

## 信号処理によるコンクリート内埋設物の探査精度向上に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岡部 克也

キーワード： 電磁波レーダ法  
地中レーダ  
開口合成法  
鉄筋コンクリート  
埋設物探査  
薄鋼電線管  
非破壊検査

Key Words : Electromagnetic radar  
Ground penetrating radar  
Aperture synthesis  
Reinforced concrete  
Buried object detection  
Thin steel conduit  
Non-destructive inspection

### Study on accuracy improvement to buried object detection by signal processing

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department  
Katsuya Okabe

### Abstract

There are many buried objects such as conduits inside the walls and the floors of the reinforced concrete structures used in nuclear power plant buildings, some of which are related to the reliability of the reactor. It is necessary to prevent these buried objects from being damaged by drilling work in equipment work or repair work. The electromagnetic wave radar method is a method for detecting an embedded object by detecting a reflection echo of a pulsed electromagnetic wave from the surface of the embedded object. In recent years, with the improvement of the performance of small radar exploration equipment for concrete exploration, it has become widely used. On the other hand, detection may be difficult depending on the arrangement of the buried object, and in order to handle the exploration device appropriately, sufficient understanding about the propagation and reflection characteristics of the radar is often required. Some exploration devices are equipped with a function to automatically identify buried objects. For buried objects with irregularly arranged conduits, etc., the above-mentioned functions are not effective for the skilled person's discriminating ability, and in the actual situation, there is great expectation for exploration methods that do not require special knowledge and skills.

As a solution to this problem, we examined a method for improving the accuracy of buried object detection by performing appropriate signal processing on the received waveform.

## 1. はじめに

原子力発電所建屋等に用いられる鉄筋コンクリート構造物の壁や床等の内部には、電線管等の埋設物が多数存在し、中には原子炉の信頼性に関わるような重要なものもある。これらの埋設物が設備工事や改修工事の際に穿孔作業等によって損傷するのを防止する必要があり、そのためには事前の埋設物探査の実施が重要になる。電磁波レーダ法は、パルス電磁波の埋設物表面からの反射エコーを検出することにより埋設物を探知する方法であり、近年、コンクリート探査向けの小型レーダ探査装置の性能向上とともに広く使われるようになった。一方で、埋設物の配置によっては探査が困難になる場合もあり、適切に探査装置を扱うには、レーダの伝搬・反射特性等に関する十分な理解が必要になることも多い。埋設物を自動判別する機能を備えた探査装置もあるが、電線管等が不規則に並んだ埋設物に対しては、熟練者の判別能力に及ばないのが実情であるため、現場では、特別な知識や技能を必要としない探査方法への期待が大きい。

この問題に対する解決手段として、受信波形に適切な信号処理を行うことにより、電磁波レーダ法による埋設物の探査精度を向上させる方法について検討した。

## 2. 電磁波レーダ法の概要

電磁波レーダ法の基本的な考え方を図1に示す。

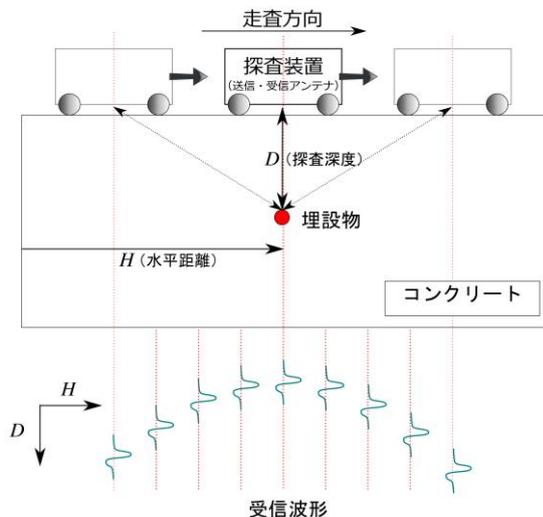


図1 電磁波レーダ法の概要

電磁波レーダ法では、一般に、電磁波の送受信アンテナとエンコーダ付きの車輪、ディスプレイを備えた探査装置を使用する(図2)。電磁波(周波数800~2,600MHzのパルス波)をコンクリートに向かって送信すると、コンクリート内に埋設物があれば、その表面からの反射エコーが受信される。埋設物の探査深度は電磁波の往復伝搬時間から判定することができ、埋設物までの水平距離は、探査装置を前方に走査することにより、車輪と連動するエンコーダを使って読み取ることができる。探査データは、通常、水平距離(エンコーダ値)を行、探査深度(往復伝搬時間)を列とする行列データ(いわゆるBスキャン画像)として記録・表示され、埋設物がアンテナの指向角の範囲内であれば、埋設物からの信号を受信することができる。電磁波の往復伝搬時間は埋設物とアンテナが離れるほど長くなるため、各地点で得られる埋設物の信号は、アンテナが埋設物の真上にある時を頂点として、山型の双曲線を描く。



図2 電磁波レーダ探査装置の例

## 3. 電磁波レーダ法の問題

コンクリート中を伝搬する電磁波は、コンクリート中の水分や空隙などによる吸収・散乱によって、空気中と比べて大きく減衰するため、電磁波レーダ法の探査可能な深度には限界が存在する。最新のコンクリート用電磁波レーダ探査装置の多くは、仕様上最大深度30~40cmまで探査可能とされるが、これは電磁波を妨げるものが存在しないような理想的な場合に限られ、埋設物の配置によっては、探査可能深度でも探査が困難であることが多い。図3①②に、特に探査が困難になる埋設物の配置の代表例を示す。

- ① 埋設物直上の鉄筋によって、電磁波がほとんど遮られる。例えば、鉄筋に固定された埋設電線管に多く見られる。
- ② 2本の鉄筋信号が交差個所で干渉し、信号を強め合うことにより、埋設物が存在するかのような擬似信号を生じることがある。また同個所に埋設物があると、見落とされやすい。

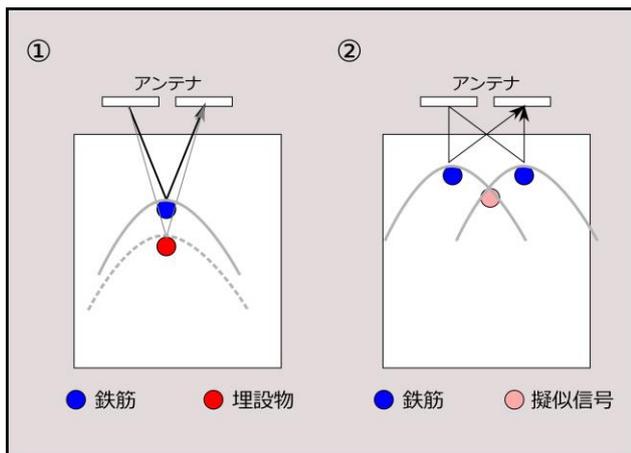


図3 探知困難な埋設物配置の例

#### 4. 開口合成法による埋設物探査精度向上方法

開口合成法は、電磁波や超音波探査等において、複数の異なる位置の受信信号を合成することにより、位置分解能を向上させる信号処理技術である。2019年にブラックホールの直接観測に成功したことで話題になったイベントホライズンテレスコープも、この応用例の一つである。また、他の例としては、航空機や人工衛星などに搭載される移動式レーダにより連続的に受信された信号を合成する合成開口レーダがある。

電磁波レーダ探査装置も移動式レーダの一種と見なし、開口合成法を適用することが可能である。図4は、この開口合成法の適用手順を示したものである。まず、信号処理の対象となる波形の水平位置をA地点とし、ここに埋設物がある場合を考える。このとき、埋設物信号はA地点を中心として山型の双曲線を描く。次に、全ての地点で信号深度が揃うような深度方向の座標変換を探査データに適用する(図4②)。これは、A地点と信号の相対的位置関係で決まる幾何学的変換で、以下の式で表される。

$$y' = F(\delta, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \sqrt{\left\{ y^2 + \left( \delta + \frac{L}{2} \right)^2 \right\} \left\{ y^2 + \left( \delta - \frac{L}{2} \right)^2 \right\}} + y^2 + \delta^2 - \left( \frac{L}{2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

( $y'$ ,  $y$ : 座標変換前と後の深度座標、 $\delta$ : A地点と信号の水平距離、 $L$ : 送信・受信アンテナの間隔)

最後に、変換した信号をA地点の信号に加算する。同じ計算を各走査位置で行うと、埋設物の位置にピークがあるような波形分布が得られると考えられる(図4③)。

最終的に、この信号処理により水平座標  $x$ 、深度座標  $y$  の探査データ  $P(x, y)$  は以下の式に従って  $Q(x, y)$  に変換される。

$$Q(x, y) = \sum_{x'=x-W}^{x+W} P(x', F(x'-x, y)) w(x'-x) \quad (2)$$

( $w$ : 区間  $[-W, W]$  を台に持つ窓関数)

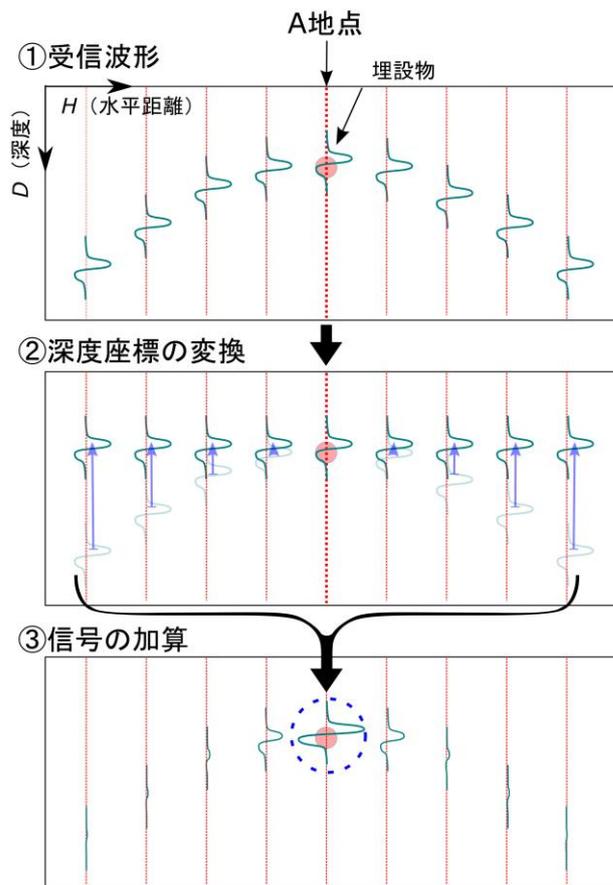


図4 開口合成法の適用手順

(1)式の導出においては、アンテナとコンクリート表面にほとんど隙間が無いと仮定している。しかし、実際の探査装置には、コンクリート表面を滑らかに走査する必要があるため、探査装置底面とコンクリート表面に数 mm 程度の隙間(空気層)が存在する。この間隔は探査深度と比較すると狭いが、屈折角が大きくなるため、電磁波の伝搬経路に与える影響は小さくない(図5)。屈折を考慮した電磁波の往復伝搬時間を初等関数で表すことはできないが、フェルマーの原理から、電磁波が最短で往復可能な伝搬経路を通るという特性を利用すると、容易に数値計算に有利な最適化問題に落とし込むことが可能である。ただし、式(2)の計算は変数 $x, y, x'$ についての3重ループとなるため、関数 $F(\delta, y)$ の計算結果をプールする等、計算コストを低減する対策が必要となる。

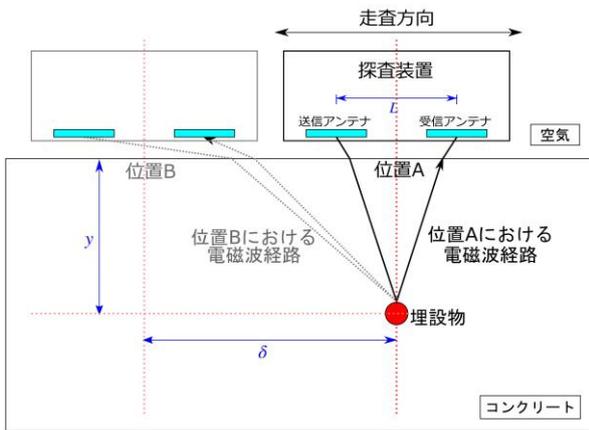


図5 屈折を考慮した電磁波の伝搬経路

## 5. 信号処理の適用例と探査精度の評価

本稿で扱う信号処理技術の効果を、幾つかの実例を通して紹介する。

図6は実際に信号処理技術を現場で適用したときの様子である。信号処理はノートPC上の専用ソフトウェアで行う。探査データは探査装置から取り込む必要があるが、更新分のみ一括で半自動的に取り込む機能を備えており、現場作業の負担にならないように工夫している。

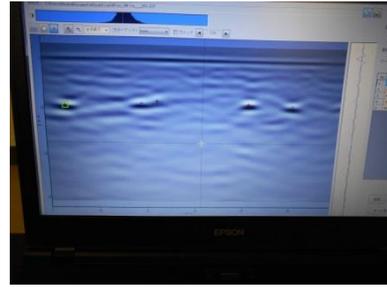


図6 信号処理技術適用時の様子

コンクリート試験体(図7)を矢印の方向に探査した結果を図8に示す。信号処理の効果を分かり易くするため、以下の信号処理ステップ毎の結果を示している。

- ① 深度方向に対する信号減衰に対する補正。
- ② ①に開口合成法を適用。
- ③ ②に屈折効果の補正を追加。
- ④ ③に加えて、埋設物信号を強調するためのコントラスト調整を実施。

開口合成法の効果として、上段の2本の鉄筋と電線管からの信号の交差部分の擬似信号が除かれていることが確認できる。屈折効果の補正は、作用は小さいものの、相対的に探査面に近い程効果が大きいことが確認できる。なお、左右の鉄筋は外径が異なるにもかかわらず、信号形状にほとんど違いが認められないことから、この方法により、数 cm オーダーの埋設物の外形を判断するのは困難であるといえる。

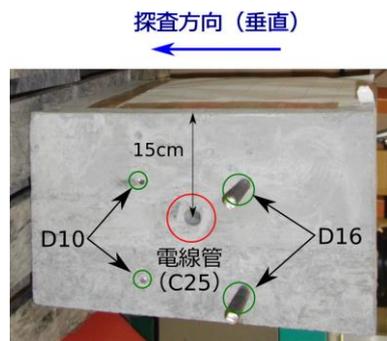


図7 コンクリート試験体

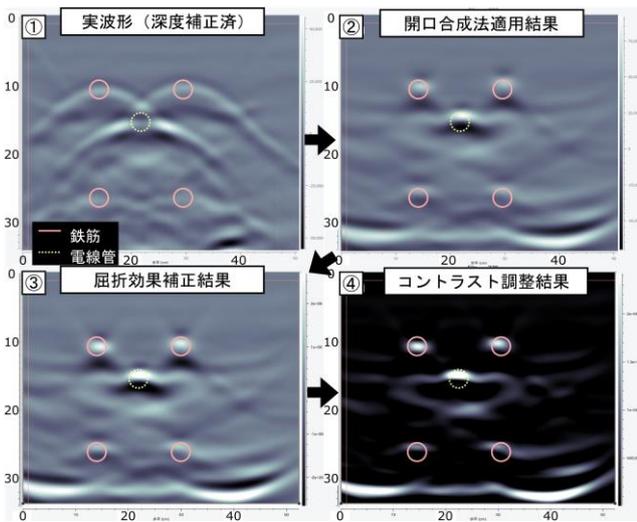


図8 コンクリート試験体への適用結果

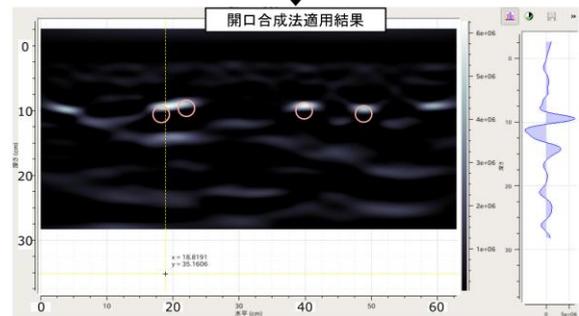
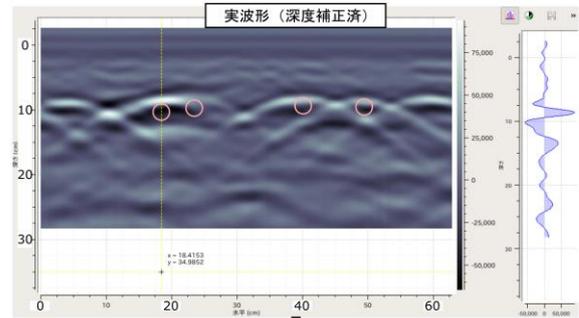
図9はコンクリート建築物の壁面の探査結果である。例1、例2は、同じ鉄筋を1m程離れた個所で探査を行っている。深度10cmのところに重ね継手と思われる2本1組の鉄筋が2組確認できるが、例1と例2では間隔に若干の違いがあるため、2本の鉄筋がわずかに傾いていることが分かる。例1の水平距離20cm付近にある鉄筋2本は特に間隔が狭く、実波形ではほぼ重なっている。一方、開口合成法適用結果では、信号に重なりはあるものの、それぞれの信号のピークを判別することは可能であり、それらが3cm程度離れていることが確認できる。このことから、信号処理の効果として、2本の鉄筋の水平方向に対する位置分解能が向上していることが分かる。

## 6. おわりに

本稿では、鉄筋コンクリート内の埋設物を電磁波レーダ法により高精度に特定する技術に関する研究成果を紹介した。この技術は、原子力発電所の改修工事で、はつり作業を実施する際に、電線管等の重要構造物が損傷するトラブル等の未然防止につながる事が期待できる。

この研究は、鉄筋や金属電線管等の金属埋設物を主な探査対象としていたが、現場では合成樹脂電線管の探査に対する需要も高いと考えられる。今後、合成樹脂電線管の探査精度の向上や、合成樹脂電線管と金属電線管や鉄筋との判別方法等についても検討を進める予定である。

### 例1



### 例2

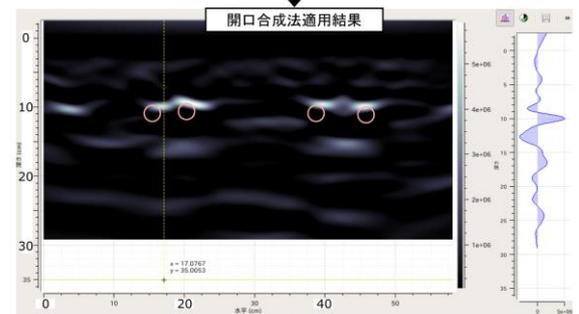
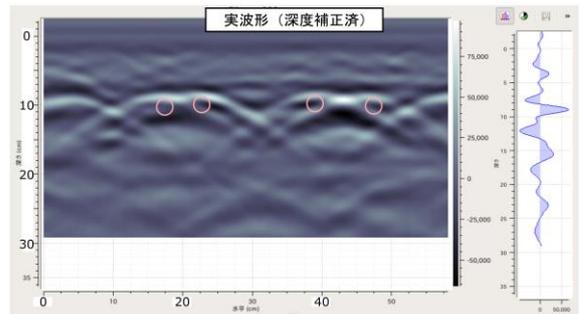


図9 コンクリート壁面への適用結果

### [謝辞]

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。