

河床波の発生・発達過程に関する実験的研究 (3)

上 野 鉄 男・宇 民 正

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF GENERATION AND DEVELOPMENT OF SAND WAVES (3)

By Tetsuo UENO and Tadashi UTAMI

Synopsis

The process of development of ripples were investigated experimentally. The three-dimensional measurement of the bed configuration was made with supersonic bed elevation meters.

The data obtained were processed by a computer system, and spatial distribution of bed elevation, bird's-eye view of bed configuration and spatial distribution of local erosion and accretion of the bed during certain intervals (about 2 minutes) were displayed. The developing process of individual sand wave was investigated in detail. Consequently, it was found that the increment of height of ripples was caused by a slant spiral flow, which scoured the sand bed locally and violently and scattered sand particles downstream.

1. 概 説

移動床流れにおいては、流量、勾配および砂粒径などといった水理量が与えられると、それらの特性に応じて各種の河床形態が形成され、流れの抵抗や流砂量などに大きな影響を与える。

河床波の形状特性と流れの抵抗特性との関連については次のような研究がある。芦田・田中¹⁾は河床波上の流れが固定床段落ち流れの機構と類似性が強いことを確かめ、段落ち流れによる損失水頭の算定をもとにして、河床波の形状が与えられると抵抗が予測できることを示した。また、吉川・石川²⁾は二次元管路内の規則的三角波のもたらす抵抗を理論的に取り扱い、河床波の形状抵抗が河床の波形勾配に大きく支配されることを明らかにした。以上から、移動床流れの抵抗特性を議論する上で、河床波の形状特性を明らかにすることが重要であると言える。

しかし、河床波、とりわけ砂漣および砂堆といった Lower Regime の領域に属する河床波は、大きさおよび形においても同じものが二つとなく、またそれらの発生・発達過程は時間とともに非常に複雑な変化をするので、これらの河床波の形状を予測することは容易でない。このような複雑な内容をもった河床波の形状特性を解明するためにこれまで多くの研究がなされてきたが、これらの研究の発展は移動床流れに対する計測技術の進展と深く関連している。

矢野・芦田・田中³⁾は、1965年に移動床流れにおける河床波の複雑な特性を一種の確率過程として捉えることができることに着目して、水位、河床の変化を連続的に高精度で計測することのできる超音波式の測定器を試作し、河床変動の計測結果から自己相関係数およびスペクトルを計算し、河床波の特性を統計的に解明するという方向に展望を切開いた。さらに、芦田・田中⁴⁾は上記の超音波式測定器に改良を加え、各種の実験条件のもとで河床変動を計測し、河床変動の標準偏差、スペクトルなどを求め、河床変動の標準偏差と河床波の波高との関係を明らかにし、砂漣と砂堆とはスペクトルの構造が異なることを指摘した。

芦田・奈良井⁵⁾は、河床波の発達過程を明らかにするために、各種の水理条件のもとで河床波の発達段階に応じて三段階程度の河床高の計測を行い、各段階ごとのスペクトル構造を求めた。また、河床高の計測は横断方向に一定距離だけ隔った流下方向の三測線で行われ、各測線の河床変動のコヒーレンスが求められ、河床形状の三次元的な特性についても検討が加えられた。しかし、これらの河床高の計測にはポイントゲージが用いられたため、計測を連続的にしかも広範囲に行うことができず、河床波の発達過程の解明と河床形状の三次元的把握という興味ある課題に十分に対処するには至らなかった。

1970年代に入って芦田・木村⁶⁾および中川・辻本⁷⁾は砂澱や砂堆に対して平坦な河床状態で通水を開始して河床波が形成されてゆく過程を超音波式河床計を用いて連続的に計測した。計測結果は統計的な手法を用いて処理されたが、これらの研究により河床波の発達に伴ってその波高ばかりでなく、波長までもが増大してゆくことが明らかにされた。河床波の発生機構に関する Kennedy⁸⁾や林⁹⁾らの解析的研究および Yalin¹⁰⁾らに代表される河床波の発生機構を水流の乱流構造と結びつけて解明しようとする研究が河床波の発達に伴ってその波長が変化しないことを前提とした取り扱いをしていることを考えると、上記の実験結果は重要な意味を持つと言える。

著者ら¹¹⁾は、写真観察の手法を用いて河床波の発達過程を詳細に検討し、発達に伴う個々の河床波の変化過程から共通する特徴を抽出して砂澱と砂堆の発達過程をモデル化した。さらに、モデルの定式化が平衡状態のもとでの河床波の波高と波長との関係をも表わすことを実験資料を用いて示した。

最近、中川・辻本¹²⁾は河床波の発達する過程を超音波式河床計を用いて短い時間間隔で連続的に計測し、砂面の波数スペクトルの時間的変化から河床波の形成機構を説明しようとした。さらに、中川・辻本・赤尾¹³⁾は上記の実験結果を基にして、個々の河床波の発生・消滅といった変化過程に着目して河床波の発達の内部構造を詳しく検討した。

以上のように、最近の研究においては個々の河床波の発達過程が現象理解の基礎として取り扱われるようになってきたが、これは移動床流れの計測技術の向上や写真観察のような新しい手法の導入によってなされたものであり、これによって河床波に関する理解は従来の静的、平均的なものから動的、構造的なものへと進められてきた。

一方、芦田・奈良井⁵⁾が課題として取り上げ、著者ら¹¹⁾の研究においてその重要性が指摘された河床波の三次元的な特性に関する理解は、これまでの研究においては河床形状の計測や現象説明が水路の一定の縦断面上に限られていたため、十分であるとは言えない。

本研究は、最近目覚ましい進歩を遂げた計算機によるデータ処理システムと複数の超音波式河床計を用いて、河床波の発達過程を三次元的にしかも連続的に把握しようとしたものであるが、上記の目的の実現に一応その展望を得たのでここに報告する次第である。また、本研究によって砂澱の波高の増大過程が三次元的に明らかにされ、河床波の波高の予測への手がかりが得られた。

2. 実験方法および結果の処理

2.1 実験方法

実験は長さ 8 m、幅 40 cm、深さ 30 cm の木製の直線水路で行ったが、河床勾配を 1/800 に設定し、水路下流端に設置された堰を調節することによって実験中に流れの等流状態が保たれるように努めた。河床形状の計測区間は、水路の上流端から 5.5 m の場所より下流側へ 80 cm の範囲とし、2 台の超音波式河床計(正豊工学製 M.T.-E. P.I.-2)を取り付けた測定台車を約 22 cm/s の速度で上下流に移動させて河床高を連続的に計測した。2 台の河床計は水路横断方向に 3 cm 離して設置されており、流下方向の各一測線の河床が計測される毎にそれらを台車上で横方向に 2 cm づつ移動させて、幅方向に 27 cm の範囲が 1 cm 間隔で計測されるようにした。計測結果はペンレコーダーに記録したが、計測区間の両端を河床計が通過するときの信号も同時に記録した。

実験は砂澱の発達過程における河床形状の変化特性を明らかにすることを目的として行われた。河床砂の

平均粒径を 0.53 mm とし、砂漣を形成させるために上野¹⁴⁾ による砂漣と砂堆の領域区分図を参考にして、流量を 6.5 l/s, 河床勾配を 1/800, 水温を 18.6°C とした。このような条件のもとで通水を開始すると、初め平坦であった河床に通水後 20~30 分経過した時点で河床波が発生し、通水後 100 分程度経過時に十分に発達した砂漣が形成された。このときの河床形状の写真を Photo. 1 に示す。

河床形状の計測は、Table 1 に示す時間帯で行った。ここで、 t は通水開始後の経過時間である。また、各 Case の計測時間は約 2 分であり、各 Case 間の計測の繰り返しの周期は約 140 秒である。

上記のような計測を行うと同時に、変化してゆく河床形状を水路の直上 2.2 m の高さに設置されたカメラによって連続撮影した。前述の Photo. 1 はその一例を示したものであり、このような写真撮影は各 Case について 4 回行ったが、それは撮影間隔にすると約 35 秒となっている。

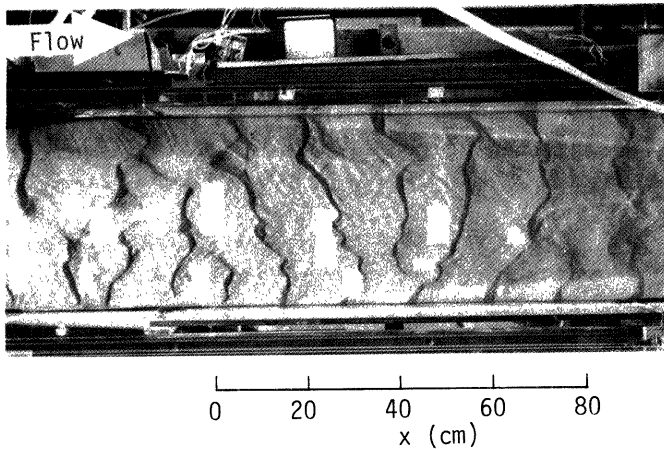


Photo. 1 Configuration of ripple bed ($t=94.2$ min).

Table 1 Measuring time of bed configuration.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
	t (min)	t (min)	t (min)	t (min)
SERIES 1	30.4~32.7	32.9~35.0	35.2~37.3	
2	42.3~44.3	44.6~46.7	47.0~49.0	49.3~51.3
3	58.8~60.8	61.1~63.1	64.8~66.9	67.2~69.3
4	75.9~78.0	78.3~80.3	80.6~82.6	82.9~84.9
5	90.7~92.8	93.1~95.1	95.4~97.5	97.7~99.9

2.2 計測結果の処理

河床形状の計測結果はペンレコーダーに記録され、その記録からディジタイザー（武藤工業サマーグラフ、BITPAD-ONE/RS-232C）を用いて流下方向に 80 cm の計測区間の河床高を 1 cm 間隔で読み取り、フロッピーディスクに収録した。このような読み取りは各 SERIES の各 Case 毎に、 $y=6.6$ cm から $y=33.6$ cm までの幅方向に 27 cm の範囲の記録について行われたので、これによって流下方向に 80 cm, 水路幅方向に 27 cm の領域内の $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ の正方格子点の河床高が数値化されたことになる。ここで、 y は水路側壁からの距離を示す。

数値化された河床高の資料をもとにして計算機によって河床高の等高線図、河床形状の俯瞰図および河床

の洗掘・堆積の分布図を作画し、河床形状の変化特性を検討した。これらの計算においては、京都大学防災研究所防災科学資料センターの計算機を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 河床波の発達に伴う波高および波長の変化特性

(1) 平均波高および平均波長の変化特性

砂漣や砂堆といった河床波は発達するに伴ってその波高および波長を増大させることが実験的に明らかにされているが^{(6), (7), (8)}、ここでは河床波の波高および波長の増大してゆく様子を平均的に検討する。

Fig. 1 および Fig. 2 は河床波の平均波高 H_m および平均波長 L_m の経時変化を示したものであり、横軸の t は通水開始後の経過時間である。図には各計測の SERIES の番号が①～⑤の記号で記入されている。なお、河床波の波高および波長はペンレコーダーの記録から直接求めた。すなわち、波高は各流下方向測線上の計測区間内の河床形状の記録から連続した5つの河床波の下流側の落差をそれぞれ読み取ってこれらの

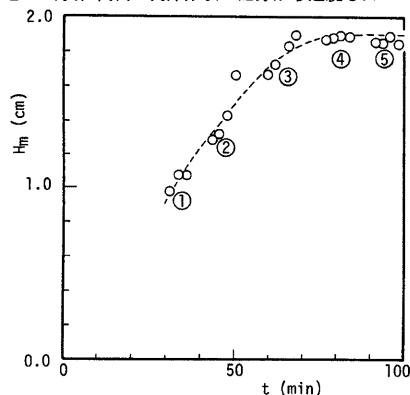


Fig. 1 Time variation of average height of ripples.

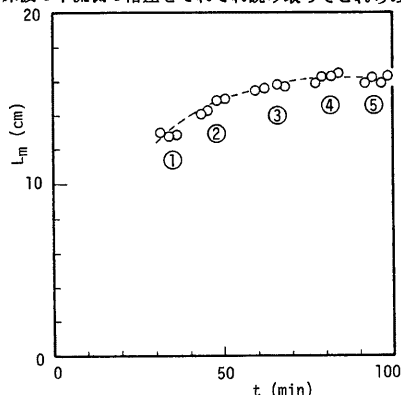


Fig. 2 Time variation of average length of ripples.

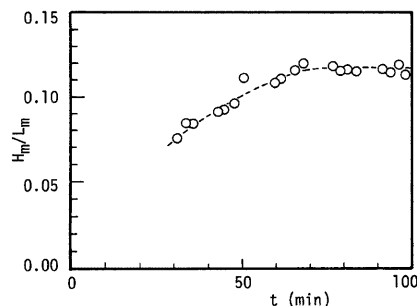


Fig. 3 Time variation of steepness of ripples.

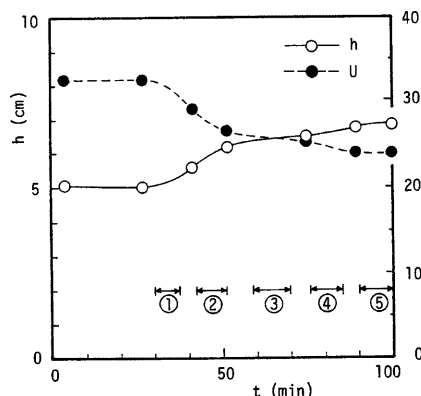


Fig. 4 Time variation of water depth and average velocity.

平均値を求め、それらを各 Case について横断方向に平均したものを平均波高 H_m とし、平均波長 L_m は計測区間内の河床波の 5 波長分の距離を平均することによって求めた。Fig. 1 および Fig. 2 より河床波は発達するに伴って波高および波長を増大させることがわかる。また、本実験においては通水開始約 80 分程度で波高および波長の増大は小さくなっており、河床波は十分に発達した状態にあることがわかる。

Fig. 3 は河床波の波形勾配の経時変化を示したものである。図から河床波が発達するに伴って波形勾配が増加してゆくことがわかるが、これは「河床波の波形勾配は、砂澱では河床波の発達するに伴って増大する」という著者らの指摘¹⁾と同じ結果を示している。

(2) 河床波の発達に伴う流れの抵抗の変化

上記のような河床波の発達に伴って、流れの抵抗がどのように変化するかを検討した。

Fig. 4 は計測区間における水深 h および断面平均流速 U の経時変化を示したものであり、図には各 SERIES の河床形状の計測時間帯が①～⑤の記号で記入されており、水深の計測は各 SERIES の計測の前後に行われている。図から河床波の発生・発達に伴って流れの抵抗の増加により水深が増大し、逆に断面平均流速が減少してゆくことがわかる。

Fig. 5 は流速係数 U/u_* の経時変化を示したものである。ここで、 u_* は摩擦速度である。図から、河床波の発生・発達に伴って流速係数は約 13 から 8 程度まで減少しており、流れの抵抗が大きく変化したことがわかる。

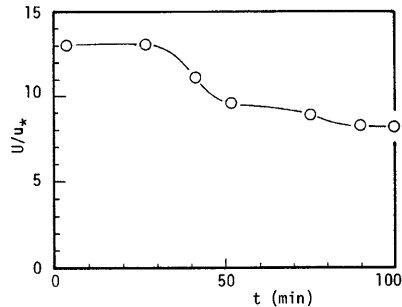


Fig. 5 Time variation of friction factor.

3.2 河床波の発達に伴う河床形状の変化特性

先に検討したように、河床波の発達に伴って波高および波長は平均的にはそれぞれ Fig. 1 および Fig. 2 に示されるように変化するわけであるが、ここでは個々の河床波に注目してそれらの波高の増大過程について三次元的かつ定量的に検討を加えることにする。

Fig. 6 (a)～(f) は各時刻における河床高の空間分布を示したものである。図において各等高線間の高低差は 2.5 mm であり、斜線で縁取りされた範囲は河床高が負の部分、すなわち初期河床を基準とすると洗掘された部分であることを示している。なお、本図の各 Case の計測においては $y=6.6$ cm の測線の計測時刻と $y=33.6$ cm のそれとの間に約 2 分程度の時間差があることに注意する必要がある。しかし、本実験においては河床波の流下速度が比較的少ないので、河床波の発達過程を局所的な洗掘と堆積といった現象を基にして検討する場合には、このことが現象理解に大きな影響を及ぼすことはないと考えられる。

つぎに、このような河床形状の理解を容易にするために計算機によって Fig. 7 (a)～(c) に示されるような河床形状の俯瞰図を作った。なお本図において、 z 方向のスケールが他のものに比較して 2 倍に拡大されていることに注意する必要がある。ここで、(a) 図は発達初期の河床形状、(b) 図は波高の増大が激しい段階の河床形状、(c) 図は十分に発達した段階の河床形状を示している。

Fig. 6 の各図においては、河床が周辺よりも特別に深くなった部分および高くなった部分が局所的に存在する。ここでは、このように洗掘深および堆積高が特に大きな値となっている個々の河床形状に注目して検討を進めることとする。このような洗掘深および堆積高が量的にどのように変化してゆくかをわかりやすくするために Table 2 を作った。表には備考欄に示した条件に当てはまる大きさをもった洗掘部および堆積部の位置 (X cm, Y cm) と高さ (Z cm) を示したが、本表に最初に現われた洗掘部には A, B, C, … の記号を、堆積部には a, b, c, … の記号を付けた。これらの記号は Fig. 6 の各図にも記入されているが、Fig. 6 においてはこれらが変化してゆく様子を添字を付けた記号によってわかりやすくしており、添字が 0 のものは

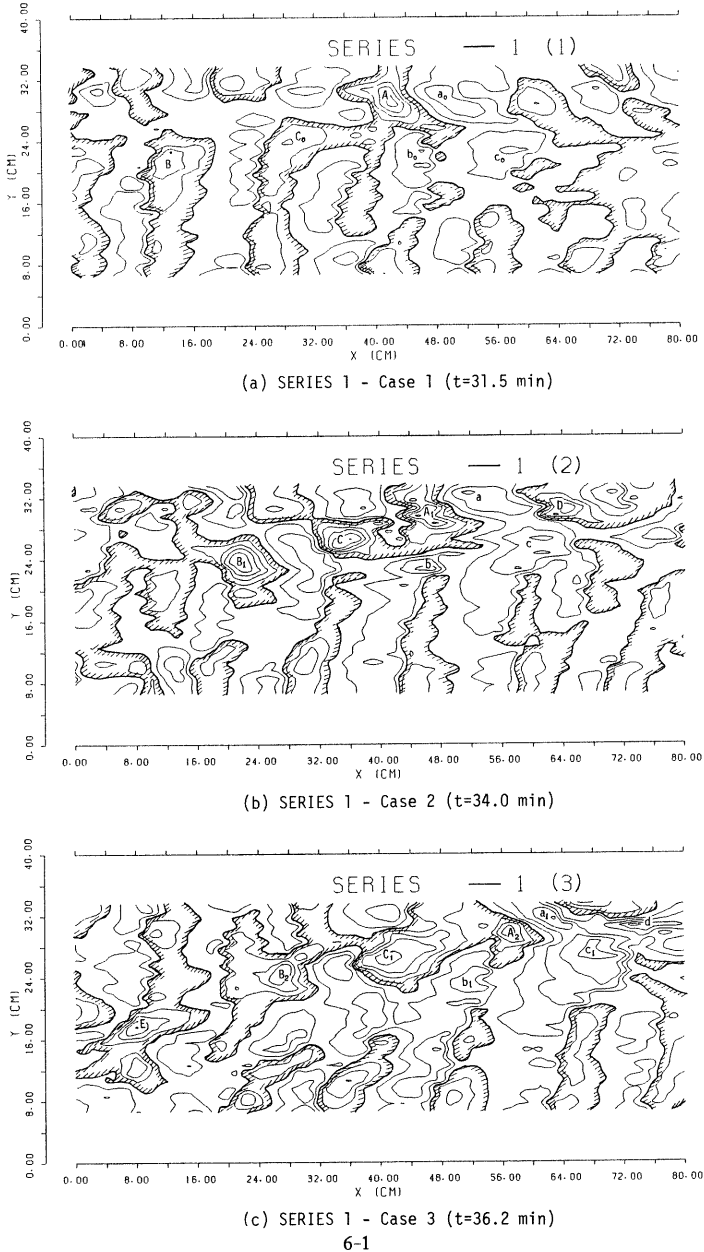
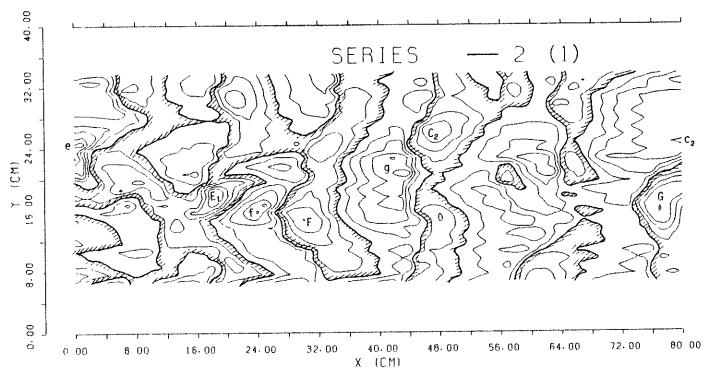
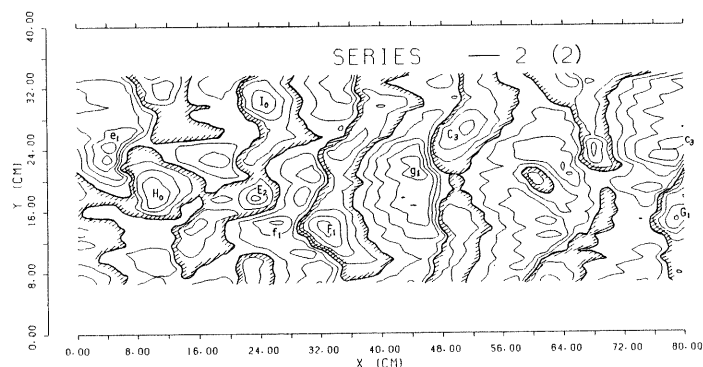


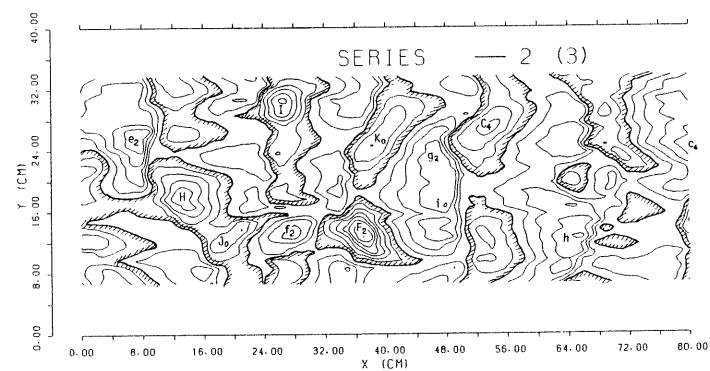
Fig. 6 Spatial distribution of bed elevation.



(d) SERIES 2 - Case 1 (t=43.4 min)

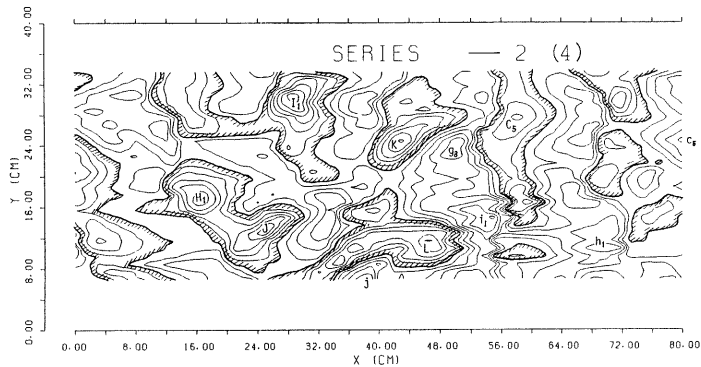


(e) SERIES 2 - Case 2 (t=45.6 min)

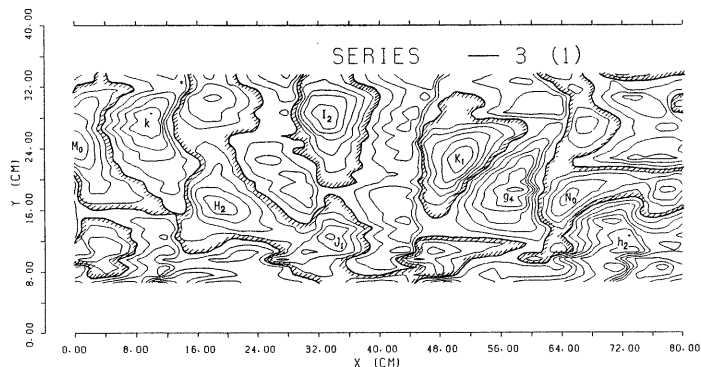


(f) SERIES 2 - Case 3 (t=48.0 min)

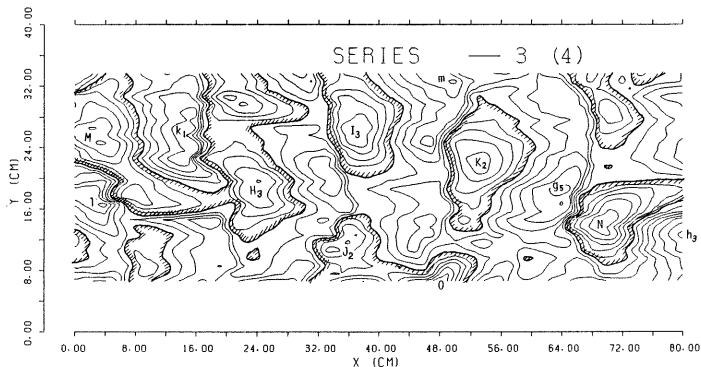
6-2



(g) SERIES 2 - Case 4 (t=50.4 min)

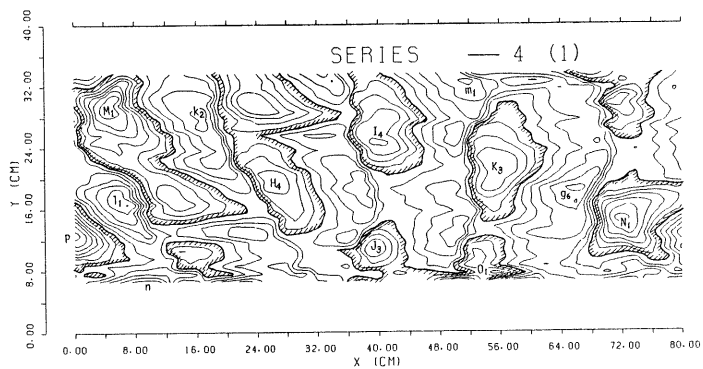


(h) SERIES 3 - Case 1 (t=59.8 min)

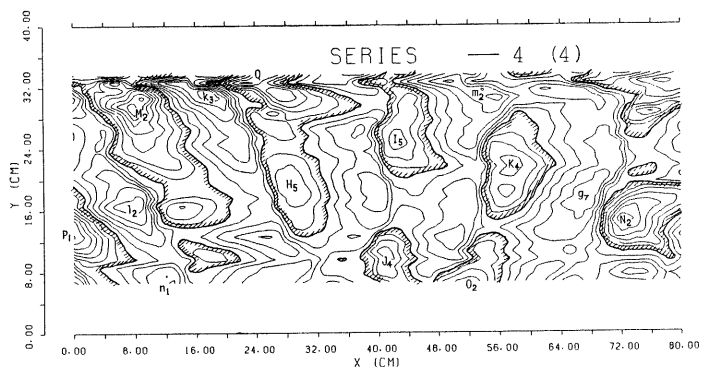


(i) SERIES 3 - Case 4 (t=68.2 min)

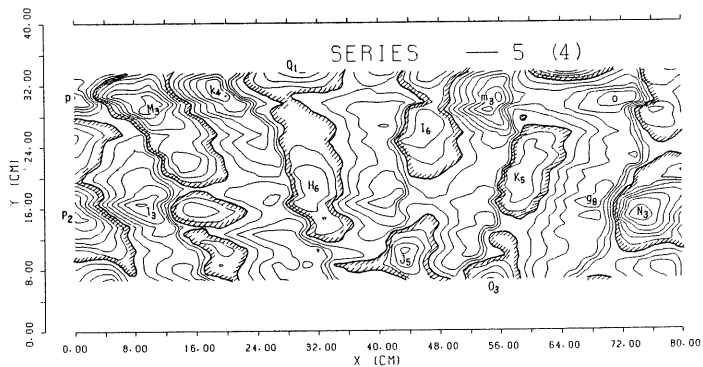
6-3



(j) SERIES 4 - Case 1 ($t=77.0$ min)



(k) SERIES 4 - Case 4 ($t=83.9$ min)



(l) SERIES 5 - Case 4 ($t=98.7$ min)

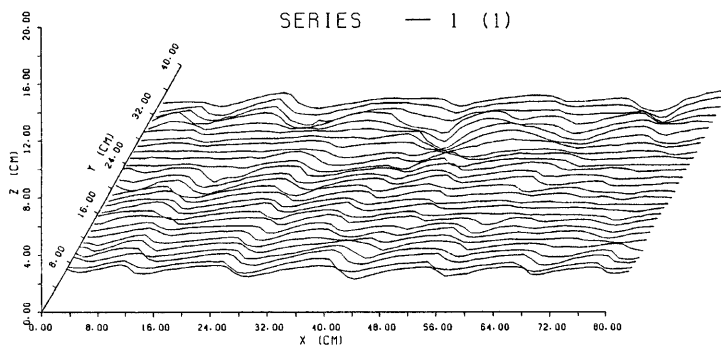
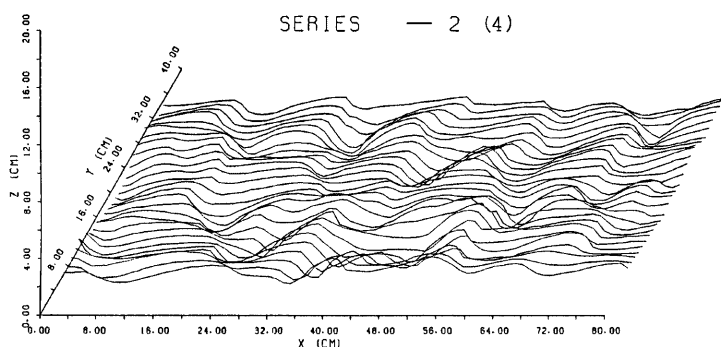
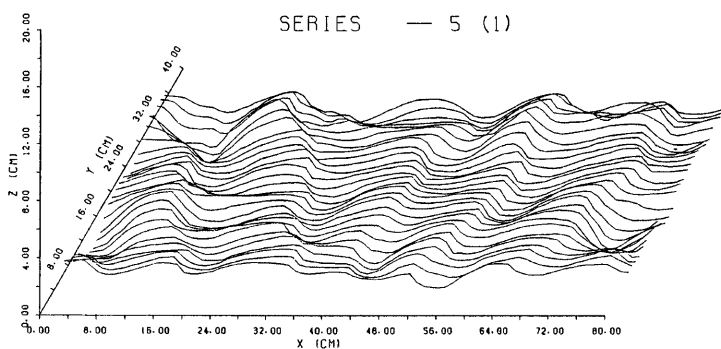
(a) SERIES 1 - Case 1 ($t=31.5$ min)(b) SERIES 2 - Case 4 ($t=50.4$ min)(c) SERIES 5 - Case 1 ($t=91.8$ min)

Fig. 7 Bird's-eye view of bed configuration.

Table 2 Position and elevation of local erosion and accretion.

SERIES	Case	t (min)	Erosion			Accretion			Remarks
			Position (Xcm, Ycm)	Elevation Z (cm)	mark	Position (Xcm, Ycm)	Elevation Z (cm)	mark	
1	1	31.5	(42, 29) (13, 23)	-1.0 -0.75	A B				$ Z \geq 0.75$ cm
	2	34.0	(47, 27) (23, 24) (36, 28) (64, 30)	-1.0 -1.0 -1.25 -0.75	A ₁ B ₁ C D	(46, 23) (52, 33) (60, 26)	0.75 0.75 0.75	a b c	$ Z \geq 0.75$ cm
	3	36.2	(41, 26) (8, 18)	-1.0 -1.0	C ₁ E	(63, 32) (74, 31) (66, 27)	1.0 1.0 1.0	a ₁ c ₁ d	$ Z \geq 1.0$ cm
2	1	43.4	(18, 17) (30, 14) (77, 16)	-1.0 -1.0 -1.0	E ₁ F G	(80, 27) (1, 25) (25, 16) (43, 20)	1.0 1.25 1.0 1.0	c ₂ e f g	$ Z \geq 1.0$ cm
	2	45.6	(33, 13) (79, 15)	-1.0 -1.0	F ₁ G ₁	(78, 24) (4, 24) (44, 21)	1.0 1.0 1.0	c ₃ e ₁ g ₁	$ Z \geq 1.0$ cm
	3	48.0	(37, 13) (14, 18) (26, 30)	-1.75 -1.0 -1.25	F ₂ H I	(80, 25) (8, 25) (65, 12) (47, 16)	1.0 1.0 1.0 1.0	c ₄ e ₂ h i	$ Z \geq 1.0$ cm
	4	50.4	(17, 17) (29, 30) (25, 13) (43, 25) (47, 9)	-1.25 -1.5 -1.25 -1.25 -1.25	H ₁ I ₁ J K L	(80, 27) (50, 24) (70, 10) (55, 14) (38, 7)	1.0 1.0 1.0 1.5 1.0	c ₅ g ₃ h ₁ i ₁ j	$ Z \geq 1.25$ cm
3	1	59.8	(33, 28) (51, 23)	-1.25 -1.25	I ₂ K ₁	(58, 19) (72, 11) (10, 28)	1.5 1.5 1.25	g ₄ h ₂ k	$ Z \geq 1.25$ cm
	4	68.2	(4, 24) (70, 14) (48, 7)	-1.25 -1.25 -1.25	M N O	(63, 18) (80, 12) (3, 16) (50, 32)	1.25 1.75 1.25 1.25	g ₅ h ₃ l m	$ Z \geq 1.25$ cm
4	1	77.0	(5, 30) (72, 15) (0, 13)	-1.5 -1.5 -1.75	M ₁ N ₁ P	(66, 18) (7, 17) (52, 32) (10, 7)	1.25 1.25 1.25 1.25	g ₆ l ₁ m ₁ n	$ Z \geq 1.25$ cm
	4	83.9	(6, 30) (73, 15) (0, 13) (23, 32)	-1.75 -1.5 -1.75 -1.25	M ₂ N ₂ P ₁ Q	(18, 31) (8, 17) (55, 30)	1.5 1.25 1.25	k ₃ l ₂ m ₂	$ Z \geq 1.25$ cm
5	4	98.7	(10, 29) (74, 15) (0, 15)	-1.5 -1.5 -1.5	M ₃ N ₃ P ₂	(19, 31) (9, 16) (55, 30) (72, 30) (0, 30)	1.5 1.5 1.75 1.25 1.25	k ₄ l ₃ m ₃ o p	$ Z \geq 1.25$ cm

Table 2 に現われる一段階前の時点の洗掘部あるいは堆積部を表わす。これらの添字付きの記号は **Table 2** に示された洗掘部および堆積部にも記入されている。

一方、先に述べたように河床形状は水路直上のカメラによって各 Case ごとに4回づつ連続的に写真撮影されており、河床形状の変化過程を理解する一助とされた。

以上の図、表および写真から河床形状の変化過程を眺めてみると、個々の洗掘部や堆積部の変化には河床波の発達段階に対応して異なった特徴が現われていることがわかる。すなわち、SERIES 1, SERIES 2, SERIES 3 および SERIES 4, 5 ではそれぞれ河床形状の変化特性が異なり、ここではそのような河床波の発達段階を便宜的にそれぞれ発達初期、発達最盛期、発達後期および発達終期と名付けて、以下に詳細な検討を加えることにする。

(1) 発達初期 (SERIES 1) の河床形状の変化特性

Fig. 6 の (a) 図においては、A および B の記号で示した深い洗掘が局所的に発生していることが認められる。一方、堆積はそれほど進んでいないことがわかる。B および C₀ の洗掘部は (b) 図においてはさらに深くなり、D の洗掘が新たに発達してきている。特に、C₀ から C への移行はその深さが 0.5 cm から 12.5 cm へとわずか140秒間に 0.75 cm も深くなっていることが注目される。これらの洗掘部の発達に伴って、それらの下流側に a, b および c の記号で示した堆積が発生している。これらの堆積部の高さは 0.75 cm 程度であり、洗掘部の深さの 0.75 cm ~ 1.25 cm と比較するとかなり小さな値となっている。

このように、砂連の発達の初期においては、まず洗掘が河床面のあちこちで局所的に発達し、それに付随して堆積も発生することがわかる。また、これらの A ~ D の洗掘部の状況を同時刻の河床形状の写真撮影結果を用いて調べると、これらの洗掘部では斜めらせん流が発生していることが推察された。斜めらせん流というのは、砂連河床に深掘れを形成する渦運動であり、その軸が水路横断方向と一定の傾きをもっていることからこう呼んでいるものである。著者らは、このような斜めらせん流の実態¹⁵⁾ および河床波の形成に果たす役割¹¹⁾ についてはこれまでの実験的研究によってある程度まで明らかにしてきている。

(2) 発達最盛期 (SERIES 2) の河床形状の変化特性

Fig. 6 の (d) 図においては、新たに現われた E₁, F および G の洗掘が発達し、また e, f および g の堆積も新たに現われ、発達していることが認められる。これらの洗掘深および堆積高は 1 cm よりも大きくなっており、このような洗掘および堆積の発達によって河床波の平均波高も急激に増大する (**Fig. 1**)。

つぎに、(e) 図と (f) 図を比較すると、この時間経過の中で斜めらせん流による洗掘が急激に発達していることがわかる。(f) 図における F₂, H および I の洗掘部はその深さを急激に増加させており、特に F₂ の洗掘部は、F₁ から F₂ へと移行するわずか140秒間に 0.75 cm も深くなり、その深さは 1.75 cm にも達していることが注目される。このような洗掘の進行に伴って堆積も局所的に進み、c₄, h, i および e₂ といった比較的高い堆積部が多く形成されている。

(g) 図においては、斜めらせん流による洗掘は最も激しくなっている。H₁, I₁, J および K の洗掘部は (f) 図の状態からともに洗掘深を増加させており、J の洗掘深の増加は 0.75 cm になっている。また、(f) 図における F₂ の洗掘部は変形してしまっており、新たに L なる洗掘部が現われている。これらの洗掘の進行に伴って堆積も進んでいるが、特に i₁ の堆積部は上流側の複数の斜めらせん流により流送された土砂の堆積によってその堆積高さを急激に増加させている。

このような段階においては、個々の斜めらせん流による洗掘深はすでに最大に達する状態にあり、その深さは 1.5 cm ~ 1.75 cm 程度となっている。これに対して、堆積部の発達はまだ十分な状態に達しているとは言えず、堆積部の高さも特別な場合 ((g) 図の i₁) を除くと 1 cm 程度に留まっている。

(3) 発達後期 (SERIES 3) の河床形状の変化特性

この段階での河床形状の特徴は **Fig. 6** の (h) 図および (i) 図に現われており、この段階では先に示したような斜めらせん流による洗掘と堆積が河床面全体で存在している。また、このような斜めらせん流による激しい洗掘と堆積の過程を通じて、河床波は全体として規模を大きくしていることがわかる。これらの結果と

して、河床形状は大きな堆積部と大きな洗掘部とが流下方向に連結する状態が作り出されている。このような状況は (i) 図においては、 $1-M-k_1-H_3$ および $I_3-m-K_2-g_5-N-h_3$ と連なる形で現われている。このように、大きな堆積部の直下流に大きな洗掘部があると、ここでの河床波の波高は大きなものとなる。

この段階では洗掘部の深さそのものは増大せず、一方、堆積部の高さは増大していることが特徴としてあげられる。

(4) 発達終期 (SERIES 4, 5) の河床形状の変化特性

この段階での河床形状の特徴は Fig. 6 の (j) 図, (k) 図および (l) 図に現われており、この段階では河床波の配置は時間が経過してもほとんど変化せず、河床波そのものの変形も小さなものとなっている。また、洗掘深および堆積高は徐々に増加して平衡状態のものに近づいてゆくようである。以上のことから、この段階においては斜めらせん流の発生は少なく、またその渦運動はあまり強いものではないと考えられる。

また、Table 2 から大きな堆積部の高さはその値が大きな洗掘部の深さとほぼ等しくなっていることがわかる。

3.3 河床の洗掘および堆積状況

前項においては、個々の河床波に注目して河床形状の変化特性を検討したが、ここでは個々の河床波の周辺での洗掘および堆積の状況を調べることによって、河床波の発達過程をさらに詳細に検討することにする。

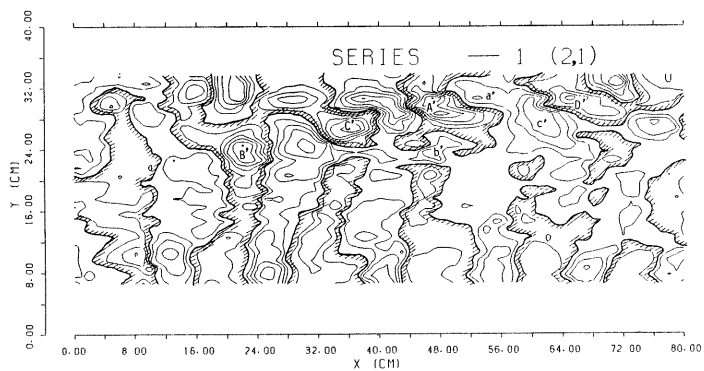
Fig. 8 は一定時間 Δt 内の河床高の変化量の空間分布を示したものであり、(a) 図は Fig. 6 の (b) 図の河床高の空間分布と (a) 図のそれとの差を求めてその等高線を描いたもの、同じく Fig. 8 (b) は Fig. 6 の (g) 図と (f) 図より求めたもの、Fig. 8 (c) は $t=81.4 \text{ min}$ の時点の河床高と Fig. 6 の (j) 図より求めたものである。これらの図において、各等高線間の高低差は 2.5 mm であり、斜線で縁取りされた範囲は Δt の間に洗掘された部分であり、他は堆積部であることを示している。また、(a) および (b) 図における Δt は約 140 秒であり、(c) 図においてはその時点での河床の変動量が小さいことを考慮して、 Δt を倍の 280 秒程度としている。ここで、(a)、(b) および (c) 図はそれぞれ前項の検討における発達初期の河床の洗掘・堆積状況、発達最盛期のものおよび発達終期のものである。これらの図においては、現象理解を容易にするために顕著な洗掘部には $A', B', C', \dots$ 、堆積部には $a', b', c', \dots$ なる記号を付けたが、これらは Fig. 6 の各図の対応する時刻における添字を除いた形の洗掘部の $A, B, C, \dots$ および堆積部の $a, b, c, \dots$ と対応している。

(1) 発達初期の河床の洗掘・堆積状況

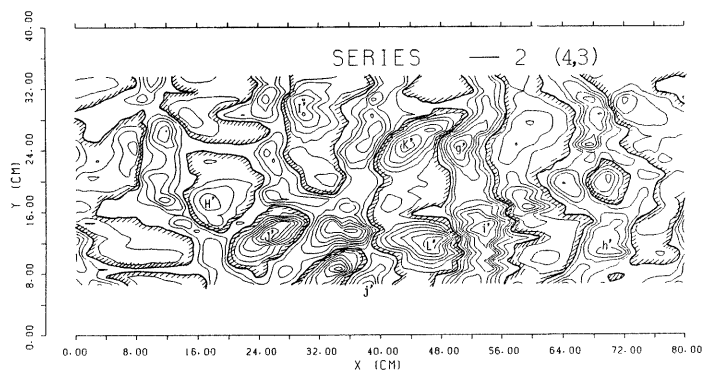
Fig. 8 (a) より河床波の発達の初期の段階では、河床の洗掘および堆積は場所的に一様に生ずるのではなく、河床の一部で局所的に発達してゆくことがわかる。本実験においては、計測区間の左岸側に集中して河床の洗掘・堆積が大きくなっている部分が存在する。これは実験方法の不備によって生じたのではなく、斜めらせん流による洗掘・堆積がいったん生じると、その影響が下流側に及んでそこでも斜めらせん流が発生しやすくなるためであると考えられる。実際、対応する時刻の河床形状の写真撮影結果（計測区間を含んで流下方向に 140 cm の河床形状が捉えられている）を調べてみると、計測区間の上下流側では左右岸で河床波の発達の差はほとんど認められず、上記の左岸側で河床の洗掘・堆積がよく進行しているという状況はこの場合にたまたま生じた現象であると言える。

また、図においては、高い堆積部の上流側にはそれに対応する深い洗掘部が存在するが、深い洗掘部の上流側で高い堆積部は必ずしも発生していない。このことから、波高の増大、すなわち、河床波の発達は斜めらせん流による洗掘によってもたらされていると言える。

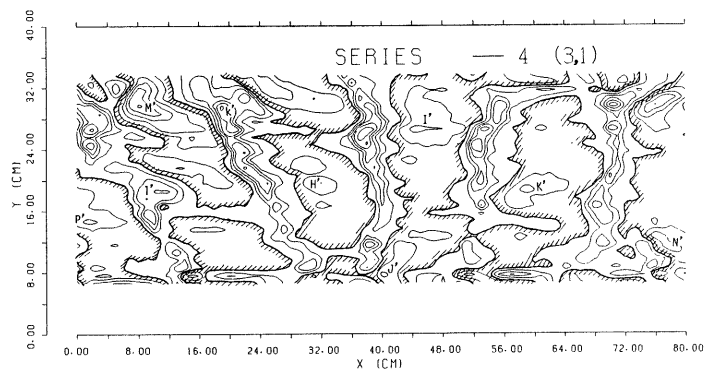
次に、Fig. 8 (a) を Fig. 6 (a) に重ね合わせてみると、約 140 秒間に Fig. 6 (a) における堆積部が洗掘され、逆に洗掘部に砂粒が堆積したことがわかる。また、Fig. 8 (a) を Fig. 6 (b) に重ね合わせてみると、両図の洗掘部どうし、堆積部どうしがほぼ一致することがわかる。さらに、Fig. 6 の (a) 図と (b) 図とを重ね合わせてみると、河床形状は斜めらせん流によって洗掘されるなどの変形をしながらも、平均的には 140 秒の間に半波長程度下流側へ前進していることがわかる。



(a) SERIES 1 - Case 2,1



(b) SERIES 2 - Case 4,3



(c) SERIES 4 - Case 3,1

Fig. 8 Spatial distribution of local erosion and accretion of the bed.

(2) 発達最盛期の河床の洗掘・堆積状況

Fig. 8 (b) より、洗掘および堆積の形状は三次元的であり、河床面のあちこちで洗掘と堆積が多量に発生していることがわかる。図で、J', K', および L' の部分では特に洗掘が激しく、それらの下流側ではいずれも堆積量が大きくなっていることがわかる。

次に、Fig. 8 (b) を Fig. 6 (f) に重ね合わせてみると、洗掘の大きな部分は Fig. 6 (f) の深掘れの位置よりも少し下流側の河床波の背面であることがわかる。特に、斜めらせん流による洗掘が著しい Fig. 6 (f) の J₀ および K₀ の部分について重ね合わせた図から詳しく考察するとつぎのようである。斜めらせん流による洗掘部の下流側の斜面が時間の経過とともにだんだんと洗掘されてゆき、深掘れの範囲も下流側へと広がると同時に洗掘深も増大し、一方、深掘れの上流側の斜面では流送された砂粒により堆積が進み、このようにして斜めらせん流による深掘れそのものも発達しながら下流側へと移動してゆくことになる。また、Fig. 6 の (f) 図と (g) 図とを重ね合わせてみると、上記のような洗掘と堆積の繰り返しによって、河床波は変形しながらも平均的には140秒間に1/3波長程度下流側へと前進していることがわかる。

(3) 発達終期の河床の洗掘・堆積状況

発達終期においては、Fig. 8 (c) に示すように、先の段階の場合に比べて Δt を約280秒と大きくしたにもかかわらず、この間の河床の洗掘および堆積量はかなり小さくなっていることがわかる。また、洗掘部は広い範囲にわたっているが、その深さは小さく、逆に堆積部の範囲は狭いがその高さは大きくなっていることがわかる。

次に、Fig. 6 (j) を約280秒後の河床波の空間分布図 (SERIES 4 の Case 3) に重ね合わせることによって、河床波はほとんど変形せずに280秒間に1/10波長程度だけ下流側へと前進していることがわかった。このような場合にはどのような洗掘と堆積が生ずるかを Fig. 8 (c) を Fig. 6 (j) に重ね合わせてみることによって検討すると、河床の洗掘は河床波の背面の広い範囲で発生しており、堆積は河床波の前面の狭い範囲で発生していることがわかる。さらに詳細にみると、Fig. 8 (c) の洗掘部の等高線のうち、洗掘量の大きな部分は洗掘部の範囲の上流側に偏って存在することが認められる。このことから、砂漣の場合には河床波の背面の洗掘は上流側ほど大きくなっていることがわかる。

上記の現象はつぎのように理解できる。Fig. 9 は砂漣の流下の過程を模式的に示したものである。実線で示した河床波が Δt 時間後に破線で示した位置まで、変形せずに流下したとすると、砂漣が、図のように背面の勾配が流下方向に徐々に変化してゆく形状をもつ場合には、斜線で示される洗掘部分は上流側ほど洗掘量が大きくなる。

(4) 河床高の変化量

以上に検討したように、河床の洗掘・堆積は河床波の発達段階に応じて変化している。これらを定量的に評価するために、各時刻における河床高の平均的な変化量 Δz を次式によって計算した。



Fig. 9 Process of movement of ripples.

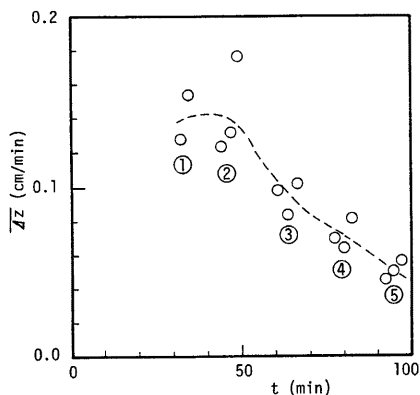


Fig. 10 Time variation of average volume of bed deformation.

$$\bar{\Delta z} = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |z_2(i, j) - z_1(i, j)|}{M \cdot N \cdot \Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 i および j は $80 \text{ cm} \times 27 \text{ cm}$ の範囲の格子点の番号であり、 i は x 方向（流下方向）に j は y 方向にとられている。 M および N はそれぞれ x 方向および y 方向の格子点の数であり、 $M=81$ 、 $N=28$ である。また、ある時点の (i, j) 点の河床高を $z_1(i, j)$ とし、それから Δt 時間後の河床高を $z_2(i, j)$ とした。

Fig. 10 は河床高の変化量 Δz の経時変化を示したものである。図で、SERIES 1 の 2 つの値が発達初期の $\bar{\Delta z}$ を示すが、これは次の SERIES 2 の発達最盛時の $\bar{\Delta z}$ とほぼ等しくなっている。そして、SERIES 3 以後の発達後期から発達終期にかけては河床高の変化量は時間とともに小さくなっている。また、図で $t=50 \text{ min}$ の $\bar{\Delta z}$ の値が極端に大きくなっているが、これは、この時点では先述の Fig. 8 (b) に示したように斜めらせん流による洗掘と堆積が非常に激しかったためである。

このように、斜めらせん流による河床の洗掘が激しいときに河床高の変化量も大きくなっている。河床高の変化は河床の砂粒の移動によって生じているから、Fig. 8 および Fig. 10 より河床砂の移動量あるいは平均的な流砂量特性もある程度推測できることになる。すなわち、砂澱においては河床波の発達初期から発達最盛期にかけては流砂量が大きく、発達後期以後は流砂量はだんだんと小さくなってゆくことがわかる。そして、流砂量に対して斜めらせん流は重要な役割を果たしているのである。

3.4 河床波の波高の増大過程

以上に検討したように、個々の河床波の波高の増大は斜めらせん流による洗掘と堆積の作用によってもたらされることが明らかとなった。ここではこのような斜めらせん流による個々の河床波の波高の増大と河床波全体の平均的な波高の増大過程との関連性について考察を加えることとする。

まず、斜めらせん流そのものの発達の状況を、それが典型的に現われたものを例として検討する。

Fig. 6 (a) においては、B および C₀ の洗掘部で斜めらせん流が発生し、発達しつつあることがうかがえる。同 (b) 図においてはそれらが急激に洗掘部の深さを増大させ、このときに斜めらせん流が最も強くなっていることがわかる。一方、(c) 図においては B₂ および C₁ の洗掘深は共に先のものより浅くなっており、また同時刻の河床形状の写真ではそれらの場所で斜めらせん流は認められなくなっている。このようにして形成された深掘れのうち C₁ はその後、(d) 図の C₂ から (g) 図の C₃ へと移ってゆくが、その形状は変化しつつも洗掘部は維持されている。しかし、河床形状の写真から一連の時間経過の中でこれらの洗掘部においては斜めらせん流の存在は認められない。

次に、Fig. 6 (d) の F の洗掘部に注目して考察を加えると、そこでは斜めらせん流が発生し、発達しつつある様子がうかがえる。この斜めらせん流は、(e) 図の F₁ へと洗掘を発達させ、さらに (f) 図ではそれを F₂ へと発達させて、このときに斜めらせん流の強さは最大になっていると考えられる。河床形状の写真からこの斜めらせん流はその直後に消滅してしまっていることがわかったが、(g) 図においては先の F₂ の洗掘部そのものが変形あるいは消滅している。これは、その上流側の J の洗掘部を形成した斜めらせん流によって流送された砂粒が F₂ の洗掘部を埋戻してしまったためである。

このように斜めらせん流は河床波の発達に要する全体の時間に比較するとごく短時間のうちに河床の洗掘や堆積を発達させることにより個々の河床波の波高を増大させる。そして、洗掘の規模が限界にまで達すると斜めらせん流そのものも消滅する。本実験においては、このような斜めらせん流の発生から消滅に至る時間は 4～5 分程度であることがわかった。

以上から、河床波の発達過程はつぎのように説明できる。初め二次元的で規模も小さな河床波が形成され、時間の経過に伴って上記のような 4～5 分の寿命時間を有する斜めらせん流が河床のあちこちで発生し、それが局所的に個々の河床波の波高を増大させる。このように規模が大きくなった河床波のうちあるものはそのまま維持され、あるものは他の河床波あるいは斜めらせん流の影響により変形、消滅させられる。このようにして、斜めらせん流により波高の大きな河床波がつぎつぎと形成されることによって河床波の平均波高は増大してゆく。そして、波高の大きな河床波が河床面全体を覆うようになったときに河床波は平衡状態

に達する。

以上の河床波の発達過程において、斜めらせん流による深掘れが個々のものについてみると河床波の発達過程の前半においてすでに最大の深さにまで達していること、および個々の河床波の波高の増大には斜めらせん流が必ず関与しているという事実は極めて重要である。というのは、個々の洗掘深や堆積の高さには一定の限界があり、この値はそこで発生する斜めらせん流の強さやスケールによって規定されると考えられるからである。このように考えると、砂漣の波高は斜めらせん流の強さとスケールによって決定されると言えよう。したがって、与えられた水理条件に対して斜めらせん流の強さとスケールが決定されるならば、砂漣の波高が予測できることになる。

4. 結 語

複数の超音波式河床計を用いて河床波の発達に伴う河床形状の変化過程を三次元的に計測した。計測結果については、計算機を用いたデータ処理システムによって数値化および図化したことが、このような方法によって得られた各時刻の河床高の等高線図、河床形状の俯瞰図、一定時間内の河床の洗掘・堆積の分布図は河床計測と同時に行われた河床形状の写真撮影結果も含めて相互に比較され、またそれらの時間的な変化も検討された。その結果、個々の河床波の発達の過程が三次元的に捉えられ、このような局所的な現象の総合的な結果として砂漣の平均波高が増大してゆくという過程が明らかにされた。

本研究によって砂漣の波高はそこに発生する斜めらせん流の強さとスケールによって決定されることが明らかとなったが、さらに、与えられた水理条件に対して発生する斜めらせん流の強さとスケールが決定できるようにすれば、砂漣の波高の予測が可能となる。

本研究は、河床波の発達過程を三次元的に把握するという目標に対してはまだほんの一步を踏み出したばかりであり、取り扱った河床形態も砂漣に限られている。今後、砂堆についても、さらに各種の水理条件のもとでも実験を行い、砂漣と砂堆の波高の予測、さらには流れの抵抗の問題の解明へと発展させたいと考えている。

本研究を遂行するにあたり、有益な助言をいただいた京都大学防災研究所、今本博健教授に感謝いたします。なお、実験および資料整理に御協力をいただいた当時摂南大学学生、大森英雄氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 芦田和男・田中祐一郎：移動床開水路の抵抗則に関する研究(1), 京都大学防災研究所年報, 第14号 B, 1971, pp. 299~310.
- 2) 吉川秀夫・石川忠晴：砂漣・砂堆上の流れの抵抗について, 土木学会論文報告集, 第281号, 1979, pp. 55~63.
- 3) 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1報), 京都大学防災研究所年報, 第8号, 1965, pp. 271~280.
- 4) 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 B, 1967, pp. 121~132.
- 5) 芦田和男・奈良井修二：河床形態の変動特性に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第12号 B, 1969, pp. 449~462.
- 6) 芦田和男・木村昌弘：SAND WAVES の成長過程に関する研究, 第28回土木学会年構 II, 1973, pp. 275~276.
- 7) 中川博次・辻本哲郎：河床波の発達性状に関する実験的考察, 京都大学防災研究所年報, 第19号 B, 1976, pp. 289~309.
- 8) Kennedy, J.F.: The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, Jour. Fluid Mech., Vol. 16, 1963, pp. 521~544.

- 9) Hayashi, T.: Formation of dunes and antidunes in open channels, Proc. ASCE, HY 2, 1970, pp. 357~366.
- 10) Yalin, M. S.: Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press, 1972, pp. 204~261.
- 11) 上野鉄男・宇民 正：砂漣と砂堆の発達過程に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第318号，1982，pp. 75~84.
- 12) 中川博次・辻本哲郎：砂面の波数スペクトルの時間的変化からみた河床波の形成機構，第26回水理講演会論文集，1982，pp. 1~8.
- 13) 中川博次・辻本哲郎・赤尾恒博：個々の河床波の発生・消滅事象に着目した河床波の発達過程，第26回水理講演会論文集，1982，pp. 9~15.
- 14) 上野鉄男：砂れんと砂堆の発生領域について，第25回水理講演会論文集，1981，pp. 93~98.
- 15) 宇民 正・上野鉄男：河床波上の流れの三次元構造，京都大学防災研究所年報，第24号 B, 1981, pp. 297~313.