

河床変動を伴う流れの抵抗について

佐賀大学 工学系研究科 学生員 大熊信之

佐賀大学 理工学部 H. M. Nagy

佐賀大学 理工学部 正員 渡辺訓甫

1. はじめに 移動床水路では、与えられた外部条件（粒径、流量）に応答して河床波が形成され、その河床波は流水抵抗や流砂運動に大きな影響を与える。また、流砂量の不均衡による河床の上昇や低下は流れ特性を変えるため、それに伴って流砂特性も変化し、流れ、流砂、河床形状が相互作用系を形成している。

著者ら¹⁾は、渡辺、Nagy ら^{2,3)}による河床波を考慮した抵抗予測手法に基づいて移動床流れのシミュレーションを行い、その適合性について検討している。本文は、本手法を用いて粗度が未知である移動床水路の河床変動計算法を提案し、モデル水路でシミュレーションを試みた結果について述べたものである。

2. 流れの解析 低水流領域の抵抗則として、次式

$$\frac{u_m}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 8.5 - \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \quad (1)$$

で定義される相当砂粒粗度 k_s を河床波のスケールと関連づけた渡辺、Nagy らの式³⁾

$$\frac{k_s}{H} = \frac{1}{3} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.3} \exp \left\{ \kappa \left[8.5 - 0.8 \left(\frac{H}{h} \right)^{0.25} \left(\frac{H}{L} \right)^{-0.125} \left(\frac{u_m}{u_*} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

を用いる。ここに、 H ：波高、 L ：波長である。

流れの解析にはプランチ・ノードモデルを用いる。基礎式は次に示す運動方程式と連続の式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial x} + gA \frac{\partial Y}{\partial x} + J(Q, Y) = 0 \quad (3) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

である。ここに、 Y ：水位、 $J(Q, Y)$ ：摩擦勾配である。

流量と河床勾配を与えると、マニングの粗度係数 n の仮定値に対して、式 (3)、(4) で流れが決定される。河床波のスケールは水理量と底質との関数で与えられるので^{2,3)}、式 (1) (2) を満たす k_s 、すなわち n の新値が求まる。この手順を繰り返して流れと粗度の平衡状態を求め、その後河床変動を計算する。

3. 河床変動計算 河床変動の計算には、流砂の連続条件式、

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{1}{B(1-\lambda)} \cdot \frac{\partial(q_B \cdot B)}{\partial x} \quad (5)$$

を用いる。ここに、 z ：基準水平面からの河床高、 B ：掃流幅、 q_B ：単位幅・単位時間あたりの流砂量、 λ ：空隙率で $\lambda = 0.45$ である。なお、流砂量の算定にあたってはスイス公式を用いる。平衡状態の流れによる Δt 時間の河床変動量から新たな河床高を求め、その河床に対して前述の流れと粗度の計算を行う。

4. 計算条件 計算条件は以下の通りである。

①水路：初期河床勾配1/1000、水路長10km、水路幅10m。

②流量：6.981 m³/s、下流端水位：2.50m

③砂の粒径：0.5mm（限界掃流力 $\psi_c = 0.0371$ ）、上・下流端での流砂量を0。

④河床変動時間： $\Delta t = 2.0hr$ 。

5. 解析結果と考察 図-1は水面形・河床形状、図-2は (a) 掃流力 ψ 、(b) 波高・水深比 H/h 、(c) 波形勾配 H/L 、(d) 粗度係数 n の流れ方向の変化を表している。各図の実線は1日後、破線は40日後、点線は3年後の諸量である。上流端からの流入土砂がないため上流端付近では河床が低下し、図-2 (a) に示すように、掃流力は急減する。また、下流部背水区間でも掃流力が急減するため、図-1に示すように

上流からの掃流土砂は背水末端付近に堆積する。堆砂背面で河床勾配は緩やかになるので掃流力は減少し、それに応じて河床波スケール、粗度係数とも減少する。一方、堆砂前面では河床勾配が大きくなるため、掃流力はそこで一旦増加する。それに伴って波高も増加するが、9kmより下流は砂粒レイノルズ数が $u_* d/\nu < 20$ となっており、短波長の河床波ripplesが形成されて図-2(c)、(d)に示すように波形勾配、粗度係数共に極めて大きくなる。堆砂が進行するにつれて背水区間は短くなるため、前述の傾向を示す領域は次第に下流側へ進行していく。3年後には堆砂は水路末端に到達して背水区間は消滅しており、下流部ではほぼ平衡状態になる。

上流部では、河床の低下によって掃流力が減少し、その範囲は時間の経過と共に下流側へ拡大して河床勾配を減じていく。掃流力の減少に伴って、波高、波形勾配も減少していくが、上流端付近では波長の小さいripplesが形成されているため、波形勾配が大きくなり、粗度係数が増加する。0.5km付近の波形勾配が局所的に小さい区間は下流へ移動して明瞭でなくなるが、2～3km付近に粗度係数の小さい区間が存在している。

6. おわりに 本シミュレート手法により、粗度係数が未知である移動床水路において河床変動を伴った流れを解析できた。今後は、洪水時を対象とした非定常流の場合についても検討して行く予定である。

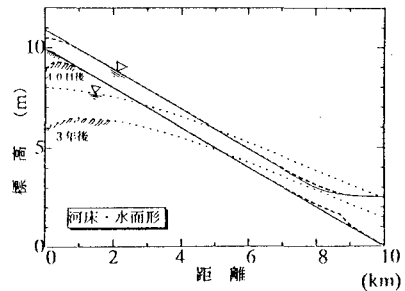


図-1 河床形態、水面形

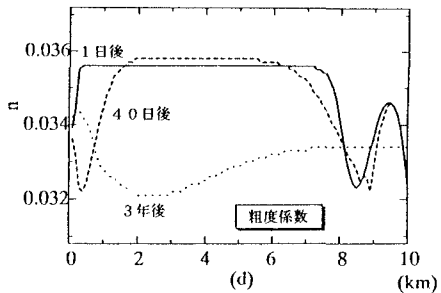
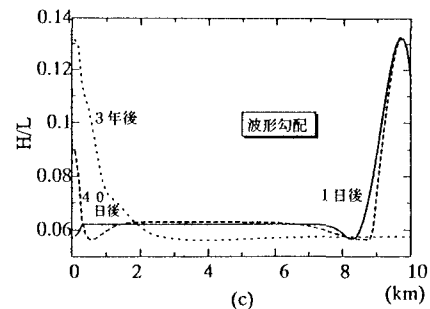
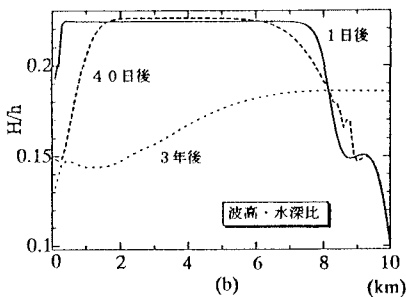
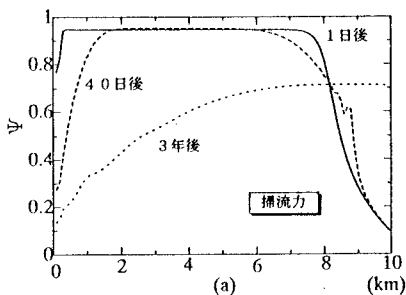


図-2 掃流力、河床波スケール、粗度係数

参考文献

- 1) 渡辺、大熊：移動床水路における流水抵抗の予測手法について：土木学会西部支部講演概要集、1996。
- 2) Nagy, Watanabe, Hirano：Flow Resistance in Alluvial Channels：水工学論文集、Vol. 39, 1995。
- 3) Watanabe, Hirano, Nagy：On the Dominant Length of Sand Wave in the Lower Flow Regime，九大紀要，1993。