

線格子法を用いた河床堆積物の粒径分析法の再検討

加藤 茂 弘¹⁾・井上 耕一郎²⁾・島津 弘³⁾

Re-examination of the Analysis of Grain Size Distributions of the Coarse River-bed Material by the Line-Grid Method. Shigehiro KATOH¹⁾, Koichiro INOUE²⁾ and Hiroshi SHIMAZU³⁾

The line-grid method is a sampling technique which determines the size distribution of coarse river-bed sediments. We first estimated the range of the error of this method and determined the minimum number of sampling particles necessary to obtain objective accuracy. The error of the mean diameter(β), with 80 percent reliability, is given by the following relationships:

$$|\beta| < 1.28n^{-1/2}CvX,$$

where n is the number of particles, Cv is the coefficient of variation, and X is the mean diameter. Based on our data, the value of Cv is estimated to be less than 1.3 with regard to the alternate bars in many Japanese rivers. Therefore, at least 300 particles are sufficient for most samples from coarse river-bed sediments, when the error(β) is within 10 percent of the mean diameter(X).

Secondly, we propose the most suitable procedure in selecting a gravel sampling site to be as follows: 1) An alternate bar along the studied reach of a river is first classified into four areas (A, B, C, and D) by observing the sedimentary structure of its surface sediments; 2) Next, based on the micromorphological characteristics of the bar, it is classified into I, II, and III zones; 3) The combination of the two divisions thus leads to systematic classification of bars into 7 types or more. After this procedure, sampling lines are set up on the A area of the I zone or the B area of the II zone, which can be recognized and occupy relatively large areas at all measuring bars along the whole reach of a river. In the former area, the brink of the channel flow should be avoided as a sampling site; 4) 300 particles are selected along the sampling line. The sampling interval should be larger than the longest (a axis) length of the largest gravels predominant in the selected area.

The above procedure is also useful for selecting 100 particles for conventional measurement. In such case, the measurement should be carried out in the same selected area.

Key words: grain size analysis, line-grid method, number of particles, gravel sampling site, surface sedimentary structure, micromorphological classification

はじめに

河床堆積物の粒径分布やその下流方向への変化を知ることは、河川の水理学的、地形学的研究において重要な基礎となる。

河床堆積物は種々の粒径を持つ粒子の集合体であり、その粒径分布は、ある地点の河床堆積物全体を母集団と考えた標本採取(サンプリング)を行って求めた平均粒径や標準偏差などの統計値(粒径特性値)によって表現される。標本採取の方法には、容量サンプリング法(例えば、

¹⁾兵庫県立人と自然の博物館 〒669-13 兵庫県三田市弥生ヶ丘6丁目 Museum of Nature and Human Activities, Hyogo. Yayoigaoka 6, Sanda, Hyogo, 669-13 Japan

²⁾武蔵大学人文学部(非常勤) 〒176 東京都練馬区豊玉上 1-26 Faculty of Human and Cultural Sciences, Musashi University. Toyotamakami 1-26, Nerima-ku, Tokyo, 176 Japan

³⁾立正大学文学部地理学教室 〒141 東京都品川区大崎 4-2-16 Department of Geography, Faculty of Letters, Ritssho University. Ohsaki 4-2-16, Shinagawa-ku, Tokyo, 141 Japan

Krumbein, 1940; 谷津, 1951など)と面積サンプリング法の2つの主要な方法があり、後者の中では、面積格子法(Wolman, 1954; Hack, 1957など)やその変形である線格子法(河村・小沢, 1970; 島津, 1990など)が用いられることが多い。また、一定面積の区画を設定し、その中から大きい順に何個かの礫を採取してそれらの平均礫径を求める簡便法(Bradley *et al.*, 1972; 小野・平川, 1975など)も用いられる。これらの中で面積サンプリング法は、計測可能な粒径範囲が広く、調査が容易であることから、山地から扇状地までの河床堆積物の粒径特性値を得るためには有利である。

これらの方法により求められた河床堆積物の粒径分布に基づいて議論する場合は、粒径特性値の分析精度や、標本採取地点や採取方法の違いによる分析結果の再現性が検討されていることが必要である。しかし、面積サンプリング法に関しては、それらの検討が十分であるとはいえない。

Wolman(1954)は、面積格子法について採取粒子数100個の場合における2/3確率信頼区間が中央粒径値の約12%以内であることを、野外調査結果に基づいて明らかにしている。しかし、採取粒子数と中央粒径の分析精度の関係についての彼の推論は、採取粒子数100個の特定の分散を持つ標本について得られたもので、その一般性については疑問が残る。

一方、河村・小沢(1970)は、面積サンプリング法によって河床堆積物の粒径分布を求めるために必要な採取粒子数を、統計的考察から約50個以上と推定している。しかし、採取粒子の粒径の計測精度と標準偏差の比をほぼ一定と仮定して採取粒子数を求めているため、理論上、採取粒子数が増えても平均粒径の分析精度が向上しないという矛盾が生じている。また、ある採取粒子数の場合にどれだけの平均粒径の分析精度が得られるのかは明らかではなく、流下方向への平均粒径の増減を判断する統計的根拠は与えられていない。平均粒径の分析精度に関しては、採取粒子数と計測対象となる河床砂礫の分散が影響すること(Hack, 1957)から、この両者を考慮に入れた平均粒径の分析精度と採取粒子数との関係や、平均粒径の決定に必要な最小採取粒子数の吟味が必要である。

分析結果の再現性については、面積サンプリング法に関して検討した例は少なく、主として容量サンプリング法に関して議論がなされてきた。

谷津(1951)は、容量サンプリング法における再現性の良い試料採取方法を提示した。すなわち、試料採取地の砂礫堆を同一の砂礫の堆積状態を示すとみられる区域に区分(層化)した後、その区域を、区域内に一般的にみられる最大礫を中心とした集積単位(クラスター)に分け、無作為に抽出したいくつかのクラスターを単位として粒径分布を求めるというものである。

小峯(1954)は、大・中・小礫が複雑に混合して層化の困難な河川上流域の砂礫堆を対象に、試料採取地点の違いによる粒径分布の変動を検討した。すなわち、砂礫堆を水際から谷壁に向かって流路と平行に配列する4帯(砂帯・a帯・b帯・c帯)に区分し、各帯においていくつかのクラスターを含む面積1m²、厚さ約30cmの砂礫を採取してふるい分け、それらの平均粒径を比較した。そして、水際に位置するc帯の中で、中央部を試料採取地点とすることにより、平均粒径のちらばりを最小にできると述べた。

一方、面積サンプリング法については、Wolman(1954)が面積格子法を対象として、試料採取者の違いや試料採取測線の位置の違いによる中央粒径の変動は無視できると述べているが、それらについての統計的検討はなされていない。さらに前述のように、容量サンプリング法を用いる際には層化の手続きや砂礫堆の微地形区分が必要であることから、面積サンプリング法に関しても、標本採取測線の設置方法を再検討する必要があると考えられる。とりわけ砂礫堆の微地形区分は、前述の小峯(1954)や小玉・井口(1986)、小玉(1994)が行っているが、前者では微地形区分の方法やその特徴が不明確であり、後者は粒径分析の再現性との関係を示した研究ではなく、小峯(1954)の区分との関係も明らかにされていない。このため、砂礫堆の微地形を再区分し、分析結果の再現性を検討する必要がある。

以上のことから本稿では、面積格子法や線格子法などの面積サンプリング法に関して、採取粒子数と平均粒径の分析精度との関係を統計的に検討し、最小採取粒子数を提示する。次に、表面砂礫の堆積状況と微地形に基づいて砂礫堆を区分し、線格子法による試料採取を行い、区域間の粒径分布の異同を統計的に検討する。最後に、区域内における粒径分析の再現性について統計的な検討を行う。

採取粒子数と平均粒径の分析精度

面積サンプリング法によって無作為に採取された粒子の数を n (個)、個々の粒子の粒径計測値(例えば中軸径や長軸径など)を X_1, X_2, \dots, X_n とすると、この標本について、

$$\text{平均粒径: } X = 1/n \cdot \sum X_i \quad (i=1 \cdots n)$$

$$\text{分散: } S^2 = [1/(n-1)] \cdot \sum (X_i - X)^2 \quad (i=1 \cdots n)$$

である。河床堆積物の粒径分布が平均 μ 、分散 σ^2 の任意の母集団である場合に、分散 σ^2 が標本分散 S^2 で代表される、すなわち $\sigma^2 = S^2$ であると仮定すると、一般に線格子法などによる採取粒子数 n は通常10以上であるから、統計量 $Z = n^{1/2} \cdot (X - \mu) / S$ は、中心極限定理より、規準正規分布 $N(0, 1)$ にしたがう¹⁾。

河床堆積物の粒径分布のように分散が大きい場合には、通常用いられる95%あるいは90%の信頼係数は信頼区間の幅が非常に大きくなるため実用的ではない。一方、Wolman(1954)が採用した2/3確率信頼区間では信頼係数が小さいと思われる。そこで信頼係数80%を採用すると、その信頼区間は

$$X - 1.28 \cdot S/n^{1/2} < \mu < X + 1.28 \cdot S/n^{1/2} \quad (1)$$

で与えられる。一方、各粒子の真の粒径を m_1, m_2, \dots, m_n 、粒径の測定誤差を $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ とすると、

$$X_i = m_i + \varepsilon_i \quad (i=1 \dots n) \quad (2)$$

であるから、

$$\begin{aligned} X &= 1/n \cdot \sum X_i \\ &= 1/n \cdot (\sum m_i + \sum \varepsilon_i) \\ &= \mu + 1/n \cdot \sum \varepsilon_i \end{aligned}$$

$1/n \cdot \sum \varepsilon_i$ は測定誤差の算術平均であり、平均粒径の分析精度を表す。 $\beta = 1/n \cdot \sum \varepsilon_i$ とおくと上式は、

$$X = \mu + \beta \quad (3)$$

となる。(1)式と(3)式より、

$$|\beta| < 1.28 \cdot S/n^{1/2} \quad (4)$$

が得られる。(4)式より、標本平均の分析精度に標本分散と採取粒子数の両者が影響することが示される。ここで変動係数 $C_v = S/X$ であるから、(4)式は、

$$|\beta| < 1.28 \cdot C_v \cdot X/n^{1/2} \quad (5)$$

と表される。線格子法による多くの実測例(島津, 1990; 加藤・島津, 1991)によれば、 $0.5 \leq C_v \leq 1.5$ である。したがって、この変動係数の範囲について、目的とする標本平均の分析精度に対する必要最小採取粒子数を(5)式より求めると、表1が得られる。

表1より、分析精度が標本平均の10%以内であれば河

Table 1. Minimum number of particles necessary to obtain the mean diameter within the objective accuracy.

coefficient of variation	sampling error'					
	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05
0.50	5	7	11	19	41	164
0.60	7	10	15	27	59	236
0.70	9	13	21	36	81	322
0.80	12	17	27	47	105	420
0.90	15	22	34	59	133	531
1.00	19	27	41	73	164	656
1.10	23	32	50	89	199	793
1.20	27	38	59	105	236	944
1.30	31	45	70	124	277	1108
1.40	37	52	81	143	322	1285
1.50	41	59	93	164	369	1475

*Represented by the ratio of the error to the mean diameter.

Table 2. Calculated error in measuring the mean diameter of a sample with a given number of particles and a given coefficient of variation.

number of samples	coefficient of variation										
	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
10	20.2	24.3	28.3	32.4	36.4	40.5	44.5	48.6	52.6	56.7	60.7
20	14.3	17.2	20.0	22.9	25.8	28.6	31.2	34.3	37.2	40.1	42.9
30	11.7	14.0	16.4	18.7	21.0	23.4	25.7	28.0	30.4	32.7	35.1
40	10.1	12.1	14.2	16.2	18.2	20.2	22.3	24.3	26.3	28.3	30.4
50	9.1	10.9	12.7	14.5	16.3	18.1	19.9	21.7	23.5	25.3	27.2
60	8.3	9.9	11.6	13.2	14.9	16.5	18.2	19.8	21.5	23.1	24.8
70	7.6	9.2	10.7	12.2	13.8	15.3	16.8	18.4	19.9	21.4	22.9
80	7.2	8.6	10.0	11.4	12.9	14.3	15.7	17.2	18.6	20.0	21.5
90	6.7	8.1	9.4	10.8	12.1	13.5	14.8	16.2	17.5	18.9	20.2
100	6.4	7.7	9.0	10.2	11.5	12.8	14.1	15.4	16.6	17.9	19.2
200	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1	9.1	10.0	10.9	11.8	12.7	13.6
300	3.7	4.4	5.2	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.6	10.3	11.1
400	3.2	3.8	4.5	5.1	5.8	6.4	7.0	7.7	8.3	9.0	9.6
500	2.9	3.4	4.0	4.6	5.2	5.7	6.3	6.9	7.4	8.0	8.6
1000	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.5	4.9	5.3	5.7	6.1

*Represented by the percentage of the ratio of the error to the mean diameter.

床堆積物の平均粒径の決定に十分であるとすると、採取粒子数は369個以上であれば良い。しかしながら、筆者らの実測例(島津, 1990; 加藤・島津, 1991)によれば、一般に日本の河川の中・下流域にみられる砂礫堆においては、変動係数が1.3を超えることはまれである。したがって、このような砂礫堆において線格子法による粒径分析を行って平均粒径を求める場合には、表1より、300個以上の採取粒子数であれば十分であると考えられる。

一方、変動係数は調査以前にわかっているものではなく、粒径分析後に決定されるものである。実際には採取粒子数の決定は、野外計測時の作業時間や測線長に対する砂礫堆幅などを考慮して決められるのが普通である。このため、ある採取粒子数と変動係数に対する平均粒径の分析精度を示しておけば、調査目的や対象とする河川区間の特徴に応じて採取粒子数を決定する助けとなると考える。そこで、(5)式に基づいて、ある採取粒子数と変動係数に対する平均粒径の分析精度を算出し、表2に示した。表2より、例えば扇状地河川において平均粒径の流下方向への減少を分析精度20%以内で判断する際には、日本の多くの扇状地河川で変動係数が1.0~1.3となることから、少なくとも70個の粒子採取を行う必要がある。

砂礫堆の微地形区分

砂礫堆の微地形を明らかにし、粒径分析の再現性を検討するために、東京都日野市の多摩川中流右岸に位置する砂礫堆(図1)で、1992年4月に調査を行った。この砂礫

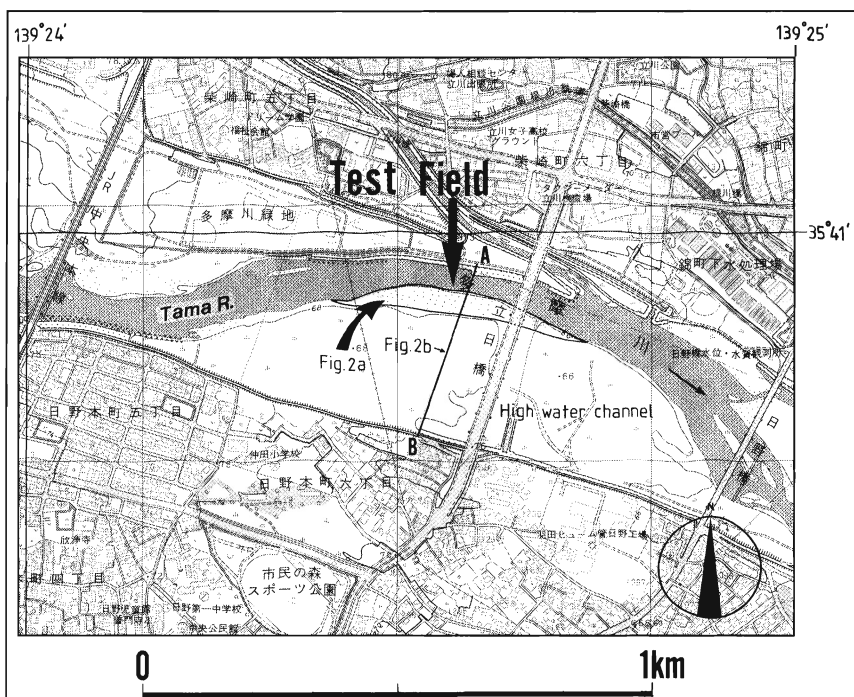


Fig.1. Map showing the research point. Using the 1/10,000 topographic map "Tachikawa" published by Geograph. Surv. Instit., A-B:locality of cross section in Fig.2-b.

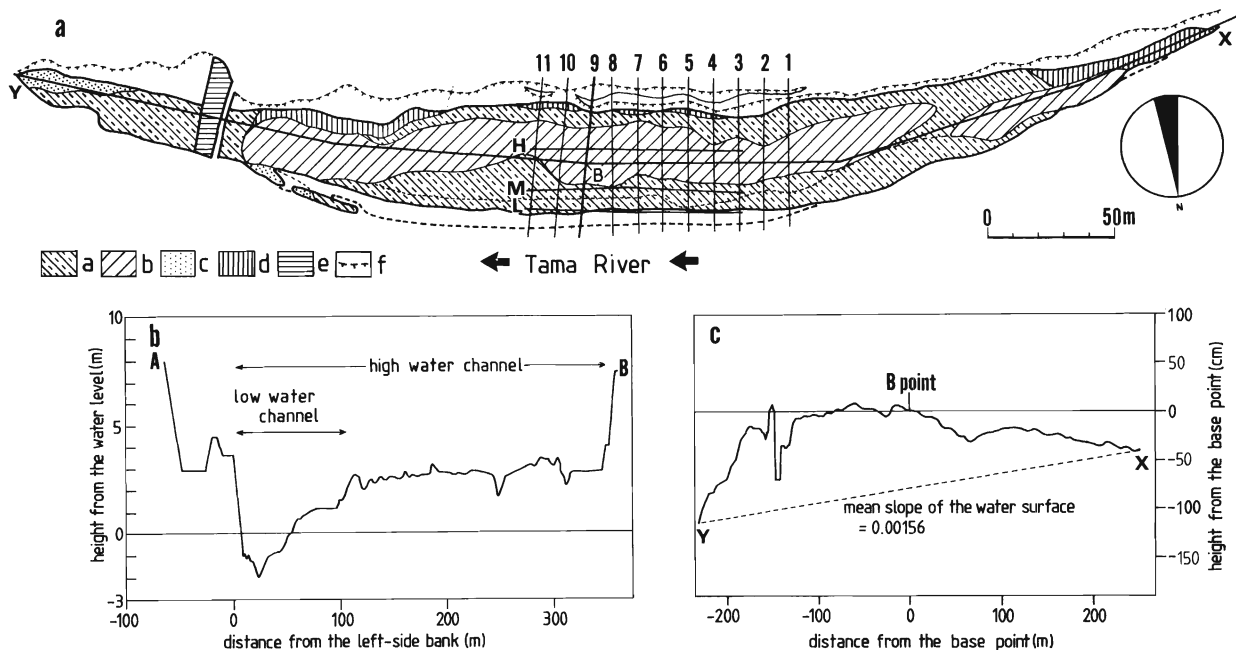


Fig.2. Characteristics of the studied bar in the Tama River.

- a) Plane figure showing four areas classified based on the diameter of gravels and the volume of matrix of the surface sediments. a:A area, b:B area, c:C area, d:D area, e:area reformed by human activities, f:slope between high water channel and low water one, 1~11:localities of cross sections in Fig.4, X-Y:locality of the longitudinal profile, H, M, and L:sampling lines.
- b) Cross section along the No.9 line and its extension (the A-B line in Fig.1).
- c) Longitudinal profile of the studied bar along the X-Y line.

Table 3. Classification of the bar based on the sedimentary condition of the surface sediments and on micro-topography of the bar.

区域	主要構成粒子	淘汰の度合い	マトリクス	
			粒 径	量
A 区域	礫が主体	淘汰が良い	砂	少ない
B 区域			砂	多い
C 区域	砂が主体	—	—	
D 区域	巨礫が集積	淘汰が悪い	シルト・粘土	少ない

堆は連続する人工堤防に挟まれた幅約350mの多摩川河川敷内にある交互砂礫堆の1つで、2万5千分の1地形図や空中写真の判読結果によれば、少なくとも最近20年間は其の平面形態を大きく変えておらず、固定砂礫堆と判断される。調査は、この砂礫堆の中の植生による被覆のない部分(図1)で実施した。以下では、この部分を日野砂礫堆とよぶ。

日野砂礫堆は、最大長約480m、最大幅約40mの三日月状の平面形をしており(図2-a)、上流側に緩勾配で下流側に急勾配の紡錘形状の縦断面形を持つ(図2-c)。水面から砂礫堆頂部までの比高は1.0~1.2mである(図2-b)。平水時における河床の一部に基盤の連光寺互層(菊地, 1989)が露出していることから、砂礫層の厚さは1~数m程度とみられる。砂礫堆中央付近における、平水時の多摩川現流路の幅は約50m、最深部の水深は約2.0m(図2-b)、水面勾配は1.56パーミルである(図2-c)。日野砂礫堆の右岸側には、水面からの比高が2.5~3.0m、中央付近における幅が約250mの高水敷が広がる(図2-b)。

日野砂礫堆は、砂礫堆表面に一般的に認められる最大礫の粒径と表面砂礫の淘汰の度合い、およびマトリクスの有無によって、以下のA~Dの4つの区域に区分できる(表3)。すなわち、最大礫径(中径)が20cm程度で砂礫の淘汰は良く、マトリクスが少ないA区域、最大礫径(中径)が15cm程度で砂礫の淘汰は良く、マトリクスが多いB区域、ほとんど砂から構成されるC区域、および最大礫径(中径)30cmを超える巨礫が集積し、砂礫の淘汰は悪く、マトリクスのシルト・粘土で個々の礫がしっかりと固着されているD区域である。

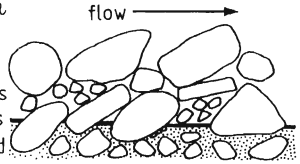
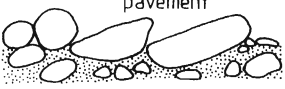



表面砂礫の堆積状況による砂礫堆区分		砂礫堆の微地形に基づく区分	
小玉・井口 (1986)		本研究	小峯 (1954)
TYPE 1	表面礫層とその直下の礫の間隙が細粒物質で充填されていないもの。その礫層を除去すると、初めて細粒物質によって礫の間隙が埋めつくされた砂礫層が出現する。  open work gravels silt with plant debris very fine sand	A 区域	I 帯 砂礫堆斜面部 I zone
TYPE 2	表面礫層の間隙は細粒物質で充填されていないが、そのすぐ下には礫の間隙を砂が埋めた砂礫層が存在するもの。  pavement	B 区域	II 帯 砂礫堆平頂部 II zone
TYPE 3	TYPE 2の表面礫 (Pavement) がお互いに離れて存在する状態に相当するもの。  pavement		III 帯 砂礫堆凹地部 III zone
TYPE 4	TYPE 2の表面礫 (Pavement) がほとんどなくなった状態で砂のみが溜まっているかの如く見えるもの。 	C 区域	a 帯および砂帯
TYPE 5	礫間のマトリクスがち密で礫を強固に保持しており、河床面から突出した礫もしっかり固定されているもの。 	D 区域	

Fig. 3. Relationships of the two classifications of the bar between the previous studies and this study.

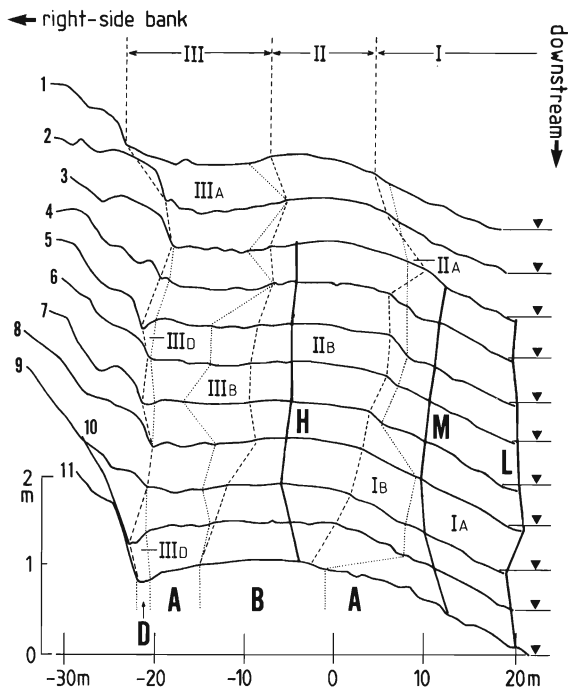


Fig.4. Cross sections of the studied bar.

Localities of cross sections are shown in Fig.2-a. A, B, C, and D indicate four areas in Fig.2-a. I, II and III indicate zones classified based on the characteristics of the micromorphology of the bar surface. A symbol such as I_A indicates an area determined by the combination of the above two classifications.

日野砂礫堆における各区域の分布は以下の通りである(図2-a)。A区域はB区域を取り囲んで分布し、砂礫堆の上流端や下流部においてD区域から漸移し、日野砂礫堆の大半を占める。B区域は紡錘状の平面形を示し、砂礫堆最下流部を除く砂礫堆中央の広い面積を占める。C区域は砂礫堆最下流端を、D区域は砂礫堆の上流端と砂礫堆中・下流部の高水敷との境界付近を、それぞれ占める小面積の区域である。

小玉・井口(1986)による表面砂礫の堆積状態のタイプと本研究のA~Dの区域を比較すると、A区域がTYPE1に、B区域がTYPE2およびTYPE3に、C区域がTYPE4に、D区域がTYPE5に、それぞれ対比されると考えられる(図3)。

図4には、日野砂礫堆の中央部における横断形の測量結果を示した。砂礫堆表面には帯状の凹凸を持った微地形が見られる。そこで傾斜の変換点と凹地部に注目し、I帯：水際の斜面部、II帯：中央の平頂部、およびIII帯：高水敷との境界に位置する凹地部、の3区域に分けた。これら各帯は、その平面的な分布の対応から、III帯が小峰(1954)のa帯および砂帯に、II帯がb帯に、I帯がc帯に、それぞれ相当すると考えられる(図3)。

以上の表面砂礫の堆積状態と微地形区分とを組み合わ

せると、砂礫堆の大部分は水際から順に、 I_A 区域：I帯中のA区域、 I_B 区域：I帯中のB区域、 II_A 区域：II帯中のA区域、 II_B 区域：II帯中のB区域、 III_B 区域：III帯中のB区域、 III_A 区域：III帯中のA区域、 III_D 区域：III帯中のD区域、の7つに分けられる(図4)。これらの区域の中では、 I_A 区域、 II_B 区域および III_A 区域が、特に広い面積を占める。

選定区域における粒径分布の比較

I_A 区域と II_B 区域のそれぞれを粒径分析区域に設定し²⁾、線格子法による標本採取と粒径分析を行った。

1. 粒径分析の手順

線格子法による粒径分析の手順を以下に述べる。

- 1) 礫採取点の間隔を、同一の礫上に2つ以上の採取点が位置しないように、採取区域に分布する最大礫の長径よりも十分に大きな25cmとした。そして、合計300個の礫を採取できる長さ75mの測線を1測線とした。
- 2) 各区域が流路に沿って長く延びていることから、測線は流路とはほぼ平行になるように設置した。設置場所は、 I_A 区域の水際、 I_A 区域中の II_B 区域よりの部分(斜面部の上部)、 II_B 区域中央部の3列(図2-a, 図4)とした。各測線は、水際から順にL測線、M測線、およびH測線とよぶ。
- 3) 各測線を、100個の採取粒子が得られる長さ25mの3つの部分測線に分け、上流側から順にそれぞれ、1, 2, 3

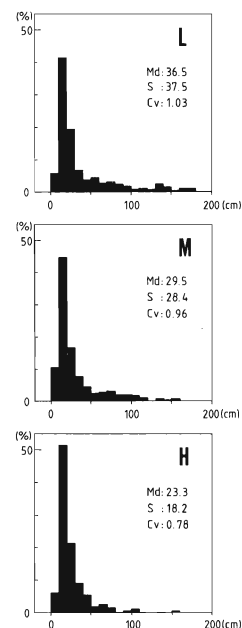


Fig.5. Size distributions of three samples composed of 300 particles.

Md: mean diameter, S: standard deviation, Cv: coefficient of variation.

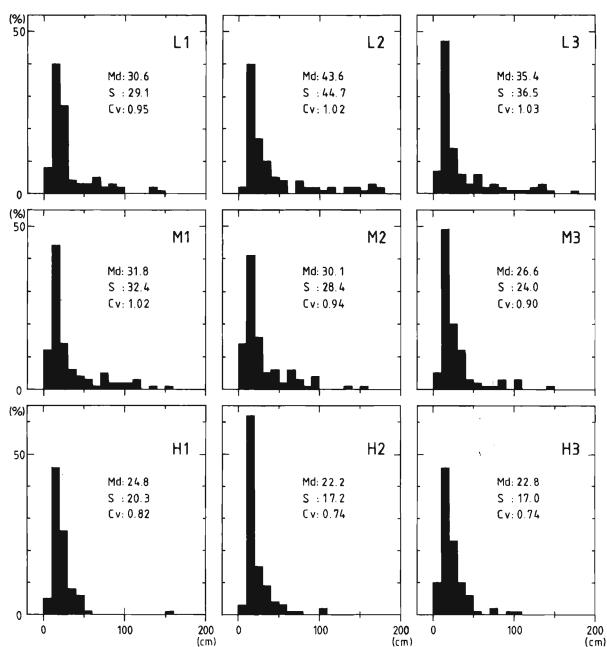


Fig.6. Size distributions of nine sub-samples composed of 100 particles.

Md:mean diameter, S:standard deviation, Cv:coefficient of variation.

の番号をつけた。部分測線名は、例えばL測線の最も上流側に位置するものを「L1部分測線」というようによぶ。

4)9本の部分測線の各々で、礫採取点直下にある中径8mm(-3φ)以上の礫を、拾い残しのないように注意して100個採取し、その中径を1個ずつmm単位で計測した。各部分測線における試料採取に際しては、あらかじめ表層の砂礫を取り除いた³⁾。礫の採取および礫径の計測は8人で行った。なお、各部分測線に沿って採取された100個の礫からなる標本を「L1部分標本」のように、各測線に沿って採取された300個の粒子からなる標本を「H標本」のようによぶ。

5)300個の礫からなる標本、および100個の礫からなる部分標本のそれぞれについて、礫径計測値から、平均粒径(Md)・標準偏差(S)・変動係数(Cv)を算出した(図5, 6)。

2. 標本間の粒径分布の比較

H, M, L標本間の分散(S^2)の異同を、F検定によって検討する。各標本間の分散比は、L標本の分散/M標本の分散=1.74, L標本の分散/H標本の分散=4.27, M標本の分散/H標本の分散=2.45である。一方、上側1%の棄却水準における $F_{299,299}(0.01)=1.53$ より、1%の棄却水準において、各標本間の分散に有意差が存在すると判断される。また分散は、H標本, M標本, L標本の順に大きくなるを考える。

各標本の平均粒径については、L, M標本間で7.0mm, L, H標本間で13.2mm, M, H標本間で6.2mmの差が

認められる(図5)。これらの平均粒径の差異については各標本の分散が異なるため、以下に述べる相関比に基づいて検討する。

図5に示した値から、L標本とM標本における平均粒径の平均(33.0mm)とその分散(12.4)、および分散の平均(1108.1)を求め、全分散(=平均粒径の分散と分散の平均の和)を算出すると1120.5となり、相関比(=平均粒径の分散/全分散)は0.011と算出される。同様に、L標本とH標本間の相関比は0.048, M標本とH標本間の相関比は0.017と算出される。一般に相関比が0.5以上であれば、2つの平均値は良く分離しているとされる。しかし、各標本間の相関比はいずれも0.05以下と著しく小さい。したがって、各標本の平均粒径の間には6.2mmから13.2mmの差があるが、その差異は統計的には有意なものではないと判断される。

3. 選定区域の粒径分布

前節における統計的検討によって、I_A区域の分散がII_B区域の分散よりも大きいことが明らかになった。このような両区域間の粒径分布の差異は、採取粒子数が300個以上で十分な分析精度を有することから、確かなものであると判断される。

I_A・II_B区域間の粒径分布の差異、つまり分散の違いは、層化の段階における定性的な観察により明らかにされた、両区域の表面砂礫の最大礫径や淘汰度の違いと一致している。したがって、線格子法においても、粒径分析に先立ち砂礫堆の表面砂礫の堆積状況を観察し、砂礫堆を区分すること(層化)が有効であると考えられる。また、I_A区域内の測線位置による分散の違いは、砂礫堆の微地形を考慮すべきことを強調している。

一方、両区域間では平均粒径に有意差が認められなかった。このため、粒径分析に際して平均粒径の変化のみを対象とする場合には、測線設置区域の違いは問題とならないと推察される。

採取粒子数100個の場合の分析再現性

面積格子法や線格子法においては、砂礫堆の面積、作業に要する労力や時間等の制約から、測線に沿って300個以上の粒子を採取することができない場合がある。その場合には、100個の粒子を採取する例が多い(Wolman, 1954; 島津, 1990など)。したがって、I_AあるいはII_B区域から100個の粒子を採取する場合における粒径分析の再現性を検討する必要があると考える。

そこで、水際に位置するL1~L3部分標本を除く、I_A区域から採取された3個の部分標本(M1~M3部分標本)と、II_B区域から採取された3個の部分標本(H1~H3部分標本)について、それらの粒径分布を統計的に比較する

Table 4. Results of F test on the variances of six samples. Italic numbers show no significant difference of the variances between the vertically arranged sample and horizontally arranged one. $F_{99,99}(0.01)=1.60$.

		I _A ZONE			II _B ZONE		
		M1	M2	M3	H1	H2	H3
I _A ZONE	M1	—	<i>1.30</i>	<i>1.82</i>	2.55	3.55	3.63
	M2		—	<i>1.40</i>	1.96	2.73	2.79
	M3			—	<i>1.40</i>	1.95	1.99
II _B ZONE	H1				—	<i>1.39</i>	<i>1.43</i>
	H2					—	<i>1.02</i>
	H3						—

ことから、各区域内における粒径分析の再現性を評価する。

部分標本間の分散の異同について、上側1%の棄却水準においてF検定を行った結果を表4に示した。なお、上側1%の棄却水準の値を $F_{99,99}(0.01)=1.60$ として判定した。F検定の結果、II_B区域では部分標本間の分散に有意差があるとはいえない。一方、I_A区域ではM1部分標本とM3部分標本の間に有意差が認められる。I_A区域とII_B区域との間では、H1標本とM3標本間を除くすべての部分標本間で分散比が1.95以上となり、分散の有意差が認められる(表4)。したがって、採取粒子数100個の場合でも、異なった区域から採取した標本間には分散の有意差が存在するといえる。

次に、標本間の分散の有意差がないと考えられる各区域内の部分標本の平均粒径の差異について、5%の棄却水準において、t分布に基づく両側検定を行った。なお、2つの標本の平均粒径を Md_1 および Md_2 、分散を S_1^2 および S_2^2 とすると、その棄却域は、

$$|Md_1 - Md_2| \geq 0.279 \cdot (S_1^2 + S_2^2)^{1/2}$$

Table 5. Results of t test on the difference of the mean diameters among the samples from the I_A area and on that among the II_B area.

		I _A ZONE			II _B ZONE		
		M1	M2	M3	H1	H2	H3
I _A ZONE	M1	—	×	×			
	M2		—	×			
	M3			—			
II _B ZONE	H1				—	×	×
	H2					—	×
	H3						—

× : No significant difference

で与えられる。

この結果、各区域の3つの部分標本間すべてに平均粒径の有意差は認められなかった(表5)。また、両区域の部分標本間の平均粒径の差異について、9組(例えば、M1標本とH1標本など)の部分標本間の相関比を求めたところ、すべて0.05未満であった。したがって、採取粒子数100個の場合にも、同一区域の標本間だけではなく異なる区域の標本間にも、平均粒径の有意差は存在しない。

最後に、同一区域内における標本の平均粒径のちらばりの程度を評価する。各区域について、部分標本の平均粒径の平均、標準偏差、および変動係数を算出した。変動係数は、I_A区域で0.073、II_B区域で0.048である。一方、(5)式によれば、粒子数100個の場合の平均粒径の分析精度は0.095~0.131の範囲である。したがって、各標本間の平均粒径のちらばりの程度は平均粒径の分析精度内に収まっており、いずれの区域においても再現性は良好と判断される。

ま と め

本稿では、面積サンプリング法による粒径分析について、平均粒径の分析精度と採取粒子数との関係を統計的に検討した(表1, 2)。また、粒径分析に有効な砂礫堆表面の区分を行い、分布の広い2つの区域を選んで線格子法による粒径分析を行い、その再現性について統計的に検討した。

その結果、80%の信頼係数では採取粒子数を300個とすれば良いこと、砂礫堆表面を礫の堆積状況と微地形で区分すると、分布の広い2つの区域では分散に差があるものの平均粒径の差は見られないこと、採取粒子数100個の場合にも区域との関係は300個の場合と同じであり、同一区域内の標本の平均粒径のちらばりは、分析精度内に収まっていることが明らかになった。

これらのことに基づいて、線格子法による試料採取は、次の手順で行うことが望ましいといえる。

- 1) 砂礫堆の表面砂礫の堆積状態について、最大礫径と淘汰の度合い、およびマトリクスの有無に基づいてA~Dの4つの区域(図3)に区分する。
- 2) 砂礫堆を、斜面部・平頂部・凹地部の3つの微地形区(図3)に区分する。
- 3) 斜面部のA区域あるいは平頂部のB区域に線格子法による試料採取測線を設置する。ただし、斜面部のA区域を選ぶ場合には、水際を避けて試料採取測線を設置する。
- 4) 試料採取測線に沿って300個の礫を採取する。礫の採取間隔は、区域内に一般的にみられる最大礫の長径よりも大きくとる。
- 5) 便宜上、採取粒子数を100個とする場合においても、

上と同様な試料採取測線の設置方法が有効である。

ところで、線格子法によって得られた標本の平均粒径などの粒径特性値と、掃流力等の水理的な量との関係は未検討である。この点については、本稿で提案した試料採取地点の設定方法が、線格子法だけでなく容量サンプリング法においても適用できることから、容量サンプリング法による粒径分布調査および水理量の算出結果と合わせて、別の機会に報告する。

謝 辞

東京大学地理学教室の大森博雄教授には、本研究に関して貴重な助言を頂いた。東京大学大学院の宿小俊・伊藤彰信・杉盛啓明の各氏、東京大学理学部地理学教室の学生(当時)の可児好宏・市川 稔の各氏には、現地において粒径計測の一部を手伝って頂いた。以上の方々から感謝いたします。

注

1) 中心極限定理は通常 $n \geq 100$ で成り立つとされるので、以下の推論で得られた採取粒子数 $n < 100$ についての結論は、厳密には80%信頼区間を保証する値とはなり得ない。また近似的に $\sigma^2 = S^2$ が成立するか否かは、線格子法により採取された標本分布が、河床堆積物の粒径分布をどの程度反映しているかという問題にはかならない。この点に関しては今後、別の方法で検討すべき課題であるが、現時点では第一近似として $\sigma^2 = S^2$ が成り立つものと考えた。

2) III_A区域を除外したのは、本区域が砂礫堆において広い面積を占める例は少ないと考えたからである。

3) 従来より河床表面の砂礫層はいろいろな要因で攪乱されていると考えられ、粒径分布調査で除外されてきた。本研究においてもこの点を踏まえ、標本採取に際して表面砂礫を取り除いた。しかし、河床表面は出水時に移動

した砂礫の流送状態をとどめている重要な箇所であるという異論(小玉, 1994)もある。表面砂礫の取扱いは、線格子法によって得られた粒径特性値と掃流力などの水理量との関係を検討する際に、評価すべき事項の1つであると考えられる。

文 献

- Bradley, W.C., Fahnestock, R.K. and Rowekamp, E.T. (1972) Coarse sediment transport by flood flows on Knik River, Alaska. *Bull. Geol. Soc. of Amer.*, 83, 1261-1284.
- Hack, J.T. (1957) *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland*. U.S. Government Printing Office, Washington, 94p.
- 加藤茂弘・島津 弘(1991)日高地方の河川における礫径分布と地形発達. 日本地理学会予稿集, No.39, 50-51.
- 菊地隆男(1989)多摩川河床, アケボノゾウ切歯化石産出地の地質. 日野市ふるさと博物館紀要, 1, 25-41.
- 小玉芳敬(1994)渡良瀬川下流部における河床勾配の急変と河床表面砂礫の堆積状況. 地理学評論, 67A, 311-324.
- 小玉芳敬・井口正男(1986)渡良瀬川下流部の河床勾配急変点付近における河床砂礫の堆積状況. 筑波大学水理実験センター報告, No.10, 67-79.
- 小峯 勇(1954)荒川における砂礫堆の構成について. 地理学評論, 27, 485-489.
- 河村三郎・小沢功一(1970)山地河川における河床材料のサンプリング方法と粒度分布. 土木学会誌, 55(9), 53-58.
- Krumbein, W.C. (1940) Flood gravel of San Gabriel Canyon, California. *Bull. Geol. Soc. of Amer.*, 51, 639-676.
- 小野有五・平川一臣(1975)ヴュルム氷期における日高山脈周辺の地形形成環境. 地理学評論, 48, 1-26.
- 島津 弘(1990)東北地方の山地河川における礫径変化に基づいた流路の区分. 地理学評論, 63A, 487-507.
- Wolman, M.G. (1954) A method of sampling coarse river-bed material. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 35, 951-956.
- 谷津榮寿(1951)堆積物研究に於ける試料の取方についての二三の問題. 地理学評論, 24, 23-26.

(1996年5月22日受付)

(1996年8月2日受理)