

# 自由蛇行河道の模擬実験

Experimental Study on the Simulation of a Free Meandering Channel

小下芳敬\*・池田宏\*\*

Yoshinori KODAMA and Hiroshi IKEDA

## I はじめに

冲積蛇行河道では、攻撃斜面側の河岸で浸食が生じると、それを補うように対岸の滑走斜面側で堆積が起こるために、河道が側方に移動しても、河道幅はほぼ一定に保たれる。もし河道幅が次第に広がってしまうならば、蛇行河道はその性状を維持できず、網状流河道となるであろう。ゆえに河道幅が時間的にはほぼ一定に保持されることは、自由蛇行河道の存続に欠かせない条件である。

水路内に砂を一様に敷き、直線的な初期河道を掘って通水すると、まもなく流心が蛇行を始め、同時に谷線が蛇行する。この時流量を減らすとあたかも蛇行河道ができたかのように見える (Tif-

fany and Nelson, 1939)。しかしさらに通水を続けると、側岸浸食が進んで水流幅は拡大し、網状流河道となってしまう (木下, 1961, p. 112; 1962, p. 139-145)。すなわち、実験材料として砂のみを用いると、蛇行した谷線を一時的に作り得るが、その状態を維持することはできない。それゆえ、蛇行河道を実験水路上に作り出して、その性状から蛇行河道の形状や蛇行の成因を解明しようとした研究者は、砂にシルト・粘土を混合させて浸食に対する河岸の抵抗力を強めることによって、河道幅を固定させようとした (第1表)。

Friedkin (1945) や木下 (1962, p. 145-167) は河岸を構成する土質、すなわち側岸浸食の難易性を調整することによって、蛇行した谷線を比較的

第1表 蛇行河道に関する従来の主な実験的研究と本研究の比較

|                          | 実験材料   | 土砂の供給 | 流量, $\ell/\text{sec}$ |
|--------------------------|--|-------|-----------------------|
| Tiffany & Nelson<br>1939 | ・中砂  | 給砂    | 不明                    |
| Friedkin<br>1945         | ・ミシシッピ川の河床砂にセメント 9% を混合<br>・河岸物質としてシルト 60%, 砂 40% の混合物   | 給砂    | 定常 1.4~8.5            |
| 木下<br>1961, 1962         | ・平均粒径 0.765 mm の粗砂 (A)<br>・粘土 16%, シルト 32%, 砂 52% の混合物 (B)<br>・(A), (B) の比率をえた混合物                    | なし    | 0.05~0.10             |
| Schumm & Khan<br>1972    | ・平均粒径 0.7 mm の分級の悪い上砂にカオリナイトを混ぜる   | 給砂    | 実験 4.2                |
| 本研究                      | ・粘土 25%, シルト 35%, 砂 40% の混合物 (Case 1)<br>・ペントナイトのみ (Case 2)<br>・粘土 12%, シルト 45%, 砂 43% の混合物 (Case 3) | 循環    | 1.3 と 1.0             |

\* 筑波大学自然学類（現 筑波大学・院・地球科学研究科）\*\* 筑波大学地球科学系 (1984年6月4日受理)

長時間維持することには成功した。しかし、実際河道で生ずる寄洲や河畔への土砂の堆積を実験河道において充分に起こしえなかつたために、河道自身を蛇行させることはできなかつた。

Schumm and Khan (1972) は、かつて網状流であった河道が、流出土砂の性質の変化に伴つて蛇行河道になつた事実に注目して次のような実験を行なつた。すなわち砂のみを使って蛇行した谷線を作つた後、流水中に多量の粘土を混ぜた。すると水深が浅く流速の遅い範囲に粘土が堆積した。また河岸にも粘土が付着して浸食に対する抵抗力が強まつた。そして谷線部で河床が掘れて水位が低下した結果、浅瀬が水面上に現われ、蛇行していた谷線部分は蛇行河道となつた。しかしこの実験河道は、沖積面上を再び浸食期に入った蛇行河道に相当し、河道の位置はほぼ固定しているものであつた。したがつて蛇行状態を維持して河道変遷をする自由蛇行河道の挙動を調べるには、なお不十分と言えよう。

とはいひ、Schumm and Khan (1972) の実験は、浮遊物質を浅瀬に堆積させるようなプロセスを取り込めば、幅を一定に保つて側方移動する河道を実験水路上に作り出すことができるこことを示唆している。本研究の目的は、蛇行状態を維持しながら流路変遷を行なう自由蛇行河道を実験水路上に作り出すことである。著者らは、実験材料として、容易に浮遊して運ばれ、かつ堆積しやすい物質を使用すれば、目的を達成できると考え、3種類の異なる材料を用いて、各々につき試行錯誤を繰り返した。その結果、シルトと細粒砂の混合した凝集性の弱い物質を用いた場合 (Case 3) に実験水路上に自由蛇行河道を作り出すことができた。また凝集性のより強い実験材料を用いた場合 (Case 1, 2) は、目的とした河道を作れなかつたが、従来の砂のみを用いた実験河道とは著しく異なる結果が得られたので、その観察事項を合わせ報告する。

## II 実験方法

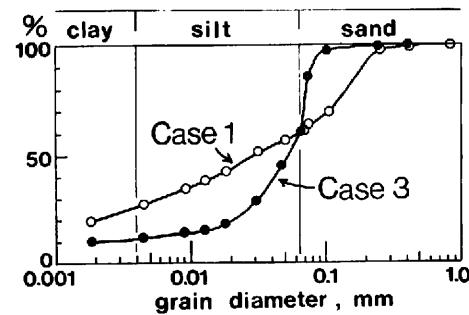
### 1) 実験材料

第2表 実験材料

|          | Case 1 | Case 2  | Case 3 |
|----------|--------|---------|--------|
| 中央粒径, mm | 0.031* | 0.010** | 0.053* |
| 平均粒径, mm | 0.082  | 0.014** | 0.044  |
| 分級係数, mm | 0.080  | 0.017** | 0.031  |

\* J I S 規格の沈降分析法による

\*\* 光透過法測定装置による (大坪, 1983)



第1図 Case 1, 3 に用いた実験材料の粒度組成

本研究では3種類の物質を用いた(第2表)。これらの物質は流水中で容易に浮遊・堆積する性質を持つ。

Case 1 の実験に用いた底質材料は、砂に多量のシルト・粘土を混ぜた分級の悪い物質で、沈降法による粒度分析によれば、粘土25%, シルト35%, 砂40%の組成である(第1図)。

Case 2 では、粘土の一種であるベントナイトを用いた。この物質の塑性限界  $W_p$  は32.95%, 液性限界  $W_r$  は186.5%で、塑性指数  $I_p$  ( $= W_r - W_p$ ) が153.5%と大きく、適度の含水比の時には、ゲル状の塑性体となる。また含水比の高いときには、粒径の大きなものが沈降して沈積面を作り、その上部の懸濁液と区別されるという沈降特性を持つ。一方含水比の低いときには、一様な懸濁液として存在する(大坪, 1983, p.22-32)。

Case 3 では、シルトと細粒砂の混合物を用いた。これは、筑波山南東麓にある碎石工場において碎石過程で生じた「ダスト」と呼ばれる岩粉である。母岩は、砂岩・頁岩互層がホルンフェルス化を受けた中生層である。沈降法による粒度分析によれば、粘土12%, シルト45%, 砂43%の組成

で分級が良い(第1図)。この物質は、静水中で速やかに沈降して、凝集性の弱い堆積物となる。

## 2) 実験装置

平衡状態にある蛇行河道を水路上に作り出すためには、長時間土砂を流し続けることが必要である。実験水路に材料を供給するには、給砂方式か循環方式が一般に用いられるが、細粒土砂の供給には、給砂方式は採用しがたい。そこで本研究では、材料を水と共に循環させる方式をとった。

使用した水路は、全長10.5m、幅81.5cm、深さ10.5cmの木製水路で、水と土砂は共に貯溜槽から水中ポンプで水路上流端に送られ、水路下流端中央に設けた幅18.7cmの可動矩形堰から貯溜槽に落ちて、水路内を循環するようになっている。流量は、送水管途中に設置した電磁流量計とバルブによって調節し、當時ベンレコーダーを使って記録した。水路起点には、ブロックと金網を用いた簡便な整流槽を作り、その位置は、使用する水路長(Case 1: 3.1 m, Case 2: 9.0 m, Case 3: 6.0 m)にあわせ移動させた。水面高の測定は、オートレベルとポイントゲージを用いて行ない、水路床勾配はジャッキで調節した。なお水路上方2.5mにカメラを固定し、平面写真を撮影した。

## 3) 実験手順

すべてのCaseで、はじめに実験材料をほぼ一様に水路に敷いた。その際、水と十分なじませるために、Case 1と3では、材料を貯溜槽に順次投入し、水と共に循環させて水路内にほぼ一様な厚さ(Case 1: 4 cm, Case 3: 3.5 cm)に敷いた。一方、ベントナイト(Case 2)の粉末は、水と容易にはなじまない。そこで大型ポンプを備えた別の循環水路を用いて、高濃度のベントナイト溶液を作った。それを実験水路に敷き、また貯溜槽に貯えた。

次に初期河道を作る。Case 1では、整流槽出口と下流端の堰を結んで直線的に溝を掘った(幅25cm、深さ4cm)。Case 3では、整流槽の下流1m区間に湾曲を1つ設け、その下流は直線的な溝とした(幅18cm、深さ3.5cm)。この湾曲は、側方移動のきっかけを河道に与えるためである(第4図1)。

Case 2では、ベントナイトが、ちょうど軟らかいブディングの様な状態であったため、初期河道を掘ることはできなかった。そこで次の方法で初期河道を作った。すなわち、まずポンプを動かしてベントナイト溶液を水路内で循環させる。この時の流速は、水路中央で大きく、側壁に近付くに従って小さくなる。次に多量の真水を一度貯溜槽に加える。すると低濃度のベントナイト懸濁液が水路中央の流心に沿って流れ、その流速は、周囲の高濃度のベントナイト溶液部分と比べ、速い。さらに時間と共に、高濃度部分は流速を減じ、数時間後には、流动部分は、水路中央に沿う一定幅内の低濃度のベントナイト懸濁液に限られ、周囲の高濃度のベントナイト溶液部分と明瞭に区別される。このようにして形成された一定幅の懸濁液流动帯を初期河道とした(第2図)。

実験は、各Caseごとに一定流量(Case 1: 1.3 ℓ/sec, Case 2: 1.3 ℓ/sec, Case 3: 1.0 ℓ/sec)を流し、Runごとに水路床勾配を増し、それぞれの勾配に対して平衡状態となる河道の応答を各材料(Case)ごとに観察・測定した。

Case 1では、各Run 20時間前後通水し、Run終了時に水路起点から0.5mと2.5mの地点で水面高を測定し勾配を求め、その後停水して河道形状を観察した。

Case 2では、初期河道形成に引き続き水路床勾配を変えて、河道の応答を観察した。この河道は停水するとただちに河岸崩壊が生じるため、河道深は音響測深機を用いて通水状態で測定した。

Case 3では、水路起点より1.0m~5.0mの区間で水面勾配と表面流速を数時間おきに測定し、Runの中での時間変化を調べた(第3図)。なお各Runの開始時には、水路下流端の堰高を適時調節して、水流が河岸満水位になるようにした。もし水位が低いままで始めると、河岸浸食により河道内の総土砂量が増えるため、平衡に達する時間が長くかかる。各Run共、平衡に達した後停水して、水路起点より1.5m~4.5mの区間で50cm間隔で河道横断形を測定し、それより平均河道幅・径深・流積を求めた(第3表)。

### III 実験結果および考察

#### 1) 粘土・シルト・砂の混合物を用いた場合

##### (Case 1)

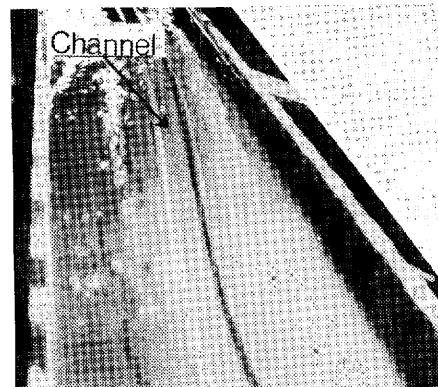
Case 1の実験は、砂とシルト・粘土の混合物を水路内で流せば、砂は掃流物質となり河床を構成し、シルト・粘土は浮遊物質となって河岸を構成するであろうとの考えのもとに行なったわけである。しかし、用いた混合物は水流中で予想したような分級を生ずることなく、粘土・シルトが砂粒子の間隙を充填した稠密な堆積物となった。しかも実験の途中で停水したために自重沈下(圧密)が生じて固く縮まったこともある、 $1.3 \ell/\text{sec}$ の水を流しながら水面勾配を0.015まで増したにもかかわらず、河道はほとんど変化せず、目的とした蛇行河道は作れなかった。

そこで参考のために、中央粒径0.2mmの均一砂(豊浦標準砂)15ℓを河道内全域にわたり一様に投入してみた。この投入砂に、摩耗剤の役割と河床形の形成を期待したのである。投入後しばらくの間砂は移動して、河道内の左右岸交替に砂堆が形成された。そして砂堆の谷(深掘れ部分)の脇の河畔には、細粒砂やシルトが円弧状に堆積した。すなわちこの場所で水流の乱れが特に強いことを示している。砂堆形成後、砂堆はほとんど移動せず、河畔堆積の位置は時間的に変化しなかった。これは、砂が移動して砂堆を形成する過程で砂粒子の間際に循環水中に多量に含まれている粘土・シルトが捕捉され、河岸物質と同様の稠密な堆積物となってしまったためである。なおこの時には、水面勾配を0.033にまで増大させたが、それでもなお河岸は浸食されなかった。

##### 2) ベントナイトを用いた場合 (Case 2)

初期河道の幅と深さは、流量と勾配を一定に保っても河岸を構成する高濃度のベントナイト部分の含水比によって変化した。すなわち、含水比が高いほど河道幅は広がり、水深が浅くなつた。

ベントナイトの含水比を長時間一定に保つことは困難であり、そのため初期河道の幅と深さは、さまざまであったが、一旦形成された一定幅のき



第2図 ベントナイトを用いた場合に形成された  
河道の一例 (Case 2)  
通水中、水路下流側から撮影。河道脇のたかまりは  
ベントナイト液が河道からあふれて形成された。

れいな河道(第2図)は、その後通水を継続してもなんの変化も生じなかつた。そこで水路床勾配を増して水流を強め、河岸浸食を起こすこととした。ところが、河岸の浸食は、一般的な様式とは著しく異なつた。すなわち、河岸に平行に亀裂が生じ、そこから河岸物質がブロック状に剪断され言わば崩壊に似たものであつた。このように河岸崩壊の生じた河道は、一週間ほど通水を継続すると再び新たに一定幅の直線的河道となる。この河道もその後なんの変化も生じない安定河道であつた。

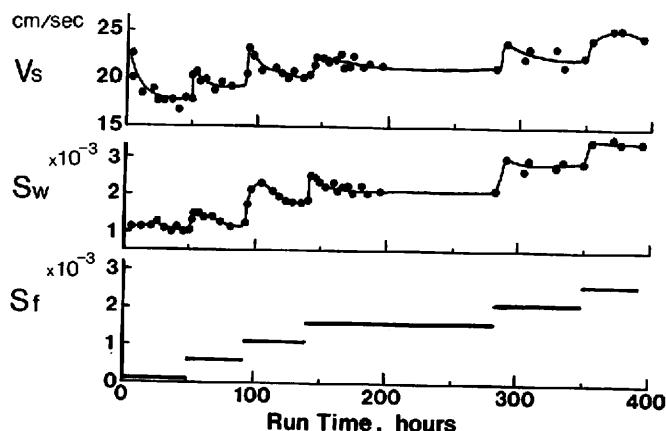
ベントナイトは、粒子間の凝集力が強すぎて、一旦側岸に堆積すると、粒子単位で浸食されにくい。ゆえに移動する河道を作り出せなかつた。この実験によって、自由蛇行河道を実験水路上に作るためには、ただ浮遊して運ばれ浅瀬に堆積するだけでなく、堆積物が粒子単位で浸食される実験材料を用いるべきであることが判つた。

##### 3) 凝集性の弱い、シルトと細粒砂の混合物を用いた場合 (Case 3)

Case 3では、容易に浸食される凝集性の弱い物質で、かつ浮遊して運ばれる材料を選んだ。最上流部に1つの湾曲をもち、その下流は直線の初期河道に、 $1.0 \ell/\text{sec}$ の一定流量を流し、水路床勾配を段階的に増し、それぞれの水流に対して平衡に

第3表 Case 3 の実験条件および結果

| Run No. | 流量 $Q$ , cc/sec | 水路床勾配 $S_f$ | 通水時間 時間 分 | 水面勾配 $S_w$ | 表面流速 $V_s$ , cm/sec | 径深 cm | 河道幅 cm | 流積 cm <sup>2</sup> |
|---------|-----------------|-------------|-----------|------------|---------------------|-------|--------|--------------------|
| 1       | 1020            | 0.0001      | 49h 30m   | 0.0010     | 18.0                | 1.9   | 26.3   | 53.4               |
| 2       | 1020            | 0.0006      | 42 45     | 0.0013     | 20.6                | 1.9   | 30.0   | 61.7               |
| 3       | 1040            | 0.0011      | 47 20     | 0.0018     | 20.4                | 1.9   | 33.3   | 68.4               |
| 4       | 970             | 0.0016      | 141 50    | 0.0020     | 21.4                | 1.4   | 37.4   | 61.6               |
| 5       | 1030            | 0.0021      | 66 15     | 0.0027     | 22.6                | 1.5   | 46.8   | 65.9               |
| 6       | 1020            | 0.0026      | 42 45     | 0.0032     | 24.8                | 1.5   | 37.0   | 58.7               |
| 7       | 1000            | 0.0020      | 70 00     | 0.0025     | 20.8                | 1.5   | 40.0   | —                  |

第3図 水面勾配と表面流速の時間的変化(Case 3)  $S_f$ : 水路床勾配,  $S_w$ : 水面勾配,  $V_s$ : 表面流速

なる河道の様子を観察した。第3表の Run 1 から 6 が相当する。また Run 7 で形成された蛇行河道で、河道変遷の様子を明らかにした。

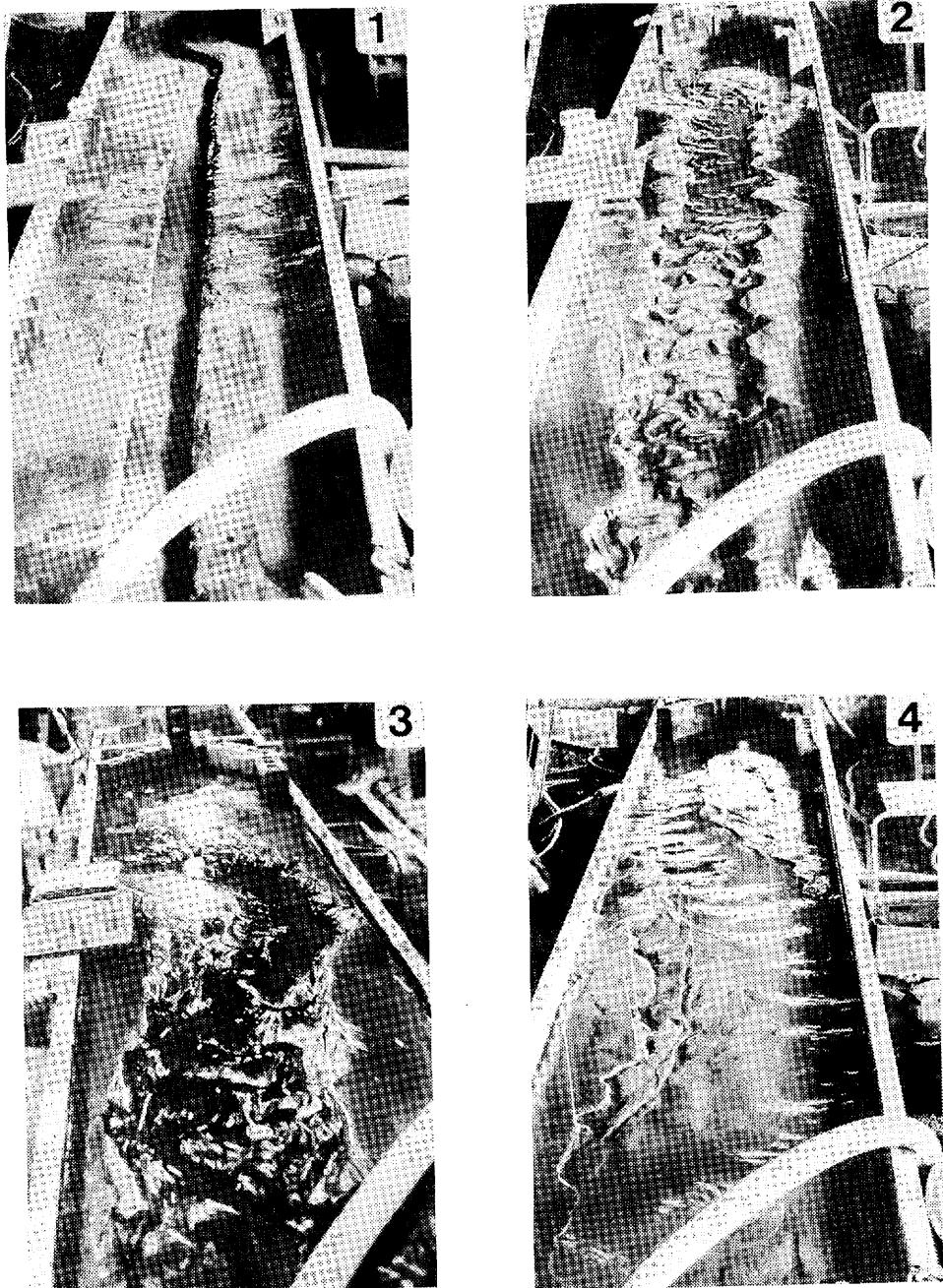
各 Run ごとに水路床勾配を増した直後には、水面勾配も表面流速も急激に増加するが、50時間前後でどちらも一定値に収束し(第3図)、平衡に達する。その様子を次に述べる。

緩勾配(Run 1と2)では、川幅を広げ平衡に達し、河道は直線のまま変化しなかった。河床には、平均波長15cmのリップルができ、河畔には、浮遊土砂が堆積してわずかな高まりを形成した(第4図2)。また河岸線は、小さな湾曲の集まりから成っていた。リップルにより水流が集中するためと思われる。初期湾曲部では、攻撃斜面側の河床が深く掘れ、掃流土砂は見かけ上滑走斜面側に集まり、リップルを作った。

勾配を増すと(Run 3と4)、初期湾曲部の攻

撃斜面側で河岸浸食が生じ、河岸は後退し、一方その対岸側では、水深が浅くなるにつれて、リップルのクレスト部の土砂が削れ移動して、すぐ下流のトラフを埋め、全体として平らな浅瀬を形成した。この浅瀬上には、うろこ状の模様が生じた。また河岸に接するトラフでは、水流が激しくて、掃流土砂が堆積せず、細長い窪地として残った。攻撃斜面側の河岸がさらに後退すると、浅瀬上の流れは一段と弱まり、浮遊土砂が堆積して、最終的には、水位と等しい高さの堆積面を形成した。そのため河道が側方移動しても、河道幅はある大きさ内に保たれた。これは本研究の目差す自由蛇行河道の重要な性状である。しかし河道は、初期湾曲部の移動した範囲を除き、依然として直線のままであった。

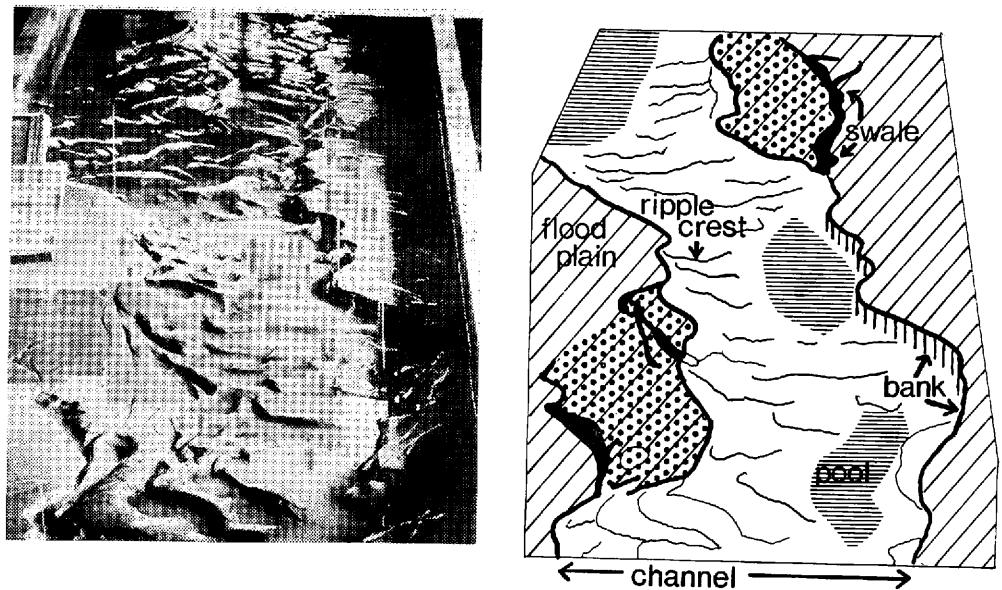
この直線河道は、さらに勾配を増すと(Run 5と6)、上流側から次第に蛇行河道へとその形態を



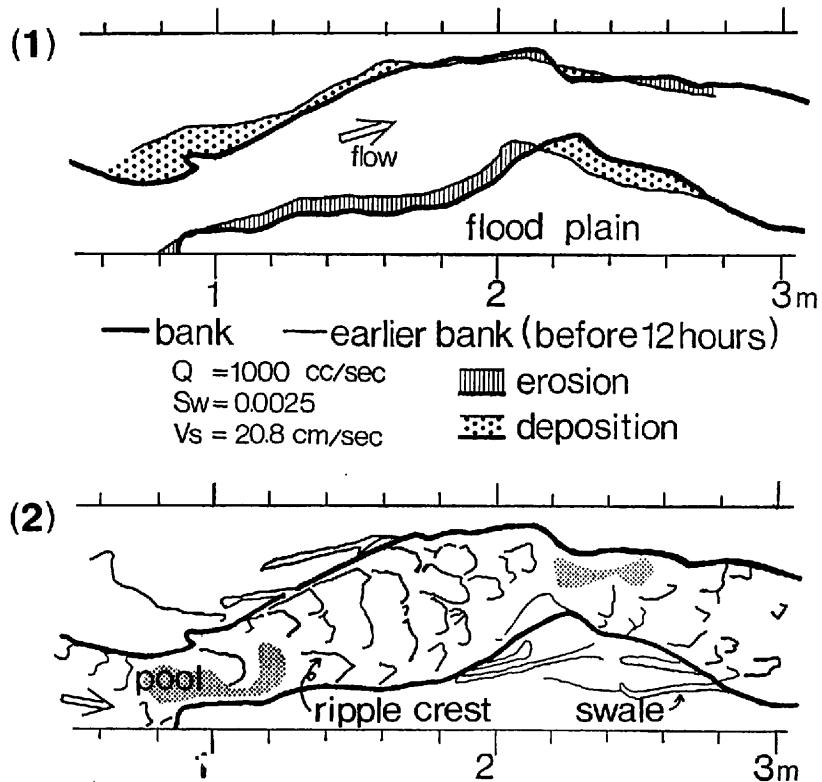
第4図 凝集力の弱い、シルトと細粒砂の混合物を用いた実験の結果 (Case 3)

- (1) 初期河道
- (2) Run 2 で平衡に達した河道、排水後撮影
- (3) 予備実験 ( $Q=1000 \text{ cc/sec}$ ,  $S_r=0.0020$ ) で形成された蛇行河道、排水後撮影
- (4) Run 6, 通水時撮影

写真はすべて水路下流側から撮影。



第5図 新しく形成された氾濫原と旧河岸の位置を示す細長い溝地（写真とその対応図）  
Case 3, Run 5 排水後下流側から見る。斜線：氾濫原、下線：河道の側方移動に  
伴い、新しく形成された氾濫原



第6図 Case 3, Run 7 において生じた河道  
(1) 河岸の浸食と堆積による河道変遷 (2) 河道平面図

変えていった。すなわち、まず初期湾曲部の直下流の河道で、水流が激しく攻撃する側の河床に深掘れが生じ、その対岸側には掃流砂が集まり、リップルを作った。そして深掘れが生じた側の河岸に浸食が生じ、その対岸には、Run 3と4の場合と同様な過程で堆積が進行して、側方移動により河道が湾曲した。この湾曲がさらに下流の河道に影響して、蛇行形態の河道を形成した（第4図3, 4）。

また河道の移動に伴い新しく形成された堆積面上には、旧河岸の位置を示す細長い窪地（Swale）が残されていた（第5図）。この堆積面は、実際河川の氾濫原に相当するものと考えられる。これは従来の研究には見られなかったものである。

第6図(1)は、Run 7において平衡状態にある蛇行河道の、58時間通水後と70時間通水後の河岸の位置を比較した平面図である。攻撃斜面側で河岸浸食が生じ、その対岸の滑走斜面側では逆に河岸堆積が生じて新しく氾濫原が形成されていること、河道幅が一定に保たれ、しかも蛇行形態を維持したまま河道が全体として下流方向に移動していることが認められる。

第6図(2)は、Run 7の70時間通水後の河道平面図である。河道内には、リップルのクロスストと河床の深掘れ部（Pool）を示し、氾濫原上には、旧河岸の位置を示す細長い窪地を示した。河道の屈曲部で河道幅は狭く、水深が大きくなり、その下流で幅は広がり、水深は小さくなっている。このような平面形と河道横断形状との対応は、まさに野外の蛇行河道に見られる特徴である。

#### IV おわりに

浮遊しやすく、しかも凝集性の弱い堆積物をつくる、シルトと細粒砂からなる実験材料（Case 3）を用いた時初めて、河道幅を一定に保ちながら流路変遷を行なう自由蛇行河道を実験水路上に出現

させることができた。

しかし今回の実験条件内では、河床にリップルができてしまった。小規模の河道内ではリップルが流れに及ぼす影響は大きく、河道形状にもそれが強く反映された。水流中に容易に浮遊し、粒子間の凝集力が弱く、しかもリップルを作らない実験材料を探すことが、典型的な蛇行河道を小型の水路上に作り出すための当面の課題であろう。

#### 謝 辞

本研究は、昭和58年度筑波大学第1学群自然科学類の卒業研究を加筆・修正したもので、御指導いただいた地球科学系の井口正男先生をはじめとする地形学分野の諸先生方に深く感謝いたします。実験材料の入手に当たっては、塙田陶管K. K. の皆様にお世話になった。水理実験センターの小島豊盛技官ならびに飯島英大技官には、測器の製作等多大の御協力をいただいた。また地球科学研究科の伊勢屋ふじこさんには、有益な御助言を幾度もいただいた。皆様に心から御礼申し上げます。

#### 文 献

- 大坪国順（1983）：底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究。国立公害研究所研究報告第42号, 177p.
- 木下良作（1961）：石狩川河道変遷調査。科学技術庁資源局資料第36号, 138 p.
- 木下良作（1962）：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, 174 p.
- Friedkin, J. F. (1945) : A laboratory study of the meandering of alluvial rivers. U. S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 18p.
- Schumm, S. A. and Khan, H. R. (1972) : Experimental study of channel patterns. Geological Society of America Bulletin, 83, 1755-1770.
- Tiffany, J. B. and Nelson, G. A. (1939) : Studies of meandering of model-streams. Transactions American Geophysical Union, 20, 664-669.