

石礫河川の河床安定に果たす石の役割

THE ROLE OF STONES ON THE RIVER BED STABILITY IN STONY BED RIVERS

福岡捷二¹・長田健吾²・安部友則³
Shoji FUKUOKA, Kengo OSADA and Tomonori ABE

¹フェロー会員 Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 博士(工学) 中央大学研究開発機構助教 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 工修 国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所長 (〒930-8537 富山市奥新田町2-1)

River cross sectional form had settled in the dynamic equilibrium form at the relationship between discharge, the river bed slope and bed material when river improvement is not progressing so much. But, river channels do not seem to satisfy the equilibrium condition of sediment transport due to river improvement work in progress. As the result, many problems have arisen on river management. Sediment transport became discontinuous by the dam and removing large size of bed materials as stones and gravel from rivers is mentioned. In this study, we describe the bed stabilization mechanism of the stony bed rivers found by the field experiment of the Joganji River and the difference in sediment transport mechanism of the stony bed river and the gravel bed river. Moreover, we insist on the problem on washing out of dam reservoir sediment and the necessity for the new bed variation analysis method in the stony bed rivers.

Key Words : *stony bed river, static equilibrium condition, boulder, flood control and river environment, removal of dam reservoir sediment*

1. はじめに

河川上流域で見られる石礫河川は、砂 (0.074cm～0.2cm) や礫 (0.2cm～7.5cm) , 石 (7.5cm以上) といった広い粒径で河床が構成されている。そのような大小様々な河床材料により、河川中下流域に見られる砂州に代表される砂礫河川とは異なる、多様な河床形状と流れ場を形成している。

河川は、自然現象である豪雨や洪水により、水災害・土砂災害を引き起こす。このような河川を、治水、利水、河川環境の面から総合的に、かつ適正に管理するために、河川計画が立てられる¹⁾。治水計画では、流域と河川の特성에応じて計画の規模を決め、それを河道とダム等の洪水調節施設により適切に分担する計画が立てられる。このような計画に則って、堤防の建設、河幅の拡大等の河道整備が行われてきた。このような整備が進むにつれ、河川の安全度は向上してきたが、河道内の景観が変化してきた。ダムや河川横断構造物により土砂移動の連続性が失われ、中下流域には上流域から大きな河床材料の供給が減じた。また、堤防が整備されることにより洪水は

氾濫することなく中下流域に到達してくる。その結果、中下流域では洪水流に安定して応答する大きな河床材料の割合が少なくなり、深掘れ、幅の縮小による滞筋の固定化、樹木の繁茂が起こり、高水敷と滞筋との比高差が拡大することで、河川構造物の維持管理を困難にしている。過去に行われた大掛かりな砂利採取も、河床材料の変化の一因となっている。必要な粒径集団を中心とした砂利採取は、河道の安定や動植物の生息・生育・繁殖環境にとって重要な粒径集団の欠けた粒度分布をもたらし、河床や底質構造の弱体化を招いている²⁾。

河川で起こっているこのような因果関係を説明できる河床変動解析法を確立することは、河道管理上きわめて重要である。大粒径の河床材料を有する石礫河川の河床変動に対して、現在の河床変動解析法^{3)・4)}の適用性は低いように思う。その主要な理由は、混合粒径河川でも、砂礫河川と石礫河川では河床変動の機構が異なり、後者の場合、大きな石の持つ役割が決定的に重要なためである。例えば、 d_{84}/d_{16} の比が砂礫河川と石礫河川で同一であっても、両者の河床変動の機構が異なると考えられるからである。

この点を明らかにするために、著者らは、石礫河川に

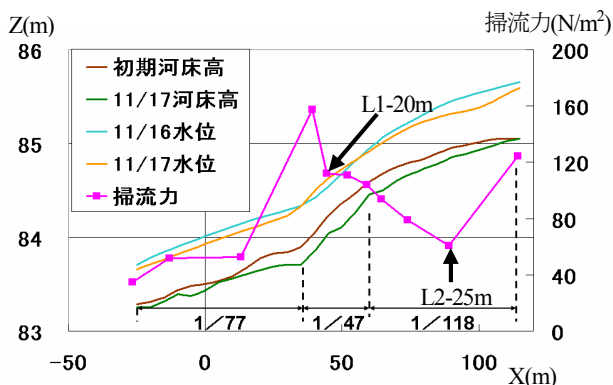


図-1 2004年実験水路の河床高，水位，掃流力縦断分布

における石礫の移動機構について，2004年，2005年，2006年に，代表的な石礫河川である常願寺川において大規模な現地実験を行ってきた^{5), 6), 7), 8)}。

本論文では，上述の常願寺川現地実験により得られた石礫河川の河床変動機構，とくに河床安定機構に果たす巨石の役割について述べるとともに，砂礫河川との土砂移動形態の違いについて考察する。また，河川上流域の石礫河川に建設されることの多いダムでの，石礫の排砂に関する課題と考え方について述べる。

2. 石礫河川における河床安定機構と砂礫河川との土砂移動形態の違い

2004年，2005年，2006年に常願寺川において大規模現地実験が行われ，石礫河川の河床変動機構に関する検討が行われた^{5), 6), 7)}。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，現地実験の結果をもとに述べる。2004年実験は，長さ約170m，水路幅約4mの直線水路に定常流を2日間通水し，水位，流量，河床高，河床表層粒度分布が測られている。実験時の流量は，自然水路から切り替えることで確保しており，通水開始時（11月16日）が約 $8\text{m}^3/\text{s}$ ，実験終了時（11月17日）が約 $7\text{m}^3/\text{s}$ であった。図-1には，実験水路の平均河床高，水位および掃流力の縦断分布を示す。通水後に測られた河床（11月17日）の河床勾配は，水路上流部で1/118，水路中央部で1/47の急勾配部分が現れ，その下流部は1/77となった。その急勾配部分で掃流力が大きくなっている。この勾配の違いは，後述するように，そこに存在する大粒径集団の大きさの違いに起因している。

写真-1には，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した。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形状や河床材料になっておらず，流れに見合った流路が形成されるまで河床洗掘や河岸侵食が起り，石や礫が活発に移動している。しかし，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



(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

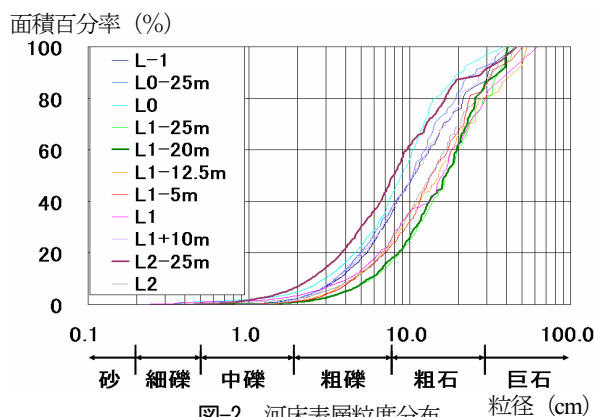
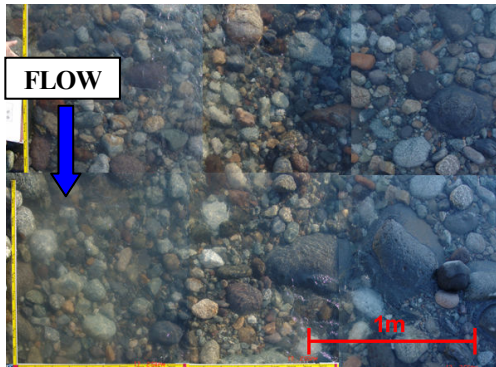


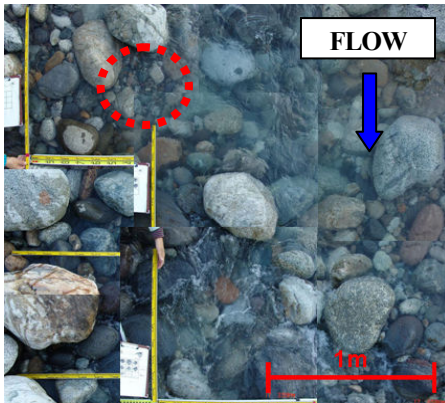
図-2 河床表層粒度分布

河川では，河床洗掘や河岸侵食が繰り返され，流れに見合った河床形状，河床材料になると，石や礫の移動が完全に停止し，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⁸⁾により測られた各地点の河床表層粒度分布を図-2に示す。緩勾配部で掃流力の低いL2-25m地点の粒度分布は， D_{60} で約10cm， D_{80} で約16cmであるのに対して，急勾配部で高い掃流力が働いたL1-20mの粒度分布は， D_{60} で約20cm， D_{80} 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



(a) L2-25m地点の河床表面画像



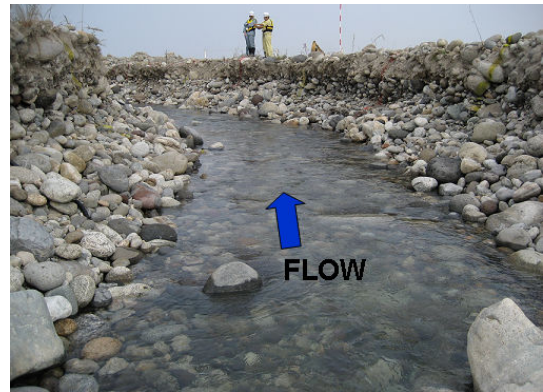
(b) L1-20m地点の河床表面画像

写真-2 安定した時の河床表面の状態

L1-20m地点の河床表面は、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、砂礫は巨石や粗石が形成するスポットや後流域に留まっている。このように、石礫河川は広い粒度で構成されているため、大きな掃流力が働けば、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。

このような石礫河川における静的平衡状態は、従来から言われる粗粒化現象⁹⁾とは異なる。粗粒化現象は、上流からの流砂が、ダムや河道横断構造物により遮断あるいは減少し、流体力により細粒分は下流河道に流される一方、大きな河床材料はその場に留まり、河床表面材料が粗粒化することで静的な状態に近づく現象である。一方、本論における石礫河川の静的平衡状態とは、写真-2のように小さな河床材料は大きな河床材料の作る空隙空間や後流域に留まることで、作用する流体力が弱まり、その場に留まることができるという事象である。この場合、河床の粒度分布は大きなものから小さなものまで広く存在でき、各地点でのD60粒径で無次元表示すれば、図-2に示される分布形状は概ね同じになる⁵⁾。

次に、巨石による河岸の安定機構について述べる。2006年に常願寺川で行った現地実験は、2つの蛇行部を有する水路で、下流側の蛇行部に護岸工を設置した⁷⁾。自然河岸では、流水の作用により砂礫が流され、巨石は安定を失い崩れ落ちる。これが繰り返り起こることで、水路幅は徐々に広がり、水中の河岸の傾斜は、写真-3(a)に示すように河岸から崩れた巨石が噛み合うことによ



(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

て安定な勾配が形成される。そして、流れに見合った断面形状となれば河岸・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。護岸工の設置は河岸際における滞筋の固定化の一因となる¹⁰⁾。

上述のような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-3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示したものである。図-3の左が石礫河川を示しており、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-3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、巨石のような流体場への抵抗になる大きな材料があり、その他の礫や砂が適切な割合や位置で配置されれば、河床は安定し、流れの規模が変化しない限り、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出てきて、粒度分布を大きくすることで安定な河床を形成する。一方、図-3の右に示した砂礫河川の河床変動過程は、石礫河川に比べて相対的に粒度が小さいために、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

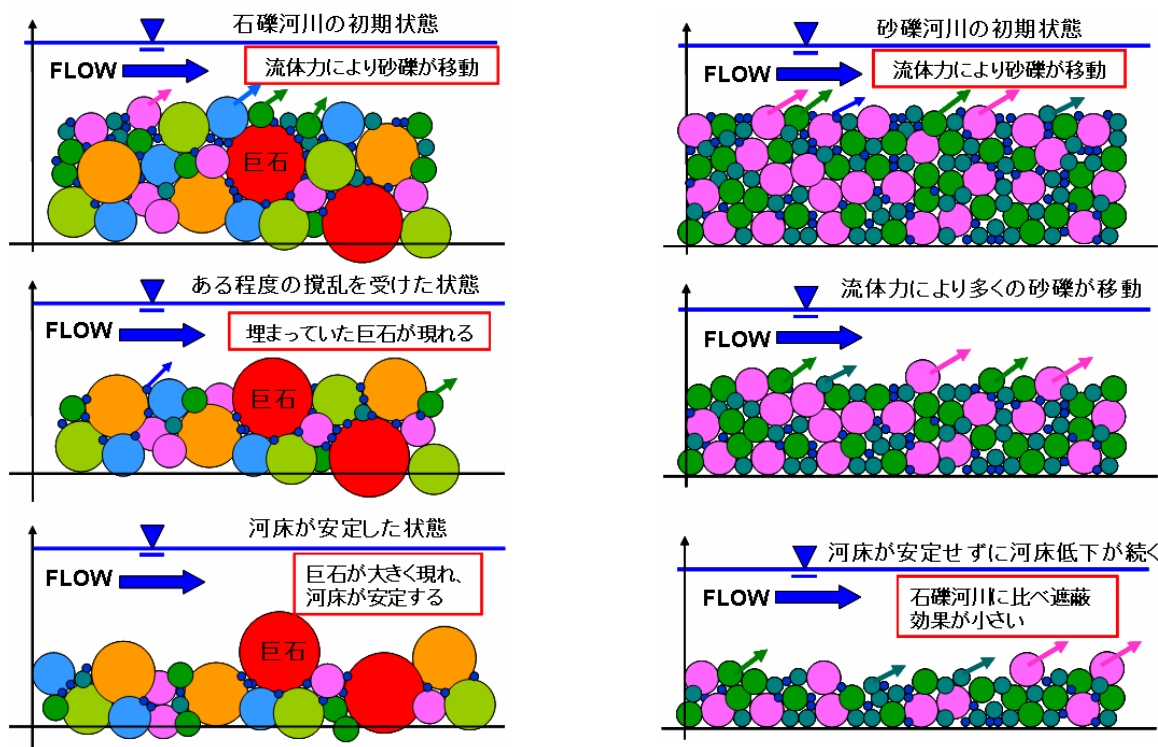


図-3 石礫河川と砂礫河川の河床変動過程

河床低下を続ける。大流量の条件では、砂礫河川では、石礫河川のように河床材料で自発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実態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生じているであろうという認識であった。その考えのもとで、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。

このような巨石の存在は、河床安定のような治水上の利点だけではなく、生態系にとっても良好な河川構造を提供している。巨石が存在することにより、その場の流れが、周囲の砂礫を浮石状態に保つ。そのような場合は、魚類の産卵、生息場となっていることはよく知られることである。魚類のみならず、底生動物にとっても凹凸のある河床は、良好な生息場となっている。

石礫河川の土砂移動、河床変動量を説明するためには、このような石礫河川の河床変動機構を十分に考慮した解析法が必要になる。著者らは、石礫河川の河床構造の治水上・環境上の重要性に鑑み、上述のような石礫河川の河床変動機構に基づいた新しい河床変動解析法の構築を進めている¹¹⁾。

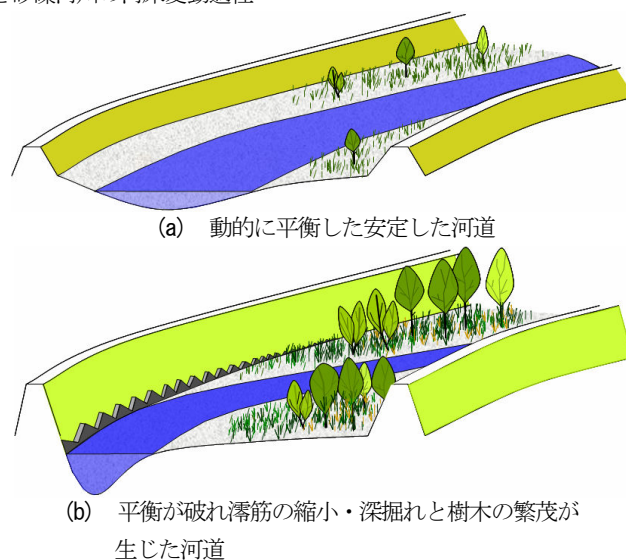
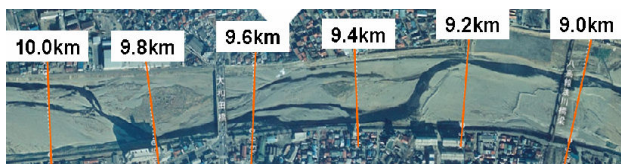


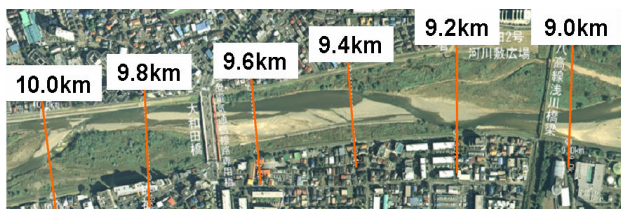
図-4 平衡した河道と平衡が破れた河道

3. 輸送土砂の質と量の変化による河道の変質

まだ十分に河道の整備が進んでいなかったころ、土砂は上流域から十分に供給されていた。河川の断面形も、支配流量、河床勾配、河床材料に応じたものとなっており、河道は動的に平衡し、安定した河床を形成していた。土砂移動が動的に平衡していたため、滞筋の深掘れが小さく、高水敷と滞筋との比高差も小さいため、樹木繁茂も少なかった(図-4(a))。その後、ダム建設、堤防の整備、河幅の拡幅、河道の掘削などの河道整備が進み、河道の様相が変化してきた(図-4(b))。連続した堤防が整備されたことで、洪水流は氾濫することなく中下流



(a) 昭和49年の河道状況



(b) 平成16年の河道状況

写真-4 浅川9.0km～10.0km区間の河道の変質

域へと流れてくるようになった。それに加えて、ダムや河川横断構造物の整備により中下流域に供給される大きな河床材料が少なくなった。また、過去に行われた大規模な砂利採取により、特定の粒径集団が採取され、中下流域の河床材料（粒度分布）は大きく変化し、河道管理上、多くの問題が生じてきた。横山ら^{2)・12)}によれば、筑後川では、1960年頃から砂利採取が活発に行なわれ、それに伴い河床が著しく低下した。それにより感潮域が10km程度延びるとともに、泥質が遡上し、河床材料が細粒化した。筑後川における粒度分布を見ると、砂利採取により2mmから10mm程度の砂礫が欠けた粒度分布となっており、砂利採取により河道、粒度分布が大きく変化したことが明らかにされた。また、多摩川水系浅川では、河川横断構造物により上流から大きな河床材料が運ばれなくなったこと、過去の砂利採取により多くの石が持ち出された経緯があり、河床材料の粒度分布が小さい側に寄っている¹³⁾。写真-4は、浅川の9.0kmから10.0km区間における昭和49年と平成16年の河道状況を示したものである。昭和49年河道は、河道内の樹木繁茂が少ない。一方、平成16年の河道には、樹木が多く繁茂し、その樹木群を避けるように流路が形成されている。図-5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、右岸側に流量が集中するようになった箇所である。この9.2km右岸の河岸際が、近年の洪水により経年的に深掘れが生じ、根固め工が縦断的に崩落した(写真-5)。福岡ら¹³⁾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、河岸際濬筋の深掘れが進行したと考えられる。さらに、この区間では、濬筋が大きく深掘れした結果、土丹層が河床表層に露出するようになった(写真-6)¹³⁾。土丹が露出すると、砂礫の衝突により壊れやすいことや、流

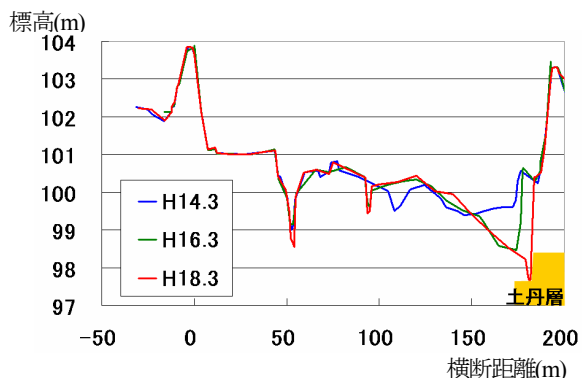


図-5 浅川9.2km横断面の経年変化と土丹位置¹³⁾



写真-5 浅川9.2km右岸水衝部の根固め工崩落状況¹³⁾



写真-6 浅川9.2km右岸の河岸際河床に露出した土丹¹³⁾

送されて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。土丹の上にとどの程度の厚さの砂礫層が存在すれば、洪水中に土丹が露出しない状況をつくる事が出来るかについては、石礫の果たす役割が大きい。

河岸際流路が深掘れすることは、結果として、その対岸砂州や高水敷との比高差の増大に繋がる。横断比高差の増大は、濬筋に流量が集中することから砂州上の樹木繁茂の要因となり、樹木の繁茂した砂州は、樹木群が洪水流への抵抗となることから、簡単に移動せず、砂州の固定化に繋がる。一方、このような比高の高い砂州の固定化は、濬筋への更なる流量の集中を招き、濬筋のさらなる深掘れや濬筋の固定化を生じさせる。また、高水敷と河岸際流路との比高差の増大は、河岸侵食が発生した際に侵食が堤防にまで到達する恐れがあり、この対策として低水路護岸工を整備するものの、このような弱体化した河道においては、その維持管理は困難であると考えられる。このように、上流からの土砂輸送量の減少や砂利採取による河床材料の質的变化は、河道管理上の多くの問題を生じさせている。

河幅や堤防高などの河道形状は、人為的に変更することは可能であるが、河床材料は、その上流域の地形や地質によって決まるものであり、ダムや河川横断構造物に

よる土砂供給の不連続や、砂利採取によって失った河床材料（粒度分布）を取り戻すことは、困難である。このような状況にある今日の河道を、適切に見極め、対策を講じるには、大きな河床材料が河床の安定に果たす役割と粒度分布が持つ意味を十分に理解し、対策技術に生かすことが重要である。

4. ダムからの排砂のための検討課題

上述したように、中下流域において上流域からの大きな河床材料の流下が減少したことにより、河床の耐力低下が起り、河川構造物の損壊など、様々な問題が生じている。上流域からの土砂移動を健全に保つため、改善しなくてはならないのが、ダムからの排砂問題である。ダムがあることにより、その区間での土砂移動が不連続となり、ダム直下流区間では河床低下とともに河床材料の粗粒化が生じるが、さらに下流では上述のような河床材料の細粒化が生じている。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。

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穴あきダム（流水型ダム）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、穴あきダム（流水型ダム）は検討すべき課題も多い。とくに、洪水時に石や礫が貯水池内でどのような挙動をするのかといった土砂移動機構の検討が重要課題である。このような土砂移動機構の解明のためにも、上述した河床変動解析法の構築が必要である。

また、排砂ゲートや排砂バイパスなどの機能、構造等の検討も、多目的ダムの排砂問題には必要になる。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。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トンネル仮排水路を排砂バイパスに利用できるように、設計段階でこのような検討を行うことも考えられる。

5. おわりに

本文では、主に河床安定に果たす石の重要性を述べた。巨石のような大きな河床材料がある河道は、河床の安定化という治水上のメリットと、生態系の生息場としての環境上のメリットの両面を持ち合わせている。これまでの河道計画は中下流域が中心であったが、上流域の石礫河川の土砂移動も考慮に入れ、時間的、空間的な広がりをもった総合的な河道計画とする必要がある。

石礫河川の土砂移動、河床変動機構を考慮に入れた河床変動解析法の構築は、ダムから排出される土砂の質と量の検討とともに、上流から下流までの健全な川づくりを実現するために必要である。さらに、中下流域の健全な河道維持のためにも、石などの大きな河床材料を河川外に持ち出さないことが重要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水利と河道の設計法，治水と環境の調和した川づくり，森北出版，2005.
- 2) 横山勝英：河川の土砂動態が有明海沿岸に及ぼす影響について—白川と筑後川の事例—，応用生態工学，8号1巻，pp.61-72，2005.
- 3) 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.
- 4) 平野宗夫：Armorings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.
- 5) 黒田勇一，福岡捷二，山本輝，吉田和弘，井内拓馬：礫床河川の濡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.
- 6) 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.
- 7) 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利，河川技術論文集，第13巻，pp.339-344，2007.
- 8) 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.
- 9) Parker.G.：粗粒化について，土木学会論文集，第375号，II-6，pp.17-27，1986.
- 10) 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.
- 11) 長田健吾，福岡捷二：礫床河川の新しい河床変動解析法とその検証，第62回年次学術講演会講演概要集，II-103，2007.
- 12) 横山勝英，鈴木伴征，味元伸親：筑後川の河床変動要因と土砂動態の変遷，水工学論文集，第51巻，pp.997-1002，2007.
- 13) 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，第13巻，pp.345-350，2007.