

平成22年5月18日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760568  
 研究課題名 (和文) 地震探査による弾性波速度構造から岩石モデルを使って地下応力を推定する手法の開発  
 研究課題名 (英文) Development of a method to estimate underground stress state using rock physics theory  
 研究代表者  
 辻 健 (TSUJI TAKESHI)  
 京都大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号：60455491

## 研究成果の概要 (和文)：

地下の水圧や応力を推定することは、掘削事故の防止、地下空間の開発、活断層のモニタリング、地震発生機構の解明といった幅広い分野において重要である。本研究では、地下応力を敏感に反映するとされるポアソン比 (P波速度とS波速度の比) を、海底地震計のデータから推定する手法を開発した。また推定した弾性波速度情報に対して、岩石物理モデルを適用することで、地下の応力と水圧を推定した。さらに主応力方向やフラクチャーの方向を調べるために、S波の波形情報を用いる手法を提案した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Prediction of pore pressure as well as effective stress is important to avoid drilling disaster, construct subsurface structure and monitor seismogenic faults. To predict pore pressure and effective stress, we estimate Poisson's ratio (or  $V_p/V_s$  ratio) from ocean bottom seismometer data using a newly-developed method. Poisson's ratio is strongly dependent on underground stress state. From the estimated seismic velocities, we predict effective stress and pore pressure using rock physics theory. Furthermore, we use S-wave characteristics in order to estimate principal stress direction and fracture alignment.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：地球・資源システム工学

科研費の分科・細目：総合工学 ・ 地球・資源システム工学

キーワード：地下応力, 地震波速度, S波偏向異方性, 固体地球物理学, 地盤工学, 海洋探査, 海洋資源, 資源開発工学

## 1. 研究開始当初の背景

地震断層のモニタリングや掘削事故の防止といった幅広い分野において、地下の応力や間隙水圧を推定することが重要であることは認識されているが、それらを定量的かつ空間的に推定する手法は確立されていない。間隙水圧は、P波速度を用いて推定されることが多いが、その限られた入力データから地下の応力を推定することは困難なことが多い。一方でS波速度は、間隙水圧や応力を、強く反映することが知られている。しかしS波速度を推定する解析は、P波速度の推定に比べて非常に複雑である。さらに実験室測定では速度と応力の関係を議論した研究が進んでいるにもかかわらず、地震探査データのS波速度を用いて応力を定量的に議論した研究例は少ない。そこでS波の情報（例えば $V_p/V_s$ や異方性）を抽出し、地下の応力状態を推定する手法の開発が求められている。

## 2. 研究の目的

地下応力の推定は、掘削事故の防止、地下空間の開発、活断層の評価、地震メカニズムの解明といった幅広い分野において重要な研究課題である。地震探査データの解析ではP波速度構造を求めるのが一般的であるが、P波速度に加えてS波速度を求めると弾性定数を推定できるため、地下応力を推定する上で定量的な情報が得られる。さらにS波速度の異方性からは、差応力の推定も可能となる。

本研究では、まずP波速度とS波速度の比( $V_p/V_s$ )を、海底地震計(OBS)のデータから推定する手法を開発する。そしてOBSデータから推定された弾性波速度に対して岩石物理モデルを適用し、地下の有効応力と間隙水圧を推定することを試みる。さらにS波の異方性情報を用いて、差応力やフラクチャーの配列方向を推定する。

熊野沖南海トラフにおいて、反射法地震探査(MCS)データ、OBSデータ、掘削データが精力的に取得されていることから、熊野沖の付加体内部を解析の対象とする(図1)。地震断層周辺の間隙水圧は、有効応力を低下させるため、地震核の分布と関係していると考えられている。また差応力は断層の不安定性と関係する。つまり、付加体内の応力分布は地震発生帯を議論する上で鍵となるパラメータであり、その解明が待たれている。

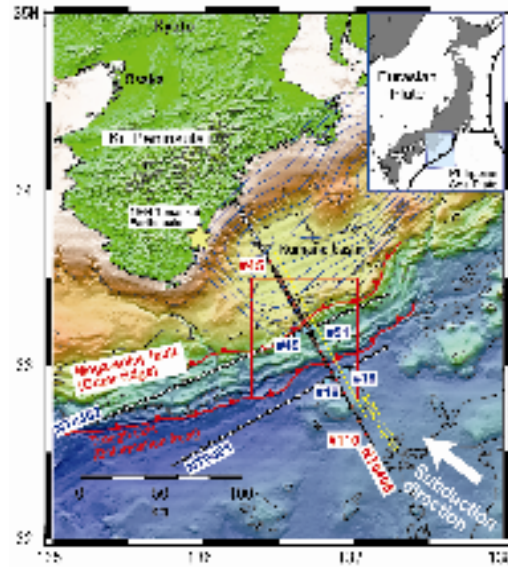


図1. 熊野沖南海トラフの海底地形図と測線図。赤丸と青丸が、本研究で用いたOBSの位置を示している。

## 3. 研究の方法

海底の有効応力と間隙水圧を推定するために、(1)OBSデータから間隙水圧を強く反映するとされる $V_p/V_s$ (ポアソン比)を推定する手法の開発、(2)主応力やフラクチャーの走向に依存するとされるS波異方性の推定、(3)P波速度とS波速度を統合して有効応力と間隙水圧を推定する研究を実施した。

### (1) $V_p/V_s$

P屈折波とPPS屈折波の走時差を利用することで、トラフ軸より海側から地震発生帯にかけて連続的に付加体内部(海洋性地殻より上に存在する堆積物内)の $V_p/V_s$ を推定した。 $V_p/V_s$ が分かれば、既に推定されているP波速度から、S波速度を推定することができる。また、この解析によって得られる $V_p/V_s$ は、トラフ軸より海側の未固結堆積物が、付加作用によって固着が促進し、さらに地震断層周辺で異常間隙水圧が存在する(クラックが発達する)という岩石の一連の進化を示していると考えられる。

一般的にS波速度の解析は、PS変換した反射波を用いて行われることが多いが、各層準からのPS変換反射波が不明瞭であることや、S波速度構造が孔井の情報によって決定されていないことから、本研究では正確に走時を決定できる(明瞭に波形を確認できる)PPS変換屈折波に注目した(図2, 図3)。PPS変換屈折波は、P波屈折波と平行して同定できることから、クロスコリレーションによって容易に走時差を決定することができた。

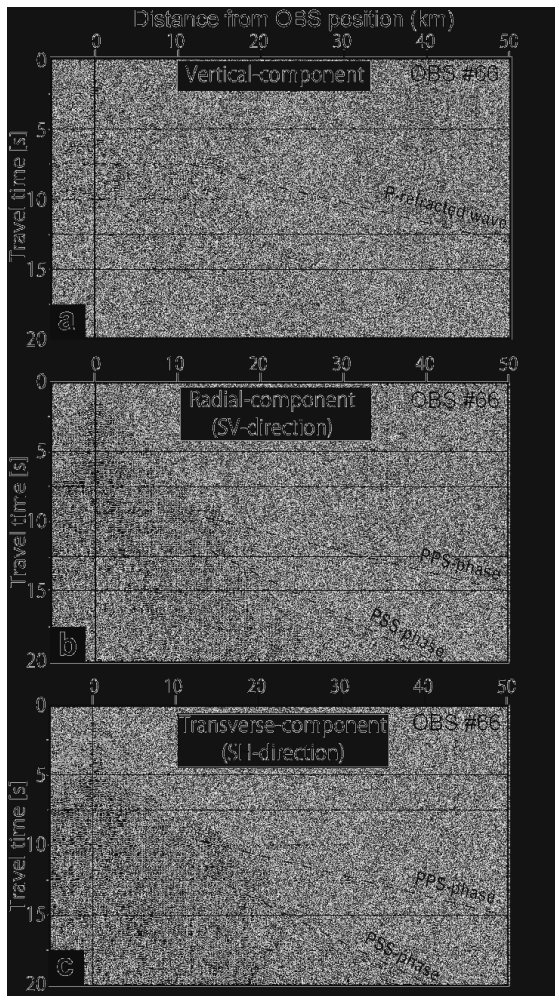


図2. OBSの受振記録、P屈折波に平行してPPS屈折波を確認することができる。

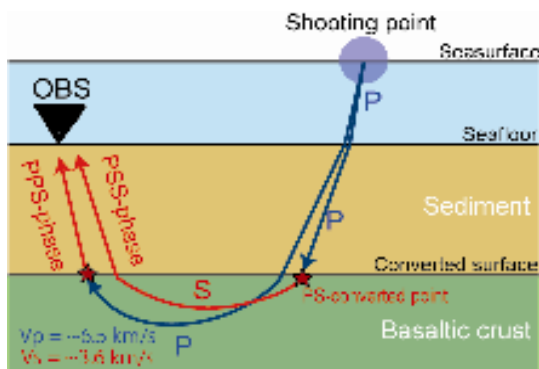


図3. PPS屈折波とPSS屈折波

#### (2) S波異方性

主応力(差応力)やフラクチャー分布の推定には、弾性波速度異方性を用いる手法がある。本研究ではOBS受振記録において、PPS屈折波とPSS屈折波のParticle-motionや、SV波とSH波の走時差から、PPS変換面より上位層のS波異方性を推定した。

本研究では、S波振動面で走時の速い方向(S-wave polarization direction)を決定することが難しかったため、S波振動面での(PPS屈折波の)振幅を足し合わせたものを異方性の指標に用いた。ここで推定したS波の振幅異方性は、散乱に伴って生じたと解釈でき、一般的なS波スプリッティング(速度異方性)とは異なると考えられる(4.研究成果を参照)。しかし振幅異方性も、海底下の断層やフラクチャーの走向を示すと考えられる。またフラクチャーが存在しない条件では、水平主応力方向にクラックが配列すると考えると、振幅異方性は水平主応力を示すことになる。

#### (3) P波速度とS波速度から地下応力を定量的に推定

三次元反射法地震探査データから推定されたP波速度と、OBSデータから推定された $V_p/V_s$ を用いて、付加体内部の応力と間隙水圧を推定した。以前の我々の研究では、P波速度からクラックモデルを用いて、間隙水圧を推定していた。しかしP波速度に加えてS波速度を用いることで、弾性定数を個々に決めることが可能になるため、P波速度だけを用いて推定された結果よりも精度が向上したと考えられる。さらに、P波速度の精度を向上させるため、OBSデータに波形インバージョンを適用した。

### 4. 研究成果

#### (1) $V_p/V_s$

南海トラフ付加体で取得されたOBSデータ(図1)に対して、 $V_p/V_s$ を抽出する解析を適用した結果、トラフ軸(変形フロント)において $V_p/V_s$ が大きく変化することが分かった。これは付加作用に伴う堆積物の圧密を表していると考えられる。さらにトラフ軸から地震性分岐断層に近づくにつれて、 $V_p/V_s$ が増加している。間隙水圧が高くなるとクラック(やわらかい間隙)が増加し $V_p/V_s$ が上昇することが知られており、この $V_p/V_s$ の増加は地震性分岐断層の下盤側に存在する高間隙水圧を示している可能性がある。

本研究で開発した手法は、PS変換波(反射波)の同定が困難な場所でも、 $V_p/V_s$ を精度良く推定することができると考えられる。既に取得されているOBSデータに対して、本手法を適用すれば、広い範囲の $V_p/V_s$ を比較的容易に推定できると考えられる。

#### (2) S波異方性

S波振幅異方性の結果から、地震性分岐断層を境界として、変換波のエネルギーの卓越する方向が大きく変化することが明らかとなった。地震性分岐断層の海側では断層の走向に垂直な方向(測線に平行な方向; Radial成分)に主振幅軸が存在しているが、陸側では断層の走向に平行な方向(測線に垂直な方向; Transverse方向)に主振幅軸が存在して

いる。また Radial 方向 (SV 波) と Transverse 方向 (SH 波) の走時差 (S 波スプリッティング) も、地震性分岐断層を境界として変化しており、振幅異方性の傾向と整合的であった。

本研究で推定した S 波振幅異方性は、散乱に伴って生じたと考えられる。震源からの波は Radial 成分 (SV 波) しか持たないにも関わらず Transverse 成分 (SH 波) が増えてくることから、異方性を引き起こすクラックに対して入射した波の振動方向が乱される現象を見ていると考えられる。つまりクラックに波が入射すると、クラックによって波のエネルギーがトラップされ、そのあとクラックを震源とした波が放出されるような現象が生じる。これが様々なクラックで生じ、入射してきた波の Radial 成分のエネルギーが失われ、Transverse 成分が増えたと考えられる。

本研究で推定した異方性は、断層の開口や地下応力に関係していると考えられる。そのため本手法を用いれば、比較的簡単な方法で、地震性分岐断層のモニタリングを行うことができる可能性がある。

(3) P 波速度と S 波速度から地下応力を定量的に推定

P 波速度と S 波速度を用いて、付加体内部の間隙水圧を推定した結果、分岐断層の下盤側で異常高間隙水圧状態であることが推測できた。さらに P 波速度の精度を高めるため、波形インバージョンを OBS データに適用した結果、地震性分岐断層下盤側に存在する低速度異常帯 (異常間隙水圧帯) が、これまで考えられていた場所より海側まで伸びていることが分かった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① Tsuji, T., H. Yamaguchi, T. Ishii, and T. Matsuoka (2010), Mineral Classification from Quantitative X-ray Maps using Neural Network: Application to Volcanic Rocks, Island Arc, 19, 105-119. 査読有
- ② Tsuji, T., K. Yamamoto, T. Matsuoka, Y. Yamada, K. Onishi, A. Bahar, I. Meilano, and H.Z. Abidin (2009), Earthquake Fault of the 26 May 2006 Yogyakarta Earthquake Observed by SAR Interferometry, Earth Planets Space (E-letter), 61, e29-e32. 査読有
- ③ Tsuji, T., J-O. Park, G. Moore, S. Kodaira, Y. Fukao, S. Kuramoto, and N. Bangs (2009), Intraoceanic Thrusts in the Nankai Trough off the Kii Peninsula: Implications for Intraplate Earthquakes, Geophys. Res. Lett., 36, L06303, doi:10.1029 /2008GL036974. 査読有

- ④ Tsuji, T., H. Tokuyama, P. Costa Pisani, and G. Moore (2008), Effective stress and pore pressure in the Nankai accretionary prism off the Muroto Peninsula, southwestern Japan, J. Geophys. Res., 113, B11401, doi:10.1029/2007JB005002. 査読有

[学会発表] (計 49 件)

- ① Tsuji, T., S. Kodaira, J. Park, J. Ashi, Y. Fukao, G.F. Moore, and T. Matsuoka (2009), Tectonic Significance of Intraoceanic Thrusts in the Nankai Trough, Eos, Vol. 90, Number 52, 29 December 2009, Fall Meet. Suppl., Abstract T21C-1828, San Francisco, 2009. 12/15.
- ② Tsuji, T., G. Fujie, A. Nakanishi, S. Kodaira and T. Matsuoka (2009), Shear-wave velocity and splitting within the Nankai accretionary prism off the Kii Peninsula: Insight into effective stress and pore pressure distribution, The 9th SEGJ International Symposium, Hokkaido University, 2009. 10/12.
- ③ 辻 健, 伊藤喜宏, 藤本博巳, 木戸元之, 芦寿一郎, YK08-06 乗船研究者 (2008), 反射法地震探査および「しんかい 6500」による観察から推定される日本海溝陸側斜面内断層, 日本地質学会第 115 回学術大会, 秋田大学, 2008. 9/21

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

辻 健 (TSUJI TAKESHI)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 60455491