

平成22年 5月21日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19540434

研究課題名（和文） 地震波による断層面の不均質性の解明に向けた理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical study to estimate heterogeneity on a fault by seismic waves

研究代表者

村井 芳夫 (MURAI YOSHIO)

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：40301931

研究成果の概要（和文）：大地震の断層として断層破碎帯を想定し、断層破碎帯として数種類のモデルを仮定し、断層破碎帯中に震源を置いて破碎帯中の多数の観測点での地震波形と振幅スペクトルを理論的に計算し、モデルパラメーター依存性を調べた。この結果を1992年 Landers 地震の断層破碎帯で得られたデータに適用すると、破碎帯の幅が約250m、卓越する亀裂長が約60m、亀裂の分布密度が  $\nu a^2=0.12$  と求められた。ここで、 $\nu$  は亀裂の数密度、 $a$  は亀裂長の半分である。

研究成果の概要（英文）：Major crustal faults form fault zones. We assume several models as a fault zone and compute synthetic seismograms of the displacement field radiated from a seismic source embedded in a fault zone. The amplitude spectra depend on the fault zone structure. The width of the fault zone of the 1992 Landers earthquake is estimated to be about 250m. The dominant length and density of the cracks distributed in the fault zone are estimated to be about 60m and  $\nu a^2=0.12$ , where  $\nu$  and  $a$  are number density and half length of cracks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：断層破碎帯、亀裂、散乱、異方性、低速度層、トラップ波、理論地震波形、地震波スペクトル

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、大地震の震源過程の研究から、断層の詳細な破壊過程が明らかになり、大地震時の断層運動は空間的に一様ではなく、断層運動の変位が大きい領域（アスペリティー）は、歴史的に繰り返し破壊していることがわかってきた。これは、断層面上の摩擦構成則が空間的に不均質であることが原因だが、その不均質の実体が何であるのかについては、未だに解明されていない。

(2) 実験室における模擬断層を用いたすべり実験によると、地震に対応する不安定すべりの前には前兆すべりが生じ、断層面間の固着度が低下することがわかった。このような断層面上の状態変化が、地震波によって実際の地震断層で検知できれば、地震発生予測に対して有用である。

## 2. 研究の目的

(1) 背景(1)に対して、理論的研究を通して、どのような地震観測を行い、どのようにデータを解析すれば、断層面の不均質性の実体を知ることができるか考察し、最終的には実際のデータを使って断層面の不均質性の実体を解き明かすことを目的とする。

(2) 背景(2)に対して、理論的研究を通して、断層破碎帯の内部構造のモニタリングにとって何が重要な観測量であるか明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

大地震の断層として断層破碎帯を想定し、断層破碎帯の微細構造としては、水や軟らかい含水鉱物あるいは断層ガウジが存在し薄い低速度層を形成している場合、断層面に配向した微小な亀裂群が分布し速度異方性をもつ薄い層が存在している場合、断層運動が繰り返されたことによって帯状の領域に亀裂が非常に密に分布している場合、および以上のモデルが組み合わさった場合を考える。以上のモデルに対して、断層破碎帯の中心に等方な線震源を仮定し、破碎帯のほぼ中心に置かれた観測点での理論地震波形と振幅スペクトルを計算し、断層破碎帯のモデルパラメーター依存性を調べる。このうち、平行で同じ長さの亀裂が周期的に分布する低速度層としてモデル化する場合には、速度構造と亀裂分布密度が同じでも、多数のモデルで多数の観測点に対して理論地震波形の計算を行い、モデルのサンプルや観測点によるばらつきを統計的に調べる。

## 4. 研究成果

(1) 二次元媒質中のS波を仮定し、断層破碎帯として以下のモデルを考える。① 平行で同じ長さ $2a$ の亀裂が周期的に分布する帯状の領域。② ①の亀裂分布は長波長極限では等価な異方性媒質と見なせるので、①の亀裂分布と等価な異方性を持つ帯状の領域。③ 帯状の低速度層。④ 低速度に加え①の亀裂分布と等価な異方性を持つ帯状の領域。⑤ 平行で同じ長さ $2a$ の亀裂が周期的に分布する低速度層。

以上のモデルに対して、断層破碎帯の中心に等方な線震源を仮定し、破碎帯のほぼ中心に観測点を置く（図1）。図1の例では、星印が震源、三角印が観測点をそれぞれ表す。網掛け領域は、モデル①では周囲と同じ媒質、モデル②では異方性媒質、モデル③と⑤では低速度層、モデル④では低速度で異方性を持つ層をそれぞれ表す。モデル①と⑤では長さ $2a$ の亀裂が周期的に分布する。

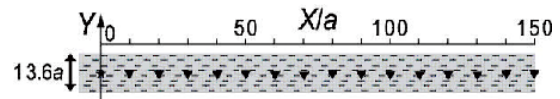


図1 断層破碎帯のモデルの例

モデル①で、亀裂の数密度を $\nu$ とすると、亀裂分布密度が高い時（ $\nu a^2=0.1$ ）でも、断層トラップ波は生じなかった。入射波の半波長が亀裂長より短い時には、震源に近い観測点では亀裂からの散乱波が後続波として現れるが、遠い観測点での散乱波は微弱だった。モデル②では、断層トラップ波は生じず、散乱波も発生しなかった。したがってトラップ波を生成するためには、破碎帯が低速度になっている必要がある。モデル③では、周囲の速度が速い媒質を伝わってきた屈折波が初動として現れ、断層トラップ波が長周期の後続波として生じ、スペクトルを取ると低波数のピークを形成していた。散乱波は発生しなかった。モデル④では、モデル③と同様の特徴を持つ波形になったが、断層トラップ波の部分の低波数のスペクトルのピークが③の場合に比べ二つに分かれた形になった。これは、波の伝わる速さが伝播方向によって変化するため、波の干渉の仕方が変わったためである。モデル⑤では、③の場合の波形の特徴に加え、震源から遠い観測点でも後続波として亀裂からの散乱波が観測された（図2）。図2に示した時間窓(a)に対してスペクトルを取ると、 $k$ を波数として、断層トラップ波に対応した低波数の $ka \sim 0.4$ でのピークに加

え、 $ka \sim 1$  で高波数のピークが現れた (図 3 a)。これは亀裂からの散乱波によるものと考えられるので、後続波の散乱波の部分 (b) でのスペクトルを取ると、 $ka \sim 1$  だけでピークが明瞭に現れた (図 3 b)。このような高周波のスペクトルのピークが実際に観測できれば、ピークが生じる周波数から卓越する亀裂長が求められる。

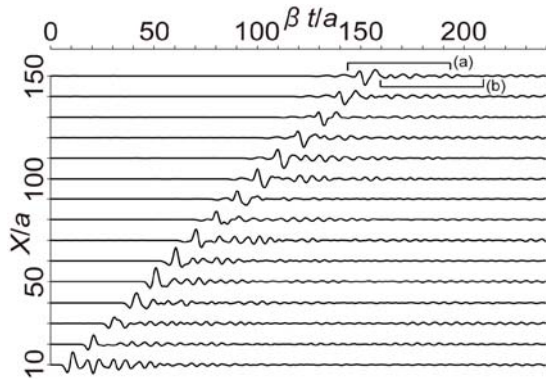


図 2 図 1 のモデル⑤に対して計算された理論地震波形

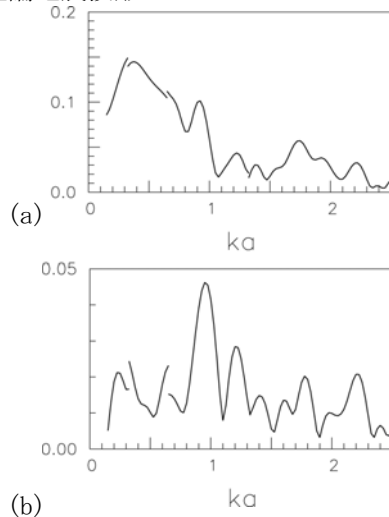


図 3 図 2 の時間窓 (a)、(b) に対する振幅スペクトル

(2) 次に、モデル⑤に対してサンプルや観測点によるばらつきを統計的に調べるため、 $100a \leq X \leq 150a$  に分布する 201 個の観測点で得られたスペクトルの平均値と標準偏差を計算した (図 4)。

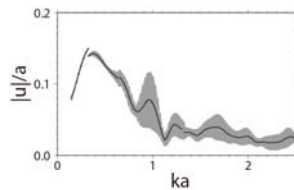


図 4 図 1 のモデル⑤の  $100a \leq X \leq 150a$  に分布する 201 個の観測点で得られた振幅スペクトルの平均値 (実線) と標準偏差 (網掛け部分)

さらに、同じ速度構造 ( $\beta/\beta_0=0.8$ ,  $\beta$  と  $\beta_0$  はそれぞれ断層破碎帯と周囲の  $S$  波速度) と亀裂分布密度 ( $\nu^2=0.1$ ) を持つ計 10 個の断層破碎帯のモデルそれぞれに対してスペクトルを計算し、高波数のスペクトルのピークを読み取って、10 個の亀裂分布モデルに対するスペクトルのピークの平均値と標準偏差を求めた (図 5)。

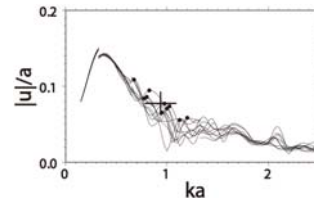


図 5 図 1 のモデル⑤で同じ速度構造と亀裂分布密度を持つ 10 個の断層破碎帯のモデルに対する振幅スペクトル (実線) と高波数のスペクトルのピーク (黒丸) の平均値と標準偏差 (線分)

$\nu^2=0.075$ ,  $0.05$  の場合にもそれぞれ 10 通りの亀裂分布モデルを作成し、それぞれに対して  $\nu^2=0.1$  の場合と同様の計算を行い、それぞれのモデルで 201 個の観測点でのスペクトルの平均値から断層トラップ波に対応した低波数のピークと亀裂からの散乱波による高波数のピークを読み取り、10 個の亀裂分布モデルに対するスペクトルのピークの平均値を求めた。その結果、低波数のピークの平均値は亀裂密度が高いほど振幅が大きくなっていったのに対して、高波数のピークはモデル間のばらつきが大きく、亀裂密度依存性がはっきり表れず平均値はほぼ一定になった。

この結果を 1992 年 Landers 地震の断層破碎帯で得られたデータに適用し、破碎帯中と外側の  $S$  波速度をそれぞれ  $2\text{km/s}$ ,  $3\text{km/s}$  と仮定すると、断層トラップ波のスペクトル形状を説明するモデルの例として、破碎帯の幅が約  $250\text{m}$ 、卓越する亀裂長が約  $60\text{m}$ 、亀裂の数密度が  $\nu^2=0.12$  と求められた。

(3) 断層破碎帯が沈み込む海洋プレート上面のプレート境界に位置していて、そこに地震探査で使われる制御震源から  $P$  波が入射する場合を想定し、1 個の亀裂に  $P$  波の平面波が入射する場合に、亀裂面上の相対変位を計算するプログラムを作成した。

(4) これまでの国内外の研究で、断層破碎帯は断層トラップ波の解析では単に低速度層として、 $S$  波スプリッティングの解析では異方性媒質として扱われてきた。本研究では (1) に書いたように、断層破碎帯の微細構造として、複数の物理モデルを仮定して、それが地震波形や振幅スペクトルにどのような違いとして表れるか明らかにした。一例とし

て、1992年 Landers 地震の断層破砕帯で得られた断層トラップ波の振幅スペクトルが、帯状の領域に亀裂が非常に密に分布している低速度層の場合によく説明されることが示された。このように複数のモデルの組み合わせで実際の観測データを説明した例はなく、これは本研究の独創的な点である。

さらに、(2)では断層トラップ波のデータから卓越する亀裂の長さや分布密度を推定する方法を提案し、1992年 Landers 地震の断層破砕帯でのデータを説明できる値を推定した。このような研究はこれまで国内外で行われたことがなく、本研究は極めて独創的である。

本研究では、亀裂が周期的に分布する場合しか考察できなかったため、今後は現実的なランダムに亀裂が分布する場合の影響を考慮する必要がある。また、断層トラップ波の考察しかできなかったため、反射波など他の地震波の解析、*P-SV*波の観測データの解釈、1992年 Landers 地震の断層破砕帯以外の様々な場所での観測データへの応用を進めていく必要がある。さらに、本研究では断層破砕帯の内部構造を推定する方法の一つを考察したが、この方法を空間的に密に分布する観測点でのデータに用いることによって、断層破砕帯の空間的不均質性の解明も進めていく。

## 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3件)

- ① Yoshio Murai, Wave propagation from a line source embedded in a fault zone containing densely distributed parallel cracks, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 査読無, Vol. 90, 2009, Fall Meet. Suppl., Abstract T43A-2042
- ② Yoshio Murai, Wave propagation from a line source embedded in a fault zone, *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 査読無, Vol. 89, 2008, Fall Meet. Suppl., Abstract T51A-1872
- ③ 村井芳夫, 非常に密に分布する亀裂群から成る断層破砕帯の散乱減衰・速度分散・反射特性, *月刊地球*, 査読無, 第29巻, 2007, pp. 242-246

[学会発表] (計4件)

- ① 村井芳夫, 亀裂が非常に密に分布する断層破砕帯中の線震源からの波動伝播, 日本地震学会 2009年度秋季大会, 2009年10月23日, 京都大学

- ② 村井芳夫, 亀裂が非常に密に分布する断層破砕帯中の線震源からの波動伝播, 平成21年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「リソスフェアの短波長不均質性の時空間変化に関する研究の高度化—物理モデルの構築と稠密地震観測記録の解析をとおして—」, 2009年9月14日, 東京大学地震研究所
- ③ 村井芳夫, 断層破砕帯中の線震源からの波動伝播, 日本地球惑星科学連合 2008年大会, 2008年5月25日, 幕張メッセ国際会議場
- ④ 村井芳夫, 断層破砕帯中の線震源からの波動伝播, 平成19年度東京大学地震研究所共同利用研究集会「リソスフェアにおける短波長不均質構造の解明—地球内部構造と地震発生特性の解明に向けて—」, 2007年9月26日, 東京大学地震研究所

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

村井 芳夫 (MURAI YOSHIO)

北海道大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：40301931