

潮流を含む水理模型実験の相似性について*

速水頌一郎・樋口明生・吉田幸三

ON THE SIMILITUDE OF HYDRAULIC MODELS INVOLVING TIDAL MOTION

by Dr. Sci. Shōitirō HAYAMI, Haruo HIGUCHI and Kozo H. YOSHIDA

Synopsis

Conditions of dynamical similitude in the mean motion between a prototype which involves tidal motion and its model are given by

$$\text{drag coefficient ratio : } C_2/C_1 = \alpha/\beta$$

and

$$\text{Froude number condition : } \gamma^2\beta/\alpha^2 = 1$$

where $1/\alpha$, $1/\beta$ and $1/\gamma$ are horizontal, vertical and time scale, respectively, of the model with respect to its prototype and C is the drag coefficient, where suffixes 1 and 2 mean the prototype and the model, respectively. These conditions contain four unknowns C_2/C_1 , α , α/β , and γ , so that at least one more condition is required to determine scale values of the model which is dynamically similar to the prototype. In order to derive the required condition, a field observation of tidal current is made in Hiroshima Bay as a prototype and a series of hydraulic model experiments are carried out for this prototype under the conditions such that $\alpha=500$, $\alpha/\beta=8$, 4 and 2, and γ satisfies the Froude number condition. The comparison and analysis of the field observations and the model experiments show that (i) a very good similitude is observed for the case $\alpha/\beta=2$, (ii) Blasius' formula of drag coefficient obtains for a tidal current in the model, if Reynolds number is constructed with the maximum tidal current velocity and tidal excursion, (iii) a relation between Reynolds number of the prototype (Re_1) and that of the model (Re_2) such as

$$Re_2 = Re_1/(\alpha\sqrt{\beta})$$

which is theoretically derived for the dynamically similar prototype and model, is experimentally justified. Putting Re_2 given above into Blasius' formula for the model, the required condition is obtained as

$$C_2 = \frac{1.328}{\sqrt{Re_1}} \alpha^{1/2} \beta^{1/4}.$$

With this condition, the drag coefficient condition changes into

$$C_1 \sqrt{\alpha Re_1} / 1.328 = \beta^{5/4}$$

which enables us, with Froude number condition, to determine the vertical scale $1/\beta$ and the time scale $1/\gamma$ of the model for a given horizontal scale α of the model.

ま え が き

わが国の漁業人口はおよそ 200 万人あるが, その大部分は沿岸漁業の従事者である。わが国の沿岸漁業は

* 臨海工事による沿岸海域の生産力向上に関する研究 (Ⅲ)

もつばら海岸の地先で行なわれており、農業とおなじくきわめて零細である。わが国の海岸線の延長を $2.5 \times 10^4 \text{ km}$ とみれば、漁業人口1人当りの平均はわずか12mであつて、沿岸海域の生産性を飛躍させないかぎり、生活水準の向上は望めない。

海洋法制定の国際会議にもみられたように、各国とも領海の範囲を大陸棚海の全域にまで拡大しようとする傾向が強い。その主張の根拠は国土に対する新しい観念である。大陸棚は大陸塊の一部であり、その傾斜は概して 1° 内外であるから、大陸棚海の限界を水深200~300mとすれば、それは距岸およそ8カイリの海域となる。これは陸地の影響下にある海域である。

海洋の生産力は海洋において生産される生体量、あるいは生体生産の可能量を意味する。海洋における生産量は巨大な量に達するけれども、海洋の広大な面積を考慮すると、その密度はきわめて低いのであつて、この点からいえば遠洋はおおむね海の砂漠である。これに反して浅海の生産力は、その総量こそ遠洋にくらべて少ないけれども、その密度はケタがちに大きい。これは陸地や沿岸海域の影響によるものである。これらの影響は主として海岸を通じて行なわれるものであるから、海岸附近の海面を人工的に統制することができるならば、浅海の生産力を制御できるであろう。近年における海岸工学の発展は、領海拡大の主張と表裏をなすものである。

今日、地域の開発は陸地を主体として考慮されており、浅海域は元来これと一系をなすものであるにもかかわらず、別の世界として取り扱われているが、沿岸海域を国土の一環とした総合開発が企図され、海岸工事によつて浅海の自然が改造されるならば、浅海の開発には無限の可能性が生れ、沿岸水産業ははじめて合理的基礎の上に運営されるであろう。この理想を実現するには、海岸の統制によつて、いかなる変化が沿岸海洋に起こるかを理解しなければならない。

海洋における物理量の分布は一般に物理量の保存則から導かれる放物線型の微分方程式によつて規定される。この方程式を解くには境界条件が必要であるが、これは海岸、海面、海底などの条件によつて与えられる。海岸工事によつて統制されるのは主として海岸の条件である。

生産力に關係する主要な物理量は海水にふくまれる物質と海水の運動量である。前者の一部は生体の構成物となり、また生体活動のエネルギー源となるものであるが、浅海においては主として陸地または沿岸海域から供給される。後者は物質の運搬者であつて、浅海において重要なのは潮流である。海岸工事によつて直接に影響されるのは海水の流動であり、物質の分布に対する影響は流水を通じて2次的に起こる。この意味において、海岸工事による海洋統制の主要な対象は流れである。物質の運搬者としての流れの重要なものは潮流およびこれに付随した各種の振動であるが、その効果は巨視的には大規模の拡散作用とみなされる。しかしながら、海岸工事によつてこれらの流れがいかに変化するかを知ることは決して容易ではない。海岸工事による沿岸潮流の変化を求めるには二つの方法が考えられる。その一つは運動方程式の数値積分による方法であつて、ある程度まで理論的に可能である。他の一つは水理模型実験による方法であつて、この報告の主題とするところである。

1. 相似性の理論的考察

水理模型実験において最も重要な問題は原型と模型における力学的相似性である。原型における現象をすべての面について模型において相似させることは原理的に不可能であるから、ここにいう相似性とは現象のうちから抽出されたある特定の関係が原型と模型において相似性を保持することを意味する。このような相似性が保たれた場合に、はじめて水理模型実験は意味をもつのである。ここに当面している問題は海岸工事による潮流の変化を水理模型実験によつて求めることであるが、この場合の相似性についてはつぎのように考える。

潮流は水平方向に卓越しているから、水平面上の平均流速を U_j ($j=1, 2$) で表わすと、 U_j を規定する方程式は近似的に

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + s U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{C}{2H} U_j^2 - g \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされる。ここに t は時間座標, x_i ($i=1,2$) は空間座標で, 添字 1, 2 は水平方向を表わす。なお, 添字 3 で鉛直方向を表わすことにする。また ζ は鉛直方向の水面昇降量, C は摩擦係数 (drag coefficient), g は重力の加速度, H は水深, s は流速の鉛直分布に関係した 1 に近い値の係数である。潮流の顕著な沿岸の浅海では, 密度分布に起因する力は河口は別として一般に (1) の各項にくらべて小さいから一応省略する。また問題にしている現象に対しては Rossby 数が大きいから, Coriolis の力も省略する。また, 海面条件として風の応力は重要であるが, 潮流を主体に考えているからこのさい考慮しない。水平混合を無視したのは水平混合の原因と考えられる潮流に起因する不規則な流動自体をも対象としているからである。

いま, 原型に関する量には添字 1 を, 模型に関する量には添字 2 をつけることにし, 原型と模型との関係を

$$t_1 = \gamma t_2, (x_i)_1 = \alpha (x_i)_2, (x_3)_1 = \beta (x_3)_2 \dots\dots\dots (2)$$

α, β, γ : 比例常数, $i=1, 2$

で表わし, (2) を (1) に代入すると

$$\frac{\partial (U_j)_2}{\partial t_2} + s (U_i)_2 \frac{\partial (U_j)_2}{\partial (x_i)_2} = -C \frac{\alpha}{\beta H_2} (U_j)_2^2 - \frac{g \gamma^2 \beta}{\alpha^2} \frac{\partial \zeta_2}{\partial (x_j)_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

が得られる。したがって, $s_1 \cong s_2$ とすれば, (1), (3) から原型と模型が平均流速について力学的に相似であるための条件として

$$C_2 = \frac{\alpha}{\beta} C_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\gamma^2 \beta}{\alpha^2} = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

が得られる。(5) は空間縮率に対する時間縮率を規定する条件を表わし, Froude 数を合致させることに相当し, (4) は模型の摩擦抵抗を規定する式である。水量の連続方程式は密度が均一であるから縮率によつて影響されない。

C_1 と C_2 の比がわかつておれば, α, β, γ のうちいずれか一つを指定すると, 他の二つは (4), (5) によつて決定される。 C は Reynolds 数の関数であつて, C_1 は乱流の抵抗係数に対応するが, C_2 は普通の模型実験では層流の抵抗係数に対応するものと考えられるから, $C_2/C_1 = 2 \sim 3$ 程度と想像されるが, 潮流の場合にこの比がどれくらいであるかはよくわからない。この比がわからないと, (4), (5) だけでは α, β, γ を決定することができない。われわれはこの比を明らかにしたい

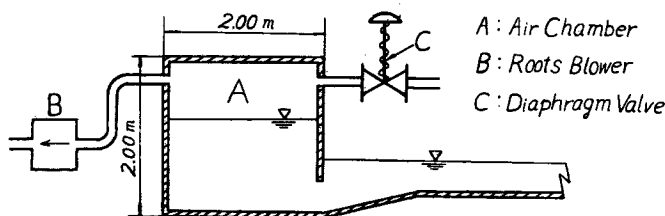
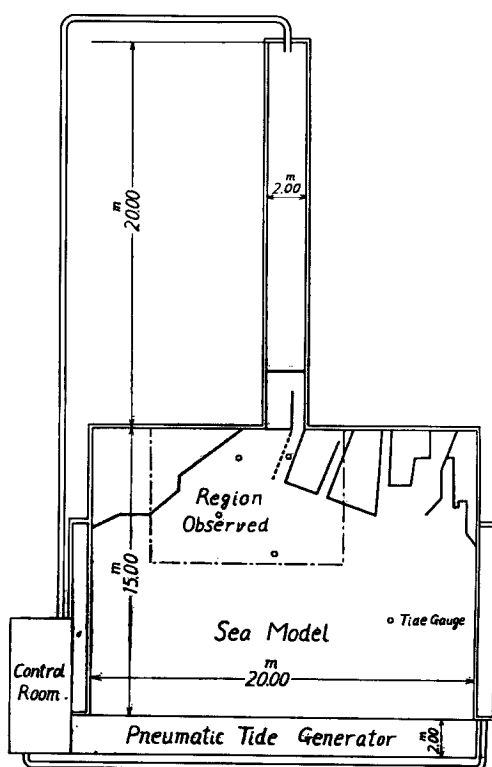


Fig. 1. Experimental facilities.

と思い、これを実験的に吟味することを試みたのである。すなわち、 α , α/β を与えると γ は (5) によって定まるから、 α を指定し、 α/β を種々に変えた模型実験を行ない、その結果を原型における観測結果と比較して、両者が最もよく相似する場合の α/β を見出そうとした。

この考え方は、(4), (5) が満された場合に、模型と原型とは平均流速に関して相似性を保持することを前提としている。理論的にはそのように考えられるが、実際には果してどの程度まで相似するものであろうか、興味をそそる問題である。

2. 模型実験と現地観測

実験は防災研究所の海岸河口水利実験施設によつて行なつた。この施設は Fig. 1 で示したように海岸にそつて巾 20 m, 沖に向つて奥行 15 m, 深さ 0.5 m のコンクリート水槽をもつて沿岸海域としたもので、海岸の中央部から陸地に向つて巾 2 m, 長さ 20 m のコンクリート床板を打ち、河川の模型をこれに設ける。また沖合の前面には巾 20 m, 奥行 2 m, 高さ 2 m のコンクリート槽があり、その下端は水面下で開放され、槽内の水は外部と連絡している。送風機によつてこの槽内の空気を排除すると、圧力低下に伴なつて模型内の水は槽内に上昇し、空気を流入させると槽内の水は模型内に出る。要するに大規模な気圧式潮流発生装置であつて、流入、流出空気量の自動制御装置によつて随意の潮汐がつくられる。河口、海底の地形は砂でつくることにし、この実験では細砂を用いた。模型の流速は層流域にあつたから、底質は全く移動しなかつた。

原型としては広島港の一部、太田川の洪水放水路として現在改修中の福島川(巳斐川)から西側の海域を択んだ。模型にとりいれた部分はかなり広く、その範囲は Fig. 2 に示すようである。この海域を択んだ理



Fig. 2. Prototype.

由は内海区水産研究所がこれを詳細に調査していて、研究上の便宜が得られるばかりでなく、建設省が福島川の右岸堤として、長さ約 1.5 km の導流堤を海中に築造する予定であり、これの完成による同海域の海況変化に大きい関心が寄せられているためである。この原型水面における観測についてはすでに報告したものがあるから、その詳細は省略するが、要点だけをのべると、この水面に多数の観測点を設定し、各測点において表面下 50 cm の流速および流向を測定した。測定は漲潮時および落潮時に行ない、流速は浮標を用い、浮標につけたヒモの長さにより、流向はコンパスによつて測つた。浮標を用いたのは流速が微弱であり、そのうえに同一地点であつても流速、流向の変動がともにはなはだしかったからである。

この原型にしたがつて上記の実験施設に模型をつくた。縮率は $\alpha=500$ 、すなわち水平縮率を 1/500 にした。水槽の巾は 20 m あるから 10 km の海岸が収容できたわけである。模型の水面に近く白い糸を縦横に

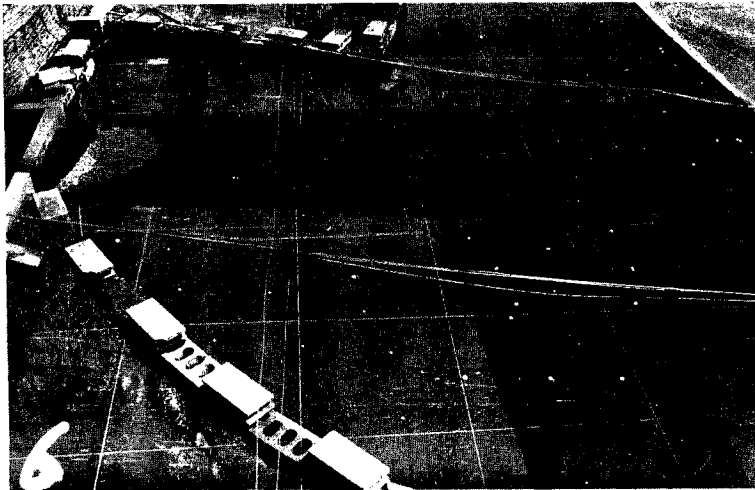


Fig. 3. Floats used for the current measurements in the model.

張り、1m 正方の網目をもつて水面をおおつて位置の座標にした。水面には水の比重にちかい多数の小さい浮子を浮べ、これを高さ 3m のヤグラの上から 1 min に 1 回の割合で撮影し、浮子の軌跡を追跡して各点の流線と流速を求めた (Fig. 3)。また、水中の 5 カ所に電気水位計を設置し、ペン書きオッシログラフによつて潮位を記録した。潮浪の進行方向は原型における沖合の観測値を参考にして定めた。福島川の放水量は改修工事のため観測当時はほとんどなかったから模型ではこれを無視した。

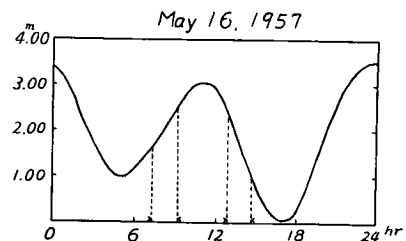


Fig. 4. Tidal curve. Periods of current observations are indicated by dotted lines.

Table 1

1957年 5月16日																								
時刻(時)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
風 向	NNE	"	"	"	"	"	"	"	"	"	S	SSW	SW	"	"	SSW	SW	"	"	"	NNE	"	"	"
風速($\frac{m}{sec}$)	5.5	6.1	6.5	7.6	5.7	5.7	5.4	3.6	2.4	2.8	4.6	1.3	4.2	1.3	4.2	3.8	3.6	1.3	4.8	0.2	2.6	4.6	3.8	4.0

日の結果を示したものである。広島地方気象台の観測によると当日の風は **Table 1** のようであつた。

この観測には 4 隻の観測船を同時に使用したが、全測点の観測にはおよそ 2 時間を要した。したがつて、この図は同一時刻の潮流を正確には表わしていない。図にみるように流速は一般に微弱であつて、20 cm/sec を越えるものはまれである。とくに、5 m の等深線附近では漲潮時、落潮時ともに流速がきわめて弱いのは注目される。5 m 等深線より奥は水深が急減して 2 m、あるいはそれ以下となり、沖に向つては水深が急増して 10 m 以上となる。すなわち、この線を中心として海底は段落ちを形成しており、太田川デルタの前線を表わしている。底質はこの線より奥では砂、沖では泥である。

この原型に対応する模型実験としては、 $\alpha/\beta=8, 4, 2$ の三つの場合を実験した。いずれの場合にも $\alpha=500$ とした。観測した潮流は半日周潮とみられるから、その周期を 12 h とみなして、(5) から α, β の値に対応する γ の値を求めると、それぞれ $\gamma=63, 45, 32$ となる。よつて、模型潮汐の周期をそれぞれ 11.5, 16, 22.5 min とした。また原型での標準潮差を 2.5 m とし、模型ではこれを β の値に応じて縮小した。**Fig. 7** は模型潮汐の記録の一例を示したもので、

Fig. 1 に示した検潮点のうち最も沖側の記録である。

予備実験の成果によると、実験施設が屋外にあるため、風の影響が意外に大きいことが判明したので、応急措置として、実験中は施設を葦簀で囲い、これにポリエチレンのおおいをかけて風を防いだ (**Fig. 8**)。しかし、完全には風を防ぐことができなかつたので、風の弱い日を選んで実験した。

実験の結果は **Fig. 9~14** に示されている。これらの図は **Fig. 5, 6** との比較

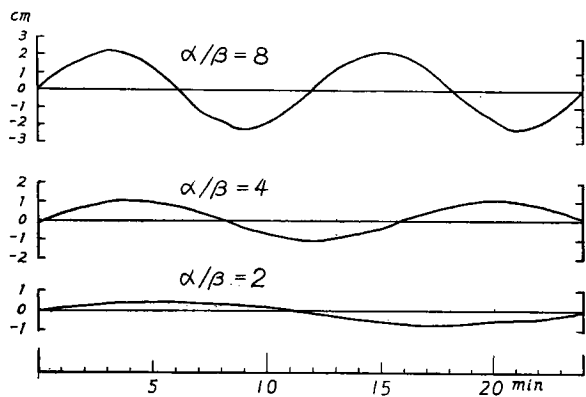


Fig. 7. Tidal curve in the model.

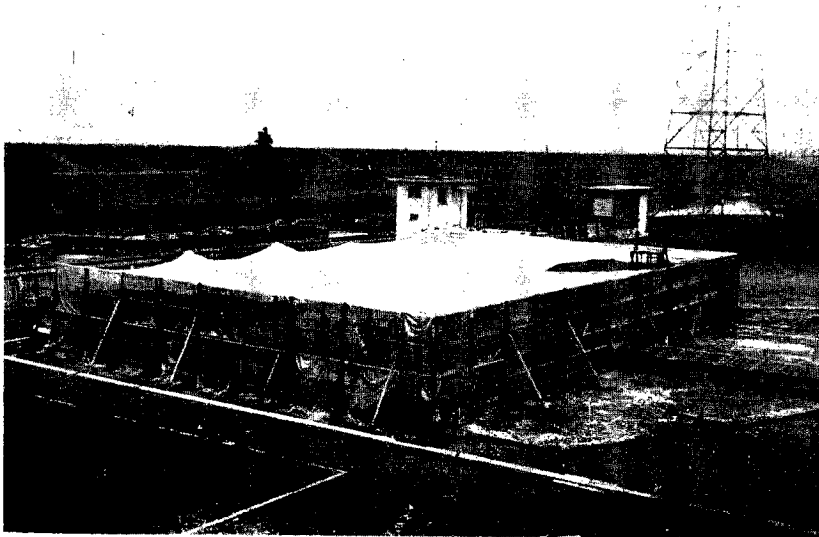
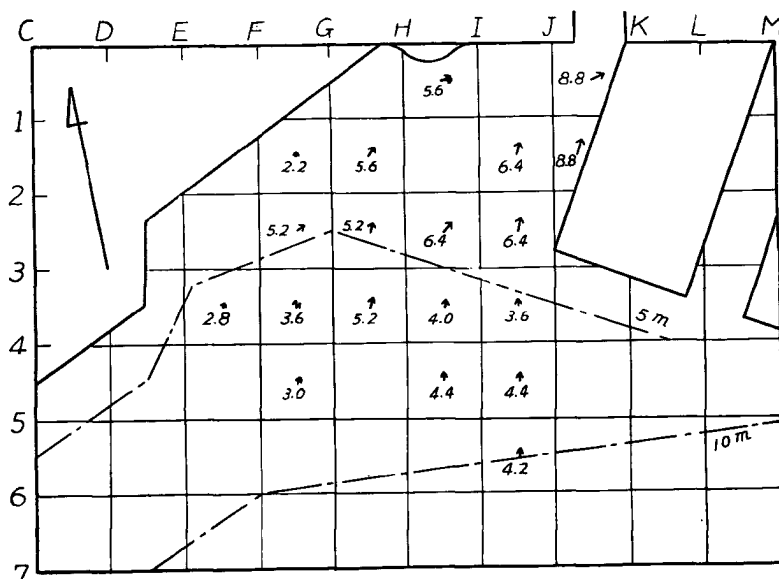
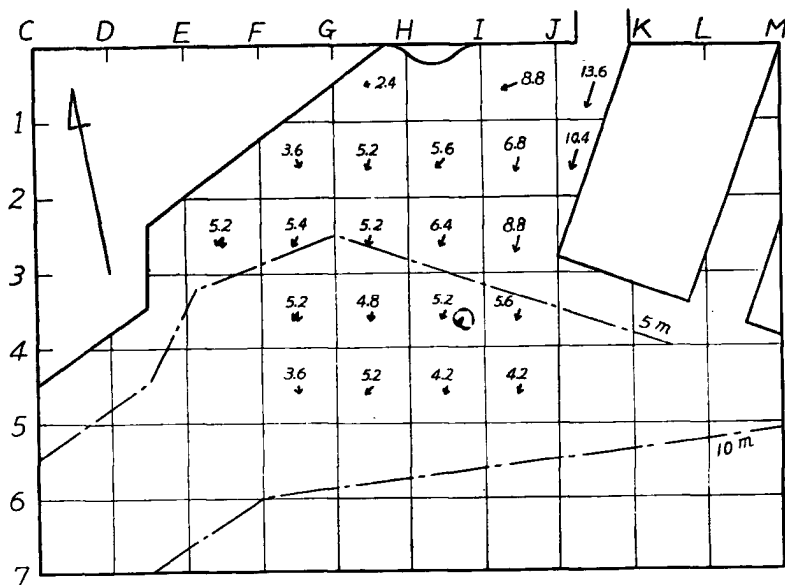
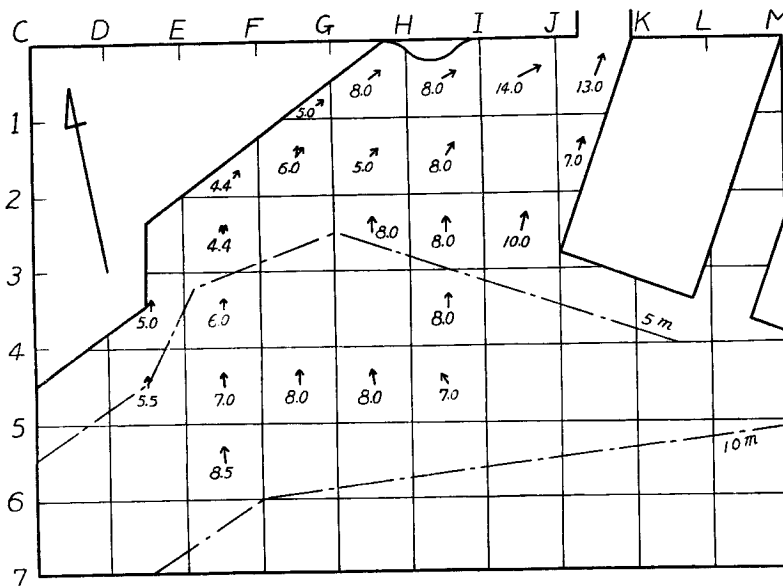
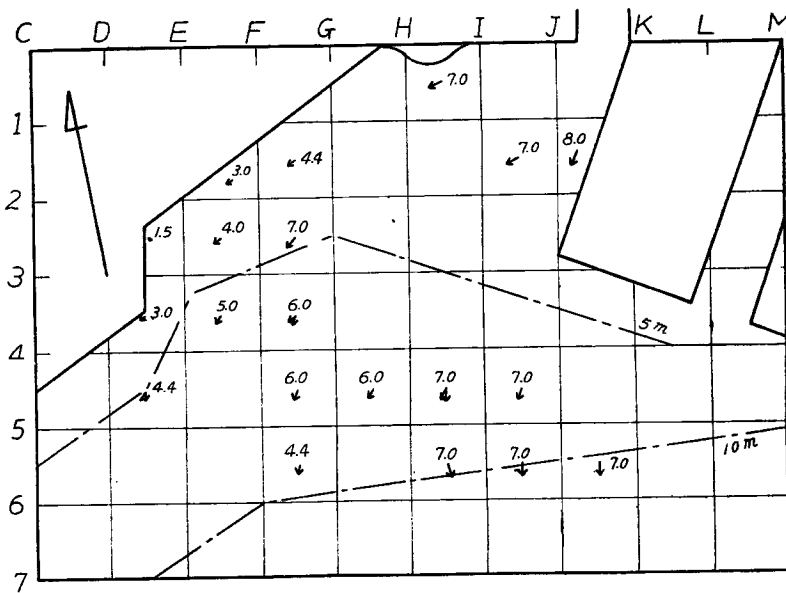


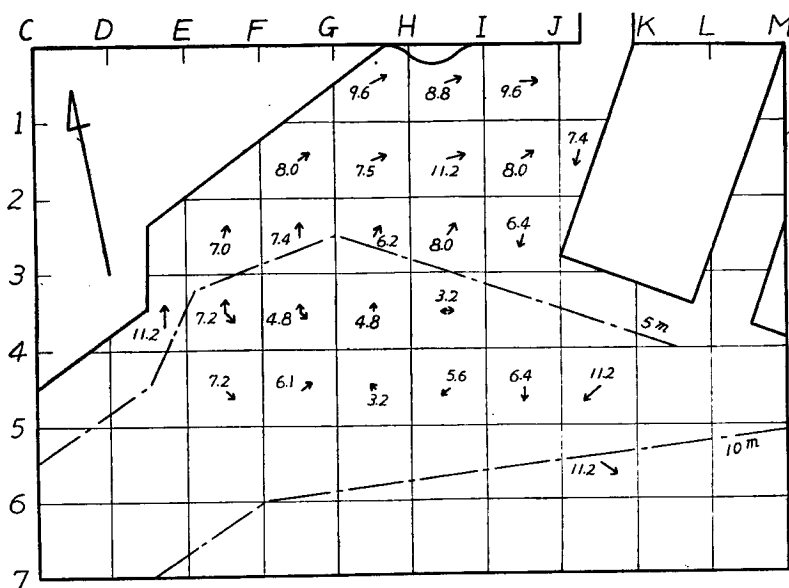
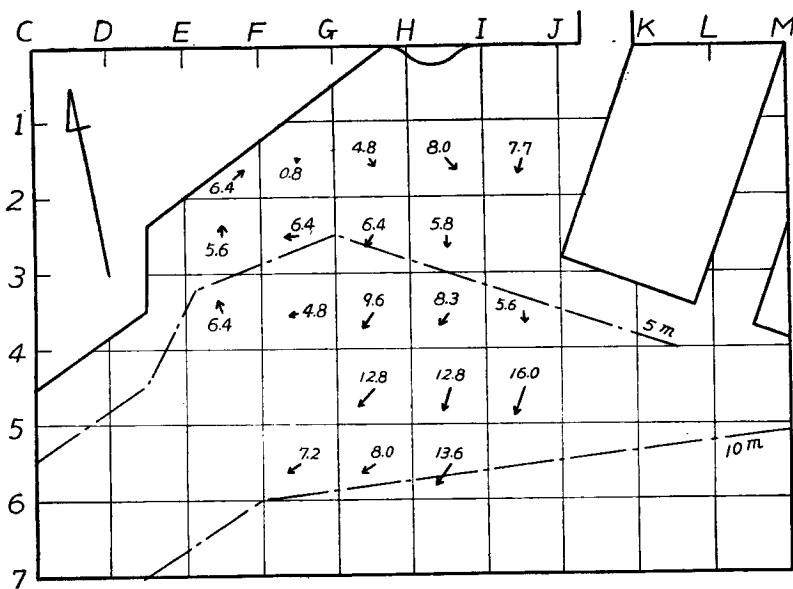
Fig. 8. Wind protection cover of the model.

Fig. 9. Pattern of the maximum rising current. Model, $\alpha/\beta=8$.Fig. 10. Pattern of the maximum falling current. Model, $\alpha/\beta=8$.

のために、最大流速附近の潮流だけを示したものである。実験結果の全般については別の機会に報告したい。Fig. 9, 10 は $\alpha/\beta=8$ の場合、Fig. 11, 12 は $\alpha/\beta=4$ の場合、Fig. 13, 14 は $\alpha/\beta=2$ の場合である。図の流速は縮率から導かれる関係式 $(U_j)_1 = (\alpha/\gamma)(U_j)_2$ によって、模型から原型にひき直した値である。これらの図をみると、 $\alpha/\beta=8$ の場合には流速は原型にくらべて小さく、また原型とちがつて沖から河

Fig. 11. Pattern of the maximum rising current. Model, $\alpha/\beta=4$.Fig. 12. Pattern of the maximum falling current. Model, $\alpha/\beta=4$.

口に向つて漸増している。 $\alpha/\beta=4$ の場合にも一般に流速は原型にくらべて小さく、また原型とちがつて流速はどこでもほぼ変わらない。これに対して $\alpha/\beta=2$ の場合には流速は原型にはほぼ近く、5m 等深線の近くでは流速が減少しており、また漲潮時には福島川左岸突堤の先端付近で原型と同様な反流がみられ、落潮時には井口前面で原型と同様な渦流がみられる。すなわち、この場合には定性的にも、定量的にも、原型と模

Fig. 13. Pattern of the maximum rising current. Model, $\alpha/\beta=2$.Fig. 14. Pattern of the maximum falling current. Model, $\alpha/\beta=2$.

型における潮流は相似している。観測や実験に付随している各種の誤差を考慮すると、両者の相似はきわめて良好であるとさえいえるであろう。

4. 考察

うえにのべた実験の結果から判断すると、この実験の条件では摩擦係数の比として

$$\frac{C_2}{C_1} = 2 \dots\dots\dots (6)$$

とおけるようである。摩擦係数 C は一般に Reynolds 数 (Re) の関数であるが、層流に対しては両者の関係は Blasius の公式によつて十分に表現できるといわれている。すなわち、

$$C = \frac{1.328}{\sqrt{Re}}, \quad Re < 10^5 \dots\dots\dots (7)$$

この公式は定常流に対して成立するものであるが、潮流のようなゆるやかに変化する流れに対しても平均的に成立するものと考え、この場合の $Re(UL/\nu)$ として、 U に潮流の最大流速、 L に潮流の最大流動距離（憩流からつぎの憩流までに流れる距離）をとることとする。この Re を実験の結果から計算すると **Table 2**

Table 2

α/β	8	4	2
Re	1.38×10^4	1.28×10^4	1.79×10^4

Table 3

α/β	8	4	2
C_2 (c.g.s.)	1.13×10^{-2}	1.17×10^{-2}	0.99×10^{-2}

のようになり、いずれも層流域にはいることがわかる。したがつて、これから (7) によつて C_2 を計算すると **Table 3** のようになる。

原型における摩擦係数 C_1 については、よくはわからないけれども、風や水流についての野外観測によつて、これまで $4 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ (c.g.s.) の程度といわれている。いま、 $C_1 = 4 \times 10^{-3}$ と $C_1 = 5 \times 10^{-3}$ の二つの場合を想定し、 C_2 として **Table 3** の値を採用して、 C_2/C_1 と α/β との関係を図示すると **Fig. 15** のようになる。

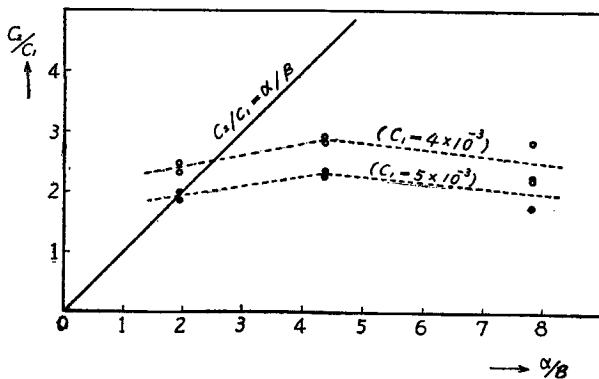


Fig. 15. Relation between C_2/C_1 and α/β (observed and theoretical).

(5) も成立している。これらの関係を原型の Reynolds 数 $Re_1\{(U_j)_1 L_1/\nu\}$ に代入すると、 Re_1 と Re_2 の関係式として

$$Re_2 = \frac{Re_1}{\alpha\sqrt{\beta}} \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。これは相似が成立しているときに原型の Re と模型の Re とが満すべき関係を表わしている。原型の観測から Re_1 の平均を求めると

$$Re_1 = 1.4 \times 10^8 \quad (U = 9.7 \text{ cm/sec}, L = 1.4 \times 10^5 \text{ cm})$$

となる。これから (8) によつて α/β の種々の値に対する Re_2 を求めると **Table 4** のようになる。ただし、 $\alpha = 500$ とした。この表からわかるように $\alpha/\beta = 2$ の場合に計算値は実験値に一致

Table 4

α/β	8	4	2
Re_2	3.4×10^4	2.5×10^4	1.7×10^4
(8)による			

しており、相以の場合に(8)が成立することを示している。(8)の Re_2 を(7)に代入して C_2 を Re_1 で表わし、この C_2 をさらに(4)に代入すると

$$\frac{C_1 \sqrt{\alpha Re_1}}{1.328} = \beta^{5/4} \dots \dots \dots (9)$$

を得る。この式は原型が与えられた場合に、これと力学的に相似な模型の水平縮率 α と鉛直縮率 β との一般的関係を与えるものである。この式によれば、われわれの実験で $\alpha/\beta=2$ の場合に相似が成立したのは $\alpha=500$ にとつたからであつて、いまかりに、 $\alpha=250$ にとれば $\beta=190$ になる。一般に α を大きくすると、 β も大きくなり、模型の水深が小さくなって実験は不可能になる。また α を小さくすれば、 β を小さくすることはできるが、この場合には模型が大きくなるから、模型の潮流が層流域のそとに出るおそれがあり、風の影響を除去することも困難になる。潮流に対する水理模型実験を計画する場合には、これらの点をよく勘案しなければならない。

5. 河口導流堤の影響

すでにのべたように、福島川の右岸堤として長さ1.5 kmの導流堤が現河口から海中に築造される予定であるが、これの竣工後に潮流がどのように変化するかは興味ある問題である。われわれは模型の相似性をたしかめたから、これとおなじ条件の下で、おなじ方法によつて導流堤完成後の模型実験を行なつた。その結果はFig. 16, 17のようである。この結果によると、導流堤によつて福島川への海水の流入が遮断されるために、導流堤以西の海域では流速が減少し、導流堤築造前の $1/2$ 以下になる。とくに、導流堤の近くでは流速の低下がはなはだしい。またその影響範囲はおよそ導流堤を一辺とする正方形の範囲とみられる。潮流による海水の交流は巨視的には一種の大規模の拡散作用とみられるが、その拡散係数は AUI で与えられる。 A は定数であるから、この係数は流速の2乗に比例する。したがつて、流速が半減すれば影響域内の拡散係数は $1/4$ に低下する。栄養物質の補給や老廃物質の排除、あるいは、塩淡水の混合などは拡散作用に基づく

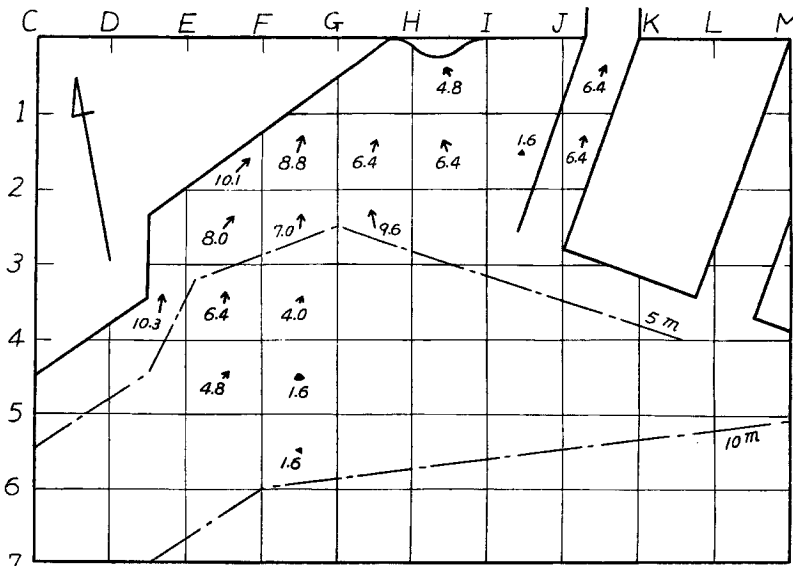


Fig. 16. Effect of the training dyke in the estuary of the Fukushima river now under planning. Pattern of the maximum rising current. $\alpha/\beta=2$.

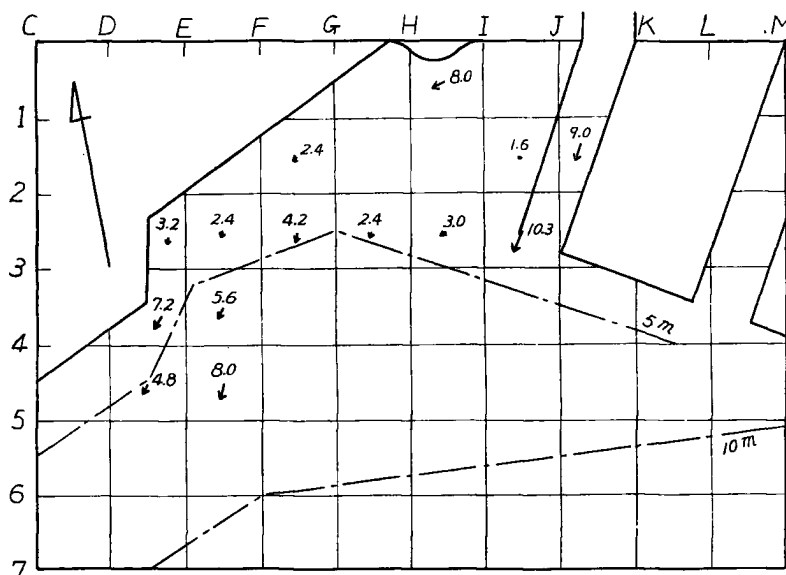


Fig. 17. Effect of the training dyke in the estuary of the Fukushima River now under planning. Pattern of the maximum falling current. $\alpha/\beta=2$.

ものであるから、影響域内の生物に対する導流堤の影響は主としてこの拡散係数の低下によるものとして取扱えるであろう。

謝 辞

この研究に原型として採用した広島港の潮流観測は内海区水産研究所の所員諸氏と京都大学地球物理学教室の国司秀明、福尾義昭の両氏が協同して行なつたものである。この機会に同研究所花岡所長をはじめ関係者諸氏に謝意を表明したい。また模型実験についての援助と実験結果に対する有益な討議をいただいた国司秀明、足立昭平両氏に厚く御礼を申しのべる。この研究は農林省農林水産試験研究補助金ならびに一部文部省科学試験研究費の援助に負うものである。ここに関係当局各位に深謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 速水頌一郎：臨海工事による沿岸海域の生産力向上に関する研究(Ⅰ)。防災研究所、1956。
- 2) 同：臨海工事による沿岸海岸の生産力向上に関する研究(Ⅱ)。防災研究所、1957。
- 3) 速水頌一郎、福尾義昭、依田大介：明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について。第3回海岸工学講演会講演集、1956。
- 4) Hayami, S., Fukuo, Y. and Yoda, D.: On the Exchange of Water and the Productivity of a Bay. Rec. Oceanograph. Works in Japan, Sp. No. 2, 1958.