

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540450

研究課題名（和文）

地中断層の微細構造と地震の動的破壊に関する研究

研究課題名（英文）

Detailed Fault Structure and Earthquake Rupture Dynamics

研究代表者

福山 英一 (FUKUYAMA EIICHI)

(独)防災科学技術研究所 地震研究部 総括主任研究員

研究者番号：60360369

研究成果の概要（和文）：

断層を貫くボーリングコアに含まれていた微細な断層構造を解析し、地中に発達する小さな断層の3次元モデルを構築した。得られた断層構造は、スケールは異なるものの、2008年に中国で発生した四川地震の断層構造と類似していたため、地中断層モデルの3次元構造から得られた知見を利用して、四川地震の断層破壊プロセスの解析を行った。その結果、地震後に確認された2つの平行した断層は、地震時に同時にすべったことがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Analyzing a borehole core across the fault zone which includes detailed 3D structure of the fault, we constructed a 3D underground fault model. We found that the obtained fault model is quite similar to that of the 2008 Sichuan, China, earthquake, although their scale is different. Therefore, we investigated the fault rupture process based on the 3D fault structure obtained in the borehole core. We found that during the Sichuan earthquake, the fault rupture propagated simultaneously along two parallel fault segments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	900,000	270,000	1,170,000
平成 20 年度	700,000	210,000	910,000
平成 21 年度	700,000	210,000	910,000
平成 22 年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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：地震現象、地震断層破壊、3次元断層構造、X線CT画像

1. 研究開始当初の背景

地震破壊がどのように成長し、どのように伝播し、どのように停止するのかは、断層の形状、断層に働く応力場、それに、断層面の性質で規定される[Fukuyama, 2003, 2006]。しかしながら、現実の微細な3次元断層構造を測定する事がきわめて困難である事から、

これらの量は、大局的な観測データや測定データで置き換えられ、断層の微細構造のデータは地震の動的破壊の研究にあまり用いられてこなかった。

一般に、断層形状が複雑な場合は、大きなすべりを伴った破壊を生じにくい反面、破壊伝播速度の変化が激しいために、高周波の波動を生成しやすい。一方、断層形状が比較的

単純な場合は、いったん、大きな破壊が始まれば、大きなすべり量を生じる地震に発展しやすい事が想像される。しかも、自然界では、この断層構造が、スケール依存である事が地形学的な調査や構造地質学的な調査から報告されている[Ben-Zion and Sammis, 2003; Otsuki and Dilov, 2005 など]。室内実験によってもそのスケール依存性が指摘されている[たとえば Ohnaka, 2003]。

しかしながら、巨大地震であっても、その断層破壊は、たかだか幅数センチ以内の非常に狭い厚さの領域における食い違いにすぎない事が、断層の地質学的調査(過去に地下深くで発生した地震断層が地質学的年代を経て地表に現れている断層露頭の調査や、断層発生帯における深層ボーリングによってサンプリングされた断層物質解析など)で明らかになっている[Swanson, 1988 など]。つまり、長さや形といった構造はスケール依存性があるものの、食い違いすべりが起る断層の厚さは、巨大地震であれ小地震であれ、非常に薄い層に限定されている事になる。巨大地震の破壊過程の物理を考える際、マクロなスケールのみに基づいた議論では、厚さ数センチもないの層の内部で生じている出来事を見落とす可能性がある。

これまでは、計算手法や計算機の実力の制限により、微細な断層構造を忠実に再現した上での断層破壊シミュレーションの研究は、非常に限られたグループで行われていた。多分、2000年初めの時点では、Aochi and Fukuyama (2002)や Aochi and Madariaga (2003)などほんの数例にしか過ぎない。しかも、これらの研究は地表に現れている断層トレースを忠実に再現しているものの、地下に存在する断層の3次元的な構造を取り入れておらず、断層の3次元的な微細構造を考慮して実際の断層破壊を研究した例はいまだきわめて少ない。実際のフィールドに存在する微小断層帯の3次元構造を用いての数値シミュレーションを行うことは、大変意義があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、断層の微細構造が、地震の動的破壊伝播にどのような影響を及ぼすかを調べることを主目的とする。断層のマイクロな構造が、マクロな地震破壊伝播にどのような影響を及ぼすかを、実際に存在する断層構造を用いて数値シミュレーション手法によって調べる。

具体的には、非常に明瞭な活断層構造が現れている日本列島におけるひずみ集中帯に位置する跡津川断層に注目する。実際に跡津川断層露頭の掘削によって得られたコアサ

ンプルの中に存在する断層破碎帯の3次元構造が、地震断層破壊にどのような影響を及ぼすかを、数値シミュレーションを用いた解析によって検討する。実際に存在する断層を考慮した破壊を計算機上で再現する事により、これまでの単純な断層構造に基づいた地震破壊モデルを、より現実的なモデルへと高度化する事ができる。

さらに、そこで得られた知見を、実際に発生した大地震の破壊過程の解析に応用することを考える。タイミングよく、研究期間中の2008年5月に中国四川省で発生したWenchuan地震の破壊過程を、跡津川断層コアサンプル解析から得られた3次元断層モデルの知見を用いて解析することを試みる。

本研究により、地震波形のインバージョン解析などから、漠然と得られていた地震破壊像が、より具体的なイメージを持って解釈可能となる事が期待される。つまり、断層の微細構造(マイクロな構造)が、断層破壊(マクロな破壊)にどのような影響を及ぼすかを調べ、断層破壊のマイクロな側面とマクロな側面がどのように結びついているかを理解することは非常に重要である。特に、断層破壊のスケールリングとどのような関係にあるのかを解明することは、地震断層破壊の物理過程を理解する上で非常に重要である。

さらに、大地震によって大きな被害を伴う激震域がしばしば生じるが、この激震域と地震のアスペリティとの関連がしばしば指摘されている。アスペリティは、この場合、断層面上で大きなすべりを生じた領域と定義される[Somerville et al., 1999]が、そのアスペリティの存在が大地震発生前に事前に予測できるかどうかといった研究に、本研究の成果は大きく役立つ事が期待される。

3. 研究の方法

所内研究プロジェクト「地震発生機構に関する研究」(H13-H17)により、跡津川断層河川敷に露出している断層露頭の掘削により、断層のすべり面(fault core)を含む岩石サンプルを採取した。さらに、CTスキャナを用いて、断層すべり面のおおまかな3次元構造を得る事ができた[福山・他, 2006]。得られた断層面の3次元構造は、単純な1枚の平面ではなく、単純な面の上に複雑な断層構造が重なっており、一見単純な構造に見えても、細部を詳しく観察すると決してそうではない事がわかっていた。

本研究は、以下の3つのステップから成っている。1) CTスキャナで得られたデータを用いて詳細な断層の3次元構造を求める。2) 求めた構造をもとに数値計算のための断層モデルを構築する。さらに、3) 構築した断

層モデルを用いて断層破壊の動的破壊シミュレーションを行い、断層の微細構造が破壊の進展にどのような影響を及ぼしているのかを詳細に調べる。

まず、CT スキャナを用いて断層の中心部を貫いているコアサンプルのより詳細なイメージを取得した。得られるデータはコアサンプルに沿った断面の多数の画像ファイルであるので、この画像データから3次元の画像ファイルを再構築する。3次元の画像ファイルから、3次元の断層面構造をベクトルデータとして抽出する。さらに、抽出した断層面構造データから、断層破壊過程計算のためのグリッドモデルを構築し、動的破壊過程の計算ができる準備を行った。

断層破壊シミュレーションは、三角形要素を用いた境界積分方程式法(BIEM) [Fukuyama et al., 2002; Tada et al. 2000; Tada, 2006] を用いて行った。この計算プログラムは、jog, step, branchなどの断層の非平面構造を忠実にモデル化し、精度よく計算する事のできる、優れた手法である。形状だけをモデル化するのであれば、有限要素法(FEM)でも可能であるが、残念ながら、FEMは、接触問題に関しては、計算精度をあまりあげることができない。有限差分法(FDM)では、微細な断層形状を取り込むことは現状では困難である。個別要素法(DEM)でも可能であるが、3次元問題を精度よく解くためには、領域の境界における境界条件をうまく設定する必要がある。よって、本研究では、BIEMを用いて計算を行った。

実存する断層構造を忠実に再現したモデルを用いた動的破壊のシミュレーションでは、断層面上の摩擦法則をどのように設定するか、断層面にかかる応力をどのように設定するかが重要である。所内プロジェクト「地震発生機構に関する研究」において、高温高压下での断層ガウジを用いた摩擦実験が行われており、断層構成物質の摩擦強度が実験室で調べられており[溝口ほか, 2005]、断層摩擦構成則に関しては、その値を参照する。さらに、同プロジェクトにおいて、跡津川断層近傍において、複数の手法による応力測定が行われており[小村ほか, 2006]、その測定結果を基に、断層に働く応力モデルを構築する。

数値実験においては、断層の微細構造と破壊伝播の複雑性の関連を重点的に調べていく。特に、破壊伝播速度と階層的な断層構造の関係を定量的に調べていくことにより、地震学で観測されるマクロな破壊過程と、構造地質学で認識されているミクロな断層構造の間の関係を解明する。

最後に、研究期間中の2008年5月に中国四川省でWenchuan大地震が発生した。この地震の初期破壊部分は、跡津川断層コアサンプルから得られた断層構造と、スケールこそ違うものの、形状が酷似していることがわかっ

た。そこで、コアサンプルから得られた断層破壊モデルで得られた知見を生かし、Wenchuan地震の発生モデルの構築を行う。この地震は、断層近傍において地震記録が得られているため、どの断層がどのタイミングでずべったかが、観測データ(断層近傍で得られた地震波形記録)から押えられる。さらに、この観測データを説明するすべりモデルに基づいた動的破壊伝播モデルの構築を行い、断層の3次元形状に依存した地震発生過程の理解を深める。

4. 研究成果

跡津川断層を貫くように掘削して得られたコアサンプルのCTイメージを取得し、そこから得られた画像の3次元画像解析を行うことにより、3次元の詳細な断層構造モデルを作成した。断層形状データの取得にあたっては、CTスキャンのbitmapデータから、断層をトレースすることによりvectorデータに変換し、数値計算が可能なモデルの構築を行った。

得られた3次元断層構造から、特徴的な構造をとりだし、その構造を単純化したモデルに対して3次元動的破壊伝播の計算を行った。その結果、コア内に存在する断層に沿った破壊を進行させるためには、そこに働いている局所的な3次元応力場が重要である事がわかった。

そこで、数値シミュレーション手法を用いて、断層面とその近傍に働いていた応力場が推定できないかどうか、試行錯誤的に調べたしかしながら、応力場を逆推定するためには、地震時に食い違いすべりを生じた構造と、地震時以外の変形により生じた構造を区別する必要があることがわかった。そこで、応力場を試行錯誤的に仮定した数値実験を行い、コア内に見られる断層構造のうち、地震時に破壊が進展していった断層面とその破壊の進展によって2次的に形成された断層面が共存している構造である事がわかった。

コア解析から得られた3次元断層構造が2008年5月に中国四川省で発生したWenchuan地震の際に地震すべりを起こした断層面の形状と酷似していることがわかったため、Wenchuan地震の初期発生モデルの構築を行った。この地震は、四川盆地の西端を南西から北東に約300km破壊が主に逆断層すべりとして伝播した。発震点付近においては、地震直後の地質学的調査により、逆断層が2枚ほぼ平行に走っていることが確認されており、それら2つの断層をつなぐ共役断層の食い違い変位も観測されている。このような断層形状

は、跡津川断層コアに見られたミクロな構造と酷似している。

そこで、Wenchuan地震の複雑な形状を再現する3次元断層モデルを構築し、その断層モデルをもとに、すべり時空間関数を仮定して断層近傍における地震動を計算し、観測された強震記録との比較を行った。InSARによるすべり分布解析や現地における構造地質学的調査によって得られているWenchuan地震の複雑形状のデータをコンパイルし、断層モデルを構築した。細かいスケールの断層形状に関するデータが得られなかったため、比較的単純なモデルを構築し、おおまかな断層運動を確定することを目的とし、2枚の逆断層とそこをつなぐ1枚の共役断層を用いて断層モデルを構築した。その断層モデルをもとに、すべり時空間関数及び破戒伝播速度を仮定して断層近傍における地震動を離散化波数法によって計算した。実際に観測された強震記録との比較を行い、あらからの破壊伝播の様子を得た。

推定されたすべりモデルにおいては、2枚の平行した断層が多少の時間ずれは存在するものの、ほぼ同時に破壊伝播する必要があり、動学的破壊シミュレーションにおいて、大きな制約条件を科することがわかった。通常、並行断層の場合、一方の断層の破壊が始まると他方の断層はすべりが抑制される応力場が形成されるが、この地震の場合は、2枚の断層が同時に破壊していかなければ、断層近傍の地震波形データを説明しないことがわかった。この現象は、横ずれ断層には見られない逆断層特有の性質かもしれない。

さらに、この Wenchuan 地震の初期発生の動的破壊モデルの構築を行った。動的破壊モデルの構築にあたっては、通常の設定をして計算を行うと、並行断層の場合、一方の断層破壊がはじまると、他方の断層はすべりが抑制されて破壊伝播しなくなるので、何らかの新しい知見を導入する必要がある。一様な応力場を考えた場合断層の傾きによってすべりやすさが異なるため、2枚の逆断層を同時にすべらせるためには、断層面に置ける摩擦係数が断層面の傾きによって変化している必要がある。つまり、断層面の傾きが高角の断層よりも低角の断層の方が摩擦係数が大きければ、上記の2枚の断層が同時に伝播していく状況を再現できそうであることが予想され、実際に計算してみると、予想通りの結果を得ることができた。これは、高角な逆断層によっては、蓄積されたひずみが十分解消されなかったものの、その後に摩擦係数の大きい低角な逆断層が破壊することにより、高角な逆断層で解消されなかったひずみが低角な逆断層により解消できたというメカニズムによると解釈できる。

最後に、このような断層破壊パターンが逆断層地震に対しては普遍的に存在するかどうか、今後調査していきたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Hok, S. and Fukuyama, E., 2011, A new BIEM for rupture dynamics in half-space and its application to the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, *Geophys. J. Int.*, 184, 301-324. (査読あり)
- ② Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., 2010, Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics based on high-velocity friction tests with variable slip rate, *Int. J. Fracture*, 163, 15-26. (査読あり)
- ③ Mizoguchi, K. and Fukuyama, E., 2010, Laboratory measurements of rock friction at subseismic slip velocities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 1363-1371. (査読あり)
- ④ Fukuyama, E., Ando, R., Hashimoto, C., Aoi, S. and Matsu'ura, M. 2009, Physics-based simulation of the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake to predict strong ground motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 3150-3171. (査読あり)
- ⑤ Tinti, E., Cocco, M., Fukuyama, E., and Piatanesi, A., 2009, Dependence of slip-weakening distance (D_c) on final slip during dynamic rupture of earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 177, 1205-1220. (査読あり)
- ⑥ 福山英一, 2009, 地震の動的破壊パラメータ, 地震第2輯, 61, S309-S314. (査読あり)
- ⑦ 福山英一, 2007, 1995年兵庫県南部地震の動的破壊過程とその周辺の応力場, 月刊地球, 29, 313-317. (査読なし)
- ⑧ 福山英一, 2007, 地震の動的破壊とアスペリティ, 月刊地球, 29, 392-396. (査読なし)
- ⑨ Fukuyama, E. and Mikumo, T., 2007, Slip-weakening distance estimated at near-fault stations, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09302. (査読あり)

[学会発表] (計 15 件)

- ① 福山英一、はお憲生, 2010, A Possible Rupture Scenario along the Double-layered Dipping Faults during the 2008 Wenchuan Earthquake, 日本地

- 震学会秋季大会, C22-10, 10月28日, 広島市.
- ② Fukuyama, E. and Hao, K. X., 2010, Coseismic Rupture along the Double-layered Dipping Fault of the 2008 Wenchuan Earthquake, 7th ACES International Workshop, October 5, Otaru, Hokkaido.
 - ③ Fukuyama, E. and Hao, K. X., 2010, Kinematics of the double-layered dipping fault rupture during the 2008 Wenchuan earthquake, Workshop on Earthquake Source Dynamics, 27, June 28, Smolnice, Slovakia Rep.
 - ④ 福山英一、はお憲生, 2010, Kinematics of the double-layered dipping fault rupture of the 2008 Wenchuan earthquake, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, SSS025-15, 5月25日, 千葉市.
 - ⑤ Fukuyama, E., 2009, A possible coseismic rupture on conjugate faults, American Geophysical Union Fall Meeting, S33C-03, December 16, San Francisco, CA, USA.
 - ⑥ 福山英一, 2009, 地震の動的破壊伝播と断層強度不均質, ワークショップ「地震波によらない地震学」, 11月25日, 京都府宇治市.
 - ⑦ 福山英一, 2009, 地震時の共役断層破壊, 日本地震学会秋季大会, A31-08, 10月23日, 京都市.
 - ⑧ Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., 2009, Earthquake dynamic rupture from high slip velocity laboratory experiments, French-Japanese Workshop on Earthquake Source, 51-52, October 7, Orlean, France.
 - ⑨ 福山英一、Hok, S., 2009, すべり分布を用いた動学的地震破壊モデルの構築, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, S148-P018, 5月20日, 千葉市.
 - ⑩ Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., 2009, Constitutive parameters for earthquake rupture dynamics, Invited Talk, IUTAM Symposium: Dynamic Fracture and Fragmentation, 37, March 10, Austin, TX, USA.
 - ⑪ Fukuyama, E. and Mizoguchi, K., 2008, Estimation of fracture energy in the laboratory, American Geophysical Union Fall Meeting, S44A-05, December 18, San Francisco, CA, USA.
 - ⑫ 福山英一, 2008, 広帯域地震波形を用いた断層面の決定: 2007年中越沖地震への適用, 日本地球惑星科学連合 2008年大会, S142-P001, 5月29日, 千葉市.
 - ⑬ 福山英一, 2007, G_c と near-fault

energy (1), 金森博雄先生京都賞受賞記念シンポジウム, 11月7日, 京都府宇治市.

- ⑭ 福山英一, 2007, アスペリティの破壊(3), 日本地震学会秋季大会, C21-10, 10月25日, 仙台市.
- ⑮ Fukuyama, E. and Mikumo, T., 2007, Slip-weakening distance at near fault stations, American Geophysical Union Joint Assembly, S43A-02, May 24, Acapulco, Mexico.

〔図書〕(計3件)

- ① Fukuyama, E., 2009, Introduction: Fault-Zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics, Fault-Zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics, 1-13, Elsevier.
- ② Fukuyama, E., 2009, Dynamic rupture propagation of the 1995 Kobe earthquake, Fault-Zone Properties and Earthquake Rupture Dynamics, 269-283, Elsevier.
- ③ Fukuyama, E., 2007, Fault structure, stress, friction and rupture dynamics of earthquakes, Advances in Earth Sciences: From Earthquakes to Global Warming, 109-132, Imperial College Press.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福山 英一 (FUKUYAMA EIICHI)
防災科学技術研究所 地震研究部 総括
主任研究員
研究者番号: 60360369

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし