

阿武隈川河口周辺の土砂移動量評価

真野明*・沢本正樹**・河上伸生***

1. はじめに

河口は沿岸海域へ土砂を供給する境界であり、また河口砂州として漂砂を捕捉し貯留する機構を有している。これらを定量的に評価することが、周辺の海岸保全や河口の維持管理を考える上での重要な要件となっており、本研究ではこの土砂移動の定量的評価と、その手法の開発を目的としている。さらに研究を行う上で基礎となる観測資料を蓄積してきている阿武隈川河口域が対象である。

阿武隈川と周辺の概要を述べると、阿武隈川は流域面積 5405 km²、幹線流路延長 239 km の一級河川である。流域の主なダムとしては七が宿ダム(集水面積 237 km²、湛水開始 1989 年)と三春ダム(同 226 km²、工事中)があり、また河口上流には 1982 年に阿武隈大堰が完成している。阿武隈川の河口には導流堤は設けられていないが、その約 1 km 南の鳥の海には約 400 m の導流堤(1959 年～1980 年)が設置されている。この海域における主要な波向きは ESE であり、沿岸漂砂の向きは北向きであるため、沿岸漂砂はこの導流堤により止められている。また、この導流堤と阿武隈川河口の間には突堤(1974 年～1976 年)や離岸堤(1986 年～1992 年)が設置され漂砂が制御されている。

土砂移動を引き起こす主な外力は洪水と波浪であり、また土砂移動を評価するための資料として各種地形測量や航空写真がある。これらの観測体制を表-1 に示す。これから解析できる現象の時間スケールが決まるが、波浪を含めた資料がほぼ完備しているのが最近の 12 年であり、本研究ではこの期間の土砂移動を解析した。

2. 土砂移動の評価方法および結果

河口周辺の沿岸域と河口砂州を検査領域にとり、これに流出入する河川の流送土砂量、沿岸漂砂量を流砂(漂砂)量公式を使って推定し、これと検査領域に堆積した土砂量から土砂収支をとり、各土砂移動量を評価する。

2.1 河川流送土砂量の推定

まず最初に河川からの流送土砂量については、大部分が洪水時に発生すると考えられるので、解析期間の主な洪水 9 個を対象とした。これらの洪水の諸元を表-2 に示す。ピーク流量、洪水期間について流量を積分した総流出量が示してある。この中で 1986 年の洪水が観測史上、ピーク流量で最大のものである。

洪水による流送土砂として、降雨による土砂生産と下流、岩沼流量観測地点における輸送能を評価する。前者については、Langbein ら(1958)の推算図を準用した。これは、年間降雨量に対して、比生産土砂量(単位面積当たりの生産土砂量)の関係を示したものであり、ここでは、年間降雨量を洪水 1 回分の有効雨量で置き換えて用いた。有効雨量は、総流出量を流域面積で除すことにより求められる。

後者については、浮遊砂と掃流砂に分けて考え、それ

表-1 阿武隈川河口周辺の観測体制

観測項目	機関	観測開始	観測間隔
流量(岩沼)	建設省	1941	1 時間
波浪(仙台港)	運輸省	1979	2 時間
河口域深淺測量	建設省	1940	約 1 年
砂州汀線測量	東北大学	1984	1～2 週間
砂州水準測量	東北大学	1989	1 週間～1 月
航空写真	米軍, 国土地理院他	1947	不定
地形測量	国土地理院	1907	不定

表-2 岩沼における最近の主要な洪水

年月日	Q_{max} ($10^3 \times m^3/s$)	ΣQ ($10^8 \times m^3$)	摘要
1981/08/23	3.9	3.3	台風 15 号
1982/09/13	5.7	5.7	台風 18 号
1985/07/01	2.8	2.6	台風 6 号
1986/08/05	7.6	7.7	台風 10 号
1989/08/07	5.2	4.4	台風 13 号
1991/09/20	3.2	3.5	台風 18 号
1991/10/13	3.4	6.8	台風 21・22 号
1992/06/21	2.7	2.7	前線
1993/08/27	3.1	2.8	台風 11 号

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

*** 正会員 日本国土開発(株)

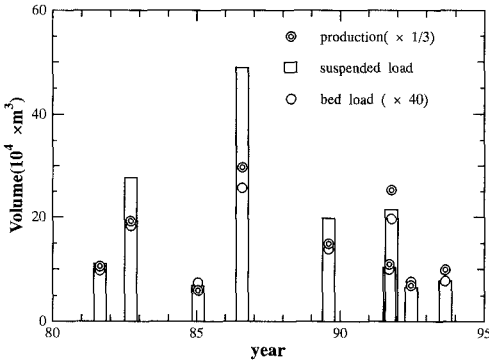


図-1 河川流送土砂量

それ、Lane-Kalinske (1941) の浮遊砂量公式と芦田・道上の基準点濃度公式 (1970), 佐藤・吉川・芦田 (1958) の掃流砂量公式を用いた。なお、基準点濃度については、後で述べる土砂収支との関係から濃度評価式にかかる係数 k として、標準値の 1.4 倍の 0.035 を用いている。

これらの公式を適用するに当たって摩擦速度 u^* が必要になるが、等流を仮定して、 $u^* = \sqrt{R\tau g}$ の関係を用いた。ここで g は重力の加速度、 R は径深である。 I は河床勾配で岩沼流量観測所の平均河床勾配 1/3300 を用いた。この地点における河川の流水断面形は複断面となっており、低水敷、高水敷とも台形断面で近似し、水位と径深の関係を現地の形状に則して求めた。等流の仮定から、マンギングの粗度係数 n を決めると、水位と流量の関係式が求められるが、実測値と比較することにより、 $n = 0.025$ が特定できる。代表粒径は河口砂州での実測値から中央粒径 $d_{50} = 0.45$ mm を用いた。

洪水過程の流量の時系列に、上記流砂量公式を適用し洪水期間にわたって積分することによって洪水 1 個分の輸送能を評価した。

土砂生産、浮遊砂輸送能、掃流砂輸送能の計算結果を図-1 に示す。これら 3 種類の量は大きさが異なるためそれぞれ図中の凡例に示すように倍率を変えてプロットしてある。これらの関係は洪水の規模によって変るが、比較的小さい洪水に対しては、ほぼ 3 : 1 : 0.025 の比になっていることがわかる。規模が大きくなると、相対的に浮遊砂量が大きくなる。

土砂生産が河口近くでの土砂輸送能を上回っているが、阿武隈川の中・下流域では毎年 30~40 万 m^3 の砂利が採取されており、土砂生産量と輸送能の差と同じオーダーになっている。したがって、ここでは土砂輸送能を海域への流送土砂量とした。また、浮遊砂量に比べると掃流砂量は 1 オーダー以上小さく、流送土砂量は、浮遊砂量によってほぼ決まる。

さらに 9 個の洪水を比べると、流量と浮遊砂量の関係

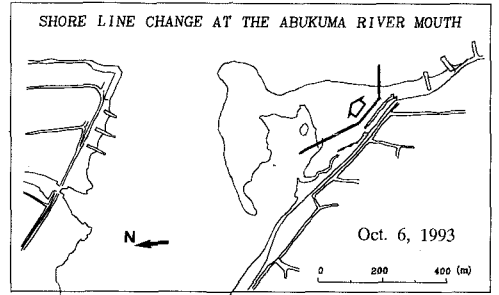


図-2 砂州面積の評価範囲

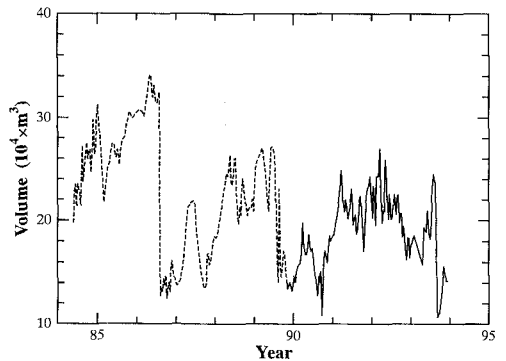


図-3 河口砂州の見かけの土砂体積変化

は非線形になっており、特に 1986 年の洪水が相対的に大きい土砂輸送能を持っていることがわかる。

2.2 河口砂州における土砂量変化

著者らは 1984 年より阿武隈川河口砂州の汀線測量を数日から 2 週間程度の間隔で実施してきており、今日に至っている。また、1989 年 10 月からは砂州上に 25 m 間隔で格子状に杭を打ち砂面の水準測量を行っている。これから砂州の静水面上の体積を求めることが出来る。

砂州の面積を算出するための領域は図-2 に実線で示す境界より左岸側とした。これは 1993 年 8 月の洪水以降、砂州が右岸に沿って上流に大きく伸び、従来用いていた領域では評価できなくなり、本研究より変更したものである。

砂州体積の経時変化を図-3 に示す。水準測量を行っていない期間については、1989 年以後の砂州の平均高さ $H = 1.60$ m を砂州の面積に掛けて、体積を推定した。図中点線で示す所が推定した部分である。またこの体積は空隙を含んだ見かけの体積であり、流砂量公式で求められる砂の実質部分の体積とは異なることに注意を要する。河口砂州は 1986 年、1989 年、1993 年の洪水で大きくフラッシュされ、10~20 万 m^3 の土砂が海域に流出している。

洪水の後、砂州は発達するが、体積増加率は 1 年当た

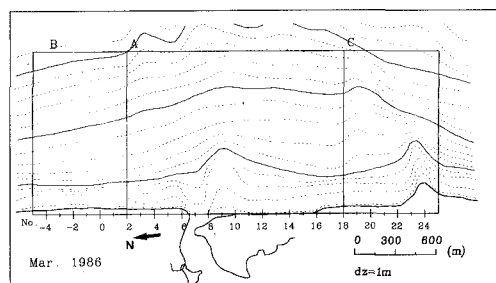


図-4 沿岸域の領域分け

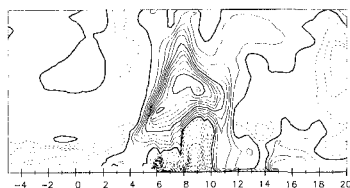
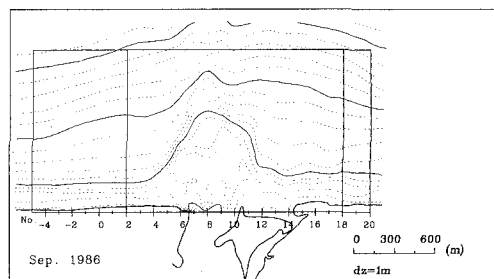
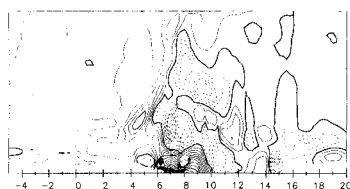
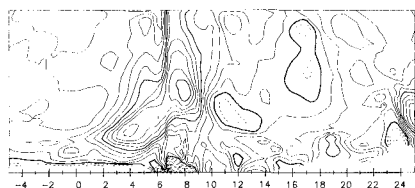
図-5 1986年3月から1986年9月までの堆積・侵食分布 ($\Delta z=0.4\text{ m}$)

図-6 1986年9月の海底地形

図-7 1986年9月から1987年12月までの堆積・侵食分布 ($\Delta z=0.4\text{ m}$)図-8 1985年8月から1993年9月までの堆積・侵食分布 ($\Delta z=0.4\text{ m}$)

り約5~10万 m^3 程度である。

2.3 沿岸海域における土砂移動

図-4に示すように、海岸線近くの基準線から沖側1.2 kmの範囲を解析領域とし、次の3つの領域、領域A(測線 No. 2~No. 18の区間で沿岸方向1.6 kmの区間、河口をほぼ中央に含む)、領域B(測線 No. -5~No. 2の沿岸方向0.7 kmの区間)、領域C(測線 No. 18~No. 25の沿岸方向0.7 kmの区間)を選んだ。深浅測量はほぼ1年に一度の割合で行われているが、測量範囲が全領域を含まない場合もあり、適宜選択した。

深浅測量図の等深線をディジタイザーで読みとり、25 m \times 25 mのメッシュデータに変換し、土砂量を算出した。図-5は1986年の洪水を挟んで、6ヶ月の間隔で測定された2枚の深浅図より差を取って、堆積(実線)と侵食(点線)の分布を示したものである。この洪水によって、河口砂州およびその前面が削られ、沖側に大規模なテラス地形が形成されている。このテラスの主な堆積領域は領域Aに含まれており、この洪水が観測史上最大規模のものであることを考えると、直接的な河川の洪水による土砂流束のうち、領域Aに堆積しないで漏れる分は少ないものと考えられる。

図-6は洪水後(1986年9月)の地形を、図-7は次の期間(1986年9月~1987年12月)における堆積・侵食分布を示したものである。河口テラスの北側斜面に堆積域、テラス沖側斜面と中央部に侵食域が現れている。河口開口部の洪水によって深掘れした部分、またフラッシュされた砂州の場所に土砂が堆積しており、これらの土砂は隣接する侵食域から運ばれたものと考えられる。

図-8にこの洪水を挟む8年間(1985年8月~1993年9月)の領域A, B, Cの堆積・侵食分布を示す。図-5に示した、河口テラスの堆積領域は南側が侵食され、北側と沖側に伸びている。北側に伸びた堆積域は領域AとBの境界である、No. 2の測線を越えている。テラスの北側先端がこの8年間で約500 m北に伸びている。

一方沖側に伸びた堆積域は、1986年の洪水の後に刻まれた河谷地形の南側に沿って分布しており、河口テラス上の北向きの沿岸漂砂の一部が河川流に阻まれて沖に流されながら堆積していったものと考えられる。

一方南の領域Cでは、No. 24付近に離岸堤が設置されているが、その南側に堆積領域が見られる。

A, B, C各領域における、この8年間の土砂堆積の見かけの体積は、それぞれ199万 m^3 、33万 m^3 、76万 m^3 である。B, C領域における、この8年間のみかけの土砂体積の経年変化を図-9に示す。領域Bでは河口テラスの堆積域が北に伸びた1992年頃から体積が約30万 m^3 増加している。領域Cではデータ数が少ないが、1985~

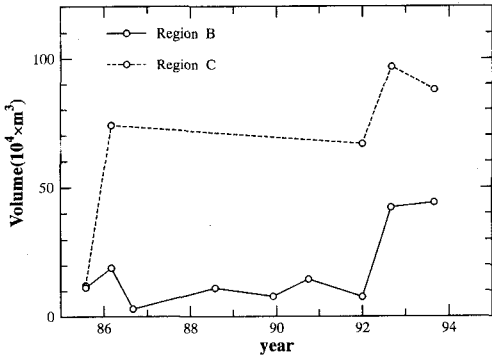


図-9 領域 B と領域 C の見かけの土砂体積変化

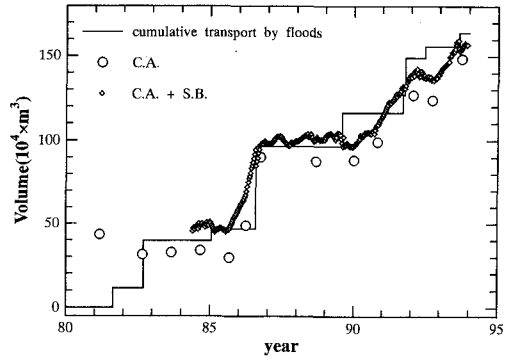


図-11 土砂収支 (実質体積)

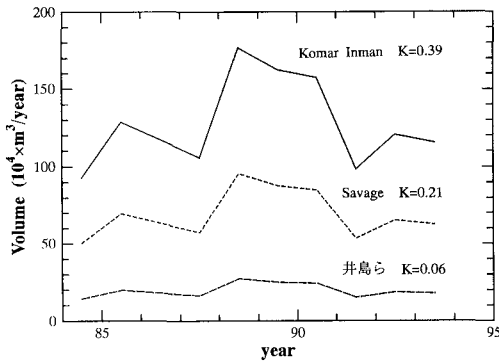


図-10 沿岸漂砂量の変化 (見かけの体積)

1986年にかけて土砂量が大きく変化し、その後の変動は小さい。領域Aにおける、詳しい経年変化については、土砂収支の節で述べる。

2.4 沿岸漂砂量の評価

仙台港沖における波浪観測データを用い、それをいったん沖波諸量に換算した後、阿武隈川河口周辺の海底地形に平行等深線(河口テラスは無視して、広域の海岸線に平行にとった)を仮定して再入射させ、砕波点におけるエネルギー流束の沿岸方向成分から、Komar・Inman (1970), Savage (1959), 井島ら (1964) の沿岸漂砂量公式を使って評価した。これらはすべて1年間の平均量として算出し図-10に示した。ここで、漂砂量公式に使われる係数はすべてKomarらの係数Kに換算してあり、体積は空隙を含めた見かけの体積である。沿岸漂砂量は各公式によって係数が大きく異なるため、オーダーが変わってくるが、渡辺(1992)の検討ではK=0.078が提案されており、これを用いると、沿岸漂砂量は20~30万 m³/yearと推定される。

3. 土砂収支および考察

最初に、河川からの流送土砂と検査領域での土砂の堆

積から土砂収支を考える。2.1で評価した流送土砂の洪水毎の累積値を図-11に示す。また領域Aにおける土砂量を空隙率λ=0.4と仮定して、土砂の実質部分の体積に換算し、同じ図に白丸でプロットした。さらに、領域Aの土砂量に河口砂州の土砂量(同じく実質体積)を加えたものを菱形でプロットしてある。領域Aの土砂量に関するデータはほぼ1年に1度の頻度で得られるので、その間は直線的に変化するものとして、砂州の体積を加えている。

2.1で浮遊砂量公式の係数を1.4倍したのは、1986年の洪水前後の検査領域の土砂増加量と河川からの流送土砂量を等しくするためである。これにより、1985年から1994年までの期間で河川からの流送累積土砂量と検査領域の土砂量がほぼ等しくなっていることが分かる。また洪水が無いか、あるいは小さい期間である、1983年から1985年までの期間、1986年9月から1990年までの期間では、検査領域の土砂量は、ほぼ一定しており、検査領域からの沿岸漂砂などの正味の出入りは小さいことがわかる。

これを利用して、領域Aの3つの境界における、土砂流束を考察してみよう。1で述べたように、領域Aの南側の境界付近は突堤や離岸堤により沿岸漂砂が制御されていることから、南側境界を通過する土砂流束は小さいものと考えられ、これから残りの2つの境界における土砂流束も小さいことが推察できる。実際、図-9の領域Bにおける、土砂量をみても、1986年の洪水を挟んで、1992年までほとんど体積の変化がない。1992年以後、河口テラスの北の端が領域Aの境界を越えて伸びてきて初めて、領域Bの土砂量が増加している。これと同時に領域Aの土砂量は不足気味になっている。

次に、領域A内の土砂移動について考察する。1986年の洪水以降河口テラスの中央部から南側斜面が侵食しており、これが洪水で深掘れした部分の埋め戻しや流出した河口砂州の修復に使われる。すなわち波によって沖か

ら砂が戻されるが、これが河口域における沿岸漂砂の供給源になっていると考えられる。この一部が砂州の修復に使われるが、河口砂州の成長は見かけの体積で年間5~10万 m^3 程度であり、その他が沿岸漂砂として北上する。その中の一部が河口テラスの北進に使われ、残りが河川流によって、沖に運ばれ前に示した8年後の堆積分布を形成するものと考えることが出来る。

4. おわりに

以上本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 洪水時に河川からの海域に流送される土砂の大部分は、浮遊砂であり、Lane・Kalinske (1941) の式と芦田・道上 (1970) の基準点濃度式を使い、この中の係数を $k=0.035$ とすることにより、流送土砂量が評価できることがわかった。これにより、1981年から12年間で海域に流出した浮遊砂量は実質体積で約165万 m^3 となる。
- 2) 流送土砂の累積値と河口を挟む1.6 km×1.2 kmの検査領域の境界を出入する土砂流束は小さい。
- 3) 波によって運ばれる河口周辺の土砂移動の顕著な現象は、1年程度の短い時間スケールでは洪水で深掘れした河口周辺の埋め戻しと、フラッシュした河口砂州の修復である。

一方5年以上の中期的な時間スケールでは、1986年の洪水で形成された河口テラス地形の北側と沖側への伸張・拡散で、洪水後7年を経過して、河口テラスの堆積域北側先端が約500 m北に移動している。

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、運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所より、貴重な資料を提供いただいた。また本研究の公表にあたり小川記念基金の援助を受けたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 岩淵 巧・沢本正樹 (1991): 中間的時間スケールでみた阿武隈川河口部の地形変化, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 203-208.
- 芦田和男・道上正規 (1970): 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, pp. 233-242.
- 佐藤清一・吉川秀夫・芦田和男 (1958): 河川の土砂流送に関する研究, 土木研究所報告, 第101号, pp. 1-16.
- 真野 明・沢本正樹・長尾昌朋・富樫健一 (1993): 阿武隈川河口砂州の変形特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 486-490.
- 渡辺 晃 (1992): 局所漂砂量算定式による沿岸漂砂の総量と岸沖分布の検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 306-310.
- Langbein, W. B. and S. A., Schumm (1958): Yield of sediment in relation to mean annual precipitation, Trans. Amer. Geophy. Union, vol. 39, pp. 1076-1084.
- Lane, E and A. A., Kalinske (1941): Engineering Calculation of suspended sediment, Trans. AGU, pp. 603-607.
- Komar, P. D. and D. L., Inman (1970): Longshore sand transport in beaches, J. G. R., vol. 75, pp. 5914-5927.