

## 断層破壊指向性を考慮したスペクトルインバージョン法の高度化 Upgrading of Spectral Inversion Method Considering with Rupture Directivity

○染井一寛・浅野公之・岩田知孝

○Kazuhiro SOMEI, Kimiyuki ASANO, Tomotaka IWATA

To clarify the factor of variation in residual of spectral inversion results, we obtained a source spectrum for a specific station from an observed Fourier amplitude spectrum by removing the propagation path and site effects, which have been obtained in the spectral inversion. We found the azimuthal dependence of both the corner frequencies and fall-off rates in the displacement source spectra at stations for several events in the 2016 Kumamoto earthquake sequence. The directivity coefficient assuming the bilateral line source model was estimated from the variation in the fall-off rate. The estimated directivity coefficient showed the rupture direction of an  $M_w$ 5.3 event was the south-west direction unilaterally, which was consistent with the rupture propagation direction of strong motion generation area for this event modeled by simulating the observed ground motions using the empirical Green's function method. This result indicates the rupture directivity caused the azimuthal dependence of variation in the spectral inversion result. Based on the directivity coefficient, we develop a new spectral inversion method considering with rupture directivity.

### 1. はじめに

スペクトルインバージョンは、複数観測点、複数地震の地震動記録から震源、伝播経路、サイト増幅の各特性を分離する手法として、岩田・入倉(1986)をはじめとして国内外で広く適用されている。従来のスペクトルインバージョンでは、ある地震の震源特性(震源スペクトル)は、イベントのみに依存する一方、実際の有限震源断層の破壊からは、放射方位によって震源スペクトルが異なることが期待される。

染井・他(2020)は、2016年熊本地震系列の強震記録に対するスペクトルインバージョン結果について、各観測点の観測スペクトルから伝播経路特性とサイト特性を周波数領域で除したもの(以下、観測点震源スペクトルと呼ぶ)のばらつきに方位依存性を示す地震があることを見出し、その原因が断層破壊指向性にあることを示した。そこで、本研究は、スペクトルインバージョン手法の高度化を進めるための感度チェックを目的として、観測点震源スペクトルから directivity 係数を推定した。

### 2. Directivity 係数の推定方法

ここでは染井・他(2020)に引き続き、2016年熊本地震系列の79地震( $M_w$ : 3.4–5.3)の強震記

録をデータセットとした。従来のスペクトルインバージョン結果から得られた観測点変位震源スペクトルには、複数の地震でコーナー周波数とそれより高周波数側のスペクトルの傾き(fall-off rate)に系統的な方位依存性が確認されたことから、観測点毎の fall-off rate のばらつきを、線震源のバイラテラル破壊を仮定した directivity 係数  $C_d$  (Boatwright, 2007) によって説明することを試みた。

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{[(1+e^2)(1+\zeta_{ri}^2) + 4e\zeta_{ri}]^{1/2}}{(1-\zeta_{ri}^2)} \quad (1)$$

$$\zeta_{ri} = (v/c) \cos \theta_{ri} \quad (2)$$

ここで、 $c$ はS波速度で3.4 km/sと仮定した。 $v$ は破壊速度、 $\theta$ は、破壊方向と観測点方位の間の角度を表す。鉛直方向の伝播する角度は、上野・他(2002)の速度構造モデルを使用した射出角を考慮した。 $e$ は、directivity ratioで、0から1の範囲でユニラテラル破壊の割合を表す指標であり、1が純粋なユニラテラル破壊、0が純粋なバイラテラル破壊を表す。破壊速度、破壊進展方向、及び directivity ratio は、表1に示す範囲、間隔で探索し、Boatwright(2007)の残差関数が最小となる方向をグリッドサーチで推定した。なお、

Boatwright (2007) は観測点毎の観測最大加速度 (速度) の地震動予測式に対する偏差を用いて破壊方向を推定したが、本研究では観測点毎の fall-off rate の $-2(\omega^2$ モデルの fall-off rate) に対する偏差を使用した。

### 3. 結果

図 1 に、例として 2016 年 4 月 19 日 20 時 47 分の地震 ( $M_w$  5.3) の結果を示す。水平、鉛直方向の破壊は、それぞれ破壊開始点 (震源) から  $N214^\circ E$  (南西方向)、真下から上向きに  $135$  度の方向と推定され、その破壊速度は  $2.4$  km/s で、directivity ratio は 1 のユニラテラル破壊と推定された。一方で、観測地震動を説明する強震動生成域モデルでは、震源から南南西及び浅部に向かって破壊進展したことが示されている (染井・他, 2020)。観測点震源スペクトルのばらつきから推定した破壊方向は、線震源仮定という違いはあるものの、両者の破壊方向は概ね一致した。

表 1  $C_d$  のパラメータ探索範囲と間隔

	探索範囲	探索間隔
破壊速度 (km/s)	1.8–3.4	0.1
水平破壊方向 (度) ※真北から	0–359	1
鉛直破壊方向 (度) ※真下から	0–180	1
directivity ratio	0–1	0.1

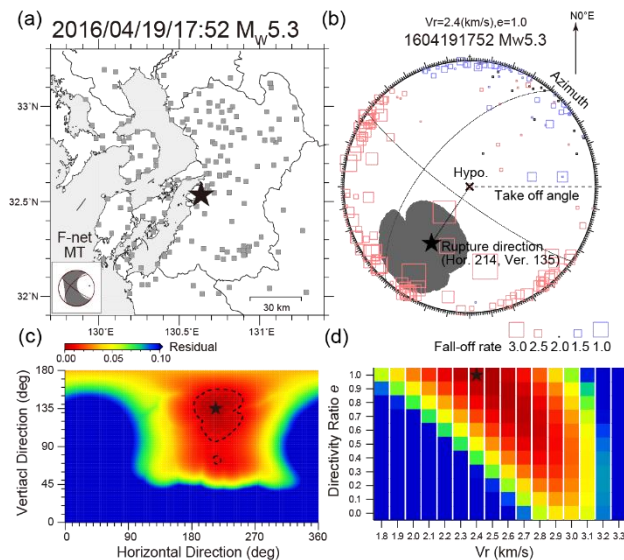


図 1 2016 年 4 月 19 日 20 時 47 分の地震の結果例。(a) 星印は震央、灰色四角印は観測点を表す。(b) 四角印は、各観測点震源スペクトルの fall-off rate を震央–観測点方位と射出角によって下半球投影のステレオネットに示したもの。星印は、推定された破壊方向。灰色領域は上位 5% の解の分布を表す。(c) 水平、鉛直方向に対する解の残差分布。星印は最適解 (破壊方向)、破線の範囲は、(b) に示した上位 5% の解の分布を表す。(d) 破壊速度と directivity ratio に対する解の残差分布。

### 4. まとめ

2016 年熊本地震系列の強震記録に対するスペクトルインバージョン結果から得られた観測点震源スペクトルの fall-off rate の分布から、バイラテラル破壊を考慮した線震源の directivity 係数を決定した。得られた directivity 係数の破壊方向は、観測地震動を説明する強震動生成域モデルの破壊方向と一致した。

この分析を踏まえ、断層破壊指向性を考慮したスペクトルインバージョン手法の開発を進める。スペクトルインバージョンの残差の要因としては、破壊伝播特性に加えて、サイト特性の入射角、入射方位依存性や  $Q$  値の空間不均質が考えられることから、それらの影響程度も確認する必要がある。

### 謝辞

国立研究開発法人防災科学技術研究所 K-NET、KiK-net、F-net 広帯域強震計、気象庁計測震度計、熊本県震度情報ネットワークシステムの強震波形記録を使用しました。本研究は令和 2 年度京都大学防災研究所共同研究 (萌芽的共同研究 2020H-01) によって実施された。

### 参考文献

- Boatwright, J. (2007), The Persistence of Directivity in Small Earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 97(6), 1850–1861.
- 岩田知孝・入倉孝次郎 (1986), 観測された地震波から、震源特性・伝播経路特性・及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, *地震* 2, 39(4), 579–593.
- 染井一寛・浅野公之・岩田知孝・宮腰 研・吉田 邦一・吉見雅行 (2019), 2016 年熊本地震系列の強震記録から分離した震源・伝播経路・サイト増幅特性, *日本地震工学会論文集*, 19(6), 42–54.
- 染井一寛・浅野公之・岩田知孝 (2020), スペクトルインバージョン結果の残差に現れる震源断層破壊伝播の影響, *日本地震学会 2020 年度秋季大会講演予稿集*, S15–16.
- 上野 寛・畠山信一・明田川保・舟崎 淳・浜田 信生 (2002), 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.