

流路形態の形成過程に関する研究

藤 田 裕一郎・村 本 嘉 雄

ON THE FORMATION OF STREAM CHANNEL PATTERNS AND ITS PROCESSES

By Yuichiro FUJITA and Yoshio MURAMOTO

Synopsis

The patterns of stream channel and their related problems are important in the fields of geomorphology and river mechanics. These have attracted the attention of many researchers and engineers.

In this paper, the problem is elucidated in connection with fluvial processes of stream channels. On the basis of the authors' results from previous investigations employing large scale experiments, a diagram depicting the formation of stream channel patterns is obtained. It is found that the widening of channel and sand bar development, particularly alternating bar, play the leading role in it. The geometrical characteristics of bars in lateral erodible channels are compared with those in fixed wall cases. Their critical values are then determined at the alternation between the channel patterns.

Accordingly, a classification of channel patterns is tentatively resulted from the diagram above-mentioned, based on the visual states of river channels in fluvial processes. Four distinctive groups are proposed, namely, straight channel 1, straight channel 2, meandering channel, and braided channel. The governing hydraulic conditions to these patterns are clarified by using the criterion for river bed configuration of meso-scale, and are compared with the equations obtained by other investigators for channel pattern criteria.

The consideration of bar development in the case of lateral erodible channel renders a expression from which the increase of bar height can be estimated. The process of stream channel patterns, predicted from using this equation and an one-dimensional analysis of river channel variation, shows a fairly good agreement with that observed in experiments.

1. は し が き

河川は、太古から人々の生活と深いつながりを持っており、それは科学技術の進歩した近年でもますます強いものとなっている。このような河川のそれ自体の挙動やそこで起きる様々の現象を明らかにすることは、極めて重要であり、また多くの研究者や技術者の興味を喚起してきたところである。その河川の最も人々の目をひきつける表面的かつ基本的な特徴は流路形態であろう。それは、広義には、Fluvial morphology の対象とされている形態、すなわち流域内の水系の配列や分布、河川の全体的な縦断形状、および河道流路の平面形態、の三要素すべてを示す表現として用いられるが、他方狭義には上述の第三の要素のみをさすと解釈される。Fluvial morphology はかなり古くから地質学、自然地理学の主要な分野となっているが、それは、その初期の成果である侵食輪廻の概念にも認められるように、長大な時間スケールにおける地形変化を主として対象としている。これに対し、河川工学の分野¹⁾では、治水・利水の両側面から河川地形をとらえており、通常前述の第一および第三要素に関して検討や考察が加えられている。すなわち、第一点は、洪水および物質（土砂・汚濁物質など）の流出・伝播あるいは水資源計画に関連して、その系の変化よりもむしろ静

的な状態の解明が図られている。一方、第三点については、洪水時における河道や河川工物などの安全性と低水時における利水と水環境に関連して、時間スケールの短い河道や流路の変動との関係が研究の目的とされてきている。最近では、地質学・地形学の方面³⁾でも地形の現況を創出した過去の営力や過程を推定する目的でこの関係の究明が試みられる気運にある。本研究もこのような観点に立つものであって、これより、以下では流路形態は、第三の River channel patterns をさして用いることにする。

上の観点からは、流路形態は沖積地における流路変動の結果あるいは経過として現われるものと解される。したがって、その研究は、実河川の観測に基いた流路形状の分類と水理条件の把握、あるいは基礎水路実験における形成過程の解明といった側面から進められており、さらに水理学モデル等による数値シミュレーションの試みも開始されている。その分類は、実河川では種々の平面形状要素が複雑に組合わされているために細分化^{3,4)}される場合が多いが、Leopold・Wolman⁵⁾が述べたように、基本的に直線・蛇行・網状の三形態に区別され、それらは実験水路規模でも形成されることが確認されている。これら三形態の形成条件式⁶⁾は、主に流量とこう配を独立変数にしたものが提案されているが、次元的にも問題があって、いずれも検討の余地が多い。

つぎに、流路形態に関する基礎実験は、後述するように実際に測定不可態なその形成過程を明らかにし、形成条件をより精確に把握することを目的として、普通個々の形態について行われてきている。したがって、流路形態の形成された水理条件は、実河川の観測の場合よりも一般に精度が高くかつ詳細であって、様々の検討を加えることが可能である。著者らもすでにこのような研究⁷⁻¹¹⁾を大型水路を用いて進めており、流路変動の機構を明らかにしてきている。また、流路形態の形成過程とそのときの水理条件についても多大の資料を蓄積している。

本研究は、上述の実験結果を流路形態の観点からまとめ、従来の実測資料も加えて流路形態の分類と形成条件を明らかにし、さらに形成過程について考察を行ったものである。

2. 流路変動と流路形態

流路形態の形成過程の初期条件が、実河川において明確に識別されることは、大規模な山地崩壊や数百年に一度程度の大出水などによって、流域の様相が一変したような場合に限られている。そこで一つの流路形態が形成されていく過程あるいは一形態から他形態への移行過程が観測されることは稀であって、通常はある形態における個々の流路の変動状況が実測されるのみである。一方、水路実験では初期条件は明確であって、それは形成過程の基本特性を明らかにするという研究の性格を反映して、平面内に掘込まれた直線溝であることが多く、上流端には流入角の有る場合と無い場合とがある。先述の著者らの実験 (Table 1 参照) でも同様の初期条件であって流入角は与えられていない。実験の詳細はすでに報告しているが、つぎに明らかにされた流路変動と流路形態形成の過程を一様こう配、一定流量の条件で行われた実験について要約して述べる。

通水初期には、流下方向に一様な振幅と河床の堆積上昇が生じ、つづいて河床上に交互砂州が発生する。その後も流路は直線形状を保持し、交互砂州も流下しながら発達するが、振幅量および河床上昇量には上、下流端の境界条件の影響が現われ始め、それらは流下方向に変化する。上流端で給砂しない場合は、上流から河床低下が始まり、それが伝播してくるとほぼ同時に振幅が停止する。この低下区間では、上流端および兩岸から掃流力に対応した河床の粗粒化が進行し、河床低下が緩慢になって、安定な直線流路が形成される。一方、河床低下の全く伝播しない中、下流区間では、流路振幅と交互砂州の移動と発達が継続している。流量が比較的大きい場合には、流路振幅と砂州の発達が進んで砂州の移動速度が低下し、同時に側岸の交互の局所侵食が開始して蛇行流路が形成される。流量の小さい場合には、振幅速度が小さく交互砂州の発達も著しくないので、砂州の移動は速かであるために蛇行流路は生じにくい。

給砂を行った実験では、河床が低下して粗粒化する区間は発生せず、基本的に上述の中、下流区間に相当する流路変動過程が観察される。すなわち、一様に発達した交互砂州に対応して蛇行流路の形成される場合

Table 1. Experimental conditions.

Exp. No.	Initial channel shape			Bed slope	Discharge (l/sec)	Flow duration time (hr-min)	Stream length (m)	Remarks		
	Trapezoidal cross-section									
	Bottom width (cm)	Side slope	Bank height (cm)							
I-1	100	1: 1	20	1/200	7.5	100-00	130			
I-2					15.0	30-19				
II					15.0	28-41				128
III					6.0	71-26				120
IV					15.0	25-00				110
V	50	1: 2	10	1/200	6.0	55-30	110	0~60 m	Two step slope	
				1/500				60~110 m		
VI				1/200	15.0	37-30	110	0~60 m		
				1/500				60~110 m		
VII					6.0~30.0	31-00	110	Step discharge		
VIII	25	1: 2	5	1/200	5.0	22-00	110	Right hand side bank is fixed		
IX	50	1: 2	10		15.0	30-00	110			
X	100	1: 1	20		20.0	17-21	42			Sand feeding
XI	50	1: 2	10		15.0	12-07	43			
XII					15.0	44-35	42.4			
XIII				15.0	15-40	42.8				

が多い。しかし、河岸高を著しく高くしたり、給砂量を多くしたりして河床こう配を増大させたときには、卓越した砂州が形成されず、流路は比較的直線に近い平面形状を保ち、兩岸で不規則な局所侵食を繰返しながら拡幅して、水流が河床上で複雑に分散した網状流路が生じる。

以上のように、実験流路は、流路拡幅および交互砂州の形成・移動・発達に伴う局所侵食という流路変動によって、初期形状から直線・蛇行・網状の形態に到達することがわかる。この過程を模式的に示せば Fig. 1 のようになり、さらにそれをダイアグラム化して表したものが Fig. 2 である。流路は、四角枠で囲まれた現象が菱形で囲まれた分岐条件に従って矢印の方向に進み、それぞれの条件が満足された後に二重枠の形態に到るが、点線枠で示した分岐条件を左右する諸因子の変化によって、現象のループを抜け難い場合もあると考えられる。

以下では、このダイアグラムに従って流路形態の形成過程の考察を進める。すなわち、まず側岸侵食性流路における中規模河床形態—砂州—の形状特性とその時間的変化について検討し、流路形態の移行限界におけるそれらの値を見出す。ついで、流路変動過程に対応した流路形態の分類を示し、その形成条件を従来の実測資料とともに明らかにして、すでに提案されている形成条件式との比較検討を行う。最後に、側岸侵食性流路における交互砂州の発達過程に側壁固定の場合の研究結果¹²⁾を適用して、その結果から流路形態の予測を試みる。

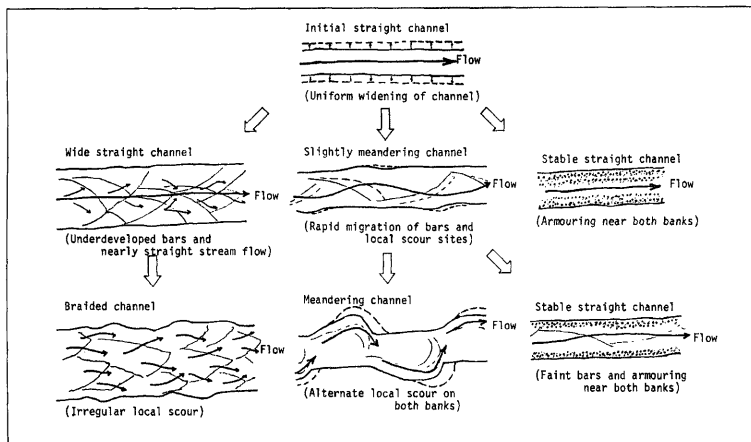


Fig. 1. Schematic sketch of processes of formation of stream channel patterns.

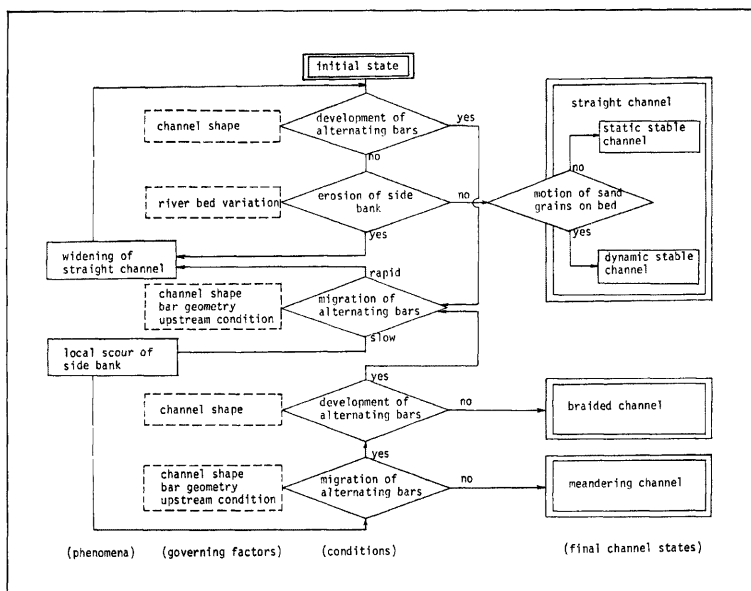


Fig. 2. The diagram representing formation of stream channel patterns.

3. 側岸侵食性流路の中規模河床形態

3.1 砂州の形状特性

側岸侵食性流路の中規模河床形態について、流路に表面的に現われている状態のみに着目すれば、現象の推移は比較的緩やかであるので時間的変化は無視できると思われ、それを支配する水理量は固定側壁の場合¹³⁾と同様つぎの3つの無次元量にまとめられる。

$$B/h, \quad h/d \quad \text{および} \quad \tau_* \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 B は流路幅、 h は平均水深、 d は河床砂の代表粒径および τ_* は無次元掃流力である。一方、中規模河床形態の特性量については、砂州の波長（水流蛇行の半波長）および波長（砂州前縁をはさむ河床高低差の最大値）を取上げ、それぞれを l_B および Z_B で表し適宜無次元化して検討する。

Fig. 3(a) および (b) はそれぞれ著者の実験および従来の実験¹⁴⁻²⁰⁾ について、 l_B/B と B/h との関係を、固定側壁の場合²¹⁾ のものと比較して示したものである。(b)には蛇行流路¹⁶⁻²⁰⁾ の無次元波長 L_M/B の $1/2$ も l_B/B に相当するものとして流入角のあるもの¹⁶⁻¹⁸⁾ も含めて図示されている。側岸侵食性流路の実験値は、

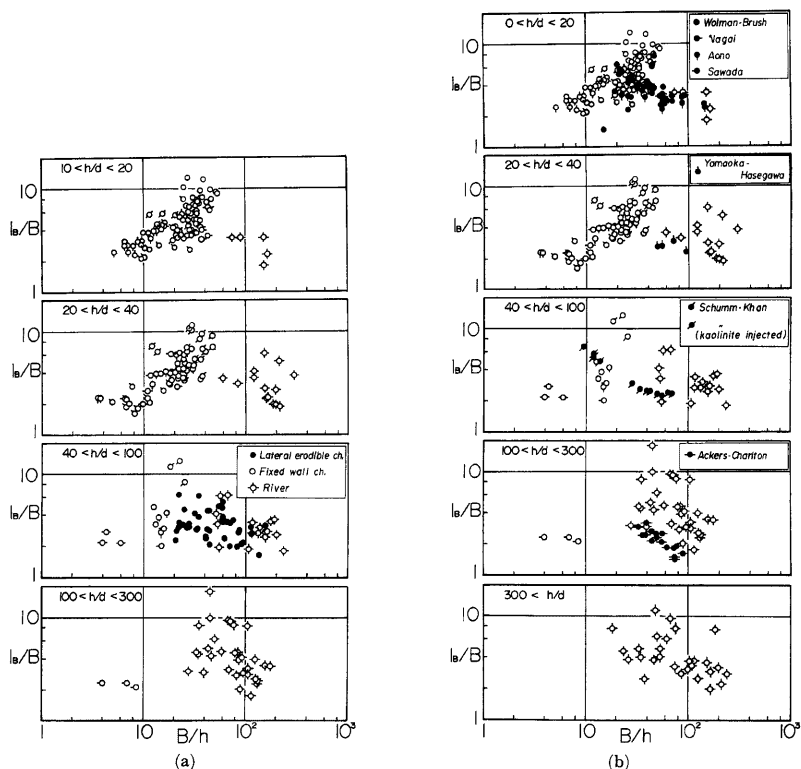


Fig. 3(a). Wave length of bars in lateral erodible channels (Authors' experiments).

(b). Wave length of bars in lateral erodible channels (Others' experiments).

$B/h = 20 \sim 150$ の間において実河川のものに近く、 l_B/B の値は固定側壁の場合の変化範囲に入っているが、全体に小さい傾向にある。この傾向は、実験の経過と対照すると、通水初期では固定側壁の場合に近い l_B/B の値を持つ砂州が形成されるものの、その後の拡幅に波長が完全には追従せず、さらに蛇行拡幅に移れば波長はほぼ一定になって流路幅のみ増加することに対応しているものと考えられる。

また、蛇行開始前後の流路に浮遊砂として kaolinite を混入した Shcumm・Khan¹⁸⁾ の実験値は、流路幅が狭く固定される傾向にあって、他のものとは異った特性を示している。一方、流入角の有無による l_B/B と B/h との関係の相違はほとんど認められず、蛇行波長に及ぼすその影響は無視できると判断され、これから最終的な流路形態に対する初期条件の相違の重要性は低いことが推定される。

つぎに、 Z_B/B について同様の検討を行えば Fig. 4 のようである。これまで側岸侵食性流路において砂州の波高が計測された例は少く、同図には著者らのもののみ記入されている。実験値は、流路変動過程の種々の段階を反映して散在しているが、固定側壁水路の実験値と河川の実測値との間を埋める部分に位置している。また、蛇行流路状態の Z_B/B の値の方が直線流路状態のものよりも大きい傾向にあって、蛇行流路は砂州の波高の増加とともに形成されていくことが窺われる。

以上のように、側岸侵食性流路における中規模河床形態の形状特性は、流路形態の変化とともに異っていくことがわかる。つぎに、両者の対応関係を明確にするために、流路形態の移行限界時の砂州の形状特性について検討する。

3.2 流路形態の移行限界時の砂州の形状特性

流路形態の移行過程における砂州の形状の変化についてはすでに著者らの実験について簡単な検討結果²²⁾ を報じている。前述のように有用な波高の資料は著者らのもののみであるので、ここでは既報の結果にその後得られた交互砂州上の流況特性²³⁾ に関する知見を加えて検討する。

すなわち、横軸には砂州の形状の支配パラメーター B/h をとり、縦軸には砂州による流量集中に最も影響を与える Z_B/h をとって、直線流路時、蛇行流路時および網状流路時における砂州形状を l_B/B をパラメーターにして図示すれば Fig. 5 のようである。同図によれば上の流路状態における砂州の相違が明確であって、それらの対応関係はつぎのようになっている。

蛇行流路における砂州形状：

$$Z_B/h \geq 1.3 \quad \text{かつ} \quad Z_B/B \geq 1.6 \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

網状流路における砂州形状：

$$1.3 > Z_B/h > 0.9 \quad \text{かつ} \quad Z_B/B < 1.6 \times 10^{-2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

いずれの場合も l_B/B の相違による影響はあまり明確ではないが、蛇行流路では $l_B/B > 6$ の範囲のものが多いことがわかる。

以上の結果は、本実験のみに関したものであるが、3.1 で示したように、本実験における砂州形状と従来の同種の実験のものとの間には明確な差異は認められないので、比較的一般性のあるものと推定される。

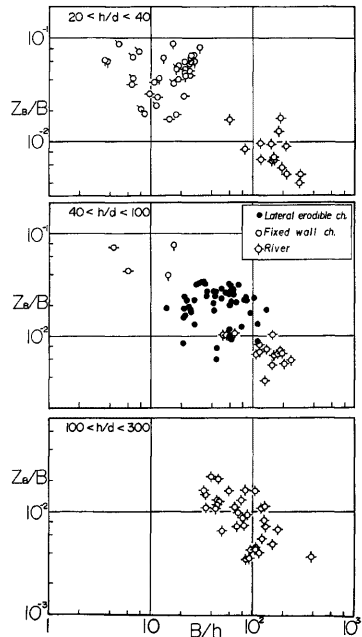


Fig. 4. Wave height of bars in lateral erodible channels.

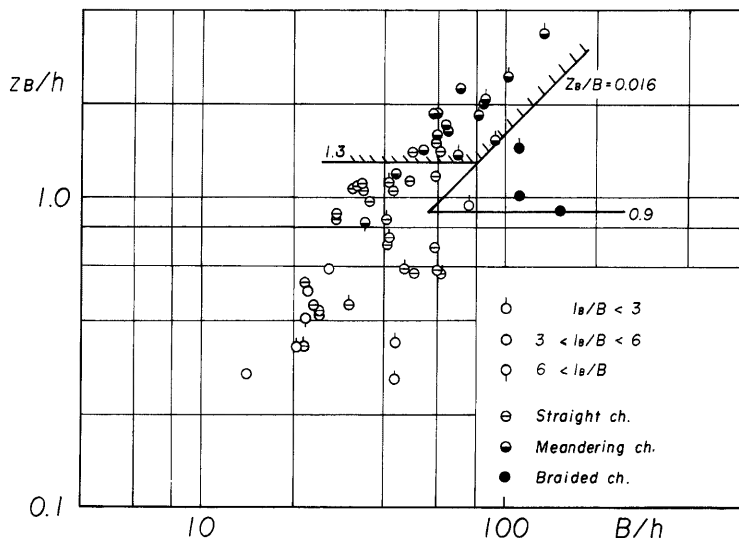


Fig. 5. Geometrical characteristics of bars in straight, meandering and braided channels.

したがって、流路変動の過程において上述の形状の限界値を持つ砂州が形成されてその形状が維持されれば、Fig. 2 のダイヤグラムにも示されているように、対応する流路形態が形成されていくと判断できる。つきでは、このような砂州形状の時間的変化を示し、流路形態の形成時間について検討する。

3.3 砂州の形状特性の時間的変化

これまで述べてきた実験について、 l_B/B , Z_B/B および Z_B/h の時間的変化を示せば Fig. 6 のようである。

最初に、 l_B/B は、時間的に単調に増加あるいは減少する傾向は認められず、全体に2~4の範囲にあって比較的变化が小さく、 l_B が B に比例して増加することを示している。さらに詳細な変化に着目すれば、流量が大きい場合には l_B/B はやや増加した後に蛇行開始とほぼ同時に減少することが認められる。これは、急激に蛇行の生じた Exp. XI でとくに明瞭であって、網状流路の形成された Exp. X や Exp. XII ではさかではない。明確な砂州の形成された実験では、この初期の l_B/B の増加の持続時間は初期幅の大きい Exp. II の場合に長く、固定側壁の場合の交互砂州の発達過程でも B が大きいほど l_B の増加が緩慢であったことに対応していると思われる。

一方、 Z_B/B は、Exp. II では通水時間 $T=6^{\text{hr}}40'$ まで、また他の実験では大体 $T=4^{\text{hr}}$ 程度まで増加しているが、その後はほぼ一定値をとっている。この一定値は、蛇行の形成された Exp. II~IV と XI および直線流路に交互砂州の残存した Exp. VIII では $Z_B/B=0.02\sim0.03$ 、一方網状流路となった Exp. X と XII では $Z_B/B=0.01$ であって、 Z_B は B に比例して増加し続けることを示している。これは、 $Z_B/B=0.03$ ぐらいでは、固定側壁の場合の発達した砂州 ($Z_B/B\approx0.06\sim0.1$) にみられるような波高発達の抑制効果が生じないことによっているためであろう。

このように、 Z_B は B に比例して増加するが、振幅によって h は減少するために Z_B/h は時間的に著しく増加していく。 Z_B/h が增大すると先述のように交互砂州上の流況は顕著な流量集中を生じるので、側岸が交互に局所侵食されるようになる。この過程の初期では砂州の移動によって侵食個所が下流に連続的に移動

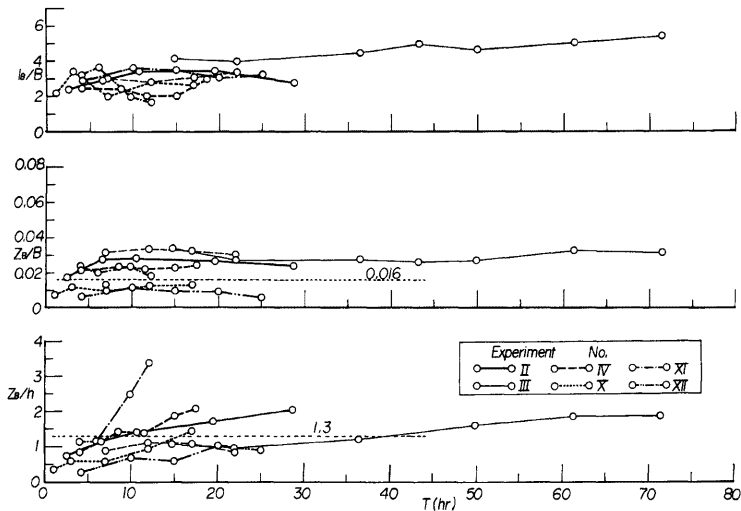


Fig. 6. Changes of geometrical characteristics of bars as a function of time.

していくために比較的直線状の流路形状が保たれる。しかし、結局 (2) 式の条件が満足されるようになると、砂州移動を維持していた流砂量の平面分布状態が消滅して蛇行流路が形成されていき、一方、振幅が速すぎて交互砂州が充分発達しない間に (3) 式の条件に到達した場合には、局所侵食の不規則かつ間欠的な網状流路が形成されと考えられる。したがって、それぞれの流路形態が形成されるためには、先述の条件を達成するまでに砂州の発達できる流路条件が維持されている必要がある。次章でこの条件と関連する流路形態の形成条件を検討する。

4. 流路形態の分類と形成条件

4.1 流路形態の分類

流路形態の分類は、はしがきでも述べたように、複雑な河川の形態を反映して詳細な項目に区別して行うこともできる。しかし、ここでは、これまで使用してきた直線、蛇行および網状の三形態を基本的なものと考え、さらに流路形態は流路内に現われる中規模河床形態に対応して形成されるという観点から、流路変動過程に重点を置いた分類を行う。流路変動過程には、流路の初期形状、流入角や給砂などの上流端条件、さらに下流端条件が大きな影響を及ぼすが、最も単純な条件に対応した Fig. 2 のダイアグラムに現われてくる流路状態に着目して、流路形態をつぎの 4 つに分類する。

- ① 直線流路 1：流路は直線状で砂州が不明確な状態
- ② 直線流路 2：流路は直線状であって砂州は明確に形成されているが、移動が速く側岸の局所侵食がほとんど認められない状態
- ③ 蛇行流路：砂州がほぼ停止し、側岸に明確な交互の弯曲部が生じて水流も蛇行している状態
- ④ 網状流路：発達の不十分な砂州の消長が激しく、水流は網状になって、不規則な側岸の局所侵食が見られる状態

上の直線流路 1 および 2 には、安定流路状態のものも蛇行あるいは網状流路への移行過程のものも含まれるが、後述するように 1 には前者がまた 2 には後者が大体対応しているとみなせよう。これらの形態の形成

条件は、分類が中規模河床形態に基いているので、中規模河床形態の形成領域区分図を拡張、適用して明らかにされると考えられる。

4.2 流路形態の形成条件

中規模河床形態の形成領域区分の拡張による流路形態の形成条件の検討は、従来提案されているものを用いてすでに報告²⁴⁾している。しかし、この形成領域区分はパラメーターの誘導方法に難点があるので、ここでは著者ら²⁵⁾が提案した区分図を用いて検討する。

Fig. 7はこの検討を行ったものであって、用いた実測値は本実験のうち一定流量のもの、従来の側岸侵食性流路のうち流入角を与えていないもの²⁶⁻³¹⁾、および Simons・Bender³²⁾の集めた stable canal の資料である。著者らの実験値は実験区間を3区間に分けただちのうち、下流区間のもののみ用いており、上流区間は、amour coat が形成されることや、砂州の発達にはある程度の流下区間が必要であることなどの理由で除いている。また、従来の実験における分類が先述のものと合致しない場合は、実験の記述や写真に基いて最も近いと判断されるものに再分類している。

同図上では、通水初期のものを除いて、各流路形態ごとによくまとまっていることがわかる。まず、 $h/d < 10^2$ の範囲では、流路形態間の区分線は、固定側壁流路の中規模河床形態の区分線と類似の傾向、すなわち両者は一致するか、やや離れて平行になっていて、形成領域は下記のように表される。ただし、いずれも上述のように $h/d < 10^2$ である。

$$\textcircled{1} \text{ 直線流路 1 : } h/d \geq 0.05 (B/h)^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$\textcircled{2} \text{ 直線流路 2 : } 0.05 (B/h)^2 > h/d \geq 0.012 (B/h)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\textcircled{3} \text{ 蛇行流路のみ : } 0.012 (B/h)^2 > h/d \geq 0.0034 (B/h)^2 \dots\dots\dots (6)$$

$$\textcircled{4} \text{ 蛇行・網状流路の混在 : } 0.0034 (B/h)^2 \geq h/d \dots\dots\dots (7)$$

上の形成領域区分では、直線流路 1 の明確な砂州の形成されない領域が固定側壁の場合 ($h/d > 0.091 (B/h)^2$) よりも広がっている。この理由は、両者の間の領域

$$0.091 (B/h)^2 > h/d > 0.05 (B/h)^2 \dots\dots\dots (8)$$

において交互砂州が発生すれば、それによる水衝部の形成とその流下によって拡幅が進み、直線流路 2 の状態に速かに移行することにあると考えられる。したがって、(8) 式の条件下に流路があるためには、掃流力が小さくて、拡幅も砂州の発達も生じにくいことが必要であると推定され、実際、この領域に図示される実験値のほとんどは摩擦速度・限界摩擦速度比 U_*/U_{*c} が 1.1 以下のものである。また、直線流路 2 の領域内の実験値であっても、 U_*/U_{*c} の値の大きいものはいずれも流路変動過程の途中段階にあって、流路が直線状態を保ち続けるには掃流力の小さいことが第一に要求されるようである。一方、④の混在領域にある蛇行流路は良く発達したものであって、砂州上の水深は小さく、浮州となっている箇所もかなりある。固定側壁の場合にはこの条件下では網状流路のみ形成されることを考慮すれば、(7) 式の条件はつぎの意味を持つと解釈できる。すなわち、この条件を満足する流路幅、平均水深および粒径を有する流路は、一統きの水面によって河床全域を常に覆っていることが困難であって、大小の水流に分割されてしまい、側岸や主流路の平面形状が規則的な蛇行状態を呈していても、広義には網状流路とみなしうることを示唆している。

つきに、 $h/d > 10^2$ の実測値は、Ackers²⁷⁾ および Ackers・Charlton¹⁹⁾の実験と Simons・Bender³²⁾の stable canal の資料のみであるので、一般的な妥当性に疑問があるが、このときの各流路形態の形成条件はつぎのようになっている。

$$\textcircled{1} \text{ 直線流路 1 : } h/d \geq 1.5 (B/h)^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$\textcircled{2} \text{ 直線流路 2 : } 1.5 (B/h)^2 > h/d \geq 0.2 (B/h)^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$\textcircled{3} \text{ 蛇行流路 : } 0.2 (B/h)^2 > h/d \dots\dots\dots (11)$$

この場合、先の④の混在領域に対応する実測値は無かったので、その条件は示されていない。

以上の各条件は、(4)～(6) 式の延長上には対応せず、他の実験資料とは著しく異っている。Simons らの資料はすべて安定流路であって砂州も発生しないと考えられ、(4) 式の範囲に入ることには問題はなく、ただ

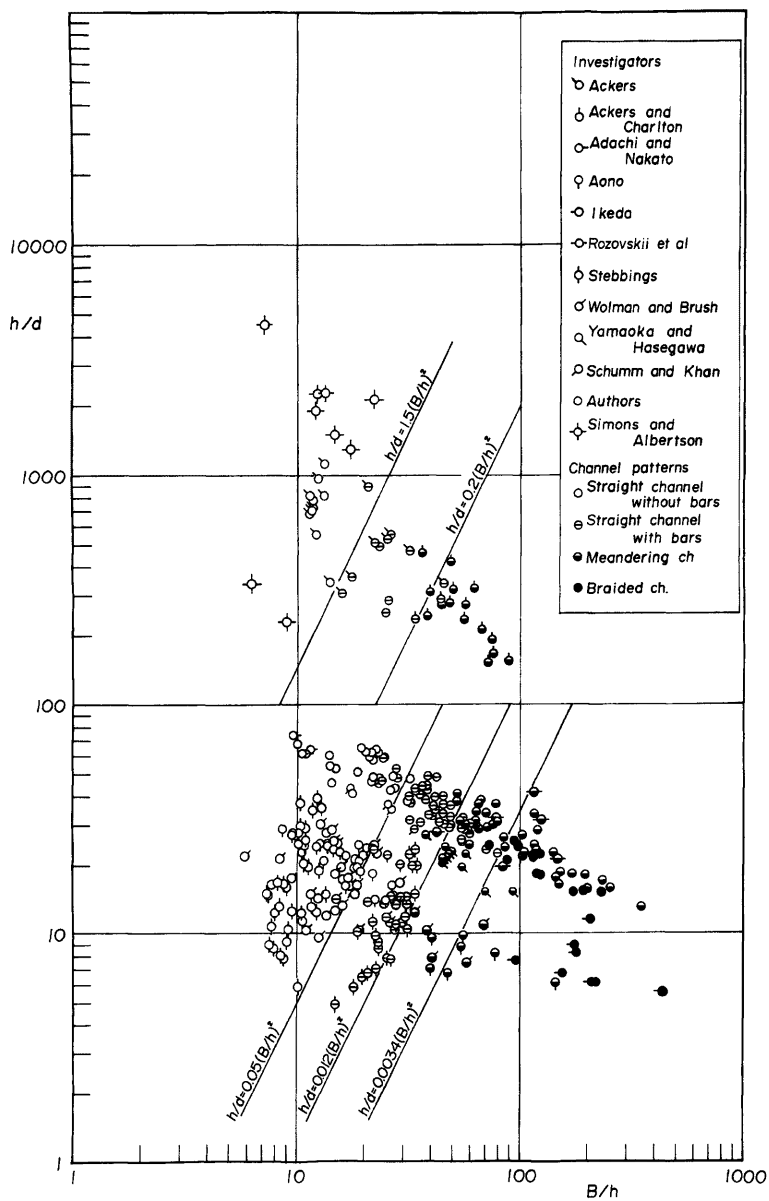


Fig. 7. Examination of a criterion of stream channel patterns.

側岸構成材料に粘性のある場合、 B/h の値が10以下と極めて小さくなることに興味もたれる。したがって、(9)～(11) 式は Ackers らの実験値の傾向のみ示しているが、この相違の原因は明確でない。しかし、強いて挙げるとすれば以下の3点が考えられる。(1) 他の実験では通水時間が高々数10時間であるのに対し、彼らの実験では流路形態が形成されるまで7～35日間の連続通水が行われている。(2) これらの水理条件は、固定側壁の場合の準砂州および一部は交互砂州の形成条件に一致している。(3) 水面上の側岸高を一定に保つために河床上昇に応じて土砂を側岸に上積みしており、結果的に拡幅が抑制されている。これらより、彼らの実験では、流路拡幅が抑制されているので掃流力が比較的高い値を保つ一方、発達不十分な砂州によっても水流は偏らされる。このため、やや偏った比較的高い掃流力によって側岸の局所侵食が生じ、それが長期間かけて発達していったものと思われる。

Fig. 8 は、流入角の与えられた実験^{33,34)} について同様の検討を行ったものであって、各流路形態の形成領域は、非蛇行領域に入った Fienkin³⁴⁾ の3例と Schumm・Khan の実験のうち流水中に kaolinite を混入したものを除いて、流入角の無い場合に良く一致していることがわかる。Fredkin の3例のうちの1例では、

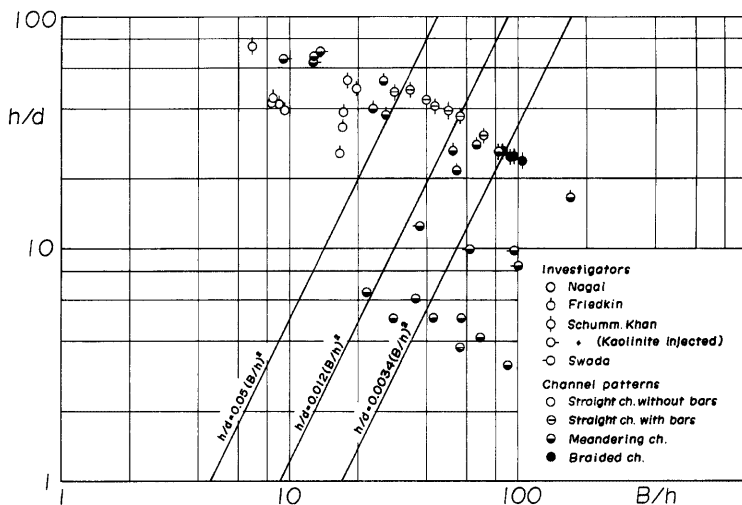


Fig. 8. Examination of a criterion of stream channel patterns in the case of experiments with inlet angle.

蛇行形成は流入端近傍の1, 2波長に限られ、下流区間では減衰しているので、これは流入角の無いときの非蛇行条件に対応している。また、他の2例も実験値の抵抗特性から判断すると、記載してある断面図の水深は過大のようであって、このため非蛇行領域に図示されると考えられる。一方、Schumm らの kaolinite を混入した実験では、砂州が露出して流水断面が溶筋のみに限定されたことが、3.1 の蛇行波長の場合と同様に、他の実験とは異った結果につながっていると思われる。

以上のように、流路形態の形成条件は、資料の豊富な $h/d < 10^2$ の範囲では、特殊な条件を与えない限り、流入角の有無によらず、固定側壁流路の中規模河床形態の形成条件に準じていることを明らかにした。一方、 $h/d > 10^2$ の場合についても形成条件を示し、若干の考察を加えたが、この場合については今後検討すべき点が多いと思われる。次節では、形成条件の明確な $h/d < 10^2$ の場合の条件式についてこれまでのものとの対応関係を検討する。

4.3 流路形態の形成条件式に関する検討

従来提案されている流路形態の形成条件は³⁵⁾、流量 Q と河道こう配 I を用いた次式との I の大小関係で表されている。

$$I = aQ^m \quad \dots\dots\dots (12)$$

係数 a と指数 m は、各研究者によって実測値に基いて決定されており、それらの関係は Table 2 にまとめ

Table 2. Equations governing the stream channel patterns.

Investigators	Channel patterns	Condition of formation
Leopold & Wolman	Meandering	$I \leq 1.3 \times 10^{-2} Q^{-0.44}$
	Braided & Straight	$I > 1.3 \times 10^{-2} Q^{-0.44}$
Lane	Meandering	$I \approx 7.0 \times 10^{-4} Q^{-0.25}$
	Braided	$I \approx 1.4 \times 10^{-3} Q^{-0.25}$
Henderson	Meandering	$I \leq 2.7 \times 10^{-3} d^{1.14} Q^{-0.44}$
	Braided	$I > 2.7 \times 10^{-3} d^{1.14} Q^{-0.44}$
Ackers & Charlton	Meandering	$I > 1.4 \times 10^{-3} Q^{-0.12}$
	Shoaled channel	$1.4 \times 10^{-3} Q^{-0.12} > I > 9.8 \times 10^{-4} Q^{-0.12}$
	Straight	$I < 9.8 \times 10^{-4} Q^{-0.12}$
Remarks Q : m/sec unit, d : cm unit		

られている。このうち、Henderson は係数 a に河床材料の粒径の効果を含ませている。次元的に問題があるにもかかわらずこのような表現がとられる理由はつぎのように推察される。すなわち、第一には、表現が単純であって伝統的な regime 式の形を撰っていること、第二には、両岸が明確でない原始河川では流路幅や水深は評価しにくい、河道こう配は測量によって比較的容易に求められ、流量も降雨や流域の状態から見積ることが可能であるので、両者の関係で流路形態の形成条件を与えておくと、洪水時などのその予測ができることである。

以上の事柄を前提として、上述の関係式と前述の形成条件式との比較検討をつぎに試みる。

まず、簡単のために等流状態を考え、かつ各々の流路形態は一形態から他形態への移行途上にはなくて比較的着着しているとする。Chézy 型の抵抗則が成立し、広長方形の流水断面近似が許されると考えると、水流の状態はつぎのように表される。

$$U = c U_* \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$Q = U B h \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$U_* = \sqrt{g h I} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 U は平均流速、 c は流速係数および g は重力の加速度である。つぎに、

$$\tau_* / \tau_{*c} = \alpha \quad \dots\dots\dots (16)$$

とおけば、流路変動はそれほど激しくないと考えているので α は $\alpha \approx 1 \sim 4$ 程度とみなせよう。ここに、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。さらに、流路形態則ともいべき条件は、(4)~(7) 式の境界に対応して下のようになる。

$$h/d = \beta (B/h)^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここに、係数 β は、たとえば直線流路と蛇行流路との区分線であれば $\beta = 0.012$ である。

以上の 5 式から、 U 、 U_* 、 h および B を消去して整理すると、従来の形成条件式に類似の次式が得られる。

$$I = \alpha^{1.2} \beta^{-0.2} c^{0.4} \tau_{*c}^{1.2} (\sigma/\rho - 1)^{1.2} g^{0.2} d Q^{-0.4} \quad \dots\dots\dots (18)$$

また、抵抗則として Manning 式を用いれば、(18) 式の代わりに下の式が導かれる。

$$I = \alpha^{1.19} \beta^{-0.177} n^{-0.315} \tau_{*c}^{1.19} (\sigma/\rho - 1)^{1.19} d Q^{-0.375} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 n は Manning の粗度係数である。(18) および (19) 式の係数の変化に強く影響するものは、 α 、

τ_{*c} および $\sigma/\rho-1$ であるが、 τ_{*c} や $\sigma/\rho-1$ の変化は通例小さいので、(16) 式の比が最も重要であることがわかる。一方、 β による係数値の変化はわずかであって、このような式形では、流路形態の相違を予測するのは困難であると推測される。

いま、やや大きい目の流水抵抗を考慮して、 $c=10$ あるいは $n=0.02$ とし、 $\alpha=2$ を仮定し、さらに普通与えられる $\tau_{*c}=0.05$ 、 $\sigma/\rho-1=1.65$ および $g=9.8 \text{ m/sec}^2$ を用いると、蛇行流路と直線流路の境界線 $\beta=0.012$ について (18) および (19) 式はそれぞれ (20) および (21) 式ようになる。

$$I=1.11 \times 10^{-3} dQ^{-0.4} \dots\dots\dots (20)$$

$$I=1.17 \times 10^{-3} dQ^{-0.375} \dots\dots\dots (21)$$

さらに、蛇行が十分に発達して浮州が生じたり、網状流路も現われ始める限界の条件は $\beta=0.0034$ に対応して

$$I=1.42 \times 10^{-3} dQ^{-0.4} \dots\dots\dots (22)$$

$$I=1.48 \times 10^{-3} dQ^{-0.375} \dots\dots\dots (23)$$

のようになる。ただし、 Q の単位は m^3/sec であり、一方 d は cm 単位を用いている。

以上の各式は、いずれも Henderson の示した式に対して係数値が数倍になっているが、 Q および d の指数値はともによく合っていることがわかる。係数の変化に支配的な α の値を大きくするとその差はさらに拡がり、逆に最小値 $\alpha=1$ にしても 2 倍程度の広きが残る。Henderson の対象にしたような実河川では一般に流水抵抗が大きいので、この効果を考えると差はやや縮まる。

以上、妥当性の比較的高いと考えられる仮定を用いて前節で得られた流路形態の形成条件を変形し、従来のものと比較したが、それは粒径の効果を加味した Henderson の式とはかなり一致していて、実河川の流路形態区分にも対応していると判断される。しかし、(12) 式の形では流路形態の形成条件の区分を行うには不適切な点のあることも指摘され、(4)～(7) 式を (12) 式以外の実河川の流路形態の予測に適用しやすい形式に変形していくことも必要であろう。

これまでの検討によって、側岸侵食性流路においても中規模河床形態の基本特性は固定側壁の場合と大体同様であり、また、流路形態の形成条件は、交互砂州を中心とした中規模河床形態の領域区分図を拡張して把握されることが判明した。しかし、側岸侵食性流路では、通常拡幅によって水理条件が変化していくので、その変化速度と砂州の発達速度との関係を明確にしておかなければ、現在の流路状態からある時間経た後に形成される流路形態の予測は不可能である。砂州形状の時間的変化は 3.3 において示したとおりであるが、以下では、まず主に交互砂州の発達に関連した流路条件の推移について検討し、ついで交互砂州の発達と流路拡幅の過程を予測して形成される流路形態を推定する方法について考察する。

5. 流路形態の形成過程

5.1 流路条件の時間的変化

交互砂州の発達しうる流路条件は、4.2 の結果から判断すると、直線流路 2 の形態の水理条件にほぼ対応するものと考えられる。この条件を 1 個のパラメータ $h/d/(B/d)^{2/3}$ で表すと次式のようになる。

$$0.23 < h/d/(B/d)^{2/3} < 0.37 \dots\dots\dots (24)$$

一方、実験におけるこのパラメーターの時間的変化を示すと Fig. 9 のようであり、これから (24) 式の関係が満足される時間すなわち交互砂州の発達条件の維持時間をまとめて示すと Table 3 のようになる。

流量 15 l/s で蛇行流路の形成された実験ではこの維持時間は全般に長いが、初期の河岸高と流路幅の小さい Exp. IV および XI では、これらの大きい Exp. II よりもこの維持時間が短くなっている。また、流量の小さい Exp. III では維持時間が極めて長く、交互砂州がゆっくり発達していったことと対応している。

一方、初期形状が Exp. II と同じであった Exp. X では、維持時間が $3^{\text{hr}}40'$ とかなり短くて、初期に明確な交互砂州が形成されかけていたが、それが発達できなかったことに合致している。同様に網状流路の形成された Exp. III では、中下流部で平均化されたパラメーターに対する維持時間は同表のように $6^{\text{hr}}30'$ と

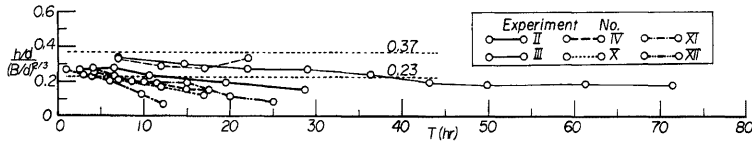


Fig. 9. Changes of stream channel condition as a function of time.

Table 3. Duration time wherein the condition of alternating bar being maintained.

Exp. No.	II	III	IV	VIII	X	XI	XII
Duration time (hr)	11.5	38	6.5	22	3.7	4.0	6.5

比較的長い、水理条件は平均区間内で大きく変化している。このため、流下していく交互砂州は発達しなかったと判断されるが、さらに Exp. XII では河岸高が 30 cm 以上もあるので、崩落砂による局所擾乱が強く、砂州形状が乱されたことの影響も考えられる。

5.2 側岸侵食性流路における交互砂州の発達

上述の維持時間内に交互砂州がどの程度まで発達するかを明らかにするために、固定側壁水路における交互砂州の発達時間について行った方法³⁷⁾を拡張して適用する。すなわち、ここでは流路幅が変化することを考慮して、 l_B に代えて B を使い、砂州の発達過程の指標 $\Sigma \Delta(BZ_B)/q_B$ と通水時間 T との対応関係を検討する。ここに、 Δ は 1 測定間隔における () 内の量の増分を示し、 q_B はその間の実測の下流端単位幅流量の平均値である。

Fig. 10 はその検討結果であって、明確な交互砂州が発達して蛇行流路が形成されていった Exp. II, III, IV および XI では、直線流路状態が維持されている期間内は T と $\Sigma \Delta(BZ_B)/q_B$ との間につきの関係が成立していると思われる。

$$\Sigma \Delta(BZ_B)/q_B = 7.0 \times 10^{-2} T \quad \dots (25)$$

この関係は、交互砂州の比較的明確であった Exp. X の初期においても成立している。しかし、Exp. XII では、 Z_B が小さいことに加えて、河岸高が大きく振幅が抑制されることおよび下流区間の河床こう配が砂州形成区間よりも大きいために q_B も大きくなっていることによって、 $\Sigma \Delta(BZ_B)/q_B$ は他の実験に比較して 1 order も低くなっている。

以上の結果は、側岸侵食性流路であっても、交互砂州の形成条件下ではその発達機構が固定側壁水路の場合と同様であることを示している。これより、交互砂州の発達過程は、(25) 式の差分を連続的な関係に置換えた次式

$$Z_B(T) = \frac{0.07}{B(T)} \int_0^T q_B(t) dt \quad \dots (26)$$

によって、流路幅と単位幅流量の時間的変化から予測することができる。

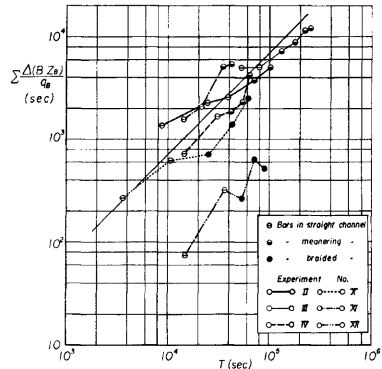


Fig. 10. Development of alternating bars in lateral erodible channels.

5.3 流路形態の形成過程の予測

本研究で対象としてきた最も単純で基本的な流路変動過程では、形成される流路形態は、拡幅している流路が(24)式の条件を満たしている間に(26)式に従って交互砂州がどの程度まで発達するかによって決定される。すなわち、交互砂州が(2)式の条件に到達しておれば蛇行流路が、(3)式の条件を満たせば網状流路が、それにも達しなければ直線流路が形成される。これを予測するためには、流路条件(24)式を決定する流路幅、平均水深および粒径と(26)式に含まれる単位幅流砂量の時間的変化を予め明らかにしておく必要がある。

直線流路の変動過程の予測にはいわゆる流路変動の一次元解析³⁰⁾が適用可能であって、その適用範囲は交互砂州の移動の速かな直線流路状態である。これには、直線流路1および(24)式が対応しかつ(26)式の成立する直線流路2の形態が含まれる。前述の B , h および q_B の予測もこの解析によって可能であるので、結局上に述べた方法によって形成される流路形態を推定することができる。

Fig. 11 は、Exp. II および VIII について流路変動の一次元解析を行い、 Z_B/B および Z_B/h の時間的変化を求めて実験値と比較して示したものであって、参照のために B および h の変化の比較も示している。別途に $h/d/(B/h)^{2/3}$ の値を検討した結果によって、いずれも(24)式を満たすことが判明している。

Exp. II の場合では、一次元解析によって求められた流路幅は図示されているように実験値に良く一致しているが、流砂量の推算値は実験値の6割程度であったので、 Z_B/B の予測値は実験値の約半分となっている。このために Z_B/B が 1.6×10^{-2} 以上になるのに実験の約3倍の7時間を要している。 Z_B/h の計算値は、 h の推算値が実験値の約2/3であるので、実験値との一致は良くなって、 $Z_B/h > 1.3$ となるのは実験の $T=10^{\text{hr}}$ に対して $T=12.5^{\text{hr}}$ と近くなっている。この結果からは、Exp. II では $T=12 \sim 13^{\text{hr}}$ にかけて蛇行流路が形成されると予測される。以上のような予測は Exp. IV についても行われ、同様の結果が得られている。

つぎに、Exp. VIII の場合では、 h の計算値は実験値の1/2～2/3であるので、 Z_B/h の予測値は実験値よりもかなり大きくなっているが、 B は両者が良く一致しているので、 Z_B/B の変化も $T=10^{\text{hr}}$ まで両者は一致しているようである。しかし、 Z_B/B あるいは Z_B/h の実験値はその後ほぼ一定の値をとるのに対して、計算値の方は流路条件が(24)式を満たしているために増加を続けている。これは、 Z_B の計算式(26)に含まれる砂州の発達の抑制因子が B の増加と q_B の減少という間接的なものでしかないことによっており、Fig. 11 のように拡幅が停止すれば q_B は大体一定値を保つので、 Z_B は直線的に増大することになる。確かに、拡幅が停止すれば固定側壁と同等の条件とみなされるので、 Z_B/B が 0.034 と比較的小さい値に留まるには何らかの原因があろう。この原因としては、側岸が鉛直壁でないことの外に、Exp. VIII のような低い掃流力では、本実験のように比較的広い粒度分布を持った河床の滞筋に形成される armour coat が破壊できないことが考えられる。これと同様の現象は、掃流力の小さい Exp. V の中、下流区間でも観察されている。

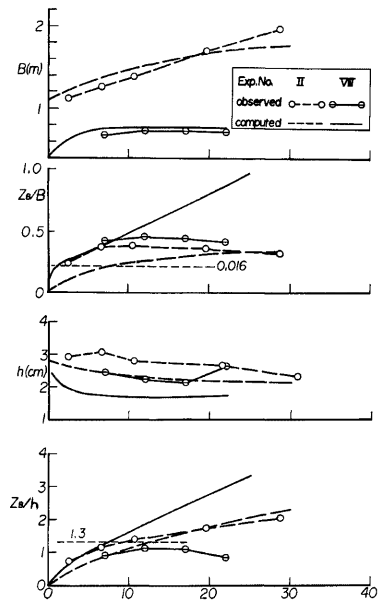


Fig. 11. Prediction of alternating bar development in lateral erodible channels.

以上のように、(26) 式は側岸侵食性流路の交互砂州に関する非常に簡単な式であるにもかかわらず、流路拡幅が継続しているときには、それによって砂州の波高を予測することができ、予測精度を向上するには流路変動の一次元解析を正確にする必要のあることが示された。これに対して、拡幅が停止する場合には、(26) 式に河床砂の粒度分布と掃流力に対応して粗粒化による波高発達の抑制条件の導入を図らねばならず、さらに、一様砂の場合にも現われる抑制機構についての検討も重要であろう。

6. あ と が き

本研究では、流路変動過程に関する基礎実験の成果に基いて、流路形態の形成過程のダイアグラムを示し、それとともに側岸侵食性流路に形成される中規模河床形態の特性に着目して、流路形態の形成条件を明らかにし、さらに形成過程の予測を試みてその考察を行った。つぎに得られた主な結果を要約する。

- (1) 流路形態は、上述のダイアグラムに示したように、流路の変動過程との関連で考察する必要があり、それらは中規模河床形態と強く結びついている。
- (2) 側岸侵食性流路における中規模河床形態は、流路拡幅の影響を受けて、直線流路時であっても無次元波長 l_B/B や無次元波高 Z_B/B の値が固定側壁水路のものよりもやや小さいが、その基本的な特性は一致している。
- (3) 流路形態の移行限界時の砂州形状は、(2) および (3) 式で表され、砂州は発達してそれらの条件を満足していく。 Z_B/B が比較的早く一定値に到達するのに対して Z_B/h の方は増加の継続時間が長く、それは蛇行流路の形成される場合に著しい。
- (4) 流路形態は、変動過程における流路の状態に着目して、直線流路 1、直線流路 2、蛇行流路および網状流路の 4 つに分類できる。
- (5) 流路形態の形成条件は、中規模河床形態の形成領域区分図を拡張して明らかにされ、資料の豊富な $h/d < 10^2$ の場合、(4)~(7) 式で表される。一方、 $h/d > 10^2$ では一応 (9)~(11) 式のようになる。
- (6) 従来の形成条件式と (4)~(7) 式との対応を検討した結果、Henderson のものとの対応の良いことが示された。しかし、(12) 式の形は流路形態の形成区分に対して不適切であることが指摘された。
- (7) 直線流路 2 の形成条件は、側岸侵食性流路において交互砂州の発達する条件と考えられ、それを流路が満足する時間は形成される流路形態と関係している。
- (8) 上の条件内であれば、交互砂州の発達過程は固定側壁の場合とほぼ同様であって、波高の増加は (26) 式によって推定される。
- (9) 一方、流路条件の変化は、流路変動の一次元解析によって予測されるので、直線流路 2 の条件が満足される時間が求められ、その間における砂州の発達状況が推定できる。
- (10) 流路形状と砂州の発達状況を (2) あるいは (3) 式と比較して、形成される流路形態を予測することができる。実験条件に適用した結果では、流量が大きく拡幅が継続する場合には、予測した流路形態とその形成時間は実測に良く一致することが判明した。

本研究によって、流路形態の形成過程についての一つの統一的な取扱いが示された。今後、水深・粒径比の大きい場合の形成条件について検討を加えることも含めて、広い範囲の条件に上述の方法を適用して、その問題点を見出すとともに、すでに指摘した拡幅停止時の砂州の挙動などの問題点について、流況と流路形状の相互干渉を考慮した研究を進めていくつもりである。

本研究はこれまで何度か述べてきているように、河川災害部門で長期に亘って行われてきた大型実験の成果によるところが大きい。最後に、これらの実験の遂行に熱意を注がれてこられた当時の河川災害部門の芦田和男教授（砂防部門）、奈良井修二助手（現島根県勤務）、および塩入淑史氏、田中修市氏をはじめ実験に携わられた卒業生諸氏に謝意を表する次第です。また、図面の整理に協力して下さった中村行雄技官、本学大学院学生小池剛君に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 村本嘉雄：流路形態，水工学に関する夏期研修会講義集 A コース，土木学会水理委員会，1976年7月，pp. 8-1-8-26.
- 2) Schumm, S. A.: Fluvial morphology: The historical perspective, River Mechanics (Shen, H. W. ed.), Ch. 4, Water Resources Pub. Fort Collins, Colorado. 1971, p. 4-1.
- 3) Dury, D. H.: Relation of morphology to runoff frequency, Water, Earth and Man (Chorley, R. J. ed.), Ch. 9. II, Methuen & Co. Ltd, 1969, pp. 419-430.
- 4) Kellerhals, R., M. Church and D. I. Bray: Classification and analysis of river processes, Proc., ASCE, Vol. 102, No. Hy 7, 1976 pp. 813-829.
- 5) Leopold, L. B. and M. G. Wolman: River channel patterns: Braided, meandering and straight, U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 282-B, 1957.
- 6) 前出の1)にまとられている。
- 7) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二・塩入淑史：河道の変動に関する研究（1）——流路の変動過程に関する実験——，京都大学防災研究所年報，第13号 B, 1970, pp. 243-260.
- 8) 芦田和男・村本嘉雄・奈良井修二：河道へ変動に関する研究（2）——安定流路の形状と形成過程——，京都大学防災研究所年報，第14号 B, 1971, pp. 275-297.
- 9) 村本嘉雄・田中修市・藤田裕一郎：河道の変動過程に関する研究（3）——流路変動の一次元解析と蛇行流路の形成過程——，京都大学防災研究所年報，第15号 B, 1972, pp. 358-404.
- 10) 藤田裕一郎・村本嘉雄：蛇行流路の形成過程に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第18号 B, 1975, pp. 551-564.
- 11) 村本嘉雄・藤田裕一郎：蛇行流路の形成過程に関する研究，京都大学防災研究所年報，第19号 B-2, 1976, pp. 167-185.
- 12) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二：交互砂州の発達過程に関する考察，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，II-97, 1979, pp. 193-194.
- 13) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号 B-2, 1977, pp. 243-258.
- 14) 青野 尚：河川の蛇行に関する実験的研究，京都大学修士卒業論文，1957.
- 15) Wolman, M. G. and L. M. Brush: Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands, U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 282-G, 1961.
- 16) 永井靖郎：河道の安定に関する実験的研究，京都大学修士卒業論文，1955.
- 17) 沢田健吉：河川の蛇行の実験的研究，京都大学修士卒業論文，1958.
- 18) Schumm, S. A. and H. R. Khan: Experimental study of channel patterns, Geol. Soc. America Bull., Vol. 83, 1972, pp. 1755-1770.
- 19) Ackers, P. and F. G. Charlton: The geometry of small meandering streams, Proc., ICE, Paper 7328 S, 1970.
- 20) 山岡 勲・長谷川和義：自由蛇行流路の流体抵抗について，文部省科学研究費総合（A），沖積地河川における河床形態と流体抵抗の研究（代表：岸力），最終報告書，1975, pp. 89-97.
- 21) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件，第22回水理講演会論文集，1978, pp. 275-282.
- 22) 前出の11)
- 23) 藤田裕一郎：交互砂州上の流況特性に関する実験的研究，第24回水理講演会論文集，1980, pp. 329-337.
- 24) 前出の11)
- 25) 前出の13)および21)
- 26) 前出の14)，15)，18)，19)および20)
- 27) Ackers, P.: Experiments on small stream in alluvium, Proc., ASCE, Vol. 90, No. HY 4, 1964, pp. 1-37.

- 28) Stebbings, J.: The shape of self-formed model alluvial channels, Proc., ICE, Vol. 25, Paper 664, 1963, pp. 485-510.
- 29) Rozovskii, I. L., E. B. Eremenko and B. A. Bazilievitch: Nieucianobivcieencia dvidzenie vodnovo patoka niaze gidroelectroctantsui evo vliianie na ryclo, Izdatelictvo «Nauka Dumka», Kiev, 1967, pp. 152-192.
- 30) 足立昭平・中藤達昭：沖積流路の拡幅に関する実験的考察，土木学会第24回年次学術講演会 講演概要集，1969.
- 31) 池田 宏：実験水路における砂礫堆とその形成条件，地理学評論，Vol. 46-7, 1973, pp. 435-451.
- 32) Simons, D. B. and M. L. Albertson: Uniform water conveyence channels in alluvial material, Trans., ASCE, Paper No. 3399, Vol. 128, Part I, 1963, pp. 65-107.
- 33) 前出の16-18)
- 34) Friedkin, J. F.: A latoratory study of the meandering of alluvial rivers, U.S. Waterways Experimental Station, 1945.
- 35) 前出の6)
- 36) 前出の13)
- 37) 前出の12)
- 38) 前出の9)および10)