

# 遺跡・遺構のための音波探査用地中ソナーの研究

—超磁歪振動子を用いた映像分解能の改善—

川崎 拓<sup>1)</sup>・杉本 恒美<sup>2)</sup>

桐蔭横浜大学工学部

(2009 年 3 月 7 日 受理)

## 1. はじめに

現在、古墳などの地下に埋もれた遺跡・遺構の探査には地中を映像化することを目的としたレーダ探査や磁気探査、電気探査などの探査法が用いられてきたが、それらの探査法では電解物質を多く含んだ土壌や含水率の高い田圃や沼地などの泥土上では探査が困難である。このような土壌中の探査には音波による地中探査が有効であると考えている。したがって、浅い地層に埋まっている遺跡・遺構の探査に横波を用いた映像化を提案している<sup>[1][2]</sup>。

過去の我々の横波を用いた研究ではハンマー法を使用してきた。この方法は振源をハンマーで叩くため、波形と周波数を変化させることができなかった。そのため、波形と周波数を変化することができる超磁歪振動子<sup>[3]</sup>を使用した。この振動子の最大変位は 140  $\mu\text{m}$  であるが、振動振幅はハンマー法の約 16 分の 1 程度であるため、パルス圧縮法<sup>[4]</sup>を用いて映像分解能の向上を検討している<sup>[5-9]</sup>。

今回は、chirp 波の周波数変化幅の瞬時周波数における減衰をシミュレーションに適用

させ映像分解能の評価を行った。また、探査実験においては取得した受振波の高周波成分を増幅することにより、シミュレーション通りの分解能で埋設物を映像化することができたので報告する。

## 2. 実験概要

### 2-1. 実験方法

実験セットアップは Fig.1 のように 50cm 間隔で受振器を 12 個一直線に並べ、5.5m のラインを 1 つの探査ラインとした。振源は受振器間を移動させて走査する。また、振動を起こす際に波の位相を反転させることにより横波の受振波のみの位相が反転するため、通常の振動と位相反転振動を起こし、受振されたその二つの波を反転加算することにより、縦波や表面波の影響を減少させ、横波を強調させた。

### 2-2. 実験器具

振源として用いた超磁歪振動子 (Moritex Corp, AA140J013-MS1) を Fig.2 (a) に示す。形は半径 1.5 cm、高さ 20 cm の円柱である。横波を発生させるために、ハンマー法で用いていた振源の上に超磁歪振動子を設置した (Fig.2 (b) 参照)。振源は 44 cm  $\times$  8 cm  $\times$

Hiraku Kawasaki<sup>1)</sup>: Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

Tsuneyoshi Sugimoto<sup>2)</sup>: Department of Electronics and Information Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama, 225-8502

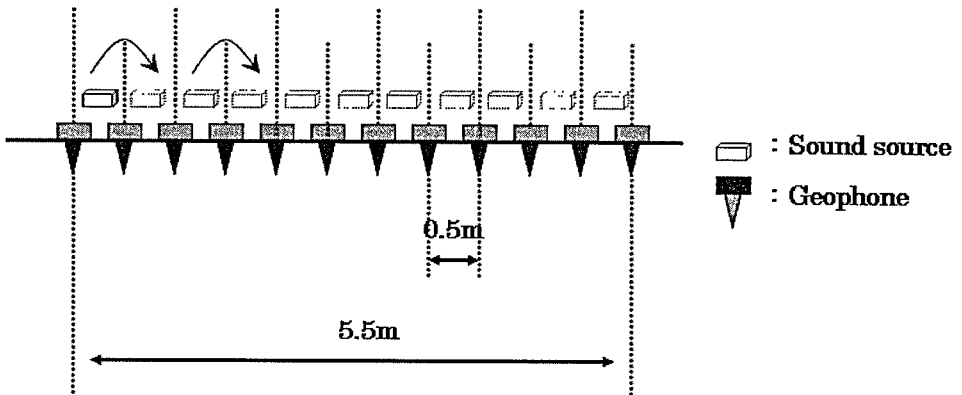


Fig.1 Experimental set-up

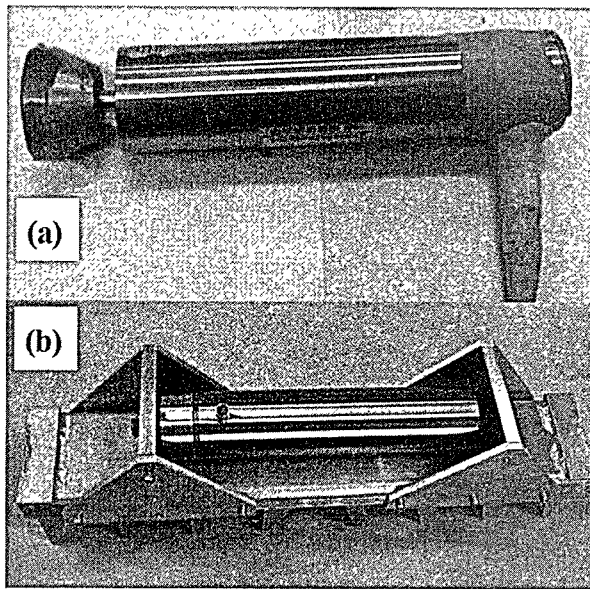


Fig.2 Sound source  
 (a) Super-magnetostriction vibrator  
 (b) Sound source for shear waves

3 cm の長方形のアルミブロックに 2.5 cm × 6 cm のスパイクがついたものである。また、受振器としては速度センサであるジオフォンを使用し、記録装置には、McSEIS-SX (Oyo Corp, McSEIS-SX, MODEL-1125R) を用い

た。

### 3. 送振波

送振波は周波数が線形的に変化する linear

chirp を使用した。窓関数はハニング窓やガウス関数がいられるのが一般的だが、これらの関数を chirp 波に用いると波形全体の振幅が抑えられてしまうという問題点がある。パルス圧縮は相関処理を行うので、周波数に変調している部分をなるべく保持した形が望ましい。そのため、短形窓を応用した窓関数を作成した。これは波形持続時間の前後の振幅（全体の 30%）をコントロールしたものであり、(1) 式を用いて振幅を保持する部分と波形の前後を滑らかな曲線でつないだものである。式中の k の乗数を用いてフラットな部分を保持することから、以降この式を k-flat 関数と呼ぶ。持続時間 100ms の chirp 波用の窓関数作成式を (2) 式に、波形例を Fig.3 に示す。

$$f(x) = \begin{cases} \int_0^x x^k (1-x)^k dx & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \dots (1)$$

$$W(t) = \begin{cases} \frac{\int_0^{\frac{1000}{15}t} x^k (1-x)^k dx}{\int_0^1 x^k (1-x)^k dx} & 0 \leq t \leq 0.015 \\ 1 & 0.015 < t < 0.085 \\ \frac{\int_{\frac{1000}{15}(0.1-t)}^1 x^k (1-x)^k dx}{\int_0^1 x^k (1-x)^k dx} & 0.085 \leq t \leq 0.1 \end{cases} \dots (2)$$

ここで、k の値を 3 とし、t は時間を示す。

#### 4. Chirp 波における瞬時周波数・減衰の考慮

##### 4-1. 減衰の計測

Chirp 波は周波数が時間とともに変化していく波形であるため、高周波成分は低周波成分にくらべて減衰値が増加すると予想される。そのため chirp 波の start 周波数と stop 周波数の変化により、パルス圧縮時の減衰が大きく変化すると考えられる。そのため、各周波数の減衰値を計測し、地中伝搬時の chirp 波を再現しなければ実際の状況をシミュレートできない。そこで、chirp 波における瞬時周波数毎の減衰を計測し、減衰におけるパルス圧縮効果の変化を確認した。

バースト波をパルス幅 50ms で 100Hz ずつ 300 ~ 800Hz までハニング窓をかけて送振した。セットアップは Fig.4 に示すように振源を 50cm 間隔のジオフォンの間を 3 箇所移動して測定した。

超磁歪振動子を取り付けた横波用振源を使用し、反転加算を行い表面方向に発生する直達の波を用いて減衰値を算出した。

地中における散乱体からの反射を考慮し、受振した波形をフーリエ変換し振源から同距離 (0.25m, 0.75m, 1.25m) にて取得した波形を平均して減衰を求めた。例として 300Hz の平均した値を Fig5 に示す。その結果より最小二乗法を用いて近似した直線の式を (3)

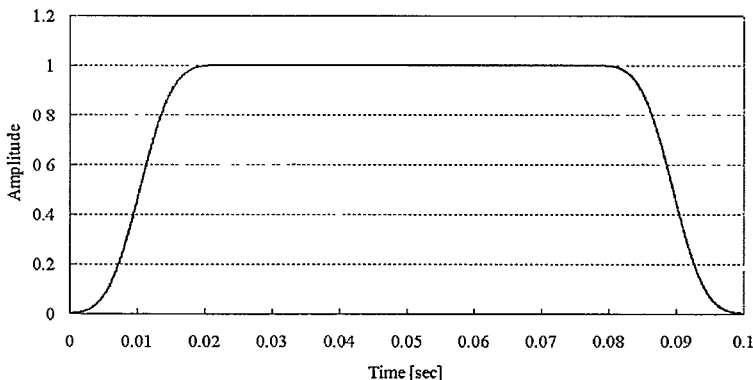


Fig.3 K-flat window function

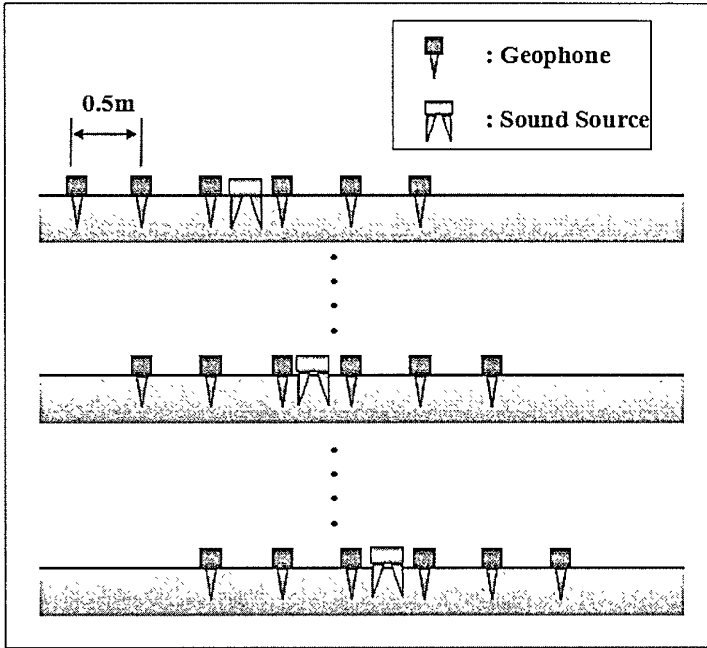


Fig.4 Experimental set-up of measurement attenuation value

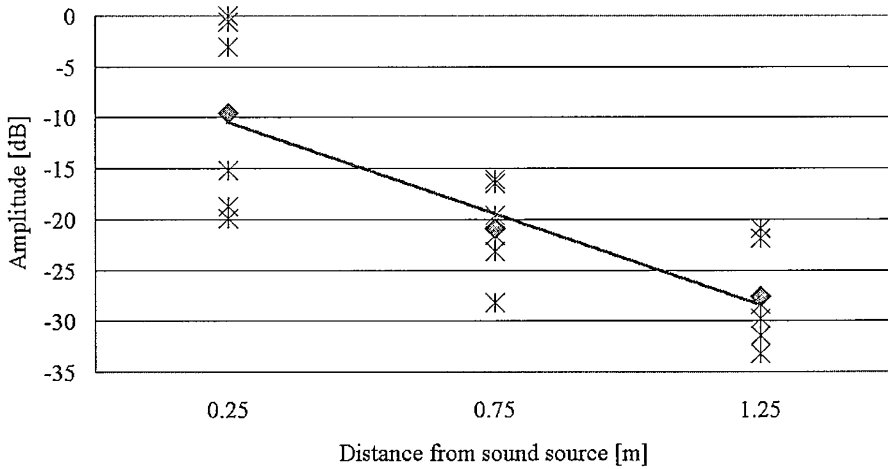


Fig.5 Amplitude spectrum (300 Hz 50 ms)  
 \* : Each Spectrum peak of FFT results  
 ◆ : Average of each FFT peak  
 ..... : Straight line of least-square method

式に示す。この式を用いて (4) 式、Fig.6 に示すように周波数領域で減衰を適用させた。

$$DF(\omega) = (-0.02 \frac{\omega}{2\pi} - 7.3) \times P \quad \dots (3)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \times DF(\omega) \quad \dots (4)$$

ここで  $\omega$  は角周波数、 $t$  は時間、 $P$  は伝播距離を示す。

#### 4-2. パルス圧縮時の減衰の確認

計測した瞬時周波数・減衰が、パルス圧縮時にどのような効果をもたらすか検討した。式 (4) を用いて送振波が 1m 伝搬した波形と 2m 伝搬させた波形を作成し、その両方をパルス圧縮し、波が 1m で減衰する値を算出した。

Fig.7 にパルス圧縮を行った際の減衰の値を示す。ここで  $\Delta f$  とは stop 周波数を 300Hz とした時の周波数差を示す。結果より  $\Delta f = 500\text{Hz}$  の時、 $-34 [\text{dB/m}]$  減衰することが確認された。

これはあくまで探査実験場における条件であるが、減衰が少ない土地でも距離方向に埋設されている物体を分離して映像化を行うのが困難であると予想される。よって、距離方向においては分解能ではなく、反応の大き

さを計測することにした。

### 5. 瞬時周波数・減衰を考慮したシミュレーションにおけるパルス圧縮効果の確認

#### 5-1. 距離方向の評価方法

前章で述べたように、超磁歪振動子を用いた方法ではハンマー法に比べ振幅が小さく、周波数が高いため減衰が大きいため、距離方向において分解能の計測が困難である。したがって、地中映像中の埋設物の反応の大きさを判別するため、映像振幅の半値幅を算出することにした。

Fig.8 (a) に示すように仮想反射点の位置を探査ライン中央、端から 2.75m、深さ 0.5m の位置に設置した。図中の点線の位置の映像振幅を Fig.8 (b) に示す。映像振幅の最大値を 1 とするとき、0.5 以上の振幅を持つ幅を半値幅とし、映像上の反射点の反応の大きさとした。

#### 5-2. 方位方向の評価方法

Fig.9 (a) に示すように仮想反射点の位置を探査ライン中央、端から 2m、深さ 0.5m の位置に設置し、もう一点の仮想反射点を近づけていった。図中の点線の位置の映像振幅を Fig.9 (b) に示す。映像振幅の最大値を 1

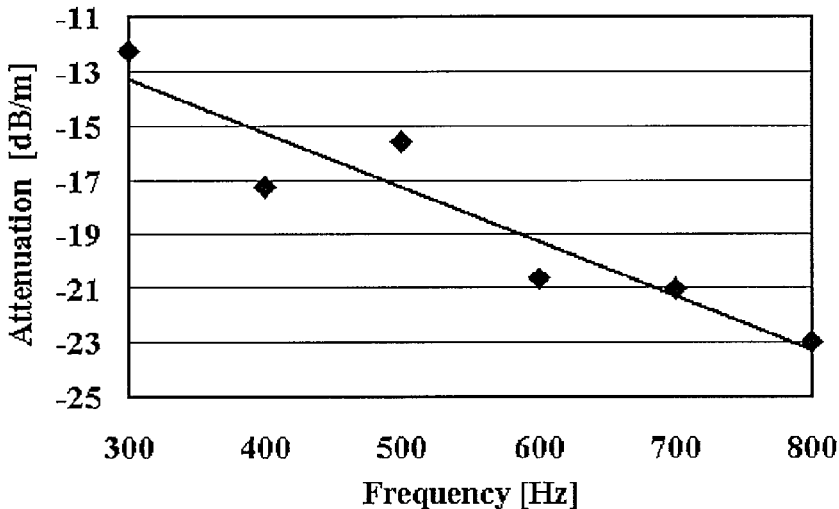


Fig.6 Attenuation of instantaneously frequency

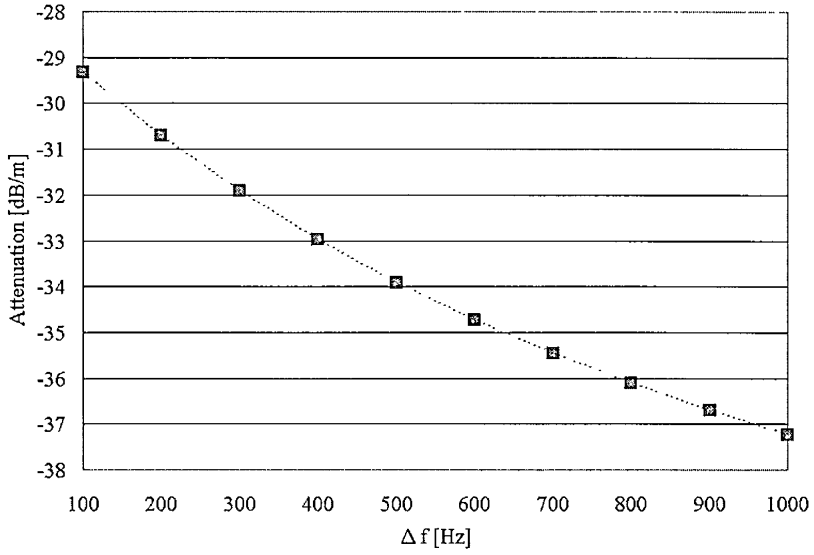


Fig.7 Attenuation of pulse compression

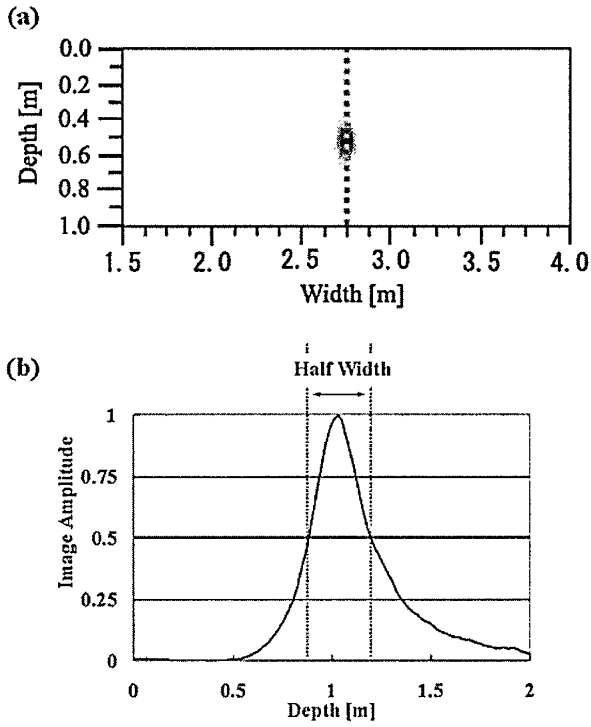


Fig.8 Measurement of half width  
 (a) Sample of simulation image  
 (b) Image amplitude

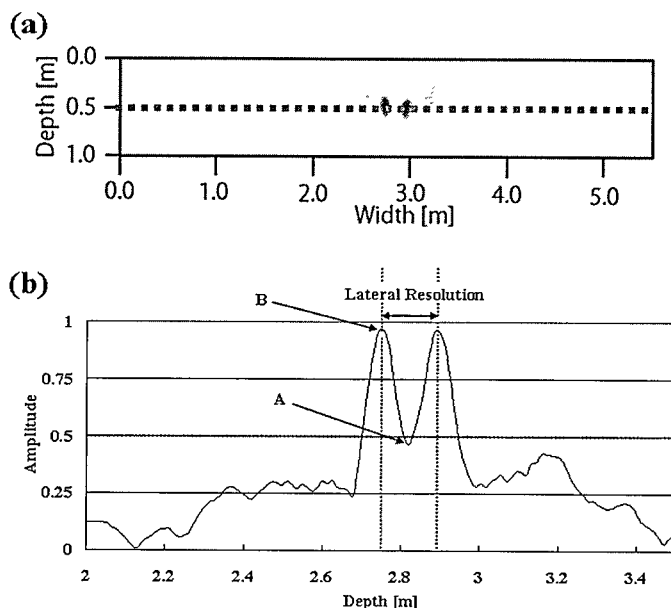


Fig.9 Measurement of lateral resolution  
 (a) Sample of simulation image  
 (b) Image amplitude

とするとき、A の値が B の値の半分になる位置を方位方向分解能とした。

### 5 - 3. 計測結果

Linear chirp を用いて  $\Delta f = 300, 500, 700\text{Hz}$  の分解能を比較した。Fig.10 (a) に算出した半値幅を、(b) に方位方向分解能を示す。横軸は音速である。

$\Delta f = 300\text{ Hz}$  の半値幅計測結果は約 20cm から 30cm、 $\Delta f = 500\text{ Hz}$  と  $\Delta f = 700\text{ Hz}$  ではあまり差はなく、半値幅は約 10cm から 20cm であることが確認できた。

方位方向分解能の結果からは  $\Delta f = 300\text{ Hz}$  は音速が 150 m/s 以下であれば 20cm 以下の分解能が得られることが確認できた。

## 6. 減衰補正効果のための屋外探査確認実験

### 6 - 1. 実験概要

実験を行った場所は茨城県にある休耕地を用いた。探査実験では振源に超磁歪振動子と

ハンマーを用い、埋設物は大きさ  $13 \times 12 \times 5\text{cm}$  の空のタッパを深さ 0.5m に埋設した。

超磁歪振動子からは持続時間 100ms の down chirp を発生させた。使用した周波数帯は  $\Delta f = 300\text{Hz}$  (600-300Hz)、 $\Delta f = 500\text{Hz}$  (800-300Hz)、 $\Delta f = 700\text{Hz}$  (1000-300Hz) の 3 種類である。また、パルス圧縮を用いた方法比較するため、ハンマー法も使用した。

探査ラインは Fig.11 にあるようにタッパを LINE 1 の中央 (2.75m) に 1 つ、LINE 2 の端から 2m の位置に 20cm 間隔で 2 つ埋設した。

### 6 - 2. 高周波成分増幅によるパルス圧縮の検討

4-2 で述べたように chirp 波は start 周波数と stop 周波数で減衰の値が異なる。Fig.12 に chirp 波取得波形、および送振波形のフーリエ変換結果を示す。受振波形の 600-800Hz の高周波成分は送振波形に比べて減衰していることが分かる。また、300Hz 以下の送振していない低い周波数帯にも雑音成分が含まれ

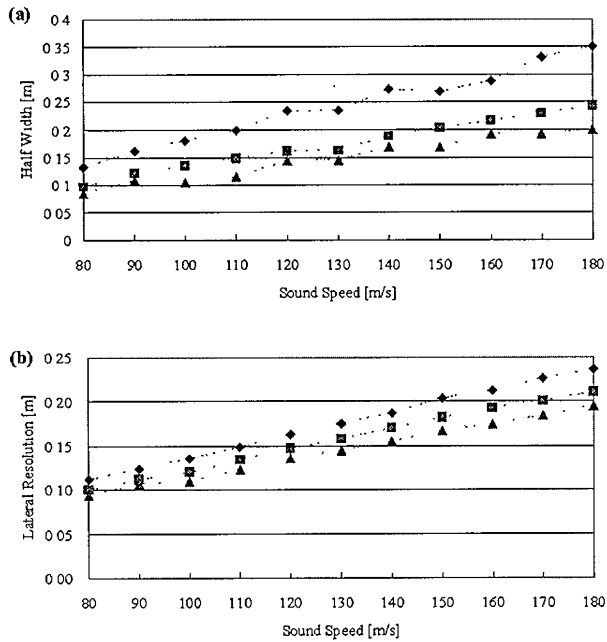


Fig.10 Measurement results  
 (a) Half width  
 (b) Lateral resolution  
 Diamond is  $\Delta f = 300$  Hz  
 Square is  $\Delta f = 500$  Hz  
 Triangle is  $\Delta f = 1000$  Hz

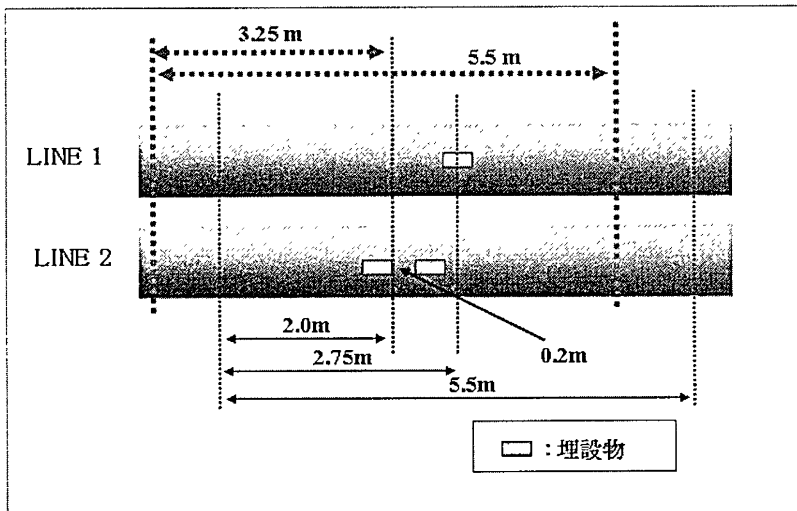


Fig.11 Experimental set-up of exploration experiment



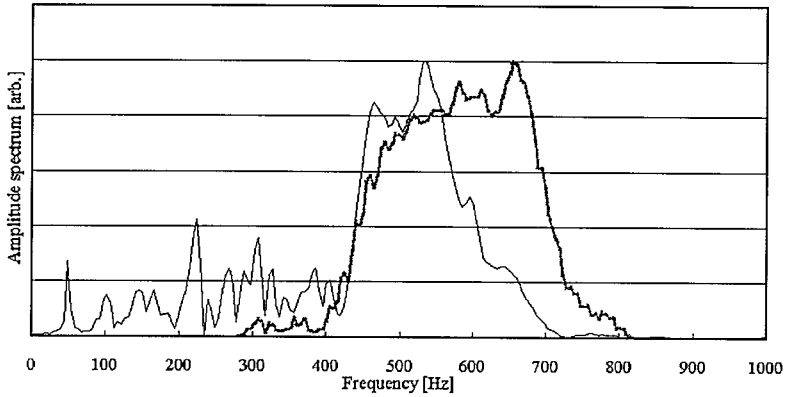


Fig.12 Fourier transforms result  
 (a) Narrow line is received waveform  
 (b) Bold line is driving waveform

ている。

そこでパルス圧縮の効果を向上させるため、周波数上で受振波と駆動波の比を取り、これを補正関数として式 (5) に示すように高周波成分を増幅した。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{-j\omega t} dt \times \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R(t)e^{-j\omega t} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} D(t)e^{-j\omega t} dt} \dots (5)$$

R は受振波 (Received waveform)、D は駆動波 (Driving waveform) を示す。

Fig.13 に駆動波形、受振波形、フィルタ処理後波形、パルス圧縮後波形を示す。受振波形の高周波成分は送振波に比べ減衰しているが、フィルタ処理後は増幅され、送振波に近い形になっている。また、パルス圧縮結果を見ると、パルスが非常に短く圧縮されている。

### 6-3. 映像化結果例

LINE 1 の映像を Fig.14 に、LINE 2 の映像を Fig.15 に示す。(a) にハンマー法、(b) に  $\Delta f = 300\text{Hz}$ 、(c) に  $\Delta f = 500\text{Hz}$ 、(d) に  $\Delta f = 700\text{Hz}$  のパルス圧縮を用いた地中映像を示す。四角の点線は埋設位置、図の説明文の STC (Sensitivity Time Compensation) とは減衰補正值を示す。音速は  $149 [\text{m/s}]$

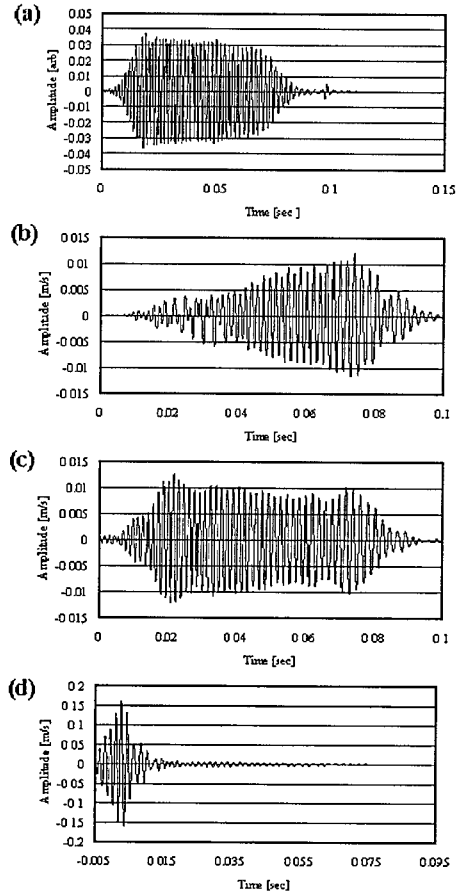


Fig.13 Signal processing waveform  
 (a) Driving waveform  
 (b) Received waveform  
 (c) Filtered waveform  
 (d) Correlation result

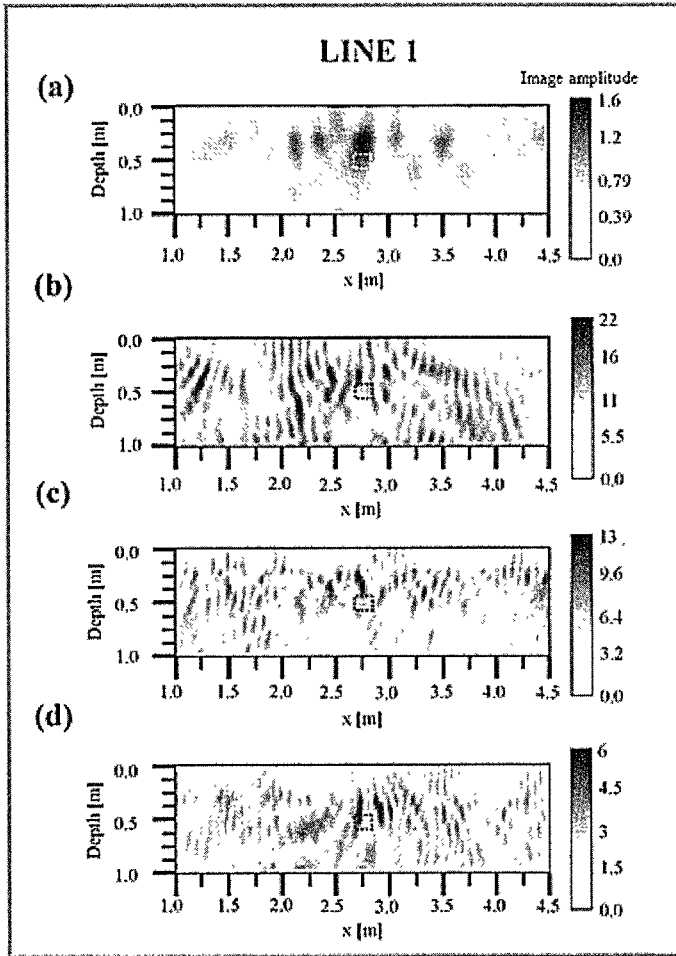


Fig.14 Underground image of LINE 1

(a) Hammer method

(b)  $\Delta f$  is 300Hz ( 600-300Hz) [Pulse compression](c)  $\Delta f$  is 500Hz ( 800-300Hz) [Pulse compression](d)  $\Delta f$  is 700Hz (1000-300Hz) [Pulse compression]

STC = 0.7 [dB/ms], Sound speed = 149 [m/s]

である。

LINE 1 の映像より、距離方向における埋設物反応の大きさはハンマー法の映像では約 50cm、パルス圧縮を用いた映像では全て約 20cm 弱の大きさであった。この結果はシミュレーションの値と大体同じ大きさであることが確認できた。また、パルス圧縮を用いた映像では  $\Delta f = 500\text{Hz}$  のみが埋設物を鮮明に映像化できた。

LINE 2 の映像を見ると、ハンマー法と  $\Delta f = 300\text{Hz}$  を用いた映像は 2 つの埋設物が重なってしまっているのに比べ、 $\Delta f = 500\text{Hz}$  を用いた映像は分解できている。これによりシミュレーション通りの結果が得られた。しかし、 $\Delta f = 1000\text{Hz}$  の映像は振幅が小さく、埋設物を映像化できていない可能性がある。

これらのことからパルス圧縮を用いた映像化と高分解能化に成功した。また、パルス圧

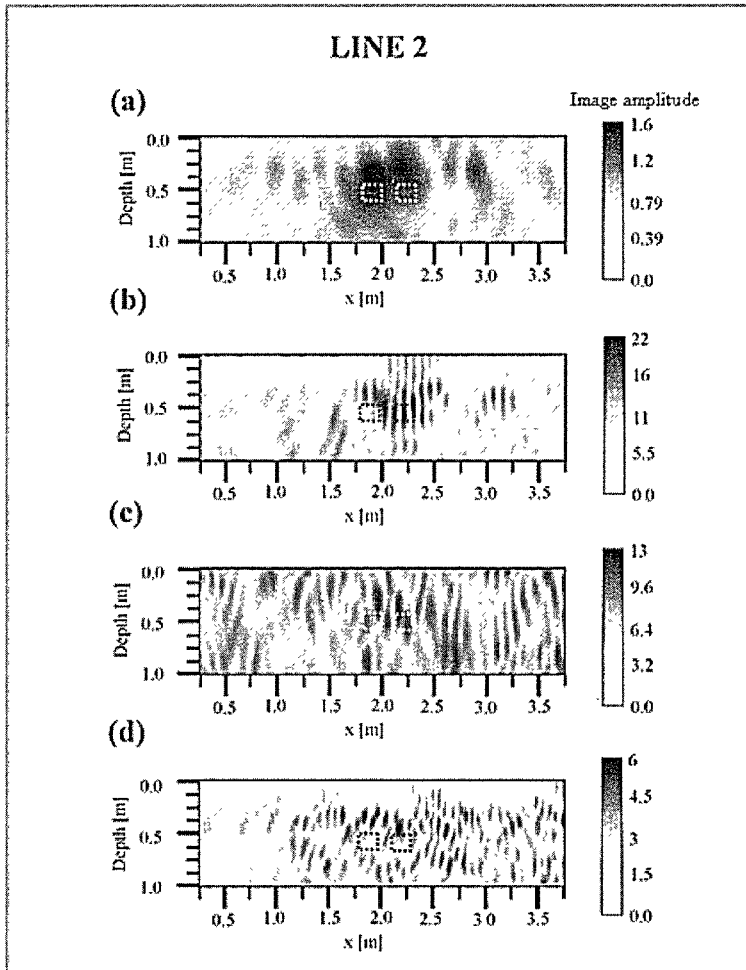


Fig.15 Underground image of LINE 2

(a) Hammer method

(b)  $\Delta f$  is 300Hz ( 600-300Hz) [Pulse compression]

(c)  $\Delta f$  is 500Hz ( 800-300Hz) [Pulse compression]

(d)  $\Delta f$  is 700Hz (1000-300Hz) [Pulse compression]

STC = 0.7 [dB/ms], Sound speed = 149 [m/s]

縮法を用いた映像の方位方向分解能は 20cm 以下であることを確認した。

## 7. まとめと今後

今回、パルス圧縮に用いる chirp 波の瞬時周波数の減衰を考慮した検討を行い、距離方向の評価に半値幅を用いることで、距離方向

と方位方向の分解能を計測した。

屋外での探査実験では受振波の高周波成分を増幅することによりパルス圧縮を用いた映像化に成功し、距離方向における埋設物の反応の大きさがシミュレーションとおおよそ同じであることを確認した。

また、パルス圧縮における瞬時周波数の減衰を考慮したことにより映像上ではっきりと

埋設物を認識できるようになった。

しかし、パルス圧縮を用いた方法は高周波成分での減衰が大きく、埋設物の深度が深ければ深いほど映像化が困難であり、埋設物の分解能も悪化することが予想される。

今後は、chirp 波の持続時間を増やした検討や、伝播距離に応じたパルス圧縮の検討を行う予定である。また、今回方位方向分解能を実際の探査実験で確認できたため、シミュレーションでも様々な条件で方位方向分解能を計測する予定である。

#### 謝辞

この研究は平成 18-20 年度科学研究費補助金基盤研究 B (課題番号 18300307) の補助を受けて行ったものである。

#### 引用文献

- [1] 杉本恒美、奥島基良：Jpn J. Appl. Phys. Vol.35, pp3105-3108, (1996.5)
- [2] 杉本恒美、奥島基良、他：Archaeological Prospection, Vol.7, No.4, pp249-261, (2000.3)
- [3] 守屋雅弘、杉本恒美：Jpn J. Appl. Phys. Vol.41, pp.3501-3502 Part 1, No. 5B, (2002.5)
- [4] 財団法人資源・環境観測解析センター, SAR 処理アルゴリズム解説書, H17.4  
[http://www.palsar.ersdac.or.jp/guide/pdf/sar\\_algorithm.pdf](http://www.palsar.ersdac.or.jp/guide/pdf/sar_algorithm.pdf)
- [5] 川崎拓、杉本恒美：Acoustical Imaging, vol.29, pp339-345, (2008.10)
- [6] 川崎拓、杉本恒美：文化財と探査, Vol.10, No.1, pp33-39, (2009.1)
- [7] H. Kawasaki and T. Sugimoto：Proc. Symp. Ultra. Son. Electron., Vol.29, pp.231-232 11-13, (2008.11)
- [8] H. Kawasaki and T. Sugimoto: Acoustics 08 Paris, pp.2115-2119, (2008.7)
- [9] 川崎拓、杉本恒美：音響春講論集 pp.1409-1412, (2008.3)