

阿武隈川河口沖合における土砂堆積特性

佐藤 芳信*・真野 明**・沢本 正樹***

1. はじめに

河川から海域に出る土砂の大部分は出水時に輸送されるものであるが、阿武隈川の実測結果(杉木ら, 1997)によると更にその中の大きな部分は粒径が0.1 mm以下の細粒分で占められている。そのような細粒土砂は、海域に出た後、すぐには沈降せずに、広く移流拡散するものと考えられ、その堆積特性を知ることは、海岸の砂とその供給源の関係を調べる上で極めて重要であるが、あまり調査が行われていない分野である。

筆者らは1996年9月の出水時に阿武隈川で大規模な現地観測を行い、浮遊状態で輸送される土砂の特性を調べている。さらに、この1ヶ月後に河口沖合で、コア状に底質を採取する調査を行った。本研究は河口から流出する土砂と沖合に堆積する土砂の関係をすることを目的としたもので、この現地調査結果の他に他機関が実施している調査結果をも解析しその特性を調べた。また、河口の実測値を境界条件として、土砂の移流・拡散・沈降の数値解析を行い実測結果と比較し考察している。

2. 底質の特性

2.1 底質採取と分析

1996年9月22-23日に台風17号により、河口の岩沼で最大流量2160 m³/sの出水があった。この出水の約1ヶ月後の、10月30日に底質採取の調査を行った。採取に当たっては、できるだけ乱さない、コア状の試料を得ることを目指した。阿武隈川の河口沖合の底質は細砂が主要な成分を占めており、このような底質をコア状に採取するためには特殊な技術が必要なため、日本ミクニヤ(株)に採取を委託した。採取にあたっては、まず直径10 cmの透明樹脂のパイプを海底に鉛直に立て、それに振動を与えて、地中に押し込み、パイプ中に試料を切り取っていく。必要な深さだけ切り取ったら、パイプを引き上げ、パイプの先が海底を離れた段階で、下に待機していたダイバーがパイプ下端にゴム栓をして、試料が

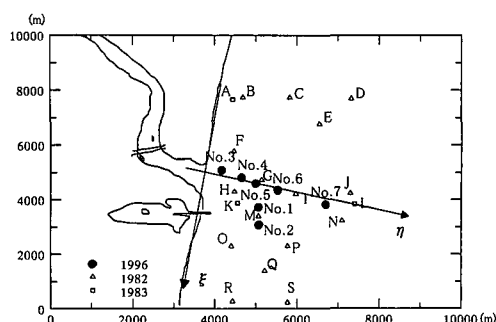


図-1 底質採取地点

ずり落ちないようにすると言うものである。

採取地点を図-1に示す。沖方向の測線ηに沿って、No.3-7の5点、沿岸方向の測線ξにほぼ平行にNo.5, 1, 2を配置し、計7点の採取を行った。No.3は河口テラスの上の点であり、No.7は河口から約3 km沖の水深22 mの地点である。試料の高さは1 m以上採取することを目指したが、河口テラス地点では特に採取が難しく、0.5 mの試料にとどまった。また、図中のA～Sの記号は2.2で述べる国土地理院の調査地点である、

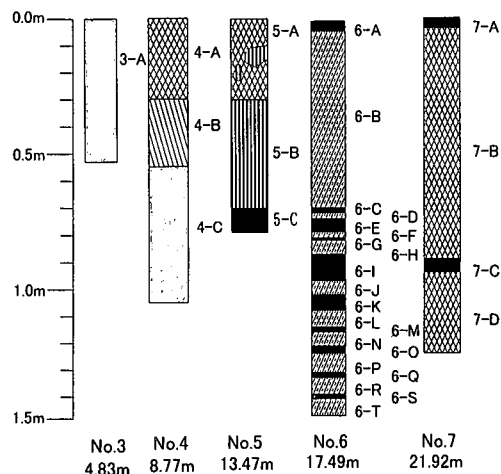
採取した試料は、まず目視観察と写真撮影を行った。図-2に岸沖方向の測線における柱状図を示す。目視観察から主に色の違いにより層分けをした。層は上より順にA, B, C, ..., とラベルをつけ、測点番号とあわせて識別した。河口テラスのNo.3では、明るい茶色の比較的粒径の大きな砂で、得られた試料の範囲で層は見られなかった。このテラスは1986年8月の観測上最大の出水(岩沼での最大流量7600 m³/s)により一時期に作られたもので、その後少しずつ変形してきてはいるが、形成当時の様子を表したものと言えよう。No.3より、沖側の地点では幾つかの層が明瞭に現れ、また沖に向かうに従って、灰色がかってくる。No.6と7では、表面は黒くヘドロ化した薄い層で覆われていた。No.6ではこのヘドロ層が何層も挟まれていた。

次に粒度分析を行った。各層毎に試料を切り出し、まず水洗いして塩分を除去した。次に試料を2つに分け、1つは灼熱減量法により有機物を除去した。それぞれの試

* 正会員 工修 新潟県

** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科

*** フェロー 工博 東北大学教授 大学院工学研究科



図一2 柱状図(岸沖方向測線)。凡例：3-A, 4-C (茶褐色の比較的荒い砂), 4-A, 5-A, 7-B (灰色の細かい砂), 4-B (暗灰色の細かい砂), 6-B (赤みがかった暗灰色の細かい砂), 6-A, 6-C, 6-E, ..., 7-A, 7-C (黒色、ヘドロ化した細かい砂)。

料は 0.074 mm 以下をコールターカウンターで、それ以上を篩で粒度分析した。岸沖方向の測線における粒径加積曲線を図一3 に示す。黒丸が有機物を含んだもの、白丸がそれを取り除いたものであり、地表近くの 2 つの層だけを表示してある。A 層と B 層を比較すると粒度分布にあまり違いはなく、地点ごとの差の方が大きいことが分かる。河口テラスの No. 3 では粒径が 0.12 mm 付近で、急激に立ち上がっており、図一2 と合わせて考えると、均一な粒径の細砂が厚く堆積していることを示している。

No. 4, 5, 6 でも、曲線が急に立ち上がっている部分があるが、細粒側にずれており、その粒径は 0.1 mm 以下と小さくなっている。また、この立ち上がり部分の左側に

は別の形の分布があり、その微細粒子の存在割合は沖に行くに従って大きくなる。さらに、有機物の有無との比較から、有機物はこの微細粒径の領域に多く含まれていることが分かる。すなわち有機物は、この微細粒子の表面に付着して運ばれ沈降堆積したものと考えられる。

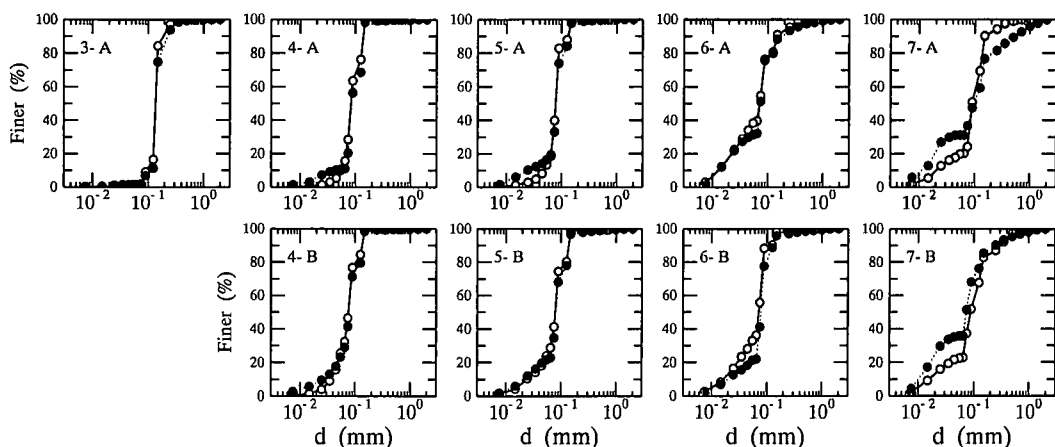
2.2 粒径の平面的な分布特性

建設省国土地理院 (1987) は名取川河口から阿武隈川の河口に至る海域で底質調査を行っており、中央粒径 d_{50} と淘汰度 (selectivity factor; FS) の値が報告されている。ここで、淘汰度は次式で定義される粒度分布の広がり示す指標であり、この式中の d_{16} , d_{84} は、mm 単位で表した、16%, 84% 粒径である。

$$F_s = (\log_2 d_{16} - \log_2 d_{84}) / 2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

大きい淘汰度は粒径分布が広いことを意味している。この報告書の値に、今回の調査で得られた値を加えて、阿武隈川河口の周辺海域で、これら値の分布を示したのが、図一4、図一5 である。図中の、 ξ と η は図一1 に示す沿岸方向、沖方向の座標軸であり、 ξ の原点は現在の河口の中心にとってある。図一4 は中央粒径の分布であるが、 ξ で -2000 m から 0 m の領域で中央粒径は大きな値をもち、そこから離れるに従って、中央粒径は小さくなる。また岸沖方向の変化で見ると、岸近くで大きく、沖に向かうに従って小さくなる。

淘汰度の分布である図一5 を見ると、中央粒径が大きな値を示した、沿岸方向距離 ξ で -2000 m ~ 0 m の範囲で小さな値を示し、そこから離れるに従って大きくなる。また岸の近くでは小さな値をとり、岸から離れるに従って大きくなる。すなわち、河口の近くでは粒径が大きくて、篩い分け作用が働いて粒径分布が狭く、河口から沿岸方向、沖方向に離れるに従って、粒径は小さくなり、また拡散作用により分布が広くなるという、河川起源の



図一3 粒度分布特性凡例：黒丸は有機物を含む試料、白丸は有機物を取り除いた試料。

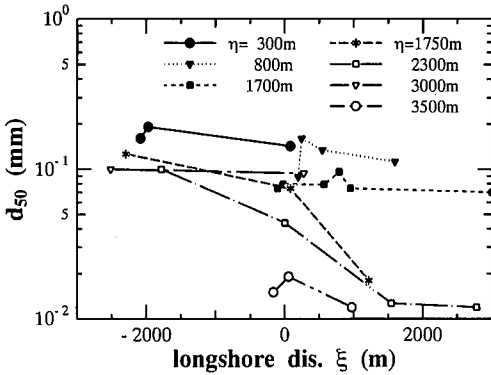


図-4 中央粒径の岸沖沿岸方向分布

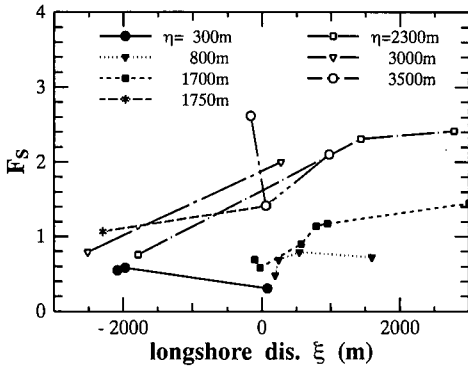


図-5 淘汰度の岸沖沿岸方向分布

堆積特性に良く似ていることが分かる。

粒径分布から判断される河口の位置がξで-2000 mから0 mと現在の河口に比べて北方にずれている点も興味深い。等深線から見ると1986年の大洪水が作った河口テラスが現河口の沖に張り出しているが、底質の分布はこれとは少し違っている。上で引用した国土地理院の報告書では、海岸に沿って細長く分布する細砂の領域(同報告書の中でA₁層と呼んでいる)が現河口より約2 km北で沖に大きく張り出していて、これが先の粒径分布特性と対応している。このずれは、古い河口が現在より北側に有ったと考えれば説明でき、事実現河道の北側に旧河道の痕跡が残されているが、底質が形成される時間スケールとの関係など詰めなければならない問題も多い。

3. 数値解析

3.1 解析方法

河口から海域に排出される土砂は浮遊状態のものと掃流状態のものが有り、河口テラスの形成などは後者が卓越した現象である。さらに、掃流砂量を決めるのは底面せん断力であるが、河口における密度の影響をどのように評価したら良いか不明な点も多い。そこで、本研究で

は浮遊状態で移流拡散する成分のみを考えることとした。

流れと土砂輸送の方程式は、いずれも鉛直方向に積分した以下の式を用いた。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M_j}{\partial x_j} = 0, \quad (j=1,2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{M_i M_j}{D} \right) + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M_i \sqrt{M_j^2} - \nu_e \frac{\partial^2 M_i}{\partial x_j^2} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\epsilon \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \frac{w_0 C}{D} \quad (4)$$

ここで、水平方向に座標 $x_j(j=1, 2)$ 、また鉛直上方に z 軸を取り、テンソルの総和規約を用いている。 ζ は水面変位、 M_j は x_j 方向の単位幅流量であり、 $u_j = M_j/D$ は x_j 方向の流速、 D は水面から海底までとった全水深、 n はManningの粗度係数で0.028を用い、 ν_e は水平渦動粘性係数でSmagorinskiモデルを用いた(Manoら, 1996)。 C は土砂濃度、 ϵ は水平拡散係数であり前述の渦動粘性係数を用いた。 w_0 は沈降速度でありRubeyの式を用いた。これらの式をLeap Frog差分法により解いている。空間格子間隔は20 mとした。

地形データは沿岸方向3.7 km、岸沖方向3.8 kmの広い領域を国土地理院の岩沼東部の沿岸海域地形図からとり、河口近くの領域は1996年2月に建設省が測量したものを用い、水深約13 mのところで接続した。

対象出水は1996年9月の台風17号による出水である。流量ピーク時の浮遊土砂の粒度分布が図-6のように観測されており、縦軸の通過百分率を10等分し、各区分の中央粒径を代表粒径として、計算を行った。最小代表粒径が0.0096 mm、最大が0.12 mmである。流量は建設省岩沼流量観測所での観測値を用いた。杉木ら(1997)により土砂濃度と流量の関係が実測値より求められており、次式を用いて出水中の濃度変化を与えた。

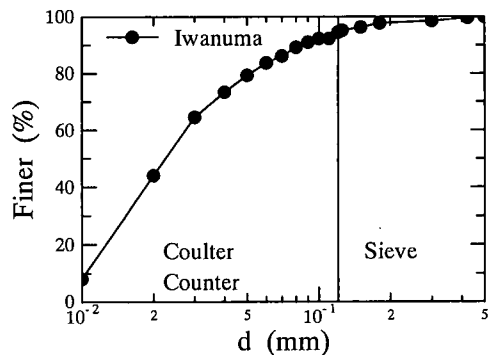


図-6 1996年9月出水ピーク時の粒度分布(阿武隈橋)

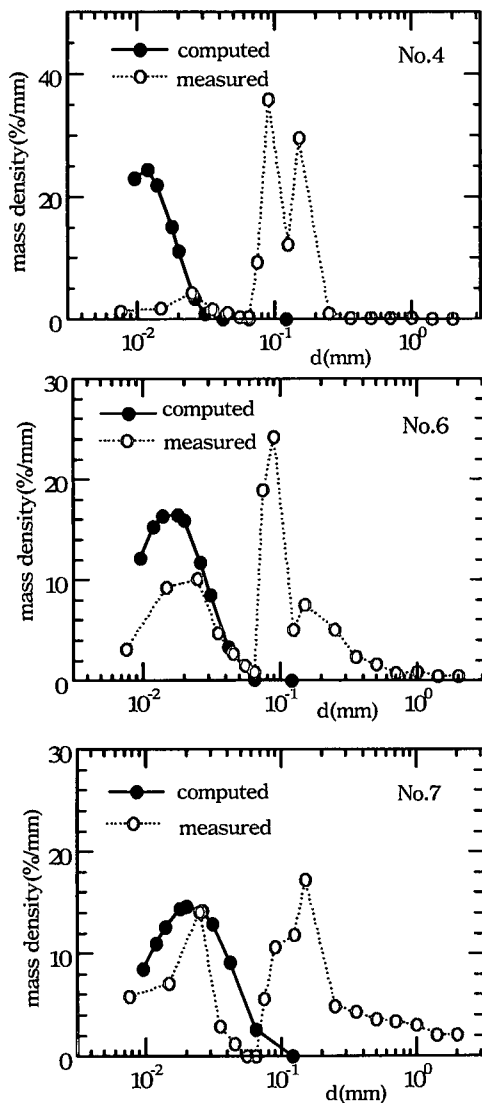


図-7 底質粒径分布の比較

$$C_0 = 2.5 \times 10^{-4} Q^{1.12} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 C_0 (kg/m³) は河口濃度、 Q (m³/s) は河口流量である。

なお粒度組成は変わらないものとして、ピーク時のものを用いた。また、実測値はすべて有機物を含んだものを対象とした。

3.2 解析結果と考察

各粒径に対する計算結果を集めると、堆積土砂の粒度分布が得られる。これを実測値と比較したのが、図-7である。ここで、縦軸は通過百分率を粒径で微分した、質量密度の形で表現してある。これは、図-4で述べた微細粒径の分布を明瞭にするためである。また、観測した浮遊砂は 0.12 mm が最大代表粒径なので、この粒径の通過

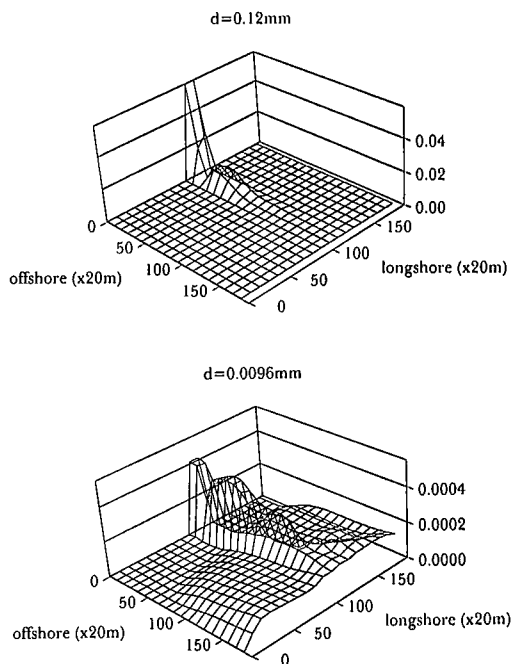


図-8 堆積高さの分布 (高さの単位は m)

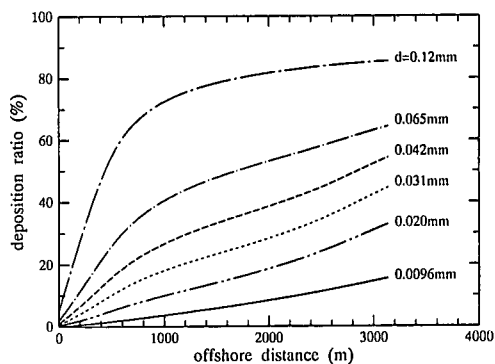


図-9 流送土砂の堆積度

百分率が 100 % になるように、実測値を調整した。

図-7 は No. 4, 6, 7 の地点の質量密度を比較してある。実測値は、明らかに 2 つのピークを有し、0.02 mm 付近にピークを持つ微細粒子の割合が沖に行くに従って大きくなる。計算は、この微細粒径が対象であるが、沖に向かうに従って、分布形や大きさとも実測値に近づいている。以上のことから、実測値に現れた微細粒径の土砂は、河川からでた土砂が、浮遊状態で運ばれ、沈降したものとして良いであろう。

これよりも大きな粒径の分布の形成機構は、今後詰めなければならない問題であるが、図-4, 5 で見たように、全粒径範囲の特性である、中央粒径や淘汰度の空間分布が河川起因と考えられる特徴を有していることは、一つ

の指針になるであろう。

図-8にこの計算で得られた、一出水分の堆積高さの分布を示す。粒径が最も大きい $d=0.12\text{ mm}$ に対する結果では、河口で最大堆積高さ5 cmが得られ、流軸に比べて比較的狭い範囲に堆積している。一方、最細粒径である $d=0.0096\text{ mm}$ に対する計算結果を見ると、流軸に沿って比較的大きな堆積をする領域と、流軸から離れて高さは低い幅広く堆積する領域があることが分かる。計算領域の境界付近の堆積高さの分布は、北側境界と沖側境界では、境界を越えて外部に流出することを示している。

図-9はある沖向き距離に対して、どの程度堆積したかを示したもので、縦軸は計算で得られた堆積量のある沖向き距離まで積分し、それを流入土砂量で割って、粒径ごとに百分率表示したものである。粒径の大きい $d=0.12\text{ mm}$ では河口から1 km沖まで出て、約70%の土砂が沈降堆積している。その後徐々に増加し、計算領域沖側境界では、85%となっている。残りは未だ沈降しないで水中にある分と、計算領域を超えて流出した分であるが、この粒径の場合には、特に前者が大きい。粒径の大きい粒子は沈降速度が大きいので、沈降を促進させるが、沈降フラックスは沈降速度と濃度の積であるので、出水が終わって濃度が小さくなるとなかなか沈降しなくなる。粒径の小さい $d=0.0096\text{ mm}$ の場合には、水中に漂っている分もあるが、図-8で示したように、境界からの流出も大きい。

図-7の実測値との比較では、特に0.02 mm付近の小さい粒径に対して、沖領域の計算値が実測値と近い分布を示した。この場合計算で得られる一洪水あたりの堆積量は0.1 cmのオーダーになる。これを、図-2の柱状図の表層の厚さ約5 cmと比較すると、この表層を形成す

るのに50個の出水が必要になり、1996年の出水のピーク流量が約 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ で、回帰年が1年であることを考えると、表層は50年分の堆積物と概算できる。

4. おわりに

本研究で得られた結論を列挙すると次の通りである。

(1) 阿武隈川河口沖合いの底質をコア状に採取し、粒度分布の岸沖方向、鉛直方向の変化特性を明らかにした。

(2) 国土地理院が実施した調査とあわせて、河口周辺の中央粒径、淘汰度の平面分布をまとめ、その特性を明らかにした。

(3) 浮遊土砂の移流、拡散、沈降の数値解析を行い、沖では微細粒子の底質分布に近い結果が得られることを示した。また計算結果を用いて、堆積高分布を明らかにした。

謝辞：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いただいた。また本研究は文部省科学研究費、河川整備基金研究助成金補助を受けたことを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 建設省国土地理院 (1987): 沿岸海域基礎調査報告書 (岩沼東部地区), 64 p.
- 杉本基泰 (1997): 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修士学位論文, 68 p.
- 杉本基泰・真野 明 (1997): 阿武隈川における細粒土砂の観測と時空間分布, 水工学論文集, 第41巻, pp. 783-788.
- Mano, A and D. Subandono (1996): Wave field in the efflux of river water, Coastal Dynamics '95, Gdansk, Poland, pp. 185-196.