

水理模型実験による廃水拡散の研究(2)

——東京湾の流況についての二、三の考察——

江村 富男*・鬼塚 正光**・太田 一之**

1. ま え が き

沿岸水域での水質汚濁の問題は臨海工業地帯の造成、都市排水、工場廃水などにより、海水利用上の諸問題をなげかけている。このような諸問題を解決するための研究が急がれている。著者らはこうした臨海工業地帯先海域の工場廃水による水質汚濁の防止対策を立てる立場から、廃水の流動、拡散現象の解明を進め、とくに水理模型を用いた手法を適用すべく実験を実施している。

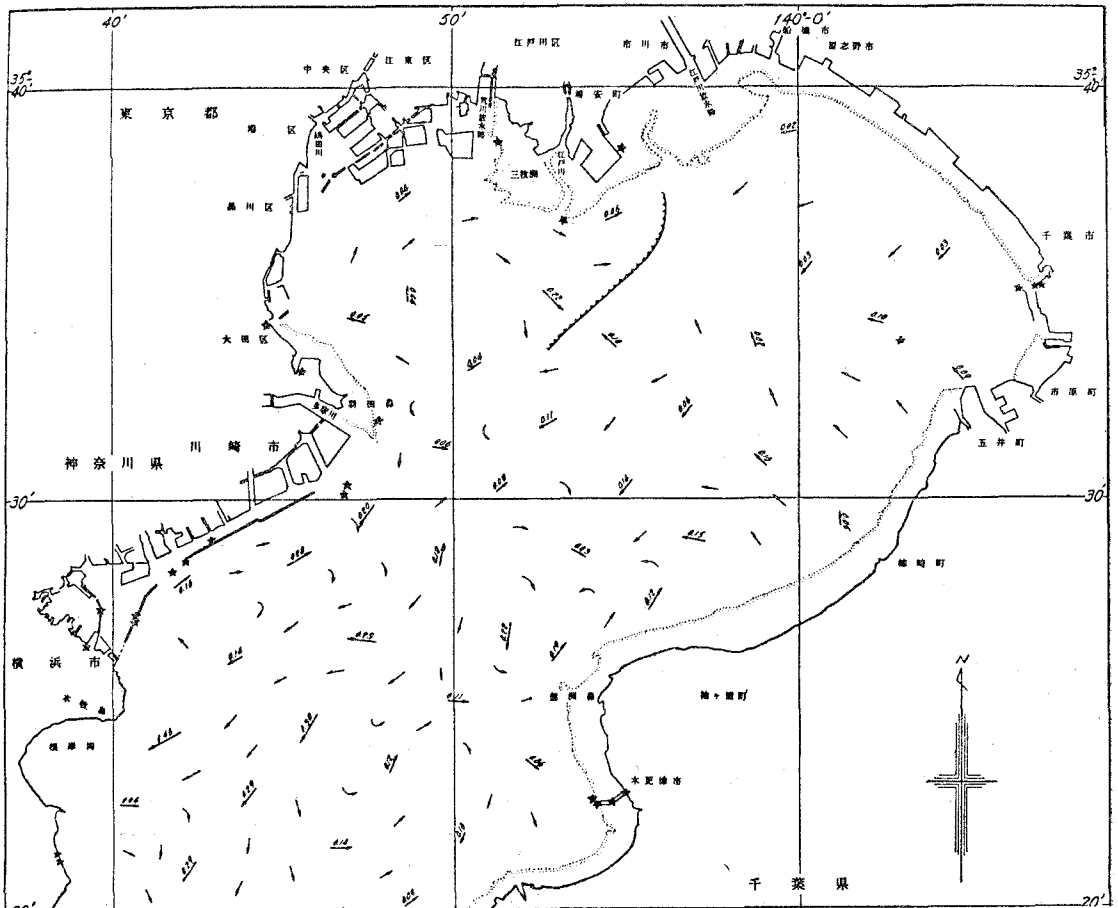
前報では事前調査の一環として、廃水拡散の研究のた

めの水理模型実験施設および装置の概略を報告した。さらに、東京湾水理模型の基礎的実験について報告した。その概要は縮尺の大きな感潮河川を含む内湾模型実験では水温変動変化によって水平流れが生じて原型と異なる大きな要因の一つとなることを指摘し、水理模型を拡散などの研究に適応する場合十分に配慮すべきことを報告した。

水理模型実験によって内湾における各種物質の拡散や循環に関する問題を研究する場合には、

(1) Froude 数が一定になるように長さ、速度、時

図-1 東京湾恒流図(海面下1m)



* 正会員 工博 工業技術院資源技術試験所産業公害第2部課長

** 正会員 工業技術院資源技術試験所産業公害第2部

間について縮率を決めて水理模型をつくり、第1近似的に原型の潮位および潮流を再現する。

(2) 人工粗度(底面粗度, 多数の金属板およびストリップ等)を巧妙に調整して, 細部の流況についても原型と類似させ, 相似の精度を上げる。

(3) この粗度を再調整して湾内各場所の塩分についても自然のスケールを再現し, 原型と完全に相似な拡散の場を模型内に再現させる。

という段階を順次経て最終的に廃水やその他の物質の拡散現象を調査する方法をとらなければならない。それゆえ, 拡散の研究のための水理模型実験の精度を上げるためには, 原型の流況や塩分分布等に関して, ばく大な数の正確なデータを必要とするとともに模型粗度の調整等にも多数の人員と歳月を必要とする。

本報文では, 昨年に続いて東京湾北部の流れ機構におよぼす地形, 感潮河川の影響について検討し, その結果から若干の考察を試みた。

原型のデータとして第2港湾建設局が昭和40年11月, 12月と昭和41年7月, 8月に測定した東京湾潮流調査報告書を参考とした。また水理模型実験も, 一般の

水理学や海岸工学で水理模型実験を実施する場合と同様に, Froude 数を原型と合わせるだけの第1近似で実験した部分について報告する。

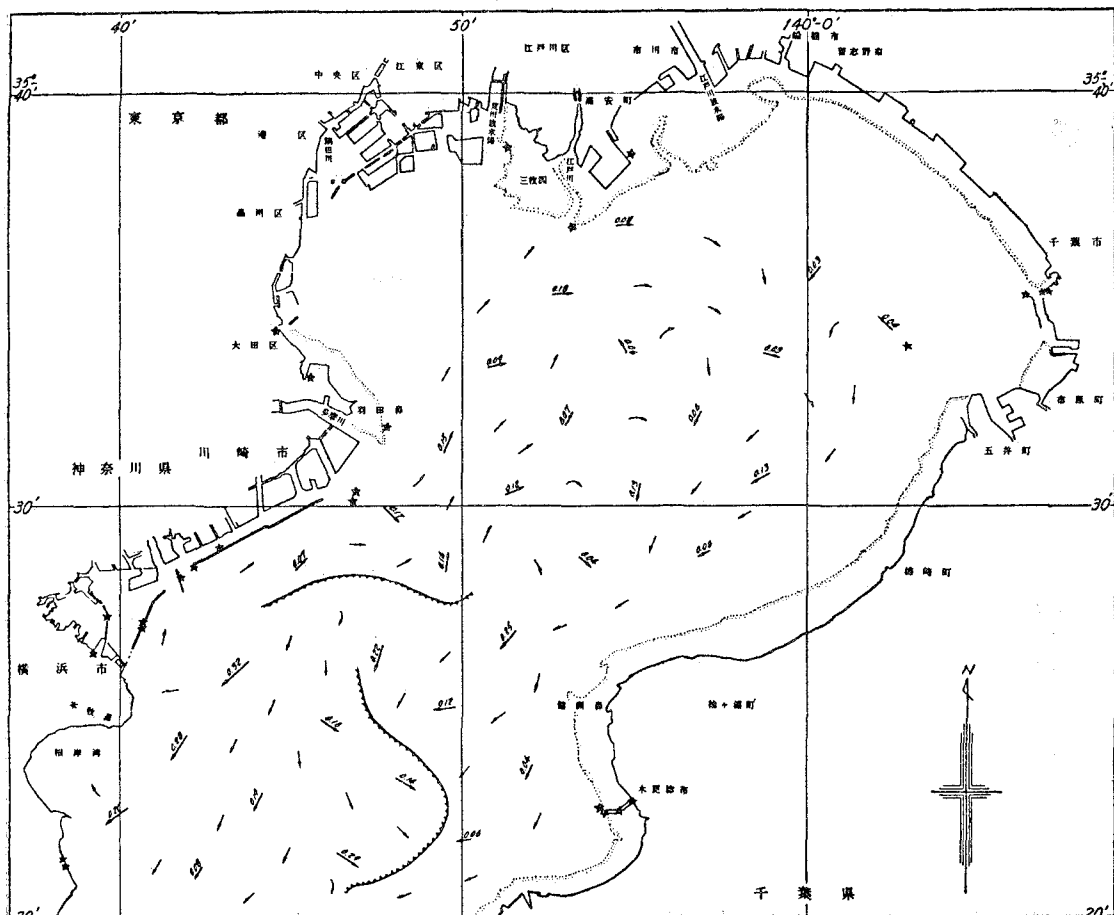
2. 東京湾の原型の流れについて

前述の第2港湾建設局の東京湾潮流調査報告によると, 湾内の現状における潮流は概略的につぎのようであると報告されている。

「潮流図末尾に示す恒流から見みると, 東京湾奥における海水の循環は時計まわりの傾向が強い。ただし, 底層水は全般的に湾奥に向かい, 湾外に流出する傾向を示すのは千葉寄りの上中層水である。江戸川以西, 羽田鼻以北の東京湾内の上層は規則正しい時計まわりの環流を示すが, その東側江戸川河口に不連続な線が認められる。潮流は全般的に微弱で各所に潮目の発達が予想される(図-1~3 参照)。

さらに上記の報告書は, 「恒流のパターンは観測日前後の河川流出状況と関係があって観測期間の長期化が必要である」と述べてあるが, 湾全体の循環流は河川の流量に大きく支配され, 河川の河口部付近では密度流が流

図-2 東京湾恒流図(海面下5m)



況に大きく影響することが予測される。

3. 模型実験

内湾における水質の汚濁の問題を考える場合、この恒流による流動、拡散の現象はきわめて重大な影響をもつものであり、原型における恒流パターンを水理模型に再現することは、本研究の最重要課題である。

東京湾の流況が再現されるのはどのような機構に基づくものであるか現状における流況、とくに恒流として観測される流れはどのようにして発生するものであるかの検討を進めている。

ここで湾北部に流入する江戸川放水路、江戸川、荒川放水路、隅田川、多摩川、鶴見川等の各感潮河川水の流動が湾全体の流況、とくに恒流に対してどのように影響するか、東京湾水理模型により解明すべく実験を行なった。

なお、概略的に湾内に河川から流出される淡水の流量を湾全体の海水と比較して多くないので、理想的な Estuary と定義される内湾における密度流の現象は顕著に現われていないものとして密度流に関する現象は除外

して、淡水のみによって実験を進め検討した。

この検討に際して、最初に昭和 50 年度に 8 000 ha の埋立て完成の模型を使用した。これは沿岸部の浅い箇所がほとんど昭和 50 年度までに図—4 のような埋立計画が完成し、模型内の流況が比較的早く安定したパターンを現わす理由によるものである。その後現状の模型に対して同様な実験を実施した。

実験に使用した東京湾の水理模型〔詳細は前年度第 1 報参照〕は図—4 のようで、実験条件および結果について以下に述べる。

(1) 各河川の河口部をすべて閉鎖して感潮部の

水の流動を止めた場合

湾北部では、図—5 のように水分子は潮汐による往復運動をするが、恒流速度はほとんどなくなり水は原点に停滞する。湾中央部(君津地区)では反時計まわりの恒流が現われるが、湾の北部、とくに千葉よりの水塊は恒流的な流れがなくなる。図中の矢印は 2 周期の間に水分子の移動した距離と方向を示す。

(2) 河川の感潮部に自由な湾内水の出入がある場合

a) 荒川放水路左岸の埋立てがない場合

図—3 東京湾恒流図(海底上 1.2 m)

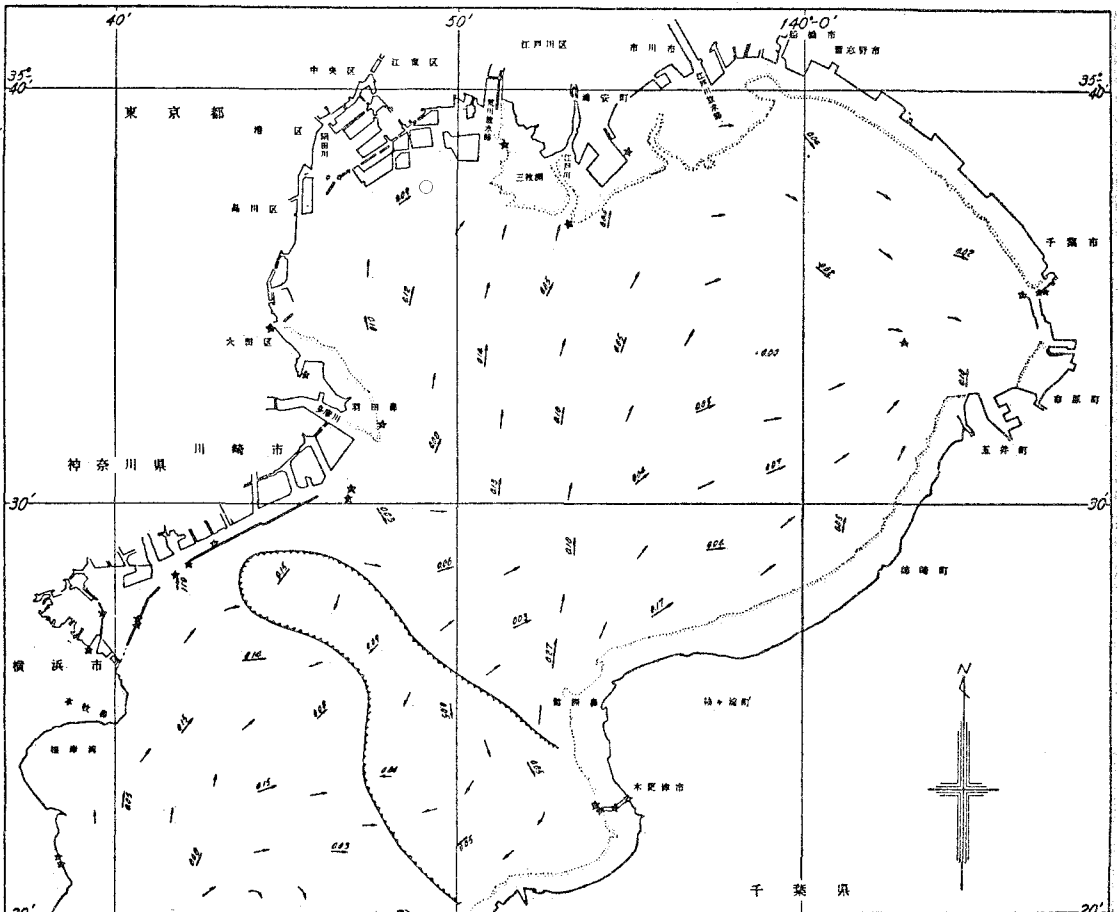


図-4 東京湾水理模型

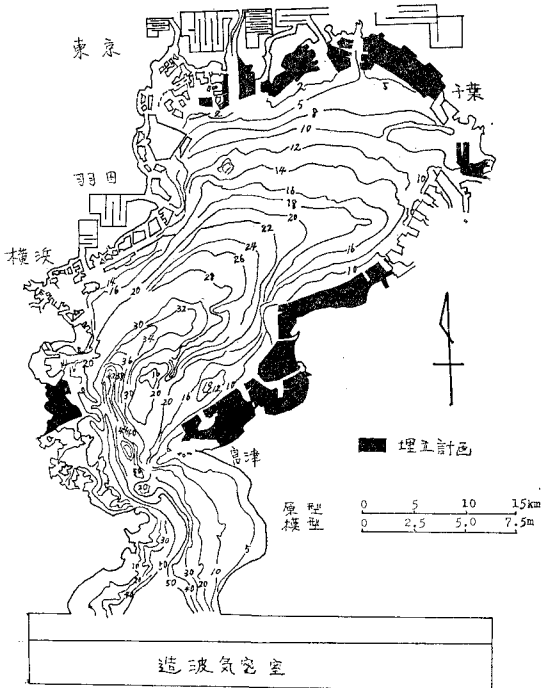
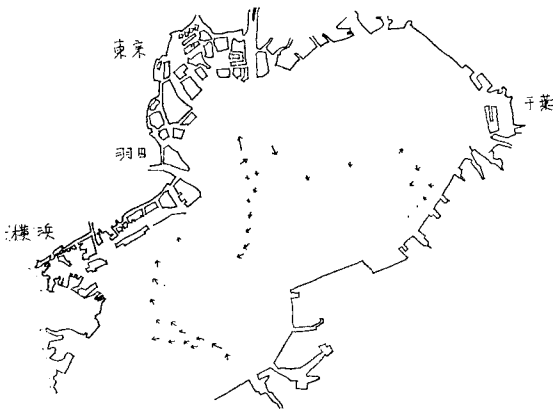


図-5 各河川の河口部をすべて閉鎖した場合



この条件では図-6のように湾北部は大きな時計まわりの恒流を画き、千葉沿岸の流れは岸と平行に南面に進行するパターンは図-2の-5mの恒流図とよく類似している。荒川放水路南方に小さな時計まわりの還流があり、この流れと江戸川放水路より流出する水が湾北部全体の時計まわりの流れの中心勢力のように観測される。湾中央部には反時計まわりの恒流がみられる。

b) 荒川放水路左岸を埋立て導水路を設置した場合

この時は図-7のように恒流は千葉沖から江戸川放水路および荒川放水路に向かう時計まわりの流れが出現する。

また荒川放水路南方にa)の場合と異なり、比較的強い反時計まわりの小還流ができる。

図-6 荒川放水路左岸の埋立てがない場合

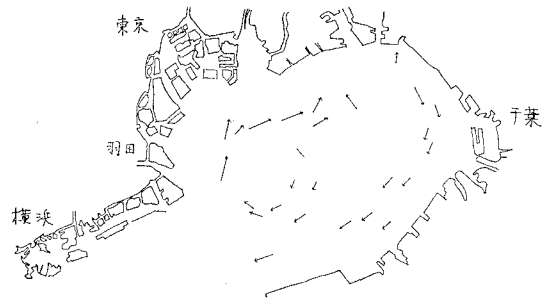


図-7 荒川放水路左岸を埋立てた場合

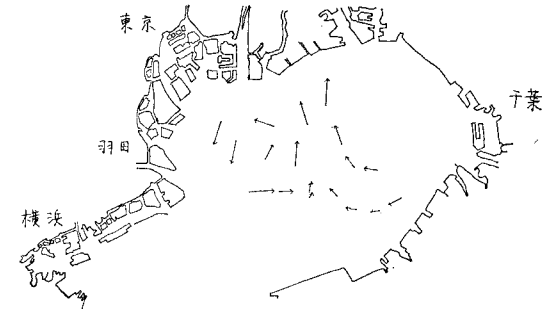
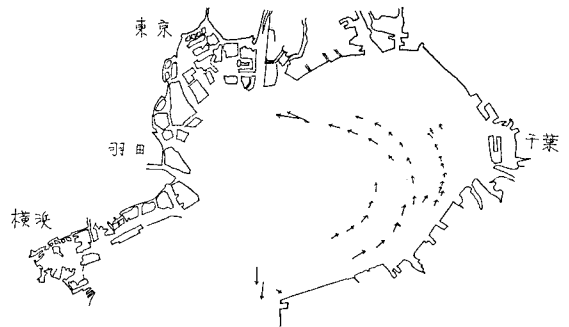


図-8 荒川放水路左岸を埋立て、江戸川放水路を閉鎖した場合



c) 荒川左岸埋立て、江戸川放水路の閉鎖の場合

この状態になると荒川放水路南方の反時計まわりの小環流の勢力が中心となり図-8のように湾北部全部の恒流は反時計まわりに微弱な流れになる。

d) 江戸川放水路以外の全河川を閉鎖した場合

この条件では湾北部の恒流は時計まわりの環流が生じ、恒流の速度はa)の場合より小さくなる。

(3) 各河川の感潮部の長さを1/2にした場合

この条件では、図-9のように荒川左岸埋立ての状態では恒流速度は1/3以下となる。荒川左岸埋立てを取り除いた場合は時計まわりの恒流速度は1/2以下になる。

そのほか、多摩川は湾北部の水塊を時計まわりにまわす作用をするが、その影響は羽田沖の狭い範囲に限られる。

なお現状模型では、つぎのような結果が得られた。

図-9 各河川の感潮部の長さを1/2にした場合

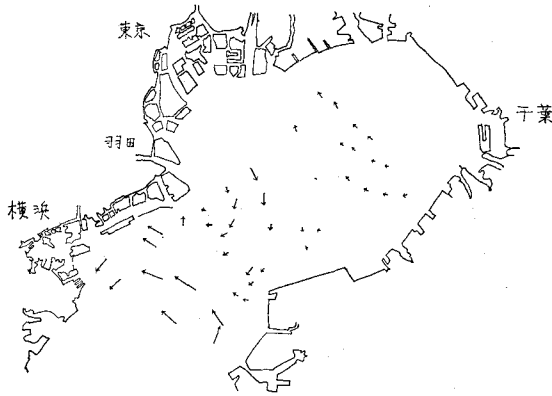


図-10 各河川に湾内水の出入りがある場合

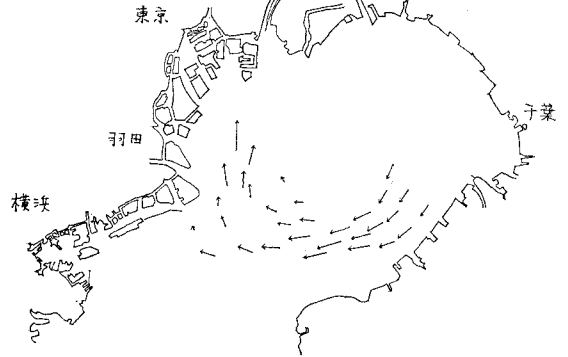


図-11 荒川放水路以外の全河川の河口部を閉鎖した場合



(4) 各河川に自由な湾内水の出入りがある場合

この条件では、図-10のように恒流パターンは、湾北部の恒流は将来模型の場合と基本的には同じであり、湾北部では大きな時計まわりの環流が生じ、一部盤州鼻の付近で局部的に流れが異なる。

(5) 荒川放水路以外の全河川の河口部を閉鎖した場合

図-11からもわかるように、千葉側では恒流は西から北西に流れが生じて、湾北の中央部では弱い南西の流れが現われている。

以上のような流動パターンから湾北部の各河川の感潮部に出入する水塊は相互に作用をおよぼしてその均衡のもとで全体として現状の恒流を構成しているものと推定され、河口部の埋立て、導流堤等の建設はこの均衡による流れに大きな影響をおよぼすものと考えられる。

これらの感潮部および地形の影響は、潮汐による河川と湾内の水位の変動の位相のずれによって生ずる流れで、河口付近の水粒子は Reynolds stress を受け、各場所の乱れの強さの相違によって恒流パターンは条件の変化に伴い変動するものと考えerほうが妥当であろう。

4. 運動の方程式

上記のような流動のパターンから、恒流の発生機構を解明するために流れの場を単純化して、理論的に検討をしてみよう。

原型においても模型においても流況を支配する基本的な原理は、水の運動方程式、水の容量および塩分の連続の方程式によって表わされる。この実験では塩分を使用しなかったことおよび模型水槽内の水の温度もできるだけその分布が少ないものを選んで試験したので、塩分質量に関する方程式は必要でない。直角座標として、水の自由表面に ox および oy 軸をとり、 ox は湾の中心軸にそって外洋向きを正とする。 oy は湾の横切る方向、 oz は下向きを正とする。 u, v, w は (x, y, z) 点で t 時刻

の平均速度成分とする。さらに、これらの速度成分は、その乱流性および潮流の影響を考慮してつぎのように互いに依存しない3つの項にわけられる。

$$u = \bar{u} + U + u', \quad v = \bar{v} + V + v', \quad w = \bar{w} + W + w' \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ は1ないし数周期にわたる平均速度成分、 U, V, W は潮流の速度成分、 u', v', w' は乱流の速度成分、それゆえ U および u' 等の平均値は定義にしたがって0である。さて運動の方程式は、

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_x}{\partial u} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $(D/Dt) = (\partial/\partial t) + [u(\partial/\partial x)] + [v(\partial/\partial y)] + [w(\partial/\partial z)]$, $f = 2w \sin \phi$ でコリオリ係数、 p は圧力、 ρ は密度、 g は重力加速度、 $\tau_{xy} \dots$ は粘性応力でこれは無視できる。よって、式(1)を式(2)~(4)に代入して1ないし数周期間にわたり平均する。またこの平均操作を $\langle \rangle$ なる記号で表わすと、 $\langle uv' \rangle, \langle Uv' \rangle$ や $\langle uU \rangle$ を0とおくと、平均の縦方向の運動方程式は、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \langle UU \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \langle UW \rangle \\ &= - \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right\rangle - \frac{\partial}{\partial x} \langle uu' \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle v'u' \rangle \\ & \quad - \frac{\partial}{\partial z} \langle w'u' \rangle \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで $\bar{v}$ および V は $\bar{u}$ や U に比較して小さく、これを含む場の加速項は無視してある。コリオリ力の項 $f\bar{v}$ も微小である。

さて、平均の横方向の運動方程式は、

$$\begin{aligned} f\bar{u} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \langle UV \rangle &= - \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right\rangle \\ & \quad - \frac{\partial}{\partial x} \langle u'v' \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle v'v' \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle w'v' \rangle \\ & \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、Stewart が強調しているように流れが明らかにわん曲している場合を考慮して、 $\bar{u}(\partial \bar{v}/\partial x) + (\partial/\partial x) \langle UV \rangle$ の項が左辺に残っている。東京湾では $f\bar{u}$ も無視できよう。

垂直方向ではすべての加速の項は無視できて、静水力学の方程式 $0 = g - [1/\rho \cdot (\partial p/\partial z)]$ のみが残る。

式(5)および(6)の項のうち従来から仮定されているように運動量の乱流 flux の水平成分は x および y 方向への運動の他の項に比較して小さく、これ無視して整理すれば、式(5)および(6)は、

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + U_0 \frac{\partial U_0}{\partial x} &= - \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right\rangle \\ & \quad - \frac{\partial}{\partial z} \langle u'w' \rangle \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \langle UV \rangle &= - \left\langle \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right\rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle v'w' \rangle \\ & \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここに U_0 は潮流速度の振幅である。

さて、式(7)が示すように、内湾にそって圧力勾配は主として、乱流応力の項 $\partial \langle u'w' \rangle / \partial z$ や潮流による加速の項 $U_0 \partial U_0 / \partial x$ と平衡を保つ。しかし、平均運動に関係する場の加速の項の作用は比較的小さいとされている。

また、式(8)の示すことは、内湾を横切っては圧力勾配は、わん曲をなして流れる水流の遠心力の項 $\bar{u}(\partial \bar{v}/\partial x) + (\partial/\partial x) \langle UV \rangle$ および乱流応力の項 $\partial \langle v'w' \rangle / \partial z$ と平衡を保つということである。

ところが、模型内の小さい水域内では Reynolds のシア応力 $\langle u'w' \rangle$ や $\langle v'w' \rangle$ 等を計測することは容易でなく、上式による定量的取扱いは今後の研究にまたねばならない。しかし、原型にせよ、模型にせよ、海底や沿岸地形の影響を受けて上式の各項の値は場所場所によって変化し、観測される複雑な流況を形成することになる。

原型では上式の速度成分 $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$ は密度(塩分)分布の関数である圧力勾配の項 $\langle 1/\rho \cdot \partial p / \partial y \rangle$ に依存し、

また塩分分布は速度に依存して、閉じた体系をつくる。このような閉じた体系のもとで内湾の循環や混合現象が生じている。

5. 考 察

“まえがき”でも述べたように、現段階では東京湾内における循環流や混合現象の問題を定量的に取り扱うことは困難であるが、ここで淡水のみを用いて行なった模型実験の流況が原型の流況と比較してみると比較的よく類似する理由について考察する。

少なくとも流況が原型と類似する場所では密度の変化に基づく流動運動(密度流等)の作用が比較的小さいものと考えられる。東京湾北部の流況に対しては河川感潮部の水の出入がきわめて大きい役割を演ずるようである。

図—5 のように全河川を完全に閉鎖すると、潮汐の1周期について平均した場合に恒流として検出されるような移動はきわめて微弱になるので、湾北では河川部がなければ、潮流はそれ自体では恒流を生じないはずのものであるが、河川感潮部内の水の潮汐による流動は、前節の式を参考にするならば、つぎの2つの働きをすることになる。

(1) 感潮部の水の流動は湾内に強大な乱流混合を生ずる。すなわち、潮流エネルギーの一部が乱流エネルギーに変換し、さらにその一部は垂直混合によって、水の位置のエネルギーの増加に用いられる。そしてこの位置のエネルギーの一部分が内湾における恒流あるいは循環流の運動エネルギーとして再現される(Reynolds stress)。

(2) 導流堤等によって河川感潮部の水が加速され、水の流れがわん曲すれば、その流れのわん曲による遠心力が恒流の運動エネルギー源となる。

東京湾の中央部では富津岬以南の浦賀水道の激しいわん曲地形の影響のため、強力な乱流とわん曲した流れを生じ模型の内湾のこの海域では比較的安定した反時計まわりの恒流を生じている。この恒流は湾北において恒流等が変化してもその影響は受けにくい。

模型水槽底部に金属板等の粗度を入れたり、河川の感潮部の長さを変えて、生成する乱流エネルギーを変化させたり、発生を減じたりすると恒流速度を著しく小さくする。バランスが破れると流向を逆転するということになる。

6. あとがき

以上のように感潮河川を含む内湾の水理模型実験で流れ場を再現する場合、感潮部の条件によって大きな影響を受けることが明らかとなった。これらの運動を定量的に解明するため、3次元の流測計を開発して、測定することによって理論的な裏づけを得るよう研究を進めた。

い。

参 考 文 献

- 1) Bailey, T.E., C.A. McCullough and C.G. Gunnerson : Mixing and dispersion studies in San Francisco Bay, ASCE, SA5, 1966.
- 2) Bowden, K.B. : Circulation and diffusion, Estuaries A.A.A.S. Publ. No. 83, 1967.
- 3) 江村富男・鬼塚正光 : 廃水拡散試験装置, 公害 Vol. 2, No. 2, 1967.
- 4) 江村富男・鬼塚正光・深尾浩・山口文男 : 水理模型実験による廃水拡散の研究(1), 第15回海岸工学講演会講演集, 1968.
- 5) 半谷高久・御巫清泰・惣谷 実 : 東京湾の汚染について, 第14回海岸工学講演会講演集, 1967.
- 6) 速水頌一郎・岩垣雄一郎・樋口明生 : 有明海沿岸埋立地区における排水拡散等変化予想模型実験, 公害 Vol. 2, No. 1, 1967.
- 7) 樋口明生 : 沿岸流の水理実験について, 沿岸海洋研究ノート, 2巻2号, 1963.
- 8) 磯崎一郎・宇野木早苗 : 東京湾潮汐の津波の数値計算の試行, 第10回海岸工学講演会講演集, 1963.
- 9) 岩垣雄一 : 海岸および港湾模型実験について, 海岸工学の最近の進歩, 1961.
- 10) 中野猿人 : 潮汐学, 古今書院, 1940.
- 11) O'connell R.L. and C.M. Walter : Hydraulic model tests of estuarial dispersion, ASCE, SA 1, 1963.
- 12) Pritchard, D.W. : The dynamic structure of a plain estuary, J. Mar. Res., 15(1) 1956.
- 13) Pritchard, D.W. and R.E. Kent : A Method for determining mean longitudinal velocities in a coastal plain estuary, J. Mar. Res., 15(1), 1956.
- 14) Roper, L.C.H.K. : The role of physical hydraulic model of San Francisco Bay and Delta in pollution studies, Proc. of Estuarine Pollution, Stanford, 1967.
- 15) 関 達哉・青木邦明・宮沢公雄 : 最近の東京内湾, 千葉県沿岸部における水質について, 水産海洋公報.
- 16) Simmons H.B. : Application and limitations of estuary model in pollution analyses, Proc. First Conf. Wastes Disposal in Marine Environment, 1959.
- 17) Simmons, H.B. : Use of models in resolving tidal problems, ASCE, Hy 1, 1969.
- 18) Stewart, R.W. : A Note on the dynamic balance in estuarine circulation, J. Mar. Res., 16(1), 1957.
- 19) 運輸省第2港湾建設局, 模型調査設計事務所 : 東京湾潮流調査報告書(第2報), 1967.