

ソナー周波数帯域における堆積層音響特性の実験的解析 Acoustic Properties of Sediment in SONAR Frequency Range

高野慎太^{1*}, 池田貞一郎¹, 今井隆介², 西平健², 高野正彦², 橋場邦夫¹, 南利光彦² (¹(株)日立 中央研究所, ²(株)日立 ディフェンスシステム事業部)
Shinta Takano^{1*}, Teiichiro Ikeda¹, Ryusuke Imai², Ken Nishihira², Masahiko Takano², Kunio Hashiba¹, Mitsuhiko Nanri² (¹Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., ²Defense Systems Group, Hitachi Ltd.)

The acoustic properties of sea sediment are location dependent and have a significant effect on the near-seafloor operation of the acoustic devices, such as SONAR. In this study, we conducted hydrophone measurement both in artificial and natural sea sediment. By the time of flight (TOF) method, we measured longitudinal sound speed c_l and attenuation coefficient α_l as acoustic properties. Physical properties, the grain sizes, depth-dependent porosity β , are also measured. Using the measured physical properties as the Biot-Stoll model parameters, we simulated acoustic properties in the sediment. Then the measured and calculated acoustic properties are compared.

1. 緒言および目的

海底堆積層の物理特性、音響特性は、表層から深さが高々1 m の範囲で大きく変化しており[1, 2], 海底面からの音波反射に及ぼす影響は少なくない。そのため堆積層の物理・音響特性を把握することは、海底面近傍でソナー等音響機器のオペレーションを行う際に重要である。海外においては、SAX99 など大規模な海底堆積物の環境、音響調査の報告が行われている[3,4]。その一方で、我が国においては堆積層の物性および音響特性を横断的に計測した研究は、いくつかの例[1,5]を除いて見当たらない。

堆積層は Fig. 1 のように、固体粒子と間隙流体とで構成される。さらに、堆積物中において固体粒子は集合体として骨格を形成し、この骨格部の摩擦損失や弾性率が堆積物中の音響特性に影響を及ぼす。このような多孔質媒質中の音波伝搬を記述するモデルとして、Biot-Stoll モデルがある[6]。Biot-Stoll モデルの線形近似を行うと、解として複素波数 k_l が求まる。 k_l の実数部および虚数部から、ある周波数 ω における縦波の音速 c_l および縦波の吸収係数 α_l が求まり、堆積層中の任意の点においてそれらの値を算出できる[7]。

本研究は、堆積層内の音響特性を明らかにするために、堆積層の物理特性として間隙率、粒子径、粒子密度を、また音響特性として、縦波音速および吸収係数を実測し、計測結果と堆積層モデル計算との比較を行った。

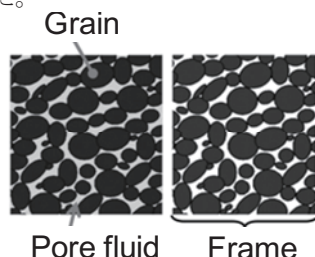


Fig. 1 Sediment Model

2. 実験方法

2.1 堆積層

人工堆積層として、荒木田土と水とを混合し、ミキサーで攪拌し凝集した粒塊を細かく分散させ、140

×95×50 (単位は cm) の水槽に深さ 35 cm まで堆積させた。また、自然の堆積層として長瀬ダム (静岡県伊豆) および内浦湾 (静岡県沼津市) において採泥および音波伝搬試験を行った。

2.2 堆積層の物理特性の計測

Biot-Stoll モデルの計算にあたっては、多数のパラメータのうち堆積層の間隙率 (堆積物中の液体の体積分率) β が最も重要である。間隙率を介して堆積層の密度 ρ は以下の式で表される。

$$\rho = \beta\rho_f + (1 - \beta)\rho_r \quad (1)$$

ここで、 ρ_f と ρ_r は間隙流体と粒子の密度である。

人工堆積層、自然の堆積層ともに HR 型不攪乱型柱状採泥器にて堆積層のコアサンプルを取得した。採取したサンプルを深さ方向に 2 cm 刻みにスライスし、それぞれの重量を計測、堆積層の深さ方向 d の間隙率分布 $\beta(d)$ を算出した[8]。また、それぞれの堆積層に関して、粒子径および粒子密度も計測した。

2.3 堆積層音響特性の計測

実験室の水槽にて人工堆積層の音速および減衰率の計測を、長瀬ダムにて自然堆積層の減衰率計測を行った。実験では、数 10 kHz 帯域の sin 波を用いた。人工堆積層中に深さ約 15 cm に送波器を 1 本、堆積層内の器間距離別 (54 cm, 76 cm) に受波器を 2 本設置し、振幅比から減衰率を、音波の到達時刻から音速を算出した (Fig. 2 (a))。また、長瀬ダムでは、水中に送波器を 1 本、堆積層内の深さ別 (25 cm, 50 cm) に受波器を 2 本設置し、振幅比を相対的に評価

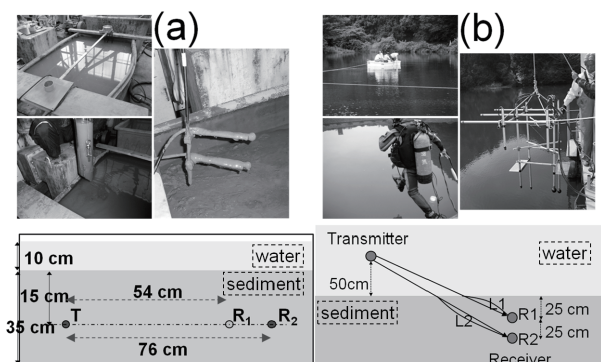


Fig. 2 Experimental configuration

E-mail: shinta.takano.zo@hitachi.com

することにより減衰率を算出した (Fig. 2 (b))。受信波形は各々HPF処理や送波波形との相互相関処理を行った後、振幅比の比較や信号の立ち上がり時刻を計測した。

3. 測定結果

3.1 間隙率分布計測の結果

Fig. 3 に各堆積層の密度分布測定から得られた間隙率分布の結果を示す。深さ 0 cm は $\beta = 0$ (すべて液体)の結果を示す。どの堆積層も表層 10 cm 程度の領域において急激に間隙率が変化し、深部において一定の間隙率に収束する。特に、人工的に作製した堆積層では間隙率変化が顕著である。また、各堆積層の平均粒径は長瀬ダム、内浦湾、人工堆積層で各々約 30, 130 および 10 μm の粒径から予想される間隙率はほぼ 0.75 程度であるが、人工堆積層の深部間隙率は $\beta = 0.52$ と内浦湾の堆積層 $\beta = 0.54$ に近い値となった。

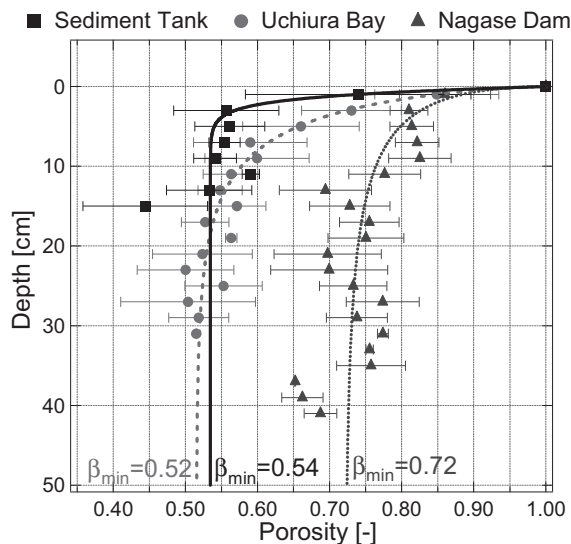


Fig. 3 Porosity distribution

3.2 音速および減衰率の計測の結果

Table 1 に人工堆積層にて送波周波数 40 kHz において計測した音速と減衰率を示す。人工水槽における計測値は、Biot-Stoll モデルによるシミュレーションの予測と大きく異なり、音速は大幅に遅くなり、減衰率は増大した。また、Fig. 4 に長瀬ダムと人工堆積層にて計測した様々な周波数に対する吸収減衰率 α_f の計測結果を示す。点線は Biot-Stoll モデルを用いた予測値である。長瀬ダムの減衰率は、ばらつきが大きいもののシミュレーションによる予測帯域に含まれたことから、計算モデルの妥当性が示された。一方、人工堆積層の減衰率は 40 kHz と同様、いずれ

Table 1 Measured acoustic characteristics of artificial sediment tank

	Simulation	Experiment
Velocity [m/s]	1547	1340
Attenuation [dB/m]	27	63.5

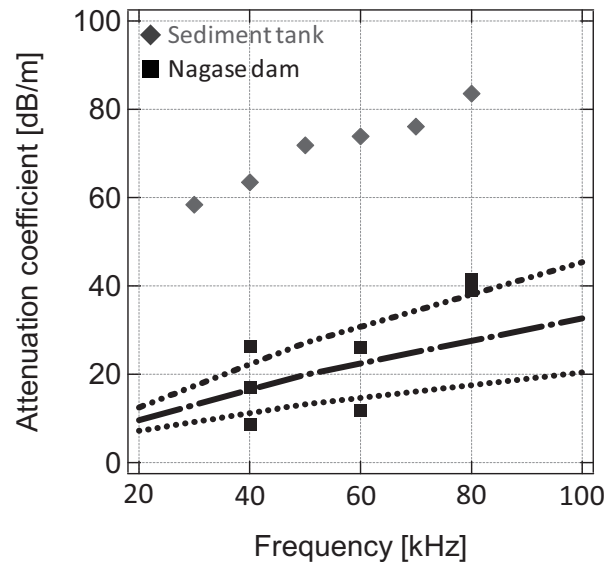


Fig. 4 Attenuation coefficient versus frequency

の周波数でも予測値と大きく異なった。これは、人工堆積層の堆積層内に気泡が混入していたからと考えられる。人工堆積層では、Biot-Stoll モデルにさらに気体の影響を考慮したモデルで解析する必要であることがわかったが、自然状態、少なくとも長瀬ダムの堆積層には気泡はほとんど溶け込んでおらず、Biot-Stoll モデルの適用範囲内であると考察される。

5. 結言

人工の堆積層と自然状態の堆積層において、物理特性および音響特性を計測した。これらの結果を堆積層モデル計算と比較し、以下の結言を得た。

- ① 人工の堆積層と自然状態の堆積層の間隙率分布は大きく異なっている。人工堆積層においては、粒径から予想される深部間隙率よりもはるかに小さくなる。
- ② 人工堆積層では、音速および減衰率は Biot-Stoll モデルの予測から大きく異なった。気泡を十分に除去できなかったことが原因と考えられる。
- ③ 自然堆積層の減衰率は、Biot-Stoll モデルの予測と定量的に一致し、そのオーダーは周波数 40 - 90 kHz において 10 - 40 dB/m である。

引用文献

1. M. Kimura and T. Tsurumi, *Acoust. Sci. & Tech.* **25**(3), 188-195 (2004).
2. R. Carbo, *J. Acoust. Soc. Am.*, **108**(4), 1545-1547 (2000).
3. E. I. Thorsos, et al., *IEEE J. oceanic Eng.*, **26**(1), 4-25 (2001)
4. E. I. Thorsos, et al., *J. Acoust. Soc. Am.*, **120**, 3096 (2006)
5. 菅田ら, 技術研究本部技報, 技-514 (1972)
6. R. D. Stoll, *Sediment Acoustics* (Springer-Verlag, Berlin,) (1989).
7. 木村正雄, “海底音響学の基礎,” 海洋音響学会第 9 回技術講習会テキスト, 12-15, (2000)
8. 池田ら, 海洋音響学会 2008 年度研究発表会講演論文集, 37-38 (2008).