

パッシブサイスミックとイメージ領域地震波干渉法

白石和也 ((株)地球科学総合研究所)

はじめに

地震観測網のみならず、環境や資源の分野においても受動的なモニタリング調査への関心が高まり、様々な場面でパッシブサイスミックデータが収録されつつある。地震波干渉法は、パッシブサイスミックデータを解析する方法の一つであり、異なる受振点で観測された記録の相互相関処理結果を多数加算することにより、ある受振点を仮想的な震源とする発震記録(或いはグリーン関数)を合成することができる(例えば Wapenaar et al., 2010, Geophysics)。合成された仮想震源記録は、その後のデータ処理を通じて地下の構造や速度分布をイメージングするのに用いられる。波形合成自体はデータのみ依存する演算であり、後半のイメージング過程で地質モデルを作成したり既存モデルを利用したりする。これに対して、地下のモデルに基づいて、異なる受振点の観測波形から有限差分モデリング等により外挿された二つの波動場を、イメージ領域で相互相関処理することで、パッシブデータから地下構造を直接イメージングできることが、数値シミュレーションにより示された(白石・仲田, 2014, 物理探査学会春季講演会)。ここでは、前者のデータ領域における従来型地震波干渉法に対して、後者をイメージ領域における地震波干渉法と呼び、その基本的な性質について考察する。

イメージ領域地震波干渉法

イメージ領域地震波干渉法では、反射法地震探査で用いられるリバースタイムマイグレーションのイメージングコンディションを基礎とし、地震波干渉法の停留位相の概念を導入することにより、新たなイメージングコンディションを定義する。パッシブサイスミックデータに対してイメージングコンディションを適用する場合、震源の情報が未知であるという仮定のもと、信号を含む任意の時間窓($t=t_1\sim t_2$)で観測記録を切り出し、仮想発震点となる受振点から順伝播させた観測波形 R^F と、他の受振点から逆伝播させた観測波形 R^B を、同一時刻でかけ合わせた後に時間窓内で積分する。この操作は、有限差分法などにより、時間の順方向と逆方向に観測波動場を外挿することで時間と空間のリデータムされた観測波形を、イメージ領域において相互相関処理していることを意味する。このとき、地震波干渉法の概念を導入すると、等方的均質に分布する多数の震源による寄与を足し合わせる項を追加することで、新たなイメージングコンディションを次のように定義できる。

$$I_{i,j}(\mathbf{x}) = \sum_k \int_{t_1}^{t_2} R_{i,k}^F(t, \mathbf{x}) R_{j,k}^B(t, \mathbf{x}) dt$$

ここで、 $I_{i,j}(\mathbf{x})$ は受振点 i と j の観測記録から得られる地下の点 \mathbf{x} における像、 $R_{i,k}^F(t, \mathbf{x})$ は震源 k に対する観測点 i における観測波動場が点 \mathbf{x} まで順伝播された波動場、同様に $R_{j,k}^B(t, \mathbf{x})$ は震源 k に対する観測点 j における観測波動場が点 \mathbf{x} まで逆伝播された波動場を表す。計算を行う際、同一震源に対する観測記録は受振点間で独立ではないので、複数の受振点で観測された記録について全て同時に、順伝播と逆伝播についてそれぞれ一回ずつ波動場外挿をして、イメージングコンディションを適用すればよい。または、仮想震源からの順伝播については受振点毎に別々に波動場外挿すると、地下の共通の解析点では発振点の異なる記録の集合(共通イメージギャザー)が得られるので、イメージ改善を目的とするフィルタ処理等を追加できる。

数値シミュレーション

これまでに、地中に分布する震源群と地表に設置した受振点群から、比較的複雑な速度モデルに対する反射波の直接イメージングを実施して、イメージ領域地震波干渉法の技術的妥当性が確認されている。ここでは、新たに一般化したモデルを用いた数値シミュレーションを実施し、イメージ領域地震波干渉法の基本的性質について検討を行なった。図 1(a)に仮定した速度モデルと震源分布を示す。空間的に速度揺らぎのあるモデル中に散乱を生じる低速度のアノマリー(矢印)を設定し、震源をランダムに 60 点分布させた。震源関数にはリックワーウェーブレット(中心周波数 5Hz)を用いた。

上記の速度アノマリーを除く正確な背景速度を用いて、2 観測点のデータのみを利用して全ての震源の寄与を計算した結果は図 1(b)のようになり、これは解析に用いた震源の分布、受振点の位置、速度モデルを反映した感度分布を示している。すなわちこの場合には、受振点間を伝播する透過波(直接波)とアノマリーのからの反射波に対する感度が、非対称に分布しているのがわかる。全ての観測点のデータを利用した場合には、感度分布の総和として構造イメージが得られる。図 1(c)はほぼ線形に配置された受振点群の記録を全て用いた結果を示す。アノマリーからの反射波はほぼ正確な位置にマッピングされた。ただし、観測点周辺の長周期かつ強振幅な直接波の効果は未処理のまま残る。

この他、等方均質の速度を変化させた場合のイメージング結果について比較した。感度の広がりや振幅の分布が速度に応じて変化するのは自明として、そこから観測点-観測点間または観測点-散乱点間の平均的な速度を見積もることは可能である。さらにインバージョンの評価方法を確立できれば、詳細な速度分布推定が可能と考えられる。

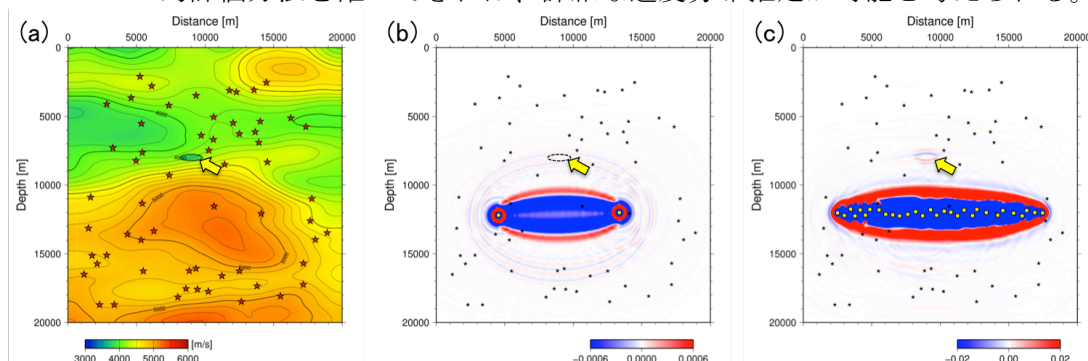


図 1 イメージ領域地震波干渉法の数値シミュレーション例。(a)仮定した速度モデルと震源分布(星印)、(b)2 観測点の記録から得られる感度分布、(c)ほぼ線形に配置された 30 観測点の記録から得られるイメージング結果(空間フィルタ未適用)。

まとめ

イメージ領域地震波干渉法は、リバースタイムマイグレーションにおけるイメージングコンディションを、地震波干渉法の概念とともに再定義することにより、パッシブな観測データから地下構造の直接イメージングを保証する。これまでの数値シミュレーションによる基礎的研究を通じて、下記の成果を得た。

- ・ 地中震源群と地表受振点群による反射波イメージングから手法の妥当性を確認した。
- ・ 一般化したモデルにおける 2 観測点の問題から、イメージ領域における感度分布を得た。構造イメージは、観測点全ての組み合わせの感度分布の総和として得られる。
- ・ 速度モデルの違いによる感度分布ならびにイメージング結果の変化を確認した。これは、イメージ領域干渉法を用いて速度解析やインバージョンの可能性を示唆する。今後は、実データへの適用を試みるとともに、マイグレーション速度の推定や空間速度分布のインバージョンに向けた技術開発を目標とする。