

（4） 筑波大学生命環境系

1. はじめに

筑波大学は、独自に地震観測網を有しておらず、組織として地震学に関わる研究に取り組む体制にはなっていない。そこで、専ら解析手法の開発や、開発した解析手法を実地震へ適用する研究に取り組んでいる。

この 10 年、我々は、震源過程解析において、グリーン関数の誤差の影響の軽減に取り組み、モデル誤差をデータの共分散行列に近似的に取り込む手法が有用であることを示した¹⁾。また、高周波を励起する領域を同定する手法として Back-projection (BP) 法があるが、浅い地震に適用すると震源近傍の反射波の影響により結果が歪められ、得られる結果の意味も不明瞭となる問題があった。それらの問題を解決する Hybrid BP (HBP) 法を開発した²⁾。

本震の破壊成長過程を理解するには、前震を含めた地震群における一連の破壊現象を解明する必要がある。独自に開発した手法を用いることにより、前震活動を伴った本震の震源過程についても研究を行なっているので、ここで紹介する。

2. 震源過程解析手法の開発

2.1 グリーン関数の誤差を考慮した震源過程解析

地震波形は、グリーン関数と断層すべり速度関数の畳み込み積分を断層面で面積分したものに对应する。グリーン関数を計算するには、単純化した地下構造を仮定する必要がある。結果として、我々は真のグリーン関数を得ることはできない。震源過程を解析する上で、グリーン関数の誤差は避けて通れない問題である。多くの研究では、主に速度構造を工夫することによってグリーン関数の改善を目指している。これに対して、我々は、解析に使用するグリーン関数に誤差が含まれていることを前提にした震源過程解析手法の開発に取り組んだ。

グリーン関数の誤差が仮定する地下構造モデルに起因する場合は、多数の地下構造モデルを用いて解析を行い、各地下構造モデルで得られた震源過程モデルの事後確率密度関数を用いて、仮定した地下構造の誤差を考慮したモデルの事後確率密度関数を求めることができる。しかし、このアプローチは莫大な計算コストが必要なため、費用対効果が低いという問題がある。

一方で、グリーン関数にランダムな誤差が含まれていると近似すれば、グリーン関数の誤差構造を、データの共分散行列に組み込むことができる。Yagi and Fukahata (2011)¹⁾は、モデル誤差をデータの共分散行列に組み込み、震源過程では必須の強い拘束条件であった非負の拘束条件を用いることなく、安定に解が得られることを示

した。

モデル誤差をデータの共分散行列に取り込む解決方法は、他の研究グループによって、異なるデータの解析にも導入され、その有用性が検証されている³⁾。

2.2 Hybrid Back-projection 法

観測波形を波の到達時間を考慮して重合することにより、波の放出源の時空間分布を求める BP 法が開発され、その簡便さと解析結果がロバストであることが評価され多くの地震に適用されてきた。その一方で、得られる結果の物理学的な意味が不明瞭であった。

そこで、Yagi *et al.* (2012)²⁾は観測波形とグリーン関数の相互相関関数を震源に逆投影する HBP 法を提案した。HBP で得られた結果は、すべり速度に対応づけることが可能であり、適用するフィルターによって高周波を励起するすべり速度の時空間変化を抽出することが可能である。Fukahata *et al.* (2013)⁴⁾は、HBP 法を用いて BP 法の理論背景を明らかにした。これによると BP 法は、HBP 法においてグリーン関数をデルタ関数と近似した場合に対応している。また HBP 法で得られる結果は、Dumped Least Square でダンピングを無限大に持っていた解に相当することになる。このように、HBP 法の登場により、今まで不明瞭であった BP 法の理論的な背景が明らかになった。

3. 前震活動と本震の震源過程の関係

3.1 2014 年イキケ地震

2014 年 4 月 1 日にチリ北部のイキケ沖で、モーメントマグニチュード 8.2 の巨大地震が発生した。ここでは、Yagi *et al.* (2014)⁵⁾の論文の内容について紹介する。この地震が発生する 16 日前から本震の震源から約 40 km 南で前震活動が開始し、本震に向かって約 5km/day で前震域が拡大していった。Incorporated Research Institutions for Seismology-Data Management Center (IRIS-DMC) から入手した遠地実体波にグリーン関数の不確定性を考慮した震源過程解析法を適用し、本震の断層すべりの時空間分布を求めた。得られたモーメント速度関数から、20 秒もの初期破壊が継続した後に、主破壊が開始したことが明らかになった。初期破壊では、前震域に沿って南に向かって高速で破壊が伝播していること、初期破壊が前震域を抜けた後に主破壊がスタートしていることが明らかになった。この結果は、本震の破壊伝播が、前震活動による応力変化の影響を強く受けていることを示す結果である。またこのような前震活動を含めた複雑な破壊伝播過程は、階層アスぺリティモデルを用いたシミュレーションで予測された破壊パターン⁶⁾

に酷似しており、アスペリティの階層性を支持する結果でもある。

3.2 2016 年熊本地震

2014 年 4 月 15 日に熊本県で気象庁マグニチュード 7.3 の大地震が発生した。この地震前に活発な前震活動が本震の震源付近で観測されている。ここでは、Yagi *et al.* (2016)⁷⁾ の論文の内容について紹介する。IRIS-DMC から入手した遠地実体波にグリーン関数の不確定性を考慮した震源過程解析法を適用し、本震の断層すべりの時空間分布を求めた。その結果、本震の破壊は日奈久断層帯と布田川断層帯の接合部付近で開始し、開始から 5 秒間は南西方向に伝播し日奈久断層帯で横ずれすべりが発生した。その後破壊は北東方向に伝播し、布田川断層帯で横ずれ成分と正断層成分を含む断層すべりが発生している。破壊は、阿蘇カルデラ周辺のマグマ溜まりが存在すると推測されている領域で急激に減速し、停止している。本震の震源過程は、断層の複雑な形状と火山活動の影響を強く受けていることが明らかになった。

4. おわりに

この 10 年で、震源過程解析の分野は大きく変化していった。広く使用されている解析手法では考慮されていないモデル誤差の問題が広く認知されるようになり、かつ、Back-projection 法の理論背景が明瞭になったことは大きかった。これらの結果を受けて、アメリカ地球物理学会の秋季大会の特別セッション等で、活発な議論が行われ続けている。また、遠地実体波は、巨大地震のみならず中規模の地震の成長過程や震源断層の形状の変化等の情報を有している。さらなる解析手法の改善が必要不可欠ではあるが、震源過程を理解するのに欠かせない観測情報である。

(八木 勇治)

参考文献

- 1) Yagi, Y. and Y. Fukahata, 2011. Introduction of uncertainty of Green's function into waveform inversion for seismic source processes. *Geophys. J. Int.*, 186, 711-720.
- 2) Yagi, Y., Nakao, A., & Kasahara, A. (2012). Smooth and rapid slip near the Japan Trench during the 2011 Tohoku-oki earthquake revealed by a hybrid back-projection method. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 355, 94-101.
- 3) Duputel, Z., P. S. Agram, M. Simons, S. E. Minson, J. L. Beck, 2014, Accounting for prediction uncertainty when inferring subsurface fault slip. *Geophys. J. Int.*, 197, 464-482.
- 4) Fukahata, Y., Y. Yagi, L. Rivera, 2013. Theoretical relationship between back-projection imaging and classical linear inverse solutions. *Geophys. J. Int.*, 196, 552-559.
- 5) Yagi, Y., R. Okuwaki, B. Enescu, S. Hirano, Y. Yamagami, S. Endo, T. Komoro, 2014. Rupture process of the 2014 Iquique Chile earthquake in relation with the foreshock activity. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 4201-4206.
- 6) Noda, H., M. Nakatani, and T. Hori, 2013. Large nucleation before large earthquakes is sometimes skipped due to cascade-up-Implications from a rate and state simulation of faults with hierarchical asperities. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 2924-2952.
- 7) Yagi, Y., R. Okuwaki, B. Enescu, A. Kasahara, A. Miyakawa, M. Otsubo, 2016. Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano. *Earth, Planets and Space*, 68:118.