様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　３０　年　　６　月　２７　日現在

機関番号：　９２１０３
研究種目：　基盤研究(C)（一般）
研究期間：　2015～2017
課題番号：　１５Ｋ０７５０２

研究課題名（和文）連続的に把握可能な掃流砂量計の新規開発とその普遍化

研究課題名（英文）Development of continuous measuring bedload sensor and its applicability

研究代表者
伊藤　隆郭（ITOH, Takahiro）

日本工営株式会社中央研究所・総合技術開発第1部・課長

研究者番号：８０３３４０３５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,000,000円

研究成果の概要（和文）：　掃流砂量計の開発，実験を主とした試験と研究の取りまとめを行った。研究期間内で成果の見通しの悪い項目も実験的に検討し，当初開発メニューに到達させた。
　まず，掃流砂量計の開発を行い，その後，水中荷重計のフレーム内の水圧開放に関する最終的な検討を行った。次に，当該期間中に構築された流砂理論の適用により水流の底面流速と掃流砂流の平均速度の推定等の演繹された理論を用いて流砂量を算出し，水中荷重計の流砂量の計測データに対する相関関係を検討し，水中荷重計を用いた予測値に対する実験係数を求めた。さらに，副次的な成果として荷重計等を用いた土石流の検知センサー(LVPセンサー)の試作と現地適用性の検証を行った。

研究成果の概要（英文）：Bedload sensor was developed, and the applicability was confirmed experimentally. The sensor was mechanically developed and countermeasure for internal pressure was conducted to keep measurements by submerged loadcell. Bedload discharge rate was calculated by weight measured by loadcell and the correlation in velocity between water on the bed and representative velocity of sediment layer. The relation in bedload rate between calculation and measurement was evaluated and the universal constants between them were obtained experimentally. LVP sensor, which was consisted from loadcell, pressure sensor and vibration sensor, was also developed through the knowledge of bedload sensor, and the sensor was for debris flow detections. The developed LVP sensor was confirmed for filed measurement usage.

研究分野：　土砂水理学

キーワード：　掃流砂量　荷重計　相互相関　連続計測　LVPセンサー

１．研究開始当初の背景

山地渓流や急流河川における掃流砂流は，洪水時に掃流力に応じて運搬され，河道全体の河床変動や流路形状を決定づけるため，出水前後の河床形状の変化の追跡では，それを把握できない。古くから，掃流砂流の流砂量を知る必要性は認識されており，現地観測法により，粒径別流砂量に関するﾃﾞｰﾀを取得する努力がなされてきた。水流の流速がそれほど大きくなく，水深も小さい流れ場においては，直接計測法（「直接法」と呼ぶ）が用いられ，例えば，人力で掃流砂を計測するような採取網のような装置である Helley-Smith ｻﾝﾌﾟﾗｰ（W.W.Emmett, USGS, 1980)を用いて，流砂量規模の小さい掃流砂量が計測されてきた。

一方，急流河川においては，流水と流砂の挙動が 1 対 1 に対応せず，さらに，河床勾配が大きく，掃流砂流の流砂移動速度が大きく，しかも，河床の凸凹が大きく，人力での流砂計測には，計測作業や時系列ﾃﾞｰﾀの連続取得のような計測が困難な点が多い。京都大学の流砂量開発研究ｸﾞﾙｰﾌﾟにより，人力を使わない計測方法に関する幾つかの検討がなされた（流砂量開発研究ｸﾞﾙｰﾌﾟ：京大防災研年報，1971)。

また，「直接法」によって，掃流砂を直接する方法ではなく，音響・振動・電場・磁場等の変化を用いて，何らかの媒体（ﾒﾃﾞｨｱ）を用いて掃流砂量を計測する「間接法」（例えば，音響，振動法）がある。これは，流砂を直接的に計測する必要はなく，ｾﾝｻｰの検知する挙動から掃流砂量を推定する方法であり，計測機器全体は，規模の小さいもので，取り扱いがし易く，幾つかのﾒﾃﾞｨｱを用いた計測方法が検討されているが，統一的な手法や方法の確立に至っていない。

急流河川での掃流砂計測では，直接法においては，計測機器が大型となり，かなり大掛かりな操作が必要となり，一方，間接法では，各種ﾒﾃﾞｨｱと流砂量の相関に一般性をもつ関係が得られておらず，現在，試験的に適用されている音響法においても，掃流砂量の推定に至っていない。しかも，計測機器の設置により，河床を乱さずに流砂量の計測可能であるような計測方法の確立が望まれている。

２．研究の目的

山地渓流における掃流砂は，河道全体の河床変動や流路特性を決定づけるため，流量等の水理量と併せて，任意断面における時々刻々の掃流砂の連続量を粒径別に把握する必要がある。観測においては，直接的に計測する「直接法」，何らかの媒体（ﾒﾃﾞｨｱ）を用いる「間接法」(例えば，音響，振動法）がある。直接法では，大型採砂機器など，大掛かりな設備を要し，間接法では，各種ﾒﾃﾞｨｱと流砂量の相関に一般性をもつ関係が得られておらず，いずれの手法においても，現在でも，掃流砂の連続量把握における有力な方法が確立されていない。

本研究では，掃流砂量が，掃流砂の移動体積と移動速度の積により求められることに着目して，2 つの荷重計を水中に沈め，流砂の水中重量を時系列的に取得して土砂体積を，底面付近の水の速度と掃流砂の平均速度の相関関係や水中重量の相互相関から掃流砂の平均移動速度を得ることによって，掃流砂量を連続的に計測できる機器を開発し，その適用性を検討するものである。

３．研究の方法

掃流砂量は，掃流砂の移動体積（単位幅・単位長さ当たりの移動層厚）と流砂の移動層内の平均速度の積により求められることに着目すると，これらをそれぞれ把握する必要がある。荷重計により掃流砂の移動重量を通じて移動体積を算定することが出来れば，掃流砂流の平均速度を求めることが出来れば良いことになる。現在においても，掃流砂流の平均速度を求める手法に関する共通見解が得られていないが，実用的なﾚﾍﾞﾙまでの知見を到達点とすれば，既往の流砂理論を発展させた場合，掃流砂の移動速度が無次元掃流力の関数となることが分かっているので，掃流砂移動層の流速分布が相似と仮定すると，水深と河床底面付近の清水の流速を用いれば，掃流砂の平均粒径に対する平均速度が演繹可能となり，実用的な平均速度の推定式の構築が可能となる。

2 つの荷重計で計測される荷重の時系列ﾃﾞｰﾀの相互相関からも，砂礫の速度の把握が可能となる。これを先に求めた掃流砂流の平均速度と比較し，速度予測を行う。検討のためのﾃﾞｰﾀは，室内水路実験により得る。

これらの知見を基に，掃流砂の移動体積を計測する 2 つ 1 組の荷重計に底面流速計(電磁流速計)と圧力式水位計を設置した計測ｾｯﾄを集積し，掃流砂量の把握が可能となる新しい計測機器（掃流砂量計）を構築する。

また，本研究は，掃流砂量計一式の機器構築のための，機器開発を行っている。次いで，水路実験ﾃﾞｰﾀを収集・解析を行うと云った室内・現地の実験的な研究と，流砂理論の適用による水流の底面流速と掃流砂流の平均移動速度の推定等を行うと云った，機器開発，理論的な研究と収集された実験ﾃﾞｰﾀと理論解析の比較・検討により進めている。

荷重計ｾﾝｻｰ等の機器は，研究協力者（JFE ｱﾄﾞﾊﾞﾝﾃｯｸ社）との共同開発中の試作機を用い，実験では，研究代表者の組織で所有する可変勾配直線水路を用いている。さらに，京都大学防災研究所穂高砂防観測所（研究協力者：京大穂高観測所と略す）の所有する水路を用いて現地水路実験を行っている。最後に，最終年度においては，研究成果の取り纏めとそれに関連した課題抽出を行うと共に，研究の進捗が思わしくない実験ﾃﾞｰﾀの収集等に努めている。

４．研究成果

（平成 27 年度）

平成 27 年度の当初予定では，掃流砂量計一式の開発のための準備を行うと共に，室内水路実験を推進する予定であった。事前の予備検討により，水中重量を計測するための水没するロードセルの仕組みに関する新たなアイディアが生まれたため，これを実現するために，掃流砂量計一式の試作機の作製に注力した。試作した掃流砂量計の作動確認等を空気中・水中で行い，計測機器の準備を行った。

申請者らが，以前に取得した室内水路・現地水路実験データを用いて，掃流砂の移動速度に関する検討を行った。掃流砂流の水中重量や底面付近の水流速度に関する連続ﾃﾞｰﾀの解析を行った。計測では，ｶﾒﾗ等による流況（静止画，動画）の撮影，ﾎﾟｲﾝﾄゲージ等による水深，底面流速計による底面付近の清水流速の計測を行った。これらの機器は，研究代表者の組織が所有のものを用いた。

一方，流砂理論の適用による水流の底面流速と掃流砂流の平均速度の推定等の理論展開について，掃流砂を含む清水流について，砂礫の移動速度と底面付近の清水流の流速との関係を理論的に演繹し，初年度の段階で，フレームワークの見通しをつけた。粗面乱流の対数型の流速分布を仮定し，清水流の鉛直方向の流速分布を解き，底面付近（河床から 0.3㎝）の清水流速を求めた。その流速と掃流砂流の移動速度が比例関係であると仮定し，比例係数を実験ﾃﾞｰﾀを用いて逆算した。

（平成 28 年度）

前年度までに，掃流砂の移動速度の予測式を用いた掃流流砂量と比較し，室内の水路実験で同定された実験定数との比較検証を行う予定であったが，現地実験において，水中荷重計のフレーム内の内圧（水圧）の解放が緩慢となることが原因で，計測荷重が過小となると共に，2 組の荷重時系列の波形から相互相関法により求められる流砂の移動時間の予測が過小となった。一方，前年度及び今年度において検討した水の底面流速および流砂移動速度の関係に関する理論的な解析と比較しても，その過小性が明らかになった。

荷重プレート上に，礫を通さず，水のみを通過させる金属フィルターと連通管を用いて，荷重フレームの内圧を解放するための改良を行い，簡易的な現地試験を行った。現地出水をとらえるために，計測機器等の準備を行った。例年，数回程度の出水が現地観測水路で発生するが，当該年度は，発生出水が少なく，現地観測データの取得が困難であった。

次年度において，室内の水路実験を行い，金属フィルターと連通管を用いた内圧解放に関する検知データ取得のための実験計画を作成した。また，現地に設置した掃流砂量計一式（試作機）の設置後以降の耐久性・維持管理に必要なデータを取得した。すなわち，フレームや金属天板等の腐食等の発生の有無や，使用機器の劣化等に関する情報取得であるが，経年的なデータに努めた。さらに，掃流砂量計の開発によって，付随的に開発できた，土石流の発生・流下を検知する LVP センサー開発を行い，現地設置によって出水時のデータ取得ができた。

（平成 29 年度）

平成 29 年度においては，研究の取りまとめを行った。研究期間内で成果の見通しの悪い項目についても，実験的に検討して，当初成果の到達に努めた。

まず，水中荷重計のフレーム内の水圧（内圧）開放に関する最終的な検討を行った。内圧の除去のために，フレーム天板に金属フィルターを設置し，フレームに連通管を用いた構造とすることで，内圧開放が実現できることを室内直線水路実験により確認した。この改良構造をもった水中荷重計を京大穂高砂防観測所（研究協力者 1）の試験水路に設置し，現地での簡易試験を行ったところ，若干の内圧開放が行われない場合もあったが，全般的に，改良前よりも改善されたデータが取得された。

次に，前年度に構築された流砂理論の適用による水流の底面流速と掃流砂流の平均速度の推定等の演繹された理論を用いて流砂量を算出し，水中荷重計の流砂量の計測データに対する相関関係を検討し，水中荷重計を用いた予測値に対する実験係数を求めた。算定された実験係数は砂礫の粒径のみの関数となり，一意的な普遍定数を得るまでには至らないと云う課題が残った（図 1）。

さらに，平成 27 年度の当初予定では想定していなかった副次的な成果も生まれた。現地計測における荷重計の有用性が明らかとなったため，水中荷重計の製作に適用した知見を用いて，荷重計，加速度計，圧力センサーによる土石流の検知センサー(LVP センサー)の試作を行い，現地適用性の検証が行えるレベルまで，センサーの検証が進展した(図 2)。

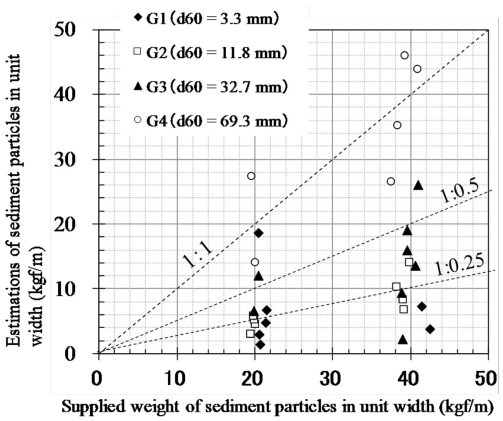


図 1　流砂量計を用いた予測値と別途計測した実測値との比較(縦軸：予測値，横軸：実測データの値)

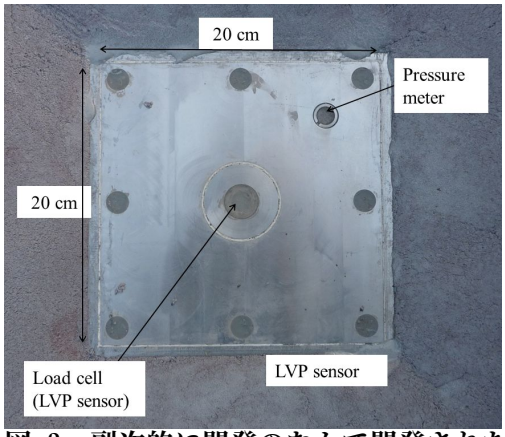


図 2　副次的に開発のなかで開発された土石流検知センサー（LVP センサー）

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，研究協力者には破線を付す）

〔雑誌論文〕（計　10 件: H27～H29 年度中）

・1) Takahiro Itoh, Takahiko Nagayama, Rei Utsunomiya, Masaharu Fujita, Daizo Tsutsumi, Shusuke Miyata and Takahisa Mizuyama: Development of new sensor systems for continuous bedload monitoring using a submerged load‐cell system (SLS), Earth Surface Processes and Landforms, https://doi.org/10.1002/esp.4329 (First published: 2 February 2018), Vol.43. pp. 1689-1700, 2018.

・2) Takahiro Itoh, Akihiko Ikeda, Takahiko Nagayama, Takahisa Mizuyama: Hydraulic model tests for propagation of flow and sediment in floods due to breaking of a natural landslide dam during a mountainous torrent, International Journal of Sediment Research, 2017, https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.10.001, Vol. 33, Issue2, pp.107-116, 2018.

・3) Satoru MATSUDA, Yotaro NISHI, Tsuyoshi IKESHIMA, Takahiro ITOH, Takahisa MIZUYAMA: Estimation of peak and surge shape of debris flow using CCTV camera and seimometer, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017 in Kuala Lumpur, Malaysia: pp.1098-1104, 2017.

・4) Takahiro ITOH, Takahisa MIZUYAMA, Michinobu NONAKA, Satoshi TAGATA, Satoru MATSUDA: Detection of debris flows by combination of LVP and wire sensors, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017 in Kuala Lumpur, Malaysia: pp.1125-1131 2017.

・5) Takahiro ITOH, Takahisa MIZUYAMA, Satoshi TAGATA: Direct debris flow monitoring using load cell systems in Sakurajima Island, Proceedings of the 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017 in Kuala Lumpur, Malaysia: pp.1142-1150, 2017

・6) S. Matsuda, T. Nagayama, T. Ikeshima, K. Goto,Y. Nishi and T. Itoh: Observation evaluating water and sediment runoff at Sabo dam in Kiso river basin, Proceedings of River Sedimentation, Wieprecht et al. (Eds)@2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02945-3, pp. 324-328, 2016.

・7) T. Itoh, T. Nagayama, R. Utsunomiya, M. Fujita, D. Tsutsumi, S. Miyata and T. Mizuyama: Development of a bedload sensor for continuous measurement and its applicability, Proceedings of River Sedimentation, Wieprecht et al. (Eds)@2017 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02945-3, pp.240-245, 2016.

・8) Ken GOTO, Takahiro ITOH, Takahiko NAGAYAMA, Rei UTSUNOMIYA, Daizo TSUTSUMI and Takahisa MIZUYAMA: Development and installation of bedload monitoring systems with submerged load cells, Journal of Mountain Science, 13(2), pp. 369-376, 2016.

・9) 天野唯子, 吉田 一雄, 野中 理伸, 伊藤隆郭, 水山高久: ハイドロフォンに用いるパイプの厚さに関する検討, 砂防学会誌 Vol. 68, No. 5, pp.43-49, 2016.

・10) 後藤　健, 伊藤隆郭, 長山孝彦, 笠井美青, 丸谷知巳: パイプハイドロフォンの音響波形に及ぼす境界条件の影響, 砂防学会誌 Vol. 68, No. 4, pp.3-11, 2015.

〔学会発表〕（計　7 件: 口頭発表が多数のため，2017 年度のみを記載）

・1) Takahiro ITOH, Takahisa MIZUYAMA, Satoshi TAGATA: Direct debris flow monitoring using load cell systems in Sakurajima Island, 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017 in Kuala Lumpur, Malaysia（国際学会）.

・2) Takahiro ITOH, Takahisa MIZUYAMA, Michinobu NONAKA, Satoshi TAGATA, Satoru MATSUDA: Detection of debris flows by combination of LVP and wire sensors, 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017 in Kuala Lumpur, Malaysia（国際学会）.

・3) Satoru MATSUDA, Yotaro NISHI, Tsuyoshi IKESHIMA, Takahiro ITOH, Takahisa MIZUYAMA: Estimation of peak and surge shape of debris flow using CCTV camera and seismometer, 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017 in Kuala Lumpur, Malaysia（国際学会）.

・4) 大坂 剛, 浅井 誠二, 石井 崇, 寺崎 賢一, 長山 孝彦, 田方 智, 松田 悟, 古谷 智彦, 伊藤 隆郭, 水山 高久, 藤田 正治: 常願寺川での流水・粒径別流砂の連続的な把握のための観測と単位流域モデル計算によるハイブリッド解析, 平成 29 年度砂防学会研究発表会, 2017.

・5) 野田信幸, 吐師一彦,田方 智, 伊藤隆郭, 松田 悟, 水山高久: 野尻川，有村川における土石流荷重計を用いた土石流流下時の縦断

的な土砂移動, 平成 29 年度砂防学会研究発表会, 2017.
・6) 野田信幸, 吐師一彦, 伊藤隆郭, 田方 智, 松田 悟, 水山高久: LVP センサーによる桜島での土石流検知と連続観測の試み, 平成 29 年度砂防学会研究発表会, 2017.
・7) 松田 悟, 長山 孝彦, 伊藤 隆郭, 堤 大三, 宮田 秀介, 藤田 正治,水山高久: 掃流砂量計と連通管を用いた掃流砂量の観測のための現地水路実験, 平成 29 年度砂防学会研究発表会, 2017.

〔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〕
ホームページ等：　なし

６．研究組織
(1)研究代表者
伊藤隆郭（ITOH, Takahiro）
日本工営（株）・中央研究所・研究員（研究推進期間中に, 課長兼任）
研究者番号： 80334035

(2)研究分担者
　なし　（　　）
　研究者番号：

(3)連携研究者
　なし　（　　）
　研究者番号：

(4)研究協力者
藤田正治(FUJITA, Masaharu)
京都大学防災研究所・教授

堤　大三(TSUTSUMI, Daizo), 宮田秀介(MIYATA, Syusuke)
京都大学・防災研究所・穂高砂防観測所・准教授, 助教

宇都宮　怜(UTSUNOMIYA, Rei)
JFE アドバンテック（株）・課長