

石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋

Issues on Fluvial Hydraulics of Stony Rivers and Key towards a Solution to a Problem

福岡 捷 二
Shoji FUKUOKA

1. はじめに

河川の洪水流と土砂流は治水上・環境上、河道で起こっているすべての現象に係わる基本的で重要な課題である。近年、洪水流と土砂流に関する基本的なデータが集められ、土砂水理現象を広い視点で解釈ができるようになってきた。その結果、これまで、最善と思われて用いられてきた洪水流や土砂輸送の算定法や河床変動計算法が、対象とする問題によっては必ずしも適切でない場合があること、また、洪水流や土砂流の水理現象についての理解が十分でなく、これまで慣用的に行われてきた検討方法に問題があり、改善の必要性も見られている。それらは、土砂移動現象計測のありかたの改良とともに、河床変動に及ぼす河床材料の役割をどう評価するかと密接に関係している。

本文では、石礫河川における大きな粒径集団が土砂移動や河床の安定に果たす役割に重点を置き記述している。次に、石礫河川における河床材料粒度分布の変化に着目することの必要性を示し、その変化が、河道、特に河床高の変化に与える影響を明らかにしている。従来の河床変動解析法の石礫河川への適用の問題点を示し、新しい考えに基づく石礫河川の河床変動解析法を示している。最後に、目的に応じた河床材料調査法確立の必要性とそのための考え方を示している。

2. 急勾配河川の土砂輸送、河床変動に関する研究の概観

わが国は、そのおかれている自然的条件、地理的条件から、急勾配河川が全国的に分布している。急勾配河川の特徴は、河床に大粒径から小粒径(石から砂、シルト)までの広い粒度分布を有する大きな河床勾配の河道に、鋭いピークをもつ洪水流量が流下することである。洪水中には、大量の河床材料が移動し、河床が変動し、著しい河岸浸食が生ずる。しかし、急勾配河川では、洪水流量の上昇、降下が急激であり、その中での流砂量や河床変動を測ることが不可能に近いこと、河道災害がいつどのような原因で起こったかが不明であるなど不確かなことが多い。また、上流の砂防区域からどのような質と量の土砂が河川へ流出して来るのかを把握しきれず、このため急勾配河川の適正な管理が困難となっている。

急勾配流路では、河床材料の移動限界が緩勾配水路の移動限界よりも大きくなること^{1) 2)}、また急勾配河川では、限界掃流力と重力の効果を大きくすることによって、緩流河川で使われている流砂量式から流砂量を求めているが、石礫河川の土砂輸送量が、砂礫河川について導かれた流砂量式の形に限界掃流力の修正や、勾配の影響の修正だけで表現可能か十分検討が必要である。また、急勾配河川の洪水流の水面形など重要な水理情報を高い精度で測定し、それらを河床変動解析の精度向上に生かすことが求められる³⁾。

急流で、河床材料が石礫からなる河川のこれまでの研究は、山地河川の流路形態、河床形態について行われ、Whittaker・Jaeggi⁴⁾によるステップ・プールの発生の研究を嚆矢とするようである。彼らは、流れが射流で、河床に反砂堆が発生し、混合粒径の河床材料で分級が起こることがステップ・プールを発生させる条件であることを示した。わが国では、芦田・江頭ら^{5) 6)}は、実験室や現地ヒル谷で、階段状河床形態の

発達、流れの抵抗則、形態特性等の先進的な研究を行い、これより発生条件を提示している。長谷川^{7) 8)}は、溪流形態として小規模河床形態のステップ・プールの水理特性を詳細に調べ、平均波長や、波高を理論的に求めている。また、中規模河床形態については、交互砂州の瀬、淵の形成に果たす小規模河床形態との共存関係を議論している。さらに、溪流におけるステップ・プールの水中生物に対するハビタット特性についても論じ興味ある結果を得ている。

石礫河川の土砂輸送、河床変動は、上述のように限定的な範囲で検討されており、緩流河川の移動床水理の理解に比して調査研究が不十分である。流域全体であるべき治水、河川環境を考えると、石礫河川における土砂輸送・河床変動機構を十分調査をして流域として見た洪水・土砂管理の体系化を図ることが重要である。

3. 代表的石礫河川、常願寺川の移動床水理

3.1 常願寺川における洪水流と河床変動－現地データの解釈－

常願寺川は、我が国有数の急流・扇状地河川であり、河床勾配は河口から10kmで1/70程度となる。図-1は河床材料d60の縦断分布であり、下流域の数cmから10km地点では30cm程度と大きく変化する。常願寺川の河床の形態は複数の滯筋を形成する複列砂州の領域に区分される。図-2と図-3にそれぞれ年最大流量の経年変化と13.1km地点の河床横断面図を示す。平成7年から9年の間には1200m³/s、平成10年には1700m³/sの洪水が発生している。図-3よりこのような1000m³/sを超える洪水が発生すると、滯筋と砂州の位置関係や洗掘深が大きく変化し、河道全体で河床変動が生じているのがわかる。平成10年の洪水痕跡水位を見ると、砂州上の水深は1~2m程度あり、砂州上の河床材料も動くと考えられる。それに対して500m³/s程度の洪水の起きている平成3年から6年の期間では、砂州部はほとんど変化が無いが、滯筋部は洗掘深が増加している。これらのことから、急流河川において滯筋の洗掘問題を考える際には、中小洪水についても考慮する必要があるといえる。

最大洗掘深は滯筋に現れるため、洗掘問題を考える際に滯筋の形成と変動特性を把握しておくことは重要である。図-4に滯筋本数の縦断分布を示す。ここでは、便宜上、滯筋は低水路平均河床高よりも低い部分と定義している。また、平成3年から14年の間に5回の横断測量が行われており、滯筋最大本数は5回の測量のうち各横断面内に現れた最大の本数、滯筋平均本数は5回の平均の本数である。常願寺川の河床形態は複列砂州に区分され、河道内には平均的に2,3本の滯筋が存在している。滯筋の本数は低水路幅と堤間幅に強く依存しており、幅が広がる断面では本数が増加し、狭まっていく断面では減少している。このことか

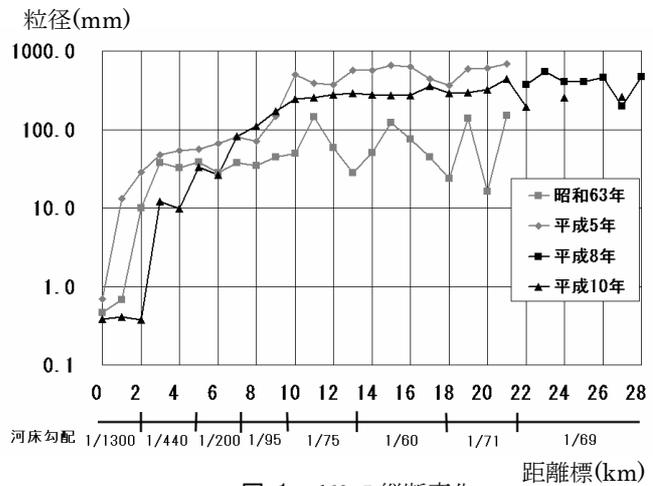


図-1 d60の縦断変化

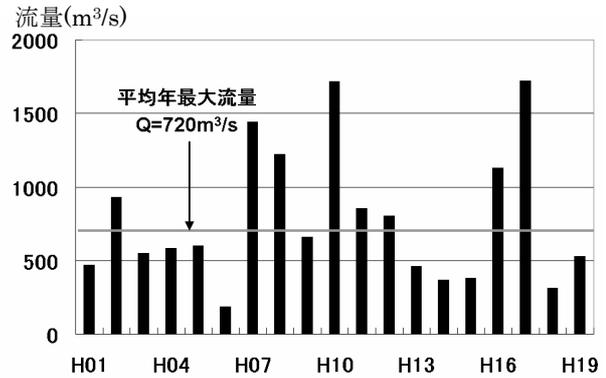


図-2 年最大流量

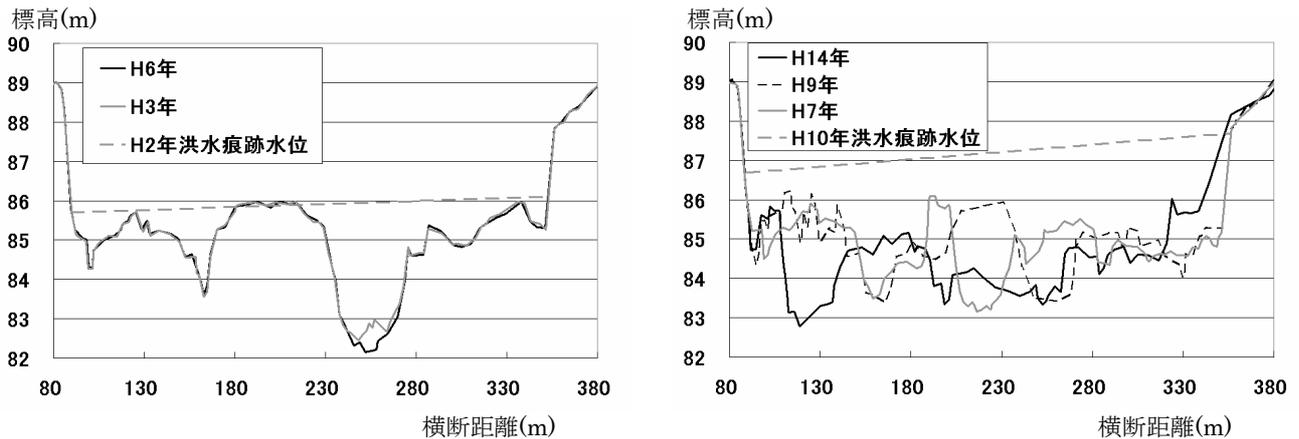


図-3 13.1km 地点の河床横断面図

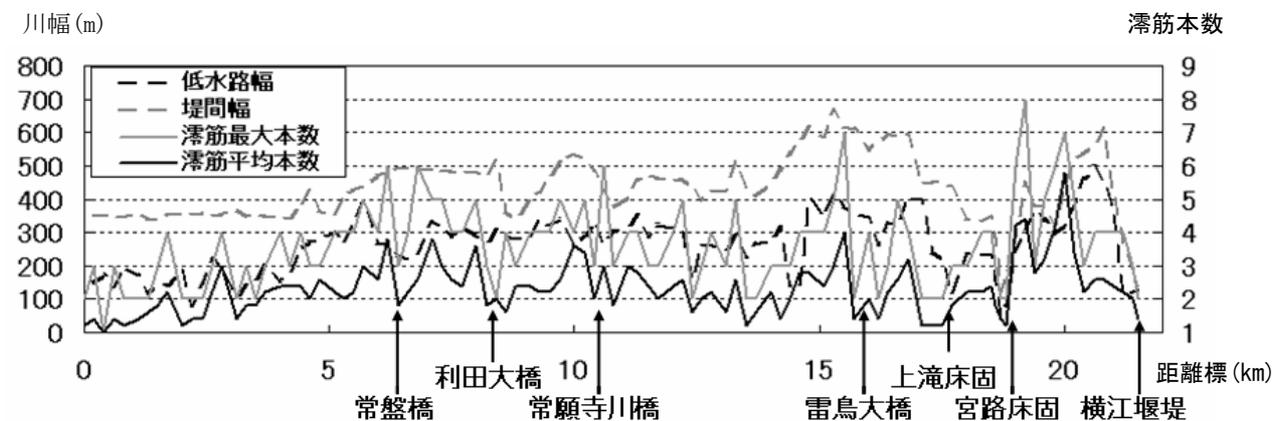


図-4 湍筋本数の縦断分布 (平成3年～平成14年)

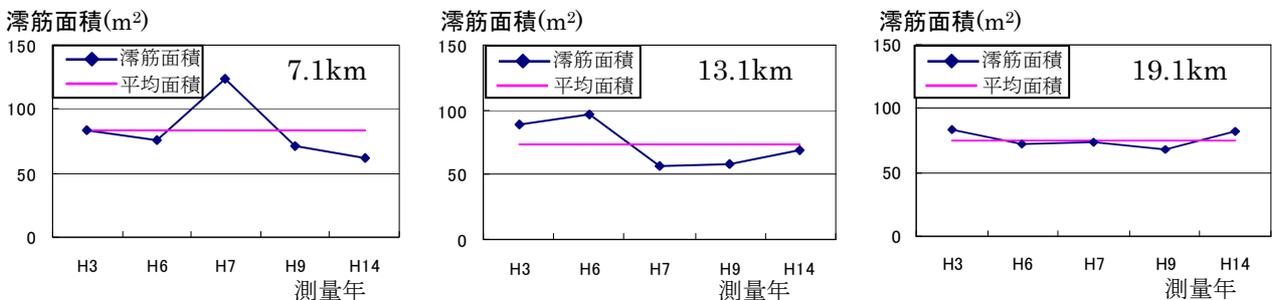


図-5 湍筋面積の変動

ら、堤間幅、低水路幅が洪水の流れ方と流砂の運動を特徴づける重要な要素であり、より運動の自由度が高いほど多くの湍筋を形成する。また、橋梁や床固、堰堤などの構造物が存在する場所では流水と流砂の動きが制限されるため、湍筋の本数が少なくなり、湍筋の横断位置の変化も小さくなることが確認された。

図-5 に3断面の湍筋面積の経年変化を示す。湍筋面積は断面内の全湍筋の断面面積を合計したものである。グラフより、それぞれの断面で湍筋面積の平均湍筋面積からの経年的な変化分はそれほど大きくないといえる。湍筋本数の経年的な変化が大きい19.1km断面(図-4参照)においてもそのようであることから、断面ごとに平均的な湍筋面積がほぼ、決まっており、洪水で湍筋の本数やその位置が変動しても、その平均の面積に近づくような河道の構造になるように変化していると考えられる。

河道形態による粒度分布特性の違いを把握するために、7.1kmと13.1km断面において、図-6に示すとおり砂州部と湍筋部の両方で河床材料調査を行なった。また、河床深度による粒度特性の違いを把握するため、

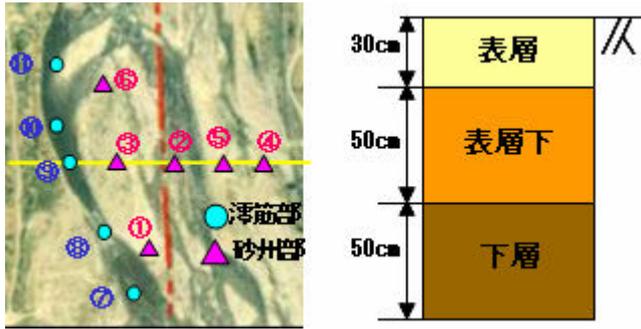


図-6 平面調査位置(13.1km)と鉛直方向調査位置

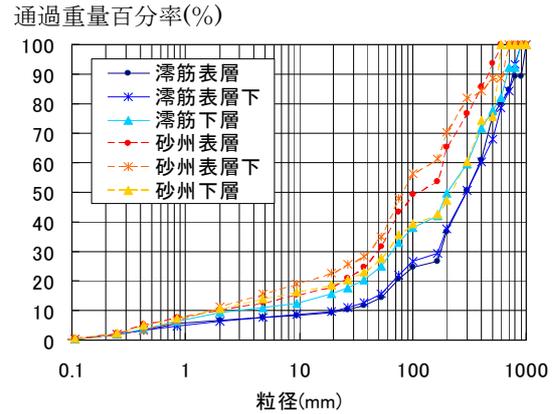


図-7 各層の平均粒度分布(13.1km)

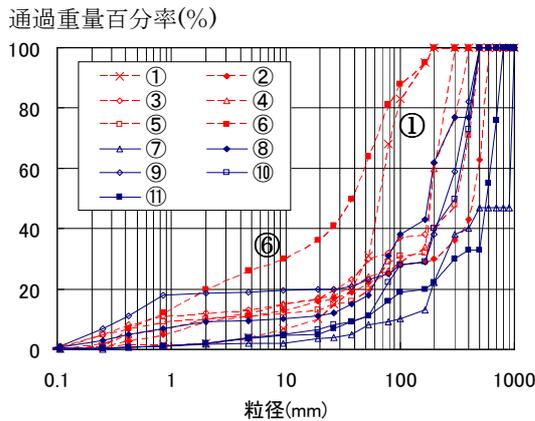


図-8 表層粒度分布(13.1km)

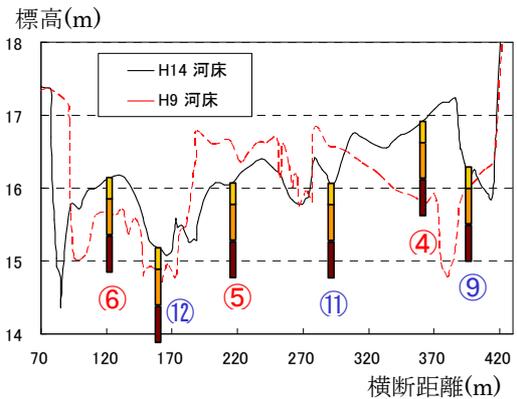


図-9 鉛直・横断採取位置(7.1km)

図-6 に示すように表層 30 cm, 表層下 50 cm, 下層 50 cm の 3 層に分けて河床材料を採取し, ふりい分析が行われた. 図-7 に河道形態別の各層の平均粒度分布を示す. 表層, 表層下のどちらも砂州部よりも湍筋部の粒径が大きくなっている. これは, 湍筋部のほうが流れの掃流力が大きく, 河床材料がふるい分けられるためである. また, 砂州部は堆積が卓越するため図-8 の①や⑥のように特異な粒度分布形状を示す場合が見られる. 表層, 表層下は砂州・湍筋それぞれ特徴的な粒度分布となっているが, 下層では両者の粒度分布がほぼ一致している. 図-9 に示す横断面内の調査位置を見ると, 砂州部の下層はほぼ湍筋の河床面の高さであり, 大きな洪水時には湍筋となって土砂が移動していた層であると考えられる. そのため砂州部の下層には混合した河床材料が堆積しており, 湍筋部下層と一致するといえる. 図-10 は湍筋部表層下の調査結果であるが, ⑨の粒度が特に小さくなっている. 横断面内の調査位置に着目すると, 表層下がちょうど平成 9 年時に砂州であった部分に当たり, 砂州部を調査したことに相当しているためである. 逆に砂州の表層下が以前の湍筋部分になっているケースも見られた. 以上のことから, 急流河川の河床粒度分布特性は河道形態の違いや, 洪水による河床変動履歴の影響を受けるため, 河床材料の調査法や調査結果を検討する際にはそれらの点を考慮する必要がある. 石礫河川の河床材料調査法については, 8.3 で評述する.

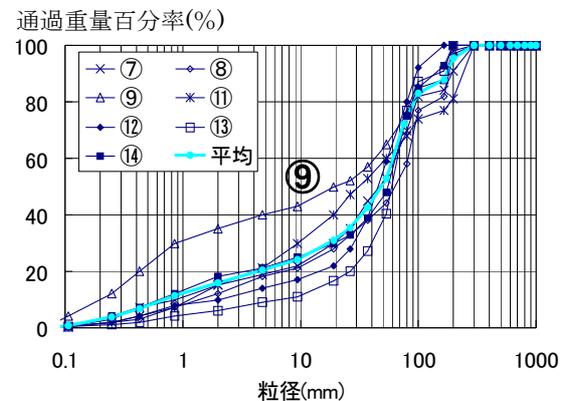


図-10 湍筋部表層下粒度分布(7.1km)

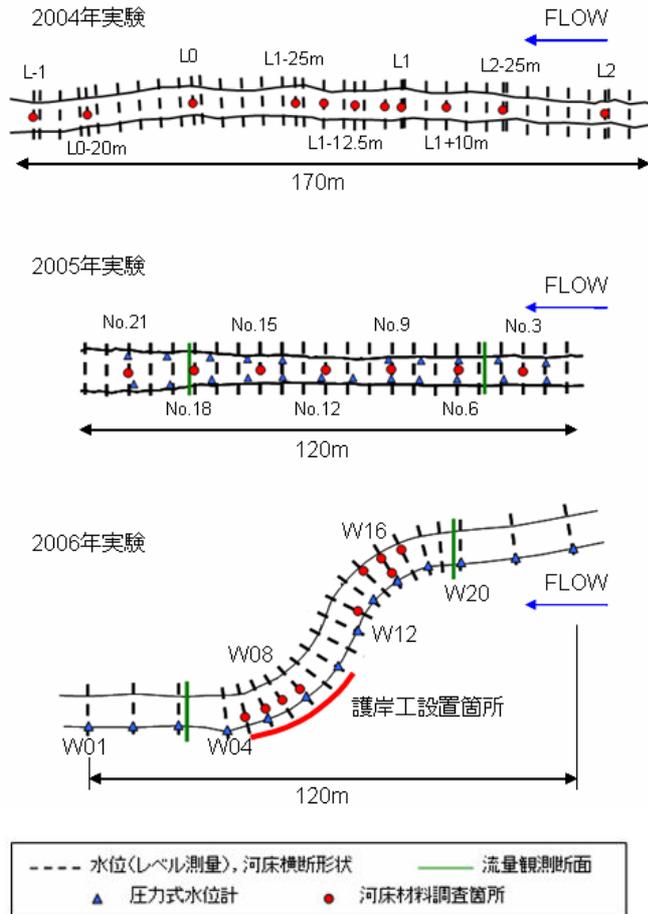


図-11 実験水路平面図

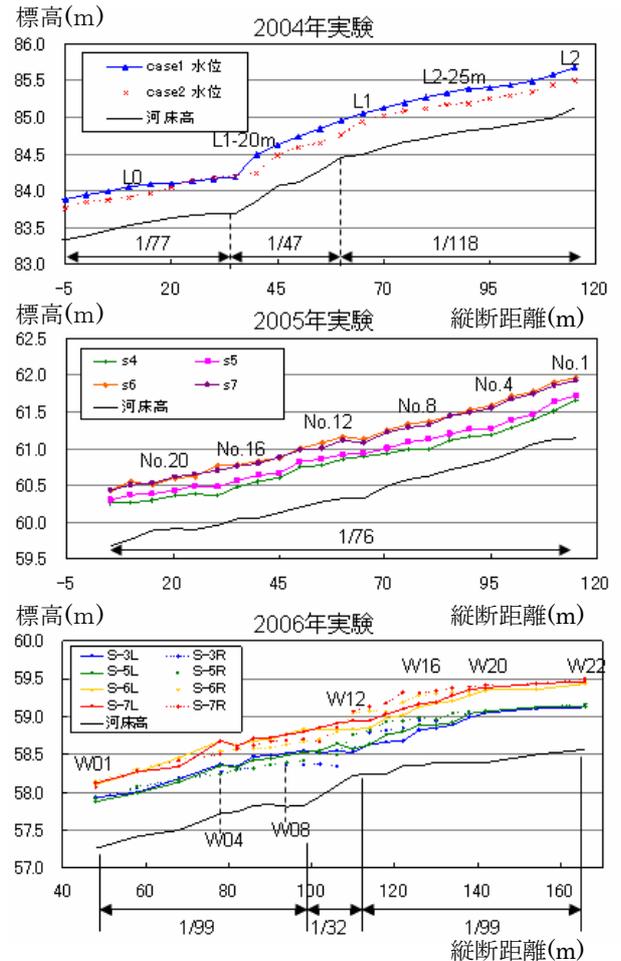


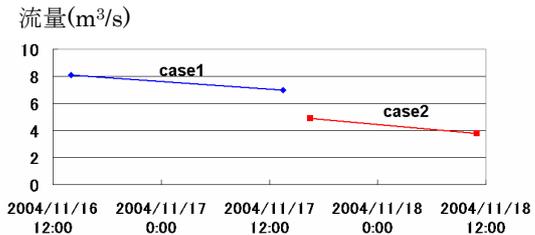
図-12 常願寺川現地実験の水位・河床高縦断分布

3.2 常願寺川現地実験による石礫河川の河道安定機構

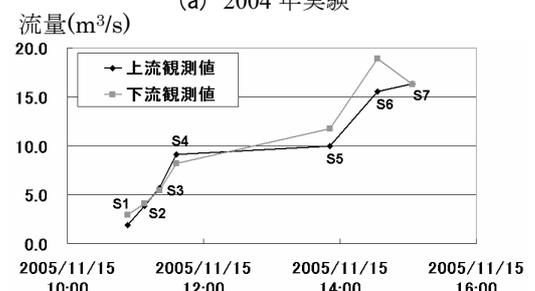
石礫河川の河床変動機構の解明を目的に、2004年、2005年、2006年に常願寺川において大規模現地実験を行った^{9)・10)・11)}。ここでは、現地実験から明らかとなった、巨石(30cm以上)等の大粒径の材料が存在することによる河床安定機構について述べる。

実験水路は、常願寺川の河川敷に滞筋規模の水路を掘削することで作成している。図-11に、各実験の平面図、図-12に各実験の縦断図を示す。2004年実験は、13.1km地点において、長さ170m、水面幅6m~7mの直線水路を作成し実験を行った。2004年実験では、実験水路中央部に河床勾配が1/47の急勾配部が現れた。2005年実験は、11.3km地点において、長さ120m、水面幅7m~8mの直線水路を作成し実験を行い、河床勾配は実験水路全体で一様に1/76である。2006年実験は11.1km地点において、長さ120m、水面幅6m~7mの2つの蛇行部を有する蛇行水路を作成し実験を行った。上流側の蛇行部は自然河岸、下流側の蛇行部には護岸工を設置した。

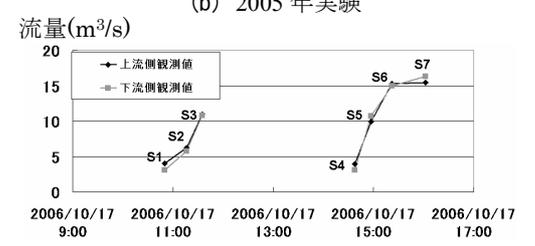
実験では、水面形、河床縦横断測量、観測流量および粒度分布が測られている。図-11に、実験における各測定項目の測定位置を示す。水面形の測定は、2004年実験では、レベル測量による水位観測を行い、2005年実験、2006年実験ではレベル測量に加えて圧力式水位計による水位観測を行った。圧力式水位計では、2秒間隔にデータを測定しており、時間的、空間的に密な測定結果が得られている。図-12に、各実験の水位および河床高の縦断分布を示す。図-13には、各実験の通水流量を示す。2004年実験は、case1が8m³/s程度、case2が4m³/s程度、2005年実験、2006年実験は、上流端において流量を調節し、各流量規模において河床が安定するまで通水を行った。



(a) 2004年実験



(b) 2005年実験



(c) 2006年実験

図-13 各実験の通水流量



(a) 通水開始直後の流れの様子



(b) 静的平衡状態での流れの様子

写真-1 通水開始直後と静的平衡状態での流れの様子

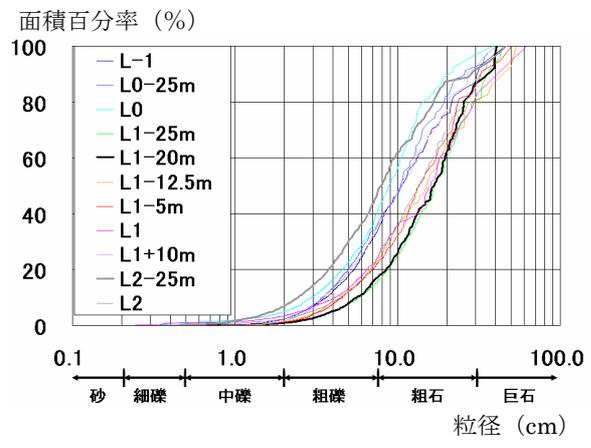


図-14 河床表層粒度分布 (2004年実験)

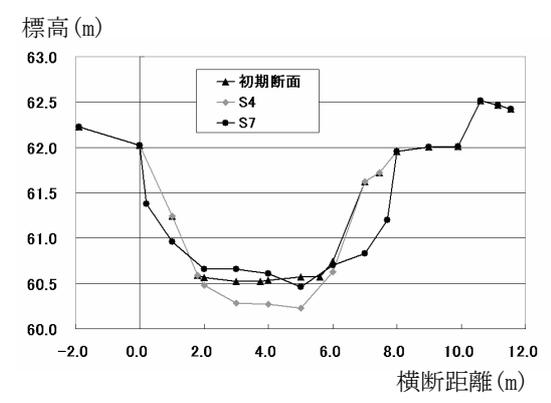
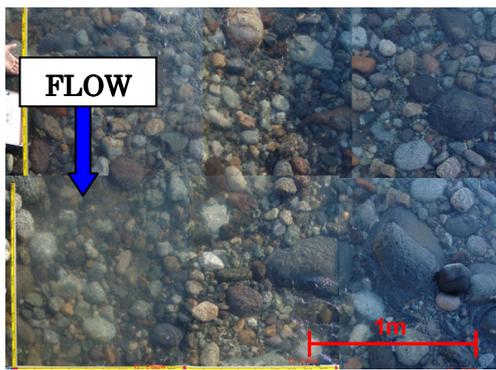


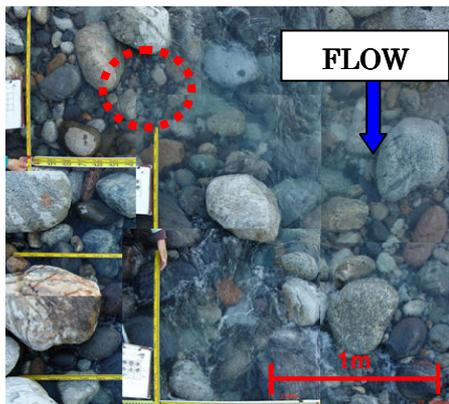
図-15 2005年実験での各流量規模における断面変化

写真-1 は、通水開始直後と通水開始から数時間後の実験水路の流れの様子を示す。通水開始直後は、水が濁っている (写真-1 (a))。通水開始直後は、その流れに見合った河床断面形状になっておらず、安定した流路が形成されるまで河床洗掘や河岸侵食が起り、石や礫の活発な移動が見られる。時間が経つと写真-1 (b)に示すように水流の濁りが消える。石礫河川では、流れに見合った安定な河床形状、河床材料になると、石や砂礫の移動が停止し、一定流量の下での静的平衡状態が出現する。2004年実験では、通水開始から約24分で静的平衡状態となった。

通水後に河床表層画像解析法¹⁾²⁾により測られた各地点の河床表層粒度分布を図-14に示す。緩勾配部で掃流力の低いL2-25m地点の粒度分布は、D60で約10cm、D80で約16cmであるのに対して、急勾配部で高

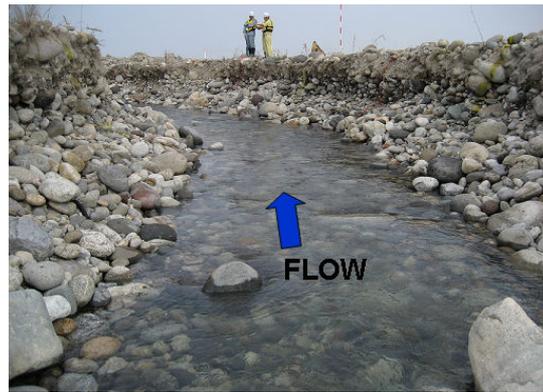


(a) L2-25m 地点の河床表層画像



(b) L1-20m 地点の河床表層画像

写真-2 安定した時の河床表層の状態



(a) 巨石により安定した河岸



(b) 護岸付近の深掘れ

写真-3 自然河岸と護岸付近の河床安定の違い

い掃流力が働いた L1-20m の粒度分布は、D60 で約 20cm，D80 は約 26cm となっており，粒度が緩勾配部に比べて大きくなっている．この L2-25m 地点と L1-20m 地点の河床表層の様子を写真-2 に示す．写真-2(a) は，L2-25m 地点の河床表層画像で，河床表層は，粗石（7.5cm から 30cm）や礫でほとんどが構成されており，巨石は少し露出している程度である．河床面の凹凸も少ない．一方，写真-2(b) に示す L1-20m 地点の河床表層は，巨石が大きく露出し，河床の凹凸も大きくなっている．また，砂礫は巨石や粗石の周囲の凹凸部やそれらの後流域に留まっている．このように，広い粒度で構成されている石礫河川では，大きな掃流力が働けば，河床洗掘の段階で巨石が現れ，それが核となって周囲の河床を安定させることになる．

図-15 は，2005 年実験の S4 段階（流量 $9\text{m}^3/\text{s}$ ）および S7 段階（流量 $16\text{m}^3/\text{s}$ ）での上流側流量観測断面における横断面形を示す．ある流量規模の場合，最初に河床が洗掘を受けることにより河床に埋もれていた巨石等の大きな河床材料が出現する．これによって河床が安定する．さらに流量が大きくなると，河床が洗掘されるよりも河岸を侵食することにより河道を安定化させる．この河岸の安定機構について 2006 年の蛇行水路実験に基づいて記述する．写真-3 に，2006 年実験の自然河岸と護岸工を設置した河岸を有する流れの安定状態に達した河床を示す．自然河岸では，流水の作用により砂礫が流され，河床を構成する巨石は安定を失い崩れ落ちる．これが繰り返し起こることで，水路幅は徐々に広がり，水中の河岸の傾斜は，写真-3(a) に示すように安定な勾配を形成する．そして，流れに見合った断面形状をとるとき河岸・河床ともに安定し，静的平衡状態となる．一方，護岸工の設置された区間では，写真-3(b) に示すように，河岸からの土砂供給がないために，河床が洗掘され巨石が河床から現れることで安定河道を形成する．結果として，自然河岸の河道に比べて，河岸際の深掘れが大きくなる．これは後述するように，護岸工の設置が，河岸際における深い滯筋の形成と滯筋の固定化を促進する¹³⁾．

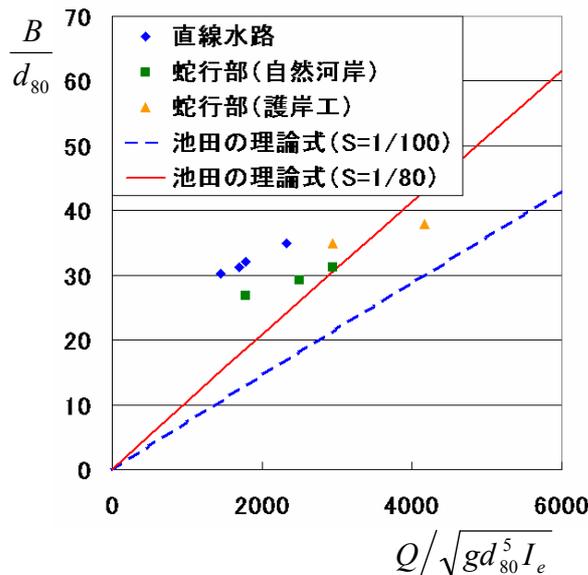


図-16 石礫河川の流量と水面幅の関係

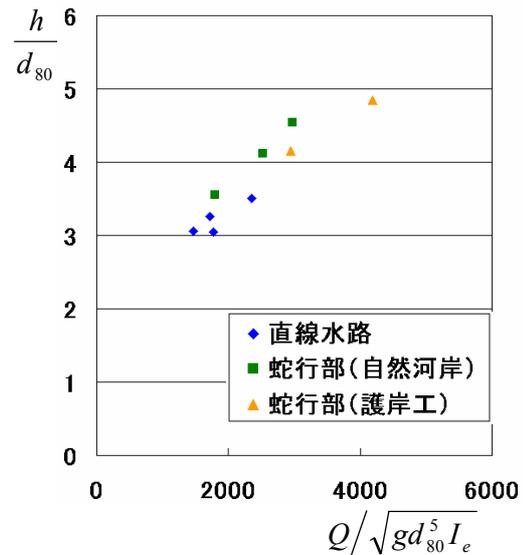


図-17 石礫河川の流量と水深の関係

3.3 石礫河川における流量、勾配、河床材料、河道断面形の関係と抵抗則

一般に、流量、勾配、代表粒径、河道の水面幅や水深等の断面形は概ね決まると考えられている。砂礫河川については、池田ら¹⁴⁾が安定な横断面形状について検討している。ここでは、石礫河川の横断面決定機構について検討を行う。図-16に石礫河川の無次元流量と水面幅の関係を示す。直線水路で行われた2005年、2006年の実験結果をプロットしており、横軸に流量 Q 、代表粒径 d_{80} 、エネルギー勾配 I_e を用いた無次元流量を、縦軸に d_{80} を用いた無次元水面幅を用いている。石礫河川は、巨石等の大粒径の河床材料が河床の安定を支配するため、代表粒径に d_{80} を用いている。 d_{90} を用いた方がよりふさわしいが、 d_{90} の存在割合は低く、求める精度が高くないため d_{80} を選んでいる。自然河岸直線水路と自然河岸蛇行水路の水面幅を比較すると、両者は異なる。これは、自然河岸蛇行部では、河岸侵食に伴い巨石が崩落し供給されることで、直線水路と比べ河床の粒度が大きくなるためである。また、蛇行部の護岸工設置箇所では、直線部と比べ無次元流量、無次元水面幅ともに大きい値をとる。これは、護岸工が設置されることで河岸からの土砂供給がなく、自然河岸と比較して河床の粒度が小さいためである。図-16に、池田ら¹⁴⁾の理論を併記した。石礫河川の安定機構が、砂礫河川と異なるため、池田らの理論値と実測値は傾向が異なる。このように砂礫河川で構築された理論が、石礫河川に適用することは難しいことが分かる。図-17に流量規模と安定水深の関係を示す。図-16と同様に横軸に無次元流量を、縦軸に d_{80} を用いた無次元水深を示す。直線や蛇行に関係なく、無次元流量が大きくなるにつれて無次元水深が大きくなる。これらの値は、図-18に示す石礫河川の抵抗図において、抵抗係数がほぼ一定値を取る領域に対応しており、主に巨石により抵抗が決まっているためであると考えられる。

石礫河川の流れの抵抗評価を行うため、実測された流量、代表粒径 d_{80} 、相対粗度 k_s/R を用いて、摩擦係数 f' を求める石礫河川の抵抗図(図-18)を作成した。この図は、管路流のムーディ図に準じている。常願寺川現地実験は完全粗面で行われており、 f' には、ムーディ図の横軸に用いられているレイノルズ数は関係しないことから、代わりに、流量・勾配・河床材料を用いた流量の無次元流量 $Q/\sqrt{gI_e d_{80}^5}$ を横軸に選んでいる。この図より、 f' は $Q/\sqrt{gI_e d_{80}^5}$ が1000より大きければ、 $k_s/4R \approx 0.08$ となり、その時 f' は0.02~0.03の値をとる。これは、流量規模が大きくなるにつれて粒径・水深比が小さくなる。このとき、流れに及ぼす巨石の形状抵抗は小さくなり、主に摩擦による抵抗が働くため抵抗係数はほぼ一定値となる。また、 $Q/\sqrt{gI_e d_{80}^5}$ が小さくなるに従い f' が大きくなる。これは、流量規模が小さくなるにつれて粒径・水深比が大きくなるため、河床材料が大きな形状抵抗を及ぼすためと考えられる。この抵抗図は、石礫河川の流量、勾配、河床材

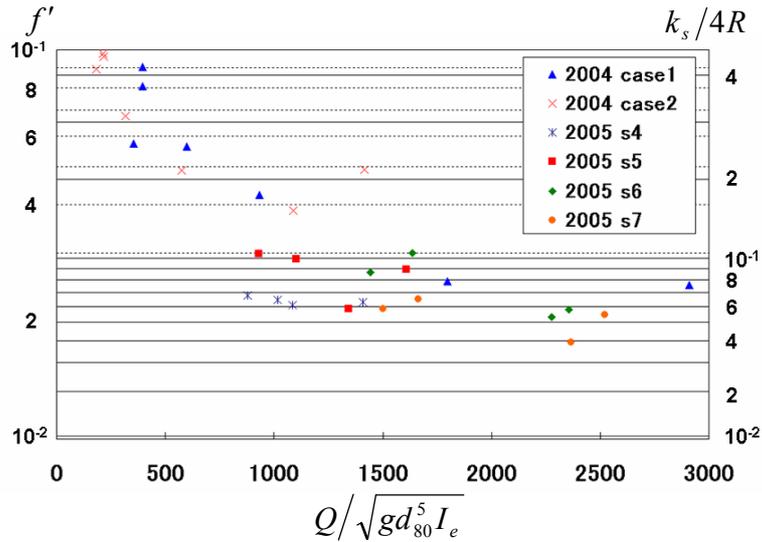


図-18 石礫河川の抵抗図

料が与えられると、水深や平均流速を推定することが可能である。横軸の無次元流量は洪水による流れの状況を表しており、左軸の摩擦損失係数は流速を、右軸の相対水深は水深を代表している。よって、洪水の流れの状況が分かると、図-18の抵抗図によって、水深が決まることで平均流速を知ることができ、また、流速が決まることで水深を知ることができる。この抵抗図は、石礫河川の水利設計を行う際の基礎情報を提供するものである。

また、常願寺川では、図-18の関係が見られたが、河川の規模が異なる他の石礫河川においても抵抗図を検討し、また図-16、図-17に示す安定水面幅、安定水深の関係についても同様に現地データを蓄積し、流量、勾配、河床材料の視点から安定な川幅、水深を定量的に評価できるようにすることが治水上、河川環境上から重要である。特に、これは県管理の急流中小河川は川幅が狭いことから、このような考え方で川のつくり方を検討することが必要である。

3.4 石礫河川と砂礫河川の土砂移動形態の違い

本章では、石礫河川の河床変動機構と砂礫河川の河床変動機構の違いについて述べる。図-19は、石礫河川の河床変動過程と砂礫河川の河床変動過程を模式的に示したものである。図-19(a)に示す。石礫河川では、流体力が作用すると砂礫が抜け出し巨石が少し現れた状態になる。さらに洗掘されると、図-19の左下のように巨石が大きく露出して、この巨石が移動しないことにより流体場への抵抗となり、周囲の砂礫は、巨石より低い位置で留まることが出来る。このように、巨石のような大きな抵抗を及ぼす材料がある割合で河床に存在し、その他の粒径の礫や砂が適切な割合で存在すれば、流量が変化しない限り静的平衡状態になり、それ以上、河床が低下することはない。流れの規模がさらに大きくなったとしても、河床から大きな材料がある量出てきて、粒度分布を大きい側に変化することで安定な河床を形成する。一方、図-19の右に示した砂礫河川の河床変動過程は、石礫河川と異なる。小さな粒径集団に対する遮蔽効果が小さいため、上流から十分に土砂が供給されない限り小さな粒径集団は抜け出し、河床低下を続ける。大流量の条件では、砂礫河川は、自立的に河床の安定化をもたらすことは容易ではなく、一般に掃流力が各粒径の移動限界を下回るまで、河床材料の移動が継続し、結果的に大きな河床変動となって現れる。

このように、砂礫河川と石礫河川の河床変動機構には違いがある。石礫河川における土砂輸送と河床変動過程の解明が遅れているため、砂礫河川の河床変動過程が石礫河川においても同様に生じているであろうという推論であった。河床変動解析法に関しても、砂礫河川で検証されたものが、石礫河川にそのまま用いら

れてきたように思う。しかし、石礫河川では、巨石等の大きな河床材料による河床安定機構があり、巨石の存在が河床変動過程に大きな役割を与えることを確実に考慮しなければならない。

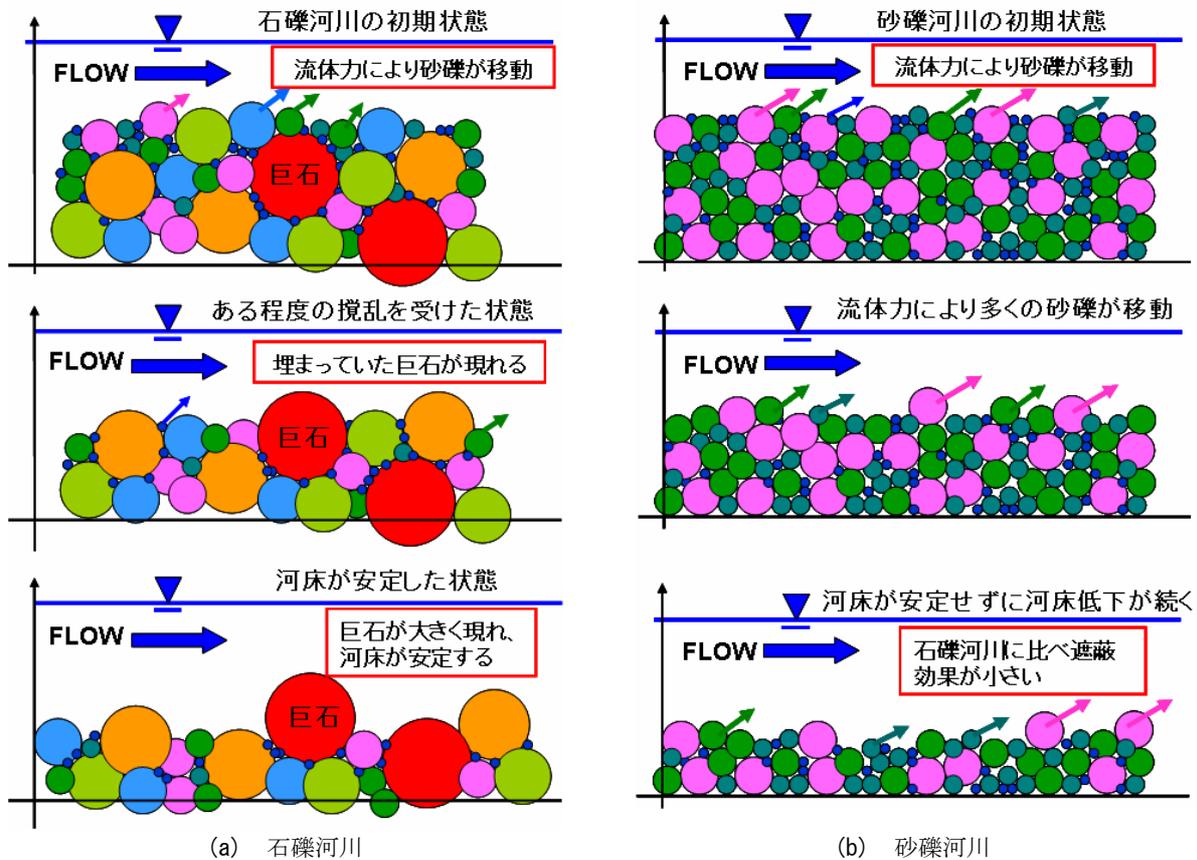


図-19 石礫河川と砂礫河川の河床変動過程

3.5 多量の砂の流入が石礫河川の河床状態に与える影響

上流河道における土砂崩落やダムからの排砂等により多量の砂が流下した場合、石礫河川の河床形状および河床表層粒度分布に影響を与える。石礫河川の滞筋は、上述のように巨石等の大きな河床材料によって河床表層が構成され、それらの材料により河床表層に大きな空隙空間が形成される。このような空隙構造は、治水面とともに、後述するように、環境面においても重要な役割を果たす。しかし、多量の砂が上流から流下した場合、この空隙を埋めるように流下することになり、石礫河川における河床表面の本来あるべき姿が失われる可能性がある。上流域からの多量の砂の流下が、下流河道に与える影響を検討することは重要である。

このような課題に対して、藤田ら¹⁵⁾は、室内実験水路に10cm程度の石を敷き並べ、上流から供給する砂の量を変化させることで、浮遊砂量と石内への堆積状況（砂面高さ）の関係を検討している。これによれば、浮遊砂量の増加とともに砂面高さが上昇する関係が得られている。しかし、流量規模および河床材料が、特別な場合を扱っており、実河道で起こる現象との対応が十分説明できていない。

著者は、2007年に常願寺川の現地実験において、石礫河道に多量の砂が流下してきた場合の河床構成材料の変化および抵抗特性の変化について検討を行っている。実験は、常願寺川6.2km左岸砂州上に水路を掘削して行った。常願寺川6.2km付近は、礫を中心とした砂礫河川である。実験では、1回目が3.6m³/s、2回目が4.2m³/s、3回目が7.2m³/sと異なる3流量を通水している。図-20には、各通水終了後に測られた横断測量結果を示す。これまで述べてきた現地実験と同様に、流量規模が低い場合、河床が洗掘され底面の低

下が見られる。しかし、流量を増加した3回目の河床の状況は大きく異なっている。侵食に伴う河岸からの土砂供給と、上流側からの多量の砂の流入により、底面が大きく上昇している。写真-4は、実験終了後の水路の状況を示す。河岸から崩落した石や礫が、河岸際に堆積することで安定な横断勾配を形成している。一方、上流から流下してくる砂は、河岸には堆積せず、河道の流心部を流下する。そのため、写真-4のように、流心部に砂の堆積層ができ、河岸部と流心部では、河床の状況が大きく異なる。このような砂の層の形成は治水上のみならず、生態系にも大きな影響を与えると考えられ、十分検討されるべきテーマである。

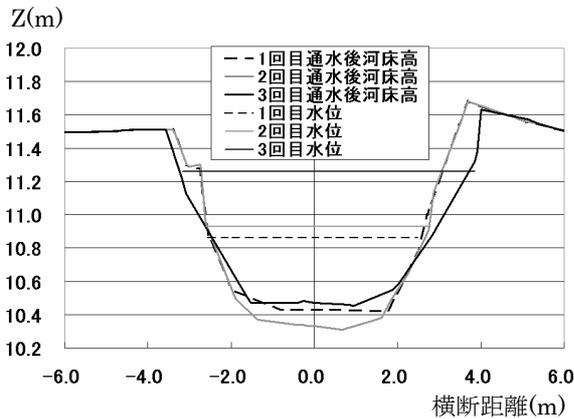


図-20 横断形状の比較



写真-4 2007年現地実験における砂の堆積状況

4. 河床変動解析法の精度向上策

4.1 水面形の時間変化を考慮した洪水流解析の必要性

現在の河床変動解析手法は、流れについては、既知のピーク流量（あるいは、流量ハイドログラフ）と洪水痕跡水位等を用いて、河床変動モデルから算定された河床高と洪水後に観測された河床高を比較し検証する。次に、検証された河床変動モデルを用いて、計画規模の洪水ピーク流量に対して河床高を推定し、河道計画に資することが一般的に行なわれている。しかし、洪水後に測られた河床高が、洪水時の河床高とどのような関係にあるのか、良くわかっていないのが実情である。このような河床変動計算の精度を考えると、外力としての洪水流の水力計算もそれほど高い精度を必要とするものでなく、通常、一次元解析や準二次元解析を用いることが多い¹⁶⁾。しかし、河川の適正な管理を行う必要性が高まっている今日、いつまでもこのようなレベルで河床変動の解析をするのがよいわけではない。

河床変動解析の信頼度を高めるには、それを引き起こす洪水流の解析精度も同様に高めなければならない。これまで、洪水流とは、水位、流速などの水理量が下流にゆっくり伝わる現象のために、水理量の時間的な変化が小さい準定常流と考えてよいとされてきた。特に、大きな流域では、ピーク流量発生時をばさんで、かなりの時間にわたってピーク流量が続く。したがって、ピーク流量を対象にした河川計画を立てる場合には、洪水流は近似的に定常流と見なすことが出来、痕跡水位を用いた不等流解析及び準二次元解析が用いられてきた。多くの洪水流の問題はこの解析法で良いが、対象とする洪水流問題によってはこれらの定常流の解析法では不十分である。洪水流現象は、その場の水理量で決まっているのではなく、河川の時間的、空間的な広がりを持った洪水水位が河道を伝わる非定常な水理現象である¹⁷⁾。水位データが時空間的に集められるようになった今日では、水面形の時間変化に、洪水流現象の本質が濃縮していることを理解し、河川管理上の重要な情報を水面形の時間変化から読み取ることが行われなければならない^{16), 18)}。

洪水現象は時間的には緩やかな変化をして下流に伝播するものの、洪水流を定常流と考えると、洪水時に起こっている多くの水理現象が十分には説明できず、非定常性を考慮すると無理なく現象を説明できること

が明らかになってきた^{16), 18)}。河床変動解析も洪水流の非定常性を考慮することから精度向上の方法が浮かび出てくる。河床変動解析の精度向上が必要な理由の一つは、洪水中の河床変動の時間変化の実態を求めることが重要であるからである。洪水中の河床高や流砂量を測る試みが行われているが、時空間的な変化を知ることは現状では技術的に困難がある。点計測主体の河床高や流砂量測定では、洪水中の河床の変動を刻々予測することは困難である。洪水中の河床変動を定量的に予測するキーは、洪水水面形の時間変化の観測値を適切に使うことにあると著者は考える。今日では、水位の観測データが容易に密に測られるようになり、洪水時の水面形の時間変化から、洪水で起こっているすべての時々刻々の水理現象が時々刻々の水面形に反映していることが明らかになってきている。この中には、河床変動の時々刻々の変化も含まれている。洪水流の水面形の時間変化を測ることは容易であり、また十分な観測精度が得られる。少なくとも、洪水時の水面形の時間変化を洪水流解析に反映されていないこれまでの河床変動計算であれば、求められた河床高は、実際の河床変動を適切に説明したものには成りえないであろう。精度の高い河床変動解析とは、洪水流の水面形の変化を時々刻々取り入れた河床変動計算を行うことであり、観測水面形を解とした洪水流の非定常二次元計算と二次元河床変動計算を組み合わせることで河床高を解析すればより実現象を説明する河床変動解析結果を与える^{19), 20)}。

4.2 既往の河床変動解析法の問題点

現在の河床変動解析法は、流れの運動方程式、連続式と、粒径別流砂量式、河床および粒度の連続式²¹⁾により構成される。このような河床変動解析法は、河床材料が砂や砂礫の場合、または、砂を中心とする混合粒径材料からなる場合が想定されており、この場合洪水流の計算法を改善すれば、解析の信頼性は高まると考えられる。しかし、砂から大礫、石等広い粒度範囲からなる石礫河川に対しては、巨礫間にある砂礫など小粒径集団の移動機構が、緩流河川の流砂量式や河床変動式で考慮している機構と異なるため、従来の解析法の適用は無理がある。ここでは、石礫河川に、このような既往の河床変動解析法を適用した場合の問題点について述べる。

河床から流体場への抵抗の評価として、マニング粗度係数を用いた摩擦抵抗式が一般に適用される。しかし、前述したように、石礫河川では主に巨石など大きな河床材料の形状抵抗が卓越している。また、石礫河川では、**図-19**に示すように、時間的、空間的に巨石を中心として河床の状態（河床表層粒度分布および河床面の凹凸）が変化し、抵抗特性も変化する。このような石礫河川の抵抗は、摩擦による考え方では捉えられず、巨石等の形状抵抗を考慮した抵抗値の評価法が必要であると考えられる。

粒径別流砂量式として一般に用いられる芦田・道上式²²⁾は、一様砂で構築した流砂量式を混合粒径に適応するように改良したものである。この粒径別流砂量式の中で大切な指標となる粒径別限界掃流力の評価には、一般に、修正Egiazaroff式が用いられる。修正Egiazaroff式は、粒子の移動限界を滑動形式による釣り合い関係から導かれている。しかし、石礫河川では、**図-19**のように河床表層に大きな凹凸があるため、滑動形式では実現象を説明することは難しいと考えられる。**図-21**は、**図-12**に示すL1-20m地点において、河床が静的に安定となった時の粒度分布から算出した修正Egiazaroff式による粒径別限界掃流力と実際に作用している掃流力を比較した

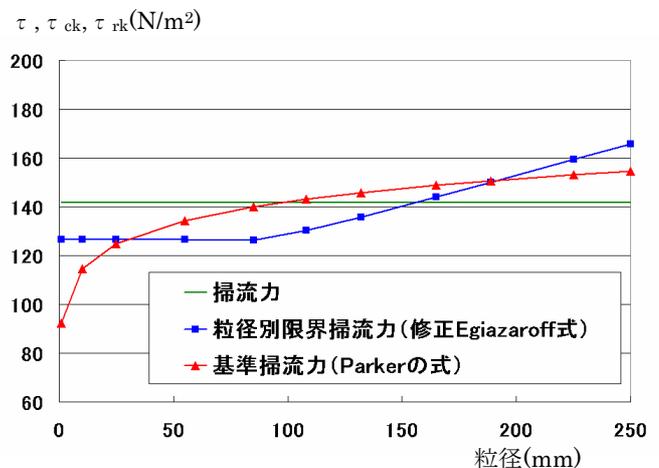


図-21 掃流力と限界掃流力の比較

ものである。実現象において河床が静的に安定となり、ほぼ全ての粒径が静止状態となった石礫河道において、修正 Egiazaroff 式では 150mm 以下の粒径に対して掃流力が限界掃流力を上回っており、これらの粒径は移動するという判定になる。図-21 には、Parker^{2,3)} による基準掃流力（この掃流力以下では流砂量は非常に少ないとされる）を併せて表示した。Parker の理論においても 80mm 以下の粒径が移動するとなっており、既存の河床変動解析の枠組みでは石礫河川の河床変動を再現することは難しい。

また、既往の解析法には、空隙率の評価に関する問題を抱えている。河床高および河床粒度分布の計算は、1971 年に平野により導かれた河床および粒度分布の連続式により行われる。以下に、河床低下の場合の河床連続式を表記する。

$$\frac{\partial Z_B}{\partial t} = -\frac{1}{B(1-\lambda_0)} \frac{\partial(q_B \cdot B)}{\partial X} + \frac{a}{1-\lambda_0} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 a : 交換層厚、 λ : 空隙率である。河床の連続式には、右辺第 2 項に空隙率の時間変化を考慮した項が含まれている。石礫河川においては、図-19 に示すように、巨石が大きく露出することにより河床表面に大きな凹凸ができ、空隙率が変化する。石礫河川の解析では、この河床の凹凸、すなわち空隙率の変化を捉え解析に導入することが重要である^{2,4)}。しかし、空隙率の時間変化を定式化することが困難であることから、一般的には空隙率を一定として解析を行っている。空隙率を一定とすることは、砂礫河川のように粒径比が小さい場合はそれほど問題が生じないが、石礫河川のように巨石から砂まで広い範囲の粒径から河床が形成されている河川においては、この仮定は正しくない。図-19 に示すような石礫河川の河床変動において、中小の砂礫が抜け出すことで埋もれていた巨石が現れるという過程が、空隙率を一定とすると、実際には、高さが変わらない巨石も周囲の砂礫の抜け出しと同時に低下する計算結果になる。これでは、巨石の存在を捉えることができず、実際よりも大きな河床変動量を見積もることになる。

4.3 石礫河川における新しい河床変動解析法の考え方と常願寺川実験への適用

長田・福岡^{2,0)} は、上述の石礫河川における河床変動機構と、既往の河床変動解析法の問題点を考慮した、石礫河川における新しい 1 次元河床変動解析法を構築した。その基本的な考え方を述べる。巨石を有する石礫河川では、洗掘の段階でその巨石が大きく露出し、流体場への抵抗として働く。一方、周囲の砂礫は巨石の遮蔽効果によりその場に留まることが出来る。このように、巨石が河床の安定に大きく貢献しており、巨石の効果を十分考慮した解析法の構築が重要である。

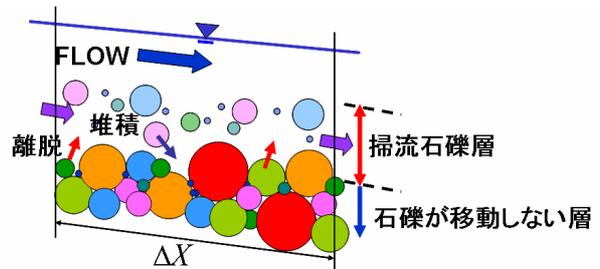


図-22 新しい河床変動解析法の概要

まず、河床から流体場への抵抗は、巨石等の大きな河床材料による形状抵抗を捉えることが重要であり、D80 以上の河床材料による形状抵抗を考慮した式を構築した。また、石礫河川では河床表面に巨石が露出することにより、大きな空隙空間を形成し、河床変動に伴う空隙の大きさの変化を捉えることが重要である。このためには、河床の凹凸を考慮できることが必要であると考え、従来の河床変動解析法のように計算格子内で河床高を一定とするのではなく、河床表面にある各粒径の高さを計算する方法を考えた。その方法を組み込むために、図-22 に示すように、掃流石礫層（粒子移動層）と石礫が移動しない層（河床）を完全に分離した。この評価のために、各粒径の河床からの離脱量と河床への堆積量を評価する式を構築した。石礫河川における河床からの離脱は、Egiazaroff^{2,5)} や芦田・道上による滑動形式よりも転動離脱の方が現象を再現できると考え、転動離脱による離脱量の算定式を構築した。また、巨石等の大きな河床材料が移動しない場合、そのような大きな河床材料が流体力を受け持つため、周囲の砂礫には流体力が作用せず、その場に留

まることが出来ることを考慮するため、大きな河床材料による遮蔽効果を十分に考慮した離脱量の算定式を導いている。河床への堆積量は、流下する粒子群の停止割合を跳躍解析から求め堆積量を算出した。流砂量の算定は、既往の解析法のように流砂量式で評価するのではなく、河床からの離脱量、河床への堆積量と隣り合う計算格子の間での土砂収支から算定する式を構築した。また、各粒径の高さおよび河床表層の粒度分布についても、河床からの離脱量と河床への堆積量を用いた式を構築した。図-23は、石礫河川の新しい河床変動解析のためのフローチャートを示す。

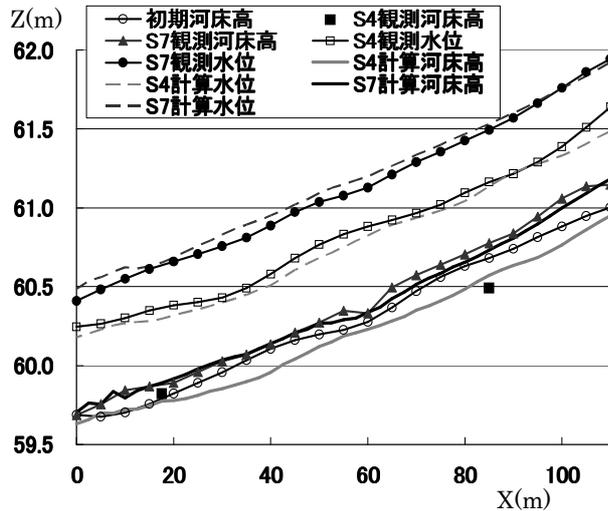


図-24 水面形の時間変化を解とした河床変動解析

図-24は、2005年現地実験の結果¹⁰⁾に対し、長田・福岡の解析法から得られた水面形、河床高縦断の解析結果を比較し示したものである。解析にあたっては、4.1で述べた河床変動解析の精度向上のために洪水流の非定常性を考慮に入れている。すなわち、時間的に変化する観測水面形を解とする洪水流の非定常次元解析と上述の次元河床変動解析法から洪水流中の河床変動高を求めている。流量が9m³/s (S4段階)では、初期平均河床高から全体的に平均河床高が低下し、さらに連続的に流量規模を大きくしていくと16m³/sのS7段階では、河岸侵食により河幅が拡大し、河岸からの土砂供給により平均河床高は上昇している。図-15に示したように、河岸侵食による土砂流入が河床上昇に影響している。このことを解析に取り込むため、実験時に撮影されたビデオ映像をもとに侵食した時間を調べ、その時間に側岸からの崩壊土砂量を河床高に上乘せした。図-24を見ると、S4段階、S7段階ともに水面形、河床高とも解析値は実測値を概ね再現出来ている。S4段階では、測られた実測河床高と解析値の比較から、上流では初期河床高から大きく低下す

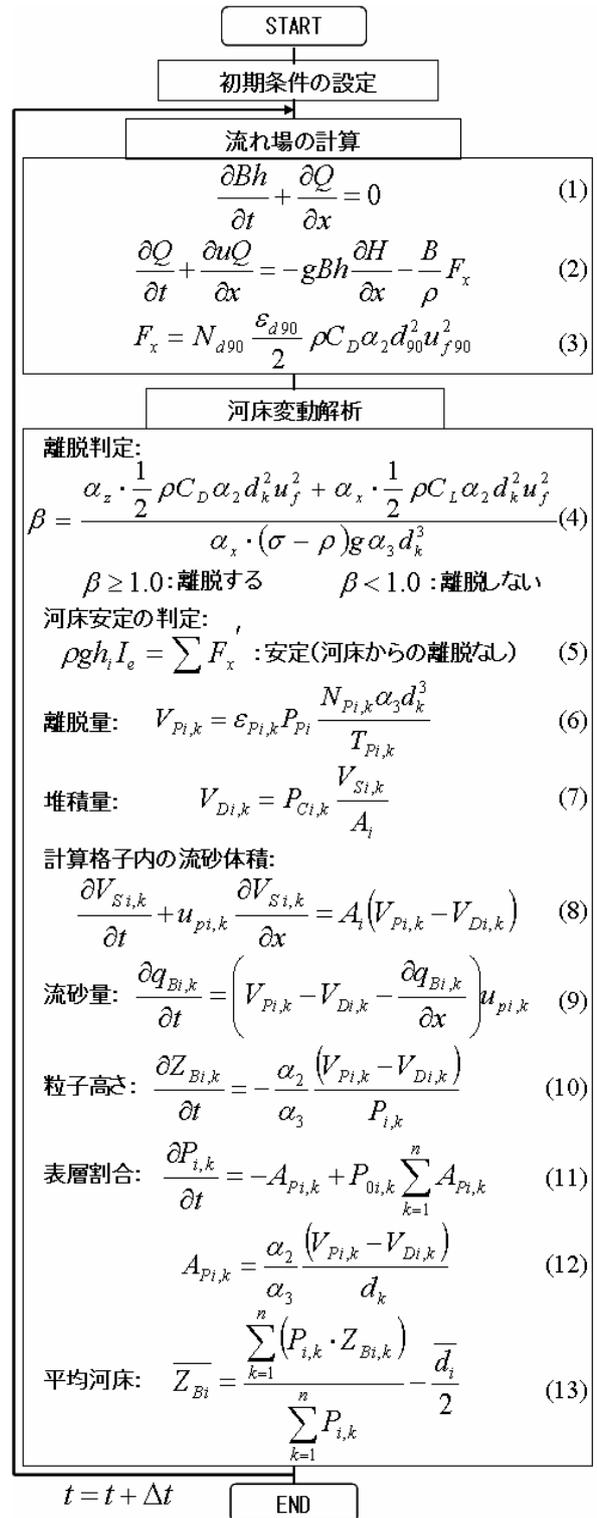


図-23 河床変動の解析過程

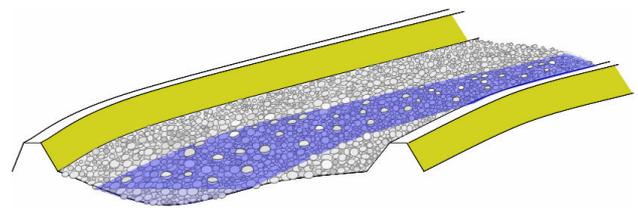
ること、逆に下流では若干の河床上昇が解析においても捉えられている。流量が増大した S7 段階では、縦断的に測られた河床高との比較から、全体的な河床上昇、そして縦断的な河床形状も実測値を概ね再現出来ている。このように、洪水水位の上昇時、ピーク時から減衰時までの各時間での水面形を洪水解析と河床変動解析に組み込むことで、河床変動の解析精度を高めることができ、これにより時間的な河床の変動を見積もることが可能となる。

5. 河床材料の粒度分布の変化がもたらす河道の変化

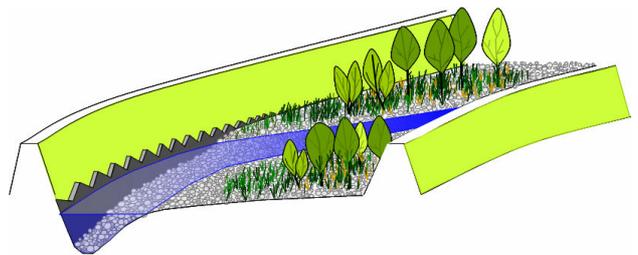
5.1 河床の低下、澇筋化、樹木群の繁茂

流域における人間活動の活発化は、河川堤防を築き、川幅を広げ、河床を掘削し、また大掛かりな砂利採取やダムなどの河川構造物の建設を行うことによって、それまで変動しながらも自然にバランスしていた洪水流量、河床材料、河川勾配と川幅、水深等の河道断面形の間関係が成立し得なくなってきた。特に、礫や石を主要な河床材料とする河川では、洪水流量の増加のために流れの掃流力が増大し、河床に存在する粒径集団では、変動しながらも平衡状態に河床を維持することが困難な河川が多くなってきている。その結果、**図-25 (a)**の平衡河道から**図-25 (b)**に示すように河床が低下し、局所洗掘が原因となって河道の澇筋化と砂州が現れ、川幅全体を使って流れる洪水は大洪水時を除いては見られなくなってきた。これは、川幅を広げ、河床を掘る等の河道改修は行えるが、河床を構成する材料は、上流山地で生産される土砂の質と量で決まっており、大幅な河道改修に合わせて河床材料を決めることは不可能であることが大きな原因である。本来、河道の改修断面は、洪水流量、河床勾配、河床材料の間関係によって決まる断面形から大きく外れるものであってはならないであろう。しかし、洪水流の流下能力という川の「器」の拡大は、河岸侵食防止のための護岸の設置による河岸沿いに集まる流れの発生、澇筋と砂州の形成を促進し、そのことが、河道内の樹木の繁茂という悪循環をもたらしている²⁾⁶⁾。樹木の繁茂は流れの抵抗を増大させるために、深く、抵抗の小さい澇筋部に一層流れを偏流させ、そこでの掃流力が増大する。澇筋を構成する河床材料が掃流力の増大に対し十分耐える量と質の粒径集団でなければ、澇筋の深掘れは進行する。澇筋が河岸や堤防に接して存在しているところでは、堤防や河岸の安定性が極端に低下することになる¹⁾³⁾。

上述のような澇筋の発生による流路の固定化、樹木の繁茂による河道の著しい変化は、洪水流に対して、主要な河床材料の集団が安定的に応答し、河床変動の幅がそれほど大きくない河道づくりが必要であることを示している。それは、洪水時、川幅全体で流れる河道にすることである。しかし、一度、澇筋化し砂州が



(a) 平衡した安定した河道（大きな河床材料で構成）



(b) 河道整備により平衡が破れ、澇筋の縮小
・深掘れと樹木の繁茂が生じた河道
(掃流力に耐える河床材料が少ない)

図-25 河床材料の細粒化による河道の変質

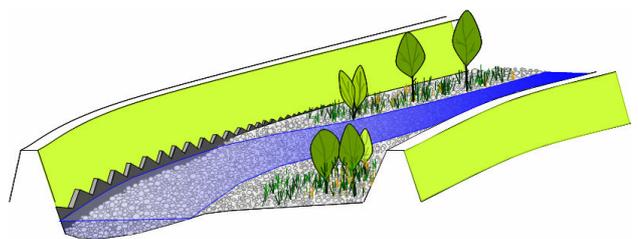


図-26 澇筋幅の拡大による河床の安定

固定化した河道では、川幅全体で流れる河道に戻すことは極めて困難であり現実的な河道計画になり得ない。問題となっている図-25 (b)のような河道において図-26 のように滞筋幅を広げれば、流体力を緩和することができ、現状の河床材料でも安定的な河道を形成することが可能であると考えられる。検討しなければならないことは、問題となっている区間における主要な河床材料集団が、大きな掃流力に安定的に対応できる滞筋幅はどの程度であるかを理解して河道を管理する技術を確立することである。現在の滞筋幅をどの程度まで大きくすれば現在の主要な河床材料集団でその川幅を維持可能か判断するための調査研究から始めなければならない。この課題に関する先駆けの研究として、福岡ら²⁷⁾は、滞筋に流れが集中して発生した多摩川水系浅川の護岸被災箇所の復旧工事の段階において、流れを付け替えることで滞筋をドライにし、滞筋の深掘れ形状、河床の粒径集団を調査した。

浅川では、過去の砂利採取により多くの石礫が持ち出されたこと、河川改修の進捗と共に上流から大きな河床材料が運ばれて来なくなったことなどから、流量の増大とは逆に、河床材料の粒度分布が小さい側に寄るようになった²⁷⁾。図-27 は、浅川 9.2km 横断面の経年変化を示したものである。9.2km 付近は、左岸側の砂州が樹林化し、右岸側の緩やかな湾曲部に流量が集中するようになった。この 9.2km 右岸際では、近年の洪水により経年的に深掘れが生じ滞筋化し、河床保護のために設置された根固め工が縦断的に崩落した(写真-5)。また、滞筋が大きく深掘れた結果、固結度の低い粘性土からなる土丹層が河床に露出するようになった(写真-6)²⁷⁾。図-28 は、ドライ化して行った水衝部河床材料の調査結果である。粒度分布は外岸よりも内岸の河床粒度分布の方が大きくなっていることが分かる。これは、土丹の露出と大きく関係している。土丹が露出した湾曲部の河床では上流から流送されてくる砂礫は洪水のピーク時に土丹上に留まらず、二次流により内岸側に運ばれ堆積した。一方、洪水の引水時に小さな掃流力で運ばれてきた砂礫の粒径集団が土丹上に堆積した。このため、内岸河床の粒度が外岸河床よりも大きくなった。福岡ら²⁷⁾は、この区間の河床材料と掃流力の関係について検討を行なった。その結果、d90クラスの粒径までが洪水時に移動していることが明らかとなった。洪水流の右岸への集中により河岸際の掃流力が増加する一方、大きな河床材料を失った河床は、洪水の流体力に耐えるだけの耐力を要しておらず、また、上流からも十分に土砂が供給されないため、河岸際滞筋の深掘れが進行したと考えられる。さらに、土丹が露出することにより、砂礫の土丹面への衝突により壊れやすいことや、流送されて



写真-5 浅川 9.2km 右岸水衝部の根固め工崩落状況



写真-6 浅川 9.2km 右岸の河岸際河床に露出した土丹

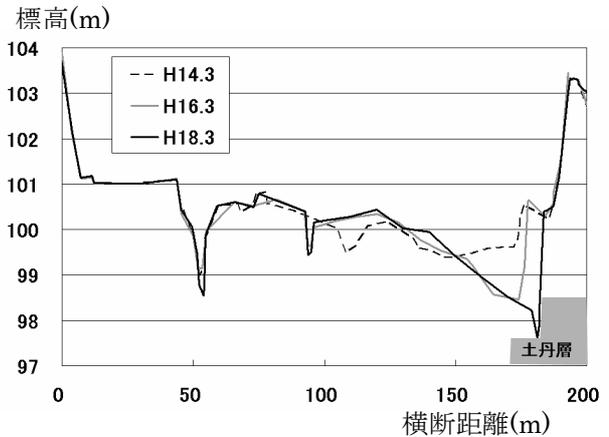


図-27 浅川 9.2km 横断面の経年変化と土丹位置

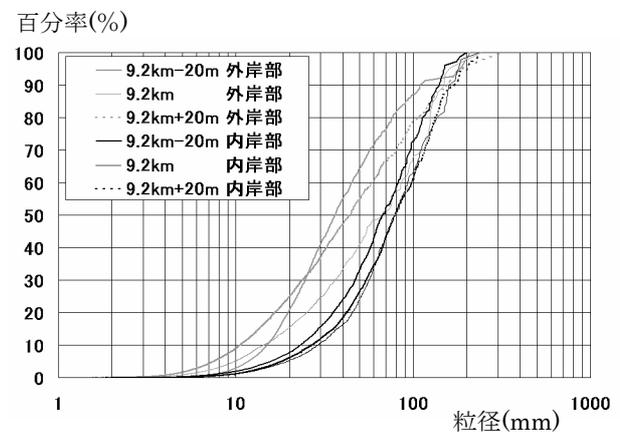


図-28 浅川 9.2km 付近の粒度分布

くる砂礫は土丹上に留まれないことから、さらに大きな洗掘が発生する恐れがある。土丹の上にどの程度の厚さの砂礫層が存在していれば、洪水中に土丹が露出せず、安定な河床状況をつくることができるかについては、今後、十分検討されなければならない課題である。

5.2 河床材料の粒度分布の変化

河床材料粒度分布は、洪水流と河道の特性、水中生物の生存を反映する重要な指標である。砂利採取により、また石礫等が砂防堰堤やダム貯水池で止められたり、河道から外に持ち出されたりすると、河床材料の粒度分布が変化する。河床材料の粒度分布が変化すると、河道はどのように応答・変化するであろうか。まずは、流速の大きい場所など、河床の掘れ易いところに深掘れが現れる。深掘れが発達し滯筋化すると、滯筋及びその周辺の土砂移動量が変化し砂洲が現れやすくなる。その結果、流れが偏流し、水流が集中する滯筋で河床の洗掘、低下が進む。それ以上の滯筋洗掘が進むかどうかは、洗掘を抑制する粒径集団が河床にあるかどうかに関係する。河床材料は、砂河川では、石礫が多い河川に比して粒度分布の一様性が高い。例えば、河床材料の粒度分布に関する標準偏差 $(d_{84}/d_{16})^{1/2}$ は、石礫河川と砂河川では大きく異なる。このことは、掃流力の変化に対して砂河川の応答は早い、石礫河川は大きな粒径集団を主体として粒度分布が広いために応答は複雑であることが理由のひとつである^{26), 28)}。

石礫河川にあっては、洪水流の掃流力が大きいため、洪水規模に応じて、河床の安定に寄与する粒径集団が異なっており、河床の安定を支配する粒径集団が実際に河床に十分存在することが重要になる^{26), 29)}。図-29は、石礫河川で粒径20cm以上(d_{70} 以上)

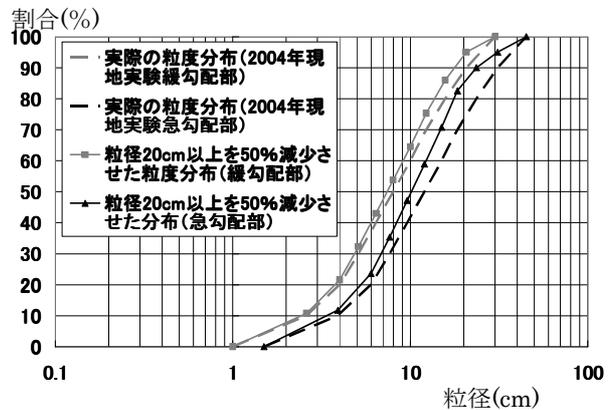


図-29 特定の粒径集団の取り出しによる
粒度分布形状の変化

(2004年常願寺川現地実験の粒度分布を基に作成)

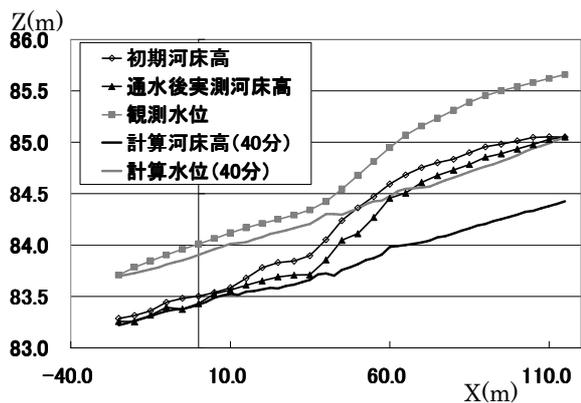


図-30 大きな材料を少なくした場合の
河床変動解析結果

のうちの50%の量が河道から外に取り出された時の粒度分布の変化を示す。取り除かれた粒径集団を境にそれより小さい方で、粒度分布は急になり存在割合が変わることがわかる。粒度分布の変化は、大きな掃流力に対抗する粒径集団の存在割合を変化させ、大きな河床変動につながる可能性があることを意味している。これに関して、図-23に示した長田・福岡が構築した石礫河川の河床変動モデル²⁰⁾を用いて、土砂輸送の変化に起因して治水上、環境上問題となる水理現象について定量的な説明が試みられている³⁰⁾。具体的には、ある粒径集団の河床材料が河道から除去されたとき、またダムの建設により大きな河床材料の集団がダムによって流下を阻止されたときに、河床高の変化がどの程度生じ、その変化がどのように上下流に伝わっていくかについて検討を行っている。図-30は、2004年常願寺川現地実験の河床粒度分布から粒径20cm以上の粒径集団を重量で50%減らした場合(図-29の粒度分布に相当)の河床変動解析結果である。現地実験では、図に示す河床高で静的平衡状態となり、急勾配部分における d_{80} が25cm程度であった。しかし、20cm以上の粒径集団を減らした場合、掃流力に耐える河床材料の割合が少なくなることから、急勾配の河床形状を保つことが出来ず、この河床材料で安定できる緩やかな河床勾配になるまで、大きく河床が低下する。こ

のような検討を行うことにより、河床材料の粒度分布の役割を理解でき、さらに、河床変動予測技術を用いて、大きな河床変動を生じさせない川づくりと河川管理を検討する段階に近づいて来ていると思う。

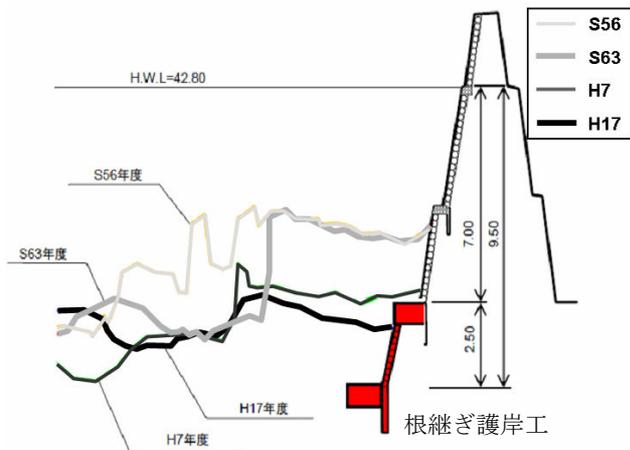
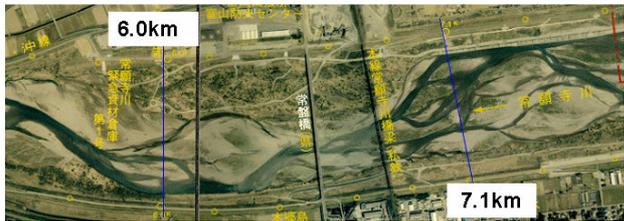


図-31 護岸前面の洗掘の進行と根継ぎ護岸工



(a) 平成33年11月



(b) 平成35年4月

写真-7 5.5kmから7.5kmの流路変動(常願寺川集成図より)

距離	H14年	H9年	H7年	H6年	H3年
4.0km					
4.2km					
4.4km					
4.6km					
4.8km	300m	300m	500m		200m
5.1km					
5.3km					
5.5km					
5.7km					
6.0km	1300m				
6.2km		850m			
6.4km			300m	200m	200m
6.6km					
6.8km					
7.1km					
7.3km					
7.5km					
7.7km	1300m	200m			
8.0km					
8.2km		1000m	150m		
8.4km					
8.6km					
8.8km			700m		300m
9.1km					
9.3km					
9.5km	250m				
9.7km					
10.0km					
10.2km	500m	500m			
10.4km					200m
10.6km					
10.8km					
11.1km					
11.3km			700m	250m	250m
11.5km	500m				
11.7km					
12.0km			200m		200m

護岸工設置箇所
新規施工箇所および改修箇所
河岸際に流路が接している箇所と長さ

図-32 低水路護岸工設置位置と河岸際流路の経年変化

6. 護岸がもたらす新たな河床洗掘問題とその対策

上述したように、常願寺川は河口から5km付近までは河床勾配が1/1150~1/520と比較的緩やかであるものの、これより上流では1/200~1/70にもなる急流河川であり、中小規模の洪水であっても河岸洗掘、侵食量が多い。このような強大な流水エネルギーから堤防を保護するため、従来から石とコンクリートによる強固な練り石護岸を施工してきている。護岸の施工により河岸侵食は抑制され、侵食に対する安全性は増大するが、河岸が直線化し摩擦が減ることで、護岸際の流速が増大する。結果として図-31に示すように護岸前面の河床をさらに洗掘させるような状況をつくりだしている¹³⁾。現状は、さらなる洗掘から護岸を保護するために護岸の根継ぎ対策を実施している。写真-7は、5.5kmから7.5km区間のH3年とH15年の航空写真を比較したものである。H3年の流路は、河岸沿いの砂州によって、滑らかな蛇行線形を生ずるのに対し、H15年の流路は、砂州が縮小し護岸に接する距離が長くなり蛇行振幅が大きくなっている。これは、護岸際の洗掘深が増大することにより河岸際に流路が固定化され、より多くの洪水を集めることで、下流側

へ水衝部が移動し、その対策として護岸工の下流側への延伸を行っていることによる。また、高水敷と河岸際流路との比高差が増大し、蛇行振幅が大きくなることにより、河岸侵食幅が大きくなり、堤防まで侵食が到達する危険性が高まる。図-32は、常願寺川4.0km～12.0kmの左岸側における低水路護岸工が設置されている区間と河岸に接した流路の関係を示したものである¹³⁾。横軸が年度、縦軸が距離標を表している。各セルの灰色で色付けした箇所は、河岸際に流路が接した箇所を表す。また、低水路護岸工が設置されている区間(既存は黒、その期間内に新規施工および改修された箇所はしま模様で表示)を示した。6.0kmから7.3kmの左岸では、H3年時点で200m(6.4km地点)接していた流路が、H9年で850m、H14年で1300mと、洪水ごとに河岸際流路の距離が延びている。他の区間でも、低水路護岸を設置した区間において河岸際流路の距離が経年的に延びている。このように、護岸工の根継ぎと下流側への延伸が続く状況を回避しない限り、治水水面での課題、問題点が解消されないだけでなく環境や景観への影響も懸念される。3章で述べたように、石礫河川では、巨石による河岸安定化の機構があることから、常願寺川において巨石を用いた新たな河岸侵食対策(巨石盛土)の試験施工が行われた。以下に、巨石盛土の設計の考え方とその効果について述べる。

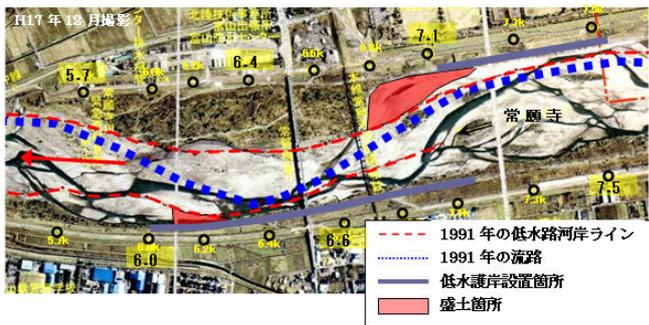


図-33 常願寺川の巨石盛土施工箇所

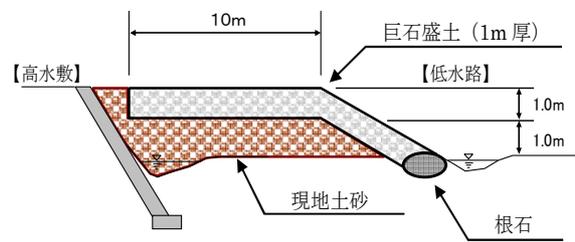


図-34 巨石盛土の横断形状



写真-8 巨石盛土施工完了後の状況(右岸6.8km～7.2km)

図-33に常願寺川に施工した巨石盛土の位置を示す。巨石盛土の試験施工箇所は低水護岸沿いに流路が形成されている左岸6.0km～6.2kmおよび下流への侵食が進行している右岸6.8km～7.2kmとした。また、流路の蛇行線形をなめらかにすることが治水上重要であることから、盛土の線形は流路の蛇行幅が小さく、河岸際の流路延長が短い1991年時点流路線形に近づくよう設定した。図-34に巨石盛土の横断形状を示す。盛土高は高水敷高程度(既設低水護岸の天端高)とし、盛土の基礎には現地採取土を用い、法面(勾配1:4)および天端保護工となる法肩から10mまでの範囲には巨石を1m厚で施工した。また、法面基礎部には洗掘防止、巨石の捕捉のための根石(1.5～2m程度)を配置し、水流が集中する先端部においても根石と同粒径の巨石を複数段配置した。法面および天端部に配置した巨石の必要粒径の検討にあたっては、「建設省河川砂防技術基準(案)同解説」、「護岸の力学設計法」(財団法人国土開発技術研究センター、平成11年2月)

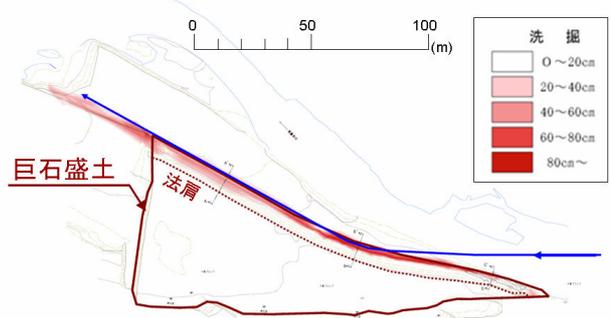
から、一体性が弱い部材からなる法履工の場合で、掃流力に対し移動しない部材の大きさと代表流速との関係式を用いた。施工性や効果の検証を考慮し、平均年最大流量（約 $720\text{m}^3/\text{s}$ ）の掃流力に耐えうる粒径とし、算出した結果、施工区間の必要粒径は 40cm となった。この粒径の巨石を常願寺川から採取する場合、 $D60$ 粒径では施工箇所から 20km 以上離れた箇所においても条件を満たすことができず、 $D90$ 粒径で必要粒径を満たし、採取作業が容易で、運搬性を考慮して 11km 地点から採取することとした。なお、採取に際しては粒径による選別は行っていない。これは積込作業の容易さを考慮したことに加え、幅広い粒径で構成させることにより、巨石が核となり、砂礫がかみ合うことで河床が安定する効果を期待したものである²⁶⁾。施工完了後の状況を写真-8 に示す。

巨石盛土の効果を検証するため、洪水時および洪水後にモニタリング調査を実施した。2007 年に発生した洪水は 8 月 23 日が最も大きく約 $450\text{m}^3/\text{s}$ 、次いで 9 月 7 日が約 $330\text{m}^3/\text{s}$ であり、それぞれ平均年最大規模洪水の約 60%、約 45% の中規模洪水であった。9 月 7 日の洪水時の状況を写真-9 に示す。施工区間では洪水の主流が左岸寄りであったため、左岸 $6.0\text{km}\sim 6.2\text{km}$ では巨石盛土の法肩付近まで冠水したが、右岸 $6.8\text{km}\sim 7.2\text{km}$ では法面中央部付近までの冠水にとどまった。一般に複断面河道では、低水路満杯流量時が最も流速が早くなることが分かっている¹⁶⁾。従って今回受けた洪水は巨石盛土にとって厳しい外力条件となった。洪水後の測量により巨石盛土法面の変動状況を確認した。その結果を図-35 に示す。右岸 $6.8\text{km}\sim 7.2\text{km}$ では既設護岸に沿って流れた洪水流が盛土先端部の巨石によってはねられ、河道中央へ戻っているが、比高差の大きい砂州があったため再び巨石盛土中央部に戻り、右岸 7.0km 付近の巨石盛土法尻が一部崩落した。左岸 $6.0\text{km}\sim 6.2\text{km}$ では、洪水流が巨石盛土の中央部にあたり、そのまま盛土の線形に沿って流下したため、当該箇所において巨石盛土法面の半分程度まで配列が乱れたが、巨石が噛み合うことにより安定な勾配が形成された（写真-10）。

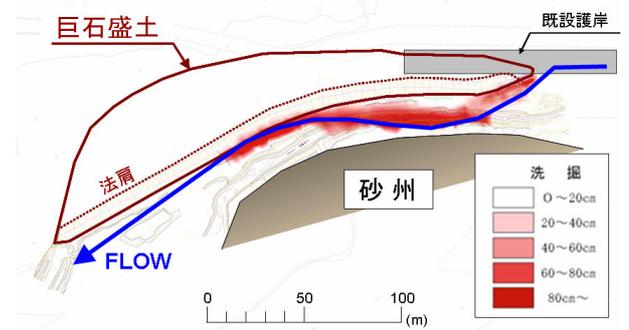
巨石盛土全体としてみれば、今回の洪水で流水のエネルギーが大きかった左岸 $6.0\text{km}\sim 6.2\text{km}$ におい



写真-9 2007年9月洪水時の状況(左岸 $6.0\text{km}\sim 6.2\text{km}$)



(a) 左岸 $6.0\text{km}\sim 6.2\text{km}$



(b) 右岸 $6.8\text{km}\sim 7.2\text{km}$

図-35 三次元平板測量による巨石盛土法面の変動状況



写真-10 洪水後の状況（最も法面の崩落が見られた箇所）

て法面の半分程度まで配列の乱れが見られたものの、これは施工時に混合していた小粒径の砂礫が流出し、安定勾配に至った結果であり、今後、同程度の洪水が発生しても現在の形状を維持できるものと考えられる。また、施工前に巨石の必要粒径算出した際の流速（平均年最大流量）は、左岸 6.0km～6.2km で約 2m/s、右岸 6.8km～7.2km で約 2.5m/s であったものに対し、9月7日洪水時の観測値は表面流速で左岸 6.0km～6.2km で約 4m/s、右岸 6.8km～7.2km で約 3.5m/s であり、想定以上の流速であったが巨石盛土法面の崩落は限定的であり、護岸としての機能は大きく損なわれておらず、既設護岸沿いに流路を直進させないで盛土によって流路線形をなめらかにするという当初の目的は達成できている。

7. 石礫河川に建設されるダムからの排砂の基本的考え方と課題の解決法

ダムは、治水上、利水上、きわめて重要な役割を果たしているにもかかわらず、ダムを取り巻く環境問題への対応の不十分さのために、ダムの持つ重要性が著しく低下している。特に、今後のダム貯水池堆砂問題への対応が、ダム環境問題に対する世間の受け取り方に大きく影響するものと思われる。

ダムの堆砂は、ダム貯水池の寿命を短くするだけでなく、ダム下流河道の治水上・環境上の質を劣化させることになる。特に、石礫の排出が行われないと、規模の大きい洪水流に対し、下流河道の河床の抵抗力が弱まり、徐々に河床洗掘を受け、局所洗掘、滞筋の固定化となって顕われる。結果として、堤防や河川構造物などの安全性が脅かされることになる。検討しなければならないことは、ダムに堆砂する石等の大きな河床材料を、どのような方法で排砂し、土砂移動の不連続性を低減するかである。現在、排砂施設のあるダムは数えるほどで、そのほとんどは砂の排砂であり、大きな河床材料はダム貯水池内に溜まることになり、これでは健全な川を維持することは難しいと考える。ダム貯水池内は、上流河道に比べて掃流力が落ちるため、貯水池内に溜まった大きな材料は容易には動かない。

ダムからの排砂の方法はいろいろ考えられるが、大切なことは、河川の特徴を決めている重要な粒径集団がダムから排砂可能な方法を採用することである。そのためには、石礫を含む土砂の移動機構を十分理解し、上流からの石礫を含む土砂がダム貯水池にほとんど堆積せずに排砂可能な方法や、そのための水理量はどのような条件か評価することが求められる。

最近、石や礫などの大きな河床材料をダム下流に流すため、治水専用ダムとして流水型ダム(穴あきダム)が注目されている。ダムに排砂穴が設けられ、平常時は水を貯めずに、洪水時に一時的に水を貯め、洪水減水期に水とともにダムに留まった石や礫を下流へ流す仕組みであり、堆砂対策、環境対策として有効である。しかし、流水型ダムには以下のような検討すべき技術課題が多い。

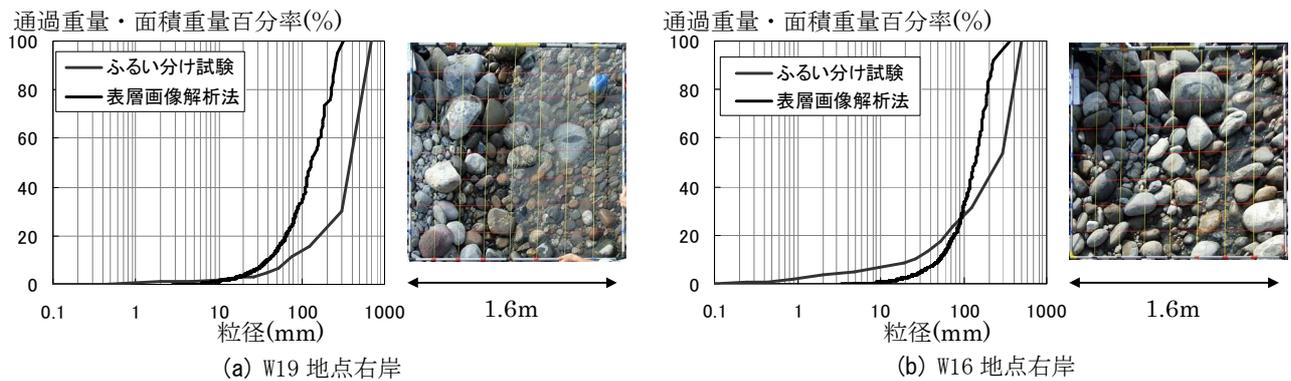
- (1). 穴の大きさや数と洪水流の大きさの大小関係にかかわるが、大きな洪水時には、ダム上流面の水位が上昇し、洪水とともに上流域から運ばれてきた石礫は、ダム上流側の河道に堆積する。堆積した石礫は、水位が下がる過程で、また貯水しない程度の洪水が来たときに、穴から排出されるであろうか。福岡・長田らの研究を応用すれば、穴あきダム近傍の流量、水深に対し、流れの取る水面形との関係で移動しうる石礫の集団が決まると考えられる。
- (2). 石礫は、ダム穴の軸に対しその両側に横断勾配をもって堆積する。一度堆積した石礫が再移動するには、堆積したときの流速（流量）を超える流速（流量）が必要とされる。これは、穴に固定されるゲートの開閉操作なしに可能であろうか。また、上流からの大きな転石が河床にあると、その転石を中心に石礫が堆積し、階段状の安定な河床縦断形を形作る可能性がある。
- (3). 流水型ダムによって、ダム貯水池にたまったシルト、砂などの細粒分が排出されることによる濁水や堆砂等、下流河道にもたらす影響を軽減できるのか。また、洪水の巨大なエネルギーを減殺するため下流側に副ダムを設置すれば、副ダム内の土砂の堆積、排砂の問題が生じないか。

また、流水型ダムだけでなく排砂ゲートや排砂バイパスなど他の手段による技術的検討も必要である。ダム貯水池内では、河道の平面形に応じて、土砂の堆砂地点が定まる。これを考慮して、排砂バイパスの入り口を設けると、排砂機能は高まると考えられる。しかし、バイパスの延長が長くなり、経済的な問題が生じることから、ダム建設時に設けられる仮排水路トンネルを排砂バイパスに利用できるように、設計段階の検討を行うことも考えられるべきである。

8. 治水と環境それぞれの目的に応じた河床材料調査法

8.1 河床材料の環境的役割

水中の生き物は、それぞれの群集に適した低水路の場所で生活している。しかし、そこに適切な場所がなくては、水中生物は生存できない。河川の生態系、すなわち生物とそれを取り巻く環境を考えるときに、水中の生物群集と河床材料（底質）の関係を理解しておくことは、治水と環境の調和した川づくりの上から重要である。河道の水中で生活する生物にとっては、河川形態の基本単位は瀬と淵であり、やや大きなスケール単位での蛇行であり、それらの組み合わせによって作られている上流から下流までの河道である。水中には、付着藻類や水生植物などの植物群集、底生動物群集、魚類群集など多くの生物群集が生息している。底質と生物群集の関係は、生物が生活している場所の視点で検討されることが多く、その中でマイクロ流れの視点も重要と考えられている³¹⁾。底質が大礫の場合と砂泥の場合では、棲む生物の種類も生活様式も異なる。水中生物にとって、礫の下部が埋まっている沈み石やはまり石であるか、礫が動きやすい状態にある浮き石であるかで礫周囲の流速場や水中の酸素量が異なる。そのような場には、マイクロな流れの構造や変化に適應できる生理機能を持つ水生昆虫が住んでいる。よく知られているように、アユは、早瀬の礫面で増殖する付着藻類を食べている。このように、河川の底質は、生物の生活環境として極めて重要である。しかし、治水面から調査、研究されているような水流量と河床材料の関係といった物理的視点だけでは、水中生物の生活を説明出来ず、底質だけでなく河川形態、水質、栄養塩濃度等を総合的に見ていかなければならない³¹⁾。



8.2 石礫河川における表層画像解析法とふるい分け試験法の比較

2006年現地実験において、河床表層画像解析法と同時にふるい分けによる粒度分布調査を行った。ここでは、両者の比較から、目的に応じた適切な河床材料調査法について検討する。ふるい分け試験は、1.0m×1.0mの調査枠を用い深度方向に0.5mまでをサンプリングし粒度分析を行っている³²⁾。図-36に、図-11に示す蛇行水路のW19、W16の右岸側の表層画像解析とふるい分けによる試験法の比較を示す。W19、W16の右岸側では、ふるい分け試験の粒度が表層画像解析法と比べ大きく、最大で粒径が50cm～70cm程度のもまで含まれている。しかし、撮影されたこの地点の河床表層写真には50cm～70cmの巨石を確認することがで

きず、一部露出していたか、表層下に存在していたかものと考えられる。1.0m×1.0m の調査範囲に対して、50cm～70cm の粒径は大きいため、大粒径の河床材料が1つ含まれることで分布形状が大きく変化する。また、河床表層に存在する巨石には、巨石の半分程度が埋まっている「はまり石状」のものと、「浮石状」のものが存在する。特に、巨石の半分程度が地中に埋まっている状態の材料は、河床表層にはその一部しか露出しておらず、表層画像解析では実際の粒径よりも小さく評価され、表層画像解析法とふるい分け試験とで得られる粒径分布に差が生じることになる。

8.3 従来のふるい分け試験の問題点と改善策

従来のふるい分け試験は、河道形態や河床材料による区別なく、河床表面から30cm以上の表層を取り除き、その下層にある砂礫を採取して粒度分析を行う。また、100mm以上のふるい分け試験の出来ない河床材料については、現地で長径と短径を計測し、100mm以下の試料は現場から試験室へ試料を持ち帰り試験を行う¹²⁾。

従来の河床材料調査法を石礫河川に適用すると①河床材料調査範囲が石礫河川の大きな粒径集団に対しては、小さいこと、②河床表層を取り除きその層より下の材料を分析すること、よって両者方法の分布に差異が現れることになる。石礫河川では洪水時に河床表層に現れている材料が重要であると考えられるが、ふるい分け試験により深度方向の影響を含んだ河床材料を考慮することは、流量増大時に起こっている河床低下を考えると重要な意味を持つ。また、ふるい分け試験は表層画像解析法と比べ大きな粒度分布が得られるので、河床材料を安全側で評価することができる。石礫河川では、土砂輸送に着目して見ると河道の滯筋部が侵食型、河床低下型の主流部を構成しており、砂州の部分は堆積型の流れ部を構成している。治水上の視点から河床材料を見るとき、滯筋の河床材料が洪水の最盛時の河床材料を代表していると考えてよく、砂州の表面部分は洪水の引水時に堆積したものと考えられる。従って、石礫河川では、滯筋の河床材料粒度分布を測ることが特に大切である。通常時、流れのある滯筋部の河床材料粒度分布をサンプリング可能な方法、例えば浚渫土砂の採取と同様に動力を使って水と共に河床の石礫を吸い上げる調査方法や、災害時の護岸工事で河床をドライにした際に、徹底的に滯筋の河床材料を調査する等の方法を考えるべきである。

以上の検討より、石礫河川の河床材料粒度分布調査にふるい分け試験法を用いるときに、認識しておくべき重要なことは以下の通りである。石礫河川に適した調査位置、調査範囲、調査深度で河床材料調査を行うことが重要である。平面的な調査範囲としては、滯筋では、1.6m×1.6mの調査枠を用い石礫河川の表面を画像解析することによって表層粒度の分布の特徴を表現し得ていることから、大きな粒径集団に対しては最低限1.6m×1.6mの調査範囲が必要である。深度方向については、滯筋の河床表層の材料を含め深さ方向に0.5mまでサンプリングを行い、粒度分析をとることが変動の大きい石礫河道にとって有効である。

9. おわりに

本文の題目は、「石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋」である。問題点を挙げる事が出来ても「解決への道筋」を描くのは難しい。しかし、流域土砂管理の視点から、解決への道筋を考えることは重要である。

「はじめに」で述べたように、現在用いられている洪水流や土砂流の技術の基本部分は、現地データが乏しかった時代（30年以上前）に、主に実験水路で見出された知見をまとめ、理論化したものである。今日の移動床問題の解法は、この基本部分はそのまま使い、対象とする問題を数値解析の中に組み込んで解くことを行っている。しかし、その後の現場データの蓄積は、現在の土砂流の理論では、治水と河川環境の多様な要請に応えられない部分が多くなってきている。このため、現地計測に立脚した新しい考え方に基づく土

砂流の基本部分の再構築が強く求められていることを示している。

移動床問題は洪水流とともに河川工学の基本であり、もっと河川現場から土砂流の本質的な課題を掴み取り解決への努力がなされなければならない。

気候変動による治水の適応策の検討が急がれる状況の中で、洪水流と土砂流について十分な理解の下に、治水施設の安全度や河川環境を評価し適切な対策をたてることが喫緊の課題である。

参考文献

- 1) 水山高久：山地河川の掃流砂に関する研究，京都大学学位論文，1984.
- 2) Graf,W.H.and Suszuka,L, Sediment Transport in Steep Channels, J. Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE,V.5, No.1, pp11~26, 1987.
- 3) 福岡捷二，土砂環境の変化に対応した洪水流と河床変動予測技術－実務上の課題と調査・研究の方向性－河川技術論文集，Vol.14, pp.1-6, 2008.
- 4) Whittaker,J.G. and M.N.R.Jaeggi, Origin of step-pool systems in mountain streams, Journal of Hydraulics Division,Proc. of ASCE, pp.758-773, 1982.
- 5) Ashida,K.T.Takahashi and T.Sawada, Sediment yieldand transport on a mountain small watershed, Bull.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ. Vol.26, Part3, No.240, pp.119-144.
- 6) 江頭進治，芦田和男，澤田豊明，西本直史：山地河道における階段状河床の形状特性，第29回水理講演会論文集，pp.537-542, 1985.
- 7) 長谷川和義，山地河川の形態と流れ，水工学シリーズ，88-A-8，土木学会水理委員会，pp.1-22,1988.
- 8) 長谷川和義，溪流の淵・瀬の水理とその応用，水工学シリーズ，97-A-9,土木学会水理委員会，pp.1-20,1997.
- 9) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の滲筋形成機構と河床粒度分布特性，河川技術論文集，第11巻，pp.363-368，2005.
- 10) 福岡捷二，山崎憲人，黒田勇一，井内拓馬，渡邊明英：急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究，河川技術論文集，第12巻，pp.55-60, 2006.
- 11) 福岡捷二，寺沢直樹，山崎憲人，塚本洋祐：巨石を有する礫床河川の水理，河川技術論文集，第13巻，pp.339-344, 2007.
- 12) 山崎憲人，寺沢直樹，福岡捷二：巨石を含む広い礫径分布を有する礫床河川における粒度分布調査手法，河川技術論文集，第13巻，pp.141-146, 2007.
- 13) 長田健吾，安部友則，福岡捷二：急流礫床河川における低水路護岸沿いの深掘れ流路形成とその特性，河川技術論文集，第13巻，pp.321-326, 2007.
- 14) 池田駿介，Gray Parker，千代田将明，木村善孝：直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール，土木学会論文集，第375号，pp.117-126，1986.
- 15) 藤田光一，山原康嗣，富田陽子，伊藤嘉奈子，小路剛志：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究，水工学論文集，第52巻，pp.547-552, 2008.
- 16) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005.
- 17) 福岡捷二，渡邊明英，原俊彦，秋山正人：水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算，土木学会論文集，No.761/II 67, pp.45-56, 2004.

- 18) 福岡捷二：洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術，河川技術論文集，Vol.12，pp.1-6，2006.
- 19) 鈴木重隆，中村修也，川口広司，福岡捷二：大きな潮位変動を受ける河道の洪水流れと河床変動－利根川下流部を例に－，第 35 回土木学会関東支部技術発表会，II-088，2008.
- 20) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の土砂移動機構に着目した 1 次元河床変動解析法の開発，水工学論文集，第 52 巻，pp.625-630，2008.
- 21) 平野宗夫：Armoring を伴う河床低下について，土木学会論文報告集，第 195 号，pp.55-65，1971.
- 22) 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，pp.59-69，1972.
- 23) Parker.G.:Surface-based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers,Journal of Hydraulic Research,Vol.28,No.4，pp.417-436，1990.
- 24) 藤田正治，Muhammad Sulaiman，Jazaul Ikhsan，堤大三：河床材料の空隙率の変化を考慮した河床変動モデルとその適用，河川技術論文集，第 14 巻，pp.13-18，2008.
- 25) Egiazaroff, I.V.:Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol.91, HY4, pp.225-247, 1965.
- 26) 福岡捷二，長田健吾，安部友則：石礫河川の河床安定に果たす石の役割，水工学論文集，第 52 巻，pp.643-648，2008.
- 27) 米沢拓繁，福岡捷二，鈴木重隆：水衝部の河床表層材料と河床洗掘の関係の調査研究，河川技術論文集，Vol.13，pp.345-350，2007.
- 28) 藤田光一：河道変化を治水・環境保全の接点においた川づくりの考え方，水工学シリーズ 06-A-8，土木学会，2006.
- 29) 山本晃一：沖積河川学，山海堂，1994.
- 30) 長田健吾：第 24 回河川・流域技術研究会発表資料，中央大学研究開発機構，国土交通省河川局，2007.8（部内資料）.
- 31) 沖野外輝夫，河川の生態学，共立出版株式会社，2002.
- 32) 建設省河川局監修：改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，山海堂，平成 9 年.