

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03313

研究課題名(和文) 河川音響トモグラフィーを用いた流速・流量の自動リアルタイム観測システムの構築

研究課題名(英文) Automated real-time stream-velocity/streamflow acquisition using fluvial acoustic tomography

研究代表者

川西 澄(Kawanisi, Kiyosi)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40144878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、音響トモグラフィー法を用いて河川流量の自動リアルタイム観測システムを構築したものである。兩岸で受信される音響データと水位データから、10分間隔で長期にわたって自動観測された河川流量の観測結果をインターネット経由で表示・送信することに成功した。川幅110mの礫床河川で自動観測システムの長期実証試験を行い、その連続観測結果から流量が水位とともに単調に変化しないことを明らかにするとともに、出水イベントごとの水位-流量曲線を求め、その変動特性を考察した。水位-流量曲線の「波打ち」は特定の水位で発生し、複雑な河道特性や水位による粗度係数の変化がこの「波打ち」を引き起こしていると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年顕著になりつつある地球規模の気候変動によって、洪水や干ばつが頻発する恐れが危惧されている中で、河川流量観測法の高度化はまさに喫緊の課題である。河川音響トモグラフィー法を用いて河川流量観測を自動化し、リアルタイムに正確な流量を常時監視を可能にする本研究は、少子高齢化による調査員の不足や安全確保の問題を解決し、洪水被害の軽減や適切な河川環境の保全に役立つ。本研究は、大規模な気候変動にともなう水循環の変化を把握する上でも重要な役割を担うと考えられ、水工学分野に大きく貢献し、人類規模の有用な社会的貢献を果たすものである。

研究成果の概要(英文)：This study demonstrates the improved fluvial acoustic tomography system (FATS), a promising approach for automatically measuring streamflows with high temporal resolution for a long period. Unlike past hydro-acoustic systems, the FATS enables us to continuously capture the depth- and range-averaged water velocity with a single transducer set. Streamflow measurements were performed in a gravel-bed river (depth: 0.8 m under low-flow conditions, width: 115 m). The average stream velocities and streamflows are automatically estimated from the acoustic data and water level data. The real-time flow data can be monitored by the Internet access. The continuous FATS estimates indicate that the streamflow does not change smoothly with the river stage. Analyses reveal that the streamflow may not be estimated accurately from a smooth rating curve (RC). The FATS captures short-wave irregularities in the streamflow time-series. It is observed that the rapid changes of RC occur owing to flood events.

研究分野：水工学

キーワード：河川流量 洪水 水資源 水循環 音響トモグラフィー

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

河川流量は、河川の水域・洪水水位を決定するとともに、土砂や栄養塩類、熱量などの輸送量を決定する重要なデータであり、国・地方公共団体の河川管理者によって多大な労力をかけて観測されている。しかし、少子高齢化による調査員不足に直面している我が国では、従来の人力による観測を実施することが困難な場合も増えており、河川流量の自動観測技術の必要性が非常に高まっている。

申請者は河川流量の連続観測を実現するために、革新的な音響技術を用いた次世代超音波流速計（以下、河川音響トモグラフィシステム：FATS と呼ぶ）を開発し、これまで流量観測が困難であった、塩水遡上のある水深変化の大きな感潮域でも流量の自動連続観測が可能であることを実証した。また、浅い礫床河川に対する FATS の適用性を江の川で検証しており、流量と断面平均水温の同時連続計測に成功している。遠隔地の河川流量をリアルタイムに自動観測することが必要とされていることから、本研究では FATS を発展させ、社会の要望に応える。

2. 研究の目的

本研究では FATS に自動データ処理・転送とインターネット接続機能を付加し、リアルタイムに河川流量を自動連続観測できる技術を確認し、その実用化を目指す。具体的には、FATS により両岸で計測された音響データを水位データとともにデータ処理装置に無線伝送し、データ処理装置で自動的に求められた断面平均流速、流量、断面平均水温と水位をインターネット経由で、常時、リアルタイムに監視できるシステムを構築し、河川流量の自動連続観測を実現する。

3. 研究の方法

これまでの申請者の研究により、FATS を用いて連続観測した流量の信頼性は確認できているが、従来の観測システムでは、両岸で記録された音響データを手動で取り出して処理しなければならず、遠隔地からリアルタイムに流量を監視することができなかった。そこで、本研究では、両岸のデータを処理ユニットに転送して自動処理するために、FATS にイーサネット通信と FTP 転送機能を付加した。さらに、自動観測システムはインターネットに接続し、測定した流量などをインターネット経由で、常時、監視できるようにした（図 1, 2）。自動観測システムによる長期連続観測は、平常時の川幅が約 110m で礫床河川である江の川（三次市）で行った（図 3）。

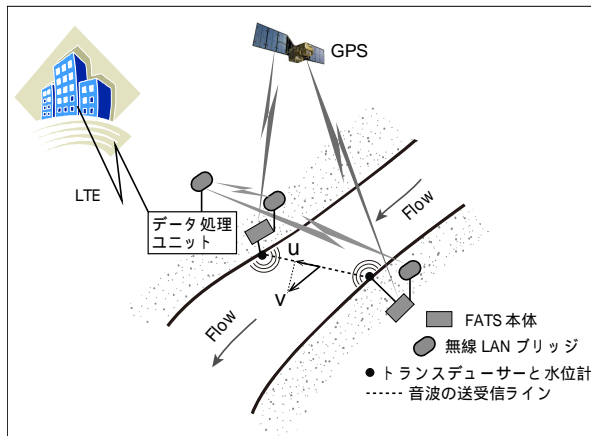


図1 リアルタイム自動観測システムの概要。
両岸のFATSと水位データを無線LANで自動データ処理装置に送り、流量の常時監視を行う。

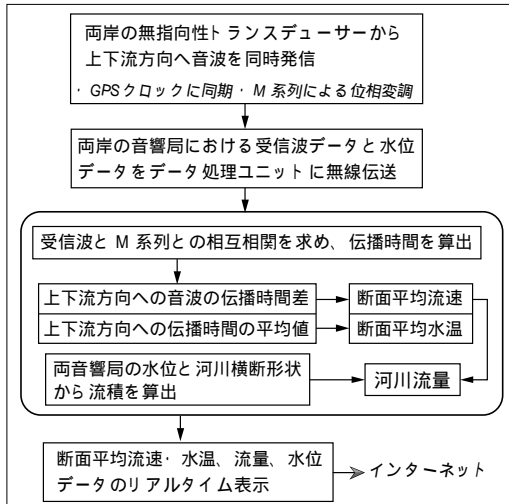


図2 自動観測システムの処理フロー。

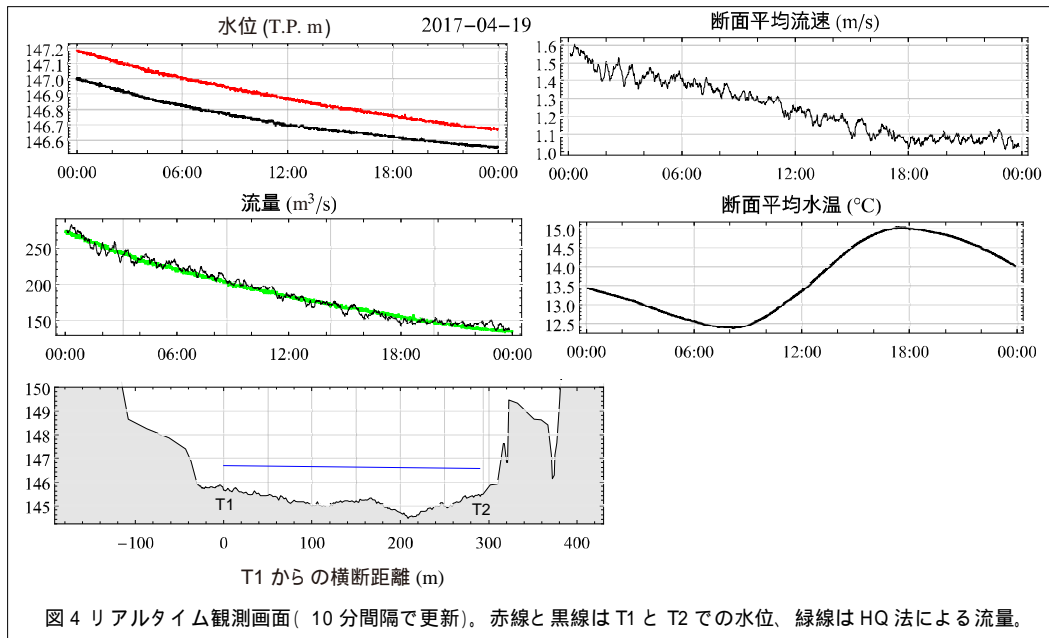
4. 研究成果

(1) リアルタイム自動観測システムの出力

図4に、リアルタイム自動観測システムの表示例を示す。この表示は、インターネットで観測装置に接続すれば遠隔地でみることができる。上・下流の水位、断面平均流速、流量、断面平均水温の時系列および音線に沿った断面形と水面の位置が表示される。グラフは午前0時から10分間隔で自動更新され、日が変わると新規の表示画面となる。処理結果のデジタルデータはいつでもCSVファイルとして自動観測装置からダウンロード可能である。



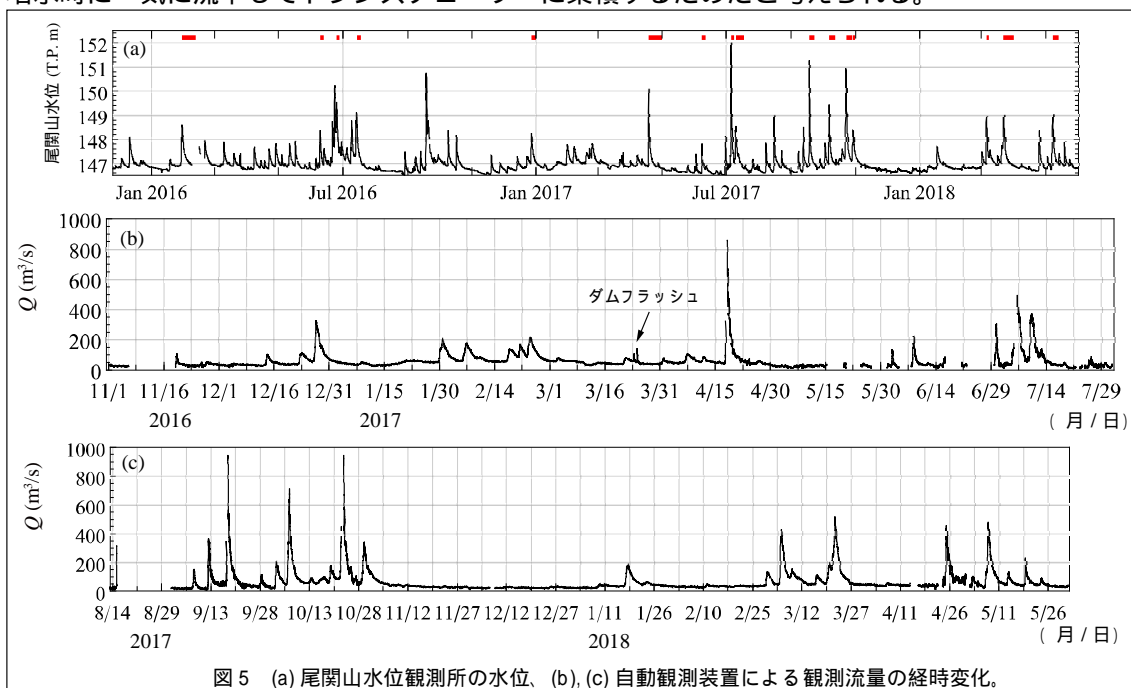
図3 江の川尾関山地点。T1、T2: トランスデューサーの位置。



(2) 河川流量の長期連続観測結果

図 5(b), (c) に自動観測装置で観測された河川流量の経時変化を尾関山水位観測所の水位時系列とともに示す。概ね良好に流量データは取得できている。30kHz のトランスデューサーで観測できた流量範囲は約 $10\text{m}^3/\text{s} \sim 1000\text{m}^3/\text{s}$ 弱である。流量時系列にみられるいくつかの欠測は、トランスデューサーに絡みついた大量の草本類により音波の送受信が妨げられたことが主原因だと考えられる。なお、2018 年の梅雨時期以降は、平成 30 年 7 月豪雨により発生した洪水のため、トランスデューサーケーブルが損傷し観測を中断せざるを得なかった。数年間の観測を想定した仮設工事であったため、大規模な洪水観測は困難であった。

大きな出水時のデータをみると、増水時に欠測となる流量に比べて減水時に計測が回復する流量はかなり大きく、流速・流量の値が本システムの計測限界を決めているのではないことがわかる。増水時に欠測しやすいのは、平水時に干出している護岸付近に存在している草本類・ゴミが増水時に一気に流下してトランスデューサーに集積するためだと考えられる。



(3) 水位 - 流量、水位 - 水面勾配の関係

自然河川では、河道状況の変化により、出水ごとに水位と流量の関係 (H-Q 曲線) は変動していると考えられるが、これまで正確な河川流量を連続観測する方法がなかったため、短期変動を無視して作られた H-Q 曲線が適切な精度を持つかどうか不明である。そこで、本研究で連続的に取得された水位・流量の時系列から、図 5(a) に示す赤線の出水期間を抽出して出水イベントごとの水位 - 流量、水位 - 水面勾配の関係を調べた。水面勾配はトランスデューサー T1、T2 地点で

計測された水位から求めた。

図 6(a)中の黒線は、16 個の出水イベントから作成した水位 - 流量関係に冪関数を当てはめて求めたものである。出水イベントごとにかなり水位 - 流量関係が変動していること、連続観測されたデータから得られた水位 - 流量関係は波打っており、滑らかな冪関数では水位 - 流量関係を正確に表せないことがわかる。図 6(a)中に赤点で示した横断 ADCP の流量も同一の水位に対して幅を持って分布している。図 6(b)に示す水位 - 水面勾配の関係も水位 - 流量関係と同様に出水イベントごとに変化している。水面勾配は水位 147T.P.m 付近までは水位とともに増加するが、147T.P.m 付近より高い水位では水面勾配はほぼ一定もしくは穏やかに増加している。水位とともにこのように水面勾配が変化するのは、観測地点の下流蛇行部に高さ 147T.P.m 程度の砂州が存在するためである。

(4) 水位 - 流量関係の変動

出水イベントごとに水位 - 流量関係がどの程度変動するのかを把握するために、変動の大きさをはかる以下の 2 つの指標を求めた。

$$\gamma_m = \frac{\overline{Q_{RC,i-1}} - \overline{Q_{RC,i}}}{(\overline{Q_{RC,i-1}} + \overline{Q_{RC,i}}) / 2} \quad \text{for } i = 2, \dots, 16 \quad (1)$$

$$\gamma_{cor} = \frac{\overline{Q_{RC,i-1} Q_{RC,i}} - \overline{Q_{RC,i-1}} \overline{Q_{RC,i}}}{\sqrt{(\overline{Q_{RC,i-1}^2} - \overline{Q_{RC,i-1}}^2)(\overline{Q_{RC,i}^2} - \overline{Q_{RC,i}}^2)}} \quad \text{for } i = 2, \dots, 16 \quad (2)$$

ここで、 $Q_{RC,i}$ は出水イベント i の水位 - 流量曲線から求まる流量、 $\overline{\quad}$ は出水イベント中の平均を表している。 γ_m と γ_{cor} はそれぞれ、引き続く水位 - 流量曲線間の変動率と相関係数である。

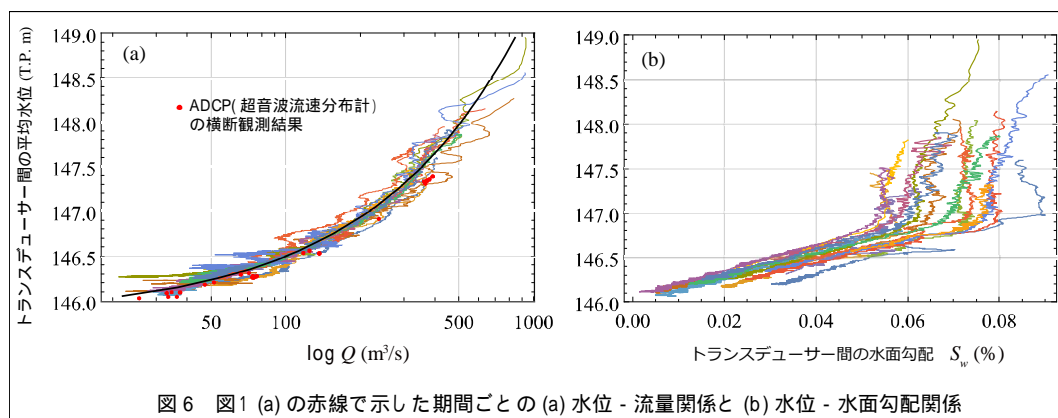


図 6 図 1 (a)の赤線で示した期間ごとの (a) 水位 - 流量関係と (b) 水位 - 水面勾配関係

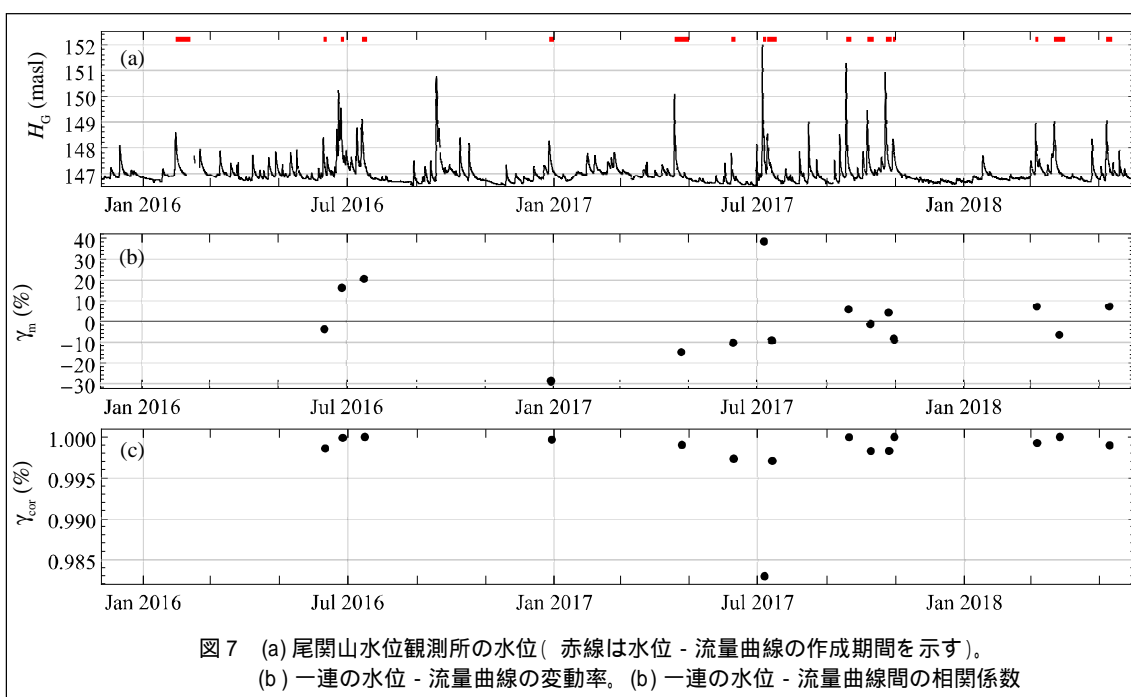


図 7 (a) 尾関山水位観測所の水位 (赤線は水位 - 流量曲線の作成期間を示す)。 (b) 一連の水位 - 流量曲線の変動率。 (c) 一連の水位 - 流量曲線間の相関係数

大きな出水イベント後は水位 - 流量曲線が変化しており、最大変動率は 40%に達している。水位 - 流量曲線間の相関係数をみると、変動率が大きくても相関係数は大きく、水位 - 流量曲線の形状に大きな変化がない場合もあることがわかる。

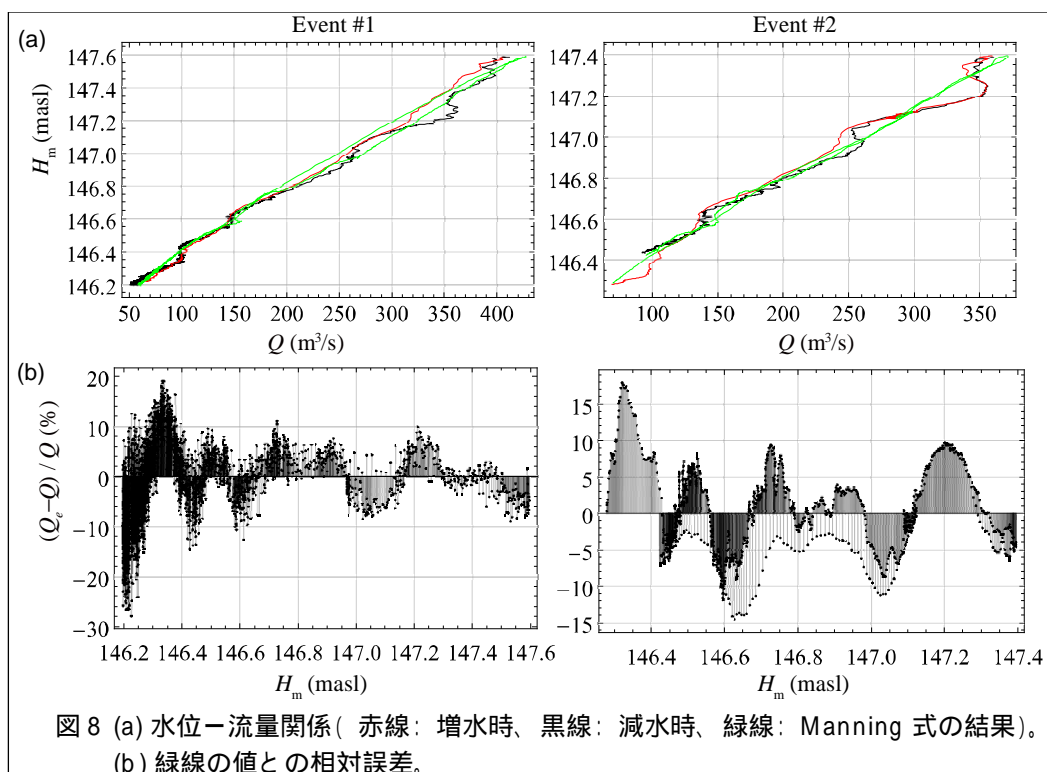
(5) 水位 - 流量曲線の微細構造

図 8(a)は、引き続き 2 つの出水イベント中に FATS で観測された水位と流量の関係をプロットしたものである。赤線が増水期、黒線が減水期の関係を示している。緑線は出水中の平均粗度係数と水面勾配から Manning 式を使って求めた水位 - 流量曲線である。観測地点は河床勾配が約 0.1%と大きいいため、水位 - 流量曲線には顕著なループはみられない。

注目すべき点は、FATS によって連続観測された水位 - 流量曲線は波打っており（微細構造が存在）従来の滑らかな幂関数では実際の水位 - 流量関係を正確に表すことはできないことである。2 つの出水イベントの結果を比較すると、水位 - 流量曲線の波打ちは特定の水位で発生することがわかり、複雑な河道特性・水位による粗度係数の変化がこの「波打ち」を引き起こしていると考えられる。滑らかな Manning 式の結果（緑線）との相対差を示した図 8(b)をみると、水位 - 流量曲線の微細構造によって 20%程度の流量差が存在していることがわかる。

(6) 水位 - 流量曲線法の不確実性

年 36 回の流観から 2 次曲線を用いて作成されている水位 - 流量曲線は、出水ごとの水位 - 流量曲線の年内変動を無視していること、さらに、水位 - 流量曲線に存在している微細構造を無視していることから、水位によっては大きな誤差を含んでいる可能性があることを認識すべきであろう。



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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi	4. 巻 172
2. 論文標題 Novel high-frequency acoustic monitoring of streamflow-turbidity dynamics in a gravel-bed river during artificial dam flush	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Catena	6. 最初と最後の頁 738-752
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.catena.2018.09.033	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 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi	4. 巻 74
2. 論文標題 Water surface slope and streamflow hysteresis patterns according to different hydrological floods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 181-186
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 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi, Mochammad Meddy Danial	4. 巻 74
2. 論文標題 Monitoring unsteady streamflow-stage hysteresis behavior of a gravel-bed river	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 313-318
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 Kiyosi Kawanisi, Mohamad Basel Al Sawaf, Mochammad Meddy Danial	4. 巻 23
2. 論文標題 Automated real-time streamflow acquisition in a mountainous river using acoustic tomography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Hydrologic Engineering	6. 最初と最後の頁 04017059-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001604	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 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi, Xiao Cong	4. 巻 75
2. 論文標題 Improving the resolution of shallow-river discharge measurement by denoising outliers using binarized image subtraction feature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 619-624
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 Masoud Bahreinimotolagh, Kiyosi Kawanisi, Mohamad Basel Al Sawaf, Reza Roozbahani, Mortaza Eftekhari, Abbas Kazemi Khoshuie	4. 巻 191
2. 論文標題 Continuous Streamflow Monitoring in Shared Watersheds Using Advanced UnderwaterAcoustic Tomography System: A Case Study on Zayanderud RiverAbbas Kazemi Khoshuie	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Monitoring and Assessment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10661-019-7830-4	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 該当する

1. 著者名 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi	4. 巻 74
2. 論文標題 Water surface slope and streamflow hysteresis patterns according to different hydrological floods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 181-186
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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 2件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi
2. 発表標題 Water surface slope and streamflow hysteresis patterns according to different hydrological floods
3. 学会等名 The 63th Conference on Hydraulic Engineering, JSCE
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kiyosi Kawanisi
2 . 発表標題 Temporal variability of discharge rating curve in a gravel-bed river
3 . 学会等名 2018 International Conference on Civil, Architecture and Disaster (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi
2 . 発表標題 Monitoring unsteady streamflow-stage hysteresis behavior of a gravel-bed river
3 . 学会等名 The 62th Conference on Hydraulic Engineering, JSCE
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Mohamad Basel Al Sawaf, Kiyosi Kawanisi
2 . 発表標題 Improving the resolution of shallow-river discharge measurement by denoising outliers using binarized image subtraction feature
3 . 学会等名 The 64th Conference on Hydraulic Engineering, JSCE
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kiyosi Kawanisi, Mohamad Basel Al Sawaf
2 . 発表標題 Investigation of fine structures in stage-discharge relations based on high-frequency streamflow time series in a gravel-bed river
3 . 学会等名 River Flow 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----