

委員会報告

洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究

THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES OF RIVER FLOOD AND CHANNEL PROCESS

土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会

*By Task Committee on Three Dimensional Structures of River
Flood and Channel Process
Committee on Hydraulics and Hydraulic Engineering, JSCE*

1. まえがき

洪水流の航空写真撮影が行われるようになってから、その三次元的流況や組織的な渦の実態はかなり解明されてきた。また、実験室では、最近急速な進展をみせていく可視化法や乱流計測法を用いて、流れの組織的渦の構造が明らかにされつつある。

一方、三次元流況と密接な関係をもつ流路形態、特に中規模河床形態や蛇行に関してはわが国の研究は非常に活発であって、多くの研究成果が集積してきた。

したがって、現象に対するわれわれの理解はかなり進んできた。しかし、総合的な理解となると必ずしも十分ではない。また、三次元的な問題の解析法については、一般的な方法は確立されておらず、個々の問題について従来数多く提案されている方法の利害得失については、あまり知られていないのが実情である。

そこで、この問題についての新しい発展を図るために、今まで集積された数多くの情報を整理する一方、研究成果の critical review を行うとともに、問題点を探ることがきわめて重要である。

土木学会水理委員会では、昭和 45 年以降水理学・水文学における先端的な課題を取り上げ、研究小委員会を組織して調査研究を行ってきた。昭和 55、56 年には上述の状況を背景にして、「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会が設置され、

- a. 洪水流の三次元的構造
- b. 曲線流路の理論と三次元流れの解析手法
- c. 中規模河床形態

d. 蛇行流路変動過程とその理論

について調査研究を行い、昭和 57 年 3 月 118 ページの報告書¹⁾を作成して水理委員会に提出した。それは参考文献数 272 にも及び、現段階における研究についてはかなりよくまとまつものであると確信している。

本文は、その要点を取りまとめたものである。紙数の関係で、重要な箇所でも割愛を余儀なくさせられたところも少なくない。また、数式的な展開は省略し、考え方のみ示したところが多い。参考文献の数も絞り込んでいる。しかし、研究成果の現状と今後解明すべき問題については十分ご理解いただけるものと期待している。本文が、この問題についての読者の理解を深めるとともに、これから発展の契機になれば幸甚である。

なお、研究小委員会の構成は次のとおりである。

水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会構成

委員長 芦田和男（京都大学）

洪水流の三次元的構造分科会

主査 須賀堯三（建設省）、今本博健（京都大学）、宇民正（京都大学）、狩津家久（京都大学）

曲線流路の理論と三次元流れの解析手法分科会

主査 首藤伸夫（東北大学）、玉井信行（東京大学）、石川忠晴（建設省）、尾崎幸男（電力中央研究所）

中規模河床形態分科会

主査 村木嘉雄（京都大学）、林 泰造（中央大学）、鰐川登（早稲田大学）、黒木幹男（北海道大学）、三輪式（岩手大学）、藤田裕一郎（京都大学）、山本晃一（建設省）

蛇行流路変動過程とその理論分科会

主査 福岡捷二（東京工業大学）、長谷川和義（北海道大学）、池田駿介（埼玉大学）、澤井健二（京都大学）、平野宗夫（九州大学）

* 土木学会水理委員会「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会
(〒160 新宿区四ツ谷1丁目無番地)

2. 洪水流の三次元的構造

洪水流は三次元的な流況を呈し、大小さまざまな尺度を有する現象が混在した複雑な流れである。三次元流れの構造には、並列旋流(縦渦)などの水深規模のもの、蛇行流や巨大な河岸渦などのように川幅および流路の平面形状等の影響を受けるもの、河岸における湧き上がり現象や複断面水路の流れなどのように、横断形状や壁面の性質の影響を受けるもの、河床波近傍や橋脚等の構造物周辺の流れ、および流れの三次元性にかかわりを有する大規模な乱流の渦などがある。このような洪水流の三次元的な構造は、単純な条件の場合を除いて、理論解析や数値計算のみによっては明らかにされない。流れの構造を知るためにには、まず、洪水流の実態把握が重要であり、さらに、実験水路内での詳細な検討が必要である。

ここでは、航空写真に基づく洪水流の三次元流況の研究、室内開水路流れの三次元性に関する研究、大規模乱流構造と流れの三次元性の関係についての考察、および河川と実験水路の流れの比較等について従来の研究や調査の結果の整理を行う。

(1) 河川における洪水流の観測

洪水流を撮影した航空写真によると、水面において横断方向に多数の浮遊模様からなる流れ方向の縦筋がみられる。これは、濁度の違いや浮遊泡で織りなされる模様の中に、泡が寄りやすい沈み込みが生じる平滑な部分と水中から間欠的に湧き上がる黒ずんだ部分とが交互に存在することを示す(図-1)。木下²⁾によると、縦筋の間隔は局所的な水深のほぼ2倍である。表面の流速は、相対的に湧き上がる部分で小さく、沈み込みの部分で大きくなっている。木曽川の昭和39年9月の洪水では、沈み込みのある部分で2.4m/s、湧き上がりの部分で2.0m/s程度の流速を示した。他の例においても流速差は大略1割前後、またはそれ以上となることがある。このような流れの構造は並列旋流(縦渦)、またはそれに類似した構造と推定されている。

河岸付近の流れは、水路の横断形状および護岸の有無や護岸の勾配と粗度などによって異なるが、河岸沿いに

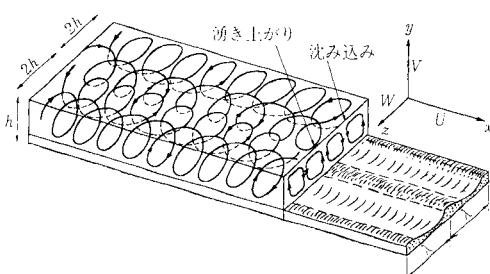


図-1 縦渦と並列旋流

湧き上がり流れの存在が多い。また、表面流速はほぼ規則的とみられる流速変化を起こしている。このような河岸渦は、一般に間欠的に発生し、流下に伴って変形し、発達するが、やがて混合拡散し消滅する。流路の曲がり等の他の条件が重なる場合には、川幅規模の渦に成長し、また両岸から発達した河岸渦が互いに干渉することもある。

砂礫堆または交番砂州上の流れは、水深が小さい範囲では収束と発散を繰り返すことに特徴がある。砂州上の流れは一様に広がるのではなく、水深に応じて砂州の高さの変化を含めた形状の影響を受けて広がり、その下流において流れは河岸付近において最も収束するのが典型である。中間地域の河道における洪水流には、さきの縦渦のほかに、横断的に数列程度のさらに規模の大きい縦渦とみられる筋が水面に現れることがある。この筋状の模様は、縦断的な川幅の変化や湾曲に応じて変化することが、利根川佐原地区の昭和47年洪水の航空写真によって知られる。一方、扇状地の河道口における洪水流の航測例は少ない。それは上空からの撮影に困難が伴うからである。そこで地上の高所から斜め写真撮影を行うことによって、洪水時における砂礫堆の運動と変形の実態を明らかにする試みが、大井川を例に木下³⁾によって行われた。その結果によると、大井川の河道は低水時は網流状態であるが、流量の増大に伴って、うろこ状に配列する複列砂礫堆の形成と複数の蛇行水流が並列する状態が生じ、ついで砂礫堆の規模の増大と形状の単純化が行われた。また、洪水後の砂礫堆は若干の変形を伴うものの、河道全面にわたって前進していることが明らかにされた。前進距離は昭和51年9月からの1年間で約100mであった。

複断面開水路流れでは、低水路の流れと高水敷上の流れとが干渉し、その境界では水面に向かう斜昇流が存在し、複断面流れ特有の渦が形成される。

橋脚後流の範囲では流速が遅くなる。洪水時の航空写真によると、脚間中央部の流速に比して1~2割程度の差違が生ずることがある。その影響は流下距離とともに減少するが、利根川水郷大橋では350~700mにわたって、また木曽川濃尾大橋では500~600mにわたってカルマン渦が観察された。

(2) 開水路流れの室内実験

一般に、室内実験水路における流れのレイノルズ数は $10^2 \sim 10^4$ 程度であり、流れの三次元的挙動が顕著でない場合が多く、その検出はかなり困難である。しかし、①水理条件の制御が容易であり、高い計測精度が期待される、②洪水観測は主として水面上の流況に限定されるが、実験では流れの内部構造にまで直接立ち入ることができる、などの理由により実験的研究の重要性が高まつ

ている。

一様断面水路において乱流状態の流れが三次元的挙動を示す原因是、平坦部におけるバースティング現象により生ずる上昇流が縦渦を誘起すること、および隅角部におけるせん断力分布の非一様性により等流速線がゆがめられて旋流が生ずることである。計測技術の進歩により、高度な実験例が報告されている。たとえば、宇民・上野⁴⁾は流れの可視化法により組織的な渦の構造を詳細に調べている。

非一様断面水路の流れでは断面形状の変化に伴い流線が曲げられたり、剝離域が形成されるなど複雑な現象が生じ、特に横断面形状の変化部では流れの三次元性が顕著となる。代表例としては湾曲部および円柱周辺の流れなどがある。

移動床上の開水路流れでは、流水の作用により路床に種々の河床波が形成され、流れの特性はまた河床波の影響を受ける。Matthes⁵⁾により河川流における大規模乱流構造と河床波との関連性が示されて以来、小規模および中規模河床形態における開水路流れの三次元性に関する多くの実験が行われている。

(3) 開水路流れの大規模乱流構造

十分に発達した二次元開水路乱流は、主として河床付近の強いせん断応力に基づいて発生する乱れエネルギーによって乱流状態が維持される。この乱れエネルギーの発生を行う運動がバースティングであり、それは壁面乱流に共通した普遍的な現象である。バースティングは低速域の間欠的な激しい浮上と高速域の降下からなる一連の現象を総称する。バースティングが河床近傍に限られるのに対して、流れの主流部で発生する大きな変動は大規模な渦であり、流れの三次元性を引き起こす主因と考えられる。このような渦にコルクやボイルとよばれる現象がある。コルクは間欠性の強い上昇渦で、土砂を浮上させるなど強いエネルギーをもち、水面に達してボイルとなる。

バースティングと並列ら旋流は横断方向にかなり整然とした構造^{6),7)}をもち、その横断スケールは、最も小規模な河床形態である current lineation(線流)の横断スケール^{8),9)}とほぼ一致する。いったん current lineationが形成されると、本来発生位置が不規則なバースティング運動が拘束されるようになり、レイノルズ応力の分布も横断方向に不均一となる。その結果小スケールの二次流や、さまざまな微細構造が河床付近に発生する¹⁰⁾。

(4) 河川と室内実験の流れの比較

一般に河川の模型実験はフルードの相似則に基づいて行われる。移動床実験の場合には、水理量により河床形態が変化し、それぞれ河床形態が別々の粗度特性と流砂特性を有しているので、小規模河床波が生じると必ずし

もフルード則が維持されない。一方、中規模河床波の運動とその形態は、流れ場の境界の形状と、流れと河床の相互作用の二重の影響を受ける。

木下¹¹⁾は小さな模型によって砂礫堆の形状と移動・変形の特性、およびその上の流れに関する相似性の見通しを得た。また、大きい模型(縮尺 1/40~1/100)を用いてフルード則までほぼ満足する実験が、建設省土木研究所等において数多く実施され、良好な結果が得られている。たとえば、信濃川模型実験¹²⁾では河床砂の粒度分布や流量について、また斐伊川模型実験¹³⁾では流砂に関する時間縮尺について検討がなされ、現地の測定精度と対比して満足すべき中規模河床形態に関する相似条件が得られた。

3. 曲線流路の理論と三次元流れの解析手法

河川流は水路軸に沿った主成分流速が卓越する流れであるが、これと直交する二次流も存在する。

プラントルによると二次流の発生原因は次の 2つである。

第 1 種の二次流は、 z 方向に一様でない流速分布をもつ流れが、 z 軸に直交する平面に投影されたその経路をしだいに曲げていく場合に生ずる。 z 方向に遠心力の差が存在するからである。

第 2 種の二次流は、レイノルズ応力の空間的分布にひずみがある場合に発生する。乱流でなくては生じない。

この 2 つは、流下方向に水路横断形状が変化しなくとも主流に直交する流速が発生する原因であるが、実河川内では河床形状は横断方向・流下方向にも変化し、直交成分を誘起する。

以下に形状や条件の単純なものから順に二次流の解析手法をみていくこととする。

(1) 断面形状が不变な直線流路内の流れ

主流方向を x とするとき、 y , z 方向の運動方程式から相互微分によって圧力項を消去すると、渦度の x 成分の式が次のように得られる。

$$\frac{\partial \omega_x}{\partial t} + v \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + w \frac{\partial \omega_x}{\partial z} = \text{I} \quad \text{II}$$

$$= \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\bar{v}'^2 - \bar{w}'^2) - \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \bar{v}' \bar{w}' = \text{III} \quad \text{IV}$$

$$+ \nu \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \omega_x = \text{V} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

第 III, IV 項がレイノルズ応力項であって、この両者の和が零でない限り、 ω_x すなわち主流に直な断面内での流れが発生する。直交断面内での主流の等流速線が互い

にまたは壁面に平行でない流れでは、この両項は零とならないと推論されている¹⁴⁾。壁面粗度の分布が一様である円管内の乱流以外では、必ず二次流が発生することになる。

レイノルズ応力項をどのように表現し評価するかが、この問題の鍵である。壁面形状を考えに入れて乱流そのものを解析するのは困難であるから、i) カルマンの相似仮説を用いる、ii) レイノルズ応力の一部に実測値を採用する、などの手法が使われている。将来の可能性として、iii) 異なった壁面せん断流に共通できるような乱れ強度分布の規則性を経験的に見出そうとする試みもある。

i) を使うためには、断面内の主流の等流速線が求まっているなくてはならない。Chiu ら^{15), 16)} は実測などを使って等流速線を決め、これに直交する方向の速度勾配によってレイノルズ応力の分布を求めている。

ii) の例として、吉川・池田¹⁷⁾、Gerard¹⁸⁾ は $\overline{v'w'}$ あるいはその一部を渦動粘性係数を仲介として二次流に結びつけた。他の乱れ強度には実測値をそのまま使ってい。なお、二次流は定常状態になっているため第 I, II 項は小さく、第 V 項は無視できるとしている。

iii) として、Perkins¹⁹⁾ は、4つの異なる壁面せん断乱流の実測値から、二次流を支配する乱れの異方度合が、最も近い壁面までの距離と摩擦速度とで普遍的に表現できることを示しているが、複雑な断面にも適用可能ならば、有力な手段となろう。

境界の作用が二次元的とみなせる幅広の直線流路でも、縦渦とよばれる二次流の存在が認められ、その解析も最近になって始められている²⁰⁾。

(2) 断面形状が不変な曲線流路内の流れ

プラントルのいう第1種の二次流は、 z 軸方向に一様でない流速分布が設定されていさえすれば、非粘性非圧縮の流体であっても、経路が曲がるにつれて発生する。Hawthorne²¹⁾ は円管内流れを解析的に解き、ベルヌイ面の振動など本質的に重要な結果を見出している。

開水路湾曲部を流下するにつれて二次流が発生発達していく流れを非平衡の流れといい、三次元問題としてほとんど省略なしの方程式群を対象として数値計算を実施しなくてはならない。流線の剥離は生じないと仮定は採用される。方程式は円筒座標系で表現される。乱流の計算には $k-\epsilon$ モデルを使ったものがある²²⁾。これは渦動粘性係数 $\epsilon = C_\mu k^2/\epsilon$ のように、乱れの運動エネルギー k と乱れの運動エネルギー逸散率 ϵ とで表わされるとおくもので、 C_μ は 0.09 程度の定数である。湾曲部入口ですべての変数についての条件を与えねばならず、特に主流については高い精度を必要とする。出口では圧力を指定すればよい。壁面においては対数分布則の成立

する仮想境界を設定しなくてはならない。

二次流の構造が流下方向に変化しないとき、平衡した流れとよばれ、いくつかの簡略化された解析手法が発表されている。主流は与えられるとして、二次流のみが解析対象となる。二次流による移流項は小さいと仮定される。これは河幅が曲率半径に比べて十分小さいことに対応する。運動量の保存式の形で解く運動量型と、二次流に対する流れ関数を導入して解く渦度型がある。

運動量型では、鉛直方向の方程式として静水圧を仮定し、半径方向のつり合い式として、

$$-\frac{v_y^2}{r} = -gI_r + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \dots \dots \dots \quad (2)$$

とする。第1項は主流 v_y に基づく遠心力、第2項は半径方向の水面勾配 I_r による圧力勾配、第3項は乱流項の一部である。

渦度型の基本式を式(2)と対応して運動量型で書くと、

$$\begin{aligned} -\frac{v_y^2}{r} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right) \\ 0 &= -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \epsilon \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad \left. \right\} \dots \dots \dots \quad (3)$$

である。渦度型にするためには相互微分により圧力を消去するから静水圧の仮定は必要としない。

これらを解くには、 v_y , ϵ , I_r を与えねばならない。

主流 v_y は、鉛直方向には対数則や放物線、あるいは両者を組み合わせたもので表現される。半径方向には、特に指定をしないもの(Rozovskii¹⁴⁾)、 v_y が摩擦速度 u_* に比例するとした結果得られる $v_y \sim r_y^{-1/2}$ とするもの(Engelund²³⁾)、強制渦型を想定し、鉛直方向に平均された局所流速 v_{cp} が $v_{cp} \sim r$ となるとするもの(吉川・池田²⁴⁾) がある。

渦動粘性係数 ϵ は $u_* h$ に比例して断面内で一定とするか、あるいは二次元開水路での混合距離 $l = kz(1-z/h)$ とプラントルの仮説とから $\epsilon = l^2 \partial v_y / \partial z$ と表示するものがある。

半径方向水面勾配 I_r は、底面境界層外縁やそれに対応する高さでの力のつり合いから、鉛直方向に平均された局所的な主流流速 v_{cp} の遠心力を使って表示される。

これは、この高さでの流速に対する境界条件になつているとえることができる。

(3) 流下方向に断面形状が変化する流れ

現実の河道では、その断面形状が水路軸方向にも横断方向にも変化する。水路軸に直交する断面内の流速成分は、第1種、第2種の二次流のほかに、こうした河床形状の場所的変化の影響を強く受けその解析もきわめて複雑となる。

水深方向に平均された変数に対する、直交曲線座標系(水路軸方向の s 軸、これと直交する方向の n 軸)の浅

水理論が用いられる。このとき、半径方向流速の鉛直分布など二次流に特徴的な情報が見掛け上なくなってしまうので工夫が必要となる。

解法としては、非線形のまま特性曲線を利用 (Kalwijk de Vriend²⁵⁾)、線形化 (Engelund²³⁾、長谷川²⁶⁾ などがある。

特性曲線を使った例では、運動量補正係数 β に特徴が現われる。 u_s^2 に関しては $\beta=1$ とするが、 $u_s u_n$ については平衡時の二次流の分布形を使って β を決める。式は、特性曲線 $\frac{dn}{ds} = \frac{\bar{u}_n}{\bar{u}_s} + 2 k_{sn} \frac{h}{R_1}$ 上で

$$\frac{d}{ds} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{\bar{u}_s^2}{2} \right) = - \frac{\bar{u}_s^2}{h} \left[\frac{g}{C^2} + k_{sn} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{h^2}{R_1} \right) \right] \quad \dots \dots \dots (4)$$

となる。C はシェジーの係数、h : 水深、R_s : s 軸の曲率半径、であり、k_{sn} は平衡二次流に対応して決められた係数である。特性曲線の方向は、地形の直接的影響を表わす第 1 項と二次流の効果を示す第 2 項とで決められ、しだいに外岸寄りへ移行していく。これと対応して、流下に伴い全エネルギーは外岸寄りで増加する。

線形化にあたっては、i) $u_n \approx 0$ とみなすが $\partial u_n / \partial s$, $\partial u_n / \partial n$ は残すもの、ii) 水路軸方向の方程式では移流項を残すが横断方向に関しては遠心力以外の加速度を省略するものの 2 つがみられる。

i) によると、n 方向の式中には圧力勾配、 $u_s \partial u_n / \partial s$, 遠心力が残るが、 u_n に関する線形微分方程式となる。この方式を採用すると、流線上で生ずる現象には誤差が生ずるが側壁での境界条件は満たすこととなる。

ii) の方式によると、この逆になる。

底面近くの二次流の方向は砂移動に関して重要である。二次流の大きさは連続の方程式から計算されたり、あるいは河床波に関する移動床実験の結果との比較から決められている。

4. 中規模河床形態

中規模河床形態は沖積河川における流路変動の支配要素であり、河道の安定に大きな影響を及ぼすことから近年、交互砂州を中心として数多くの現地観測、基礎実験ならびに理論的研究が行われ、各種の砂州の定義とその形成条件および水理特性が、しだいに明らかにされてきた。ここでは、平衡状態の中規模河床形態に注目して、主要な研究成果を要約する。

(1) 中規模河床形態の分類

沖積地河川に形成される河床形態のうち、河幅規模のものを砂州、あるいは水深規模の小規模河床形態（砂渦、砂堆など）と対比して中規模河床形態という。砂州には、ほぼ直線的な河道区間に形成される単列の交互砂州（単列砂礫堆）および複列砂州（うろこ状砂州、複列

砂礫堆）と合流点・湾曲部・河口部などの局所的な河道条件によって形成される砂州とがある。交互砂州と複列砂州は下流へ移動するが、河口砂州、寄州など河道の局所的変化部の砂州は形成する位置がほぼ一定しており、移動しない。

(2) 中規模河床形態の形成機構と河床安定解析

中規模河床形態のうち、交互砂州は流れを蛇行させ、蛇行流路および蛇行河道の形成因となる。この蛇行流の発生原因については、河道の局所的障害物、地球自転による転向力、流れの過剰エネルギー、熱対流あるいは河床と河岸の摩擦力の差によって発生するら旋流、水面静振の伝播、流れおよび河床の擾乱の不安定性など、古来、種々の考察がなされてきた²⁷⁾。しかし、最近では、河床面の不安定説が主流をなしており、小規模河床形態に関する安定論の拡張として、中規模河床形態の線形安定解析が盛んに行われている。

河床安定解析の中心となる流れのモデルは、ポテンシャル流とシアー流とに大別され、後者はさらに二次元浅水流と三次元シアー流に分けられる。これらのうち、二次元浅水流モデルが最も多く用いられており、しかも通常、流砂濃度は小さく、河床変動に流れがすぐ応答するので、流れの非定常性を無視した解析ができる。

河床安定論における中規模河床形態の発生機構（河床面の不安定要因）には、河床の擾乱波形、河床せん断力（ポテンシャル流では底面流速）および流砂量の三者間の位相差が重要であって、二次元および三次元シアー流モデルでは河床の波形とせん断力間の位相差は基礎式に内在している。しかし、この位相差だけでは、交互砂州発生の卓越性を説明できないので、横方向流砂成分に対する河床勾配の影響（重力効果）、流れと流砂の方向の偏り、掃流砂と浮流砂の相違、掃流砂の非平衡性、小規模河床形態による抵抗の差などを考慮した線形安定解析が行われている。また、以前の安定解析ではフルード数と河床擾乱の波数の相関図上で不安定領域を示す方法が多く用いられてきたが、最近では、增幅率の極大値に注目して卓越モードを算定し²⁸⁾、水理諸量から交互砂州（蛇行流路）と複列砂州（網状流路）の形成領域を決定

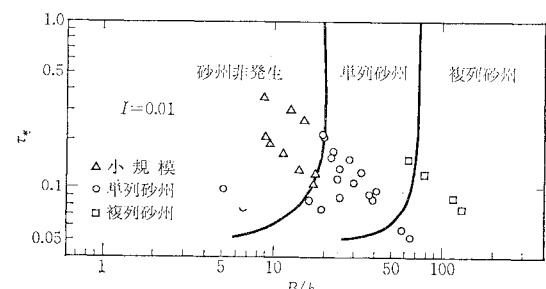


図-2 形成領域区分図（黒木・岸）

する実用的な区分図が得られている^{29),30)}。図-2に、二次元浅水流モデルに基づく解析結果の一例³⁰⁾を示す。図中の記号で、 I : 河床勾配、 τ_* : 無次元掃流力、 B : 河幅、 h : 水深である。

(3) 中規模河床形態の形成条件

河床波の卓越波数に関する安定論の進展に伴って、中規模河床形態の形成条件に対する予測精度も向上してきたが、実際には河川および実験水路の実測値に基づく領域区分図が広く用いられている。実測値から支配パラメーターを導く方法としては、移動床ひずみ模型の相似概念によるものと、次元解析に基づく方法がある。前者では、原型とひずみ模型における掃流力と移動限界掃流力の比に注目し、領域区分図として、

$$u_*/u_{*c} \sim (B/I/R)^n \dots \quad (5)$$

の関係が得られ^{31),32)}、 $n=1/2, 1/3, 1/4$ の三通りの区分線が提案されている。ここに、 u_* : 摩擦速度、 u_{*c} : 限界摩擦速度、 R : 径深である。

一方、次元解析による方法では、次の無次元量の組合せについて検討されている。

$$\tau_*, h/d, B/h \dots \quad (6)$$

ここに、 d : 砂粒径である。検討結果では、中規模河床形態の形成条件に対して B/h の影響が最も大きく、 h/d がそれにつき、 τ_* あるいは河床勾配やフルード数の影響は二次的であることが指摘されている^{33),34)}。 $\tau_{*c} < \tau_* < 0.6$ における $B/h-h/d$ 区分図の一例³³⁾を図-3に示す。図では、交互砂州 (Alternate Bar) と複列砂州 (Double Row Bar) 以外に、砂堆との中间形態の短対角砂州 (Short Diagonal Bar) および不明瞭で弱蛇行流となる準砂州 (Semi Bar) の形成領域も示されている。図-3 の区分図は図-2 のそれとほぼ対応するが、実河川で問題となる $h/d > 10^2$ 、 $\tau^* > 0.5$ の範囲の形成条件はなお不明確である。

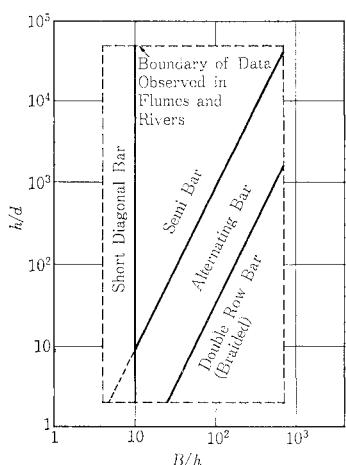


図-3 $B/h \sim h/d$ 区分図 (村本・藤田)

(4) 砂州の形状と移動特性

中規模河床形態は、上述のように各種の砂州に分類されるが特に交互砂州を対象として形成過程とその形状および移動特性の検討が行われている。

砂州の発達過程は、波長の伸長と波高の増大によって特徴づけられるが、通常、波長より波高が平衡状態に到達する時間が長く、砂州の発達時間は波高が極大になる時間で定まる。また、砂州の発達に伴って、流水が蛇行し、その蛇行流によって水路の側壁近傍で洗掘された土砂が水路中央へ輸送されるので、砂州一波長の平均横断形状は上に凸な蒲鉾形となる。このような砂州の波高あるいは蒲鉾形横断形状の発達時間は、平衡状態における砂州の波長と波高の積に比例し、単位幅流砂量に反比例する³⁵⁾。

砂州の波長は、流心線の蛇行の半波長で定義され、波長と水理量との対応関係について、実測値あるいは(2)に述べた蛇行発生論に基づく検討がなされている。実測値から導かれた経験則としては、波長が流量の平方根あるいは河幅に比例する関係がよく知られている。これら関係は、河幅が流量の平方根に比例するというレジーム則に従っている。しかし、それぞれの比例定数の変化範囲は広く、たとえば、砂州波長・河幅比 $l_B/B = 2 \sim 20$ (平均 6) となっている。この理由として、同一の水理条件下でも波長の分布範囲が広い(たとえば、最大と最小波長の比が4倍に及ぶ)点も挙げられるが、 l_B/B に対する式(6)の無次元量の影響を検討した結果では、 h/d と τ_* より B/h に対する依存性が強く、 $B/h \approx 40$ で $l_B/B = 10 \sim 20$ の極大値をもつことが指摘されている³³⁾。

一方、蛇行発生論(静振論あるいは河床安定論)から得られている蛇行波長・河幅比は、いずれもフルード数の增加関数になっており、実測値の傾向と対応していない。また、最近の安定論から導かれた蛇行波長には、抵抗係数や河幅・水深比の影響が含まれており、定性的には実測値と対応する結果が得られているが、平衡状態の波長の予測は線形安定論では不完全である。

次に、砂州の波高は、1つの砂州の最大の高低差をとる場合もあるが、簡単のために、横断高低差の最大値で定義することが多い。しかし、波高の発達と計測には時間を要するので、精度の高い実測値は少ないが、波高・河幅比 z_B/B に対する式(6)の無次元量の影響が検討され、波長と同様に、 B/h の影響が最も支配的で、 $B/h \approx 20$ で $z_B/B = 0.1$ の極大値をとり、 $B/h > 20$ で $z_B/B = (0.2 \sim 2) h/B$ となることが示されている。

一方、砂州の移動速度は、単位幅流砂量に比例し、砂州波高に反比例することが、掃流砂条件で明らかになっている。しかし、砂州の平衡波高の推定法が確立してい

ないので、砂州の移動速度は、実測の波高と掃流砂量式から求められている。

(5) 砂州に対する河道形状と河川構造物の影響

河道湾曲部では、砂州の移動速度が低下し、ある角度以上の偏角からなる蛇曲（屈曲）水路では砂州の移動は止まる。この停止限界角度 θ_c は、図-4 に示すように水路の蛇曲波長・水路幅比 l/B によって変化することが実験によって明らかにされており、河川では、 $\theta_c = 20 \sim 25^\circ$ で河床勾配に関係しないことが見出されている³⁸⁾。また、 θ_c の偏角をもつ蛇曲水路では、砂州による局所洗掘深は直線水路と同程度であって、洗掘位置が安定しているので、河道計画上も好ましい条件であることが指摘されている。

一方、砂州の形成に対する床固めや堰などの河川構造物の影響は無視でき、砂防ダムのような大きな落差工があつても、その下流には上流側の砂州に対応した砂州が形成される。しかし、床固めの落差が大きくなるにつれて砂州の伝播に遅れが生じ、砂州の波長の縮小と波高の減少など若干の形状変化がある場合もみられる。

また、砂州の形成を利用した河川構造物としては、わが国古来の「湾曲斜め堰」があつて、この取水堰は洪水時に破壊されにくく、建造も容易であった。最近では、可動堰が多くなり、河道に直角に造られるようになったが、砂州による河床変動のために取水堰が埋没する場合も生じている。

さらに、砂州の移動を堰によって止める試みとして、横方向に天端を傾斜させた堰を用いる実験が行われております、傾斜を交互に変えた天端傾斜堰を多数設置することにより、上述の蛇曲水路と同じ効果を与えることが見出されている³⁹⁾。しかし、蛇曲水路と比較すると、砂州長により大きく影響され、堰間隔を大きくすると砂州が移

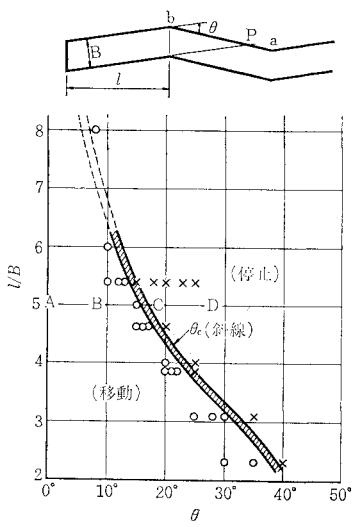


図-4 蛇曲水路の砂州の停止限界（木下・三輪）

動するなどの点で特性が異なっている。このように砂州の挙動をコントロールすることは治水、利水上重要であつて、河川の特性に対応してその適用性を検討していく必要がある。

5. 蛇行流路の変動過程とその理論

(1) 河川の流路形態

河川の流路形態は、① 直線流路、② 蛇行流路、③ 網状流路に分類される。直線流路は蛇行流路や網状流路に変形していく 1 つの過程とみなすことができる³⁸⁾。網状流路はわが国の扇状地河川でよくみられるが蛇行流路ほど十分研究は行われていない。蛇行の程度を表わす指標として谷の長さに対する蛇行長の比である屈曲度が用いられる³⁹⁾。蛇行の平面形状の表現は、流量の代表値や水面幅のべき関数を用いたレジーム理論によることが多いが⁴⁰⁾、力学的考察に基づく研究もしだいに行われるようになってきた。

交互砂州がその上の水流を蛇行させ、それが河道の蛇行へと発展することを、最初に見出したのは木下⁴¹⁾である。木下は石狩川での詳細な調査⁴²⁾より一蛇行内の交互砂州の数は一定ではなく蛇行振幅の増大に伴って変化すること、蛇曲河道から迂曲河道への発達、袂状部の形成と不動点の存在などを実証的に示し、その後の蛇行研究に重要な影響を与えた。

(2) 蛇行変動過程の実験

実河川の流路形態は洪水による流路変動後の痕跡から調査したもので変動過程そのものをとらえたものではない。変動過程の把握には実験的研究が不可欠である。多くの実験的研究により直線流路から蛇行流路への変化過程が明らかとなったが、一方において、実河川の蛇行現象には重要な微細粒子による河岸の固結化作用や植生の作用など実験水路で調べることが困難な問題も明らかとなってきた。

流路形態の形成条件を実験資料に基づき検討したものは多く、藤田・村本⁴³⁾は流路形態を $(h/d)/(B/h)^2$ で区分することを提案している。蛇行の形成過程には砂州が重要な役割を果たすことから、蛇行発達の初期段階には蛇行と砂州の波長・前進速度、発達速度がほぼ一致することが示されている。しかし、蛇行発達時には、比較にたえる十分な資料が得られていない。

(3) 側岸の侵食

流路横断面上の任意の点で接線方向に r 軸、流れ方向に x 軸をとる。単位幅当たりの流砂量を q_B 、流砂の方向と x 軸のなす角を τ とすると各成分方向の流量砂は $q_{Bp} = q_B \sin \tau$, $q_{Bx} = q_B \cos \tau$ となる。流砂の連続条件は

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bp}}{\partial p} + \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

で与えられ、側岸侵食過程の解明には側岸斜面における流砂量とその方向角 τ (または $q_{B\rho}$) が必要となる。これらを規定する水理量は側岸斜面上のせん断力分布と限界掃流力である。池田ら⁴⁴⁾は傾斜角 θ の斜面上の砂粒の限界掃流力 $\tau_{c\theta}$ の式を導き、これを簡単化し ϕ と θ によって規定される次式を得た。

$$\tau_{c\theta}/\tau_{co} = \cos \theta \sqrt{1 - \tan^2 \theta / \tan^2 \phi} \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 τ_{co} は水平河床 ($\theta=0$) における限界掃流力、 ϕ は砂の安息角である。式 (8) は、Lane の式と一致するが風洞実験による測定値をよく説明する。斜面上の流砂の運動方向に関しては、長谷川⁴⁵⁾が解析的に

$$\tan \tau \approx \frac{\tan \theta}{\sqrt{\mu \mu_s}} \sqrt{\frac{\tau_{*c} \cos \theta}{\tau_*}} \quad \dots \dots \dots (9)$$

を導いている。ここに μ 、 μ_s はそれぞれ動摩擦係数、静止摩擦係数である。斜面上の無次元掃流力は $T_* = \tau_*/\tau_{*c} \cos \theta$ で与えられ、無次元流砂量 $q_B/u_* d$ は T_* の関数となることが期待される。したがって、横断方向の流砂量は τ が小さい範囲では式 (9) を用いて

$$\frac{q_{B\rho}}{u_* d \tan \theta} = \sqrt{\frac{\tau_{*c} \cos \theta}{\mu \mu_s \tau_*}} f(T_*) \approx f_1 \left(\frac{\tau_*}{\cos \theta} \right) \quad \dots \dots \dots (10)$$

となる⁴⁶⁾。 $q_{B\rho}/u_* d \tan \theta$ と τ_* が一義的な関数関係にあることが風洞実験により得られ⁴⁴⁾、式 (10) の妥当性が確かめられている。

流路横断面形の変形過程は、式 (7) に侵食量式を適用することにより計算することができるが、その際せん断力分布と水際の取り扱いが問題となる。斜面上のせん断力分布の計算法はいくつか提案されているが、実用的には area method で十分である^{47), 48)}。水際では、土砂の移動は重力のみによって行われる。その移動機構については、まだ十分研究が進んでいないが、流路変動計算に際し、横断形状の相似性^{46), 48)}、流砂の移動方向の相似⁴⁸⁾、崩落砂の堆積形状の仮定⁴⁵⁾などにより水際の問題が処理されている。

粘着性物質が河岸の構成材料に含まれていると一般に侵食抵抗が増大する。限界掃流力と侵食速度は、材料ごとに侵食試験を行って求める必要がある。

粘着性流路でも式 (7) が成立するが、侵食速度と流砂量の従属関係が非粘着性流路と異なる。すなわち、侵食速度が局所的な水理量に対応しその積分値として流砂量が決まることに注意を要する。粘着性流路の平衡横断面形は、非粘着性流路のそれに比べて水面幅、最大水深比の小さいのが特徴で、その値が 4 度となる⁴⁹⁾。

(4) 蛇行変動の理論

蛇行変動を支配する主たる力学的要因は、① 河床の交互起伏 (交互砂州、交互洗掘)、ならびに ② 河道の平面曲率 (遠心力) であり、① と ② または両者のいず

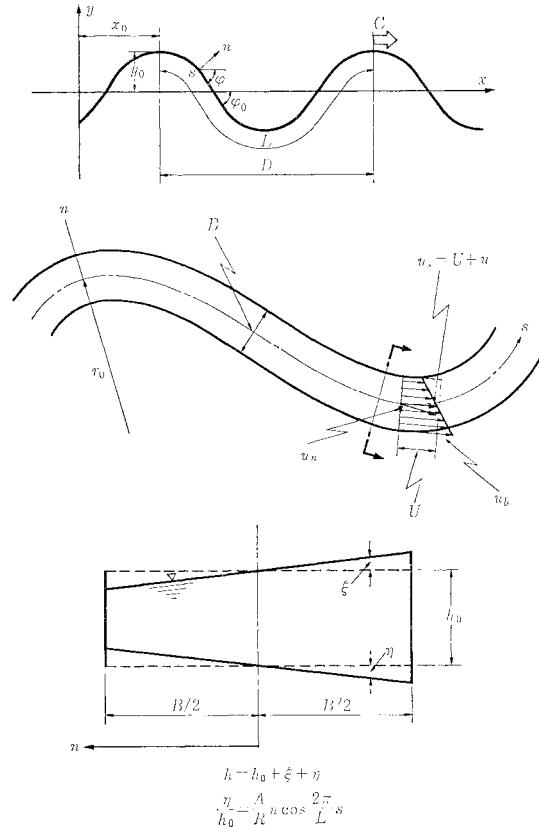


図-5 座標系と記号の定義

れかの力に着目した解析がなされている。いま、図-5 のように川幅が時間的、空間的に変化しない蛇行流路を想定し、そこでの流れは平面二次元流として扱えると考えることにより基礎式 (11)～(13) を得る。

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial s} + \frac{1}{F_r^2} \frac{\partial \hat{\xi}}{\partial \hat{s}} + C_f \left\{ \hat{u} - \frac{1}{2} (\hat{\xi} + \hat{\eta}) \right\} = 0 \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$\frac{\partial \hat{v}}{\partial s} + \frac{1}{F_r^2} \frac{\partial \hat{\xi}}{\partial \hat{n}} - \frac{1}{\hat{r}_0} + \frac{1}{2} C_f \hat{v} = 0 \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{s}} + \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{n}} + \frac{\partial}{\partial \hat{s}} (\hat{\xi} + \hat{\eta}) = 0 \quad \dots \dots \dots (13)$$

ここに

$$\begin{aligned} \hat{u} &= u/U, \quad \hat{v} = u_n/U, \quad \hat{\xi} = \xi/h_0, \quad \hat{\eta} = \eta/h_0 \\ \hat{r}_0 &= r_0/h_0, \quad \hat{s} = s/h_0, \quad \hat{n} = n/h_0, \quad F_r = U/\sqrt{gh_0} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (14)$$

a) 河道の平面形状を考慮した理論

水流の運動を考慮した流路変動は、池田・日野・吉川⁵⁰⁾の研究を、その嚆矢とする。彼らは、河道形状と流心線との間に存する位相差が蛇行の発達・減衰に大きく関与し、流心線が凹岸側に偏倚する場合に発達、逆の場合に減衰が生ずるとの考えのもとに、蛇行の発達および卓越波長について式 (11)～(13) に基づき論じた。この

流線の偏倚現象を「流線偏倚作用」とよぶ。池田らの研究は流れの基礎方程式から出発して流線偏倚を表現し、蛇行の発達と関連づけた意義は大きく、その後の流路変動の研究に大きな影響を与えた。

福岡・山坂⁵¹⁾は、池田らの研究が河岸侵食と堆積による流路の変動過程を扱えない欠点を補うために、sine-generated curve で与えられる蛇行形状が C の速度で移動すると同時に、河岸の侵食と堆積により、偏角 φ_0 が時間的に変化する扱いによって、蛇行振幅の十分大きな状態に至るまでの発達過程を解析した。解析結果は偏角の発達率、移動速度とともに偏角 φ_0 の増加とともに単調に減少し、また、移動速度は波長 D の増加によっても著しく減少することを示す。福岡らの研究は、河道変動の追跡を可能としたほか、河道変形に関する微分幾何学的表現や、蛇行の発達・変形と移動速度の関係に、理論上、新しい貢献をしたが、河床形状が考慮されていない問題を含む。

b) 河道の平面形状と河床の交互起伏を考慮した理論

池田・Parker・澤井^{52), 53)}は、先の池田ら⁵⁰⁾の研究で省略されていた河床起伏を取り入れるとともに、河岸の侵食速度式を理論に組み入れ、蛇行振幅の発達の基礎式(蛇行方程式)を導いた。これより、沖積蛇行と穿入蛇行の卓越波長としてそれぞれ次式を得た。

$$D_p = \frac{4\pi}{1.50} \cdot \frac{h_0}{C_f} \quad (\text{沖積蛇行}) \quad (15)$$

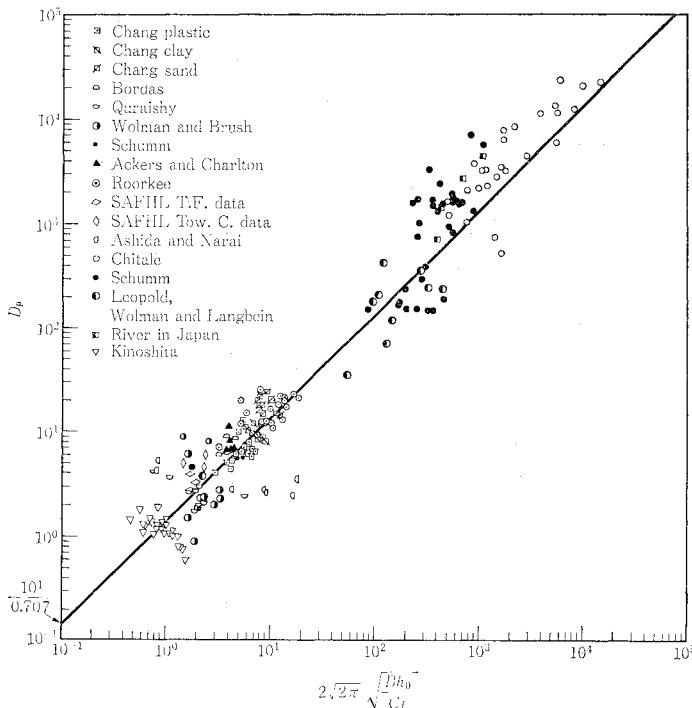


図-6 実測データと式(17)の比較(単位:m)]

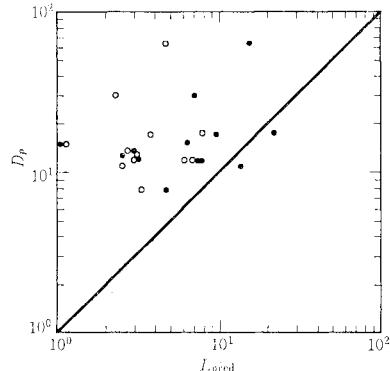


図-7 穿入蛇行実験データと式(16)の比較(黒円)
 L_{pred} は理論値を表す。(単位:cm)

$$D_p = 4\pi \frac{h_0}{C_f \cdot F_r} \quad (\text{穿入蛇行}) \quad (16)$$

野外および実験室の蛇行波長と、式(15)の対応関係は比較的よいがばらつきは大きい。図-6は、交互砂州の不安定理論から導かれた Parker⁵⁴⁾の卓越波長

$$D_p = \frac{2\sqrt{2}\pi}{0.707} \cdot \sqrt{\frac{Bh_0}{C_f}} \quad (17)$$

と実測値の比較を示すが、理論と実測の一一致は良好である。図-7は、芦田・澤井が⁵⁵⁾粘着性流路で得た穿入蛇行長を式(16)と比較したものであり、理論は実測値をおおよそ説明している。

以上の検討より、沖積蛇行波長は、交互砂州波長に規定されること、沖積物の存在しない穿入蛇行波長は、遠心力のもたらす平面不安定によって波長が規定されること、河道の曲がりに伴って、河床に洗掘が生ずるときは蛇行波長が短くなり、砂州の卓越波長の平均に近づくことなどの解釈が可能となった。

長谷川・山岡⁵⁶⁾は、池田ら^{53), 54)}の研究では取り扱えなかった蛇行河道に交互砂州が存在する場合の流れを、「流線偏倚作用」の考えに基づいて、河道平面曲率、曲がりに伴う河床洗掘形状および交互砂州の影響の大きさを明らかにすることを試みた。平面曲率のみの場合には、卓越蛇行長は、池田ら⁵⁰⁾の結果に一致する。交互洗掘のみの場合には、条件によって卓越蛇行長が2つ求まる。

すなわち、

$$\frac{40}{9} \left(\frac{AC_f \hat{b}}{\pi} \right)^2 \ll 1 \text{ のとき, } L_p \approx \frac{2\sqrt{6}\pi}{\sqrt{A}} \cdot \frac{h_0}{C_f} \quad (18)$$

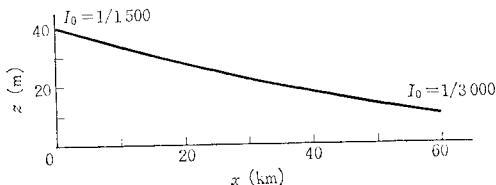


図-8 河床縦断形状

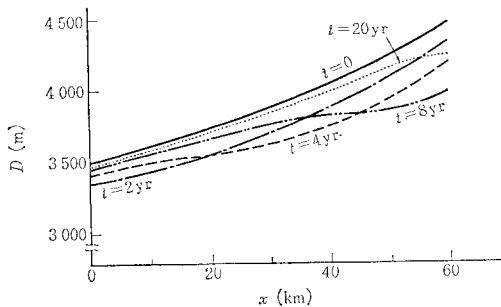


図-9 蛇行波長の時間変化

$$\frac{40}{9} \left(\frac{AC_f b}{\pi} \right)^2 \gg 1 \text{ のとき, } L_p \approx \frac{2\sqrt{2\pi}}{0.795} \cdot \sqrt{\frac{Bh_0}{C_f}} \quad \dots \dots \dots (19)$$

となる。前者は、 $A=2.89$ とすると式 (15) にほぼ等しく、後者は、式 (17) に近い値を示す。

長谷川らの研究は、蛇行の成長に砂州と曲がりの2つの作用が重要であるという木下⁴¹⁾の主張を裏づけるものといえる。しかし、蛇行の発達を「流線の偏倚作用」で議論しているために、河道の変動過程が扱えない。また、蛇行流路内で変形する砂州を固定床と同様に扱っている不十分さも残されている。今後は、このような河床変動を組み入れた蛇行方程式を構築することが課題となる。

c) 河道の平面形状と縦断形状を考慮した理論

福岡・山坂⁵¹⁾は、勾配が緩やかに変化し、任意点の流れがその点の局所勾配に等しい一様勾配流路の流れによって近似できる蛇行の生起場を考え、先述の一様勾配の理論を拡張して変勾配沖積面における流路変動を解析した。このとき、沖積面上にある蛇行波長の時間変化率は、

$$\frac{\partial D}{\partial t} = D \frac{\partial C}{\partial x} - C \frac{\partial D}{\partial x} \quad \dots \dots \dots (20)$$

で与えられ、 φ_0 の時間変化率は次のようにある。

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_0}{\partial D} \left(\frac{\partial D}{\partial t} - C \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \left[\frac{d\varphi_0}{dt} \right]_u - C \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} \quad \dots \dots \dots (21)$$

さきの一様勾配河道で得られた C_0 、 $d\varphi_0/dt$ を用い、式 (20) と (21) を解いた結果を図-8、9 に示す。最終的な蛇行波長は、ほぼ、その点の局所勾配によって定まる卓越波長に落ち着くことがわかる。この研究は、異なる

条件下の蛇行が相互干渉によっていかなる変化を遂げていくかを全体的に表現することに成功しており、蛇行の理論研究に新しい方向づけを与えていている。

6. 今後の課題

今後究明すべき課題は数多く残されているが、そのうち、重要と思われるものを列挙すると次のようである。

(1) 洪水流の三次元的構造

① 洪水流の航空写真観測は、洪水流の流況に関しておびただしい情報を提供してきた。しかしそれは、洪水流の表面流況、しかも瞬時における流況をとらえているにすぎないという制約をもっている。今後はこの制約を補足する河川観測が必要であろう。

② 表面流況について河川流と実験水路の流れの間の詳細な比較検討が必要である。この際、洪水流の瞬間水理量の解釈の方法と、河川における河床の状況や流砂の影響などに関する調査が必要である。また、河川流量の非定常性の影響についての考察も必要である。

③ 三次元流の内部構造について、小規模河床波上の流れは、定性的に解明されたが、定量的に究明することが今後の課題といえる。また、縦渦の強度の定義、流速分布、圧力分布、間欠現象の特性、発達条件 (ripple, 河床上の斜め格子の効果)、維持機構、干渉機構 (流路幅の変化の効果、湾曲流の影響、横断形状や水深の効果、構造物の影響等)、消滅の機構および縦渦と土砂輸送、せん断力、エネルギー消費、拡散などの現象との関係に関する定量的な解明が必要である。その他の渦についても同様の研究を必要とする。

④ レイノルズ数が十分大きくなったときの組織渦の乱流構造の変化は基礎水理学、流体力学の分野で1つの大きな研究課題となっている。河川流でもバースティング現象が存在するという実測例があり、一方、コルク・ボイルや並列旋流など大規模渦は河川流で見出されたものである。両現象のスケール則や相似則は若干検討されたが、これらの組織渦間の関連性や相互作用は依然不明である。河川の河床は、その河床波の峰線が斜め方向に分布したかなり不規則な三次元分布を示す。また、河道の断面形状は各種あり、しかも湾曲あるいは蛇行している場合が多い。

このような複雑な境界条件のもとでの組織渦の変化および三次元流況に対する寄与の問題はほとんど未解明であるが、重要な研究課題と考えられる。

(2) 曲線流路の理論と三次元流れの解析手法

① 流れの三次元構造の解析は始まったばかりである。個々の実験値の説明は可能となりつつあるが、同じ解析手段がどの場合にも正しい結果を与えるかは疑問である。解決を急がれる問題として、まず乱流の表現方法

がある。種々の条件下での乱流に対する、精度のよい測定値の集積が望まれる。

(2) 解析に際して用いられている仮定や近似には、時として内部矛盾があったり、あまりにも恣意的なものがある。平衡状態を仮定すると解析は格段に楽になるが、実験・実測によって平衡状態が確認されたものは数少ない。また、力学的境界条件が二次流発生の主因の1つでありながら無視されがちである点は改良されねばなるまい。

(3) 流線の剝離の生じ得る箇所へも適用できる解析手法の開発も必要であろう。複雑なものになれば数値計算によらざるを得ないが、計算格子の寸法いかんでは小さな構造の二次流が見落とされてしまう。こうした問題の精査も行わなくてはならない。

(3) 中規模河床形態

(1) 中規模河床形態の形成機構に関して、流砂様式(掃流砂・浮遊砂)の相違、小規模河床形態の影響、流砂の非平衡性、流れの三次元性などの諸要素の河床安定性に及ぼす効果を明確にするとともに、増幅率極大の条件によって卓越波長および形成条件を求めることが妥当性を追求する必要がある。

(2) 中規模河床形態の形成条件に関する実験としては、安定論を実証するために、支配要素と擾乱を制御した砂州発生初期の実験が必要である。また、安定論と次元解析による形成領域区分で相違点となっている掃流力の大きい($\tau_* > 0.5$)条件および h/d の影響が不明確となる $h/d > 10^2$ の条件の実験、さらに砂漣・砂堆など小規模な河床波と重なり合う場合の形成条件の実験は検討が残されている。

(3) 砂州の形状および移動特性については、砂州の発生・発達過程、特に波長が決定されるまでの初期過程について明らかにされていない。また、砂州相互の配置と形状特性の時間変化に注目して、砂州の波形、容積変化などについても平衡に至る過程を把握することが望まれる。さらに、平衡状態の砂州については、複列砂州や中間的な形態(準砂州、短対砂州など)の実測値が少なく、交互砂州の平均横断形状(蒲鉾形)との相違も明らかとなっていない。一方、砂州の形状を予測する研究は少なく、特に、平衡波高に関する考察を進展させるために、砂州上の流れと流砂特性に関する研究が必要である。

(4) 砂州に対する河道形状と河川構造物の影響は、砂州の挙動を制御する意味で重要であって、蛇曲水路や堰に関する系統的な実験の成果を理論的に裏づけ、実際河川への適用性を明確にする必要がある。また、堤防の表法勾配、護岸・水制様式など河岸条件が砂州の形状、移動特性に与える影響も系統的な検討を要する課題である。

る。

(5) 中規模河床形態は、小規模河床形態に比して平衡状態に達するのに長時間を要し、かつ空間的スケールが大きいので、実際河川では、流量の非定常性、ダム上、下流のような河床上昇・低下特性、流出土砂量と粒度特性など種々の境界条件の影響を受け、非平衡かつ非一様な状態での砂州の特性が問題となる。こうした実際河川の砂州については、河道条件・水理条件を明確にした精度の高い資料の収集・解析が必要であって、代表河川における観測・調査の恒常化が望まれる。

(4) 蛇行流路の変動過程とその理論

(1) 自由蛇行の理論解析上いくつかの重要な問題が残されている。すなわち、用いられている基礎方程式がどの程度の振幅蛇行まで適用可能であるかの検討、従来主として、側岸部と河床部を分割する取扱いによる解析が行われているが、それを統一的に扱う方法の開発、側岸の浸食、堆積と河床の交互砂州を直接取り入れた蛇行発達の定量的解析法の開発などは特に重要である。

(2) 蛇行実験においては、給砂条件や境界条件、水路の規模、河岸、河床構成材料の特性などが蛇行の発達にどのように影響を与えるかについて系統的な検討を加えるとともに、湾曲・交互砂州上の非平衡流砂現象や掃流力の分布といった基礎的な課題について定量的な解明が必要である。

(3) 実河川における洪水時の交互砂州の運動とそれに伴う水衝部の河岸浸食、洪水引水時の砂州の挙動といった現地測定データの収集が重要であり、そのために現地観測態勢を確立していくかなければならない。

参考文献

- 1) 土木学会水理委員会研究小委員会(研究代表者: 芦田和男): 洪水流の三次元流況と流路形態に関する研究, 昭和57.3.
- 2) 木下良作: 航空写真による洪水流の解析、その乱流構造と表面の流れ方の特性について、日本写真測量学会誌, Vol. 6, No. 1, 1967.
- 3) 木下良作: 大井川河床形態と洪水流に関する検討業務報告書, 建設省静岡河川工事事務所, 1979.
- 4) 宇民 正・上野鉄男: 可視化法による大スケール乱れに関する研究(2), 京大防災研年報, 第20号, B-2, 1977.
- 5) Matthes, G.H.: Macroturbulence in Natural Stream Flow, Trans. A.G.U., Vol. 28, No.2, 1947.
- 6) Nakagawa, H. and Nezu, I.: Prediction of the Contribution to the Reynolds Stress from Bursting Events in Open Channel Flows, J. of Fluid Mech., Vol. 80, 1977.
- 7) Nakagawa, H. and Nezu, I.: Structure of Space-Time Correlations of Bursting Phenomena in an Open Channel Flow, J. of Fluid Mech., Vol. 104, 1981.
- 8) Allen, J.R.L.: Physical Processes of Sedimentation, George & Unwin, ch. 2, 1970.
- 9) Karcz, I.: Reflection on the Origin of Source: Small-Scale Longitudinal Streambed Scours, Fluvial Geomorphology, (ed. M. Morisawa), ch. 7, 1973.

- 10) Allen, J.R.L. : Bed Forms due to Mass Transfer in Turbulent Flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 49, 1971.
- 11) 木下良作：大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験、建設省静岡河川工事事務所, 1980.
- 12) 深見親雄・馬場亨：模型実験による低水路計画（信濃川を例として）、土木学会年譲 II, 1977.
- 13) 坂野章・山本晃一・高橋晃：石炭粉を使った河川移動床模型における二、三の試み－斐伊川模型実験を通して、土木学会年譲 II, 1980.
- 14) Einstein, H.A. and Huon Li. : Secondary Currents in Straight Channels, *Trans. AGU*, Vol. 39, No. 6, 1958.
- 15) Liggett, J.A., Chiu, C.L. and Miao, L.S. : Secondary Currents in a Corner, *Proc. ASCE*, Vol. 91, HY 11 Nov., 1965.
- 16) Chiu, C.L., Lin, H.C. and Mizumura, K. : Simulation of Hydraulic Processes in Open Channels, *Proc. ASCE*, Vol. 102, HY 2, Feb., 1976.
- 17) 吉川秀夫・池田駿介：正方形断面を持つ直線水路の速度分布に関する研究、土木学会論文報告集, 第250号, 1976年6月。
- 18) Gerard, R. : Secondary Flow in Noncircular Conduits, *Proc. ASCE*, Vol. 104, HY 5, May 1978.
- 19) Perkins, H.J. : The Formation of Streamwise Vorticity in Turbulent Flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 44, Part 4, 1970.
- 20) 黒木幹雄・岸力：開水路に発生する縦渦の構造の研究、土木学会論文報告集, 第312号, 1981-8.
- 21) Hawthorne, W.R. : Secondary Circulation in Fluid Flow, *Proc. Roy. Soc.*, A 206, 1951.
- 22) Leschziner, M.A. and Rodi, W. : Calculation of Strongly Curved Open Channel Flow, *Proc. ASCE*, Vol. 105, HY 10, 1979.
- 23) Engelund, F. : Flow and Bed Topography in Channel Bends, *Proc. ASCE*, Vol. 100, HY 11, 1974.
- 24) Kikkawa, H., Ikeda, S., Ohkawa, H. and Kawamura, Y. : Secondary Flow in a Bend of Turbulent Stream, *Proc. JSCE*, No. 219, 1973.
- 25) Kalkwijk, J.P. Th. and de Vriend, H.J. : Computations of the Flow in Shallow River Bends, *J. Hyd. Res.*, IAHR, Vol. 18, No. 4, 1980.
- 26) 長谷川和義：直線および蛇行流路内の発達した砂州上の流れ、第36回年譲 II, 1981.
- 27) 林泰造：蛇行論、水工学夏期研修会講義集, B-16, 1970.
- 28) Engelund, F. and Skovgaard, O. : On the Origin of Meandering and Braiding in Alluvial Streams, *J. Fluid Mech.*, Vol. 57, 1973.
- 29) Fredsøe, J. : Meandering and Braiding of Rivers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 84, Part 4, 1978.
- 30) 黒木幹男・岸力：沖積河道の流路形態の領域区分に関する研究、第26回水理講演会論文集, 1982.
- 31) 蝶川登：実験水路における交互砂州（砂れき堆）の形成条件、土木学会論文報告集, 第207号, 1972.
- 32) 池田宏：実験水路における砂礫堆とその形成条件、地盤学評論, 46-7, 1973.
- 33) 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.
- 34) 泉岩男・池谷浩・伊巻幹雄：急勾配水路における砂礫堆について、新砂防, No. 109, 1978.
- 35) 藤田裕一郎・村本嘉雄・堀池周二・小池剛：交互砂州の発生機構、第26回水理講演会論文集, 1982.
- 36) 木下良作・三輪式：砂れき堆の位置が安定化する流路形状、新砂防, 94, 1974.
- 37) 三輪式：天端傾斜ゼキによる砂れき堆の安定化に関する実験、農業土木学会論文集, 85, 1980.
- 38) Leopold, L.B. and Wolman, M.G. : River Channel Patterns-Braided, Meandering and Straight, U.S. Geological Survey Professional Paper, 282 B, 1957.
- 39) Schumm, S.A. : Sinuosity of Alluvial Rivers on the Great Plains, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 74, 1963.
- 40) たとえば、吉川秀夫：河川工学、朝倉書店, 1966.
- 41) 木下良作：河床における砂礫堆の形成について、土木学会論文集, 42号, 1957.
- 42) 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.
- 43) 藤田裕一郎・村本嘉雄：流路形態の形成過程に関する研究、京都大学防災研究所年報, 第23号, B-2, 1980.
- 44) 池田駿介・宮下修一：斜面における砂の移動について、第25回水理講演会論文集, 1981.
- 45) 長谷川和義：非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究、土木学会論文報告集, 第316号, 1981.
- 46) 平野宗夫：拡幅を伴う流路変動について、土木学会論文報告集, 第210号, 1973.
- 47) Lundgren, H. and Jonsson, I.G. : Shear and Velocity Distribution in Shallow Channels, *Proc. ASCE*, Vol. 90, HY 1, 1964.
- 48) 藤田裕一郎：沖積河川の流路変動に関する基礎的研究、京都大学博士論文, 1980.
- 49) 沢井健二・芦田和男：粘着性流路の浸食と横断形状に関する研究、土木学会論文報告集, 第266号, 1977.
- 50) 池田駿介・日野幹雄・吉川秀夫：河川の自由蛇行に関する理論的研究、土木学会論文報告集, 第255号, 1976.
- 51) 福岡捷二・山坂昌成：側岸の浸食・堆積による蛇行発達の理論、土木学会論文報告集, No. 327, 1982.
- 52) 池田駿介・G. Parker・沢井健二：河川の蛇行に関する統一見解、第24回水理講演会論文集, 1980.
- 53) Ikeda, S., Parker, G. and Sawai, K. : Bend Theory of River Meanders. Part. 1. Linear Development, *J. Fluid Mech.*, Vol. 112, 1981.
- 54) Parker, G. : On the Cause and Characteristic Scales of Meandering and Braiding in Rivers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 76, Part 3, 1976.
- 55) 芦田和男・沢井健二：裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(3)－流路の3次元形状－、京都大学防災研究所年報, 第20号B-2, 1977.
- 56) Hasegawa, K. and Yamaoka, I. : The Effect of Plane and Bed Forms of Channels upon the Meander-Development, *Proc. JSCE*, No. 296, 1980.

(1984.3.12・受付)