

報 文

沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(Ⅲ)

井口 正男・磯部 豊彦(筑波大、大学院、地域研究科)・河村 和夫(アジア航測)

I まえがき

はじめに Udden (1914) の先駆的研究以来、河川堆積物のみならず、風成堆積物、海岸堆積物などの現成堆積物に関する研究は、とくに最近30年間に、より多彩に、より精確に展開されてきたといえよう。このうち堆積物の粒度組成の表現方法に関しては Folk (1966) の展望によって最近の動向を知ることができる。

ところで、その堆積物の粒度組成がいかなる堆積環境を反映しているかを追及することを、堆積物研究の基本的な目標の1つとすべきであることに異論は少ないのであろう。この目標に従えば、堆積物の粒度組成の把握または記載は、単に統計的に完全であることが必ずしも価値が高いのではなく、むしろ堆積環境の指示者であり得るか否かによってその価値が定まるといるべきであろう。このような観点に立って、以下では2、3の側面から従来の研究を整理してみる。

log-normality Udden (1914), Wentworth (1922) を経て Krumbein (1934) によって提唱された Phi-scale を用いることにより、多くの堆積物はその粒径分布が対数正規分布かまたはそれに近い分布形を持つことが指摘されてきた(例えば Krumbein, 1938)。Inman (1952) は粒径分布の測度の簡便な計算法を提案したが、それは1つの試料を Phi-scale によって篩いわけて求めた粒径分布曲線は正規曲線またはそれに近いという

前提、すなわち log-normality の前提に立っていた。この場合、skewness と kurtosis の値は粒径分布曲線の正規曲線からの偏異の程度を示す測度であり、これらの値を媒介として、粒径分布曲線が Pearson Type のどの曲線に類似しているかを判定することができるとした。同様にして Otto (1939) も G—Charlier 曲線に類似性を求めている。堆積物研究のいわば初期の段階では、代表例としての上記2つの研究からも理解されるように、粒径分布曲線の log-normality の追及と統計的により完全で、より簡便な表現とに主眼がおかれていたといえよう(Folk, 1966)。

しかし、ある堆積物の粒径分布曲線の特徴をあらわす測度が記載できても、その測度の堆積環境における位置づけをすることは極めて困難な場合が多い。例えば, Folk and Ward (1957) は Texas の Brazos River の河床堆積物の粒度組成を記述するより適切な測度について考察したが、skewness と kurtosis は結局、粒径分布曲線における2つまたはそれ以上の mode の含まれ方をあらわしているに過ぎないということが重要な結論の1つであった。したがって、このような堆積物の場合には、その堆積環境は、log-normal curve からの偏異度をあらわす skewness や kurtosis の値よりも、むしろ粒径分布曲線を構成する mode の性質により直接的に反映しているといえるであろう。

polymodality 堆積物を Phi-scale で処理した

粒径分布曲線には、ただ 1 つの mode ではなく、2つないし 3 つの mode があらわれる傾向のあることは Udden (1914) も既に指摘している。それ以後でも、この種の指摘をした研究は多数あり、とくに礫などの粗粒子を含む河床堆積物ではこの傾向が著るしい (Yatsu, 1955; Folk & Ward, 1957; 矢野ほか, 1969)。

しかし、海浜堆積物には polymodality の不明瞭なものがある。例えば Mason & Folk (1958)によれば、Mustang Island (Texas) の beach, dune, aeolian flat の 3 つの地帯では、堆積物の粒径分布曲線はいずれも非常によく似ていて、平均粒径の値にはほとんど差違はないが、sorting, skewness, kurtosis, とくに後 2 者の値には微妙な違いがある。この微妙な違いは、粒径分布曲線を構成する主要な mode に対して、それとは別の貧弱な mode が加わると仮定することによってよりよく説明できるという。前記した Inman (1952) の考察は、polymodality が不明瞭で、主要な mode に対して副次的な mode が余りにも貧弱な堆積物を対象としたものと考えられる。

一般的に言って、粒径分布曲線にあらわれる mode は、顕著か貧弱かを問わなければ、2つないし 3つ認められるのが普通である。別言すれば、粒径分布曲線には 1 つないし 2 つの谷があらわれる。しかも、この谷はあるきまつた粒径 (4 ~ 1 mm, 1/8 ~ 1/16 mm) のところにあらわれ、これは size deficiency として注目されてきた (Pettijohn, 1957, P. 44~51)。この size deficiency は基本的には岩石の風化特性に基づくと考えられてきた (Pettijohn, 1957, p. 48~49) が、このことは、ほとんどの堆積物の粒径分布曲線が polymodal であることを示唆している。

multi-Gaussian Curve 粒径分布曲線にあらわれる幾つかの mode それぞれが 1 つの正規曲線を呈するであろうという想定はかなり早くからいろいろな研究者によってなされていた。しかしこのことが意識的に扱われるようになったのは 1950 年代の後半からであろう。Harris (1958) は Phi-scale を用いて正規確率紙へプロットした粒

径積算曲線は幾つかの直線部分の結合からなるものと見なし、ある 1 つの試料は各直線部分があらわす正規分布集団の結合からなると考えた。しかし、この問題をより明確にしたのは Spencer (1963) であろう。彼は先ず、Folk & Ward (1957) が Texas の Brazo River で示した著るしい bimodality は 2 つの正規分布集団の合成と説明するのが合理的であるとし、unimodal な分布でも 2 つの正規分布集団の合成からなることもあることを指摘した。そして Krumbein & Aberdeen (1937) による Barataria Bay の堆積物は 2 つの正規分布集団の合成とみることによって、その粒度組成が極めて合理的に説明できることも示した。このようにして Spencer は、一般的に言って、堆積物は 3 つの基本的な正規分布集団の合成からなるものと考えた。彼はこの 3 つの正規集団を gravel population, sand population, clay population と呼び、それぞれがあるきまつた平均粒径と標準偏差とで特徴づけられるとし、堆積物の粒度組成はこれら 3 つの集団の合成され方によって異なるという説明を試みた。

しかし、堆積物の粒度組成の多様性を説明するために、Spencer は基本的な正規分布集団は truncation の効果によって変質するものとした。truncation とは、ある粒径を境として、それより細粒物はすべて運び去られ、それより粗粒物はすべて残されるような process を指している。ところが、空気や水の流れが乱流であれば (自然界における大部分はそうであるが)、流れそれ自体の現象が統計的性質をもち、堆積物も——自然界における大部分がそうであるように——混合粒径であれば、Spencer のいう truncation の現象がおこると考えることは極めて困難である。結局 “truncation” の考えを導入したことは Spencer の説明の明確さをそこなう結果につながったといえよう。

Visher (1969) も粒径分布曲線が幾つかの正規分布集団の合成からなるものと考えた。しかし彼の説明は Spencer ほどに本質的ではない。その理由は、前記した Harris と同様に、正規確率紙

上での直線部分それ自体が正規分布集団をあらわすと考えたことにある。

以上のはかにも粒径分布曲線を2つ以上の正規曲線の合成とした研究はあるが（例えば Fuller, 1961; Klovan, 1966），いずれも構成正規分布集団が堆積または運搬のどのような process に由来したかを明らかにすることはできず，したがって，堆積物の粒度組成とその堆積環境との関係はなお不明確なままである。

堆積環境からの approach 以上の記述からも明らかなように，堆積物の粒度組成に関する研究が多いのに対して，堆積環境または生成の process から堆積物の粒度組成を説明しようとした試みは皆無といつてもよいであろう。その例外ともいべきものに Inman(1949) の研究がある。

Inman は流体によって運ばれる岩屑粒子の運動形式を surface creep, saltation, suspension の3つに分けることを再確認し，理想化された河川や海洋の流れを想定して実際の河床堆積物や深海底堆積物の粒度特性の説明を試みた。彼の説明は運動する流体の中での岩屑粒子の挙動特性に基づいており，この種の説明に流体力学的な観点からの考察が必要であることを強く印象づけた。しかし，説明の基礎にやや理論的な不明確さが残っていたことと註¹⁾，当時としては saltation に関する知識が極めて貧弱であったことの2点が，Inman の説明を不十分なままに留めたといえよう。

Bagnold (1966, 1973) の研究はこの2点を克服するのに必要な素材を提供しているように思われる。そこでこの報告では，前報（井口，目崎，1974 b）に統いて，Harding (1949) の方法によって構成正規分布集団を明らかにし，Bagnold の研究に基づいて surface creep, saltation, suspension の挙動特性をより具体的に考察することにより，信濃川下流部の河床堆積物の粒度特性とその堆積環境との関係の追究を試みることにする。

II 信濃川下流部

調査の対象としたのは，魚野川との合流点から下流，大川津分水地点までの信濃川の下流部の約40 Km の区間である（図1）。信濃川のこの区間の上流部分（大川津分水地点から 30 Km より上流，以下大川津分水地点からの距離によって位置を示す）では，両岸に広がる沖積平野は極めて貧弱で，側岸や河床の処々に基盤の第三系が露出し，この部分の流路は完全な冲積河道とはいえない。しかし，30 Km から下流，大川津分水にいたる部分では，両岸に沖積平野が広く発達し，一部人工的な護岸などを除くと，側岸や河底はすべて erodable で，ほぼ典型的な冲積河道ということができる。

この区間の河床物質は，上流部で粗粒で下流へ向って細粒になるのは当然であるが，長岡市の藏王橋（13 Km）付近までは礫が混っていて，いわゆる礫床区間を呈し，それより下流が砂床区間となっている。礫床，砂床の両区間ともに，河床形態は交互砂礫堆の範ちゅう（池田，1975）に属し，平水時には左右両岸寄りに交互に寄州を見ることができる。ただし最下流部は，大川津分水の堰により水面幅は広くなり，河床形態も何らかの影響を受けているように思われる。

III 河床砂れき

1) 河床砂れき試料の採取と処理

調査区間の河床物質の粒度組成を知るために，約4 Km ごとに計10地点の河床から試料を採取した（図1）。平水時の水面上に露出している1つの寄州でも，場所によってその表面を構成する砂礫の大きさが異なるので，その平均的な大きさを示す場所のなるべく河道の中央に近い地点を選ぶように務めた。細粒物質が相対的に少ない表層を除去し，その下層から1クラスター分の砂礫を採取し，少し間隔をおいて別の1クラスター，計2クラスターの砂礫を1地点から採取した。したがって1地点からの試料の採取量はクラスターの大きさによって異なり，多いところでは 50~60

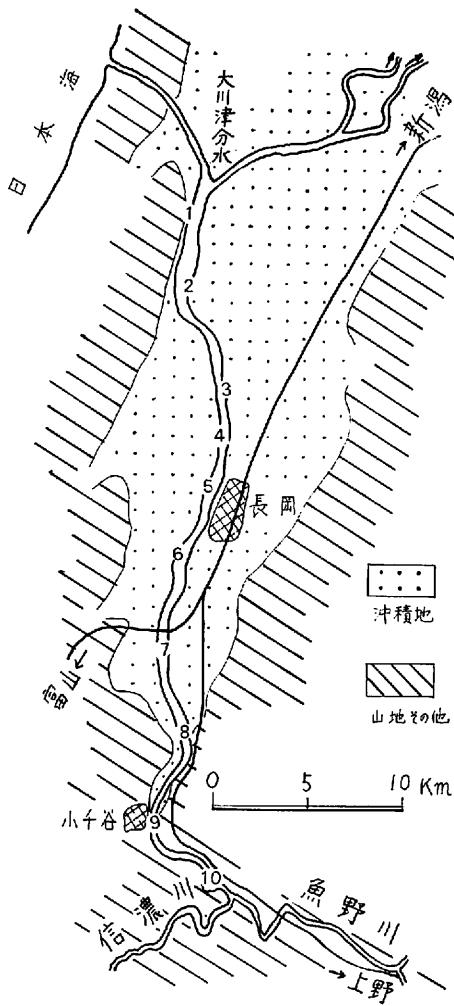


図 1 信濃川下流部および試料採取地点

Kg, 少ないところでは 1 Kg 以下であった (表 1)。

採取した試料は 0.25φ 間隔で篩いわけた。篩いわけは -3φ までは現地で、それより細粒部は研究室へ持ち帰って行なった。篩の網としては、 -1φ までは円形の穴をあけた金属板を用い、それより細粒部には標準篩を用いた。

篩いわけの結果、いずれの試料にも共通して、 -0.75φ の篩に残る粒子は極めて少量で、 -0.5φ の篩に残る粒子も他の篩のそれにくらべて明らかに少量であった。この事実は自然現象そのものに由来するのではなく、むしろ使用した篩の性質に

基づいていると考えられる。すなわち、 -1.0φ よりも粗粒部を篩った網の目は円形で、その大きさを直径であらわしてあるのに対し、 -0.75φ より細粒部に用いた標準篩は、網の目が正方形で、その大きさは一辺の長さであらわしてある。砂れきの粒子の形がすべて球かもしくは円柱状であれば、上記した 2 種類の篩をつなぎ合せることにより、 0.25φ 間隔の 1 つの系列の篩としての役目を果してくれるに違いない。しかし、もし粒子の形が完全に偏平であれば、正方形の対角線の長さに等しい粒径 (中径) の粒子までその篩を通過することになる。つまり標準篩にあっては、表示されている目開きの大きさの $\sqrt{2}$ 倍の大きさの粒子まで通過することになる。 $\sqrt{2}$ 倍を Phi-scale になおすと、表示されている Phi 値から 0.5 を引くことに相当するから、 -1.0φ の大きさの円形の目開きと -0.5φ と表示されている正方形の網の篩とは同じ大きさの目開きの篩としての役目を果たすことになる。

前記したように、 -0.75φ の篩にはごく少量、 -0.5φ の篩 (2つとも標準篩) には相対的に少量の粒子しか残らなかった事実は、砂れきの粒子の形がすべて球か円柱状もしくは完全に偏平のどちらでもないことに由来していることは明らかであるが、いずれにしても、円形と正方形の 2 種類の篩を用いて行なった篩いわけの結果には何らかの補正を施す必要があるだろう。

他の資料との比較の便を考えて、この報告では、正方形(標準篩)の目の大きさを規準とし、これに円形の目の大きさを合せるように補正をすることにした。具体的には、まず -1.25φ の円形の篩に残った粒子と、正方形の篩(標準篩)の -0.75φ に残った粒子 (ごく少量) とを加えて -0.75φ の篩に残った粒子とし、ついで、 -1.0φ の円形の篩に残った粒子と -0.5φ の標準篩に残った粒子 (相対的に少量) とを加えて -0.5φ の篩に残った粒子として表示することにした。そして、 -1.5φ よりも粗粒部の円形の目の篩はその Phi 値に 0.5 を加えた (φ の絶対値を 0.5 だけ小さくした) Phi 値であらわすこととした。粒子の形が完

表 1 粒径分布

(残留重量百分率)

試料番号 採取地点の 距離 粒径 ((phi))	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0.1 Km	4.4 Km	10.7 Km	13.1 Km	14.8 Km	19.8 Km	24.4 Km	29.2 Km	34.9 Km	39.9 Km
-6.75							13.27	14.64	16.70	12.68
-6.5							17.86	19.23	16.70	15.36
-6.25							21.01	18.17	28.22	
-6.0				0.93	4.69	3.48	22.04	27.58	28.22	
-5.75				4.22	10.57	12.07	27.06	31.94	25.31	36.61
-5.5				9.09	14.55	19.12	32.32	36.76	28.04	43.74
-5.25				18.39	24.98	26.73	37.11	43.83	33.86	50.28
-5.0				25.27	31.71	35.86	42.96	54.97	38.73	57.81
-4.75				31.32	41.55	40.82	48.12	61.13	45.11	61.49
-4.5				40.31	51.24	47.91	53.51	67.03	51.23	65.67
-4.25				44.72	55.08	52.61	56.83	69.52	54.57	68.46
-4.0				50.00	58.24	58.27	60.95	73.04	59.00	71.78
-3.75				54.48	61.20	62.38	64.29	76.01	62.37	74.37
-3.5				57.55	62.90	66.13	66.49	77.88	64.26	75.82
-3.25				61.84	66.30	70.13	70.08	80.49	67.68	78.35
-3.0				64.49	68.23	72.22	72.15	81.91	69.78	79.66
-2.75				67.21	70.51	74.42	74.38	83.30	71.93	81.12
-2.5				69.45	72.33	75.69	76.18	84.44	73.55	82.23
-2.25			0.24	72.35	74.38	76.99	78.02	85.42	75.76	83.65
-2.0	0.08		0.36	74.26	75.97	78.01	79.36	86.18	77.13	84.63
-1.75	0.08	0.03	0.51	75.73	77.27	78.77	80.42	86.70	78.11	85.39
-1.5	0.12	0.16	0.82	77.42	78.84	79.64	81.66	87.31	79.21	86.33
-1.25	0.20	0.17	1.07	78.38	79.75	80.19	82.32	87.64	79.87	86.89
-1.0	0.29	0.24	1.74	79.50	80.86	80.94	83.22	88.04	80.74	87.59
-0.75	0.57	0.37	3.12	80.56	81.93	81.65	84.20	88.49	81.78	88.31
-0.5	1.11	0.64	4.98	81.43	82.83	82.34	85.10	88.91	82.83	88.92
-0.25	2.41	1.21	9.02	82.81	83.90	83.38	86.46	89.46	84.80	89.73
0.0	3.70	1.25	12.93	83.69	84.45	84.10	87.21	89.77	86.06	90.15
0.25	7.08	4.19	23.20	85.31	85.27	85.39	88.11	90.22	88.06	90.66
0.5	12.59	8.76	42.56	87.16	86.18	86.83	89.31	90.83	89.94	91.27
0.75	25.09	19.91	68.44	89.68	87.73	88.97	91.08	91.79	92.38	92.04
1.0	37.67	31.69	82.82	91.21	88.95	90.44	92.34	92.54	93.77	92.71
1.25	59.20	46.87	93.02	93.06	90.88	92.75	94.22	93.53	95.76	93.59
1.5	84.90	73.27	98.01	94.98	92.82	95.26	95.97	95.04	97.45	94.91
1.75	91.26	82.17	98.95	95.72	93.62	96.22	96.65	95.87	98.04	95.60
2.0	97.66	93.01	99.53	97.08	95.28	97.73	97.75	97.47	98.89	96.94
2.25	99.29	97.50	99.58	98.17	96.85	98.69	98.52	98.44	99.38	97.69
2.5	99.55	98.67	99.59	98.63	97.46	99.00	98.81	98.82	99.51	98.13
2.75	99.73	99.62	99.61	99.24	98.39	99.44	99.23	99.30	99.70	98.78
3.0	99.78	99.78	99.62	99.43	98.74	99.59	99.38	99.47	99.76	99.01
3.25	99.83	99.87	99.64	99.71	99.34	99.78	99.62	99.69	99.87	99.33
3.5	99.85	99.91	99.69	99.82	99.54	99.86	99.72	99.79	99.91	99.50
3.75	99.90	99.94	99.77	99.91	99.75	99.92	99.82	99.88	99.94	99.69
4.0	99.94	99.95	99.86	99.94	99.82	99.93	99.86	99.91	99.95	99.78
試料採取量 (gr)	224.88	256.37	534.52	31259.8	34150.1	42580.2	47859.8	49810.0	60490.2	55989.7

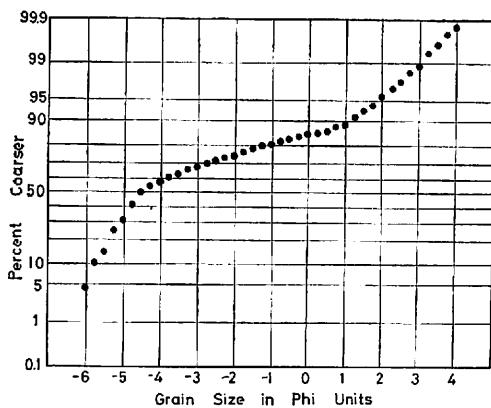


図 2 河床砂れきの粒径頻度分布
(試料 No. 5, 14.8 Km, 長岡大橋付近)

全に偏平でない限りこのような補正も完全とはいえないが、ある程度の目的は達したものと考える。

上記のような篩いわけと処理を行なった結果は表1のようになつた。

2) 粒径分布型

前述したように、起点から 13 Km (長岡市、藏王橋付近) より上流の信濃川は礫床、それより下流は砂床を呈しており、この2つの区間で河床砂れきの粒度組成は全く異なる。このうち、礫床区間から採取した7つの試料の示す粒度組成はいずれも同一の型に属するように思われ、しかもその型は前報 (井口、日崎, 1974 a, b) で扱つた酒匂川や鬼怒川のそれとは、粒径頻度曲線の分析にとって無視することができない違いが存在している。

図2は長岡大橋付近(14.8 Km)からの試料の粒径頻度を正規確率紙へプロットしたものである。この図の示す粒径頻度分布曲線は、後で行なう分析からもわかるように、粒径 0 ϕ あたりを境として、それよりも細粒な部分と粗粒な部分の2つに分けられることは一見して明瞭である。この点は酒匂川や鬼怒川の試料と同様である (井口、日崎 1974 b) が、2つに分けられたうちの粗粒部を1つの正規分布集団とみなすと、信濃川の試料では十分な適合性が得られないことが酒匂川や鬼怒川の場合と非常に異なる点である。図2では粒径

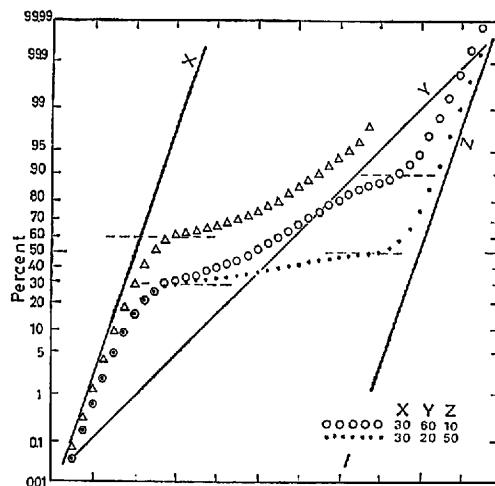


図 3 3つの正規分布集団の合成

-4.5 ϕ より粗粒の描点が図上で左下方へ急斜して分布し、そのため 0 ϕ あたりより粗粒部全体を1つの正規分布集団とみなすと適合性が非常に悪くなる。この傾向は信濃川の礫床区間からの試料に共通すると同時に、酒匂川や鬼怒川の場合とは著しく異なる点である。

このような性質をもつ粒径頻度曲線の、とくに粗粒部が、幾つかの正規分布集団が合成されたものであるかどうかを知ることと、もしそうであるならば、粒径頻度曲線からそれらの正規分布集団を分離する方法を見出すことがこの報告の1つの目的である。

3) 3つの正規曲線の合成

既に述べたように (井口、日崎, 1974 b, 井口, 1975 p.115), ある堆積物の粒径分布を幾つかの正規分布集団に分離するための最初の手掛りは、正規確率紙上で描く粒径頻度曲線の屈山の変換点を見出すことであった。ところが、前記した信濃川の礫区間からの試料では、図2からもうかがわれるよう、その粗粒部の範囲内に屈山の変換点を見出すことは必ずしも容易ではない。しかしこの部分を複数の正規集団に分離するための手掛けは、やはり屈曲の変換点を見出すことであるから、このためには何らかの手立てを構てる必要がある。

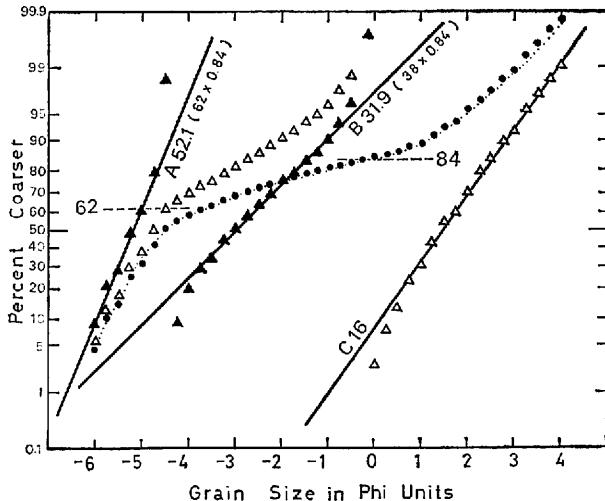


図 4 粒径頻度曲線の分析 (I)

前報（井口、目崎、1974 b）では 2 つの正規分布集団の合成を試みて分析の手掛りとしたが、ここでは 3 つの正規分布集団 X, Y, Z の合成を試みることにする。図 3 の直線 X, Y, Z が合成しようとする正規分布集団をあらわす。この X, Y, Z を、かりに、それぞれ 0.3, 0.6, 0.1 の割合で合成すると図の白丸、0.3, 0.2, 0.5 の割合で合成すると黒丸のようになる。したがって、白丸の分布には 30% と 90% の位置に屈曲の変換点がある筈であるが、前者が明瞭なのに対して、後者を図形から判断することはかなり困難である。一方、黒丸の分布では 30% と 50% の位置に屈曲の変換点がある筈であるが、後者が明瞭なのに対して、前者を図形から判断することは困難である。このようにして、同じ正規集団の合成でも、その合成割合によっては、合成曲線に屈曲の変換点が明瞭にあらわれたり、あらわれなかったりすることが明らかである。

信濃川の礫床区間からの試料の粒径頻度曲線は、粗粒部で屈曲の変換点が不明瞭で、図 3 の黒丸の分布に似ている。そこで、図 3 の黒丸の分布で、30% の位置にある筈の屈曲の変換点を図形の上でも明瞭になるようにするために、X と Y の合成割合を任意に変えてみることにする。図 3 の

三角印がその結果で、50% までの個々の黒丸印のパーセンテージ数に 50% の逆数、すなわち、 $100/50=2$ を掛けたものである。三角印の点の描く图形は 60% の位置に屈曲の変換点があることは图形から明瞭である。これをもとの黒丸印に戻して、 $60 \div 2 = 30\%$ の位置に屈曲の変換点のあることを知ることができる。

④ 粒径頻度曲線の分析

以上の考察を参考として、信濃川の Loc. 5 (14.8 Km) (図 1) からの試料の粒径頻度曲線を分析したのが図 4 で、その手順は次のようにある。図 4 の黒丸は表 1 の試料番号 5 の数字をプロットしたもので (図 2 と同一)、これらの描く图形には、前にも述べたように、84% (粒径約 0.0 φ) の位置に明瞭な屈曲の変換点が認められる。このことを手掛りとして、既に述べた (井口、1975, pp. 115~119) 方法を適用すると表 2 の b, c 欄のようになり、これをプロットすると図 4 の白三角の点となる。

この白三角の点は 0.0 φ より細粒部と粗粒部とで 2 つの系列に分かれ、前者が 1 つの直線に沿って分布しているのに対して、粗粒部の白三角点は途中で折れ曲り、62% の位置に屈曲の変換点が見出される (精確には “白三角の点の描く曲線は

表 2 正規集団分離の手順

Size (φ)	a	b $a \times \frac{100}{84}$	c $\frac{(a-84)}{16}$	d $a \times \frac{100}{62}$	e $\frac{(a-62)}{22}$
-6.0	4.69	5.58		7.56	
-5.75	10.57	12.58		17.05	
-5.5	14.55	17.32		23.50	
-5.25	24.98	29.74		40.30	
-5.0	31.71	37.75		51.15	
-4.75	41.55	49.46		67.02	
-4.5	51.24	61.00		82.65	
-4.25	55.08	65.57		88.80	
-4.0	58.24	69.33		93.93	
-3.75	61.20	72.86		98.70	
-3.5	62.90	74.88		4.09	
-3.25	66.30	78.93		19.55	
-3.0	68.23	81.23		28.32	
-2.75	70.51	83.94		38.68	
-2.5	72.33	86.11		46.95	
-2.25	74.38	88.55		56.27	
-2.0	75.97	90.44		63.50	
-1.75	77.27	91.99		69.41	
-1.5	78.84	93.86		76.55	
-1.25	79.75	94.94		80.68	
-1.0	80.86	96.26		85.73	
-0.75	81.93	97.54		90.59	
-0.5	82.83	98.61		94.68	
-0.25	83.90	99.88		99.55	
0.0	84.45	2.81			
0.25	85.27	7.98			
0.5	86.18	13.63			
0.75	87.73	23.31			
1.0	88.95	30.94			
1.25	90.88	43.00			
1.5	92.82	55.13			
1.75	93.62	60.13			
2.0	95.28	70.50			
2.25	96.85	80.31			
2.5	97.46	84.13			
2.75	98.39	89.94			
3.0	98.74	92.13			
3.25	99.34	95.88			
3.5	99.54	97.13			
3.75	99.75	98.44			
4.0	99.82	98.88			

62% の線に対して右上から左下に向って漸近してゆく”と表現すべきである。この粗粒部の白三角点に対して、もう一度同じような手順を繰り返すと、表 2 の d, e 欄のようになる。これをプロットすると図 4 の黒三角の点となる。この黒三角の点は前と同様に 2 つの系列に分れてそれが直線的な分布をし、それらに最適な直線が求めようとする正規分布集団をあらわしている。

以上のようにして、図 4 の黒丸の描く曲線を 3 つの正規分布集団に分離したのであるが、既に述べた名命法（井口、1975, p. 119）に従って、これら 3 集団を粗粒な方から A 集団、B 集団、C 集団と呼ぶことにする。試料の全重量 (34, 150.1 gr) に対する各集団の割合は、A 集団 : $62 \times 0.84 = 52.1\%$, B 集団 : $(100 - 62) \times 0.84 = 31.9\%$, C 集団 : $100 - 84 = 16\%$ となる。

この混合割合で 3 つの正規集団を合成すると図 4 の点線となって黒丸の描く曲線によく一致し、上記のような分析とその結果の妥当性を確認することができる。

同じ手法を他の試料の粒径曲線に適用し、その 2, 3 の例を図示したのが図 5 である。またすべての試料について分析結果を示すと表 3 のようである。

IV 水理資料

河床物質の粒度組成の特徴をその堆積環境との関連から説明してゆくためには、その河川の水理資料が必要である。ところが、前項で述べた採取砂れきは、いつの出水で流されたのか明らかでない。したがって、この報告では特定の出水を対象とはできない。そこで、河道の諸性質と対応性が高いと一般に考えられている、河岸満水時の水理資料を対象とすることにし、とくにその時点での掃流力を求めるにした。

この掃流力は以下に述べるように河道形状から求めたが、その際、次の点に留意した。河道の形状その他の性質は河道に沿って必ずしも一様ではなく、多少とも三次元性をもっている。そして、その河道内を流れる水の流れにも三次元性があ

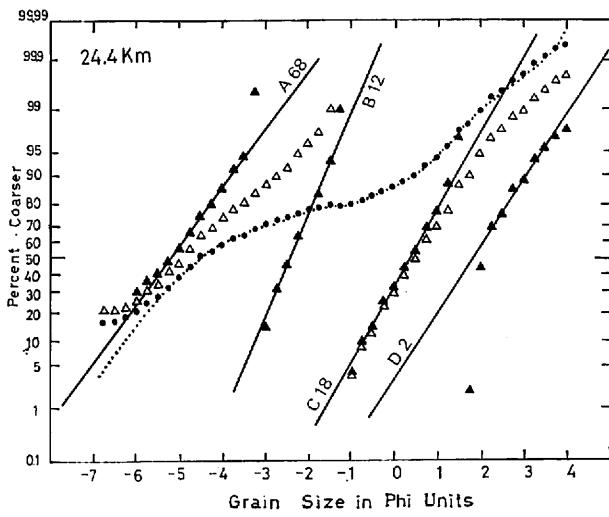
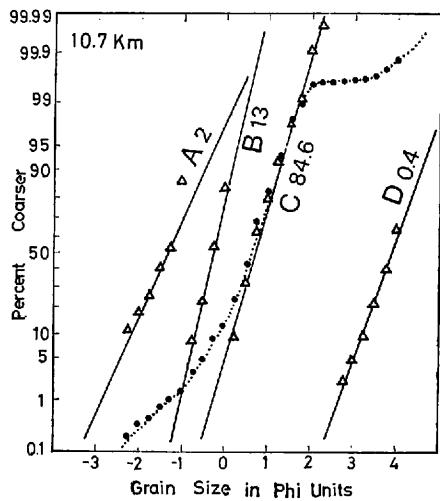
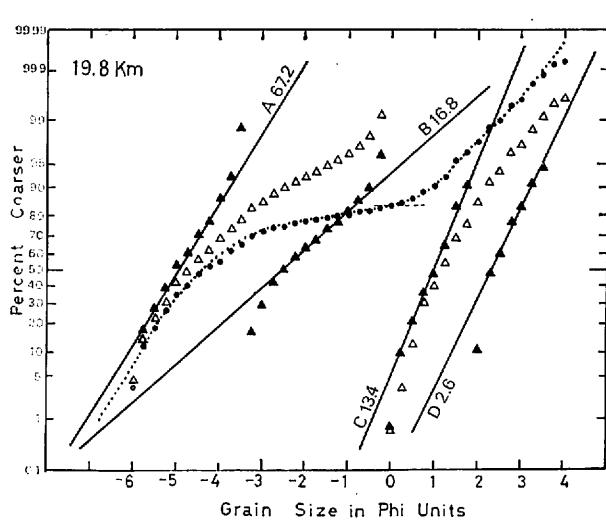
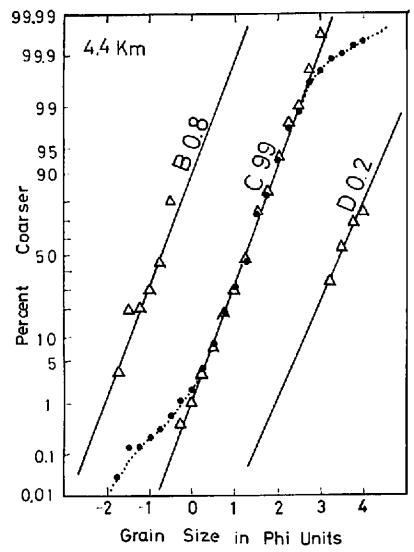


図 5A 粒径頻度曲線の分析 (II)

図 5B 粒径頻度曲線の分析 (III)

り、河道内の各場所で一様ではない。しかし、この研究で解明を意図しているのは、このような三次元性にもとづく水流と河床物質の粒度組成との局所的な対応関係ではなく、河川のある区間における両者の平均的または代表的な値の対応関係である。前項で述べたように、付近で平均的な大きさを示す地点から砂れきを採取したのはこの意味を含めたつもりである。

掃流力の値を得るために水深と河床勾配との資料を必要とするが、これらは河道横断形から求

めることにした。横断形資料としては建設省長岡工事事務所による昭和 47 年度実施の横断測量図（水平縮尺 1/1000, 鉛直縮尺 1/100）を使用し、まず図 6 のように横断形状要素を求めた。この図で a : 河道横断面積, b : 河岸満水位の高さ, w : 河道幅, $a \div w = d$: 断面平均河道深さである。このうち河岸満水位の高さ (b) を横断図から正確に見出すことは必ずしも容易ではないが、算定しようとしている掃流力の値への影響は直接的ではないので、この高度の割り出しは比較的 rough に

表 3 河床砂れきの粒度組成

M_φ : Phi scale による中央粒径, σ_φ : Phi scale による標準偏差, W% : 構成割合 (%)

試 料	構成集団											
	A			B			C			D		
	M _φ	σ _φ	W%	M _φ	σ _φ	W%	M _φ	σ _φ	W%	M _φ	σ _φ	W%
1	—	—	—	-1.25	0.5	0.4	1.1	0.5	99.4	3.75	0.4	0.2
2	—	—	—	-0.75	0.6	0.8	1.2	0.5	99	3.45	0.65	0.2
3	-1.3	0.9	2	-0.4	0.2	13	0.7	0.4	84.6	3.38	0.5	0.4
4	-5.25	0.4	40	-3.35	1.2	40	0.8	1.1	20	—	—	—
5	-5.2	0.6	52.1	-3.0	1.5	31.9	1.25	1.25	16	—	—	—
6	-4.95	0.9	67.2	-2.6	1.7	16.8	1.0	0.6	13.4	2.25	0.7	2.6
7	-5.4	1.3	68	-2.4	1.3	17	0.9	0.9	14.1	3.25	0.75	0.9
8	-5.6	1.0	76.5	-2.9	1.6	13.5	1.35	0.7	8.5	2.7	0.85	1.5
9	-5.2	1.05	68	-2.45	0.65	12	0.4	0.9	19.6	3.1	0.55	0.4
10	-5.95	0.8	63	-3.4	1.8	27	1.25	0.75	7.4	2.75	0.9	2.6

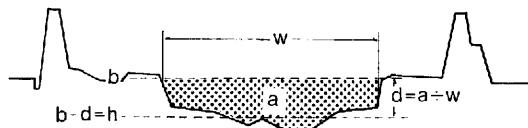


図 6 河道横断形模式図

行なった。

図 6 のようにして求めた平均河道深さ、すなわち河岸満水時の断面平均水深の値は、主として河床形の三次元性のために、隣接する断面の間でもかなり大きい違いを示すことがある。このことを試料 No. 7 の採取地点 (Loc. 7, 起点からの距離, 24.4 Km) 付近の例で示すと表 4 のようである。この表では、1.75 Km の区間で 250m おきに 8 本の横断測量が行なわれており、このうち最大の平均河道深さは最小のそれの 1.5 倍以上の値となっている。できるだけ区間の平均的な値を採用するという趣旨から、表 4 の場合には、試料 No. 7 に対応する河道深さの代表値として、8 つの平均河道深さをさらに平均した値 (2.75m) を採用することにした。表 5 に示した各採取地点の平均水深はこのようにして得た値である。

表 4 越路橋付近の河道横断形状

(平均河道深 : 2.75 m)

起点から の距離 (Km)	河岸満水 位 (b) (海拔 m)	河道幅 (w) (m)	横断面積 (a) (m ²)	平均河 道深 (d) (m)	平均河 床高 (h) (海拔 m)
23.75	28.5	540	1,793	3.32	25.18
24.0	29.0	510	1,559	3.06	25.94
24.25	29.0	375	1,113	2.97	26.03
24.5	29.0	415	981	2.36	26.64
24.75	29.5	490	1,631	3.33	26.17
25.0	29.5	490	1,068	2.18	27.32
25.25	29.5	365	782.5	2.14	27.36
25.5	30.0	355	949.5	2.67	27.33

次に、各採取地点の河床勾配は以下のようにして求めた。ある横断面における平均河床高の海拔高度の値を y, その断面の起点からの距離を x として、横断図を操作して得た約 80 の個々の値を半対数グラフ用紙へプロットすると、x と y との関係は $x=13 \text{ Km}$ の地点を境として 2 つの指數曲線にわかれる傾向が認められた。

そこで、それぞれの区間にについて最小自乗法によって x と y の関係を求めるとき、

表 5 水理資料

地 点	起点からの距離(Km)	河床勾配 $\times 10^{-3}$	水 深 (cm)	τ_0 (dyn/cm ²)	v_*^2 (cm ² /s ²)
1 町 軽 井	0.1	0.2181	332	0.0724	70.95
2 与 板 橋	4.4	0.2398	393	0.0938	91.89
3 天 神 町	10.7	0.2720	445	0.1210	118.62
4 蔵 王 橋	13.1	0.7267	493	0.3582	351.08
5 長 岡 大 橋	14.8	0.7918	434	0.3436	336.77
6 長 生 橋	19.8	1.019	376	0.3832	375.57
7 越 路 橋	24.4	1.286	275	0.3536	346.52
8 白 岩 下 流	29.2	1.639	298	0.4833	478.50
9 旭 橋	34.9	2.185	470	1.0270	1006.42
10 牛 ケ 島	39.9	2.813	352	0.9900	970.25

$$(x < 13 \text{ Km}) \quad y = 0.010467 e^{0.0208x}$$

$$(x > 13 \text{ Km}) \quad y = 0.007424 e^{0.0505x}$$

ただし、 x の単位は Km, y の単位は m である。

上式を x について微分すると

$$(x < 13 \text{ Km}) \quad dy/dx = 0.0002177 e^{0.0208x}, \quad (1)$$

$$(x > 13 \text{ Km}) \quad dy/dx = 0.000375 e^{0.0505x} \quad (2)$$

となる。河床試料採取地点の x の値によって(1)または(2)式の右辺を計算すれば、河床の凹凸を縦断方向に平滑にしひきのその地点の河床勾配を得ることができる。

表 5 には上記のようにして求めた各試料採取地点の河床勾配が掲げてあり、これと平均水深とが対象としている堆積環境を指示する因子であり、これによって各地点の掃流力を求めることができる。

V 考 察

この報告の主要な目的は表 1 のような砂れきの粒度組成の由来を表 5 に掲げた水理条件との関係から説明することである。そのためには、表 5 のような水理条件下での流砂の状況について考察する必要がある。

流砂階線図 一般的に言って、低流砂階と高流砂階(井口, 1975)とでは流砂の状況が著しく異なるので、信濃川の下流部の対象としている区

間で、河岸満水時に高流砂階に達しているか否かをまず検討する。この検討のために、前報(井口, 日崎, 1974 b)と同様に R. A. Bagnold のダイアグラムを用いることにする。ただしこの報告の趣旨に適合するために Bagnold (1966) が提示したダイアグラムに流砂階の限界を示す線を加えることにした(図 7 参²)。

砂床形がデューンから平滑にかかわった時点で高流砂階に達したものとみなし、その時の無次元掃流力 $\theta = \tau / (\sigma - \rho)gd$ の値を既存の水路実験の資料から求めると次のようである。ただし、 τ : 掫流力、 σ : 砂粒の密度、 ρ : 水の密度、 g : 重力の加速度、 d : 砂粒の粒径。

Simons & Richardson の実験(Guy, Simons, & Richardson, 1966)では $d=0.45 \text{ mm}$ で $\theta=0.5$, Gilbert (1914) の実験では $d=0.307 \text{ mm}$ で $\theta=0.5$, $d=0.376 \text{ mm}$ で $\theta=5.5$, $d=0.507 \text{ mm}$ で $\theta=0.4$, $d=0.79 \text{ mm}$ で $\theta=0.3$, $d=1.71 \text{ mm}$ で $\theta=0.2$ である。これらの値を描点すると図 7 の黒丸のようになる。もともと、 θ の値と出現する砂床形とには 1 対 1 の対応関係はないが、ある程度の対応関係を認めることはできる。そこで、図 7 の黒点を包むように 2 本の線を描けば、この 2 本の線が高流砂階と低流砂階とのおおまかな限界を示しているとすることができよう。

かくて、図 7 の 3 種類の線は岩屑移動の形式と程度とを画しており、この図は 1 種の流砂階線図

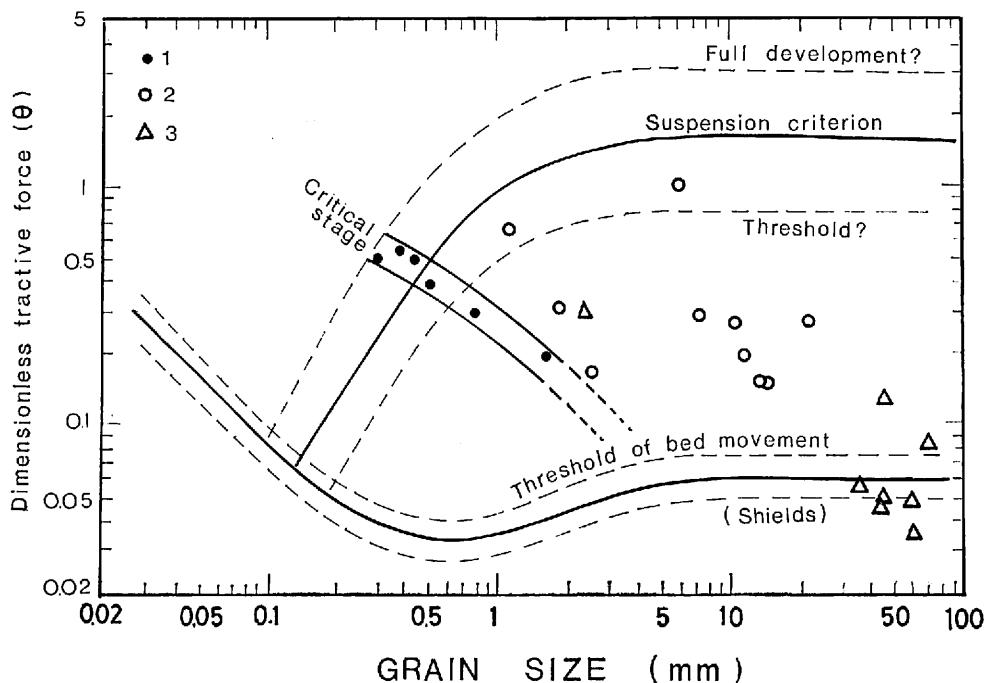


図7 流砂階線図

1: 実験値, 2: B集団, 3: A集団

表6 平均粒径 (m) と無次元掃流力 (θ)

試料	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
集団	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B										
m (cm)	—	0.25	—	0.18	0.24	0.11	3.73	1.46	4.53	1.36	4.60	1.17	6.06	0.73	6.02	1.08	4.73	0.61	7.31	2.18
θ	—	0.17	—	0.31	0.31	0.67	0.058	0.15	0.046	0.15	0.050	0.20	0.035	0.38	0.049	0.27	0.13	1.02	0.082	0.28

(transport stage diagram) と呼ぶことができる。なお、流砂階の限界の指標とした砂床形は砂粒 (<1 mm) の範囲について実験的に確認されている (Simons & Richardson, 1966) だけで、砂粒より粗大な粒径 (> 2 mm) に関しては明確ではない。しかし、図7の流砂階の限界を示す線の傾向からみて、5 ~ 6 mm より粗大な岩屑粒子では、動き始めた時点ですでに高流砂階に相当する段階に達しているものと解釈されよう。

河岸満水時の流砂階 次に、図7の流砂階線図へ、IIIで分析した各試料に関するプロットを試み

る。プロットはA集団とB集団のみについて行なう。掃流力 (τ) は河岸満水時のそれを採用することは言うまでもないが、A集団、B集団の代表粒径としては、表3のような単なる平均粒径よりも、現象に含まれる物理的内容から考えて、(3)式のような加重平均粒径 (m) を用いることが好ましい。

$$m = \frac{\sum (Md_i \cdot p_i)}{\sum p_i} \quad (3)$$

ここで Md_i は各階級の中央値、 p_i はその階級に属する粒子の重量頻度である。

各試料のA集団およびB集団について m と θ の値を示すと表6のようで、これをプロットすると図7の三角印および白丸印となる。この図を見ると、各試料ともA集団とB集団の点は、2, 3の例外を除いて、浮流限界と始動限界の間で、しかも高流砂階の範囲へ落ちている。このことはA集団とB集団とがともに掃流物質に由来することと、河岸満水時にはこれら掃流物質の粒径に関して高流砂階の段階に達していたことを示唆している。

高流砂階における流砂の状況 前報(井口、目崎、1974 b)ではB集団の由来の説明が不十分であった。これをより明確にするには、高流砂階における掃流物質の移動状況について考察する必要がある。

高流砂階では底面に沿ってある厚さの saltation zone が出現する (Gilbert, 1914; Bagnold, 1966)。この saltation zone の内部では、Bagnold (1973) によると、個々の粒子の運動は激しく複雑であるが、その頂部から基部にいたるまですべてが常に激しいわけではない。その基部には、当然であるが、粒子が緩慢な運動をする部分がしばしば見出され、その運動は始動限界 (threshold) 付近における個々の粒子の運動に似ている。Inman (1949) が指摘した surface creep と saltation とはこの始動限界付近または低流砂階に見られる現象であるが、いまここで述べているのは高流砂階において激しく運動をする saltation とその基部にみられる surface creep である。

以上の考察から、高流砂階においては底面 (rigid boundary) から上方へ surface creep, saltation, そして suspension と様式の異なる粒子の運動状態が層状に出現することが想定されるが、それらの境界面の位置と、それぞれの運動様式、とくに前2者の様式をとる粒子の粒径特性とに関しては未だ何らの情報もたらされていない。恐らくこの2つは、流れのいろいろな種類の脈動に応じて変動を繰返し、著しく統計的な性格をもっているに違いない。

構成正規分布集団の由来 III-1) で述べたよ

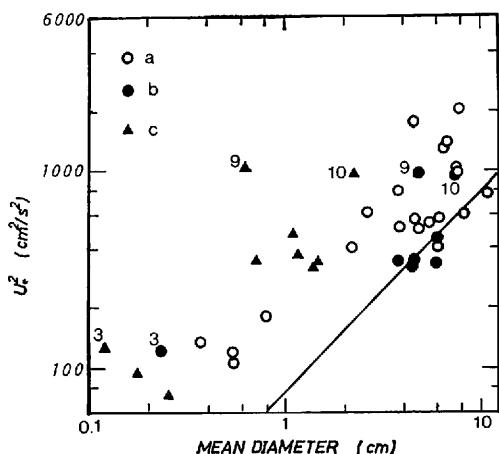


図 8 A集団およびB集団の平均粒径との関係

a : 鬼怒川, b : 信濃川A集団, c : 信濃川B集団

うに、河床の表層には相対的に細粒物が少ない。これはある出水の水位低下時におこった armore 現象のあらわれである。したがって、その下層から採取された試料は最高水位の前後に流されてきた掃流砂れきの一部とみなしてさしつかえない。

この掃流砂れきが4つまたは3つの正規分布集団からなっている(他の河川では2つの集団からなることもある)。これらA, B, C, Dの4つの集団の由来については前報(井口、目崎、1974 b, p. 553)で簡単な説明を試みたが、目崎、北、柿崎(1976)の信濃川の与板橋地点での実測はそれをある程度実証しているといえよう。ただし、前報ではB集団を掃流と浮流の両者にまたがるような運動に由来すると述べたが、このようなことは実際上は考え難い。前述したように、B集団はむしろ掃流様式の運動を行なう固有の大きさの粒子からなるとするのが妥当である。

A集団とB集団とをともに掃流による集団とし、前報と同じ趣旨から、これら両集団の加重平均粒径と各試料採取地点の河岸満水時の掃流力との関係をみると図8のようである。この図は前報のfig. 9と同じ性質の図で、斜めの直線は岩垣公式をあらわし、比較のためにプロットしてある鬼怒川の資料には加重平均粒径が用いてある。この

図をみると、信濃川の試料3, 9, 10の点はA集団、B集団とともに信濃川の他の点の示す傾向とは異なった位置に落ちている。このうち試料9と10の採取地点付近は、ともに河床または河岸に基盤の第三系が露出していて、沖積河川の性質を十分に具えていない。その上、前者は水力発電所放水口の近くに位置し、河道形態に人为的な影響があらわれていることが考えられる。試料3についての詳細は以下のところ不明である。

これらの点を除くと、信濃川からのB集団は鬼怒川からのA集団の大半と同じ傾向を示し、信濃川からのA集団は鬼怒川からのそれの一部とともに限界摩擦速度に近い位置に落ちている。鬼怒川と信濃川とでは水理資料のとり方に違いがあるが、もしこの資料のとり方の違いが上記した描点の示す傾向に影響をしていないとすれば、あるいは鬼怒川と信濃川とでは、水出時の高流砂階に相当する段階の流砂状況、とくに saltation zone 内部における流砂特性に固有な違いのあることも考えられる。

それはともかくとして、図8の信濃川のA集団とB集団の描点のみに注目すれば、前者が限界摩擦速度付近に落ち、後者は粒径にしてそれよりかなり小さい位置に落ちて別の傾向を示すことが認められる。これら的事実を踏まえて、A集団を surface creep, B集団を saltation に由来する集団と便宜上認定することにする。上記のような事実以外に、このような認定をする積極的な根拠は以下のところもち合せていない。このほか、C集団が浮流に由来することは前報(1974 b)以上に論ずる必要はないだろうし、D集団はその定義(Einstein, 1950)からみて wash load に由来することは明らかである。

V まとめ

以上をまとめると次のようである。1) 信濃川下流部の河床から採取した試料はA, B, C, Dの4つの正規分布集団からなると認めることができる。ただし、試料によってはA集団またはD集団が認められないものもある(表3)。これら試

料のうち、礫床区間からのものは、その粗粒部の粒径分布が酒匂川や鬼怒川の場合とは異なった型を呈している。2) 対象区間の信濃川の河道形状から河岸満水時の水理資料を求める表5のようになる。3) 表5の水理資料と加重平均粒径[(3)式]とを用いてA集団およびB集団を流砂階線図(図7)へプロットすることにより、これら両集団がいずれも掃流様式に由来することを認めることができる。4) さらに掃流力(摩擦速度)と平均粒径との関係を示すプロット(図8)を参考として、結局、A集団は surface creep, B集団は saltation, C集団は suspension, D集団は wash load にそれぞれ由来するものと解釈することができる。

この研究にあたり、信濃川に関する資料を快く提供していただいた建設省長岡工事事務所、現地調査に際して多大の援助をいただいた大手開発(株)新潟営業所の両機関に対して謝意を表します。また諸種の計算を手伝っていただいた小野有五氏および筑波大学学生の伊勢屋ふじ子さんにお礼を申し上げます。

注

註1) 本稿脱稿後に Middleton (1976) の論文が印刷されていることを知った。この論文で Middleton は幾つかの興味ある点を指摘しているが、とくに Inman (1949) の説明で理論的に不明確であった部分を、その後の実測値などを用いて明確にしている。

註2) この図の suspension criterion は $\theta = 0.4 V^2 / gd$ を筆者等が計算した値によって示してある。Bagnold (1966) のダイアグラムではV(砂粒の沈降速度)の値が小さく見積られ過ぎているように思われる。

参考文献

- 池田 宏(1975)：砂礫堆からみた河床形態のタイプと形成条件. 地理評, 48, 721-730.
井口, 目崎(1974 a)：沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(Ⅰ). 東教大地理学研究報告, XVIII, 25-38.
井口, 目崎(1974 b)：沖積河川における河床砂れきの粒度組成について(Ⅱ). 地理評, 47, 545-556.

- 井口正男(1975)：漂砂と流砂の水理学。古今書院，290 p.
- 日崎，北，柿崎(1976)：信濃川下流部与板橋で観測した流砂の粒度組成について。日本地理学会予稿集，10，p. 136, 137.
- Bagnold, R. A. (1966) : An approach to the sediment transport problem from general physics. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 422-I
- Bagnold, R. A. (1973) : The nature of saltation and of 'bed-load' transport in water. Proc. R. Soc. Lond. A. 332, 473-504.
- Einstein, H. A. (1950) : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U.S. Dept. Agr. Tech. Bull., 1026.
- Folk, R. L. (1966) : A review of grain-size parameters. Sedimentology 6, 73-93.
- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957) : Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters. Jour. Sed. Petrol., 27, 3-26.
- Fuller, A. O. (1961) : Size distribution characteristics of shallow marine sands from the Cape of Good Hope, South Africa. Jour. Sed. Petrol., 31, 256-261.
- Gilbert, K. G. (1914) : The transportation of debris by running water. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 86.
- Guy, H. P., Simons, D. B., & Richardson, E. V. (1966) : Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 462-1.
- Harding, J. P. (1949) : The use of probability paper for the graphical analysis of polymodal frequency distributions. Jour. Marine Biol. Assoc., New Series, 28, 141-153.
- Harris, S. A. (1958) : Probability curves and the recognition of adjustment to depositional environment. Jour. Sed. Petrol., 28, 151-163.
- Inman, D. L. (1949) : Sorting of sediment in the light of fluid mechanics. Jour. Sed. Petrol., 19, 51-70.
- Inman, D. L. (1952) : Measure for describing the size distribution of sediments. Jour. Sed. Petrol., 22, 125-145.
- Klovan, J. E. (1966) : The use of factor analysis in determining depositional environments from grain-size distributions. Jour. Sed. Petrol., 36, 115-125.
- Krumbein, W. C. (1934) : Size frequency distribution of sediments. Jour. Sed. Petrol., 4, 65-77.
- Krumbein, W. C. (1938) : Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve. Jour. Sed. Petrol., 8, 84-90.
- Krumbein, W. C. & Aberdeen, E. (1937) : The sediments of Barataria Bay. Jour. Sed. Petrol., 7, 3-17.
- Mason, C. C. & Folk R. L. (1958) : Differentiation of beach, dune, and aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas. Jour. Sed. Petrol., 28, 211-226.
- Middleton, G. V. (1976) : Hydraulic interpretation of sand size distributions. Jour. Geol., 84, 405-426.
- Otto, G. H. (1939) : A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analysis of sediments. Jour. Sed. Petrol., 9, 62-76.
- Pettijohn, F. J. (1957) : Sedimentary rocks. Harper, New York, 718 p.
- Simons, D. B. & Richardson, E. V. (1966) : Resistance to flow in alluvial channels. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 422-J.
- Spencer, D. W. (1963) : The interpretation of grain-size distribution curves of clastic sediments. Jour. Sed. Petrol., 33, 180-190.
- Udden, J. A. (1914) : Mechanical composition of clastic sediments. Bull. geol. Soc. Amer., 25, 655-744.
- Visher, G. S. (1969) : Grain size distributions and depositional processes. Jour. Sed. Petrol., 39, 1074-1106.
- Wentworth, C. K. (1922) : A scale of grade and class terms for clastic sediments. Jour. Geol., 30, 377-392.
- Yatsu, E. (1955) : On the longitudinal profile of the graded river. Trans. Amer. Geoph. Union, 36, 655-663.