

山地河川における河床砂礫の粒度分布の形成に関する研究

Study on the formation of particle size distribution
of river bed materials in mountainous rivers.

山田正*・大前智敬**

By Tadashi YAMADA and Satoyuki OOMAE

The objectives of the present study are to clarify the physical mechanism regarding to the formation and downstream variation of particle size distribution of bed materials in rivers. In the field observation carried out, we measured the abrasion rate of many cobbles put on river bed during snowmelt flood and their downstream migration distance. The numerical simulation of the newly proposed equation shows the relative importance of the two mechanisms of selective sorting and abrasion due to the differences of the geological features of bed materials.

Keywords: particle size distribution, selective sorting,
gravel abrasion

1. はじめに

本研究は山地河川における河床砂礫の粒度分布の形成に及ぼす選択分級作用および粉砕・摩耗の効果について、実河川における野外調査と数値モデルによる検討を行ったものである。野外調査では年間を通して流量が一番大きくなる融雪期間に礫を河川中に設置し、礫の粉砕・摩耗量を測定している。次に粉砕・摩耗および選択分級の両作用を考慮した河床材料の粒度分布に関する理論式を導入し、これを数値計算することにより粒度分布の形成と流下方向への変化に与える特性量とその効果が検討されている。

2. 従来の研究

砂礫河川の流下方向における縦断粒径分布の特性変化は、次にあげる二つの要因によって説明されてきた。(1)粒径のより細かい土砂が優先的に下流方向へ運ばれ、大きい粒径土砂が順に上流に残されるという選択分級作用。(2)個々の土砂が衝突したり、擦れ合ったりして粒径が減じるという粉砕・摩耗作用。また風化等による粒径減少などがある。歴史的には、Sternberg⁽¹⁾による先駆的な研究があり、その中で彼は摩耗に関するモデル式をたて、砂礫が流下方向に移動する間に粒径が指数関数的に減少するといういわゆる摩耗説を起

* 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 学生員 北海道大学大学院 工学研究科土木工学専攻
(同上)

こしている。その後日本では矢野・土屋・道上⁽²⁾により実測および理論的研究がなされている。彼らの研究により流下方向の粒度特性変化は上流部では大きい砂礫の方に peak 値がある非対称な分布を示しているが、中流部ではピークが二つある分布を示し、さらに下流部では正規分布に近い分布になっていることが示された。さらに彼らの理論研究により河床材料の粒度分布に関する上記の特性は選択分級作用に強く依存していることが明らかにされた。その後山本⁽³⁾は多くの河川における粒度分布の流下方向変化と河川の縦断形状の関係について以下のような性質を見出し出している。すなわち、砂利から砂河川に急変する原因として、日本の河川で、砂を河床材料として持つセグメント(ほぼ同一勾配を持つ区間)では、粒径 2cm 以上の河床材料は小出水では動けないような水理量になっている。さらに、砂をセグメントとする所では沖積層の下部に砂利層があり、その砂利層の縦断勾配は、現河川の砂利をセグメントに持つ上流のセグメントとつながっていることが多い。この粒度分布の特性変化の原因の説明として彼は選択分級効果を掲げている。これらの説に対して小玉・池田・伊勢屋⁽⁴⁾は渡良瀬川の河床材料の粒度分布と各粒径ごとの岩種に関する現地調査を行っている。この中で彼らは粒径階級別にみても岩種の構成比は下流方向に変化するという実測結果を見だし、もし選択分級作用のみならば同一の粒径階級の岩種の構成割合は一定のまま上下流に維持されるべきだとして、粒度特性における破碎・摩耗作用の重要性を述べている。また、Parker⁽⁵⁾は洪水による河床砂利の選択分級と摩耗の機構の組合わされたモデルを構築し、河川の縦断形を説明する理論を提案している。その中で彼は、より細かい礫や砂はそれより粒径の大きいものにより遮蔽されて動きづらいとして選択分級作用をとり込み、一方摩耗は掃流土砂と静止している土砂との二つの衝突によってシルトを作り出すとして解析している。

3. 調査概要

3.1 調査方法

上記の研究の現況を鑑み本研究では粒度分布の形成に関する基本的な資料収集を行う目的で、融雪期間中の礫の重量減少に関する野外実験を行った。実験では石狩川水系白水仙(図-1)を対象とし、ここに重量測定をあらかじめした礫を多数設置し、洪水後の重量測定を行い摩耗量を算出している。白水仙は札幌市の南西部に位置する無意根山に源を発し、豊平川支川薄別川に合流する山地河川で、主流路長6.7km、流域面積12.89km²、平均勾配1/20である。礫の設置場所は図-2に示す400m離れた2箇所である。調査方法では川辺の礫を50個サンプリングし、ペンキを塗布した後、その重量を測定した。その後1989年11月13日に設置し、1990年7月20日に回収するまでの北海道で年間を通して一番流量が大きくなる期間中、礫を川の中に放置しておいた。

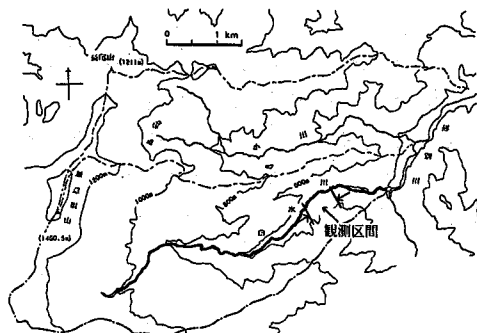


図-1 白水仙の流域概形

(長谷川ら⁽⁶⁾の文献：山地河川の分岐流路形態とその変動—白水仙調査より—より引用)

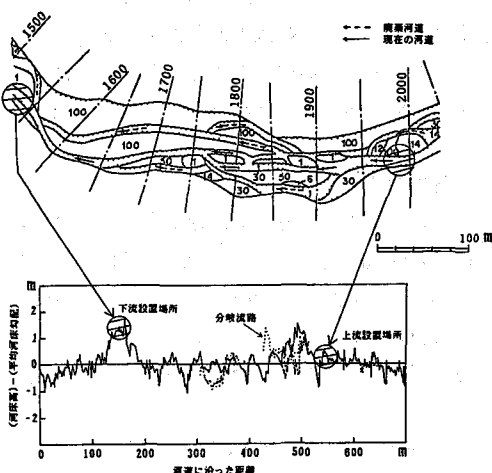


図-2 礫の設置位置の河川の平面図および縦断面図

(長谷川ら⁽⁶⁾の文献：山地河川の分岐流路形態とその変動—白水仙調査より—より引用)

3.2 調査結果

融雪終了後の礫の回収率はおよそ80%であった。回収時の礫の状況は以下のである。礫が発見された場所は、(1)ステップ・プールのプール部、(2)大きな礫に寄り沿うような礫の上流側の部分、(3)大きな粒径の礫の間などであった。そのほか、(4)回収した礫は河床土砂の中にもぐり込んではおらず河床表面に存在していた。(5)礫が動いた距離の範囲は、大きな粒径の礫も小さな粒径の礫もほぼ等分布で、およそ50~80mであった。中にはほとんど動いていない礫もあれば、400~500m動いた礫もあった。(6)

礫に塗ったペンキは礫の角の部分剥けており、丸い礫は剥げ方は少なかった、などである。

図-3はもとの礫の重量 M に対する回収後の重量 M' の減少率を示している。この図より重量減少率は粒径の大小でみると、小さな粒径の礫の方が大きな粒径の礫に比べて減少率は多少大きな傾向をみせるものの大きな差はなく、ほぼ0.3%程度の一定値を示している。測定時の礫の状態から判断すると、角ばっている礫の方が重量の減少が大きく、丸みを帯びた礫はあまり変化がなかった。図中に示す粒径は比重を2.6として重量より計算した換算粒径である。

図-4は設置期間中の計測されたハイドログラフである。図中の破線は平均流速公式としてHey式の射流に対する式

$$\frac{U}{\sqrt{ghi}} = 5.75 \log \left(\frac{ah}{d_{84}} \right) \quad (1)$$

と限界掃流力の公式を用い、そのときの流

量で移動しうる最大の粒径を示したものである。ここに、 $a=11.16$ 、 $d_{84}=0.25(m)$ 、 $i=1/20$ である。この図および回収時の礫の存在状況より、大粒径の礫の移動する期間は比較的短く、一方小粒径のものは移動期間は長いものの上述のように遮蔽効果を受けて停止しやすい。既述のように粒径の大小や形状の違いによる移動距離の差の少ないことや、重量減少率の粒径による差の少ないことなどは、このような砂礫の移動特性に起因しているものと考えられる。

4. 粒度特性に関する解析

本節では選択分級および粉碎・摩耗の両効果を考慮した粒度分布の形成とその流下方向変化を理論的に考察する。ここで粉碎・摩耗過程の数学的表現においては粉体工学の考え方を用い、これに分級の効果を粒径別に移流速度が異なるとして表現する方程式を新たに提案する。

4.1 粒度特性を表す基礎式

選択分級作用および粉碎・摩耗作用を表す基礎式は質量の保存を考えると以下のようになる。

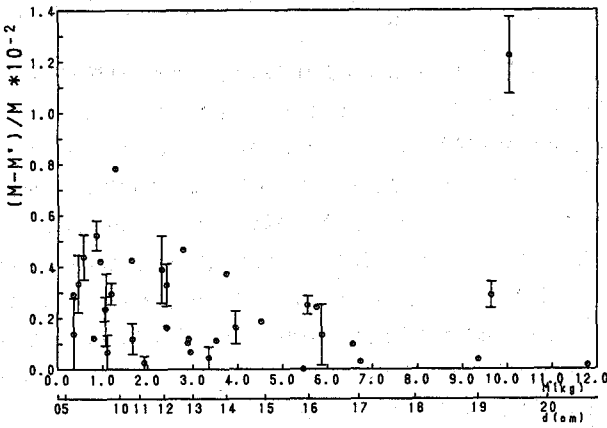


図-3 礫の重量減少率

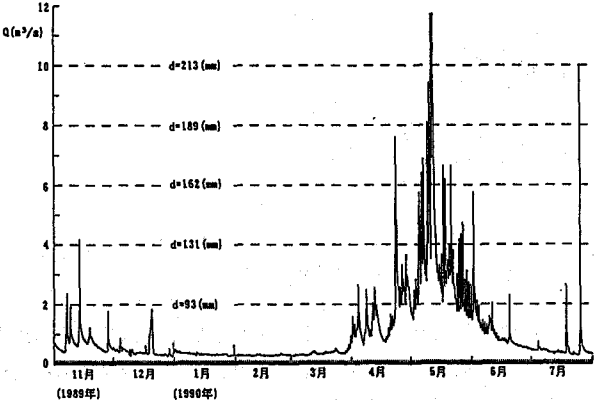


図-4 設置期間中のハイドログラフ

$$\frac{\partial f(r, x, t)}{\partial t} + c(r) \frac{\partial f(r, x, t)}{\partial x} = -f(r, x, t)S(r) + \int_r^{r_{\max}} f(p, x, t)S(p)C(r, p)dp \quad (2)$$

ここに t は時間、 x は流下距離を示す。 $f(r)dr$ は掃流砂および浮遊砂として河道を流下移動している砂礫のうち、粒径として $r \sim r+dr$ の間に存在する割合である。左辺第2項は粒径 r の砂礫の移流速度である。右辺第1項は単位時間に粒径 r のものが粉碎して、 r より小さいものが生成する割合を示し、 $S(r)$ は単位時間当たりの粒径 r の粉碎される割合である。また右辺第2項は単位時間に粒径 r より大きい粒径 p のものが粉碎されて $r \sim r+dr$ になる割合の積算を示し、 $C(r, p)$ は $p \geq r$ で p がこわれて $r \sim r+dr$ になる遷移確率である。なお $c(r)$ 、 $S(r)$ および $C(r, p)$ の特性量は本来未知数である $f(r)$ の関数であり、かつ時間的には非定常なものであり、本質的には非定常の係数を持つ非線形微積分移流（拡散）方程式で表現されるものであろうが、本研究では取扱いの簡便さと上式の解の基本的な特性を検討する目的から上記のように線形微積分方程式として取り扱う。

4.2 数値計算の方法と解析結果

粉碎・摩耗作用は $S(r)$ と $C(r, p)$ の二つの関数を、また分級作用は粒径別移流速度 $c(r)$ を定義することにより記述することができる。特性量 $c(r)$ 、 $S(r)$ の関数形としてそれぞれ(3)、(4)式、 $C(r, p)$ の関数形としては3通りのものを考え(5-A)、(5-B)及び(5-C)式を採用した。

$$c(r) = v_0 \exp(-ar) \quad S(r) = k \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^n \quad (3, 4)$$

$$C(r, p) = m \left(\frac{r}{p} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{r} \quad (5-A)$$

$$C(r, p) = \frac{1}{p} \frac{1}{B(q, s)} \left(\frac{r}{p} \right)^{q-1} \left(1 - \frac{r}{p} \right)^{s-1} \quad (5-B)$$

$$C(r, p) = \frac{1}{p} \frac{1}{B(q_1, s_1) + B(q_2, s_2) + bB(q_3, s_3)} \left\{ \left(\frac{r}{p} \right)^{q_1-1} \left(1 - \frac{r}{p} \right)^{s_1-1} + \left(\frac{r}{p} \right)^{q_2-1} \left(1 - \frac{r}{p} \right)^{s_2-1} + b \left(\frac{r}{p} \right)^{q_3-1} \left(1 - \frac{r}{p} \right)^{s_3-1} \right\} \quad (5-C)$$

ここでは粒径別移流速度 $c(r)$ を一定値として選択分級作用がなく、粉碎・摩耗のみの効果を考えた場合と、粒径によって移流速度を変えて選択分級と粉碎・摩耗作用を同時に考慮にいたした場合の2通りの結果を比較している。いくつかの粉碎・摩耗の形態を考え $C(r, p)$ の形状として3つの式(5-A、B、C)に対応する図-5-A、B、Cの三つの場合を考えた。第一は礫が完全粉碎をおこし、大礫がこごなごに粉碎し非常に小さい粒径になる割合が大きい場合(図-5-A、式5-A)、第二は大礫が壊れて中間の小礫になる割合が大きい場合(図-5-B、式5-B)、第三に礫が摩耗されほぼ同径のものが残ると共に非常に小さい粒径のものが生産される場合(図-5-C、式5-C)である。ところで地質による岩石の物理的風化作用の相違は虫明⁽⁷⁾によって定性的にまとめられている。これを参考にしつつ上記の3つの式形を解釈すると、図-5-Aは花崗岩、頁岩、砂岩などにあたる。図-5-Bは石英斑岩などであり、図-5-Cは石灰岩、安山岩、玄武岩などにあたる。以下では(2)式を基にして数値計算を行った。上流端の境界条件は全ての粒径に対して $f(r, x=0, t)=1$ とし、初期条件として $f(r, x, t=0)=0$ の比較的簡単な場合を取り扱っている。

粒度分布が定常に達したときの結果が図-6に示されている。縦軸は各粒径における質量分率、横軸は粒径である。各図面に続く下の図は横軸の粒径 r を ϕ スケールで表示したものである。これらの図より以下のことがわかる。

- (1) A-a、A-bは粒径の小さい方に向かって単調に増加しているが、B-a、B-bやC-a、C-bはある粒径においてピークを持つ。
- (2) B-aとC-a、B-bとC-bを比べると分布形状は似ている、C-a、C-bの方が細かい粒径の割合が大きく、ピーク

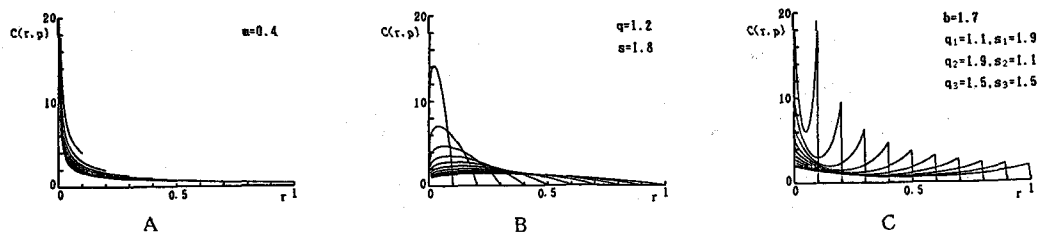


図-5 粒子の粉碎・摩耗遷移確率 $C(r, p)$ の例

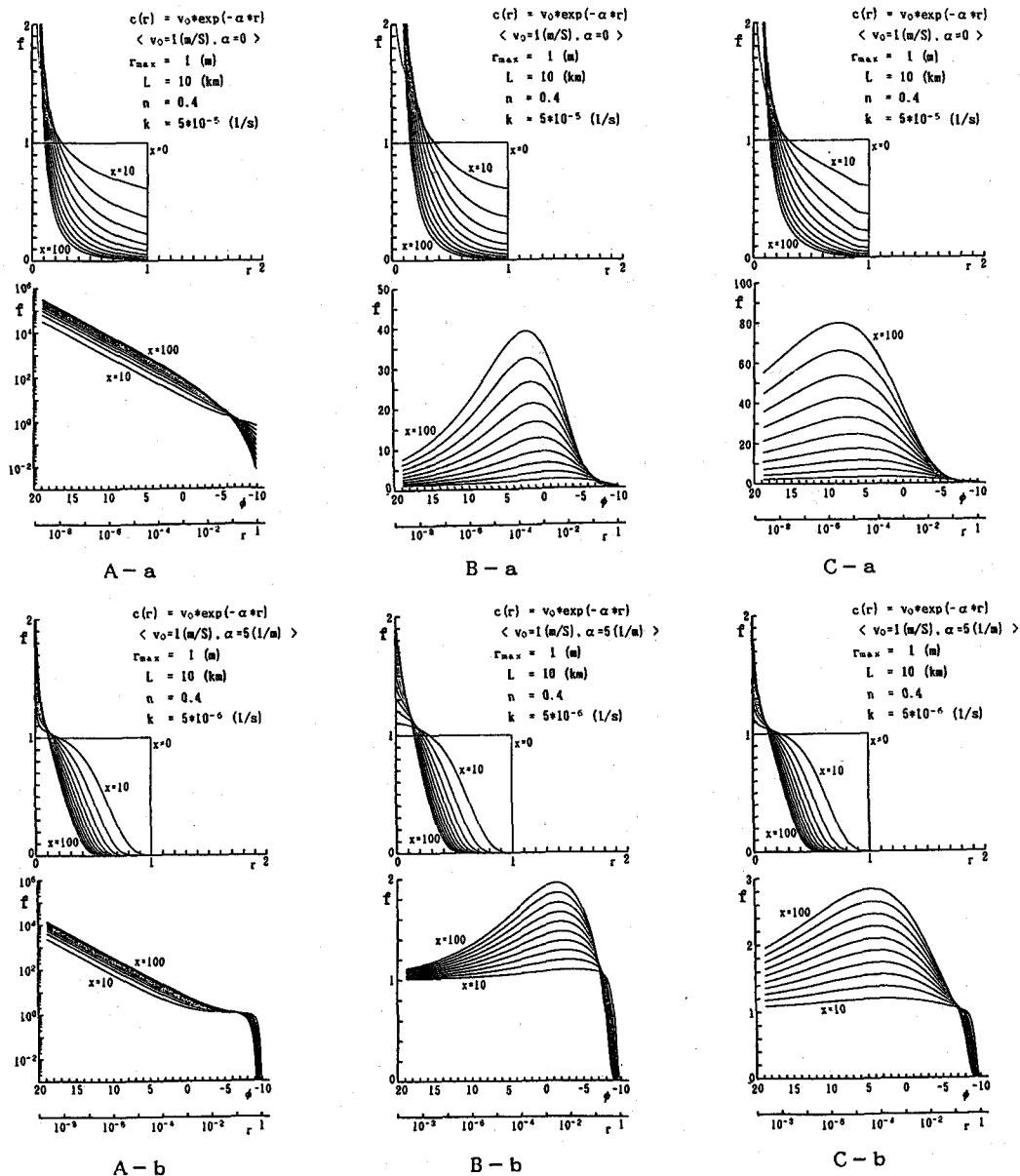


図-6 流下距離 x をパラメータとして表した粒度分布 $f(r)$
(下図は粒径 r を ϕ スケールで表現したもの)

は粒径の小さい方に移る。

(3) 流下距離 x の値が大きくなるにつれて、粒度分布のピーク値が粒径の小さい方へ移っていくのがわかる。

(4) 粒径別に移動速度が違う場合、大きい粒径は速度が遅いため、ある断面(x の値)を通過するまでに粉碎されてしまい、大きな粒径の値は粒径別移流速度が全ての粒径につき一定の場合よりかなり小さくなっていく。

(5) 粒径別に移動速度が違う場合、一定速度の場合に比べて f の値は小さい。

以上のように、遷移確率 $C(r, p)$ の形状の相違によって、粒度分布 $f(r)$ の形状は大きく異なっていることがわかる。

5. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、次のようになる。実測においては、

(1) 礫が動いた距離は粒径の大小に関わらずほぼ等分布であった。大きな粒径の礫の移動する期間は比較的短く、一方、小さい粒径の礫は比較的長いものの遮蔽効果により停止しやすいことによるものと考えられる。

(2) 粒径の大小に係わらず重量減少率は0.3%程度であり、詳細にみれば小さい粒径の方が若干大きい。

数値計算においては、

(3) 選択分級作用および粉碎・摩耗作用を表す基礎式を提案した。この中に現れる3つの水理特性量 $c(r)$ 、 $S(r)$ および $C(r, p)$ の関数形を定義することにより、粒度分布の形成とその流下方向変化を表現することができる。

(4) 遷移確率 $C(r, p)$ の形状により、粒度分布 $f(r)$ の流下方向の変化は大きく異なる。単調減少タイプの $C(r, p)$ をとるとき粒度分布は、粒径の小さいものが流下につれて急激に増大し、単峰形あるいは双峰形の $C(r, p)$ をとるときは、粒径の小さいある値の近傍でピーク値をもつ単峰形を示す。

(5) 粒径別に移動速度が異なる場合、分級作用のために大きい粒径の礫は急速に減少する。

以上より、粉碎・摩耗をあらわす数学表現としては遷移確率 $C(r, p)$ であり、その関数形に大きく依存している。一方、選択分級の効果は粒径別移動速度の違いとして表現し得ることがわかった。

謝辞 本研究において野外調査を行うにあたって、北海道大学土木工学科の長谷川和義先生に多大なるご支援をいただいている。また、本研究は、文部省科学研究費・重点領域(1)(代表 山田正)の補助のもとに行われている。ここに記して深甚なる謝意を表す。

参考文献

(1) Sternberg, H : Untersuchungen über Längen und Querprofil geshieße führender Flüsse, Zeitschrift für Bauwesen Jahrg. xxv., pp.484~506, 1875.

(2) 矢野勝正・土屋義人・道上正規：沖積河川における河床砂れきの特性の変化について、京大防災研年報、第12号B、1969.

(3) 山本晃一：ミニ河川講座 [1] ~ [5]、(財)河川情報センターニュース、1988~1989.

(4) 小玉芳敬・池田宏・伊勢屋ふじこ：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、No.13、pp.13~25、1989.

(5) G. Parker : Downstream variation of grain size in gravel rivers : abrasion versus selective sorting, 私信.

(6) 長谷川和義・石川伸・高橋一浩：山地河川の分岐流路形態とその変動—白水川調査より—、土木学会北海道支部論文報告集第46号、pp.269~274、1990.

(7) 小出博：日本の国土(上)、東大出版会、1973. 8pp.59~64

(8) 藤田重文・東畑平一郎：「化学工業Ⅱ、機械的操作」、東京化学同人.