

大規模洪水に対する阿武隈川本川の 土砂輸送の評価

EVALUATION OF SEDIMENT TRANSPORT IN THE ABUKUMA RIVER MAIN CHANNEL FOR LARGE FLOODS

富樫 昇¹・真野 明²
Noboru TOGASHI, 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, coastal erosion of the Sendai Coast, especially at the Abukuma River Mouth becomes significant, which suggests decrease of sediment supply from the river. In order to know the sedimentary environment of the river, suspended and bed load sediment transports for recent large floods are evaluated along the main channel of the Abukuma River. The evaluated sediment transport at the river mouth explains the reason of the coastal erosion. Finally, we can get the result of calculation and evaluate quantities of sediment transports for recent large flood. The result shows that the evaluated sediment supply is less than littoral drift.

Key Words : Abukuma River, bed load, suspended load, large flood, sediment supply

1. はじめに

仙台湾南部の仙台北岸は、宮城県の南部に位置し、宮城県仙台北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。この主たる原因は、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⁶⁾、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。これらのことから、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評価するだけではなく、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るので、大規模洪水時の送流土砂量の定量的評価が重要となる。しかし、洪水に対しての土砂量の定量的な評価はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、阿武隈川を研究対象流域とし、岩沼水位観測所で観測史上最高のピーク流量を記録した1986年8月の大洪水と阿武隈川上流部で6日間1200mmの記録的な集中豪雨を記録した1998年8月の大洪水の2つの大規模洪水を対象出水とした阿武隈川本川における土砂輸送量の定量的評価を行い、阿武隈川の供給土砂量減少を確認することを目的とする。

2. 対象流域および対象出水の概要

(1) 対象流域

本研究の対象流域である阿武隈川流域は、一級河川であり、観測体制は一級河川ほど整備されており、それらのデータを集め解析することにより、様々な流域の特性が調べられることである。阿武隈川流域を図-1に示す。

阿武隈川は福島県中通りおよび宮城県南部に位置し、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

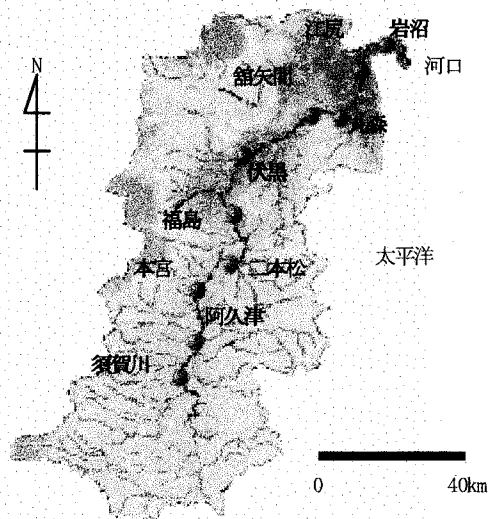


図-1 阿武隈川流域と各水位観測所の位置

西白河郡西郷村大字鶴生、標高1835m)に発し、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、宮城県の角田盆地に流入して、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、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5405km²、幹線流路延長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3983km²、平地1336km²、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。また地質は右岸と左岸で大きく異なっており、右岸は阿武隈高地と呼ばれ、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。

(2) 対象出水

本研究で阿武隈川本川における土砂輸送量を評価するにあたって、対象とする大規模洪水の詳細が必要となる。出水の規模が大きいほど土砂は多く輸送されるため、対象とした出水は、1986年8月の台風による出水と1998年8月の豪雨による出水とする。規模はどちらも数十年に一度のものである。例として、1986年と1998年の岩沼観測所における洪水期間中のハイドログラフを図-2、図-3に示す。

1986年の出水は、台風10号による洪水で8月4日から降り始めた雨は次第に下流へ広がり、夜には全域で豪雨となり、5日未明には福島で37mm、岩沼、亶理では40～50mmの時間雨量を記録した。特に福島では24時間雨量为264mmと気象台開設以来の記録的な豪雨となった。このため、阿武隈川では、上流から下流全川各所において氾濫し、大きな被害を出した。被害状況としては、死者等

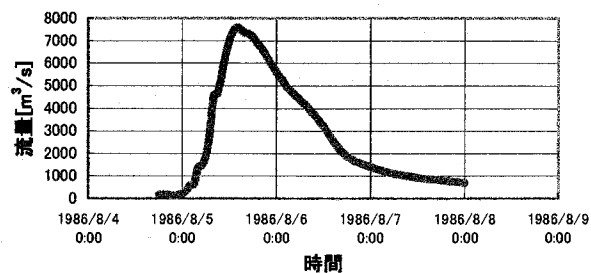


図-2 岩沼水位観測所のハイドログラフ(1986年)

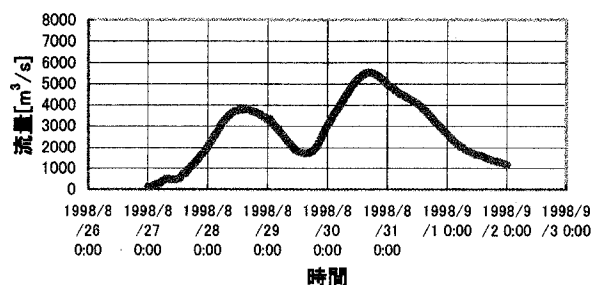


図-3 岩沼水位観測所のハイドログラフ(1998年)

人的被害11人、床上・下浸水約20100戸にも及んだ。

1998年の出水は、8月26日から31日にかけて、栃木・福島県境付近を中心とする東日本一帯で記録的な豪雨となった。阿武隈川下流の全観測所で警戒水位を突破した。被害状況としては、死者11人、家屋被害約220戸、床上・下浸水3600戸にも及んだ。この洪水を福島上流域の2日雨量確率で評価すると約1/40～1/50である。

そこで、これらの大規模洪水による土砂輸送量を評価するため、下記の期間に対して計算を行うことにした。

- ・1986年8月4日18:00～8月8日0:00の78時間
- ・1998年8月27日0:00～9月1日12:00の132時間

3. 数値データ

(1) 粒径について

阿武隈川本川における大規模洪水1個分の土砂輸送量を評価するには、洪水時のハイドログラフだけではなく、河床材料も重要な要素となる。粒径範囲の広い混合砂礫床の河川では、河床材料の混合特性が大きく影響することに注意すべきである。そこで本研究では、阿武隈川本川において水位観測所を10地点ピックアップして、各観測所から勾配、粒径等の数値データを収集した。阿武隈川本川における各観測所の位置を図-1に示す。

河道部においては、国土交通省 東北地方整備局 仙台工事事務所・福島工事事務所で河床土砂の採取および分析を行っているので、その河床土砂の粒度分布を用いる。この粒度分布は、1999年に河道中央部と両河岸部で採取した試料を、ふるい分け試験により分析して得られたものである。国土交通省の河床土砂のデータとしては本川上の数十点の場所のデータがあり、採取地点は河口から

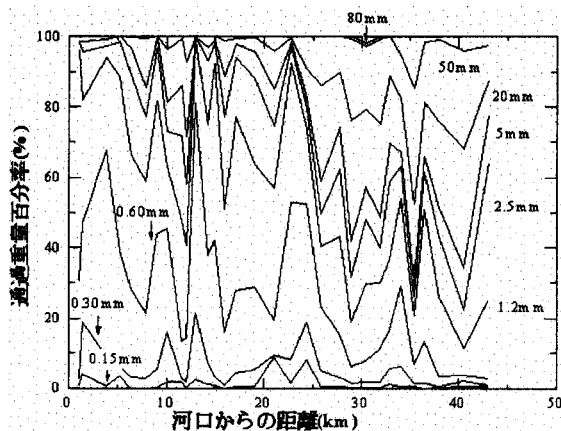


図-4 河口距離0km～50kmの粒度分布（仙台工事管轄）

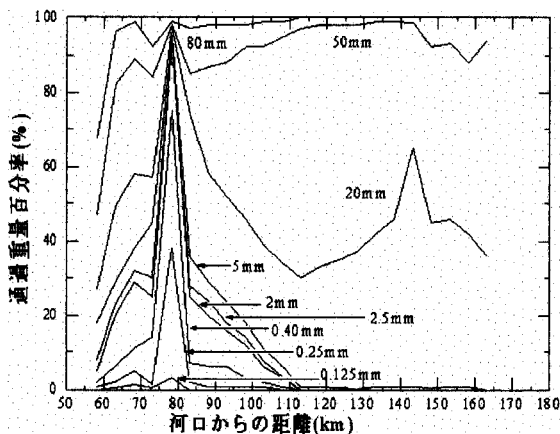


図-5 河口距離50km～180kmの粒度分布（福島工事管轄）

の距離により確認できる。本研究では、市毛¹⁾が用いた資料を利用した。その粒度分布を図-4、図-5に示す。

(2) 勾配について

阿武隈川本川における大規模洪水1個分の土砂輸送量を評価する上で、河床勾配も重要な要素となる。各観測所周辺の河床勾配についての数値データも同様に市毛¹⁾の資料を利用した。これを図-6に示す。各観測所位置が、河口からどれくらいの距離であるかを考慮して、各観測所周辺の河床勾配を算出した。

図-6から、河口からの距離80km～100kmのところで河床勾配がかなり急になっていることがわかる。

4. 計算方法

(1) 掃流砂

掃流砂は河床面上の砂礫粒子に及ぼす流水の流れ方向の抵抗力によるものである。河川内の土砂移動を考慮する場合、河床変動に対して支配的な影響を持つ掃流砂を取り上げることで、河床面上の土砂輸送過程を評価する。

河床面上の土砂輸送過程を把握するには、洪水1個分

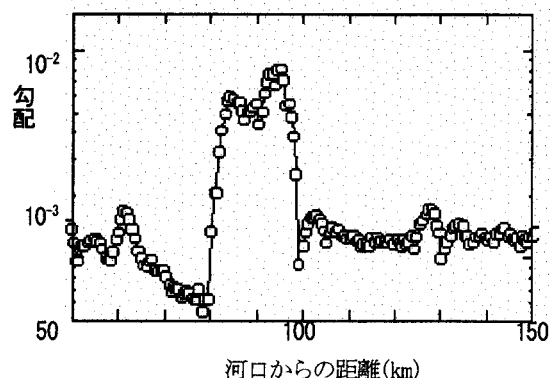


図-6 福島市周辺の勾配（河口距離50km～150km）

の土砂輸送量を評価する必要がある。そこで本研究では、掃流砂量式のMeyer Peter-Müller(1948)の式²⁾および芦田・道上(1972)の粒径別掃流砂量式²⁾を用い、大規模洪水時の掃流砂輸送量を算出、評価をする。なお、土砂動態を調べる上での仮定として、洪水時の測定値は限られているため河床材料の粒度分布は変わらないと仮定し、洪水時には平均水深はあまり変化しないため河床変動はしないと仮定し計算を行う。

掃流砂の運動は、流水と河床面との境界近傍のごく薄い層で発生する複雑な現象であるため、流砂の運動機構のモデル化ないしは次元解析的な手法によって流砂量式が誘導されている。阿武隈川のような粒径範囲の広い混合砂礫床の河川では、河床材料の混合特性が大きく影響する。本研究では、まず平均的な土砂輸送特性をみるために、中央粒径 d_{50} を用いたMeyer Peter-Müllerの式²⁾を用いて、対象出水における土砂輸送量を算出、評価する。中央粒径 d_{50} は図-4と図-5の粒度分布から各観測所における粒径加積曲線を作成し、値を得た。

Meyer Peter-Müllerの式²⁾は、広範囲の水理条件と河床材料についての実験データに基づいてされたもので、無次元量である掃流砂輸送量 Φ_B を次式によって求めている。

$$\Phi_B = 8(\tau_{*e} - 0.047)^{3/2} \quad (1)$$

ここで、 τ_{*e} は $\tau_{*e} = u_{*e}^2 / (sgd)$ 、 s は砂の水中比重、 g は重力の加速度、 d は河床材粒径である。また、 u_{*e} は $u_{*e} = (n_b/n)^{3/4} u_*$ 、 n_b は砂粒抵抗を表す粗度係数であり $n_b = 0.0192d_{90}^{1/6}$ (d_{90} : cm単位) で与えられる。

u_* は摩擦速度であり、本研究では幅広断面の等流状態を仮定し、次式のようになる。

$$u_* = \sqrt{ghI} \quad (2)$$

ここで h は水深、 I は勾配である。なお、 n は流れ全体のManningの粗度係数であり、本研究ではStrickler形式の n の推定法²⁾を用いる。

$$n = 0.0131d^{1/6} \quad (d: \text{mm単位}) \quad (3)$$

ただし本研究では、 d を中央粒径 d_{50} とした。

次に、今度は粒径別に掃流砂輸送量を算出、評価する。実際河川では、河床材料がある粒径範囲を持っているので、その粒径範囲を任意に区分して粒径別に掃流砂量を計算することが重要である。本研究では、粒度分布(図-4、図-5)から粒径範囲を任意に区分した。図-4は粒径が0.15mmから80mmまで、図-5は0.125mmから80mmまでの粒度分布を表わしているのので、この粒径範囲を7つに区分して粒径別掃流砂量を考えた。粒径別掃流砂量を評価するために用いる芦田・道上の式²⁾は、次式になる。

$$i_B q_B = 17 i_b d_i u_{*e} \tau_{*ei} \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*} \right) \left[1 - \left(\frac{u_{*ci}}{u_*} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ここで、 i_B はある粒径範囲の粒径 d_i の粒子が q_B 中に占める割合、 q_B は単位幅の河床面上を単位時間に掃流形式で移動する流砂量、 i_b は粒径 d_i の粒子が河床材料中に占める割合である。 τ_{*ei} は $\tau_{*ei} = u_{*e}^2 / (sgd_i)$ 、 u_{*e} は平坦河床を仮定することで摩擦速度と等しいとする。粒径別の限界摩擦速度 u_{*ci} は、次式で与えられる。

$$\frac{u_{*ci}^2}{u_{*cm}^2} = \frac{\tau_{ci}}{\tau_{cm}} = \left[\frac{\log_{10} 19}{\log_{10} 19(d_i/d_m)} \right]^2 \left(\frac{d_i}{d_m} \right) \quad (5)$$

ここで、平均粒径の限界摩擦速度 u_{*cm} は、岩垣の式²⁾を用いて算出する。

粒径範囲全体の掃流砂量は、 $q_B = \sum i_B q_B$ で与えられる。対象とする洪水過程の流量の時系列に洪水期間にわたって積分することで洪水1個分の土砂輸送量を評価する。

(2) 浮遊砂

洪水の規模が大きくなると、掃流力が大きくなり、相対的に浮遊砂量が大きくなるため、浮遊砂についても土砂輸送量を評価する必要がある。本研究では、板倉・岸(1980)の式²⁾を用い、洪水時の浮遊砂量を粒径別に算出し検討、評価をする。

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²⁾は、濃度分布式として式(6)を使用し、速度分布式として式(8)を使用した。

$$\frac{C_i}{C_{ai}} = \left\{ \left(\frac{h-y}{h-a} \right)^{(1+\phi_{2i})} \left(\frac{a}{y} \right) \right\}^{z_i} \quad (6)$$

ここで、 a は濃度の基準点とされる河床からの高さであり $a = 0.05h$ とした。 ϕ_{2i} は $\phi_{2i} = \alpha_3 \kappa_0 sgh \omega_{0i} \bar{C} / u_*^3$ である。 $\alpha_3 = 7$ とし、カルマン定数は $\kappa_0 = 0.4$ とした。 ω_{0i} は沈降速度で、本研究ではRubeyの式²⁾から沈降速度を求めた。動粘性係数は、 $\nu = 0.01005 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。 ϕ_2 の値は断面平均の体積濃度 $\bar{C}$ を与えて計算する必要があるのので、河村²⁾に従って吉川・石川(1978)の方法²⁾に

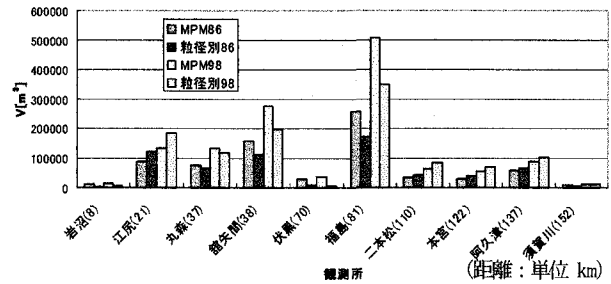


図-7 2つの掃流砂量式による流砂量の比較

よって計算し、 ϕ_{2i} を推定した。なお、基準点濃度 C_{ai} については板倉・岸の式²⁾を用いた。

$$C_{ai} = A_7 \left[\frac{0.14}{(1+s)} \frac{u_*}{\omega_{0i}} \frac{\Omega}{\tau_*} - 1 \right] \quad (7)$$

ここで、 A_7 は実測濃度の平均値的な値の $A_7 = 0.0018$ を使用した。 Ω は τ_* との関係²⁾から算出した。

$$\frac{u}{u_*} = 8.5 + \frac{1}{\kappa_0} \left[\ln \frac{y}{k_s} + \phi_1 \frac{y}{k_s} \right] \quad (8)$$

ここで、 $\phi_1 = 7k_s / L_2$ 、 $1/L_2 = \kappa_0 sgh \omega_{0i} \bar{C} / u_*^3$ 、 k_s は相当粗度である。

5. 計算結果と考察

(1) 掃流砂について

a) Meyer Peter-Müllerの式²⁾による計算結果

式(1)による計算方法を用い、1986年と1998年の出水時の各観測所周辺の数値データを適用する。対象とする洪水過程の流量の時系列に洪水期間にわたって積分することで洪水1個分の土砂輸送量を評価する。図-7に2つの掃流砂量式による掃流砂量の比較を示す。ここで、図-7中の括弧内は河口からの距離を示す。

図-7から1986年と1998年の出水1個分の各観測所における流砂量を比較してみると、1998年の出水時の方が大きくなっている。災害の規模、被害ともに1986年の時の方が大きい、対象とした洪水期間が1998年の方が長かったため、流砂量が大きくなったと考えられる。また、出水1個分の各観測所における流砂量は、10地点の観測所のうち江尻、丸森、館矢間、福島で大きくなることがわかる。この原因として挙げられるのは、河口部に近い江尻、丸森、館矢間では河床材料の粒度分布が小さいために掃流力が大きくなる。一方、福島では福島観測所の河口からの距離が81kmでちょうど河床勾配が急になっているため、掃流力が大きくなったと考えられる。

図-8は2つの掃流砂量式による各観測所間の土砂堆積量を示している。この堆積量は図-7から各観測所における流砂量から算出した概算値である。図-8から福島一伏黒観測所間で土砂がよく堆積していることがわかる。こ

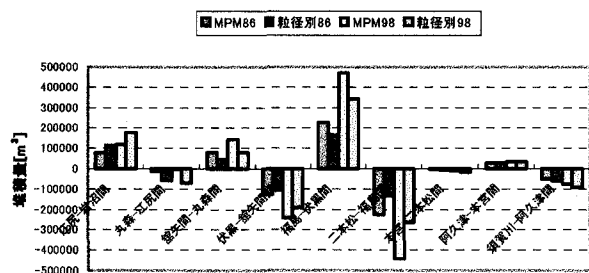


図-8 2つの掃流砂量式による各観測所間の土砂堆積量

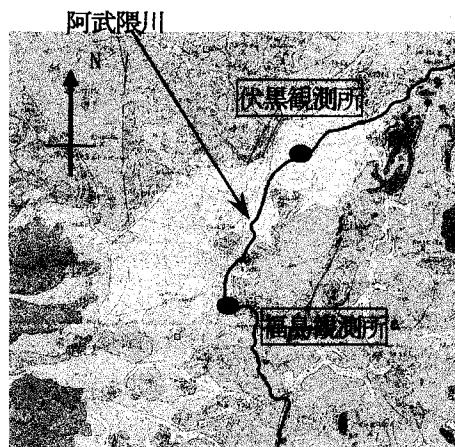


図-9 福島市周辺の土壌地質図⁹⁾

の原因として挙げられるのは、福島観測所の上流部に存在する信夫、蓬萊の両ダムから、出水時に多量の土砂が流出していることが考えられる⁷⁾。また、福島工事事務所による平成1年、8年の横断面図⁸⁾から、伏黒観測所（河口からの距離70km）と福島観測所（河口からの距離81km）では堆積していることからこの計算結果は妥当性を示していると言える。

b) 芦田・道上の式²⁾による計算結果

式(4)による計算方法を用い、1986年と1998年の出水時の各観測所周辺の数値データを適用する。同様に、対象とする洪水過程の流量の時系列に洪水期間にわたって積分することで洪水1個分の土砂輸送量を評価する。

図-8からやはり福島－伏黒観測所間で土砂がよく堆積していることがわかる。1986年、1998年ともに本研究でピックアップした観測所のなかで、福島－伏黒観測所間で一番堆積していることから、この二本松－福島－伏黒観測所間では膨大な量の土砂が移動してきたことになる。図-9は福島市周辺の土壌地質図⁹⁾であるが、白い部分が一番新しい地質の沖積層である。このことから福島－伏黒観測所間によく堆積することを示している。ただし、この辺りは支川の影響もあり、本川における大規模洪水時の土砂堆積だけの影響とは一概にいけない。

各観測所における粒径別の掃流砂量を図-10に示す。図-10から粒径別に各観測所における掃流砂量をみるとそれぞれ特徴が見られる。全体的には上流側では粒径が粗く下流に向かうにつれて粒径が小さくなっていく様子がわかる。江尻では1.2-2.2mmの粒径の土砂が多く、

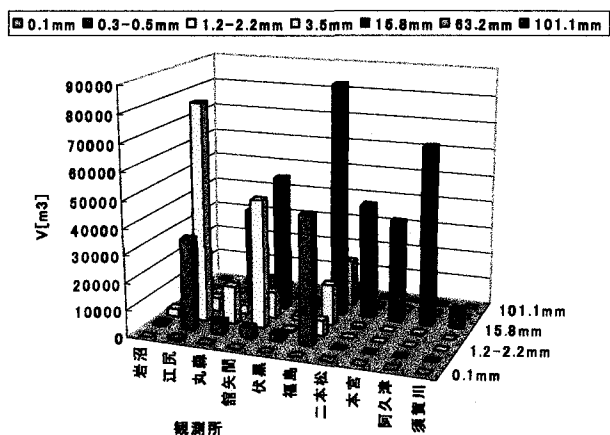


図-10 各観測所における粒径別の掃流砂量(1986年)

この土砂が主に岩沼上流部の堆積作用をもたらしていると考えられる。館矢間では粒度分布が広がっている様子がわかる。福島では粒径が粗いものが特に多くまた掃流砂量も多い。

c) 2つの掃流砂量式による計算結果の比較

Meyer Peter-Müllerの式²⁾と芦田・道上の粒径別掃流砂量式²⁾によって算出した出水1個分の各観測所における流砂量を比較すると、全体的にみて各観測所における流砂量はほぼ同じ割合になった。土砂が無限にあるという仮定上ではあるが、評価結果が確認できた。図-7を詳しくみると、福島や館矢間などの阿武隈川中流部では、粒度分布が広い（図-5）ために粒径別掃流砂量式²⁾で算出した流砂量の方が小さくなった。一方で、阿武隈川上流、下流部での細粒側と粗粒側においては粒径別掃流砂量式²⁾で算出した流砂量の方が大きくなった。これは、Meyer Peter-Müllerの式²⁾では河床材料を中央粒径としているため細粒部と粗粒部についての流砂量は考慮されにくく、粒径別掃流砂量式²⁾では粒径別に流砂量を算出したため、細粒部と粗粒部もしっかり考慮されたことを示している。

(2) 浮遊砂について

式(6), (8)による計算方法を用い、1986年と1998年の出水時の各観測所周辺の数値データを適用する。求めた各観測所における浮遊砂量を図-11に示す。図-11から、県境の狭窄部をぬけた館矢間から下流にかけて浮遊砂量が大きくなっていることがわかる。特に値が大きくなった館矢間（河口から38km）は、粒度分布（図-4）によると、粒径が1mm前後の土砂の割合が高かったため、浮遊砂量が大きくなったと考えられる。図-12に各観測所における粒径別の浮遊砂量を示す。図-12から中流域において浮遊砂は1.2-2.2mmの粒径のものがほとんどを占めていることがわかる。これは、浮遊砂の定義が $1\mu\text{m}$ -2mm径のものであることと合致する。また、岩沼から0.3-0.5mmの浮遊砂が約 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ /海岸へ供給されるという結果になった。実際に仙台海岸での中央粒径が0.2-0.4mmである⁶⁾ということから、この粒径範囲の土砂が海岸に供

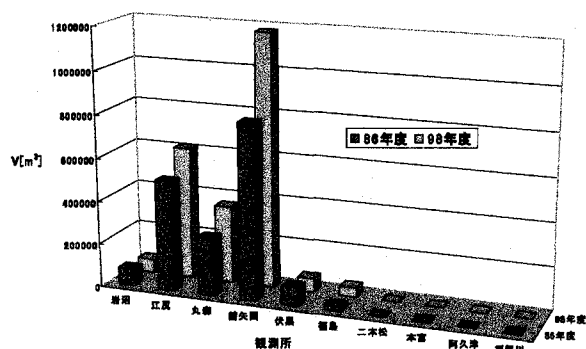


図-11 板倉・岸の式による
各観測所ごとの浮遊砂量

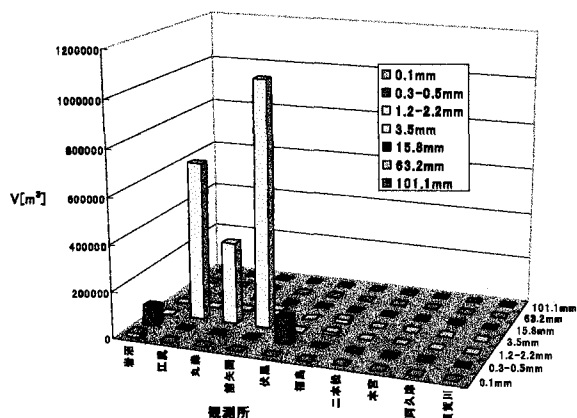


図-12 各観測所における粒径別の浮遊砂量(1986年)

給されたと言える。

図-13は阿武隈川下流部の砂利採取の変遷を示したもので、波線は採取許可量、実線は採取実績を示している。図-13からここ30年の阿武隈川下流部における土砂量は年間約 $3 \times 10^5 \text{ m}^3$ の採取で推移している。一方、計算値では江尻-岩沼間で約 $2 \times 10^5 \text{ m}^3$ の堆積が起り、洪水1回で年間の半分以上を占めることから出水時に多量の土砂が運ばれることが再確認できた。また、岩沼では両流砂量合わせて約 $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ の土砂が海岸に供給されることになるが、この大規模洪水が10年に一回の規模だったとして、年あたり約 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ となり、採取量の方が圧倒的に多いことが分かる。また、実際の沿岸漂砂量は約 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{year}$ と大きい³⁾ため、阿武隈川の土砂供給量が少ないことを示唆している。この供給土砂量の減少が、阿武隈川河口の沿岸漂砂下手側における海岸侵食の原因と言える。

6. 結論

出水時における河川の流砂量は、河床材料や河床勾配に大きく起因し、各掃流砂量式から大規模洪水による土砂輸送量を算出し、福島下流部でよく堆積することがわかった。2つの掃流砂量式による計算結果がある程度

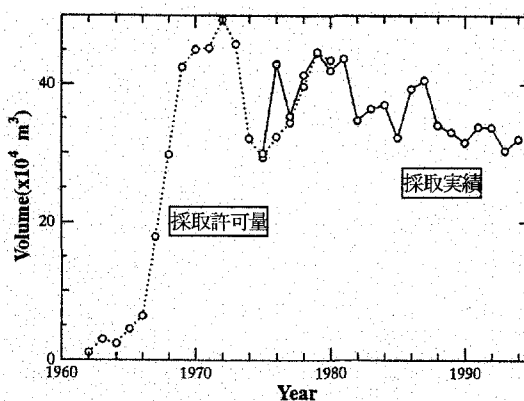


図-13 阿武隈川下流部における
砂利採取量の変遷⁶⁾

同じになったことから、定量的な評価が確認できた。粒径別に評価することで各観測所における土砂量に特徴がみられた。

また、浮遊砂は主に下流部に多くみられ、大量の土砂が浮遊状態で上流から運ばれたことを示している。海岸の土砂供給が問題となる河口部の岩沼上流では堆積が起り、海岸に供給された計算値の土砂供給量は年平均で考えると、現状の沿岸漂砂量より少ないことがわかった。この供給土砂量の減少が、阿武隈川河口の沿岸漂砂下手側における海岸侵食の原因と言える。

謝辞：本研究を行うにあたり貴重な流量データを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。

参考文献

- 1) 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. 27, 51-52, 1999.
- 2) 河村三郎：土砂水理学 1，森北出版，pp. 64-69, 211-212, 243-294, 1982.
- 3) 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.
- 4) 東北地方土地質図編集委員会：東北地方土地質図 4，1988.
- 5) 富樫 昇：阿武隈川における土砂輸送，東北大学工学部土木工学専攻卒業論文，pp. 20-23, 2001.
- 6) 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.
- 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) 東北地方建設局 福島工事事務所：横断面図（阿武隈川上流），1989, 1996.

(2002. 9. 30 受付)