

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年06月11日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540430

研究課題名（和文） 不均質地殻構造内で発生する地震が作る応力場の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical Study on the heterogeneous stress field in the 3D crustal structure

研究代表者

宮武 隆 (MIYATAKE TAKASHI)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：60126183

研究成果の概要（和文）：

差分法を用いた変位を未知数とする定式化とツール開発を行った。なお定式化とコードの作成においては、構造不均質に対応するために、基礎方程式に不均質構造の空間微分の項も考慮した。この場合、強い不均質は、実体力のように作用することになる。

不均質媒質での運動方程式を考えると、不均質構造の影響は、構造不均質によって生じる実体力と、歪みに比例する量としての弾性定数の2つの影響の仕方が考えられる。一方、断層運動は、地震学の基礎理論では、等価実体力で表現できるので、これを差分格子に適用した。具体的には、矩形格子の8つのコーナーにモーメントテンソルによって分配された実体力成分を与えることで表現した。断層面上の滑り量分布を考慮してこれらは空間分布を持つようにした。以上の要因の検討のため、また不均質媒質の影響を物理的に理解するために、いくつかのモデルケースについて計算を行い、現象の物理的理解を深めることができた。例えば、構造境界の相互作用のため不均質構造は単純に弾性定数倍の応力増加をもたらさないこと、低弾性定数の塊部分は、インクルージョンとして作用して周囲の応力を高めることで強い応力不均質をもたらすことなどがわかった。また中越地震震源域の3次元不均質構造を用いて、中越地震の連続して発生した5つの大余震に応用することが出来た。これらの内容を地震学会などで発表すると同時に、学術雑誌「地震」に論文として掲載した。

研究成果の概要（英文）：

Computation of Coulomb stress change ( $\Delta CFF$ ) due to earthquake slip is a powerful tool in order to understand earthquake triggering. However uniform half space is usually assumed in the computation, though highly heterogeneous crustal structures have been estimated in source regions. The purpose of this study is to understand the effect of heterogeneity on the calculation of static stress field. In order to calculate stress field from fault slip in a heterogeneous half space, we solve the equation of motion using 3D finite difference method in which the Lamé constants vary with position and spatial differentiation of these medium properties is taken into account. Since fault slip is represented by double couple force system, we apply equivalent body forces in our finite difference grids (Graves, 1996a). First, we calculated stress and  $\Delta CFF$  field for several simple 2D models to understand easily the effect of heterogeneous medium to  $\Delta CFF$  field. For two-layered medium, stress is amplified on the region with higher elastic constants. However, ratio of the stress amplification is less than the ratio of elastic constants between two layers. This is because of interaction between

two layers. For simplified basin structure and shallow thrust fault below,  $\Delta CFF$  increases near the basin but decrease in it. We also discuss the effect of heterogeneity near subducting plate on  $\Delta CFF$ . We found that the subducting plate structure expands the area of positive  $\Delta CFF$  in the region where outer rise earthquakes occur. Second, we apply to the 2004 Chuetsu (mid-Niigata prefecture) earthquake (Mw6.6) and four large aftershocks (MJMA>6). Hikima and Koketsu (2005) and Miyazawa et al.(2005) calculated distribution of  $\Delta CFF$  for the homogeneous crustal structure and concluded that  $\Delta CFF$  values just before each aftershocks were positive at the hypocenters of the major aftershocks. However, since the structure is complex in the source region (Kato et al., 2006), it is important to consider the effect of heterogeneity. We used the fault models estimated by Hikima and Koketsu (2005) and 3D structure model by Kato et al (2006) in computation of  $\Delta CFF$ . The results show that main aftershocks occurred in the area with positive values of  $\Delta CFF$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

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：固体地球物理・地震・震源・応力・誘発

1. 研究開始当初の背景

地震が地震を誘発（トリガー）することがあるのは、よく知られた事実である。誘発のし易さの指標として使われているのは、最初の地震によって生じる応力変化から計算される  $\Delta CFF$  であるこれは誘発される地震の断層面にかかる shear stress と、断層面の法線応力と摩擦係数から求められる大きな正の  $\Delta CFF$  の領域には次の地震が起きやすく、負の  $\Delta CFF$  領域では起きにくいことが、理論的にも期待され、現在では、これを指針として地震のトリガーの研究がされている。これにより、次の地震発生場所の予測の可能性がもたらされると期待できる。しかし  $\Delta CFF$  の計算には、計算の簡単のために、均質半無限媒質内に生じた断層運動が仮定されており、不均質構造の影響は考慮されていない。いうまでもなく地震を発生している地殻は均質ではなく、強い不均質性を持つので、この仮定は正しくない。既に断層すべりの不均質性は取り入れられているが、地下構造の不均質性の影響も取り入れることが必要である。多くの地震の  $\Delta CFF$  の空間分布を見ると、 $\Delta CFF$  の正負はデリケートな問題であることがわかるよって、地下構造が不均質であれば、その影響で応力テンソルの値は変化し、 $\Delta CFF$  の値も変わってしまうことは容易に想像できる。従って地殻構造の影響を取り入れることが必須である。

例えば、単純な2次元問題の場合の予備計算を行うと、不均質構造の影響が大きく、誘発地震の研究に大きな影響を及ぼすことがわかった。

申請者は、動力学モデルによる断層運動の数値シミュレーションなど震源モデルの研究や、それにより生じる地震波、地殻変動、応力場の計算を、これまでに行ってきた。この技術を応用して計算コードを作成すれば、不均質媒質での  $\Delta CFF$  の計算は可能である。予備的計算として30km程度のサイズの断層を含むのに必要な、200km x 200km x 50km領域を250mグリッドで分割の計算には数GBのメモリーが必要であり、現在の汎用機で十分に現実的であることがわかっている。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、

3次元不均質媒質での断層運動による応力場計算コードを作成し、これを用いて、不均質媒質での応力変化の基礎的研究を行って、現象を物理的に理解する。さらに、作成ツールと基礎研究の結果を応用して、3次元媒質地殻構造内で発生した現実の地震による  $\Delta CFF$  を計算して地震のトリガーの研究を行うこと、特に、均質媒質を仮定した場合との違いを検討することを目標とする。

### 3. 研究の方法

必要なツールである強い不均質媒質での3次元静的応力計算コードを本計画で開発する。なお震源の影響を研究する際は断層運動に等価な実体力で表現し、震源域の差分格子に実体力を加える。造構応力による媒質内部の応力場を計算する差分法コードも開発する。なお差分法での定式化の際に、媒質の不均質の空間微分の効果も考慮する。

作成されたツールを用いて、いくつかの典型的な不均質構造を設定し、その中で発生する断層運動により生じる応力分布を計算する。同様の断層運動が均質構造で発生した場合の応力分布と比較することで、不均質構造の影響を研究する。また不均質構造が及ぼす影響を物理的に考察する。

応用として中越地震震源域で推定されている3次元地下構造モデル内に中越地震の断層運動を導入して周辺の応力場を計算し、余震活動との関連を研究する。この地震については4つの大余震が観測されていて、この発生系列で $\Delta$ CFF仮説を検証する。これらの結果と均質構造を仮定した場合の結果とを比較する。

次に、地震直前の応力分布の研究を、3次元不均質構造に造構応力を加えてさらに静岩圧・封圧も考慮する。ただし造構応力の絶対値、封圧も未知であるので、これらの値の取り得る範囲をグリッドサーチ法により推定する。

### 4. 研究成果

まず差分法を用いた変位を未知数とする定式化とツール開発を行ない、構造不均質内に生じた断層運動による応力変化の計算を可能にした。これを用いて不均質媒質の影響を物理的に理解するために、いくつかのモデルケースについて計算を行い、現象の物理的理解を深めた。例えば構造境界の相互作用のため不均質構造は、単純に弾性定数倍の応力増加をもたらさないこと、低弾性定数の塊部分は、インクルージョンとして作用して周囲の応力を高めることで強い応力不均質をもたらすことなどがわかった。また中越地震震源域の3次元不均質構造を用いて、中越地震の連続して発生した5つの大余震に応用することが出来た。これらの内容を地震学会で発表すると同時に、学術雑誌「地震」に論文として掲載した。以上が研究計画当初の目的であり、これは達成された。

不均質媒質中での応力場・変位場の基本的性質の研究をさらに推し進め、震源域の地殻構造に造構応力を加えた場合に生じる応力分布を研究した。この結果と本震震源過程の関係を中越地震震源域のデータを用いて研究した結果、不均質構造が想定断層面上に応力降下量の高い領域を作り、これが、震源過

程のアスペリティ位置にほぼ対応することがわかった。これらの研究成果は、米国地球物理連合総会、日本地震学会、日本地球惑星科学連合大会などで口頭発表された。

結果の物理的理解を得るための研究（具体的には、不均質構造に造構応力を加えたとき、内部にどのような応力場が生じるかを物理的に理解すること）を行った。

その結果、傾斜した平面境界に凸部があり深い側の弾性定数が高ければ、凸部はアスペリティとして作用することを発見した。この単純構造は中越地震震源域の中越地域の地下構造を単純化したものである。

ただし造構応力の絶対値、静摩擦係数、動摩擦係数の値はわかっていないのでこれらを未知数として、グリッドサーチを行った。その結果、妥当な値の時に中越地震が発生可能であることがわかった。この分布と実際に発生した震源過程を比較することから絶対応力値についても推定することができた。またこの際、地中に含まれる水の封圧についても情報を得ることが出来た。これらについては、地震学会、米国地球物理連合秋季大会で発表した。

### 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1件)

刀禰, 宮武隆, 引間, 加藤, 不均質場で発生する地震が作る $\Delta$ CFF, 地震, 61, 91-97, 2009.

[学会発表] (計7件)

T. Miyatake, S. Tone, K. Hikima, and A. Kato, Change of static stress field from earthquake rupture in heterogeneous crustal structure, American Geophysical Union (米国地球物理学連合) 秋季大会, 2009, 12/14, 米国, サンフランシスコ

宮武隆, 刀禰茂康, 不均質場で発生する地震による地殻変動, 日本地震学会秋季大会, 2009, 10/22, 京都.

Takashi Miyatake, Naoyuki Kato, Jun Yin, Aitaro Kato, The effect of heterogeneous crust on the earthquake -- The case study of the 2004 Chuetsu, Japan, earthquake. American Geophysical Union (米国地球物理学連合) 秋季大会, 2010, 12/16, 米国, サンフランシスコ

宮武隆, 加藤尚之, 殷峻, 加藤愛太郎, 震源域の構造不均質により生じる応力不均質と震源過程, 日本地震学会秋季大会, 2010年10月28日, 広島市, 広島国際会議場

宮武隆, 震源域の不均質構造による生じる地震前の応力場, 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月27日, 千葉市, 幕張メッセ国際会議場

宮武隆, 震源域の不均質構造による生じる地震前の応力場—pore fluid factorの推定—, 日本

地震学会秋季大会, 2011年10月13日, 静岡市、  
静岡県コンベンションアーツセンター

Takashi Miyatake, Estimation of the pore  
pressure distribution on the fault -- The case  
study of the 2004 Chuetsu, Japan, earthquake--,  
American Geophysical Union (米国地球物理学連  
合) 秋季大会, 2011, 12/8、米国, サンフランシ  
スコ

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮武 隆 (MIYATAKE TAKASHI)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：60126183

### (2) 研究分担者 なし

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者：なし

( )

研究者番号：