

弾性波を用いた埋設物探査手法に関する基礎的検討

Fundamental Study on Detecting Buried Object using Seismic Reflection Method

R&Dセンター	程塚 保行	YASUYUKI HODOTSUKA
R&Dセンター	松田 拓	TAKU MATSUDA
知的財産部	戸村 豪治	GOJI TOMURA
土木技術部	長谷川 弘明	HIROAKI HASEGAWA
土木技術部	矢野 安則	YASUNORI YANO
大阪支店	井上 淳一	JUNICHI INOUE

試掘確認が困難な深度1~10mの埋設物は、ボーリング掘削による探針などが行われ、調査に多大な労力を要している。そのために、この深度の効率的な探査手法の開発が求められており、探査手法の確立のために、深度2.5mの矩形函渠を対象に反射法弾性波探査手法を用いた基礎的実験と数値シミュレーションを実施した。実験の事前検討として矩形函渠から反射する波を高密度に受振する測定配置と反射点を抽出するデータ処理方法を数値シミュレーションで検討し、その測定配置とデータ処理方法を実験で適用した。その結果、比較的に精度よく矩形函渠上面の位置を特定することができた。このことにより、本研究で用いた測定配置及びデータ処理方法は、埋設物の探査手法として適用可能であることを確認した。

キーワード：地下埋設物、反射法弾性波探査、矩形函渠、数値シミュレーション

Exploration of buried objects at a depth of 1 to 10 m, which is difficult to confirm by test pitting, takes labor for exploration, such as probe by boring. Therefore, the development of an efficient exploration method for this depth is required. In order to establish the exploration method, fundamental experiments and numerical simulations using the seismic reflection method were carried out for the box culvert at a depth of 2.5 m. As a preliminary study of the experiment, the measurement arrangement for receiving the reflected waves from the box culvert at high density and the data processing method for extracting the reflection points were considered by numerical simulation, and the measurement arrangement and the data processing method were applied in the experiment. As a result of the experiment, it was possible to identify the position of the upper surface of the box culvert with relatively high accuracy. From these it was confirmed that the measurement method and data processing method used in this study can be applied as a method for exploring buried objects.

Key Words: Underground buried object, Seismic reflection method, Box culvert, Numerical simulation

1. はじめに

地下埋設物や地下構造物の施工の際には、事前に既存埋設物を把握する必要がある。それらの既存埋設物は、一般に試掘による目視で確認される。試掘確認が困難な深度1~10mの埋設物は、ボーリング掘削による探針などが行われ、調査に多大な労力を要する。よって、この深度の効率的な探査手法の開発が求められている¹⁾。一方、非掘削の調査手法として電磁波の反射波を用いる地中レーダー探査は、短時間の測定が可能であり精度も

高いが、探査深度が1~2m程度と浅く、また、深度1m以浅であっても地下水位以深では電磁波の減衰が大きく探査が困難な場合が多い。そこで、深度1~10mの非掘削の探査手法として、数十mの深さの地層の分布を調べる目的で利用される反射法弾性波探査を用いることとした。この手法を埋設物探査に応用するためには地下の局所的な位置から反射する波を測定する方法やその反射位置を特定するデータ処理方法を確立する必要がある²⁾。

本研究では、深度1~10mの埋設物を探査する手法の確立のための基礎的な検討として、深度2.5mにある既

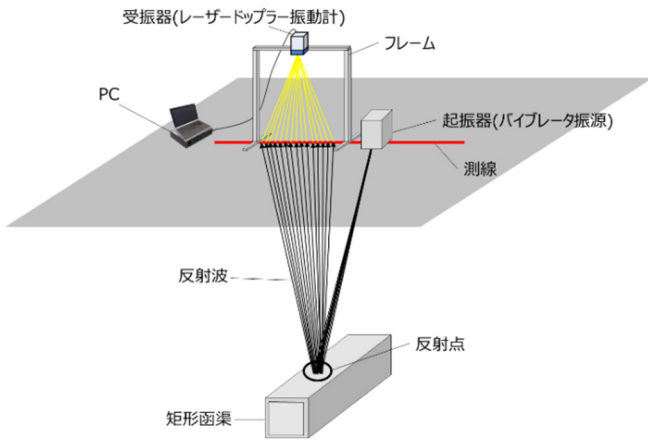


図-1 探査レイアウト

知の埋設物を対象に、数値シミュレーションによる測定配置やデータ処理手順などの埋設物探査手法についての事前検討と、その検討結果を踏まえて実施した埋設物探査実験の結果について報告する。

2. 埋設物探査手法概要

地層と比較して埋設管のような小さな物体で散乱し反射した波を測定するためには、埋設管の大きさより小さな波長の波を起振し、埋設管から反射してきた波を高密度に測定する必要がある。松原(1994)ら³⁾は、小型のパイゼータ振源を用いて深度1.5~2.0mの埋設物から反射した波を捉えている。更に、Bachrach(2010)ら⁴⁾は高密度に展開した受振器を用いて深度1.5mに埋設された埋設管から反射した波をマイグレーションなどのイメージング処理を適用することにより検出している。本研究では、Bachrach(2010)らの手法を応用し、埋設物の検出に加えて、埋設物から反射する波を反射点として抽出し埋設物の位置を特定する手法を数値シミュレーションで検討し、実験で適用した。実験の探査レイアウトを図-1に示す。

3. 数値シミュレーションによる事前検討

埋設物探査実験に先立って、実験を模擬した数値シミュレーションによる事前検討を行った。

(1) 数値シミュレーションデータの作成

数値シミュレーションは、実験で計画した起振点-受振点の配置と実験地を模擬した2次元の弾性波速度モデルを設定して、波線理論⁵⁾により受振点の速度振幅を計算した。起振点-受振点の配置と弾性波速度モデルを図-

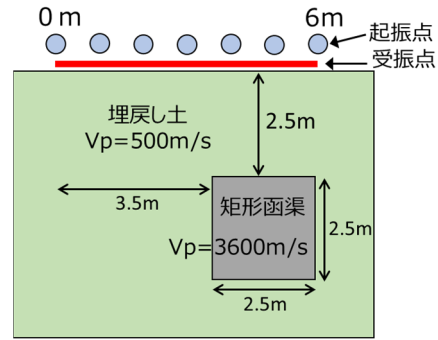


図-2 起振点-受振点配置と弾性波速度モデル

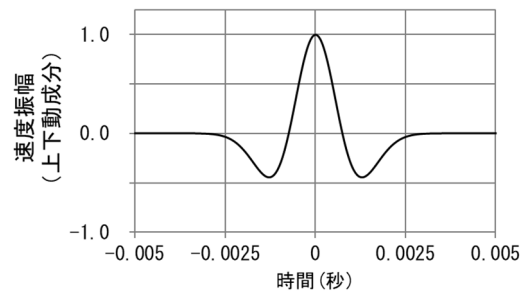


図-3 入力波形(リックウェーブレット)

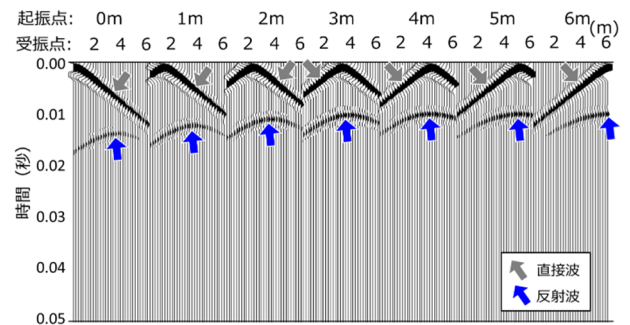


図-4 探査波形(数値シミュレーション)

2に示す。測線長は6mとし、起振点は1m間隔で7点、受振点は0.2m間隔で31点配置した。弾性波速度モデルの矩形函渠は、上面が深度2.5mにあり、大きさは幅2.5m×深度2.5mとし、弾性波速度は $V_p=3600\text{m/s}$ とした。その周囲は埋戻し土を想定し弾性波速度を $V_p=500\text{m/s}$ とした。数値シミュレーションの入力波形は、中心周波数300Hzのリックウェーブレットとした(図-3)。

数値シミュレーションにより計算した受振点の速度振幅の探査波形を図-4に示す。探査波形の反射波の双曲線の頂点を青矢印で示す。起振点が0~3mにおける反射波の双曲線の頂点はすべて3.5m地点で反射波の双曲線形状が同様となっている。そして、起振点が矩形函渠から遠ざかるにつれて到来時間が遅くなっている。探

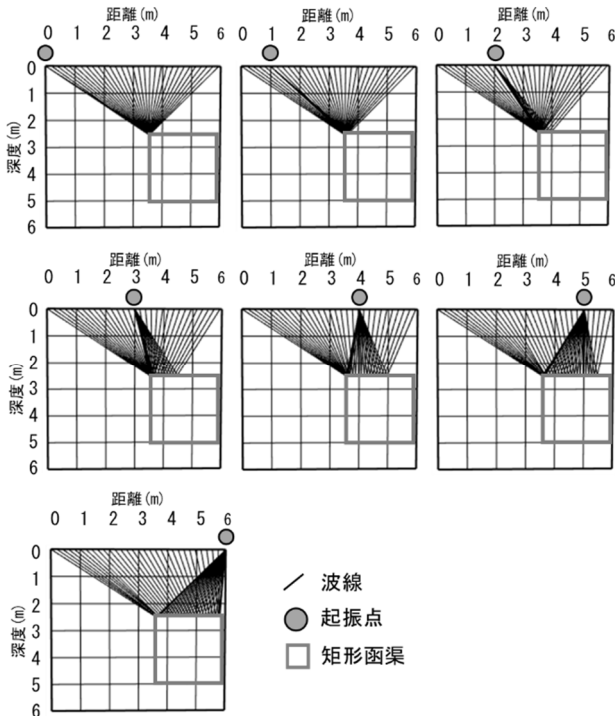


図-5 波線図 (数値シミュレーション)

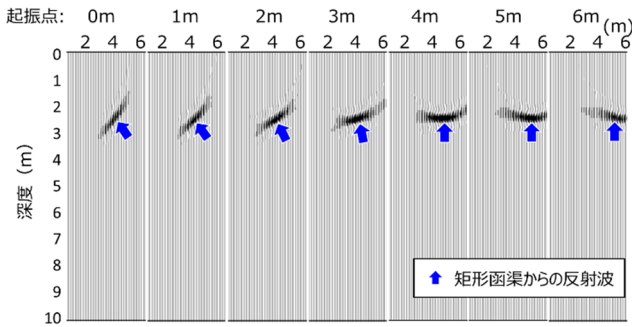


図-6 重合前時間マイグレーション後の深度変換結果 (数値シミュレーション)

査波形の反射波の波線経路を図-5に示す。起振点が0~3mの反射波のほとんどは矩形函渠の上面の隅角部(3.5m地点)で反射している。すなわち、矩形函渠の隅角部から反射する波は、起振点位置が変わっても反射波の双曲線の頂点が矩形函渠の隅角部直上となり、起振点と矩形函渠の隅角部との距離に応じた到来時間となることを示している。一方、起振点が4~6mの探査波形の反射波の双曲線の頂点は、起振点の位置とほぼ同一であり、それぞれ起振点位置の反射波が同一時間に到来している。これは、図-5の波線図に示すように4~6m起振点の下部に矩形函渠が位置しているためである。

(2) 数値シミュレーションデータの処理

探査波形の直接波をミュートで除去し、速度構造モ

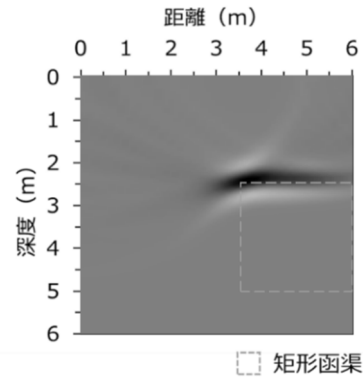


図-7 重合断面 (数値シミュレーション)

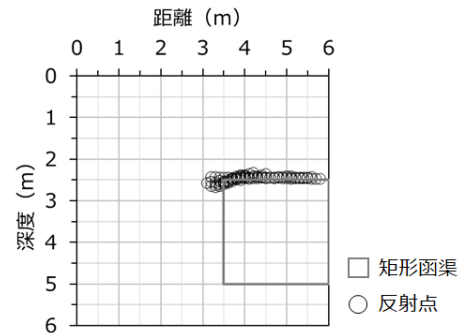


図-8 深度変換結果の反射点分布 (数値シミュレーション)

デルの埋戻し土の弾性波速度 ($V_p=500\text{m/s}$) で重合前時間マイグレーション⁶⁾および深度変換⁶⁾を適用した。この重合前時間マイグレーションは、探査波形における反射波を地下の反射点位置にイメージする処理である。そして、深度変換は、弾性波速度データを用いて時系列データを深度データに変換する処理である。重合前時間マイグレーション後の深度変換結果を図-6に示す。図中青矢印の反射波が集中してイメージされた反射点位置は、矩形函渠上面に対応する。また、図中青矢印と図-5の波線図の反射点の整合性から、反射波の振幅が反射点へイメージできていることが確認できる。

7 起振点分の深度変換結果の振幅を足し合わせた重合断面を図-7に示す。重合断面から、矩形函渠の上面と3.5m付近の隅角部が認められる。

(3) 反射点の抽出

探査結果として矩形函渠の位置座標を得るために、反射波の振幅に閾値を設定して反射点を抽出した。反射点の抽出の際には、図-6の深度変換結果と図-7の重合断面の反射点位置の分布や精度を比較する目的で、それぞれ反射点を抽出した。深度変換結果から抽出した反射点分布を図-8に、重合断面から抽出した反射点分布を図-

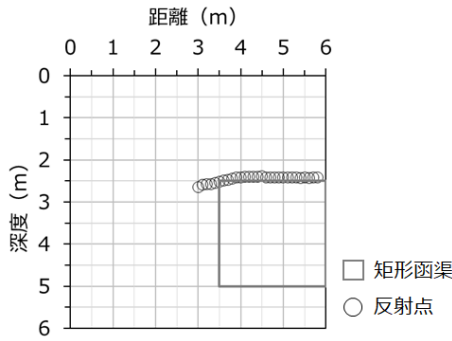


図-9 重合断面の反射点分布
(数値シミュレーション)

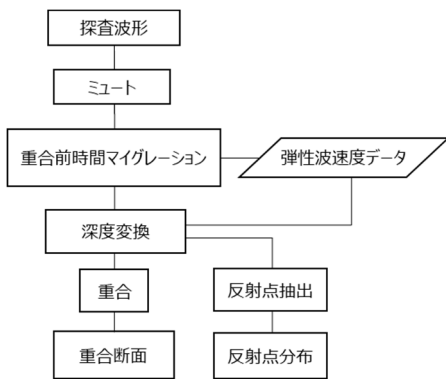


図-10 データ処理フロー (数値シミュレーション)

9 に示す。両者とも反射点の分布位置はおおむね同一であるが、深度変換結果の反射点分布の方が反射点の抽出数が多く且つ矩形函渠隅角部 (3.5m地点) の反射点の集中が顕著である。この隅角部の反射点の集中は、矩形函渠の隅角部位置の把握を容易にする重要な特徴であるため、反射点の抽出には深度変換結果を用いることとした。

以上のデータ処理フローを図-10 に示す。この手順を基本とした処理フローを次章の埋設管探査実験で用いた。

4. 埋設物探査実験

実験は、片側 2 車線の道路上の規制帯内で実施した (図-11)。実験エリアには深度 2.5m で 2.7m×2.8m 程度の大きさの矩形函渠が道路の車線方向に敷設されており、これを探査対象とした。測線はこの矩形函渠を横断する方向に配置し、測線長は道路幅の 6m とした。

(1) 実験データの取得

探査データの測定は、高感度で高密度測定が可能なレーザードップラー振動計と高周波数帯域の起振ができるバイブレーション源を使用した (表-1)。受振点の間隔は

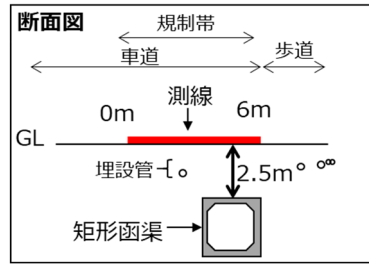


図-11 測線配置

表-1 実験機器

機器名	規格・仕様	
レーザードップラー振動計	電源	100VAC
	測定距離	125mm~100m
	測定物のサイズ範囲	数mm ² ~最大数m ²
	スキャン角度	50° × 40°
	測定周波数帯域	0~50kHz
	分解能	0.005~0.05 (μm/s)/√Hz
可搬型バイブレーション源	電源	12VDC
	加振力	450N
	周波数範囲	20~400Hz
	起振部重量	35kg
	全重量	130kg

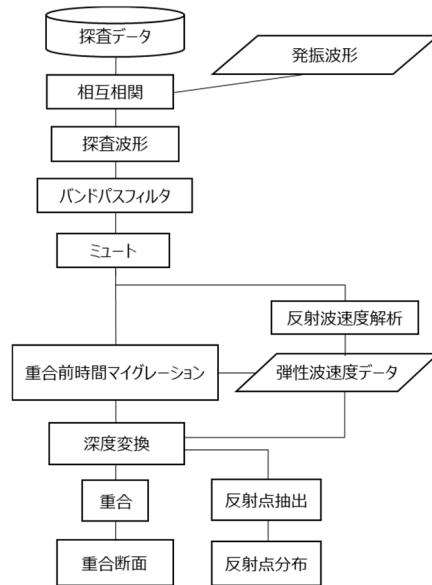


図-12 データ処理フロー (探査実験)

0.2m の固定展開とし、起振点は 1m 間隔で 7 点配置した。実験エリアの隣の対向車線には車両が走行し、その上部は鉄道が走行しており、その振動ノイズが 10Hz 付近の周波数帯域で卓越していた。そのため、バイブレーション源の起振周波数は 20~400Hz とした。

(2) 実験データの処理

データ処理フローを図-12 に示す。図-10 のデータ処

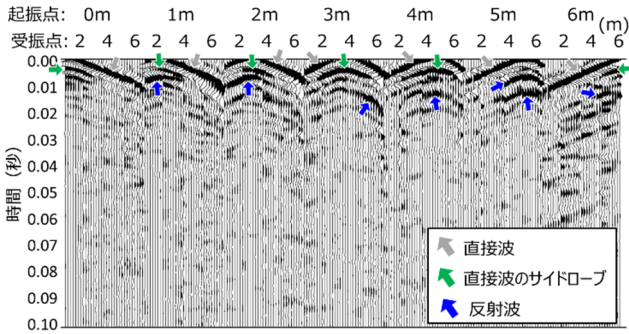


図-13 探査波形図 (探査実験)

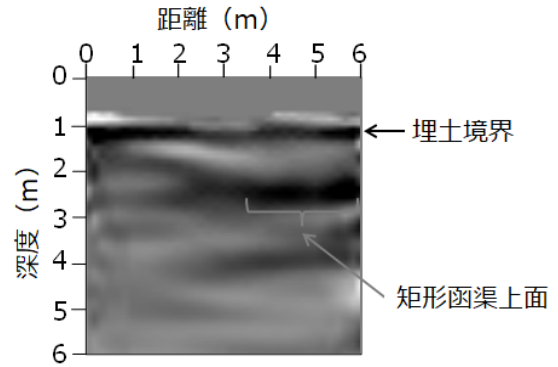


図-15 重合断面 (探査実験)

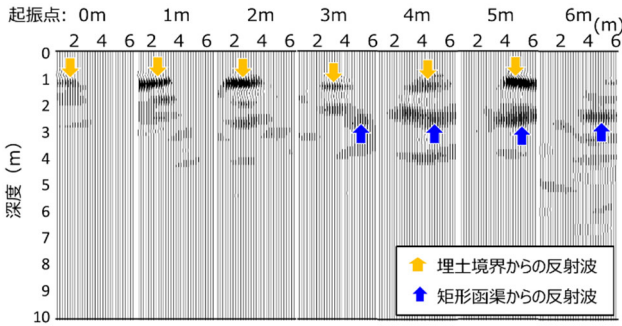


図-14 重合前時間マイグレーション後の深度変換結果 (探査実験)

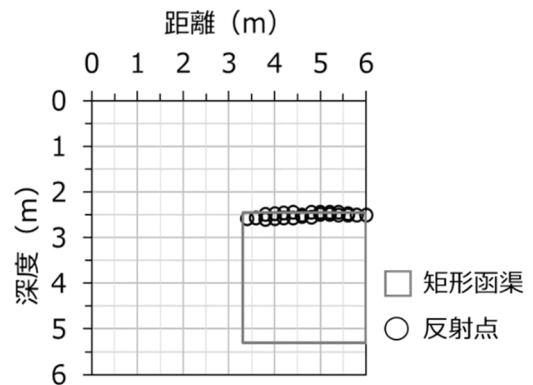


図-16 反射点分布 (探査実験)

理フローに、相互相関とバンドパスフィルタ、反射波速度解析を加えた。相互相関は、実験に用いたバイブレータ振源によって起振される周波数変調の探査データを時系列の探査波形に変換するために適用した。バンドパスフィルタは、探査波形を起振周波数帯域に制限しノイズ除去を目的として適用した。そして、重合前時間マイグレーションを適用するために必要な実験地の地盤の弾性波速度を得るために反射波速度解析を行った。測定データと発振波形を用いて相互相関処理を適用した探査波形を図-13に示す。探査波形はやや不明瞭であるが、これはバックグラウンドノイズや表面波、PS変換波などの反射波以外の影響が含まれていることが原因と思われる。そのために、前章の数値シミュレーションの探査波形のような明瞭な双曲線形状は認められないが、直接波とそのサイドローブの後に反射波と思われる波がいくつか認められる。その反射波を抽出するため、探査波形に起振周波数帯域のバンドパスフィルタを適用し、直接波とそのサイドローブをミュートにより除去した。その後、反射波速度解析を実施して得られた弾性波速度データ ($V_p=360\text{m/s}$) を用いて重合前時間マイグレーションを適用し深度変換を行った。深度変換結果を図-14に示す。深度 1m 付近と深度 2.5m 付近に比較的振幅の大きな反射波が認められる。これらの反射波は既存情報から

深度 1m 付近は埋土境界からの反射波、深度 2.5m 付近は矩形函渠上面からの反射波と推定される。この矩形函渠上面から反射した波を抽出した反射点分布と重合処理を適用した重合断面をそれぞれ作成した。

(3) 探査結果

重合断面を図-15に示す。深度 1m 付近に埋土境界が測線の始点から終点まで連続して認められる。そして、深度 2.5m 付近の振幅の大きな反射波の分布は、矩形函渠の上面の既存情報の位置及び深度とも概ね整合している。その矩形函渠の下部の深度 4m 付近にもやや小さな振幅の波の分布が認められるが、その波の分布幅が矩形函渠上面の反射波分布と同様であり、その深度 (4m) が矩形函渠と埋土境界の間の深度の差 (1.5m) を矩形函渠の深度 (2.5m) に足した深度と一致するため、これは埋土境界と矩形函渠上面の間で多重反射した波と推定される。

深度変換結果から抽出した反射点分布を図-16に示す。その反射点分布の幅は矩形函渠の上面と概ね一致している。そして、その反射点は、反射点分布と既存情報との比較から 10~20cm の位置精度で検出できていることが

確認できた。

5. まとめ

深度 1~10m の埋設物を探査する手法の確立のための基礎的な検討として、既知の深度 2.5m の矩形函渠を対象に埋設物探査実験を実施した。その実験の事前検討として、数値シミュレーションで測定配置やデータ処理手順などの埋設物探査手法について検討した。その結果、探査実験で計画した測線配置や起振点間隔及び受振点間隔で矩形函渠が探査可能であること、重合前時間マイグレーション後の深度変換結果から反射点を抽出することにより矩形函渠上面の位置及び形状の把握が容易になることが確認できた。これらの数値シミュレーションでの検討結果を基に、埋設物探査実験を実施した。その結果、矩形函渠から反射した波が検出でき、その反射点分布から比較的精度よく矩形函渠上面の位置を特定することができた。今後の課題として既存情報がない埋設物を対象とした探査手法の検討と探査波形の S/N 比の向上が挙げられる。

参考文献

- 1) 社団法人全国地質調査業協会連合会：防災・維持管理分野における物理探査の適用，報告書，2007.
- 2) 今吉隆ほか：3D 極浅層反射法地震探査の適用性に関する基礎実験，物理探査学会第 145 回学術講演会論文集，pp.109-112，2021.
- 3) 松原由和ほか：ポータブルバイブレータの極浅層反射法探査への適用，物理探査学会第 91 回学術講演会論文集，pp.62-66，1994.
- 4) R.Bachrach,M.Reshef:3D ultra shallow seismic imaging of buried pipe using dense receiver array: Practical and theoretical considerations, GEOPHYSICS,Vol.75, No. 6, G45-G51, 2010.
- 5) 綾瀬一起ほか：近地震波の伝播に関する理論，地震 第 2 輯，42 卷，3 号，pp.391-403，1989.
- 6) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，pp.75-81，1998.