

瀬と淵が交互に形成された河道における 塩水遡上と底質の縦断的特性

LONGITUDINAL CHARACTERISTICS OF SALT WEDGE INTRUSION AND
BOTTOM SEDIMENT IN THE RIVER WITH RIFFLE AND POOL ALTERNATELY

工藤 健太郎¹, 鈴木 伴征², 石川 忠晴³

Kentaro KUDO, Tomoyuki SUZUKI, Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

²学生会員 工修 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

In this study, field observation was carried out in the Old Kitakami River. As a result, most of the mixture form was of weakness mixing, and it was shown that the saline wedge was almost stopped at the riffle at the 6km site. The result of the bottom sediment survey, proved that the property of the bottom sediment is different in the upstream and downstream of the riffle. Next, numerical simulation was done according to the two-dimensional $k-\epsilon$ turbulent model. Simulation result of the saline wedge stopping at the riffle was reproduced in good agreement with the observation result. Finally, by changing the flow rates, it was shown in the simulation that features of the saline wedge differed in the upstream and downstream of the riffle. These results suggest that the saline wedge is frequently stopped by the riffle in ordinary water discharge, and then, mound is formed by suspended solid settling on the top of the saline wedge.

Key words: saline wedge, field observation, bottom sediment, numerical simulation, meandering river

1. はじめに

河川感潮域における塩水侵入は、一般に滞筋形状の影響を受ける。一方、塩水楔先端付近では流れが停滞するとともに塩分が急変するため、懸濁物質が凝集沈殿しやすく、また塩水楔の運動に伴い、一旦沈殿した懸濁物質が移流・拡散される。したがって河川感潮域においては、塩水流動と河川地形の相互干渉により、懸濁物質の堆積環境はより複雑になるものと考えられる。

近年、河川感潮域における水環境の保全と回復が行政的・学術的課題としてクローズアップされてきているが、懸濁物質の運動と堆積は、付着栄養塩の循環や貧酸素水塊の発生に大きく関与すると考えられることから、その定量的理解を深めることは重要であると思われる。

塩水流動と懸濁物質の堆積との関係は、定性的または通説的に述べられているものの¹⁾、その実態を定量的に検討した例はほとんど見られない。そこで本研究では、その基礎的段階として、蛇行により瀬と淵が交互に形成

され、且つ流況が比較的安定している旧北上川下流部において、塩水遡上の現地観測と底質調査を行い、両者の関係について考察した。また $k-\epsilon$ モデルにより塩水流動の数値計算を行い、現地観測結果との比較からその有効性を確認した上で、河床形状が塩水遡上及び底質分布に及ぼす影響について考察した。

2. 現地調査

(1) 調査区間の特徴

本研究で対象とする区間は、旧北上川の河口より10.0kmの範囲である(図-1 参照)。旧北上川はこの区間で大きく蛇行しており、数百mおきに瀬と淵が交互に現れる。図-2に河床縦断形を示す。数百m~1kmのスケールで瀬と淵が形成され、その水深差は数mのオーダーとなっている。図中の黒い帯は平均的な河床縦断形を示しているが、河口から6kmの辺りで大局的な勾配の変化が見られる。なお旧北上川の流量は脇谷の分流工(新北上

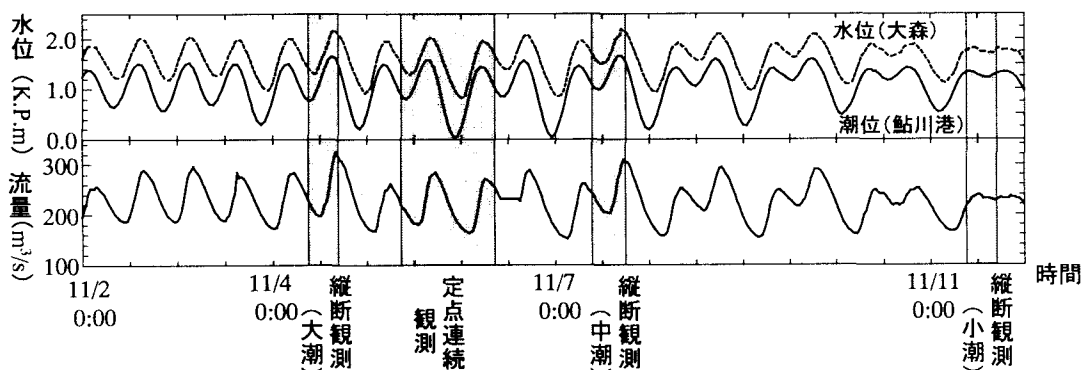


図-3 観測日程および観測期間中の潮位

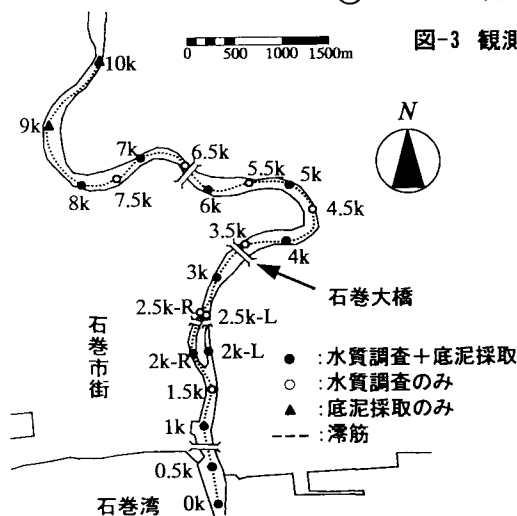


図-1 旧北上川下流部の形状と観測地点

川分派点)で調整されているため、流量はかなり安定している。近年は平水流量が約 $250\text{m}^3/\text{s}$ 、渇水流量でも約 $200\text{m}^3/\text{s}$ が確保されている。

(2) 調査の概要

底質調査は1998年7月21日に実施した。採泥地点は、0.0km～10.0kmの区間の滞筋上に1kmおきに設定した(図-1参照)。採泥にはエクマンバージ採泥器を用い、採取した底質の上層の数センチ分を試料として分析をした。分析項目は粒度分布および強熱減量である。

塩水流動の現地観測は1998年7月16～23日と11月4日～11日に実施した。ただし本論文では紙面の制約から11月観測のみについて述べる。図-3に観測期間中の潮位(鮎川港)、大森(河口より13.2km地点)の観測水位、及び和湊(河口より21.2km地点)の観測流量を示す。図中の灰色の部分観測時間帯である。この図から、潮汐に伴う水位・流量変動が和湊の上流まで達していることがわかる。しかし後に述べるように、塩水遡上自体は7.0km付近までであった。なお、この期間の日平均流量は $240\text{m}^3/\text{s}$ 前後で安定しており、流況の時間変動は潮汐によって誘起されていたと考えられる。

塩水流動観測は縦断観測と定点連続観測から成る。

縦断観測は、大潮・中潮・小潮時の塩水遡上の時空間変化を捉えるために3日にわたって行った。河口

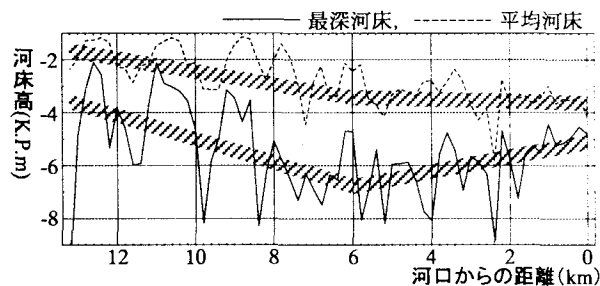


図-2 観測サイト内における河床縦断面図

(0.0km)より8.0kmにおいて、滞筋上に500mおきに観測点を設定した(図-1参照)。そして、各計測点をボートで移動しながら塩分、水温、濁度の鉛直分布を計測した。このような計測をそれぞれの潮について3時間おきに3回実施した。(夜間計測は危険を伴うので、いずれも早朝から夕方までの間に行った。)なお、1つの縦断分布を得るためには約90分の時間を要した。

定点連続観測は、石巻大橋上(3.4km地点)の左岸側(滞筋)、中央、右岸側の3地点で行った。1時間おきに塩分などの鉛直分布を計測し、その時間変動を捉えた。縦断観測、定点連続観測のいずれも、多項目水質計(アレック電子製:ACL-1183PDK)を使用した。

(3) 観測結果

a) 底質の縦断分布特性

0.0km～10.0kmの底質の粒径加積曲線を図-4に示す。また、中央粒径と強熱減量の縦断分布を図-5及び図-6にそれぞれ示す。ただし2.0km地点には中州があるため、右岸川水路(2.0km-R)と左岸川水路(2.0km-L)における値を記している。分析結果から、底質は6.0km付近を境に上流側は砂質、下流側はシルト質を多く含み、特に下流側の底質には有機物も多く含まれることが分かる。

分析結果のもう一つの特徴は、2.0kmと5.0kmにおいて砂質分が増大(或いはシルト分が減少)することである。このことは図-5、図-6からも推測されるが、図-4の粒径加積曲線により明瞭に表れている。すなわち、2.0km-Lと5.0kmの粒径加積曲線は屈曲しており、二峰性の粒度分布であることを示している。同様の特徴は7.0kmと8.0kmにも見られる。したがって、河床材料はかなり

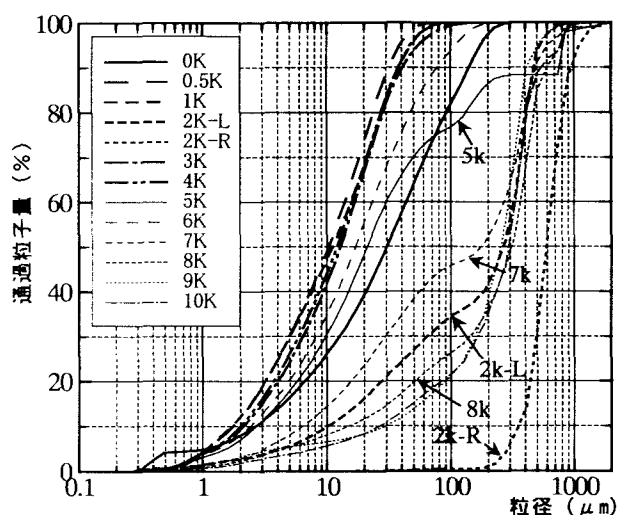


図-4 底質の粒度分析結果

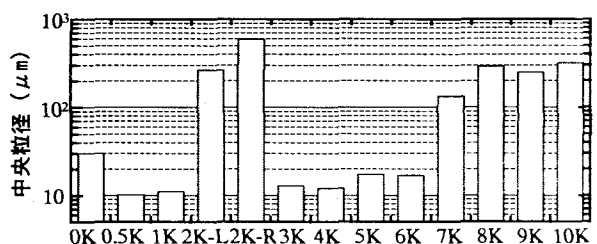


図-5 底質の中央粒径 採泥地点

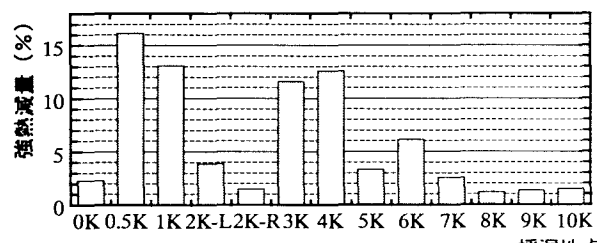


図-6 底質の強度減量 採泥地点

粒径の異なる2つの成分から構成され、その割合が地点によって変化していると言える。

2.0km は河道が分岐している特異な区間であるためこれを除いて考えると、8.0km～5.0km の間にセグメント²⁾の境目があり、堆積物の組成が変化するものと解釈できよう。このことは図-2 に示した河床縦断面図でも裏付けられる。すなわち、図中に暗い帯で示したように、平均河床も最深河床も6.0km 付近で折れ曲がっている。このような堆積環境の大局的変化の上に、蛇行に伴う瀬と淵の配置の影響が重なり、観測結果のような縦断変化が形成されたと考えられる。

b) 塩水遡上の時空間的变化

図-7 に11月の大潮(11月4日)、小潮(11月11日)の縦断観測結果を等濃度線で示す。濃度間隔は5%である。各図の矩形の黒い部分は、各計測点における河床を表している。計測位置が毎回多少ずれるために各図の河床形状は少しずつ異なっている。

図-7 より、混合形態が弱混合であることがわかる。ただし、大潮の場合には5.0km より上流で緩混合気味になっている。また、塩水の遡上は河床形状の影響を強く受け、特に6.0km 付近の瀬では、濃い塩水は潮によらずほぼせき止められている。満潮時には塩水楔上部の薄い塩水が上流に遡上するものの、濃い塩水は依然として6.0km の瀬より下流にとどまっている。なお、7月の観測においても濃い塩水が6.0km の瀬でせき止められており、それより上流には殆ど遡上していなかった。

3. 塩水遡上現象の数値計算による再現

現地観測で得られた結果はあくまで流量が240m³/s 程度の場合であり、それ以外の流量条件での塩水の遡上特性は分らない。そこで、旧北上川における塩水遡上現象を数値計算によって再現し、河床形状によって塩水遡上が受ける影響を数値実験により検証した。

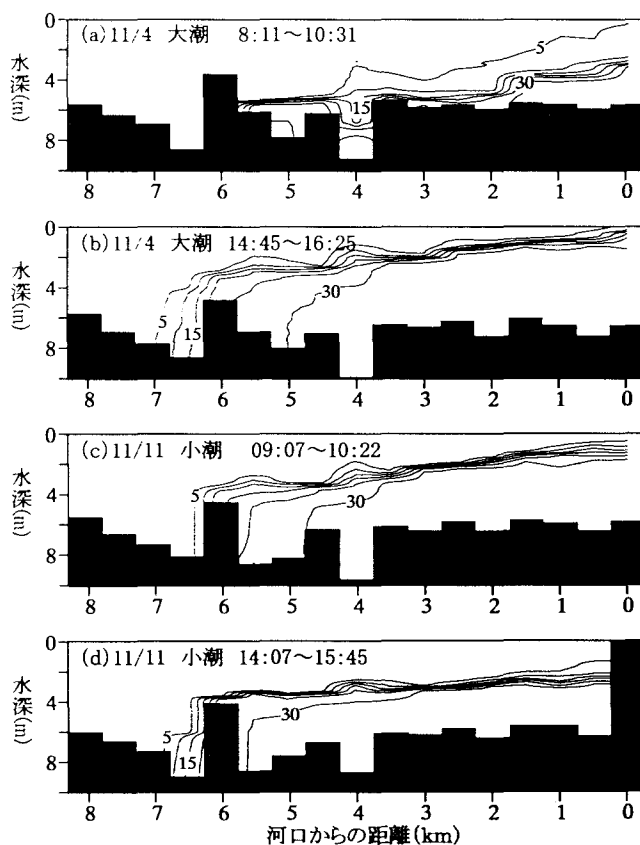


図-7 塩分濃度の縦断分布(観測結果, 単位‰)

(1) 計算方法

数値計算には鈴木らの構築した鉛直2次元モデルを用いた³⁾。このモデルは3次元 $k-\epsilon$ 乱流モデルの運動方程式を横断方向に積分して導出しているの、式中に川幅や側岸での摩擦フラックスの項を含み、3次元的な河床形状の効果もある程度計算に反映することができる。ただし、河川の湾曲による遠心力の効果は考慮されていない。また、観測期間中の水温差は大きくて5℃、濁度も大きくとも100ppm であり、それによる密度変化は塩分

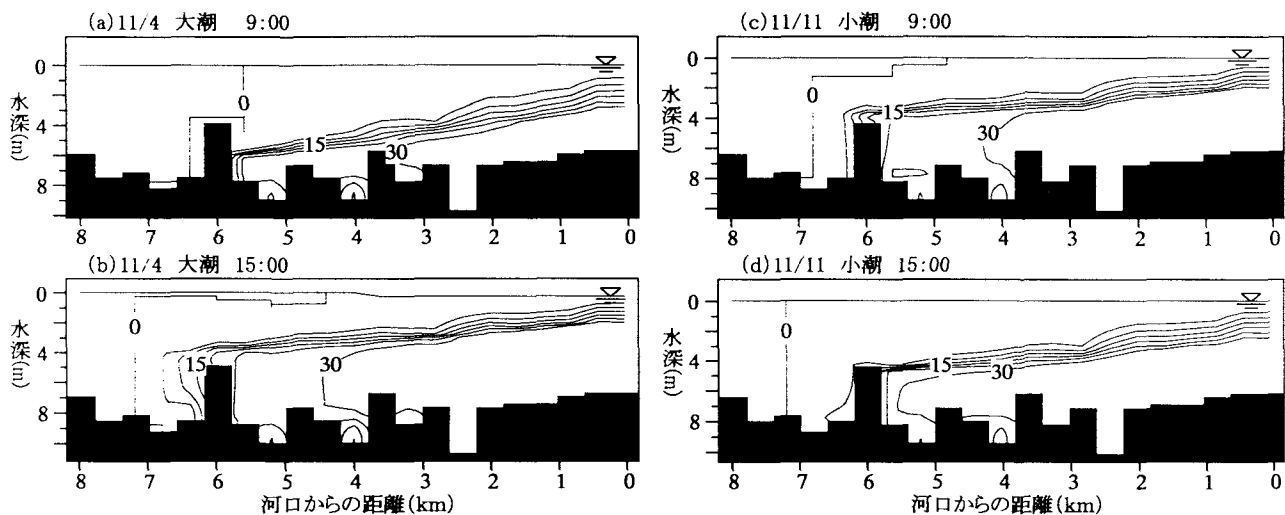


図-8 塩分濃度の縦断分布(計算結果, 単位‰)

濃度に対して十分小さいので、密度効果は塩分によるもののみを考慮した。

基礎方程式は、ブシネスク近似した運動方程式、連続式、標準型の k 、 ε の輸送方程式および塩分 δ の輸送方程式からなり、これらの方程式系を有限体積法を用いて離散化し、SIMPLE 解法により解いた⁴⁾。以下に基礎方程式系を示す。

$$\frac{\partial}{\partial x}(uB) + \frac{\partial}{\partial z}(wB) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial t} B + \frac{\partial}{\partial x}(uB\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(wB\Phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_{eff} B \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} B \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = -BS + \frac{F}{(n_s \cdot n_y)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 x 軸は河道方向、 z 軸は鉛直方向を示し、 u 、 w はそれぞれ x 、 z 軸方向の断面平均流速、 ν_{eff} は実効動粘性係数または渦拡散係数、 Φ は輸送される物理量(u 、 w 、 k 、 ε 、 δ)である。 B は各深度における川幅で、 x と z の関数である。 S は Φ の生産・消滅を表し、 u 、 w の輸送方程式では圧力勾配、 δ の式ではゼロ、乱れエネルギー k および粘性散逸率 ε の式では k - ε モデルにより定義される関数で、 k 、 ε 、 δ 、動粘性係数やモデル定数等を含む。 F はフラックス項で、 u 、 w の式では側岸のせん断応力のフラックス、その他の式ではゼロとした。 $(n_s \cdot n_y)$ は、各深度における側岸に垂直な単位ベクトルと横断方向の単位ベクトルとの内積である。

潮汐による水面変動を考慮するために、表層メッシュを水面変動に合わせて変化する可変メッシュとした。単位時間あたりの水面変動分は、水面の位置で圧力 $p = p_0$ (大気圧) を境界条件とし、運動学的条件から計算した。また、可変メッシュの変動量が一定値を越えた場合には下層の通常メッシュと合体・分割をするようにした。

(2) 計算条件

計算領域は、大森(13.2km)から河口より外側 4.0km 地

点までの計 17.2km とした。河口より外側の領域は、境界条件が河道領域に及ぼす影響を少なくするために設けたもので、角度 45° で水平幅を直線的に広げている。

メッシュ間隔は全域一様に Δx を 400m、 Δz を 0.25m とし、時間ステップ Δt は 30s とした。ただし、 Δz は表層メッシュのみ可変である。なお、各水平要素の潤辺ではスリップ流速を認め、流速の 2 乗に比例する底面せん断力を式(2)の F に与えている。塩分の境界条件は、流出する場合は自然境界条件、流入する場合は上流端で淡水(0‰)、下流端で海水(33‰)を水深方向に一律に与えた。以上の条件で、図-3 に示す期間について計算した。

(3) 計算結果と観測結果の比較

図-7 の観測結果に対応する時刻の計算結果を図-8 に示す。両者の河床形状が若干異なっているが、その理由は以下のとおりである。北上川の滞筋は航路であるため標識ブイを設置できない。そこで観測においては目測と音探で最深部を探し計測するが、時間の制約や流れおよび風の影響で、どうしても位置が若干ずれる。このため、図-7 では最深河床よりやや浅いところに河床面が描かれている。また、図-7 の観測は 500m ピッチで行われたが、図-8 の数値計算は、定期横断測量図のピッチにあわせて 400m おきになっている。

さて、両図を比較すると、計算結果では大潮における満干潮の界面変化がやや小さい。また小潮における 6~7km の塩分濃度に差が見られる。しかし、大潮小潮の塩水流動の特性の違いや、潮によらず塩水が 6.0km の瀬でせき止められる様子が再現されていることがわかる。

ただし、河床付近において密度が上下逆転する箇所が見られる。この原因は次のように考えられる。前後に比べて河床が凹んでいる地点の底部矩形メッシュにおいては出口が上方にしかないため、計算上の水の出入りが不自由であり、過去に存在した水が取り残される。実際現象においては、もちろん、重い流体が斜面に沿って軽い流体を押しつけるのけながら下に侵入するであろう。あるいは、

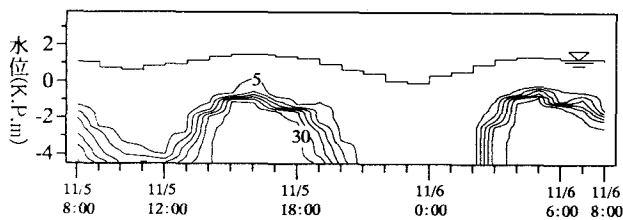


図-9 塩分濃度分布の時間変動
(石巻大橋(3.4km地点), 単位‰)

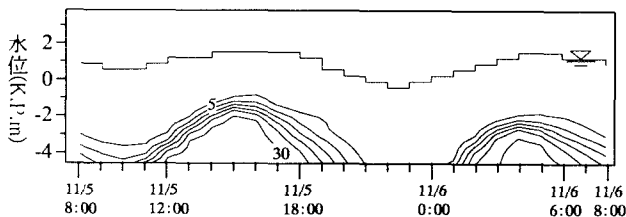


図-10 塩分濃度分布の時間変動
(計算結果(3.2km地点), 単位‰)

仮に不連続的な凹みが在ったとしても、密度不安定による鉛直混合で一様化するであろう。矩形メッシュを用いてそのような状況まで表現するには、メッシュサイズをかなり小さくして河床形状をより滑らかにするとともに、通常の $k-\varepsilon$ モデルではうまく表現できない密度不安定に基づく混合を便宜的に表すルーチンを付け加える必要があると考えられる。この点については今後の課題としたい。ただし“体積的”には、この問題はさほど大きくない。というのは、本計算モデルでは、前述したように、各深度における川幅を考慮して基礎方程式を横断方向に積分しているので、凹んだ地点における最下段メッシュの実質的体積は表層・中層に比べてかなり小さいからである。この点を考えれば図-8 の計算結果はおおむね良好であると言える。

次に、定点連続観測結果を図-9 に示し、対応する計算結果を図-10 に示す。グラフの横軸は時間、縦軸は河床からの距離で、一番上の曲線が水面である。等濃度線の間隔は 5‰ である。両図を比較すると、計算結果における時間変化率が観測結果のそれに比べてやや緩やかであるが、水位変動や塩水層の厚さ、及び上げ潮時に比べて下げ潮時の躍層が厚くなるなどの傾向はある程度再現されていると思われる。以上より、本計算モデルにより旧北上川における塩水遡上現象をおおむね把握できるものと考えられる。

4. 瀬の塩水遡上・底質分布に及ぼす影響

(1) 塩水遡上距離の変動特性に関する数値実験

6.0km 地点の瀬が塩水遡上に与える影響を調べるために、図-3 に示した実際の潮位条件のもとで、上流端流入量を種々変化させることにより、流量が仮に異なった場合の大潮日(11月4日)と小潮日(11月11日)における流量と遡上距離の関係を調べた。なお、計算対象流量は

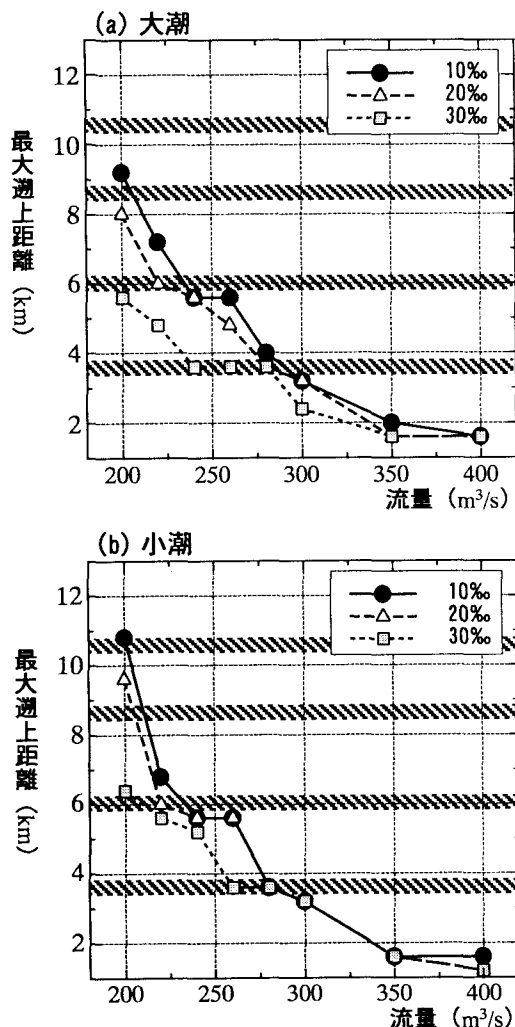


図-11 流量と塩水の遡上距離の関係

200~400 m^3/s とした。前述したように、旧北上川では湧水流量でも 200 m^3/s を下回することは極めて稀だからである。

その結果を図-11 に示す。縦軸は各濃度の塩水の河床付近における最大遡上距離であり、横軸は計算区間の上流端における流量である。なお、図中には、瀬の位置を水平のハッチで示している。

大潮と小潮における塩水遡上距離を比較すると、流量が 250 m^3/s 以下において、小潮の侵入距離が大きくなっている。これは、従来から認識されているように、潮位変化速度の大きい大潮では塩淡混合が強くなり、密度差が減少するためである。このことは、 $Q=220$, 240 m^3/s の計算ケースにおける大潮時の 30‰と 20‰の位置の開き、及び $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ の計算ケースにおける 10‰と 20‰の位置の開きに表れている。

遡上距離が瀬の位置の影響を強く受けていることがわかる。すなわち、どの等濃度線も瀬の位置で停留し、その後次に次の瀬まで一気に遡上する傾向が見られる。福岡ら⁵⁾は、那珂川における現地観測で、塩水楔のこのような性質を確認している。

図-11 ではややわかりにくいですが、大潮時(緩混合)には“瀬を越えるごとに”塩分濃度の減少が認められた。すなわち、3.6km の瀬においては 30‰と 20‰の線が分離し、6.0km の瀬では 20‰と 10‰の線が分離している。この現象は、図-7 の観測結果にも見られるように、緩混合の上部のみが瀬を越えて遡上することによっている。一方、小潮の場合には、部分的に同様の状態が生じるが(流量が $260\text{m}^3/\text{s}$ の場合)、弱混合であるため密度躍層が薄いので、さらに流量が減少した場合には高濃度の塩水が楔先端に“追いついている”。(流量が $220\text{m}^3/\text{s}$ と $240\text{m}^3/\text{s}$ の場合)

以上のように、塩水の遡上は瀬の位置の影響を強く受けるとともに、その効果は大潮と小潮で微妙に異なるものと考えられる。

(2) 底質分布に及ぼす瀬の影響

前節で述べたように、塩水の遡上は瀬の位置の影響を強く受けると考えられるが、旧北上川の場合には 6.0km の瀬の効果が最も大きい。図-11 からわかるように平水流量($250\text{m}^3/\text{s}$)に対応する塩水遡上距離がこの位置に対応しているからである。

さて、河床材料特性の縦断変化について、2 (3) a) ではセグメントという大局的な見方から説明した。しかし、塩水楔の先端付近において濁質が凝集沈降しやすいということから、楔先端が最も停留しやすい 6.0km 付近で河床材料の急激な細粒化が生じると解釈することもできる。もちろん、現象の原因が一つに特定されねばならないということはない。この場合には、塩水楔の遡上距離自体が大局的な勾配変化(すなわちセグメント)の影響を受けているわけだから、二つの原因どうしが密接に関係しているとも言える。しかし塩水楔が存在する状態においては、河床勾配と掃流力の関係は一価的ではないから、通常のセグメントの概念をそのまま適用できず、より詳細な考察が必要になろう。その意味で、細粒分が 6.0km 付近から急激に増加する現象について、少なくともその“直接的”原因を塩水遡上現象に求めることは妥当であると考えられる。すなわち、塩水楔先端におけるマウンド形成¹⁾と同様の見方である。ただし、旧北上川の場合は、塩水楔が自力でマウンドを形成したというよりも、河道蛇行によって生じた瀬の効果が大きいと言える。図-12 に河道内地形のコンター図を示すが、実際、旧北上川 6.0km 付近にはマウンドと呼べるほどの顕著な盛り上がりは見られない。しかし三つの主要な瀬(9.0km, 6.0km, 3.6km)を比較すると、6.0km の瀬がきわめて平坦であることに気づく。通常の瀬は、9.0km や 3.6km の瀬のように、平坦とは言っても滞筋の切れ込みが多少は見られるものだが、6.0km の瀬においては、それらが懸濁物質の沈降によって埋没しているのではないかと考えられる。

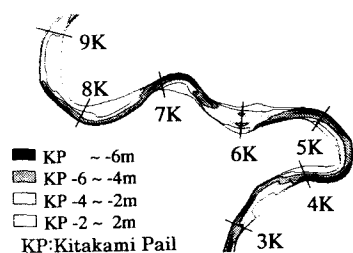


図-12 河道湾曲部の地形

5. まとめ

本研究では、旧北上川の感潮域において現地観測を行い、塩水遡上現象と底質の縦断的特性を調べた。また、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いた塩水遡上の数値実験により、流量と塩水遡上距離の関係性を調べ、懸濁物質の堆積環境について考察した。その結果、以下に示す知見を得た。

- (1) 現地観測はほぼ平水流量時に実施されたが、塩水楔の先端は、大潮・中潮・小潮のいずれの条件においても、6.0km の瀬の付近に停留していた。
- (2) 底質調査の結果、6.0km 地点の瀬およびその下流の底質は有機物を多く含むシルト質、6.0km 地点より上流は砂質となり、瀬の上流と下流で底質の傾向は異なった。
- (3) 数値実験の結果では、塩水遡上距離と流量の関係は瀬の位置の影響を強く受けていた。また、塩水は一つの瀬を越えると次の瀬の位置まで一気に遡上する傾向が見られた。
- (4) 現地観測と数値実験を総合すると、旧北上川では平水流量では河口から 6.0km の瀬で塩水は堰き止められることが多く、その先端部から懸濁物質が沈降・堆積するものと考えられた。

謝辞：現地観測を実施するにあたり、建設省東北地方建設局北上川下流工事事務所に多大の便宜を図っていただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 西條八東, 奥田節夫編：河川感潮域, 名古屋大学出版会, pp.85-105, 1996.
- 2) 鮎川登, 大矢雅彦, 石崎勝義, 荒井治, 山本晃一, 吉本俊裕：河川工学, 鹿島出版会, pp.107-108, 1992.
- 3) 鈴木伴征, 石川忠晴：利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発達・流動に関する現地観測と数値計算, 水工学論文集, 第43巻, pp.881-886, 1999.
- 4) 荒川忠一：数値流体工学, 東京大学出版会, 1994.
- 5) 福岡捷二, 嶋村春夫, 鍛冶屋義信, 高橋晃, 岡田和郎：那珂川における塩水遡上の現地観測, 第32回水理講演会論文集, pp.203-208, 1988.

(1999. 9. 30 受付)