

能登半島で発生したマグニチュード差が 0.1 の地震の震度分布の比較

板寺一洋^{*1}・吉田康宏^{*2}・吉田明夫^{*3}

Comparison of the seismic-intensity distribution for earthquakes with magnitude difference of 0.1 which occurred in the Noto Peninsula

by

Kazuhiro ITADERA^{*1}, Yasuhiro YOSHIDA^{*2} and Akio YOSHIDA^{*3}

1. はじめに

能登半島では 2020 年 12 月に始まった群発的な地震活動が続く中で 2024 年 1 月 1 日にマグニチュード (M, 以下 M は気象庁マグニチュードを表す) 7.6 の令和 6 年能登半島地震が発生した。群発地震活動活発化以降、能登半島北東端の領域では、2024 年 6 月 3 日の M6.0 の地震を含めて、2024 年 8 月 31 日までに M5.4 以上の地震が 8 個起きている (表 1)。図 1 a, b に、これらの地震の震央位置とメカニズム解を示す。これらの地震は、いずれも主圧力軸方向がほぼ北西—南東方向の逆断層地震だった (防災技術研究所, 2024)。なお、本稿の記述では、例えば 2024 年 1 月 1 日の M7.6 の地震は 20240101M7.6 と表記する。

表 1 に掲げた 8 個の地震のうち、20220619M5.4、

20230505M5.4 および 20240101M5.5 の 3 つの地震と、20230505M5.9、20240101M5.9 および 20240603M6.0 の 3 つの地震は、それぞれ M が同じか、もしくは差が 0.1 だった。本短報では、震度データが残念ながら得られていない、20230505M6.5 の直後に発生した 20230505M5.4 と、令和 6 年能登半島地震 (20240101M7.6) の直前に発生した 20240101M5.9 を除いて、M 差が 0.1 だった 20220619M5.4 と 20240101M5.5 および 20230505M5.9 と 20240603M6.0 の二組の地震について、M のわずかな差が震度分布にどのような違いをもたらしたかを検討する。

本稿で使用した震源位置および震度は気象庁の震源リストおよび震度データベースの検索サイト (気象庁, 2024a および b) のデータによる。また、地震のメカニ

表 1 2021 年 1 月～2024 年 8 月に能登半島先端部北東端で発生した M5.4 以上の地震のリスト。本稿で震度分布の比較を行った地震をハッチ掛けで示した。

日	時	震源				
		経度	緯度	深さ (km)	Mjma	Mw
2022/06/19	15:08:07	137.275	37.515	13	5.4	5.2
2023/05/05	14:42:04	137.303	37.538	12	6.5	6.2
2023/05/05	14:42:34	137.313	37.518	15	5.4	
2023/05/05	21:58:04	137.235	37.525	14	5.9	5.7
2024/01/01	16:06:06	137.245	37.510	12	5.5	5.3
2024/01/01	16:10:09	137.230	37.507	10	5.9	
2024/01/01	16:10:22	137.270	37.495	16	7.6	7.5
2024/06/03	06:31:40	137.302	37.467	14	6.0	5.8

*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

*2 気象研究所 〒 305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

*3 静岡大学防災総合センター 〒 422-8529 静岡県静岡市駿河区大谷 836

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 56 卷, 27-33, 2024

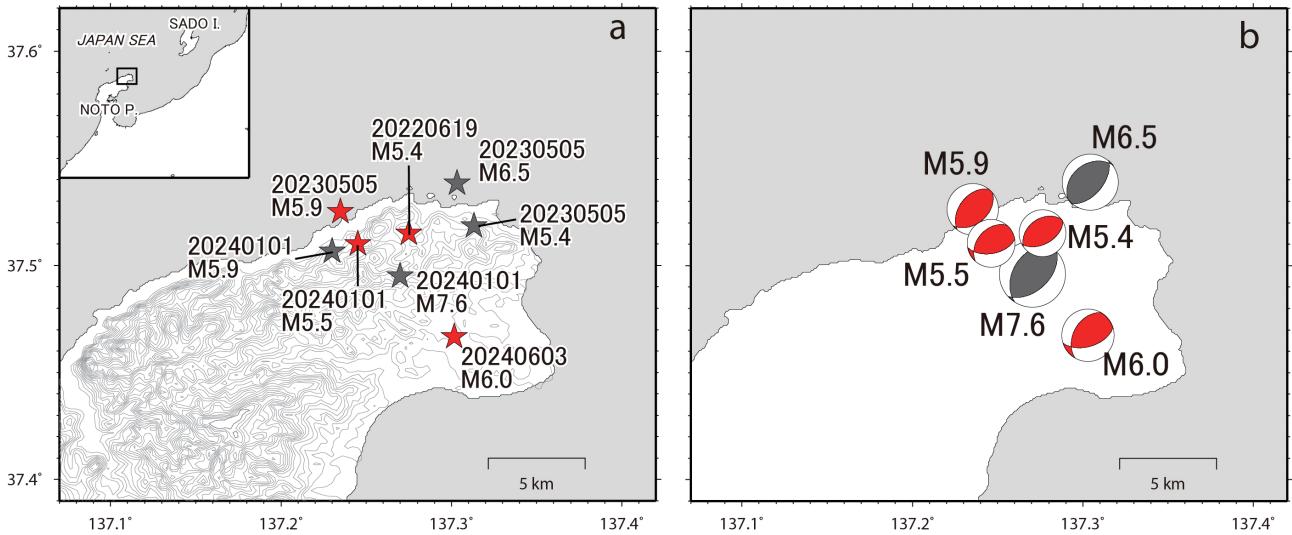


図1 2021年1月～2024年8月に能登半島先端部北東端で発生したマグニチュード5.4以上の地震の(a)震央分布と(b)メカニズム解。本稿で震度分布の比較を行った地震を赤色の記号で示した。M6.5の地震の直後に発生したM5.4の地震と、令和6年能登半島地震(M7.6)の直前に発生したM5.9の地震のメカニズム解は求められていない。

ズム解およびモーメントマグニチュード(Mw)については防災科学技術研究所F-net-Projectによる広帯域地震波形を用いたメカニズム解析結果(防災技術研究所, 2024)を使用した。

2. M差が0.1の二組の地震の震度分布の比較

図2a, bは、20240101M5.5と20220619M5.4の震度分布、そして図3a, bは、20240603M6.0と20230505M5.9の震度分布をそれぞれ並べて示したものである。マグニチュードの大きな地震の方が観測される震度も大きく、有感となる範囲も広くなると予想される

が、図2a, bおよび図3a, bを見ると、Mが0.1異なる二組の地震の震度分布はどちらもよく似ており、違いは明瞭ではない。そこで、図4aに、20240101M5.5による震度の方が20220619M5.4による震度よりも大きかった観測点を赤丸、小さかった地点を青丸、また震度が同じだった地点を白丸で表してみた。同様に、図4bに20240603M6.0による震度が20230505M5.9の震度よりも大きかった地点を赤丸、小さかった地点を青丸、同じ震度だった地点を白丸で示した。

図4a, bから、比較した2つの地震による震度が同じだった白丸の観測点が共に多く存在することがわか

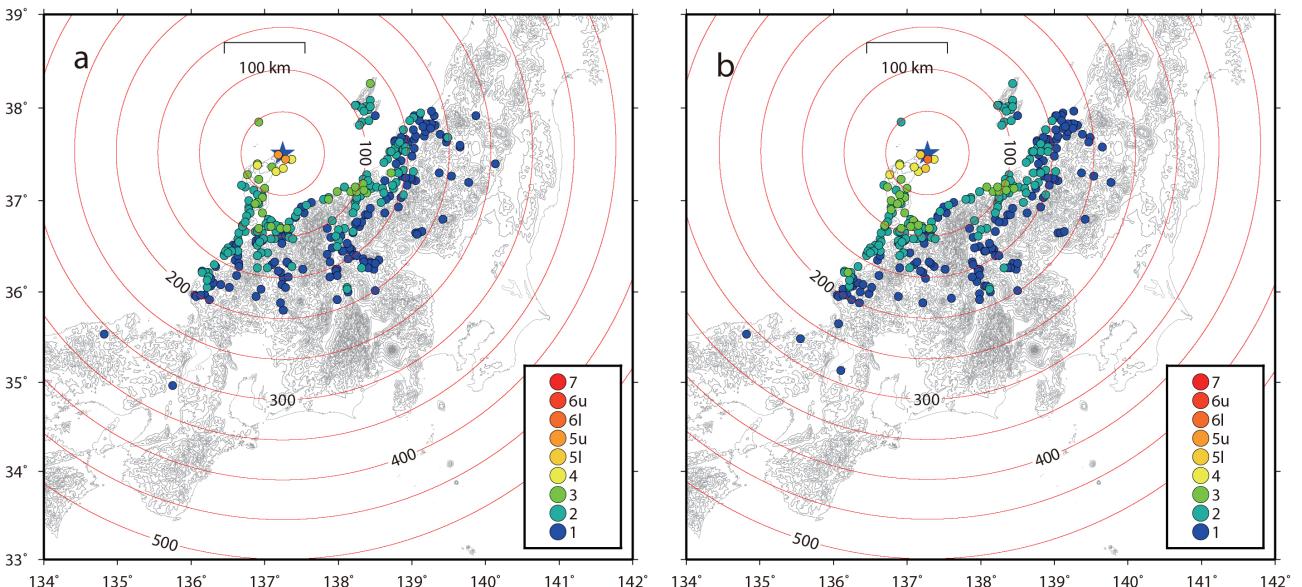


図2 (a)2024年1月1日のM5.5の地震の震度分布と(b)2022年6月19日のM5.4の地震の震度分布。

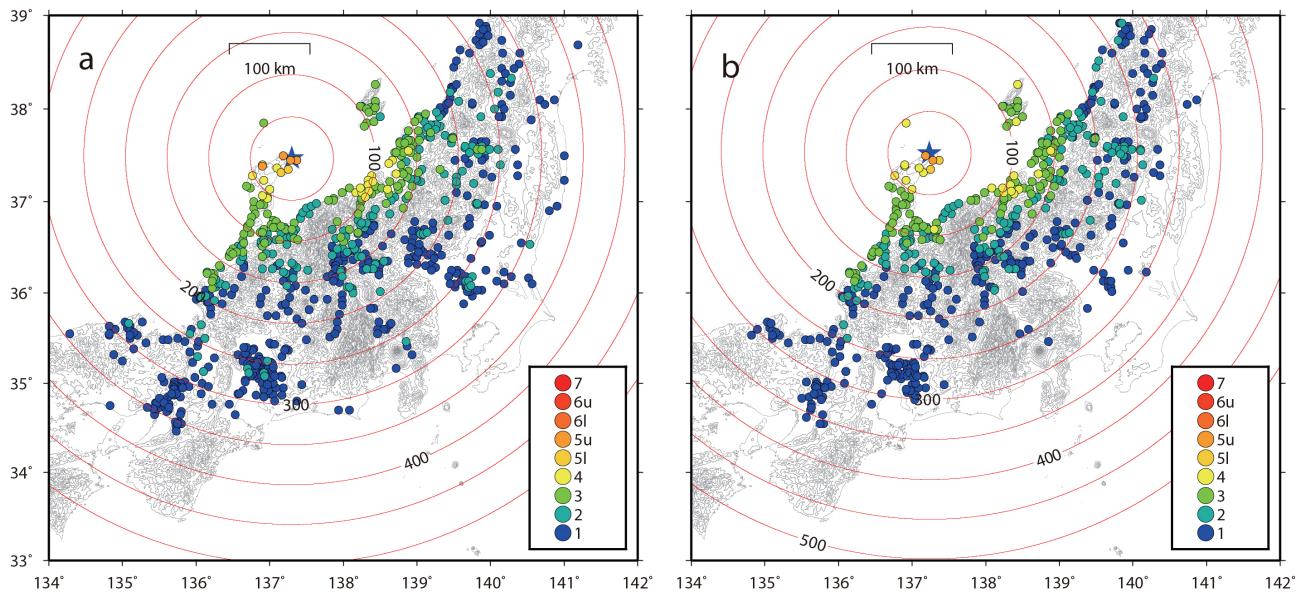


図3 (a)2024年6月3日のM6.0の地震の震度分布と(b)2023年5月5日のM5.9の地震の震度分布。

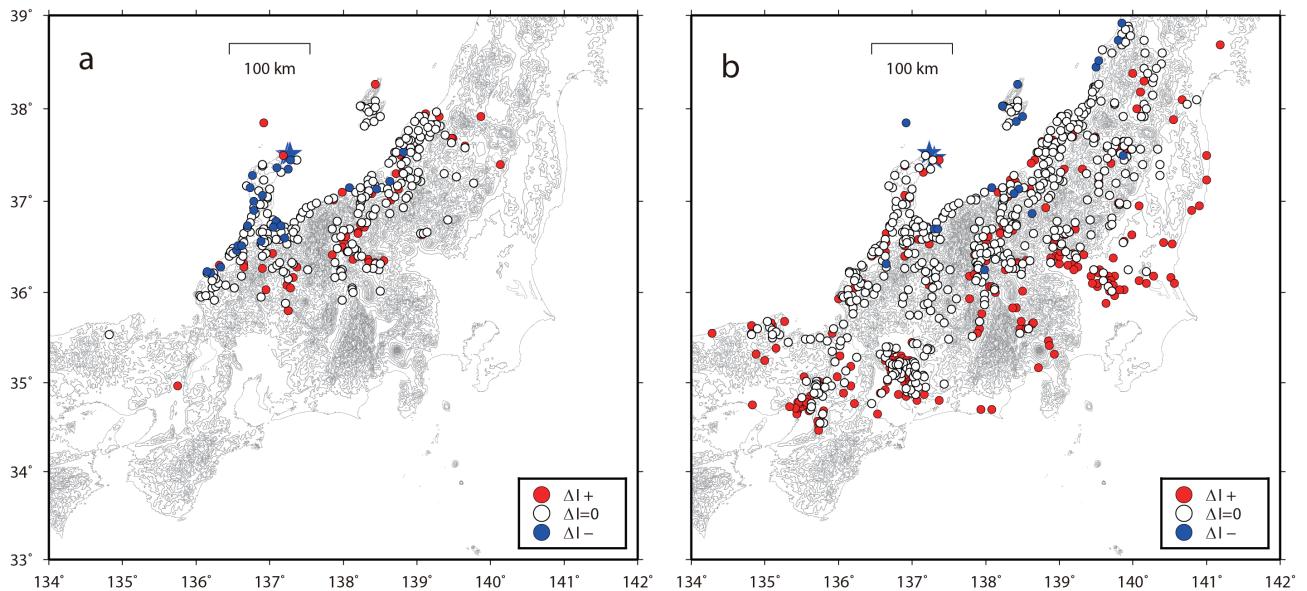


図4 (a)2024年1月1日のM5.5の地震と2022年6月19日のM5.4の地震の震度の差と(b)2024年6月3日のM6.0の地震と2023年5月5日のM5.9の地震の震度の差。

る。これは比較した地震のMの差が0.1とわずかだったことから、ある意味、当然と言える。二つの図の双方で共通するもう一つの特徴は、有感となった範囲の端に近い観測点、すなわち遠方側で、Mの大きい地震の方が小さい地震に比べて震度が大きく出る傾向が見えていくことである。

一方、図4aと図4bとで異なる特徴は、図4aではMの大きな20240101M5.5の方が20220619M5.4よりも震度が小さく求まった観測点が能登半島内とその近辺、すなわち震源に近いところで多く分布することである。

20240603M6.0と20230505M5.9の震度差でも、前者よりMの小さな後者の地震の震度が大きかった地点が散見されるが、地域的にまとまっては分布していない。

図4aに見られる震度差の分布の特徴の由来を考えるには、気象庁マグニチュードと震度のそれぞれの計算方法に遡る必要がある。気象庁マグニチュードは、地震観測網の歴史から、周期数秒の変位振幅の大きさを基に決定されている(勝間田, 2004)。これに対して、計測震度の算出ではフィルターを掛けた加速度データが用いられ、その値には周期1秒前後の地震動が主に寄与する

(気象庁, 2024c)。どちらの指標も観測された地震波の振幅を基に算出されるが、両者では基準とする波の特性、変位振幅か加速度振幅か、そして、どの周波数帯の波に着目するかといったような点が異なるので、必ずしもマグニチュードが大きい地震ほど、どの観測点でも震度が大きくなるということにはならない。Hoshiba *et al.* (2010, 及び私信)によれば、同地域で発生した同じ M もしくは M 差が 0.1 の地震間でも平均 0.4 程度の震度差があり、たまに、M の小さい地震の方が、平均震度が大きくなる場合も存在する。

上述のように、計測震度とマグニチュードでは使用する波形（変位か、加速度か）や依拠する周波数帯に違いがあり、1 秒前後の加速度波形のパワーが弱いとマグニチュードは大きくても震度が小さくなることがある。図 4 a で地域的にまとまって青丸が分布することにより、局所的な地盤などの影響ではなく地震波のソースに原因がある可能性も示唆される。実際に、能登半島内の観測点での 20240101M5.5 と 20220619M5.4 の加速度波形のパワースペクトル比をとると、周期 1 秒付近では 20220619M5.4 の方が波の振幅が大きいという傾向が認められる（明田川・伊霸, 2024 私信）。

なお、M の大きい地震の方が小さい地震に比べて遠方で震度が大き目に出るという特徴については、M と震源断層の大きさとの相関が関係していると思われる。地震の断層運動が規模に依らず基本的に相似であれば、断層面積の大きい地震の方が、すべり時間や破壊継続時間もその分、相対的に長くなり、それによって短周期の波に比べて減衰が小さく、より遠方まで伝わりやすい長周期の波が比較的多く放射されることになる。20240101M5.5 の方が 20220619M5.4 に比べて遠方で震度が大きかった地点が分布していたのは、1 秒より長周期側で地震波が大き目であったとすれば理解できる。断層破壊域の大きさのより直接的な指標は M よりもモーメント・マグニチュード (M_w) であるが、20240101M5.5、20220619M5.4 の M_w はそれぞれ 5.3、5.2 と求められており、また、20240603M6.0、20230505M5.9 では M_w に対してそれぞれ 5.8、5.7 という値が得られている（防災科学技術研究所, 2024）、比較した二つの地震の間では、どちらのケースでも M の大きかった地震の方が M_w も大きく、従って震源断層の広がりも相対的にいくぶん大きかったと考えられる。

3. 考察

2040101M5.5 が 20220619M5.4 に比べて震源近傍で震

度が小さかったのは、短周期の地震波が相対的に小さかったためとみられることを指摘した。短周期の波の励起が少なくなる理由は何だろうか。一つ考えられるのは水の存在である。流体が破碎帯に侵入すると、断層の破壊強度が低下（すなわち地震時の応力降下量が低下）し、短周期の波が出にくくなると推定される。

2020 年 12 月の群発地震活動の開始とほぼ期を一にして、震源域とその周辺で地殻変動が生じたことが GNSS で観測されている。Nishimura *et al.* (2023) は、その地殻変動は、初期の 3 カ月間は深さ 16 km 付近でのほぼ水平な膨張張によって、それ以後は、その上部から北西に向かって浅くなる面での開口を伴った逆断層的なゆっくりすべりで説明できることを示して、それらの変動源には地殻深部の水が関わっていたという考えを提出している。実際、能登半島下では深さ 20 ~ 40 km に流体の存在を示唆する低速度層が広がっていることが明らかにされているほか(Nakajima, 2022)、Yoshida *et al.* (2023b) は、群発地震の震源域の下に明瞭な S 波の反射面が存在すること、その下に見られる低速度領域、地表で観測される高ヘリウム同位体比 (${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$)、震源域と低重力異常域との対応などから、そこにはかつて火山活動があって、それに関わる多量の水が地下深部に貯留されており、その水が既存の破碎帯に沿って上昇してきたことが群発活動を引き起こしたと推定している。群発活動では、震源の浅い側への移動現象が頻繁に観測されていて (Amezawa *et al.*, 2023; Yoshida *et al.*, 2023a)、その移動速度は、水の拡散・浸透が原因とみられる他の多くの地域での震源の移動速度とほぼ同じであることも、群発地震活動が深部からの水の破碎帯への浸透によって引き起こされたという考えを支持する。

能登半島北端部における一連の群発地震活動は複数の破碎帯の存在が示唆される 4 つの領域に分かれて生じており、20220619M5.4 はその中の領域 a と d (気象庁, 2023) の中間付近で南東下がりの破碎面に沿って発生した。Yoshida *et al.* (2023a) によれば、この地震の震源はそれまでの震源移動領域の先端部にあたっていて、その後、更に浅い側で地震が起き始めた。20220619M5.4 の約 1 年後に発生し、令和 6 年能登半島地震に先行した地震のうち最大規模であった 20230505M6.5 の震源は 20220619M5.4 の震源よりも東側の活動領域 d にあつたが、その余震活動は西側の活動領域 a にも及び、南東に傾斜する逆断層解 (図 1 b) の浅い側の北西側海域で余震が多発した (気象庁, 2023)。一連の群発地震活動が地殻内に存在した多重破碎帯への深部からの水の供給によって引き起こされたと考えられること (Yoshida

et al., 2023a, b)、その一つの破碎帯を震源断層とする 20230505M6.5 の地震の余震域が海域まで広がったということから、令和 6 年能登半島地震 (20240101M7.6) の発生前にはその震源域周辺の地殻内に水がかなりの程度、浸潤していたと推定される。

20240101M5.5 が 20220619M5.4 と比べて、周期 1 秒前後の地震波の加速度振幅が相対的に小さかったとみられることが前節で述べたが (明田川・伊霸, 2024 私信)、それはあくまで 20220619M5.4 との比較による相対的なものであり、そのことから直ちに、20240101M5.5 の断層運動のすべり速度が小さかったとは言えない。これについては地震時の応力降下量が一つの判断指標になると考え、20240101M5.5 と 20220619M5.4 の S 波の観測波形のスペクトル解析を行い、 ω^2 モデル (Brune, 1970) を適用してコーナー周波数を求めた。その結果を能登半島の地震の応力降下量に関する先行研究 (Fukuoka *et al.*, 2024) と比べてみたのが図 5 である。彼らは、群発地震の応力降下量の広範な調査から、浅部に比べると深部のほうが応力降下量が小さいことを示し、これは、破碎帯への流体の浸潤度が領域によって異なるためであるとした。本短報で取り上げた二つの地震は、

いずれも群発地震の活動域内にあるが、活動時期に 1 年半の間があり、その間に破碎帯内への流体の浸潤が更に進行したことは十分考えられる。20240101M5.5 の応力降下量が 20220619M5.4 に比べて小さかったという結果は、先述のパワースペクトル比の解析結果と合わせて、破碎帯内の流体の存在の影響が M5.5 の地震発生時により大きく作用したことを示すものである。

応力降下量はすべり速度そのものを表すわけではないものの、それが大きいということは、言わばパチッと強く割れたことを示し、破壊のすべり速度も早かったと推定される。図 5 を見ると、20240101M5.5 の応力降下量は、能登半島で発生した他の地震と比べてむしろ大きな値であり、これは水が浸透していた断層帶の中で、強く固着していたところが壊れたことを示唆する。

M5.5 の地震は 20240101M7.6 (Mw7.5) の 4 分前に発生した。20240101M7.6 (Mw7.5) の地震の発生プロセスに関して、地殻変動データのインバージョンと、0.3-1.0 Hz の地震波のバックプロジェクション解析を行った Ma *et al.* (2024) は、断層運動開始時の破壊はゆっくりと進行し、そのすべりの中に高周波の地震波の放射源も含まれていたことを示して、震源の周辺

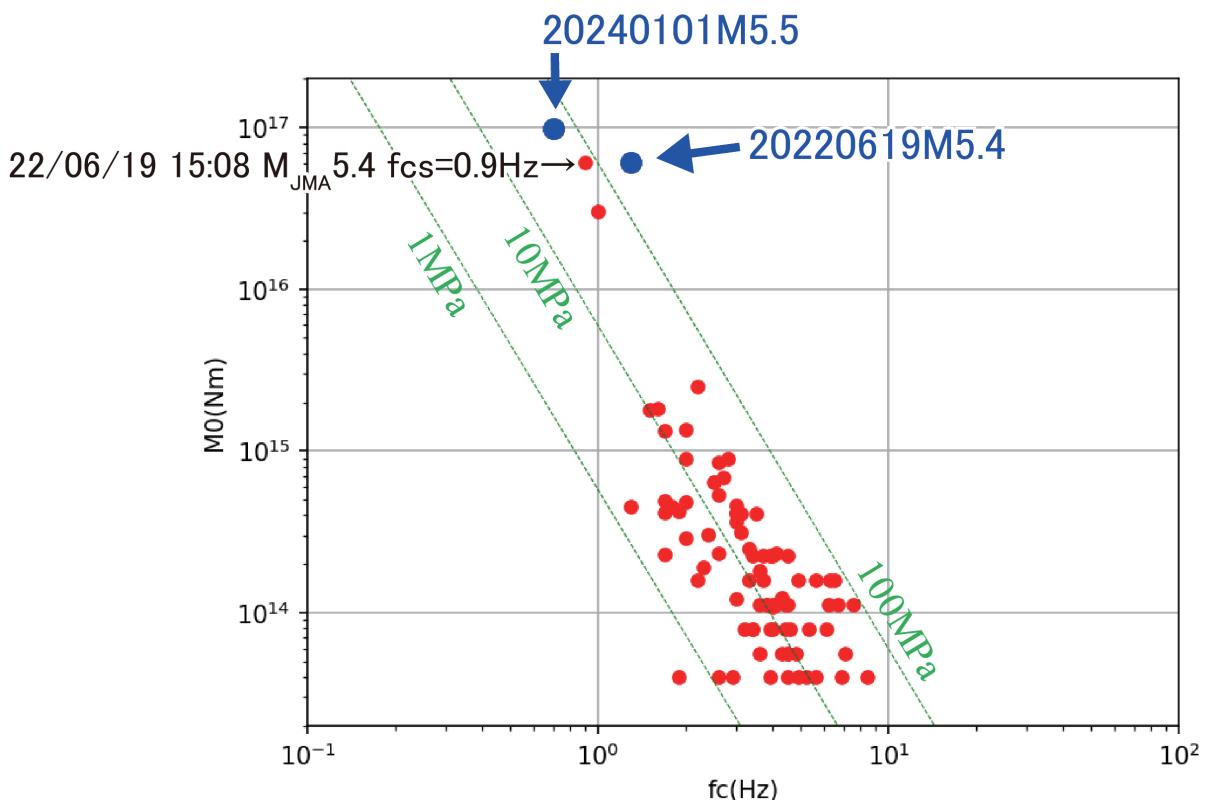


図 5 2024 年 1 月 1 日の M5.5 の地震と 2022 年 6 月 19 日の M5.4 の地震のコーナー周波数 (S 波) と地震モーメント (青丸)。Fukuoka *et al.* (2024) で報告されている結果 (赤丸)、応力降下量一定の線 (緑点線) を重ねて示す。

は非一様で、水を多く含む断層帯の中に固着したところがパッチ状に分布していたという見方を提出している。20240101M5.5 は、図 5 から、群発地震全体と比較すると高い応力降下量であったことが見てとれるので、Mw7.5 の地震の初期破壊の中で 0.3-1 Hz の周波数帯で検出されたパッチ状に分布した固着域に相当するところが壊れたと推定される。20240101M5.5 の地震の 2 分後に M4.6 の地震、そしてその 2 分後に M5.9 の地震が発生して 20240101M7.6 (Mw7.5) の断層破壊につながっている。このことから、破碎帶内に分布していたいくつかのアスペリティが次々に壊れていったことによって、その周辺の広い範囲でゆっくりと断層がすべり始め、それが Mw7.5 の大地震の発生を引き起こしたということを考えられる。

なお、図 5 に見るよう、20240101M5.5 の S 波のコーナー周波数は 20220619M5.4 のそれと比べてやや小さかった。前節で、20240101M5.5 の方が 20220619M5.4 よりも遠い観測点で震度が大き目であったのは長周期の波がより多く放射されたためであろうと考えたが、コーナー周波数が相対的に小さかったことは、その推察が妥当であったことを示す。

謝辞

本稿をまとめた当初の段階において、明田川保、石原丈実、小林昭夫、佐藤興平、野口伸一、濱田信生、弘瀬冬樹、干場充之、細野耕司、山科健一郎の諸氏から多くのコメントをいただきました。また、査読者である本多亮氏及び栗原亮氏のレビューは原稿の改善にたいへん有益でした。以上のお二人に深く感謝します。

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. <https://doi.org/10.1029/2022GL102670>
- 防災科学技術研究所 (2024) F-net による地震のメカニズム情報月別リスト, <https://www.fnet.bosai.go.jp/event/joho.php?LANG=ja>
- Brune, J. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, pp.4997-5009.
- Fukuoka, M., Hiramatsu, Y., Yamada T. (2024) Linking the spatiotemporal distribution of static stress drops

to source faults in a fluid-driven earthquakes swarm, northeastern Noto Peninsula, central Japan, *Earth Planets Space*, 76, 125.

Hoshiba, M., Otake, K., Iwakiri, K., Aketagawa, T., Nakamura, H., Yamamoto, S. (2010) How precisely can we anticipate seismic intensities? A study of uncertainty of anticipated seismic intensities for the Earthquake Early Warning method in Japan, *Earth Planets Space*, 62, 611-620, 2010.

勝間田明男 (2004) 気象庁変位マグニチュードの改訂、
験震時報、67、1 – 10.

気象庁 (2023) 関東・中部地方とその周辺の地震活動
(2022 年 11 月～ 2023 年 4 月)、地震予知連絡会会報第 110 卷、67-90.

気象庁 (2024a) 震源リスト, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/hypo.html>

気象庁 (2024b) 震度データベース, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/>

気象庁 (2024c) 計測震度の算出方法について、https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.html

Ma Z., Zeng, H., Luo, H., Liu, Z., Jiang, Y., Aoki, Y., Wang, W., Itoh, Y., Lyu, M., Cui, Y., Yun, S.H., Hill, E. M., Wei, S. (2024) Slow rupture in a fluid-rich fault zone initiated the 2024 Mw 7.5 Noto earthquake, *Science*, 385, 866-871, doi:10.1126/science.ado5143.

Nakajima, J. (2022) Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan. *Earth Planets and Space*, 74(1), 160. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01719-x>

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(1), 8381. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35459-z>

Yoshida, K., Uchida, N., Matsumoto, Y., Orimo, M., Okada, T., Hirahara, S., Kimura, S., Hino, R. (2023a) Updip Fluid Flow in the Crust of the Northeastern Noto Peninsula, Japan, Triggered the 2023 Mw 6.2 Suza Earthquake During Swarm Activity. *Geophysical Research Letters*, e2022JB026047. <https://doi.org/10.1029/2023GL106023>

Yoshida, K., Uno, M., Matsuzawa, T., Yukutake, Y., Mukuhira, Y., Sato, H., Yoshida, T. (2023a) Upward

earthquake swarm migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep ring-shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a

hidden magma system. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(6), e2022JB026047.
<https://doi.org/10.1029/2022jb026047>

