

21. 阿武隈川から海域への流出土砂の 観測と解析

Observation and analysis of the suspended sediment transported
from the Abukuma River

杉木基泰 * ・ 佐藤芳信 * ・ 真野 明 *
Motoyasu SUGIKI, Yoshinobu SATOU, Akira MANO

ABSTRACT; Vertical distributions of fine particle sediments have been observed during floods by a specially designed sampler. The samples were analyzed through the Coulter Counter to obtain the grain size distribution. For each grain size range, the observed vertical distributions of the concentration are compared with Rouse's solution. The reference concentration at 5% of the depth from the bottom extrapolated by the solution are compared with the semi-experimental estimation by Lane using the grain size distribution of the bed material which was also taken during the flood.

KEYWORDS; fine particle sediments, floods, grain size distribution, vertical distribution

1 はじめに

おもに降雨によって生じる河川の出水は、様々な物質を海域に輸送するが、そのなかで海域の環境に影響を与えるものとして細粒土砂を挙げることができる。河川流域で発生して海域に到達した細粒土砂は沖合いまで拡散して沈降し、藻場に影響を与える。また土砂に付着して輸送された栄養塩は海域での生態系を維持する一方、過剰な栄養塩は赤潮の要因になる。さらに土砂自体が漂砂源となって沿岸の土砂収支に影響を与えている。このように河口における土砂収支を正しく評価することは、広く沿岸環境を解析していく上での基礎となるのである。

本論文では、出水時に現地観測することで流水を採取し、得られた試料の分析結果をもとに土砂濃度と粒度分布を評価し、出水時に運ばれる細粒土砂の輸送特性を報告するものである。

2 観測状況

著者らは1994年から阿武隈川河口8km地点の阿武隈橋で自作の簡易採水器を用いて、出水期間中に観測を行ってきた。この近くには建設省のテレメーターによる水位観測所があるため、観測試料を検討するために必要な水位の時系列データが得られる。流量は水位流量検定曲線によって算出した。出水時には流量の時間的変化が大きいことから上昇期と下降期で不定流の効果が異なることも考えられるが、事前におこなった不定流計算によって等流近似で十分であることを確認している。摩擦速度 u_* は等流を仮定し、径深の代わりに採水位置での水深を用いて算出した。観測現場の河床勾配は約1/3300である。

現在までに観測は1994年9月29~30日(ピーク流量 $2,800 \text{ m}^3/\text{s}$)、1995年5月13~14日(同 $700 \text{ m}^3/\text{s}$)、1995年8月3~4日(同 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$)、1995年9月17~18日(同 $1,900 \text{ m}^3/\text{s}$)の計4回行なった。観測には自作の簡易採水器を用いて、出水期間中に橋の上からロープを下ろして流水を採取した。

*東北大学大学院工学研究科 Division of Engineering, Graduate Schools, Tohoku University

また採水器に取り付けたマンメーターから、採水をおこなった水深を知ることが出来る。採水器の詳細と、1994 年 9 月出水の観測状況と分析結果は真野・杉木 (1995)[1](以下、前報) で詳しく報告している。この時点では採水器の設計が十分ではなく、水深で約 2 m の深さまでしか採水出来ず、河床付近での観測結果が得られなかった。しかしその後の採水器の改良 [2] によって 1995 年 5 月以降 3 回の観測では河床付近の試料を採取している。特に 1995 年 8 月出水では出水期間中に河床土砂を採取し、平常時の河床土砂の粒土分布と比較した。

観測現場の横断面図と採水位置を Fig.1 に示す。図中の No.1, No.2 が採水位置を表している。これは横断方向での濃度と粒径分布の違いを知るために 2 箇所での採水をおこなった。Fig.2 に 95 年 8 月出水のハイドログラフと摩擦速度の経時変化を、Fig.3 に水位と採水位置を示す。この時の河床高さは約 2.2 m なので、河床付近の試料を採取していることがわかる。採水器の取り扱いが非常に簡単で軽量であり、一点の採水にかかる時間は約 5 分程度であることから、任意の時空点で数多くの採水が可能である。

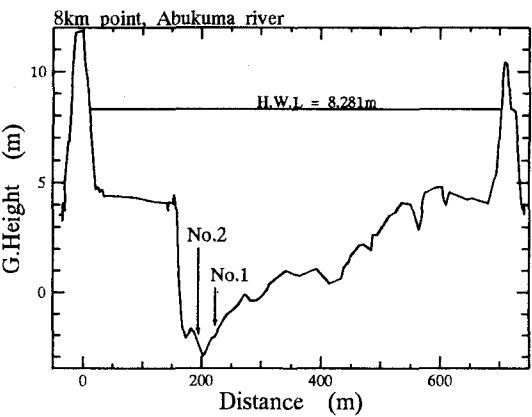


Fig.1: 観測位置の横断面図

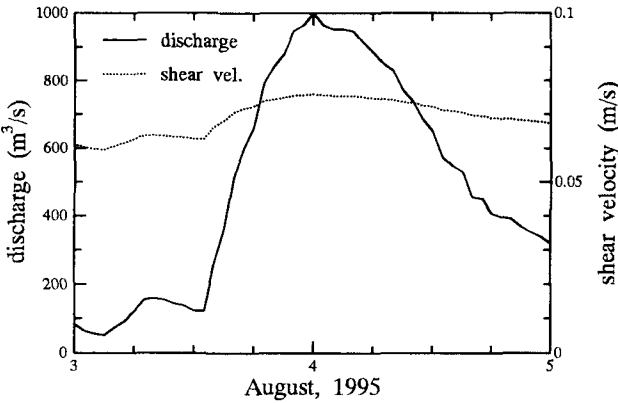


Fig.2: 1995 年 8 月出水の流量と摩擦速度の経時変化

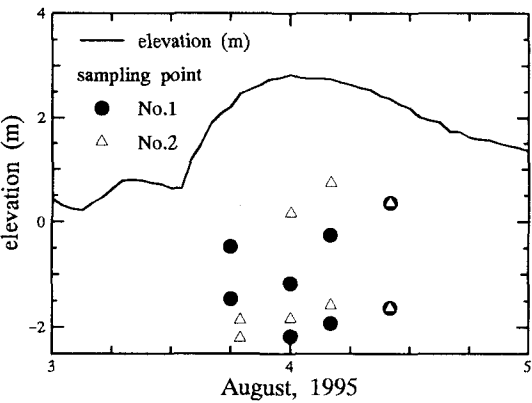


Fig.3: 1995 年 8 月出水の水位と採水高さ

3 試料の分析と考察

採水した試料から質量濃度と粒径分布の 2 項目を分析した。前者については試料の一定量を $1\mu\text{m}$ のフィルターで濾し、残留質量から濃度を求めた。後者はコールターカウンターを用いて分析した。この分析によって試料の一定量中に含まれる各体積範囲の土粒子の個数が判るので、土粒子の個数分布と体積濃度が算出される。なお、分析方法の詳細は前報で報告している。これらは海域に流出する細粒土砂について必要な情報であり、対象とする流域や出水毎に詳細が異なるため、観測が必要である。

3.1 流送土砂の粒径分布

分析によって得られた土砂の粒径毎の個数分布から、粒径加積曲線を求めた。Fig.4に8月出水の測点No.1の粒径加積曲線を示す。図中の高さは、河床から採水した位置までの高さを表す。図から、観測された土粒子の最大粒径は約0.1 mm程度であることが判る。また、その他の観測においても得られた試料中に含まれる最大粒径もほぼ等しかった。現在までの観測では94年9月出水時に生じた3,000 m³/sが最大流量なので、これ以下の出水で輸送される土砂は、ほとんどが0.1 mm以下であると予想できる。

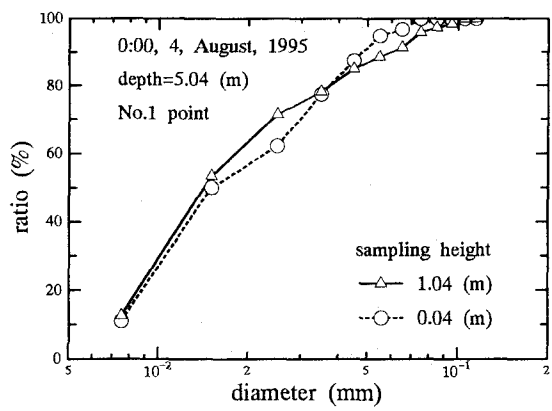


Fig.4: 1995 年 8 月出水の No.1 地点の粒径加積曲線

3.2 河床材料の粒度分布

河床材料の構成を調べるために、95 年 8 月の観測中に水位のピーク付近で地点 No.1 の河床材料を採取して、ふるい分け試験によって粒度分布を求めた。一方、比較のため平常時の同地点での粒度分布を得た。Fig.5とFig.6にそれを示す。また、分布特性を関数化するために次の関数を用いた。

$$y = 50(1 + \tanh(a \log_{10}(\frac{x}{b}))) \tag{1}$$

式中の係数 a は分布の広がり、 b は中央粒径を表している。係数 a, b は最小二乗法により求めた。平常時の粒度分布である Fig.6は図中の係数を用いて良く対応している。また中央粒径を比較すると出水期間中は $b = 0.892$ 、平常時が $b = 0.501$ と平常時の方が相対的に細粒分が多くなっている。これは出水期間中は粒径の小さな土砂が流れの乱れによって流水中に巻き上げられ、粒径の大きな土砂の占める割合が大きくなったこと。また平常時は、出水の後半で運ばれてきた細粒土砂が河床に堆積して細粒分の割合が大きくなっているためと考えられる。

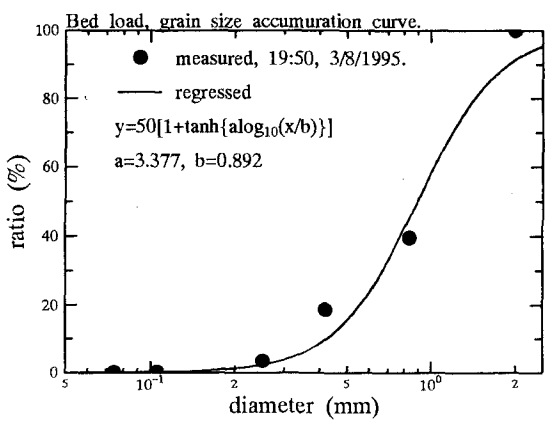


Fig.5: 1995 年 8 月出水時の河床の粒度分布

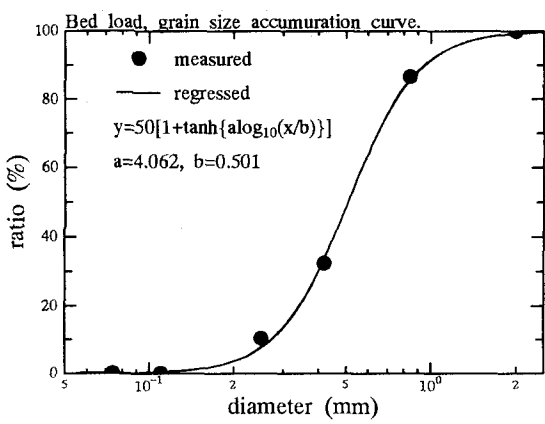


Fig.6: 平常時の河床の粒度分布

3.3 流送土砂の濃度分布

海域に供給される土砂量を推定するには、流送土砂の濃度分布の情報が不可欠である。既往の研究で浮遊砂の鉛直方向濃度分布式が数多く提案されているが、どれも境界条件として河床付近での濃度が必

要であり、これは測らなければ判らない情報である。95年5月出水時において鉛直方向に3点の採水を行い、Rouse(1937)の浮遊砂濃度分布式[3]と比較した。この濃度分布式は鉛直上方に y 軸をとり、

$$\frac{C}{C_a} = \left(\frac{h-y}{y} \cdot \frac{a}{h-a} \right)^{w_0/\kappa u_*} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 C : y 地点での濃度、 C_a : a 地点での濃度、 h :水深、 a :浮遊砂濃度の基準点とされる河床面からの高さ、 w_0 :土粒子の沈降速度、 κ :カルマン定数、 u_* :摩擦速度を表す。基準点の高さ a は水深の5%、 κ は0.4で定数とした。また、粒径毎に沈降速度が異なることから、計算は粒径範囲を5-24, 24-48, 48-74, 74-105 μm の4段階に分割して行い、沈降速度はそれぞれの粒径範囲の中央値を用いてRubey(1933)[4]の沈降速度式から算定した。

Fig.7からFig.10に各粒径範囲毎の分析結果とRouseの鉛直分布を示す。基準点濃度 C_a は観測で得られた試料の中で、最深部の濃度とその高さから算出している。図から、観測された鉛直方向の濃度分布が、基準点の濃度を基準としてRouseの曲線におおむね対応していることが分かる。

従来より、これらの細粒土砂はウオッシュロードであるとされ、その濃度は流域での土砂生産量に依存するとされてきた。しかしFig.7からFig.10で示したように、鉛直方向の濃度分布に良く対応した。このことから細粒土砂の挙動は流れによる乱れの影響を受けながらも、鉛直方向の濃度分布があると考えられる。

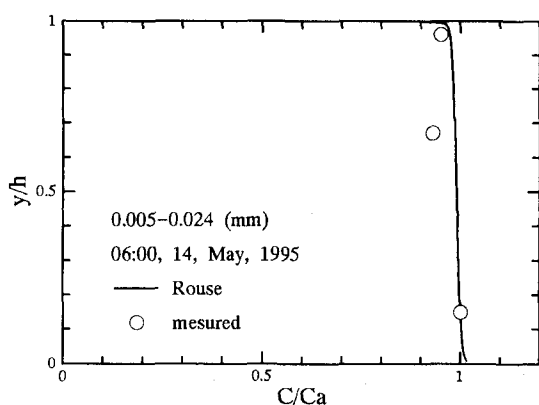


Fig.7: 1995年5月出水の鉛直濃度分布 1

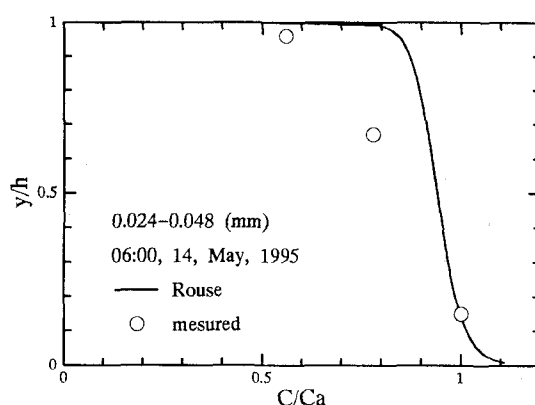


Fig.8: 1995年5月出水の鉛直濃度分布 2

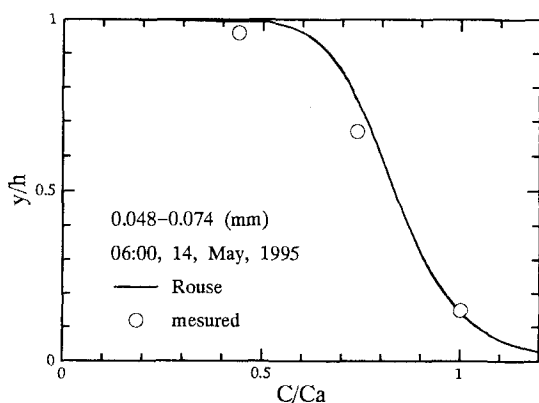


Fig.9: 1995年5月出水の鉛直濃度分布 3

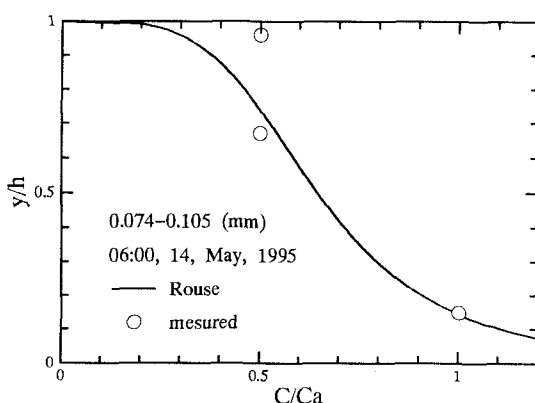


Fig.10: 1995年5月出水の鉛直濃度分布 4

つぎに、95 年 8 月出水時に採取した河床の粒土分布から基準点濃度 C_B を求めた。計算には Lane-Kalinske(1941)[5] を用いた。

$$C_B = 5.55 \Delta F(w_0) \left(\frac{1}{2} \frac{u_*}{w_0} \exp \left(- \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^2 \right) \right)^{1.61} \tag{3}$$

ここで $\Delta F(w_0)$ は沈降速度 w_0 の土粒子が河床に占める割合である。 C_a との比較のために粒径範囲を C_a を算出した時と同じに 5-24, 24-48, 48-74, 74-105 μm に分割し、式 (1) を用いてそれぞれの $\Delta F(w_0)$ 算出した。また、河床の土砂の採取は出水期間を通じて 1 回のみであったので、採取試料を出水期間通じて変化しないと仮定し、摩擦速度の変化のみを寄与させた。

この C_a と式 (3) で算出した C_B を合わせて Fig.11 に示す。観測で得られた 0.1 mm 以下の範囲で、 C_a と C_B の傾向が比較的良く合っている。このことは、ウオッシュロードとされる細粒土砂が上流域からの土砂供給のみではなく、河床表面でも土砂交換があることを示している。また C_B の算出に用いた Lane らの式が数 μm の土粒子まで考慮された式であることも [5]、これらの小さな粒径範囲で C_a と C_B に相関がみられた要因となっていると考えられる。以上のことから、0.1mm 以下の細粒土砂も上流域からの供給土砂と、河道内に堆積していた土砂からなり、その濃度分布特性は浮遊砂と同じ傾向にあると言える。一方、0.1 mm 以上の土砂が観測されなかったが、今後原因を調査することが必要と思われる。

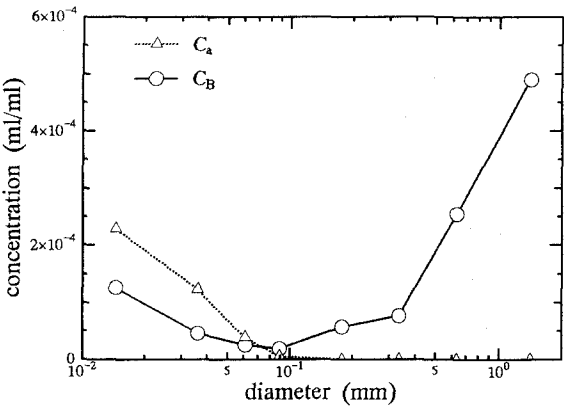


Fig.11: 基準点濃度 C_a と C_B の比較

つぎに、出水によって輸送される土砂量を算定するため、今回の観測から得られた基準点濃度 C_a と流量の関係を関数化した。これによって流量から濃度分布を決定できるため、適当な速度分布を乗じて横断方向に積分すれば土砂量を算定できる。Fig.12から Fig.15に粒径ごとの流量と基準点濃度 C_a の関係を示す。基準点濃度 C_a は体積濃度である。また図中の実線は回帰直線である。

阿武隈川では出水の頻度は年に数回、少ない年で 1 回程度であり、なかなか大きな出水が望めない。今回行ってきた観測でも最大流量が 94 年 9 月出水時のピーク流量約 3.000 m^3/s 程度であり、思い通りの観測試料を得ることが非常に難しい。したがって今後も観測を続けることにより、より精度を上げていく必要がある。

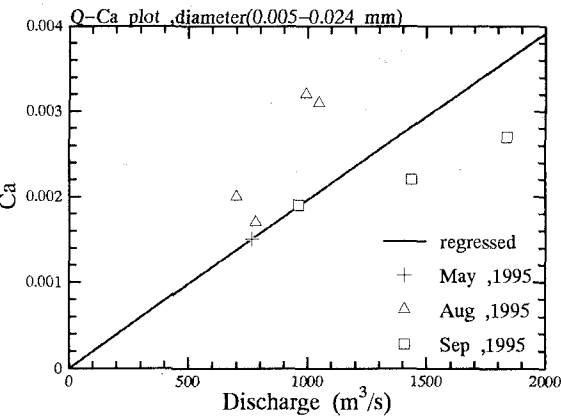


Fig.12: 流量と基準点濃度との関係 No.1

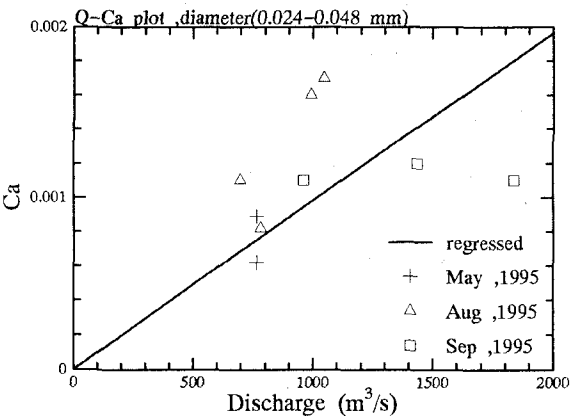


Fig.13: 流量と基準点濃度との関係 No.2

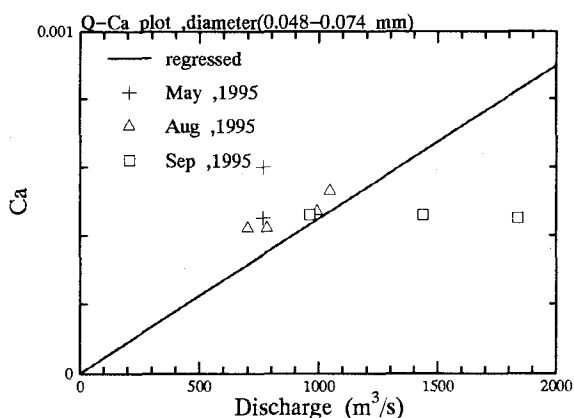


Fig.14: 流量と基準点濃度との関係 No.3

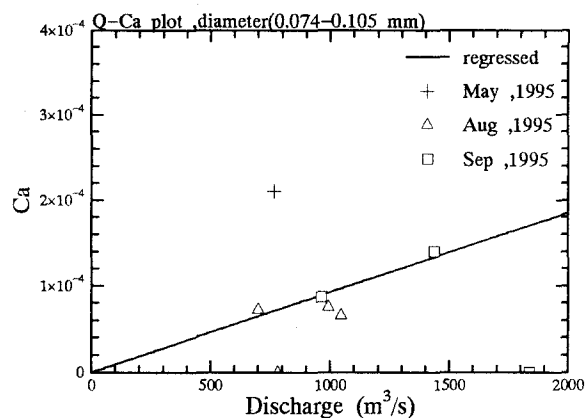


Fig.15: 流量と基準点濃度との関係 No.4

4 結語

出水時に現地観測することによって浮遊状態で輸送される土砂の粒径分布と、出水時と平常時の河床の粒度分布の特性を考察した。またウォッシュロードとされる細粒土砂の濃度分布特性が、浮遊砂的な取り扱いが出来ることを示した。これによって細粒土砂の濃度分布を決定することができ、海域に輸送される土砂量を評価できる。

尚、本研究を行うにあたり建設省東北地方建設局仙台工事事務所より貴重な資料を提供していただいた。また本研究は文部省科学研究費試験研究Bを受けたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 真野 明・杉木基泰:洪水用浮遊砂採水器の試作と現場試験, 第39回水理講演会論文集, pp.887-890,1994
- [2] 真野 明・杉木基泰・沢本正樹:洪水用簡易浮遊砂採水器の開発, 東北地域災害化学研究集, 第32巻,1996.
- [3] Rouse,H.:Modern conceptions of the mechanics of turbulence, Trans.ASCE,Vol.102,pp.463-505,1937.
- [4] 河村三郎:土砂水理学1, 森北出版, 339p.,1982.
- [5] Lane,E.W. and Kalinske,A.A.:Engineering calculation of suspended sediment,Trans.AGU,pp.603-607,1941.
- [6] 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男:河川の土砂流送に関する研究, 建設省土木研究所報告, 第101号, pp.49-64,1959.
- [7] 芦田和男・道上正規:浮遊砂に関する研究(1)-河床付近の濃度-, 京大防災研究所年報, 第13号B, 63-79, 1970.
- [8] 村本嘉雄・道上正規・下島栄一:大戸川における微細土砂の流送過程について, 京大防災研究所年報, 第16号B, 433-447, 1973.
- [9] 中川博次:流砂量の算定, 吉川秀夫編著「流砂の水理学」第3章, 丸善, 543p., 昭和50年.