

一水路内での水路幅に対する水深比の流水蛇行及び河床形態に対する効果

On Effects of the Ratio of Depth to Width on Stream Meanders and Bed Morphology
in a Sand Channel with Solid Banks

金沢工業大学 正 員 中 川 武 夫

金沢工業大学 正 員 今 井 悟

金沢工業大学 学生員 牧 田 孝 之

1. はじめに

流水蛇行が側壁が固定、床が砂からできている水路内で起こるという事実は既に木下（1957）、Chang et al（1971）、中川・堀田（1982）、Nakagawa（1983）らにより報告され、この流水蛇行と水路床に形成される交互砂州との間の密接な関係が指摘されている。ここで、流水蛇行とは藤芳（1949）が定義した流心の水平振動と同義である。ところで、流水蛇行発生条件については従来余り注目されてこなかったが、Nakagawa（1983）は境界条件の異なる5種類の一様水路内での実験結果を基礎にして次のような流水蛇行の発生条件を提案している。

$$Me = \tau_s P_s / \tau_b P_b < (Me)_{crit.} \quad (1)$$

ここで、 Me は上で定義された流水蛇行を支配する無次元パラメータであり、 $(Me)_{crit.}$ はその臨界値である。 τ_s と τ_b はそれぞれ側壁と床に働く平均せん断応力である。また、 P_s と P_b はそれぞれ、一様水路断面の一方の側壁の潤辺長と床の潤辺長の半分である。(1)式の特別の場合として、両側壁が床面に対して垂直な場合には P_s と $2P_b$ はそれぞれ水深 d と水路幅 w に他ならないので、(1)式を次のように書きなおすことができる。

$$d/w < \frac{(Me)_{crit.}}{2} \frac{\tau_b}{\tau_s} \quad (2)$$

(2)式から水路内における流水蛇行発生条件を水路幅に対する水深の比 d/w では、一義的に規定することはできず、この比は τ_b/τ_s の値に依存することがわかう。このことに関連して、木下（1957）は側壁が固定、床が砂から成る一様水路内の流水が蛇行し、かつ水路床に交互砂州が形成される場合の d/w の値の範囲は $0.05 \sim 0.1$ 程度であり、この比の値が 0.1 以上の場合には流水は蛇行しないで水路床に砂澁または砂堆が形成されるという報告に加えて、流水蛇行が発生するときの d/w の臨界値が床に敷かれた砂の粒径分布に依存すると述べている。水路床に敷く砂の粒径分布が τ_b/τ_s の値に影響することを考慮すれば、木下（1957）によるこの実験結果の記述は(2)式と両立するものである。したがって、(2)式及び木下（1957）の実験結果から、逆に τ_b/τ_s の値を決める水路の側壁及び床の境界条件一定に保てば、流水蛇行の発生条件は(2)式で規定できることになる。 (2)式はより一般的な流水蛇行発生条件である(1)式の、いわば条件付流水蛇行発生条件といふべきものであるが、その適用上の簡単さにおいて(1)式より優っているといえよう。また、河川改修の済んだほとんどの河川の側壁及び床の境界条件がほぼ一定であることを考えると(1)式の有用性がさらに増そう。

本研究は(2)式で表現される条件付流水蛇行発生条件の d/w の臨界値を側壁が固定、床が砂でできている水路内で実験的に決めること及び d/w の値によって水路内の流水の挙動及び水路床の形態がどのように変わるかを明らかにすることをその目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

Fig. 1 は実験に使用した水路の平面図及び側面図を示す。水路上流端の湛水部と下流端の沈砂部の間に厚さが 0.1 m となるように砂を敷き、砂の表面が水平面となるように整地した。砂面勾配は水路上流端の底部

下面にスパーサーを挿入することにより $\frac{1}{100}$ に設定した。続いて、図のように、長さ 3 m 、幅 0.15 m 、厚さ 10 mm の二枚のアクリル板を両内壁面が互いに平行で、その間隔が 0.1 m となるように砂面に対して垂直に突き立てた。すなわち、これら二枚のアクリル板が本実験水路の側壁となり、この間に挟まれた長さ 3 m 、幅 0.1 m の砂層が水路床となるわけである。

水路内への水の供給は高水槽、ホース、湛水部底部の有孔パイプ、湛水部、導入水路を経て行なわれる。各実験ごとの流量計測はメスシリンダーを用いて、ホース出口部において行なった。このようにして、初期水路内へ導びかれた流水は水路床を構成する砂の侵食、運搬及び堆積をくり返しつつ水路下流端の沈砂部に到ったのち排水されることとなる。なお、有孔パイプ及び湛水部は流水の乱れを極限するためのものであるが、導入水路設定の目的は主として、水路入口部における砂の供給の不連続性緩和をねらったものである。しかしながら、予備実験の結果、とくに流量が少ない場合には水路入口部における砂の供給の不連続性の影響が避けられないことが明らかになったので、こうした水路区間はここでの実験対象から除くこととした。

Fig. 2 は実験に使用した砂の粒径分布を示す。すなわち、砂の中央粒径は 0.31 mm であり、その比重は、 2.65 である。Table 1 には、ここで行なった 4 種類の実験ごと流量、平均流速、平均水深、フルード数、水路幅及び水路幅に対する水深の比の値を掲げた。実験中、水路内における流水の挙動及び水路床形態の写真撮影を逐次行なうとともに、流水が水路入口に達してから約 2 分後から水路内の流心平面位置の測定をポイント・ゲージにより流下方向へ 10 cm ごとに行なった。なお、流心の平面軌跡は、中川・堀田（1982）の研究により、水路床で砂の輸送が最も活発に行なわれる彼らにより定義された砂連鎖及び砂連鎖の形成にもなって水面に現われるこれとほぼ同位相の波列の平面軌跡と一致するということが明らかにされているので、この知見を用いて求めた。また、各実験の通水時間は 25 分間であり、通水後に実験対象区間内において流下方向と水路幅方向へ、それぞれ 10 cm と 0.5 cm 間隔で水路床の高さの測定をポイント・ゲージを用いて行なった。

なお、実験結果の解析にあたっては、初期水路入口端の床の中央を原点とし、それぞれ流下方向を x 軸、左岸方向を y 軸そして上方を z 軸の正方向とする右手座標系を採用した。但し、水路断面形状の表示にあたっては、 z 軸の原点は常に当該断面の初期水路床の高さとした。また、実験経過時間 t の時間原点は流水が初期水路入口端へ到達した時点とした。

3. 実験結果及び考察

Fig. 3 は各実験ごとの流心の平面軌跡を示す。但し、 y 軸のスケールは x 軸の 10 倍に拡大されていることには注意を要しよう。図から水路幅に対する水深の比 d_w の値が増加するに従って水路中心軸を基準としたときの流心平面軌跡の波長及び振幅はいずれも減少する傾向を示していることがわかる。Fig. 4 は実験 3 の途中、 $t=2\text{ min}$ の時点で水面に現われた波列の状況を示す写真である。この写真は $x \approx 2.3\text{ m}$ から 3.2 m の水路の範囲を下流から上流に向かって撮影したものである。この写真からは、実験 3 の場合の波列の平面軌跡が極めて直線的で、かつこの波列の水路幅方向の位置は上流から下流全体にわたって水路中心軸にあるかのようにみえようが、この実験 3 の場合のみならず、 d_w の値がさらに増した実験 4 の場合にも、Fig. 3 に示したように流心の水平振動が存在していた。

ところで、流心平面軌跡の測定は $t \approx 2\text{ min}$ の実験初期に行なわれたものであるので、この時点では前述のように d_w の値が大きいほど、流心の水平振動の振幅は小さいが、時間の経過とともに徐々に増加し、最終的にはいずれの実験ケースの場合にもこの振幅は水路半幅に等しくなるが、流心の水平振動の波長は時間の経過とは独立に、 d_w の値に固有なほぼ一定な値を保持することが明らかとなった。これに伴って、水路床には比 d_w の値に固有な流心の水平振動の半波長とほぼ長さの等しい河床波が形成された。たとえば、Fig. 5 は実験 3 の終了後に撮影した、 $x \approx 1.5\text{ m}$ から 1.9 m の範囲の水路床に形成された河床波の状況を示す写真であるが、Fig. 3 からわかるように実験 3 の場合の $t \approx 2\text{ min}$ の時点での流心の水平振

動の半波長 (20 cm 程度) とこの実験終了後の河床波の長さとはほぼ等しいことがわかる。このことはまた、 d/w の値にかかわらず、本実験で対象とした側壁が固定、床が砂から成り立っている水路床の河床波の形成機構は本質的には同じであることを示唆している。Fig. 5 に示めされたような形態の河床波を一般に砂堆と呼称して交互砂州と区別されているようであるが、両者の間に本質的な差異は認められず単に幅に対する長さの比において前者の方が後者より小さいのみである。従って、交互砂州が水路床にできるかどうかの d/w の臨界値は交互砂州をどのように定義するかに依存するためにそのあいまいさはまぬがれないが、Fig. 5 に示したような河床波がたぶん交互砂州と呼びうる限界と考えられよう。というのは、Fig. 6 は実験 4 の終了後に撮影した、 $x \approx 2.0 \text{ m}$ から 2.6 m の範囲の水路床に形成された河床波の状況を示す写真であるが、Fig. 3 からわかるように、実験 4 の場合の $t \approx 2 \text{ min}$ の時点での流心の平面軌跡は他の三つの実験ケースの場合のそれと比べて明確でなく、流下方向の位置によっては二本の流心が描かれている。このように複数の流心の軌跡が実験 4 の場合に限って描かれているのは、Fig. 4 に示した写真中に認められるような波列が実験 4 の場合には数条同時に水面に現われ、一本に限定することが容易ではなかったことによる。すなわち、実験 4 の場合の程度に d/w の値が増すと流心そのものが不明確になってくる結果、水路床に形成される河床波の形態は Fig. 6 に示されたようなうろこ状砂州となり、交互砂州とは大きく異なる河床形態となるからである。

Figs. 7、8、9 そして 10 はそれぞれ実験ケース 1、2、3 そして 4 の $x = 1.5 \text{ m}$ から 2.5 m の範囲にある水路断面形状を 10 cm 間隔ごとに示したものである。Table 2 には、各実験ごとに Fig. 3 から読みとった流心蛇行の程度に加えて河床波の形態、河床波の長さ、河床波の最大高さ及び水路床が侵食性か堆積性かの別を Figs. 7-9 から読み取ってまとめた結果が示めされている。すなわち、流心の平面軌跡は d/w の値が 0.10 未満の実験 1 と 2 の場合には正弦波状であるが、 d/w の値が 0.10 の実験 3 の場合にはほぼ直線となる。そして d/w の値が 0.10 より大きい実験 4 の場合の流心の平面軌跡は直線的ではあるが軌跡の数が複数となる。河床波の形態は d/w の値が 0.10 未満の実験 1 と 2 の場合には交互砂州、 d/w の値が 0.10 の実験 3 の場合には砂堆そして d/w の値が 0.10 より大きい実験 4 の場合にはうろこ状砂州となる。各実験ごとの河床波の長さは Table 2 に掲げたとおりであるが、この結果から河床波の長さが d/w の値の増加に伴って減少する傾向を認めることができる。河床波の最大高さは、実験 1 のみが約 1 cm であるのに対して、残りの実験 2、3 及び 4 のいずれも約 2 cm である。水路床が侵食性であるか堆積性であるかは、流心の水平振動が存在し、かつ水路床に交互砂州が形成される実験 1 と 2 の二つの場合が堆積性であるが、流心軌跡がほとんど直線となり、水路床に砂堆が形成される実験 3 の場合には侵食性となることが明らかとなった。なお、流心軌跡の数が複数となり、水路床にうろこ状砂州が形成される実験 4 の場合には水路各断面における砂の量がほぼ平衡状態となった。すなわち、実験 3 の場合のみ水路床が明瞭な侵食性を示していることになる。この原因の主なものとしては、(1) 流心の軌跡が直線的であること、(2) フルード数が 0.92 と常流と射流とを区分するフルード数の値 1.0 と比較的近いため流れに対する河床抵抗が急増したことの二つをあげることができよう。これら二つの原因のうちのいずれか欠けても水路床が侵食性とはならないことは、実験 2 の場合のように、フルード数は 0.92 と実験 3 と同じであるのに、流心が正弦的に振動するために水路床が逆に堆積性となった例からも明らかであろう。

4. 結論

側壁が固定、床が砂からできている水路内での本実験から得られた主な知見は次のとおりである。

- (1) 水路幅に対する水深の比の値が増加するに従って、水路中心軸を基準としたときの流心平面軌跡の波長及び振幅はいずれも減少する。なお、流心平面軌跡の振幅は時間の経過にともなって増加するが、その波長は時間の経過とは独立に水路幅に対する水深の比の値に固有なほぼ一定な値を保持する。
- (2) 流水蛇行すなわち流心の水平振動は水路幅に対する水深の比の値にかかわらず存在するが、この比が約

0.10 以下の場合には水路床に交互砂州が形成され、一方この比が約 0.10 以上の場合には水路床に砂堆あるいはうろこ状砂州が形成される。

- (3) 水路幅に対する水深の比の値が 0.10 未満の場合には水路床が堆積性、この比が 0.10 以上の場合には水路床がほぼ平衡状態となるのに対して、この比の値がちょうど 0.10 程度となる場合に限って水路床が明確な侵食性となる。この原因として流心水平振動及びフルード数の二つの効果が示唆された。

5. 参考文献

- Chang, H.Y., Simons, D.B. & Woolhiser, D.A.(1971) Flume experiments on alternate bar formation. Proc. Am. Soc. civ. Engrs. 97, WW1, 155-164.
- Fugiyoshi, Y.(1949) Kasen no Dako to Saigai, Sasaki Pub. Co., Tokyo.
- Kinoshita, R.(1957) Formation of " Dunes" on river bed- an observation on the condition of river meandering. Trans. Japan Soc. civ. Engrs. 42, 1-21.
- Nakagawa, T. & Hotsuta, M.(1982) Boundary effects on meandering stream and river morphology. Proc. 26th Japanese Conf. Hydraulics, Tokyo, 45-50.
- Nakagawa, T.(1983) Boundary effects on stream meandering and river morphology. Sedimentology, 30(to be published).

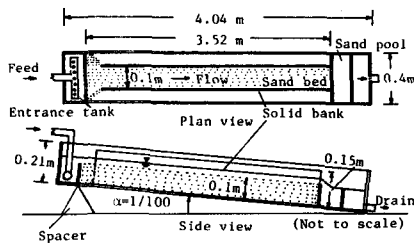


Fig.1: Schematic diagram of the experimental set-up.

Table 1. Hydraulic parameters.

	Ex.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4
Discharge[cm ³ /s]	127	241	300	333
Mean velocity U[cm/s]	31	27	29	25
Mean depth d[cm]	0.40	0.89	1.03	1.31
Froude no. $F_r=U/\sqrt{gd}$	1.58	0.92	0.92	0.71
Channel width w[cm]	10	10	10	10
Depth/width d/w	0.04	0.09	0.10	0.13

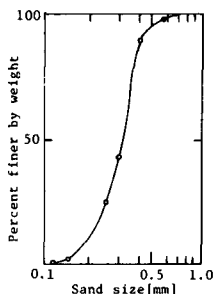


Fig.2: Size distribution of sand grains.

Table 2. Stream meandering and bed morphology

	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4
Locus of stream centre	Sinuous	Sinuous	Straight	Straight but multiple
Type of sand wave	Alternate bars	Alternate bars	Dunes	Imbricate bars
Length of sand wave[cm]	≈50	≈25	≈20	≈10
Maximum height of sand wave[cm]	≈1	≈2	≈2	≈2
Erosion bed or deposition bed	Deposition	Deposition	Erosion	Equilibrium

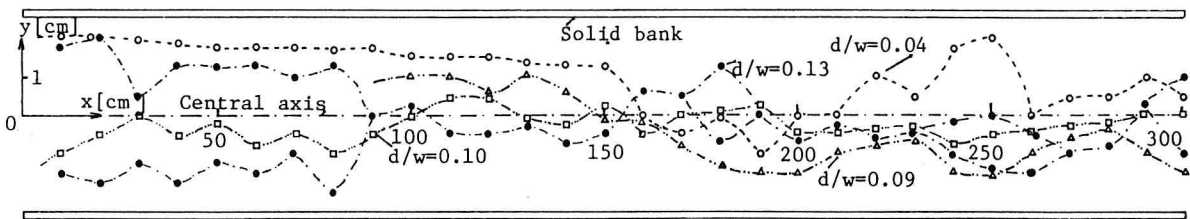


Fig.3: Plan locus of stream centre for each experiment. ($t \approx 2$ min.)

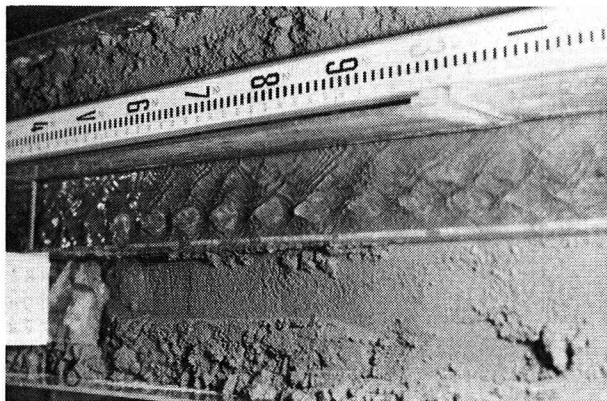


Fig.4: Wave train appeared on the water surface in experiment 3 ($t \approx 2$ min.). Flow direction is from left to right.

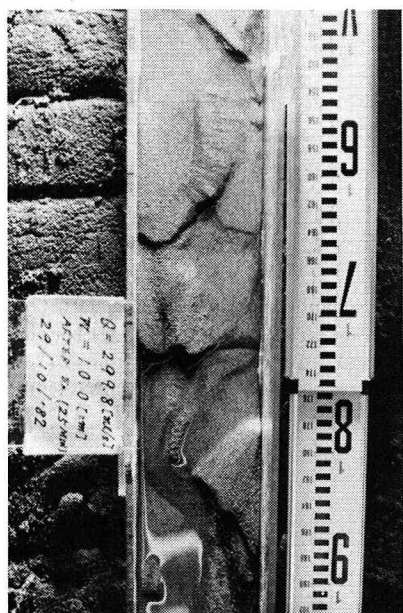


Fig.5: Dunes on the sand bed after experiment 3 ($t = 25$ min.). Flow direction is from top to bottom.

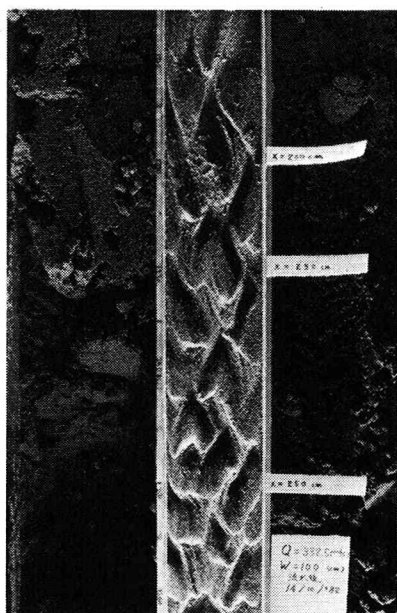


Fig.6: Imbricate bars on the sand bed after experiment 4 ($t = 25$ min.). Flow direction is from top to bottom.

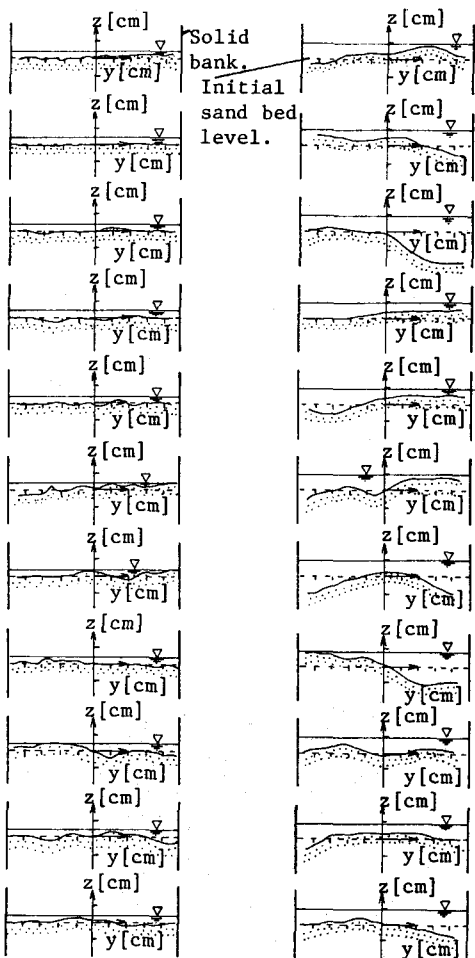


Fig.7: Channel cross sections at 10 cm intervals for experiment 1. (t=25 min.)

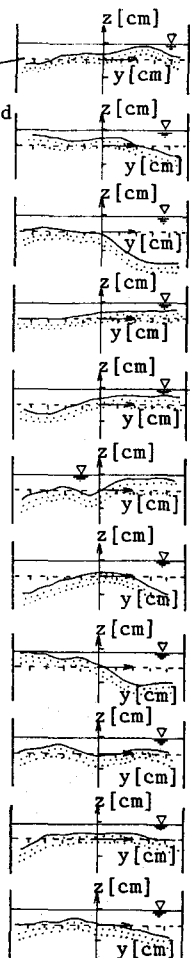


Fig.8: Channel cross sections at 10 cm intervals for experiment 2. (t=25 min.)

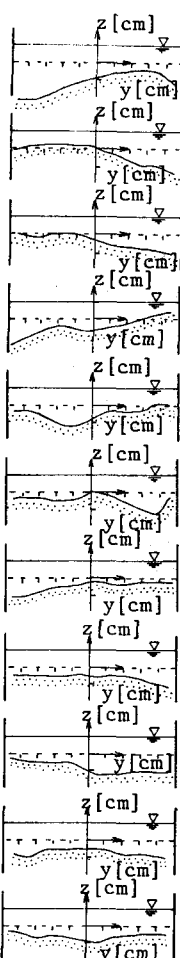


Fig.9: Channel cross sections at 10 cm intervals for experiment 3. (t=25 min.)

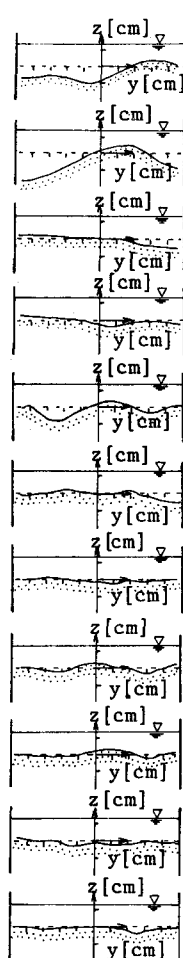


Fig.10: Channel cross sections at 10 cm intervals for experiment 4. (t=25 min.)

(Both horizontal and vertical scales are in cm unit.)