

ACROSS の観測データから走時を読む

Traveltime estimation from the data observed by ACROSS

羽佐田 葉子[1]; 熊澤 峰夫[2]; 鶴我 佳代子[3]; 國友 孝洋[3]

Yoko Hasada[1]; Mineo Kumazawa[2]; Kayoko Tsuruga[3]; Takahiro Kunitomo[3]

[1] サイクル機構・東濃; [2] JNC・東濃; [3] サイクル機構

[1] TGC, JNC; [2] Tono, JNC; [3] JNC

【はじめに】

ACROSS は、精密に制御した連続的な波を送受信することにより、観測対象の伝達関数を周波数領域で測定する地下構造探査・モニタリング手法である。ACROSS によって測定された周波数領域の伝達関数から、波の走時を読む、すなわち時間的に局在したイベントを抽出する方法のひとつとして、存否イベント解析がある。この手法は、存否セブストラム法として、ACROSS 開発の初期からその理論的根拠として研究が続けられてきたものである。本講演では、存否イベント解析の基本理論と ACROSS の観測データをより有効に解析するためにこれまでに開発してきた幾つかの要素技術を、実際の解析例を交えて紹介する。

【存否イベント解析】

ACROSS で取得される初期データは繰返し信号の時系列データであり、繰返し周期の整数倍の時間長で区切って、S/N 比が必要な大きさになるまでスタッキングをする。これをフーリエ変換によって複素周波数系列に変換し、送信周波数のデータを抽出して受信信号とする。また、送信周波数の周りのスペクトル振幅から受信信号の誤差を見積もる。受信信号から観測システムの特性を補正し、送信信号のスペクトルで割ることによって伝達関数が得られる。これは、限られた周波数帯域で離散的にサンプリングした伝達関数であるから、これをフーリエ逆変換して得られる時系列は、インパルス応答に観測周波数帯域のバンドパスフィルタをかけたものに相当する。周波数範囲が狭い場合、フィルタの影響が大きく、波の走時を読むことは難しくなる。存否イベント解析は、時系列のスペクトル解析手法である存否法を逆空間に適用することにより、比較的狭い周波数帯域のデータについても波の走時の分解を可能にする。

存否イベント解析では、観測された伝達関数を、実部と虚部の位相が $\pi/2$ ずれた減衰振動(波素)の重ね合わせでモデル化する。時間領域では、インパルス応答をローレンツ関数とそのヒルベルト変換の線形結合で表されるパルスの連なりで表すことに相当する。1つの波素について、複素走時(走時と減衰率)と複素振幅(最小観測周波数における振幅と位相)という2つの複素数をパラメータとして定義し、複素数に拡張した存否法に基づいてこれらのパラメータを推定する。モデルの次数、すなわち波素の数は AIC (Akaike's Information Criterion) に基づいて決定する。

【分散性波動の解析】

減衰のある媒質を伝播する波動は必ず分散性を持ち、その伝達関数は単純な減衰振動モデルでは表せない。存否イベント解析では、周波数帯域を分割し、狭い周波数帯内では周波数依存性がないと近似することにより、分散性波動の解析を可能にした。Hasada et al. (2001) では、合成データを用いたテストにより、表面波の構造分散解析に有効であることを示した。また、2000年には東濃鉱山の弾性波 ACROSS による実験で実体波の分散解析を試みた。その結果、P波、S波ともに $\sim 10\%$ の速度分散が求められたが、これには構造の不均質などによる見かけ上の周波数依存性が含まれる可能性がある。

【重みつき最小二乗法の適用と最小二乗法の繰返しによるパラメータの改善】

現在 ACROSS では誤差つきの伝達関数データを取得することができるので、存否イベント解析の過程で最小二乗法により複素振幅を求めるときに、誤差の -2 乗を重みとする重みつき最小二乗法を用いると、複素振幅についてのみ観測値の誤差を考慮したパラメータ推定が可能となる。複素走時についても観測値の誤差を考慮するため、最初に固有値問題の解から求めた複素走時を初期値とし、線形化したモデルについて、微小な補正量を最小二乗的に求めるという方法を考案した。また、観測時期や周波数帯、観測点の位置が微小に異なるデータでは、パラメータの差が微小であると考えて共通の初期値を採用することにより、同一の波素の微小な変化を容易に求めることができるようになった。

【アレイ解析への応用】

現在、存否イベント解析のモデルに基づいて、受信点アレイで取得した ACROSS データを解析する方法を開発している。2002年地震学会で提案した手法では、アレイ各点で求めた走時と位相から、最小二乗法を用いて波のスローネスを推定する。より簡便な手法として、線形化モデルを用いた重みつき最小二乗法で、複素走時・複素振幅の初期値からのずれと同時にスローネスを推定する方法を考案したが、アレイ各点の位相情報を利用しておらず、スローネスの推定精度が低いことが分かった。さらに実用的な解析手法の開発が今後の課題である。

【誤差評価】

これまでにブートストラップ法を用いた誤差評価を提案したが、実用面で幾つかの困難があった。線形化モデルでの最小二乗法を取り入れることによって誤差伝播による誤差の見積もりが可能になり、この方法で求めた誤差

はブートストラップで求まる値とほぼ同じになることが確認された。