

透過水制や樹木群を用いた河道断面制御手法の開発¹

Regulation of river cross-sections with the use of permeable dikes or vegetation

泉 典洋²

Norihiro IZUMI

1. はじめに

河川空間における豊かな自然環境整備の重要性が叫ばれるようになって久しい。水害の危険性が軽減され国民の生活が豊かになるにつれて、とかく機能面のみが強調されがちであった河川に対し、豊かな生態系を育む自然空間としての期待が高まったのである。そして近年、機能や採算ばかりにとらわれない自然環境重視の河川管理に対する国民的なコンセンサスが得られるに至って、河川管理の現場でも本格的な自然環境の保存と整備が行われるようになった。

このような状況の中で、従来までのコンクリート護岸に代わる自然環境に配慮した河道制御法の開発は重要課題の一つであると言っても過言ではあるまい。本研究ではその一つとして透過水制や樹木群を用いた河道断面制御手法を取り上げる。

透過水制は古い時代から世界中で用いられてきた河道制御法の一つであり、日本でも多くの河川で用いられてきた。またよく整備された樹木群が河道安定化に有効であることも古くから知られていた事実であり、日本においても水害防備林という形で多くの河川に適用されてきた。ところがこれら伝統的工法は近代河川工法が確立されて以降、あまり省みられることは無くなった。そしてそれとともに、両工法に関する理論的な研究も十分には行われないうちとなっていた。必要最小限の人工構造物を用いる透過水制や、自然の一部を利用する樹木群を用いた河道制御手法は、自然環境を大きく破壊することはない。従来までのコンクリート護岸に代わる自然環境に配慮した河道制御法として再び注目されるべきではないだろうか。

本研究では透過水制や樹木群を用いた河道断面制御手法について理論的側面から論ずる。

2. 沖積地河川の特性と河道の固定

2.1 沖積地河川の特性

日本のほとんどの大都市は沖積地上に位置しており、沖積地河川の制御を行うことは治水重要な課題である。沖積地の形成プロセスは氾濫と流路変動の歴史に他ならない。上流から運搬されてきた土砂は最初河道内へ供給されるが、これによって河床の上昇が生じ洪水氾濫が発生する。そしてそれによって河川は現河道より低い位置へと流路を変動させる。このようなプロセスの繰り返しによって、河道内だけでなく河道外へも土砂が供給され、広がりをもった扇状地や三角州等の沖積地が形作られていった。河床上昇とそれによる流路変動はまさに沖積地の形成プロセスそのものだったのである。

2.2 河道の固定と土砂輸送能力の高い河道断面形状

沖積地河川を制御するためには、河床上昇を抑え流路を固定する必要がある。河床上昇の原因は土砂輸送能力の欠如である。元来沖積地を形成する河川は十分な土砂輸送能力を有していないのが普通である。それ

¹ キーワード：透過水制，樹木群，河道断面形状，河道制御

² 東北大学助教授 工学部土木工学科 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

では十分な土砂輸送能力を有する河道とはどのような河道であろうか？

図-1に示すような流量 Q を流し得る二つの河道を考える。a及びbの河道はそれぞれ河幅 B_a 及び B_b を有しており、 $B_a > B_b$ を仮定する。簡単のために河道断面形を広幅矩形断面とみなし、抵抗則として次のマニング則を用いる。

$$V = \frac{1}{n} H^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

ここで V は平均流速、 n は粗度係数、 H は平均水深、 S は河床勾配である。流量 Q を流すのに必要な水深は次式で表わされる。

$$H = \frac{n^{3/5} Q^{3/5}}{B^{3/5} S^{3/10}} \quad (2)$$

土砂輸送量は次のBrownの式を用いる。

$$q_s = q'_0 \tau^{*5/2} = q_0 (V^2 H^{-1/3})^{5/2} \quad (3)$$

ここで q_s は単位幅当たりの土砂輸送量、 τ^* はシールズ数、 q'_0 及び q_0 は定数である。式(3)に(1)及び(2)を代入すると単位幅当たりの土砂輸送量 q_s 及び全土砂輸送量 Q_s はそれぞれ次のように得られる。

$$q_s = q_0 \frac{Q^{3/2} S^{7/4}}{n^{7/2} B^{3/2}}, \quad Q_s = q_0 \frac{Q^{3/2} S^{7/4}}{n^{7/2} B^{1/2}} \quad (4, 5)$$

粗度係数及び勾配を等しいとみなすと単位幅当たりの土砂輸送量は河幅の3/2乗に、全土砂輸送量は河幅の1/2乗に比例することがわかる。すなわち河幅の大きいaの河道に比べればbの河道の土砂輸送能力の方が大きいことになる。一般に河道の土砂輸送能力を高めるためには、河道幅をできるだけ小さくすることが必要となる。

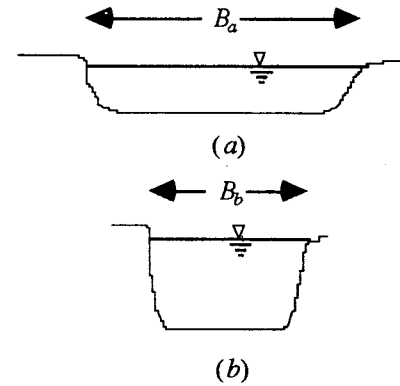


図-1 土砂輸送能力の高い河道

3. 安定河道断面形状のメカニズム

河道断面形状の設計の際に重要となるのが設計断面形状の安定性である。前節で土砂輸送能力の高い河道断面形状は河幅の小さい河道であることを示したが、そのような断面を作り得たとしてもそれが安定的に維持できるものでなければ無意味である。それでは安定的な河道断面形状とはどのようなものであろうか？

3.1 掃流砂が支配的な河道の安定断面形状

いま図-2のような河道断面形を考える。蛇行が激しく曲率が大きき場合を除けば、河道断面形状は一般的に平らな河道中央部と勾配を有する側岸部からなっている。掃流砂が支配的な河道の場合、安定断面の維持のためには側岸部上のあらゆる土砂は静止していなくてはならない。なぜなら側岸部上を移動する土砂は必ず重力による侵食を受けるからである。したがって側岸部と河道中央部との境界(以降接続点と呼ぶ)で底面剪断力は限界掃流力となる¹⁾。底面剪断力 τ の最も簡単な表現は次式である。

$$\tau = \rho g D S \quad (6)$$

上式で見積もられる底面剪断力は局所的な水深 D に比例することになる。ところが前述したように河道中央部は平坦でなければならない。すると接続点では限界掃流力となっているはずであるから河道中央部における底面剪断力もやはり限界掃流力ということになってしまう。つまり、側岸侵食が生じないような安定な状態では土砂輸送量はゼロということになる。このパラドックスは乱流による運動量の輸送を考慮することによって解決される²⁾。底面剪断力は、より正確には次式で表わされる。

$$\frac{\tau}{\cos \theta} = \rho g D S + \frac{d}{dy} \int_0^D (-\rho \overline{u'v'}) dz \quad (7)$$

ここで θ は河床の横断方向の傾き角、 y は横断方向座標である。また右辺第二項が乱流による運動量輸送を表わしている。この運動量輸送のために、底面剪断力は図-2の点線のように再分配される。つまり実際の底面剪断力は接続点で限界掃流力となり、河道中央に向かって徐々に大きくなる。このような限界掃流力より

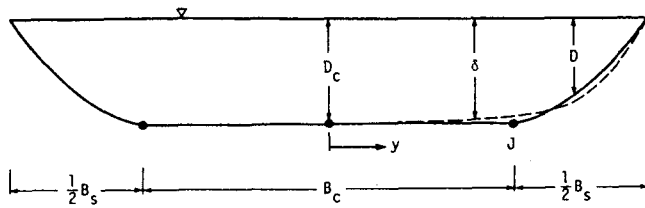


図-2 掃流砂河川の安定横断形状

わずかに大きい河道中央部の底面剪断力によって土砂は下流へと運ばれていくのである。現在の河道を形作っている流量以上の水が流れると水深が増大する。水深が増大すると側岸部の侵食が生じ拡幅が起こる。そして接点における底面剪断力が限界掃流力になったところで拡幅は停止する。

底面剪断力をシールズ数で表すと次式が成立する。

$$\frac{\rho g D_c S}{\rho R_s g D_s} = \beta \tau_{thr}^* \quad (8)$$

ここで D_c は河道中央での水深、 R_s は砂粒子の水中比重、 D_s は河床材料の粒径である。 β は河道

中央の底面剪断力と限界掃流力の比であり、理論より1.2程度の値をとることが明らかとなっている³⁾⁴⁾⁵⁾。また限界シールズ数 τ_{thr}^* は粒径によらずほぼ一定(0.03~0.06)であることが知られており、上式の右辺が定数であることを考慮すれば、安定河道の中央水深は粒径と河床勾配の-1乗に比例することがわかる。

3.2 浮遊砂が支配的な河道の安定断面形状

浮遊砂が支配的な場合、側岸部の土砂は静止している必要はない。掃流によって侵食された側岸部は、河道中央部から乱流拡散によって輸送される浮遊砂によって補填され、その形状を維持することが可能となる。河道断面形状が安定であるときの浮遊砂と掃流砂の動的なバランスを概念的に示したのが図-3である。横断方向の掃流砂量を q_{BL} 、横断方向の浮遊砂フラックスを $\mathcal{F}_L$ 、浮遊砂の沈降量と巻き上げ量をそれぞれ ϕ 及び ε で表すと、それらのバランスは次のように定式化できる⁶⁾。

$$\mathcal{F}_L + q_{BL} = 0, \quad -\frac{d\mathcal{F}_L}{dy} = \phi - \varepsilon \quad (9)$$

上式は q_{BL} 、 $\mathcal{F}_L$ 、 ϕ 、 ε の四つの変数を水深と浮遊砂濃度という二つの変数でパラメタライズすることによって解かれ、安定河道中央における相対水深は河床勾配の-0.8乗程度に比例することが明らかとなっている⁷⁾。浮遊砂が卓越する河道における安定断面形状のメカニズムは、浮遊砂が卓越する河道の場合と大きく異なっているものの、やはり中央相対水深は河床勾配の-1乗程度の値となるという非常に似通った結果が得られることは注目に値する。

3.3 実河川での検証

山本⁸⁾はその著書の中で河道中央における摩擦速度の二乗は河床材料の粒径が等しければほぼ等しくなることを指摘している(図-4)。しかも図によれば粒径が大きい範囲(2cm以上)において摩擦速度の二乗は粒径とほぼ比例関係にある(直線の傾きが1である)ことがわかる。また粒径が小さい範囲(0.01mm-0.2mm)においても比例関係が認められるが、大きい範囲とは違った比例定数を持つ(別の直線に載っている)ことがわかる。

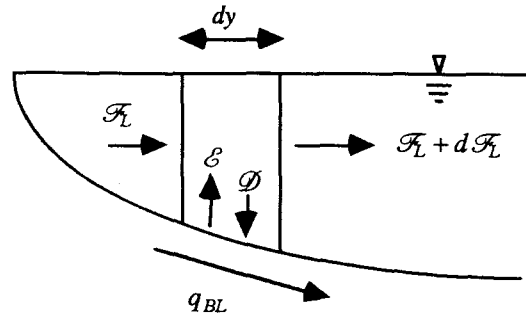


図-3 浮遊砂河川の安定断面形状

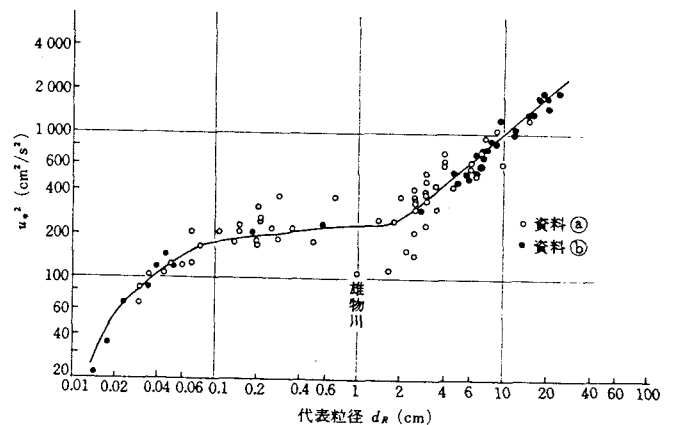


図-4 u_*^2 と d_R の関係(山本⁸⁾より引用)

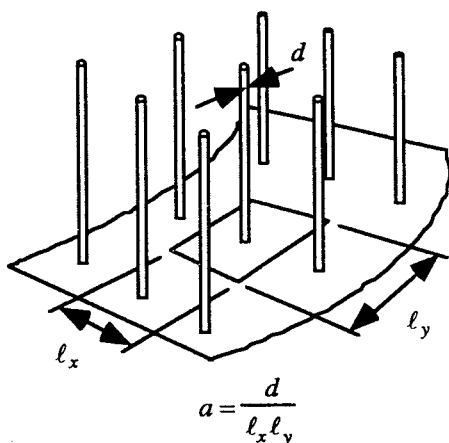


図-5 a の定義

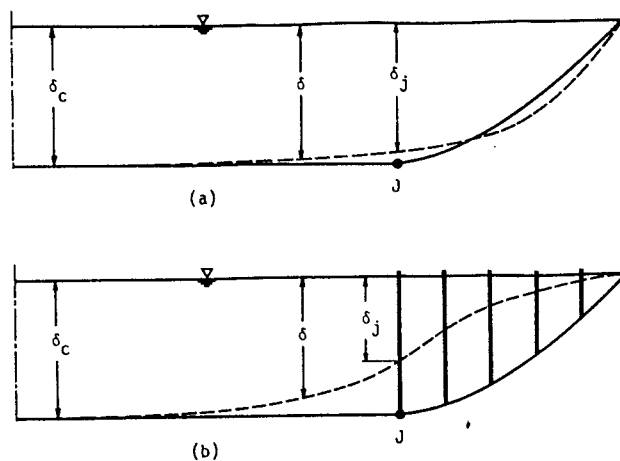


図-6 側岸部上の円柱群による底面剪断力分布の変化

この関係を式で表すと次のようになる。

$$u_c^{*2} = \alpha_1 d_{50} \quad (10)$$

ここで d_{50} は50%粒径であり, $u_c^* = (g D_c S)^{1/2}$ であることを考慮すれば, 上式は次のように書き換えられる。

$$\frac{D_c}{d_{50}} = \frac{\alpha_1}{g} S^{-1} \quad (11)$$

この式は3.1及び3.2の理論から導かれる関係式に他ならない。しかも掃流砂と浮遊砂で別の直線に載っている事実は, 3.1及び3.2の理論において大きく異なるメカニズムによって良く似た関係が得られたことに対応している。このことは上記の理論を強く指示するものである。

4. 透過水制及び樹木群による安定断面形状の変化

前節で河床勾配に応じた安定な水深が存在することを示した。流量が決まると安定水深に応じて必要な河幅が決定される。この河幅より狭い河幅を与えると, 河道内に安定水深より大きな水深が生じ側岸侵食が始まる。従来, このような側岸侵食を防ぐために用いられていたのが護岸である。護岸によって拡幅が抑えられ必要な土砂輸送能力が得られることになる。この節では側岸部に設置された透過水制や樹木群が安定水深を増加させる機能を有しており, それによって河幅の減少と土砂輸送能力の増加がもたらされることを示す。

4.1 側岸部に円柱群を有する掃流砂河川

透過水制及び樹木群を円柱群に置き換えて考える。円柱群の抗力の効果を加味すると底面剪断力は次式で表される。

$$\frac{\tau}{\cos \theta} = \rho g D S + \frac{d}{dy} \int_0^D (-\rho \bar{u}' v') dz - D_r, \quad D_r = \rho C_D a D_c \frac{\bar{u}^2}{2 \cos \theta} \quad (12)$$

ここで D_r は流水に対する円柱群の抗力, C_D は円柱の抗力係数であり1から2程度の値をとる⁹⁾。また a は単位河床面積あたりに存在する円柱の幅の合計であり, 図-5で定義される。上式からも明らかなように円柱群はその抗力によって底面剪断力の一部を減少させる働きを有している。側岸部に円柱群が存在するときの底面剪断力の横断分布形を示したのが図-6bである。 a の円柱群がない場合に比較すれば, 円柱群が底面剪断力の一部を受け持つため底面剪断力が側岸部近傍で小さくなる様子がわかる。円柱群の無い場合と同様接続点で限界シールズ数となることに変わりはないが, 河道中央でのシールズ数と接続点でのシールズ数の比 β は円柱群が無い場合に比べて大きくなり, 中央水深が大きくなるのがわかる。理論より求められた相対中央水深 D_c / d_{50} と χ との関係を図-7に示す⁴⁾。ここで χ は円柱群の密度を表す無次元パラメータであり次式で表

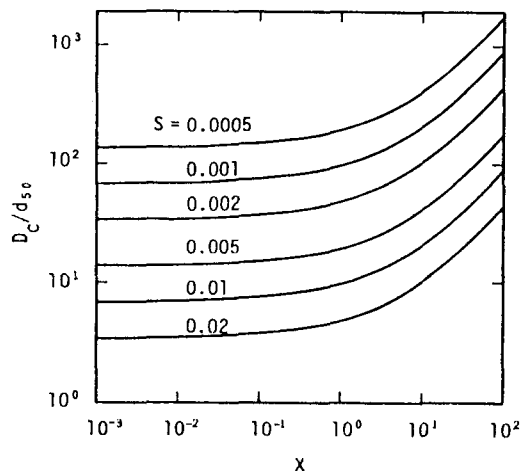


図-7 相対中央水深 D_c/d_{50} と χ 及び S の関係

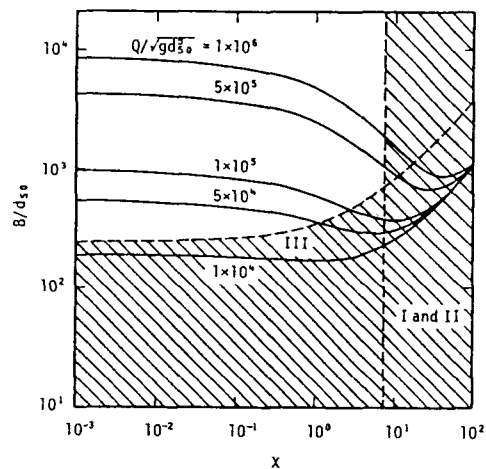


図-8 相対河幅 B/d_{50} と χ 及び $Q/\sqrt{gd_{50}^5}$ の関係

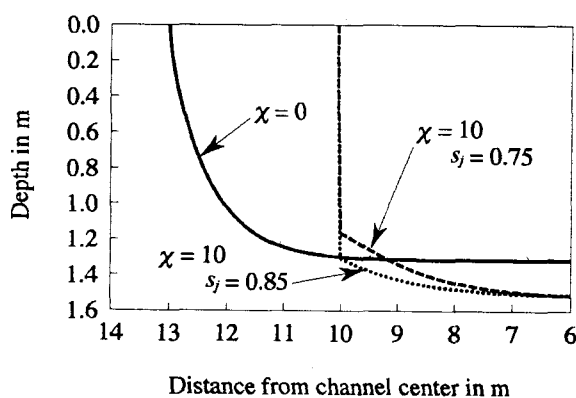


図-9 円柱群設置前後の断面形状の変化

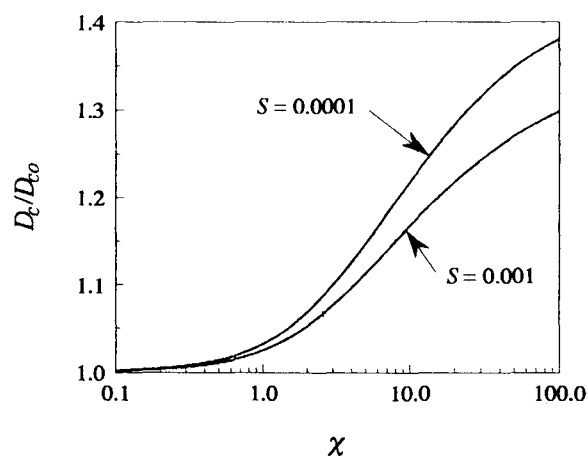


図-10 D_c/D_{c0} の上限値の χ 及び S による変化

される。

$$\chi = \frac{C_D a D_c}{2 C_f} \quad (13)$$

ここで a は前述した円柱群の密度、 C_f は底面の抵抗係数である。 χ は円柱による抗力と底面剪断力との比を表している。泉・池田⁴⁾、泉・池田・Parker¹⁰⁾によれば、樹木群の場合 χ の値は1から7程度、透過水制の場合1から100程度の値をとる。図-7によると χ が1を超えたあたりから D_c/d_{50} の値は急激に増加を始め $\chi=10$ 付近で2倍以上になることがわかる。

図-8に相対河幅 B/d_{50} と χ の関係を示す⁹⁾。流量が大きいとき川幅は半分以下まで減少することがわかる。

図-6を見ると河道中央部の底面剪断力は、側岸部になにもないときは限界掃流力をわずかに上回るだけであつたのに対し、側岸部に円柱群を有するときは限界掃流力を大きく上回ることになる。掃流砂量は一般的に底面剪断力と限界掃流力の差の1.5乗から2.5乗程度に比例するので、この側岸部における円柱群の有無は土砂輸送能力に大きな違いを生じさせる。側岸部上の透過水性や樹木群は掃流砂量を飛躍的に増加させることがわかる。

4.2 側岸部に円柱群を有する浮遊砂河川

浮遊砂が支配的な場合、透過水制及び樹木群が流水に及ぼす抵抗によって側岸部の底面剪断力が減少し、側岸部での浮遊砂巻き上げ量が減少する。また側岸部と中央部の浮遊砂量の差が大きくなり、河道中央から

側岸部へ向かう浮遊砂フラックスが増加する。この浮遊砂フラックスによって側岸部上には顕著な堆積が生じることになる。

理論より得られる安定状態における浮遊砂河川の断面形状を示したのが図-9である¹⁰⁾。当初26mだった河道の両側岸部に幅3mにわたって $\chi=10$ の円柱群を設置すると仮定し、設置前の断面形状を実線で、設置後の断面形状を点線と波線で示した。流量及び河床勾配は変化しないものと仮定している。図中横軸10mより左側に円柱群が設置されているが、この領域は浮遊砂の堆積によってほぼ埋まってしまっている。いいかえれば円柱群の設置された領域は、その大部分が砂に埋まるまで安定状態に達しないことがわかる。水制設置後の断面形状の理論値は $s_j = 0.75$ と0.85の二通りが存在するが、この内のどちらの解が実際に現れるかは解の安定性の問題となる。いずれにしても中央水深は同じく132mから1.52m程度に増加している。

浮遊砂河川の場合、水深の増加率は円柱密度のみによるのではなく水制の位置や河床勾配の関数となっている。適切な水制位置によって最大どの程度まで水深が深くなりうるかを示したのが図-10である¹⁰⁾。縦軸は円柱設置後の中央水深を設置前の値で割ったものである。 $\chi=10$ 付近で20%前後、 $\chi=100$ で30%から40%増加する様子がわかる。

5. 実現象への応用

5.1 側岸部に植生を有する掃流砂河川

Andrews¹¹⁾はコロラド州を流れる河川の流量、水深、河幅、河床材料の流径等について実測を行い、側岸に植生(主に樹木群)がある場合、ない場合に比べて水深が60%増加し河幅が55%減少すると報告している。実測された河川はコロラド州を流れる山地領域を流れる河川であり、掃流砂が卓越する河川であると考えられる。したがって掃流砂河川の安定断面形状の理論を用いて、水深及び河幅について理論値と実測値の比較を行ったのが図-11、12である。図-11では樹木群の効果は考慮されていない。樹木群を有するケースで水深は実測値の方が大きくなり、河幅は実測値の方が小さくなっている様子がわかる。図-12では樹木群の効果が考慮されている。全体的に良好な一致がみられる。

5.2 水制設置による河道断面形状の変化

図-13には浮遊砂河川であるアメリカ合州国コロンビア川における水制設置前後の河道断面形状の変化を示した^{10),12)}。図中の△は水制設置直前の1909年、○は水制が設置されて50年足らずが経過した1957年における断面形状の実測値である。水制によって水制設置領域はほぼ土砂に埋没してしまったのに対して、河道中

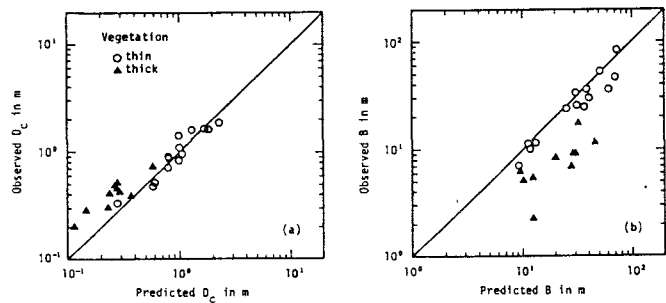


図-11 実測値と理論値の比較（植生の影響無）

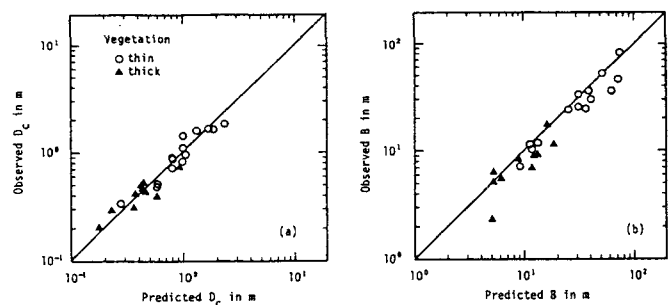


図-12 実測値と理論値の比較（植生の影響有）

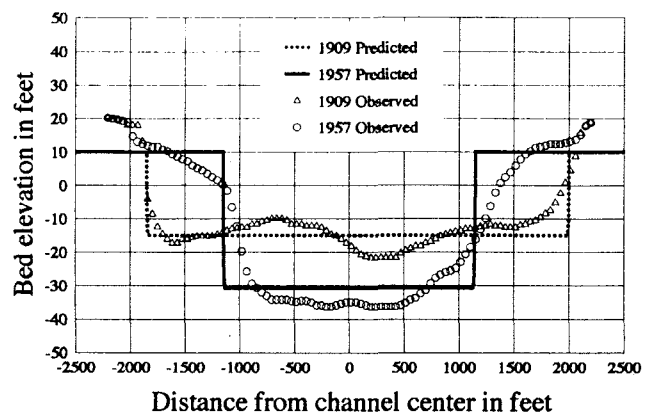
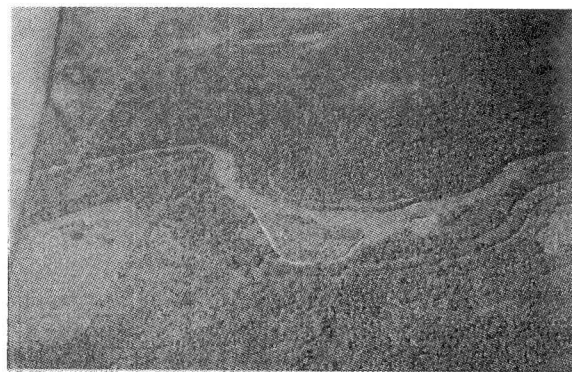


図-13 水制設置前後の断面形状の変化



(a)



(b)

図-14 サントドミンゴ川（ベネズエラ）

中央部ではlow water levelを基準として水深が約2倍に増大していることがわかる。4.2で述べた理論を用いると水深の増加はせいぜい40%程度であることになり、図の現象を説明することはできない。これを説明するためには平衡縦断形状の考え方が必要となる。4.2では流量と河床勾配が保存すると考えたが、Straub¹³⁾、芦田¹⁴⁾によれば縦断形状が平衡に達した状態ではむしろ流量と土砂輸送量が保存されているという。この条件を用いて計算し直したのが点線及び実線であり、前者が設置前、後者が設置後に対応している。計算値はどちらもほぼ矩型をしているが、これは横断方向のスケールが大きいためであり、横断方向に引き伸ばして見ると滑らかな曲線となっている。計算値は勾配の急なところで掃流砂量が増大する効果などをいれてないため側岸部が非常に急な勾配となっている。実測値と理論値の一致は必ずしも良くないが、平衡縦断形状の概念を導入することによって2倍近くまで増加した水深を説明することが可能となる。

5.3 樹林帯を流れる浮遊砂河川

図-14はベネズエラのサントドミンゴ川の写真である。

写真付近の勾配は約1/6000、中央粒径は0.4mmであり浮遊砂量が多い河川であると考えられる。この二つの写真はわずか数kmしか離れていないが、河道周辺に繁茂する植生のために、その様子が若干異なっているのがわかる。aの植生が疎な河道では多くの砂州がみられるのに対し、bの植生が密な河道ではあまり砂州が見られず明瞭な水際を有している。またbの左右端の植生の濃い部分の河幅が、中央の植生の薄い部分に比べて若干小さくなっている。このような植生の密度による河道形態の違いは、4.2の結果から次のように推定することができる(図-15)。植生によって覆われた河岸部は、なにも無い場合に比べて侵食に強く、拡幅が起きにくい。また洪水によって越水が生じたとしても河岸部の植生によって流速が減減され、河岸に沿って大量の浮遊砂を堆積させる。4.2の理論によれば植生帯の内部は大部分が堆砂で埋るまで平衡に達しないことになる。これによって自然堤防が発達するため、洪水氾濫の規模は抑えられ、流路変動の頻度も減少する。

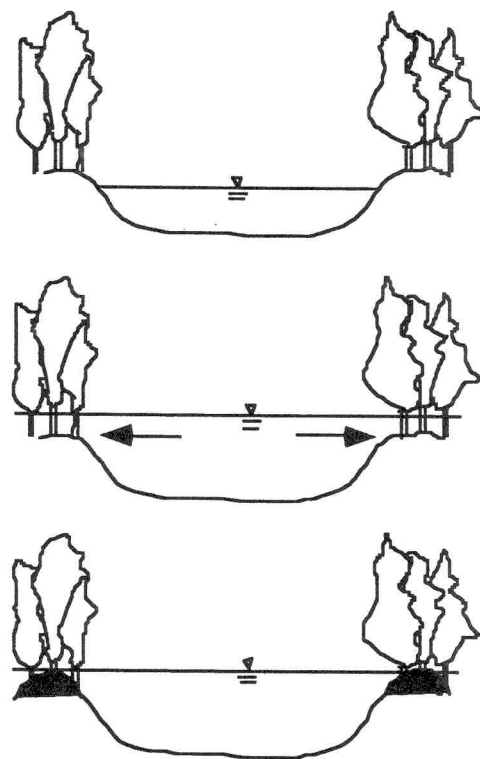


図-15 河岸上の植生による河道安定化

植生が疎な図-14aを見ると河道周辺に数多くのスクロールバーが見られるのに対し、植生の密なbではあまり見られない。植生に流路変動が抑制されていることを示しているのではないだろうか。

6. 実用化に向けて

理論によって側岸部上の透過水制や樹木群は側岸部上の底面剪断力を減少させ、安定な中央水深を増加させることが明らかとなった。特に掃流砂河川の場合、透過水制や樹木群は土砂輸送能力を顕著に増加させる。このことを用いれば河道断面形状及び土砂輸送能力の制御が可能となる。もちろん理論は理想的な条件を前提としたものであって、実際に用いるためには現場の特性を考慮にいたしより詳細な検討が必要となる。実用化に向けた研究が望まれる。

参考文献

- 1) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について，土木学会論文報告集，第210号，pp.13-20, 1973.
- 2) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed, Part 2, The gravel river, J. Fluid Mech., Vol. 89(1), pp. 127-146, 1978.
- 3) Ikeda, S., Parker, G. and Kimura, Y.: Stable width and depth of straight gravel rivers with heterogeneous bed material, Water Resources Research, Vol. 24, No. 5, pp. 713-722, 1988.
- 4) 泉 典洋，池田駿介：側岸に樹木を有する直線礫床河川の安定横断河床形状，土木学会論文集，No. 411/II-12, pp. 151-160, 1989.
- 5) Ikeda, S. and Izumi, N.: Width and depth of self-formed straight gravel rivers with bank vegetation, Water Resources Research, Vol. 26, No. 10, pp. 2353-2364, 1990.
- 6) Parker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 1, The sand-silt river, J. Fluid Mech., Vol. 89, Part 1, pp. 109-125, 1978.
- 7) 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.
- 8) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，470p, 1994.
- 9) Ikeda, S., Izumi, N. and Ito, R.: Effects of pile dikes on flow retardation and sediment transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, No. 11, pp. 1459-1478, 1991.
- 10) 泉 典洋，池田駿介，Parker, G.: 透過水制を有する直線砂床河川の平衡横断面形状，土木学会論文集，No. 565/II-39, (掲載予定).
- 11) Andrews, E. D.: Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado, Geol. Soc. America Bull., Vol. 95, pp. 371-378, 1984.
- 12) Committee on Channel Stabilization: Symposium on channel stabilization Technical Report No. 1, Vol. 1, U. S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, 1963.
- 13) Task Committee on preparation of sedimentation manual: Sediment transportation mechanics; erosion of sediment, Proceedings of A.S.C.E., pp. 121-122, 1962.
- 14) 芦田和夫：断面変化部における河床変動に関する研究(1)，京大防災研究所年報第6号，pp. 312-327, 1963.