

物理モデルと数値モデルとの組み合わせによる海底地形の予測

入江 功*・栗山 善昭**・田川 昌宏***

1. ま え が き

最近行われつつある海底地形変化に関する3次元数値モデルは、流速の鉛直分布が一様としていること、さらに漂砂量が局所的条件下で与えられていることなどの理由で、航路・港内埋没の予測精度を上げるのに限界があるものと思われる。漂砂をより正しくモデル内に再現するには、海浜流のうち特に底層流を考慮に入れる必要があり、また、航路・港内埋没の再現には、底質の移流沈降過程の再現が必要である。

本研究では、数値モデルでは計算困難な底層流を物理モデル実験（ここでは、物理モデルと呼んだ）により求め、現地スケールに適用可能と考えられる Bijker の浮遊砂分布モデルと組み合わせて底質の移流沈降過程を電算機により計算するという、いわば物理モデルと数値モデルの長所を生かしたシミュレーション法を用いて、日本海に面する滝港の海底地形変化を求めた。さらにその結果を従来の方法と比較し、再現性を検討した。

2. 従来の漂砂シミュレーションモデルに対する改良点

(1) 底質の移流沈降過程の導入

従来行われている漂砂による海底地形変化量の計算は図-1の左側の図に示すように、底質の連続の式より

$$\Delta z/\Delta t = (Q_{x,i} - Q_{x,i+1})/\Delta x + (Q_{y,j} - Q_{y,j+1})/\Delta y \quad (1)$$

により求められる。

ここに、 $\Delta z/\Delta t$ が単位時間当たりの海底地形変化量を示し、 $Q_{x,i}$ 、 $Q_{y,j}$ は、 (i,j) 点における水深、波、流れにより定まる局所漂砂量の x 、 y 成分である。しかし、この方式では、非常に不都合な点が出てくる。これを、図-2の航路埋没過程の模型図により述べる。図の最上段は、実際の航路で考えられる埋没過程を示したもので、漂砂の上手の水深の浅い所で波や流れにより巻き上げられた底質は、航路内に入り水深が大きくなると、波や流

れによる底面の攪乱も小さくなるので、それまでの浮遊砂を保持できなくなり急速な沈降が始まる。しかしやがて浮遊砂量も航路内の条件に応じた濃度に落ち着き、それ以上の底質の沈降はなくなる。したがって、航路は図の点線で示すような断面形状に埋没する。一方、式(1)に示した局所漂砂量方式では、 $Q_{x,i}$ 、 $Q_{y,j}$ が局所的な条件により求められるので、この条件が変化しない航路内の水平床部では、埋没は発生し得ず、結局図の中段に示すように、水深が変化する航路面でのみ沈降が発生することになり、実際とは合わない結果となる。

そこで、本研究¹⁾では図-1の右側に示すように、底質の移流を考慮した沈降過程を計算した。すなわち同図に示す水柱を高さ D_k の k 層に分け、移流拡散の式により浮遊砂濃度を計算した。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(c_k D_k) + \frac{\partial}{\partial x}(u_k c_k D_k) + \frac{\partial}{\partial y}(v_k c_k D_k) \\ & + w_{k-1} c_{k-1} - w_k c_k \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x D_k \frac{\partial c_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y D_k \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) \\ & + \gamma_{k-1} (c_{k-1} - c_k) - \gamma_k (c_k - c_{k+1}) \\ & + w_0 c_{k-1} - w_0 c_k \quad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

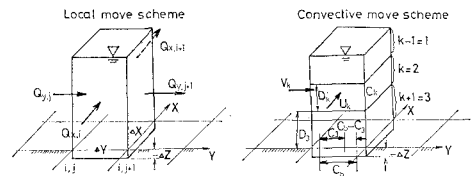


図-1 局所漂砂量方式と移流沈降方式との相違

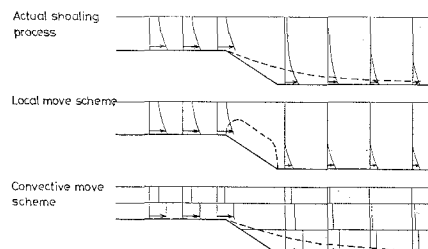


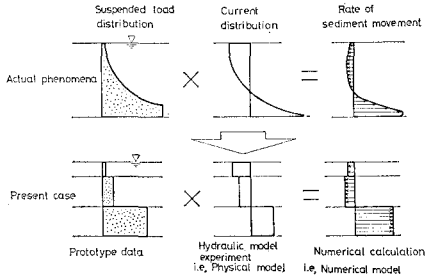
図-2 局所漂砂量方式と移流沈降方式との航路埋没過程の相違

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室

*** 正会員 沿岸開発技術研究センター 調査研究部 主任研究員

ここに、 c_k : k 層での浮遊砂濃度、 D_k : k 層の厚さ、 u_k : k 層における x 方向の流速成分、 v_k : k 層における y 方向の流速成分、 w_k : k 層の底面上向きの流速成分、 $K_x \cdot K_y$: x, y 方向の水平拡散係数、 γ_k : 第 k 層と第 $(k+1)$ 層との内部境界面交換関数、 w_0 : 底質の沈降速度で



図—3 海浜流が鉛直分布を有する場合の漂砂量の計算

ある。今回は、3層モデルに対する計算を行ない、厚さ D_3 最下層の濃度 c_3 を求めた。海底面の変動量の計算は次式による。

$$\Delta z / \Delta t = w_0 c_3 - \epsilon_z \frac{2}{D_3} (c_b - c_3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ϵ_z : 底面での鉛直境界面交換係数、 c_b : 底面で定義される浮遊砂濃度である。

式(2)、(3)に示した移流沈降過程により考えられる航路埋没過程を図—2の下段に示した。航路は、図の点線で示した形で埋没するものと考えられ、同図最上段の実際の埋没とよく似たものになることが期待される。

(2) 海浜流の鉛直分布の導入

浮遊砂の濃度は、底面近くの方が上方の水中部に比べ桁違いに多い。したがって漂砂は底層流に支配されると云っても過言ではないであろう。数値計算により求めることの困難な底層流を、固定床による水理模型実験により求め、これを漂砂の数値モデルにインプットした。海浜流の相似則は未だ確立されてはいないが、筆者らは、模型内の底面に沿う平均流が、現地スケールにおける海底地形の変化を定性的に支配することを確認している²⁾。

実際の現地における浮遊砂濃度、流速分布と漂砂量との関係は、図—3の上段に示すようなものであろう。今回のシミュレーションでは、同図下段に示すように、水深方向に3層に分け、各層の浮遊砂濃度、平均流速を用いて漂砂量を計算した。

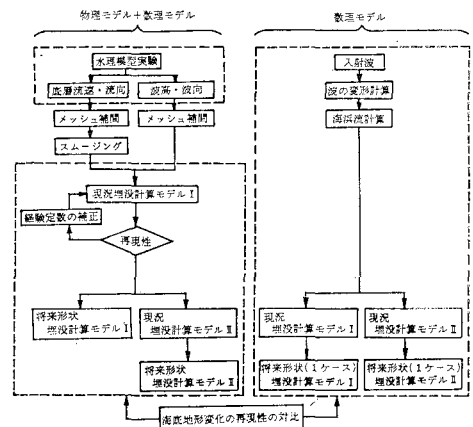
3. 物理モデルと数値モデル

今回の海浜変形シミュレーションの実施フローを図—4に示す。図中左半分は、物理モデルと数値モデルの組み合わせの場合のフローであり、右半分は数値モデルのみの場合のフローである。

物理モデルと数値モデルとの組み合わせの場合におい

ては、水理模型実験により漂砂の外力に関する表層流、底層流、波高、波向を求める。実験での測定メッシュは、40 cm (現地で 50 m) であり、数値計算のメッシュとするには、どうしても粗いものになるので、計算により半分のメッシュに補間し、さらに、水路内の水の振動、測定誤差などによるデータのばらつきを、一定の平滑処理により滑らかなものにする。計算の対象とする3層に対して初期値として実験による底層流を与え、下の層を固定しつつ順次連続の式が成立するように、中層、上層を試行錯誤的に修正する。こうして得られた3層の流れをインプットし、以下のフローにおける海底地形変化の計算を行うものである。

一方、図—4の右側の数値モデルのみによる場合は、波高分布、波向分布、流れ(鉛直一様分布)を数値計算により求めるものである。



図—4 海底地形変化シミュレーションの実施フロー

4. 滝港の海底地形変化の再現

(1) 滝港の流況に関する水理模型実験

滝港は、能登半島の西岸に位置し、冬期風浪により長年にわたり埋没問題に悩まされてきた。底質粒径が、0.1~0.2 mm と非常に細かいことが埋没を顕著にする原因でもある。港内は、図—5に示すように東半分が埋没傾向を示し、西半分沖側領域で侵食傾向を示す。図中には、荒天時における蛍光砂重心の移動に関する調査結果を矢印で示してあるが、これと侵食堆積のパターンから、東半分での沖側からの底質の供給、西防波堤開口部からの底質の侵入などがうかがえる。

流況再現の水理模型実験は、沿岸方向 1.0 km、岸沖方向 0.5 km を対象とし、これを 5.5 m × 10 m の平面水槽内に模型縮尺 $1/25$ で再現して行なった。波の条件は、年間の波のエネルギー分布を考慮し、滝港の漂砂を支配すると考えられる波の条件として、波高 3.0 m、周期 8.0 sec、波向 N 62°W (沖波) を選定した。水槽内

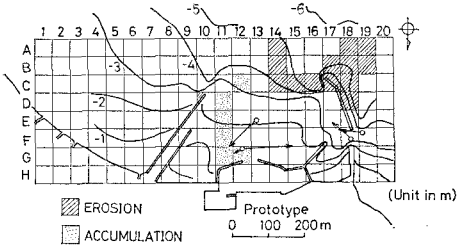


図-5 滝港の蛍光砂の移動及び長期的な海底地形の変化傾向

の波向測定は容量式波高計にて行い、波向測定は上からの写真撮影によった。流況測定には、表層流が直径 10 mm、底層流が直径 3 mm の追跡子を用いた。港内の流れの遅い所では、冷却した過マンガン酸カリウム溶液を水底に静かに置いてその移動を測定した。この水理実験の段階で、可能な限り再現性をチェックした。例えば、図-6、図-7 に示すように、表層流の現地と模型の相似性をチェックした。冬期に行われた多くの投射式漂流標の調査結果から、実験波の波向に近い時の表層流調査結果を集めたのが図-6 である。全体的に港外向かう流れが卓越しており、また西防波堤開口部から流入して防波堤先端部へ抜ける流れが存在するが、これらは図-7 の実験結果にも比較的良く再現されている。このときの底層流の実験結果を図-8 に示す。これを図-7 の表層流と比較すると西防波堤開口部から港内へ侵入し、沖側へ抜ける流れは両者において同様であるが、港内の東半分において、表層流が沖向きであるのに対し、底層流が岸向きであることが大きな相違点である。

(2) 水理模型実験の結果にもとづく海底地形変化の計算

図-7、図-8 に示した流れの測定メッシュは、現地スケールで 50 m 間隔となっているが、計算上は、漂砂現

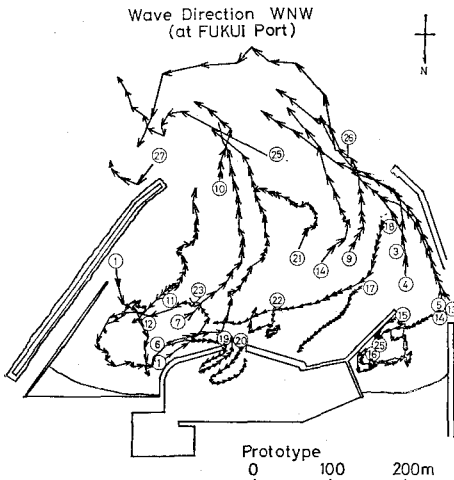


図-6 現地における表層流

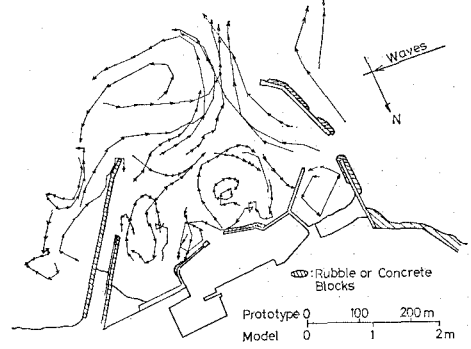


図-7 水理模型実験による表層流

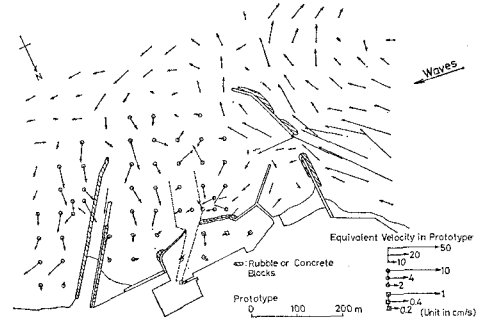


図-8 水理模型実験による底層流

象をより滑らかに再現するため、25 m のメッシュになるように補間した。この場合、流れが未定義のメッシュについては、その点に最も近い実測値を用いて補間した。次に、流れの各成分毎に以下の平滑操作を必要回数繰返すことにより、流速平面分布の平滑化をおこなった。

$$u_{i,j} = 0.5 \times u_{i,j} + 0.125 \times (u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1}) \dots (4)$$

但し、この平滑操作において、陸岸、防波堤等の地形条件は考慮している。図-8 の測定結果にこうした平滑操作を施した結果を図-9 に示す。

実験測定値である波高、波向についても、同様の補間、平滑操作を行った。図-9 のように求めた底層流をもとに、先に述べた方法で、中層、上層の流速平面分布を求め、Bijker の浮遊砂の式を用いて、漂砂計算を行った。Bijker の式は、³⁾

$$c = c_0 \exp(-w_0 z / \varepsilon) \dots (5)$$

としたときの底面濃度 c_0 を与えたものである。

図-10 に、これまで述べてきた方法で滝港の現況海底地形変化の計算結果を示す。さらに図-11 は、昭和 52 年から昭和 57 年までの海底地形変化がほぼ一定の傾向をもって変化した時期の平均的海底地形変化速度を示したものである。図-10 の結果を求めるに当たり、図-15 に示す各ブロック内の地形変化の絶対値が、平均的に図-11 の実績に合致するように、Bijker 公式の比例定

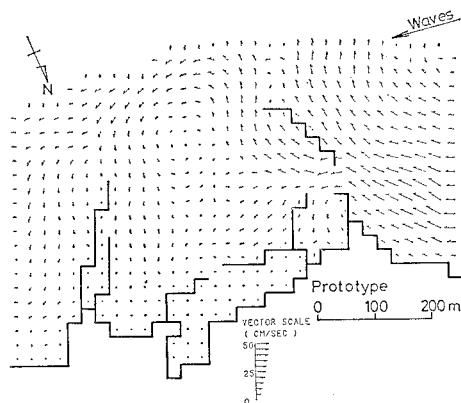


図-9 底層流の補間および平滑化の結果

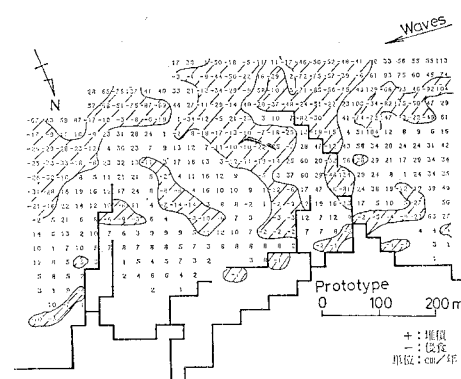


図-10 滝港の現況海底地形変化の計算結果

数を校正して計算した。図-10、図-11から、港内の東半分の堆積、西防波堤先端内側の著しい侵食が相当良好に再現されているのがわかる。

5. 数値モデルを主体にした従来モデルとの比較

ここでは、通常行われている数値モデルのみによる方法の再現性について検討してみる。図-12は、入射波を不規則波とし、その変形をエネルギー平衡方程式により求め、さらに海浜流を radiation stress により求めた流況図を示す。その流速鉛直分布は一樣と仮定してある。図-9の底層流の平面分布と比較すると、港内東半分において、図-12では沖向きの流れとなっており、港外からの底質の侵入は再現され得ないことになる。

波と流れを求めること以外は、図-10と全く同様の条件で海底地形変化を求めた結果を、図-13に示す。港内東半分が逆に侵食しており、図-11と比較しても再現性が非常に劣っている。

図-13では底質移動を移流過程を考慮して計算したが、一般には局所漂砂量方式を取られることが多い。そこで、波、流れの計算は図-13と全く同じであるが、

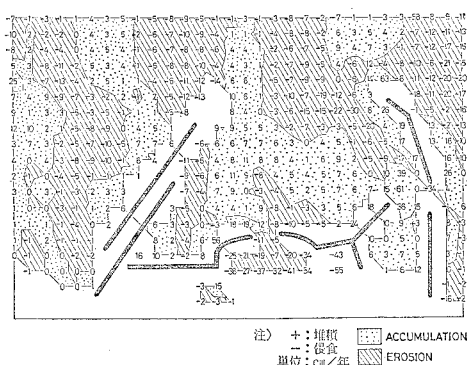


図-11 滝港の現況海底地形変化の実績

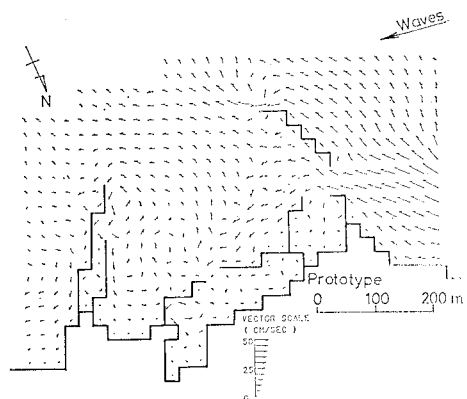


図-12 radiation stress による海浜流計算結果

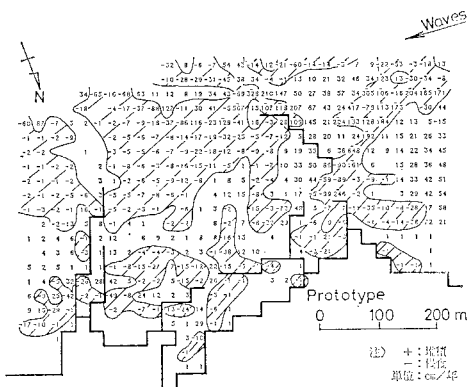


図-13 波・流れを計算で求めた場合の海底地形変化

底質移動を局所漂砂量方式で計算し、海底地形変化の計算を行ったのが、図-14である。

この結果を、現地実績の図-11と比較すると、地形変化の再現性が著しく劣っていることがわかる。

図-16は、図-15に示すように、港内をⅠ～Ⅳの4つのブロックに分け、各ブロックの平均水深の年間変化量を示したものである。図中の黒丸(●)が現地の実績である。今回の物理モデルの数値モデルの組み合わせによ

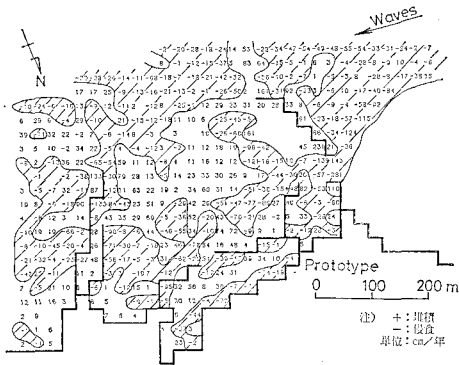


図-14 波、流れともに計算により求め、局所漂砂量方式による場合の海底地形変化

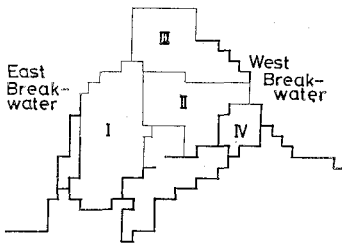


図-15 滝港港内のブロック分割図

る結果を小さい白丸(○)で示すが、各ブロックともに現地の実績と非常によく一致しているようである。一方、流況を物理モデル(P)で求め、波高分布を数値モデル(N)で求めた結果を(●)で示すが、これも再現性は良い方である。ところが、波高、流況(radiation stress)を数値モデル(N)で求めた結果を(■)で示すが、全体的に相当異っている。以上は、底質移動を移流沈降方式(C)で求めたものであるが、従来行われている局所漂砂量方式(L)による結果が以下に示してある。図中の(Δ)印は、物理モデルにより波、流れを求めたケースで、比較的再現性は良いが、波を計算、流れを物理モデルで求めた図中の(○)や、波、流況をすべて計算で求めた図中の(□)印などは、実績から程遠いものとなっている。

6. 主要な結論

(1) 物理モデルと数値モデルの長所を組み合わせ、底

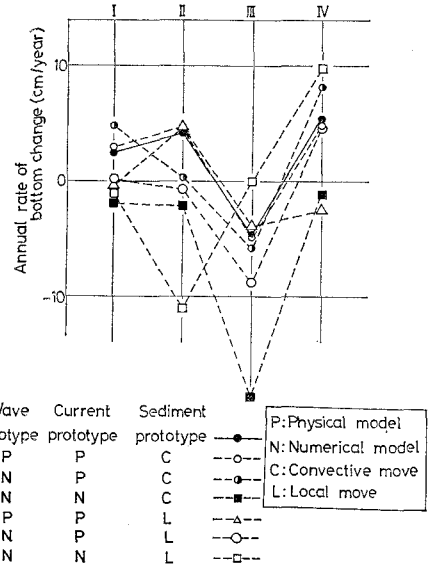


図-16 各モデルの海底地形変化の再現性の比較図

質移動を移流沈降方式で計算すれば、優れた海底地形変化の再現性が得られる。

(2) 海浜流を鉛直一様分布と仮定したり、局所漂砂量方式で漂砂計算をする限り、港内航路埋没の再現性は劣るものと思われる。

7. あとがき

本研究は、石川県の沿岸開発技術センターへの委託によって行われたものである。最後に、貴重な資料を提供していただいた石川県港湾課の各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 入江 功・栗山善昭: 底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号, 1985.
- 2) 入江 功・瀬岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次: 重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, 1984, pp. 3~52.
- 3) Bijker, E. N.: Sedimentation in channels and trenches, Proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., 1980, pp. 1708~1718.