

# 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—

芦田和男・奈良井修二

## THE STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF THE BED CONFIGURATION IN OPEN CHANNELS

—On the Statistical Structure of the Bed Configuration—

By *Kazuo* ASHIDA and *Shuzi* NARAI

### Synopsis

In this paper, the authors study on the statistical structure of the configuration of movable bed in the range of Lower regime,  $F_r < 1$ , and describe the results of experiments in the two channels which are different in width.

The spectra of bed configuration along the longitudinal line, which are measured in space and time, show interesting characteristics as follows. (1) The range of wave length of Alternating bar is about 2~10 times of width  $B$ , and the eminent wave length is  $4 \cdot B$ . (2) The range of wave length of Dune spreads to about 10 times of depth  $h$ , and its statistical structure composes some "inertia subrange" in time and space, which has a similarity independent of external conditions. The wave length of Dune accompanied with surface water wave, which occurs when  $F_r$  is nearly 1, is about  $4 \sim 5 \cdot h$ . (3) Another bed configuration is longitudinal streakings, the interval of which is  $2 \cdot h$  laterally. (4) Above three components are able to coincide each other according to hydraulic condition.

In the latter half of this paper, the results of turbulence measured in the channels with the fixed and movable bed are showed, and reveal that the occurrence and the growth of bed configuration has a close connection with the structure of turbulence.

The experimental results indicate this statistical approach to phenomena of the movable bed to be applicable even for the estimate of flow resistance.

### 1. 緒 言

開水路移動床上を水が流れるとき、河床に波動的攪乱が発生する。この攪乱は流れの条件に応じて極めて多種多様な形態に変化する。このような河床変動現象を解明するため、多くの研究者による実験的、解析的研究の巨大な集積があるが、その発生、発達機構については現在のところ適確な理論が得られているとはいえず、河川工学上、流砂をとまらう諸問題、たとえば流砂量、流れの抵抗則あるいは河道の安定問題などを取扱う上での大きな障害となっている。したがって、まず河床変動現象の諸特性を明確に把握することが必要とされる。

流体の境界面に発生する波動的攪乱の発生現象は自然界の他の分野においても観察されている。たとえば、砂漠上の砂漣・砂堆、積雪上の風紋、潮流の蛇行、成層流の内部波の発生など多岐の物理領域にみられ

る。本研究が対象とするのは、固体側壁と自由表面を有する開水路流れでの移動床上に誘起される河床変動現象であって、上述の他の物理領域における現象とは境界条件、流体の物理的特性など異質的ではあるが、流体力学的な面においては多くの類似性がみとめられる。したがって、河床変動現象の研究に際してはその類似性に着目した普遍的な適用性を持つ一般理論の追求ということを念頭において研究をすすめて行く必要がある。

移動床水路にみられる河床形態は規則的な側面があるとともに、時間的・空間的構造においては不規則な変動特性を示し、微視的な特性を表現することはほとんど不可能である。したがって、河床形態の変動特性を明確に把握するためにわれわれが必要とするのは現象の巨視的な特性であって、ここに統計的取扱が必要とされる理由がある。本研究は河床変動を統計的に解析しその諸特性を明らかにすることにある。こうした統計的解析を行なう場合には、われわれは河床変動現象に何らかの統計的法則性が存在することを前提としているわけで、この未知の統計的法則が巨視的な境界条件、水理条件などによってどのように決定されるか、あるいはどの程度にそれらが無関係であるかを知ることにある。

本論文においては、Froude 数が1より小さい、いわゆる Lower régime を対象として水路幅の異なる二種類の水路を用い、発生した河床形態の統計的解析の結果、得られた諸特性について詳細に検討する。さらに移動床上の水流の乱れの測定を行ない、その結果と河床形態の変動特性の関係から河床変動の発生、発達機構に関して若干の考察を試みる。最後に移動床水路での抵抗特性についての検討を付す。

## 2. 河床形態の変動特性に関する実験

### 2.1 実験および解析方法

河床形態に関与する水路幅の影響を調べるため Table 1 に示す二種類の水路を用いた。両者とも側壁は鋼板であるが、B水路では中流部 10 m 区間は両面ガラス張りとなっている。

Table 1 Dimension of flumes used in experiment.

Flume	Width $B$ (cm)	Length $L$ (m)	Sediment supply
A	60	150	No supply
B	20	18	Recirculation system

実験に用いた河床砂は Fig. 1 に示す粒度加積曲線をもつ平均粒径  $d_m = 0.71$  mm, 篩分け係数  $S_0 = 1.30$ , 比重  $\sigma = 2.65$ , 空隙率  $\lambda = 45\%$  の均一砂である。

実験の手順は、河床形態の発達過程を明らかにするために、初期河床を一定こう配として、一定流量を一定時間通水し、河床高の縦断方向の変動を測定した。測定はポイントゲージを用い、水路中心線と両側壁近傍の3測線に沿い、測定間隔はA水路で10 cm, B水路で2.5 cm とし上・下流端の影響域を除いてそれぞれ60~100 m, 15 m 区間を対象として、0.5 mm 単位で河床高の測定を行なっている。この測定をさらに2~3回断続的に通水した各通水時間で繰返した。A水路では同一流量の実験を二度行ない、現象の再現性、平衡状態の検討を試みた。

各実験での水理条件は Table 2 に示すとおりであるが、表中  $h$  は各実験の最終時の値であり、 $u_*$ ,  $k_s$ , および  $n$  は径深  $R$  を用いて算出している。

測定した河床高の縦断方向の変動記録は、乱れ、風波の分野での統計的解析法に準じ、パワースペクトル、クロススペクトル計算に供し、まず河床変動の波数特性を調べることとした。

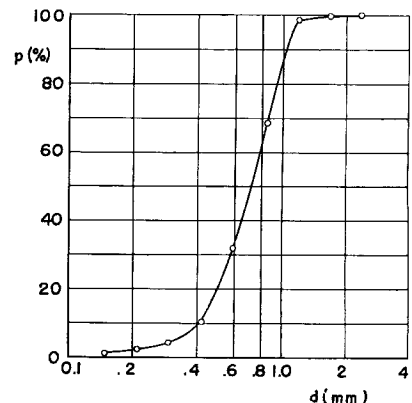


Fig. 1 Grain-Size accumulation curve of used sand.

Table 2 Experimental conditions.

Exp.	Discharge $Q(l/s)$	Slope $i$	Depth $h(cm)$	Mean velocity $U(cm/s)$	Shear velocity $u_*(cm/s)$	Froude number $F_r$	Manning coeff. $n(m^{-1/3}s)$	Relative roughness $k_s(cm)$
A-1	20	1/500	7.1	46.9	3.34	0.56	0.0160	0.228
2	20	1/500	8.6	38.8	3.62	0.42	0.0216	1.010
3	10	1/500	4.0	41.7	2.62	0.67	0.0122	0.0658
4	10	1/500	3.8	43.9	2.58	0.72	0.0123	0.0411
5	30	1/500	15.1	33.1	4.45	0.27	0.0356	5.68
6	5	1/500	2.65	31.7	2.19	0.62	0.0118	0.0823
B-1	3.0	1/200	3.09	53.1	3.16	1.00	0.0116	0.0294
2	4.6	1/500	4.72	51.8	2.37	0.78	0.0099	0.00536
3	6.4	1/300	5.33	62.8	3.37	0.89	0.0122	0.0214
4	2.6	1/500	3.02	43.1	2.13	0.79	0.0084	0.00840

Table 3 Experimental results of bed form properties.

Exp.	Length of Alternating bar $A(cm)$	Length of Dune $\lambda(cm)$	Ratio of $B/A$	Ratio of $h/\lambda$	Travelling velocity		Standard deviation $\sigma_z(cm)$	Bed configuration
					$v_A(cm/s)$	$v_\lambda(cm/s)$		
A-1	260	100	0.23	0.069	2~3		0.601	Irregular→Alternating bars
2	280	120	0.21	0.071			1.144	Irregular
3	240		0.25				0.488	Alternating bars
4	350		0.172				0.443	Alternating bars
5	280	150	0.21	0.111			1.827	Irregular
6	—	—	—	—	—	—	—	Flat
B-1	80	14*)	0.25	0.22*)	10	16*)	0.269	Dunes and Alternating bars
2	—	60	—	0.079		11	0.187	Dunes and a Longitudinal Streaking
3	85	18*)	0.23	0.29*)		30*)	0.332	Irregular
4	—	—	—	—	—	—	—	Two Longitudinal Streakings and Dunes

\*) Dunes accompanied with water surface waves.

2.2 解析結果とその考察

Table 3 は解析の結果得られた Alternating bar, dune の卓越波長  $A, \lambda$  と、実験中測定したそれぞれに対応する移動速度  $v_A, v_\lambda$ 、および従来の分類での河床形態を表示したものである。

河床変動のスペクトル特性についての実験的研究は芦田・田中<sup>1)</sup>らの他に二・三の論文<sup>2),3)</sup>があるが、そのすべてが水路中心線上、任意時間での河床変動だけを取扱っているだけで河床形態の三次元的な面的変動あるいはその発達過程を明確に把握することはできない。以下では、こうした点に着目して、各水路での河床形態に関する実験の解析結果について考察をすすめる。

(1) A水路での河床形態の変動特性について

Fig. 2 は Exp. A-1 での2時間通水後の河床変動スペクトルの横断方向の変化を示したものである。その河床形態は Photo. 1 の様であった。

$k > 10^{-2} cm^{-1}$  の高波数域に水路幅方向に変化しない平衡領域がみられ、通水時間を増加させても顕著な差異はあらわれない。通水時間の増加とともに著しく変化するのは、特に側壁近傍の測線において、後で述

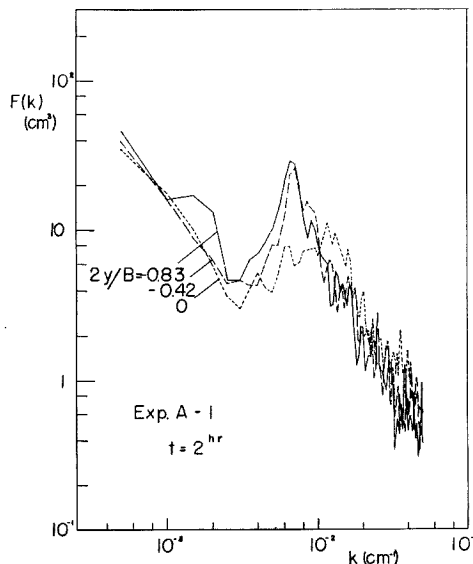


Fig. 2 Lateral variation of power spectral density of bed configuration along the longitudinal line, after 2 hr. in Exp. A-1.

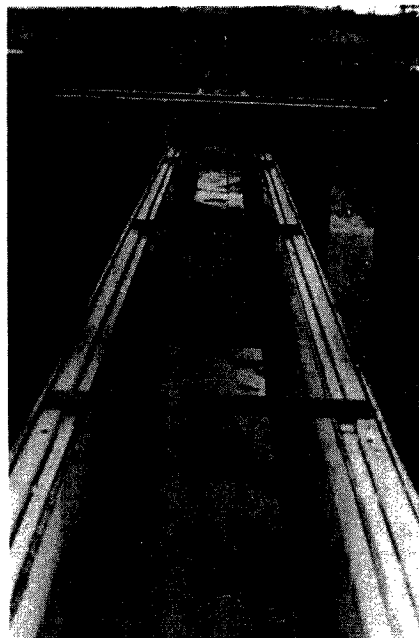


Photo. 1 Bed configuration to down stream, after 2 hr. in Exp. A-1.

べるように、無次元化した波数  $k \cdot B$  がおよそ 0.1~0.5 の波数域である。 $k \cdot B < 0.1$  の波数域ではパワースペクトル密度が一様に高いのは初期河床設定時の不整あるいは上・下流端の影響域によるものと考えられる。

Fig. 3 (a)~(d) は各実験条件での  $2y/B = -0.83$  の測線での河床変動スペクトルの通水時間による変動特性である。また  $2y/B = \pm 0.83$  間のコヒーレンスの時間的変化の一例が Fig. 4 (a), (b) である。これらからつぎのことがみとめられる。

高波数域側に通水時間の影響を受けない、また測線間にも変化しない一種の平衡領域が存在することが明らかである。Alternating bar が卓越している河床形態にある Exp. A-3, 4 では若干性状を異にしているが、この平衡領域のスペクトルのこう配はおよそ -2 に近い値であり、水理条件に関係していない。このことは B 水路での実験結果にもみとめられる。従来の実測結果<sup>1), 2)</sup> ではそのスペクトルのこう配はほぼ -3 の値であり、またそれを理論的に裏付けようとする研究<sup>3)</sup> がみられるが、本実験範囲での結果を十分に説明することはできない。このことは後述するように、河床形態の構造には異なる統計的構造を示す二つの波数領域が存在していること、したがってそれぞれの領域での力学的過程に対する適確な考察をすすめる必要があることを示唆している。本実験で得られた結果から検討すると、水深  $h$  を使って無次元化した波数  $k \cdot h > 0.1$  の波数領域では時間的に空間的、あるいは水理条件などによって変化しない定常的な統計的状态、すなわち平衡領域を形成している。このことは、流れと流砂の力学的過程には外的条件に支配されないところの一種の相似性のある慣性領域が成立していることを示している。

河床の観察から検討すれば、この波数領域での河床形態が、従来では Dune あるいは Ripple に分類されたものに相当するものである。

低波数領域  $0.1 < k \cdot B < 0.5$  においては、側壁近傍のスペクトル、コヒーレンスの結果が示すように、通水時間の増加とともにかなり規則的な河床形態に発達する傾向にあることがみとめられる。スペクトル密度  $k \cdot F(k)$  が極大となるのは、Exp. A-4 を除いて  $k \cdot B \approx 0.25$  でほぼ一定であり、Alternating bar が卓

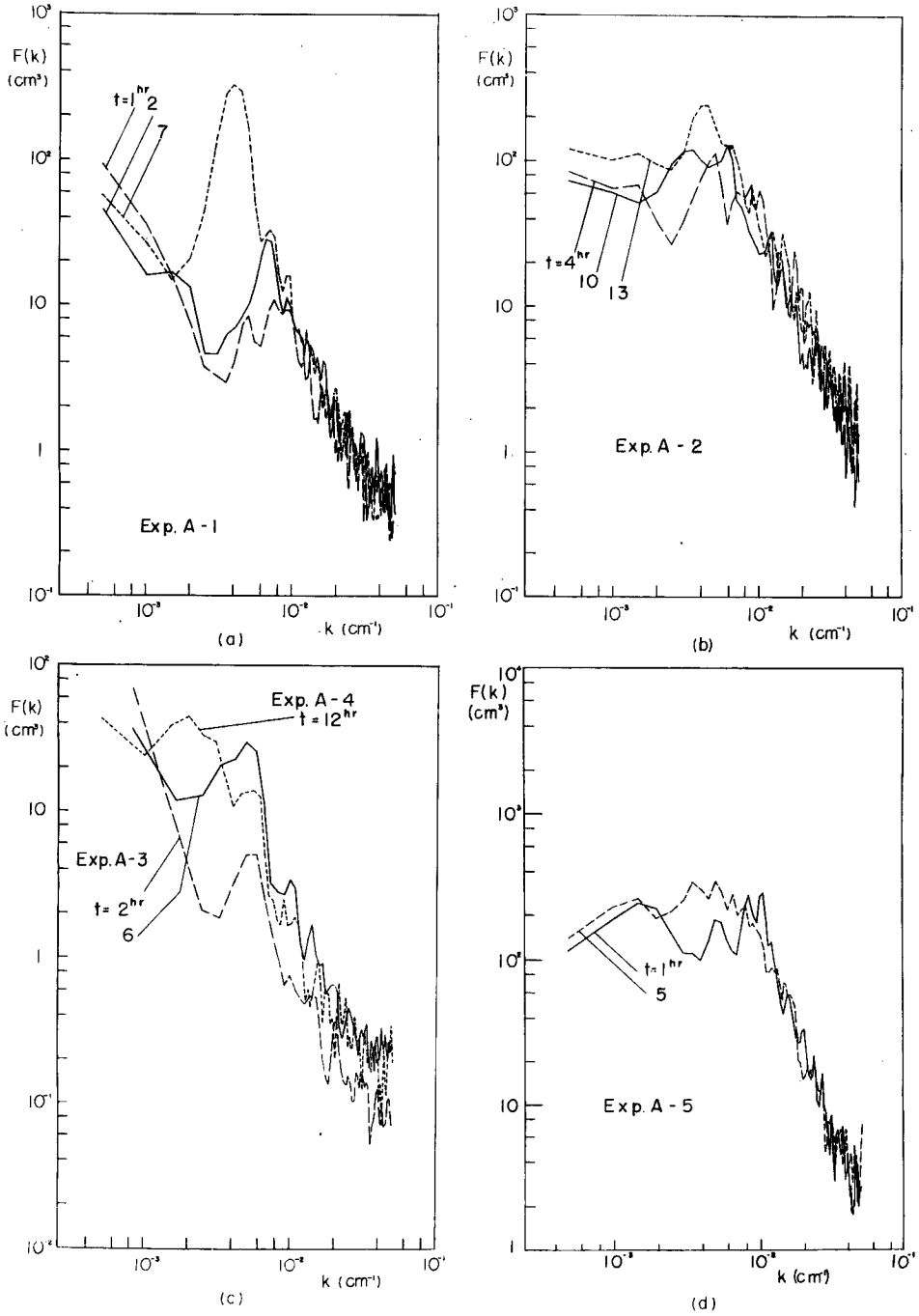


Fig. 3 Variations of power spectral density of bed configuration along the longitudinal line with time in A-channel.  $2y/B = -0.83$ .

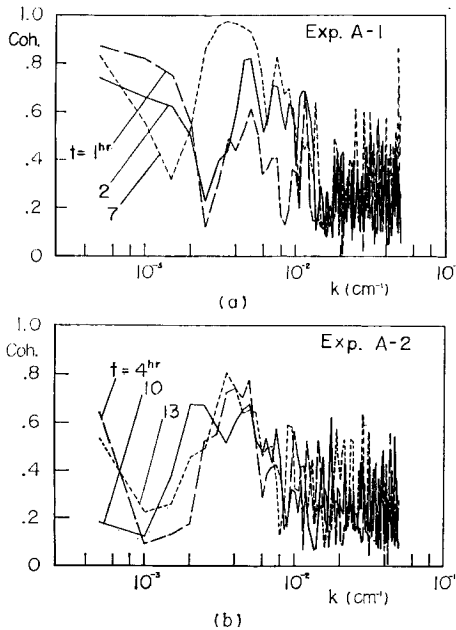


Fig. 4 Variations of coherence between  $2y/B = \pm 0.83$  with time in A-channel.

波数側でのスペクトルの特性は若干性状を異としているが、そのこう配はほぼ  $-2$  の値であり平衡領域を形成していることがみとめられる。この波数域でみられる鋭いピークは通水中にあらわれる顕著な水面波をとまなり変動成分であってその無次元波数  $k \cdot h \approx 0.2 \sim 0.3$  ではば一定である。Exp. B-1, 3 での河床形態を Photo. 2 (a), (b) に示す。三次元的な Dune と分類されると思われる Exp. B-3 の河床形態はここでの解析で明らかのように Dune の領域と Alternating bar の領域とが共存する場合の河床であることがわかる。また、 $Fr.$  数が 1 に近い水理条件では、Dune の波数領域において、水面波すなわち重力波的攪乱が卓越することがみとめられる。

Exp. B-2 の河床変動スペクトルでは  $k \cdot h > 0.07$  のかなり広い波数域でそのこう配がほぼ  $-2$  の値を持つ平衡領域が形成されている。この実験では Alternating bar の波数域はみられず、河床形態の観察によると、二次元的 Dune と水路中心部に一本の縦条が共存する河床であることがみとめられた。Exp. B-4 は河床砂の平均粒径の限界掃流力に近い水理条件の場合で、Photo. 3 (a) に示すような平均粒径より細かい砂粒が収斂する二本の縦条と、それらによって分離された三本の河床路を単位とするような微小な二次元的 Dune の発生がみられた。通水中に水面にアルミ粉を流下せしめたときの水面の流れ模様が Photo. 3 (b) である。これから明らかなように、ほぼ水深の幅を持ち上昇流、下降流が交互に並ぶいわゆる縦渦構造の存在を示しているが、主流方向にはかなり断続的構造にあるように見える。これらの縦渦については、木下<sup>9)</sup>らの詳細な観察がある。

以上、実験結果に基づいて河床形態の統計的構造について検討し考察を行なってきたが、得られた結果を要約するとつぎのようである。

(1)  $0.1 < k \cdot h$  の波数領域で Dune あるいは Ripple の河床形態が形成される。この領域での統計的構造は、水路、水理量などの外的な条件に無関係な相似性が成立し、慣性領域を形成する。そのスペクトルのこう配の値はほぼ  $-2$  で一定である。 $Fr.$  数が 1 に近い水理条件では  $k \cdot h \approx 0.2 \sim 0.3$  の波数の水面波

越する河床形態にある Exp. A-1, 3 の観察、およびクロススペクトル解析での位相のずれなどから検討すると、この波数領域は Alternating bar の河床形態に相当する領域であることが知られる。実験結果にみられるように、この波数領域での発達にはかなりの長時間を必要とし、本実験範囲の通水時間ではその平衡状態を検討するまでには至らなかった。

同一流量に対する現象の再現性については、初期河床の不整、断続通水による攪乱、あるいは水温変化による水の粘性の変化などの種々の外的要因、および全波数域での平衡状態が検証されなかったので、本実験では検討することはできなかった。

## (2) B水路での河床形態の変動特性について

この水路の実験においては、多種多様な河床形態を発生させることができたが、その統計的構造に関しては A-水路で得られた解析結果と同一のものであった。

Fig. 5 (a)~(c) は各実験条件の河床変動スペクトルの測線別、時間的変化を示したものである。Exp. B-1, 3 での、 $0.1 < k \cdot B < 0.5$  の波数領域は Alternating bar の河床形態に相当するものである。また  $k \cdot B \approx 0.25$  でそのスペクトル密度  $k \cdot F(k)$  は極大値を持つ。この結果は A-水路での結果と一致する。高

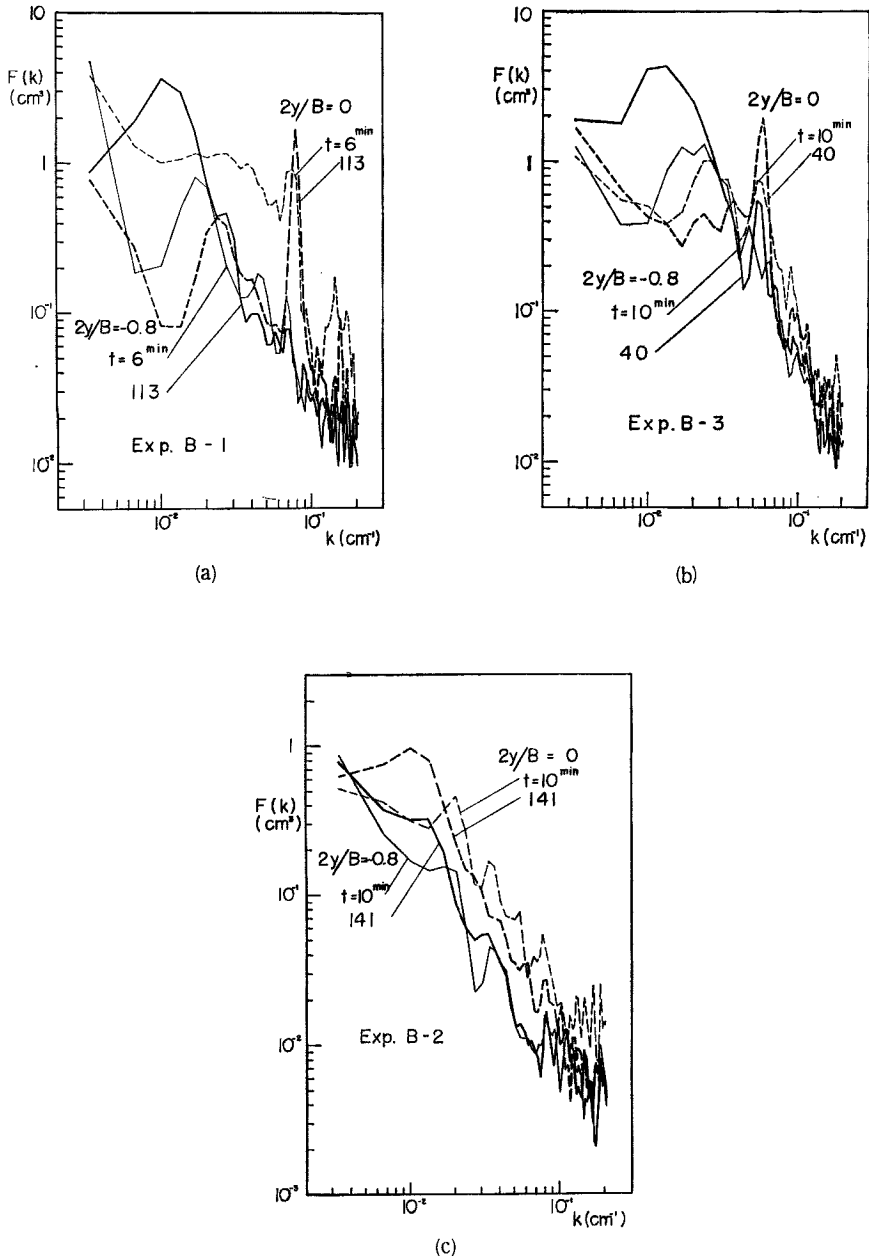


Fig. 5 Power spectra of bed configuration along the longitudinal line with time in B-channel.

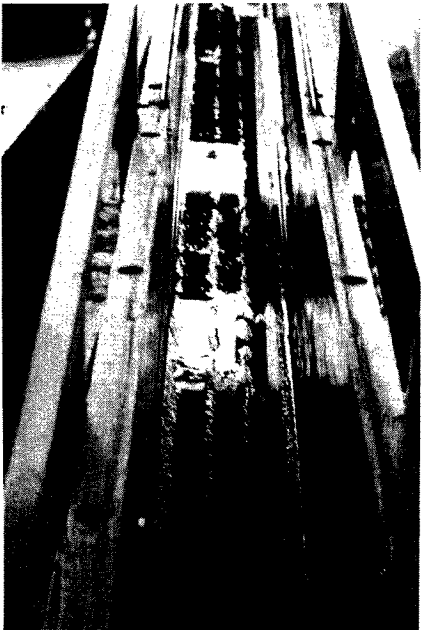


(a) After 113 min. in Exp. B-1.



(b) After 40 min. in Exp. B-2.

Photo. 2 Bed configuration to up stream in B-channel.



(a) Bed configuration to up stream after 2 hr.



(b) Surface flow pattern with aluminum powder to up stream.

Photo. 3 Longitudinal streakings in Exp. B-4.



をとともう変動成分が卓越する。

(2)  $0.1 < k \cdot B < 0.5$  の波数領域では、三次元的な Alternating bar の河床形態が形成される。この領域での平衡状態は明らかでないが、(1) の平衡領域が達成された後で発達して行く傾向がみられる。

(3) 上の二つの河床形態とは構造的に異なる縦条の形態が発生する。

(4) 以上の三つの相異なる特性を持つ各領域の河床形態は共存しうる関係にある。

以上得られた河床形態の構造的特性は、余越<sup>9)</sup>らの開水路流れの乱流構造に関する測定結果と非常に多くの類似点を持っている。すなわち、水深、水路幅によって規定される鉛直せん断乱流場、二次元的水平乱流場の存在すること、前者の最大攪乱のスケールが水深の約10倍、後者は水路幅の約10倍程度である点である。それぞれの波数域は、河床形態の Dune, Ripple と Alternating bar の波数域と対応している。したがって、河床形態と乱流構造とは密接な関係にあるように想像されるが、移動床上では乱れの特徴がどのように変化するかを調べることは河床形態の発生、発達を考察するためには重要な問題となる。3. では、こうした観点から移動床上の乱れを実測した結果について検討を試みる。

### 3. 移動床水路での乱れに関する実験

#### 3.1 計測方法および解析

移動床水路での乱れの測定はA-水路での河床変動の実験と併行させて行なった。

流速変動の計測は、市販の光電管式小型プロベラ式流速計、直径 25 mm、を 2 台使用し、5~10 cm/sec の紙送り速度でペンオンロググラフを用いて記録させた。当実験範囲での平均流速での流速計の定数は 0.2 秒以下であるので、約 0.2 秒間の平均流速を読み取っている。計測時間は開水路流れでの最大攪乱スケールが水路幅の約10倍程度であることを考慮して 200 秒間とした。

測定は上流端より 98 m の断面で  $2y/B = \pm 0.57$  の 2 点で、各ケースとも水面下 2 cm の高さに流速計を設置して行なった。河床変動の発達過程と対比させるため、通水時間の経過に応じて 2~5 回、測定を繰り返している。

また、固定床水路での乱れの特徴との比較検討を行なうために、B 水路でベンキ塗り鋼板滑面床での乱れを測定した。この場合の計測時間は 80 秒間で、約 0.1 秒間の平均流速値の変動を読み取った。上流端より 15 m の断面内で高さ、横方向数点で測定している。

河床変動の波数特性と比較、検討するために流速変動についても 2. と同様にスペクトル計算を行なっている。

#### 3.2 解析結果とその考察

##### (1) 固定床水路での乱れの特徴

Fig. 6 は B 水路固定水路での乱れの測定結果の一例である。 $n > 1.5 \text{ sec}^{-1}$  の高周波領域では  $-5/3$  乗則の成立する、いわゆる慣性領域にあることがみとめられる。余越<sup>9)</sup>が実際河川での測定結果から得たところの鉛直せん断乱流場と二次元的水平乱流場を判別することは、計測技術上あるいは  $h/B \approx 0.24$  程度の水理条件では不可能なようである。

乱れのエネルギー密度  $n \cdot F(n)$  が極大値をとる最大攪乱の周波数は  $n \cdot B/U \approx 0.25$  である。この波長は凍結乱流を仮定すれば、水深の10倍以上であり、二次元的水平乱流場の領域にあると考えてよいであろう。2. での移動床実験で、この B 水路に発生した Alternating bar

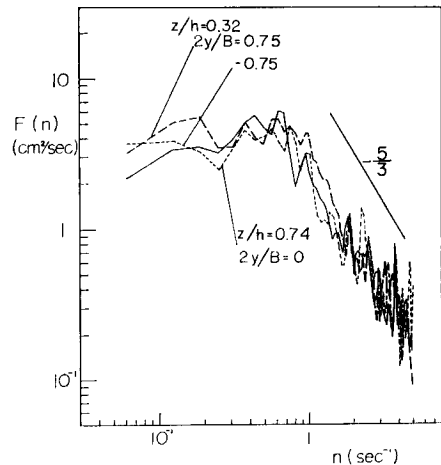


Fig. 6 Energy spectra of the longitudinal velocity on the steel bed in B-channel,  $\bar{U} = 70.6 \text{ cm/s}$ ,  $h = 4.75 \text{ cm}$ ,  $i = 1/200$ .

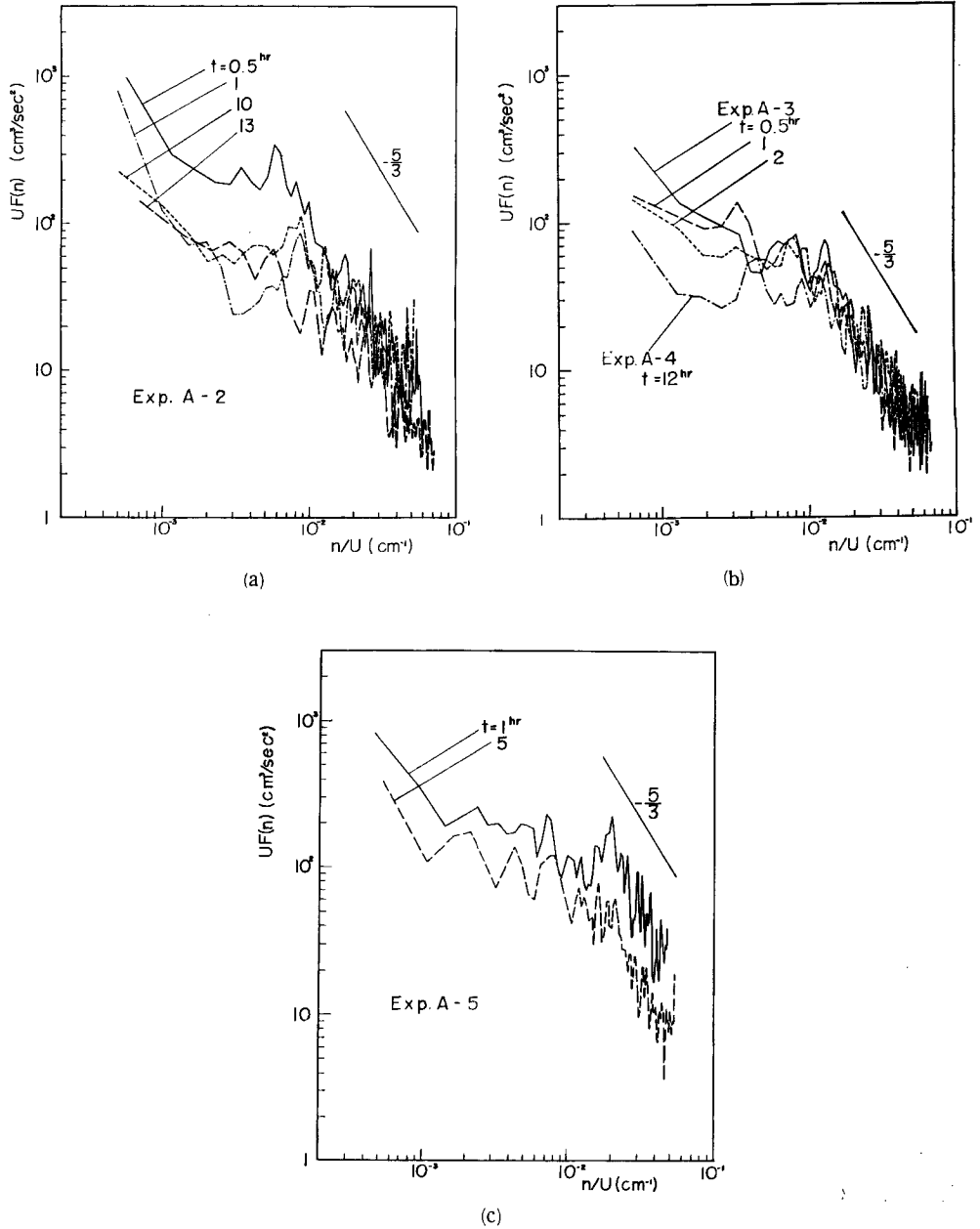


Fig. 7 Variations of energy spectra of the longitudinal velocity with time on the movable bed in A-channel, at  $2y/B = -0.57$ ,  $z = (h-2)$  cm.

の波数は  $k \cdot B \approx 0.25$  であった。このように、固定床水路を平均流で移送される最大攪乱と移動床に誘起される最大攪乱の波数が一致することは偶然の結果であろうか。

開水路流れでの鉛直せん断乱流場の乱れの構造については、余越<sup>9)</sup>の河川での実測結果、あるいは大気乱流<sup>7)</sup>、潮流の乱れ<sup>8)</sup>などの分野の測定結果があり詳細な検討がなされている。それらの結果によると、境界面からの高さ  $Z$  での乱れのエネルギー密度はほぼ  $n \cdot Z/U = 0.1 \sim 0.25$  で極大となることを示している。したがって、自由水面を他方の境界とするせん断乱流場での最大攪乱の波数は  $n \cdot h/U = 0.1 \sim 0.25$  と考えてよいであろう。この乱流場の波数域と河床に誘起される Dune, Ripple の波数域とはほぼ等しく、また河床変動には乱流場で成立する慣性領域と同様な統計的構造がみられるなどの類似性があげられる。

開水路流れでの自由表面の存在は、とくに  $Fr$  数が 1 より大きな水理条件では乱れの構造に重要な影響を与えられられるが、この問題については細井<sup>9)</sup>らの若干の実験的研究がみられる程度で、その機構については今後に残された課題であろう。

## (2) 移動床水路での乱れの特性

移動床上での流れの乱れスペクトルの時間的変化を示したのが Fig. 7 (a)~(c) である。固定した流速計での測定であるので流速変動の記録には河床形状の移動、変化の影響が入ってくる。この実験での河床変動成分の最小スケールはほぼ水深のオーダーで、その移動速度は 20 cm/min 以下と観察されたので、したがって  $n < 0.1$  の低周波数域では乱れの特性は議論できない。また、測定した記録の中にスペクトル密度が平滑化され、noise 的変動特性を示すものがあったが、これは測定断面付近の河床形状の急激な変化などによるものと考えられるので省いた。

Exp. A-2 での通水初期にあらわれる乱れエネルギー密度の極大値が  $n \cdot B/U \approx 0.3$  にあることは固定床実験での値にほぼ一致している。 $0.1 < n \cdot B/U < 0.5$  の波数域では通水時間の増加とともにエネルギー密度の著しい減衰がみとめられる。この波数域は Fig. 3 (b) の河床変動スペクトルの Alternating bar の波数域に相当するものである。他のケースの結果においても、通水初期に Fig. 6 の固定床水路での乱れスペクトルを想定すれば、同様な傾向にあると言える。

乱れスペクトルの時間的変化と河床変動スペクトルの時間的変化を対比させて考えると、移動床水路での乱れの特性についてはつぎのようなことが言える。通水初期の乱れの構造は固定床水路のそれと同じであるとすれば、あたかも河床変動のスペクトルへ乱れのエネルギーが吸収されて行く過程にあるようにみえる。

高周波側での乱れの構造的变化は低周波域にくらべて明らかでないが、これは水面近くでの乱れを測定しているためで、詳細な検討が望めない。Alternating bar が顕著に卓越する Exp. A-3, 4 での結果には  $-5/3$  乗則の適用されるかなり広い慣性領域が存在している。他のケースとを比較すれば、この高周波数域においても河床変動の構造に対応して乱れの構造も変化しているとも考えられるが、これはさらに河床近傍での乱れの測定結果による検討が必要であろう。

上述の移動床の乱れの構造的变化は、福岡<sup>9)</sup>の実験による水面変動スペクトルにも同様な傾向がみられることから推察される。

以上の測定結果から明らかなように、乱れの構造的变化と河床変動の発達とは相対的な関係にあることがみとめられる。この事実をさらに明確にするためには、Dune, Ripple の二次元的な河床形態に対しては鉛直方向の乱れ成分  $w'$  のかなり高周波域までの測定、Alternating bar の三次元的形態には水平方向の乱れ成分  $v'$  の測定によってその構造的特性を詳細に検討することが必要であろう。

## 4. 河床変動の発生、発達機構に関する考察

河床変動の発達過程と乱れの構造的变化とは密接な関係にあることが実験的に検証された。開水路流れでの乱流構造に関する知識、また、流砂現象の微視的な力学的機構について不明な点の多い現在の段階において、河床変動の発生、発達機構に関して早急な結論は慎むべきであろうが、2. および 3. での実験結果から推測すればつぎのような河床変動の発生、発達の機構が考えられる。

乱れスペクトルにあらわれる最大攪乱の発生については後で考察するが、この攪乱のエネルギーは固定床では平均流によって移送され、より高次の波数の攪乱へエネルギーを伝達する過程を経て、遂には分子粘性によって熱として逸散する一つの統計的過程を形成している。しかし移動床水路では、その最大攪乱のエネルギーは流砂現象へ直接的に伝達され消費されるものと考えられる。したがって、流れの中に発生する攪乱は平均流で移送されることなく、この攪乱形態に対応した河床変動を発生せしめ、空間的には定常な攪乱として平均流からのエネルギーを流砂へ伝達する過程が考えられる。このようにして発生する河床変動は、平均流から供給されるエネルギーと流砂現象によって消費されるエネルギーが平衡する状態まで発達すると考えられる。このような水流と流砂との摩擦過程が 2. で明らかにされたような河床変動の平衡領域のスペクトルを決定する統計的過程を構成するものであろう。

開水路乱流場にあらわれる最大攪乱の存在性については、乱流発生理論の分野での層流の流体力学的不安定性の基礎方程式である、Orr-Sommerfeld 方程式の解の存在性<sup>10)</sup>が対応すると考えてよいであろう。すなわち、二次元 Poiseuille 流れの不安定性は開水路流れの二次元的水平乱流場の最大攪乱を、また境界層的速度分布の不安定性は鉛直せん断乱流場の最大攪乱の発生を示唆している。また縦渦の現象は、重力・遠心力などの遠達力が不安定性の原因となる熱対流・同心円筒の間の Couette 流れにあらわれる三次元的攪乱と類似しており、その発生は乱れ自身が生じせしめるレイノルズ応力による不安定性が原因と考えられるが、今後の乱れの測定結果によって実証される必要な問題であろう。この考察による河床変動の発生、発達機構を検証するためには、さらに乱流構造に関する定性的、定量的な知識を集積した上で検討される必要がある。

以上に述べてきた河床変動の発生、発達の機構は、閉管路流れでの移動床の現象をも説明し得るもので、今後、閉管路を使った実験的検討を行いたいと考えている。

## 5. 抵抗則に関する考察

水流によって発生、発達する河床変動は、流れの抵抗を著しく変化させることが知られている。移動床の抵抗則に関する研究には、篠原<sup>11)</sup>らの砂粒粗度、河床形状によるエネルギー損失などの微視的機構に着目した詳細な研究がみられる。しかし、2. での解析で明らかのように、河床変動の波数域はかなり広いものであり、こうした問題を微視的に取扱うことの困難さがある。

2. での解析の結果、河床変動の高波数域に定常的な平衡領域が形成されているのを見た。したがって、この波数領域では、3. での考察でみられるように、水流から流砂現象に供給されるエネルギーと流砂現象で消費されるエネルギーが平衡状態にあると考えてよいだろう。また、この波数域は、水理量などの外的条件に左右されない相似性が成立するのがみられることから、この流砂現象によって消費されるエネルギーは、河床変動状態をあらゆる巨視的な物理量によって記述できる可能性がある。

$u \gg v$  と考えてよいから、二次元的河床形態の波数域でのエネルギー損失を対象とすれば十分と考えられる。実測によって得られた河床変動状態を記述する統計的物理量として、いま河床変動の標準偏差  $\sigma_z$  を採用して、開水路流れに適用されている平均流速公式にあらわれる、河床でのエネルギー損失を決定する重要なパラメータである相当粗度との関係を調べてみる。

すでに芦田・田中<sup>12)</sup>らは水路中央部での河床変動の標準偏差  $\sigma_z$  と開水路流れの平均流速公式

$$\frac{U}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s}$$

で定義される相当粗度  $k_s$  との間に一定の関係がみられることを指摘している。Fig. 8 は本実験で得られた結果を付加して図示したものである。Nordin らの一部の結果を除けば、水理条件、測定方法などの差異があるにもかかわらず  $\sigma_z$  と  $k_s$  との間には、非常に強い相関があり、上での考察が正しいことを示唆している。

したがって、本研究でのこうした巨視的な考え方によって、移動床の抵抗特性を明らかにすることが可能

であろう。そのためには、まず、河床変動にあらわれる平衡領域の統計的狀態を支配する外部的なパラメーターを見つけ出すことである。すなわち、河床近傍での流砂の運動によるエネルギー逸散を規定する物理量についての実験的考察を行なう必要があろう。

### 6. 結 語

本論文では、河床変動現象の解明に統計的解析手段を用いて、河床形態の諸特性をかなり明確に記述することができた。さらに移動床上での乱れの実測結果と河床形態の変動特性の関連から、河床変動の発生、発達機構に関する考察を試み、流体力学的取扱いへの発展の可能性を示唆した。また、移動床の抵抗については巨視的な取扱いで十分説明しうることを示した。したがって、河床変動現象を明確に把握するためには、本研究での統計的取扱いが必要であることを確認するものである。

流れの中の一粒子、一粒子の砂の変化に富んだ動きに眩惑されがちであった本研究の途上、唯一の指針であったのは、河の流れは一つの摩擦過程であって、このような河川の諸現象の基盤には統計的過程が存在する、と示唆された速水博士<sup>12)</sup>の鋭い洞察であったことを付記する。

最後に、本研究の遂行に際し、実験および資料整理に労苦をともにしてくれた朝田正君に甚大なる感謝の意を表します。

### 参 考 文 献

- 1) 芦田和男・田中祐一郎：砂漣に関する実験的研究（3），京都大学防災研究所年報，第10号，昭42.
- 2) Nordin, C.F. and Algert, J.H.: Spectral analysis of sand waves, Proc. A.S.C.E., vol. 92, HY5, 1966.
- 3) 福岡捷二：砂漣の発生、発達とそのスペクトル，東京工業大学土木工学研究報告，No. 4, 1968.
- 4) 日野幹雄：砂漣スペクトルの平衡領域について，同上.
- 5) 木下良作：航空写真による洪水時の流況測定，1968年度水工学に関する夏期研修会講義集，B. 河川コース，土木学会水理委員会，1968.
- 6) Yokoshi, S.: The structure of river turbulence, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, vol. 17, 1967.
- 7) Lumley, J.L. and Panofsky, H. A.: The structure of atmospheric turbulence, Interscience, 1964.
- 8) Bowden, K.F. and Howe, M.R.: Obserbation of turbulence in a tidal current, J. Fluid. Mech., vol. 17, 1963.
- 9) 細井正延・杉山錦雄：流れの中に発生する波の実験的研究（第一報），第10回水理講演会講演集，

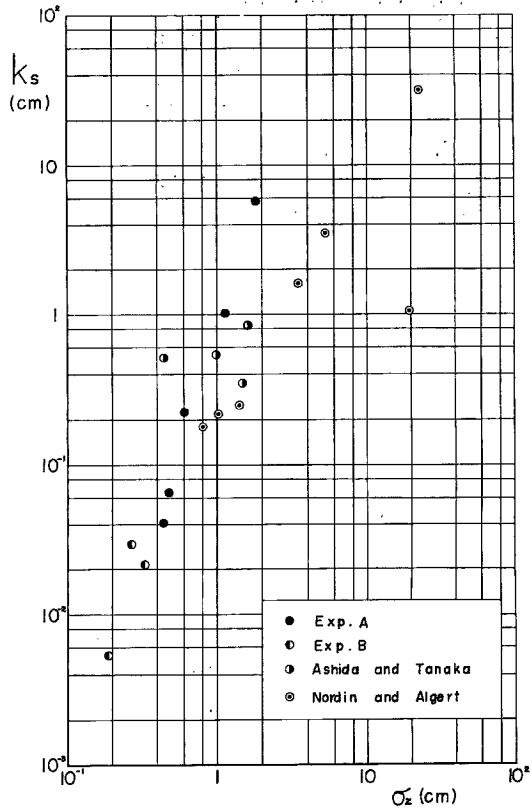


Fig. 8 Relation between  $k_s$  and  $\sigma_z$ .

土木学会水理委員会, 昭41.

- 10) Lin, C.C.: The theory of hydrodynamical Stability, Cambridge University Press, 1955.
- 11) Shinohara, K and Tsubaki, T.: On the characteristics of sand wave formed upon the beds of the open channels and rivers, Rep. of Res. Inst. for App. Mech., Kyushu Univ., vol. VII, 1959.
- 12) 速水頌一郎: 堆積過程の研究, 地球科学, 第2号, 1950. あるいは, 洪水流の理論について, 水工学の最近の進歩, 土木学会, 1953.