

流水の蛇行及び流路形態に対する境界の効果

Boundary Effects on Meandering Stream and River Morphology

金沢工業大学 正員 中川 武夫
名古屋大学 学生員 堀田 正史

1. はじめに

流路自体が蛇行をしていればその流路に沿って流れる水が蛇行することは自明の理であるが、逆に流水が蛇行するためには流路が蛇行をしていることは必ずしも必要ではない。ここで、流水の蛇行とは藤芳(1949)が定義した流心の水平振動と同義である。足立(1967)は重力作用のみによって流れている直線流路内の水がある条件下で蛇行する事実に着目し、流水内に常に存在すると考えられる微小じょう乱こそが流水の蛇行素因と考え、流水蛇行に関する理論展開を行なった。これに対して著者らは微小じょう乱以外により実体的な流水の蛇行素因が存在するに違いないという予測から流水と流路境界との間の干涉機構の中に流水の蛇行素因が潜んでいるとする仮説をうちたてた。著者ら(1981)は既に流水が蛇行するためには、流路壁面の摩擦抗力の流路幅方向への分布が重要な役割を果し、流路床中央部での摩擦抗力が、より外側の流路壁面の摩擦抗力より大きいことが必要であるというこの仮説を支持する示唆をえている。

本論文は、上記の仮説の検証のための一段階として流路壁面の境界条件の流路幅方向への変化が流路内の流水蛇行及び流路形態にいかなる影響を与えるかを明らかにすることを意図したものである。

2. 実験装置及び実験方法

実験に使用した蛇行水路の概要をFig. 1に示す。水路は長さ25 m、幅2 mのモルタル製である。本実験では、水路上流端から5 mの区間を除く水路床全体に厚さ約30 cmの砂を敷きつめたのち、砂面勾配設定装置でまず水平距離12 mの区間を一定勾配 $\frac{1}{100}$ の砂面に整地し、この傾斜砂面に続く水平距離8 mの区間を水平砂面とした。続いて、水路中央の砂層に一定断面の初期流路を設定した。ここでは、一定勾配の砂層区間のみを実験の対象とした。

水路内への水の供給は高水槽と水路との間の水頭差による。なお、高水槽と水路との間はパイプで連結され、パイプ内の流量はパイプ内に取り付けられた電磁流量計により計測された。水路内へ導びかれた水はまず湛水部で流勢を止められたのち、流路入口部での流水の急縮に伴う乱れを抑えるために設けられた流路幅が漸減する砂でできた導入流路を経て実験流路内へ流入することになる。流路内を流れる水は流路壁の砂の浸食、運搬及び堆積を繰り返しつつ水路下流端に達し帰還水路を通り低水槽に帰る。

本実験で使用した砂の粒径分布はFig. 2に示したとおりであり、砂の平均粒径は0.43 mm、比重は2.65であった。

Fig. 3には、ここでの4種類の実験ごとの初期流路の形状、寸法及び境界条件を示した。また、実験1、2、3そして4の設定流量はそれぞれ、0.50 (ℓ/s)、0.70 (ℓ/s)、0.55 (ℓ/s)そして0.6 (ℓ/s)であった。

実験においては、流水挙動及び流路形態の写真撮影に加えて、Table 1に掲げた諸量の測定を実験の前、中、後に行なった。横断面、縦断面、水位、砂れき堆平面形及び流路平面形はポイント・ゲージにより5 mm間隔で測定を行なったが、実験2の場合にのみ測定した流速分布の測定は直径5 mmのプロペラ流速計を用いて、水面下7.5 mm、流路幅方向2 cm間隔、流路軸方向2 m間隔の各断面において行った。また、蛇行、砂漣及び砂れき堆の進行速度の測定は物さしとストップ・ウォッチを用いて行なった。

Table 2には、それぞれの実験について実験経過時間 t 、流路軸方向距離 x ごとにフルード数、平均流速及び平均水深の値を示した。ただし、これらの水理量はここでの実験の性格上、時間と場所に依存して変わるの

であくまで参考値と考えられるべきものである。

なお、実験結果の解析に際しては初期流路最上流端の河床面中央を原点とし、それぞれ流下方向を x 軸、左岸方向を y 軸、上方を z 軸の正とする右手座標系を採用した。また、各実験の経過時間 t の時間原点は初期流路内へ水が流入を開始した時刻とした。

3. 実験結果

本章では、ここで行なった4種類の実験結果を別々に述べることにする。

(a) 実験1

流路内へ水が流入してしばらくすると、流心の水平振動が始まった。ここで流心とは1つの流水横断面内で流速が最大となる点を意味する(藤芳 1949 p70)。時間の経過とともに、流心の水平振動の振幅が徐々に増大し、Fig. 4(a)の時点で既にこの流心の水平振動の振幅が流路幅に達しているために流心直下の河床が洗掘されるとともに流路側壁の浸食も、流心の軌跡が側壁に当たる部分で顕著となった。したがって、河床は上から見ると流心の軌跡に沿って正弦波状に洗掘されることになる。この正弦波状の軌跡に沿って砂漣が鎖状に形成され、(以後、砂漣鎖と略記。)、砂は滑動、転動または躍跳をくり返しつつ砂漣鎖の外形線に沿って運ばれると同時に、砂漣鎖全体が徐々に流下方向へ進むことによって運ばれることがわかった。

河床における砂漣鎖の形成により、その直上の水面に砂漣鎖とほぼ同位相の水面波が形成される。Fig. 4(b)の時点では流水自体の蛇行はもちろん、流路の平面形状が蛇行状になった。

Fig. 5には $x = 3.7\text{ m}$ 及び 10.0 m における流路幅と時間 t との関係を示した。同図には比較のために後出の実験2のデータも合わせてプロットした。Fig. 5から実験1と実験2のいずれの場合にも流路幅は時間とともに増加することが明らかになった。また、 $x = 3.7\text{ m}$ と $x = 10.0\text{ m}$ の地点における流路幅の増加の仕方の間には有意の差が認められないが、蛇行幅は下流の地点ほどその増加率が大きいことが分かっている。

流路が蛇行形状となると、側岸の各凹面部は良く知られているように時間の経過とともに徐々に流下方向へ移動する。Fig. 6に各凹面部の頂点の位置と時間との関係を示した。図中の記号 R、L はそれぞれ右岸、左岸を意味し、R または L に続く数字は各凹面部の頂点の位置を示すがこれらの番号が若いほど上流の位置を意味する。Fig. 6から、流路凹面部の進行速度は下流のものほど速いことが分かる。また、凹面部頂点 R4 の速度は流路が蛇行状になるとまもなく最大 $7.2\text{ cm}/\text{min}$ に達したが、時間の経過とともにその速度を減じ最終的に速度零となる。ところが Fig. 6 の図中矢印で示めされているように凹面部頂点 L4、R3、L3 及び R2 のようにその速度が零になるとそのすぐ下流側に新たな凹面部を形成し再び流下方向へ進行するという事実が観測された。さらに Fig. 6 は距離 x 、時間 t にかかわらず蛇行長はほぼ 2 m を保ちながら蛇行形態全体が下流方向へ進むことも示している。

Fig. 7には距離 $x = 3.7\text{ m}$ での流路横断面形状の時間 t に伴う変化を示した。Fig. 7(b)では流心が流路中央部にあったものが、(c)では右岸側へ移動し、さらに(d)、(e)及び(f)では、左岸側に流心があるものの、断面形状に数本の明確な溝が認められる。この結果、流心の位置が時間 t とともに刻々と変化すること及び時間 t が十分に長くなると、流路内流水が網状となることがわかるであろう。

(b) 実験2

初期流路内へ水が流入するやいなや、側壁から流水によりえぐられた砂が流路床に敷いた板を覆いつくす。砂が流路床に堆積する割合は時間 t の増加にともない漸減する。流路床が砂で覆われる以前では流水は流路内を直線的に流下し、流水の蛇行は認められなかった。ところで、このように流路床が完全に砂で覆いつくされてしまえば、この流路の境界条件は実験1のそれと同様になるので、以後の流水の挙動、砂の浸食、輸送及び堆積の過程は実験1の場合と極めて似かよったものとなったが同時に次のような相違点が認められた。Fig. 5 から、実験2のように流路床に板を敷いた場合のほうが流路幅の増加率及び漸近流路幅とも流路床に

板を敷かない実験 1 の場合より小さいことが明らかとなった。同じく、Fig. 5 から実験 2 の場合には距離 $x = 2 \text{ m}$ の場合を除いて、距離 x にかかわらず流路幅がほぼ同じ率で増加していくことがわかった。このことは実験 2 の場合には Fig. 8 に示すように流路両岸が常にほぼ平行の状態を保ちながら時間 t の増加とともにその距離を拡げていくことを意味する。さらに Fig. 4(b) と Fig. 8 の流路平面形状を比較すると、実験 2 の場合には実験 1 ほど流路の蛇行形状が顕著ではないことがわかる。以上のような実験 1 と実験 2 の相違は、河床に堆積している砂層厚の差に起因することは明白である。なお、Fig. 5 で距離 $x = 2 \text{ m}$ における流路幅の増加の仕方が他と異なるのは、流路上流端の影響によるものと考えられる。

Fig. 9 には距離 $x = 6 \text{ m}$ での断面流速分布を、また Fig. 10 には同地点での流路断面形状を示した。Fig. 9(a) と Fig. 10(b)、Fig. 9(b) と Fig. 10(c) をそれぞれ比較すると、流速が極大となる位置と河床の洗掘部とが良好な対応を示していることがわかるであろう。

(c) 実験 3

初期流路内へ水が流入するとまもなく、流路床に Fig. 11(a) に示したような砂連鎖が形成された。Fig. 11(a) で小判型の部分は個々の砂連鎖の頂部を示す。また、Fig. 11(b) は、河床に砂連鎖が形成され、水面にこれとほぼ同位相の波が形成されている状況を示す写真である。

河床の砂は、主として流路中央部の砂連鎖の外形線に沿って転動、滑動あるいは躍跳をくり返しながら流下方向へ輸送されると同時に、砂連鎖全体が下流へ移動することにより輸送される。例えば時間 $t = 210 \text{ min}$ における砂連鎖の速度は 3 mm/s であった。なお、砂連鎖の波長、波高はそれぞれ約 3 cm 、 1 cm であった。

流路内の流水の挙動に関しては、流心の蛇行は顕著には認められなかったものの、流水全体が横振動をしたために、Fig. 11(a) に示したように側壁表面には波形の水際線を観察することができた。

また、Fig. 11(a) に示したような砂連鎖は常に流路全体にわたって形成されているわけではなく、突如として流路のある区間、ある期間、平滑化されることがあることも明らかになった。

(d) 実験 4

初期流路内へ水が流入するとまもなく、流心の水平振動が観測された。

本実験と実験 3 との間の境界条件の類似性にもかかわらず、両実験の河床波の形態が著しく異なる。Fig. 12 は時間 $t = 96 \text{ min}$ ごろの流路床に形成された砂れき堆の平面形状と主要な流れの概略の軌跡を示した。但し、ここでは流路最上流端で砂を補給していないので、流路上流部の河床が洗掘低下する範囲での砂れき堆の形は不整一なものとなった。

砂連鎖は Fig. 12 の主流の軌跡に沿って主として形成され、副流は砂れき堆の外形線をきわだたせるように砂を浸食することがわかった。

この実験の場合には砂の移動は、砂連鎖の外形線に沿う滑動、転動または躍跳によるもの、砂連鎖全体の移動によるもの、副流軌跡に沿う滑動または転動によるものに加えて、砂れき堆全体の流下方向への移動により行なわれる。例えば、距離 $x = 5.44 \text{ m}$ 、時間 $t = 168 \text{ min}$ の砂れき堆先端の速度は 0.439 mm/s であった。

4. 議 論

著者らは直線流路が蛇行流路へと変形していく前触れ (Precursor) として流水蛇行をとらえている。換言すれば流水の蛇行素因と流路のそれとの間には本質的な相違は存在しないものと考えている。そこで、前章に示した実験結果を流水蛇行と流路境界条件との関連で考察を加えることにする。実験 2 の場合で、流路床の板が砂で覆われる以前の流路のように流路床における摩擦抗力の方が流路側壁のそれより小さいと考えられる流路境界をもつ流路内の流水は蛇行をしないで真直ぐに流下するのに対して、実験 3 及び 4 の場合のように流路床における摩擦抗力の方が流路側壁のそれより大きいと考えられる流路内の流水は蛇行をする

ことが明らかとなった。なお、実験1の場合には流路壁が全て砂でできているので他の3つの実験のように流路境界の流路幅方向への相違はないが、流路壁面の摩擦抗力の流路幅方向への分布が、流路境界以外の効果たとえば流路断面形、流路内の流速分布、流路壁構成材料等により、実験3及び4の分布と同様になるために流水の蛇行が起こったものと予想される。

木下(1957. p5)はここでの実験3及び4と同様な実験を行ない、河床波の形態が流路幅に対する水深の比 d_w の値により異なることを指摘している。すなわち、流路床を構成する砂の粒径により異なるとしながらも、 $d_w = 0.1 \sim 0.05$ 程度では砂れき堆が形成されるのに対して、 $d_w > 0.1$ の範囲では砂堆または砂漣が形成されると述べている。事実、ここでの実験においても $d_w \neq 0.25$ である実験3の場合には砂漣が形成され、 $d_w \neq 0.023$ である実験4の場合には砂れき堆が形成された。一方、このような河床波の形態の差をフルード数の違いに帰着する見方もできよう。Table 2から、実験3の場合のフルード数は1以下であるのに対して、実験4の場合のフルード数は1以上である事実注目すれば、常流の場合には砂漣が形成され、射流の場合には、砂れき堆が形成されるのであろうという予測も可能であるが、これに関して林(1970 p21)は木下による比重が比較的小さい石灰粒子を用いたフルード数が1よりかなり小さい場合の実験結果を引用し砂れき堆の形成はフルード数には依存しないことを示唆している。

以上のことから、ここでの実験3あるいは実験4のような境界をもつ流路の河床形態は木下(1957)の指摘のように流路幅に対する水深の比が支配的に影響するものと考えられる。

5. 結 論

流路内の流水挙動、流路形態及び河床形態は流路の境界条件に依存して変わることが明らかになった。

また、流路床における摩擦抗力の方が流路側壁のそれより小さいと考えられる流路境界を有する流路内の流水は蛇行しないが、逆に流路床における摩擦抗力の方が流路側壁のそれより大きいと考えられる流路内の流水は蛇行することが明らかとなった。

6. 謝 辞

故足立昭平氏は著者らの一人(中川)に蛇行研究の端緒を与えられたのみならず、本研究の遂行にあたり、幾多の有益な助言を与えられた。

また、本実験は名古屋大学土木工学科水理実験室において行われたものであるが、その間、名古屋大学・高木不折氏、豊橋技術科学大学・中村俊六氏、大同工業大学・久保田稔氏及び当時の名古屋大学学生・真新哲朗君に種々の援助をいただいた。ここに付記し、謝辞とする。

参 考 文 献

- 1) 木下良作：河床における砂礫堆の形成について、土木学会論文集、第42号、1-21(1957)。
- 2) 中川武夫・中川俊六・真新哲朗：蛇行の発生と、流路形態に関する実験的研究。土木学会中央支部研究発表会講演概要集、76-77(1981)。
- 3) 藤芳義男：河川の蛇行と災害(河川蛇行論)、佐々木図書出版、東京(1949)。
- 4) 林泰造：河川蛇行論、土木学会水理委員会、水工学シリーズ70-16(1970)。
- 5) Adachi, S.: A Theory of Stability of Streams. Proc. IAHR, 1, 338-344(1967)。
- 6) Nakato, T.: Model Studies of Bed Roughness in Alluvial Streams. M. Sc. Thesis.

Department of Civil Engineering, Nagoya University(1968)。

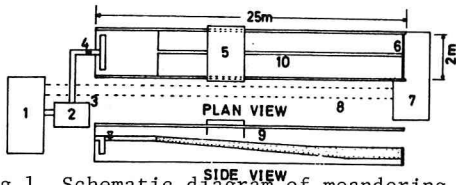


Fig.1 Schematic diagram of meandering flume.
1;low tank,2;high tank,3;pump,4;flow meter,
5;scraper,6;weir,7;sand pool,8;return channel,
9;rail,10;channel.

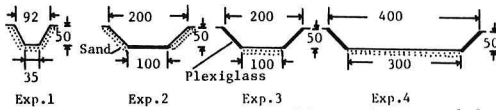


Fig.3 Cross sections, dimensions and boundary conditions for each initial channel.
(units:mm)

Table 1 Data for each experiment.

Exp.No.	Data	During experiment						
		Transverse cross section	Transverse cross section	Water level	Meandering velocity distribution	Ripple speed	Sarekital speed	Sarekital plane view
1	U	U	U	U	U	U	U	U
2	U	U	U	U	U	U	U	U
3	U	U	U	U	U	U	U	U
4	U	U	U	U	U	U	U	U

Exp.No.	Data	Post-exp.			
		Transverse cross section	Longitudinal cross section	Channel plane view	Sarekital plane view
1	U	U	U	U	U
2	U	U	U	U	U
3	U	U	U	U	U
4	U	U	U	U	U

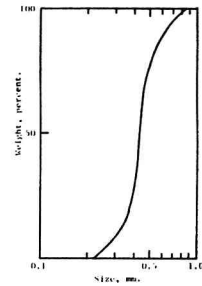


Fig.2 Size distribution of sand(after Nakato 1968).

Table 2 Hydraulic parameters.

Parameter	Exp.No.	1	2	3	4
Froude No. $Fr = U/\sqrt{gd}$		0.50	0.44	0.61	1.21
Mean flow velocity U (cm/s)		20.2	17.0	30.1	31.8
Mean water depth d (cm)		1.7	1.5	2.5	0.7
Elapsed time (min.)		20	43	32	20
Position x (m)		3.7	8.0	4.0	2.0

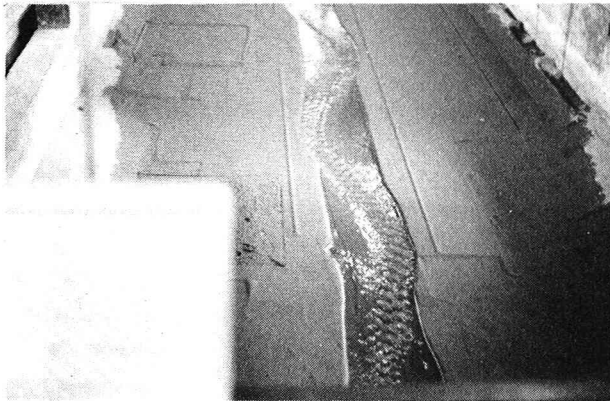


Fig.4(a) Meandering of water stream centre.
(t=91 min.)

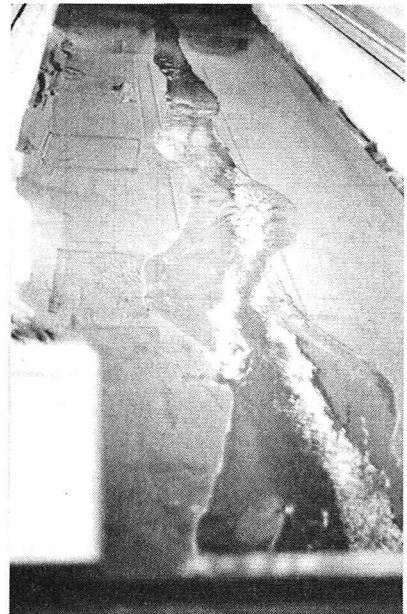


Fig.4(b) Meandering of a sand channel
(t=305 min.)

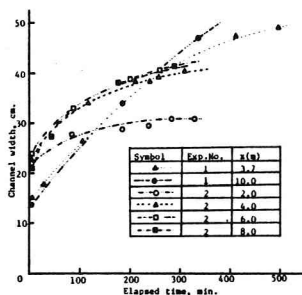


Fig.5 Channel width vs. elapsed time.

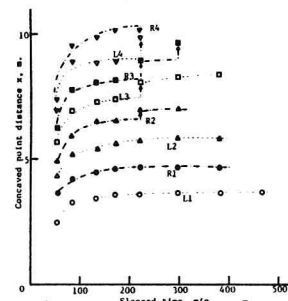


Fig.6 Progression of concaved points at a channel bank.

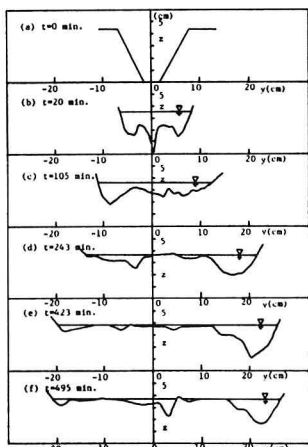


Fig.7 Development of cross section for a sand channel. ($x=3.7$ m)

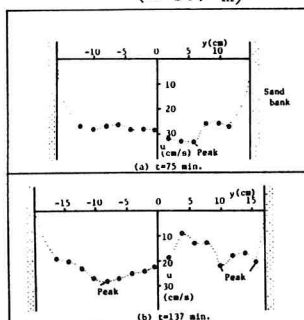


Fig.9 Velocity distribution at a channel cross section composing of sand except bed initially. ($x=6.0$ m and 7.5 mm below water surface.)

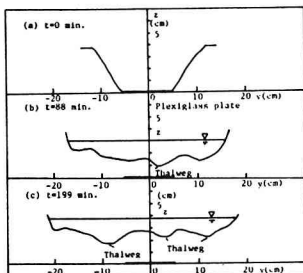


Fig.10 Development of cross section for a channel composing of sand except bed initially. ($x=6.0$ m).

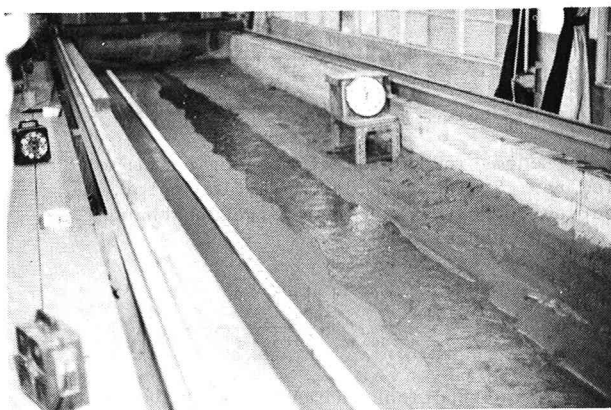


Fig.8 Pattern of sand channel with solid bed initially. ($t=300$ min.)

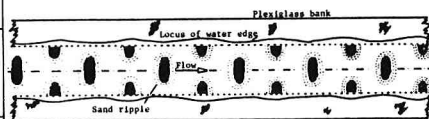


Fig.11(a) A sketch of sand ripple trains on a bed.

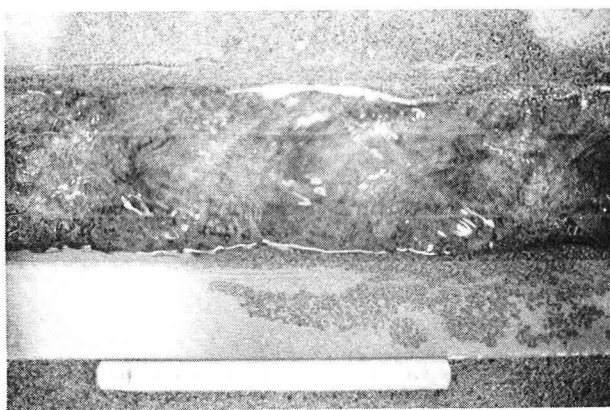


Fig.11(b) Surface waves over sand ripple trains.

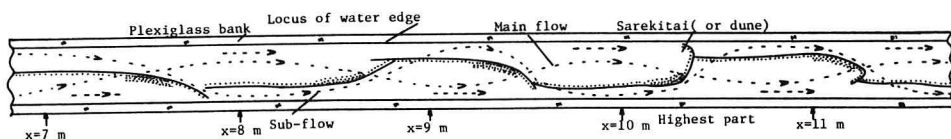


Fig.12 Formation of 'Sarekitai' (or dune) on a sand bed with solid bank. ($t=96$ min.)