

# 箱根火山での深部低周波地震と深部高周波地震の活動モニタリング

栗原 亮

## Activity monitoring of deep low-frequency earthquakes and deep high-frequency earthquakes in Hakone volcano

by

Ryo KURIHARA

### Abstract

Deep low-frequency (DLF) earthquakes occur around volcanic area at the depths of 10–50 km. In Hakone volcano, it was reported that DLF earthquakes increased before the phreatic eruptions of Hakone volcano in 2015. In this study, I newly constructed detection system based on matched filter technique. I replaced template events and observation station in the new system from previous studies. In results, I found that activity of DLF earthquake was activated in 2015, 2019, 2021 and 2023. These activities of DLF earthquakes preceded volcanic unrest such as crustal deformation in 2015 and 2023, whereas they occurred synchronously with the unrest in 2021. In contrast, although a certain level of activity was also observed during the active period in 2019, the most active phase lagged behind the volcanic unrest by approximately six months. Among these, in 2015, 2021, and 2023, earthquake swarms that emitted high-frequency seismic waves from nearly identical hypocenters occurred within the swarm activity of DLF earthquakes. In all cases, these high-frequency swarms occurred during the ongoing swarms of DLF earthquakes.

These observations suggest that the DLF earthquakes are related to magma supply to Hakone volcano, and that the occurrence of earthquakes with distinct waveform characteristics indicates that DLF earthquakes are generated by a mechanism different from that of ordinary earthquakes. Therefore, it is plausible that DLF earthquakes are produced by a mechanism that radiates low-frequency seismic waves associated with fluid oscillations.

### 1. はじめに

多くの火山地域の深さ 10–50 km では深部低周波地震と呼ばれる地震が発生している。この地震のほとんどは M2.0 以下と小さいが、同規模の通常の地震と比べて低周波の地震波を放出するのが特徴である。気象庁のカタログを見ると、低周波の地震は大きく分けると東海から四国にかけてのプレート沈み込み帯と火山周辺に分布している。このうち東海から四国の低周波地震は、連続的に発生することが多く、深部低周波微動と呼ばれることもある (Obara, 2002)。一方、それ以外の地域は低周波地震が孤立的に発生しており、概ね火山の分布と対応する。ただし、大阪湾や島根県東部など一部火山から離れた発生もあり、これらの地震の発生原因については未解明である。

火山周辺での深部低周波地震は、その発生場所から

マグマの深部からの供給が関連していると考えられてきた。実際、1986 年の伊豆大島の噴火の際 (Ukawa and Ohtake, 1987) や 1991 年のフィリピンのピナツボ火山での噴火 (White, 1999) の際に深部低周波地震の発生が観測されている。しかし、気象庁のカタログを網羅的に調べた研究 (高橋・宮村, 2009) では、火山活動と深部低周波地震の関係性は明瞭ではなかった。そこで、Kurihara and Obara (2021) では、気象庁のカタログ中の深部低周波地震の地震波形をテンプレートとして、相関係数を計算し、そこから類似の波形を探索するマッチドフィルタ法 (Gibbons and Ringdal, 2006) という方法により、全国の火山地域 (一部非火山地域を含む) 52 地域の深部低周波地震の活動を調べた。その結果として、霧島火山では 2011 年の噴火に伴う深部低周波地震の増加 (Kurihara *et al.*, 2019) が確認されている。また、御

---

\*1 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

論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 57 巻, 21-31 2025

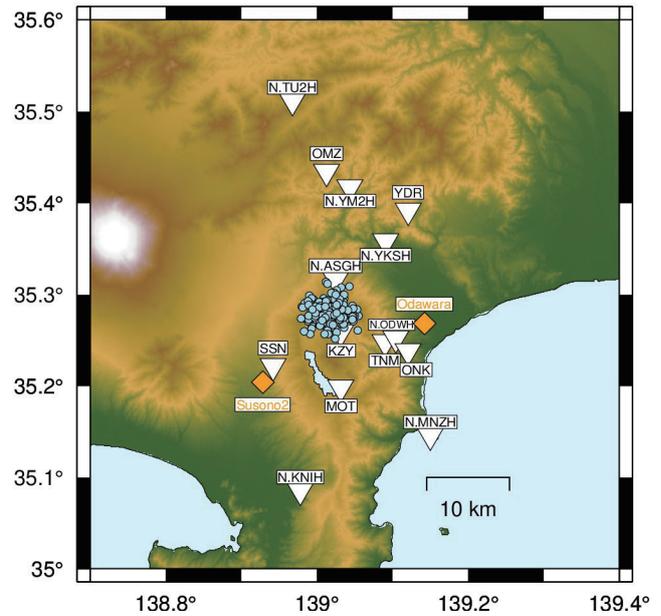


図1 箱根火山の位置（左図）および周辺の観測点分布（右図）。薄い青色は深部低周波地震の位置を示し、白の逆三角は地震観測点を示す。オレンジ色の四角形はGNSSの観測点GEONET小田原と裾野2を示す。

Fig. 1 Location of Hakone volcano (left) and observation stations around the volcano (right). The light blue circles indicate the locations of deep low-frequency earthquakes, while the white inverted triangles mark seismic observation stations. The orange squares represent the GNSS stations GEONET Odawara and Susono-2.

嶽山では2014年の水蒸気噴火前に深部低周波地震の増加が確認され、桜島においては2015年のマグマ貫入イベントの前に深部低周波地震が増加していた。このように全国の火山において、火山活動と対応した深部低周波地震が明らかとなっている。つまり、深部低周波地震は火山の深部からのマグマ供給を示すと考えられるようになった。そのため、深部低周波地震の継続したモニタリングはマグマ供給過程の解明に加えて火山活動の監視の観点からも重要性を増しており、高精度なモニタリングが欠かせない。

箱根火山においては、2015年の噴火前後に深部低周波地震の増加が観測されている(Yukutake *et al.*, 2019)。この研究も、Kurihara and Obara (2021)と同様にマッチドフィルタ法を使用したものであるが、同一地域の検出個数に違いがある。これは、使用する観測点のデータ、適用するバンドパスフィルタ、用意したテンプレート等の条件に違いがあるからである。マッチドフィルタ法は簡易な原理でありながらも高精度に地震の検出が可能な手法ではあるが、テンプレートに存在しないようなタイプの地震は検出できないという欠点がある。そのため、地震活動様式が急に変化しテンプレートと類似しない地震が増加した場合は検出できない。テンプレートが不十

分で検出できないタイプの地震が増加した場合、実際に深部低周波地震が増加していても、カタログからはその増加が確認できなくなり、火山活動の認識を誤ることに繋がってしまう。つまり、テンプレート地震の選択が最終的に得られる地震カタログに大きな影響を与える。また、精度の高い検出のためには使用する観測点の選択を適切に行う必要があり、ノイズレベルが低く深部低周波地震がよく観測できる観測点を選択する必要がある。そこで、本研究では箱根火山の深部低周波地震に改めて着目し、これらの先行研究を踏まえてテンプレートとする地震波形や使用する観測点を変更し、より高精度な検出を行なって箱根火山での最新の深部低周波地震活動について調べることとした。

## 2. 研究手法

本研究ではまず、深部低周波地震の波形の確認と信号とノイズの比(Signal-to-Noise ratio, 以下SN比とする)の計算を実施した。この波形の確認作業と得られたSN比を元に、次の段階であるマッチドフィルタ法で使用する観測点とテンプレートイベントの選択を実施した。その後、マッチドフィルタ法を実装し準リアルタイムでの検出システムを構築した。

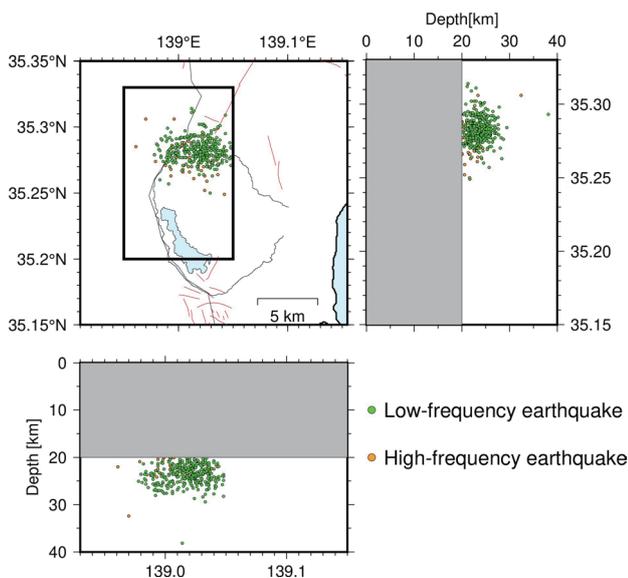


図2 箱根火山での深部の地震の分布。プロットには気象庁のカタログを使用し、期間は2010年1月から2025年7月である。緑色の点は深部低周波地震で、オレンジ色の点は深部高周波地震を示す。黒色の線は県境および箱根のカルデラの外輪山の位置を示す。青の塗り潰しは芦ノ湖である。赤い実線は周辺の断層の位置を示している。黒枠は今回注目した深部の震源の範囲を示す。  
 Fig. 2 Distribution of deep earthquakes in the Hakone volcano region. The plot uses the Japan Meteorological Agency catalog, covering the period from January 2010 to July 2025. Green dots represent deep low-frequency earthquakes, while orange dots indicate deep high-frequency earthquakes. The black lines denote prefectural boundaries and the location of the outer ring of the Hakone caldera. Blue shading indicates Lake Ashinoko. The red solid line marks the position of surrounding faults. The black border outlines the area of deep hypocenters that formed the focus of this study.

## 2. 1. 深部低周波地震の波形の確認と Signal-to-Noise 比の計算

箱根火山の深部低周波地震は、カルデラの北端にあたる金時山付近の深さ 20-30 km で主に発生しており (図 1, 2)、気象庁の一元化カタログでは低周波地震にフラグがつけられている。地震の波形の特徴について調べるため、フラグのついた地震について、目視による波形の確認を実施した。低周波地震では丹沢地域の観測点を中心に低周波に卓越した波形が確認されている

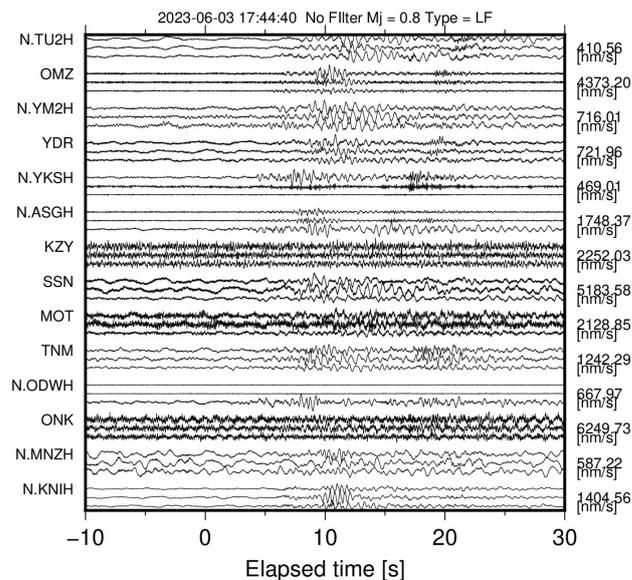


図3 2023年6月3日17時44分40秒に発生した深部低周波地震の波形。波形は各観測点での最大振幅 (右に記載) で規格化している。バンドパスフィルターは適用していない。

Fig. 3 Waveforms of a deep low-frequency earthquake that occurred at 17:44:40 on June 3, 2023. The waveforms are normalized by their maximum amplitude at each station (indicated on the right). No bandpass filter has been applied.

(図3)。P波S波の正確な到来時刻は地震波が低周波に卓越し、明瞭な立ち上がりを伴わないためわかりにくいですが、各観測点の波形を並べることで最も震源に近いN.ASGH(Hi-net 南足柄観測点)において、P波とS波の時間差が3秒程度あることがわかる。この地震ではS波の継続時間が3-5秒程度とやや長めに見える。また、図3の20秒付近には規模が小さい別の低周波地震も確認でき、連発的に発生するケースもある。箱根火山では深部低周波地震の発生震源域において、低周波フラグのない通常の地震が混在している。これらの地震の波形をプロットすると、他の地震と比べて確かに高周波の地震波が含まれている一方で、地震波の到来時刻は低周波地震とほとんど同一に見える (図4)。便宜上、本論文では以下この地震を「深部高周波地震 (Deep High-Frequency Earthquake)」と呼ぶことにする。S波には低周波のコーダ波を伴っているが、高周波部分だけを見ると、継続時間は2秒程度と低周波地震に比べて短い。このタイプの地震の場合、高周波の波は初動に強いピークがあるため、明瞭にP波とS波の立ち上がりが確認できる。高周波成分は震源よりも北側の丹沢地域の観測

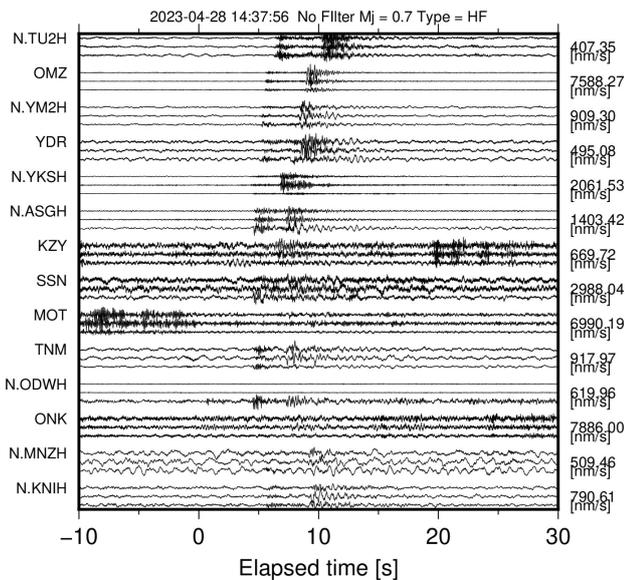


図4 2023年4月28日14時37分56秒に発生した深部高周波地震の波形。波形は各観測点での最大振幅（右に記載）で規格化している。バンドパスフィルターは適用していない。  
 Fig. 4 Waveforms of a deep high-frequency earthquake that occurred on April 28, 2023 at 14:37:56. The waveforms are normalized by their maximum amplitude at each station (indicated on the right). No bandpass filter has been applied.

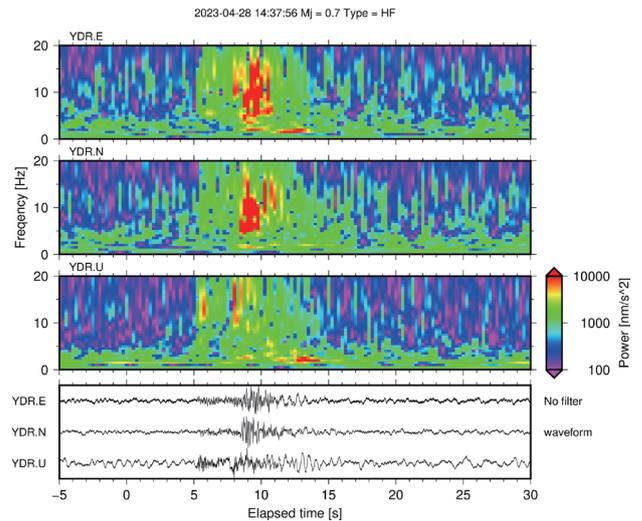


図6 YDR（寄観測点）における2023年4月28日14時37分56秒に発生した深部高周波地震の3成分のスペクトログラムと、3成分の波形記録。  
 Fig. 6 Three-component spectrograms and waveforms of a deep high-frequency earthquake that occurred at 14:37:56 on April 28, 2023, at YDR station.

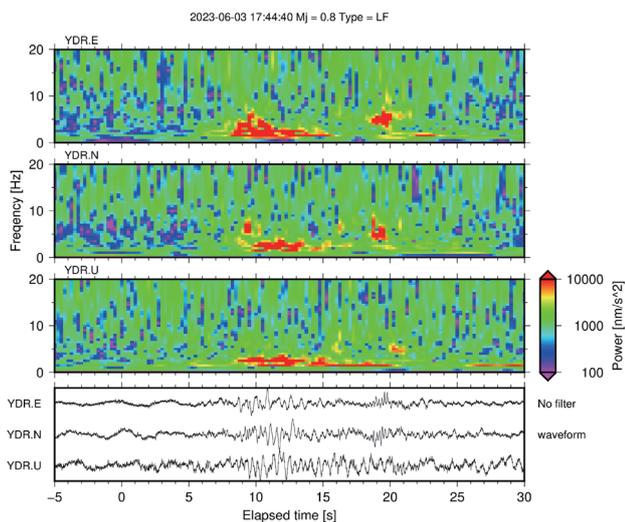


図5 YDR（寄観測点）における2023年6月3日17時44分40秒に発生した深部低周波地震の3成分のスペクトログラムと、3成分の波形記録。  
 Fig. 5 Three-component spectrograms and waveforms of a deep low-frequency earthquake that occurred at 17:44:40 on June 3, 2023, at YDR station.

点では強く確認できる一方で、箱根火山の南に位置するN.KNIH(Hi-net 函南観測点)では高周波の成分が弱まり、低周波地震に似た波形になっている特徴がある。

深部低周波地震と深部高周波地震をスペクトログラムで比較する(図5,6)。低周波地震では2-5 Hz程度に卓越した波が確認でき、連続的にシグナルが到着して継続時間が比較的長い。一方で高周波地震では5-20 Hzと比較的高周波側の広い帯域に強いシグナルが確認できる。低周波地震と比べると強いシグナルの継続時間は短い。高周波地震ではP波が上下動で強く観測されているが、低周波地震ではP波の判別が難しい。

次に、深部低周波地震のシグナルがどの観測点で強く観測されているかを調べるため、箱根火山周辺の温泉地学研究所、防災科学技術研究所、気象庁の地震観測点計22点を対象にSN比を計算した。2010年1月から2025年7月に発生した気象庁の一元化カタログ中の箱根火山深部での地震を抜き出す。範囲としては、東経138.95度から139.05度、北緯35.2度から35.33度、深さ20から40 kmの全ての地震を対象とした。抜き出した地震は351個であり、このうちの311個が低周波フラグのある地震(つまり深部低周波地震)、残りの40個は通常地震(つまり深部高周波地震)であると扱われている。これらの地震について、気象庁のP波とS波のピックデータがある場合にはその時点から、ない

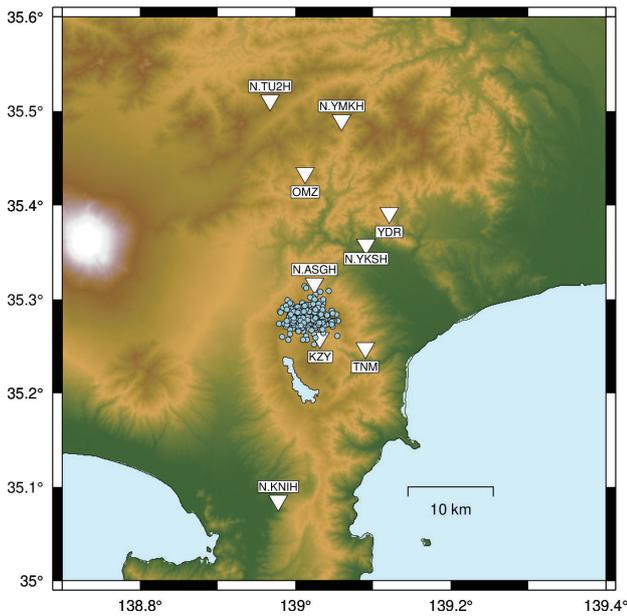


図7 マッチドフィルタ法で使用した観測点（白色逆三角）と深部低周波地震の分布。

Fig. 7 Observation stations used in the matched filter technique (white inverted triangles) and distribution of deep low-frequency earthquakes.

場合には震源位置から各観測点までの水平距離と鉛直距離に対して気象庁の走時表を用いて推定した到達時刻から3秒間のRMS振幅の値を信号の振幅とする。なお水平動ではS波、上下動ではP波の到達時刻を使用する。地震発生前60秒間のRMS振幅をノイズの振幅として、その比を計算した。最終的には、観測点ごとにこれら全てのイベントのSN比の中央値を求めた。なお、これらの解析には1-8 Hzのバンドパスフィルタを適用した地震波形を利用した。

## 2.2. マッチドフィルタ法による深部低周波地震および深部高周波地震の検出

本研究で新たに設定したマッチドフィルタ法について説明する。マッチドフィルタ法は、波形同士の相関を元に地震を検出する手法であり、過去の観測記録をテンプレートとして、そのテンプレートに似たイベントを探索する。精度の高い検出のため、この相関係数は複数観測点(5-10観測点程度)で計算し、その和を使って検出する。本解析においては1-8 Hzのバンドパスフィルタを使用し、テンプレートの時間窓の長さは8秒とした。波形相関の計算をする時間窓は観測点ごとにずらしている。気象庁により各観測点で観測されているS波到着時刻を時間窓の中央に来るように設定した。気象庁でのS波到着時刻が読み取られていない場合は、気象庁により推定された震源位置と観測点の位置から気象庁の走時表(上野ほか, 2002)を利用してS波到着時刻を推定した。

箱根火山において深部低周波地震は中央火口丘の直下ではなく、中央火口丘から5 kmほど北に離れたカルデラの北端の地下で発生している。このため、箱根の北に位置するOMZやN.YMKHなどといった丹沢地域にある観測点でよく観測される。しかし、箱根の北にある観測点のみを利用すると、南の遠方で起きた通常地震や遠くで発生した遠地地震の表面波を誤検知する場合がある。また、震源近傍の観測点ばかり選択すると、深さ方向への感度が低下し、浅い地震と深部の地震が区別できなくなる。誤検出を防ぐためには、震源域から使用する観測点については、ある程度方位や距離が偏らないように観測点を選択する必要がある。本研究では、観測点のバランスや欠測・故障等の頻度も考慮し観測点を選択した。比較的SN比がよくシグナルが観察できる合計

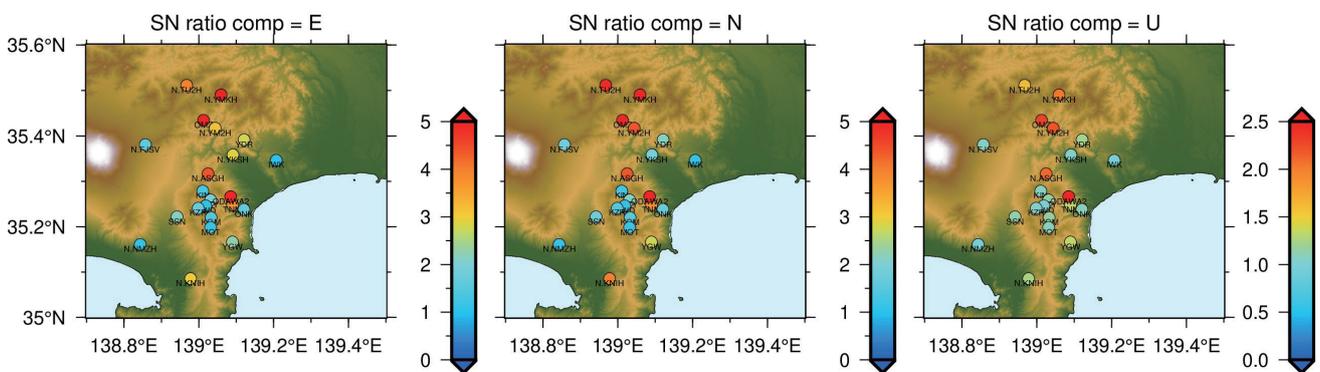


図8 3成分それぞれでの深部低周波地震・深部高周波地震の各観測点での平均SN比。

Fig. 8 Average SN ratio for each component of deep low-frequency earthquake and deep high-frequency at observation stations.

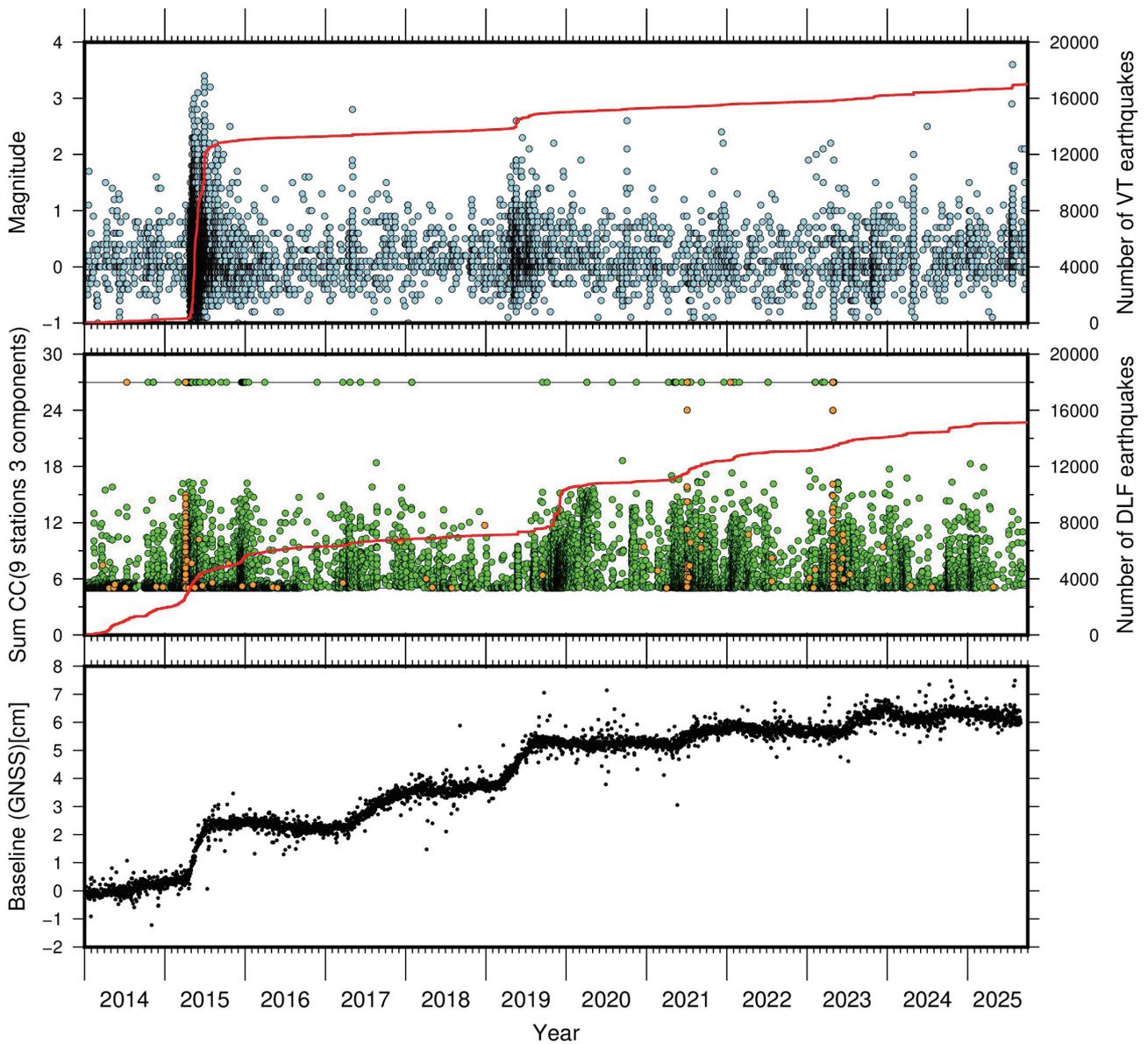


図9 箱根火山における2014年1月から2025年9月までの地震発生数(最上段、温泉地学研究所のカタログによる、青色丸印はマグニチュードを表し、赤線は累積個数を表す)、深部低周波地震および深部高周波地震の検出状況(中段、緑色は深部低周波地震、オレンジ色が高周波地震を示し、縦軸は検出に用いた相関係数を示す、赤線は累積個数を表す)、GNSSによる小田原-裾野2間の基線長の変化(最下段)。

Fig. 9 Number of earthquakes occurring in the Hakone volcano from January 2014 to September 2025 (top row; data from the Hot Springs Research Institute catalog, blue circles indicate magnitudes, and red lines show cumulative counts), detections of deep low-frequency earthquakes and deep high-frequency earthquakes (middle row; green represents deep low-frequency earthquakes, orange represents high-frequency earthquakes, with the vertical axis showing the correlation coefficient used for detection, red lines indicate cumulative counts), and changes in baseline length between GNSS Odawara and Susono-2 stations (bottom row).

9観測点を使用する(図7)。この中には箱根より南に位置するHi-net函南(N.KNIH)観測点も含まれる。プレートは2009年から2023年5月までに発生した気象庁カタログ掲載のうち、今回使用する9観測点全ての

波形データが使用できる地震を抽出し、深部低周波地震184個およびその震源域で発生する深部高周波地震35個の合計219個の地震を使用した。

表1 群発的な地震活動のまとめ

	浅い群発地震 (10個/1時間で定義)	深部低周波・高周波地震 (30個/2時間で定義)
2015年	4/26 14:35~4/30 3:22 392個 5/1 17:22~5/7 4:11 734個 5/7 16:16~6/2 14:52 6914個 6/9以降 6/27まで小規模群発7回 6/29 5:56~7/5 15:05 2071個 以降7月と8月に小規模群発4回	4/1 9:18~4/2 5:29 123個 4/5 5:29~4/5 23:37 124個 4/26 16:24~4/27 13:56 112個
2016年	なし	なし
2017年	10/4 4:47~10/4 7:39 28個	6/9 2:48~6/9 10:20 36個
2018年	なし	なし
2019年	1/24 00:44~1/24 1:29 13個 5/18 3:48~5/20 2:56 458個 6/10 15:11~6/10 23:52 42個 6/13 12:44~6/13 18:47 14個 7/16 21:50~7/18 00:07 48個 8/24 22:51~8/24 22:56 11個	5/25 22:09~5/26 18:46 147個 8/10 18:43~8/12 15:29 120個 11/4 12:01~11/5 9:31 295個 11/6 17:36~11/7 7:57 371個 11/29 19:37~12/4 9:27 877個 12/4 12:52~12/6 7:32 356個 12/15 11:45~12/17 4:40 116個
2020年	3/27 23:03~3/28 3:38 24個 9/13 16:50~9/14 0:28 24個 10/4 4:47~10/4 7:39 28個	なし
2021年	なし	5/7 22:17~5/8 2:10 59個 7/4 3:56~7/4 13:40 54個 7/11 12:25~7/11 20:45 49個 7/12 17:01~7/13 7:51 70個 9/8 1:20~9/8 9:09 67個
2022年	なし	なし
2023年	8/9 22:16~8/10 1:45 18個 8/14 20:10~8/14 22:15 15個 10/31 00:00~10/31 10:0 42個	4/28 12:23~4/28 16:03 46個
2024年	4/29 9:31~4/30 11:04 139個	なし
2025年	7/21 4:24~7/21 20:55 66個 7/23 21:49~7/24 8:45 115個	なし

### 3. 結果

#### 3.1. SN比の分布について

図8を見ると、SN比の高い観測点は丹沢山地に多く分布している。P波を使用している上下動ではSNの値がそもそも低いが、東西動・南北動・上下動を使用しても分布の傾向はほとんど変わらない。箱根カルデラ内部の観測点では、震源に近いにも関わらずSN比が低くなっていることがわかった。一方で、箱根カルデラより南のN.KNIH(防災科研Hi-net 函南観測点)では震源からの距離はそれなりにあるが、高いSN比が得られている。全体としてカルデラの外にある観測点でSN比が高い傾向が確認できる。

#### 3.2. 深部低周波地震・深部高周波地震の活動と通常の地震活動、地殻変動の比較

箱根火山でのマッチドフィルタ法による解析の結果、2014年1月から2025年9月までの間に約17000個もの深部の地震を検出した。そのほとんどは深部低周波地震である。図9を見ると2015年、2019年、2021年、

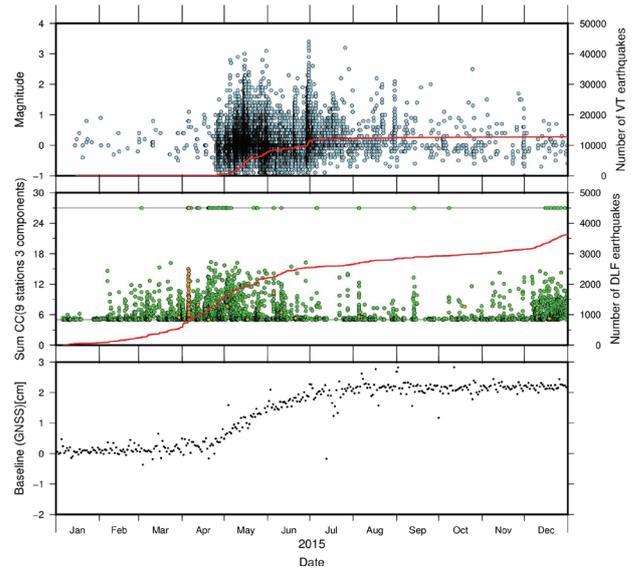


図10 図9の2015年1年間の拡大図。

Fig. 10 Enlarged view of Fig. 9 covering the entirety of 2015.

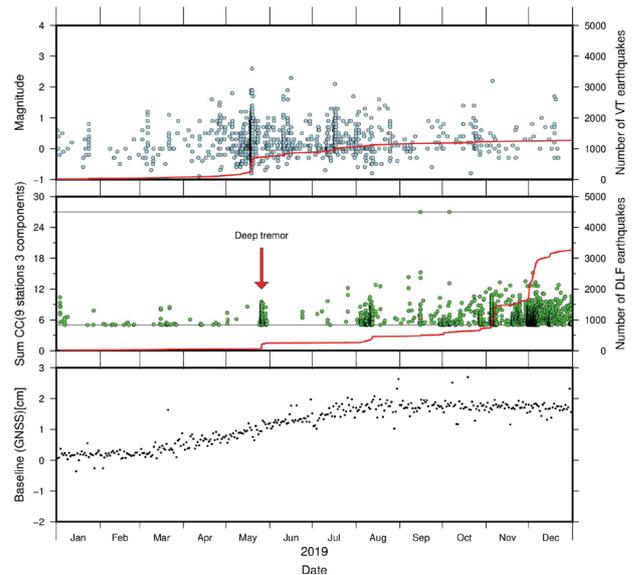


図11 図9の2019年1年間の拡大図。

Fig. 11 Enlarged view of Fig. 9 covering the entirety of 2019.

2023年に他の時期に比べて多くの深部低周波地震が発生している時期があるように見える。図9では箱根火山浅部(10km以浅)で発生する地震と箱根火山を挟むGNSS基線長(国土地理院小田原・裾野2間)と比較している。この比較を見ると、2015年・2019年・2021年・2023年と深部低周波地震の増加は概ねGNSSの基線長の伸びで見られる地殻変動と対応している。この地殻変動は箱根火山を挟む基線長で見られており、箱根火山の

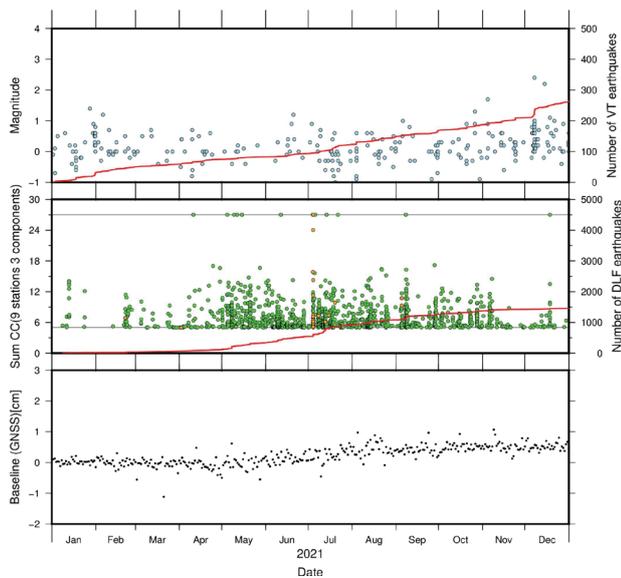


図 12 図 9 の 2021 年 1 年間の拡大図。

Fig. 12 Enlarged view of Fig. 9 covering the entirety of 2021.

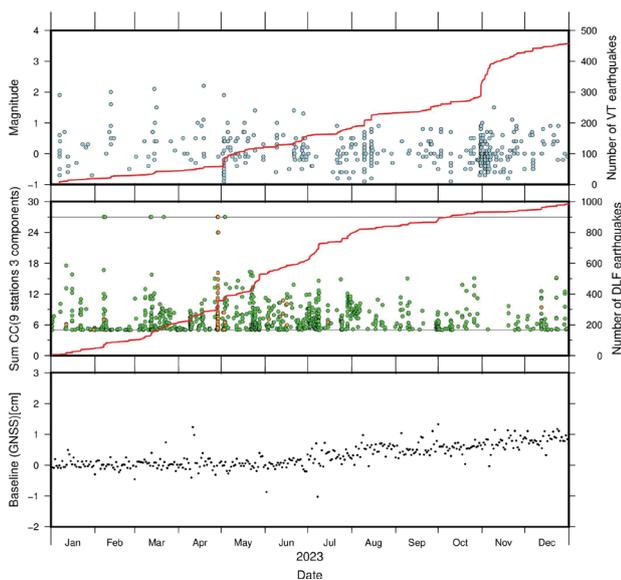


図 13 図 9 の 2023 年 1 年間の拡大図。

Fig. 13 Enlarged view of Fig. 9 covering the entirety of 2023.

マグマだまりの圧力変化に伴う火山体の膨張で説明される (e.g., 原田・吉田, 2024)

活発な活動がいつ発生しているのかを単純な方法で計算した。温泉地学研究所では、群発地震を「地震数が 1 時間に 10 個以上あり、活動期間は前後 3 時間地震なしで区切る。」と定義している。これを応用し、今回マッチドフィルタ法により作成した深部低周波地震および深

部高周波地震が共に含まれるカタログで群発的な深部の地震活動を抽出する。この定義をそのまま深部の地震に当てはめると大量の小規模な群発エピソードが検出されてしまい全体的な活動の把握が困難であった。そこで、深部地震へ適用する場合の定義を「地震数が 2 時間に 30 個以上あり、活動期間は前後 3 時間地震なしで区切る。」として、比較的継続時間が長く発生個数の多い群発エピソードを抽出した。

浅部の群発地震と深部の地震の群発を単純に比較すると、重複するのは 2015 年 4 月 26 日ごろのイベントのみである (表 1)。この時期は 2015 年の活動の初期にあたる。一方で、2015 年や 2019 年、2023 年はそれぞれ群発的な活動が何回も観測されているものの、期間が異なっており、短期的な群発活動は浅部と深部で対応しないことがわかった。しかし、図 9 を見るとこれらの年に活動が活発であるという特徴は類似しており、数ヶ月から 1 年程度の中長期での対応関係があるようだ。

次に、これらの活発化が見られた年の活動を確認する。2015 年は深部低周波地震が 2 月から 4 月ごろにかけて多くなっており、4 月から開始した地殻変動、浅部の地震と比べて明らかに先行している (図 10、表 1)。この結果は先行研究でも確認されている (Yukutake *et al.*, 2019)。水蒸気噴火の発生は 6 月 29 日であるが、6 月になると深部の活動は減少している。2015 年 4 月 5 日には顕著に深部高周波地震が増加し、群発的な活動が記録されている (表 1)。この活動からさらに深部低周波地震の活動が高まり、GNSS の地殻変動もこの直後から開始しているように見える。

2019 年の深部低周波地震の活発化は地殻変動に比べて遅れて発生している (図 11)。この年には火山活動の活発化が発生しており、3 月ごろから 7 月ごろにかけて地殻変動が見られ、5 月と 7 月には浅い火山性地震において群発地震が発生している。深部低周波地震は 5 月 26 日にまとまった活動を伴った後、8 月上旬から中旬にも群発的に活動している。特に顕著なのが、10 月下旬から 12 月にかけてのイベントである。特に 11 月 4 日から 5 日や 11 月 29 日 - 12 月 6 日ごろには非常に多数の深部低周波地震が観測された。一方で、10 月以降に浅い地震の活動や地殻変動は見られず、全体的に見ると深部低周波地震の活動は火山活発化に比べて半年ほど遅れているような傾向になっている。

2021 年では、5 月から 9 月にかけて変動量が小さい地殻変動が発生している。この小さな地殻変動と対応して、同じ時期に深部低周波地震と深部高周波地震が活発化している (図 12、表 1)。この年の浅部の地震活動は穏

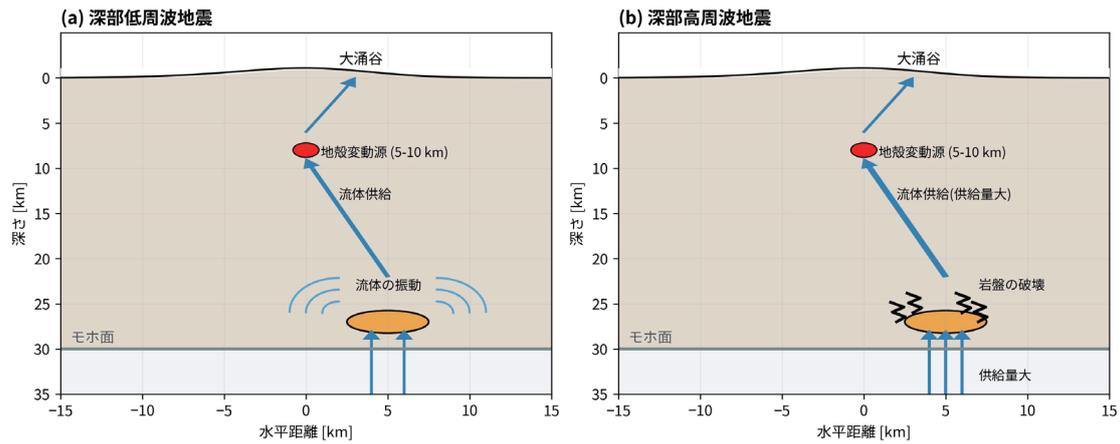


図 14 深部低周波地震と深部高周波地震が発生する時の流体供給に関する模式図。

Fig. 14 Schematic figure illustrating fluid supply mechanisms with occurrences of deep low-frequency earthquakes and deep high-frequency earthquakes.

やかであり、群発地震活動は見られない。7月4日には高周波地震を含み深部の地震活動が活発化しており、この日は全体の活動でのほぼ中間にあたる。

2023年の活動では深部低周波地震および深部高周波地震が3月から7月にかけて活発化している(図13)。この活動は浅部の地震がやや多い時期とよく対応する。一方で、地殻変動は6月から12月ごろにかけて発生しており、深部の地震活動は地殻変動から先行している。5月1日から3日に浅部での地震活動が増加している。4月28日には深部高周波地震が活発に発生しており、この浅部の活動に数日先行している。

#### 4. 議論

深部低周波地震のSN比の分布は、あまり震源からの距離に依存しておらず、箱根の深部低周波地震は丹沢山地や箱根の山麓の観測点で高いSN比を示す一方で、カルデラ内部の観測点では軒並み低いSN比であった。この原因として考えられるのは、箱根カルデラ内部の観測点は、地表設置の観測点が多くノイズレベルが高くなっていることと、山体浅部に高減衰域があることで深部からの地震波が減衰して箱根カルデラ内の観測点に届きにくいことが考えられる。また、震源の東西では高いSN比の観測点が乏しいが、これは足柄平野や御殿場市周辺に観測点がそもそも少ないこと、平野でノイズレベルの高い地域が分布している影響が考えられる。深部低周波地震の放射パターンの影響の可能性もあるが、現状では議論が難しい。そこで、振幅に関する議論はいったん棚上げし、以下では深部低周波地震と浅い地震、地殻変動との対応関係に注目する。

箱根火山での深部低周波地震活動の増加は多くのケースで地殻変動、つまり火山体の膨張と同期して発生している。深部低周波地震の発生域は20–30 km付近、火山活発化時に発生する地殻変動の変動源の深さは5–10 km付近(Harada and Yoshida, 2024)であり、深さが異なる。この深部低周波地震と地殻変動の同期は、地殻変動源の深さへの深部からのマグマの供給に対応して深部低周波地震が発生しているとする既往研究のモデルを支持する(Yukutake *et al.*, 2019; Kurihara *et al.*, 2019)。一方、2019年の活動は他と異なって火山活動との対応関係が複雑である。深部低周波地震が明らかに多発しているのは11月から12月にかけてで、4–9月に発生していた火山活動の活発化に比べて遅れている。地殻変動や浅部の地震といった火山活動が見られたのは主に5–6月ごろであり、そこから見ると半年程度遅れて深部の活動が活発化している。しかし、2019年の活動は拡大してみると、5月26日–29日にかけて最初の活発化がある。5月26日には観測史上唯一、深部を震源とする微動が観測されている(Yukutake *et al.*, 2022)。そのため、この活動が深部からの供給を示唆するもので、この日に深部からの供給が活発であった可能性がある。11月以降の活動は浅部活動に遅れているが、火山活動は必ずしも深い場所から順に発生するものではなく、霧島山では2011年1月の準プリニー式噴火に続いて2月に深部低周波地震が増加している(Kurihara *et al.*, 2019)。この活動はマグマが噴火で抜け、圧力が低下したことに伴う再充填現象であると考えている。2019年の箱根火山では噴火が起きていないため、顕著な減圧が起きたとは考えにくいだが、マグマの地下での移動や冷却に伴う減圧があり、その再

充填で活発化した可能性がある。

本研究では深部低周波地震と同じ震源域で発生する深部高周波地震についても検出した。これらは2015年、2021年、2023年の特定の時期に発生しており、全ての場合において群発的な深部低周波地震活動の最中である。これらのイベントは特に2015年4月5日、2021年7月4日、2023年4月29日の極限られた時間に集中して発生している。この日付は地殻変動開始1ヶ月程度前(2015, 2023年)あるいは地殻変動開始の初期(2021年)である。これらの観測データから考えると、これらの時期には地下からのマグマ等の供給が多い時期にあたる可能性がある。つまり、そのような期間にはマグマ等の供給が多いことにより、他の時期と比べて大きな応力変化等が生じ、普段発生する深部低周波地震に加えて高周波地震を引き起こしている可能性がある(図14)。また、この地震の発生は、深部低周波地震のメカニズムの理解へ貢献する。ほぼ同一の震源域で深部低周波地震と深部高周波地震が発生することから、波動の伝播に伴う散乱や減衰といった効果はほぼ共通であり、波形の見た目が異なる理由にはならない。従って、深部低周波地震には流体の移動などといった低周波の地震波を放出する特別なメカニズムがあり、高周波地震とはメカニズムが異なるということになるであろう。

## 5. 結論

本研究では、テンプレートや観測点をアップデートすることにより、網羅的に箱根火山での深部低周波地震を検出するマッチドフィルタ法を再構築した。その結果、より網羅的に深部低周波地震を検出することができた。活発化は2015年、2019年、2021年、2023年に見られ、2015年、2023年には地殻変動に先行し、2021年はほぼ同期的に発生、一方で2019年は火山活発化に比べて半年程度遅れている。また、2015年、2021年、2023年の活発化では同じ震源域で発生する「深部高周波地震」の群発が含まれていることがわかった。これらの結果から、深部低周波地震は地下深部からのマグマ供給過程と関連していることが示唆される。特に同じ震源域で異なるタイプの地震が発生していることは、深部低周波地震は通常の地震とは異なるメカニズムで発生することを強く示唆する。

## 謝辞

本研究では神奈川県温泉地学研究所の観測データに加えて、防災科学技術研究所が運営する高感度観測網(Hi-net)および気象庁のデータを使用しました。図の作成にはGeneric Mapping Toolsを使用しました。テンプレートの作成には気象庁の一元化地震カタログを使用しました。比較のため、国土地理院のGNSS連続観測システム(GEONET)の記録を使用しました。本研究はJSPS 科研費JP22K14113の助成を受けたものです。記して感謝します。この原稿は本多亮氏および1名の匿名の査読者によるコメントによって改良されました。記して感謝します。

## 参考文献

- Gibbons SJ, Ringdal F (2006) The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophysical Journal International* 165:149–166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x>
- 原田昌武・吉田明夫(2024)箱根火山活動における膨張源の深さ. *地学雑誌* 133:91–100
- Kurihara R, Obara K (2021) Spatiotemporal Characteristics of Relocated Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath 52 Volcanic Regions in Japan Over an Analysis Period of 14 Years and 9 Months. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 126:e2021JB022173. <https://doi.org/10.1029/2021JB022173>
- Kurihara R, Obara K, Takeo A, Tanaka Y (2019) Deep Low-Frequency Earthquakes Associated with the Eruptions of Shinmoe-dake in Kirishima Volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124:13079–13095. <https://doi.org/10.1029/2019JB018032>
- Obara K (2002) Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan. *Science* 296:1679–1681. <https://doi.org/10.1126/science.1070378>
- 高橋浩晃, 宮村淳一(2009)日本列島における深部低周波地震の発生状況. *北海道大学地球物理学研究報告* 72:177–190
- 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生(2002)気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—. *験震時報* 65:123–134

Ukawa M, Ohtake M (1987) A monochromatic earthquake suggesting deep-seated magmatic activity beneath the Izu-Oshima Volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research* 92:12649–12663. <https://doi.org/10.1029/JB092iB12p12649>

White RA (1999) Precursory Deep Long-Period Earthquakes at Mount Pinatubo: Spatio-Temporal Link to a Basalt Trigger. *FIRE and MUD Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*

Yukutake Y, Abe Y, Doke R (2019) Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath the Hakone Volcano, Central Japan, and their Relation to Volcanic Activity. *Geophysical Research Letters* 46:11035–11043. <https://doi.org/10.1029/2019GL084357>

Yukutake Y, Honda R, Ukawa M, Kurita K (2022) Harmonic tremor from the deep part of Hakone volcano. *Earth Planets and Space* 74:144. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01700-8>