

現状・課題・方向性検討についての説明資料 (江頭委員からの提供資料)

2001年11月29日 (淀川流域委員会)

河相 (川の姿) について

立命館大学理工学部 江頭進治

内容の要約

1. 河相の形成

河相とは川の顔、すなわち姿・形のことである。これは、対象となる区間の川幅、勾配、河床材料、および上流側の洪水と流砂条件、ならびに下流側の流砂条件に依存して形成される。すなわち、河相は、急流で石がごろごろした川、砂州の多い川、蛇行した川、植生の繁茂した川など、人がその川から受ける印象に加えて、水と土砂の運動に関する原理・原則から定まる川の諸特性である。

(OHPにて説明)

2. 河相の事例 (木津川下流)

現地の資料解析、掃流砂を対象とした河床変動のシミュレーションによれば、0キロメートルから37キロメートル区間の河道は次のような状態になっている。

- ・河床は僅かに低下傾向で、年間平均0.64センチメートルの低下。
- ・もしダム貯水池、砂防施設がなければ、河床は年間約2センチメートル上昇し、天井川になる。
- ・河床材料は粗粒化の傾向にあり、流砂はオーバーパッシングロードが支配的。
- ・砂州への細粒砂の堆積や河床材料の移動性の低下等により、砂州の固定化・陸地化とともに植生化が進みつつある。
- ・洪水疎通能力については、河床低下による疎通容量の増大がみられる一方において、植生による洪水疎通能力の減少がみられるため、総体としての傾向はわからない。適切な植生管理が望まれる。

(OHPにて説明、江頭らの論文を添付資料)

3. 好ましい河相

- ・悪い河相：流路、河床高、河床材料、水位、植生、水質などの現象が一方向に進む。たとえば、河床が下がり続ける、河道内植生が成長し続けるなど。
- ・好ましい河相：現象が一方向に進まず、それが許される範囲で変動する。河相は、人の生活、活動の影響を必ず受けるから、好ましい河相を形成するためには、川をコントロールすることが必要である。

(OHPにて説明)

以上

木津川下流域の河床変動と土砂収支

BED VARIATION AND SEDIMENT BUDGET IN THE DOWNSTREAM REACH OF KIZU RIVER

江頭 進治¹・金 海生²・竹林 洋史³・池田 晶⁴・永田 徹⁵

Shinji EGASHIRA, Hai-sheng JIN, Hiroshi TAKEBAYASHI, Akira IKEDA, and Toru NAGATA

- ¹ 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
² 正会員 Ph.D 日本工営株式会社 中央研究開発研究部 (〒300-1245 茨城県稲敷郡基崎町高崎 2304)
³ 学生会員 工修 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
⁴ 学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
⁵ 学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

The present study describes field surveys of bed material, findings based on surveyed data and bed variation in a downstream reach, 0km to 37km, of the Kizu River. Field data realize that the river bed elevation changes longitudinally like riffle-pool bed profiles, coarse gravel are dominant in the riffle region, sand particles are deposited deep in the pool region, and sediment particles of pool region are transported from upstream as over-passing load or as selectively entrained sediment on riffle bed. The formula of grain size distribution which is employed in numerical simulation of river bed variation as the upper boundary condition of the study reach is proposed, taking account for the difference between grain sizes in riffle and pool regions as well as for characteristics of bed load transport such as over-passing load.

Key Words : river bed profile, riffle and pool, over-passing load, river bed variation, sediment budget

1. 緒言

木津川は、かつて天井川化による流路変遷が顕在化しており、破堤・氾濫や流路付け替え等による流路変遷があったことが明らかにされている¹⁾。

図-1は木津川水系の概要である。木津川上流域には砂防対策が実施されるとともに、図に示されるように流域にはいくつかのダム貯水池が築造されており、天井川化した時代に比べると土砂流出量はかなり減少しているものと思われる。事実、木津川下流域は河床のアーミングが進み、砂質河川から礫床河川へと変わりつつある。

このような河川は全国的にも多く、それらが将来どのような河相に遷移していくのかを知ることは、治水・利水を含む河川環境の問題を総合的に検討する上できわめて重要である。ここでは、その第一歩として、河床材料が粗粒化しつつある木津川下流域に着目し、三川合流点(0km)から笠置(37km)の区間における流砂・河床変動ならびに土砂収支について検討する。なお、図-1の数字は三川合流点からの距離(km)である。

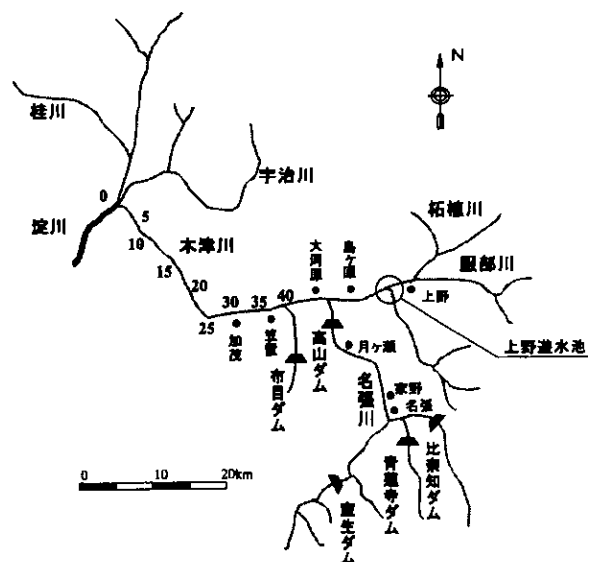


図-1 木津川水系

2. 流域と河道の特性

木津川は、鈴鹿、布引山脈に源を発し、上野盆地において柘植川、服部川を合流して西へ流れて岩倉峠を通る。さらに、木津川は、布引山脈に源を発し、名張盆地を流れる名張川を合流して笠置渓谷に至り、加茂から4kmほど下流において山付区間から沖積地河川の性状へ変わり、枚方地点において宇治川および桂川と合流して淀川となる。

木津川の流域面積は、枚方地点において約1650km²（笠置地点約1300km²）であり、支川名張川の流域面積は、約600km²である。流域には火成岩が露出して風化作用を受けた風化花崗岩が広く分布しており、それが主要な土砂生産源となっている。流域の平均年降水量は約1600mm程度であって、我国の平均値にほぼ等しい。しかし、この流域は台風常襲地帯にあつて、それによる異常降雨もたらされることもある。たとえば、昭和28年（1953）の台風13号および昭和34年（1959）の伊勢湾台風などがある。伊勢湾台風では、各地で連続雨量600mm、時間雨量100mmを越え、山腹崩壊約400ヶ所、崩壊土量1000万m³の発生をみた²⁾。

図-2は、三川合流地点の上流30.8kmの加茂地点における約25年間の日平均流量時系列である。これによれば、日平均で1000m³/sを越える出水は、この期間に11回発生している。なお、平均年最大流量は約1700m³/s程度になっている。

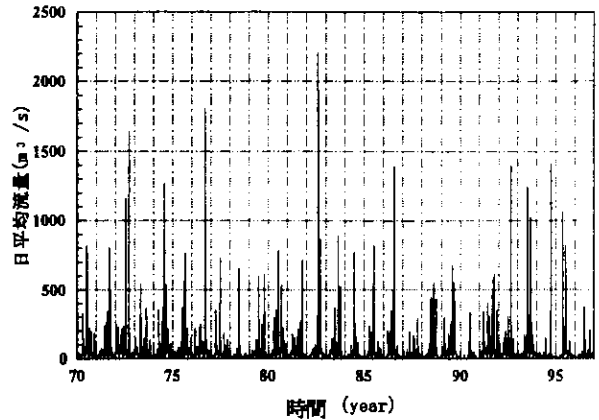


図-2 日平均流量時系列

上述のような状況にあつて、木津川下流域（山付部より下流域）の河道には砂州が発達し、かつて流路は乱流状態であった。しかし、昭和30年代後半から砂利採集が活発に行われ、昭和40年代に入って、上流域には高山ダムをはじめ4つのダム貯水池が築造された。これらによる影響と上流域における砂防事業による土砂流出抑制の効果が現れ、河床低下が急激に進んだ。この傾向は砂利採集が禁止された昭和46年以後の昭和48年まで続き、昭和48年から昭和50年代の後半まで若干の堆積傾向を示した。その後、現在に至るまで、若干の河床低下は見られるもののほぼ安定した状態にある。なお、高山、青蓮寺、室生の各ダムにおける平成3年までの貯水池堆砂量の統計は約400万m³程度と推定されている³⁾。

図-3は最深河床位の縦断分布であり、三川合流点から

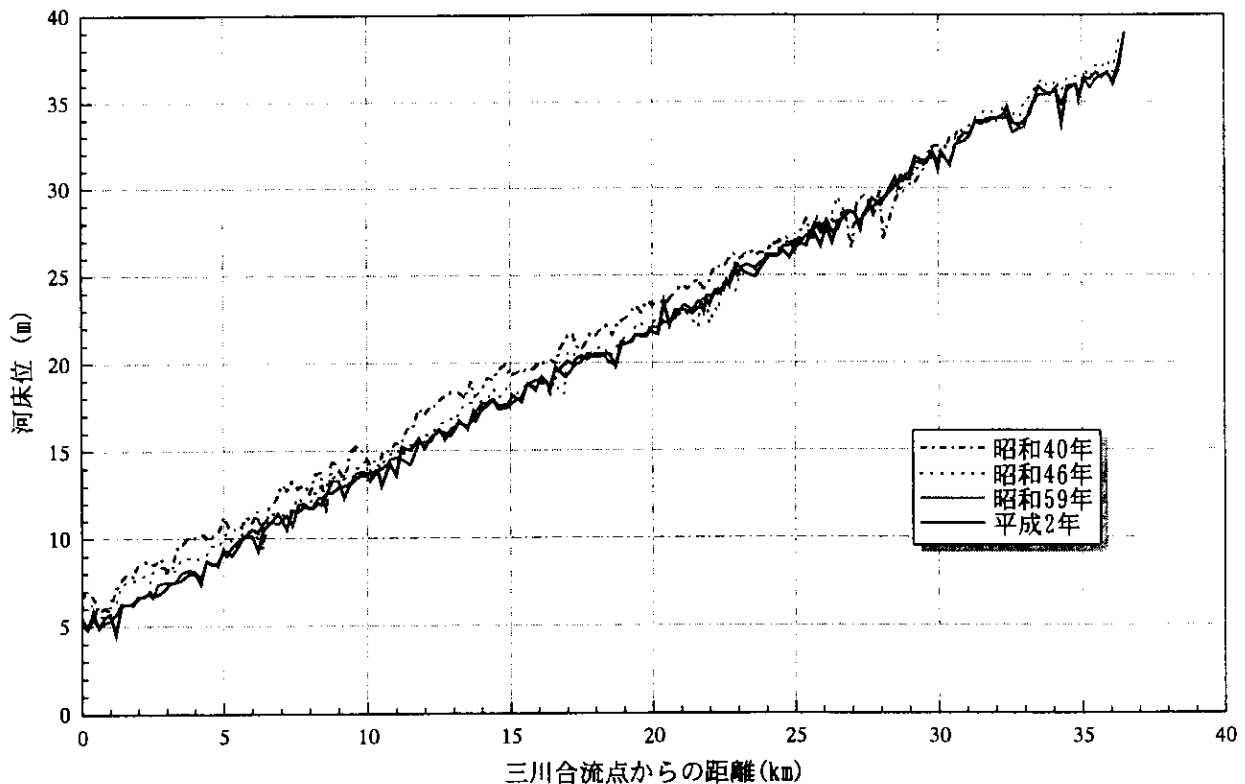


図-3 最深河床位の縦断分布

笠置地点までの区間について昭和40年、46年、59年および平成2年のデータが示されている。上述したことから推察されるように、昭和40年から46年までの間に顕著な河床低下があり、昭和59年以降はほぼ安定していることが分かる。

河道砂州の動態は、上流域からの土砂供給条件と洪水の規模、頻度に依存する。前述したように、昭和30年代には河道は乱流状態にあったが、河道掘削および土砂供給条件の変化に伴う河床変動過程において、砂州はほぼ固定され、そこには植生が繁茂し、河道には明瞭な自己形成流路が形成されている。ここで、自己形成流路とは、堤外地に自然に形成された低水路状の流路のことであり、特に低水流量で形成されたものではない。

3. 河床材料と流砂特性

三川合流点から37.2kmまでの区間の澤筋（自己形成流路の中央）において、500m間隔を原則として河床表層の粒度分布調査⁹⁾を行った。図-4は、平均粒径の縦断分布である。これによれば、二つの顕著な特徴が見出される。一つは、平均粒径が20kmを境に急激に変わり、下流側の沖積部において小さいこと、もう一つは、平均粒径が大きく変動し、平均粒径の小さいものが全区間に存在していることである。

一つ目の特徴は、主として河幅と河床勾配に依存するものと思われる。そこで、流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ のときの水面幅³⁾についてみると、0kmから20kmの区間においては、200~300m程度であって、20kmから上流の37kmの区間においては100~200m程度になっている。河床勾配は下流域において1/1130、上流域で1/950程度になっている。このような河幅および勾配の変化が、20km地点を境に平均粒径の急激な変化をもたらしているものと推察される。

二つ目は、土砂供給の減少によって河床材料の粗粒化が進行している一般の河川において見られる粒度分布の特性であるものと思われる。すなわち、このような河川では自己形成流路の蛇行、砂州の固定、砂礫の分級に伴う河床波の固定化が進むため、様々なスケールを持つ瀬と淵が形成され、瀬の材料は粗く、淵のそれは細くなるということが推察される。

二つ目の特徴を検証するため、28km~30.5kmの区間を抽出して、50m~100mの間隔を原則として平水時の水面幅、澤筋における水深および河床材料の調査を行った。図-5はその結果を示している。図の中段に示す水深のデータにおいて、RおよびPはそれぞれ瀬および淵である。平均粒径の縦断分布と水深の縦断分布に着目すると、上述のように平均粒径は瀬において粗く、淵において細かいことが分かる。ただし、29.5km~30.1km区間においては、淵と判定しているにもかかわらず粒径が大きいため、粒径は複雑に変化している。これは、水面幅と水深のデータ

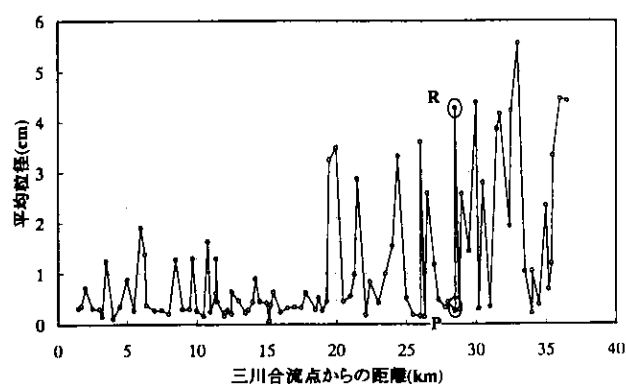


図-4 澤筋における河床表層の平均粒径の縦断分布

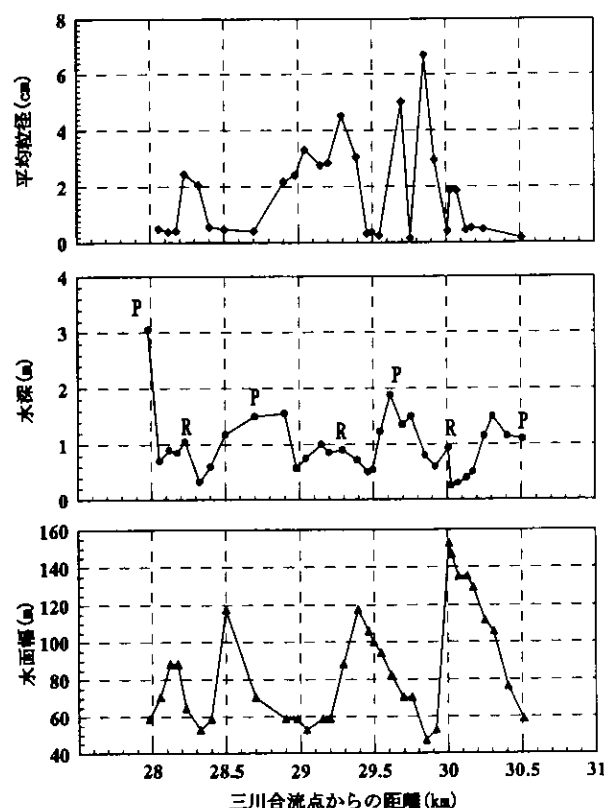


図-5 澤筋における河床材料の平均粒径、水深および水面幅の関係

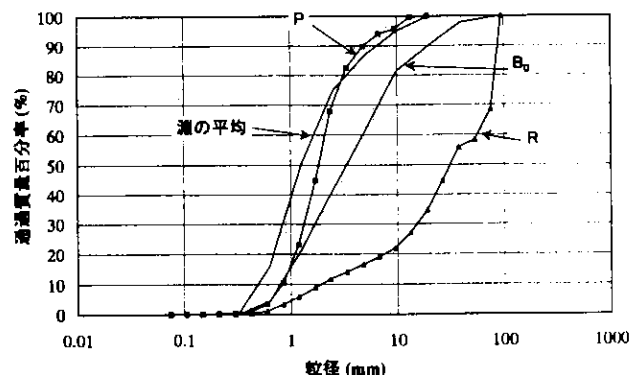


図-6 瀬および淵における河床表層の粒度分布

に示されるように、水深は大きいものの河幅が異常に狭いために流れが集中するなどの要因であると推察される。

図-6は、図-4においてRおよびPの印で示した瀬および淵における河床材料の粒度分布である。図には、後述の計算で用いる粒度分布も示されている。瀬(R)と淵(P)の粒度分布を比較すると、淵の材料の大部分は10mm以下の砂礫から構成されており、これは瀬の20%粒径程度であることが分かる。

淵の材料は、瀬の材料が選択的に輸送されるものと、瀬の材料と混合しないまま輸送される(便宜上、オーバーパッシングロードと呼ぶ)ものから構成されているものと推察される。どちらの輸送形態が卓越するかは、瀬を構成する河床材料の分級の程度に依存する。その目安を得るため、瀬の材料の平均粒径および最大粒径をそれぞれ4.27cmおよび9.5cmとして、それらの移動限界流量を推算すると、それぞれ1740m³/sおよび3000m³/sとなる。図-2によれば、日平均でこれらの限界流量を越える出水は、1983年以降観測されていない。これは、対象区間の上流域の流砂は、オーバーパッシングロードであることを示唆するものである。

4. 河床変動と土砂収支

これまでの解析によって、現在の木津川河道はほぼ安定した状態であることが示された。そこで、一次元解析法を用いて過去から現在を予測し、変動過程における上流域からの土砂供給条件および淀川への土砂流出条件を調べてみる。支配方程式は、水流に関する一次元非定常流の連続式と運動方程式、および流砂の連続式と粒径別流砂量式であって、初期・境界条件は次のようである。

初期条件：河床の縦断形状には、砂利採取が禁止された昭和46年(1971)のものを採用する。ただし、山付区間の26.6kmよりも上流部の形状は、河床低下のプロセスを見るのを容易にするため、26kmから36km区間の河床高の凹凸を滑らかにし、これを延長する方法で設定している。河床材料の粒度分布は、図-4の結果を参照し、対象区間をいくつかの領域に分割して、一つの領域には同じものを与えた。ただし、計算対象区間において顕著な河床低下がみられる26.6kmよりも上流域には、現在の瀬および淵の河床材料を適当に混合して作成した河床材料を与え、その粒度分布をB₀として図-6に示している。この粒度分布は、アーマーコート(アーマーコート)の粒度分布より初期粒度分布の最大径を決定し、1971年の河床材料は淵の材料よりは粗くなることが予想されること、および1971年の河床材料は現在のものより細粒分を多く含んでいたことが予想されることを考慮して決定したものである。

境界条件：下流端における河床高は、実測値を与えており、水位には、 $\partial Q/\partial x = 0$ として下流端流量に対応する等流水深を採用している。上流端流量には図-2の日平

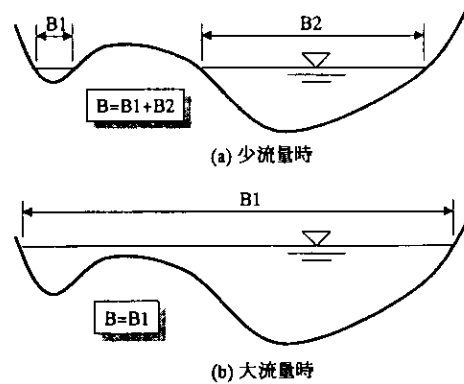


図-7 数値解析に用いた川幅(B)の設定法

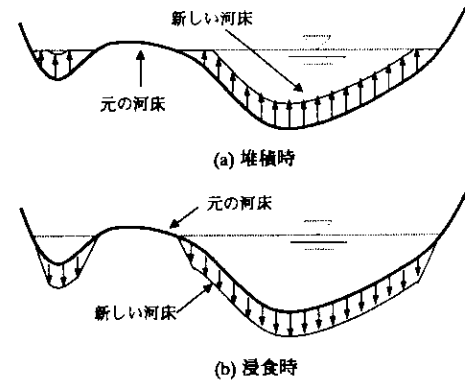


図-8 河床変動に伴う横断形状の変化

均流量を与え、供給土砂の粒度分布には、瀬と淵の材料の粒度分布を参考にして図-6に示すものを用いた。供給土砂量の条件は、オーバーパッシングロードを考慮し、現実の河床を再現することを目的として、芦田・道上式⁵⁾を用いて次のように置く。

$$\frac{q_{bi}}{\sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd_i^3}} = 17(af_{Pi} + bf_{Ri})\tau_{ci}^* \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_*}\right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*}\right) \quad (1)$$

$a + b = 1 \quad (a \geq 0, b \geq 0)$

ここに、粒径階*i*の流砂量 q_{bi} 、河床材料の密度 σ 、流体の密度 ρ 、重力 g 、無次元掃流力 τ_* 、粒径階*i*の無次元有効掃流力 τ_{*ci} 、粒径階*i*の無次元限界掃流力 τ_{*ci} 、摩擦速度 u_* 、粒径階*i*の限界摩擦速度 u_{*ci} である。 f_{Pi} は、図-6に示す淵の材料に占める粒径 d_i の存在率、 f_{Ri} は、アーマーコートの発達した瀬の材料に占める粒径 d_i の存在率であり、淵の材料の粒径階と瀬のそれとは同一である。また、 f_P と f_R は、時間的に一定としている。 a, b は、それぞれ、供給土砂に占める淵、瀬の材料の割合である。

上式において、 $a=0$ の条件は、上流端の河床表層のアーマーコートから細粒分が選択的に供給されるか、あるいは破壊される条件以外には、土砂供給が無いことを表しており、 $a=1$ は淵の材料が、その掃流力に応じて供給されることを表している。

数値解析における川幅の設定法を図-7に示す。各計算断面には河床横断形状の情報が与えられており、川幅は流量に応じて変化させている。図-8は、河床変動に伴う横断形状の変化の模式図である。図のように、本計算に

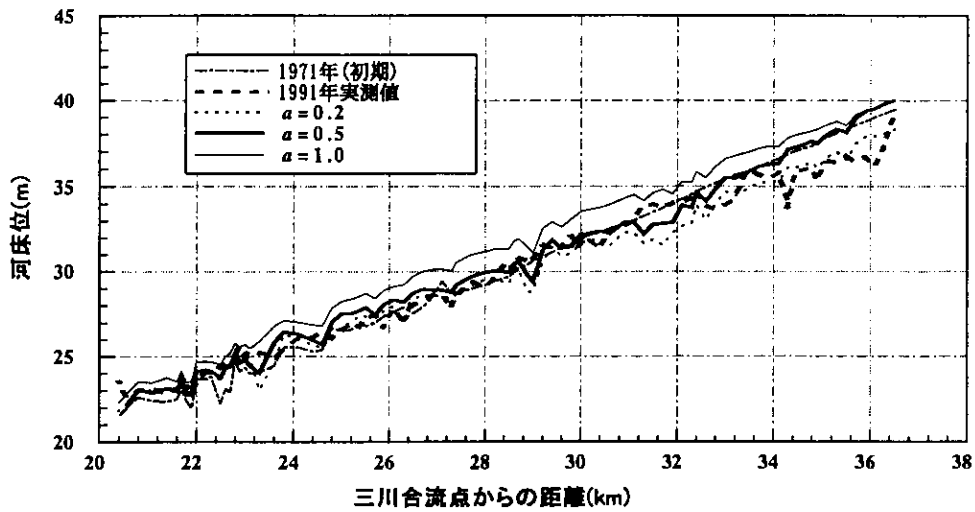


図-9 河床縦断形状に関する実測値と計算値

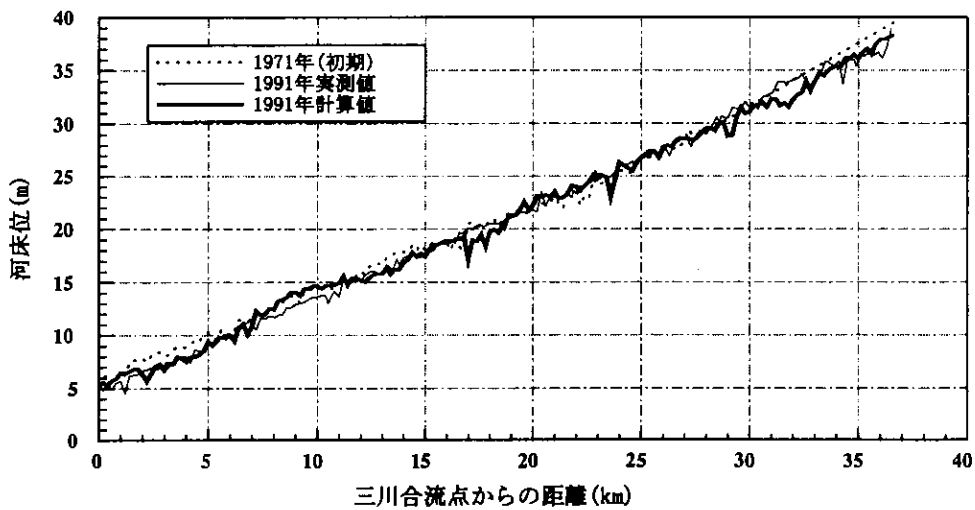


図-10 河床縦断形状に関する実測値と計算値 (土砂供給条件 $a=0.2$)

においては、河床横断形状は時間的に変化させている。

図-9は、 $a=1.0$ 、 0.5 および 0.2 として算定される1991年における河床形状であって、対象領域の上流部について示されている。これによれば、 $a=1.0$ すなわち淵を形成する材料が平衡状態で供給される場合には、河床は上昇する傾向を示し、 $a=0.5$ の条件では、初期河床がほぼ維持されている。 $a=0.2$ のとき、ほぼ河床形が再現されている。淵の材料、すなわちオーバーパッシングロードの材料は、瀬の20%粒径以下のものから構成されていることは前述の通りであり、このことと1991年の河床形状が $a=0.2$ とした土砂供給条件によってかなり適切に予測されることが対応しているのは興味深い。

図-10は、 $a=0.2$ としたときの計算値と実測値を全区間にわたって比較したものである。これによれば、細部には課題はあるものの、1981年および1991年の河床形状はほぼ再現されている。図-11は、河床表層の平均粒径の縦断分布に関する計算結果を示したものである。計算結果によれば、図-4の実測データに比べ、河床材料の粗粒化は、比較的緩やかに起こり、20年経過した1991年の時点においても、粗粒化は上流端から10km程度の領域にとどまっている。

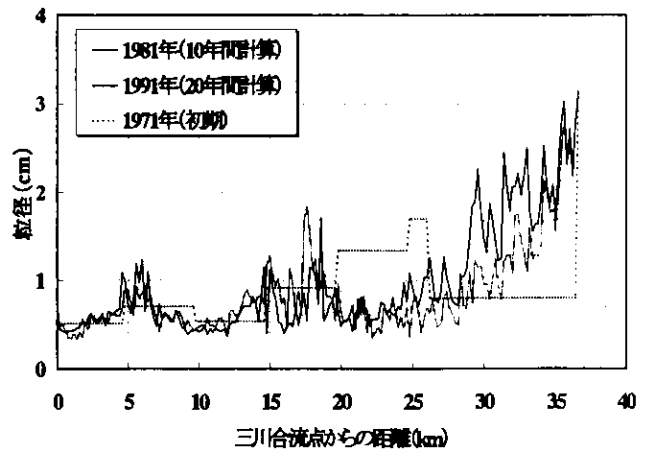


図-11 河床表層の平均粒径の縦断分布

図-12(a)、(b)は、それぞれ上流端における年供給土砂量および下流端での年流出土砂量に関する計算値である。ここでは、実質体積で示されている。三つのデータは、それぞれ土砂供給条件を $a=0.2$ 、 0.5 および 1.0 としたときのものである。上流端における供給土砂量についてみると、最も確からしい $a=0.2$ の場合について、20年間の平均値は、 $14000\text{m}^3/\text{year}$ 程度である。ダム貯水池流域を除く流域を 600km^2 とし、間隙率を 0.4 とすれば、年比流出

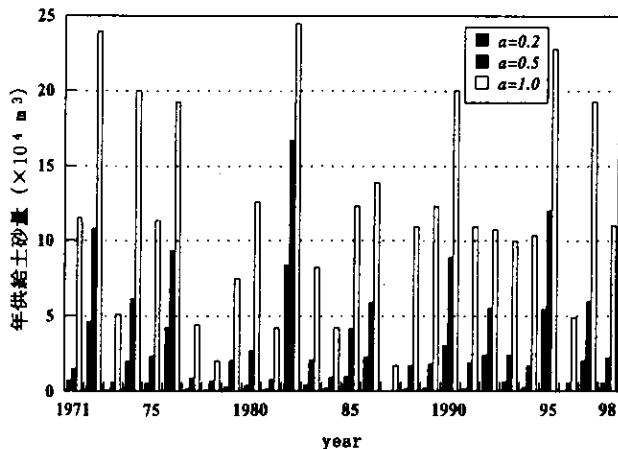


図-12(a) 最上流端における供給土砂量の経年変化

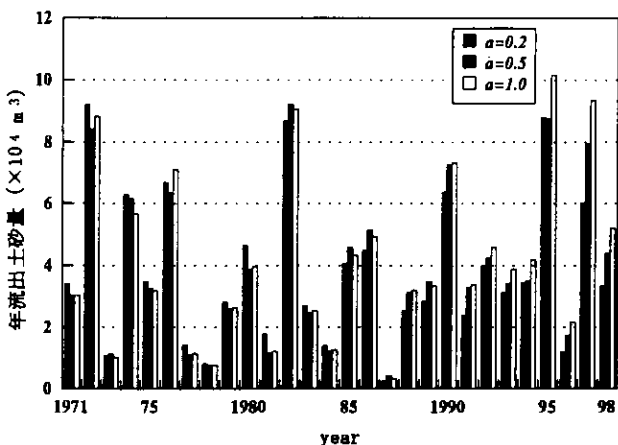


図-12(b) 最下流端における流出土砂量の経年変化

土砂量は、約 $40\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ 程度に見積もられる。また、淵の材料は、この流域におけるマサ土の粒度分布にほぼ一致しており、 $a=1$ の条件は、貯水池ダム等がない状態に近いと考えられ、この条件で土砂供給が行われるものとしたときの供給土砂量は、実質体積で $110000\text{m}^3/\text{year}$ 程度に推算される。一方、前述したように、ダム堆砂量の統計は、約 21 年間で $500\text{万}\text{m}^3$ であり、間隙率を 0.4 とすれば約 $143000\text{m}^3/\text{year}$ となる。これに $a=0.2$ のときの計算値 $14000\text{m}^3/\text{year}$ を加えると、 $157000\text{m}^3/\text{year}$ となって、貯水池堆積土砂の全部がそのまま流出することはないことを考慮すれば、 $a=1$ としたときの土砂供給量にほぼ一致する。

ついで、下流端流出土砂量についてみると、土砂供給条件による有意な差は見られず、 $a=0.2$ の場合の流出土砂量は実質体積で $37000\text{m}^3/\text{year}$ 程度に推算される。これは、供給土砂量の約 2.6 倍に相当しており、対象区間の河道は、わずかではあるが河床低下の傾向にある。ちなみに、河道長 40km 、河幅 150m とすれば、土砂収支から算定される河床低下量は $0.64\text{cm}/\text{year}$ となる。一方、この対象区間の上流域にダム貯水池がなく、 $a=1$ の条件で土砂供給があれば、図-9 に示すような河床上昇が起こり、洪水氾濫や河道が乱流することが推察される。

5. 結語

我国には、土砂供給量の減少によって砂質河川から礫床河川へと遷移しつつある河川が多い。このような河川における河床変動と土砂収支に関する予測法を明らかにするため、木津川下流部を対象に、現地調査、資料解析および数値シミュレーションの結果に基づいて検討した。得られた主要な結果を要約すると以下のようなものである。

- (1) 滞筋は多様なスケールをもつ瀬と淵から構成されており、河床材料は瀬において粗く、淵において細くなっている。これらの平均粒径の比は $10\sim 20$ 程度である。淵の材料の大部分は、瀬の 20% 粒径よりも細かい成分からなっており、その平均粒径は、 $2\sim 5\text{mm}$ 程度である。淵の材料は、瀬の河床材料が選択的に輸送されるものおよび上流域からオーバーパッシングロードとして輸送されるものから構成されている。
- (2) 瀬および淵における河床材料特性や流砂特性に基づいて、上流端における土砂供給量を推定するための河床材料の条件式を提案した。土砂供給量は、この式と流砂量式を用いて与えられる。さらに、ダム貯水池等が存在しない流域条件を想定した場合の土砂供給条件についても明らかにされている。
- (3) 上述の土砂供給条件を用いて最近 20 数年間の河床変動および土砂収支に関する計算を行い、対象区間の河道は今後も粗粒化が進むとともに、区間平均で 1 年に 0.64cm 程度は低下することを示した。一方、ダム貯水池が存在せず、淵の材料が掃流力に応じて供給される場合には、河床上昇が顕著に起こり、それに伴い洪水氾濫で河道が乱れることを推察した。

謝辞: 本研究は、立命館大学プロジェクト研究および(財)河川環境管理財団 河道変遷特性研究会(座長 砂田憲吾 山梨大学教授)の補助を受けている。吉川秀夫先生、芦田和男先生をはじめ、研究会のメンバーの諸兄には、有意義なコメントを頂いている。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) (財) 河川環境管理財団: 河道変遷特性に関する研究, 1999, 10.
- 2) 近畿地方建設局木津川上流工事事務所: 木津川砂防百年のあゆみ, 1971, 9.
- 3) (財) 河川環境管理財団河川環境総合研究所: 河川の植生と河道特性, 資料第 1 号, 1995, 5.
- 4) 立命館大学理工学部土木工学科水工研究室: 木津川河床材料の粒度分布調査データ集, 1998, 12.
- 5) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp. 59-69, 1972.

(1999. 9. 30 受付)