

北海道雌阿寒岳における深部・浅部低周波地震活動*

弘前大学大学院理工学研究科 松野 有希・小菅 正裕・前田 拓人

1. はじめに

地震波の卓越周波数は地震の規模に関係しており、規模の小さい地震ほど高周波が卓越する。しかし、その一般的な関係よりも顕著に低周波の波が卓越する特異な地震があり、それを低周波地震という。日本列島内陸で発生する低周波地震は、震源の深さの面でも特異な地震である。一般的な地震の深さの下限（15 km 程度）は、断層が急激にずれる脆性破壊を起こす温度の上限に対応すると考えられている。それに対して、低周波地震はより深部の高温領域で発生するという特徴がある。内陸の低周波地震の多くは活火山近傍で発生するが、浅部で発生する低周波地震と区別する場合は深部低周波地震と呼ぶ。このように、卓越周波数・震源の深さの特異性と、活火山近傍で発生することが多いという特徴から、深部低周波地震の発生メカニズムは断層のずれではなく、マグマなどの流体が関与しているという考えがある（例えば、Hasegawa et al., 2005）が、未だ解明されていない。

最近、北海道函館付近と青森県八甲田山周辺において、深さ 10 km 以浅の地殻浅部でも低周波地震が発生していることが報告された（野口・他, 2018）。浅部低周波地震は脆性破壊域での低周波地震であることから、その発生メカニズムの解明は、一般的な地震の発生メカニズムにも再考を迫るものとなる点においても注目される。しかし、他地域での浅部低周波地震の発生は報告されていないため、浅部低周波地震が一般的に見られる現象であるかどうかを明らかにするためには、他地域での発生状況を調べる必要がある。東北日本における深部低周波地震発生域での震源分布を見ると、通常地震と低周波地震は異なる深さ範囲に分布している場合が多い。しかし、北海道雌阿寒岳では、通常地震の震源が分布する範囲が深部低周波地震の震源分布域の上端から地表付近まで連続しており、深さ 15 km 付近では低周波地震と重なっているように見える。そのため、浅部でも低周波地震が発生している可能性がある。

そこで本研究では、雌阿寒岳の地殻浅部で低周波地震が発生しているかを確認することと、低周波地震の発生位置や時空間変化、波形の特徴を基に深部と浅部の低周波地震の特徴を解明することを目的とする。これまで、低周波地震の調査は気象庁一元化震源カタログ中の低周波地震を識別するフラグに基づくことが多かった。しかし、フラグ付けは深部低周波地震を対象にしていたため、浅部低周波地震については地震波形を基に精査する必要がある。

雌阿寒岳は北海道東部に位置する活火山で、近年も数年おきに噴火が発生している。最近では、2006 年にごく小規模な、2008 年に小規模な水蒸気噴火が発生している他、火山性微動や地殻変動などの火山活動が知られている。2008 年には、深部低周波地震が浅部での群発地震に先

* Deep and shallow low-frequency seismic activity at Meakan-dake volcano in Hokkaido by Yuki Matsuno et al.

行して発生したことが報告されている (Takahashi et al., 2012)。

2. 低周波地震の識別

低周波地震の検出は FI 値 (Buurman and West, 2010) を用いて行った。FI 値は高周波帯域と低周波帯域の平均スペクトル振幅比の常用対数で表され、FI 値が負の場合は低周波成分が卓越することを示す。本研究では、高周波帯域は通常の地震の卓越周波数である 10–20 Hz、低周波帯域は低周波地震で卓越する 2–4 Hz に設定した。地震波形記録は防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net と気象庁の観測点で収録されたもの、験測値は気象庁一元化処理によるものを用いた。解析期間は、2004 年 4 月 1 日～2018 年 11 月 30 日である。

地震波の卓越周波数はマグニチュードに依存し、規模が大きいほど卓越周波数が低くなるため、推定された FI 値にはマグニチュードによるバイアスがかかり、マグニチュードが大きくなると FI 値が小さくなる (図 1)。そこで、FI 値のマグニチュード依存性を考慮したしきい値を定め (図 1 の実線)、それよりも FI 値が小さいものを低周波地震とした。こうして認定された低周波地震は雌阿寒岳近傍の地表付近から深さ約 30 km まで帯状に分布し、雌阿寒岳近傍の浅い地震に低周波地震が含まれていることが確かめられた。ただし、低周波地震と通常の高周波地震の分布は明瞭に分かれておらず、特に深さ 15 km 付近では、低周波地震と高周波地震の分布が重なりあっているように見られた。しかし、本当に震源分布が重なっているのか、それとも震源決定精度の限界でそのように見えているだけなのかは判然としない。

そこで、より震源決定精度の高い Double-Difference (DD) 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を適用して震源再決定を行った。DD 法は、近接する地震ペアからの観測走時差と理論走時差の差を利用して高精度震源決定を行う方法である。震源再決定の結果を図 2 に示す。低周波地震は雌阿寒岳を中心に発生しているのに対し、高周波地震は雌阿寒岳の南側で発生している。低周波地震は深さ 10 km より浅いところと深さ 13 km 程度より深いところで発生している。互いに近接してはいるものの、深さ 13 km 程度を境に低周波地震と高周波地震が棲み分けていることが明らかになった。

次に、地震の深さ分布の時間変化を図 3 に示す。深さ 10 km 以浅の低周波地震は、主に 2006 年と 2008 年、および 2017 年～2018 年にかけて見られる。2006 年には 3 月にごく小規模な水蒸気噴火が起きており、浅部での低周波地震はその前の 2 月に発生している。2008 年には 11 月に小規模な水蒸気噴火が起きており、同年の 1 月に浅部で低周波地震が発生し、9～10 月には深部で低周波地震が発生している。2016 年には深部で集中的に地震が発生していることがわかる。ただし、設定した S/N 比の条件から FI 値が求まらなかったため、低周波地震かどうかはわからない。

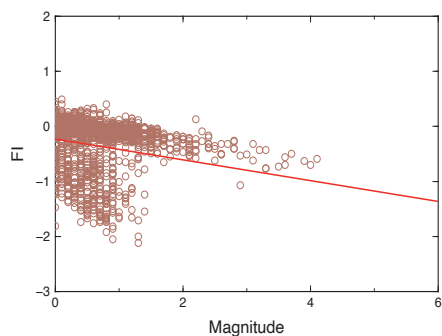


図 1. FI 値とマグニチュードの関係。
マグニチュード依存性を考慮して、赤
線より上を高周波、下を低周波地震と
識別した。

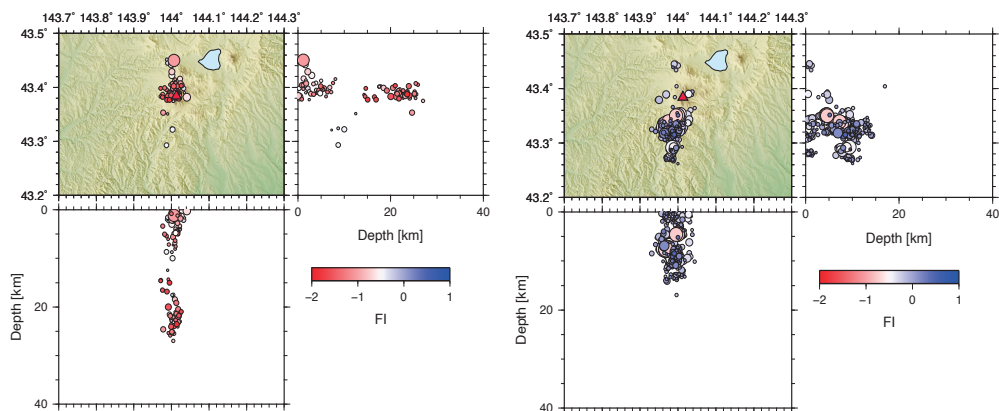


図 2. 低周波地震（左）と高周波地震（右）の震源分布。色は FI 値を表す。震源位置は再決定
によるもので、丸の大きさはマグニチュードを表す。

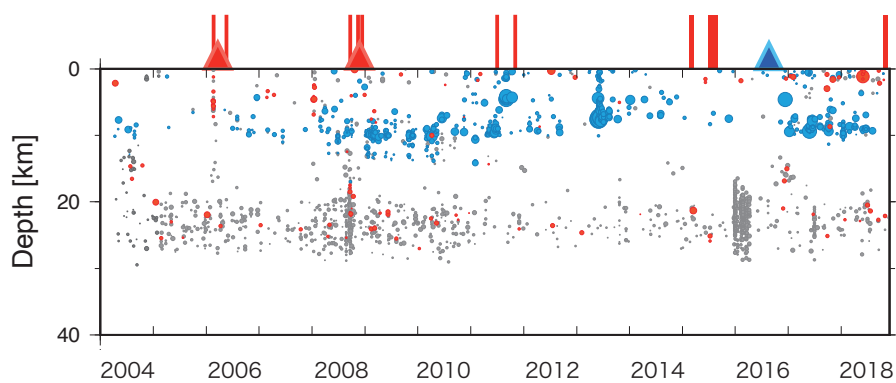


図 3. 震源深さの時間変化。赤丸が低周波地震、青丸が高周波地震を表す。グレーの丸は、条
件から FI 値が求まらなかった地震を表す。丸の大きさはマグニチュードを表す。図の上部の赤
三角は噴火、青三角は地殻変動、赤棒は火山性微動が発生した時期を示す。

3. 波形相関に基づく地震分類

こまでの検討から、雌阿寒岳周辺における地震活動は時空間的に局在している傾向が明らかになったため、波形の相互相関係数を用いて地震のグループ分けを行った。相互相関係数の計算には2-8 Hzのバンドパスフィルターをかけた波形を使用する。相互相関係数は、観測点ごとに3成分の相関係数の平均を求めた後、観測点平均をとって地震の相関係数とした。本研究では、Hi-net 観測点の足寄、白糖北、阿寒北の3点の波形を用いて相関係数を計算した。

S/N比が低いデータを除外した1385個の地震を対象とし、相関係数が0.7より大きく5個以上の地震がある場合にグループ化を行った結果、19グループに分けられた。グループ内の地震の平均的な位置を図4に示す。低周波地震のグループは、深さ15 km以深に2グループと、深さ10 km以浅ではごく浅いところに4グループ、やや浅いところに2グループに分かれて分布している。

図4のグループ①(地震数は158個)はS/N比の条件からFI値が求まらなかったが、波形を確認したところ低周波地震であったため(図5①)、このグループも低周波地震グループとする。マグニチュードの時間変化を図6に示す。2015年12月~2016年4月の比較的短期間に135個の地震が発生しており、2008年と2017年にも比較的短期間に集中的に発生している。

次に、グループ②(地震数は18個)に着目する。このグループの波形を図5②に、マグニチュードの時間変化を図7(A)に示す。このグループでは数年間隔で地震が発生しており、地震数は2016年に特に多い。そこで2016年11月~2017年1月の期間を拡大して図7(B)に示す。これを見ると、低周波地震が4~8日間隔で繰り返し発生していることがわかる。

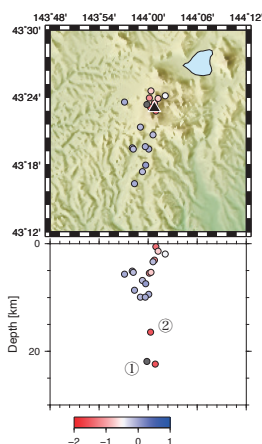


図4. 地震波形の相関係数を用いて分けられたグループの平均的位置。丸の色はグループ内の地震の平均FI値を表す。グレーはS/N比の条件からFI値が求められなかったグループを表す。黒三角は雌阿寒岳の位置を示す。

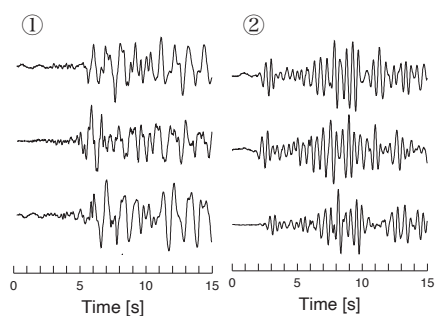


図5. 図4のグループ①, ②の地震波形。①は東西成分, ②は上下動成分の波形を示す。

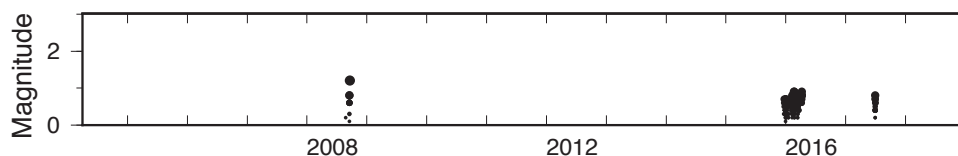


図 6. グループ①の地震のマグニチュードの時間変化。縦軸と丸の大きさがマグニチュードを表す。

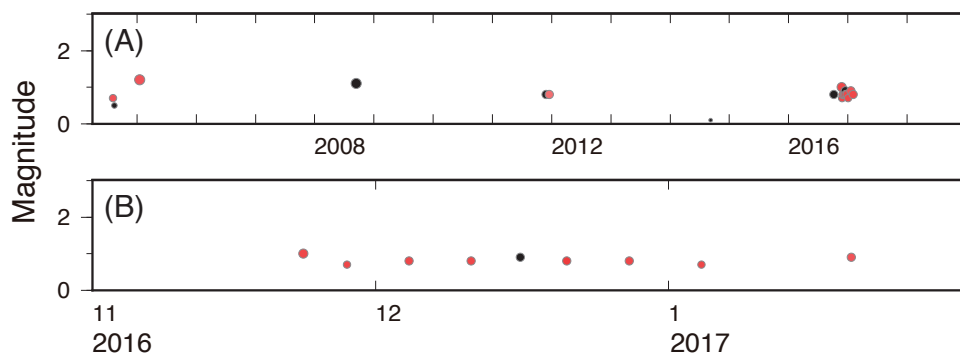


図 7. グループ②の地震のマグニチュードの時間変化。(A)は 2004 年 4 月～2018 年 11 月, (B)は 2016 年 11 月～2017 年 1 月の期間を表す。赤丸が低周波地震, 黒丸は FI 値が求まらなかった地震を示す。

4. 議論

グループ①の低周波地震(図 6)は、マッチドフィルターで検出した地震を波形相関を用いて分類した Kurihara (2019) においても同一グループとされた。これらの地震群は、2008 年の噴火前と 2016 年の地殻変動前に群発的に発生した。Kurihara (2019) はこれらの群発地震は火山活動と関連していることを示唆した。

低周波地震グループ②では、地震がほぼ等間隔で繰り返す、繰り返し低周波地震とも呼ぶべき特異な活動が見いだされた(図 7(B))。東北地方の太平洋沖プレート境界では繰り返し地震が発生することが知られており、その発生メカニズムは以下のように考えられている(例えば、Uchida et al., 2003)。プレート境界の孤立した小アスペリティ周辺での非地震すべりによってアスペリティに応力が集中し、アスペリティの破壊が起こる。地震後に固着は回復するが、プレートが一定の速さで動くことで、短い間隔で同じ波形の地震が繰り返し発生する。それとのアナロジーから、繰り返し深部低周波地震については次のようなメカニズムが考えられる。深部での流体だまりの圧力がしきい値を超えると流体が絞り出されて低周波地震が発生する。流体だまりの圧力増加の割合が一定だと、決まった時間で圧力がしきい値に達し、繰り返し地震が発生する。しかし、メカニズムについては更なる事例の蓄積を通して検討する必要がある。

5・ 結論

本研究では、北海道雌阿寒岳において FI 値により低周波地震の客観的な判別を行い、さらに DD 法を用いて高精度震源決定を行った。その結果、深さ 10 km 以浅でも低周波地震が発生していること、高周波地震と低周波地震の震源が深さ 13 km 程度を境に分かれることが判明した。

地震波形の相互相関を用いた地震のグループ分けを行ったところ、浅部での低周波地震はごく浅いところに 4 グループ、やや浅いところに 2 グループに分けられた。深部低周波地震は 3 グループに分けられ、発生時系列の特徴が異なることが明らかになった。また、ほぼ一定の時間間隔で繰り返し発生する深部低周波地震が確認された。これは特異な現象であるが、その発生メカニズムの解明は今後の課題である。

謝辞

本研究では、気象庁観測点の波形データ、気象庁一元化処理震源と観測値、および国立研究開発法人防災科学技術研究所高感度地震観測網 Hi-net の波形記録を使用した。関係機関に感謝いたします。

参考文献

- Buurman, H. and M.E. West (2010), Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine Volcano, The 2006 Eruption of Augustine Volcano, Alaska, 41-57. doi:10.3133/pp17692.
- Hasegawa, A., J. Nakajima, N. Umino, and S. Miura (2005), Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, *Tectonophysics*, 403, 59–75. doi:10.1016/j.tecto.2005.03.018.
- Kurihara, R., (2019), Comprehensive detection and spatio-temporal distributions of deep low-frequency earthquakes in volcanic areas all over Japan, Ph.D thesis, the University of Tokyo.
- 野口科子・関根秀太郎・澤田義博・笠原敬司・佐々木俊二・田澤芳博・矢島浩・阿部信太郎・石田貴美子 (2018), 高密度観測網 AS-net で捕らえられた東北地方北部~北海道南西部の低周波イベントの分布と特徴, 日本地震学会 2018 年秋季大会, 郡山, 2018 年 10 月, S23-P26.
- Takahashi, H., T. Shibata, T. Yamaguchi, R. Ikeda, N. Okazaki, and F. Akita (2012), Volcanic strain change prior to an earthquake swarm observed by groundwater level sensors in Meakan-dake, Hokkaido, Japan, *J. Volc. Geotherm. Res.*, 215–216, 1–7. doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.11.006.
- Uchida, N., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and T. Igarashi (2003), Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 30(15), 1801, doi:10.1029/2003GL017452.
- Waldhauser, F. and W.L. Ellsworth (2000), A Double-Difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 1353–1368. doi:10.1785/0120000006.