

名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験 (1)

京都大学助教授 防災研究所 樋口 明 生
同上 助手 同 吉田 幸 三

1. ま え が き

1959年9月26日夜伊勢湾をおそった15号台風は、東海地方一帯に未曾有の被害をひき起こした。とくに、中京経済圏の中枢である名古屋市周辺は、伊勢湾台風にもなった高潮に対し最も危険な湾奥にあるために、多数の人命をふくむ多大の損害をこうむった。名古屋港周辺の高潮防御対策工事の一環として、港界に沿って木曽川河口左岸の鍋田干拓地から対岸の知多半島古見地区に向かって延長約10kmにおよぶ大防波堤を設けて、高潮の被害を防止軽減するとともに、この防波堤の内側の海面を埋め立てて臨海工業地帯を造成しようとする計画がある。この計画が実施されると、この付近の海域における流況が当然大きく変わることが予想される。一般にこの種の問題を理論的に解明することはきわめて困難であるから、これを水理模型実験によって明らかにしたわけである。

すなわち、この海域の模型を製作し、これに半日潮を与えて、現状と大防波堤完成後および埋立完了後などの数種の地形的条件のもとにおける流況をしらべた。

この実験はつぎに行なう予定の本実験に対する予備実験であり、模型も小さく、また境界条件(防波堤開口部)についての相似性がよく確かめられていないので、この結果をただちに原型に適用することはできないかも知れないが、定性的にはかなり信頼できると思われる興味ある結果が得られた。

2. 相似性の考察

考えられるすべての現象について、原型と模型との間に完全な相似性を保たせることは不可能であるから、ここでは主として潮流の平均流速の変化に着目して相似性を考えることにする。原型と模型において、つぎの運動方程式および連続式が成立するものとする。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{C_f}{2h} U^2 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{C_f}{2h} V^2 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Uh) + \frac{\partial}{\partial y} (Vh) = 0 \quad (2.3)$$

ここに、 t は時間、 x および y は水平二方向の距離、

U および V はそれぞれ x および y 方向の平均流速、 h は水深、 ζ は鉛直方向の水面昇降量、 C_f は摩擦係数、 g は重力の加速度である。

原型と模型とが力学的に相似であるためには、原型および模型に対する運動方程式と連続式において、それぞれ対応する各項の比が等しくなければならない。したがって、原型に関する量と模型に関する量との比を各量の添字 r で表わすことにすると、(2.1)、(2.2) および (2.3) 式から、つぎの関係式が得られる。

$$\frac{U_r}{t_r} = \frac{U_r^2}{x_r} = \frac{U_r V_r}{y_r} = \frac{\zeta_r}{x_r} = \frac{C_{fr}}{h_r} U_r^2 \quad (2.4)$$

$$\frac{V_r}{t_r} = \frac{V_r^2}{y_r} = \frac{U_r V_r}{x_r} = \frac{\zeta_r}{y_r} = \frac{C_{fr}}{h_r} V_r^2 \quad (2.5)$$

$$\frac{\zeta_r}{t_r} = \frac{U_r h_r}{x_r} = \frac{V_r h_r}{y_r} \quad (2.6)$$

さらに、 $y_r = x_r$ 、 $\zeta_r = h_r$ 、 $V_r = U_r$ とすれば、相似の条件として、つぎの式が得られる。

$$t_r = x_r \cdot h_r^{1/2} \quad (2.7)$$

$$U_r = h_r^{1/2} \quad (2.8)$$

$$C_{fr} = h_r / x_r \quad (2.9)$$

(2.7) 式は Froude 数を合わせることに相当し、(2.9) 式は摩擦係数を規定する条件を表わしているものである。現地における昭和7年11月の神戸海洋気象台の実測によると、名古屋港の外港区で最大流速 1/3 Knots、すなわち、約17cm/sec となっているので、これを原型の値として採用する。

一方、実験を行なう場所の大きさおよび対象とする範囲から考えると水平縮尺 $1/x_r = 1/2000$ ぐらいが適当である。このような小さい模型においては、流れは層流の範囲内にあることが容易に想像されるから、以前に報告した¹⁾ような相似則が適用できるであろう。すなわち、原型の摩擦係数を C_{fp} とし、最大流速と最大流動距離とを用いた Reynolds 数を Rep と書くことにすれば鉛直縮尺は次式で表わされる。

$$h_r^{3/4} = \frac{C_{fp} V \sqrt{x_r Rep}}{1.328} \quad (2.10)$$

いま、原型の最大流速を $U_p \max = 17 \text{ cm/sec}$ とすれば、最大流動距離 (憩流からつぎの憩流までに流れる距離)

$$L = \frac{U_p \max}{\pi} T = 2.4 \times 10^5 \text{ cm}$$

であるから、 $Rep = 4.1 \times 10^8$ となる。また、原型の摩擦

係数は前述したように、 $C_{fp}=5 \times 10^{-3}$ とする。これらの値を(2.10)式に代入すると、鉛直縮尺 $1/h_r=1/673$ が得られる。模型の製作の便宜上実際には $1/h_r=1/667$ を採用した。このときの時間縮尺および流速の縮尺は(2.7)、(2.8)式から、それぞれ $1/t_r=1/77.5$ 、 $1/U_r=1/25.8$ が得られ、半日潮の周期は 9.6 min、最大流速 17cm/sec は 0.659cm/sec となる。

模型での Reynolds 数は $Rem=1.9 \times 10^4$ となり Blasius の公式が成立する範囲 ($Re < 5 \times 10^5$) であるから上記の相似則が適用できるであろう。

3. 実験施設

実験は宇治川水理実験所の屋内に新設した小潮流実験水槽で行なった(写真-1参照)。これは図-1に示すようなもので、巾約 5m、長さ約 11m、深さ約 0.2m のコンクリート製の水槽で、この中に水平縮尺 1/2 000、鉛直縮尺 1/667 の模型を製作した。この模型にふくまれ

写真-1 模型の全景

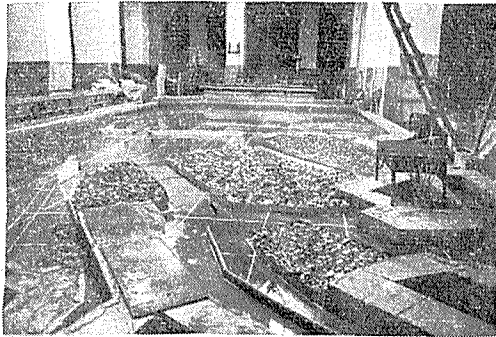
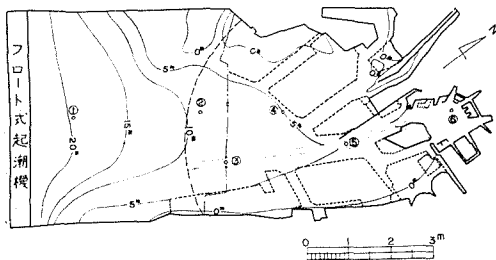


図-1 模型一般図



る範囲は、名古屋港全域と港界の沖合い約 7km までの海面である。水槽の側壁は $20 \times 20 \times 40$ cm の建築用コンクリートブロック 2 段積みとし、内側は防水モルタルこて仕上げである。海底地形は海図にもとづいて鉛直縮尺 1/667 となるようにし防水モルタルこて仕上げとした。なお、大防波堤および埋立地の建設工事完了後には、現地では海底をしゅんせつする計画であるが、この実験は予備実験であるので、その場合にも模型の海底地形は作り変えず、名古屋港の航路水深にもとづいて模型の水深を増して実験を行なった。模型の大防波堤および埋立地はガラス用パテとブリキ板とで作り、埋立地の内

部には水面と区別するために玉砂利を敷いた。大防波堤には大小 2 つの開口部があり、大きい方は航路の部分に当り巾 350 m である。小さい方はそれより鍋田 2.5 km の地点にあり、小船舶用の航路であり巾 50 m である。

図-2 フロート式起潮機

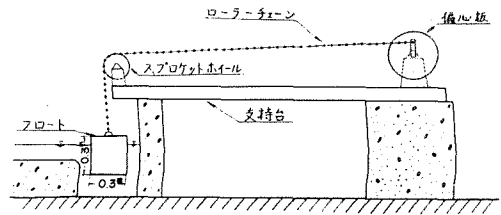
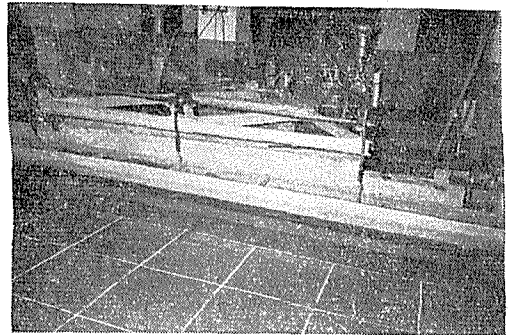


写真-2 フロート式起潮機

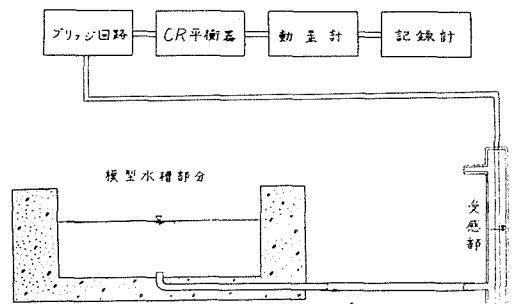


それらの開口部は模型では底長 100 m に相当する鉛直壁とした。

潮汐は図-2および写真-2に示すようなフロート式起潮機を用いて起こした²⁾。これは一種のブランジャー式の起潮機で、フロートを水面で上下させることによって水槽内の水位を変化させるものである。偏心板のピンの位置を変えることにより、フロートの行程が変化し、潮差を加減することができる。

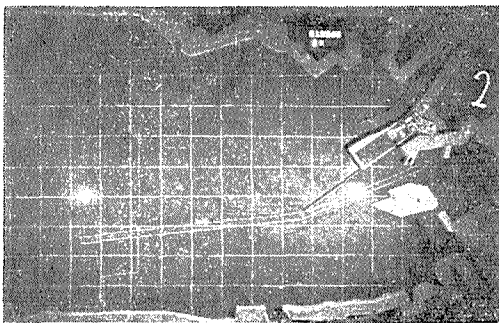
図-1に示した水槽内の①～⑥の地点の海底に、図-3に示すように $\phi 10$ mm の銅管を埋めこみ、ビニールチューブを通してその他端にあるメタクリル製の受感部に水を導き、水位を計測することにした。これは電気抵抗式水位計で、パイプの中に張られた 2 本のステンレス線の間の電気抵抗の変化を図-3に示すような方法で水位の変化に換算して、計測記録した。

図-3 水位計



表面流速は写真撮影により行なった。位置を示すために模型の海底に白ペンキで 0.5m 間隔の網目を書き、直径約 2.5 cm、厚さ約 2mm の白く塗ったコルク板を浮べ真上から撮影して追跡した。撮影に際して実験室を暗室にして、カメラのシャッターを開放にし、フロートの上下に周期させて一定間隔で間欠的に照明すると、浮子を点々と撮影することができる。実際には 1/4 周期ごとにフィルムを送り、その間に 6 回照明するような装置を試作して、1 周期に 24 回撮影した。したがって、撮影間隔は約 0.4min である。記録の例を写真-3に示す。点々と白く写っているのが浮子である。

写真-3 漲潮時の流跡
(A-case, $H=2.6\text{m}$, $d=9\text{m}$)



4. 実験経過と結果および考察

この実験では半日潮のみを対象とした。すなわち、3.6m, 2.6m, 2.2m および 1.8m の 4 種の潮差をもった半日潮について実験を行なった。

また、平均水位としては、航路水深 8m, 9m, 10m, 11m, 12m および 16m の場合の 6 種の水深を与えた。これは名古屋港基準面 (N.P.) 上: $+0.4\text{m}$, $+1.4\text{m}$ (名古屋港の平均潮位) $+2.4\text{m}$, $+3.4\text{m}$, $+4.4\text{m}$ および $+8.4\text{m}$ に相当する。模型の航路水深は、それぞれ 1.41 cm, 1.56 cm, 1.71 cm, 1.86 cm, 2.01 cm および 2.61 cm となる。いままでに行なった実験ケースは

A-case: 現状 (昭和 33 年 10 月当時)

C-case: 大防波堤と南部臨海工業地帯完成後の場合

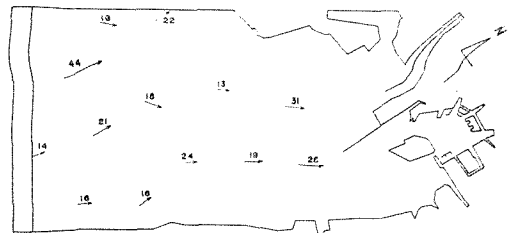
D-case: 大防波堤と南部および西部臨海工業地帯完成後の場合

である。なお、図面には潮差を H 、航路水深を d で表わしている。

(1) 相似性に関する実験

海上保安庁水路部が昭和 33 年 9 月 15 日から同年 10 月 25 日までの 40 日間にわたって名古屋港周辺の潮流観測を行なった結果をその後入手したのでこれを原型の資料とする。図-4 は海面下 3m の大潮の最大流速を示したものである。

図-4 原型の流速 (大潮, 海面下 3m)
(単位 cm/sec)



この原型に対応する実験として、A-case の航路水深 9m のとき、潮差 2.6m の半日潮を与えた実験を行なった。その結果は図-5、図-6 および図-7 に示す。図-5 は①~⑥の水位計測

図-5 水位記録

点での各水位記録を表わ (A-case, $H=2.6\text{m}$, $d=9\text{m}$)

している。これから各地

点での半日潮の潮差の変化はほとんど認められない。図-6 および図-7 は図-4 と比較するために、それぞれ漲潮時および落潮時の最大流速付近の流速分布の一例である。なお、この場合の流速は原型の値に換算した値が示してある。これらの図をみると航路部分の流速が他の海域にくらべて大きくなっており、流向、流速ともに原型と模型における潮流は相似しているものと考えられる。

以上のことから、この模型における現象は原型

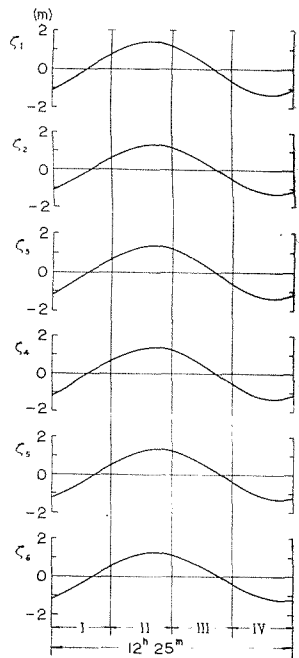
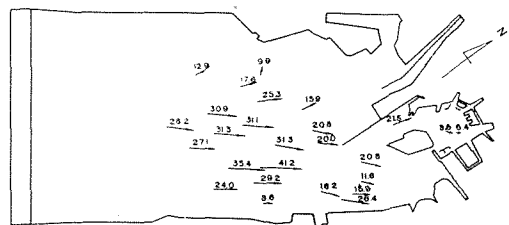


図-6 漲潮時の流速
(A-case, $H=2.6\text{m}$, $d=9\text{m}$) (単位 cm/sec)

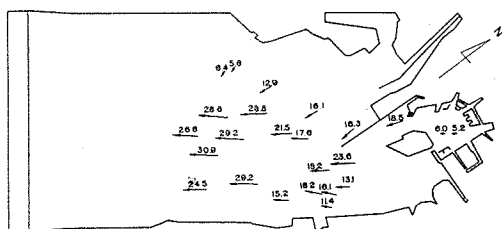


と相似であるものと認めて、以後の実験を行なった。

(2) 水深および潮差の効果に関する実験 (現状)

現状の模型 (A-case) において現在的水深 ($d=9\text{m}$) における大潮 ($H=2.6\text{m}$) を中心として、潮差を一定にして水深を変えた場合および水深を一定にして潮差を変えた場合の実験を行ない、その影響をしらべた。

図-7 落潮時の流速
(A-case, $H=2.6\text{m}$, $d=9\text{m}$) (単位 cm/sec)



まず、現状で同じ潮差 2.6m を与えて、模型の航路水深を 8m , 9m , 10m , 11m および 12m とした場合の実験を行ない、潮流の様子が水深によってどのように変化するかをしらべた。

その結果の一部は図-8および図-9に示す。白丸および実線は漲潮および満潮を表わし、黒丸および破線は

図-8 流 跡
(A-case, $H=2.6\text{m}$, $d=9\text{m}$)



図-9 流 跡
(A-case, $H=2.6\text{m}$, $d=12\text{m}$)



落潮および干潮を表わす。白丸から白丸および黒丸から黒丸の部分はそれぞれ漲潮時および落潮時の潮流の流跡を表わしている。白丸から黒丸および黒丸から白丸の部分はそれぞれ満潮および干潮付近の流跡を表わしている。

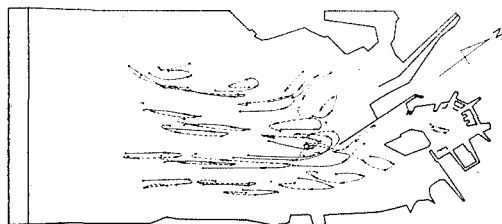
これらの図から水深が変化しても全体的な潮流の傾向はあまり変わらないことがわかる。すなわち、どの場合にも航路より東側の海域では、流跡は航路にはほぼ平行した長軸をもつごく扁平な円形をしており、右まわりをしているが、西側の海域では、流跡はかなり丸味をもっており流れ方は左まわりである。潮流の最大流動距離は模型の水深が大きくなるとそれに付れて小さくなっている。

つぎに、水深を一定にして、潮差を変えた実験を行なった。すなわち、航路水深 9m のときに、潮差を 1.8m , 2.2m , 2.6m および 3.6m としたときの実験を行ない、

潮流の様子が潮差によってどのように変化するかをしらべた。

その結果の一部は図-10および図-8に示す。図中の流跡の表示法は前にのべた通りである。これらの図から、この場合も水深を変えた場合と同じように模型の潮差によって潮流の全体的な傾向は変わらず、流跡は前に

図-10 流 跡
(A-case, $H=1.8\text{m}$, $d=9\text{m}$)



のべたと同じような特徴をもっていることが認められる。また、最大流動距離は与える潮差が大きいほど大きくなっていることがわかる。

(3) 大防波堤・埋立地の効果に関する実験

つぎに、大防波堤および埋立地が一部および全部完成した場合の実験を行ない、潮流の様子の地形的条件による変化をしらべた。

C-case では内側の水面積は大防波堤だけが完成したときの約 $3/4$ になり、D-case では約 $1/2$ になる。この場合には原型においては海底をしゅんせつするため水深が増し、また海底地形も若干変化するのであるが、ここでは前にものべたように平均水深を増して実験を行なった。この場合の航路水深は 12m であり、与えた半日潮は大潮に相当するものである。

C-case の実験の結果は図-11、図-12および図-13に示す。図-11および図-12はそれぞれ漲潮時および

図-11 漲潮時の流速
(C-case, $H=2.6\text{m}$, $d=12\text{m}$) (単位 cm/sec)

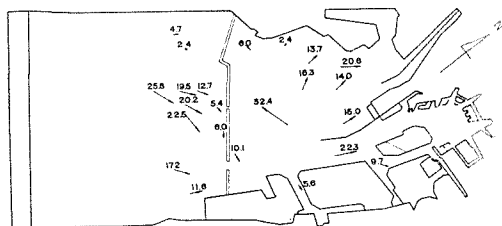


図-12 落潮時の流速
(C-case, $H=2.6\text{m}$, $d=12\text{m}$) (単位 cm/sec)

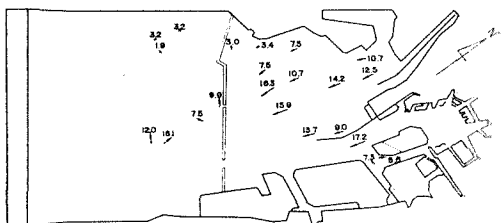
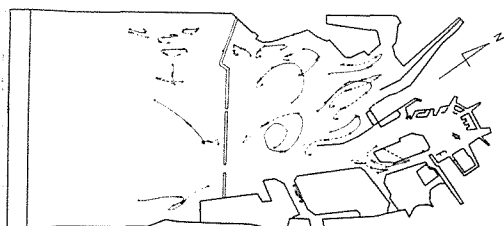


図-13 流 跡
(C-case, $H=2.6\text{m}$, $d=12\text{m}$)



落潮時の流速分布である。流速は原型に換算した値を示してある。これらの図から、漲潮時には防波堤の内側、落潮時には外側の開口部付近の海域が相当乱れることがわかる。これは開口部から噴流ようになって水が出入りするため、その下流側に当る海域が乱れ、大きなうずをまくためである。このうずの存在は図-13にも内側にみられる、乱れない側の海面、すなわち、漲潮時には外側、落潮時には内側では当然のことかも知れないが、最大流速は大きい方の開口部に向かって集中している。ま

図-14 漲潮時の流速
(D-case, $H=2.6\text{m}$, $d=16\text{m}$) (単位 cm/sec)

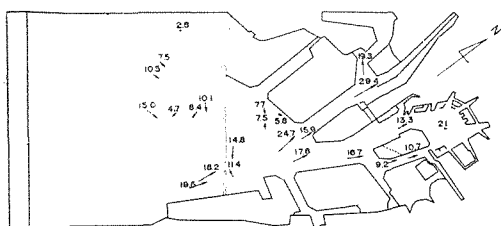


図-15 落潮時の流速
(D-case, $H=2.6\text{m}$, $d=16\text{m}$) (単位 cm/sec)

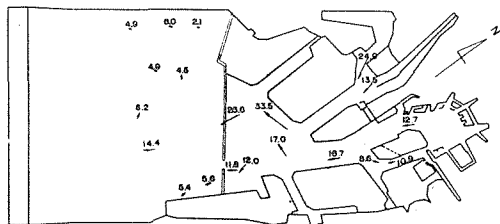
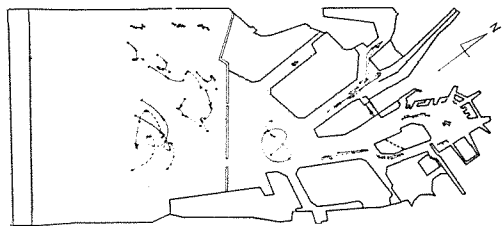


図-16 流 跡
(D-case, $H=2.6\text{m}$, $d=16\text{m}$)



た、この場合には流跡が閉じず、従って浮子は一周期たっても元の位置に戻らないことから乱れが大きいことが推察される。また、一周期の間の流動距離は現状の場合よりも全体として幾分か小さくなるようである。

つぎに、D-case の実験を行なった。この場合の水深は $d=16\text{m}$ である。結果は図-14、図-15 および図-16 に示す。C-case のときと同じようにそれぞれ漲潮時、落潮時の最大流速および流況を示している。これによると C-case の場合より一層複雑な流れ方をしていことがわかる。とくに、内側の埋立地前面の広い所ではその流跡は非常に複雑な形をしている。外側においても開口部の近くでは同じような傾向がみられる。また、埋立地の間ではその流跡は水路に平行し、一次元的な運動をしている。この場合の流速の大小は奥の水面積の大小によることが認められる。

以上の事柄については防波堤開口部における相似性の検討が十分でなく、また、海底地形も正確なものではないので、これらの結果をそのまま原型に適用することはできないであろうが、大防波堤の内側の海域の流況に関する一般的な性質については大きな誤りはないと考えられる。なお、外側の海域では、木曾川などが流れこむために実際には、この実験の結果とは異なった流況を示すものと推察される。

5. む す び

名古屋港周辺の潮流の様子は大防波堤および埋立地を作ることによっていちじるしく変化する。すなわち、現状では一般に乱れが少なく、その流跡は航路の方向に長いごく偏平な円形であるが、防波堤完成後はかなり乱れが生じ流跡は閉じなくなる。埋立てが全部完成した場合にはさらに乱れが大きくなる。この実験は予備実験であり、定量的には正確なものとはいえないが、定性的には十分信頼できるものであろう。定量的な議論を進めるためには、より本格的な実験を行なう必要がある。

最後に、この研究を遂行するにあたって、終始適切な御指導を賜った岩垣雄一教授、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って行なったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 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、京都大学防災研究所年報、第2号、昭和33年12月、pp. 83~95.
- 2) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について、海岸工学の最近の進歩、土木学会関西支部、昭和36年3月、pp. 21~42.