産物被害域を変化させる
ことが懸念されている。そこで、
埋没および工業港拡張に伴う附近
海面汚染域の変化を知る目的で、
実験を行なった。

2. 野外観測

(1) 実験方法

現在の汚水の拡散状況を見るに
め、海域に色素を投入し、その
輸送および拡散の状況をセナス機
で航空写真に撮ることにし、採水
船により採水し、観測した。使用
色素としては、ウラニン、ロダミ
ンB等を検討した。ウラニンは太
陽光線に遇すると変色する欠点があるが、
吸着が小さく、かつ水によく溶
けるので、前実験¹⁾に引き続き使用し
た。投入方法は約50ℓ入りのホリ
バケツ中からあらかじめ真水に溶解

図-2 汚水拡散状況と貝の被害域



させ、これを漁船で投入するに代り、なるべく静かに海中に投入した。航空写真の結果を解析する場合、色素の見えなくなる時間がある。重要な意味をもっており、これは色素投入量に比例するにめ、投入量は慎重に決定する必要がある。そこで予備実験の後、これを20 kgと決定した。20 kg投入した場合、色素の見えなくなるまでの時間は投入後3～4時間である。航空写真では深さ方向の拡散を正確につかめないので、採水船により、色素cloudの濃度最大値で各層より1m間隔に色素が検出できなくなるまで採水し、比色定量した。なお船上より色素最高濃度値を判別するのは困難であるので、ヘリコプターにより採水船を誘導した。投入地点、投入時刻を図-3に示す。なお採水船の位置は地上よりトランシットで追った。実験当日の潮位は表-1に示す。航空写真はセナス175単巻フィルムを用い、飛行速度100 km/時で、高度400 mより、航空写真用広角カメラ(90°, F 4.5 38 mm, フィルムは6 mm × 6 mm判)を用いて撮影した。現像カラー写真の縮尺は約1/7800である。写真位置を示すために飛行は一定

表-1 昭和41年3月におけるO港潮位

日	干潮	日出	満潮	干潮	日没	満潮
3月23日	4.00分	6.19分	10.09分	16.18分	18.32分	22.24分
24日	4.30	6.17	10.33	16.43	18.33	22.52
25日	4.58	6.16	10.56	17.09	18.33	23.20

方向に行きわたしめ、3 m 綱尺を
あてはぐ地中に2箇所、50 m 間
かくの標識を置く。色素移す状
況を図-3に示す。航空写真はカ
ラ-でないと色素の判別が困難な
ため、本論文には添付せず、発表
当日スライドでご見せしめたい。
なお、参考のために実験当日の潮流
潮流化、風向、風速が測定され、
汚染物追跡もなされる。

(2) 実験結果および考察

前論文で述べたように、海中
に汚染物あるいは色素を投入し、その
拡散輸送をモデルとして、(1)式が
あてはまる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(D_z \frac{\partial C}{\partial z}) \quad \dots\dots ①$$

ここで座標軸は海流と平行に移動
する移動座標とし、海流の方向に
x 軸、鉛直下方向に z 軸をとる。D_x
、D_y、D_z は x、y、z 方向の拡
散係数、C は汚染物または色素の
濃度とする。この M 量の色素を海中の 1 英に投入し、D_x、D_y、D_z を一定 constant と考
えれば解は

$$C = \frac{M}{4(\pi t)^{3/2} \sqrt{D_x D_y D_z}} \exp \left\{ -\frac{1}{4t} \left(\frac{x^2}{D_x} + \frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z} \right) \right\} \quad \dots\dots (2)$$

となる。航空写真より拡散係数を求める場合、色素の可視限界を利用するが、この可視限界を色素濃
度 C とするが、あるいは色素の深さ方向の積分値 $S = \int_0^{\infty} C dz$ とするから、解釈に多少の差
果を生ずる。経験によれば、水中の濃度が低く、透明度の低い所は前者をとる方がよく、透明で浅
い水域の研究には後者を採用した方がよいのである。前者については前論文で理論的考察
を述べ、この A 川²⁾³⁾、琵琶湖⁴⁾ に対する適用例を添付したところ、ここからは後者のほうがよい。
この(2)式を積分すれば、

$$S = \int_0^{\infty} C dz = \frac{M}{4\pi t \sqrt{D_x D_y}} \exp \left\{ -\frac{1}{4t} \left(\frac{x^2}{D_x} + \frac{y^2}{D_y} \right) \right\} \quad \dots\dots (3)$$

時間 t、z 図-4 のように色素の拡がりが見られると、



図-3 染料域の移動

$$\frac{M}{4\pi t_1 \sqrt{D_x D_y}} e^{-\frac{x_1^2}{4t_1 D_x}} = \frac{M}{4\pi t_1 \sqrt{D_x D_y}} e^{-\frac{y_1^2}{4t_1 D_y}}$$

よって、

$$\frac{D_x}{D_y} = \left(\frac{x_1}{y_1}\right)^2 \quad \dots\dots(4)$$

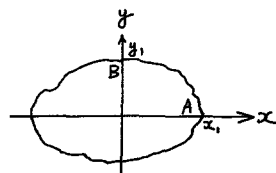


図-4 染料域の拡散

時刻 t_0 における色素の拡がり x_2, y_2 を求めると x_1, y_1 と組合わせて理論的 D_x, D_y を求めるが、精度が悪いので、色素集団の可視域が最大となる時刻 t_{max} 又は見えなくなる時刻 t_0 より拡散係数を求める。 t_0 に関する(3)式より、

$$\frac{M}{4\pi t_1 \sqrt{D_x D_y}} e^{-\frac{x_1^2}{4t_1 D_x}} = \frac{M}{4\pi t_0 \sqrt{D_x D_y}}$$

よって、

$$D_x = \frac{-x_1^2}{4t_1 \ln \frac{t_1}{t_0}} = \frac{x_1^2}{4t_1 \ln \frac{t_0}{t_1}} \quad \dots\dots(5)$$

(5)式より D_x が求まり、よって(4)式と組合わせて D_y が求まる。(5)式より x 方向の cloud 径の $1/2$ である x' は

$$x' = \sqrt{4D_x t \ln \frac{t_0}{t}}$$

t_{max} のとき、 $\frac{dx'}{dt} = 0$ と仮定から、 $t_0 = e t_{max}$ となる関係が得られる。したがって、(5)式で t_0 の代りに $e t_{max}$ を用いてよい。航空写真より、3月24日午前10時30分、0川河口に20 kg のウラニンを投入し拡散係数 D_x, D_y を、同日13時30分川沖に20 kg のウラニンを投入し拡散係数 D_x, D_y の計算を各一、表-3 に示す。なお採水による色素の比色定量より拡散係数は

$$D = \frac{M}{4\pi t d c_{max}}$$

で算出されるので、その計算結果を各々の場合につぎ表-4、表-5 に示す。ここに d は混合層で色素濃度が 0.2 ppm となる z の深さをとる。

表-2 航空写真による拡散係数の推定

ウラニン 20 kg を3月24日10時30分 河口に投入。色素の消滅は13時30分。 $t_0 = 3 \text{ 時間} = 10800 \text{ 秒}$

写真番号	時刻	$t_1 (\text{sec})$	$x_1 (\text{cm})$	$y_1 (\text{cm})$	$\frac{t_0}{t_1}$	$\ln \frac{t_0}{t_1}$	$4t_1 \ln \frac{t_0}{t_1}$	$D_x (\text{cm}^2/\text{sec})$	y/x_1	$(y/x_1)^2$	$D_y (\text{cm}^2/\text{sec})$
1-2	10:31	60	1.48×10^3	8.58×10^2	180	5.2	1.25×10^4	1780	0.58	0.32	324
1-3	10:47	1020	1.25×10^4	3.51×10^3	10.6	2.36	9.63×10^3	1.62×10^4	0.282	0.0887	1440
1-5	11:03	1980	2.26×10^4	9.75×10^3	5.47	1.70	1.35×10^4	3.77×10^4	0.432	0.162	6100
1-6	11:15	2760	2.03×10^4	8.58×10^3	3.92	1.37	1.51×10^4	2.72×10^4	0.423	0.133	3630
1-7	11:30	3600	2.85×10^4	8.97×10^3	3.00	1.10	1.58×10^4	5.14×10^4	0.315	0.099	5100
1-8	11:45	4500	3.58×10^4	9.36×10^3	2.40	0.875	1.58×10^4	8.12×10^4	0.261	0.082	6670
1-9	12:00	5400	4.52×10^4	1.41×10^4	2.00	0.694	1.50×10^4	1.36×10^4	0.310	0.0975	13300

表-3 航空写真による拡散係数の推定

ウラニン 20 kg を3月24日13時30分、河口に投入。色素の消滅は18時30分。 $t_0 = 18000 \text{ sec}$

写真番号	時刻	$t_1 (\text{sec})$	$x_1 (\text{cm})$	$y_1 (\text{cm})$	$\frac{t_0}{t_1}$	$\ln \frac{t_0}{t_1}$	$4t_1 \ln \frac{t_0}{t_1}$	$D_x (\text{cm}^2/\text{sec})$	y/x_1	$(y/x_1)^2$	$D_y (\text{cm}^2/\text{sec})$
2-3	13:52	1320	8.97×10^3	2.81×10^3	10.6	2.63	1.39×10^4	5.76×10^3	0.313	0.0983	566
2-8	14:01	1860	1.87×10^4	3.32×10^3	9.69	2.27	1.69×10^4	2.06×10^4	0.177	0.0644	1320
2-13	14:17	2820	3.20×10^4	5.46×10^3	6.38	1.85	2.08×10^4	4.90×10^4	0.171	0.0537	2630

2-17	14.29	3570	2.88×10^4	4.68×10^3	5.03	1.63	2.32×10^4	3.57×10^4	0.162	0.0506	1800
2-23	15.01	5460	2.84×10^4	10.13×10^3	3.30	1.19	2.57×10^4	3.12×10^4	0.398	0.123	2830
2-27	15.16	6390	2.92×10^4	11.7×10^3	2.81	1.06	2.71×10^4	3.15×10^4	0.400	0.16	5040
2-32	15.32	7350	3.03×10^4	11.7×10^3	2.45	0.895	2.63×10^4	3.48×10^4	0.385	0.121	4210
2-37	15.46	8190	2.27×10^4	7.02×10^3	2.20	0.79	2.59×10^4	1.99×10^4	0.310	0.0973	1940
2-47	16.17	10950	1.95×10^4	6.63×10^3	1.64	0.495	2.17×10^4	1.75×10^4	0.340	0.107	18300

表-4 採水比色による拡散係数の推定

3月24日10時30分 ウラン-20 kgを河口に投入した場合

$C_{max}(ppm)$	$t(sec)$	$d(m)$	$4\pi C_{max} t d$	$D(m^2/sec)$
2.05	900	300	6.93×10^6	2.89×10^3
0.40	1800	200	1.86×10^6	1.08×10^4
0.40	2700	100	1.36×10^6	1.47×10^4

表-5 採水比色による拡散係数の推定

3月24日13時30分 ウラン-20 kgを河口に投入した場合

$C_{max}(ppm)$	$t(sec)$	$d(m)$	$4\pi C_{max} t d$	$D(m^2/sec)$
0.75	1200	300	3.39×10^6	5.91×10^3
0.47	2100	300	3.71×10^6	5.40×10^3

一見、2つの方法で求めた拡散係数には大きな差異があるように見えるが、この係数は正確に求めることが難しく、Order 2/3 といわれるとわかるが、実用的には合致しているとみてよいであろう。

3. 模型実験

(1) 模型の相似性について

模型を作成する場合、原型とモデルの相似が問題となる。この鉛直方向に平均的な流速の水平成分 U , V についてのみ考える。流れが重力と粘性力によって規定されるととき、運動方程式は相似的

$$\frac{\partial U}{\partial t} + S U \frac{\partial U}{\partial x} + S V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{C}{2k} U^2 - g \frac{\partial z}{\partial x} \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + S U \frac{\partial V}{\partial x} + S V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{C}{2k} V^2 - g \frac{\partial z}{\partial y} \quad \dots\dots(8)$$

と与えられる。ここで t は時間、 x と y は水平方向の距離、 z は水面昇降量、 k は水深、 C は摩擦係数、 g は重力加速度、 S は流速の鉛直分布に関係係数に近しい係数である。現象が相似であるためには原型と模型に対する(7), (8)式の各項の比が等しくなければならぬから、原型に関する量と、模型に関する量の比を添字 r で表わせば、

$$\frac{U_r}{t_r} = S_r \frac{U_r^2}{x_r} = S_r \frac{U_r V_r}{y_r} = C_r \frac{U_r^2}{k_r} = \frac{S_r}{x_r} \quad \dots\dots(9)$$

ここで $S_r = 1$, $x_r = y_r$, $U_r = V_r$, $r = k_r$ とすると

$$t_r = \frac{x_r}{U_r} \quad \dots\dots(10)$$

$$C_r = \frac{k_r}{x_r} \quad \dots\dots(11)$$

(10)式は模型の Froude 数をあわせるとを意味し、時間と空間の縮尺の関係を示している。(11)式は粘度の相似を示す。原型に対して添字 p , 模型に対して添字 m をつける。模型施設が大きすぎると、図-1 に示すように Model Limit を設定し、水平縮尺を

$$\frac{x_m}{x_p} = \frac{1}{x_r} = \frac{1}{2000} \quad \dots\dots(12)$$

とせる。C は Manning の粗度とは

$$C = \frac{2g n^2}{k^{1/2}}$$

の関係があるから、原型の推定粗度 $m_p = 0.01$ に対し、模型の粗度 $m_m = 0.013$ をとけば、(1)式より鉛直縮尺

$$\frac{h_m}{h_p} = \frac{1}{h_r} = \frac{1}{200} \quad \dots\dots (13)$$

が得られる。模型粗度 $m_m = 0.013$ を得るためには底面をモルタル刷毛仕上とすればよい。(16)、(13)式より時間の縮尺は

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{1}{t_r} = \frac{1}{141} \quad \dots\dots (14)$$

となる。原型の Reynolds 数は $10^6 \sim 10^7$ の乱流域のに対し、模型は 10^3 の order の乱流から遷移領域にある。潮流に関する相似性は成立すが、乱流の微細構造まで相似性を保たせることは不可能である。よって、拡散係数 D は $[L^2 T^{-1}]$ の次元をもちよるところから、

$$\frac{D_m}{D_p} = \frac{1}{D_r} = \frac{x_r^2}{t_r} = \frac{1}{2.8 \times 10^7} \quad \dots\dots (15)$$

は関係があるから、拡散係数を(15)式で補正する必要がある。

(2) 模型

模型実験は防災研究所宇治川水理実験所で行われる。図-5に示すように、コンクリートブロックで外壁を作り、その内面を防水のためアスファルトライニングし、その中に海底地形をモルタルで作り刷毛仕上とせしむ。また任意の潮流を与える起潮機をとりつけ、模型全体を高さ9mの天井から起広角レンズで撮影して水の動きを観測する。材料実験は、溶液が水であるから、比重を少し低くする目的からメチレンブルーを用い、現地実験と同様の手法により材料域の拡散を観測する。模型諸元を表-6に、またその写真と写真-1に示す。

表-6 模型諸元

	縮尺	原型	模型
距離	1/2000	20 km	10 m
水深	1/200	10 m	5 cm
潮差	1/200	5 m	2.5 cm
周期	1/141	12 h 25 m	5 m 17 sec
流速	1/14.1	1 kt	3.53 cm/sec
流量	$1/5.66 \times 10^6$	$10^5 \text{ m}^3/\text{day}$	$0.206 \text{ cm}^3/\text{sec}$
拡散係数	$1/2.8 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}$	$1 \text{ cm}^2/\text{sec}$

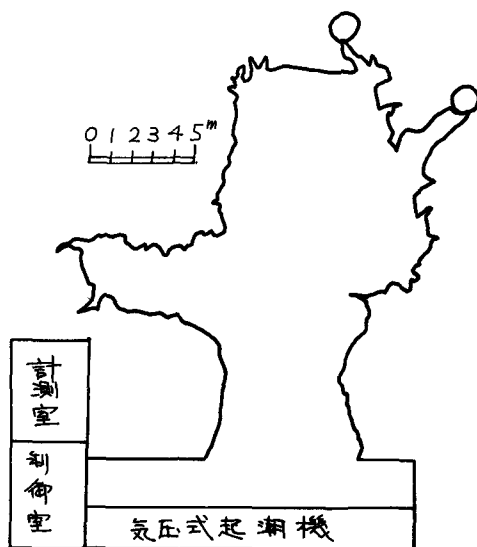


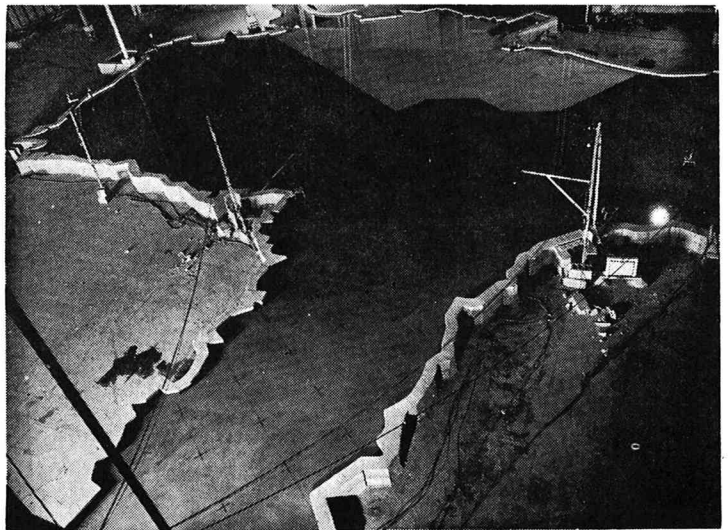
図-5 模型

(3) 結果

実験の結果、模型は潮汐、潮流による水粒の移動距離等の流況は、よく再現する。恒流については、原型の定量的な資料が少ないうえに比較しにくいが、大体的傾向は再現された。拡散係数は、材料域が $x=100 \text{ m}$ 程度の場合、Scale の補正をして模型の値は原型の約1/2程度であった。これは

は模型の Reynolds 数が小さいため乱れが十分発達していないためと考えられ、模型を作るに、適当なスケールで適当な強さの乱れを供給して得るかが今後の問題英と考えられる。

模型が原型の流況をよく示したので、埋立地を附加し、水流の変化を観測してみた。その結果、上げ潮急激時に右廻りの逆流が河口と港の間に生じ、かつ埋立地のため汚水の南下が遅くなるので、この附近の汚染物濃度はかなり高くなるこゝが予想された。逆に、汚染物は北方にあまり移動しなからるので、河口より北岸一帯の濃度は若干低くなると考えられる。



写真一 模型

4. 結 語

O湾を例として、海面埋立に伴う海水汚染状態の変化を模型と現地実測により推定する方法を述べた。色素を海中に投入し、染料域の拡がりや航空写真と採水による比色定量で調査したところ、両者はほぼ同一の拡散係数を与えた。一方相似性に注意しつつ模型を作成したところ、潮流、恒流、水塊移動距離などの流況は、模型によりよく再現されることを知った。拡散係数は模型の Reynolds 数が低いために水の乱れが十分発達せず、模型縮尺による補正をほどこして、低い値が得られた。今後の実験の問題英として解決しなければならぬ事柄と考えられる。模型に埋立て予定地をつけたところ、定性的に河口南部で汚染が進み、逆に北部では減少するこゝを知った。

本実験は、産業公害事前調査の一部として行われたものであり、実測に参加した関係機関に謝意を表す。なお、野外実測は岩井、井上が、この模型実験は桶口が主として担当したことを附記する。

参 考 文 献

- 1) 岩井重久, 井上頼輝, 与島 泰, トレーサーによる河川汚染の解析について, 第2回厚生工学研究討論会講演論文集, 44頁 - 63頁, 昭和40年11月
- 2) 岩井重久, 井上頼輝, トレーサーによる某河川の汚染予知実験, 土木学会第21回年次学術講演会概要集, 昭和41年5月
- 3) 岩井重久, 井上頼輝, 航空写真による汚染物質の拡散の測定と解析, 土木学会第21回年次学術講演会概要集, 昭和41年5月
- 4) 井上頼輝, 湖面および海面における汚水の拡散の測定, 第3回下水道研究発表会概要集, 昭和41年6月