

流水中の浮遊物質の連続計測に用いる 超音波減衰スペクトル法の二種類の線形理論

TWO TYPES OF LINEAR THEORY IN ULTRASONIC ATTENUATION
SPECTROSCOPY USING FOR CONTINUOUS MEASUREMENT OF SUSPENDED
SEDIMENT IN RUNNING WATER

古川仁志¹・猪股重光²・田井秀一³・小林力⁴

Hitoshi FURUKAWA, Shigemitsu INOMATA, Hidekazu TAI and Tsutomu KOBAYASHI

¹正会員 電源開発株式会社 土木建築部 (〒104-8165東京都中央区銀座6-15-1)

²非会員 北斗理研株式会社 (〒189-0026東京都東村山市多摩湖町1-25-2)

³非会員 日本大学准教授 工学部電気電子工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

⁴非会員 日本大学名誉教授 電気電子工学科 (同上)

Ultrasonic attenuation spectroscopy is a technique for measuring the concentration and particle size distribution of a colloidal dispersion. The authors have performed continuous measurement of the concentration and particle size of suspended sediment in experimental flumes and the Rokkaku River in order to use this measurement technique in rivers. Up until now the authors have used the linear model of ultrasonic attenuation spectroscopy for their experiments, but in this paper we carried out experiments using particulate dispersion for 1-200 μm spheres with the McClements model for long wavelength regime and the Faran model for intermediate wave regime. The result indicated that it is possible to measure particles from sub-micron level to 1mm using ultrasonic waves in the 5.0 to 8.0MHz frequency band, and that calibration is required to measure the concentration of particles with irregular shapes.

Key Words: *Suspended Sediment, Particle Size Distribution, Concentration, Ultrasonic Attenuation Spectroscopy, Linear Theory*

1. はじめに

1951年(昭和26年), 中谷宇吉郎は文芸春秋に「ダム
の埋没」と題する論文を発表して, わが国の水資源開発
の必要性を論じる中で, 既設の発電ダムが土砂で埋まっ
ている実情とダムの堆砂対策の必要性を指摘した. その
後, 大規模な水力開発, 大ダムの建設が行われたが, ダ
ム排砂の本格的な取り組みが開始されたのは, 1985年(昭
和60年)に完成した出し平ダム¹⁾からである. 現在, 黒
部川水系の宇奈月ダム・出し平ダムでは, 連携排砂・通
砂が定期的実施されており, 水質・底質・水生生物な
どの調査が, ダム貯水池, 河川および海域等において排
砂実施前, 実施中, 実施後に行われている. 排砂実施中
は, 水温, pH, DO, 濁度, SSとSS粒度組成が1時間間隔
でモニタリングされている²⁾.

また, 熊本県南部を北上して八代湾に注ぐ球磨川の河
口から約20kmに位置する荒瀬ダムでは, 現在, ダム堤体
の撤去工事が行われている. 熊本県企業局では, 荒瀬ダ

ム撤去フォローアップ専門委員会を設置して, 各種の環
境モニタリング調査を実施している. 水質調査は, ①常
時観測, ②定期観測, ③出水時調査が行われており, 出
水時調査では, 毎年1回の出水を対象として濁度, SS,
DO, SS粒度組成の調査が行われている. 大槻ら^{3,4)}の研
究グループでは, 球磨川から八代海の干潟・沿岸海域へ
の土砂輸送に関する調査研究を進めており, 荒瀬ダムの
上下流の二地点において, 濁度, DO, 水位の自動連続観
測と出水時の採水を行いSSとSS粒度組成を測定して, SS
輸送特性の評価を行っている.

これらの調査では, SSとSS粒度組成の調査が行われて
いるが, 自動観測ができる技術がなくサンプルを採水し
て分析する方法が採用されている. 超音波減衰スペクト
ル法^{5,6)}は, サスペンションやエマルションに含まれる粒
子の濃度と粒径の測定技術である. この方法は, 光学式
の測定方法に比較して, 高濃度の測定が可能であり, 希
釈などの処理が不要なためリアルタイムで測定できる優
位性をもつ. 筆者らは, この測定技術を河川で利用する
ため, 実験水路や六角川で超音波減衰スペクトル計によ

る懸濁物質の濃度と粒度の連続計測実験を行ってきた⁷⁻¹⁰⁾。これまで我々の超音波減衰スペクトル法の線形モデルには粘性損失と散乱損失の二種類の実験式⁹⁾を用いており、粒径の測定範囲はサブミクロンから最大100 μm であった。黒部川のダム排砂時のSS粒度は数%の417~837 μm の中砂が測定されており、これを測定するためには1000 μm (1.0mm) 程度の粒径が測定できるシステムが必要となる。このシステムには、これまで用いてきた実験式に代わる線形理論の適用が不可欠となる。本論では、粒径が30~200 μm のガラスビーズ、不規則な粒子形状をもつけい砂および粒径が10 μm 以下の球形単分散のシリカ微粒子を用いた実験を行い、これらの実験データを用いて二種類の線形理論を超音波減衰スペクトル法の測定に適用した際の有効性を検証してみる。

2. 超音波減衰スペクトル法に適用する線形理論

超音波減衰スペクトル法^{5,6)}は、ECAH理論^{11,12)}に基づく周波数と粒径に依存する超音波の減衰特性を利用して、サスペンションやエマルションの粒度組成と濃度を測定する技術である。超音波の減衰のメカニズムは複雑であるが、サスペンションの場合は、粒子の半径 r と超音波の波長 λ とすると、 $r \ll \lambda$ の長波長域では粘性損失が、 $r \approx \lambda$ の中間波域では散乱損失が支配的になる。本論で適用した粘性損失と散乱損失の線形理論は以下のとおりである。

(1) 粘性損失の線形理論

McClements¹³⁾によれば、 $r \ll \lambda$ の長波長域における粘性損失による減衰係数 $\alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j)$ は次式で算出することができる。

$$\alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j) = \frac{1}{2} \frac{\phi k_i s (\rho_2 - \rho_1)^2}{(\rho_2 + T\rho_1)^2 + s^2 \rho_1^2}, \quad (1)$$

$$\text{ここで,} \quad s = \frac{9\delta_v}{4r_j} \left(1 + \frac{\delta_v}{r_j} \right), \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{2} + \frac{9\delta_v}{4r_j}, \quad (3)$$

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\eta_1}{\omega_i \rho_1}}, \quad (4)$$

f_i は周波数番号 i の周波数、 $d_j (= 2r_j)$ は粒径階級 j の幾何平均粒径、 ρ_1 、 ρ_2 は水と粒子の密度、 $\phi (= C/\rho_2)$ は体積分率、 C は濃度、 $k_i (= \omega_i/c)$ は波数、 $\omega_i (= 2\pi f_i)$ は角周波数、 c は音速、 η_1 は水の粘度である。

(2) 散乱損失の線形理論

Hay and Mercer¹⁴⁾によれば $r \approx \lambda$ の中間波域における散乱損失による減衰係数 $\alpha_{\text{sc}}(f_i, d_j)$ は次式で算出することができる¹⁵⁾。

$$\alpha_{\text{sc}}(f_i, d_j) = -\frac{3\phi}{2(k_i r_j)^2 r_j} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n), \quad (5)$$

$$\text{ここで,} \quad \text{Re}(A_n) = -\frac{\tan^2 \eta_n}{1 + \tan^2 \eta_n}, \quad (6)$$

A_n はFaran¹⁶⁾の n 次の散乱係数である。 $\tan \eta_n$ の詳細は付録に示す。

(3) 減衰スペクトルの線形モデル

減衰スペクトルの理論値 $\alpha_{\text{mod}}(f_i)$ は、次の線形モデル式から算出することができる⁹⁾。

$$\alpha_{\text{mod}}(f_i) = \phi \cdot \sum_{j=1}^m K(f_i, d_j) \cdot g(d_j) \Delta d, \quad (7)$$

$$K(f_i, d_j) = \frac{1}{\phi} \cdot [\alpha_{\text{vis}}(f_i, d_j) + \alpha_{\text{sc}}(f_i, d_j)], \quad (8)$$

ここで、 $K(f_i, d_j)$ は、粒子径 d_j と周波数 f_i に依存する体積分率 $\phi = 1$ の減衰係数を表すカーネル行列、 $g(d_j)$ は粒度分布関数、 m は粒径階級の総数を示す。カーネル行列は式 (8) に示すように、粘性損失と散乱損失による減衰係数の合計である。

3. 線形モデル検証実験

(1) 計測装置

実験に使用した超音波減衰スペクトル計を図-1に示す。超音波減衰スペクトル計は、1個のトランスデューサで超音波の送受信を行うパルス反射法を採用している。トランスデューサは、直径20mmのプラノコンケーブ形のチタン酸鉛振動子で、パルス電圧を印加することによって約1~10MHzの広帯域の超音波を放射することができる。懸濁液中を往復してきたエコーの第一反射波をFFT変換して測定制御機に送信する。濃度と粒度組成の計測値は、リアルタイムで浮遊砂自動計測装置に表示される。

(2) 実験装置

実験装置を写真-1に示す。実験装置は、内径300mm × 高さ500mmの透明アクリル製攪拌容器と小型攪拌機で構成される。攪拌容器は底部が円弧状になるように加工している。小型攪拌機はインペラを中速 (300rpm) で回転させて攪拌容器内の微粒子が均一に分散するように攪拌する。

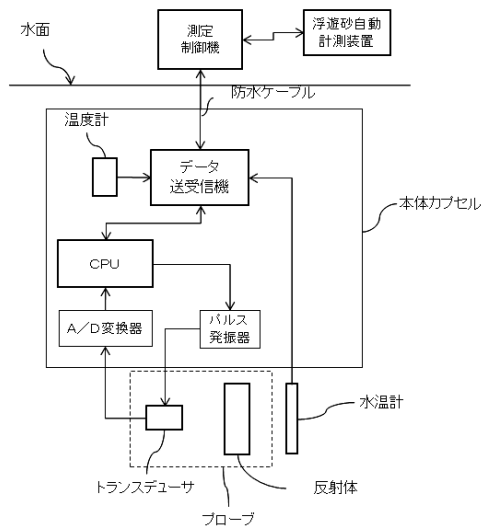


図-1 超音波減衰スペクトル計の概要



写真-1 実験装置

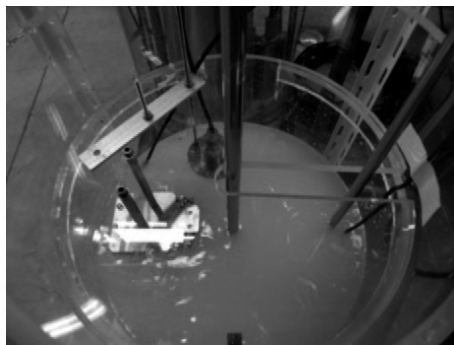


写真-2 攪拌容器

(3) 試験用微粒子

表-1には、二種類の線形理論を本測定装置に適用できるかの検証実験に用いた球形単分散微粒子を示す。粒径が $1.0 \sim 6.0 \mu\text{m}$ のシリカ微粒子は宇部エクシモ株式会社のハイプレシカ、粒径が $30 \sim 100 \mu\text{m}$ のガラスビーズは日本粉体工業技術協会のJIS試験用粉体2、粒径 $150 \mu\text{m}$ と $200 \mu\text{m}$ のガラスビーズはユニチカのユニビーズを使用した。また、不規則な粒子形状をもつけい砂は、日本粉体工業技術協会のJIS試験用粉体1の1種(JIS-1.1)を使用した。

表-1 球形単分散微粒子の密度と粒径

No.	Sample	Density [kg/m^3]	Median Diameter [μm]	10% Diameter [μm]	90% Diameter [μm]	CV [%]
1	FR-N2N-1	2220	0.98	-	-	3.67
2	FQ-N2N-2	2200	2.376	-	-	1.50
3	FQ-N2N-4	2190	4.01	-	-	1.11
4	FQ-N2N-6	2200	6.075	-	-	1.62
5	GBL-30	2500	29.7	27.4	31.8	-
6	GBL-40	2500	41.3	37.8	43.8	-
7	GBL-60	2500	58.4	55.8	61.8	-
8	GBL-100	2500	99.8	96.9	103.2	-
9	SPL-150	2500	149.2	145.4	153.8	-
10	SPL-200	2500	208.3	203.1	214.3	-

注) CV値 = 標準偏差 / 平均径 $\times 100$ (%)

表-2 ガラスビーズの弾性係数・ポアソン比

材質	弾性係数 GPa	ポアソン比
ソーダ石灰シリケートガラス	71.6	0.23

(4) 実験方法

標準的な実験方法を以下に示す。表-1に示す微粒子を計量して500 mlのビーカに入れ、純水200mlを加えて一様となるようかき混ぜて全粒子が水に浸かるようにする。ガラス板でビーカにふたをして、 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ の恒温乾燥炉に入れる。約1時間後に恒温乾燥炉からビーカを取り出し、15時間以上放置した後、ビーカに純水を加えて全体で300mlにする。シリカ微粒子の場合は、ビーカに入れた300mlの懸濁液を超音波ホモジナイザー(750W)で10分間分散処理する。次に、攪拌容器に脱気した純水180を入れる。攪拌容器内の純水300mlを捨て、分散処理した懸濁液300mlを加えて180とする。攪拌容器にプローブ、小型攪拌機、濁度計および水温計を取り付けて、20分間攪拌する(写真-2)。20分経過後、濁度、水温と減衰スペクトルを測定する。濃度の測定は以下のとおりである。ガラスビーズとけい砂の濃度は、懸濁液約200 mlを採水して分析した。粒子の乾燥質量を懸濁液の容積で除して濃度を求めた。また、シリカ微粒子の濃度は、水理実験用の透過式濁度計(東京計測、PC-206およびPST-3503)を使用して、試験用微粒子の懸濁液でキャリブレーションを行い、濁度計の計測値を濃度に換算した。

(5) 減衰スペクトルの測定値の算出

減衰スペクトルの測定値は次式から算出した⁹⁾。

$$\alpha_{\text{meas}}(f_i) = -\frac{1}{2L} \ln \frac{A_{\text{meas}}(f_i)}{A_0(f_i)}, \quad (9)$$

ここで、 $A_{\text{meas}}(f_i)$ は周波数 f_i での計測スペクトルの振幅、 $A_0(f_i)$ は周波数 f_i での基準スペクトルの振幅、 L は振動子と反射体との間の距離を示す。

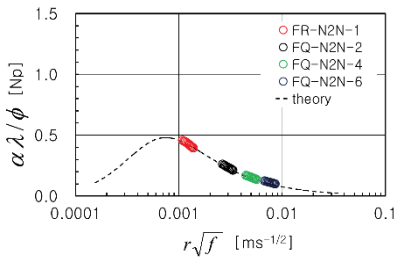


図-2 長波長域の減衰特性曲線

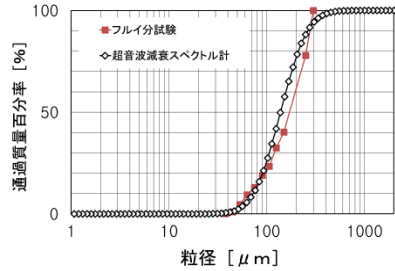


図-5 粒度分布測定結果（けい砂）

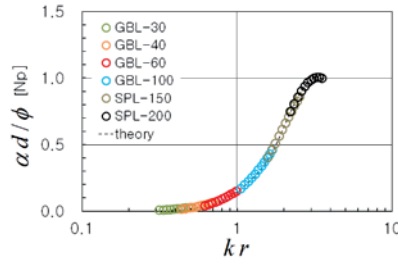


図-3 中間波域の減衰特性曲線

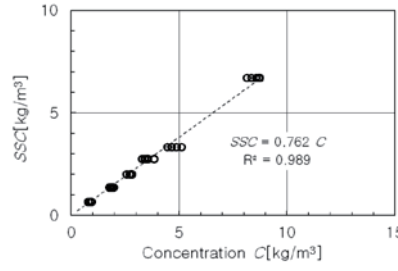


図-6 濃度測定結果（けい砂）

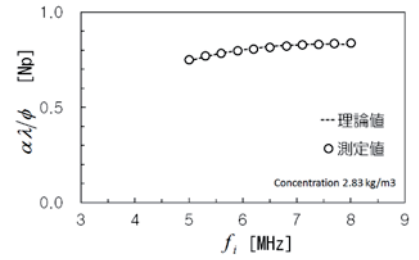


図-4 減衰スペクトルの例

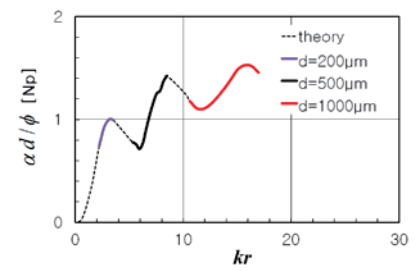


図-7 散乱損失による減衰係数（理論値）

(6) 音速測定値の算出

音速は次式から算出した⁹⁾。

$$c = \frac{2L}{t} \quad (10)$$

ここで、 t は第一反射波の到達時間である。

(7) 濃度と粒度組成の測定方法

微粒子の濃度と粒度組成の測定はモデル依存の逆解析法を用いる。この方法は、次式を用いて減衰スペクトルの理論値 $\alpha_{\text{mod}}(f_i)$ と測定値 $\alpha_{\text{meas}}(f_i)$ の偏差の分散 σ^2 を算出し、分散が最小になる体積分率と粒度分布を測定値とする方法である。

$$\sigma^2 = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p [\alpha_{\text{meas}}(f_i) - \alpha_{\text{mod}}(f_i)]^2, \quad (11)$$

ここで、 p は測定に用いる周波数の数である。減衰スペクトルの理論値は、体積分率 $\phi (= C/\rho_s)$ と粒度分布関数 $g(d_j)$ を変化させて式 (7) を用いて計算する。また、粒度分布関数には対数正規分布関数などを適用する。

4. 実験結果

(1) 球形単分散微粒子の減衰特性

球形単分散微粒子の実験結果を図-2～図-3に示す。図-2は、長波長域での減衰特性を示すMcClementsの図¹³⁾で、横軸は $r\sqrt{f}$ 、縦軸は $\alpha\lambda/\phi$ である。図-2には、粒径が1～6 μm の4種類の球形単分散シリカ微粒子の実験から得られた減衰係数の計測値、および粒子の密度 $\rho_s 2200\text{kg/m}^3$ を用いてMcClementsモデルから求めた理論値を示している。また、図-3は中間波域の散乱損失による減衰特性

を示すHay and Mercerの図¹⁴⁾で、横軸に kr 、縦軸に $\alpha d/\phi$ をプロットしたものである。図-3には粒径が30～200 μm の6種類の球形単分散ガラスビーズの実験から得られた減衰係数の計測値、および表-1に示す粒子の密度と表-2に示すガラスビーズの弾性係数・ポアソン比を用いてFaranモデルで算出した理論値を示す。

(2) けい砂の濃度と粒度組成の測定

けい砂の測定結果を図-4～図-6に示す。けい砂の密度は 2630kg/m^3 、Faranモデルに適用する弾性係数とポアソン比は、表-2に示すソーダライムシリケートガラスの物性値を適用した。図-4は減衰スペクトルの一例を示すもので、本装置では11点の周波数を用いている。式 (11) において σ^2 が最小値となった減衰スペクトルの理論値と計測値を示している。図-5には超音波減衰スペクトル計による粒度組成の計測結果と、フルイ分け試験から求めた粒度組成を示している。粒度分布関数には対数正規分布を適用した。図-6には濃度の測定結果を示す。横軸は、超音波減衰スペクトル計で計測した濃度 C 、縦軸には、採水して分析したSSC (Suspended Sediment Concentration) を示す。実験では、1, 2, 3, 4, 5および 10kg/m^3 の平均濃度 (=けい砂の質量/純水の水量) で濃度と粒度分布を測定したが、攪拌中に粒子の沈降がみられ、攪拌容器全体にけい砂粒子が均一に分散するように攪拌できなかったため、採水して分析した濃度SSCは図-6に示すように平均濃度の約70%となった。

5. 考察

(1) 線形モデルの検証

図-2に示すように、超音波減衰スペクトル計で計測した球形単分散シリカ微粒子の減衰係数と、McClementsモデルを使って求めた粘性損失による減衰係数の理論値はほぼ一致する。また、図-3から明らかなように超音波減衰スペクトル計で計測した球形単分散ガラスビーズの減衰係数と、Faranモデルで算出した散乱損失による減衰係数の理論値が一致することを確認することができた。これらの線形理論は適用が可能である。次に、Faranモデルの適用範囲を検証する。前回の実験⁹⁾は $kr < 2$ の範囲で実施しており、散乱損失の実験式の適用範囲はこの範囲に限定されていた。図-7は、本超音波減衰スペクトル計で使用する周波数帯（5～8MHz）での、粒径200, 500, 1000 μm の粒子の kr に対する減衰係数の理論値を示すHay and Mercerの図¹⁴⁾である。図-7において粒径1mmの粒子は kr が10～17の範囲内にある。Richterら¹⁵⁾は、市販の超音波減衰スペクトル計（DT-1200, Dispersion Technology社製）を使って、粒径が最大200 μm の球形のガラスビーズなどを用いた実験を行い、 $kr < 30$ の領域でFaranモデルが適用できることを検証しており、Faranモデルの適用によって本超音波減衰スペクトル計を用いて粒径1mmの粒子を測定できることが示唆された。

(2) 不規則な形状をもつ粒子の測定

図-5には、けい砂の粒度組成の測定結果を示している。図-5に示す二つの粒度分布曲線は完全に一致しなかった。しかし、超音波減衰スペクトル計で測定した粒度組成を、土の粒度試験方法（JIS A 1204）に示された粘土（5 μm 以下）、シルト（5～75 μm ）、細砂（75～250 μm ）、中砂（250～850 μm ）、粗砂（850～2000 μm ）に区分すると、シルト17%、細砂75.3%、中砂7.7%となり、これはフルイ分け試験結果にほぼ等しい値となる。一方、図-6の測定結果では、超音波減衰スペクトル法による濃度Cと採水して分析したSSC値は一致せず、濃度CはSSCの1.31（ $=1/0.762$ ）倍となった。これは、筆者らが六角川で実施した懸濁物質濃度の測定結果¹⁰⁾と同様に濃度測定にキャリブレーションが必要であることを示唆するものである。Schaafsmaら¹⁷⁾の研究によれば、不規則な形状をもつ粒子に、球形粒子の散乱理論を適用する場合は、濃度と粒径の補正が必要であるとして、2変数のキャリブレーションモデルを提案している。また、H. Geersら¹⁸⁾は、不規則な形状をもつ粒子の減衰特性は、線形理論から実験的に評価できるとして、キャリブレーション手法を用いて、粒度組成のリアルタイム測定を実現している。球形単分散微粒子を対象とした水中の超音波の減衰に関する線形理論を用いて、不規則な形状をもつ粒子の濃度と粒度組成を測定する場合は、粒子形状によるキャリブレーションが必要である。

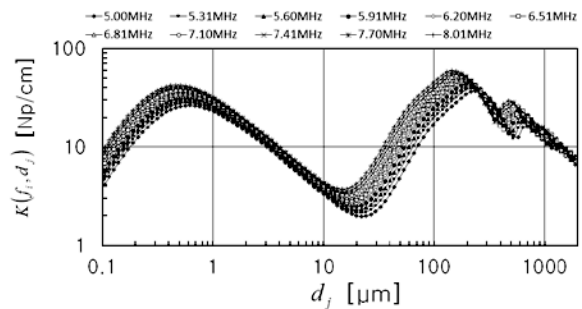


図-8 カーネル行列（けい砂）

(3) カーネル行列

けい砂の計測に用いたカーネル行列の一例を図-8に示す。図-8の横軸は粒径階級 j の幾何平均粒径 d_j 、縦軸には粒径と周波数に依存するカーネル行列を示す。図-8は式（8）から算出したもので、Albaら¹⁹⁾が開発したUltrazizerで使用した減衰特性曲線に相当する。球形の固体粒子の測定にはこのカーネル行列を用いてサブミクロンからミリメートルの粒径の粒子を測定することができる。しかし、不規則な形状をもつ粒子の測定では、図-6にみられるように濃度の測定値はSSCの値と一致しないので、粒子形状によって図-8のグラフの一部もしくは全体を変形させることが必要となる。

6. 結論

本論では、粒径が1～200 μm の球形単分散微粒子と不規則な粒子形状のけい砂を用いた実験を行い、超音波減衰スペクトル法に適用する線形理論の有効性を検証して以下の結論を得た。固体粒子を含むサスペンションの濃度と粒度の測定では、粘性損失による減衰係数を表すMcClementsモデルと、散乱損失による減衰係数を表すFaranモデルの二種類の線形理論を適用することができる。また、超音波減衰スペクトル計では、これらの線形理論を用いて、①サブミクロンから1mmの粒径の土粒子の計測が可能であること、②土粒子のような不規則な形状をもつ粒子を測定する場合は、粒子形状によるカーネル行列の値のキャリブレーションが必要であることが示唆された。今後、モニタリングを計画している各河川または貯水池から細砂～シルト粒子を採取して減衰特性実験を行い、実用化に向けて微粒子の濃度と粒度組成の測定のための適切なキャリブレーション手法の開発が必要である。

付録

式（6）に示すFaranの n 次の散乱係数 A_n の $\tan \eta_n$ は次式から算出する¹⁵⁾。

$$\tan \eta_n = \tan \delta_n(kr) \frac{\tan \alpha_n(kr) - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \tan \zeta_n(k_L r, k_T r)}{\tan \beta_n(kr) - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \tan \zeta_n(k_L r, k_T r)} \quad (12)$$

$$\text{ここで,} \quad \tan \delta_n(kr) = -\frac{j_n(kr)}{n_n(kr)}, \quad (13)$$

$$\tan \alpha_n(kr) = -\frac{kr \cdot j_n'(kr)}{j_n(kr)}, \quad (14)$$

$$\tan \beta_n(kr) = -\frac{kr \cdot n_n'(kr)}{n_n(kr)}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tan \zeta_n(k_L r, k_T r) = & -\frac{(k_T r)^2}{2} \left[\frac{\tan \alpha_n(k_L r)}{1 + \tan \alpha_n(k_L r)} \right. \\ & \left. - \frac{n^2 + n}{n^2 + n - 1 - (k_T r)^2 / 2 + \tan \alpha_n(k_L r)} \right] \\ & / \left[\frac{n^2 + n - (k_T r)^2 / 2 + 2 \tan \alpha_n(k_L r)}{1 + \tan \alpha_n(k_L r)} \right. \\ & \left. - \frac{(n^2 + n)(1 + \tan \alpha_n(k_T r))}{n^2 + n - 1 - (k_T r)^2 / 2 + \tan \alpha_n(k_T r)} \right], \quad (16) \end{aligned}$$

級数 j_n , n_n と j_n' , n_n' は球形ベッセル, 球形ノイマン級数とこれらの一次導関数, $k_L r$, $k_T r$ および kr は, 次式のとおりである.

$$k_L r = \pi d f / c_L, \quad k_T r = \pi d f / c_T, \quad kr = \pi d f / c,$$

$$c_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_2(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (17)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho_2(1+\nu)}}, \quad (18)$$

c_L , c_T は粒子中の圧縮波およびせん断波の速度, E は粒子の弾性係数, ν はポアソン比である.

参考文献

- 小久保哲也, 板倉正和, 原田稔: 貯水池の排砂実績と予測手法, 大ダム, No.162, pp.43-54, 1998.
- 角哲也, 金澤裕勝: 黒部川のフラッシング排砂における環境調査, 大ダム, No.197, pp.121-135, 2006.
- 大槻順朗, 川崎貴志, 二瓶泰雄, 鬼蔵徳雄: 出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.69, No.4, I_1063-I_1068, 2013.
- 大槻順朗, 北村直也, 二瓶泰雄, 石賀裕明, 皆川朋子, 島谷幸宏: 荒瀬ダム撤去影響評価に向けた球磨川及び河口干潟の土砂輸送・堆積特性の把握, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, I_1071-I_1075, 2012.
- ISO 20998-1 : Measurement and characterization of particles by acoustic method-Part.1 — Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy, 2006.
- ISO 20998-2 : Measurement and characterization of particles by acoustic method-Part.2 — Guidelines for linear theory, 2013.
- 加藤英, 田井秀一, 小林力: 集束性の超音波インパルスを用いた微粒子濃度測定, 信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE, US-2004-105, 2004.
- 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力: プラノコンケーブ形超音波振動子を用いた浮遊砂自動計測装置の開発, 信学技報 IEICE Technical Report US2012-105, pp.93-100, 2013.
- 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を用いた流水中の浮遊砂濃度と粒度分布の計測技術に関する研究, 河川技術論文集, 第 19 巻, pp.129-134, 2013.
- 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を用いた六角川感潮部の浮遊物質の濃度と粒度分布の連続観測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, I_607-I_612, 2014.
- P. S. Epstein and R. R. Carhart : The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions, J. Acoust. Soc. Am. 25, pp.553-565, 1953.
- J. R. Allegra and S. A. Hawley : Attenuation of Sound in Suspensions and Emulsions —Theory and Experiments, J. Acoust. Soc. Am. 51, pp.1545-1564, 1972.
- D. J. McClements, J. N. Coupland : Theory of droplet size measurement in emulsions using ultrasonic spectroscopy, Colloids and surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspect 117, pp.11-170, 1996.
- E. Hay and D. G. Mercer : On the theory of sound scattering and viscous absorption in aqueous suspensions at medium and short wavelengths, J. Acoust. Soc. Am. 78(5), pp.1761-1771, 1985.
- A. Richter, F. Babric, and S. Ripperger : Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit, J. Acoust. Am. 118 (3), 2005.
- J. J. Faran Jr. : Sound Scattering by Solid Cylinders and Spheres, J. Acoust. Soc. Am 23(4), pp.405-418, 1951.
- S. Schaafsma and A. E. Hay : Attenuation in suspensions of irregularly shaped sediment particles : A two-parameter equivalent spherical scatterer model, J. Acoust. Soc. Am 102(3), pp.1485-1502, 1996.
- H. Geers and W. Witt : Ultrasonic Extinction for In-line Measurement of Particle Size and Concentration of Suspensions and Emulsions, Particulate Systems Analysis 2003, Harrogate, UK.
- F. Alba, et al : Acoustic spectroscopy as a technique for the particle sizing of high concentration colloids, emulsions and suspensions, Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects, 153, pp.495-502, 1999.

(2014. 4. 3受付)