

懸濁物質の粒径による水中超音波の減衰特性に関する実験的考察

Experimental study on attenuation characteristics of underwater ultrasonic for different particle sizes of suspended solids

○浦畑 夢, 猪飼 研人, 岡島 賢治

URAHATA Nozomu, IKAI Kento, OKAJIMA Kenji

1. はじめに

近年, 農業用開水路の機能診断で要求される水理性能の指標の一つである粗度係数を計測する方法として, 超音波法による粗度係数計測技術が注目されている. 新井ら(2008)によれば, 懸濁物質の粒径が大きくなるにつれ水中超音波の減衰も大きくなることが指摘されている. 佐藤ら(2013)によると, 農業用排水路に流れている懸濁物質の平均粒径は $8\mu\text{m}$ 程度と報告されている. 本研究では懸濁物質の粒径による水中超音波の減衰特性を明らかにすることで, 水中超音波による粗度係数計測の有効性と限界を明らかにすることを目的に研究を行った.

2. 計測方法

本研究では既往の研究を参考に, 水槽に164Lの水道水を入れ, そこに粒径2, 4, $8\mu\text{m}$ のアルミナ(日本粉体工業技術協会)を, Table1のように添加した懸濁液を用意した. 水中超音波センサ: Hook Reveal 5 83/200 (LOWRANCE社)は調査対象面(滑面)に対して400mm離れた位置に設置した. 使用した水中超音波は83kHz, 200kHzとした. 粒径による減衰特性を調べるために, まず0ppmの時の滑面に対して水中超音波を照射して最大振幅(V)を計測した(例えばFig.1). この時, 波形の伝播時間からFig.1, 2の四角内の波形が初めに到達した反射波であることを確認して最大振幅(V)を計測した. その後, 表1に従い浮遊懸濁物質濃度(ppm)を増加させ最大振幅(V)を計測し(例えばFig.2), 0ppm時の最大振幅(V)を基準に計測減衰比を求めた.

本研究では, 実験で得られた計測減衰比を, (i)式に示す減衰式(新井ら, 2008)を用いて計算した解析減衰比と比較した.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-2\alpha r} \quad \dots (i)$$

ここで, $\alpha = \alpha_w + \alpha_1 + \alpha_2$, α_w : 海水による

Table1 Amount of alumina and suspended solids concentration (ppm)

No.	1	2	3	4	5	6
アルミナ総量 (mg)	0	500	1000	1500	2000	3000
浮遊懸濁物質濃度 (ppm)	0	3.05	6.098	9.146	12.20	18.29
No.	7	8	9	10	11	12
アルミナ総量 (mg)	4000	5000	6000	7000	8000	9000
浮遊懸濁物質濃度 (ppm)	24.39	30.49	36.59	42.68	48.78	54.88
No.	13	14	15	16	17	18
アルミナ総量 (mg)	10000	15000	20000	25000	30000	35000
浮遊懸濁物質濃度 (ppm)	60.976	91.463	121.95	152.44	182.93	213.41

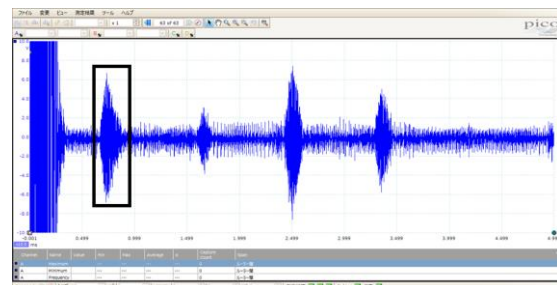


Fig.1 Waveform at 0ppm using 200kHz

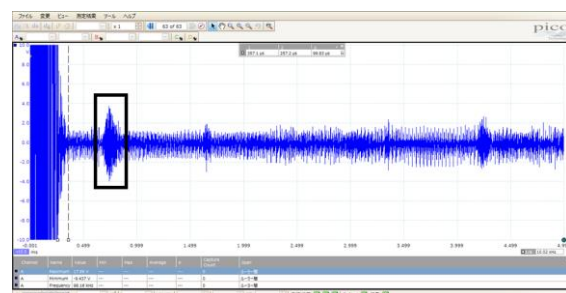


Fig.2 Waveform at 213.41ppm using 200kHz

*三重大学, Mie University キーワード:水中超音波, 減衰特性, 懸濁物質, 粒径

吸収, α_1 : 粒子半径による吸収, α_2 : 粒子半径による散乱である.

ここで I : 減衰後の最大振幅(V), I_0 : 減衰前の最大振幅(V), r : 往復の距離(mm). それぞれの α は $\alpha_w = \left[\frac{1.86Sf_t f}{(f_t^2 + f^2)} + \frac{2.68f}{f_t} \right]$, $\alpha_1 = (10 \log e^2) \frac{Mk(\sigma-1)^2}{2\rho_s} \left[\frac{s}{s^2 + (\sigma+\delta)^2} \right]$, $\alpha_2 = (10 \log e^2) \frac{3MX^2}{4d\rho_s}$. こ

こで, $\sigma = \frac{\rho_s}{\rho_w}$, $f_t = 21.9 \times 10^{(6 - \frac{1520}{273+T})}$, $\delta = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{9}{(2\beta d)} \right]$, $s = \frac{9}{4\beta d} \left[1 + \frac{1}{\beta d} \right]$, $X = \frac{1.1(4/3)k_a x^4}{[1 + 1.3x^2 + (4/3)k_a x^4]}$,

$\beta = \left[\frac{kc}{sv_w} \right]$, f : 水中超音波の周波数(kHz), f_t : 緩和周波数(kHz), T : 水温($^{\circ}\text{C}$), M : 浮遊懸濁物質濃度(ppm), k : 波数(m^{-1}), ρ_s : 粒子密度(g/cm^3), ρ_w : 海水密度(g/cm^3), d : 粒子半径(mm), v_w : 動粘性係数(m^2/s), c : 水中超音波の伝搬速度(m/s), $x = kd$, $k_a = 0.18$.

3. 結果と考察

それぞれの粒径の懸濁液中で 83kHz, 200kHz の水中超音波によって計測した計測減衰比と, (i)式で求めた解析減衰比を比較したグラフを Fig.3, 4 に示す. 解析減衰比では, 83kHz, 200kHz とともに減衰が生じる結果となった. また, 高周波数である 200kHz の方が 83kHz より減衰比が大きくなり, 粒径は大きいほど減衰比が大きくなった.

実験で計測した計測減衰比では, 2, 4 μm どちらの周波数でも 213.41ppm までは減衰はみられなかった. 一方, 8 μm では 83kHz では減衰がみられないが, 200kHz の方では 50ppm まで解析減衰比とほぼ同じ減衰を示し, 50ppm より高濃度になるとおよそ 6 割の減衰で一定となった. 懸濁液中での水中超音波による粗度係数計測の可能性として, 計測減衰比の結果をもとに考えると, 83kHz, 200kHz の周波数でも懸濁物質が 2, 4 μm の濁水であれば水中超音波による計測の可能性が示された. また懸濁物質が 8 μm の濁水であれば 83kHz での計測か, 200kHz の場合でも 50ppm 程度までは (i) 式を用いた補正を行うことで計測の可能性が示された.

4. まとめ

本研究では, 農業用排水路に流れている懸濁物質の粒径に近い 8 μm 以下の粒径における水中超音波の減衰特性を検討し粒径の影響を精査することを目的に研究を行った. その結果 83, 200kHz では粒径が 2, 4 μm の時減衰が見られず, 8 μm では 200kHz の場合のみ減衰が見られた. そのため 2, 4 μm であれば計測できる可能性があることが示された. 一方, 8 μm では 83kHz では計測できる可能性があり, 200kHz では 50ppm 程度までは既往の研究の減衰式から補正することで計測の可能性が示された.

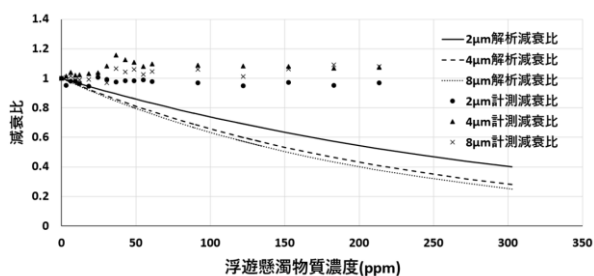


Fig.3 Measured attenuation ratios and computed attenuation ratios at 83 kHz

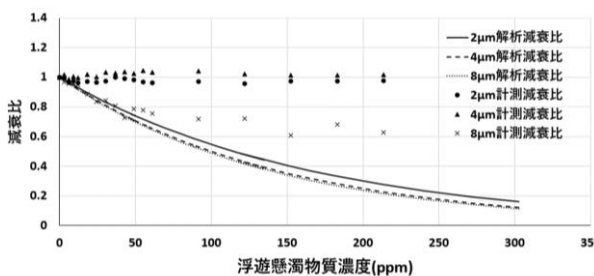


Fig.4 Measured attenuation ratios and computed attenuation ratios at 200 kHz