

沖積河川における河床砂れきの特性の変化について

矢野勝正・土屋義人・道上正規

ON THE CHANGES OF CHARACTERISTICS OF BED MATERIALS IN AN ALLUVIAL CHANNEL

By *Katsumasa YANO, Yoshito TSUCHIYA*
and *Masanori MICHIE*

Synopsis

The authors investigated characteristics of the bed materials of the Hira River flowing into the west side of Lake Biwa of which the basin area is 11.58 km². It was found that the distributions of size frequency of the bed materials were classified three patterns, such as skew distributions in an upstream reach of the river, distributions with binominal peaks in a middle reach and log-normal distributions in a downstream reach. Changes of these distributions of size frequency of the bed materials with distance can be explained by the sorting effect of running water.

An equation for calculating the distribution of size frequency of the bed materials is proposed on the basis of the assumption that the sand and gravel of maximum size in the bed materials are in the critical condition for movement. Calculated values of the maximum and median sizes, standard deviation and skewness of the bed materials are in good agreement with observed ones.

1. 結 言

河道を構成している河床砂れきの粒度分布の距離的变化は、河川に関する種々の問題を考える上において重要なものであり、たとえば河道計画の樹立にあたって、それは必須の条件となるものと考えられる。また、地形学的に河川をみたときに、河川上流部から下流部にかけて、河床砂れきの粒度特性が変化する様相は興味ある現象であるといえよう。こうした河床砂れき径の距離的变化を説明するために、Sternberg¹⁾は砂れきの摩耗説を提案した。周知のように、彼の考え方は砂れきが流送される間に河床との衝突によってその砂れきは摩耗し、しだいに小さくなり、砂れき径は距離に関して指数関数的に減少するというものである。このような考え方はその後多くの研究者によって検討され、はたして摩耗によって砂れき径が減少して現在の河道を構成しているものであろうかという疑問がもたれてきた。

Lokhtin²⁾はSternbergの考え方に疑問をもった一人で、彼は掃流力と砂れきの抵抗とが釣合った状態で砂れきが河道に配列されるものと考え、Sternbergの法則と類似な式を導びいた。わが国では、安芸³⁾が限界掃流力に対して河床砂れきの混合状態を示すパラメーターを導入し、さらにSternbergの法則を広義に解釈して、河床砂れきの平均粒径の距離的变化をあらわす式を導びいている。上述の諸式は比較的大きな代表砂れきを対象としているものであって、巨視的には現象を説明しているようであるが、粒度分布についてはなんら考察されておらず、検討の余地が残されているように思われる。

一方、速水^{3), 4)}は長年揚子江中下流部において、詳細な河床砂の調査を実施し、平衡状態の河道における河床砂の粒度分布をあらわす式を導びいた。浮流砂が重要な役割を演ずる安定な河川中下流部の河床砂の粒度分布は、彼の式を用いると、砂粒子の沈降速度と流水の摩擦速度との比によって一義的に決定される。しかしながら、わが国の河川のように河状係数が大きいところでは、速水の考え方が適用できるかどうかは疑問である。

著者らは河床砂れきの粒度特性の距離的变化が、河川上流部から供給される砂れきの粒度特性に強く依存しており、それが河川における流水の輸送能力に基づいて、河道に配列されるものと考えている。ところが、山地河川では、ある地点の河床表面を構成している個々の砂れきは、その地点にこれまで滞在してきた時間がそれぞれ相違しているために、単純な力学モデルで河床砂れきの粒度分布特性を説明することは、きわめて困難なようである。したがって、河床砂れきの粒度分布の距離的变化に関する統一的な理論あるいは理解を深めるためには、流域を構成している岩石の風化機構および土砂の生産機構などを包括するような地形学的な見方に立脚した河川学と、河川における比較的時間スケールの短い現象の説明に用いられている土砂水理学とを融合させることが必要であろう。

さて、巨視的に河床砂れきの粒度分布の距離的变化をみた場合、河川上流部では砂れきの移動限界で規定されるようであるが、一方河川中下流部のように全河床砂がたえず移動しており、しかも浮流砂が支配的であるような状態では、すでに速水によって提起されているように、河床からの砂粒の flux によって規定されるような河床砂の粒度分布構成がなされるところと考えられる。後者に関する考察は平衡状態の河床のもとで、速水⁴⁾や芦田および道上⁵⁾によってなされている。

ここでは、前者の現象を対象として、河川に関する情報量を広げるために、比良川の河床砂れきの調査を実施して、河床砂れきの粒度分布ならびに形状特性が、流下距離とともにどのようなパターンに移行していくかを把握し、さらにこれらの調査結果に基づいて、限界掃流力の理論を用いた若干の考察を試みるつもりである。

2. 比良川流域および調査方法

びわ湖西岸に流入している比良川を調査流域に選んで、河床砂れきの粒度および形状特性の距離的变化を

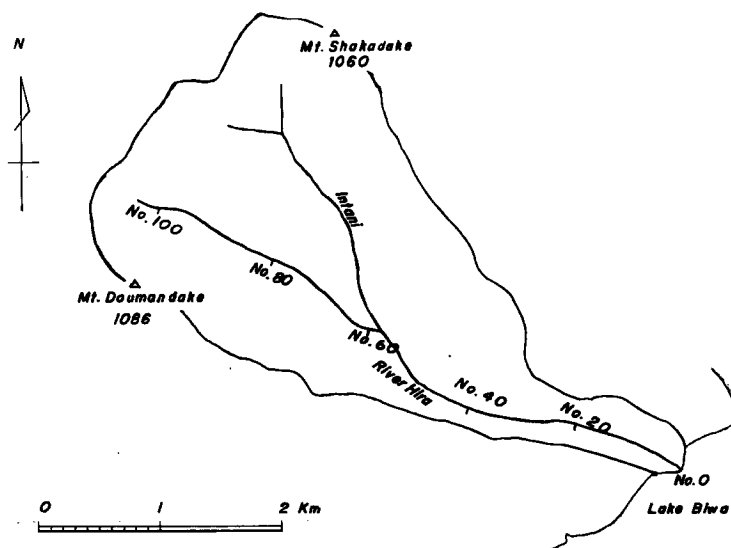


Fig. 1 Hira River basin.

調査した。比良川流域は、Fig. 1 に示すような羽状流域で、その流域面積は 11.58 km^2 であり、比良川本川の流路延長は約 5 km の山地河川である。イン谷と合流点より上流部の比良川の流域面積は、それぞれ 3.25 km^2 と 4.19 km^2 で、ほぼ両者は等しくなっている。比良川流域の上流部には、多数の山地崩壊がみられ、比良川は流出土砂量のかかなり大きい河川である。流域は花崗岩と古生層から構成されており、流域内において花崗岩の占める割合は圧倒的に大きく、古生層は山頂の一部に若干みられる程度である。したがって、河道を構成している砂れきは花崗岩の風化物質からなっていた。

河床砂れきの調査はつぎのようにして実施された。河川横断方向については、3地点の河床表面の砂れきをそれぞれ約 20 kg 採取して、断面内の河床砂れきの平均化を期した。河川縦断方向には、約 200 m 間隔に比良川本川に沿って砂れきの採取を実施した。なお、河川上流部の巨れきは採取が不可能であったので、写真撮影によって粒度分布の測定を行なった。採取した砂れきを標準網フルイを用いてふるい分けし、重量百分率でその粒度分布を表示した。また、各粒径ごとにふるい分けられた70個の試料を無作為に抽出して、砂れきの三軸長を測定し、その砂れきの形状を Corey の提案した形状係数によって表示した。

3. 河床砂れきの特性

(1) 河床砂れきの粒度特性

従来河床砂れきの粒度分布を表示する方法として、主として加積曲線による方法が用いられてきた。しかしながら、こうした表示方法によると、詳細な粒度分布のパターンが理解しにくいので、ここでは加積曲線とヒストグラムの2つの方法を用いて表示した。かくして、河床砂れきの粒度分布から得られる河川の情報量を広げることにした。ヒストグラムを用いて表示した比良川の河床砂れきの粒度分布の数列を Fig. 2 に示す。

こうした方法はすでに地形学の分野で使用されているが⁹⁾、 ϕ スケールで表示したヒストグラムにおいて、比良川の上流部では右に非対称な分布であって、大きい砂れきの占める割合が圧倒的に大きい。一方、中流部における粒度分布は binominal peak を有する分布に変化しており、きわめて特徴のある分布形を呈している。さらに、下流部における分布形は、中流部の binominal peak のうちの一方に相当する大きい peak の粒径が消失して、正規分布に近い形に移行している。比良川の河床砂れきの粒度分布は大別して以上の3つの形に分類される。このような傾向は河川において、しばしば観測される事実⁹⁾であって、中流部において binominal peak があらわれるということは興味深い現象である。この河川の資料に基づいて考察すれば、上流部で右に非対称であった分布形は下流に移行するにしたがって変形し、大きい粒径の peak 値の減少とともに binominal peak が顕著に現われてくる。比良川では、binominal peak を有する分布の極小値は、 $d_0 = -2 \sim -4$ ($4 \sim 16 \text{ mm}$) で生じている。このような河川において、ある粒径範囲の砂れきが欠損しているのは、速水⁷⁾が指摘したような輸送形態の差異に基づくというよりは、むしろ流域を構成している岩石の風化機構に関係しているか、または支川の影響によるものではないかと推察される。

つぎに、Fig. 3 は河床砂れきの特性の河道に沿った距離方向の変化を ϕ スケールで表示したものである。図中の Md_ϕ 、 σ_ϕ および α_ϕ は、それぞれ中央粒径、標準偏差および歪度をあらわしている。河床砂れきの中央粒径は上流から下流方向に次第に減少しているが、標準偏差および歪度は No. 52 地点を境界にして上下流の傾向が相違している。No. 52 地点より上流側では、写真撮影によって粒度分布の測定を行なったので、粒径 1 cm 程度以下の砂れきは測定範囲外となったために、このような相違があらわれたものと思われる。したがって、No. 52 地点より下流に限定すれば、標準偏差は河口付近で急激に減少しているが、その他の地点ではほぼ一定している。一方、歪度は上流から下流方向に変化して、河口付近では粒度分布形が対称になることを示している。

Lokhtin¹⁾ が提案した移動限界係数 (coefficient of fixation) i/d を用いて資料をプロットしたものが Fig. 4 である。ここに、 i : 河床こう配および d : 砂れきの直径をあらわしている。この図のこう配と中央粒径との比の距離的な変化をみると、binominal peak が顕著にあらわれる地点 (No. 28) より上流側で

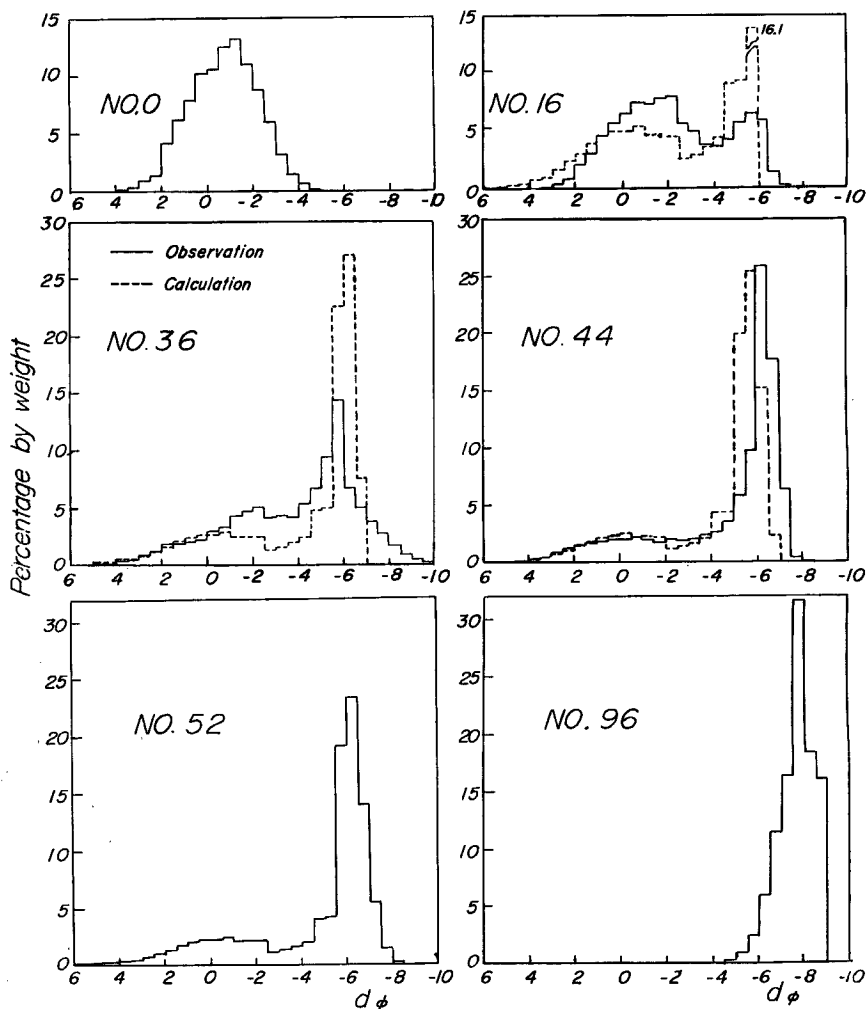


Fig. 2 Distributions of size frequency of bed materials in Hira River.

は、それはほぼ一定しているが、それより下流側では i/d_{50} は急激に増加しはじめる。binominal peak が顕著にあらわれる地点までは、中央粒径はこう配に比例するが、それより下流では比例しなくなることを意味している。しかしながら、binominal peak の大きい粒径の peak 値の砂れき径を d_{LP} であらわし、小さい方のそれを d_{SP} であらわすと、上流部の i/d_{50} と i/d_{LP} はほぼ一致して一定となり、上流側では i/d_{50} 、また下流側では i/d_{LP} の値がそれぞれ一定になる関係が成立するようである。したがって、以上の事実から、大きい砂れきは、その地点の限界掃流力と釣合った状態で河道を構成しており、こうした山地河川の河床砂れきの粒度分布の考察を進める場合には、大きい砂れきの移動限界が重要であることを暗示している。

(2) 河床砂れきの形状特性

河床砂れきの形状は流砂に関して少なからず影響を与えるはずであるが、現状では流砂理論が砂れきの形状を議論するほど完成されていないので、この方面に関する研究はあまりなされていないようである。一般的には、輸送形態の差異に基づいて、すなわち浮流形式で輸送される砂粒子は角ばっており、掃流形式で輸

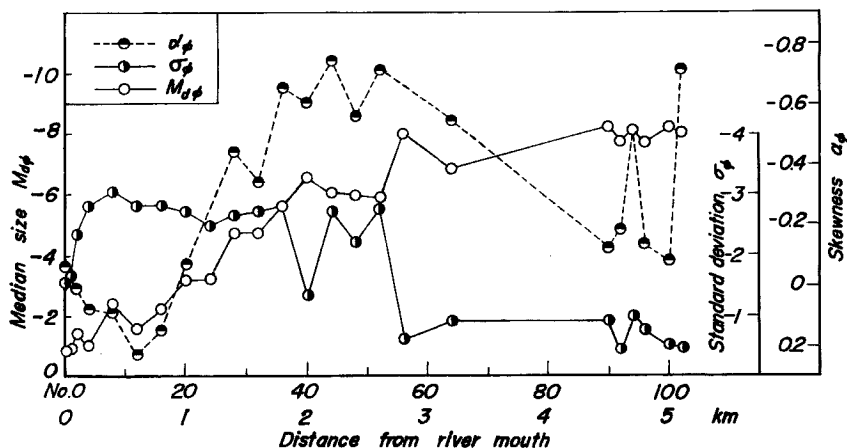


Fig. 3 Variations of median size $Md\phi$, standard deviation $\sigma\phi$ and skewness $\alpha\phi$ with distance.

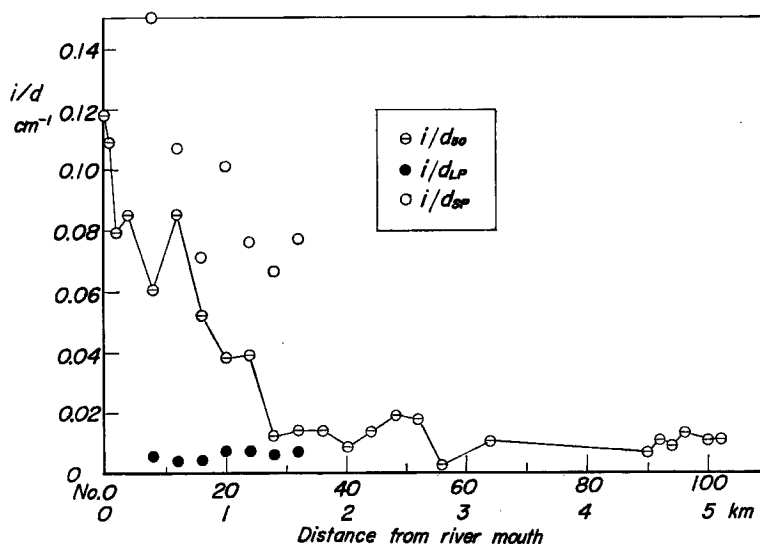


Fig. 4 Variations of Lokhtin's coefficient of fixation i/d with distance.

送される砂れきは丸味がかっていると言われている。しかしながら、実河川における河床砂れきの形状に関する実態的研究はあまりされていないので、実態を把握することが重要であると考えられる。著者らは採取した砂れきの形状の距離的变化を検討するために、Corey の提案した形状係数を用いて試料を整理した。各粒径ごとの砂れきの形状係数の分布はほとんど正規分布に従うことがわかった。Fig. 5 は形状係数の平均値の距離的な変化を示したものである。ただし、粒径が 2 mm 以下の砂れきは測定が困難であったことおよび 40 mm 以上のものはその個数が少なかったことなどのために、ここでは形状係数を求めることができなかった。測定された形状係数の範囲内においては、この図から小さな砂れきの形状係数の方が大きい砂れきのそれよりも大きくなっていることが理解されるであろう。したがって、中流部であられる binominal peak の粒度分布は輸送形態の差違に基づいてできるのではないといえよう。また、砂れきが上流から下流に流送されるにしたがって、形状係数はわずかに増大する傾向を示している。さらに大きい砂れきは

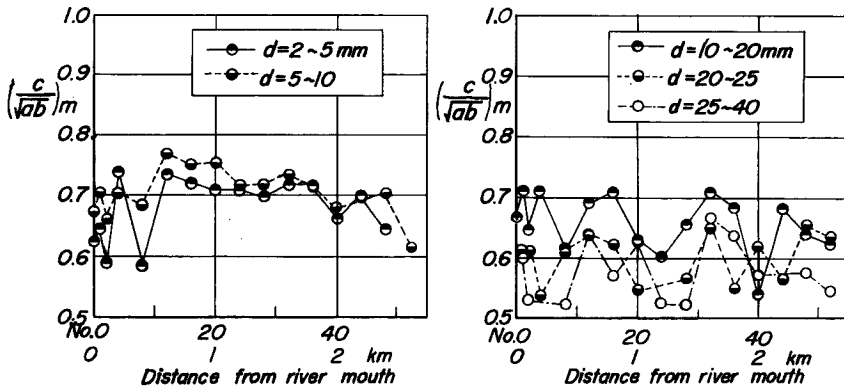


Fig. 5 Variations of mean values of shape factor with distance.

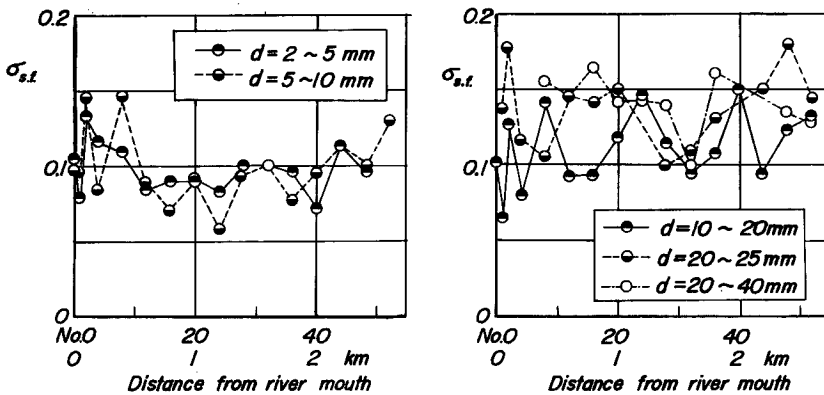


Fig. 6 Variations of standard deviation of shape factor with distance.

同一粒径であっても、その形状は距離的にかなり変動している。

つぎに、砂れきの形状係数の標準偏差を Fig. 6 に示す。大きい砂れきの標準偏差の方が小さい砂れきのそれよりも大きく、また各粒径ごとの標準偏差は上流から下流方向に減少する傾向を示している。したがって、砂れきが流送されるにしたがって、均一な形状になるようである。以上の事実から、このような河川においては小さい砂れきの方が大きなそれよりも丸味がかっており、距離方向には砂れきが上流から下流に輸送されるにしたがって、砂れきの丸味は増してくるといえよう。形状係数の分布の広がり小さい砂れきの方が小さく、また距離的には上流から下流方向に減少する傾向がみられる。

4. 粒度分布に関する考察

緒言でも述べたように、河床砂れきの粒度分布の理論的な考察を進めるためには、個々の砂れきの過去の履歴をも考慮に入れた方法論が確立されなければならないと考えられる。しかしながら、ここでは著者らが対象としている砂れきは、河床面付近に限定されていることおよび Fig. 4 に示したように山地河川においては大きな砂れきが第一次的に河床こう配に関係しているという調査結果に基づいて、粒度分布の距離的变化を考察する。もちろん局所的には、河幅の変化や流量の変動が河床砂れきに与える影響も少なくないと考えられるが、こうした山地河川においては河床こう配の距離的变化がもっとも支配的であると仮定することができよう。

いま、河川の横断面を幅の広い長方形断面水路とみなしてよいときには、Manning 型の抵抗法則は、つぎのようにかくことができる。

$$\left. \begin{aligned} u_*^2 &= g(Q/B)^{3/5} n^{3/5} i^{7/10} = \alpha' i^{7/10} \\ \alpha' &= g(Q/B)^{3/5} n^{3/5} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 u_* ：摩擦速度， g ：重力の加速度， Q/B ：単位幅当りの流量， i ：河床こう配および n ：粗度係数である。

河川のある地点の最大粒径の砂れきは、その地点の限界掃流力の状態におかれていると仮定することにしよう。いま粒径が比較的大きい場合を対象として、この範囲に関する岩垣の限界掃流力公式

$$d \geq 0.303 \text{ cm}; \quad u_{*c}^2 = 80.9d \dots\dots\dots (2)$$

を用いることにすれば、河川の基準地点から距離 x の下流の地点の最大粒径の砂れきは、つぎのようにかきあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} d_{max}(x) &= \alpha i^{7/10} \\ \alpha &= \alpha' / 80.9 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 d ：粒径， u_{*c} ：限界摩擦速度および $d_{max}(x)$ ：距離 x の地点の砂れきの最大粒径である。(3) 式において、単位幅当りの流量および粗度係数が一定すなわち α の値が一定とみなせるような河川については、河川のある地点における砂れきの最大粒径は、河床こう配の $7/10$ 乗に比例することがわかる。

さて、(3) 式の α が一定であるような場合に限定して議論を進めることにしよう。基準地点の河床砂れきの粒度分布を与え、これが流水の分級作用によってどのように変化するかを検討するために、各地点の最大粒径は (3) 式で規定され、それよりも大きい砂れきはその地点の上流側に堆積しており、それよりも小さい砂れきは下流方向に輸送されるものと仮定する。いま、基準地点の河床砂れきの粒度分布を $f(d, 0)$ であらわすことにすれば、基準地点より距離 x の下流の地点の河床砂れきの粒度分布 $f(d, x)$ は、つぎのようにかきあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} d \leq d_{max}(x); \quad f(d, x) &= f(d, 0) / \int_0^{d_{max}(x)} f(d, 0) dd \\ d > d_{max}(x); \quad f(d, x) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

この定義から、基準地点の砂れきの平均粒径 $d_m(0)$ および分散 $\sigma^2(0)$ は、それぞれつぎのように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} d_m(0) &= \int_0^{d_{max}(0)} d f(d, 0) dd \\ \sigma^2(0) &= \int_0^{d_{max}(0)} d^2 f(d, 0) dd - d_m^2(0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

したがって、これらの関係を用いて、距離 x の地点の河床砂れきの平均粒径 $d_m(x)$ および分散 $\sigma^2(x)$ を求めると、つぎのようにかきあらわされる。

$$\left. \begin{aligned} d_m(x) &= \left[d_m(0) + \int_{d_{max}(0)}^{d_{max}(x)} d f(d, 0) dd \right] / \int_0^{d_{max}(x)} f(d, 0) dd \\ \sigma^2(x) &= \int_0^{d_{max}(x)} d^2 f(d, 0) dd / \int_0^{d_{max}(x)} f(d, 0) dd - d_m^2(x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

以上かなり大胆な仮定のもとに粒度分布の距離的变化を示す式を導びいてきたが、これらの式を比良川に適用したときの条件は、つぎのようである。単位幅当りの流量および粗度係数が一定とみなせるような No. 52 地点を基準地点とした (Fig. 1 参照)。No. 52 地点の粒度分布、最大粒径および河床こう配を与えて、(3) 式中の α を決定した。その地点よりも下流断面に対しては、このようにして基準地点で決定された α の値と河床こう配を用いて順次計算を進めた。

(4) 式を用いて計算した結果が Fig. 2 に破線で示されている。No. 52 地点の河床砂れきが流水の分級

作用によって、ふるい分けられていく過程の実測値と計算値は比較的一致しており、また計算結果からも中流部で binominal peak があらわれることが明らかにされた。

Fig. 7 は最大粒径の実測値と計算値とを比較したものであるが、河口付近および No.30 地点付近を除外して考えれば、両者は比較的一致しているといえるであろう。実測値と計算値との差が顕著な河口付近については、試料採取地点がびわ湖に流入しているデルタのところであったために、河幅が非常に大きくなっていたことに起因しているように思われるが、No.30 地点付近についての原因はよくわからない。しかし、実測値の傾向としてもこの付近の最大粒径は大きすぎるようである。Fig. 8~10 はそれぞれ中央粒径、標準偏差および歪度の実測値と計算値とを比較したものである。図中の計算値は計算を簡単化するために (3) および (4) 式を用いて決定された粒度分布を ϕ スケールで表示した値である。これらは実測値と全体的によく一致している。

さて、ここで導びかれた粒度分布の距離的变化をあらわす式は山地河川を対象にしたものであるが、このような考え方を拡張して、石狩川中流部の河口から約 60 km に位置している月形町と深川町の 60 km 区間に適用して計算した結果と実測値との比較が Fig. 11 および 12 に示されている。

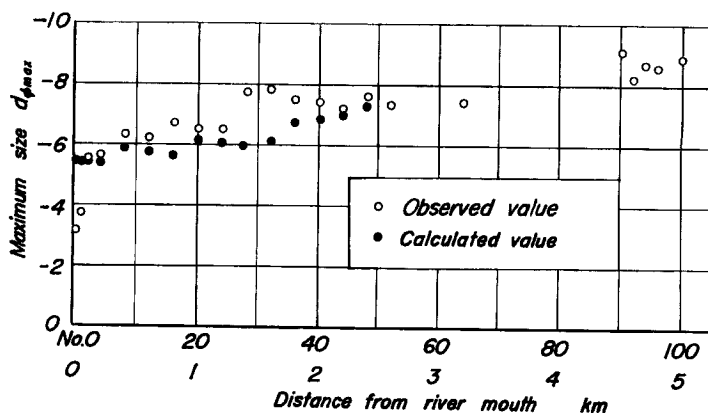


Fig. 7 Comparison between calculated values of maximum size of sand and gravel in Hira River and observed ones.

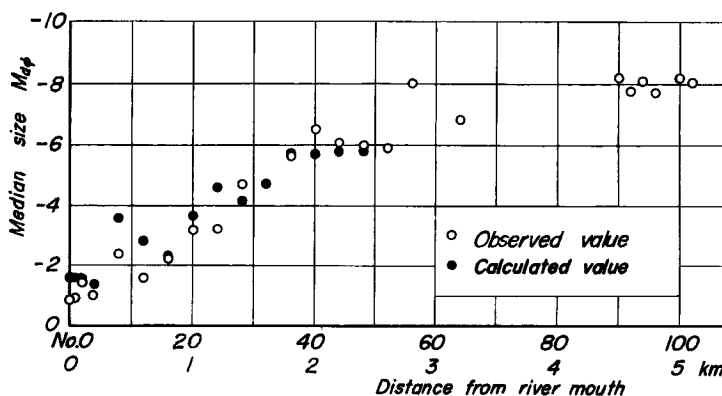


Fig. 8 Comparison between calculated values of median size of sand and gravel in Hira River and observed ones.

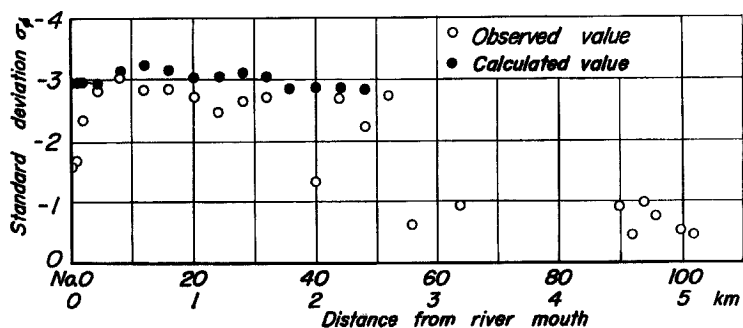


Fig. 9 Comparison between calculated values of standard deviation of sand and gravel in Hira River and observed ones.

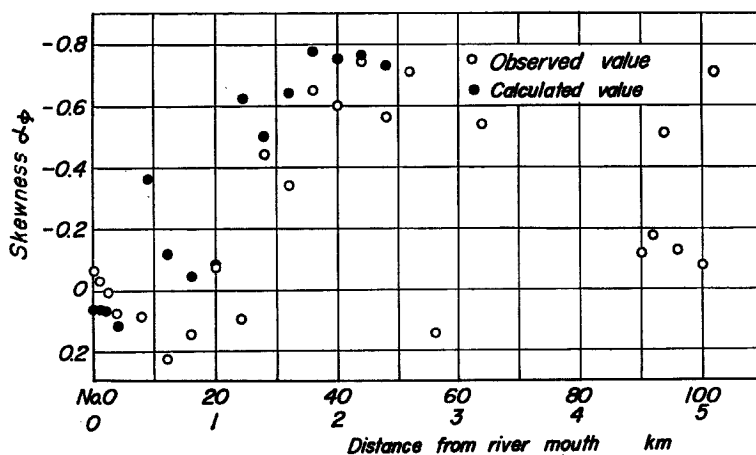


Fig. 10 Comparison between calculated values of skewness of sand and gravel in Hira River and observed ones.

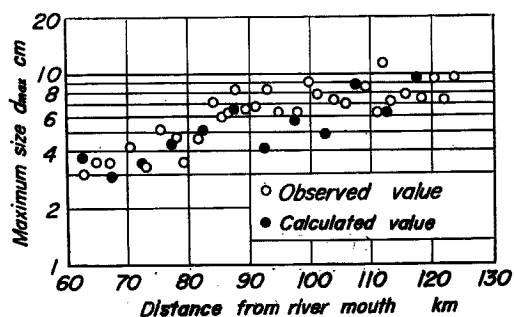


Fig. 11 Comparison between calculated values of maximum size of sand and gravel in Ishikari River and observed ones.

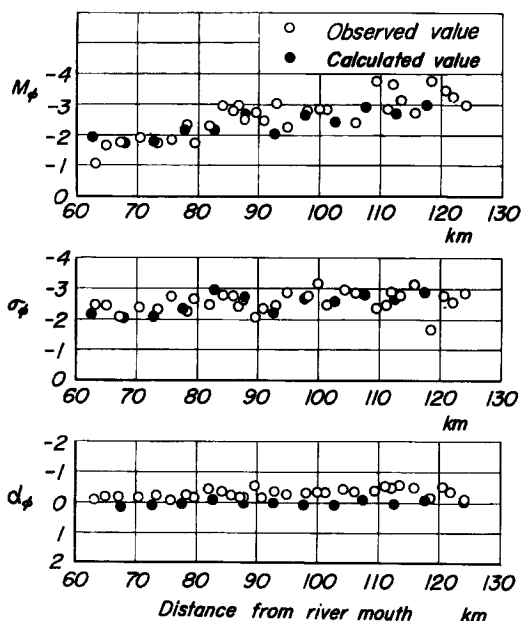


Fig. 12 Comparison between calculated values of mean size, standard deviation and skewness of sand and gravel in Ishikari River and observed ones.

基準地点は河口から 123.75 km の地点とし、比良川における場合の計算方法とまったく同じ方法で解析した。石狩川の計算の対象区間には 2, 3 の大きな支川が流入しているにもかかわらず、これらの図から明らかに、実測値と計算値はかなりよく一致している。なお実測値は北海道開発局石狩川開発建設部の河床材料調査資料を整理したものである。

以上 2 つの河川についての河床砂れきの粒度分布の実測値と計算値とを比較することによって、(3) および (4) 式がほぼ成立することが明らかにされたので、今後こうした考え方を山地河川などに適用してさらに詳細な検討を加えるつもりである。

5. 結 語

びわ湖に流入している比良川流域を調査流域に選んで、河床砂れき調査を実施して、つぎのようなことを明らかにした。

(1) 河床砂れきの粒度分布形は、3 つのパターンに分類される。すなわち、河床砂れきの粒度分布を ϕ スケールによってヒストグラムで表示した場合、上流部では大きい砂れきの方に peak 値がある非対称な分布を示しているが、中流部では binominal peak を有するきわめて特徴ある分布を示し、さらに下流部では正規分布に近い分布になっている。このような現象は、流水の分級作用に強く依存していると考えられる。

(2) Lokhtin が提案した移動限界係数 (coefficient of fixation) を用いて資料を整理した結果、山地河川における河床砂れきの粒度分布の考察を進める場合には、大きい砂れきの移動限界が重要な役割を演ずるということを見出した。さらに、粒度分布に影響を与えるもっとも支配的因子は、河床こう配であるということが明らかにされた。

(3) 河床砂れきは粒径が小さいものほど丸味をおびており、また同一粒径の砂れきにあつては上流から

下流に流下するにしたがって、丸味をおびてくる傾向がみられる。さらに、河床砂れきの形状の分布の広がり、大きい砂れきのものほど大きく、また距離方向に関しては同一粒径の砂れきであっても上流のものほど若干大きくなる傾向がみられる。

(4) これらの調査結果に基づいて、河川のある地点の最大粒径の砂れきは移動限界にあるという仮定をもうけ、それよりも大きい砂れきはその地点の上流側に堆積し、小さい砂れきは下流に流送されるものと考えて、任意の地点の河床砂れきの粒度分布をあらわす式を導びいた。これらの式を用いて、比良川の河床砂れきの最大粒径、中央粒径、標準偏差および歪度を計算した結果はそれぞれ実測値とよく一致した。さらに、石狩川中流部についても比良川と同様な手法で計算した結果は、実測値とよい一致を示した。

今後多くの河川の系統的な河床砂れき調査を実施して、実証的研究を進めていくとともに、山腹から供給される砂れきと河床砂れきの粒度特性との関連が追述されなければならない。

最後に本研究を遂行するにあたって、石狩川の資料を提供して下さった北海道開発局石狩川開発建設部山口嘉之枝官、資料採取に多大の労をわずらわした京都大学防災研究所角野稔助手ならびに熱心に資料解析の計算を手伝って下さった吉田義則技官に心から感謝の意を表明する。

参 考 文 献

- 1) Scheidegger, A. E.: Theoretical geomorphology, Springer-Verlag, 1961, pp. 169—171.
- 2) 安芸皎一：河相論，昭19，pp. 91—108.
- 3) Hayami, S.: On the composition of the bed sediments in the lower Yangtze River system, J. Shanghai Sci. Inst. N. S. Vol. 1, 1941, pp. 15—44.
- 4) Hayami, S.: On the stability of an erodible river bed, with special reference to the lower Yangtze River, J. Shanghai Sci. Inst. N. S. Vol. 1, 1941, pp. 45—67.
- 5) 芦田和男，道上正規：浮流砂量に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報第10号B，昭42，pp. 63—79.
- 6) 町田貞：河岸段丘—その地形学的研究—，古今書院，昭38，pp. 75—80.
- 7) Hayami, S.: A note on the critical tractive force of an alluvial river, Special Contributions Geophysical Inst. Kyoto Univ. No. 5, 1965, pp. 1—6.