

論文内容の要旨

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 高鉢裕也

【研究の背景と目的】

開水路粗面乱流の構造と粒子群の運動は、水路のスケールや粗面構造、粒子の体積や形状、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。本論文では、数値解析法(APM 法)を用いて、異なるスケールや複雑な底面境界形状の開水路粗面乱流の構造、水流中の大粒径粒子群の跳躍運動及びそれに伴う流れの構造変化の機構を明らかにする。

【本論文の内容と成果】

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、かつ水流中を大粒径粒子が移動する場を説明するための数値解析法(APM 法)を示した。第二に、Manes らの固定床浸透性粗面乱流の実験を対象に APM 法を適用し、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 $d/\Delta \geq 10$, $d/\Delta_{\text{subcell}} \geq 60$ とすることにより、流速分布や乱れ構造を説明可能なことを示した。

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、アスペクト比と相対水深の異なる開水路粗面乱流の数値解析を実施し、以下の結果を得た。第一に、レイノルズ応力方程式の各項の大小関係より、レイノルズ垂直応力($R_{22} = \overline{v'v'}$)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、その結果、二次流のスケールが変化することを示した。第二に、レイノルズ方程式の各項の大小関係より、粗面の効果は、特に圧力の縦断分布に現れ、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と谷部に潜り込む流れを駆動すること、これら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等を明らかにした。

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と非浸透性粗面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、以下の結果を得た。第一に、浸透層の有無にかかわらず、レイノルズ方程式の重力加速度項と圧力勾配項の和は、粗度要素を乗り越える流れ、間隙に潜り込む流れ、粗度要素を回り込む流れを駆動することを示した。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度の大きさは、最大で摩擦速度の 7 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を示した。第二に、浸透性粗面乱流では、バースティング現象が頻発し、粗面頂部より低い位置の二次流速度の大きさが非浸透性粗面乱流と比べて大きくなり、またレイノルズ応力 $\overline{u'w'}$ を増大させ抵抗を増す機構を明らかにした。

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分析し、異なる形状の石礫の粗面乱流中の運動機構に及ぼす形の効果を明らかにした。第二に、これに APM 法を適用し、各石礫の移動形態と移動速度を説明し得ることを示した。第三に、大粒径粒子群を含む固定床粗面乱流の数値解析より、粒子群の最高到達高さよりも高い位置まで流れの乱れ強度が大きくなるなど、微細な粒子が浮遊する流れの構造との差異を示した。また、粒子の跳躍運動が、底面付近の低速流体塊を高い位置に、高い位置の高速流体塊を低い位置に運び、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 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。

論文審査の結果の要旨

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 高鈴裕也

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粒子群の運動は、流れの抵抗則、河川構造物の設計、物質輸送、水棲生物の生息、繁殖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(底面粗度の凹凸や空隙の大きさ、浸透層厚)、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。

本論文では、数値解析法(APM 法)を用いて、異なるスケールや複雑な底面境界形状の開水路粗面乱流の構造、水流中の大粒径粒子群の跳躍運動及びそれに伴う流れの構造変化を明らかにしている。

【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、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を説明するための数値解析法(APM 法)を示した。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ている。流れの解析はLES法、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粒子周りの応力を積分し直接評価する。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する。Manes ら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を検討した。

第一に、レイノルズ応力方程式の各項の大小関係を分析し、異なる規模の二次流を駆動するレイノルズ垂直応力の発生機構、すなわち、主流速 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 ($R_{22} = \overline{v'v'}, R_{33} = \overline{w'w'}$) が生成されること。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、開水路粗面乱流においてもレイノルズ垂直応力項は、基本的に水路の内側から底面コーナーに向けて作用し、底面コーナーに向かう流れの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度の大きさの最大値の比 $|\bar{s}\bar{v}_{max}|/\bar{u}_{max}$ が開水路滑面乱流(Nezu and Nakagawa)と比べて十分大きくなることを明らかにした。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、結果として二次流の構造変化を明らかにした。

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、時空間平均した水理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%程度大きくなることを示した。第二に、浸透層の有無にかかわらず、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($\bar{w} > 0$)、隙間に潜り込む流れ($\bar{w} < 0$)、粗度要素を回り込む流れ w' を駆動することを示した。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度の大きさ($\bar{s}\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2 + \bar{w}^2}$)は、最大で摩擦速度の7割程度、平均的には4割程度、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を示した。最後に浸透性粗面乱流では、バースティング現象の頻発により粗面頂部より低い位置の二次流速度の大きさ($\bar{s}\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2 + \bar{w}^2}$)が、非浸透性粗面乱流と比べて大きくなり、レイノルズ応力 $u'w'$ を増加させ、浸透性粗面乱流の抵抗を大きくすること。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($z/d \approx 1.0$)まで及ぶことを示した。

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、單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)の運動機構に及ぼす形の効果を明らかにした。第二に、單一石礫流送実験にAPM法を適用し、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、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、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、跳躍する粒子群に伴う流れの構造変化の機構を調べた。最初に、粒子群の接触と跳躍運動の結果、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構造との差異を示した。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。

以上、本論文は、APM法を用いて、複雑な水路底面境界形状を有する開水路乱流と跳躍運動する粒子群のある流れの実験結果とこれに対する数値解析により、多くの新しい重要な研究成果を与えていた。得られた成果は、これまで十分説明することができなかった流れと粒子の運動の相互作用が関わる多くの移動床水理学の課題に、新しい解析技術と方向性を与えるものであり、本論文の学術的、工学的価値は高く、博士(工学)に値する。