パルス式ハイドロフォンを用いた粒径別掃流砂量の推定とその検証の試み

日本工営株式会社 ○松田 悟・長山 孝彦・田方 智・伊藤 隆郭
京都大学防災研究所 藤田 正治
政策研究大学院大学 水山 高久

1. はじめに

山地河川における流砂観測は，全国的に広く実施されている．出水時のﾊﾞｹﾂ採水などの直接手法，濁度計による細粒成分や音響法による掃流砂計測などの間接手法がある．流砂観測において得たい情報は流れる土砂の量と質（粒径）が重要であることが言われており，現在間接手法による流れる土砂の質（粒径）の把握について検討している例は多くない．本研究では，音響法を用いた掃流砂観測機器のひとつであるﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝを用いた掃流砂の礫径を推定，また，それらの結果に基づいて粒径別流砂量を推定する手法を示す．また，実際の山地河川の観測所のﾃﾞｰﾀを例にして，ﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝに併設の観測枡で捕捉された土砂の粒度分布と推定された粒度分布を比較し，推定手法の検証を試みた結果について報告する．

2. 運動量と出力電圧値の関係把握

2.1 運動量と出力電圧値の関係把握

音響法を用いたﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝは，礫が鋼管に衝突した際の音がﾏｲｸを通じて電圧に変換され，電圧増幅等の波形処理を介してﾊﾟﾙｽ数が出力され（後藤ら，2012：図 1），観測枡に堆積する土砂量を用いた校正を行うことによりﾊﾟﾙｽ数から流砂量を推定する．この時，礫の衝突の運動量とﾊﾟﾙｽのｶｳﾝﾄに用いられる出力電圧のﾋﾟｰｸ値に線形関係があることが言われており（たとえば栗原ら，2009），この関係に着目した．実際には，ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝに既知の質量 m の物を衝突させた際の衝突速度 u_s から運動量 mv を求め，その時の出力電圧との関係を把握することになる．しかしながら，運動量に対する出力電圧は，ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝの固定方法による違いが指摘されており（後藤ら，2015），ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝにおける運動量と出力電圧の関係を各現場での試験を通じて把握しておく必要がある．

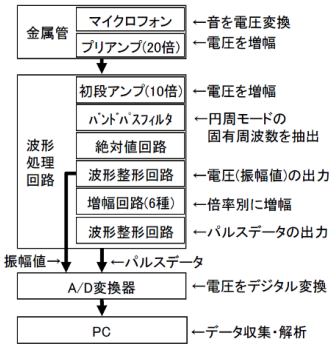

図 1 ﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝｼｽﾃﾑ

2.2 試験方法

運動量と出力電圧の関係は，現場の機器の設置状況によって異なるため，現地試験により関係性を把握しておく必要がある．現場に設置されたﾊﾟｲﾌﾟﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝにおける運動量と出力電圧の関係性確認に先立ち，与える運動量の検討を行った際の様子を図 2 に示す．室内試験ではｺﾝｸﾘｰﾄ上にﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝを設置し，管の両端をｻﾄﾞﾙﾊﾞﾝﾄﾞで固定した．使用した機器については，後藤ら（2012）と同様の機器及びｼｽﾃﾑで実施している．幅広い運動量での試験を検討するため 7 種の径（ϕ=26 mm，22 mm，16 mm，10 mm，8 mm，6 mm，4 mm）の鋼球（SUJ2）を自由落下させ，ﾊｲｽﾋﾟｰﾄﾞｶﾒﾗ（600 fps）で衝突速度を把握して現場試験で与える運動量の検討を行った（図 3）．

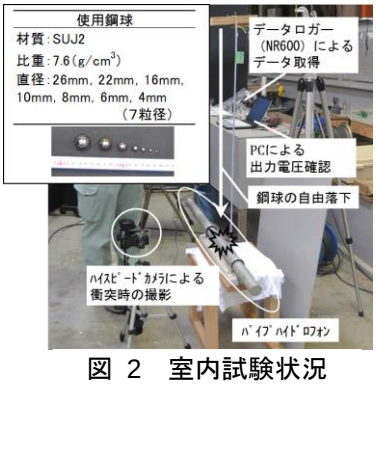

図 2 室内試験状況

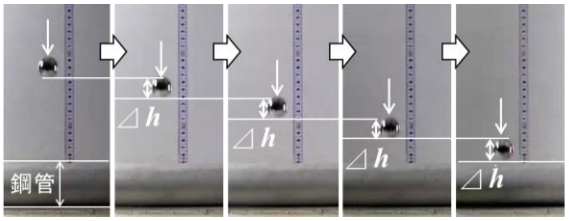

図 4 ﾊｲｽﾋﾟｰﾄﾞｶﾒﾗによる衝突速度の推定

室内試験の結果を図 4 に示す．2 g･m/s の運動量よりも大きい量を与えると出力値が頭うちになるような結果が得られており，既往研究においても同様の傾向が確認されている．ここで示す結果は，室内試験の物であるが，現場に設置されたﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝにおいても，同様のｼｽﾃﾑであるため，既知の運動量を与え，その際の出力電圧との関係を求めれば，計測ﾃﾞｰﾀからの粒径推定に用いることのできる線形関係が得られる．

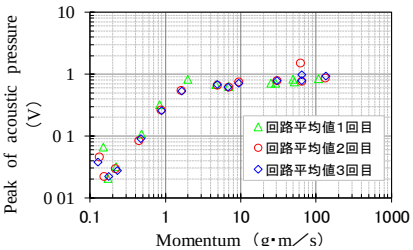

図 3 運動量と出力電圧の関係（室内試験結果）

3. 計測ﾃﾞｰﾀからの粒径推定

3.1 粒径の推定

運動量は，礫の質量と礫の衝突速度（移動速度）の積で表現されるため，礫の移動速度が推定でき，かつ現場土砂の土粒子密度が把握できれば，球体を仮定した際の粒径推定が可能である（図 5）．

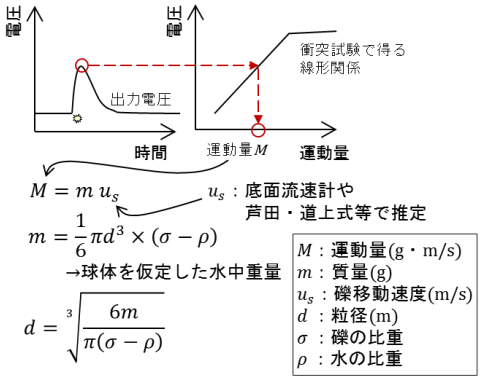

図 5 粒径推定のｲﾒｰｼﾞ

なお，ここでは礫の移動速度を同地点に設置された観測機器で別途計測される水理量を用いた芦田・道上式や綱川ら（2013）で示される礫移動速度と底面流速の関係をもとに底面流速計の値から推定した礫移動速度を用いて検証に使用した．

3.2 粒度分布の推定

ﾊﾟｲﾌﾟﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝにより計測されたﾃﾞｰﾀは，現場により異なるが，1 分から 5 分のｲﾝﾀｰﾊﾞﾙでﾃﾞｰﾀﾛｶﾞｰに記録される．この際，ｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ時間中のﾊﾟﾙｽ数の合計が記録される他，その期間中の平均的な出力電圧が記録される．この電圧値を用いて運動量および粒径の推定をｲﾝﾀｰﾊﾞﾙ時間ごと行った．これを 1 出水でまとめると，その出水での粒度分布が推定される．

4. 粒径別流砂量の推定と検証

4.1 流砂量の推定

流砂量の推定にはﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝﾊﾟﾙｽの数から推定する方法（Goto, et al., 2014）や音響波形（ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝからの出力電圧波形）から推定する方法（鈴木ら，2010）が，本研究においては，図 6 に示すように，ﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝと観測ますが設置されている実在の山地河川の観測地点におけるﾃﾞｰﾀを用いて流砂量の推定を行うとともに推定粒度分布の検証を行った．ﾊﾟﾙｽ式ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝでは，波形処理後の電圧値を複数の倍率に増幅し，それぞれのﾊﾟﾙｽ数を把握する．各増幅率のﾊﾟﾙｽ数と観測枡に堆積した土砂量との相関（図 7 の①）が良い増幅率を用いて校正線を引き（図 7 の②）ﾊﾟﾙｽ数から土砂量を推定する（図 7 の③）．これにより求められた流砂量と先述の粒径情報をもって粒径別流砂量を推定した．

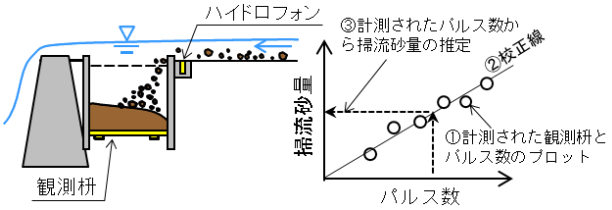

図 6 流砂量の推定

4.1 粒度分布の推

この対象地点
設置されたﾊﾟﾙｽ
ｲﾄﾞﾛﾌｫﾝの運動量
出力電圧との関
を把握するため
現場での試験も
施した（図 8）．
の試験で求めら
た運動量とﾊｲﾄﾞ
ﾝの出力電圧の関
を用いて算出した

図 7 現地試験の実施

粒径を 1 出水分でまとめた粒度分布を図 9 に示す．比較対象となる観測枡で捕捉された粒度分布も併せて掲載している．観測枡内の土砂の粒度分布の形に一致するような結果は得られなかったが，60%粒径で比較すると底面流速計から推定した礫移動速度を用いた場合の推定粒度分布と芦田・道上式を用いた場合の推定粒度分布の平均的な粒径と観測枡の粒径は凡そ同程度になる．この結果から今回の検証で粒度分布の推定までは至らずとも現場での代表的な粒径の推定には寄与するものと示唆される．

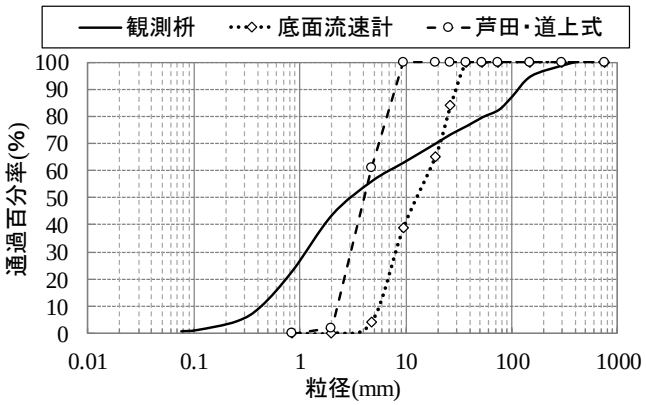

図 8 推定粒度分布と観測枡で捕捉された土砂の粒度分布の比較

5. おわりに

ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝの計測可能範囲として細かい粒径に対して計測できないことや，大きい粒径，大きな運動量に対しては電圧値が頭打ちになるような関係性であることが原因の一つとして考察される．今回はﾊﾟｲﾌﾟﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝを対象に検討しているが，現在同じく音響法を利用した掃流砂の観測にﾌﾟﾚｰﾄ型（野中ら，2013）や同じﾊﾟｲﾌﾟ型でも肉厚の厚いﾀｲﾌﾟのﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝ（野中ら，2017）が用いられる事例もあるため，各ﾀｲﾌﾟでの適用範囲などの比較検討を行う．

参考文献

1) 後藤健・伊藤隆郭・長山孝彦・田方智・杉山実(2012)：平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 586-587.（題目省略，以下同様）
2) 栗原淳一・宮本邦明(1992)：砂防学会誌，Vo.44，No.5，p.26-31.
3) 後藤健・伊藤隆郭・長山孝彦・笠井美青・丸谷知己(2015)：砂防学会誌，Vo.68，No.4，p.3-11.
4) 長谷川祐治・宮本邦明(2009)：ﾊｲﾄﾞﾛﾌｫﾝによる流砂量計測に関する研究，平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集，pp. 282-283.
5) 綱川浩章・渡邊正一・石田哲也・四十谷朋子・矢下誠人・長山孝彦・田方智・後藤健・伊藤隆郭・水山高久（2013）：平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集 A, pp. A-218 - A-219.
6) Ken GOTO, Takahiro ITOH, Takahiko NAGAYAMA, Mio KASAI, Tomomi MARUTANI(2014)：International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 7, pp. 101-110.
7) 鈴木拓郎・水野英明・小山内信智・平澤良輔・長谷川祐治（2010）：砂防学会誌，Vol.62, No.5, pp.18-26.
8) 野中理伸・水山高久・堤大三(2013)：平成 25 年度砂防学会研究発表会概要集 B, pp. B-266 - B-267.
9) 野中理伸・水山高久・堤大三(2017)：平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, pp. 494-495.