

土砂供給の量と質が砂州河道に及ぼす 影響に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON EFFECTS OF SEDIMENT-SUPPLY CONDITION ON BAR MORPHOLOGY

溝口敦子¹・森田梓²・辻本哲郎³

Atsuko MIZOGUCHI, Azusa MORITA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹正会員 博(工) 名城大学理工学部 講師 建設システム工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

²正会員 修(工) 日本工営株式会社 国内事業本部流域・都市事業部河川水工部
(〒102-8539 東京都千代田区麴町5丁目4番地)

³正会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科 教授 社会基盤工学専攻
(〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

In many rivers of Japan, bed degradation has been recognized as serious problem which it has caused change of river ecosystems. These days, in some rivers, artificial sediment supply is on trial. However, it is still unknown where supplied sediment deposit, and how and when sediment move. Considering river management, we need grasp detail of sediment movement along river. Generally, estimation of sediment transport along river is treated as one dimensional problem. However, bed form has possibility to affect sediment transport.

We focus on the influences of sediment-supply condition on bed form. In this paper, numerical simulations and trial experiments indicate that sediment-supply condition affect characteristics of bar form from upstream area because of characteristic sediment behavior on bars. And it is clear that change of bar form depends on amount and size of supplied sediment.

Key Words : Gravel- bed river, alternate bars, multiple bars, numerical simulation

1. はじめに

ダム湖への堆砂問題は、ダム機能の低下、下流河道の環境の変化の面から注目されてきた。これを受け、近年、ダムの機能回復および下流河道の環境回復を目的として、ダム下流河道へ土砂を流す試みが各地で行われている。しかし、様々な事情により下流へ流す土砂の粒径や量、流す方法が限定されているため、土砂供給事業をいかに効果的行うか、検討を要している。このなかで、土砂供給の量、質(粒度)が下流河道へ及ぼす影響、供給した土砂の行き先に関して、未だ不明な点が多く、事業を行う際には、モニタリングを行って供給の仕方を改善していく必要があると言える。そこで、土砂供給の量と質(粒度)によって単列、複列砂州河道が地形変化の面で受ける影響を明確にすることを目的とし、研究を行った。本研究では、実スケールの現象を視野にいれるため、ダム再編事業が行われている天竜川のスケールを参考とし

た数値解析などを用いて土砂供給の量と粒度の変化が砂州河道に及ぼす影響を河道形態(単列、複列)による相違、河床材料特性による相違に着目して検討を行った。

2. 参考河川(天竜川)の概要

本研究で参考とするスケールは、ダム再編事業が行われている天竜川のうち、ダムの影響を最も受けている下流河道のスケールとした。天竜川の下流河道は、川幅、河床材料等の特徴により、表-1のように小セグメントに区間分けされる。なお、表-1には、平均的な値を使用して理論解析を行った結果、10,000m³/sの出水で卓越するだろう砂州のモード数を示した。天竜川下流河道は、区間5の上流部は単列砂州を有するが、その他の区間は、平水時には複雑な流路が現れる複列砂州を有している。

(1) 流況の変化

天竜川鹿島観測所における年最大流量の経年変化を

図-1に、日流量から算出した各流量規模を超過する生起日数を図-2に示す。これによると、ダムが建設されてもピーク流量自体は、変化していないが、船明ダム建設後、日流量が500m³/sを超える日数が極端に少ない年があるなどその他の流量に変化が現れていることがわかる。

(2) 河床低下状況

ダムが及ぼす影響の一つとして、河床低下状況を見るため、図-3に最深点の1961年からの変化量の区間平均値の経年変化を示す。この図から、1970年代まで激しく低下し、その後、上流から徐々に河床が低下している状況が見て取れる。1970年代までの全体的な河床低下は、天竜川下流域で1970年代まで活発に行われていた砂利採取が主な要因であり、その後の区間4、5の河床低下は、その後も行われた砂利採取およびダムによる供給土砂の減少が要因だと考えられる。

(3) 河道の変遷状況

天竜川ダム再編事業環境検討委員会資料¹⁾や戸田ら²⁾、³⁾が指摘しているように、天竜川では、上述した流況の変化および河床低下により、植生が進出し流路の様相は変化している(図-4)。天竜川は複列砂州形成河道であるため、以前は複雑に流路が変動していたが、現在は、植生域の侵入により流路の動きが制限され、これまでとは異なる流路変動状況となっている。

そこで、基盤地形の砂州モード数を調べるため、200mごとの横断地形データを用いて、各断面の流路本数を調べた。ただし、流路本数は、水位の変化とともに現れる幅20m以上、かつ、全体水面幅の1割以上となる流路をカウントし、その最大値とした。図-5に示した区間ごとの平均値の経年変化より、流路数は、1970年代までに減少し、その後一定となっていることがわかる。つまり、急激な河床低下とともに流路本数も減少し、その後は、大きな変化はなくなっていると言える。

(4) 河床材料の変化

図-6に河床材料の粒径分布を示す。この図から、天竜川下流河道は、1mm程度以下の砂分と8mm程度以上の礫分に二極化した材料構成になっていることがわかる。あわせて、1956年から2001年にかけて、砂分の減少が確認される。天竜川ダム再編事業環境検討委員会資料¹⁾によると、減少した砂分の粒径は、佐久間ダム等の堆積土砂の粒径と一致しているとあり、ダム堆砂により、下流域の砂分が減っているとしている。

3. 条件の設定と数値解析の検討方法

(1) 条件の設定

本研究では、上流からの土砂供給の質、量の変化に

表-1 天竜川下流域の区間分け

区間	5	4	3	2	1
河口からの距離	21.2-25.2	15.0-21.2	10.6-15.0	6.6-10.6	0.4-6.6
低水路幅 (m)	520	780	890	790	840
河床勾配	1/590	1/520	1/650	1/880	1/1270
河床材料代表粒径(mm)	22	24	21	20	14
初期卓越砂州モード数	1-2	2-4	3-5	2-4	2-4

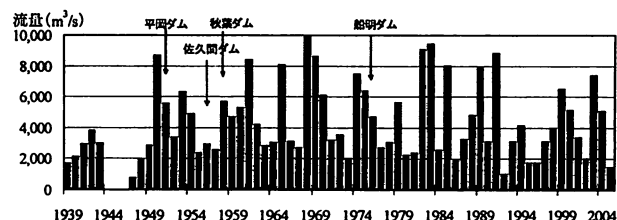


図-1 年最大流量の経年変化

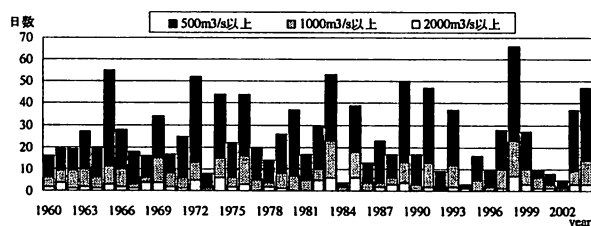


図-2 日流量から算出した出水規模ごとの生起日数

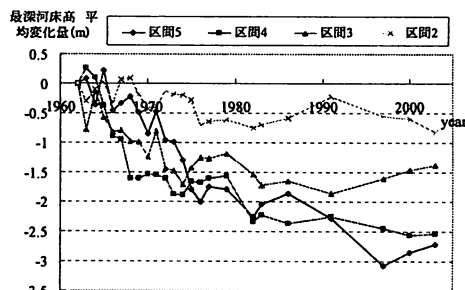


図-3 1961年からの最深河床変位量の経年変化

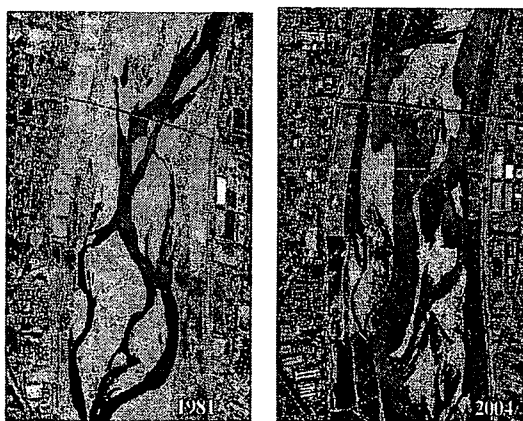


図-4 区間4における河道変遷状況

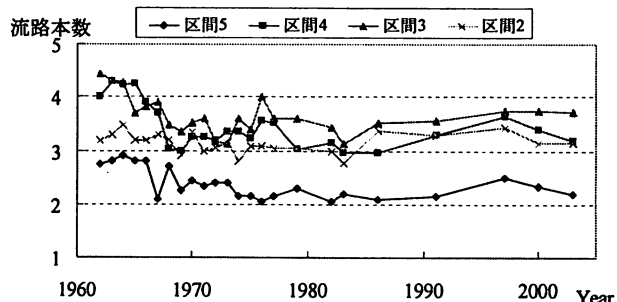


図-5 流路数区間平均値の経年変化

よって、下流の砂州河道がどのような影響を受けるかを数値解析により検討する。ここでは、実河川のスケールを考え、天竜川の区間4を参考に決め、直線流路上の砂州を形成させて検討する。ただし、高モードの複列砂州を対象とすると、複雑な現象となるため、今回検討する条件のうち、川幅のみ280m、560mと変化させ、より単純に議論できるようにした。各条件はそれぞれ、単列砂州、モード2の複列砂州を形成する条件となり、形成砂州による現象、伝播等の相違も検討することにした。また、平均粒径24mmを用いた一様粒径砂と砂分を0.6mm、粗砂分を80mmに代表させた2粒径混合砂を対象として、解析を行った。なお、地形変動等を検討するため、掃流砂を対象とした河床変動解析を行う。

流量は、天竜川の砂州支配流量と考えられる10年に1回起こる出水流量 $10,000\text{m}^3/\text{s}$ を一定に与えて考え、今回、流量の変化が及ぼす影響を排除した。また、流量の継続時間は、天竜川の時間流量を調べた結果から、100年分が50時間に相当する。

(2) 検討方法

本研究では、これまで著者ら⁴⁾が検討した数値解析による砂州の描写方法の特徴を生かして検討を行う。本研究で用いる描写方法の詳細とその特徴を表-2に示す。

ここでは、まず、手法2を用いて、平衡状態の砂州周期を求めてから、手法1を用いて平衡状態を算出する。その後、平衡状態の砂州を連ね、手法2を用いて、上流からの給砂条件の変化による砂州河道の変化を検討する。

なお、周期境界条件を用いた計算は、上流にも同じような砂州がいくつも存在する、ダム建設前の理想的な河道の状態を意味する。一方、手法2のような上流端境界条件に砂州形成の種となる微小擾乱のみを与え、供給土砂量をコントロールする場合、土砂供給だけでなく上流からの流れの条件も変化するわけであり、ダム建設後の上流端に砂州河道が存在しない状態で供給土砂をコントロールされることを意味する。

本研究で用いた数値解析モデルは、名古屋大学大学院水工学研究室で開発され、著者らが修正した水深方向平均平面二次元浅水流れ方程式を基礎式としたNHSED 2Dモデルを用い、流れおよび掃流砂を対象とした河床変動を解析する。(詳細は、文献4)～6)を参照されたい。)

(3) 各条件の平衡状態

単列砂州および複列砂州形成河道における土砂供給の変化に対する応答を検討するにあたり、手法1を用いて平衡状態を見出した。図-7に各条件下の平衡状態を示す。また、表-3に平衡状態における波高、波速を示す。

4. 数値解析を用いた土砂供給量の減少が砂州河道に及ぼす影響の検討

ここでは、数値解析を用いて砂州形成河道の河床低下現象を検討する。上流からの供給土砂の減少による河床

低下は、平坦河床上では、上流から徐々に伝播する(rotational degradation)。一方、一様粒径で構成された

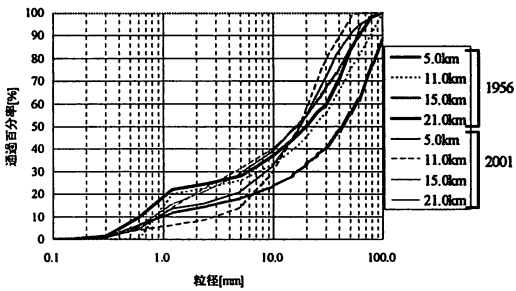


図-6 河床材料粒径の変化 (1956年, 2001年)

表-2 数値解析を用いた砂州の描写手法とその特徴

手法	初期河床に乱数で微小擾乱を与え、周期境界条件を用いる。	
	長所	短所
手法1	・理想的な平衡状態が計算可能。 ・計算時間が短縮可能	・現象が領域長によって変化する。 ・上下流一方向に伝播する現象には適用できない。 ・周期が変化する現象には対応不可能。
手法2	初期河床に乱数で微小擾乱を与え、同時に、継続的に上流端で流量(流速)に1%程度の微小擾乱を横断方向に与える。	
	長所	短所
手法2	・計算領域等、周期を気にする必要が無く、容易に決定できる。 ・一方向に伝播する現象も再現可能	・上流端に助走区間が必要であり、計算領域長を長くとる必要があるため時間がかかる。

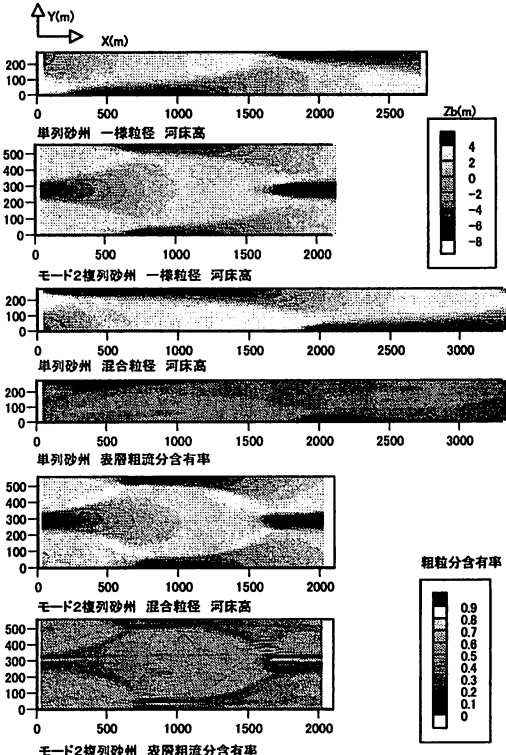


図-7 平衡状態の河床変位、粗粒含有率コンター

表-3 各条件下の平衡状態

河床材料	川幅	モード数	波長(m)	波高(m)	波速($\times 10^3\text{m/s}$)	一箇長分の砂州が覆下するのに要する時間(h:mm)
均一粒径	280	1	2,765	8.95	7.2	106.7
	560	2	2,100	8.42	5.8	100.6
2粒径	280	1	3,300	10.53	6.9	132.9
	560	2	2,000	9.57	5.6	99.2

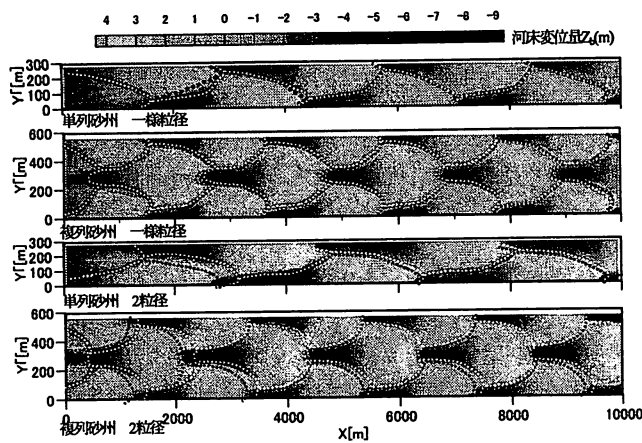


図-8 土砂供給停止後50時間後の様子

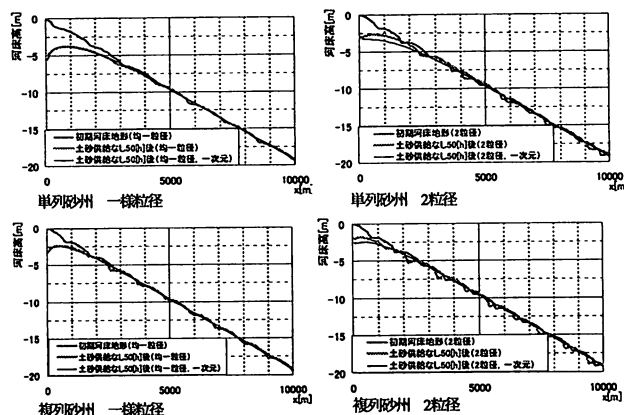


図-9 土砂供給停止後50時間後の縦断形状

河床にモード1の単列砂州が形成されていた場合、多少河床低下位置は平面的に偏りを持つが、平坦河床とほぼ同じ速度で徐々に下流へ伝播する。また、既往の研究⁷⁾、⁸⁾により、河床低下の伝播は、砂州の進行を遅らせ、上流から砂州を間延びさせることが分かっている。しかし、モード2以上の複列砂州上での影響はこれまで検討されておらず、河床材料が混合粒径で構成された場合も、河床の凹凸のために一次元的な現象との相違が大きくなる可能性があるが検討されていない。そこで、ここでは、モードの違いおよび河床材料の違いに着目し、ダムによる土砂供給の減少が河道に及ぼす影響について検討する。

(1) 土砂供給の減少が砂州河道に及ぼす平面的影響

a) 一様粒径構成河床上の単列砂州河道および複列砂州河道の場合

図-8に、土砂供給をなくし50時間経過した後の河床高コンターを示し、白色破線で上流部にダムが存在しない場合の理想的な前縁線位置を示す。この図から、河床材料が一様粒径で構成された単列砂州と複列砂州河道は、両者とも、上流からの供給土砂の減少の影響を上流部の砂州から受けることがわかる。上流部の砂州は、深掘れ部がさらに掘れ、わずかだが波速が落ちていることが確認される。さらに、前縁線形状もふくらみがなくなっており、形状も変化していることがわかる。

b) 混合粒径構成河床上の単列砂州河道および複列砂州河道の場合

次に、2粒径で構成された河床の砂州河道において検討した結果、基本的には、一様粒径と同様の現象が起こることがわかった。ただし、上流部の砂州の減速は、一様粒径の場合より著しい。また、粒度に関してしてみると、地形的に影響を受けている砂州上で粗粒化が起きていることが確認され、表層材料の影響範囲は、地形的影響範囲とほぼ同じであることが分かった。

なお、複列砂州河道は、長時間土砂供給量を減少させると、特に混合粒径構成河床においてモードの減少に近い現象が見られ、上流から徐々に砂州波長を伸ばしながら横断方向に乱れていくことが確認された。しかし、手法2を用い、平衡流砂量の供給を行ったケースでも同様な現象が起こり、供給したケースでむしろ早期に乱れることが確認された。これは、安定性が低い複列砂州で、さらに混合粒径で構成された河床という不安定になりやすい条件が加わり、上流部に周期的な砂州が存在しない境界条件によって、横断方向の乱れが促進され起こる現象だと考えられる。このことを踏まえると、河床低下傾向にある砂州が単列化するの、上流からの河床低下により直接的に促進されるものではないと言える。

(2) 河床低下の伝播の特徴

砂州形成河床における河床低下の縦断方向への伝播の特徴を一次元解析結果と比較して検討する。図-9は、土砂供給を0として、二次元および一次元解析を行った50時間後の断面平均河床高を示す。これらの図から、一様粒径構成河床の場合、一次元と二次元では、複列砂州の深掘れ部で若干違いがでるものの、河床低下の伝播状況はほとんど同じ結果となっていることがわかる。それに対し、2粒径を考慮した場合は、一次元計算結果と二次元計算結果の差が明確に出ており、一次元計算結果がより全体的に河床低下していることがわかる。一方、砂州形成河床で特に複列砂州形成河床では、縦断形状から見ても高く残る部分と低下する部分が明確に分かれていることがわかる。これは、砂州形成河床では凹凸があるため、流れと流砂に平面的特徴が現れるが、2粒径で構成された河床はよりその平面的分布が明確になり、河床低下の伝播状況が一次元的取り扱いでは予測できなくなることを意味している。

(3) 天竜川下流河道の状況に関する考察

今回、天竜川のスケールを用いて河床低下の伝播特性に関して検討を行ったが、前述した結果から上流からの土砂供給の減少による河床低下に関しては、一様粒径、2粒径構成河床ともに伝播速度が非常に遅いことが分かった。つまり、2章で述べた天竜川における河床低下は、砂利採取が主な要因であると言える。

また、今回の解析により土砂供給を行わないことで上

流から粗粒化が起こり、河床低下の伝播とともに粗粒化領域が進行することが確認された。この結果は現地の状況と異なる。実際の河川では、小流量時に細粒分が抜け出している可能性があるが、現解析は掃流砂のみの計算であることと混合粒径の取り扱い方法に問題があり、大出水時の細粒分の流出までは解析できない可能性がある。そのため、細粒分の流出現象の詳細は、今後検討が必要である。ただし、細粒分が表層から抜ける現象は、河床形状を大きく変化させる可能性は低いため、地形等の変形の議論に支障はないと言える。

5. 土砂供給の再開が砂州河道へ及ぼす影響の検討

ここでは、河床低下河道への土砂供給再開時の現象について、復元効果の面から検討する。検討に際し、4章で示した土砂供給が停止して50時間後の河道を初期形状として、土砂供給を再開し解析を行うこととした。

まず、再開時の土砂供給量を河床低下前の平衡流砂量とした場合の変化を示す。

図-10に示す河床高コンターにより、土砂供給の再開は、どのケースにおいても、土砂供給停止時に減速した上流部砂州を活発に動かすことがわかる。ただし、本解析では、上流部に砂州が形成しない、または、十分発達しない領域ができた。また、2粒径構成河床における複列砂州は、土砂投入により上流側砂州に横断方向の乱れが生じていることがわかる。本現象の要因は、4章(1)で論じた通り、上流境界条件の影響と複列砂州および2粒径構成河床という不安定性だと考えられる。

次に、図-11に横断方向平均河床の縦断面図を示す。この図からわかるように、土砂供給を再開すると、上流から徐々に河床勾配は回復する。一方で、下がった河床高はすぐには回復せず、河床低下領域が徐々に下流側へ伝播し、深掘れ部の低下が促進される領域が増えるとともにゆっくりと回復していくのがわかる。当然の結果だが、土砂供給の停止時間に河道から流出した土砂量を供給しない限り、元の河床高には回復しないことがわかる。

実際の河川では、もともと上流部の条件によって土砂供給量が変化するため、ダム建設前はどのようなバランスで河道環境が変化してきたのか可能な限り検討し、最適な環境を目指し、土砂供給を行う必要がある。

6. 土砂供給の質の変化が砂州河道へ及ぼす影響の検討

(1) 砂のみの土砂供給再開が及ぼす河道への影響の数値解析的検討

ここでは、5章と同様の初期条件で、2粒径構成河床上に砂のみの土砂供給を再開した場合の河道の変化を検討する。ただし、解析の安定性を考慮し、細粒砂河

床のときの平衡流砂量ではなく、2粒径構成河床時の砂分のみの流砂量で砂を供給することとした。

図-12に100時間毎の河床高コンターを示す。なお、この図の白線は、礫も含めた土砂供給の再開時の砂州の前縁線位置を示す。結果より、砂分の土砂供給は、上流から表層を砂に変化させ、砂州の状態も変化させた。図-12から分かるように、上流部で波長の短い砂州が確認される。また、砂の供給は、平衡流砂量でないため、河床低下は生じるものの、供給完全停止時より低下を食い止める結果となった。

(2) 砂のみの土砂供給が及ぼす砂州河道への影響解明に向けての実験的試み

次に、大粒径上を砂が流下していく現象を現在の混合粒径の河床変動解析では十分表現できない可能性を

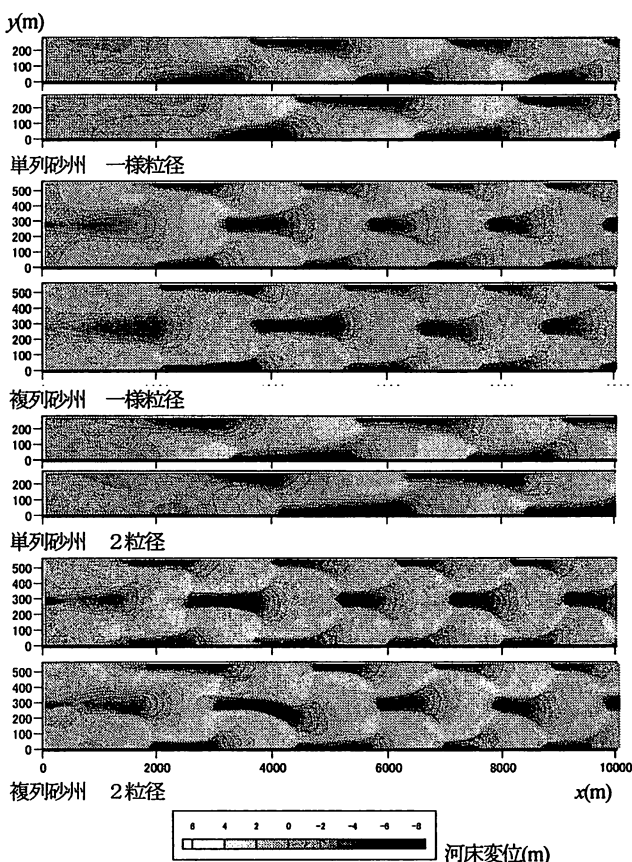


図-10 土砂供給再開50, 100時間後の河床変位コンター

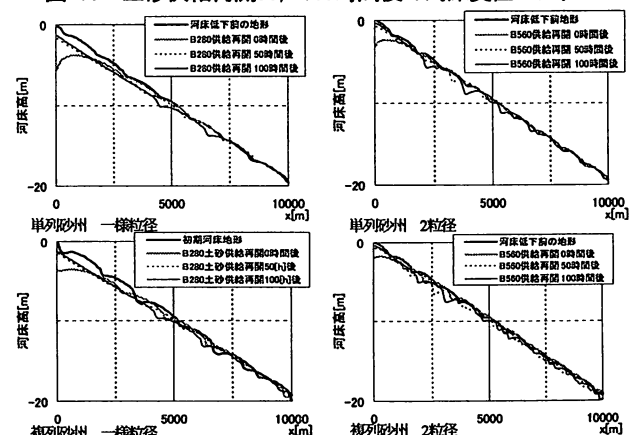


図-11 土砂供給再開後の縦断面形状

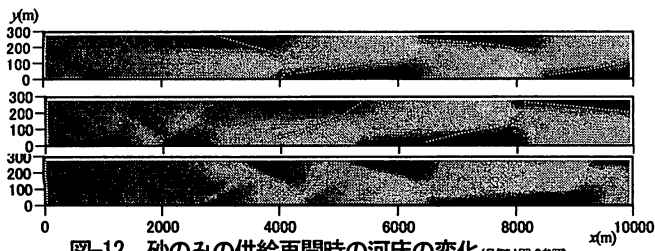


図-12 砂のみの供給再開時の河床の変化(尺野は図-8参照)

表-4 実験条件

流量 (m^3/s)	河床勾配	水路幅 (cm)	初期平均水深 (cm)	河床材料粒径(mm)	
				細粒分	粗粒分
0.0018	1/50	30	1.3	0.6	2.2

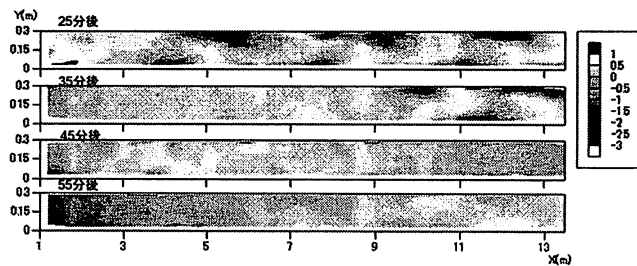


図-13 細粒分のみ供給時の河床の変化

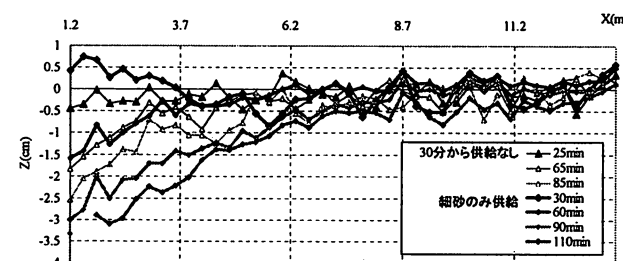


図-14 平均河床高縦断分布の時間変化

考え、砂のみの供給が河道へ及ぼす影響を検討するに際し、試験的に行った実験について簡潔に述べる。

実験は、実験施設等の制約から、表-4に示す条件で長さ16mのステンレス壁をもつ水路で行った。河床材料は、粗粒分と細粒分を8：2で構成させた。本実験条件では、通水開始10分後には波高3.5cm程度の明確な単列砂州が形成され、毎分6cm程度の速度で活発に流下する。

ここでは、通水開始30分後に供給土砂を混合粒径砂（毎分700g（細砂1：粗砂9））から細砂のみ（毎分700g）に変更し、河床高の変化を計測した。

実験結果として、河床変位コンターを図-13に、横断方向平均変位量の縦断変化を図-14に示す。ただし、図-14には30分後に土砂供給を停止した実験結果も示す。図-13からも見て取れるように、供給した細砂は、表層を流れ砂州の深掘れ部を埋め、上流から砂州を消失させた。また、土砂供給を停止したケースよりも河床低下を促進していることが図-14から分かる。この結果は、水理条件に対し平衡流砂量に満たない細砂の投入により、細砂の流下が粗粒分をも活発に動かし、河床低下を促進した可能性を示唆している。この現象のメカニズム、詳細については今後検討する予定であるが、細

粒砂のみの供給は下流河道の影響を考慮して上で行う必要があると言える。

7. 結論

本論文では、天竜川下流域を参考として、実河川スケールで解析を行い、砂州形成河道における土砂供給の減少、河床低下後の土砂供給再開が河道地形へ及ぼす影響の検討を行った。また、同時の単列と複列砂州、河床構成材料の違いによる現象の相違、河床材料とは粒度の異なる土砂供給が河床へ及ぼす影響を調べた。その結果、次の結論を得た。なお、これらの結果は、実際の土砂供給事業において下流河道環境の回復のためには、供給量、粒度ともに考慮する必要があることを示唆している。

- 土砂供給の減少による河床低下は、単列、複列砂州ともに砂州の進行を上流から遅らせ、間延びさせる。
- 砂州形成河道における土砂供給の減少による河床低下の伝播は、特に天竜川のような2粒径構成河床では、一次元解析では表現できない。
- 土砂供給の回復は、土砂を活発に動かし、上流から河床勾配を元に戻すが、河床低下分の砂が過剰に供給されない限り、河床高の回復は困難である。
- 供給土砂の粒度が急激に変化した場合、供給した砂の粒度によって上流から河道内地形自体が変化する。
- 平衡流砂量に満たない大量の細粒分の供給は、河道地形を変形させ、粗粒分をも活発に動かし河床低下を促進させる可能性がある。この現象に関して、今後メカニズム、詳細を調べる必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省中部地方整備局浜松河川国道事務所：天竜川ダム再編事業環境検討委員会第三回資料，2007。
- 2) 戸田祐嗣，花井駿介，辻本哲郎：天竜川下流河道における植生域の拡大・破壊と土砂捕捉に関する長期予測モデルの開発，河川技術論文集，vol.14，pp.151-156，2008。
- 3) 戸田祐嗣，高松伶介，辻本哲郎，土屋允人：天竜川下流域における河道地形と植生繁茂の変遷について，河川技術論文集，Vol.13，pp.201-206，2007。
- 4) 寺本敦子，辻本哲郎：砂州の形成過程に関する数値計算手法，応用力学論文集，第7巻，pp.975-982，土木学会，2003。
- 5) A. Pompromin, A. Teramoto, N. Izumi, T. Kitamura, T. Tsujimoto : Numerical simulation of bar formation in straight channels by the NHSED2D model, J. Applied Mech., JSCE, pp.629-938, 2002.
- 6) 寺本敦子，辻本哲郎：卓越砂州モード数へ及ぼす河床の粒度構成の影響，水工学論文集第48巻，土木学会，pp.1003-1008，2004。
- 7) 長田信寿，村本嘉雄，内倉嘉彦，細田尚，矢部昌之，高田保彦，岩田通明：各種河道条件下における交互砂州の挙動について，水工学論文集第43巻，pp.743-748，1999。
- 8) 寺本敦子，辻本哲郎：流量，土砂流入条件が砂州の変動に及ぼす影響の一考察，河川技術論文集，第10巻，pp.273-278，2004。

(2009. 4. 14受付)