

衝突音による粒径別流砂量測定法に関する研究

Estimation of the Sediment Discharge and Size Distribution
from Collision Sounds

*

**

澤井健二・銭谷善信

By Kenji SAWAI and Yoshinobu ZENITANI

In order to estimate the sediment discharge and size distribution in mountain stream, a new method by means of collision sounds is developed.

In order to isolate the collision sound from noise, a small microphone was confined into a pipe, which was attached behind a board. When a gravel particle collides to the board, a typical sound generates, whose amplitude is expected to distribute with some definite function for each size class.

In this paper, a new estimation method of the sediment size distribution is derived based on the factor analysis method and applied to some flume experiments.

Keywords: sediment discharge, size distribution, collision sound, measurement, probabilistic analysis

1. まえがき

著者ら^{1), 2)}は、数年前から衝突音による流砂量測定法について研究を進め、衝突条件をうまく制御すれば、衝突音の振幅と礫径との間にかなりの相関があることを見出してきた。すなわち、平均的には、粒径の大きな礫ほど大きな衝突音を生じることが期待され、検出された衝突音の個数と平均振幅から、平均粒径と流砂量を推定することがある程度可能である。しかしながら、同じ粒径の礫に対しても、衝突音の振幅はかなり広く分布し、個々の衝突に関して言えば、かなり粒径の異なる礫に対しても、衝突音の振幅が逆転することがしばしば見られる。そのため、個々の衝突音の振幅に対応する粒径を求めて全体の粒径分布を推定することはできず、より適切な粒径分布の推定法が検討課題として残されてきた。

栗原・宮本³⁾は、その解決法として、各粒径階に対する衝突音の振幅分布行列を求め、測定された振幅の分布ベクトルにその逆行列を掛けることによって粒径別衝突個数ベクトルを推定する方法を提案している。

本論文は、栗原・宮本の方法の適用性を検討するとともに、さらにそれを拡張した新たな解析法を提案し、その適用性を検討したものである。

* 正会員 工博 摂南大学教授 工学部土木工学科
(〒572 寝屋川市池田中町 17-8)

** 正会員 工博 摂南大学助教授 工学部土木工学科

2. 流砂の衝突音の特性と検出法

2.1 衝突音の発生とその特性

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と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、実用には供されてこなかった。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つまみ、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⁴⁾。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。

図-1は、片端にマイクロホンを封入した外径3cm、肉厚2mmの2本の鋼管を、30cm離して下半分だけ埋め込んだ状態で水路床に直接固定し、水を流しながら粒径1cmの礫を1個投入した時のマイクロホンの出力電圧波形を示したもので、ch.1が上流側、ch.2が下流側のパイプによるものである。管の全長は30cmで、内部の25cm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。マイクロホンは、直径5.6mm、長さ7mmのコンデンサタイプで、周波数特性は50~15000Hz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、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突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突音以外の音を遮断する必要がある。

図-2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、礫の重さとピーク値との間にある程度の相関が認められる。

そこで、図-3に示すように、水路下流端にプラスチック板を設置して落下する石礫を衝突させ、プラスチック板の裏側にマイクロホンを封入したパイプを取り付けて、衝突音を検出することを試みた。その際、粒子の落下軌跡ができるだけ均一になるよう、金網に当てて流水から分離し、一旦速度を失わせてから自由落下させるようにした。これにより、各粒子の運動軌跡がかなり揃うとともに、プラスチック板への衝突速度がかなり均一化され、粒子の質量と衝突音の大きさとの相関がよくなることが期待される。

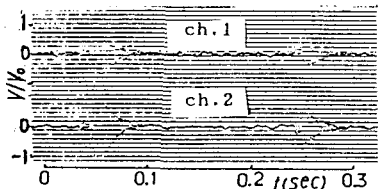


図-1 マイクロホンからの出力電圧波形の例

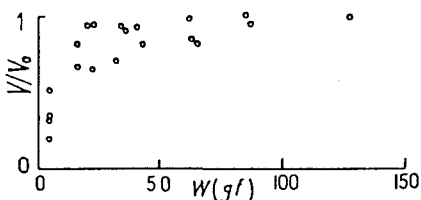


図-2 礫重量とピーク出力電圧の関係

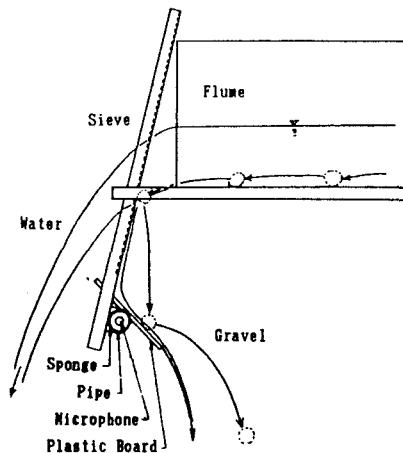


図-3 マイクロホンの設置状況

2.2 衝突音の検出法

上記のような特性をもつ流砂の衝突音を検出し、解析するためは、衝突音を一旦そのまま録音し、それを再生しながら種々の処理を加える方法と、ある種の処理を加えてから記録する方法とが考えられる。前者は同じデータから何度も繰り返して種々の処理を行い、比較する場合に適しているが、データ量が多くなると、実時間処理が困難であることなどの欠点をもつ。後者は、目的に合致したデータのみを残し、実時間処理も比較的容易であることなどの利点をもつが、それ以上に細かいデータが必要となった場合に対応できない欠点をもつ。

本研究では、実時間処理をめざしながら、解析法の比較をもできることを勘案して、図-4に示すようなアナログ回路を通してマイクロホンからの出力電圧を整流、平滑化し、適切な時間間隔で一定時間AD変換を行ってその時系列を記憶し、即座に解析する手法をとることにした。

図-5は、石礫粒子が1個だけ衝突した場合の、アナログ回路を通過した後の信号波形の一例を示したものである。これによると、出力電圧は石礫粒子の衝突直後、数ms内に急増し、その後数十msの間に徐々に低減している。このような波形からそのピーク値を正しく検出するには、1ms程度以下のサンプリング間隔が必要とされるが、後述する統計処理を行うためにはある程度の時間にわたって継続した電圧の時系列が必要であり、それを1分間とすると、1回の統計処理を行うためのサンプリングデータ個数が6万個に及ぶことになる。これを比較的安価なパーソナルコンピュータで実時間処理することは難しく、ここでは、ピーク電圧の検出精度を犠牲にして、サンプリング時間間隔を4msとし、データ個数を15,000個に減らすことにした。

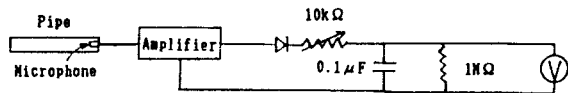


図-4 平滑回路の模式図

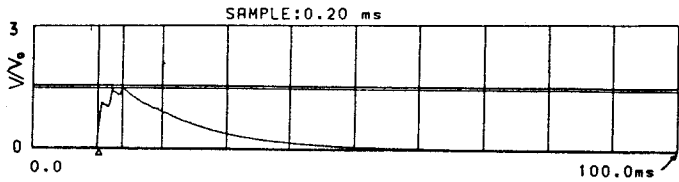


図-5 平滑回路からの出力電圧波形の例

3. 流砂の衝突音の解析法

3.1 粒径別振幅分布

図-5のようなパターンをひとつの衝突とみなし、その大きさから粒径を推定するためには、衝突音のピーク電圧を指標とすることが考えられるが、その場合には、ピーク電圧をかなり正確に把握する必要がある。しかしながら、先に述べたように、ピーク電圧を正確に求めるには、AD変換の時間間隔を短く取らねばならず、必ずしも得策でない。そこで、それに代わるものとして、ピーク付近のある時間内の電圧の積分値あるいは平均値を指標とすれば、サンプリング時間間隔をやや大きくしても、ピーク値の誤差の影響が緩和される。その積分時間あるいは平均時間は、個々の衝突音の持続時間（たとえば半減期）程度にするのが適当であると考えられるが、それがあまり長ければ、その間に次の衝突が生じる機会が増えるため、ここでは、ピーク後の16msの平均振幅を指標とすることにした。ただし、あまり小さなピークをも取り上げると、衝突音以外の雑音をも検出してしまう危険性があるので、ある閾値以上のピークのみを対象とすることにした。

そこで、電圧の時系列データから、ピーク値を捜し出し、その後の16msの平均振幅の出現頻度から、粒径別流下量を推定しようとするのであるが、それには、あらかじめ、各粒径階の粒子が衝突した際に生じる衝突音の振幅の出現頻度分布を把握しておく必要がある。

3.2 振幅分布からの粒径分布推定法

一般に、碟の粒径を $D_1 \sim D_n$ 、衝突音の振幅を $V_1 \sim V_m$ の階級に区分し、粒径階 D_j の碟が 1 個通過した時に発生する振幅階 V_i の音の検出期待頻度 a_{ij} が既知であるものとし、実際に検出された衝突音の各振幅階別出現頻度から、それを発生させた碟の粒径別通過個数を推定する方法を考える。

各碟の通過が互いに独立であるものとすれば、粒径階 j の碟が n_j 個通過した場合、各振幅階 V_i の音の検出期待頻度は

$$m_{ij} = a_{ij} n_j \quad (1)$$

で表されるから、各粒径階 $D_1, D_2, \dots, D_n$ の碟が $n_1, n_2, \dots, n_n$ 個通過した場合、各振幅階 V_i の音の検出期待頻度は

$$m_i = \sum m_{ij} = \sum a_{ij} n_j \quad (2)$$

となる。一方、実際に各振幅階 V_i で検出された衝突音個数を m'_i とすれば、そのような衝突音を発生させた源として、 m_i と m'_i の偏差

$$\delta_i = m_i - m'_i \quad (3)$$

ができるだけ小さくなるように、各粒径階 D_j の碟個数 n_j の組合せ $\{n\}$ を推定するのが妥当であろう。ただし、碟個数が負となるのは不合理であるから、

$$n_j \geq 0 \quad (4)$$

の条件を加えることにする。

ここで、最小 2 乗法を適用すれば、偏差の 2 乗和

$$f = \sum (\delta_i)^2 \quad (5)$$

を最小にするような $\{n\}$ を見いだせばよいことになる。

いま、式(4)の条件を考えなければ、 f を最小にする条件は、

$$\partial f / \partial n_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

を解くことにより、

$$\{n\} = (2A^t A)^{-1} (2A^t \{m'\}) \quad (7)$$

となる。ここに、

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\{n\} = (n_1 \ n_2 \ \cdots \ n_n) \quad (9)$$

$$\{m'\} = (m'_1 \ m'_2 \ \cdots \ m'_m) \quad (10)$$

である。

式(7)が(4)の条件を満たしていれば、それが求める解となるのであるが、(4)の条件を満たしていなければ、(4)の条件のもとで f が最小となるためには、いくつかの n_j が 0 でなければならない。そこで、任意の n_j (複数であってもよい) が 0 の条件下で f を最小にするような $\{n\}$ を同様の方法で求め、さらにその内、いずれの n_j も負にならないようなものの中で、 f が最小になる $\{n\}$ を求めれば、それが最適解となる。

なお、 $m = n$ で式(4)の条件を外した場合には、式(7)は

$$\{n\} = A^{-1} \{m'\} \quad (11)$$

となり、栗原・宮本³⁾の方法と一致する。

4. 水路実験による検討例

4.1 粒径別振幅分布

図-6は、勾配1/11、単位幅流量500cm²/sの条件のもとで、粒径が約5、10、20、40、60mmの礫をそれぞれ100個ずつ流して得た、粒径別振幅分布を示したものである。粒径が異なっても、振幅の分布範囲にはある程度の重複が見られるが、その振幅分布状況は粒径によって明らかに異なっている。

このように、同じ粒径の粒子でも、衝突音の振幅がばらつくのは、粒子形状が不規則なために、板に衝突した時の接触角がまちまちになるからであろう。極端な場合には、域値以下の音しか発生しないこともあり、また、時には、同じ粒子がバウンドして複数のピークを発生することもある。したがって、検出された電圧のピーク個数は必ずしも流下させた粒子個数に一致せず、場合によってはそれよりも少なかったり多かったりする。そのようなことも含めて、各粒径の粒子1個当りに期待される衝突音のピーク出現頻度を振幅階に分けて表現すると、表-1のようになる。

表-1 出力電圧階別ピーク出現頻度確率

mm	<700~1400~2100~2800~3500mV				
5	1.00				
10	0.62	0.37	0.01		
20	0.33	0.65	0.02		
40	0.06	0.68	0.25	0.01	
60	0.01	0.14	0.37	0.32	0.16

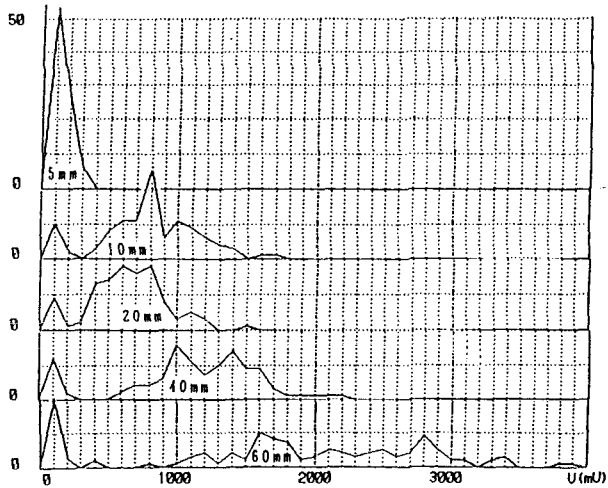


図-6 粒径別振幅個数分布

4.2 模擬データによる粒径別流砂量の推定

前節に述べた粒径別流砂量推定法の妥当性を検討するために、表-1の振幅頻度分布に基づいて、各粒径階ごとに100個の乱数を発生することにより、衝突音個数数列 {m' } を模擬発生させ、まず、式(11)に基づいて {n } を求めたところ、いずれも負の要素が含まれ、不合理な結果となった。

そこで、式(4)の条件を加えて f を最小にする粒径別礫個数数列 {n } を求め直したところ、次のような結果が得られた。

ケース1 (粒径階1 (d = 5 mm) の振幅分布のみに基づいて100個の乱数を発生させた場合) :

{m} = (100, 0, 0, 0, 0) → {n} = (100, 0, 0, 0, 0)

ケース2 (粒径階2 (d = 10mm) の振幅分布のみに基づいて100個の乱数を発生させた場合) :

{m} = (64, 35, 1, 0, 0) → {n} = (6, 94, 0, 0, 0)

ケース3 (粒径階3 (d = 20mm) の振幅分布のみに基づいて100個の乱数を発生させた場合) :

{m} = (39, 56, 5, 0, 0) → {n} = (15, 0, 71, 14, 0)

ケース4 (粒径階4 (d = 40mm) の振幅分布のみに基づいて100個の乱数を発生させた場合) :

{m} = (8, 67, 23, 2, 0) → {n} = (0, 0, 8, 90, 2)

ケース5 (粒径階5 (d = 60mm) の振幅分布のみに基づいて100個の乱数を発生させた場合) :

{m} = (1, 17, 35, 32, 15) → {n} = (0, 0, 2, 3, 95)

これらは、概ね予期した粒径階近傍に集中したものとなっており、この推定法の妥当性を示している。

そこで、次に、複数の粒径階の振幅分布を何倍かず重ね合わせた場合について、粒径別礫個数数列を推定したところ、次のような結果が得られた。

ケース6（粒径階2の振幅分布に基づいて100個、粒径階5の振幅分布に基づいて100個の乱数を発生させて合わせた場合）：

$$\{m\} = (65, 52, 36, 32, 15) \rightarrow \{n\} = (0, 103, 0, 0, 97)$$

ケース7（粒径階2の振幅分布に基づいて100個、粒径階5の振幅分布に基づいて200個の乱数を発生させて合わせた場合）：

$$\{m\} = (66, 69, 71, 64, 30) \rightarrow \{n\} = (0, 102, 0, 0, 198)$$

ケース8（粒径階1～5の各振幅分布に基づいて100個ずつの乱数を発生させて合わせた場合）：

$$\{m\} = (212, 175, 64, 34, 15) \rightarrow \{n\} = (158, 0, 149, 95, 108)$$

これらの場合も、概ね妥当な粒径階に妥当な頻度で n_i が分布したが、ケース8において n_2 が0となり、 n_1 と n_3 に分散したのは問題である。

5. 実用化への見通しと今後の課題

前節に述べたように、本研究で提案した粒径別流砂量推定法は、概ね妥当な結果をもたらしたが、ケース8のように、不十分な推定しかできない場合も見られた。これは、図-6に示した衝突音の振幅分布そのものにも原因があり、ばらつきを小さくするようにセンサーの改良を考えることも重要であるが、振幅階をどのように区分するかというデータ処理法によっても改善される可能性がある。また、各粒径階ごとの振幅分布に実験値をそのまま用いるのではなく、ある程度のスムージングや関数当てはめを行うのも一法であろう。粒子の運動機構に基づいて、衝突速度や衝突角度などから振幅分布を理論的に求めることもある程度可能かもしれない。

ところで、なんらかの方法である程度精度の向上が図れたとしても、このような方法の適用できる粒径や流砂量の範囲が狭ければ、実河川での適用は難しい。まず、ノイズと識別できる粒径の下限は概ね5mm程度であり、砂に対してはほとんど適用できない。適用できる粒径の上限は、マイクロホンや電気回路のダイナミックレンジの問題からは、複数のレンジのものを併用することによって、いくらにでも拡大できるが、図-3に示したような構造物の力学的な強度上の問題からは、10cm程度の粒径が上限であろう。より大きな粒径をも捉えるためには、金網のような構造は不都合で、それを板で置き換えるなどの改良が必要であろう。しかし、そうすると、礫の衝突速度が水量や流速に依存し、衝突音の振幅分布が水理条件によって変わることになる。したがってその場合には、水理条件ごとの振幅分布を把握しておくことが必要となる。

一方、本方法は個々の粒子の衝突が独立に生じて、その重ね合わせができることを前提にしているから、ある粒子の衝突音が消滅しないうちに次の粒子が衝突すると、誤差を生じることになる。この意味から、衝突頻度は毎秒100個程度が限度となり、流砂量が多い場合には、その一部のみを抽出して計測する必要がある。

さらに、流砂量計として実用化するには、実時間処理のできることを望ましいが、本解析法は、比較的安価なパーソナルコンピュータによって、1分間おき程度で粒径別石礫量を算出することができ、非定常な流砂現象の計測に十分対応できるものと考えられる。

本研究を進めるに当たっては、(財)近畿建設協会の助成を受けた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 流砂量測定手法研究会（澤井健二・小倉久直・板倉安正・中山純一・谷口伸一・澤田豊明・諏訪浩・宮本邦明）：
可聴音による間接的流砂量測定法（パイプ法）の基礎実験、昭和63年度砂防学会研究発表会、1988。
- 2) 澤井健二・馮金亨：音響による流砂量計測実験、土木学会第43回年次学術講演会、1988。
- 3) 栗原淳一・宮本邦明：音響を利用した流砂量計測装置について、新砂防、Vol.44, No.5, 1992。
- 4) 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。