

流砂量測定器の試作研究(2)

澤 井 健 二

A STUDY ON THE EQUIPMENT FOR SEDIMENT DISCHARGE MEASUREMENT (2)

By Kenji SAWAI

Synopsis

In this study, some measuring techniques of sediment discharge are discussed. In the previous paper, the author devised a direct measuring system composed of a fixed sieve, a sand pump, rotating baskets and a load cell. In this paper, it is improved to a system composed of a trommel and a tipping bucket suspended by a load cell. For relatively small gravel and sand, this system works well.

It is difficult, however, to apply direct measuring methods for coarser gravel, and it is necessary to devise some indirect measuring techniques.

Among some indirect methods, an acoustic one is discussed in this paper. The oscillation of air confined in a pipe is detected by a microphone mounted on an inside wall of the pipe. The amplitude is proportional to the momentum of the particle which impacts the pipe. If the particle velocity is known or constant, it is possible to estimate the particle mass from the amplitude with some calibration. Two sets of calibration were carried out using a small flume. It is expected that this method will be also applicable to field measurement.

1. 緒 言

河川における土砂の動態を明らかにする上で、流砂量を正しく把握することは必須の課題である。前報¹⁾において、著者は水路実験用に開発した比較的簡易な自動流砂量計について述べ、ある条件内では、実用に供し得ることを明らかにした。しかしながら、その適用条件を広げていくためには、いくつかの改良を加える必要のあることも見出された。その主な点を要約すると、次のようである。

流砂量の測定には、流砂を一定時間捕捉して、その重量または体積を計測する直接法と、流砂を捕捉せずに、流砂にかかわる他の物理量を測定して流砂量を推定する間接法とがあるが、従来の流砂量計は、そのほとんどが直接法によるものである。直接法では、流砂をいかにして捕捉するかということと、捕捉した流砂をいかにして計量するかということに問題を分けることができるが、流砂を計量し易い状態で連続的あるいは断続的に捕捉するには、流砂を流水からうまく分離するとともに、計量部へ移動させ、計量後、それをうまく排出することが必要である。前報で試作した流砂量計測システム（1号試作機）では、水路下流端に固定した0.3mmメッシュの金網によって流水と流砂を分離させたが、20ℓ/s以上の流量では、金網の目詰まりによる堰き上げがしばしば生じ、長時間継続して用いることが困難であった。また、捕捉した土砂を計量部へ輸送するのに、1ℓ/sのポンプを断続的に運転したが、ポンプあるいはパイプの閉塞することがしばしばあった。容量2ℓの5個の金網円筒容器をベルトで間欠的に駆動させ、受砂→秤量→排

砂→洗浄→待機を反復させる計量部は順調に作動したが、秤量時間間隔が一定（1分間）であったため、10%以内の精度で計測できる流砂量の範囲が0.2～1 kg/minと比較的狭かった。性能のチェックに用いた砂は粒径0.4 mm～2 mmのものであるが、この試作器では、それが取り扱える粒径範囲の限界に近いものと考えられる。

その後、著者はこれらの問題点のいくつかを改良し、さらに適用範囲の広い採砂・秤量機構について検討するとともに、音響を用いた流砂の間接測定法についても検討し、実用化の見通しを得たので、報告するものである。

2. 直接法による2号試作機

1号試作機において見られた種々の難点を克服するために、Fig. 1に示すような、大幅な改良を施した自動流砂量計を設計・試作した。主な改良点は、流水を分離するフルイを固定式から回転式にしたこと、秤量を間欠的なものから連続的なものにしたことである。これらは

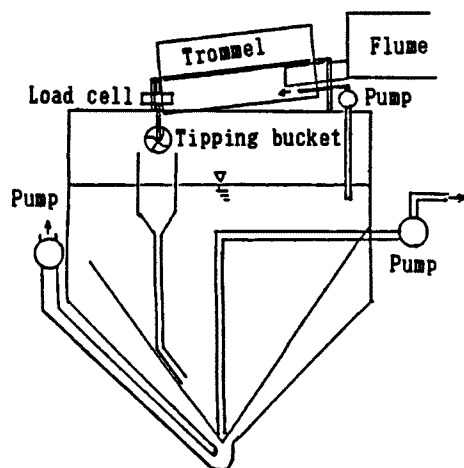


Fig. 1. Apparatus for a direct measurement of a sediment discharge.

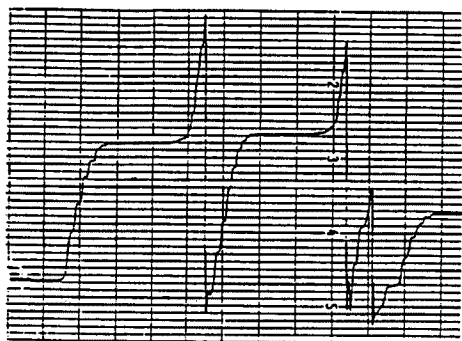


Fig. 2. A sample record of the output from the load cell.

セルの容量を超えないよう、留意した。

Fig. 2は、測定記録の一例であり、ほぼ連続的に流砂量が検出できている。転倒開始時の重量にばらつきがあるのは、マスにたまる砂礫の位置にばらつきがあるためであり、マスの転倒回数のみでは、流砂量が正確に測定できないことを示している。また、転倒後の重量にもばらつきがあるのは、砂礫のいくらかがマスに付着して落下しないからであろう。しかしながら、本装置では、砂礫の重量を連続的に測定し

た自動流砂量計を設計・試作した。主な改良点は、流水を分離するフルイを固定式から回転式にしたこと、秤量を間欠的なものから連続的なものにしたことである。これらはいずれも本研究で新たに考案されたものではなく、穂高砂防観測所において、既に実用に供されているものを組み合わせたものである。

すなわち、水路下流端に0.3 mmメッシュの金網でできた直径60 cm、長さ110 cmのフルイを傾斜角度9°で設置し、中心軸のまわりに9 rpmで回転させる。これにより、水路からの流出水はほとんど下方に落下し、砂礫のみが下流側に搬出される。直径数mm以上の礫が含まれている場合には、砂礫は網に付着せず、円周方向にわずかに移動すると、重力の作用で中央に引き戻されながら下流方向へ移動し、数秒から十数秒程度のうちにフルイの外に搬出されるが、最大径が小さい場合には、いくらかの砂礫が網に付着してフルイと共に回転し、下流端に到達するのに長時間を要することがある。そこで、フルイの上流側から、膜状の噴流を吹きつけて、金網に付着して上がろうとする砂礫を落下させると共に、水流の助けで下流側へ速く移動させるようにした。フルイの下流端直下には、直径20 cm、長さ25 cmで、4室から成る転倒マスをロードセルを介してつり下げている。転倒マスの各室の隔壁は多孔板でできており、片面に0.3 mmメッシュの金網が張ってある。転倒荷重モーメントは分銅の調節により、0.5～2 kg cmの範囲で可変となっている。ロードセルは、客量5 kg、精度0.3%フルスケールのものを用い、砂礫と転倒マスの合計重量がロード

ているため、それらの問題は支障とはならない。

本装置では、現在のところ、金網の目詰まりによるトラブルは発生しておらず、1号機に見られた最大の問題は解決された。また、流量が0～40 l/sの間で変化しても、システムは良好に作動する。

ただし、現在のところ、転倒マスの軸受けとストッパー機構に若干の問題があり、改良の余地が残されている。そのひとつは、軸受け部分に細砂が挟まると、摩擦が増え、転倒マスが作動しなくなることである。もうひとつは、マスが転倒してまだ完全に静止していないうちに多量の砂がやってくると、マスが回転し続け、計測不能となることである。これらの問題を解決するには、砂礫と分銅のモーメントのバランスではなく、モーターなどによってマスの回転を強制的に制御することが有効であろう。

3. 衝突音による流砂量の間接測定法

3.1 測定原理

砂礫が流下する際に特有の音を発することはよく知られており、これを計測しようとした試みも古くからあるが、流砂の発する音と流砂量などの対応が不明確なこと、周囲の雑音から流砂の発する音のみを抽出するのが困難なことなどから、実用には供されていないようである。これは、自然状態で流砂の発する音をいわば受動的に捉えようとしていたところに問題があり、何らかの手法によって能動的に流砂の発する音を制御することができれば、計測も容易になるものと期待される。

そのような、流砂音の制御ならびに抽出法のひとつとして、パイプの中にマイクロホンを封入し、パイプに加わった衝撃による気柱の振動を測定することが考えられる。ここで、パイプの形状、材質や、設置法あるいは流砂の当て方そのものを制御すれば、他の音ととの識別を容易にするとともに、流砂量などとの対応度を高めることができるものと考えられる。

さて、半径 a 、長さ l の長い円筒閉管内の気柱の円周方向の1次モードの固有振動数は、

$$f_{10}=0.298c/a \quad \dots\dots\dots (1)$$

半径方向の1次モードの固有振動数は

$$f_{01}=0.61c/a \quad \dots\dots\dots (2)$$

軸方向の1次モードの固有振動数は

$$f_r=c/(2l) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。²⁾

ここに、 c は管内の音速である。流砂による衝撃音は衝撃の瞬間を除けば、これらの固有振動で特徴づけられるものと考えられる。

一方、体積 V 、表面積 S の室内の残響エネルギー密度は、

$$\varepsilon=\varepsilon_0 \exp(-13.6t/T) \quad \dots\dots\dots (4)$$

残響時間は

$$T=0.16V/(\alpha S) \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表される。ここに、 ε_0 は初期音響エネルギー密度、 α は平均吸音率である。この残響時間と流砂の衝突頻度をうまく組み合わせることにより、測定効率を高めることが可能となろう。

ε_0 は、粒子の衝突のしかたによっても異なるが、鋼球をパイプの中心に向けて衝突させた場合には、衝突直前の運動量に比例することが知られている。したがって、粒子がパイプの中心に向かって衝突し、かつ衝突速度が把握できる場合には、 ε_0 を測定することによって、粒子の質量を推定することができる。粒子の衝突角度や速度が一定でない場合には、 ε_0 と質量との対応にもばらつきが生じるが、その統計的性質がわかれば、 ε_0 の分布から衝突粒子の質量分布をある程度推定することが可能となろう。

3.2 予備実験

実験に用いた水路は、幅 30.7 cm、長さ 12 m の鋼製勾配可変水路で、下流部の約 4 m 区間に厚さ 3 cm の木板を敷き、Fig. 3 に示すような、片端にマイクを封入した 8 本の鋼管を下半分だけ埋め込んだ状態で河床に直接固定し、まず、水だけを流して録音した。次に水を流しながら、直径 1～4 cm で重さが既知の礫を 1 個ずつ投入した。

その後、さらに粒径 1～4 cm の礫を連続的に供給し、録音と同時に下流端で土砂を採取して秤量した。パイプは 2 本 1 組となっており、上流から、A (外径 1 cm、厚さ 1.5 mm)、B (外径 1 cm、厚さ 2 mm)、C (外径 3 cm、厚さ 2 mm)、D (外径 3 cm、厚さ 3 mm) の 4 組となっている。管の全長は 30 cm で、内部の 25 cm の部分が空洞になっておりその両端に吸音材がセットされている。各組のパイプの間隔は直径の 10 倍に設定した。マイクロホンは、直径 5.6 mm、長さ 7 mm のコンデンサタイプで、周波数特性は 50～15000 Hz である。記録には、周波数特性 100～8000 Hz のアナログカセットデータレコーダを用いた。

水理条件は、勾配 1/30～1/15、流量 10～20 l/s、給砂量 0～5 kg/min の範囲で数通りの組み合わせを設定した。

Fig. 4 は、パイプ C の出力波形を電磁オシログラフで表示したもので、ch. 1 が上流側、ch. 2 が下流側のマイクによるものである。この図からわかるように、礫の衝突時の波形は、水流のみの場合とは明らかに異なり、少なくともある程度以上の大きさの礫の衝突を識別することは可能である。ただし、ch. 1 と ch. 2 の波形の間には顕著な差異はなく、対象とするパイプへの衝突音だけでなく、他のパイプへの衝突音に対しても、両方のマイクが同時に反応している。さらに詳細な検討を行ったところ、必ずしも礫がパイプに衝突する時だけでなく、床の他の部分に衝突する時にも類似した衝撃音の感知されることがあった。これは、衝撃音の検出頻度から砂礫の通過頻度を推定しようとする場合、きわめて不都合であり、何らかの方法で、対象とするパイプへの衝撃音以外の音を遮断する必要がある。

Fig. 5 は、礫の重さとピーク振幅値との関係を示したものであり、小さな礫に対しては重さとピーク値の関係を求めることができないが、約 15 g 以上の礫に対しては、礫の重さとピーク値との間にかなり明確な相関が認められる。

パイプの厚みを変えた場合には、振幅がやや変化するものの、残響の特性はほとんど変わらない。一方、パイプの外径を変化させた場合には、パイプ径が小さいと、礫が衝突せずに通り超してしまい易くなり、逆にパイプ径が大きいと、パイプの設置による上流側への堰き上げや下流側の剥離渦の形成のため、礫が滞留してしまい易くなる。これは、パイプ径だけでなく、流速や礫径にも依存する。

また、流砂量が多くなると、礫の衝突時間間隔が短くなるが、それが、衝突音の残響時間よりも短くなると、個々の衝突音を識別することは困難となる。さらにパイプが埋没すると、本方法が適用できなくなるのはもちろんである。

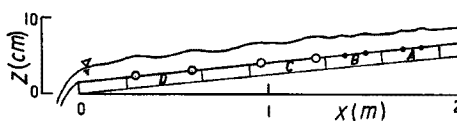


Fig. 3. Pipes arrayed along the flume bed.

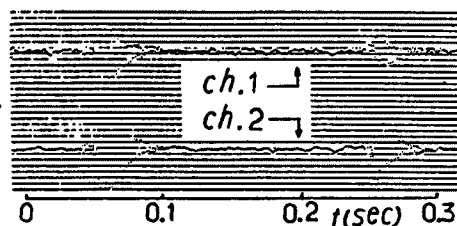


Fig. 4. A sample record of the output from the microphone.

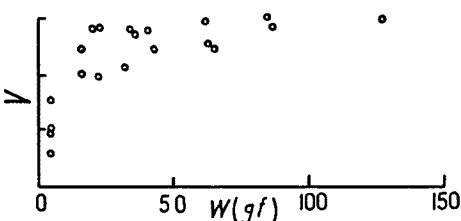


Fig. 5. A plot of the maximum amplitude versus the particle weight.

3.3 流砂の衝突音のリアルタイム処理

前述の予備実験において、河床に設置したパイプの中に封入したマイクロホンによって、流砂の衝突音を検出し、礫の大きさをある程度推定できることがわかったが、これを流砂量計に発展させるには、リアルタイム処理を考える必要がある。

Fig. 6 は、前記の直径 3 cm のパイプに礫が衝突した際の音響波形を、プリトリガー機能付きのアナライジングレコーダで採録し、その時間波形とスペクトル分布を示したものである。衝撃音はかなり高周波成分を含んだ不規則なものであり、約 10 ms の間に指数関数的に減衰する。最も卓越しているスペクトルピークは約 8 kHz に見られるが、これは式 (1) に示した円周方向の固有振動に対応する。また、2 番目のピークが約 0.7 kHz に見られるが、これは式 (3) に示した軸方向の固有振動に対応する。

このような音響波形を直接に AD 変換してリアルタイム処理することは、不可能ではないにしても、あまり効率的であるとは言えず、アナログ的な手法である程度の処理を行ってから AD 変換する方法が効率的であろう。

そこで、Fig. 7 に示すように、マイクからの出力をアンプで増幅した後、ダイオードによって整流し、さらに抵抗とコンデンサを組み合わせた回路によって遅延・平滑化すると、Fig. 8 に示すような波形が得られ、比較的遅い AD 変換によっても、ピーク値や積分値をかなり正確に求めることができるようになる。そこで、Fig. 9 に示すような流れ図に従って、パーソナルコンピュータで個々の衝突音の電圧値を一定個数ずつ採録し、一定時間ごとにそれら进行处理して、各衝突ごとの電圧の積分値を出力するプログラムを作成した。

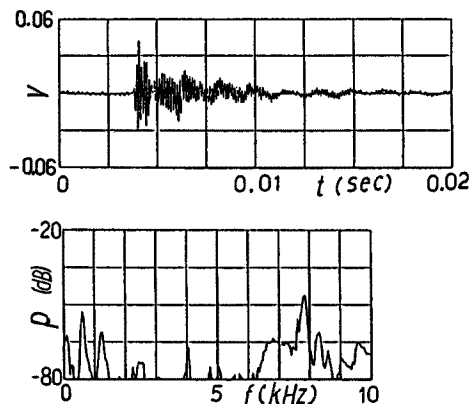


Fig. 6. A typical wave pattern and spectrum distribution.

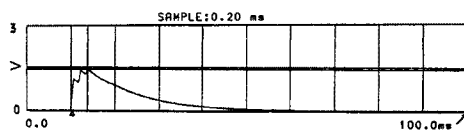


Fig. 7. An analog circuit for pre-acquisition of data.

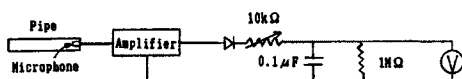


Fig. 8. A sample record obtained through the analog circuit.

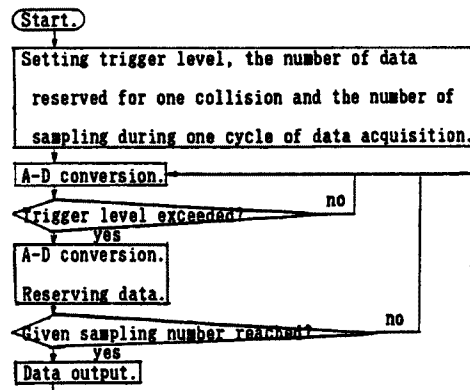


Fig. 9. The flow chart of real time processing of data.

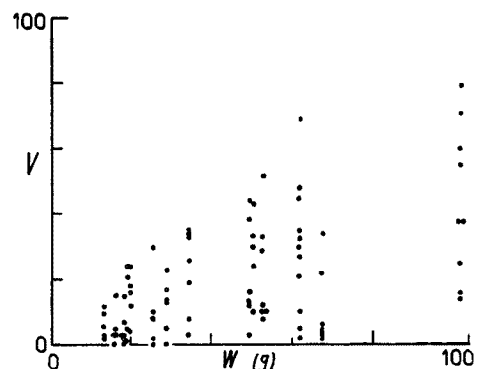


Fig. 10. Data for the case in which particles were supplied separately.

Fig. 10 は、幅 15 cm、勾配 1/20 の水路床に、先の予備実験で用いた直径 3 cm、長さ 30 cm のパイプを横断方向に半分の高さまで埋め込み、8 l/s の給水下で同一の礫を 10 回ずつ反復して 16 個の礫を個別に投下し、礫重量と出力値との関係をプロットしたものである。予備実験において、パイプを直接に水路に固定すると、パイプへの衝突音以外の音をも検出してしまうことがわかっているので、本実験では、スポンジを介してパイプを固定し、周囲からの音響的な絶縁を図っている。この図より、大きな礫の通過はほぼ毎回検出されているが、礫が小さくなるにつれて検出率が低下していることがわかる。3 g 以下の礫も投下したが、それらは 1 回も検出されなかった。また、同一の礫に対しても、検出されたデータにかなりのばらつきがあり、個々のデータから礫径を特定することには無理がある。これは、速度をも含めて、礫の衝突のしかたにばらつきがあるためであろう。しかしながら、出力電圧の分布範囲と礫重量との間には明確な相関があり、多くのデータの統計処理によって、粒径別の流砂量を求めることは十分可能である。

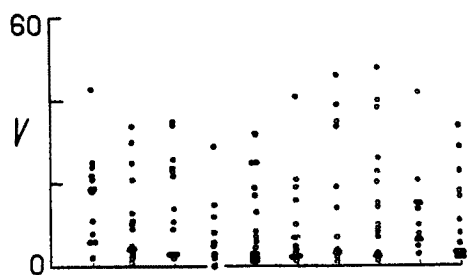


Fig. 11. Data for the case in which 16 particles were supplied simultaneously.

Fig. 11 は、これら 16 個の礫の同時投入を 10 回繰り返して、各回の出力値の分布をプロットしたものである。個々の検出データには各回ごとにかなりのばらつきがあり、どのデータが何 g の礫に対応しているかは特定できないものの、礫を同時に投入した場合でも、出力データを Fig. 10 と対比することにより、統計的な意味で、その重量分布を推定できることが確認できた。もっとも、礫の衝突頻度や衝突速度、衝突角度は、水理条件によっても変わるため、この方法では、水理条件ごとのキャリブレーションが必要である。

3.4 センサーの形状と配置の改良

前述のように、パイプを河床に設置したのでは、流砂がパイプに当たらずに、その上を通過してしまうことがあり、しかもその頻度が水理条件に依存する。そこで、パイプとその周辺の河床とを音響的に完全に絶縁せずに、ある範囲の河床面に当たった流砂音は検出するようにすると、今度は、同一の礫が複数回衝突する頻度が増加し、正しい流砂量計測ができなくなる。また、パイプとそれ以外の部分とでは、同一の礫でもその衝突のしかたが異なるため、礫重量と音響出力の関係が異なり、同じデータ処理をしたのでは、誤った結果を導くことになる。

そこで、できるだけばらつきが少なく、しかも 1 回だけ礫を衝突させるような構造物として、Fig. 12 に示すように段落ち部に板を設置し、その裏側にマイクロホン被封入したパイプを取り付けて、板への衝突音を検出する方法を考案した。さらに、板への衝突速度をできるだけ一定にするために、流砂を一旦鉛直の金網に当てて速度を矢わせてから自由落下させて、板に当てるようにした。鉛直面を金網にしたのは、水流をできるだけ排除することと、流砂の衝突エネルギーを吸収して、反射を弱めるためである。適度な大きさの衝突板をある程度傾けて設置しておくと、ほぼすべての礫を 1 回ずつ当てることができる。

さて、礫をうまく板に衝突させることができたとしても、その衝突音が処理のしやすいものでなければ、適当とは言えない。板の衝撃音は、板の材質、形状、寸法、固定のしかたなど、多くの要因に支配されるが、ある程度の振幅を有すること、残響時間ができるだけ短いことなどを考慮して、幅 20 cm、長さ 15 cm、厚さ 15 mm のアクリライト板を用い、前記の実験に用いた直径 3 cm、長さ 30 cm、肉厚 2 mm の鋼管に帯金で固定し、鋼管の両端を、スポンジで音響的に絶縁して金網のフレームに固定した。

Fig. 13 は、幅 15 cm、勾配 1/50 の水路の下流端にこのセンサーを設置し、9 l/s の給水下で同一の礫を 10 回ずつ繰り返して投下し、礫重量と出力との関係をプロットしたもので、ほとんどすべての礫の衝突が検出されているとともに、Fig. 10 の場合に比べて、データのばらつきもかなり小さくなっていることがわかる。しかしながら、この場合でも、個々の衝突音からそれぞれの礫の大きさを特定することは不

可能であり、統計的な意味でのキャリブレーションが必要であることには変わらない。

なお、この図の縦軸に示す出力値は、トリガー検出時から50個のサンプリング電圧の和を、0.08 Vを1として示したものである。トリガーレベルは0.04 V、サンプリング時間は約0.1 sであるが、これらはアンプの倍率やコンピュータの処理速度に依存するので、絶対的なものではない。

Fig. 14は、17個のれきの同時投入を10回繰り返して、出力分布をプロットしたもので、個々の測定では礫の重量分布までは求まらないにしても、それらの総量はかなりの精度で把握できており、また、試行を繰り返すことによって、その分布をもある程度把握できることが判明した。

現地観測のように、反復のできない場合においても、ある程度の量のデータを統計的に取り扱うことにより、本方法によって、流砂量ならびにその粒度分布の変化をリアルタイムで測定できるものと考えられる。

4. 問題点と今後の展望

以上のように、本研究では、採砂・秤量方式による流砂量の直接測定法と、流砂の衝突音から流砂量を推定する間接測定法について、種々の検討を行い、実用化への見通しを得ることができた。しかしながら、両手法とも問題点を含んでおり、それぞれに改良の余地があるとともに、それらは相い補うものであり、条件によって使い分けるかもしくは併用することにより、効率が高まるものと考えられる。

直接法の最大の難点は、装置が大がかりになることである。とりわけ粒径が大きくなると、採取・計量することはきわめて困難であり、10 cm程度以上の礫を直接法で計測するのは、効率的でない。

一方、音響法は、ある程度以上の大きさの礫に対して有効なものであり、数mm程度以下の礫や砂に対しては、効果的でない。したがって、粒径範囲の広い場で流砂量を計測するには、大粒径成分は音響法によって計測し、小粒径成分は直接法で計測するのが、現在のところ有効であると考えられる。

流砂量の間接的計測法のひとつに、流砂の映像による方法があるが、可視光によるものは、表面を通過する粒子の計測に限定されてしまう。そこで、最近、著者ら⁴⁾

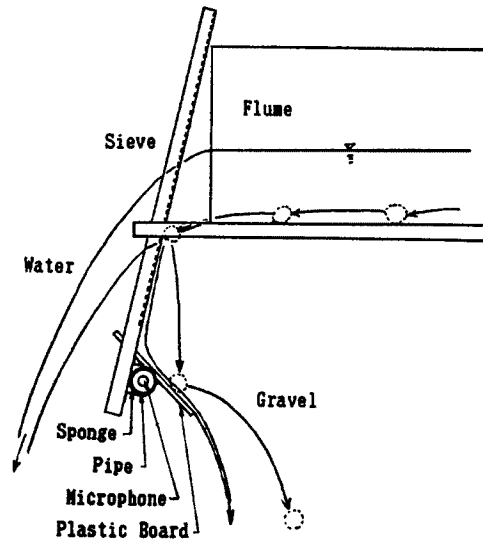


Fig. 12. Arrangement of the sensor in the improved system.

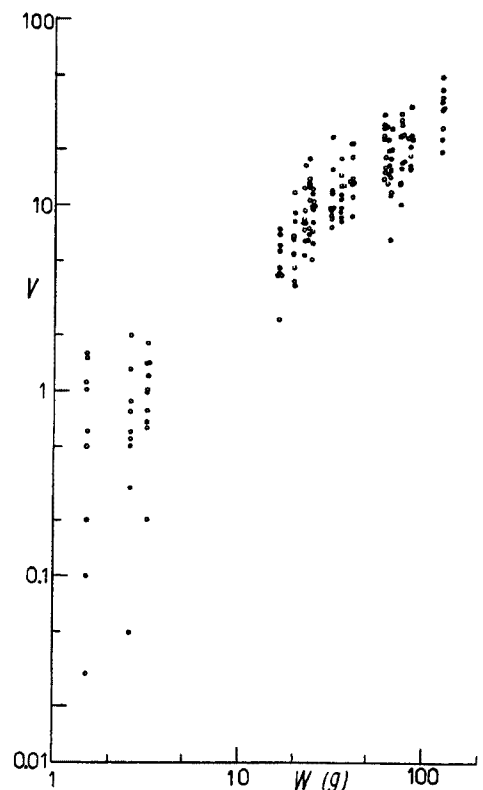


Fig. 13. Data for the particles supplied separately in the improved system.

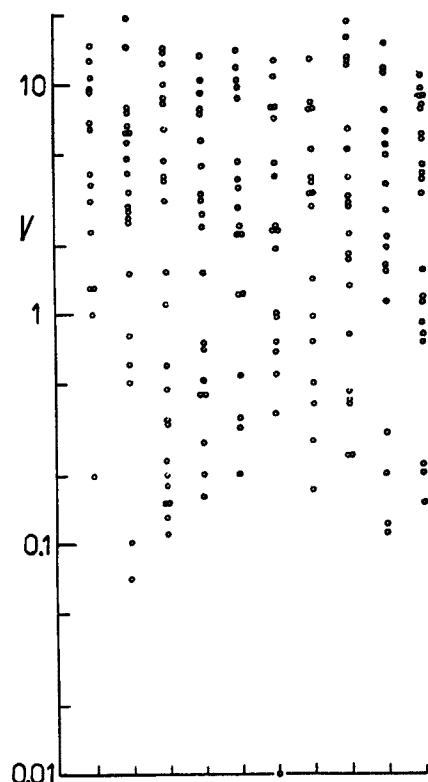


Fig.14. Data for the particles supplied simultaneously in the improved system.

は、超音波断層撮影法を流砂量計測に応用する研究を試みている。まだ、実用化の域には達していないが、将来、有力な流砂量計測法とし得る見通しを得ている。

あ と が き

本研究を進めるにあたり、京都大学防災研究所砂防部門 芦田和男教授、宇治川水理実験所 今本博健教授、穂高砂防観測所 沢田豊明助教授より、均大の助言と援助をいただいた。また、パイプの中にマイクロホンを封入する着想は、建設省北陸地方建設局立山砂防工事事務所の委託により、財団法人砂防・地すべり技術センターが世話役となって組織された流砂量測定手法検討委員会から得たものである³⁾。音響法に関する最近の実験では中国黄河水利科学研究所 馮金亭氏の助力を得た。記して関係各位に謝意を表す。

なお、流砂量測定法の開発には、砂防工学や水理学のみでなく、電子工学や計測工学の分野との協力が不可欠であり、昭和62年度より、流砂量測定手法研究会（京都大学工学部電子工学科 小倉久直教授、滋賀大学教育学部物理学講座 板倉安正教授、京都工芸繊維大学電子工学科 中山純一助教授、京都大学防災研究所穂高砂防観測所 沢田豊明助教授、京都大学防災研究所地形上じょう災害部門 諏訪浩助手、滋賀大学経済学部計算センター 谷口伸一助手、砂防・地すべり技術センター技術課 宮本邦明氏ならびに筆者（京都大学防災研究所宇治川水理実験所助教授）の8名で、共同研究を進めていることを付記する⁵⁾。

参 考 文 献

- 1) 澤井健二：流砂量測定器の試作研究，京都大学防災研究所年報，第29号 B-2，1986，pp.505-510.
- 2) 城戸健一：音響工学，コロナ社，1982.
- 3) 北陸地建立山砂防工事事務所：昭和60年度流砂量測定手法検討業務報告書，1986.
- 4) 小倉久直・中山純一・澤井健二・鈴木 宏・宮本邦明：超音波による流砂の映像化と流砂量計測について，自然災害科学，Vol. 7，No. 3，1988（投稿中）.
- 5) 谷口伸一・板倉安正・清野雅雄・鈴木 宏・澤井健二・小倉久直：流砂量の間接的な測定法としての音響法の提案とその信号処理，第26回計測自動制御学会講演集，1987.