

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

河 村 三 郎*
小 沢 功 一**

1. 緒 言

山地河川における粗度係数、流速分布、流砂量、安定河床、河床の Armoring (洪水流によって河床表面の細かい砂礫が下流へ流送され、大粒径の礫および岩石が河床面に残される粗粒化現象をいう)などを研究するためには、河床材料の粒度分布を的確に把握する必要がある。しかしながら、山地河川の河床材料は一般に大粒径の粒子からなり、通常のサンプリング方法とふるい分け試験は適用できない場合が多い。特に、平均粒径が 10 cm 以上になると、ふるい分け試験が不可能となる。したがって、山地河川における河床材料のサンプリングと粒度分布の解析には他の方法が必要となってくる。

一般に、サンプリング方法を大別すると容積サンプリング (Volumetric Sampling, または Bulk Sampling) と表面サンプリング (Areal Sampling, または Surface Sampling) の二方法がある。前者の容積サンプリングの方法は前述のように大粒径の山地河川には適用できない方法である。後者の表面サンプリングの方法としては

- ① 面積格子法 (Grid Method)
- ② 線格子法 (Line Grid Method)
- ③ 平面採取法 (Quadrat Method)
- ④ 写真測定法 (Photograph Method)

などがある。著者らは、1968年に山地河川におけるサンプリング方法として、最も適合する方法を見出すために、前述の諸方法を長良川に適用して粒径の大きい山地河川の粒度分布の推定方法を研究した¹⁾。本文においては、最初に河床表面の最大粒径が 10~20 cm 程度の河床材料を平面採取法で採取して通常のふるい分け試験を行ない、この結果と面積格子法および線格子法による結果とを比較して、山地河川における最適なサンプリング方法およびサンプリングの必要粒子数を統計的に求めてい

る。また、山地河川の相当粗度の推定法を考察し、さらに計算例によって粒度分布の計算法を示している。

2. サンプリング方法と分析方法

(1) 面積格子法

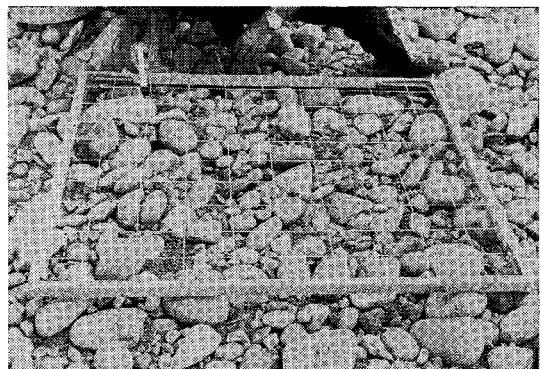
写真-1のように、10 cm 間隔に糸を張り、格子を組んだ 1×1 m の木枠を測定しようとする場所に置き、各格点下の粒子を採取する方法であって、かりに面積格子法と名づけた。格点間隔は最大粒径の長さに対応させて選ぶようにする。著者らは、長良川の忠節橋上流、約 200 m の最大粒径が 10 cm 以下 (A 地点) と 10 cm 以上 (B 地点) の 2 地点からこの方法により河床材料を採取した。A 地点においては最大粒径が約 6 cm であったから 10 cm 間隔の格点下の粒子 (81 個) を採取した。B 地点においては、最大粒径が約 19 cm であったから 20 cm 間隔の格点下の粒子 (36 個) を採取した。

分析方法としては、次の二方法を使用した。

a) 重量百分率

採取した各粒子の三軸長 (長軸 a , 中軸 b , 短軸 c) を測定し、三軸長を使用して体積 V を式 (1) により計算し、さらに粒子の単位体積の重量を体積 V に掛けて

写真-1 面積格子法によるサンプリング



* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

重量を計算し、中軸 (b) のある粒径範囲ごとに重量百分率を求めた。

$$V = c^2(ab)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

本文においては、1個の粒子の代表粒径として中軸径 (b) を取っているが、代表粒径としては次のような表現法がある。

- d_n : Nominal Diameter——同体積の球の直径
- d_s : Sieve Diameter——粒子がふるいを通過する直径 (ふるい径)
- d_a : 三軸長の算術平均径 $= (a+b+c)/3$
- d_g : 三軸長の幾何平均径 $= (abc)^{1/3}$

T.C. Muir²⁾ は、Tyne 河における実測値から d_n と b , d_a , d_g との関係を考察して、次のような結果を得ている。

- b : d_n より 2.1% 大きい
- d_a : d_n より 2.4% 小さい
- d_g : d_n より 6.4% 小さい
- d_s : d_n より 8.2% 小さい

したがって、粒子の代表粒径として中軸径 (b) あるいは三軸長の算術平均径 d_a がよいことが知られる。特に、中軸の測定は最も簡単である。河床材料は、一般に長円体から球の範囲にあると考えられる。そこで、長円体粒子と同体積の球の直径 d_n の式を求めると、式 (2) のようになる。

$$d_n = \left[\frac{6}{\pi} c^2 (ab)^{1/2} \right]^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

b) 個数百分率

中軸について区分した粒径範囲ごとに個数および累加個数を求め、さらに区分した粒径範囲ごとの個数を累加個数で割って個数百分率を求める。

(2) 線格子法

この方法は前述の面積格子法の変形であって、写真—2

写真—2 線格子法によるサンプリング



のように、測定しようとしている地点の下流方向に巻尺を張り、最大粒径の長さに対応する間隔を格点間隔にとり、これらの格点の下の粒子を採取する方法である。

Kellerhals³⁾ は水中のサンプリングにこの方法を変形して使用している。水中サンプリング (水深が浅い場合) は、一様な歩調で水中を歩き、一步間隔あるいは数歩間隔ごとに足の下に粒子をサンプリングする方法である。この方法は陸上においても簡単に使用できるサンプリング方法であって、歩測格点法 (Paced Grid) と呼ばれる方法である。

長良川のA地点では 10 m の長さにわたって 10 cm 間隔に 100 個の粒子を採取した。B地点においては、10 m の長さにわたって 20 cm 間隔に 50 個の粒子を採取した。サンプリングした資料の分析方法は、面積格子法の場合と同じである。

(3) 平面採取法

数 m² の河床表面に露出した全粒子を採取する方法である。採取した資料の分析は、ふるい分け試験により行なう。長良川では、AおよびB地点において、それぞれ 1 m² の河床表面の全露出粒子を採取した。また、AおよびB地点の表層を除いた下層の河床材料を別に採取してふるい分け試験を行なった。この方法は、E.W. Lane と E.J. Carlson⁴⁾ が最初に使用した方法であって、Lane らは 1 y² の全表面粒子をサンプリングしてふるい分け試験を行なった。

(4) 写真測定法

河床面上の写真を取り、露出粒子の直交する二軸長を写真から推定し、個数百分率を求める方法である。この場合の粒子代表径は二軸の算術平均径または幾何平均径を使用する。A.F. Pashinskiy⁵⁾ は、この方法を使用してソビエトの Psezuapse 河の粒度分布を求めた。この方法は、水深が大きい場合の水中サンプリング (水中カメラの使用) や、人間の近づきたくない場所におけるサンプリングに応用できると考えられる。しかしながら、得られる結果は前述の三方法に比して精度が悪く、概略値を与えることになるのは避けられない。

3. 粒度分析の結果

三軸長 a , b , c から求めた計算重量と実測重量は、図—1 のようにほぼ一致しており、また 図—2 に示したように中軸径 (b) と同体積の球の直径 d_n も大体一致している。したがって、 $b = d_n$ と考えてよいであろう。前述の写真測定法を除く三方法を使用して採取した資料の粒度分布を示すと 図—3, 4 のようである。最大粒径が 10

図-1 計算重量と実測重量の関係

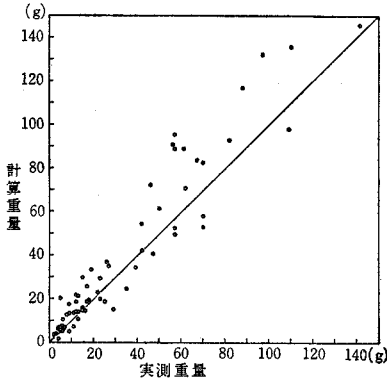


図-2 同体積の球の直径と中軸径との関係

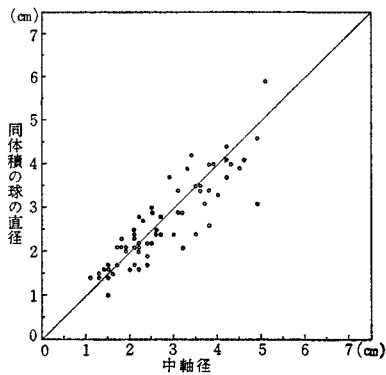


図-5 A地点における粒度分布

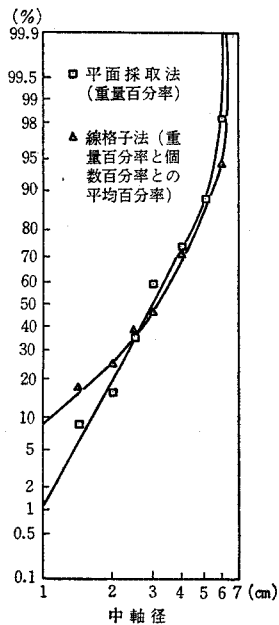


図-3 A地点における粒度分布の比較

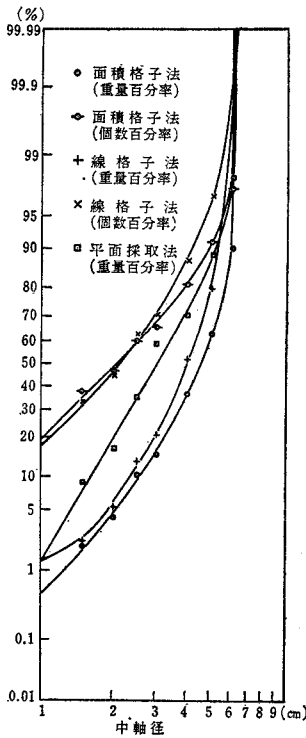


図-6 B地点における粒度分布

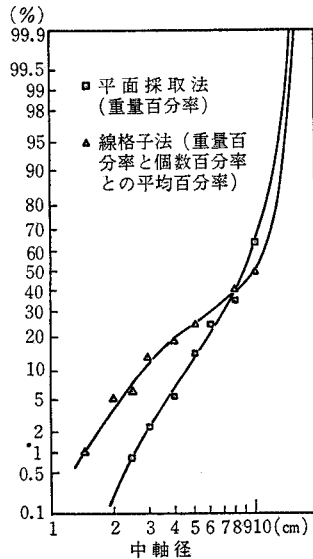
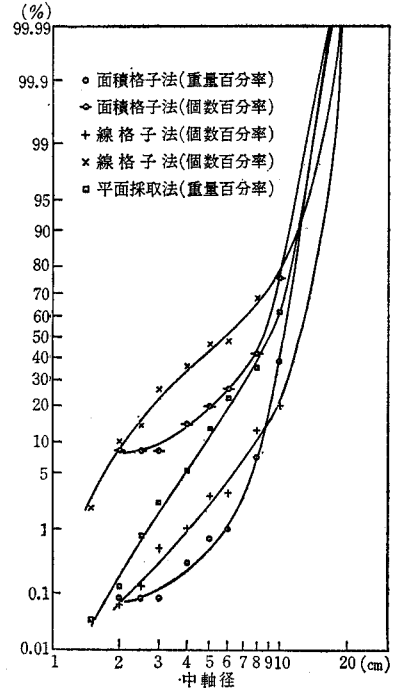


図-4 B地点における粒度分布の比較



格子法による結果はかなりよく一致しているが、平面採取法による資料の通常のみる分析の結果とはかなり異なっている。両地点の結果を考察すると、面積格子法あるいは線格子法において、重量百分率による分布曲線と個数百分率による分布曲線の間で平面採取法による重量百分率の分布曲線があることから、重量百分率の分布曲線と個数百分率の分布曲線との平均分布曲線が平面採取法による結果と、ほぼ一致すると考えてよいであろう。線格子法によるこの平均分布曲線と平面採取法による通常のみ分け試験の結果を示すと、図-5.6 のようである。

4. サンプリングの必要粒子数

粒度分布を求めるために必要なサンプリングの粒子数を統計的に求めてみる。サンプリングした資料の個数百分率または重量百分率による河床材料の粒度分布は、近似的に、平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ と考えてよい。任意標本(粒子の代表粒径、たとえば中軸径などの測定値)を $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ とし

cm 以下のA地点について考察すると、面積格子法と線

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \dots\dots\dots (3)$$

とすると、 $\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$ は $N(0, 1)$ の標準正規分布に従うことになる。ここで、標本平均が 95% の確率で $\bar{X} = \mu \pm \beta$ の限界内にあるとして標本数 n を求めると $|\bar{X} - \mu| < \beta$ であるから

$$\frac{\beta\sqrt{n}}{\sigma} < 1.96 \dots\dots\dots (4)$$

したがって

$$n > 3.84 \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

となる。山地河川における粒径の測定精度から $\beta = 0.3 \sim 4.0$ cm 程度と考えてよい。一方、標準偏差は $\sigma = \sigma_\phi$ とおくと、 $\sigma_\phi = 1.2 \sim 15$ の範囲内にある。ここに、 σ_ϕ は、後述するように、河床材料の粒度分布に関する標準偏差である。これらの β と σ_ϕ の値から σ_ϕ/β の値は $\sigma_\phi/\beta = 3.5 \sim 4.0$ と考えてよいであろう。すなわち、大粒径のときは、一般に σ_ϕ は大きく、しかも β は $\beta = 4$ cm 程度となる。また小粒径のときは σ_ϕ は小さく、 β も小さくなる。ここで $\sigma_\phi/\beta = 3.5$ について n を求めると $n > 47$ となる。したがって、サンプリングの必要粒子数は約 50 個程度以上と考えてよいであろう。

5. 山地河川の相当粗度の推定

図-5.6 から知られるように、線格子法による資料の重量百分率の粒度分布曲線と個数百分率の粒度分布曲線との平均分布曲線は、ほぼ 20% 粒径以上において通常のふるい分け試験の結果とよく一致している。したがって、土砂水理学において必要な d_{16} (16% 粒径)、 d_{50} (中央粒径)、 d_{65} (65% 粒径)、 d_{84} (84% 粒径)、 d_{90} (90% 粒径) などを推定できる。ここに、 d_{16} と d_{84} は河床土砂の標準偏差 (σ_g) を計算する際に使用されるもので、次の式から求められる。

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84} - d_{16}}{2.303}} \dots\dots\dots (6)$$

もし、対数確率紙上における粒度分布曲線が直線になるとき、式 (6) による標準偏差は次の幾何標準偏差の値と一致する⁶⁾。

$$\sigma_g = \frac{d_{50}}{d_{16}} \dots\dots\dots (7)$$

あるいは

$$\sigma_g = \frac{d_{84}}{d_{90}} \dots\dots\dots (8)$$

一方、相当粗度 k_s は H.A. Einstein の提案に従い、通常 $k_s = d_{65}$ を使用している。また、R. Kellerhals⁹⁾ は礫河川の研究から、山地河川の相当粗度として $k_s = d_{90}$ を使用することを提案している。図-5.6 から知られるよ

うに、線格子法による重量百分率と、個数百分率の平均分布曲線が平面採取法によるふるい分け試験の結果とよく一致しているため、 d_{65} および d_{90} は、かなり正確に推定することができる。

6. 外国における実測例

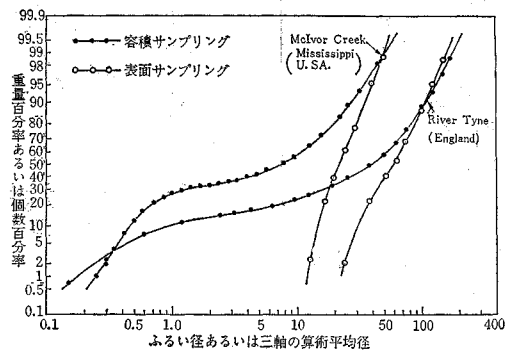
1965 年 T.C. Muir²⁾ に、はイギリスおよびアメリカの実測資料を使用して、容積サンプリングと表面サンプリングの比較を行なった。図-7 はミシシッピ州の McIvor Creek とイギリスの Tyne 河の実測結果であって、Muir の論文から引用したものである。Tyne 河の容積サンプリングの資料は、河床表面の露出部だけでなく、面積 2×2 ft、深さ 1 ft から採取され、一方、McIvor Creek においては面積 1×1 ft、深さ 1/2 ft から採取された。また、図中の表面サンプリングのデータに、平面採取法、歩測格点法、および、ある距離に張ったテープの下の全粒子をサンプリングする方法 (Muir は Line Transect 法と名づけている。この方法は線格子法を变形したものである) により得られたものである。

Muir は、また表面サンプリングの最小粒径を 4 mm としている。この値は現場で三軸長を正確に測定できる最小粒径であり、1~4 mm の粒径範囲では粒子分離を生ずるから、妥当な限界値といえよう。

7. 線格子法による粒度分布の計算例

写真-3 に示したような河床材料のサンプリングを線格子法により行なった。資料採取地点の最大粒径が 80 cm であったから格点間隔を 1 m ととり、50 個の粒子をサンプリングした。表-1 はサンプリングした資料を中軸径 (b) の大きさの順に整理し、粒子と同体積の球の直径 d_n および計算重量を示したものである。表-2 は、表-1 のデータを 16 の粒径範囲に区分して、個数百分

図-7 容積サンプリングと表面サンプリングとの比較 (Muir による)



表一 各粒子の中軸径に対する同体積の球の直径と計算重量

b (cm)	d _n (cm)	W (g)	b (cm)	d _n (cm)	W (g)	b (cm)	d _n (cm)	W (g)
2	1.7	6	17	9.6	1 222	40	36.9	69 960
3	3.1	41	17	15.3	5 009	40	47.1	145 750
5	4.5	131	17	16.1	5 777	40	49.5	169 070
5	5.5	232	18	19.2	9 885	42	34.0	54 590
6	5.1	185	20	15.0	4 717	43	31.5	43 469
6	6.3	345	20	19.7	10 653	44	46.2	136 210
6	7.2	512	22	19.4	10 097	53	39.2	83 740
8	7.9	676	23	12.4	2 629	54	57.2	259 965
9	5.7	258	27	36.8	69 430	54	57.8	267 650
9	10.2	1 458	30	25.6	23 241	59	64.3	348 350
9	10.6	1 654	33	38.8	94 870	60	79.6	702 250
10	8.2	755	34	40.1	90 100	61	62.6	341 850
10	9.1	1 044	34	40.8	94 340	70	87.6	935 450
10	11.4	2 078	35	39.8	88 510	75	89.9	009 650
11	12.0	2 390	36	39.1	88 245	77	76.8	630 700
14	14.2	3 975	36	41.2	97 255	80	74.1	564 450
16	15.4	5 088	36	44.8	125 080			

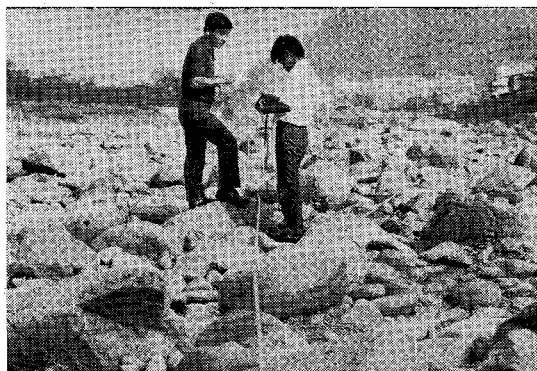
表二 粒度分布の計算

粒径範囲 (cm)	幾何平均 粒径 (cm)	個数	累加 個数	個百分率 (%)	率 (%)	粒径範囲内の 粒計算重量の計 (g)	累加重量 (g)	重量百分率 (%)	平均百分率*
2 < b ≤ 4	2.83	2	2	4.0		46	46	0.00	2.0
4 < b ≤ 6	4.90	5	7	14.0		1 405	1 451	0.02	7.0
6 < b ≤ 8	6.93	1	8	16.0		676	2 127	0.03	8.0
8 < b ≤ 10	8.94	6	14	28.0		7 247	9 374	0.14	14.1
10 < b ≤ 15	12.25	2	16	32.0		6 365	15 739	0.24	16.1
15 < b ≤ 20	17.32	7	23	46.0		42 351	58 090	0.88	23.4
20 < b ≤ 25	22.36	2	25	50.0		12 726	70 816	1.07	25.5
25 < b ≤ 30	27.39	2	27	54.0		92 671	163 487	2.48	28.2
30 < b ≤ 35	32.40	4	31	62.0		367 820	531 307	8.05	35.0
35 < b ≤ 40	37.42	6	37	74.0		695 360	1 226 667	18.57	46.3
40 < b ≤ 50	44.72	3	40	80.0		234 269	1 460 936	22.12	51.1
50 < b ≤ 60	54.77	5	45	90.0		1 661 955	3 122 891	47.28	68.6
60 < b ≤ 70	64.81	2	47	94.0		1 277 300	4 400 191	66.62	80.3
70 < b ≤ 75	72.46	1	48	96.0		1 009 650	5 409 841	81.91	89.0
75 < b ≤ 77	76.01	1	49	98.0		630 700	6 040 541	91.45	95.0
77 < b ≤ 80	78.49	1	50	100.0		564 450	6 604 991	100.00	100.0

注 *：個数百分率と重量百分率との算術平均。

率、重量百分率、および平均百分率を計算した結果である。表二 から、幾何平均粒径に対する個数百分率、重量百分率、およびそれらの平均百分率による粒度分布を示すと 図八 のようである。

写真一三 計算例に使用した河川の河床状態



図七 と 図八 を比較すると、図七 の容積サンプリングの結果は表面サンプリングの結果よりも σ_p の値が大きく、しかも小さい粒径部分の比率が大きくなっている。一方、図八 の個数百分率の結果は重量百分率の結果よりも σ_p の値は大きく、図七 と同一の傾向を示している。したがって、最大粒径程度の深さの表層部分の粒度分布は線格子法または Line Transect 法によってサンプリングを行ない、中軸径に対する個数百分率で表わした粒度分布曲線に、ほぼ近い分布曲線となるであろう。

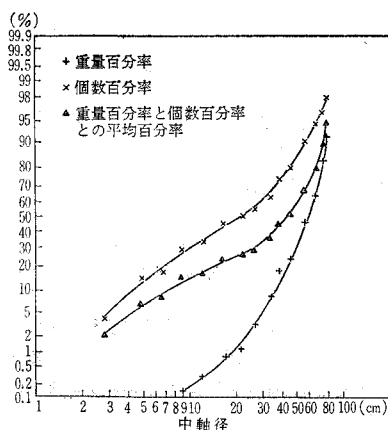
8. 結論

山地河川における河床材料、特に、河床面および河床の表層部分の粒度分布を求め、諸方法を研究した結果、次の結論が得られた。

(1) サンプリング方法としては、線格子法および Line Transect 法が最も簡便であって、現場で測定するのは粒子の三軸長のみである。

(2) 一つの粒子の代表径としては中軸または三軸長の算術平均値をとる。

図八 線格子法による粒度分布



(3) 粒度分布を求めるためには約 50 個以上の粒子をサンプリングする必要がある。

(4) 中軸径に対する個数百分率による粒度分布曲線と三軸長を使用して求めた重量百分率による粒度分布曲線との平均分布曲線は、平面採取法による資料のふるい分け試験の結果と、かなりよく一致する。

(5) 最大粒径程度の深さの河床表層部分の粒度分布は、線格子法または Line Transect 法によってサンプリングを行ない、中軸径に対する個数百分率で表わした粒度分布曲線により表わすことができる。

参考文献

- 1) 河村三郎・小沢功一：山地河川の粒径分布の推定法，土木学会中部支部研究発表会講演概要集，昭和 43 年 11 月，pp. 11~12.

- 2) Muir, T.C.: "Sampling and Analysis of Coarse Riverbed Sediments", Proc. Mississippi Water Resources Conference, 1969, pp. 73~83.
- 3) Kellerhals, R.: "Stable Channels with Gravel-Paved Beds", Proc. ASCE, WW 1, Feb., 1967, pp. 63~84.
- 4) Lane, E.W. and Carlson, E.J.: "Some Observations on the Effect of Shape on the Movement of Coarse Sediments", Trans. American Geophysical Union, Vol. 35, p. 453.
- 5) Pashinskiy, A.F.: "Experience of the Study of Alluvial Deposits of the Psezuapse River", Soviet Hydrology, Selected Papers, American Geophysical Union, No. 3, p. 276.
- 6) Otto, G.H.: "A Modified Logarithmic Probability Graph for the Interpretation of Mechanical Analyses of Sediments", Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 9, No. 2, August, 1939, pp. 62~76.

(1970.5.14・受付)

水工学に関する夏期研修会講義集・在庫一覧

● 1965 A. ダム・河川コース B 5・230・2 000 円 (〒 100)

1. ダムの Spillway の設計/岩崎
2. ダムの Outlet Works の設計/山岡
3. ダムにおける Sedimentation/芦田・土屋
4. 河川流出の例題解説/石原
5. 開水路流れの例題解説/岩佐
6. 護岸・水利・床固めの水理機能/吉川
7. 弯曲水路の流れ/岸
8. 北海道の河川事業の特色/町田
9. 護岸・水利・床固めの工法と設計例/古賀
10. 水門・樋門の設画と設計/西畑
11. 密度流論/嶋

● 1965 B. 海岸・港湾コース B 5・180・1 500 円 (〒 100)

12. 波浪の推定に関する最近の研究/井島
13. 波浪スペクトル論とその応用/浜田
14. 漂砂論/堀川
15. 漂砂測定法/福島
16. 波圧論/光易
17. 消波構造論/尾崎
18. 北海道における海岸および港湾の諸問題/穴釜
19. 海岸保全計画論
20. 河口密度流論/柏村
21. 津波理論/室田

● 1967 A. 河川コース B 5・176・1 000 円 (〒 100)

1. 水理学における数学的手法/岩佐
2. 流れの抵抗則/足立
3. 流出機構/高橋
4. 内水の流出解析/西畑
5. 水資源論序説/高橋
6. 土砂災害とその対策/矢野

● 1967 B. 海岸・港湾コース B 5・148・900 円 (〒 100)

7. 港湾計画/長尾
8. 港湾機能とその変貌/久田
9. 波の変形論/岩垣
10. 構造物に働く波力/台田
11. 短周期波のうちあげに関する最近の研究/細井
12. 漂砂/樫木
13. 外国における高潮問題/本間

● 1968 A. 海岸・港湾コース B 5・206・1 300 円 (〒 100)

1. 土木技術者の教育について/松尾
2. 波浪の数値予測/井島
3. 海岸計測論/光易
4. 沿岸潮汐の予知について/宮崎
5. 海岸保全/豊島
6. 特殊防波堤論/伊藤
7. 沿岸環境問題/和田
8. 河口安定論/吉高

● 1968 B. 河川コース B 5・192・1 200 円 (〒 100)

9. 日本の雨の特性/坂上
10. 航空写真による洪水時の流況測定/木下
11. 河川汚濁論/粟谷
12. 貯水池群の統合操作/石原
13. 境界層/岡部
14. 電子計算機の応用例/木下
15. 乱流拡散/栗原

● 1970 A. 海岸・港湾コース B 5・268・2 200 円 (〒 100)

1. 波浪の数値計算/合田
2. 波浪の統計的解析への応用/日野
3. 湾内拡散/日野
4. 津波/岩崎
5. 漂砂特論/堀川
6. 海洋開発/本間
7. 波浪観測/村木
8. 越波と根固め/富永
9. 冷却水・取排水に関する技術的問題/千秋

● 1970 B. ダム・河川コース B 5・210・1 800 円 (〒 100)

10. 異常降雨について/大西
11. 水文学における確率過程/山岡
12. 水理構造物に作用する流体力/岩佐
13. キャピテーション・その 1/村井
14. キャピテーション・その 2/大場
15. 掃流砂礫の流送機構/土屋
16. 蛇行論/林
17. 空気混入流/坂本
18. Estuary の水理/吉川
19. 河川構造物の水理機能/土屋