

阿武隈川の洪水時における 浮遊土砂輸送

SUSPENDED SEDIMENT TRANSPORT IN THE ABUKUMA RIVER DURING FLOODS

富樫 昇¹・真野 明²
Noboru TOGASHI and Akira MANO

¹学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工博 東北大学教授 工学研究科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06)

Recently, the Sendai Coast, especially near the sedimentary leeside of the Abukuma River mouth shows significant coastal erosion, which suggests decrease of sediment supply from the river. In order to know the sedimentary environment of the river suspended sediment transport observation was conducted during the flood in 2002 at several stations. Additionally, to estimate suspended sediment during floods we used the data provided from the observation stations that discharge, grain size of bed material, slope, etc. The estimated suspended sediment transport is compared with the observed results, and suspended sediment transport rate during floods is evaluated and validated. The evaluated sediment transport near the dam reservoirs of Hourai and Shinobu in the Abukuma River explains major decrease of the sedimentation in the two dams.

Key Words : Abukuma River, dam, suspended sediment, flood

1. はじめに

仙台湾南部の仙台北岸は、宮城県仙台港から福島県磯浜漁港に至る約40kmのゆるい弧状の砂浜海岸であり、東北地方では数少ない長大な砂浜を有する海岸である。しかし最近では、この海岸において局地的な海岸侵食により砂浜が減少し、砂浜の消失が懸念されている。この主な原因は、海岸構造物の建設に伴う沿岸漂砂の遮断および河川からの供給土砂量の減少である。

仙台北岸の砂浜を構成する土砂の主要な供給源の一つとして阿武隈川がある。近年、阿武隈川の河口に隣接する沿岸漂砂下手側の海岸においても侵食する傾向にあり^{1),2)}、阿武隈川からの土砂供給が減少していると考えられる。また、ここ20年間で数十年に一度の規模の洪水が数回おこっており、上流部から下流部へ多量の土砂が輸送されたと考えられる。これらのことは、土砂供給源としての阿武隈川の特徴が変化してきていることを示唆している。さらに、長い時間スケールを考えた場合に、下流部周辺の土砂移動形態を定量的評価するだけでなく、阿武隈川上、中流部についても考えて、流域と海域を含めて、土砂の生産から、輸送、堆積までを通して評価す

る必要がある。

陸域から河口部を通じて海域に供給される土砂はその大部分が出水時に運ばれ、その流送土砂のうち大部分は浮遊状態で運ばれる。特にウォッシュロードは沈降速度が小さいため、出水時には流水の流れに保持されたまま流下することが指摘されている³⁾。このため、その濃度は生産源となる河床やダムなどの存在に大きく影響される。ダムが河川の土砂環境に及ぼす影響については、従来から様々な調査、研究が行われている^{4),5),6)}。

そこで本研究では、阿武隈川を研究対象流域とし、2002年10月の台風21号による出水時に観測を行い、試料を採取、分析した。また、浮遊砂量式を用いて浮遊砂量を推定し観測値と比較することで、阿武隈川における出水1回分の土砂輸送量を評価することを目的としている。また、土砂の供給源となり得るダムに着目し、上、下流部での土砂移動に関して定量的評価を行った。

2. 対象流域および対象出水の概要

(1) 対象流域

阿武隈川は福島県中通りおよび宮城県南部に位置し、

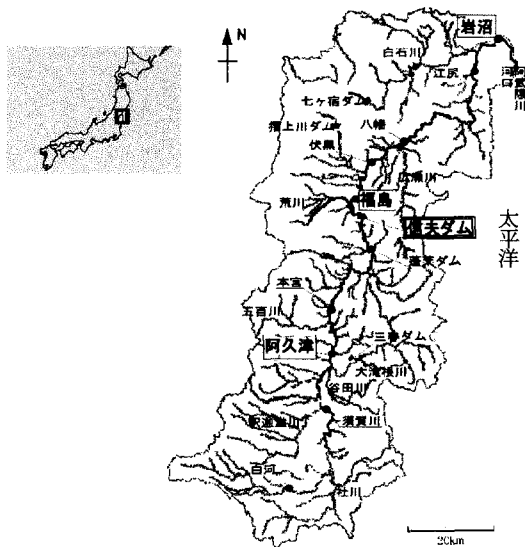


図-1 阿武隈川流域

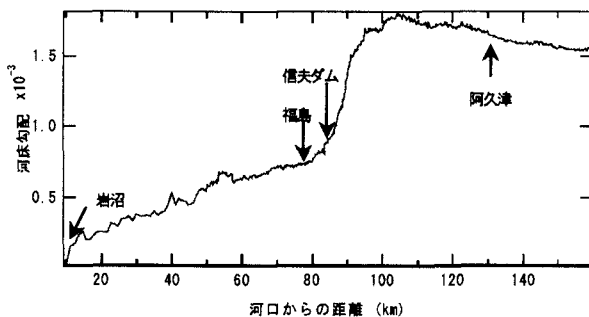


図-2 阿武隈川本川の河床勾配

福島県、宮城県、山形県の3県にまたがる流域を持っている一級河川である。水源は那須火山帯の旭岳（福島県西白河郡西郷村大字鶴生、標高1,835m）に発する。福島県の白河を通り、福島県中通りを北に貫通して、福島・宮城の県境部で狭窄部を経て、柴田町で蔵王山系より発する最大の支川、白石川と合流した後、流向を東に変え、仙台平野南部を通過して岩沼市と亶理郡亶理町の境の荒浜で太平洋に流入している。

流域面積は5,405km²、幹川流路延長239.2km（東北地方第2位、日本第6位）である。流域面積の内訳は、山地3,983km²、平地1,336km²、河川区域86km²である。阿武隈川流域は、奥羽山脈と阿武隈高地に挟まれている。一方、複雑な気象状況を示すため、洪水流出も複雑である。地質は右岸と左岸で大きく異なっており、右岸の阿武隈高地は、主に古い花崗岩からなっていて風化土が厚く地表を覆っている。左岸は安達太良山などの火山による火山岩や礫、砂、泥などの堆積物からなり、また縦断勾配が大きいことから粒径の大きな土砂が流出している。図-1に阿武隈川流域を示し、図-2に阿武隈川本川の河床勾配を示す。

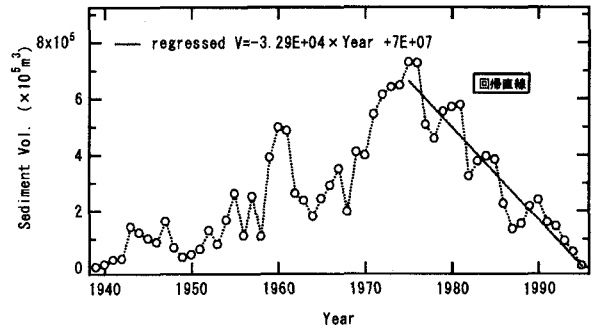


図-3 信夫ダムの年間堆砂量

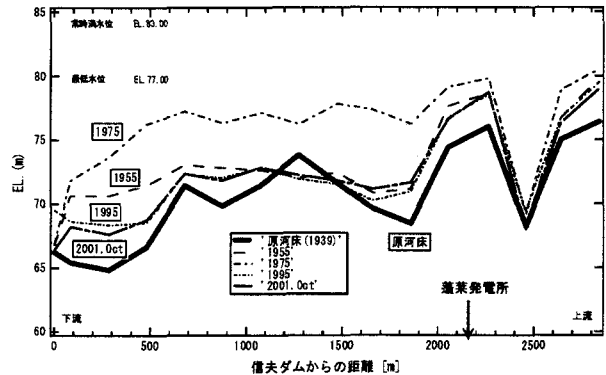


図-4 信夫調整池の最深河床の縦断変化

また、本研究で対象とする信夫ダムは、河口から85km、福島から5km上流に位置し、1939年に築造され、集水面積2,880km²、ダム高（非越流部21.5m、越流部11m）の東北電力の発電用の重力式越流型ダムである。このダムは発電式低落差のダムで、出水時には流入水をそのまま流出させるようなゲート操作を行っているため、出水時にはダムに堆積していた土砂が流出している。信夫ダムの年間堆砂量を図-3に示す。

図-3から1976年頃より年間堆砂量は減少に転じている。1976年以降の堆砂量を1年あたりの減少量として評価すると、約 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{y}$ で表せる。信夫ダムでは1986年から砂利採取実績量が平均で約 $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{y}$ あるが、評価した減少量には影響しない程度の小さな値である。よってこの堆砂量の減少は、ダムが土砂供給源になり、特に洪水のピーク時にはダム下流部での土砂濃度増加の主要因になると考えられる。

図-4には東北電力によって行われている横断測量によって得られた最深河床の縦断変化を示した。1975年には多量の土砂が堆砂していたことがわかる。また、信夫ダムから上流に2,200mまでの堆砂量のうち、1975年から2001年において最深河床部での減少量は $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m}$ と評価できる。また、現在の堆砂量を示すために1939年（原河床）から2001年までの差をとったところ、2001年の最深河床部での堆砂量は $3.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{m}$ しか残っていないことがわかった。

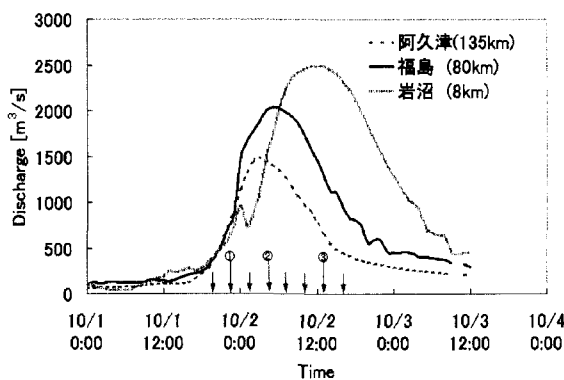


図-5 各水位観測所のハイドログラフ(2002年10月)

(2) 対象出水

本研究で対象とした出水は、2002年10月の台風21号による出水である。観測地点に最も近い流量観測所である阿武隈川本川上の岩沼、福島、阿久津観測所における洪水期間中のハイドログラフを図-5に示す。なお、()内は河口からの距離を示す。

東北地方を縦断した速度の速い台風21号の影響により、阿武隈川流域では9月30日夕方から雨が降り始め、10月2日の明け方まで降り続いた。降り始めからの総雨量は、阿武隈川の上流に位置する真船観測所で136mmを記録した。

3. 実測データ

(1) 実測概要

出水時の実測は、日本大学と共同で行い阿武隈川上、中流部において10月1日19時から2日16時まで橋の上からバケツにロープを結んで採水を行った。採水地点は、下流側から岩沼(阿武隈橋)、福島(蓬莱橋)、阿久津(阿久津橋)であり、3時間おきに観測を行った。阿武隈川本川における採水地点の位置を図-1に、採水時刻を矢印で図-5に示す。

採取した試料を研究室に持ち帰り分析を行い、質量濃度と粒径分布を得た。分析方法としては、質量濃度は一定容量の試料中に含まれる土砂全体を1 μ mのフィルターでろ過した後、フィルターを炉乾燥させ、残留分の質量を電子天秤で計り、必要とした試料の体積で除することにより求めた。これで残る有機物成分については無視した。試料の濃度にもよるが、50から100ml程度を測定した。本研究では、この質量濃度を浮遊土砂濃度とする。また、粒径分布は日機装マイクロトラック粒度分析計を用いて分析した。これは0.1 μ m～700 μ mの広い範囲の粒径分布の測定に用いることが可能である。

(2) 実測結果と考察

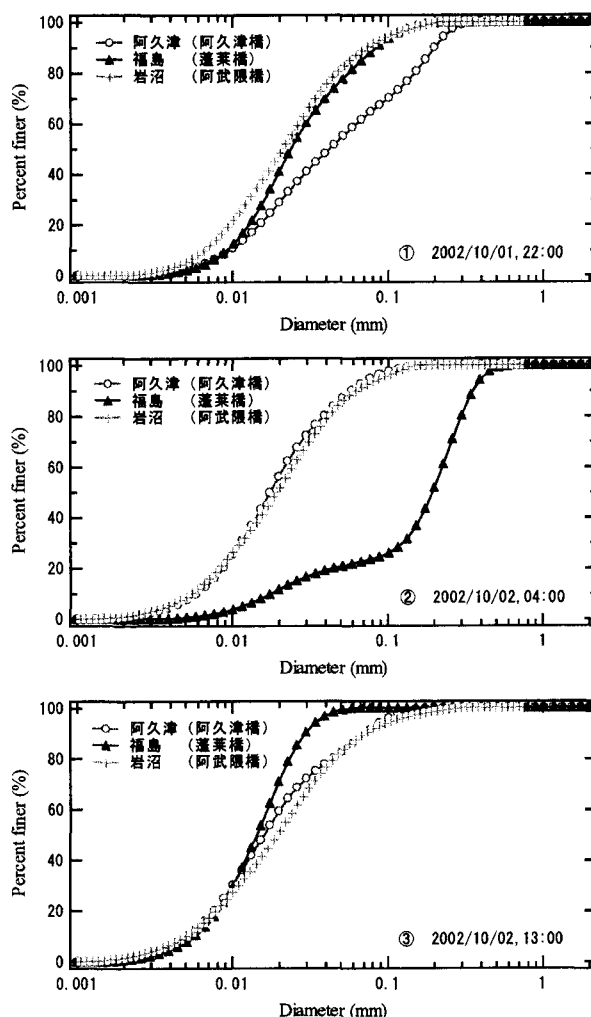


図-6 観測による粒径分布

分析結果から得られた観測による粒径分布を図-6に、浮遊土砂濃度を図-7に、各地点でピーク流量が生じた時刻の流量、土砂濃度の空間分布を図-8に示す。図-6から水位がまだ増加し始めていない観測開始時とピークを過ぎて水位が下がり始めた時の浮遊砂の粒径分布はどの地点でもほぼ同じように0.1mm以下の細粒分がほぼ占めている分布を示しているが、中、上流部がピーク水位を記録した頃の粒径分布は、中流部の福島においてかなり粒径が粗くなっている。

ここで、図-9に各地点における河床材料の粒径分布を示す。この粒径分布は2002年に国土交通省で実施した河床材料調査により得られたものである。この図から、阿久津、福島ともに0.1mm以下の粒径は20%ほどを占めていることがわかる。粒径別の浮遊砂量解析のために、細かい粒径の部分の通過重量百分率を市毛ら³⁾に従って算出した。

また、図-7から中流部の福島において水位ピーク時にかなり急激な浮遊土砂濃度の増加が見られる。図-8からもピーク流量時には福島だけかなり大きな浮遊土砂濃度の値を示している。この浮遊土砂濃度の増加と流量が関係あるかどうかを検討するために式(1)を用いて、各地

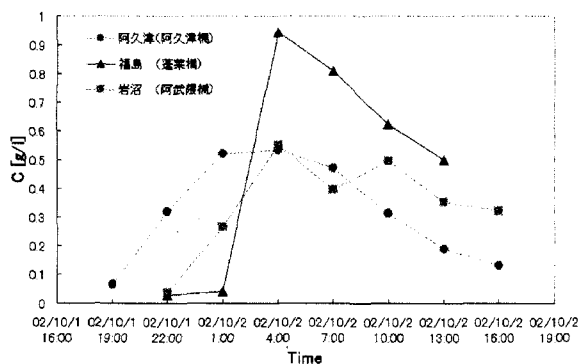


図-7 観測による浮遊土砂濃度

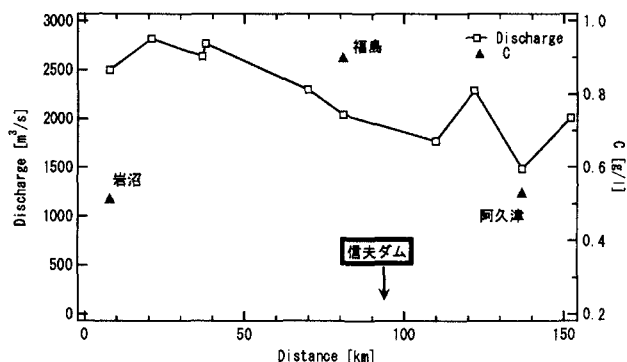


図-8 各地点でピーク流量が生じた時刻の流量と土砂濃度

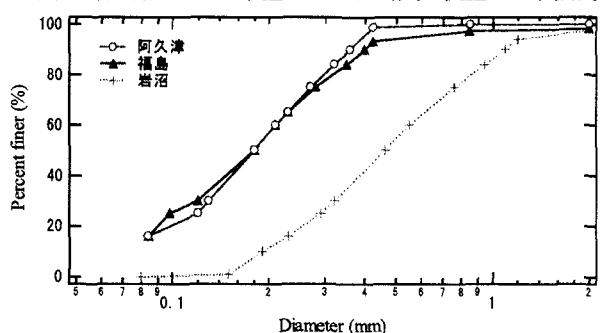


図-9 河床材料の粒径分布

点の浮遊土砂濃度と流量の関係を比較する。

$$C = \alpha Q^\beta \quad (1)$$

ここに、 C は浮遊土砂濃度、 Q は流量、 α, β は係数である。杉木ら^{7), 8)}によると、 α は流域の特性や土砂の生産状況で大きく変化するが β は1.0~1.4とされている。図-10に観測された浮遊土砂濃度と流量の関係を示す。ここで累乗近似曲線を引く時に、近似曲線の有効性を判定する R^2 を1に近づけるために特異点をはずして考えた。図-10から上流部の阿久津と下流部の岩沼では、 β は1.3~1.6の値をとり杉木ら^{7), 8)}の値とほぼ一致したが、中流部の福島では3.2とかなり大きな値となった。このことは、流量の増加によるもの以外に土砂濃度を増加させる原因があると考えられる。福島上流部にあるダムが、阿武隈川における土砂の供給源としての役割を果たし、ダムから巻き上げられた土砂が下流の濃度増加の原因であるといえるだろう。

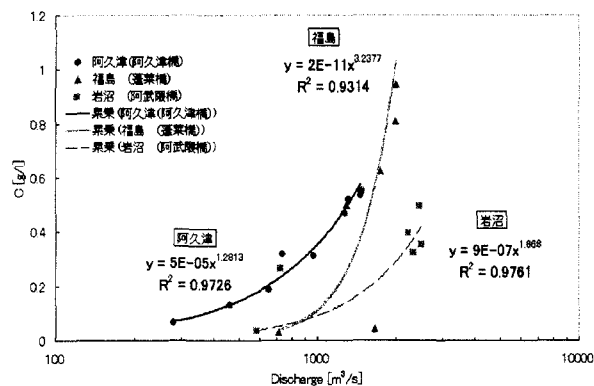


図-10 浮遊土砂濃度と流量の関係

4. 計算方法

浮遊砂量の計算を本研究では板倉・岸(1980)の式⁹⁾を用いて、出水時の浮遊砂量を粒径別に算出し検討、評価をする。Manoら¹⁰⁾は洪水時の浮遊土砂濃度の観測値と平衡理論式を比較し、適用性を示している。粒径については図-7の河床材料データから得られた累積粒度曲線により、任意の粒径範囲を設定して用いた。

浮遊砂量の計算式は、流速分布の式と濃度分布の式から導くことができる。板倉・岸⁹⁾は、速度分布式として式(2)を使用し、濃度分布式として式(3)を使用した。

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + \frac{1}{\kappa_0} \left[\ln \frac{y}{k_s} + \phi_1 \frac{y}{k_s} \right] \quad (2)$$

$$\frac{C}{C_a} = \left\{ \left(\frac{h-y}{h-a} \right)^{(1+\phi_2)} \left(\frac{a}{y} \right)^Z \right\} \quad (3)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 κ_0 : カルマン定数 (=4.0)、 $\phi_1 = 7k_s/L_2$ 、 $1/L_2 = \kappa_0 s g \omega_0 \bar{C}/u_*^3$ 、 k_s : 相当粗度、 s : 砂粒の水中比重 (=1.65)、 g : 重力加速度、 ω_0 : 沈降速度、 $\bar{C}$: 断面平均の体積濃度、 C_a : 基準点濃度、 h : 水深、 a : 濃度の基準点とされる河床からの高さ ($a = 0.05h$ とした)、 $\phi_2 = \alpha_3 \kappa_0 s g h \omega_0 \bar{C}/u_*^3$ 、 $\alpha_3 = 7$ 、 $Z = \omega_0/\kappa_0 u_*$ である。本研究では相当粗度を平均粒径と等しいとし、摩擦速度は幅広断面の等流状態を仮定し、 $u_* = \sqrt{ghI}$ とした。 I : 勾配である。

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd} \cdot F(d) \\ F(d) &= \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{sgd^3}} \\ C_a &= A_7 \left[\frac{0.14}{(1+s)} \frac{u_*}{\omega_0} \frac{\Omega}{\tau_*} - 1 \right] \\ \Omega &\geq 7.15(1+s)\tau_*(\omega_0/u_*) \end{aligned} \quad (4) \quad (5)$$

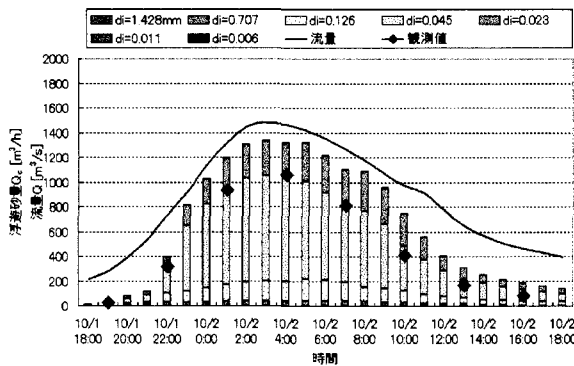


図-11 出水期間中の推定浮遊砂量（阿久津）

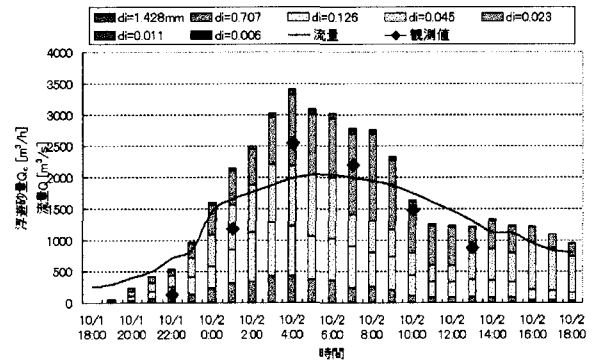


図-12 出水期間中の推定浮遊砂量（福島）

表-1 出水期間中の総推定浮遊砂量 [m³]

福島	阿久津	差
4.0×10^4	1.7×10^4	2.3×10^4

沈降速度はRubeyの式⁹⁾から求めた(式(4))。 d : 粒径, ρ : 水の密度, σ : 固体の密度, ν : 動粘性係数 ($=0.01[\text{cm}^2/\text{sec}]$) とした。断面平均の体積濃度 $\bar{C}$ は、河村⁷⁾に従って吉川・石川(1978)の方法⁹⁾によって計算した。基準点濃度は板倉・岸の式⁹⁾を用いた(式(5))。ここに、 A_f は実測濃度の平均値的な値の $A_f = 0.0018$ を使用した⁹⁾。 $\tau_* = u_*^2 / (sgd)$, Ω は τ_* との関係⁹⁾から算出した。なお、式(5)での Ω の条件は負の濃度にならないためである。

これらの式を用いて、出水期間中の浮遊砂量を推定し、観測値と比較する。

5. 計算結果と考察

観測値の浮遊砂濃度は水表面付近のデータなので浮遊砂量を算出するには鉛直分布を考慮しなければならない。よって式(3)を用いて鉛直方向の濃度分布を算出した。また、式(2)から(5)による計算方法を用いて、2002年10月の出水時における阿久津と福島の浮遊砂量を推定する。上流部の阿久津と中流部の福島において、観測値から導いた浮遊砂量と計算値との比較を図-11、図-12に示す。図-11の上流部の阿久津において1時間当たりの浮遊砂量は山なりに増減し、流量とほぼ同じような時間変化を示しているのに対し、図-12の中流部の福島においての1時間当たりの浮遊砂量は凸型で浮遊砂量の急激な増加を示している。浮遊砂量の最大値は阿久津で約1,400m³/h、福島で約3,500m³/hと2倍以上も違う。このことにより福島より下流部には多量の浮遊砂が輸送されていると考えられる。計算値と観測値による浮遊砂量を比較すると、ピーク時付近で観測値より計算値の方が20～25%の過大評価だったが、出水期間を通して挙動はうまくとらえている結果となった。この差は、浮遊砂量式の精度を考え

れば十分無視できる。

粒径別に比較してみると阿久津では出水期間中を通してほぼ0.1mm以下の粒径で浮遊砂を構成しているが、福島では流量がピークになるにつれて、0.1mm以上の粒径の土粒子でも浮遊している。これは図-6からも明らかである。また、浮遊砂量がピークになるまでの時間は、ピークを過ぎて浮遊砂量がなくなるまでの時間に比べて早い。これは出水時には、ピークまでの流砂量よりピーク後の方が徐々にその量は減少していき、多量に下流方向に運ばれていくことを示している。なお、図-12中の10/2 14:00頃から1時間ほど流量が下降傾向をとらなかったために、浮遊砂量も下降傾向をとらなかったと考えられる。

ダムにおける土砂収支を検討する。流域内の土砂輸送が出水時に多いことを考えると、ダムからの土砂流出は日常的なものではなく、出水時の短期間に大部分が生じていると考えられる。そこで上記で示した信夫ダムの年減少堆砂量と出水期間中の流出土砂量を比較する。図-11、図-12で示した計算値を出水期間中にわたって積分することで今回の出水の総浮遊砂量として評価する。

信夫ダムにおける1976年以降の年減少堆砂量は $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{y}$ であった。一方、2002年10月の出水時にダム上流部の阿久津と下流部の福島で算出された通過土砂量を表-1に示す。ダムの上流からの土砂流入量として阿久津の通過土砂量を用い、下流への流出量として福島の通過土砂量を用いる。阿久津と福島の通過土砂量の差が厳密なダム流出量ではないが、信夫ダムでは1998年以降、砂利採取を行っていないことや、ピーク時の浮遊砂濃度の空間分布がダムの上、下流で大きく変化していることを考慮して、阿久津と福島の通過土砂量の差をダムからの流出土砂量として評価する。その差は $2.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ であった。これをダムからの流出量と考えてダムの年減少堆砂量と比較すると、約2/3が出水時の短時間に流出したことになる。このことは年間を通してのダムからの土砂流出が主に出水時に多いことを示し、ダムから巻き上げられた土砂が下流の濃度増加の原因であるといえる。

6. おわりに

本研究では、阿武隈川において 2002 年 10 月の出水時に数箇所にて採水を行って得た試料を分析した結果、阿武隈川中流部の福島において特徴的な濃度の増加を示し、福島上流部の信夫ダムが下流部への土砂の供給源としての役割を果たしていることを示した。また、板倉・岸の浮遊砂量式⁹⁾を用いて、福島、阿久津における通過土砂量を推定した。そして観測値から得た浮遊砂量と計算値を比較したところ、計算値の方が過大評価だったが出水期間中の浮遊砂の挙動をとらえられた。

ダムにおける土砂収支を検討する上で、ダム上流の阿久津と下流の福島の出水期間中の通過土砂量の差をダムからの流出土砂量として評価したとき、信夫ダムの年減少堆砂量と出水期間中の流出土砂量を比較した。その結果、約 2/3 が出水時に流出したことになり、年間を通してダムからの土砂流出は主に出水時に多いことを示した。

謝辞：本研究を行うにあたり、貴重な流量データを提供して頂いた国土交通省仙台工事事務所、福島工事事務所、東北電力に謝意を表します。また、貴重な出水時における実測データを提供して頂いた日本大学の長林研究室に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 真野 明・沢本正樹：阿武隈川河口周辺の土砂環境、日本の河口, pp. 49-63, 1998.
- 2) 真野 明・沢本正樹・河上伸生：阿武隈川河口周辺の土砂移動量評価, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 451-455, 1994.
- 3) 市毛輝和：阿武隈川全流域の分布型浮遊砂輸送モデル, 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文, pp. 1-67, 1999.
- 4) 坊野聡子・清水康行・斎藤大作・吉田義一：ダムを含む沖積河川の土砂輸送について, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 581-586, 1999.
- 5) 河田恵昭・植本 実：ダム堆砂の支配要因について, 水工学論文集, 第42巻, pp. 1027-1032, 1998.
- 6) 守利悟朗・椎葉充晴・堀 智晴・市川 温：流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用, 水工学論文集, 第47巻, pp. 733-738, 2003.
- 7) 杉木基泰：阿武隈川における流送土砂の観測と解析, 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文, pp. 2-52, 1997.
- 8) 今野 修：河口域における栄養塩の輸送特性, 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻修士論文, pp. 106-110, 2002.
- 9) 河村三郎：土砂水理学 1, 森北出版, pp. 64-69, 211-212, 243-294, 1982.
- 10) Mano, A., Sugiki, M. and Sato, Y.: Observations and analyses of fine grains in flood flows at the Abukuma River mouth, *Journal of Global Environment Engineering*, Vol.3, pp.53-63, 1997.

(2003. 9. 30 受付)