水位低下による土砂スルーシング時の 超音波を用いた SS 濃度と粒度分布の連続計測

MEASUREMENT OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION USING ULTRASOUND DURING SEDIMENT SLUICING BY DRAWDOWN OPERATION

古川仁志¹・前田修一²・猪股重光³・田井秀一⁴・小林力⁵

Hitoshi FURUKAWA, Syu-ichi MAEDA, 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 正会員 電源開発株式会社中部支店土木グループ 課長 (〒486-0815 愛知県春日井市十三塚町 1-43)

³ 非会員 北斗理研株式会社 開発部長 (〒189-0026 東京都東村山市多摩湖町 1-25-2)

⁴ 非会員 博 (工) 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)

⁵ 非会員 工博 日本大学名誉教授 工学部電気電子工学科 (同上)

In recent years, ultrasonic attenuation spectroscopy has been frequently used for the measurement of suspended sediment concentration and particle size distribution. Sediments are derived from the rock masses at the upper basin and transported downstream owing to floods, and then deposited in the reservoir. The reservoir sediments affect the entire river system because the sediment transport is blocked by dams. For this reason, sediment sluicing has been performed in several rivers. In such cases, it is important to monitor the suspended sediment concentration and particle size distribution. Therefore, we have measured the suspended sediment concentration and particle size distribution using an ultrasonic spectrometer during sediment sluicing by drawdown operation. The applicability of our measurement technology using ultrasonic attenuation spectroscopy for monitoring of suspended sediment concentration and particle size distribution was verified.

Key Words : *Sediment sluicing, concentration, particle size distribution, ultrasonic attenuation spectroscopy, inverse scattering problem*

1. まえがき

上流域で生産された土砂は洪水によって河道を流下して貯水池に堆積する。貯水池の堆砂は貯水容量の減少、貯水池上流部の河床や洪水位の上昇などの局地的な問題だけでなく、流砂系全体に影響を及ぼす。しかし、貯水池の堆砂を恒久的に排除することは困難が多く、近年では土砂が貯水池に堆積するのを防止するため水位低下による土砂スルーシングが各水系で実施されている。

黒部川の宇奈月、出し平ダムでは毎年連携排砂が行われている。これらのダムは本格的な排砂設備を有するが、既設ダムの多くは本格的な排砂設備を持たないため、耳川¹⁾ではダムの改造が計画されている。洪水時に水位低下による土砂スルーシングを実施する場合は、土砂と水質のモニタリングが重要となる。土砂のモニタリングでは SS 濃度と粒度分布

の測定が行われる。SS 濃度の測定は環境庁告示第 59 号付表 9、粒度分布は一般的にレーザ回折・散乱式粒度分布測定装置による方法が用いられる。近年、流砂系の総合的な土砂管理のため土砂のモニタリングが行われており、採水分析に代わる測定技術について多くの研究が行われてきた。例えば、角ら²⁾は黒部川のダム連携排砂による数万 mg/ℓ の高濃度 SS を測定するため、差圧式 SS 計を開発して連続観測を行っている。水垣ら³⁾は 10 000 mg/ℓ 以上の鵜川・沙流川の SS 濃度と濁度の観測結果から、濁度と流量データを用いた SS 濃度の推定式を提案している。また、古川ら^{4,9)}は超音波減衰スペクトル計を用いた SS 濃度測定技術の開発を進めており、室内実験⁵⁾では最大 50 000 mg/ℓ、六角川^{6,9)}では 5 000 mg/ℓ の高濃度 SS 濃度を測定している。

超音波減衰スペクトル計は SS 濃度だけではなく SS の粒度分布を同時にしかも連続して測定できる。

超音波減衰スペクトル計で測定できる粒径は10 nm～3 mm とされている¹⁰⁾。しかし六角川の SS は50% 粒径が10 μm程度で粒度分布に大きな変動がなく、超音波減衰スペクトル計による粒度分布の測定性能を十分検証できなかった。本研究では、超音波減衰スペクトル計開発の目的の一つである水位低下による土砂スルーシグ時の粒度分布と SS 濃度の連続測定を行い、超音波減衰スペクトル計による粒度分布と SS 濃度の測定技術を検証した。

2. 測定方法

SS の測定方法は、①超音波減衰スペクトル計（J-POWER-2011モデル、北斗理研株式会社製）、②光学式濁度計（後方散乱光方式、カオリン検定、同）、③採水による河川水の分析を用いた。図-1に超音波減衰スペクトル計と光学式濁度計による測定システムの概要を示す。超音波減衰スペクトル計のプロンプ、水温計、光学式濁度計は本体カプセルの底部に固定し、本体カプセルは手動ウインチを用いて陸上からワイヤーロープで水深1.0m まで吊り下げた。測定地点は長野県下伊那郡天龍村に位置する平岡ダム（中部電力）の上流約100 m にある平岡発電所（同）取水口である。平岡ダムは天竜川水系天竜川の中流域にあり、平岡ダムから約35 km 下流に佐久間ダムが位置する。測定期間は平成26年10月5日から7日までの3日間、10月5日14時からダム放流が開始された。この出水の最大流入量は約1 100 m³・s⁻¹であった。図-2に平岡ダムの貯水位と流量の経時変化を、写真-1に出水時の状況を示す。また、採水した河川水の分析項目を表-1に示す。

3. 超音波減衰スペクトル計による SS 濃度と粒度分布の測定方法

(1) 超音波減衰スペクトル法

超音波減衰スペクトル法¹⁰⁾は、ECAH 理論^{11),12)}に基づく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懸濁液中の微粒子の粒度と濃度を測定する技術である。減衰スペクトルとは周波数の関数として測定した減衰係数をいう¹⁰⁾。超音波減衰スペクトル法では逆解析法が用いられる。逆解析法は、固体体積分率 ϕ と粒度分布モデルを仮定して減衰スペクトルの推定値を算出し、この推定値と測定値の偏差の分散 σ^2 が最小となる固体体積分率と粒度分布モデルを繰り返し計算によって決定する方法で、次式が用いられる^{7),8),9)}。

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

図-1 超音波減衰スペクトル計と光学式濁度計による測定システムの概要

図-2 出水時のハイドログラフ

写真-1 出水時の状況（10月6日12時）

表-1 採水による河川水の分析

分析項目	試験方法
粒度分布	レーザ回折散乱式粒度分布測定装置 MARVERN 社製 MASTERSIZER2000
SS 濃度	環境庁告示第 59 号付表 9 GFP ろ過重量法
強熱減量	JIS K0102(2013) 14.5 項
土粒子の密度	JIS A1202

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

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

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

$\alpha_{meas}(f)$ 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スペクトルで、水温、水の吸収係数および固有音響インピーダンスからその振幅を算出することができる¹³⁾。式(3)の $K(f, d)$ は周波数 f と粒子径 d 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。 $\alpha_{sc}(f, d)$ 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である。

(2) 等価球形散乱体モデル

SSなどの非球形粒子の測定では等価球形散乱体モデルを用いて減衰係数を算出する。減衰係数の散乱損失成分は、Schaafsma and Hay¹⁴⁾が提案した等価球形散乱体モデルを適用する。この実験モデルを次式に示す。

$$\alpha_{sc}(f, d) = -\frac{3b_0\phi}{2k^2(a_0r)^3} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(A_n) \quad (5)$$

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

k は波数、 $r(=d/2)$ は粒子の半径、 $\operatorname{Re}(A_n)$ は A_n の実部、 A_n はFaranの n 次の散乱係数^{15),16),17)}、 $i = \sqrt{-1}$ 、 a_0 と b_0 はSchaafsmaの等価粒径係数である。Schaafsma and Hayの実験¹⁴⁾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。この等価粒径係数は現地測定データを解析して決定する。

また、減衰係数の粘性損失成分は次式に示す古川ら^{8),9)}の提案した等価球形散乱体モデルを適用する。このモデルはMcClements¹⁸⁾の式に等価粒径係数を導入した実験モデルである。

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

ここで、
$$s = \frac{9\delta_v}{4c_0r} \left(1 + \frac{\delta_v}{c_0r}\right) \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{2} + \frac{9\delta_v}{4c_0r} \quad (9)$$

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、 c_0 は粘性損失の等価粒径係数で、古川らの実験⁹⁾によれば $c_0 \leq 1.0$ である。この等価粒径係数も現地測定データを解析して決定する。

(3) 粒度分布関数

式(3)に適用する粒度分布関数は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、

図-3 土砂スルーシング時のSSの粒度分布 (50 粒径)

図-4 水位回復時のSS粒度分布 (50 粒径)

$$g(d_j) = p_1 g_1(d_j) + (1 - p_1) g_2(d_j) \quad (10)$$

ここで、
$$g_N(d_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} \exp \left[-\frac{(x_j - \mu_N)^2}{2\sigma_N^2} \right] \quad (11)$$

$$x_j = \ln d_j \quad (12)$$

$$\mu_N = \ln \bar{d}_N \quad (13)$$

$g(d_j)$ 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。

4. 等価球形散乱体モデルの適用

(1) 粒度分布コード

土砂スルーシング時 (10月5日21時～10月6日20時) のSSの粒度分布の測定結果を図-3に示す。粒径区分は $0.1 \mu\text{m} \sim 2 \text{ mm}$ の50粒径である。図-3に示すよう

表-2 粒度分布コード（土砂スルーシング時）

No.	測定日	時	p_1	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2
1	2014/10/5	21	0.18	2.71	1.80	3.58	0.95
2	2014/10/5	22	0.22	2.86	1.80	3.63	0.90
3	2014/10/5	23	0.24	3.14	1.75	3.83	0.85
4	2014/10/6	0	0.28	3.39	1.95	3.72	0.85
5	2014/10/6	1	0.26	3.00	1.75	3.70	0.85
6	2014/10/6	2	0.18	2.74	1.80	3.77	0.95
7	2014/10/6	3	0.18	2.58	1.80	3.70	0.90
8	2014/10/6	4	0.20	2.67	1.80	3.73	0.90
9	2014/10/6	5	0.16	2.09	1.40	3.73	0.90
10	2014/10/6	6	0.16	2.30	1.45	3.87	0.90
11	2014/10/6	7	0.22	3.62	1.75	3.71	0.85
12	2014/10/6	8	0.18	2.69	1.85	3.74	0.95
13	2014/10/6	9	0.26	2.72	1.80	3.63	1.00
14	2014/10/6	10	0.18	2.22	1.50	3.85	1.05
15	2014/10/6	11	0.18	2.03	1.50	3.68	1.05
16	2014/10/6	12	0.28	2.56	1.70	3.63	1.00
17	2014/10/6	13	0.34	2.61	1.70	3.47	1.00
18	2014/10/6	14	0.28	2.20	1.45	3.75	1.00
19	2014/10/6	15	0.28	2.22	1.55	3.80	1.00
20	2014/10/6	16	0.32	2.10	1.50	3.66	1.00
21	2014/10/6	17	0.30	1.85	1.45	3.50	1.00
22	2014/10/6	18	0.24	1.51	1.30	3.55	1.05
23	2014/10/6	19	0.36	1.63	1.30	3.30	0.95
24	2014/10/6	20	0.22	1.02	1.15	2.97	1.00

表-3 等価粒径係数の解析データ

測定日時	2014/10/06_5:00
SS 濃度	C 0.457 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
土粒子密度	ρ_2 2 645 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
固体体積分率	$\phi_{\text{meas}} (= C/\rho_2)$ 173×10^{-6}
粒度分布	$g(d)$ 粒度分布コード No.9

表-4 等価粒径係数の解析条件

係数	最小値	最大値	計算間隔
a_0	0.50	1.00	0.01
b_0	1.00	1.80	0.01
c_0	0.40	1.00	0.01
$\phi [\times 10^{-6}]$	1	500	1

表-5 等価粒径係数の解析結果

a_0	b_0	c_0	$\phi [\times 10^{-6}]$	$\varepsilon (= \phi_{\text{meas}}/\phi)$
0.97	1.04	0.55	312	0.554

に10月5日21時から6日15時までのSSの50%粒径は約40 μm で粒径100 μm 以上の細砂が約20%含まれている。この期間中は平岡ダムに600~1 100 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ の流入量があり、写真-1に見られるよう貯水位が最低水位から大きく低下した状態で貯水池は河川状態となる。このため上流から流入する土砂の多くは貯水池に堆積することなくダムを通過したと考えられる。また、図-4は水位回復時の粒度分布の測定結果を示す。流入量の減少にともない水位回復が行われる。図-4に示すよう水位回復期間のSSの50%粒径は約30 μm から5 μm 程度まで大きく変化していることが分かった。土砂スルーシング時の粒度分布をBLNモデルで近似した結果を表-2に示す。表-2に示すBLNモデルの5個の係数を粒度分布コード⁹⁾と呼んでいる。この粒度分布コードを超音波減衰スペクトル計によるSS濃度と粒度分布の測定に用いた。

図-5 粒度分布コード（No. 9）から算出した BLN 粒度分布モデル（100 粒径）

図-6 等価粒径係数を決定した減衰スペクトルの測定値と推定値のベストフィット

図-7 超音波減衰スペクトル計による SS 濃度測定結果

図-8 超音波減衰スペクトル計による SS 粒度分布の測定結果（50%粒径）

(2) 等価粒径係数

等価球形散乱体モデルに適用する等価粒径係数は古川らが提案した方法⁹⁾を用いて決定した。この方法は SS 濃度と粒度分布の測定値を式(1)に適用して減衰スペクトルの測定値と推定値がベストフィットする等価粒径係数を決定する方法である。測定値は式(2)、推定値は式(3)から算出し、粒度分布 $g(d)$ はBLN モデルを用いる。等価粒径係数の解析データを表-3、解析条件を表-4、解析結果を表-5に示す。等価粒径係数は $a_0 = 0.97$ 、 $b_0 = 1.04$ 、 $c_0 = 0.55$ 、 $\varepsilon = 0.554$ は VSS 補正係数⁹⁾である。解析に用いたBLN 粒度分布モデルを図-5に、また減衰スペクト

写真-2 浮遊物質の団粒構造（10月6日0時採水）

ルの測定値と推定値がベストフィットした結果を図-6に示す。図-6の縦軸は減衰係数 α と超音波の波長 $\lambda (= c/f)$ との積、 c は超音波の音速を示す⁹⁾。

(3) 等価球形散乱体モデルによる SS 濃度と SS 粒度分布の測定結果

等価球形散乱体モデルに表-5に示す等価粒径係数 a_0, b_0, c_0 とVSS補正係数 ε を適用して粒度分布とSS濃度を測定した。粒度分布 $g(d)$ はBLNモデルを適用し、表-2に示す土砂スルーシング時の粒度分布コードを用いた。SS濃度 C は次式で算出した。

$$C = \varepsilon \cdot \rho_2 \cdot \phi \quad (14)$$

ここで、 ϕ は式(1)から求めた固体体積分率である。図-7に超音波減衰スペクトル計によるSS濃度の測定値（ultrasonic）と採水して環告第59号付表9に基づき測定したSS濃度の経時変化を示す。超音波減衰スペクトル計による測定値と環告第59号付表9による測定値は、SS濃度が $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上ではよく一致するが、これより低濃度の領域では測定誤差がやや大きくなる傾向がみられた。また、SS粒度分布の測定結果を図-8に示す。10月5日21時から6日15時までの超音波減衰スペクトル計による50%粒径の測定値（ultrasonic）は、採水してレーザ回折・散乱式粒度分布測定装置を用いて測定した50%粒径（laser）とほぼ一致することが分かった。しかし、一部にレーザによる測定値と一致しない超音波減衰スペクトル計の測定値が見られた。この原因は、本体カプセルを水中に吊り下げた状態で測定したため、本体カプセルに取付けたプローブを固定した状態で測定できなかったことによるものと考えられる。

5. 考察

(1) 等価粒径係数

等価粒径係数 a_0, c_0 は不規則な形状をもつ粒子の粒径を超音波減衰特性の等しい球形粒子の粒径に換

図-9 濁度と SS 濃度の測定結果

図-10 濁度と SS 濃度との関係

図-11 超音波減衰スペクトル計と光学式濁度計による SS 濃度の測定結果

算する係数、 b_0 は濃度補正係数である。これらの係数の導入によってECAH理論に基づく線形モデルを適用することができる。古川ら⁸⁾が実施した天竜川産の不規則な粒子形状をもつシルトや細砂の実験によれば、 $a_0 = 0.68$ 、 $b_0 = 1.54$ が得られている。表-5に示す平岡ダム地点の粒径係数は、 $a_0 = 0.97$ 、 $b_0 = 1.04$ であり、同じ天竜川産のシルト・細砂の測定において等価粒径係数に相違が見られた。この原因を調査するためSEMを用いてSS粒子の形状を観察した結果を写真-2に示す。SSは、①単粒構造ではなく粒径の異なる粒子の団粒構造であること、②珪藻等の有機物が含まれていることが明らかになった。この時の強熱減量は約10%であった。等価粒径係数が1.0に近い値を示す要因は粒子の構造が単粒構造ではなく団粒構造であるためと考えられる。

(2) モデル依存の逆解析による粒度分布の測定

超音波減衰スペクトル法による粒度分布の測定には粒度分布モデルを用いた逆解析が用いられる。BLNモデルは5個の係数で粒度分布を表すことができ、しかもSSの粒度分布を実用的な精度で表現できるモデルである。しかし、BLNモデルの5個の係

数には無数の組み合わせがあり、また、実際の粒度分布と大きく異なるモデルを用いても減衰スペクトルの推定値が測定値とベストフィットする場合がある。このため、本論では土砂スルーシグ時の粒度分布の測定結果を BLN モデルで近似して逆解析に適用することによって粒度分布・SS 濃度ともに精度の良い測定結果が得られた。

(3) 超音波減衰スペクトル計と光学式濁度計による SS 濃度の測定システム

光学式濁度計の測定値（濁度）と SS 濃度の経時変化を図-9 に示す。また濁度と環境庁告示第 59 号付表 9 に基づく SS 濃度との関係を図-10 に示す。SS 濃度 C は濁度 T_b を用いて次式から算出できる。

$$C = 0.000091 \times T_b^{1.639} \quad (15)$$

図-11 に超音波減衰スペクトル計と光学式濁度計による SS 濃度の測定結果を示す。濁度が 100 度以下の場合には式(15)を用いて濁度から SS 濃度を算出した。図-7 と図-11 を比較すると、超音波減衰スペクトルと光学式濁度計を併用した測定システムによる SS 濃度の測定値は、超音波減衰スペクトルの測定値より、環境庁告示第 59 号付表 9 に基づく SS 濃度と一致することがわかる。このシステムの採用によって出水時の全期間を通して測定精度の高い SS 濃度の連続測定が可能となる。

6. 結論

本論では水位低下による土砂スルーシグ時の粒度分布と SS の濃度を測定し、超音波減衰スペクトル法による測定技術を検証した。本論で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 等価球形散乱体モデルと BLN 粒度分布モデルを用いて時間とともに変化する SS の粒度分布と濃度を同時に連続して測定できることが分かった。
- 2) 等価粒径係数は、粒子の形状だけでなく粒子の構造（単粒、団粒）にも依存することが示唆された。
- 3) 超音波減衰スペクトル計と光学式濁度計を併用した測定システムの採用によって出水時の全期間を通して測定精度の高い SS 濃度の連続計測が可能となる。

謝辞：本研究は中部電力株式会社長野支店飯田電力センター平岡ダム管理所のご協力を得て実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉武宏晃, 吉村健, 三谷泰裕：耳川水系ダム通砂における土砂管理のための貯水池への流入土砂量把握に関

- する研究, 電力土木, No.373, pp.28-32, 2014.
- 2) 角哲也, 森田佐一郎, 小宮秀昭：水中型 SMDP を用いた黒部川ダム排砂時の高浮遊砂濃度連続計測, 水工学論文集, 第54巻, pp.1111-1116, 2010.
- 3) 水垣滋, 阿部孝章, 丸山政浩：濁度計による高濃度濁水中の浮遊土砂濃度推定法, 寒地土木研究所月報, No.706, 2012.
- 4) Tsutomu Kobayashi *et al.* : Measurement method of particle concentration and acoustic properties in suspension using a focused ultrasonic impulse radiated from a plano-concave transducer, Ultrasonics 44, e491-e496, 2006.
- 5) 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.
- 6) 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.1-607-612, 2014.
- 7) 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, 2014.
- 8) 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, 2015.
- 9) 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計による SS 測定に用いる等価球形散乱体モデルの検証, 河川技術論文集, 第21巻, pp.55-60, 2015.
- 10) ISO 20998-1 : Measurement and characterization of particles by acoustic methods — Part 1: Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy, 2006.
- 11) P. S. Epstein and R. R. Carhart : The Absorption of Sound in Suspensions and Emulsions, J. Acoust. Soc. Am. 25, pp.553-565, 1953.
- 12) 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.
- 13) 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力：パスレングスを固定した超音波減衰スペクトル計の海水中の固有周波数応答, 日本音響学会講演論文集, pp.1115-1118, 2015.
- 14) 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.
- 15) J. J. Faran Jr. : Sound scattering by Solid Cylinders and Spheres, J. Acoust. Soc. Am 23(4), pp.405-418, 1951.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) D. J. McClements, J. N. Coupland : Theory of droplet size distribution measurement in emulsions using ultrasonic spectroscopy, Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect 117 , pp.161-170, 1996

(2015. 9. 30 受付)