

潮流模型実験の比較検討

寛 源亮*・梅田眞三郎**・鈴木 盛夫***

1. ま え が き

海岸・港湾の整備に起因する海域形状変化に伴う環境変化の予測手段として数値モデルによるシミュレーションならびに水理模型実験が頻繁に行われている。これらのうち水理模型実験については、力学的相似性と計測技術等の理由から模型が大型化する傾向にある。しかしながらこのような大型水理模型実験は、模型の製作ならびに計測にあたり莫大な経費と日時を必要としなければならない問題を抱えている。逆に模型を縮小化し、小型模型とすると一面経済的であるが模型精度、測定方法ならびにその力学相似に種々の問題が生じることは否めない。

このように水理模型実験においては、相似性と経済上の問題があり、特に小型模型には計測上からの問題が残され、未だ実験手法が十分には確立されていないものと思われる。

本研究は、潮流模型実験として実測データを基に、従来から行われているような規模の模型と小型模型との比較を行った。計測法としてホログラフィー干渉法の応用を試みた。これらの結果を数値計算によるものと一応比較検討し潮流解析の手法について考察を行った。

なお模型の原型としては、神戸港内の一部を研究対象海域に選んだ。

2. 模型の相似律

原型と模型とが力学的に相似であるためには両方の流れを規定する基礎方程式が一致することが必要である。

潮流による流れは長波とみなされるため、鉛直方向成分は水平方向成分に比べて小さいものとし重力相似を考えると、時間縮尺および流速縮尺は次のようになる。

$$T_r = X_r Z_r^{-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$U_r = V_r = X_r T_r^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

ここでは2種類の縮尺模型について実験を行った。そのうち大きい方の模型を便宜上大模型と名づけ、もう1つを小模型と名づける。原海域の大きさは防波堤に囲ま

れた約 8.6×6.2 km の港域である。それぞれの模型に対して (1), (2) 式より時間および流速縮尺を求めた結果を表一に示す。原型の潮汐資料は、図一に示す昭和 48 年 12 月 10 日から 12 日の大潮時に実測したものを、模型でこの時の流れを再現するものとする。

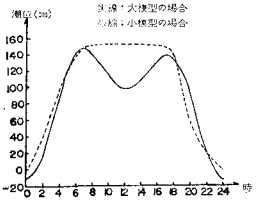
表一 模 型 縮 尺

縮尺 名称	水平縮尺	鉛直縮尺	時 間 縮 尺	流速縮尺
大 模 型	1/1,000	1/100	1/100	1/10
小 模 型	1/20,000	1,000	$\sqrt{10}/2,000$	$1/10 \sqrt{10}$

3. 実験方法

実験模型は、大模型の場合は海底粗度を荒いモルタル仕上げとし、また小模型の場合は海底地形を厚さ 1 mm の塩化ビニル板で再現し、これらを海底粗度とした。防波堤はそれぞれアクリル板を用いた。

潮汐は、図一の実線に示す実測潮位と同じものを用いた。この潮汐を実験では、大模型の場合模型プール端にもうけた気圧型潮汐発生装置に一定圧力の空気をコック操作で送、排気することにより潮汐を再現した。一



図一 潮汐曲線

方小模型では、水供給タンクを上下させることによって潮汐を再現した。小模型では大模型の場合と比べて実測潮汐を十分に再現できず、主として満潮時付近までの潮汐のもとでの実験結果を解析し大模型実験結果と比較検討した。その潮汐曲線を 図一 の破線に示す。正確に小模型の潮汐変化を与える方法は引きつづき検討している。

模型潮流速の測定は、大模型の場合には浮子を適宜水面に配置し、テレビカメラでこれらを追跡するトレーサー法を用いた。なおこれらの記録はビデオテープに収録した。撮影された浮子は、そのテープを再生し 1 コマ読

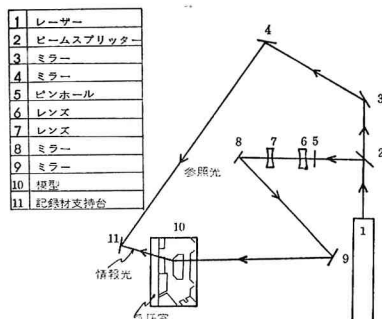
* 正会員 工博 神戸大学工学部
** 正会員 神戸大学工学部
*** 正会員 日本国土開発(株)

みを行い、1時間（模型では36秒）ごとの平均流速と流向を求めた。

一方小模型の場合には、ホログラフィー干渉法による水面変位の測定ならびにトレーサー法を併用した。写真機によりシャッター速度4秒でトレーサーの軌跡を潮流の各時間相当ごとに計測した。

実測潮流速は、前述の大潮時に研究対象海域の4観測点で得ている。その測定方法は3昼夜にわたり1点は定点観測、残り3点は船による移動観測を行い、CM—2型流速計により海面下1mと6mの2点にて流速と流向を測定した。海面下1mと6mのそれぞれの実測結果を比較すると、風の影響などのために流速・流向がやや異なるものも現われ、模型での潮流速の再現性に対しては、模型の潮流速測定方法などを考慮して海面下6mの実測結果を用いて比較検討を行った。

実験順序は、まず大模型において実測結果の再現性を検討した。その結果流速、流向ともそれぞれ図—2、図—3に示すように実測結果とかなり一致しており、原型に対する相似性は満足されていると考えられる。ただし図—2、3の実測結果は、ホログラフィー干渉法による小模型実験の測定点付近の1観測点のものである。残りの3観測点においても原型に対する相似性は満足されている。

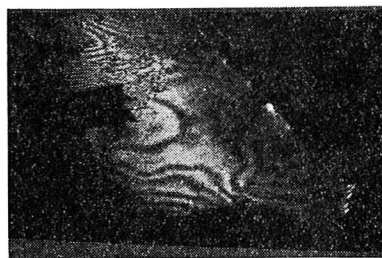


図—4 ホログラフィー干渉装置（光学系）

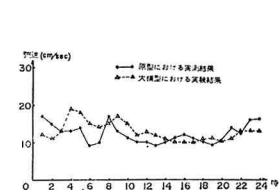
ムを用い、再生用の写真撮影には普通のフィルムを用いた。

水面の変動を二重露光法によってホログラムに記録するには機器の性能上、次の方法を用いた。模型の潮汐のパターンが定常になった後測定潮汐高で第1回目の光パルスを出し、次の周期の Δt 後で2回目のパルスを出してホログラムを撮った。ここで一番問題となったことは、水面での散乱光が弱く水底の塩化ビニル板による反射が大きくなることである。そのため水面に反射物質を散布することにより水面散乱光を強くすることを試みた。散布物質は、数ミクロンの粒径の黒鉛粉末、ナイロン粉末、粘土粒子と銅粉末を用いた。この結果、黒鉛を薄く散布した場合が最良の結果を得た。

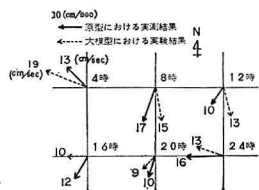
次にホログラムは、漲潮時、満潮時、落潮時と干潮時の4つの代表的な水面変動について求めた。これらのうち1例として漲潮時のホログラムを写真—1に示す。



写真—1 漲潮時のホログラム



図—2 原型と大模型の流速比較図



図—3 原型と大模型の流向比較図

次に埋立による地形境界条件の変更が生じた場合の流動の再現性を大模型と小模型を用いて検討を行った。

4. ホログラフィー干渉法による表面流速、流向の測定^{1),2)}

光ホログラフィーは物体からの情報光と原光との間の干渉を利用した記録法である。情報光と原光を重ね合わせるにより、通常の写真のように情報光の振幅の変化だけでなく位相の変化も記録することができる。このため得られたホログラムを再生すると三次元の像が再生できる。従って物体の変形する前後で二重露光を行えばその変位は干渉縞として再生物体上に得られる。この実験で用いたホログラフィー計測の光学系を図—4に示す。用いた機材は、光パルスとして波長が6943Åのルビーレーザーを、再生用としてアルゴンレーザーを用いた。ホログラム用写真乾板にはアルファゲバルトフィルム

得られたホログラムから水面変位³⁾を求めるには、再生ホログラムから得た干渉縞が水面を斜め方向から見たものであり、また水面を照射する光も斜光であることから真上方向から見た縞に直す必要がある。

光の波長を λ 、縞次数を N とすると水面変位 d は、

$$d = \frac{N\lambda}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \dots \dots \dots (3)$$

で求められる。ここで、 θ_1 、 θ_2 はそれぞれ光の水面に対する入射角、散乱角である。ホログラムに写った水面を

メッシュで区切り、メッシュ上での繰回数 N を求めることにより水面各点での変位が求められる。

連続の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial r} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を用いて、 $\Delta Q = \Delta v \cdot h$ (h : 水深) とすると

$$\Delta v = \frac{\Delta \zeta}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta r}{h} \quad \dots\dots\dots (5)$$

から水面変位から流速変動 Δv が求められる。 $\Delta \zeta$ はホログラム再生像の等変位線から求めた変位量、 Δr は等変位線から次の等変位線までの距離、 Δt は二重露光の時間間隔である。

本実験では先に述べたように、水面の変位がある潮位時の水面を基準として Δt 後の水面を求めているため $\Delta \zeta$ は相対的な値である。よって (5) 式から得られる流速は Δt の間の変動値である。

流れ方向は、再生ホログラム上の干涉縞が示す等水位線に直交する方向を示し、その間の繰回数が流速を示している。この解析結果の1例として漲潮時の流線を図-5に示す。

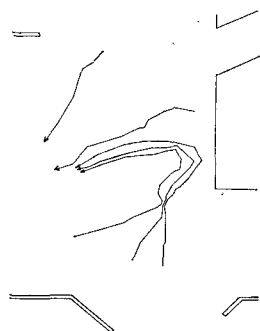


図-5 ホログラフィー干渉法による流線図 (漲潮時)

5. 数値計算

基礎方程式は Navier-Stokes の運動方程式を海底から海面まで積分した流量成分で書き直した式を基に、350 m 間隔の矩形メッシュに切り、時間に関して前進差分をとって数値計算を行ったり。境界条件は、海岸では岸に垂直な方向の流れを零とし、外洋との境界で潮位を与えて計算を行った。これらは従来からの手法となんら変わったものではない。

6. 実験結果と考察

図-2, 3 に示したように原型の流れの再現性は、海底粗度として荒いモルタル仕上げの模型で十分満たされている。ところが地形境界条件を変更した大模型と塩化ビニル板を海底粗度とした小模型のそれぞれのトレーサー実験結果を比較すると、流速に関して小模型の方がやや小さい値となった。これは小模型の相似律において表面張力や海底摩擦を無視したことが原因と考えられ、次のような検討を行った。

表面張力および海底摩擦を考慮した基礎方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \left(g + \frac{Kk^2}{\rho} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{K_f u^2}{2h} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = - \left(g + \frac{Kk^2}{\rho} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{K_f v^2}{2h} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 K : 表面張力、 k : 波数、 K_f : 水底の摩擦係数。まず原型、模型それぞれにおける表面張力の影響を調べる。長波とみなされることから波長を L 、周期 T とすると、

$$L = T \sqrt{gh} \quad \dots\dots\dots (8)$$

であり、波数 k は、

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \dots\dots\dots (9)$$

原型での周期 $T_p = 8.64 \times 10^4$ sec、模型での周期 $T_m = 79.8$ sec で水深 $h_p = 20$ m では、

$$k_p = 5.2 \times 10^{-8}, \quad k_m = 1.8 \times 10^{-3}$$

よって、(6), (7) 式中の $K \cdot k^2 / \rho$ はそれぞれ、

$$\left(\frac{Kk^2}{\rho} \right)_p = 2.1 \times 10^{-16}, \quad \left(\frac{Kk^2}{\rho} \right)_m = 2.4 \times 10^{-4}$$

となる。上の値の重力加速度に対する比は、

$$\left(\frac{Kk^2}{\rho} \right)_p \frac{1}{g} = 2.1 \times 10^{-19}, \quad \left(\frac{Kk^2}{\rho} \right)_m \frac{1}{g} = 2.4 \times 10^{-10}$$

となる。よって表面張力の項は無視できる。

次に海底摩擦の影響を調べる。歪模型における相似則から摩擦 K_f の値を原型、大模型および小模型のそれぞれにおいて求めると次のようになる。

まず原型の場合、Bretschneider による推算法によると $K_{fp} = 0.02$ で与えられる。大模型の場合、流れが乱流であるから $K_f = 2gn^2/h^{1/3}$ より n の測定から $n = 0.014$ となり、従って $K_f = 0.14$ となる。小模型の場合は、流れが層流であるから $K_f = 16/Re$ ($Re = 4uh/\nu$) より $K_f = 0.29$ となる。これらより摩擦係数の項の重力加速度の項に対する比を求めると次のようになる。

$$\left(\frac{K_f \frac{u^2}{2h}}{g \frac{\partial \zeta}{\partial x}} \right)_p = 0.016, \quad \left(\frac{K_f \frac{u^2}{2h}}{g \frac{\partial \zeta}{\partial x}} \right)_{L.m} = 0.15,$$

$$\left(\frac{K_f \frac{u^2}{2h}}{g \frac{\partial \zeta}{\partial x}} \right)_{S.m} = 0.57$$

ここに、 $L.m$ は大模型、 $S.m$ は小模型を表わし、 $\partial \zeta$ は海面の高まり、 ∂x は波長を用いている。

この結果から各模型においては、海底摩擦の項を考慮すべきであることがわかる。大模型の場合、 $K_f = K_{fp}/K_{fm} = 1/7$ となり満足すべき条件 $Z_r/X_r = 1/10$ を完全には満たしていない。しかしながら重力項との比較にお

いてその影響が小のためか原型の流れを十分再現している。

小模型においては、 $K_{fr}=1/14.5$ となり条件 $Z_r/X_r=1/20$ を満足していると言い難い。なおその上重力との比においてその影響は大きく、このため流れの相似は十分でない。小模型の摩擦項を重力項に含め、これらの比を補正係数とした模型に関する相似式を作ると次の (10)、(11) 式となる。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{s.m} = -\alpha \cdot \frac{T_r^2 Z_r}{X_r^2} \left(g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)_{s.m}$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right)_{s.m} = -\alpha \cdot \frac{T_r^2 Z_r}{X_r^2} \left(g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)_{s.m}$$

ただし $\alpha=1-0.57=0.43$ である。ここで $T_r^2 Z_r/X_r=1$ の場合に模型と原型の間に相似が成立することとなる。これから原型に換算した流速を使って、図—2、3 に示したようにその観測点における大模型と小模型のそれぞれのトレーサー実験結果は、図—6、図—7 になる。またこの流速を使ってホログラフィー干渉法による結果から解析して求めた流速およびトレーサーによる流速、ならびに大模型によって求めた流速の 1 例を図—8、図—9 に示す。大模型とトレーサーおよびホログラフィー実験による小模型の流速結果を比べると小模型の方がやや小

さいめの値となっている。これは小模型実験における測定方法やその他の誤差の影響によるものと思われるが、全体的な流況はかなり一致していると言えるだろう。

その他、満潮時付近までの各時の流速、流向などの流況はそれぞれの模型ではほぼ一致しているが、用いた潮汐の関係上小模型における落潮時から干潮時に至る流況は大模型のそれとはやや異なった結果となった。

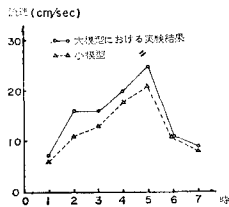
一方数値計算に関しては、図—10 にその流況図の 1 例を示すが、防波堤付近などの細部では模型実験結果と比べると流況がやや異なった結果が得られた。これはメッシュが荒いため、渦などが生じると予想される付近では細かくしなければ流れが再現できないと思われる。

7. 結 論

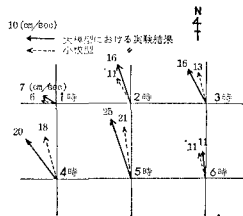
模型実験では、原型との相似性を確認した上で本来の目的である予測を得るための実験を行わなければならない。本研究では、大模型実験に関しては潮流の流動の相似性を十分満足しているようであるが、小模型実験においては測定上種々の難しい問題が生じていることは事実である。小模型となると、たとえ歪模型にせよ水深が浅くなる。そのために底面の粘性境界層や表面張力の影響も現われる。小模型におけるトレーサー実験では、前述のように表面張力の影響はほとんど無視してもよいが、底面の影響は無視できず摩擦係数 K_f を導入することによって考慮した。

一方ホログラフィー干渉法による表面流速の測定においては、現在のところ水面に散布する反射物質として黒鉛粉末が適しており、しかもそれを薄い膜にする方が水面形の変化の再現がより優れていた。確かに、ここにも膜面形成による表面張力の影響も無視できないものと思われる。

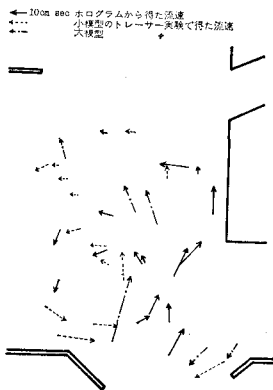
潮流に関する水理模型実験において相似性、実験施設や計測装置などに種々の難しい問題が残されているが、大模型になると相似性はより容易に満足されるが、その



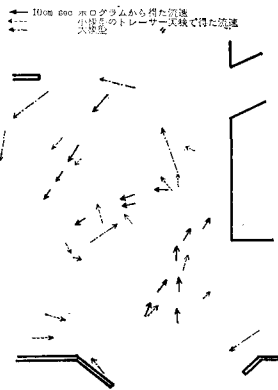
図—6 大模型と小模型の流速比較図



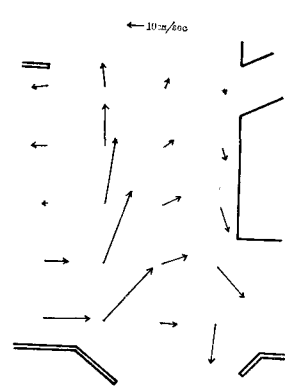
図—7 大模型と小模型の流向比較図



図—8 実験結果 (漲潮時)



図—9 実験結果 (満潮時)



図—10 数値計算結果 (漲潮時)

反面測定方法および実験施設などが大がかりとなる欠点を有している。一方、小模型においては実験模型の製作などに関しては経済的で取扱い便である。しかも今回用いたホログラフィー干渉法により定性的ではあるが流況特性は極めて簡単に得られるが、相似性を満足させるには海底摩擦について十分考慮する必要がある。なおホログラフィー干渉法に関しては、本実験でも苦心した水面に散布する反射物質材料の選定あるいは水以外の流体の選定により、ホログラムの鮮明度や解析方法がさらに改良されるだろう。またこれらの散布の改良とともに現在測定されつつある乱流計測へのホログラフィー干渉法の応用⁵⁾が確立されると、潮流模型実験もさらに進歩することと思う。

一方数値実験に関しては、今回研究対象海域として選んだ神戸港域内は防波堤および埋立地などにより、境界条件が複雑であり、しかも模型実験結果からもわかるように対象海域には渦をとまなう流れであるという複雑な流動であるため、模型実験で得られたような細部にわたっての流動の再現性はなかなか困難に思われる。

今後ホログラフィー干渉法などの流体計測法の技術向上とともに模型実験の精度を上げる一方、F. E. M. 等の数値計算を並行に用いて潮流解析を行い、各種の環境変化の予測手段の確立を目標に研究を進めていく予定である。

本研究は、昭和51年度文部省科学研究費試験研究(2)「ホログラフィー干渉法による乱流計測」に費用の一部の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 篁 源亮・井口理一郎・木佐幸佳: ホログラフィー干渉法による流速測定, 土木学会論文報告集, 第255号, 1976.
- 2) 篁 源亮・梅田眞三郎・鈴木盛夫: ホログラフィーによる潮流小模型実験, 土木学会関西支部年講, 1977.
- 3) Ennos, A. E.: Measurement of in-plane surface strain by hologram interferometry, J. of Scientific Instruments, Ser. 2, Vol. 1, pp. 731~734, 1968.
- 4) 篁 源亮・梅田眞三郎・末光英和: 小海域における潮流の数値計算, 土木学会関西支部年講, 1977.