

河川の蛇行に関する実験

埼玉大学工学部 正会員 ○池田 駿介

” ” 中村 広昭

1. 序

著者等は河川の蛇行に関する基本的な考え方を既に発表¹⁾し蛇曲の発達・前進あるいは迂曲への進展が蛇行水路内の流れを考察することによつて水理学的に説明しうることを示した。これらの考察を検証する為に自由蛇行の実験を行なっている内に著者は河道の形態は安定不安定解析²⁾³⁾によつて調べられているように直線水路内の流れのパターンによつてのみ決定されるものではなく、最終的に蛇行水路となるかあるいは網状水路となるかは河床を構成している土砂の粒度分布、粘着性等土質の効果を抜きにしては論ずることのできないことに気が付いた。すなわち河道が持続して蛇行するには流れの条件のみでなく、土質の条件も満足されねばならないと思われる。

本研究はこのような観点に立つて水流を自由蛇行させて実験を行ない、その流れについて調べ、既に行なわれた理論的研究の裏付けを行なうと同時に、不充分ではあるが土質の条件についても実験を行ないその効果について考察したものである。

2. 実験装置と実験の手順

実験水路は長さ5m、巾1mの鋼製可変勾配水路で水平から最大1/10までの勾配をとることが可能である。非粘着性の実験は $d_{50} = 0.4\text{ mm}$ 、均等係数1.0を持つ均一な河過硅砂を水路に厚さ10cmに敷きつめ、水路中央に下辺5cm、底辺4.5cm、深さ4cmの直線的な溝を堀り、上流端から攻撃角 30° を持つ整流装置を通して水を流して行なつたものである。又、粘着性の実験は砂：ベントナイト：水を重量比で25：1：4に練り混ぜて水路に敷きつめ水を加えて平らにし、下流端から排水させて後に溝を堀り実験を行なつた。この時排水時間が重要で長時間放置しておくとも側岸が固まつて侵食できなくなつた側が見られた。

3. 実験結果

行なつた実験のデータを表1に示す。写真1はRun1の時間変化を示すものである（右が上流である）。写真1-aに示されるように側岸が交互に侵食されると同時に運ばれた土砂は同じ岸のすぐ下流に堆積して交互砂洲を形成し、水流は蛇行をどんどん増大させる。この写真から側岸が既に侵食されている上流側では交互砂洲が発達し、側岸が未だ侵食されていない下流では砂洲ができていないことがわかる。写真1-bは蛇行がある程度進行した後水表面にアルミ粉を流し、主流の流線を撮影したものである。主流の流線と河道形状には若干の位相差が見られ、蛇行形状の前進をうかがわせている。このとき側岸の侵食状況を手細に観察

Run	流量 (ℓ/秒)	勾 配	土 質	Run	流量 (ℓ/秒)	勾 配	土 質
1	1.38	1/50	河過硅砂	6	1.08	1/20	河過硅砂
2	1.38	1/30	”	7	1.08	1/15	”
3	1.38	1/20	”	8	1.22	1/30	”
4	1.08	1/50	”	9	1.08	1/30	河過硅砂+
5	1.08	1/30	”	10	1.08	1/30	ベントナイト

表1 実験条件

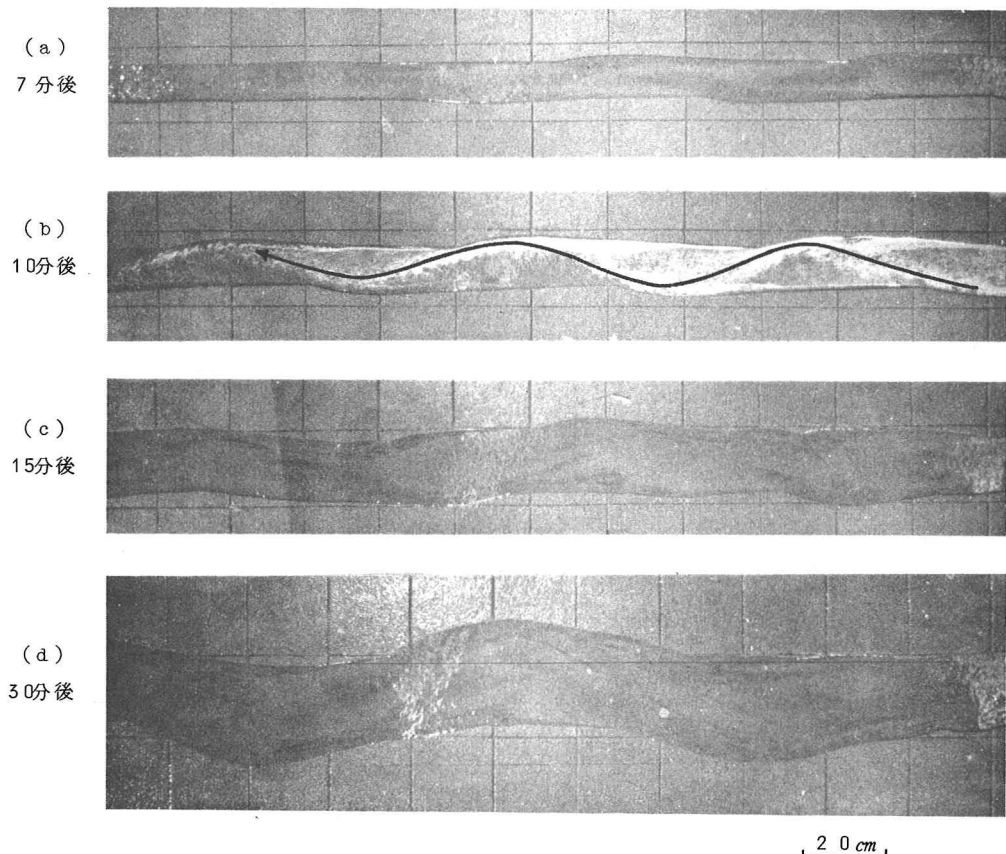


写真 1. 蛇行形状の変化

すると凹岸側の蛇曲の頂点でも勿論侵食が存在するが、これよりも下流ではさらに盛んな侵食が生じており、水流と河道の蛇行の位相差によつて蛇行形状が前進することを裏付けている。写真 1 - c, d はこの Run 1 においてのみ観察された現象で蛇行長が急に変化している。すなわち交互砂洲二つで蛇行していたものが、まとまつて長い波長の蛇行が形成され、写真 1 - d のような比較的安定した蛇行が形成されたものである。その他の例では勾配が急な場合には蛇行が進行して水流の曲率が増大するとともに凹岸側で水があふれ実験が継続できなかつたり、写真 2 - c に示されているように途中ではきれいに蛇行しても最終的には河巾が拡がり、中洲が形成されて網状河川の様相を呈するようになってしまい蛇行を実現させることができたのは比較的短い時間であつた。

図 1, 2 は各実験例に対する蛇行波長 L の時間変化を示したものである。蛇行波長が次第に増大して行くとともに一定長に近づいて行く様子が示されている。けれども Run 1 のみは特異な例であり、一定となつていた蛇行長が通水後 15 分程度で再び急激に増大し、又次第に一定長さとなつて行くことが示されている。この Run 1 において蛇行形状の前進速度がどのように変化して行つたかを示すものが図 3 である。図 1 と比較して蛇行長が一定の時間域（通水後 10 分前後）においても蛇行の前進速度は次第に減少して行き、蛇行長が変化する 15 分前後から前進速度は急激に減少している。このことは蛇行の性質がこの時間を境界として変化したものと見られ、著者はいわゆる交互砂洲から固定砂洲 (Point bar) への移行が生じたものと考えている。すなわち交互砂洲が自由に前進して行く状態から砂洲が凸岸側に固定され、比較的安定な蛇行が形成されたものであろう。

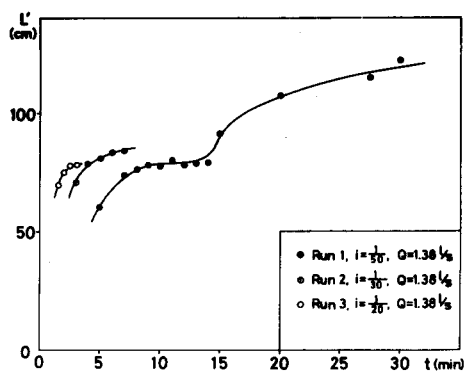


図 1 蛇行長の時間変化

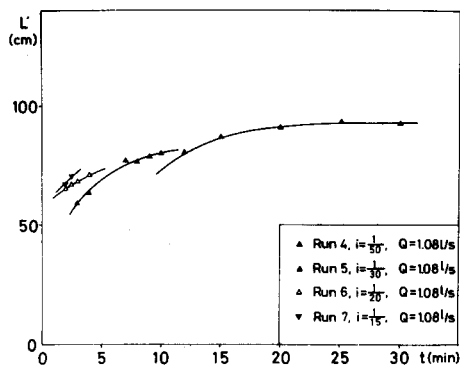


図 2 蛇行長の時間変化

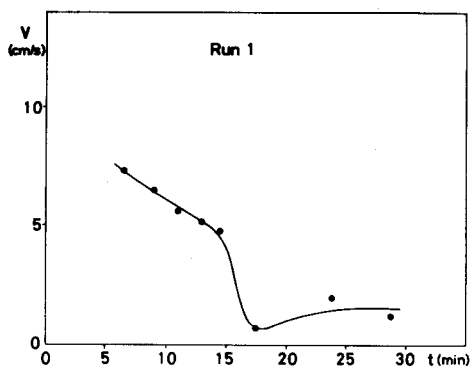


図 3 前進速度の変化

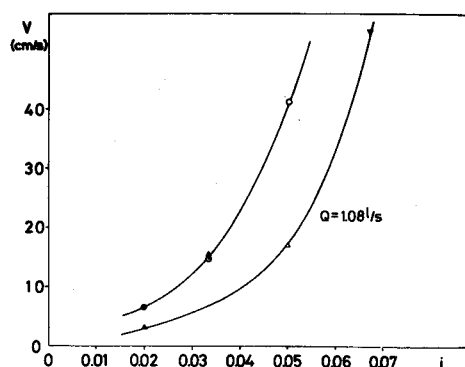


図 4 前進速度と勾配の関係

図 4 は河床勾配と蛇行の前進速度の関係を図示したものであり、河床勾配と流量の影響を強く受けていることがわかる。この前進速度を支配している物理量について考察してみる。蛇行水路内の流れは次のように解かれる。¹⁾

$$u = n \left(a \sin \frac{2\pi s}{L} + b \cos \frac{2\pi s}{L} \right) \quad \dots\dots (1)$$

但し

$$a = \frac{u_0}{2\pi \frac{h_0}{fL} + \frac{1}{2\pi} \frac{fL}{h_0}} \left(1 + \frac{u_0^2}{2gh_0} \right) \frac{2\pi\theta_0}{L} \quad \dots\dots (2)$$

$$b = \left\{ \frac{1 + \frac{u_0^2}{2gh_0}}{(2\pi)^2 \frac{h_0^2}{f^2 L^2} + 1} - 1 \right\} \frac{2\pi\theta_0 u_0}{L} \quad \dots\dots (3)$$

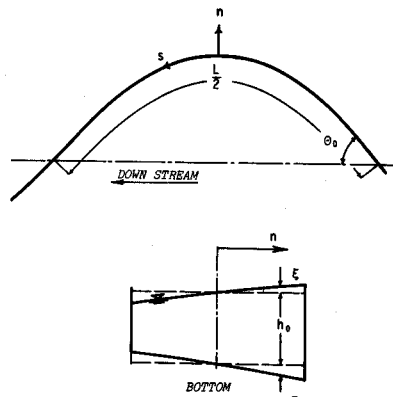


図 5 座標系の概略

である。ここに u_0 は断面内の平均流速、 u は実際の流速から平均流速をさし引いた偏倚量成分、 f は抵抗係数であり、その他の記号は図 5 に示されている。蛇行振巾の発達には蛇行の頂点 $s = 0$ での u の値、即ち b

の値で支配され、進行速度は $s = L / 4$ の値、即ち a の値によって支配されると思われる。なぜなら夫々の位置で偏移量 u の値を最大とするからである。 b を最大とする条件から卓越蛇行長 L_p が次のように求まる。

$$\frac{f L_p}{h_0} = 2 \sqrt{6} \pi \frac{\sqrt{g h_0}}{u_0} \dots\dots\dots (4)$$

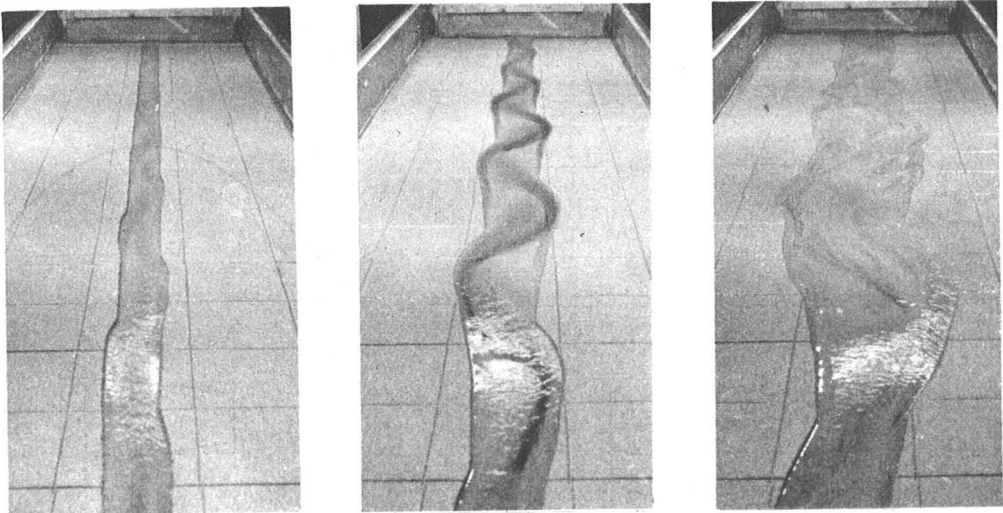
ここで蛇行長がそれぞれの地点で卓越蛇行長をとると考えて a の値がどのような水理量に支配されているかを考えてみる。式(4)を式(2)に代入し整理すると

$$a = \frac{f \theta_0 \sqrt{g}}{\sqrt{h_0}} \frac{u_0}{\sqrt{g h_0}} \frac{1 + \frac{u_0^2}{2 g h_0}}{1 + \frac{6 g h_0}{u_0^2}} \dots\dots\dots (5)$$

となる。即ち a の値は Froude 数によって支配されるといえよう。この a の値は Froude 数の増大とともに単調増加する関数形を有しているので、上下流で同一の流量を有していれば、Froude 数が大きい方が蛇行の前速速度は大きいはずである。ところで、 u_0 を Manning の式を用いて書き直せば

$$\frac{\sqrt{g h_0}}{u_0} = \frac{n}{h_0^{\frac{1}{6}}} i^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (6)$$

であるから、結局蛇行の前進速度は勾配が増大すれば u_0 自身の値が増大することとも相まって大きくなることが示される。以上の考察から勾配が急から緩へ変化する地点では蛇行形状の前進速度が異なる為に最終的には河道の迂曲、切断へ至り易いと考えることができよう。この点については実験水路において途中で勾配を変化させて実験を行なってみたいと思っている。更に実際の河川においても調査をすすめねばならないであろう。



(a) (b) (c) 最終状態

写真2 蛇行の発達と網状河川への移行 (Run 8)

写真2はRun8を水路の斜め上流から撮影し、その形状の時間変化を示したものである。初期には部分的に側岸が欠け、それとともに交互砂洲が河床に発達して行くことがわかる。写真2-aは主流の流線を示すものであり、水流は蛇行していることがわかる。このとき河床での砂の動きを観察すると凹岸側で侵食された砂は一部はすぐ下流のbarの部分へ運ばれ堆積するが、大部分の砂は主流とはほぼ同じ方向に運ばれ次第に舌のような砂洲が対岸下流へ向つて伸びて行く。このような状態がしばらく持続すると、侵食によつて河道の形状が前進し、それとともに主流の位置も変化して対岸に対する水当り部分も変化する。そうすると今度はかつて凸岸であつた部分に主流が衝突し、河巾は増々拡げられてしまう。又、砂が同じ岸の凸岸に堆積されず対岸へ向つて伸びて行く為にこの砂洲が対岸に達するとその時点で水が溢れる。このような状態になると水流及び河道は蛇行を維持することができず、最終的には河巾が拡がり中洲ができて写真2-cのような網状流路が形成される。このようにある段階ではきれいな蛇行が見られても河床構成材料が蛇行を維持できないようなものであると最終的に網状流路へと移行して行く。このことは直線水路で側岸を固定して水流の流れ方を安定・不安定解析で調べこれによつて蛇行河川と網状河川を区分する方法^{2,3}では不適切な場合もあることを示している。

次に蛇行が維持される条件について考察してみる。以上の観察から蛇行が維持されるには水流が蛇行するとともに蛇行振巾が増大しても川巾が一定に保たれる²ような機構が存在しなければならない。この機構は実際の河川では次の二点で維持されていると筆者は考える。即ち

- (1) らせん流の存在によつて凹岸側で侵食された土砂が同じ側の凸岸に堆積されること。
- (2) 側岸が粘着性を有している為に容易に川巾が拡がらないこと。

である。川巾が拡がつて水深が浅くなるとらせん流の強さは減少する⁴ので、(2)の条件と(1)の条件は表裏一体を成しているが、土砂が凸岸に堆積され易い為には、さらに河床材料の粒度分布も重要で、水深が浅く掃流力が小さい凸岸の砂洲に運ぶには粒径の小さなものも混じっている必要があると思われる。

このような条件を満足させるにはFriedkin⁵が行なつたようにシルトを砂に混ぜて実験を行なう方法がよいと思われるが、ここでは純粋に粘着性の効果のみを調べる積りで前にも述べたように砂にベントナイトを混ぜて実験を行なつてみた。ベントナイトを砂に様に混入させ水でまぜることは少々困難で、手順を誤るとベントナイトが塊状となつて砂に様に混ざらない。従つて筆者はまず砂とベントナイトを手練りで入念に混ぜ、その後コンクリートミキサーで水を加えて水が行きわたるようにした。これを水路に敷きつめ、更に水を加えて後に砂表面を平らにし、その後下流端のバルブから排水した。

Run9は排水時間を1日とした場合の実験である。ベントナイトによる粘着性は含水比の影響を鋭敏に受け、更に排水後時間が経過している為に側岸がかなり固まつており、この実験では通水初期に交互砂洲の発生が見られたものの側岸の侵食が困難である為に固定砂洲へとは発達せず、むしろ河床が低下してしまつた。このとき交互砂洲の長さは徐々に増大して行つたが最終的には明瞭な砂洲は観察できなかった。

Run10は排水時間を約1.5時間にとつた場合であるが、この例では排水時間が不足で含水比がやや大きい為に粘着性が不足しており、流路は写真2と同様に蛇行したもの、最終的には網状河川へと移行した。このとき最終状態に達するまでの所要時間は砂のみの場合と比較して大きかつた。このようにベントナイトを入れた実験はその制御が難しく、又ベントナイトが流れ去つてしまうので同一の条件で実験を行なうことは困難である。今後は先にも述べたように凸岸の堆積と側岸が粘着性を有し水深が容易に減少しないという二

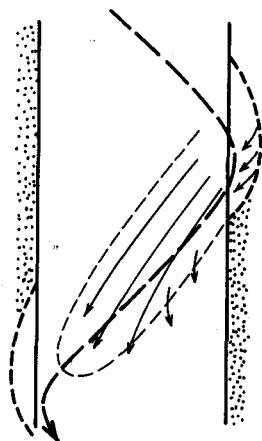


図6 砂の移動の模式図

つの条件を満足させる為にシルト、細砂を混ぜて実験を継続する予定である。

4. あとがき

以上の実験および考察の結果を列記すると次の通りである。

- (1) 蛇行波長は時間経過とともに増大するが次第に一定長に近づく。
- (2) 蛇行の前進速度は交互砂洲から固定砂洲へ移行するとともに急激に減少する。
- (3) 蛇行の前進速度は勾配の影響を強く受け、勾配が増大するとともに増加する。
- (4) 蛇行を維持させる為には水流が蛇行する条件のみでは不十分で、この他に河床材料の粒度構成が重要な要素であり、水深が保たれねばならない。

実験の遂行に当っては学部学生田辺岩男、技官大室利之両氏の援助を受けた。又、関陽太郎教授には文献の所在を御教え頂いた。記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) 池田駿介、日野幹雄、吉川秀夫：河川の自由蛇行に関する理論的研究、土木学会論文報告集、255号、1976。
- 2) Engelund, F and Skovgaard: On the origin of meandering and braiding in alluvial streams, J. Fluid Mech., vol. 57, part 2, 1973.
- 3) Callander, R.A. : Instability and river channels, J. Fluid Mech., vol. 36, part 3, 1969.
- 4) 池田駿介：移動床河川の湾曲部における二次流と動的横断平衡河床について、土木学会論文報告集、229号、1974。
- 5) Friedkin, J.F. : A laboratory study of the Meandering of alluvial rivers, U.S. Waterways Experiment station, 1945.
- 6) 藤田裕一郎、村本嘉雄：蛇行流路の形成過程に関する研究(1)、京大防災研究所年報18号B、1975。
- 7) 芦田和男、田中健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(1)、京大防災研究所年報18号B、1975。
- 8) Leopold, L.B and W.B. Langbein: River meanders, Scientific American, June, 1966.
- 10) 木下良作：石狩川河道変遷調査—参考編—、科学技術庁資源局資料36号、1962。
- 11) Wolman, M.G. and L.M. Brush : Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands, U.S.G.S. Prof. Paper, 282-G, 1961.
- 12) Leopold, L.B. and M.G. Wolman : River channel patterns—braided, meandering, and straight, U.S.G.S. Prof. Paper 282-B, 1957.
- 13) Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual : Sediment control methods, B. Stream Channels, Proc. ASCE, HY7, 1972.