

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06583

研究課題名(和文)高濃度土砂が粗面乱流の抵抗特性および流動機構に与える影響

研究課題名(英文) Effects of hyperconcentrated sediment on flow resistance and structure in open channel with roughness elements

研究代表者

大本 照憲 (Terunori, Ohmoto)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・教授

研究者番号：30150494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は二次元角柱粗度、三次元角柱粗度、円柱粗度および球状粗度を有する粗面開水路流れにおいて高濃度土砂が乱流構造、大規模渦の発生機構に与える影響を明らかにすることを目的とする。そのため、高濃度土砂流の模擬流体としてPSA溶液を用い、流速の計測にはPIV(Particle Image Velocimetry)を適用し、速度勾配テンソルの第二不変量であるQ定義法により大規模渦を同定し、その動特性を清水流との比較を通して詳細に検討した。解析結果から、高濃度土砂流では土砂濃度の増大により大規模渦の強度を弱まり、発生周期は長く、粗度頂部の剥離渦を抑制することが認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高濃度土砂流において粗度の影響が強いRoughness Sublayer内の流れは、粗面乱流の抵抗則を規定する重要な領域であるにも係わらず乱れの空間変動特性について十分に検討されていない。本研究では、2次元粗度(円柱粗度、角柱粗度)3次元粗度(球状粗度、角柱粗度)上に高濃度土砂流を発生させ、その抵抗則および高空間分解能を有し高精度の粒子画像流速計法を用いて流動機構を明らかにした。Roughness Sublayer内の剥離渦の構造と抵抗則との関係を明らかにし、粗面乱流の普遍的構造を解明することは学術的意義が非常に大きく、河川の治水および環境機能を強化する上で基礎的知見となる。

研究成果の概要(英文)：The hyper-concentrated sediment laden flows have caused flood control, river environment and irrigation problems such as aggradation and clogging. Several researchers documented the effects of large concentrations of sediments on the fluid properties such as the viscosity, the density, and the reduction of fall velocity of bed sediment particles, the increase of sediment discharge. However, such a sediment flow feature has not been investigated in detail on the effects of suspended clay concentration on large scale vortex structure. In this paper, we experimentally investigated velocity fluctuations in hyper-concentrated sediment laden-flow in an open channel with two-dimensional square ribs by using Particle Image Velocimetry(PIV). The results showed that rheological properties significantly dissipated the large scale coherent vortex identified on the second invariant of the velocity gradient tensor over the bed with square ribs by comparison with the clear water flow.

研究分野：水工学

キーワード：sediment transport non-Newtonian fluids open channel flow coherent vortex PIV

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

開水路における流れの抵抗は河床形態、粗度の大きさ・形状・配列、さらには流砂の存在、水理条件の影響を強く受ける。河道における流れの抵抗は河道、流砂および流れの相互作用系のマクロの結果として生じ、その機構の解明と予測手法の確立は、治水上最も重要な研究課題の一つである。その目的は、河川における水位と流量の関係さらには流砂量の予測精度の向上に繋がるが、経験則が主流であり普遍的メカニズムについては不明な点が多い。

実河川に見られる大規模な組織渦は、流れの抵抗、土砂輸送現象および河床形状との関係が深く、取分け河床波の存在が大規模渦の発生や乱流構造に与える影響は、多くの研究者によって検討された。

大規模渦構造を有するボイルの生成に関しては、古くは Matthes が河床から水面へ達する竜巻状の上昇渦をコルク渦と明記した。また Jackson は、観測から河床波の谷部においてボイルが生じやすく、その発生周期はバースティングと同程度であったことから、バースティングがボイルになると推測した。禰津らは直線河道に見られるボイルは、その発生機構より第1種から第3種に分類した。このうちバースト現象に起因する第3種は、河床形状にかかわらず形成され得るのに対し、第1種と第2種はそれぞれ流下方向と横断方向の河床波に起因するものと考えられている。河川のような高レイノルズ数流れでは、第3種は弱くなると見られることから、砂堆河床に出現するボイルは、主としてコルク渦に起因する第1種ボイルであることが予想される。

河川水面に間欠的に観察されるボイルを始めとした大規模渦構造については依然として不明な点が多く、高濃度土砂が大規模渦に与える影響について検討した研究事例は皆無に等しい。

2. 研究の目的

粗度に較べて相対的に水深が小さい流れは、山地部の砂礫河川、地表や路面上の流れ、急勾配水路流れおよび護岸上の流れ等において観察される。完全粗面上の清水流および高濃度土砂流は、水工学の分野では治水や利水上の観点から、抗力や抵抗則に関わる応用的研究および平均流特性や乱流構造の基礎的研究、近年では礫床河川の環境再生の視点からの研究も求められているが、境界近傍の流れが複雑なため、未解明な点が多い。

本研究では水深に対する河床粗度が相対的に大きい領域の 1)二次元粗度および三次元粗度を伴う高濃度土砂流の抵抗則、2)礫床(gravel bed)および巨礫床(stone bed)における高濃度土砂流の抵抗則、3)三次元流動機構、4)高濃度土砂が運動量やエネルギー収支に与える影響および5)実河川における高濃度土砂流の現地観測および流動機構の解明を目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、礫床(gravel bed)および巨礫床(stone bed)に加えて2次元粗度(円柱粗度、角柱粗度)3次元粗度(球状粗度、角柱粗度)上に高濃度土砂流を発生させ、完全粗面における清水流および高濃度土砂流の抵抗則およびその流動機構を明らかにする。特に、高濃度土砂流の実態解明を図るために高濁度且つ高粘性の流動機構および高濃度土砂が抵抗特性、運動量輸送およびエネルギー収支に与える影響明らかにすることを主目的とする。さらに、高濃度流体を模擬したモデル流体流れを数値的に再現し、組織渦と高濁度との相互作用および実河川における高濃度土砂流の流動機構についても検討する。なお、高濃度土砂流の粘性及び抵抗特性を再現可能な高分子剤のPSA水溶液を用いることにより、流れの計測に対してPIV法を適用する。

4. 研究成果

大本らは、二次元角柱粗度上において高濃度土砂が抵抗特性および流動機構に与える影響を検討した。その結果、図-1に示す通り二次元角柱粗度における抵抗係数の土砂濃度依存性は、清水流に較べてKaolin体積土砂濃度 $C_v < 8.5\%$ で抵抗係数が小さくなり、土砂濃度 $C_v > 8.5\%$ では逆に抵抗係数が大きくなることを示した。

土砂濃度が流れ場において一様な場合には、支配方程式であるNavier-Stokes方程式は、密度には依存せず動粘性係数のみが支配因子となる。高濃度土砂流と類似の動粘性係数を有するポリアクリル酸ソーダ(PSA)溶液を用いた流れ場に粒子画像流速計法を適用して、清水流との比較によって高濃度土砂流の動力学特性を検討した。さらに、抵抗則を規定する運動量輸送およびエネルギー収支について詳細に検討した。

本研究では、二次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂が乱流構造、大規模渦の発生機構に与える影響を明らかにすることを目的とする。そのため、高濃度土砂流の模擬流体としてPSA溶液を用い、流速の計測にはPIV(Particle Image Velocimetry)を適用し、速度勾配テンソルの第二不変量であるQ定義法により大規模渦を同定し、その動特性を清水流との比較を通して詳細に検討した。

4.1 大規模渦の抽出および解析法

乱流中における管状および層状の形をとる高濁度領域を組織構造と定義し、それぞれ渦管(vortex tube)および渦層(vortex layer)と呼ぶ。渦構造の中心に渦度が集中することに基づいて、渦度自体の大きさを閾値として渦構造を抽出する方法が古くから用いられてきた。しかし、渦度には対称テンソルのせん断変形速度と反対称テンソルの回転運動との両者の寄与

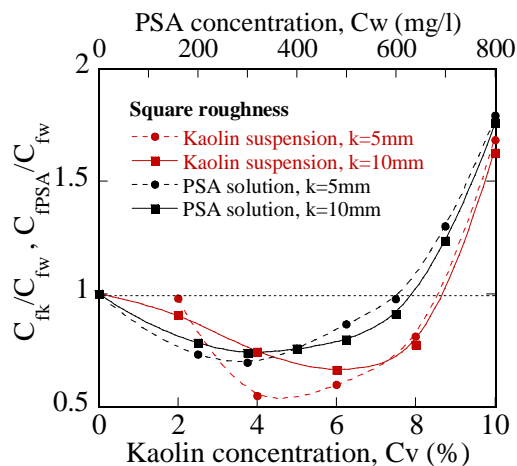


図-1 抵抗係数と土砂濃度

が含まれているため、渦度の高い領域が、必ずしも回転運動とは対応していない。そのため渦構造のダイナミクスを議論するためには、複雑な乱流場の中から渦管を分離抽出する必要があり、この管状旋回渦の組織構造を直接可視化する方法が提案され、そのメカニズムや詳細な特性が明らかにされつつある。そこで、本研究では以下のQ定義法⁴⁾を適用し考察する。Q定義法は、速度勾配テンソル ∇u の第2不変量Qが正となる領域を管状旋回渦と定義する。これは、第2不変量Qが次式

$$Q = \frac{1}{2}(u_{i,i}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = -\frac{1}{2}u_{i,j}u_{j,i} = \frac{1}{2}(\|\Omega_{i,j}\|^2 - \|S_{i,j}\|^2) \quad (1)$$

によって表され、上式右辺第一項の渦度テンソルのノルムが右辺第二項の変形速度テンソルのノルムより卓越する場合、Qが正になることを利用している。ここに、変形速度テンソルおよび渦度テンソルは次式で表される。

$$S_{i,j} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \quad \Omega_{i,j} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (2)$$

一方、この条件は圧力ポアソン方程式

$$\nabla^2(p/\rho) = 2Q \quad (3)$$

のソース項とも対応することから、 $Q > 0$ の領域は、圧力の極小値をもち局所低圧部分であることを示すと同時に、Qが大きいほどより強い渦であることを示す。

大規模渦の軌跡は、フレームレートは62.5fpsでアニメーション化された2000枚の瞬間流速ベクトルおよび第2不変量Qの時系列データから得た。なお、横断方向に一樣な二次元角柱粗度上の流れとは言え、大規模渦は三次元的挙動を示すが、DNS解析やLES解析で捉えられた渦の様に立体視は出来ない。

4.2 大規模渦の解析結果

(1) 瞬間速度場と第2不変量Q

図-2は、清水流、PSA溶液濃度 $C_w=300$ mg/lおよび $C_w=800$ mg/lにおける瞬時流速場の主流速コンターおよび流速ベクトルを、図-3は同一時刻における速度勾配テンソルの第2不変量Qのコンターを示す。なお、第2不変量Qが正の場合のみを抽出している。清水流では粗度頂部を結ぶ線上近傍では主流部とキャビティの間で乱れによる運動量交換が活発で、主流速コンターは強い波状性を示すがPSA溶液濃度の増大に伴い主流速の空間変化は小さく、鉛直方向の流速成分を小さくすることが分かる。同一時刻の第2不変量Qの瞬時値は、相対的に清水流で最も大きく、PSA溶液濃度の増大に伴い小さくなる。特に、清水流、PSA溶液濃度 $C_w=300$ mg/lでは角柱粗度近傍で明瞭に大規模渦の発生が認められるが、 $C_w=800$ mg/lでは、流下に伴う大規模渦の減衰が大きい。

(2) 第2不変量Qの時間平均値

図-4は、第2不変量Qの時間平均値の空間分布を示す。但し、Qが正の場合のみを抽出し統計処理した。なお、図中の破線は、主流速の変曲点である $(d^2 U)/(dz^2=0)$ の位置を示す。清水流では、粗度頂部で発生した剥離渦が、粗度背後の自由せん断層において発達し強い渦となり流下していること、大規模渦の軌跡はせん断速度の極大値位に対応していることが示唆される。PSA溶液濃度 $C_w=300$ mg/lにおいて、第2不変量Qは、粗度キャビティ境界面において大きな値を示し、 $x=2, 3.5$ cmで極大値がみられるが、清水流に較べて顕著ではない。

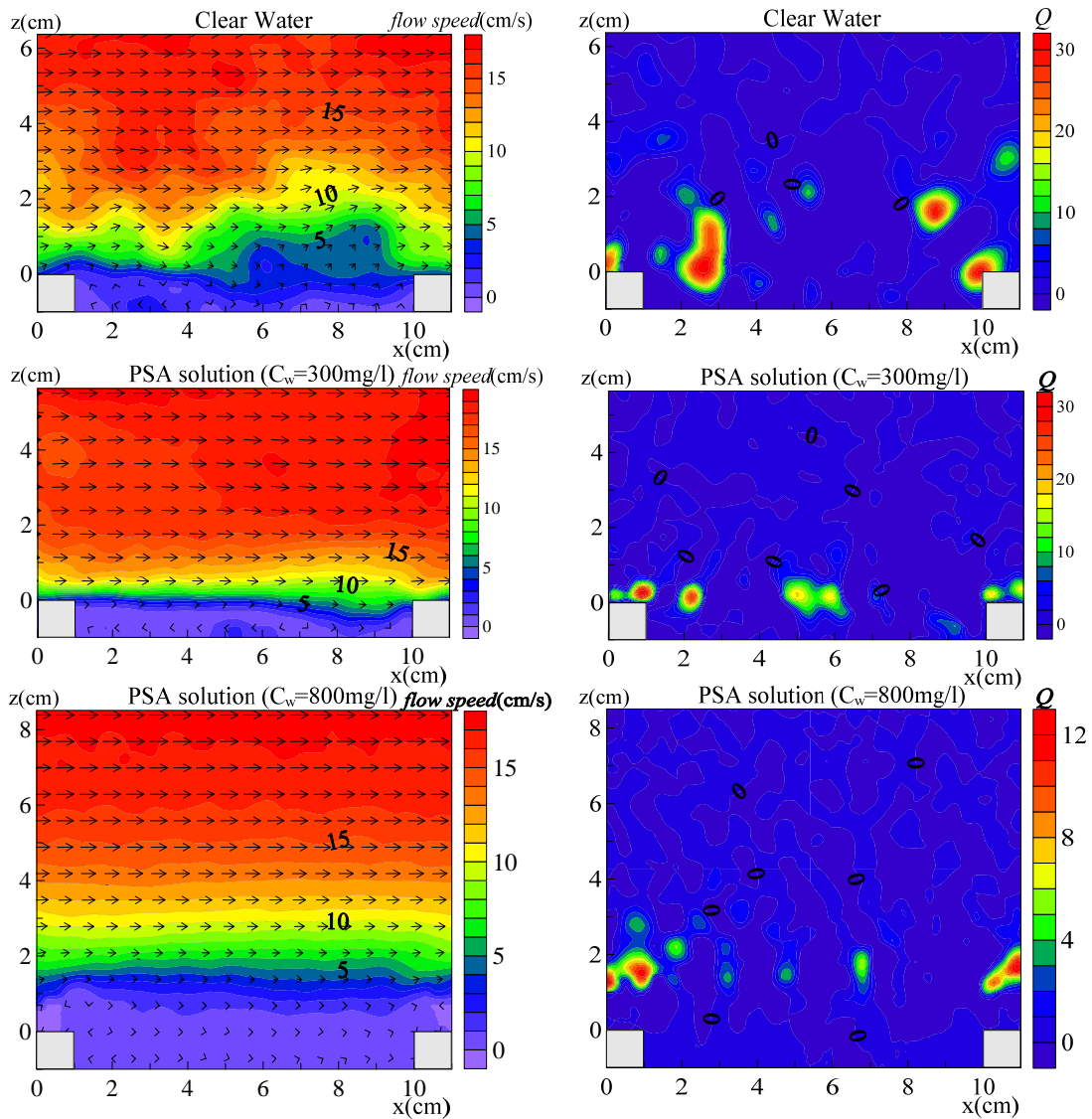


図-2 瞬時流速ベクトルおよび主流速コンター

図-3 瞬時速度勾配テンソルの第二不変量Q

PSA 溶液濃度 $C_w=800$ mg/l では、第二次不変量 Q は粗度近傍でのみ大きな値を示し、その他では渦の発生は見られない。一般的に Q の時間平均値は、主流速の変曲点との対応が良く変曲点不安定により渦の発生し易い場所であること、PSA 溶液濃度に伴って小さくなり以下の関係が認められる。

$$Q(C_w=0 \text{ mg/l}) > Q(C_w=300 \text{ mg/l}) \gg Q(C_w=800 \text{ mg/l}) \quad (4)$$

また、粗度頂部近傍は剥離渦の発生場所で低圧力渦の出現が示唆される。

(3) 第2不変量 Q による大規模渦の出現確率

PSA 溶液濃度 $C_w=800$ mg/l では粘性の増大に伴い渦の発生が抑制されていても、大規模渦が生じている可能性の高い領域が考えられる。そこで、渦検出法として、次の式(14)で定義される渦の出現確率を用いる。

$$P(Q > Q_c) = n(Q > Q_c) / n \quad (5)$$

ただし、時系列データのサンプル数 n は 2000 である。

(4) 大規模渦の軌跡

図-5は、清水流およびPSA溶液濃度 $C_w=300$ mg/lにおける代表的な大規模渦の中心をLagrange的に追跡した軌跡を示す。なお、PSA溶液濃度 $C_w=300$ mg/lでは、二種類の軌跡(Case1, Case2)が認められた。PSA溶液濃度 $C_w=800$ mg/lにおいては粗度頂部で発生した剥離渦は直下流で消失しLagrange的に同定することは出来なかった。

清水流では、粗度下流側頂部付近で発生した渦は2cm間では急上昇していることが分かる。また、渦の移流速度は各位置の時間平均流速に較べて小さく、低速流体塊の浮上に載っており、第1種ボイルとの相関が示唆された。

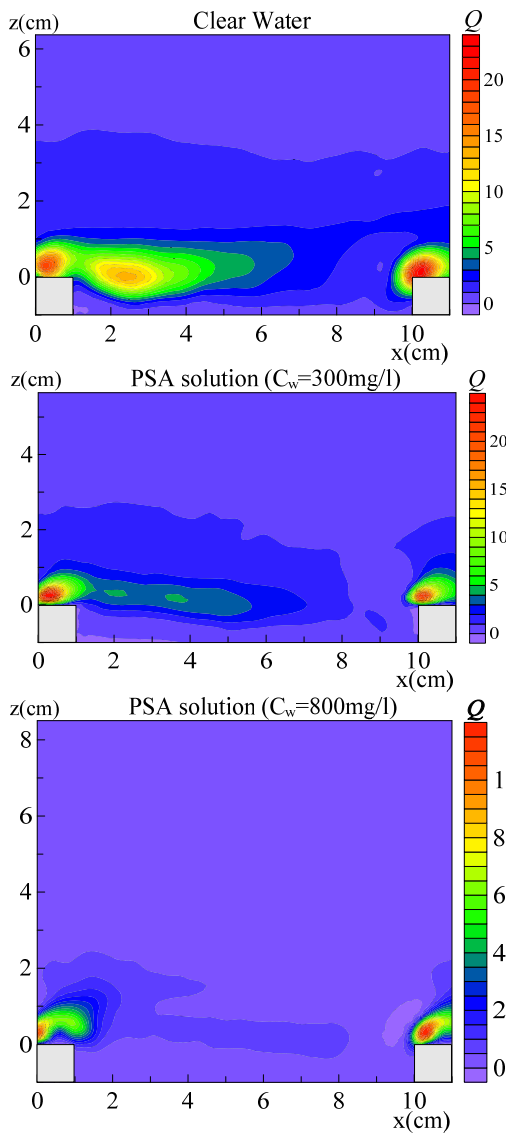


図-4 時間平均の第二不変量 Q の分布

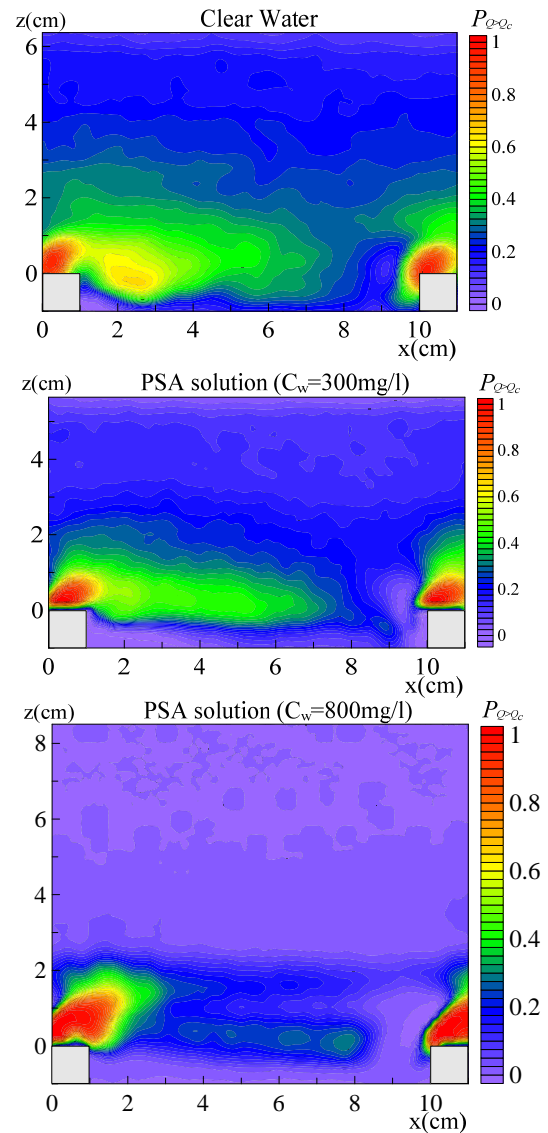


図-5 渦の出現確率 $P_{Q=Q_c}$ の分布 ($Q_c = 1.0$)

PSA 溶液濃度 $C_w=300 \text{ mg/l}$ の Case1 の渦は、粗度頂部近傍で発生し、 $2\text{cm} < x < 8\text{cm}$ の区間ではほぼ x 軸に平行に移流、 $8\text{cm} < x < 10\text{cm}$ の区間では上昇しつつ流下する。

PSA 溶液濃度 $C_w=300 \text{ mg/l}$ の Case2 の渦は、粗度下流側頂部で発生し、 $2\text{cm} < x < 6\text{cm}$ の区間では一様に下降し粗度キャビティー内の $6\text{cm} < x < 8\text{cm}$ では若干上昇傾向を示すが減衰し $8\text{cm} < x < 10\text{cm}$ の区間では渦の同定は出来なかった。PSA 溶液濃度 $C_w=300 \text{ mg/l}$ では清水流に較べて剥離渦は上層まで浮上しない様であった。

(5) まとめ

本研究では、二次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂の粘性増大が大規模渦構造に与える影響を明らかにするため、高濃度土砂流の模擬流体として PSA 溶液を用い、流速の計測には PIV を適用し、速度勾配テンソルの第二不変量である Q 定義法により大規模渦を同定し、その動特性を清水流との比較を通して詳細に検討した。得られた結果を要約すれば以下の通りである。

- 1) 第 2 不変量 Q の瞬時値は、相対的に清水流で最も大きく、PSA 溶液濃度の増大に伴い小さくなる。
- 2) 第 2 不変量 Q の時間平均値は、主流速の変曲点との対応が良く変曲点不安定により渦の発生しやすい場所であること、PSA 溶液濃度に伴って小さくなる。
- 3) PSA 溶液濃度 $C_w=800 \text{ mg/l}$ における $z=3.59\text{cm}$ を除いて何れのケースにおいても大規模渦の出現確率の極大値は乱れの強さの極大値の位置にほぼ対応した。
- 4) 清水流では渦の移流速度は各位置の時間平均流速に較べて小さく、低速流体塊の浮上に載っており、第 1 種ボイルとの相関が示唆されたが、PSA 溶液濃度 $C_w=300 \text{ mg/l}$ では顕著なボイルは認められなかった。
- 5) 高濃度土砂による粘性係数の増大は、エネルギースペクトルを減少させると同時に、大規模渦の発生頻度および強さを抑え、乱れの生成を抑制している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Terunori OHMOTO, Kanji ADACHI, Hiroto KONDO	4. 巻 1
2. 論文標題 Effects of Hyper-concentrated Sediment on Flow Resistance and Flow Structure in an Open Channel with Three-dimensional Square Ribs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 International Conference on Environment, Energy and Earth Sciences (EEES2018)	6. 最初と最後の頁 paper No. E215
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroto Kondo Terunori Ohmoto Kanji Adachi and Hiroataka Une	4. 巻 1
2. 論文標題 EFFECT OF HYPER-CONCENTRATED SEDIMENT ON FLOW RESISTANCE CHARACTERISTICS AND FLOW STRUCTURE IN AN OPEN CHANNEL WITH CLOSED-PACKED SPHERICAL ROUGHNESS	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Japan-Korea-Taiwan 2018 Joint Conference on Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 paper No.1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 XIANG CHEN, RYUICHI HIRAKAWA, TERUNORI OHMOTO	4. 巻 Vol.3, No.5
2. 論文標題 FLOOD CAPACITY OF SHIRAKAWA RIVER AT TATSUDAJINNNAI AREA IN KUMAMOTO PREFECTURE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Economy, Energy and Environment	6. 最初と最後の頁 51-57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大本照憲・西将吾	4. 巻 Vol.74, No.4
2. 論文標題 三次元角柱粗度を有する開水路流れにおいて高濃度土砂が抵抗特性および流動機構に与える影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 697-702
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 宇根拓孝・大本照憲・安達幹治	4. 巻 Vol.74, No.4
2. 論文標題 開口部を有する越流堰の直下流における三次元乱流特性について	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 685-690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Nishi and T. Ohmoto	4. 巻 1
2. 論文標題 EFFECTS OF HYPER-CONCENTRATED SEDIMENTS ON FLOW RESISTANCE AND FLOW PATTERN IN AN OPEN CHANNEL WITH SQUARE RIBS	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 4th International Symposium of Shallow Flows	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Hirakawa1 and T. Ohmoto	4. 巻 1
2. 論文標題 Field study on suspended sediment transport around spur dikes in river tidal area	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 4th International Symposium of Shallow Flows	6. 最初と最後の頁 5-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----