

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420505

研究課題名(和文)粗度の多重スケール性と非平衡粗面抵抗則に基づく礫床河川の流れの解析法の開発と応用

研究課題名(英文) Calculation method for open channel flows with multi-scale roughness in gravel bed rivers based on dynamic wall law

研究代表者

内田 龍彦 (Uchida, Tatsuhiko)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00379900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実用性の高い平面二次元解析法の枠組みの中で、流速の鉛直構造と圧力の非静水圧成分、河床極近傍の流れと河床せん断応力および土砂を精度よく解析するため、著者らが開発してきた非静水圧準三次元解析法(GBVC法)に河床近傍の流れの非平衡性を考慮できる非平衡粗面抵抗則(DWL)を導入した一般底面流速解析法(GBVC4-DWL法)を開発し、検証した。DWLは、流れの三次元構造を解析する主計算領域の底面境界条件において、対数分布則などに用いられたように、底面近傍の流速と摩擦速度の一定の関係をを用いることなく、河床近傍の流れを連続式運動方程式に基づいて解析し、動的に底面境界条件を定める特徴がある。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a new calculation method, GBVC4-DWL, which was developed by coupling General Bottom Velocity Computation (GBVC) method with Dynamic Wall Law to calculate three dimensional flow structures and complex bottom velocity fields in open channel flows in the frame work of two dimensional computation method. The dynamic wall law allows us to calculate bottom velocity dynamically based on continuity and momentum equations for bottom thin layers of vortex and roughness layers without assuming equilibrium flow condition, such as log law velocity distribution, for the bottom boundary condition for the computation of three dimensional flows. The method has been validated though the comparison with experimental data not only for three dimensional flow structures with multi-scale toughness, but also for bed variation analysis.

研究分野：水工水理学

キーワード：開水路流れ 準三次元解析 粗面抵抗則 多重スケール 跳水 礫床河川 非平衡流砂 二相流

1. 研究開始当初の背景

礫床河川における抵抗評価や流れの解析法の確立は治水だけでなく、河川生態系評価等の環境面でも重要である。例えば、治水と環境の調和した多自然川づくりとして、巨石を用いた河床高回復工法や護岸際の洗掘対策工法が注目されるようになってきている。一般に粗面の境界条件には対数分布則に基づく壁法則が用いられている。しかし、急流礫床河川のように、水深に比べて河床粗度が相対的に大きくなると対数分布則が適用できないことが知られている。特に、水深スケールに匹敵する巨石の抵抗は壁法則では取り扱えない問題がある。このような問題を解決するためのひとつの方法として、図-1に示すように粗度の多重スケール性(MSR)の導入が検討されている[1]。即ち、乱流解析にお

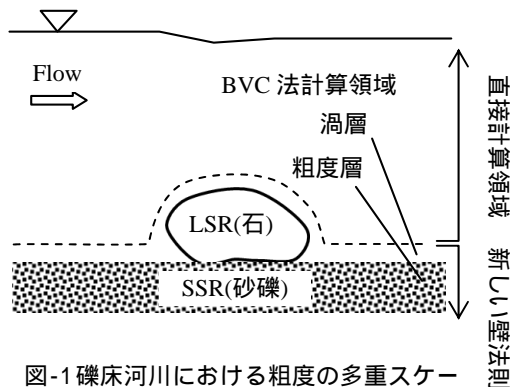


図-1 礫床河川における粗度の多重スケール性(MSR)と本申請研究の考え方

る LES と同様に、大きな粗度(LSR)の抵抗は直接評価し、小さな粗度(SSR)の抵抗は壁法則でモデル化する。しかし、LSR の存在や SSR 自身によっても河床近傍の渦層内や粗度層内の流れは乱されるため、等流状態の仮定に基づく対数分布則が成り立たず、SSR の抵抗評価法に課題が残されている。この流れの非平衡性は粗度層にも及ぶため、乱れの非平衡性のみを考慮した粗面の壁法則[2]では十分でなく、気象分野の樹木評価などに用いられていたダブルアベレーシング(DA)の考え方を導入し、渦層内や粗度層内の非平衡流れを運動方程式から求める方法が提案されている[3]。しかしこの方法も、基礎方程式の DA に伴う種々の未知係数を決定する必要があることと、従来の抵抗則との関連が明確でないため、適用性には課題を残している。最近では、石礫河床における粗面近傍の乱流特性[4]や石礫の挙動[5]を明らかにするために、石礫と流れの相互干渉を直接解析する数値シミュレータが開発されている。これらの研究は、乱流研究において乱流シミュレータが果たした役割と同様に、河床近傍の現象解明に寄与すると考えられる。一方で、礫床河川に適用するために、従来の平面二次元解析法と同様の枠組みの中で礫床河川の抵抗評価法を検討することが必要と考えられる。

申請者らは、水没する河川構造物周りの局所洗掘解析モデルを構築するために、静水圧

分布等の浅水流の仮定を用いない準三次元解析法(BVC法)を開発してきた[6-8]。BVC法は河床の凹凸などによる底面近傍の流れと圧力分布を解析できる[6-7]。このため、BVC法に MSR を導入することによって、礫床河川の流れと抵抗評価法について有力な手法を与え得ると考えられる。しかし、BVC法は水没粗度背後の剥離を考慮することはできないものの、流速分布に三次関数が仮定している等、流れの鉛直分布の解像度に限界があるため、どの程度の大きさの水没粗度まで適用できるかは定かではない。また、BVC法においても従来の三次元解析と同様に、壁面近傍で平衡状態を仮定した壁法則が用いられており、これらの課題を解決する必要がある。

参考文献

- [1] Nicholas, A.P. (2001) Computational fluid dynamics modelling of boundary roughness in gravel-bed rivers: an investigation of the effects of random variability in bed elevation, *Earth Surface Processes and Landforms* 26:345-362.
- [2] Launder, B.E. and Spalding, D.B. (1973) The numerical computation of turbulent flow, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3:269-289.
- [3] Nikora, V. et al. (2007) Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: applications, *J. Hydraul. Eng.* 133:884-895.
- [4] Stoesser, T. (2010) Physically Realistic Roughness Closure Scheme to Simulate Turbulent Channel Flow over Rough Beds within the Framework of LES, *J. Hydraul. Eng.*, 136(10): 812-819.
- [5] 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦(2013) 移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.69, No.4, I\_1051-I\_1055.
- [6] 内田龍彦, 福岡捷二 (2013) 浅水流の仮定を用いない水深積分モデルによる種々な小規模河床形態の統一的解析法の構築, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.69, No.4, I\_1135-I\_1140.
- [7] 内田龍彦, 福岡捷二(2012) 浅水流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.68, No.4, I\_1225-I\_1230.
- [8] 内田龍彦, 福岡捷二(2011) 底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析, *土木学会論文集 B1*, Vol. 67, No. 1, pp.16-29.

2. 研究の目的

本研究では、礫床河川の流れと抵抗評価法を開発するために、(a)大きな粗度(LSR)周りの流れと抵抗評価に対する BVC 法の適用性の検証及び BVC 法の改良と(b)渦層内と粗度層内の流れの非平衡性を考慮できる新しい粗面抵抗則の開発と検証を行い、さらに(c)礫床河川の三次元流れ・構造物周辺の局所洗掘問

題への応用を検討する．具体的には，

(a) 水深に対して大きい巨石や水没・非水没大型粗度群周りの流れや作用する流体力に対し，実験結果と解析結果の比較を通して，BVC法の適用性を明らかにするとともに，水没粗度背面の剥離や流速分布の評価法などを改良する<sup>1),2),4),5),8)</sup>．

(b) 渦層内と粗度層内の流れの非平衡性を考慮できる新しい粗面抵抗則を開発し，水没する巨石が点在する粗面流れや河川構造物周りの河床極近傍の流れの実験結果と比較し，検証する<sup>1),2),7)-9)</sup>．

(c) 開発した解析法を礫床河川の三次元流れの解析と構造物周辺の局所洗掘解析への応用性を検討する<sup>1),3),6),9),10),11)</sup>．

### 3．研究の方法

本研究では，図-1に示すように流れの領域を主計算領域，抵抗則領域，浸透層に分けて考え，それぞれの領域に対して解析法を検討する．同様の領域区分はNikora et al. [3]によっても提案されている．本研究では，主計算領域の流れについて水深スケールの三次元渦運動を浅水流の仮定を用いずに解析できるGBVC法[7]を適用する．従来の粗面壁法則を用いる場合，抵抗則領域では平衡状態が想定されるが，本研究では非平衡粗面抵抗則を導入して流れの非平衡性を考慮する．抵抗則領域の流れの解析では，粗度表面より下では粗度の流体力が作用するようになるため，粗度表面より上の渦層と表面より下の粗度層を分離する必要がある．粗度層の流れの運動方程式には粗度に作用する流体力を考慮している．非平衡粗面抵抗則では渦層，粗度層の運動方程式と連続式を解くことにより，抵抗則領域の流れの非平衡性と領域間の流れの交換を考慮する．また，渦層，粗度層の運動方程式は平衡状態において，従来の粗面抵抗則に帰着するように導出する．なお，本研究では浸透層については考慮しない．このような壁面近傍の流れの性質に合わせて解析を変える方法は，壁面近傍で乱れの代表スケールが急変する乱流特性を効率的に捉えるために開発されたDESと呼ばれるLES/RANSのハイブリッド解析法に見られるが，粗面では明確な境界高さが与えられないため，後述するように河床高さを定義する必要がある点や粗度層以下を取り扱う点が滑面の場合と大きく異なり，ここに本解析法の特徴がある．

さらにこの解析方法に基づいて，二相流解析法を検討する．流砂系の運動は流砂密度によって鉛直方向に区分されることから，流れ系の計算領域である，主計算領域，渦層領域，粗度層領域において異なる流砂系モデルを導入する．粗度層内では高濃度の掃流砂層を仮定し，粒子間応力(骨格応力)が支配的であったとした二相流モデルを導入する．ここでは，濃度を一定と仮定し，連続式によりその厚さを決定する．渦層内では流れの乱れによって

砂が巻き上げられ，激しく運動する遷移層を仮定する．このため，粒子間の応力は接触力ではなく，乱流運動により生じる(運動量交換)とした二相流モデルを導入する．渦層厚は流れ系モデルにより定義されるため，土砂の連続式により濃度を決定する．主計算領域は巻きあげられた土砂が流体と一緒に運動する浮遊砂層とし，運動方程式を解かず従来浮遊砂の輸送方程式から水深平均浮遊砂濃度を解く．

### 4．研究成果

本研究で得られた主要な研究成果を以下に示す．

(1) 主計算領域の流れを解く一般底面流速解析法(BVC法)と，渦層，粗度層の流れを解く非平衡粗面抵抗則(DWL)の解析法から構成される新しい準三次元解析法を開発した<sup>1),2)</sup>．

(2) DWLの運動方程式の各項のオーダー比較することにより，渦層，粗度層の流れの非平衡性と相対粗度 $k_s/h$ の関係を検討し，DWLの適用条件や粗度条件，流れのスケールと必要な解析法を明らかにした．礫床河川の局所流解析においては渦層の非平衡性に加えて粗度層の非平衡性も考慮する必要がある<sup>1)</sup>．

(3) 本解析法は，開水路粗面上の加速する流れについて，底面近傍の大きな流速分布領域などを再現するのに課題を残すが，減速する流れについては実験の流速分布をよく再現できる．また，緩やかな加速，減速流などの非平衡性の弱い流れにおいては，浅水流の仮定と渦層以下の流れの非平衡性の影響は解析に現れないことが確認された<sup>1)</sup>．

(4) 構造物周りの局所流解析において，平衡粗面抵抗則は，河床近傍の非平衡性の強い流れを解析するには十分でないことを明らかにし，非平衡粗面抵抗則を導入することによって河床近傍の流れと構造物近傍の三次元流れの解析精度が向上することを示した<sup>1),5),7),9)</sup>．

(5) 本解析法は水没する孤立巨石群を有する底面近傍の複雑な流れについて実験結果を再現できることを示し，平衡粗面抵抗則を用いた場合と比較し，非平衡粗面抵抗則の必要性和有用性を明らかにした<sup>2),4),8)</sup>．

(6) 本研究では流砂系の三つの連続式を用い，従来の河床変動解析法において掃流砂の連続式が簡略化されていることを明らかにし，流れ系と流砂系からなる二相流解析の役割を示した<sup>3)</sup>．

(7) 非平衡粗面抵抗則を用いた底面流速解析法に基づき，土砂密度に応じて鉛直方向に異なる流砂系モデルを導入した，水深積分型の新しい二相流モデルを構築した．本解析法では掃流砂から浮遊砂の遷移には鉛直方向流速が考慮され，流砂運動は流砂系の連続式と流れ系との相互作用項を含む運動方程式により記述される<sup>3),10),11)</sup>．

(8) 本解析法は段波による激しい河床変動に対し，掃流砂層厚の変化に伴う急激な河床変

動や流砂による抵抗増加を考慮でき、従来法に比べて実験結果の説明力が向上することを示した<sup>3),10),11)</sup>。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7件)

1) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 71, No. 2, pp.43-62, 2015. 査読付, <https://doi.org/10.2208/jscejhe.71.43>

2) Uchida, T., Fukuoka, S., Papanicolaou, A.N. and Takiris, A.G.: Non-hydrostatic quasi-3D model coupled with dynamic rough wall law for simulating flow over rough bed with submerged boulders, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.142, Issue 11, 04016054, 14p., published online on July 14, 2016. 査読付

DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001198

3) 内田龍彦, 福岡捷二: 一般底面流速解析法と非平衡粗面抵抗則に基づく水深積分型二相流解析法の適合性の検討, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.73, No.4, pp.I\_937-I\_942, 2017. 査読付

[https://doi.org/10.2208/jscejhe.73.I\\_937](https://doi.org/10.2208/jscejhe.73.I_937)

4) 田中規夫, 内田龍彦, 山上路生: 境界層水理学が生態系保全に果たす役割, 河川技術論文集 23: 549-554, 2017. 査読付

5) 加藤翔吾, 福岡捷二, 内田龍彦: 常願寺川現地実験水路における河岸防護工近傍の流れの三次元構造と河岸に作用する流体力の評価, 河川技術論文集 23: 155-160, 2017. 査読付

6) Uchida, T. and Fukuoka, S.: Quasi-3D two-phase model for dam-break flow over movable bed based on a non-hydrostatic depth-integrated model with a dynamic rough wall law, Advances in Water Resources, 2017. 査読付

<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.020>

7) 内田龍彦: 粗面上に発生する跳水を含む段落ち部下流の流れの水深積分モデルによる解析法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.74, No.1, pp.17-26, 2018. 査読付

<https://doi.org/10.2208/jscejam.74.17>

[学会発表](計 4件)

8) Uchida, T., Papanicolaou, A. N., Tsakiris, A. G. and Fukuoka, S.: A numerical calculation method for flow in the presence of isolated boulders atop a rough bed by using an enhanced depth integrated model with a non-equilibrium resistance law, River Flow 2014, International Conference on Fluvial Hydraulics, Lausanne, Switzerland, 2014.9.3-5.

<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b17133-50>

9) Uchida, T., Fukuoka, S. and Papanicolaou, A. N.: A 3D flow calculation around a structure in gravel bed rivers by using non-hydrostatic depth-integrated model with dynamic rough-wall law, River Flow 2016, Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics, St. Louis, Mo., USA, pp.1755-1763, 2016.7.12-15.

<http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9781315644479-212>

10) Uchida, T. and Fukuoka, S.: Quasi-3D two-phase modelling of fluid and sediment dynamics based on a non-hydrostatic depth integrated model with a dynamic rough wall law, The 3rd symposium on Two-phase modelling for Sediment dynamics in Geophysical Flows, THESIS-2016, Tokyo, Japan, September 14, 2016.

11) Uchida, T.: Challenges for large-scale sediment transport simulations, Invited presentation, Workshop on sediment transport dynamics: conventional and novel approaches and their complementary relations, THESIS-2016, invited presentation, September 13, 2016.

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

<http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/profile/ja.8629b5cd2a7099e9520e17560c007669.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 龍彦 (UCHIDA, Tatsuhiko)

広島大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00379900