

河床波の分類と形成過程に関する実験的研究

NISHIYA, Takanobu / MAKINO, Rippei / 牧野, 立平 / 西谷,
隆亘

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

22

(開始ページ / Start Page)

139

(終了ページ / End Page)

156

(発行年 / Year)

1986-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004038>

河床波の分類と形成過程に関する実験的研究

The Classification of Ripples Formed in a Laboratory Flume

西谷隆亘*・牧野立平*

Takanobu NISHIYA* and Rippei MAKINO*

Summary

Though it has been conceived that alternating bars in the alluvial channel appear during high water, the detailed process of their geneses is not yet clear. On the other hand, ripples and dunes would be reckoned as irregular, but by the attentive observation they might be comprehended to have the regularity.

In experiments of the relatively shallow depth (ratio of the depth to the breadth $< 1/20$) with a laboratory flume, some sand waves (sand ridges, skewed-lattice ripples, linguoid ripples, parallel ripples and alternating bars) are observed. The results are summarized as follows:

- I. The formation of alternating bars has a series of stages for developing.
 - II. Three-dimensional ripples in early stage change to two-dimensional ripples.
 - III. Alternating bars always coexist with ripples and dunes.
- These phenomena might be called the "Engels-Kinoshita effect".

Résumé

C'est bien connu que la crue rapporte des bancs obliques sur le lit dans un canal, mais le processus de leur formation n'est pas clair. D'ailleurs, on considère rides du fond comme irréguliers.

Par des expériences dans le laboratoire de Hôsei Université, les auteurs ont obtenu des configurations du lit alluvial suivantes: arêtes de sable, rides du fond aux carreaux obliques, rides du fond imbriquées, rides du fond parallèles et bancs obliques. En conséquence les auteurs atteignent les conclusions ci-dessous.

- I. La formation des bancs obliques se dirige, correspondant à la condition hydraulique, avec un quelque procédé.
- II. Des rides du fond à trois-dimensions évoluent au premier stade en celles à deux-dimensions.
- III. Bancs obliques coexistent toujours avec rides du fond diverses.

Les auteurs proposent que les phénomènes susdits s'appellent l' "Effet d'Engel-Kinoshita".

* 土木工学科

梗 概

河床の砂礫堆は洪水時に形成されることはわかっているが、砂礫個々の移動から砂礫堆を形成するに至る過程は詳らかでない。砂礫堆以外の砂漣や砂堆は定義と形状を明確にする必要がある。

本文は水深の薄い流れにおいて開始時の平坦な河床から砂礫堆形成までの経過を実験により観察した結果の報告である。河床形態としては、縦条、斜め格子縞、ウロコ状砂漣、砂礫堆、二次元的な砂漣などが得られた。そして、次のような事柄が観察された。

- I. 砂礫堆はある順序で形成される。
- II. 二次元的な形状をもつ砂漣は三次元的な河床波の形成初期のものが変形して形成される。
- III. 種々の河床形態は必然的に共存する。

これらの現象は「あぶり出し効果」(Engels-Kinoshita effect) により説明される。

§1. 緒 論

河岸に見られる寄洲は注意深く見ると、左右交互に規則正しく配置されている。直線的な河道であってもこのような砂礫の洲を見ることができ、低水時の水流も左右岸交互に蛇行して流れている¹⁸⁾。これらの洲は高水時の、水流の幅に比べて水深の小さい流れの水面下で、流れと河床材料の相互作用により形成されることがわが国では1953年頃から木下により見い出され、『砂礫堆』と名づけられた¹⁹⁾。この『砂礫堆』は河床変動を理解する上で重要であることが指摘された。実際の河川での巨視的な河床変動では、この砂礫堆が大きな役割を果し、河道内の洪水流の運動が、河床形態のこの巨視的な変動によって促えられるという前提に立って行われた緩い蛇曲河道の模型実験において、低水路や水衝部の位置など現地航空写真と比較して河道の状況の再現に関して良好な結果が得られている^{12), 13)}。洪水の河道内での流向や水衝部、低水流路の状態などを説明するにはこの種の現象が鍵であると思われる。

移動床において、限界掃流力を超えた流れでは、上述の砂礫堆 (Alternating Bars) だけでなく、水理条件に応じて種々の河床形態が存在する。すなわち、掃流力の大きさと流れの規模により砂漣 (Ripples), 砂堆 (Dunes) などが形成されることは、よく知られている。掃流力の大きさは、水路の規模が同じであれば河床の勾配と水深の組み合わせにより決まるが、流れの規模は水路の規模、勾配、流量や水深と水路幅の比などの水理量と河床材料の大きさとの相対的な関係にある。流れの規模はまた、これら河床形態の大きさをも支配する。流れの規模を小さくして行くと、砂礫堆の規模も小さなものになって行く。しかし、流れの規模と河床材料の大きさとの相対的な関係で決まる大きさがあり、砂礫堆の規模は限りなく小さなものになる訳ではない。ある水理量 (流量, 水深, 流速, 水面勾配, 水路幅, 河床勾配, 砂粒径, 砂の比重) に対応する最小

単位の河床形態が見られる筈である。砂礫堆の場合はこの最小単位の河床形態を基本パターンとし、これが幾つか組み合わさって次第に水理量に見合う大きさのものに成長して行くのが、実験で観察される。他の河床形態ではどのような基本パターンが存在し、それがどんな河床形態に発展し、それらと砂礫堆とはどんな関わりがあるかを明らかにすることにより河床変動が理解できると考えられる。しかし、砂漣と砂堆については形状的な分類が Allen (1968)¹⁰⁾ により集大成されてはいるが、実際の形態と水理量との関係、砂礫の移動やその形態の形成過程は未だ十分明らかとは言えない。

本研究は河床形態の形成に至る過程を観察し、河床と流れの相互作用を視覚的に捉え（すなわち、河床形態を分類し）、それを通じて洪水流—流れ—の構造を解明しようとするものである。

§ 2. 河床形態の分類

Talweg (湊筋) の変遷の研究から移動床の室内実験を行なった Engels (1905)¹⁾ は木下(1961)⁶⁾ の言う砂礫堆を見出した (Fig. 2.1)。Engels の論文に見られる河床形態を表わす言葉は Rippelmark, blattartig Sandzunge, Sandzunge, Sandbank, Geschiebebank, Kiesbank, Schwell などである。砂漣の研究を行った Blasius (1910)³⁾ は Bank (堆積) と Kolk (深掘れ) の交互配置で Engelsche Schrägbank を説明している。そして, Staffelriffel (階段状砂漣) が移行して Parallelriffel (平行砂漣) となることを指摘した。Shields (1936)⁴⁾ は「限界掃流力」の概念をはっきりさせた有名な論文の図の中に、詳しい説明なしに, Riffeln, Schuppe (Kurze Banke), Schrägbank (lange Bänke), Das allmöhliche Kürzer-und Tieferwerden der Bettausbildung Überspringen der Köpfs, Abschleifen などの河床形態を表す言葉を記入している¹⁸⁾。これらから判断すると、当時のヨーロッパでは河床形態を三次元的に理解していたことが伺える。それに対して、米国における室内実験による研究はヨーロッパの研究情報にもかかわらず、Gilbert (1914)⁵⁾ でさえ単純に dunes, smooth, antidunes, transition の4種の河床形態を挙げているだけで、砂礫堆への関心は薄い。Guy ら (1966) の研究⁸⁾ では ripples, ripples on dunes, plane bed, transition, standing waves, antidunes など河床形態の種類は多くはなったが、依然として砂礫堆の存在には気付いていない。しかし、河床形態の用語を定義した ASCE の Committee on Sedimentation の報告 (1966)⁹⁾ では、Flat bed や Chutes and Pools などとともに三次元的な形態を定義した語としては Bars の項に Alternating bars と Transverse bars が定義されている。わ

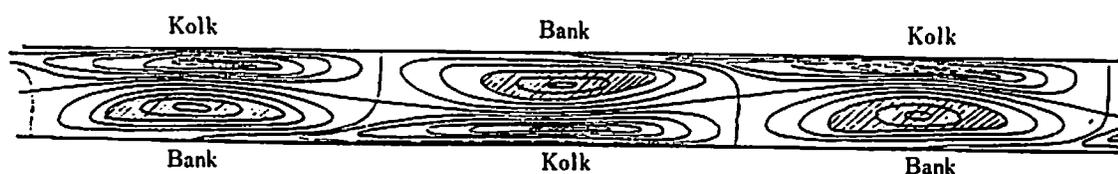


Fig. 2.1 Alternating bars of Engels²⁾
Engels の砂礫堆

Table 2.1 Classification of sand waves (JSCE)¹⁴⁾
河床形態の分類 (土木学会)

名 称	形状・流れのパターン		移動方向	備 考	
	縦断図	平面図			
小規模河床形態	砂漣			下流	波長・波高が砂粒径と関係する
	砂堆			下流	波長・波高が水深と関係する
	遷移河床				砂漣・砂堆・平坦河床が混在する
	平坦河床				
	反砂堆			上流停止 下流	水面波と強い相互干渉作用をもつ
中規模河床形態	砂州				波長が水路幅と関係する。
	交互砂州			下流	
	うろこ状砂州			下流	

が国では木下により砂礫堆の研究が始められ、砂礫堆の形成、水流の蛇行性と並列ラセン流の存在が指摘された⁶⁾。そこでは単列砂礫堆、複列砂礫堆、準砂礫堆、砂堆列、ウロコ状 dune、ナナメ交錯模様の dune、タレスジ、砂漣、線状砂漣、带状砂漣など多種多様な河床形態の詳細な記述があるが、3種の砂漣の説明はない。

土木学会水理委員会(1973)¹⁴⁾は交互砂州として砂礫堆を組入れた河床形態の分類を定性的に記述している (Table 2.1)。そこでは、小規模河床形態と中規模河床形態に大別して示され、各規模河床形態は各々、さらに細分類されている。砂漣 (Ripples), 砂堆 (Dunes), 反砂堆 (Antidunes), 砂州 (Bars), 平坦河床 (Flat Bed), 遷移河床 (Transition) の6種類が河床形態として挙げられている。これらの形態は形状 (平面形状, 縦断形状, 横断形状), 大きさと水理量 (砂粒の物理的性質, 流れのレイノルズ数やフルード数) とにより分類されているが、以下に見るように砂礫堆を除く各形状の定義は、総括的で分類としては不十分である。最小の形態である砂漣の項では、『砂漣の平面形状には、三次元的な不規則なものから頂と谷が流れと直角方向に一直線に並んだ比較的規則的なものまで各種ある。また、縦断形状には、上流側斜面勾配が緩やかで下流側斜面勾配がほぼ砂の水中安息角をなす三角形状から比較的対称的な正弦波形状まで各種ある。』と述べられているが、これは分類としては未分明で大まかに過ぎる。横断形状については何も述

べていないし、形状が各種あるのならそれらを分類すべきである。砂堆と反砂堆の形状については、両者は同様な二次元の平面形状であり、縦断形状は砂漣とはほぼ同様である事が記述されているが、砂堆と反砂堆は水面波形と河床波の位相の相違により区別されている。しかし、砂漣と砂堆の区別は後者は前者よりも規模が大きく、前者に比べて一般に不規則であるとされているが、Table 2.1を見る限りでは規則性は逆のようである。砂州は、最も規模の大きい河床形態として定義されているが、その性格もまた不明瞭である。固定砂州(Point Bars)や交互砂州(Alternating Bars)の他に、平面形状のはっきりしない二次元的な形状のものもこの範疇に含まれている。

規模の区分けでは、砂州を中規模河床形態とし、砂州に較べて砂漣、砂堆、反砂堆の規模は小さいので、このグループを小規模河床形態と区分されているが、『小規模河床形態は主として抵抗や流砂量に、中規模河床形態は主として流路変動に支配的な影響を与える。しかし、実験水路などで水路幅と水深と同程度の場合には、小規模河床形態と中規模河床形態との規模が接近して、両者を明確に区別できなくなり、また中規模河床形態も粗度要素として重要な影響をもつようになる。』と述べているので、単なる形状規模のみによるものではないようではあるが、判然としない。基本的には、相対的な規模の大小で小・中規模河床形態の区別をしているが、相対的な基準では境目を判定することは困難で、『規模が接近して、両者を明確に区別できなく…』なのである。この場合は規模の大小よりもむしろ、各河床形態の定義を明確にし、可能ならば水理量により区分すべきであろう。

しかも、分類では小・中規模河床形態には類似の形態は示されていないにも拘わらず、規模が接近すると区別できないという。この分類の中で小・中規模の境界で区別できなくなる形態として考えられるのは、小規模河床形態の砂漣の中の三次元的な形状と中規模河床形態のうろこ状砂州との区別、または小規模河床形態の砂堆と中規模河床形態の砂州の区別である。前者であるとする、小規模河床形態の砂漣・砂堆の性格もまた、上述のように曖昧である。後者としたら、中規模河床形態である砂州の定義もまた不明瞭である。砂州とは砂礫が水の営力により堆積してできた堆積面である。彎曲部の凸岸に見られる固定砂州は流路の形態によって生ずる洲であり、水の流れの本来の構造によってできるものではないので、これと交互砂州(うろこ状砂州も含めて)との区別は明らかである。Table 2.2にある二次元的な形状の砂洲については存在自体が疑問である。低水時に現れる洲に水路横断方向一杯に二次元的な広がりをもつ堆積面が洲の規模で存在するであろうか。規模の大きな砂堆あるいは反砂堆が交互砂州の堆積面上に載っているのはよく観察されるところである。この砂堆あるいは反砂堆の大規模のものを砂州と言うのであろうか。先のASCEの報告(1966)のTransverse Barsに対応するものであろうか。

河床形態の共存しうる関係として、『砂堆の上流側斜面に砂漣を伴う場合』と『砂州の上流側斜面に砂堆や砂漣を伴う場合』が例として挙げられているが、前者の場合は砂漣と砂堆の定義が曖昧である限り、状況は不明である。また、遷移河床と遷移領域の項で砂漣と砂堆および平坦河床の共存に触れているが、実際には、以下で見ると有らゆる場合に共存の可能性があり、このような共存は全く意味がない。共存は本質的なものであり、遷移河床は形態として挙げるには適当ではない。

深見(1978, 1979)^{17), 19)}は「中規模および小規模河床形態は一般に共存している」という観点か

ら実験を行っている。この場合にも各河床形態そのものを明らかにする必要がある。後に見るように、実際には規模の大小が共存を決めるのではなく、規模と形状には連続性があり、明解に区別できないものもあるのである。規模の大小による分類は適切ではないことがわかる。

これまでの河床波の分類は、種類や定義だけでなく平面形状の分析が欠けていて（特に二次元的なものについて）、河床形態の形成の水理条件や各形態相互の関連などの点から見て、十分なものではない。河床形態の分類を行うには種類を分別するのが先決で、その後形態的な分類と物理的な形成要因の関連を追求することが必要である。

§3. 実験概要

実験は幅1m、長さ40mの直線長方形断面水路の中央部20mにわたり、厚さ約7cmにほぼ均一な砂（50%粒径0.072cm）を敷き坦し、各実験ごとに流量と勾配を一定として通水し、水面と河床の状況を観察した。河床形態が出現した時点で通水を停止する。

通水中は、上方より河床の様子を観察するとともに砂粒の動きを水路側面のガラス部分より観察する。水面からの視察では、砂粒が動き始めると即ぐに単列砂礫堆ができるように見えるものでも、砂粒の動きに側方より光線を当て陰影を付け観察すると、斜め格子縞やウロコ状砂漣の形を経て、単列砂礫堆が形成されるのが見られる。水流の蛇行性は着色液の混入やアルミ粉末あるいはパンチ屑の浮流により観察する。

水面勾配は連通管により測定する（2.5mおきに7ヶ所）。水深は適当な断面で横断方向に3点

Table 3.1 Hydraulic conditions of bed forms
実験の水理条件

Bed configuration 河床形態	Discharge 流量 Q (l/s)	Surface slope 水面勾配 I	Mean depth 平均水深 h_m (cm)
Braided flow 網状流	0.80 ~ 6.0	1/50 ~ 1/222	0.52 ~ 1.50
Sand ridges 縦条	3.8 ~ 17.8	1/225 ~ 1/659	0.96 ~ 4.42
Shewed-lattice ripples 斜め格子縞	2.9 ~ 8.1	1/175 ~ 1/269	1.10 ~ 2.00
Linguoid ripples ウロコ状砂漣	3.9 ~ 8.8	1/158 ~ 1/303	1.17 ~ 2.55
Alternating bars (2) 複列砂礫堆	1.1 ~ 13.9	1/57 ~ 1/381	0.77 ~ 3.45
Alternating bars (1) 単列砂礫堆	3.0 ~ 20.5	1/51 ~ 1/333	0.89 ~ 4.32
Ripples I 砂漣 I	0.9 ~ 6.2	1/137 ~ 1/263	0.70 ~ 2.62
Ripples II 砂漣 II	7.0 ~ 24.6	1/175 ~ 1/692	2.62 ~ 5.20

測定する。

今回の河床形態と水理条件の範囲は Table 3.1 の通りである。水路幅と水深が同程度の流れや遡上する反砂堆が発生する激しい流れの実験は行われていない。

§ 4. 河床形態の種類と特徴

水流の幅に比べて水深の極度に薄い流れでは、水流が分裂していくつかの水脈ができ乱流する、いわゆる『網状流』(Braided flow)となるが、その場合にも流路は複列あるいはうろこ状砂礫堆の帯を辿る。各水脈が限界掃流力を越えた流れであれば、流れに応じた河床波が発生する。こ

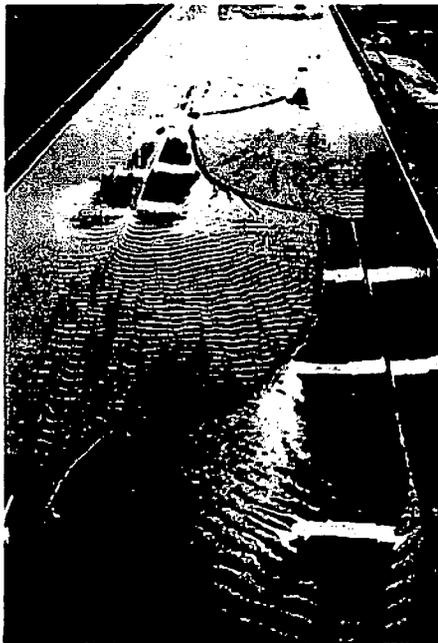


Photo. 4.1 Alternating bars (1) and ripples II ($I=1/133$, $Q=6.1l/s$, $h_m=1.78cm$) 単列砂礫堆と砂漣 II

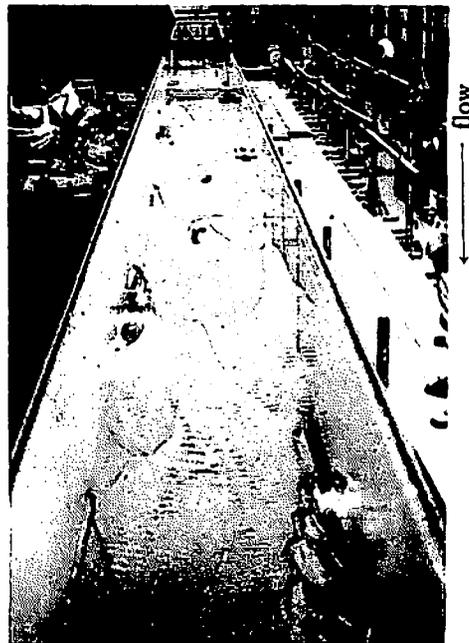


Photo. 4.2 Alternating bars (2) ($I=1/89$, $Q=5.0l/s$, $h_m=1.58cm$) 複列砂礫堆

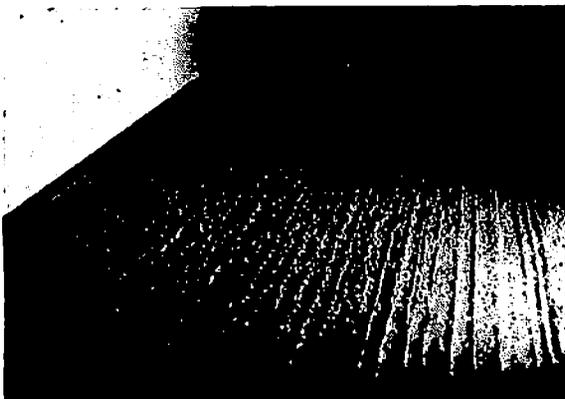


Photo. 4.3 Sand ridges ($I=1/435$, $Q=4.3l/s$, $h_m=1.53cm$) 縦条

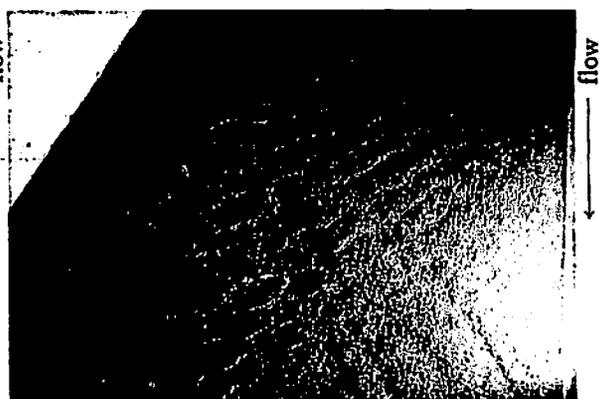


Photo. 4.4 Linguoid ripples ($I=1/284$, $Q=8.4l/s$, $h_m=2.21cm$) ウロコ状砂漣



Photo. 4.5 Ripples I
(no data) 砂漣 I

のような網状流は高水時には水面下に没して河床の一部になるという意味では、河床形態の1つではあるが、水面下の河床で形成される砂漣や砂堆、砂礫堆などの河床波とは少し異なるものである。しかし、実験で得られた河床形態として、網状流についてもここで述べておく。

なお、水深の極度に薄い限界掃流力以下の流れであって平坦河床の儘の場合でも、長時間通水していると深掘れがところどころに生ずる現象が見られる。これは粒径が極端に大きい砂粒の周りの洗掘によるもので河床形態としては発達しない。

次に当該実験で観察された個々の河床形態の特徴の要約を記す (Photo. 4.1~11)。縦条の他は三次

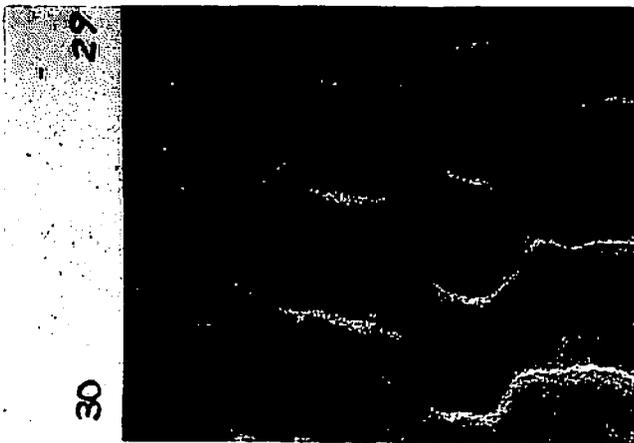


Photo. 4.6 Ripples I
($I=1/139$, $Q=18.1l/s$, $h_m=2.87cm$) 砂漣 I

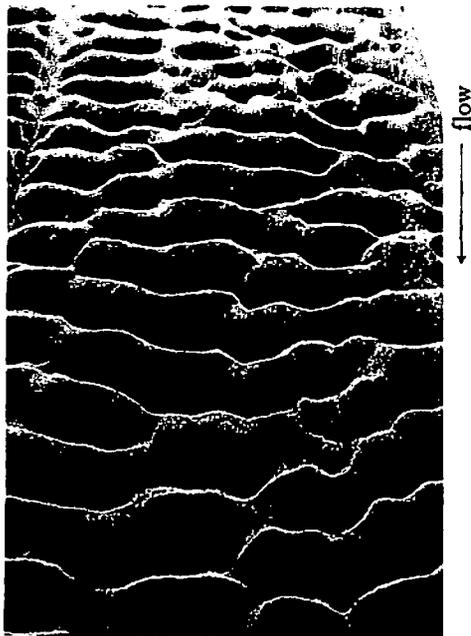


Photo. 4.7 Ripples II
($I=1/130$, $Q=19.9l/s$, $h_m=3.44cm$)
砂漣 II

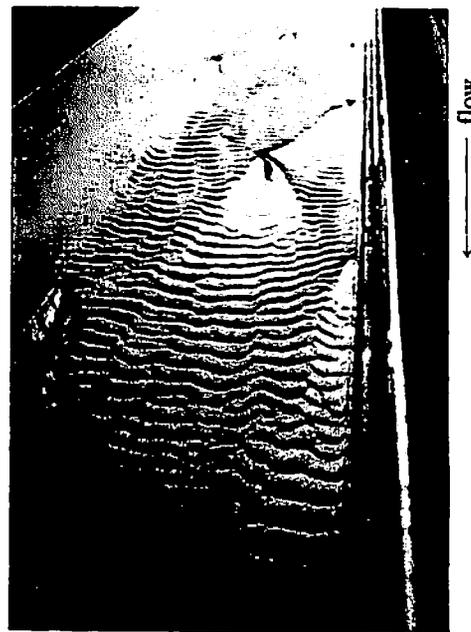
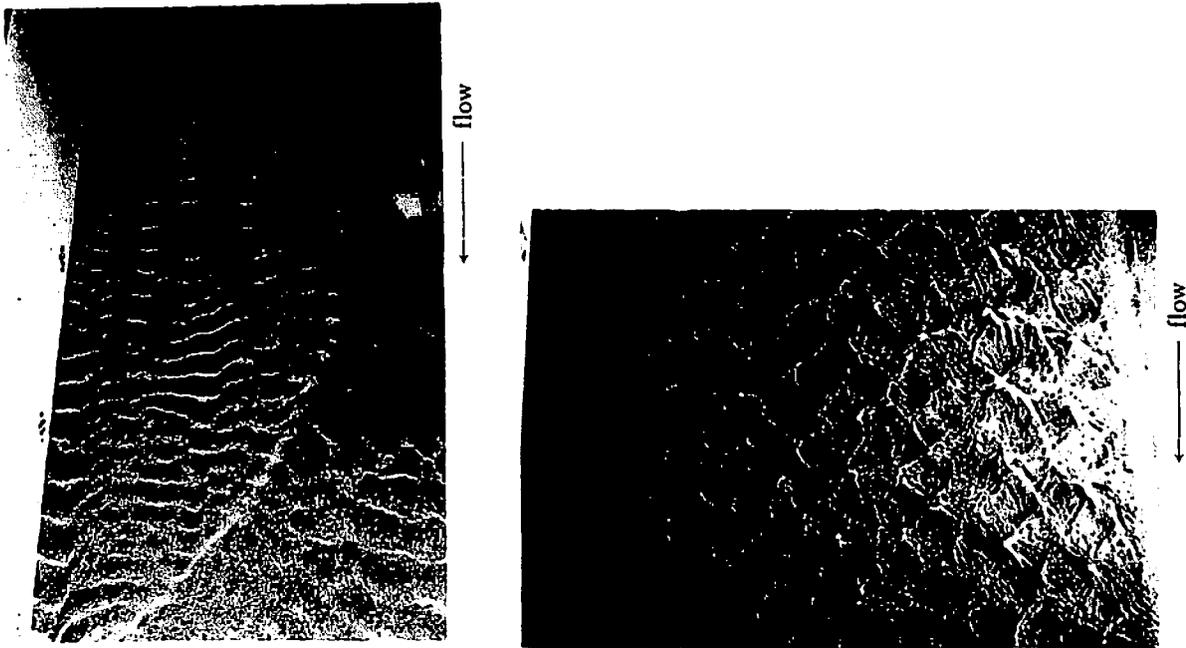


Photo. 4.8 Alternating bars (and 2)
ripples II ($I=1/122$, $Q=11.1l/s$,
 $h_m=2.55cm$) 複列砂礫堆と砂漣 II

元的な形状と二次元的な形状とに大別されるが、いずれも規則的なものである。

網状流 流量を少なくして薄い流れを作ろうとしても余りにも流量が小さい時は、水路全面への通水は困難である。当初は全面通水であっても、複列砂礫堆が形成されるやに見えたとすぐに



(a) (b)
 Photo. 4.9(a) Alternating bars (1) and ripples II 単列砂礫堆と砂漣 II
 (b) Water surface during the same run 通水中の水面
 ($I=1/127$, $Q=9.0l/s$, $h_m=2.39cm$)

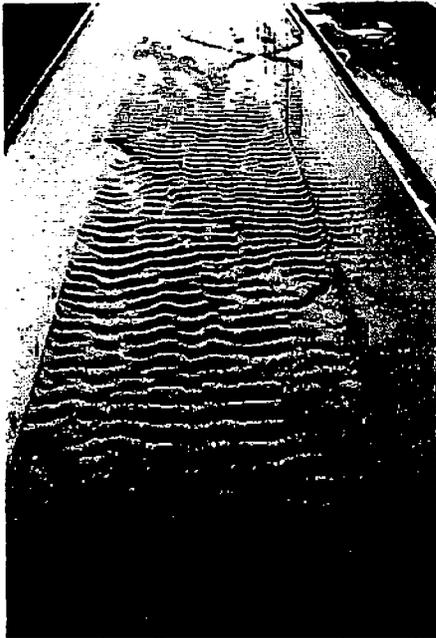


Photo. 4.10 Diagonal lines (1) and ripples II ($I=1/127$, $Q=13.0l/s$, $h_m=2.75cm$) 斜め溝(1)と砂漣 II



Photo. 4.11 Diagonal lines (2) and ripples II ($I=1/277$, $Q=15.1l/s$, $h_m=3.35cm$) 斜め溝(2)と砂漣 II

深掘れ部に水流が集中し、洲が水面上に頭われて、この形態ができる。この時の水脈は蛇行し、砂礫堆の渚が水脈となっている。自然河道内の乱流は洪水時に形成されたウロコ状あるいは複列砂礫堆の洲が低水時に頭われたものや初めから分裂した水脈が含まれる。

縦条 水深の2倍の間隔で水路縦方向に形成される稜線状に盛り上がった細い条。掃流力が非常に弱く砂粒の動きは鈍く形成までに時間を要する。山部の砂粒はほとんど動かず、谷部の砂粒のみ下流方向に動いている。

斜め格子縞 水深の2倍の菱形で砂礫堆の基本パターンと考えられるもの。目で見える段階では低い段差がついていて、上流側のものが下流側のもとに覆い被さって形成されている。砂礫堆の前縁部に下流の開いた格子縞模様として見られることが多い。

ウロコ状砂漣 斜め格子縞の菱形の先端が丸く立体的に厚みを帯びて、多数の小さい砂漣が魚鱗のように形成され、集合している形態。大きな砂礫堆の背にできやすい。不安定なので水路全面に形成させることは難しい。斜め格子縞との大きさの区別はない。

複列砂礫堆 2列以上の単列砂礫堆が一本の水流に形成されたもの。勾配が急になると、条件によっては、安定なものではできにくい。一葉の砂礫堆は複数の斜め格子縞の菱形あるいはウロコ状砂漣で構成されている。

単列砂礫堆 左右岸交互に深掘れを持ち、左右岸の深掘れを結んで形成される前縁が下流側に弓形に張り出した斜めの洲。十分に発達しない場合の洲の前縁は直線的であり、流れの規模が大きい時は左右岸交互の深掘れのみで前縁は見られない。移行区間では隣り合った形態と混在しやすく、前縁近くの瀬の部分には縦条や斜め格子縞あるいは線状跳水を伴った砂漣が載りやすい。水面には二次元的な孤立波に近い転波が部分的に奔る。

後の四種類は三次元的な形態として認められるが、これらの他に斜め条がある。これは縦条や二次元的な砂漣Ⅱと共存する場合は細く段差も小さく、水路を斜めに横断する斜め条となるが、ウロコ状砂漣や二次元的な砂漣Ⅰと共存する場合は太い溝となり大きい菱形を形づくる。

二次元的な河床波としての砂漣には次のような二種が認められた。

砂漣Ⅰ 流れの規模が余り大きくない時、斜め格子縞・ウロコ状砂漣が横方向に崩れた形でできる。水路横方向に波形の二次元的な広がりを見せる。砂礫堆の背の部分に載ることが多い。

砂漣Ⅱ 勾配が急になり、流れが速くなると水面には水路幅一杯に広がる二次元的な低い孤立波に近い転波が一定間隔で奔る。その時、水路横方向に折線であるが全体ではほぼ直線的な二次元的な河床波ができる。水面は河床波と同位相となる。砂礫堆に重なってできるが、流れの規模を大きくすると単独で形成される。下流に移動する。

この両者は峰の形状が少し異なるが、規模や移動状況などは大差ない。流れの規模や掃流力ともに小さい時、発生する二次元的な河床波では、斜め格子縞やウロコ状砂漣の名残りが残り、波形が一見不規則に見える場合があるが、大旨、規則的である。この二次元的な河床波を砂漣Ⅰと

呼ぶことにする。そして、流れが急になって発生する直線的な二次元河床波を砂漣Ⅱと呼ぶことにする。いずれの二次元河床波(砂漣)も三次元河床波と同時・同一場所に共存する。一方、水理委員会の分類(1973)¹⁴⁾では砂堆と反砂堆は水面の位相と河床波の位相の関係でできまっているようであり、Lower Regimeで発生する河床波は砂堆、Upper Regimeのものは反砂堆と定義されている。実験における流れの水深は薄いので砂漣の発生は部分的な射流域で見られることが多い。しかし、Guyら(1966)⁹⁾の定義はLower flow regime «Flow in sand channels which results in bed forms of ripples, ripples on dunes, and dunes». Upper flow regime «Flow in sand channels which results in bed forms of plane bed (with sediment movement), standing waves, and antidunes.»である。それに従うと、当該実験の流れの領域はLower flow regimeである。中規模河床形態の三次元河床波と共存する二次元河床波は、遡上する反砂堆ではない。砂堆・反砂堆と砂洲は当該実験の範囲を超えた大規模な流れで砂礫堆ができなくなる領域において形成されるものと思われる。これらは砂礫堆を消すような水理条件の異なった大規模の流れで生ずる、単列砂礫堆より規模の大きい河床波の範疇に入るものであろう。ここでは以上のように砂漣、砂堆、反砂堆と砂洲を定義するが、それらの区別の基準は実験によりさらに調べられなければならない。

三次元河床波(砂礫堆)は、ある領域では常に二次元の河床波(砂漣)と共存する。形成要因の相異を示すものであろう。

§5. 河床波の形成過程

実験水路における典型的な単列砂礫堆形成の様子は次のようである。:「砂は掃流力により下流方向へと移動を始めると、水面は全面泡立ったように揺れ細かい波立ちが広がる。その時、河床にはほぼ全面にわたって菱形に配置された無数の小さな凹みが見られる。通水開始後、約15分後には最初ほぼ平らに坦してあったはずの河床上に、凹みを結ぶように水路幅一杯に河床中央で交差するような斜めの条が何本もでき始め、その中の幾本かは次第に段差を生じるようになり、他は消えてゆく。時間の経過にともない左右兩岸を結ぶ斜めの条は、左右のうち片方のみが、下流方向に移動して発達したりあるいは消滅したりして30分位経過すると遂には左右岸より交互に砂礫堆が形成されて、流路中央部が下流にふくらむような弓形に発達する。そして砂礫堆は水の流れに比して非常に遅い速度で下流方向に移動して行く。」

河床波の形成過程を実験でみると、所与の水理条件に適合した河床波が行き成り、生成されるのではなく、砂粒が動き始めてから極短時間のうちに或るプロセスを辿って流れの規模と掃流力に見合った形態ができる。すなわち、斜め格子縞やウロコ状砂漣の形を経て、複列砂礫堆や単列砂礫堆が形成される。途中に見られる河床変動の形態は、他の水理量を設定した別の実験により最終の姿として見る事ができる。最終の姿として顕れるまでの時間は極めて短く、定常流の実

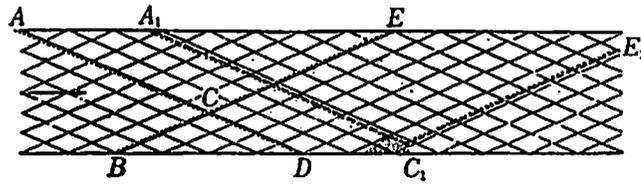


Fig. 5.1 Explanation of generation of sand waves by Engels¹⁾
Engels の河床波発生モデル

験であっても、時間の経過とともに、河床勾配・水面勾配などの水理量は微妙に変化し、他の形態に遷移する。斜め格子縞模様やウロコ状砂漣、複列砂礫堆などの形態はフラクタルなパターンであり、最小のパターンがいくつか統合されて、水理量に応じた規模の形態が顕れると考えられる。このことはすでに、Engels (1905)¹⁾ や木下 (1961, 1976)^{6), 15)} らにより指摘されている (Fig. 5.1)。これを「あぶり出し効果」(Engels-Kinoshita effect) と呼ぶことにする^{H3)}。斜め条も斜め格子縞模様の斜めの線が連らなって形成されるものである。

ところで、三次元河床波である砂礫堆が形成される時の水流は、蛇行している。複列砂礫堆では数条の蛇行している主流線が見られる。一方、二次元的な小規模河床形態である砂漣、特に砂漣Ⅱでは、水流は直進性が強く、ほとんど蛇行していなくて、水路幅一杯に広がる波高の低い孤立した転波が一定間隔で水面上を奔っている。転波列は砂礫堆形成時にも見られるけれども、この時のものは当初は水路幅の転波が間欠的に現れるが、転波の進路の蛇行により主流の蛇行が認められ、やがて砂礫堆の瀬の上に河床の凹凸を反映した幾本かの線状跳水《竜の背骨》となって現れる。しかしながら、砂礫堆は平均水理量で見た限界流速付近の常・射流のいずれであっても形成されるものであって、局所的に射流と常流が混在するのである。

水流が蛇行しない場合は、斜め格子縞の菱形の先端が崩れ、あるいはウロコ状砂漣の斜めの線が消えて、水路横方向に連なった波状の曲線を示す二次元河床波 (砂漣Ⅰ) となり、更に急流の場合は砂礫堆と共存する横方向に折線的な二次元河床波 (砂漣Ⅱ) が形成される^{H2)}。流れの規模がさらに大きいと波方向に直線的な二次元河床波 (砂漣Ⅱ) のみが形成される。砂の移動の激しい実験ではフルード数が1を僅かに超える薄い流れの時に上述の二次元的な河床波が顕著に発生する。しかし、いずれの場合も完全な直線ではなく、波状の名残がある。状態によっては二次元河床波か三次元河床波かの判定は困難になるのである。また、ウロコ状砂漣に見られる太い斜め条は二次元河床波 (砂漣Ⅰ) が形成されても大きな菱形の溝として残っている^{H6), H7)}。ウロコ状砂漣から二次元的な砂漣への遷移については Blasius (1910)²⁾ により報告されている (Fig. 5.2)。水理委員会報告書(1982)²⁰⁾ では峰線が横断方向に並ぶ場合は『河床形態の発生原因と流れの三次元性とは直接には関連がなく、本質的に二次元乱流と見なされる』としているが、二次元的な河床波と三次元的な河床波とが共存することは二次元乱流も蛇行することを示すものである。

いずれの場合にも河床には斜め格子縞が生成され、それが大きく統合される時は三次元の砂礫堆が形成され、水流は蛇行するが、水流が蛇行しないで、斜め格子縞が横方向に崩れる時は二次元的な砂漣となる。三次元河床波の規模は、水深規模の小さい斜め条の格子縞から複列砂礫堆を経て、水路幅規模の大きな単列砂礫堆まで連続している。小規模と中規模の区分基準の判断は難しい。このように見ると、規模の大小による小規模河床形態と中規模河床形態の区分は明晰ではない。

限界掃流力の付近の流れでは、水深の約2倍の間隔で「縦条」が形成される^{H2), H3), H4) H6)}。この縦条は砂礫堆形成時に比べると、勾配は緩く、水深の大きな時に水路全面で顕著になる。この縦条は流れが水深規模の並列螺旋流の細胞から成っている構造の間接的な証明である。縦条は盛り

上がった稜線のように見えるが、実際の砂の動きは横断方向の掃流力の斑により谷部の砂が主流方向に動き、帯状に低下した結果、峰として残るもので、稜線部の砂の動きはほとんど無い。限界掃流力の付近の流れであるため砂の移動は極僅かで、縦条と断定できるまで完全に発達するには約1時間を要する。

縦条は注意深く観察すると、中規模河床形態と重なって、特に砂礫堆の深掘れ部分の下流に部分的に見られることが多い。縦条の形成が並列螺旋流（縦渦）によるものであり、並列螺旋流は砂礫堆など三次元河床波上の流れでもあることは木下（1961, 1962, 1977）^{5), 6), 10)}の指摘するところである。しかし、縦条が形成される時の水面には水路横方向に広がる二次元的な波が見られ、砂漣の発生を予想させるが、側方から光線を当て河床を観察すると、砂粒は真直ぐ下流に掃流されて、縦条が形成されているのがわかる。

流れの基本的構造を反映した縦条が河床波の基本パターンの1つであることは間違いないと思われるが、斜め格子縞との関係は判らない。縦条が節を作って変形した結果が斜め格子縞となるのではないかとの疑いも持たれるけれども、縦条と水深の約2倍の規模の斜め格子縞とは共存する^{H3)}。

§6. 各種河床形態の共存について

今まで述べてきたような移動床実験では長い水路に水理的条件を均一につくり出すことは不可能で、様々な河床形態が同一実験で形成される。砂礫堆の背の上に砂漣が載ったり、斜め格子縞ができたりして幾種かの河床形態が共存する。各種形態の共存は河川でも見られる現象である。

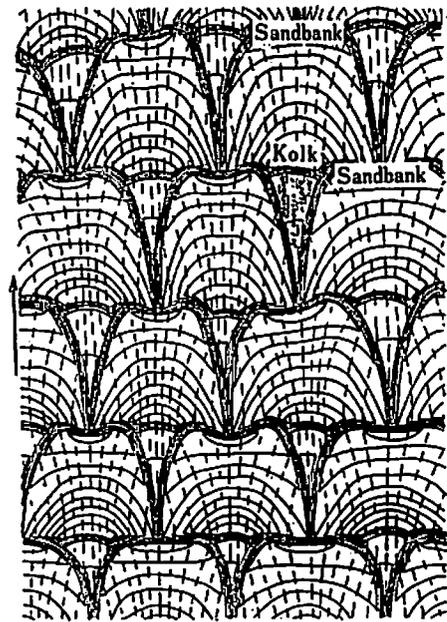


Fig. 5.2 Linguoid ripples by Blasius²⁾
Blasiusのウロコ状砂漣

「共存」には同一水流で場所を異にして異種形態が混在する場合と異種形態が重なり合わさったものがある。すなわち、前者は水理量が場所的に不均一になり、横断方向・縦断方向共に場所により種々の河床形態が存在するものであり、後者の場合は局所的に注目すると、1つの河床形態の上にそれより小さいか同じ規模の河床形態が載った共存関係が見られるのである。前者は実験水路などの実験施設の精度、砂の敷き出し方法や砂の補給などの実験技術の他に、実験中の砂の移動の不均一が原因と思われる。

後者の共存に見られる具体的な河床波の組み合わせには、次のようなものがある⁴³⁾。

1. 縦条と斜め格子縞
2. 縦条と斜め条
3. 砂礫堆の背の上にウロコ状砂漣・斜め格子縞や縦条が載る。
4. 砂礫堆の背の上に砂漣Ⅰ・砂漣Ⅱが載る。
5. 砂礫堆と水路幅一杯の砂漣Ⅰあるいは砂漣Ⅱの重ね合わせ

これらの共存の組み合わせの中、3、4に関しては、形成過程の観察から

- 1) 通水時間が十分でないため卓越した段差以外の斜め格子縞が消滅しないで、それらの残影がある。
- 2) 卓越した段差のため水理量が局所的に変化し、残影の中の他の格子縞が新たに卓越する結果、複数の河床形態が同時に見られる。
- 3) 一端、単列あるいは複列砂礫堆が形成されるが、局所的な水理条件により、新たな斜め格子縞が発生し、それに対して「あぶり出し効果」が見られる。

さらに、自然河川では

- 4) 洪水時の非定常流のため、水理量が時間的に変化し、残像効果により、複数の河床形態が見られる。
- 5) 複数回の洪水により、各々の洪水により発生した河床形態が消滅しない儘に、重さなり合っている。

以上5つの共存関係の発生の可能性が推論される。河床波の共存の組み合わせ5.については以上の推論からは説明がつかない。特に、砂漣Ⅱは砂礫堆消滅後の規模の大きい流れでも単独で形成されるので、現在の河床形態の定義では深見(1978)¹⁷⁾の言うような中規模と小規模の共存とはならない。

共存状況を纏めると、

- a) 水理量の場所的な不均一による共存
 - 二次元河床波(砂漣Ⅰ, 砂漣Ⅱ)
 - 三次元河床波(複列砂礫堆)と三次元河床波(単列砂礫堆)
- b) 未発達段階にあるための共存

三次元河床波（斜め条，複列・単列砂礫堆）と三次元河床波（斜め格子縞，ウロコ状砂漣）
 三次元河床波（斜め条，複列・単列砂礫堆）と二次元河床波（砂漣Ⅰ，砂漣Ⅱ）

c) 形成要因の相異のための共存

縦条と三次元河床波（斜め条，斜め格子縞，ウロコ状砂漣，複列・単列砂礫堆）

三次元河床波（斜め条，複列・単列砂礫堆）と二次元河床波（砂漣Ⅰ，砂漣Ⅱ）

a), b)は水理条件の部分的な不均一に由来するものと思われるが，c)は形成要因・過程の相異による本質的なものであろう。河床形態の共存の様子を観察すると二次元河床波と三次元河床波の形成要因は異なるようである。b)の場合は元来存在しているものが「あぶり出し効果」により顕著になるものであり，c)は水深，勾配や流速などの水理条件だけでは表現できない「流れの構造」に由来するものであると考えられるので，水理学的な形成領域は当然オーバーラップする。したがって，実験により種々の形態の共存を考慮して，各形態の水理学的な形成区分を一意に定め，一葉の図上に表現することは困難であると思われる。特定のある形態の形成限界は意味をもつだろう。

§ 7. 河床形態の相互関連

今までに見てきた河床波は，形成要因により次のような系列に分類できる (Fig. 7.1)。各系列

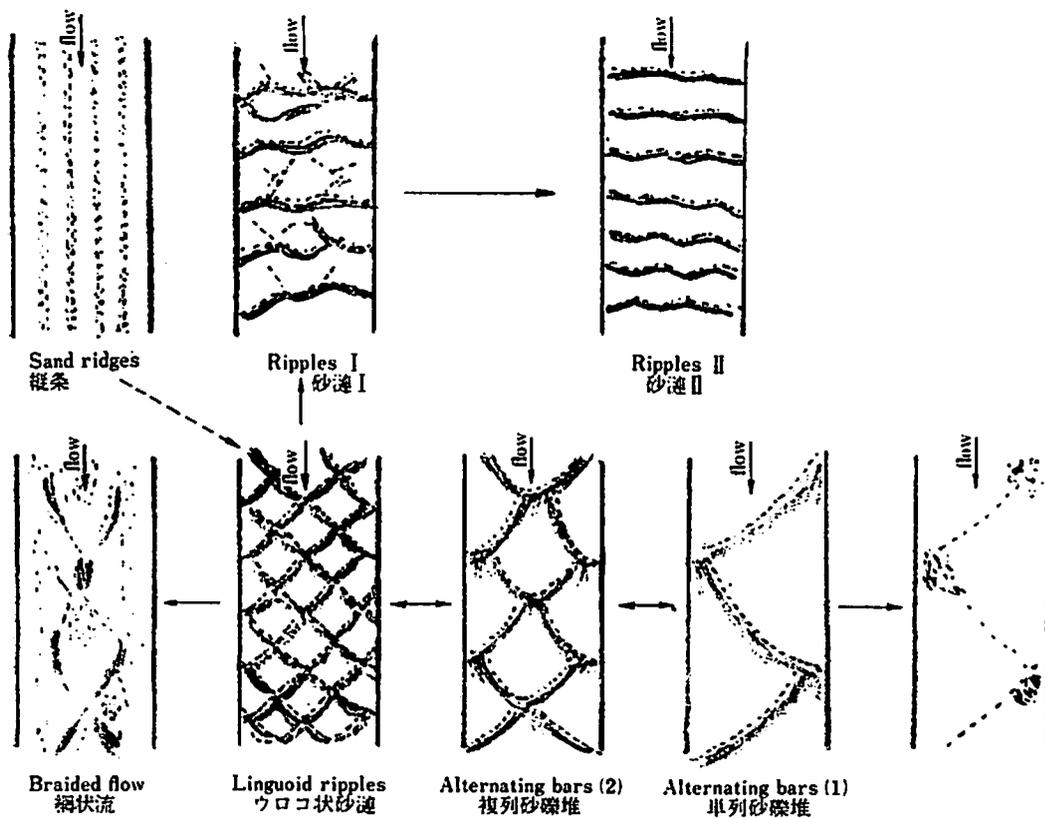


Fig. 7.1 Hierarchical associations of bed forms
 河床波の相互関連図

間の相互関連（フラクタルなパターン関係，変形過程，規模の連続性など）はなく，水理条件によっては重ね合わさった形で共存する。

A系列 ……縦条

B系列 ……三次元河床波（砂礫堆）

B 1 ……斜め格子縞・ウロコ状砂漣・複列砂礫堆・単列砂礫堆

B 2 ……砂漣 I

C系列 ……二次元河床波（砂漣 II）

D系列 ……砂堆・反砂堆

E系列 ……その他の不規則な擾乱による河床波

B 2 系列と C 系列は形態的に見ると，連続性を持っている。

各系列の水流の特徴は

A 系列は縦渦の存在によるものと思われる。流れは直進していて，水深は他の系列に比較して大きく，掃流力は非常に小さい。

B 系列は波方向に部分的な shoots & pools を伴った水深の薄い蛇行性の流れである。掃流力は大きく，部分的に縦渦の存在が見られる。また，全体としては，場所的に交互に収斂・発散を繰返す扁平な単一または並列の螺旋流をなしている（銚川(1971)¹¹⁾。

C 系列の流れは間欠性の横方向に広がる転波を伴い直進性が強い。実験では水路幅一杯の二次元的な小規模な shoots & pools の流れである。幅が無限に大きい水路でも二次元的な広がりが可能か否かは不明である。

D 系列は水深の大きい大規模でかつ，慣性力が優勢な流れである。

E 系列はほとんど一定方向の流れを伴わない水深の大きい河床にできるものである。

こうして見ると，一定方向の水流は「ある構造を持った流れ」^{5), 16), 20), 21)}であるように思われる。

§ 8. 結 論

水面幅に対して水深の小さい薄い移動床上の流れにおける実験で得られた結果は，次のとおりである。

- I. 河床波としての「縦条」および「斜め格子縞」の存在を確認した。
- II. 二次元河床波と三次元河床波の形成過程を明らかにした。
 - II-1. 砂礫堆（三次元河床波）はある順序で形成され，水理量に見合った段階に至るまで生成・発達・成長し，そこで安定になる（「あぶり出し効果 I」）。
 - II-2. 二次元的な形状を持つ砂漣は三次元河床波の形成初期のものが変形して形成される（「あぶり出し効果 II」）。
- III. 種々の河床形態は必然的に共存する（「あぶり出し効果 III」）。

Ⅳ. 形成要因・過程を考慮した河床波の分類・命名をして、概念の混乱を避けなければならない。そのために幾つかの提案がなされている。

小規模河床形態と中規模河床形態とに分類するのならば、規模の基準を設ける必要がある。抵抗係数や粗度係数、掃流力や剪断力など河床変動の推定に必要な水理量と河床形態との関係を明らかにしなければならない。

§ 9. おわりに (Some Remarks)

河床形態に対応する水理条件を実験で把握することは難しい。実験の当初に平坦にした河床の砂は通水後は時間の経過とともに凹凸を生じ、水深や勾配などの水理量は場所的に不均等になる結果、局所的に種々の形態が発生する。これらの諸形態の中の何れと平均的な水理量に関連づけるかの判定は、微妙になる。理論的な厳密さを要求するならば、局所的な形態と局所的な水理量に関連づける必要があるだろう。

河床形態の共存は流れの構造について多くのことを暗示している。また、水路の長さが十分でなかったり砂の補給が適切でない場合には上流端の局所的な影響が過大に評価されるおそれがある。そして河床波の発生が上流端から下流に伝播して行くように錯覚する。

これまでに述べてきた事柄は実験水路内の限られた粒径の砂による実験から得た結果である。しかし、実際の河川でも同様の事は生じる筈であるが、砂礫の粒径が異なる場合、水の當力や砂礫の安息角の関係で実験で得られた全種類ではなく、幾つかの種類のみしか見られないであろう。特に河床材料が大きい時は縦条や斜め格子縞などを見るのは無理である。砂の粒径が余りに小さい時も水の粘性の影響が出て、輪郭のはっきりした河床波はできにくい。

寸法が大きくしかも混合粒径の砂礫の河床上の規模の大きな流れで生ずる河床波は、実験のものとは大いに異なり、相似則も成り立つかどうかはよくわからない。どんな相似則が成り立つのか興味のあるところである。

参 考 文 献

- 1) Engels, H.: Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flußtrecken mit beweglicher Sohle, Zeitschrift für Bauwesen, pp.663-680, 1905.
- 2) Blasius, H.: Über die Abhängigkeit der Formen der Riffeln und Geschiebebänke vom Gefälle, Zeitschrift für Bauwesen, pp.465-472, 1910.
- 3) Gilbert, G.K.: The transportation of débris by running water, U.S.G.S. Professional Paper 86, 1914.
- 4) Shields, A.: Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Erschienen im Eigenverlage der PVWS, Berlin 1936.
- 5) 木下良作: 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料36号, pp.77-82, pp.88-92, 1961年11月.
- 6) 木下良作: 石狩川河道変遷調査一参考編一, 科学技術庁資源局資料36号, pp.97-102, p.131, 1962年12月.
- 7) 井口昌平: 砂礫堆の形成に関する水理学的考察, 東京大学生産技術研究所報告, 第14巻, 第5号, 1965年10月.

- 8) Guy, H.P., D.B. Simons, and E.V. Richardson: Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-61, U.S.G.S. Professional Paper 462-1, 1966.
- 9) Task Force on Bed Forms in Alluvial Channels of the Committee on Sedimentation: Nomenclature for bed forms in alluvial channels, Proc. ASCE, HY3, pp.51-64, May, 1966.
- 10) Allen, John R.L.: Current Ripples, North-Holland, pp. 29-95, pp.185-199, 1968.
- 11) 鮎川 登: 直線河道における蛇行現象に関する水理学的研究, 科学技術庁資源調査所, 1971年8月。
- 12) 井口昌平・吉野文雄: 真名川の砂礫堆の形成に関する実験的研究, 生産研究, 第24巻第4号, pp.47-50, 1972年4月。
- 13) 西谷隆亘・吉野文雄・牧野立平: 洪水による河床変動についての実験的研究, 法政大学工学部研究集報, 第9号, pp.29-51, 1973年2月。
- 14) 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会: 移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集, 第210号, pp.65-67, 1973年2月。
- 15) 木下良作: 大井川牛尾地区河道計画検討報告書, 建設省中部地建, pp.31-32, 1976年3月。
- 16) 木下良作: 並列らせん流に関する実験的研究, 北海道開発局, 1977年3月。
- 17) 深見親雄: 中規模河床波と小規模河床波の共存, 建設省土木研究所, 土研資料(河川における土砂の移動機構に関する研究ノート), 第1416号, pp.117-153, 1978年10月。
- 18) 井口昌平: 川を見る一河床の動態と規則性一, 東京大学出版会, 1979年9月。
- 19) 深見親雄: 砂礫堆と砂連・砂堆の共存一小規模河床形態を含む中規模河床形態の領域区分一. 土木技術資料 21-10, pp.529-534, 1979年10月。
- 20) 水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会: 洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究, p.14, pp.23-24, p.69, 1982年3月。
- 21) 巽 友正編: 乱流現象の科学, 東京大学出版会, pp. 507-509, 1986年2月。
- H1) 拙著: 複列砂レキ堆形成の水理条件, 土木学会関東支部第5回年研, pp.77-78, 1978.
- H2) 拙著: 砂レキ堆の形成の初期段階について, 土木学会第37回年講, 第Ⅱ部門, pp.565-566, 1982.
- H3) 拙著: 砂レキ堆の形成初期段階の水理量について, 土木学会関東支部第10回年研, pp.67-68, 1983.
- H4) 拙著: 縦すじの形成について, 土木学会関東支部第11回年研, pp.59-60, 1984.
- H5) 拙著: 縦すじの形成過程について, 土木学会第39回年講, 第Ⅱ部門, pp.459-460, 1984.
- H6) 拙著: 河床波の形成に関する実験的研究, 土木学会関東支部第12回年研, pp.89-90, 1985.
- H7) 拙著: 二次元河床波と三次元河床波の共存について, 土木学会第40回年講, 第Ⅱ部門, pp.483-484, 1985.