

砂礫河川の掃流砂に関する基礎的研究

村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦

BASIC STUDY ON THE BED LOAD IN GRAVEL RIVER

By *Yoshio* MURAMOTO, *Yoshiaki* KAWATA and *Akihiko* NUNOMURA

Synopsis

The purpose of this study is to make clear the mechanics of sand transport and to estimate its rate in a gravel river which consists of graded bed material with large standard deviation. Field measurements were carried out in the Yasu River in flood season by the tracer method which offers a unique approach for studying the motion of discrete sand grains. Characteristics of bed load on a gravel bed such as the effect of longitudinal strips which are formed on it on the rate of bed load and the influence of secondary flow to the tractive force were studied by detailed experiments and theoretical analysis. A proposed method of estimating the rate of bed load in a gravel river is verified with the data on the basis of effective tractive force and efficient width.

1. 緒 言

従来、河床変動の予測に際しては、Einstein 式などの流砂量式が適用され、かなりの成果をあげてきた。しかしながら、河床が混合砂礫からなる場合、標準偏差が小さくいわゆる混合効果が顕著に現れない場合を除いて、各種流砂量式の適用性に問題があることがしばしば指摘されている。とくに、砂礫河川や分級作用を受けるダム下流部では、一般に河床砂礫の標準偏差がきわめて大きく、これに起因する遮蔽と巻き上げの両効果が複雑に絡み合うほか、発生頻度の高い中小洪水時に大砂礫は不動で流れに対し粗度として働き、細砂のみが流送されるという特徴的な現象を呈するため、流砂量の推定はほとんど不可能であるといっても過言ではない。

これまでの混合砂礫を対象とした流砂の取り扱い、大別すれば粒度分布を連続的とするものと代表二粒径に置き換えるものとのわけることができる。前者の立場から行われた代表的な研究としては、Einstein¹⁾の理論があつて、彼は確率的な概念を用いて誘導した一様砂礫の流砂量式に、遮蔽効果を導入して混合砂礫の流砂量式を導びいた。しかし、細砂に対する遮蔽効果が過大評価されていることや粒径別流砂量の重ね合せの仮定に問題があつて、実測値と計算値とが必ずしも一致しないといわれている。一方、移動限界の一義的な定義に批判的であつた Einstein とは別に、実用上の観点から混合砂礫の限界掃流力に関して数多くの研究が行われてきた。Egiazaroff²⁾は次元解析的考察から混合砂礫の粒径別移動限界を表す式を提案し、その後平野³⁾および芦田⁴⁾らによって実験的検討が加えられ、いずれも粒径が平均粒径の数分の1以下ではEgiazaroff 式の計算値が過大なることを指摘している。しかし、これらの立場は、基本的には粒径別に限界掃流力が相違するといふものであり、それ以前に発表された岩垣⁵⁾および土屋⁶⁾の結果と異っている。すなわち、岩垣によれば限界掃流力に及ばず混合効果は、従来のような標準偏差の範囲では明確でなく、移

動限界の判定方法によって変化するとし、むしろ均等係数などの混合状態を表す指標を導入すべきであると主張している。また、土屋は混合砂礫の平均粒径に対応した砂礫の限界掃流力は、標準偏差の増加とともに遮蔽係数が0.4より減少することを実験および理論から確かめ、これを考慮すれば一様砂礫の場合と同様の取り扱いが可能であることを示している。また、最近水山ら⁷⁾は、運動砂礫が停止する限界の掃流力は平均粒径より大きい粒度範囲でも一定であることを見出し、上述した Egiazaroff 式の適用上、問題があることを指摘している。このように、実験手法上の困難さも加わって混合砂礫の限界掃流力に関しては、いまだ統一的な見解が得られていないようであり、とくに河床砂礫の標準偏差が大きい砂礫河川を対象としたものはほとんど見当たらないのが現状である。

混合砂礫の限界掃流力の評価は、一般的に粒径別流砂量の算定へとつながるものであるが、上述したような問題があるので、むしろ経験的立場から流砂量を求めようとする試みも行われており、その代表的なものとして浅田⁸⁾の研究がある。浅田は山地河川の流砂量の算定方法に関して系統的な研究を進め、砂礫の混合効果を加味した流砂係数を対象河川ごとに決定して流砂量と貯水池の堆砂形状の計算を行っている。しかし、流砂係数を流砂機構の面から明らかにすることが重要な課題であると考えられる。なお、混合砂礫の限界掃流力に支配される現象として、砂礫河床の粗粒化現象があげられるが、ここでは平衡河床を対象としているのでこの方面の研究には詳しく触れないことにする。

一方、混合砂礫を代表二粒径で単純化し、その水理特性や流砂機構について考察した研究は少ない。Zwaard⁹⁾は、砂礫床上で細砂が流下方向に波状に堆積する場合と全砂礫がある程度露出し、砂礫間を細砂が流送される場合について、抵抗分離法によって河床粗度のスケールと Chézy の係数との関係を検討し、土屋ら¹⁰⁾は2礫混合の場合の大粒径砂礫背後に生ずる死水域に着目して有効掃流力を定式化することを試みている。しかし、これらの研究は、流れの特性と混合砂礫の流砂機構との関係の一般的表示を得るまでに到っていない。また、浅田¹¹⁾は管路における代表二粒径の流砂実験から上述の流砂係数を検討しているが、細砂の運動形態は河床波を伴う浮遊状態のものが多く、その流砂機構については明らかにされていない。

さて、以上では河道横断方向には流送特性は変化しないという前提を立て、従来の混合砂礫に関する研究を概観してきた。しかしながら、河床砂の標準偏差が大きい砂礫河川ではこのような前提が必ずしも成立しないことに注目しなければならぬ。たとえば、Karcz¹²⁾や Allen¹³⁾は比較的細かい砂礫によって河床に縦筋が発生することを指摘しており、また、実験水路においても芦田ら¹⁴⁾は、混合砂の平均粒径が限界掃流力に近い水理条件で、それより細かい砂が収斂する2本の縦筋が発生したと報告している。これらの事実から判断すれば、砂礫河川では河道横断方向に流砂量に変化することが容易に想像されよう。一方、この縦筋の発生については水流中の縦渦の存在が大きな役割を果たしていると考えられるが、これに関しては古くは Casey¹⁵⁾や Vanoni¹⁶⁾および寺田¹⁷⁾にはじまり、近年、流体力学および水工学の分野でかなり活発に研究されている。たとえば、木下¹⁸⁾は航空写真から、洪水時の水面に現れる収斂線の観察を通して縦渦の存在を指摘したほか、実験水路における日野¹⁹⁾、井口ら²⁰⁾、森ら²¹⁾および林ら²²⁾の縦渦の特性や発生機構などに関する研究がある。しかし、縦筋と縦渦は密接な関係があるにもかかわらず、両者を別々に考察した定性的な研究が多く、砂礫河川の流砂機構との関連で論じようとした研究はなされていない。

そこで、本研究は砂礫河川での流砂量予測法を確立するための第1歩として、まず砂礫河川の特徴的な流砂現象を明らかにしたのち、代表二粒径モデルで単純化した流砂実験を行い、水理特性や流砂量特性について詳しく検討し、これらの結果と粗面路床上の掃流砂機構に関する簡単な考察から、砂礫河川の流砂量予測を試みるものである。

2. 砂礫河川の掃流砂の特性

洪水時の河川の掃流砂量を測定するために、従来、捕砂器を用いたものが数多く考案されてきた。しかし、一般的に捕砂器を使用した計測方法は信頼性の点からかなり問題があるといわれている。その理由とし

ては、捕砂効率に及ぼす捕砂器前面の局所洗掘や河床波の凹凸による影響が挙げられる。また、その適用上の観点から、捕砂器の大きさに限界があるので、大砂礫が点在する砂礫河川では用いることができないことや、洪水時に危険を伴うことを考えると、もっと簡単に実施できる方法を考案する必要がある。

本研究で行ったトレーサー法は、すでに荒川や新潟県の溪流河川で実施された例^{23),24)}があるが、いずれも河床砂礫を適当にサンプリングし、ペンキなどで着色してトレーサーとするものであって、河床砂礫の移動流下実験に終わっており、流砂量を推定することを目的としてトレーサー法を適用した例は少ない。ここでは、野洲川を対象としてトレーサー法の適用を試み、洪水時の移動砂礫の特性と流砂量を推定し、砂礫河川における掃流砂の特性を明らかにする。

2.1 観測の概要

観測は、Fig. 1 に示すように、琵琶湖の南東部に流入する野洲川の上流 18 km 地点にある中郡橋付近と 29 km 地点にある柏貴橋付近で実施した。これら両地点の概要は Table 1 に示す通りであって、河道はほぼ直線で、縦横断勾配が急変してなく、付近に量水標が設置されている。

観測期間は1975年5月～1976年10月の洪水期を対象としており、トレーサー設置期間を Table 2 に示してある。トレーサーの設置は、幅約 30 cm および河道横断方向 15～20m の範囲の表面近傍の河床砂礫に、赤および緑の流砂用シロイヒをジョーロで着色することによって行った。また、移動層厚を測定するために、部分的に河床を 15～20 cm 掘り返して同様の方法で塗布した。トレーサーの回収は、洪水後トレーサー設置河床が水面上に露出した時に実施し、流下方向に 5～30 m 間隔で粒径が 1 mm 程度以上の着色砂礫を発見するよう努めた。

河床砂礫の粒度分布は線格子法を適用して求めた。この方法の長所は、河床の横断方向に広範囲にわたっ

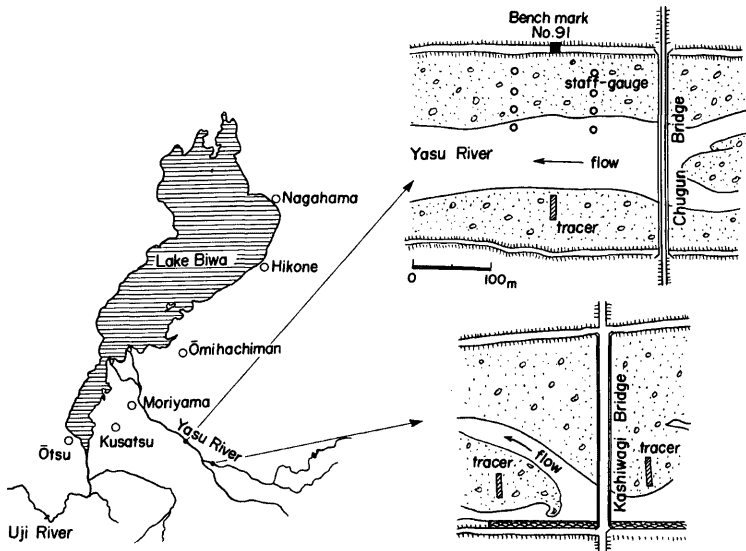


Fig. 1. Map showing study location.

Table 1. General information about observation reach in Yasu River.

	Chugun	Kashiwagi
Mean bed slope	1/268	1/324
Width of water surface at low discharge	50-60 m	10-20 m
Maximum water depth	0.7 m	1.2 m
Channel width	250 m	150 m
Water gauge	1. Staff gauge (Interval : 100m) 2. Automatic water gauge	Staff gauge (Interval : 100m)
D. L.	T. P. +119. 355 m	T. P. +157. 015
Mean diameter of sand gravels (Line grid method)	8. 88 cm	13. 7 cm

Table 2. Date of setting and collecting tracer.

Chugun		Kashiwagi	
Case	Period	Case	Period
1	1975. 5. 17- 8. 11	1'	1975. 5. 16- 8. 12
2	8. 11-10. 30	2'	8. 12-10. 23
3	1976. 5. 27- 9. 1	3'	1976. 5. 28- 9. 1
4	9. 1-10. 16	4'	9. 1-10. 15

てサンプリングができるので、河床表面粒度の横断方向変化や長距離の平均的な粒度分布特性が見出せることである。今回の線格子法の格子点間隔は中郡橋および柏貴橋付近の最大粒径を考慮して、それぞれ 25 cm および 50 cm とした。トレーサーとして移動した着色砂礫、トレーサー設置点に洪水後残留している着色砂礫および線格子法を適用した場合の砂礫の粒径は、山本²⁵⁾の研究を参考にして、長径 a と短径 b を測定した場合には $(a+b)/2$ とし、さらに中径 c を測った場合には \sqrt{abc} で表すことにした。また、粒径が小さくかつ砂礫個数が多い場合には、通常のみるい分けを行って、粒度分布を求めた。なお今後断りがない限り、粒度分布はすべて重量分布で表示している。

2.2 河川砂礫の粒度分布特性

(1) 砂礫の粒度分布

中郡橋および柏貴橋付近の線格子法および従来の方法による粒度分布を比較したものが Fig. 2 である。両者の方法による粒度分布は明らかに大きく相違している。この原因としては、測定年度と採取位置の違いが考えられるが、この期間で河床移動がほとんど起っていないことおよび採取位置付近の上下流部では顕著な流砂源がないことから判断して、これらが原因であると思われえない。むしろ、従来の方法では、局所的あるいは深さ方向の粒度分布の変化が直接影響することが原因として考えられる。事実、この方法では粒径が 5 cm 以上の砂礫は見出されませんが、付近の河床では 20 cm 程度の砂礫がかなり多く見られたことによっても裏付けられよう。Fig. 2 には、移動砂礫と残留砂礫の粒度分布の 1 例も示されており、これらの粒度分布の比較から、つぎのような傾向が見出される。すなわち、中小洪水時には河床砂礫のうち粒径の比較的小さいものが流送される結果、残留砂礫の標準偏差が小さくなり、かつ平均粒径は当然大きくなる。しかし、

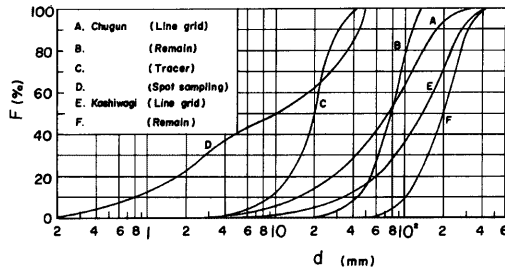


Fig. 2. Grain-size distribution curves.

洪水後、残留砂礫の間には上流から流送されてきた細砂が再び堆積するので、粒度分布は洪水前のものとあまり変化しないことがわかる。

(2) 砂礫の横断方向分布

前述したように、河床砂礫の場所的な分布特性の変化に起因して、線格子法と従来の方法による粒度分布は相違することが明らかになったが、この結果は河床横断方向に砂礫の粒径がかなり大きく変化することを示すものと考えられる。そこで、この変化を見出すために、線格子法によって得た粒径の移動平均を求め、図示したものが Fig. 3 である。ただし、いずれの地点の値も 4 格子点の移動平均を表している。この図から、河床横断方向の移動平均粒径の周期的な変動が見られ、砂礫河川における縦筋の存在を裏付けていると考えられる。縦筋が河道にほぼ平行であることは、つぎの事実によって確かめられる。すなわち、着色砂礫の河床横断方向の移動幅は洪水前の設置幅とあまり相違せず、しかもトレーサー設置河床から数 10 m 以上下流では、着色砂礫の分布がかなり偏在し、流下方向に点々と見出される部分とほとんど発見できない部分と

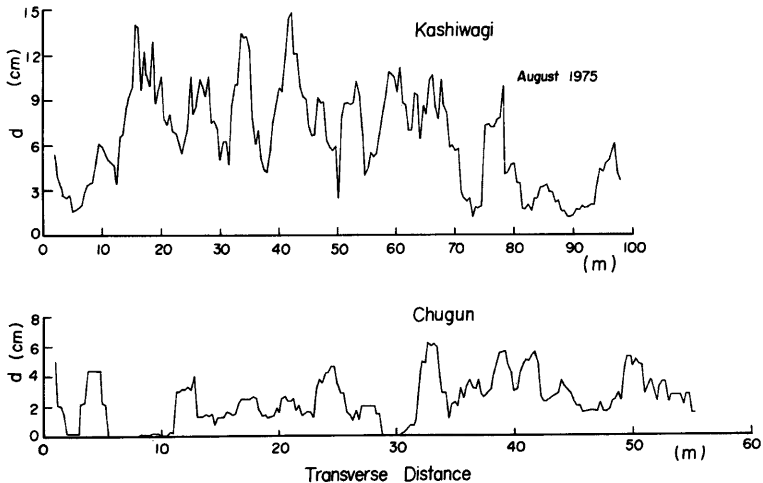


Fig. 3. Transverse moving average of diameter of sand grains by line grid method.

に河床を明確に区別することができる。また、移動平均粒径の比較の細くなる縦筋の間隔は 2~4 m 程度であり、トレーサー設置付近の既往の洪水による最大水深が 1~2 m であることを考えると、両者の比は 2:1 になり、後述するように実験水路における縦筋の間隔と水深との関係にほぼ一致するようである。

2.3 着色砂礫の移動特性

(1) 移動砂礫の個数分布

まず、中郡橋下流の No. 91 における河床横断形状の変化を示したものが Fig. 4 である。これから、観測期間中に大きな河床変動が生じていないことがわかり、河床砂礫の粒度特性もほとんど変化していないと推定されよう。柏貴橋の下流部についても、同様の結果が見出された。

さて、今回の1連の観測のなかで、移動着色砂礫が4082個回収できた Case 4 について、単位面積当りの粒径別捕捉個数の流下方向変化を Fig. 5 に示す。これから明らかなように、粒径に関係なく流下距離が 30 m および 80 m 付近に捕捉個数のピークが見られる。一方、図中には Case 1 について、回収砂礫数 397 個の捕捉個数分布を比較のために示したが、これには顕著な中間ピークは見当らず、指数的に減少していることがわかる。Case 1 で示された単一ピークを持つ傾向は、トレーサー法による実験²⁶⁾および現地観測²⁷⁾ですぐに見出された結果と一致するが、Case 4 の結果との相違の原因としてつぎのことが考えられる。Case 1 および 4 はともに中郡橋下流での観測結果であるので、河床条件はほぼ同一と見なせる。一方、水位時間曲線で代表される洪水の特性については、Case 1 では単一ピークを持つのに対し、Case 4 では Fig. 6 で示すように、第1ピークから顕著なサブピークを数回経て水位が漸減しており、これが着色砂礫

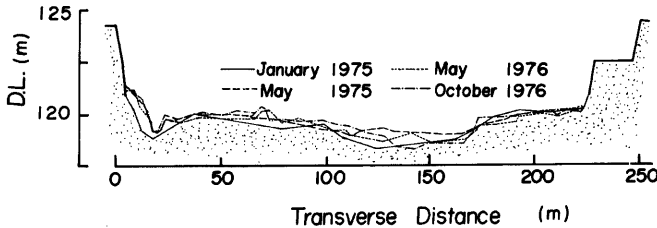


Fig. 4. Variation of cross section.

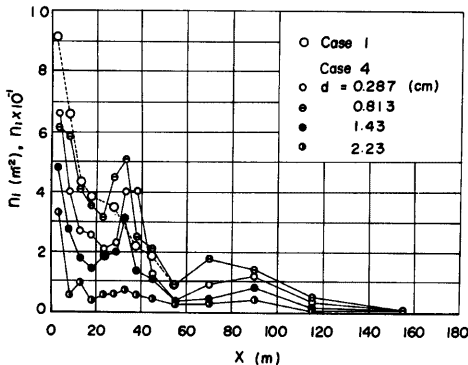


Fig. 5. Longitudinal distributions of painted sand grains.

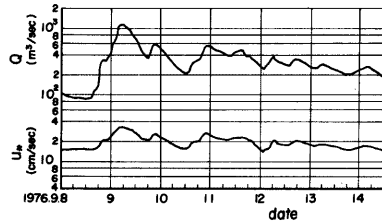


Fig. 6. Hydrograph and variation of shear velocity in Yasu River.

の流下過程に大きく影響したものと推定される。

(2) 砂礫の粒径と移動距離との関係

Fig. 7 は着色砂礫の粒径の縦断変化を示したものである。移動距離が大きくなるにしたがって、着色砂礫が少なくなるため平均粒径の変化が散乱するようになるが、この範囲を除外せば一般に平均粒径が減少することが認められる。ただし、その傾向は洪水の規模によって変化し、比較的大きかった1976年 (Case 3, 3' および 4) の観測結果の方が1975年の場合に比べて減少の度合いが小さいことは興味あることといえよう。さらに、Case 4 について着色砂礫の移動距離に粒度分布を比較したものが Fig. 8 であり、これらが縦断方向にあまり変化しないことがわかる。着色砂礫全体の平均粒径と平均移動距離を知ることは、トレーサー法の適用による流砂量推定において必須であって、とくに Case 4 で示されるような特性はこの点から好都合であろう。

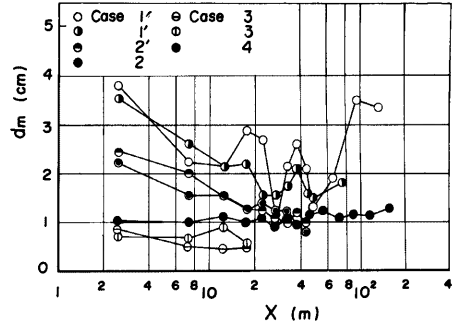


Fig. 7. Longitudinal variation of mean diameter of painted sand grains.

つぎに、Fig. 9 は粒径別平均移動距離の分布を示し、これから、洪水の規模が相違するにもかかわらず、粒径が約 10 mm 付近で平均移動距離の極大値が現れ、これより小さい粒径では移動距離が小さくなることが見出される。この結果は、混合砂礫の遮蔽効果を示しているものといえよう。なお、各観測ごとに各粒径に対する平均移動距離に顕著な差がみられないので、流砂量の増加は移動砂礫の個数、すなわち移動層厚の増大に依存する度合いが大きいと推察される。

(3) 粒径別限界掃流力と流砂量

Fig. 10 には、粒径別の限界掃流力 $\tau_{s,ci}$ について従来実施されてきた混合砂礫の実験結果と、高山²⁸⁾および著者らの観測結果を示してある。ただし、実験の場合移動限界の判定基準としては、流砂が若干存在するいわゆる限界掃流力にほぼ対応している。一方、砂礫河川における現地観測の場合には、高山は捕砂器で

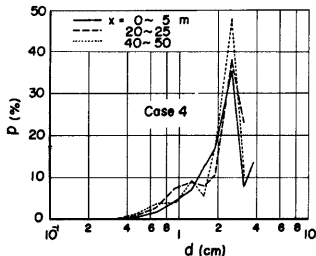


Fig. 8. Grain-size distribution curves of painted sand grains.

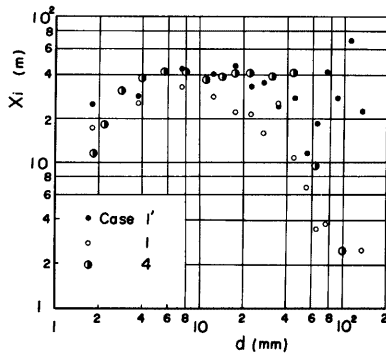


Fig. 9. Relation between individual sizes of painted sand grains and their average moving distance.

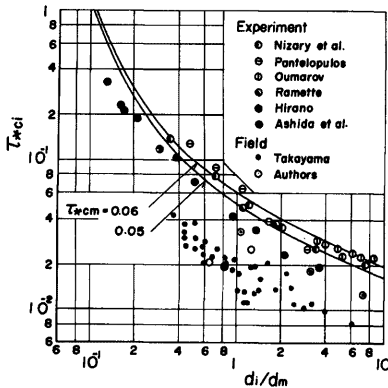


Fig. 10. Critical tractive force as function of the ratio d_i/d_m .

捕捉された最大砂礫が移動限界にあると判断し、著者らは移動した着色砂礫の最大粒径が観測期間の最大流量時に移動限界であったと仮定している。図中に示した曲線は、Egiazaroff の式

$$\frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*cm}} = \left\{ \frac{\log 19}{\log 19(d_i/d_m)} \right\}^2 \dots\dots\dots (1)$$

を計算したものである。ここに、添字 i および m はそれぞれ各粒径および平均粒径に対応している。この図から、高山と著者らの結果は比較的一致しており、無次元限界掃流力が Egiazaroff の計算値や実験値に比べて全体的に小さくなっていることが分かる。これは移動限界の判定基準の相違のほか、河床砂礫の標準偏差が大きく、かつ移動しない大砂礫がかなり存在するという河床条件に起因すると考えられる。

トレーサー法を適用した場合の流砂量は、つぎのようにして求められる。すなわち、Fig. 9 に示したような着色砂礫の粒径別平均移動距離 x_i と砂礫の移動層厚 h_b を用いると、単位幅当りの全流砂量 q_B は粒径別流砂量 q_{Bi} の和として、次式で与えられる。

$$q_B = \sum_i q_{Bi} = \sum_i f(d_i) h_b (1-\lambda) x_i \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $f(d_i)$: 粒径 d_i の砂粒が河床砂礫の全体に占める割合および λ : 空隙率である。たとえば1976年17号台風がもたらした洪水による流砂量は、 h_b を移動した着色砂礫の最大粒径に等しいと仮定し、 $\lambda=0.4$ とすれば、Fig. 9 および式 (2) から、 $q_B=0.76 \text{ m}^3/\text{m}$ が得られる。Table 3 に粒径別流砂量の計算結果

Table 3. Calculation of rate of bed load by tracer method.

d_i (cm)	x_i (m)	Number of tracers	$f(d_i)$ (%)	q_{Bi} (m^3/m)
0.183	11.89	128	0	0
0.218	18.21	116	0	0
0.283	30.32	307	0.6	0.0122
0.400	38.71	548	0.9	0.0234
0.566	42.71	723	1.5	0.0430
0.800	41.19	744	2.0	0.0549
1.10	37.02	517	2.6	0.0636
1.42	38.61	379	3.2	0.0808
1.74	41.21	249	2.6	0.0700
2.20	40.35	172	5.0	0.1208
3.11	39.81	148	8.7	0.1664
4.40	41.59	22	8.0	0.1046
6.22	9.50	5	16.1	0.0122
9.91	2.50	4	24.8	0.00744
12.89	0	0	24.0	0
$\Sigma q_{Bi}=0.7596 \text{ m}^3/\text{m}$				

の1例を示す。

3. 粗面路床の掃流砂に関する実験

3.1 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験に使用した水路は、Fig. 11 に示すように幅 50 cm、高さ 50 cm および全長 21 m の鋼製水路で、中央部 9 m は両面ガラス張りになっており、下流部に設置された貯水槽とこれに接続するパイプおよびポンプによって、水と砂礫を同時に循環できるようになっている。水路こう配を 1/250 に設定し、路床に、平均径が 2.45 cm のガラス玉を、Fig. 12 のように規則正しく1層敷き詰め、流れに対する粗度を代表させ

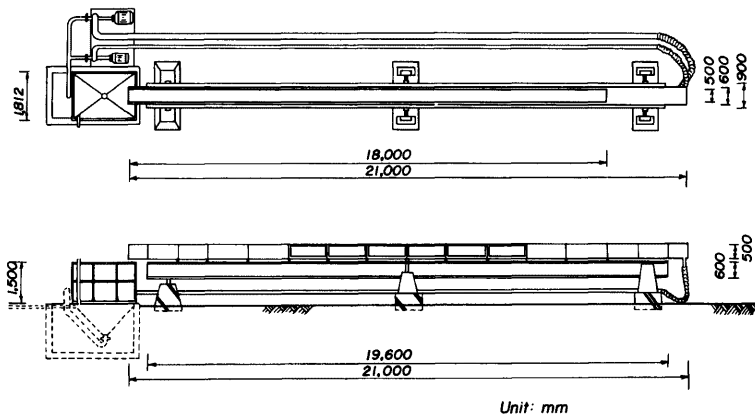


Fig. 11. Schematic sketch of experimental flume.

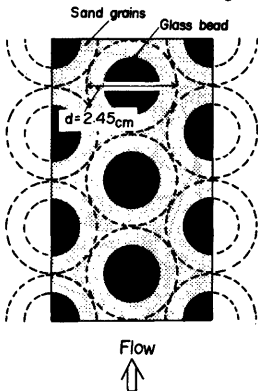


Fig. 12. Rhombhedrally packed bed of glass beads.

た。流送される細砂は粒径が 1 mm の一様砂を用いた。流速の測定には、外径 4 mm のプラントル型ピトー管と差圧計および超小型プロベラ流速計（プロベラ径 5 mm）を使用した、また、流砂量の測定は、Fig. 13 に示すように、水路横断方向の流砂量分布を知ることができるように試作した採砂装置を用いて、水路下流端で行った。

(2) 実験方法

本実験において最も配慮したことは、水理条件および細砂の堆積状態を定常に保ち、各種計測を実施することであるが、使用した水路が循環式水路であることに起因して種々の問題が生じた。すなわち、今回使用した細砂の粒径が大きかったので、とくに低流量の場合に、パイプ内の砂粒に十分な掃流力が働かず、砂粒が堆積するという現象が発生した。その結果、下流端まで流送された細砂よりもパイプ内に堆積した量だけ少ない細砂が上流端に供給されることになり、水路床上の細砂の絶対量が時間的に減少する。後述のように、細砂の絶対量の低下は、ガラス玉の露出高さの増加につながり、流砂量を大きく減少させる主因となる。

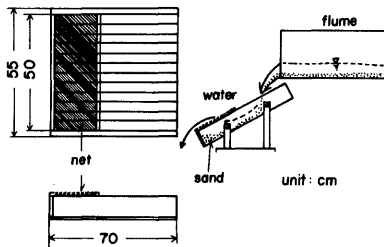


Fig. 13. Sampler of bed load.

したがって、以上の循環式水路の特性をふまえて、つぎのような手順で実験を行った。まず通水前に、水路全長にわたって均等に細砂が分布するように水路の各部分の細砂の量を調節し、通水開始後、縦筋の位置および規模が流下方向にほぼ一樣になるのを確認した。一樣になるまでの所要時間は2~6時間であった。各測定項目とその内容はつぎのようである。

(i) 水深：水深（水面とガラス玉頂部の差）の測定は、水路上流端 8 m から 2 m ごとに 6 点でポイントゲージを用いて行い、それらの平均値を水深とした。

(ii) 流量：流量は、下流端において幅 5 cm の樋を用いて流水を容器に導びき、その重さを測定する操作を 3 回繰り返して、単位時間、単位幅当りの流量を求めた。また水深測定の場合と同様に、1 つの実験ケースで数回の測定を行い時間的変動がないことを確認した。

(iii) 流速分布：流速の測定は、水路上流端から約 10 m 下流のほぼ平均的な水量を与えていると思われる地点で行った。ほとんどの実験において、水路横断方向の中央部付近の細砂が堆積している地点とガラス玉が大きく露出している地点の 2 ヶ所で、鉛直方向の流速を測定したが、数ケースの実験については、流速の鉛直および水平分布特性を知るために 1 ケースにつき 200~300 点の流速を測った。なお、流速の実験値は、すべて 1~2 分間の平均流速である。

(iv) 流砂量：流砂量の測定は、水路下流端で、上述の採砂装置を用いて各実験ごとに 1 回あるいは、小流量の場合には数回行った。なお、循環式水路であるので、給砂は通常行わなかったが、下流端部で流砂量計測のために採砂する場合には、上流端のガラス玉のない約 1 m の水路床に細砂が存在するように随時給砂し、流砂量および縦筋が平衡に近い状態になるよう工夫した。

(v) 細砂の縦筋：本実験では一般に細砂の縦筋が発生し、流砂量が縦筋に大きく影響されると思われるので、各実験ケースごとに細砂の堆積状態を写真撮影した。そして、それをもとにした水路床の横断面図から、細砂の縦筋の幅およびガラス玉の露出高さを測定した。実験は流下方向に縦筋が一樣な状態を実施することを目標としたが、細砂の分布状態のごくわずかな時間的および場所の変動が生ずるため、水路の上下流断面で写真撮影を行い、それらの平均の値をそれぞれ河床条件として使用した。

(vi) その他：縦筋の発生は流下方向の 2 次流の存在に起因すると思われるので、水路床付近の流向を測定した。そのために、水路床近傍に約 2 cm 間隔で横断方向にセットした長さ 3 cm の木綿糸を、0.25 秒間隔で連続 10 枚写真撮影し、流下方向からの偏角を読み取った。また、アルミ粉、重クロム酸カリウム、粉ミルクなどを水中に投下し、2 次流の写真撮影を行った。

本実験は、水路こう配と細砂の粒径を一定として、約 30 ケース行った。一連の実験条件を Table 4 に示す。

3.2 粗面路床上の流砂現象の特徴と支配要素

(1) 縦筋と流砂量分布

従来、掃流砂に関する研究の大半のものは、流下方向に 1 次元的な取り扱いであるが、本実験においては、すべての実験ケースにおいて、Photo. 1 に示すような細砂の縦筋が発生し、流砂量も水路横断方向に顕著な変化が生じた。Fig. 14 は流砂量の分布と縦筋の位置との関係の数列を示したものである。これらの図から、縦筋の部分とそれ以外の部分とでは流砂量が大きく相違し、前者が後者の数 10 倍になる場合もある

Table 4. Experimental conditions and results.

$D=2.45$ cm, $d=0.1$ cm, $I=0.004$

Run	h (cm)	R (cm)	u_{mean} (cm/sec)	u_{*R} (cm/sec)	τ_{*R}	δ_m	q_f (cm ³ /cm-sec)
1	5.30	5.06	40.0	4.46	0.126	0.425	225
2	7.18	6.65	49.2	5.11	0.165	0.750	376
3	10.37	8.19	76.0	5.67	0.204	1	829
4	4.33	3.47	30.0	4.19	0.111	0.730	141
5	8.42	7.53	53.2	5.43	0.187	0.470	469
11	4.02	4.01	30.3	3.96	0.100	0.370	130
12	5.72	5.44	41.9	4.62	0.135	0.530	253
13	7.21	6.52	50.0	5.06	0.162	0.470	373
14	9.58	8.12	62.7	5.64	0.202	0.540	625
15	5.66	5.40	39.2	4.60	0.134	0.350	233
21	5.39	—	—	—	—	—	229
22	3.57	3.55	31.8	3.73	0.088	0.362	121
23	5.67	5.37	42.6	4.59	0.133	0.442	256
24	6.72	6.01	49.2	4.88	0.151	0.199	339
25	8.84	8.21	37.7	5.67	0.204	0.270	339
31	4.36	4.34	29.9	4.13	0.108	0.308	138
32	2.96	3.09	24.3	3.48	0.077	0.420	78
33	4.25	4.29	33.2	4.10	0.107	0.550	154
34	5.18	4.88	44.1	4.37	0.121	0.380	242
35	6.02	5.67	43.0	47.2	0.141	0.430	273
41	8.59	7.45	55.5	5.40	0.185	0.394	490
42	7.50	6.62	52.8	5.09	0.164	0.260	409
43	8.68	7.65	53.7	5.48	0.190	0.500	482
44	5.46	5.33	38.4	4.57	0.133	—	225
45	5.49	5.29	40.7	4.55	0.132	—	239
51	5.41	5.03	43.0	4.44	0.125	—	242
52	5.38	5.03	42.9	4.44	0.125	—	242
53	5.25	4.97	42.5	4.41	0.123	—	235

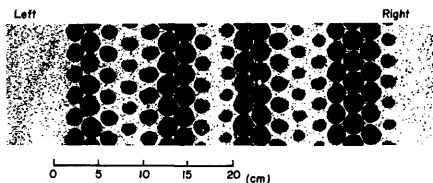


Photo. 1. Logitudinal strips on a glass bead bed.

るので、全体として下流側へ移動してゆく。しかしながら、溝の下流端の運動を詳細に観察すれば、大部分の砂粒は水路と平行に流送されるのではなく、微小な角度ではあるが溝の左右両側に向かってかなり速い速度

ことがわかる。このように流砂量が波状に変化する現状は縦筋の存在に起因することがわかったが、その形成過程はつぎのようであった。粗面路床上に細砂をほぼ均一にならしたのち通水すると、水路全体の至るところで局所的な細砂面の洗掘が発生する。この洗掘によって生じた流下方向の溝は、その上流側の細砂が溝内に落ち込む結果溝の上流端が下流に前進し、また溝内の速い流れによって下流端の部分が洗掘され

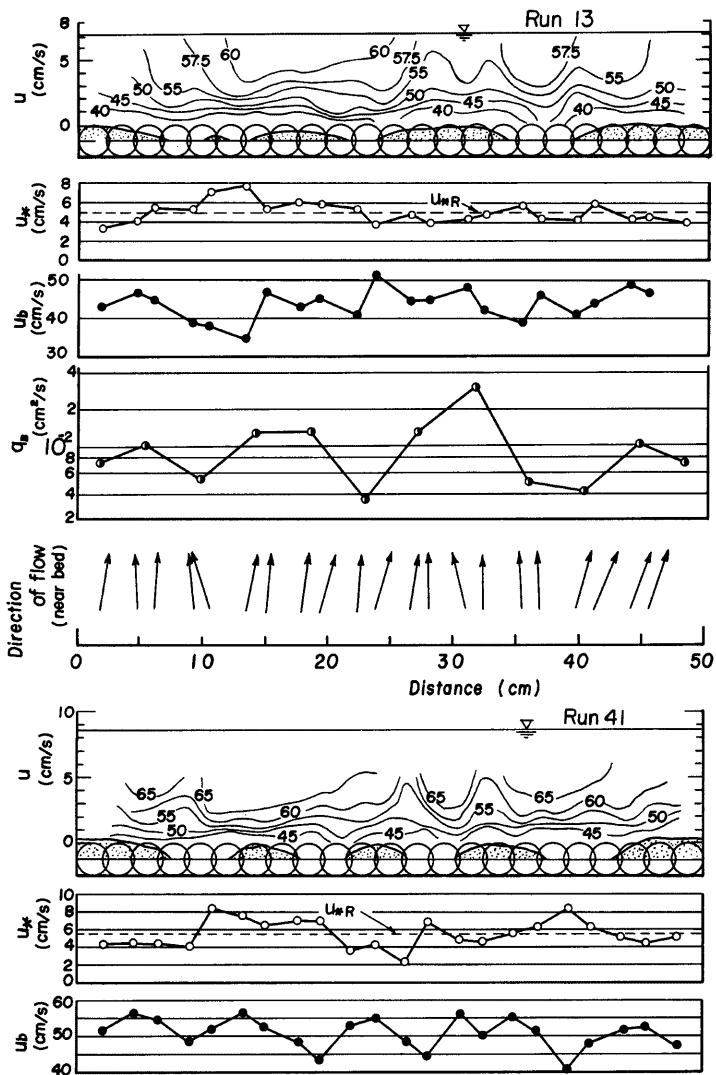


Fig. 14. Transverse variations of current velocity, shear velocity and rate of bed load on a gravel bed.

で動くことがわかる。したがって、上流端より下流端の移動速度の方が圧倒的に速くなり、個々の溝は時間とともに流下方向に成長していくことになる。そしてある程度溝の長さが長くなれば、上流側または下流側で発達する他の溝と結合し、最終的には、水路全体にわたる溝ができ、この溝の両側に細砂の縦筋が形成される。この縦筋は、非常に安定なものであり、水路横断方向の幅や位置が時間的に変動することはほとんど無かった。

つぎに、縦筋の特性の1つとして縦筋の間隔 ΔL と水深 h との関係を図 15 に示す。図中には、細砂の粒径が 0.3 mm および 0.5 mm を用いて行った予備実験の結果²⁰⁾も図示したが、粒径の相違に関係なく縦筋の間隔が水深の約2倍になっている。

(2) 球状粗度周辺の細砂の挙動

ガラス玉近傍での細砂の挙動を詳細に観察すれば、ガラス玉の細砂堆積面からの露出度合によって2種類の流砂形態がみられる。その1つは、縦筋の部分のようにガラス玉の露出が比較の少ないところで、細砂が掃流形式で流下方向に直線状に運ばれていく形態である。(1)で述べたように、縦筋の発達過程では、細砂は縦筋の軸方向の速度成分を持つが、ほぼ安定化した縦筋では、細砂は横断方向に動かず流下方向へのみ流送される。これは縦筋と溝との境界近傍で、細砂に働く2次流による流体力と重力の接線方向成分とが平衡していることによると推定される。

一方、ガラス玉の露出が多い場合には、細砂がガラス玉背面の中央部を上昇したのち頂部付近で両側に落下する特徴的な運動が観察される。ガラス玉背面に巻き込まれる細砂は流速の増加とともに多くなるようである。この現象は、ガラス玉背面に左右対称に発生する剝離渦によるものであるが、隣接する他のガラス玉の干渉のために非対称になる場合もある。

(3) 流砂現象の支配要素

(1) および (2) では、本実験で観察された粗面路床上の流砂現象の特徴を示し、縦筋と流砂量との関係についても簡単に触れた。さらに、ここでは、粗面路床における細砂の掃流砂機構を支配すると考えられる諸要素を列挙し、その特性について検討を加える。

まず、水理条件として細砂面に働く掃流力を推定しなければならない。Fig. 14 には摩擦速度、底面流速と流向および等流速線をすでに示してある。ただし、それぞれの値はつぎのようにして決定した。速度の鉛直分布から摩擦速度 u_* を求めるのに際しては、後述する解析結果から、座標原点はガラス玉の頂部と細砂面との差 ΔH の1/2のところの位置に置いた。したがって、径深から摩擦速度を推定する場合、水深 h' は h (ガラス玉頂部から水面までの値) に $\Delta H/2$ を加えて計算した。また、底面流速 u_b は実験結果の整理の都合上、細砂面から 1.88 cm 上方の点での値であり、流向は見やすくするために実際の角度の4倍を示す。これから、各等流速線が水路横断方向に波状を描き、これが下に凸なところは溝の部分に対応し、摩擦速度が大きくなっていることが見だし、逆に上に凸な部分は縦筋の位置に一致しており、摩擦速度が小さくなっていることがわかる。したがって、底面流速と摩擦速度は逆位相の関係にあると推定されるが、Fig. 14 からそれがほぼ妥当であることが示される。

等流速線の波状性は、上凸部分での上昇流と下凸部分での下降流に起因すると考えられ、前述した縦筋の形成過程と底面流向を参考にすれば、流下方向に軸をもつ2次流が発生しているものと思われる。

つぎに、河床条件として縦筋の特性を検討する必要がある。すでに指摘したように、縦筋の部分の流砂量はそれ以外の部分での値の数10倍に達するので、粗面路床の流砂量を算定することは、結局縦筋における流

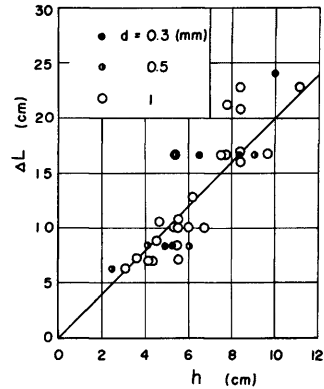


Fig. 15. Variation of intervals of longitudinal strips with water depth.

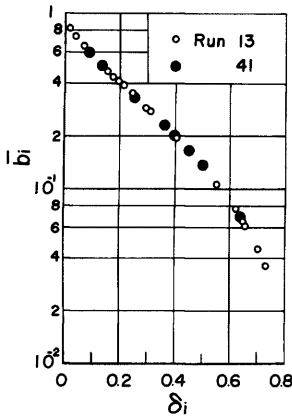


Fig. 16. Relation between exposed height of glass bead and width of movable sand bed \bar{b}_i .

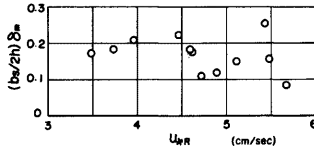


Fig. 17. Relation between shear velocity and efficient width of longitudinal strips.

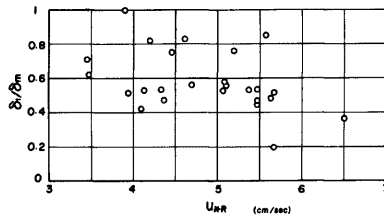


Fig. 18. Relation between shear velocity and δ_i/δ_m .

砂量を求めることに帰着するといっても過言ではない。そこで、まず写真解析の結果からガラス玉の露出高 ΔH と水路横断方向に隣接するガラス玉間の平均の細砂幅 \bar{b}_i の関係を求めたものが Fig. 16 である。ただし、図中の記号 $\bar{b}_i = b_i/(D/2)$ および $\delta_i = \Delta H_i/(D/2)$ である。これから、露出高は細砂幅によってほぼ一義的に決定されることがわかる。

さて、縦筋の定義として、通水停止後の δ が、初期（通水前）の平均的な δ_m に比べて小さくなっている部分であるとすれば、縦筋の幅 $b_s = (b_i/2h)$ および δ_m の無次元量は、今回の実験範囲では、Fig. 17 のように摩擦速度 u_{*R} の増加に伴って若干減少するが、近似的に一定として取り扱うことができる。また、縦筋の部分の無次元露出高 $\delta_i = (\Delta H_i)/(D/2)$ と δ_m との比は、Fig. 18 に示すように 0.4~0.8 程度であり、 u_{*R} の増加とともに縦筋において細砂がわずかに盛り上げる傾向が見られる。

このように、縦筋の特性とそこに作用する掃流力が粗面路床における細砂の流砂現象を支配していると推察される。

4. 粗面路床上の流砂機構と流砂量に関する考察

4.1 摩擦速度の評価と有効掃流力の算定

(1) 摩擦速度の評価

流速分布に対数分布則を適用して摩擦速度を推定しようとする場合、水路の鉛直方向の座標原点をどの位置にとるかということは、非常に重要な問題である。とくに、本実験のように、水路床が不動状態のガラス玉と細砂の移動床で構成され、水深がガラス玉の直径の数倍程度であって必ずしも完全粗面乱流になっていない場合には、流速測定値の散乱も起因して、精度の高い摩擦速度の値を得ることは極めて困難である。一方、このように水深が浅い場合には、平均水深とエネルギー勾配を用いて推定する方法が一般的であるが、河床粗度が粗いために、粗度の間を流下する流量が粗度上の流量に比べて無視できない場合が多く、水深の

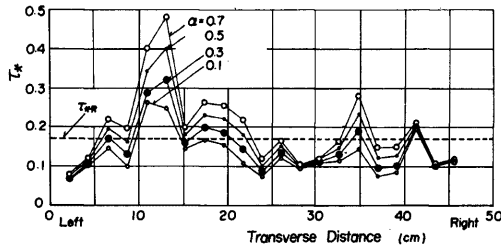


Fig. 19. Changes of dimensionless tractive force with the origin of z-axis.

評価を慎重に行う必要があるだろう。

本実験では、 $\delta=0$ が一様砂の Plane bed の移動床に対応し、 $\delta=1$ がガラス玉の固定床になることから、ガラス玉の露出高 ($0 < \delta < 1$) が粗度の代表長になる可能性が大きいと推定される。そこで、1つの試みとして、鉛直座標原点の位置をガラス玉頂部から $0.1 \Delta H$ づつ下方にとり、流速の実験値に最小2乗法を適用して対数則にもとづく摩擦速度 u_* を求めた。

一方、それぞれの場合に対して径深分割法から摩擦速度 u_{*R} を計算し、両者の値を比較した。その結果、Fig. 14 に示したように、座標原点をガラス玉頂部から $0.5 \Delta H$ 下方にとれば、 u_* と u_{*R} がほぼ等しくなることがわかった。Fig. 19 には、Run 13 の場合の無次元掃流力 τ_* の座標原点の相違による変化を示した。図中 α は、 $\alpha \Delta H$ だけ原点がガラス玉頂部の下にあることを意味し、 τ_{*R} は $\alpha=0.5$ としたときの径深から求めた値である。

上述したような鉛直方向の座標原点の位置は、固定床粗面上の流れを対象とした従来の研究結果と数値的にはほぼ一致している。したがって、本実験ではガラス玉の頂部と細砂面との中間を座標原点として、摩擦速度 u_* および u_{*R} を評価することにした。

つぎに、相当砂粒粗度 k_s について検討する。Fig. 20 は、縦筋の部分 ($0 < \delta < 0.5$) における Reynolds 数 $u_* \Delta H / \nu$ と k_s / D との関係を示したものであり、両者の相関が認められる。ただし、縦筋以外の路床 ($0.5 < \delta < 1$) では k_s がガラス玉の直径の数倍に達することもあり、両者の明確な関係は見出されなかった。後者の結果は、土屋ら¹⁰の実験値でも指摘される事実であって、粗度近傍では規則的渦流が支配的で、対数則が成立する完全乱流域にないことと路床近傍の流速測定の困難さに原因があると考えられる。

しかしながら、3.2(3) で述べたように、粗面路床における流砂量は縦筋における流砂量に支配されるから、この部分での k_s が Fig. 20 のように河床条件との関係で評価できれば流砂量の予測が十分な精度で可能になる。

(2) 有効掃流力の算定

いま、粗面路床の細砂面に働く有効掃流力を算定することを試みてみよう。モデル化にあたって、つぎのように仮定する。すなわち、(i) ガラス玉は不動であり、その背後では有効掃流力が零となる死水域が存在する。(ii) ガラス玉と死水域以外の細砂面には、有効掃流力が一様に作用する。

Fig. 12 に示すような河床状態を対象とし、流れが等流の

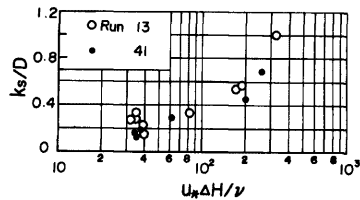


Fig. 20. Relation between Reynolds number and equivalent sand roughness.

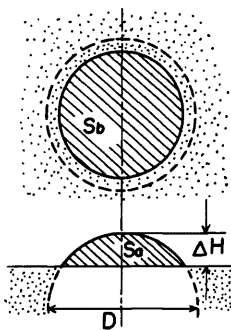


Fig. 21. Definition sketch for bed condition.

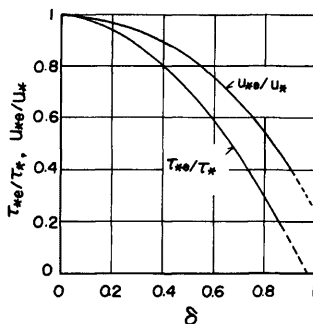


Fig. 22. Influence of δ on effective tractive force.

条件で抵抗の線形性を仮定すれば、次式が成立する。

$$\sum \frac{1}{2} \rho C_D u_0^2 S_a \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \tau_e (A - A_1) = \tau_0 A \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 C_D : ガラス玉の抗力係数、 u_0 : 代表流速、 D : ガラス玉の直径、 S_a : $D/2=1$ の単一のガラス玉に働く流体力の作用面積、 τ_e および τ_0 : それぞれ有効掃流力と全せん断応力、 A および A_1 : それぞれ対象としている全底面積と全死水域の面積および N : 面積 A の路床内に点在するガラス玉の数である。

Fig. 21 に示した模式図を参照すれば、細砂面から δ だけ露出しているガラス玉について、 S_a および S_b は、それぞれつぎのように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} S_a &= (\pi/2) - \sin^{-1}(1-\delta) - (1-\delta)\sqrt{\delta(2-\delta)} \\ S_b &= \pi(2-\delta)\delta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

死水域の面積は、簡単のために S_b に比例すると仮定すれば、式 (3) は次式のようになる。

$$\frac{1}{2} C_D \left(\frac{u_0}{u_*}\right)^2 \sum S_a \frac{D^2}{4} + \left(1 - \frac{c_1 N S_b}{A} \frac{D^2}{4}\right) \left(\frac{u_{*e}}{u_*}\right)^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u_{*e} : 有効摩擦速度および c_1 : 定数である。ガラス玉1個が受けもつ路床面積 A/N と $S_b \frac{D^2}{4}$ との比を p と置くと、有効掃流力は式 (5) から、結局つぎのように表される。

$$\frac{\tau_{*e}}{\tau_*} = \left(\frac{u_{*e}}{u_*}\right)^2 = \left\{1 - \frac{1}{2} C_D u_0^2 \left(\frac{S_a}{S_b}\right) \left(\frac{1}{p}\right)\right\} / \left\{1 - \frac{c_1}{p}\right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $u_0 = u_0/u_*$ である。式 (6) の右辺は δ のみの関数であり、有効掃流力の δ による変化を Fig. 22 に示す。ただし、計算に際しては、つぎのようにして定数や u_0 を決定した。

(i) u_0 : 縦筋の部分では Fig. 20 に示したように、相当砂粒粗度 k_s/D と δ の間に明確な関係が見出されている。 u_0 の算定においては、この k_s を用いて、ガラス玉頂部 ($z = \Delta H/2$) での u_0 を求めた。

(ii) C_D および c_1 : ガラス玉が上半部程度露出した場合の抵抗係数は、 $\Delta H \approx 1$ cm、 $u_0 \approx 10$ cm/sec および $\nu = 0.01$ cm²/sec として、 $R_{*e} \approx 10^4$ となることから、0.4程度になると推定される。ただし、ガラス玉前面の局所洗掘や露出部分が完全に球でないことを考慮しなければならないことは当然である。また、 c_1 については、 δ が大きくなり、死水域が広くなれば当然背後のガラス玉の干渉が加わると考えられる。この干渉がない場合には、点粗度の後流に関する実験結果^{10),30)} などから1~3程度になると推定される。しかし、

Fig. 12 に示したようなガラス玉の配列状態では、たとえば $c_1=2$ とすれば $\delta=0.5$ 程度でガラス玉背後の面積と死水域の面積が等しくなってしまう、それ以上の δ では死水域が重なり合うという矛盾が生ずる。そこで、ガラス玉背後の干渉とその前面の局所洗掘を考慮して、死水域の面積を簡単につぎのように与えられるものとした。

$$A_i/N = c_1 S_b \frac{D^2}{4} + c_2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $c_2 = a_1(\pi/2)(D^2/4)$ であり、実際の計算では $c_1=1$ および $a_1=0.133$ とした。

(iii) A/N : Fig. 12 のようなガラス玉の配列では、 $3.46 \text{ cm}^2/\text{個}$ である。

Fig. 22 から、有効掃流力は δ の増加とともに顕著に減少することがわかる。このような傾向は定性的には妥当であろうが、 τ_{*c} を正確に実測することがほとんど不可能であるので、定量的な適否については流砂量などの考察を通して間接的にしか検討できない。

4.2 縦渦の特性とその評価

(1) 縦渦(2次流)の特性

Fig. 14 などに示した粗面路床上の等流速線の分布から2次流の方向を推定した数例が Fig. 23 である。この図と観察結果から、側壁近傍を除けば、縦渦の断面は円に近く、その直径は水深程度であることがわかる。また、2次流の上昇位置は細砂の縦筋の発生位置とよく一致しており、その下降時の路床にはほとんど細砂が見られない。縦渦の発生機構に関する Kline²¹⁾らの研究によれば、Reynolds 数が大きくなる程縦渦が不安定になると報告されているが、本実験で観察された縦筋はそれとは逆に非常に安定なものとなって

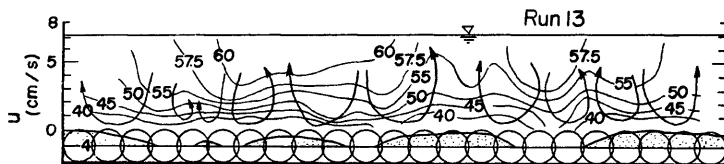


Fig. 23. Examples of direction of secondary flow.

いる。この結果は木下¹⁸⁾の観察結果も一致していると考えられ、今回対象としたような河床条件下では、縦渦が縦筋を形成し、その縦筋が縦渦を安定化させる相互作用が内在すると推察される。

つぎに、幅一水深比 B/h と縦渦の個数 n との関係を図示したものが Fig. 24 であって、これから両者に非常に強い線形性が認められる。

(2) 縦渦の評価

縦渦はつぎのような水理条件と河床条件の変化をもたらし、流砂量に影響を及ぼすものと考えられる。すなわち、縦渦により水路断面内の流速分布が変形し、水路床に働く掃流力が変化するということであり、また縦渦によって縦筋が形成され河床条件が変わることである。後者については局所的な流砂機構を明らかにする必要があり、現状では非常に困難であるから、ここでは前者について簡単なモデルを用いて検討する。

いま、縦渦の外周における回転速度を v_s とし、等流速線および縦渦を模式的に表すと、Fig. 25 のようになる。図中の添字 1, 2 は、それぞれ縦渦の上昇位置と下降位置を示す。 v_s の評価に際しては運動量的な考察を進めることにすれば、 $y=y_1$, $z=h/2$ の位置において鉛直上向き velocity v_s をもつ流れによって、単位時間、単位面積当り上部に輸送される運動量 τ_s は、 $\rho u_m v_s$ である。ここに、 u_m は $z=h/2$ における流下方向の時間平均流速である。したがって、この面に働くせん断応力 τ_1 は、いわゆる Reynolds 応力 $\tau = -\rho u'w'$ との和として、次式で表される。

$$\tau_1 = \tau - \tau_s = -\rho(u'w' + u_m v_s) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 u' および w' : それぞれ流下方向および鉛直方向の変動流速である。同様に $y=y_2$, $z=h/2$ の地点

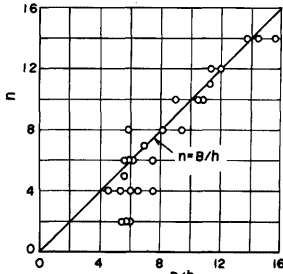


Fig. 24. Relation between width-depth ratio and number of streamwise vorticity.

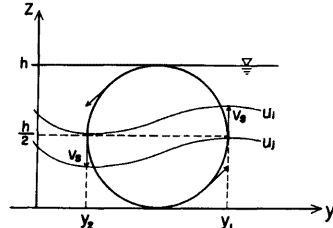


Fig. 25. Schematic diagram of secondary flow.

においては、せん断応力 τ_2 はつぎのようである。

$$\tau_2 = \tau + \tau_s = -\rho(\overline{u'w'} - u_m v_s) \dots\dots\dots (10)$$

式 (9) および式 (10) から、縦渦の下降部では上昇部に比べ $2\rho u_m v_s$ だけせん断応力が大きくなるのがわかる。

つぎに、式 (9) および (10) を用いて v_s を求めてみよう。 τ は径深を用いて計算されるせん断応力 τ_R で与えられるとし、それぞれの流速分布から τ_1 および τ_2 を算定して両式に代入すれば、 v_s を評価できる。Fig. 26 はその結果を示し、 v_s は u_{*R} の増加とともに線形的に大きくなり、後者の1/20程度であることがわかる。ただし、図中の点はその実験における個々の縦渦についての平均値である。これから、 v_s の値はたかだか数 mm/sec 程度であり、Fig. 14 に示した底面流向の偏角が流下方向から数度であるという測定結果とかなりよい対応を示している。

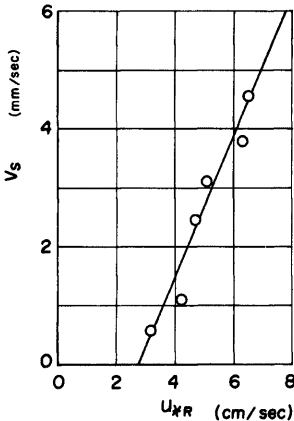


Fig. 26. Relation between shear velocity and velocity of secondary flow.

4.3 流砂量に関する考察

Fig. 27 は、流速分布から求めた局所的な無次元掃流力 $\tau_* (= u_*^2/(\sigma/\rho - 1)gd)$ と Fig. 11 で示した採砂装置を用いて得た局所的な無次元流砂量 $q_* (= q_B/u_*d)$ との関係を示す。実験値は δ の範囲により6段階に分類してあり、また図中の曲線は、Plane bed における一様砂の流砂量を与える芦田・道上式⁴⁾

$$q_* = 17\tau_* \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_*}\right) \dots\dots\dots (11)$$

を、 $\tau_{*c} = 0.05$ として計算したものである。従来の Plane bed を対象とした流砂量の実験値は、式 (11) をはじめ種々の流砂量式とよく一致することがすでに認められており、ここではこの式によって Plane bed の流砂量が与えられるものとして以下の検討を進める。

この図から、 δ の値が大きくなるに従い、同一の τ_* に対する q_* の値が減少し、逆に $\delta \ll 1$, すなわちガラス玉が露出せず水路床が細砂のみによって構成される場合には、一様砂の流砂量に接続する傾向が見出される。そこで、 δ の値により流砂量が Plane bed のものより減少する割合を知るため、粗面路床上の細砂の流砂量が次式

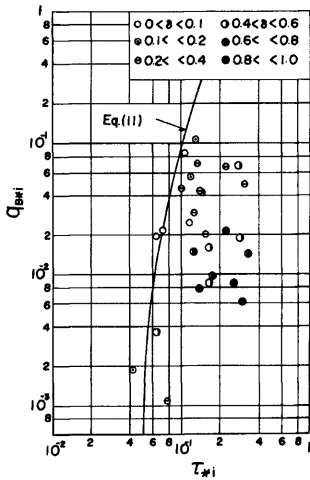


Fig. 27. q^* vs. τ^* relation.

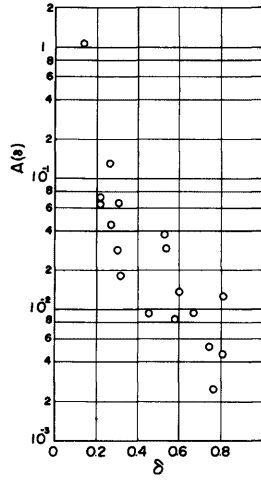


Fig. 28. Relation between δ and $A(\delta)$.

で表示できるものと仮定する。

$$q_{*i} = A(\delta) f(\tau_{*ei}) \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 i は水路床横断方向の任意の位置を示し、 $A(\delta)$ は δ のみの関数である。Fig. 28 は有効掃流力を考慮せずに δ と $A(\delta)$ との関係を図示したものである。これから、 $\delta=0.5$ 程度の流砂量は Plane bed の場合の1/100に減少することがわかる。すでに、3.2で述べたように δ の増加は細砂幅 b_i の減少をもたらすが、Fig. 16 から判断してその変化はたかだか1/10程度であるので、単位幅当りの流砂量を細砂幅に対応させて修正しても一様砂の流砂量 ($A(\delta)=1$) にはならない。このような理由から、細砂幅のほかに 4.1 に述べた有効掃流力を考慮することにして、Fig. 16 および 22 を用いて実験値を再整理した結果、Fig. 29 のようになった。実験値の精度上の問題はあるが、縦筋以外での流砂量も含めて実験値はある程度計算値と一致することが認められる。したがって、粗面路床における細砂の流砂量は縦筋と有効掃流力を考慮することによって、従来の一様砂を対象とした流砂量式で算定可能なことがわかる。

4.4 代表二粒径モデルによる流砂量予測の試み

ここでは、砂礫河川の中小洪水時の流砂量を予測することを目的として、代表二粒径モデルの適用性について若干検討する。

(1) 流砂量の推定法

代表二粒径モデルによる流砂量の計算法を整理すると、Fig. 30 のようになる。このフローチャートの各部分を段階を追って簡単に説明する

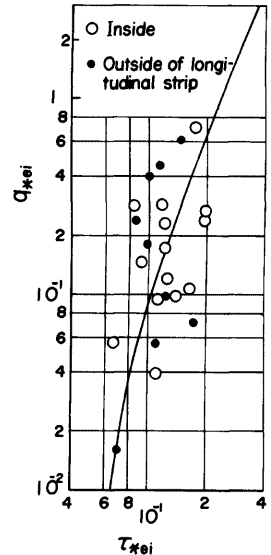


Fig. 29. Comparison between modified experimental values and theoretical curve calculated by Eq.(11)

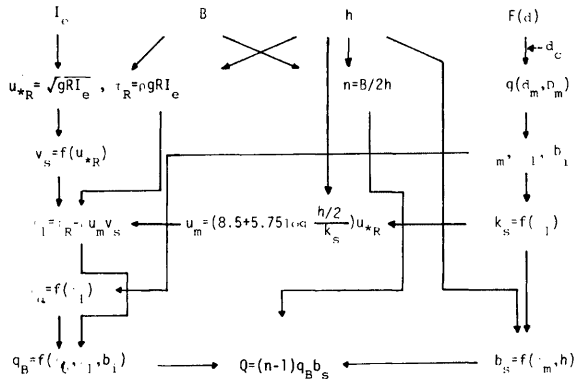


Fig. 30. Flow chart for calculation of rate of bed load on a gravel bed.

ことにしよう。ただし、既知の資料は実河川に適用することを考慮して、エネルギーこう配 I_e 、水深 h 、水路幅 B および河床砂礫の粒度分布 $F(d)$ であるとする。

まず、縦筋の個数 n_l は、Figs. 14 および 24 から、

$$n_l = B/2h \tag{13}$$

で与えられる。また、平均の摩擦速度 u_{*R} および掃流力 τ_R は、それぞれ次式で表される。

$$u_{*R} = \sqrt{gRI_e}, \quad \tau_R = \rho g RI_e \tag{14}$$

つぎに、縦渦の回転速度 v_s を用いて、縦筋の部分での掃流力 τ_1 は、次式で表される。

$$\tau_1 = \tau_R - \rho u_m v_s \tag{15}$$

ここに、 u_m は $z=h/2$ での流速である。 v_s については、系統的な実験および理論的解析から詳細に検討しなければならないが、今回の実験条件の範囲では、Fig. 26 からつぎのように与えられよう。

$$v_s = f(u_{*R}) \tag{16}$$

一方、河床砂礫の粒度分布 $F(d)$ と、代表二粒径モデルに変換した場合の粒度分布との比較を、模式的に Fig. 31 に示した。この図において、 d_m は移動可能な砂礫の平均粒径、 d_c は移動限界にある砂礫の粒径および D_m は不動砂礫の平均粒径である。 d_m および D_m の混合割合 $g(d_m, D_m)$ から、砂礫 D_m の平均露出度 δ_m は砂礫河床の写真などの解析から近似的に得ることができる。この δ_m から、縦筋の位置の露出度 δ_1 は Fig. 18 に示す関係を用いて推定でき、同時に k_s が Fig. 20 からわかる。したがって、 u_m は次式で与えられる。

$$u_m = \left\{ 8.5 + 5.75 \log \frac{(h/2)}{k_s} \right\} u_{*R} \tag{17}$$

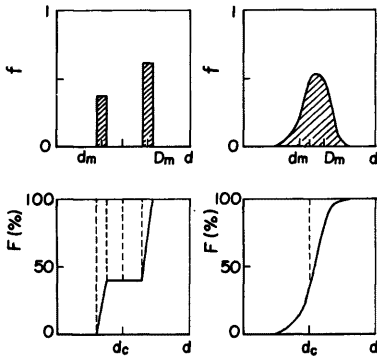


Fig. 31. Transformation of graded grain-size distribution to representative two diameters.

そのほか、流砂幅および有効掃流力に関する検討結果を用いれば、最終的に全幅流砂量 Q_B は、次式で得ることができよう。

$$Q_B = n_i q_B b_i \dots\dots\dots (18)$$

(2) 流砂量予測の試み

ここでは、1976年9月の台風17号による洪水による中郡橋下流地点の流砂量を、上述した代表二粒径モデルで算定する。まず、この洪水の hidrograph および摩擦速度 u_{*R} の時間的変化は、すでに Fig. 6 に示した。ここで、流量 Q は、低水流観測資料からマンシングの粗度係数を0.043とし、流下方向に100m離れた2点の水位の実測値と河床断面図から水面こう配および平均水深を計算して、その結果得られた平均流速から求めたものである。ただし、2断面間の速度水頭の変化が水位変化に比べて無視できる程小さかったので、エネルギーこう配として水面こう配を近似的に与えた。これらの値を用いた計算結果を Table 5 に示す。ただし、計算の時間々隔は4時間とし、粒径 d_c は Fig. 10 の実河川における限界掃流力の平均値を用いた。また、 δ_m は移動する砂礫 d_m の全河床砂礫に対する割合 f を面積割合で表示し、これに対応する δ_m の値を d_m と D_m の代表二粒径モデルに適用して算定した。

代表二粒径モデルを適用した試算では、単位幅当りの流砂量は $0.223 \text{ m}^3/\text{m}$ となり、2.3で示したトレーサー法による実測値 $0.76 \text{ m}^3/\text{m}$ とある程度対応していることがわかる。一方、Egiazaroff 修正式と芦田・道土式を適用すると $41.4 \text{ m}^3/\text{m}$ となり、かなり過大に評価されていることが認められる。

Table 5. Rate of bed load calculated by proposed method.

	1976. 9. 9 (6:00-10:00)	(10:00-14:00)
h (cm)	111. 8	103. 1
u_{*R} (cm/sec)	20. 2	19. 4
F_{d_m} (%)	67. 2	64. 5
d_c (cm)	10. 7	10. 3
d_m (cm)	4. 82	4. 62
D_m (cm)	17. 8	17. 6
δ_m	0. 138	0. 151
b_s (m)	1. 62	1. 37
b_i	0. 65	0. 62
τ_{*a}/τ_{*c}	0. 99	0. 98
q_B (m^3/m)	0. 125	0. 0976

5. 結 語

本研究は、砂礫河川において、中小洪水時に不動状態の砂礫が存在する場合の細砂の掃流砂量を予測することを目的として、野洲川でトレーサー法による砂礫の移動調査を行うとともに代表二粒径モデルによる粗面路床上の流砂実験から流砂機構と流砂量の推定法に関する考察を行った。ここでは、得られた主な結果を要約して結論とする。

- 1) 河床砂礫の粒度分布の測定方法としては、河床表面の粒度特性と横断方向の粒度分布と求めることを目的とするならば、線格子法が適切である。
- 2) 線格子法で実測された砂粒径の、河道横断方向の移動平均を求めることによって、野洲川においても細砂の縦筋が存在することが確認できた。
- 3) 着色砂礫の観測結果から、砂礫の粒径別移動特性と移動限界に対する混合効果がかなり明らかになっ

た。

4) 粗面路床の細砂の流砂実験では、縦筋の間隔は従来の報告と一致して、ほぼ等間隔であり、水深の約2倍に等しい。また、縦筋の部分とその他の部分とでは、流砂量に大きな相違があり、前者の流砂量は後者のその数10倍にもなるので、流砂量算定に際しては、縦筋の影響を考慮する必要がある。

5) 水路断面内の等流速線は、縦筋とほぼ同位相で波状に変形しており、これは水路に発生する縦渦(2次流)によるものといえる。この結果、摩擦速度と掃流力が横断方向に変動することがわかった。

6) 流砂量に支配的な影響を及ぼす縦筋の部分におけるガラス玉の無次元露出高 δ_1 および無次元流砂幅 b_s は、今回の実験範囲では、通水前の無次元平均露出高 δ_m との関係で近似的に表示できることがわかった。

7) 鉛直方向の流速分布に関しては、ガラス玉の露出高が粗度になる可能性があることから、対数分布則の座標原点を露出高の関数で表し、最小2乗法により摩擦速度を求めたところ、ガラス玉頂点と細砂の面の1/2の所に原点を取れば、平均水理量から算定される摩擦速度とほぼ一致することが見出された。また、縦筋の位置における相当砂粒粗度は、ガラス玉の露出高の関数であることがわかった。

8) 死水域を考慮した抵抗分離法を適用すれば、今回対象とした河床条件下での有効掃流力が算定可能であることが明らかになった。

9) 縦渦による運動量輸送が水路横断方向の掃流力を変化させるという考えから、上昇流および下降流を生じる地点での掃流力を評価し、それらが実験値の特性と対応することを明らかにするとともに、縦渦外周での最大回転速度が摩擦速度の関数となることを指摘した。

10) 代表二粒径モデルに基づいて、縦筋の影響と有効掃流力を考慮した流砂量推定のフローチャートを示した。そして、このフローチャートに従って野洲川の流砂量の算定を試みたところ、トレーサー法による実測値とかなり対応し、代表二粒径モデルの適用性がある程度認められた。

以上、砂礫河川の掃流砂に関して縦筋を伴う流砂機構の解明に重点をおいて考察を行い、代表二粒径モデルにもとづく流砂量の推定法を示したが、この推定法には、かなり大胆な近似や実験結果にもとづく仮定が導入されており、残された問題点も多い。しかしながら、従来の流砂理論は、河川における流砂量計測の困難さもあって、ともすれば実験室規模の流砂現象に対してのみ有効である恐れが多分にあった。今後、さらに実際河川と実験水路における流砂機構との関連を明らかにして流砂量予測法の確立に努めようと考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり、現地調査に協力して頂いた藤田裕一郎助手および中村行雄技官に謝意を表すとともに、図面整理に協力して頂いた芝野照夫助手に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Einstein, H.A.: The Bed-Load Function for Sediment Transportation in open Channel Flow, U.S. Dept. Agric. Soil Conservation Service, Tech. Bull., No. 1026, 1950, pp. 1-71.
- 2) Egiazaroff, I.V.: Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, HY. 4, 1965, pp. 225-247.
- 3) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, 1971, pp. 55-65.
- 4) 芦田和男・道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第206号, 1972, pp. 59-69.
- 5) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, 1956, pp. 1-21.
- 6) 土屋義人: 混合砂礫の限界掃流力に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第6号, 1963, pp. 228-253.

- 7) 水山高久・芦田和男・高橋 保：混合砂礫の掃流現象に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，1976，pp. 305-306.
- 8) 浅田 宏：山地河川の流砂量および河床変動の実用的計算手法について，土木学会論文報告集，第216号，1973，pp. 37-46.
- 9) Zwaard, J.J. : Roughness Aspect of Sand Transport over a Fixed Bed, Proc. 15th I.A.H.R., 1973, pp. 83-90.
- 10) 土屋昭彦・山本晃一：混合粒径河床の土砂移動—二礫混合の場合—，第15回水理講演会講演集，1971，pp. 25-30.
- 11) 浅田 宏：山地河川の流砂に関する2.3の考察，新砂防，vol. 89. 1973，pp. 4-13.
- 12) Karcz, I : Secondary Currents and the Configuration of a Natural Stream Bed, J. Geoph. Res., vol. 71, 1966, pp. 3109-3116.
- 13) Allen, J.R.L. : Physical Processes of Sedimentation, Elsevier, 1970.
- 14) 芦田和男・奈良井修二：河床形態の変動特性に関する研究—その統計的構造について—，京都大学防災研究所年報，第12号 B, 1969，pp. 449-462.
- 15) Casey, H. : Uber Geschiebewegung, Mitt. der Preuss. Versuch-sanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Helt, vol. 19, 1935.
- 16) Vanoni, V.A. : Transportation of Suspended Sediment by Water, Trans. A.S.C.E. vol. 111, 1946, pp. 67-133.
- 17) Terada, T. : Observations of Secondary Currents, Report of the Aeronautical Res. Inst., Tokyo Univ. vol. III, 1928.
- 18) 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定，土木学会水工学シリーズ，1968，pp. 12—1-40.
- 19) Hino, M : Large Eddies in Stratified Flow, Proc. 13th I.A.H.R. 1969, pp. 61—73.
- 20) 井口昌平・吉野文雄・森田 稔：可動河床水路の中の流れの二次元流の特性について，生産研究，第21巻，1969，pp. 420—421.
- 21) 森 明巨・黒木幹男・岸 力：開水路で見出された二次流に関する実験，土木学会年次講演会講演集，1971年，pp. 305—308.
- 22) 林 泰造・山田 正：開水路における縦渦の形成に関する研究，第21回水理講演会論文集，1977，pp. 245—253.
- 23) 荒川流下土砂量調査報告，埼玉県土木部，1947，pp. 11—28.
- 24) 高山茂美：溪流河川の河床礫の移動について（その1），地理学研究報告，東京教育大学，Vol. IX, 1965，pp. 169—188.
- 25) 山本晃一：礫河床のサンプリングと統計的処理，土木技術資料，Vol. 13, 1971，pp. 354—358.
- 26) 矢野勝正・土屋義人・道上正規：砂礫の流送機構の確率過程としての特性について，京都大学防災研究所年報，第11号 B, 1968，pp. 61—73.
- 27) 村本嘉雄：土砂収支からみた自然環境変化の解析と予測—庄川とその河口海岸—，土砂の流送・運搬に伴う自然環境変化に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究研究成果，1975，pp. 31—47.
- 28) 高山茂美：新潟県海府浦付近の溪流河川の流送土砂礫に関する研究（第1報），地理学評論，1965，pp. 29—41.
- 29) 村本嘉雄・河田恵昭・布村明彦：粗面水路における流砂に関する研究，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，1975，pp. II—26—27.
- 30) 足立昭平：人工粗度の実験的研究—イボ型粗度—，京都大学防災研究所年報，第5号 A, 1962，pp. 252-259.

- 31) Kline, S.J., W.C. Reynolds, F.A. Schraub and P.W. Rundstadler : The Structure of Turbulent Boundary Layers, *J. Fluid Mech.*, vol. 30, 1967, pp. 741-773.