

植生が繁茂した河川水際への細粒土砂堆積の特性¹

塚原隆夫²・藤田光一³・望月達也⁴

Takao TSUKAHARA, Koh-ichi FUJITA, Tatsuya MOCHIZUKI

1. はじめに

河川の水際は、図-1に示すように「横断勾配を持った河床形状」とそれを形成する「表層河床材料」、「水面」、「流れ」、「植生」により構成され、しかもそれらが時間的に変化・変動する。このような空間には多様な水生・陸生動物が棲息し、河川固有の自然環境として貴重な場となっている。このような水際の代表的な変化の一つに、その場の河床材料より細粒でウォッシュロード的挙動をする土砂(以下では「細粒土砂」という)の堆積現象がある。図-2は米国パウダー川における細粒土砂の堆積状況¹⁾を示しており、10年のうちに礫床上に多いところで1m程度と有意な大きさを細粒土砂が堆積していることがわかる。このような細粒土砂の有意な堆積は植生の存在によって引き起こされることが多いと考えられ^{1),2)}、その結果、植生が存在する箇所の表層河床材料が変化し、それが植生の遷移を促し、水際のハビタットの变化をもたらす。細粒土砂の堆積が、場合によっては流下能力に影響を与える程川幅を縮小させることもある²⁾。これらのことから、植生による細粒土砂の堆積を予測することはきわめて重要である。

そこで、本論ではこのような細粒土砂堆積がどのような条件で起こるのかを水理的に明らかにすることを目的とする。

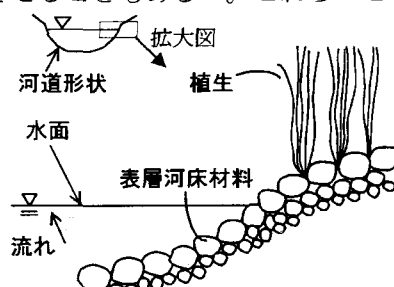


図-1 水際環境の概念図

2. 細粒土砂堆積の特性を把握する上での問題設定

現地河川の水際における植生の繁茂状況は、一般に地形変化の激しい段階ではその丈が低く、細粒土砂が多く供給される洪水時には水没状態になると考えられる。また、この時に植生の丈は水深に対して相当低いものと考えられる。このことを念頭におき、水際の環境を変化させるような植生による細粒土砂堆積現象を図-3のように模式化した。植生による細粒土砂堆積は①主流部ではウォッシュロードとして挙動する細粒土砂が横断方向に輸送される、②水没植生内における細粒土砂の沈降・堆積・浮上、③①と②の相互作用、の3つの過程により起こるものと考えられる。これらの過程のうち①については通常の河床面での沈降・堆積・浮上と合わせ Parker³⁾、

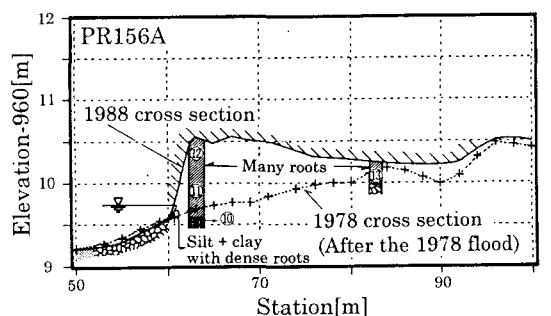


図-2 細粒土砂の堆積事例(パウダー川)¹⁾

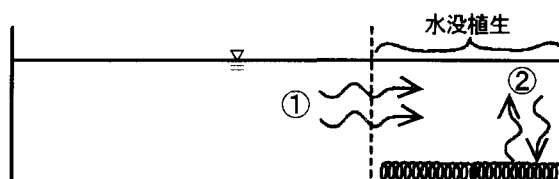
¹ キーワード：ウォッシュロード、植生、河岸、堆積、水際、細粒土砂、高水敷、川幅縮小、ハビタット、表層材料

² 建設省土木研究所河川部河川研究室 研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

³ 同 上 主任研究員 工博

⁴ 同 上 室長

泉・池田⁴⁾の研究など多くの検討により、そのモデル化が既になされている。しかし、②については塚原ら⁵⁾が水没植生における検討を行っているが、これは浮上を無視しているため②の過程を十分に検討しているとはいえない。③についての検討も十分には行われていないと考えられる。これらから、地形変化の激しい段階における水際の細粒土砂堆積現象を定量的に把握するには②および③の過程を詳細に検討し、モデル化することが不可欠である。



①：河岸への土砂輸送
②：水没植生内の土砂の沈降・堆積・浮上

図－３ 水際の細粒土砂堆積現象の模式図

そこで、まず上記②の過程について実験と解析を行い、その過程をどのようにモデルに反映させるかについて検討した(3. 1)。この検討を踏まえ、③の過程について堆積計算モデルを構築し、実験により検証を行った(3. 2)。以上の検討の結果構築された堆積計算モデルを用いて、実際の河川水際の状況を図－３のように想定し、河床勾配や植生密度を変えた時、細粒土砂の堆積量がどう変化するか調べ、細粒土砂の堆積と河道特性との関係について考察した(4章)。

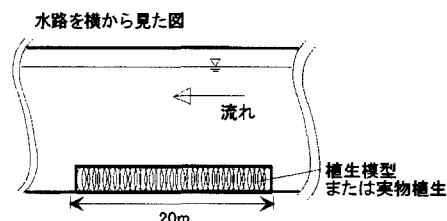
3. 細粒土砂堆積特性把握のための実験および解析

3. 1 水路幅一杯に敷かれた水没植生内への細粒土砂堆積

表－１ 実験Ⅰのケース

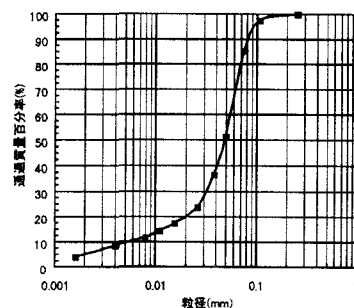
ケース	植生の種類	高さ(cm)	空隙率(%)	透過係数(m/s)	設定流速(m/s)	初期濃度(kg/m ³)
CASE1	多孔質体模型	5	91	0.38	0.8	0.882
CASE2	溶接金網 10 段模型	6.4	99.4	1.37	0.9	0.968
CASE3	溶接金網 10 段模型	18.5	99.8	2.32	0.45	1.03
CASE4C-1	ヨシ(85 本/m ²)	18.0(流水中)	90	5.76	0.6	1.09
CASE4C-2	ヨシ(85 本/m ²)	18.0(流水中)	90	5.09	0.5	0.830

＜実験方法＞ 循環水路(水路幅 0.5m、水路直線部 60m、水路曲線部 16.7m)の一部の底面に、図－４のように水路全幅、縦断方向 20m にわたって表－１の植生模型および実物植生を敷き詰め、静水状態での水深を 50cm として表－１に示す各水理条件で水を循環させた(表中の設定流速は植生がない状態において達成される流速である)。なお、表－１中の透過係数とは植生内のみかけの平均流速がエネルギー勾配の二乗根に比例するとしたときの比例定数である⁶⁾。



図－４ 実験水路の縦断図

ここで、植生模型は実植生の形状特性に近くなるよう設定し、CASE1 は例えばクサヨシ等の密な草本類が密生した状態を示し、CASE2,3 になるにしたがって植生の密度が小さくなることを想定している。また、CASE4C-1,4C-2 では実際の河川水際部に繁茂している植生(ヨシ)を用い、現地で繁茂していた時と同程度の植生密度を水路で再現している。次に、それぞれのケースについて図－５の粒度分布を持つ細粒土砂(ミクロサンド)を投入して植生上面を不透水性シートで覆った状態で十分に循環させて、土砂濃度が平衡になるようにした(初期濃度(植生領域上流端の鉛直平均)は表－１のとおり)。初期濃度の設定は、実河川の実測浮遊砂量⁷⁾を参考に流量が 2,000m³/s 程度のときの濃度になるように決めた。土砂濃度が平衡になったことを確認の後、不透水性シートを一気にはずし、流速、水位、土砂濃度の時間変化を計測し、最終的な堆積高を計測した。



図－５ 投入土砂の粒度分布

＜流速場＞ 図－６は CASE3 における流速の鉛直分布を示している。植生領域になると植生外より流速が大きく減少し、底面ごく近傍と植生上面付近を除けば、流速が鉛直方向に一定になることがわかる。この特徴は、他のケースについても同様であった。この流速一定領域は、植生より上の速い流れの影響を受けてい

ないために生ずるもので⁸⁾、ここでの流速は次式により表すことができると考えられる。

$$u_v = KI^{0.5} \quad (1)$$

ここで、 u_v ：植生内の流速一定値域での流速値、 K ：透過係数、 I ：エネルギー勾配。

以後、本実験に関する底面摩擦速度 u_* の計算においては、

$$u_* = u_v / \phi \quad (2)$$

を用いている。ここで、 ϕ ：植生の置かれた底面についての流速係数(=21)。

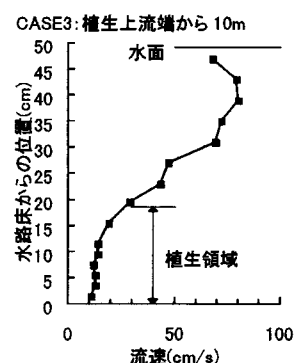


図-6 流速の鉛直分布

＜土砂堆積状況＞ 図-7に各ケースにおける48時間後の植生領域内全体の土砂堆積量を示す。各ケースで有意に堆積量の違いが出る原因について考察する。水没植生内における土砂堆積は、土砂の沈降の効果と浮上の効果のバランスによって決定され、沈降の効果が浮上より大きい場合は堆積し、小さい場合は堆積しない。このバランスは次のように表される。

$$E = C_b w_0 - q_{ub} \quad (3)$$

$$q_{ub} = f(u_*, d) \quad (4)$$

ここで、 E ：土砂堆積の有無($E > 0$ ：堆積する、 $E < 0$ ：堆積しない)、 $C_b w_0$ ：沈降フラックス(C_b ：底面近傍の濃度、 w_0 ：沈降速度)、 q_{ub} ：浮上フラックス。

図-8の■は、単位時間当たりの濃度変化と $-E$ が等しいとして実験から求めた粒径0.0467mmの q_{ub} を示している。これと図-7を比較すると、土砂堆積量が多くなるにつれて q_{ub} が小さくなる対応にある。次にこの q_{ub} をどのような式が適当か検討した。図-8の実線は q_{ub} を表す式の一つであるItakura・Kishiの式⁷⁾を示している。これを見る限りと実験値はItakura・Kishiの式はほぼ近いと考えられる。

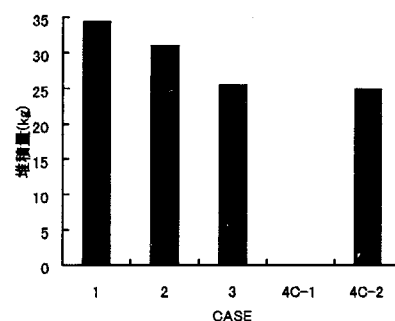


図-7 各ケースの植生領域内全体の土砂堆積量

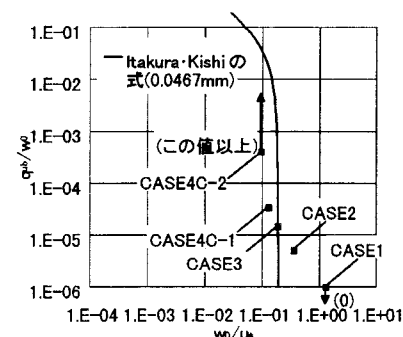


図-8 q_{ub} と w_0/u_* との関係

＜まとめ＞ 以上の結果をまとめると以下のとおりである。

(a)本実験の範囲内で見える限り、水没植生内に流速一定域が現れる。

実験に用いた植生諸元が実際の植生形状特性に対応していることから、以後の検討においては植生内の流速および摩擦速度を(1)および(2)式で表す。

(b)植生内であっても、浮上条件はItakura・Kishiの式⁷⁾で概ね表現されるとしてよい。

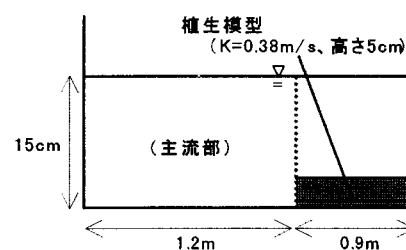


図-9 実験水路の横断面図

3. 2 水路の片側に敷かれた水没植生への細粒土砂堆積

＜実験方法＞ 図-9に示すような横断形状を持つ堆積現象が再現できる水路(幅2m、水路勾配は水平、水路長25m、下流から上流へ濁水が循環できるようにポンプを設置)の側岸に、表-1 CASE1と同じ諸元を持つ植生模型を、横断面内に図-9のように縦断距離20mにわたり敷設した。静水状態での水深を15cmとし、主流部の平均流速が約0.65m/sになるよう流量を設定した。3.1とほぼ同じ濃度になるよう図-5の細粒土砂を投入し、植生表面を不透水性シートで覆った状態で十分に循環させて、土砂濃度が平衡になるようにした(初期濃度(水路上流端における断面平均)は1.01kg/m³)。土砂濃度が平衡になったことを確認の後、不透水性シートを一気にはずし、流速、水位、土砂濃度の時間変化を計測し、最終的な堆積高の横断形状を計測した。

<実験結果・解析> 図-10 は、時間平均流速の横断分布が縦断方向にほぼ平衡になったと考えられる断面における、植生領域での 48 時間後の土砂堆積高の横断変化を示している。植生領域と領域外の境界(横断距離 0m ; 以下「植生境界」とする)から 5cm 程度離れた位置で堆積高のピークがあり、そこから離れるにしたがって堆積高が漸減している結果となっている。主流部には全く堆積は見られなかった。

上記の横断方向の細粒土砂堆積過程を計算により再現することを試みる。基本式は以下のとおりである
2)(座標は図-11 参照)。

$$\bar{c} = \frac{1}{D} \int_0^D c dz \quad (5)$$

$$\varepsilon_y \frac{d^2}{dy^2} (\bar{c} D) + \frac{d\varepsilon_y}{dy} \frac{d}{dy} (\bar{c} D) - \varepsilon_y \frac{dD}{dy} \frac{dc_b}{dy} - \left(\frac{d\varepsilon_y}{dy} \frac{dD}{dy} + \varepsilon_y \frac{d^2 D}{dy^2} \right) c_b + \left[q_{ub} \sqrt{1 + \left(\frac{dD}{dy} \right)^2} - c_b w_0 \right] = 0 \quad (6)$$

$$\bar{c} = c_b \frac{1}{6Z} \{ 1 - \exp(-6Z) \} \quad (7)$$

ここで、 c : 土砂濃度、 $\bar{c}$: 鉛直平均した土砂濃度、 c_b : 底面($z=0$)における土砂濃度、 D : 水深、 ε_y : 横断方向の拡散係数、 w_0 : 沈降速度、 q_{ub} : 底面から鉛直上向きの浮上フラックス、 $Z : (= \kappa u_* D / 6)$ 、 $\kappa = 0.4$ 。

上式は縦断方向に平衡な細粒土砂濃度場を想定して、横断面内の土砂濃度に関する拡散方程式を鉛直方向に積分することにより求めている。(堆積計算モデルの詳細については文献 2)に報告されているので参照されたい)。本論では水没状態の植生を対象としているため、3. 1 で得られた結果から(6)式に以下の手順で算出した q_{ub} を代入する。まず、図-11 に示す水没状態の植生領域内における摩擦速度を(1),(2)式から求める((1)式の I には水面勾配を代入した)。この摩擦速度を Itakura・Kishi の式 9) に代入して q_{ub} を算出する。

上記のモデルにより実験結果の再現を行う。対象とした細粒土砂の粒径は、計算を簡単にするために 1 粒径(0.0467mm : 50%粒径)のみとした。図-11 に示すように計算領域を設定し、 $y=-0.3$ m において土砂濃度場の境界条件を以下のように設定した。縦断方向に平衡な細粒土砂濃度場を仮定して、鉛直平均した土砂濃度は、水路上流端における各時刻の断面平均値(実験値)の 70%を与えた。70%とした理由は、図-5 に示す粒度分布の非常に細粒な成分は堆積しないものとして無視したためである。流速場の計算は、主流部、植生上面および植生領域内の流速係数をそれぞれ $\phi=13$ 、 $\phi_w=5.98$ および $\phi=13$ として行った。これから計算すると植生境界付近で、植生領域内の流速および摩擦速度の分布が不連続になるが、現実にはそのようなことはあり得ないので図-12 のように流速分布が連続的になるように植生内流速を線形補完した。

5 時間後堆積高を計算した結果が図-10 の実線である。ここで、計算では 5 時間後の堆積高を示したのは、実験では 5 時間後から 48 時間後まで、ほとんど土砂濃度が変化せず、堆積が起こらなかったと判断したためである。これを見ると、最大堆積高の位置はほぼ一致し、そこでは計算値の方が実験値より 3 割程度大きな値をとり、そこから離れるにしたがって計算値が実験値より速く減少する傾向にある。しかし、細粒土砂堆積高とその大局的な横断変化傾向は概ね再現されているといえる。特に非水没状態の植生の時に見られる途中に極大値をもつような対数指数的な形状 2)ではなく、指数関数的に減少するような形状を

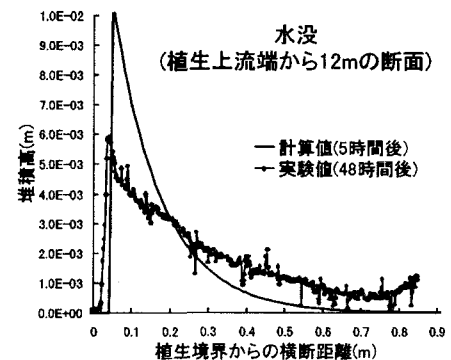


図-10 土砂堆積高の横断変化

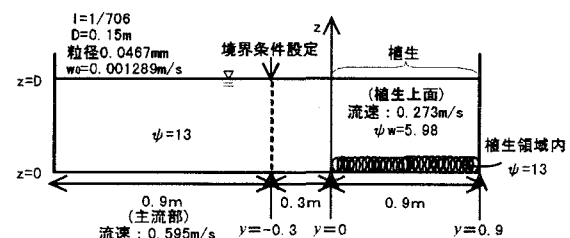


図-11 計算領域

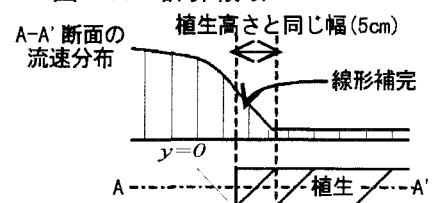


図-12 境界付近の植生内の流速

よく再現している。以上から、本論での堆積計算モデルは、水没植生領域内の土砂堆積高を求めるモデルとして概ね妥当なものと判断する。

4. 実河川の条件を想定した細粒土砂堆積量の見積り—細粒土砂堆積モデルの応用—

3 章までの検討により得た、水没植生領域内の細粒土砂堆積計算モデルを用いて、河道が平均年最大流量程度の出水を受けた時に、さまざまな植生、供給土砂量によって土砂堆積量がどう変化するかを、実河川の条件を想定したモデル河道において見積った。モデル河道の設定の考え方は以下のとおりである。対象としたのは、河床勾配が 1/200、1/900、1/2,500 となる河道区間である。これは河床勾配や河床材料粒径等の特徴で分割するセグメント区分⁹⁾による方法で、河道区間をセグメント 1(扇状地区間)、セグメント 2-1(自然堤防帯区間)、セグメント 2-2(自然堤防帯区間)にそれぞれ対応する。植生の種類は、透過係数 K で表現し、クサヨシ等の草本類が高密度で密生していると考えられる状態($K=0.38\text{m/s}$)、幼齡のヤナギ等の直径 7mm の茎をもつ植生が 1m^2 当たり 225 本繁茂している状態($K=3.53\text{m/s}$)、およびヨシが 1m^2 当たり 85 本繁茂している状態($K=5.42\text{m/s}$)と、透過係数が段階的に変化するように設定した。なお、ここでは植生高に対して水深がきわめて大きい(相対水深が大きい)水没状態における計算のみ行った。

図-13 は対象とするモデル河道の横断面図(矩形一様断面)である。山本⁹⁾の実河川における低水路幅と平均年最大流量との関係を参考にして、幅 200m を主流部として設定し、主流部を流れる流量を $2,000\text{m}^3/\text{s}$ とした。主流部の右端($y=-15\text{m}$)から 15m 離れた位置に相対水深が大きい水没状態の植生を $y=0\sim 20\text{m}$ にわたり設置した。供給土砂量は実測浮遊砂量(大部分がウォッシュロード成分と考えられる)と流量の関係⁷⁾を示した図から、ウォッシュロードの量が普通の河川(a) $Q_s=2.0\times 10^{-7}Q^2$ (Q_s : 供給土砂量(m^3/s)、 Q : 主流部を流れる流量(m^3/s))、ウォッシュロードの量が多い河川(b) $Q_s=2.0\times 10^{-6}Q^2$ の 2 つの条件を用いてそれぞれ流量 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ での供給土砂量を(a) $0.8\text{m}^3/\text{s}$ 、(b) $8\text{m}^3/\text{s}$ とした。この供給土砂は単一粒径ではないが、粒径を決定するのは困難であるので、既往の洪水観測データ¹²⁾を参考にしつつ供給土砂のうち 50~80%がシルトであると想定した。そして本検討では供給土砂のうち 70%を対象として、それをすべて粒径 0.05mm(沈降速度 $2.5\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s}$)のシルトとした。こうして求めた Q_s から濃度の境界条件を設定する方法(設定位置 $y=-15$)を藤田らと同じとした²⁾。流速場の計算は、主流部および植生領域内の河床粗度に関する流速係数を 12、植生上面の流速係数を 7 として、3. 2 と同じ方法とした。土砂堆積高の横断変化は $2,000\text{m}^3/\text{s}$ の流量が 2 時間継続した状況を想定して計算を行った。

図-14 はそれぞれの河床勾配において、それぞれの植生密度に対する土砂堆積高の横断変化の予測値を示したものである。縦軸のスケールの違いに注意して図を比較すると、供給土砂量の違いによって、供給土砂量が多い(b)の方が堆積量が大幅に増加することがわかる。さらに(a)では堆積しなかった $K=3.53\text{m/s}$ (河床勾配 1/900)、 $K=5.42\text{m/s}$ (同 1/2,500)の植生でも、(b)では堆積することがわかる。これらのことは、供給土砂量が堆積しやすさに大きく依存していることを示している

また、(a)(b)どちらの結果についても、通常は細粒土砂堆積が起こりにくいとされる扇状地区間の河床勾配 1/200 の区間においては、幼齡のヤナギのような植生が繁茂している状況($K>3.53\text{m/s}$)では細粒土砂堆積は起こらないが、クサヨシのような草本類が密生していれば($K<0.38\text{m/s}$)平均年最大流量程度が 2 時間継続する出水 1 回で、1~10cm 程度の細粒土砂堆積が起こることが目安として示される。著者らが多摩川 52.6km(河床勾配 1/250)の低水路水際付近(この付近は調査直前の 1996 年 9 月に洪水により冠水した)のイヌコリヤナギが繁茂している箇所を調査したところ、周辺の表層河床材料(礫)より細粒の土砂は堆積していなかった。この事実は本予測から十分説明される。さらに、自然堤防帯区間(河床勾配: 1/900、1/2,500)では扇状地区間より細粒土砂堆

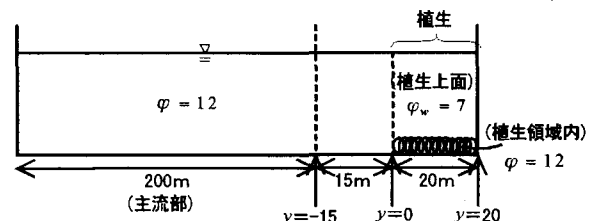


図-13 対象としたモデル河道

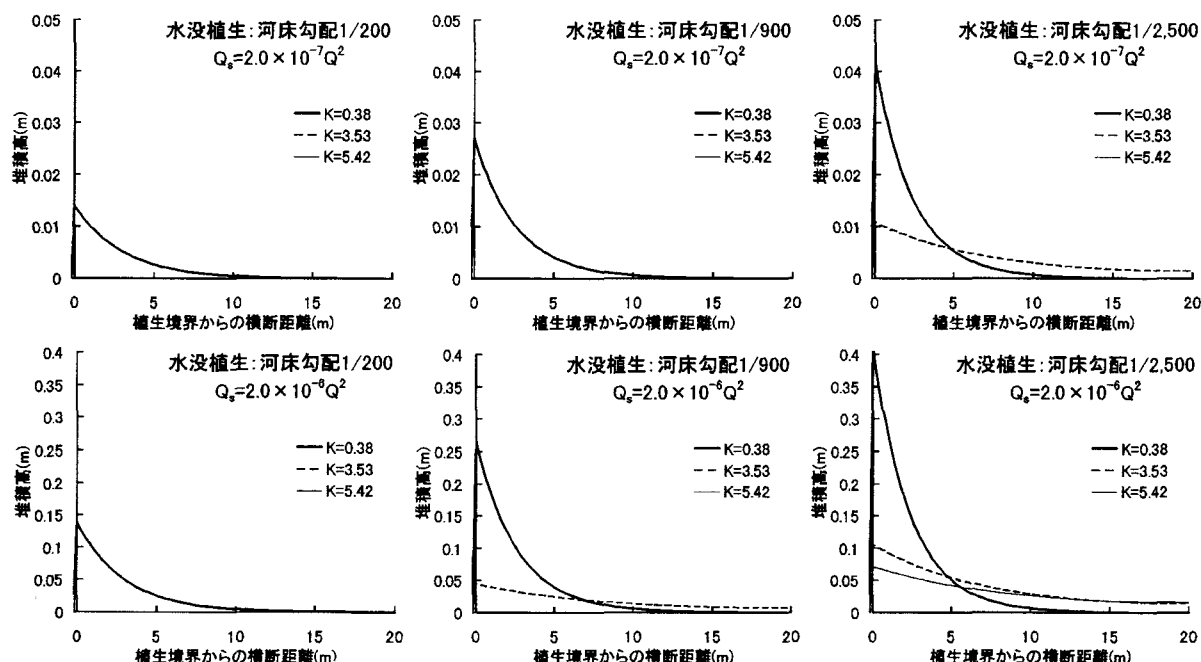


図-14 各河床勾配におけるさまざまな植生に対する土砂堆積高の横断変化(2時間後；上段(a)、下段(b))

積が促進され、特に(b)程度の供給土砂量があればイヌコリヤナギのような植生、河床勾配 1/2,500 の区間ではイヌコリヤナギよりも K が大きい植生の繁茂状況でも、同程度の 1 回の出水で 5~40cm 程度の細粒土砂堆積が起こることがわかる。

以上は簡単なモデルによる結果ではあるが、河床勾配、植生の透過係数、供給土砂量が細粒土砂の堆積現象に非常に大きな影響を及ぼすことを強く示唆している。このような分析を進めて、土砂堆積条件を明らかにすることは水際環境を考える上で大切である。水際環境変化がが起こる河道区間の予測や、設計した河道に対する細粒土砂堆積の影響評価を行う上で、この結果は有用な情報といえる。今後は、種々の植生に対する K を明らかにすることや、土砂堆積量の平面分布・横断方向に高水敷のような明確な段差がある場合を考慮した堆積モデルを構築することが課題である。

参考文献

- 1) 藤田・Moody・宇多・Meade：川幅縮小機構についての考察—パウダー川と川内川の観察結果から—、第2回河道の水理と河川環境シンポジウム論文集、pp.183-190、1995。
- 2) 藤田・Moody・宇多・藤井：ウォッシュロードの堆積による高水敷の形成と川幅縮小、土木学会論文集 No.551/II-37、1996。
- 3) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 1. The sand-silt river, J. Fluid Mech., Vol.89, pp.109-125., 1978。
- 4) 泉典洋・池田駿介：直線砂床河川の安定横断河床形状、土木学会論文集、No.429/II-15、pp.57-66、1991。
- 5) 塚原・宇多・藤田：水路床に敷かれた薄い植生層が細粒土砂堆積に果たす役割、第51回土木学会年次学術講演会概要集、No.2、pp.544-545、1996。
- 6) 福岡捷二・藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、土木研究所報告、第180号、pp.143-150、pp.178-181、1988。
- 7) 建設省河川局：改訂河川砂防技術基準(案) 調査編、山海堂、第12章、pp.303-324、1978。
- 8) 山田正・川端規之：浸透層上の流れの抵抗則に関する理論的研究、土木学会論文報告集 No.325、pp.69-80、1982。
- 9) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Pros. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, 106, HY8, 1325-1343, 1980。
- 10) 山本晃一：沖積河川学、山海堂、pp.5-7、470p。
- 11) 山本晃一：河道特性論、土木研究所資料、第2662号、pp.37-50、1988。
- 12) 建設省土木研究所河川部河川研究室：涸沼川洪水観測レポート [I]、土木研究所資料、第2895号、pp.123-126、1990。