

名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験 (2)

樋口 明生*・吉田 幸三**

1. まえがき

伊勢湾台風に端を発する高潮対策の一環として、現在名古屋港の港界に沿う高潮防波堤が建設中であり、同時にこの防波堤の内側の海面を埋立てて臨海工業地域を造成する工事も進められている。これらの計画の完成後のこの付近における潮流の様相を知るために、水理模型実験を行なった。この研究は、ここ二、三年来継続して行なわれており、最初に小さい模型を用いて予備実験を行ない、その結果を参考にして現在大きい模型により実験中であるが、二、三の興味ある結果が得られたのでここに述べる。

2. 相似性

水理模型実験を行なうに際して、最も重要なことはいうまでもなく、原型と模型との間に力学的相似性が保たれていることである。この実験の場合のように、広い海域と狭い港口とがふくまれるような場合、両区域で同時に満足するような相似則を見出すことは困難である。これをどのように取り扱うかということを見出すのが、われわれの行なっている一連の研究の一つの課題であるが、ここでは主として広い海域における潮流の平均流速の変化に着目して相似性を考える。

このような場合、原型と模型との間に力学的相似性が保たれるためには、つぎの関係式が成立しなければならない。

$$t_r = \frac{x_r}{h_r^{3/2}} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_f = \frac{h_r}{x_r} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 t は時間、 x は水平方向の長さ、 h は水深、 C_f は摩擦係数であり、添字 r は原型の量と模型の量との比を表わしている。式(1)は Froude 数を合わせることに相当し、式(2)は摩擦係数を規定する条件である。式(2)は原型と模型とで摩擦係数がことなれば ($C_{fr} \neq 1$) 模型をひずめなければならないことを示している。広い海域における潮流に着目する場合、模型内の流れが層流域にあるときには、水平縮尺と鉛直縮尺の間には、つぎの関係が成り立たねばならない²⁾。

$$h_r^{5/4} = \frac{C_{fr} \nu \sqrt{x_r Re_p}}{1.328} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、添字 p は原型に関する量を表わし、 Re は最大流動距離 L (憩流からつぎの憩流までに流れる距離) と最大流速 U_{max} とを用いた Reynolds 数である。

最大流動距離 L については、流速の時間的変化が正弦的であるとすれば、潮汐の周期を T として、

$$L = \frac{U_{max}}{\pi} T \dots\dots\dots(4)$$

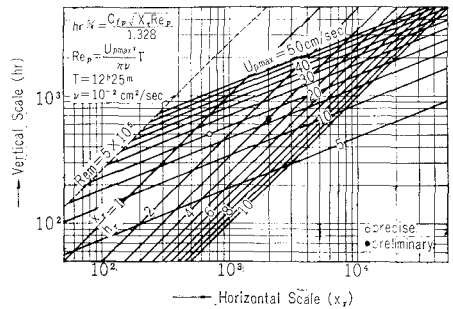
で表わされるから、Reynolds 数は

$$Re = \frac{U_{max} L}{\nu} = \frac{U_{max}^2 T}{\pi \nu} \dots\dots\dots(5)$$

となる。ここに、 ν は水の動粘性係数である。

$C_{fr} = 5 \times 10^{-3}$ 、 $T_p = 12h25m$ 、 $\nu_p = 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とし U_{pmax} をパラメーターとして式(3)を図に示すと 図-1 のようになる。この図から原型における最大流速を知り、水平縮尺か鉛直縮尺のどちらかを決めれば、他の一つを求めることができる。図中の破線は式(3)の適用限界

図-1 潮流実験用層流模型の縮尺



を示している。さて、原型の流速については、1958年9月から10月にかけて行なわれた潮流観測の結果³⁾によると、対象とする海域における最大流速は $U_{pmax} = 20 \text{ cm/sec}$ 程度と考えられる。一方、その海域の大きさと実験施設の大きさを考えると水平縮尺は、 $1/x_r = 1/700$ ぐらいが適当である。したがって 図-1 に○印で示したように鉛直縮尺 $1/h_r = 1/500$ が得られる。この場合時間縮尺は式(1)により $1/t_r = 1/31.3$ となる。採用した縮尺と模型における諸元を表-1示す。

図-1 中、●印は予備実験の場合の縮尺であるが、これが○印と同一 U_{pmax} 線上にないのは、当初にさきの資料³⁾ がなく、海図に記載されている値 ($U_{pmax} = 1/3 \text{ knot}$) を採用したためである。

以上は、広い海域に関する相似性についての議論であり、防波堤開口部(港口)のようなせまい所ではかなり

* 正員 京都大学助教授 防災研究所
 ** 正員 技研興業KK

表-1 模型諸元

水平縮尺：1/700, 鉛直縮尺：1/500,
時間縮尺：1/31.3

	縮尺	原型	模型
距離	1/700	10 km	14.3 m
水深	1/500	16 m	3.2 cm
湖差	1/500	2.6 m	5.2 mm
周期	1/31.3	12h25m	23.8 min
流速	1/22.4	1 knot	2.3 cm/sec
水面積	1/4.9×10 ⁵	100 km ²	204 m ²
断面積	1/3.5×10 ⁵	10 ⁴ m ²	286 cm ²
流量	1/9.27×10 ⁶	10 ⁴ m ³ /sec	1.08 l/sec

図-2 模型一般図

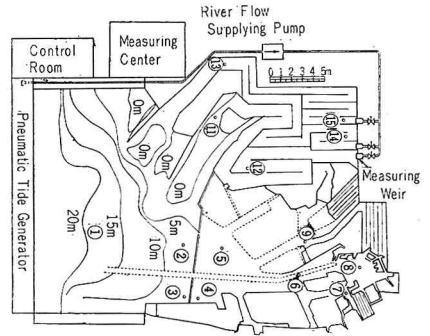


表-2 模型水面積

		原型 (km ²)		模型 (m ²)	
		Case-D	Case-C	Case-D	Case-C
港内	海域	40.32	61.21	82.29	124.92
	河川	9.95	9.95	20.31	20.31
	計	50.27	71.16	102.60	145.23
港外	海域	141.25	141.25	288.26	288.26
	河川	70.86	70.86	144.61	144.61
	計	212.11	212.11	432.87	432.87
合計		262.38	283.27	535.47	578.10

大きい流速が予想され、流れは層流域を出る可能性がある。上記の議論が成り立たないかも知れないが、この点については後に考察を行なう。

なお、河川部については感潮域を上記の縮尺で再現したが、単に水面積を合わせることにとどめ、相似性については考慮しない。

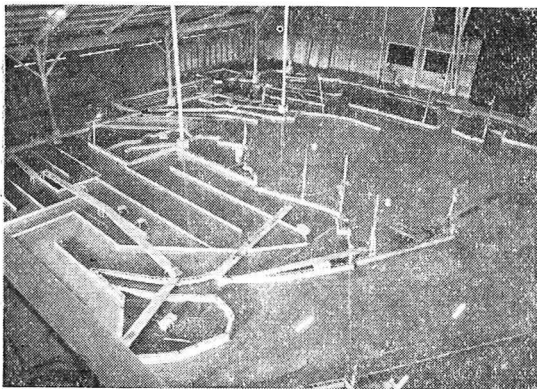
3. 実験施設

実験は宇治川水理実験所の海洋実験室(縦37m, 横30m, 高さ12m)で行なった。実験施設は模型水槽、起潮機、河川用給水装置、および計測装置より成っている。

(1) 模型水槽

前節にのべたように、水平縮尺1/700, 鉛直縮尺1/500の模型を作った(写真-1)。ふくまれる範囲は図-2に示すように、四日市、常滑を結ぶ線から北側の海域である。表-2に原型と模型の水面積を示す。河川部については、木曾川、長良川、揖斐川、および庄内川、新川、天白川の感潮域を考慮し、水面積を確保するため平均幅、平均河床勾配をもつ水路を模型にふくめた。

写真-1 名古屋港潮流実験用模型



模型はコンクリートブロックで外壁を作り、その中に海底地形はモルタルで、海岸線および埋立地は写真-1に見られるようにブロックで、河川部の仕切りは木材で、防波堤は木材とモルタルで作った。製作した模型は

大別して2種類である。その一つは、計画が全部完成した場合、すなわち、図-2の点線の部分も完成した場合で、これを Case-D と名づけた。この場合の海底は、航路は名古屋港基準面 N.P. -16m, 航路の東側は -12m 西側は -15m である。他の一つは、図-2の点線部分が未完の場合であり、これを Case-C と名づけた。航路は -12m, 東側は -12m, 西側は現況のままである。防波堤は開口部付近は原型と同じ断面形をもった模型を木で作り、それ以外の部分はモルタルで似たような断面形のものを作った。開口部の条件を表-3に示す。

表-3 港口断面積

名古屋港平均海面 (N.P. +1.4m) 下

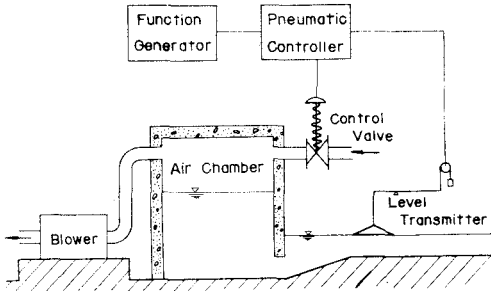
実験例	実験記号	港口幅 b _p (m)		水深 h _p (m)		横断面積 (原型)	横断面積 (模型)
		主口+副口	主口 副口	主口 副口	A _p (m ²)	A _m (cm ²)	
Case-D	TDA	350+50		16, 7.5		7 414.0	211.8
	TDB	400+200		16, 7.5		9 619.0	274.8
	TDC	500+300		16, 7.5		12 249.0	350.0
Case-C	TCA	350+50		12, 7.5		6 062.0	173.2
	TCB	400+200		12, 7.5		8 067.0	230.5
	TCC	500+300		12, 7.5		10 297.0	294.2

(2) 起潮機

この実験に用いた起潮機は図-3のような構造のもので気圧式起潮機⁴⁾と呼ばれている。これは幅20m, 高さ2m, 奥行2mの空気室内の気圧を加減して潮汐あるいは任意の水位変動を与えるもので、自動制御装置により

制御されている。起こし得る水位変動の範囲は全振幅が 0.1~4.0 cm, 周期は 1~60 min である。

図-3 流況測定用信号



(3) 河川用給水装置

木曾川, 長良川, 揖斐川に流量を与えるために用いたもので, 図-2 に示すように起潮機の空気室下部より取水し, 1/2 HP のポンプにより計量ぜきを通して河川上流部に給水することができる。

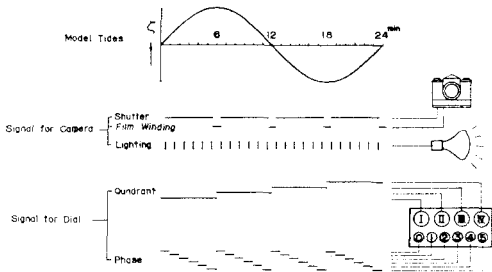
(4) 計測装置

この実験では模型内 6 点での水位の時間的变化, 港口の表面流速, 港内および港外の流況などを測定した。

水位は 図-2 の①~⑥の地点に通水口を設け予備実験と同様に電気抵抗式水位計により計測記録した。測定点は主として①, ②, ⑤, ⑥, ⑦および⑧である。港口の表面流速は浮標の追跡により求めた。航路の横断方向に数個の浮標をならべ, 間欠的に照明し写真撮影した。この方法は, 主として上げ潮および下げ潮の最大流速時についてのみ適用したが, 時間的变化については数例について測定した。

流況は, 水面に多数の浮標をうかべ, 上と同様の方法で自動的に測定した。照明, 写真機駆動および位相表示用の電気信号を 図-4 に示す。

図-4 堰式起潮機原理図



3. 実験の経過および結果

実験は前述のように 2 種類の地形 (Case-D および Case-C), 3 種類の港口幅 (表-3 参照) について行なった。大潮 (潮差 2.6 m) および小潮 (1.8 m) をふくむ数種類の潮差の半日潮について調べたが, 以下には

とくに断らないかぎり大潮に関して述べることにする。半日潮の周期は 24 min である。

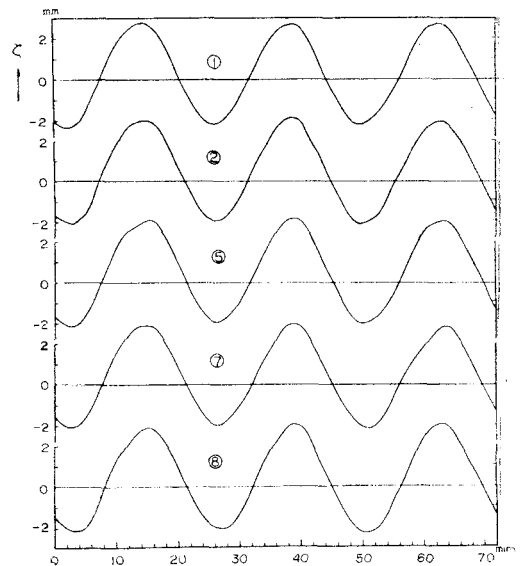
まず Case-D の模型を作り, 流況を調べ, つぎに港口流速を測定した。この場合には港口幅が 400 m (主口) と 200 m (副口) の組み合わせについては省略した。

つぎに Case-C の模型について同様の実験を行なった。また港口流速の時間的变化を調べた。なお, 参考のために潮汐を与えた場合の木曾三川内の水位を流量のある場合とない場合について調べた。

(1) 水位の時間的变化

水位の時間的变化の例を 図-5 に示す。これは Case-C で, 港口幅 500 m (主), および 300 m (副) の場合である。

図-5 海域の水位記録 (模型 TCC)



(2) 港口流速

Case-C において, 表面流速の時間的变化を調べた。一例を 図-6 に示す。これは港口幅が 350 m (主) と 50 m (副) の場合である。図中②, ⑥における水位をそれぞれ実線および点線で, 主口および副口における流速を実線および点線で示した。港口の最大流速は 図-7 に示すようである。図の横軸は潮差, 縦軸は流速である。上段は Case-D, 下段は Case-C を表わし, ○ および ●印は主口における上げ潮時, および下げ潮時の値であり △ および ▲印は副口における値である。

(3) 流況

流況の例を 図-8~10 に示す。これらは港口幅が 500 m (主) と 300 m (副) の場合である。図-8 および 9 は上げ潮, および下げ潮時の最大流速の分布を示したものである。図-10 は流跡であって, ○ および ●印はそれ

図-6 港口流速と水位 (模型 TCA)

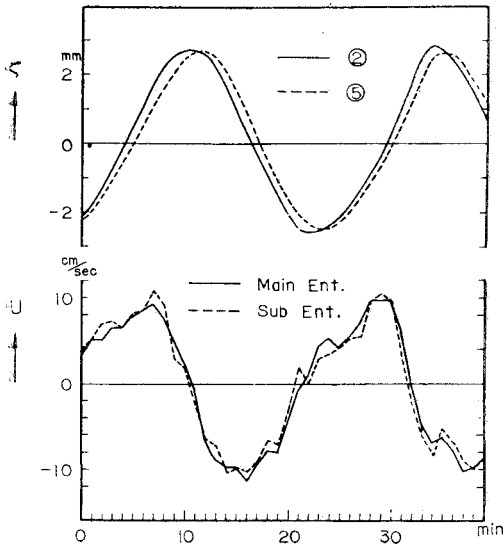


図-7 港口の最大流速

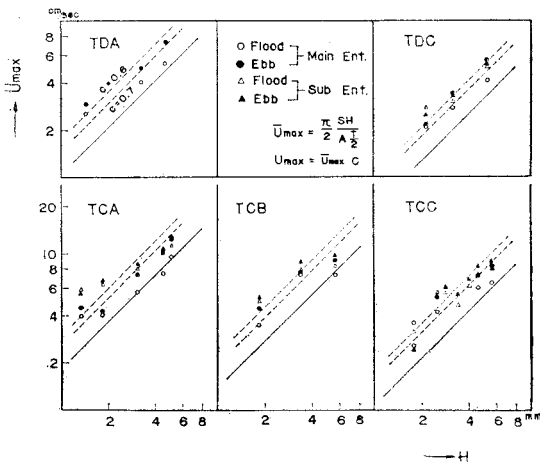
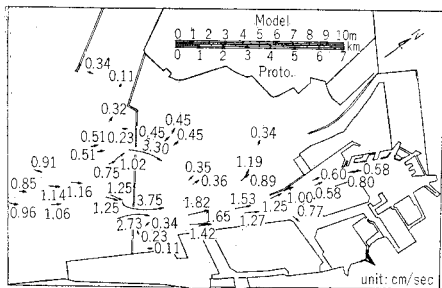


図-8 上げ潮時の最大流速 (模型 TCC)



それぞれ満潮時および干潮時を表わし、実線および点線はそれぞれ上げ潮時、および下げ潮時における流跡を表わしている。

図-9 下げ潮時の最大流速 (模型 TCC)

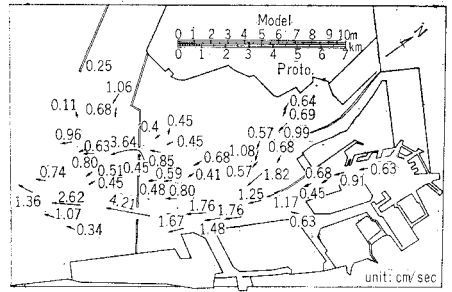
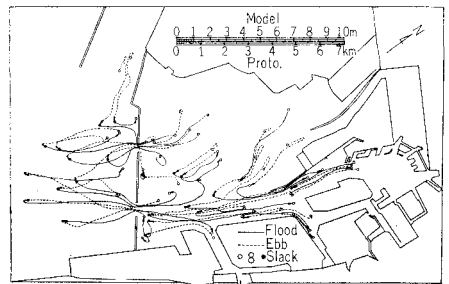


図-10 流跡 (模型 TCC)



5. 考察

(1) 水位の時間的変化

図-5 に Case-C の模型における半日潮の様相を示したが、この図から各点での潮差はほとんど変わらないことがわかる。位相の遅れについては、ほぼ長波の伝播速度から推定される程度である。

(2) 港口の表面流速

図-6 は港口流速の時間的変化を示したものであるが、これによると水位はほぼ正弦的に変化しているが、流速はそうではなく、形が少しひずんでいることがわかる。もし摩擦がなければ流速も 1/4 周期だけずれた正弦曲線で表わされるはずであるが、実際はそうでないことを表わしているものといえよう。しかしながら、大ざっぱに見れば、水位曲線が平均水位を切る時刻にほぼ最大流速が現われるようである。つぎに述べる事項はこの時刻前後の流速を最大流速と見なしたものである。

このような最大流速は図-7 に示されているが、これによると、最大流速はつぎの場合に大きくなることがわかる。すなわち、1) 同一の模型については半日潮の潮差が大きい場合、2) 港内の水面積が大きい場合 (上下の比較)、3) 港口断面積が小さい場合 (左右の比較)。このことは、つぎのように説明できる。すなわち、海域では潮差はかわらないから、潮差と港内水面積の積に相当する水量が半周期ごとに港口から出入りするわけで、1)および2)の場合はこの水量が多いから、一定時間内にそれをまかなうために、流速が大きくなるのである。ま

た、3)の場合は同一流量を小さい断面積でまかなうのであるから流速が大きくなるのは自明である。

いま対象とする海域では、潮差は変わらないものとし、港内では水位は同時に上下するものとし、かつ、流速の時間的変化は正弦的であるとすれば、港口の横断方向に平均した時間的**最大流速** \bar{U}_{max} は連続の関係からつぎのように表わされる。

$$\bar{U}_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{HS}{A(T/2)} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 H は潮差、 S は港内水面積、 A は港口断面積、 T は潮汐の周期である。図-7の実線はこのような \bar{U}_{max} を表わしている。ところが実際には港口の断面全体に一樣に水が流れるのではなく、底の摩擦や縮流のために局所的な分布が生ずるはずである。測得した値は横断方向についての最大値であり、鉛直方向についても最大値と考えられるので、さきの \bar{U}_{max} よりも大きいはずである。その程度ははっきりわからないが、たとえばその影響が流量係数だけで表わされるものとするれば、大ざっぱに**最大流速** U_{max} はつぎのように表わしてもよいであろう。

$$U_{max} = \frac{\bar{U}_{max}}{C} \dots\dots\dots(7)$$

ここに C は港口の流量係数である。図-7には $C=0.6$ および 0.7 の場合の U_{max} を破線で示した。測得流速はこの破線に近いようであるが、潮差 H の小さい場合には離れる傾向が見られる。この流量係数については、別に小水槽(長さ10m、幅5m、深さ0.2m)で同一断面の防波堤について定常流の実験を行ない、図-11のような結果を得ている。これによると流量係数 C は Reynolds 数により変化するが、非定常の場合にもこの関係が正しいとすれば、前述の傾向は定性的にはつぎのように説明できる。すなわち、潮差が小さい場合は、Reynolds 数が小さく流量係数も小さい。最大流速

は流量係数に逆比例すると考えられるから、潮差が小さければ大きくなり、この傾向が見られる。流量係数は各実験例ごとに異なるから、それぞれの場合の係数を別に求めて式(7)による値と実測値とを比較すれば、このような考え方の妥当性を確かめることができるが、これについては目下研究中である。図-7によれば下げ潮時の最大流速の方が上げ潮時よりも大きい、この理由は不明であり、これも研究の余地がある。これらの資料から原型における値を推定するわけであるが、原型においても模型と同一の流速分布をもてば、単に流速縮尺を乗ずるだけでよいのであるが、実測例がないので何らかの仮定のもとにこれを推定しなければならない。このような場所における流れ方を表わす一つの目安としてさきのべたように流量係数が考えられる。これには縮流のほかに摩擦などいろいろの効果が含まれているが、模型ではほぼ式(7)で表わされることが明らかになった。もし原型においても同様にして最大流速が求められるものとするれば原型の最大の流速 U_{pmax} は、模型の最大流速 U_{mmax} を用いて

$$U_{pmax} = \frac{\bar{U}_{rmax}}{C_r} U_{mmax} \dots\dots\dots(8)$$

で表わされる。ここに \bar{U}_{rmax} は断面について平均した最大流速の比であり、これは流速縮尺 U_r と等しく、 C_r は流量係数の比である。したがって、 C_r を推定すればよいことになる。 C_m は図-11に示すようにこの実験に現われる最大流速付近($Re = \frac{\bar{U}h}{\nu} = 2 \sim 3 \times 10^3$)では、 $C_m = 0.6$ 程度である。一方 C_p を少し大胆であるがこの図の外そうから $C_p = 0.8$ の程度と見積れば、 $C_r = 1.33$ となるから、模型の流速から原型の流速に換算する場合にこの逆数すなわち $1/C_r = 0.75$ の程度に割り引かねばならないことになる。このような考え方で原型の最大流速を推定すると表-4の推定値(I)の値が得られる。

図-11 港口の流量係数

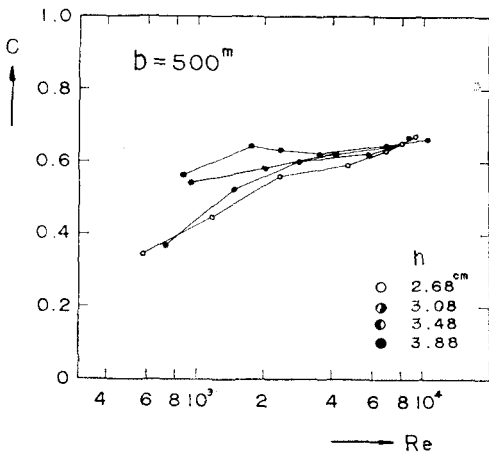


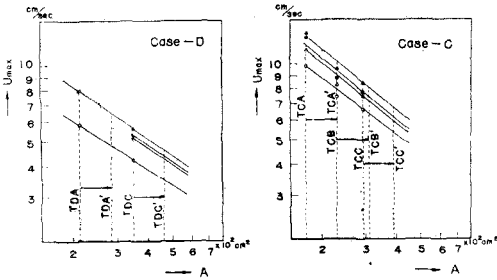
表-4 港口の最大流速(推定値)

実験記号	実験値 (cm/sec)	換算値 (knot)	推定値(I) (knot)	補正值 (cm/sec)	推定値(II) (knot)	推定値(III) (knot)
TDA	8.0	3.48	2.61	6.5	2.82	2.6~3.5
TDB	-	-	-	5.5	2.36	-
TDC	5.6	2.43	1.82	4.6	2.00	1.8~2.4
TCA	13.3	5.78	4.33	10.3	4.47	4.3~5.8
TCB	10.3	4.48	3.35	8.1	3.52	3.4~4.5
TCC	8.4	3.65	2.73	6.7	2.91	2.7~3.7

もう一つの推定法はつぎのようである。すなわち、港口の流速に関与するのは断面積 A と流量係数 C との積 CA と考えられるが、このうち A は表-1の縮尺で再現されているから、 C の違いだけを考えればよい。実際には積の形できくと考えられるので C の違いを A の違いにおきかえることが可能であろう。ここで、ふたたび $C_r = 1.33$ とすれば、 A の増加の程度から見て大

ざっぱに T_{CB} が実は T_{CA} に相当し、 T_{CC} が T_{CB} に相当するといえる。図-7 から大潮の潮差 ($H_m = 0.52$ cm) に相当する流速 U_{max} をよみとり、これを縦軸にとり、断面積 A を横軸にとって図に表わすと図-12 のようである。この図から断面積が 1.33 倍になったときの値、すなわち、 T_{DA} のかわりに T_{DA}' の値を実験値として採用し、これに流速縮尺を乗じて推定した値が表-4 中の推定値(II)である。

図-12 港口流速と港口断面積との関係



これらの二つの推定値は、図-12の直線の勾配が-1なら当然一致する性質のものであるが実際にはそうでなく、推定値(II)の方が若干大きい。これらの値は原型の流量係数 C_p の推定に弱点があるばかりでなく、 C_m も実は実験例ごとに異なるので、 C_r があいまいであり信頼度は高くはないが、大きな誤りはないと考えられる。しかしながら、 $C_r < 1$ とは考えられないから、安全のために $C_r = 1 \sim 1.33$ として与えられる推定値(III)の程度に見積るのが賢明であろう。

(3) 流況

上げ潮時および下げ潮時の最大流速の分布が図-8および9に示されているが、この図によると流速は港口で最も大きく、ついで航路沿いに大きいことがわかる。また、港内では防波堤から離れるにつれて流速は小さくなっている。これらを予備実験⁹⁾の結果をくらべると、大体の傾向は一致しているが、航路以外では予備実験の結果の方が若干小さいようである。これは、海底地形の相違に起因するものであろう。すなわち、予備実験では水深が大きかったためと考えられる。図-8および9の港口流速が、さきの図-7の値と一致しないのは、定義の違いによるものである。すなわちこの場合は長い区間の平均値を示しているから小さくなっているのである。港口では、噴流のような流れ方をし、下流側の両側に大きな渦ができる。図-11の港口付近にそれらしいものが見られる。また、噴流が完全に止まりきらないうちに転流がはじまり、その付近では流れが相当乱れるようである。

図-10に流跡の一例を示したが、これによると港内では流跡は一般に港口を中心とした放射線を長軸とする偏平な長円形であるが、港口を通る場合はかなり複雑に

なることがわかる。なお、流跡は一周期ごとに閉じず、乱れがあることを暗示している。

6. むすび

名古屋港に高潮防波堤が建設され、南部埋立地だけが完成した場合、および西部埋立地も完成した場合の模型(水平縮尺 1/700, 鉛直縮尺 1/500)に半日潮を与えて、水位、流況、港口流速などを、それぞれ3種類の港口幅について調べた。その結果つぎのことが明らかになった。

- (1) 潮差は海域では港内外ともほとんど変化なく、位相の遅れは長波の伝播速度で推定できる程度である。
 - (2) 港口の最大流速は水位曲線が平均水位をきる時刻付近に現われ、その大きさはほぼ式(7)で表わされる。すなわち、潮差および港内の水面積が大きいほど、また港口の断面積が小さいほど最大流速は大きくなる。
 - (3) 原型における港口の最大流速は大潮時には表-4の推定値(III)の程度になるであろう。この値に幅があるのは、原型の港口における流れ方が明らかでないことに起因するもので、これが解明されないかぎり正確な一つの値を決定することは困難であり、この程度の幅があるのはやむを得ないことである。
 - (4) 港内の流跡は港口を中心とした放射線を長軸とする長円形に近いが、一周期で閉じていない。
 - (5) 港口の下流側は噴流のような流れ方をし、それが止まるまでに転流が起こりその付近に乱れができる。
- なお、木曾三川内の水位を調べた結果、潮汐波の変形が見られ、倍潮が相対的に大きくなることがわかり、この種の模型で感潮河川の水位変動が取り扱える可能性が見出されたが、詳細については紙面の都合で省略する。
- 最後に、この研究を遂行するにあたって、終始適切にご指導を賜った岩垣雄一教授、ならびに実験に協力して頂いた北川吉男、平賀太郎の両氏に深甚なる謝意を表する次第である。なお、この研究は一部運輸省の委託によるものであることを付記する。

参考文献

- 1) 樋口明生・吉田幸三：名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験(1)，第8回海岸工学講演会講演集 昭36. 9, pp.114~118.
- 2) 速水頌一郎・樋口明生・吉田幸三：潮流を含む水理模型実験の相似性について，京大防災研究所年報，第2号，昭33. 12, pp.83~95.
- 3) 名古屋港管理組合：名古屋港外潮流観測概報，昭35, pp. 1~18.
- 4) 京都大学防災研究所：宇治川水理実験所概要，京大防災研究所創立5周年記念論文集，昭31. 11, pp. 282~313.