

(3) やや長周期表面波の群速度を用いた平均的地下構造の推定

東京電力 植竹富一 東京電力 松本尚志 東電設計 菅原正晴
東京工業大学 山中浩明 鹿島建設 武村雅之

1. はじめに

やや長周期地震動を評価する上で、地下深部までの構造の情報が重要である。深部構造の探査は人工地震や微動のアレイ観測などにより行われているが、それらは点もしくは測線のように限られた地域を対象としている。本研究では、記録の群分散が震央-観測点間の地下構造を反映している事に着目し、1地点での地震観測記録の表面波の群速度の逆解析からより広い地域の深い構造の推定を試みた。検討には新潟県柏崎で得られた地震記録を用いた。新潟地域は堆積層が厚い地域であり、深い堆積層構造がやや長周期地震動に与える影響が議論されている〔工藤・坂上(1984), 横山・他(1990), 植竹(1992)等〕。

2. 対象記録の概要

柏崎で得られた記録の中で、やや長周期成分の卓越した記録を解析に用いた。観測点の位置及び検討対象とした地震の震央位置を図1に示す。また、対象とした6地震の諸元を表1に示す。地震観測は、加速度計で行われており長周期領域までS/Nのよい記録は限られ、記録時間も長いものは少ない。比較的Mの大きな浅い地震が選定され、千葉県東方沖地震を除けば、観測点から見て東側の地震がほとんどない結果となった。なお、柏崎では鉛直アレイによる観測が行われているが、本検討では地表付近の記録を用いた。

表1 検討対象地震の諸元

番号	地域または地震名	年/月/日	時間	経度	緯度	震央距離 (km)	M	深さ (km)
1	長野県西部地震	1984/09/14	08:48	137.56	35.82	203	6.8	2
2	新潟県南部沖	1987/03/24	21:49	137.91	37.48	67	5.9	21
3	千葉県東方沖地震	1987/12/17	11:08	140.50	35.37	280	6.7	58
4	新潟県中部	1990/12/07	18:40	138.56	37.21	23	5.3	4
5	能登半島沖地震	1993/02/07	22:27	137.30	37.65	124	6.6	25
6	北海道南西沖地震	1993/07/12	22:17	139.20	42.78	597	7.8	34

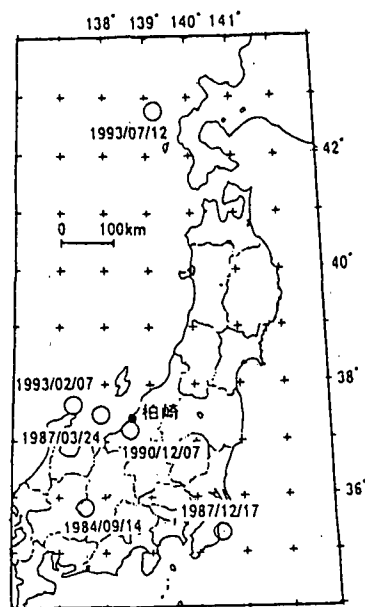


図1 観測点と震央の位置

3. マルチフィルターによる分散解析と群速度の推定

分散性の波動成分を抽出するために、マルチフィルター解析を行った。加速度記録を2回積分して、変位波形を求め、水平成分についてはTR成分とR成分に座標変換した。つぎに、中心周期を1秒から15秒まで変化させて、狭帯域のバンドパスフィルターをかけ、それぞれについて包絡波形を計算した。

図2には長野県西部地震のTR成分の結果を示す。図中の●は分散性を示す一連の波群の最大値または極大値の発生時刻を示している。周期2.5秒から15秒の帯域で滑らかに発生時刻が変化しており、ラブ波の分散を示していると解釈できる。さらに、最大値を示す時刻から群遅延時間を求め、震央と柏崎観測点の間の平均的な群速度を求めた。同様の操作を上下成分またはR成分についても行い、レイリー波の群速度も求めた。さらに、他の地震記録についても同様の解析を行った。

以上のようにして得られたラブ波およびレイリー波の群速度を図3、4にまとめて示す。周期5秒以下の帯域では、新潟県南部から能登半島に震央を有する地震によるラブ波の群速度がその他の地域の地震に対する群速度より小さくなっている。この傾向はレイリー波についても認められる。このことはこの地域で厚い堆積層が存在していることを示唆している。

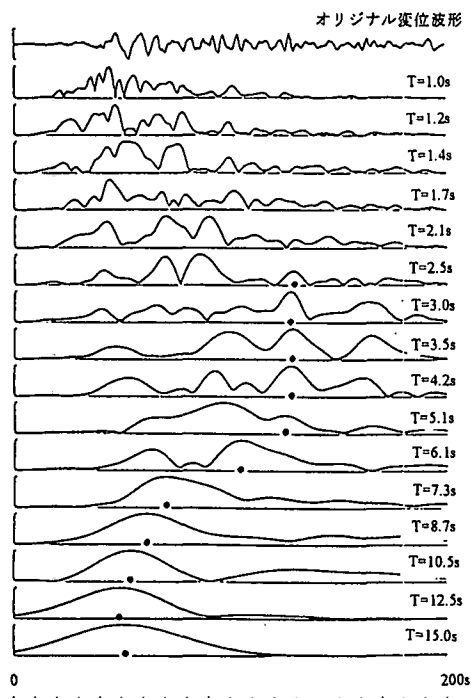


図2 長野県西部地震のTR成分マルチフィルター解析結果

4. 群速度の逆解析

各地震記録から得られた群速度の逆解析を行い、平均的地下構造の推定を行う。逆解析では水平成層を仮定して、遺伝的アルゴリズムに基づく方法〔山中・石田 (1995)〕を用いる。最適にすべき目的関数としては、ラブ波とレイリー波の両者の群速度について観測値と計算値の差の2乗和 (misfit) とした。なお、群速度の理論値としては基本モードを仮定した。

逆解析では、P波・S波速度および密度を植竹 (1992) による値に固定して、各層の厚さのみを変化させて最適な地下構造モデルを探索する。表2には、仮定したパラメータや層厚の探索範囲が示されている。ここでは、植竹 (1992) の4層モデルの下にS波速度 3.8km/s を仮定した。また、遺伝的アルゴリズムに用いたパラメータは、総個体数 20、交差確率 0.9、突然変異確率 0.03、世代更新数 100 である。乱数の初期値を変えて 10 回、計算を行い、その平均値を最終的な逆解析結果とした。

逆解析の例として、長野県西部地震による群速度に対する結果について述べる。図5は misfit の世代更新に伴う変化を示している。初めの数世代で、misfit は急激に小さくなり、ほぼ 20 世代で一定値に収束している。観測値と逆解析による地下構造モデルに対する計

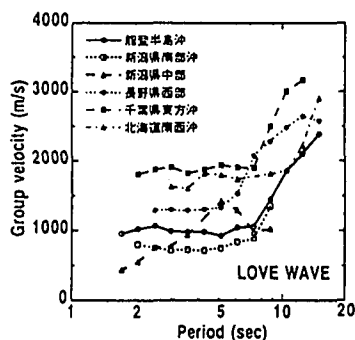


図3 ラブ波の群速度

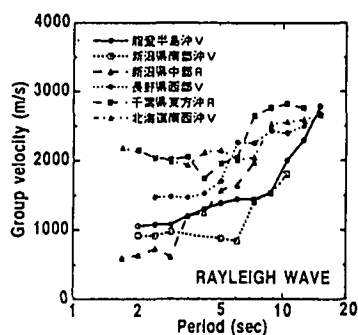


図4 レーリー波の群速度

表2 地盤モデルと探索範囲

Vp(km/s)	Vs(km/s)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	H(km)
2.2	0.9	2.0	0.01-1.0
3.1	1.6	2.2	0.01-3.0
4.0	2.2	2.5	0.5 -6.0
6.0	3.4	2.7	10.0
6.8	3.8	2.9	∞

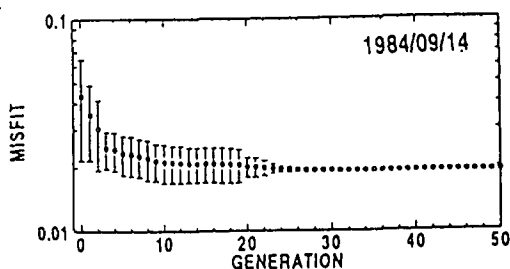


図5 misfit の変化

算値の比較を図6に示す。一部の周期帯域で多少計算値と観測値にずれが見られるが、全体的な分散特性の傾向は逆解析モデルによって説明できている。

逆解析から得られた地下構造モデルを図7に示す。図には、その他の地震による群速度の逆解析から得られた地下構造モデルも示されている。新潟県南部から能登半島に震央を有する地震に対しては堆積層が厚くなっている。とくに、富山トラフ北部に震央がある新潟県南部沖地震に対して得られた地下構造モデルでは、新潟県中部地震や能登半島沖地震に比べて、堆積層がより厚くなっていることがわかる。この結果は重力異常[河野・古瀬(1989)]や釜田・他(1994)が能登半島沖地震の気象庁記録を対象に解析した結果と調和的である。また、観測点から長野県西部地震の震央に向かう方向ではIKAMI et al.(1987)による地下構造モデルがあるが、今回の結果は、そのモデルに対し、ほぼ平均的なモデルとなっている。

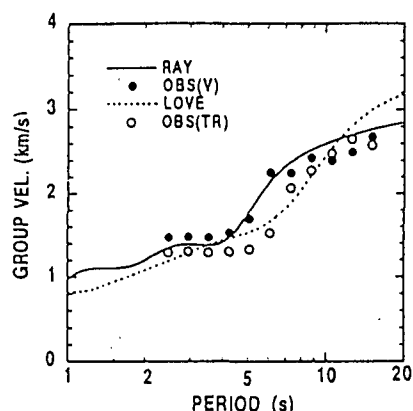


図6 長野県西部地震による群速度の観測値と理論値の比較

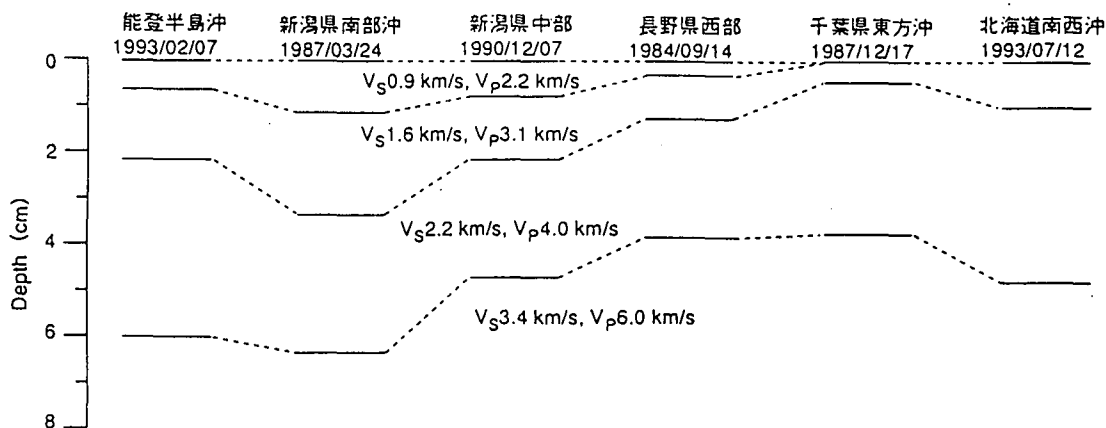


図7 群速度の逆解析から得られた地下構造モデル

5. 波形のシミュレーション

次に、得られた地盤構造モデルと既往の断層モデルを用い、正規モード法を用いて波形の再現を試みた。長野県西部地震に対する計算結果を記録とともに図8(変位波形)及び図9(速度応答スペクトル)に示す。なお、震源断層のモデルはTAKEO and MIKAMI(1987)によるものをそのまま用いている。波形に関しては、位相関係はよく一致しているものの最大振幅はUD成分では計算結果が大きいく、R及びTR成分では小さめとなっている。応答スペクトルに関してはR成分は比較的良好に一致しているが、TR成分では計算結果が小さめ、UD成分では大きめの評価となっている。他の記録に対しても、位相に比べ振幅の再現性は低い結果となった。震源モデルを見直すことに振幅の再現性は上がると考えられるが、植竹(1995)が指摘しているように複雑な地下構造を平行成層で近似する限界にも注意する必要がある。

6. まとめ

新潟県柏崎における地震動記録のやや長周期成分から震央と観測点の間の平均的な地下構造を評価した。求められた地下構造は、地質構造や重力異常とよい対応を示しており、大局的な地下構造の変化をとらえていると考えられる。

また、得られた平均的な地下構造と既往の断層モデルを用いて地震記録の再現を試みた。振幅に関しては満足行かない部分もあるが、位相関係については良い対応を示す結果となった。

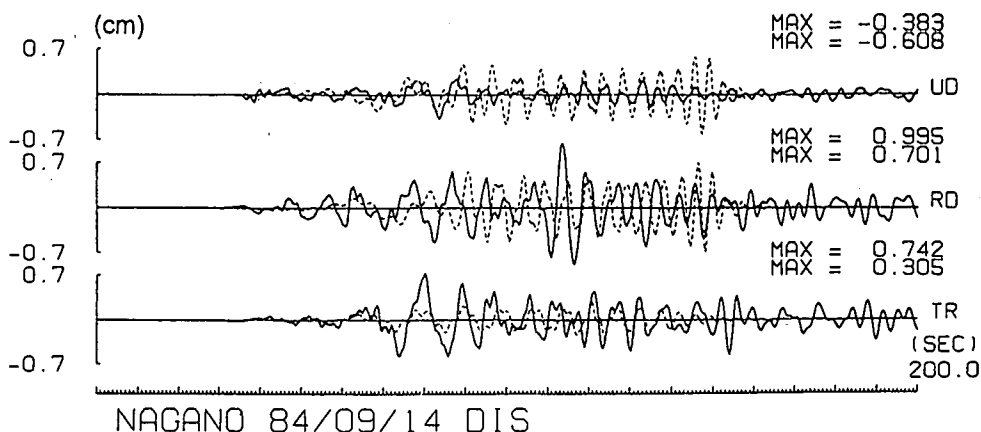


図8 長野県西部地震の観測記録と計算結果の比較（変位波形，実線：記録，破線：計算）

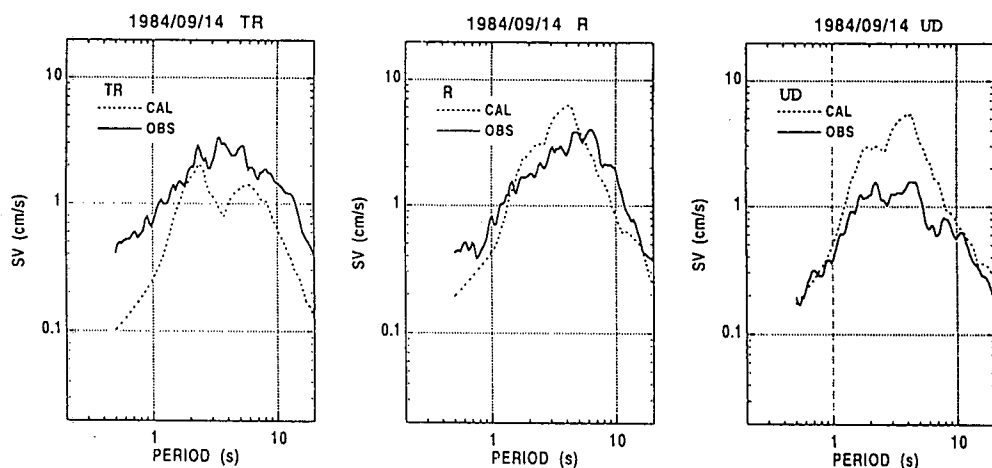


図9 長野県西部地震の観測記録と計算結果の比較（速度応答スペクトル）

[参考文献]

- IKAMI et al., 1986, A seismic-refraction profile in and around Nagano Prefecture, Japan, *J. Phys. Earth*, 34, 457-474.
- 釜田・他, 1994, 1993年能登半島沖地震により発生したやや長周期地震動のシミュレーション, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, 541-546.
- 河野・古瀬, 1989, 日本列島重力異常図, 東京大学出版会.
- 工藤・坂上, 1984, 1983年日本海中部地震による石油タンクの被害と地震動の特徴について—新潟における石油溢流の問題点—, 地震研 集報, 59, 361-382.
- TAKEO and MIKAMI, 1987, Inversion of strong motion seismograms for the source process of the Naganoken-Seibu earthquake of 1984, *Tectonophysics*, 144, 271-285.
- 植竹, 1992, 新潟県南部の浅発地震によるやや長周期地震動の解析, 地震2, 45, 317-325.
- 植竹, 1995, 新潟県南部の浅発地震により励起された表面波について, 地震2, 48, 印刷中.
- 山中・石田, 1995, 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 468, 1-9.
- 横山・他, 1990, 新潟におけるやや長周期地震動と堆積盆地地形の関係 その1 1983年日本海中部地震の伝播経路の検討と表面波の識別, 構造工学論文集, 36A, 757-770.