

流域地質特性に着目した ダム下流の底質形成過程の解明

ANALYSIS OF RIVERBED FORMATION PROCESS IN RIVERS DOWNSTREAM OF DAMS: FOCUSING ON CHARACTERISTICS OF BASIN GEOLOGY

須川遼¹・知花武佳²

Ryo SUGAWA and Takeyoshi CHIBANA

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

There is a phenomenon called armoring of the river bed as an impact of dams to its downstream, and has been researched previously by several researchers. However, previous researches often focused on one particular dam, therefore comparison of the phenomenon among several rivers which have different characteristics has yet to be conducted. In this research, we focused on several dams in rivers which have different geological features in its basin. As surveys, we took data of bed materials upstream and downstream of dams, and compared them. Based on these data, we found that the armoring of the river bed seldom occurs when the geology of the river basin is sedimentary rocks, and it frequently occurs when the geology is volcanic rocks. More in detail, the location of the landslide affects the size distribution of the river bed. The size will be smaller when the landslide exists in downstream of dams, and larger when it does not exist.

Key Words : Dam, Armoring of River Bed, Substrate, Geology, Landslide

1. はじめに

(1) 背景

河川は源流から河口部へと連続的に流れ、洪水時には土砂を運搬する機能を果たす。この土砂運搬装置としての河川に横断的にダムを建設すると、土砂に対してダムはフィルターのような働きをすることになる。すなわち河川はダムを通過する際に、溶媒としての水のみを通され、溶質としての土砂は堰き止められてしまう。これをダムのフィルタリング効果と呼び、ダム堆砂問題や環境問題としてしばしば取り上げられる^(例えは1), 2)。

この効果が環境に与える重大な影響の1つとして、ダム下流の河床のアーマー化が挙げられる。アーマー化とは、上流からの土砂供給が遮断されることによって、中小規模の洪水で流されるような中礫以下の土砂が選択的に流送され、表層の粒度が粗粒化し底質が固化する現象のことである(ただし、後述するように定義が人によって異なり、しばしば混乱を招いている)。この現象が進行すると、最大粒径付近の河床材料で均質化された底質

ができあがり、互いに噛み合って大規模洪水時にも動かなくなるため、攪乱機会の大幅な減少の一端を担う。このことは底生動物等の多様性を失わせてしまう³⁾。

既往研究では、個々の河川におけるアーマー化現象を取り上げ、その原因や生物への影響の解明を試みている^(例えは4)が、複数の河川間での影響比較は行われていない。

そこで本研究では1つ高次の視点を持ち、流域の地質構造によってダムが下流河道に及ぼす影響がどの様に異なるかを分析する。そのために複数の河川のダム上下流を対象とした現地調査を行い、評価する。

(2) アーマー化の定義

ここで、本研究の主題であるアーマー化現象の物理的な定義について明確にしておく。

多くの既往研究においては、河床材料の粗粒化＝アーマー化としている場合が多い⁵⁾。当然、粗粒化すれば河床は動きにくくなるが、その一方で大きな礫で均質化された河床においては、池田ら⁶⁾の研究にある通り「岩盤河川において巨石が長時間残留できる理由は、巨石が集まり、互いに噛み合う状態」が形成されているからだ

表-1 岩石の風化特性

岩石の種類	堆積岩	凝灰岩	火山岩	閃緑岩	花崗岩
物理的風化過程					
基岩	○	○	○	○	○
岩塊		○	○	○	○
礫	○				
砂利	○				
砂	○				○
粘土	○				

(○印が安定しやすい礫の大きさ)

いう考察も考慮に入れなくてはならない。すなわち、単に河床材料が粗粒化して動きにくくなる効果と、大きな礫で均質化することによって互いに噛み合っ動きにくくなる効果は、分けて考えなくてはならないと言える。

前述した通り、アーマー化が環境に対して悪影響を及ぼすとされるのは、大規模洪水でも流されない河床の形成によって底質の攪乱機会が減少し、底生動物等の多様性が失われるからである。一方、河床から細粒土砂が幾分か抜け、以前より粗粒化したというだけでは、大礫の攪乱頻度が減少したとは限らない。なぜなら伊勢屋ら⁷⁾によれば、混合砂礫において礫が支配的になり、砂が潤滑材として河床材料を運びやすくする効果を失うのは、礫の割合が全体に対して40～50%以上を占める時だからである。このことから、攪乱機会が著しく減少するのは河床材料が一定割合以上礫で均質化している状態の時であり、単に以前より粒度分布が粗粒化しているからと言ってアーマー化と括るのは適当でないとと言える。

以上から、本研究では「粗粒化」と「アーマー化」を区別して議論を行う。あくまでアーマー化とは、以前より粒度分布が粗粒化し、尚且つ大礫で40～50%以上均質化した河床を形成する現象と捉える。

2. 現地調査と結果

(1) 調査地の選定方法と概要

ダムは性質上、主に山地河川に建設される。山地河川は、今日最も広く受け入れられている河川区分の指標である山本のセグメント論⁸⁾において、セグメントMに該当する。セグメントMにおいては流れに対して土砂生産が卓越すること、基盤岩で河道が拘束されていること等の理由により、河川の諸元を数式で関連付けることは困難である。

しかし逆手をとれば、山地河川は土砂が生産される場に近く、選択的輸送による分級が十分でないため、その河床底質は自身の流域が属する山地の地質に直接影響を受けていると言える。山地から生産される土砂の地質ごとの岩石風化特性は、小出⁹⁾によって表-1のようにまとめられている。

表-1を模式図で表すと、堆積岩・火山岩の生産土砂の粒度分布はおおよそ図-1のようになる。

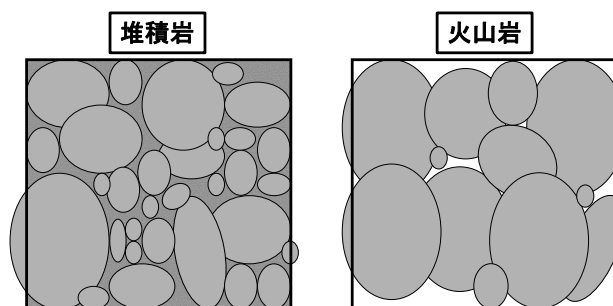


図-1 模式図

表-2 観測サイト一覧

観測日	河川名	ダム名	主な流域地質	備考
2010/9/7	多摩川	小河内ダム	中生代堆積岩	後日、詳細観測を行った。
2010/10/22	渡良瀬川	草木ダム	火山岩	
2010/11/11	荒川	二瀬ダム	中生代堆積岩	
2010/11/12	中津川	宮ヶ瀬ダム	火山岩	

図-1から、粒度組成が連続的な堆積岩ではアーマー化する様な粗粒材料の割合が少ない上に、礫径が連続的に変化する様々な材料があるためアーマー化が起こらず、大礫の多い火山岩では細粒分が流されてしまうと粗粒材料のみとなり、アーマー化が起こるのではないかという仮説を立てることができる。

そこで本研究では、中生代堆積岩を流域地質にもつ多摩川と荒川、そして火山岩を流域地質にもつ渡良瀬川と中津川、計4河川のダム上下流において、それぞれ現地調査を行った(表-2)。ただし、ダム上流の調査地はダム湖の背水が十分掛からないとされる地点を選び、ダム下流の調査地はダム下流2kmで固定した。これは、支流や側岩の影響を考慮して調査地を選定しようとするとな煩雑になってしまうため、まずは距離を固定して調査を行った上で、分析段階でこれらの影響を見るという手法に則ったものである。例外的に多摩川では、支流などの影響を見るために多くの調査地を設けて分析している。この結果については第4章で説明する。

(2) 調査手法

本研究では、ユニットスケールにおける平瀬に着目し、ダム上下流それぞれの粒度分布を得た。

測定は30cmメッシュで5×5の格子点をもつ1.2m四方の方形枠を用いて面積格子法を行った。

(3) 調査結果

調査結果を図-2にまとめた。中生代堆積岩を流域地質に持つ多摩川と荒川のグラフを見てみると、下流が上流に比べて細粒化、粗粒化という違いを認めることができるが、どちらの下流においても大礫で均質化という条件を満たしていない。荒川では粗粒分で均質化しているものの、50%より大きい材料を見ると100mm付近が大多数で、噛み合い効果を加味しても、これらが大規模洪水で流されないような大礫であるとは考えにくい。以上から、両

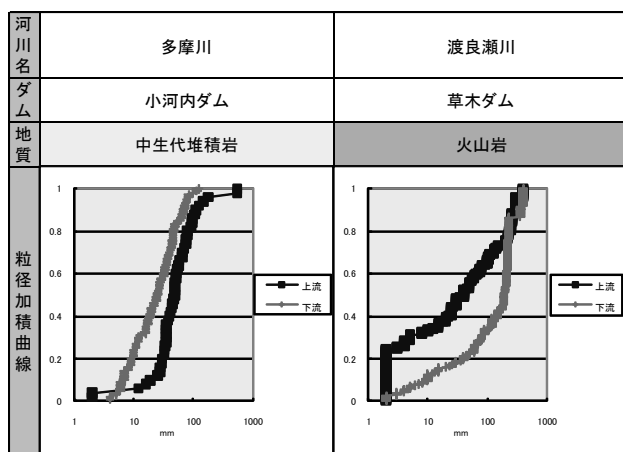


図-2 観測結果一覧

河川ともにアーマー化は起こっていないと言える。一方、火山岩を流域地質に持つ渡良瀬川と中津川では、下流が上流に比べて顕著に粗粒化している上に、200mm～300mmの大礫で全体の40%以上均質化していることから、大規模洪水でも流されない典型的なアーマー化した河床が形成されていることが分かる。実際に、渡良瀬川や中津川では大礫が隙間を作りながら噛み合い、藻類がその上に過剰に繁茂している様子が観察されたが、多摩川や荒川の礫は簡単に河床から取り出せるほどであり、藻類の繁茂も見られなかった。

以上のことから、堆積岩ではアーマー化が起こらず、火山岩ではアーマー化が起こるという前述の仮説と同様の結果が得られた。しかし、多摩川と荒川で結果が異なるのはなぜか、支流による影響はどの程度あるのか、そして各々の河床の形成メカニズムは何であるのか、という疑問に対する解決はまだ見ていない。そこで、土砂生産、縦断的な粒度分布の変化、ダムの堆砂実績の経年変化を追うことで、その解決を試みた。

3. 地すべりと土砂生産

前述の通り、堆積岩の河川である多摩川と荒川では、アーマー化が起こらないものの細粒化、粗粒化という異

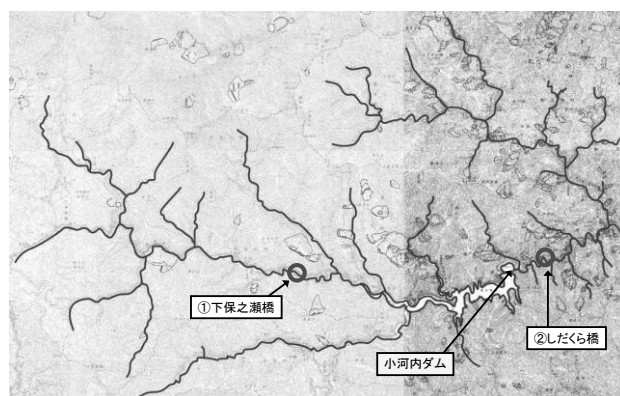


図-3 多摩川の地すべりマップ
(点線で囲まれているのが地すべり)

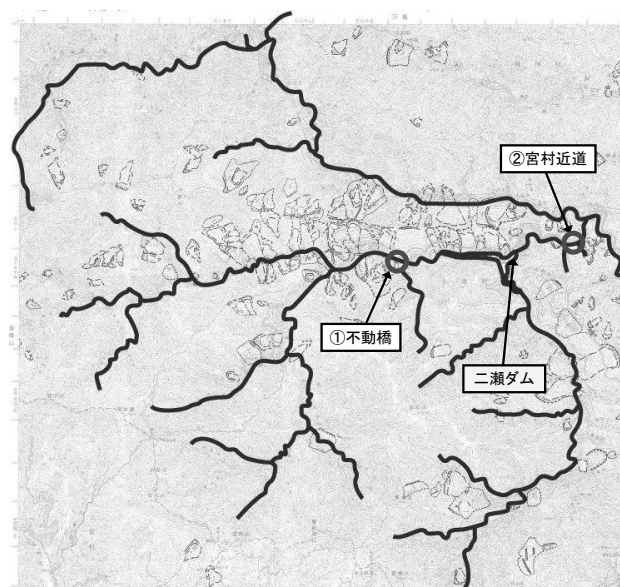


図-4 荒川の地すべりマップ
(点線で囲まれているのが地すべり)

なった結果が出ている。そこで、中生代堆積岩の土砂生産過程に着目し、両河川の比較を行った。

小出¹⁰⁾は、土砂生産過程は地すべり・山くずれ・崖くずれ・土石流など様々であるが、地質帯によってどれが最も起こりやすいかを分類することができるとし、まとめている。四万十帯・秩父帯に属する中生層の山地に流域を持つ多摩川と荒川の源流付近では、群発急性型地すべりが起こりやすいとされる。これは今日までに考えられている最も規模の大きい土砂生産過程である。

山くずれや崖くずれが浅く小規模なのに対して、地すべりは一般に大規模であり、航空写真などからの判別が可能である。このことから、防災科学研究所は地すべり地形分布図データベース¹¹⁾に「地すべりマップ」と呼ばれる地すべりの分布図を載せており、一般に閲覧可能である。そこで、図-3、図-4の地すべりマップをもとに、多摩川と荒川においてどの場所での程度地すべりが起こっているのかを判読した。すると、多摩川ではダム下

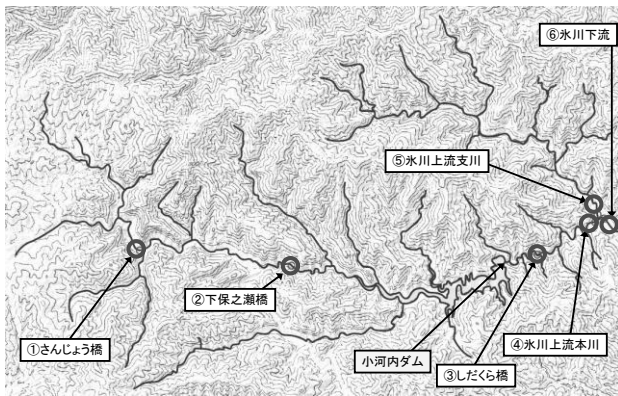


図-5 多摩川観測サイト一覧

流で特に地すべりが多く、荒川ではダム上流で特に多いことが読み取れた。

地すべりの存在は、そこが大きな土砂供給源であることを意味している。特に中生代堆積岩の地質を持つこれらの河川では細粒土砂の生産が活発なため、比較的頻繁に起こる中小洪水で流れやすい細粒土砂の生産源がダム下流区間に多く存在すると、そこにおける粒度分布の細粒化が起りやすいと考えられる。

このことから、多摩川ではダム下流に多くの地すべりが見られることから細粒化が起り、一方で荒川ではダム下流にあまり地すべりが見られないことから細粒化が起りにくいことと、ダムで土砂が堰き止められることが相まってやや粗粒化が起きたと考察することができる。

なお、火山岩地質である渡良瀬川や中津川に関しては、そもそも細粒土砂の生産が少ないことや、地すべり以外の土砂生産が支配的であることから、地すべりマップを用いて土砂生産の議論を行うのは適切ではない。そもそもこれらの河川ではアーマー化（＝細粒土砂が不足した状態）が見られることから、その意義もないと思われる。

4. 支流などの影響

本章では、前述した支流やダム湖の背水が河床の粒度分布に与える影響を、多摩川を縦断的に見ていくことで検証する。図-5が観測サイトの一覧である。

上流から順に、まずは①さんじょう橋と②下保之瀬橋の粒径加積曲線を比較する（図-6）。この図から分かる通り、上流のさんじょう橋よりも下流の下保之瀬橋の方がやや細粒分が多い。これは、下保之瀬橋にダムの背水がかかっているためである。実際に現地観測を行った際には、河原まで砂が多量に分布している様子が確認できた。

ダム上下流の比較は第2章で既に行ったためここでは触れず、次に③しだら橋と④氷川上流本川を比較する（図-7）。この図から、両者の粒径加積曲線が良く一致

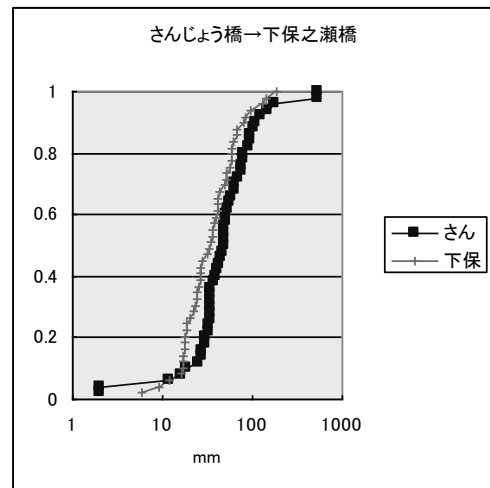


図-6 さんじょう橋と下保之瀬橋の比較
(さん：さんじょう橋，下保：下保之瀬橋)

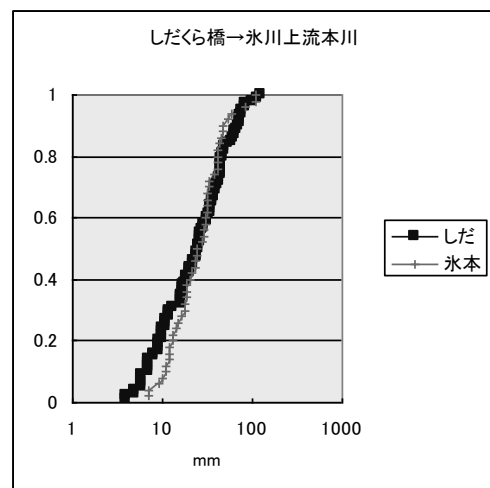


図-7 しだら橋と氷川上流本川の比較
(しだ：しだら橋，氷本：氷川上流本川)

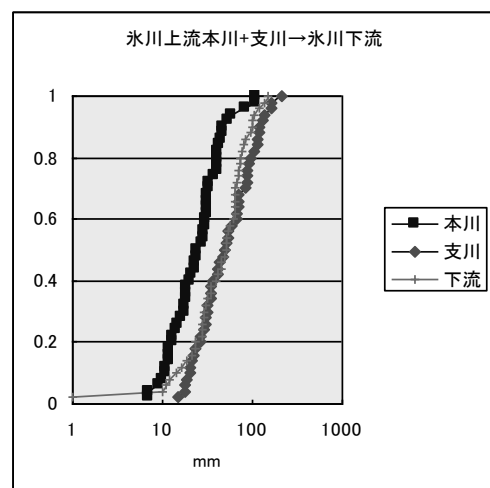


図-8 氷川上流本川+支川と氷川下流の比較

していることが確認できる。これは、ダムから氷川上流本川の間では地質特性が大きく変化せず、この区間で生産される砂利中心の細粒土砂で覆われているためである。中生代堆積岩は細粒土砂を多く産出するため、上流のさんじょう橋や下保之瀬橋で見られたような100mm以上の河床材料がダムで堰き止められてこれらの供給が減少すると、細粒分でそのほとんどが埋まってしまう。そのため全体的に細粒分が乗り、同じような粒度分布が形成されるため図-7のようになると思われる。

最後に、④氷川上流本川、⑤氷川上流支川、⑥氷川下流を同時に比較する（図-8）。図-5の観測サイト一覧を確認すると、大きな支川（日原川）が氷川地点で合流していることが分かる。日原川では、細粒分から粗粒分までを産出する上流域の土砂生産源から合流地点まで土砂をフィルタリングする構造物が無い場合、細粒分が卓越することはない（そのため、氷川上流支川と多摩川本川最上流のさんじょう橋は条件が重なり、粒径加積曲線が良く一致する）。一方、氷川上流本川では前述した通り細粒分が卓越している。結果として、本川と支川の粒径加積曲線を重ねたような河床材料が下流に現れる。

以上の考察から、ダム背水や支流の影響を知ることができた。なお本研究で調査を行った4河川では、ダム上流では背水が十分かからないような地点をとっており、またダム下流ではダムから2kmと距離で条件を決めているものの、多摩川における日原川のような大きな支流の影響は無いことが全ての調査地で確認できた。

5. 流域地質と土砂生産特性

本章では、どのような規模の流量が流れることによって各々の河床が形成されるのかを、ダムの堆砂量の年変化を追うことで解明する。

図-9は中生代堆積岩の地質をもつ荒川の二瀬ダムと、火山岩地質をもつ渡良瀬川の草木ダムの堆砂実績経年変化を比較したものである^{12), 13)}。二瀬ダムは1988年に上流に二瀬貯砂ダムが建設されたため、それ以降の堆砂量が鈍化している。そこで二瀬ダムについてはそれ以前のデータを、草木ダムについては竣工以来全てのデータを用いて比較する。

図に実線で示したのは、それぞれの河川で大規模な洪水が無く、中小洪水のみだった年のグラフの傾きである。大規模な洪水とは、便宜的に二瀬ダムではピーク流量が500 (m³/s) 以上、草木ダムでは1000 (m³/s) 以上のものとしている。これに該当する洪水は、二瀬ダムでは66年、74年、81年～82年に、草木ダムでは78～82年、85年、90年、98年、01～02年に起こっているため、図の実線はこれらの年を除外している。どちらのダムも、大規模な洪水があったときには大きな堆砂量の伸びを見せているものの、こうした洪水が無かったときには両者間に違いが

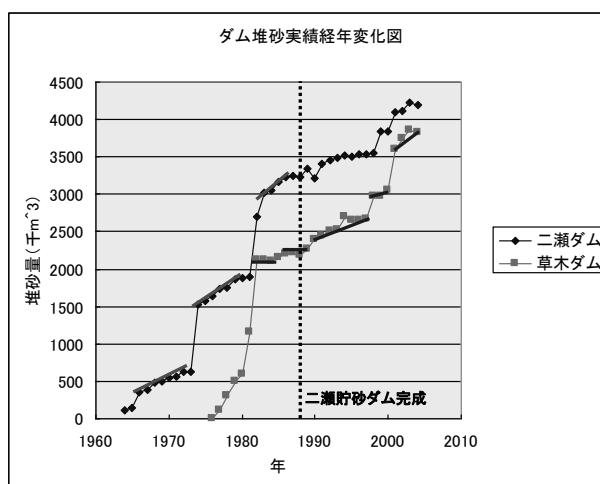


図-9 ダム堆砂実績経年変化の比較

見られる。

両河川の実線の傾きの平均を比較すると、二瀬が48.3 (千m³/年)、草木が29.4 (千m³/年)であり、さらにこれらをダムが受け持つ流域面積で割れば、二瀬が0.284 (千m³/年/km²) に対して草木が0.116 (千m³/年/km²) となる。これは、荒川では渡良瀬川に比べて単位流域面積あたりの中小洪水時に流れるような細粒土砂の生産が大きいことを意味している。

以上をまとめると、細粒土砂を多く含む中生代堆積岩の河川（多摩川、荒川）では中小洪水時にも土砂が流れ、河床が変化する。一方で、細粒土砂をあまり含まない火山岩の河川（渡良瀬川、中津川）では、中小洪水時には土砂があまり流れず、河床はほとんど変化しないと考えられる。

6. ダム下流の河床形成過程

以上の結果から、調査を行った全ての河川における河床の形成過程を考察する。

(1) 多摩川

風化特性より大礫をあまり産出しない中生代堆積岩を流域地質に持つこの河川では、ダムによるフィルタリング効果を受けても大礫で河床が覆われることはなく、アーマー化特有の固화가起こらない。そして、上流から大礫が供給されない状況で地すべり域を通過するため、中小規模の洪水時に細粒分が流されてきて、大礫は埋められる。そのため、観測結果のようにダム下流で細粒化が起これと考えられる。

(2) 渡良瀬川

火山岩が流域面積の大部分を占めているこの流域では、大礫の産出量が多い。そのため、ダムによって土砂がフィルタリングされると、下流では大礫で均質化され

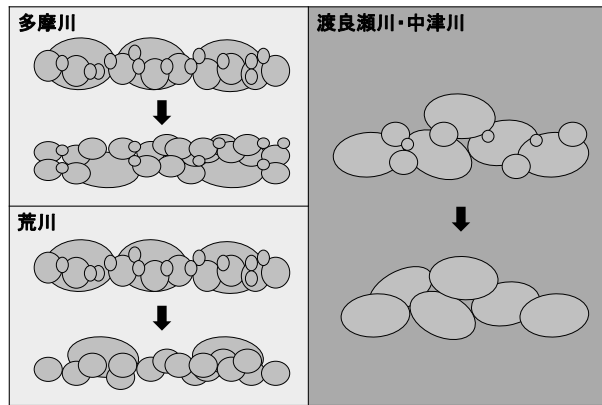


図-10 河床の形成過程まとめ（上が上流，下が下流）

た河床が出来上がり，噛み合って固化する。ダム下流における細粒分の土砂生産も少なく，また中小洪水では土砂が流れてこないため，静的で変化のない河床が出来上がる。

(3) 荒川

中生代堆積岩を流域地質に持つ荒川は，多摩川同様，大礫の産出量が少なく，ダム下流の河床が均質化して固化することは無い。一方多摩川と異なるのは，ダム下流の土砂生産である。今回選んだダム下流のサイト周辺には多摩川のような地すべり地域は無く，細粒分が頻繁に流されてくることは無い。そのため，細粒分の割合は上流よりは少なくやや粗粒化する。しかしながら，これは固化して動かない河床とは言い難く，アーマー化したとは言えない。

(4) 中津川

火山岩が流域地質の大部分を占めるこの河川では，大礫の産出量が多い。そのため渡良瀬川同様，ダムによって土砂がフィルタリングされると，下流では大礫で均質化された河床が出来上がり，噛み合って固化する。ダム下流における細粒分の土砂生産も少なく，また中小洪水では土砂が流れてこないため，静的で変化のない河床が出来上がる。

以上を模式図として表したのが，図-10である。

(2011.5.19受付)

7. 成果

本論文の成果を以下に箇条書きでまとめる。

- ・ダム下流河床の形成過程を解明した。
- ・大礫で均質化し噛み合って固化するアーマー化，大礫で均質化はしないが細粒分の割合が減少する粗粒化，

大礫で均質化せず細粒分によって河床が覆われる細粒化という3つの現象が生じることを示し，これらの違いは流域地質に起因することを導いた。

- ・アーマー化しない河床で細粒化するか粗粒化するかは，粒度分布だけでなく地すべりの有無が与える土砂生産との兼ね合いで決まると考えた。

参考文献

- 1) 芦田和男：ダム堆砂文献資料集成，河鍋書店，1976.
- 2) 辻本哲郎：ダムが河川の物理的環境に与える影響—河川工学及び水理学的視点から—，応用生態工学2(2)，pp. 103-112, 1999.
- 3) 池淵周一：ダムと環境の科学 I ダム下流生態系，京都大学学術出版会，2009.
- 4) 竹門康弘・波多野圭亮・山本佳奈・池淵周一・高津文人・永田俊：ダム下流域における底生生物群集構造の変化，平成16年度CREST研究概要，2004.
- 5) 田代喬・辻本哲郎：河床状態の変化に着目した矢作川中流域における河道動態とそれに伴う生息場の変質—底生魚・底生動物の分布と大型糸状藻類の繁茂に関する分析—，矢作川研究 No. 7，pp. 9-24，2003.
- 6) 池田宏・伊勢屋ふじこ・小玉芳敬：ダム上流の河床勾配変化—侵食性平衡勾配から堆積性平衡勾配へ—，応用生態工学2(2)，pp. 113-123，1999.
- 7) 伊勢屋ふじこ・池田宏：混合砂礫を用いた大型水路実験—混合効果による勾配の急変と堆積構造の違い—，筑波大学水理実験センター報告，10，pp. 125-134，1986.
- 8) 山本晃一：沖積河川学 堆積環境の視点から，山海堂，1994
- 9) 小出博：日本の国土 —自然と開発—（上），東京大学出版会，1973
- 10) 小出博：日本の国土 —自然と開発—（下），東京大学出版会，1973
- 11) 地すべり地形分布図データベース：
<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/>
- 12) 国土交通省関東地方整備局：荒川流水総合改善事業（実施計画調査），2006
- 13) 独立行政法人水資源機構：草木ダム定期報告書，2005