

七北田川における河口地形変化と水理特性

田中 仁*・伊藤俊夫**・首藤伸夫***

1. はじめに

従来の河口調査は大河川を対象としたものが多い。その他の中小河川に関しては河口処理計画立案の際の基礎資料ですら十分でない場合が多い。河口変形現象は河川規模によって異なるものと考えられ、大河川で得られた知見をそのまま中小河川に適用することは出来ない。

本研究では二級河川・七北田川（宮城県仙台市）を対象にし、河口平面地形、最狭部横断形状の継続的な調査を行い、その成果をもとに各種水理特性について詳細な検討を行った。その結果、大河川の場合とは異なる特徴的な現象が観察されたので、ここに報告する。

2. 七北田川の概要と調査内容

今回の調査の対象である七北田川流域の概要図を図一1に示す。七北田川は、その源を仙台市北西部の泉ヶ岳に発し、仙台市蒲生地先で仙台湾に注ぐ二級河川である。七北田川はもとより現河口近くで約1km北上してから仙台湾に注いでいた。これは、仙台湾岸において北上する漂砂が卓越する（佐藤・庄子・田中, 1966）ことを示している。昭和40年代に、現河口から約2km北の位置に仙台新港が建設された。これにともない旧河口が締め切られ、現在の河口地形が形成された。仙台新港南防波堤の建設を機に、漂砂移動のパターンが変化し、近年まで河口において左岸砂州の伸長が見られることが多い。

現地調査は1988年6月より現在まで継続して行われている。測定内容は、汀線形状、最狭部横断形状、河口近傍での水位、流速の4項目である。まず、汀線形状測量は光波測距儀を用いて約2週間に一度行われた。最狭部横断測量は約4週間に一度ずつ行われた。パルンを用いた空中写真撮影も行われた。また、自記式水位計を設置し、水位の連続計測を行った。設置地点は、図一1に示した河口より500m地点（以降、当地点の水位を河口水位と呼ぶ）、河口左岸に位置する蒲生干潟内、およ

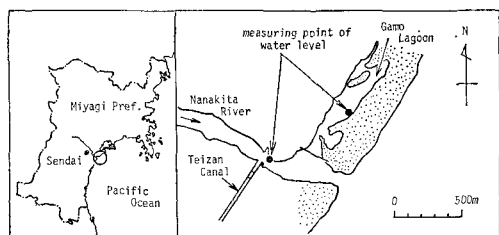
び河口より約5km上流の支川梅田川に架かる福田新橋の3地点である。1988年8月26日、27日、および1989年7月19日、20日には25時間にわたって地形・流速の連続観測が行われた。

現在にいたる観測期間中に、台風出水による顕著な砂州フラッシュが2度観測された。また、1988年12月には完全閉塞が生じた。

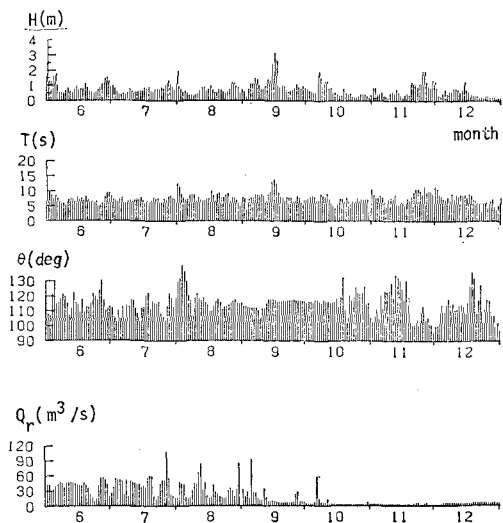
3. 観測結果

（1）汀線形状および最狭部横断形状

まず、1988年の測定結果について述べる。この年の各



図一1 七北田川河口地形の概要



図二 外力の変化

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 仙台市 下水道局

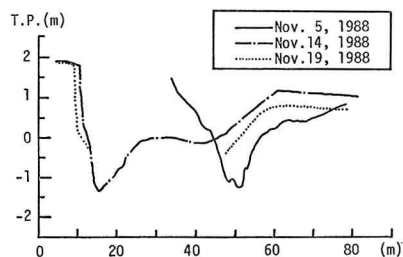
*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部災害制御研究センター

種外力の経日変化を図-2に示した。同図は上から、有義波の波高、周期、波向き（方位角）、および河川流量を示している。波浪は河口より沖合い約4km、水深20mの位置で測定されている。図-3に汀線測量結果を示す。図-3(a)の本川・干潟間には石積の締切堤があり、その延長線上には汀線までコンクリート製の導流堤が設置されている。図-3(a)に示した時期には、導流堤は砂中に埋没している。また、右岸汀線より100m地点から上流側には石積護岸がある。図-3(a)は夏期のものであり、台風出水の影響で、右岸の護岸に沿う方向に河口流路が形成されている。この時期に測定された横断形状はほぼ左右対称で、滞の偏りはみられなかった。

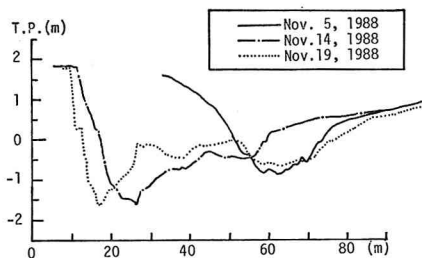
秋期から冬季にかけて、図-2に見られるように河川流量が極端に低減する。これとともに右岸砂州が成長し、12月上旬に完全閉塞に至った。閉塞直前の汀線変化を図-3(b)に示す。10日程度の間大きな地形変化が生じている。前述のように左岸側には汀線まで伸びる導流堤がある。14日の開口部左端は導流堤に達しているの、その後左岸の河口地形に変化はない。図中の3本の測線で測定された横断形状を図-4(a), (b), (c)に示す。測線1および2において滞筋が30mほど移動していることが分かる。ここで、興味深い点は測線1においてT.P. 0mより下の三角形断面がほぼ等しい面積を保持している点である。これは、沿岸漂砂が河口内へ運び込まれても、短期間の間にその時点での流量（河川流量＋潮汐流量）に対応した動的平衡断面が作り出されている

ためであると考えられる。

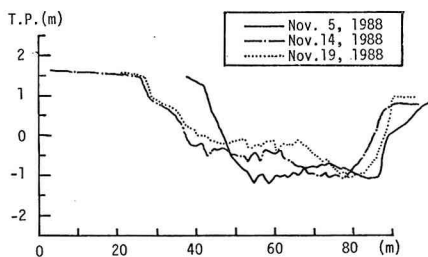
11月下旬から12月上旬にかけて高波浪が来襲し、河口は完全閉塞するに至った。閉塞してから約3週間後に撮影した空中写真を写真-1に示した。河口より500mの地点から南に向かって貞山堀と呼ばれる運河があり、その端部は名取川に至る。このため、完全閉塞後の河川流



(a) 測線 No. 1

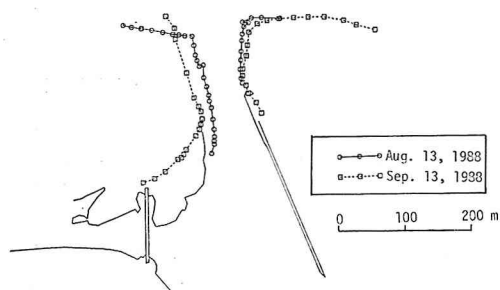


(b) 測線 No. 2

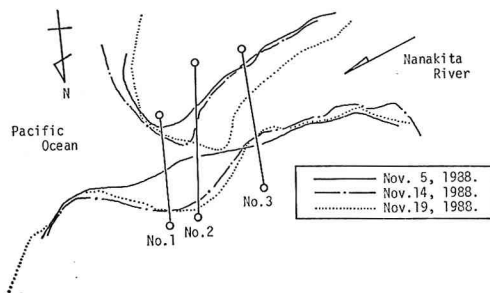


(c) 測線 No. 3

図-4 1988年の横断測量結果(11月5日, 14日, 19日)



(a) 8月13日, 9月13日



(b) 11月5日, 14日, 19日

図-3 1988年の汀線変化

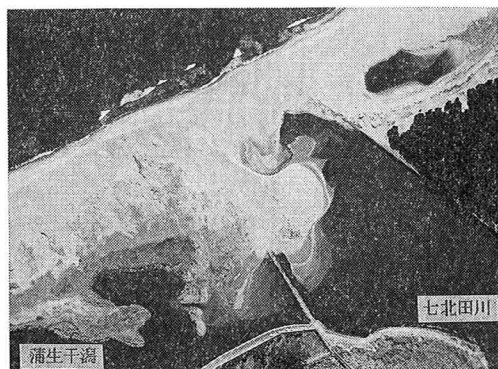
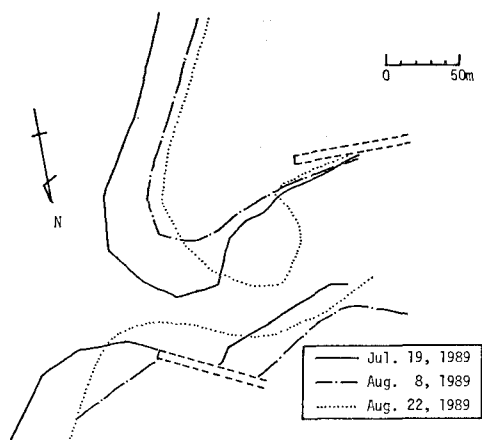
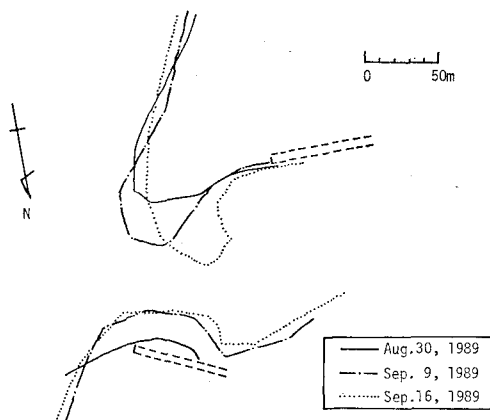


写真-1 完全閉塞後の空中写真(1988年12月23日)



(a) 7月19日, 8月8日, 8月22日



(b) 8月30日, 9月9日, 9月16日

図-5 1989年の汀線変化

量 ($2 \sim 3 \text{ m}^3/\text{s}$) はこの 貞山 堀を通じて名取川河口より太平洋に注いだ。図-2 で閉塞が生じた11月下旬から12月上旬を見ると、波高が高い点とともに、波向き角が他の時期に比べて極端に小さい点が特徴的である。詳細な検討の結果、七北田川においては小さな波向き角が閉塞発生の主要因であると考えられた。この点については、別に報告を行う予定である。

次に、1989年の実測結果について述べる。夏季の汀線形状変化を 図-5 に示した。この年もやはり右岸砂州の張り出しがみられる。8月6日から7日にかけて台風13号による出水があった。河口でのピーク流量は $499 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。図-5(a) に示したように、この出水によって河口幅が広がった。その後、2週間程度で地形はほぼもとに戻っている。8月27日から28日には再び台風17号による出水があった。ピーク流量は、 $615 \text{ m}^3/\text{s}$ である。汀線形状を 図-5(b) に示す。先の出水に比べて流量が多い分、8月30日の河口幅の方が広い。その後、先と同様に2週間程度ではほぼ平衡状態に達している。著者の一

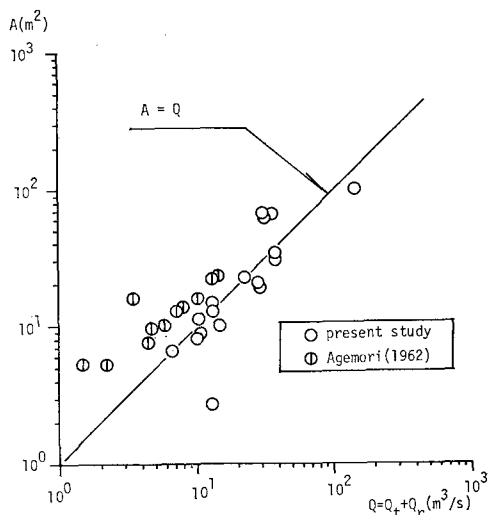
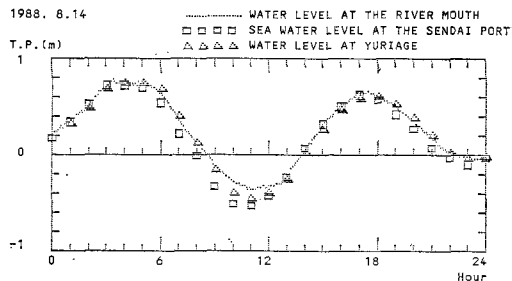
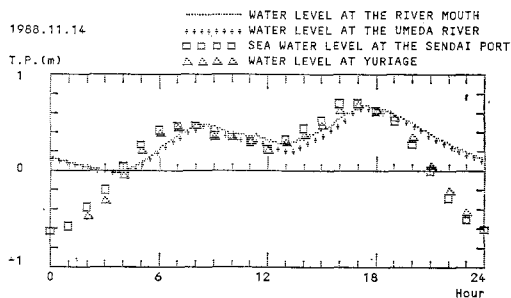


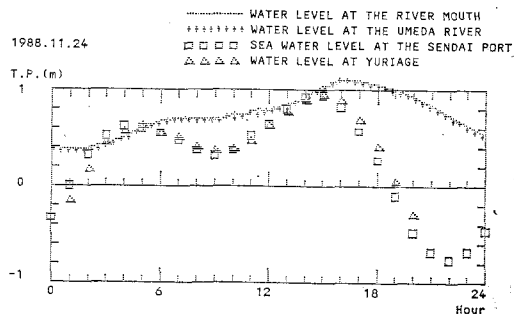
図-6 断面積 A と流量 Q との関係



(a) 1988年8月14日



(b) 1988年11月14日



(c) 1988年11月24日

図-7 水位の時間変化

人は、阿武隈川における出水後の地形変化についてすでに報告している(澤本・首藤・谷口, 1987)が、その結果と比較すると、中小河川においては地形変化のタイムスケールが非常に短い。この点に関しては(3)で詳述する。

最狭部断面積 A と流量 Q (河川流量+潮汐流量) の関係を図-6 に示した。図中には上森 (1962) によるデータも示しているが、上森は流量として潮汐流量を含んでいない。著者らのデータに比べ、幾分左寄りに位置するのはこのためであろう。

(2) 水位変化特性

水位の変化例を図-7 に示す。図中には仙台新港での潮位データおよび七北田川より 8 km 南に位置する名取川河口・閑上地点での水位変動も示した。図-7(a) は図-3(a) の時期に対応するものである。この時期は頻繁に出水があり、十分な河口断面積が維持されていた。このため、河口水位は外海潮位とほぼ同じ波形を持つ。名取川河口においても同様である。図-3(b) に示した閉塞直前の時期の波形を図-7(b) に示す。河口より 5 km 上流の梅田川水位は河口水位にほぼ一致している。潮位変動に対して、河口内水位には振幅低減・位相のずれが見られる。特に干潮時に河口内水位は T.P. 0.0 m 程度までしか下らない。これは河口部断面積の減少による。潮汐流量評価の際、水位変動として外洋のそれを用いることが多いが、この方法によると中小河川においては潮汐流量を過大評価し、危険側の判断を下すことになる。

河口は12月1日に完全に閉塞した。その直前の水位波形を図-7(c) に示す。図-2 に見られるように、この時期に高波浪が来襲している。満潮時、潮位に比べて河口水位がかなり高い。この現象は名取川河口水位には見られない。七北田川におけるこの水位上昇は wave set-up によるものと考えられる。名取川河口は導流堤によって大きな水深が維持されている。このため、河口前面で碎波が生ぜず、水位上昇が見られないものと考えられる。七北田川では高波浪時に水位の上昇により、碎波後の波が河口内に進入し易い。このため、河口内への砂の持込みが助長され、閉塞が促進されたと考えられる。

(3) 流速と剪断応力

ここでは、河口部における水理量を定量的に評価するために、一次元解析(例えば、Bruun, 1987)を行う。感潮区間内で水位は一様に上下するものとする。図-7 に示したように、河口水位と河口より 5 km の福田新橋での水位がほぼ一致しているので、この仮定は妥当である。通常は外洋と河口を結ぶ水路を単断面として計算を行うが、(2) に示したように、七北田川では大出水直後を除いて複断面形状を呈する場合が多い。そこで、本研究ではこの特性を考慮し、一般に河口部断面が m

個の断面からなると考えて、以下のような基礎式を用いた。

$$\eta_0 - \eta_B = \frac{L_0}{g} \frac{du_i}{dt} + \left(K_{en} + K_{ex} + K_{cu} + \frac{2gn^2 L_0}{R_i^{4/3}} \right) \frac{u_i |u_i|}{2g} \quad (i=1, m) \quad (1)$$

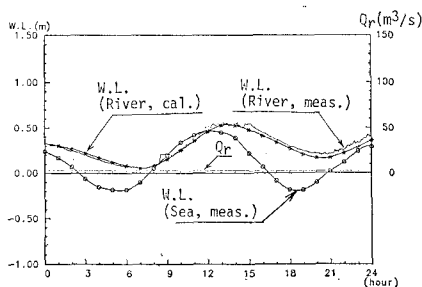
$$\sum_{i=1}^m u_i A_i = A_B \frac{d\eta_B}{dt} - Q_R \quad (2)$$

ここで、 η_0 : 外海水位、 η_B : 河口内水位、 L_0 : 外海と河口内を結ぶ水路の長さ、 g : 重力加速度、 u_i : i 番目断面における流速 (外海から河口内に向かう方向を正)、 t : 時間、 K_{en} , K_{ex} , K_{cu} : 入口、出口および曲がりの損失係数、 n : マニングの粗度係数、 R_i : i 番目断面の径深、 A_i : i 番目断面の断面積、 A_B : 感潮面積、 Q_R : 河川流量である。各種損失係数は、 $K_{en}=0.5$, $K_{ex}=1.0$, $K_{cu}=1.0$ とし、マニングの粗度係数は 0.035 とした。 L_0 , A_B は通常一定値とするが、七北田川河口近傍には浅瀬が多く、潮位の変動にともない L_0 , A_B の値が変動する。これらを適切に選ばないと、実測値と計算値に差があらわれる(清水ら, 1988)。そこで、今回の計算では地形の実測結果および航空写真をもとに、水路長・感潮面積を水位の関数として変化させた。

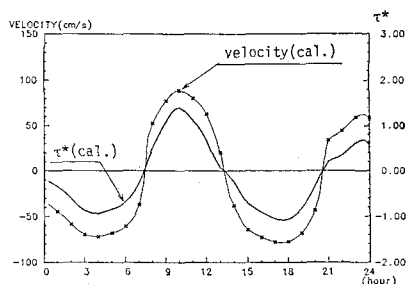
河川流量 Q_R は河口より 9 km 地点での値が測定されている。夏期の場合には上流の堰での取水を考慮し、5 割減の値を計算に用い、それ以外の季節ではそのままの値を用いた。外海水位については運輸省塩釜港工事事務所により測定された仙台港における値を用いた。ただし、図-7 に示した様に高波浪来襲時には wave set-up の影響により、碎波帯内の水位が上昇する。そこで、合田 (1975)、佐々木・佐伯 (1974) の研究をもとに、沖波波高の 1 割を実測外海水位に加算し、これを外海の境界条件とした。

式 (1), (2) を連立させて、Runge-Kutter-Gill 法によって数値的に解いた。初期条件としては、河口内水位と流速を与える必要がある。そこで、前者としては実測水位を、後者の値には実測河口内水位と実測外海水位の差からマニングの式により求めた流速を与えた。計算対象は、横断測量データが得られている1988年11月14日(以下、ケース1と呼ぶ)、および1989年7月19日から20日(同ケース2)の2とした。これらのうち、ケース2については、CM-2 および小野式流速計による流速の実測データも得られている。

図-7, 8 はそれぞれケース1およびケース2に対する計算結果である。河口内水位については実測値と計算値は非常によく一致している。次に、ケース2の流速を見ると、計算値は幾分大きいものの、実測値と比較的良好一致している。なお、CM-2 による実測値(実線)は断面平均値を表しており、小野式流速計による値(◇印)

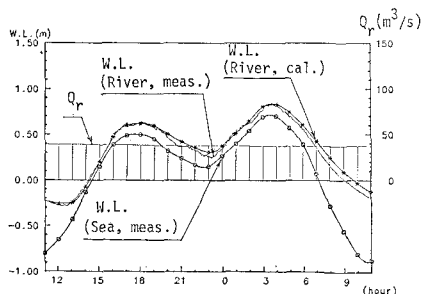


(a) 水位

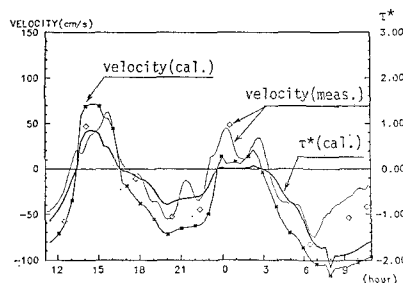


(b) 流速, 剪断力

図-8 ケース1の計算結果



(a) 水位



(b) 流速, 剪断力

図-9 ケース2の計算結果

は一点での計測値である。

計算対象とした両ケースで、河口断面形状や河川流量が大きく異なるにもかかわらず、いずれも流速の最大値は約 1.0 m/s、無次元掃流力 τ^* は 2.0 程度であり、ほぼ同じ値を持つことがわかる。これは両者がそれぞれの外力のもとでの平衡状態にあったためと考えられ、上記の値が動的平衡の条件を表していると考えられる。ここで、先に 図-6 に示した河口最狭断面積 A と流量 Q の関係を $A=1.0 Q$ と近似すれば、 $u=1.0$ m/s となり、今回の計算で得られた値と一致する。

阿武隈川のような大河川では、外力の変化に対して河口地形の応答が生じるまで比較的時間を要する。一方、七北田川のような中小河川では (1) に示した様に地形変化の応答が早い。このような地形変化速度の違いはおもに、河川流量の大小、異常出水で生じた地形変化の規模、および流域面積の大小に起因する洪水のタイムスケールの相違によるものと考えられる。七北田川においては地形変化のタイムスケールが短いため、上記のような地形条件・各種外力条件が大きく異なる時期で、すでに動的平衡に近い状態にあったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、二級河川・七北田川を対象とした河口変形調査を行い、大河川との相違を明らかにした。また、

従来、動的平衡状態を表現する指標としては流量が用いられているが、ここでは流速・剪断応力の形で表現することが出来た。これらの物理量を用いることにより、砂移動量の定量的評価へ発展させることが可能である。

最後に、貴重な資料を提供して頂いた建設省仙台工事事務所、運輸省塩釜港工事事務所、宮城県仙台東土木事務所、ならびに調査に協力された東北大学河川研究室の諸兄に謝意を表す。なお、本研究に対し文部省科学研究費（一般研究 (C)）、代表：首藤伸夫、総合研究 (A)、代表：澤本正樹）の補助を、また本論文の公表にあたり小川記念基金の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 上森千秋 (1962): 河川吐口の閉塞とその処理に関する研究, 高知大学農学部紀要, 第9号, pp. 1~120.
- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59~106, 1975.
- 佐々木幹夫・佐伯 浩 (1974): 碎波後の波の変形に関する研究, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 39~44.
- 佐藤昭二・庄子忠夫・田中則男 (1966): 仙台湾沿岸の漂砂について, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 176~182.
- 澤本正樹・首藤伸夫・谷口哲也 (1987): 阿武隈川河口砂州の変形過程, 土木学会論文集, 第387号/II-8, pp. 179~188.
- 清水琢三・近藤 浩右・木村 祝啓・池田 正・坂井 淳 (1988): 感潮狭水路を有する漁港の航路水深維持, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 377~381.
- Bruun, P. (1978): Stability of tidal inlets —Theory and Engineering, 510pp, Elsevier.