

# GPRにおけるデータ処理法

西山 英一郎<sup>1)</sup>・鈴木 敬一<sup>1)</sup>・笠井 弘幸<sup>1)</sup>

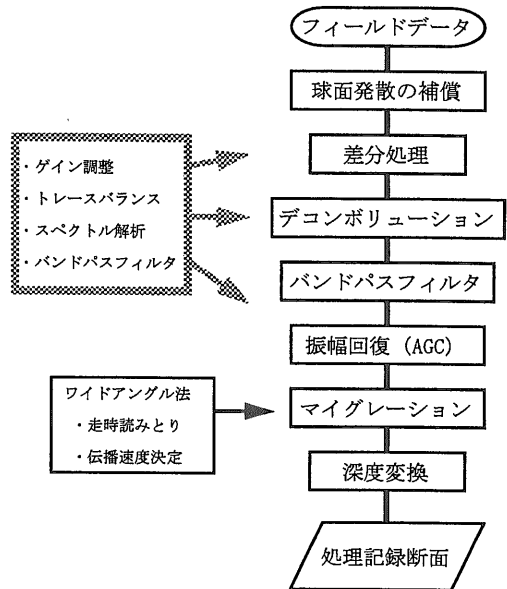
## 1. はじめに

GPR (ground penetrating radar ; 地中レーダ) は、電磁波の波動としての性質を利用して、地下構造のイメージングを行う物理探査装置である。本文では、表題にあるように地中レーダを用いた探査手法や技術体系全体を指してGPRあるいは地中レーダと呼ぶ場合もある。

GPR探査では一対の送受信器を用いる。送信器から地下に向けて発せられた電磁波は、電磁気的な不連続面で反射・透過および屈折を繰り返し、波動エネルギーの一部が受信器に到達する。地質学的な不連続面、たとえば層界面や断層面、クラック、岩種の異なる境界面など、また土木的な構造物や建造物、空洞などの存在するところでは、電磁気学的な物性値が急変する場合が多い。観測される反射波は、地下の地質・土木的な何らかの情報をもたらしていると考えられる。GPR探査は、電磁波がとらえた地下の構造から、地質・土木的な構造を推定するための反射法探査である。

データ処理に関しては、GPRは先達の反射法地震探査に完全に負っている。得られるデータは、地震探査の記録断面と見かけ上何ら変わりはない。GPRにおいては、探査深度が数メートルから数十メートル、分解能が数十センチメートルから1メートル程度、そして時間軸の単位がナノセカンドである。

本文では、反射法地震探査のデータ処理法一般を参照し、GPRにおけるデータ処理法を実例とともに解説する。



第1図 GPR反射法データ処理の手順。

## 2. 反射法データ処理の概要

第1図に筆者らが行っているデータ処理の大きな流れを示す。GPR反射法のデータ処理は、ほぼ全てが反射法地震探査に取材したものである。

データ処理の体系は、デコンボリューション (deconvolution) とマイグレーション (migration) を中心に構成されている。デコンボリューションは、基本ウェーブレットの影響を取り除き、記録断面の分解能を向上させる処理である。マイグレーションは、記録断面上の回折波を除去し、傾斜した反射波の列を地下の真の位置に戻す操作である。

二つの主要なデータ処理の効果を向上させるため、必要に応じて付随的なデータ処理が行われる。

1) 川崎地質株式会社 環境防災事業部：  
〒108-8337 東京都港区三田 2-11-15

キーワード：反射法、反射波、回折波、フィルタ、デコンボリューション、マイグレーション、連続波レーダ、反射法地震探査

デコンボリューションに先立ち、深部の振幅を十分回復させるために、球面発散効果を補償する処理と差分処理が行われる。地中に送信された電磁波は、球面状に広がって伝播するため伝播距離とともにエネルギーの密度が減少する。これを球面発散効果という。ほかにも送信信号の振幅を減衰させる要因は数多くある。データ処理の最初の段階で、振幅の減衰を大まかに補正するものが球面発散の補償である。差分処理は、卓越する直達波を除去し微弱な信号を抽出するものである。

デコンボリューションは記録の周波数帯域を広め、もともと存在しない高周波の成分を生成する。そのため、デコンボリューションの後にバンドパスフィルターを適用する。マイグレーションを行って最終断面を得る前に、振幅回復処理を行う。これは、記録断面の浅部から深部にいたるまで、また一つの反射波記録が同程度の平均振幅を示すように振幅の調整を行うものである。

深度によって有為な情報をもたらす周波数成分が異なる場合は、スペクトル解析を行って深度ごとに適当な帯域のバンドパスフィルターを適用する。記録断面の表示や出力を目的として、振幅調整を施す場合もある。振幅の補正に関する処理、スペクトル解析やバンドパスフィルターはデータ処理のいろいろな局面で用いられる。

反射法地震探査では、デコンボリューションおよびマイグレーションとともに、CMP重合を中心とするものが主要なデータ処理の一つである。CMPはcommon midpoint（共通の midpoint）を意味する。CMP重合に関連する処理は、地下のある反射点を共有し波線を異にする反射波記録のグループ

(CMPギャザー)に対して行われる。これらのデータはマルチチャンネル計測により得られるものである。CMP重合の過程で、記録のS/Nの向上と多重反射の抑制が達成され、地下の地震波速度構造が決定される。CMPギャザーでは時間軸と空間軸とを同時に扱うことができるため、適用可能なデータ処理の範囲が飛躍的に増大する。

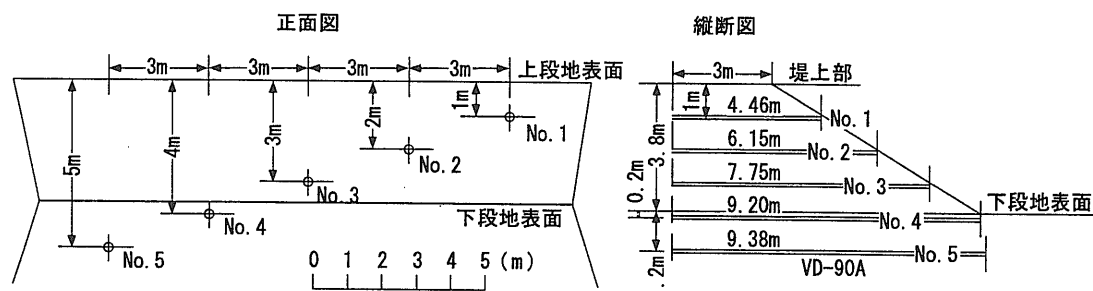
GPR探査では、マルチチャンネルでの計測が実用化されていない。CMP重合関連のデータ処理は今後の課題である。地下の電磁波伝播速度の情報は、ワイドアングル法で得られる。周辺の大局的な値が得られるのみであるが、この値はマイグレーションおよび地形補正、深度変換に用いられる。ワイドアングル法については、本特集号の鈴木他に概略の説明がある。

### 3. データ処理各論

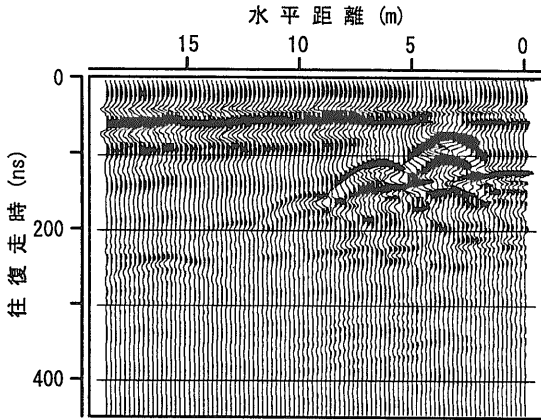
ここでは、GPR探査の代表的なデータ処理について、関連する事項を含めて個別に説明する。個々の事項を記述する際、必要に応じてデータ処理の施された記録断面を示す。用いたデータセットは財団法人電力中央研究所の赤城試験センターで収録されたものである(鈴木他, 1997)。

#### 3.1 連続波レーダ・データセット

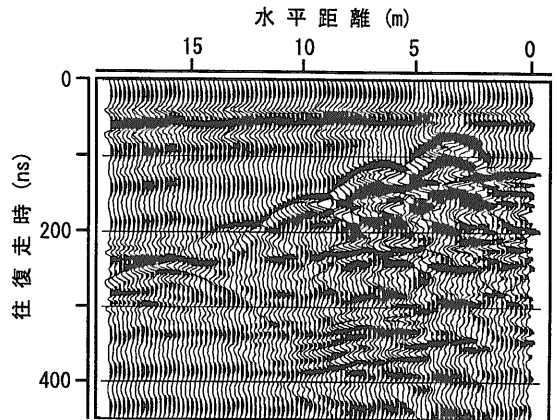
赤城試験センターの一画に地中に鋼管を埋設した場所がある(第2図)。周辺地質はおもに関東ロームである。第2図の縦断面図にある通り、斜面正面から奥に向かって深度方向に1m、水平方向に3mおきに直径10cmの鋼管が埋設されている。計測



第2図 連続波レーダ探査実験サイトの見取り図。5本の鋼管が水平に埋設されている。計測は、上段地表面上を鋼管の伸びの方向に対して直交する方向に行った。測線全長は18.4m、測点間隔は0.2mである。No.1の鋼管直上は測線の3.4m地点に相当する。



第3図 連続波レーダのフィールド計測記録断面。すべての鋼管からの回折波がとらえられている。深度120-150nsおよび200-250ns付近に地層境界に相当すると考えられる反射波の列が観察される。



第4図 フィールドデータに球面発散の補償を行った記録断面。第3図で確認されるイベントは強調され、深度300-400nsに明瞭な反射波が確認される。

は、上段地表面上をNo.1からNo.5の鋼管に向かう方向に20cm間隔で行った。測線全長は18.4m、トレース数は93である。計測周波数帯域は20～160MHzである。この間を0.35MHzごとに合計401の異なる周波数の信号を用いている。計測により得られたデータを第3図に示す。

### 3.2 球面発散効果の補償

送信器を發した電磁波の単位面積あたりの波動エネルギーは、球面発散効果のために伝播距離とともに減少する。球の表面積は半径の2乗に比例するから、送信点からの距離が $n$ 倍になると、エネルギー密度は $1/n^2$ に減少し振幅は $1/n$ になる。地中を伝播することに伴う振幅の減少は、他のいろいろな要因のためにさらに大きなものとなるが、それらを正確に把握することは難しい。

本格的なデータ処理に先立ち、時間軸の増加する方向へ、振幅の減少を補正する重み付けを行う。すべての測定記録に対して同一の処理を行う。球面発散効果を基本とし、適当な係数の指数関数を加味したものを重み関数とする。ある深度を基準として、伝播距離に比例した量が増幅度の基本となる。このとき、地下のおおよその電磁波伝播速度を見積もる必要がある。第4図に、フィールド記録に対して本処理を施した記録断面を示す。深度100nsを基準とし、一様の勾配で深度450nsでの増幅度が8.4となる重み付けがなされている。

### 3.3 差分処理

記録断面中の走時の早いある時刻に、ほぼ同一の特徴を持つ信号の列が観測されることがある。送信器を發した信号が、空中および地表を伝播して直接受信器にとらえられたものである。これらを直達波と呼ぶ。空中および地表を伝播する電磁波の速度はそれぞれ異なるが、送受信器間隔は数mと非常に短いため、実質的な走時差が生じず一連の波として観測される。送受信器が隣接して配置された一体型のシステムでは、信号を發したと同時に大振幅の信号が収録される。

直達波の振幅が地下の反射波の振幅に比べて格段に大きいと、有用な情報が埋もれてしまう。その場合は、記録断面全体から標準となる記録を生成し、各測定点の記録からこの標準記録を差し引く処理を行う。これを差分処理あるいは平均波形除去処理と呼ぶ。記録断面の領域により、平均的な記録が異なると判断される場合は、それぞれの領域ごとに平均波形を算出して差分処理を行う。

差分処理は簡便な操作で微弱な信号を抽出することができるが、実施に際しては以下の点に注意を要する。第一に、地表に対して平行に並ぶ信号が不明瞭になる場合があることである。第二に、差分処理は振幅値の単純な引き算であるため、周波数成分が本来のものと変わってしまうことである。以上の点を考慮して、なお有効な信号の抽出に有効であると判断される場合に本処理を適用する。

第5図に差分処理の施された記録断面を示す。

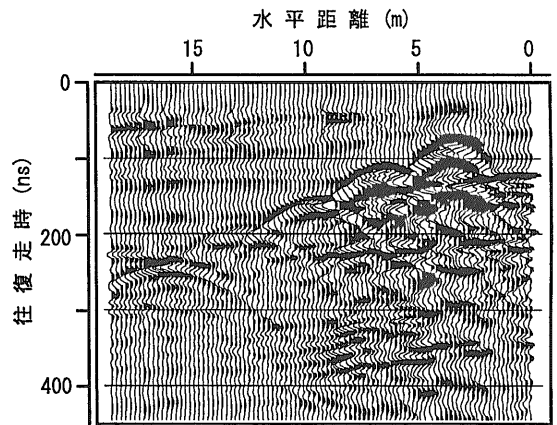
### 3.4 周波数フィルタ

周波数フィルタの概念は、波動のデータ解析を考える場合に最も基本的なものである。任意の波は、周波数の異なる複数の単振動の重ね合わせで合成される。波形や振幅の違いは、各単振動成分の振幅と位相の違いとしてあらわれる。各成分の振幅と位相を、周波数に対してプロットしたものをそれぞれ振幅スペクトル、位相スペクトルと呼ぶ。ある波について、各時刻の振幅値を時間軸に対してプロットしたものを時間領域における表現といい、振幅および位相スペクトルを示す場合を周波数領域における表現という。

時間領域の波形から、振幅スペクトルと位相スペクトルを求めることを周波数解析あるいはスペクトル解析という。時間領域および周波数領域における表現は全く等価なもので、両者の橋渡しはフーリエ変換が行う。計算機を用いた数値計算は、高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform 略してFFT) のアルゴリズムを用いてきわめて効率的に実行される。

周波数フィルタは、時間領域の波形をフーリエ変換し、周波数領域において興味のある成分を残して時間領域の波形に戻すというものである。周波数領域において、振幅スペクトルには適当な重み付けを行い位相スペクトルには何も手を加えない。重み関数は、基本的には通過帯域で1、遮断帯域で0の値を持つものである。遮断する領域の振幅を唐突にゼロとしてしまうと、時間領域の波形にゆがみが生じる。これをさけるために、通過帯域の上限および下限から振幅を完全にゼロとする周波数に至る領域で、重み関数に勾配を設ける必要がある。また、通過帯域の幅の違いや通過帯域が低周波側にあるのか高周波側にあるのかにより、勾配の与え方に違いがあるので注意を要する。

周波数フィルタの設計にあたり、波動の分解能向上には高周波成分だけでなく低周波成分も寄与すること、通過帯域の上限と下限との比の値をある値以上にすることが必要であることなどに注意しなければならない。



第5図 球面発散の補償を行った記録に差分処理を行った記録断面。基本的には第4図の断面と同様な特徴を持つ。直達波が抑制され、浅部の反射面がやや強調された。

### 3.5 デコンボリューション

継続時間をゼロと見なせるパルス状の信号が、波形変化を起こさずに地中を伝播し反射波が生成されたとすると、どんなに近接した反射面も分離することができる。現実の送信信号は、ある継続時間をもつ減衰振動である。また、地中を伝播するうちにいろいろなフィルター作用を受け、徐々にその形を変える。そのため、記録断面において分離可能な反射面の間隔には限界がある。

デコンボリューションは、波形変形を引き起こす要因を取り去り、地下の反射係数の分布をできるだけ高分解能で得ようとする操作である。デコンボリューションを説明するためには、線形フィルタ、相互相関と自己相関およびウィナーの最適化フィルタの概念を導入する必要がある。

#### <線形フィルタ>

フィルタとは、ある入力に対して何らかの出力を応答するものである。フィルタの性質は、単位の大さきのインパルスを入力したときの出力の形で記述される。入力インパルスを  $d(1, 0, 0, \dots)$ 、フィルタによる出力を  $f(f_0, f_1, f_2, \dots)$  とする。  $f$  をフィルタのインパルスレスポンスという。加えて次の3つの約束を与え、これらが成り立つフィルタを線形フィルタと呼ぶ。

- ① 入力インパルスの大きさが  $a$  倍になれば出力も  $a$  倍になる。

② 入力インパルスのパルスの位置がある時間遅れれば出力も同じ時間だけ遅れる。すなわち、 $d(0, \dots, 1, 0, 0, \dots)$ に対する出力は $f(0, \dots, f_0, f_1, f_2, \dots)$ である。

③ 大きさの違うインパルスが時々刻々と入力される場合の最終的な出力は、上の約束に従う一つ一つの出力の重ね合わせとなる。

線形フィルタの概念を用いて、入力と出力との関係が記述できる対象を線形システムという。ある波形を持つ信号が入力されることは、大きさの違うインパルスが次々に入力されることと同等であるから、ある入力に対する線形システムの出力は③の演算で得られる。③は、入力されたインパルスの数だけ、インパルスの大きさとインパルスレスポンスとの積を作り、それぞれを加算する演算である。これをコンボリューション(convolution)という。コンボリューションは畳み込みと訳されるが、積と和をとる演算という意味で積和という語もある。コンボリューションは、積と和で構成されるので線形の演算である。複数のフィルタが作用する場合は、順々に演算を連ねればよい。線形であるから作用させる順番は問われず、交換と結合の法則が成立する。入力 $w(w_0, w_1, w_2, \dots)$ に対するフィルタ $f(f_0, f_1, f_2, \dots)$ の出力はコンボリューションで表される。これを $w*f$ と書く。線形フィルタについては、本特集号の鈴木他に図や式による説明があるので参照していただきたい。

#### <相互相関と自己相関>

時系列 $x(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{2n})$ と $y(y_0, y_1, y_2, \dots, y_{2n})$ について、これらの類似性を論じる場合を考える。表記の便宜上 $x$ と $y$ の長さを $2n+1$ とした。まず、 $x$ と $y$ の同一時刻の値同士で積をつくり、すべての時刻にわたって加算する。これを $z_0$ とすると、

$$z_0 = x_0y_0 + x_1y_1 + x_2y_2 + \dots + x_{2n}y_{2n}$$

である。次に、 $y$ の時刻を1単位時間シフトさせて同様のことを行いその結果を $z_1$ とすると、

$$z_1 = x_0y_1 + x_1y_2 + x_2y_3 + \dots + x_{2n-1}y_{2n}$$

である。加算の数の整合性をとるために、

$$z_1 = x_0y_1 + x_1y_2 + x_2y_3 + \dots + x_{2n-1}y_{2n} + x_{2n}y_0$$

とする場合もある。以下同様にして、相互相関 $z(z_0, z_1, z_2, \dots, z_{2n})$ を定義する。時間シフトの大きさを遅延時間と呼ぶ。 $z$ の値が大きいほど、 $x$ と $y$ と

が類似していると評価することができる。 $z$ の後半部分は、 $x$ を $y$ に対してこれまでとは逆方向にシフトさせたと考えてもよいから、 $z(z_n, z_{n+1}, \dots, z_1, z_0, z_1, \dots, z_n)$ と定義することもできる。

時系列 $x$ について自分自身との相互相関を考えるとき、これを $x$ の自己相関という。自己相関は遅延時間ゼロのとき最大値をとる。自己相関は $x$ の周期性を見る指標である。 $x$ が周期 $T$ を持てば、遅延時間 $T, 2T, 3T, \dots$ で自己相関は極大値をとる。 $x$ が周期性を持たなければ、自己相関は遅延時間ゼロでのみ値を持ち、他ではすべてゼロとなる。自己相関は必然的に偶関数である。

#### <ウィナーの最適化フィルタ>

ウィナー(Wiener)の最適化フィルタあるいはウィナーフィルタとは、ある入力に対して希望する出力を与えるフィルタである。ウィナーは、この理論を立案し確立した人の名である。ウィナーフィルタの理論は、最小2乗法に立脚している。ある入力 $a(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$ に対して、 $b(b_0, b_1, b_2, \dots, b_n)$ を出力したいとする。 $f(f_0, f_1, f_2, \dots, f_m)$ を設計すべきフィルタとする。 $f$ を未知数のままコンボリューションによるフィルター出力 $c(c_0, c_1, c_2, \dots, c_n)$ を作る。 $c$ の各要素は、 $f$ の各要素を未知数とする多項式で表される。そして、当面の出力 $c$ と希望出力 $b$ との対応する要素同士の差の2乗和 $E$ を考えると、

$$E = (c_0 - b_0)^2 + (c_1 - b_1)^2 + \dots + (c_n - b_n)^2$$

である。 $E$ は、設計すべきフィルタ $f$ の各要素の未知数と入力 $a$ 、希望出力 $b$ の各要素を係数にもつ多項式である。ここで、 $E$ をゼロとするように $f$ の各要素を決めればよい。 $E$ がゼロとなるための必要条件は、 $E$ を $f$ の各要素で微分したとき、これらがすべてゼロとなることである。すなわち、 $f$ の未知数の個数からなる連立方程式が得られ、これを解いて目指すフィルタの係数が決定される。連立方程式の最終的な形は、入力の自己相関 $r_i$ と入力と希望出力との相互相関 $c_i$ と未知数 $f_i$ とを用いて次のように表される。

$$r_0f_0 + r_1f_1 + r_2f_2 + \dots + r_mf_m = c_0$$

$$r_1f_0 + r_0f_1 + r_1f_2 + \dots + r_{m-1}f_m = c_1$$

$$r_2f_0 + r_1f_1 + r_0f_2 + \dots + r_{m-2}f_m = c_2$$

$$\dots \quad \dots \quad \dots$$

$$r_mf_0 + r_{m-1}f_1 + r_{m-2}f_2 + \dots + r_0f_m = c_m$$

行列の形で書けば、 $RF = C$  である。主対角成分がすべて同じ値の行列を、テープリッツマトリックス (Toeplitz matrix) という。Rは対称なテープリッツマトリックスである。この形の連立1次方程式は、レビンソン (Levinson) の漸化式を用いてきわめて効率的に解くことができる。

<反射波記録のモデル>

反射法データ処理では、地球を線形システムと考える。入力信号が次々に深部へ達し、それぞれの深度で反射係数に応じた大きさの反射波が、地表に向けて返される。地表の受信器では、これらの信号の重ね合わせを反射波記録として受信する。入力信号を  $w (w_0, w_1, w_2, \dots)$ 、地下の反射係数の時系列を  $e (e_0, e_1, e_2, \dots)$  とすると、受信器にとらえられる反射記録  $x (x_0, x_1, x_2, \dots)$  は、 $x = w * e$  と表すことができる。これが、数値計算を行う場合の反射波記録のモデルである。入力信号  $w$  は、測定機器と地中のいろいろなフィルタ作用が多数組合わせられたものである。これを基本ウェーブレットと呼ぶ。

<デコンボリューションフィルタ>

反射記録のモデルを  $x = w * e$  とする。両辺に基本ウェーブレット  $w$  を単位インパルス  $i (1, 0, 0, \dots)$  に変換するウィナーフィルタ  $f$  を作用させることにより、地下の反射係数の時系列を見いだすことができる。上式の両辺に左側からフィルタ  $f$  を作用させると、 $f * x = f * w * e$  である。仮定により、右辺の  $f * w$  は単位インパルスとなる。単位インパルスと  $e$  とのコンボリューションは  $e$  自身である。したがって、フィルタ  $f$  と観測された反射記録  $x$  とのコンボリューションが、地下の反射係数の時系列を与えることになる。問題は、ウィナーフィルタ  $f$  を設計することが可能かどうかである。基本ウェーブレットの形は未知である。ウィナーフィルタの設計には、入力と希望出力の両方が必要とされる。希望出力は、単位インパルスとはっきりしているが、入力を指定することができない。その意味ではウィナーフィルタの設計は不可能である。

ここで、地下の反射係数時系列  $e$  に周期性がないという仮定を設ける。これは、地下の構造に周期的な繰り返しがないと仮定することである。そし

て、反射波記録のモデル  $x = w * e$  の自己相関を考えると、

$$(x \text{ の自己相関}) = (w \text{ の自己相関}) * (e \text{ の自己相関})$$

の形の式が得られる。  $e$  の非周期性により、  $e$  の自己相関の部分が単位インパルスとなるから、

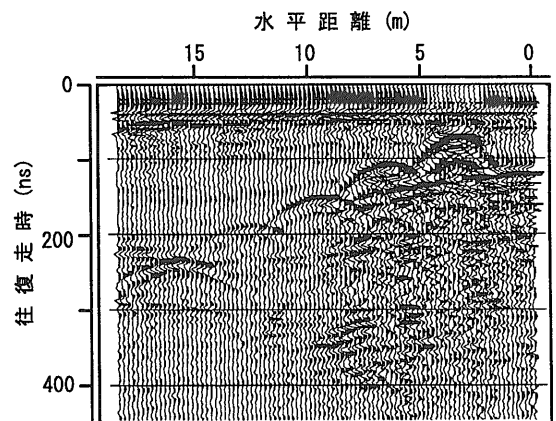
$$(w \text{ の自己相関}) = (x \text{ の自己相関})$$

という結果が得られる。ウィナーフィルタの設計には、入力の自己相関と、入力と希望出力との相互相関が必要である。いま設計を試みているウィナーフィルタの入力は、基本ウェーブレット  $w$  である。  $w$  の自己相関は、反射波記録  $x$  の自己相関で代用できる。希望出力が単位インパルスであるから、入力が何であれ入力と希望出力との相互相関は、単位インパルスに比例するものとなる。したがって、この場合ウィナーフィルタ  $f$  の設計は可能であると結論される。

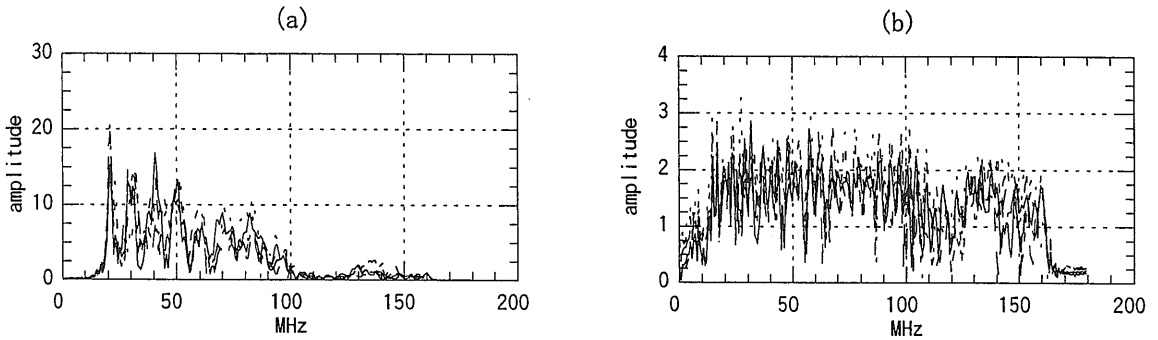
デコンボリューション後の反射波記録の振幅スペクトルは、周波数軸に対してほぼフラットになる。第6図に、デコンボリューション処理を行った記録断面を示す。第7図に、デコンボリューションの前後で、反射波記録の振幅スペクトルが変化する様子を示す。

3.6 マイグレーション

フィールドで得られたデータを図化する場合は、時間軸を紙面の下方にとり、各測定点での記録を



第6図 第4図の記録にデコンボリューション処理を行った記録断面。120-170ns付近のやや傾斜した反射波の列がよく分離されている。微弱な信号であるが、60-70nsおよび80-100ns付近に傾斜した反射波の連なりが確認される。



第7図 デコンボリューション前後での反射波記録の振幅スペクトルの比較。5つの反射波記録（データセットの5～9番目の記録）のスペクトルが重ねて表示されている。(a)は図4の記録断面、(b)は図6の記録断面の反射波記録によるものである。縦軸の絶対値の違いは数値計算上のスケーリングによるものである。デコンボリューション後のスペクトルは周波数帯の全域にわたりほぼ一様な振幅を見せている。

横に並べる。受信器に到達する反射波は、必ずしも鉛直下方から到来したものではない。一般に、記録断面上の反射波の列は、地下の反射面の真の傾斜と位置を表していない。

第8図(a)で、A-B-D-Eは地下の地質境界を示している。この境界面で反射波が発生する。屈曲点BおよびDは、あらゆる方向から到来する信号に対して、同じ方向への反射波を返す回折源としてはたらく。地表のOからXに向けて等間隔で反射法探査を行う。送受信点は同一の位置にあるとする。測定点X1で発せられた信号は球面状に伝播する。X1直下のA-B上の点で反射波が生成されX1の受信器にとらえられる。波動エネルギーの一部は回折源Bに達し、先の反射波に遅れて回折波がX1に到達する。測定点X2では、反射面A-B上のBからの反射波と反射面B-D上のCからの反射波が観測される。測定点X3からX4の間では、回折源Dからの回折波が観測されるが、反射面B-Dからの反射波は観測されない。測定点X4からX側では反射面D-

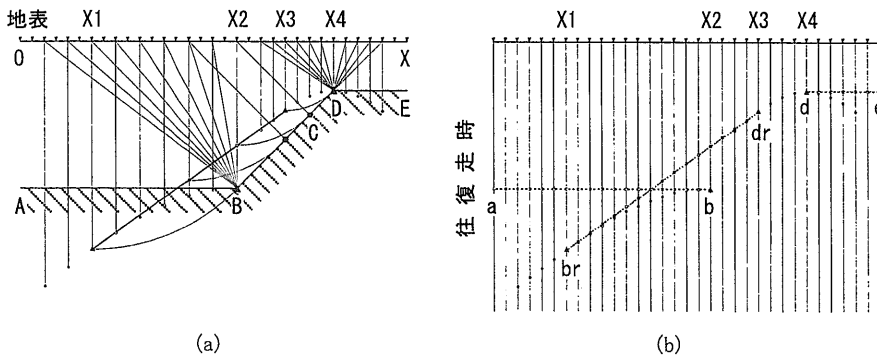
Eからの反射波と回折源Dからの回折波が観測される。

第8図(b)は、横軸に測定点の位置を縦軸に往復走時をとり、それぞれの測定点の記録を並べたものである。反射法計測で得られる記録断面はこれに相当する。水平な反射面A-BおよびD-Eは、記録断面上の線分a-bおよびd-e上に並ぶ反射波の列に対応する。傾斜した反射面B-Dからの反射波は、記録断面上では線分br-dr上に並ぶ。また、測定点X1からX2の間およびX3付近には回折波が観測される。

マイグレーションは、第8図(b)に相当する通常の記録断面のデータセットを、真の地下構造に変換する処理である。第9図に、マイグレーション処理の施された記録断面を示す。

#### 4. おわりに

GPR探査で行われているデータ処理について概



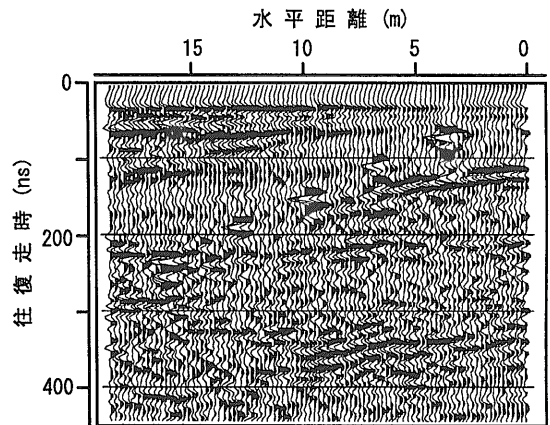
第8図  
(a) 水平な反射面と傾斜した反射面および回折源を持つ地下構造のモデルと模式的な波動の伝播経路。  
(b) (a)のモデルに対する反射波記録断面。観測される反射波および回折イベントが示されている。

観した。反射法地震探査で行われているデータ処理の基本的なものを利用し、記録の分解能の向上が達成される。反射法地震探査データ処理の根幹の一つをなす速度解析に相当するものは一般には行われていない。GPRにおけるマルチオフセットの計測が実用化していないためである。

マルチオフセットのデータセットは、速度解析だけでなく多方面のデータ解析手法に利用される。たとえば、ラドン変換やtau-p変換と呼ばれる、(時間-距離)以外の空間でのデータ処理が適用される。その空間でのデコンボリューションやフィルタ操作は、データ解析の新たな視点を提案する。

連続波レーダのデータセットは個々の周波数ごとに収録される。数MHzより周波数の低い領域では、誘電率の分散現象が顕著にあらわれることが知られている。すなわち電磁波の伝播速度が周波数に依存する。誘電分散を示すデータセットを精密に解析すれば、地下の物性を直接評価することが可能になる。そのためには、狭帯域の時系列データを解析する手法の確立が必要である。誘電分散の問題は、本特集号の鈴木他で論じている。

本文ではこれまで引用文献を示さなかった。反射法のデータ処理に関する限り、GPRに特化された文献は見当たらない。反射法地震探査のデータ処理では、朝倉(1983)、朝倉(1985)、石井他(1983)などに初歩的な解説がある。教科書のスタンダードといえるものは、Sheriff and Geldart(1995)、Yilmaz(1987)などである。フィルタ理論一般に関してはClaerbout(1985a)、マイグレーションを中心としたものではClaerbout(1985b)が広く参照されている。笠原・友田(1993)は、物理探査一般のデータ処理法について多角的な解説を試みている。同書には分野別の的を得た参考文献のリストがある。データ処理ソフトウェアを開発する場合は、Robinson(1967)、Press *et al.*(1986)などを参照されるとよい。



第9図 第7図の記録にマイグレーション処理を行った記録断面。回折波が回折点に正しく戻されている。本処理前に20-120MHzのバンドパスフィルタと振幅補正、処理後に20-80MHzのバンドパスフィルタを適用した。

#### 文 献

- 朝倉夏雄(1983): 反射法データ処理におけるフィルタリングの基礎概念。物理探査, 36, 87-99.
- 朝倉夏雄(1985): 地震反射法におけるデータ処理技術(1), (2)。号外地球, 82-95.
- Claerbout, J. F. (1985a): Fundamentals of geophysical data processing: with applications to petroleum prospecting. Blackwell Scientific Publications.
- Claerbout, J. F. (1985b): Imaging the earth's interior. Blackwell Scientific Publications.
- 石井吉徳, 加藤徹史, 村山隆平(1983): 3次元構造と反射法マイグレーション-模型実験による考察-。物理探査, 36, 49-63.
- 笠原順三, 友田好文(1993): コンピュータ地球科学。東京大学出版会。
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T. (1986): Numerical recipes: the art of scientific computing. Cambridge University Press.
- Robinson, E. A. (1967): Multichannel time series analysis with digital computer programs. Holden-Day.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P. (1995): Exploration Seismology 2nd edition. Cambridge University Press.
- 鈴木敬一, 伊藤牧人, 田辺一夫(1997): ステップ式FM-CWレーダによる埋設管探査実験。物理探査学会第96回学術講演論文集, 376-380.
- Yilmaz, O. (1987): Seismic data processing (Investigations in geophysics, vol. 2). Society of Exploration Geophysicists.

NISHIYAMA Eiichiro, SUZUKI Keiichi and KASAI Hiroyuki (1999): The GPR data processing.

< 受付: 1999年4月1日 >