

符号化ソナーによる桜島火山域表層の弾性波伝搬特性の測定
Measurement of Elastic Wave Transmission Characteristics of
Sakurajima Volcanic Area Subsurface Using Coded Sonar

○棚田嘉博・井口正人・山本圭吾・中道治久・森田裕一

○Yoshihiro TANADA, Masato IGUCHI, Keigo YAMAMOTO, Haruhisa NAKAMICHI, Yuichi MORITA

An artificial earthquake by dynamite shot and an underground coded sonar by pseudonoise sequence are practical measures for probing underground structure. The latter technique is suitable for real time observation of underground structure. We adopt Huffman sequence as pseudonoise sequence which can lead to multiplexing coded sonar. A coded sonar using Huffman sequence is composed and applied to measure elastic wave transmission characteristics of Sakurajima volcanic area subsurfaces. Experiments show 2dB/m attenuation and 83m/s velocity at 200Hz under shallow grounds.

1. はじめに

地殻の構造探査のためにダイナマイトによる人工地震[1]、擬似雑音符号による弾性波振動源を用いる方法がある[2]。前者は地盤の固有振動が場所によって異なるのに対して、後者は振動源が場所によらず等価的にインパルスとなる。したがって、多点間の伝搬特性を測定するには後者のほうが有利である。これまで擬似雑音符号として直線変調FM波(チャープ波)が使われているが、符号が1種類のため同時に多重伝送することができない。

本報告では、多重符号が構成できる有限長の擬似雑音符号として Huffman 系列符号で地中符号化ソナーを試作し[3]、桜島火山地域表層の弾性波伝搬実験を行い、基本的な測定データを得ている。すなわち、地中の周波数伝送特性、距離伝搬特性、伝搬時間特性、伝搬速度特性を得ている。

2. 擬似雑音弾性波による地中探査

地中音波伝搬において、送信音波振動源を $s(t)$ 、伝送路のインパルス応答を $h(t)$ とすると、受信波形 $r(t)$ は畳み込み

$$r(t) = s(t) \circ h(t) \quad (1)$$

で与えられる。ここに (\circ) は畳み込みを表す。受信波形 $r(t)$ と送信信号 $s(t)$ の相関関数を求めれば、送信信号(符号)の自己相関関数がインパルスであれば、

$$\rho(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} r(t)s(t-\tau)dt = h(\tau) \quad (2)$$

となつて、伝送路のインパルス応答が求まる。ただし、 T は符号の継続時間である。送信符号のエネルギーが等価インパルスのエネルギーに等しい。

人工地震は地盤の固有振動が場所によって異なるので受信信号 $r(t)$ から伝搬特性 $h(t)$ を推定するのが難しいのに対して、符号化ソナーは伝搬特性 $h(t)$ が直接に求まる。もし、多点で同時に異なる符号を送信し多点で多重信号を無干渉で受信できればリアルタイム CT の実現の可能性がある。本報告で用いる符号は一定の時間範囲で無干渉となる符号が構成できる、Huffman 系列符号で符号化ソナーを構成する。

地中での弾性波の伝搬は、音圧を p [N/m]、ひずみを u [m/s] とすれば次式で表される。

$$p = Ae^{-\alpha r} / r \quad (3)$$

$$u = p / Z \quad (4)$$

ここに、 A は定数、 r [m] は送受信間の距離である。 α [Nep/m] は減衰定数、 $Z = \rho \cdot c$ [Pa · s/m] は音響インピーダンスである。地中での減衰は大きいので符号化ソナーは長大な符号を使ってエネルギーを稼ぐ必要がある。

3. 有限長擬似雑音系列符号と信号処理

偶数長 M の Huffman 系列 $\{a_i; i = 0, 1, \dots, M-1\}$ は

$$A(Z) = \sqrt{M} \varepsilon_{M-1} |K(Z^{-1} + \gamma_0)| \times \prod_{m=1}^{\frac{M-1}{2}} (Z^{-2} + 2\gamma_m Z^{-1} \cos \frac{2m\pi}{N} + \gamma_m^2) \quad (5)$$

の展開係数で与えられる。ここでは長さ $M=11822$

に対し素数 $N=11821$ の平方剰余から系列を求めた。各系列値を幅 T_c のパルス列に重み付け、幅 T_c 内に 8 周期の方形搬送波を掛けて送信符号を作る。受信側では、搬送波に対応したバンドパスフィルタを通過させ、 \sin , \cos 成分を 1 周期あたり 8 点でサンプルして相関処理を行い、二乗和を開平して相関パルスを求める。

図 1 に実験システムの構成を示す。送信符号はノート PC と USB 接続した任意波形発生器で発生する。受信側では A/D 変換器がノート PC と USB 接続されており、取得した受信データはノート PC で信号処理を行う。水を満たし地中に埋めたプラスチック容器に、水中スピーカ及びハイドロフォンを入れて、音波を伝達させる。サンプリングパルスおよびトリガパルスは光ケーブルで送る。

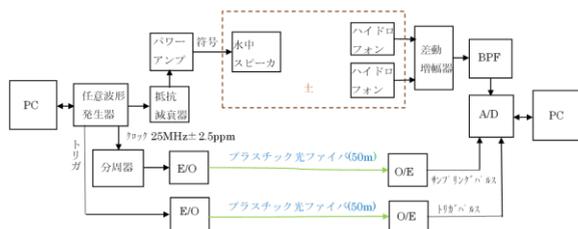


図 1 実験システムの構成

4. 地中伝搬実験

最初に、火山灰土で形成された桜島裾野（京都大学防災研究所黒神観測所構内）の表層部で伝搬実験を行った。水を満たしたプラスチック容器各々に、水中スピーカを吊り下げて送波部とし、ハイドロフォンを内壁に固定して受信部とした。プラスチック容器は縦(22cm)、横(36cm)、深さ(25cm)の大きさで、地表から 23cm まで埋めた。図 2 に距離 4m のとき 1kHz での相関パルスのピーク値を 0dB とした周波数伝送特性を示す。60Hz の電源ハムを抑えるためにノッチフィルタを挿入したので 50Hz で伝送量が下がっている。次に搬送周波数 200Hz で送波部、受波部の距離を 4m, 8m, 16m, 24m, 32m に変化させたとき、減衰特性を図 3 に、伝搬遅延特性を図 4 に示す。これらより減衰定数 $\alpha=0.23\text{Nep/m}=2.0\text{dB/m}$ 、伝搬速度 $c=83.3\text{m/s}$ を得た。

次に、錦江湾沿い住宅地で、晴天が数日続いた日、夕方から深夜にかけて降雨があった翌日に、搬送周波数 200Hz、伝搬距離 3m で実験を行った。初日、翌日で、それぞれ伝搬速度が $c=114\text{m/s}$, 83m/s 、土の密度が $\rho=1.6, 1.4\text{g/m}^3$ 、音響インピーダンスが

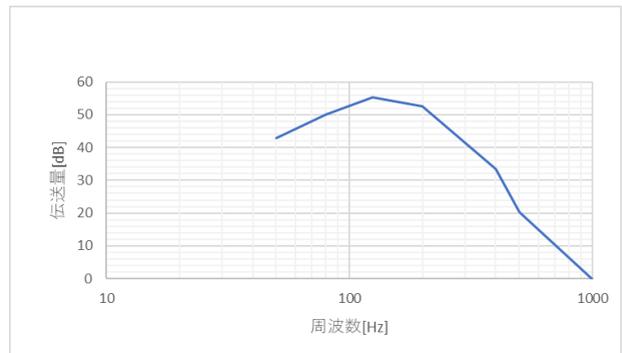


図 2 周波数伝送特性

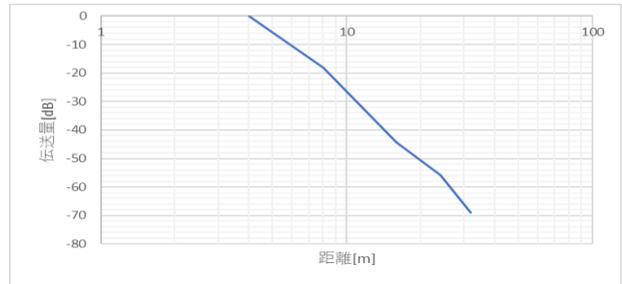


図 3 距離減衰特性

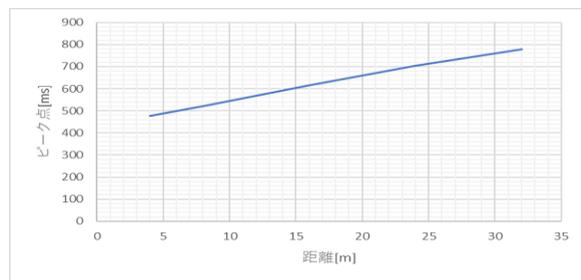


図 4 距離伝搬遅延特性

$$Z = 1.8 \times 10^5 [\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}], \quad Z = 1.2 \times 10^5 [\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}]$$

となった。このことから、桜島黒神と住宅地はほぼ同じ土質で、水分増加とともに音速、音響インピーダンスが低下することが分かった。

5. おわりに

Huffman 系列を用いた地中符号化ソナーを構成し、桜島火山地域表層で地中伝搬実験を行った。地中深部での反射実験が今後の課題である。

謝辞 本研究は東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間共同研究の経費によった。

文献

- [1] T. Tsutsui, et al, Jour. Volca. Geoth. Res. 315, pp.1-14, 2016.
- [2] 岩槻ほか, 応用地質, 38 巻, 6 号, pp.359-369, 1998.
- [3] 棚田ほか, 第 34 回センシングフォーラム資料, pp.1-6, Aug. 2017.