

上流からの土砂供給量の減少によって発生する海岸侵食と河床低下

Coastal erosion and river bed degradation due to decreases in sediment supply from upstream of rivers

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 開坂亮太 (Ryota Kaisaka)

北海道大学工学研究院 正員 泉典洋 (Norihiro Izumi)

1. はじめに

高度経済成長期の1960年代から70年代にかけて、日本の河川は河床上昇傾向にあり、各地で堤内地の地盤高より河床が高い天井川が社会問題であった。河床上昇傾向にある河川は氾濫を起こしやすい。当時、河川氾濫による被害が数多く起きた理由の1つに、河床上昇があることが推測される。1980年代以降、河川上流域での砂防事業の進捗や、洪水調整施設の建設、森林化の進行に伴って、河川中流域より下流に供給される土砂の量が大きく減少した。それによって、80年代から現在まで激しい海岸侵食が進んでいる。さらに近年では中下流部における河床低下が顕著に生じている河川も現れるようになった。

河床上昇は水害を激化するが、海岸侵食や河床低下も工学的にはやはり好ましいことではない。海岸侵食は国土の一部を失うだけでなく、住宅地が海に近くなることで高潮や津波の被害を激化させるし、河床低下は護岸や橋脚などの河川構造物を危険に晒すと同時に、取水施設や分派施設など、ある河床高を想定して設計されていた施設の機能障害を引き起こす。このような観点から、河川の上流から下流までの一貫した土砂管理が重要な工学的課題となっている。

本研究では、等流近似を使った非常に簡単なモデルを用いて、河川上流域からの供給土砂量の変化が、下流の河川縦断形状にどのような影響を与えるのかを明らかにする。特に供給土砂量が減少する場合にどのようなプロセスで河床低下や海岸侵食が生じるのか、その再現を試みる。

2. モデル

図-1のような河川の上流域から河口までを考える。上流域は地盤が隆起している領域であり、河床では一部基盤岩が露出している。その下流域は地盤が沈降している領域であり、河床が土砂に覆われている沖積地である。下流端には海があり、流れと土砂は海に注いでいる。問題を簡単にするために、上流から下流まで土砂の粒径は一樣であり川幅や流量は一定であるとする。下流の沖積域が一定速度 $\bar{\sigma}$ で沈降しているとする、このとき沖積域における河床高さ $\tilde{\eta}$ の時間変化は次式で表される。

$$\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{t}} = -\frac{1}{1-\lambda_p} \frac{\partial \tilde{q}_B}{\partial \tilde{x}} - \bar{\sigma} \quad (1)$$

ここで $\tilde{t}$ は時間、 $\tilde{x}$ は沖積域上流端を原点とし、水平方向で河川の流れる向きに取った座標、 $\tilde{q}_B$ は土砂輸送量、 λ_p は空隙率である。また、 $\tilde{\cdot}$ は後に導入する無次元量と区別するために次元量に付けたものであり、無次元量はこれを取って表す。

図-1に示したような河川の上流域から下流域までの大きなスケールで考える場合、流れは局所的に等流と近似的に考えることができる。そこで、次の等流近似の式と流量一定の式を用いて表す。

$$\rho g \tilde{h} S = \rho C_f \tilde{u}^2, \quad \tilde{u} \tilde{h} = \tilde{q} \quad (2)$$

ここで ρ は水の密度、 g は重力加速度、 S は河床勾配、 $\tilde{u}$ は流速、 $\tilde{h}$ は水深、 $\tilde{q}$ は流量である。上式から $\tilde{h}$ を消去すると次式が得られる。

$$\tilde{u}^3 = \frac{g \tilde{q}}{C_f S} \quad (3)$$

流砂量 $\tilde{q}_B$ は、例えばMeyer-Peter & Müllerの式を用いて次の様に表される。

$$\tilde{q}_B = 8(\theta - \theta_c)^{3/2} (R_s g d_s^3) \quad (4)$$

ここで θ は無次元底面せん断力($= C_f \tilde{u}^2 / R_s g d_s$)、 θ_c は限界無次元せん断力、 R_s は土砂の水中比重($= 1.65$)、 d_s は土砂の粒径である。いま、問題を簡単にするために限界無次元せん断力の影響を無視すると、 $\tilde{q}_B$ は次のように流速の3乗で表される。

$$\tilde{q}_B = \frac{8 C_f^{3/2}}{(R_s g d_s)^{3/2}} (R_s g d_s^3)^{1/2} \tilde{u}^3 = 8 \left(\frac{C_f^{3/2}}{R_s g} \right) \tilde{u}^3 \quad (5)$$

式(3)を上式に代入すると次式が得られる。

$$\tilde{q}_B = \left(\frac{8 C_f^{1/2} \tilde{q}}{R_s} \right) S \quad (6)$$

$S = -\partial \tilde{\eta} / \partial \tilde{x}$ であるから、上式を式(1)に代入すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial \tilde{\eta}}{\partial \tilde{t}} = \tilde{Q} \frac{\partial^2 \tilde{\eta}}{\partial \tilde{x}^2} - \bar{\sigma}, \quad \tilde{Q} = \frac{8 C_f^{1/2} \tilde{q}}{(1 - \lambda_p) R_s} \quad (7)$$

3. 無次元化

次のような無次元化を導入する。

$$\tilde{\eta} = \tilde{H} \eta, \quad \tilde{x} = \tilde{L} x, \quad \tilde{t} = \frac{\tilde{L}^2}{\tilde{Q}} t \quad (8)$$

ここで $\tilde{H}$ および $\tilde{L}$ は沖積域上流端の下流端からのそれぞれ高さおよび距離である。式(8)を式(7)に代入すると次のようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \sigma \quad (9)$$

ここで

$$\sigma = \frac{\tilde{L}^2}{\tilde{Q} \tilde{H}^2} \bar{\sigma} \quad (10)$$

4. 平衡プロファイル

沖積域において河床プロファイルが時間的に変化しない平衡状態を求める。平衡状態では $\partial \eta / \partial t = 0$ である。したがって式(9)より次式が得られる。

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} = \sigma \quad (11)$$

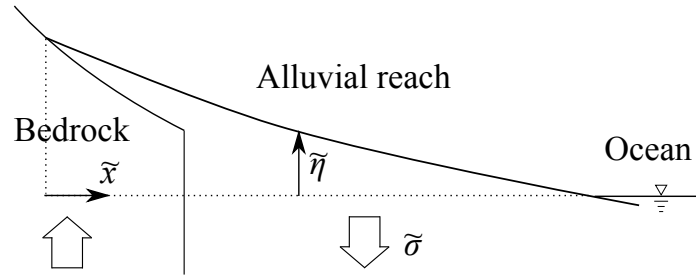


図1 Conceptual diagram.

河床高さ η を沖積域の上流端の下流端からの高さ $\tilde{H}$ で、水平方向の座標 $\tilde{x}$ を沖積域の長さ $\tilde{L}$ で無次元化したので、沖積域の上下流端ではそれぞれ次の境界条件が成り立つ。

$$\eta = 1, \quad x = 0 \quad (12)$$

$$\eta = 0, \quad x = 1 \quad (13)$$

上の2つの境界条件を用いて式(11)を積分すれば次のような解が得られる。

$$\eta = 1 - x + \sigma \frac{1}{2} x(x-1) \quad (14)$$

すなわち、平衡状態では下に凸の二次曲線となることがわかる。地盤の沈降を埋めるためには土砂堆積が生じなければならないが、土砂堆積が生じるためには下流に向かって土砂輸送量が減少しなければならない。土砂輸送量が減少する河床形状では下流に行くにしたがって勾配が減少する。したがって下に凸の二次曲線となるのである。

このとき、上流端および下流端における土砂輸送量はそれぞれ次のようになる。

$$q_B = -\frac{d\eta}{dx} = 1 + \frac{1}{2}\sigma, \quad x = 0 \quad (15)$$

$$q_B = -\frac{d\eta}{dx} = 1 - \frac{1}{2}\sigma, \quad x = 1 \quad (16)$$

すなわち、上流端からの土砂供給量は下流端から海へ流出する土砂量より σ だけ多い。この量の土砂が沖積域に堆積したことを意味している。

ただし、沈降量は通常非常に小さいので相当長い距離を考えない限りほとんど無視することができる。そこで本研究では σ を1より十分小さいとして、河床縦断形状を次のように考える。

$$\eta = 1 - x \quad (17)$$

このとき、上流端および下流端における土砂輸送量はいずれも1となる。

5. 供給土砂減少の影響

いま、供給土砂量が ϵ だけ減少したとする。すなわち $x = 0$ における供給土砂量 $q_B(0)$ が次のように表されるとする。

$$q_B(0) = 1 - \epsilon \quad (18)$$

それに合わせて河床勾配は全区間で $-(1 - \epsilon)$ となるから、次式が成り立つ。

$$\frac{d\eta}{dx} = -1 + \epsilon \quad (19)$$

上式を積分すると次式が得られる。

$$\eta = \eta_u - (1 - \epsilon)x \quad (20)$$

ここで η_u は沖積域上流端の新たな高さである。

下流端での流失土砂も $1 - \epsilon$ であり、それによって海岸線（下流端）の位置も変化する。海岸線の位置は、河川から供給される土砂量と波によって沖合に運ばれる場所が釣り合う場所である。波による侵食力が卓越すると海岸は後退し、河川からの供給土砂量が卓越すると海岸は前進する。平衡状態では、河川による供給土砂量と波による土砂輸送量がともに1であることで下流端の位置が決まっていた。いま、 ϵ だけ減少したのであるから、海岸線は後退することになる。海岸線が後退しても河口からの土砂流出量が変化しない場合、海岸線はいつまでも後退し続けることになる。

ある時点での海岸線の後退量を ϵl とする。その時、海岸線の位置 $x = 1 - \epsilon$ で $\eta = 0$ となるから、式(20)より次の関係が導かれる。

$$0 = \eta_u - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon l) \quad (21)$$

上式中 ϵ の2次以上の項を微小として無視すれば、 η_u は次のように得られる。

$$\eta_u = 1 - \epsilon(1 + l) \quad (22)$$

すなわち上流端付近では $\epsilon(1 + l)$ だけ低下することになる。ただし、図-1のように上流域の基盤岩領域の勾配が S_b であるような場合、上流端の位置も変化する。上流端の位置は次のようになる。

$$x = \frac{\epsilon(1 + l)}{S_d} \quad (23)$$

結局、 ϵ だけ土砂供給量が減少すると、河床縦断形状は次のように変化する。

$$\eta = 1 - x - \epsilon(1 + l + x) \quad (24)$$

したがって河床低下量 $\Delta\eta$ は次のように表される。

$$\Delta\eta = -\epsilon(1 + l + x) \quad (25)$$

6. おわりに

非常に簡単なモデルを用いて上流からの土砂供給量が減少した場合の河床縦断形状の変化を解析し、その定性的な挙動を明らかにした。

参考文献

- ・ 流砂の水理学, 吉川秀夫編, 543p, 丸善, 1985.