

地震波干渉法を利用した坑井間物理探査法

Cross-well Seismology Using Seismic Interferometry

松 岡 俊 文 (まつおか としふみ)

京都大学大学院 教授

湊 翔 平 (みなと しょうへい)

京都大学大学院 博士後期課程

東 宏 幸 (あずま ひろゆき)

応用地質(株)エネルギー事業部 技術長

岡 島 靖 司 (おかじま やすし)

リサイクル燃料貯蔵(株) 土木建築部長

1. はじめに

近年、シオトモグラフィ技術¹⁾や VSP (Vertical Seismic Profiling)²⁾に代表されるような、ボーリング坑を利用した地下の可視化技術は、広く注目を浴びようになって来ている。特に主要な物理探査手法である反射法地震探査を二つのボーリング坑井間で行う手法³⁾は、地表から行う地震探査よりも高分解能の地下構造を得ることができる重要な手法との認識が広まりつつある。この手法では複数の坑井に対して、一つに発振器、残りに受振器を設置して坑井間を伝播する地震波動を計測する。これによって震源と受振点を探査対象の近くに設置できるため、得られるデータは一般に高分解能であることが期待できる。しかしながらこの探査手法では、ボーリング坑内で振動を発生させることが出来る特別な震源⁴⁾が必要になる。さらに、ボーリング坑を破壊しないように低エネルギーの震源を用いるため、探査範囲に限界がある。この様な問題点を解決し、比較的簡便に坑井間での反射法地震探査を行うために、我々は地震波干渉法⁵⁾と呼ばれる手法を用いて、坑井間の地下構造の可視化を試みた。

地震波干渉法⁵⁾、あるいはバーチャルソース法⁶⁾と呼ばれる手法は、複数の受振点で取得された観測記録に対して相互相関処理を施すことで、これらの受振点間を伝播する波動のグリーン関数を合成するデータ処理手法と言える。この手法は近年急激な理論的發展を遂げ⁷⁾、現在多くの研究者によっていろいろな地下探査の分野に広く適用が試みられつつある。

地震波干渉法を坑井間反射法に応用するにあたり、受振器は坑井内に設置し、人工震源を地表に設置した。これにより地表震源にダイナマイトのような高エネルギーの震源を用いれば、探査範囲を拡大できる可能性がある。本研究では地震波干渉法理論をフィールドデータに適用し、地下構造の可視化を試みた。さらに今まで行われてきた坑井内震源を用いたイメージング結果との比較を行った。

2. 地震波干渉法による坑井間記録の合成

地震波干渉法の基礎となる式は、周波数領域においては次式の様に表現できる⁵⁾。

$$2\Re\{\hat{G}(X_A, X_B, \omega)\}$$

$$\approx \frac{2}{\rho c} \oint_{\partial D} \hat{G}^*(X_A, X, \omega) \hat{G}(X_B, X, \omega) d^2x \cdots \cdots (1)$$

この基本式は弾性波動伝播における相反定理と時間反転理論から導かれる⁵⁾。ここで左辺は、震源が X_B に存在し、受振点が X_A に在るときの波動伝播のグリーン関数 $G(X_A, X_B, \omega)$ を周波数領域で表現し、その実部を取ったものである。

一方、右辺は二つの点 X_A と X_B において、波動を作り出している震源が X に在るとして、同時に観測された波動場（すなわちグリーン関数 $G(X_A, X, \omega)$ と $G(X_B, X, \omega)$ ）に対して、周波数領域で乗算を行い、閉曲線上のすべての震源に対する積分を行う演算となっている。周波数領域における乗算は、時間領域におけるコンボリューション演算になっており、また一つのデータは複素共役を取っているため、この乗算は時間領域では二つの時系列データの相互相関演算となっている。すなわち式(1)は、離れた2点で同時に波動場を観測し、それらの相互相関を取って、さらに複数回の観測データを足し合わせれば、最終的に観測点である2点、 X_B から X_A に伝播する波動のグリーン関数が求まる事を意味している。このグリーン関数が求まれば、理論的にはこれら2点間の地下構造の推定は可能となる。

我々は震源 X を地表に設置し、二つの坑井内に受振器を設置した。さらに地表の複数の地点に震源を配置し、坑井内のすべての受振器で波動場を観測した（図-1）。

このデータを用いて、次の手順に従って、2本のボー

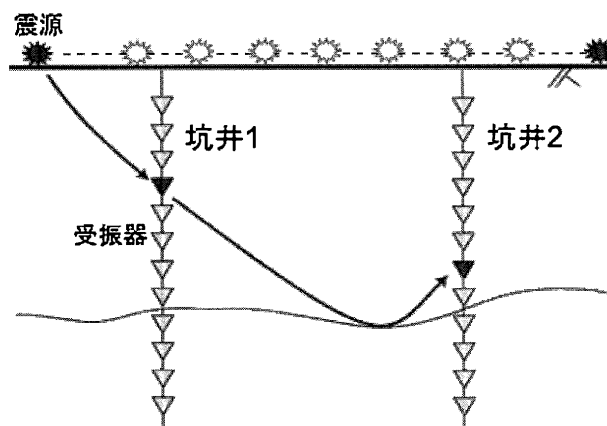


図-1 震源は地表に、受振器は2本の坑井に同時に設置する。

リング坑の間を伝播する擬似的な地震探査記録を合成した。

1. 二つの異なる受振器を選択する。一つは坑井 1 内の受振器 (R_A)、もう一方は坑井 2 内の受振器 (R_B) とする。
2. 震源を共通とする R_A と R_B での記録を相互相関する。
3. すべての地表震源に対して受振記録を相互相関処理し、足し合わせることで、一方の受振器を震源として、もう一方の受振器で受振したとする擬似記録が合成出来る。

相互相関処理する受振器の組み合わせを変えることで、すべての受振器は仮想的な震源となり得る。しかしながらこの配置では、震源が地表に局在しており、受振器を取り巻く閉曲線ではないために、合成された記録はこの影響を受ける。これについては後述する。

3. イメージング処理手法

通常の反射法においては、観測された記録は速度解析が行われ、その後適当なフィルター処理が適用された後、NMO 補正が行われ、重合される⁸⁾。その結果に対して、重合後の時間マイグレーション処理⁹⁾と呼ばれるイメージング処理が施されるが、近年この処理プロセスにおいて、重合処理の前のデータを用いて、重合前深度マイグレーション処理⁹⁾と呼ばれる処理が適用されることが多い。この処理は、通常の反射法処理においては水平多層構造が仮定されているが、その限界を超えるために提案された手法である。

本研究では地下の反射面をイメージングするための処理手法として、最近利用され始めた重合前制限付キルヒホッフ深度マイグレーション処理を採用し、坑井間での反射法データに適用出来るように修正した手法を用いる。この手法は、以下のような手順で実施される (図-2 参照)。

解析対象としている地下の速度構造モデルは、速度解析手法などにより既知であると仮定する。解析領域内の任意の地点は反射点になれる可能性があるため、この任意の点を仮想的に反射点と見なして、震源からこの反射点まで達した後、受振点へ戻って来る波の走時を、速度構造モデルを基に波線計算法により求める。この値を着目した仮想的な反射点に対する走時として、同じ走時を持つ反射点を結ぶと、図-2 のような楕円に似た曲線となる (楕円となるのは地下の速度構造が均質で一定の場合である)。

次に時系列となっている反射波のデータに対して、到達走時に応じて、上記の曲線上に観測された波動の振幅値を対応 (マッピング) させる。これをすべての観測データに対して行い、これらの振幅値を足し合わせると、真の反射点では波は強めあい、最終的に地下における反射面の位置をイメージングすることが可能となる。この時、曲線の接線と水平方向との角度 θ が、 $\theta=0$ のとき、この点は震源と受振点を結ぶ面の鏡面反射点になっている。

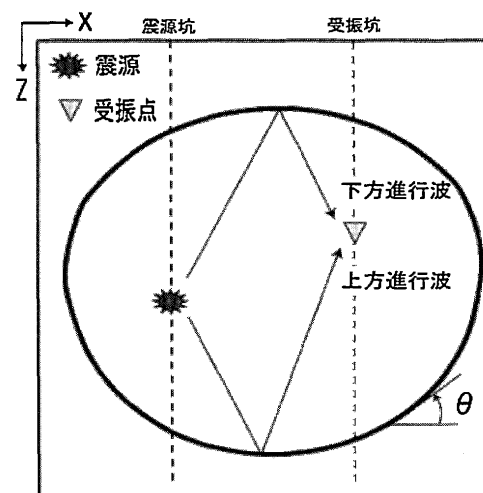


図-2 重合前制限付キルヒホッフ深度マイグレーション

すなわち、震源と受振点が同じ深度に存在し、地下構造が水平多層構造の時には、 $\theta=0$ の点は、震源と受振点の midpoint となっている。

本研究においては、上記処理において発生するノイズ成分であるスマイルを抑制するため、マッピングによる開口幅を制限した。具体的には受振記録の反射波マッピングする領域を、鏡面反射を含む $|\theta| \leq 5^\circ$ の部分に限った。また震源と受振点が地中にあるため、合成された記録には上方から受振点に到達した波と、下方から到達した波が存在している。そのため、マッピングする候補点は受振点より上方と下方、両方に分布する。そのため受振記録を上方進行波と下方進行波に分離し、マッピングする位置を選択する。この一連の処理をすべての震源と受振点の組み合わせで行う。

4. フィールドデータへの適用

4.1 サイトの状況と合成記録の作成

図-3 に本研究で解析を行ったサイトでの震源と受振器の配置を示す。坑井 1、坑井 2 には、深度 28 m から 170 m まで 2 m 間隔でそれぞれ 72 個ずつ受振器が設置されている。地表において 5 m 間隔で合計 33 地点に震源を設置し、坑井内の全受振点で受振した。地表の震源は発破震源、受振器はハイドロフォンを用いた。受振記録中には強振幅のチューブウェーブが卓越していたが、このチューブウェーブは地表震源が坑井に近づくにつれてより卓越することから、表面波に起因すると考えている。

地震波干渉法の考えに従って、坑井 2 を震源坑とし、坑井 1 で受振したとする坑井間の擬似記録を合成した。一方、今回の処理結果を検討するために、実際に坑井内にボアホール用の震源を設置して、通常の坑井間物理探査データの取得を行った。そして取得された坑井間記録と合成記録の比較を行った。

4.2 地震波干渉法の処理

取得されたデータに対して、チューブウェーブを除去した後、帯域制限フィルターを適用し、S 波の除去処理、

論 説

振幅補正 (AGC) 処理, デコンボリューション処理, 再度帯域制限フィルター処理を施した後, 相互相関処理を行い, 観測された33の記録を足し合わせた。

この様にして合成された坑井間記録と, 通常の坑井間記録を図-4に示す。両者の震源と受振点の配置は同じ

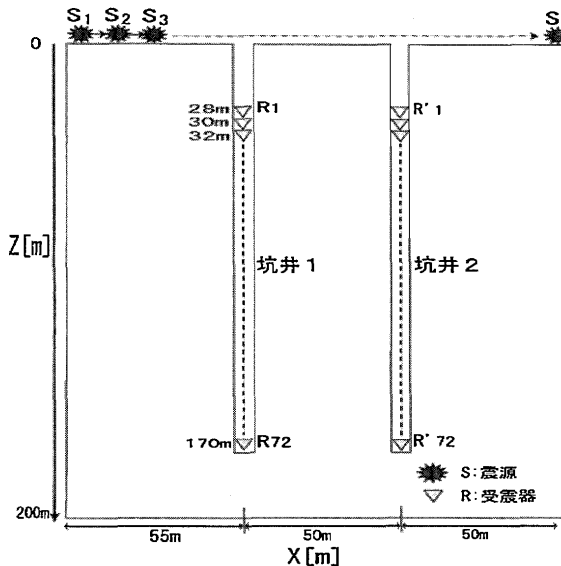


図-3 実験サイトにおける震源と坑井内での受振点の配置

である。図-4 (a)には坑井内の震源の深度が28 m, 100 m, 170 m の場合に, 坑井 2 で観測された共通震源記録が示されている。

相互相関処理の前に AGC 処理を適用したため, 合成記録の反射波は良好に確認できる。また S 波が確認できないのは, P 波処理のノイズと考えて相関前に除去したためである。

合成された記録には, 通常の坑井間記録の初動と反射波に対応する波が確認できる。しかし, 初動以前に偽の波が現れ, また震源が深くなるにつれて震源から上方へ向かう直接波は確認できなくなる。これらは前述した様に観測された波動場の震源が, 受振点を取り巻く閉曲線になっていないためである。すなわち相関前の受振記録の震源が地表に限定しているためである。震源が地表に局在していることで, 上方へ向かう直接波の合成に効果的に寄与する上方伝播波が観測されにくくなる。しかしながら反射波を合成するという観点からは, 図-1に示すように, 2本の坑井間に存在する反射面からの反射波の上方伝播波は図-4に見られるように捉えられている。また, 震源が密に分布していないため, 初動以前に波が現れるという結果になった。

4.3 イメージング

上記の一連の処理によって合成された擬似的な記録に

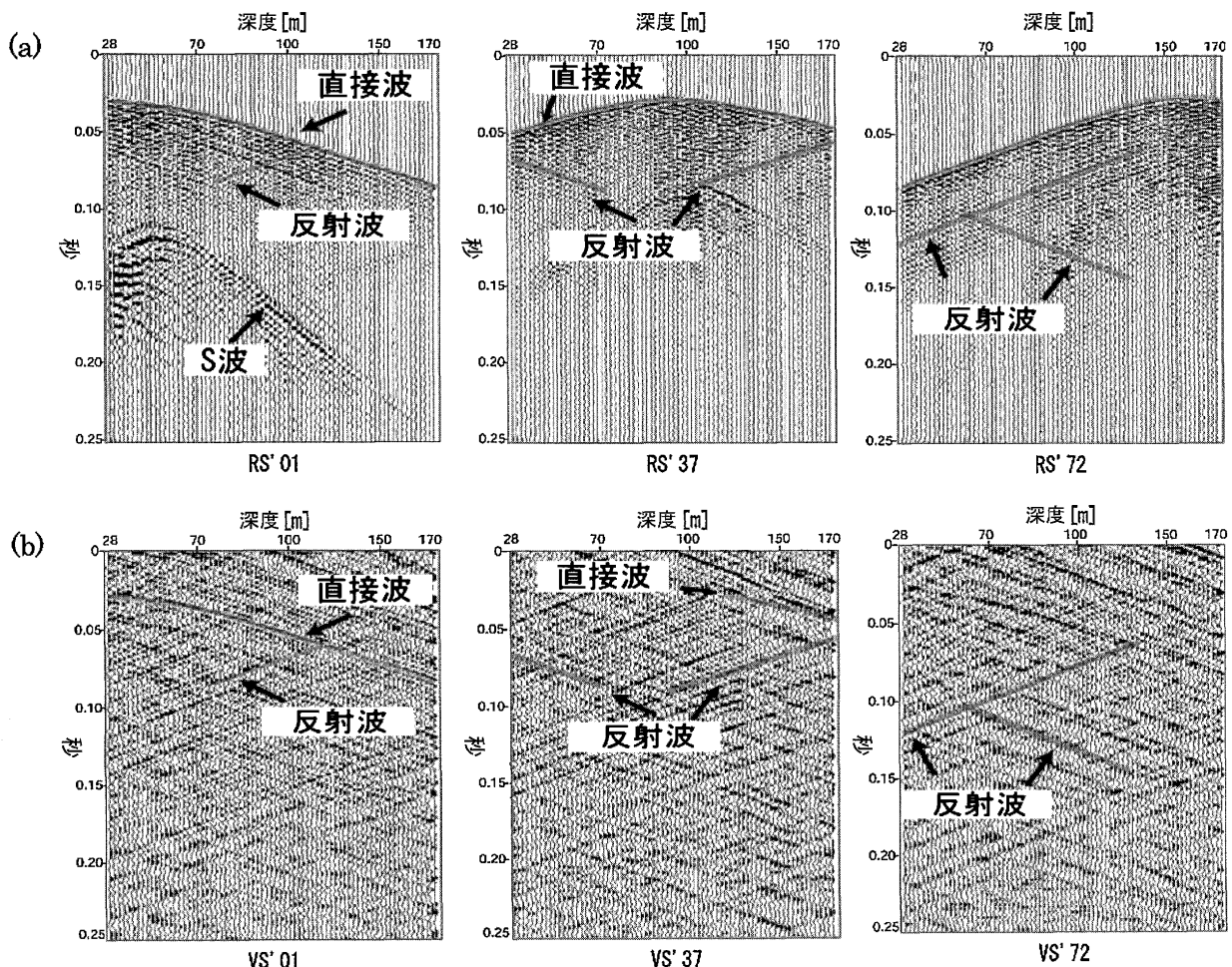
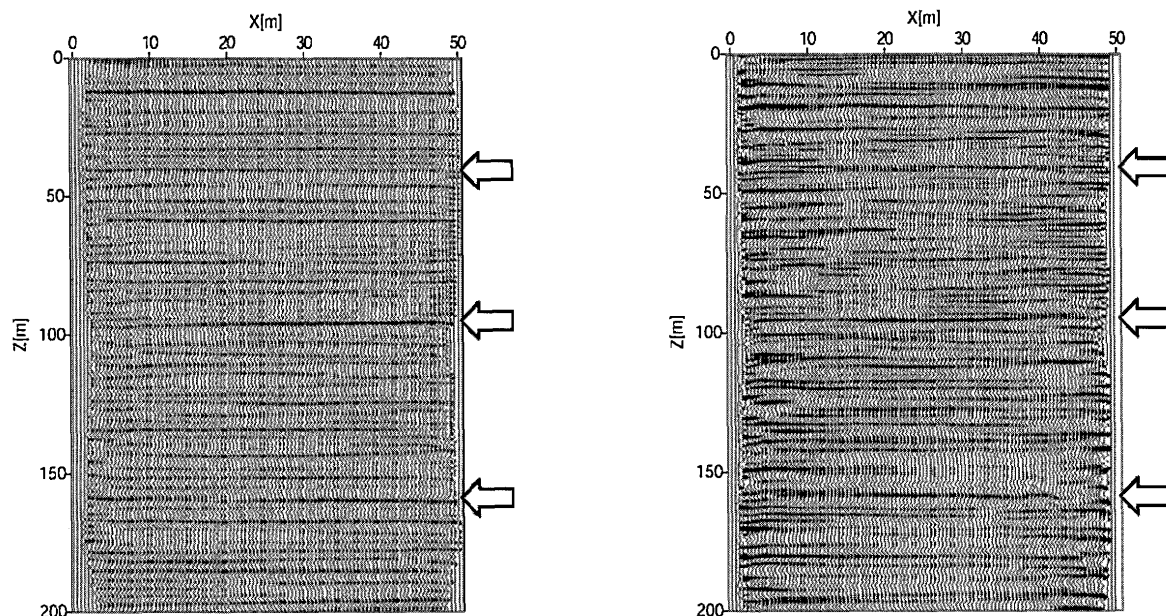


図-4 (a)通常の坑井間記録と, (b)地震波干渉法を用いて合成された坑井間記録。それぞれ左から, 坑井内の震源が深度28 m, 100 m, 170 m にある場合の共通震源記録。通常の坑井間記録に見られる矢印で示された直接波および反射波が, 地震波干渉法によって合成された記録中に再現されている。



図—5 通常の坑井間記録によるイメージング結果（左図），と地震波干渉法を用いて合成された坑井間記録によるイメージング結果（右図）。 $X=0$ m の位置は坑井 1, $X=50$ m は坑井 2 の位置に対応している。両図において、矢印で示された同深度の地中境界が明瞭に確認できる。

対して 3 章で述べた，重合前キルヒホッフマイグレーションを適用し地下の反射断面図を作成した。また坑井内に震源を設置して得た通常の坑井間記録にも同様の処理を施した。この処理に必要となる速度モデルには，今回は坑内検層の結果を用いた。合成記録によるイメージング結果と坑井内に震源を設置して得た記録のイメージング結果の比較を図—5 に示す。両結果とも，水平多層構造が明瞭にイメージングされた。地震波干渉法によるイメージング結果では，坑内震源を用いた記録のイメージング結果と対応する地中境界が明瞭に確認できる。

5. ま と め

今回は地震波干渉法の坑井間物理探査法への適用を検討した。しかしながらこの理論の基礎方程式はより広い適用範囲を持っている。すでに通常の反射法地震探査への適用例は幾つか報告されている⁷⁾。地震波干渉法の最も大きな利点は，地下を伝播する各種振動を利用できる点にある。通常の反射法地震探査においては，ダイナマイトなどの人工的な震源が必要となるが，これらは危険物としての取り扱いや，市街地などでは生活環境に与える影響など，簡単な利用は近年困難になりつつある。このような状況の下で，日常的に生じている地下を伝播する振動，例えば自然地震，交通振動，工場などの振動，波浪などが作り出す振動を，地下の可視化のための震源として利用出来れば，地下の可視化技術はより簡便に広く利用される可能性が高い。

本研究は，フィールドデータを用いて地震波干渉法を坑井間反射法に応用した結果を示した。今回の実験においては地表に震源を設置して得た記録を相互相関処理することで坑井間記録を合成した。その結果，反射波記録が良好に合成された。将来的には，自然地震などによって作られる振動を利用する事も可能である。また合成記

録を用いて，水平構造にほぼ鏡面反射する波をマッピングすることで地下構造をイメージングした。イメージング結果は通常の坑井間反射法による結果と良い一致を示した。

今回の検討の結果，地震波干渉法を坑井間反射法に応用し，坑井内に震源を設置せずに坑井間の地下構造をイメージングすることが可能であることが確認された。今後高エネルギーの地表震源を用いることで探査範囲を拡大することができ，また坑井内に震源を設置する際の困難を減らすことができると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 物理探査学会標準化検討委員会：「新版物理探査適用の手引き」，物理探査学会，pp. 471～481, 2008.
- 2) 物理探査学会：「物理探査ハンドブック」，物理探査学会，pp. 747～820, 1998.
- 3) Harris J., Nolen-Hoeksema, Rangan, R., Schaack, M., Lazaratos, S. and Rector, J.: High-resolution crosswell imaging of a west Texas carbonate reservoir: Part I—Project summary and interpretation, *Geophysics*, Vol. 60, pp. 667～681, 1995.
- 4) 横田俊之・石井義朗・島田伸介・溝畑茂治・荘司泰敬・大橋武一郎・小倉公雄：多層円盤を用いた坑井内震源の開発—石油探査に向けての実用化—，物理探査，Vol. 53, No. 4, pp 309～323, 2000.
- 5) Wapennar, K.: Retrieving the elastodynamic Green's function an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation, *Physical Review Letters*, Vol. 93, 254301 (1-4), 2004.
- 6) Bakulin, A. and Calvert, R.: The virtual source method: Theory and case study, *Geophysics*, Vol. 71, SI 139-150, 2006.
- 7) 物理探査学会：小特集：地震波干渉法，物理探査，Vol. 61, No. 2, pp. 85～144, 2008.
- 8) 佐々安一・芦田 譲・菅野 強：建設・防災技術者のための物理探査，森北出版，1993.
- 9) Biondi, B.: *3D Seismic Imaging*, SEG, Tulsa, 2006.

(原稿受理 2009.1.21)