

砂漣に関する実験的研究 (第1報)

矢野 勝正・芦田 和男・田中 祐一朗

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SAND WAVES (1)

By *Katsumasa YANO, Kazuo ASHIDA and Yuichiro TANAKA*

Synopsis

It is one of the most important problems in hydraulic engineers to solve the mechanism of sand waves. Because sand waves occur at almost time when the bed materials move by running water and they give various difficult problems. We know the existence of various bed configurations, ripples, dunes, stationary waves, antidunes and etc.. But we cannot fully explain these complex phenomena at present.

Authors started a series of studies from the standpoint of thinking these phenomena as one of the stochastic process.

As the first step of these studies, authors have manufactured a equipment measuring water level and bed elevation using ultra-sonic device with sufficient accuracy. And they have discussed the significance of the mean values of the period, wave-length, wave-height and etc. as the characteristic values of the sand waves.

1. 緒 言

ダムや床止め又は取水堰などのような人工構造物の築造が盛んになるに伴ない、河床変動など水と流砂とを同時に考慮した適切な計画がなされる必要がある。又明治時代の低水路方式から築堤による高水方式および貯水池の築造による洪水調節方式といった河川管理方式は限界に達しつつあり、浚渫による洪水快疎方式へと転換しようとする気運も芽生え、流砂問題の重要性は日毎に高まっている。

このような現実の諸問題に対し、現在の土砂水理学は十分な解答を与えてくれるだろうか。これは水工技術者が常に直面し、また抱く疑問である。こうした不安は流砂問題を取り扱う上で最も基本となる流砂量公式が経験的、実用的なものであり、その力学的根拠が十分明らかにされていないことによるものである。従来は現象の複雑なせいもあり、流砂量の問題、移動床における抵抗法則の問題、砂漣の発生、発達の問題などがそれぞれ別個に研究される場合が多く、これらを一体として体系的に取り扱った研究は少ないように思われる。Liu¹⁾によれば、砂の移動限界曲線と砂漣の発生限界曲線とはほぼ一致している。従って流砂機構と砂漣の伝播とは表裏一体の関係にあり、流砂の力学的機構を明らかにするためには、砂漣の発生とその形態および流水に及ぼす抵抗など砂漣のメカニズムを明らかにすることが必要である。

前述のように砂漣は流砂の存在する所では殆んど常に存在するものであり、その美しい形と種々に変化する形態によって以前から多くの研究者の興味を引き、各種の研究がなされて来た。しかし今日に至るもその全容を十分に説明し得るようなものは残念ながら見られないようである。そこでこれらの研究の跡を今一度振り返って見ることによりその問題点を探ることも意義のないことではなからうと思われる。

砂漣に関する従来の研究は大別すると次の三つに分類されよう。

第一は Gilbert²⁾に始まる各種の実験的研究である。多くの人々によって積み重ねられた実験により複雑

な砂漣の有する興味ある性質が色々と明らかにされて来た。しかし計測方法の困難なことから Plane bed, Ripples, Dunes, Transition, Smooth bed, Stationary waves, Antidunes など各種の bed configuration に対する定量的な評価も一定でなく、研究者によってその区分もまちまちという状態で、未だ十分にその性質を理解しているとは云い難いように思われる。また現象の複雑なせいもあって、その解析法は殆んど次元解析の考察に基くものである。この方法による限り、個々の性質を抽出することは可能であるが、その力学的背景の全容を説明することはなかなか困難である。またこの種の研究では、砂漣の波動性に注目して、波高、波長、周期、伝播速度などの平均値でもって砂漣の特性を代表させ、実験資料を整理する方法を採っている。しかし砂漣はこのような周期性の卓越したものばかりではなく、マルコフ性の強いものもあり、本来 Stochastic process と解すべきものと思われる。したがってこれらの特性値の平均の意義についても今一度考察を加える必要があろう。

第二は Anderson³⁾ から J.F. Kennedy⁴⁾ に至る研究である。これは wavy な河床面に沿っての複素 potential flow を仮定し、これと土砂の連続式、経験的な流砂量式を基にして理論的な展開を試みたものである。これは最初に仮定した波面の形状を示す係数 $k=2\pi/L$ (L は波長)、水深に相当する d 、水深、流速および砂の性質などに関係する無次元量 j およびフルード数 F などの値によって各種の bed configuration が現われることを説明付けており、砂漣の有する種々の性質との関連において非常に興味深い研究である。しかし流砂量式として流速に比例するとした極めて簡単なものを用いていること、最初から河床を周期的な wavy bed と仮定していることおよび k, d, j などと他の水理量などの関連が十分明らかでないことなどにより、このようなモデルで複雑な砂漣のメカニズムを十分代表させているかどうかといった点に多くの問題を残している。

第三のものは Exner⁵⁾, Liu¹⁾, 松梨博士⁶⁾ によって代表される研究である。これらの研究は研究者によって方法論的に多少の差異はあるが、その根底は Helmholtz⁷⁾ から始まる境界面の安定性の問題にある。これらはいずれも流砂の連続式と流砂量公式との組み合わせによる河床変動の基礎方程式をその拠点とするものであり、したがってこの基礎式の妥当性すなわち用いた流砂量公式の如何が決定的な要因を占めることはいうまでもない。しかしその力学的機構を十分説明できるような流砂量公式が提案されていない現在では、この方法による砂漣の説明はおのずから限界があることは明白である。事実砂漣の発生限界などにはある程度の成果を収めているが、各種の河床形態の下における現象までは説明することができず、実験結果の次元解析的な考察によりこれを補おうとしているのが現状である。

このように砂漣に関しては従来から各種の研究がなされて来たが、いずれも色々と問題点が多く、現在までのところこの複雑な現象を十分説明し得るものはない。これは未だ現象に対する吾々の知識、とくに定量的な意味においての知識が貧困なことが研究の進展を妨げる大きな要因であろうと思われる。

実験水路において見られるように、ある河床形態における砂漣でも波高、波長、周期などは各種のものが混在しており、それらが伝播とともに変形して行く。また砂の粒子に着目しても個々の粒子はそれぞれ異った運動をしており、その様相は極めて複雑である。したがってこれらのメカニズムを一つの関数形で表現しようという点にすでに無理があるので、これらを一つの Stochastic process と見なすべきものと思われる。

このような流砂の機構は水流の位置のエネルギーの減少が河床面における摩擦となって砂を移動させるものであり、この過程においてはエネルギーの総量こそ変わらないが、エントロピーの値には変化が生ずる。こうしたエントロピーの原理に従う現象の基盤には速水博士⁸⁾ も述べておられるように、Stochastic process が存在すると考えるべきであろう。事実、前述のように砂漣には周期性に富んだものもある一方、random 性の強いものがあり、この両者の兼ね合いが砂漣の性格を特徴付けるものであろう。このことは砂漣の現象も又一つの Stochastic process の範ちゅうにあることを示すものであろう。例えば、海洋における風波の発生も砂漣と同様に、境界面に摩擦力が作用することによって生じられる現象である。この方面ではすでに早くからこうした Stochastic process の取り扱いの一つとして、スペクトル解析が盛んに行なわれ、かなりの成果を挙げつつある。

しかし砂澱に関する従来の研究では、計測方法の困難なこともあって、周期性にのみ着目して今一方の性質ともいべき random 性について考察したものは殆んど見られないようである。そこで著者らは砂澱の現象を Stochastic process と見なし、現象の諸性質を今一度詳細に調べることによって新たな一步を踏み出すべく、ここに一連の研究を始めた次第である。

本研究の最終的な目的はやはり砂澱の発生、伝播、水流に与える抵抗、流砂量式との関連などそのメカニズムの全容を明らかにすることにある。しかしこれらはなかなか簡単に解決されるような問題ではない。そこで今回はその第一段階として、以上のような研究を進めるために新に試作した超音波式の水位、河床測定器と、それをを用いて行なった二三の実験についてここに報告して大方の御批判を得たいと考えている。

2. 超音波式測定器

砂澱の現象を一つの Stochastic process と見なし、これを統計的に処理することにより、それらの特性値に対する確率論的評価を与えるためには、水位および河床の時間的な変化を連続的に、正確にしかも容易に測定し、記録できる計測装置がぜひ必要である。従来より水位の測定装置についてはいろいろなものが試作され、実用に供されているが、河床形状の変化を測定し得る計測器は比較的少ない。最近アメリカにおいて超音波を用いた河床の計測装置が試作されたことが発表されている⁹⁾が、著者らも超音波を用いてどの程度まで水位および河床の変化を正確に測定し得るかを検討し、沖電機 KK および同音響研究室の協力を得て一応満足すべき計測器を試作することができた。

その外観は Photo. 1 に、また構成および性能は Table 1 および Table 2 に示す通りである。また Fig. 1

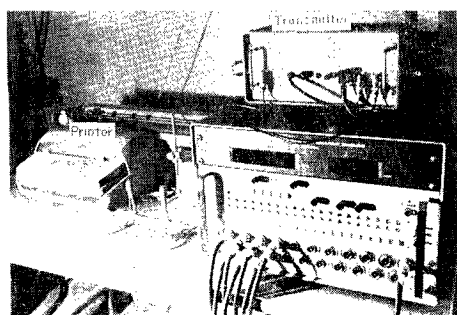


Photo. 1. Echo sounder.

には本計測装置の原理および機構が模式的に示してある。

自走ブロッキング発振器からのパルス衝撃波が送波器に加えられ、超音波を発生する。これが水面または河床で反射して受波器にて受波され、増幅器、波形整形器を通り、ブロッキング発振器のトリガーパルスとなる。このようにして送受波器から水面または河床面までの距離に比例した周期をもつ閉回路を形成する。この周波数と標準発振器の周波数とを比較することにより距離を測定するものである。時計または手動指令による測定開始信号により、各

Table 1. Constitution of the echo sounder.

名 称	数 量	寸 法 (mm)	重 量	備 考
情 報 入 力 部	7	155×320×290	10 kg	
標 準 発 振 部	1	155×320×290	9.5kg	
送 受 波 器	8	215 256	525 g	河床用 100 g 水位用 425 g
計 数 部	1	495×330×480	—	
電動的タイプライター	1	巾 高さ 695×225	—	
時 計	1	300×600×200	—	
収 納 箱	1	180×550×350	4 kg	
接 続 電 線	8 本	10φ 4 芯シールド	—	

Table 2. Performance of the echo sounder.

	河 床	水 位
測定距離範囲	3 ~ 30 cm	10 ~ 50 cm
精度(最小検出変位)	± 1 mm	± 1 mm
誤動作ならびに誤差	5% 以下	5% 以下
使用温度範囲	$-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
使用音波周波数	約 1 MC	約 80 KC
送振波形	パルス	パルス変調波
標準器間隔	10 cm	10 cm
流速	3 m/s 以下	
電源電圧	50 c/s ~ 60 c/s	95~105 V
所要電力	13~16 VA (情報入力部 1 台)	

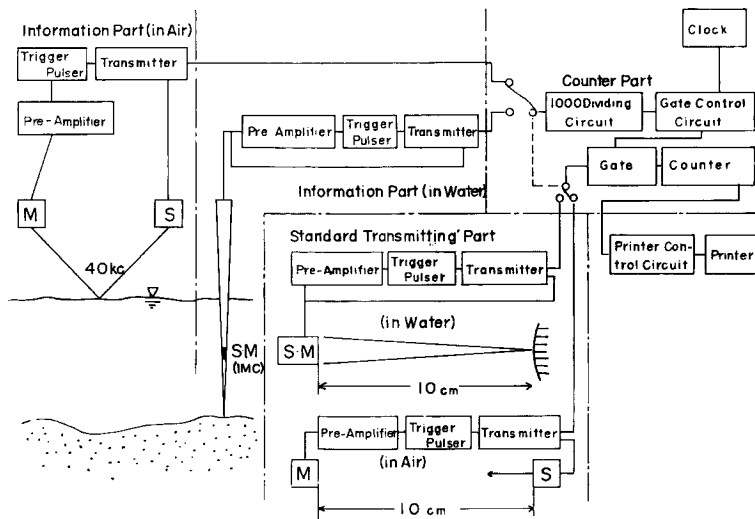


Fig. 1. Block diagram of the echo sounder.

送受波器からの情報信号を一つづつゲート制御信号としてゲートに入れ、また同時に標準発振器からの標準周波数をゲートに入れる。これを計数部で比較計数して表示する。この計数部の出力を制御部を通して印字部に入れ、電動タイプにてmm単位で自動的に印字するようにしてある。印字に要する時間は一測点(河床および水位)について、せいぜい2秒弱である。したがって一台の記録計で30測点を計測できるようにしてあるため、自動的にスタートする測定時間間隔は1分、2分、5分、10分、および手動となっている。

本装置はとくに実験水路において使用することを目的としたもので、比較的短い距離(河床: 3~30 cm, 水位: 10~50 cm)をかなりの高精度(誤差 1 mm)で測定し得るように配慮してある。Sing Around 方式による超音波の繰り返し周波数を測定するようにしているのもこのためであり、また送波器の共振周波数を繰り返し周波数より 1 order 以上大きくするため、水中のものは 1 MC, 空気中のものは 80 KC にとられていた。音速は温度、濁度など媒質の変化による影響が大きいので、同媒質中に反射板との距離を一定に保った標準発振部を設け、この標準周波数と測定周波数とを比較することによって、自動的にその補正を行わせ

るようにしてある。

測定精度上最も問題になるのは空振りの現象である。送波器からの音波は約 15° の拡がりで伝わるが、このビームの当たった瞬間における反射面が或る程度以上傾斜していると、反射波は受波器に帰らずいわゆる空振りの現象を生ずる。この空振りは反射面の状態によって生ずるものであるが、これがあまりに多く現れるようでは測定不能である。

Fig. 2 は平均粒径 0.9 mm の砂で人工的に波状の河床を作り、静水中において本計測器とポイントゲージの両方で測定した結果を比較したものである。砂粒はいろいろの面を持っているから音波は乱反射し、したがって河床については空振りは比較的少ない。そのために両者はほぼ所定の精度内でよく一致している。しかし水面に波長の短い波を生ずるような場合は時々空振りを生ずる。こうしたことをできる限り避けるために、水位測定用の送受波器は送波器1個と受波器2個より成っている。河床については空振りの少ないことから、流水の抵抗を小さくするために外径 8 mm の金属棒の先端にジリコン素子とアルミニウムの振動板を張りつけたもので送波および受波の両方を兼用させている。

測定距離にもよるが、反射面の状態により反射波が受波器以外の方向に向う場合もあるため、各送受波器は河床用は $1.5\text{ cm} \sim 50\text{ cm}$ 、水位用は $25\text{ cm} \sim 1\text{ m}$ 以上の間隔をとって垂直にセットしないと誤差が増大する。発振器の電気的な構造上測定距離により、**Table 3** に示すように発振器の作動を4段階に分割操作する必要がある。

送波器の構造上、振動板の固有振動により発生する音波は完全な矩形パルスとはなり得ず、また反射面によりこれが更に変形されることから、受波器の感度の取り方によりこれが誤差の原因となることもある。水と砂との音響インピーダンスはあまり変わらないから、反射率は非常に小さくほぼ $1/30$ 程度であるため、前記の誤差を少なくする意味からも受波器の感度はできるだけ上げておくのが望ましい。しかしあまり感度を

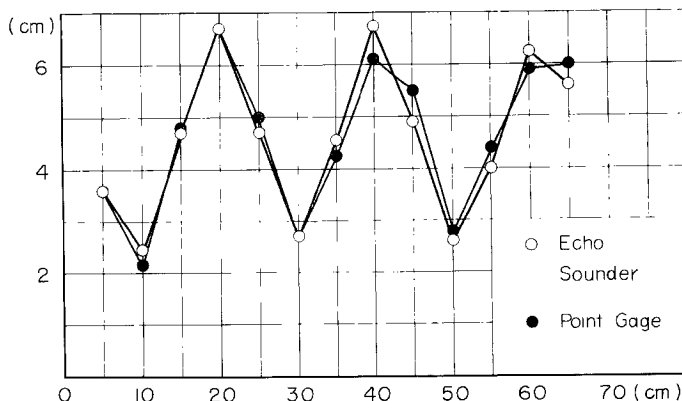


Fig. 2. Comparison between the bed profiles measured by echo sounder and point gage.

Table 3. Domain of measurement.

Gate	0	1	2	3
Intormafion Part in water	30 ~ 54	47 ~ 84	78~148	147~300
Intormafion Part in air	--	92 ~156	155~270	270~500

上げると二次的な反射波にも感應することになりなかなかむつかしい所である。これらは反射面の状態に影響される所が大きく、浮遊砂の存在する場合における反射率の変化などの問題点については目下検討中である。

3. 実験およびその考察

(1) 実験装置と実験方法

以上により本計測装置はまだ多くの問題点を残しているが、一応実験に使用し得ることがわかったので、これを用いて若干の実験を行なった。行なった実験の種類は Table 4 に示す通りである。Table 4 の第3, 4 の欄は杉尾博士の分類¹⁰⁾に従って ψ の値を計算し $i-\psi$ 図より河床形態を予測したものである。ここに F は Flat bed, R は Ripple, C R は次の段階への境界点であることを示す。

実験に用いた砂は Fig. 3 に示すように、上下をカットしたほぼ一様な粒径のもので、その平均粒径は 0.88 mm である。

実験に用いた水路は Fig. 4 に示すように、幅 50 cm、長さ 20 m の両面ガラス張りのものである。流量

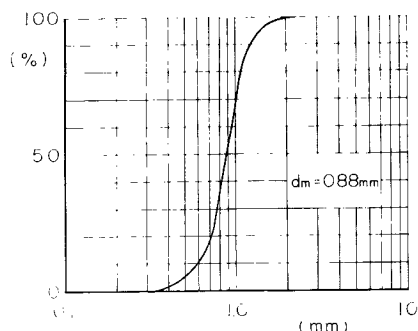


Fig. 3. Grain-size accumulation curve of used sand.

は上流端に設けた台形堰の越流水深で測定した。水路の上流部約 3 m は整流区間として捨て、給砂点をもって原点とした。水路は 1/800 のこう配に設置し、河床面に約 15 cm の厚さに一様に砂を敷きならした状態をもって実験の初期条件とした。上流からはスクリー式による給砂装置によって乾燥砂を補給し、実験期間中河床こう配が変化しないように努めた。水位および河床の変化の測定は上下流の影響を避け、Fig. 4 に示すように水路の中央部 9 m の区間において行ない、使用した 6 組の送受波器のうち 4 組は 50 cm の間隔に近付けて、砂漣の峯などの通過を観察して記録と対応させ、その移動速度を知るようにした。

実験に先立って、所定の流量に対する平均水深とはほぼ同程度の水位に下流端を堰止め静水位を保ち、この

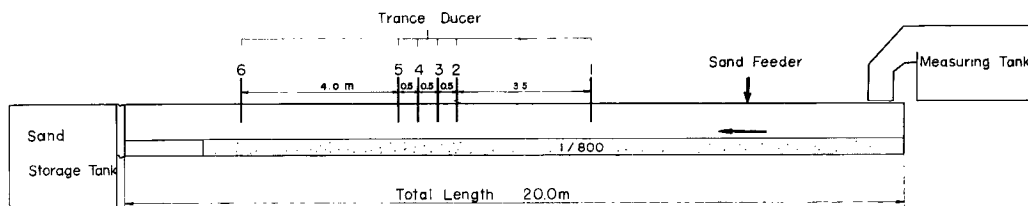


Fig. 4. Experimental flume.

Table 4. Extent of Experiment.

Experiment	A - 1	A - 2	A - 3	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Bed slope	1/800	"	"	"	"	"	"
Discharge (l/s)	6	10	11	12	20	26	27
Supplied sediment (gr/s)	0	0.1	0.11	0.16	0.79	1.6	1.8
ψ	0.037	0.052	0.055	0.058	0.081	0.097	0.100
Bed configuration	F	F	C R	R	R	R	C R

ときの水位および河床高を給砂点の下流 14 m の位置においてポイントゲージで測定するとともに、しばらく各測定器を作用させて各点のものを記録させることにより、実験中の水位および河床高との関連をつけ、水面こう配などを求めるようにした。

通水と同時に堰を取り除き、滑らかに通水状態へと移行させるように努めた。測定は与えられた流量に対する砂漣が十分発達して、平衡状態が達成されたと思われるまで通水を継続してから行なった。今回の測定は送受波器を一定の位置に固定し、水位および河床の時間的な変化を30秒間隔で測定したいわゆる定点観測で、縦断方向に移動させての測定は行わなかった。また下流端の砂止めを越流する流砂を実験中に随時採取することにより流砂量を求めた。

(2) 実験結果と二三の考察

実験 A-1 は限界掃流力の状態におけるもので、表面付近にある砂のうち 1 割程度が移動する。この場合は河床は平らであり、実験を継続しても砂漣は現れない。しかし A-2 この実験では表面をほぼおう程度に流砂が存在するようになり、波高 4~5 mm のきれいな Ripples が発生する。さらに流量を増した実験では漸次砂漣が発達し、A-3 の頃より一つの砂漣の上に別の小さな砂漣が重なるような状態が生じ始め、その形もかなり複雑になって来る。また実験 A-5 の頃から、砂漣のクレスト線は必ずしも横断方向に並ばないものも現われるようになり、A-6, A-7 では観察による限りでは Ripples と Dunes と判然と区別し難いようになる。これらの実験結果の一例を示したものが Fig. 5 である。

この図の上部は A-4、下部は A-7 の例である。A-4 はかなりきれいな Ripples であり、比較的規則正

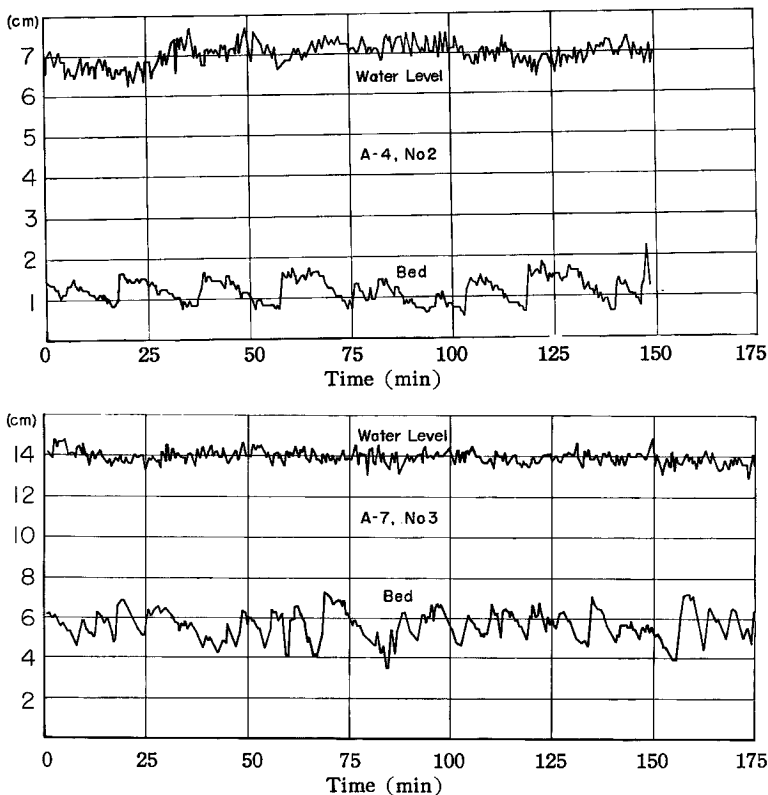


Fig. 5. Variations of the water level and the bed elevation in constant section with time (measured by echo sounder).

しい波が河床に現われているのが見られる。しかし A-7 の図ではそのような規則的なものではなく、種々の周期のものが混在している。A-4 の図の水位に見られるように、砂漣の3~4個を一波長とする非常に長周期の波が存在している。これは A-5, 6, 7 などでも見られる現象であり、砂漣の現象の中に内在されているものか、給砂装置または水路の特性によって現われるものかは目下の所明らかではないが、非常に興味ある現象と思われる。

砂漣の規模と抵抗係数の間には密接な関係があると思われ、従来からも平均波高 H や、Steepness H/λ と抵抗係数の関係などが実験的に調べられてきた。そこで、砂漣の規模を代表させる値として H/λ の代りに平均河床に対する標準偏差 σ をとり、これと相当粗度 k_s との間の関係を調べたものが Fig. 6 である。

この図からも、予想される通り σ と k_s はほぼ直線的な関係にあることがうかがわれるが、流量が多く砂漣の規模の大きいもの程点の散乱が著しくなっている。このことは Dunes の領域に近づくにしたがい、砂漣は不規則となる。そのため河床の凹凸の程度と抵抗係数とは一義的な関係で結び付けることは困難となり、流線の剝離や渦の消長などその内部機構にも立ち入って考察する必要があることを示すものと思われる。

前述のように、一定点で観測した水位および河床の時間的変化の記録は一つの時系列量をなしている。そこで河床の記録を用いてこの時系列量の自己相関係数およびスペクトル密度を次式によって計算してみた¹¹⁾。

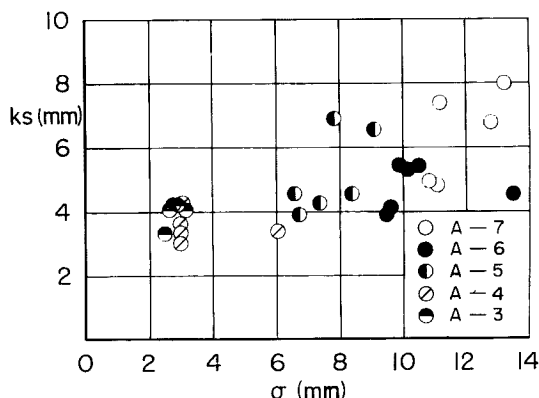


Fig. 6. Relation between k_s and σ .

$$R(\tau) = \frac{N}{N-\tau} \frac{\sum_{i=0}^{N-\tau} z(i) \cdot z(i+\tau)}{\sum_{i=0}^N \{z(i)\}^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$F(f) = 4 \int_0^m R(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau \dots\dots\dots (2)$$

(2)式の積分は Simpson の方法により行ない、計算は FACOM 231 ALGOL によって行なった。計算に用いたデータは30秒間隔で測定した369個の値で、ずらし数 m は40である。この場合の自由度は約17である。

Fig. 7 は A-3 および A-5 の実験の一例について計算した自己相関係数の関係を图示したものである。この図からもこれらの砂漣の現象は周期性とマルコフ性との中間の性質を有する現象であることが分る。また A-3 と A-5 では相関の減少の様子が著しく異っている。これは A-3 では比較的周期の長い規則的な変動が現われているのに対し、A-5 では周期も短かく、変動も大きいことを示しているもので実際の現象をよく表現している。

Fig. 8 はこの場合のスペクトル密度を計算したものである。この図においてもこの現象は周期性とマルコフ性の両方の性質を示しており、種々の周期の波によって組合わされたものであることが分る。例えば A-3 の場合はほぼ完全な Ripples の状態であり、観察による限りでは波長、周期などはほぼ一定の一つの値が顕著であるため、他のものは見逃しがちである。しかしこのようにスペクトルを求めてみると、少なくとも二つの顕著な周期が存在していることが分る。また A-5 の場合では観察によって得られた各々の周期の算術平均値は、統計的に有意な周期とは全く異った値を与える。したがって従来のような観察値からの算

術平均によって得られる周期, 波長などの値は実際の現象の中には殆んど存在しないもので, このような値で現象の性質をどれ程代表させ得るかは非常に疑問であると思われる。

4. 結 語

以上著者らは, 砂漣に関する従来の研究が現在行き詰りの状態にあるのは, 現象に対する我々の理解とくに量的な意味においての理解が不足していることを指摘し, これを打解するためにはこのような複雑な現象は一種の Stochastic process とみなすべきではなからうかと考え, この立場に立っての一連の研究を開始した。

このように現象を統計的な目で眺め, 処理して行くためには, それに相応した計測の方法が必要である。そこで著者らは水位および河床の変化を連続的に高精度で測定, 記録するため超音波を用いた測定器を試作した。この測定器はまだ多くの問題点を残しているが, 一応所期の目的を達することが明らかとなった。

そこで本計測器を用い, Ripples から Dunes に至る領域について二三の実験を行い, その結果を用いて自己相関係数, スペクトル密度などを計算したところ興味ある結果を得ることができた。いまだ実験ケース, 計算例などが少なく, 現段階では現象そのものについて何らかの結論を下すことは危険であるが, 今後これらの研究を重ねることにより, 砂漣についての種々の性質が明らかになることが期待され, またこれを手掛りに現象を解明する緒口が得られたものと思われる。

本研究を行うに当たり, 沖電気 KK の方々到大変お世話になった。ここに付記して謝意を表する次第である。

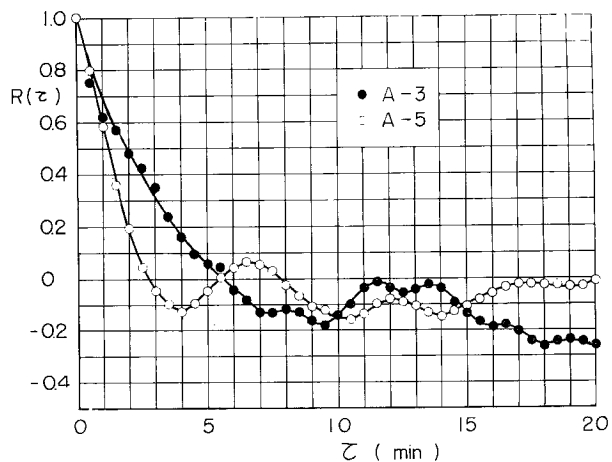


Fig. 7. Auto-correlation function of the height of ripples.

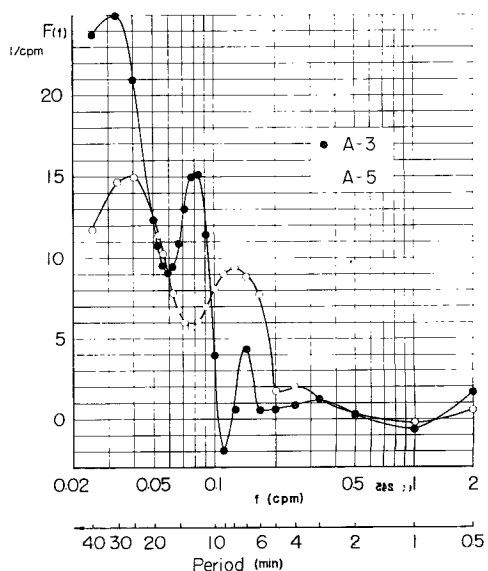


Fig. 8. Power spectra of the height of ripples.

参 考 文 献

- 1) H.K. Liu: Mechanics of sediment-ripple formation, Proc. ASCE, Vol. 83, No. HY2, 1957, p. 1~23.
- 2) G.K. Gilbert: Transportation of debris by running water, U.S. Geological Survey, Prof. Paper, No. 86, 1914, p. 1~259.

- 3) A.G. Anderson : The Characteristics of sediment waves formed by flow in open channels, Proc. 3rd Midwestern Conference on Fluid Mechanics, 1953, p.379~395.
- 4) J.F. Kennedy : The mechanics of dunes and antidunes in erodible channels, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 16, Part. 4, 1963, p. 521~544.
- 5) S. Leliavsky : An introduction to fluvial hydraulics, Constable & Co., Ltd., London, 1957, p. 24~33.
- 6) 松梨順三郎, “開水路における移動床の不安定性について一微小振動法による理論的解析一”, 土木学会論文集 第61号, 昭34. 3.
- 7) H. Lamb : Hydrodynamics, 6th edition, Cambridge press, 1963.
- 8) 速水頌一郎, “堆積過程の研究”, 地球科学, 第2号, 1950, p. 63~70.
- 9) S. Karaki, E.E. Gray and J. Collins, Dual channel stream monitor, Proc. ASCE. Vol. 87, No. HY6, 1961, p. 1~16.
- 10) 松尾捨三郎, 移動床をもつ流れの水維床状態の区分について, 土木学会論文集, 第71号, 1960.
- 11) 谷 一郎, 乱流理論, 克誠堂, 1950, p. 127~129.