

伊勢湾の水利模型実験について (I)

中村 充*・大西 英夫**・白石 英彦**・佐々木泰雄**

1. 緒 言

昭和 35 年 9 月、惨禍を残した伊勢湾台風以来 3 年を経過した今日、この地域における高潮対策事業は着々と進行している。筆者らは昭和 35 年のはじめから高潮の研究に着手し、平面水槽、潮波発生装置および、そのほか付加的な河川流発生装置、沿岸流発生装置などの実験施設を建設し、以来伊勢湾における水利模型実験を実施してきたが、ここにその実験の概要を中間的に報告するものである。

高潮の解析は妥当な現地における常数を用いて、N-S の運動方程式および連続方程式を正確な初期条件、境界条件の下に解くことに帰結する。しかしこれらの式はなんらかの平均化の過程を経なければならず、このために同式中に現われる諸因子、諸常数がまだ不十分で、N-S 方程式自体における物理量が抽出され、条件の制御された解も不十分である。したがって、高潮の研究は条件を制御した基礎的な研究の解が必要である。しかし筆者らは時間的な制約も受けて、伊勢湾における水利模型実験をこの地区における潮汐、高潮解析の一つの手段として実施してきた。

海岸防災、利用保全のための諸施設、特に鍋田干拓河川堤から対岸知多町長浦地先にわたって建設中の高潮防波堤はこの地域の自然条件を大きく変えることであり、各関係分野から多角的に十分な調査をしなければならない。筆者らは特に次の観点からこれを検討することにした。

(1) 用排水問題との関連において、高潮防波堤建設による堤内の平時潮汐の変動について

(2) 鍋田干拓河川堤など木曾三川河口付近における高潮防波堤建設による高潮時の潮位について

なお、この実験の目的の一つとして潮汐高潮水利模型実験上の諸問題について解析し、水利模型実験による現象解析の手法を調べ、その裏づけとなる基本的諸問題を研究するものである。

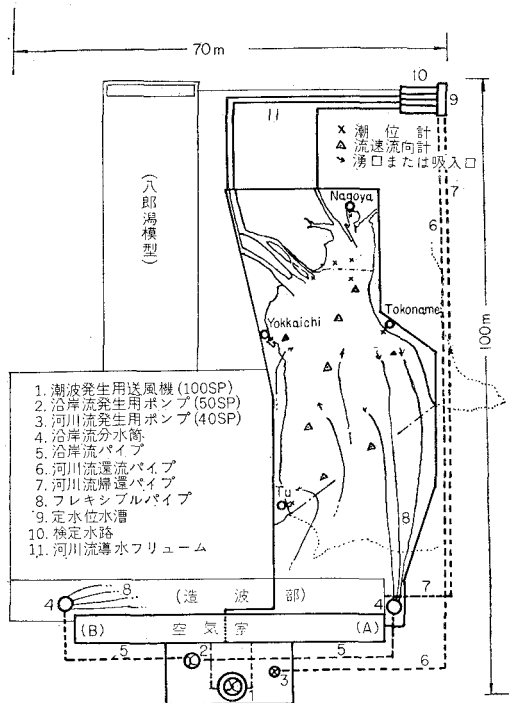
2. 実験装置

この実験のための実験施設と観測装置の概要は次に示すとおりである。

平面水槽は 50 m×70 m であるが、この一部を用いて伊勢湾模型は図-1 に見るように配置されている。潮波

発生装置は全幅 50 m にわたるニューマチックタイプの起潮装置で水の吸吐水量最大 350 m³、吸吐流量最大 4.3 m³/sec の能力をもち、制御は油圧噴射管式自動制御機構を用いた。図-2 はその機構を示すものである。

図-1 全体配置図



潮位の制御は四方弁と放風弁により、風量を制御することによって行なうことができる。四方弁は大概、一次の波形を、放風弁は微小な二次波形の設定に使用する。河川流発生装置は図-1 に見るように、木曾川、長良川、揖斐川、庄内川などの水流を発生させるもので、水槽の外洋にあたる部分から水を吸入し、陸側に管路で導き、定水位水槽を通して計量され、河川流となって流れるようになっている。最大流量は 200 l/sec である。

沿岸流発生装置は、図-1 に見るように 2 個の分水筒の先端にサクションホースを取り付け、任意の位置に湧口と、吸入口がつくれるようにしてある。この実験では恒流の発生に用いている。最大流量は 400 l/sec である。

観測事項は潮位、流速、流向であり、これらを同時に観測しなければならない。潮位の観測は抵抗線型水位計を用い Bridge の 2 辺に組込まれた極線間の水の抵抗値の

* 正員 農博 農林省農業土木試験場

** 正員 農林省農業土木試験場

図-2 自動制御機構

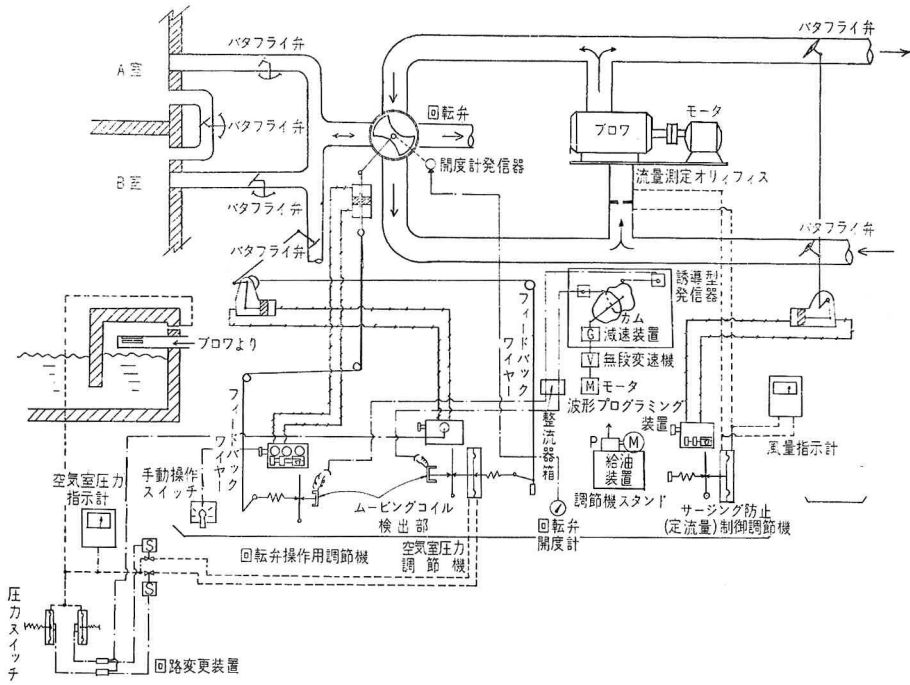


写真-1 熱線型流速流向計

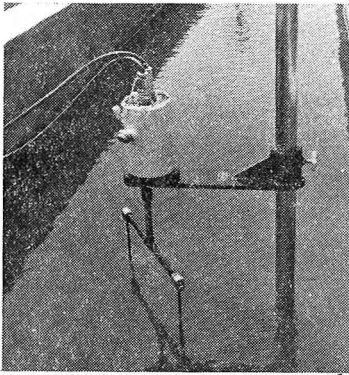
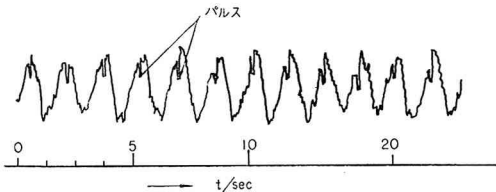


図-3 ペン書き Oscillo-graph による流速流向計の記録



変化を Strain-meter (D.P.M.) で電氣量に変換し、これを増幅してペン書き Oscillo-graph に記録させる。流速流向計は写真-1 に見るように熱線型の平均微流速計で2個のヒーター コイルを 30 cm の直径で回転して、これを Bridge の2辺に組んでペン書き Oscillo-graph に記録させる。これは検出部の回転における位相と流向と

写真-2 操作観測装置



の関係において最大流速は最大振幅として記録される。したがってホルダーに規定してある定方向における位相でパルスを与えることにすれば、このパルスと最大流速記録との位相差を読むことによって流速と同時に流向を知ることができるようになっている。写真-2 は潮位計および流速流向計の記録部と制御盤を示すものである。図-3 は流速流向計の記録例である。

3. 基礎方程式

この実験における基礎方程式は式 (1) で与えられる。この式を実験に用いる場合、実験装置の機能を配慮して、実験地区内で大気圧は一樣とし、海水密度は一定として考察する。流れは鉛直方向の平均値を用い、傾斜流における表層流、底流などについては別途に調べることにする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \text{ grad}) \vec{v} &= -\vec{\omega}_z \times \vec{v} - g \text{ grad} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial z} \\ \text{div } \vec{v} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$\vec{v}$: 流速, $\vec{\omega}_z$: 地球自転の角速度の鉛直成分
 g : 重力の加速度, ρ : 海水の比重
 z : 基準面からの位高, p : z なる位置の水圧
 τ : 海水のせん断応力

これを成分で書けば,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= 2\omega v \sin \varphi - g \frac{\partial}{\partial x} \\ &\times \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -2\omega u \sin \varphi - g \frac{\partial}{\partial y} \\ &\times \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= - \int_0^h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ただし, ω は u, v にくらべ相対的に $\omega=0$ としてある。上式中 τ_x, τ_y は渦粘性を用いて,

$$\left. \begin{aligned} \tau_x &= -\rho \overline{u'w'} = \epsilon_x \frac{\partial u}{\partial z} \\ \tau_y &= -\rho \overline{v'w'} = \epsilon_y \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。

ここに

u, v, w : 流速 $\vec{v}$ の x, y, z 方向の速度成分
 φ : 緯度, h : 水深, τ_x, τ_y : 海水のせん断応力 τ の x, y 方向の成分, t : 時間
 u', v', w' : x, y, y 方向の速度変動分
 ϵ_x, ϵ_y : x, y 方向の渦粘性係数

いま, 大気圧分布を実験地区内でほとんど均一とみなし, かつ水深についての平均流速を Vector 平均を用いて $\vec{V}(U, V)$ とする。

$$\begin{aligned} \vec{v} &= u\vec{i} + v\vec{j} \\ \vec{V} &= \frac{1}{h} \int_0^h \vec{v} dz \quad \text{で定義すれば} \\ \vec{V} &= \frac{\vec{i}}{h} \int_0^h u dz + \frac{\vec{j}}{h} \int_0^h v dz = U\vec{i} + V\vec{j} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

となる。式 (2) を式 (4) を用いて平均化する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \alpha_u U \frac{\partial U}{\partial x} + \beta_u V \frac{\partial U}{\partial y} &= 2\omega V \sin \varphi \\ &- g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + i_x \right) + \frac{1}{\rho h} (\tau_{xh} - \tau_{x0}) \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \beta_y U \frac{\partial V}{\partial x} + \alpha_y V \frac{\partial V}{\partial y} &= -2\omega U \sin \varphi \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} -g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + i_y \right) + \frac{1}{\rho h} (\tau_{yh} - \tau_{y0}) \\ \frac{\partial h}{\partial t} = -h \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \text{ここに}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_x &= \int_0^h \left(\frac{u}{U} \right)^2 \frac{dz}{h} \\ \alpha_y &= \int_0^h \left(\frac{v}{V} \right)^2 \frac{dz}{h} \\ \beta_x &= \beta_y = \int_0^h \frac{u}{U} \cdot \frac{v}{V} \cdot \frac{dz}{h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

式 (5) に示される基礎方程式を用いて現地を相似に再現するための条件を調べる。式 (5) で $(x, y) = L'(x_0, y_0)$, $z = D'z_0$, $(U, V) = V'(U_0, V_0)$, $t = (L'/V')t_0$, $\tau = \tau'\tau_0$ とおき dash' のついた量はそれぞれの量を測る適当な尺度とすれば Suffix 0 のついた量はすべて無次元である。このとき式 (5) は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U_0}{\partial t_0} + \alpha_x U_0 \frac{\partial U_0}{\partial x_0} + \beta_x V_0 \frac{\partial U_0}{\partial y_0} &= \left(2\omega \frac{L'}{V'} \sin \varphi \right) V_0 \\ &- \frac{gD'}{V'^2} \left(\frac{\partial h_0}{\partial x_0} + i_{x_0} \right) + \frac{\tau' L'}{V'^2 D' \rho} \cdot \frac{1}{h_0} (\tau_{xh_0} - \tau_{x_{00}}) \\ \frac{\partial V_0}{\partial t_0} + \beta_y U_0 \frac{\partial V_0}{\partial x_0} + \alpha_y V_0 \frac{\partial V_0}{\partial y_0} &= - \left(2\omega \frac{L'}{V'} \sin \varphi \right) V_0 \\ &- \frac{gD'}{V'^2} \left(\frac{\partial h_0}{\partial y_0} + i_{y_0} \right) + \frac{\tau' L'}{V'^2 D' \rho} \cdot \frac{1}{h_0} (\tau_{yh_0} - \tau_{y_{00}}) \\ \frac{\partial h_0}{\partial t_0} &= -h_0 \left(\frac{\partial U_0}{\partial x_0} + \frac{\partial V_0}{\partial y_0} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) が実物, 模型で同一であるためには

$$\begin{aligned} \alpha_{xr} &= \alpha_{yr} = \beta_{xr} = \beta_{yr} = \left(2\omega \frac{L'}{V'} \sin \varphi \right)_r \\ &= \left(\frac{gD'}{V'^2} \right)_r = \left(\frac{\tau' L'}{\rho V'^2 D'} \right)_r = 1 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

であればよい。ここで Suffix r は模型と実物の比であることを示す。式 (8) の関係を満足するように諸量を定める。 α, β は式 (6) に示す無次元量で, 流速の鉛直分布に關係し, ほぼ 1 であるからその比の値もまた

$$(\alpha_{xr}, \alpha_{yr}, \beta_{xr}, \beta_{yr}) \doteq 1 \dots\dots\dots (9)$$

次に重力項は

$$\left(\frac{gD'}{V'^2} \right)_r = \left(\frac{D'}{V'^2} \right)_r = 1 \quad \therefore V'_r = D_r'^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

また

$$V'_r = \frac{L'_r}{T'_r} \quad \therefore T'_r = \frac{L'_r}{D_r'^{1/2}} \dots\dots\dots (11)$$

粘性項については

$$\left(\frac{\tau' L'_r}{\rho V'^2 D'} \right)_r = \frac{\tau'_r L'_r}{\rho_r D_r'^2} = 1 \quad \therefore \tau'_r = \frac{\rho_r D_r'^2}{L'_r} \dots\dots\dots (12)$$

式 (3) を用いて τ を渦粘性係数で置きかえれば

$$\epsilon'_r = \frac{\rho_r D_r'^{3/2}}{L'_r} \dots\dots\dots (13)$$

また, 式 (12) を粗度係数 n で置きかえれば

$$n'_r = \tau_r'^{1/2} / (\rho_r^{1/2} D_r'^{1/2}) \dots\dots\dots (14)$$

地球自転による偏向力については

$$\left(2\omega \frac{L'}{V'} \sin \varphi\right)_r = 1$$

ω は地球自転の角速度であるから一定であり、 φ は緯度で、模型 (平塚市) で $\varphi = 35^\circ 20'$ 、現地伊勢湾で $\varphi = 35^\circ 40' \sim 35^\circ 50'$ である。よって $L_r'/V_r' = 1$ である。この条件は式 (10) による条件と同時に成立させることはできない。したがってこれが条件を満足させるためには、

$$\omega_m = \left(\frac{D_r'^{1/2}}{L_r'} - \frac{\sin \varphi_m}{\sin \varphi_p} \right) \omega \sin \varphi_p \dots\dots\dots (15)$$

ここに Suffix m, p はそれぞれ模型および実物であることを示す。

流量 Q については

$$Q_r' = V_r' L_r' D_r' = D_r'^{3/2} L_r' \dots\dots\dots (16)$$

次に湾の固有振動について考察する。共振周期を θ とすれば波速 c 、湾の Scale をあらわす長さを l 、 α を補正係数として、

$$\theta = \frac{\alpha 4 l}{c}$$

$$\theta_r = L_r' \cdot D_r'^{-1/2} \dots\dots\dots (17)$$

ただし $c = \sqrt{gh}$ なる長波の波速としてある。式 (17) は重力項による時間縮尺式 (11) と同じであり、一見なんらの考慮も要しないようであるが、これは抵抗を考慮しない長波波速を用いているため式 (12)~(14) による抵抗項の設定を行なえば式 (11)~(17) は若干の相違を生ずる。

以上の諸式にこの実験における数値、すなわち平面縮尺 1/1 000、鉛直縮尺 1/65 としてそれぞれ代入すると次のとおりである。

$$L_r' = \frac{1}{1000}, D_r' = \frac{1}{65}, T_r' = \frac{1}{124}$$

$$\tau_r' = \frac{1}{435}, \varepsilon_r' = \frac{1}{34.1}, n_r' = \frac{1.95}{1}$$

$$\omega_n = 5.06 \times 10^{-3}, v_r' = \frac{1}{8.06}, Q_r' = \frac{1}{524000}$$

4. 潮流抵抗測定実験

先に考察した諸量の中でも特に粘性項については不明な点が多く、しかもこの実験では粘性項が重要な役割を果たしているからその設定はきわめて重要である。なお、これに関する現地資料ははなはだ不十分である。この実験では最終的には試行錯誤的に潮流抵抗の調整をしなければならないが、あらかじめこの概値を知り、また最終的に調整された抵抗がいかなる数値であるかを知るために、潮流抵抗に関する予備実験を実施した。

実験に用いる潮流抵抗体として所定の抵抗値を与える以外に、いかなる条件のものを用いるかについては、次の性質を考慮して定めた。まず第一に乱れについて考えるに模型について $Re_c = 2000$ として安定領域と不安定領域を図示すれば図-4 に見るとおりである。模型実験における流れはその比較的多くの部分が安定領域内の流

れに属する。他方相似律から要請される渦粘性は 1.5~6.0 CGS (現地における渦粘性は 50~200 CGS として) 程度である。したがって抵抗体はずい所においてかく乱因子を与えるものであることが望ましい。第二に運動量の輸送については上記のようにかく乱因子を布設して所期の乱れ、したがって、渦粘性による運動量輸送を期待することは困難と思われるため、抵抗体は水表面近くまで与える必要があろう。また、このことは抵抗値の調整範囲から考えても底面における凹凸程度で、深水部の抵抗値は与えることが不可能である。

以上の観点から抵抗体として写真-3 および図-7 に見るようなサンフレックスを針金でこんだものを水底にとりつけることにした。

実験に用いた抵抗体の諸元は表-1 に示すようであり、これらによる実験結果を粗度係数 n で整理すると図-5 に示すようである。抵抗体を規定する量として、抵抗体の水中における見掛け容積の割合をもって示し、これを見掛け容積率 λ と称した。図-5 における λ はこの値である。抵抗体の水中における分布、位置による影響はほとんどなく、一意的に λ によってほぼ定まることが見られる。

図-4 層乱流の境界

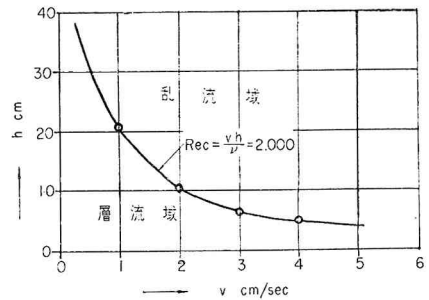


写真-3 抵抗体



図-5 潮流抵抗測定実験装置

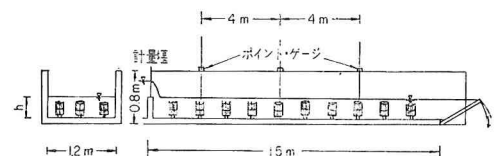


表-1 抵抗力の諸元

種別	D	H	m ² 当り	λ	摘要
1	5 cm	15 cm	9	0.035 h	
2	10	15	9	0.133 h	
3	10	30	9	0.263 h	
4	10	30	8	0.192 h	
5	5	15	2	0.059 h	
	10	30	4		

図-6 λ と n の関係

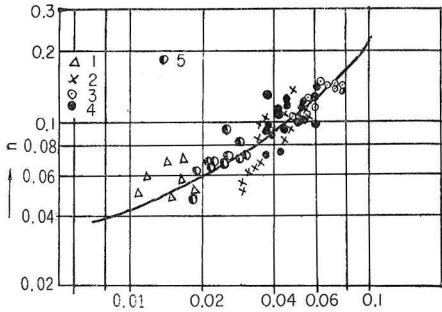
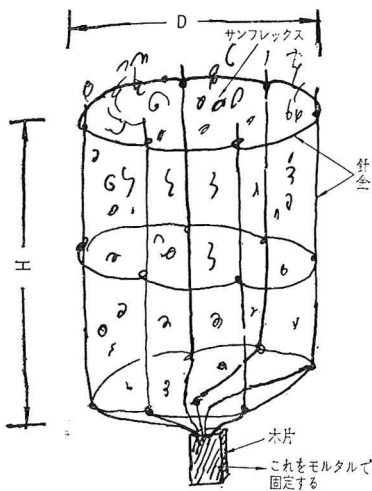


図-7 抵抗力



5. 流量係数測定実験

潮汐、高潮に対する高潮防波堤の影響はその開口部からの流出量が支配的な因子となる。模型は既述のように、ひずめた模型であり、堤防の開口部における流量係数が大きく影響する。このため次式

$$Q=CBH\sqrt{2g\Delta H}$$

ただし、C：流量係数、B：開口幅、H：水深、
ΔH：内外水位差

が成立する領域内で流量係数 C と B/H の関係を R_{ec} 、 F_r などをパラメーターとして観測した。実験装置は幅 1.2m、長さ 18m の水路と 10m×10m の平面水槽の2つを用い、堤防の開口部を設けて、流量、流速、水位、水深などを測定した。写真-5 はその装置を示すものである。

6. 平面水槽本実験

本実験は平面縮尺 1/1 000、鉛直縮尺 1/65 の地形模型をつくった。模型範囲は図-1に見るとおりであり、津—富見崎を結ぶ線以内にとった。写真-6 はその全景である。

河川模型は河口から 12 km の地点まで入れ、感潮域までの水面積に等しく導水路を設けた。写真-7 は模型における木曾三川河口と鍋田干拓地周辺である。

境界条件の設定は、潮波発生装置による潮汐の発生、河川流発生装置による木曾、長良、揖斐、庄内の各河川の河川流、沿岸流発生装置による恒流の発生を同時に行なって境界条件を現地と相似に設定し、後、海域における抵抗調整を行なって各校潮所（津、四日市、名古屋、

写真-4 潮流抵抗測定実験水路

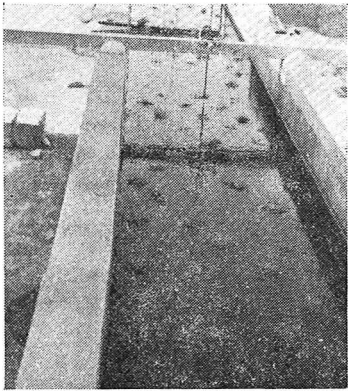


写真-5 流量係数測定実験（平面水槽）

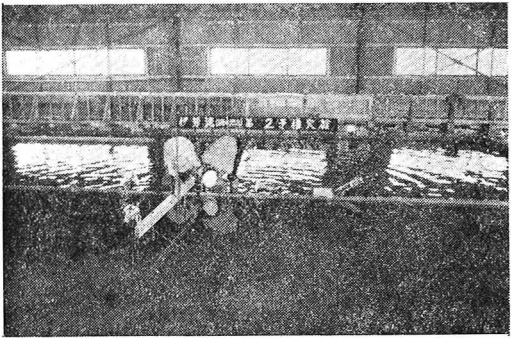


写真-6 伊勢湾模型全景（名古屋港から湾口をのぞむ）

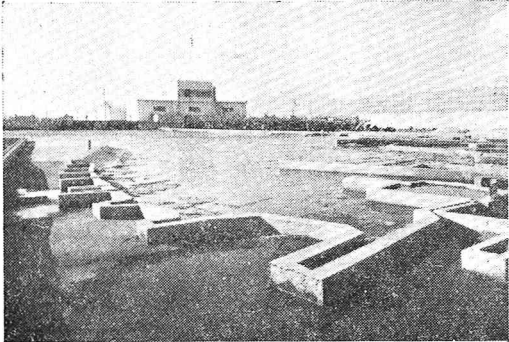


写真-7 鍋田干拓地周辺
(木曾三川河口より名古屋港をのぞむ)

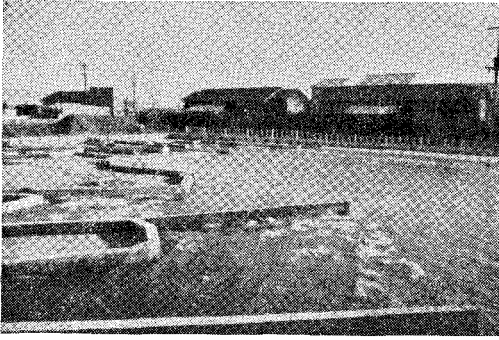


図-8 名古屋港における共振周期の頻度

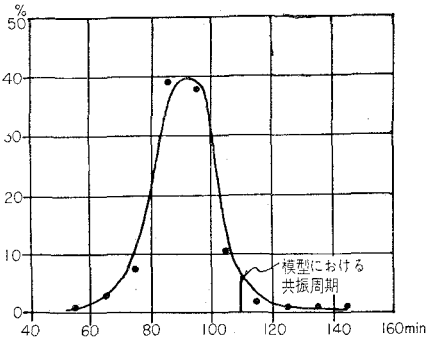
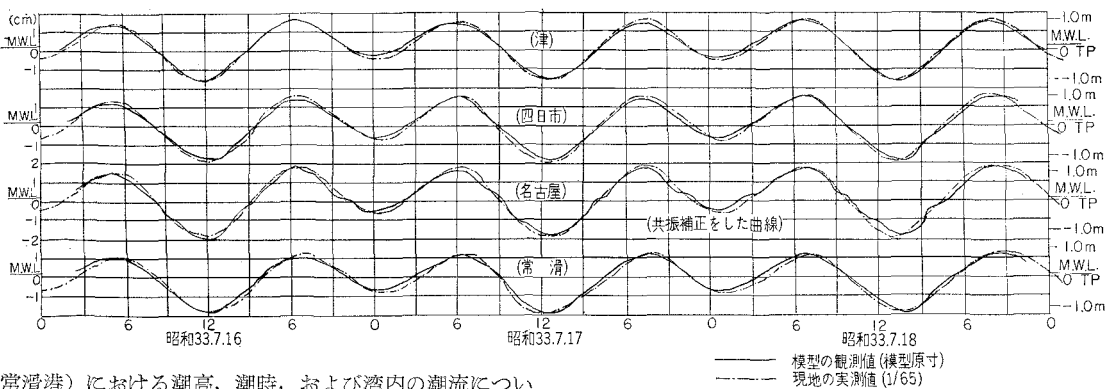


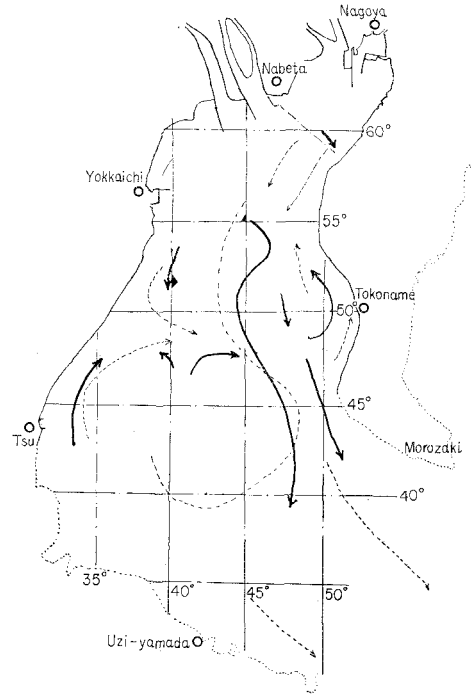
図-10 潮位曲線の実測値の比較



常滑港)における潮高, 潮時, および湾内の潮流について相似性を確認するものである。その後において高潮防波堤建設など海域の変化による海象の変化をとらえた。

セイシュについては名古屋港で顕著にあらわれ, その共振周期は現地名古屋の記録は図-8に示すとおりであり, 模型においてはいくぶん過大であるが現地資料の分析を深めて今後の解析に待たなければならない。図-9は沿岸流発生装置によって発生させた恒流の記録を現地の観測と比較したものである。図-10は一例として昭和33年7月16日~7月18日の3日間を用いて模型における潮位計記録と現地伊勢湾における検潮記録を比較したものである。このとき模型における海域の潮流抵抗は $n_m=0.11\sim0.08$ であり, これから現地の n を逆算すると $n_p=0.06\sim0.04$ が類推される。

図-9 恒流の観測
(図中の実線は模型で観測した恒流で, 点線は現地の実測である)



7. 結 言

以上, 今回の報告は主として潮汐現象を中心にまとめた。この実験は完全相似を目標に運動方程式, 連続方程式にあらわれる各項について考慮を払った。地球自転による偏向力については相似律の要請するような回転を模型に与えることはできないが, これは間接的に恒流の設定という形で補足した。この実験は大別して相似性の確認, 潮汐現象の実験, 高潮実験において対象地区(高潮防波堤近傍)における高潮潮位を与えた場合の実験, 伊勢湾全域に波面応力を与えて高潮潮位と重ねた場合の実験, この4つの段階が考えられるが今回は前2者および3の一部についてまとめた。これらの実験結果の詳細は当日報告する予定である。