

パーティクルフィルタを利用した自動震源決定

溜瀧功史（気象庁）

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震の余震活動のように、広域で地震が多発すると、従来の手法ではトリガ検知ができなかったり、複数の地震の相を混ぜて震源決定したりするために、実際の震源とは大きく異なる場所に偽りの震源を決定することがある。その対策として Liu, 山田(2011)は、震源を適切に識別するために、パーティクルフィルタを用いることを提案した。パーティクルフィルタは、確率密度関数を多数のサンプル（パーティクル）で近似し、それぞれのサンプルの尤度を現時点で得られている観測データから求めることによって、新たな確率密度関数を逐次推定・更新する手法である。Liu, 山田(2011)は、ある観測点で地震波を検知すると、観測点周辺の5次元空間（時間、緯度、経度、深さ及びマグニチュード）に多数のパーティクル（仮想震源）をばらまき、各パーティクルから期待される振幅と、実際に観測されている振幅値に近いほど、その仮定した震源の尤度が大きくなるように尤度関数を設定した。振幅情報のみを用いたこの手法は、規模が比較的大きな地震に対しては有効であると考えられるが、さらに規模が小さな地震に対しても適用するために、振幅情報以外にP相、S相の検測結果を取り込むことで、高度化を試みたので報告する。

2. 尤度関数と初期分布の設定

尤度関数は基本的に(1) 真の震源周辺で尤度が最大となること、(2) 異常値に対してロバストであること、の2つの条件を満たせばよい。ある震源 $\mu(t, lat, lon, dep)$ と分散 σ を仮定すると、各観測点($i = 1, \dots, N$)の理論走時(t_i^{cal})を求めることができ、観測走時(t_i^{obs})との走時残差の尤度関数は、

$$f(t_i^{obs} | \mu, \sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(t_i^{obs} - t_i^{cal})^2}{2\sigma_i^2} \right\},$$

で与えられる。その際、理論走時周辺（例えば ± 2 秒以内）に観測走時がない場合は、ペナルティとしてある程度の残差を与えることとする（例えば $t_i^{obs} - t_i^{cal} = 2\sigma_i$ ）。同様に、ある震源 $\mu(t, lat, lon, dep)$ を仮定すると、各観測点の振幅から観測点マグニチュードを計算することができ(M_i^{obs})、マグニチュード残差の尤度関数は、

$$g(M_i^{obs} | \mu, \sigma_M) = \frac{1}{\sigma_M \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(M_i^{obs} - M^{ave})^2}{2\sigma_M^2} \right\},$$

で与えられる。ここで、 $M^{ave} = \sum M_i^{obs} / N$ である。上式は単に観測点マグニチュードの残差が最小になればよいことを示している。したがって、ある震源 $\mu(t, lat, lon, dep)$ と分散 σ を仮定したときの尤度は、

$$lik(x | \mu, \sigma) = \prod_{i=1}^N f_P(t_i^{obs} | \mu, \sigma_i) \cdot f_S(t_i^{obs} | \mu, \sigma_i) \cdot g(M_i^{obs} | \mu, \sigma_M),$$

として計算することができる。

また、震源決定を開始する最初の確率密度関数（パーティクルの初期ばらまき）は、一様分布によっても与えることができるが、(1) トリガ観測点が他の観測点と比較して十分に近い位置にのみパーティク

ルをばらまくこと（テリトリー法の考え方）、(2) 過去の震源分布を考慮すること、によって効率化を図った。

3. 適用結果とその考察

2011年9月3日18時からの24時間に対して適用したところ、一元化震源と一致した自動震源の個数は393個（うちM3以上は31個）であった。気象庁の既存の自動処理（295個うちM3以上27個）に比べると、決定数は30%以上増加した。また、M3以上の空振りイベントは、気象庁の既存処理（55個）から本処理（11個）へと1/5程度に減らすことができ、自動震源の決定精度が向上した。空振りイベントと分類された理由として、(1) 沿岸の地震で、S相の読み違いにより異なる位置に震源を決定した、(2) やや規模が大きな地震の際に、検測値のはぎ取りが不十分で、残った検測値で偽りの震源を決定してしまった、という事例があった。

マグニチュードごとに一元化震源と比べると、内陸の浅い地震については概ねM1以上で90%以上決定できる。一方で、沿岸から離れた地震や島嶼部の地震については60~70%程度と決定率が低い。今後、沿岸及び島嶼部の地震に対する決定率向上を目的とした尤度関数の検討を進める。

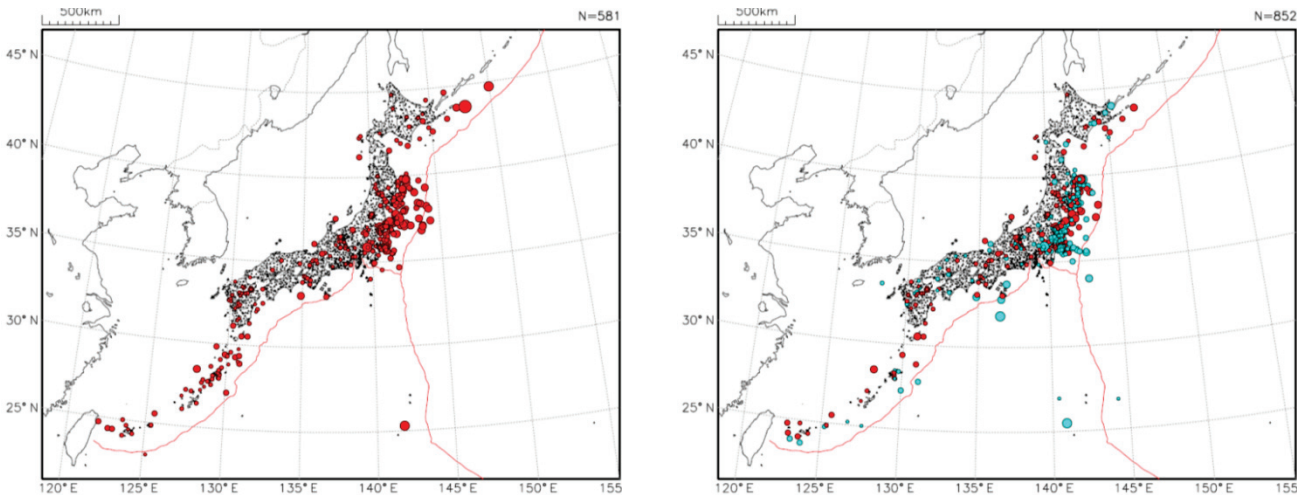


図1 一元化震源と本処理による自動震源の分布図

左：一元化震源、右：本処理による自動震源（赤：一元化震源と一致した震源、青：不一致の震源）

参考文献

Annie Liu, 山田真澄, 2011, 同時多発地震の識別法, 地震研究所研究集会「地震動の瞬時解析と直前予測」.