地中配管検知を目的とした 楕円軌道輝度値法による極浅層映像化*

川村 洋平¹ 河 宜成²
蒲原 章裕² 大川 浩一³

A Method of Underground Imaging Using Value of Elliptic Orbit Brightness for Detecting Underground Piping

by Youhei KAWAMURA^{a*}, Takanari KO^a, Akihiro KAMOHARA^a and Hirokazu OKAWA^b

a. Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba
305-8573, Japan (* Corresponding author E-mail: kawamura@iit.tsukuba.ac.jp)

b. Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Akita, 010-0852, Japan

When underground piping for a water or gas supply is buried, the construction site should be checked in advance, referring to the plan or sign. However, some obstacles, such as unknown pipes or stones, can be encountered. To avoid these cases, an examination of the underground condition is required. The purpose of this study is to detect underground objects that exist in the ultra-shallow layer, where 2-3 m below the surface, and to obtain underground image which is easy to see intuitively. For detection, seismic method is applied. However, this method has two downsides. One is a generally used seismic source not having reproducibility. The other is mixing Rayleigh wave which is one of the surface waves and reflected waves. To compensate these downsides, giant-magnetostriction vibrator was used as a seismic source, and magnified cross-correlation analysis was proposed. Underground image was obtained using combinations of them. In this paper, as the method of underground imaging, new algorithm of elliptic orbit brightness value it was developed by the authors was used.

KEY WORDS: Underground Imaging, Giant-Magnetostriction Vibrator, Ultra-Shallow Layer, Elliptic Orbit

1. 緒 言

近年、日本国内のみならず近隣諸国の都市開発が目覚ましく、日進月歩で進められている。経済活動を加速させるため、都市部では住宅地が買収され、商業施設や高密度住宅地の開発、また道路や鉄道などの整備に充てられている。経済活動が隆盛になるにつれて、地方からの住民の移動が増え、人口が増加する。土地の不足は高密度住宅により補われているという傾向がある。

このような状況のもと、電気、上下水道、ガス、電話などのインフラ整備は日々進み、都市部の地下のインフラ状況は想像以上の複雑さを呈しており、今後、更に地下の配管構造の複雑さが増すものと思われる。また、従来あった住宅地を新たな施設に急速に変化させているため、古くなった配管や、基礎杭がそのまま残る事例も少なくない。そのため、都市部の地下を掘り返してみると、不明な管や石、礫が見つかる場合がある。

ところで、実際に電気、上下水道、ガス、電話などの配管埋設工事が行われる際は、予めその施工現場の配管埋設状況が記され

た図面や標識を参考にし、配管埋設位置の検討が行われる。しかしながら、実際に施工現場を掘り返してみると、先に述べた古くなった配管や基礎杭がそのまま残っているという事例が少なくない。このような場合、それらの障害物を取り除く、または配管埋設位置の再検討が必要になる。既設管も地中には存在するため、それらを傷つけることなく、障害物を取り除くのは困難な場合が多い。また、配管埋設位置を再検討し、施工した場合でも、再検討した地点においても再び障害物が見つかる場合もある。どちらにせよ、施工に関する費用、時間が増大し、作業効率が非常に悪化する。

これらの点を改善させるためには、地中内部の様子を、掘り返すことなく、地表面で把握することが必要である。地表面で地中内部の様子を把握することは物理探査を行うことで可能になる。

本論文では従来から用いられてきた物理探査である電磁波探査、地中レーダではなく反射法地震探査¹⁻³⁾を適用した。電磁波探査や地中レーダを用いた地中内部の様子を把握する装置は既に製品化されているが、これらの製品は物理探査の特性上、水の影響により、測定誤差が大幅に変化する。そのため、天候や気候の変化に左右されにくい反射法地震探査を基本の探査手法として選択した。ここ数十年極浅層領域の探査は地中レーダが主流であったが、新たな振動子の実用化やPCにおける計算処理速度の向上により、新たな反射法地震探査手法の開発が進んでいる⁴⁻¹²⁾。その際、土中埋設物からの反射波を受け取ることが重要となるが、

* 2008年7月8日受付 11月6日受理

1. 普通会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 講師

2. 筑波大学大学院学生 システム情報工学研究科

3. 普通会員 秋田大学 工学資源学部 助教

【著者連絡先】FAX: 029-853-5356 (筑波大・川村)

E-mail: kawamura@iit.tsukuba.ac.jp

キーワード：地中映像化、超磁歪振動子、極浅層、楕円軌道

Fig.1 Schematic of seismic method.

地震波を発生させた際、地表面を伝播する Rayleigh 波が生成され、反射波と Rayleigh 波が混在する状況が発生する。この状況下では反射波を特定することができない。本論文では、これまでに報告した Rayleigh 波と反射波を分離する解析手法の結果に基づき¹³⁻¹⁵⁾、地中内部の様子を簡単に把握するための、地中内部の映像化アルゴリズム（楕円軌道輝度値法）を提案し、地中埋設物検知システムを構築する。

2. 反射法地震探査による検知手法の概要

2・1 反射法地震探査の概要

反射法地震探査は震源より発生させた地震波を用いて、反射波を受振する手法である¹⁻³⁾。反射法地震探査の概念図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 は地表面に P 波（Primary wave、縦波）を発生可能な震源、受振器が設置され、地中に埋設物が存在している状況を表している。震源が地震波を発すると直接波が土中を伝播していき、地表面では Rayleigh 波や Love 波といった表面波が発生する¹⁶⁾。震源が P 波を発生した場合は、Rayleigh 波が大きな振幅を持ち、Love 波による影響はほとんど生じない。直接波は埋設物表面で反射 P 波（Reflected Primary wave）、反射 SV 波（Reflected Vertical components of Shear wave）と屈折 P 波（Refracted Primary wave）、屈折 SV 波（Refracted Vertical components of Shear wave）に分離する。

反射 P 波の反射角は入射角と等しくなるため、埋設物表面、および地表面が水平な場合、振動子と受振器設置位置の中心の反射 P 波が受振器において観測される。この時の反射波観測時間を t 、非常に浅い層であるので P 波伝播速度 v を一定とみなし、振動子と受振器距離を x とおくと、埋設物の深度 d は式 (1) により導かれる。このようにして埋設物の深度を特定することができる。

$$d = \frac{\sqrt{(vt)^2 - x^2}}{2} \dots\dots\dots (1)$$

2・2 超磁歪振動子

反射法地震探査において、震源の選択が重要になってくる。極浅層を対象にした反射法地震探査ではハンマによる起振、もしくは重錘落下による起振が一般的であるが、本研究では超磁歪振動子（MORITEX 社製 AA-145J025-MSI）を利用し、P 波を発生させた。ハンマや重錘落下による起振では入力の変現性が乏しく、入出力の平均値をとる平均応答法を適用しても良好な結果を得ることができない。また、任意の周波数の入力ができないため、分解能を考慮した計測が不可能であるためである。

超磁歪振動子の外形および内部構造を Fig. 2 に、諸元を Table 1 に示す。超磁歪振動子は超磁歪素子¹⁷⁾およびコイルから構成されている。超磁歪素子は磁場印加により寸法が変化する磁歪現象が従来のフェライトなどの磁歪体に比べ、数百～数千倍の磁歪現象を起こす素子である。一般的に希土類元素と鉄を原子比 1:2

Fig.2 Giant-magnetostriction vibrator.
(a) Picture of vibrator (b) Inner structure

Table 1 Specifications of giant-magnetostriction vibrator.

Type:AA-140J025-MS1	
Displacement (μm)	0~140
Natural Frequency (Hz)	2400
Frequency range (Hz)	DC~2500
Max. Dynamic force (N)	± 890
Input current (A)	4.7

で表す組成 TbFe₂, DyFe₂, HoFe₂, ErFe₂などを超磁歪素子という。

磁歪現象には 2 種類の現象（ジュール効果、ビラリ効果）が存在する。ジュール効果は磁歪素子に対して磁場を付加することで、磁場方向に変形する。超磁歪素子の場合は数 μm ～ 数百 μm の大変位の変形が可能である。本研究の振動子のように積極的な働きかけが必要な場合はジュール効果を用いる。

超磁歪振動子では超磁歪素子に対して適切な磁場をコイルで形成することで、その磁場に応じて超磁歪素子がジュール効果により変形する。磁場を形成するためにコイルに電流が入力される。超磁歪振動子は圧電素子に比べ、高速応答、大変位発生可能、高電圧を要さない、高温で使用可能、様々な形状に対応などの長所を持つが、一方で大電流が必要、磁場形成による他機器への影響などの問題も併せ持つ。しかしながら、本研究の場合、小型で携帯しやすく大変位を発生可能であり、磁場形成による他測定装置への影響はあまり問題ない環境であるため非常に有用である。

2・3 ジオホン

地震波を受振する受振器としてジオホン（Geo Space 社製 GS-11D）を利用した。ジオホンとは地震探査において広く用いられている受振器である。ジオホンは低周波数（～1 kHz）を感知しやすいムービングコイル型の受振器である。地震波を受振すると、コイルが振動する。本研究で使用したジオホンは鉛直方向の振動を感知可能である。そのため、地表面に垂直に設置することで、垂直方向の P 波および SV 波を感知できる。本研究で使用したジオホンの諸元を Fig. 3 および Table 2 に示す。

2・4 極浅層へ適用する際の課題

深度 2～3 m 未満の領域を一般に極浅層とよぶ。この領域を対象に反射法地震探査を行う場合は以下の 3 点に気をつけなければいけない。

- ・震源の指向性¹⁴⁾
- ・地震波の波長¹⁸⁾
- ・Rayleigh 波と反射波の区別¹³⁻¹⁵⁾

まず、震源の指向性である。震源としてハンマや振動子を用いる場合、点音源のように P 波が伝播するわけではなく、ある指向性内においてのみ P 波が発生する。その指向性内に存在する埋設物からのみ、反射波を受け取っていると理解することが重要である。

極浅層において最も重要なことは Rayleigh 波と反射波の区別

Fig.3 Frequency characteristics of geo-phone.

Table 2 Specifications of geo-phone.

Natural Frequency	14±0.75 Hz
Coil Resistance @ 25 °C±5 %	380 Ω
Intrinsic Voltage Sensitivity with 380 Ω Coil ±10%	0.81 V/in/s(0.32 V/cm/s)
Normalized Transduction Constant(V/in/s)	042(sq. root of Rc)
Open Circuit Damping	0.23 ± 10 %
Damping Constant with 380 Ω Coil	344
Optional Coil Resistance ±5 %	56160 Ω
Moving Mass ±5 %	16.8 g
Typical Case to Coil Motion P-P	0.07 in (0.18 cm)
Harmonic Distortion with Driving Velocity of 0.7 in/s(1.8 cm/s) P-P	0.2 % or less @12 Hz
Dimensions	
Height(less terminals)	1.32 in(3.35 cm)
Diameter	1.25 in(3.18 cm)
Weight	3.9 oz(111 g)

である。一般的に Rayleigh 波は反射波よりも速度が遅い。そのため、石油探査のような大規模な探査を行う場合は受振器震源間隔が数 10 m - 数 km であるため、反射波が Rayleigh 波よりも早く受振器に到達し、Rayleigh 波の伝播は解析の際に問題にはならない。これに対して、極浅層の場合は受振器 - 震源間隔が数 10 cm と非常に小さい。この場合、反射波と Rayleigh 波が混在する状況が生じてしまう。また、Rayleigh 波は震源が発した地震波と同じ周波数成分をもつため、混在している出力波形からは反射波到達時間を特定することはできない。そのため、以下の式 (2) に示す周波数重合法を受振波形に施した。

$$M(j) = \prod_{k=1}^L \left| \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_k(i) \cdot y_k(i+j) \right| \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 j はデータ番号、 L は総相互相関法結果数、 $x_k(i)$ は入力波形 x_k の i 番目のデータ値、 $y_k(i+j)$ は出力波形 y_k の $i+j$ 番目のデータ値、 N は入力波形 x_k および出力波形 y_k のデータ数の和である。絶対値で囲まれた領域は相互相関法と同一である。周波数重合法は複数の相互相関法結果の積で表されている。本解析手法の説明は既に報告済みの論文が多数あることから、詳細は過去の論文を参照して頂きたい¹³⁻¹⁵⁾。

3. 地中映像化手法

3・1 楕円軌道による映像化アルゴリズム

地中映像化を行うにあたり、以下の仮定をたてた。

仮定：P 波伝播速度は一定

上記の仮定をもとに地中映像化を行う。映像化には楕円の性質を用いることにした。楕円 (x, y) は式 (3) で定義される。

$$(x, y) = (a \cos \theta, b \sin \theta) \quad (0 \leq \theta < 2\pi) \dots\dots\dots (3)$$

ここで a 、 b はそれぞれの軸の長さである。 $a < b$ の時、 a 、 b はそれぞれ短軸、長軸と呼ばれ、 $a > b$ の時、 a 、 b はそれぞれ長軸、短軸と呼ばれる。 $a = b$ の時は円となる。

楕円には、二焦点と楕円軌道間の距離の和は一定という性質がある。地中映像化にはこの性質を用いる。Fig. 4 に楕円軌道を用いた映像化アルゴリズムの概念図を示す。

Fig. 4 に示すように、ある地点 S_k に震源を設置し、ある地点 R_i に受振器を設置したとする。 x 軸を水平方向、 y 軸を深度方向とする。震源 S_k 、受振器 R_i の位置は式 (4) を用いて、それぞれ $(x, y) = (S_k, 0)$ 、 $(x, y) = (S_i, 0)$ である。

$$R_i = d \cdot i, \quad S_k = \frac{d(2k+1)}{2} \dots\dots\dots (4)$$

この時、震源 S_k から P 波を時間 0 の時に起振させ、ある時間 t に反射波が受振器に到達したとする。この時、反射点の位置を知ることができないが、P 波伝播速度 v と反射波到達時間 t を乗

Fig.4 A method of underground imaging. Double circle marks show receiving points, and x-marks show shaking points.

じること、震源から埋設物まで伝わった直接波および埋設物からの反射 P 波の伝播距離の和を vt として求めることができる。

$$(x, y) = \frac{1}{2} \left(vt \cos \theta + R_i + S_k, \sqrt{(vt)^2 - |R_i - S_k|^2} \sin \theta \right) \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで楕円の性質を用いる。まず震源位置と受振器位置をそれぞれ楕円の焦点として考え、続いて二焦点と楕円軌道間の距離の和を先ほど導出した伝播距離 vt を設定する。これより、式 (3) をもとに伝播距離、震源位置、受振器位置を考慮した式 (5) で示される楕円軌道を描くことができる。なお、ここでは深度方向のみ映像化を行うため、 $(0 \leq \theta \leq \pi)$ の条件を付記している。仮定に基づけば、反射点は式 (5) で示され楕円軌道上に必ず存在していることになる。この時の楕円軌道は振幅情報を持っている。振幅情報はこの震源位置、および受振器において周波数重合法を行った際の時間 t における振幅が代入される。この振幅は映像化の際に、色情報に変換される。ここで反射波到達時間 t を 0 ～ 計測時間まで変化させる。この結果、サンプリング点数分の楕円が描かれることになる。

続いて、異なる受振器位置、例えば R_{i-1} を考え、前述と同様に震源位置 S_k と受振器位置 R_{i-1} を焦点とした楕円を考える。同様に S_k と R_i を焦点としてサンプリング点数分の楕円を描く。この時、前述の S_k と R_i を焦点として描いた楕円と重なる領域が生じる。この領域では重なった楕円軌道の振幅を加算する。

さらに、異なる位置に震源を設置し、同様の手順で楕円軌道を描く。これにより複数の楕円軌道が重なり合い、振幅を強め合う。この一連の流れを繰り返すことで地中映像化を行う。

ところで周波数重合法結果において、反射波が観測された時間ではピークとして現れる。つまり、反射波観測時間の振幅値は反射波観測時間付近の振幅値に比べ非常に大きな振幅値をもつ。この結果を用いることで反射波観測時間における楕円軌道の振幅は大きくなり、付近の領域に比べ大きな振幅をもつ。さらに、複数の震源位置、受振器位置の楕円が重なり合うことで実際に反射波が観測されている地点では振幅の大きい楕円が重なり合い、自然に反射面が浮かび上がってくる。

実際に映像化を行うことができるかどうかを確認するために次節においてシミュレーションを行った結果を示す。

3・2 シミュレーション

シミュレーションでは Fig. 5 に示す位置に震源、受振器、反射面を設定した。本図において x 軸を水平方向、 y 軸を深度方向、 S_0 から S_4 を震源位置、 R_0 から R_5 までを受振器位置としている。受振器間隔は 30cm である。入力波形として、5 種類のアップチャープ信号を用いた。各々 200-300、250-350、300-400、350-450、400-500 Hz の周波数帯であり、入力時間は 20 ms である。アップチャープ信号とは、低周波から高周波へ連続に変化す

Fig.5 Positions of shaking points, receiving points, and reflection surface for the simulation. Shaking points are S_0 - S_4 ; receiving points are R_0 - R_5 .

Fig.6 Received waveforms in the case that the shaking point was S_2 and the 200-300 Hz up-chirp waveform was used as an input waveform.

る信号である。時間、周波数帯がともに任意に設定可能である。また、単一周波数の信号と異なり入力波との相互相関により反射ピークを検出することに優れている。ここで P 波伝播速度を 100 m/s、Rayleigh 波伝播速度を 30 m/s と仮定し、震源位置を S_0 から S_4 に変化させ、それぞれの受振器で得られる出力波形を作成した。出力波形を作成するにあたり、距離減衰、位相速度については考慮せず、つまり、地震波伝播中、地震波は変化しない。表面波振幅は入力波と同振幅、同位相とし、反射波振幅は入力波形の 0.8 倍、同位相とした。 S_2 かつ 200-300 Hz アップチャープ信号を入力した時の、シミュレーション用出力波形を Fig. 6 に示す。本図より S_2 は R_2 と R_3 の中点であるため、 S_2 から Rayleigh 波が広がっていく様子が確認できる。また R_0 、 R_1 、 R_4 、 R_5 においては Rayleigh 波のみが観測されており、 R_2 、 R_3 では Rayleigh 波と反射波が混在して観測されている。本シミュレーションで用いた受振波形は振動子の指向性を考え、震源位置が S_1 の時、 R_4 、 R_5 、震源位置が S_2 の時、 R_2 、 R_3 、 S_3 の時、震源位置が R_0 、 R_1 でそれぞれ反射波が観測されるように作成した。

Fig. 7 に震源位置が S_2 の時に全ての出力波形に対して周波数重合法を適用した結果を示す。各受振器において、表面波による 1st ピークが観測され、受振器 R_2 、 R_3 において反射波による 2nd ピークが観測されていることがわかる。

上記の条件の下、地中映像化アルゴリズムを適用した地中映像化シミュレーション結果を Fig. 8 に示す。振幅値の大小は記載の

Fig.7 Results of magnified cross-correlation analysis in the case that the shaking point was S_2 . Each first peak value, which is caused by a Rayleigh wave, is connected with a dotted line.

カラーコードに対応し、また波線は反射面を示している。この図を見ると、反射面付近の振幅が強調され、反射面が像として浮かび上がっている様子を確認することができる。また、深度が深くなるにつれて、振幅が減少していく様子を確認することができる。これは時間の経過とともに表面波による振幅が減衰していくためであり、Fig. 7の周波数重合法結果からも減衰の様子を確認することができる。

また、Fig. 9にシミュレーション用受振波形において、表面波の成分をゼロとし、反射波のみの受振波形を用いて映像化を行った図を示す。この図より、反射面付近に大きな振幅をもつ楕円軌道が生成されているのが確認でき、また反射面上は非常に大きな振幅をもつことがわかる。この反射面上に存在する楕円軌道は、震源の指向性を考慮することで、減衰することができるが、実実験において震源の指向性、および対象となる土の周波数特性を把握することは本研究目的である配管埋設工事補助から逸脱するため、震源の指向性や周波数特性は本映像化アルゴリズムでは考慮しない。また、前述のFig. 8において観測された深度とともに振幅が減少する現象はFig. 9において発生しない。これは表面波の影響が存在しないためである。言い換えれば、表面波が存在する場合のみ、深度とともに振幅が減少する現象が発生する。

これらのシミュレーション結果から本映像化アルゴリズムを用いて地中映像化を行うことが可能であることが示唆された。次章では実規模実験を行い、本映像化手法を用いて実際に映像化を行うことが可能であるかを判断することにする。

4. 地中映像化実験

提案した地中映像化アルゴリズムと実データを用いて実際に地中映像を得ることができるかどうかを確認するために実規模実験を行った。Fig. 10に本実験のセットアップ図を示す。Fig. 10 (a)が測定機器のセットアップ状況であり、Fig. 10 (b)が震源位置、受振器位置およびコンクリートブロック位置を示している。本図においてx軸は水平方向、y軸は深度方向、 S_0 から S_4 は震源位置、 R_0 から R_5 は受振器位置を表している。検知対象物は、直径28.0 cm、高さ9.5 cmの円柱形の重量コンクリートであり、酸化鉄粉

Fig.8 Simulated underground image considering the Rayleigh wave. A dotted line indicates the reflection surface.

Fig.9 Simulated underground image not considering the Rayleigh wave. A dotted line indicates the reflection surface

Fig.13 Experimental underground image. (a) Underground image on site A. An area, enclosed by a dotted line, indicates the buried concrete block.

を多く含んでいる。コンクリートの密度は 3.15 g/cm^3 である。埋設深度は100 cmである。地盤は関東ローム層であり、上記のコンクリートを埋設、締め固め後1ヶ月間経過したものを計測対象としている。震源には超磁歪振動子を用い、受振器にはジオホンを6基用いた。

振動子には前節と同様の5種類のアップチャープ信号を入力した。各々200-300, 250-350, 300-400, 350-450, 400-500 Hzの周波数帯であり、入力時間は20 msである。

実験では各受振器位置 R_0 - R_5 にジオホンを設置した。受振器

Fig.10 Schematic of experimental setup. (a) Experimental setup. (b) Positions of shaking points S_0 - S_4 , received points R_0 - R_5 , and the buried concrete block.

Fig.11 Input and received waveforms in the case that the shaking point was S_2 and the 200-300 Hz up-chirp waveform was used as an input waveform.

間隔は 30 cm である。各受振器間の中点が各震源位置 S_0 - S_4 に対応している。超磁歪振動子を震源位置に設置、起震、出力波形取得後、異なる震源位置に超磁歪振動子を設置、起震、出力波形取得という作業を全ての震源位置に対して繰り返し行った。

振動子を起震、出力波形を取得する手順を示す。まず PC 上でアップチャープ信号を作成し、ファンクションジェネレータに取り込み、電圧波形として出力する。電圧波形はコンバータを介して電流波形に変換され、超磁歪振動子に入力される。各ジオホンにより受け取った出力波形は 1 kHz のアナログ低域通過フィルタを通過後、PC 上に取り込まれ、解析が行われる。

また、入力とは 10 回繰り返され、その 10 回分の出力波形に対して平均応答法を適用しており、解析にはこの平均応答波形を用いる。これにより SN 比が $\sqrt{10}$ 倍向上することとなる。本章において、これ以降、出力波形と記述している場合は平均応答波形を意味することとする。

本実験のサンプリング周波数は 50 kHz であり、予め計測された P 波伝播速度は 78 m/s であった。

Fig.12 Results of magnified cross-correlation analysis in the case that the shaking point was S_2 .

本実験により得られた出力波形のうち、震源位置が S_2 かつ 200-300 Hz アップチャープ信号を入力した時の出力波形を Fig. 11 に示す。震源位置 S_2 は受振器位置 R_2 , R_3 の中点であるため、 S_2 から Rayleigh 波が広がっていく様子が確認できる。また、受振器位置 R_2 と R_3 では Rayleigh 波に混ざり、反射波によると思われるリップルを 25 ms 付近に確認できる。

Fig. 12 に震源位置 S_2 のときの周波数重合法結果を示す。振幅は常用対数で表示している。Rayleigh 波によるピーク、および反射波によるピークを確認でき、どちらも強調されていることが確認できる。これらに対して地中映像化アルゴリズムを適用した結果を Fig. 13 に示す。

Fig. 13 において破線で囲まれている領域は実際のコンクリートブロック埋設位置を表している。本図において x 軸が水平方向、y 軸が深度方向である。地表面近くの浅部で非常に大きな振幅が生じていることが確認できる。これは Rayleigh 波による影響であり、深度が深くなるにつれて減衰する。この減衰傾向は一定深度に達するまで継続する。これは周波数重合法結果からも確認することができる。この Rayleigh 波の減衰傾向の中でコンクリート

ト上部の深度 70 cm 付近に大きな振幅値が出現している。これはコンクリートブロックからの反射波により生じた像だと思われる。この像をコンクリートブロックからの反射波とみなし、実際の埋設位置と比較すると、垂直分解能で大きな誤差があるものの、水平分解能は決して悪くはなく、配管埋設工事の補助としては十分な精度だと考えられる。この垂直分解能での誤差は P 波速度を地表付近のものを使用し、単一層として計算したことによることが原因と考えられる。つまりは仮定 2 の限界である。正確な平均 P 波速度を計測することが可能となれば、Fig. 13 における深度方向の誤差は解消される。今後は事前の P 波速度計測において、表面波探査等の層構造を推定できる計測法を用い、平均的な P 波速度を算出する必要がある。これは多層の場合にも適用が可能な手法である。また、地表面に舗装路がある場合には舗装路下部からの反射がピークとなって得られるが、表面波の減衰前に反射が得られることから、対象物の検知には影響を与えないものと考えられる。ただし、舗装路下部での反射により、それ以降への波動エネルギーが低下することから、入力をさらに強力にする必要がある。

本結果より、提案した地中映像化アルゴリズムを用いることで、実規模においても埋設物位置を映像化することが可能であることが示された。

今後、精度を向上させるためには、受振器配置の検討および振動子を含めた入力周波数・振幅の検討が必要である。例えば地山の種類の違いは P 波伝播速度を変化させるため、探査精度に影響を及ぼす。固い地山では P 波速度が速くなり、波長が長くなることから、精度は低下する。その際は、入力周波数を上げることにより、本実験と同様の精度を得ることが可能となる。

5. 結 言

本論文では、楕円軌道を利用した地中映像化アルゴリズムを提案した。提案したアルゴリズムはシミュレーションによりその効果を確認された。また、実際に得られた実データに対しても地中映像を得ることが可能かどうかを確かめるために、実規模実験を行った。実規模実験で得られた出力波形に各種解析手法、および地中映像化アルゴリズムを適用した結果、配管埋設工事において地中内部の様子を得るに十分な地中映像を得ることができた。

今後の課題として、入力波形の再考察、他の地中映像化手法との組み合わせ等が考えられる。また、受振器の設置状況ができる

限り均一になるような設置方法、もしくは受振器そのものを考える必要がある。それらを行い、精細な地中映像を得ることが当面の目標となる。仮に精細な像を得ることに成功したならば、空洞や水道管、金属パイプ、砂利などを検知対象物として地中映像化を行い、データサンプル数を増やす必要がある。様々な検知対象物に関しても精細な像を得ることができれば、2 次元映像を並べ、3 次元地中映像化を行う。または受振器をグリッド上に並べて、3 次元における楕円軌道の計算を行い、3 次元地中映像化を行う。

最終的には実際の埋設工事現場を想定し、地表面にアスファルトが存在する状況での反射法地震探査を行うべきである。そのためにはアスファルトの速度構造のモデル、一般的なアスファルト厚を解明し、そのモデルに合わせて反射波を特定できるように出力波形を変換する必要がある。

3 次元地中映像化技術を確立した時点で遺跡探査や防災などの本論文での目的以外の分野にも応用が可能となり、様々な分野で用いられると考えられる。

謝辞 本研究の一部は科研費(18760357)の助成を受けたものである。

References

- 1) G. S. Baker, C. Schmeissner, D. W. Steeples: *Geophysical Research Letters*, **26** (1999), 279-282.
- 2) G. S. Baker, D. W. Steeples, and C. Schmeissener: *Int. J. Society of Exploration Geophysicists*, **64** (1999), 323-325.
- 3) S. Chopra, J. Castagna, and O. Portniaguine: *J. Can. Society Exploration Geophysicists*, **25** (2006), 19-25.
- 4) T. Sugimoto, and M. Okujima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996), 3105-3108.
- 5) T. Sugimoto, H. Saito, and M. Okujima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997), 3197-3198.
- 6) T. Sugimoto, H. Saito, and M. Okujima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998), 3120-3121.
- 7) T. Sugimoto, N. Yoshida, and M. Okujima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999), 3161-3162.
- 8) L. Tao, T. Takashi, T. Watanabe, and S. Motooka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999), 3148-3153.
- 9) M. Yusuke, L. Tao, T. Watanabe, and S. Motooka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002), 3539-3544.
- 10) Y. Matsuo, L. Tao, T. Watanabe, and S. Motooka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002), 3539-3544.
- 11) M. Moriya, T. Okamura, T. Sugimoto, T. Shirakawa, and K. Nakamura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003), 2929-2930.
- 12) L. Tao, and S. Motooka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007), 4589-4594.
- 13) Y. Kawamura, M. Tsurushima, K. Mizutani, M. Ujihira, N. Aoshima, and S. Kuraoka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005), 4364-4369.
- 14) E. S. Ha, Y. Kawamura, M. K. Mizutani, H. Okawa, M. Asaka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007), 4500-4506.
- 15) E. S. Ha, Y. Kawamura, M. K. Mizutani, A. Kamohara, H. Okawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008), 3946-3951.
- 16) T. Lay, T. C. Wallace: *Jishingaku*, (Kokin Shyoin, Tokyo, 2002), pp. 0-300.
- 17) A. E. Clark, H. Kodai: *Chyoyuizwai Zairyou*, (Nikkan Shinbunsha, Tokyo, 1995), pp. 83-122.
- 18) M. B. Widess: *Int. J. Society of Exploration Geophysicists*, **38** (1973), 1176-1180.