

粘着性・非粘着性河床材料混在場における土砂輸送特性 —トンレサップ川を対象として—

竹林洋史・中元達也*・藤田正治

* 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

要 旨

河川の中・上流域には河床の一部から岩が露出している場を良く見かける。また、平野部においては、粘着性土層と非粘着性土層の互層構造が良く見られ、河床の侵食特性が空間的に変化している場が存在する。このような場では、岩や粘着性土が露出する箇所の侵食が抑制され、さらに土砂が非平衡な状態で下流へ輸送される。本研究では、掃流砂層の厚さを無次元掃流力の関数として時空間的に変化させ、粘着性・非粘着性河床材料混在場における流砂量を評価した。さらに、本モデルをカンボジア国・トンレサップ川に適用し、粘着性土層の存在が流砂・河床変動特性に与える影響について検討した。その結果、順流と逆流を繰り返すトンレサップ川では、メコン河の粗い土砂がトンレサップ湖まではほとんど流れておらず、メコン河の土砂によるトンレサップ湖の縮小については、その心配の必要がないことが分かった。

キーワード: 粘着性土, 非粘着性土, 河床変動, 非平衡流砂, トンレサップ川

1. はじめに

トンレサップ川の流域面積は84000 km²であり、カンボジア国内におけるメコン河流域の約54%を占めている (WUP-JICA, 2004)。トンレサップ川の長さは約150kmであり、Fig. 1に示すように、カンボジア国の中心部を流れ、トンレサップ湖とメコン河を結んでいる。トンレサップ川とメコン河は、カンボジア国の首都プノンペンで合流しており、合流点付近はチャトムックと呼ばれている。トンレサップ湖は、東南アジア最大の淡水湖であり、雨期の面積は13000 km²にも達する (堀, 2000)。トンレサップ川流域は、カンボジア国とベトナム国南部における経済活動や生態システムにおいて非常に重要な役割を果たしているだけでなく、その特異な流向特性によって非常に良く知られた流域である。トンレサップ川の水は、10月から5月までは、トンレサップ湖からメコン河へ流れるが、6月から9月は、メコン河からトンレサップ湖へ流れる。つまり、トンレサップ湖は、メコン川の洪水を緩和する自然の貯水池として機能している。このように、雨期に逆流する特性があるため、洪水時のメコン河からの大量の土砂がトンレサップ

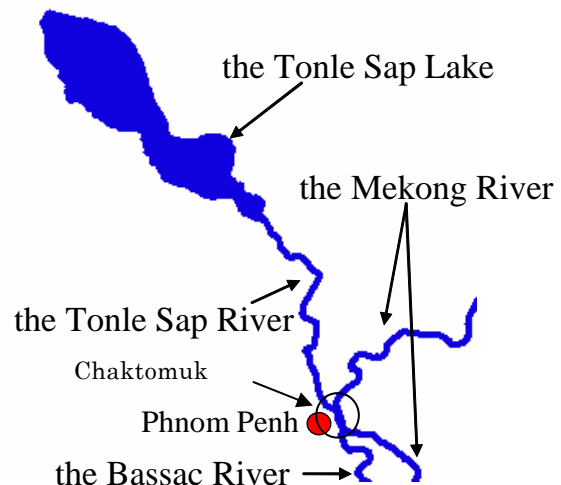


Fig. 1 Tonle Sap System

湖に流れ込み、トンレサップ湖が年々埋まっているのはと危惧されている。

トンレサップ川流域における河床変動特性については、いくつかの研究グループによって活発に研究されている。Kummu, Koponen and Sarkkula (2005) は、トンレサップ湖における土砂輸送特性を三次元

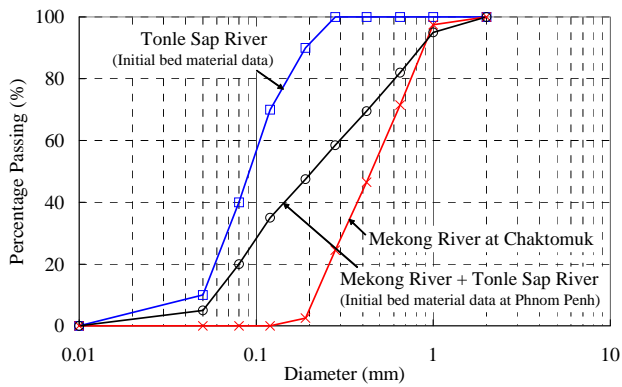


Fig. 2 Size distribution of bed material employed in the analysis

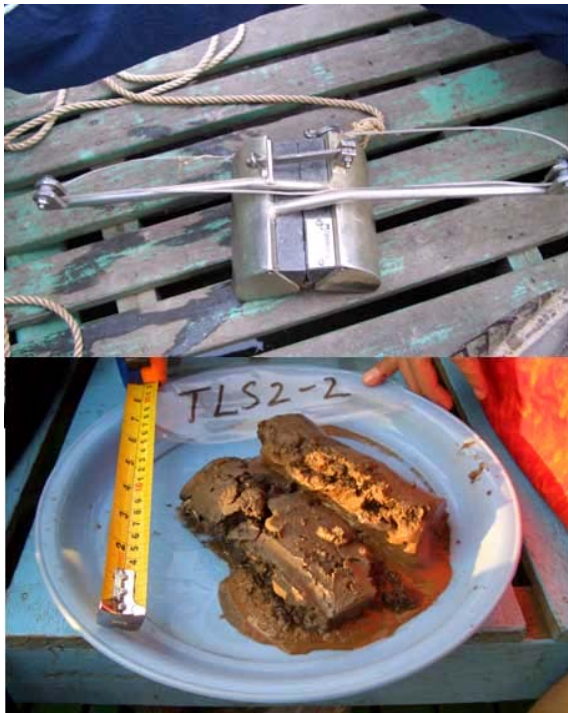
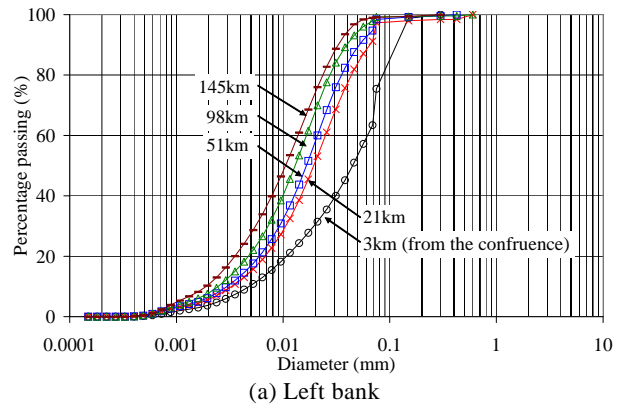


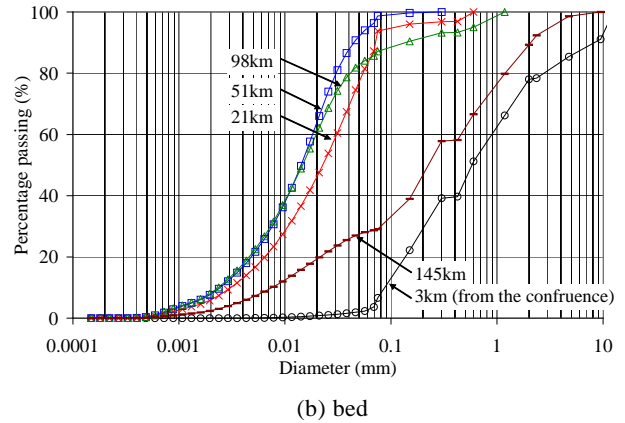
Fig. 3 Sediment sampler and an example of sediment at Tonle Sap River

流れの河床変動解析を用いて調べている。また、Egashira, Takebayashi and Inoue (1999) や Olsen and Tjerry (2005) は、平面二次元の河床変動解析を用いてチャトムック地区の河床変動特性を調べている。これらの研究成果は、それぞれの地区の河床変動特性を把握するための重要な情報を提供しているが、河床変動特性を強く支配する河床材料の粒度について十分な実測データに基づいて決定していない。そのため、粒度分布の季節変化の大きいトンレサップ流域においては、解析結果の信頼性に問題を残している。

Fig. 2に示すように、メコン河の土砂は、平均粒径0.5mm程度の非粘着性材料であるが、トンレサップ川の土砂は、平均粒径0.1mm以下で粘着性を示す材料を含んでいる。つまり、逆流するときには、メコ



(a) Left bank



(b) bed

Fig. 4 Size distribution of bed and bank materials along the Tonle Sap River

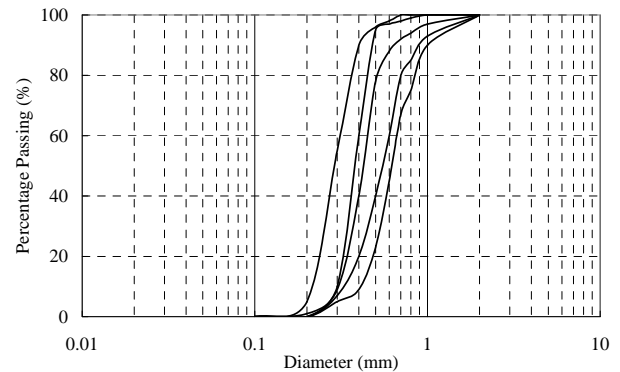


Fig. 5 Examples of size distribution of bed materials in the Mekong River at the confluence



Fig. 6 Shells on beds at 145km from Phnom Penh

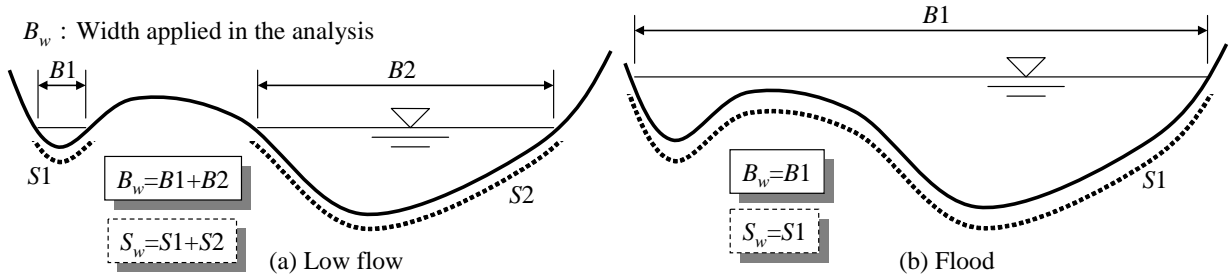


Fig. 7 Definition of flow width and wetted perimeter

ン河の粗い土砂がトンレサップ川の粘着性河床上を流れていることとなる。このような場では、粘着性土が露出する箇所の侵食が抑制され、さらに土砂が非平衡な状態で輸送される。そこで、本研究では、掃流砂層の厚さを無次元掃流力の関数として時空間的に変化させ、河床を粘着性土と非粘着性土の混在場として扱った一次元河床変動解析モデルを開発し、カンボジア国・トンレサップ川に開発したモデルを適用し、粘着性土層の存在が流砂・河床変動特性に与える影響について検討する。

2. 河床材料調査の概要

河床材料は、乾期において、Fig. 3に示すサンプラーを用いて格段面ごとに2カ所ずつ採取した。サンプラーは、8cmの厚さで河床表面から河床材料を採取する。また、同時に、左右の両河岸からも土砂を採取している。断面間隔は約10kmであり、河道全川に対して行った。Fig. 4に河床材料と河岸材料の一例を示す。河床材料には、粗い粒径の材料も含まれているが、それらを除くと河床材料と河岸材料は同オーダーの粒径となっている。チャトムックから3km地点の粗い河床材料は、メコン河から流入したものと考えられる。これは、トンレサップ川に比べ、メコン河の河床材料は粗く、Fig. 5に示すように、平均粒径が約0.5mm程度となっているためである。一方、145km地点の粗い材料については、4.で示すように、メコン河の材料が流れ込む可能性は非常に少ないため、貝殻の破片や護岸工事の材料などが含まれていた可能性が高い。これは、Fig. 6に示すように、トンレサップ川がトンレサップ湖と接続している地点は非常に貝が多く、河床全体が貝で覆われている地点も存在したためである。

3. 解析方法

3.1 基礎方程式

流れの質量保存則および運動方程式は、以下のようである。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -\frac{Q_f}{B_f} \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - gAI_e + \frac{\partial}{\partial x} (A\sigma_{xx}) \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 x は流下方向の座標、 A は本川の流水断面積、 Q は本川の流量、 Q_f は氾濫原から本川への横流入流量、 B_f は氾濫原から本川への流入幅、 g は重力加速度、 ρ は水の比重、 z は本川の水位、 I_e は本川のエネルギー勾配であり、以下のようにマニング則によって評価している。

$$I_e = \left(\frac{n_m Q}{R_w^{(2/3)} A} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 n_m はマニングの粗度係数、 R_w は径深である。本解析では、雨期と乾期の流れと流砂を評価するため、河道の横断形状を考慮している。そのため、流水川幅 (B_w) と潤辺 (S_w) はFig. 7に示すように評価している。 σ_{xx} は乱流応力であり、以下のように評価している。

$$\sigma_{xx} = 2\nu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{A} \right) \quad (4)$$

$$\nu = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (5)$$

ここに、 ν は渦動粘性係数である。流砂量は、河床勾配が限界掃流力に与える影響を考慮した芦田・道上式を用いる (芦田・道上, 1972, Kovacs and Parker, 1994, Liu, 1991)。

$$Q_{bk} = B_w 17 \sqrt{sgd_k^3 \tau_{*ck}^{3/2}} \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right) \left(1 - K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) f_{bk} r_b \quad (6)$$

ここに、 s は土砂の水中比重、 τ_{*k} は k 粒径階に対する無次元掃流力であり、以下の修正Egiazaroff式により算定した (芦田・道上, 1972)。

$$\tau_{*ck} = \tau_{*cm} \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} (19 d_k / d_m)} \right]^2 \quad d_k / d_m \geq 0.4 \quad (7-1)$$

$$\tau_{*ck} = 0.85 \tau_{*cm} \frac{d_m}{d_k} \quad d_k / d_m < 0.4 \quad (7-2)$$

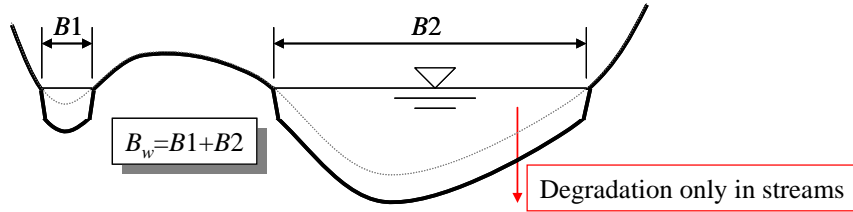


Fig. 8 Change of cross-sectional shape

ここに、 τ_{*cm} は交換層内の土砂の平均粒径に対する無次元限界掃流力であり、以下の岩垣式(岩垣, 1956)により算定した。

$$d_m \geq 0.303 \quad (8-1)$$

$$0.118 \leq d_m < 0.303 \quad (8-2)$$

$$0.0565 \leq d_m < 0.118 \quad (8-3)$$

$$0.0065 \leq d_m < 0.0565 \quad (8-4)$$

$$d_m < 0.0065 \quad (\text{Unit : cm}) \quad (8-5)$$

$$\tau_{*cm} = u_{*cm}^2 / (sgd_m) \quad (9)$$

τ_{*ek} は k 粒径階に対する有効無次元掃流力であり、以下の関係より求める⁶⁾。

$$u_{*em} = \frac{Q}{A \left(6 + 2.5 \ln \frac{h}{d_m (1 + 2\tau_{*m})} \right)} \quad (10)$$

$$\tau_{*ek} = u_{*em}^2 / (sgd_k) \quad (11)$$

K_c は限界掃流力の修正関数であり、以下の関係より求める (Kovacs and Parker, 1994, Liu, 1991)。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_c} \left(\frac{\rho}{s} + 1 \right) \tan \theta_x \quad (12)$$

ここに、 μ_c は静止摩擦係数、 θ_x は流下方向の河床勾配である。河道横断形状を考慮した一次元河床変動解析であるが、断面流砂量と断面内の流水域の河床材料の粒度は、それぞれ、一つの値としている。 f_{bk} は k 粒径階に対する流水域の掃流砂層の土砂の存在率である。掃流砂層内の土砂の粒度は、以下の土砂の質量保存則により求める。

$$B_w \frac{\partial c_b E_b f_{bk}}{\partial t} + B_w (1-\lambda) F_{bk} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_{bk}}{\partial x} + B_w w_k (c_{sbe} - c_{sbe}) = 0$$

$$\begin{cases} F_{bk} = f_{d1k}, \partial z_b / \partial t \leq 0, E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \\ F_{bk} = f_c, \partial z_b / \partial t \leq 0, E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \\ F_{bk} = f_{bk}, \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

ここに、 λ は河床土砂の空隙率、 f_{dik} は掃流砂層直下の堆積層(遷移層(Liu, 1991))における k 粒径階の土砂の存在率、 E_b は掃流砂層の厚さである。掃流

砂層直下の堆積層における土砂の質量保存則は、以下のようである。

$$\frac{\partial E_{d1} f_{d1k}}{\partial t} - F_{dk} \frac{\partial E_{d1}}{\partial t} = 0 \quad \begin{cases} F_{dk} = f_{d1k}, \partial z_b / \partial t \leq 0 \\ F_{dk} = f_{bk}, \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 E_{d1} は掃流砂層直下の堆積層の厚さ、 f_c は粘着性土砂の存在率、 f_{dmk} は m 番目の堆積層における k 粒径階の存在率、 c_b は鉛直平均の掃流砂の濃度、 E_{be} は平衡掃流砂層厚さであり、以下の関係より求める (Egashira and Ashida, 1992)。

$$\frac{E_{be}}{d_m} = \frac{1}{c_b \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_{*m} \quad (15)$$

ここに、 ϕ は安息角、 τ_{*m} は平均粒径に対する無次元掃流力、 E_{sd} は粘着性土層上の非粘着性土の厚さ、 E_b は掃流砂層の厚さであり、以下のよう求める。

$$E_b = E_{be} \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (16-1)$$

$$E_b = E_{sd} \frac{1-\lambda}{c_b} \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (16-2)$$

r_b は粘着性土層上の非粘着性土の量に関するパラメータであり、以下のよう求める。

$$r_b = 1 \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (17-1)$$

$$r_b = \frac{E_b}{E_{be}} \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1-\lambda} \quad (17-2)$$

浮遊砂の沈降速度(w_{fk})は、以下の関係より求めた (Rubey, 1933)。

$$w_{fk} = \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_k^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{(\rho_s/\rho - 1)gd_k^3}} \right) \times \sqrt{(\rho_s/\rho - 1)gd_k} \quad (18)$$

c_{sbe} は k 粒径階の浮遊砂の基準点濃度である。 c_{sbe} は基準点高さにおける k 粒径階の平衡浮遊砂濃度であり、以下の関係より求めた (Lane and Kalinske, 1941)。

$$c_{sbe} = 5.55 \left(\frac{1}{2} \frac{u_*}{w_{fk}} \exp \left(-\frac{w_{fk}}{u_*} \right) \right)^{1.61} f_{bk} r_b \quad (\text{unit: ppm}) \quad (19)$$

k 粒径階の断面平均浮遊砂濃度(c_{sk})は、以下の関係より求めた。

$$\frac{\partial A c_{sk}}{\partial t} + \frac{\partial Q c_{sk}}{\partial x} = A D_h \frac{\partial^2 c_{sk}}{\partial x^2} + B_w w_{jk} (c_{sbe} - c_{sbk}) \quad (20)$$

浮遊砂の水深分布は、指数分布を仮定している。従って、断面平均浮遊砂濃度と基準点濃度の関係は、以下のようである。

$$c_{sk} = \frac{c_{sbk}}{\beta_s} (1 - e^{-\beta_s z}) \quad (21)$$

ここに、 $\beta_s = w_{jk} h / D$ 、 h は断面平均水深である。 D は浮遊砂の拡散係数であり、簡単のため、渦動粘性係数と同じ値を与えている。掃流砂層内の土砂の平均粒径は、以下の関係より求める。

$$d_m = \sum_{k=1}^n d_k f_{bk} \quad (22)$$

ここに、 n は粒径階の数である。河床はFig. 8に示すように、断面内の流水域のみ変化するとして以下の河床位方程式より求める。

$$B_w \frac{\partial (c_b E_b)}{\partial t} + B_w (1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial Q_{bk}}{\partial x} + B_w w_k (c_{sbe} - c_{sbk}) \right) = 0$$

$$E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_b}{1 - \lambda} \quad (23-1)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + V_e = 0 \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_b}{1 - \lambda} \quad (23-2)$$

粘着性土層の侵食速度(V_e)は関根らの式(2003)を修正した以下の関係より求める。

$$V_e = \alpha R_{wc}^{2.5} u_*^3 (1 - r_b) \quad (24)$$

メコン河からトンレサップ川への水の流れは、チャトムックでの合流点からだけではなく、メコン河とトンレサップ川に挟まれた氾濫原を通過してメコン河からトンレサップ川へ流れ込むものもあり、無視できない量となっている。そこで、式(1)の右辺に示すように、横流入を考慮している。氾濫原上の流れの質量保存則と運動量保存則は、以下のようである。

$$B_f \frac{\partial z_f}{\partial t} + \frac{\partial Q_f}{\partial y} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q_f}{\partial t} = -g A_f \frac{\partial z_f}{\partial y} - g A_f I_e \quad (26)$$

ここに、 z_f は氾濫原の水位、 y はトンレサップ川本川の流れと直行する方向の座標、 A_f は氾濫原の流れの流水断面積である。

3.2 解析条件

解析条件はCase 1からCase 4の4ケースである。Case1とCase2は、単純な水理条件を対象とした解析であり、計算領域は直線矩形水路を想定し、初期河床を平坦床とする。初期河床は、砂礫による可侵食性河床 (Case1)、粘着性土による難侵食性 (Case2)

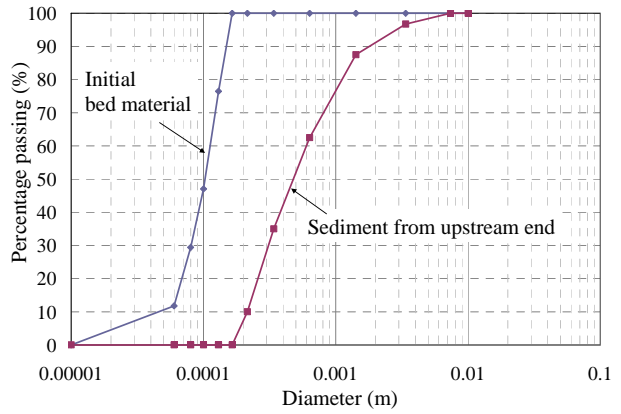


Fig. 9 Size distribution of supplied and initial sediment

の2種類である。給砂材料は両解析条件で非粘着性材料である。給砂量は、上流からの供給土砂の粒度の下流への伝播特性が分かるように、1年目に平衡給砂量の8倍を給砂し、2年目以降は平衡給砂量を給砂する条件とした。河床材料の粒度分布をFig. 9に示す。初期河床材料は平均粒径0.1mm程度の細かい土砂であり、Case1では非粘着性土砂として扱い、Case2では河床から離脱するまでは粘着性を示すものとした。給砂の平均粒径は、0.5mm程度であり、河床材料より粗く非粘着性材料として扱う。初期河床勾配は0.0015、川幅は200m、流量は83.1m³/sを定常的に与えた。

Case 3とCase 4は、トンレサップ川の流れと河床変動特性を解析したものである。解析期間は、2002年6月～2003年11月であり、ちょうどトンレサップ川の逆流の開始から1年後の順流の開始ぐらいまでである。ここで、逆流とはメコン河からトンレサップ湖への水の流れとし、順流とはトンレサップ湖からメコン河への水の流れとする。河床形状は、1997年～1999年にかけて実測されたデータを用いる (Kingdam of Cambodia, Ministry of Public Works and Transport, Waterways Department, 1999)。解析に用いた河床材料の初期粒度は前出のFig. 2に示されている。粒度の初期条件は、チャトムック側の境界を除いて、一定の値を与えている。平均粒径は0.108mmであり、Case1では粘着性を示すものとして扱っており、Case2では非粘着性土として扱う。チャトムック側の境界の初期河床材料は、平均粒径0.347mmであり、トンレサップ川の粒度データとメコン河で採取した土砂の平均的な粒度を合成した分布としている。境界条件として、チャトムック地区に位置するプノンペン港とトンレサップ湖南部で実測された水位データを用いた。氾濫原を通過してトンレサップ川へ流れるメコン河の流量は、減水時にトンレサップ川から氾濫原へ戻る流量の20倍程度であることが実測されており (Fujii, et al., 2003)、これを用いて与えた。

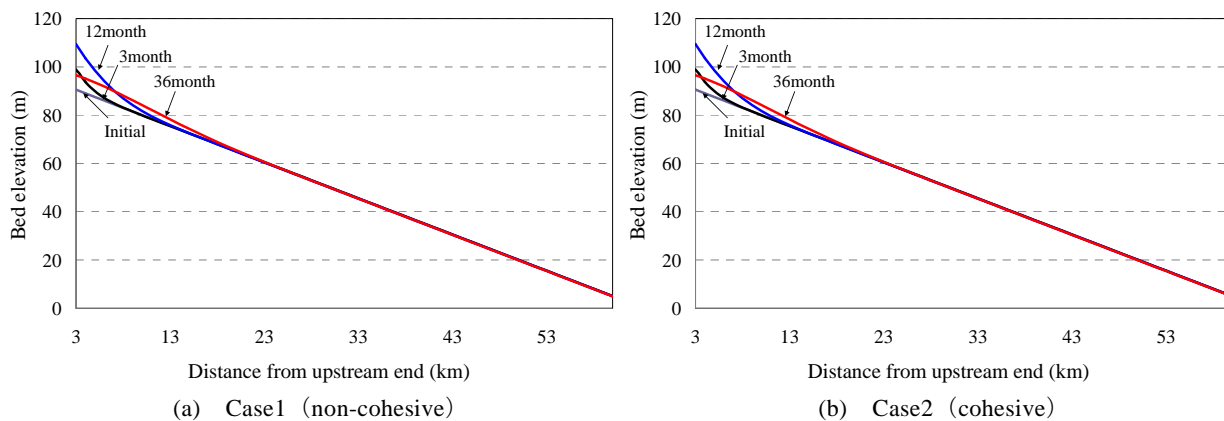


Fig. 10 Temporal change of bed elevation

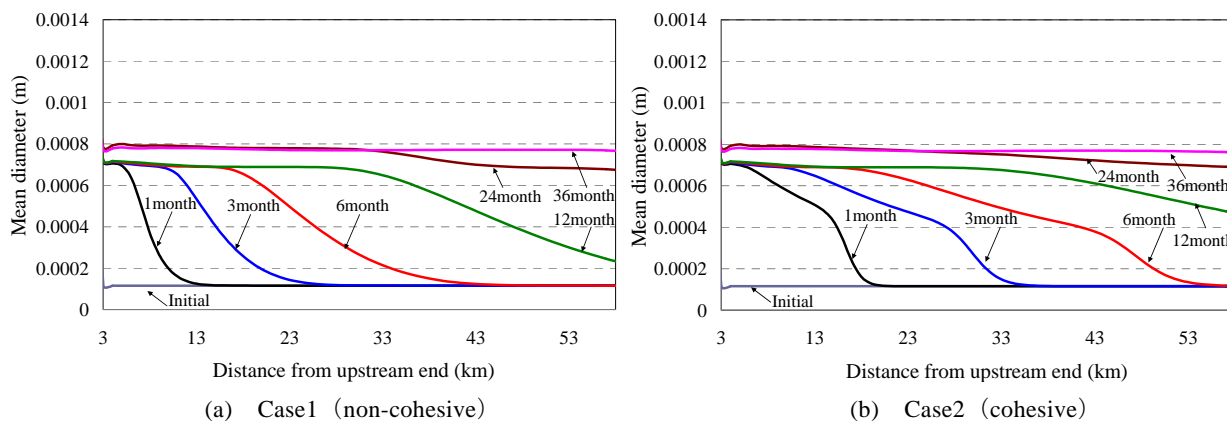


Fig. 11 Temporal change of mean diameter

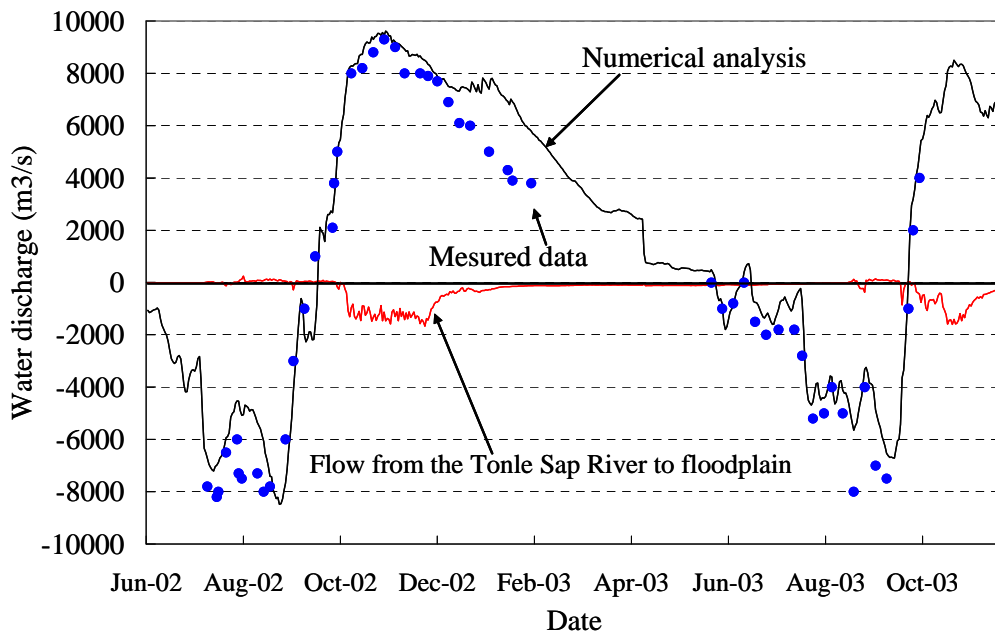


Fig. 12 Water discharge at the Phnom Penh and flooded discharge from the Tonle Sap River

4. 結果と考察

4.1 単純な水理条件を対象とした解析

Fig. 10に、Case1とCase2の解析結果を示す。Fig. 10(a)と(b)を比較すると、初期河床が非粘着性の場合

と粘着性の場合ではほとんど違いが無い。これは、河床上昇傾向の条件のため、両ケースで河床形状に大きな違いが出る河床侵食箇所がほとんど無いためである。一方、平均粒径の時間変化には大きな違いが発生している。Fig. 11 (a) と(b)を比較すると、粘着性河床の方が非粘着性河床よりも上流からの給砂

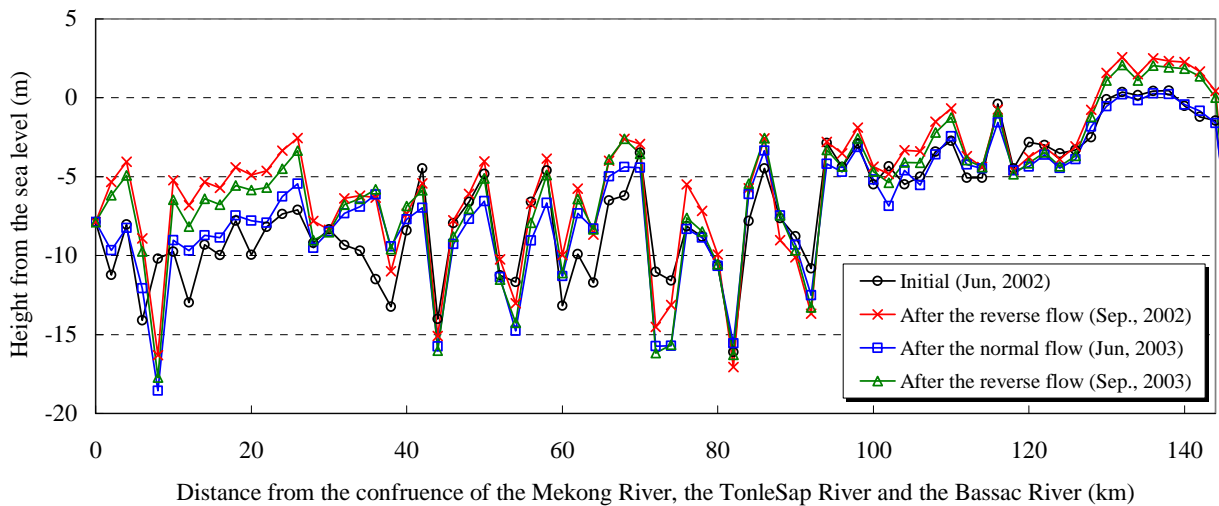


Fig. 13 Longitudinal distribution of deepest bed elevation in each cross-section

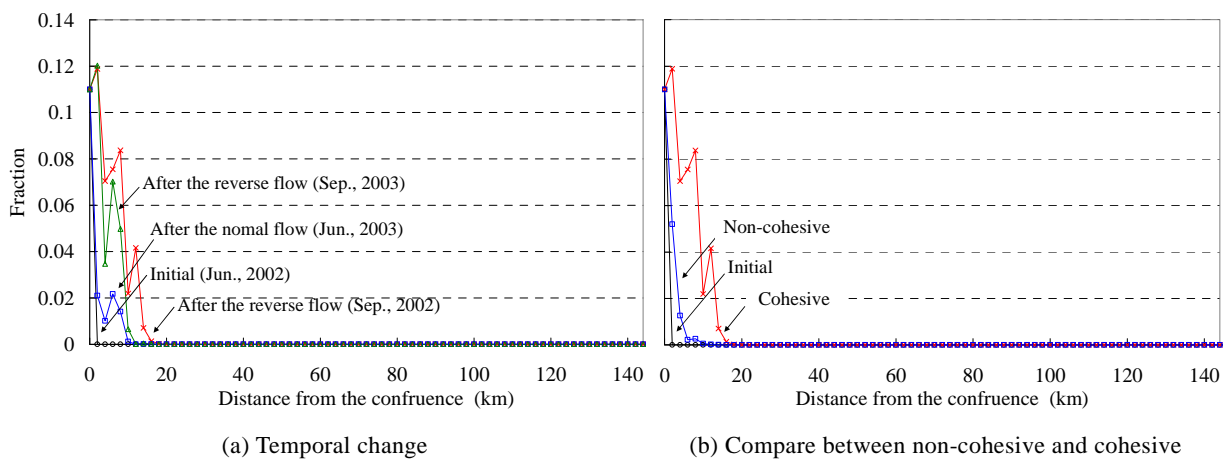


Fig. 14 Longitudinal distribution of sediment fraction of size class 5 (0.28mm)

材料による粗粒化の下流への伝播が速い。これは、非粘着性土では、初期河床に存在する多くの細かい土砂が粗い土砂と混合しながら流砂として輸送されるため、初期河床面以下にも粗い土砂が堆積するなどの現象が発生する。一方、粘着性河床では、河床からの細かい土砂の供給が少なく、流砂が初期河床面以下にほとんど堆積せず、そのまま下流へ伝播するためと考えられる。

4.2 トンレサップ川の流れと河床変動特性

Fig. 12はチャトムック地区における流量の時間変化を示す。図より、解析結果は、2002年12月～2003年2月までを除くと、実測データを良く再現していることがわかる。

Fig. 13は、Case3における最深河床位の縦断分布の時間変化を示す。逆流時は、チャトムック付近とトンレサップ湖付近で堆積傾向となっている。一方、順流時は、逆流時の堆積量とほぼ同量の河床低下が発生している。結果として、1年間の河床変動の収支は、非常に小さくなっていることがわかる。

Fig. 14 (a) は粒径0.28mmの第5粒径階の存在率の

縦断分布の時間変化を示す。第5粒径階は、チャトムック地区の土砂としては比較的細かい粒径であるが、初期粒度としてはチャトムック側境界にしか存在しないものである。図より、第5粒径階の材料は、2003年9月においても、メコン河との合流地点から20km付近までしか輸送されておらず、メコン河との合流点付近を行き来しているだけである。この結果は、メコン河の粗い土砂は、トンレサップ湖まではほとんど輸送されていないことを示すものであり、現地において危惧されている「メコン河の土砂による急速なトンレサップ湖の埋没」は発生していないことを示す。Fig. 14 (b)は、Case1とCase2の計算終了後の第5粒径階の土砂の存在率の縦断分布である。これによると、河床を粘着性材料として扱う方がメコンの土砂がトンレサップ湖側へ近づくことが分かる。これは、単純な水理条件を対象とした解析結果と同様に、非粘着性土では、初期河床に存在する多くの細かい土砂が粗い土砂と混合しながら流砂として輸送されるため、初期河床面以下にも粗い土砂が堆積するなどの現象が発生する。一方、粘着性河床では、河床からの細かい土砂の供給が少なく、流砂が初期

河床面以下にほとんど堆積せず、そのまま下流へ伝播するためと考えられる。

5. 結論

現地調査によって得られた河床材料データを用いて混合砂河床を対象とした一次元河床変動解析を行い、トンレサップ川の土砂収支と河床材料の粒度特性を明らかにした。また、河床を粘着性土と非粘着性土の混在場として扱った一次元河床変動解析モデルをトンレサップ川に適用し、河床材料の粘着性が流砂と河床変動特性に与える影響を検討した。本研究で得られた成果をまとめると以下ようになる。

(1) 粘着性河床の方が非粘着性河床よりも上流からの給砂材料による粗粒化の下流への伝播が速い。これは、非粘着性土では、初期河床に存在する多くの細かい土砂が粗い土砂と混合しながら流砂として輸送されるため、初期河床面以下にも粗い土砂が堆積するなどの現象が発生する。一方、粘着性河床では、河床からの細かい土砂の供給が少なく、流砂が初期河床面以下にほとんど堆積せず、そのまま下流へ伝播するためと考えられる。

(2) トンレサップ川においては、逆流時に河道内に土砂が堆積し、順流時に逆流時の堆積量とほぼ同じ量だけ侵食される。その結果、1年間の河床変動の収支は小さい。

(3) メコン河の粗い土砂は、トンレサップ湖まではほとんど輸送されていないことを示すものであり、現地において危惧されている「メコン河の土砂による急速なトンレサップ湖の埋没」は発生していないと考えられる。

謝 辞

科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者:塚脇真二),同基盤研究(A)(研究代表者:清水康行),同若手研究(B)(研究代表者:竹林洋史),GCOE(アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点)(拠点リーダー:松岡譲)の助成を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

芦田和男,道上正規:移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究,土木学会論文報告集,第206号(1972),pp.59-69.

岩垣雄一:限界掃流力の流体力学的研究,土木学会

論文集,第41号,pp.1-21,1956.

関根正人,西森研一郎,藤尾健太,片桐康博:粘着性土の浸食進行過程と浸食速度式に関する考察,水工学論文集,第47巻,pp.541-546,2003.

堀博:メコン河-開発と環境-,古今書院,2000.

B. Y. Liu: Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels., 京都大学学位論文,1991.

Egashira, S. and Ashida, K. Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, *Advances in Micromechanics of Granular Materials*, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, pp. 391-400, 1992.

Egashira, S., Takebayashi, H. and Inoue, K.: Flow Pattern and Bed Evolution in Four Arms Region of the Mekong, メコン河下流域における持続的な開発ポテンシャルの研究(代表者 玉井信行),平成9年度~平成10年度科学研究費補助金(国際学術研究)研究成果報告書,pp.46-61,1999.

Kingdom of Cambodia, Ministry of Public Works and Transport, Waterways Department: Hydrographic Atlas Tonle Sap River and Tonle Sap Lake in Cambodia, Vol. 3, 1999.

Hideto Fujii, Henrik Garsdal, Peter Ward, Masaki Ishii, Kanehiro Morishita and Thomas Boivin: Hydrological roles of the Cambodian floodplain of the Mekong River, *Intl. J. River Basin Management*, Vol. 1, No. 3, pp. 1-14, 2003.

Kovacs, A. and Parker, G.: A new vectorial bed load formulation and its application to the time evolution of straight river channels, *J. Fluid Mech.* Vol. 267, pp. 153-183, 1994.

K. W. Olesen and S. Tjerry: Morphological modeling of the Chaktomuk Junction, *River Flow 2002 Balkema*, pp. 879-887, 2002.

Lane, E. W. and Kalinske, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment," *Trans. A.G.U.*, Vol. 22, 1941.

Matti Kummu, Jorma Koponen and Juha Sarkkula: Proceedings of the 2005 International Conference on Simulation & Modeling, V. Kachitvichyanukul, U. Purintrapiban, P. Utayopas, eds, 2005.

Rubey, W. W.: Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *American J. of Science*, Vol. 25, pp. 325-338, 1933.

WUP-JICA: The study on Hydro-Meteorological Monitoring for Water Quantity Rules in Mekong River Basin, Final report, 2004.

Sediment Transport Characteristics on Bed with Cohesive and Non-cohesive Materials in Tonle Sap River

Hiroshi TAKEBAYASHI, Tatsuya NAKAMOTO* and Masaharu FUJITA

* Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo

Synopsis

When cohesive material is exposed at scoured areas in rivers, erosion of bed tends to be suppressed. Sediment transport rate is also suppressed on bed composed of cohesive material. In the present study, sediment transport and bed deformation characteristics on bed composed of cohesive material are discussed with attention focused on sediment sorting, based on the results obtained from numerical model of bed deformation and the model is applied to the Tonle Sap River in Cambodia. The results show that the bed degradation at the eroded area is suppressed because of the exposure of the cohesive material. Furthermore, the sediment transport rate is decreased. However, the temporal change of sediment size distribution on bed with cohesive material is faster than that on bed with non-cohesive material, because sediment is transported to downstream area without bed erosion process.

Keywords: cohesive material, non-cohesive material, bed deformation, non-equilibrium sediment transport, Tonle Sap River