

超音波減衰スペクトル計によるSS測定に用いる 等価球形散乱体モデルの検証

MEASUREMENT OF CONCENTRATION OF SUSPENDED SOLIDS USING EQUIVALENT SPHERICAL SCATTERER MODELS IN ULTRASONIC ATTENUATION SPECTROSCOPY

古川仁志¹・猪股重光²・田井秀一³・小林力³

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 東京都中央区銀座六丁目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)

³非会員 日本大学名誉教授 工学部電気電子工学科 (同上)

In recent years, technology for measuring the concentration of suspended solids using ultrasonic waves has been studied. Particles of suspended solids have an irregular shape, and the distribution of particle size varies with time and space. Further, suspended solids include volatile suspended solids such as vegetable pieces and plankton. In this study, we proposed equivalent spherical scatterer models that take into account the shape, particle-size distribution, and density of suspended solids. We measured the concentration of suspended solids in the Rokkaku River estuary and confirmed the usefulness of these models. As a result, we proved that equivalent spherical scatterer models could accurately measure the concentration and particle-size distribution of suspended solids.

Key Words: *Ultrasonic attenuation spectroscopy, suspended solids, equivalent spherical scatterer model, the Rokkaku River, volatile suspended solids*

1. まえがき

河川の浮遊物質 (suspended solids, 以下「SS」という) の測定方法は環境庁告示第59号付表9 (以下「環告59号付表9」という) に定められている。SSとは、水中に懸濁している不溶解性物質のことで、2 mmのフルイを通過し1 μm のろ過材上に残留する物質と定義されている。SSにはシルトや粘土粒子だけでなく、植物片や動植物プランクトンなどの揮発性浮遊物質 (volatile suspended solids, 以下「VSS」という) も含まれている。SSの測定では、河川等で採水したサンプルを環告59号付表9に基づき測定する方法が用いられる。この方法はサンプル数が多くなると分析コストや採水の手間がかかるため、光学式や超音波の利用などの代替技術が研究¹⁻³⁾されてきた。最近では、超音波ドップラー流速計 (ADCP) の測定値からSSを推定する方法に関する数多くの研究⁴⁻⁶⁾がなされている。光学式や超音波式によるSS濃

度の測定技術では、SS濃度の測定値が粒子径に依存するため、粒子径の測定が課題となっている^{2,3,5)}。近年、実用化されてきた微粒子の粒子径の測定技術として超音波減衰スペクトル法⁷⁾がある。この技術は、①リアルタイムで測定ができる、②高濃度の測定に適している、③濃度を測定できるという特長を有している。

筆者らは、この技術の特長に着目して超音波減衰スペクトル法を用いたSSの計測システムの開発を進めてきた⁸⁻¹⁵⁾。これまでの研究¹⁰⁻¹³⁾からSS濃度の測定には散乱損失と粘性損失の二種類の線形モデルが必要であることが分かっている。これらの線形モデルはECAH理論¹⁶⁻¹⁷⁾に基づいているが、ECAH理論は均質の球形粒子にしか適用できない。したがって、SSのような不規則な形状をした粒子などの非球形粒子の場合は実験モデルが用いられる¹⁸⁾。古川ら¹⁴⁾は粒子径30~300 μm の天然のシルトや細砂を用いた実験から、不規則な形状をした粒子の減衰係数は等価

球形散乱体モデル (equivalent spherical scatterer model) を用いて算出できることを検証した。また、不規則な形状をした粒子の粘性損失について古川らは、粒子径0.1~100 μm のシリカ粒子を用いた実験から粒径係数を導入した実験モデル¹⁵⁾を提案している。しかし、これらの実験はいずれも室内実験であり、実河川での検証が課題となっている。

本論では、室内実験および現地計測実験において超音波減衰スペクトル計で計測したデータにこれらの等価球形散乱体モデルを適用してSSの粒度分布と濃度を測定して、その有用性を検証する。

2. 超音波減衰スペクトル法

(1) 測定原理

超音波減衰スペクトル法¹⁹⁾は、周波数と粒子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に含まれる微粒子の粒度組成や濃度を測定する技術である。この方法では、次式を用いて減衰スペクトルの測定値と推定値との偏差の分散 σ^2 を算出し、この分散が最小となる固体体積分率 ϕ と粒度分布をそれぞれの測定値とする逆解析法が用いられる。

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [\alpha_{meas}(f) - \alpha_{mod}(f)]^2 \quad (1)$$

ここで、

$$\alpha_{meas}(f) = -\frac{1}{2L} \ln \frac{A_{meas}(f)}{A_0(f)} \quad (2)$$

$$\alpha_{mod}(f) = \phi \sum K(f, d) g(d) \Delta d \quad (3)$$

$$K(f, d) = \frac{1}{\phi} \{ \alpha_{sc}(f, d) + \alpha_{vis}(f, d) \} \quad (4)$$

$\alpha_{meas}(f)$ は周波数 f における減衰係数の測定値、 $\alpha_{mod}(f)$ は周波数 f における減衰係数の推定値、 m は測定に用いる周波数の数を示す。式(2)の L は振動子と反射体との間の距離、 $A_0(f)$ は基準スペクトルの振幅、 $A_{meas}(f)$ は測定した透過スペクトルの振幅を示す。基準スペクトルは微粒子を全く含まない水の透過スペクトルで、水温、塩分および水圧に依存する。基準スペクトルは実験から決定する¹²⁾。式(3)の $K(f, d)$ は、周波数と粒子径に依存する超音波の減衰特性をモデル化したカーネル行列、 $g(d)$ は粒子径 d の粒度分布関数を示す。式(4)の $\alpha_{sc}(f, d)$ は減衰係数の散乱損失成分、 $\alpha_{vis}(f, d)$ は減衰係数の粘性損失成分を示す。減衰係数の散乱損失成分はECAH理論により次式で表される²⁰⁾。

$$\alpha_{sc}(f, d) = -\frac{3\phi}{2k^2 r^3} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n) \quad (5)$$

ここで、

$$A_n = -\frac{i \cdot \tan \eta_n}{1 + \tan \eta_n} \quad (6)$$

k は波数、 r は粒子の半径、 $\text{Re}(A_n)$ は A_n の実部、 A_n はFaranの n 次の散乱係数²¹⁾、 $i = \sqrt{-1}$ である。また、

減衰係数の粘性損失成分については、ECAH理論に基づくMcClementsの式²²⁾を用いて次式で表される。

$$\alpha_{vis}(f, d) = \frac{1}{2} \frac{\phi k s (\rho_2 - \rho_1)^2}{(\rho_2 + T \rho_1)^2 + s^2 \rho_1^2} \quad (7)$$

ここで、

$$s = \frac{9\delta_v}{4r} \left(1 + \frac{\delta_v}{r} \right) \quad (8)$$

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

ρ_1 は水の密度、 ρ_2 は粒子の密度、 $\delta_v = \sqrt{2\eta_1/\omega\rho_1}$ 、 η_1 は水の粘度、 $\omega (= 2\pi f)$ は角周波数を示す。

(2) 等価球形散乱体モデル

不規則な形状をした粒子の減衰係数については複数の実験モデルが提案されている¹⁸⁾。古川ら¹⁴⁾は粒子径30~300 μm の天然のシルトや細砂を用いた実験から、Schaafsmaら²³⁾が提案した等価球形散乱体モデルによる散乱損失の推定値が実験値とよく一致することを検証した。このモデルは比較的単純な実験モデルで、次式で表される。

$$\alpha_{sc}(f, d) = -\frac{3b_0\phi}{2k^2(a_0r)^3} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(A_n) \quad (10)$$

ここで、 a_0 と b_0 は散乱損失の等価粒径係数を示す。このモデルは、式(5)の線形モデルに粒径係数を導入して、 $r \rightarrow a_0 r$ 、 $\phi \rightarrow b_0 \phi$ に変換したものである。等価粒径係数はSchaafsmaらの実験によれば $0.6 < a_0 \leq 1.0$ 、 $1.0 \leq b_0 < 1.8$ の値が示されている。球形粒子の場合は $a_0 = b_0 = 1.0$ である。

また、SSには粒子径が30 μm 以下の粒子が多く含まれている。これらの粒径の粒子では粘性損失が支配的となる。古川ら¹⁵⁾は粒子径0.1~100 μm のシリカ粒子を用いた実験を行い、不規則な形状をした粒子の粘性損失は粒子の半径 r を $c_0 r$ に変換した次式を式(7)に適用することを提案している。

$$s = \frac{9\delta_v}{4c_0 r} \left(1 + \frac{\delta_v}{c_0 r} \right) \quad (11)$$

$$T = \frac{1}{2} + \frac{9\delta_v}{4c_0 r} \quad (12)$$

ここで、 c_0 は粘性損失の等価粒径係数を示す。古川らの実験¹⁵⁾によれば $c_0 \leq 1.0$ である。

3. 実験方法

(1) 計測装置

計測装置には、筆者らのチームが独自に開発した超音波減衰スペクトル計¹³⁾ (J-POWER-2011モデル、北斗理研株式会社製)を用いた。このスペクトル計は、①プローブ、②本体カプセル、③測定制御機、④浮遊砂自動計測装置 (汎用PC) で構成され、各装置間はケーブルで接続されている。トランスデューサには、田井・小林⁸⁻⁹⁾が開発したプラノコンケーブ形超音波振動子を採用している。これは直径20mm

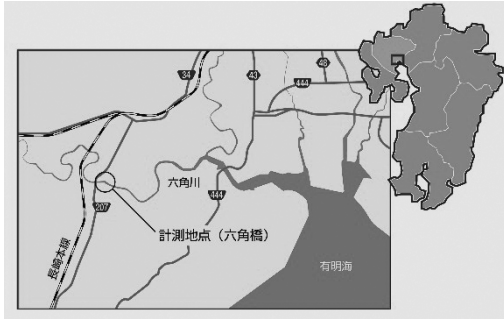


図-1 現地計測地点（六角川）

の市販の円形チタン酸鉛製圧電セラミックスの一面を曲率半径30 mmで凹面状に加工し、その加工面と裏面に電極をつけた振動子である。振動子の前方においた反射体で、振動子から懸濁液中に放射した超音波パルス波を反射させて、同一の振動子で反射波を受波する。この反射波の周波数スペクトルが透過スペクトルとなる。この振動子は厚さが0.2 mmから2.0 mmまで連続的に変化しているので、1～10 MHz帯の広帯域の超音波が同時に放射できる。また、超音波放射面が凹面であるために集束した超音波が放射できる。

(2) 室内実験

室内実験では、粒子径の異なる3種類のシリカ粒子を用いた。シリカ粒子の密度はガス置換法（島津製作所・マイクロメリテックス社製、乾式自動密度計アキュピック1340TC 10cm³モデル）を用いて測定した。シリカ粒子の密度は2 600 kg・m⁻³である。また、実験濃度は1, 2, 3, 4kg・m⁻³の4濃度とした。計量したシリカ粒子を500mlのビーカーに入れ、純水200mlを加えて一様となるようにかき混ぜて全粒子が水に浸かるようにした。ビーカーにガラス板でフタをして、脱気のため110±5℃の恒温乾燥炉に入れて煮沸した。約1時間後、恒温乾燥炉からビーカーを取り出し、15時間以上放置した後、ビーカーに脱気した純水を加えて300 mlとした。次に、脱気した純水17.7ℓとシリカの入った300 mlの純水を攪拌容器に入れて合計18 ℓとした。攪拌容器にプローブ、小型攪拌機、水温計を取付けて20分間攪拌した後、水温と透過スペクトルを5回計測した。計測時の水温は20℃となるように調整した。計測終了後、懸濁液約200mlを採水してメスシリンダで容積を測定した後、アルミ容器に移して、110±5℃の恒温乾燥炉に約20時間入れて水分を蒸発させ、乾燥質量を計量した。乾燥質量を容積で除してシリカ粒子の濃度Cを算出した。懸濁液中のシリカ粒子の固体体積分率を次式から算出した。

$$\phi = C/\rho_2 \quad (13)$$

(3) 現地計測実験

流水中のSSの計測実験は佐賀県白石平野を流れる六角川で実施した。図-1は六角川の位置と計測地点を示す。計測地点は既往の研究¹⁾を参考として河口

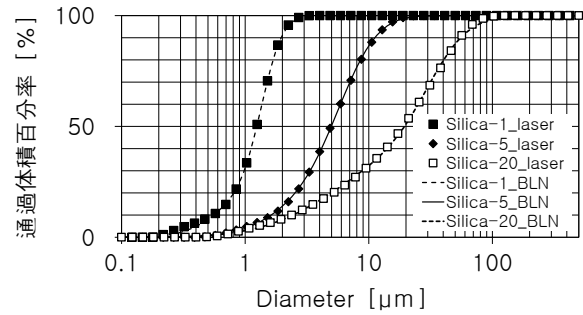


図-2 実験用シリカ粒子の粒度分布

表-1 シリカ粒子の粒度分布コード

Sample	p_1	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2
Silica-1	0.30	-0.33	0.60	0.32	0.30
Silica-5	0.28	0.80	0.75	1.80	0.55
Silica-20	0.52	1.97	1.25	3.45	0.55

から11.2 km地点を選定した。六角川下流部は、有明海の湾奥部特有の大きな干満差の影響が河口から約29km付近にまで及んでおり、この長い感潮区間の河岸には有明海より遡上する浮遊粘土（ガタ土）が堆積している。計測実験は平成26年6月11日と12日に実施した。6月12日は大潮の日である。計測地点に小型作業船を係留し、作業船から河川中央部の水深1.0mの位置に超音波スペクトル計を吊り下げて、水温、塩分、電気伝導度、溶存酸素量、濁度および透過スペクトルを10分間隔で自動計測した。水位は六角橋水位観測所（国土交通省）のデータを入手した。また、市販の万能採水器（宮本理研工業㈱、2ℓ用）を用いて採水し、粒度分布、SSおよび強熱減量を測定した。SSの測定は環告59号付表9、強熱減量の測定はJIS K0102(2013)による。

4. 実験結果

(1) 粒度分布コード

図-2に室内実験に用いた3種類のシリカ粒子の粒度分布曲線を示す。粒度分布はレーザ回折・散乱式粒度分布測定装置（MASTERSIZER2000，MARVERN社製）を用いて測定した。超音波減衰スペクトル法による粒度分布の測定にはモデル依存の逆解析法が用いられる^{18,19)}。このモデルは式(3)の粒度分布関数 $g(d)$ を示す。本論では粒度分布関数として二峰性対数正規分布（Bimodal log-normal distribution，以下「BLN」という）モデルを用いる。BLNモデルは次式で表される。

$$g(d_j) = p_1 g_1(d_j) + (1 - p_1) g_2(d_j) \quad (14)$$

ここで、

$$g_N(d_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_N)^2}{2\sigma_N^2} \right] \quad (15)$$

$$x_j = \ln d_j \quad (16)$$

$$\mu_N = \ln \bar{d}_N \quad (17)$$

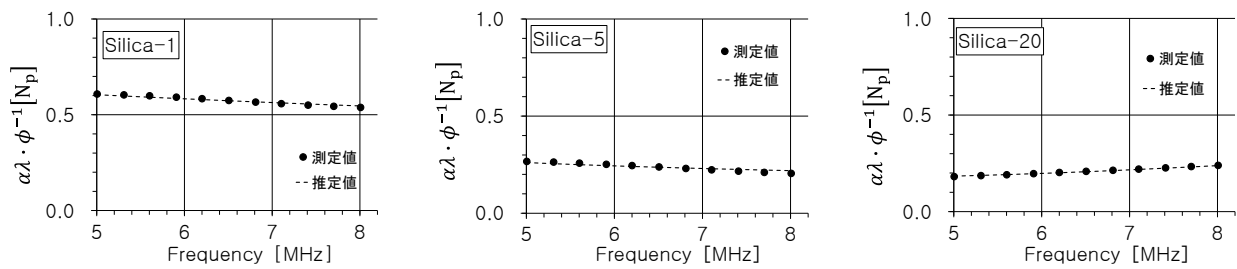


図-3 減衰スペクトルの測定値と等価球形散乱体モデルを用いた推定値

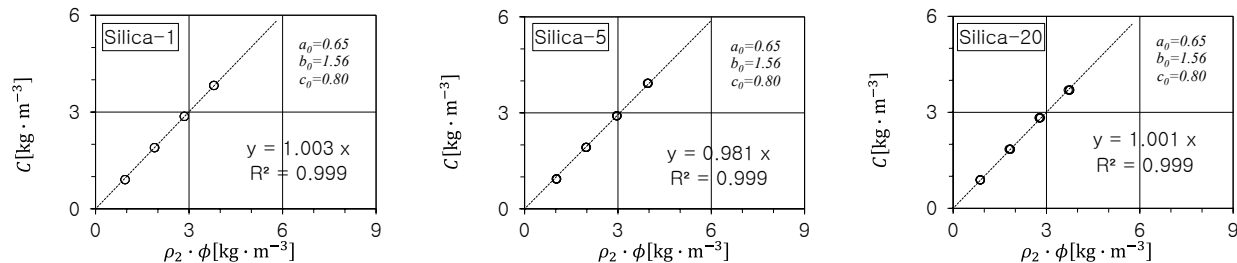


図-4 等価球形散乱体モデルによるシリカ粒子の濃度測定結果

$g(d_j)$ は粒子径 d_j の頻度、 $g_N(d_j)$ は粒度分布 N の粒子径 d_j の頻度、 d_j は粒径階級 j の粒子の粒子径、 $\bar{d}_N$ は粒度分布 N の平均粒子径、 σ_N は粒度分布 N の標準偏差、 $N = 1, 2$ 、 p_1 は比率である。表-1には各シリカ粒子の粒度分布をBLNモデルで近似したパラメータを示す。各シリカ粒子の粒度分布を示すこの5個のパラメータを各粒子の粒度分布コードと呼んで、モデル依存の逆解析に用いる。

(2) 等価球形散乱体モデルの等価粒径係数

実験濃度 $1\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ の各シリカ粒子の減衰スペクトルの測定値を図-3に示す。図-3の横軸は周波数、縦軸には減衰係数 α と超音波の波長 $\lambda(=c/f)$ の積を固体体積分率で割った値 $\alpha\lambda\phi^{-1}$ を示す。 c は超音波の音速である。これらの測定データを用いて表-2に示す方法で等価球形散乱体モデルの等価粒径係数を決定した。シリカ粒子の等価粒径係数は $a_0 = 0.65$ 、 $b_0 = 1.56$ 、 $c_0 = 0.80$ となった。これらの係数を適用した等価球形散乱体モデルによる推定値を図-3に破線で示す。

(3) シリカ粒子の濃度測定結果

等価球形散乱体モデルによる各シリカ粒子の濃度測定結果を図-4に示す。図-4の横軸は、シリカ粒子の密度と式(1)を用いて算出した固体体積分率との積、縦軸は採水して測定したシリカ粒子の濃度を示す。図-4に見られるように $C = \rho_2 \cdot \phi$ となることが分かった。超音波減衰スペクトル法による濃度測定では、式(1)を用いて算出した固体体積分率に粒子の密度を乗じて濃度を算出する。

5. 考察

六角川の測定データを用いて、河川のSS計測に適用する等価球形散乱体モデルを検証する。検証は

表-2 等価粒径係数の決定方法

①	等価球形散乱体モデルの等価粒径係数 a_0 、 b_0 および c_0 の値をそれぞれ設定する。
②	式(13)から固体体積分率を算出する。
③	粒度分布コードを用いて式(14)から粒度分布を算出する。
④	等価球形散乱体モデルを用いて式(4)からカーネル行列を算出する。
⑤	式(3)から減衰係数の推定値を算出する。
⑥	式(2)から減衰係数の測定値を算出する。
⑦	式(1)から分散を算出する。
⑧	等価粒径係数を変えて繰り返し計算を行い、最小分散となる等価粒径係数を決定する。

表-2に示す方法を用いて等価粒径係数を決定し、等価球形散乱体モデルを用いて計測した固体体積分率とSSの密度からSS濃度を算出し、環告59号付表9による測定値と比較した。

(1) SSの密度と粒度分布

六角川のSSの密度は「土粒子の密度試験(JIS A 1202)」に基づき測定した。土粒子の密度とは、土の固体部分($110 \pm 5^\circ\text{C}$ で乾燥させた後に残留する部分)を構成する無機物や有機物の単位体積当たりの質量である。また、六角川で採水したSSの粒度分布(全22サンプル)を図-5に示す。粒度分布はレーザ回折・散乱式粒度分布測定装置(SALD-3000J、島津製作所製)で測定した。表-3はBLNモデルで近似した粒度分布コードの一部を示す。

(2) 等価粒径係数とVSS補正係数

代表的な六角川のSSの減衰スペクトルの測定値を図-6に示す。図-6の測定データと同時刻の粒度分布コードを用いて、表-2の方法で等価粒径係数を決定した。その結果、散乱損失の粒径係数 b_0 が1.8を

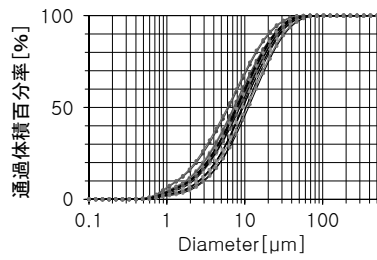


図-5 六角川のSS粒度分布

No.	p_1	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2
1	0.22	1.29	0.90	2.56	0.75
2	0.26	1.20	0.90	2.43	0.75
3	0.30	1.38	1.00	2.46	0.75
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	0.26	1.18	0.95	2.41	0.80

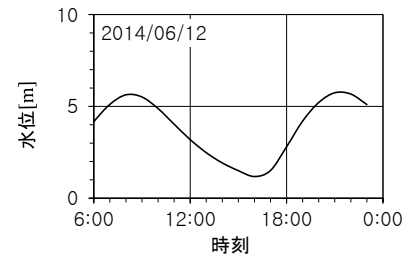


図-10 六角川水位観測所の水位

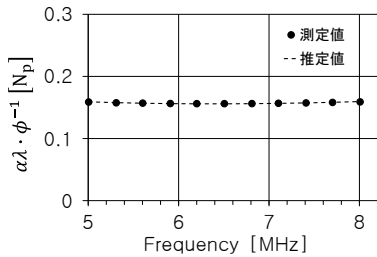


図-6 代表的な六角川のSSの減衰スペクトル (2014/06/12/12:00)

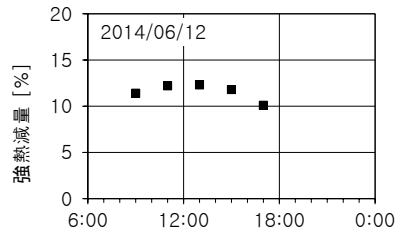


図-8 強熱減量の測定結果

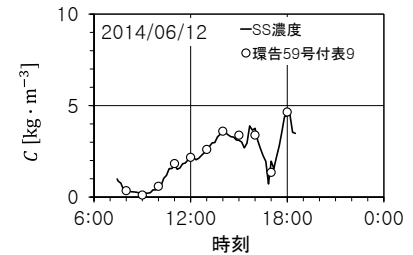


図-11 等価球形散乱体モデルによるSS濃度測定結果

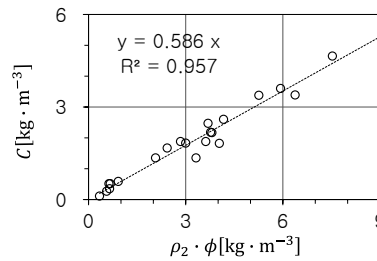


図-7 等価球形散乱体モデルによるSS濃度測定結果

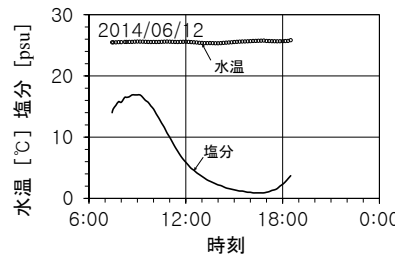


図-9 水温、塩分の測定結果

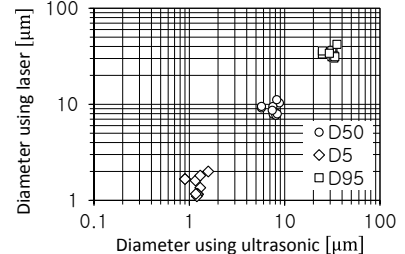


図-12 等価球形散乱体モデルによるSSの粒度分布測定結果

大きく上回る結果となった。前述したように、 $1.0 \leq b_0 < 1.8$ である。このため粒径係数の決定方法を変更し、表-2の②に示す固体体積分率を測定値から変数に代えて、減衰スペクトルの測定値と等価球形散乱体モデルによる推定値がベストフィットする等価粒径係数と固体体積分率を算出した。等価粒径係数はそれぞれ $a_0 = 0.85$ 、 $b_0 = 1.50$ および $c_0 = 0.85$ となった。これらの係数を用いた等価球形散乱体モデルによる減衰スペクトルの推定値を図-6に破線で示す。

次に、これらの粒径係数を適用した等価球形散乱体モデルと粒度分布コード(表-3)を用いて式(1)からSSの固体体積分率を計測した。図-7は2014年6月11日と12日のSSの固体体積分率の毎正時の計測結果である。図-7の横軸はSSの密度と固体体積分率との積 $\rho_2 \cdot \phi$ 、縦軸は環告59号付表9によるSS濃度の測定値 C を示す。SSの密度は $2430 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ である。 $\rho_2 \cdot \phi$ とSS濃度 C との関係は、

$$C = \varepsilon \cdot \rho_2 \cdot \phi \quad (18)$$

となった。 ε は補正係数を示す。図-4に示すシリカ粒子の実験では、シリカ粒子の密度と等価球形散乱体モデルを用いて測定した固体体積分率との積は採水して測定したシリカ粒子の濃度に一致した。しか

し、図-7に示す六角川の測定結果では、等価球形散乱体モデルによる測定値 $\rho_2 \phi$ が環告59号付表9の測定値 C を大きく上回る結果となった。この原因はVSSによるものと考えられる。計測時の六角川の強熱減量を図-8に示す。強熱減量は10～12%で、平均値は11.3%である。強熱減量はSSに含まれるVSSを質量百分率で示した値で、SSの質量の11.3%がVSSである。VSSは主に有機物であり、水中に浮遊する有機物が超音波の減衰を大きくしているものと考えられる。式(18)はVSSによる補正が必要であることを示しており、現地計測データの蓄積とその影響の解明がこれからの課題である。

(3) 等価球形散乱体モデルによるSSの測定

計測時の水温、塩分および水位を図-9、図-10に示す。水温は約 26°C 、塩分は満潮時に最大16psu、干潮時には約1psuまで低下した。図-11は式(18)を適用して等価球形散乱体モデルで測定したSS濃度と環告59号付表9による測定値を示す。両者は良く一致している。水深1.0mで測定したSS濃度は満潮時に最も低い測定値となった。また、図-12は等価球形散乱体モデルを用いて毎正時に測定したSSの粒度分布を示す。D50、D5、D95はそれぞれ50%粒径、5%粒径、95%粒径を示す。図-12の横軸は超音波減

衰スペクトル計で計測した粒子径，縦軸はレーザ回折・散乱式粒度分布測定装置で測定した粒子径を示す．両者はよく一致している．これらの結果から，超音波減衰スペクトル法に等価球形散乱体モデルを適用して，複数（ここでは11周波数）の周波数の計測データを利用することにより，既存の技術では達成できなかったSSの粒度分布と濃度を同時に測定できることが分かった．

6. 結論

本論では，室内実験および現地計測実験において超音波減衰スペクトル計で計測したデータに等価球形散乱体モデルを適用してSSの粒度分布と濃度を測定して，その有用性を検証した．

- 1) 等価球形散乱体モデルは超音波減衰スペクトル法による河川や貯水池でのSSの粒度分布と濃度の測定に適用できる線形モデルである．
- 2) これらのモデルはECAH理論に3種類の等価粒径係数を導入したもので，等価粒径係数は本論で詳述した方法により決定することができる．
- 3) SSにはVSSが含まれているので，SS濃度の測定にはVSS補正が必要である．
- 4) 粒度分布の測定データをモデル化した二峰性対数正規分布の粒度分布コードは，超音波減衰スペクトル法によるSSの粒度分布と濃度の計測に有効なツールとなる．

謝辞：現地計測実験にあたり，国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所朝日出張所のご協力をいただいた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 横山勝英，梅田信，山崎久勝：音響式SS測定装置の開発に関する研究，水工学論文集，第49巻pp.547-552，Feb.2005.
- 2) 加藤茂，Syamsidik，岡部拓巳，青木伸一：超音波を用いた浮遊砂計測法の開発に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.B2-64，No.1，pp.1436-1440，2009.
- 3) 中嶋亮太，加藤茂，穂積直裕，岡辺拓巳：超音波パルスを用いた浮遊砂の粒径推定に関する研究，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.70，No.2，pp.1476-1480，2014.
- 4) 二瓶泰雄，北山秀飛，木水啓，原田靖生：H-ADCP計測と数値解析を組み合わせた浮遊土砂輸送量計測システムの提案，河川技術論文集，第13巻，pp.225-230，Jun.2007.
- 5) 川西澄，稻田景：超音波流速計による浮遊粒子の粒径を考慮した浮遊砂濃度の計測法，海岸工学論文集，第53巻，pp.1401-1405，2006.
- 6) S. A. Moore and L. Le Coz: Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers, J. Acoust. Soc. Am. 133(4), pp.1959-1970, 2013.
- 7) 柳田博明監修：微粒子工学大系 第I巻 基本技術，

フジ・テクノシステム，2001.

- 8) 田井秀一，小林力：広帯域性の超音波振動子を用いた微粒子濃度の測定，信学技報 TECHNICAL REPORT OF IEICE US2003-1，pp.1-6，Apr.2003.
- 9) 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，US2004-105，pp.19024，Mar.2005.
- 10) 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，Jan.2013.
- 11) 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，Jun.2013.
- 12) 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.607-612，Feb.2014.
- 13) 古川仁志，猪股重光，田井秀一，小林力：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，河川技術論文集，第20巻，pp.1-6，Jun.2014.
- 14) 古川仁志，猪股重光，田井秀一，小林力：流水中の浮遊土砂の粒子形状が超音波減衰スペクトルに及ぼす影響，水工学論文集，第59巻，Feb.2015.
- 15) 古川仁志，猪股重光，田井秀一，小林力：広帯域の超音波パルスを用いた浮遊砂濃度計測システムの開発，信学技報 IEICE Technical Report US2014-78，pp.21-26，Jan.2015.
- 16) P. S. Epstein and R. R. Carhart: The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions, J. Acoust. Soc. Am. 25, pp.553-565, 1953.
- 17) 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.
- 18) ISO 20998-2: Measurement and characterization of particles by acoustic method-Part.2—Guidelines for linear theory, 2013.
- 19) D.J. McClements: Ultrasonic Measurement in Particle Size Analysis, Encyclopedia of Analytical Chemistry, John Wiley & Sons, pp.5581-5588, 2000.
- 20) 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.
- 21) J. J. Faran Jr.: Sound scattering by Solid Cylinders and Spheres, J. Acoust. Soc. Am 23(4), pp.405-418, 1951.
- 22) D. J. McClements, J. N. Coupland: Theory of droplet size distribution measurement in emulsions using ultrasonic spectroscopy, Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 117, pp.161-170, 1996.
- 23) 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.

(2015. 4. 3受付)