

チャープ超音波の相関解析による浅層地下探査

平田克己*・清水貴之**

Shallow Underground Exploration by Correlation Analyses of Chirped Supersonic Wave

Katsumi Hirata* and Takayuki Shimizu**

In this paper, we propose a simple method to estimate positions of buried objects under the ground (remains, water pipes, and so on) without digging up. The method is based on correlation analyses between radiated chirped supersonic wave and reflected one. The principle and possibility to apply the proposed method to underground exploration are shown with experimental results.

1 はじめに

地面を掘り返すことなく、その地中構造や埋没物の有無や位置、形状、さらには材質等を推定することは、埋没文化財調査や、水道管やガスの埋設状況調査など、様々な場面で役に立つものと考えられる。そこで我々は、特に埋没物の有無および位置の推定に的を絞って基礎研究を行った。

これまでに様々な地下探査手法が考案さらには実用化されている[1,2]。その中でも弾性波、すなわち超音波を用いた手法は古くからあり、初めは自然地震を、後に人工的な弾性波、例えば火薬発破や重錘落下等の振動源を用いた探査法が広く用いられるようになった[3]。しかしこれらはいずれも、石油や鉱脈の探索といった深層探査を目的としていたこともあり、非常に大がかりな装置を必要としていたため、地表数メートルといった浅層の探査には向いていなかった。

そこで、できるだけ簡便な方法で実現可能な浅層地下探査として、耐ノイズ性という観点において有効であると考えられるチャープ超音波を放射信号とし、その反射信号との相関解析に基づく手法に関し

て、その可能性を実験的に検討した。本稿ではその探査原理と実験の評価について報告する。

2 地下探査原理

地面に発振器と受振器を配置し、前者から超音波を放射すると、その信号は地下埋没物に反射して受振器で検出される。この検出信号は、放射信号が減衰し伝搬距離に応じた時間遅れを伴ったものになる。この遅れ時間を検出することができれば、発振器と受振器の位置関係をもとに、その埋没物までの距離を推定することができる。さらに、受振器を複数用いることによりその3次元位置の推定が可能になると考えられる。

本研究では放射信号は、耐ノイズ性に優れ、かつ発生が容易であるチャープ信号を用いることとした。チャープ信号とは、周波数が時間とともに直線的に変化する信号であり、FM信号の一種である。振幅 A 、中心周波数 f_0 、継続時間 T のチャープ信号は、次式のように表される。

$$s(t) = \begin{cases} A \sin\left(2\pi f_0 t + \frac{1}{2} \mu t^2\right), & |t| \leq \frac{T}{2}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 μ は変調度を表し、変調帯域幅を Δf とすれば、

$$\mu = \frac{2\pi\Delta f}{T}, \quad (2)$$

である。すなわち、 $s(t)$ は、時間 T の間に周波数が

* 小山工業高等専門学校電子制御工学科

** 群馬大学大学院工学研究科(平成16年3月小山工業高等専門学校専攻科電子システム工学専攻修了)

* Department of Electronic Control Engineering, Oyama National College of Technology

** Master's Program in Engineerings, Gumma University (Graduated from Electronic System Engineering Course, Oyama National College of Technology in Mar. 2004)

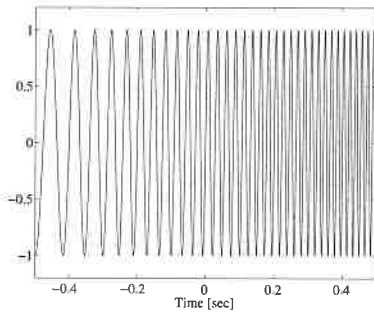


Fig.1 An example of chirped signal, where $f_0=35[\text{Hz}]$, $\Delta f=50[\text{Hz}]$, and $T=1[\text{sec}]$.

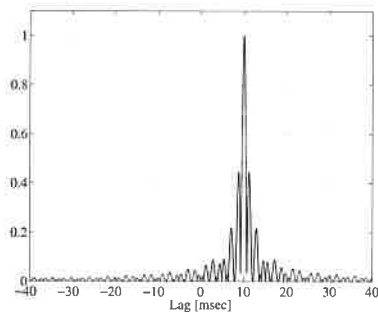


Fig.2 An example of cross-correlation between a chirped signal and delayed one in absolute value, where $f_0=350[\text{Hz}]$, $\Delta f=500[\text{Hz}]$, and $T=1[\text{sec}]$.

$f_0 - \Delta f/2$ から $f_0 + \Delta f/2$ まで上昇するような信号である。Fig.1 は, $f_0 = 35[\text{Hz}]$, $\Delta f = 50[\text{Hz}]$, $T = 1[\text{sec}]$ のチャープ信号の一例である。

このようなチャープ信号の自己相関関数は時間差 0 の周りにパルス幅 $1/\Delta f$ のピークを持つ[2]。これは, パルス圧縮としてもよく知られている。Fig.2 は, $f_0 = 350[\text{Hz}]$, $\Delta f = 500[\text{Hz}]$, $T = 1[\text{sec}]$ のチャープ信号と, 同じものを 10msec だけ遅らせたものととの相互相関関数の絶対値の一例である。時間差 10msec のところに鋭いピークが立ち, それ以外のところでは小さくなっていることが分かる。これを利用すれば, 例えば, 対象物体に向けて放射したチャープ信号とその反射波との相関解析により, 伝搬時間を検出することができ, 対象物までの距離が推定可能となる。

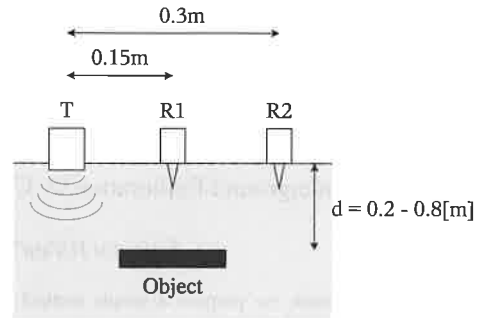


Fig.3 The arrangement of a radiator T , detectors R_1 , R_2 , and an object.

3 基礎実験

本節では, 提案手法による地下探査の可能性を探るために, 屋外にて実際の状況下を考慮して行った基礎実験について述べる。

3.1 実験方法

予め探査対象物体を埋めておき, 地表面に設置した発振器からチャープ信号を連続的に放射しつつ, 少し離して同じく地表面に設置した受振器にて, その反射波を検出する。その後, 放射反射両信号の相互相関解析を行う。なお, 本実験は本校電子制御工学科棟の裏庭にて行った。

Fig.3 に検出系の概略を示す。深さ $d (=0.2 \sim 0.8[\text{m}])$ に埋めておいた対象物体のほぼ上の地表面に発振器 T と 2 つの受振器 R_1, R_2 を直線上に 15cm 間隔で並べて置いておき, ノートパソコンにて繰り返し生成したチャープ信号をパワーアンプを通して T から放射する。放射された信号は対象物で反射するが, その反射信号と元の放射信号とを同時に同パソコンに採取する。今回の実験では, 水道管やガス管など管状の埋設物を想定して, 直径約 6.5cm, 長さ約 17cm の小型ガスボンベの空き缶を対象物として用い, 横に寝かせて埋めた。また, 発振器には, 口径 8cm のコーンスピーカを, 受振器にはジオフォーンと呼ばれる速度検知型の振動センサを用いた。

Table1 は, 今回行った実験の条件をまとめたものである。対象物の深さは, 0.2m, 0.4m, 0.8m の各場

Table 1 Experimental conditions.

OBJECT	PORTABLE GAS CYLINDER
DEPTH d	0.2, 0.4, 0.8 m
RADIATED SIGNAL	CHIRPED SUPERSONIC WAVE
BANDWIDTH Δf	200, 500, 900 Hz
DURATION PER A CYCLE	0.5 sec
LOWER FREQUENCY	100 Hz
DETECTOR	OYO GEOSPACE GS-20DH
DISTANCE FROM RADIATOR	0.15 and 0.3 m

合、及び、比較のため何も埋めない場合について行った。放射するチャープ信号の帯域は、発振器と受振器の特性を考慮し、また、電源ノイズやその他の低周波振動との干渉を極力抑えるため、最低周波数はいずれも 100Hz とし、帯域 Δf を 200, 500, 900Hz とした。また、発振器 T から各受振器 R_1 , R_2 までの距離はそれぞれ 0.15m, 0.3m とした。

3.2 実験結果

実際に発振器に出力した信号を Fig.4 に示す。帯域 Δf がそれぞれ(a) 200Hz, (b) 500Hz, (c) 900Hz の場合である。これに対して、Fig.5 が対象物を埋めなかった場合の受振器 R_1 における検出信号である。これらは、放射信号の直接波であると考えられる。発振器と受振器、および土の伝搬特性の影響を受け、時間に対する周波数の変化に伴って、振幅も変化してしまっていることが分かる。特に(c)の場合、全時間の半分以上で、本来検出したい信号が小さすぎて、約 50Hz の低周波ノイズ成分に埋もれてしまっている。

次に、検出信号と放射信号との相互相関関数の推定結果を示す。Fig.6 は、放射チャープ信号の帯域が (a) 200Hz, (b) 500Hz, (c) 900Hz の場合で、それぞれ実線が対象物を 0.4m の深さに埋めたもの、破線が何も埋めなかったものである。実線と破線とで比較してみると、いずれもおおよそ 4msec 付近に最大ピークがあり、その後の 5msec 以降では、実線のほうがやや大きなピークが見られる。前者のピークは直接波によるものと考えられ、後者は対象物を埋めた実線のほうにだけ見られることから、その反射波によるものであると推察される。このピークが検

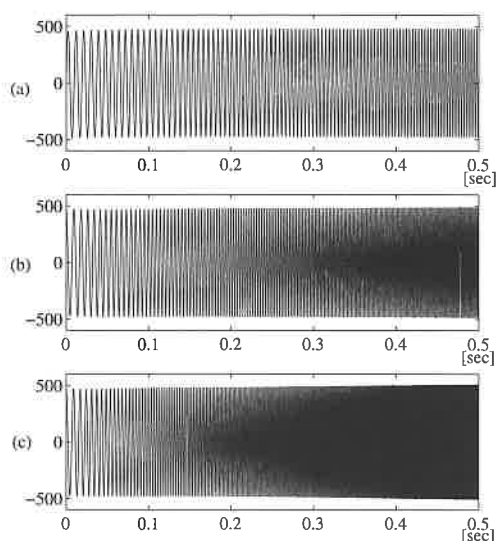


Fig.4 Radiated chirped signals, where bandwidths Δf are (a)200Hz, (b)500Hz, and (c)900Hz, respectively.

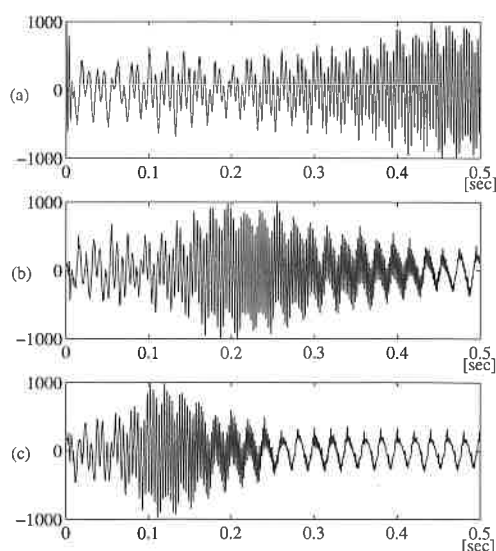


Fig.5 Detected signals with detector R_1 , where bandwidths Δf are (a)200Hz, (b)500Hz, and (c)900Hz, respectively.

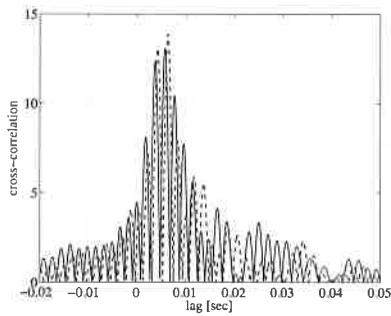
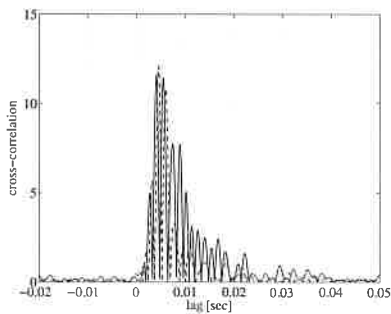
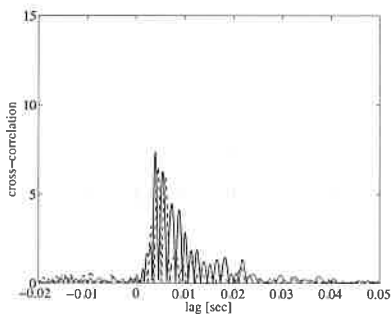
(a) $\Delta f = 200[\text{Hz}]$ (b) $\Delta f = 500[\text{Hz}]$ (c) $\Delta f = 900[\text{Hz}]$

Fig.6 Estimated cross-correlation function between detected signal and radiated one, where solid lines are the case that the object was buried in depth of 0.4m, and broken lines are in case of no object.

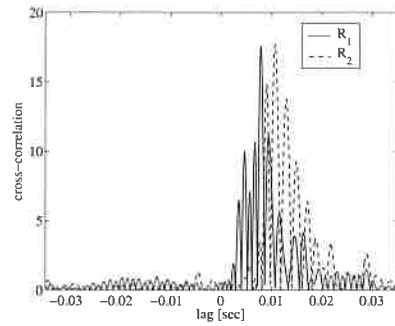


Fig.7 Estimated cross-correlation function between detected signal and radiated one, where the solid line is for the detected signal by R_1 , and the broken line is for by R_2 .

出できれば、対象物の有無がわかることになる。

一方、帯域 Δf で比較してみると、帯域がもつとも狭い (a) の場合よりも、広い (b) のほうが包絡線のピークが鋭くなっている。すなわち、時間に対する包絡線ピークの分解能が良くなっている。しかし、(b) に対して (c) は、帯域が広がっているにもかかわらず、包絡線のピーク幅はそれほど鋭くない。これは、前述したように、広帯域の信号を放射しても、実際には高周波成分は、放射、伝搬、検出の過程において大きく減衰してしまっているためであると考えられる。

Fig.7 は、対象物の深さが 0.2m、帯域 Δf が 500Hz の場合の相互相関の一例で、実線が発振源に近い受振器 R_1 での信号のもの、破線が他方の R_2 でのものである。 R_2 のほうが発振源から 2 倍離れている分、破線の最大ピークも遅れた時刻に出てきていることが分かる。

以上が、推定した相互相関関数の絶対値の一例であるが、これらそれぞれの最大ピークの時刻とその後に出てくる 2 番目のピークの時刻をそれぞれ直接波と反射波の到達時刻と位置付け、検出器までの距離と対象物の深さについてまとめた。Table2 は、その直接波と反射波の到達時刻を相関関数のピーク時刻より推定した結果を示す。ここで、“direct” が直接波の、“reflected” が反射波の到達時刻であり、また、“none” は対象物を埋めていないことを、“ $d \sim [\text{m}]$ ”

Table 2 Arrival time of direct/reflected wave at R_1 and R_2 . They were estimated from peak-time of cross-correlation.

	R_1		R_2	
	direct	reflected	direct	reflected
no object	4.48	—	5.59	—
$d=2.0$ [m]	4.58	7.85	10.68	28.90
$d=0.4$ [m]	4.03	16.74	7.12	12.10
$d=0.8$ [m]	10.45	18.46	7.75	13.57

[msec]

はその深さに埋めたことを示している。まず、 R_1 での検出信号について見てみると、一部を除いて、直接波の到達時刻はほぼ一致しており、平均で4.36msecであった。発振器からの距離が0.15mであるので、逆算すれば信号の伝搬速度は34.4m/secとなる。この直接波は、発振器の振動方向から、主に横波であると考えられるが、地表面で一度掘り返されたような軟らかく空気をよく含んだ土での横波の伝搬速度は30~50m/sec程度とも言われている。今回の実験では発振器や受振器自体が数cmの大きさを持っているので、この速度の値自体に多少大きな誤差が含まれている可能性はあるが、それほど見当違いな値ではないと言える。一方、反射波の到達時刻から伝搬速度を算出してみると、平均で64.7m/secとなった。こちらはやはり位置関係から、主に縦波であると推測されるが、縦波の速度は横波のそれよりもおよそ1.7~2倍程度であることから[4]、今回の実験が妥当なものであると言える。

次に、 R_2 での検出信号についてであるが、直接波、反射波とも到達時刻がばらばらになっており、相関解析によりうまく到達時刻を推定できていないようである。これにはいくつかの原因が考えられるが、その中で主なものとしては、次のようなものがある。

1. 単純に発振器からの距離が遠く、信号がうまく伝搬していないから。
2. 発振および受振器が直線配置のため、間にある R_1 が直接波伝搬の妨害をしているから。
3. 位置関係から、対象物での反射角が大きくなる

ため、反射波に横波の成分がより多く含まれるようになったから。

これらへの対処法として、放射信号をもっと強くすることや、発振器や受振器をより小さくしたり土とのインピーダンスの整合性を考慮したりして、それ自体での反射の影響を軽減させることなどが考えられる。

以上、実験の結果から、発振器と受振器がそれほど離れてなく、対象物がそのほぼ真下20~80cm程度にあるような場合では、波動の伝搬速度が予め分かっているならば、その対象物までの距離が推定できる可能性があることが分かった。

4 おわりに

ごく浅い地下を対象とした埋没物探査について、その埋没物の位置を簡単な装置で簡便に推定する手法開発に向けた基礎実験を行った。その結果、地表面に設置した発振器からチャープ超音波を放射し、別の受振器での検出信号との相関関数の絶対値のピーク時間から、埋没物までの距離推定の可能性が明らかになった。これを応用し、複数の受振器を用いて複数の検出信号の相関解析をすることにより、対象物の3次元位置や形状の推定への可能性が期待できる。このためには、放射信号強度の検討や発振器や受振器の小型化及び音響インピーダンスの考慮等の改善が必要であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Sugimoto and M. Okujima: Underground Imaging Using Shear Waves: Stacking Method of the Reflected Scattered Waves, Jpn. J. Appl. Phys. **35-1-5B**, 3105/3108 (1996)
- [2] 富澤良行, 荒井郁男: 遅延相関関数を用いたチャープ信号パルス圧縮地中レーダ, 電子情報通信学会論文誌, **J83-B-1**, 113/120 (2000)
- [3] 足立和成, 中條利一郎, 西村康: 文化財探査の手法とその実際, 真洋社 (1999)
- [4] 力武常次, 山崎良治: 地震を探る, 東海大学出版会 (1975)

