

河床洗掘深, 洗掘速度に及ぼす洪水波形・河道 特性の影響 - 中小河川と大河川の比較 -

EFFECTS OF FLOOD HYDROGRAPHS AND RIVER CHANNEL CHARACTERISTICS
ON BED SCOURING AND RATE OF BED SCOURING

原田芳朗¹・福岡捷二²・田中浩史³・黒田勇一⁴・戸谷三知郎⁵
Yoshirou HARATA, Shoji FUKUOKA, Koushi TANAKA, Yuichi KURODA and Michio TOYA

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー Ph. D 工博 中央大学理工学部特任教授, 中央大学研究開発機構教授
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 新潟県土木部河川管理課企画調査係 主任 (〒950-0965 新潟県中央区新光町4-1)

⁴正会員 国土交通省北陸地方整備局 高田河川国道事務所 副所長
(〒943-0847 新潟県上越市南新町3-56)

⁵正会員 国土交通省中部地方整備局 静岡河川事務所 調査課長
(〒420-0068 静岡県静岡市葵区田町3-108)

It is important to estimate maximum scour depths during the flood for maintenance and management of river channels and river structures. Generally, floods in small-medium rivers are characterized by sharp shape and short duration. Therefore, bed variation analysis using hydraulic parameters of peak discharge is inappropriate for evaluating bed scour depths of small-medium rivers.

Temporal changes of bed surface height during the flood were measured in Hokura River and Yukiya River. The purpose of this study is to clarify the relationship between the speed of bed scour and the rate of flood level rise in small-medium rivers. Furthermore, we compare the bed variation characteristics between small-medium rivers and large rivers.

Key Words : *scouring depth, steep channel, flood hydrograph, direct measurement, bed variation, small-medium river*

1. はじめに

洪水時の河床の最大洗掘深を予測することは河道や構造物の維持管理において重要な課題である。一般に洪水時の洗掘深の予測には、洪水ピーク時の水流量が用いられる。これは洪水の継続時間が十分長く、河床形状が洪水ピーク時の水流量によって規定されると考えられるためである。河床洗掘深の算出方法には、経験的な方法から解析的な方法までいろいろあるが、近年では数値計算による河床変動解析がよく用いられる¹⁾。河床変動解析では、洪水ピーク期における水流量を一定時間与え、横断河床形状と比較し議論されることが多い。しかし、洪水後に観測された河床変動量には洪水減衰期の埋め戻しが含まれるため、必ずしも最大洗掘深と一致しないことが多い。このため、洪水期間中のハイドログラフの変化

を考慮した河床変動解析も行われている。ここでは、洪水時の水面形の時間変化に河床変動の影響も表れていると考え、実測された水面形を説明するように洪水流と河床変動を一体的に解くことによって洪水時の河床変動を明らかにしようとするものである²⁾。しかし、この場合には水面形の時間変化が実測されていることが必要でどの河川でもできるわけではないが、洪水時の河床変動を理解する有力な手段である。

大河川の河床変動については多くの調査研究が行われている。平成14年より3年間国土交通省国土技術研究会において従来、データ取得事例の少ない洪水時の河床変動に焦点を絞り、洗掘深の実測データを検討すると共に、二次元河床変動計算の有効性について議論している。この中で姫川、安倍川、富士川等の大河川で砂面計等を用いて洪水時の河床変動のモニタリングを集中的に実施し、洗掘深とそれを予測するための評価法との適用性の

検討が行われている³⁾。そこでは課題は明らかになったが、未だ予測ができる段階には達していない。一方、中小河川ではこのような検討事例は極めて少ない。中小河川は大河川に比べ洪水継続時間が短く、洪水波形が先鋭である。このため、洪水波形の緩やかな洪水ピーク時の水理量から洗掘深を推定したり、大河川で用いられる計算法の準用は正しい洗掘深の評価を与えないと考えられる。そのため非定常性の強い洪水波形を持つ中小河川の洗掘深には、洪水波形を考慮して評価する必要がある。

2. 砂面計を用いた洪水中の河床変動観測の意義と課題

洪水中の河床の時空間的な変動を観測することは危険なうえに、精度の高い河床高データを取得することは困難である。しかし、適正な河川管理を行う上では、洪水中の河床変動状況を理解することは重要なことである。本研究が対象としている砂面形等を用いた河床高観測データは、洪水中の河床高の変化を直接的に知る一つの有力な方法である。しかし、地下レーダーを除いてはこれまでは、縦横断的に孤立した地点で砂面形観測が行われており、収集されたデータの活用のためには、検討すべき多くの課題を抱えている。

河床変動は、当該地点に単位時間当たりに入流して来る流砂量と流出していく流砂量の差が河床高の変化となって表れる現象である。しかし、河床変動を引き起こす流砂量は、河道の平面形、横断形、河床勾配、河床材料などの河道特性や、洪水流ハイドログラフの特性によって異なるものであり、砂面形情報はこれらの河道、洪水流情報と同時に考慮して解釈しなければ、正しい情報となり得ない。このことは、一地点の河床高の観測値の測定だけでは、河床変動量を説明したことにはならないことを示す。また、中小河川の波形は、シャープである上に河床材料が大きいことから、河床変動に対する履歴効果が重要であり、以前の洪水流による河床状態はもとより対象洪水の外力に対する河床材料の応答遅れ等を考慮しなければならない。

これまで、砂面形を用いて河床高の時系列変化を測定してきた理由は、洪水中の河床高を直接測定し、河床の変化状況を知りたいという河川管理者の思いがあった。しかし、砂面形情報と他の必要な情報を同時に計測するように計画的に行われてきたようには見えない。最近いくつかの中小河川で、大河川と同様に砂面形データが集められて来た。中小河川では、洪水流や、河道特性の観測が十分行われていず、河床変動実態もほとんど観測されていない。そのような状況の中で、中小河川の洪水波形と河道特性に関係づけて観測された河床高の変化を論じることは、中小河川の河床変動実態を理解する

うえに必要なことである。本文では、河床変動観測には、以上の問題点を持ちながらも、集めうる河道特性、洪水流特性データを用いて、砂面形等から測定された河床洗掘深、洗掘速度について、洪水波形、河道特性の影響評価を試みている。最初に、中小河川である新潟県保倉川の県管理区間、岩手県雪谷川に砂面計を設置して観測された洪水中の河床高の時間変化データを用いて洪水中の河床洗掘機構と洪水波形の関係を明らかにする⁴⁾。次にこれら中小河川と姫川、安倍川等の大河川の河床変動について比較して論ずる。最後に、砂面形データを定量的な河川管理情報として、活用するために今後何を検討すべきかについてまとめている。

3. 洪水中の河床変動観測

(1) 河床高観測の概要

図-1に保倉川の対象区間平面図を示す。対象区間は18.4km（顕聖寺水位観測所）～19.6kmの県管理区間である。図中の赤丸の3地点に光電式砂面計が設置され、2004年から2005年にかけて洪水中の河床高の時間変化が測られている。図-2に観測に用いられた光電式砂面計を示す。砂面計には赤外線センサーが5cmあるいは10cm間隔で付いている。各センサーは赤外発行器と受光体で一体になっており、赤外光が砂、泥などで遮断されると回路がオフとなり、そのセンサー位置がデータロガーに記

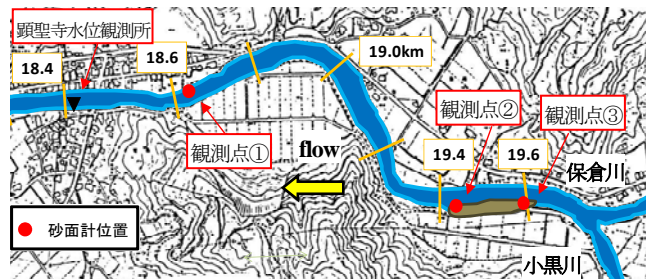


図-1 保倉川の対象区間平面図



図-2 観測機器の光電式砂面計

表-1 保倉川の河道特性

河川	観測点名	縦断距離(km)	川幅(m)	河床勾配	代表粒径(mm)
保倉川	観測点①	18.6	28.0	1/118	130
	観測点②	19.4	42.5	1/136	
	観測点③	19.6	40.5		165

録され洪水時の河床高が計測される⁹⁾。観測点は、洪水時の水理量を推定するために水位観測所の近くで、かつ直線的な河道区間を選定している。表-1に保倉川の各観測点の河道特性を示す。観測点②・③は左岸側の同じ寄州上に砂面計が設置されており、観測点③は支川の小黒川との合流点の直下流に位置している。観測点の川幅は30~40m程度であり、河床勾配は約1/126となっており急流河川である。図-3に各河川の河床材料粒度分布を示す。保倉川の観測点の平均粒径は観測点①・②で130mm、観測点③で165mmとなっている。上流側の観測点ほど河床材料がやや大きくなっているが、3観測点で概ね等しい粒径分布である。また表-2に保倉川の対象洪水データを示す。河床変動が生じた6洪水を検討対象としており、計画流量(470m³/s)規模を超える洪水が2回発生している。保倉川において2004年に観測された3洪水は洪水ピークが1山の形をした洪水であり、2005年に観測された3洪水は短い期間に2回洪水ピークが発生する2山の洪水波形を有している。また各観測点での水位は、顕聖寺水位観測所のH-Qデータに基づき準定常流計算より求めた値を用いる。

次に図-4に保倉川の比較対象とする安倍川、姫川の河道平面図と観測位置を示す。表-3に比較対象河川の河道特性を示す。姫川では山本基準地点(7.2k)の直下流において横断面全体を地下レーダー(6.97k地点)で、上下流(7.0, 7.1k地点)の4点において砂面計で同一洪水について河床高の時間変化が観測されている。地下レーダー観測は電磁パルスを放射し、その反射を捉えることにより非接触型での河床の測定が可能である⁹⁾。姫川の基準地点の観測所の川幅は大河川の中でも狭く、河床勾配が1/110と急流河川である。安倍川は河床に網状砂州が発生するため横断方向に大きな水面勾配ができる。水位と河床高の関係を正確に捉えるために横断面に複数の砂面計と水位計が設置されている。

(2) 観測結果

図-5に各河川の洪水位ハイドログラフと河床高の経時変化を示す。図-5(a), (b)は保倉川の1山と2山の洪水、図-5(c)は安倍川、図-5(d)-1, (d)-2は姫川での主流部と副流部の観測結果である。最初に、保倉川での河床洗掘過程について検討する。洪水波形が1山の洪水では、波形がシャープで洪水位ピークになる前に最深河床高に達して埋め戻され始める。計画流量(470m³/s)規模の大きい流量になると、最深河床高の発生時刻がピーク水位の時間帯に近づいていく。2山の洪水では、洪水位ピークに達する時刻とほぼ同じ時刻に最深河床高となる場合や洗掘と堆積が交互に繰り返される場合が見られる。2山洪水では1山目の洪水で流送された土砂が掃流力の低下とともに堆積し、2山目の出水でその影響を受けることにより洗掘と埋め戻しが交互に起こる変動が生じている。

次に大河川での河床洗掘過程として安倍川と姫川について検討する。大河川ではほとんどの洪水でピーク水位時に河床が最深河床に達し、そのまま洪水減衰期でも暫

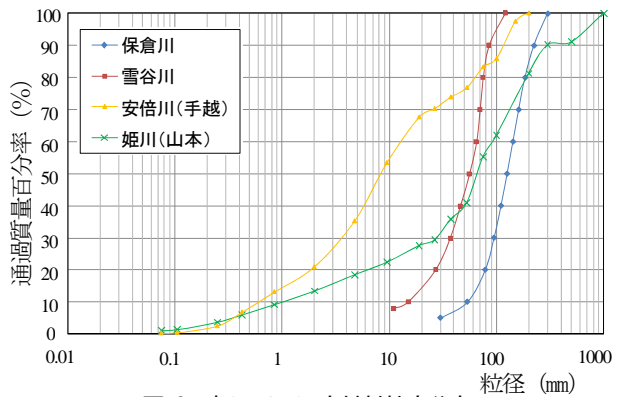
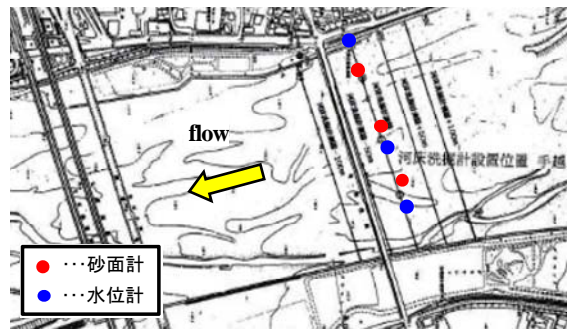


図-3 各河川の河床材料粒度分布

表-2 保倉川の対象洪水データ

洪水発生日	ピーク流量 (m ³ /s)	ピーク水深 (m)	ピーク流量時平均流速 (m/s)	洪水ピーク数
2004/2/23	235	2.72	2.4	1山
2004/7/18	500	3.74	3.5	1山
2004/10/21	320	3.09	2.8	1山
2005/6/28	610	4.08	3.8	2山
2005/8/16	370	3.29	3.0	2山
2005/8/22	290	2.98	2.6	2山

安倍川 手越基準地点 (4.1k)



姫川 山本基準地点 (7.2k)

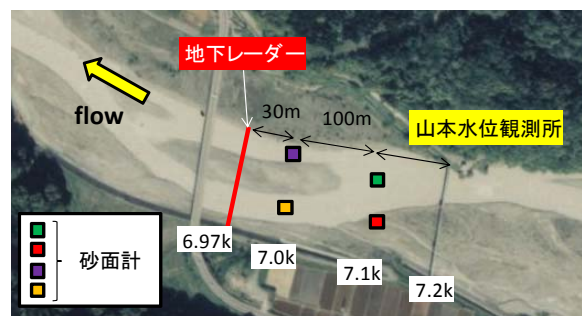


図-4 安倍川、姫川の河道平面図と観測位置

表-3 比較対象河川の河道特性

河川	観測点名	縦断距離(km)	川幅(m)	河床勾配	代表粒径(mm)
雪谷川	観測点Ⅰ	8.7	30	1/240	65
	観測点Ⅱ	10.4	53		
	観測点Ⅲ	11.3	35		
安倍川	手越	4.1	500	1/250	13
	門屋	14.3	450	1/125	50
	牛妻	17.3	370	1/125	60
姫川	山本	7.0	150	1/110	90
		7.1	150		

くの間河床高が維持される傾向が見られる。安倍川は河床形態が網状流路のため水流の発散・集中が生じ、洗掘深が断面内で異なる。図-5(c)が示すように、手越地点では右岸に水流が集中し河床の洗掘深は洪水波形と同じ形で推移して最大で2m程度洗掘し、やがて埋め戻されている。他の横断位置では、洗掘深は小さい。洪水波形と河床高波形の関係から安倍川では洪水時の土砂の移動が活発であることを示している。姫川の観測点では砂州によって流路が二分されており滞筋主流が上流右岸から下流左岸に流れている。砂面計観測では図-5(d)に示す洪水においてピーク水位付近では砂州上も冠水しており、滞筋主流部の砂面計観測地点でピーク水位発生時刻にはほぼ最深河床に達していることが分かる。また洪水減衰期には元の河床高まで徐々に埋め戻されている。地下レーダー観測では砂面計観測に比して河床変動量が大きく、全体的に堆積傾向にある。図-5(d)で砂面計と地下レーダーの初期河床高が異なっているのは、地下レーダーが砂面計より下流に位置しているためである。土砂の縦断方向の連続的な動きは主流部の上流右岸砂面計で最深河床に達すると、下流左岸の地下レーダー観測では上流からの土砂供給により堆積が生じている。また副流部の下流右岸砂面計での洗掘深とその下流の地下レーダーの堆積深はほぼ同じ変動量であり、土砂の連続的な動きが分かる。次に図-6に地下レーダーと砂面計の洪水時の最大河床変動量の比較を示す。洗掘深は砂面計、地下レーダー共に洪水直前の河床高から洪水時の最深河床高を引いた値とする。堆積が起こっている地点では最大堆積深を示している。また横軸は地下レーダー観測点断面における横断距離を示しており、上流の砂面計設置位置とも対応している。洗掘深は砂面計上流右岸で0.85m、下流右岸で1.5m、地下レーダー左岸中央で0.25m、右岸中央で0.85mである。砂面計下流右岸の洗掘深が大きい理由は、下流右岸に普段より土砂が堆積しており洗掘されやすい条件であったためと考えられる。しかし、砂面計観測による洗掘深は砂面計と地下レーダー観測点の縦断的な位置関係の違いによる差だけでなく、全体的に地下レーダーに比して洗掘深が大きい傾向にある。これは砂面計観測では河道内に構造物を設置しているため、地下レーダーに比べて洗掘深が大きめに評価される可能性が高いと考えられる。

4. 中小河川と大河川での洗掘深の検討

中小河川と大河川との洪水ピーク時の水理量を用いた洗掘深の比較を行う。図-7に無次元掃流力と無次元洗掘深の関係を示す。横軸にピーク水深 h_p 、河床勾配 I_b 、代表粒径 d_{60} を用いた無次元掃流力を、縦軸に最大洗掘深 S 、代表粒径 d_{60} を用いた無次元洗掘深を示す。無次元掃流力の増加により無次元洗掘深が増加する傾向が概ね捉える

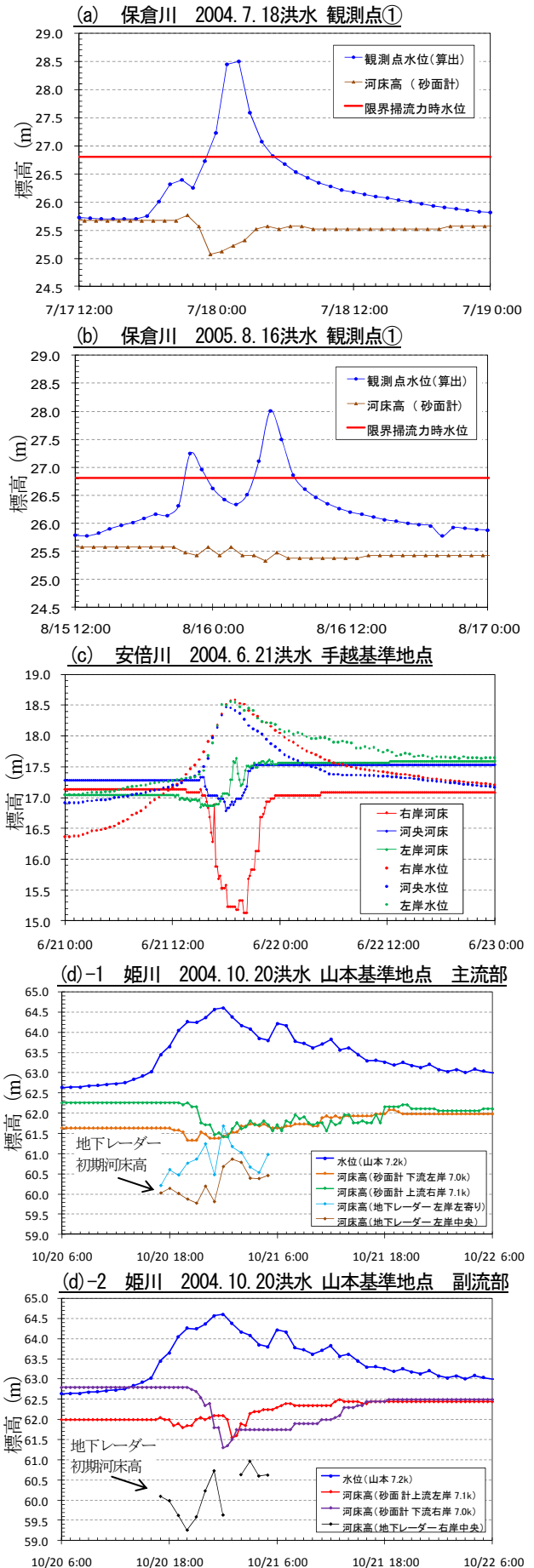


図-5 洪水位ハイドログラフと河床高の経時変化

ことができる。中小河川と大河川で同程度の大きさの無次元掃流力で無次元洗掘深を比較すると中小河川では大河川に比べ無次元洗掘深が小さくなっている。これは中小河川の洪水水位の継続時間が短いことや河床材料が大河川に比べ大きいこと等の理由が挙げられる。中小河川では洪水継続時間が短いため、ピーク水位が計測されてもその水位に対して見合った河床形状となるまで時間を要するためである。中小河川での洗掘深を大河川と同じ基準で評価すると、無次元掃流力に対して洗掘深は過大評価されることになる。以上より中小河川と大河川の洪水波形と河床高の時間変化の関係から、洪水波形の違いや河道特性が洗掘過程に大きな影響を及ぼしていることが分かる。

5. 河床洗掘深・河床洗掘速度に及ぼす洪水波形の影響

中小河川の河床高の時間変化に対する水位ハイドログラフ（洪水波形）の非定常性の影響を検討する。図-8に洪水水位上昇速度と河床低下速度の定義を示す。水位上昇速度は、限界掃流力（平均粒径が一様粒径と仮定）に達した時刻の水位からピーク水位までの水位上昇量をその経過時間で割って算出する。ただし、計算上限界掃流力に満たない洪水ではピーク水位とピーク水位時刻より前の最も近い時刻の観測点水位の水位差をその経過時間で割って水位上昇速度としている。また、河床低下速度は河床が掘れ始めた時刻から最深河床までの実測洗掘深をその経過時間で割って算出している。洪水波形が2山の洪水については水深が大きい方の水位と河床高の時間変化を用いて求めている。図-9に保倉川、雪谷川の洪水中の無次元水位上昇速度と無次元河床低下速度の関係を示す。横軸と縦軸は、水位と河床高の時間変化率 h_t 、 z_t をそれぞれ最大摩擦速度 u_* で割って無次元化して示している。凡例の各記号は観測点を、色は各洪水を示しており、白抜きの記号は2山の洪水波形の結果である。これより保倉川で観測された6洪水において無次元水位上昇速度が増加するにつれて、無次元河床低下速度も増加することが分かる。洪水波形が1山の洪水は流量規模の増加とともに無次元河床低下速度もほぼ増加する傾向にある。それに対して2山洪水では洪水の中に洗掘と堆積が交互に発生するため、流量規模の増加による河床低下速度の増加の関係は1山洪水と対応していない。洪水波形が1山の洪水は同一洪水において観測点ごとに比較すると、観測点②、①、③の順に無次元河床低下速度が増加する傾向にある。これは、②に比べて①の無次元掃流力が大きいことにより、①の洗掘量が大きくなると考えられる。保倉川の6洪水において1山と2山の洪水波形を合わせて観測点ごとに比

較すると、4洪水で観測点③の河床低下速度が観測点①より大きくなる傾向が見られる。表-1に示すように観測点①は川幅が狭いため、観測点①の水深は観測点③より大きく、水位ピーク付近の観測点①の無次元掃流力は観測点③より大きくなっている。しかし、図-1より観測点③は内岸砂州前縁に位置し、洪水時には洪水流が直線的に流れることにより水衝部にあたるためと考えられる。このように洪水中の河床変動の直接観測により洗掘深・堆積深の特徴は、理解されるようになったが、洗掘・堆

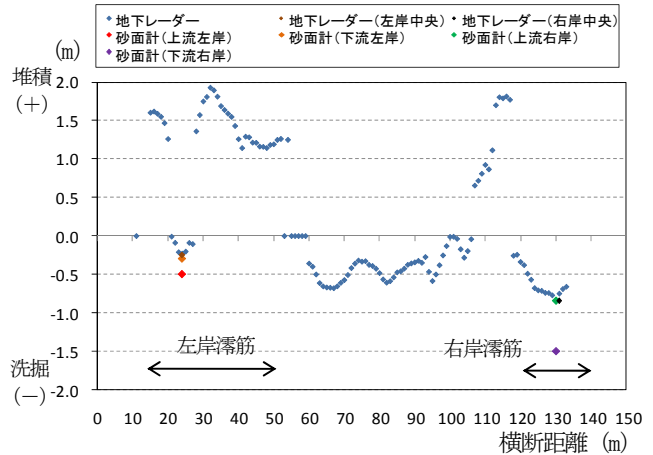


図-6 地下レーダーと砂面計の洪水中の最大河床変動量の比較

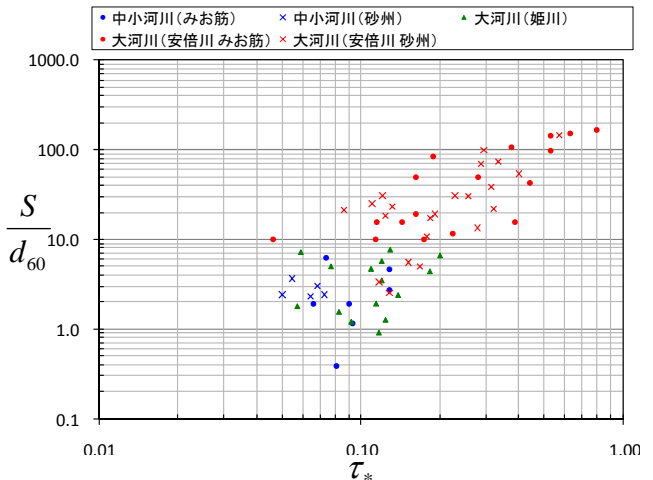


図-7 掃流力と洗掘深の関係

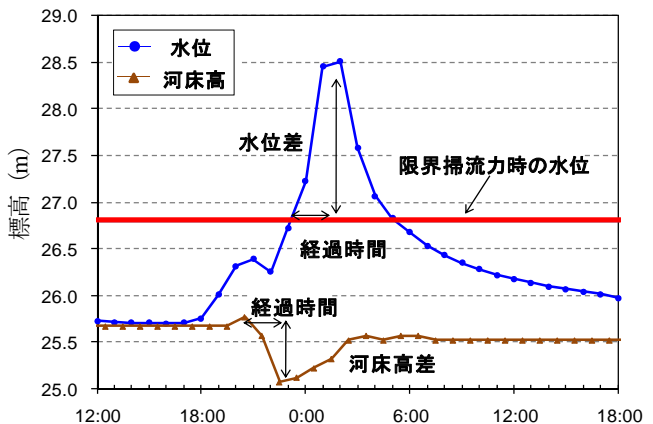


図-8 洪水水位上昇速度と河床低下速度の定義

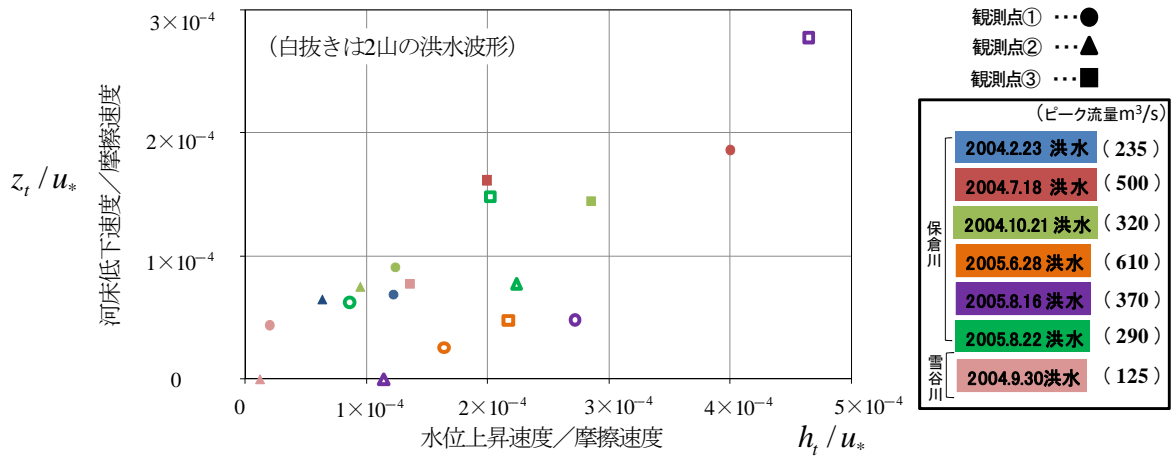


図-9 無次元水位上昇速度と無次元河床低下速度

積の定量的な議論には至っていない。本研究では、砂面形等で観測された河床変動データと洪水流、および河道特性との関係についての分析を行ったが、2. で述べたように砂面形観測データには実現象との対比において多くの課題を有している。本文で示した結果は、現存する砂面形データを用いての解釈に止まっている。この解釈の一般性を持たせるためには、以下のことが検討されなければならない。

まずは、石礫河川における砂面形の精度と河床変動の値を正しく把握することである。このためには、著者らが石礫河川の現地実験を数年にわたって行っている常願寺川の大規模試験流路において⁷⁾、複数の砂面形を設置し、異なる流量条件での流砂量の流出入の変化や河床形態の変化、河床材料の変化、水面形の変化による河床高の時空間変化を調べ、砂面形を用いた河床変動の有効な測定法、配置法、とそれに対する洪水流・河床変動の二次元解析法を検討する。また、河床縦横断測量による河床高の測定値と砂面形データを比較し、石礫河川の河床変動の評価に対する砂面形の精度を明らかにするとともに、問題があればその改良を行う。洪水ハイドログラフによる河床変動機構の違い等については、砂面形等による観測データ及び河床の縦横断測量結果に対してこれらを説明する二次元河床変動解析を適用し理解を深めていくことも必要である。これらによって、実河川での砂面形による河床変動データを用いた信頼性の高い河道管理を行えるようにする。

6. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 中小河川と大河川での洪水波形と河床高の時間変化の関係

各河川の洪水波形の違いと河道特性から、中小河川では洪水波形が1山の洪水では、洪水位がピークになる前に最深河床高に達して埋め戻され始めるという傾向

が見られる。それに対して大河川ではほとんどの洪水でピーク水位時に最深河床に達し、そのまま洪水減衰期でも暫くの間河床高が維持される傾向が見られた。

(2) 洪水ピーク時の水理量による洗掘深の比較

中小河川では洪水波形が先鋭であり洪水継続時間が短いため、ピーク水位に見合った掃流力に相当する河床洗掘は発生しない。そのため大河川と比べて同じ規模の無次元掃流力に対して無次元洗掘深は小さくなる。

(3) 中小河川の河床低下速度に及ぼす洪水波形の影響

中小河川では特に1山の洪水において洪水位の無次元上昇速度が増大すると河床の無次元低下速度が増大することを実測データより示した。

(4) 砂面計観測の課題

砂面計を用いた現在の河床変動観測の問題点を示し、観測精度の向上、活用のための今後の調査研究方法を示した。

参考文献

- 1) (財) 国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法，山海堂，1999.
- 2) Suzuki, K. Fukuoka, S. and Matuso, K.: Bed material structure and sand transport by flood flows in the estuary of the Chikugo river, *Proceedings of the Third international conference on the estuaries and coasts*, Vol.1, pp. 101-108, 2009.
- 3) 国土交通省国土技術研究会，河床変動の特性把握と予測に関する研究報告書，2005.
- 4) リバーフロント整備センター，中小河川における洪水時の河床変動観測報告書，2006.
- 5) 国土交通省北陸技術事務所報告，第33号，1986.
- 6) 板垣修，小沼仁，丸山誠：急流河川姫川での洪水管理方法の取り組みについて，北陸地方整備局管内技術研究会，高田工事事務所，2002.
- 7) 塚本洋祐，福岡捷二，須賀正志，澤原和哉，長田健吾：石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状，河川技術論文集，第14巻，pp.7-12, 2008.

(2009. 9. 30受付)