

(10) 震源インバージョンにおける各種波動の貢献度

東京大学地震研究所 正会員 ○飯田昌弘

U.S. Geological Survey Paul Spudich

1. 目的

ある目的のために、どの種類の波動の使用が効果的であるかがわかっているとたいへん便利である。我々は、震源インバージョン（逆解析）にはどの種類の波動が有効かという問題を扱う。最近の研究[1]によると、工学で重要な短周期の強震動においても、主要動を含む前半の波形は震源によって説明できる。従って、震源インバージョンの研究は重要である。波動の一部を除去した際の、インバージョンの精度の低下を評価することにより、各種波動の有効性を解明する [2]。

2. 方法

'Overdetermined'の最小二乗インバージョンを使う[2]。断層を分割し、その小断層の大きさで'Spatial Resolution'を表現し、'Model Variance'を震源インバージョンの精度として使用する。正確に言うと、震源インバージョンの精度を、すべての小断層の地震モーメントを推定する際の、その標準偏差の最大値（最も悪い推定精度）として定義する。精度は、Wolbergの予測解析法 [3]により、きわめて効率的に計算される。計算の簡単のため、半無限一様媒質における厳密解を使用する。

3. 断層の傾斜角と深さの効果

半無限一様媒質は、(1) Love波、(2) 震源を下向きに出て地表に戻ってくる波、を持たない、という問題がある。だが、各種波動の貢献度を知れば、これら欠けている波の貢献度も評価できるかもしれない。多くの波動の使用は、情報量の増加による解の不確定性（精度）の向上につながるが、それは同時に、位相の妨害による解の不確定性（精度）の低下をもたらす。物理波（波動の種類）に関係する重要な断層パラメータは、断層の傾斜角と深さであろう。傾斜角は、断層各部から発生する波の、各観測点での到着時刻の集中度（位相の妨害）と関係し、深さは、表面波の励起と密接である。

図-1に、使用する断層-観測点のレイアウトを示す。使用する3種類の断層を、表-1にまとめた。ここで、位相の妨害の程度を測定するパラメータPIを導入する。 $PI = \sum_{i=1}^{Ns} (Tri - Tsi) / Ns$ で、Tri及びTsiは、それぞれi番目の観測点に最も遅く到着するレイリー波及び最も早く到着するS波の到着時刻、Nsは観測点数である。PIが小さいほど位相の妨害は大きい。垂直なStrike-slipの断層[1]は、大きな位相の妨害を引き起こす。また、断層[2]と[3]を比較すれば、断層深さの違いによる表面波の貢献度を評価できる。各観測点で使用される物理波を図-2に示す。使用される物理波は、半無限媒質に対する解、無限媒質に対する解、far-fieldの項（無限媒質）、near-fieldの項（無限媒質）の4種類で、その効果を詳しくみるために、断層に近い3観測点と断層から離れた3観測点で、異なる物理波を使用することもある。3つの断層のそれぞれに対して、同じ10ケースの物理波を使う。重要な比較は、ケース1と3（表面波）、2と5（near-fieldの項）、4と10（far-fieldの項）である。

図-3に得られた震源インバージョンの精度をまとめた。まず第一に、断層[2]、[3]に対する結果は、断層[1]に対する結果と大きく異なる傾向を示す。傾斜したDip-slipの断層では、遠方観測点の表面波が最も有効である。far-fieldの項はその次に役立つが、near-fieldの項は有効でない。断層[2]、[3]に対する結果を比較すると、表面波が卓越するとインバージョンの精度が改善されることがわかる。これに対して断層[1]では、表面波は有効でなく、far-fieldの項のみを使用したケース7で最もよい精度を得る。垂直な断層では、位相の妨害が大きいためだと思われる。断層近くの観測点及び断層から離れた観測点のfar-field

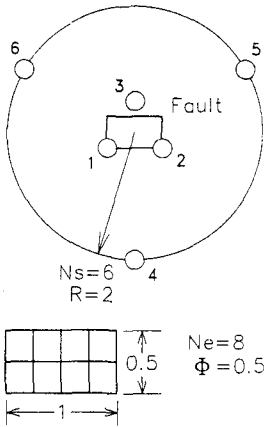


図-1 断層-観測点のレイアウト (I)。

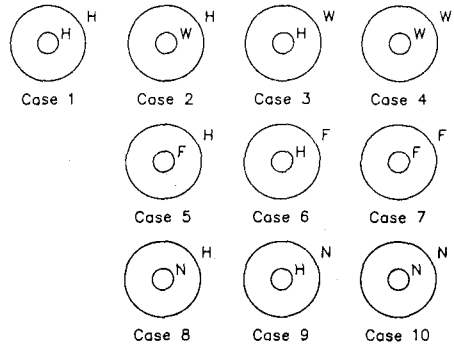


図-2 各観測点で使用される波動の種類。内側の円は断層に近い3観測点を、外側の円は断層から離れた3観測点を示す。Hは半無限媒質に対する解、Wは無限媒質に対する解、Fはfar-fieldの項、Nはnear-fieldの項である。

表-1 3種類の断層。P Iは位相の妨害の程度を測定するパラメータで、本文に説明がある。

Type	Slip Direction	Dip angle	Average Depth	PI
[1]	Strike Slip	90°	0.35	1.02
[2]	Dip Slip	30°	0.225	1.17
[3]	Dip Slip	30°	0.35	1.13

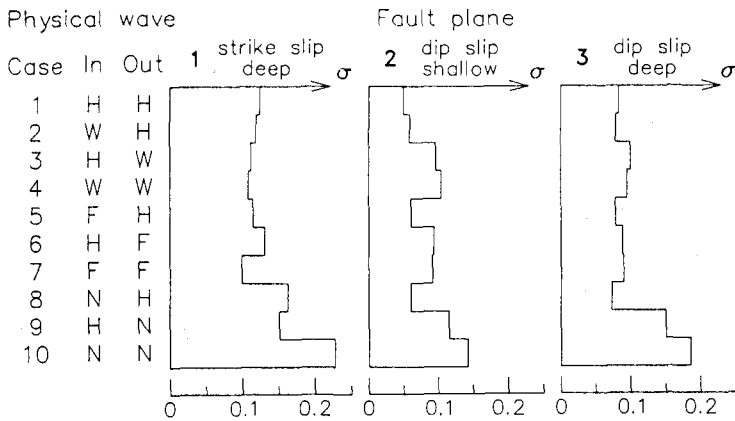


図-3 震源インバージョンの精度。断層は表-1、物理波は図-2で説明されている。

の項が重要で、near-fieldの項は有効ではない。

4. アレイ半径の効果

物理波の効果をさらによく理解するために、震源インバージョンの精度とアレイ半径の関係を調べる。使用する断層-観測点のレイアウトは図-4のものである。使用する物理波は前と同じ4種類で、すべての観測点で同じものを使用する。ここでは、位相の妨害が少なく、表面波が卓越する断層 [2]を選ぶ。図-5に結果を示す。半無限媒質の解の(表面波も含む)場合には、アレイ半径が大きくなるほど精度がよくなるのに対して、無限媒質の解(実体波のみ)では、アレイ半径が小さいほど精度がよい。グラフは、断層を囲む観測点を使った、正規方程式を解くインバージョン(例えば [4])や繰り返しの最小二乗インバージョン(例えば [5])の一般的な有効性と同時に、断層近くに設置された'Differential Array'により得られた記録の実体波解析(例えば [6])の効果を実証している。

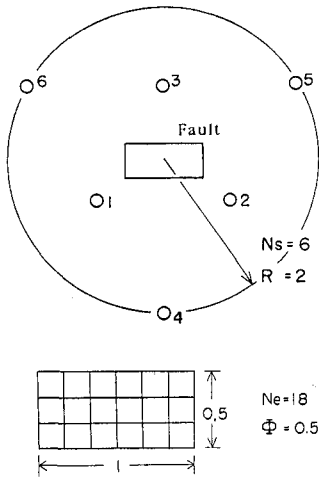


図-4 断層-観測点のレイアウト (II)。

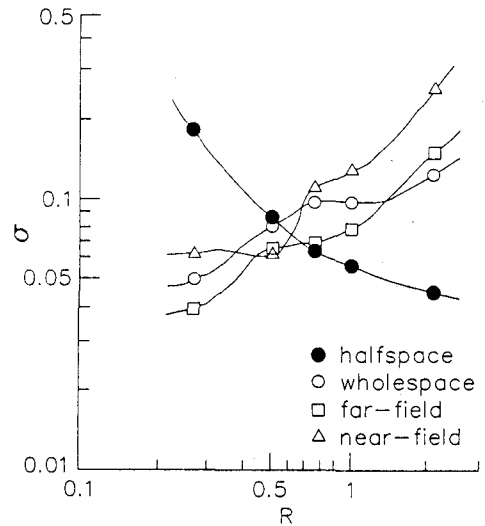


図-5 震源インバージョンの精度 σ とアレイ半径の関係。

5. 半無限一様媒質の解の妥当性

これまでの結果に基づいて、半無限一様媒質の解の妥当性を考える。遠方観測点のラブ波も、レイリー波同様有用な情報をもたらすであろう。けれども、ラブ波はレイリー波とS波の中間の速度を持つので、位相の妨害は激しく、インバージョンの精度は改善されないであろう。震源を下向きに出る波は、到達に時間を要するので、これまた表面波と位相の妨害を起こし、精度の改善にはつながらないであろう。以上より、半無限一様媒質の解は、基本的に各種波動(物理波)の貢献度を定性的に評価できると考える。

参考文献

- [1] S.Hartzell and M.Iida, "Source complexity of the 1987 Whittier Narrows, California, earthquake from the inversion of strong motion records," J. Geophys. Res. 95: 12475-12485 (1990).
- [2] M.Iida, T.Miyatake and K.Shimazaki, "Relationship between strong-motion array parameters and the accuracy of source inversion and physical waves," Bull. Seism. Soc. Am. 80: 1533-1552 (1990).
- [3] J.R.Wolberg, Prediction Analysis, Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand Co., 1967.
- [4] A.H.Olson and R.Apsel, "Finite faults and inverse theory with applications to the 1979 Imperial Valley earthquake," Bull. Seism. Soc. Am. 72: 1969-2001 (1982).
- [5] M.Kikuchi and H.Kanamori, "Inversion of complex body waves," Bull. Seism. Soc. Am. 72: 491-506 (1982).
- [6] P.Spidich and D.Oppenheimer, "Dense seismograph array observations of earthquake rupture dynamics," in Earthquake Source Mechanics, Geophys. Monograph 37, S. Das (Editor): 285-296 (1986).

<連絡先> 〒113 東京都文京区弥生 1-1-1

東京大学地震研究所 (伯野研究室) 飯田昌弘

電話 03-3812-2111 (内線5785)

FAX 03-3814-6365