

平成23年 6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20540407

研究課題名(和文) アスペリティの動的破壊過程と短周期地震波発生に関する研究

研究課題名(英文) A study on dynamic rupture process of an asperity and radiation of short-period seismic waves

研究代表者 加藤尚之 (Naoyuki Kato)  
東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：60224523

## 研究成果の概要(和文)：

断層面上の非地震性すべりによるアスペリティ周囲での応力集中がアスペリティの破壊過程に及ぼす影響を数値シミュレーションにより調べた。非地震性すべりによる応力集中が破壊の発生を促進するため、アスペリティ破壊の際の平均的応力降下量は比較的小さくなることがわかった。これは、プレート内地震とプレート境界地震の応力降下量の違いの原因と考えられる。また、アスペリティ端の応力集中の効果により、地震の平均的応力降下量は破壊エネルギーや臨界すべり量に依存することが明らかになった。円形アスペリティの動的破壊過程の数値シミュレーションの結果、破壊は応力集中しているアスペリティ周囲の1点から始まり、周囲を伝播して、最後に残った1点が破壊して終わることがわかった。最後の1点の破壊は強いパルスのなすべりを発生させ、短周期成分に富む地震波を生成することが示された。エンベロープインバージョンにより短周期地震波放射特性の空間分布を調べた結果を取りまとめ、短周期地震波エネルギーに関して、スケーリング則、周期依存性、地域依存性を明らかにした。

## 研究成果の概要(英文)：

We investigate effects of stress concentration at the rim of an asperity due to surrounding aseismic sliding through numerical simulations. The stress concentration due to aseismic sliding promotes earlier occurrence of seismic rupture. This results in lower average stress drop of earthquake. This effect of stress concentration at the rim of asperity may explain the difference in average stress drop between intraplate and interplate earthquakes. The stress concentration at the edge of an asperity affects rupture process of asperity, and the average stress drop of asperity rupture increases with fracture energy or critical slip-weakening distance. A numerical simulation is conducted for dynamic rupture process of a circular asperity, where stress concentration is generated at the rim of the asperity. Seismic rupture starts from a point of the stress concentrated rim and propagates bilaterally around the rim. A significant slip pulse is generated at the end of the rupture due to rupture front focusing. We compile spatial distributions of short-period seismic energy radiation on faults estimated from the envelope inversion method to obtain the scaling law, frequency dependence of seismic energy radiation, and locality.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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

### 1. 研究開始当初の背景

地震学および測地学的観測データの解析から、プレート境界面のすべり特性は一樣ではなく、アスペリティと呼ばれる領域では通常（地震間）の固着と地震時の急激なすべりを繰り返している（固着-すべり）のに対し、それ以外の領域では非地震性のゆっくりしたすべり（安定すべり）が生じていることがわかってきた。これは、プレート境界面の摩擦特性の不均一性に起因すると考えられ、摩擦構成則の一つであるすべり速度・状態依存摩擦則により説明可能である。アスペリティの外側での定常的な非地震性すべりにより、アスペリティ周辺域には応力集中が生じるが、そのような応力分布はアスペリティの動的破壊過程に重大な影響を及ぼすと考えられる。アスペリティの周囲でのすべりによる応力集中という条件下で、Das and Kostrov (1983)はアスペリティ動的破壊過程の数値シミュレーションを行っているが、アスペリティの外側では摩擦がないという非現実的な仮定を用いているため、アスペリティ周辺域への応力集中過程について厳密な議論は難しい。さらに、アスペリティの外側では破壊に対する抵抗がないため、破壊は停止せず、アスペリティ破壊により放射される地震波を正確に評価することはできない。アスペリティ領域とその外側の摩擦を適切にモデル化することにより、アスペリティ周囲での応力集中がアスペリティ破壊過程や短周期地震波発生に及ぼす影響を正確に評価する必要がある。

### 2. 研究の目的

現実的な摩擦構成則を考慮することにより、現実のプレート境界面で生じていると考えられるアスペリティ周囲での応力集中過程を適切にモデル化したうえで、アスペリティの動的破壊過程の数値シミュレーションを行う。シミュレーション結果から、非地震性すべりによる応力集中が、アスペリティ破壊過程、短周期地震波発生に及ぼす影響を評価する。さらに、複数の地震について短周期エンベローブ解析を行い、地震波エネルギー放射量分布を推定する。この結果と長周期地震波の解析から推定されたすべり量分布との比較等から、断層の破壊過程と短周期地震波発生過程との関係について検討する。

### 3. 研究の方法

アスペリティ周囲への応力集中過程については、断層面上の摩擦が速度・状態依存摩

擦則に従うと仮定した準動的な地震サイクルシミュレーションを行って評価する。アスペリティでは速度弱化的摩擦特性、アスペリティの外側では速度強化的摩擦特性を仮定することにより、アスペリティの外側での安定すべりにより固着しているアスペリティへの応力集中過程を計算する。アスペリティの動的破壊過程については差分法により計算する。これらシミュレーションを組み合わせることにより、アスペリティ内外の摩擦特性が、アスペリティへの応力集中過程、アスペリティの動的破壊過程、地震の震源特性、短周期地震波発生過程に及ぼす影響を評価する。自然地震のエンベローブインバージョンに関しては、断層面から放射される地震波のエネルギーを周波数ごとに評価し、長周期地震波の解析から推定されるすべり量分布と比較する。プレート境界地震やプレート内地震等、地震のタイプにより短周期地震波の放射特性に違いが見られるか等に関して研究し、アスペリティ破壊過程と短周期地震波放射過程との関係について理解を深める。

### 4. 研究成果

応力降下量は最も基本的な断層パラメータに1つであり、多くの地震について推定され、いくつかの経験則も確立されている。しかし、推定される応力降下量のばらつきは大きく、これがどのような物理量に依存するかを知ることは、地震発生過程や地下の応力場を理解するうえで重要である。地震発生前の準静的なすべり過程が地震の震源特性に及ぼす影響を数値シミュレーションにより調べた。固着しているパッチが非地震性すべり域に挟まれているアスペリティモデルに従うとき、地震の平均的応力降下量は破壊エネルギーの平方根に比例することがわかった。これは、非地震性すべりによるアスペリティ端での応力集中と破壊エネルギーのバランスが地震の発生を支配しているためである。このように、アスペリティモデルに従う場合には、非地震性すべりによる応力集中が地震の発生や平均的な応力降下量に影響を及ぼすことがわかった。一方、断層全体が一樣に固着しているときには地震発生前にはほぼ一樣に応力が増大する。このような場合は、非地震性すべりによる応力集中が生じないため破壊は発生しにくく、地震発生時の断層面上の平均的な応力は大きくなる。その結果、地震の平均的な応力降下量も大きくなる。プレート内地震の応力降下量はプレート境界地震よりも大きいことが知られているが、その

原因についてはわかっていなかった。プレート境界面での固着は空間的に不均一で非地震性すべりが観測されるが、これは、アスペリティ周囲の非地震性すべりのためにアスペリティと非地震性すべり域の境界領域に応力集中が生じて、アスペリティ内の応力は一様にはならないことを示唆する。その結果、プレート境界地震の平均的応力降下量は小さくなると考えられる。プレート内の断層の場合非地震性すべりはあまり観測されないため、断層の応力は一様に増大するであろう。そのため、プレート内地震の応力降下量は比較的大きくなると考えられる。

断層上の運動がどのように短周期地震波生成に寄与するのかについて考察した。短周期源として、従来考えられているのは、2つある。1つは断層運動の揺らぎであり、これは断層パラメータの空間的ゆらぎによって生じるものである。もう1つは、断層端で生じる Stopping phase である。運動学的な断層モデルを用いてシミュレーションを行い、揺らぎの影響について理論的に研究し、パラメータの中でも破壊伝播速度の揺らぎが効率よく短周期地震波を生成することを物理的に明確にした。動的破壊過程のためのツールの開発を行った。これは Miyatake and Kimura (2006)で提案された2次元差分法による断層のモデルを3次元化したものである。これを用いて Day et al. (2005)のベンチマークテストを行い良好な結果を得た。これを用い、非地震性すべりによるアスペリティ周囲での応力集中が生じているという初期条件のもと、アスペリティの動的破壊過程を差分法により計算した。破壊は、円形アスペリティの円周の1点から始まり、円周に沿って2方向に伝播し、最後に残った1点が破壊して終わることが示され、この最後の一点の破壊は強いパルス、従って短周期成分に富む地震波を生成することが示された。この結果は、Kato (2007)の準動的シミュレーションにより定性的に得られていた結果を動的モデルで確認するものである。

短周期の地震波放射特性の空間分布を調べるエンベロープ・インバージョン法については、新たな解析結果とこれまでに行ってきた多くの地震についての解析結果を取りまとめ、短周期地震波エネルギーに関して、スケール則、周期依存性、地域依存性を明らかにした。2008年岩手宮城内陸地震については近地強震動記録から、震源断層面における地震波エネルギー放射量分布を推定し、破壊開始点付近、北北東深部、南南西浅部、南南西深部の4箇所短周期エネルギー放射が強いことが明らかになった。6つの内陸地震と4つの海溝型地震についてエンベロープ・インバージョンにより解析した結果を整理し、短周期地震波エネルギー放射量分布と、

既往の長周期波形インバージョン解析による断層すべり量分布と比較すると、互いの位置関係は必ずしも相補的ではなく、複雑であることが分かった。また、短周期地震波エネルギー放射量は断層面積にほぼ比例すること、同じマグニチュードでは、東北日本の海溝型地震は内陸地震よりも10倍程度強く短周期地震波エネルギーを放射していることが明らかになった。これは内陸地震と海溝型地震で、応力場や不均一性などに違いがあり、断層破壊過程が異なることを示唆する。断層を小断層に分割し、小断層ごとに短周期地震波放射エネルギーを推定して分布を調べたところ、放射エネルギーは Weibull 分布で説明可能であることがわかった。

#### 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5件)

① Kato, N., Numerical simulation of recurrence of asperity rupture in the Sanriku region, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, 113, B06302, doi:10.1029/2007JB005515, 2008.

② 宮武隆, 三宅弘恵, 木村武志, 隅谷謙一, 短周期地震の成因についての考察, *地震*, 61, 91-97, 2008

③ Nakahara, H., Seismogram envelope inversion for high-frequency seismic energy radiation from moderate to large earthquakes, *Advances in Geophysics*, 50, 401-426, 2008.

④ Kato, N., A possible explanation for difference in stress drop between intraplate and interplate earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23311, doi:10.1029/2009GL040985, 2009.

⑤ 中原恒, 震源における短周期地震波エネルギーの励起, 第38回地盤震動シンポジウム, 17-22, 2010.

[学会発表] (計3件)

① 宮武隆, 隅谷謙一, 三宅弘恵, 木村武志, 短周期地震波の成因の理解のために一数值シミュレーションによる考察(3), 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月30日, 幕張.

② Miyatake, T., H. Miyake and T. Kimura, Radiation mechanism of short period seismic waves, *French-Japanese Workshop on Earthquake Source*, Oct. 8, 2009, Orlean, France.

③ Kato, N., Dependence of earthquake stress drop on critical slip-weakening distance, 2010 Fall Meeting, American Geophysical Union, Dec 13-17 Dec, 2010, San Francisco, Calif., USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者 加藤尚之  
(東京大学・地震研究所・准教授)  
研究者番号：6 0 2 2 4 5 2 3

(2) 研究分担者 宮武隆  
(東京大学・地震研究所・准教授)  
研究者番号：6 0 1 2 6 1 8 3

研究分担者 中原恒  
(東北大学・大学院理学研究科・助教)  
研究者番号：2 0 3 0 2 0 7 8