

平成 22 年 6 月 10 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20710136

研究課題名（和文） 活断層モデルに基づく大地震連鎖可能性評価手法の開発と適用

研究課題名（英文） DEVELOPEMENT AND APPLICATION OF AN EVALUATION METHOD OF SEQUENCES OF LARGE EARTHQUAKES BASED ON AN ACTIVE FAULT MODEL

研究代表者

長 郁夫 (CHO IKUO)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・研究員

研究者番号：10328560

研究成果の概要（和文）：

大地震連鎖の評価技術の開発を目指して、新潟県中越地方の活断層をターゲットとして2種類の物理モデルを構築、検討した。1つは六日町断層をターゲットとして構築した、断層の摩擦が地震発生にどのような影響を与えるか調べるためのモデルである。このモデルに基づいて、同断層の周辺で起こった地震による応力擾乱が六日町断層の活動に与える影響を評価した。その結果、地震サイクルのどの時期に応力擾乱が与えられるかによって次の地震が遅れるか早まるかが系統的に変化することが分かった。もう1つのモデルは、2004年中越地震および2007年中越沖地震をターゲットとして、地殻粘性の3次元的な不均質構造が応力の伝搬にどのような影響を与えるか調べるために構築したものである。このモデルを用いた検討の結果、中越沖地震は地殻粘性の強い影響のもとに中越地震により誘発された可能性があることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

Aiming to develop a method to evaluate the sequences of large earthquakes, we constructed and examined two kinds of physical models of active faults in the Mid-Chuetsu district, Niigata prefecture. One is a model that was constructed to evaluate the influences of fault frictions on the generation of earthquakes. We examined the influences of stress perturbations emitted from nearby earthquakes on the activity of the Muikamachi fault. It was shown that the stress perturbations systematically changes the occurrence time of the next earthquake on the Muikamachi fault. The other model was constructed to evaluate the effects of the three-dimensional inhomogeneities of viscoelastic properties of a crust-and-mantle structure on the stress transfers. The relation between the 2004 Chuetsu earthquake and the 2007 Chuetsu-oki earthquake was examined based on this model. As results, a possibility was indicated that the Chuetsu-oki event was induced by the Chuetsu event under strong influences of viscoelasticity of the crust and mantle.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：活断層，内陸地震，連鎖，中越地震，中越沖地震，物理モデル，摩擦則，地殻粘性

1. 研究開始当初の背景

我々は一般に，活断層では適当な時間間隔（再来間隔）で大地震が繰り返されると見てその発生確率を評価し，活断層の危険度と呼ぶ．この見方によれば，再来間隔の終盤に近い活断層は危険度が高い．そこで我が国（地震調査研究推進本部，2007）では個々の活断層についてその履歴データから平均再来間隔や最新活動時期を推定し，単純な統計により危険度を評価している．このように，活断層の危険度は最新活動時期からの経過時間に依存して高くなるという見方は自然と言える．しかしその一方で，どこかで地震が起こればそれによる応力変化で活断層の危険度が変化し，地震が発生しやすくなる可能性（地震連鎖）が危惧されることもまた事実である．現行の危険度評価の問題は，このような地震の連鎖の観点で考慮されていないことである．

2. 研究の目的

2007年新潟県中越沖地震周辺の活断層をターゲットとして，物理モデルに基づく内陸地震連鎖の評価技術開発を目指す．

3. 研究の方法

大地震連鎖の評価技術を開発するために，2種類の物理モデル，すなわち（1）断層の摩擦則に着目するモデルおよび（2）3次的に不均質な地殻の粘弾性構造に着目するモデルを用いてそれぞれ着目するファクターの影響を検証する．

4. 研究成果

（1）断層の摩擦則に着目するモデル

新潟県中越地域の六日町断層の物理モデルを用いて数値シミュレーションを実施し，周辺の地震による応力擾乱の影響（連鎖可能性）を評価した．具体的には，六日町断層周辺の地震がもたらす静的な応力変化が六日町断層の地震発生にどのように影響を与えるかについて，状態と速度に依存する摩擦則に従う断層の物理モデルを用いて検討した．その結果，地震サイクルのどの時期に応力擾乱が与えられるかによって次の地震が遅れるか早まるかが系統的に変化することが明らかになった．

その原因が断層深部の非地震性滑りにあることが，次の検討によって明らかにされた．我々はまず六日町断層を想定した2次元逆断層を半無限弾性媒質に埋め込んだ．断層は速度と状態に依存する摩擦則に従うものとし，下部地殻で安定滑りが卓越し，上部地殻で不安定滑りが卓越するようにパラメータを設定した．この場合，応力擾乱を与えなければ，地震と地震の間の期間に断層深部の安定滑りが拡大，徐々に浅部に移動する様子が観察される．またそこでは非地震的な滑りイベント（以下，ASEと呼ぶ）の自発的な発生が準周期的に繰り返す様子が見られる．安定領域における滑り部分が更に拡大して不安定滑り領域が卓越する深度に達し，一定の臨界長を超えると，ASEの振幅は急激に成長する．最終的には高速の不安定滑りすなわち地震

滑りに発展する．以上が応力擾乱を与えない場合の地震の自然発生を詳細に観察した結果だが，もしもステップ状の応力擾乱が与えられれば，大振幅の ASE が強制的に励起され，自然発生的な ASE の影響を凌駕して地震発生をコントロールすることになる．この場合基本的な断層応答は次のようになる．すなわち応力擾乱を与えるタイミングが遅れれば（早まれば），応力擾乱の正負には関係なく ASE 発生のタイミングが遅れる（早まる）．その結果次の地震が発生するタイミングも遅れる（早まる）．ただし，応力擾乱を与えるタイミングをある一定値以上遅らせると（早めると），繰り返し発生する ASE のうちの 1 つ前（後）のものが地震に発展する．そのため地震発生は不連続的に早まる（遅れる）．地震サイクルの最終ステージで正（負）の擾乱が与えられる場合に限り，次の地震の発生時期は系統的に早め（遅め）られる．

以上はシミュレーションの観察結果なので，現実の断層深部で以上のような複雑な断層応答が実際に起こっているか，摩擦則の無理な外挿による人工的な結果でしかないのかは現時点では不明である．確実に言えることは，地震発生シミュレーションに応用可能と期待され多くの研究者に用いられている構成則，すなわち速度と状態に依存する摩擦則（実験に基づく経験則）に適切なパラメータ・セットを与えた場合に起こりやすくなるということである．連鎖の影響を数値シミュレーションで評価するために，本研究のような詳細な評価を実施し，断層応答を把握しておくことは大変重要と言える．そこで我々は上述の断層応答の詳細についてエッセンスをとりまとめ権威ある国際誌で発表した．

（ 2 ） 3 次元的に不均質な地殻の粘弾性構造に着目するモデル

ここでの検討を要約すると次のようになる．すなわち我々は 2004 年中越地震と 2007 年中越沖地震との関係を明らかにするために，まず各断層ジオメトリに関連する一連の研究をレビューした．地下速度構造データを収集し，地震，測地データと併せて地殻-マントルの 3 次元粘弾性構造モデルを構築した．得られたモデルに各断層を埋め込んで有限要素法による数値シミュレーションを実施することにより，2004 年中越沖地震が発生した領域では一般に CFF（次の段落で説明する）が負値をとるものの，地殻粘性の設定によっては地震発生の数年後に CFF が正值に変わることを明らかにした．

以下に詳細を説明する．まず，CFF とは地震の誘発を示唆するファクターである．CFF が正ならば一般に地震活動は活発化し，負ならば抑制される傾向が見られる．均質弾性体を用いた理論計算によれば，中越地震による CFF の計算結果は中越沖地震の震源周辺で負となることが分かっている．そのため地震調査委員会（2008）は，「両地震の関係は明らかではない」という見解を示した．

これを受けて，中越沖地震の発生要因として，いくつかの考えが報告された．例えば尾形（2008）は中越地震の余震活動の統計を基礎として，中越沖地震の深部延長部は CFF が正なので，そこが中越地震に誘発されて非地震的に滑ったため中越沖地震が発生したという仮説を提案した．Nakajima & Hasegawa（2008）は，両地震の発生にはそれぞれ上部マントルから供給される多量の水が関与したという考えを示した．

我々は，地震の連鎖や発生を予測するためのモデルをつくるという観点から，できるだけ一般的なモデルで両地震の関係を説明したいと考えた．そのために最初に検討すべきは媒質に 3 次元的な粘性・速度の不均質を導入しても中越沖地震の周辺でやはり CFF が負となるのかを

確認することではないかと考えた。通常 CFF の理論計算には均質な弾性半無限媒質が用いられるが、この地震は北部フォッサの高熱流量地域で起こったので、速度構造の不均質や地殻深部の粘性が地震発生の重要なファクターとなるかもしれない。このような地殻構造のモデル化は他地域でも一般に可能と考えられるから、このようなアプローチがうまくいくことが示されれば、地震の連鎖や発生を予測するための物理モデルづくりに期待が高まる。

具体的な地下構造モデルとして、上部地殻、下部地殻、上部マントルの 3 層構造を考え、各層境界深度を 15km および 30km とするケースと Zhao et al. (1995)によるスプライン曲面を適用するケースを比較した。粘性構造として、上部地殻を弾性、下部地殻および上部マントルを Maxwell 粘弾性のモデルで表した。粘性係数は、各層に 10^{18} Pas を適用するケースとそれぞれ 10^{18} , 10^{19} Pas を適用するケースを比較した。P,S 波速度と密度は全層で均一のケース、層ごとに代表値を与えるケース、Matsubara et al. (2008)のトモグラフィデータを用いるケースを比較した。

このような粘弾性媒質に、中越地震として Kato et al. (2006)のジオメトリを参考に 25x10km の矩形断層を埋め込んだ。断層面に均一に 3m の滑りを与えた場合の断層周辺の応力場を有限要素法で計算した。その際、Pylith (Agaad et al., 2007) というフリーの計算ソフトを利用した。

CFF の計算のために、中越沖地震の震源断層として、Kato et al. (2008)の北部セグメントを採用し、北西落ちの 10x6km の断層ジオメトリを与えた。摩擦係数は 0.8 と設定した。一部の計算結果については Fukahata and Matsu'ura (2004)の解析解と比較し、CFF の符号が着目領域で信頼できることを確認した。

結果として、多くのケースで、中越地震発生後数年で中越沖地震の断層周辺で CFF が負から正に反転する傾向が見られた。弾性定数を均

質半無限として下部地殻以下の粘性を 10^{18} Pas とした水平成層構造モデル、すなわちここで用いたモデルのうち最も単純なものでも、中越地震後 5 年程度で中越沖地震の断層の上端付近では CFF の符号が反転する様子が見られた。このモデルに対して粘性構造のみ複雑化したモデル、すなわち下部地殻、上部マントルを 10^{18} , 10^{19} Pas と変更したモデルを用いると、中越地震の 5 年後までに中越沖地震北部セグメントのほぼ全域で CFF が正となった。更に、モデルの層境界形状を水平から Zhao et al. (1995)のモデルに変更すると、CFF が反転するまでの時間が短縮されて 4 年となった。

層ごとに弾性定数を変えてもほぼ同様の結果で顕著な相違は生じなかったが、弾性定数に Matsubara et al. (2008)のトモグラフィ結果を利用した場合は、約 2 年後には CFF の符号が反転した。この結果は、剛性率の不均質による地震後の応力分布と Maxwell 時定数のばらつきから説明できる。

以上より、地震の連鎖を評価するためには地殻粘性および弾性定数の 3 次元的な不均質を考慮することがきわめて重要なことが分かった。そこで我々はこの結果を同分野の研究者に周知すべく地球惑星連合および米国地球物理学会で発表した。

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)

Cho, I., T. Tada, and Y. Kuwahara, Stress triggering of large earthquakes complicated by transient aseismic slip episodes, *J. Geophys. Res.*, **114**, B07310, doi:10.1029/2008JB006125, 2009.

(査読有)

[学会発表](計 2 件)

Cho, I., R. Ohtani, Y. Kuwahara and Y. Abe,

Possibility of viscoelastic stress transfer triggering of the 2007 Chuetsu-Oki earthquake by the 2004 Chuetsu earthquake, Japan, 米国地球物理学会, サンフランシスコ, 2009年12月18日.

長郁夫, 大谷竜, 桑原保人, 2004年中越地震が2007年中越沖地震を誘発した可能性, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 幕張(千葉), 2009年5月21日.

[その他]

ホームページ等

<http://staff.aist.go.jp/ikuo-chou/theme.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長 郁夫 (CHO IKUO)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・地震研究センター・研究員

研究者番号: 10328560