

複雑な開水路粗面乱流場における 流速・圧力分布

宅和 佑悟¹・福島 千乃²・福岡 捷二³

¹学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: a19.ty6h@g.chuo-u.ac.jp(Corresponding Author)

²学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 (同上)

E-mail: a18.esbm@g.chuo-u.ac.jp

³フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構 (同上)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

山地河川は急流河道に巨岩・巨石等の激しい混合を伴う三次元的な流れ場である。逆流域を伴うこうした複雑な流れ場では非静水圧準三次元解析法 (Q3D-FEBS) が用いられるが、流速・圧力分布の与え方に課題が残されていた。そこで、河床近傍の複雑な流れ場をより適切に説明するために粗度の影響の大きい下層とそれより上の層に分け、流速・圧力分布形の検討を行った。具体的に、2層4次関数流速分布式と流れの境界条件の与え方を検討し、流速・圧力分布の提案を行う。粗度周りの三次元解析データより粗度の大きい流れの流速分布の変曲点がレイノルズ応力分布の極大位置と概ね一致することから、この位置を2層の境界面と設定した。解析結果は逆流域や複雑な二次流場のある複雑な開水路粗面乱流場に対し適合性の高い分布形を与えることを示した。

Key Words: Q3D-FEBS, vertical velocity distribution, non-hydrostatic pressure, three-dimensionality of flow

1. 序論

近年の豪雨災害の激甚化・頻発化を受け、山地から河口まで一体的な洪水流・河床変動解析法を構築し、河川計画へ適用する必要がある¹⁾。特に、巨岩・巨石等の多い山地部では流れの三次元性の強い流れ場となる。このため、山地河川の洪水流解析は複雑な自然現象の説明力の高い非静水圧準三次元解析法 (Q3D-FEBS)²⁾の適用が望ましい。Q3D-FEBSは、流速鉛直分布として3次関数式と平均流の運動方程式に加え、境界面 (水面・底面)の運動方程式を用いて、平面二次元解析法の枠組みで、3次元的な流速・圧力場を解くことのできる高精度な準三次元解析法である。これまでにQ3D-FEBSでは、扇状地河川の侵食メカニズムの解明 (竹村ら³⁾)、浮遊砂挙動の解明 (長谷部ら⁴⁾)等に活用され、特に3次元性の強い洪水流と土砂移動の工学的検討に利用されている。

こうした背景から大野ら⁵⁾は、三次元的な洪水流・土砂移動現象を説明可能なQ3D-FEBSを山地河川に適用し、巨石等の存在による水面変動ならびに流速・圧力場の説

明を行っている。また、解析により得られた流速・圧力分布等を用い個別要素法 (DEM)により、洪水時の巨石の初期移動の検討を行った。しかし、流れ場の解析精度が高くないため十分な説明はできなかった。このことから、複雑な巨岩・巨石周りの流れ場ではQ3D-FEBSにおける流速・圧力分布の精度を高めた評価法の構築が求められている。以上のことから従来の3次関数式では流れの剥離が生じ、逆流が発生するような河床の凹凸の激しい流れ場へのQ3D-FEBSの適用性に問題が残されている。

宅和ら⁶⁾は福島ら⁷⁾によるアスペクト比の小さく側壁や大きな粗度による二次流や逆流の影響の強い場での三次元数値実験データを用いて流速鉛直分布式についての検討を行った。結果、8次程度の次数が必要であることを示した。巨石等のある場では逆流域も含む流れを説明するために、特に河床近傍の流れ場の評価が重要であることから、河床近傍とそれより上の領域の2層に分け、上層、下層をそれぞれ4次関数近似し、これに対する境界条件を適切に設定する必要がある。

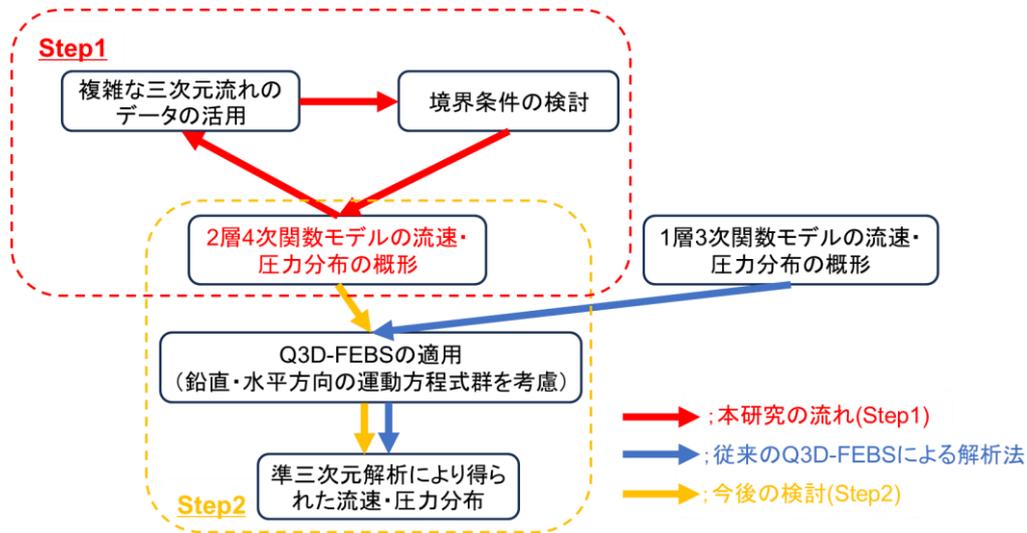


図-1 本研究のフローチャート

図-1 に研究のフローチャートを示す。本研究が対象とする Step1 では、従来の Q3D-FEBS で逆流等の発生する場に不適合であった 3 次関数式を 2 層の 4 次関数式に改めることを目的とする。このとき、複雑な三次元流れデータ⁷⁾を用いて、2 層 4 次関数の流速分布、圧力分布の概形を提案する。Step2 ではこの概形に対し、Q3D-FEBS の水平・鉛直方向運動方程式を用いて、2 層 4 次関数形を決定し、種々の流れ場について適用可能な解析方法を提示する。

2. 2 層 4 次関数モデル

竹村ら²⁾は、非静水圧準三次元解析法 (Q3D-FEBS) のもと、流速鉛直分布を 3 次関数式(1)で表現 (表-1: 1~4 を考慮) し、平均流の運動方程式に加えて、境界面 (底面・水面) の運動方程式を解き、流速・圧力の三次元分布を得ている。

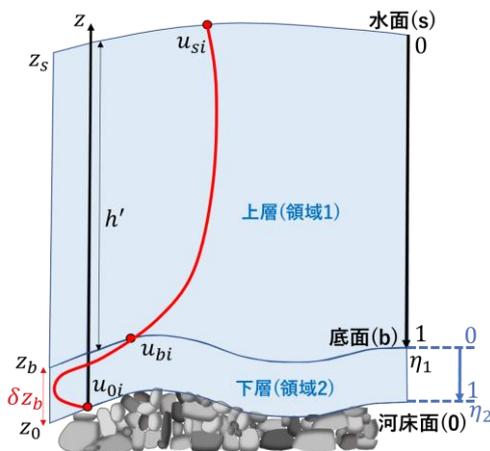


図-2 2 層 4 次関数モデルの概念図

$$u_i(\eta_1) = U_{1i} + \Delta u_{1i}(12\eta_1^3 - 12\eta_1^2 + 1) - \delta u_{1i}(4\eta_1^3 - 3\eta_1^2) \quad (1)$$

$i = 1, 2(x, y$ 方向), U_{1i} : 水深平均流速, $\Delta u_{1i} = u_{si} - U_{1i}$, $\delta u_{1i} = u_{si} - u_{bi}$, $\eta_1 = (z_s - z)/h$ とする。Q3D-FEBS は河床面の形状を取り込むことができる特徴を有するが、底面位置 (添え字: b) は河床面から水面までの高さに応じて 3% 分河床から離れた位置にとり、底面より下の流れ場は、解析の対象にしていない。

Q3D-FEBS は極端な河床凹凸のある流れを除く、三次元的な流れが主な研究対象であり、これについては良好な結果を得ている³⁾が、河床形状の複雑な巨岩・巨石周辺は剥離流れとなるため、河床近くの層を丁寧に解く必要がある。河床から水面まで一つとした従来の Q3D-FEBS ではなく河床近くの層と水面までの層の 2 層に分割し、上層と下層の領域をそれぞれ 4 次関数の流速分布を与え、流れの評価を行う (上層: 式(2), 下層: 式(3))。式(2),(3)においては $u_{si}, u_{bi}, U_{1i}, U_{2i}$ が未知量である。

表-1 流速鉛直分布を決定するための条件について

領域1 ($\eta_1 = \frac{z_s - z}{h'}$)	番号	領域2 ($\eta_2 = \frac{z_b - z}{\delta z_b}$)	番号
$u_{1i}(0) = u_{si}$	1	$u_{2i}(0) = u_{bi}$	6
$u_{1i}(1) = u_{bi}$	2	$u_{2i}(1) = 0$	7
$\int_0^1 u_i(\eta_1) d\eta = U_{1i}$	3	$\int_0^1 u_i(\eta_2) d\eta_2 = U_{2i}$	8
$\frac{\partial u_i}{\partial \eta} \Big _{\eta_1=0} = 0$	4	$\frac{\partial u_i(\eta_2)}{\partial z} \Big _{z=z_b} = \frac{\partial u_i(\eta_1)}{\partial z} \Big _{z=z_b}$	9
$\frac{\partial^2 u_i}{\partial \eta_1^2} \Big _{\eta_1=1} = 0$	5	$\frac{\partial^2 u_i}{\partial \eta_2^2} \Big _{\eta_2=0} = 0$	10

(未知数について)
 U_{1i} : 上層厚平均流速, U_{2i} : 下層厚平均流速,
 ρ : 密度, h' : 上層厚さ, δz_b : 下層厚さ

$$u_i(\eta_1) = U_{1i} + \Delta u_{1i} \left(-\frac{40}{3}\eta_1^4 + \frac{100}{3}\eta_1^3 - 20\eta_1^2 + 1 \right) + \delta u_{1i}(5\eta_1^4 - 12\eta_1^3 + 6\eta_1^2) \quad (2)$$

$i = 1, 2(x, y$ 方向), U_{1i} : 上層高さ平均流速, $\Delta u_{1i} = u_{si} - U_{1i}$, $\delta u_{1i} = u_{si} - u_{bi}$, $\eta_1 = (z_s - z)/h'$ とする.

$$u_i(\eta_2) = U_{2i} + u_{bi}(-5\eta_2^4 + 4\eta_2^3) + \Delta u_{2i}(20\eta_2^4 - 20\eta_2^3 + 1) + \frac{\delta z_b}{h'} \left(\frac{20}{3}\Delta u_{1i} - 4\delta u_{1i} \right) (5\eta_2^4 - 6\eta_2^3 + \eta_2) \quad (3)$$

$i = 1, 2(x, y$ 方向), U_{2i} : 下層高さ平均流速, $\Delta u_{2i} = u_{bi} - U_{2i}$, $\eta_2 = (z_b - z)/\delta z_b$ とする.

各層における流速鉛直分布式(2), (3)については, 表-1に示すように, それぞれ5つの境界条件を考慮し2層4次関数形の概形を導いている. 従来の3次関数形に対して, 上層, 下層それぞれ流速鉛直分布の2階偏導関数がゼロとなる条件(条件5, 10)を追加したこと, 流速の1階偏導関数の接続条件(条件3)を下層の境界条件としたことに本解析法の特徴がある. また, Q3D-FEBSは, 河床面の形状を境界適合座標系として取り込むことができる(条件7).

2層4次関数モデルにおいては, 2層の境界面位置は流速鉛直分布の変曲点位置に設定する. 変曲点位置は, 流速の1階偏導関数を微分したものがゼロとなる位置と対応する(式(4)). これより, 渦度分布(式(5))やレイノルズ応力分布(式(6))の極大位置と境界面位置が理論的には対応することになる. また, レイノルズ応力分布が境界面で極大値をとるためには以下の式を満足する. すなわち境界面位置が流速分布の極大位置のみならず, v_t の極大位置とも対応している必要がある. 下層厚さ δz_b (式(7))の設定に関しては, 式(7)によりパラメータ C_{z_b} のもと, 水深比で設定を行う.

$$\left. \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} \right|_{z=z_b} = \left(\left. \frac{\partial u_i}{\partial z} \right|_{z=z_b} \right)' = 0 \quad (4)$$

$$\omega_y = \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{xz} = \rho v_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$\delta z_b = C_{z_b} h \quad (7)$$

ω_z : 渦度の鉛直方向成分, τ_{xz} : レイノルズ応力
 $-\overline{u'w'}$, ρ : 密度, v_t : 渦動粘性係数とする.

また, 鉛直方向流速 w に関しては, 水平方向流速式(2),(3)がそれぞれの連続条件を満たすように5次関数形で

計算を行う(上層:式(8), 下層:式(9)). 式(8)の右辺最終項 $w_{(\eta_2=0)}$ は, 式(9)の $\eta_2 = 0$ を代入することによって求まる.

$$w(\eta_1) = \frac{\partial}{\partial x_i} h' [(\eta_1 - 1)U_{1i} + \left(-\frac{8}{3}\eta_1^5 + \frac{25}{3}\eta_1^4 - \frac{20}{3}\eta_1^3 + \eta_1 \right) \Delta u_{1i} + (\eta_1^5 - 3\eta_1^4 + 2\eta_1^3) \delta u_{1i}] + w_{(\eta_2=0)} \quad (8)$$

$$w(\eta_2) = \frac{\partial}{\partial x_i} \delta z_b [(\eta_2 - 1)U_{2i} + (4\eta_2^5 - 5\eta_2^4 + \eta_2) \Delta u_{2i} + (-\eta_2^5 + \eta_2^4) u_{bi} + \frac{\delta z_b}{h'} \left(\frac{20}{3}\Delta u_{1i} - 4\delta u_{1i} \right) \left(\eta_2^5 - \frac{3}{2}\eta_2^4 + \frac{1}{2}\eta_2^2 \right)] \quad (9)$$

圧力分布に関しては, Q3D-FEBSの流速分布(u, v, w)を鉛直方向の運動方程式に代入することにより, 非静水圧成分の評価を行う. Q3D-FEBSでは, 計算の安定化のために平均流の水平方向流速 U_i と線形近似した鉛直方向流速に式(1)と連続条件を満たすように求めた水深平均鉛直方向流速 W (式(10))を用いている. この考え方を2層モデルの上層の評価式の考え方に適用する. このとき, 上層の W は式(3)を連続条件を満たすように求めた水深平均鉛直方向流速とする. 一方で, 下層は粗度要素を乗り越えるときに, 特に河床近傍で鉛直方向流速が大きく発生するために, 上層で用いた線形近似が成立しないと考えており, 2層モデルの鉛直方向流速分布式(9)を直接使用する. また, u_i に関しても, 式(3)を用いることで, より厳密な評価を行う狙いがある. これにより上層, 下層の非静水圧成分評価式をそれぞれ式(11), 式(12)と書ける.

$$w = W + \frac{\delta w}{2} (1 - 2\eta_1) \quad (10)$$

$$\frac{p'}{\rho} = h' U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(W \eta_1 + \frac{\delta w}{2} (\eta_1 - \eta_1^2) \right) \quad (11)$$

$$- \frac{\tau_{iz}}{\rho} \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \eta_1 \frac{\partial h'}{\partial x_i} \right) + \frac{\tau_{zz}}{\rho}$$

$$\frac{p'}{\rho} = \delta z_b \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\int_0^{\eta_2} u_i(\eta_2) w(\eta_2) d\eta_2 \right) \quad (12)$$

$$- \frac{\tau_{iz}}{\rho} \left(\frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \eta_2 \frac{\partial \delta z_b}{\partial x_i} \right) + \frac{\tau_{zz}}{\rho}$$

ここで, $i = 1, 2(x, y$ 方向), $\delta w = w_s - w_b$, τ_{zz} : レイノルズ応力とする.

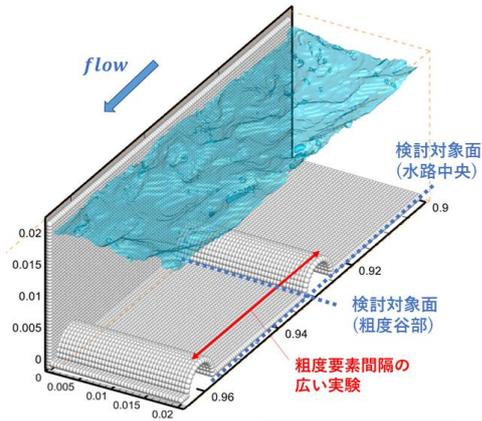


図-3 三次元数値実験水路 (福島ら⁸⁾) (Case1)

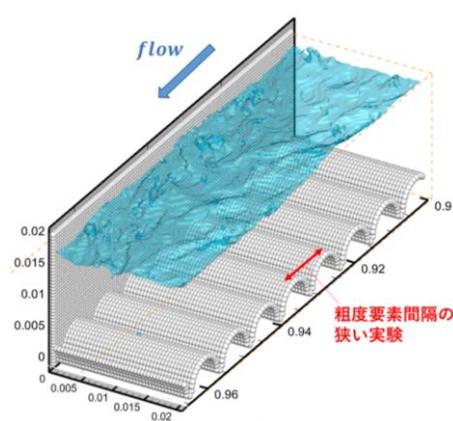


図-4 三次元数値実験水路 (福島ら⁷⁾) (Case2)

3. 三次元数値解析データを用いた境界面位置の検討

(1) 検討対象の流れ場の設定

検討対象とした流れは、幅の狭く、側壁抵抗の強い水路に半円柱からなる粗度要素を等間隔にならべた開水路数値実験である (それぞれ Case1⁸⁾ (図-3), Case2⁷⁾ (図-4) とする). 幅 0.02(m), 長さ 1.5(m), 勾配が 1/20, 半径が 0.004(m)の半円柱粗度を Case1 は 0.024(m)間隔, Case2 は 0.0002(m)間隔で配置した開水路に, 一定流量 (0.171(l/s)) を流し, LES を用いた三次元数値解析を行っている. 図-5, 6 に Case1 の粗度谷部における主流速, 横断方向流速, 鉛直方向流速コンター図を示しているが, velocity-dip 現象や第二種二次流が顕著に発生していることがわかる.

(2) 各種水理量の鉛直分布

まず, 式(7)の下層厚さ δz_b 設定の根拠とする流速分布の変曲点位置と解析データから得られる渦度, レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の鉛直分布の対応関係を確認する. 図-7, 8 には Case1 の水路中央粗度谷部における各水理量鉛直分

布を示す. 渦度分布ならびに, レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置は, おおむね水深の 20%程度の位置で生じている. なお, 渦動粘性係数に関しては, 三次元数値解析結果から, エネルギー散逸率と乱れエネルギーから二方程式モデルを用いて分布を計算し, 境界面位置と極大・極小位置が一致することを確認した. ただし, 粗度頂部等の順流では, レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置は変曲点位置と概ね一致するものの, 渦度の極大位置は河床の極近傍にあり, 変曲点位置と一致しないが, 本検討では概形決定のためレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置を境界面の基準として設定する.

(3) 境界面位置 δz_b の設定

実河川では, 自然の営力により生み出された粒径の異なる多様な石礫が, 複雑な河床を構成する. 山地部では, 特に巨礫や巨石等の存在により流れ場は大きく変化する. そのため, レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置は河床の凹凸に応じて, 異なることから, 式(7)の境界面位置 δz_b の設定の際に, 粗度配置に応じた C_{z_b} を検討する必要がある. Case1,2 の実験は二次元粗度の配置間隔が異なる流

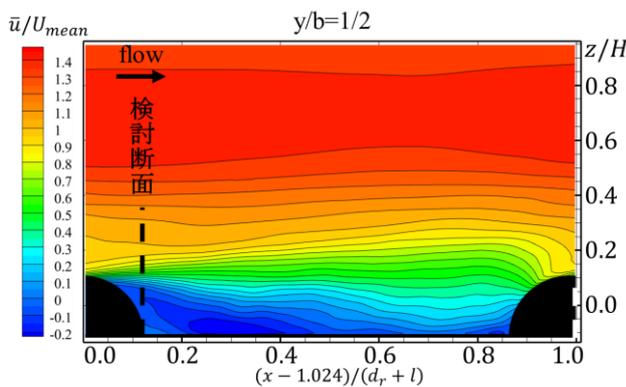


図-5 主流速の縦断面コンター図 (Case1 : 水路中央)

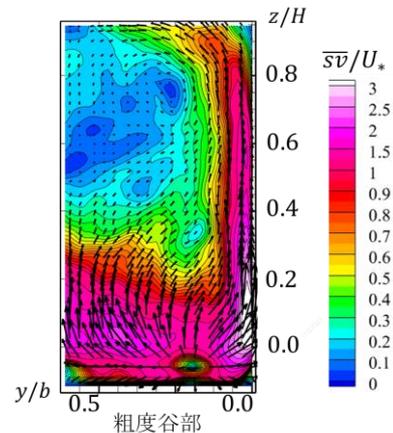


図-6 二次流速の横断面コンター図 (Case1 : 粗度谷部)

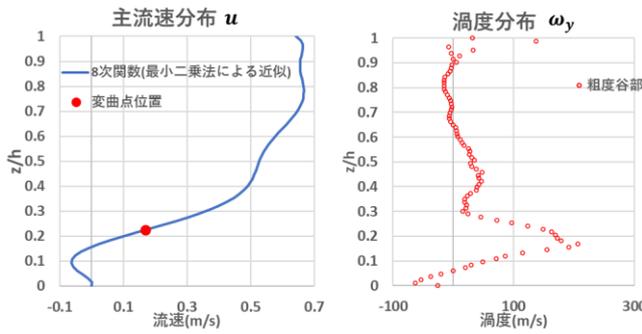


図-7 主流速鉛直分布の変曲点 (Case1:水路中央粗度谷部)

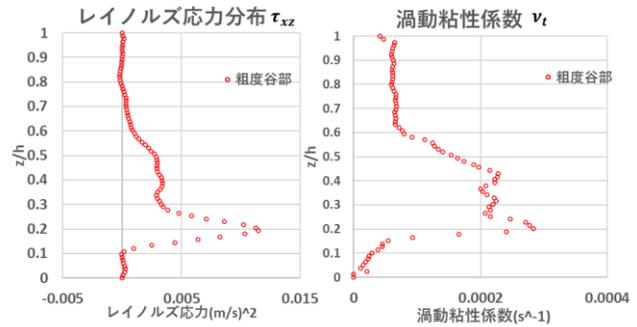


図-8 渦度, レイノルズ応力, 渦動粘性係数分布 (Case1:水路中央粗度谷部)

れの三次元解析データが得られている。以下では特に粗度要素間隔に応じたレイノルズ応力の極大位置の変化に着目して C_{z_b} の検討を行う。

図-9は, Case1,2 それぞれ縦断距離ごとにレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の極大位置に対する水深の比でプロットしたものである。縦軸に極大の発生位置, 横軸に粗度谷部を原点とする縦断距離(x)を粗度要素間隔(L)と半円柱粗度の直径(D)の和 $L+D$ で無次元化し示した。グラフより, 粗度要素の抵抗を強くうけるCase1で流れが粗度要素を乗り越えた後流域において, 極大位置が高めに出る傾向にある。また, レイノルズ応力分布の極大位置は流れが粗度にぶつかることにより, 主流速の逆流や鉛直方向に強い上昇流が生じ, 乱れの影響が強く表れることで, 粗度谷部等で抵抗が大きく極大位置が高くなる。Step1では, 2層4次関数モデルの概形の評価であることから, 当座は $C_{z_b} = 0.2$ と設定し, 以下の検討を行う。今後のStep2ではQ3D-FEBSを用い, 実河川の洪水解析を行い, C_{z_b} の値の検討を行うことになる。

4. 複雑な開水路粗面乱流場における2層4次関数モデルの適用

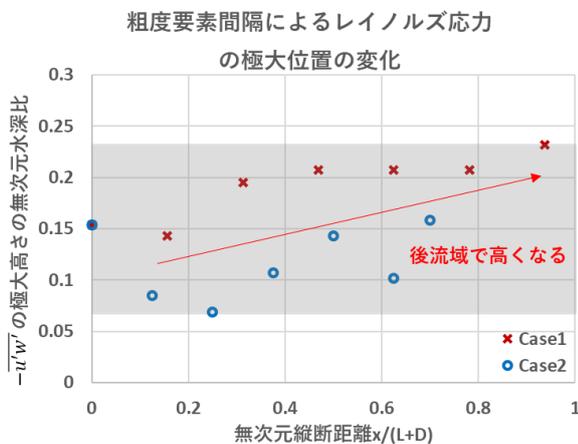


図-9 極大位置に関する検討結果 (Case1,Case2)

2層4次関数モデルの適合性を福島ら⁸⁾による開水路粗面乱流場の三次元数値解析結果を用いて検討する。なお, 本検討ではCase1の水路中央断面と側壁近傍の逆流域の発生する粗度谷部付近(半円柱粗度と平板の境界(後流域側))における検討結果を示す。ここでは, 2層4次関数流速分布形を決定するための境界条件に関して, 三次元解析結果を直接与えている。実験が定常流で行われたことから, 圧力分布の検討は, 非定常項と水面の変動を考慮していない。境界面の位置に関しては前章の検討を参考に, パラメータ $C_{z_b} = 0.2$ と設定し, 以下の検討を行う。

(1) 流速分布の適用結果

2層4次関数モデルを適用した流速分布, 圧力分布をそれぞれ図-10, 11, 12に示す。主流速に関しては従来のQ3D-FEBSで用いられる3次関数近似式と比較して式(2),(3)は逆流域の評価を可能としている。しかし, 側壁近傍粗度谷部で2層モデルでは逆流が生じているが, 実際の流れは順流であった。この段階では, 運動方程式を直接介しておらず, このため分布にはずれが見られる。今後Step2で2層4次の関数形を用いてQ3D-FEBSを用いた解析を行うことによって, 分布形のずれが補正されることになる。また, 数値実験データから横断方向流速は, プラントルの第二種二次流を伴う分布形となっている。本解析結果は従来の3次関数式と比較して, 河床近傍の複雑な流速分布の評価精度が向上している。これら (u, v) と連続条件を満たすように計算される鉛直方向流速 w は, 粗度谷部(水路中央)の河床近傍の強い上昇成分ならびに粗度谷部(側壁近傍)の強い流速成分を評価できている。

(2) 圧力分布の適用結果

圧力分布に関しても, Q3D-FEBSで用いられている1層モデルと本研究の2層モデルとの比較を行っている。結果, 両モデル式は, どちらも負の非静水圧分布の傾向

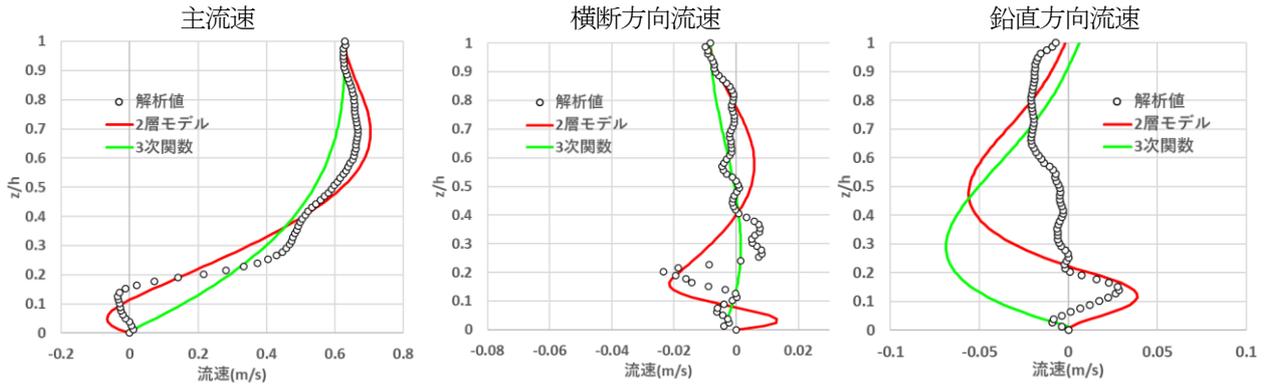


図-10 Case1 水路中央粗度谷部における流速分布の検討結果

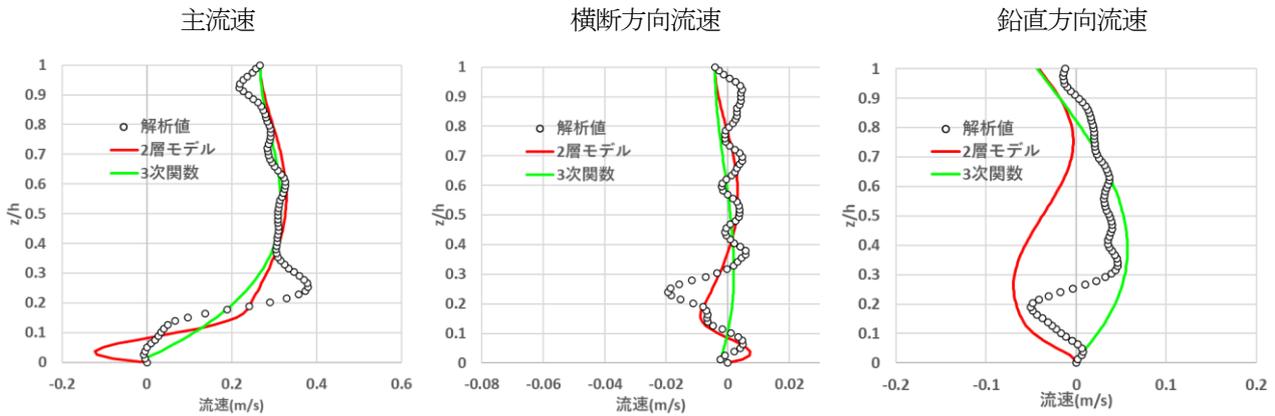


図-11 Case1 側壁近傍粗度谷部における流速分布の検討結果

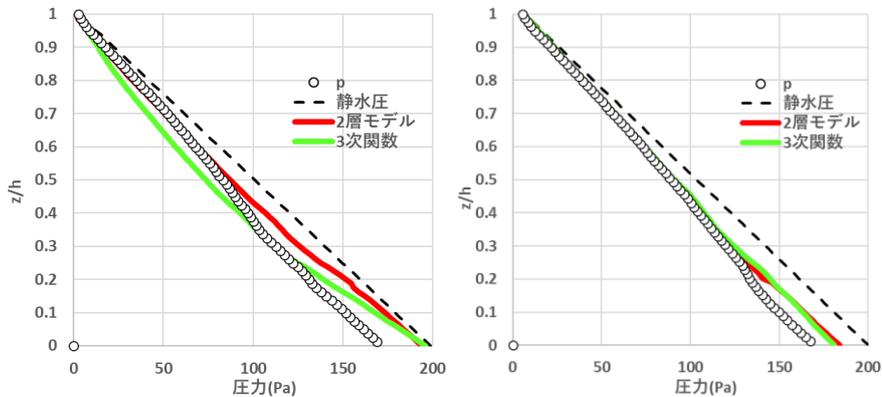


図-12 圧力分布に関する検討結果 (左 ; Case1 水路中央粗度谷部, 右 ; Case1 側壁近傍粗度谷部)

をとらえている。流速分布とともに2層モデルは、圧力分布について評価精度が向上しているが、下層において不十分さが見られる。この問題を改善するためには、流速分布同様 Q3D-FEBS の枠組みにおいて式(11), 式(12)を準三次元運動方程式に導入し計算を行うことによって圧力分布形が改善されることになる。

5. 結論と今後の課題

本研究は、非静水圧準三次元解析法 (Q3D-FEBS) における流速分布に着目し、巨石等のある河床近傍の複雑

な流況をとらえることを目的に2層4次関数モデルを提案した。新しいモデルは計算領域を2層に分割、境界を流速鉛直分布の変曲点と設定し、この点がレイノルズ応力の極大位置と対応するとして、三次元解析による詳細なデータに基づいた設定を行った。このモデルを複雑な開水路粗面乱流場に適用したところ、逆流域や複雑な分布を評価可能であることを示した。

本論文では、詳細な三次元数値解析データを用い、2層4次関数モデルの概形と境界条件の提案を行った。今後は、図-1のフローチャートにおける Step2 に示すよう

に、本研究 (Step1) で得られた 2 層 4 次関数分布式を Q3D-FEBS の運動方程式群に導入し、種々の流れに適した 2 層 4 次関数解析モデルの適合性を検討する。

REFERENCES

- 1) 福岡捷二：洪水水面形観測情報の広域的・総合的活用による流域治水の考え方の構築に向けて、河川技術論文集, 第23巻, pp.251-256, 2017. [Fukuoka, S.: Creating an idea of integrated river plan due to the use of widespread water surface profiles in river basins, *advances in river engineering*, Vol.23, pp.251-256, 2017.]
- 2) 竹村吉晴, 福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)状の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集 B1(水工学), 75 巻, 1 号, pp.61-80, 2019. [Takemura, Y. and Fukuoka, S.: Analysis of the flow in undular and hydraulic jump stilling basins using non-hydrostatic quasi-three dimensional model considering flow equations on boundary surfaces, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.75, Issue 1, pp.61-80, 2019.]
- 3) 竹村吉晴, 福岡捷二：扇状地河川の河岸侵食プロセスの解析法と常願寺川現地実験への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), 77 巻, 2 号, I_799-I_804, 2021. [Takemura, Y., Fukuoka, S.: Analysis of riverbank erosion processes in alluvial fans: application to the field experiment in the Joganji river, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.77, Issue 2, pp.799-804, 2021.]
- 4) 長谷部夏希, 後藤岳久, 福岡捷二, 榊井正将：掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和 56 年 8 月石狩川洪水への適用, 土木学会論文集 B1(水工学), 78 巻, 2 号, I_967-I_972, 2022. [Hasebe, N., Goto, T., Fukuoka, S. and Masui, M.: Development of quasi-three-dimensional flood flow and riverbed variation analysis method that can calculate bed load and suspended load integrally, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.78, Issue 2, pp.967-972, 2022.]
- 5) 大野純暉, 山下篤志, 竹村吉晴, 福岡捷二：山地河川における洪水観測水面形と詳細地形測量結果に基づく非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)を用いた巨石群の移動解析, 土木学会論文集 B1(水工学), 77 巻, 2 号, I_631-I_636, 2021. [Ohno, J., Yamashita, A., Takemura, Y. and Fukuoka, S.: Consideration of movement of boulders using quasi-three-dimensional analysis based on flood water surface profiles and detailed riverbed observation data, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.77, Issue 2, pp.631-636, 2021.]
- 6) 宅和佑悟, 福岡捷二：複雑な開水路粗面乱流における流速鉛直分布の考察, 日本流体力学会 2022. [Takuwa, Y. and Fukuoka, S.: Study on vertical velocity distributions of complex three dimensional flow in an open-channel with rough bed, *meeting of Japan society of Fluid Mechanics2022*, 2022.]
- 7) 福島千乃, 高嶽裕也, 福岡捷二：プラントルの第二種二次流を有する開水路粗面乱流の構造と浮遊砂運動による構造変化, 土木学会論文集 B1(水工学), 78 巻, 2 号, I_607-I_612, 2022. [Fukushima, Y., Takakuwa, Y., and Fukuoka, S.: Flow structures and changes due to motions of suspended loads of turbulent flow over roughened open-channel with secondary flow of prandtl's second kind, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.78, Issue 2, pp.607-612, 2022.]
- 8) 福島千乃, 高嶽裕也, 福岡捷二：浮遊砂の有無による開水路粗面乱流の時間平均流構造の変化, 日本流体力学会年会 2022. [Fukushima, Y., Takakuwa, Y., and Fukuoka, S.: Variation of time averaged flow structures of turbulent flow over roughened open-channel with and without the suspended load, *meeting of Japan society of Fluid Mechanics2022*, 2022.]

(Received May 31, 2023)

(Accepted September 12, 2023)

VERTICAL DISTRIBUTIONS OF VELOCITY AND NON-HYDROSTATIC PRESSURE IN THE THREE DIMENSIONAL OPEN-CHANNEL FLOW WITH ROUGH BED

Yugo TAKUWA, Yukino FUKUSHIMA and Shoji FUKUOKA

In mountain rivers, we often see three-dimensional vortex motion caused by large rocks and boulders. To solve these flow, a non-hydrostatic quasi-three dimensional model considering flow equations on boundary surfaces is used. But, there are issues with analysis accuracy. So, we focused on its characteristic evaluation method of vertical velocity distribution by cubic function, not considering boundary condition near the riverbed. To improve this problem, we divided the computational area into two layers, and added the additional boundary conditions. The purpose of this model improvement is to solve complex flow in the vicinity of the riverbed more accurately. At the same time, we noted the inflection point and set as the boundary surface corresponding to the maximum position of the Reynolds stress distribution. We determined the outline of this new model using the three dimensional open-channel flow with rough bed. As a result, it was able to evaluate backwater regions and complex secondary flow.