

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540492

研究課題名(和文) 周期的応力変化がアスペリティ破壊に及ぼす影響に関する研究

研究課題名(英文) Effect of periodic loading on asperity rupture

研究代表者

加藤 尚之 (Kato, Naoyuki)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：60224523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：日本領域の低周波地震および相似地震に対して地球潮汐による応力変化が及ぼす影響を調べた。低周波地震については統計的に有意な位相選択性が見いだされた。相似地震については有意な位相選択性が見られなかったが、東北地方太平洋沖地震の前後で位相選択性の特徴が変化した。摩擦が速度状態依存摩擦則に従うと仮定し、周期的なせん断応力変化を加えてアスペリティ破壊の数値シミュレーションを行った。周期的応力の振幅が同じ時は、破壊エネルギーが小さくなるほどアスペリティ破壊の位相選択性が顕著になることがわかった。この結果から相似地震の破壊エネルギーを推定できる。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effects of tidal stress on occurrence of low-frequency earthquakes and small repeating earthquakes in Japan. While statistically significant phase selectivity was found for the low-frequency earthquakes, no significant result was obtained for the small repeating earthquakes. The characteristics of phase selectivity changed after the 2011 Tohoku-oki earthquake. Assuming periodic stress perturbation and rate- and state-dependent friction on the fault, we conducted a numerical simulation of asperity rupture. When the amplitude of periodic stress is the same, phase selectivity of asperity rupture is more significant for smaller fracture energy at the asperity. This result indicates that the fracture energy of small repeating earthquakes may be estimated from the observation of phase selectivity.

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：地震活動 アスペリティ 潮汐 数値シミュレーション 摩擦特性

### 1. 研究開始当初の背景

潮汐による応力変化の振幅は地震の応力降下量に比べると非常に小さいが、潮汐による応力速度はテクトニックな応力速度よりも大きいため、潮汐による応力変化が地震発生に影響を及ぼすか否かについては多くの研究が行われてきた。固体潮汐と海洋潮汐の効果を含めて潮汐による応力変化を正確に計算して地震活動と比較する研究が行われるようになり、いくつかの大地震の前に、中規模地震の発生と潮汐の相関が高まることが示された。一方、潮汐等の周期的応力変化が地震発生に及ぼす影響に関する理論的研究については、速度・状態依存摩擦則を用いた研究が数多く行われている。これらの研究では、1自由度のバネブロックモデルが使われている。しかし、このモデルでは、現実的な連続体モデルとは異なり、断層すべり域と固着域の共存を表現できないため、固着域の端に発生する応力集中が表現できない。破壊の発生は、応力拡大係数で代表される応力集中の程度と物性値である破壊エネルギーとのバランスで決定されるので、1自由度のバネブロックモデルでは破壊発生時を厳密に議論することはできない。

近年の地震学的・測地学的な観測研究から、プレート境界面上のアスペリティと呼ばれる領域では、地震間は強く固着し地震時には大きくすべるのに対し、それ以外の領域では常に非地震性すべりが発生して歪が蓄積されることがわかってきた。プレート境界面上の小繰り返し地震は、このようなアスペリティで発生し、周囲の非地震性すべりの影響を強く受けていると考えられている。本研究では、アスペリティモデルに従う断層モデルを使って周期的応力変化の影響を理論的に調べ、アスペリティモデルで説明できると考えられるプレート境界面上の小繰り返し地震のデータ解析結果と比較する。

また、地震発生に及ぼす潮汐の変化に関しては、LURR(Loading/Unloading Response Ratio)という考えが提案されている。これは、潮汐によるせん断応力が増大する期間と応力が低下する期間とで、地殻変動や地震活動の変化の比(LURR)が異なるとするもので、いくつかの大地震の前にはLURRが変化したとの報告がされている。応力が増大する期間には、震源域の微小破壊が進展し非弾性変形が増大して剛性が低下するのに対し、応力が低下する期間にはそのような非弾性変形の進行は顕著ではないことに起因するとの考え方が提案されている。LURRの考え方に基づく地震活動データ解析は、LURR提案者らのグループによる研究がほとんどであり、地震先行現象としての有効性の検証は不十分である。本研究では、良く整備された日本の地震データを用いてLURRの解析を行うとともに、このような現象が起こりえるかを、現実的な断層モデルで理論的に検討する。

### 2. 研究の目的

本研究では、プレート境界地震とプレート内地震とは発生機構が異なることを考慮して、プレート境界で発生する小繰り返し地震を対象として地震発生と潮汐の相関を調べる。小繰り返し地震は、固着している領域(アスペリティ)の周囲での非地震性すべりによる荷重が原因と考えられており、破壊様式が明確なため、理解がしやすい。また、プレート境界地震として適切と考えられているアスペリティモデルに従う現実的な断層モデルを使って数値シミュレーションを行い、周期的応力変化の効果を調べる。以上の研究に基づき、大地震発生前に地震発生と潮汐の相関が高まる原因を解明し、地震発生予測に資することを目指す。また、観測とシミュレーションの比較から、アスペリティにおける摩擦特性の推定を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 地震活動と潮汐の相関の調査対象とする小繰り返し地震のカタログを整備する。(2) 理論潮汐の計算を行い、地震活動との相関を調査する(LURR解析を含む)。(3) 周期的応力変化の下でのアスペリティの地震サイクル数値モデルを開発する。(4) 1自由度バネブロックモデルと連続体中のアスペリティモデルとで、周期的応力変化の効果がどのように異なるかをシミュレーションにより調べる。(5) 周期的応力変化と地震の相関の、摩擦パラメータ、応力振幅、周期依存性を調べる。(6) (2)と(5)から、小繰り返し地震のアスペリティにおける摩擦パラメータ値を推定する。(7) 大地震発生前に地震と潮汐の相関が変化すること、およびLURRが変化することについての物理機構を明らかにし、変化が現れる条件について考察する。

### 4. 研究成果

#### データ解析

地球潮汐による応力変化が、低周波地震・微動および相似地震に対してどのような影響を与えるかについて、地球潮汐の位相選択性に基づく解析を行った。データセットは、気象庁一元化震源において低周波地震・微動と識別された地震32243個(期間:1997年10月から2012年3月31日まで;データセットA)とIgarashi(2010, GRL)の手法により相似地震と同定された10421個(期間:2002年1月1日から2012年1月31日まで;データセットB)の二つであり、日本領域に発生した地震を対象とした。地球潮汐による応力変化は、データセットの個々のメカニズムが決定されていないため、応力の対角成分(J1成分)に対する位相選択性をシュスターの検定を用いて相関性の有無の調査を行った。解析の結果、データセットAに対しては、時間的に安定した地球潮汐との相関性が得られ、かつ位相として圧縮の位相の時に発生することがわかった。データセットBに対しては、デ

ータセット全体に対する検定においては、相関性が得られなかったが、太平洋プレートにおける相似地震に対しては、東北地方太平洋沖地震の前後でその位相選択性が変化していることがわかった。

さらに、データセット A, B に対して、地殻の臨界状態を示すとされている LURR 解析を行った。地球潮汐による応力変化が地震の発生を加速するフェーズと抑制するフェーズとの比(F 値)をとることにより、地殻の臨界状態のインデックスとして使用される。もし、地殻が臨界状態に近づくと F 値が 1 より大きくなるという性質を用いる。低周波地震・微動に対する 1 年時間幅の F 値の時間変化は、1.5 を超えることはなく LURR 解析においては、地球潮汐に明瞭な相関は得られなかった。同様に相似地震においては、マグニチュード 4 以上の地震を選択することにより、2009 年に発生した相似地震の F 値は 2.5 を超えたが、多くは 1 前後の値をとり、地殻の臨界状態とはいえないという結果となった。LURR 解析は、潮汐位相に対して二分化してその比をとるという解析なので、相関が出にくい指標であることがわかった。

#### シミュレーション解析

断層面にはたらく摩擦が速度状態依存摩擦則に従うと仮定し、断層面上に円形アスペリティを設定した上で、定常のプレート運動によるせん断応力増加に加え周期的なせん断応力変化を加えてアスペリティ破壊の数値シミュレーションを行った。アスペリティ破壊の周期的応力の位相選択性をシュスターの検定により調べた。断層面にかかる法線応力  $n$ 、速度・状態依存摩擦則の特徴的すべり量  $L$ 、周期的せん断応力変化の振幅を変化させてシミュレーションを行った。アスペリティ破壊の開始点の破壊エネルギー  $G$  を応力-すべり量関係から計算し、 $G$  は  $nL$  に比例することを確認した。 $G/nL$  が大きくなるほど、アスペリティ破壊の位相選択性が顕著になることがわかった。プレート境界の相似地震については、通常時は明瞭な位相選択性はみられない。この結果を利用すると、プレート境界の相似地震の破壊開始点の破壊エネルギーは  $10^4 \text{ J/m}^2$  程度よりも大きいことが推定される。東北地方太平洋沖地震前に相似地震の位相選択性に変化が見られることから、相似地震の破壊エネルギーはプレート境界巨大地震の破壊開始点の破壊エネルギー  $\sim 0.1 \text{ MJ/m}^2$  よりも顕著に小さいと考えられる。

外部から与えられる周期的応力変化のため断層でのすべり速度も周期的に変化するが、アスペリティ破壊が近づくにつれ、すべり速度変化の振幅が増大することがわかった。これは、アスペリティ破壊が近づくにつれて潮汐による応力変化が増幅されることを示し、大アスペリティの近傍で多数の小地震が発生していると考え、大地震の発生

が近づくにつれて小地震発生の位相選択性が高まることと定性的には調和的である。しかし、これまでに行ったシミュレーションでは、応力の増幅率は数十%程度であり、観測事実を説明できるほどの効果になるかは疑問である。これについては、摩擦パラメタ等を変えて多数のシミュレーションを行い、応力の増幅率を調べる等さらに検討する価値がある。

#### 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 2 件)

Kato, N., Deterministic chaos in a simulated sequence of slip events on a single isolated asperity, *Geophys. J. Int.*, 査読有, doi:10.1093/gji/ggu157, 2014.

Abe, Y. and N. Kato, Intermittency of earthquake cycles in a model of a three-degree-of-freedom spring-block system, *Nonlin. Proc. Geophys.*, 査読有, 2014, in press.

[学会発表](計 8 件)

Igarashi, T., T. Iidaka, S. Sakai, K. Obara, and N. Hirata, Small repeating earthquakes and interplate aseismic slip in and around the Kanto district after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting, 2013 年 12 月 9 日, San Francisco.

Igarashi, T., Small repeating earthquakes and interplate aseismic slip after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, IAHS-IASPO-IASPEI Joint Assembly, 2013 年 7 月 26 日, Göteborg,

加藤尚之, 孤立したアスペリティでの複雑な地震サイクル, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 23 日, 千葉.

Kato, N., Complicated Recurrence of Slip Events on a Uniform Circular Asperity, American Geophysical Union Fall Meeting, 2012 年 12 月 7 日, San Francisco.

五十嵐俊博, 平成 23 年東北地方太平洋沖地震発生後の小繰り返し地震活動, 日本地震学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月 19 日, 函館.

Kato, N. and Y. Abe, Complex Earthquake Cycles in Models of Interacting Faults with Rate and State-dependent Friction, Asia Oceania Geosciences Society, 2012

年 8 月 17 日, Singapore.

五十嵐俊博, 平成 23 年東北地方太平洋沖地震発生後の地震クラスター地震活動・小繰り返し地震活動の特徴, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 25 日, 千葉.

Igarashi, T., Seismic activities of earthquake clusters and small repeating earthquake in Japan before and after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011 年 12 月 9 日, San Francisco.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 尚之 (KATO, Naoyuki)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号: 6 0 2 2 4 5 2 3

### (2) 研究分担者

鶴岡 弘 (TSURUOKA, Hiroshi)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号: 1 0 2 8 0 5 6 2

五十嵐 俊博 (IGARASHI, Toshihiro)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 1 0 3 3 4 2 8 6