

浮遊漂砂の非平衡性に着目した航路埋没の数値計算法について

Numerical simulation for predicting shoaling process of navigation channel

榎木 亨*・出口一郎*・小野正順*・裏 基成**

Toru.Sawaragi, Ichiro.Degechi, Masanobu.Ono and Kisung.Bae

A numerical model for predicting depositional processes of navigation channels caused by waves and currents is proposed. In the model, un-equilibrium concentrations of suspended sediment are accurately solved numerically by the split-operator approach. The calculated concentrations across a channel show good agreements with the measured concentration in experiments. Based on the calculated concentration, differences of upward and downward sediment fluxes are estimated to predict topographic change. The predicted topographic change across the channel coincides fairly well with the measured profile provided that the current velocity is relatively stronger than that of waves.

Keywords : un-equilibrium sediment concentration, advection-diffusion equation, channel shoaling

1. まえがき

最近、海浜変形を数値的に予測する種々のモデルが提案されてきている。それらの多くは、いわゆる平衡状態において定式化された局所漂砂量を漂砂移動の連続式に用いて、水深変化を予測しようとするものである。しかしながら、漂砂移動の外力となる波浪及び流れの場が空間的に急変するような領域（例えば、構造物周辺、航路などの水深急変部、あるいは砕波点近傍など）における漂砂移動に関しては、平衡状態における漂砂量則が適用できないことは容易に推定できる。一方、非平衡状態における漂砂移動については、従来あまり研究されておらず、その内浮遊漂砂については、その非平衡性を考慮した水深変化予測モデルがいくつか提案されているが、いずれも非平衡状態の濃度分布に対しては、近似的に取り扱われている。また、掃流漂砂の非平衡性については今のところどの程度の空間スケールで生じるのかという点も含めてほとんど明らかにされていない。

従って、本研究では浮遊漂砂について非平衡性を考慮できるように、非平衡状態の浮遊砂濃度分布の算定について移流拡散方程式の高精度数値計算法を用いた地形変化予測モデルを提案し、従来の予測モデルとの比較を行うことにより従来の解析モデルの問題点について明らかにする。更に、波と流れによる航路埋没に関する移動床実験を行い、埋没形状と浮遊砂濃度分布についてそれぞれの解析モデルの適用性について検討を行った。

2. 非平衡状態の浮遊漂砂と地形変化の関係

浮遊漂砂による地形変形は、浮上フラックスP、沈降フラックスQ及び底質の空隙率 λ を用いて次式のように示される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} (Q - P) \quad (1)$$

従って、浮遊漂砂による地形変形は、浮上・沈降フラックスにより左右され、浮上・沈降フラックスのバランスが崩れる非平衡状態の浮遊砂濃度が現れる領域で地形変形が生じる。

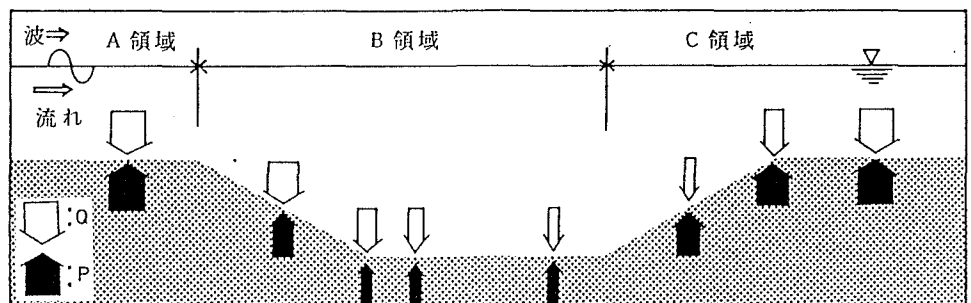


図-1 非平衡状態の浮遊漂砂と地形変化の関係

実際の航路における

非平衡性の浮遊漂砂による埋没・侵食は、次のような機構で生じると考えられる。図-1に示すように波と流れが航路を横断するような場合を想定する。航路の上流側Aの領域では、十分長い流下距離で浮遊漂砂が巻き上げられ、ほぼ空間的に一様な浮遊砂濃度分布（平衡状態の濃度分布）となっており、浮上フラックスと沈降フラックス

* 正会員 大阪大学工学部土木工学科 (565 吹田市山田丘 2-1)

** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻

スがつりあっているため浮遊漂砂による地形変形は生じない。そして、航路法面上及びその下流側Bの領域では、移流による水深の増加に伴う底部せん断力の減少により浮遊漂砂の浮上フラックスが減少するため浮上フラックス<沈降フラックスの非平衡状態の浮遊砂濃度分布となる。この非平衡状態の浮遊砂濃度分布は、下流側Bの領域での平衡状態の濃度分布に達するまでの範囲で生じており、この領域においては、浮遊漂砂によって堆積が生じる。また、下流側の航路法面上及びその下流側Cの領域については水深の減少に伴う底部せん断力の増加により浮遊漂砂の浮上フラックスが増加するため、浮上フラックス>沈降フラックスの非平衡状態の浮遊砂濃度分布となる。この非平衡状態の浮遊砂濃度分布は、航路下流側一定水深上での平衡状態の浮遊砂濃度分布に達するまでの範囲で生じ、この領域で地形は侵食される。以上のように、非平衡状態の浮遊漂砂は、浮上・沈降フラックスと直接的に関係しており地形変化を精度よく予測するためには、非平衡状態の浮遊砂濃度分布を正確に算定する必要がある。

3. 航路埋没の数値計算法

ここではまず航路埋没の数値予測に関する従来の方法とその問題点を述べ、それらを解決するための新しい方法を提案する。

3. 1 従来の浮遊漂砂による地形変化予測モデルとその問題点

a) 1次元拡散方程式に基づく方法

この方法がいわゆる平衡状態を仮定した算定法であり、各地点での基準点濃度 C_0 と鉛直方向の拡散係数 E_z を与えることにより各地点での濃度の鉛直分布を1次元拡散方程式の解である $C(z) = C_0 \times \exp(-E_z \times z / w_f)$ で算定する方法である。この算定法では C_0 や E_z が空間的に急変する場合、その影響が鉛直方向の濃度分布に瞬時に伝播するためその地点での濃度分布が急変する。すなわち浮遊漂砂の浮上・沈降過程は、解析上考慮されておらず、さらに移流速度の影響は C_0 と E_z において考慮されるが、直接的には移流過程は無視されている。

b) Bijkerモデル¹⁾

Bijkerは、航路内と航路外上流側(図-1のA領域)において平衡状態の浮遊砂濃度分布を仮定してその2地点の平衡状態の鉛直濃度分布から航路法面上とその下流側の非平衡状態の濃度分布を推定し、そこでの局所漂砂量 ΔQ を次式で算定した。

$$\Delta Q = \frac{dS_s(x)}{dx}, S_s(x) = S_{s3} + (S_{s1} - S_{s3}) \times \exp\left(-\frac{E_z \cdot w_f}{q} x\right) \quad (2)$$

$$\text{ここで、} E_z = \frac{h_{*1}(h_{*2} - h_{*1})}{h_{*2}\{1 - \exp(-h_{*1})\} - \alpha h_{*1}\{1 - \exp(-h_{*2})\}} \quad (3)$$

$h_* = w_f \times h / E_z$: 無次元化された水深、 h_1, h_2, h_3 : 航路外、法面上、航路内の水深、 S_s : 浮遊砂量フラックス、 w_f : 底質の沈降速度、 E_z : 鉛直方向の拡散係数、 q : 流量、 $\alpha = C_{03} / C_{01}$: 航路内外の基準点濃度の比である。この場合、航路内外での平衡状態における鉛直方向の拡散係数 E_{z3}, E_{z1} 及び基準点濃度 C_{03}, C_{01} と法面上での鉛直方向の拡散係数 E_{zx} のみが与えられれば非平衡状態の局所漂砂量 ΔQ_s が算定できる。しかしながら、算定される非平衡状態の浮遊漂砂について力学的な考察はなされておらず、a)の方法と同様浮遊漂砂の浮上・移流・沈降過程は、解析上考慮されていない。また、法面上での鉛直方向の拡散係数 E_{zx} についても水深に比例するような形で次式で仮定されている。

$$E_{zx} = E_{z1} \times (h_x / h_1) \quad (4)$$

c) 移流拡散方程式に基づく算定法

一般的に浮遊漂砂は、次式で示される非定常移流拡散方程式に基づいて解析される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} - w_f \frac{\partial C}{\partial z} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5)$$

上式は、浮遊漂砂の輸送速度 u 、水平・鉛直方向の拡散係数 E_x, E_z 、が与えられると、境界条件の下で数値的に解くことが可能である。しかしながら、計算機容量の制限や計算時間の短縮のために従来以下に示す種々の方法で解かれている。

i) 鉛直方向に積分する方法²⁾

一般的に計算機容量を削減するため、(5)式の移流拡散方程式は鉛直方向に積分した次式の形で解析される。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \Delta Q_s \quad (6)$$

ここで、 U : 断面平均流速、 $\bar{C}$: 浮遊砂の断面平均濃度であり、基準点での鉛直方向の漂砂量フラックス ΔQ_s は、波・流れ共存場の摩擦速度を u_{cw*} とおくと次式で示される。

$$\Delta Q_s = [(1 - \gamma) C_0 w_f (1 - u_{cw*} / w_f) + \alpha \bar{C} w_f] \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{cw*} > w_f & \gamma = 0 \\ u_{cw*} < w_f & \gamma = 1 \end{cases}$$

ここで、 $\bar{\alpha}$ は沈降フラックスの算定の際に、基準点での浮遊砂濃度に断面平均濃度を用いた事による補正係数であり、本論文では基準点濃度と断面平均濃度の比を考慮して20とした。このようにこの方法では、境界条件として基準点における鉛直方向の漂砂量フラックスを与える必要があり、そのためには浮上フラックスにおける底質砂の巻き上がり速度や、沈降フラックスにおける底質砂の濃度を与える必要がある。非平衡状態におけるこれらの値を実験で測定あるいは、解析で求めることは極めて困難である。また、底質砂の浮上・沈降過程が、基準点における鉛直方向の漂砂量フラックスのみで支配されることを考えると、上述された問題はこのモデルにとって避けがたい問題である。

ii) 鉛直方向を多層に分割する方法³⁾

入江らは、i)の方法での問題点を解消するため鉛直方向を多層に分割することにより、基準点での沈降フラックスの底質砂の濃度に最下層の断面平均濃度を使用した。しかしながら、各上下の層における底質砂の収支として鉛直方向の拡散係数に対する実験定数を与える必要があり、基準点濃度 C_0 、水平方向の拡散係数 E_x 以外に多くの実験定数を与える必要がある。

iii) 鉛直方向の分布形を仮定する方法

灘岡ら⁴⁾は、非平衡状態における濃度の鉛直分布に指数分布を仮定することで、浮遊砂濃度分布を基準点濃度 C_0 と形状パラメータ A (w_f/E_z に類する定数)の2変数を未知数におき、(5)式を満足するよう重み付き残差法により未知数を決定し非平衡状態の浮遊砂濃度分布を決定した。しかしながら、基準点での境界条件として浮上フラックスを与える必要があり、これについては平衡状態を仮定して、(平衡状態の基準点濃度)×(沈降速度)で与えており、やはり基準点での境界条件の与え方に問題がある。

3. 2 次元移流拡散方程式の高精度数値解析法に基づく新しい予測法

直接、非定常2次元移流拡散方程式を数値的に解いて非平衡状態の浮遊砂濃度分布を求める場合、最大の利点は、水平・鉛直方向の拡散係数 E_x, E_z と基準点濃度 C_0 を与えると求めることができ、これらの物理量は平衡状態を仮定するならば、実験により容易に求めることができる。Rijnら⁵⁾は、定常状態を考え更に水平方向の拡散項を無視した移流拡散方程式に基づく解析を行っている。本論文では、水平方向の拡散も考慮して(5)式を差分法により数値的に解いている。その算定法としては、Sprit operator approachにより計算を行い、移流方程式の差分は6点法を、拡散方程式の差分には5点法を用いて行った。このとき計算する上で基準点濃度 C_0 、水平・鉛直方向拡散係数 E_x, E_z 及び浮遊漂砂の輸送速度 u を与える必要がある。一般に C_0 は、波・流れ共存場の底部せん断力あるいは摩擦速度 u_{cw*} の関数として与えられ、 E も流れに対する渦動粘性係数に比例すると考えると、それも u_{cw*} の関数として与えられる。 u_{cw*} は、波・流れ共存場の底部境界層の渦動粘性係数に対して2層モデルを仮定することにより求められる、波及び流れの流速分布の厳密解に基づく底部せん断力の振幅から決定した。そして、鉛直方向の拡散係数 E_z 及び基準点濃度 C_0 を次式で算定した。

$$E_z = \alpha_{E_z} \times \kappa \times u_{cw*} \times \delta w \quad (8)$$

$$C_0 = \alpha_{C_0} \times \left[0.688 \times (a_m \cdot \sigma) / \left\{ 1.13 \times \left(\frac{\beta}{\beta} - 1 \right) \times g \times w_f \times T \right\} \right]^{1.77} \quad (9)$$

ここに、 κ はカルマン定数、 δw は境界層厚で混合距離 $l (= \kappa \times u_{cw*} / \sigma : \sigma = 2\pi/T)$ の4倍で定義した。 a_m は、境界層外縁の波による水粒子軌道振幅である。 $\alpha_{E_z}, \alpha_{C_0}$ は各々比例定数であり、平衡状態と考えられる航路上流側での鉛直方向の浮遊砂濃度分布の実験結果と比較して決定した。また水平方向の拡散係数 E_x は E_z に等しいと仮定し、浮遊砂の沈降速度 w_f は、Rubeyの式より求めた。なお、数値計算の安定性に関わるペクレ数とクーラン数については、ペクレ数 $(E_z \Delta t / \Delta z^2) = .22$ 、クーラン数 $(w_f \Delta t / \Delta z) = .05$ 程度で計算を行った。ここに、 $w_f = 1.16$ cm/sec: 沈降速度、 $\Delta t = .02$ sec、 $\Delta x = 5$ cm、 $\Delta z = .5$ cmである。また、浮遊漂砂の輸送速度 u は流速に等しいと仮定し、流速の鉛直分布は対数分布を仮定して断面平均流速 U より求めた。断面平均流速 U については、連続式と流れの影響を考慮したラディエーション応力項を含む運動方程式を2-step Lax-Wendroff法で差分化して算定した。

一方、掃流漂砂は浮遊漂砂はど巻き上がり高さが大きくないためその非平衡性が及ぼす地形変化に対する影響はそれほど大きくないと考えられるが、基準点濃度を介して浮遊漂砂と関係していることを考えると今後掃流漂砂の非平衡性について研究する必要があると考えられる。本論文では、著者ら⁶⁾によって提案されている次式を用いて浮遊漂砂とは独立に掃流砂量フラックス Q_b を算定した。

$$Q_b = 47 \sigma \pi d_{50}^2 (\psi - \psi_c)^{3/2} U / u_w \quad (10)$$

$$\begin{cases} \psi = u_{cw*}^2 / \left\{ \left(\frac{\beta}{\beta} - 1 \right) g d_{50} \right\} \\ \psi_c = u_{*c}^2 / \left\{ \left(\frac{\beta}{\beta} - 1 \right) g d_{50} \right\} \end{cases}$$

ここに、 d_{50} : 底質砂の中央粒径、 $u_w (= a_m \times \sigma)$: 境界層外縁の波による水粒子速度振幅、 u_{*c} : 岩垣の式による

限界摩擦速度である。

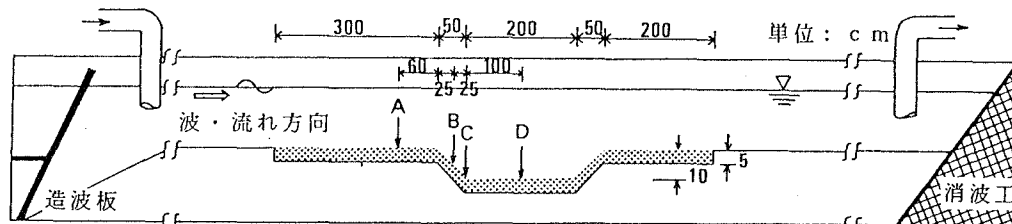


図-2 実験で用いた航路形状と浮遊砂濃度測定地点

4. 航路埋没実験の概要

実験は2次元造波水槽を用い、図-2に示す諸寸法を有する航路を水路中央部に設け流れ及び波が航路を横断する場合を想定した。航路の上流側では平衡状態の浮遊砂濃度分布となるように3mの移動床を設け、この移動床上で侵食が生じないように移動床の上流端で給砂した。用いた底質砂は、中央粒径0.012cmの豊浦標準砂である。作用させた波の周期と波高は1.5secと8cm程度とし、断面平均流速 U は19.4, 10cm/secの2種類とした。鉛直方向の浮遊砂濃度の測定は、採水により砂漣の峰上0.7cmの高さから鉛直方向に1cm間隔の8地点で同時測定した。測定精度は、30ppm程度である。非平衡状態の浮遊砂濃度の測定は、図-2に示すように堆積領域（浮上フラックス<沈降フラックス）である上流側の航路法面上及びその下流側の3地点で測定した。そして、航路上流部の平衡状態と考えられる浮遊砂濃度の鉛直分布は、60cm上流側のA地点で測定した。また、地形変化の測定は、造波開始時間から3.5時間後に行った。

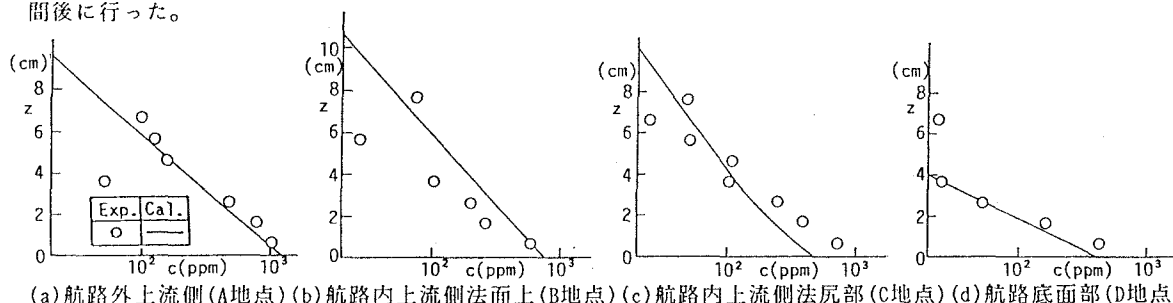


図-3 航路周辺の浮遊砂濃度の鉛直分布 ($U=10\text{cm/sec}$)

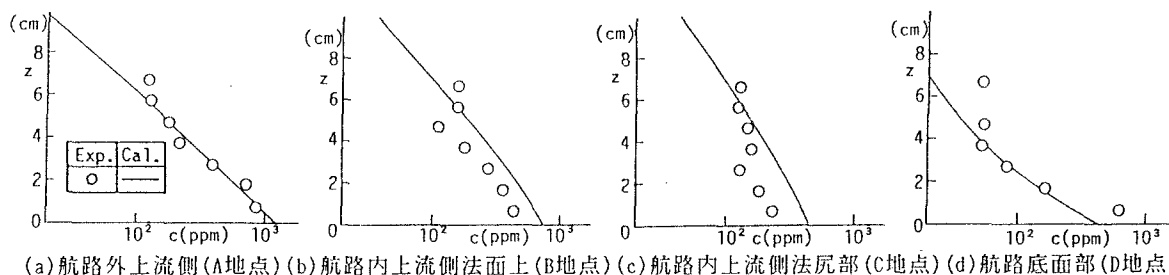


図-4 航路周辺の浮遊砂濃度の鉛直分布 ($U=19.4\text{cm/sec}$)

5. 解析法の適用性

5. 1 非平衡状態の浮遊砂濃度の空間分布

図-3と図-4は、各々断面平均流速 U が10と19.4cm/secの場合における航路周辺の浮遊砂濃度の鉛直分布を示す。各(a)図は、航路上流部のほぼ平衡状態と考えられる図-2中のA地点における浮遊砂濃度分布を示し、各(b)(c)(d)図は、航路内の浮遊砂濃度分布を示し図-2中のB, C, D地点における鉛直方向の濃度分布を示す。この場合縦軸の z は、砂漣の峰から鉛直上方にとっている。また、図-3, 4中に示されている算定結果は、Sprit operator approachにより計算されたものである。両図より、非平衡状態の浮遊砂の鉛直分布は、航路の法面上でもほぼ指数分布を保ちながら移流していることや、航路上流側の法面上では移流による上流からの砂の供給のため、底部から離れた所での濃度はあまり変化しないことがわかる。また、水深の増加に伴う底部せん断力の減少により、底部からの浮上フラックスが流下に伴い減少するため、基準点近傍の浮遊砂濃度は減少する。また、航路法尻から航路底面上にかけての濃度分布は、水深が深いため基準点濃度も拡散係数も小さいが、上流から移流してきた浮遊砂の沈降に伴って濃度勾配が緩やかになり、航路底面上の平衡状態の濃度分布に漸近する。しかしながら、基準点濃度は、航路底面上では顕著な場所的变化は示さない。この航路法面上での浮遊砂濃度分布の挙動は、図-4の断面平均流速の大きい場合により明確に現れる。

なお、上述の方法によって計算された浮遊砂濃度分布は、このような実測された濃度分布の特性を十分再現し

ている。航路法面上での濃度分布において実験結果の方が小さく現れているがこれは、算定結果において法面上での鉛直方向の流速が無視されているためであると考えられる。

図-5, 6は、各々断面平均流速 U が10と19.4cm/secの場合における航路周辺の浮遊漂砂と掃流漂砂の漂砂量フラックスの空間分布を示す。断面平均流速の違いによる各漂砂量の定量的な比較をして

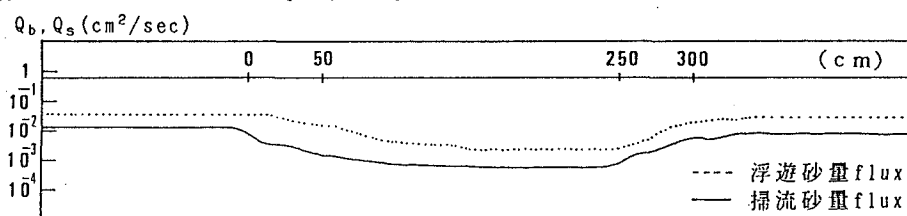


図-5 航路周辺の浮遊、掃流砂量フラックスの空間分布 ($U=10.0$ cm/sec)

みると、 $U=19.4$ cm/secの場合は $U=10$ cm/secの場合に対して浮遊砂量フラックスは2倍以上の増加を示し、掃流砂量フラックスは5倍以上の増加を示して

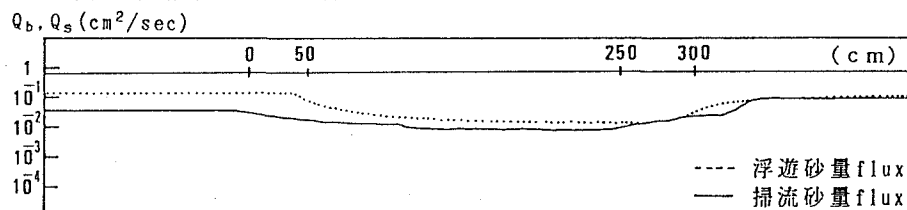


図-6 航路周辺の浮遊、掃流砂量フラックスの空間分布 ($U=19.4$ cm/sec)

いる。すなわち、断面平均流速の増加に伴う影響は、浮遊漂砂の特性量（拡散係数、基準点濃度）よりも、掃流漂砂の特性量（底面せん断力）の増加により大きい影響を与えることになる。しかしながら、漂砂量フラックスの空間的な変化は図-5, 6の両ケース共、浮遊漂砂の方がその非平衡性のために、掃流砂よりもより広い範囲で生じ、この傾向は断面平均流速が大きいほど顕著である。

5. 2 航路断面形状の変化

図-7, 8は、各々断面平均流速 U が10と19.4 cm/secの場合における3.5時間後の航路地形についての3種類の解析法による算定結果と実験結果との比較を示す。すなわち1次元拡散方程式に基づく計算法（図中にEqui.で示す）、2次元移流拡散方程式を鉛直方向に積分して断面平均濃度を用いる計算法（図中にL. S. B.で示す）及び高精度計算法（図中にS. O. A.で示す）の3つの方法である。各算定結果の比較を行うと、浮遊漂砂の非平衡性があまり広い範囲で

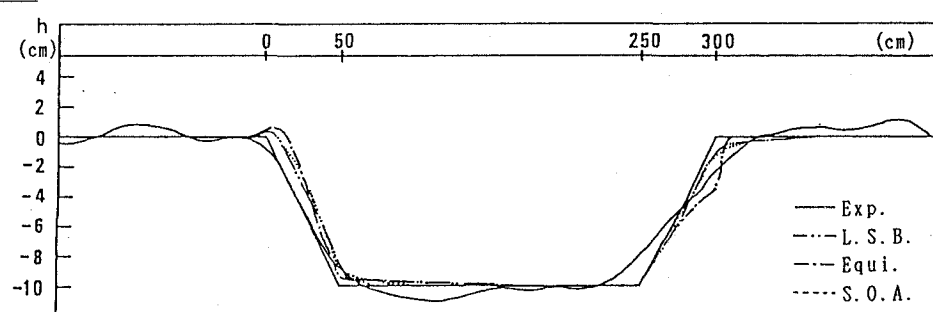


図-7 航路断面形状の変化 ($U=10.0$ cm/sec, 3.5時間後)

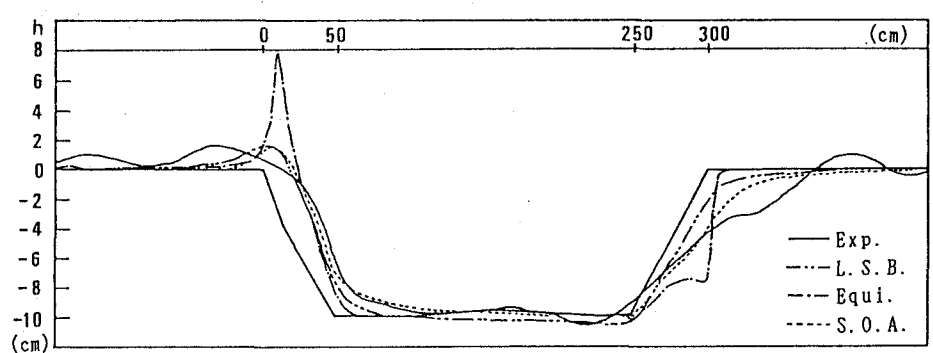
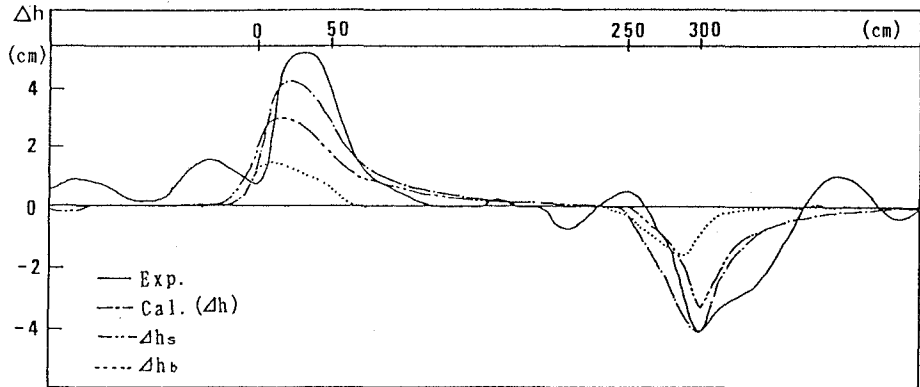


図-8 航路断面形状の変化 ($U=19.4$ cm/sec, 3.5時間後)

生じない断面平均流速の小さい図-7の場合、各算定結果にそれほど差異はみられない。しかしながら、浮遊漂砂の非平衡性が広い範囲で生じる断面平均流速の大きい図-8の場合、1次元拡散方程式に基づく計算結果は、他の移流拡散方程式に基づく2つの計算法に比較すると航路の法面上で大きく異なる。これは、1次元拡散方程式に基づく計算方法では、浮遊砂濃度分布はその地点の基準点濃度と拡散係数によって決定されるため、底面のせん断特性の急変する航路法面上で浮遊砂濃度分布が空間的に急変し、この付近での水深変化が過大評価されるためである。また、移流拡散方程式に基づく2つの解析法の違いは、鉛直方向の濃度分布を考えるか否かであり、鉛直方向の濃度分布形状が空間的にあまり変化しない本研究の場合では、両算定結果に差異は少ないと考えられる。一方、実験結果と3つの算定結果との比較を行うと、地形変化量の少ない図-7の場合には明確な差異は現れないが、地形変化量の多い図-8の場合には、やはり高精度計算法が航路周辺の地形変化全体を、ほぼ定性的にも定量的にも予測できていると判断できよう。なお、実験結果が1m程度の波長を有して変動しているが、これは消波工からの反射の影響と考え

られる。また、図-7の場合には3つの算定結果において、航路埋没が生じる結果となっているにも関わらず、実験結果では航路埋没が生じていない。これは、波によるnetの冲向きの漂砂移動が生じており、流れによる漂砂移動とほぼつりあっているため



に航路埋没が生じなかったと考えられる。波・流れ共存場での漂砂移動において、流れの方向の輸送が卓越する条件を決めるパラメータとして U/u_b を考えると、図-7の場合 $U/u_b=0.37$ 、図-8の場合 $U/u_b=0.76$ である。 U/u_b の値がある程度以上になり、流れの移流による漂砂量が、波によるnetの漂砂量に比較して十分大きい場合でないと、高精度計算法による予測は困難であると思われる。最後に図-9は、断面平均流速 U が19.4cm/secの場合について、高精度計算法の算定結果の掃流、浮遊漂砂別の水深変化量（それぞれ Δh_b 、 Δh_s と表示）を示したものである。図より掃流漂砂による地形変化は、底部せん断力の場所的変化の大きい航路の法面上でほとんど生じており、浮遊漂砂による地形変化は法面上及びその下流側の非平衡状態の浮遊砂濃度の生じる広い範囲で変化していることがわかる。

6. 結語

- i) 漂砂移動の外力となる波や流れが空間的に急変する領域において、正確に地形変化を予測する場合、浮遊漂砂に対して非平衡性を考慮する必要がある、その非平衡性を正確に考慮するためには、非定常2次元移流拡散方程式に基づいて浮遊砂濃度を予測する必要がある。
- ii) 非平衡状態の浮遊砂濃度分布及びそれに伴う地形変化の予測法を、非定常2次元移流拡散方程式の高精度計算法に基づいて提案した。この算定法は、境界条件として比較的实验で測定が容易な基準点濃度と拡散係数を与えると解くことができ、従来の算定法のように浮上・沈降フラックスで境界条件を与えることを必要としない利点がある。
- iii) 航路上流側の法面上における非平衡状態の浮遊砂濃度分布は、移流に伴う底部せん断力の減少で浮上フラックスが減少し、底部付近の浮遊砂濃度は減少するため、結果として鉛直方向の濃度勾配は小さくなる。さらに、航路の底面においては、法面上より拡散係数は小さく、法面上で比較的上方まで巻き上げられた浮遊砂が沈降し、底面における平衡状態に達するまで上方の濃度が減少しながら移流される。そして、こうした非平衡状態の浮遊砂濃度分布の特性は本論文で提案した算定法でほぼ予測できる。
- iv) 航路周辺の地形変化は、断面平均流速が大きいほど非平衡状態の浮遊砂濃度分布の発生する領域が広がり、広い範囲で地形変化を生じる。波・流れ共存場における漂砂量が、波ではなく流れに支配される領域におけるこのような地形変化は、本論文で提案した算定法で十分予測できる。

今後さらに波によるnetの漂砂量及び掃流砂における非平衡性の影響等に対する検討を行っていくつもりである。

<参考文献>

- 1) Bijker, Z.W.: Sedimentation in channels and trenches, proc. of 17th Conf. on Coastal Eng., 1980, pp. 1708~1718.
- 2) 榎木亨・李宗燮・出口一郎・松山章：非線形分散波理論による波浪変形および海浜流の数値予測モデルについて，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 238~242，1985.
- 3) 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，pp. 157~204，1985.
- 4) 灘岡和夫・蒲田浩久・八木宏：非平衡性および三次元性を考慮した簡易浮遊砂計算法の提案，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 322~326，1988.
- 5) Leo C. van Rijn: Sedimentation of Dredged Channels by Currents and Waves. Journal of Waterway, port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 112, No. 5, ASCE, 1986, pp. 541~559.
- 6) 榎木亨・出口一郎・片上貴文：河口流出砂の堆積形状に関する数値予測モデルと堆積形状に及ぼす河口処理工の影響，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 377~381，1987.