

地下埋設物探査システムの研究 (その1)

—各種探査装置のフィールド実験—

西林清茂 上野孝之
仮谷幸吉 佐藤哲

Study on Underground Exploration System (Part 1)

—Field Experiments of Several Underground Exploration Systems—

Kiyoshige Nishibayashi Takayuki Ueno
Kokichi Kariya Tetsu Sato

Abstract

The capacities of underground exploration system were investigated in this study. The systems which were investigated were representative ones selected from among a number of types. This field experiment was the first step in studies on underground exploration systems. The following results were obtained with these experiments: (1) ground probing radar is influenced by the condition of the ground, but it is possible to detect objects which are buried to a depth of 1.5 m regardless of the material of the object, (2) the electromagnetic induction method is limited to pipes which have conductivity, and (3) the magnetic exploration method is not suitable for pipes of small diameter.

概要

地下埋設物探査装置の能力がフィールド実験によって調査された。地下埋設物探査装置はいくつかの機種の中から選んだ代表機種である。このフィールド実験は研究の第一段階であり、実験の結果は次のとおりである。

(1) 地下レーダー方式は地盤の状態にかなり影響されるが深さ約1.5mまでの埋設物を材質に関係なく探知できた。(2) 電磁誘導方式は導電性のある管に限られるが、地盤の状態に関係なく探知できた。(3) 磁気探査方式は小口径の埋設管探査には適さない。

1. まえがき

建設工事を実施する際、地下に埋設された物体を事前に調査して保護することは施工者にとって必要不可欠である。現状では埋設物所有者である各企業の埋設物台帳を調査することと、現地の何箇所かを試掘調査する方法が多く採用されている。埋設物台帳を調査することには台帳の整備状況の不確実さという問題がある。現地を試掘調査する方法は、調査精度は完全であるが、費用の問題と、試掘箇所の規制の問題、試掘中に埋設物を損傷してしまうという問題を抱えている。そこで地表面から、掘削せずに埋設物を探査することが既に一部で行なわれており、探査精度向上のために研究開発が盛んに進められている。地下を探査する方法には、地層、空洞、埋設

物を対象とした電磁波反射方式（以下地下レーダー方式と呼ぶ）、弾性波方式、導電性のある管を対象とした電磁波誘導方式、磁性を帯びた鉄類を対象とした磁気探査方式、水で満たされた管を対象とした音波方式がある。これらのうち埋設管探査には、地下レーダー方式と電磁波誘導方式が有効であり、また、鉄類などの強磁性のものであれば磁気探査法も適用可能といわれている。ここでは、埋設管を対象として、これら三つの代表的方式の現状の探査能力を調査し、適用限界を明らかにするためにフィールド実験を行なった。

2. 探査装置

実験に使用した装置は、地下レーダー方式4機種、電磁波誘導方式3機種、磁気探査方式1機種である。

各方式の一般的特徴はおおよそつぎのとおりである。

2.1. 地下レーダー方式

探査の概念を図-1に示す。パルス幅が1~6ナノ秒(ナノ; 1×10^{-9})の短いインパルス状の送信波(図-2)を、地表近くに置いた送信アンテナから地中に向けて放射する。この送信波の一部は地表面で反射されるが、残りは地中に入り、埋設管、空洞、地下水など電気的特性(比誘電率)が異なる物質との境界面で反射され、再び地表に出て受信アンテナに到達する。

反射物体までの深さLは、次式から得ることができる。

$$L = \frac{1}{2} \times v \times T \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで電磁波の地中での速度vは次式で求められる。

$$v = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon}} \quad (\text{m/s}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ϵ ; 土の比誘電率

従って、深度の測定精度は、土の比誘電率 ϵ に大きく左右される。

反射物体の平面的位置は、アンテナを地表に沿って移動させることにより知ることができる。

反射物体が埋設管の場合、反射映像はおおよそ図-3に示すような特徴を有している。

この方式は金属・非金属を問わずほとんどの埋設物の探査に適用できる。探査結果は、リアルタイムでグラフィックレコーダー、またはブラウン管に映像として表示されるが映像から埋設物を確認するには、多くの経験を必要とする。

2.2. 電磁誘導方式

探査の概念を図-4に示す。送信機で誘導磁界を発生させ、地下埋設管路、ケーブルなどに誘導電流もしくは直流電流を生じさせる。その電流によって発生する誘導磁界を地表上の受信機で検出し、埋設位置、深さを探査する方式である。

埋設物位置については受信機が埋設管を横断するとき、その管から生じる磁界の強さのピークを検出することに

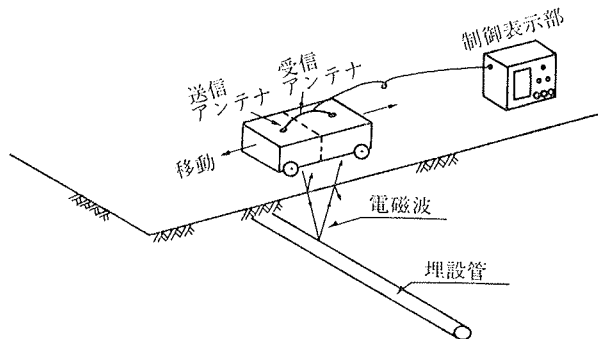


図-1 地下レーダー方式の探査概念図

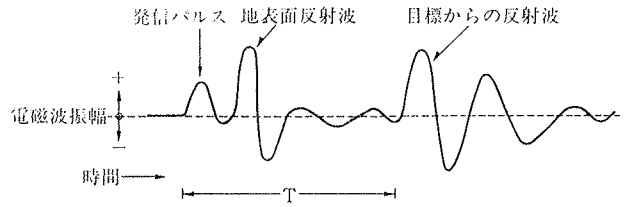


図-2 地下レーダーの反射波形

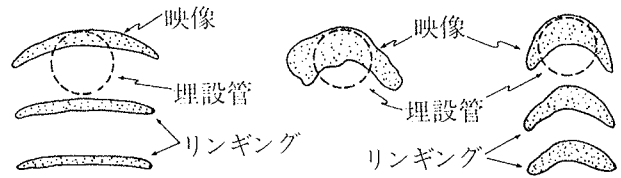


図-3 地下レーダーの反射映像

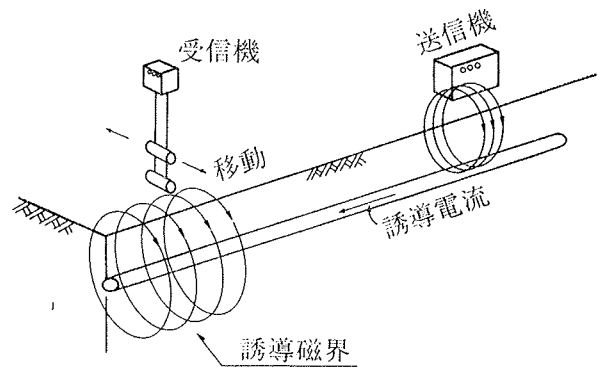


図-4 電磁波誘導方式の探査概念図

よって測定する。

深さは磁界の減衰特性を利用して測定する。すなわち磁界の強さと距離は逆比例の関係にあり、受信コイルを図-5に示すように一定間隔引き上げたときの減衰から式(3)によって深さを演算する。また、受信コイルを45度に傾け埋設物の軸方向と直角方向に左右いずれかに移動しながら受信波の最弱点を探知する。その地点と埋設物直上の地点との間隔が埋設物の深さとなる。

電流を生じさせる方法としては、以下の三つの方法がある。

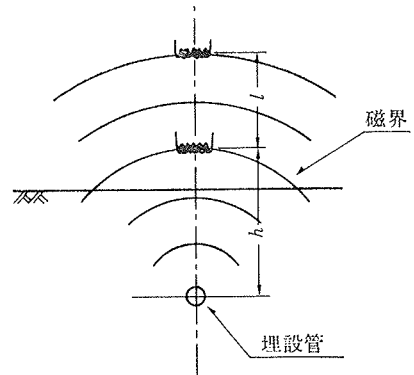


図-5 電磁波誘導方式の深さ測定原理

$$h = l / \sqrt{e_A / e_B - 1} \quad \dots\dots\dots(3)$$

但し、 h : 下段コイルと埋設位置までの距離(m)

l : 上下水平コイルの間隔(m)

e_A, e_B : 上下水平コイルの出力値(V)

①間接法 (誘導法)

地上においた送信機から磁界を放射し埋設管に間接的に誘導磁界を生じさせる。(図-4)

②直接法

送信機の端子を管路の一部に直接接続し、他方を地中にアースして、管路に直接電流を流す。

③外磁コイル法

金属管でも、その表面が絶縁物で被覆されているような場合、コイルを直接管路に装着し目的の管だけに効果的に誘導電流を流す。

この方式は金属管路、電力ケーブルなど導電性のものが探査対象になっており、非金属や継手部が絶縁されているものは探査できない。装置はコンパクトで、操作も容易であり、熟練を要しない。探査結果はリアルタイムにデジタル値で表示される。

2.3. 磁気探査方式

探査の概念を図-6に示す。鉄などの強磁性体は地球磁場などにより磁化しており、その近傍でコイルを移動するとコイルの軸方向の磁場の強さが変化して起電圧を生じる(電磁波誘導の法則)。この起電圧は、コイルの軸方向の地場の強さの変化率(磁気傾度)を示し、その記録から磁気異常物の位置を求めることができる。

2.4. 各探査装置の仕様

実験に使用した各探査装置の仕様を表-1に示す。

3. 実験方法

三つの地盤条件で探査実験を行なった。各フィールドの物理的・電気的定数を表-2に示す。

3.1. 実験 1

埋設管の径、材質、深さと探査能力の関係を把握するため図-7に示すフィールドを造成した。フィールドは関東ローム地盤に長さ10m、幅5m、深さ3mのピット

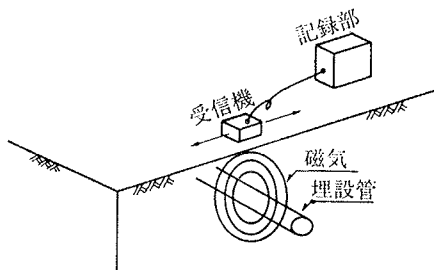


図-6 磁気探査方式の探査概念

| 機種 | アンテナ型式 | 送信パルス波 | 周波数帯域 | 中心周波数 | 繰返し周波数 | 印加電圧 | |
|--------|--------|--------------|-----------|------------|--------|-------|--------|
| 地下レーダー | A | 送受信ダイポールアンテナ | 2nsインパルス | 10~700MHz | 300MHz | 50KHz | 35VPP |
| | B | " | " | 50~400MHz | 150MHz | 50KHz | 80VPP |
| | C | 単一ダイポールアンテナ | 6nsモノサイクル | 50~300MHz | 150MHz | 50KHz | 150VPP |
| | D | 送受信ダイポールアンテナ | 2nsインパルス | 100~900MHz | 120MHz | 60KHz | 70VPP |
| 電磁誘導法 | A | コイル | — | — | 83KHz | — | 9V |
| | B | " | — | — | 38KHz | — | 9V |
| | C | " | — | — | 380Hz | — | 9V |
| 磁気探査 | 両コイル型 | — | — | — | — | — | |

表-1 各探査装置の仕様

| 地盤の物性 実験 | 土質 | 単位体積重量 (g/cm ³) | 含水比 (%) | 比抵抗 (Ω・m) | 導電率 (ms/m) | 比誘電率 | |
|-------------|----------|--------------------------------|------------|--------------|---------------|------|------|
| | | | | | | | 実験 1 |
| 実験 1 | 関東ローム | 1.25 | 73.2 | 111 | 8.98 | 24.4 | |
| 実験 2 | " | 1.13 | 74.4 | 1200 | 0.83 | 13.7 | |
| 実験 3 | 締め固めた地盤 | 山砂 | 2.00 | 12.5 | 800 | 1.25 | — |
| | 締め固めない地盤 | " | 1.50 | 11.5 | 800 | 1.25 | — |

表-2 各フィールドの物理的・電気的定数

を掘り、1m、2m、および3mの深さにそれぞれφ50mm、φ200mmの鋼管、塩ビ管を埋設し、関東ロームで埋め戻したものである。

3.2. 実験 2

舗装、および埋設後の経過時間の探査能力に及ぼす影響を把握するため図-8に示すフィールドを設定した。これは既設の埋設管(給水管、雨水排水管および光ファイバーケーブル)が芝生下とアスファルト舗装下の関東ローム地盤内に同じ条件で約2年以上前に埋設されたフィールドである。

3.3. 実験 3

地下レーダーを対象として、土質、管の材質、埋設深さ、舗装、地下水と探査能力の関係を把握するため図-9に示すフィールドを造成した。これは関東ローム地盤に1m、1.5m、および2mの深さのピットを掘り、φ100mmの塩ビ管と、電力線を入れたφ100mmのポリエチレン製コルゲート管を設置し、笠間産の山砂で埋め戻したものである。このフィールドでは山砂の密度と、

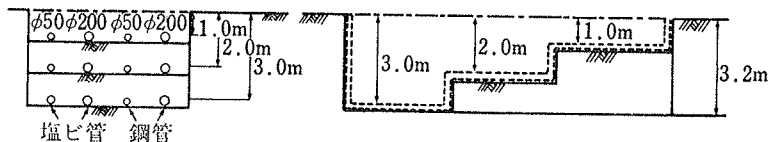


図-7 実験1のフィールド

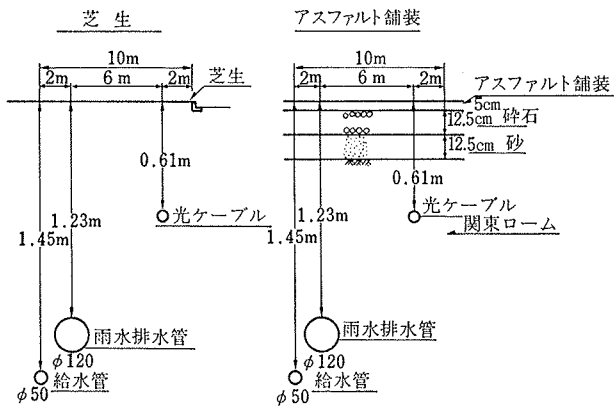


図-8 実験2のフィールド

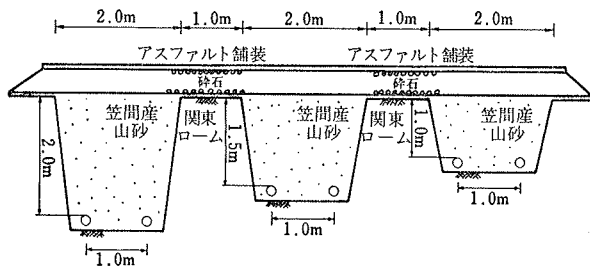


図-9 実験3のフィールド

| | | |
|-----------|---------------------------------------|-----------|
| 埋設管の種類 | φ100mmのポリエチレン製コルゲート管に入った電線、φ100mmの塩ビ管 | |
| 埋設深度 | 1.0, 1.5, 2.0m | |
| 埋戻し地盤 | 締め固めて埋戻し | ゆるく埋戻し |
| 碎石層厚 | 20cm | 40cm |
| アスファルト舗装厚 | 5cm | 5cm |
| 地下水位 | — | 管上10cm 満水 |

表-3 実験3の実験条件

碎石層、およびアスファルト舗装の厚さ、地下水の有無を考慮できるようにした。実験条件を表-3に示す。

4. 実験結果

4.1. 実験1の結果

4.1.1. 地下レーダー方式 4機種種の多少の差はあるものの探査能力は同程度であった。実験結果の主なもののはつぎのとおりである。①探査深さは1mまでであった。②鉛直方向の誤差は最大50cmであった。③水平方向誤差はほとんど無かった。④塩ビ管に比較して鋼管の映像のほうが明瞭であり、また管径が大きいくほど映像は明瞭であった。探査結果例を写真-1に示す。

4.1.2. 電磁誘導方式 実験結果の主なもののはつぎのとおりである。①3機種種のうち1機種種だけが直接法によりφ50mmの鋼管を深さ3mまで探査できた。その時の鉛直方向誤差は最大で30cmであり、水平方向誤差は

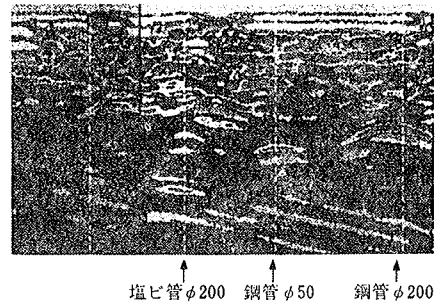


写真-1 実験1の地下レーダー探査結果例

無かった。間接法では3機種とも埋設管の確認ができなかった。

4.1.3. 磁気探査方式 周囲の金属に影響を受け埋設管の存在を探知できなかった。

4.2. 実験2の結果

各探査装置の実験結果を表-4に示す。

| 地表面状態 | 管材 | 管径 (mm) | 埋設深度 (m) | 地下レーダー方式 | | | | 電磁誘導方式 | | | 磁気探査方式 |
|----------|------------|---------|----------|----------|---|---|---|--------|---|---|--------|
| | | | | A | B | C | D | A | B | C | |
| 芝生 | 鉄管 | 50 | 1.45 | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | △ |
| | 塩ビ管 | 120 | 1.23 | ○ | ○ | ○ | ○ | × | × | × | × |
| | 光ファイバーケーブル | 10 | 0.6 | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | × |
| アスファルト舗装 | 鉄管 | 50 | 1.45 | × | × | × | × | △ | ○ | ○ | △ |
| | 塩ビ管 | 120 | 1.23 | ○ | ○ | ○ | ○ | × | × | × | × |
| | 光ファイバーケーブル | 10 | 0.6 | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | ○ | × |

○…探査可 △…深度不明 ×…探査不可

表-4 実験2の結果

4.2.1. 地下レーダー方式 実験結果の主なもののはつぎのとおりである。①芝生上では4機種ともに1.45mの埋設管まで探知したが、アスファルト舗装上では1.45m下の給水管(鉄管)を探知できなかった。②鉛直方向誤差は最大54cmであり水平方向誤差はほとんど無かった。③同じ関東ロームでも、埋設直後に探査した実験1と2年以上前に埋設されている管を探査した実験2では探査映像の明瞭さに差異があった。埋め戻し直後は土の組織が乱されており電磁波の減衰が大きいため映像が不明瞭になるものと考えられる。探査結果例を写真-2に示す。

4.2.2. 電磁波誘導方式 実験結果の主なもののはつぎのとおりである。①3機種ともに光ファイバーケーブルと給水管(鉄管)を間接法により探知できた。②地表面のアスファルト舗装の影響はなかった。③探査できたのは1.45mの深さの埋設管までであった。④鉛直方向誤差は、最大35cmであり水平方向誤差はなかった。⑤導電性のあるものが探査対象であるため、塩ビ管は探査不可能であった。

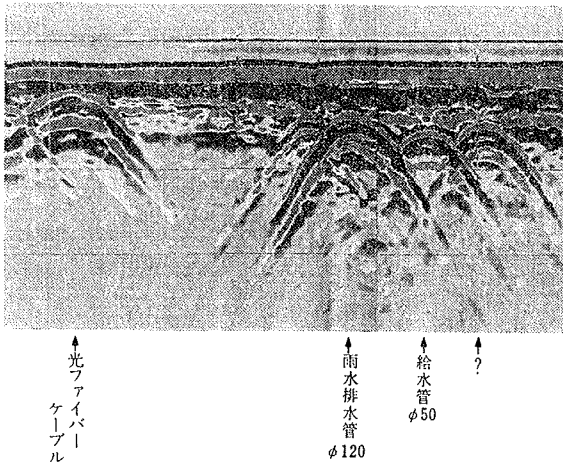


写真-2 実験2の地下レーダー探査結果例

4.2.3. 磁気探査方式 実験結果の主なものはつぎのとおりである。①給水管（鉄管）を探知したが、反応は小さかった。②地表面のアスファルト舗装の影響はなかった。③鉛直方向距離は不明で、水平方向誤差は40cmであった。

4.3. 実験3の結果

3機種の地下レーダーによる実験結果を表-5に示す。実験結果の主なものはつぎのとおりである。①塩ビ管に比べて電線管の探査映像の方が明瞭であった。②碎石層が厚くなるにつれて探査映像は不明瞭となるが、アスファルト舗装の有無の影響はほとんどなかった。③締め固めながら埋め戻した地盤の探査映像は撒き出し層の境界での反射が強く、層状となって現われるため、管の識別が困難であった。一方締め固めない地盤の探査映像では管の識別が容易であった。④掘削境界からの反射波が管の映像を判別し難くする場合があった。⑤探査映像は地下水のある場合については不明瞭になる。また、地表面まで地下水がある状態と、管上10cmまで地下水がある状態では前者の映像の方が明瞭であった。探査結果の一例として表層に碎石とアスファルトがある条件で探査した映像を写真-3に示す。

5. まとめ

以上三つのフィールド実験から次のことがいえる。地下レーダー方式は探査の対象が多いため適用性は広い。また、探査能力は、地盤条件に左右されるが、現状では、深さ1.5~2mの地盤の中にある埋設管を探査できる。

| 地盤状態 | | 締め固めた地盤 | | | | | 締め固めない地盤 | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|--------------|----------|---------------------------|----------|----|--------------|---------------------------|----------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 湿润状態(含水比12%) | | | | | 湿润状态(含水比12%) | | | | | | | | | | | | | |
| 表層 | 管材 | | | | | 管材 | | | | | | | | | | | | | | |
| | 無 | 碎石20cm | 碎石40cm | 碎石40cm アスファルト 舗装5cm | 同左 | 無 | 碎石20cm | 碎石20cm アスファルト 舗装5cm | 同左 | 同左 | | | | | | | | | | |
| 地下レーダー | 電線φ10管cm | | 塩ビφ10管cm | | 電線φ10管cm | | 塩ビφ10管cm | | 電線φ10管cm | | | | | | | | | | | |
| | A | 1.0 | ○ | △ | ○ | × | △ | × | △ | × | - | - | - | - | - | - | × | × | × | × |
| 1.5 | | ○ | △ | ○ | × | × | × | × | × | - | - | - | - | - | - | × | × | × | × | |
| 2.0 | | △ | △ | × | × | × | × | × | × | - | - | - | - | - | - | × | × | × | × | |
| B | 1.0 | ○ | △ | ○ | △ | ○ | △ | ○ | △ | ○ | ○ | △ | ○ | △ | △ | × | × | × | ○ | △ |
| | 1.5 | △ | △ | △ | △ | △ | △ | △ | △ | ○ | △ | ○ | × | △ | × | × | × | × | △ | × |
| | 2.0 | △ | × | × | × | × | × | × | × | ○ | × | △ | × | × | × | × | × | × | × | × |
| C | 1.0 | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | × | ○ | △ | △ | △ | △ | × | × | × | × | △ | △ |
| | 1.5 | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | × | △ | △ | △ | × | △ | × | × | × | × | × | × |
| | 2.0 | △ | △ | △ | × | △ | × | △ | × | △ | △ | × | × | × | × | × | × | × | × | × |

判別：○…明瞭な管の特徴がある映像が認められる、△…わずかに管の特徴が認められる、×…反応がない

表-5 実験3の結果

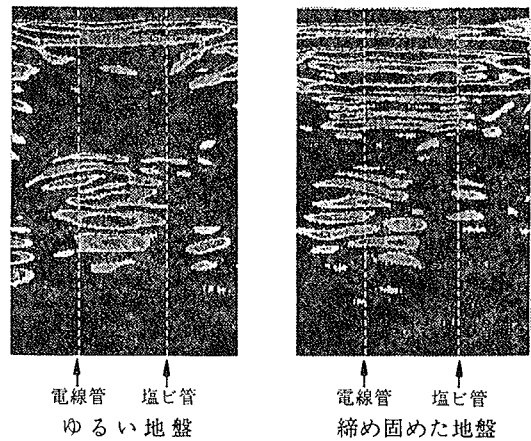


写真-3 実験3の地下レーダー探査結果例

電磁波誘導方式は探査対象が導電性をもつこと、管が輻射していないこと、管の延長がある程度以上あることなどの制約条件がある。しかしこの条件を満たせば、土質、舗装に関係なく深度3m程度まで探知能力がある。磁気検査方式は体積の大きい強磁性の鉄類が検査対象であるため小口径の埋設管探査には適さないようである。地下レーダーによる探査技術の向上のためには、種々の土質条件、埋設物の材質、形状条件などで変化する物体固有の映像パターンを把握しておく必要がある。今後これらの関係を調査する予定である。