

移動床水理現象のとらえ方 －研究の展開と成果の適用－

岐阜大学工学部土木工学科教授

藤田 裕一郎

土 木 学 会
水 理 委 員 会 ・ 海 岸 工 学 委 員 会
2000 年 8 月

移動床水理現象の捉らえ方 - 研究の展開と成果の適用 -

Toward Hydraulic Phenomena of Movable Bed
- Tendency of Researches and Applications -

藤 田 裕 一 郎
Yuichiro FUJITA

1. はじめに

「移動床」という語が「固定床 rigid bed, fixed bed」に対して用いられていることは論をまたない。流体に境界を与えている面に「床」との語をあてるのも、境界が流れよりも下方に在って、あたかも流れがその上に横たわっていることを暗黙の前提としていることによっており、この言葉には、自然界に、というよりも「地表」に普通に存在する水や空気の流れを対象としている姿勢が明らかである。「移動床」は、こうした流れが強さを増せば容易に形状が変化する境界のことであり、風によって風紋 sand ripples が発生し、嵐によって砂丘 barkhan dune の様相が変わる砂漠の表面も代表的な移動床である。この意味で、英語では, movable bed あるいは mobile bed の語がより一般的であるが、それらとともに、水理学・水工学や地形学・自然地理学の分野では alluvial bed という言葉もしばしば目にとまる。それが用いられていることから、対象が河川の移動床、河床、に限定されていることが判る。ここでも、移動床水理現象という言葉は、河床とその続きである河岸における水にまつわる現象としている。

河床が移動床であることは、土佐物語に引用されている飛鳥川の歌を思い浮べるまでもなく、古来から認識されていたことで、舟運の維持のために出水毎に滞り位置が調べられ、古くから淀川では、座礁の防止も主目的であった滞標（みおつくし）が設置されていたことも広く知られている。舟運の発達したヨーロッパでは、こうした航路測量の結果として、例えばライン河では、弯曲部、蛇行部ばかりではなく、図1や図2のように、直線的な河道区間でも水面下の河床に（交互）砂州が形成され、それが下流に移動していくことが19世紀には実証されていた（井口、1979）。河川での航路維持の立場から、砂州に関する移動床実験が当時から試みられていたことも井口によって紹介されている。

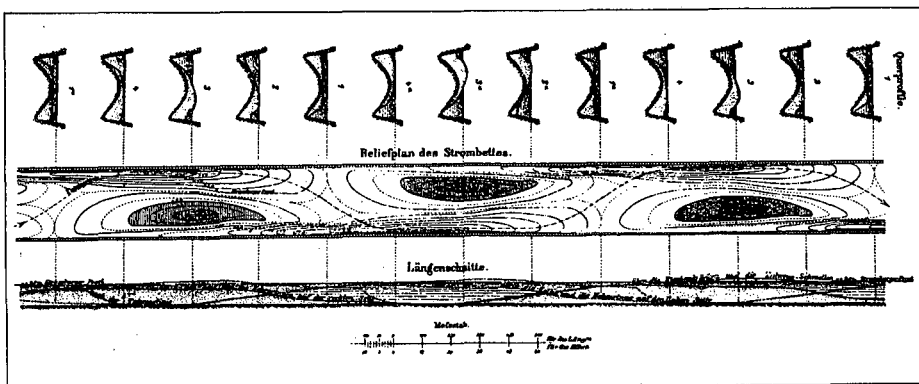


図1 ドイツのライン川上流部の河床形態の模式図（井口、1979）

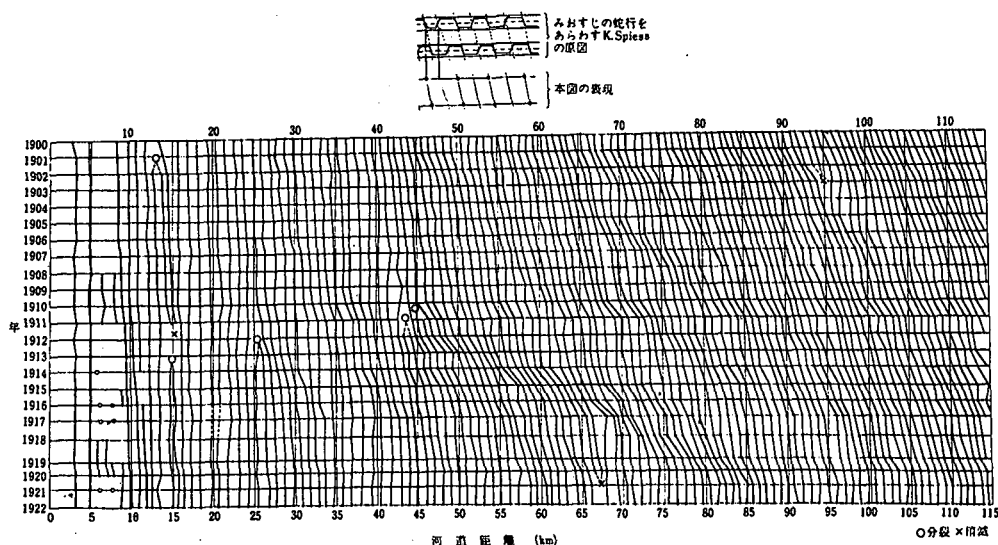


図2 ドイツのライン川上流部の最新部の走時曲線（井口，1979）

このような実際的な実験研究が、水理学、河川工学のほとんどの教科書に載っている Shields の限界掃流力の研究に用いられた移動限界に関するいくつかの基礎実験にどのように繋がっていったか、というような研究の流れについては、残念ながらこれまで調べる余裕を持てなかった。20世紀から21世紀の移動床水理の発展を見据えるには、こうした初期からの研究の系統を丁寧に追跡しておくことも重要かもしれない。ただ、Gilbert や WES などによる流砂量実験資料が重用されてきたことから類推されるように、メカニズムの解明の進行状況にかかわらず、丹念な広範囲の実験や観測、事実の入念な記述は、後年の研究の展開を大いに助けることになるのは確実であろう。

さて、移動床水理現象の捉え方となると、系統的なあるいは標準的なものはアドヴァンストな内容まで記述された水理学や河川工学の教科書に記述されているものであろう。それは、おおよそ、流送土砂の性質、その移動限界、河床形態、流砂量、河床変動、流路変動、の順にまとめられていて、内容の深度は書物の専門性に応じて相違している。そのような系統的な移動床現象の学び方からは少し離れ、移動床現象が課題の中心となるかいくつかの問題についてその見方を考えていこう。

2. 移動床水理現象と関連する問題

上にも述べた通り、移動床は流れによって変化する境界であるので、河川においてそこでの現象が人々、あるいは技術者、研究者の関心を引くのはやはりその境界である河床および河岸の変化が著しくなったり、なると思われるときであり、また、少しの変化でも何等かの支障が人間の活動や河川の環境にもたらされたり、もたらされると予想されるときであろう。この河床や河岸の変化には、その位置が移動したり、表面の状態や様相がそれまでと異なってくることの両者があるが、後者については、水質汚濁によって底質が無酸素状態になったり、微生物の付着膜が形成されるような化学的、生物学的な変化までは含めないことにする。すなわち、水理現象とは、元来力学的な要因によって水を中心とした場に生起する事象であると理解されるので、流れの力によって境界を構成していた物質が移動状態に移されたり、移動状態にあった物質が停止して境界に沈積することによって生じる変化を移動床水理現象と考える。なお、水理学は hydraulics の土木工学分野における訳語であり、機械工学分野では水力学と訳されていて油圧現象もとくに区別することなく含まれていることは周知のこととであって、この相違からも自然界に密着した土木工学の特質を見ることが出来る。

このように考えると、移動床水理現象には、主に境界の形状や位置が変動する場合と境界表面の状態が変化する場合があります。前者が広い意味での「河道の変動」であって、それは時間的・空間的スケールや変動速度の相違から、通常、「河道変遷」、「河床変動」、「局所洗掘（局所的に堆積もあるが）」に分けて考えられていて、河道変遷が狭い意味での河道の変動と見なされている。後者には、洪水で植生が剥ぎ取られたり、逆に流木が沈積することも入るが、一般的には、アーミングあるいはアーマーコートの形成として知られている「河床の粗粒化」、および逆に河床の間隙がより微細な土砂で埋塞される細粒化がある。移動床水理現象がこれらのように具体的に示されてくると、関連して問題あるいはその解明が課題となるのは、洪水による河川災害の防止軽減対策を立てるときや、その繰返しともいえる長期的な地形の変化を予測する場合であったり、また、人為的に加えざるを得ない河川や流域の改変に対する影響の評価を行う場合であることも分かる。これらは主に工学的・技術的な観点からの課題であり、理学的・自然科学的な立場では、以上の諸現象の解明自体が興味の対象であり研究課題となることは説明を要しないであろう。このことは、しかしながら、工学的な面での研究が自然科学的な立場での研究と無関係に展開されてきたというのではない。水理学研究の現況を見ても、むしろそれらの成果をできる限り導入し、実的な目的に適用可能なように咀嚼する努力が続けられてきたと見ることができる。

3. 移動床水理研究の展開と成果の適用

それほど意識しないで付けた副題「（移動床水理現象に関する）研究の展開と成果の適用」は、これまで記述してきたことから容易に理解して貰えるように、とてつもない誇大表示であつたとお詫びせざるを得ない。今世紀における移動床水理現象に関する研究の展開の全貌を振り返ることは、最初にも述べたように、遙かに能力を超えたことであり、戦後といわず最近の10年余りに限定してもほとんど不可能なことである（藤田, 1999）。そこで、研究の展開や成果の適用の動向の説明について安易な方法をとりたい。

水理学に関する基礎的な研究成果の実際への適用を図っていくという面では、昭和23年以来これまで6回にわたって版を改めながら刊行されてきた(社)土木学会水理委員会編水理公式集に勝るものはないといえよう。また、応用的な研究、あるいは実地に即した研究の成果の適用という面では、昭和33年に初版が発行された建設省河川砂防技術基準（案）が網羅的で最もまとまっており、よりコンカレントなものに土木技術資料があるが、以下では、昭和38年増補改訂版、同46年版、同60年版および昨年刊行された平成11年版の水理公式集によって、移動床水理学に関する研究成果の適用についてその特徴を概観しよう。

昭和38年増補版の水理公式集では、第1編河川の1つの章[1.6]が流砂という標題で移動床水理に関する項目に充てられている。内容は表の通りであって24ページの記述と、全体578ページの僅か1/24にしか過ぎない。同46年版になると、第1編基礎編の14章で土砂生産、流出が取上げられ、第2編河川編では5章と6章とがそれぞれ流砂と河床の変動と局所洗掘とに充てられ、総計38ページで全体597ページの1/15.7となっている。同60年版では、第1編基礎水理編からは移動床に関する項目は無くなったが、第3編河川編には、5、6、7章がそれぞれ流砂、土砂生産と流出、河床変動に充てられており、さらに、8章の河川構造物の水理で局所洗掘が取上げられて、約60ページと598ページの1割を占めるようになっている。平成11年版では基礎水理編が無くなり、水環境編が新たに加えられて682ページと従来版に比較して14%も記載内容が増加したが、第2編河川編では、第3章土砂生産と流出土砂量、第4章流砂量の評価手法、第5章河床変動と河岸浸食、第6章河川構造物、最終第7章河川環境まで、移動床と関わりのある事項が100ページ近くに及んで全体の1/7に達している。昭和38年版では100ページ以上、全体の1/6以上が充てられていた洪水流出や洪水流の測定・解析の割合は、水文編と河川編のみに分れた平成11年版でもほぼ同じであることに對して、この30数年間に移動床水理に関する研究が非常に進展したことを物語っている。その背景には、終戦から昭和30年代前半にかけて頻発した洪水災害に対処するために、洪水流の規模の推定に集中して割かれていた研究者・技術者の力が大きな成果を挙げていったことによって、昭和35年からの高度成長期に増加した土工技術

者・研究者の相当部分が流砂，移動床水理研究に従事することが可能となったことがあると考えられる。

水理公式集では，水平路床上の移動限界については昭和38年から基本的に変っていないが，掃流砂，浮流砂では，新たな流砂量式，有効掃流力，混合粒径効果，流砂の非平衡量性，乱流拡散係数，基準点濃度の取扱いなどに見られるように，移動床水理現象の研究結果が順次付加されてきて上述の活況を呈することになった。さらに，河床変動，河床形態，流路形態に着目してそれらの特色を示すと表1のようになろう。河床形態や流路形態の形状特性や形成機構が把握されるとともに河床変動の取扱いが進展して，その内容は版を重ねる毎に拡充されている。これには，流れの2次元数値解析の発展が大きく寄与していると思われる。同時に平成11年版では，側岸浸食現象が一層大きく取上げられ，その一方で，安定流路について記述の比重が下がっている。日本のように，平水時と洪水時で余りにも流れに差のある自然では，現実的に安定流路は達成されず，河川はある幅の中で常に変動を繰返すものとの認識になりつつあるのかもしれない。

表1 水理公式集に見る「河床変動，河床形態，流路形態」の記述の変遷

	河床変動	河床形態	流路形態
昭和38年版	1次元	---	---
昭和46年版	1次元 拡散型方程式	小規模	安定流路 (動的・静的平衡)
昭和60年版	1次元 2次元(側岸浸食のみ)	小規模・中規模	側岸浸食，蛇行流路 安定流路
平成11年版	1，2次元直線流路 2次元蛇行流路	小規模・中規模	側岸浸食，蛇行流路

水理公式集とともに，移動床水理に限らないが，水理学研究の進展を跡付けているものに水理委員会に設置されてきたそのときどきの課題についての研究小委員会の報告書がある。移動床水理の関連では，「移動床流れの粗度と河床波」研究小委員会（林泰造委員長，1972），「洪水流の三次元流況と流路形態」研究小委員会（芦田和男委員長，1982），「流砂量と河床形状」研究小委員会（村本嘉雄委員長，1990）があり，それぞれの小委員会の中には複数の分科会が設けられて，主査を中心にその時点の所謂 state of the arts について議論された結果が報告書にまとめられ，また，土木学会論文集にはその概要がかなり詳しく報告されている。さらに，このような討議を経てはいないが，水理委員会基礎水理部会による「水理講演会十年の歩みとこれからの基礎水理学の展開－基礎水理部会」（辻本哲郎部会長（当時），1999）には，移動床も含めた水理学研究の最近の動向が19人の中堅研究者によってそれぞれの得意分野について紹介されていて，今後研究を進めていく上で，同時に，現在の最新の成果を実際に適用していく上で参考となる知見を得ることができる。その中で，「河岸浸食・河床形態・流路形態」に関する近年の研究動向をまとめたが，その特徴は次のようである。

表2，表3のように，1987年から1997年の11年間の合計では，河床形態のみを対象とした論文が73編，流路形態のみのものが45編，河岸侵食のみ17編であり，いくつかに股がるものは合計で30編である。3つのテーマのうち，「河岸侵食」に関する発表は他に跨るものを加えても29編と少なく，多い年次で4，5編の発表がなされている。また，「流路形態」についての発表は全て合わせると75編に上り，やはり流砂が募集課題となった年次の編数が少ないが，経年的に一定の傾向はなくて先に指摘した課題制の効果が覗える。同様の傾向は，合計94編と発表の最も多かった「河床形態」に関する研究編数の変動にも明確である。結局，発表数の多い年次についてみると，これら3テーマの内訳割合は11年間における総数の内訳割合と大体同じであり，いわば steady に研究テーマが取り上げられきていたことがわかる。これは，何もこれらの研究の内容や手法に進歩や新しい展開がなかったこと示している訳ではなく，この11年間においてこれら3テーマの

表-2 研究テーマ別の発表数の推移

年 次	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	合計
全体の発表数	136	108	111	122	115	119	141	139	144	188	189	1512
関連の発表数	21	8	18	14	10	17	13	6	17	23	18	165
流路形態のみ	5	3	3	7	4	1	7	0	4	6	5	45
流路河床両者*	3	0	2	1	0	6	0	0	5	0	1	18
河床形態のみ*	12	4	12	4	4	8	1	4	4	13	7	73
河床河岸両者*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
河岸侵食のみ	1	1	0	2	1	2	4	1	1	1	3	17
河岸流路両者	0	0	0	0	1	0	0	1	3	3	1	9
三 者*	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	3

表-3 河床形態を取り上げた研究発表数の推移

年 次	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	合計
河床形態関連	15	4	15	5	4	14	2	4	9	13	9	94
小規模河床形態	7	3	10	3	3	4	1	4	3	4	3	45
中規模河床形態	3	0	5	2	1	9	1	0	6	6	5	38
両 者	5	1	0	0	0	1	0	0	0	3	1	11

重要性・必要性にほとんど変化がなかったことを意味している。

研究を基礎的なものと応用的なものに分けてみるなら、lower regime の小規模河床形態に関する研究は流水抵抗と流砂量の評価の面のみが応用的な側面であって、個別的・問題解決的な研究は行い難いという特質を有しており、これが上述の近年における研究発表の減少に繋がっている可能性がある。これに対して、中規模河床形態－流路形態－河道変動現象についての研究は、河道変遷の特徴、プロセスとメカニズム、現実の問題と対策・制御、構造物(へ)の影響、という具合に、基礎的な面から応用的な面まで研究対象が広がっており、数値計算の発展がこの傾向に拍車をかけている。なお、流路形態に関連しては、二次流の制御による河床変動制御の研究が引続き行われているが、これも基礎研究の成果を現実の河川に適用していこうとする努力の現れとみることができる。

元来、洪水時における河床や河道の変動過程を対象として行われてきたこの分野の研究は、これまで河道の制御と安全の確保に直結した「治水」に関連したものに限られていたといって過言でない状況であって、利水に関連して河床形態や流路形態が研究された例は、時折報告される取水施設の維持に関するものを除いて皆無に近いようであった。しかしながら、河川の環境機能に対する昨今の関心の高まりから、偏りやバラツキのあることを内包している「多彩」とか「多様」とかいう言葉が善しとされ、河川を河川らしく見せている「流路形態」や「河床形態」の平水時の機能が着目されて、この機運が上述の発表数にも現れている。実際、河川の生態環境には、水際あるいは水面からの(水平・鉛直)距離が最大の支配要因となっており、河道や河床に凹凸を持たせる「流路形態」や「河床形態」が多彩な環境を提供していることは間違いないところである。

このように、流路形態や河床形態に関する研究は平水時を対象とした研究も増加してきているが、「河岸侵食」に関する研究は、当然のことながら、洪水時を対象とした研究に限られている。河岸の侵食機構については、斜面上における砂粒移送の研究が1980年代にほぼ一段落し、この11年間に新たな展開を浮遊砂・ウオシュロードの河岸域への輸送を考慮した研究、植生の影響の解明、河岸斜面の安定評価等に求めている。すなわち、実験室のできるだけ条件を単純にして、現象の本質を把握し、その機構を明確にしようとする基礎的な研究から、現地により複雑な条件にある実現象の様々な様相に着目して、浮遊砂の河岸域での堆積による高水敷の形成、侵食とのバランスを考慮した安定流路の形成、植生による河岸侵食の抑制効果についても検討され、また、類似の問題として、堤体表面の流水侵食に対する植生被覆の効果も定量化されつつある。

学術的な場での発表を目指した実験は、現象の本質や基礎特性の把握・解明を第一義として、理想化(必

表-4 研究の形態・手法別に見た発表件数の推移

年 次	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	合 計
全 体	21.0	8.0	18.0	14.0	10.0	17.0	13.0	6.0	17.0	23.0	18.0	165.0
調査・資料解析(F)	4.0	0.0	6.0	4.6	5.0	1.2	3.6	2.6	3.4	7.6	6.0	44.0
基礎・模型実験(E)	11.4	6.0	7.0	5.6	2.0	10.4	5.4	0.8	6.2	8.4	7.2	70.4
理論・数値解析(A)	5.6	2.0	5.0	3.8	3.0	5.4	4.0	2.6	7.4	7.0	4.8	50.6
数値計算の割合(%)	16.7	0.0	0.0	37.5	33.3	50.0	60.0	0.0	37.5	71.4	80.0	38.3
同 上 (件数比)	1/6	0/3	0/6	3/8	1/3	3/6	3/5	0/3	3/8	5/7	4/5	23/60

表-5 各研究テーマにおける研究形態・手法の推移 (重複を許している)

年 次	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	合計
全 体	21.0	8.0	18.0	14.0	10.0	17.0	13.0	6.0	17.0	23.0	18.0	165.0
流路形態関連	8.0	3.0	6.0	8.0	5.0	7.0	8.0	1.0	12.0	9.0	8.0	75.0
F	2.0	0.0	3.4	2.0	3.0	0.0	1.6	1.0	1.0	2.0	3.0	19.0
E	4.4	2.6	2.0	4.2	1.0	4.6	4.4	0.0	4.6	3.0	3.0	33.8
A	1.6	0.4	0.6	1.8	1.0	2.4	2.0	0.0	6.4	4.0	2.0	22.2
河床形態関連	15.0	4.0	15.0	5.0	4.0	14.0	2.0	4.0	9.0	13.0	9.0	94.0
F	3.0	0.0	5.0	3.0	1.0	0.0	0.6	1.0	1.4	5.0	4.0	24.0
E	7.0	3.4	5.6	1.0	1.0	9.0	0.4	0.4	3.2	5.0	3.2	39.2
A	5.0	0.6	4.4	1.0	2.0	5.0	1.0	2.6	4.4	3.0	1.8	30.8
河岸侵食関連	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	5.0	2.0	4.0	4.0	5.0	29.0
F	0.0	0.0	0.4	0.6	2.0	1.2	2.6	1.6	2.0	0.6	2.0	13.0
E	1.0	0.0	0.6	0.4	0.0	0.8	1.4	0.4	2.0	1.4	1.0	9.0
A	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	2.0	2.0	7.0

ずしも単純化ではないが通常は一致)された条件下で進められることが多く、これがこれまで基礎実験による研究成果の現地への適用を難しくしてきたことは否めない。一方、現地のような具体場での問題では、様々な条件が現象に影響を与えている可能性があり、かつ、全ての条件が顕在化してとは限らないので、その整理は極めて重要であり、慎重に行われる必要があつて、現地実験の結果の容易な一般化は避けるべきである。いずれにしても、基礎的な知見を多量に蓄積してきたこの分野の研究が、最近、現地での具体的課題をどんどん取り込んできていることは非常に望ましい。

基礎的な研究成果の実際問題へ適用を容易にしてきた背景には、河床変動や流路変動にかんする数値シミュレーションの発達があるのは想像に難くない。実際、表-4から判るように、解析の占める編数には経年的に実験の場合のような大きな変動はないが、その中で数値シミュレーションの占める割合は明らかに高くなる傾向を示し、96、97の2ヶ年では70から80%となっている。内容的には、河床変動に関する数値計算は水平2次元が標準となり、1次元の計算は長期間・長区間を対象とするもの以外では行われることが稀になっている。さらに、局所的に侵食・洗掘が進行するような蛇行流路の洪水時を取扱う場合には、2層から多層に分けた疑似3次元の河床変動計算も行われるようになっており、河岸侵食に応じて座標を移動させるようなシミュレーションも実施されている。こうしたモデルの中で用いられている各種の式は、この11年間よりも以前の研究において定式化されてきたものがほとんどであつて、ここにも蓄積された知見の具体化の波を見ることができる。

各研究テーマ毎の研究形態の推移を表-5に示している。11年間の通算では、発表数の少ない河岸侵食関連の研究のみ既に指摘したように現地調査の比重が高くなっている。一方、流路形態関連と河床形態関連の研究は、ともに、実験―解析―調査の順で全体と同じ順になっており、その比率にも大差がなく、かつ、最近の2、3年では実験の比重が下がっていて、その分数値シミュレーションが多くなっていると見られ、両者の研究形態・研究手法が非常に似通っていることが分かる。この点は、小規模河床形態と中規模河床形態に分けて検討すれば若干変わった傾向になる可能性があるがここでは行っていない。ただ、このような流れの中で「実験を行いました。ではシミュレーションしましょう。合いましたからよい成果です。」というよう

な形で、実験結果に合致させるためだけの安易な数値シミュレーションがかなりあるのではないかと危惧を捨てることはできない。やはり、数値シミュレーションは、理論展開の検証や、残念ながら小規模で行わざるを得ない通常の実験の成果を実際に適用させていくための重要な手段であることを忘れてはならない。

4. 移動床水理現象の捉え方について

河川の変化は、放水路やショートカットなどの新川掘削のような大規模な人為的改変まで含めると極めて幅の広いものである。しかしながら、移動床水理現象の結果生じる変化は、わが国を始めとする、温帯域、モンスーン域では、一般に洪水時を中心とした水流の作用によるものであって、それが先に述べた河川の道筋の変化という広い意味での「河道の変動」である。

この河道は、見方を換えれば、降水が集中して流れ下る経路であり、同時に降水が持っている位置エネルギーを集中して作用させる場でもある。このエネルギーは最終的には渦乱として熱エネルギーに変換され消散していくが、様々なスケールの渦乱の発生は流水の境界を構成している物質が流水に及ぼす作用力によっている。その反作用として境界構成物質は流水から力を受け、その力は境界面に垂直な成分と平行な成分に分けることができる。そのうち、前者は流水の支持反力として働いて通常仕事をしないため、流水のエネルギー損失とは無関係となり、後者のみが所謂「河川の作用力」として境界構成物質を移動状態に移し、その状態を継続させることで境界形状を変化させて種々の河道の変動を引き起こす。一方、河道境界の構成物質は、岩盤が古いものから新しいものまでの土砂堆積物であり、風化が進んでいる場合を除いて、一般に、新しい堆積物ほど量的、規模的、また速度的にも容易かつ顕著に移動状態に移される。洪水災害で第一に問題になるのはやはり、こうした沖積土砂のような固結していない土砂の移動である。

さて、河道の変動を時間的・空間的スケールで分類すると以下ようになる。

①河道が左・右と横方向に移動して沖積地を形成していく、図3のような場合が最も河川の挙動の自由度が高く、変動の規模が大きい。これが狭い意味での「河道の変動」であって、「河道変遷」ともいわれる。
②近年のわが国のほとんどの河川のように、河道が堤防や護岸で明瞭に区別されていると、大洪水の場合を除いて河道変動の範囲は兩岸の堤防・護岸の間に限定され、その変化は河床の上昇・低下のみとなる。そこで、この変動は「河床変動」と呼ばれるが、無論河床変動が河道の幅方向に一樣に起こることはないので、平水時の水流は瀬や淵を形成し、網状流路のように分岐や合流を繰返すこともある。
③このような河道に支川が合流したり、弯曲部が形成され、あるいは構造物が設置されると、局所的な流れの偏りが著しくなると多くの場合河床に極度の深掘れを生じる。この現象が「局所洗掘」と呼ばれるもので、規模が小さいので自然的にも人為的にも生じやすいが、河岸近傍で起これば河岸浸食を誘発・激化するなどその影響が広く及んでいく場合もある。つぎに、移動床水理現象のうち、最も顕著に現れる浸食現象について見てみよう。

(1) 浸食現象の本質

流水から見た浸食現象とは、境界を構成物質側に後退させることであり、通常の河道では土と水との境界面で生起するので、その正確な理解には、水の流れとともに土の挙動に関する知識も要求される。しかしながら、沖積土砂が境界を構成している大半の河道では、土砂が個別粒子として挙動する場合も多く、この場合の境界面の浸食（および堆積）は土砂の移動量の不均衡に起因する。河道は平面的に広がっているため、数学的にはこの不均衡は2次元的な土砂移動量フラックス（流砂量フラックス） q_s の発散で次式のように表され、現象の記述の精度はこの流砂量フラックスの解明に依存している。古くから取組まれてきた流砂量に関する研究がその最も基礎的な部分である。

$$(1-\lambda) \partial z / \partial t + \nabla q_s = 0$$

ここに、 λ は河床の空隙率、 z は河床高、 t は時刻である。上式を解くために、浸食・洗掘現象に特徴的な境界形状や流れの解明に基づいて様々な工夫が導入されている。

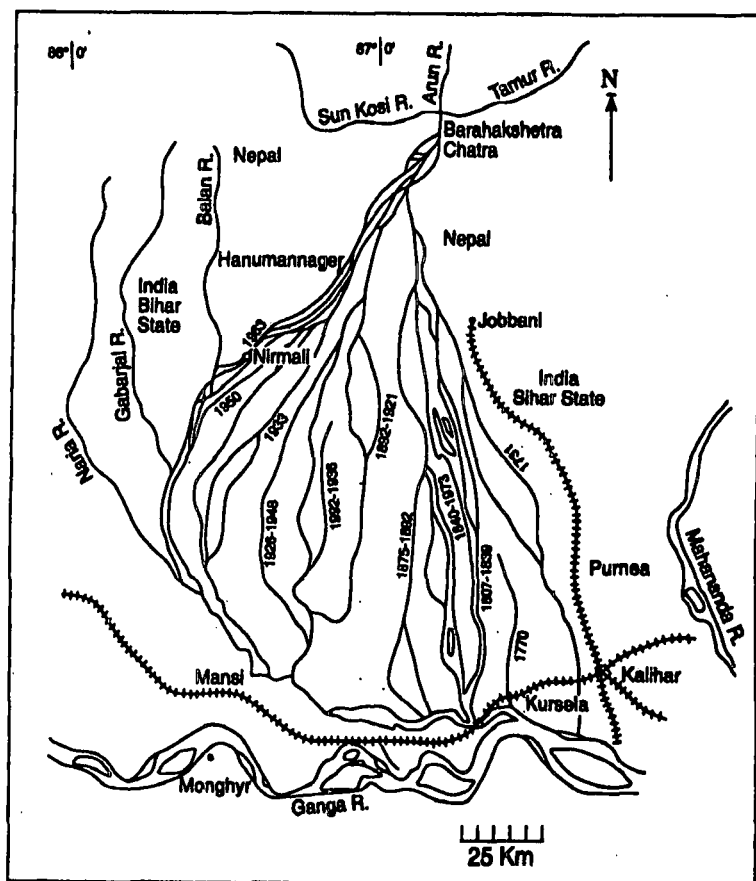


図3 ガンジス河の支川・コシ河（インド）の河道変遷

浸食現象において、土砂を移動させるように働く力は流体力と重力しかなく、重力が現象に実際的な影響を持つのは、境界形状の勾配がかなり大きいときのみである。一方、それらに対する抵抗力は、境界構成物質の材料特性に依存した慣性力、摩擦力、粘着力である。ある個所においてこれらの力が組み合わされた結果として、流砂量フラックスの発散が近似的にも0となる場合は、作用力が移動を生じさせることができないほど小さい（移動限界未満の流送能力の）場合を除いて事実上皆無である。また、河床洗掘現象は、流砂量フラックスの大きな発散が局所的に発生して、その点の河床が急激に低下していくことを指していて、弯曲部とともに、堰・床止め、橋脚、水制のような河川構造物による流れの急激な変化が原因になる場合が多い。一方、河岸浸食は現象の一部が流水外でも生じる点、境界に勾配の大きい部分のあること、微細土砂が堆積しやすいという河岸の特性から粘着力を有する材料を含んでいる場合の多いことなどが特徴である。

(2) 自然河川の浸食現象

河床や河岸は合い接していて、ともに同一の洪水によって同時に浸食や洗掘を受け、かつ、前項で述べたように共通する面も多い。しかし、力学機構の面では、重力と粘着力の役割の比重が河床と河岸とは異なり、浸食・洗掘防止構造物の作用も差異が大きいため、ここでは個別に説明する。

a) 河床の浸食

通常の河床面は河岸斜面に比べると流下方向、横断方向とも勾配が緩やかでほぼ水平と見なされることが多い。このため、流砂量フラックスの発散が浸食性災害に繋がるほど大きくなるには、流水の集中・発散を激化させる要因が必要で、かつ、それが期間の持続しなければならない。その主な要因には、流路弯曲、

河道砂州、構造物が挙げられ、自然状態では移動床流れの不安定性によって起きる前2者のみが存在する。これら2者の影響で河床の浸食や洗掘が進行しても、それが構造物の機能低下や河岸の後退に繋がらないかぎり問題は生じない。そのために護床工や護岸が設置されており、被害が発生するのはこうした構造物の損壊後であり、また、構造物の基礎を「根浮き」状態にしてその安定性を損なう長期間の河床低下も砂利採取や上流部における大規模横断構造物の建設等人為的な要因が大きい。結局、洪水時の河床の浸食災害については、構造物と切り離した議論のみでは余り意味のないことになる。

b) 河岸の浸食機構

河岸浸食は直接堤防の破壊や土地の流失に繋がるので、自然状態の機構の解明が重要となるが、その様相は河岸材料の粘着性の有無で大きく異なっている。河岸材料が砂質土で土質強度的には粘着力が無視される場合でも、不飽和状態にあると毛管引張力が働き、また、乾燥している場合でも僅かに含まれている微細土砂のセメンテーション効果で河岸上部は切り立っていることが多い。一方、数cm以上の平均径の石礫で構成される河岸は、通常安息角から静止摩擦角の勾配の斜面となっているが、ときには扁平な石が積み重なり、その咬み合わせで直立していることもある。

河岸材料に働くいわゆる見かけの粘着力は河岸が水没して間隙空気が排出されるとほとんど消失し、多くの切り立った河岸は水没するだけで崩壊する。しかし、この崩壊は一時的なもので、崩れ落ちた土砂が流送されない限り緩勾配となった斜面は安定で崩壊は継続せず、浸食には結びつかない。一方、真の粘着力を持った河岸は水没のみで崩れることはなく、かつ、流水浸食にも強い抵抗力を持っている。現在のところ、粘着性材料の流水浸食抵抗力に関する標準的な試験法は確立されていないが、骨格構成粒子の間を充填している粘着性の微細土砂マトリックスが溶けるように浸食されると、露出した骨格粒子に働く流体力や斜面方向重力が顕在化し、それに粒子が摩擦力と底面接触部分の粘着力で抵抗すると考え、検討が進められている。

なお、洪水時における粘着性河岸・河床の浸食では、流送土砂の衝突による浸食も激しいと推察され、その定量化も移動床水理学の今日的課題の一つと考えられる。

粘着力を有する河岸は、周辺河床からの比高が大きく、より急な勾配を維持できる傾向にあつて、これがその浸食形態をすべり破壊を伴った形式のものとしている。洪水期の水深が大きくなる図4のような大河川（村本・藤田，1989）を始めとして、河岸の比高が10m程度に達しているとこの形式の河岸浸食過程がよく現れる。この河岸斜面のすべり破壊にも地下水浸透のある場合の斜面安定解析手法の適用が可能である。けれども、上に述べた理由から、浸食過程にとってはすべり面上の不安定化土塊の水中への移動と、その後の水流による流送のされ方が問題となる。前者については、河岸斜面がすべり破壊するとすべり面に働いていた粘着力が解放され、抵抗力が摩擦力のみに減少するため、土塊はすべり面に沿って加速度運動を開始し、勾配の減少と水の流体抵抗によって減速・停止すると考えた解析が行われ、妥当な結果が得られている（Fujita-Kawaguchi-Pham, 2000）。このようにして流水中に供給された河岸土砂も巨大なすべり土塊のままで容易には流送されず、テラス状の河岸斜面が長時間残存していることも稀ではない。浸食過程が速やかに進むのは、元々河岸斜面に内在していた裂け目で巨大な土塊が簡単に分解される場合と考えられる。

一方、非粘着性材料の場合は、河岸を構成する個々の土砂粒子の図5のような移動を集積したものが河岸浸食現象となる（藤田，1980）。例えば、水面上の部分も含む河岸上部が崩落してもその土塊は水中に没すると同時に分解され、表面から個々の粒子が流送される。河岸斜面では勾配方向に常に重力が働くので、移動している粒子は緩慢ではあっても河床中央部に向かって進み、河岸斜面は土砂を失っていく。これより、河岸浸食機構の取扱いは、斜面上の粒子に働く慣性力も含めた力の釣合いに基づいて、斜面上の限界掃流力や流砂量に与える横断勾配の効果が明らかにされている。こうして、横断勾配が静止摩擦角のようなある限界よりも急になると河岸上部が滑落して河岸は後退し、この滑落土砂が流送され、さらに、その下の斜面からも土砂粒子が浸食されて斜面が急になると再び上部が滑落して浸食過程は進行する。最近では、河床変動の水平2次元解析にこの浸食過程を取り込んで流路変動過程を解析する試みも行われている（長田，1998）。

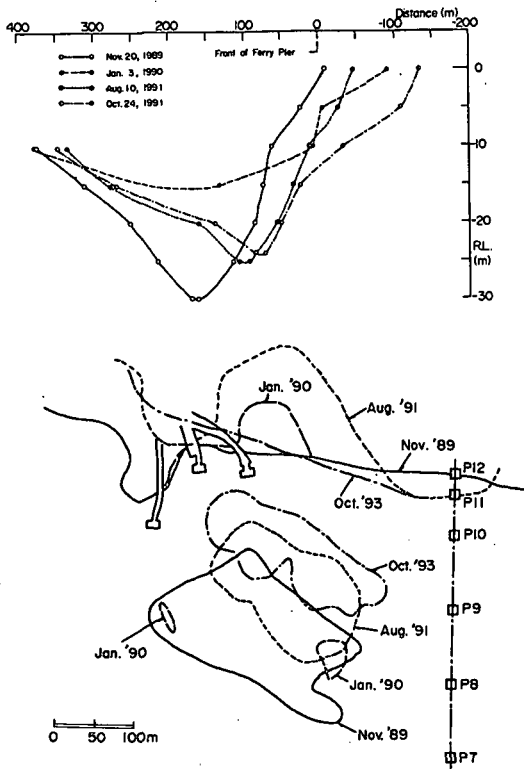


図4 バングラデシュ国メナ河メナ橋付近の河岸浸食状況

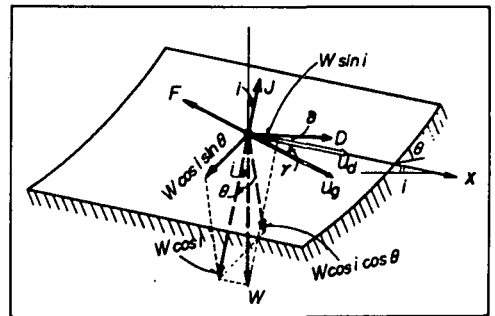
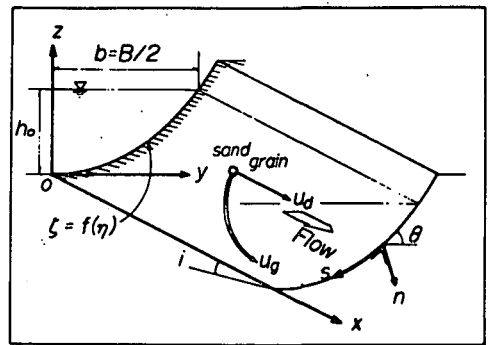


図5 河岸砂面上の砂粒運動と砂粒に働く力

5. 移動床水理現象を巡る 2, 3 の話題

(1) 河床変動の取扱いについて

ここで、開水路流れの取扱いと移動床変化の取扱いについて、1 次元的な変化の場合を比較してみよう。4. で示したように、両者とも連続式はフラックスの発散に応じて水深または河床高が変化する同型の関係式である。一方、流量あるいは流砂量の変化を支配する運動方程式はどのような対応になっているだろうか。よく知られているように、流れの場合の基本は非定常流の運動方程式であるが、移動床変化の場合は流砂量式がそれに当たり、通常それは河床せん断力の関数として表現される。流砂量式が河床せん断力のみの関数の場合は、それは流れの運動方程式の近似の程度に運動して各地点における流砂量が決まることになる。しかし、流砂に働く重力や慣性力を考慮すると、取扱いに差異が生じ、水路勾配を急にして水流、流砂とも重力の効果を高めていくと土石流に近づいていく。側岸のように、流れの方向と斜面の方向が相違している場合には、水中での相対速度が大きくなり、重力と流体力が流砂現象を支配する。この意味で、河岸土砂や土石流は主働的な土砂移動であり、河床流砂は受働的な流砂機構に支配されているといえる。こうした河床流砂の持っている慣性力が大きい場合には、それを遅れ距離の形で考慮する方法と慣性力を加味して求めたピックアップレートで表現する方法とが通常用いられている。

流れの場合、局所等流仮定を用いるとその変化はキネマティック・ウェーブとして伝わることが知られているが、移動床の場合、流砂量フラックスの表現に平衡流砂量式を用いれば拡散方程式になる。逆に、流れの運動方程式に水面勾配の項を残すと水面の変化は拡散方程式に従うのに対して、移動床変化の伝播はキネマティック・ウェーブとなるように定式化されている（応用水理学中 I）。流れの慣性力がそのまま残され

れば、ダイナミック・ウェーブとして流れの変化は2地点の影響を受けることになる。流砂の慣性力を完全に評価した流砂量式を用いるとその伝播はどのようなになるのか、思考を巡らしてみたいとも感じる。

(2) 河道改修と移動床の応答

治水安全度を向上させるために改修された河道は一般にそれまでの河道よりも拡幅されている場合が多い。最近では多自然型川づくりの考えから、改修河道の河床を水理計算に使われた断面通りの平面に丁寧に仕上げることは少なくなってきたと思われるが、まだまだどのように凹凸を付ければよいか判らず、平面に近い状態にされていることも少なくはないであろう。中小河川の場合、全面改修は相当な被害を受けた後、より超過確率の低い大きな流量に対応できるように実施されるため、その後で経験する出水では単位幅流量が相当程度減少してしまい、土砂が容易には移動しなくなる。この結果、長時間にわたって平坦な河床状態が維持されてしまい、単一相の植生で河床が覆われてしまう現象に見舞われる。かつて、交互砂州を始め、各種の砂州の形成実験を行っていたときには、それが中以上の出水に対応した実験であることをほとんど認識せず、改修で拡幅された河道の平坦になった河床を見ても、すぐに

砂粒の運動 → 河床面の変化 → 河床波の発生 → 砂州の発生 → 水流蛇行の開始

という具合に移動床が応答して、河川らしい様相が醸し出されると錯覚していた。この反省から、将来にわたる長期的な河床変動を予測する場合には、各種の流量の生起確率をはっきりと認識しておくべきであることを学んだ。

確かに、土砂流出の大きな河川では、僅かな流量でも河床はよく動いて、放っておけば常願寺川の戦後間もない断面形状のように、数列の砂州が形成される。現在、砂利採取の無くなった安倍川ではそのような断面になりつつあることが報告されている。

(3) 安定流路の考え方について

潤辺上で掃流力と斜面上の移動限界掃流力が一致するという、Laneの示した静的平衡状態の安定流路の式のみが平成11年度の水理公式集では示されている。この断面は中央水深に比してかなり幅が狭く、その意味で路床に少々平均粒径よりも小さい流砂が存在しても砂州は容易には発生しないであろう。動的平衡状態については Parker が、一様砂であっても存在し得る可能性を示したが、その条件を満たしても幅・水深比が大きければ砂州が発生する可能性があつて、最近の安定流路に関する研究 (Vigilar・Doplas, 1998) でも図6のように幅が広がっていることが気にかかるところである。かつて、交互砂州の発生しない条件を導入して検討した結果では、川幅は流量の0.4乗に比例して増加することが判った (藤田, 1980)。

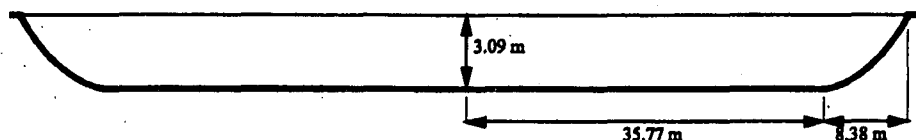


FIG. 11. Wide Channel Designed Using Graphical Method (Bed Load Transport Rate Given)

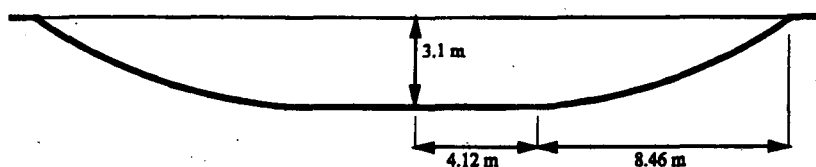


FIG. 12. Narrow Channel Designed Using Graphical Method (Bed Load Transport Rate Given)

図6 安定流路の検討断面の例 (Vigilar・Doplas, 1998)

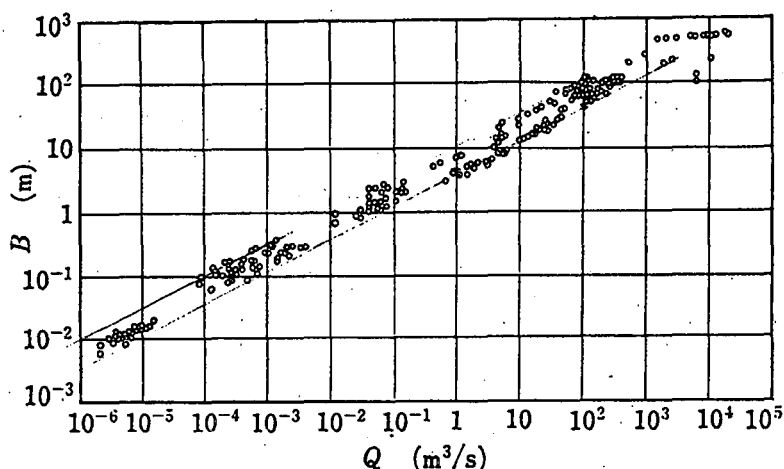


図7 流量 Q と流路幅 B との関係

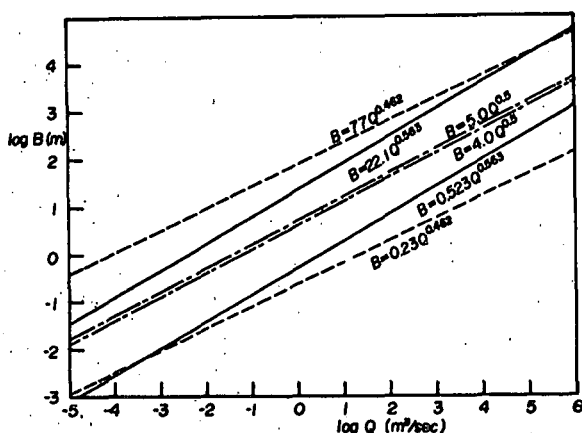


図8 流量 Q と流路幅 B との対応関係についての検討結果（藤田，1980）

そこから、さらに、レジーム理論でいわれている、図7のような流路幅が流量の平方根に比例する関係について、幅・水深比および掃流力・限界掃流力比を一定とすると、流路幅が流量の6/13乗に比例することも示され（藤田，1980），これより、しばしば仮定されるこのレジーム式が幅水深比がスケールの異なった種々の流路でもそれほど変化しないことに対応していると理解される。

6. おわりに

公共事業費の圧縮が現実の問題として取り沙汰されている。中心的な公共事業である河川事業において従来型の河川整備が21世紀にも継続できるとの保証は必ずしも明確ではない。少ない事業費で、というよりもむしろ環境負荷低減型の土木事業を目指し、エネルギーコストをかけないで、十分な成果を上げる技術力の高い河川事業をの展開を今後図っていかねばならない。このためには、河川を形造っている移動床水理現象のさらなる理解も避けて通れないところであり、例えば、安価に河岸・河床の耐浸食性を一段と高める粘着性材料に関する研究などには今後も力を注いでいかなければならないであろう。

最後に、さらに、この講義のテーマに関連して日頃感じていることを述べさせて頂いておわりにかえたい。

我が国でも、一度大雨となり、それが2、3日以上も降り続けると河川は氾濫し、河岸侵食を伴いながら日頃の流路からは考えられないような河道が出現する。その時になって、家屋や田畑があった土地が過去の（大）洪水で形成された微高地であったことに気が付き、洪水を意識してこなかったこと省みるようになるが、幸い雨は1週間もすると大体止んでくれる。しかし、河岸侵食に恒常的に苦しんでいる地域では、第一に洪水期間の長さが、そして河川－河岸（斜面）の規模、侵食抵抗の低い地盤の土質・地質がその原因となっている。まさに、流路変動・河道変遷が現実に行っているのであるが、こうした被害を軽減するために果たして現在の河岸侵食に関する研究が役立つだろうかとなるとやはり暗澹たる気持ちになってしまう。図に示したようなこうした大河川での河岸侵食に、例えば、流水表面近傍のみに低減機能を有する植生が有効だとは当然いえず、また、従来の護岸・水制等も驚くほどの巨大構造物となって築造と維持に莫大な費用が必要となり、かつ、こうした構造物も河道内の砂州が移動すると無用の長物と化してしまう。したがって、対策の基本は、できるだけ小規模な構造物によって河岸に流れを集中させず、河岸斜面の脚部に土砂を留める方法を確立することであろう。今後の10年でこうした問題に有用な解答が得られるように研究が進んでいくことを願わずにはいられない。

また、かつて、河岸侵食・流路変動に関する研究について、地形の変動が全体的に侵食相にある場合の取扱いは比較的容易であるが堆積相の研究は困難であるとの趣旨の文章を書いたことがある。侵食相の場合、水流による侵食・流送現象が生起する場の境界を明確に規定することが感覚的にも実際のにも容易であるの対して、堆積相の場合は、流路床への堆積に伴って流路から水が溢れ、新たな流路を求めることが繰返されるために水流の境界を明確にすることができ難く、流路の位置が明確になっていることを前提とした従来の理論的な取扱いや数値的な解析・シミュレーションを適用することは簡単ではない。洪水氾濫解析はこれまでからこの困難に立ち向かっているのではあるが、単純な話、水面よりも上の土砂の侵食は普通に起こり得るが、水面よりも上に土砂が堆積する状況を想像することは困難であって、洪水位の大きな変化とか、飛砂とかといった何らかの別な状況を加味しなければ、定常的な流れの下では水面よりも上部で堆積が生じることは考え難い。すなわち、流水による運搬・堆積現象は、如何に供給土砂量が多かろうとも常に水面下、それも流砂の慣性力を無視すれば土砂の移動限界より大きな掃流力を有する領域で生起するとみなすことが自然である。現在の沖積地も多量の土砂供給とその運搬が可能であった時代に形成され、その後水位が下がって現れたものと考えべきなのだろうか。すでに、多少の試みはなされているが、こうした点に今後ますます研究は進められていくことを期待している。以上、取りとめもないことをお詫びして終りたい。

参 考 文 献

- 井口昌平(1979) 川を見る 河床の動態と規則性、東大出版会、pp.63-82.
- 藤田裕一郎(1999) 課題制下の水理講演会 11年にみる「河岸侵食・河床形態・流路形態」に関する研究の傾向、「水理講演会十年の歩みとこれからの基礎水理学の展開－基礎水理部会」、土木学会水理委員会基礎水理部会、pp.79-84.
- Fujita, Y., kawaguchi, M. and Pham, T. H.(2000) A conceptual model for erosion process of high river bank, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, pp.753-758.
- 村本嘉雄・藤田裕一郎(1989) バングラデシュ主要河川の近年における河道変動－メグナ河の河岸侵食を中心として－、京都大学防災研究所年報、第35号B-2, pp.89-111
- 藤田裕一郎(1980) 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
- 長田信寿(1998) 流路変動過程の解析法とその応用に関する研究、京都大学学位論文
- Vigilar Jr, G. and Diplas, P. Stable channels with mobile bed: Model verification and graphical solution, J. Hydraulic Engineering, Vol.124, No.11, ASCE, pp.1097-1114.