

論文内容の要旨

論文題目

Three-dimensional P- and S- wave velocity structures in the Backbone Range of Tohoku, northeast Japan, by a travel time inversion method with spatial correlation of velocities

(速度に空間的相関を持たせた走時インバージョン法による東北脊梁山地の3次元P波,S波速度構造)

氏名 松原 誠

1. はじめに

東北脊梁山地は、東西圧縮場の典型的な島弧に位置し、脊梁山地を挟む形で活断層が存在し、活断層に関連する内陸大地震も発生している。これまで、東北地方の地殻構造について、屈折法探査による2次元構造 (Iwasaki *et al.*, 2001) や、トモグラフィー法 (Zhao *et al.*, 1992) による3次元構造 (中島他, 2001) が提示されている。しかし、これまでの地殻構造推定のトモグラフィー法は、グリッド配置の影響で実際の構造を反映していない場合があった。また、活断層に挟まれた領域について、10 km 程度の詳細な構造は求められていない。

そこで、本研究では、データのもつ解像力を最大限に引き出して、最も高分解能な構造を求めるトモグラフィーの手法を開発し、その手法を用いて東北脊梁山地の下、特に千屋・北上低地帯西縁断層の二つの活断層に挟まれた領域の3次元P波・S波速度構造を明らかにし、速度不均質構造と活断層の深部構造・微小地震活動との関係を解明することを目的とした。

2. 観測・データ

詳細な構造を知るためには観測点を密に配置した観測を行う必要があった。そこで、1997-1999年に東北脊梁山地では、広域テレメーター観測・オフライン稠密微小地震観測・屈折法地震探査・反射法地震探査が行われた。私は、オフライン観測について、観測点配

置の決定からデータ処理・解析まで携わり，広域テレメーター観測にも参加した．これらの観測で得られた自然地震の地震波の到達時刻のデータと，屈折法地震探査で得られた人工地震からの走時データをインバージョンに使用した．

3. 解析手法

詳細な構造を反映したモデルを得るためには，グリッドを細かく配置することが望ましいが，その場合，未知数が増えて *underdetermined* になる．そこで，相関距離 (L_c) 内のグリッド間の速度に相関を導入して，これを解消した．

未知数は，震源座標と各グリッドでの *slowness* とした．さらに，データの分散，*slowness* の分散共分散，相関距離を与え，最尤法によって解を推定し，*slowness* を求めた．速度分布に空間的相関を持たせるために，重み行列 ($C_s^{-1/2}$) を次のように設定した．

$$C_s^{-1/2} = E_0 + E_2$$

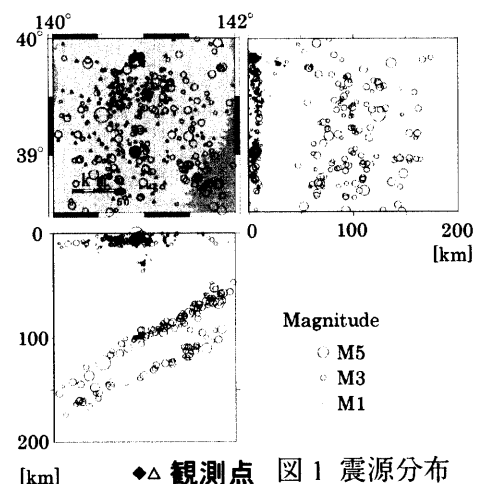
$$E_0 = \begin{cases} 1 & [i = j] \\ \sigma_{ij} & [i = j] \\ 0 & [i \neq j] \end{cases}$$

$$E_2 = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2}{L_c^2}\right\} & |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| \leq 2L_c \\ 0 & |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| > 2L_c \end{cases}$$

ここで， \mathbf{x}_i は i 番目のグリッド座標， σ_{ij} は初期値から許容される *slowness* パターバージョン， σ は隣接するグリッド間の *slowness* パターバージョンの許容される差を示している．数値実験の結果，構造の不均質の波長 L_h に対し，グリッド間隔 (L_g) と L_c が， $L_g \leq (1/4)L_h$ ， $L_c \leq (1/8)L_h$ の場合に，データを最大限に生かした構造を求められることが分かった．今回の観測では，観測点密度が異なる領域が存在するため，新しい手法では観測点密度に応じたグリッド配置を設定できるようにした．

4. 東北脊梁山地の速度構造解析

東北の観測で得られたデータに，新たな解析手法を適用した．広域テレメーター観測と微小地震観測により得られた 706 個の自然地震 (図 1) と 50 個の発破からの 33,993 個の P 波，18,483 個の S 波の走時データを用い，インバージョンを行った．グリッド間隔と相関距離は表 1 に示すとおりである．



	グリッド間隔 (水平/鉛直)	相関距離 (水平/鉛直)
上部地殻 (広域)	5 km/2.5-5 km	7.5 km/1.25-2.5 km
上部地殻 (脊梁部)	2.5 km/2.5-5 km	2.5 km/1.25-5 km
下部地殻	10 km/7 km	5 km/3.5 km

表 1 グリッド間隔と相関距離

5. 結果

チェッカーボードテストの結果、上部地殻では、20-60 km の波長の不均質構造まで信頼できることが分った。大局的に見ると、表層では、北上低地帯、横手盆地、秋田平野、仙北平野、栗駒山などの火山の付近で低速度になっている。上部地殻では、脊梁山地から西にかけての領域では低速度であり、北上山地の下では高速度になっている。下部地殻では、北上低地帯の下では高速度であるが、脊梁山地では低速度になっている。断層に挟まれた領域に着目すると、表層では千屋・川舟断層のトレース付近では、P 波速度が 10% 程度遅くなっている。脊梁山地の下では、東西の幅 7-15 km, 南北 18 km 程度の領域の P 波速度が 6-8% 遅くなっていることが分った。また、活断層に挟まれた脊梁山地の下の構造は、東傾斜の構造が卓越している (図 2 (a))。

19 回の繰り返し結果、残差は、自然地震の P 波は 0.343 秒から 0.186 秒、S 波は 0.441 秒から 0.280 秒、人工地震の P 波走時は 0.503 秒から 0.158 秒へと 30-70 % 程度減少した。

6. 議論

脊梁山地を挟む断層について、反射法地震探査による断層面が得られている (平田他, 1999)。東傾斜の構造が卓越しているトモグラフィーの結果は、千屋断層との調和はよいが、北上低地西縁断層とは斜交している。

本研究で求められた微小地震は、千屋断層の断層帯の近傍下部付近と北上低地西縁断層の断層帯の下に分布している。これらの地震の発震機構は、千屋断層の断層帯付近の微小地震については、逆断層型であり、震源の位置も断層帯の近くにある。一方、北上低地帯西縁断層の下の微小地震は、down-dip compression 型である。千屋断層の変位速度は 0.8-1.0 mm/年であるのに対し、北上低地帯西縁断層帯の変位速度は 0.2 mm/年である (Nakata, 1976)。このことから、変位速度の大きな断層については、断層と調和的なメカニズムの微小地震がより発生しやすいと考えられる。

北上低地帯西縁断層の深部延長の低速度領域は、MT 法から求められた低比抵抗の領域 (Ogawa et al., 2001) と調和的である。この領域を構成する岩石を、一般的に上部地殻を主に構成する花崗岩と考えると、熱のみにより周囲に比べ 6-8% 程度低速度になるためには、 600° 以上必要である。しかし、火山が存在しない場所では、それほど高温とは考えにくい。一方、この領域の V_p/V_s 比は 1.65-1.70 であり、花崗岩 (1.70) とほぼ同じか小さい。従って、岩石のメルトの存在する可能性は低い。以上より、この領域の低速度は水に起因すると考えられる。Takei (2001) によりまとめられた $d \ln V_s / d \ln V_p$ に対するポアの形状・流体物性の相対的寄与、およびポアの形状を与えたもとでの $-d \ln V_s / d \phi$ (ϕ は流体の占める体積の割合) の値を用いて、本研究で求められた P 波・S 波速度の低速度の割合を考慮すると、2-8% 程度の流体 (水) がこの領域に存在することが示唆される。

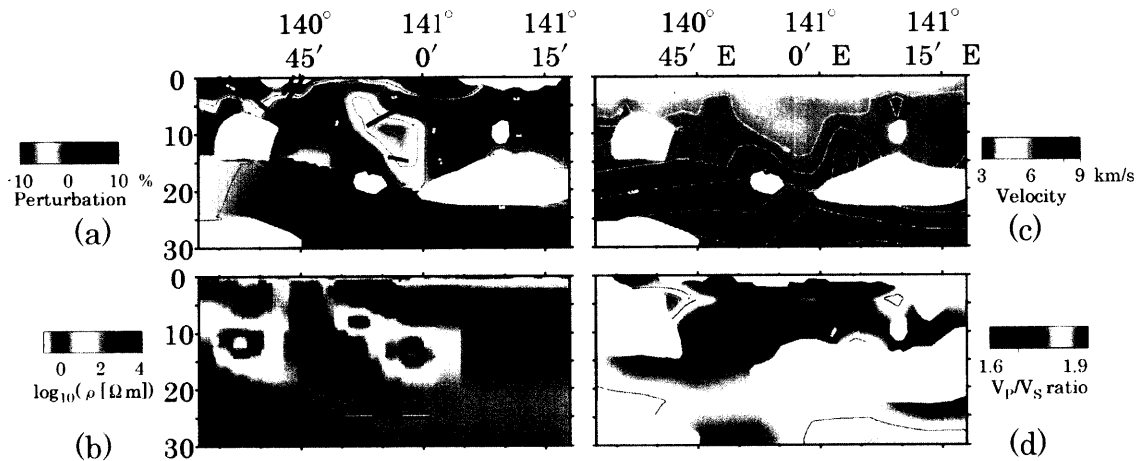


図2 新しいトモグラフィー法で得られた東北脊梁山地の東西断面図. (a) P波速度のパーターベーションと活断層 (平田他,1999), (b) 比抵抗分布 (Ogawa *et al.*, 2001), (c) P波速度, (d) V_p/V_s 比. 白い部分は信頼できない領域.

7.結論・まとめ

データを最大限生かしたトモグラフィー法を開発した. 最適な解を求めるためには, グリッド間隔や相関距離について考慮が必要である. 相関距離は再現できる構造の不均質の波長の 1/8 程度がよい.

活断層に挟まれた東北脊梁山地の詳細な速度構造を求めるために, 東北脊梁山地において多くの観測を行った. 観測された地震からのP波・S波の到達時刻データを用い, 本研究で開発した新しい手法により, これまでより詳細な構造モデルを得ることができた. 波長 20 km 程度の構造では, 上部地殻は東傾斜の構造が卓越している. この構造は, 千屋断層とは調和的であるが, 北上低地帯西縁断層とは斜交している. 脊梁山地の下には低速度領域が存在し, 低比抵抗の領域と調和的である. V_p/V_s 比を考慮すると, この領域には 2-8% 程度の水が存在することが考えられる.