

## ベイズ推定を用いた自動震源決定の高度化 —事前確率の改良—

溜瀧功史 (気象研究所)

### 1 はじめに

同時に発生した複数地震を識別するために、検測時刻に加えて最大振幅等の特徴量を統合して扱うことができるベイズ推定を用いて自動震源決定手法を改良し、緊急地震速報や一元化震源の自動震源決定に適用してきた (溜瀧・他, 2014, 地震2; 溜瀧・他, 2016, 駿震時報). 両者の処理の流れは、入力データや逐次/非逐次処理の違いによって差はあるが、概ね図1のような処理の流れとなっている. ここで、事前確率は、過去の震源分布とボロノイ分割の拡張を利用している. そのうち過去の震源分布は、1997年10月以降の全ての地震を用いており、また計算効率の観点から水平0.5度、鉛直10kmのブロック内の発生個数をあらかじめカウントし、これを利用している. しかしながら、これは深さ分布においては大局的なプレートの沈み込みに伴う地震活動を反映しているものの、内陸の浅い地震に注目すると、ほぼ一様分布になってしまう (図2). 一方で、地震は余震に関する大森・宇津公式 (Utsu, 1961) や ETAS モデル (Ogata, 1983) など代表されるように、

ひとたび大きな地震が発生すると、時空間的に近接して地震が多発することが知られている.

そこで本稿では、この事前確率に最新の地震の発生状況を考慮し、かつ計算コストを増大させないように改良を試みたので報告する.

### 2 手法

最新の地震の発生状況を知るために、自動震源の結果を利用する. ここでは、自動震源を10,000個の配列にサイクリックに保持しておき、これを事前確率として用いた. 本稿では、ある地点が最初にトリガしたとき、その地点をキー観測点という. 事前確率に従ってサンプルを配置する際には、このキー観測点の周囲±2°の範囲にある自動震源配列から、最大1,000個の地震を取り出したうえで、重み付きの復元抽出を行った. キー観測点の周囲±2°の範囲内の地震が1,000個満たない場合は、従来の「過去の震源分布」に基づき乱数を用いて震源を配置し、これを合計1,000個になるまで繰り返した. また、復元抽出を行う際の重みは、次式による余震に関する大森・宇津公式 (Utsu, 1961) を用いて重み付けを行った.

$$w(t) = \frac{K}{(t+c)^p} \quad (1)$$

ここで、 $t$ は経過時間 (日) である.  $K=1$ ,  $c=0.1$ ,  $p=1$ とした. 実際には、地震系列ごとに値は異なるが、今回は事前確率として初期震源を配置することが目的であるので、簡易的に一律の値を与えた. 重み付きの震源配列から復元抽出を行う方法は、ルーレット選択と呼ばれる方法を用いて行った. この重みづけにより、時間が経っていない震源を優先的に選択することができる. なお、プログラム起動直後は、自動処理結果を保持していないので、一元化震源 (暫定値) を読み込んで、処理結果配列に格納した.

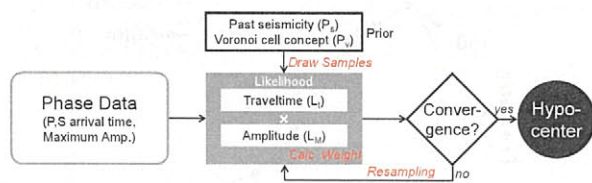


図1 手法の概念図

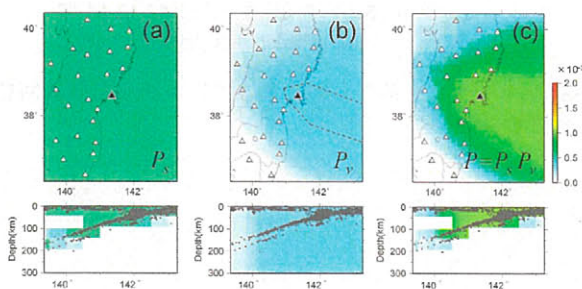


図2 事前確率分布の例

(a)過去の震源分布  $P_s$ , (b)ボロノイ分割の拡張  $P_v$ , (c)両者の積  $P_s P_v$  をそれぞれ示す.  $\Delta$ は観測点,  $\blacktriangle$ は最初にトリガした観測点 (キー観測点), 水平分布は深さ10kmにおける分布, 断面図はキー観測点を横切る断面図を示す. 過去の震源分布に着目すると、水平分布はほぼ一様分布になっていることが分かる.

### 3 結果

事前確率によってサンプリングされた震源の分布を図3に示す. (b)の従来の事前確率に比べて、(c)の方が最新の地震の発生状況を反映して初期震源が配置されていることが分かる. また、これは地震の処理結果配列から復元抽出するだけなので、ほとんど計算コストがかかることはない.

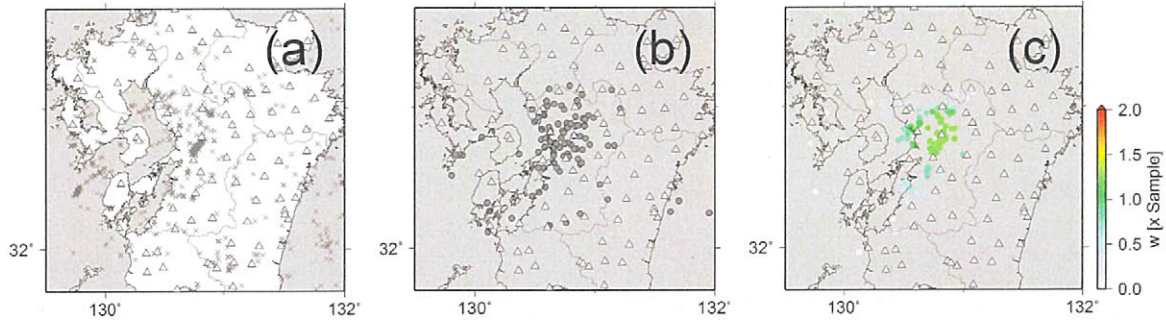


図3 事前確率分布の例 (a)は最新 10,000 個の震源分布, (b)は従来の事前確率による初期分布, (c)は(a)から抽出した初期分布である.

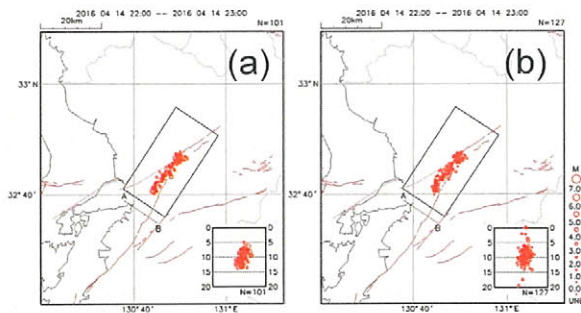


図4 震央分布と断面図 (a)一元化震源(暫定値:2016/6/6 参照), (b)自動震源の分布をそれぞれ示す. 断面図は図中 A-B 断面.

この事前確率の改良を行って、2016年4月14日22時から1時間の処理を行った。処理結果を図4に示す。表1に変更前後における決定数や精度の比較を示すが、この事前確率の変更の前後において、震源計算の結果にほとんど変化はない。一方で、図5に示す収束判定までの繰り返し計算回数を見ると、計算回数が減少していることが分かる。これはすなわち、事前確率に基づく初期の震源配置は最終的な解に対しては大きな影響はないものの、初期震源の配置を効率化することにより、わずかではあるが従来よりも早く解を収束させることができることを示している。これは特に、逐次的に処理を行う緊急地震速報処理において、従来よりも早く最終解に収束させることができる可能性があると考えられる。

#### 4 まとめと今後の課題

最新の地震発生状況を事前確率として活用することで、自動震源決定精度の向上ができるか検討を行った。その結果、最終的な解には大きな影響を与えずに、解の収束を早める効果が確認できた。最新の地震発生状況は、特に観測データが少ない初期の段階で、有効な事前情報であると考えられる。一方で、事前確率が時々刻々と変化する場合、

表1 震源決定数及び精度の比較

	変更前	変更後
決定数	128	127
一致数	91	91
緯度残差	$0.13 \pm 1.13 \text{ km}$	$0.13 \pm 1.10 \text{ km}$
経度残差	$0.05 \pm 0.69 \text{ km}$	$-0.01 \pm 0.71 \text{ km}$
深さ残差	$0.91 \pm 2.20 \text{ km}$	$0.80 \pm 1.75 \text{ km}$
M 残差	$0.04 \pm 0.13$	$0.04 \pm 0.13$

一致と判断する条件は、一元化震源と比較して、発震時刻差 5 秒かつ水平差 0.5 度以内とした。残差は、一元化震源と一致した震源について、一元化震源との差を意味する。

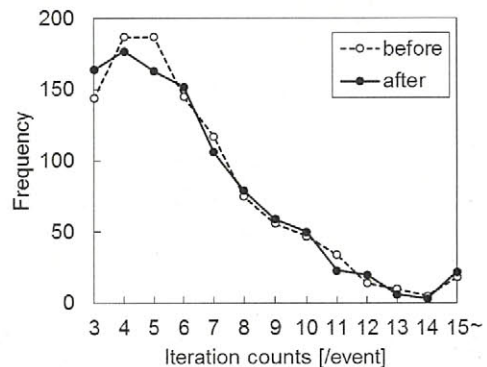


図5 1イベントあたりの収束までにかかった計算回数の頻度分布.

再現性がさらに低下し、事例検証や評価が難しくなるといった指摘もある。今後、検証方法も含めて、緊急地震速報 (IPF 法) への活用についても、検討を進めていきたい。