

日本海東縁で発生する地震の周波数特性

-規模を考慮した Frequency Index 解析に基づく検討-*

弘前大学大学院理工学研究科 片山 藍貴・前田 拓人・高野 智也

1. はじめに

地震の周波数特性の一つに低周波地震 (Low-Frequency Earthquake; LFE) がある。通常の地震は規模が小さいほど高周波 (10-20 Hz) に卓越するが、低周波地震は規模が小さいにも関わらず低周波 (2-4 Hz) に卓越する。低周波地震が最初に発見されたのは活火山の北海道有珠山である (Minakami et al., 1951)。当初は火山周辺で観測されていたが、地震の検出技術の向上や気象庁の深部低周波地震の観測により火山以外の地域でも発見されるようになった。Nakajima and Hasegawa (2021)は、日本全国の内陸で発生した M0-2.5 の地震を網羅的に調べることで、深部から浅部まで幅広い地域で低周波地震を検出した。特に構造境界で多く検出されており、例えば中部地方の糸魚川・静岡構造線や北海道中央のプレート境界などの領域が挙げられる。Nakajima and Hasegawa (2021)の網羅的な解析や火山における低周波地震の周波数特性の研究 (松野・他, 2021) から、低周波地震といっても、どの程度低周波に卓越するかはさまざまであり、通常の地震から特に低周波が卓越する地震まで、その特性が連続的に広がっていることが明らかとなってきた。

低周波地震の検知に関する先行研究は内陸では数多く行われているが、日本海東縁のような海域ではあまり行われていない。海域では内陸と比べて観測点との距離が遠いため、地震波形が減衰されてノイズに埋もれるからである。日本海東縁には逆断層が帯状に分布している歪み集中帯が存在し、定期的に大地震が発生している (大竹・他, 2002)。歪み集中帯の一部は北海道中央にも分布し、この地域は Nakajima and Hasegawa (2021)が検出した低周波地震の発生箇所と一致する。そのため、他の歪み集中帯においても特徴的な周波数特性をもつ地震が存在する可能性がある。

そこで本研究では、日本海東縁で発生した地震を対象に地震波スペクトルの形状から卓越周波数の高低を指標化し、空間分布を検討する。具体的な手法として Buurman and West (2010)による Frequency Index (FI 値)を用いる。また、幅広いマグニチュードの地震に対して網羅的にその周波数特性を検討できるよう、FI 値の距離と規模依存性を考慮した補正 FI 値を新たに考案する。

2. 方法とデータ

本研究では卓越周波数の高低を表す指標として FI 値を用いた (Buurman and West, 2010)。その値は、以下で表される。

* Characterization of earthquakes on the eastern margin of the Sea of Japan based on spectral shapes of seismic waves with correction for earthquake magnitude by Aiki Katayama

$$FI = \log_{10} \left(\frac{A_H}{A_L} \right) \quad (1)$$

ここで、 A_H と A_L は高周波数帯、低周波数帯の平均スペクトル振幅である。本研究では、 A_H の周波数帯を10-20 Hz、 A_L の周波数帯を2-4 Hzとした。FI値が大きな値であるほど高周波に、小さな値ほど低周波にそれぞれ卓越した波形であることを示す。地震波形解析には防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netの波形記録を用い、震源情報は気象庁一元化震源カタログを使用した。FI値を求める解析時間窓は気象庁のS波理論到達時間を基準に前5秒、後ろ10秒の間で最大振幅となった時間から2.56秒間とした。

本研究では日本海東縁を覆うように北海道から能登半島までの海域で発生した12289個の地震を対象としてFI値を求めた(図1)。地震発生期間は2004年4月1日から2022年12月31日までとし、深さ50km以浅の地震を使用した。地震の規模はM2からM6とした。規模をM2以上に設定したのは観測点まで震源距離が遠く、M2が観測点の検出限界だからである。使用する観測点は震央距離から200km以内の観測点を用いた。太平洋側の観測点は地震波散乱により波形が崩れる傾向が観測されたため、使用しなかった。また、S/N比が3以下の地震波形は除外した。

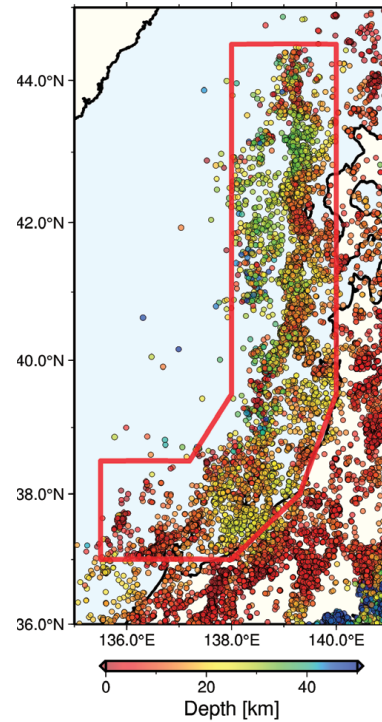


図1 | 研究対象(赤枠の範囲)とした地震の震源分布を丸で示す。色は深さを表す。

3. FI値の距離と規模依存性

本研究では日本海東縁全体の多くの地震と観測点を用いたため、FI値に距離依存性と規模依存性が見られた。そのため、まず平均的な地震のFI値の距離や規模依存性を表す理論FI値を新たに考案し、観測されたFI値の距離と規模依存性と比較した。その後、理論FI値を用いてFI値の依存性を改善できるよう試みた。理論FI値を構成する(1)式の A_H と A_L は、Boore(1986)の ω -squareモデルに基づく以下の式で表される。

$$A_H = \left(\frac{1}{f_{H2} - f_{H1}} \right) \int_{f_{H1}}^{f_{H2}} \frac{f M_0}{1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2} e^{\left[\frac{-\pi f r}{\beta Q_s} \right]} df \quad (2)$$

$$A_L = \left(\frac{1}{f_{L2} - f_{L1}} \right) \int_{f_{L1}}^{f_{L2}} \frac{f' M_0}{1 + \left(\frac{f'}{f_0} \right)^2} e^{\left[\frac{-\pi f' r}{\beta Q_s} \right]} df' \quad (3)$$

ここで、 f_{H1} 、 f_{H2} 、 f_{L1} 、 f_{L2} はそれぞれ高周波数帯、低周波数帯の下限と上限であり、 f と f' は積

分変数を示す。 M_0 は地震モーメント、 r は震源距離である。 Q_s は Q 値、 β は平均 S 波速度である。 f_0 はコーナー周波数を示し、Eshelby (1957)の円形クラックモデルに基づき、

$$f_0 = \left(\frac{16 \Delta\sigma}{7 M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{2.34\beta}{2\pi} \quad (4)$$

で表される。ただし、 $\Delta\sigma$ は応力降下量である。震源距離と地震モーメントは地震によって異なるため、理論 FI 値は地震の震源距離と規模に依存する。理論および観測 FI 値の距離依存性と規模依存性を図 2 と図 3 に示す。理論的に予測される FI 値の距離と規模依存性が観測 FI 値と整合していることが確かめられた。

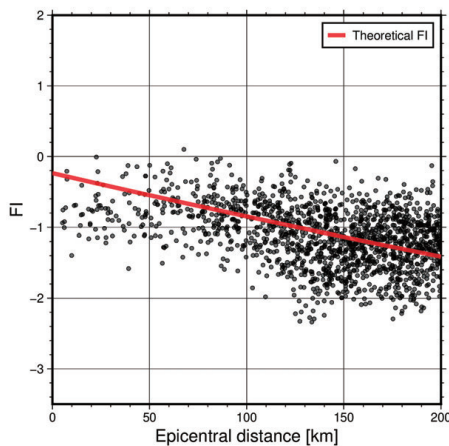


図 2 | FI 値の距離依存性。黒丸が観測記録に基づく FI 値、赤い直線が理論 FI 値。観測 FI 値と理論 FI 値は共に距離が大きくなるにつれて減少していく。

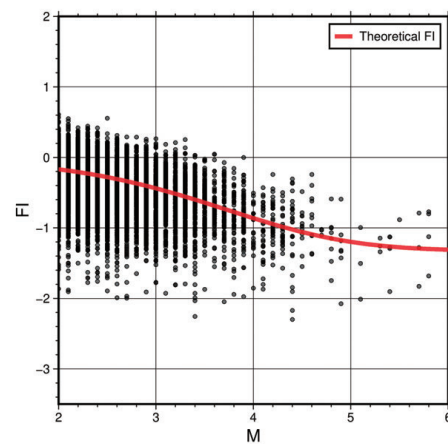


図 3 | FI 値の規模依存性。詳細は図 2 と同様。縦軸が FI 値で横軸が規模を示す。観測 FI 値と理論 FI 値は共に規模が大きくなるにつれて減少していく。

次に、FI 値の距離と規模依存性を改善する手法として補正 FI 値を新たに考えた。補正 FI 値は観測 FI 値から理論 FI 値を引くことで求めた。理論 FI 値はパラメータである Q 値、S 波速度、応力降下量を適切に仮定し、観測 FI 値と一致するようにした。本研究ではそれぞれ Q 値 700、S 波速度 3500 m/s、応力降下量 10 MPa とした。そのため、補正 FI 値はゼロ付近に分布し、距離や規模によらず一定の値を示す (図 4)。

4. 結果

補正 FI 値を日本海東縁の地震に対して計算した結果を図 5 に示す。また、図 6 に補正前の

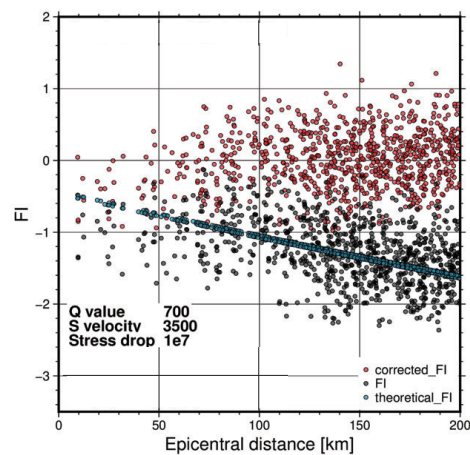


図 4 | 震央距離と FI 値の散布図。補正前 FI 値を黒丸、理論 FI 値を青丸、補正 FI 値を赤丸で表す。左下に理論 FI 値の計算に用いた Q 値と S 波速度、応力降下量の値を示す。

FI 値の結果を比較として示す。図 5 より、補正 FI 値の大小が明瞭な地域がある。特に補正 FI 値が小さい地域は北海道沖、男鹿沖、新潟沖、能登半島周辺の 4 地域であり、これらの地域では相対的に低周波が卓越した地震が多く発生している。図 7 より補正前の FI 値の平均値は約-0.58 だが補正 FI 値の平均値は約-0.12 となり、補正後ではより 0 に近い場所で FI 値が分布した。また補正 FI 値での頻度分布のばらつきが小さく、標準偏差も改善されたことが分かった。

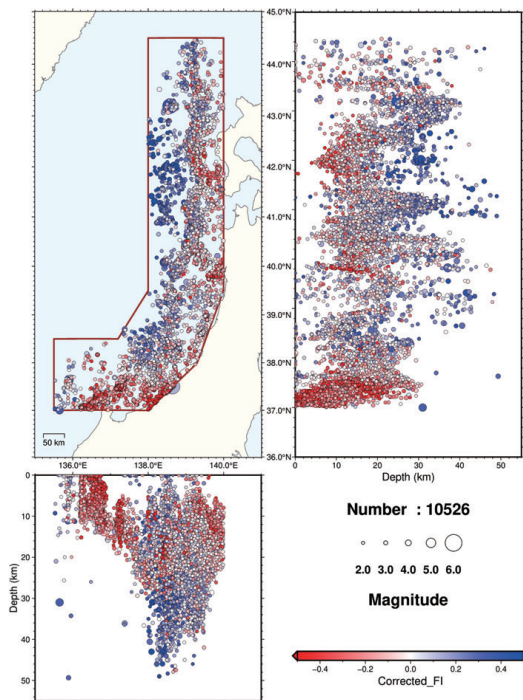


図 5 | 補正後の震源分布図。地震の震央位置と経度、緯度方向の深さ分布を示す。カラースケールは補正 FI 値に対応。

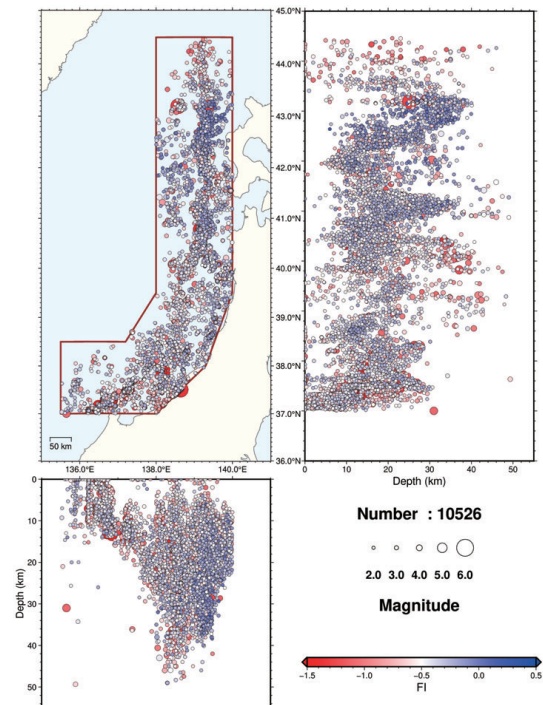


図 6 | 補正前の震源分布図。詳細は図 5 と同様。カラースケールは観測 FI 値に対応。

5. 議論

補正 FI 値が周囲と比べて小さい 4 地域は低周波地震が発生していると考えられる。そこで、既往研究で検出された内陸の低周波地震の分布図と比較を行った。既往研究として Nakajima and Hasegawa (2021)が検出した低周波地震 (図 8)と気象庁が検出した低周波地震 (図 9)の分布図を使用した。図 8, 9 より、4 地域周辺の内陸でも低周波地震が発生していることが分かる。これは本研究で検出された FI 値の小さい地域が内陸の低周波地震発生領域と連続して分布しているように見え、海域の低周波地震も内陸の低周波地震の発生メカニズムと同じように発生している可能性がある。例えば、Nakajima and Hasegawa (2021)では内陸の低周波地震の発生メカニズムに流体が関わっていると主張している。特に能登半島周辺は 2018 年頃から群発地震が活発に発生しており発生メカニズムに流体が関与していることが指摘されている (Amezawa et al., 2023)。そのため、能登半島周辺で検出された低周波地震も流体の関与が示唆される。ま

た、新潟沖では構造境界である糸魚川・静岡構造線が存在する。内陸と海域で低周波地震が連続して分布していることから、この構造境界が海域まで広がっている可能性が考えられる。

本研究では補正 FI 値を考案し、依存性の改善を試みた。しかしながら、規模依存性は大幅に改善されたが距離依存性は未だ残る結果となった。これは理論 FI 値のパラメータを決める際、地下構造を一様だと仮定していたからだと考えられる。よって、地下構造が深さによって変化することを考慮することで、距離依存性のさらなる改善に繋がると期待される。

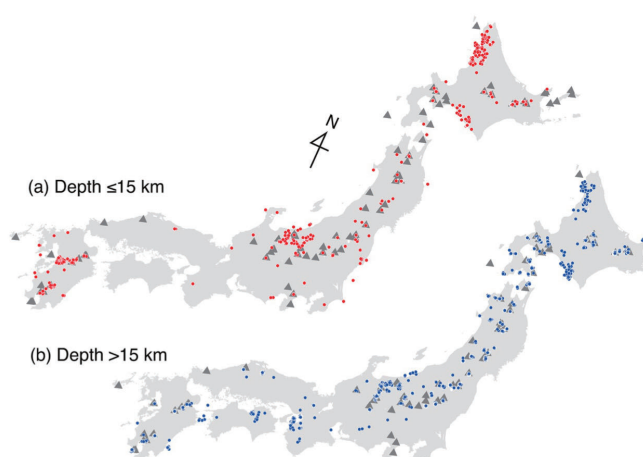


図 8 | Nakajima and Hasegawa (2021)より、検出した低周波地震の分布。上が深さ 15 km 以浅で下が深さ 15 km 以深の低周波地震を示す。黒い三角形が活火山。

5. おわりに

本研究では日本海東縁で発生した地震を対象に FI 値を用いることで日本海東縁の周波数特性を調べた。その際、震源距離と規模に応じた理論 FI 値を新たに考案し、補正 FI 値によって距離と規模依存性の改善を試み

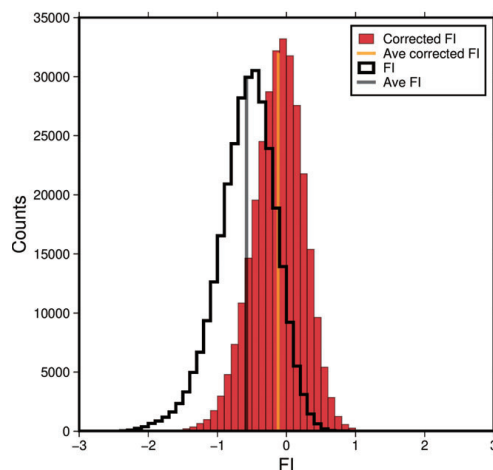


図 7 | 補正前 FI 値 (黒線)と補正 FI 値 (赤線)の頻度分布図。灰色の直線が補正前 FI 値の平均値, オレンジ色の直線が補正 FI 値の平均値を示す。

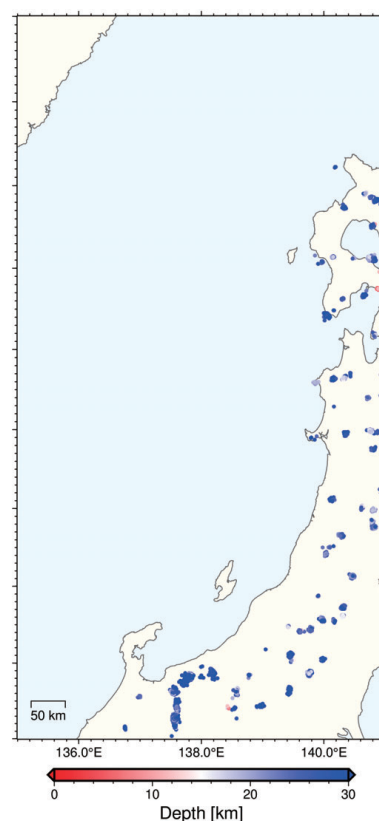


図 9 | 気象庁が検出した低周波地震の分布。カースケールは深さに対応。

た。その結果、補正 FI 値の分布に明瞭な地域性が見られた。特に補正 FI 値が小さい領域は北海道沖、男鹿沖、新潟沖、能登半島沖の 4 つの地域であることが分かった。これらの地域は低周波地震が発生していると考えられるため、4 つの地域と Nakajima and Hasegawa (2021) や気象庁が検出した内陸の低周波地震の発生領域と比較を行った。その結果、4 つの地域全てで内陸と海域で低周波地震が連続して分布していることが分かった。このことから、補正 FI 値を用いる事でこれまで調べられていなかった日本海東縁で発生した地震の顕著な周波数特性を発見することができた。

謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網 Hi-net の地震波形記録と気象庁一元化震源のデータを使用させて頂きました。関係機関に感謝いたします。

参考文献

- Amezawa, Y., Hiramatsu, Y., Miyakawa, A., Imanishi, K., & Otsubo, M. (2023). Long-Living Earthquake Swarm and Intermittent Seismicity in the Northeastern Tip of the Noto Peninsula, Japan. *Geophysical Research Letters*, 50(8), e2022GL102670. doi: 10.1029/2022GL102670.
- Boore, D. M. (1986). The effect of finite bandwidth on seismic scaling relationships. *Earthquake Source Mechanics*, 37, 275-283. doi: 10.1029/GM037p0275.
- Buurman, H., West, M. E., Power, J. A., & Coombs, M. L. (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.
- Eshelby, J. D. (1957). The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*, 241(1226), 376-396. doi: 10.1098/rspa.1957.0133.
- 松野有希, 小菅正裕, 前田拓人. (2021). 北海道雌阿寒岳における深部・浅部低周波地震活動. *東北地域災害科学研究*, 第 57 卷, 109-114.
- Minakami, T., Ishikawa, T., & Yagi, K. (1951). The 1944 Eruption of Volcano Usu in Hokkaido, Japan: History and mechanism of formation of the new dome "Syowa-Sinzan". *Bulletin Volcanologique*, 11, 45-157.
- Nakajima, J., & Hasegawa, A. (2021). Prevalence of shallow low-frequency earthquakes in the continental crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(4), e2020JB021391. doi: 10.1029/2020JB021391.
- 大竹政和, 平朝彦, 太田陽子. (2002). 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス. *東京大学出版会*, 27-69, 175-185.