3.2 エンベロープデータを用いたイベント自動検出

勝間田 明男

3.2.1 はじめに

地震発生直後に余震活動の特徴を自動処理により把握することを目的として、地震波形のエンベロープを用いた自動震源計算手法の開発を行った。平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震では、余震活動が非常に活発であり、地 震波の相の明瞭な立ち上がりに基づいた手法では、規模の大きな地震であっても十分なデータが検出できない場合が あった。そのような事態にもイベントの発生のみは検出可能な手法として検討した。

エンベロープ的情報を用いたイベント識別として東田・大竹(2001)もある。また、深部低周波微動の検知にはエ ンベロープ相関法(Obara, 2002)が用いられている。エンベロープ相関法は比較的長い時間にわたって消長を繰り返 す深部低周波微動に適しているとみられる。ここではエンベロープの振幅情報も用いた上で、規模の比較的大きな地 震のイベント識別に用いる。

3.2.2 手法

以下のようなエンベロープのピーク振幅と時刻のみに基づく処理方式とした。

- ・リアルタイム伝送されてくる地震波形に、高周波を強調するフィルター(帯域1.5-8 Hz)を施す。
- ・フィルター処理後の波形からエンベロープを得る。
- ・エンベロープの振幅が大きくなっている時間帯を得て一つのイベントからの信号として、その範囲におけるエンベロープのピーク時刻、最大振幅の情報を取り出す。これを一つのデータとして扱う。
- ・解析に用いる観測点のエンベロープの最大振幅・その時刻に整合的な震源を推定する。

Fig. 3.2.1にエンベロープ化の例を示す。高周波成分を抽出するフィルター処理後に1秒ごとのRMSを計算し、更に数秒の時定数の平滑化フィルター処理をしてエンベロープを取り出す。エンベロープの最大振幅及びその時刻の情報を震源推定処理に用いる。



Fig. 3.2.1 Example of determination of the envelope of a seismic wave. The black trace is the seismic waveform and the red curve is its envelope. The green line is the noise level and the red bar shows the duration of the detected signal.

信号として抽出されたデータの時間・空間分布図の例をFig. 3.2.2に示す。右側に示すグラフ中の線分は、地震波の 振幅が大きくなっている時間帯を示しており、縦軸は左地図の縦座標に対応する。右グラフの13:16~13:17、38°N-40°N 付近に分布している振幅が大きくなっているとして抽出されたデータの一群は、地震によるものである。しかしなが ら、地震によるデータ以外に非常に多くの信号が認められる。これらのほとんどは地上ノイズによるものである。自



動震源推定の場合には、このような多くのノイズの中から地震としての信号を識別することが課題となる。

Fig. 3.2.2 Example of time-space distribution of envelope signals. Circles on the map indicate the locations of seismic stations. The vertical axis of the panel on the right corresponds to that of the map on the left. Each of the colored bar in the right panel spans the duration of a signal detected at the corresponding station on the map on the left.

イベントの識別処理を行う際、多くの場合に何らかの評価関数を用いる。各観測点におけるデータを独立な事象と みなして正規分布の確率密度関数の相乗積を評価関数として用いることが多くの場合行われる。しかしFig. 3.2.2に示 すように対象とする地震に関係するデータと同等程度の数のノイズのデータが含まれる場合には、相乗積をとるとノ イズの影響により評価関数の実際のイベントに関係する値も小さくなってしまう。規模の小さなイベントであるほど、 その影響が大きくなる。溜渕・他(2014)が下限値のある確率密度関数を用いたのも、ノイズの影響を抑えるためで あるとされている。ここでは評価関数として総和タイプを考える。つまりノイズデータの評価関数の値が小さい場合 には、それらをいくら加えてもイベント部分の値に大きな影響を与えないようにし、イベントに関係する部分は有効 なデータの積算により大きくなる関数を考える。ここでは、関数として計算が容易な次式を設定した。

$$f(x_t, x_m) = \sigma_t^2 / (x_t^2 + \sigma_t^2) \cdot \sigma_m^2 / (x_m^2 + \sigma_m^2)$$

ここで*σ_tとσ_m*は走時とマグニチュードの標準偏差相当の値であり、*x_t* = 0,*x_m* = 0の時に*f(x_t, x_m*)は最大値の1をとる。*x_t* としては、仮定した震源から計算される信号のエンベロープピークの時刻と観測された時刻の差、*x_m*としては仮定したマグニチュード相当の値とエンベロープピーク振幅から計算されるマグニチュード相当の値の差を用いる。ここではエンベロープピークの時刻の計算値として、S波走時の1.25倍の値と仮定した。Fig. 3.2.3に示すようにピーク振幅が現れる走時は、地震の規模等の様々な条件により異なる。破壊継続時間等の関係もあり地震の規模が小さければ1.25倍よりも大きくなってしまうが、ここでは概数としてこの値を仮定した。マグニチュードの計算には渡辺(1971)を用いている。もちろん、エンベロープの振幅と元の波形の振幅は異なるものであるが、基本的に振幅の距離減衰に大きな差がないと仮定した。なお、ここで用いた関数においては2次の値を用いた。4次にした場合にはピークの鋭さは補強されるが、次に述べるノイズからの影響の受けやすさの問題の解決に結びつく

ものではない。

評価関数の適用例をFig. 3.2.4に示す。Fig. 3.2.4において+によって示す地点が通常の震源決定において求められた震 央である。ここでは仮定するマグニチュードは固定してある。震源時については限られた範囲(-10~+10秒)におい てグリッドサーチして最適化している。なお、この例において正規分布に基づく確率密度関数を計算した場合には値 が小さくなりすぎ数値的アンダーフローを起こしてしまいそのままでは計算できない。



Fig. 3.2.3 Arrival times (red dots) of envelope peak amplitudes. Each colored bar spans the duration of the detected signal. The left and right panels are for M2.2 and M7.5 events, respectively. The red, blue and green curves indicate calculated arrivals of P-wave, S-wave, and the envelope peak amplitude (assumed at 1.25 times of S-wave traveltime).



Fig. 3.2.4 Example of distribution of evaluation value. The cross indicates the epicenter estimated by the conventional hypocenter determination method. To find a time-domain peak of the evaluation value at each point, the origin time was scanned within ± 10 s of that estimated by the conventional hypocenter determination method.

本手法はこのような評価関数に基づいてエンベロープデータから震源位置を推定するものであるが、震源時・緯度・ 経度・深さ・規模の5次元空間におけるパラメータ探索を行った場合には、仮定した震源パラメータに偶然整合するノ イズが積算してしまい評価関数が大きくなる場合が非常に多い。特に仮定する震源が観測網から遠いと、広い範囲の 同じような振幅のノイズの総和として評価関数が高くなるようなことが発生する。そのような例をFig. 3.2.5に示す。 これはFig. 3.2.4と同じデータについて震源時を実際の震源時から60秒まで遡ることが可能としてグリッドサーチした 結果であるが、震源時を遡って観測網から離れた場所に震源を仮定した場合に、広い範囲のノイズが整合的なデータ とみなされて評価関数の値が高くなっている。本手法は、振幅のピークに注目するという点においてSSA

(Sourcescanning algorithm: Kao and Shan, 2004)に共通する面があるが、SSA においても必ずしも空間分解能の高い結果が得られない場合がある。



Fig. 3.2.5 Distribution of evaluation value if origin times up to 60 s before the true origin time of an event are permitted. This chart shows the maximum case (time-scan to -60 s). The cross indicates the epicenter estimated by the conventional hypocenter determination method.

一般に、制約条件の少ない状態の解の探索においては、有意な解が得られることは極めて少ない。有意な解を得る ためには、最初から探索の範囲を狭くしておく必要がある。そこで、ここではキーとなるデータを選び出し、それに 整合的な範囲で震源を探すこととした。広い範囲から最適解を直接探すのではなく、信頼できるデータを軸にして探 索範囲を最初から制限している。また、深さに制約を課さない場合には、深くなるに従い観測網から離れるのと同じ ことになるので深さは固定とした。キーとなるデータを固定した場合には、震源時に制約がつくとともに、キーとな るデータの振幅に整合的である必要があるため震央距離とマグニチュードの関係に相互的制約がかかる。仮定する震 央がキーデータとした観測点から離れるに従い、震源時がさかのぼると同時に、キー観測点のデータから計算される マグニチュードは大きくなる。

キー観測点のデータを用いて震源時・震央距離・マグニチュードについて制約条件をつけて求めた評価関数の分布 をFig. 3.2.6に示す。白丸がキーとして選択したデータが得られた観測点の場所を示す。Fig. 3.2.5のように評価関数が同

気象研究所技術報告第77号 2017

心円的なパターンとなることはないが、観測点からみて実際の震源の方向に評価関数の高い領域が広く現れる。これ も仮定する震源がキー観測点から離れるに従い、振幅と時刻の一致するノイズの積算として評価関数が高くなってし まうためとみられる。そこで更に解に制約をつけるため解の探索範囲について、キー観測点からの震央距離の最大値 を制限することとした。第一段階の解の大域探索を行った後に、最適解の得られた方位について震央距離と評価関数 の関係を調べるとFig. 3.2.7に示すように、評価関数は距離の近い範囲においてピークをとった後に評価関数の距離に 対する増加率が下がる部分(震央距離約220 kmのところ)が現れる。そこで、解の探索範囲をこの範囲に制限するこ ととした。



Fig. 3.2.6 Distribution of evaluation values for which key data from a particular station was used to constraint the solution. The white dot indicates the station from which the key data was obtained.



Fig. 3.2.7 Relationship between the epicentral distance from the station from which the key data was obtained and the evaluation value.

キーデータの設定においては、まず複数地点で同時に振幅レベルが上がったグループを探し、更にその中で最大の SN比を持つものを選び出すこととした(Fig. 3.2.8)。なお、観測点のSN比の大きさに基づいてキーデータを選ぶ場合 に、ノイズが選びだされてしまう例が多い。しかし、ノイズについては最終的に整合的なデータの数が少ないため、 多くの場合地震とはみなされない。



Fig. 3.2.8 Grid search of an area of large signal-to-noise ration. The warmer colors indicate larger signal-to-noise ratio.

解を求める際には、大域探索手法の一つであるSCE-UA法 (Duan *et al.*, 1992)を用いた。Fig. 3.2.9に探索の例を示す。 灰色中塗りの赤丸がキーデータとした観測点を示す。他の丸は震源であるかを評価した点を示す。SCE-UA法におい ては乱数・鏡像などを用いながら評価値が高くなる条件を探している。Fig. 3.2.9において暖色系が評価値が高いこと を表している。



Fig. 3.2.9 Parameter estimation by the SCE-UA method (Duan *et al.*, 1992). The gray-filled red circle indicates the station from which the key data was obtained. Parameters were estimated by holding the key data fixed. Colored solid circles indicate trials of the possible solutions. Warm colors indicate better solutions.

一つの処理対象の時間内で複数のイベントを検出するには、はぎとり処理を行った。イベントの一部として判定されたデータから除いていき、残ったものから更にイベントを識別していく。P波群のみで分離して一つの信号として 検知される場合もあり、はぎとりはP波の可能性も含めて行う。SN比の高い観測点が集まっている領域がなくなるま で処理を繰り返す。

3.2.3 平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖地震への適用

以上の手法を平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の本震及びその直後の地震記録に用いた。その結果をFig. 3.2.10 に示す。右側グラフの各ドットがエンベロープデータを表すが、イベントに関連づけられなかったデータも黒 色でプロットしてある。この図に示した地震は一元化震源カタログに掲載された以下のイベントに対応する。

- 2011/03/11 14:46:18.12 N38°06.21' E142°51.66' M_w9.0
- 2011/03/11 14:51:20.56 N37°18.64' E142°14.25' $M_{\nu}6.8$
- 2011/03/11 14:54:31.32 N37°30.48' E141°21.19' M_v 6.1

ここで *M*_v は速度振幅マグニチュードである。エンベロープのピーク時刻をデータとして用いたものであるので震源 パラメータとの差はある程度あり、相対的に規模の小さな地震の検出はできていないものの、エンベロープのピーク をイベントとして認識できている。なお、*M*_w9.0 の地震の場合 P 波と S 波の到着時刻の間もこの地震として結びつけ られたデータ群がある。これは震央距離が長い場合に P 波群が S 波群から分離して一つの信号として検知され、それ を P 波群としてイベントに結びつけたものである。

3.2.4 まとめ

大地震の直後のような地震波が重なり立ち上がりが明瞭でない状態にも地震の発生を検知できることを目指して エンベロープデータを用いた地震のイベント識別の手法の開発を行った。自動震源決定について一般に言えることで あるが、イベント識別においてノイズの影響を如何に抑えるかが重要な要素であった。そのため、以下のような方法 をとった。

- ・評価関数として、多数あるノイズの影響を受けにくく、注目するイベントに関わるデータについて相補的に評価値 を上げることができるよう、総和型のものを用いた。
- ・近隣観測点を含めてエンベロープデータの振幅増大を検知した観測点の一つをキーデータとして用い、キーデータ
 に整合的な範囲内において解の探索を行った。
- ・解の探索には、大域探索手法の一つであるSCE-UA法を用いた。

・複数のイベント識別には、イベントに結びつけられたデータは除くというはぎとり法を用いた。

その結果、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の本震とその直後の主な余震についてイベント識別可能である ことが確認された。



Fig. 3.2.10 Application of the method of this study to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The dots on the panels on the right denote the arrival times of peak amplitudes relative to the estimated origin time. Red, orange and green dots indicate station locations (the map on the left) and their corresponding data (on the graph). Orange and the green dots indicate data with large residuals. Green dots indicate data with smaller amplitude and relatively large time residuals. Black dots represent data that are not associated with the earthquake. The red, blue and green curves indicate calculated arrivals of P-waves, S-waves, and peak amplitudes, respectively.

謝辞

本調査には、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、 京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、気象庁、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国土地理院、青森県、 東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市及び国立研究開発法人海洋開発研究機構のデータを利用している。

参考文献

- Duan, Q., S. Sorooshian, and V. Gupta, 1992: Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resources Research*, **28**, 1015-1031.
- Kao, H. and S.-J. Shan, 2004: The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space, *Geophys. J. Int.*, **157**, 589-594.
- Obara, K., 2002: Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan, Science, 296, 1679-1681.
- 溜渕功史・山田真澄・S. Wu, 2014: 緊急地震速報のための同時多発地震を識別する震源推定手法, 地震2, 67, 41-55, doi:10.4294/zisin.67.41.

東田進也・大竹和生,2001: パターン認識を応用した自動地震識別法, 地震2,53,273-280.

渡辺 晃, 1971: 近地地震のマグニチュード, 地震2, 24, 189-200.