

阿武隈川河口テラスと砂州の干渉作用

真 野 明*・林 吉 近**・沢 本 正 樹***

1. はじめに

河口砂州の発達、洪水の疎通能力、塩水の遡上、船舶の航行などの工学的な問題に直接影響を与えるので、その変形特性の解明が急がれている。とくに、大規模な河川においては、砂州変形の平均的な時間スケールも長く、河口部の中・長期的な予測や計画を安定に行うための基礎として、砂州変形の因果関係や砂州と外力との定量的な応答特性を、各時間スケールについて、解明しておくことが重要である。

著者らは阿武隈川の河口をフィールドとして、1984年より今日まで河口砂州の観測を行ってきている(Sawamoto ら, 1988; 岩渕ら, 1991; Mano ら, 1995a)。この間、1986年には阿武隈川下流部の約50年にわたる流量観測史上最大のピーク流量をもつ洪水が発生し、この洪水によって河口前面には巨大な河口テラスが生まれた。その後いくつかの中小規模の出水がこの河口を通過し、砂州のフラッシュと発達を繰り返しながら今日に至っている。

フラッシュ後の河口砂州は、1986年の洪水後の約7年間は、河川を横断する方向に安定して発達していたが、1992年ころより伸張の方向が変わり、先端が河川上流を向くようになり、今日に至っている。このため、近年は河口開口部が広く開かれた状態が続き、あたかも、洪水疎通の問題が突然解消したようにも見えるのである。本研究はこの砂州の伸張方向の変化に着目し、その長期的な変動の因果関係を解析し、これに河口テラスの干渉作用が重要な役割を果たしていることを明らかにしたものである。

2. 砂州形状の変遷

砂州の形状を写真-1と2に示す。1991年の3月に撮影された写真-1では砂州が右岸から河口を横断するように伸びており、左岸に接して開口部があるが、その河口最小開口幅は約60mと狭くなっている。一方1994年

の7月に撮影された写真-2では、砂州の先端は上流に向かって伸びている。1993年12月の小規模出水から7カ月を経て、砂州は発達した状態であるにもかかわらず開口幅は約200mと広がっている。

砂州の発達と出水の経時的な関係を、河口最小開口幅 B を測度にえらび、図-1に示す。出水は建設省の岩沼水位観測所の流量が日平均流量で $800 \text{ m}^3/\text{s}$ を越えるものをすべて取り出し、各出水期間の流量を積分した総流出

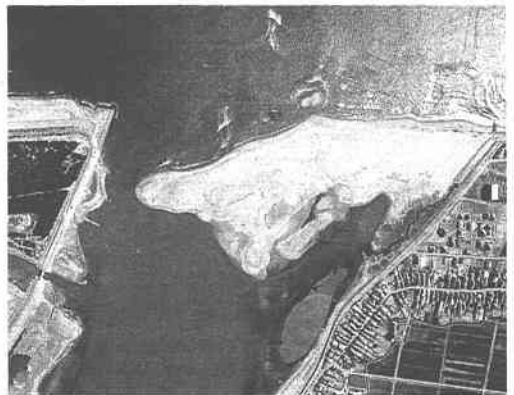


写真-1 砂州の航空写真 (1991年3月2日 建設省仙台工事事務所撮影)

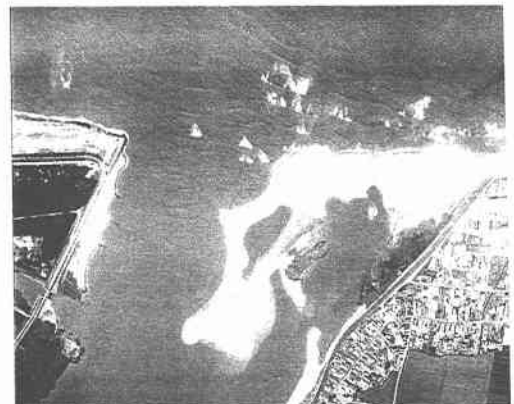


写真-2 砂州の航空写真 (1994年7月4日 建設省仙台工事事務所撮影)

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 大都会工業(株)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

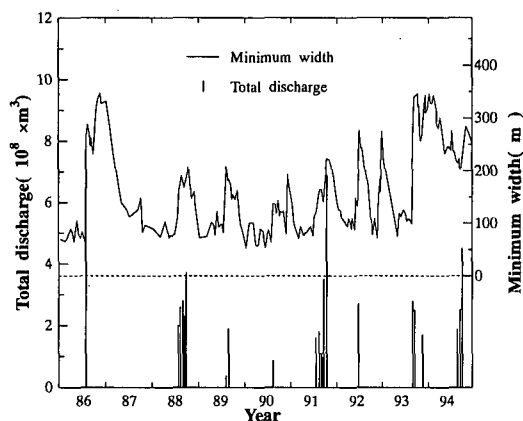


図-1 河口最小開口幅と主要な出水の経時変化

量でプロットしてある。

これらの出水によって、砂州がフラッシュし開口幅が200 m～350 mに開くが、1993年までの期間においては、最小開口幅の縮小過程は早く、数カ月という比較的短い時間で開口幅はフラッシュ前の幅に戻る（開口部復元時間）。出水が無いときの最小開口幅の定常値は約60 mで、これは河川の平水流量と潮汐の退が維持する平衡断面に対する値と解釈されている（青田ら1980）。特に1986年の洪水では定常値に達するまでに約1年を要しているが、これは洪水の通過により開口部や砂州の前面で深掘れが生じ、それらの埋め戻しに時間がかかったため、例外である。それ以外の出水では開口部復元時間はほぼ一定している。

これら中小規模の出水の後の砂州の回復過程では、まず最初に砂州の先端が砂嘴のように細い状態で河川横断方向に伸び、砂州全体の面積が増大する肥大は開口部復元時間の数倍の時間スケールをかけて行われる。写真-1は先端部の伸張が止まって、肥大過程にある状態のものである。

一方1993年後半からの河口最小開口幅の変化を見ると、フラッシュ後1年を経過しても約200 mに縮小しただけで、次の台風期に入り出水により開口幅が再び拡大している。写真-2は、この出水前の写真であり、先端部が河川の上流に向かって発達するため最小開口幅の縮小は遅い。砂州の開口部に面した部分には2つの弧状の海浜が形成されている。これらは波によって形成されたものであり、弧の中心の向きは海浜に入射する波向きとほぼ対応するが、2つの写真で波向きが大きく異なり、写真-2ではより左岸方向から波が進入してきていることが示唆される。沖波の特性には大きな経年変化はないので、波が砂州に接近する過程での波の屈折特性の変化が原因と推測されるのである。そこで、次に河口テラスの変形について述べることにする。

3. 河口テラスの変形

河口前面には1986年の洪水により巨大なテラス地形が作り出されている。これは上流から運ばれた土砂とそれまで砂州に蓄えられていた土砂が洪水により押し流されて出来上がったもので、洪水直後に建設省が実施した深浅測量から、テラスの上面は水深が約4 mで平らに均された地形であることがわかる（図-2参照）。

ところが、このテラス地形がその後ゆっくり変形してきている。前節で述べたように、1986年の洪水のあと7年間は砂州が右岸から横断するように伸びているので、河口開口部は左岸に接しており、そこで深掘れが生じている。海域に流出する河川流の流軸はこの開口部から真っ直ぐ沖に向かって存在するものと考えられ、これに沿って河口テラスが侵食され、谷地形が発達してきている。図-3は1993年の深浅測量結果であるがこの谷地形が明確に見られる。

海岸線に平行に沖合い600 mまでの地形の横断面をとったのが、図-4a)とb)である。テラス形成当時、河口部にあった2筋の渚が1本になり、平らなテラス地形の北側に谷地形が刻まれていることがわかる。これらをもとに、ほぼ年1回の割で行われている深浅測量の結果を使って、谷地形の体積を求め、前出の出水の総流出量と比較したのが図-5である。

流量が多い期間には谷地形の体積も大きく増加してい

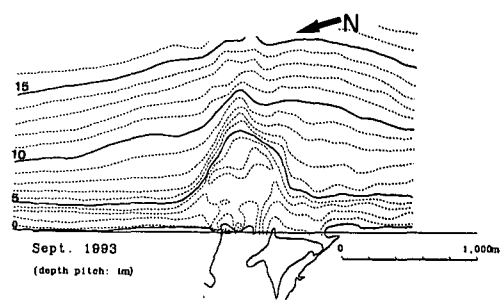


図-2 1986年の洪水によって形成された河口テラス地形

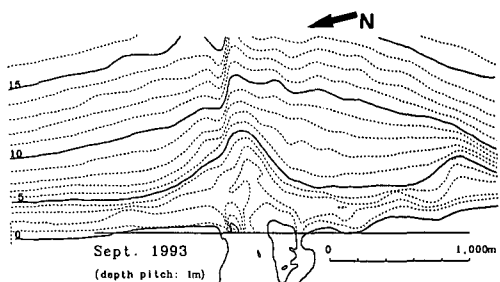
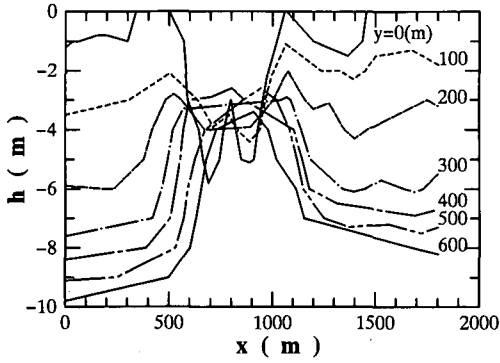
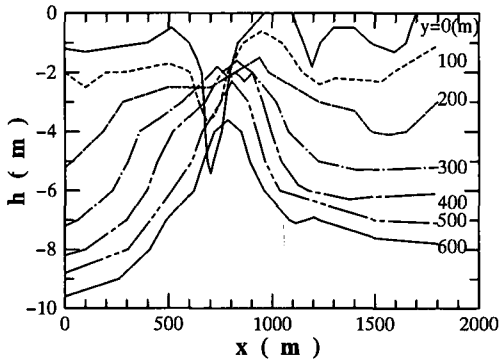


図-3 1993年9月の河口テラス地形



a)



b)

図-4 河口テラスの横断形状, a) 1986年9月, b) 1993年9月

ことが読みとれる。そこで、この関係を直接比較するために、2つの引き続く深浅測量の間の期間を考え、その間の出水による総流出量の総和と谷体積の増分 dv の関係を調べたのが図-6である。流出量が多い場合には体積の増分と比例関係に有ることがわかる。また、流出量が少ない場合には負の体積増分があるが、これは河川流による侵食効果より、波による谷地形の埋め戻し効果の方が勝っているためと考えることができよう。

なお、河川の流出量として出水だけでなく、渇水までも含めた総流出量をとり dv との関係を調べたのが図-7であるが、この場合には明確な相関関係は見られず、河川流の中でも出水時のものが谷地形の形成に寄与していることを示している。すなわち、大規模な洪水は河口テラスを形成するが、その後の中小規模の出水がこのテラスに谷地形を刻んでいるのである。次に、このテラスを始めとする河口周辺の海底地形による波の屈折を解析する。

4. テラス上の屈折特性

波は地形変化と流れの変化により屈折する。ここでは、

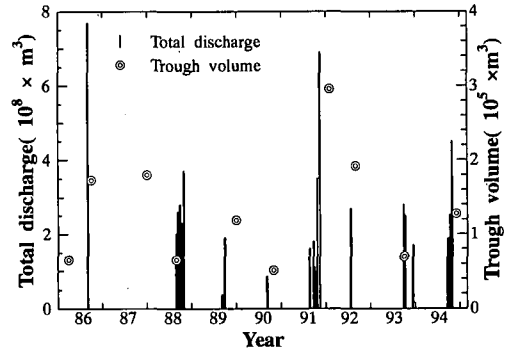


図-5 出水の総流出量と谷体積の時系列

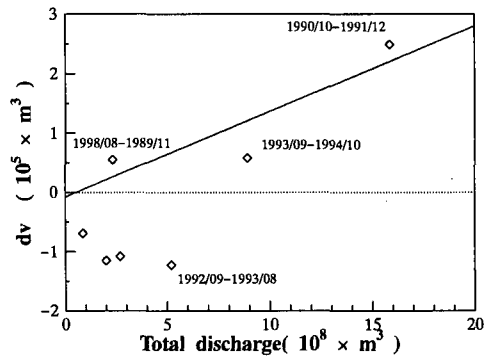


図-6 出水の総流出量と谷体積の増分の関係

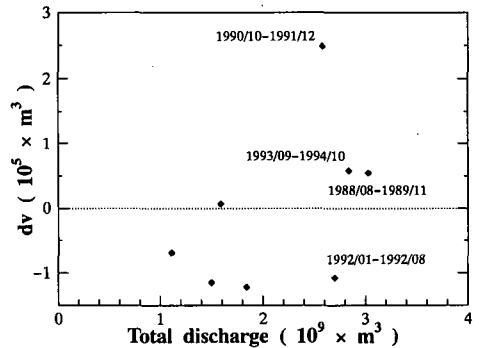


図-7 渇水までを含めた総流出量と谷体積の増分の関係

河口砂州の発達に関係する波の屈折だけを問題とするので、河川流の状態は平流量時だけを考えればよい。流れによる波の屈折の大きさを計る測度は流速と波速の比であるが、平流量の場合、海域に流出した河川流の流速がもともと小さいこと、初期の運動量が小さいため海域での広がり幅が大きくなることの二重の効果により、海域での河川流出流の流速は小さくなる (Mano ら, 1995b)。このため、河口内などの特別な領域を除いて、

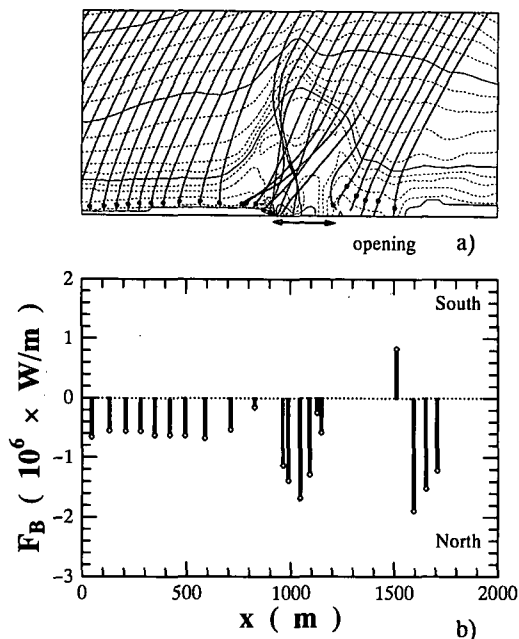


図-8 1986年9月の地形に対する、a) 波向き線とb) 砕波点におけるエネルギーフラックスの沿岸方向成分

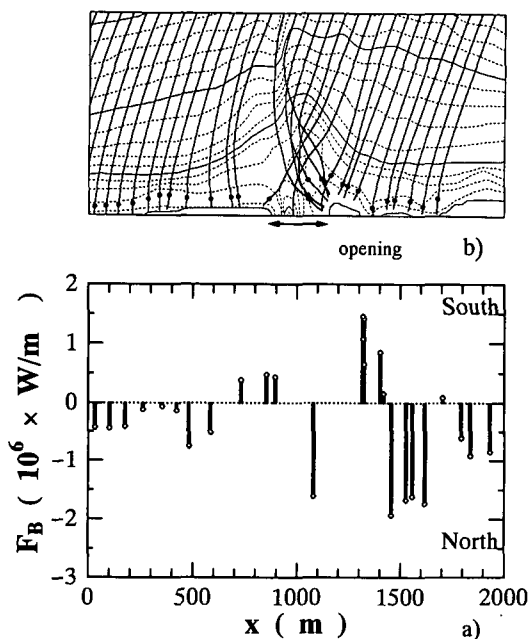


図-9 1993年9月の地形に対する、a) 波向き線とb) 砕波点におけるエネルギーフラックスの沿岸方向成分

流速波速比は小さくなり、流れによる屈折の影響は無視できる。

そこで、地形による屈折だけを考えることにし、汎用プログラムを開発した。基礎方程式は、Mei (1983) に示

されている波向き線方程式と、Munk ら (1952) が導いた波向き線間隔の方程式で2次精度の差分に展開した。地形は等深線をディジタイザーで読み込んだ後、長方形の格子データに変換し、海底を直角3角形のパネルの集合で表現した。沖で与えた境界条件から順次波向き線の通っているパネルで、波向き線の次の位置とそこでの屈折係数を計算するが、各パネル上では水深の最急勾配方向を主軸とする局所座標を用いることにより、分散関係式の計算回数を減らし、計算時間を短縮した。波浪データは、運輸省が仙台南港沖で観測しているものを用い、年平均波を外力とした。また、砕波点の評価には合田の砕波指標を用い、さらに、Komar ら (1970) による沿岸漂砂量公式 (1) より、砕波点におけるエネルギーフラックスの沿岸方向成分 F_B を評価した。

$$F_B = (E c_g \sin \theta \cos \theta)_B \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 E , c_g , θ はそれぞれ波エネルギー、群速度、汀線に立てた法線からの波向きを表し、添字の B は砕波点の値を示す。

図-8 は河口テラス形成直後の1986年9月の地形に、波高0.77 m, 周期7.4 s, 波向き N 127°E の波を入射させた場合の、波向き線とエネルギーフラックス F_B の分布 (南向きを正) を示したものであり、砕波点を黒丸印で記入してある。波向き線はテラス上で複雑に屈折し、左岸に集中している。エネルギーフラックスを見ると、右岸に強い北向きの分布があり、これが砂州を比較的短い時間スケールで伸張させる外力となっている。

一方、テラスの変形が進んだ1993年9月の地形に、波高0.79 m, 周期7.9 s, 波向き N 115°E の波を入射させた場合の結果が図-9である。河口テラスの北側に発達した谷地形により、波が大きく屈折し火焦線を形成していることがわかる。右岸砂州の左端付近には、この火焦線を通過してきた波と、テラスを南東側から通過してきた波の、2つの波向きの波が存在しているが、前者が写真-2の所で指摘した左岸寄りの方向から入射する波に対応している。テラスに刻まれた谷地形が深くなるにつれて、火焦線が発達し北東から砂州に接近する波が強くなってきている。エネルギーフラックスの沿岸方向成分の分布は、右岸砂州左端付近に南向きの強い成分をもった波が入射していることを示している。図-8の波の条件は年平均波であるが、1993年の地形では、種々の波向きや周期に対してこの火焦線が安定に作られることが確かめられている。

5. 議 論

南東から砂州に入射する波は、砂州を横断方向に伸張させる。テラスが形成してしばらくの間は谷地形は未発達であるので、谷で屈折してくる波は弱く、河口砂州を

安定して横断方向に伸張させる。前に述べたように、この期間が阿武隈川では約7年続いたが、これは河口テラスに顕著な谷地形が形成されるまでの時間スケールであると言えよう。谷地形の形成は中小規模の出水が主原因であるが、河口砂州が平流量時の滞筋を固定し、出水もここを通るので砂州自体が谷地形の発達を促進している。

谷地形が発達してくると、顕著な火焦線が形成されるようになり、ここで屈折した波が砂州の左端に入射し、これが河口砂州の横断方向への伸張をとめる。河口開口部は広く開いたままであるので、波が河道内に入りやすくなり、谷地形で屈折した波により、土砂が上流に運ばれ、砂州が上流に向かって伸張する。砂州の河に面する部分には写真-2に示すように弧状の海浜が2つ見られ、波により形成されたことを示しているが、とくに上流側の弧は左岸と正対しており、河道内の谷地形で屈折した波が関与している。

河口テラスに刻まれる谷地形の発達の時間スケールに比べて、砂州伸張の時間スケールが短いことと、谷地形が発達するまでは火焦線の影響が小さいことから、砂州の伸張方向の変化は、ある年に突然姿を現すのである。

現在開口部は広く開いているが、これまで考察してきた機構より次の事が予想される。開口部の滞はこれまでの様に固定されていないので、今まで注目してきた谷地形の侵食速度が鈍ることが予想される。また、河道内を遡る波は減衰するので、砂州の上流への伸張も鈍るものと考えられる。

6. 結 論

1986年の巨大洪水が形成した河口テラスやその後の変形が、阿武隈川河口砂州の発達に重要な影響を与えて

いることを明らかにした。テラス形成の初期の段階では、テラス上で屈折した波が河口砂州を横断方向に伸張させる。これは同時に、河口開口部の滞筋を固定し、河口テラスの上に、中小規模の出水によって刻まれる谷地形の発達を促進する。谷地形の発達はテラス上の波の屈折特性を変え、火焦線を形成し砂州の伸張方向を上流に向ける。

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、運輸省第二港湾建設局塩釜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総合研究A、試験研究B、河川整備基金研究助成金、および小川記念基金の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

- 青田茂雄・首藤伸夫 (1980): 河口断面積変化過程の数値モデル, 第24回水理講演会論文集, pp. 203-208.
- 岩瀬 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.
- Komar, P. D. and D. L. Inman (1970): Longshore sand transport in beaches, J. G. R., Vol. 75, pp. 5914-5927.
- Mano, A., M. Sawamoto and M. Nagao (1995a): Response characteristics of river mouth topography in wide time scale range, Proc. 24th ICCE (in press).
- Mano, A. and D. Subandono (1995b): Wave field in the efflux of river water, Coastal dynamics '95 (to be published).
- Mei, C. C. (1983): The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley & Sons, 740 p.
- Munk, W. H. and R. S. Arthur (1952): Wave intensity along a refracted ray, Gravity Waves, National Bureau of Standards, Circular 521.
- Sawamoto, M. and N. Shuto (1988): Topographical change due to floods and recovery process at the Abukuma river mouth, Coastal Eng. in Japan, Vol. 30, No. 2, pp. 99-117.