

## 青森県陸奥湾下の地震の S 波スプリッティング解析\*

東北大学理学研究科 岡田知己・藤村遼太郎・内田晴海・木村洲徳・高木涼太  
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・前田純伶  
弘前大学理工学研究科 前田拓人  
地震予知総合研究振興会 野口科子・阿部信太郎

### 1. はじめに

青森県陸奥湾下では、2024年11月に地震活動が活発化し、2024年11月16日にはM4.6（最大震度4）の地震が、20日にはM5.1（最大震度4）の地震が発生した。これらの地震の発震機構解はいずれも東北東—西南西方向に圧縮軸を持つ逆断層型の解であった（気象庁、2025）。この地域の応力場を検討したMaeda et al. (2020)によれば、2011年東北地方太平洋沖地震後のこの地域の応力場は、東北東—西南西方向に圧縮軸を持つ逆断層型の応力場であり、今回の地震活動と概ね調和的であった。一方、陸奥湾付近の陸域においては、およそ南北方向の走向を持つ断層が確認されている（例えば、工藤・他、2021）。なお、このような地震活動は火山活動に関連している可能性もあるが、阿部・他（2002）によれば震源域付近で火山活動を想起されるような構造は確認されていない。ただし、これらの地震活動の震央付近では、これまで顕著な地震活動が発生していなかったため2024年に活発化した地震活動付近での断層や火山活動については不明である。

地震を起こす断層の向きや応力場は地震活動の理解の上で重要である。断層の向きや応力場に関する情報を得るための手段の1つにS波スプリッティングと呼ばれる現象がある（例えば、Cragin, 1985）。通常、地球内部は、地震波速度が地震波の振動方向や進行方向によらない等方的な弾性体として取り扱われるが、実際には断層や微小亀裂（クラック）等が存在している。それらの断層やクラックが一定方向に卓越している、または配列した場合には異方的な弾性体として振る舞う。例えば、地下の応力は非等方的であるため、クラックは最大水平圧縮軸方向に法線を持つクラックのみが選択的に開いていると考えられる。また、断層構造や褶曲構造はそれらの特徴的長さより十分大きな波長の波に対して、異方性弾性体として振る舞う。そのような異方性弾性体内を地震波が通過する場合、S波が異なる速度を持つ2つのS波に分かれて伝搬する。特に、速い速度を持つS波は開いたクラックや断層の走向に並行な振動方向を持つことが期待される。例えば、能登半島北東部では、応力起因の異方性とその南部に、断層起因の異方性が北部に分布しており、南部で始まった群発地震活動が断層構造の発達した北部に広がることで地震活動が活発化したことが指摘されている（Okada et al., 2024）。

---

\*Shear wave splitting observed for the 2024 earthquake swarm beneath Mutsu Bay, Aomori Prefecture, northeastern Japan by Tomomi Okada, Ryotaro Fujimura, Harumi Uchida, Shu'utoku Kimura, Ryota Takagi, Martha Savage, Ayaka Tagami, Sumire Maeda, Takuto Maeda, Shinako Noguchi, and Shintaro Abe

そこで本研究では、S波スプリッティングを観測することにより、この地域の応力場や断層に関する知見を得ることを目的とする。

## 2. 手法

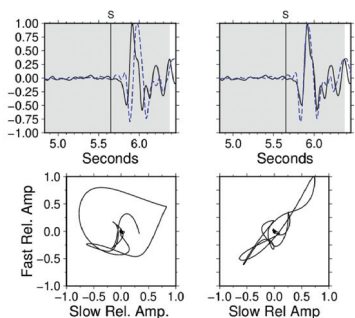
S波スプリッティングは震源から射出された1つのS波が異方性弾性体中で2つのS波に分裂する現象である。震源から射出された1つのS波は一定方向に振動していたはずであるため、分裂した2つのS波を正しく震源から射出された状況に補正すれば、補正したS波は一定方向に振動しているはずである。ここでの補正のために必要なパラメータは速いS波の振動方向と分裂した2つのS波の到着時間差である。言い換えれば、速いS波の振動方向と分裂した2つのS波の到着時間差の組み合わせを変えて、最も一定方向に振動しているように補正した際の速いS波の振動方向と分裂した2つのS波の到着時間差を求めることになる。そのための手法として Silver and Chan (1991)の手法が知られている。

一方、実際のS波は地動ノイズやコーダ波と呼ばれる散乱波等の後続波の影響を受ける。そのため、S波スプリッティングを求める際のタイムウインドウの取り方によっては、地動ノイズや後続波の影響を強く受けてパラメータを正確に推定することが難しい場合がある。そのためには、複数のタイムウインドウを取って、それぞれのタイムウインドウから推定されたパラメータからクラスター処理等により最も安定に求められるパラメータを選択することが必要となる。そのための手法として、本研究では、Silver and Chan (1991)の手法を基礎とした、Savage et al. (2010)の方法を採用した。

## 3. データ

本研究では、気象庁一元化震源カタログによる震源位置とS波到着時刻を解析に用いた。なお、本研究の研究対象領域では、地震予知総合研究振興会により、AS-netと呼ばれる地震観測網が整備されており、他の地域と比べると密な観測網となっている（例えば、野口, 2025）。解析期間は2000年10月1日から2025年5月5日までである。

S波スプリッティングを求める際には、地表でのS波臨界角を考慮する必要がある。臨界角よりも浅い角度でS波が地表に入射すると、S波がP波に変換するため位相の変化が生じ、S波スプリッティングが正確に推定できない。そこで臨界角よりも浅い角度でS波が地表に入射する場合を除く必要がある。本研究ではJMA2001の地震波速度構造（上野・他, 2002）を用い、



入射角を計算した。

図1. 得られたS波スプリッティングの例。上図は波形の時系列。実線は速いS波。波線は遅いS波。左図は到着時間差の補正前。右図は補正後。下図はS波の振動軌跡。左図の補正前ではS波スプリッティングによる楕円状の振動軌跡であるのに対し、右図の補正後は直線的な振動軌跡となっている。

#### 4. 結果

本解析の結果、11観測点において、計1081件のS波スプリッティングの推定が行われた。図1は得られた波形例を示す。

図2(a)に観測点A.HGTZ、(b)に観測点A.STDJの結果を、それぞれ示す。どちらの観測点においても概ね北北西-南南東方向に速いS波の異方性が観測された。異方性による2つのS波の到着時間は概ね0.1秒以下であった。震源の深さが10km程度のもので多いため、深さ依存性は確認できなかった。なお、地震活動の活発な期間は短かったため、時間変化は確認できなかった。S波の異方性の向きを地震の震央位置に表示すると、異方性の向きが場所によって異なる傾向が見られた。

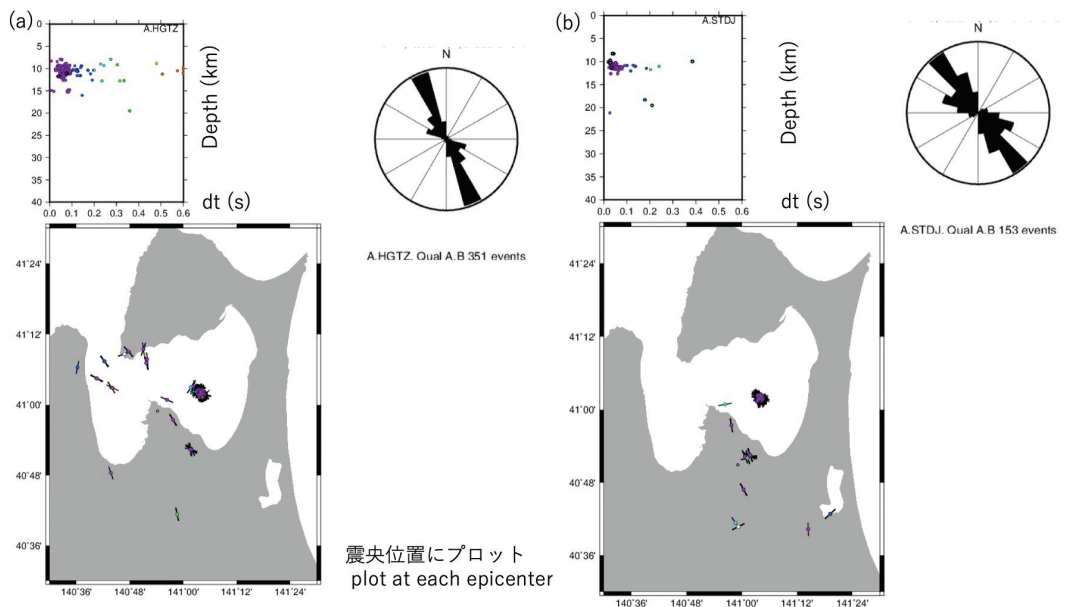


図2. 速いS波の振動方向。(a)A.HGTZ観測点。(b)A.STDJ観測点。それぞれの地震の震央位置にプロットしている。観測点位置は丸で示す。左上は地震の深さと時間差の関係。右上は速いS波の振動方向の方向別頻度分布（ローズダイアグラム）。

そこで、S波の異方性の向きの空間平均を表示したものを図3 (a) に示す。ここでは、Johnson et al (2011)を使用した。陸奥湾西部 (A 領域) では異方性の方向が複雑に分布していた。下北半島西部では、東西方向が、今回の陸奥湾の地震から夏泊半島にかけては北西—南東方向が確認された。一方、下北半島東部 (B 領域) では、概ね南北方向の異方性が確認された。

次に、異方性の大きさを平滑化して表示したものを図3 (b) に示す。ここでは Pastori et al. (2019)と同様に、GMT(Wessel et al., 2014)の nearestneighbor コマンドを利用して作成した。陸奥湾西部 (A 領域) では、大きさが比較的小さめであるが、空間的に不均質であり、局所的に大きな場所も確認された。一方、下北半島東部 (B 領域) では、全体として比較的大きな異方性が確認された。

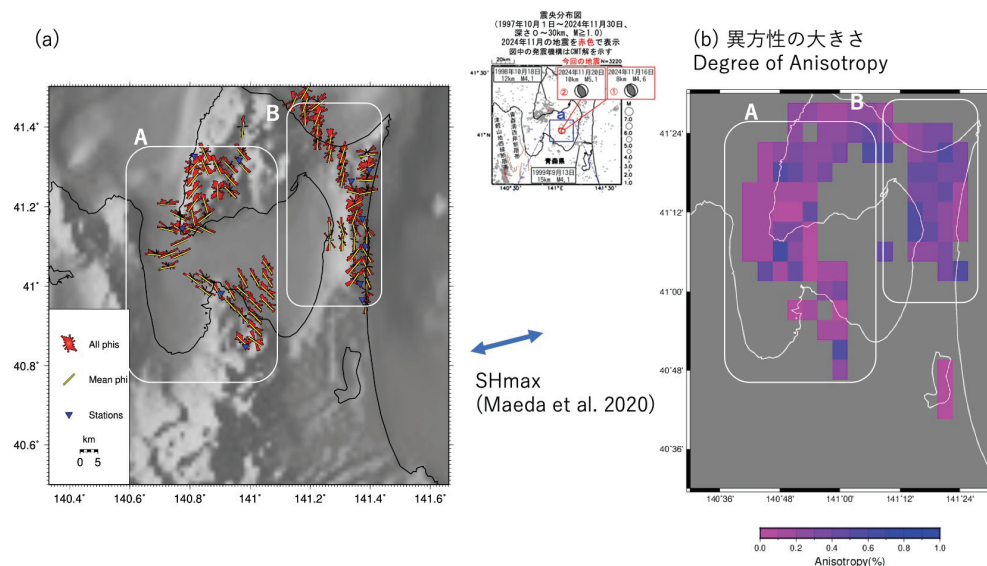


図3. (a) 速いS波の振動方向の空間平均。(b) 異方性の大きさの空間平均。3分毎とした。気象庁(2025)による震源分布・メカニズム解の分布図と Maeda et al. (2020)による SHmax (最大水平圧縮軸) 方向を併せて示す。

## 5. 議論

得られた異方性方向について検討を行う。この地域の応力場は、東北東—西南西方向に圧縮軸を持つ逆断層型の応力場と報告されている。一方、陸奥湾付近の陸域においては、およそ南北方向の走向を持つ断層が確認されている。下北半島西部でのおよそ東西方向の異方性は応力起因による異方性である可能性がある。一方、今回の陸奥湾の地震から夏泊半島にかけての北西—南東方向や、下北半島東部での、概ね南北方向の異方性は断層構造に起因する異方性である可能性がある。

## 6. まとめ

青森県陸奥湾下で、2024年11月に活発化した地震活動の地震波形データを用いてS波スプリッティング解析を行い、同地域の応力場や断層との関係を検討した。その結果、青森県陸奥湾下で2024年11月に活発化した地震活動は既存断層に関係する可能性が示唆された。

今後、より広い範囲のS波スプリッティング解析を行うことで、東北地方北部の応力場や断層との関係の検討を進める予定である。

**謝辞：**本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第3次）」の支援を受けました。

## 参考文献

- 1) 気象庁: 3-1 東北地方とその周辺の地震活動 (2024年11月~2025年4月), 地震予知連絡会会報, 114, 32-52, [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou114/03\\_01.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou114/03_01.pdf), 2025.
- 2) Maeda, S., Matsuzawa, T., Okada, T., Katao, H., Yoshida, T., Kosuga, M., Otsubo, M.: Spatiotemporal variations in the stress field in the northeasternmost part of the NE Japan arc: constraints from microearthquakes. *Earth, Planets Sp.* 72, 117. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01245-8>, 2020.
- 3) 工藤 崇, 小松原純子, 内野隆之, 昆 慶明, 宮川歩夢: 野辺地 (第2版), 20万分の1地質図幅, 産総研 地質調査総合センター, <https://www.gsi.jp/Map/JP/geology2-2.html>, 2021.
- 4) 阿部 信太郎, 徳山 英一, 坂井 眞一: 東北日本弧最北部を横断する反射法地震探査, 物理探査学会学術講演会講演論文集, 107, 276-279, 2002.
- 5) Crampin, S.: Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting, *GEOPHYSICS* 50, 142-152. <https://doi.org/10.1190/1.1441824>, 1985.
- 6) Okada, T., Savage, M.K., Sakai, S., Yoshida, K., Uchida, N., Takagi, R., Kimura, S., Hirahara, S., Tagami, A., Fujimura, R., Matsuzawa, T., Kurashimo, E., Hiramatsu, Y.: Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan. *Earth, Planets Sp.* 76, 24. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01974-0>, 2024.
- 7) Silver, P.G., Chan, W.W.: Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J. Geophys. Res.* 96, 16429. <https://doi.org/10.1029/91JB00899>, 1991.
- 8) Savage, M.K., Wessel, A., Teanby, N.A., Hurst, A.W., 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>, 2010.
- 9) 野口 科子: [SSS12-P02] 地域地震観測網 AS-net による 2024 年 11 月の陸奥湾の地震：地震活動と震源分布, 日本地球惑星科学連合 2025 年大会, <https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2025/subject/SSS12-P02/advanced>, 2025.

- 10) 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生: 気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, 65, 123-134,  
[https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/catalog/refer/ref\\_3.pdf](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/catalog/refer/ref_3.pdf), 2002.
- 11) Johnson, J.H., Savage, M.K., Townend, J., Distinguishing between stress-induced and structural anisotropy at Mount Ruapehu volcano, New Zealand. *J. Geophys. Res.* 116, B12303.  
<https://doi.org/10.1029/2011JB008308>, 2011.
- 12) Pastori, M., Baccheschi, P., Margheriti, L., Shear Wave Splitting Evidence and Relations With Stress Field and Major Faults From the “Amatrice - Visso - Norcia Seismic Sequence.” *Tectonics* 38, 3351–3372. <https://doi.org/10.1029/2018TC005478>, 2019.
- 13) Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J., & Wobbe, F.: Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 94(45), 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>, 2014.