

モンテカルロ混合カルマンフィルタを用いた測地データの新しい時間依存インバージョン手法の開発

A new approach to time dependent inversion of geodetic data using Monte Carlo mixture Kalman filter

福田 淳一[1], 樋口 知之[2], 宮崎 真一[3], 加藤 照之[1]

Jun'ichi Fukuda[1], Tomoyuki Higuchi[2], Shin'ichi Miyazaki[3], Teruyuki Kato[4]

[1] 東大地震研, [2] 統数研, [3] 地震研

[1] Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, [2] Inst. Stat. Math., [3] ERI, [4] Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo

1. はじめに

近年の GPS 連続観測網の発展により、沈み込み帯ではスローイベントと呼ばれる時定数が数時間から数年のプレート境界面のすべりによる地殻変動が観測されている。このようなイベントにおける断層すべりの時空間変化を精度良く推定することは、プレート境界における地震の発生メカニズムを解明し、その予測を行うために重要である。測地データから断層すべりの時空間変化を推定する方法の一つとして Segall and Matthews (1997) による時間依存インバージョンがある。この手法では断層すべりによる地殻変動を線形・ガウス型状態空間モデルで定式化し、断層すべりの時間変化の推定に Kalman filter (KF) を用いている。彼らは断層すべりの時間発展のモデルとして、すべりが時間的に滑らかであるというモデルを用いており、時間的な滑らかさを表すパラメータを導入している。彼らの手法では、このパラメータは時間的に一定であると仮定されており、その値は最尤法によって決められる。しかし、この仮定は問題点を含んでいる。この仮定の下では観測期間全体にわたってすべりが平均的に平滑化されるため、断層すべりの急激な変化は過度に平滑化され、すべりが定常な期間では推定値が過度に振動する。従って、すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータが一定という仮定の下では、スローイベントの全過程における断層すべりの時間変化を精度良く推定することが困難である。本研究ではこのような問題点を解決するために、断層すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータを時間変化させることができる新しい時間依存インバージョンの手法を開発した。

2. モンテカルロ混合カルマンフィルタ

本研究では状態空間モデルを用いて非定常地殻変動をモデル化した。断層すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータの時間変化を実現するために、モンテカルロ混合カルマンフィルタ(Monte Carlo mixture Kalman filter, MCMKF)と呼ばれる新しい状態推定手法を開発した。MCMKFでは、(1)断層すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータが異なる m 個の状態空間モデルを導入し、(2)各時刻毎にこれらのモデルの中から最適なものを選ぶことによって断層すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータの時間変化を実現する。 m 個の状態空間モデルを表現するために、ここでは m 個の整数値のいずれかをとり Indicator variable と呼ばれる確率変数を導入する。Indicator variable の値の時間変化を決めることができれば、断層すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータの時間変化が実現することになる。MCMKFでは、Indicator variable の予測・フィルタ分布をこれらの分布から発生したと仮定する多数の実現値(粒子)で近似する。予測・フィルタ分布を近似する粒子は、予測・フィルタという二種類のアルゴリズムを繰り返し用いることにより、逐次的に推定され、最終的には全データが与えられたときの Indicator variable の分布(平滑化分布)を近似する粒子が得られる。平滑化分布が得られると、粒子毎に KF を用いて状態ベクトルの時間変化を推定することができる。最終的な状態推定値は各粒子に対する状態の分布の平均となる。

3. 数値実験

MCMKF を用いた新しい時間依存インバージョンの手法の有効性を確かめるために、数値実験を行った。半無限弾性体中に無限に長い横ずれ断層を考え、これに時間変化するすべりを与えることによってデータを作成した。このデータに対して MCMKF を用いた方法(断層すべりの時間的な滑らかさを表すパラメータが時間変化)と KF を用いた方法(このパラメータが一定)を適用して断層すべりの時間変化を求め、両手法によって得られた結果を比較した。数値実験は断層すべりのシグナルが(1)大きい場合と(2)小さい場合の二つの場合について行った。(1)、(2)いずれの場合も MCMKF を用いた方が KF を用いた場合に比べて AIC(Akaike information criterion) が小さいモデルが得られた。この結果は、MCMKF を用いた方が統計的に良いモデルが得られることを示している。(1)の結果から、MCMKF を用いた方が与えたすべり速度の変化を正確に再現できることが分かった。また、(2)の結果から MCMKF を用いた方が微小な断層すべりのシグナルを検出する能力が高いことが分かった。