

三次元開水路粗面乱流場の流速分布と圧力分布の検討

中央大学 学生会員 ○宅和 佑悟
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

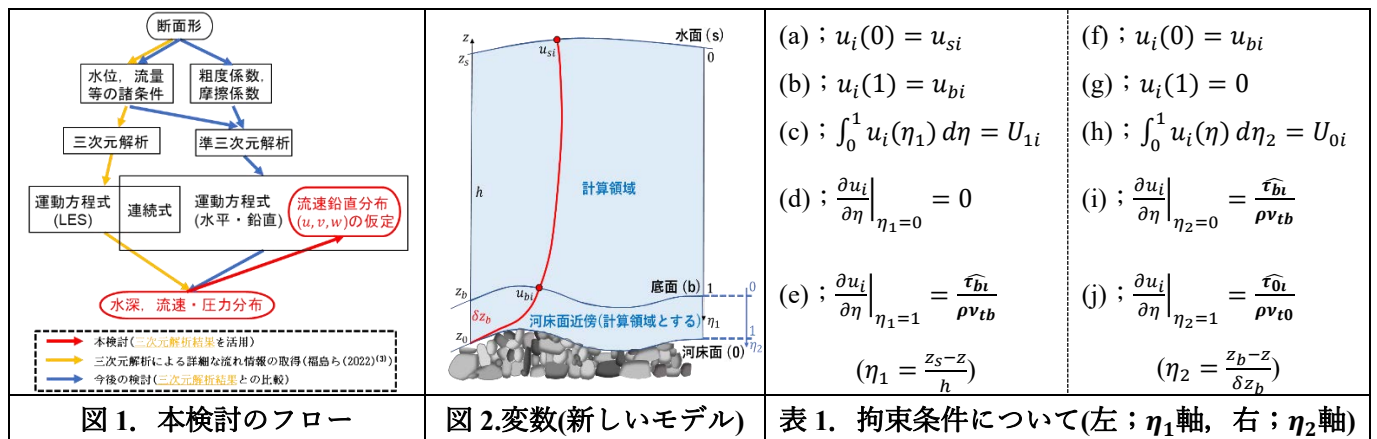
竹村・福岡(2017)⁽¹⁾によって開発された Q3D-FEBS 法は、3 次関数で流速鉛直分布を仮定し、平面二次元解析の枠組みで水面・底面・水深平均の運動方程式を用いて実河川の流速場・応力場を解き、三次元的な洪水流と土砂移動現象を適切に説明している。今後、Q3D-FEBS 法は、巨岩・巨石等からなる複雑な急流河川に解析範囲を広げていくために、流速・応力分布について改善し、解析精度を高めることが求められる。

2. 従来の非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)の課題と本検討での改良点について

従来の非静水圧準三次元解析法においては、水平方向の流速鉛直分布に関して、4 つの拘束条件(表 1; (a)~(d))を考慮した 3 次関数形で仮定がされている。この際に底面流速は運動方程式から考慮されるが、底面近傍の力学現象を表す底面流速勾配を考慮しておらず、河床の形状や巨石・巨岩等の影響により底面付近の逆流や流速が逆勾配を生じる水理現象を説明できない。従来はこの底面の位置に関して、「水深の 3%分の高さ河床から離れた位置」と定義されており、底面より下の領域に関しては、流速鉛直分布等の評価を行わない非計算領域としている。しかし、河床面近傍は複雑な地形をしており、魚類等水生生物の生息、繁殖地となり、水理的、河川環境的に重要な領域であり、正しい解析ができることが望ましいことから、本研究では底面を挟んで 2 層の流れ場を考える。

また、圧力分布に関しては、計算の安定化のために直線近似を行った鉛直方向流速分布と運動方程式(鉛直方向)より一体的に求められる。しかし、準三次元解析法の適用される流況は特に河床面近傍において複雑であり、直線近似が適切かを検討する必要がある。

以下にこれら 2 つの課題の改善について検討を行う。まず、流速分布に関して底面流速勾配に関する拘束条件(表 1; (e))を新たに考慮した 4 次関数形で近似する。また、これまで非計算領域として扱ってきた河床面近傍の流速分布に関して、底面・河床面における流速勾配に関する項を含めた 5 つの拘束条件(表 1; (f)~(j))について考慮した 4 次関数近似式を設定する。底面の位置に関しては、底面の物理的な拘束条件が 4 次関数近似式に及ぼす計算の不安定化を考慮して、レイノルズ応力分布($-\overline{u'w'}$)の極大位置を基準に底面の設定を行った。この際に 2 層モデルの物理的な境界として大本ら(2002)⁽²⁾の検討を参考とした。さらに、圧力分布に関しては、直線近似を行わず、仮定式を直接考慮した検討を行う。本検討のフローは、以下の図 1 の通りであり、参照されたい。



U_{1i} ; 水深高さ平均流速, U_{0i} ; 底面高さ平均流速, ρ ; 密度, ν_t ; 渦動粘性係数, $\hat{\tau}_t$; せん断応力

キーワード Q3D-FEBS, 流速鉛直分布, 非静水圧分布, レイノルズ応力極大

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

3. 検討対象の複雑な開水路粗面乱流場について

流速・圧力分布の検討のために、福島ら(2022)⁽³⁾による LES を用いた高精度な開水路粗面乱流の三次元数値解析結果を用いる。実験では図3の幅0.02(m)、長さ1.5(m)、円柱の半径が0.004(m)の半円柱を粗度要素とする勾配1/20の水路に定常流(0.171(l/s))を流している ($b/h=1.41, h/r=3.55$)。このような円柱粗度と側壁抵抗により、プラントルの第二種二次流, velocity-dip 現象を示す癖の強い流速分布が現れる。宅和ら(2022)⁽⁴⁾は、こうした複雑な流況を一つの関数形で流速鉛直分布を説明する次数は、おおむね8~9次程度必要であることを最小二乗法で示している。以下では、流れ場を特性の異なる2層で表現することによって、より低い次数で解析できることを示す。

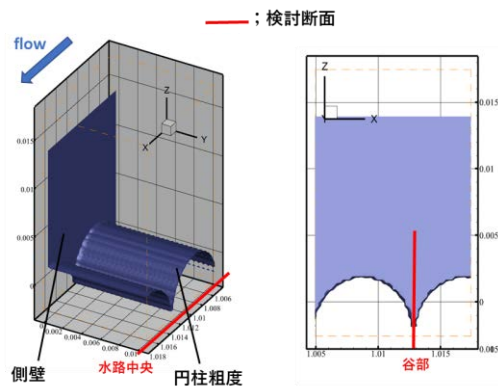


図3.数値移動床水路の外観

4. 2層解析モデルと従来法との比較検討について

流速鉛直分布に関して、本検討で提案した2層モデルとQ3D-FEBSに用いた従来の分布を比較した結果を示す。圧力分布は、それぞれ3次関数・2層モデル(4次関数カップリング)近似式を連続式と一体的に鉛直方向流速について求めたもの(それぞれ①,②とする)と、従来の直線近似式を代入したもの(③とする)をそれぞれ比較した。本検討では、底面の位置について、レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置を基準に、粗度高さとの関係から便宜的に設定した。ここでは水路中央断面における粗度谷部(図3参照)における検討結果について考察する。

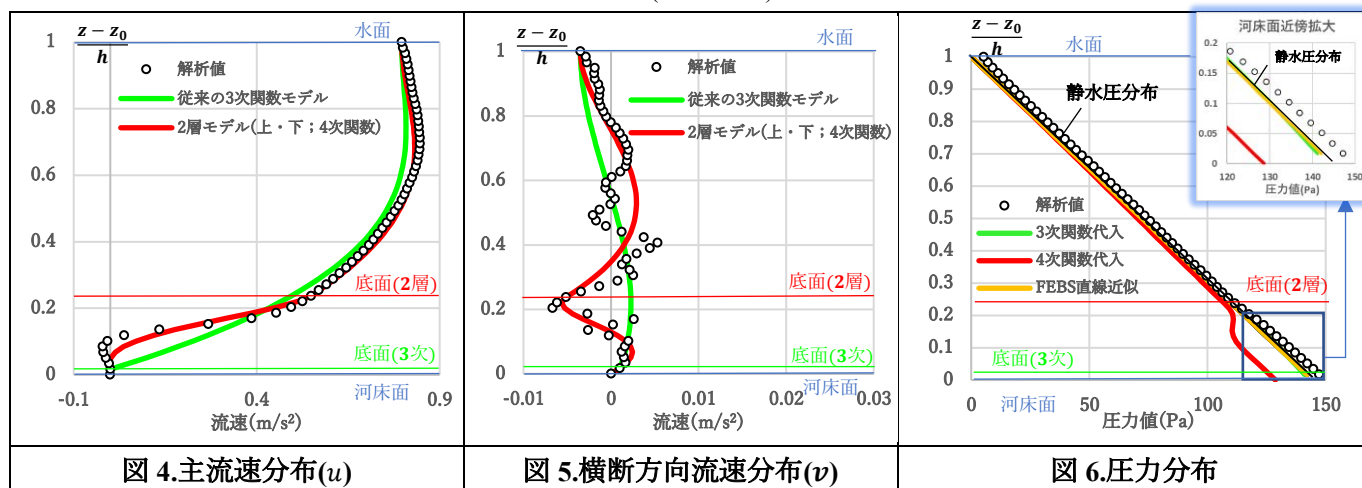


図4.主流速分布(u)

図5.横断方向流速分布(v)

図6.圧力分布

流速鉛直分布(図4,5)に関しては、新しい2層モデルはよく説明できており、特に粗度谷部の逆流域の複雑な流速分布の評価が可能となり、こうした高精度が必要な流速鉛直分布をもつ流況について、底面・河床面それぞれの物理的な拘束条件を考慮した2層モデルが適していると考えられる。また、圧力分布(図6)に関しては、複雑な流れにあってもほぼ線形分布となり、従来のQ3D-FEBS近似式(③)によりおおむね傾向をとらえられる。しかし、③はほぼ静水圧分布と一致しており、非静水圧分を正確に評価するには、より厳密に3次関数代入式(①)、4次関数代入式(②)を適用するべきである。ただ本研究では、①、②ともに非静水圧成分を正確に評価できず、特に②は谷部において厳密な河床勾配の影響を受けることで、値が大きすぎていた。今後は、こうした課題の解決とともに、Q3D-FEBS法の枠組みにおける解析を行い(図1参照)、モデルの適用範囲を広げていく。

参考文献

1)竹村ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.75, No1, pp.61-80, 2019. 2)大本ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.46, pp.517-522, 2002. 3)福島ら, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, pp.617-622, 2022. 4)宅和ら, 日本流体力学会年会 2022, 講演番号 057(2022/9/29 13:50), pp.1-5, 2022.