

マルコフ連鎖モンテカルロ法による表面波の位相速度の逆解析 Surface-wave phase velocity inversion using Markov Chain Monte Carlo method

山中 浩明^{1*}

Hiroaki Yamanaka^{1*}

¹ 東京工業大学総理工

¹Tokyo Institute of Technology

微動探査は、比較的容易にS波速度構造モデルを推定できることから、地震動予測のための地盤モデルの構築の際によく用いられている。首都圏でも、多数の微動探査が行われ、堆積層の3次元S波速度構造モデルも提案されている(例えば、山中・山田, 2006)。今後も、同様の探査が行われ、モデルが改良・更新されることになると期待されるが、追加されたデータの効果を理解するためには、モデルの精度や分解能などの議論が不可欠である。

微動探査では、表面波の位相速度の推定とその逆解析が主要な要素技術である。位相速度の逆解析では、最小2乗法だけでなく、GAやSAなどのヒューリスティック探索法も使われている(例えば、山中, 2007)。ヒューリスティック探索法の利点のひとつは、目的関数の微分係数を用いていないので、アルゴリズムのロバスト性が高いことである。そのために、位相速度の逆解析だけでなく、多くの分野で用いられている。その一方で、最小2乗法などに比べてパラメータの感度が直接的にはわかりにくいという短所もある。例えば、全く感度がないパラメータでも、ヒューリスティック探索による最小誤差のモデルでは探索範囲内である値に決まることになるので、結果の評価には十分に注意しなければならない。これに対して、山中ほか(1999)では、適応解の概念を用いて、目的関数が小さい解のパラメータの分布を求め、解のユニーク性を定性的に調べているが、これにしても十分に感度や分解能を理解できるわけではない。

マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法は、目的関数のパラメータのマルコフ連鎖の状態のランダムサンプリングから、その確率分布を求める統計的な手法であり、解析的に目的関数の形状が求められない場合を対称として開発されたもので、最近、様々な分野で注目されている(例えば、伊庭, 2005)。さらに、ベイズ定理によれば、逆解析の解のパラメータの事前確率が一樣であれば、観測値の尤度が解の事後確率となり、逆解析のモデルの決定だけでなく、その分解能も評価できることになる。逆解析では、観測値と計算値で決まる尤度の確率分布をMCMC法に基づいて推定することになる。したがって、GAやSAと同様に高ロバストである利点を有しているといえる。本研究では、マルコフ連鎖モンテカルロ法を位相速度の逆解析に適用することを試み、関東平野での実データへの応用を行った。

まず、関東平野の深部地盤を模擬した4層モデルを仮定して数値実験を行った。周期0.5 - 10秒の基本モードのレイリー波の位相速度を計算し、これらに以下のように仮定した標準偏差の20%のランダムなノイズを与え擬似観測データを作成した。これらの擬似観測値の5から40%の値を観測値の標準偏差として与えた。逆解析では、S波速度と層厚を未知数とした。実際の計算では、温度一定のSAに類似したMetropolis-Hastings法を用いて、サンプリングを行った。モデルの変化量を与える提案密度関数としては、正規分布を仮定し、最終的な受理確率が5割程度になるように、正規分布の標準偏差を決定した。各パラメータに対して3万回のモデル更新を行うことにしたので、合計21万回の順計算を行うことになる。サンプリングしたS波速度と厚さから平均値と標準偏差を求め、それらを逆解析の解とした。観測誤差によらず、得られた解は、正解値に近いものであった。一方、当然ながら、モデルパラメータの標準偏差は観測値の誤差に依存し、観測値の誤差が大きいほど、モデルパラメータの推定誤差も大きくなっている。観測値とパラメータの標準偏差との比較から、モデルパラメータの誤差を10%以内にするには、観測誤差を10%以内にする必要があることがわかった。ただし、深部の厚さに関するモデルの分解能は低く、周期10秒でもデータが不十分であることを示している。

このように、MCMC法による逆解析では、誤差が最小となる一つのモデルを探索するのではなく、パラメータの確率分布を求めることになり、逆解析モデルの分解能などの定量的な評価が可能となる。これは、GAやSAにはない利点であると考えられる。今後、関東平野で得られている位相速度のデータへの適用を行い、推定モデルの分解能の空間的理解を行い、関東平野の3次元モデルの更新などの検討を行う予定である。また、強震動や地盤特性に関する他の逆解析に対して応用可能であり、推定パラメータの分解能が定量的に評価できるので、非常に有効な逆解析方法であると考えられる。

キーワード: 微動探査, 地盤モデル, 表面波, 位相速度, S波速度構造, マルコフ連鎖モンテカルロ法

Keywords: microtremor exploration, basin model, surface wave, phase velocity, S-wave velocity, Markov Chain Monte Carlo