

# 岩手県北部における周波数依存性を考慮した S 波スプリッティング解析

東北大学理学研究科 藤村遼太郎・岡田知己・内田晴海  
ヴィクトリア大学ウェリントン Martha SAVAGE  
産業技術総合研究所 田上綾香

## 1. はじめに

岩手県北部では 2024 年 7 月 19 日に M4.0 (最大震度 4) の地震が、7 月 28 日に M4.2 (最大震度 4) の地震が発生した。またそれぞれの地震に付随して、M1-2 程度の余震が 2 週間で約 60 回発生するなど、地震活動が一時的に活発化した。発震機構解はともに西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であった(気象庁, 2024)<sup>1)</sup>。東北地方の地震の発震機構解(岡田・他, 2015)<sup>2)</sup>を使用し、応力テンソルインバージョン法(Michael, 1987)<sup>4)</sup>によって得られた岩手県北部-青森県南東部の広域応力場は東北東-西南西方向の圧縮軸を示した。誤差範囲を加味しても、今回の地震の発震機構解はこの結果と 30° 前後異なることから、この地域で局所的な応力場のゆらぎがあると推測される。また今回の地震活動の震源域の北東部には活断層と評価されている折爪断層が存在する。最大の長さ 47km、西傾斜・西側隆起の逆断層であるが、過去の活動時期や活動間隔は不明であり(地震調査研究推進本部, 2004)<sup>5)</sup>、折爪断層での地震の発生数も少ない。

S 波スプリッティング解析は地殻内の応力場や、断層などの微細な地殻構造の推測に有効な手法である。S 波はその振動方向によって伝搬速度が異なる(S 波偏向異方性)場合がある。特に 1 つの S 波が異方性媒質中で異なる伝搬速度をもつ 2 つの S 波に分裂する S 波スプリッティングという現象は、S 波偏向異方性を直接的に示す現象として知られている。この 2 つの S 波は互いに直交する振動方向をもつが、速い方の波の振動方向は異方性の方向を示すパラメータとして扱われる。上部地殻においては、応力による微小亀裂の選択的配向や地震活動に伴う断層フラクチャが異方性の原因となり、そのような場合異方性の方向は最大水平圧縮応力(SHmax)方向や断層走向に平行となることから、S 波の波形から S 波スプリッティングを検出することで応力場や地殻構造の推測をすることができる。

S 波スプリッティング解析の最大の長所は、最少で 1 組の地震と観測点のペアから異方性パラメータを得られる点にある。このため地震波を検出した観測点が少ないような微小地震も用いる

---

\*Frequency dependence on shear wave splitting observed in the northern Iwate Prefecture, northeastern Japan by Ryotaro Fujimura, Tomomi Okada, Harumi Uchida, Martha Savage, and Ayaka Tagami

ことができる他、地震の発生間隔がそのまま時間分解能となるため、他の地震学的手法と比較しても高い時間分解能を持つ。またS波スプリッティングのパラメータには、フラクチャの幅や異方性媒質の特徴的長さ、深さ方向の分布などが原因となって周波数依存性を示すことが知られている(例えば、Mizuno et al., 2001<sup>6)</sup>; Huang et al., 2011<sup>7)</sup>). ただし実際に周波数依存性に着目したスプリッティング解析を行った例は少ない。

本研究では2024年に微小地震が多く発生した岩手県北部においてS波スプリッティング解析を行い、局所応力場や断層走向との関係を推測する。また周波数依存性の考慮を加えることで異方性の原因について従来の解析より詳細な検証を行う。

## 2. 手法

S波スプリッティングは、高速成分の振動方向  $\phi$  と2つの波の到着時刻差  $\delta t$  で表現される。それぞれ異方性の方向と大きさを示す。時間領域での元のS波の波形を  $u_0(t)$  とし観測点に対して鉛直入射する場合を考えると、S波スプリッティングによって分裂した後の高速・低速成分の波形はそれぞれ以下の式で表される。

$$u_{fast} = \cos(\phi - \theta_0)u_0(t + \frac{1}{2}\delta t), \quad u_{slow} = -\sin(\phi - \theta_0)u_0(t - \frac{1}{2}\delta t)$$

ただし、 $\theta_0$ はS波の初期振動方向である。最終的な観測波形の水平2成分(一般には南北、東西方向)は高・低速成分の波の重ね合わせの南北・東西成分への投影であるため、次のように表される。

$$\begin{pmatrix} u_{NS} \\ u_{EW} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{fast} \\ u_{slow} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\phi - \theta_0)u_0(t + \frac{1}{2}\delta t) \\ -\sin(\phi - \theta_0)u_0(t - \frac{1}{2}\delta t) \end{pmatrix}$$

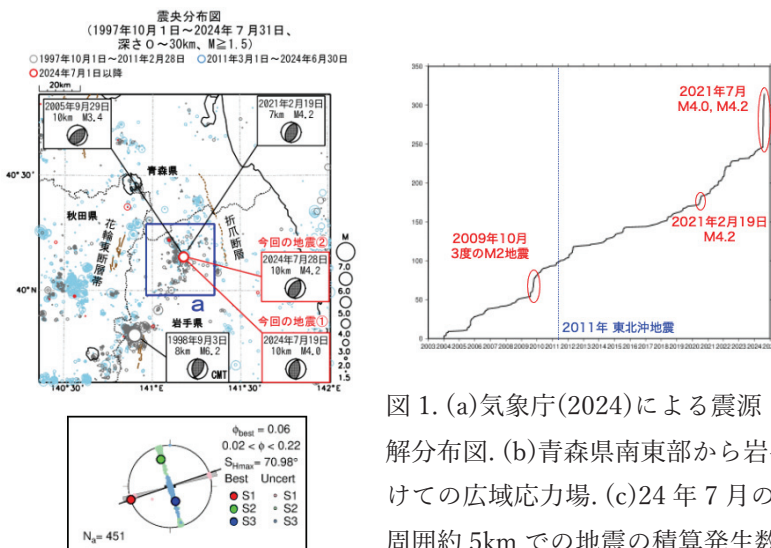


図1. (a)気象庁(2024)による震源・メカニズム解分布図. (b)青森県南東部から岩手県北部にかけての広域応力場. (c)24年7月の地震の震源域周囲約5kmでの地震の積算発生数

この水平 2 成分の観測波形を  $\phi$  方向への軸回転で高速・低速の 2 成分に変換し、両成分の波形の到達時刻差を打ち消すように  $\mp \frac{1}{2} \delta t$  の時間補正を加えると、高速・低速成分の波形をそれぞれ以下のような形に戻すことができる。

$$u_{fast} = \cos(\phi - \theta_0)u_0(t), \quad u_{slow} = -\sin(\phi - \theta_0)u_0(t)$$

これは一定方向  $\theta_0$  に振動する波形  $u_0(t)$  を示すのと同義であり、スプリットिंगが生じる前の S 波を再現した状態である。このように適切に S 波スプリットिंगの除去ができている場合、高速・低速成分の波は波形がよく似ることや振動が一定方向に定まる。一般的な S 波スプリットिंग解析ではこの性質を利用し、高速・低速成分の波形相関が高くなる、もしくはパーティクルモーションが線型化される (Silver & Chan, 1991)<sup>7)</sup> パラメータ  $(\phi, \delta t)$  の組み合わせをグリッドサーチで求める手法が用いられる。

また S 波スプリットिंग解析においては、ノイズやコーダ波の影響を取り除くために直達 S 波を適切に取り出すことが重要視される。Savage et al. (2010)<sup>8)</sup>にて開発された手法は、フィルタや時間窓の設定からパーティクルモーションの線型化を用いたスプリットिंग解析、得られた異方性パラメータの品質評価までを各地震波形に合わせて自動で行うため、多くの地震波形を効率的にかつ客観的に処理することができる。本研究は Savage et al. (2010)の手法を用いたが、周波数依存性の考慮のために別途 1-4, 2-6, 4-10 Hz のフィルタを設定しそれぞれの帯域でスプリットिंग解析を行った。

### 3. データ

S 波スプリットिंग解析を行うにあたり、防災科学技術研究所の Hi-net の 5 観測点で得られた波形を用いた。解析に用いた地震波は、2024 年 7 月 19 日から 31 日まで、 $M \geq 1$  以上のものである。また解析の際に気象庁一元化震源カタログによる震源位置を使用したほか、時間窓の自動設定の基準となる S 波到着時刻にも同カタログの読み取り値を用いた。また観測点における S-P 変換波の影響を除去するため、Hasegawa et al. (1978)<sup>9)</sup>の地震波速度構造を用いて入射角の計算を行い、観測点への入射角が  $35^\circ$  未満の地震波形のみを解析に用いた。

### 4. 結果

5ヶ所の観測点で、24 年 7 月の岩手県北部の地震活動から S 波スプリットिंगを検出した。震源のすぐ南に位置する観測点 N. IHEH と北西部の N. TTKH では異方性の方向は周波数によらずほぼ一定であった。対して折爪断層近傍の 2 観測点 N. NHEH, N. KHEH と震源域西部の N. ASRH では異方性の方向に顕著な周波数依存性が見られた。

震源のすぐ南に位置する観測点 N. IHEH と北西部の N. TTKH では異方性の方向は周波数によってほとんど変化しなかった。観測点 N. IHEH は NNE-SSW 方向の異方性が優勢であるが、この方向は起震断層の走向に平行である。この観測点は震源位置に近く、波線経路長に対する起震断層の破碎帯の広がり相対的に大きいことから、その異方性を直接的に反映していると考えられる。対して

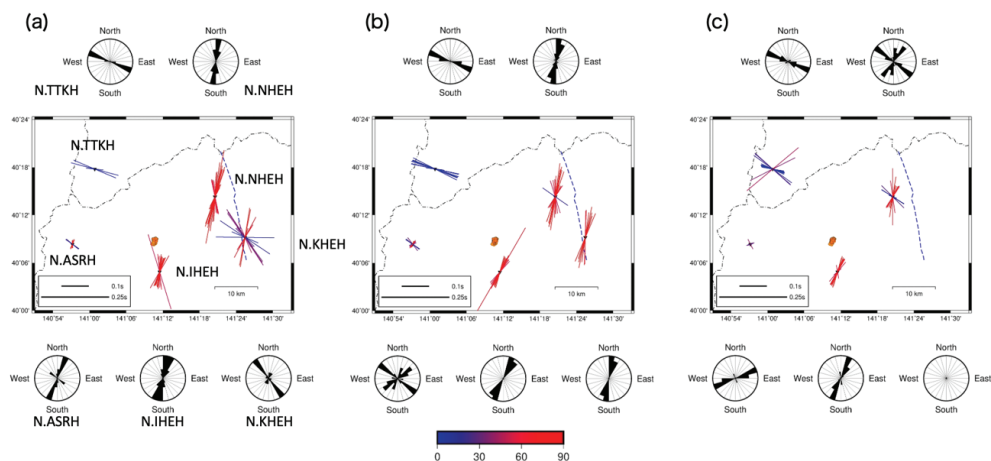


図 2. (a)1-4 Hz (b)2\_6 Hz (c)4-10 Hz のバンドパスフィルタを用いて得られた異方性と観測点毎の頻度分布. シンボルの色は SHmax 方向との差[°]を示す.

観測点 N. TTKH は WNW-ESE 方向の異方性が優勢であるが、この方向はメカニズム解の圧縮軸方向に平行である。この観測点への波線経路長は長く、経路長に沿って応力起因の異方性が継続的に作用するために、その異方性をよく反映していると考えられる。

折爪断層近傍について、観測点 N. NHEH では 1-4、2-6 Hz では概ね南北方向の異方性が顕著に見られた。また観測点 N. KHEH では 1-4 Hz では北西-南東方向、2-6 Hz では南北方向の異方性が優勢であった。これらの方向は圧縮軸方向(およそ東西方向)に直交し、折爪断層の走向に近い。また他観測点と比較して遅延時間が長い。対して 4-10 Hz の波形からは、観測点 N. NHEH では異方性方向のばらつきが強くなり、遅延時間が比較的短くなった。観測点 N. KHEH では採用基準を超える高品質なスプリッティングパラメータが得られなかった。

震源域西部の観測点 N. ASRH での異方性方向について、1-4 Hz では北北東-南南西方向の異方性が優位に見られた。また北西-南東方向の異方性も少数であるが見られた上、比較的長い遅延時間を示した。4-10Hz では東北東-西南西方向の異方性が顕著に見られた。2-6 Hz での異方性の最頻方向は NW-SE 方向であったが、1-4、4-10Hz で優勢であった異方性方向に対応するピークも見られるなど、ばらつきが大きい。また遅延時間は総じて 0.02 秒程度と小さい。

## 5. 議論

この地域の地質図(図 3; 産業総合技術研究所・20 万分の 1 日本シームレス地質図 [https://gbank.gsj.jp/seamless/])<sup>10)</sup>では、折爪断層と走向が平行な層状構造が地表付近、幅数 km にわたって大規模に発達していることが確認できる。この構造は中世代の付加体に由来し、東

方向の傾斜の層構造が推察される。今回の震源域から伝搬するS波は、東部の2観測点N.NHEH, N.KHEHへは層状構造を貫くような経路で入射する。低周波、長波長の波は比較的大きいスケールの異方性媒質でもスプリッティングを生じる。1-4, 2-6 Hzで顕著なN-S方向の大きい異方性は折爪断層に付随する大規模な層状構造を示唆していると考えられる。対して4-10 Hzでは、異方性方向のばらつきや検出数の極端な低下が見られた。高周波帯の波形は波長が短く、反映しやすい異方性媒質の特徴的長さも短くなる。そのためより小さいスケールの局所的な異方性媒質を反映しやすい。その場合に考えられることとして、波線経路上の複数の異方性媒質を反映する可能性に加え、互いに直行に近い方向の異方性媒質が存在している場合、スプリッティングが打ち消される可能性がある。

観測点N.ASRHでは1-4, 2-6HzでNNE-SSW方向の異方性とNW-SE方向の異方性がよく見られた。この異方性の原因としてはWNW-ENE方向の圧縮軸とNNE-SSW方向の走向をもつ起震断層のフラクチャが考えられる。一方4-10 Hzおよび2-6 Hzのサブピークとして見られるENE-WSW方向の異方性については応力場や起震断層では直接的には説明できない。また遅延時間が短く、検出数も少ないことから、スケールの小さい異方性の影響が考えられる。この震源域西部は火山帯に近く、このような環境下では火山由来の局所的な異方性媒質が形成されうる(例えば, Johnson et al., 2011)<sup>11)</sup>。高周波、短波長の波が局所的な異方性媒質を反映しやすいことを考えると、この波線経路上に火山性の小規模な地殻構造に起因する異方性が局在する可能性がある。

## 6. 結論

2024年7月に活発化した岩手県北部の地震波形を用いて、周波数依存性を考慮したS波スプリッティング解析を行った。折爪断層近傍の2観測点N.NHEH, N.KHEHと震源域西部のN.ASRHでは異方性の方向に顕著な周波数依存性が見られたが、それぞれ折爪断層に起因する大規模な異方性、火山帯の局所的な異方性を反映している可能性がある。また震源域のすぐ南の観測点N.IHEHと北西部のN.TTKHでは周波数依存性が見られなかったが、それぞれ起震断層の走向や応力場を反映した複数の異方性媒質を伝播しており、それぞれを通る波線経路の長さによって優勢な方向が変わっている可能性がある。

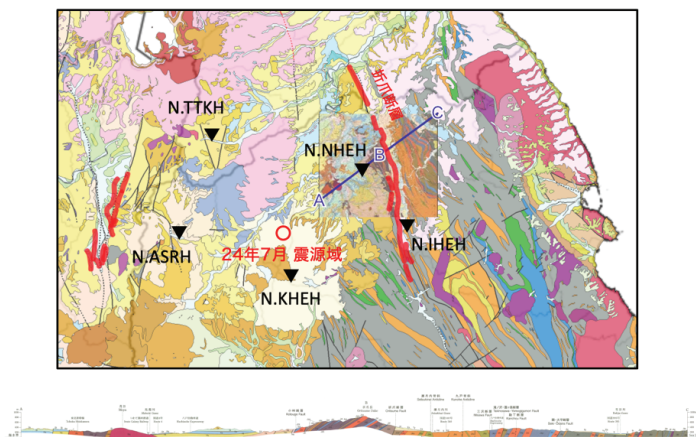


図3. 岩手県北部地域の地質構造および折爪断層近傍の断面図。震源域と観測点の位置を追記。

## 謝辞

本研究では気象庁一元化震源カタログを使用しました。

## 参考文献

- 1) 気象庁, 2024, 東北地方とその周辺の地震活動 (2024年5月~10月), 地震予知連絡会会報, 113, 51-58, [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou113/03\\_01.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou113/03_01.pdf)
- 2) 岡田知己・中山貴史・平原聡・立岩和也・堀内茂木・勝俣啓・大園真子・小菅正裕・前田拓人・山中佳子・片尾浩・松島健・八木原寛・2011年東北地方太平洋沖地震緊急観測グループ, 2022, 東北地方中南部における臨時地震観測, 東北地域災害科学研究, 58, 19-24, <http://nds-tohoku.in.arena.ne.jp/ndsjournal/volume58/58-4.pdf>
- 3) Michael, A. J., 1987. Use of focal mechanisms to determine stress: A control study. *J. Geophys. Res.* 92, 357. <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00357>
- 4) 地震調査研究推進本部, 2004, 折爪断層の長期評価について, [https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou\\_pdf/11\\_oritsume.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/11_oritsume.pdf)
- 5) Mizuno, T., Yomogida, K., Ito, H., Kuwahara, Y., 2001. Spatial distribution of shear wave anisotropy in the crust of the southern Hyogo region by borehole observations. *Geophys. J. Int.* 147, 528-542. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.01534.x>
- 6) Huang, Z., Zhao, D., Wang, L., 2011. Shear wave anisotropy in the crust, mantle wedge, and subducting Pacific slab under northeast Japan. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 12, <https://doi.org/10.1029/2010GC003343>
- 7) Silver, P.G., Chan, W.W., 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J. Geophys. Res.* 96, 16429. <https://doi.org/10.1029/91JB00899>
- 8) Savage, M.K., Wessel, A., Teanby, N.A., Hurst, A.W., 2010. Automatic measurement of shear wave splitting and applications to time varying anisotropy at Mount Ruapehu volcano, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 115, B12321. <https://doi.org/10.1029/2010JB007722>
- 9) Hasegawa, A., Umino, N., Takagi, A., 1978. Double-planed structure of the deep seismic zone in the northeastern Japan arc. *Tectonophysics* 47, 43-58.
- 10) 産業総合技術研究所, 2025, 20万分の1 日本シームレス地質図, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>
- 11) Johnson, J.H., Savage, M.K., Townend, J., 2011. Distinguishing between stress-induced and structural anisotropy at Mount Ruapehu volcano, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 116, B12303. <https://doi.org/10.1029/2011JB008308>