

中小地震の破壊伝播指向性と応力降下量

–東北沖地震後に活発化した福島-茨城県境の地震活動の解析–*

東北大学 池田里奈, 吉田圭佑, 松澤暢

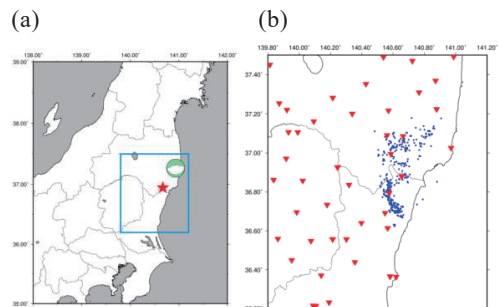
1. はじめに

地震は地殻内で増加した偏差応力・歪エネルギーを解消する自然現象である。地震前後での断層面上のせん断応力の減少量を応力降下量と呼ぶ。応力降下量は、地震破壊を記述するための基礎的なパラメータとして広く用いられるとともに、地震による高周波放射エネルギーの大きさの指標としても注目されてきた (e.g., Boore, 1983)。

通常、中小地震の応力降下量は、円形断層の対称破壊を仮定したモデル (以降、対象破壊モデル。例えば, Brune 1970; Sato & Hirasawa, 1973) に基づき、破壊継続時間と地震モーメントから推定されている。対称破壊モデルでは、観測される破壊継続時間には強い方向依存性は生じないことになる。一方、実際の破壊が非対称である場合、各観測点で観測される「みかけの破壊継続時間」は強い方向依存性を持つことになる (e.g., Ben-Menahem, 1962)。破壊伝播指向性 (rupture directivity) は、みかけの破壊継続時間だけではなく地震動の大きさにも影響を与える。その効果は特に S 波に対して劇的であり、破壊伝播指向性は地震動の理解のために応力降下量とともに重要な量であるといえる。

これまで、中小地震の解析では、破壊伝播指向性の存在を無視し、対称破壊モデルを仮定することが殆どであったが (Abercrombie, 2021)、この仮定が誤っていた場合、応力降下量の推定値にも大きな誤差が加わることになる。

本研究では、中小地震の破壊伝播指向性の様子を調べる。福島-茨城県境周辺の地震活動を解析対象とした (図 1)。この地域では、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震後から非常に活発に正断層地震が発生しており、4 月 11 日には $M_{JMA}7.0$ の地震も発生している (図 1a の星印)。



2. データと手法

福島-茨城県境周辺で 2011 年 3 月 11 日から 2018 年 10 月 31 日までに発生した地震のうち、F-net によりメカニズム解が推定されている 348 個の地震の解析を行った。震源の深さは 40 km 以浅であ

図 1 (a) 解析対象域 (青枠) と 2011 年福島県浜通りの M7 地震の震央 (星印)。 (b) 対象地震の震央 (青丸) と観測点の位置 (赤三角)

*Simultaneous estimation of stress drop and rupture directivity of small earthquakes near the Fukushima-Ibaraki border by Rina Ikeda, Keisuke Yoshida, Toru Matsuzawa

り、地震の規模は $3.3 \leq M_w \leq 5.2$ である。図 2 に対象地震の震央 (青丸) と、使用した観測点の位置 (赤三角) を示す。

2.1 地震破壊モデル

非対称破壊を考慮したモデルとして、Dong & Papageorgiou (2003) を用いた (以降、一般破壊モデル)。このモデルは、Sato & Hirasawa (1973) の円形対称破壊モデルを拡張したもので、楕円形断層や非対称破壊も考慮できる。破壊は楕円上の任意の点 C_N で開始し、楕円中心が C_0 に向かって一定速度で移動していく。楕円形の破壊フロントも一定レートで拡大していく。このモデルに対しては、任意の観測点でのみかけの震源時間関数の解析解が得られている。今回は (1) 破壊の開始点 C_N が楕円の焦点に位置する (Savage, 1966), (2) 楕円フロントが長軸方向に拡大する速さ v_r が S 波速度 v_s と $v_r/v_s = 0.9$ の関係を満たすという拘束条件も与えた。

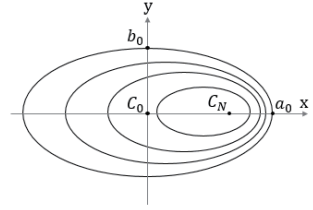


図 2 一般破壊モデルの概略図。 C_N は破壊の開始点、 C_0 は楕円の中心

2.2 震源時間関数とコーナー周波数の推定

中小地震の破壊伝播指向性を調べるために、各観測点でみかけの震源時間関数を求めた。具体的な方法は、Yoshida (2019), Yoshida et al. (2019) と同様であり、地震の S 波波形を用いた。対象地震の近傍で発生した小地震の波形を経験的グリーン関数として用いて、deconvolution により、対象地震のみかけの震源時間関数を推定した。Deconvolution には、Kikuchi & Kanamori (1982) の手法を用いた。得られたみかけの震源時間関数と経験的グリーン関数の convolution 波形により、対象地震の波形を復元率が 80 % 以上再現できたもののみを信頼性のある結果として採用し、それが 15 観測点以上で得られた地震を解析対象とした。得られたみかけの震源時間関数のそれぞれに対し、Andrews (1986) により定義されたコーナー周波数を時間領域で求めた。

2.3 モデル・パラメータの推定

得られたコーナー周波数とその方向依存性から、モデル・パラメータの推定を行った。楕円断層の長軸 a_0 、楕円率 b_0/a_0 および破壊の進展方向 φ_0 をグリッドサーチして観測されたコーナー周波数を最も良く説明するパラメータを求めた。フィッティングの際には、コーナー周波数の平均二乗残差

$$\text{Var} = \sum_{i=1}^n (f_c^{\text{model}} - f_{c_i})^2 / n \quad (1)$$

が最小となるようにした。ここで f_c^{model} はコーナー周波数の理論値、 f_{c_i} は各観測点のコーナー周波数、 n はデータ数である。得られた残差を用いて、赤池情報量基準 (AIC; Akaike, 1974) に基づき一般破壊モデルと対称破壊モデル ($a_0 = b_0$) の比較を行った。

$$\text{AIC} = n \ln \text{Var} - \frac{n}{2} + 2m + n \ln 2\pi \quad (2)$$

m はモデルの自由度である。確率分布が正規分布に従うことを仮定した。AICは、その値が小さいモデルの方が優位であることを示す指標として用いることができる。本研究では対称破壊モデルのAICから一般破壊モデルのAICを引いた値 ΔAIC を用いてモデルの比較を行った。

解析結果の例を示す。1つ目の例は2011年4月8日に発生したMw 4.0の地震である。図3(a)はみかけの震源時間関数を観測点の方位に基づき並べたものである。180-270°(南西方向)でパルスの継続時間が短い傾向にあることから、破壊が南西方向に伝播したことが示唆される。図3(b)は、コーナー周波数の観測値とモデルによる理論値を比較している。観測値(黒丸)は、対称破壊モデルで計算された理論値(灰色線)よりも、一般破壊モデルで計算された理論値(赤線)に良く合う傾向が見られる。 ΔAIC は82.8で、対称破壊モデルよりも一般破壊モデルの方が優位であった。

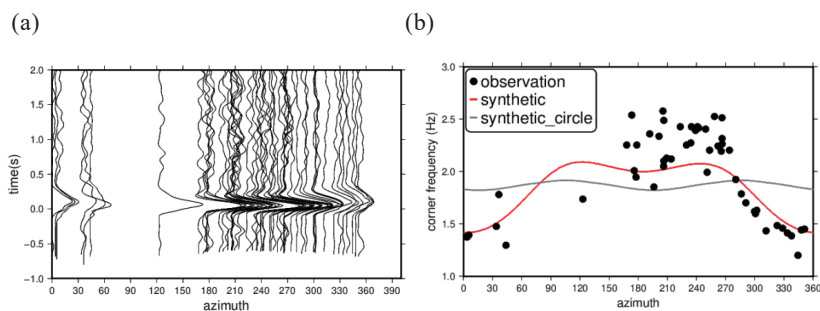


図3 (a) みかけの震源時間関数の方位依存の例。(b) 理論と観測のコーナー周波数の比較。黒丸：観測値，赤線：一般破壊モデルの理論値，灰色線：対称破壊の場合の理論値。

図4に、 ΔAIC が低い場合の例として、2011年5月5日に発生したMw 4.4の地震の結果を示す。みかけの震源時間関数に顕著な方向依存が見られているのにも拘わらず、 ΔAIC は-4で、一般破壊モデルよりも対称破壊モデルの方が優位となっている。この地震の場合には、みかけの震源時間関数に2つのピークが見られ、2つの破壊が連続して発生したと考えられる。このような複雑な震源時間関数を持つ地震に対しては、今回、みかけの破壊継続時間を測る尺度としたコーナー周波数や、単発地震を仮定したモデルがうまく働かなかったと考えられる。

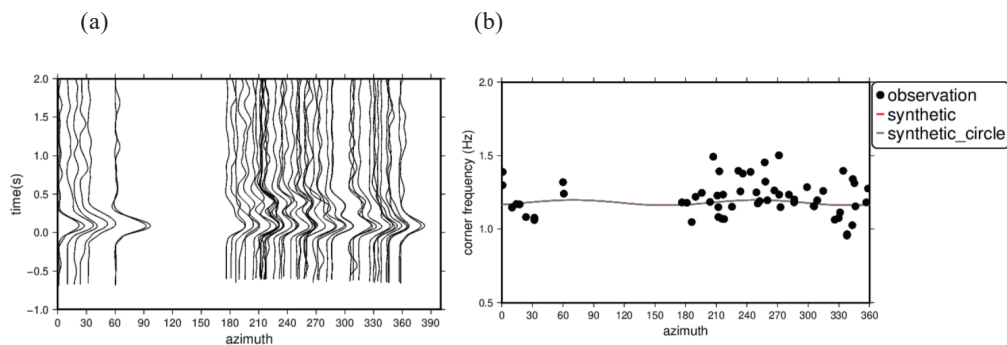


図4 (a) みかけの震源時間関数の方位依存の例。(b) 理論と観測のコーナー周波数の比較。黒丸：観測値，赤線：一般破壊モデルの理論値，灰色線：対称破壊モデルの理論値。

3. 結果・議論

図5に、解析対象とした348個の地震に対して得られた ΔAIC の頻度分布を示す。306個の地震で $\Delta AIC > 0$ であり、多くの地震破壊が有意な破壊伝播指向性を有していることを示している。この結果は、小地震の場合にも破壊伝播指向性の影響が無視できないことを示唆している。図6に、推定した断層面積、応力降下量 $\Delta\sigma$ 、 ΔAIC とマグニチュードの関係を示す。断層面積が規模とともに増加するのに対し、応力降下量は規模にあまり依存していない。この傾向は、地震のスケールリング則と調和的である(Aki, 1967)。 ΔAIC も強い規模依存性を示さず、破壊伝播指向性の強さも規模に大きく依存しないことを示唆する。

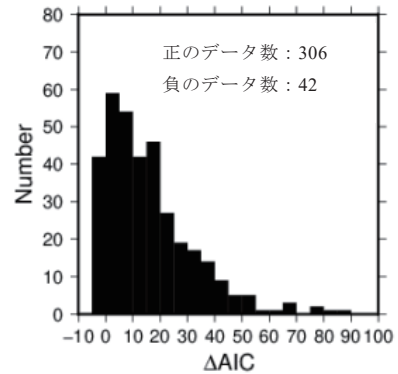


図5. ΔAIC の頻度分布

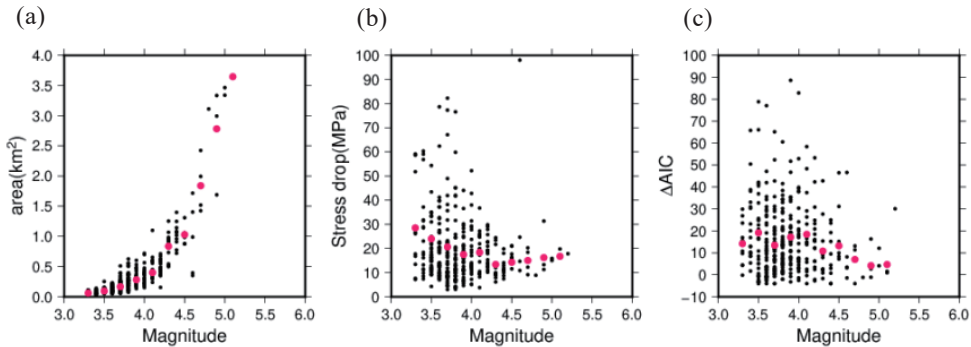


図6 (a) 断層面積, (b) 応力降下量, (c) ΔAIC と規模の関係。赤丸は規模ごとの平均値を示す。

図7(a)に破壊の伝播方向の結果を示す。破壊が方位 $50-180^\circ$ に伝播した地震が多いように見える。先行研究により、地震破壊に伝播しやすい方向が存在する可能性が指摘されているが(Kane et al., 2013; Calderoni et al., 2015; Yoshida et al., 2022), 今回の結果はそれらと調和的である。

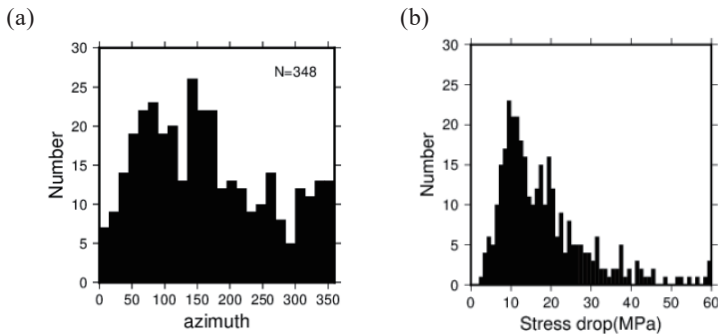


図7 (a) 破壊の進展方向の頻度分布, (b) 応力降下量の頻度分布

得られた応力降下量の値は 5-30 MPa 程度のものが多かった (図 7b)。この地域を含む東北日本で推定されている最大剪断応力の値は数十 MPa (Yoshida et al., 2015a and b)であり、本研究で推定された応力降下量の平均値と同程度である。このことは、断層面上の剪断応力が地震により殆ど解放されていることを示すのかもしれない。

一方、本研究の解析により、中小地震の破壊伝播の複雑性も明らかになってきた。図 4 に示した地震は、複数の破壊からなる地震の例である。本研究では、多くの先行研究で無視されてきた破壊伝播指向性を考慮した一般破壊モデルを用いて破壊伝播指向性と応力降下量を推定した。しかし、このモデルでさえ、図 4 のような地震の複雑性を十分に説明できない。このような複雑な破壊をモデル化するためには、大地震 ($M > 6$) に対して行われている震源過程インバージョンのような解析が必要である。しかしながら、そのような解析では、データの限界から滑り分布の時間発展や応力降下量を十分よく拘束できないことが多いだろう (Adams et al., 2016)。一般に、破壊継続時間から断層サイズを高精度に拘束することは難しく、補助的な仮定が必要である。上記のことを考えると、小地震の応力降下量を正確に見積もることは実際のところ非常に難しいように思われる。小地震に対して推定されている“応力降下量”は、高周波エネルギー放射の尺度としては有用であるものの、その本来の意味である地震時の断層上の応力解放量とは必ずしも結びつかず (e.g., Boore, 1983)、詳細な物理的解釈を行うことは難しいかもしれない。一方、小地震の破壊伝播方向等のパラメータは、これまであまり注目されてこなかったものの、多くの地震について明瞭にみられる。小地震に対しても **robust** に推定することが可能な量として有用となるかもしれない。

5. 結論

福島ー茨城県境周辺で発生した中小地震の破壊伝播指向性の推定を行った。その結果、多くの小地震が顕著な破壊伝播指向性を示しており、従来の対称破壊モデルを用いた応力降下量推定の際の仮定があまりよく成立していないことが分かった。今回は先行研究で無視されてきた破壊伝播指向性を考慮して破壊伝播方向と応力降下量を同時に推定したが、今回用いたモデルでさえ実際の地震破壊の複雑性を十分に説明できていない場合がみられた。それらについては応力降下量を大幅に誤推定している可能性も考えられる。

小地震の破壊伝播指向性に関するパラメータは、これまであまり注目されてこなかったものの、今回、多くの地震について明瞭に確認された。小地震の震源過程に関して **robust** に推定することが可能な情報として今後有用になるかもしれない。

引用文献

- Abercrombie, R. E. (2021) Resolution and uncertainties in estimates of earthquake stress drop and energy release. *Philosophical Transactions Royal Soc* 379.
- Adams, M., Twardzik, C. & Ji, C (2016) Exploring the uncertainty range of coseismic stress drop estimations of large earthquakes using finite fault inversions. *Geophys J Int* 208, 86–100.
- Akaike, (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, pp. 716-723.

- Aki, K. (1967) Scaling law of seismic spectrum. *J Geophys Res* 72, 1217–1231.
- Andrews D. J. (1986) Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size. *Earthq source Mech* 37, 259–267.
- Brune, J. N. (1970) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J Geophys Res* 75, 4997–5009.
- Calderoni, G., Rovelli, A., Ben-Zion, Y. & Giovambattista, R. D. (2015) Along-strike rupture directivity of earthquakes of the 2009 L'Aquila, central Italy, seismic sequence. *Geophys J Int* 203, 399–415.
- Dong G, Papageorgiou AS (2003) On a new class of kinematic models: Symmetrical and asymmetrical circular and elliptical cracks. *Phys Earth Planet Inter* 137, 129–151. doi: 10.1016/S0031-9201(03)00012-8
- Savage J.C. (1966) Radiation from a realistic model of faulting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 56, (2), 577–592.
- Kane, D. L., Shearer, P. M., Goertz-Allmann, B. P. & Vernon, F. L. (2013) Rupture directivity of small earthquakes at Parkfield. *J Geophys Res Solid Earth* 118, 212–221.
- Kikuchi M, Kanamori H (1982) Inversion of complex body waves. *Phys Earth Planet Inter* 72, 491–506. doi: 10.1016/0031-9201(86)90048-8
- Sato T, Hirasawa T (1973) Body wave spectra from propagating shear cracks. *J Phys Earth* 21, 415–431. doi: 10.4294/jpe1952.21.415
- Yoshida, K (2019) Prevalence of asymmetrical rupture in small earthquakes and its effect on the estimation of stress drop: a systematic investigation in inland Japan. *Geoscience Lett* 6, 16.
- Yoshida K, Hasegawa A, Okada T (2015a) Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations. *Tectonophysics* 647, 63–72. doi: 10.1016/j.tecto.2015.02.013
- Yoshida K, Hasegawa A, Okada T (2015b) Spatially heterogeneous stress field in the source area of the 2011 Mw 6.6 Fukushima-Hamadori earthquake, NE Japan, probably caused by static stress change. *Geophys J Int* 201, 1062–1071. doi: 10.1093/gji/ggv068
- Yoshida, K., Saito, T., Emoto, K., Urata, Y. & Sato, D (2019) Rupture directivity, stress drop, and hypocenter migration of small- and moderate-sized earthquakes in the Yamagata-Fukushima border swarm triggered by upward pore-pressure migration after the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics* 228184. doi:10.1016/j.tecto.2019.228184.
- Yoshida, K., Uchida, N., Kubo, H., Takagi, R. & Xu, S (2022) Prevalence of updip rupture propagation in interplate earthquakes along the Japan trench. *Earth Planet Sc Lett* 578, 117306.