

幅広水路を用いた流路網形成実験

Hydraulic Experiments on Characteristic of Channel Network Configurations

島絵梨子*・渡邊 康玄**・佐野賢司***

Eriko SHIMA and Yasuharu WATANABE and Kenji SANO

*学生員 北見工業大学 工学部 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

**正会員 工博 北見工業大学教授 工学部 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

***学生員 北見工業大学大学院 工学研究科 土木開発工学専攻 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

Channel network configurations are changed by hydraulic conditions. The characteristic of a river channel network configuration is directly connected with river channel disasters and a river ecosystem. For this reason, the relation between the form characteristic and the hydraulic conditions needs to be grasped. In this study, hydraulic experiments on channel network configurations were conducted. Sufficiently wide flume was used for the experiments so that the influence of side walls might not appear in the channel network formation. Although few channels were formed in the hydraulic condition that the bed shear stress was near the critical bed shear stress, multi-row bars were formed in the condition that the bed shear stress is to some extent large. As a result of conducting linear stability analysis, it was shown that a phenomenon which is different when hydraulic conditions differ arises.

Key Words : Channel Network, Hydraulic Experiments, linear stability analysis

1. はじめに

一般の河川には、平常時に流水が存在する流路網が形成される。流路形状は流れに基づいて決定されており、流量の変動によって変化する。そのため、近年の局所的豪雨やダムなどによる流量の変動により、流路形状が大きく変化することが推察される。それにより、安定的な河道の維持が困難になることが考えられ、災害時の対策という観点からも、従来の水理条件によって河川自身が形成してきた流路形状が、維持管理上好ましいとは限らなくなるという問題が生ずる。

流量と川幅の関係に関しては、河岸満杯流量の0.5乗に比例するとするレジーム則や、動的平衡状態における礫河川の側岸部の静的安定条件を用いた理論式¹⁾²⁾³⁾がある。レジーム則については、藤田⁴⁾が安定流路の幾何形状について次元解析により、その妥当性を検証している。また山本⁵⁾は、改修等によって人工的に川幅が変化した河道の応答について、実際の河川データに基づいて解析し、川幅は流量と摩擦速度に規定されており、水理量が変わらない場合には河川自身が形成した川幅に戻るとことを示している。近年では井上⁶⁾、福岡ら⁷⁾が実河川のデータを用いて、流量と川幅との関係を考察している。一方、複列砂州と網状流路の形成過程に関しては藤田ら⁸⁾により、複列砂州及び網状流路の形成過程の定量的な把握を目的とした基礎的な実験が行われている。また、関根⁹⁾、竹林ら¹⁰⁾は、網状流路の形成・発達過程の数値実験並びに網状流路の形成に関する実験を行い、解析モデルの妥当性及び

流路変動プロセスを検証している。流路の分裂機構に関しては芦田ら¹¹⁾が、一本の流路が拡幅し分裂に至る過程に着目し、水理実験による解析及び、数値解析による検討を行なっている。河川の分岐現象や川幅の決定機構に関しては、渡邊ら¹²⁾により河道の横断的な形状の安定という視点から、線形安定理論を適用した川幅の自立形成機構に関する研究が進められている。しかし、流路網と蛇行流路との関係並びに、それらの形成過程や川幅の決定機構に関する研究は実験例も少なく、実現象では十分に解明されていないのが現状である。安定的に河道を維持するためには、川幅や流路網形状及び蛇行形状と水理量との因果関係を解明することが非常に重要となる。

本研究では、水路側壁による横断方向に対する拘束ができる限り小さい場合の水理実験を行い、平坦床から形成される流路網並びに蛇行流路の形状特性を把握するとともに、線形安定解析を実施し、流路網形成機構を把握することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 実験方法および実験条件

本実験では、流路網形成に対して、水路側壁による横断方向に対する拘束ができる限り小さくなるように、水深に対して川幅が十分に広い水路を用いた。流量 Q を一定に保ったまま長時間通水した場合に、流路形状がどのように変化していくのかを把握することが本実験の目的である。実験に使用した水路は、図-1に示す、

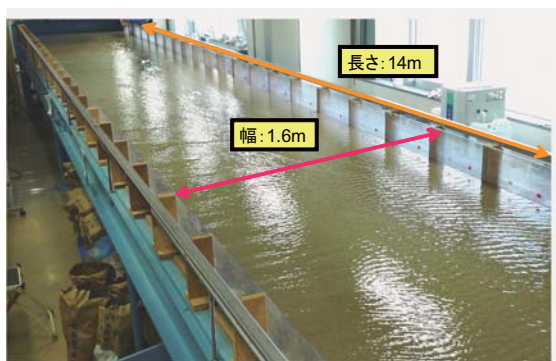


図-1 実験水路写真

表-1 実験条件

実験番号	水深 (m)	流量 (m^3/s)	無次元掃流力
Case1	0.0050	0.00177	0.040
Case2	0.0072	0.00330	0.058

長さ 14m, 幅 1.6m の直線水路である。使用した河床材料は、平均粒径 d_m が 0.765mm の均一な 4 号珪砂である。この河床材料を水路上流端から下流 12m まで水路に平らに敷き詰め、河床勾配が 1/100, 水路底を基準とした河床高を 10cm とした初期河床を形成した。水路の上下流端には初期河床高と同じ高さの固定堰を設置している。実験条件は表-1 に示すように、初期の無次元掃流力 τ_* が限界掃流力 τ_{*c} をわずかに上回る ($\tau_*/\tau_{*c} = 1.05$) 場合と、初期の τ_* が τ_{*c} の 1.5 倍程度になる場合の 2 ケースを行なうこととした。両ケースの通水時間は、流路が水路側壁に到達してからある程度時間が経過した 16 時間としている。なお、今回の実験は現象を単純化するため、掃流砂のみで河床材料が移動する場合を対象としており、水深粒径比が 10 程度と、実河川としては比較的小さい場合における現象となっている。

2.2 測定項目

実験での測定項目は、給砂量、河床高、流量である。給砂は上流端から水路横断方向に均等に行い、10 分ごとに給砂量を記録した。河床高の測定は、水路上流端から水路下流 11.9m 地点までの縦断距離で約 12m の区間について、縦断方向に 10cm, 横断方向に 1cm 間隔でレーザー砂面計 ((株) ジャコム製) を用いて行った。通水中に流路形状を測定するには、一旦通水を停止させる必要がある。本実験では河床の変化過程の把握のため、河床高計測毎に通水を一旦停止しているが、所定の時間まで通水を再開させ、流路網形成を継続させた。流量の測定については、実験条件を満たしているかを確認するため、下流端において 30 分ごとに測定を行った。



図-2 Case1 実験後河床 (T=8hr)



図-3 Case2 実験後河床 (T=8hr)

3. 実験結果および考察

3.1 河床形状の時間変化

通水開始から 8 時間後に形成された、Case1, Case2 それぞれの河床の様子を写真で示したものが図-2, 図-3 である。Case1 においては、網状の流路が形成されている様子が見て取れる。Case2 においては、Case1 に見られるような流路は確認することができず、Case1 ほど起伏が激しくなく、舌状の砂州が形成されていることが分かる。

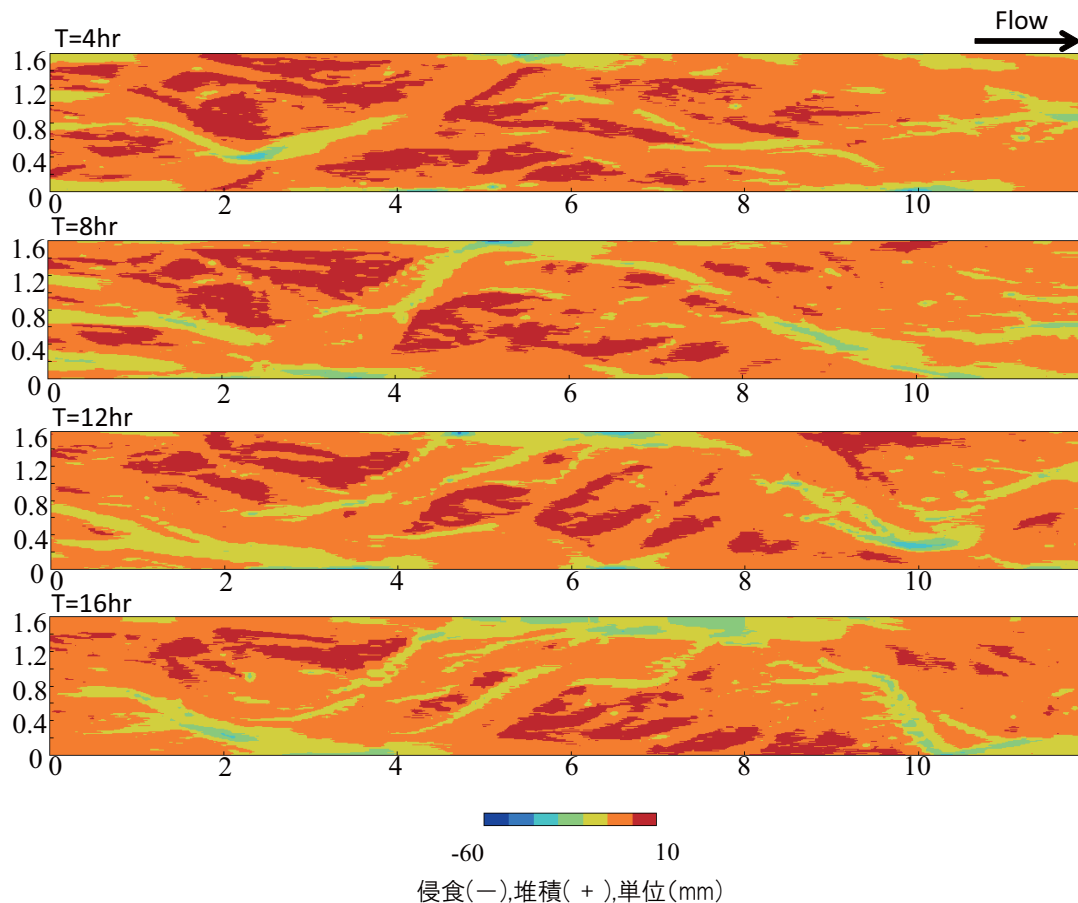


図-4 Case1 流路形状時間変化

次に、上流端から下流 11.9m までの河床形状の変遷過程を、Case1, Case2 それぞれについてコンター図の変化で図-4, 図-5 に示した。Case1 では、4 時間毎に通水を停止し、河床高の測定を行った。通水初期に多モードの砂州が形成されたが、時間経過とともに浮洲が多数存在するようになり、上流からおよそ 2.5m の地点から一波長がおおよそ 6m の蛇行した、比較的明瞭な流路を確認することができた。その他にも、小さな流路が見て取れる。なお、通水 12 時間ほどで蛇行流路の曲頂部が水路側壁に到達し、左岸側 4m~10m の区間において、他の部分と比較すると縦断的に広範囲で洗掘していることが読み取れる。この箇所は、発達した蛇行流路の横断方向への移動が水路側壁により制約を受けたため、流路の曲率半径が小さくなり、流路の湾曲に伴う二次流の増大による影響を受けたものと考えられる。その流れが時間経過とともに下流方向に伝播していくことで、縦断的に広範囲で大きく洗掘したものと推察される。水路幅が広ければ、より明瞭な蛇行形状をした流路網が形成され则认为られる。

Case2 では、Case1 に比べ現象の進行が早かったため、通水開始から 5 時間目までは 1 時間毎に河床高を測定している。Case1 のような明瞭な浮洲の存在や、蛇行形状の流路は見られず、多列砂州が形成され、藤田ら

8) が指摘しているように、経過時間とともに多モードの砂州から少モードの砂州へと変遷していく様子を見て取れる。また、Case1 と比較すると明瞭な流路網は形成されていないことが分かる。

3.2 流路形状の時間変化

Case1 において、蛇行形状の明瞭な流路を確認することができ、また浮洲が形成されたことから、流路形状の変化を経過時間毎に比較することとした。なお、Case2 においては多列砂州が形成され、明瞭な浮洲が形成されていなかったため、この解析は行っていない。上流、下流の影響を受けていると推察される区間を除く、上流 5m から下流 10m までの区間を対象として、河床高測定断面ごとの流路数、流路幅、洗掘深の時間変化を把握することとした。本実験では通水時の水面形を測定できなかったことから、実験時における観察と写真から明確に流速が存在すると判断された、初期河床から 3mm 以上低下している個所を流路とみなした。流路数については各断面における流路数、流路幅については各断面の流路幅の合計を全流路幅、最大値を最大流路幅、平均値を平均流路幅として整理を行なった。洗掘深については各断面の最大値を最大洗掘深、平均値を平均洗掘深として整理を行なっている。結果を図-6~

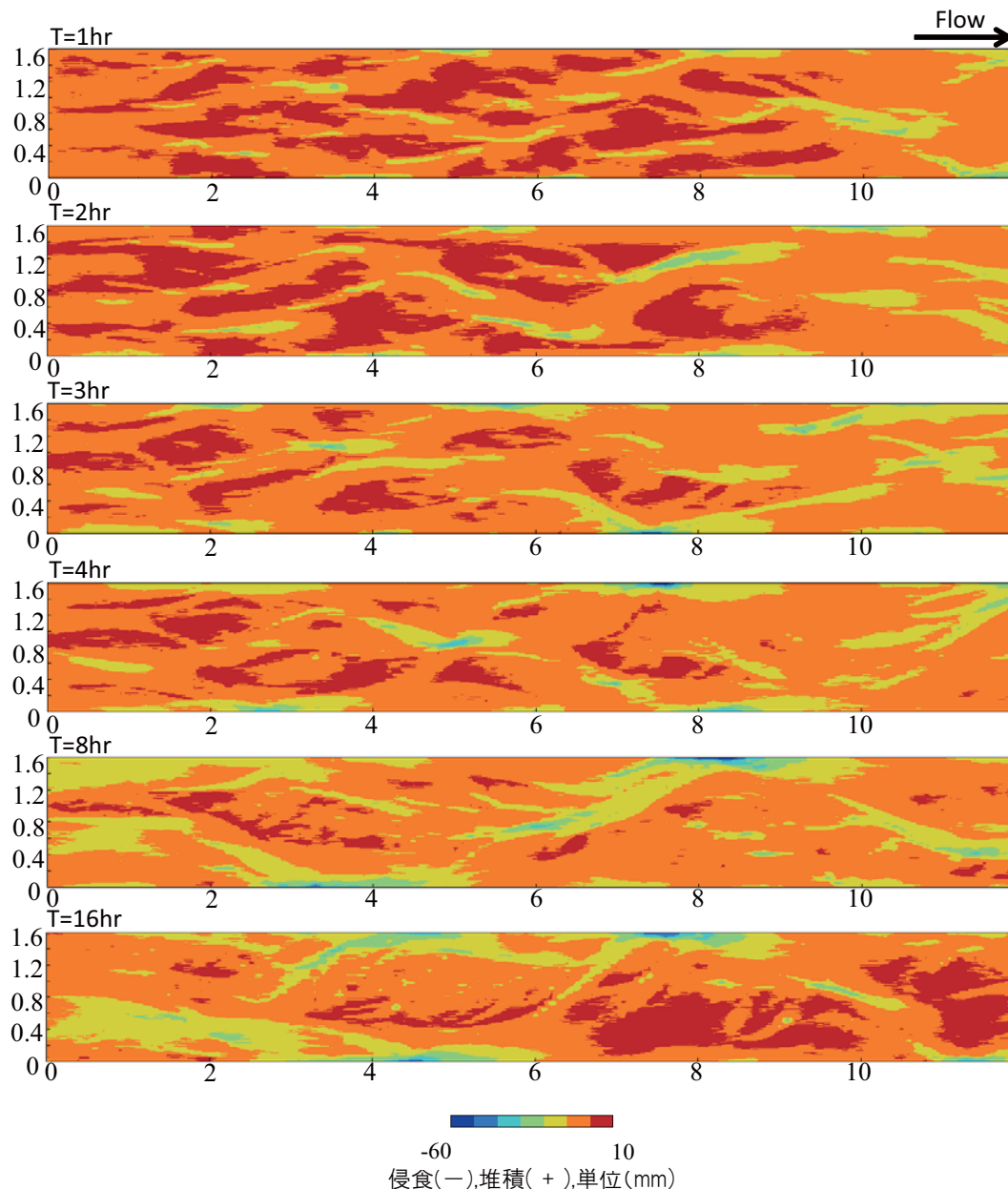


図-5 Case2 流路形状時間変化

図-11 に示す。また、流路数、全流路幅、最大流路幅、平均流路幅、最大洗掘深、平均洗掘深については経過時間毎に平均し、より時系列変化が分かるように整理を行うこととした。結果を図-12～図-14 に示す。図-6 より、流路数はおよそ 1m 毎に周期性があることが読み取れ、図-12 からは、時間経過とともに流路数は減少傾向にあることが分かる。流路数を経過時間毎に平均すると、8 時間目におよそ 4.8 本だったものが、16 時間目にはおよそ 3.5 本となり、時間経過とともに流路がおよそ 1.3 本減少していることが見て取れる。一方、全流路幅、最大流路幅、平均流路幅は図-13 に示されるように、時間が経過してもそれほど大きな変化は見られないが、詳細に見ると時間的に大きな変化を示すものも存在する。図-8 より、16 時間が経過した時点で

の最大流路幅は、上流端から下流におよそ 6.5m～8.5m の区間で、それまでの時間帯の値と比較すると、大きく増大していることが分かる。また、最大洗掘深、平均洗掘深ともに、16 時間目において上流端から下流におよそ 6.5m～8.5m の区間で時間的に大きく洗掘していることが読み取れる。この区間はコンター図からも確認できる、広範囲での洗掘個所と重なることから、上述したように水路側壁の影響を受けているものと考えられる。なお、最大洗掘深、平均洗掘深は初期に大きく変化し、その後はほとんど変化していない。このことは、流路が水路側壁に到達しても、水路側壁に沿って洗掘個所が下流に移動し、洗掘深を極端に大きくしないことを示している。

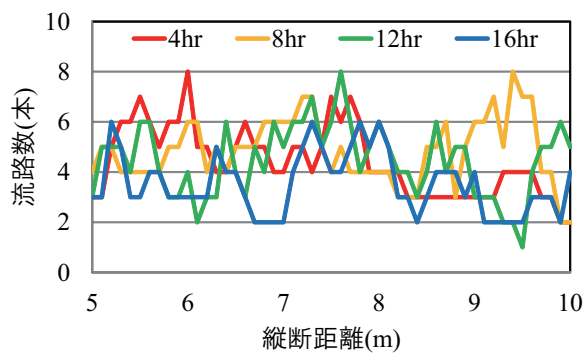


図-6 流路数時間変化

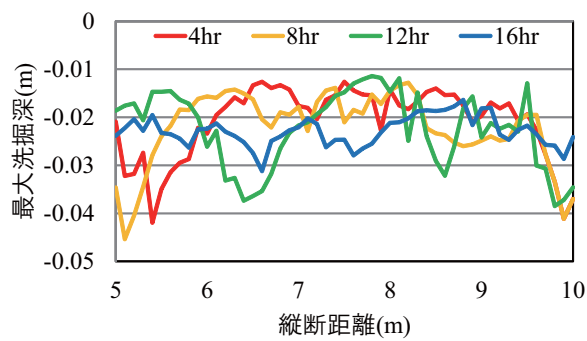


図-10 最大洗掘深時間変化

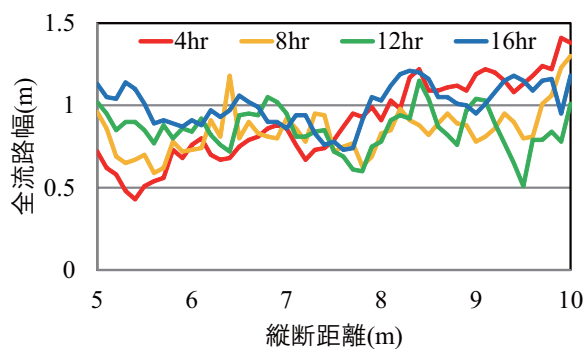


図-7 全流路幅時間変化

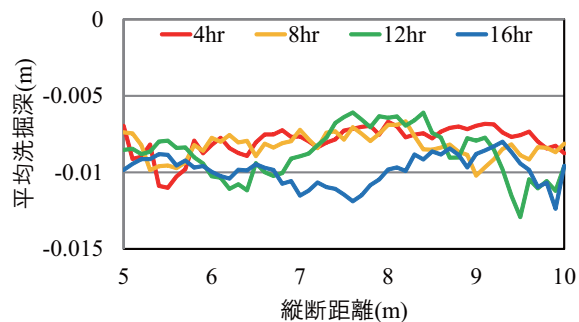


図-11 平均洗掘深時間変化

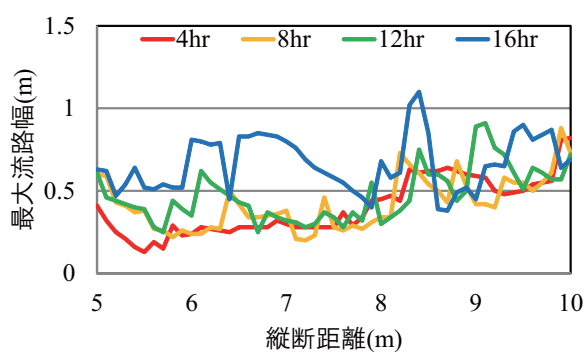


図-8 最大流路幅時間変化

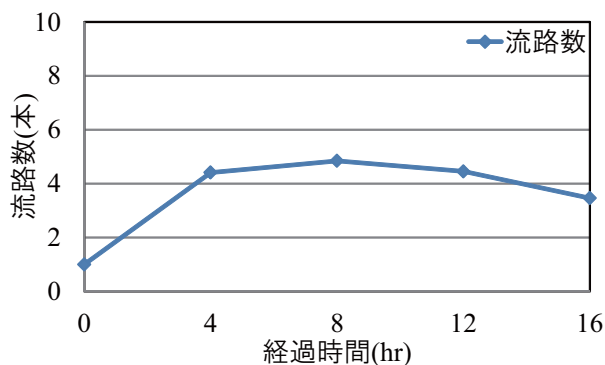


図-12 経過時間ごとの流路数平均値

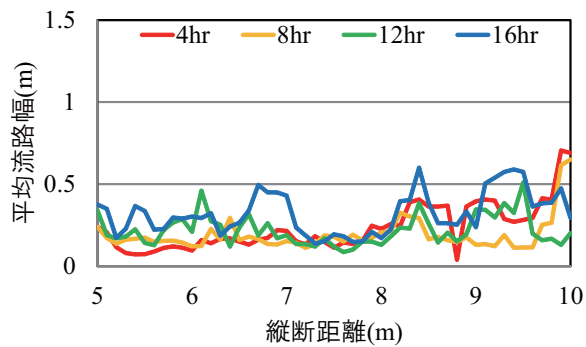


図-9 平均流路幅時間変化

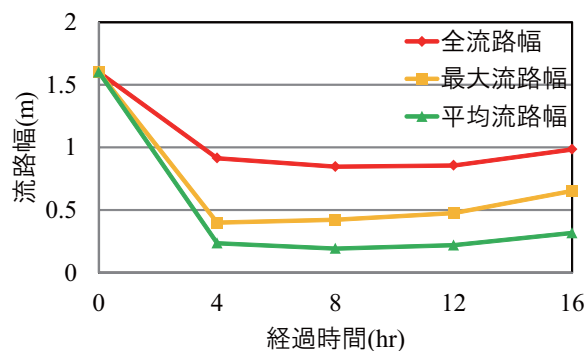


図-13 経過時間ごと流路幅平均値

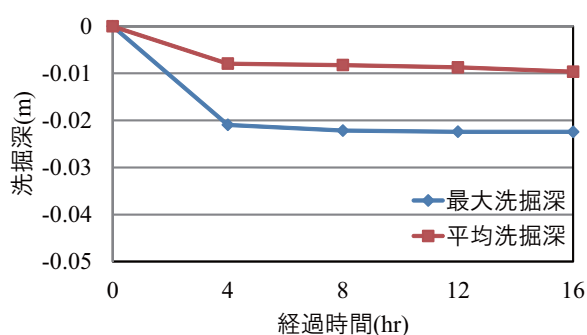


図-14 経過時間ごとの洗掘深平均値

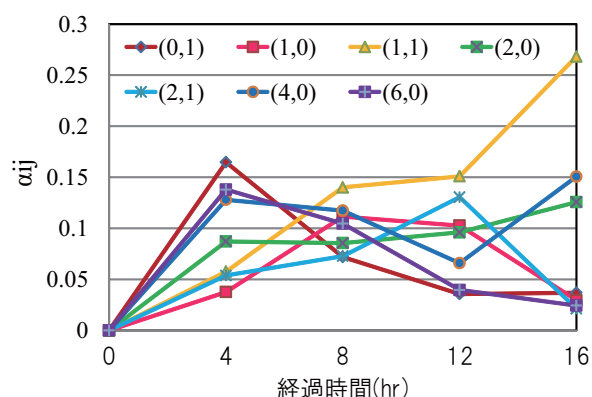


図-15 Case1 主要成分時間変化

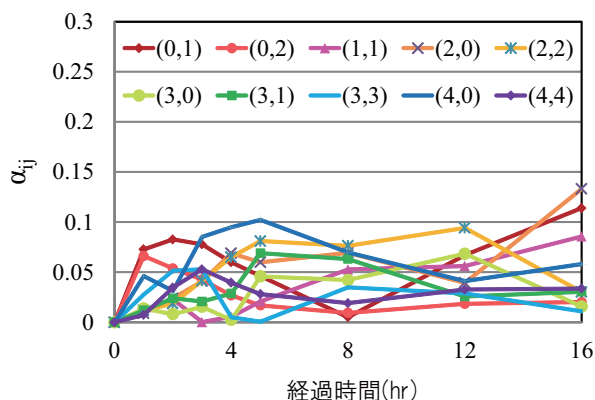


図-16 Case2 主要成分時間変化

3.3 河床の形状特性

(1) 主要成分による比較

河床の形状特性を把握するため、上流端から下流 11.9m までの区間において、2 重フーリエ解析を行った。初期平均水深で無次元化された初期河床からの変動量 η を式 (1) で表わし、各波の振幅 α_{ij} の大きさを比較することとした。

$$\eta = \sum \sum \alpha_{ij} \sin \left(i \frac{2\pi}{2B} \tilde{y} - \frac{\pi}{2} \delta_{ie} \right) \cos \left[j \frac{2\pi}{L_b} \left(\tilde{x} - \delta_{ij} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 i, j はそれぞれ横断方向 \tilde{y} および縦断方向 \tilde{x} の波数、 L_b は波長、 δ_{ij} は波数 i, j の位相であり、 δ_{ie} は式 (2) で表わされる。

$$\delta_{ie} = \frac{|1 + (-1)^i|}{2} \quad (2)$$

経過時間毎に河床波の成分を解析した結果を図-15、図-16 に示す。図-15 に示される Case1 においては、主に α_{01} , α_{10} , α_{11} , α_{20} , α_{21} , α_{40} , α_{60} の 7 個の成分が卓越しており、経過時間によって卓越している河床波の成分が異なる結果を得た。その中でも、横断方向にかまぼこ型の形状を示す α_{20} は一定の値を持ち、交互砂州あるいは蛇行流路形状を示す α_{11} は 8 時間目以降から卓越し、最大値を持つ成分となっている。

図-16 に示す Case2 においては、主に α_{01} , α_{02} , α_{11} , α_{20} , α_{22} , α_{30} , α_{31} , α_{33} , α_{40} , α_{44} の 10 個の成分が卓越しており、Case1 と同様に経過時間によって卓越している成分が異なる結果を得た。 α_{22} , α_{33} , α_{44} といった、多列砂州を示す成分が出現している。4 時間目以降 α_{22} が α_{33} の値を上回っていることが読み取れ、3 列砂州から 2 列砂州への移行があったことが分かる。また、交互砂州あるいは蛇行形状を示す α_{11} , α_{20} の値が 4 時間目以降大きくっており、16 時間目には α_{20} が最大値を持つ成分となっている。

(2) 主要成分合成模式図による比較

河床形状の特徴に対する理解をより深めるため、振幅が微小な成分を除き、Case1, Case2 における河床波の主要成分を足し合わせたものを図-17, 図-18 に示す。図-17 に示す Case1 においては、4~8 時間目に横断方向に 4 本の流路が形成されていることが分かる。また、12 時間目以降は流路数は減少し、蛇行形状の流路が形成されていると考えられる。なお、これによって表現される流路数は、実験によって観察された流路数よりもやや少ないものとなった。図-18 に示す Case2 においては、4 列砂州から 3 列砂州へ、さらに 2 列砂州へと砂州モードの減少の過程が表現されている。このように、本研究で扱った実験条件においては、初期の無次元掃流力が限界掃流力に非常に近い条件の場合には、多列砂州が形成されず、複数の流路が形成され、時間の経過に伴って蛇行流路が形成されるという結果を得た。

3.4 実験における流路幅と理論における川幅との関係

流路幅と水量との関係を結び付けるため、理論的に導かれた渡邊ら¹²⁾の安定解析に基づく基本川幅と、実験で得られた流路幅とを比較することとした。渡邊らの基本川幅は、横断方向に微小な振幅を持つ波を摂動解として与え、それらの発達時間を調べる線形安定解析の手法を適用して得られた川幅である。平坦床に単位幅当たり一定の流量が流れ、河床波が形成されると、

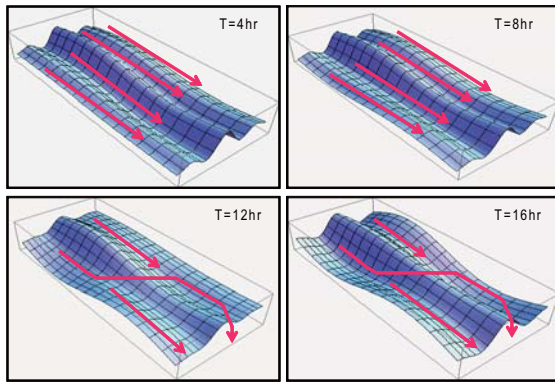


図-17 Case1 主要成分合成模式図

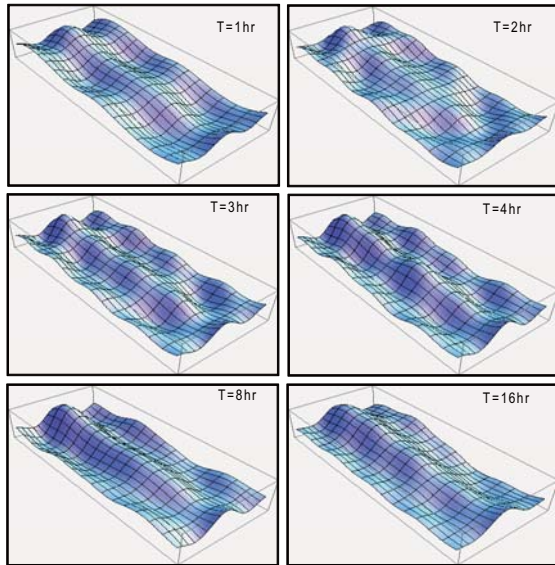


図-18 Case2 主要成分合成模式図

横断方向に深浅の変化が生じ、横断方向に平均河床高が変化しなければ、流速の変化に伴い水位が下がる。その結果として、ある幅(基本川幅)毎にまとまって流下するものとして検討が行われている。以下にその取り扱いを簡単に紹介する。川幅無限大の一定勾配の水路における拡散項を省略した定常2次元浅水式と連続の式および掃流砂を対象とした流砂連続式を、平坦河床上の等流の諸元を基に無次元化を行うと以下の式(3)～(6)で表わされる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\tau_x}{D} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\tau_y}{D} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial (UD)}{\partial x} + \frac{\partial (VD)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + Q_0 \left(\frac{\partial Q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

A を摂動パラメータとして、 (U, V, H, D) を式(7)で示されるように等流時の値と摂動量とに分ける。

$$(U, V, H, D) = (1, 0, H_0, 1) + A(U_1, V_1, H_1, D_1) \quad (7)$$

摂動量については、式(8)で表わす横断方向に波長 \tilde{L} を持つ微小攪乱を与える。

$$(U_1, V_1, H_1, D_1) = (C_1 u_1, S_1 v_1, C_1 h_1, C_1 d_1) E_1 \quad (8)$$

ここで、

$$(S_1, C_1, E_1) = (\sin(\lambda y), \cos(\lambda y), \exp(rx + \omega t)) \quad (9)$$

$$\lambda = 2\pi \frac{\tilde{D}}{\tilde{L}} \quad (10)$$

としており、 r は微小攪乱の縦断方向の増幅率である。すなわち、式(9)は無限上流($x = -\infty$)で振幅が0、下流端($x = 0$)で微小な振幅を持つ形状を与えていることとなり、解析対象範囲は x が負の領域である。

この安定解析を行い、Case1、Case2における等流水深 \tilde{D}_0 と基本川幅 \tilde{B} に対する時間増幅率 ω のコンター図を図-19に、等流水深 \tilde{D}_0 に実験値を与えた場合の基本川幅 \tilde{B} と時間増幅率 ω の関係をそれぞれ図-20、図-21に示す。渡邊ら⁶⁾の研究により、実河川データとレジーム則との比較で、河床勾配が1/250の場合には、 r が0.1~0.2で両者がほぼ一致することがわかっている。 r に関してはまだ十分に解明されていないが、本実験の河床勾配は $I = 1/100$ であるため、最も再現性が高いと判断される $r = 0.20$ を適用した。図-20に示されるCase1において、等流水深 \tilde{D}_0 を固定した場合の時間増幅率 ω の基本川幅 \tilde{B} に対する変化を見ると、増幅率に関して特異点が存在する。この値を連ねた線を図-19に併せて記している。図-20からは、およそ0.45mのときに増幅率が不連続、すなわち特異点を持つことが分かる。通常の安定解析では増幅率が不連続となる点は出現せず、極大値を持つ増幅率が得られる。よって、増幅率が不連続となる点では何らかの不安定性が生じているものと推察される。特異点が基本川幅を示すものと考え、本実験で用いた水路の水路幅が1.6mであるので、横断方向におよそ3.6本の流路が形成されることになる。実際に実験で形成された流路数は、実験開始から16時間後に平均で3.5本であり、理論値とほぼ一致する結果を得た。図-21に示されるCase2において、等流水深 \tilde{D}_0 を固定した場合の時間増幅率 ω の基本川幅 \tilde{B} に関する変化を見ると、Case1とは異なり、増幅率に関して特異点が存在しない。このことは、Case2においては明瞭な流路が形成されないということを示していると考えられ、Case1の現象とは異なる現象が生じたものと判断される。すなわち、

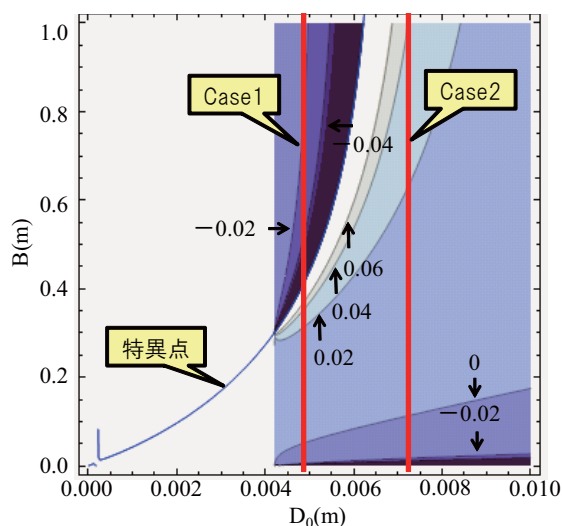


図-19 Case1 及び Case2 時間増幅率コンター図

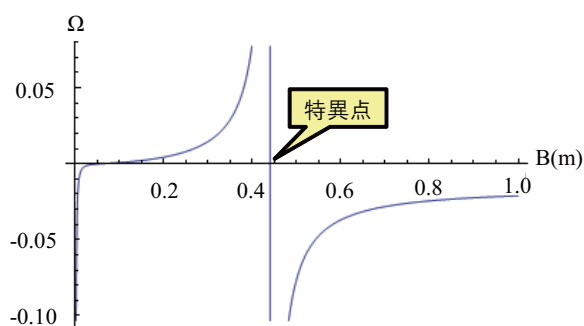


図-20 Case1 実験条件における流路幅と時間増幅率の関係

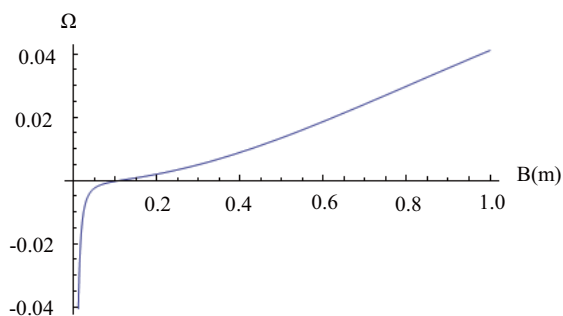


図-21 Case2 実験条件における流路幅と時間増幅率の関係

Case1 では明確な流路網が形成され、Case2 では明瞭な流路網は形成されず、多列砂州が形成されたものと推察される。

4. まとめ

本研究では、水路側壁による横断方向に対する拘束の影響ができる限り小さい場合における、流路網並びに蛇行流路と水理量との因果関係について明らかにす

ることを目的として、水理実験を行った。実験の結果、Case1 においては、時間経過とともに一波長がおおよそ 6m の蛇行した、比較的明瞭な流路が形成された。また、実験で得られた流路数と理論によって得られた基本川幅による流路数が、ほぼ一致する結果を得た。蛇行した流路については、流路網形成後に分岐した流量に基づいて形成されるが、本研究ではその形成機構の解明までは行なっておらず、どのような流量が与えられると流路が分割されるのかという点までしか検討を行っていない。今後、平坦な河床から流路網が形成されたその後に、蛇行流路が形成されていく過程について議論する必要がある。Case2 においては、多列砂州が形成され、時間経過とともにモードが減少する現象を確認した。また、Case2 では安定解析結果において特異点が存在しないため、Case1 とは異なる現象が生じたものと考えられる。

今後の課題として、本研究では 2 ケースのみの実験結果による考察であるため、様々なケースの実験を重ね、流路網と水理量の因果関係についてさらに検討していく必要がある。流路網と水理量との因果関係が明らかになれば、今後の地球温暖化による流量変動を見越した河道管理に対して、維持管理が容易な川幅の設定が可能となる。そのため、本研究は河川維持管理の観点より、重要な位置づけになり得ると考えられる。

参考文献

- 1) Paker, G.: Self-formed straight rivers with equilibrium bank and mobile bed, Part 2. The gravel river, JFM, vol. 89, pp. 127-146, 1978.
- 2) 池田駿介, Gary PARKER, 千代田将明, 木村善孝: 直線礫河床河川の動的安定横断形状とそのスケール, 土木学会論文集, 375, I-6, pp. 176-126, 1986.
- 3) 泉典洋, 池田駿介: 直線砂床河川の安定横断形状, 土木学会論文集, 429, II-15, pp. 57-66, 1991.
- 4) 藤田裕一郎: 沖積河川の流路変動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 1980.
- 5) 山本晃一: 沖積河川学—堆積環境の視点から, 山海堂, 1994.
- 6) 井上和則: 安定な河道断面・断面形の既往研究の概観と実河川の流量・川幅・水深関係の一考察, 水工学論文集, 第 55 巻, S787-S792, 2011.
- 7) 福岡捷二: 治水と環境の調和した治水適応策としての河幅, 断面形の検討方法, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp. 5-10, 2010.
- 8) 藤田裕一郎, 赤松英樹, 村本嘉雄: 複列砂州と網状流路の形成過程に関する実験, 京都大学防災研究所年報 第 29 号 B-2, pp. 451-472, 1986.
- 9) 関根正人: 斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション, 水工学論文集, 第 47 巻, 2003.
- 10) 竹林洋史, 江頭進治, 岡部健士: 網状流路の時空間的な変動特性, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 737-742, 2002.
- 11) 芦田和男, 江頭進治, 里深好文, 後藤隆之, 尾島知: 京都大学防災研究所年報 第 35 号 B-2, 1992.
- 12) 渡邊康玄, 早川博, 清治真人: 安定解析に基づく川幅の自立形成機構, 水工学論文集, 第 53 巻, 2009.

(2012 年 3 月 8 日 受付)