

流路網形成過程に関する基礎的水理模型実験

Hydraulic experiment on formation process of channel network.

北見工業大学工学部社会環境工学科
北見工業大学工学部社会環境工学科
北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻

○ 学生員 島 絵梨子 (Eriko Shima)
正会員 渡邊 康玄 (Yasuharu Watanabe)
学生員 福岡 将太 (Shota Fukuoka)

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、近年の局所的豪雨などによる流量の増加で、流路形状が大きく変化することが推察される。現在の流路幅は、維持管理の点からも、従来河川が形成してきた川幅に基づいて決定されてきているが、流量が大きく変動した場合にはこれまで河川自身が形成してきた形状が維持管理上好ましいとは限らなくなる。従って、今後河道管理を実施していく上で、安定的に河道を維持できる川幅や蛇行形状と水理量との因果関係を解明することは非常に重要である。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における測岸部の静的安定条件を用いた理論式¹⁾²⁾³⁾で表わされている。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。河川の分岐現象や川幅の決定機構に関しては、渡邊⁶⁾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、実現象では解明されていないのが現状である。

本研究では、分岐合流を含む流路網と流量の因果関係について明らかにしようとするものである。

2. 水理実験の概要

(1) 実験方法および条件

流量 Q を一定に保ったまま長時間通水し、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。実験に用いる水路は、図-1に示すような、長さ14m、幅1.6mの直線水路である。用いた河床材料は、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に敷き詰めて、河床勾配1/100の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。通水時間は16時間とし、流量は一定で、初期の無次元掃流力 τ_* が限界掃流力 τ_{*c} をわずかに上回るように定めた。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、河床の変化過程を把握するため、

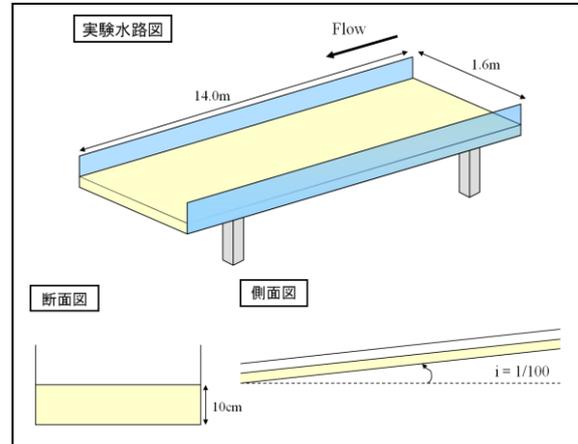


図-1 実験水路の模式図

河床高の測定のたびに通水を一旦停止し、流路網形成を継続させた。

(2) 測定項目

実験での測定項目は、河床高、流量、給砂量である。河床高の測定は、通水4時間ごとに、水路下流端11.9m地点から上流端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を用いて行った。流量の測定は下流端において、実験条件を満たしているかを確認するため、30分ごとに測定を行った。

3. 実験結果と考察

(1) 時間経過による流路網形状の比較

形成された流路網の様子を示したのが写真-1である。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11mまでの区間での河床測定断面ごとの流路数、全流路幅、最大流路幅、平均流路幅、最大洗掘深、平均洗掘深を図-2～図-7に示す。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、明確に流速が存在する初期河床から3mm以上洗掘している箇所を流路とみなした。流路幅については、各断面の水路における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た。洗掘深については、各断面の水路における最大値を最大洗掘深、平均値を平均洗掘深とした。流路数は、およそ100cmごとに周期性があることが読み取れ、時間の経過とともに、流路数は減少傾向にあることがわかる。流路数を経過時間ごとに平均すると、4時間目におよそ4.5本だったものが、16時間目にはおよそ3.5本になっていることがわかった。

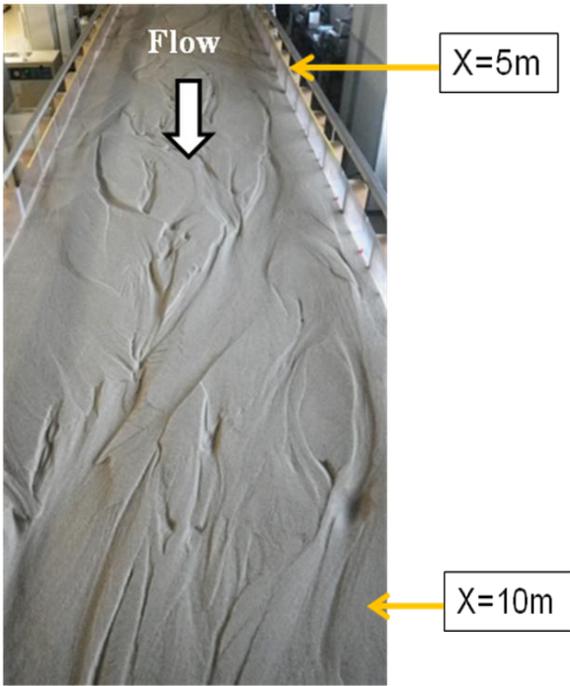


写真-1 形成された流路網の様子 (T=8hr)

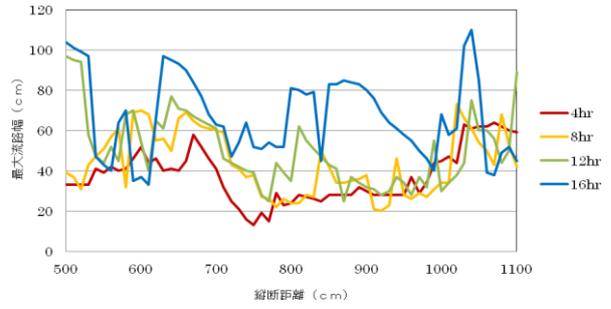


図-5 最大流路幅の時間変化

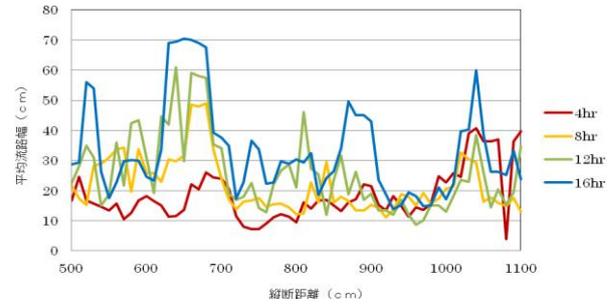


図-6 平均流路幅の時間変化

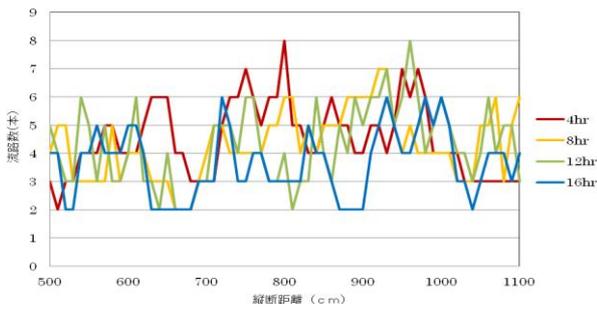


図-2 流路数の時間変化

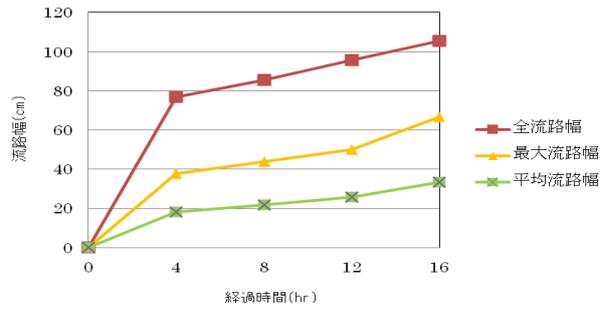


図-7 経過時間ごとの流路幅の平均値

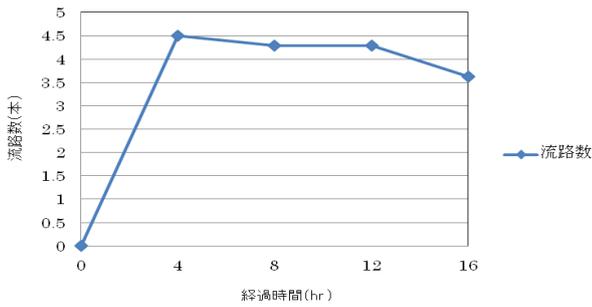


図-3 経過時間ごとの流路数平均値

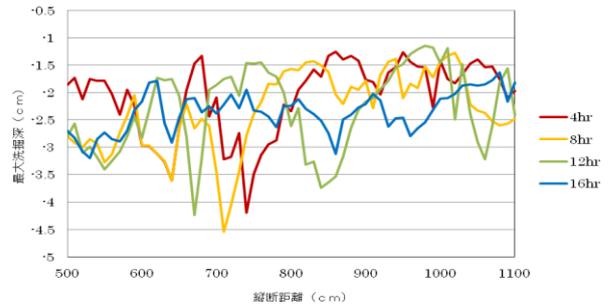


図-9 最大洗掘深の時間変化

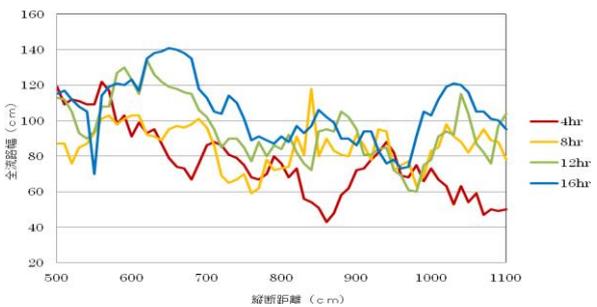


図-4 全流路幅の時間変化

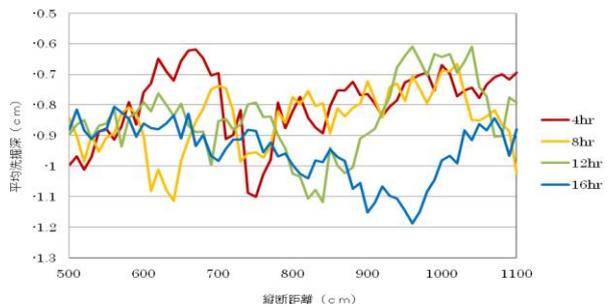


図-10 平均洗掘深の時間変化

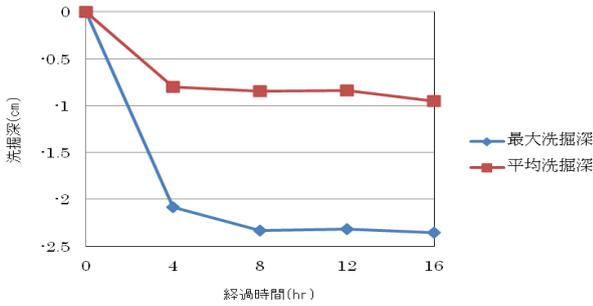


図-11 経過時間ごとの洗掘深の平均値

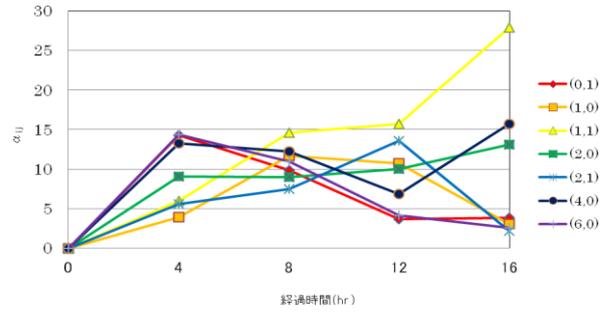
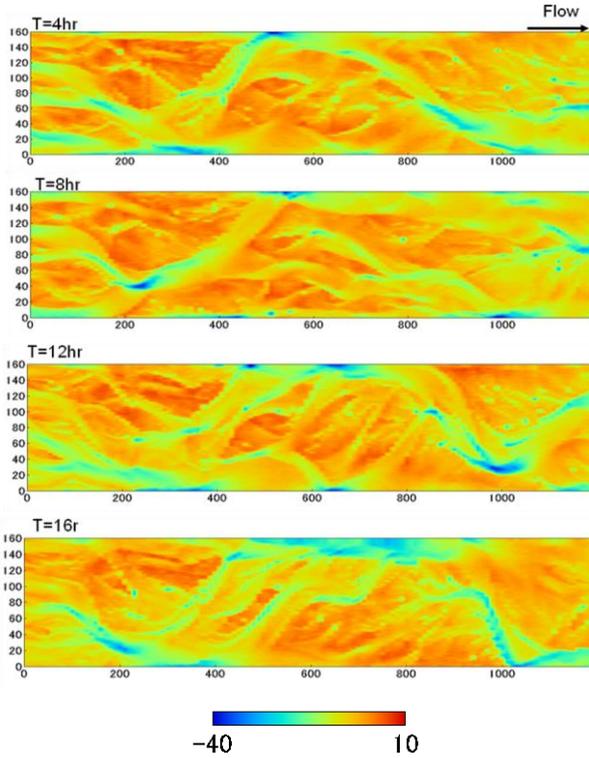


図-9 主要波成分の時間変化



侵食(-), 堆積(+), 単位: mm

図-8 河道形状の時間変化

全流路幅、最大流路幅、平均流路幅は時間が経過するに従って、増大する傾向が見られる。特に、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850cmの地点から大きく増大していることがわかる。最大洗掘深は、時間変化による大きな変化は見られなかった。平均洗掘深は、16時間目の上流端から下流におよそ900cmの地点から大きく洗掘していることが読み取れる。これは後述するように、側壁の影響を受けているとも考えられる。最大洗掘深、平均洗掘深の平均値では、時間経過による大きな変化は見られなかった。

次に、流路形状の形成過程を図-8にコンター図の変化で示した。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確認できる。また、左岸側400cm~1000cmの地点が、他の部分と比較すると大きく洗掘していることが読み取れる。この個所と上述の最大洗掘深が時間的に大きく変化した個所は、蛇行した流路の横断方向への移動が側壁により制

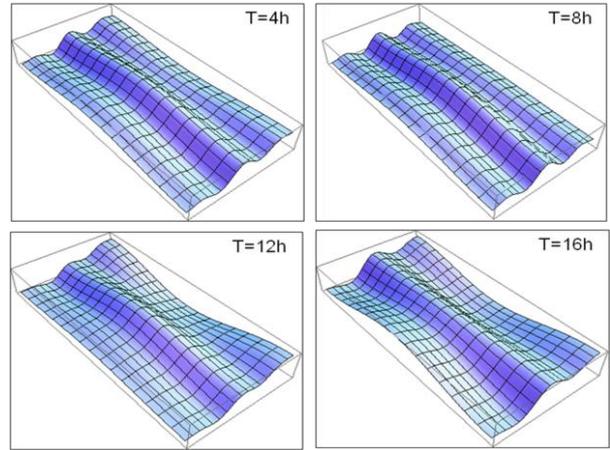


図-10 河床波の主要成分合成模式図の時間変化

約を受けた個所とも一致している。水路幅が広ければより明確な蛇行形状をした流路網が形成されると推察される。

(2) 河床の形状特性

河床波の形状特性を把握するため、2重フーリエ解析を行った。水深で無次元化された初期河床からの変動量 $\tilde{\eta}$ 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にした。

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

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、 δ_{ij} は波数 ij の位相であり、 δ_{ie} は式(2)で表わされる。

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

経過時間ごとに河床波を解析した結果を図-9に示す。

α_{01} 、 α_{10} 、 α_{11} 、 α_{20} 、 α_{21} 、 α_{40} 、 α_{60} の7つの成分が主に卓越しており、経過時間によって卓越している河床波の成分が異なることがわかる。 α_{01} 、 α_{10} 、 α_{21} 、 α_{60} の4つの成分は、最終的に減衰していることが読み取れる。 α_{11} 、 α_{20} 、 α_{40} は最終的に増加し、特に 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。

次に、各成分の形状を足し合わせたものを模式的に示したものが図-10である。4~8時間目には4本、12~16時間目には3本の流路が形成されている。

(3) 実験における水路幅と理論における川幅の関係

流路幅と水理量とを結び付けるため、理論的に導かれた渡邊ら⁶⁾の安定解析に基づく基本川幅と、実験で得られた流路幅を比較する。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。川幅一定の直線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、平坦河床の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。

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

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

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

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

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。

$$(U_1, V_1, H_1, D_1) = (C_{1u1}, S_{1v1}, C_{1h1}, C_{1d1}) E_1 \quad (8)$$

ここで

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

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

この安定解析を行い、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-11に、等流水深 \tilde{D}_0 を実験条件である0.005mとした場合の川幅 \tilde{B} と時間増幅率 ω の関係を図-12に示す。渡邊ら⁶⁾の研究により、実河川データおよびレジーム則との比較で、 $I=1/250$ の場合には $r=0.1\sim 0.2$ がほぼ一致する傾向を示す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 $r=0.15$ を適用した。川幅 \tilde{B} を固定した場合の時間増幅率 ω の等流水深 \tilde{D}_0 に関する変化を見ると、増幅率に関して特異点が存在する。この値を図-11に併せて記している。図-12からは、基本川幅 \tilde{B} が0.45mのときに特異点を持っていることがわかる。本実験で用いた水路の水路幅は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は、実験開始から16時間後に平均で3.5本となり、理論値と一致する結果を得た。

4. まとめ

本研究では流路網と流量の因果関係について明らかにすることを目的に水理実験を行った。実験の結果、時間変化とともに一波長がおよそ6mの蛇行した、比較的明

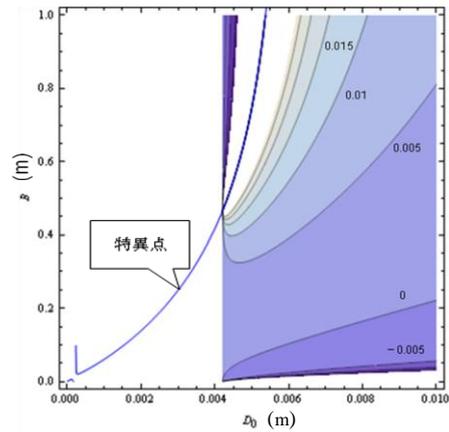


図-11 時間増幅率 ω のコンター図

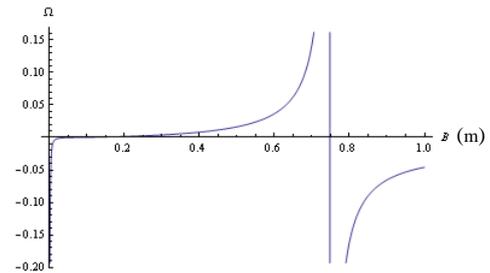


図-12 流路幅 B と時間増幅率 ω の関係

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の本数が一致した。しかし、今回は1ケースのみの実験であるので、今後は様々なケースの実験を重ね、流路網と流量の因果関係についてさらに検討していく必要がある。流路網と流量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うると考えられる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基礎研究(B)(代表：泉典洋、課題番号：23360209)の助成を受けて行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Parker, 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, II-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) 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.