

砂漣に関する実験的研究(2)

—砂漣の形成に及ぼす側壁の影響—

芦田和男・田中祐一朗

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SAND WAVES (2)

—The influence of the side wall on sand waves formation—

by Kazuo ASHIDA and Yuichiro TANAKA

Synopsis

Authors manufactured an equipment measuring water level and bed elevation using ultra-sonic device, and are conducting a series of experimental studies for the characteristics of sand waves. Sand waves on movable bed have usually three dimensional characteristics and it is considered that the side wall gives a large influence on their forms. In this paper, authors studied experimentally the side wall effects on the characteristics of sand waves. Two types are considered as the side wall effects, namely shear defect and the secondary current due to the side wall.

For the defect of the shear stress, it could be assumed to distribute logarithmically across the channel bottom from the measurement of the velocity distribution, but the effect of the non-uniformity of the shear stress distribution on sand waves was not so much.

On the other hand, the secondary currents give a large influence on the deformation of sand waves and the occurrence of the meandering flow. Authors gave some qualitative consideration about these secondary currents.

1. 緒 言

砂漣は移動床水路において、流砂の存在する場合は殆んど常に存在するものである。このために、流砂量の問題、移動床水路の抵抗法則の問題、砂漣の発生、発達の問題、蛇行流発生の問題など移動床特有の種々の問題を呈起し、これらが互に関連し合って現象をいよいよ複雑なものにしている。以上の諸問題はどれ一つ取り上げてもなかなかむづかしい問題で、従来から多くの研究者によって種々のアプローチが試みられてきたが、いずれも十分な解明を与えるまでには至っていない。これは現象が複雑なため、全体にわたっては思考し難く、現象を何らかの形でモデル化して考察を進めていく必要があるが、まだその思考モデルが十分に確立されていないことによるものと思われる。このモデルを明確にするためにも、また砂漣が水流に与える抵抗の機構と密接な関係のあることから、まず第一に形成される Sand waves の形状特性を明確に把握する必要がある。しかし Sand waves は極めて複雑な形状を呈し、これを的確に把握するためには、その測定方法と、その表示法とを確立しなければならない。また実験を行なう場合、有限巾の実験水路で形成される Sand waves と半無限巾と考えられる実際河川で形成されるものとの間に相違があるものか、すなわち Sand waves の形成に対して側壁はどのような影響を及ぼすのかを知っておく必要がある。

著者らは先年 Sand waves のスペクトラム特性についての研究に着手したが¹⁾、この研究を進めていくためにも、どのようにして測定した記録が最も良くその性質を抽出しているのか、すなわち測定に際し側壁の影響を考慮する必要があるかどうかを知っておくことが重要である。また先年試作した超音波式測定器は試作品1号機のため、使用するに及んで後述のような種々の問題を惹起し、その改良にかなり手間どった。このため前回の研究は一時中断せざるを得なかった。そこで今回は砂漣の形状特性について、とくに砂漣の形成に及ぼす側壁の影響について、実験的に二、三の考察を加えたのでここに報告して御批判を得たい。

2. 実 験

(1) 超音波式測定器

著者らは先年、水位および河床の変化を高精度で連続的に測定、記録するため、沖電気 KK の協力を得て超音波式測定装置を試作した¹⁾。しかし試作品一号機のため、実用に供するに及んで次のような種々の問題点が明らかとなったため、更に改良を加えてきた。その主なものを挙げると次のようである。

まず測定誤差を小さくするため、Sing Around 方式により10回の繰り返し周波数を測定するようにしてあった。このため測定距離によりゲート時間がかかなり変化するため、発振器の作動を4段階に分割して操作する必要があった。これは測定面の変位によって度々ゲートを切換えねばならず、実用上極めて不便であった。また繰り返し周波数を測定することは必ずしも有利でなく、かえって誤差を累積する場合もあることが分った。そこで、1回毎に計数する Start-Stop 方式に改めた。

この方式に改めると、パルス波形に余程注意しないと誤差が増大する。このためパルスの立ち上り特性を改良し、また送振電圧を増大して音圧を増加させ、必ず第1波形でトリガーをかけられるようにした。しかし音圧を増加すると、送振時の残響が最小測定距離(3cm)の受信時にも影響するようになる。そこでスポンジゴムで振動板を支柱から浮かせ、この残響を約1/3に減少させた。このため増巾器のゲインをこれまでの60dB から80dB に、したがってマージンを40dB から60dB に上げることができた。

またこれまでは水位および河床測定の発振周期は全く独立であった。このため河床の繰り返し信号と水位の出力信号が相互に結合して、カウンターにて誤動作する場合があった。そこで水位および河床測定用の

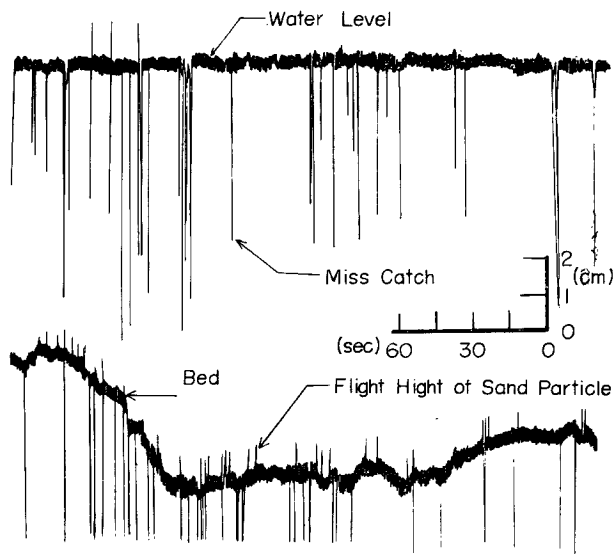


Fig. 1 An example of the analogue record by echo sounder.

マイクロフォンを同時に発振させ、また水位のゲート時間を $500\mu\text{s}$ としたため、河床の最大測定範囲 30 cm ($40\mu\text{s}$) の受信時に充分なゲート (5 ms) をかけ、相互の結合を除くことができた。また 1 回測定方式としたため、空振りの場合はこれを捨て、再度測定して真値を得るようにした。したがって測定面が傾斜して空振りが続く場合は、感度を調節して微弱な反射をもキャッチしてこれを避けるようにした。

測定結果を記録する方式には digital と analogue の二種がある。前回は digital 記録を得るようにしたが、analogue の方が便利な場合も多い。そこで新たに、digital, analogue 両方の記録の得られる計器を二要素追加した。Fig. 1 は得られた analogue 記録の一例である。これは電磁オッシロにより記録するようにしてある。図に見られるように、時々河床面から上に出た線がある。これは砂粒子の跳躍高さを示すものである。まだ実際現象との検証が十分でないため、これがどの程度まで信用できるかは明確でないが、使用方法如何によっては極めて興味ある資料が得られるものと思われる。

(2) 実験方法

実験に用いた水路は $50\text{cm} \times 60\text{cm}$ の断面で長さ 20m の両面ガラス張りの水路である。流量は上流端に設けた台形堰の越流水深で測定した。水路の上流端 3 m は整流区間として捨て、給砂点をもって距離の原点とした。上流からスクリー式の給砂装置によって乾燥砂を補給し、実験中河床こう配を一定に保つようにした。実験に用いた砂は Fig. 2 に示すようなほぼ均一な粒径のもので、その平均粒径は 0.732mm である。側壁の影響を実験的に調べるためには B/h の値を変えた種々の実験を行なう必要があるが、現在までに行なった実験は Table 1 に示すような三種のものである。

河床面に約 15cm の厚さに一定こう配に砂を敷き均した水路に、一定の流量、給砂量を与え、水面形およ

Table 1 Extent of experiment

	Discharge $Q(\text{l/s})$	Supplied Sediment Discharge $Q_{Bi}(\text{gr/s})$	Slope i	Width $B(\text{cm})$	Depth $h(\text{cm})$	Mean velocity u_m (cm/s)	Shear velocity u_* (cm/s)	B/h	F_r	n $\times 10^{-2}$	F_*	$\frac{u_* d}{\nu}$
Fxp. 1	9	0.83	1/800	50	5.25	34.3	2.53	9.53	0.48	1.27	0.090	16.87
Exp. 2	20	5.96	1/800	50	8.73	45.8	3.26	5.73	0.50	1.33	0.149	20.59
Exp. 3	16.3	45.2	1/200	50	5.30	61.5	5.07	9.44	0.86	1.43	0.362	33.74

び河床縦断形状を時々測定する。また下流端より流出する流砂を随時補促計量し、これが給砂量とほぼ等しくなるまで、すなわち平衡状態がほぼ達成されたと認められるまで実験を継続した。こうして形成された Sand wares を乱さないように水を止め、この河床形状を実験 1 では左岸より 1, 13, 25, 37, 49cm の 5 測線に、実験 2 では 1, 7, 13, 19, 25, 37, 49cm の 7 測線に、実験 3 は 7, 16, 25, 34, 43cm の 5 測線に沿って、縦断方向には 5 cm の間隔で測定した。なお各測線はそれぞれ左岸より No. 1, 2... と名付けた。測定は実験 1, 2 はポイントゲージで、実験 3 は超音波式測定器で行なった。この後河床をセメントにて固定し、前と同じ流量を与え、砂漣の山、谷など数断面において、ピトー管、マンメータを用いて流速分

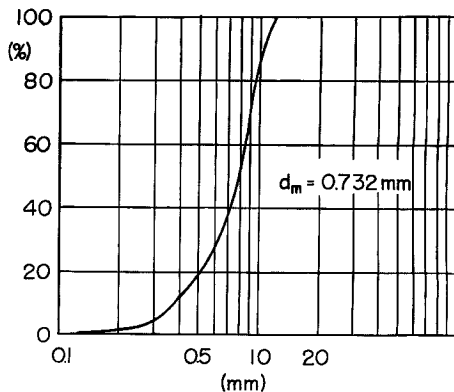


Fig. 2 Grain-size accumulation curve of used sand.

布を詳細に測定した。

3. 実験結果と二、三の考察

(1) 実験結果

各実験において通水を停止した後の河床形状を測定した結果は **Table 2** にまとめて示す。

Table 2 Experimental results

No.	Exp. 1		Exp. 2				Exp. 3			
	\bar{z}	2σ	\bar{z}	2σ	H	λ	\bar{z}	2σ	H	λ
1	3.80	1.30	7.55	3.42	4.15	85.0	4.59	1.36	1.22	49.7
2	3.58	0.53	7.69	3.24	3.97	95.1	4.79	1.73	1.52	30.9
3	3.83	0.60	7.41	2.80	3.45	100.0	4.76	1.65	1.45	30.9
4	3.78	0.53	7.34	2.98	3.26	97.2	4.81	1.67	1.51	33.8
5	3.63	0.49	7.23	3.02	3.04	100.7	4.77	1.87	1.26	37.1
6			7.10	2.58	3.20	90.0				
7			7.69	3.18	4.06	102.1				

実験 1 は限界掃流力を少し上回った状態であり、水路全体にわたって波高 5 mm 程度の **Ripple** が形成されている。この場合上流端での整流板が少し小さく、両サイドに **jet** 流を生じたため、かなりの区間にわたって、両サイドが平均的に深くなった。このことは **Table 2** にも認められよう。このために側壁の影響を論議するには十分でないが、観察によると、両サイドでは断面中央部より砂漣の波高はやや小さい。これは断面内において流砂量、すなわち u_* が変化していることによるものと思われる。しかしその差はわずかで、形成された **Ripple** も一、二のものを除いて、そのクレスト線は流れ方向に対しほぼ直角である。したがってこの場合には側壁の影響はわずかで、砂漣は二次元的な **Ripple** と考えても良いものと思われる。

実験 2 は前と同じこう配で B/h の値をほぼ $1/2$ にし、側壁の影響を更に顕著にさせようとしたものである。この場合は通水と同時に初期の平面河床上に **Ripple** が発生する。しかし **実験 1** よりも断面内の u_* の変化が顕著なため、**Sand waves** の進行速度が断面内で異なり、その形状は中央部で下流に凸となる。この進行速度はやがて断面内で一様となるようで、**Ripple** はその規模を増大させながら、あまり平面形状を変えることなく下流に伝播して行く。また側壁近傍の砂粒子は一部が **Ripple** の陵線に沿って断面中央部へ運ばれ、下流に凸の形状は更に顕著になる。側壁近傍ではとくに砂漣の谷部において間歇的に発生する強い渦により砂粒が運び去られ、深掘れが生じてくる。このことは **Table 2** において **Exp. 2** では両サイドが中央部より \bar{z} も σ も大であることからもうかがわれよう。砂漣の規模が大きくなるにしたがい、一つの砂漣の背後に別の小規模なものが発生するようになる。これは **Dune with Ripple** として知られているものであるが、この二次的な **Ripple** はどの **Dune** にも一様に発生するものではない。またこの **Ripple** は必ずしも断面内一様ではなく、一部だけがどんどん進行するものもある。このような二次的な **Ripple** は大規模な **Dune** よりも進行速度が大なため、やがて両者は接近し、ついには一体となる。またこうした二次的な **Ripple** が発生しないままに **Dune** が断面内で二つに分裂するものもある。以上のように最初はかなり二次元的であった **Sand waves** も時間とともにその規模を増大しながら三次元的な複雑な形状へと変化して行く。しかしこの変化の過程には色々のものがあり、統一的には把握し難い。

実験3は B/h は実験1とほぼ同じにし、フルード数を変えた場合である。砂の移動が激しく、水が濁ったため十分に現象を観察することはできなかったが、実験2とほぼ同様な経過をたどって行くようである。ただしこの場合は実験2と異なり、波長の短い(30cm前後)砂漣が形成され、それに伴って水面に Standing wave が発生する。しかしこの水面波は全く定常的なものではなく、一波長程度下流へ移動し、一旦消滅しかかっては再びもとの位置に発生するということを繰り返している。

Fig. 3 は実験2において形成された Sand waves の平面形状と底面付近の流向とを示したものである。実験流量 20l/s では x 方向の流れが支配的で、明瞭な流線の曲りは認められないが、流量を減じて行くと、図中に点線で示すような蛇行流が底面付近に存在することが分る。この蛇行の現象は実験3において更に顕著となり、Photo. 1 に示すように、蛇行した低流路が河床に形成されている。

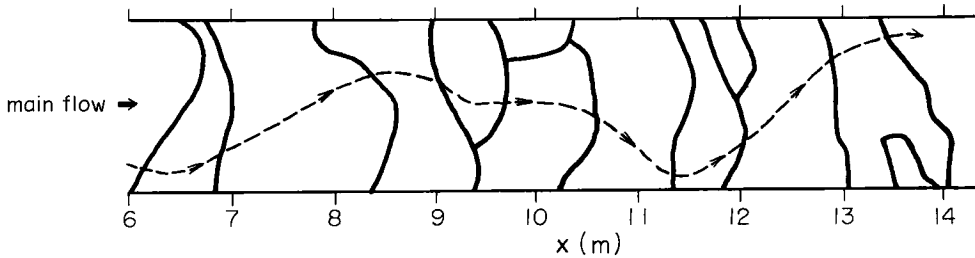
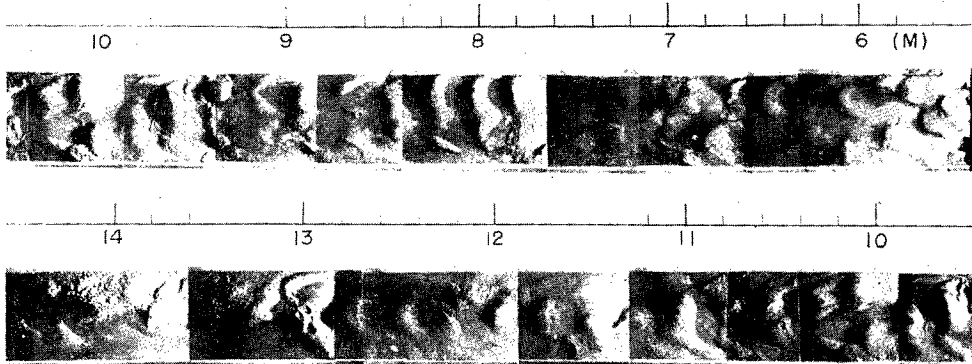


Fig. 3 Plane figure of sand waves in Exp. 2



Photol. 1 Plane figure of sand waves in Exp. 3

このような直線水路における蛇行流の発生は、すでに木下²⁾、Einstein ら³⁾によって実験的に研究されている。しかし木下の実験はフルード数が1又はそれ以上の場合が多く、また Einstein の実験は側面を極めて粗にした場合である。これに対し著者らの実験は $F < 1$ で側面は底面より滑らかな場合である。このような場合にも前述のように蛇行流の形成が認められる。このことはフルード数とか側面の粗滑に関係なく、前駆現象として三次元的な Sand waves の形成を伴って、全ての場合に蛇行流が発生する可能性の存在することを示すもので、これが現象として明確な形をとって現われるかどうかは、発生する二次流の強さと、粒径の大小などによって決るものと思われるが、二次流の機構が明らかでない現在、明確な結論は得られない。

Table 2 に河床の測定結果を示したが、この表における \bar{z} とは初期河床こう配に沿った基準面からの河床の平均高さを示す。したがって数の大なることは河床が低いことを意味している。Fig. 4 および Fig. 5 に実験2および3の各測線に沿っての河床縦断形状を示す。Fig. 4 に見られるように、6 m 前後を境として

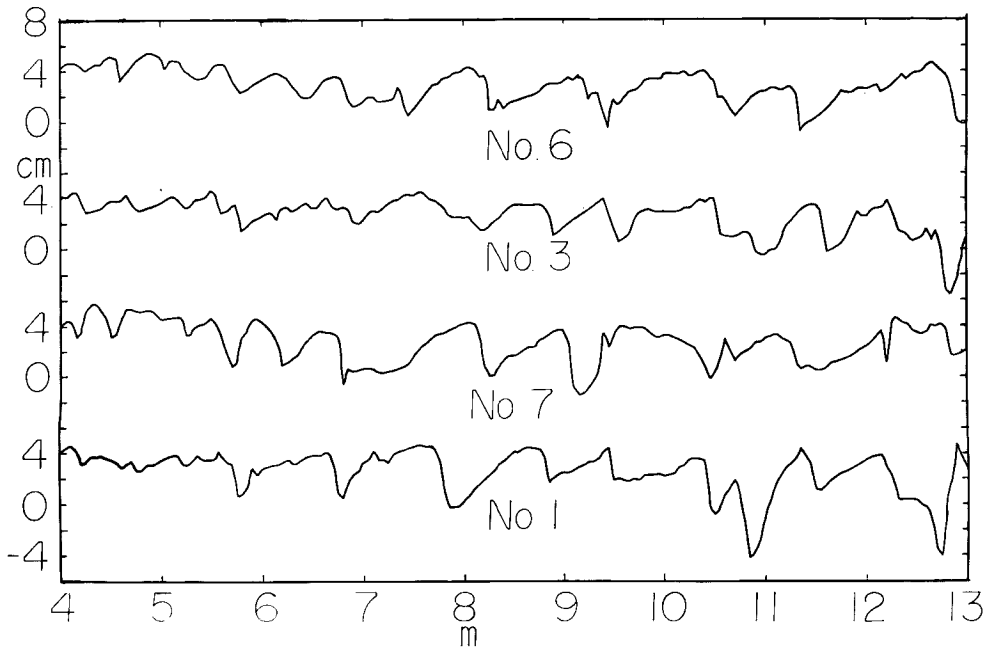


Fig. 4 Longitudinal profile of bed in Exp. 2

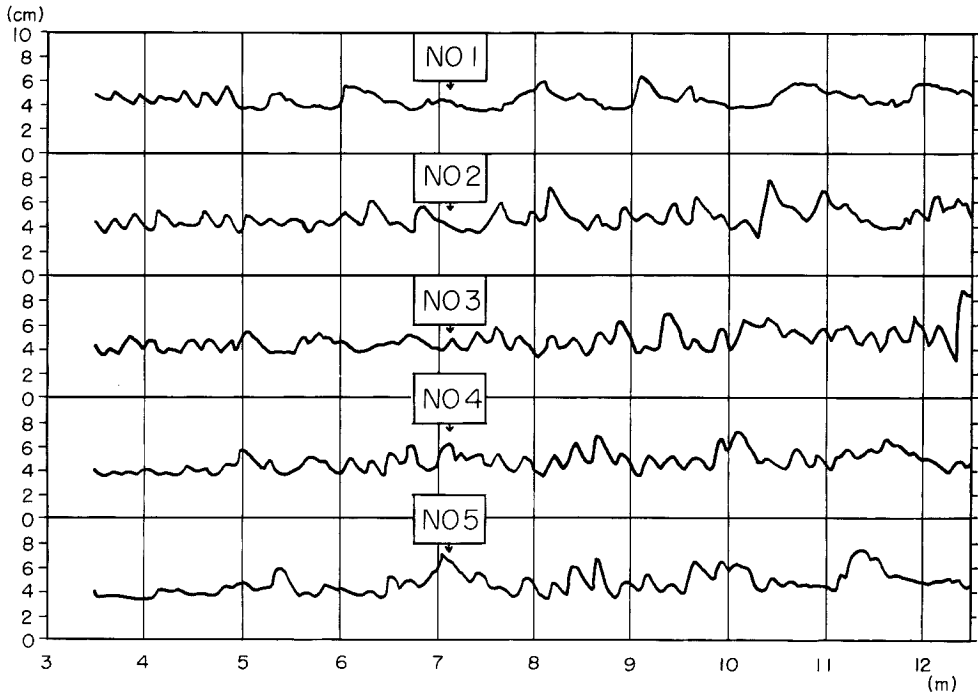


Fig. 5 Longitudinal profile of bed in Exp. 3

上下流で Sand waves はかなり顕著な差がある。これは給砂など上流端条件の影響が残ったため、この外下流端条件の影響域などを考慮すると、対象とし得る区間はかなり限定されることになる。したがって形成される Sand waves の波長にもよるが、我々が通常用いる程度の実験水路では、対象とし得る Sand waves は 10~20 個程度であろう。この Sand waves の形状特性を表示するものとして、従来より波高 H 、波長 λ などが用いられているが、Fig. 6 に示すように、前述のような二次的な Ripple を有する場合、これらを別個のものを見なすかどうかという疑問が生ずる。これは前述のように対象とするものの個数が少ない場合、結果に大きな影響を及ぼす。このような問題を避けるため、河床を詳細に測定し、その平均値 \bar{z} に対する標準偏差 σ をとった。この σ は河床の凹凸の程度を示すもので、Table 2 に見られるように、 2σ の値は波高の平均値にほぼ等しい。したがって H の代りにこの 2σ を用いる方が良いのではないと思われる。測定間隔は小なる程良いのであるが、手数が大変であるため、目下のところ形成される Sand waves の波長の $1/5 \sim 1/10$ 程度が適当ではないかと考えている。

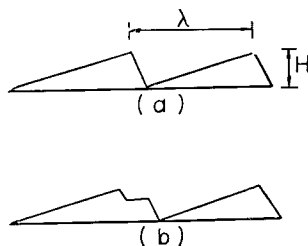


Fig. 6 Schematic diagram of sand wave.

Fig. 7 に実験 2 と 3 における H/λ および $2\sigma/\lambda$ の横断方向の変化を示してある。実験 2 では両サイドで H/λ も $2\sigma/\lambda$ も共に大きくなっている。これは側壁近傍で発生する二次流によってこの付近に深掘れの生じていることを意味している。一方実験 3 では逆に両サイドで小となっている。これは両

サイドで堆積が生じているという意味ではなく、最深部は側壁の近くにあるが、顕著な蛇行した低流路が形成されたため、蛇行の一波長以上の区間をとった場合、断面中央部では側面付近の約 2 倍の回数で低い部分が現われることによるものである。しかしいづれにしても H/λ は断面内でかなり変化している。これは Sand waves はその三次元的な形状を持色とし、二次元と見なせるのは Ripple の初期など、むしろ特殊な場合であり、したがってその形状特性を表示するものとしては H/λ だけでは不十分であることを意味しているものと思われる。

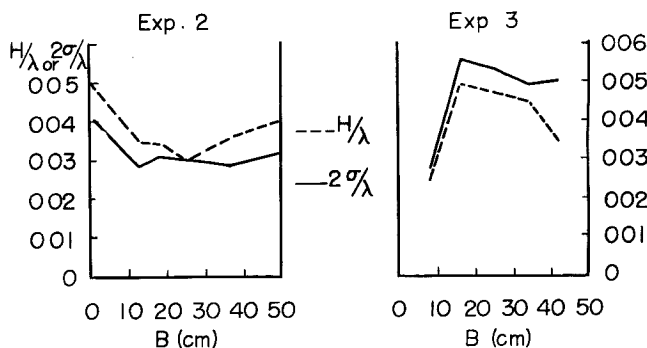


Fig. 7 Variation of H/λ across the channel.

前述のように Sand waves の形成に対し側壁はかなりの影響を及ぼし、これが水路巾全体にわたって現われた場合には蛇行流の発生となる。Photo. 1 に見られるように、Sand waves のクレスト線が流れ方向となす角は側壁近傍ではどれもほぼ等しい。これは側壁近傍の現象、とくに u_* の分布と二次流の強さおよびその方向が重要な役割を演ずるものと思われる。以下これらについて若干の考察を試みる。

(2) 断面内における u_* の分布

この研究を行なう目的の一つに、どこで測定すべきかを明らかにする、すなわち側壁の影響域を知ることである。この側壁の影響域についてはすでに Einstein の研究⁴⁾、足立博士の研究⁵⁾ などがあつた。いま実験 1 の場合について、足立博士の方法により影響域の境界の方程式を求めると、隅角部を原点として次式が得られる。

$$y = 0.762z^{1.285} \dots \dots \dots (1)$$

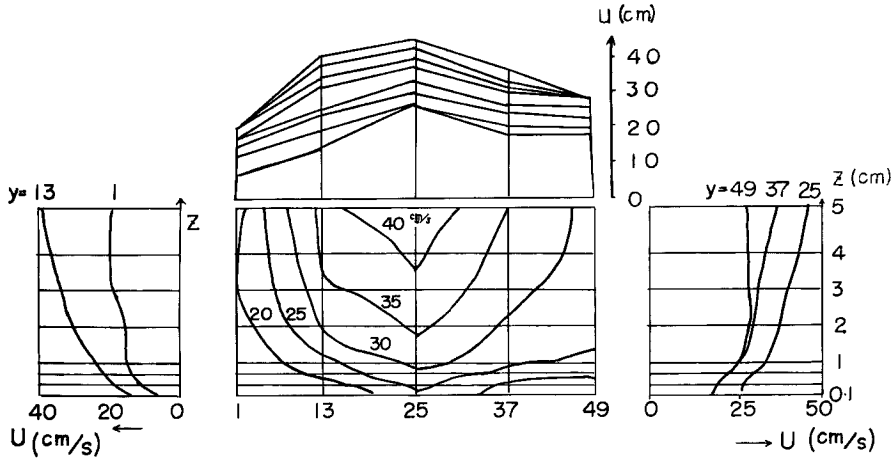


Fig. 8 Velocity distributions in cross-section (Exp. 1)

上式から分るように、この方法では側壁の影響域はほぼ隅角部の二等分線の範囲内にあることになり、ごく限られた部分である。Fig. 8 に実験 1 の場合の実測による断面内の流速分布の一例を示す。図の中央は断面内の等流速線を、左右は深さ方向の流速分布を、また上は横断方向の流速分布である。この図からも分るように、側壁の影響は断面中央部付近にまで及んでいるようである。したがって断面全体の平均的な流体抵抗を論ずるような場合は従来の方法でも十分であろうが、断面内部にまで目を向けた場合には不十分であると思われる。これは底面と側面の影響域をそれぞれ独立としたこと、および横断方向の u_* を一様としたことに原因があるものと思われる。

そこでいま Fig. 9 に示すように、断面中央に座標軸をとり、足立博士と同様に横断方向にも対数法則が成立するものと仮定すると、

$$\frac{u}{u_{*b}} = \frac{1}{\kappa} \ln(M_1 z), \quad \frac{u}{u_{*s}} = \frac{1}{\kappa} \ln\left\{M_2 \left(\frac{B}{2} - y\right)\right\} \dots (2)$$

と書ける。いま z 軸上で河床から z_1 の位置での流速を u_1 、これを y 方向に y_1 だけ移動した点での流速を u_2 とすると、

$$\frac{u_1}{u_{*b}} = \frac{1}{\kappa} \ln(M_1 z_1), \quad \frac{u_2}{u_{*s}} = \frac{A}{\kappa} \ln\left\{M_2 \left(\frac{B}{2} - y_1\right)\right\} \dots (3)$$

となる。 $y_1=0$ で $u_1=u_2$ より A を求め、任意の点における流速を与えるものとして添字 1, 2 を省略すると、一般の流速分布式として、

$$u = \frac{u_{*b}}{\kappa} \cdot \frac{\ln\left\{M_2 \left(\frac{B}{2} - y\right)\right\}}{\ln\left(\frac{M_2 B}{2}\right)} \cdot \ln(M_1 z) \dots \dots \dots (4)$$

が得られる。ここに $u_{*b} = \sqrt{gh_i}$ であり、 M_1, M_2 は境界面での粗滑に関する量として、

$$\begin{aligned} \text{粗面: } M_1 &= 1/m_r k_{sb}, \quad M_2 = 1/m_r k_{ss} \\ \text{滑面: } M_1 &= u_{*b}/\nu m_s, \quad M_2 = u_{*s}/\nu m_s \end{aligned} \dots \dots \dots (5)$$

で与えられる。また m_r, m_s は Nikuradse の実験値を用いると次のようである。

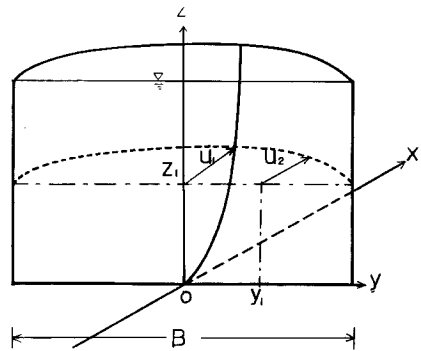


Fig. 9 Definition sketch of the velocity distribution.

$$m_r=1/30, m_s=1/9 \dots\dots\dots (6)$$

(4) 式はまた次のように書き直すこともできる。

$$u = \frac{u_* \kappa}{\ln(M_1 z)} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$u_* = \frac{u_{*b}}{\ln\left(\frac{M_2 B}{2}\right)} \cdot \ln\left\{M_2\left(\frac{B}{2} - y\right)\right\} \dots\dots\dots (4-2)$$

これは結局二次元における対数法則 (4-1) 式が断面中央で成立するとして、この場合の u_* が横断方向に (4-2) 式のように対数分布していることを仮定したという意味である。

Fig. 10 は実験 1 における深さ方向の流速分布の一例である。図に見られるように、極めてよく対数法則に一致している。河床での剪断力を直接測定することができなかったため、図の直線のこう配から各点の u_* を求めた。このようにして求めた実測の u_* と (4-2) 式の計算値とを比較したものが Fig. 11 である。実験

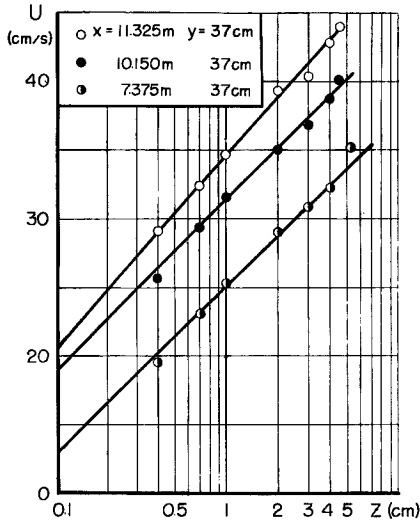


Fig. 10 Velocity distribution in z-direction. (Exp. 1)

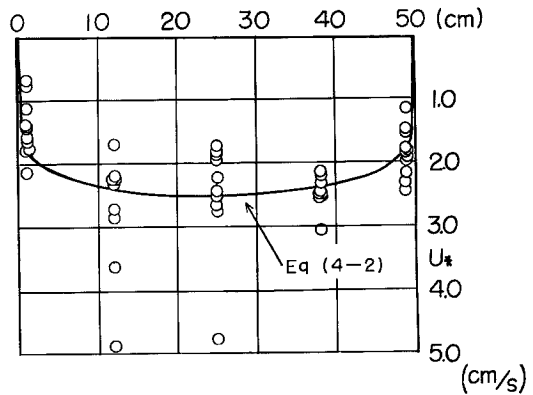


Fig. 11 Comparison between Eq. (4-2) and experiment (Exp. 1)

1 は小規模ながら Ripple が形成されているため、実測の u_* は場所によりかなり変化している。しかし (4-2) 式はこれらの平均的なものを与えているように思われる。

(4) 式によって流速分布を計算する場合に M_2 すなわち u_{*s} を知る必要のある場合がある。この場合、断面全体の力の釣合いを考えることにより、

$$2hu_{*s}^2 + Bu_*^2 = ghBi \dots\dots\dots (7)$$

を得る。上式の左辺第二項に (4-2) 式を用い、これを y 方向に積分することにより u_{*s} の関係式として次式を得る。

$$u_{*s}^2 = \frac{gBi}{2} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{M_2 B}{2}\right)} \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式から直ちに u_{*s} は求まらないが、この程度なら試算により容易に u_{*s} を決めることができる。

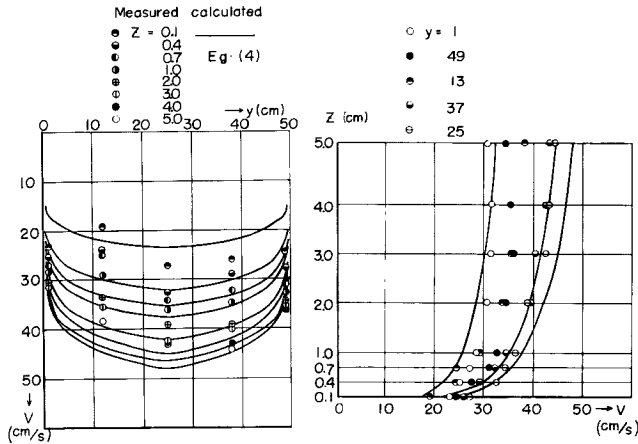


Fig. 12 Comparison between Eq. (4) and experiment. (Exp. 1)

以上のようにして実験 1 の場合の断面内の流速分布を実測と計算と比較したものの一例が Fig. 12 である。この図の左は横断方向の、右は深さ方向の分布を示す。図に見られるように、両者は値そのものまで一致させることはできないが、傾向はよく合っているように思われる。このような流速分布は断面内の流れの機構が明らかになって始めて明確に規定されるものであるが、乱れの機構など不明の点が多い現状では、以上のような取り扱いは止むを得ぬものとしてある程度許容されるのではないかとと思われる。

(2) 二次流について

砂漣の形成に及ぼす側壁の影響の中で、最も顕著な動きをなすものは、側壁近傍に発生する二次流である。

直線水路における二次流に関しては古くから研究がなされているが、いまだその機構は十分明らかでない。すなわち、実験的には閉水路および開水路における流水断面内の等流速線の歪から、局所的な循環流の発生を予測した Prandtl⁶⁾、Nikuradse⁷⁾らの研究がある。また Gibson⁸⁾ は最大流速点の降下現象との関連から、二次流の特性について実験的に検討し、興味ある結論を得ている。

一方、理論的には流水の底面摩擦によって発生する熱対流に基づくものとする藤芳博士の研究⁹⁾があるが、これは単なる着想に止まっている。この外最近では乱れとの関連において把えようとして、Reynolds 応力の分布とこれによる局所的な圧力こう配によるという研究も^{10) 11)}発表されている。

これらはいずれも、二次流の存在の可能性と、その二、三の特性を指摘したに止まり、定量的な取り扱いを望むべくもない。

現象を詳細に観察すると、とくに砂漣の谷部で顕著な二次流が存在することが認められる。Fig. 13 に示すように、Ripple が形成されると、その下部に Wake が発生する。Ripple のクレストで剥離した水流は B 点で河床に衝突するが、この水は四散しようとし、一部は Wake 内を back flow となり、又一部は x 方向に流下する。しかし他の一部は y 方向へも流れる。この際側壁近傍では、側壁の存在という境界条件により、y 方向の流れは水路中央部へ向う一方のもののみとなる。また back flow した水は A 点で同様にその一部が水路中央部へ向うことになる。このように側壁近傍の Wake 内ではかなり顕著な y 方向の流れが存在することが予想される。このような流れが存在すると、側壁近傍では u_* が小さく、したがって流砂量が小であるから、この部分に深掘れが生じ、水路中央部では余分に y 方向から移動された量だけ砂漣の形状は

下流に凸となる。以上のように考えると、二次元的な Ripple から三次元的な Dune へと移行する過程がある程度説明できるように思われるが、まだ定性的な推察に止まり、定量的に論議するまでには至っていない。

4. 結 語

以上著者らは Sand waves の形状特性について、とくに砂漣の形成に及ぼす側壁の影響について若干の実験をもとに二、三の考察を加えた。しかしこれには二次流の問題、断面内の流速分布の問題、蛇行流の発生の問題など、どの一つをとっても独立したテーマとして更に深く追求されねばならぬ困難な問題が互に関連しあっている。これらの基礎的な知識が貧困な現状では、その応用としての Sand waves の変形の問題を論ずることは非常に困難であり、したがって定性的に二、三の事項について考察するに止まった。本研究によって明らかとなった二、三の点を列挙すると次のようである。

- (1) Sand waves は三次元的な形状を特徴とし、二次元的と考えられるのは極めて限られた場合である。
- (2) したがって Sand waves の形状特性を表示するパラメーターとしては H/λ だけでは不十分である。
- (3) Sand waves の波高を調べる場合、定義上疑問を生ずることもある。このため波高 H の代りに詳細な測定から得られる 2σ を用いる方が望ましい。
- (4) 側壁の存在により、断面内の u_* はかなり変化している。その分布形は断面内の流水の機構が明らかでないため十分ではないが、一応(4-2)式のような対数分布を考えても良いように思われる。
- (5) Sand waves の形成に及ぼす側壁の影響の中で最も重要なものは側壁近傍に発生する二次流である。しかし二次流の機構が明らかでない現在、この効果を論議することはむづかしい。これは蛇行流の発生などとも関連して極めて重要であるため、更に検討を進める必要がある。

参 考 文 献

- 1) 矢野勝正, 芦田和男, 田中祐一郎: 砂漣に関する実験的研究(第一報), 京大防災研究所年報第8号(昭40.3)
- 2) 科学技術庁資源局: 石狩川河道変遷調査(参考編), 科学技術庁資源局資料第36号(昭37)
- 3) H. A. Einstein & H. W. Shen: A study on meandering in straight alluvial channels, A. G. U. Vol. 69, No. 24. (1964)
- 4) H. A. Einstein & N. L. Barbarossa: River channel roughness. Trans. A. S. C. E. Vol. 117. (1952)
- 5) 足立昭平: 開水路模型実験の相似律に関する研究—模型歪みの効果について—, 京大防災研究所年報第2号。(昭33.12)
- 6) Prandtl: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, Göttingen (1926)
- 7) J. Nikuradse: Untersuchung über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen, Forschungsarbeiten, H. 281. (1926)

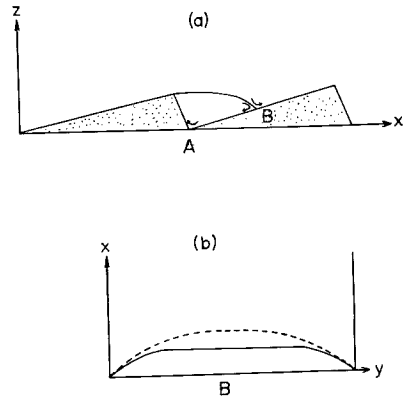


Fig. 13 Schematic diagram of flow over the sand wave.

- 8) A. H. Gibson : On the depression of the filament of maximum velocity in a stream flowing through an open channel, Proc. Roy. S. London. (1909)
- 9) 藤芳義男 : 河川の蛇行と災害 (河川蛇行論), 佐々木図書出版 (昭24.5)
- 10) H. A. Einstein : Secondary currents in straight channels, Trans. A. G. U., Vol. 39, No. 36. (1958)
- 11) 石原藤次郎, 村本嘉雄 : 二次流の発生機構について, 第7回水理講演会講演集. (1962.10)