

## 逐次相対モーメントテンソル法による微小地震の高精度メカニズム解推定 今西和俊・内出崇彦(産業技術総合研究所)

### 1. はじめに

地震発生における流体の影響や断層帯の変形機構等の詳細を解明するため、微小地震のモーメントテンソル解を数多く、そして精度良く推定する必要性は年々高まっている。しかし、微小地震のモーメントテンソル解析で常に障害になるのは、地下構造の詳細がわからないため、高周波数域まで正確にグリーン関数を計算できない点である。グリーン関数に不確実性が残る限り、信頼性の高いモーメントテンソル解は得られない。

Dahm (GJI, 1996) は隣接する地震ペアの同一観測点における振幅比をデータとすることで、共通する伝播経路の効果をキャンセルし、グリーン関数を計算せずにモーメントテンソル解を推定する手法(相対モーメントテンソル法)を提案した。この手法で推定されるのは、マスターとなる地震のモーメントテンソル解に対する相対値である。この手法の概要は以下の通りである。地震*i*、観測点*l*における変位スペクトルの低周波側の振幅値  $u_{ij}$  は次式で表現できる (Aki & Richards, 2002)。

$$u_{ij} = I_{ij} \sum_{k=1}^6 m_i^k a_{ij}^k$$

ここで  $m$  はモーメントテンソル成分、 $a$  は射出角と方位角に依存する係数、 $I_{ij}$  は伝播経路に関する項である。近接する地震ペア1, 2の同一観測点における振幅比を取ると、 $I_{1j} \approx I_{2j}$  であるため、パラメータ推定に一番厄介な  $I_{ij}$  をキャンセルすることができ、最終的に以下の関係式が導かれる。

$$u_{1j} \sum_{l=1}^6 m_2^l a_{2j}^l = u_{2j} \sum_{k=1}^6 m_1^k a_{1j}^k$$

地震2のモーメントテンソル ( $m_2$ ) が既知の場合、左辺はデータベクトル  $\mathbf{d}$ 、右辺は地震1のモーメントテンソル ( $m_1$ ) からなるモデルベクトル  $\mathbf{m}$  と  $u_{2j}$  と  $a_{1j}$  から構成される  $\mathbf{G}$  行列に書き下すことができ、最小二乗法等の最適化問題により地震1のモーメントテンソルを推定することができる。一方、この手法の問題点として、マスターとなる地震(上記の場合、地震2)のモーメントテンソル解の精度がそのまま推定結果に影響を与えてしまう点が挙げられる。そのため、とても有効な手法であるにもかかわらず、実データへの適用は多くないようである。本研究では相対モーメントテンソル法の利点を活かしつつ、この本質的な問題点を解決する手法を提案する。

### 2. 手法開発: 逐次相対モーメントテンソル法

近接したN個の地震(クラスター)がある場合を想定する。このクラスターに相対モーメントテンソル法を繰り返し行いつつ、個々のモーメントテンソル解を改善させていく方法(逐次相対モーメントテンソル法)を提案する。具体的な手順は以下の通りである。

- (1) ある程度拘束できているメカニズム解を持つN個の近接した地震(クラスター)を抽出する。
- (2) 推定対象とする地震(ターゲット地震)を一つ選び、それ以外の地震をマスター地震として相対モーメントテンソル法を適用する。この作業を他の地震についても同様に行う。
- (3) 推定された解を新たなモーメントテンソル解(修正解)とし、再び(2)を行う。
- (4) 残差の総和に変化が見られなくなるまで(2)、(3)を繰り返す。

ポイントの一つは(2)のステップにおいて、1個のターゲット地震に対して複数のマスター地震を取る点にある。これにより、推定精度が十分でないマスター地震の影響を軽減させることができる。さらに、イテレーションにより、個々のモーメントテンソル解の推定精度を上げるのと同時に、クラスター内の地震間の相対精度の向上も期待される。

### 3. 数値実験

提案手法の有効性を確認するため、数値実験を行った(図1)。半径20kmほどの領域に観測点が12点あり、ダブルカップル解を持った8個の地震を深さ8kmに設定した。観測振幅値を模擬するため、地盤増幅を0.5~4倍の間で与え、さらに10%のランダムノイズを加えた。初期メカニズム解として適当なダブルカップル解を仮定し、設定した解(真の解)が本手法により復元できるのかを調べた。図2はイテレーション回数に対する残差の総和の変化を示しているが、数回の繰り返しで残差の総和は大きく減少し、その後、残差の変化はほとんど見られなくなる。イテレーションによって解がどのように変化していくのかを図3に示す。ビーチボールの色は真の解との間のKagan角を示し、数回の繰り返しで真の解に近づいていることがわかる。非ダブルカップル成分もイテレーションにより減少し、最終的に数%にまで落ち、仮定したダブルカップル解をほぼ正確に推定できることが確認できた。一方、個々の地震に対して通常のモーメントテンソルインバージョンを行った場合、地盤増幅を正しく評価できないため、Kagan角が10度を超え、非ダブルカップル成分も20%を超える地震が半数近く存在した。地盤増幅を含めた伝播経路の影響を考慮しなくてよい本提案手法の優位性が伺える。発表においてはその他の数値実験の結果や実データへの適用についても紹介する。

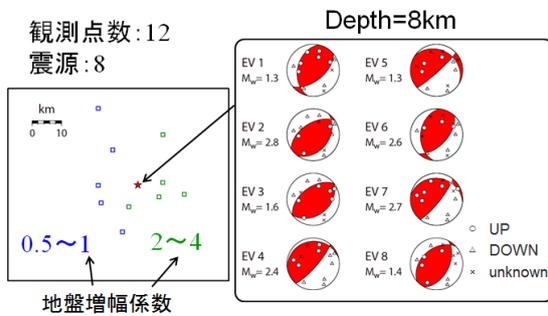


図1 数値シミュレーションで仮定する観測点分布、クラスター位置、メカニズム解。

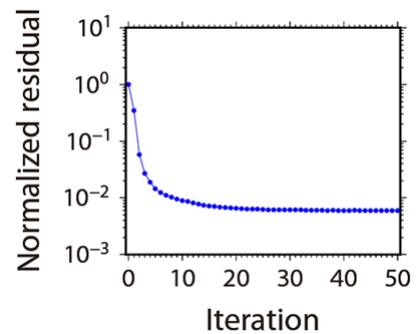


図2 繰り返し回数による残差の総和の変化

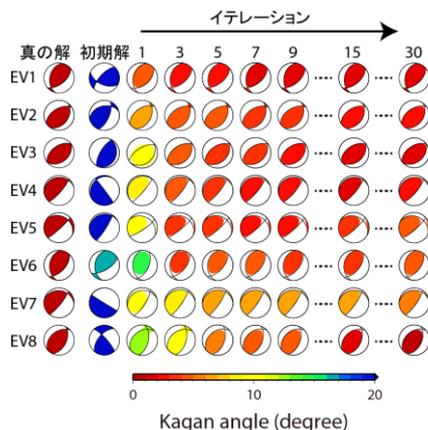


図3 イテレーションによる解の変化。ビーチボールの色は真の解に対するKagan角を示す。