

ファインバブルが超音波減衰スペクトル計による浮遊砂濃度・粒度測定に与える影響

電源開発	正会員	○ 古川 仁志
日本大学工学部	正会員	朝岡 良浩
日本大学工学部	正会員	長林 久夫

1. まえがき

浮遊砂濃度と粒度分布の新しい測定技術として超音波減衰スペクトル法が注目されている。水中の微細な気泡は超音波の透過を妨げるが、まだこの微細な気泡が超音波減衰スペクトル法の測定に与える影響は明らかにされていない。ISO 20480-1 では直径 0.1 mm より小さな気泡をファインバブルと定義し、1 μm 以上 100 μm 未満をマイクロバブル、1 μm 未満をウルトラファインバブルと区別している。マイクロバブルは水中で白濁して見えるが、ウルトラファインバブルは肉眼では見えない¹⁾。

超音波減衰スペクトル法は水中を透過する超音波の減衰を周波数の関数として測定し、この減衰スペクトルから多重散乱理論を用いて微粒子の濃度や粒度分布を測定する方法である²⁾。古川ら^{2),3),4),5)}は六角川、天竜川および伊南川において超音波減衰スペクトル計を用いて浮遊砂濃度と粒度分布を測定しているが、いずれも超音波減衰スペクトル計で測定した濃度は実測値より大きな値となるので、濃度補正を行っている。また、古川ら²⁾はこの原因として揮発性浮遊物質 (VSS) を挙げているが、伊南川の測定^{5),6)}では濃度補正係数は約 0.2 であり、この現象は VSS ではなく水中のファインバブルの影響であると考えられる。本研究では、ファインバブルによる超音波の減衰特性を明らかにするとともに、河川の測定においてファインバブルが浮遊砂濃度と粒度分布の測定に与える影響を検証した。

2. 実験方法

ファインバブルの実験装置を図-1 に示す。実験ではパルス反射法を採用したフローセル型超音波減衰スペクトル計 (以下「スペクトル計」という) を使用した。このスペクトル計はプラノコンケーブ形超音波振動子を用いているので 1 ~ 10 MHz の広帯域の超音波による測定ができる。また、ファインバブル発生器は坂本技研製 FB-M50A を使用した。実験方法は図-1 に示すように 500 l の水槽から自吸式ポンプ (1.5 kW, エバラ) で取水し、ファインバブル発生器を通過させて水槽内にファインバブルを発生させた。次にファインバブル水を循環ポンプ (0.09 kW, 三和) で取水して内径 50 mm のフローセル (検出器) と電磁流量計 (M) を通過させファインバ

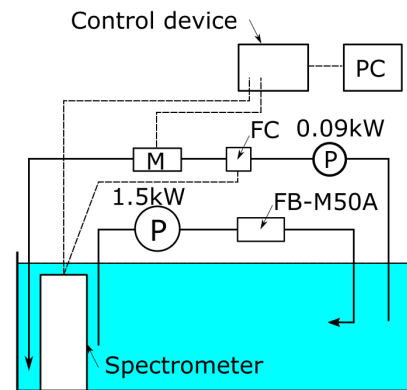


図-1 ファインバブル実験装置

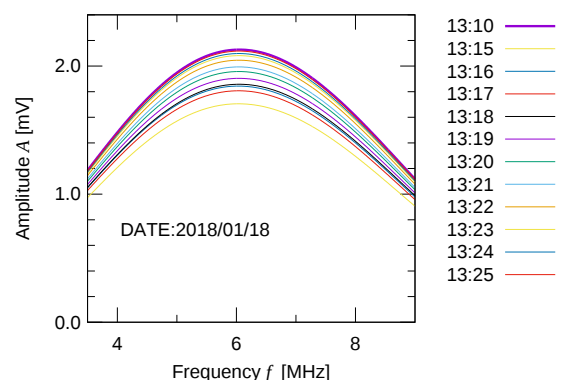


図-2 ファインバブルの周波数スペクトルの測定結果

ルの減衰スペクトルを測定した。フローセル内の流速は $V = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ とした。

3. 実験結果

ファインバブルの周波数スペクトルの測定結果を図-2 に示す。図-2 は横軸に周波数、縦軸にスペクトルの振幅をプロットしており、13:10 から 13:25 までの周波数スペクトルの経時変化を示す。自吸式ポンプ運転前 (13:10) の測定値が最大値を示し、同ポンプ停止時 (13:15) の測定値を最低値となった。ファインバブルによってスペクトルの振幅は大きく低下し、時間の経過とともに振幅は回復し約 10 分後にはファインバブルは消滅して元の測定値まで回復することがわかった。

次にファインバブルの減衰スペクトルの測定結果を図-3 に示す。減衰スペクトルは 5 ~ 8 MHz の 11 周波数の減衰係数の測定結果を示す。ファインバブルの減衰ス

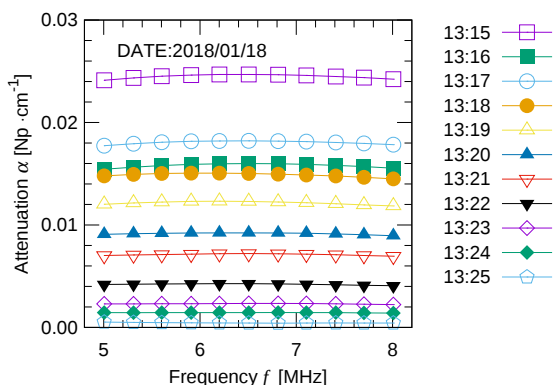


図-3 減衰スペクトルの変化

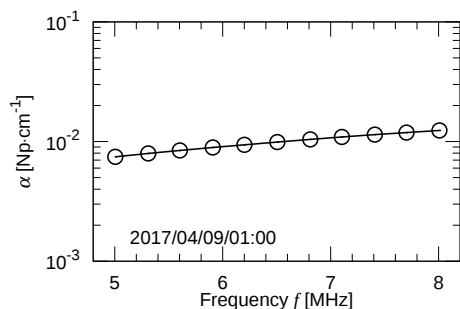


図-4 融雪出水時の減衰スペクトルの測定値の例

ベクトルはポンプ停止時(13:15)に最大値となり、時間の経過とともに低下し、約10分でファインバブルの消滅によって減衰係数はゼロになることがわかった。また、減衰係数は周波数5～8MHzにおいて周波数に依存しない一定値となることがわかった。減衰係数 $\alpha(f_i)$ は次式で算出した²⁾。

$$\alpha(f_i) = -\frac{1}{2L} \ln \left(\frac{A(f_i)}{A_0(f_i)} \right) \quad (1)$$

ここで、 L は振動子と反射板との間の距離、 $A(f_i)$ は周波数 f_i でのスペクトルの振幅の測定値、 $A_0(f_i)$ は周波数 f_i での基準スペクトルの振幅を示す。基準スペクトルとは脱気水道水を測定した超音波減衰スペクトル計の測定値であり、実験式から算出する。

4. 考察

本実験から得られた知見に基づいてファインバブルが浮遊砂濃度・粒度の測定に与える影響を検証する。微粒子による超音波の減衰係数 $\alpha_p(f_i)$ は次式で与えられる²⁾。

$$\alpha_p(f_i) = \phi_p \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) \cdot g(d_j) \Delta x \quad (2)$$

ここで、 $\phi_p (= C/\rho_2)$ は粒子の固体体積分率、 C は濃度、 ρ_2 は土粒子の密度、 $K(f_i, d_j)$ は周波数 f_i 、粒子径 d_j の粒子の減衰係数でカーネル行列と呼ばれている。 $g(d_j) \Delta x$ は粒子径 d_j の体積比率、 m は粒径階級の総数である。式

(2) から減衰係数は粒子の固体体積分率に比例し、粒度分布に依存することがわかる。次に融雪出水時の減衰スペクトルの測定結果の一例^{5),6)}を図-4に示す。この減衰スペクトルは粒子による減衰係数とファインバブルの減衰係数の総和であり、その傾きは粒度分布に依存する。ファインバブルによる減衰係数は周波数に依存しない一定値であり、ファインバブルは減衰スペクトルをその傾きと形状を保ちながら上下方向に変化させる。減衰スペクトルのこの変化は式(2)において粒度分布一定の条件で固体体積分率が変化したときと同じような影響を与えるので、浮遊砂とファインバブルによる減衰係数 $\alpha_{p+fb}(f_i)$ は次式で表すことができる。

$$\alpha_{p+fb}(f_i) = e_0 \cdot \phi_p \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) \cdot g(d_j) \Delta x \quad (3)$$

ここで、 e_0 はファインバブルによる固体体積分率の割増係数である。また、ファインバブルが減衰スペクトルに与える影響は固体体積分率の割増係数 e_0 に限定され、減衰スペクトルの傾きと形状には影響しないことから粒度分布の測定への影響はないと考えられる。

5. 結論

本研究で得られた知見は以下のとおりである。ファインバブルの減衰は本研究で使用したスペクトル計の測定周波数5～8MHzでは一定値となる。また、減衰係数の理論式においてファインバブルによる減衰の影響は固体体積分率の割増係数として表すことができる。さらに減衰スペクトルの傾きを変えないので粒度分布の測定には影響を及ぼさない。

参考文献

- 1) 寺坂宏一, 氷室昭三, 安藤景太, 秦隆志: ファインバブル入門, 日刊工業新聞社, 2016.
- 2) 古川仁志: 超音波による河川濁水の浮遊砂濃度と粒度分布の現地計測に関する研究. 日本大学, 2017, 博士論文.
- 3) 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力: 超音波減衰スペクトル法による六角川感潮部の懸濁物質濃度と粒度分布の連続計測. 土木学会論文集 B1 (水工学). 第70巻, No.4, pp.1607-1612, 2014.
- 4) 古川仁志, 前田修一, 猪股重光, 田井秀一, 小林力: 水位低下による土砂スルーシグ時の超音波を用いたSS濃度と粒度分布の連続計測. 土木学会論文集 B1 (水工学). Vol.72, No.4, pp.1919-1924, 2016.
- 5) 古川仁志, 小森歩, 猪股重光, 朝岡良浩, 長林久夫: フローセル型超音波減衰スペクトル計による融雪出水期の浮流砂輸送量の観測方法の検証. 土木学会論文集 B1 (水工学). Vol.74, No.4, pp.1847-1852, 2018.
- 6) 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力: 水中のマイクロバブルが超音波による浮遊砂濃度と粒度分布の測定に与える影響. 電子情報通信学会技術報告. US2017-106, pp.129-134, 2018.