

II-48

蛇行河川の流路変動に関する研究

北海道大学工学部 学生員 高 沢 寛
 北海道大学工学部 正 員 清 水 康 行
 北海道大学工学部 正 員 長 谷 川 和 義
 北海道開発局 正 員 鳥 谷 部 寿 人

1、はじめに

自然河川の蛇行河道は流下方向へ前進しながら振幅を拡大し、大きく曲がりくねり、最終的には自然短絡に至るといふ発達過程をとる。また、中規模河床形態の発達による流路の平面形状と流心線の偏倚集中の大きい部分ほど浸食速度が大きくなることが、蛇行の発達に影響を及ぼすとして知られている。本研究は、蛇行の発達過程に着目し、その流路変動を実験によって再現し、様々な現象を観測するとともに線形偏倚流方程式によって求めた流速の偏倚によって平面変動計算を行い、実験との比較を試み、その相違などについて検討を行うことを目的とする。

2、実験の概要

2-1、実験の目的

河岸の浸食速度は流れを介在として流路の平面及び底形状によって関係づけられる。河床の形状において砂州の発生、非発生及びその領域区分(単列、複列など)については多くの領域区分図が提案されている¹⁾。また、砂州の移動は蛇行角に支配され、蛇行角がある限界に達すると砂州の移動は止まることが報告されている²⁾。河川の蛇行を解析する場合には、その発生機構と発達機構は分けて考える必要がある。発生状況を観測するには直線水路から砂礫堆の形成→流水の蛇行→流路の蛇行という一連の変化を見なければならぬが、今回の実験では蛇行の発達過程、すなわち平面形状の時間的進展に着目し写真測定を行って蛇行角度、蛇行流の変化を調査する。このため、初期水路として直線水路を用いると砂州の下流方向への移動に伴う水衝部の変化によって、完全な蛇行流路が形成されない場合が多いため、あらかじめ初期水路を蛇行させておき、その蛇行角を限界蛇行角より大きくとって砂州の移動を防ぎ、河岸浸食と流路の平面、底形状との関係をより明らかにするものとする。

2-2、実験条件の設定

実験条件は主として以下の項目を考慮して設定した。

- ①実験水路の初期平面形状は、Langbein-Leopold³⁾によって概ね実河川の平面形状を表すとされているSine-generated Curveの式を用いる。

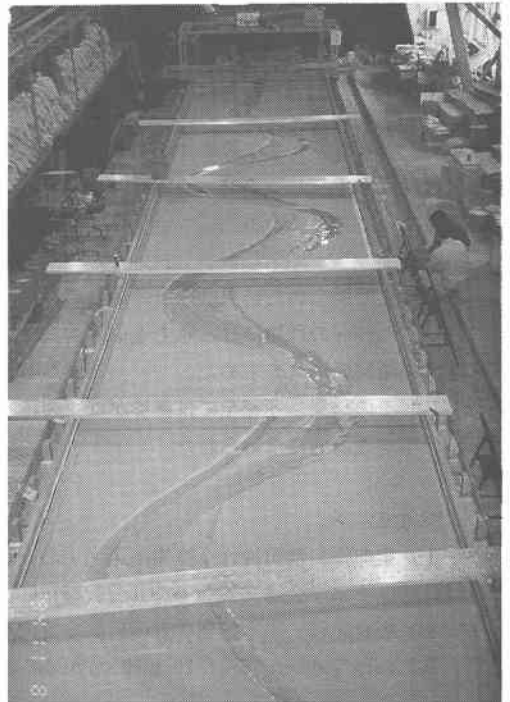


写真1. 実験風景

Study on the Channel Variation in Meandering River
 by Hiroshi. TAKASAWA, Yasuyuki. SHIMIZU, Kazuyoshi. HASEGAWA and Toshihito. TOYABE

- ②砂州の発生に関しては、従来の理論的研究等から河幅水深比 $\beta (= B/D_0)$ 、 D_0 :平均水深)が支配パラメータであると言われている。本実験では、このパラメーターに着目して砂州発生、非発生の各条件のもとで蛇行の発達過程の違いについて調べることをするため、鳥谷部ら⁴⁾による固定蛇行水路移動床実験において非砂州実験(RUN1)、砂州実験(RUN2)となるような水理条件、初期蛇行平面形状を選んで、今回の初期条件とした。
- ③一般に河川では常流の流れであることからフルード数が1未満となるようにする。
以上の条件を考慮して設定された実験条件を表1に示す。

表1, 実験条件

	本研究の条件		固定蛇行水路移動床実験における条件						
	Q(l/s)	I	β	2B(cm)	D_0 (cm)	u(cm/s)	τ_*	F	θ_0 (deg)
RUN1	4.0	1/243	5.0	30.0	3.0	44.56	0.124	0.822	28.662
RUN2	1.5	1/161	10.0	30.0	1.5	35.56	0.095	0.927	28.662

Q:流量, I:勾配, β :河幅水深比(=B/D₀), 2B:河幅, D₀:平均水深, u:平均流速
 τ_* :無次元掃流力, F:フルード数, θ_0 :初期蛇行水路における最大蛇行角

2-3、実験装置及び実験方法

長さ25メートル、幅3メートルの実験架台に概ね17cm厚で東北珪砂5号(平均粒径: $d_s = 0.494\text{mm}$ 、比重 $\gamma_s = 2.646$)を敷きならした。通水溝を初期蛇行形状に沿って切り、流量を流した。なお、最初の通水溝の断面形状が流路の蛇行の状態に及ぼす影響の有無が懸念されるが、広すぎて砂が移動しないような断面でない限り、最初の断面形状には関係せず溝の断面積によって流量の範囲を規制するのみであることが予備実験の結果明らかになっている。

一定時間ごとに写真撮影を行って平面変動の状況を観察した。時間と共に蛇行振幅の拡大が生じたが、ある時間に達すると凹岸の水衝部で氾濫が起こり側岸を乗り越えて流れてしまうので、この状態に達した時点で実験を終了した。予備実験で停止時間を決定し、本実験ではこれを5分割し、河床が変化しないように通水を中止させ排水し、ポイントゲージを使用して河床高の測定を行い河床形状を求めた。流況はビデオ撮影を行うこととし、流速、流向はステレオ写真解析によりベクトルを図化した。いずれも、上流端からの砂の補給は行わなかった。

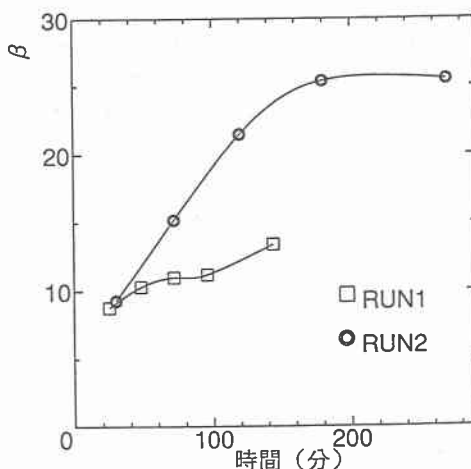


図1. 川幅水深比の時間的変化(曲頂部のみ)

2-4、実験結果、考察

今回は側壁のない自由蛇行実験であるため、2-2の条件設定②のままでは安定せず、河幅は徐々に広がり、流速も次第に減少した。この結果、河幅水深比も時間的に変動してしまうため必ずしも砂州、非砂州どちらかの領域のみにとどまっているとは言えない。今回の実験の河幅水深比 β の時間的な変化（曲頂部のみ）を図1に示す。

RUN1の曲頂部における河床横断形状の時間的な変化を図2に示す。ここで、縦軸は整地面を基準とした河床高、横軸は左岸側の側壁からの距離を表している。内岸側の河岸位置はほとんど変わっていないのに対し、外岸側が浸食され時間と共に河幅が増大し、河床高も高くなっているのが分かる。通水後60分までは、外岸側に向かってある程度の傾きはあるものの横断形状は比較的なだらかであるが、60分を越える頃から砂州が形成され始め、内岸側と外岸側での高低差が顕著になり堆積・浸食の状況が現れている。ただし、内岸側の砂州部分の河床高は通水中は水面より高くなることはなかった。実験材料として、砂のみを用いると凹岸側は浸食され蛇行が発達するが、凸岸側の堆積速度が浸食速度に追いつかないため河幅は徐々に広がったと考えられる。

実験水路横断方向への凹岸の移動距離と時間の関係を図3に示す。ここで、予備実験とは、同じ条件で連続通水した実験である。図3の横軸は時間 T の0.5乗をとってあるが、これによると河幅の変化量はほぼ、 T の0.5乗に比例していることが分かる。予備実験と本実験では浸食の速度に違いがあり、通水を断続的に行ったことによる影響が出ていると考えられる。一旦排水することにより、砂がある平面形状のまま一度締め固められ表面が乾燥すること、目標の流量に達するまでに約8分の時間を要することなどがその原因として考えられる。

河床コンター図の中から特徴的なものを選び図4に示す。最大深掘れの位置（図中のa）は曲頂の上流側にあるが、蛇行振幅の最も発達している部分（図中のb）はやや下流側にあり、両者の位置が一致していないことが図より読み取れる。この現象は、必ずしも深掘れの起きている位置で蛇行が発達するとは限らないことを示している。深掘れの位置は時間ごとに多少の変動はあるものの、全体を通しては曲頂の上流側にあった。

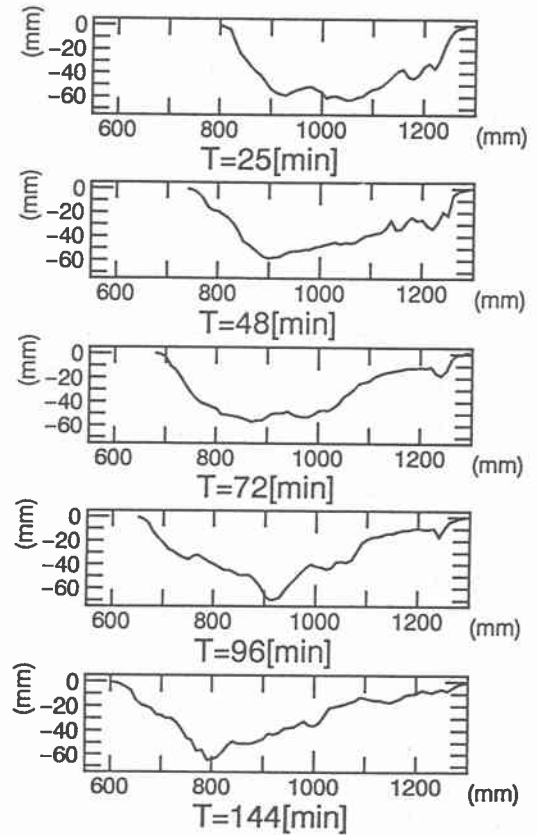


図2、河床横断形状の時間的な変化（RUN1）

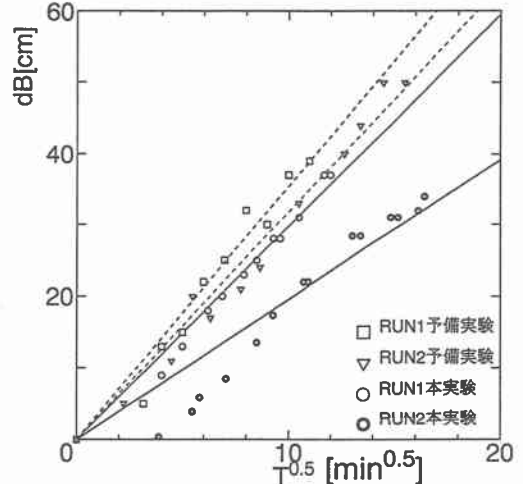


図3、凹岸の移動距離と時間の関係

RUN 2, 270分後

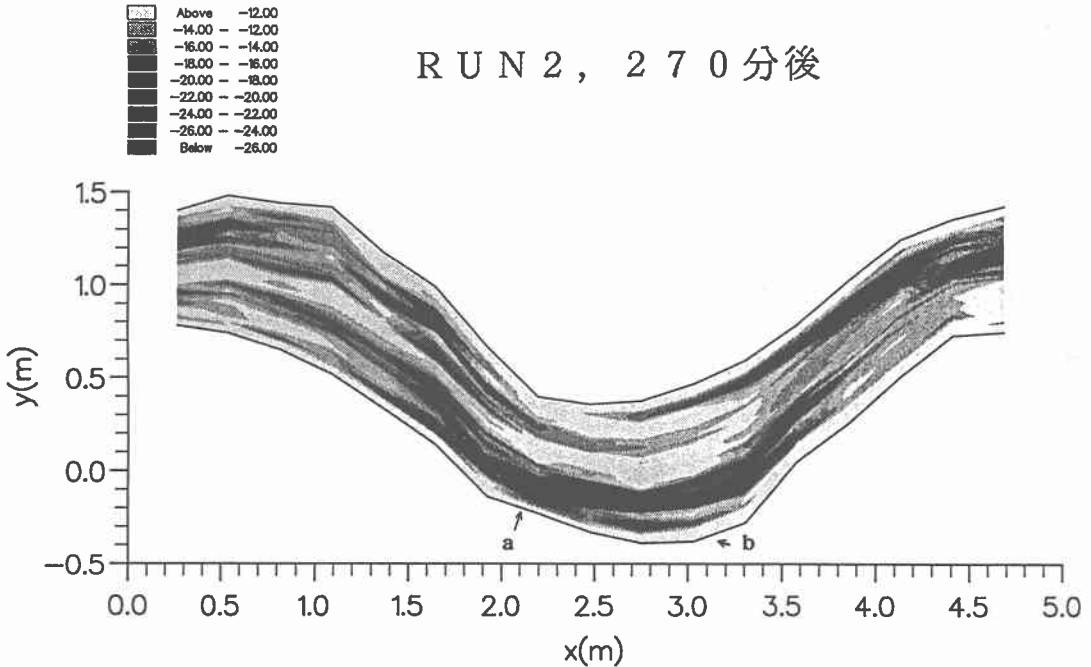


図4. 河床コンター図

3. 線形偏倚流速式による平面変動計算

3-1. 基礎式

流路の平面形状と流心線形状のずれによって側岸浸食が生じ、流心線の偏倚集中が大きいところほど浸食速度が大きいたと蛇行変動モデルは長谷川ら⁶⁾やIkedaら⁷⁾によって提案され、実際河川の流路変動についての追跡、予測も既に数多く試みられている。

長谷川ら⁶⁾の蛇行変動モデルによれば、河道の変動速度 $\tilde{\zeta}$ は河岸での偏倚流速 \tilde{u} に比例し、比例定数を E_0 とすると、 $\tilde{\zeta}$ は

$$\tilde{\zeta} = E_0 \tilde{u} \quad (3-1)$$

で表される。また、谷軸方向平均流速を不変とみなした表現方法による河岸近傍の偏倚流の線形化方程式は次式で表される。

$$\frac{du}{ds} + 2\alpha C_1 u = b_1 \left\{ -\alpha \frac{dC}{ds} + C_1 (F^2 \alpha^5 + A \alpha^2) C \right\} \quad (3-2)$$

ここで、 u : 谷軸方向の流れを想定したときの平均流速 U_0 で無次元化した河岸偏倚流速、 $\alpha = \sqrt[3]{I/I_0}$ 、 $C_1 = gH_0 I_0 / U_0^3$ 、 $F = U_0 / \sqrt{gH_0}$ 、 A : 洗掘係数 (湾曲によって生じる河床面の傾きに関する係数)、 \tilde{B} : 実河川の河幅、 $b_1 = \tilde{B} / (2H_0)$ 、 \tilde{C} : 実河道の曲率 ($\partial\theta/\partial s$, 時計回りを正

とする) ; $C = \tilde{C} H_0$, H_0 : 谷軸方向の流れを想定したときの平均水深、 I_0 : 谷軸勾配、 I : 実河川の流路に沿う勾配、 \tilde{s} : 流路に沿った距離、 $s = \tilde{s} / H_0$ である。

同式を $s = -\infty$ において $u = 0$ なる条件のもとに解くと、次のような結果になる。

$$u = -\chi C_{x(s)} + \int_{-\infty}^s C_f (A+2)\chi^2 + F^2\chi^5 C_{x(s')} \exp \{-2\chi C_f (s-s')\} ds' \quad (3-3)$$

長谷川ら⁹⁾は、 U_0 および B を時間的、空間的に一定と仮定し、上記の諸式で河岸浸食速度を求めているが実験結果によると、 B は一定ではなく浸食速度の大きい場所ほど広くなり、流速も場所によって異なるそこで、本研究では計算を6分の時間ステップ単位で行い、その時間ごとに浸食速度に比例した変動量を算出しこの量を河幅の拡大の分として1ステップ前の時間の河幅に加算することによって各断面ごとの新しい河幅を求めることとした。なお、流量 Q 、水深 H_0 、谷軸勾配 I_0 は従来どおり一定とし、各断面ごとに等流とみなして算出した。

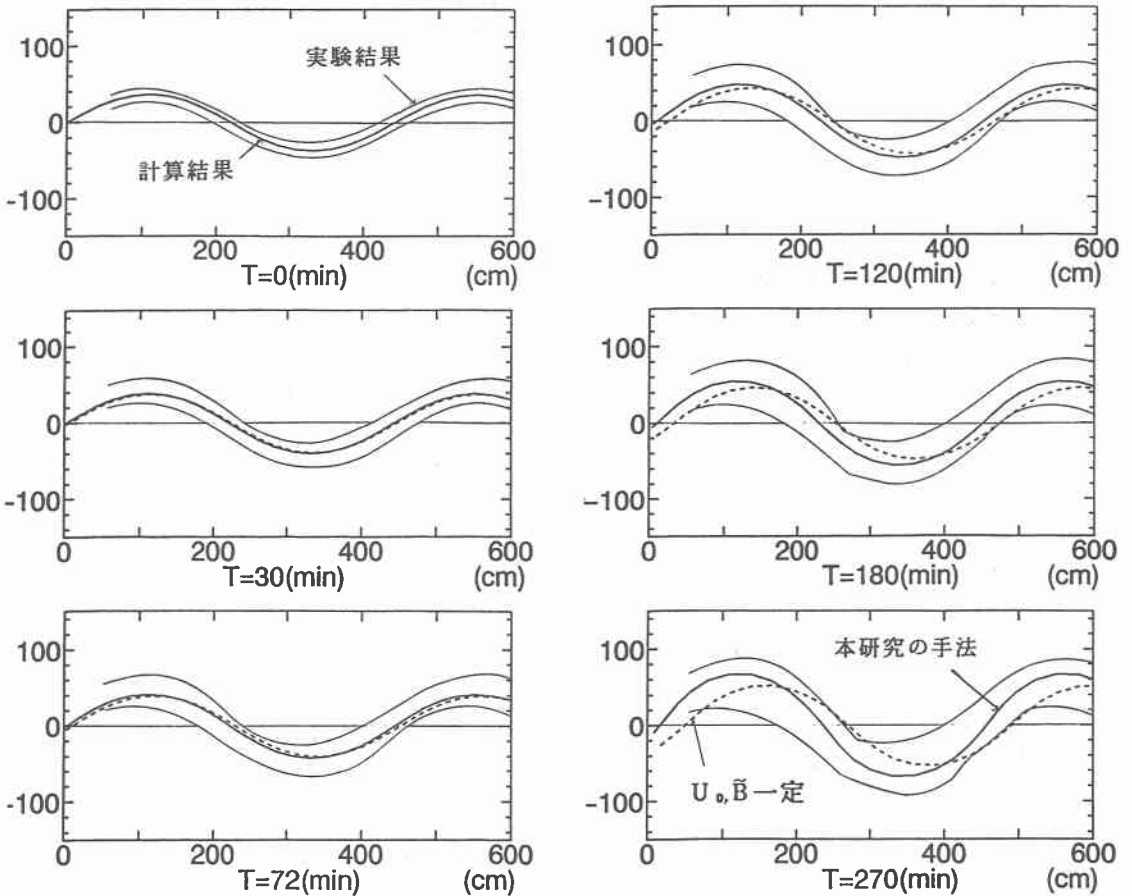


図5,平面変動計算(RUN2)

3-2、実験流路への適用

前節までの諸式を用いて実験流路の変動追跡を試みる。図5に、RUN2の流路変動と計算による流路との比較を示す。計算値は実際の流路内を通り、ほぼ計算結果と一致しているのが分かる。これは、既述したように河幅変化を考慮したことによる効果である。河幅を一定とした計算では図に見られるようように流路が下流方向へ移動するのに対して、河幅を変化させた計算では下流への移動は見られず流路に不動点が生じてくる。実験の流路も曲頂部に若干の下流への移動はあるものの、ほぼ横断方向へ垂直に蛇行が発達し、不動点も存在しているのが分かり、計算とよく一致している。なお、洗掘係数A、比例定数Eについては実験によって得られたデータに基づいて算定した値を用いている。

4、結論

最後に、今回行った実験、平面変動計算の結果明らかとなった諸点を以下に列記する。

- 1) 蛇行の発達には必ずしも深掘れによるものばかりではなく、砂州や湾曲による効果など様々な要因が相互に絡み合っていることが実験から明らかになった。
- 2) 通水を連続的に行った場合と断続的に行った場合とでは蛇行発達に要する時間が異なる。しかし、流路変動の経路に相違は見られなかった。
- 3) 河幅水深比は時間と共に変化し、非砂州領域にある流路は砂州領域へ、砂州領域にあった流路は複列交互砂州領域へそれぞれ移動し、一つの領域にとどまることはなかった。
- 4) 平面変動計算においては、河幅、流速の場所的、時間的变化を考慮に入れることによって実験流路にほぼ一致した結果を得ることができた。

【参考文献】

- 1) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集第342号, 1984.
- 2) 木下良作: 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料 36号, 1961.
- 3) Langbein, W. B. and L. B. Leopold: River meanders—Theory of Minimum Variance, U. S. Geological Survey Prof. Paper 422H, 1986.
- 4) 鳥谷部寿人, 清水康行, 渡邊康玄: 共振深掘れの発生条件に関する移動床蛇行水路実験, 土木学会北海道支部論文報告集 第49号, 1993.
- 5) 鳥谷部寿人, 清水康行, 渡邊康玄: 共振深掘れの発生条件に関する移動床蛇行水路実験, 土木学会北海道支部論文報告集 第50号, 1994.
- 6) 長谷川和義, 伊藤仁: 蛇行流路の経年変動に関する電算機シミュレーション, 土木学会北海道支部論文報告集 第34号, 1978.
- 7) Ikeda, S., G. Parker and K. Sawai: Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development, J. Fluid Mech. Vol. 112, 1981