

旧北上川蛇行部における塩水遡上現象について

東京工業大学大学院 工藤健太郎

1. はじめに

河川感潮域で生じる塩水侵入は、河道形状の影響を強く受ける。特に河道が蛇行している場合には、遠心力によって二次流が発生するため、塩水界面は内岸側に傾き、三次元的な流況が生じる。一方、塩水楔先端付近では流れの停滞と塩水の化学的作用により懸濁物質が凝集・沈降するため、河道堆積物の特性も空間的に変化する。そこで本研究では、塩水流動と懸濁物質の堆積との関係を把握するために、河川感潮区間が蛇行している旧北上川において、塩水流動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。さらに、k-乱流モデルによるシミュレーションを行い、三次元塩水流動の再現を試みた。

2. 塩水流動の観測

対象水域である旧北上川下流部の全体図及び蛇行部の拡大図を図-1に示す。拡大図の等深線上の数値は標高(Kitakami Pail)を示している。湾曲部では、遠心力によって二次流が生じるため、湾曲の外岸側が深く、内岸側が浅くなっていることが特徴である。なお、別途行っている現地観測結果¹⁾より、旧北上川では平常時の場合、塩水楔はこの湾曲部上流まで遡上することが分かっている。

観測では船を2艘使用し、1艘にはADCP及び音響測深機(以下音探という)を、もう1艘には多項目水質計を搭載し、河道内の各横断面内において流速及び塩分の同時計測を行った。塩水流動の観測によって得られた塩分、流速分布及び音探画像の一例を図-2、図-3に示す。図-2(a)(b)は4.8km地点の音探画像および塩分の鉛直分布、図-2(c)(d)は4.8km地点の河道方向流速分布、図-3は表層および底層における平面流速分布である。

音探画像(a)(b)は上端が水面、画像内の太い黒帯が河床に対応する。その他に画像内に水平方向に縞状の線が映っているが、これは塩分の界面に対応すると考えられる。この塩水界面に着目してみると、上げ潮時は界面が概ね水平であるのに対し、下げ潮時は界面が右岸上がりに傾いていることがわかる。次に流速分布に注目すると、上げ潮時には表層の淡水の流速はそれほど小さくなく、河床付近の塩水は逆流となっている。一方、下げ潮時には強い順流が生じ、表層と底層で大きな流速差が生じることが分かる。蛇行部においては、二次流によって表層付近に左岸方向の流れが発生する。この時、水面は左岸側でわずかに上昇し、その分塩水界面は押し下げられ、逆に右岸側では界面が持ち上げられる。さらに、二次流によって界面付近の塩水が右岸浅瀬に輸送される作用が重なり、図-2(d)のような塩水界面が生じたと考えられる。

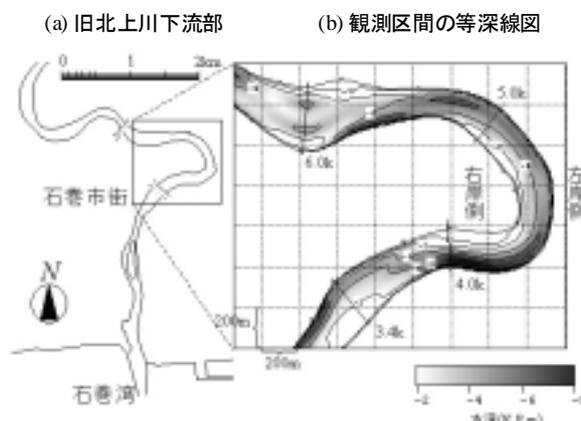


図-1 旧北上川下流部の形状と観測地点

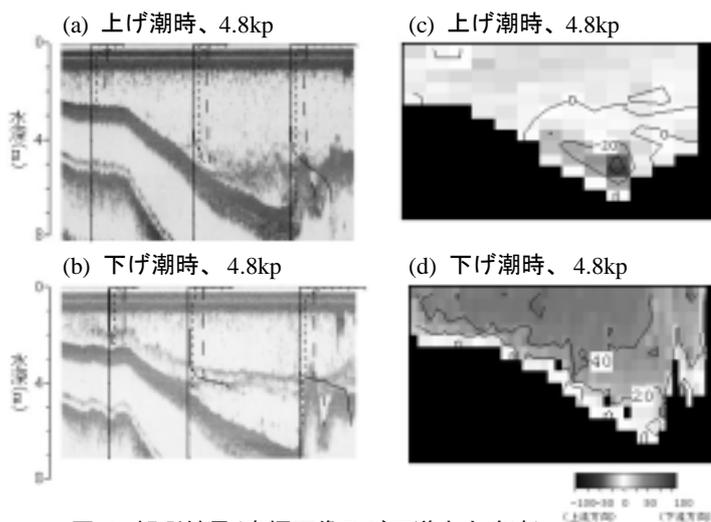


図-2 観測結果(音探画像及び河道方向流速)

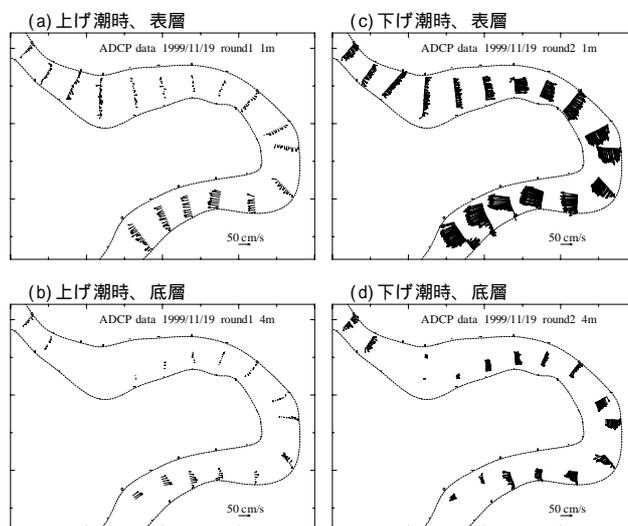


図-3 観測結果(平面流速ベクトル)

3. 底質の空間的分布

図-1 に示した水域内で、エクマンバージ採泥器により底質を採取し、含水比・強熱減量および粒径分布を計測した。中央粒径および強熱減量の平面分布を図-3 に示す。全体的な分布としては、蛇行部においては左岸側(滞筋)にはシルト質が堆積し、河道中央付近(水深4~6m、K.P.-3~-5m)では砂質、最も右岸の、水深の浅い地点では再びシルト質が堆積していることが分かる。特に、4.0~4.4kmの区間の底質は強熱減量が他の地点より多くなっていることから、有機質に富んだ河床が形成されていると考えられる。

このような底質分布が形成される要因として、塩水流動が大きな役割を果たしていると考えられる。すなわち、塩水楔の遡上に伴い、その先端部では水中の微細な懸濁物質が海水の化学的作用でフロックを形成し、沈降しやすい状態となる。このとき、下げ潮時に発生する二次流と薄い塩水の這い上がりにより、微細粒子が内岸側へと輸送され、岸近くに堆積していると推察される。しかし、河道中央部分は砂になっていたことから、塩水があるからといって細粒分が堆積するわけでもなく、土砂堆積に関しては今後洪水時などを含めた様々な流況を総合的に考察する必要がある。

4. 三次元塩水流動の数値シミュレーション

本研究では、蛇行部における塩水流動の三次元的特性をより詳細に検討するために塩水流動モデルの開発を行い、観測結果との照合によるモデルの適合性の検討を行った。基礎方程式には密度差を考慮した三次元k-乱流モデルを用い、有限体積法で離散化しSIMPLE解法により解いた。また、河川の湾曲による効果を「遠心力項」として運動方程式中に組み込むことで、蛇行河道を直線的に近似し、かつ蛇行部における二次流をある程度まで再現できるようにした。以下に三次元の基礎方程式のうち、「遠心力項」の含まれる u 、 v の運動方程式を示す。

$$\frac{Du}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{v^2}{r} \quad \dots(1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_L \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{uv}{r} \quad \dots(2)$$

ここに、 x 、 y 、 z はそれぞれ河道横断方向、縦断方向、鉛直方向の座標であり、 u 、 v は、 x 、 y 方向の流速、 p は圧力、 r は河道の曲率半径、 ρ は密度である。また、 ν_{eff} は k -モデルによる渦動粘性係数であり、水平方向の渦動粘性係数 ν_L はリチャードソンの4/3乗則により与えた。さらに、上下流端の境界条件は次のように与えた。まず実際に観測された水位変動から一次元不定流計算により流量の縦断分布の経時変化を求め、次いで一次元計算で求めた流量を用いて鉛直縦断二次元計算を行い、河口部の境界条件を求めた。以上の方法により、三次元シミュレーションを行いその結果と観測結果を比較したところ、二次流の形成や引き潮時の塩水の這い上がりなど、三次元的な流動をある程度再現できた(図-5)。

参考文献 1) 工藤健太郎, 鈴木伴征, 石川忠晴: 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, 水工学論文集, 第44巻, pp.1023-1028, 2000.

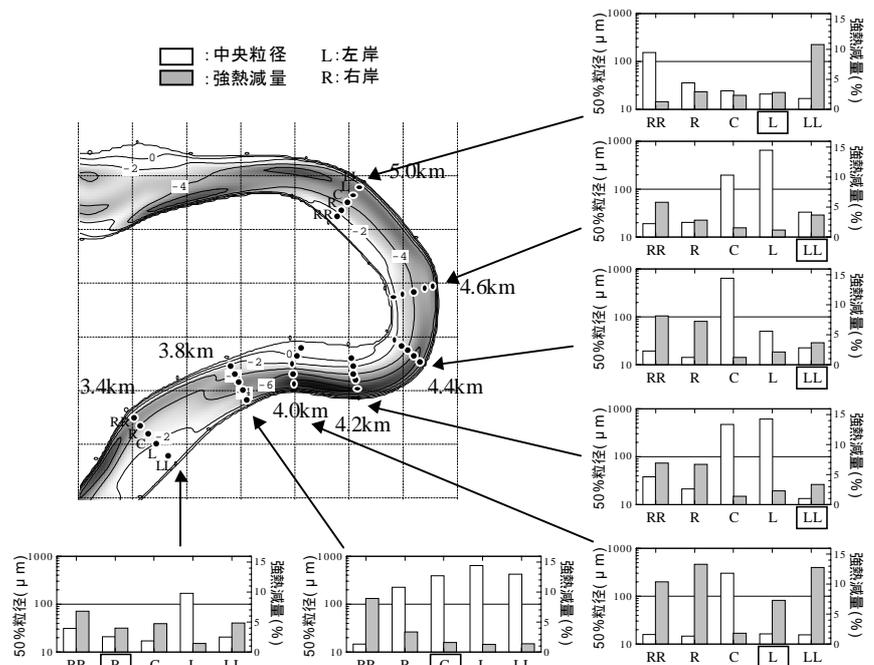


図-4 底質の平面分布(2000年11月16-18日採取、白:中央粒径、灰色:強熱減量)

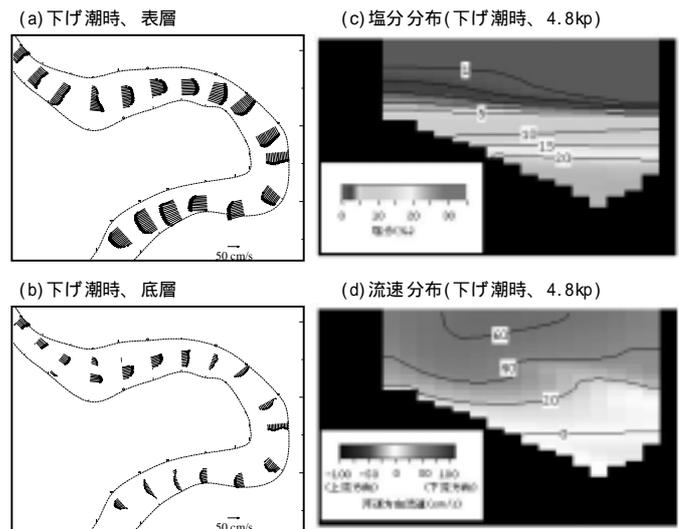


図-5 計算結果(平面流速ベクトル、塩分・河道方向流速)