

大規模洪水時の河口砂州周辺の三次元流れ場の渦構造とその解析法の考察

中央大学大学院 学生会員 ○立山 政樹
 中央大学研究開発機構 正会員 内田 龍彦
 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 研究背景・目的

洪水時、河口砂州を有する河口域では、縦断的に河道断面形状が大きく変化することにより、流れの加速と減速を伴いながら、河口砂州を回り込む流れや越流する流れにより三次元流れが生じる。これにより底面流速場が変化し、流砂運動によって河床変動が生じ、流れ場が変化するため、河口域では複雑な洪水流と河床変動の相互作用場となる。著者らは、大規模洪水による河口砂州地形変化が生じた阿賀野川を対象として、観測水面形の時間変化と鉛直方向流速と非静水圧力分布が解析できる一般 BVC 法¹⁾を用い、洪水流と河床変動の解析法を検討してきた²⁾。しかし、一般 BVC 法は複雑な方程式系から成り、各項の役割や必要性についてさらに検討する必要があると考える。本研究では、一般 BVC 法を用いて水面形の時間変化を再現するように解析した解は、洪水時の流れの構造を表していると考え、まず、解析結果から河口域の流れの三次元性を生じさせる渦構造を明らかにする。さらに渦構造を水深平均流速場から記述する方法を導出し、これを用いて河口域の解析法を検討することを目的とする。

2. 流れの三次元性の定義とその評価方法

図-1 は、湾曲水路の流速鉛直分布を例とした本研究における流れの三次元性の考え方を示す。例えば、湾曲水路では、遠心力より二次流が生じ、主流方向の流速鉛直分布が変形する。これにより主流方向、二次流方向ともに等流状態の流速鉛直分布からの偏差流速分布 $u'_i = u_i - u_{ei}$ (u_i : i 方向流速, u_{ei} : 等流状態の流速分布) が生じる。本研究では、この偏差 u'_i を流れの三次元性と定義し、水面流速の偏差 $u_{si} - u_{sei}$ と底面流速の偏差 $u_{bi} - u_{bei}$ の差(式(1))より評価する。式(1)は、渦度の定義式を水深積分すると得られる。

流れの三次元性は、一次的には底面せん断力による水平方向渦度が流速の平面分布によって伸縮・回転することで発生すると考えられる。そこで、水深積分渦度方程式(2)において、流速鉛直分布を等流状態とし、定常流を仮定する。浅水流の仮定により、式(1)の鉛直方向流速の空間変化項を無視すると、水深積分された流速分布の変形量 δu_i は、式(3)で表すことが出来る。式(3)を用いれば、任意の流れ場において、水深平均流速の平面分布から簡易的に流れの三次元性を計算できる。例えば、湾曲水路の二次流については、式(3)を s - n 座標系に変換し、流れの縦断的变化と C_0 の空間変化をゼロとすれば、流線曲率による二次流強度^{例えは³⁾}と同形の式(4) が得られることから、式(3)は湾曲二次流場にも適用できることが分かる。ただし、式(3)より計算される流れの三次元性は、式の導出において、等流状態の流速鉛直分布(対数分布側)を仮定したため、流速鉛直分布が変形したことによって生じる流れの三次元性が考慮されていない。

以上の考え方を踏まえ、大規模洪水により河口砂州周辺地形が大きく変形した阿賀野川河口域の洪水時の三次元流れ機構を

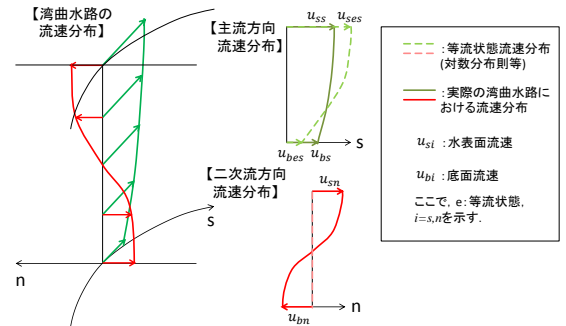


図-1 流れの三次元性の考え方

$$\delta u_i - \delta u_{ei} = (u_{si} - u_{bi}) - (u_{sei} - u_{bei}) = \varepsilon_{ijs} (\Omega_j - \Omega_{ej}) h + \left(\frac{\partial Wh}{\partial x_i} + w_s \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - w_b \frac{\partial z_b}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega_i h}{\partial t} = (u_{si} \omega_{\alpha s} - u_{bi} \omega_{\alpha b}) + \{v_{ij} (\omega_{bij} - \omega_{bji}) / h\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -U_j \Omega_i + U_i \Omega_j + \omega'_j u'_i - \omega'_i u'_j + \frac{v_i}{\sigma_\omega} \left(\frac{\partial \Omega_i}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\delta u_i - \delta u_{ei} = \frac{3h^2}{2\kappa v_{ib}} \left\{ C_0 \left(\frac{C_0}{\kappa} - 2 \right) \left(U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + U_i \left(\frac{C_0}{\kappa} - 1 \right) \left(U_j \frac{\partial C_0}{\partial x_j} \right) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\delta u_n}{u_s} = \frac{3hU}{\kappa v_{ib}} \left(\frac{C_0}{2\kappa} - 1 \right) \frac{h}{r} \quad (4)$$

δu_i : u_i と u_{bi} の差, δu_{ei} : 等流状態の δu_i , Ω_i : 水深平均渦度, h : 水深, Wh : 水深積分鉛直方向流速, w_s, w_b : 水面, 底面の鉛直流速, z_s, z_b : 水面, 底面の標高, $\omega_{\alpha s}, \omega_{\alpha b}$: u_{si}, u_{bi} の回転, $v_{ib} = \frac{\kappa}{18} \max(\delta u_i, \delta u_{ei})$ 底面渦動粘性係数, ω_b : 底面の渦度, ω_{be} : 等流状態の ω_b , ω'_j : 渦度の水深平均値からのずれ, $C_0 = U_j / U, \kappa = 0.41, r$: 曲率半径

キーワード 流れの三次元性, 二次流, 洪水流, 阿賀野川, 河口域, 一般 BVC 法

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL. 03-3817-1615

検討する．ここでは，洪水時に観測された水面形の時間変化と一般 BVC 法を用いて解析した結果を用いてピーク時の流れを検討する．この時，図-2 に示すように河口砂州周辺では洗掘，浅海部では堆積による河口テラスの形成が生じている．また，図-3 に示すように河口砂州近傍と河口テラス上で流速が加速する等，河口域全体に流速の場所的变化が著しい．

3. 大規模洪水時の河口砂州周辺の三次元流れ機構

図-4, 図-5 に，二次流と主流速の変形量の分布について，一般 BVC 法による解析結果 (a) と一般 BVC 法より解析された水深平均流速分布を用いて式(3)より計算した結果 (b) の比較を示す．なお，瞬間値では非定常な平面渦や水面の変動による影響が見られた．本研究では，特に時間スケールの大きい浅海部における平面渦の影響を平滑化するため，10 分間の時間平均値を示している．図-4 (a) より河口砂州の上流において，河口砂州を回り込む流れが生じるため，右岸側では右回り，左岸側では左回りの二次流が発生している．この二次流は，河口部の拡幅を生じさせる．また，浅海部に形成された河口テラス先端部では，河床勾配が逆勾配となるため，流線が急激に曲がり，右側では右回り，左側では左回りの二次流が生じている．図-5 (a) より河口砂州近傍と河口テラス先端部において主流方向の流れの三次元性が大きくなっていることが分かる．これらの河口部の全体的な流れの三次元性の傾向は，図-4 (b)，図-5 (b) に示す式(3)による計算結果でも概ね表せている．例えば，砂州上流の流れの三次元性が小さい場所では，式(3)で解析できることが分かる．しかし，河口砂州による狭窄部において流れの三次元性が過大に評価されている．これは，上流からの逆向きの渦の移流が考慮されていないためである．河口テラス先端部では，式(3)の計算結果は一般 BVC 法の解析結果よりも主流方向の流れの三次元性が小さい．この主要因として時間平均する際に着目した平面渦の影響や逆向きの渦の移流が考えられるが，この点についてはさらに検討を行う必要がある．

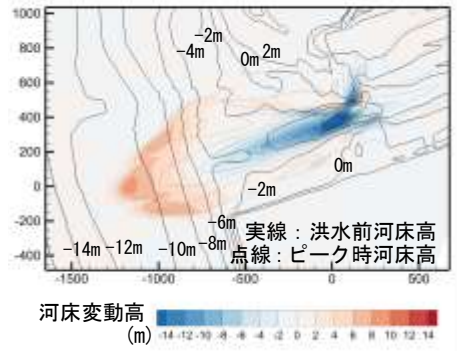


図-2 河口砂州地形の変化(阿賀野川)

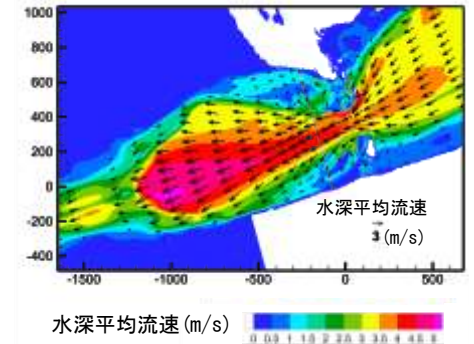


図-3 洪水ピーク時水深平均流速分布

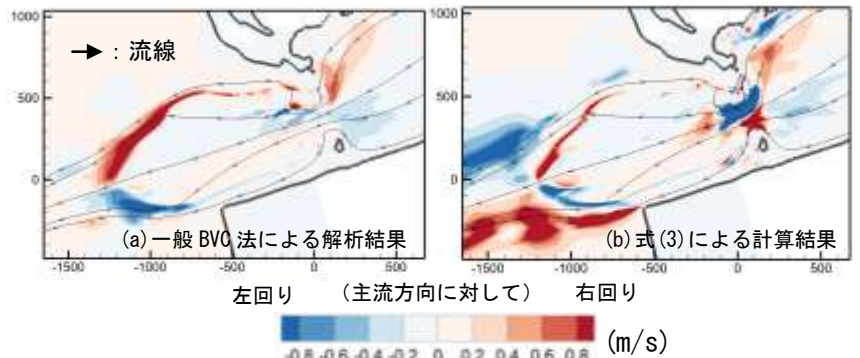


図-4 河口域における洪水時の二次流強度

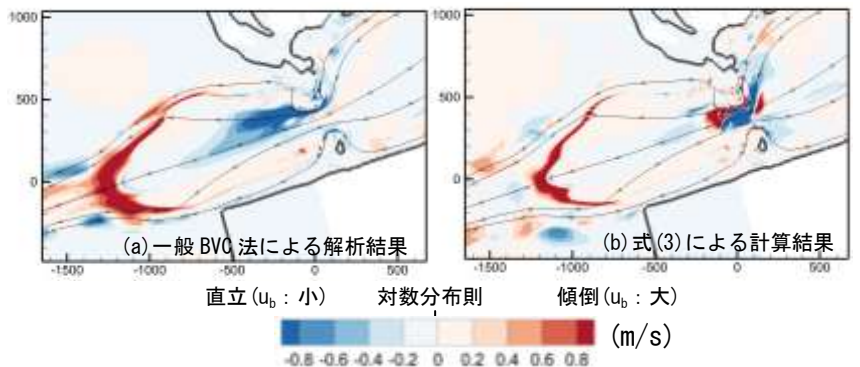


図-5 河口域における洪水時の主流速鉛直分布の変形量の分布

4. 結論

洪水時の河口域では，二次流方向だけでなく主流方向の流速鉛直分布も大きく変形する．水深積分渦度方程式(2)から流速平面分布を用いて，簡易に流れの三次元性を評価する式(3)を導いた．式(3)は，河口域の全体的な流れの鉛直構造の特徴を表し，砂州上流などの三次元性があまり強くない場所の渦構造は表せることを示した．強い三次元性を持つ河口狭窄部や河口テラス先端部では，式(3)では鉛直方向流速の変化を過大評価することから，渦度の非平衡性を適切に考慮できる一般 BVC 法が必要であることを明らかにした．

参考文献

1)内田龍彦,福岡捷二:浅水流場の仮定を用いない水深積分モデルによる底面流速の解析法,土木学会論文集 B1(水工学),Vol.56,I_1225-I_1230,2012. 2)立山政樹,内田龍彦,福岡捷二,田部成幸:大規模洪水時の河口砂州と周辺河床の変動解析-平成 23 年阿賀野川洪水を対象として-,土木学会論文集 B1(水工学),Vol.69,No.4,I_1009-I_1014,2013. 3)西本直史,清水康行,青木敬三:流線の曲率を考慮した蛇行水路の河床変動計算,土木学会論文集,N0.456/II-21,pp.11-20,1992.