

能登半島北東部の地震活動と遠地地震による誘発度との比較

Comparison of Seismicity in the Northeastern Noto Peninsula and Triggering Intensity Estimated by Teleseismic Earthquakes

松尾凌・宮澤理稔

Ryo MATSUO and Masatoshi MIYAZAWA

Synopsis

Dynamic triggering, or far-field triggering, is a natural phenomenon where large surface waves from large earthquakes cause other earthquakes to occur remotely due to stress perturbations. The triggering intensity is utilized to quantitatively evaluate changes in the seismicity rate associated with teleseismic earthquakes. This measure of triggerability is referred to as the n -value. Previous study indicated that large n -values were found in regions that have experienced large earthquakes, volcanic eruptions, and geothermal activity in Japan, suggesting a correlation to the stress state in Japan. In this study, we compare the seismicity in the Northeastern Noto Peninsula with the triggering intensity estimated from teleseismic earthquakes. The temporal changes in the n -values showed relatively high values in 2021. During the period from December 2020 to July 2021, when the seismic swarm activity increased, the n -values likely reflect the state of the stress field.

キーワード: 動的誘発, n 値, 能登半島, 時間変化, 遠地地震

Keywords: dynamic triggering, n -value, Noto Peninsula, temporal changes, teleseismic earthquake

1. はじめに

地震の誘発とは、外部からの応力擾乱などの影響によって地震が発生する現象である。力学的側面から、ある地震に伴い誘発される別の地震の発生の過程は大きく分けて3種類に区別することができる。地震発生時に断層の永久変位によって生じる静的歪み変化が地震を誘発する静的誘発と、上記の静的歪み変化(地震時変形)が粘弾性緩和によってゆっくりと時間をかけて空間的に広く伝わり地震を誘発する準静的誘発、比較的大規模な地震による表面波などが応力擾乱をもたらしながら伝播することにより、遠地で別の地震を誘発する動的誘発(遠地誘発)である。

本研究では動的誘発(遠地誘発)に着目する。静的応力変化量に比べて地震波伝播に伴う動的な応力変化量は、距離減衰が小さく遠方まで伝わることから、遠地で地震を誘発することができる。動的誘発により発生する地震のことを動的誘発地震(遠地誘発地震)と呼ぶ。近年、世界規模で地震観測網が密になっ

たことにより動的誘発に関する事例が数多く報告されているが、そのメカニズムは十分に解明されておらず動的誘発に伴う地震活動の変化に関する定量的な研究は十分に進んでいない。

動的誘発のされやすさの指標 *triggering intensity* (van der Elst & Brodsky, 2010) と地震発生場との間には関係が認められる場合がある。例えば、*triggering intensity* の分布を日本列島の地震活動に対して調査したところ、大規模な地震や火山活動、地熱地帯という地域性の影響を受けていることが確認され (Fig.1), 地下の応力状態を示す可能性が示唆された (松尾, 2024)。

能登半島北東部では2020年末から群発的な地震活動が発生しており、応力場が時間とともに変化していたと考えられる。*Triggering intensity* は応力場の状態を反映している可能性があるため、本研究では、能登半島北東部における地震活動と遠地地震による誘発度を比較し、群発地震発生中の応力の状態とその変化について推察することを目指し、*triggering intensity* の時間変化と、*triggering intensity* と PGV の対

応を調べる。

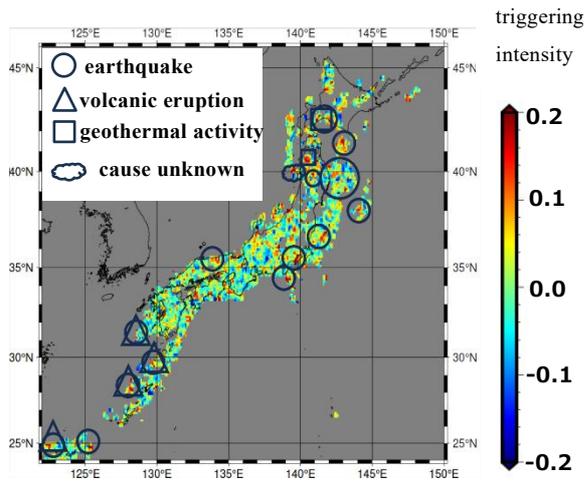


Fig.1. Distribution of triggering intensity estimated by seismicity from 2012 to 2021 in Japan (Matsuo, 2024).

2. 手法

本研究では、地震活動の活発度合いを示す指標である triggering intensity (n 値)(van der Elst & Brodsky, 2010)を用いて遠地地震による誘発度を表す。 n 値は、誘発の原因となると考えられる遠地地震の表面波到達の前後の地震活動度 λ の変化比で定義され、

$$n \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1} \quad (1)$$

と与えられる。ここで、式(1)の λ_1 と λ_2 はそれぞれ、遠地地震の表面波到達前と後の地震活動度である。 n 値が正のときは遠地地震の表面波通過後に地震活動が活発化したこと、0のときは地震活動に変化が無いこと、負の時は地震活動が静穏化したことを示す。通常 λ を求めるには十分な観測期間が必要だが、高頻度に発生する遠地地震に対して地震活動の変化について調べるには、どの遠地地震の影響を受けたかを分離できず、長い期間を取った λ を求めることは不適當である。よって、地震間の時間の比 R を介して n を求める。 R は、遠地地震の表面波が到達した時刻と、その1つ前と後に地震が発生した時刻との差である、 t_1 と t_2 (Fig.2)を用いて

$$R = \frac{t_2}{t_1 + t_2} \quad (2)$$

と表す。様々な遠地地震の波の到達に対する式(2)の R をすべて足し合わせて平均をとった R のアンサンブル平均 $\langle R \rangle$ は n を用いて、

$$\langle R \rangle = \frac{1}{n^2} [(n+1) \ln(n+1) - n] \quad (3)$$

と表すことができ、式(3)を数値計算的に解いて n 値を求める(van der Elst & Brodsky, 2010)。尚、遠地地震の表面波到達時刻を求める際には、表面波が誘発地震を調べる領域に到達するまでの走時を補正する。このときの表面波の速度は、4.1 km/sとする。 n 値を求める領域は、能登半島北東部の $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ の範囲とし、 M_c (completeness magnitude)を下限としたマグニチュードの地震を用いる。時間変化を求める際は地震が8個以上含まれる場合にのみ n 値の計算を行う。

Peak Ground Velocity(PGV)と n 値との対応を調べるために、表面波通過に伴うPGVを近似的に推定する。PGVは、遠地地震と解析領域間の震源距離と遠地地震の表面波マグニチュードから求め、 V_{max} をPGV、表面波マグニチュードを $M_s(BB)$ 、各々の遠地地震とグリッドとの間の震源距離を Δ としたときの関係式

$$M_s(BB) = \log \frac{V_{max}}{2\pi} + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (4)$$

を使用する(Ammon et al., 2020)。PGVの単位はm/sである。対数の底は10で、 Δ の範囲は、 $2^\circ < \Delta < 160^\circ$ である。

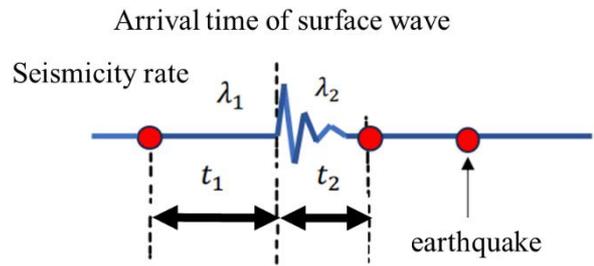


Fig.2. A schematic illustration showing the relation between t_1 and t_2 for obtaining the interevent time ratio R .

3. データ

本研究では、2011年の東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)により大規模の余震が多数発生して全国的に小地震の検出能力が低下し、遠地の大地震による誘発地震の検出に影響を与えたと考えられることと、2020年12月以降、能登半島北東部で群発地震活動の活発化が始まったことを考慮し、2012年から2024年までの期間を調査対象とした。遠地地震としてANSSの地震カタログ記載の、同期間に発生したM6以上で

深さ60km以浅の地震1290個を用いた (Fig.3). また、遠地地震によって能登半島の地震活動がどのように変化したかを調べるために、誘発の有無を調べる地震については気象庁一元化処理震源を用いた。観測期間は遠地地震と同期間であり、深さは30km以浅である。解析領域の M_c を求めたところ2.2であり、これ以上のマグニチュードを持つ地震を用いたところ、3226個あった (Fig.4)。解析領域は、北緯37.2度から37.7度まで、東経136.9度から137.4度までとした。なお、2012年から2019年まではいずれの1年間の時間窓でも解析領域で観測された地震数10個未満と少ないことを考慮し、 n 値の時間変化の期間は2020年から2024年とした。

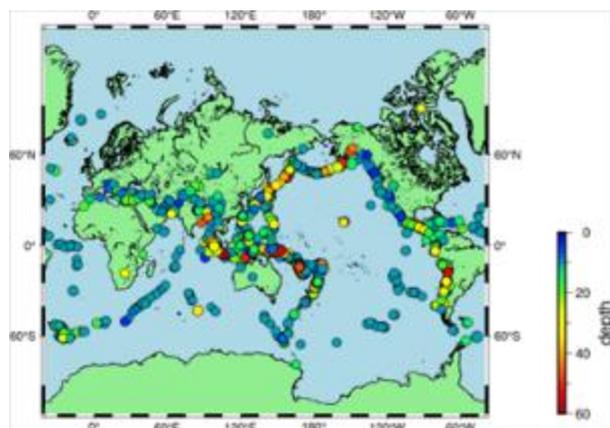


Fig.3. Earthquakes of magnitude 6.0 or greater and at depths shallower than 60 km that occurred from 2012 to 2024, based on the ANSS catalog. Each circle represents an earthquake, with its size proportional to the magnitude. The figure was created using data from the USGS website.

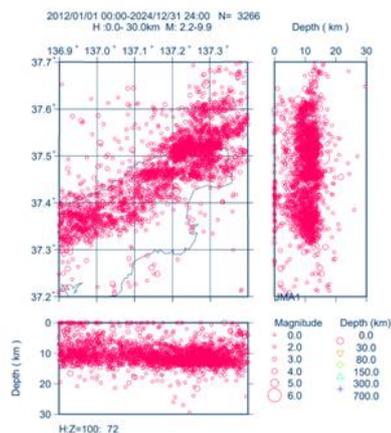


Fig.4. Distribution of 3,226 hypocenters from the JMA unified catalog that occurred in the Northeastern Noto Peninsula with depths shallower than 30 km and magnitudes equal to or greater than M_c 2.2. The figure was created from the TSEIS website.

4. 結果

2012年から2024年までの能登半島北東部において、地震の誘発のされやすさを表す n 値と遠地地震による揺れの大きさを表すPGVとの関係を調べた (Fig.5). n 値の推定誤差を求めるためにブートストラップ法を使用し、 n 値とPGVの対応を調べた。また、遠地地震によるグリッドごとのPGVを複数のbinに分割し、そのbin内のRのアンサンブル平均 $\langle R \rangle$ を介してPGVに対応する n 値を求めた。Fig.5は、PGVに対する n 値の分布を、Miyazawa et al. (2021)の南カリフォルニア地域のモデルと比較している。地震の揺れが大きいほど地震が動的誘発されやすくなる傾向が顕著である南カリフォルニア地域とは異なり、能登半島北東部ではPGVに対する n 値の依存性は確認されなかったことが分かった。

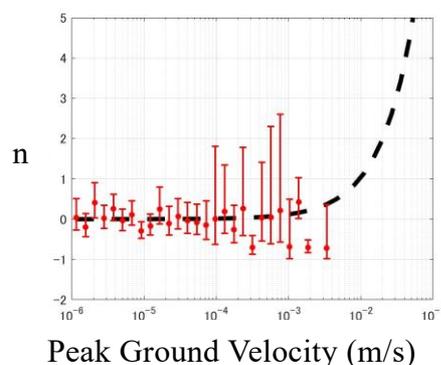


Fig.5. Relationship between the n -value and PGV in the northeastern Noto Peninsula from 2012 to 2024. Red circles represent data obtained in this study, while the black dashed line indicates the model for the southern California region proposed by Miyazawa et al. (2021).

n 値の時間変化については、地震の数が充分にある2020年以降について求めた。Fig.6は2020年から2024年までの能登半島北東部における n 値の時間変化を示す。なお、 n 値の時間変化については、解析期間の開始時期を2020年から半年ずつ移動させ、1年間の時間窓を用いて求めた。本研究で求めた値の推定誤差をブートストラップ法により求め、信頼区間を90%とした。

2020年の n 値は約0.243,90%信頼区間は-0.043~0.670,2020年7月から2021年6月までの n 値は約0.107,90%信頼区間は-0.147~0.477となり、地震活動の変化がほとんど確認されなかった。しかし、2021

年の n 値は約0.509(90%信頼区間は0.184~0.928)と解析期間内で最大となり、遠地震により地震活動が一時的に約50.9%増加していたことが分かった。2021年7月から2022年6月までの n 値は0.442(90%信頼区間は0.101~0.887)となり、それ以降は値が急激に低下し、0前後の値をとった。これらの結果から、群発地震活動がより活発化した2021年後半以降は誤差範囲内に地震活動の変化が認められない $n=0$ が見られたことが示された。

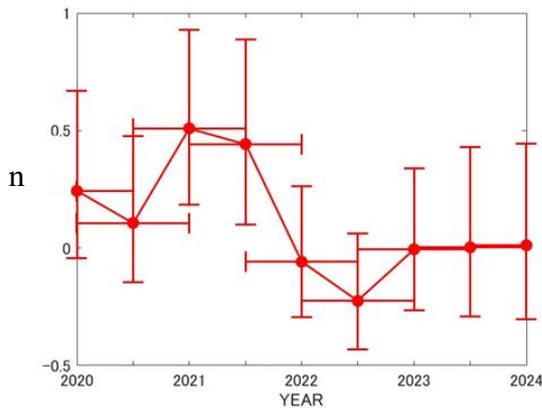


Fig.6. Temporal changes in the n -value in the northeastern Noto Peninsula from 2020 to 2024.

5. 議論

2012年から2024年まで、能登半島北東部ではPGVに対する n 値の依存性が確認されなかった。そこで、期間内に n 値が時間変化していることを考慮し、PGVが 1.0×10^{-4} (m/s)以上という地震の揺れが比較的大きいときのPGVに対する n 値の時間変化を調べた。このときの時間変化はFig.7に示す結果となり、Fig.6とは異なった結果となった。この時の遠地震は40個、解析期間内で最大の n 値は2022年の約3.42(90%信頼区間は0.340~20.340)となり、遠地震によって一時的に342%も地震活動が大幅に活発化したことが示された。Fig.7のように、この値のみが誤差範囲内に0が含まれなかったが、いずれの値も信頼区間の幅が1.7以上と大きく、中でも2022年は20と極めて大きくなった。

地震活動の時間変化と n 値の時間変化とを比較した。Fig.6の2020年7月から2021年7月までの n 値の増加は、群発地震活動が活発化する2020年12月以降の非定常ETAS解析結果の背景地震活動度 $\mu(t)$ の上昇に対応しているように見える(地震調査研究

推進本部, 2025)。

また、地殻変動の時間変化と n 値の時間変化とを比較した。2020年以降の珠洲市の電子基準点950253(珠洲)の地殻変動を見ると、2021年から2022年にかけて比較的急激に隆起し、その後は2024年1月1日に発生したM7.6の能登半島地震発生まで隆起の値が高止まり状態となり、地震発生に伴う大幅な隆起以降は沈降している(Fig.8)。これと、 n 値の時間変化との対応を考えると、2021年から2022年にかけての地殻の隆起が地震活動の活発化と誘発度の上昇に寄与したことが考えられる。

このように、2021年前後で観測された比較的大きな n 値は、背景地震活動の増加時や地殻の隆起時に対応していることが分かる。群発地震は、スロースリップイベントやマグマの貫入などの外的かつ一時的な応力変動や、間隙流体の圧力の上昇による断層強度の低下に関連する現象として解釈されることが多い(Nishimura et al., 2023)。2020年12月から活発化し始めた群発地震活動や2021年から2022年にかけての地殻変動には、地下深部からの流体の移動が影響していることが考えられている(Nishimura et al., 2023)が、動的誘発を引き起こしやすい状況を意味する高い n 値と整合的であると考えられる。その後 n 値は0付近になるが、地下深部からの流体の移動が止まったことが考えられる。

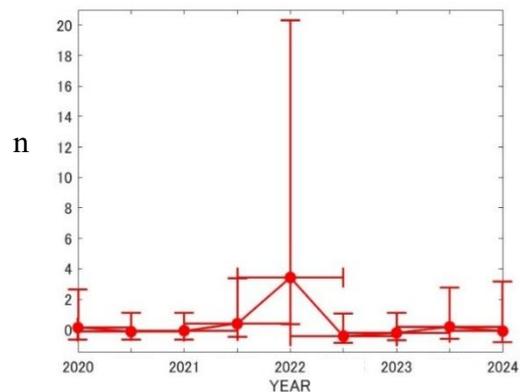


Fig.7. Temporal variation of the n -value in the northeastern Noto Peninsula from 2020 to 2024 for events with PGV greater than 1.0×10^{-4} (m/s).

謝 辞

本研究では、ANSS地震カタログ、気象庁一元化処理震源カタログ、国土地理院のGEONETの電子基準点データ提供サービスを用いました。記して感謝いたします。

参考文献

- 気象庁. “震源データ”.
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>.2025年7月17日.
- 国土地理院. “電子基準点データ提供サービス”.
https://terras.gsi.go.jp/pos_main.php. 2025年8月10日.
- 地震調査研究推進本部 (2025年): “第409回地震調査委員会資料” .
P.26.<https://www.jishin.go.jp/main/suihon/erc409/erc409-4.pdf>.2025年7月17日.
- 松尾凌(2024):遠地地震による日本列島における地震活動の変化にもとづく動的誘発の定量的研究, 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修士論文.
- Ammon, C.J., Velasco, A.A., Lay,T., Wallace,T.C. (2020):*Foundations of Modern Global Seismology*,7,204p.
- Miyazawa, M., Brodsky, E.E., Guo, H. (2021):Dynamic Earthquake Triggering in Southern California in High Resolution: Intensity , Time Decay , and Regional Variability, *AGU Advances*, 2(2).
- Nishimura, T., Hiramatsu, Y., Ohta, Y. (2023):Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, *Scientific Reports*,13,8381.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-35459-z>.
- USGS Earthquake Hazards Program.
<https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>.2025年7月17日.
- van der Elst, N.J., Brodsky, E.E. (2010): Connecting near-field and far-field earthquake triggering to dynamic strain, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*,115, (B7).

(論文受理日：2025年8月30日)

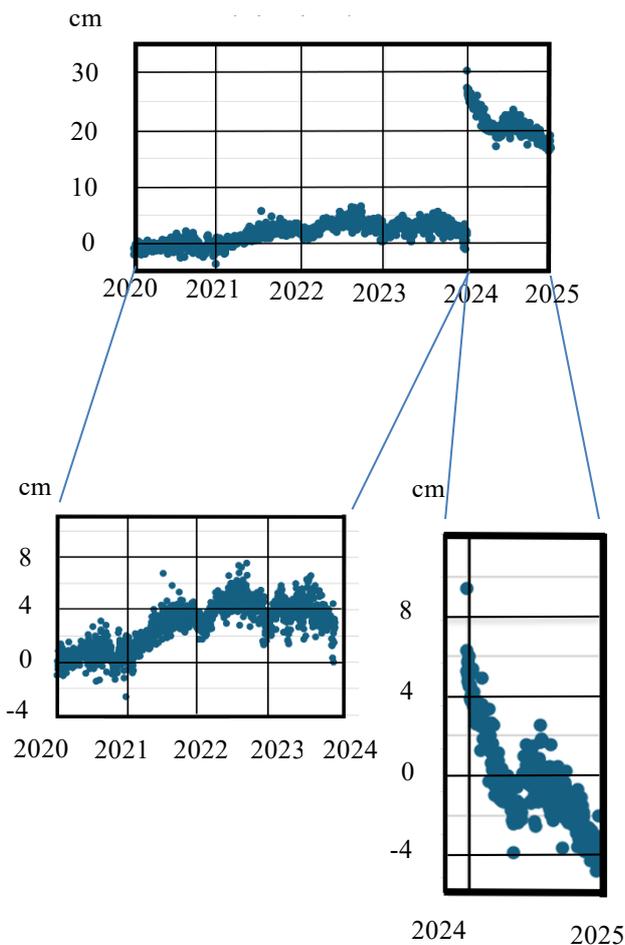


Fig.8. Vertical crustal displacements in Suzu City. The figure was created using data from the Electronic Reference Point Data Provision Service provided by GEONET.

6. おわりに

本研究では、能登半島北東部において誘発のされやすさの指標であるtriggering intensity (n 値)の時間変化を調べることで、群発地震発生期間中の応力の状態の変化について推察した。2020年から2024年までの期間においては、2021年で比較的大きな n 値が観測され、2020年前後から2022年にかけては n 値が地震発生の場の状態を反映していると考えられる。また、2022年以降は群発地震活動がより活発化したが、 n 値を見ると、2024年までの遠地地震活動による地震活動の変化が静穏化またはほぼ0であることが示された。