

### 3. 埋設地点環境調査に適用可能な物理探査技術の検討

物理探査技術は、その名称の通り物理現象を利用して地下の状況を探査する技術であり、利用する物理現象により種々の方法がある。ここでは、『埋設農薬の調査 = 埋設位置の特定』という観点から各物理探査技術について整理を行ない、次に、『埋設農薬の調査 = 埋設位置の特定』に対する適用性についてまとめる。

#### 3.1 各物理探査技術の整理

物理探査技術は、物理現象を利用して地価の状況を探査する技術であるが、利用する物理現象により種々の方法がある。利用する物理現象には、『電気（電磁を含む）』、『弾性波（超音波を含む）』、『赤外線（温度を含む）』、『重力』、『磁気』、『放射能』および『光』の7通りが挙げられる。また、測定を行なう場所により区分することができ、『空中』、『地表』、『孔内（単孔）』、『複数孔間または地表/孔間』、および『孔内検層』などに分けられる。

空中からの探査、地表からの探査、およびボーリング孔を利用した探査について、そのイメージを図 3.1.1 に示す。

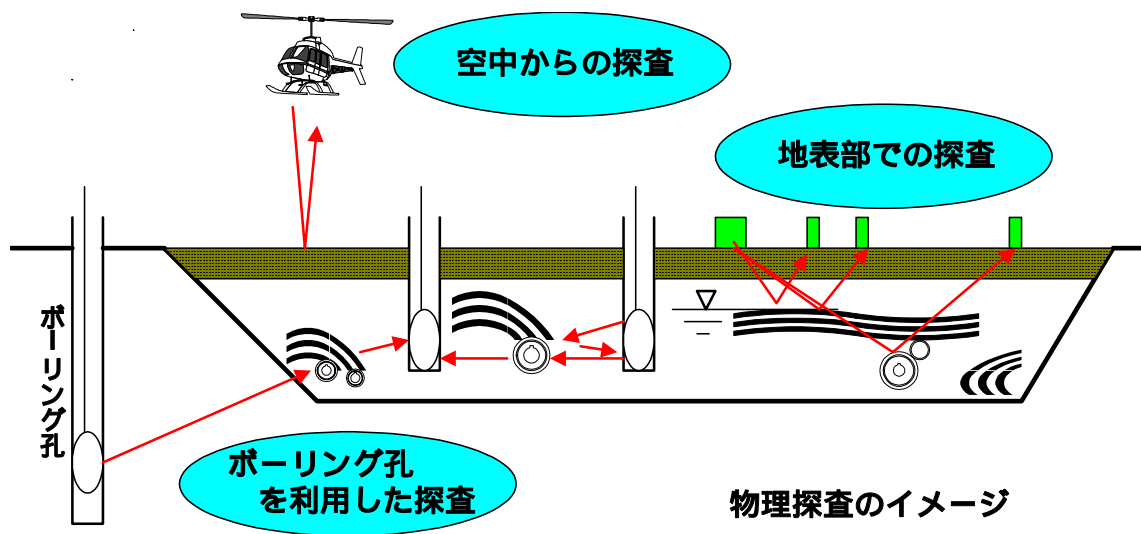


図 3.1.1 測定場所による物理探査のイメージ

各物理探査技術について、利用する物理特性（現象）と測定を行なう場所により整理して、表 3.1.1 に示す。表に挙げた物理探査技術は、一般に行なわれる手法をほぼ網羅しており、探査手法の名称については、物理探査の教科書的な文献である『物理探査ハンドブック』（物理探査学会編、1998）に順じた。表では、後述するが埋設物探査に一般に利用されている探査技術、および埋設物の状況によっては適用の可能性が考えられる探査技術について、色をつけて示した。

農薬の埋設位置を特定する場合、コンクリート製施設や金属容器などの埋設形態に違いはあるものの、周辺地盤とは物理的特性が異なるものを探査することになり、いわゆる埋設物探査と行うことができる。そこで、以下に各物理探査技術の埋設物探査に対する適用性を検討する。

### (1) 空中探査

空中探査は、ヘリコプターや航空機に測定器を搭載し、資源探査や地質構造探査など比較的大規模な地質構造を対象として、広範囲を迅速に探査する場合に行なわれるのが一般的である。探査対象が金属や磁性体である場合には、電磁法および磁気探査が手法としては適用の可能性が考えられ、埋設範囲の植生や土壌の種類が周囲と異なっている場合には、手法としては光学リモートセンシングが適用の可能性が考えられる。

しかしながら、一般に行なわれている現状の空中探査技術は、高高度（例えば高度 50m 以上）からのヘリコプターや航空機を利用した大規模な探査であり、埋設物探査への適用は困難と考えられ、非常に低空において小型で安全かつ安定した測定が可能なシステムを開発することが必要である。

### (2) ボーリング孔を利用した探査

ボーリング孔を利用した探査手法のうち、孔内検層（物理検層）はボーリング孔の極めて近傍地盤の物理特性を測定するものであり、埋設物探査には適用不可能である。

その他のボーリング孔を利用した探査手法の場合も、探査対象物の近傍にボーリング孔を設けること、または探査対象物を挟むように複数のボーリング孔を設けることが必要となる。したがって、埋設物の場所を特定する目的には適用不可能である。

### (3) 地表からの探査

地表からの探査には、表 3.1.1 に示したように、利用する物理特性により多くの探査手法がある。これらの物理探査手法のうち、一般に埋設物探査によく利用されているのは、地中レーダ、電磁探査（時間領域 EM、周波数領域 EM）、磁気探査である。この他に、探査対象物の大きさが深度と同程度かそれ以上の場合には、電気探査（比抵抗法）、反射法地震探査、表面波探査、重力探査なども適用の可能性が考えられる。


推定される埋設状況に応じて、より適切な探査手法を検討し、場合によっては複数の手法を用いて探査を行なうことが必要である。


参考資料として、一般に埋設物探査によく利用される探査技術、および探査対象物の状況によっては適用の可能性が考えられる物理探査技術について、以下の項目を整理した。まとめた結果は、巻末資料に示した。

名称、探査原理、測定概念図、探査結果図、得られる結果（求められる物理量など）  
主な適用分野、適用上の問題点（適用限界など）、作業性、探査深度

表 3.1.1 各種物理探査技術の分類

		利用する物理特性(利用技法)による区分						
		電気(電磁を含む)	弾性波(超音波を含む)	赤外線(温度を含む)	重力	磁気	放射能	光
測定場所 による 区分	空中	空中電磁法 周波数領域(AEMorHEM) 時間領域(TDEM)			空中重力探査	空中磁気探査	空中放射能探査	光学リモートセンシング(MSS) マイクロ波リモートセンシング(SAR)
	地表	電気探査 自然電位法 比抵抗法 強制分極法(IP) 電磁探査 MT VLF CSAMT TDEM 周波数領域EM 地中レーダ	反射法地震探査 屈折法地震探査 微動探査 常時微動測定 表面波探査	赤外線熱映像 地温探査	重力探査	磁気探査	放射能探査	
	孔内(単孔)	流電電位法 ボアホールレーダ 孔中EM	VSP シングルホールイメージング		孔内重力探査	孔内磁気探査		
	孔内検層	電気検層 自然電位検層 インダクション検 誘電率検層 NMR検層	速度検層(音波検層) ボアホールテレビュア	温度検層			孔隙率検層(中性子 密度検層(ガンマ線検 自然ガンマ線検層)	ボアホールカメラ
	複数孔間 または 地表/孔間	比抵抗トモグラ IPTモグラフィ EMトモグラフィ レーダトモグラフィ	弾性波トモグラフィ 孔間反射法 フルウェーブトモグラフィ 音響トモグラフィ					

 : 埋設物探査に一般に利用されている手法

 : 埋設物の状況によっては適用の可能性が考えられる手法

### 3.2 アンケート調査に見られる地中レーダ探査利用の現状

平成16年2～3月に、環境省および土壤環境センターにより各都道府県を対象として「埋設農薬調査・掘削等暫定マニュアル」についてのアンケート調査が実施されている。このアンケートの回答について、物理探査（地中レーダ探査）利用の現状に関して、下記の項目についてまとめた。

- ・POPs 農薬埋設地点の有無
- ・埋設地点特定のための調査で地中レーダ探査を実施したかどうか
- ・地中レーダ探査による埋設農薬調査結果（埋設位置特定の可否）

アンケートをまとめた結果は、以下のようである。

- ・POPs 農薬の有無：
  - 現にある： 23/47 都道府県
  - 箇所数： 160 箇所
  - 該当なし： 19/47 都道府県
  - アンケート回答なし：5/47 都道府県  
（アンケート回答なしと言うのは、アンケートについてまとめた時点で回答のなかったものである）
- ・埋設地点特定のための調査で地中レーダ探査を実施：
  - 実施した： 12/23 都道府県
  - 箇所数： 25 箇所
- ・調査の結果、埋設位置を特定できたかどうか：
  - 特定できた： 5/25 箇所
  - 既に特定できていた： 3/25 箇所
  - 結果不明+未回答： 17/25 箇所

すなわち、POPs 農薬が現にある 23 都道府県 160 箇所のうち、12 都道府県 25 箇所において埋設地点特定のための調査で地中レーダを実施している。その調査の結果特定できたのが 5 箇所、調査以前から既に特定できていたのが 3 箇所、結果不明または未回答 17 箇所である。

アンケート結果において地中レーダを実施したが結果不明となっている複数の自治体に、電話を通じて結果不明の内容について問い合わせた。その結果、いずれも地中レーダ探査による埋設農薬調査により農薬が埋設されている可能性のある地点を指摘できているが、試掘などの確認作業が行なわれていないために、結果不明と回答したとのことであった。

このことから、地中レーダ探査による調査は農薬が埋設されている可能性のある地点を指摘する上で十分効果があったが、多くはその後の確認作業が未実施の状況にあるものと考えられる。

### 3.3 推定される埋設状況と適用可能な探査技術

農薬を地下に埋設する場合には、農薬そのものを直接土壌中に埋設するのではなく、容器、袋など何らかの『入れもの』に入っているものと考えられる。すなわち、物理探査による埋設農薬調査では『農薬そのもの』を探査するのではなく、『入れもの』すなわち埋設物を探査することになる。3.1 節で述べたように、埋設農薬の探査には地表からの物理探査手法が適用可能と考えられ、このうち埋設物探査によく利用されているのは、地中レーダ探査、電磁探査（時間領域 EM、周波数領域 EM）、磁気探査である。また、探査対象物の大きさによっては、電気探査（比抵抗法）、反射法地震探査、表面波探査、重力探査なども適用の可能性が考えられる。

一方、2 章で述べたように農薬の埋設形態と埋設地点の地表状況は様々なものが想定される。ここでは、推定される農薬の埋設状況および地表の状況に対し、適用可能な探査手法について検討を行なう。さらに、各探査手法について埋設物の材質による適用性、および探査深度について述べる。

#### （1）農薬の埋設状況

想定される農薬埋設状況には、大きく分けて次の 2 通りがある。

- ・ 3 トン以上をコンクリート容器に入れて埋設した大規模集約型
- ・ 1 箇所当たり 300kg 以内とした小規模分散型

大規模集約型の場合には、

- ・ 大型コンクリート容器（施設）に入れて埋設されており、容器は鉄筋の有無および金属製蓋の有無の区別がある

また、小規模分散型の場合には、

- ・ 乳剤の場合で、粉剤、粘土粉、消石灰に吸収させて埋設されている場合
- ・ 農薬の上下および周囲を消石灰で包むように埋設した場合
- ・ 厚手のビニール袋、段ボール箱などに入れて、または被包のまま埋設されている場合
- ・ 石油缶などの金属容器に入れて埋設されている場合
- ・ ガラスびん、缶、袋など雑多な状態であり、埋設形態もコンクリートに封印、缶に入れるなど様々な場合があり、点在して埋設されている場合もある

などが想定される。

#### （2）地表の状況

地表の状況については、埋設から約 30 年の長い年月が経過しているため、土地の改変がある可能性も推定される。しかしながら、比較的良好に埋設箇所の維持管理が行なわれているものと考えられるので、住宅地などの開発が行なわれているとは考えにくい。可能性のある地表の状況としては、下記の状況が想定される。

- ・ 比較的平坦な更地である場合（埋設時の状況が維持されている可能性が高い）

- ・ 田畑、果樹園内など、耕作地である場合
- ・ 山林内で樹木がある場合
- ・ 管理用地内の道路などの舗装（アスファルト、コンクリート、鉄筋コンクリート）
- ・ 構造物下
- ・ 構造物近傍

地表からの探査であるので、構造物下を探査することは不可能である。また、構造物近傍については、構造物自体が金属体である場合や構造物基礎が周辺に存在する場合が考えられ、このような場合は、いずれの探査手法も構造物による何らかの影響を受けるので、その構造物の影響を受けない程度離れることが必要である。また、いずれの探査手法も、測定が可能な程度に下草刈りなどの伐採を行なう必要がある。

### （３）適用の可能性について

このように想定される農薬埋設状況、地表状況はともに様々な状況が考えられ、種々の状況に対する物理探査手法の適用性について、表 3.3.1、表 3.3.2 に整理して示す。ここでは、埋設の上面深度としては 1 ~ 2 m とした。

表では、理論的に適用が困難と考えられる場合は×、ある条件の下で適用可能と考えられる場合は○、適用可能と考えられる場合は△とした。ただし、○の場合もどのような条件でも適用可能と言うことは少なく、△に比べると適用条件が緩い場合と言うことができる。

各物理探査手法について、表にしたがって説明を加える。

#### 地中レーダ探査：

- ・ 地中レーダ探査では、地盤の電磁気特性の違いにより電磁波の反射が生じ、それを利用して探査を行なうので、原理的には全ての埋設状況に対し適用可能と考えられる。特にビニールなどで覆われている場合、金属容器の場合、鉄筋コンクリートや金属製蓋の場合に、強い反射が得られるので適用性が高い。農薬が収められていた袋や箱が破損して、農薬が周囲の粘性土と混在しているなど周囲とのコントラストが小さい場合には、適用が難しいと考えられる。
- ・ 地表の状況については、地表でアンテナを測線に沿って移動するので、アンテナの幅以上のスペースで測線が確保できれば測定可能である。ただし、植生や塀などが障害物となり測定できない場合が考えられる。
- ・ また、地表の凹凸が測定記録の品質に影響を及ぼす場合があるので、アンテナが地表にほぼ密着した状態で測定が行えるような地表状況が必要である。
- ・ 地中レーダ探査では金属体の影響を強く受けるので、地表面が鉄筋コンクリートで覆われている場合には、測定記録において鉄筋の影響を受けずにその下を探査できる程度の鉄筋間隔が必要となる。一般には、鉄筋コンクリートでは鉄筋が密に配置されていることが多いので、このような場合には適用が難しいことが多い。

#### 電磁探査（時間領域 EM、周波数領域 EM）：

- ・埋設状況については、電磁気特性（特に比抵抗）の違いを捕えるものであるため、周辺地盤と埋設農薬部分との比抵抗のコントラストが非常に大きい場合には、探査可能と考えられる。金属体に非常に強く反応するので、金属容器、鉄筋コンクリート、金属製蓋の場合には適用性が高い。
- ・時間領域電磁探査（TDEM）では、金属埋設物探査専用の探査装置があり、この装置の金属埋設物に対する適用性は非常に高い。
- ・地表状況については、地表で測定器を測線に沿って移動するので、測定器の幅以上のスペースで測線が確保できることが必要である。測定器のセンサー部分は地表から浮いた状態であるため、測定者が普通に歩行できる程度の地表の凹凸であれば測定可能である。
- ・浅部の金属体の影響を強く受けるので、地表面が鉄筋コンクリートで覆われている場合や測定範囲の近傍に大型の金属構造物が存在する場合には、適用困難となる。

#### 磁気探査：

- ・地球磁場の大小を捕えて地下の状況を探査する手法であるが、埋設物探査の場合には、地下に埋設されている磁性金属体（磁石に付く金属）が探査対象となる。一般には、周辺地盤と埋設農薬部分との磁性のコントラストは小さいため、金属体以外の埋設物に対する適用は困難と考えられる。ただし、ごく稀に火山灰が堆積している場合には、埋設部分が掘削などにより乱されることにより周辺と磁性が異なるため、探査可能な場合もある。
- ・地表状況については、磁気探査では地表で測定器を測線に沿って移動するが、測定器の幅は小さなものであるため、測定者が普通に歩いて通れる程度の幅があれば探査可能である。
- ・浅部の金属体の影響を強く受けるので、電磁探査と同様、地表面が鉄筋コンクリートで覆われている場合や測定範囲の近傍に大型の金属構造物が存在する場合には、適用困難となる。

#### 電気探査（比抵抗法）：

- ・地盤の比抵抗の違いを捕えるものであるため、周辺地盤と埋設農薬部分との比抵抗のコントラストが非常に大きく、埋設範囲が大きな場合には、探査可能と考えられる。また、万が一、農薬の袋や箱が破損して農薬が土壌と混在するような場合でも、周辺地盤に対して比抵抗の大きな違いがあれば探査可能となる。
- ・地表状況については、地表に測線を設定して電極を地中に打設して測定を行なうので、地表に土壌が露出していれば測定可能である。地表が舗装などで覆われている場合には、舗装部を削孔して電極を打設することにより測定可能となる。

#### 反射法地震探査：

- ・地盤の密度や弾性波速度の異なる境界面で生じる反射波を利用して地下を探査するものであるため、周辺地盤と埋設農薬部分との密度または弾性波速度のコントラストが非常に大きく、埋設範囲が大きな場合には、探査可能と考えられる。

- ・地表状況については、地表に測線を設定して測定を行なうが、地表の露出の有無によらず測定可能である。ただし、振源（板、パイプレータ）の設置が可能な幅が必要である。浅部探査では、測点間隔が非常に細くなる（0.5m 間隔など）ので、作業性に難点があり現実的ではない。

#### 表面波探査：

- ・表面波を利用して、地盤の速度構造を求めて地下を探査するものである。周辺地盤と埋設農薬部分との密度または弾性波速度のコントラストが非常に大きく、埋設範囲が大きな場合には、探査可能と考えられる。
- ・地表の状況については、地表に測線を設定して測定を行なうが、地表の露出の有無によらず測定可能である。通常は人力による地表打撃で起振するので、測線沿いに起振作業が可能なスペースが必要である。

#### 重力探査：

- ・地盤の密度構造により生じる重力分布を把握して、地下を探査するものである。周辺地盤と埋設農薬部分との密度のコントラストが非常に大きく、埋設範囲が大きな場合には、探査可能と考えられる。
- ・地表の状況については、各測点において重力計を地表に置いて測定を行なうので、測定可能なスペース（1 m 四方以下）があれば測定可能である。ただし、浅部探査では測点間隔を小さくする必要があり（1-2m 間隔など）、また、各測点のレベル測量を行なう必要がある。作業性は余り高くない。

以上に述べたように、埋設農薬の調査に対し最も適用性の高い物理探査手法は、埋設物の材質によらず探査が可能と言う点および作業性の点から、地中レーダ探査と考えられる。埋設物に金属体を用いている場合には、電磁探査および磁気探査も適用性が高い。

すなわち、

『埋設農薬の調査に対し最も適用性の高い物理探査手法は地中レーダ探査であり、埋設において金属体を用いている場合には、地中レーダ探査に加えて電磁探査および磁気探査も適用性が高い』

とすることができる。

なお、ここで見てきた手法の他にリモートセンシングを含む空中探査や赤外線熱映像を利用した探査などがあるが、空中探査は埋設農薬の調査に適用するためには測定方法についてかなりの開発が必要であること（非常に低空において、小型で安全かつ安定した測定が可能なシステムを開発することが必要）、赤外線熱映像については、埋設物探査に対する適用事例が非常に少なく研究開発が必要と考えられることから、これらの探査手法については検討から除外した。



表 3.3.1 埋設状況に対する各種物理探査の適用性

	(乳剤等の場合で)粉剤、粘土粉、消石灰に吸収埋設	(粉剤が)消石灰で包まれている	ビニール袋入り	石油缶などの金属容器	大規模埋設	
					コンクリートのみ(無筋)	鉄筋コンクリートまたは金属製蓋
地中レーダ探査						
電磁探査(時間領域、周波数領域)						
磁気探査	×	×	×	(磁性金属)	×	(磁性金属)
電気探査(比抵抗法)						
反射法地震探査						
表面波探査						
重力探査						

- : 適用可能と考えられる場合
- : ある条件の下で適用可能と考えられる場合
- ×: 理論的に適用が困難と考えられる場合

表 3.3.2 地表の状況に対する各種物理探査の適用性

	更地	田畑、果樹園など	山林	管理用地内の道路などの舗装下			構造物下	構造物近傍	作業性
				アスファルト	無筋コンクリート	鉄筋コンクリート			
地中レーダ探査							×		優
電磁探査(時間領域、周波数領域)						×	×		優
磁気探査						×	×		優
電気探査(比抵抗法)							×		良
反射法地震探査							×		劣
表面波探査							×		良
重力探査							×		良または劣

○：適用可能と考えられる場合

△：ある条件の下で適用可能と考えられる場合

×：理論的に適用が困難と考えられる場合

作業性については、相対的に判断した。

#### (4) 埋設物の材質と適用可能な探査手法について

これまでに、埋設農薬の調査に対する物理探査の適用性を検討する上で必要な事項として『埋設状況』と『地表の状況』を挙げ、これらに対する各物理探査手法の適用性を検討整理した。物理探査の適用性を検討する場合、これらに加えて、埋設物の材質と探査手法の特性に着目することが重要である。前述した内容と重複する部分もあるが、埋設物の材質から見た適用可能な物理探査手法についてまとめる。

埋設農薬調査において、埋設物を探査対象とする手法として適用性の高いのは、地中レーダ探査、電磁探査、磁気探査である。これらの各手法は、埋設物の材質により適用性は異なったものとなる。すなわち、

『埋設農薬の調査に対し最も適用性の高い物理探査手法は地中レーダ探査であり、埋設において金属体を用いている場合には、地中レーダ探査に加えて電磁探査および磁気探査も適用性が高い』

と言うことができる。また、農薬の袋や箱が破損して農薬が土壌と混在する場合には探査は難しいが、周辺との電気的なコントラストが非常に大きい場合には、電気探査が有効と考えられる。

一方、埋設物の材質としては、表 3.3.1 に示した埋設状況を材質の点で整理すると、

- ・土壌に近い状態：粉剤、消石灰などに吸収埋設
- ・非金属の場合：ビニル袋入り、無筋コンクリート、その他にガラス、段ボール箱、木箱など
- ・金属の場合：金属容器、鉄筋コンクリート容器など
- ・材質が不明の場合

があり、おのおのが混在している場合もある。埋設物の材質とそれに適用可能な探査手法を整理すると次のようになる。

- ・土壌に近い状態の場合： 地中レーダ探査、電気探査
- ・材質が不明の場合、または非金属の場合： 地中レーダ探査
- ・金属の場合： 地中レーダ探査に加えて、電磁探査、磁気探査（ただし磁気探査は磁性金属に限る）
- ・非金属と金属が混在する場合： 地中レーダ探査と、電磁探査または磁気探査の併用

#### (5) 探査深度について

埋設農薬の調査に適した探査手法を検討する際には、ある探査手法の探査可能な深度が、想定される埋設農薬の深度をカバーしていることが必要条件である。各物理探査手法の探査深度は、調査地点の地質状況(土質種類や特性など) 対象とする埋設物の大きさ、材質などにより変わる。ここでは、埋設物の分布調査に適用性の高い物理探査手法(地中レーダ探査、電磁探査、磁気探査)について、探査深度の目安について記す。

- ・地中レーダ探査：

通常の土質地盤では、探査深度は 2 m 程度である。地下水位が低い場合には、砂質土や火山灰ではこれより大きな探査深度となる。粘性土のように比抵抗の低い地盤では探査

深度が小さくなる。他の探査手法に比べて地下水の影響を受けやすく、地下水位が高い場合には、地下水位以深の探査は困難となる場合が多い。また、沿岸部の埋立地などのように地下水に塩水が浸入して地盤の比抵抗が非常に低い場合には、探査深度は非常に小さくなるので注意が必要である。

- ・電磁探査（金属埋設物探査装置の場合）：

探査深度は、ドラム缶程度のもので約 2 m、石油缶（一斗缶）程度のもので約 1 mである。対象とする金属は、導電性を有するものであれば何でも探査可能である。

- ・磁気探査：

対象とする埋設物の大きさによるが、ドラム缶程度のもので探査深度は約 2 m、石油缶（一斗缶）程度のもので約 1 mである。ただし、金属は鉄などの磁性金属であることが必要である。