

自然河岸形成工法の河岸発達過程に関する追跡調査

FIELD OBSERVATION ON FORMATIVE PROCESS OF THE RESORATION OF NATURAL RIPRIAN ZONE

瀬崎智之¹・末次忠司¹・伊藤政彦¹・吉田昌樹²・外山久典³

Tomoyuki SEZAKI, Tadashi SUETSUGI, Masahiko ITOU, Masaki YOSHIDA and Hisanori TOYAMA

1 正会員 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

2 (株) ウエスコ 兵庫支社 (〒651-0092 兵庫県神戸市中央区生田町2-2-2)

3 正会員 国土交通省 東北地方整備局 仙台工事事務所 (〒980-8602 宮城県仙台市青葉区二日町9-15)

The new restoration method to create natural riparian zone in front of concrete revetments is suggested by P.W.R.I in 1997. In this method, after the construction of mounds in front of concrete revetments, following two processes are expected. 1) Formation of vegetation communities on the mound. 2) Deposit of fine sediment in the vegetation communities and elevation of ground level in the restoration zone. In this study, to make this restoration method fit for practical use, field observations were performed after test construction in 1996. The results are as follow. 1) The ground level in the restoration zone becomes over 1m higher compared with the initial mound levels. 2) The sediment on the mound consists thick layers made of fine sand and medium sand and thin layers made of silt. 3) After the change of vegetation communities, the ratio of the sediment volume on the mounds to the total influx volume was stepped up.

Key words : restoration of riparian zone, sedimentation of fine sand, river bank, riparian vegetation

1. はじめに

堤防や高水敷を防御する目的から、低水路水際部分には、コンクリートブロックなど人工的な材料を用いた改修が施されてきた。しかし、人工的な材料で作られた水際部は、土砂や植生などで作られた河川固有のハビタットを河川生物に提供するという機能を失ってしまっている。このため、既存の人工的な材料を用いた護岸の周辺に簡易な方法で、土砂や植生を材料とする代替の水際空間を創造する工法の開発が望まれている。

「自然河岸形成工法」は、既存の護岸前面に土砂と植物を材料とした豊かな生態系を持つ水際空間を創造することが出来る新しい工法として、図-1に示すように概念が提案されている¹⁾。人が手を加える部分は、①植生の形成を促すためのマウンドの設置、だけに留め、②マウンド上への植生の形成と③洪水時の植生被覆部での土砂堆積作用を利用して、設置地点の物理的・生物的特徴を強く反映した環境を創造することが期待出来る。また、出水時には、④マウンド上の一定範囲で侵食や堆積が繰り返されることで、環境の時空間的多様性を保つことが出来る。

本工法の実用化に向けて、1996年に阿武隈川下流域において試験施工を実施し、以後、モニタリング調査を継

続した。1999年には2年間経過時点の調査結果を基に、図-1中①から②に至る植生形成条件について検討し、以下の結論を得た²⁾。1) マウンド設置高は平水位以上にする必要がある。2) マウンド上への植栽土の敷設を行わない場合にも何らかの植生は形成される。本報告では、図-1中②→③に至る発達過程において現地調査を行い、結果を考察して、「自然河岸形成工法」の概念の有効性について検証し、さらに中水敷発達速度について考察を行う。

2. 試験施工と調査の概要

(1) 試験設置の概要

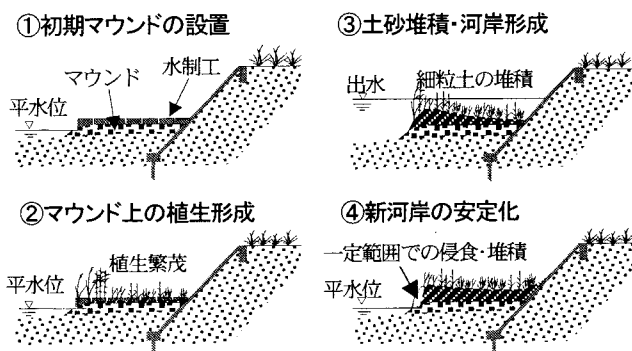


図-1 自然河岸形成のシナリオ¹⁾

阿武隈川 14.4km 付近左岸を試験マウンドの設置地点に選定した(図-2)。同地区を含む区間の平均河床勾配は 1/2,000 で、セグメント 2-2 (自然堤防帯) に属する。周辺の河川敷および低水路の河床材料調査結果から、0.1~0.5mm の細砂~中砂を主体とする粒径集団と、0.4~4mm の粗砂~細礫を主体とする粒径集団のいずれかで低水路の河床表面が覆われていることがわかっている。周辺を踏査した際の観察によると、河床の大部分は粗砂~細礫で形成され、細砂~中砂は砂州の下流側など流れの滞んだ地点や高水敷上に堆積している材料であった。付近の河岸には、タチヤナギ、ツルヨシ、ヨシ、オギを中心とした植物群落が形成されている³⁾。

1996 年 8 月設置当初のマウンド周辺の比高(平水位 T.P. 4.1m を基準とした高さ)を図-3(o)に示す。マウンドは横断幅約 30m、縦断方向の長さ約 200m の長方形形状をしており、平均粒径 5.5mm の砂利を用いた。また、試験区 C, D には植物の繁茂を促すために周辺の河川敷から採取した植栽土を約 5cm の厚さで敷設した。側岸侵食から守るために 40m 間隔に幅 2.2m、マウンドからの高さ 0.3~0.6m、長さ 30~40m の水制 6 基を設置した。マウンド設置高は、比高-0.1m (B, C 河道中央側幅 10m) と比高+0.2m (A, D, E および B, C 中央部幅 10m)、比高+0.5m (B, C の護岸側の幅 15m) の 3 種類に設定した。詳細については、文献 2) を参照されたい。マウンド設置地点上流には、主要な支川である白石川の合流点があり、平水時と洪水時(マウンドの設計水位である T.P. 7.8m まで水位上昇した出水)のいずれの場合でも、マウンドと河道中央部にある中州との間に(図-2 参照)、明瞭な濁度の境界が現地調査時に確認された。

(2) 現地調査の概要

マウンド設置後の水位変動と調査時期を図-4に示す。発生した出水の規模・頻度からマウンド設置後の 6 年を、期間Ⅰ(1996 年 9 月~1998 年 7 月):小出水期、期間Ⅱ(1998 年 8 月~1999 年 10 月):大出水期、期間Ⅲ(1999 年 11 月~2001 年 11 月):小出水期、の 3 期に分けることが出来る。調査項目は、以下のとおりで、図-4 下段に調査時期を明記した。

- ・地形測量:低水護岸法肩から河道中央に 50m の横断測線を 10.5m 間隔で実施した。水制先端部など地形変化の大きい箇所は適宜補完した。また、図-2 に示す中州についても縦断方向約 50m の間隔で横断形状を測量した。
- ・植物群落分布調査:気球からの空中写真撮影または GPS (Trimble 社製 X-pro) による測量と現地踏査によって植生図を作成した。
- ・植物群落の物理構造調査:植物群落分布調査でゾーニングした植物群落ごとに単位面積当たりの本数・群落高・葉面積・茎の直径を測定した。同一種から構成される植物群落であっても、物理構造に明瞭な差がある場合と判断された場合には、それらを区別してそれぞれの物

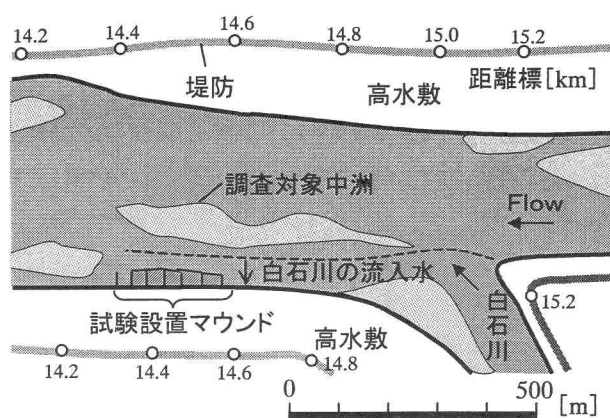


図-2 試験設置マウンドの位置

試験区A 試験区B 試験区C 試験区D 試験区E

(o)1996年9月(マウンド設置直後)

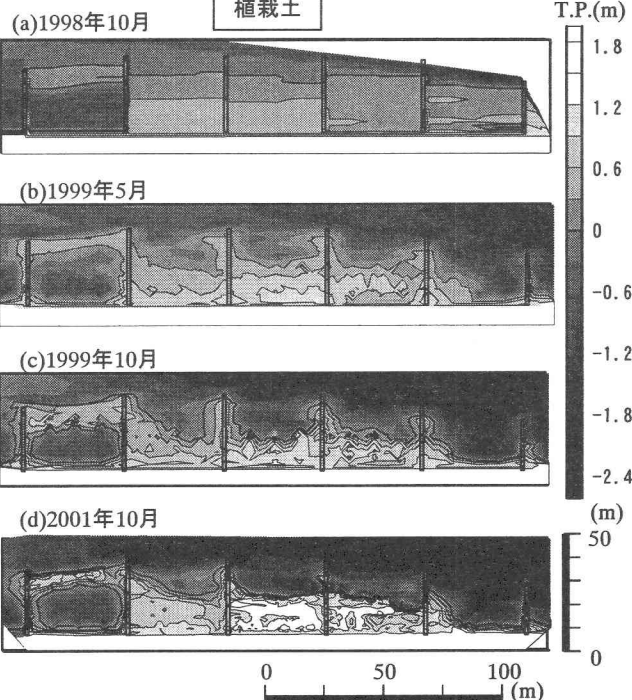
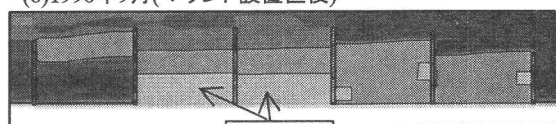


図-3 マウンドの地形変化

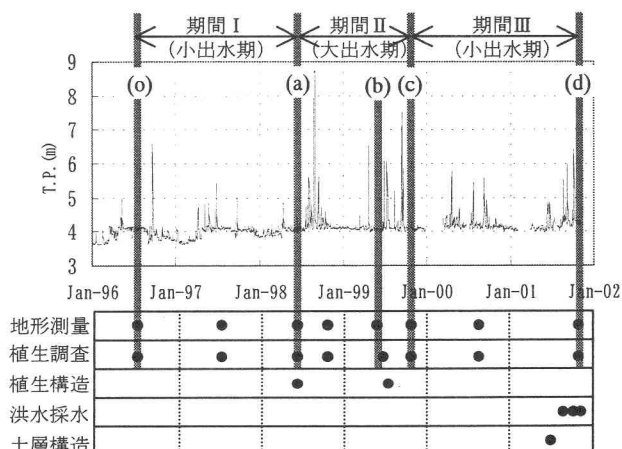


図-4 調査地点の水位変動と現地調査実施時期

理構造を測定した。

・洪水流採水：2001年8月23日、9月12日、10月11日の3出水を対象に、自動採水装置（ISCO社製6700）を用いて2001年時点のマウンド最上流端に位置する試験区E下流の護岸のり肩から10mの距離にあるマウンド上の高さ10cmの位置（T.P.5.1m：2001年7月当時の平均的なマウンド高に相当）で採水を行った。採水した濁水は、持ち帰ってSSと含有土砂の粒度分布を分析した。

・土層構造調査：マウンド上および図-2に示す中洲の堆積土層構造をトレンチ掘削によって調査した。また、各土層の土砂サンプルを持ち帰って、粒度分析を行った。

3. 試験設置後の地形と植生の変化

(1) 地形の変化

期間Ⅰ～Ⅲの境界に相当する図-4中(a)～(d)に示す時期の比高を図-3(a)～(d)に示す。まず、比高0m以下の水中部のマウンドに着目する。試験区Aのワンド状になった部分では河床変動がほとんど生じていない。また、試験区B、Cの平水位-0.1mマウンドは、1～2m標高が低下している。試験区B、Cのマウンド部の低下は、マウンド前面において、期間Ⅱ[(a)→(b)→(c)]、期間Ⅲ[(c)→(d)]で、最大1m以上の河床低下が上流から進行しているためと考えられる。ただし、マウンド周辺の横断測量成果によると、マウンド周辺から200m以上上流の14.8km付近まで低水路部分全体の河床が低下しており、水制の設置に直接的に起因するものでない。その結果、試験区Eではマウンドの大部分が流失し、試験区C、Dでも河道中央側のマウンドが侵食されてマウンド幅が小さくなっている。水中部分で土砂が堆積していないことは、本試験施工で設置した水制の効果だけでは、水制間に急激な土砂堆積を促すことが出来なかったことを示唆するものである。

これに対して、比高0m以上の陸地部分に着目すると、期間Ⅰ[(o)→(a)]ではマウンドが冠水する出水が何度も発生しているにも関わらず、目立った地形変化は生じていないが、大出水が頻発した時期Ⅱ[(a)→(c)]では、試験区A、C、Dのほぼ全面と試験区Bでは護岸のり肩に沿った部分で土砂堆積が進み、一部では水制よりも高い位置まで比高が増加している。再び小出水期が続いた期間Ⅲ[(c)→(d)]では、堆積量は多くないものの、試験区全体が上昇していることがわかる。以上の水面下、陸域の土砂堆積傾向の違いは、土砂堆積にマウンドが果たす影響が極めて大きいことを示している。

これらの時間変化を他の測量成果も加えて考察する。試験区B、C、Dのマウンド中央横断測線の内、護岸の影響が大きくなり、側方侵食を受けていない護岸の肩から河道中央方向に距離10m～20mの区間の平均河床高を図-5に示す。小出水期である期間Ⅰではほとんど変化がないが、大出水が生じた期間Ⅱで急激に上昇していることが

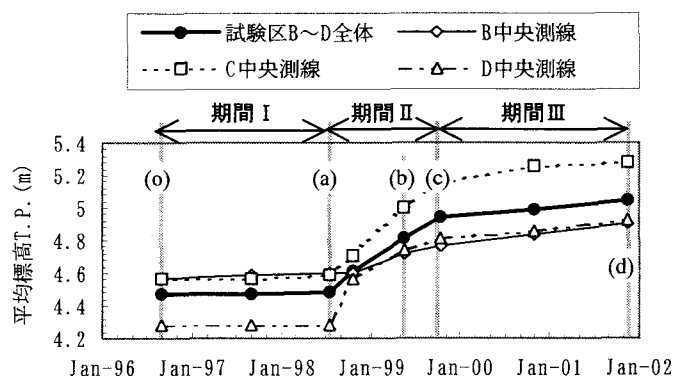


図-5 試験区B～Dの標高の推移

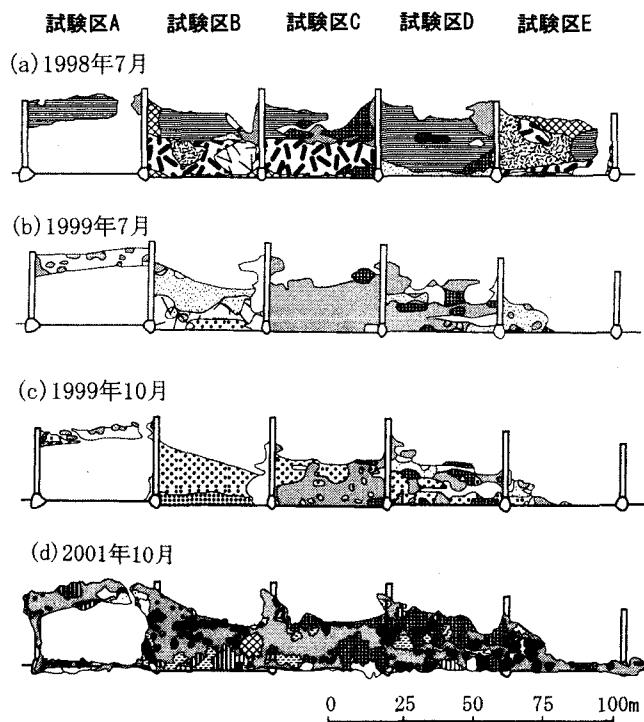
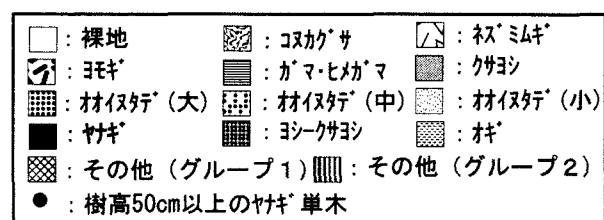


図-6 マウンド上の植生の変化

わかる。再度小出水となった期間Ⅲでは、上昇速度は小さいものの上昇していることがわかる。

また、堆積した土砂の平面形状に着目すると、現段階でのマウンド形状は、上流が高くて下流が低く、また護岸に沿った部分と水際に沿った部分が若干高い構造をしている。

(2) 植生の変化

図-3、4に対応する3時期の植生図を図-6(a)～(d)に示す。まず、(a)を見ると、比高0.2mのマウンドにはガマ・ヒメガマ群落、比高0.5mのマウンドにはヨモギ群

落がマウンドに共通して形成されている。植栽土の有無の影響について試験区 A, B, E (植栽土なし), 試験区 C, D (植栽土あり) を比較すると、植栽土を敷設した試験区にはヨシ・クサヨシ群落の一部形成されているのに対して、植栽土を敷設していない試験区にはない点が異なっている。全体としては、当初のマウンド設置高に対応して植物群落が形成され、植栽土の影響は小さいと言える。(b) では、試験区 B にはオオイヌタデ群落、試験区 C, D はクサヨシ群落とオオイヌタデ群落が大部分に形成され、河川敷に特徴的に見られる植物群落へと遷移した。また、(c) では、(b) と植物群落の種類に変化はないが、試験区 B に形成されていたオオイヌタデ群落が成長している。(d) では、オオイヌタデ群落がほとんどなくなり大部分にクサヨシ群落が形成され、土砂堆積の特に進んだ護岸および水際に沿った部分でヨシ・クサヨシ群落がパッチ状に形成され、特に高い部分にオギ群落も形成されている。また、マウンド設置高を比高+0.2 に設定した試験区 A, D, E および B, C の水際部では、(a) (c) の時期にはクサヨシなどの群落内で点在していた樹高 1m 未満のヤナギの幼木が成長して広範囲に優先的な群落を形成している。(d) の調査時点で試験区 B, C の護岸側の部分にも樹高 1m 程度のヤナギ幼木が、多数存在していることから、今後さらにヤナギ群落の拡大が続くことが予想される。

(3) まとめ

形成された植物群落の種類と比高には密接な関係があるが、(d) でヨシ・クサヨシ群落やオギ群落も形成された

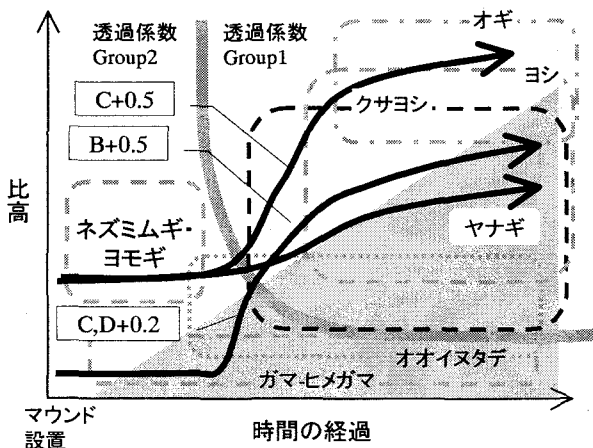


図-7 植生遷移シナリオの概念図

護岸や水際に沿った比高の高い部分は、(c) の時点ですでに基本的な形状が出来ていたことから、本マウンドにおいては、地形・土壌の変化に植物群落の遷移が追従していると考えることが出来る。以上の地形と植生についての図-1 に対応させて考えてみる。特に明瞭な地形変化が生じておらず、全面に植生が形成されている(a)の段階は、図-1 中②に相当し、その後の(b)~(d)で地形の変化が生じる③を経ている。このように、当初想定していたシナリオが再現されたと言える。河岸発達までの植物群落の遷移過程は、図-7のようにまとめられる。設置当初に与えた試験区 A~E 間のマウンドの初期設定に応じて、初め段階の植物群落に差は生じたが、出水を経た発達段階では全ての試験区で、クサヨシ群落の中にヨシ・オギ・ヤナギ群落がパッチ状に存在する植物群落の分布パターンになった。これは試験区周辺の中州に見られる植物群落パターンであり、形成された中水敷の生態系の質の点でも工法の有効性が示された。

4. マウンド上への土砂堆積機構

(1) 平面的な土層構造

試験区間で堆積土層厚に差が生じた原因を把握するために、図-8に、A~D の各マウンド中央横断面の土層構造と横断形状の変化を示す。土層の粒径は、粒度分析結果より、粒径を礫、砂 (5段階)、シルト、粘土の7粒径成分の内、30%以上含有している成分がある場合にはそれを全て列挙し、どの粒径成分の含有率も 30%に満たない場合には、最も含有率が高いものを記した。

マウンド形状の変化と土層構造の関係に着目すると、期間 I および III (小出水期) に形成された土層は、すべての断面で層厚が比較的小さく、細砂やシルトなど細粒分から構成されている。それに対して期間 II (大出水期)

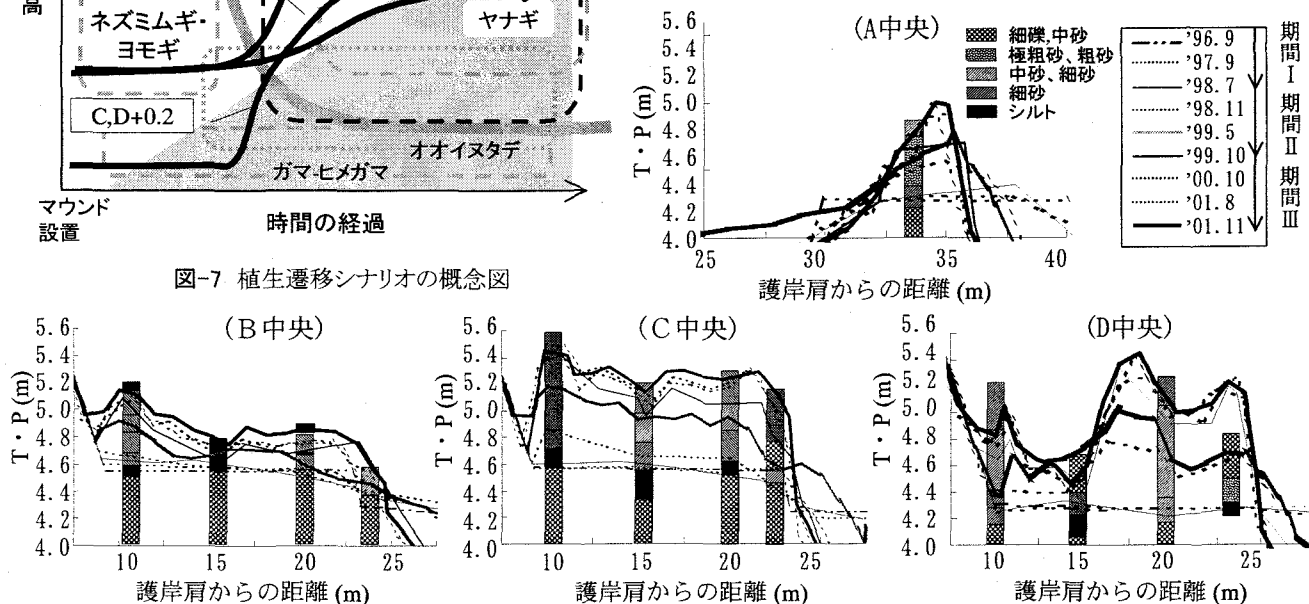


図-8 試験区 A~D 中央断面の土層構造と横断形状の変化

の土層は、上流側の試験区Dは層厚が大きく河床材料に含まれる比較的粒径が大きい細砂～中砂成分で構成されているのに対して、下流側の試験区Bでは期間Ⅰ、Ⅲと同様の細粒成分によって土層が形成されていることがわかる。これは水際部を除いて、横断距離が10m、15m、20mの位置に関わらず見られる傾向である。このことから、出水時のマウンド上に堆積する土砂は、マウンド上に乗り上げる流れに含まれる土砂が掃流力の急激な減少によって堆積したものであることがわかった。

ここで、試験区と同一横断面上で河道中央側にある中州（位置は図-2参照）の標高と土層構造を図-9に示す。コンター図（上段）を見ると、この中州が上流端部と若干左岸側にずれた中央部にそれぞれT.P. 6.0～6.5mと最も試験マウンドの堆積高より1m以上高いテラス頭を持ち下流に向かって低くなる2つの州が合体したものであることがわかる。土層構造に着目すると、1) 厚い粗粒土層と、薄い細粒成分の互層構造となっている、2) テラス上流ほど粒径が粗く、堆積高が高いこと、と試験マウンドと類似した構造をしている。試験マウンドで見られた堆積パターンは、自然の作用においても見られる堆積パターンと一致していることがわかった。

（2）堆積速度についての考察

次に、小出水期であった期間Ⅰと期間Ⅲの堆積高に差が生じた原因について検討するために、まず、冠水頻度、冠水深、供給土砂量などに関係する基準量を導入することにする。藤田らは、パウダー川の高水数成長過程の調査結果から、高水数に供給される土砂輸送量の概算値の増加に伴って高水数堆積高が上昇するとの傾向を見いだしている。この考えに倣って、土砂供給量と堆積高との関係を見るために、マウンド上への土砂輸送量を概算することにする。マウンド上に堆積する土砂はマウンド上流面から供給されることから、マウンド上流境界単位幅当たりの土砂供給量 $V(\text{m}^3)$ は、マウンド上流の流速 $u(\text{m/s})$ 、土砂濃度 $C(\text{ppm})$ 、マウンド上の水深 $h(\text{m})$ の積として以下の式(2)のように与えることが出来る。

$$V = \int (uCh) dt \quad (2)$$

マウンド流入部の流速 u は、マウンド上流端での等流時の流速で近似することとし式(3)で表す。

$$u = \varphi u_* = \varphi \sqrt{ghI} \quad (3)$$

ここで、 I : 河床勾配(=1/2000)、 φ : 流速係数(=12で一定と仮定)を表す。

また、マウンド上流端での洪水観測結果を図-10に示す。マウンド付近の水質には白石川からの流入水の影響が強いと考えられることから、図中には3回の出水についてそれぞれ、①全SS→当該地点の流量→黒プロット、②全SSと白石川流量→白プロットの2とおりの整理をしている。白石川の流量は、船岡大橋観測所（白石川：マ

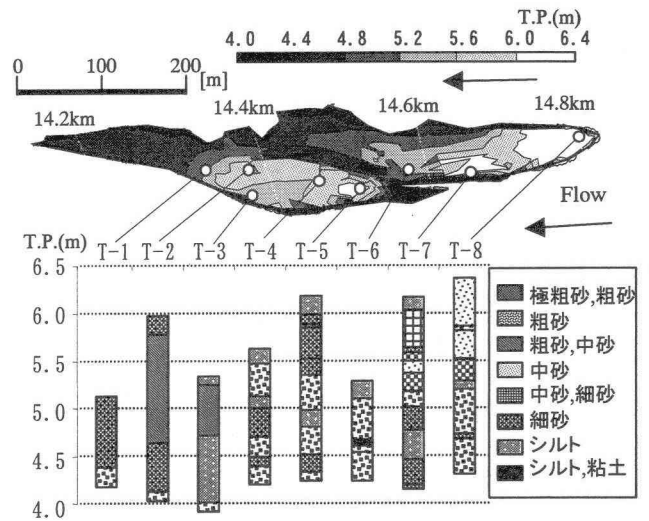


図-9 中州の標高と土層構造

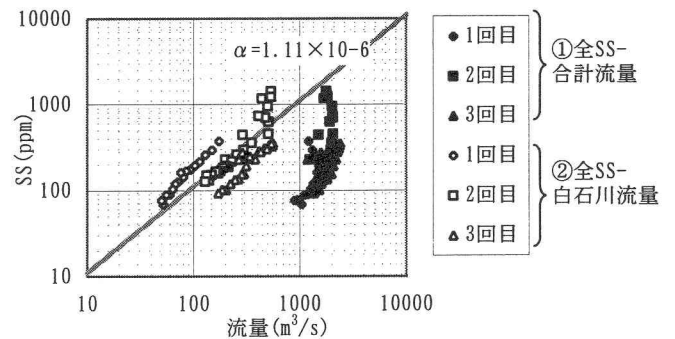


図-10 マウンド上流端での土砂観測結果

ウンドより4.3km上流)を、当該値の流量は、江尻観測所（本川：マウンドより4.4km上流）と船岡大橋流量の合計流量をそれぞれ用いた。土砂濃度は、当該地点の流量よりも白石川の流量との相関が高いことから、土砂濃度 $C(\text{ppm})$ を以下の式(4)で与える。

$$C = \alpha Q_F \quad (4)$$

ここで、 Q_F : 船岡大橋の流量(m^3/s)、 α : 流量と土砂濃度との比例係数(= $1.11 \times 10^{-6} (\text{m}^3/\text{s})$ 観測値の平均値を代表値として用いる)、を表す。以上の結果得られた土砂供給量を用いて、図-5に示した試験区B～Dマウンドの平均河床高の変化にマウンド縦断幅120mを乗じて堆積土砂量に直し供給土砂量との関係を整理した結果を図-11に示す。これを見ると、マウンド上に供給される土砂量の増加に伴って堆積土砂量が上昇する変化をしているが、この上昇の傾きが、マウンド設置直後の期間Ⅰでは極めて小さいのに対して、期間Ⅲでは大きく、期間Ⅱの間に大きく変化することがわかる。期間Ⅰと期間Ⅲの両小出水期では、供給量に対する堆積量の割合の点でも全く異なることがわかった。

塚原ら⁴⁾は、側岸に植生が形成された水路内の浮遊砂の堆積について水路実験および数値実験を行い、植生内の土砂堆積速度が、植物群落内部の流速を決定する植物群落の透過係数に強く関係していることを指摘している。そこで、物理構造調査結果を以下の式(1)適用して植物群

落の土砂堆積能力の指標として植物群落の透過係数 K を求める。

$$K = \sqrt{\frac{g}{\sum_i \left\{ N_i \left(C_d d_i + C_f \frac{A_{L_i}}{H_{v_i}} \right) \right\}}} \quad (1)$$

ここに、 g :重力加速度、 N_i :群落構成植物 i の単位面積当たりの本数、 C_d :抵抗係数(=1.2)、 C_f :葉の摩擦係数、 d_i :群落構成植物 i の根本付近の茎の直径、 A_{L_i} :群落構成植物 i 1 本当たりの葉の表面積、 H_{v_i} :植物群落構成植物 i の自然高を示す。主要な植物群落の透過係数を表-1 に示す。これを見ると、透過係数は、0.4~0.5m/s の第1グループと1.1~1.8m/s の第2グループに2分されることがわかる。これを植生図と照らし合わせてみると、(a)の時点でマウンド上に形成されていた大部分を占めるヨモギ群落、ネズミムギ群落、ガマ・ヒメガマ群落、オオイヌタデ(小)などの植物群落は、種類は異なるもののほぼ同等の透過係数を持つ第2グループの透過係数であるのに対して、(c)(d)の時点で広範囲の群落を形成している成立しているクサヨシ群落、ヨシ・クサヨシ群落、オオイヌタデ(大)群落は第1グループの透過係数であることがわかる。期間Ⅱは、第1グループの植物群落から第2グループの植物群落への過渡期であることから、堆積速度に大きな変化が生じたことが推測される。(b)の時点では試験区C、Dがほぼ全面第1グループの植物群落で覆われているが、試験区Bでは護岸に沿った部分だけが第1グループで、その他の部分は第1グループであり、第1グループから第2グループに変化する最終段階にあったと言える。以上の結果から、砂利のマウンドを設置しただけでは、土砂堆積能力の大きい植生が形成されるまでにある程度の期間を要することから、中水敷形成期間を短縮したい場合には、ヨシの根が混入した植栽土の敷設などの処置を行うことが有効であると考えられる。

5. まとめ

阿武隈川での試験施工を行い、追跡調査を行った結果、以下の知見を得た。

- ① 平水位以上の高さを保つことが出来るマウンドを設置することが、護岸前面に細粒土砂を堆積させるための十分条件である。
- ② 大出水時には河床材料が浮遊して厚く堆積し、小出水時にはウォッシュロードで掃流される細粒成分が薄く堆積して中水敷を形成する。
- ③ マウンド上に土砂が堆積した結果、植物群落の遷移が生じ、付近にみられる植物群落が成立する空間的に変化に富んだ水際環境が創造する事が出来る。
- ④ マウンド上に形成される植物群落の種類は、マウンド上に供給される土砂量と堆積量との割合に密接な

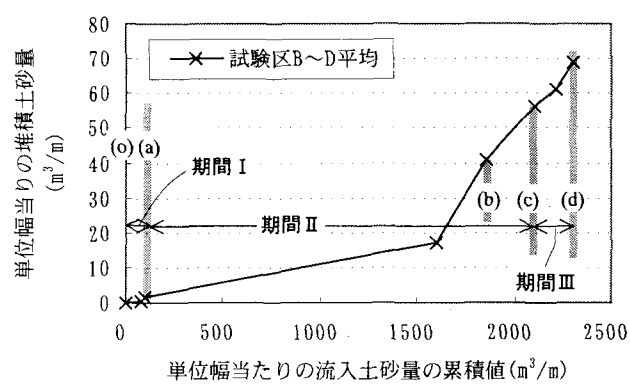


図-11 流入土砂量と堆積量の関係

表-1 マウンド上の植物群落の透過係数

植物群落名	K(m/s)	植物群落名	K(m/s)
クサヨシ	0.43	ガマ・ヒメガマ	1.26
ヨシ・クサヨシ	0.44	ネズミムギ	1.09
コヌカグサ	0.51	ヨモギ	1.24
オオイヌタデ大	0.51	オオイヌタデ(小)	1.81
オオイヌタデ(中)	0.46		
↑第1グループ		↑第2グループ	

関係がある。

謝辞:本研究の成果の一部として用いた2001年8月の現地調査では、当時夏期実習生であった平川隆一君(当時熊本大学博士課程)と西田将人君(当時広島大学3年生)の助力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

1) 宇多高明, 望月達也, 藤田光一, 平林桂, 佐々木克也, 服部敦, 藤井将人, 平谷渉, 平館治 (1997) 洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料, 第3489号, pp.445-503.

2) 瀬崎智之, 藤田光一, 近藤和仁, 山内芳朗, 栗田信博, 松井幸一, 内田正: 水際植生の土砂堆積機能を利用した自然河岸形成工法の開発, 河川技術に関する論文集, 第5巻, pp.105-110, 1999.

3) 建設省東北地方建設局仙台工事事務所: 阿武隈川水系(阿武隈川下流)植物調査報告書, 1997.

4) 塚原隆夫, 藤田光一, 望月達也: 植生が繁茂した河川水際の細粒土砂堆積の特性, 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp259-264, 1997.

5) 藤田光一, John. A. MOODY, 宇多高明, 藤井政人: 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, pp47-62, 1996.

(2002.4.15 受付)