

震源イメージングに対する点広がり関数 Point spread functions for earthquake source imaging

中原 恒^{1*}; ヘイニー マシュー²
NAKAHARA, Hisashi^{1*}; HANEY, Matthew²

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² アメリカ地質調査所
¹ Graduate School of Science, Tohoku Univ., ² U.S. Geological Survey

はじめに

近年、地震の震源イメージングにおいて、波形インバージョン法 [例えば Hartzell and Heaton (1983)] に加えて、バックプロジェクション (BP) 法 [例えば Ishii et al. (2005)], 時間反転 (TR) 法 [例えば Larmat et al. (2006)], ハイブリッドバックプロジェクション (HBP) 法 [Yagi et al. (2012)] などの手法が適用されている。また、それらの手法間の理論的な関係も明らかにされている [例えば Kawakatsu and Montagner (2008), Fukahata et al. (2013)]。本研究では、光学分野で用いられる点広がり関数 (Point Spread Function; PSF) の概念を用いれば、震源イメージングの物理的意味を理解しやすくなることを示す。また理想的な場合には、震源イメージングの PSF は、地震波干渉法の問題として解釈できることを示す。

定式化

(運動学的) 震源インバージョンとは、観測される波動場から、既知のグリーン関数を用いて、震源断層面上のすべり量分布を推定することであり、その基礎となる観測方程式は表現定理に基づいている。この手法は震源過程解析の正攻法と考えるとよいと思うが、もう少し簡略化された震源イメージング法もあり、BP 法、HBP 法、TR 法などがこれにあたる。Claerbout (2001) の物理探査の教科書によれば、イメージングとは、観測方程式にグリーン関数のアジョイントをかける操作として数学的に定義されている。つまり、各観測点の波動場とグリーン関数との相互相関をとり、それをすべての観測点について重畳したものが、求められる震源イメージとなる。Fukahata et al. (2013) により指摘されているように、この操作は HBP 法とかなり近い。この震源イメージが、観測点数の制限や分布の片寄りなどのため、どれだけ真の震源過程からずれる (ぼける) かを示すのが、PSF である。この PSF は、観測点から震源の 2 点までのグリーン関数の相互相関をすべての観測点について重畳したものととして、表現することができる。

震源と観測点を空間的に離散化すれば、観測方程式を行列で書き下すことができる。正規方程式の導出には、観測方程式の両辺にグリーン関数のアジョイント (随伴) 行列をかければよい。こうして得られる正規方程式を解くことが震源インバージョンである。そして、これは PSF を補正することによって、真の震源過程を推定することを意味する。また、その他の震源イメージングの手法では、PSF の影響を補正できていないことになり、この影響によるゴーストに注意する必要がある。

PSF の地震波干渉法による解釈

以下では、震源イメージングの PSF をさらに物理的に解釈することを考える。そのため、理想化された状況であるが、観測点が震源をぐるりと取り囲むように連続的に分布していると仮定する。そのときに、点広がり関数は、震源の 2 点へのグリーン関数の相互相関を全観測点について重畳したものであることを思い出そう。震源と観測点とを入れ替えるグリーン関数の相反性を利用すると、点広がり関数は、ぐるりと取り囲んだ震源に対して、2 点の観測点間の波形の重畳された相互相関を求める問題に置き換えることができる。これは地震波干渉法によるグリーン関数復元の問題と完全に等価である。これにより、震源イメージングの点広がり関数は、地震波干渉法の問題として解釈可能になる。さらに具体的に考察を進めるため、2 種類の震源を考える。まずはシングルフォース震源の場合である。この場合は、点広がり関数は、2 点間の (シングルフォースに対する) グリーン関数の虚部に等しいことが分かる。この結果は、全く等価ではないが類似の TR 法の観点から、すでに Fink (2006) によって指摘されている。次に、モーメントテンソル震源を考える。この場合は、点広がり関数が、(シングルフォースに対する) グリーン関数の虚部を、2 点の観測点座標で、それぞれ 1 階ずつ空間偏微分したものに对应することが導かれた。これは、本研究により初めて明らかになった結果である。また 2 種類の震源のいずれの場合にも、地震波干渉法が成立する場合には、震源イメージは、真の震源過程を 1 回時間積分した結果になることが示唆される。

まとめ

震源イメージングの問題を PSF の概念を利用して考察した。その結果、震源インバージョンでは PSF の影響を補正した震源イメージが得られること、他のイメージング手法では PSF の影響が残るため、データの適切な重みづけを行うなどゴーストの影響に注意する必要があることが分かった。また、グリーン関数の相反性を利用すると、PSF は地震波干渉法の問題として解釈可能であることも明らかになった。本研究は、震源インバージョン法の意味をよく理解する上で有益であろう。

SSS27-07

会場:411

時間:4月29日 11:00-11:15

キーワード: 震源イメージング, 点広がり関数, 地震波干渉法

Keywords: Earthquake source imaging, Point spread functions, Seismic interferometry