

19. 広瀬川愛宕堰上流区間の浮遊土砂輸送特性

有働恵子^{1*}・真野明¹

¹東北大学大学院附属災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

* E-mail: udo@potential1.civil.tohoku.ac.jp

寄州発達メカニズムを明らかにするため、細粒土砂の堆積による寄州の発達が問題となっている宮城県広瀬川愛宕堰上流区間において、2006～2009年の6洪水を対象として洪水期間中の表層の浮遊土砂のSSおよび粒径を調べ、これらと河床堆積物、降雨パターン、ならびに河川流量との関係を調べた。浮遊土砂のSS特性は、流量に加えて降雨パターンにも依存していた。洪水期間中の浮遊土砂の中央粒径は、流量が $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ をこえる場合に寄州上流側では最大 $143 \mu\text{m}$ 、下流側では最大 $80 \mu\text{m}$ で、流量が $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 以下の場合 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ であり、寄州部分の河床堆積物に高割合での含有が認められた粒径と一致した。粒径 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ （シルト）の輸送形態は通常浮遊で、平常時には浮遊土砂が殆ど生じないことを考慮すると、寄州発達は洪水時に生じる浮遊細粒土砂の堆積に起因する可能性が高いことを示した。

Key Words : flood, SS, grain size distribution, hysteresis loop, sand bar

1. 緒言

河道を横断する河川構造物等の周辺で生じる細粒土砂の堆積は、植生の繁茂をもたらす洪水疎通の障害になる¹⁾と同時に、水面下の細粒土砂の厚い堆積は酸素消費を促し、嫌氣的な条件を生み出す。治水面および環境面の双方において問題となる細粒土砂の堆積の制御は、河道計画に極めて重要な課題の一つである^{2), 3)}。

シルト等の細粒土砂は通常ウォッシュロードとして輸送される。近年の研究ではウォッシュロードがその一部を河道内に堆積させ、寄州地形形成に重要な役割を果たしていることが指摘されている⁴⁾。細粒土砂の輸送現象を明らかにするためにはウォッシュロードに浮遊砂をも含めた浮遊土砂の輸送過程に関する知見が必要とされるものの、これを解明するための現地データは限られており、今後知見の蓄積が期待される。

浮遊土砂の現地データ解析結果は2000年代に入ってから多数報告されるようになった。これらによれば、浮遊土砂量は、流量や洪水波形の特性（単峰性／双峰性など）、土地利用等に依存するようである。流量が大きい場合には時計回りの、小さい場合には反時計回りのヒステリシスが生じること^{5), 6)}や、短期間に複数の洪水イベントが発生することで供給可能土砂量が変化し、先行洪水と比して後続洪水の浮遊土砂量は小さいこと^{7), 8)}、植生の繁茂により浮遊土砂量が減少すること⁹⁾等が報告さ

れている。

本研究では、細粒土砂の堆積による寄州の発達が問題となっている宮城県広瀬川愛宕堰上流区間において、河床堆積物、降雨パターン、ならびに河川流量と洪水時の浮遊土砂との関係を調べることで、寄州発達区間の浮遊土砂特性を明らかにすることを目的とする。

2. 調査対象区間の概要と変遷

調査対象区間は、上流端を霊屋橋、下流端を愛宕橋とする広瀬川下流域（名取川との合流地点から約5km、名取川河口から約10km地点）の河川区間で（図-1、図-2）、対象区間の河床勾配は平均1/380程度（最大1/70）である。広瀬川上流部に注ぐ大倉川に建設された大倉ダムは1961年に、青下川に存在する青下ダムは1933年に竣工された。愛宕橋下流側には、六郷堀および七郷堀への農業用水の取水のため1954年に愛宕堰が完成した。

愛宕堰上流側では、寄州が顕著に発達している。国土地理院により撮影された対象区間の航空写真判読によれば、1961年以前は寄州全面に石河原が広がっているのに対して、1975年以降は寄州に植生が進入して樹林化が進行し、1984年には寄州全体に植生の繁茂が見られた。植生が繁茂し始めた1983年以降、寄州面積は増加傾向にあった。1999年の人為的な寄州掘削により寄州面積は一旦

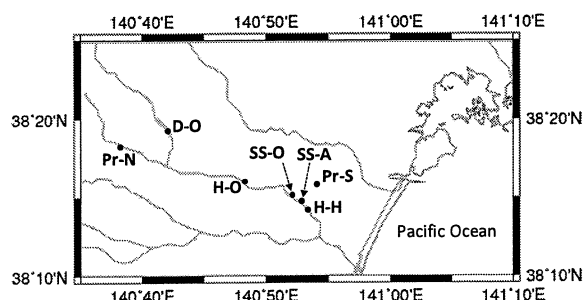


図-1 使用データの計測地点。H-O：落合観測所，H-H：広瀬橋観測所；Pr-N：新川観測所，Pr-S：仙台観測所；SS-O：霊屋橋，SS-A：愛宕橋；D-O：大倉ダムの位置を示す。

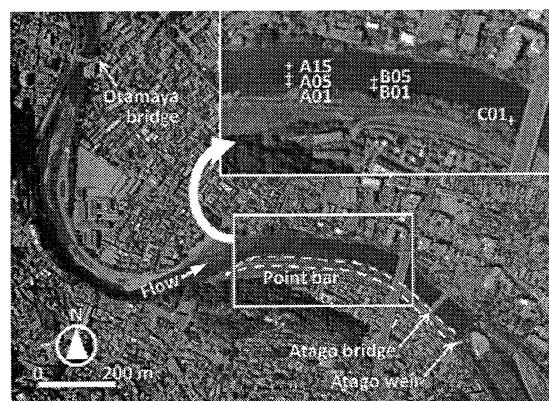


図-2 調査対象区間（霊屋橋～愛宕橋）の航空写真。2007年9月宮城県仙台土木事務所撮影。地点番号は河床堆積物の採取位置を示す。上下流端については図-1のSS-OおよびSS-Aを参照。

減少したものの、掘削後は再度増加し、2008年に再度掘削が行われた。

3. 調査方法

(1) 寄州周辺における河床堆積物の構成比の測定

図-2に記す愛宕堰上流側の6地点において、コアサンプラーを用いて河床から層厚20 cm程度の河床堆積物を採取し、粒径分布および強熱減量を求めた。

粒径分布の分析では、粒径75 μm 以上の砂はふるい分け試験で、75 μm より小さい細粒分についてはマイクロトラック粒度分析計（MICROTRAC HRA 9320-X100、測定レンジ0.1～700 μm ）を用いて分析した。強熱減量は、採取した土砂を110℃で一昼夜乾燥させて質量を計測した後、550℃で1時間強熱した後の質量を計測し、これらの差から求めた。粒径分布の分析結果および強熱減量より、河床堆積物の構成比を調べた。

(2) 洪水時の浮遊土砂SSおよび粒径の測定

2006.9.27洪水，2006.12.27洪水，2007.9.7洪水，2008.8.31

洪水，2008.10.9洪水，ならびに2009.10.8洪水を対象として、寄州の上流および下流側に位置する霊屋橋地点および愛宕橋地点で流路中心の表層の河川水を採取し、洪水時に流送される浮遊土砂のSSおよび粒径分布を測定した（図-1のSS-OおよびSS-A，表-1参照）。増水期から流量のピーク後6時間後までは1時間毎に、その後は流量の変動に応じて採水した。

SSは、採取した河川水からとり出した試料（100ml程度）を粒子保持能1.0 μm のフィルターでろ過した後の固形物の質量より算出した。粒径分布は、3. (1)と同様に粒度分析計を用いて分析した。

(3) 洪水時の流量および雨量データの解析

降雨パターン（Pr）と流量（Q）の変化を調べるため、新川および仙台観測所のアメダス雨量データをそれぞれ上流域および調査地点のPrとして使用し、落合および広瀬橋観測所の水位データをそれぞれ上流域および調査地点のHとして使用した（図-1のH-OおよびH-H，Pr-Nおよび

表-1 現地調査結果の概要

観測期間	洪水ピーク	最大流量(時刻, タイムラグ)	最大SS [mg/l], 粒径 [μm] (時刻)	
			霊屋橋	愛宕橋
2006/09/27 07:40 ~ 09/30 14:00, 78.3hr	1回	190 (09/27 14:00, 1hr)	244, 33.7 (09/27 12:00)	308, 19.8 (09/27 16:00)
2006/12/27 10:00 ~ 12/29 10:00, 48hr	1回	610 (12/27 09:00, 1hr)	2770, 78.8 (12/27 12:00)	2650, 79.9 (12/27 12:00)
2007/09/07 09:00 ~ 09/09 12:00, 51hr	2回	先行 350 (09/06 03:00, 2hr)	N/A	N/A
		後続 408 (09/07 14:00, 1hr)	1172, N/A (09/07 15:00)	1211, N/A (09/07 14:00)
2008/08/29 04:00 ~ 09/02 20:30, 112.5hr	2回	先行 193 (08/31 04:50, 1hr)	506, 40.8 (08/31 05:00)	483, 32.3 (08/31 05:30)
		後続 240 (08/31 17:10, N/A)	N/A	N/A
2008/10/09 08:00 ~ 10/11 04:30, 44.5hr	1回	346 (10/09 10:00, 1hr)	471, 39.6 (10/09 08:00)	467, 36.5 (10/09 08:30)
2009/10/08 09:00 ~ 10/09 16:30, 31.5hr	1回	272 (10/08 13:00, 2hr)	717, 143.5 (10/08 11:00)	608, 37.3 (10/08 11:30)

タイムラグ：広瀬橋より13.7km上流の落合観測所における水位ピークからの広瀬橋における水位ピークの時間遅れ。

粒径はSSが最大となるとき粒径を表示。

びPr-S参照)。新川および落合観測所はそれぞれ愛宕橋の上流32kmおよび10.9km地点に位置し、広瀬橋および仙台観測所はそれぞれ1.5 km下流側および3km北東に位置する。落合および広瀬橋観測所のHの基準はそれぞれ標高66.23m, 10.22mで、流域面積は274km², 309km²である。調査地点のQ [m³s⁻¹] は、広瀬橋のHから以下のH-Q式を用いて推定した。

$$Q = 132.25(H + 1.10)^2 \text{ for } -1.05 < H < -0.97 \quad (1a)$$

$$Q = 153.81(H + 1.09)^2 \text{ for } -0.96 < H < -0.42 \quad (1b)$$

$$Q = 99.99(H + 1.25)^2 \text{ for } -0.41 < H < 0.93 \quad (1c)$$

4. 結果および考察

(1) 寄州周辺の河床堆積物の構成比

図-4に寄州周辺の河床堆積物の構成比を示す。中央粒径D₅₀は、堆積領域の上流外湾側に位置するA15地点の237μmを除けば51μm~122μmで（均等係数8~15）、特に内湾に位置するA01, A05, ならびにB01地点では粒径40μm以下の細粒土砂が約半分を占めていた。寄州以外の部分におけるD₅₀は2mm~15mm程度¹⁰⁾であることが報告されており、寄州および岸から離れるにつれてD₅₀が大きくなる傾向にあった。寄州部分の河床堆積物は、周辺と比べて極めて細かい土砂で構成されていた。強熱減量は、A05およびB01地点で比較的大きかったものの、最大でも12%であった。

(2) 対象洪水の降雨特性

図-5に上流域（新川）と調査地点（仙台）におけるPrおよび上流域（落合）と調査地点（広瀬橋）におけるHの時系列変化を示す。2006.9.27洪水においては、上流域と調査地点におけるPr特性が概ね一致していたのに対し、2006.12.27洪水および2007.9.7洪水では、Prのピークのタイミングは一致していたものの、ピーク雨量は上流域で大きかった。2008.10.9洪水ではピーク雨量は同等であったものの、ピークのタイミングが異なった。2008.8.31洪水および2009.10.8洪水ではピークのタイミングもピーク雨量も異なり、ピーク雨量は下流域で大きかった。

(3) 対象洪水の流量および降雨パターンと浮遊土砂SSの変化特性

霊屋橋および愛宕橋における洪水時の流量およびSSの時系列変化を図-6に、流量と浮遊土砂SSの関係を図-7に示す。霊屋橋と愛宕橋で同時刻に取得されたSS値は概ね等しい値となっており（図-8）、霊屋橋~愛宕橋区間に

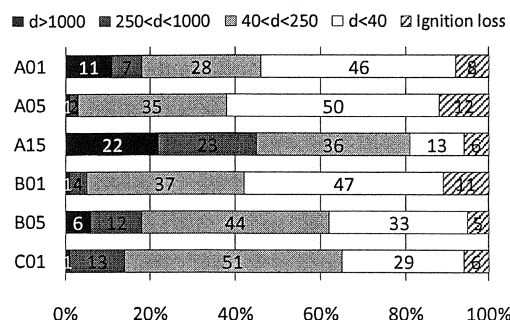


図-4 河床堆積物の構成比。粒径dの単位はμmである。棒グラフの数字は割合(%)を示す。

における表層のSSの空間分布は概ね一様であったと考えられる。このことは、少なくとも堰の直ぐ上流位置の表層においては移流により対象区間に輸送された浮遊土砂の多くが堰による貯留の影響を受けることなく浮遊していたか、あるいは貯留の影響による浮遊砂濃度の減少を補う程度の浮遊土砂の供給が霊屋橋~愛宕橋区間で生じていたことを示す。

図-6の時系列および図-7のヒステリシスループに示されるように、2006.9.27洪水、2006.12.27洪水、ならびに2007.9.7洪水では洪水のピークに対してSSのピークが最大で2時間程度遅れていた（反時計回り；遅れ型¹¹⁾）のに対し、2008.8.31洪水、2008.10.9洪水、ならびに2009.10.8洪水では洪水のピークに対してSSのピークが最大で2時間程度早まっていた（時計回り；先行型¹⁰⁾）。前述したように、ヒステリシスタイプは流量、洪水波形の特性、ならびに土地利用等に依存することが報告されている。本調査においては、土地利用との関係については未解析であるが、ヒステリシスタイプの流量や洪水波形の特性への依存は認められなかった。

一方、ヒステリシスタイプと降雨との関係を調べたところ、反時計回りのヒステリシスの場合には調査点付近の降雨が上流域の降雨より小さいのに対し、時計回りの場合には調査点付近の降雨が上流域の降雨より大きい傾向にあった。2008.8.31洪水に注目すると、降雨特性が観測地点と上流域で異なり、調査地点付近では双峰性であったのに対し、上流域では単峰性であった。調査地点付近の後発洪水の流量が先発のそれより大きいにもかかわらず、先発洪水時のSSの方が大きかった理由としては、先発洪水時に流出可能な土砂が流出してしまったためか、あるいは、先発洪水時には調査地点付近の下流域で水位上昇と同時に生じた強い雨により、主に下流域を供給源とする土砂が輸送されていたためと考えられる。2009.10.8洪水においては、調査地点付近における流量ピークではなく、雨量ピークと同時刻帯にSSが増加しており、降雨パターンの影響を大きく受けたと考えられる。

洪水ピーク後の減衰期に注目すると、流量が50m³s⁻¹を

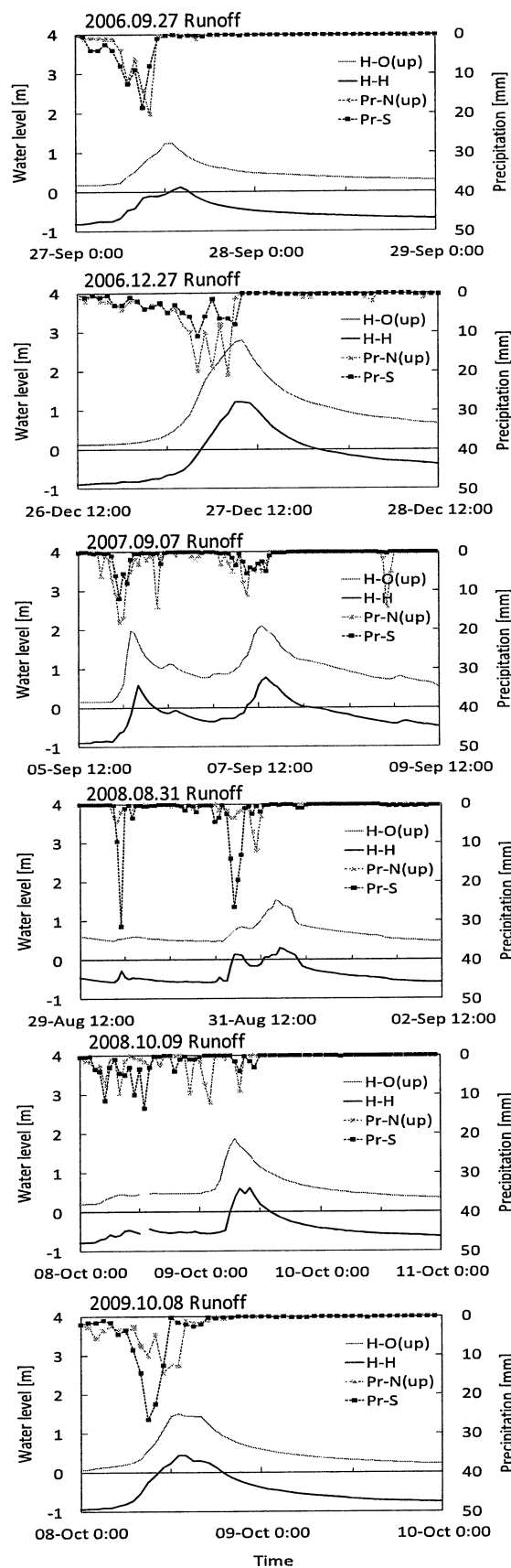


図-5 対象洪水時の新川 (Pr-N) と仙台 (Pr-S) のPrおよび落合 (H-O) と広瀬橋 (H-H) のHの時系列変化。

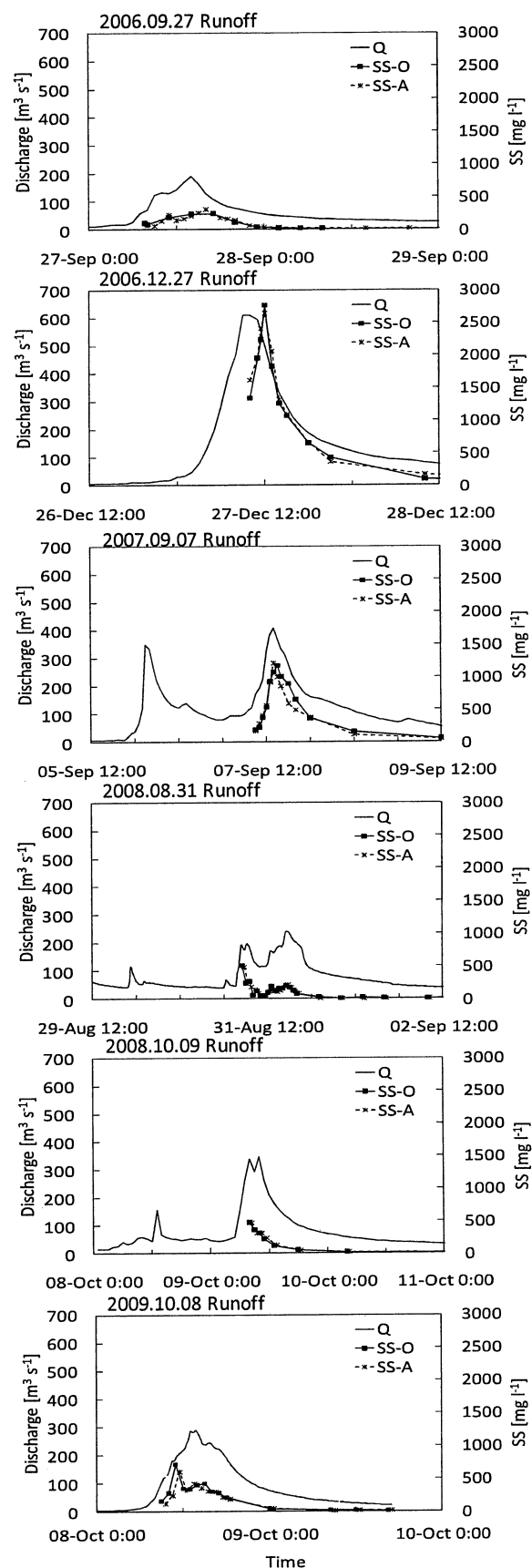


図-6 対象洪水時のQおよび霊屋橋 (SS-O) と愛宕橋 (SS-A) におけるSSの時系列変化。

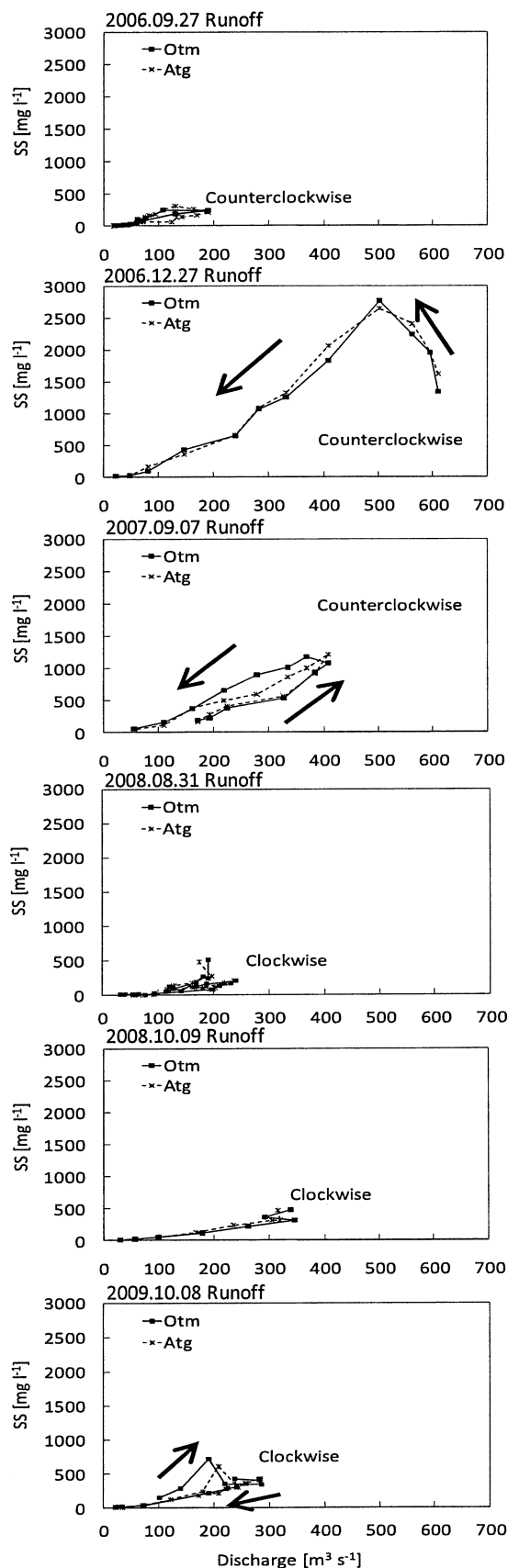


図-7 霊屋橋および愛宕橋における洪水時の流量とSSの関係。図中矢印は時間経過を示す。

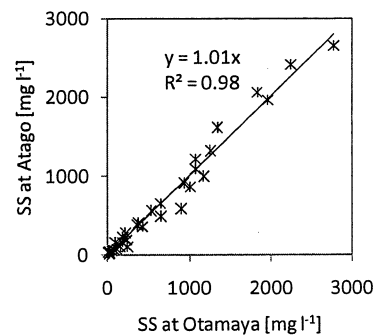


図-8 霊屋橋と愛宕橋における同時刻のSSの比較。

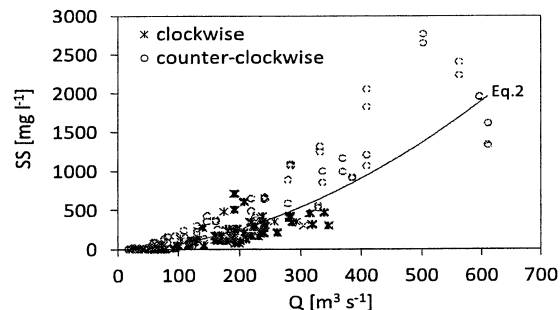


図-9 洪水時のQとSSとの関係。

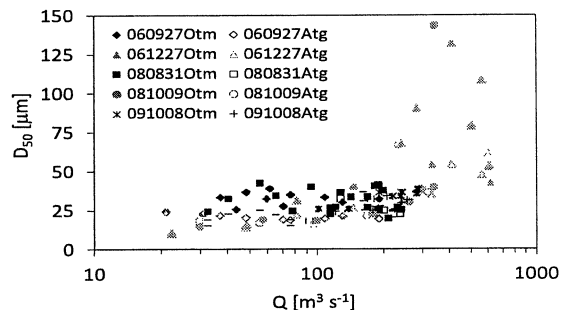


図-10 洪水時のSSと D_{50} の関係。Otmは霊屋橋、Atgは愛宕橋のデータを示す。

下回る場合にはSSが急激に減少し、最終的には 10mg l^{-1} 以下に減少していた。これと通常時の目視観測から、通常時には浮遊土砂が殆ど生じないと考えられる。霊屋橋および愛宕橋から採取された流量 Q とSSの関係を、先行型と遅れ型の場合に分けて図-9に示す。遅れ型の場合には先行型と比べて流量が大きかったこともあり、SSが比較的大きかった。SSと Q の間には $SS=aQ^b$ の関係があることが知られており、全データについて求めた近似曲線式は次式ようになった(決定係数 $r^2=0.83$)。

$$SS = 0.0169 Q^{1.82} \quad r^2 = 0.83 \quad (2)$$

下流域で Q -SS曲線を求めた例は上中流域と比して少なく、また、河川により様々な条件が異なることから、ここで得られた近似曲線と他河川のそれとの差異に関する詳細な議論は困難であるが、例えば、富樫・真野¹²⁾は

阿武隈川の阿武隈橋（河口から 8km 地点）において、

$$SS = 0.0009 Q^{1.6} \quad r^2 = 0.98 \quad (3)$$

の関係を示しており（決定係数 $r^2=0.98$ ，最大流量約 $2500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ），これと式(2)とを比較すると，広瀬川下流域のウォッシュロードは阿武隈川下流域と比して 1 オーダー以上大きい。この一因としては，阿武隈川本川の河床勾配が河口から上流域に至るまで 1/600 以下で，広瀬川の 1/30 以下と比べて緩勾配であることが考えられる。

(4) 洪水時の浮遊土砂のSSと粒径との関係

霊屋橋および愛宕橋から採取された浮遊土砂のSSと D_{50} の関係を図-10に示す。浮遊土砂の D_{50} は最大 $143 \mu\text{m}$ で， $80 \mu\text{m}$ をこえる D_{50} は寄州上流側に位置する霊屋橋のみで観測された。 D_{50} は， $Q < 200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ の場合には $10 \sim 40 \mu\text{m}$ 程度（均等係数 3～13）で，寄州部分の河床堆積物（A01, A05, B01地点）に高割合での含有が認められた粒径と一致した。 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ のシルト分の輸送形態は通常浮遊で，平常時には浮遊土砂が殆ど生じないことを考慮すると，寄州発達は洪水時に生じる浮遊細粒土砂の堆積に起因する可能性が高い。

洪水時の浮遊細粒土砂の堆積が寄州発達に寄与する可能性が高いにも関わらず，寄州上流地点（霊屋橋）と下流地点（愛宕橋）のSSに差異が認められなかった（図-8）原因としては，寄州周辺への土砂堆積に寄与する河床付近の巻き上げおよび沈降フラックスが表層のSSと比して微小であるためか，あるいは，これらのフラックスの影響が表層までは及ばないためと考えられる。一方で，浮遊砂濃度の移流分は河床付近の土砂の巻き上げおよび沈降プロセスに影響を及ぼす。今後，より詳細な浮遊土砂輸送特性を明らかにすることが必要とされる。

5. 結論

本研究では，広瀬川下流域の愛宕堰上流区間において，洪水時の流量や降雨パターンが浮遊土砂のSSに及ぼす影響を調べた。SSと流量との間には，既存の研究と同様の正の相関関係が認められた。SSのヒステリシスタイプと降雨との関係を調べたところ，反時計回りのヒステリシスの場合には調査点付近の降雨が上流域の降雨より小さいのに対し，時計回りの場合には調査点付近の降雨が上流域の降雨より大きい傾向にあった。また，洪水時の浮遊土砂と河床堆積物の粒径を比較することにより，洪水時に輸送される細粒の浮遊土砂により愛宕堰上流に形成された寄州の堆積が促進された可能性が高いことを示した。

謝辞：現地観測においては，東北大学災害ポテンシャル研究室の白鳥喜之氏（現（株）電源開発），小竹翔太氏をはじめとする学生メンバーに協力頂いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 李參熙・藤田光一・塚原隆夫・渡辺敏・山本晃一・望月達也：礫床河川の樹林化に果たす洪水と細粒土砂流送の役割，水工学論文集，第 42 巻，pp.433-438，1998.
- 2) 三輪式：取水堰付近の堆砂問題とその対策，水理講演会論文集，第 26 回，pp.69-74，1982.
- 3) 福岡捷二・三代俊一・荒谷昌志・中須賀淳・岡田将治・田中正敏：堰の位置及び構造の違いによる堰上流，下流の河道水理量の変化，水工学論文集，第 45 巻，pp.397-402，2001.
- 4) 平林桂・砂田憲吾・大石哲・宮沢直季：片庭川流域における洪水時の浮遊砂・ウォッシュロード観測と流域土砂動態モデルの検討，土木学会論文集，No.768/II-68，pp.33-43，2004.
- 5) Alexandrov, Y., Laronne, J.B. and Reid, I.: Intra-event and inter-seasonal behaviour of suspended sediment in flash floods of the semi-arid northern Negev, Israel, *Geomorphology*, Vol. 85, pp.85-97, 2007.
- 6) Lana-Renault, N. and Regues, D.: Seasonal patterns of suspended sediment transport in an abandoned farmland catchment in the Central Spanish Pyrenees, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 34, pp. 1291-1301, 2009.
- 7) Rovira, A. and Batalla, R.J.: Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN), *Geomorphology*, Vol. 79, pp.58-71, 2006.
- 8) Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S. and Onda, Y.: Determinant factors of sediment graphs and rating loops in a reforested watershed, *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp.271-282, 2008.
- 9) Lecce, S.A., Pease, P.P., Gares, P.A. and Wang, J.: Seasonal controls on sediment delivery in a small coastal plain watershed, North Carolina, USA, *Geomorphology*, Vol. 73, pp.246-260, 2006.
- 10) 渡辺幸三・白鳥喜之・有働恵子・真野明・大村達夫：取水堰が河川底生動物群集に及ぼす影響，水工学論文集，第 52 巻，pp.1159-1164，2008.
- 11) 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編：水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—，古今書院，pp. 132-142，1996.
- 12) 富樫昇・真野明：阿武隈川の洪水時における浮遊土砂輸送，水工学論文集，第 48 巻，pp.949-954，2004.

(2010. 2. 26 受付)

(2010. 5. 28 受理)

Characteristics of Suspended Load in the Upper Area of an Intake Weir

Keiko UDO¹, and Akira Mano¹

¹Disaster Control Research Center, Tohoku University

Fine sediment deposition is a serious problem in the upper area of the Atago Intake Weir in the Hirose River downstream. In order to explain the mechanisms of the fine sediment deposition, this study investigated suspended sediment transport characteristics through field observations of the suspended sediment concentration and its grain size during six floods as well as the grain size of the bottom deposits. Characteristics of SS during the floods depended on the discharge and spatial rainfall pattern. In addition, the bottom deposits were mainly composed of sediments finer than $40\mu\text{m}$ similarly to those of the suspended sediment during the floods, indicating that the fine sediment deposition have been caused by the fine sediment deposits during flood events.