

石礫の輪郭形状に着目した河床間隙の評価と 移動床現象に関する考察

DISCUSSIONS ON MODELLINGS OF BED INTERSTITIAL ZONES AND
BED LOAD INCIPIENT MOTIONS IN COBBLE BED RIVERS
WITH PARTICULAR REFERENCES ON BED-MATERIAL PARTICLE SHAPES

田代喬¹・畔柳諒輔²・岩田裕輝³・辻本哲郎⁴

Takashi TASHIRO, Ryosuke KUROYANAGI, Yuuki IWATA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名古屋大学准教授 減災連携研究センターライフライン地盤防災寄附研究部門
(〒464-8601 名古屋市千種区不老町1番地 名古屋大学減災館401室)

²学生会員 名古屋大学大学院博士課程前期課程学生 工学研究科社会基盤工学専攻

³非会員 工修 元 名古屋大学大学院博士課程前期課程学生 環境学研究科都市環境学専攻

⁴フェロー会員 工博 名古屋大学大学院名誉教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(²⁻⁴とも 〒464-8603 名古屋市千種区不老町1番地 名古屋大学工学部9号館)

Conventionally, the particle shape of bed-material has not been taking into account the modelling of channel bed with sediment transport in the fields of fluvial hydraulics and environmental management. The objectives of this study is to check the effects of particle shape not only on the sediment transport process, but also on the bed interstitial zone as a condition of habitat environments.

Firstly, it is examined whether the bed-material particle shapes are characterized as the properties of channels and their watersheds or not. Secondly, it is described that the bed interstitial zones are formed due to the difference of particle shapes. And then, the critical tractive force on bed load incipient motion could be reevaluated by using the classical hydraulic modelling with ellipsoidal particle approximated by its tri-axial lengths, finally.

Key Words : Particle shape, bed interstitial zone, sediment incipient motion, cobble bed river

1. はじめに

河床材料として存在する石礫は、上流域の山地で生産された後、流送過程において一時的に留まったものであり、その特性は生産地の地質によって異なる¹⁾。石礫の幾何学的特性の一要因である輪郭形状は、サイズ(粒径)、オリエンテーション(定方性)とともにその輸送に大きな影響を有すると指摘されてきた²⁾。

今日、石礫河川の移動床現象は、粗大な粒径集団による作用が大きく、低平地の沖積河川のそれと比べて記述しきれていない現象が多く残されている³⁾。近年、不連続な粒度分布や大きく異なる河床間隙率に着目するなどして数多くの検討が行われてきているが⁴⁾、これらの基盤にあるのは球形粒子を前提とするモデル化である。過去には、地質学者Krumbein²⁾だけでなく水工学者Lane & Carlson⁵⁾も、石礫粒子の輪郭形状が輸送特性に及ぼす影響について言及したが、これまで粒子の輪郭形状を流砂等のモデルに反映した事例は非常に少ない。

本報告では、従来計測されてきた3軸径による簡易な

石礫の輪郭形状把握に基づき、その輪郭形状が河床間隙の形成と移動床現象に及ぼす影響を論じる。はじめに、同一地域で石礫特性の変異の著しい二河川における観測結果の分析を通じ、石礫形状が河道・流域特性として位置付けられるか検証する。続いて、異なる形状の石礫が形成する河床間隙の明示的区別を試みて生息場所利用の観点から考察を行う。さらに、粒子の初期移動機構に関する滑動モデルを援用した理論的考察により、輪郭形状の違いが石礫の掃流限界に及ぼす影響について考察する。

2. 河道・流域特性としての石礫の輪郭形状

(1) データ収集、解析方法

調査地は、三重県を流れる櫛田川水系の仁柿川と相津川とした。両集水域は隣接するも中央構造線によって分断されており、仁柿川は領家帯(主に花崗岩(深成岩)を産出)、相津川は三波川帯(主に結晶片岩(変成岩)を産出)といった性状の異なる単相な地質帯を流れ、瀬・淵における粒度分布⁶⁾、拳大以上の大礫の輪郭形状

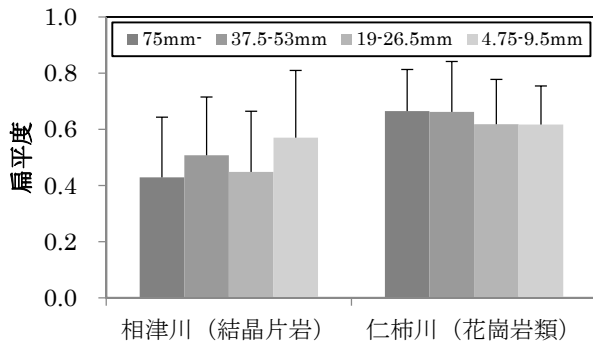


図-1 河川 (地質), 粒径によって異なる石礫の扁平度

が異なること⁷⁾が報告されている。ここでは、各河川の平瀬で材料を採取し、ふるい分析によってサイズ分画された各集団の石礫 (75mm以上, 37.5-53mm, 19-26.5mm, 4.75-9.5mm) から無作為に抽出した試料 ($N=19\sim24$) の長径, 中径, 短径を計測した。これらから輪郭形状を表す指標として, 長短度 (=中径/長径), 扁平度 (=短径/中径) を算定した⁸⁾。得られたデータについては, 正規性・等分散性を確保するために逆正弦変換を行ったうえで, 流域地質 (河川), 粒径サイズを二要因とする二元配置分散分析を実施し, 地質 (河川) や粒径の違いによる輪郭形状の違いを調べた。

(2) 地質・粒径が石礫形状に及ぼす影響

解析の結果, 長短度は地質 (河川), 粒径間に有意な違いは見られず (交互作用有), 扁平度について地質 (河川) 間における有意差 ($P < 0.001$) が確認された (交互作用無)。事後検定の結果, 仁柿川 (領家帯) と相津川 (三波川帯) の間に有意差が検出された (Scheffe's F test, $P < 0.01$)。図-1には, 各石礫の扁平度に関する結果を示す。

これまでに, 著者ら⁹⁾はふるい分析や摩耗・破碎試験で観察し, 拳大の大礫では直接に見出すことで, 両河川 (地質) における石礫の輪郭形状の違いを報告してきた。本報ではさらに, 粒径サイズによらない明確な傾向となって見出されたことから, 少なくとも調査地の二河川における石礫の輪郭形状は, 河道・流域特性の一つとして位置付けられたものと考えられる。なお, 既報通り, 結晶片岩 (相津川) の石礫は, 岩塊から層状剥離して派生するために扁平な形状を有する一方, 花崗岩類 (仁柿川) の石礫は, 花崗岩特有のタマネギ状風化の過程で「芯」として残るコアストーン由来の玉石が多く含まれていたこと¹⁰⁾を申し添える。

3. 石礫形状に着目した河床間隙の評価

(1) 石礫からなる河床間隙の模式化とその定量

河床間隙空間を模式化するに当たり, 石礫形状をその

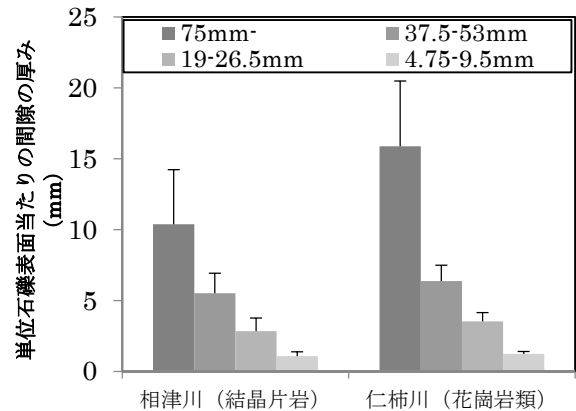


図-2 河川 (地質), 粒径によって異なる間隙の厚み

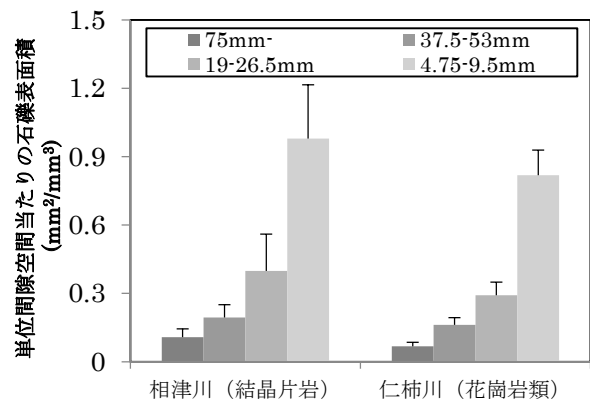


図-3 河川 (地質), 粒径によって異なる間隙内の石礫表面積

直交する3軸径からなる楕円体で表現すれば, 近似式⁹⁾と公式によって石礫の表面積と体積が推定できる。この石礫体積をそれと接する直方体の体積から差し引けば, 石礫が周囲の間隙空間として派生し得る最大体積 (間隙空間ポテンシャル) が得られる。ただし, この間隙空間ポテンシャルは元の楕円体, あるいは, 近接する直方体の体積から見て定率になることには注意を要する。

(2) 形状の異なる石礫が生み出す間隙ポテンシャル

図-2には, 間隙空間ポテンシャルを石礫表面積で除した間隙の厚みを, 図-3にはその逆数をとった石礫表面積についての結果を示す。石礫扁平度と同様に変数変換を行ったうえで解析したところ, いずれも地質 (河川), 粒径間における有意差 ($P < 0.001$) が確認された (いずれも交互作用無し, $P > 0.001$)。次元を有するため, 粒径間における有意差は自明であるが, 地質 (河川) 間でも有意差が検出された。このことから, 河床の間隙空間ポテンシャルは石礫形状によって異なることが定量的に示されたものと考えられる。なお, それぞれの特徴として, 扁平な結晶片岩からなる相津川では, 河床間隙も狭くて薄いものの, (そこに入り込むことができれば,) 接地可能な石礫表面は大きく広がっているのに対し, 玉石からなる仁柿川では間隙は大きく入り込みやすいもの

の、設置可能な石礫表面は相対的に小さいことが併せて明示された。

(3) 生息生物からみた河床間隙ポテンシャルとその意義

図-2の縦軸は、単位表面積当たりの間隙空間ポテンシャルの厚みや深さを示すのに対し、図-3のそれは、間隙空間に入り込むことができた場合の（単位体積当たりの）接地可能な表面積を示している。いわゆる”vice versa”の関係にある両者であるが、底生動物の生活型分類¹¹⁾などに鑑みれば、前者は浮き石帯（あるいは、透かし礫層）を好む造網型などの広い間隙を必要とする生物、後者は匍匐型や固着型など扁平な体型を有し、石礫表面を利用する生物やより微小な間隙内微生物（メイオファウナ）などにとって深く関係することは自明である。

間隙空間ポテンシャルは、石礫が最も緩く堆積した状態での間隙を表すが、いわゆる「浮き石」状態の河床間隙に相似したものと類推される。この状態を基準としながら現象把握することにより、実河床の間隙空間を系統的に表現できる可能性が示唆されたと言えよう。

4. 石礫の移動限界状態に関する理論的考察

(1) 形状を考慮した石礫の無次元限界掃流力

流水中に置かれた石礫が滑動によって掃流輸送される状態を想定し、石礫が流れから受ける抗力を F_D 、石礫に作用する河床の摩擦力を F_f とすれば、次式が成り立つ。

$$F_D = F_f \quad (1)$$

この際、石礫を前記のように楕円体によって表現し、静水圧近似が成り立つとすれば、次のように記述できる。

$$F_D = \frac{\pi}{8} \rho C_D b c u_b^2 \quad (2)$$

$$F_f = \frac{\pi}{6} \mu_f \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g a b c \quad (3)$$

ここで、 a ：石礫の流下方向長さ（長径）、 b ：同横断方向長さ（中径）、 c ：同水深方向高さ（短径）、 ρ ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 u_b ：石礫に作用する代表高さ（ y_b ）における流速、 μ_f ：静止摩擦係数、 g ：重力加速度、 σ ：粒子の密度である。なお、移動限界状態を対象とし、鉛直方向に対数則が成立する場において y_b は石礫高さ c の1/2相当と仮定すれば、 u_b は次のように推定できる。

$$\frac{u_b}{u_{*c}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y_b}{c} + 8.5 \cong \frac{1}{\kappa} \ln \frac{1}{2} + 8.5 \cong 6.77 \quad (4)$$

ここで、 u_{*c} ：限界摩擦速度、 κ ：Karman定数(0.4)である。一方、無次元限界掃流力 τ_{*c} は次式で表されることから、

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{(\sigma/\rho - 1)gc} \quad (5)$$

この式に式(1)～(4)を代入して整理すれば、以下の関係が導かれる。

$$\tau_{*c} = 0.0291 \frac{\mu_f a}{C_D c} \quad (6)$$

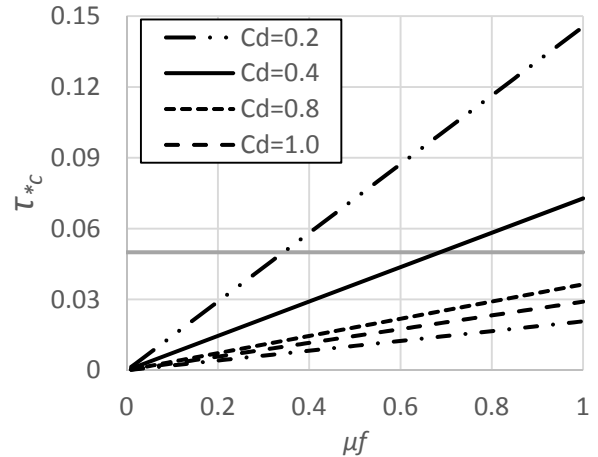


図-4 抗力係数をパラメータとする球形粒子に関する静止摩擦係数と無次元限界掃流力の関係

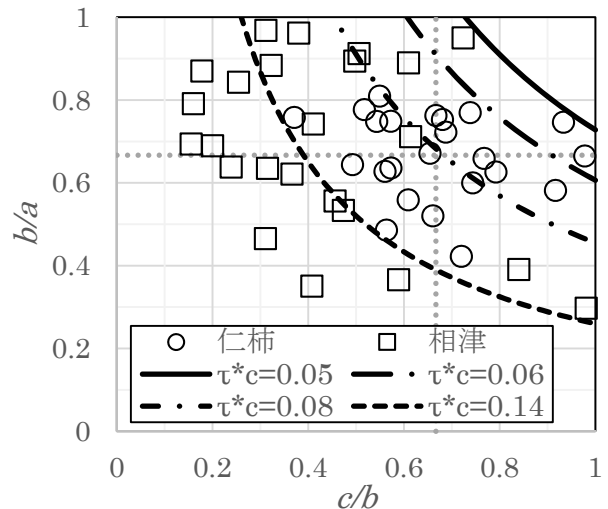


図-5 調査地の石礫（75mm以上粒子）に関するZingg[®]の形状分類と τ_{*c} の関係（ $C_D=0.4$ 、 $\mu_f=0.5$ として作成）

式(6)において球形粒子（ $a=c$ ）を対象とした場合の C_D をパラメータとする μ_f と τ_{*c} の関係を図-4に示す。例えば、レイノルズ数の十分に大きい条件下で多用される球の抗力係数（ $C_D=0.4$ ）は、 $\mu_f \cong 0.7$ （内部摩擦角 $\phi \cong 35^\circ$ ）との組合せで $\tau_{*c} = 0.05$ （岩垣式¹¹⁾など）を呈することが確認できる。その一方、抗力係数（水流に面する形状など）だけでなく、静止摩擦係数や内部摩擦角（河床への接地状況）によっても、無次元限界掃流力は大きく変動し得る指標であることが理解されよう。

(2) 形状の異なる石礫の掃流限界条件

式(6)における無次元限界掃流力の制御因子のうち、石礫の輪郭形状に関わるものは上記抗力係数のほか、長径 a と短径 c の比が含まれている。そこで、実河川で観察された石礫(図-1参照)のうち、粒径75mm以上の粒子について、Zingg⁸⁾の提案した形状分類として再整理したものを図-5に示す。なお、図中には $C_D=0.4$ 、 $\mu_f=0.5$ として描ける、 τ_{*c} 一定の曲線を複数併記した。

Zingg⁸⁾によれば、図-5は両軸の数値0.67を閾値(点線で表記)として4つの象限に分類することができ、左上の第一象限は円盤状、右上の第二象限は球状、左下の第三象限は板状、右下の第四象限は棒状の粒子形状を呈するとされる。実際に計測された石礫のプロットから、右上の球状に近い形状ほど、 τ_{*c} は小さくなっているのに対し、左下の板状に近い形状ほど、より大きな τ_{*c} を必要とする様子が確認できる。今回の整理により、相津川に多く見られる扁平な形状の石礫は、仁柿川の玉石に比べてより移動しにくい特性を有することが改めて浮き彫りになった。Lane and Carlson⁹⁾は、扁平な形状の石礫が動きにくい原因について、河床に「瓦状」に重なって存在するところに求めたが、扁平な粒子形状を有する石礫は、河床に単独で存在した場合にも動きにくくなることが示されたと言えよう。なお、本検討では、石礫の輪郭形状が掃流限界に及ぼす影響を明らかにしたが、こうした要因が流砂の移動形態、さらには、河床形態にどのように影響を及ぼし得るかまでは考察できていない。流砂の移動形態に関しては滑動を扱っているに過ぎず、他の運動形態も含め、改めて詳細な検討が必要になると思われる。ただし、河床形態に及ぼす影響に関しては、式(6)で示したような、掃流限界の変更を考慮するだけでも多少の考察は可能かも知れない。これらの流砂-移動床モデルへの展開については今後の課題である。

5. おわりに

本研究では、石礫の輪郭形状に着目し、現地で観測された河床材料の諸元の整理から、1) 河道・流域特性としての一般性の検証、2) 生態系機能の側面から河床間隙評価への適用、3) 移動床過程における掃流限界条件の再記述といった具合に議論を進めた。その過程で得られた主な成果は、以下に集約される。

- 1) 石礫の輪郭形状について、粒径サイズによらず河川(地質)に対応した特徴と成り得ることを観測データから実証的に示した。
- 2) 石礫形状をその3軸径からなる楕円体として近似し、その表面積、体積などの推定により、河床間隙空間ポテンシャルとして評価し、実河床間隙の系統的評価に向けた有用性を考察した。
- 3) 石礫粒子の初期移動機構に関する掃流滑動モデ

ルを援用した理論的考察から、輪郭の違いが石礫の掃流限界に及ぼす影響を明らかにした。

石礫の輪郭形状に関しては、地質・地形学分野では古典的な研究対象であるが、それが流砂機構を変化させ、生態系の多様性を担保しているといった展望は含まれなかった。本研究ではその新たな展開の一端を見出したが、このように異なる学問領域に跨って現象記述しようとする試みは依然として少ないようである。

今後、生態系管理などを主眼とする応用的な学問体系を再構築するに際し、境界領域に根差した視点を持ちながら、既知と信ずる基礎事象を改めて深く掘り下げ、理論を再構築する必要性が生じている。本稿がこの種の取り組みを活性化させていく一助になれば幸いである。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募地域課題分野(平成25～27年度、代表：田代喬)の一環として実施した。ここに記して御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 相澤泰造：三重の地質と斜面リスクマネジメント。(財)三重県建設技術センター，津，120p，2005。
- 2) Krumbein, W.C.: Fundamental attributes of sedimentary particles, *Proceedings of the Second Hydraulics Conference*: June 1-4, 1942. Iowa, pp.318-330, 1943.
- 3) 福岡捷二：石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋，土木学会／水工学委員会・海岸工学委員会，水工学シリーズ08-A-1, A-1-1-A-1-25, 2008。
- 4) 堤大三，藤田正治，M. Sulaiman：混合砂礫河床材料の空隙に関するシミュレーションモデル。水工学論文集，第50巻，pp.1021-1026，2006。
- 5) Lane, E.W. and Carlson, E.J.: Some observation of the effect of particle shape on the movement of coarse sediments, *Transactions of American Geophysical Union*, Vol.35, No.3, pp.453-462, 1954.
- 6) 田代喬，登立公平，辻本哲郎：流域地質構造が河床材料特性の流下方向変化に及ぼす影響，河川技術論文集，Vol.14, pp.121-126，2008。
- 7) 田代喬，辻本哲郎：流域地質の異質性からみた山地河川の河床材料構成と底生動物の関係：櫛田川流域における現地観測，応用生態工学，Vol.18, No.1, 2015(印刷中)。
- 8) Zingg, T.: Beitrag zur Schotteranalyse, *Schweizer Miner. Petrogr. Mitt.*, Vol.15, pp.39-140, 1935.(直接参照していない)
- 9) 藤岡奨，牛島省：多相流場の解法による上昇気泡群の気液界面面積評価。第25回数値流体力学シンポジウム，E11-1, 8p，2011。
- 10) 竹門康弘：底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価，日本生態学会誌，Vol.55, pp.189-197，2005。
- 11) 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，pp.1-21，1956。

(2015. 4. 3受付)