

## 地殻浅部での低周波地震活動\*

弘前大学理工学研究科 小菅 正裕

### 1. はじめに

震源から放射される地震波の波長の上限は断層の大きさに関係し、規模が小さい微小地震は波長が長い、すなわち低周波の波を放射することはできない。しかし例外的に、通常の微小地震よりも有意に低い数 Hz の波が卓越する地震があり、これを低周波微小地震と呼ぶ（以下、低周波地震と略記する）。低周波地震は発生する深さにも特徴がある。図1は、東北日本で発生した通常地震と低周波地震の深さ分布を示したものである。通常地震の深さの下限は15 km程度である。これは、それ以深では高温で物質が軟らかくなり、脆性破壊を起こすことができなくなるためと解釈されている。一方、低周波地震はその多くが20 kmよりも深部で発生するため、脆性破壊とは異なるメカニズムで発生する地震と考えられている。

気象庁では1998年以降、震源カタログに低周波地震であることを示すフラグ(印)を付けている。その際、火山周辺の地殻浅部においてマグマだまりの膨張・収縮やマグマの移動に伴って発生する低周波地震と区別するために、フラグ付けの対象とする地震はおよそ10 km以深のものとし、「深部低周波地震」と呼んでいる。図1の右側の深さ分布は、深部低周波地震のフラグが付いた地震の分布である。これを見ると、通常地震が発生する地殻浅部において発生する低周波地震も一定数存在している。このように脆性破壊域でも低周波地震が発生するのはなぜかということは、地殻内での断層運動の発生条件は何かということと直接関係し、地震学上極めて重要な問題を含んでいる。それを考えるためには地殻浅部での低周波地震の活動状況を知ることが必要であるが、浅部の低周波地震に対してはフラグ付けがなされていないため、活動の実態は不明である。

そこで本研究では、地殻浅部において通常地震と低周波地震の両方が発生していることが知られている地域において、地震波の周波数成分の割合を示す Frequency Index (以下、FI 値と述べる)を用いて地震の分類を行い、地殻浅部における低周波地震の活動状況を把握することを目的とする。

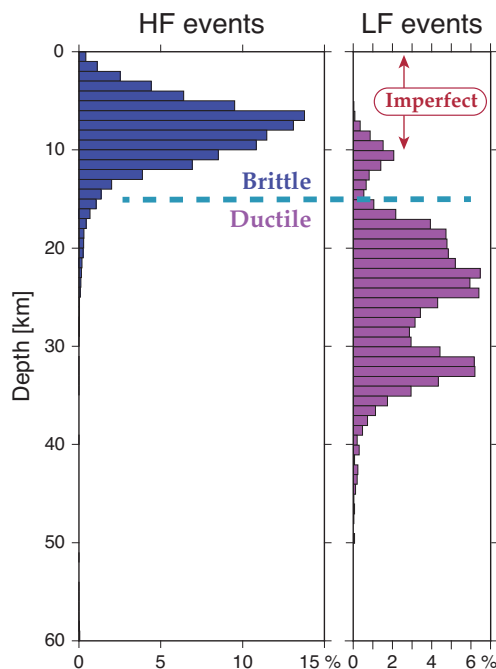


図1 東北日本で発生した通常の高周波地震(左)と低周波地震(右)の深さ分布。気象庁一元化震源カタログを用い、低周波地震のフラグの有無で分類した。

\*Seismic activity of shallow low-frequency earthquakes by Masahiro Kosuga

## 2. 方法とデータ

FI 値は  $FI = \log_{10}(\bar{A}_H / \bar{A}_L)$  で定義される [Buurman and West (2010)]。ここで  $\bar{A}_H$  と  $\bar{A}_L$  は高周波および低周波帯域における平均スペクトル振幅である。両帯域でのスペクトル振幅が等しければ FI 値は 0、低周波のスペクトル振幅の方が大きければマイナスの値をとる。本研究では、高周波帯域は 10–20 Hz、低周波帯域は 2–4 Hz を用いた。高周波帯域は通常の微小地震において卓越する周波数、低周波帯域は東北日本の低周波地震において卓越する周波数に対応する。

FI 値を求めた例を図 2 に示す。本研究では、まず各観測点の S 波 2 成分の平均 FI 値を求めた。その際、上記の 2 つの帯域での S 波のスペクトル振幅が、P 波到達前のノイズのスペクトル振幅の 2 倍以上であることを条件にした。次に、FI 値の観測点平均値を求め、それを各地震の FI 値とした。

FI 値を用いた地震の分類は、八甲田山と北海道函館付近の地震を対象に行なった。波形データは、防災科学技術研究所 Hi-net のホームページからダウンロードしたイベント波形データを用いた。S 波の到達時刻は気象庁一元化震源の観測値を用いた。

## 3. FI 値の頻度分布

高周波地震も多数発生している八甲田山周辺域について求めた FI 値の頻度分布を図 3 に示す。FI 値は、+0.2 付近に大きなモード、-1.0 付近に幅が広くて小さなモードを持つ、bimodal な分布を

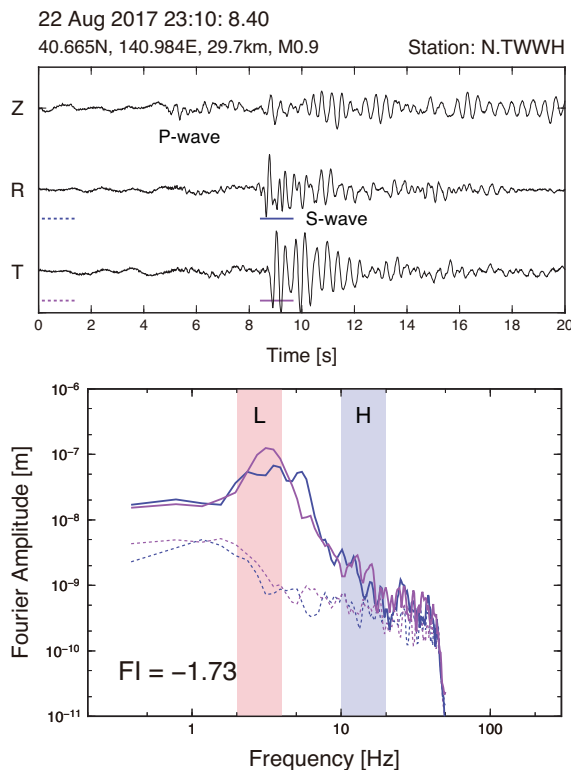


図 2 八甲田山の深部低周波地震について FI 値を求めた例。まず、水平 2 成分それぞれについて、S 波部分の 1.28 秒間のフーリエ振幅スペクトルを求め、2–4 Hz (図の L の帯域) と 10–20 Hz (H の帯域) での平均スペクトル振幅比の常用対数を FI 値とする。次に、2 成分の FI 値の平均を観測点の FI 値とする。下段の破線は P 波到達前のノイズのスペクトルで、S 波とノイズのスペクトル比がしきい値を下回る場合は FI 値を求めない。S 波とノイズの時間ウィンドウは波形の下に示している。

している。前者が高周波、後者が低周波地震に対応する。図3の下に示すようなカラースケールを用いると、地震の周波数成分を「高周波」「低周波」の二元論的分類ではなく、連続量として評価してその空間分布を見ることができる。

#### 4. 八甲田山周辺の低周波地震の空間分布

2002年～2018年の期間に八甲田山周辺で発生した地震のFI値の空間分布を図4(a)に示す。赤色で表される低周波地震は、八甲田大岳付近の深さ5 km以浅に円柱状に、また、大岳の東の深さ20 km以深に小さな2つのクラスターを形成して分布している。八甲田山では2013年2月以降、大岳付近を震源とする地震活動が活発になり、GNSSによる観測では膨張性の地殻変動が観測された。また、大岳山頂付近を震源とする低周波地震も発生した〔仙台管区気象台火山監視・情報センター(2013)〕が、気象庁一元化震源カタログでは低周

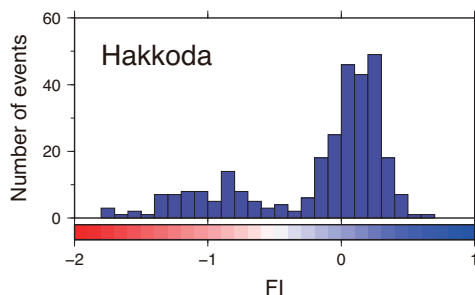


図3 八甲田山周辺で発生した地震のFI値の頻度分布。図のカラースケールに従って分類した震源分布を図4に示す。

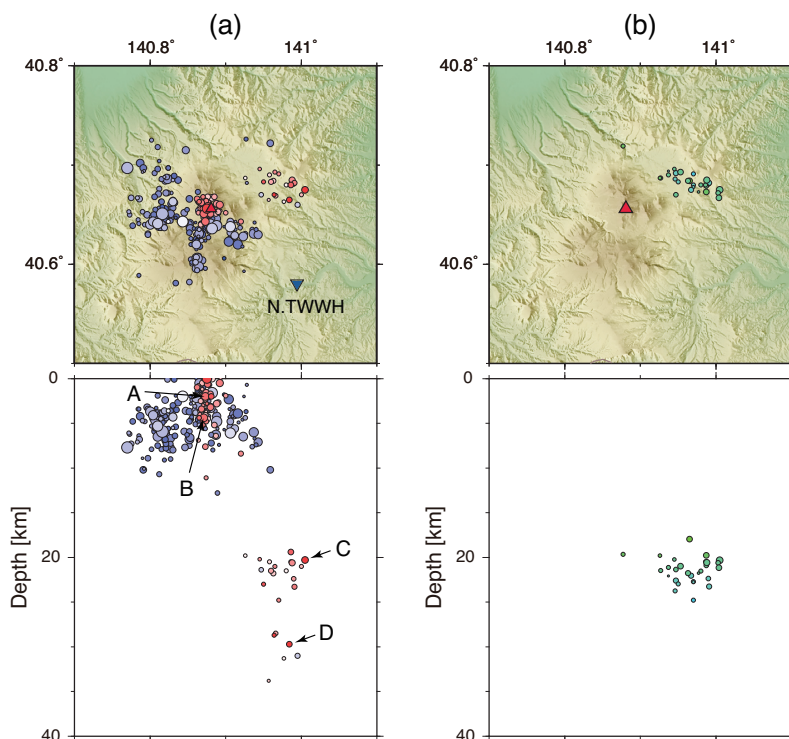


図4 (a) 八甲田山周辺で発生した地震のFI値の分布。カラースケールは図3に示す。震源の丸の大きさはマグニチュードを表す。赤い三角印は八甲田大岳の位置を示す。(b) 気象庁一元化震源カタログで低周波地震のフラグが付けられている地震の震源分布。丸の色は深さを表す。

波地震のフラグは付けられていない（図4(b)）ので、FI 値を用いることで、八甲田山周辺での低周波地震の活動状況を客観的に示すことができるようになったと言える。なお、(a)(b)ともに気象庁一元化震源カタログによる位置を用いているが、対応しない地震があるのは、ノイズレベルが高くてFI 値を求めることができなかった地震はプロットされていないためである。

八甲田山周辺で発生した地震のFI 値の時空間分布を図5に示す。八甲田大岳付近での低周波地震活動が2013年から始まり2014年前半まで継続したこと、深さ20 km以深での低周波地震は大岳付近での地震活動が活発になった後で発生し始め、活動はその後も継続していることがわかる。また、2006年4月に大岳付近の浅部で低周波地震が発生したこと（図5の矢印）もわかる。このように、FI 値を用いることで、地震活動図に地震波の周波数成分の情報を盛り込むことができる。

## 5. 函館周辺の低周波地震の空間分布

函館付近で発生した地震についてもFI 値を求め、その空間分布について検討した。ただし、対

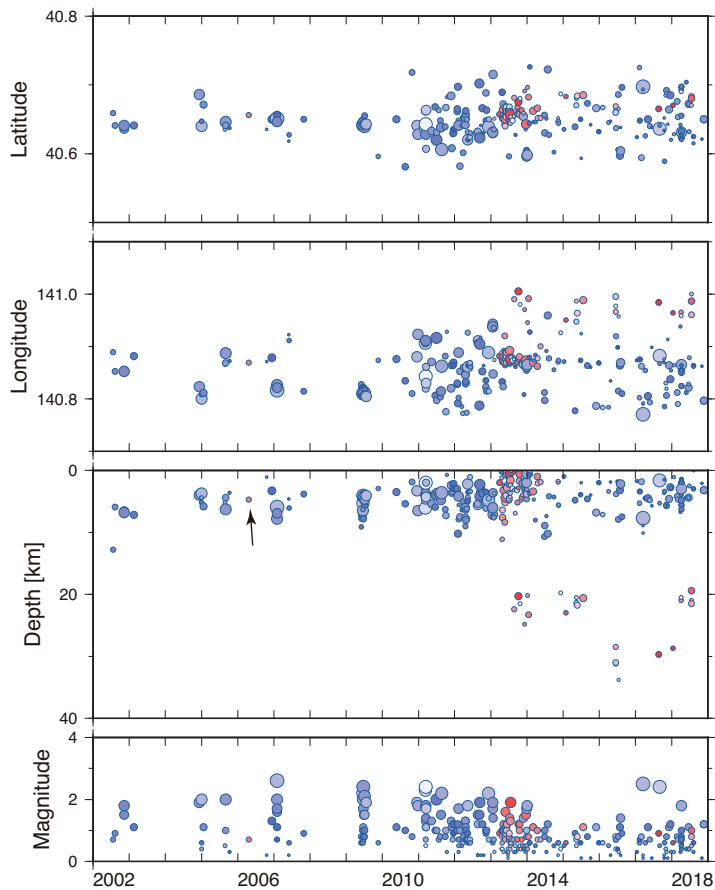


図5 八甲田山周辺で発生した地震のFI 値の時空間変化。丸の大きさはマグニチュード、丸の色はFI 値を表す。深さの時間変化図の矢印は低周波地震の発生を表す。

象とした地震は、活火山である恵山の南西の汐首岬付近の低周波地震と、2018年10月から11月にかけて函館市石崎町において臨時地震観測を行なった期間に発生した地震であるので、空間的にも時間的にも非一様である。FI値の空間分布を図6(a)に示す。低周波地震は、汐首岬付近の深さ20～32 kmに大きなクラスター、それよりも10 km程度西方の石崎地区の深さ5～20 kmに小さなクラスターを形成している。気象庁一元化震源カタログによる低周波地震の分布域(図6(b))で発生した地震は、FI値からでも低周波と判定されている。石崎地区では、高周波地震と低周波地震が隣接して分布していて、東部は低周波、西部は高周波と棲み分けているように見える。

## 6. 議論

FI値を用いた地震の分類は、しきい値を決めれば客観的に行うことができ、観測者の主観に左右されることがないので、地震活動の検討には有用なツールとなる。2013年から2014年にかけて、青森県から北海道渡島半島南端部にかけての領域に地震観測網AS-netが整備された。そのデータの解析から、函館市石崎付近の深さ5 km前後において、低周波地震が発生していることが確認された[野口・他(2018)]。2018年10月から11月にかけて実施した臨時地震観測中に発生した地震のFI値からも、同程度の深さで低周波地震が発生していることが確認できた。このような地殻浅部での低周波地震がなぜ発生するか の 解 明 は 次 の 課 題 に な る が、高周波地震と低周波地震が隣接して分布していることは、それらを含むクラスター領域が特異な地下構造をしているというよりは、個々の地震発生様式の違いを反映していることを示唆する。このような検討を各地で進める

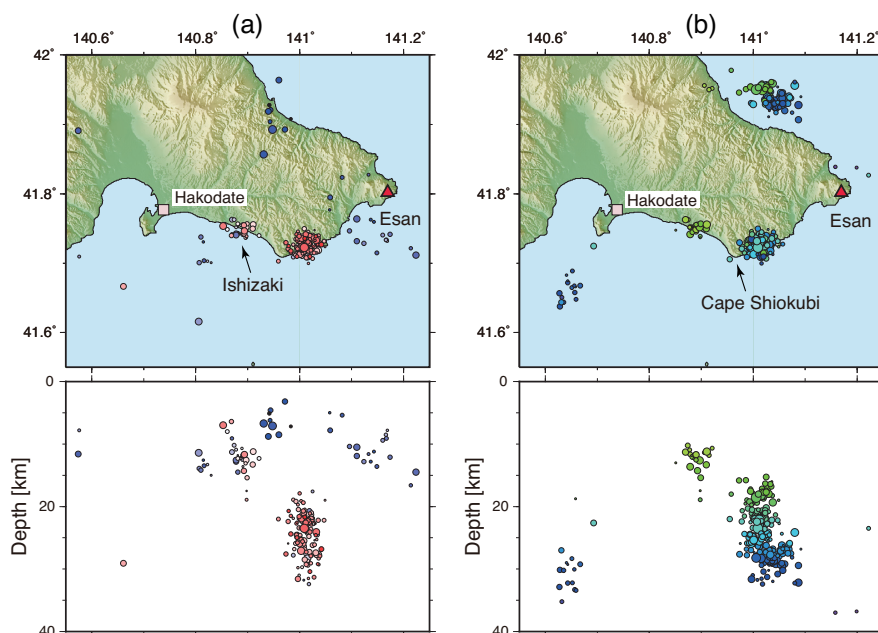


図6 (a) 函館周辺で発生した地震のFI値の分布。カラスケールは図3に示す。震源の丸の大きさはマグニチュードを表す。赤い三角印は活火山の恵山の位置を示す。(b) 気象庁一元化震源カタログで低周波地震のフラグが付けられている地震の震源分布。丸の色は深さを表す。

上で、FI 値の時空間分布は基本的なデータとなる。

FI 値を用いた先行研究としては以下のような例がある。Buurman and West (2010) は、アラスカの Augustine 火山の 2006 年の噴火活動の期間に FI 値がどのような時空間変動をしたのかを調べ、マグマの上昇との関係を議論した。Hotovec-Ellis et al. (2018) は、カリフォルニアの Mammoth 山の地殻中深部の地震を FI 値を用いて分類し、低周波・高周波地震の震源分布からマグマの存在領域を推定し、高周波地震の震源移動から流体の移動を推測した。このように、FI 値を通して地震活動を捉えることは、高周波・低周波地震の発生メカニズムを考える上で有用である。

## 7. おわりに

本研究では、八甲田山と北海道の函館周辺で発生した地震について、波形記録から FI 値を算出して地震の分類を行い、低周波地震と高周波地震が空間的に棲み分けていることを明らかにした。FI 値は簡便に求めることができ、地震の分類が客観的に行えるので、地震活動解析には有効なツールであることも示した。

今後は、地殻浅部の高周波地震から地殻下部の低周波地震まで連続した震源分布を示す北海道の雌阿寒岳、深さ 10 km 前後に低周波地震と高周波地震が分布している岩手山や北海道の羊蹄山地域などでの解析を進める。

## 文献

- Buurman, H. and West, M.E., 2010, Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine Volcano, chapter 2 of Power, J.A., Coombs, M.L., and Freymueller, J.T., eds., The 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska: U.S. Geological Survey Professional Paper 1769, 41-57.
- Hotovec-Ellis, A. J., D. R. Shelly, D. P. Hill, A. M. Pitt, P. B. Dawson, and B. A. Chouet, 2018, Deep fluid pathways beneath Mammoth Mountain, California, illuminated by migrating earthquake swarms. *Sci. Adv.*, 4, eaat5258.
- 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 で捉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 年度秋季大会講演予稿集.
- 仙台管区気象台火山監視・情報センター, 2013, 八甲田山の火山活動について, 火山噴火予知連絡会会報, 116, 22-35.

## 謝辞

本研究では、気象庁一元化震源要素と観測値、及び Hi-net と気象庁観測点の波形データを使用した。弘前大学理工学研究科の前田拓人准教授と弘前大学理工学部地球環境学科の成田伊織・松野有希の両氏には、函館周辺での臨時観測とデータ整理にご協力いただいた。以上の関係機関と方々に厚く御礼申し上げます。