

複雑な水路底面境界形状と跳躍運動する粒子群を考慮した開水路粗面乱流の数値解析

Numerical Simulations of Turbulent Flows over Rough-bed Channels

Considering Saltating Particles and Complex Bed Boundary Shapes

都市人間環境学専攻 高嶽裕也

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Yuya Takakuwa

【研究の背景と目的】

開水路粗面乱流の構造と乱流中の粒子群の運動は、流れの抵抗則や土砂移動、河川構造物の破壊、栄養塩等の物質輸送、水棲生物の生息環境等を検討する上で基礎的かつ重要な課題であり、水路のスケール(水路幅  $b$  や水深  $h$ )や粗面構造(底面粗度の凹凸  $r$  や空隙の大きさ、浸透層厚  $pl$ )、粒子の体積や形状、物性値といった粒子特性、移動粒子と底面凹凸との関係、移動粒子間の相互作用、移動粒子と流れの相互作用等に規定される。

粒子群を含まない開水路の三次元乱流に関する研究は多い。林ら(2006)は、幅の狭い矩形断面を有する開水路滑面乱流においては、横断面内の圧力とレイノルズ応力の不均衡により、水路の内側から底面コーナーに向かい底面コーナーから水路中央に進む Bottom Secondary Flow(BSF)、底面コーナーから側壁沿いを上昇する Outer Secondary Flow(OSF)、水面と側壁に囲まれた隅において OSF とは逆向きに回転する Inner Secondary Flow(ISF)の3種類の二次流セルが形成されること等を明らかにしている。しかし、幅の狭い粗面開水路流れについては、最大主流速に対する二次流速度の最大値の比  $|\overline{sv}_{max}|/\overline{u}_{max}$  が開水路滑面乱流のときと比べて大きくなること、二次流セルのスケールが大きくなること等は実験的に示されているものの(冨永(1988))、その物理的な機構については解明されていない。また、水路のアスペクト比が  $b/h > 5.0$  と水路幅が大きくなると、流れの三次元構造に及ぼす側壁の影響は小さくなり、粗度高さに基づく相対水深  $h/r$  や粗面表層の構造、浸透層の有無が重要となる。相対水深が小さくなると底面付近で対数分布則が成立しなくなること、浸透層があることにより流れの抵抗が増加すること等が示されているものの(例えば、Manes ら(2009))、特に、相対水深の小さい浸透性粗面乱流の構造については理解が不足している。

粒子群を含む乱流に関する多くの研究は、微細な粒子が浮遊する乱流を対象としており、粒径が大きいかつ跳躍運動する粒子群を伴う乱流の構造変化に関する研究は少ない。その様な中で、近年、Fukuokaら(2014)の Arbitrary Particle Multiphase method(APM 法)によって、任意形状の大粒径粒子の運動と周囲の乱流場の解析が可能となり、特に移動床からなる流路の抵抗則に関する研究が進められている。しかし、移動床実験では、乱流構造の変化が移動粒子によるものか河床変動によるものか等その要因について十分な理解は得られていない。

また、粒子運動に着目すると、粒子の運動に及ぼす形の効果に関する検討は極めて少ない。この様な中で、福岡ら(2004, 2005)、重村(2004)は、ダム貯水池の堆砂対策のための排砂水路の磨耗進展機構を調べ、さらに、形状の違いによる単一石礫の流下挙動に関する貴重な実験結果を得ている(以下、単一石礫流送実験と呼ぶ)。しかし、実験当時は、石礫に作用する流体力や石礫周りの流れ場、また石礫と水路との接触力等を計測し、これらを解析する技術力はなかったため、非球形石礫の運動機構について十分な評価はできなかった。このため、非球形粒子の流体中の運動機構の解明は今なお残された課題となっている。

本論文では、水路のスケールや複雑な底面境界形状を考慮した開水路粗面乱流の構造を解明し、それを用いて水流中を跳躍運動する大粒径粒子群の運動機構及び大粒径粒子の跳躍運動に伴う流れの構造変化の機構を明らかに

することを目的とする。そのため、第一に、複雑な水路底面凹凸と跳躍運動する大粒径粒子群を考慮した開水路粗面乱流を評価することの可能な数値解析法 (APM 法) を示す。以降、本文で言う数値解析法とは APM 法を指す。この数値解析法を Manes ら(2009)の固定床浸透性粗面乱流実験に適用し、流れ構造を高精度に評価するために必要な計算格子幅等の計算条件を明らかにする。

第二に、第一の検討で得られた計算条件のもと、アスペクト比  $b/h$  や相対水深  $h/r$  などの水路のスケールや浸透層の有無といった水路底面境界形状の異なる開水路粗面乱流に数値解析法を適用し、時間平均流と応力の三次元構造を解明し、さらに時間平均流と乱流の瞬間構造と粗面構造との関係を明らかにする。

最後に、開水路粗面乱流中の大粒径粒子の運動と流れとの相互作用の機構を検討する。まず、単一石礫流送実験映像の画像解析と、単一石礫流送実験を対象とした数値解析により、開水路粗面乱流中の石礫の運動に及ぼす形の効果を明らかにする。次に、跳躍運動する大粒径粒子群を含む固定床浸透性粗面乱流の数値解析を実施し、粒子の跳躍運動に伴う流れの構造変化及び移動粒子間の相互作用の機構を明らかにする。

## 【本論文の内容と成果】

本論文は 6 章で構成される。各章の内容と成果の概要は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、研究の背景、目的、本論文の構成を示した。

第 2 章「移動粒子群及び複雑な水路境界形状を考慮した開水路粗面乱流の数値解析法」では、第一に、複雑な水路底面境界形状を有し(第 2 章～第 5 章)、かつ水流中を水深に対して無視することのできない大きさの粒子が移動する場(第 5 章)を説明することの可能な数値解析法 (APM 法) を示した。流れの解析は、流れの瞬間構造を捉えることのできる Large Eddy Simulation (LES) である。複数の移動粒子周りに適合する計算格子を時々刻々と設定することは容易ではなく、流体計算の格子は立方体とし、固液混相の一流体モデルを導入し、サブセル法で算出した格子内の固相の体積割合を用いて、格子内の固相の質量と運動量を流れの解析に反映した。また、流体中の粒子運動は Lagrange 的に解いている。粒子に作用する流体力は、粒子よりも十分小さな計算格子を用いて得られる粒子周りの応力を積分し直接評価した。また、粒子間の衝突力は、多数の接触を同時に評価することの可能な個別要素法を用いて評価した。

APM 法の妥当性は、Fukuda ら(2019)により、一様流中に固定された球に作用する流体力(抗力係数)や大量の土砂が流動する土石流水理実験を対象として検証されている。しかし、これまで開水路粗面乱流の流れ構造を分析可能か十分に検証されていなかった。本章では、第二に、Manes ら(2009)の固定床浸透性粗面乱流の実験を対象に、計算格子幅やサブセル幅、SGS モデルの異なる条件のもと数値解析を実施し、流れ構造の解析精度に及ぼす計算条件の影響を検証した。これより、Smagorinsky モデルを用いて浸透性粗面を構成する球の直径  $d$  に対して計算格子幅とサブセル幅をそれぞれ  $d/\Delta \geq 10$ ,  $d/\Delta_{subcell} \geq 60$  とすることにより、流速分布や乱れ構造を説明し得ることを明らかにした。

第 3 章「幅の狭い粗面開水路流れの構造とこれに及ぼすアスペクト比と相対水深の効果」では、アスペクト比( $b/h = 0.36 \sim 1.43$ )と相対水深( $h/r = 3.63 \sim 12.00$ )の異なる開水路粗面乱流の数値解析を実施し、二次流を含む時間平均流と応力の三次元構造や二次流セルのスケール及び主流速分布に及ぼすアスペクト比と相対水深の効果に関する以下の結果を得た。

第一に、LES の結果を用いて、レイノルズ応力方程式の各項の大小関係を分析し、BSF や OSF を駆動するレイノルズ垂直応力の発生機構を示した。すなわち、主流速  $\bar{u}$  の底面及び壁面方向勾配により流下方向成分の速度変動  $u'$  が発生し、これがレイノルズ応力方程式の圧力-歪相関項を介して横断方向及び鉛直方向の流速変動 ( $v'$ ,  $w'$ ) に変換され、

レイノルズ垂直応力( $R_{22} = \overline{v'v'}$ ,  $R_{33} = \overline{w'w'}$ )が生成される。また、レイノルズ垂直応力 $R_{22}$ に関するレイノルズ応力方程式の圧力-歪相関項は、アスペクト比が大きく、相対水深が小さいほど、水深に対するスケール及びその強度が大きくなり、乱れの非一様性が強くなることを明らかにした。

第二に、レイノルズ方程式の各項の大小関係から、支配的な応力の構造を分析した。その結果、開水路粗面乱流においてもレイノルズ垂直応力項は、基本的には水路の内側から底面コーナーに向けて作用し、BSF や OSF の底面コーナーに向かう成分を駆動することを示した。粗面の効果は、特に圧力の縦断分布に現れ、レイノルズ方程式の重力加速度項と圧力勾配項の和が粗度要素を乗り越える流れ( $\bar{w} > 0$ )と谷部に潜り込む流れ( $\bar{w} < 0$ )を駆動すること、これら時間平均鉛直方向流速 $\bar{w}$ と横断面内の二次流とが重なり合い二次流が縦横断的に変化すること、最大主流速に対する二次流速の大きさの最大値の比 $|\overline{sv}_{max}|/\bar{u}_{max}$ が開水路滑面乱流(Nezu and Nakagawa 1993)と比べて十分大きくなることを明らかにした。また、これらの結果より、幅の狭い粗面開水路流れの時間平均流と応力の三次元構造を可視化し示した。

最後に、二次流のスケールと主流速分布に及ぼすアスペクト比と相対水深の効果を調べ、アスペクト比が大きく相対水深が小さくなるほど、乱れの非一様性が増し、また粗度要素周りの時間平均鉛直方向流速 $\bar{w}$ が大きくなり、OSF のスケールは拡大し ISF のスケールが縮小することを明らかにした。また、相対水深  $h/r$  が 5.0 以下のときに、粗度要素近傍の二次流速の大きさが径深に基づく摩擦速度の大きさと同程度になることを示した。

第 4 章「幅の広い粗面開水路流れの構造に及ぼす浸透層の効果」では、一様な大きさの球で構成される浸透性粗面(5 層)と非浸透性粗面(単層)の幅の広い直線水路上の定常流に関する数値解析を実施し、時間平均された主流及び応力の構造に及ぼす粗面表層の構造や浸透層の効果、またこれらに及ぼす流れの瞬間構造の効果について検討し、以下の結果を得た。

第一に、時空間平均した水量を用いて抵抗係数を評価した結果、浸透性粗面乱流の抵抗係数  $f$  は非浸透性粗面乱流と比べて 8%程度大きくなり、Manes ら(2009)など従来から指摘されているように、浸透性粗面乱流の抵抗は非浸透性粗面乱流の抵抗よりも大きくなることを示した。なお、本ケースでは相対水深が  $h/r \approx 7.0$  と、粗度要素が流れの抵抗に大きく寄与するため、摩擦速度で無次元化した時空間平均主流速鉛直分布の形状は両ケースで変わらなかった。

第二に、第 3 章と同様にレイノルズ方程式を用いて支配的な応力の構造を分析し、時間平均流の三次元構造と粗面構造、浸透層の関係を調べた。まず、浸透層の有無にかかわらず、基本的には、粗度要素の前面の圧力増加に伴い、レイノルズ方程式の圧力勾配項は、粗度要素を乗り越える流れ( $\bar{w} > 0$ )、間隙に潜り込む流れ( $\bar{w} < 0$ )、粗度要素を回り込む流れ $\bar{v}$ を駆動することを示した。ただし、浸透性粗面乱流の場合、粗面頂部より低い位置における二次流速の大きさ( $\overline{sv} = \sqrt{\overline{v^2} + \overline{w^2}}$ )は、最大で摩擦速度の 7 割程度、平均的には 4 割程度と非浸透性粗面乱流と比べて大きくなり、主流と浸透流との相互作用の効果が表れることを示した。

最後に、粗面頂部近傍の流速変動を分析し、浸透性粗面乱流において粗度要素周りの二次流速( $\overline{sv} = \sqrt{\overline{v^2} + \overline{w^2}}$ )が非浸透性粗面乱流と比べて大きくなる理由を調べた。浸透性粗面乱流では、非浸透性粗面乱流のときと比べて、主流から浸透流に侵入する流れは減衰しづらく、バースティング現象(本検討では、特に、摩擦速度の 2~4 倍程度の sweep)が頻発することを明らかにした。このことは、第一に浸透性粗面乱流における粗面頂部より低い位置の二次流速の大きさ( $\overline{sv} = \sqrt{\overline{v^2} + \overline{w^2}}$ )が非浸透性粗面乱流と比べて大きくなること、第二にレイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ を増加させ、その結果、浸透性粗面乱流の抵抗が大きくなることに寄与することを表す。この主流と浸透流との相互作用は、粗面頂部から粗面を構成する球の 1 粒径分高い位置( $z/d \approx 1.0$ )まで及んだ。

第5章「固定床粗面乱流中の大粒径粒子の跳躍運動とこれに伴う乱流構造の変化」では、3つの検討を実施した。

第一に、単一石礫流送実験映像を画像解析し、開水路粗面乱流中の3種類の石礫(扁平な形状の石礫、塊状で対称性の強い石礫、塊状だが非対称性の強い石礫)の運動に及ぼす形の効果を明らかにした。以下に主要な結果を示す。

- ① 扁平な形状の石礫は、「短軸を回転軸とした転動・跳躍」と「長軸や中軸を回転軸として跳躍する滑空形態」とで移動形態を変えながら流下する。
- ② 長軸周りの形状が円形に近い塊状の石礫は、基本的に「長軸を回転軸とした転動・跳躍」により移動する。ただし、形の非対称性が強い石礫は、回転軸が安定せずに水路底面と接触する際に高頻度で姿勢を変え、石礫頂部が水路底面と接触すると大きく跳躍することがある。

第二に、単一石礫流送実験に APM 法を適用し、開水路粗面乱流中の非球形石礫の運動を解析した。球と異なる形状の石礫運動の解析には、水路底面凹凸の実態を十分考慮する必要がある。本解析では、石礫よりも小さな平面スケールの水路底面凹凸を的確に解析に考慮することにより、各石礫の移動形態と移動速度を説明可能であることを示した。

第三に、第4章の固定床浸透性粗面乱流中に底面粗度を構成する球と同じ大きさの球を投入し続け、互いに接触しないで流下する粒子や集団を形成して接触しながら流下する粒子群の運動機構、跳躍運動する粒子群に伴う流れの構造変化の機構を調べた。他の粒子と接触せずに単独で流下する粒子は、跳躍時に大きな流下方向流体力を受けて加速し、降下時には低い位置の流速よりも粒子速度が大きくなるため負の流下方向流体力を受けて減速する。一方、粒子が集団を形成し接触しながら流下する場合、まず、集団の後方に位置する粒子が大きな流下方向流体力を受けて、前方の粒子を乗り越えたり、回り込んだりする。次に、追い抜かれた粒子が大きな流下方向流体力を受け、前方の粒子を追い越し、これらの運動が繰り返される。この結果、粒子集団の移動速度は小さくなる。このような粒子群の跳躍運動の結果、粒子濃度が大きくなるほど主流速は小さくなるものの、粒子の最高到達高さ( $z/d = 2.0$ )よりも高い位置においても流れの乱れ強度の全成分が大きくなるなど、微細な粒子が浮遊する流れの構造に関する知見(例えば、Muste ら(2009))との差異を示した。跳躍する粒子周りの流速場の変化を詳細に調べた結果、粒子が跳躍する際に底面付近の低速流体塊を高い位置に運び、降下する際には高い位置の高速流体塊を低い位置に輸送することを示し、粒子の跳躍運動が乱流の ejection や sweep のような働きを流れに及ぼすことを明らかにした。

第4章と第5章の結果は、幅広い粒度分布からなる土砂の運動を検討する際には、微細な粒子の運動に及ぼす主流と浸透流との相互作用や大粒径粒子の運動に伴う流れの構造変化の機構を考慮する必要があることを表している。

第6章「結論」では、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題を示した。

本論文では、開水路粗面乱流の構造と乱流中の粒子群の運動機構を明らかにするため、幅の狭い粗面開水路流れの時間平均流と応力の三次元構造とこれに及ぼすアスペクト比と相対水深の効果、幅の広い粗面開水路流れにおける主流と浸透流の相互作用の機構、水流中の粒子運動に及ぼす形の効果及び跳躍運動する粒子群と流れの相互作用の機構を明らかにした。

以下に、本論文に関する今後の課題を示す。

- ✓ 浸透層が造り出す組織的な乱れ構造が主流構造に与える効果を明らかにする。特に、底面の粗さと浸透流が生み出す乱れの構造変化を調べる。
- ✓ 粒子の跳躍運動のバラツキに及ぼす粒子体積や形状及び水路底面凹凸の効果を明らかにする。
- ✓ 粒子濃度が大きく、移動粒子間の接触が多い条件の解析を実施し、粒子間の相互作用(接触)が粒子の運動に及ぼす効果を明らかにする。