

河床堆積物の粒度組成に関する研究 —筑波大学における研究の展開—

Grain Size Distributions of River—bed Materials :
A Review of Studies at the Univ. of Tsukuba

小玉 芳敬*

Yoshinori KODAMA

I はじめに

河床堆積物の粒度組成は河川地形と密接に関連している(池田, 1985など)。本稿では, 1970年以降に本学で行われた河川地形の研究の中から, 特に実際河川における河床堆積物の粒度組成を対象としたものに焦点をあてレビューすることを目的とする。さらに河床堆積物に関する今後の研究課題の一つを指摘し, 水理実験センターにおける課題を明確にした。

本学では大きく分けて2つの考え方で研究が進められてきた。一つは, 河床堆積物の粒度組成を詳細に検討することで, 河川営力—特に流水との関係を考察する一連の研究である。他の一つは, 砂礫が運搬される過程で受ける破碎・摩耗作用との関係を考察する研究である。井口・目崎(1974a)も指摘したように, 河床物質がいかなる粒度組成を持つかは, 流水の作用と上流から運ばれる砂礫の性質との複雑な組み合わせの結果と考えねばならない。つまり, 本学で研究されてきた流水の作用と砂礫の破碎・摩耗作用は, どちらも河床堆積物の粒度組成の成因を明らかにするために欠くことのできない研究テーマである。以下それぞれにつき研究成果の概要を述べる。

II 流水との関係で捉えた研究

河床堆積物の粒径分布はHarding(1949)の方法により, いくつかの正規分布集団に分離できる。この手法を用いて, 井口・目崎(1974a, 1974b)をはじめとした一連の研究が盛んに行われてきた。つまりこれらの研究は, 一つの河床堆積物の粒径分布がいくつかの特有な粒径正規分布集団から構成されているとみなし, しかもそれぞれの正規分布集団が流水によって運ばれる岩屑粒子の運動形式と密接に関連していると考えた。そして堆積物の粒度組成がいかなる堆積環境を反映しているかを追求することが研究の目標とされてきた。井口ほか(1977)にこの分野での従来の研究の動向がまとめられている。また粒径集団分析の方法に関しては, 井口(1984)が石狩川の河床堆積物の実例を多数挙げて最も丁寧に説明している。

はじめに井口・目崎(1974a, 1974b)は, 多摩川・酒匂川・鬼怒川から採取された河床砂礫の試料を2~4つの粒径正規分布集団の合成として説明可能なことを示した。そして正規分布集団の平均粒径がほぼ $0 \sim 2 \phi$ (中・粗砂)にあるような集団をC集団と呼んだ。このC集団はすべての試料に認められ, しかもこの集団の粒度特性は, 他の集団に比べて画一性が高いため, 各試料の集団に統一的な名称を与える際の基準となった。最も粗粒な集団をA集

*筑波大学・水理実験センター

団, A 集団と C 集団の間にあらわれる集団を B 集団, C 集団よりも細粒な集団を D 集団とそれぞれ名称が決められた。なお B 集団と D 集団は試料によっては欠損する。

このように分離された粒径正規分布集団は, その粒度特性からみて, それぞれ一定の流送様式に関連して構成されたものと推測され, 水理量との関係が検討された。水理資料に関しては, 河道の諸特性と対応性が高いと一般に考えられている, 河岸満水時のものを対象にした。つまり, 調査河川の河床試料採取地点付近での河道横断測量図(建設省工事事務所の資料)から断面平均河道深を求め, さらに河道縦断形の近似曲線から各河床試料採取地点の平均的な河床勾配を得て, これらによって掃流力を求めた(井口ほか, 1977; Inokuchi, 1977; 井口, 1984, Inokuchi, 1989)。

このようにして得られた水理量と各集団毎の平均粒径の関係を Bagnold (1966) のダイアグラムにプロットすることで, A 集団は掃流物質に C 集団は浮遊物質に由来すると解釈され, D 集団に関しては wash load に由来するものと考察された。

同様な調査が信濃川で行われた(井口ほか, 1977; Inokuchi, 1977)。信濃川では酒匂川や鬼怒川と異なり B 集団が頻繁に認められたため, A・B 集団に関して流送様式が詳しく検討された。Bagnold (1966) のダイアグラムに流砂階限界を加筆した流砂階線図を用いることで, A・B 集団は, どちらも浮遊限界と始動限界の間の掃流物質に由来し, しかも高流砂階の段階に達したものであることが明らかにされた。

Bagnold (1966, 1973) 等の研究成果からすると, 高流砂階では底面に沿ってある厚さの saltation zone が出現し, その内部では底面から上方へ surface creep, saltation, suspension と様式の異なる粒子の運動状態が層状に出現することが想定される。ただし, それらの境界面の位置や運動様式, また粒子の粒径特性に関しては情報が限られており推察の域を脱し得ないが, 井口ほか (1977) では A 集団を surface creep, B 集団を saltation に由来するものと認定した。

以上のように正規分布集団にそれぞれ特有な流送

様式が対応することが推察されたが, その妥当性を実際河川での観測資料を基に検討した研究が 2 つある。一つは目崎 (1977) の信濃川における約 4 ヶ月にわたる掃流砂観測で採取された掃流砂の粒径分布からの検討である。他の一つはアメリカ合衆国の 8 河川で実測された浮遊砂の粒径分布資料を用いて解析した池田 (1979) の C 集団に関する検討である。両研究とも井口ほか (1977) で認定された各正規分布集団の流送様式を支持すると結論した。

目崎 (1977) は, 信濃川において土研式掃流砂採取器 2 型を用いて捕捉した掃流砂が, 井口ほか (1977) がその付近の河床から採取した河床砂と同様に A~D 集団から構成されていることを実証した。また各正規分布集団の流送様式を Bagnold (1966) のダイアグラムを用いて考察した。その際, 各集団の分級度などの粒度特性も考慮された。C 集団の構成割合は捕捉された河床砂試料のほとんどで半分以上を占め, これらは河床面付近を掃流砂と一体になって移動している浮遊砂に由来するものと考察された。さらに A・B 集団の構成割合は掃流力の増加に応じて増大すること, 一方 D 集団は流水の強さに依存せず一定量流送されることが示され, D 集団が wash load に由来することを支持した。また各集団の平均粒径に関しては, A 集団は流水の強さに対応して粒径を粗大化させるが, B・C・D 集団は流れに関係なく粒径をほとんど変化させない事実が報告された。この原因に関しては不明である。

池田 (1979) は, 実測された浮遊砂の粒径分布資料から wash load 成分を除いた粒径集団 (C_s) の粒度特性と, 各河川における河床砂の粒径分布資料から粒径集団分離した C 集団 (C_B) の粒度特性とを比較した。その結果, 両者の間には統一的な傾向が認められ, C 集団が suspension に由来することを支持した。

さて河床縦断形の成り立ちを考慮する場合, 単に河床砂礫全体の平均粒径で議論するよりも, 掃流砂礫の平均粒径で議論することに物理的な意味がある。そこで 2 つの河川を対象に研究が行われ, 粒径集団分析の有効性が示された。つまり, 石狩川において河口から 60km より上流側では, A・B 集団の粒径の

縦断的な分布が移動限界粒径に近い分布であることが(井口, 1984), またミシシッピ川において河床物質が掃流集団と浮流集団に分けられ, 掃流集団の中央粒径の分布と河床縦断形との間により対応があることが(Inokuchi, 1989), それぞれ示された。

以上の一連の研究で残された課題は, 各粒径集団と砂礫の流送様式とが1対1対応しているかどうかをより直接的に探る研究であろう。それには水路実験が有効な研究手段である。まず砂礫の流送様式を詳細に観察することが出発点で, いかにして砂礫の流送様式を定義し, さらに各流送様式に対応する粒径をどのような手法で測定するかを充分に検討する必要がある。特に実際河川を対象とする場合, 混合砂礫の流送様式に関する実験が必須であろう。この種の研究には, 現在世界中で多くの研究者が取り組んでおり, 優れた成果を出すにはユニークなアイデアが必要とされるであろう。

III 砂礫の破碎・摩耗作用との関係で捉えた研究

河床堆積物の粒径分布の成因を流水との関係で捉えた研究では, 特に沖積河川においては流水によるふるい分け作用が粒径分布を支配する主要因であると考えている。これに対して池田(1970)は, 流域の地質が異なる隣接する3つの河川(花崗岩流域, 古生層流域と, 両者の混合流域)で, 河床砂礫の粒径分布を岩種別に調べ, 最大粒径ばかりでなく中央粒径の下流方向への分布も一つの河川内では岩種毎に異なること, しかし河川が異なっても岩種毎に特有な分布を有することを示した。さらに河床砂礫全体の中央粒径の分布と河床縦断形との間には密接な対応関係が認められるのに対して, 岩種別に分けたときの中央粒径の分布は縦断形と対応関係がないことを明らかにした。このような事実は流水によるふるい分け作用では説明できない。つまり河床砂礫の粒径分布の成因として, 砂礫の細粒化のプロセスが重要であると指摘した。

小玉ほか(1989)は渡良瀬川下流部で河床砂礫の粒径分布ばかりでなく, 各粒径毎の礫の岩種構成を調べ, その縦断的な変化を明らかにした。一つの粒径階級内では, 流水による岩種の選択的な運搬は生

じないと考えられる。にもかかわらず, いずれの粒径階級で調べてもチャート礫に対する他の岩種礫の構成比率は下流方向に大きく変化した。この事実もまた流水によるふるい分け作用だけでは河床礫の粒径分布の縦断的な変化を説明できないことを示している。むしろ上流側では安山岩の巨礫が, 下流側ではチャート礫の中礫が, それぞれ礫径分布の骨格を成しており, 粒径分布には安山岩礫とチャート礫の細粒化プロセスの違いが反映されていると考察された。

そこで小玉(1990a)は, 渡良瀬川の現河床から採取した安山岩礫とチャート礫を用いて, 礫の破碎・摩耗実験を実施した。出水時に流送される礫が河床に静止した他の礫に衝突する現象を実験で模擬した点が従来の摩耗実験と大変異なる。実験の結果, 安山岩礫の巨礫は破碎されにくく, 摩耗作用で徐々に礫径を小さくすること, 逆にチャートの巨礫は容易に破碎されて細礫にかわること, 細礫に関しては安山岩礫はチャート礫よりもはるかに crush され易いこと等が明らかにされた。しかもこのような両岩種礫の破碎・摩耗特性は, 渡良瀬川における両岩種礫の礫径分布の縦断的な変化と調和的であった。つまり, 流水によるふるい分け作用だけでは説明できなかった岩種毎の粒径分布が, 実験から得られた破碎・摩耗特性で定性的ながら合理的に解釈された。

さて従来の摩耗実験から得られた礫の摩耗速度は極めて小さく, 実際河川での礫径の減少率は摩耗作用ではとても解釈できなかった(Kuenen, 1956など)。そのために現在多くの研究者は, 河床砂礫の粒径分布の成因を, 流水によるふるい分け作用で説明しようと試みている。ところが小玉(1990a)で得られた礫径の減少率は, 日本の多くの扇状地河川で測定された礫径の減少率にオーダーで一致した。つまり礫同士の衝突に伴い, 礫は破碎し礫径を急減させたからである。実際, 扇状地河川の河床礫表面には, 出水時の礫同士の衝突を物語る percussion mark が無数に観察され, また明らかに割れた形態を示す礫(割れ円礫)が, 安山岩礫の2~4割に達することが確かめられている(小玉, 1990b)。これは礫の同士の衝突にともなう礫の破碎作用が, 礫径の縦断分布

を決める重要な要因の一つであることを示している。

以上の一連の研究で、沖積河川における河床砂礫の粒径分布を岩種に注目して質的に分析した結果、流水によるふるい分け作用だけでは説明できない事実が明らかにされた。これらの事実は各岩種の破碎・摩耗特性で解釈可能であることが、礫の破碎・摩耗実験で実証された。

IV 今後の展望

河床堆積物の粒度組成を調べることで、我々は河川が地形形成に及ぼす役割を探ろうとしている。河川地形の成り立ちや変化速度等を論じる場合、結局流域での土砂収支が問題となり、これを理解するには砂礫の流送プロセスに関する研究と、流送過程で生じる砂礫の変質プロセスに関する研究の両者が必要である。前者に関しては現在世界中で多くの研究者が精力的に取り組み、混合砂礫における流砂量式の検討や流水による粒径のふるい分けプロセスの研究が盛んに行われている。一方後者に関しては、現在ほとんど研究されていないのが実状である。つまり、河床砂礫の破碎・摩耗に伴う変化の重要性が、まだ十分に認識されていない。

小玉(1990c)で指摘されているように、砂礫の破碎・摩耗作用は流域からの土砂収支を理解し、河床縦断形の成り立ちを考える上で、今後ますます重要になると思われる。掃流砂礫は運搬過程で破碎・摩耗され細砂・シルト・粘土等の細粒岩屑を生産する。これらは出水時に濁りとなり、浮遊状態で一気に流亡すると考えられる。つまり、掃流砂礫の量は浮遊物質を生産することで下流方向に減少する。このことは極めて重要な新しい認識である。

砂礫の破碎・摩耗プロセスに関する研究は、砂礫の変質まで考慮した土砂収支論を打ち立てる際に、近い将来必ず必要とされる研究分野であり、水理実験センターで今まさに取り組む絶好の機会といえよう。

謝 辞

本稿執筆の機会を与えていただきました筑波大学地球科学系・池田宏助教授に感謝いたします。

文 献

- 池田一雄(1979)：河床砂と浮遊砂の粒度組成について。筑波大学水理実験センター報告, 3, 55-64.
- 池田 宏(1970)：三重県, 朝明川・三滝川・内部川の河床縦断形について。地理学評論, 43, 148-159.
- 池田 宏(1985)：河床材料と河道の縦断形。水理工学シリーズ 85-A-3, 土木学会水理委員会, 1-13.
- 井口正男・目崎茂和(1974a)：沖積河川における河床砂れきの粒度組成について (I)。東京教育大学地理学研究報告. XVIII, 25-38.
- 井口正男・目崎茂和(1974b)：沖積河川における河床砂れきの粒度組成について (II)。地理学評論, 47, 545-556.
- 井口正男・磯部豊彦・河村和夫(1977)：沖積河川における河床砂れきの粒度組成について (III)。筑波大学水理実験センター報告, 1, 1-15.
- 井口正男(1984)：沖積河川の河道形態に関する研究。昭和56, 57, 58年度文部省科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書(課題番号56, 460, 194), 56p.
- 小玉芳敬・池田宏・伊勢屋ふじこ(1989)：渡良瀬川における粒径別岩種構成比の縦断的变化—沖積礫床河川における礫の破碎・摩耗効果の重要性—。筑波大学水理実験センター報告, 13, 13-25.
- 小玉芳敬(1990a)：ERC-ABRASION-MIXERによる渡良瀬川の河床礫の破碎・摩耗実験。筑波大学水理実験センター報告, 14, 115-130.
- 小玉芳敬(1990b)：梓川と寒河江川における“割れ円礫”の存在比率について。筑波大学水理実験センター報告, 14, 109-114.
- 小玉芳敬(1990c)：礫の破碎・摩耗による細粒物質の生成：東河内沢の礫を用いた回転ドラム実験。高山茂美編, 『河川における混合砂礫の流送機構の研究』—昭和62・63・平成元年度文部省科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書(課題番号62, 460, 235)—, 125-134.
- 目崎茂和(1977)：信濃川と板橋で観測した掃流砂の粒度組成。琉大法学部紀要, 20, 91-131.
- Bagnold, R.A. (1966)：An approach to the sediment transport problem from general physics. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 442-I.
- Bagnold, R.A. (1973)：The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water. *Proc. R. Soc.*

Lond. A. **332**, 473–504.

Harding, J.P. (1949) : The use of probability paper for the graphical analysis of polymodal frequency distributions. *Jour. Marine Biol. Assoc., New Series*, **28**, 141–153.

Inokuchi, M. (1977) : Grain size distributions of river bed material and their hydraulic interpretation. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **3**, 16–

21.

Inokuchi, M. (1989) : Channel morphology of the lower Mississippi River. *Trans. Japanese Geomorph. Union*, **10**, 83–94.

Kuenen, Ph.H. (1956) : Experimental abrasion of pebbles 2. Rolling by current. *Jour. Geology.*, **64**, 336–368.