

Matched filter 法を用いた箱根深部低周波地震の監視システムの開発

行竹洋平*

Development of a routine system for a deep-low frequency earthquake in Hakone Volcano, by using the matched filter method

by

Yohei YUKUTAKE*

Abstract

I developed a routine system to monitor deep-low frequency earthquakes (DLFs) in Hakone Volcano, by using the matched filter method. DLFs have been often observed beneath the caldera of Hakone volcano within the depth range from 18 to 28 km. The activity of DLFs is thought to be related to a behavior of magmatic fluid at the depth. Therefore, monitoring of DLFs activity on a real-time basis is essential to evaluate the volcanic activity. However, DLFs could be hardly detected by using our present triggering system based on an STA/LTA ratio, because of a spatial distribution of amplitudes for DLF signals and the triggering process. Then, we applied the matched filter method to the continuous seismic record at the permanent seismic stations around Hakone volcano. The template waveforms of DLFs are prepared on the basis of the unified catalog by Japan Meteorological Agency. The cross-correlation analysis is conducted between the template waveforms and the 3600 sec seismic records every hour. The DLF catalog obtained by the matched filter method reveals the detailed temporal variation of the activity and new system is useful to monitor the DLF activity at the volcano.

1. はじめに

火山直下の深さ 10 から 30km の範囲で、通常の地震よりもゆっくりとした地震波を励起する「深部低周波地震 (Deep low frequency earthquake)」(以下、DLF) という現象が観測されている。図 1 は気象庁一元化震源カタログ (以下、気象庁カタログ) を用いて作成した 2003 年から 2017 年までの期間に日本列島で発生した低周波地震の震央分布である。東海から四国西部にかけての領域で東西に帯状に低周波地震の分布が見られるがこれは沈み込むフィリピン海プレート境界で発生する非火山性の低周波地震 (例えば、Obara, 2002) である。それ以外の領域では、低周波地震は多くの場合活火山周辺に分布していることがわかる (本論では特に記載がない限り、火山下で発生する低周波地震のことを DLF と呼ぶことにする)。それゆえに、DLF の発生原因についてこれまで、火山深部のマグマ性流体が深くかかわっていると考えられてきた。例えば、Nakamichi *et al.* (2003) により岩手山で発生した DLF について実体波

の振幅比からモーメントテンソル解が推定され、ダブルカップル成分だけではなく開口クラック変動を示す成分も含まれているためマグマ性流体の関与が示唆された。一方で、DLF と山体の膨張を示す火山性地殻変動や浅部の群発地震及び地表面現象などの火山活動との関係は必ずしも明瞭になっていない。例えば、原田ほか (2010) では、富士山及び箱根で発生する DLF 活動について気象庁カタログに基づき地殻変動との関係を検証した結果、箱根で発生する DLF と地殻変動との明瞭な相関は認められないと結論付けている。

このように DLF と火山活動との関係についてはまだまだ検証や議論の必要があるが、それが火山深部におけるマグマ性流体の何らかの振る舞いを反映した現象である可能性は十分考えられる。従って、DLF の活動状況をできるだけ詳細にかつリアルタイムで把握することは、火山活動監視の観点から重要であると思われる。そこで筆者は、近年様々な研究で利用されている Matched Filter 法 (以下、MF 法) を用いて、箱根火山において

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

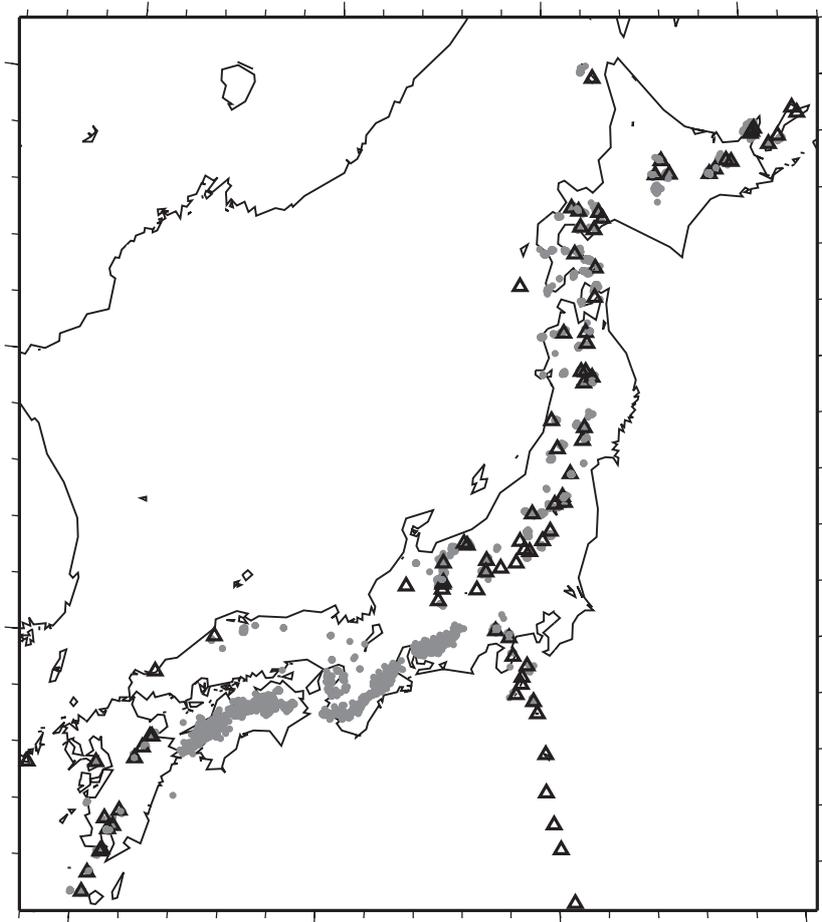


図1 気象庁カタログによる2003年以降14年間で日本列島に発生した低周波地震の分布(灰色●)及び活火山の位置(△)
 Fig.1 Hypocenter distribution of low-frequency earthquakes in and around Japanese Islands by using the JMA catalog in the period from 2003 to 2017. Circles and triangles show the epicenters of low-frequency earthquakes and active volcanos, respectively.

発生するDLFをほぼリアルタイムで検出するシステムを温泉地学研究所(以下、当所)に導入したので、本論ではそれについて記載をする。なお、MF法で検出されたDLFの詳細な地震活動様式は、この現象の発生メカニズムや火山活動との関係を考える上で非常に重要な結果であると思われるが、この議論は別の論文で改めることにし、本論はDLFの概要と導入したシステムの記載を目的とする。

2. 箱根火山でのDLF活動について

図2には気象庁カタログによる箱根火山で発生したDLFの震源分布を示す。箱根火山ではカルデラの北端、金時山の下深さ18~28kmの範囲にDLFが分布する。防災科学技術研究所(以下、防災科研)Hi-net足柄観測点で観測された、DLFの波形例を図3、振幅スペクトルを図4にそれぞれ示す。DLFのシグナルは1-6Hzの周波数範囲にエネルギーが卓越し、また地震動の継続時間は約15秒である。一方、箱根の深部では、DLFよりも

高周波成分に富んだ地震波を励起する地震も観測されている。本論では、これを深部高周波卓越型地震(DHF)と呼ぶことにする。なお、気象庁カタログではDHFに対しては、“低周波地震”を示すフラグがついておらず、通常の構造性地震と同じ分類がされている。DHFは図2においてその震源位置が○で示されているが、DLFの活動域の上部に集中しているように見える。また、DHFの波形及びその振幅スペクトル(図3及び4)から、この地震のシグナルは1-20Hzの広い範囲で卓越し、また継続時間もDLFと比較して短いことが分かる。DHFについては気象庁カタログでは通常地震と同じに分類されているが、定常的な地震活動が起きていない場所で発生しており、マグマ性流体と何らかの関係がある現象の可能性もある。

次に図5に気象庁カタログに基づくDLF活動の時系列を示す。DLFと火山活動との関係については2015年群発地震活動の際には発生数が明瞭に増えているが、一方でその他の期間例えば2009年の群発活動では明瞭な

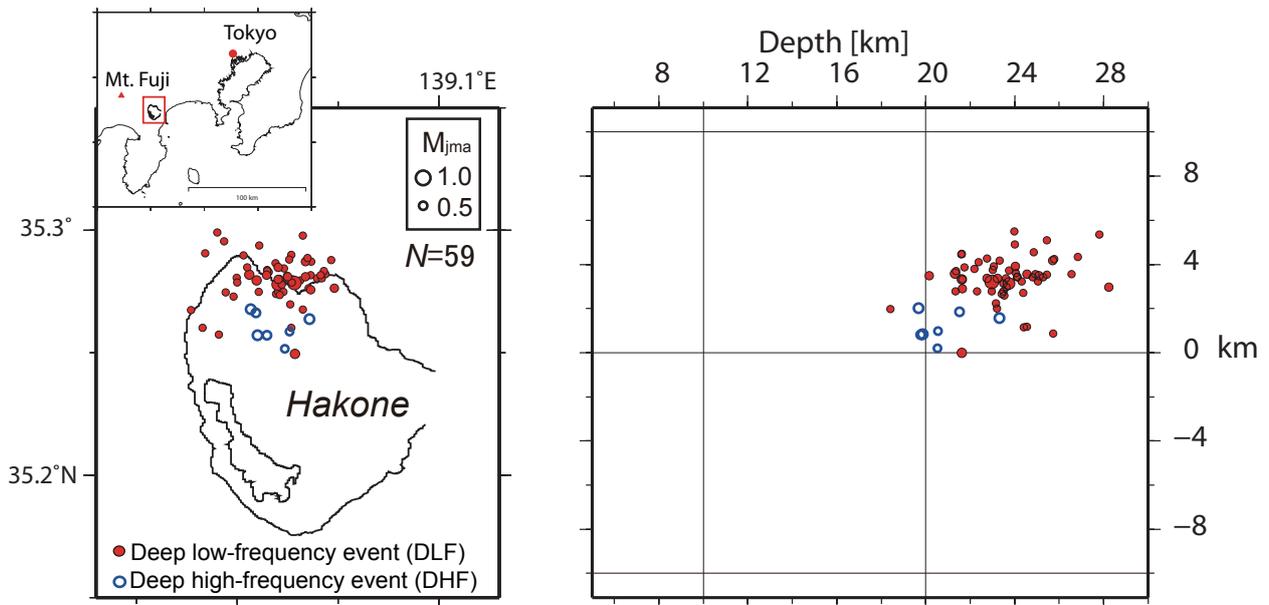


図2 気象庁カタログによる2011年1月から2016年12月の期間に箱根で発生したDLFの震源分布 ($M_j > 0.4$ のみを●でプロット)。なお○はより高周波成分を含むDHFの震源位置を示す。(左)震央分布図、(右)南北断面に投影した深さ分布。

Fig.2 Hypocenter distribution of DLF and DHF by the JMA catalog in the period from January 2011 to December 2016. Solid and open circles show the locations of DLF and DHF, respectively. (Left) Epicentral distribution, (right) Depth distribution along N-S cross section.

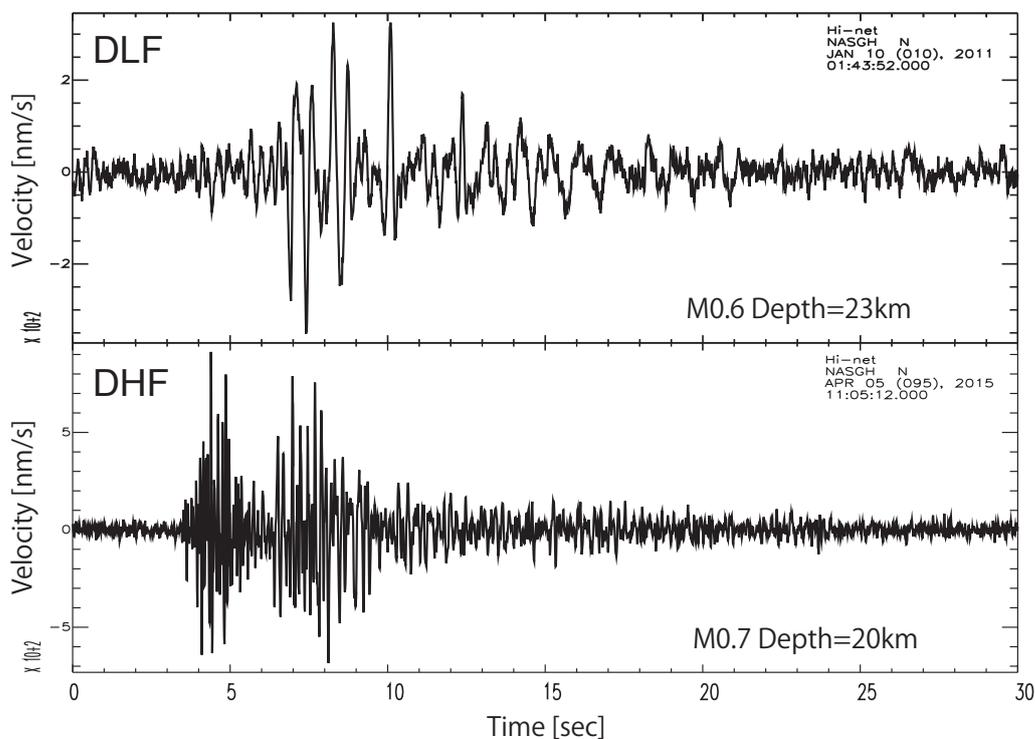


図3 (上段)防災科研 Hi-net 足柄観測点で観測されたDLFの南北成分波形例。(下段)同観測点で観測されたDHFの波形例。

Fig.3 Examples of waveform records for DLF and DHF at the NASGH Hi-net station.

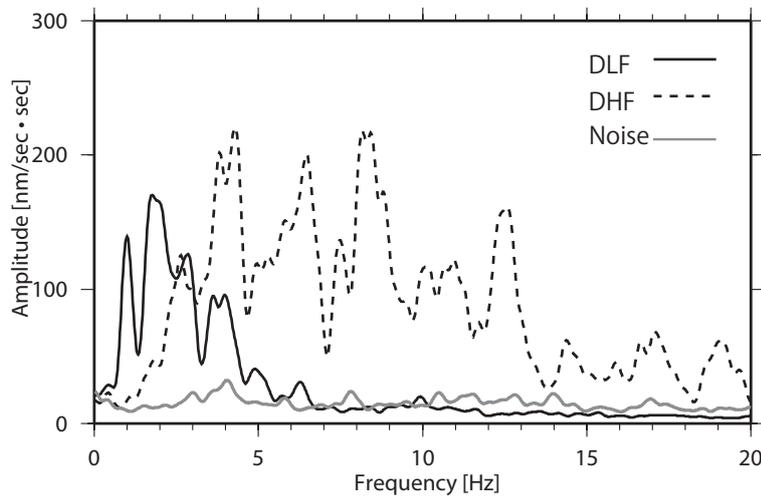


図4 図3に示した DLF (実線) 及び DHF(破線) の振幅スペクトル。灰色線は Hi-net 足柄観測点のノイズ波形の振幅スペクトル。

Fig. 4 Amplitude spectra of DLF (black line) and DHF (broken line).

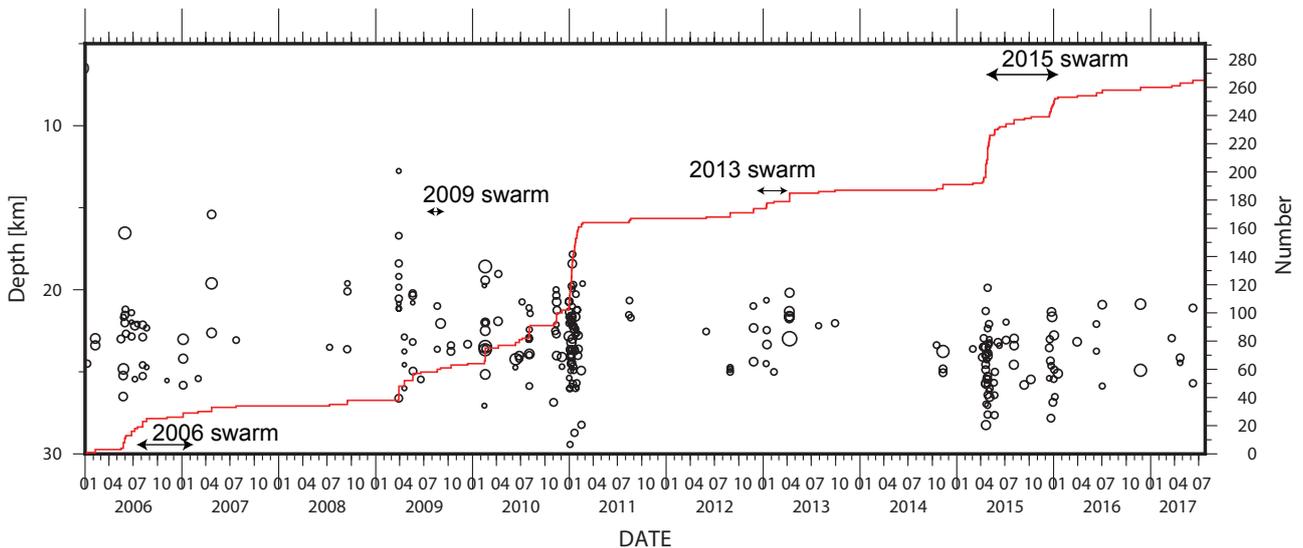


図5 気象庁カタログに基づく、2006年1月から2017年7月までの期間における DLF の時間-深さ分布及び積算曲線(実線)。矢印はこの期間に箱根で発生した主な群発地震活動の時期を示す。○の大きさはマグニチュードに対応。

Fig.5 Time-depth plot and cumulative number of earthquake for DLF occurred beneath Hakone volcano. The arrows show the time periods of remarkable swarm activities. Size of each circle corresponds to its magnitude.

関係性は積算数からは必ずしも見えるわけではなく、また2011年1月のように有意な火山活動の活発化が群発地震や地殻変動データには表れていない時期にも、DLFが多く検出されている期間もある。

3. 現ルーチンシステムの DLF に対するイベント検知能力

現在当所では、WIN システム (上部、1994) による STA/LTA に基づいた地震トリガリング方法で、地震の検出を行っている。箱根での DLF に対する検知能力については、例えば2015年は気象庁一元化カタログによると約60イベントが検出されているが、一方当所の震

源カタログでは検出された地震は数イベントしかなく、現システムでは DLF に対する検知能力が非常に低いことを示している。

ではなぜ、当所システムでは DLF に対する検知能力が低くなっているのだろうか? その原因は、DLF シグナルの振幅空間分布と現システムのトリガリング方法にある。図6は DLF のシグナルに対する箱根火山周辺の定常観測点 (当所、防災科研、気象庁及び東大地震研究所) の S/N 比を示す。ここでの S/N 比は、気象庁カタログに基づき2015年に発生した約60イベントの DLF に対して、イベント毎に各観測点で S/N 比を求め、その

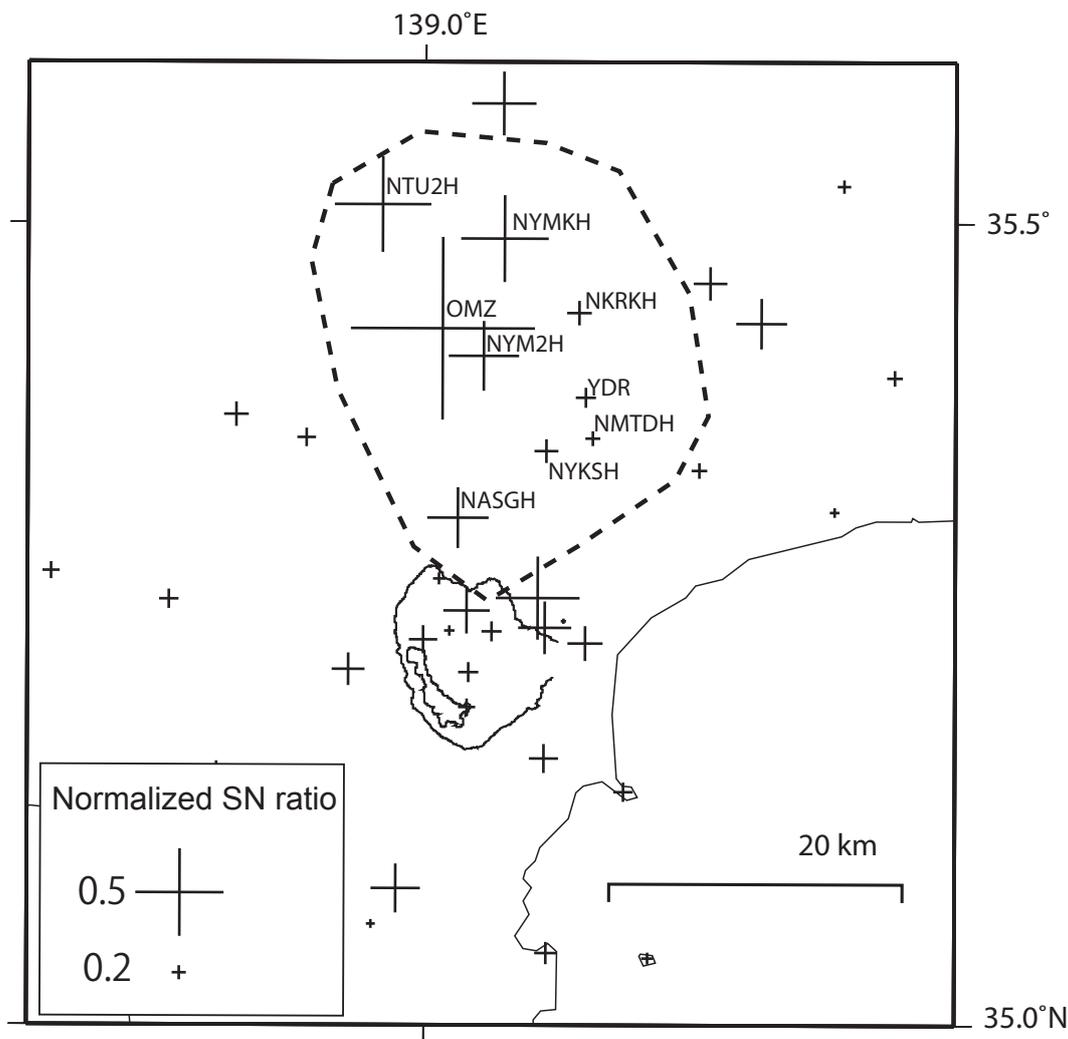


図6 DLFのシグナルに対する各観測点の正規化されたS/N比。

Fig.6 Spatial distribution of S/N ratio at each station.

イベントの最大値で観測点のS/N比を正規化、その処理を全イベントで行い観測点毎に正規化したS/N比の平均値を求めたものである。つまり、図6に示したS/N比が高い値を示す観測点ほど、DLFシグナルの振幅が大きくなりやすいこと意味している。図6からDLFのシグナルは、震源域直上の箱根カルデラ内の観測点よりも、足柄平野から丹沢山地における観測点で高くなる傾向がみられる。これは、DLFの地震波放射パターンもしくはこの領域の地震波減衰構造が影響していると考えられる。さらに、当システムでは箱根カルデラ内の浅部で発生する群発地震の検知を重点においているため、カルデラ内の地震観測点のみを用いて地震イベントのトリガー処理を行っている。そのため、DLFに対してはよほど規模が大きくなる限り、現システムでは検知されない。

上記の問題に対して、DLFの検知能力を高める方法は次の2通りが考えられる。一つは、大又沢(OMZ)や寄

(YDR)など丹沢山地の観測点のデータもイベントトリガー処理に加えることである。しかし、この方法では丹沢地域などで過去の温地研地震カタログと検知能力の整合性が保たれなくなるという問題がある。さらに、DLFの波形は立ち上がりが通常の地震よりも緩やかでかつ規模がマグニチュード1以下のものがほとんどなので、地動ノイズに埋もれてSTA/LTAを用いたイベント検知方法では、そもそも多くのDLFを取りこぼしているという可能性もある。もう一つの方法は、まったく別のイベント検知システムを導入することである。従来とは独立した処理システムを導入することにより、従来システムによる震源カタログの均質性を変えることなく、新たなDLF専用の震源カタログを得る事ができる。そこで本研究は、MF法を用いてDLFをほぼリアルタイムで検出するシステムを導入した。

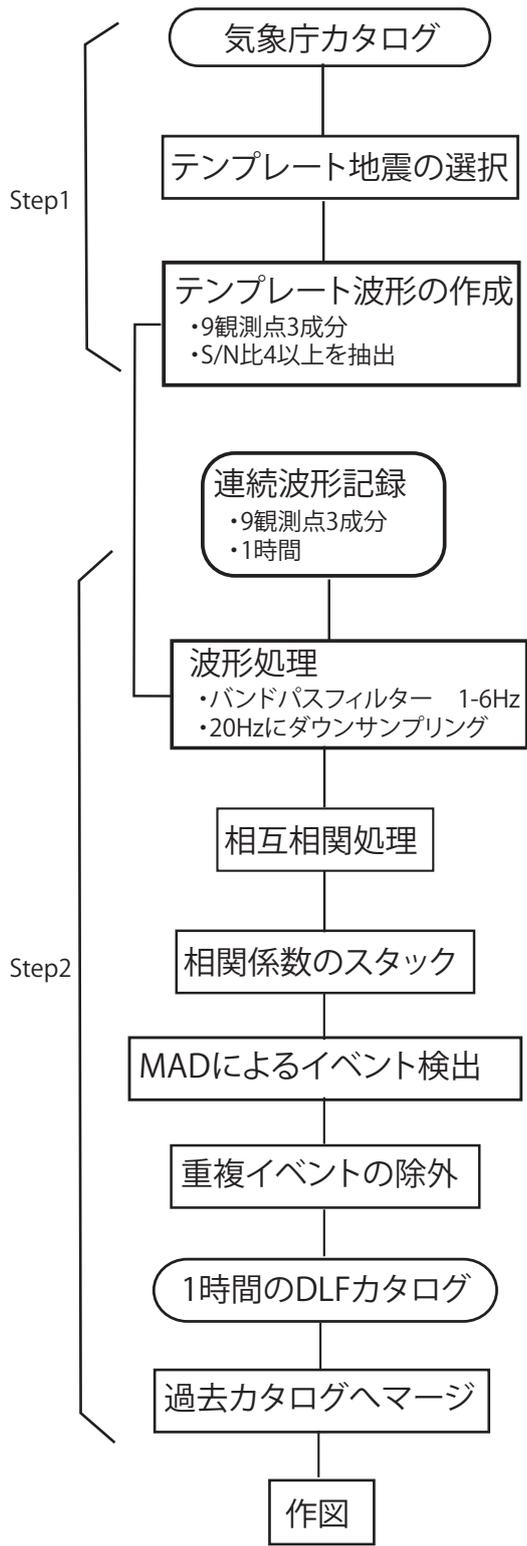


図7 MF法によるDLF検出ルーチンの計算フロー図。
Step 2の処理は1時間に一度実施される。
Fig.7 The process flow diagram in the Matched filter method. The process of step2 is conducted every hour.

4. MF法によるDLF検出

MF法はS/N比のよい地震波形を雛形にして、連続地震波形と雛形地震波形との相関処理によりシグナル検出を行う方法である。連続波形データを端から端まで調べるので、本研究で対象としたDLFのように地動ノイズに埋もれたシグナルの検出に威力を発揮する。MF法を用いた研究例では、大地震発生直後の余震の検出(例えば、Peng and Zhao, 2009)や、プレート境界での非火山性微動の検出(例えば、Shelly *et al.*, 2007)、及び前震の検出(例えば、Kato *et al.*, 2012)などがある。

MF法によるDLF検出の手順を図7に示す。本研究ではPeng and Zhao (2009)の手順を参照した。まず、気象庁カタログから雛形地震(テンプレート地震)の選択を行う。ここでは図2に示した2011年1月~2016年12月までに発生した $M_{JMA}0.4$ 以上のDLF51イベント及びDHF8イベントをテンプレート地震として選択した。次に選択したテンプレート地震のテンプレート波形を準備する。これには、図6に示したDLFに対して振幅が大きくなりやすい足柄平野から丹沢山地にある9観測点(図6破線で囲まれた領域)の3成分速度波形記録を使用した。S波の理論走時時刻の前2秒から後4秒間の波形を切り出しS/N比が4以上ある波形のみを抽出し実際の処理に用いた。

このように事前に準備されたテンプレート波形に対して、図6の9観測点3成分の連続波形記録に対して相関処理を行う。実際のルーチン処理では1時間に一度以下の計算プロセスを実行させる。解析時刻の前1時間の波形記録を波形サーバからコピーし、3600秒×27トレースの連続波形記録に対して、上記の59イベントのテンプレート地震波形と、連続波形記録の各サンプリング時刻を先頭にテンプレート波形と同じ長さ分切り出した波形との相関係数を計算する。この際、図4で示したDLFの周波数特性を考慮し1-6Hzのバンドパスフィルターをテンプレート及び連続波形記録に施し、計算時間軽減のため20Hzまでダウンサンプリングしたのち、時間領域で相関係数の計算を行う。この処理によってあるテンプレート地震のある成分に対して、3600秒間の相関係数の関数が得られる。次に得られた相関係数の関数の時刻をテンプレート地震のS波理論走時だけもどす。この処理をテンプレート地震がS/N比4の基準を満たした観測点の3成分の地震波形記録に対して行い、全観測点の記録を同じ時刻でスタックする。その処理を59のテンプレート地震に対して実施する。上記の処理で3600秒分のスタックされた相関係数の関数が、59トレース作成されることになる。図8aにあるテンプレ-

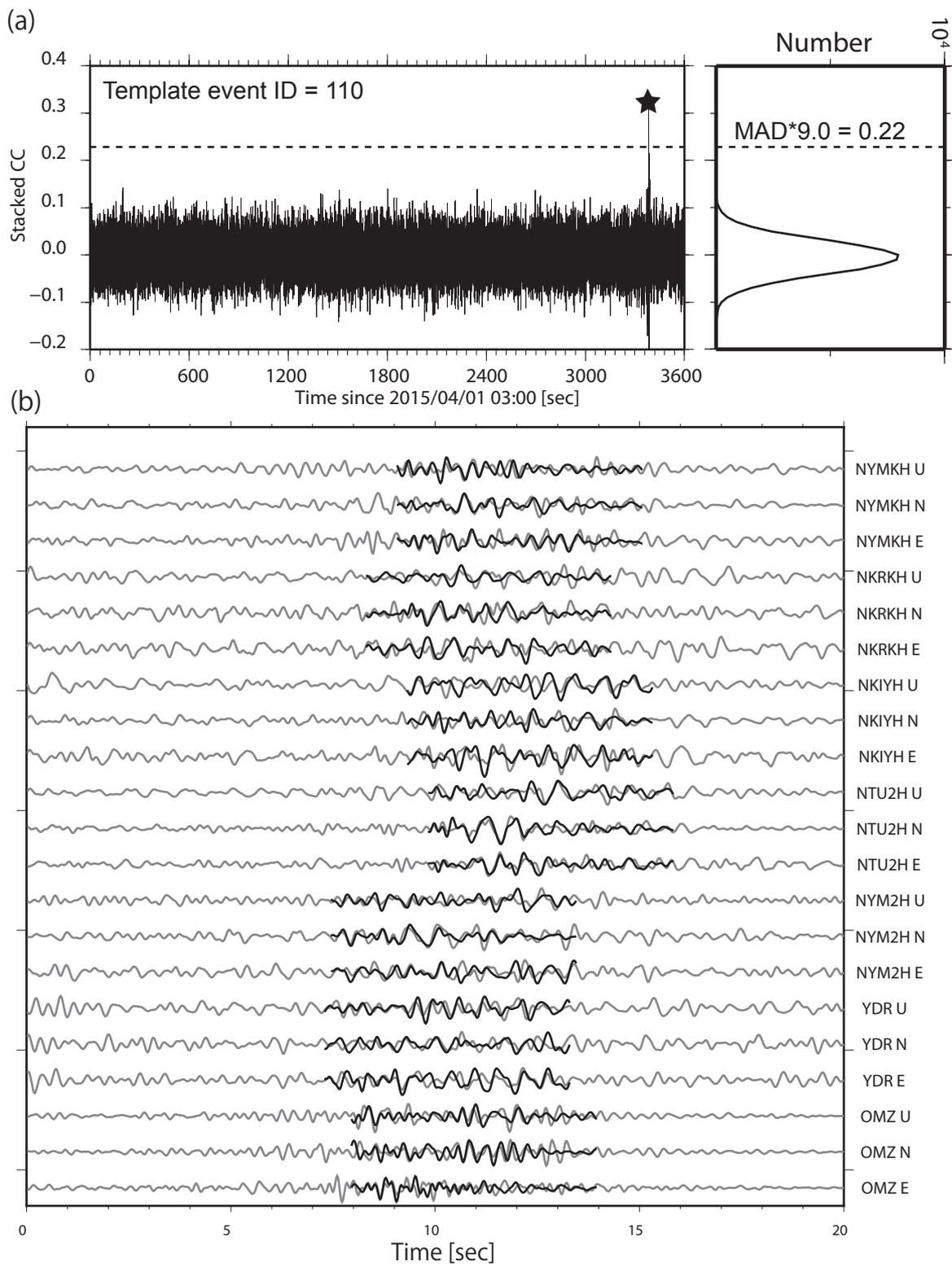


図8 (a) テンプレート地震 (Event ID 110) に対するスタックされた 3600 秒間の相関係数とその頻度分布。点線はイベント検出基準である MAD の 9 倍の値に対応する。星印がイベントが検出された時刻に対応。(b) a の星印で検知された時刻での連続波形記録 (灰色線) とマッチしたテンプレート地震 (Event ID 110) の波形トレース (黒色)。

Fig.8 (a) Time sequence of the stacked correlation coefficient for the template earthquake (Event ID 110) and the frequency distribution of coefficient. The horizontal broken line shows the threshold for the event detection. Star shows the detected event time. (b) An example of continuous waveforms (gray lines) and the machined template waveforms (bold lines).

ト地震 (Event ID 110) に対するスタックされた 3600 秒間の相関係数の例を示す。上記の処理により、テンプレート地震と相関のあるシグナルが含まれている場合、発震時に該当する時刻にスタッキングされた相関係数が高くなる。相関関数の時系列に対して相関関数の中央絶対偏差 (Median absolute deviation, MAD) の 9 倍という基準を設けて、その基準をこえる相関係数が推定された時刻でこのテンプレート地震にマッチする地震が起きたと判断する。イベントが検出された時刻の連続波形記録の例を図 8b に示す。テンプレート地震と相似でかつ理論走時と整合する波群が連続波形トレースに含まれていることがわかる。この処理では同時刻に複数のテンプレート地震が上記の基準を満たし、複数イベントが検出される場合もある。本研究では重複イベントを避けるため、20 秒間に複数イベントが検出された場合はその中からスタックされた相関係数が最も高くなるイベントを選択した。検出された DLF 及び DHF の震源位置はマッチしたテンプレート地震の気象庁カタログでの震源位置と同じと仮定した。これらの処理によって 1 時間に発生した DLF 及び DHF の震源カタログが作成される。それを過去に作成した既存の震源カタログに追加し、地震積分曲線などの図を作成する。現状の計算機能力では、1 時間波形に対するこれらの処理に要する時間は約 3 分である。

5. 結果及び議論

図 9 に作成したルーチン処理によって得られた DLF 及び DHF の地震活動時系列を示す。この図が 1 時間に一度更新され、現状では所内限定の監視ウェブを通して閲覧できる。図 9 は 2017 年 5 月 16 日より前 3 年間の地震活動の推移を示したものであるが、この期間に MF 法により約 2200 イベントの DLF が検出された。これは同期間の気象庁カタログに記載されている DLF の約 27 倍に相当する。MF 法により DLF の検知能力が大幅に向上されたことを示している。MF 法による震源カタログから詳細な地震活動時間変化をほぼリアルタイムで得ることが可能になり、例えば 2015 年 4 月下旬の時点で DLF の顕著な活発化が起きていることが把握できる。2015 年火山活動は 4 月下旬当時で、浅部の群発地震や傾斜変動の異常、GNSS の基線長の伸びが把握できており、今後はこうした情報に加えて DLF の活発化の情報も加えることができ、火山監視機能がさらに向上されるはずである。

一方、今回導入したシステムについて課題点もある。まず、MF 法ではテンプレート地震波形を事前に作成し

ておく必要があるが、もし過去の活動域とは離れた場所でイベントが発生したり、メカニズム解の大きな変化などの理由で、テンプレート波形とは全くことなる波形が観測された場合、原理上 MF 法ではこのイベントを検知することはできない。今後はそのような波形の DLF が起きた場合は、事後にテンプレート地震を新たに追加しリアルタイム処理に加えるほか、過去の連続波形トレースを再スキャンしカタログを修正するようにシステムを改良する必要がある。ただし、図 9 の結果は 2011 年 1 月から 2016 年 12 月までの期間で発生した DLF をテンプレート地震として用いているが、2017 年 4 月に起きた DLF のわずかな活発化を検出できているので、現状では大きな問題はないと考えられる。例えば、2017 年の間に気象庁カタログに記載されている DLF については、いずれも MF 法で検知されていた。また、今後テンプレート地震や利用観測点が大幅に増えていった場合、計算時間の問題でリアルタイム処理が困難になってくることも予想されるので、プログラムの高度化により計算時間を短縮することも検討すべき課題である。さらに、現在のシステムでは震源決定はせずに、マッチしたテンプレート地震の気象庁カタログの震源位置を当てはめているが、マッチしたイベント波形の相関係数が最大となる時刻と理論走時との時間差から震源再決定することにより、詳細な地震活動時系列だけではなく活動域の時間的推移もより精度よく把握できることが期待できる。

今回 DLF の検出のために用いた MF 法については、それ以外の地震活動処理にも応用できると考えられる。その一つが、地震波形の自動検出処理の高度化である。このことはすでに大見 (2015) によって、飛騨山脈での群発地震活動に適用され、地震活動域が狭くかつ波形の類似性が高い群発地震活動には非常に有用であることが示されている。従って、箱根火山浅部で発生する群発地震活動にも有用であると考えられる。テンプレート地震数が多くなると計算処理時間の短縮など克服すべき課題もあるが、今後は MF 法を箱根群発地震活動の自動検出に適用し、従来の WIN システムの自動処理震源より高精度な震源がリアルタイムで得られることを目指す。

謝辞

本研究には、気象庁一元化震源カタログを利用させて頂きました。また防災科学術研究所、気象庁によって取得された地震波形データを使用させていただきました。道家涼介氏と匿名査読者、及び安部祐希氏には本論の改善に役立つコメントをいただきました。

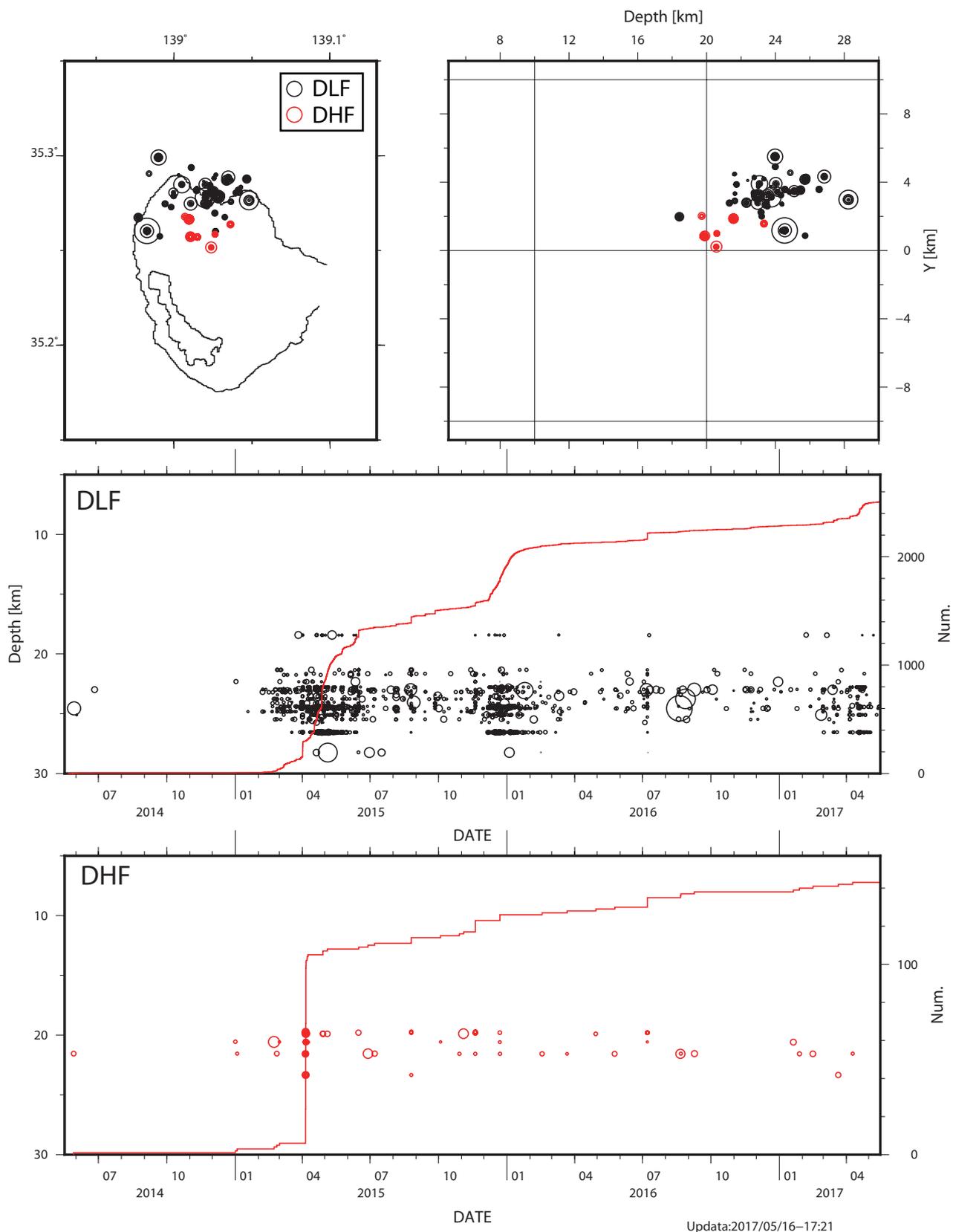


図9 MF法により検出されたDLF及びDHFの地震活動。上段震源分布、中段DLFの時間-深さ分布と地震積算曲線、下段DHFの時間-深さ分布と地震積算曲線。図は2017年5月16日17時に作成されたもの。○の大きさはマグニチュードに対応。

Fig.9 The activity of DLF and DHF detected by the matched filter method. (Upper) hypocenter distribution, (middle) time-depth distribution and cumulative number of DLFs, (bottom) time-depth distribution and cumulative number of DHFs. Size of each circle corresponds to its magnitude.

参考文献

- 原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫
(2010) 富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動, 火山, 55 (4):193-199
- Kato A., Obara K., Igarashi T., Tsuruoka H., Nakagawa S., Hirata N. (2012) Propagation of slow slip leading up to the 2011 M(w) 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 335 (6069):705-708, doi:10.1126/science.1215141
- Nakamichi H., Hamaguchi H., Tanaka S., Ueki S., Nishimura T., Hasegawa A. (2003) Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan, *Geophysical Journal International* 154 (3):811-828, doi:10.1046/j.1365-246X.2003.01991.x
- Obara K. (2002) Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan, *Science*, 296 (5573):1679-1681, doi:10.1126/science.1070378
- 大見士郎 (2015) 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, 第2輯 68 (1):1-15. doi:10.4294/zisin.68.1
- Peng Z., Zhao P. (2009) Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake, *Nature, Geoscience*, 2 (12):877-881, doi:10.1038/ngeo697
- Shelly D.R., Beroza G.C., Ide S. (2007) Non-volcanic tremor and low-frequency earthquake swarms, *Nature*, 446 (7133):305-307, doi:10.1038/nature05666
- ト部 卓 (1994) 多チャンネル地震波形データのための共通フォーマットの提案, 日本地震学会講演予稿集, 2, 384-384.