河川技術論文集，第19巻，2013年6月

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

STUDY OF MEASUREMENT TECHNOLOGY OF CONCENTRATION AND PARITICLE SIZE DISTRIBUTION OF SUSPENDED SEDIMENT IN FLOWING WATER USING ULTRASONIC ATTENUATION SPECTROSCOPY

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（〒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）
[3,4]非会員　日本大学工学部　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）

Ultrasonic waves are applied to the measurement technology in many fields. In our study the measurement technology is also applied to the concentration measurement and the size analysis of sand particles in flowing water. We manufactured a automatic measurement equipment for suspended sediment using a plano-concave ultrasonic transducer adopted as a transducer and conducted various kinds of measurement for the purpose of monitoring the concentration and the particle size distribution of suspended sediment which is a problem in comprehensive sediment management in rivers. Consequently we clarified that the concentration measurement and the particle size analysis could be simultaneously carried out using an attenuation spectrum at a frequency band of 1 to 10 MHz.

Key Words : *Suspended Sediment, Particle Size Analysis, Plano-concave Transducer, Ultrasonic Attenuation Spectroscopy, Kernel Function*

１．はじめに

水系の総合土砂管理は，治水・利水・環境に係る重要な課題である．総合土砂管理においては流水中の土砂の動態をモニタリングすることが必要となるが，光学式，超音波式ともに正確な濃度を求めるためには懸濁粒子の粒径に関する情報が必要であるため，浮遊砂のモニタリング技術について数多くの研究[1)~7)]が進められてきている．この分野における超音波の利用は、光学式の濁度計では計測できない光を通さない高濃度の領域においても濃度や粒度分布を直接計測できる将来的に有望な技術である．しかし，既存の超音波利用に関する研究[2)~7)]は超音波流速計等の反射強度を用いた後方散乱方式によるもので，濃度分布が測定できる利点はあるが，計測濃度は限定されており，粒径が測定できないので濃度の測定精度に課題がある．

本研究の目的は，超音波による計測技術を用いて，洪水時あるいはダムの排砂時の河川において時空間で大きく変化する濃度と粒度分布を連続して直接計測することができる計測技術を開発することにある．コロイドや懸濁液中の濃度および粒度分布の測定に超音波減衰スペクトル法(Ultrasonic Attenuation Spectroscopy，以下「UAS法」という.）を利用できることはよく知られている．その基本概念は，試料を通過中の超音波の周波数依存減衰もしくは速度を測定することにある．この減衰は，試料内の粒子の散乱または吸収による寄与を含み，分散物質の粒度分布と濃度が減衰スペクトルを決定する．この関係が実験観測または理論計算によって確証されれば，超音波データから粒度分布をほぼ推定することができる．UAS法は，濃厚なスラリーやエマルションでの動的なオンライン測定に有用である．さらに，凝集，分散および粉砕のような動的プロセスを直接リアルタイムで計測することができる[8)]．

本研究[9)~13)]では，1個の圧電セラミックス振動子による広帯域（1～10MHz）の超音波を用いた浮遊砂自動計測装置を試作して，バックグラウンド測定を行い，本計測装置の固有周波数応答を測定した．また，UAS法に適用する超音波と粒子の物理的相互作用の実験モデルを構築するため，この装置を用いて粒子径が0.2～100μmの市販の

単分散微粒子を用いた超音波減衰特性試験を実施した．さらに計測プログラムを開発して，水路試験を実施した．

２．測定方法

(1) 原理

超音波はサスペンション，スラリー，コロイドまたはエマルション中を通過するときに，分散相によって散乱・吸収され，その結果，透過音（transmitted sound）の強さが弱まる．減衰係数（attenuation coefficient）は超音波の周波数の関数であり，粒子径の組成および物理的状態に依存している．減衰スペクトルの測定は，粒度分布および濃度の推定に用いることができる．測定された全減衰量は，連続液相の固有吸収，分散相の固有損失，熱損失，粘性損失と散乱損失によるものである．この損失メカニズムの相対的な重要度は，材料系によって決まる．このメカニズムの理論モデルまたは実験モデルは，測定した減衰スペクトルデータを粒度と粒度分布の推定値に変換するのに用いることができる[8]．

(2) 計測装置

試作した計測装置のシステム概要を**図-1**に示す．本計測装置は1個のトランスデューサで超音波の送受信を行うもので，パルス反射法と呼ばれる方法を採用している．河川または貯水池の水面⑭の下に本体カプセル⑩，超音波検出器③および水温計⑦を設置し，陸上部に測定制御機⑫と浮遊砂自動計測装置⑬を設置する．検出器③はトランスデューサ①と反射体②で構成されている．トランスデューサは市販の円形チタン酸鉛振動子の一面を曲率半径r=30㎜で凹面状に加工し，その加工面と裏面に電極を付けたプラノコンケーブ形振動子で，加工面と側面には厚さ数10μmのフッ素コーティング加工を施している．また，反射体は厚さ5㎜のステンレス鋼で，プラノコンケーブ形振動子の幾何焦点距離（L=44.33㎜）の位置に設置する．トランスデューサに印加するパルス電圧は3.0～6.0V，パルス幅60～90nsの短いインパルスである．

水中に設置した本体カプセル⑩には，陸上部の測定制御機⑫と各種信号やデータの送受信を行うデータ送受信機⑨，測定したデータの高速フーリエ変換（FFT）を行うCPU⑤，トランスデューサにパルス電圧を印加するパルス発振器⑥，トランスデューサが受信した信号をデジタルデータに変換するA/D変換器④およびカプセル内温度計が収納されている[13]．

(3) 水温の測定

純水の音波吸収係数α_wは式(1)で表わされる[14]．

$$\alpha_w = A_3 P_3 f^2 \tag{1}$$

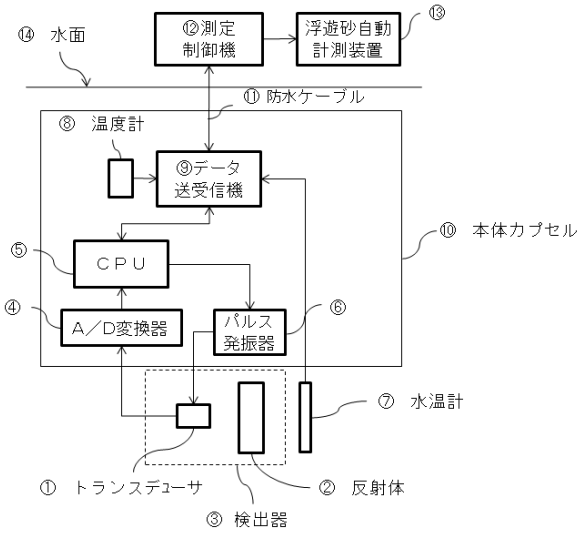

図-1 本計測装置のシステム概要

ここで，A_3は水温の影響を考慮した係数，P_3は圧力補正係数，f は周波数を示す．河川では通常圧力補正は必要としないが，水温は減衰係数の計測に大きな影響を及ぼすため，バックグラウンド測定を実施して水温が超音波の透過に与える影響を予め把握しておく必要がある．また，水温の測定は十分信頼できる水温計を使用する．

(4) バックグラウンド測定

本装置のような固定のパスレングスを用いる方法では，減衰を測定するために計測装置の固有周波数応答の測定を必要とする[15]．このような場合には，超音波減衰の低い適切な較正用液体（水など）を用いて透過スペクトルを得る．その後の計算において，そのスペクトルをバックグランウンド信号として用いる．

バックグラウンド測定は，十分脱気した純水を満たした計測容器に計測装置を設置して行われた．このバックグラウンド測定から得られた透過スペクトルを基準スペクトルとする．各周波数帯の基準スペクトルの成分は水温の関数として式(2)から算出することができる．

$$A_0(f_i) = a_i + b_i\theta + c_i\theta^2 \tag{2}$$

ここで，A_0 (f_i) は周波数f_iでの基準スペクトルの成分，θは水温［℃］，a_i，b_i，c_iはバックグラウンド測定データから得られた基準スペクトルの係数である．バックグラウンド測定の一例を**図-2**に示す．各周波数帯における水温に対する基準スペクトル成分との関係を**図-3**に示す．

(5) 音速の測定

音速はパスレングスを第一反射波の到達時間で割ることにより算出する．

$$c = \frac{2L}{t} \tag{3}$$

ここで，c は水中の音速［m/s］，L はトランスデュー

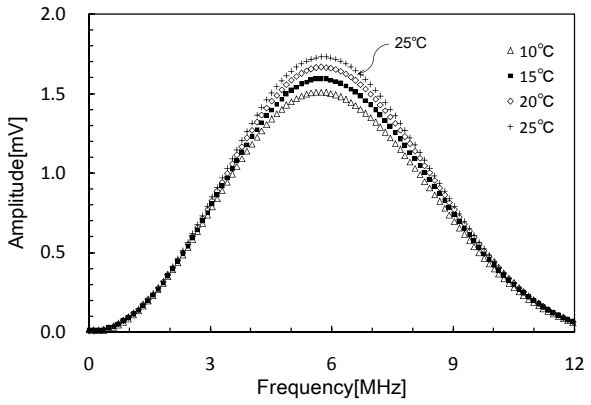

図-2 バックグラウンド測定

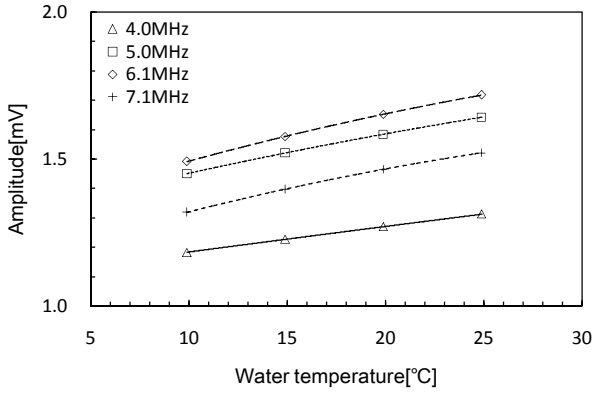

図 - 3 水温と基準スペクトルの成分との関係

サと反射体との間の距離［m］，t は第一反射波の到達時間[s]である．

(6) 減衰スペクトルの測定

周波数の関数として測定した減衰係数を減衰スペクトルという．減衰係数は，透過値に対するバックグラウンド値の比率の自然対数をとり，この値をパスレングスで除して式(4)から算出する[15]．

$$\alpha_{meas}(f_i) = -\frac{1}{2L}\ln\frac{A(f_i)}{A_0(f_i)} \tag{4}$$

ここで，α_{meas}は減衰係数の計測値［Np/m］，$A(f_i)$は周波数f_iでの透過スペクトルの成分である．

３．計測プログラム

(1) 濃度と粒度分布の算出

計測プログラムは，測定された減衰スペクトルから適切なモデルを用いて濃度と粒度分布を求めるプログラムである．線形モデルを用いた減衰スペクトルの推定値は式(5)により算出することができる[15),16),17)]．

$$\alpha_{\mathrm{mod}}(f_i) = \phi \cdot \sum_{j=1}^{m} K(f_i, d_j) \cdot g(d_j) \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^{m} g(d_j) = 1.0 \tag{6}$$

ここで，$\alpha_{\mathrm{mod}}(f_i)$は減衰スペクトルの推定値［Np/m］，$g(d_j)$は粒子径$d_j$の粒度分布関数，$m$は粒径階，$\phi$は浮遊砂の体積パーセント濃度［vol.%］である．$K(f_i,d_j)$はカーネル関数（kernel function ）と呼ばれる関数で，周波数f_iと粒子径d_jから算出される単位体積濃度当たりの減衰係数である．このカーネル関数は標準試料を用いた超音波減衰特性試験から決定することができる．

次に，式(7)を用いて減衰スペクトルの計測値と推定値が一致する濃度と粒度分布関数を決定する．具体的には式(5)の濃度ϕと粒度分布関数を変化させて分散s が最小となる濃度・粒度分布が計測値となる．

$$s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left[\alpha_{meas}(f_i) - \alpha_{\mathrm{mod}}(f_i)\right]^2 \tag{7}$$

ここで，sは減衰係数の計測値と推定値の偏差の分散，nは適用する周波数帯の数を示す．この計測プログラムを用いて，減衰スペクトルから濃度と粒度分布を同時に逆変換するためには，粒度分布に関する情報が重要となる．粒度分布が既知の場合は，未知数は濃度だけであるから，これを求めることは容易である．しかし，浮遊砂のように濃度と粒度分布がともに未知数である場合は，粒度分布に関する情報，すなわち浮遊砂の最大粒径，平均粒径および標準偏差についてそれぞれの範囲を条件として設定することによって計測値の信頼度を向上させることができる．

(2) 粒度分布関数

粒度分布関数は，標準対数正規分布もしくは式(8)から式(10)に示す変形４パラメータ対数正規分布[18)]（modified 4-parameter lognormal distribution）を適用する．

$$g(x_j') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_g'}\exp\left[-\frac{(x_j' - x_g')^2}{2\sigma_g'^2}\right] \tag{8}$$

$$x_j' = \frac{(x_j - x_0)(x_\infty - x_0)}{(x_\infty - x_j)} \tag{9}$$

$$x_j = \ln d_j \tag{10}$$

ここで，$g(x_j')$は粒度分布関数（相対粒子量），x_∞は粒子径の上限値，x_0は粒子径の下限値，d_j は粒径階j の粒子径［m］，x_g'はメディアン径［m］，σ_g'は標準偏差である．

４．超音波減衰特性試験

(1) 標準試料

超音波減衰特性試験に使用する標準試料は，球状の単分散微粒子で密度，平均粒径およびCV値が既知のものを使用した．標準試料とその物性値を**表-1**に示す．

表-1　標準試料

	Sample	Density [g/cm³]	Median Diameter [μm]	CV [%]	備考
1	FR-N2N-0.2	2.27	0.22	4.14	宇部日東化成㈱ ハイプレンカ
2	FR-N2N-0.5	2.08	0.52	2.13	
3	FR-N2N-1	2.22	0.98	3.67	
4	FQ-N2N-2	2.20	2.376	1.50	
5	FQ-N2N-4	2.19	4.01	1.11	
6	FQ-N2N-6	2.20	6.075	1.62	
7	TS-N3N-20.0	2.00	19.94	1.15	
8	GBL-30	2.43	29.8	-	JIS試験用粉体2の ガラスビーズ
9	GBL-40	2.46	40.6	-	
10	GBL-60	2.44	58.8	-	
11	GBL-100	2.40	100.4	-	

注)　CV値＝標準偏差／平均径×100(%)

(2) 試験方法

表-1に示す標準試料を入れた懸濁液を攪拌装置で攪拌しながら水温，濁度および超音波減衰スペクトルを測定した．攪拌装置は内径300mm×高さ500mmの透明アクリル製容器で底部は断面が円弧状になるように加工を施している．攪拌装置の中心に小型攪拌機のシャフトをおいて，インペラを中速（300rpm）で回転して微粒子が均一に分散するように攪拌する．攪拌装置の中に検出器，水温計および濁度計を入れ，透明アクリル製の容器に本体カプセルを設置し，カプセル収納容器内の水温を一定にして試験を行った．懸濁液は18ℓ，試験濃度は0.2～0.4wt.%とし，濃度の計測には水理実験用の透過式濁度計（東京計測，PC-206およびPST-3503）を使用した．**表-1**の標準試料を用いて濁度計のキャリブレーションを行い，濁度計の計測値から濃度を求めた．

(3) 解析方法

測定した超音波減衰スペクトルデータは，中間波領域（Intermediate Wave Regime，以下「IWR」という）と長波長領域（Long Wavelength Regime，以下「LWR」という）に区分して解析する．この超音波の領域は式（11）で表わされるkrによって区分される．

$$kr = \frac{2\pi f}{c} \cdot r = \frac{\pi f d}{c} \tag{11}$$

ここで，k は波数（wave number），r は粒子半径，d は粒子径，c は音速，f は周波数を示す．$kr \ll 1$の領域はLWR，$kr \approx 1$の領域はIWRとなる[17]．

(4) IWRの減衰特性

粒子径10μm以上はIWRに属する傾向にあり，IWRでは散乱損失が支配的になる．IWRの減衰係数αは式(12)で表わすことができる[17]．

$$\alpha = -\frac{3\phi}{2(kr)^2 r}\sum_{n=0}^{\infty}(2n+1)\cdot \mathrm{Re}(A_n) \tag{12}$$

ここで，ϕは体積濃度，A_nは散乱係数（scattering coefficient）を示す．減衰係数は濃度に比例し，またkrの関数として解析することができる．IWR領域の減衰スペクトルデータを解析した結果を**図-4**に示す．**図-4**において，x軸はkr，y軸は式（13）から算出した値をプロットした．

$$y_{sc} = ad \tag{13}$$

$$a = \frac{1}{\phi}\alpha_{meas} \tag{14}$$

ここで，a は式(14)で算出した単位体積濃度当たりの減衰係数，d は粒子径を示す．**図-4**から単位体積濃度当たりの減衰係数の散乱損失分a_{sc}’は式(15)で表わすことができる．

$$a_{sc}' = \frac{\pi}{c}\cdot k_{sc}(f,d) \tag{15}$$

ここで，$k_{sc}(f,d)$はカーネル関数と呼ばれる関数で，周波数 f と粒子径 d の関数である．これが散乱損失モデルとなる．

(5) LWRの減衰特性

一方，粒子径10μm以下のLWRの超音波の減衰は，物質固有の損失，散乱損失，熱的損失および粘性損失に分けることができる．浮遊砂の場合は物質固有の損失と熱的損失が無視できるため，LWRの減衰係数は式(16)～(18)に示すとおりとなる[19]．

$$\alpha = \alpha_{sc} + \alpha_{vis} \tag{16}$$

$$\alpha_{sc} = \frac{1}{2}\phi k_1^{\,4} r^3 \left(\frac{1}{3}\left[\frac{\kappa_1 - \kappa_2}{\kappa_1}\right]^2 + \left[\frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2 + \rho_1}\right]^2 \right) \tag{17}$$

$$\alpha_{vis} = \frac{1}{2}\frac{\phi k_1 s(\rho_2 - \rho_1)^2}{(\rho_2 + T\rho_1)^2 + s^2\rho_1^{\,2}} \tag{18}$$

ここで，α_{sc}は減衰係数の散乱損失成分，α_{vis}は減衰係数の粘性損失成分，κは断熱圧縮率，ρは密度を示す．添字1,2は連続相（水）と分散相（粒子）を示す．LWRでは粘性損失が支配的であるが，粒子径が大きくなると散乱損失が増加する．このため，LWRの減衰スペクトルの解析では，式(19)により減衰スペクトルの計測値aから散乱損失成分と粘性損失成分を分離しなければならない．

$$a_{vis} = a - a_{sc}' \tag{19}$$

LWRの減衰スペクトルデータの解析結果を**図-5**に示す．LWRの減衰スペクトルの解析は，McClementsの理論[20]を用いた．すなわち，x軸は式（20），y軸は単位体積濃度当たりの減衰係数a_{vis}と波長λとの積$a_{vis}\lambda$を密度差の二乗で除した補正を加えた式(21)から算出した．

$$x_{vis} = r\sqrt{f} \tag{20}$$

$$y_{vis} = \frac{1}{(\rho_2 - \rho_1)^2} a_{vis}\lambda \tag{21}$$

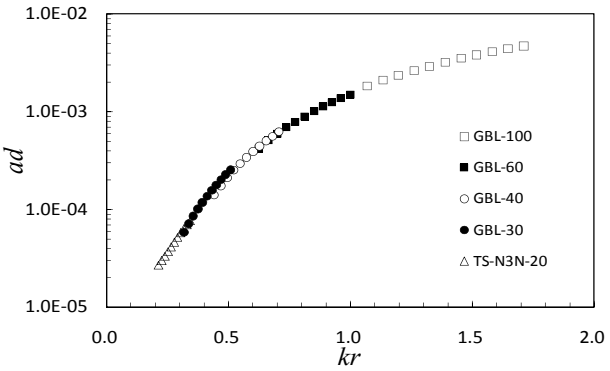

図-4 IWRの減衰特性

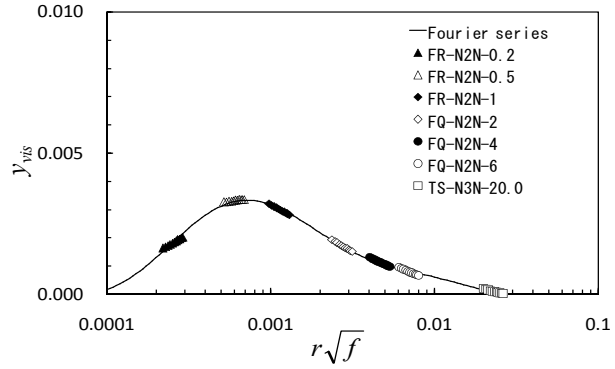

図-5 LWRの減衰特性

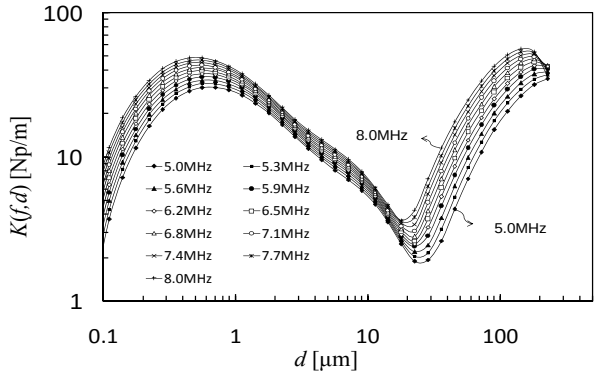

図-6 カーネル関数の例

これらの式を周波数 f と粒子径 d の関数とすると式(22)，(23)が得られる．

$$x_{vis} = \frac{1}{2} d \sqrt{f} \tag{22}$$

$$y_{vis} = \frac{1}{(\rho_2 - \rho_1)^2} a_{vis} \cdot \frac{c}{f} \tag{23}$$

図-5から単位体積濃度当たりの減衰係数の粘性損失成分a_{vis}’は式(24)で表わすことができる．これが粘性損失モデルとなる．

$$a_{vis}' = \frac{1}{c} \cdot (\rho_2 - \rho_1)^2 \cdot k_{vis}(f, d) \tag{24}$$

(6) カーネル関数

減衰係数は式(16)に示すように散乱損失成分と粘性損失成分の合計となることから，式(5)のカーネル関数$K(f, d)$は式(25)で算出することができる．

$$K(f,d) = \frac{1}{c}\left[k_{sc}(f,d) + (\rho_2 - \rho_1)^2 k_{vis}(f,d)\right] \tag{25}$$

式(25)から算出したカーネル関数の一例を**図-6**に示す．粒子径d ＜ 20μmでは粘性損失が，d ＞ 20μmでは散乱損失が支配的となり，この境界付近の減衰係数は粘性損失と散乱損失が含まれる．

5．水路実験

(1) 試験方法

フィールドにおけるオンライン計測を模擬して，循環式実験水路を利用した計測試験を実施した[13]．水路は幅0.80m，全長12.0m，水深0.30mで，流速は約20cm/sである．水路内に超音波検出器と水温計を設置し，本体カプセル，測定制御機および浮遊砂自動計測装置を水路脇に設置した．水路下流端に設けた貯留槽と水路上流の給水槽との間はφ150mmの給水管で接続して循環ポンプを運転しながら1時間間隔でシリカパウダーのスラリーを貯留槽に投入して濃度を段階的に増加させて，約2分間隔で懸濁液の濃度と粒度分布を計測した．また，30分間隔で2ℓの懸濁液を採水して濃度と粒度分布を測定した．採水した懸濁液濃度の測定方法は，JIS K 0102（工場排水試験方法）により試料をろ過し，ろ過材上に残留した懸濁物質を105～110℃で乾燥して質量を計測し，この質量を懸濁液の質量で除して算出した．粒度分析はレーザ回折式粒度分布測定装置（島津製作所：SALD-3000J）を用いた．

(2) 計測結果

水路実験により，懸濁液の濃度と粒度分布を測定した結果を**図-7**，**図-8**にそれぞれ示した．これは，前述の計測プログラムを用いて減衰スペクトルから濃度と粒度分布を同時に逆変換した結果であるが，図中には実際に水路から採水して計測した値についても記してあり，両者をみると比較的良く一致する．この結果は，本モニタリングシステムによる浮遊砂濃度と粒度分布の同時計測を実証するものであり，今後，フィールドでの計測の実現が期待できる．

6．結論

近年，UAS法のISO規格[8),15)]が制定されており，今後，微粒子の粒度分布測定技術として広く普及するものと思われる．UAS法は，光学式，その他の代替技術に比較して数多くの優位性を持つ．第一に光を通さないような高濃度でも計測が可能であること，第二にサンプルを希釈等の処理を施すことなく直接計測が可能である．粒度分布の測定装置として用いられていることが多いが，前述したように濃度と粒度分布の計測が可能である．本研究では，UAS法による計測技術について，以下の結論を得ると

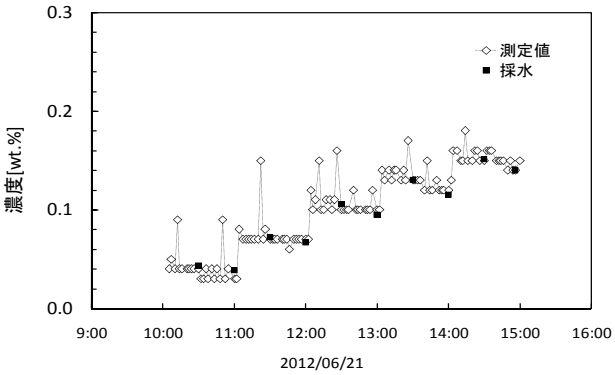

図-7　水路実験結果（濃度）

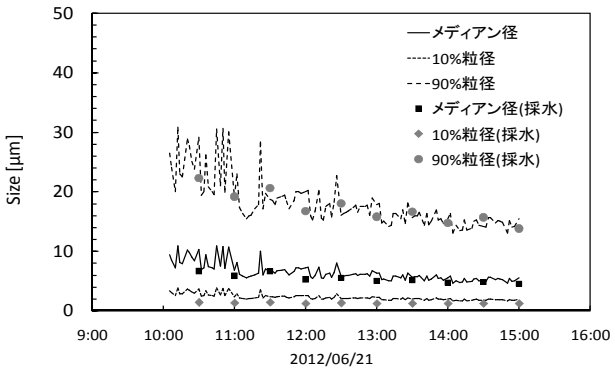

図-8　水路実験結果（粒度分布）

ともに, UAS法が浮遊砂モニタリング技術として利用できることを検証した. ①UAS法を用いて流水中の懸濁液中の微粒子濃度を精度良く計測することが可能となった．これはUAS法を採用することによって粒度分布の計測が可能となったためである. ②UAS法に適用するカーネル関数は，球状単分散微粒子を用いた減衰特性試験データを解析することによって求めることができた．③計測精度を向上させるためには，微粒子の密度と粒度分布に関する情報（最大粒径・平均粒径・標準偏差等）が重要となる．

今後，現地計測試験によって計測性能を実証するとともに計測装置の改良と普及を図り，本装置がダムの堆砂対策と総合土砂管理の一助になることを期待している．

参考文献

1) 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.

2) 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, 2005.

3) 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.225-230，2007.

4) 川西澄，稲田景：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測定法, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.1401-1405，2006.

5) 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, Vol.B2-65，No.1，pp.1436-1440，2009.

6) 新井励，中谷直樹，奥野武敏：海域モニタリングに適した ADCP を用いた濁度の鉛直分布計測手法，日本船舶海洋工学会論文集，第 7 号，pp.23-30，2008.

7) 橘田隆史，横山洋，橋場雅弘，新井励：ADCP の超音波反射強度を利用した濁度計測技術について，河川流量観測の新時代，第 2 巻，pp.49-56，2011.

8) ISO 20998-1, Measurement and characterization of particles by acoustic method-Part.1：Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy, 2006.

9) 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，US2003-1，2003.

10) 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.

11) T.Kobayashi, H.tai, S.Kato：Measurement method of particle concentration and acoustic properties in suspension using a focused ultrasonic impulse radiated from a plano-concave transducer, ultrasonics 44, pp.491-496, 2006

12) 古川仁志, 猪股重光, 田井秀一, 小林力:広帯域性の超音波振動子を用いたウォッシュロードのモニタリング装置の開発に関する研究（第 1 報），電力土木，No.332，pp.9-17，Nov.2007.

13) 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.

14) R.E.Francois and G.R.Garrison :Sound absorption based on ocean measurements :Part Ⅰ:Pure water and magnesium sulfate contributions, J. Acoust. Soc. Am.,Vol.72,No.3, pp.896-907,1982

15) ISO 20998-2(draft)，Measurement and characterization of particles by acoustic method-Part.2：Guidelines for linear theory, 2012.

16) H.Geers，W.Witt :Ultrasonic Extinction for In-line Measurement of Particle Size and Concentration of Suspensions and Emulsions，Particulate Systems Analysis 2003，Harrogate，UK.

17) A. Richter, F.Babick, S. Ripperger: Polydisperse particle size characterization by ultrasonic attenuation spectroscopy for systems of diverse acoustic contrast in the large particle limit, J.Acoust.Soc.Am.，Vol.118, No.3, 2005.

18) L.E.Wagner，D.Ding :Representing Aggregate Size Distributions as Modified Lognormal Distribution，Transactions of the ASAE，Vol.37(3)，pp.815-821，1994.

19) D.J.McClements,.J.N.Coupland :Theory of droplet size distribution measurements in emulsions using ultrasonic spectroscopy, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 117,pp.161-170，1996.

20) D.J.McClements: Principles of Ultrasonic Droplet Size Determination in Emulsions，Langmuir, Vol.12, No.14 pp.3454-3461，1996.

（2013. 4. 4受付）