礫の形状が河川中流域における 土砂の分級におよぼす影響 EFFECTS OF GRAVEL SHAPE ON THE SORTING PROCESS IN MIDDLE REACHES OF RIVERS

伊藤悠¹ · 知花武佳² · 原田大輔³ Yu ITO, Takeyoshi CHIBANA and Daisuke HARADA

 1学生員
 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)

 3学生員
 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)

This research showed that shape of a gravel has an effect on its transportation pattern and deposition area. A circular gravel has small critical tractive force and can be transported very quickly. It tends to roll and move linearly by inertia force. A flat gravel has larger critical tractive force and is transported slowly. It tends to slide and move smoothly along a streamline. These trends affect the sorting process in a river channel. Circular gravels are deposited on the upstream side of a weir where tractive power decreases. Flat gravels are deposited on the downstream side of a weir where is being eroded. Circular gravels move linearly and they tend to be deposited on the upstream edge of a dry riverbed. Since these sorting patterns occur during a recession period of a flood, they are not seen particularly in a river which has a sharp hydrograph.

Key Words : Gravel Shape, Mid Stream, Sorting process, Sediment Transport

1. 背景と目的

土砂水理学に関する研究^{例に(II),2)}においては,現地 調査の際に採取した礫の中間径のみを測定し,これを礫 径として扱ってきた.しかし,仮に中間径が等しい礫で も,その形状が異なればその外観は全く異なったものに なる(図-1).その結果,水流から受ける物理的作用も 異なるため,その移動特性は形状ごとに分けて考える必 要があると考えられる.礫の形状がどのように影響する かに関する研究は,土屋らの研究³⁾などがあるが,礫単 体の分析にとどまっており,礫単体の移動特性から実河 川における分級を説明するような研究とはなっていない. そこで,本研究においては礫の形状に着目した上で,そ れが実河川において土砂の土砂輸送にどのような影響を 与えるのかを分析し,土砂動態をさらに正確に理解する ための一助とすることを目的とした.

2. 礫単体の移動について



図-1 中間径が等しく形状の異なる礫

(1) 本研究における定義

本研究においては、礫の3つの径を、長径をa、中間 径をb,短径をcと表す.図-1からもわかる通り、礫の 平面的な大きさに比して、その高さが高いか否かでその 礫が水流から受ける運搬作用が大きく異なると考えられ る.そこでこうした形状の特徴を、Mcnown⁴⁾らによっ て定義された、以下の形状係数を用いて表現する.

$$s = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{1}$$

形状係数は0から1までの値をとり、0に近いほど礫の 断面が平たく、1に近いほど礫の断面が丸いということ を示している.



図-2 転動で動き始める時(左)滑動で動き始める時(右)

(2) 水路実験

礫単体の移動特性を考える上で、まずその様子を観察す るために水路実験を行った.水路は、幅30cm、勾配 1/12.5のものを用い、水路床には0.75mm: 22%、 1.5mm: 24%、3mm: 33%、6mm: 14%、12mm: 7%の 混合砂礫を敷き、流量0.222m³/minを5分流して、交互砂 州を形成させた.この中で最も粒径が大きな中間径が 12mmのものを対象に、形状係数が0.75以上の丸い礫は 黒く着色し、形状係数0.5以下の平らな礫は白く着色し、 それぞれの動きを観察した.

その結果,形状ごとに以下の4つの移動特性を確認した.1.移動開始の流量に関しては,丸い礫のほうが少ない流量で移動を開始したのに対して,平らな礫は流量が大きくなるまで移動を開始しなかった.2.同じ流量での移動速度は、丸い礫の移動速度が速く,平らな礫の移動速度は遅かった.3.移動形式については、丸い礫が転動しながら移動したのに対し,平らな礫は主に滑動で移動した.4.丸い礫は移動が速いため慣性力で直線的に移動したのに対し,平らな礫は流線に沿うように左右に振れながら移動した.

(3) 移動形態に形状が及ぼす影響の検討

実験によって観察された現象を説明するために,既往 研究⁵⁾を参考に,図-2に示す状況で転動または滑動を開 始することを考える.なお,礫に作用する揚力L,抗力 D,礫の水中重量W1,以下の式で与えられる.

$$\mathbf{D} = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \mathbf{C}_{\mathrm{D}} \rho \mathbf{u}_{\mathrm{b}}^2 \mathbf{A}_2 \mathbf{d}^2$$
(2)

$$L = \frac{\varepsilon_0}{2} \cdot C_L \rho u_b^2 A_2 d^2 \qquad (3)$$

$$W = \rho(\frac{\sigma}{\rho - 1})gA_3d^2 \qquad (4)$$

ここで、coti遮蔽係数、 C_D および C_L は抗力係数、 ρ は 水の密度、 σ は礫の密度、 U_b は局所近傍流速(着目礫中 心高さにおける流速)、 A_2 は2次元形状係数、dは中間径、 gは重力加速度、 A_3 は3次元形状係数を表している. する と、転動モデルにおける移動開始条件は、

$$L\sin\beta + D\cos\beta > W\sin(\beta - \alpha) \qquad (6)$$

となり, 滑動モデルにおける移動開始条件は



図-3 中間径が等しく形状の異なる礫

$$D + W \sin \alpha > (W \cos \alpha - L) \mu_f \qquad (5)$$

で与えられる.ここで、 μ_t は静止摩擦係数、 α は河床勾 配、 β は礫の離脱角(angle of escape)である.これらを整 理すると、転動及び滑動を開始するときの礫前面におけ る局所近傍流速はそれぞれ以下の式で表される.

$$u_{bc}^{2} = \frac{2A_{3}}{\varepsilon_{0}C_{D}A_{2}} \cdot \frac{\cos\alpha}{k_{L}} \cdot (\sigma/\rho - 1)gd \cdot \frac{\tan\beta - \tan\alpha}{\tan\beta + 1/k_{L}} (7)$$
$$u_{bc}^{2} = \frac{2A_{3}}{\varepsilon_{0}C_{D}A_{2}} \cdot \frac{\cos\alpha}{k_{L}} \cdot (\sigma/\rho - 1)gd \cdot \frac{\mu_{f} - \tan\alpha}{\mu_{f} + 1/k_{L}} (8)$$

ただし、 K_L =L/Dである.一方で、対数則を仮定する と礫前面の局所近傍流速 u_{bc} は次式で表される.

$$\frac{u_b}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(\frac{c/2}{ks}) + 8.5 \tag{9}$$

ここで、cは礫の短径であり、ksは相当粗度であるが、 ksがその場における平均的な礫径の0.5倍程度であり、こ の礫径を長径と中間径の幾何平均だと仮定すれば、ksを $0.5\sqrt{ab}$ として、次式のように形状係数を用いて表現で きる.その妥当性に関しては後に考察する.

$$\frac{u_b}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(s) + 8.5$$
 (10)

また,滑動ではなく,転動で移動し始める時の離脱角 βは,完全に球体の時に30度,ほぼ板状の時には真上 (90度)であるということを考え,形状係数で以下のよ うに表されるものとする.

$$\beta = 90 - 60s \tag{11}$$

さらに、無次元掃流力は以下の式で表される.

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} \tag{12}$$

式(7)または(8)を式(10)に代入し,式(10)を式



図-5 中津川と浅川における形状分布曲線

(12) に代入すると、滑動、及び転動を開始するときの 無次元限界掃流力が求まる.ここで式(11)及び遮蔽係 数 $co=0.4^{6}$ 、抗力係数 $C_D=1.0^{3}$ および $C_L=0.85^{8}$ 、 $\rho=1.0$ 、

 σ =2.65, $A_2=\pi/4$, $A_3=\pi/6$, $\mu_f = 1.0$ ⁷を代入し, 各限界掃 流力と形状係数の関係を示したのが図-3である.両方の 移動形式に関して,形状係数が大きくなるにしたがって, 限界掃流力が小さくなっていくことから,丸い礫ほど移 動しやすいという特徴,形状係数0.75以下の平らな礫に 関しては滑動で移動を開始するが,0.75以上の丸い礫に 関しては転動限界掃流力のほうが小さく,転動によって 移動し始めるという特徴が表せている.

なお、図-3でs=1.0(すなわち球)とすると、 $\tau_{*c}=0.02$ 程度となり、既往の知見^{例えばい}と比較して小さい.既往 研究ではksを平均的な礫径dと仮定する事で $\tau_{*c}=0.05$ 程度 となっており、本研究においてもksを \sqrt{ab} とすれば、 s=1.0の場合に $\tau_{*c}=0.05$ 程度となる.ところが、後に図-5 や図-6で示すように、実河川においてs=1.0の礫はほと んどなくs=0.5程度が中心である。そのため、本研究で 仮定したとおりs=0.5程度で $\tau_{*c}=0.05$ 程度になるというこ とは、実河川でも $\tau_{*}=0.05$ 程度で礫が移動することを意味 している。このような観点からも、ksを0.5 \sqrt{ab} とした.

3. 実河川における堆積傾向

(1) 調査対象地および調査手法

これまで見てきた礫単体の移動特性が,実河川におけ る堆積土砂の分級に及ぼしている影響を分析するために, 神奈川県厚木市の相模川水系中津川および東京都八王子



図-7 中津川における三砂州の位置関係

市の多摩川水系浅川において現地調査を行った.両者は 河川の規模や勾配に大きな違いがないものの,中津川は 上流域が主に火山岩地質であるのに対して,浅川は主に 堆積岩地質であるという違いがある.各河川中流域にお いて堰上下流の3砂州を対象として,礫の採取を行った. 採取方法は,河原の上流端,下流端のそれぞれの水際に おいて5m間隔で6箇所1辺60cmの格子枠を設置した後, 面積格子法を用いて15cm間隔の格子点から合計25個の 礫を採取し,それぞれの礫の*a*,*b*,*c*の長さを計測し た.合計すると,1つの水際については150個の礫を,1 つの砂州において300個の礫を採取し,計測した.

(2) 地質と粒径と形状について

まず、二河川における粒度分布を比較したものが、図 -4である.このように、中津川の方が浅川よりも粒径が 大きいが、中津川では火山岩地質由来の10cm大の礫が 多く産出されるのに対して、堆積岩地質はあまり産出し ないという一般的な傾向⁹⁾に加え、近年浅川では河床低 下に伴い基盤岩が露出し、大きな礫がとどまれないこと も影響していると思われる.

次に、形状指数の分布を比較したものが図-5である. ここでは、粒度分布を表す粒径加積曲線と同じ方法を用いて、何割の礫がその形状指数より小さい(平たい)か を示している.しかし、僅かに浅川の方が平たい方にシ フトしているものの、その形状分布にはほとんど違いが 見られない.すなわち、本対象区間に関しては、地質の 違いが礫の形状に現れていないと考えることができる.

また,各河川における形状係数を縦軸に,中間径を横軸にとった散布図が図-6であるが,中津川で相関係数





図-9 中津川N3砂州における上下流の形状の違い

0.12,浅川で0.09となり、礫の中間径の大きさと礫の形状の間には相関はないと考えることができる.

これ以降の考察は以上の2つを前提として議論することとする.

(3) 中津川における堰上下流の砂州同士の比較

中津川の対象区間である才戸橋周辺(図-7)における3 つの砂州上に見られた礫の形状分布は図-8のようになっ た.上流側の砂州N1における形状分布は下流側の2つに 比べて丸いという傾向が見られる.これは砂州の上下流 における掃流力の違いによって説明される.図-7中に示 したとおり中津川の河床勾配は堰の上流側で小さく、下 流側で大きい.そのため、洪水時には上流側では掃流力 が小さいのに対して、下流側で掃流力が大きくなる.洪 水減水期には上述した通り平らな礫が先に停止するが、 丸い礫はまだ移動しているという状況が生じる.そのた め、堰の下流側の急勾配区間では丸い礫が抜けていき平 らな礫が残存し、一方堰の上流では丸い礫のみが上流か ら転がってくるというメカニズムによって説明ができる.

(4) 中津川における砂州内の上下流水際の比較

次に、砂州の上流端と下流端で形状に違いが見られる かを比較した.砂州の発達が良くないN1やN2では明瞭 な傾向が見られなかったが、固定堰から十分離れ砂州の 発達したN3では図-9に示すとおり砂州上流側の水際の



図-12 浅川における三砂州上の礫の形状分布

方が、下流側と比較して丸い礫が多いという分級が見られた. なお、堰直上で発達の悪いNIの場合でも、分級がよく見られる位置が設定した水際にうまくのらなかっただけで、実際には図-10に見られるとおり、河原の上流端には丸い礫が多く、下流端に平坦な礫が多いということは視覚的に確認できた.

これも、固定堰上下流の分級と同様に、形状ごとの礫 の移動形式の違いによって説明できる.丸い礫は転動に よって移動するため、直進的に移動しやすい特性を持っ ていることは水路実験でも確認した.なお、普段は早瀬 となる、洪水時の流線と前縁線が交わる場所付近で、洪 水時の流線は片側の岸から反対側の岸へと動き、水衝部 が水みちに、水裏部が河原となる.丸い礫はこうした流 線に沿って曲がりきることなく、比較的直線的に砂州の 上流側に乗り上げるという現象が発生する.これによっ て多くの丸い礫が砂州の上流側水際付近に堆積する.ま た、砂州の下流端側には、これによって丸い礫の割合が 少なくなる上、洪水減水期にも抜け落ちていくためにそ の割合が小さくなるものと考えられる.

(5) 浅川における堰上下流の砂州同士の比較

浅川においても図-11に示すとおり中津川と同程度の



図-13 浅川A2砂州における上下流の形状の違い

スケールで堰上下流の三砂州において調査を行った. 浅 川でも、中津川同様に堰の上下流で河床勾配が大きく変 化していることがわかる. この三砂州の河原上にある礫 の形状分布を図-12に示す.

ここから見て取れるとおり,浅川では堰の上下流で勾 配が大きく異なるという特徴は中津川と同様であるにも 関わらず,形状分布に関しては,ほとんどその特徴を捉 えることができずどの砂州でも同じであるという結果に なった.

(6) 浅川における砂州内の上下流水際の比較

次に、浅川においても砂州の上流端と下流端で形状に 違いが見られるかを比較した.すると、中津川のN3と 同じように堰から離れたA2砂州において、図-13に示す ような違いが見られた.しかし、この下流にあるA3で も、堰上流にあるA1でもほとんど曲線が重なってしま い、明瞭な傾向が見られなかった.また、図-13を見る と、確かに上流側の方が全体的に丸いという特徴はでて いるものの、形状係数0.7付近と0.3付近のものの比率が 異なるという程度で、図-9に見られたように上流側に極 端に丸い礫が集中しているという特徴は見られない.す なわち、河原の上下流比較においても、中津川ほど明瞭 な分級が見られないという結果となった.

4. 考察

本研究では、水路実験により丸い礫と平たい礫が交互 砂州上をどのように動くかを観察して、おおよその特徴 を捉えた上で、その一部を水理学的に考察し、中津川で はその効果が堰の上下流、河原の上下流の分級という形 で現れていることを確認した.このように礫の形状に よって、浸食傾向の場所では平たい礫の方が安定しやす いことや、緩勾配区間でも丸い礫であれば比較的大きな 礫が転がって来やすいと言うことは、ごく自然な結果で はあるが、今後の河床低下対策や、河道内の生息場再生 を考える上では重要な知見であると考えられる.





しかし、問題はなぜそのようなごく自然な傾向が、浅 川では見られなかったかである。その原因として考えら れるのが、中津川と浅川における洪水時の水位変化の違 いである。図-14は中津川および浅川における典型的な 洪水時の水位の変化を示している。上流の宮ヶ瀬ダムで 洪水時に流量の調節が行われている中津川においては、 一定流量が放流されるため、この流量に該当する水位の 継続時間が長い。

中津川では、60%通過粒径がおよそ10cmであり、図-3 よりS=0.5程度の平たい礫の無次元限界掃流力が0.04程 度、S=0.8程度の丸い礫の無次元限界掃流力が0.027程度 と見積もることができる.これにより、代表粒径の内丸 い礫が動き出す水位と平たい礫が動き出す水位を求めた ところ、図に示す洪水は水際にある平たい礫を動かすこ とはなく、丸い礫がギリギリ動く程度であると言うこと がわかる.もちろん、勾配や礫径によってこの値は変化 するが、このような水位変化をすると、場所によっては 丸い礫ばかりを長時間輸送する可能性が指摘できる.

一方の浅川は、上流でのダム操作は行われないのみな らず、流域が都市化されているためハイドログラフが シャープになるのが特徴である.この浅川では、60%通 過粒径がおよそ6cmであることと、先ほどと同様の無次 元限界掃流力を考慮すると、図に示すように、丸い礫が 動き始めた直後に平たい礫も動き始め、平たい礫が停止 してから、丸い礫が停止するまでの時間も短いというこ とが見て取れる.

このような違いを考慮すると、現地において形状によ る分級があまり見られなかった理由は、このハイドログ ラフの違いにある可能性が大きいと考えられる.

5. まとめ

本研究では礫の形状が,土砂の選択的運搬作用にどの ような影響を与えるのかを示した.

水路実験によって以下のことが確認された. 丸い礫は 低めの掃流力で転動を開始し,動き出すと速度が速いた め,慣性によって直線的に移動する. それに対して平ら な礫は高めの掃流力で滑動を開始し,動き出しても速度 が遅いため,流線に沿うように移動していた.

水理学的な考察によって以下のことが示された. 礫は 形状が丸くなるほど,移動開始限界掃流が小さくなり, 形状係数0.75付近を超えて丸くなると,移動形式が滑動 から転動へと変化する.

実河川における調査では以下のことが確認された.礫 が産出された地質および礫の中間径は、今回の対象区間 では、その礫の形状との間に相関が見られなかった.し かし、それでも堰上流側の緩勾配区間においては、丸い 礫が多く堆積し、堰下流側の急勾配区間においては、平 らな礫が多く堆積していた.また、洪水時には、丸い礫 がその慣性によって直進し河原の上流端に乗り上げるた めに、砂州上流側の水際には丸い礫が多く堆積しており、 下流側には相対的に平らな礫が多くなる.中津川のよう にダムで水位を制御され、中小規模の出水が長く続く場 合には、両者の違いが際立ちやすいが、浅川のような シャープなハイドログラフを有する都市河川では、この ような違いが見極めにくい. 謝辞:本研究は、文部科学省 「グリーン・ネットワー ク・オブ・エクセレンス (GRENE)環境情報分野」の支 援のもとに実施されました.記して御礼申し上げます

参考文献

- 1) 河村三郎:土砂水理学1, 森北出版, 1982
- 2) 山本晃一:沖積河川,技報堂出版, 2010
- 土屋義人:水門下流部における洗掘限界に関する研究、土木 学会論文集,第82号,pp21-51,1962
- John S. Mcnown, Jakil Malaika : Effects of particle shape on settling velocity at low reynolds numbers, American Geophysical Union, Volume31, Number1, 1950
- 5) 辻本哲郎,中川博次:移動床流れの水理学,技報堂出版,新 体系土木工学,23巻,1
- 6) Horner, S. F. : Interference drag, chap8, Fluid-dynamic drag, p20, 1958
- 7) 岩垣雄一:限界掃流力の流体力学的研究,土木学会論文集, 第41号, pp1-21, 1956
- Chepil, W. S. : The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aero-dynamic forces on a soil surface, AGU, Volume9, No3, pp397-404, 1958
- 9) 小出博:日本の国土(上),東京大学出版会,1973

(2013.4.4受付)