

# 側岸浸食機構を考慮した河川の流路変動 に関する基礎的研究

関根正人

正会員 工博 早稲田大学助教授 理工学部土木工学科  
(〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

自然河川は河床面だけでなく側岸も浸食可能な流路であり、水および土砂の輸送とこれに付随して生じる境界面としての地形の変化が、相互に影響を及ぼし合いながら起こるため、このような流路を対象とした解析はほとんどなされていない。本研究は、補正係数や諸仮定を極力排除した形で、蛇行河川がその流路法線形を自由に變化させながら移動していく過程を予測しようとする研究の第一段階に当たるものである。本論では、流路変動の原因となる側岸浸食の機構の十分な理解と、これを考慮に入れた流路変動解析モデルの構築を目指し、流路法線形が直線あるいは一様に湾曲する場合に限定して解析を行った。その結果、提案された解析方法の妥当性が確認されたほか、側岸浸食に伴い生じる流路変動に関する新たな知見が得られた。

*Key Words : bank erosion, river channel migration, sediment transport, bed scour, secondary current*

## 1. 序論

自然河川は側岸部をも含めた河道自体が土砂により構成され、河道内を流送される土砂のほとんどが元来は河道構成材料であったものである。このような河川では、流況の変化に伴い、河床の洗掘・堆積が生じるほか、側岸の浸食が起こるため、河道が鉛直方向のみならず縦・横断方向へも変位することが知られている。本論文は、このような河川の側岸浸食機構とそれに伴う流路変動について論じるものである。

まず、流路変動についての議論に先立って、最近佐々木ら<sup>1)</sup>によって報告された河道の安定川幅について考えてみる。これは、建設省土木研究所が河道改修前後の河道直線部の川幅の変化について長期間にわたって調査した結果であり、次のような示唆に富むものである。すなわち、個々の川にはそれぞれ固有の安定な川幅が存在し、河道改修により安定幅よりも狭い河道としても、流れに応じた側岸浸食が起こり、拡幅が進むために、いずれは安定川幅に戻っていく。また、逆に、人為的に安定川幅よりも

広い河道としても、側岸部への土砂の堆積が進み、結果として同様のことが起こるとされる。前者は側岸浸食が、後者は堆積が卓越する場合といえる。このように河道には自己調節作用があり、その河道特有の流量特性に応じた安定な川幅を維持していることがわかる。

本論では、上記の安定川幅の議論からすると前者に相当する側岸浸食に伴う安定河道形状について検討する。これに類する研究は従来より幾つかあり、直線河道の拡幅に関する研究としては、池田<sup>2)</sup>、福岡ら<sup>3)</sup>、長谷川<sup>4)</sup>あるいは村本・藤田ら<sup>5)</sup>による理論的・実験的研究や、Pizzuto<sup>6)</sup>、Kovacs and Parker<sup>7)</sup>あるいは安原・関根<sup>8)</sup>による数値計算による研究がある。これに対して、蛇行河川を対象とした研究は、わずかに福岡ら<sup>9)</sup>による実験的研究が見られる程度である。これは、蛇行河川では、その流路曲率に応じて生じる遠心力の影響により、強い二次流が発生し、湾曲部外岸部では河床の局所洗掘が生じ、これと関連して側岸浸食が生じることが知られているものの、流れと局所洗掘の理解に重点が置かれ、側岸を固定として河床変動のみを許した解析に終始し

てきたためである。その反面、蛇行河川をマクロに見た場合の本質的な問題である河道の流路変動については、Ikeda, Parker and Sawai<sup>10)</sup> や Hasegawa<sup>11)</sup> により研究されてきた。彼らは、流路変動を引き起こす側岸浸食の機構を側岸浸食速度という物理量に凝縮して解析する立場をとり、これと流れのパラメータとを関係づけることで、一本の線で代表した流路の変動について検討した。しかし、河川湾曲部における河床高の変動と側岸浸食の進行との間の明確な関係については未だ明らかにされていない。本研究は、以上のような点を考慮して、直線あるいは蛇行河川の側岸浸食を統一的に説明する物理モデルを構築し、これと支配方程式とからなる解析モデルを提案し、流れと断面形状の時空間変化過程を理解することを目的とした一連の研究の第一歩となるものである。ここでは、蛇行河川のひとつの例として、解析の比較的容易な一樣湾曲流路を対象とした解析を行い、将来、任意の平面形状を有する蛇行河川の流路変動を予測するための準備とする。

なお、側岸浸食に及ぼす土砂の粘着性および透水性の影響が顕著であることが、近年、福岡ら<sup>12)</sup>の現地実験を通じて明らかにされてきたが、この効果については、将来、別途モデルに取り込むことにし、ここでは非粘着性土砂のみを対象にしている。さらに、河道が堆積により狭まることで安定川幅に到るという佐々木らによる第二のパターンについては、本研究で対象とする定常・等流を考える限り説明不可能であり、非定常流中の浮遊砂の側岸部への堆積が主な原因であると考えざるを得ない。これについての研究は未だないことから、現在、別途研究を進めており、別論文の形で報告する予定である。

## 2. 流路変動解析モデル

### (1) 概略

自然河川では、曲率が局所的に変化し、流れおよび河床形状が流下方向に変化するため、流路の側岸浸食は流下方向に一樣に進行するわけではない。しかし、直線流路および曲率の変化のない一樣湾曲流路では、入り口からある程度の距離を有する助走区間を除いて、流れおよび流路断面形状が流下方向に変化しない平衡状態が存在する。この平衡状態では、側岸浸食は横断面内における二次元の現象として進行するため、流れおよび流路断面形状の解析は比較的容易となる。本研究では、自然河川の流路変動を予測する新たなモデル化へ向けての第一歩として、上記のような簡略化された場における側岸浸食および流路変動について解析する。

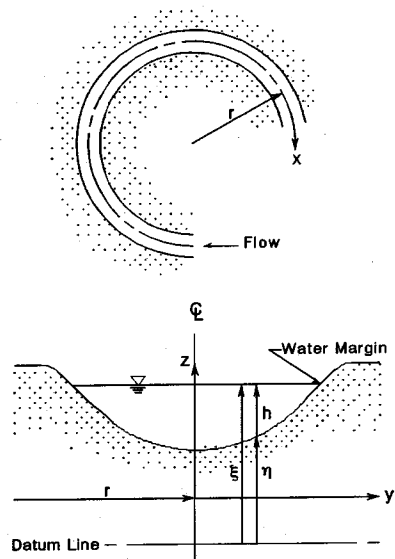


Fig. 1 変数の定義

解析の対象となる流路横断面形状と座標軸をFig. 1に示す。x, y, z方向の流速成分をそれぞれu, v, wとする。また、 $\eta, h$  および  $\xi$  を河床高、水深および水面高とする。図中の  $r$  は曲率半径であり、曲率  $C$  はこの逆数として定義される。

### (2) 流れ場の解析

局所的な流速および水深に関する支配方程式は、x方向への微分項を零とした運動方程式および連続式である。ただし、解析の簡略化のため圧力の静水圧分布を仮定しており、これによりz方向への運動方程式は満足されているものとする。また、解析に当たり、断面形の変化に対して、流れが直ちに追従し、瞬時に定常状態に達し得るくらい変化が速いものと考え(疑似定常の仮定)、流れに関する時間微分項は省略する。流れの支配方程式は以下の通りである。

$$v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} - \frac{gI_0}{1+\gamma C} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_i \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_i \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} - \frac{gI_0}{1+\gamma C} \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_i \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_i \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial rv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\nu_t$  は乱流拡散係数であり、ここでは、簡易化のため、これを断面内で一定とした近似的な取り扱いをする。すなわち、この値を各時間毎の断面の流路中心軸上での摩擦速度  $u_*^0$  と水深  $h_0$  との関係から  $\nu_t = \kappa/6 \cdot u_*^0 \cdot h_0$  によって与えることにする(ここに、 $\kappa$  はカルマン定数)。なお、厳密な取り扱いをする、式(1)、(2)に示した拡散項に付加的な項が加わることになるが、 $\nu_t$  を空間内で一定として取り扱うことなどから、ここでは支配方程式を式(1)、(2)の形で表すことにした。

式(1)~(3)の解法に当たっては、次のような境界条件を用いている。まず、底面でslip conditionを採用する。すなわち、底面せん断力の $x$ 方向成分 $\tau_{bx}$ を抵抗係数 $C_f$ の関係で、次式のように定義する。

$$\tau_{bx} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\rho C_f \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \times u_b \quad (4)$$

$$C_f = \left\{ \frac{1}{\kappa} \log_e \left( \frac{30z_b}{k_s} \right) \right\}^{-1/2} \quad (5)$$

ここに、 $\mu$  は水の粘性係数、 $k_s$  は河道を構成する面(以下河道面と呼ぶ)の相当粗度高さであり、河道構成材料の平均粒径 $D$ の2倍程度とした。 $z_b$  は粘性底層の外側にとった基準高さであるが、本研究では $C_f$ を時空間的に変化させることなく一定値として与えることにしたため、これを初期断面の中央水深 $h_\infty$ との関係で与えることにした( $z_b = 0.05 \times h_\infty$ )。また、流速の横断方向成分 $v_b$ については、底面せん断力ベクトル( $\tau_{bx}, \tau_{by}$ )が底面近傍の流速ベクトル( $u_b, v_b$ )に平行であるとして処理した。さらに、河道面および水面を横切る流れはないものとし、水面では $u$ および $v$ の面に直角方向への速度勾配が0であるとした。また、水際には、すべての流速成分を0とした。

上記の支配方程式の解法には、関根<sup>13)</sup>が蛇行河川の土砂のふるい分けを解析した際に用いた方法と同一の手法を用いた。すなわち、変数および方程式を無次元化した後、流路曲率を摂動展開のパラメータとして変数および方程式の摂動展開を行い、展開された方程式の線形一次の解を求める。次に、これを繰り返し計算の第一次の近似解として元々の非線形方程式を解いていく。ここでは、一例として、水深の横断方向変化についての計算について説明する。まず、式(2)を水深方向に積分した浅水流方程式から得られる水位の横断方向変化の第一次近似を、式(6)に基づいて求める。

$$\frac{1}{r} \int_0^r \bar{u}_0^2 dz = \frac{gh}{1+\gamma C} \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (6)$$

ここに、 $\bar{u}_0$  は曲率の影響のない直線河道における主流速の水深方向平均値である。次に、これを初期条件として計算領域を決定し、計算格子網を設定した後、流れの計算を行い、式(6)の元になった非線形の方程式を解くことで、水位の非線形解を求める。このような手順を繰り返し、流速と水位の解が収束するまで計算を行うことにした。なお、この解法の詳細については、別論文<sup>13)</sup>を参照されたい。

計算格子については、次のように設定する。本研究で対象とする横断面形状が自然河川に見られるような任意な形状となり、側岸の勾配が安息角まで変化のほか、水深が流路中央部での比較的大きな値から水際の0まで変化する場を解析することになる。このような場合に、従来の直交座標系のままで領域内に格子網を形成し、差分法を用いて支配方程式を離散化して解こうとすると、格子の非直交性が原因となり、計算精度を著しく落とす恐れがある。そこで、本研究では、近年盛んに使われるようになった一般座標系を導入することにし、日野ら<sup>14)</sup>あるいは孟ら<sup>15)</sup>による方法に倣って、支配方程式を書き直した後、これらを解いている。格子網の生成を含めた解析方法の詳細は前述の文献<sup>14),15)</sup>を参照されたい。

### (3) 河床変動

本研究では、浸食可能な傾斜した側岸をもつ均一粒径砂からなる流路を対象としており、ここでは特に掃流砂としての土砂の輸送のみを考慮する。なお、流路変動に及ぼす浮流砂の影響および土砂粒径の混合の影響については改めてモデルに取り込むことは容易であるが、ここでは特に考慮しない。さて、本研究で対象とする場における土砂の体積保存式は、Exnerの式として知られ、次のように表される。

$$(1-\lambda) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_{bs}}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

ここに、 $\lambda$  は空隙率であり、 $q_{bs}$  は掃流砂量ベクトル $q_b$ の $y$ 方向成分である。本研究では、河床の縦断方向傾斜角 $\alpha$ については、 $\sin \alpha \approx \tan \alpha \approx \alpha$ 、 $\cos \alpha \approx 1$ が成り立つ程度に小さいが、河床の横断方向傾斜角 $\omega$ については安息角 $\phi$ に等しい角度まで変化する場を対象としており、 $q_{bs}$ および $q_b$ の評価式として式(8)、(9)を用いている。ここに、式(8)はMeyer Peter and Muller式、式(9)はParker<sup>16)</sup>により近年導かれた式である。

$$q_{Bx} = 8.0 \times \sqrt{(\sigma_s - 1)gD^3} \times (\tau^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (8)$$

$$\tan \psi_p = \frac{q_{By}}{q_{Bx}} = \frac{v_h}{u_b} + \frac{\Gamma}{\mu_s} \sqrt{\frac{\tau_\omega^*}{\tau^*}} \tan \omega \quad (9)$$

式(9)中の $\mu_s$ は静止摩擦係数であり、 $\Gamma$ は式(10)で定義される関数である。

$$\Gamma = \left( \frac{1 + \tan^2 \psi_\tau \cos \omega}{\sqrt{1 + \tan^2 \psi_\tau} \cos \psi_p} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$\tan \psi_\tau = \tan \psi_p - \frac{1}{\mu_s} \frac{\tan \omega}{\cos \psi_p} \quad (11)$$

ここに、 $\tau_c^*$ は限界掃流力であり、横断方向勾配 $\omega$ および河床面近傍での流速ベクトルの方向を表す角度 $\psi_\tau$ ( $= \arctan v_h/u_b$ )に応じて変化し、例えば、Shieldらにより求められている水平河床(あるいは、縦・横断方向に顕著な勾配をもたない斜面上)での値 $\tau_\omega^*$ との間に、次の関係を満たす。

$$\left( \frac{\tau_c^*}{\tau_\omega^*} \cos \psi_\tau \right)^2 + \left( \frac{\tau_c^*}{\tau_\omega^*} \sin \psi_\tau - \frac{1}{\mu_s} \sin \omega \right)^2 = \cos^2 \omega \quad (12)$$

いま、仮に $\psi_\tau = 0$ とすると、式(12)はLane<sup>17)</sup>らにより導かれた次式となる。

$$\frac{\tau_c^*}{\tau_\omega^*} = \cos \omega \sqrt{1 - \left( \frac{\tan \omega}{\mu_s} \right)^2} \quad (13)$$

また、 $\omega = \phi$ ( $= \arctan \mu_s$ )とすると、 $\tau_c^*/\tau_\omega^* = 0$ となり、流れによらず土砂は移動することを意味する。なお、横断方向傾斜角 $\omega$ が縦断方向傾斜角 $\alpha$ と同等に小さいとした極限操作をすると、式(10)は式(15)となり、従来より用いられてきた関係式となる。

$$\tan \psi_p = \frac{q_{By}}{q_{Bx}} = \frac{v_h}{u_b} + \frac{1}{\mu_s} \sqrt{\frac{\tau_\omega^*}{\tau^*}} \tan \omega \quad (14)$$

#### (4) 側岸浸食モデル

流路横断面内における側岸の浸食について考える。実験時の観察によれば、側岸浸食のプロセスは次のように説明される。すなわち、掃流力および傾斜角の断面内変化に伴い、横断方向流砂量の不均一が生じ、結果として側岸部においても局所的な堆積・洗掘が生じる。この浸食により、局所的に安息角を越えるような急な斜面が形成されることになる。

しかし、安息角を越える急な斜面は物理的に不安定であり、存在できないことになる。その結果、安息角に等しい傾斜角をもつ滑り面が形成され、側岸における土砂の崩落が、主に水際付近で生じることになる。側岸浸食の取り扱いの概要は、一部Parkerらに倣い、以下に示す通りとした。

(1) 崩落が生じないとして式(8)に基づき河床変動計算を行う。この際に、河床上に設定された隣接する格子点間の傾斜角が安息角以下であるか否かを判定する。

(2) 安息角を越える斜面が形成された場合には、安息角に等しい傾斜角をもつ滑り面に沿って崩落が起こると考え、幾何学的に崩落土砂量を算出する。

(3) 崩落に伴い新たに生じた河床面および計算格子点を設定する。この際に、水際位置の側方への移動を考慮する。

(4) 単位時間当たりに崩落により生産された土砂量は、崩落が生じた斜面の下端における流砂量の付加量であると考え、土砂の連続式の中で考慮する。なお、この土砂供給が完了するまでの時間については検討の余地を残すところであるが、ここでは、便宜的に、計算を進める際の一つの時間ステップ内に生じた崩落による土砂は同じ時間程度でフィードバックを完了するものとした。

なお、上記のように、従来の平衡流砂量式を用いた移動土砂量の評価に加えて、崩落による土砂供給を考慮する理由は次の通りである。すなわち、実験時の観察によれば、この現象が他の移動床問題と顕著に異なる点は間欠的に生じる側岸の崩落にあり、これが重要であると考えられること、これについては従来の平衡流砂量式では考慮できないこと、崩落が生じない時間帯における土砂移動については平衡流砂量式で近似的に評価できると予想されること、などである。なお、流砂の非平衡性については長谷川<sup>9)</sup>がこれを盛り込んだ検討を加えているが、ここではそのような取り扱いはしていない。

## 2. 数値解析の概要

本研究では、流路横断面の初期形状として台形断面を想定し、これが河床変動ならびに側岸浸食の結果、どのような形状に変化していくかを時間を追って解析する。計算手順の概要は以下の通りである。

- (1) 断面の初期形状および流れの初期条件を設定する。
- (2) 与えられた境界形状に対して、計算格子網を設定する。
- (3) 流速および壁面せん断力を計算する。

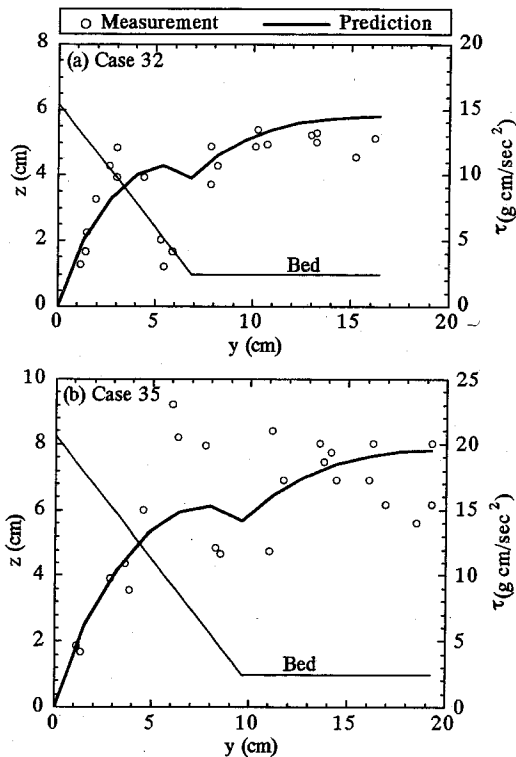


Fig. 2 壁面せん断力の評価：Ghosh et al. (1970) の実験データとの比較

- (4) 計算された壁面せん断力に基づき流砂量ベクトルを求める。
- (5) 側岸崩落に伴う土砂の供給がある場合には、これを考慮して、河床変動量を計算する。なお、結果として生じた斜面の勾配が安息角を越える場合には、新たな崩落を生じさせる。
- (6) 河床形状の変化に伴い、兩岸の水際位置が変化するため、これを設定する。
- (7) 流れおよび河床形状が平衡状態に達するか、あるいは所定の時間に達した場合に計算を終了する。計算を継続する場合には上記の (2) に戻る。

### 3. 壁面せん断力の算定

側岸が浸食される過程を解析するためには、壁面上のせん断力を精度よく予測することが必要である。ここでは、流れ場に関する本解析方法の妥当性を検証する目的から、台形断面水路で Ghosh ら<sup>18)</sup> により測定された壁面せん断力分布と、本解析モデルによる予測結果との比較を行った。Fig. 2 (a), (b) には、Ghosh らの Run 32 と Run 35 の実測結果が○印で示してあるほか、予測値が実線で示されている。ここに、実測値として、直接計測値、速度分布から

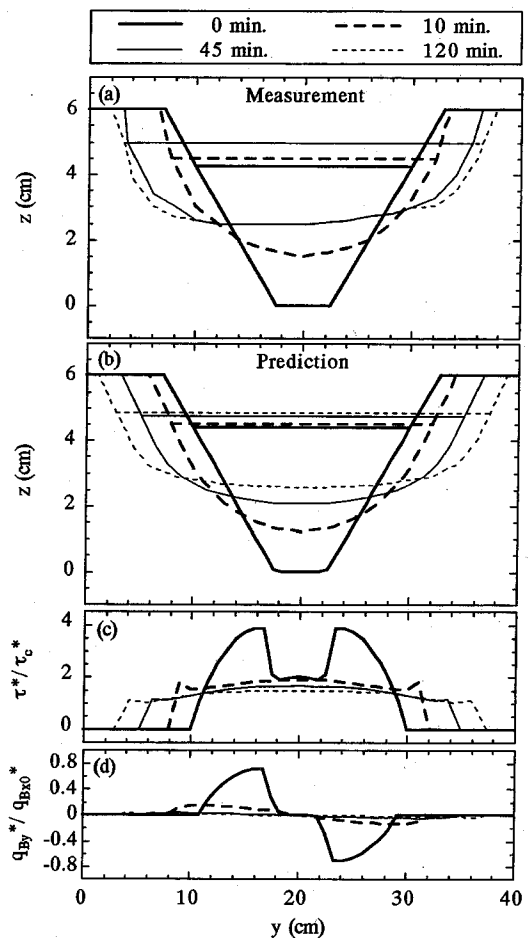


Fig. 3 直線流路の拡幅過程：(a), (b) 断面形状変化, (c) 掃流力分布変化, (d) 横断方向流砂量分布の変化

の算出値および Preston 管による計測値の 3 通りが示されている。Fig. 2 より、台形断面における特徴的な壁面せん断力分布が精度良く予測されていることがわかり、本解析における流れ場の計算の妥当性が確認された。

### 4. 直線流路の拡幅過程の解析

ここでは、直線河道の拡幅過程に関する解析を行い、側岸浸食の機構を理解するとともに、その結果として生じる安定 (平衡状態に達した) 河道について検討する。また、同時に本研究で提案した側岸浸食モデルの妥当性についても検証する。解析の対象として選んだのは、福岡・山坂<sup>3)</sup> によってなされた水路実験 (Run No. SW-1) と同一の条件で生じる現象である。実験の概要は次の通りである。すなわち、粒径  $D = 0.067$  (cm) のほぼ均一粒径の砂を用い、水路床

の縦断勾配  $I_0 = 1/400$ ，底面幅  $5\text{ cm}$ ，側岸の斜面角  $30^\circ$ ，側岸の天端までの高さ  $6\text{ cm}$  の台形断面流路を設定し，これを初期断面形状として一定流量  $Q = 2.0 \times 10^3 (\text{cm}^3/\text{sec.})$  を通水し，2 時間にわたって河道内の横断面変化を調べた。

直線流路の拡幅過程を時間を追って調べた結果が Fig. 3 である。Fig. 3 (a) が実験結果，Fig. 3 (b) が計算結果である。図よりわかる通り，側岸浸食に伴う拡幅過程は通水直後に急激に進行した後，その速度を落とし，平衡状態に向かってゆっくりと進んでいくことがわかる。また，計算結果が実験結果とはほぼ一致していることから，解析モデルの妥当性も確認できる。

また，Fig. 3 (c)，(d) には，各時間における流路断面形状に対する掃流力分布  $\tau^*/\tau_c^*$ ，および横断方向掃流砂量  $q_{Bs}^*$  の断面内分布 ( $q_{Bs0}^*$ ：初期断面における流路中心軸上の縦断面方向無次元掃流砂量) をそれぞれ示している。この図より，平衡状態における直線流路は，横断方向流砂量  $q_{Bs}^*$  が断面内の全域で 0 に漸近することにより達成されていることがわかる。このことを詳しく見ていくと，次のような事実が明らかになる。すなわち，(a) 河道の横断方向傾斜角  $\omega$  が 0 でない水際に近い部分では  $\tau^*/\tau_c^* \leq 1$  となり，土砂移動が生じなくなる，(b)  $\tau^*/\tau_c^* \geq 1$  となる河道中央部では，横断方向傾斜角  $\omega$  が 0 に近い値となり，縦断方向流砂量は存在するものの，横断方向流砂量が 0 となる。これは動的平衡状態として知られている状態に他ならない。

## 5. 一様湾曲流路の側岸浸食過程の解析

湾曲流路における側岸浸食に関する研究は，現地河川での調査報告はあるものの，これまであまり行われておらず，わずかに福岡・山坂ら<sup>9)</sup>による実験的研究が見られる程度である。湾曲流路における側岸浸食は流路変動 (channel migration) の直接の原因となり，治水上極めて重要な問題である。流路変動に関する従来の研究は，Ikeda, Parker and Sawai<sup>10)</sup>，Hasegawa<sup>11)</sup>の研究に代表されるように，側岸浸食速度を，側岸固定の条件下で生じると予測される河床の深掘れの進行との幾何学的な関係から予測することで流路変動を解析しようとするものであった。しかし，側岸浸食の進行過程と河床に深掘れが生じる過程との相互関係が明確にされていない点に本質的な問題を残している。本研究は，任意の曲率変化を伴う自然河川の流路変動を予測することを最終的な

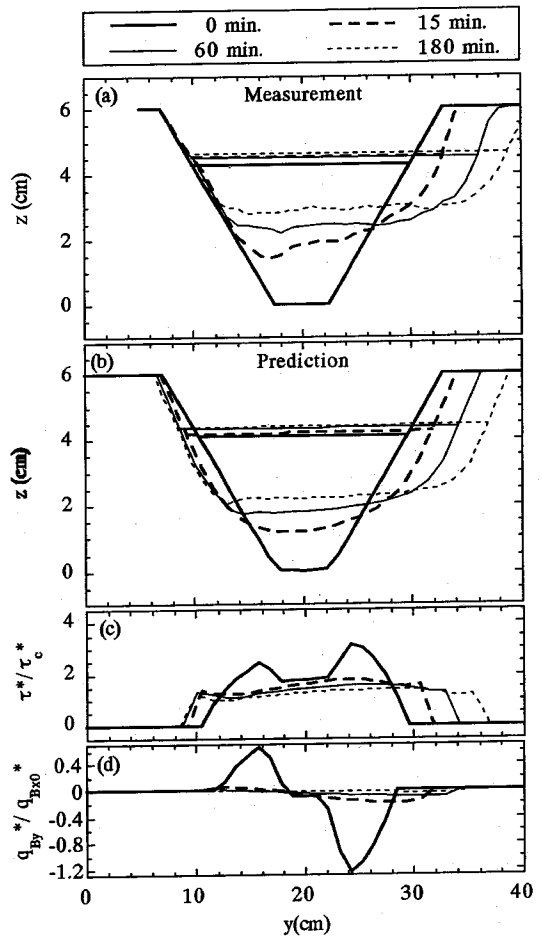


Fig. 4 一様湾曲流路の流路変動過程：(a)，(b) 断面形状変化，(c) 掃流力分布変化，(d) 横断方向流砂量分布の変化

目的とした研究の第一段階であり，解析の容易な一様湾曲流路の平衡状態における流路変動について検討した。この場合には，直線河道の拡幅過程と同様に，現象が想定した横断面内で生じると考えることができる。

解析の対象としたのは，福岡・山坂ら<sup>9)</sup>によりなされた一様湾曲流路における実験 (Run 1) と同一条件下での現象である。実験の詳細は次の通りである。すなわち，中心曲率  $450\text{ cm}$ ，幅  $100\text{ cm}$ ，湾曲角  $306^\circ$  の一様湾曲流路上に，平均粒径  $D = 0.072 (\text{cm})$  の均一粒径砂を用いて台形断面の溝を掘り，これを流路の初期条件として一定流量を通水することで実験を行った。なお，この際の流路中心軸の曲率半径は  $r_c = 415 (\text{cm})$  としている。また，水路床勾配，台形断面の形状および流量については，前述の直線河道の場合と同一である。

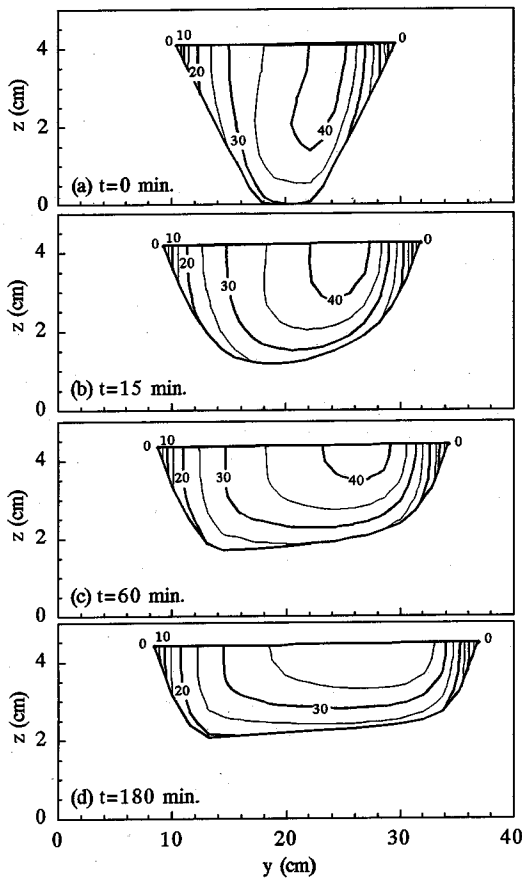


Fig. 5 一様湾曲流路内の主流速の等値線図の時間変化

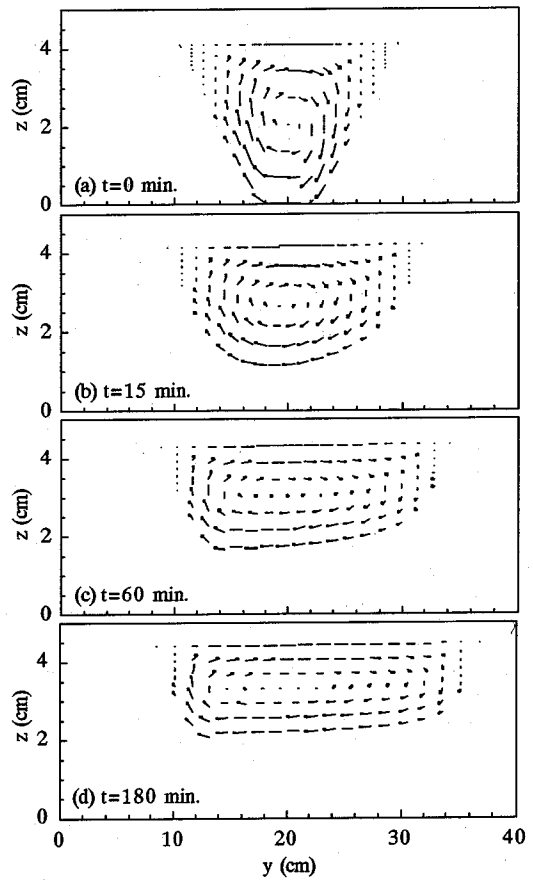


Fig. 6 一様湾曲流路内の二次流ベクトルの時間変化

側岸浸食に伴う流路横断面形状の時間変化について調べたのが Fig. 4 である。Fig. 4 (a), (b) には、実測値および予測値が示されており、両者はよく一致していることがわかる。また、Figs. 5, 6 には、各時間における断面内の主流速の等値線図および二次流ベクトルの予測値が示されている。さらに、Fig. 4(c), Fig. 4(d) には、各時間における流路断面形状に対する、掃流力分布  $\tau/\tau_c$ 、および横断方向掃流砂量  $q_b$  の断面内分布をそれぞれ示している。

Figs. 4, 5 および 6 から、側岸浸食が生じ得る湾曲流路において特徴的なことは以下の通りである。(1) 側岸の傾斜に伴う重力の作用により輸送される土砂と、断面内に生じる二次流の作用により外岸から内岸へと輸送される土砂との2つの流れがあり、両者が逆方向となる流路内岸での側岸浸食はかなり抑制され、同方向となる外岸では促進される。これは、直線流路における拡幅状況との比較をすれば明白である。(2) 側岸の浸食に伴い、河道面の相対的な上昇が生じ、流路幅が広く、かつ浅い流れへと変化

していく。その際に、いわゆる深掘れと呼ばれる顕著でかつ局所的な洗掘は生じず、断面内で最大水深を生じる位置は、一般に言われている外岸付近ではなく、むしろ内岸付近に現れる。

以上のことは次のように考えることで説明できる。すなわち、これまで主に研究の対象とされてきた側岸固定の条件の下では、側壁を通しての土砂の供給がなく、二次流による外岸付近から内岸方向への土砂の輸送のみ存在するため、外岸付近の河床面は自ずと低下せざるを得ず、深掘れが生じていた。しかし、側岸の浸食が可能な条件下では、直線河道の拡幅の解析でも明らかのように、側岸部ではその傾斜に伴う重力の作用による土砂の供給があり、これが前述の外岸部の深掘れの原因となった二次流の作用による土砂の輸送と同じ方向であるため、側岸浸食は進行するものの、底部の局所洗掘が生じることはなく、むしろ堆積が生じることになる。一方、内岸付近では、側岸浸食の抑制に伴う側岸部からの土砂の供給はほとんどなく、外岸から二次流によって輸送されてくる土砂量は外岸付近で見られるほど

多くないため、外岸部ほどの堆積は生じない。この結果、断面内で最大水深をとる位置は、予想に反して内岸付近にくることになる。このことは、水理条件・断面の幾何学的条件・土砂条件を変えて行った数通りの数値実験に共通した傾向であり、側岸が河床と同一の材料で構成されている一様湾曲流の場合の特徴であると考えられる。ただし、実河川では、河岸構成材料の耐浸食性が河床構成材料に比べて大きいことや、流れおよび土砂移動の流下方向への変化があることなどから、ここで得られた横断面形状とは異なる特徴を有する断面形状となることが予想され、さらに検討を必要とする。

## 6. 結論

本研究では、蛇行河川における流路変動に関する研究の第一歩として、直線ならびに一様湾曲流路における側岸浸食機構に関する検討を行った。検討に際し、側岸浸食と横断面内の流れ場との相互作用を考慮に入れた数値解析モデルを開発し、数値実験を試みた。また、解析モデルの妥当性を検証のために、実測結果との比較も行った。本研究により、得られた新たな知見を以下に示し、結論とする。

(1) 流路の安定な横断面形状は、横断方向流砂量が0となることにより実現する。これは、具体的には、流路側岸部では $\tau' / \tau_c \leq 1$ 、中央部では横断方向傾斜角 $\omega$ が0という条件を満たすことで達成されており、これはいわゆる動的平衡状態に相当する。

(2) 一様湾曲流路では、流路外岸部において側岸浸食が生じるが、浸食により供給された土砂は主に外岸付近の河床上に堆積し、外岸部の深掘れが生じることはない。これは河道の洗掘が側岸部の浸食という形で進行するためである。なお、このような河道の横断面形状は、本研究で想定した条件、すなわち、側岸が河床構成材料と同一の材料で形作られている場合、あるいは流下方向への変化が生じない一様湾曲流路の場合、に見られる特有のものである可能性があり、今後さらに検討していく必要がある。

また、今後の課題として次のようなものが挙げられる。すなわち、

(1) 側岸浸食に伴う土砂のふるい分け(Sorting)について考慮する。本研究では均一粒径砂を対象としてきたが、土砂のふるい分けによって断面形状にどの程度の影響がでてくるのかを調べる必要がある。なお、これについては、長谷川<sup>19)</sup>により火山灰土を用いた直線流路における大規模な拡幅実験が行われ、横断面内で土砂のふるい分けが生じていることが報告されている。

(2) 流路中心曲率が変化する自然河川における流路変動を予測するように現モデルの拡張を行う。流路変動に伴って河道幅の大きな変化が見られないとの報告があるが、そのためには流路内岸側の水際が外岸方向に移動することが必要である。これを実現するためには、側岸浸食とあわせて水位低下が生じなければならないが、流量一定の下で水位低下が生じる機構についてもあわせて検討する。

(3) (2)と関連する問題として、土砂の堆積と水位低下の結果、川幅が狭まり、直線河道が安定川幅に到る過程について検討する。

謝辞：本研究の解析モデル開発に当たり、一般座標系に関する情報を快く提供して下さった清水建設(株) 孟岩氏(当時、東京工大大学院)に謝意を表します。Minnesota大学のParker教授には、著者の同大学在籍中に、側岸浸食の考え方に関する議論を始め、本研究に関わる数多くの貴重なお教を賜った。また、本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究C(課題番号06650572)、および、河川環境財団の調査研究助成金(ともに代表者：関根正人)を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 佐々木克也, 山本晃一, 藤田光一: 低水路川幅の変化, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.98-99, 1992.
- 2) Ikeda, S.: Self-Formed Straight Channel in Sandy Beds, *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, pp. 369-406, 1981.
- 3) 福岡捷二, 山坂昌成: なめらかな横断面形状をもつ直線流路のせん断力分布と拡幅過程の解析, 土木学会論文集, 第351号, pp.87-96, 1984.
- 4) 長谷川和義: 非平衡性を考慮した側岸浸食量に関する研究, 土木学会論文報告集, 第316号, pp.37-50, 1981.
- 5) 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 河床横断形状の形成過程, 土木学会第29回年次学術講演会概要集, 1977.
- 6) Pizzuto, J. E.: Numerical simulation of gravel river widening, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 9, pp.1971-1980, 1990.
- 7) Kovacs, A. and Parker, G.: A mathematical model for the time development of straight self-formed channels in non-cohesive material with the application of a new vectorial bed-load formulation II, *Journal of Fluid Mechanics*, (in press), 1992.
- 8) 安原達, 関根正人: 直線河道の拡幅過程に関する研究, 土木学会第48回年次学術講演会, pp.502~503, 1993.
- 9) 福岡捷二, 山坂昌成, 竹内聡, 古屋晃, 永納栄一: 湾曲流路の側岸侵食, 第27回水理講演会論文集, pp.721-726, 1983.
- 10) Ikeda, S., Parker, G. and Sawai, K.: Bend theory of river



meanders, Part 1 Linear development, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 112, pp. 363-377, 1981.

- 11) Hasegawa, K. : Universal bank erosion coefficient for meandering rivers., *Journal of Hydr. Engrg.*, ASCE., Vol. 115, Vol.6, pp. 744-765, 1989.
- 12) 福岡捷二, 木暮陽一, 佐藤健二, 大東道郎: 自然堆積河岸の浸食過程, 水工学論文集, 第 37 号, pp.643-648, 1993.
- 13) 関根正人: 蛇行河川における土砂のふるい分けに関する研究, 土木学会論文集, 第 467 号, pp.29-36, 1993.
- 14) 日野幹雄, 太田猛彦, 砂田憲吾, 渡辺邦夫: 洪水の数値予報, 森北出版, 1989.
- 15) 孟岩, 奥村卓也, 日野幹雄: 直接数値計算による任意波状境界をもつ 2 次元および 3 次元波状曲面状の流れの解析, 水工学論文集, 第 36 卷, pp.355 - 360, 1992.
- 16) Parker, G. : personal communication.
- 17) Lane, E. W. : Design of stable channels, *Trans. ASCE*, Vol. 120, pp. 1234-1260, 1955.
- 18) Ghosh, S.N. and Roy, N. : Boundary Shear Distribution in Open Channel Flow., *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, HY4, pp. 967 - 994, 1970.
- 19) 金高州吾, 渡邊康玄, 長谷川和義, 亀田裕二: 大型火山灰流路を用いた側岸浸食実験, 水工学論文集, 第 37 号, pp.631-636, 1993.

(1995. 2. 23 受付)

## STUDY ON THE CHANNEL MIGRATION DUE TO A BANK EROSION

Masato SEKINE

Numerical model of the channel migration was developed considering the mechanism of bank erosion. Full sets of governing equations for a water flow and a sediment transport are taken into account in the model with the physical sediment collapse model on the side wall. The validity of the model was verified by the predicted results being compared with the experimental ones by Fukuoka et al. Based on the extensive numerical experiments, the changing process of the flow field, sediment transport and channel cross section, especially how channel shift proceeds, were fully understood.