

Matched Filter Methodによる群発地震の解析の試み —2011年飛騨山脈山麓旗鉾付近の群発地震活動の例—

Seismic Activity at the Western Frank of Mt. Norikura, Gifu Prefecture, Japan, in 2011, Detected by the Matched Filter Method

大見士朗

Shiro OHMI

Synopsis

Earthquake swarm activity that took place at the western flank of Mt. Norikura, Gifu Prefecture, Japan was analyzed using the Matched Filter Method (MFM). Focal mechanism solutions indicate this activity occurred at the ENE extension of the Takayama-Oppara fault system. Hypocenter distribution detected by MFM well coincide with those with manually inspected catalogue by JMA.

キーワード: 飛騨地方, 群発地震, Matched Filter Method

Keywords: Hida district Gifu Japan, earthquake swarm, Matched Filter Method

1. はじめに

岐阜県飛騨地方では、飛騨山脈を中心として微小地震活動が活発であり、しばしば群発地震活動が発生する。たとえば、2011年3月11日の2011年東北地方太平洋沖地震の直後に発生し、2011年4月まで活発な活動が継続した群発地震（大見ら、2012）や、1998年8月に長野県上高地付近で始まり、約1年半にわたって活動が継続した群発地震活動（和田ら、1999、2000等）などがその主たる例である。

このうち、2011年3月からの飛騨山脈での群発地震活動の直前には、飛騨山脈南部に位置する乗鞍岳西麓の岐阜県高山市丹生川町旗鉾付近を中心とする群発地震活動が発生しており、本稿ではこの地震活動について報告する。この地震活動は、2011年2月27日2時18分頃発生したM5.0（気象庁マグニチュード、以下同じ）の地震を皮切りに発生した。この地震および同5時38分に発生したこの活動の最大地震であるM5.5の地震により、岐阜県高山市では震度4の揺れを記録した。高山市の気象官署で震度4を記録したのは、1944年12月7日の昭和東南海地震、1945年1月13日の三河地震以来のことであった。

著者の属する地震予知研究センター上宝観測所は、

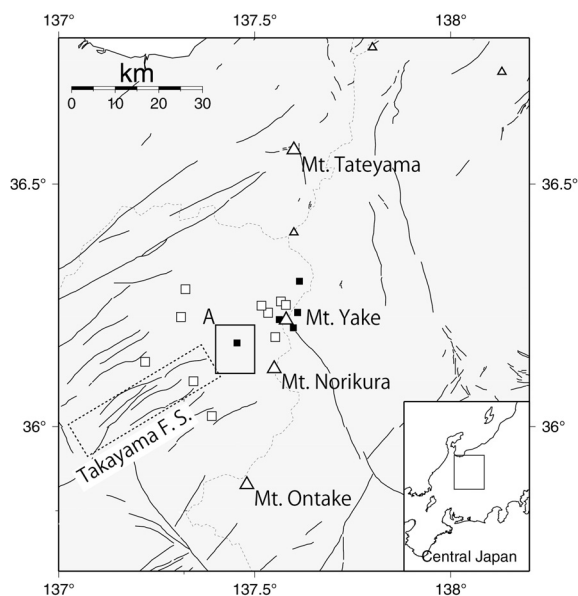


Fig.1 Study area together with active faults and volcanoes. Squared area named A is the target area and large and small open triangles show the active and Quaternary volcanoes while solid lines indicate active faults. Open and solid squares permanent and temporally (offline) seismic stations, respectively.

岐阜県飛騨地方の地震活動も研究対象のひとつとしている。対象地域の地震活動の監視は必ずしも観測所の本務ではないが、気象庁等、他機関の地震カタログの精度向上が著しい現状でも、個々の地域自治体に対しては、さらに迅速かつ、きめの細かい情報が必要な場合も残されている。それにもかかわらず、昨今の観測点数の増加および熟達した検測者の減少により、特に速報的な報告を要する際にはそれが次第に困難となりつつある。そのため、大見(2014)では、群発地震の自動処理手法として、Matched Filter Method (たとえば、Gibbons and Ringdal, 2006やShelly et al., 2007) を導入し、その有用性を検証しながら群発地震活動の報告を試みた。本稿では、大見 (2014) と同様の手法により、2011年2月27日に始まった、飛騨山脈西麓の地震活動について報告する。

2. 観測データとその処理手法

2.1 対象地域と観測網

Fig.1に、今回の報告の対象地域と用いた微小地震観測点の分布を示す。当地域には、大学、気象庁(JMA)、防災科学技術研究所(防災科研, NIED)、国土交通省北陸地方整備局神通川水系砂防事務所(神通砂防)等が運用するテレメータ観測点からなる観測網が展開されており、それらのデータは京都大学防災研究所(京大防災研, DPRI)に集約されている。そのほかに、当地域には京大防災研により、焼岳火山の地震活動の監視を目的とした臨時観測点も設置されて

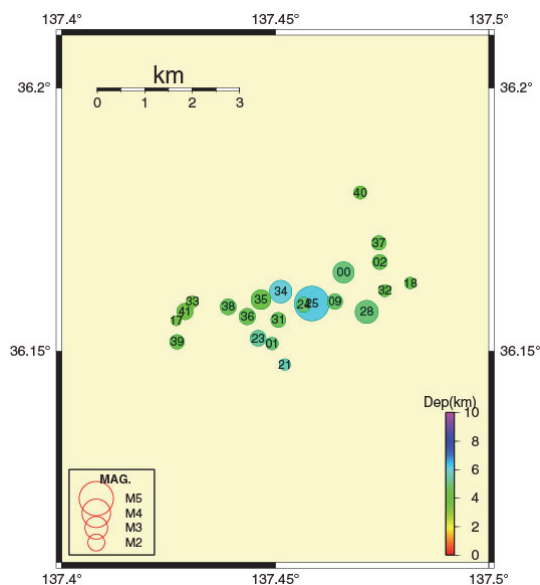


Fig.2 Location of the template earthquakes for MFM analysis. Plotting area coincides with the area A shown in Fig.1. Numerals attached to the symbols denote the index number of the template.

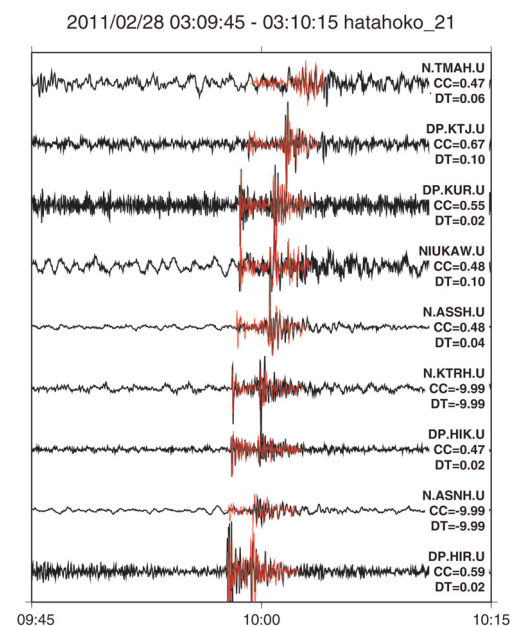
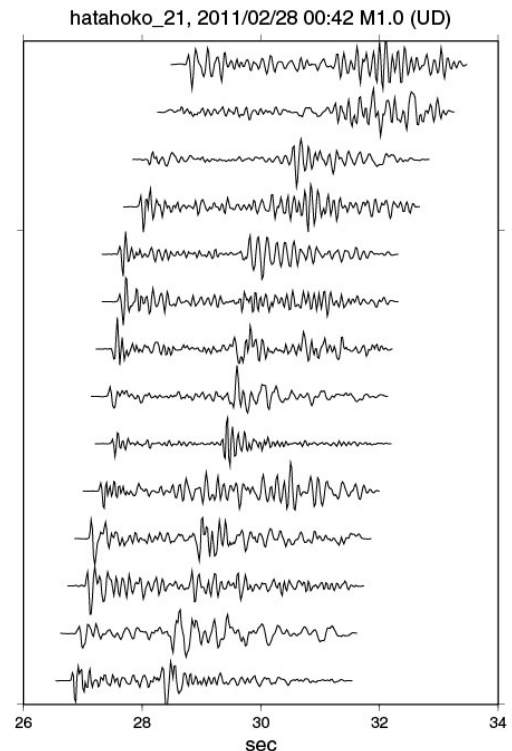


Fig.3 (a) (upper) Example of a template earthquakes. They are vertical components waveform of the template No.21. (b) (lower) Example of a detected event using template No.21. Vertical components with their station names shown. CC shows the correlation coefficient among the template and detected event while DT shows the time shift between origin time of the detected event and lag time that exhibits the correlation coefficient CC.

いる（たとえば，大見ら，2012）．本報告では，震源決定については，それらのうち主としてFig.1に示した観測点を使用した，地震の発震機構の決定については，これらに加えて震源域を中心とする半径150km以内の観測点を適宜使用した．

2.2 Matched Filter Methodについて

Matched Filter Method（以下，MFMと略す）は，対象地域の観測網で捉えられた代表的な地震の波形をテンプレートとして使用し，これを用いて連続波形データをスキャンすることにより，テンプレート地震と同様の波形の特徴を持つイベントを検出する手法であり，比較的狭い範囲に震源が集中する群発地震の解析処理には有効に機能することが期待される．ここでは，大見(2014)が用いた，MFMにより，地震の検出と同時に検出の際に得られた情報を用いて震源決定を行うことができるようにした手法を用いた．

なお，Kato et al. (2013)が，本報告と同じ群発地震活動をMFMで解析し，東北地方太平洋沖地震の発生に伴う同地域の地震活動度の静穏化の議論を行っているが，Kato et al. (2013)と本報告のMFM手法の着眼点や適用方法は以下のような点で異なっている．Kato et al. (2013)では，東北地方太平洋沖地震発生に

伴う当地域の地震活動の変化の検出が主目的であり，気象庁カタログが一応の完成を見た段階でこれに記載された本群発地震のイベントの大多数をテンプレートとして用いて連続波形データのスキャンを行い，地震の検出を行っている．これに対して，本報告では，前述のように，準リアルタイムで，進行していく現象を把握していくのが主目的であるため，できるだけ少数のテンプレートでMFMを実行することを目指した．そのため，ある地域で地震活動が発生した際にはその地域に適用できるテンプレートを作成し，既存テンプレートでは検出できない地震が後日新たに発生した場合には新規のテンプレートを作成するというステップを繰り返していること，さらには，それぞれの地震を検出した段階で検出結果を使用して準リアルタイムで個別地震の震源決定も可能な手法に発展させている部分が異なっている．

3. 解析結果

解析に使用したテンプレート地震の震央分布をFig.2に示す．それぞれのテンプレート地震波形は，Fig.1に示す観測点の中から使用に耐えうる波形を選び，それぞれの観測点の3成分波形から，P波到着時

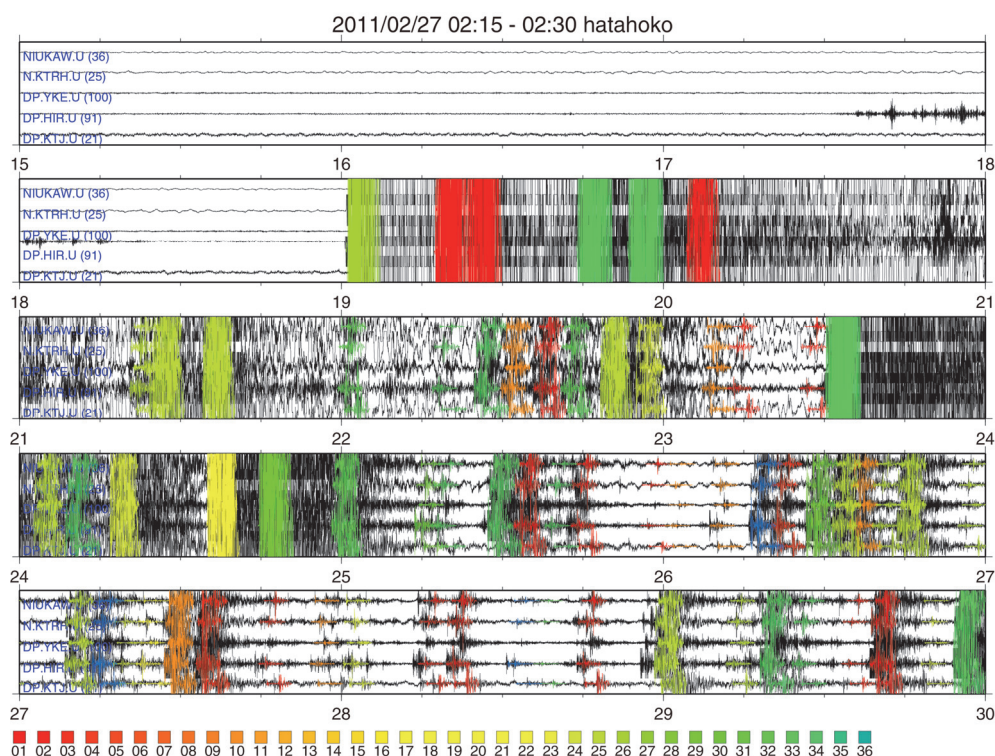


Fig.4 Example of event detection by Matched Filter Method (MFM) during 15 minutes starting 02:15, February 27, 2011, JST. Colored areas show the earthquakes detected by this method.

刻の0.25秒前から5秒間の波形を使用した． Fig.3(a)にテンプレート地震波形の例を示す．これはNo.21として使用したテンプレートの上下動成分の例であ

る．また, Fig.3(b)は, このテンプレートを使用して, 連続波形データ上に検出されたイベントの例である． Fig.4に, MFMによる地震の検出結果の例を示す．

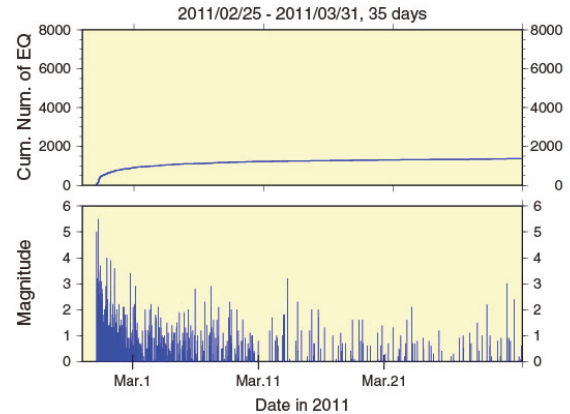
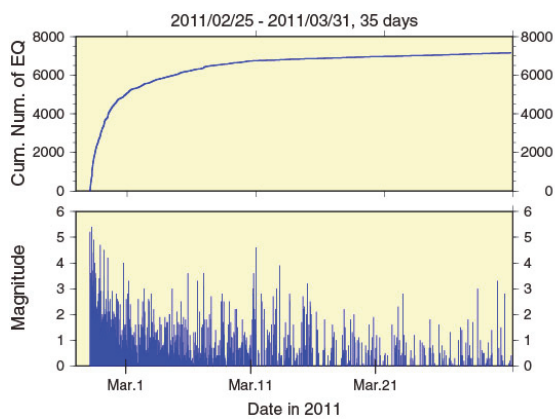
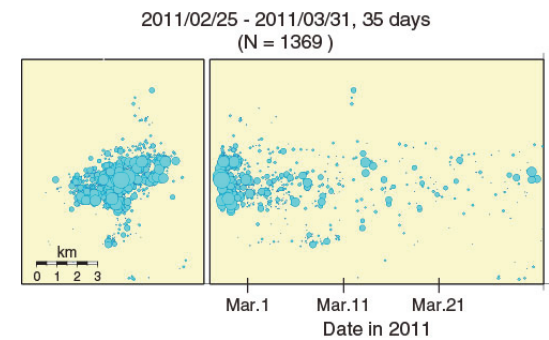
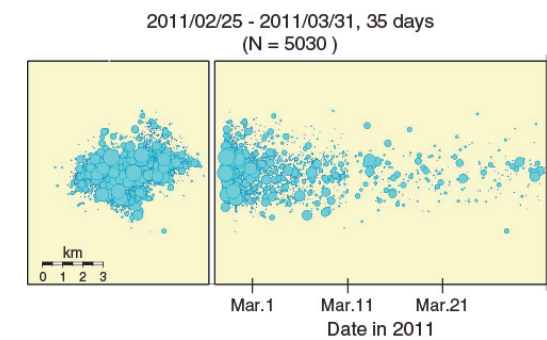
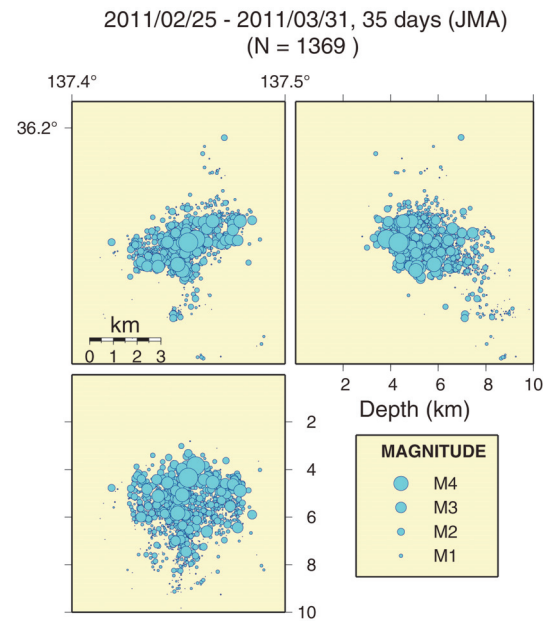
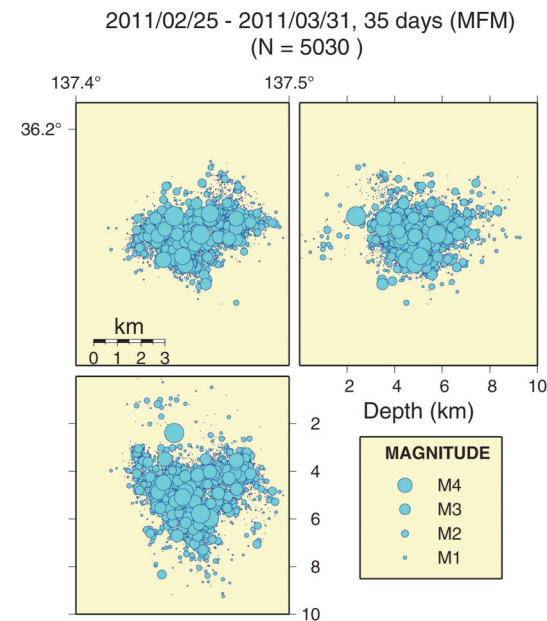


Fig.5 Hypocenters relocated using MFM technique. (a) (upper) Hypocenter distribution in the region A (see Fig.1) from February 25 to March 31, 2011. (b) (middle) Spatio-temporal plot. (c) (lower) Cummulative number of earthquakes (top) and magnitude-time plot (bottom).

Fig.6 Hypocenters relocated by JMA for reference. (a) (upper) Hypocenter distribution in the region A (see Fig.1) from February 25 to March 31, 2011. (b) (middle) Spatio-temporal plot. (c) (lower) Cummulative number of earthquakes (top) and magnitude-time plot (bottom).

これは、地震活動開始前後の、2011年2月27日2時15分から15分間の解析結果である。この15分間に、本手法では、66個のイベントを検出している。なお、同時間帯に気象庁カタログに記載されているイベントは27個である。

Fig.5(a)にMFMで決定した2011年2月27日から3月31日までの震源分布、Fig.5(b)に同期間の時空間分布、Fig.5(c)に地震検出数積算グラフおよびM-Tダイアグラムを示す。なお、Fig.5(a)および5(b)には、P波到着時刻およびS波到着時刻がそれぞれ6点以上で検出され、高精度に震源決定がなされたと考えられるイベントのみをプロットしているのに対し、5(c)では検出されたイベントすべてについてプロットしている。また、比較のため、Fig.6(a)から6(c)に、同期間の気象庁のカタログによる同種の図を示す。

Fig.7は、2月27日から3月10日までに震度2以上を記録した地震を中心に手動で再検測を行い、初動極性を用いて発震機構解を求めたものである。

4. 考察と今後の課題

4.1 地震活動について

今回の群発地震活動の震源域には活断層の記載はないが、高山・大原断層帯を構成する高山断層帯(Fig.1参照)の東北東延長部にあたること、Fig.7に示す発震機構解に同断層帯の走向に調和的なものが多いことから、今回の活動は同断層帯の東北東延長部で発生したものであると考えられる。

Kato et al. (2013)で議論された、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の前後での地震活動の変化については、本手法の結果でも3月11日以降の明らかな活動度の低下はみられないものの、Kato et al. (2013)に

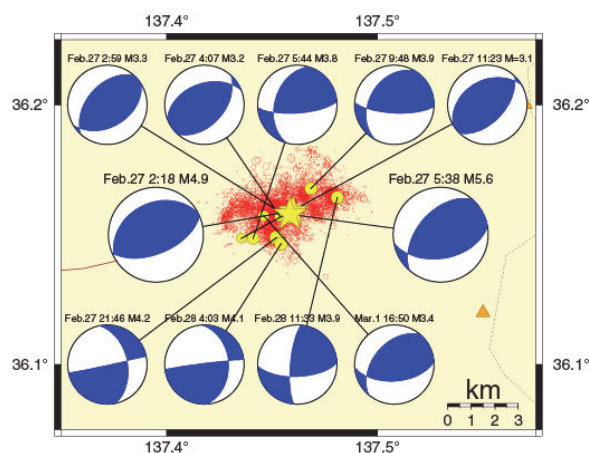


Fig.7 Focal mechanism solutions of felt earthquakes from February 27 to March 10, 2011 whose intensity is equal to or more than two (2). Initial motion of P waves are used for analyses. Lower hemisphere projection is used.

比較すると3月11日直後のみは検知数が減少しており、活発な余震活動や飛騨山脈の群発地震活動等により、MFMによる当該地域の地震の検知能力が低下したことが予想される。

4.2 MFMによる地震検出と震源決定について

本報告では、MFMを発展させ震源決定にも応用できるようにした手法を用いた。地震の検出に関しては、本手法が有効に機能していることはFig.4により明らかである。前述のように、Fig.4に示した時間帯の本手法による検出数は66個であったのに対し、従前からSATARNシステム（大見ら、1999）で使用しているWINシステム（ト部ら、1992）のイベント検出論理による検出数は約30個であり、約2倍の数のイベントを検知した。なお、同時間帯の気象庁カタログには27個のイベントが記載されているが、気象庁の基準での地震の検知数については不詳である。

また、Fig.5とFig.6を比較すると、大局的には同様の傾向を示しており、SATARNシステムなどの従前の自動処理震源データと比較すると、速報データとして使用する価値は高いと考えられる。これは、本手法での地震の検知が有効に機能している部分に負うところが大きいものと考えられる。このように、本手法での地震の検知については有効に機能することが確かめられたが、震源決定の精度については若干の課題が残る。Fig.8は、2月27日から3月10日までに震度2以上を記録した地震を中心にMFMによる自動震源決定の結果と、手動再検測の結果を比較したものである。青いシンボルが再決定震源の位置を示し、赤い線分の先がMFM震源の位置を示す。これによれば、震央位置については、およそ1km程度以内の移動にとどまっているが、深さについては、再決定震源は系統的に浅くなっており、イベントによっ

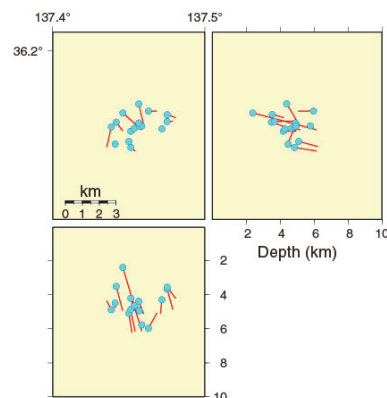


Fig.8 Shift in location of hypocenters among two relocation methods. Solid circles show the hypocenters manually inspected and relocated while the other end of the red bars show the hypocenters automatically located by MFM.

ては最大2km程度の差が生じているものもある。今回の群発地震の震源域の広がりからみると2kmの誤差は必ずしも小さいものではなく、精度向上のための検討が今後必要である。

本手法の欠点として、大見（2014）でも言及しているように、テンプレート地震を設定していない地域で発生したイベントには、MFMの原理上、対処できないという点があげられる。そのような地域にあらたに地震活動が発生した場合には、テンプレート地震のチューニング作業に一定の時間を要するため、その間は充分な情報の発信ができない恐れがある。

火山地域のような、比較的狭い地域に地震活動が局在化するようなケースでは、本手法は有効に機能することが期待される。

5. まとめ

Matched Filter Method (MFM)を使用して、2011年2月27日に始まった岐阜県飛騨地方乗鞍岳西麓の群発地震を解析した。主なイベントの発震機構解を求めたところ、高山・大原断層帯の東北東延長部で発生したと考えると整合的である。MFMにより求められた震源分布を気象庁カタログと比較したところ、大局的には同様の傾向を示しており、本手法は速報データとしては意味のある情報を作成できると考えられる。しかし、個別のイベントの震源決定精度には問題の残る部分もあり、今後の検討課題である。

謝 辞

今回の解析では、各大学、気象庁、防災科学技術研究所、および国交省神通川水系砂防事務所の微小地震観測網の波形データを使用した。また、高山市危機管理室には、震源域の高山市丹生川町旗鉾地区での臨時地震観測に多大の便宜を図っていただき、地震活動の把握に有用なデータを得ることができた。中部山岳国立公園内での臨時地震観測に際しては、以下の関係機関のご協力をいただいた。記して感謝する。国交省神通川水系砂防事務所、国交省富山河川国道事務所、環境省平湯自然保護管事務所、岐阜県飛騨振興局、林野庁飛騨森林管理署、名古屋鉄道株式会社、奥飛観光開発株式会社、国交省松本砂防事務所、環境省松本自然環境事務所、長野県松本地

方事務所、林野庁中信森林管理署、松本市安曇支所、長野県松本建設事務所、信州大学山岳科学総合研究所

参考文献

- ト部 卓・東田進也（1992）：win-微小地震観測網波形験測支援のためのワークステーション・プログラム（強化版），地震学会講演予稿集，No.2，P41.
- 大見士朗（2014）：Matched Filter Methodによる群発地震解析の試み～2013年飛騨山脈穂高岳付近の地震活動の例～，地震2，投稿中.
- 大見士朗・和田博夫・濱田勇輝（2012）：飛騨山脈焼岳火山周辺における東北地方太平洋沖地震後の群発地震活動，地震2，第65巻，pp.85-94.
- 大見士朗・渡辺邦彦・平野憲雄・中川 渥・竹内文朗・片尾 浩・竹内晴子・浅田照行・小泉 誠・伊藤 潔・和田博夫・澁谷拓郎・中尾節郎・松村一男・許斐 直・近藤和男・渡辺 晃（1999）：微小地震観測網SATARNシステムの現状 と概要，京都大学防災研究所年報，第42号B-1，pp. 45-60.
- 和田博夫・伊藤潔・大見士朗（2000）：飛騨山脈の群発地震（その2）—周辺活動域への影響—，京都大学防災研究所年報，第43号B-1，pp.115-121.
- 和田博夫・伊藤潔・大見士朗・岩岡圭美・池田直人・北田和幸（1999），1998年飛騨山脈群発地震，京都大学防災研究所年報，第42号B-1，pp.81-96.
- Gibbons, S. J. and Ringdal, F. (2006) : The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation, Geophys. J. Int., 165, pp.149-166, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x.
- Kato, A., Fukuda, J., and Obara, K. (2013) : Response of seismicity to static and dynamic stress changes induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/grl.50699
- Shelly, D. R., Beroza, G. C., and Ide, S. (2007) : Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, Nature, doi:10.1038/nature05666.

（論文受理日：2014年6月11日）