【土木学会論文集　第387号／II-8　1987年11月】

阿武隈川河口砂州の変形過程

TOPOGRAPHY CHANGE PROCESS AT THE ABUKUMA RIVER MOUTH

沢本正樹*・首藤伸夫**・谷口哲也***

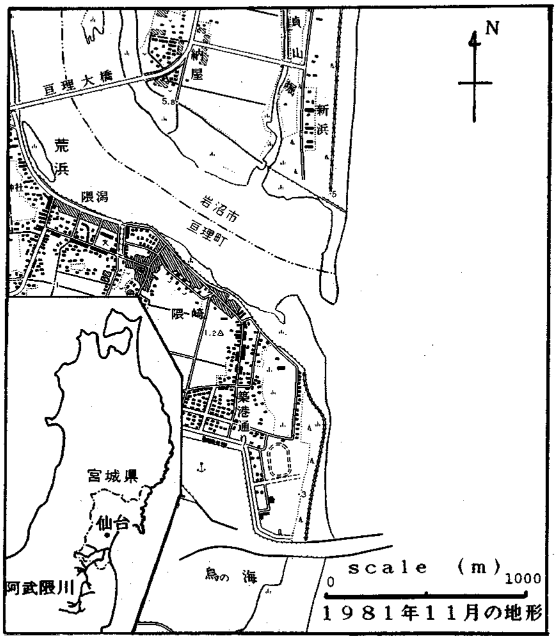
By Masaki SAWAMOTO, Nobuo SHUTO and Tetsuya TANIGUCHI

River mouth process is investigated at the Abukuma River. Firstly, topography change process with long time scales is discussed analyzing the maps since 1907 and the aerial photographs since 1947. Secondly, the short time scale process is reported basing on the field surveying since 1984, which includes the observations of floods on July 1, 1985 and August 5, 1986. It was concluded that the morphology is to be changed drastically by flood larger than 2 500 m^3/s in case of the Abukuma River. The factors relating the process are also discussed in the paper.

Keywords: *river mouth, shore process, topography change, flood*

1. はじめに

河口砂州は，洪水疎通能力の低下，塩水の河道への侵入阻止など，利水，治水の両面から重要視されており，従来よりいくつかの研究や技術論が展開されてきている[1),2)]．しかし，砂州変形過程の詳細な観察はきわめて限られているのが実状である．著者らは，河口砂州変形過程の基礎資料を得るため，1984年5月より阿武隈川河口において砂州の継続的調査を始めた．調査項目は砂州地形測量，波向測定，および主要変化の目視観測である．この期間中，1985年7月1日の台風20号および1986年8月5日台風10号による砂州越流を伴う出水，1985年9月の小出水があり，これらの出水による変形過程とその後の回復過程を観察することができた．このうち，1985年の出水に関しては，文献[3)]に一部を報告した．本論文では，次節で阿武隈川の概況，河口砂州過程に影響しそうな諸要因について説明する．3. では既往の地形図と空中写真を用いて阿武隈川河口の長期的変化特性を考察する．4. では，1985年～1986年の洪水による変形および回復過程の観測結果を紹介する．5. では河口砂州変形過程の全体像について考察し，砂州変形解析モデル構築の際，考慮すべき事項について考察する．



図―1　阿武隈川河口地形図（国土地理院）

* 正会員　工博　東北大学助教授　工学部土木工学科
（〒980　仙台市荒巻字青葉）
** 正会員　工博　東北大学教授　工学部土木工学科（同上）
*** 学生会員　東北大学大学院博士前期課程（同上）

2. 調査対象河口の概要

阿武隈川は図—1 に示すように，那須旭岳に源を発し，白河，郡山，福島，角田の各盆地を貫流し，宮城県岩沼町と亘理町の境で太平洋に流出する１級河川である．延長 239 km，流域面積 5 400 km^2 に及び，長さは東北地方第２，日本第６位にランクされる．左側流域は奥羽山脈，右側流域は阿武隈高地であり，地質的には第３系の火山岩や凝灰岩，第４系火山岩，白亜系花崗岩などからなり，それらに起因する鉱物組成が海岸で観測される[4)]．

河川流量は岩沼（7.9 km 地点）で 100 年確率基本高水流量 10 700 m^3/s，計画高水流量 9 200 m^3/s である．年平均流量は，120～180 m^3/s であるが，季節的変化が著しく，融雪期，梅雨時，台風時に大きな値を示す．感潮面積は比較的広く，潮汐流量は日平均 50～130 m^3/s に達し，低水時に潮汐流量が河口に与える影響は大きい．

仙台平野に出てからは，写真—1 から推測される旧河道に示されるように乱流し，一時は鳥の海に流入していたこともあった．河口は江戸時代には現在の位置にあり，右岸荒浜は河村瑞賢の東廻り航路の開発（1671 年）により，阿武隈川上流の天領や仙台平野の米の積み出しと漁業で栄えた河口港であった[5)]．しかし，後述の砂州の変動からも理解されるように，河口部の砂の移動が激しく船の航行は難渋し，「マネアゲ」とよばれる水先案内人を必要としていた[6)]．また，そのころより河口部の浚渫が行われていた記録も残されている[5)]．戦後，隣接鳥の海の荒浜漁港が整備されたことにより，現在河口部を利用している船は少数の小規模のものに限られている．

阿武隈川上流では，左支川の白石川で七ヶ宿ダムの建設が進められているが，まだ建設中で河口部への土砂供給への影響はない．それ以外にも 2，3 の小ダムがあるが，土砂供給の面で重要な影響を与えるものはない．10.4 km 地点には 1982 年（昭和 57 年）阿武隈大堰ができたが，400 m^3/s 以上の流量で，ゲートは河床面と同レベルまで開くので，土砂流下に及ぼす影響は少ない．このように，河川構造物による土砂供給量の減少は少ないと思われるが，中下流部では河床は低下傾向にあり，杭打ち低水護岸の頭が水面上に出たり，角田市水道取水口の付け替え工事を要するなどの事例が生じている．河口部も当然，この影響を受けているものと思われる．原因としては源流部での砂防や上流部での河道整備によるものと推測されるが，中下流部で現在も続けられている砂利採取の影響も無視し得ないものと思われる．

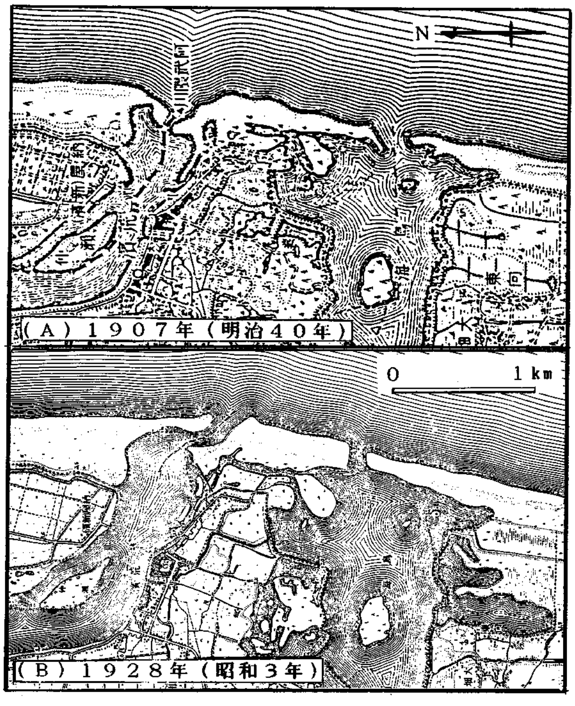
写真—1 1947 年空中写真（米軍撮影：国土地理院）

阿武隈川が開口する仙台湾海岸は相馬港から仙台港まで緩やかな曲線を描く砂浜海岸であり，その漂砂特性は文献 4）に詳しい．河口近辺では北向き沿岸漂砂が卓越しており，そのことは次節の変形過程でも認められる．

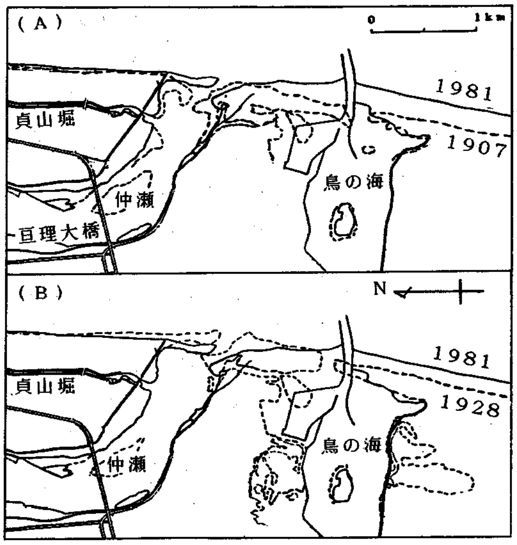
3. 長期的河口地形変形過程

（１） 既往の地形図の比較

図—2 に 1907 年（明治 40 年）5 万分の 1，1928 年（昭和 3 年）2 万 5 千分の 1 地形図を示す．これらの海岸線を 1982 年（昭和 57 年）発行（1981 年 11 月の空中写真による）地形図のものと比較したものが図—3 である．鳥の海防波堤南での汀線の前進が著しい．これについては著者らの一人が報告済みである[9)]．このことの河口地形に及ぼす影響を重視した報告もある[7)]．鳥の海防波堤は 1956 年以降の空中写真で認められ，その後の延長工事により，現在南側汀線より約 350 m 突き出している．



図—2 1907，1928 年地形図（国土地理院）



図—3　過去の海岸線の比較

現在の河口部は1928年と比較すると，砂州が河道内に入り込み侵食傾向にあるようにも見受けられる．しかし，1907年と比較すると，河口部左岸砂州が過去のものより海側に出ているなどして，むしろ堆積傾向のようにもみえる．1907年地形図については精度上の懸念がないわけではないが，当時すでに精細な河川台帳が完成しており河口付近の地形は十分信頼し得ると思われる．

図—3で認められるもう1つの大きな変化は，亘理大橋の下にあった「仲瀬」の消滅である．これは人工的に浚渫されたもので，空中写真では1974年（昭和49年）のものよりなくなっている．これにより，河口部での河川流はなんらかの影響を受けているものと思われる．

（2） 空中写真より読み取れる河口地形変化

写真—2には，米軍および国土地理院によって撮影された空中写真から河口部を複写したものを示す．また，**付表**には，流量年表に記載された岩沼流量観測所での日平均の年最大流量と1 000 m³/s以上の出水の記録を示す．まず第一に，河口部の変動がきわめて複雑であることに気付く．しかし，この複雑な変化も流量と対比して考察すると以下のように規則性が浮き上がってくる．

1947年と1948年を比較すると，開口部の拡幅が認められる．1948年の空中写真はアイオン台風の1か月後のものである．同台風は阿武隈川流域にも洪水被害をもたらしており，この開口部拡幅はその際の出水によるものと考えられる．その後，1956年までは写真がなく傾向がはっきりしない．

1956年から1961年にかけては，1956年7月と1958年9月に比較的大きな出水がある．これらの直接的効果を写真上にみることはできない．しかし，これらの出水

付表　阿武隈川年最大および主要洪水一覧

（◎印：年最大，その他：1 000 m³/s以上，流量年表記載の岩沼流量観測所（7.9 km）日平均値）

年	月／日	流量 m³／s
1956	7／16	1182
	7／17	◎2778
	7／18	2067
	9／28	1159
1957	7／24	◎1389
1958	7／24	1457
	7／27	1178
	9／18	1511
	9／19	2499
	9／27	◎3821
	9／28	2115
	10／19	1181
	12／27	2047
1959	7／3	1341
	8／10	1049
	9／27	◎1285
1960	7／15	◎531
1961	6／28	1141
	6／29	◎1164
	8／8	1007
	10／11	1021
1962	7／14	◎1939
	7／15	1615
1963	10／31	◎986
1964	8／25	◎1828
	9／26	1185
1965	5／28	◎1451
	7／18	1394
1966	6／29	◎2837
	6／30	1231
	9／25	1823
	9／26	2116
1967	9／22	◎1244
1968	12／13	◎702
1969	7／7	◎808
1970	10／21	◎1227
1971	9／1	◎2647
	9／2	1328
	9／7	1100
	9／8	1262
	9／9	1035
	9／12	1259
	9／13	1070
	9／27	1017
1972	9／17	◎1149
1973	4／18	◎262
1974	6／7	◎910
1975	7／8	◎749
1976	8／15	1017
	8／16	1176
	9／15	◎1217
1977	5／16	1017
	8／19	1067
	9／20	◎1954
1978	6／28	◎2263
1979	10／20	◎961
1980	8／27	◎894
1981	6／23	1665
	9／23	◎2491
	9／24	1445
1982	4／16	1795
	5／21	1073
	9／13	◎4575
	9／14	1340
1983	9／29	◎1380
1984	4／20	◎729
1985	7／1	◎1697
	7／2	1405
	9／30	1268
1986	8／5	◎4972*
	8／6	3132*

* 1986年は水位からの換算値

で排出された土砂が次に述べる1961年以降の過程に影響を及ぼしていることは当然推測される．

1961年から1964年にかけては，右岸砂州が成長し，左岸砂州が縮退している．その後，1964年と1969年の間には開口部が左岸寄りから右岸寄りへ移っている．1959年から1965年にかけては最大流量2 000 m³/sを越えるものはない．1966年から1969年にかけての最大流量は1966年6月29日の2 837 m³/sである．同年9月25日には台風26号による洪水で流域は大被害を受けている．空中写真で認められる開口部の移動はこれらの出水のいずれか，あるいは，双方により生じたと考えられる．

1969年と1974年の空中写真の比較では右岸砂州の縮退がみられる．この間，1971年9月1日の2 647 m³/sの出水がある．両者の関連を確かめることはできなかったが，一応，留意しておく必要がある．1974年空中写真では開口部は大きく右岸に寄っている．しかし，右岸砂州が完全に消滅することはない．右岸寄りには1961年，1969年の写真上でその一部がみられるように基部をコンクリートで固めた3基のT字形杭出し水制があり，流れが完全に右岸に寄るのを阻止しているからである．これらの効果も阿武隈川河口砂州変形過程を考えるうえで考慮に入れなければならないものの1つである．

1974年から1979年にかけては，1978年に2 263 m³/sの出水がある．1979年空中写真では開口部前面が浅くみえるが，これはこの出水の影響であろう．しかし，砂

(A) 1947年（昭和22年）11月13日米軍撮影

(B) 1948年（昭和23年）10月21日米軍撮影

(C) 1956年（昭和31年）4月4日米軍撮影

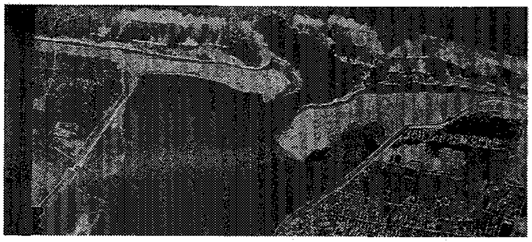
(D) 1961年（昭和36年）12月21日国土地理院撮影

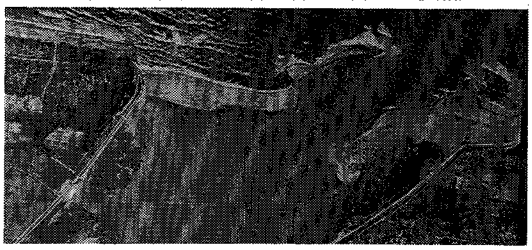
(E) 1963年（昭和38年）10月8日国土地理院撮影

(F) 1964年（昭和39年）7月27日国土地理院撮影

(G) 1969年（昭和44年）5月4日国土地理院撮影

(H) 1974年（昭和49年）4月30日国土地理院撮影


(I) 1975年（昭和50年）9月12日国土地理院撮影


(J) 1979年（昭和54年）6月5日国土地理院撮影

(K) 1983年（昭和58年）5月4日国土地理院撮影

(L) 1984年（昭和59年）11月4日国土地理院撮影

写真―2 阿武隈川河口空中写真（国土地理院）

州地形全体に及ぶ変化は生じていない．

1979年以降の変化は，右岸砂州が成長し，左岸砂州が縮退していく過程である．この間，1982年に4 575 m³/sの出水があり，砂州も大きく変形したものと思われる．著者らが観測を開始した1984年以降，1986年8月5日までの河口砂州は，この1982年出水の履歴に強く支配された地形である．

流量と河口砂州変形の対応をみてくると，阿武隈川河口においては日平均流量2 500 m³/s程度を境として，変形過程に大きな差があることに気付く．これ以下の出水では，河口砂州の縁の変形や開口部の拡幅は起きるが，開口部の移動など砂州全体に及ぶ大きな変形はなく，出水前の地形に戻る．次節の1985年出水に伴う過程がこれに相当している．これ以上の出水では砂州は大きく変形し，出水前の地形に戻ることはなく，その次の大出水までの基本的砂州地形を規定する．次節の1986年の出水はこれに対応する．出水がない場合には沿岸漂砂により右岸砂州が成長していくのが基本過程である．

以上が，数年ないしは数十年のスケールでみた場合の阿武隈川河口砂州変形過程であり，このスケールで考えると河口地形は直前の大出水とそれ以降の履歴に大きく支配されていることが理解される．

4. 短期的河口地形変形過程

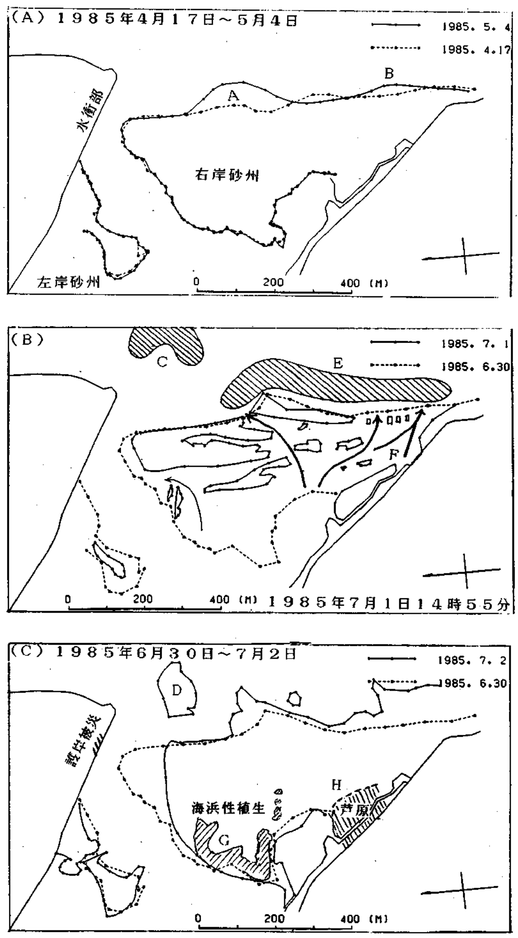
ここでは著者らの砂州地形測量結果および建設省提供の空中写真に基づいて1985年7月1日（台風20号）および1986年8月5日（台風10号）の出水に伴う数日の時間スケールの変形過程，および，洪水後の数か月のスケールをもった回復過程について説明する．

図—4に1985年，図—10に1986年の観測結果と，洪水時の空中写真を図化したものの一部を示す．図は，汀線勾配を用いて潮位に関する補正を済ませたものである．観測方法については文献[3]を参照されたい．以下，これら図を用い，1985年出水前，出水時，出水後，1986年出水時，出水後，に分けて説明する．

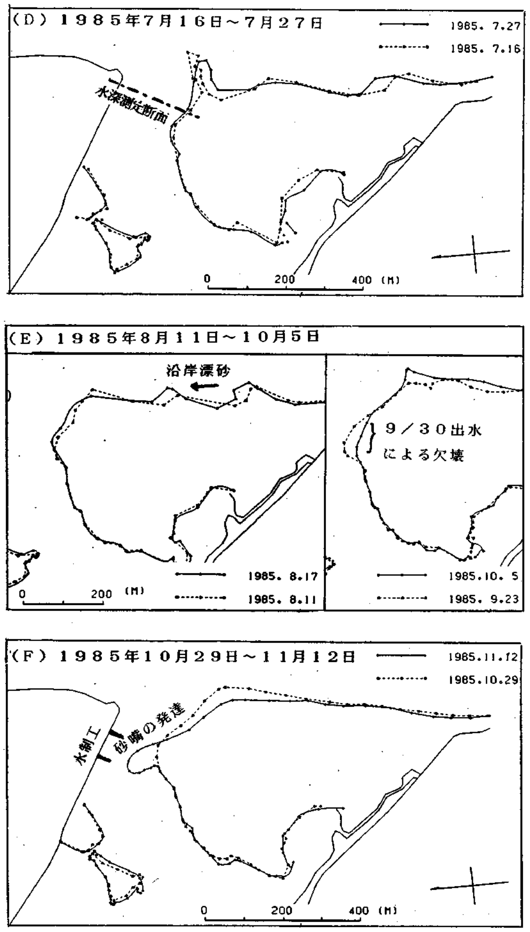
（1） 1985年7月出水前

図—4（A）に1985年4月，5月の砂州地形を示す．また，図—5には1985年の潮汐を考慮した河口流量と河口開口幅の変化を示す．融雪出水時60 mほどあった河口は5，6月，流量が減少するに従って約10 m狭くなった．観測を開始した1984年5月から1985年6月末までは目立った出水はなく，この間，海側汀線で最大100 m，開口部で数10 m程度汀線が変動した砂州形状の基本的変化はなかった．この時期，前回の出水からかなり年月が経過していたため右岸砂州上には浜えんどうなど海浜性植物が広く分布していた．右岸堤防前には長さ200 m，最大幅60 m程度の芦の植生が広がり，日昼はごいさぎの群れが観察された．また，飛砂により風成の1.5 m以上の高まりが形成されており一方の汀線から反対側の水面を見通すことはできず，測量時も複数の基準点を用いないと，汀線全部を見通すことはできなかった．砂州は中央粒径 $d_{50}=0.2\sim0.3$ mmの砂よりなり，後述の洪水時補給されたものとは異なっていた．色も洪水時補給された花崗岩系のものより黒色成分が多いものであった．これが前回の洪水以後のソーティングが長期にわたったための結果であるのか，それとも他の理由によるものであるのかは，はっきりしない．

右岸砂州の海側には，図中に文字A，Bで示したような巨大カスプが認められる．これは砂州前面水面下の三日月バーの付け根に対応していることが地上観測あるいは空中写真より確かめられた．開口部幅が縮小する際には，カスプが開口部へ近付きそこから開口部への砂の補給が行われているようである．このような巨大カスプは汀線前進の大きい鳥の海防波堤南側海浜でも観察される．三日月バーの移動による沿岸漂砂がこの周辺海岸の



図—4 河口砂州変形観測結果（1985年）



図—4 （つづき）

特徴なのであろう．河口北側海岸では汀線に消波ブロックが並べられており，このような現象は確認できない．

このようにして河口部へ供給された砂は，河川流および入退潮流により排出され，河口開口部はいわゆる動的な平衡状態にあったものと考えられる．この状態が，出水後数か月以上たった後の平常の姿である．

（2） 1985年7月1日出水時

1985年7月1日，台風20号によるピーク流量約2800 m^3/sの出水があり，砂州は冠水し，開口部は図—5，6に示すように約170 mに広がった．その際の潮位，水位，流量，河口開口幅の変化を図—6に示す．

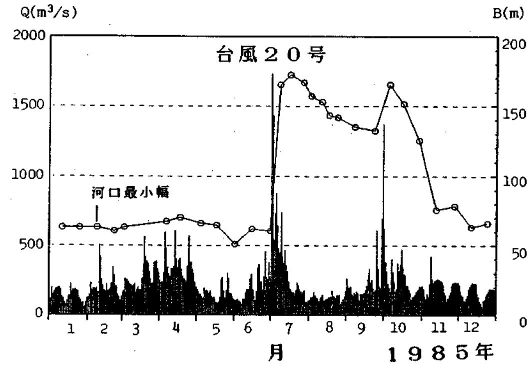
図—4 (B)，(C) は7月1日ピーク流量時近くの空中写真より読み取った流れの様子，および，出水前日の測量結果と出水翌日の空中写真の比較を示す．左岸砂州は河道内水位の上昇により頂部のみを残して水没したが顕著な侵食や変形を受けることはなかった．以下，大きく変形した右岸砂州についてのみ説明する．

同日は13時～14時に河川水が右岸砂州を越流し始めた．越流開始直後，右岸砂州の右岸寄り半分の海側斜面上のかなり広い範囲にわたり水が流れたが，しだいに流れが集中し，16時頃には砂州上にいくつかの明瞭な水路（図中の矢印）が形成された．洪水後の観測では，これらの水路は幅数10 mで周辺の砂州地盤より1～1.5 m程度掘れ込んだ矩形断面をしており，いわゆる水路の争奪により強い水路が弱い水路の流れを奪いながら発達していった跡が確認できた．

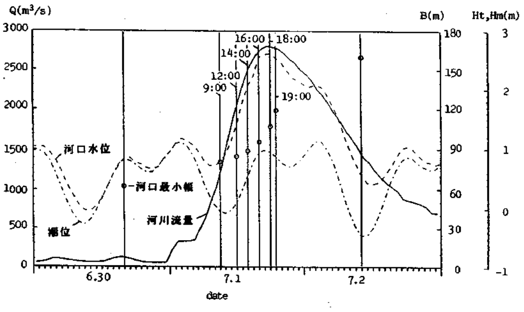
後日の踏査によると，砂州上，冠水したが流れの強くなかった部分では，従来からの砂の上に上流からきた比較的粒径の大きな砂（d_{50}=0.3～0.5 mm）が堆積し，さらにその上に泥質が重なっているのが観察された．また，海側汀線では局部的に d_{50}=0.5 mm以上の粗い砂が集まっている場所が認められた．

開口部，最狭部の砂州側岸近くでは，水面にスタンディングウェイブが現われては上流に伝播して消えるということが数分の時間スケールで繰り返すのが観察され，反砂堆の形態で砂が流送されていることが推測された．流れの中央部では激しいボイルとそれに伴う激しい土砂の動きが認められた．開口部側岸では，側岸が崩落し，その崩落した砂を流れが運び去るというサイクルが数分ないしそれ以上の周期で生じていることが観察された．

開口部から出た土砂は波の砕波状況から沖合い300～400 m程度にテラス状に堆積していることが推測された



図—5 流量と河口開口幅



図—6 1985年7月出水状況

(図—4 (B) のC). その一部により翌日には州 (図中のD) が形成された. 砂州の海側前面は, 台風に伴う暴浪により約 20 m 後退した. この欠壊した砂および越流により砂州上より押し流された砂は砕波状況から汀線のすぐ沖 (図中のE) に堆積していることが推測された.

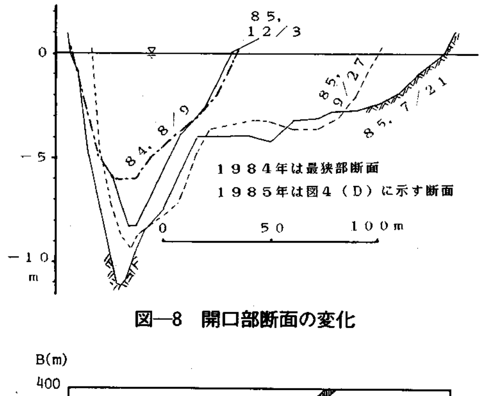
図—7 には砂州上にあらかじめ打ってあった杭を左岸から観測して測定した右岸砂州先端部の洪水による侵食状況を示す. 黒丸は流失した杭, 括弧内の数字は流失時刻である. 開口部の拡幅過程は一様でなく, 9時から 14時頃までは最狭部より上流側の欠け方が大きく, その後は上下流一様に欠けていった. このような複雑な過程をとったのは, 図の左下にその一部がみえる左岸砂州の影響のためである. 左岸砂州のため, 始めの間鋭く屈曲されていた河川流は, 右岸砂州の侵食が進むにつれて, しだいに曲がりが緩くなり前述のような侵食過程をとったと考えられる.

次に, 開口幅と流量の関係を図—6 でみてみる. 流量のピーク近くである 16時～18時と 18時～19時では流量はほぼ同じであり, かつ, 河川内水位と潮位との差も同程度であることから河川流の掃流力も大差ないと思われる. しかし開口幅の変化率は 5.9 m/h と 11.7 m/h で大きな違いがある. これは次のように考えることができる. 前述のように, 流れは左岸の砂州に拘束され左岸に向かった. しかし, 左岸は護岸があるため掃流力は水路の拡幅に使われることはなく, 水深方向の増深に使われざるを得なかった. この様子は図—8 に示した出水前後の開口部断面の変化にみられる左岸の深掘れからも窺える. 洪水時の変形過程を考える場合には, 開口幅のみでなく, このような水深方向の変化も重要となる. この開口部での流れの屈曲および深掘れは図—4 (C) に示す位置に護岸の被災をもたらしている. しかし, 前節の過去の空中写真の調査によれば, 本出水時のような右岸左岸砂州の配置は他に例はみられず, やや特殊な現象と考えてもよいであろう. なお, この水衝部には, その後, 図—4 (F) に示す位置に災害復旧で2基のコンクリートブロック積み水制が設置された.

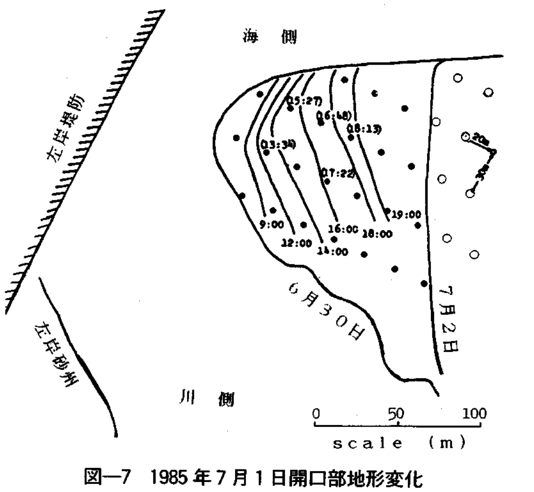
(3) 1985年出水後

引き続く砂州の変形を, 図—4 (C)～(F), 図—10 (G) に示す. 出水が終りかけると同時に排出された砂の一部が浜に上がってくる. 図—4 (C) にDで示す州や右岸砂州海側付け根の極端な汀線の前進がそれである. 砂州上に形成された水路のうち, 右岸寄りのもの (図—4 (B) のF) は, 翌日からその開口部の右岸から舌状に砂が付き始め, 7月5日には水深 10 cm 程度の浅瀬のみ残してほとんど閉塞した. 出水の翌日から認められた離れ島の州 (図—4 (C) のD) の上には7月5日に杭を設けたが, 3日後にはなくなっており砂の移動の激しさが窺われた. この州は7月8日過ぎまで島となっていたが, その後トンボロで右岸砂州につながり, さらに岸側に移動して右岸砂州と見分けがつかなくなった (図—4 (D)).

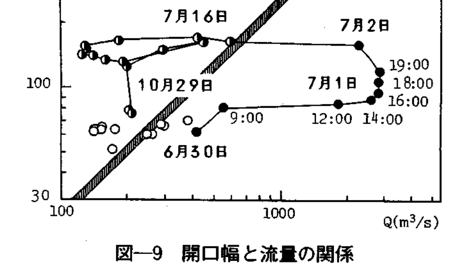
出水後, 砂州上の植生は右岸砂州の河道内側 (冠水のみで砂州侵食はなかった) 部分 (図—4 (C) のG) に限られ, 次の出水までの間でも出水前の植生の回復はみられなかった. なお, 右岸堤防前の芦の植生 (図—4 (C) のH) はほとんど変化しなかった. 右岸砂州上の出水時の水路跡の縁は風でならされていき, また, 砂州全体がのっぺりとしたものとなった. その結果, 測量時は砂州中央に設けた1つの基準点で足りるようになった.



図—8 開口部断面の変化



図—7 1985年7月1日開口部地形変化



図—9 開口幅と流量の関係

右岸砂州は，岸沖漂砂により徐々に海側汀線が前進し，出水前に比べかなり太った形となった．海側汀線では，沿岸漂砂とともにカスプ地形が 4～6 m/日で河口に向けて南から北へ進行した．河口開口幅は図—5 に示すように徐々に狭まっていったが，9 月 30 日に小出水があり，再び 170 m にまで拡幅した（図—4（E））．開口部の狭まり方は，図—8 の開口部断面に示されるように右岸から順次埋め立てられていくものである．開口部が急速に狭まったのは，図—4（F）に示すように，11 月に入って砂嘴状の地形が発達し始めた後である．図—9 には出水時から 11 月までの河口幅と流量の関係を示す．図には，著者らの一人[8]が求めた阿武隈川河口における動的平衡関係を斜線で示してある．開口部は，出水時，流量の増加に遅れて拡幅していったが，出水終了後，すぐには狭まらず，動的平衡に戻るのは 10 月末である．

11 月以後翌年の出水まで，砂州の基本形状は変化せず，出水前の過程の説明で述べたのと同じような動的平衡の状態が続いたものと解釈できよう（図—10（G））．

以上より，出水後の回復過程では，まず，いくつかの異なる時間スケールの岸沖漂砂により汀線が前進し，次に，この堆積した砂が沿岸漂砂により開口部を狭めるという，2 段階の過程を経ていることが結論される．最終的に動的平衡の状態に戻るには数か月を要している．

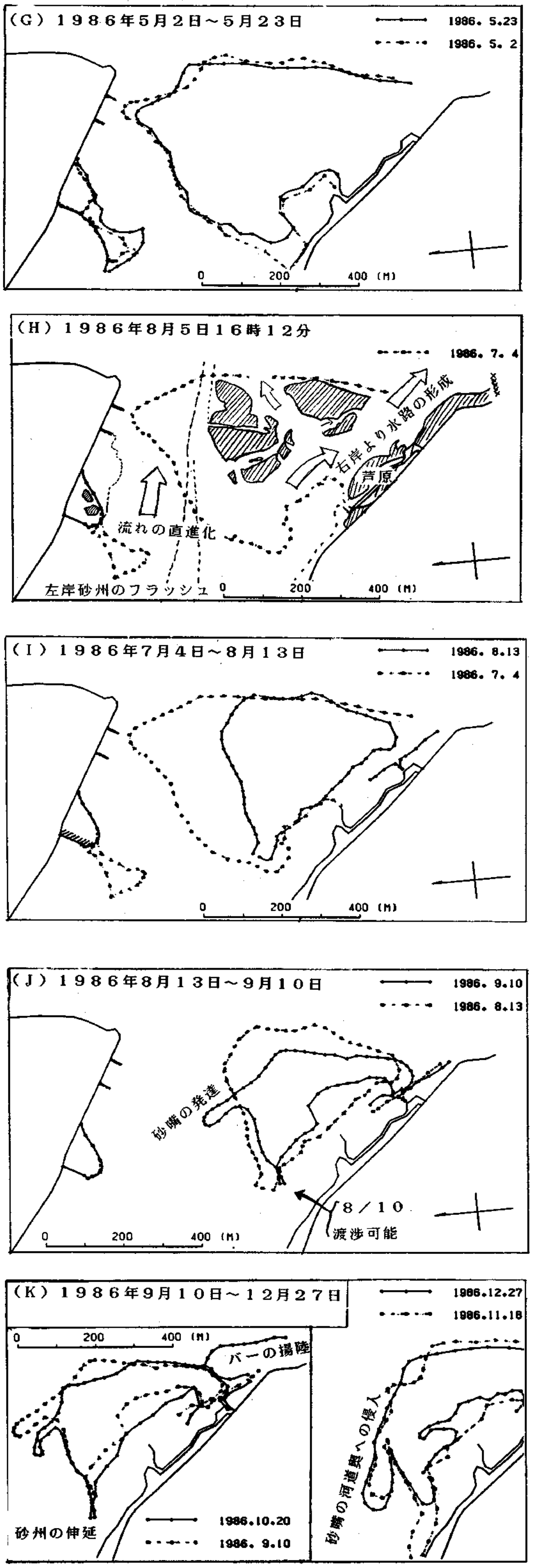
（4） 1986 年 8 月 5 日出水時

1986 年 8 月 5 日東北地方は台風 10 号による豪雨に襲われ，阿武隈川は上中流および支川各所で破堤氾濫した．河口付近では連続雨量 400 mm 以上を記録し，ピーク流量は 7 600 m^3/s に達した．この出水時の河口砂州については土木学会誌[10]にその空中写真が紹介されているので参照されたい．なお，当日は内水氾濫により各所で道路が通行不能となり，現地に行けたのは 5 日日没近くであり，観察結果も限られたものとなった．

図—10（H）には文献[10]と同じ空中写真から流れの様子を読み取った結果を，図—10（I）には出水前後の砂州地形を示す．前年との比較は次のとおりである．

最も大きな違いは左岸砂州の主要部分が完全にフラッシュされたことである．これと，前述の左岸に設置された水制により河口部の流れは屈曲が消え，左岸から離れたところを直進するようになり，左岸水衝部は消滅した．なお，図中に残っている左岸砂州の根元のハッチ部分はコンクリート護岸で固められた恒久的な水際線である．これより上流左岸には植生のある州が付いており，この部分が突出して流れを阻害することはない．

砂州右岸よりには前年同様水路が形成されたが，その断面，流れの強さは前年より大きなものであり，もし，出水がもう少し長時間に及んだ場合には本流が右岸よりに移ったこともあったのではないかと想像された．



図—10 河口砂州変形観測結果（1986 年）

右岸堤防前の芦原はすべてなぎ倒されるか引きちぎられるかし，裸地に近い状態となった．しかし，その地盤は倒れた芦や残された根により保護されていたため，侵食されたのは河道中央に張り出した一部のみであった．

開口部より排出された砂は，前年と同様，河口沖にテラス状に堆積していたが，その範囲は前年より広く，700 m 程度沖まで広がっていた．砂州上および右岸寄り水路から排出された砂は，前年同様右岸水路開口部前面に幅広く広がっていることが観察された．

開口部は最終的に 280 m まで拡幅し，右岸砂州はおむすび形の中州となった．亘理大橋下の仲瀬のあった部分には，水面ぎりぎりの中州ができ，州の存在が洪水時の流れの癖に対応するものであることが推測された．

（5） 1986 年 8 月出水後

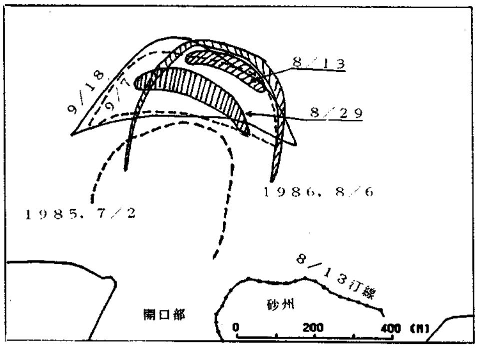
図—10 (J)，(K) に出水以後の変化を示す．右岸寄りの水路の開口部は上がってくる砂により水路左岸からしだいに狭まり浅くなっていき，8 月末にはちょろちょろした流れを残すのみとなった．しかし，完全に流れが閉塞して中州が右岸砂州に戻ったのは出水後 1.5 か月以上たってからである．右岸水路開口部前面に堆積した砂は水面下ぎりぎりの沿岸砂州となっている様子が浜から遠望できた．この沿岸砂州はその後揚陸し，図—10 (K) に示すように急激な汀線の前進をもたらした．

前年の出水以後の過程は基本的には出水前の形状への回復過程であったが，1986 年出水以後の砂州は，図—10 (J)，(K) に示されるように激しく変動し，出水前あるいは出水直後の地形の面影を全くとどめないものとなっている．出水終了後ただちに，河道内に侵入した波により右岸砂州の河口開口部に面した北側汀線に沿って浜漂砂が生じ，砂州が上流側に細く伸延していった．その結果，右岸水路が開口部付近でかなりの水深を保っていた 8 月 10 日，この部分では渡渉可能となっていた．

主開口部では，あまり日数を置かずに，海側汀線の沿岸漂砂による砂の補給により，砂嘴が発達し始めた（図—10 (J)）．その後，この砂嘴は上流側へ曲げられて河道奥へ伸びていった（図—10 (K)）．それゆえ，この間，開口幅の顕著な縮小はみられない．これは河口が極端に大きく開いてしまったために波が河道内に侵入して，前述と同様の浜漂砂が砂嘴先端や開口部側岸で生じるため，沿岸漂砂により開口部に運ばれて河口幅を狭めるべき砂が河道奥へ運ばれてしまったからである．

出水後の右岸砂州の面積の変化をみると，かなり小さくなっていることに気付く．この削れた分の砂の一部は上流への砂州の伸延に使われたがそれだけでは収支が合わない．この削れた砂は，水深の埋め戻しをして断面積を縮小させるに使われたと解釈するのが自然であろう．

図—11 は出水後の一連の空中写真から読み取った河口前面の砕波帯の位置を示す．これより開口部前面にテラス状に堆積した砂の大まかな動きを推測することができる．砕波帯は図に示したようにかなりの幅をもつようになったが，写真を詳細に観察すると，波の挙動などから砕波帯の岸側フロントがテラス状地形の肩の位置に対応し，それより岸側は比較的勾配の緩いテラス上面であるように推測される．8 月 6 日の砕波帯はきわめて狭い範囲に限られており，テラスの縁が急勾配で落ち込んでいることが想像される．その後，8 月，9 月にかけて肩の部分が削られてテラス上面の縁が岸側に寄り，テラス斜面の勾配が緩くなったものと推測される．また，9 月の砕波帯を出水時とに比較すると，テラス状地形がならされて両側に広がっていく様子を読み取ることもできる．このように，テラス状地形の変形は数週ないし数か月以上の時間スケールで着実に生じている．1987 年 4 月時点でも河口沖での砕波は明瞭に認められ，それが完全に解消するにはもうしばらく時間を要する．

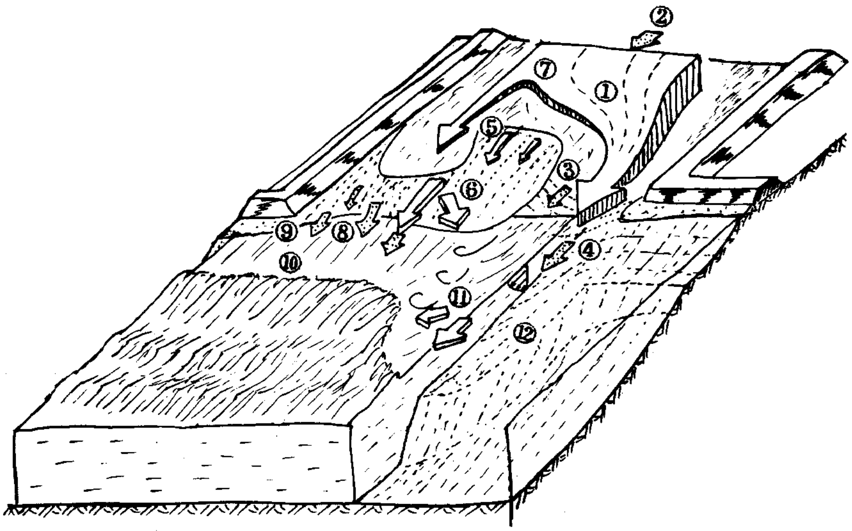


図—11　出水以後の砕波帯の変化

6. 考　　察

前節までをまとめてみると，河口砂州変形過程は多種多様の要因の影響のもとにあることがわかる．ここでは，このような現象をモデル化するにあたってどのような事項を考慮すべきかを考察する．最初に，河口砂州過程は種々の時間スケールをもった現象であり，支配微分方程式系を単一の時間きざみで積分していく方法だけでは無理があり，各時間スケールでの考察を整合させながら議論を進める必要があることを指摘しなければならない．

河口砂州を顕著かつ急激に変形させる要因は洪水である．もし，洪水が長期間生じなければ，河口は一種の平衡状態に達する．すなわち，沿岸漂砂による河口への砂の補給とその時点での河口流量（河川固有流量＋入退潮流）による河口開口部からの砂の排出量がつり合うように河口断面が維持される状態が生じる．前節で例を示した動的平衡状態がこれである．この状態が一種の極限状態であり，これを明確に押さえておく必要がある．



図—12 出水時の過程

洪水時の現象は数時間から最大2日程度までの時間スケールであり，次のような事項を考慮すればよいであろう．出水前の河口地形を初期条件，出水流量，潮位，来襲波を外力条件として，①砂州が存在する場合の堰上げ効果，水平および鉛直流速分布など流れ場の計算，②上流からの流砂量評価，③開口部側方侵食速度の算定，④開口部底面地形変化の算定，⑤砂州越流水による侵食量評価，⑥越流水の集中と水路の形成過程解明と流砂量算定，⑦越流開始による堰上げ効果の再計算，⑧波による暴風海浜の形成と汀線後退量の評価，⑨暴風末期の浜の回復評価，⑩砂州前面での砂の堆積の評価，⑪開口部よりの流出解析，⑫沖でのテラス状堆砂の評価，など．これらを模式的に図—12に示す．図中○内の数字で表わしたものは前述の事項番号である．

洪水終了後の過程は数日から1年以上のスケールの現象が同時に起きており，おそらく洪水時の解析よりは手こずるであろう．まず，出水による変形結果が単なる開口部の拡幅や砂州縁辺の変形程度のものであって，砂州が出水前の地形に戻るものであるのか，それとも，全く別の地形に遷移するようなものであるのかを見極める必要がある．阿武隈川の場合日平均2 500 m^3/sが1つの目安になるであろう．次に，前述の出水時の解析結果を初期条件，河川流量，波浪諸元を外力として，以下の事項を考慮する．①岸沖漂砂による浜の回復およびバーの揚陸過程の解明．ただし，これはいくつかの異なる時間スケールで生じるようである．②浜回復以後の沿岸漂砂の評価，③砂嘴の発達計算，④開口部の砂収支計算，⑤開口部での波の河道内への遡上限界の把握，⑥開口部前面のテラス状地形の変形による岸沖漂砂および周辺海浜への砂の供給の評価，など．

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，運輸省第一港湾建設局塩釜港工事事務所から助力を得た．また実測にあたっては，藤田仁志君をはじめ東北大学河川水理・海岸水理研究室の学生諸君の助力を得た．ここに謝意を表します．

参　考　文　献

1) 吉川秀夫編：土砂水理学，丸善，543 p.，1985.
2) 富永康照：河口処理について，水工学シリーズ66-12，1966.
3) 谷口哲也・沢本正樹・首藤伸夫：出水による阿武隈川河口砂州の変形過程の観察，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 262～266，1986.
4) 佐藤昭二・庄司忠夫・田中則男：仙台湾沿岸の漂砂について，第13回海岸工学講演会講演集，pp. 176～182，1966.
5) 土木学会東北支部編：東北の土木史，476 p.，1969.
6) 河北新報連載：荒浜今昔，1987，1～2月.
7) 野村和正・宇多高明・因幡昭義・宮内利夫：阿武隈川河口砂州の変形について，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 267～271，1986.
8) 青田茂雄・首藤伸夫：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. 203～208，1980.
9) 藤田義治・首藤伸夫：導流堤の防砂効果，第36回土木学会年次学術講演会，II-428，pp. 853～854，1981.
10) 建設省仙台工事事務所提供，「口絵」および「ニュース」，土木学会誌，1986年10月号.

（1987. 4. 20・受付）