

潮流をふくむ水理模型実験の相似性について

京都大学教授 理学博士 速 水 頌 一 郎

同 助手 樋 口 明 生

同 大学院 吉 田 幸 三

1. 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もっぱ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 2.5×10^4 km とみれば、漁業人口 1 人当りの平均はわずか 12 m 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 200~300 m 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が、遠洋における生産量は莫大な量に達する。しかし海の広い面積を考慮すると、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、その密度はケタちがいに大きい。これは陸地の影響によるものと思われる。陸地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、海岸付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質量と海水の運動量である。前者の一部は生体の構成物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。陸地からの物質は工場廃水などのように海岸または沿岸海域から補給されるものもあるが、大部分は陸地の内部から補給され、したがつてある程度まで陸地の開発によつて制御されるものである。これに対して、海岸工事によつて直接影響をうけるのは海水の流動であり、物質の分布に対する影響は流れを通じて 2 次的に起きる。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。

2. 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現象の相似性である。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。この場合の相似性についてはつぎのように考えられる。

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

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

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、 g は重力の加速度、 H は水深、 a 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。地球回転による偏向力についても同様である。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 p を、模型に関する量には添字 m をつけることにし、原型と模型との関係を

$$(t)_p = r(t)_m, (x_i)_p = \alpha(x_i)_m, (x_3)_p = \beta(x_3)_m \quad (2)$$

$$\alpha, \beta, r: \text{比例常数}, i=1, 2$$

で表わし、(2) を (1) に代入すると

$$\frac{\partial (U_j)_m}{\partial (t)_m} + a (U_i)_m \frac{\partial (U_j)_m}{\partial (x_i)_m} = -C \frac{\alpha}{\beta(H)_m} (U_j)_m^2 - \frac{g r^2 \beta}{\alpha^2} \frac{\partial (\zeta)_m}{\partial (x_j)_m} \quad (3)$$

が得られる、したがつて、 $(a)_p \approx (a)_m$ とすれば、(1), (3) から原型と模型との関係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

$$(C)_m = \frac{\alpha}{\beta} (C)_p \quad (4)$$

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

が得られる。(5) は空間縮尺に対する時間縮尺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縮尺によつて影響されない。

$(C)_p$ と $(C)_m$ の比がわかつておれば、 α, β, r 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、 $(C)_p$ は乱流の抵抗係数に対応するが、 $(C)_m$ は普通の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、 $(C)_m / (C)_p = 2 \sim 3$ 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, r を決めることができない。われわれはこの比を明らかにしたいと思い、これを実験的に定めることを試みた。すなわち、 $\alpha, \alpha/\beta$ を与えると r は (5) によつて定まるから、 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。これがみつければ、 C の比は (4) からただちに求められる。

この考え方は、(4), (5) が満たされた場合に、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。両者の相似が模型実験の実用性を保証する程度であるならば、これは逆に原型の現象が運動方程式によつて理論的に計算できることを保証することにもなる。

3. 模型実験と現地観測

実験は防災研究所の海岸河口水理実験施設によつて行なつた。この施設は図一1で示したように海岸にそつて幅 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幅 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。また沖合の前面上には幅 20 m、奥行 2 m、高さ 2 m のコンクリート槽があり、その下端は水面下において開放され、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。要するに大規模の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波が作られる。また河川には最大 20 l/sec までの流量を供給することができ、

流量自動制御装置によって、任意波形の洪水を出せる。河口、海底の地形は砂でつくることとし、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から西側の海域を選んだ。その位置は図-2に示すようである。この海域を選んだ理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。図-3に測点および検潮儀、自記流速計の設置点を示した。測定は漲潮時および落潮時に行い、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、その上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つたからである。

この原型にしたがつて上記の実験施設に模型をつくつた。縮尺は $\alpha=500$ 、すなわち水平縮尺を1/500にした。水槽の幅は20 mあるから10 kmの海岸が収容できたわけであり、ほぼ図-2の範囲をふくんでいる。模型の水面に近く白い糸を縦横に張り、1 m 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3 m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。また、水中の5カ所に電気水位計を設置し、ペン書きオ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つたから模型ではこれを無視した。

4. 観測および実験の結果

原型における潮流の観測は1957年5月14日から16日にわたり、漲潮時および落潮時のいずれについて、最大流速時を中心として行なつた。図-4は当時の潮位変化を示したものであるが、図の太い線は観測時を示している。原型の潮流観測には風の影響がまじるので、観測の結果は日によつてちがっている。図-5, 6は比較的に静かであつた16日の結果を示したものである。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時刻の潮流を正確に

図-1 海岸河口水理実験施設

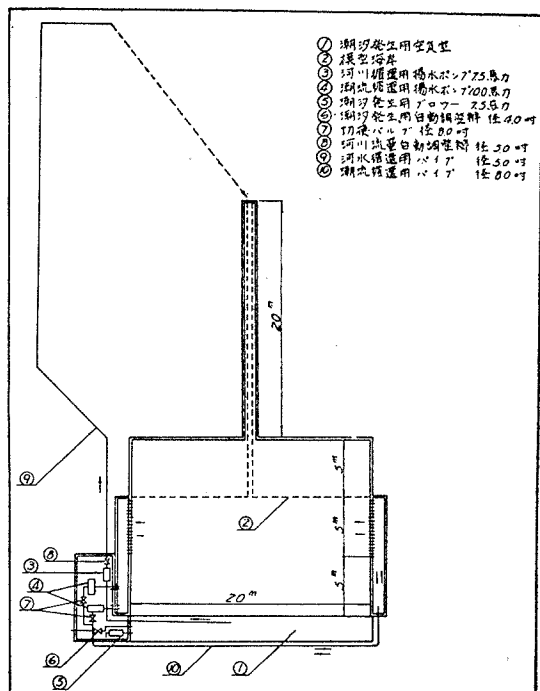


図-2 原型の位置

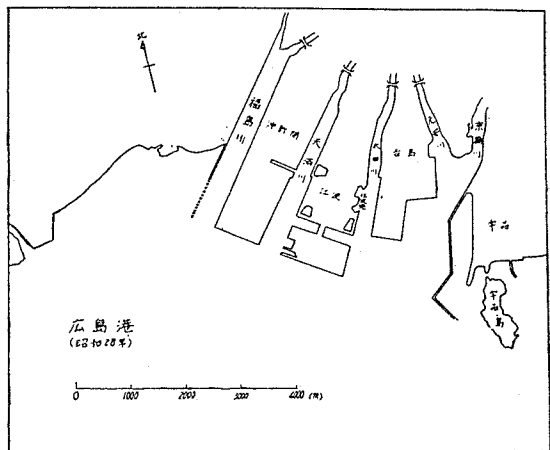


図-3 原型の測点

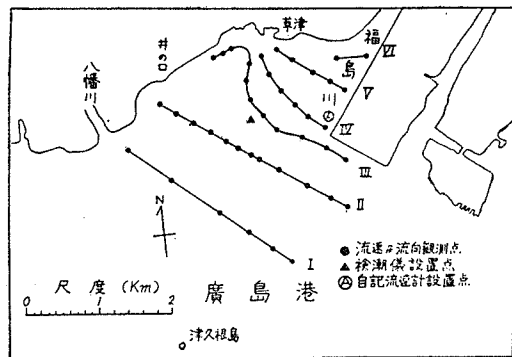


図-4 原型の潮位変化

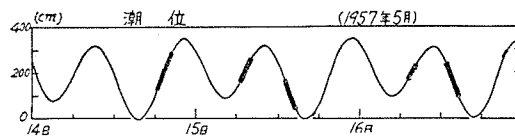


図-5 原型の潮流 (漲潮時)

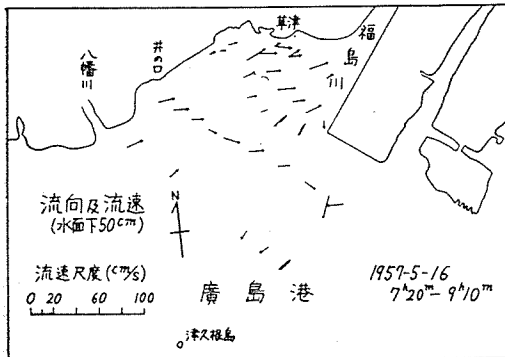
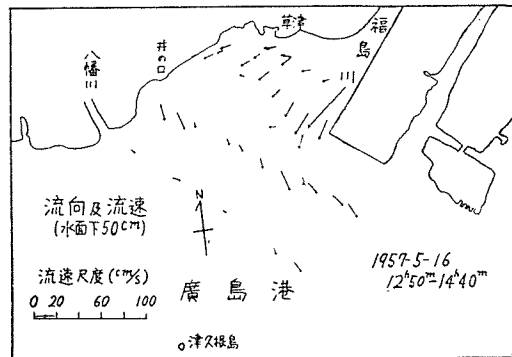


図-6 同 左 (落潮時)



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。とくに図-3 に示した測線Ⅲの付近では漲潮、落潮時ともに流速がきわめて弱いのは注目される。この測線はほぼ平水位の5m等深線にそつており、これより奥は水深が急減して2mあるいはそれ以下となり、沖に向つては水深が急増して10m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。このデルタはいまノリ場やカキ場として利用されている。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、すでにのべたように $\alpha=500$ 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12hとみなして、(5) から α, β の値に対応する r の値を求めると、それぞれ $r=63, 45, 32$ となる。よつて、これにしたが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2.5mとし、模型ではこれを β の値に応じて縮小した。

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、実験中は施設を葦藁で囲い、これにポリエチレンのおおいをかけて風を防いだ。しかし完全には風を防ぐことができなかったため、風の弱い日を選んで実験した。このために実験の機会がはなはだ制限された。

実験の結果は図-7~12 のようである。これらの図は図-5, 6 と比較のために、最大流速付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。図-7, 8 は $\alpha/\beta=8$ の場合、図-9, 10 は $\alpha/\beta=4$ の場合、図-11, 12 は $\alpha/\beta=2$ の場合である。それぞれ漲潮時と落潮時の潮流が示されている。

図に示した数値は流速を表わしているが、これらは関係式 $(U_j)_p = (\alpha/r)(U_j)_m$ によつて、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

図-7 模型の潮流 (漲潮時)

図-8 模型の潮流 (落潮時)

数字は流速 (cm/sec) $\alpha/\beta=8$

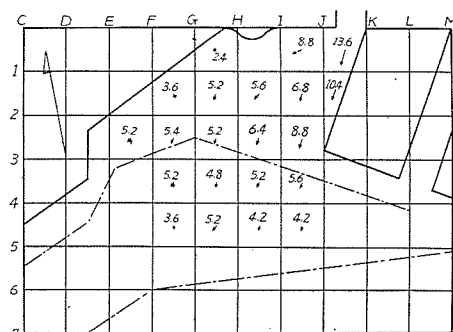
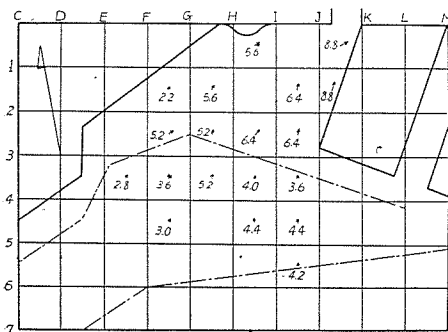


図-9 模型の潮流（漲潮時）

数字は流速 (cm/sec) $\alpha/\beta=4$

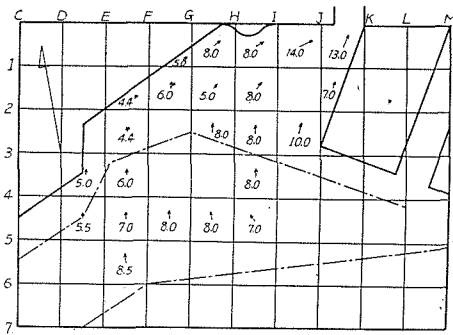


図-10 模型の潮流（落潮時）

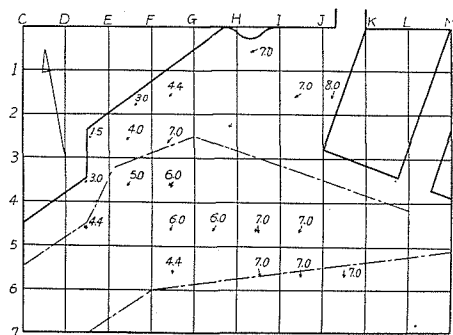


図-11 模型の潮流（漲潮時）

数字は流速 (cm/sec) $\alpha/\beta=2$

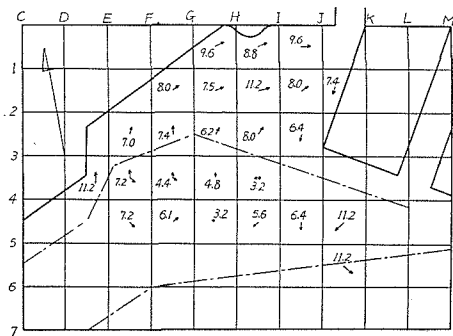
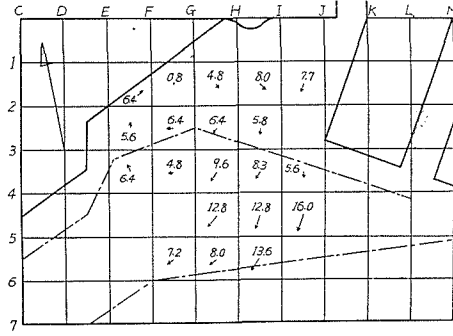


図-12 模型の潮流（落潮時）



沖から河口へ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ば近く、測線 III の近くでは流速が減少しており、また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、両者の相似は極めて良好であるとさいいえるであろう。

5. 考 察

沿岸海域の潮流に関して原型と模型とが力学的に相似であるためには、両者の尺度比 α, β, r を適当に選ばなければならない。両者の摩擦係数 C の比がわかれば、(4), (5) によつて、 α, β, r のうちいずれか一つを指定すれば、他の二つは必然的に定まる。われわれの実験例はまだ少ないけれども、実験の結果から判断すると、 C の比については

$$(C)_m / (C)_p = 2 \quad (6)$$

とおけるようである。この場合、 $\beta=\alpha/2$ であるから、 α を大きくすると模型の水深が小さくなつて、実験は不可能になる。また、水深を保つために β を指定すれば、 α の値を大きくすることができなくなる。この意味において、有明海や瀬戸内海のような広域の潮流を水理模型によつて模擬することは不可能であろう。 β を小さくしたまま α をして大きくとれば、 α/β の値が大きくなるから、 $(C)_m$ が大きくなり、人工粗度が必要になる。しかし人工粗度によつて $(C)_m$ を増大させるにも限度があり、またこの場合には、人工粗度によつて潮流は乱され、潮流の細かい構造はみえなくなる。もし α を小さくとれば、模型が大きくなるから、非常に大きい潮汐発生装置が必要となり、風の影響を除去することもまた困難になる。潮流に関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。

6. 結 言

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、福尾義昭の両君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。またこの研究は農林省農林水産試験研究補助金ならびに 1 部分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。