

流水挙動及び流路形態に関する水路境界の役割

Role of Channel Boundary in the Streams and Morphologies

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 小 澤 誠
金沢工業大学 学生員 桃 井 康 憲
金沢工業大学 宇 谷 彰 訓

1. はじめに

移動床水路内で起こる蛇行、河床波の形成、土砂輸送などのもろもろの水理現象は水路内を流れる水と境界との干涉作用の各局面を示しているものと考えることができよう。こうした視点は流水と水路境界の干涉機構に変化をもたらす砂の粒径分布、河床勾配等の変化にともなって移動床水路内での水理機構が変わるという既存の多くの実験事実によって裏打ちされている。

自然河川が広大な沖積平野の上を自由に蛇行する場合はさておき、今日見られるような多くの都市河川内での水理現象を取り扱う際に無視できない要素の一つに水路境界の効果がある。たとえば、河川堤防の一部が護岸工事により可侵食性の土砂からコンクリートなどの非侵食性の固定境界によって取りかえられた場合には、流水と水路境界との干涉機構がこのことによって何らかの影響を受けることは容易に予想できることである。それにもかかわらず、この種の研究が本格的に始まったのはつい最近のことである。著者らは流水と水路境界との干涉機構に注目し、これが流水及び流路の蛇行の生成、維持そして消滅に支配的な役割を果たしていることを実験的に明らかにしている。

本研究は流水挙動、流路形態、河床波の形状及び河床波のスペクトルが水路の境界条件にどのように依存するかを明らかにすることを主な目的とする。また、河床波の形成機構についてもいくらかの考察を加えることとする。

2. 実験装置及び実験方法

実験に使用した水槽の概要を Fig.1 に示す。実験は長さ 5.89 m、幅 0.4 m、深さ 0.2 m のアクリル製容器に厚さ 100 mm の砂を敷いてつくった水槽内で行なわれた。まず、水槽中央の砂層表面に長さ 5.36 m の定断面の初期水路を河床勾配が $1/100$ となるように設定した。Fig.2 に本実験で用いた 5 種類の初期水路の断面形状、寸法及び境界条件をそれぞれ示した。これらの初期水路境界は砂またはアクリルであり、水路側壁面と底面とのなす角度は水路 2 の左岸のそれが 90 度であることを除き全て砂の安息角 34 度である。

水路内への水の供給は高水槽と水路との間の定水頭差による。高水槽と水路との間はパイプで連結され、流量は実験に先だってパイプ出口部において計測された。このようにして、水路内へ導びかれた水は湛水部においていったん減勢されたのち、初期水路内へ流入することになる。水路内を流れる水は境界を構成する砂を侵食、運搬あるいは堆積しつつ水路下流端に達し、沈砂池を経て排水される。本実験で使用した砂の粒径分布は Fig.3 に示したとおりであり、この砂の中央粒径は 0.31 mm 、比重は 2.65 であった。

実験方法は一定流量、 $158.8\text{ (cm}^3/\text{s)}$ の水を各水路内へ合計 80 分間通水するというものであるが、この間、 $t = 20, 40, 60\text{ min}$ の各中間時点で通水をいったん停止し、 $x = 250, 300, 350$ 及び 400 cm の場所における水路横断面形状をポイント・ゲージにより数 mm 間隔で測定した。通水中の $t = 10, 30, 50, 70\text{ min}$ には $x = 250, 300, 350, 400\text{ cm}$ の場所であつ初期水路中央における河床高及び水位測定を行なった。実験終了時の $t = 80\text{ min}$ において $x = 250 \sim 400\text{ cm}$ の区間内で、水路平面形状の測定及び水路中心軸と幅の両方向へそれぞれ数 mm 間隔で河床高の測定を行なった。実験終了時の河床高データを用いて最大エントロピー法 (MEM 法) により $y = \pm 0.5, \pm 2.5\text{ cm}$ の 4 本の初期水路中心軸と平行な直線に沿う河床波のスペクトル解析を行なった。

Table 1 には各実験ごと $t = 10$ 分の時点での $x = 250, 300, 350, 400$ cm の場所における平均流速 U 、平均水深 h 及びフルード数 $Fr = U/\sqrt{gh}$ の値を示した。なお、実験結果の解析にあたっては初期水路最上流端の河床中央を原点とし、それぞれ流下方向を x 軸、左岸方向を y 軸として上方を z 軸の正方向と定義した。ただし、水路横断面の表示に限り、 z 軸の原点は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 の原点は水が初期水路最上流端に到達した瞬間とした。

3. 実験結果及び考察

Fig.2 のような初期水路間の境界条件の相違にもかかわらず、これら 5 種類の水路内における流水挙動、河床波の形状機構、流路形態には共通する部分が多く認められた。この理由により、本章では主として実験 1 の結果について述べることにし、残りの実験 2 - 5 までの結果については実験 1 との主な相違点を補足するに留める。

(a) 実験 1

水路内への水の流入から実験終了までの流水挙動と河床波形成の段階は Fig.4 に示したように大きく四つに区分できることが明らかとなった。以下、各段階ごとと順を追って説明を加えることにする。なお、図中の記号 W と B はそれぞれ水表面と河床面を意味する。

段階1: 水路内への水の流入後ただちに水表面に斜交波線が描く斜め格子模様が現われた。こうした水表面の格子模様は $t \simeq 5$ min まで存在し、この間の河床面はほぼ平坦であった。

段階2: $t \simeq 6$ min 時点では、それまで水表面にできていた無数の斜交波線のいくつかがそのうちの卓越した斜交波線によって統合され、段階 1 の場合より大きな斜め格子模様が現われた。また、こうした水表面の変化に伴って斜交波線の各交点における水位が高くなる一方、これら交点直下の河床が局部的に盛り上がっているのが認められた。この結果、水路中心軸に沿うように楕円形の平面形状をもつ砂れんの列（以後これを砂れん鎖と呼称）がそして、その両側に各 1 列ずつ半月形の平面形状をもつ砂れんの列（以後これを半砂れん鎖と呼称）が形成された。

段階 3: $t \simeq 8$ min になると、水路中心軸に沿う斜交波線の各交点付近の水位がますます増加し、これらのうちのいくつかの頂部が砕波しているのが認められた。また、水表面にはこれらの斜交波線各交点を中心に水路横方向へ開いた一対の扇形の模様が現われた (Fig.4 stage 3W 参照)。これに伴って斜交波線の各交点直下の河床がますます隆起し、段階 2 の場合より大きな砂れん鎖が水路中心軸に沿って形成され、その両側に各 1 列ずつの半砂れん鎖が形成された。なお、砂れん鎖を構成する砂れんの高さは半砂れん鎖を構成する砂れんの高さより高いのが普通である。また、段階 2 及び 3 のいずれの場合にも砂れん鎖（または半砂れん鎖）の位相とその直上の水面波のそれとほぼ一致していた。

段階 4: $t \simeq 11$ min になると、それまで直線的であった水路中心軸に沿う斜交波線各交点及び砂れん鎖の軌跡が蛇行しはじめた。こうした変化に伴って、それまで河床に形成されていた砂れん鎖及び半砂れん鎖は徐々に消滅していった。以後時間の経過とともに、流心の蛇行波長はほぼ一定値を保ったまま、その振幅を徐々に増すことになるが、この間流心わん曲部直上の水表面にはしわ状の波面が形成された。一方、こうした流心の挙動を反映して、流心わん曲部直下の河床及び側岸の洗掘が顕著となった。しばらくすると、流心以外にその平面軌跡に沿って土砂が運ばれる流跡ができた。以後、この流跡を副流心と呼称し、これに対して前出の流心を主流心と呼称することとする。副流心わん曲部直下の河床及び側岸も洗掘を受けるが、主流心によるそれよりはその程度が少ない。ところが、Fig.4 stage 4 から明らかのように、主流心と副流心の平面軌跡の位相は互いに 180 度程度ずれているために、これら両軌跡のわん曲部は水路のほぼ同一断面内にくることとなる。この結果、河床にはこれら二つのわん曲点を結ぶ水路を横切る線の平面軌跡に沿うように砂洲の峰線が形成された。すなわち、砂洲の峰線は主流心（または副流心）のほぼ半波長ごとに形成されるために、河床にはこの長さの砂洲が水路軸に沿って並ぶこととなった。

砂洲峰線部を詳細に観察すると、峰線と主流心線及び峰線と副流心の二つの交点において峰線が下流側へ

舌状に突き出ているのを認めることができた。すなわち、河床の砂は滑動、転動あるいは跳躍をくり返ししながら、主・副両流心線の平面軌跡に沿って主として運ばれるが、これらの砂の多くが峰線舌状部直後の谷に堆積されるわけである。しかしながら、実際には多少の差こそあれ、砂は河床全面にわたって運搬されるために砂洲峰線直後の谷は時間の経過とともに水路幅全体にわたって徐々に埋められていくことになる。このために、表面的には砂洲峰線が流下方向へ移動することになる。砂洲峰線後方の斜面は砂の崩壊面であるので、その傾斜角は水中での砂の安息角程度と考えられるが、この斜面上において流れのはく離が認められた。このため、砂洲峰線後方斜面の砂粒子がはく離流により洗掘され、これらの一部が浮遊状態で下流方向へ輸送された。なお、ここで観測されたのはく離渦の形状あるいははく離内の流れはきわめて複雑な三次元的様相を呈していた。一方、主・副両流心の軌跡も砂洲峰線の前進に伴って常にこれらのわん曲部が砂洲峰線直後の谷直上にくるように移動し、谷部をわん曲流あるいははく離流として洗掘する結果、谷の深さが維持されることとなった。

Fig.5は $x = 250\text{ cm}$ の位置における実験1の水路横断面形状の時間的変化を示した。 $t = 20\text{ min}$ の時点では水路幅の増加及び河床への砂の堆積が認められるが河床面は比較的平坦であるのがわかる。 $t = 40\text{ min}$ では、水路左岸側河床の方が右岸側河床より低くなっている。ところが $t = 60\text{ min}$ になると、逆に水路右岸側河床の方が左岸側河床より低くなっている。そして、 $t = 80\text{ min}$ になると再び水路左岸側河床の方が右岸側河床より低くなっている。これらの事実からも、砂洲が時間の経過に伴って徐々に流下方向へ移動する状況が理解されよう。さらに、Fig.5は水路幅及び河床へ堆積する砂の厚さが時間の経過とともに増加することを示している。

(b) 実験 2

水路2は水路1の砂から成る傾斜左岸を垂直なアクリル板によって置きかえたものである。実験1との本質的な相違は実験2の場合には流心及び砂れん鎖の位置がより左岸よりに移動したことである。この結果、左岸アクリル板近傍での洗掘が顕著となった。

(c) 実験 3

水路3は水路1の砂床面をアクリル板によって置きかえたものである。実験1と実験3との相違は実験初期において顕著に認められた。すなわち、水路3の中へ水が流れ込むと、水面にはFig.4 stage 1Wに描かれたような斜交波線が描く斜め格子模様が現われるものの、アクリル製河床面は両側壁から洗掘された砂によって徐々ににおおい尽くされる過程が実験3の場合には存在するという点である。ところが、河床全体がいったん砂でおおい尽くされてしまえば水路3の境界条件は水路1のそれと等価なものとなるために、これ以後の流水挙動、河床波の形成機構、流路形態等について両者の間に大きな差異を認めることができなかった。ただ、実験3の場合には堆積によって形成され、アクリル板上の砂層厚が実験1のそれと比較して薄いために河床形態がよりへん平的なものとなった。

(d) 実験 4

水路4は水路1の砂床面をアクリル板によって置きかえたばかりではなく、アクリル板の幅を水槽の全幅と等しくすることにより実験中アクリル板上面より下方への洗掘が起らないようにしたものである。実験1と実験4との相違は上述の実験1と実験3との相違に加えて、実験4の河床形態は実験3のそれよりもさらにへん平的なものとなった。

Fig.6に実験4終了時点における $y = \pm 0.5, \pm 2.5\text{ cm}$ の4本の軸に沿う河床波のスペクトルを示した。低波数帯すなわち $k = 10^{-1} [\text{cycle/cm}]$ 以下においては、水路中心軸に比較的近い $y = \pm 0.5\text{ cm}$ の2本の軸に沿うスペクトルは波数の増加に伴って比較的滑らかに減少するが、水路中心軸からより離れた $y = \pm 2.5\text{ cm}$ の2本の軸に沿うスペクトルは $k \approx 0.06 [\text{cycle/cm}]$ において顕著なピークをもつことがわかる。しかしながら、 $k \approx 10^{-1} [\text{cycle/cm}]$ 以上の高波数帯においては水路幅方向への位置の違いにもかかわらず、これら全ての河床波のスペクトルは波数が増加に伴って上・下動をくりかえしながら全体として減少していくことがわかる。なお、 $k \approx 0.6 [\text{cycle/cm}]$ に認められる $y = \pm 2.5\text{ cm}$ の2本の軸に沿うスペクトルのピー

ク値は河床に形成された規則的な砂洲の存在を反映しているものと解釈される。

(e) 実験 5

水路 5 は水路 1 の両砂側壁をアクリル板によって置きかえたものである。実験 1 と実験 5 との相違は Fig. 4 stage 4 B に描かれたような砂洲の峰線と主流心線の交点における舌状部分が実験 5 の場合には下流へ異常に突き出した結果、いわゆる砂れき堆が河床に形成された点である。しかしながらここでとくに注目すべき事実はこのように実験 1 と実験 5 において河床に形成される河床波の形態が表面的には大きく異なるにもかかわらず、これらの双方の河床波の形成機構の間に何ら本質的な差異が認められなかったことである。

Fig. 7 に実験 1 - 5 までの全てについて実験終了時点におけるそれぞれの水路平面形状を示した。図から水路 1 の両側壁及び水路 2 の右側壁の平面形状に比べて、水路 3 及び 4 の両側壁の平面形状がより直線的であることがわかる。このことは実験 1 及び 2 の場合の流心の蛇行軌跡に比較して、実験 3 及び 4 のそれがより直線的であったことを反映しているものと考えられる。実験 5 の場合の水路両側壁は固定であるのでこれらの形状が変わらないことはもちろんであるが、実験中、流心の蛇行が明瞭に認められた。実験終了時における各平均水路幅の間の大小関係は Table 2 に示したとおりである。すなわち、流水の蛇行軌跡及び水路両側壁の平面形状がより直線的な実験 3 及び 4 の平均水路幅の方がこれらがより曲線的である実験 1 及び 2 のそれよりも小さい。ただし、水路 2 の場合には比較の便宜上 Table 2 の欄外に示したようにして求めた等価水路幅を用いた。

4. おわりに

本研究によって水路の境界条件の違いは河床波及び流路形態に対して、外見的には明瞭な影響を及ぼすものの、水路内の流水挙動や河床波及び流路の形成機構そのものには本質的な影響を与えないことが明らかにされた。すなわち、境界条件の異なる全ての水路内での流水は程度の差こそあれ流心の蛇行性を示し、その蛇行流心を有する流水と水路境界との間で起こる第 3 章で述べたような相互干渉の結果として河床波及び流路形態がつくられるということである。事実、ここで行なった 5 種類の実験の水路横断面形状の時間変化、流路平面形状、河床波のスペクトル形状などが全て定性的には極めて類似の傾向を示した。こうした結果は、従来から少くとも一部の研究者によって信じられてきた、河床波の種類ごとにその形式機構が異なるという立場に対して、形状の異なる河床波といえども、共通の形成機構すなわち本質的には同一の流水と水路境界との干渉によりつくられるとする新たな視点の妥当性を示唆していよう。

5. 参考文献

- 1) Simons, D.B., Richardson, E.V. & Nordin, C.F. Jr. 1965 Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels. Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation, Am. Assoc. of Petro. Geo. Special Pub. No.12.
- 2) 中川武夫、堀田正史 1982 流水の蛇行及び流路形態に対する境界の効果、第 26 回水理講演会論文集、45 - 50
- 3) 中川武夫、今井悟、牧田孝之 1983 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、第 27 回水理講演会論文集、715 - 720
- 4) Nakagawa, T. 1983 Boundary effects on stream meandering and river morphology, Sedimentology, 30, 117-127.
- 5) Nakagawa, T., Imai, S. & Makita, T. 1983 On effects of depth/width ratio on stream centre meandering and bed morphology in a sand channel with solid banks, Memoirs of Kanazawa Institute of Technology, A20(to appear).

Table 1 Hydraulic parameters

	Experiment 1				Experiment 2				Experiment 3				Experiment 4				Experiment 5			
x[cm]	250	300	350	400	250	300	350	400	250	300	350	400	250	300	350	400	250	300	350	400
U[cm/s]	10.45	9.80	18.90	11.68	25.61	16.72	23.35	21.75	24.81	17.64	23.35	22.06	19.13	15.57	16.04	23.01	24.43	26.92	33.79	29.96
h[cm]	1.56	1.79	0.80	1.35	0.82	1.30	0.92	1.05	0.76	0.79	0.68	0.75	0.82	1.10	1.03	0.81	0.85	0.83	0.79	0.94
F _r	0.27	0.23	0.67	0.32	0.90	0.47	0.78	0.68	0.91	0.63	0.90	0.81	0.67	0.47	0.50	0.82	0.85	0.94	1.21	0.99

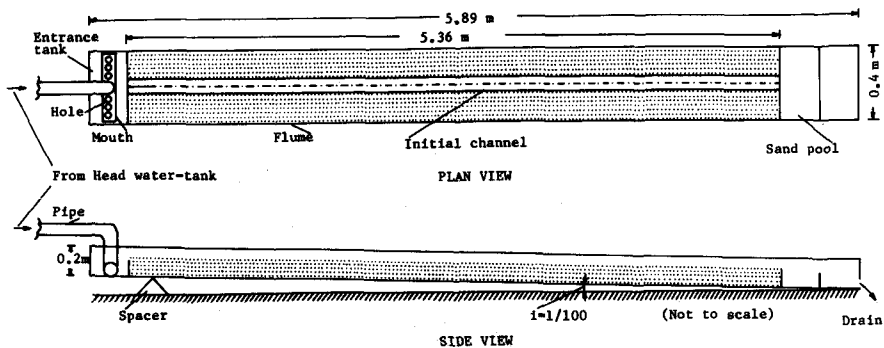


Fig.1 Schematic diagram of experiment

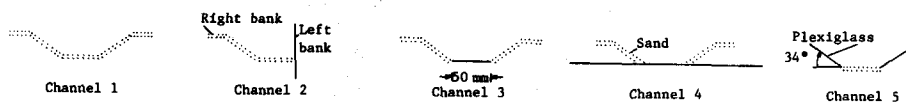


Fig.2 Cross-section and boundary conditions for each initial channel

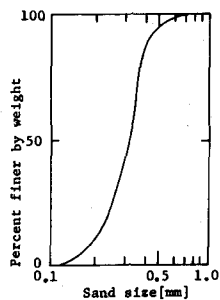


Fig.3 Size distribution of sand

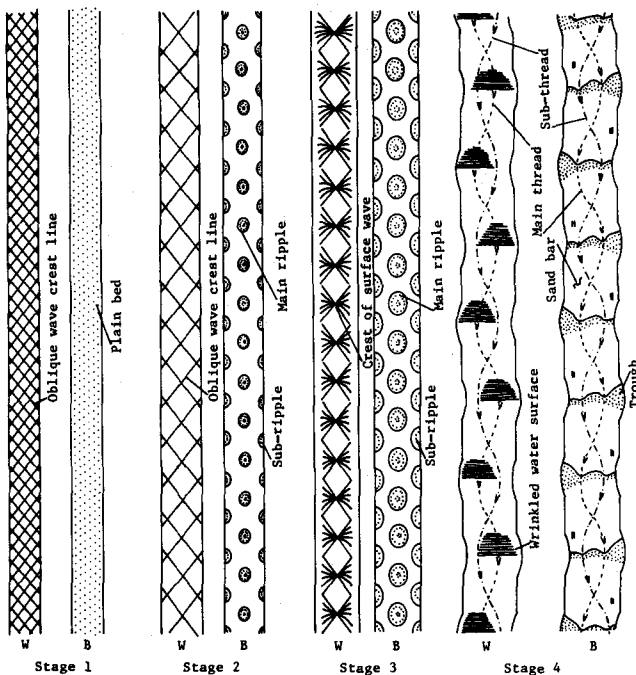


Fig.4 Development of water surface(W) and bed surface(B)

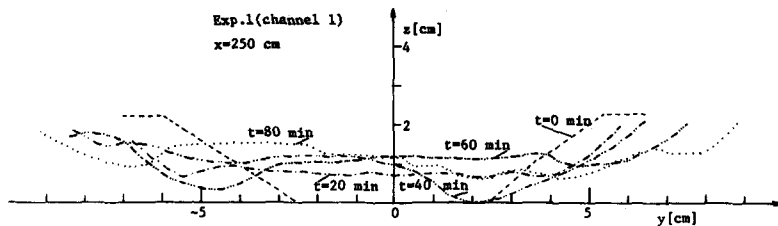


Fig.5 Time development of channel cross-section

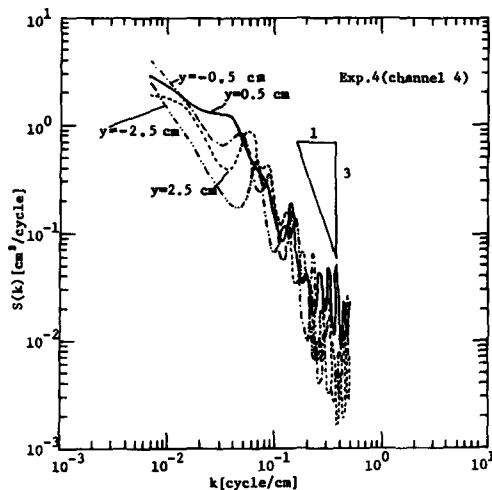


Fig.6 Spectra of sand waves

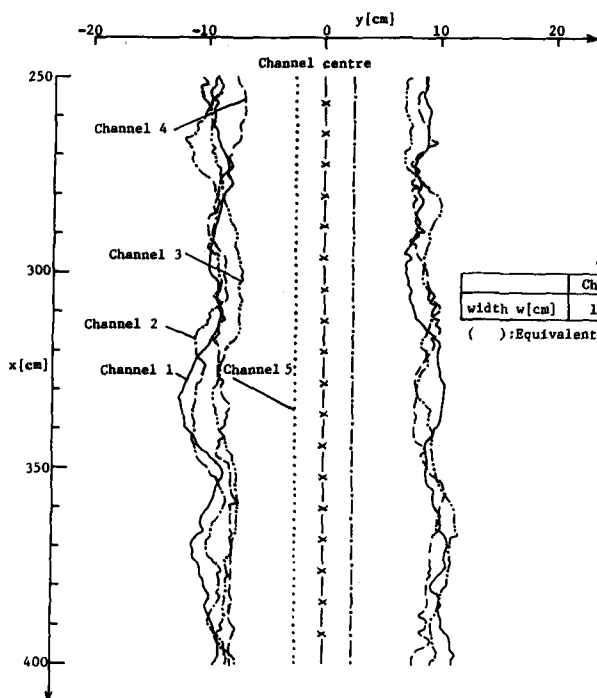


Table 2 Average channel width after experiment.

	Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5
width w[cm]	18.91	12.32(19.64)	17.54	16.97	5.00

():Equivalent channel width given by [Average width-(Initial width)/2]×2

Fig.7 Plan form for each channel after experiment