

砂礫の敷設・供給が下流河道へ 与える影響とその応答速度

INFLUENCE OF IMPORTING GRAVEL AND SAND ON RIVERBED TOPOGRAPHY AT THE DOWNSTREAM AREA AND ITS RESPONSE RATE

福島雅紀¹・武内慶了²・箱石憲昭³

Masaki FUKUSHIMA, Yoshinori TAKEUCHI and Noriaki HAKOISHI

¹正会員 工博 (独)土木研究所 河川・ダム水理チーム 主任研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究室 研究官 (〒305-0804 つくば市旭1)

³正会員 (独)土木研究所 河川・ダム水理チーム 上席研究員 (〒305-8516 つくば市南原1-6)

Sand and gravel are dredged at the upstream area of a cross-river structure, for example dam, weir etc. and placed at the downstream area of the structure for the purpose of improving river environments, recovering sediment continuity, solving sedimentation at reservoir and so on. After these works, environmental surveys were conducted intensively to check its effect, but few reports were published from the point of view of flood control. These works might make sedimentation rate at the backwater area of weir at the downstream. In this paper, gravel transport rates were investigated with low-frequency communicator and influences of importing gravel and sand on the sedimentation rate were confirmed with cross-section surveying in the Tama River. As a result, imported gravels reached weir at the downstream in two or three years and the sedimentation rate did not increase after the gravels reached the weir.

Key Words: response of river channel, sediment, continuity, low-frequency communicator

1. はじめに

植木ら^{1, 2)}に述べられているように、多摩川永田地区の上流端では約3km上流に位置する小作取水堰で浚渫した砂礫を2001年以降ほぼ毎年敷設している。敷設された砂礫は出水に伴って生じる水流によって侵食され、その結果として下流河道へと供給される。近年、ダムにおいては、堆砂対策の一手法として、もしくは下流河道の環境改善を目的として、貯水池で掘削・浚渫した土砂をダムの下流河道へと置き土する事業が20程度のダムで実施されている³⁾。その影響を把握するため、ダムの下流河道では瀬淵構造、礫間への土砂の堆積状況、砂州の発達状況、河床表面に見られる藻類の更新状況などが調査されている。永田地区においても同様な調査が実施されたことは文献1, 2, 4等で述べられた通りであるが、主として河川環境に着目し、砂礫の敷設地点から下流に1km程度の区間に限定した調査となっていた。治水面から見ると、むしろ下流に存在する堰での堆砂、または流送過程で生じる局所的な土砂の堆積などが流下能力に与える影

響として懸念される。堰の構造によっては流れを固定化させ堰上流部での土砂の堆積、河積の減少を引き起こす可能性があり、多摩川でも徐々に堰の構造の改善が進められている。砂礫の敷設地点から約5km下流には昭和用水堰(固定堰, 48km)が存在することから、砂礫の敷設・供給の影響を確認しておくことが重要である。

そこで、昭和用水堰上流の堆砂状況を確認するため、定期横断測量結果から砂利採取が完全に禁止された1964年以降の土砂収支を算定した。また、下流河道への影響の評価する際、敷設された砂礫の流下速度が重要となることから、礫に低周波発信器⁵⁾を取り付け、2006年10月出水(平均年最大流量規模)および2007年9月出水(基準地点の石原で戦後2番目の大きさ)を対象として、出水に伴う礫の移動状況を調査した。さらに、一次元不定流計算によって出水中の摩擦速度の変化を算定し、礫の移動限界摩擦速度との関係から、出水中に生じる礫の平均的な移動速度を算定した。以下、第2章では昭和用水堰上流における土砂収支の算定結果、第3章では低周波発信器を用いた礫の移動状況調査結果を示す。第4章では一次元不定流計算結果から平均的な礫の移動速度を推定し、

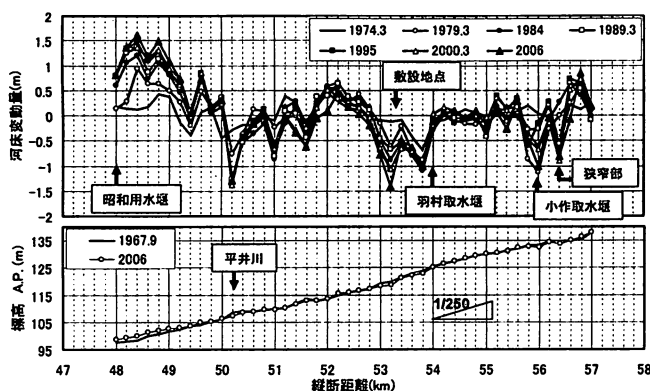


図-1 河道縦断形の変化

敷設した砂礫の影響がどの程度の期間で堰上流に到達したかについて言及する。最後に、これらの調査結果から得られた知見を整理するものとする。

2. 砂礫の敷設地点下流に位置する堰の堆砂状況

(1) 河床縦断形の変化と土砂収支算定範囲の特定

多摩川では1967年9月以降、数年に一度の割合で定期横断測量が実施されており、砂利採取禁止後の地形変化を検討する上で都合がよい。ここでは、昭和用水堰(48km)、羽村取水堰(54km)、小作取水堰(56km)を含む48～57kmの延長9km区間の河道縦断形の変化を調べ、昭和用水堰の背水の影響がある区間を特定する。また、高水敷に堆積した細粒土層厚についても確認することで、平面的な土砂収支の算定範囲も特定する。

図-1の下側には、1967年9月と2006年のH. W. L. 以下の河床の平均的な標高(以下、堤間幅平均河床高)の縦断形を、上側には1967年9月を基準とした堤間幅平均河床高の河床変動量を示す。ここで、上側の図では見易さのため約5年毎にデータを間引いた(以下、同様)。これらの図を見ると、昭和用水堰の上流約2km区間で顕著な堆積を確認できる。また、50.2km付近、羽村取水堰下流、小作取水堰周辺では顕著な侵食を確認できる。1964年に砂利採取が禁止された後の地形変化として、堰上流での堆積、下流での侵食はよく知られた現象であるが、それだけでは説明できない変化も生じている。この理由を追求するためには、堰の竣工年に加え、砂利採取の実施箇所を考慮する必要がある。昭和用水堰、羽村取水堰、小作取水堰の竣工年は、それぞれ1955年、1923年、1980年である。ただし、前の2つについては既存の堰が改築され現在の状態となった年である。また砂利採取地点としては、当該区間で満遍なく実施されていたが、1920年以降、羽村堰上流から狭窄部である56.4kmまでの区間ではほとんど採取が行われていなかったようである⁶⁾。

これらの情報を付加して考えると、狭窄部上流では砂利採取によって低下した河床に土砂が堆積し、その下流では一時的に土砂の不足した時期があったと推定される。

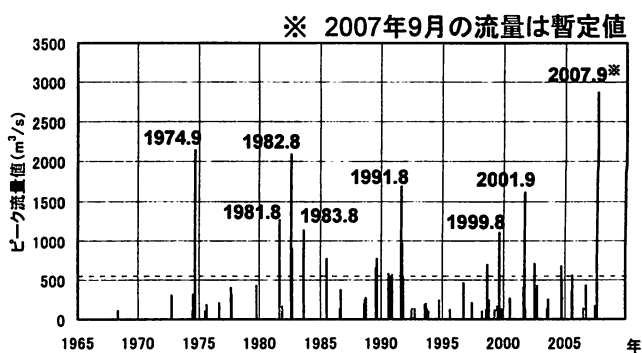


図-2 出水の発生状況(調布橋水位・流量観測所)

それが小作取水堰建設前に生じた河床低下であり、堰の建設後は堰の敷高が河床高とほぼ一致していたことから河床高の変化はほとんど生じていない。羽村取水堰上流では竣工後約40年が経過しており、その上流での砂利採取量が少なかったと予想されることから、河床はほぼ動的平衡状態となっていたと考えられる。そのため、上流からの供給土砂量が減少しても羽村堰上流の河床はほとんど影響を受けなかったが、堰下流では砂利採取による河床低下に加え、供給土砂の不足による河床低下が進行した⁶⁾。昭和用水堰上流では、1955年の堰の竣工後も1964年までは砂利採取の影響で河床が低下しており、砂利採取禁止後は急激に土砂が堆積した。また、50.2km地点は1967年当時の縦断形が上に凸の形状であり、侵食しやすい縦断形であったと考えられるが、現地を確認すると、平井川との合流点には土丹層(軟岩)が露出しており、そのような箇所では砂利採取が行われなかったと予想される。この土丹層が露出した河床は、砂利採取によって周辺の河床が低下する中で一時的に突出した形状となったが、土丹層の固結した材料特性から侵食されずにある程度の期間は維持されたが、図-2に示すように1974年9月出水(流量基準地点の石原で既往最大規模)が発生し急激な侵食が生じたものと類推された。

写真-1は、昭和用水堰上流の航空写真(2007年9月出水直後撮影)である。図-1の結果から49.8km地点までを昭和用水堰の堆砂区間と考え、秋川合流の影響を排除し、48.8～49.8km区間の土砂収支を評価するものとした。図-3は、49.0kmおよび49.4km断面の横断形変化と細粒土層厚(バーチャートで表示)を調査した結果である。細粒土層厚については、写真-1の★印を付した高水敷上で検土杖を河床の鉛直下方に突き刺し、その貫入長を計測することで調査した。個々の地点で近傍の3地点の調査を行い、その平均値をもって細粒土層厚とした。低水路河岸際の礫層の位置が分かる場所で同様な調査を行い、検土杖による調査でほぼ礫層の位置を特定できることを確認している。ちなみに、調査は2009年2月に実施した。図-3には代表的な2断面を示したが、2006年の定期横断測量結果を河床表面としているため、細粒土層厚の表示には現状での河床高との相違がある可能性はあるが、

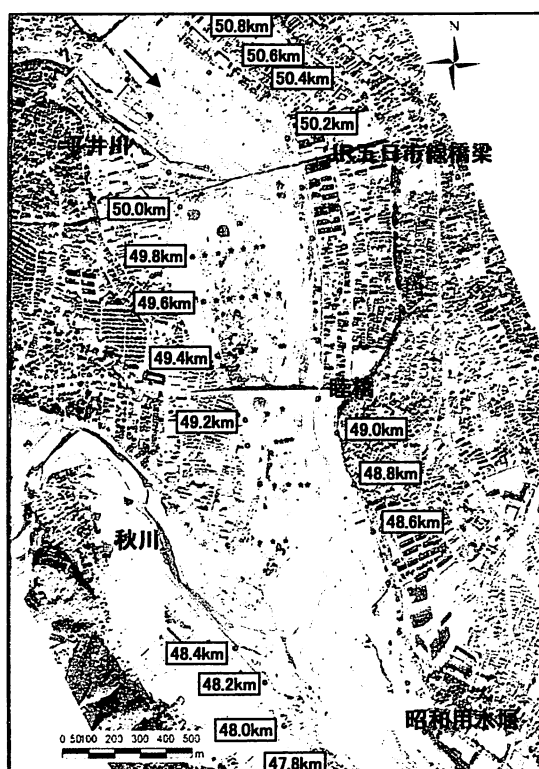
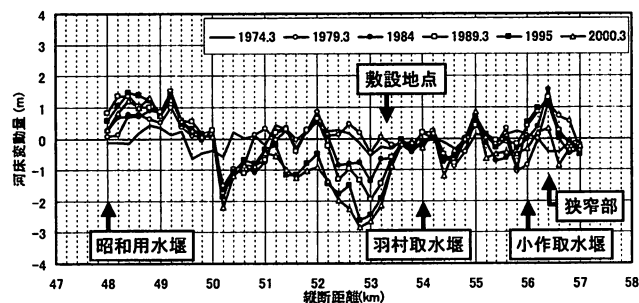
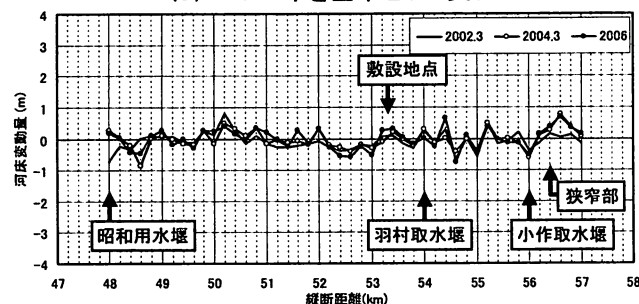


写真-1 昭和用水堰上流の河道の状況



(a) 1967年を基準とした変化



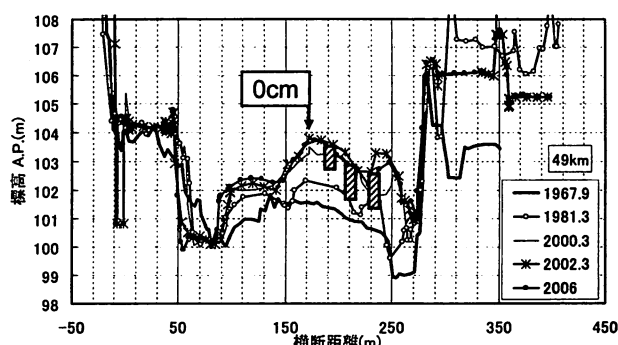
(b) 2000年を基準とした変化

図-4 低水路平均河床高の変化

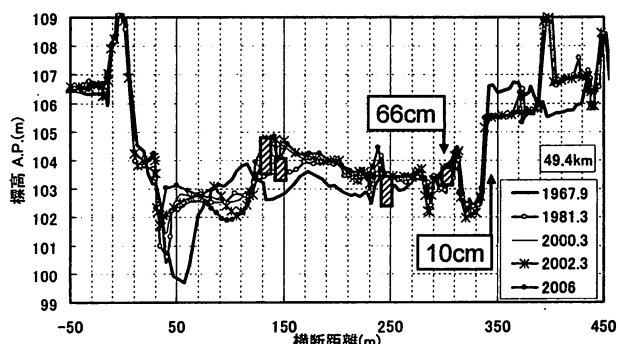
1981年3月以降はほぼ細粒土砂のみの堆積で高水敷が形成されてきたと考えてよいと考えられた。そこで、敷設する砂礫に細粒土砂がほとんど含まれていないことから、低水路内の河床高の変化に焦点を当てることとした。

(2) 堰上流の堆砂状況と砂礫の敷設・供給の影響

図-4(a), (b)は、それぞれ1967年、2000年を基準とした低水路平均河床高の変化を示す。堤間幅平均河床高の変化と同様に、49.8kmまでの区間を堆砂区間と考えることができる。2000年までの変化から、昭和水堰上流



(a) 49.0km断面の変化



(b) 49.4km断面の変化

図-3 河道横断形の変化と高水敷への細粒土砂の堆積状況

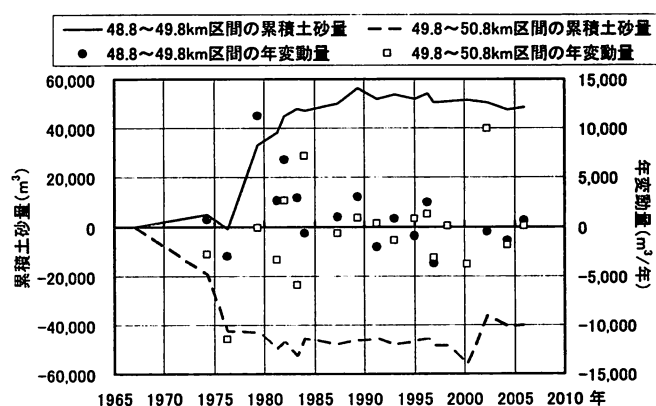


図-5 昭和用水堰上流区間での土砂量の変化

2km区間での堆積、羽村取水堰下流、いわゆる永田地区（51.7～53.2km）での急激な侵食を、低水路の変化に限定したことにより明確に確認できる。2000年以降の変化としては、一時的に堆積、侵食を受ける箇所はあるが、大きな変化は生じていない。図-5は、1967年を基準とした48.8～49.8km区間および49.8～50.8km区間の土砂量の経時変化を累積土砂量および年変動量で示した。なお、49.8～50.8km区間は対照区間、土砂量は空隙を40%とした実質的な体積とした（以下、同様）。1976年から1990年にかけては急激な土砂の堆積が見られたが、その後は安定傾向にあることが分かる。年変動量で見ても、1976年から1979年にかけて約11,000m³/年と上流からの年間の供給土砂量に匹敵する量が堆積していたが、1985年以降は±4,000m³/年程度、2000年以降は±1,500m³/年程度で推移している。対照区間では全く逆の変化が生じているが、1974年9月出水に伴う変化が顕著であり、それ以

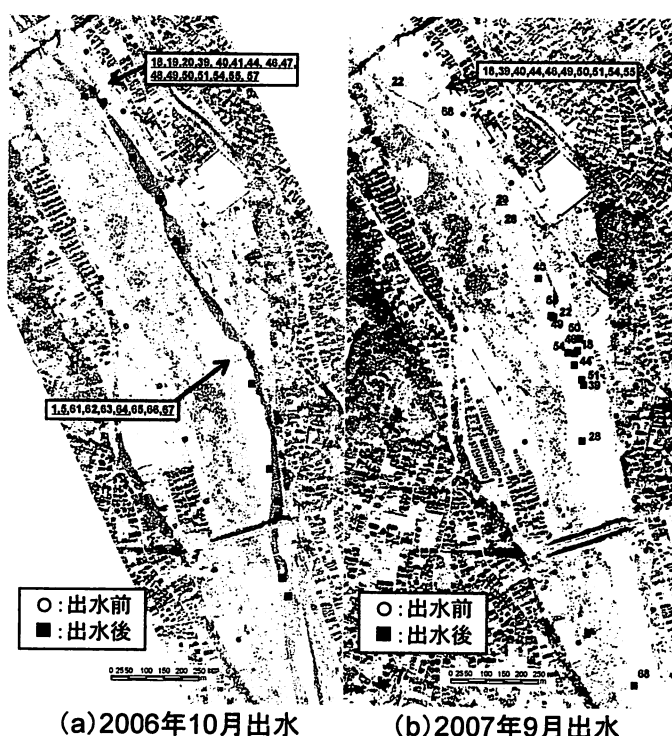
降大きな変化が生じていないことから、前述したように既往最大出水に伴う土丹層の侵食が原因であったと考えて問題ないと考えられる。2000年には一度急激な土砂の堆積が生じたが、これは2001年9月出水に伴う影響と考えている。50.2km付近の横断形の変化を見ると、2001年3月から2002年3月にかけて低水路内に土砂の堆積を確認できるが、その間に敷設された土砂量は6,400m³であり、2001年9月出水および2002年の出水で敷設された砂礫が50.2km付近まで流送されたと考えても、1km区間に20,000m³の土砂が堆積したことを考えると、その影響は小さい。また、2000年から2002年にかけて、昭和用水堰直上流で河床が低下したが、2000年に実施された魚道の改築の影響であることを横断図の変化から確認している。

以上の結果を整理すると、1964年の砂利採取禁止後、昭和用水堰上流(48.8～49.8km区間)には、上流から供給される量に匹敵する量の土砂が一時的に堆積したが、1985年頃には徐々に堆積量が減少し、1990年以降にはほぼ動的平衡状態に達していたと考えられた。2000年の魚道の改築により累積土砂量の減少が見られたが、その後安定しており、砂礫を敷設・供給したことの影響は確認できない。詳細については触れなかったが、流送過程で生じる局所的な堆積も確認できなかった。53.3km付近に敷設した砂礫が堰地点まで到達していない可能性もあり、以下、その点について考察を加える。

3. 低周波発信器による礫の追跡実験

本章では、礫の移動速度を低周波発信器を用いて調査し、敷設した礫の伝播速度を推定した結果について述べる。低周波発信機は、直径46mm、高さ51mmの円筒形であり、電波の発信周波数が10～20kHzと比較的低い周波数帯を用いていることから⁵⁾、砂礫や水中に埋没した場合でも10m程度は電波が到達し、出水で流された後の発見率が高い。調査にあたっては、出水期前に現地から礫を採取し、低周波発信器を埋め込んだ上で(以下、発信器付礫)、礫径程度の深さに埋設する。これは、多摩川河川敷の利用が盛んであること、小規模出水時に礫の移動が生じないようにすることを目的としたものである。低周波発信器には、傾斜センサーが装備されており、埋設時には電波を発信しないように設置している。礫が45度程度傾斜すると電波を発信し始めるが、電池寿命のため発信期間は約2ヶ月間となっている。そのため、上記のような埋設方法とした。なお、出水後は2ヶ月以内に電波受信機を持参し河道内を探索することとなる。

図-2に示したように、2006年10月、2007年9月にはそれぞれピーク流量が430m³/s、2,800m³/s程度の出水が発生しており、その時に発信器付礫が移動した状況を図-6に整理した。また、表-1、2には、図-6から2点間を直線的に移動した場合の移動距離、出水後に確認された場



(a) 2006年10月出水 (b) 2007年9月出水

図-6 発信器付礫の移動状況

表-1 2006年10月出水時の発信器付礫の移動状況

礫番号	粒径(mm)	移動距離(m)	水深(m)	埋没深(m)	V _s (m/min.)	V _s ave(m/min.)
21	113	1184	0.1	0	0	0.81
23	108	1147	0	0	0	0.78
24	107	720	0.3	0	0	0.49
25	118	540	0.4	0.2	0.37	
26	114	1517	0.8	0	1.03	
27	111	515	0.3	0	0.35	
69	123	178	0.2	0	0.12	
63	118	427	0.4	0.1	0.29	
62	105	696	0.5	0	0.47	
61	101	465	0.1	0.3	0.32	

表-2 2007年9月出水時の発信器付礫の移動状況

礫番号	粒径(mm)	移動距離(m)	水深(m)	埋没深(m)	V _s (m/min.)	V _s ave(m/min.)
22	113	921	0.3	0.45	0.33	
18	102	840	0	0.3	0.30	
68	122	1730	0	0.9	0.63	
28	106	674	0	0.6	0.24	
39	189	930	0	0.15	0.52	
40	194	605	0	0.7	0.34	
44	192	868	0	0.15	0.48	
46	203	837	0	0.8	0.47	
49	277	721	0	0.9	0.86	
50	299	811	0	1.1	0.97	
51	298	915	0	0.4	1.09	
54	277	828	0	0.4	0.99	
55	293	713	0.2	0.6	0.85	

所の状態を示す。ここで水深は、陸上にあった場合はゼロ、水中の場合にはその地点の水深を示した。また、埋没深は砂礫に埋もれていた場合の深さを示したものであり、河床にあった場合にはゼロとした。深く埋没した場合など、人力によって掘り起こすことができなかった場合には、電波強度の減衰状況から埋没深を推定した。なお、2006年4月時点で、表-1、2を含め40個程度の発信器付礫が埋設されていたが、2006年10月出水時に土砂により埋没したもの、人為的に移動されたものもあった。表-2に示す13個の発信器付礫は、厚い砂礫に覆われるなどして回収できずに残されたものが、偶然に2007年9月出水を受け移動したものである。ちなみに、2006年10月出水で電波を発信し始めた礫は位置を特定した上で回収されたが、人為的移動によるもの、供給された砂礫に

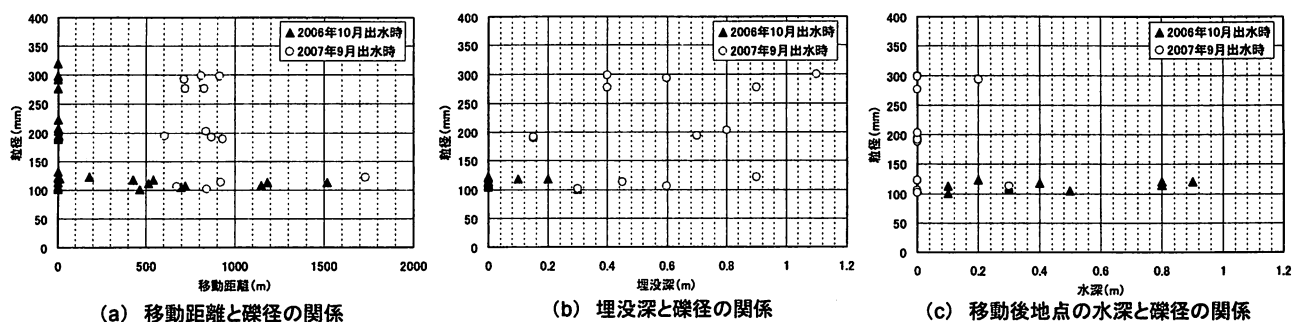


図-7 移動距離・埋没深・水深と礫径との関係

よって埋没したものは表-1には掲載していない。これらに加え、毎年1個の発信器付礫が発見されなかったが、図-6の礫番号に下線を付して示した。

図-7は、移動距離、埋没深、水深それぞれと礫径との関係をプロットしたものである。直感的には、礫径が小さいほど移動距離が大きくなることが予測されるが、異なる礫径が移動した2007年9月出水時の移動状況を見ると、礫番号68の例外を除き、礫径によらず移動距離は600～900mとなっている。一方、2006年出水時には同粒径の礫であるにもかかわらず、移動距離は200～1,500mと幅があった。移動後の発信器付礫の分布が2006年10月出水時には水中であり河床表面付近で確認できたのに対して、2007年9月出水時には砂州上で砂礫に埋もれていたことも特徴として挙げられる。以下、出水中の摩擦速度の変化から、礫の平均的な移動速度について考察する。

4. 考察

図-8は、2006年10月出水および2007年9月出水の流量ハイドログラフである。両出水とも先鋭な波形をしており、後述するように永田地区でD60程度の河床材料が移動を開始する $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上の継続時間は、2006年10月出水で約50時間、2007年9月出水で約68時間とピーク流量の差異ほど大きくは異なっていない。細田⁷⁾を参考にして、一次元不定流計算によって出水中の水理量の変化を算定した。図-9は、計算結果の妥当性を確認するため、52km断面の水位について計算値と実測値を比較したものである。ここで、実測値は52km左岸の堤防法尻付近で自記式水位計によって15分毎に記録した水位である。調布橋水位・流量観測所は52km地点から約7km上流に位置し、洪水流の伝播時間を考慮すると30分程度の遅れが予想されるが、その点は考慮していない。2006年10月出水では、洪水ピーク時に計算水位が20cm程度高めに算定されているが、河床変動を考慮していない中で、ある程度水位を再現できている。2007年9月出水では、増水期からピーク流量までは計算値が高めに、減衰期の9月7日18時以降は計算値が低めに算定されている。石原基準地点において2007年9月出水は戦後2番目の大きさの出水であり、河

床も大きく変動していたことが予想され、最大で70cm程度の誤差が生じたと考えられる。減水した後も水位の再現性が悪いのは河床が大きく変化したためと考えられ、実際に52km断面の内岸側砂州には1m程度の厚さで砂礫が堆積した。河床変動に伴い水理量の再現性に多少の誤差が含まれるが、砂礫の移動を検討するための時間スケールと比較した場合には十分な精度で水理量が算定された。

不定流計算結果から径深と水面勾配を抽出し、52km断面および52.8km断面の摩擦速度の変化を図-10に示す。一点鎖線、破線はそれぞれD60(3.6cm)、D90(10cm)の河床材料の移動限界摩擦速度を示す。なお、移動限界摩擦速度はEgiazaroffの式を用いて算出した。ちなみに、粒径が20cm、30cmの材料の移動限界摩擦速度はそれぞれ0.26m/s、0.29m/sである。この結果を用いて、発信器付礫の移動距離を粒径毎に移動限界摩擦速度以上の継続時間で割ると、礫の平均的な移動速度 V_s が算定される(表-1, 2)。なお、個々の礫の移動速度をほぼ同一粒径の礫について、平均した結果が表の最右列の数値である。

2006年10月出水時の摩擦速度の変化を見ると、20cm程度以上の礫はほとんど移動していない。一方、2007年9月出水時には30cm程度の礫を含めて移動しており、図-7(b)を見ても礫径が大きい方が深く埋没しているように見える。すなわち、移動している材料の最大粒径程度の移動層厚で河床材料は移動しており、移動層厚の増加に伴い河床からのpickup rateが低下した結果、10cmの礫の移動速度が減少したと考えられた。また、大きな粒径の礫ほど河床からの突出率が大きく、流速の鉛直分布を考えた時により大きな流体力を受けることから速い速度で移動したと考えられた。

ここでは礫の移動特性について十分に議論することができなかったが、D90以上の礫が $0.38 \sim 0.95\text{m}/\text{min}$ 程度の移動速度で流下していることが確認された。表-3には、2001年以降の出水について、流量が $200\text{m}^3/\text{s}$ 、または $100\text{m}^3/\text{s}$ を超えた時間を調布橋水位・流量観測所のデータから抽出した結果を示した。これに最も遅い場合の移動速度を考慮すると、同表のように年毎の移動距離を算定できる。ここで、 $200\text{m}^3/\text{s}$ 、 $100\text{m}^3/\text{s}$ 以上はそれぞれD90、D60程度の礫が移動を開始する流量に相当する。したがって、2004年には2002年に敷設したD60程度の礫は昭

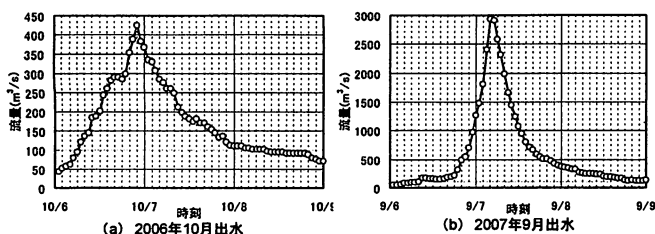


図-8 流量ハイドログラフ

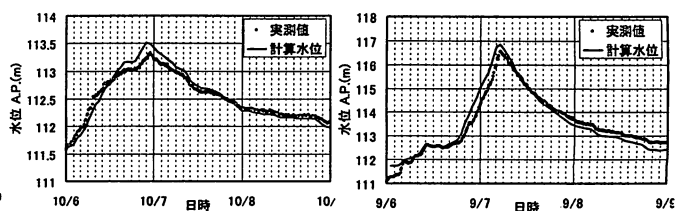
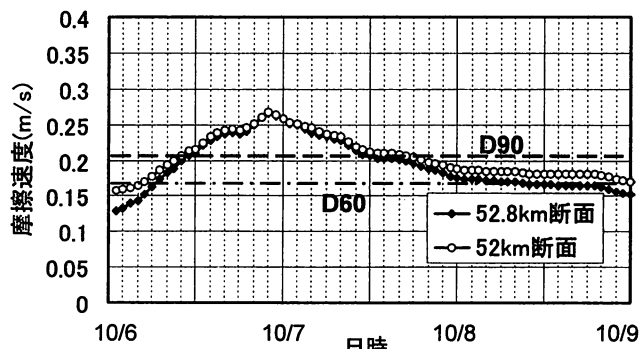
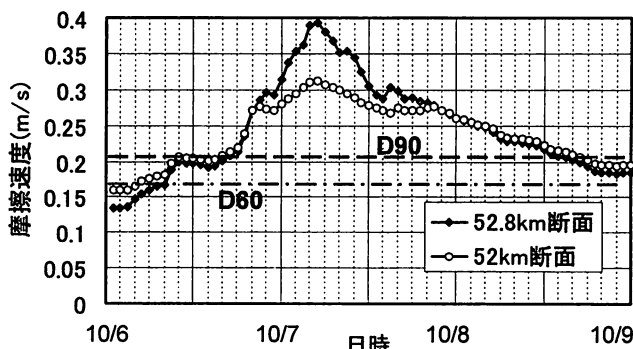


図-9 計算結果の検証 (52km地点左岸水位との比較)



(a) 2006年10月出水



(b) 2007年9月出水

図-10 52km断面および52.8km断面の摩擦速度の時間変化

和用水堰に到達していた。また、D90程度の礫も2006年には到達していたと推定できた。その上で3章の結果となったことから、砂礫の敷設・供給の昭和用水堰に対する堆砂の影響はほとんど生じなかったと言えた。

5. まとめ

以上を整理すると、以下の通りとなる。

- ① 永田地区上流端に敷設された粒径10cm程度の礫(D90相当)は、1出水で最大1.5km程度移動した。出水の履歴を考慮すると、2004～2006年頃には昭和用水堰まで到達したと推定された。
- ② 昭和用水堰上流区間では、砂利採取禁止後の樹林化の進行とともに急激に堆砂が進行した(延長1km区間について最大で11,000m³/年)。しかし、1990年以降は安定傾向にあり、2000年以降も顕著な堆砂は生じていない。よって、砂礫の敷設・供給による下流の堰への影響は小さいものと判断された。
- ③ 出水時に礫は0.4～1m/min.程度の平均速度で移動した。10cmの礫の移動速度に着目すると、平均年最大流量時に比べ、大規模出水時の方が小さかった。この理由は今後のさらに検討する予定である。
- ④ ミクロな視点で移動後の礫の状態を観察すると、大きな粒径の礫ほど深く埋没した状態で発見された。このことから、礫床河道における河床材料の鉛直方向の分級機構が推定された。

謝辞：本研究は河川生態学術研究会多摩川研究グループの調査研究の一環として実施したものである。東京都水道局羽村取水所、国土交通省関東地方整備局京浜河川事

表-3 出水の継続時間と礫の移動距離

年	200m³/s以上		100m³/s以上	
	時間(hour)	移動距離(m)	時間(hour)	移動距離(m)
2001	84	1,915	138	3,146
2002	29	661	76	1,733
2003	7	160	105	2,394
2004	37	844	94	2,143
2005	21	479	46	1,049
2006	117	2,668	170	3,876
2007	69	1,573	104	2,371

務所には、調査にあたって協力していただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 植木真生・福島雅紀・末次忠司：河道内への砂礫の敷設供給が下流河川の河床状態に与える影響，河川技術論文集，Vol. 12，pp. 415-420，2006。
- 2) 植木真生・福島雅紀・山下武宣：河道掘削および砂礫の敷設供給に対する河床の応答，河川技術論文集，Vol. 13，pp. 381-386，2007。
- 3) (財)ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノート，pp. 72-77，2008。
- 4) 河川生態学術研究会多摩川研究グループ：多摩川の総合研究－永田地区の河道修復－，(財)リバーフロント整備センター，P. 686，2006。
- 5) 西川友幸・高橋正行・細野貴司・江島敬三・谷弘之・伊藤力生・才田誠：安倍川砂防における低周波を用いた土砂移動実験，砂防学会研究発表会論文集，pp. 136-137，2005。
- 6) 服部敦・瀬崎智之・伊藤政彦・末次忠司：河床変動の観点で捉えた河原を支える仕組みの復元－多摩川永田地区を事例として－，河川技術論文集，第9巻，pp. 85-90，2003。
- 7) 土木学会：水理公式集例題プログラム集[平成13年版]，例題2-9，2002。

(2009. 4. 9受付)