

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17746

研究課題名(和文)海溝型大地震の中期予測を高度化するための潮汐現象の解明

研究課題名(英文)Elucidate a tidal phenomenon to improve the mid-term risk evaluation for the occurrence of large thrust-type earthquakes

研究代表者

田中 愛幸(Tanaka, Yoshiyuki)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：90508350

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：東日本のM>7.5の地震の発生時期には月の楕円軌道に係る8.85年の周期性が見られるが、なぜそのような弱い潮汐が地震を誘発するかは分かっていなかった。本研究は、弱い潮汐の効果が増幅されるメカニズムの一端を初めて明らかにした。10年スケールの海洋の変動や地殻流体の移動が短周期の潮汐と組み合わせることで、大地震の震源域周辺のプレート境界の沈み込み速度が長期的に増減し、地震発生確率が変化することが確かめられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海溝型大地震の発生時期の確率的な見積もりには、30年以内に何十パーセントという表現がよく用いられる。本研究は、潮汐が地震を誘発するメカニズムを明らかにすることで、地震がより起きやすい時期、起きにくい時期を数年の時間スケールで見積もることのできる中期予測の手法を切り開くものである。本研究の結果は、例えば、海洋変動の一例である黒潮大蛇行を予測することで、その後の地震発生確率の変動をある程度予測することが可能になることを示唆している。

研究成果の概要(英文)：An 8.85-year periodicity associated with the lunar orbital motion is seen in the occurrence time of historical large earthquakes with M>7.5 over eastern Japan. However, why such a weak tide triggers earthquakes has not been known. In this study, we found a mechanism that can explain how the effect of a slow, weak tide is enhanced. We confirmed that decadal variations in the ocean and crustal fluid flow, when combined with short-period stronger tides, accelerates/decelerates the plate subduction speed near the source region of mega-thrust earthquakes, resulting in the change of the probability of earthquake occurrence.

研究分野：測地学

キーワード：スロースリップ 潮汐 海溝型地震 地殻変動 重力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

海溝型大地震は、プレート沈み込み境界の固着域(アスペリティ)に限界まで蓄積された応力が急激に解放されることで発生する。アスペリティに隣接するプレート境界面上の領域で、通常の地震よりもゆっくりと応力を解放するスロー地震と呼ばれる現象が起きている。スロー地震はプレート境界のすべり(スロースリップ)を引き起こし、アスペリティに応力を蓄積させるため、スロースリップが最後の一押しとなって大地震が誘発される可能性が指摘されている(Obara and Kato, 2016)。近年、月や太陽に起因する潮位の変化(潮汐)など、通常の地震を引き起こすのに必要な応力の1,000分の1程度の小さな応力変化しか生み出さない現象によって、スロー地震が誘発されることが分かってきた。弱い応力でも誘発される原因として、スロー地震の発生域に存在する高圧の流体が有効法線応力を下げていることが報告されてきた。

一方、研究代表者は、北海道から東海にかけて東日本で発生したマグニチュードが7.5を超える大地震(宇津カタログに記載された約1400年間の地震約30個)の発生に、月の近地点に関連する8.85年の周期性が見られることを発見した(Tanaka, 2013)。しかし、このような長い周期の潮汐が引き起こす潮位の変化は、半日周・日周帯の短周期の潮汐が引き起こす潮位変化に比べて非常に小さく、通常の地震はもちろんのこと、スロー地震でさえ誘発するのに不十分である。このため、大地震の発生にそのような周期性が見られる原因はまだ明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

大地震の発生時期に関する上記の周期性がどのようなメカニズムによって生じるのかが分かれば、地震発生リスクの予測をより高度化することができる。これまでの30年以内に何十%という表現だけでなく、大地震がより発生しやすくなる時期とそうでない時期とを統計的に見積もることができるようになる。大地震の周期性が1000年以上にわたって継続していることから、そのメカニズムには規則的な外力を引き起こす潮汐が関係していることが予想できる。さらに、上に述べた背景から、潮汐がスロースリップを誘発し、誘発されたスロースリップが大地震を引き起こすという過程も含まれている可能性が高い。そこで、振幅が小さくかつ周期の長い潮汐がスロースリップを引き起こすメカニズムを解明することで、周期性の原因を突き止める。

### 3. 研究の方法

短周期の潮汐の振幅が、1日より長い周期で周期的に変化する「振幅の変調」に着目する。振幅変調としてよく知られているのは、約半月ごとに発生する大潮・小潮である。振幅変調は、半年、8.85年などほかの周期でも起きている。スロースリップの発生頻度は短周期の潮汐に応じて非線形に増減し、プレート境界のすべり速度を加速・減速させる。したがって、振幅の変調が起きることで、より長い周期でプレート境界のすべり速度も変化するはずである(Ide and Tanaka, 2014)。このとき、通常の潮汐の理論から見積もられる地殻の弾性変形に加え、プレート境界のすべりによる変形も加算される。石垣島等のスロースリップ発生域においてこのすべりをGNSS(Global Navigation Satellite System: 全球測位システム)や重力観測により検出するとともに、物理モデルを構築して再現することで、振幅変調がスロースリップを引き起こす仕組みを定量的に明らかにする。

### 4. 研究成果

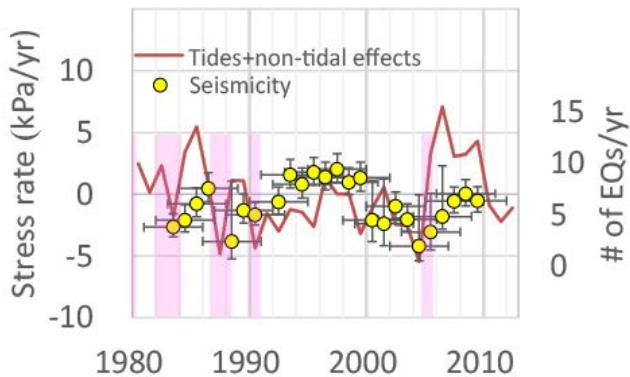
2015年度は重力観測を開始するとともに、モデル研究から次のことを明らかにした。本研究では、スロースリップを増減させるメカニズムに振幅変調が関係していることを前提において、振幅変調には長周期の潮汐に加え、1年程度以上の時間スケールを持つゆっくりした非潮汐性の海底圧力の変動も影響することを初めて発見した。従来は、海底圧力の変動は、地震発生に影響を及ぼすには小さすぎると考えられてきた。気象庁気象研究所が開発した数値海洋モデルに基づく海底圧力変動を、固体地球潮汐、海洋潮汐に足し合わせ、スロースリップの増減をモデルで見積もった。このモデルは、すべり速度が外部から加えられる応力に指数関数的に依存するという、岩石実験で一般的に観察されている摩擦則を採用している。この摩擦則のため、潮汐による応力(1 kPa)よりも小さい数100 Paの海底圧力変動の効果は非線形に増幅される。その結果、長期的なすべりの増減には、海底圧力変動の効果の方が短周期の潮汐よりも強く反映することが確かめられた。

このモデルを東海地方に適用したところ、黒潮を含む非潮汐性の海洋の変動が引き起こすスロースリップと、地殻内で発生する地震の定期的な活動と非常によく対応することが分かった(図1)。海洋の変動が地震発生頻度に影響しうることが世界で初めて定量的に示された。この結果(Tanaka et al., 2015)はEarth Planets and Space誌のハイライト論文として掲載され、同誌のブログ(SpringerOpen blog, 2016/8/2)でも紹介された。

2016年度は重力観測を継続するとともに、防災科学研究所広帯域地震観測網石垣島局・琉球大学西表研究施設園場において、重力観測におけるノイズの判別をするための地磁気連続観測点の整備を行った。モデル研究では、前年度発見した非潮汐性の海洋変動により潮汐の効果が増幅されるメカニズムと整合するような長期的スロースリップが、東京湾北東部で1996-2000年ごろと2007-2011年ごろに発生していたことを、GNSSデータの解析により突き止めた。構築したモデルにより、長期的スロースリップの時間的な挙動が定量的に再現できることが分かった。

た。スロースリップの大きさを説明するには、有効法線応力が非常に小さいか、不安定なすべりが小さなすべりによってトリガーされる必要があることが示唆された。

図1 東海地方の地震活動（黄）とスロースリップによる応力変化速度（赤）



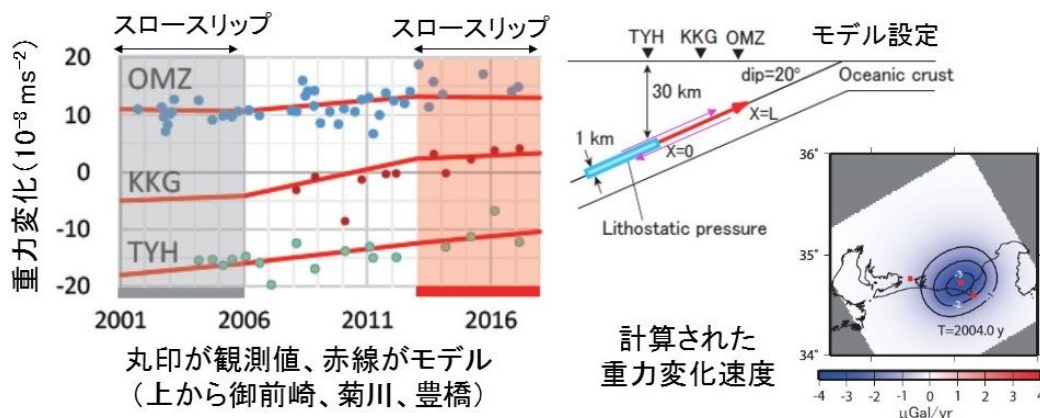
スロースリップがアスペリティと与える応力をモデルで計算している。モデルの入力に非潮汐性の海底圧力変動が含まれているため、応力変化速度に潮汐のみを考慮したときには現れない、約10年周期のピークが現れている（85, 95, 05頃）。ピンクの太い縦線は、黒潮大蛇行が発生した時期。大蛇行の時期に地震活動と応力変化速度が下がり、その後、回復している。

2017年度は、東海地方の重力観測から、当初予想していなかった振幅変調やスロースリップの発生メカニズムに関わる重要な知見が得られた。年約1回の頻度で約20年にわたって実施してきた重力観測の結果、2回の長期的スロースリップ（2001-2005年、2013-2017年）中に、重力がわずかに（地表の平均重力1Gの10億分の4程度）減少していることが分かった。この重力減少は、地殻の上下変動や断層すべりに伴う地殻の密度変化、降雨による土壌水分の変化といった既知の現象では説明できないことが確かめられた。東海地方では、長期的スロースリップの震源域近傍に、沈み込む海洋プレートの脱水反応で生じた高压の流体が存在することが地震波観測から明らかになっている。そこで、高压流体の流れが生じたとして、間隙弾性反発理論に基づいて重力変化を試算した。断層破砕帯の透水率が10の-18乗～10の-15乗平方メートルのとき重力データを説明できた（図2）。この透水率は、室内実験から推定されている値と、スロースリップの数値シミュレーションから示唆される値の中間の値であり、流体が移動したという一定の可能性を示している。この流体の移動が潮汐の振幅を拡大または縮小させ、地殻変動のゆらぎを引き起こすことが理論的に導かれる。長期的スロースリップに伴う流体移動を観測に基づいて定量的なモデルで再現した研究は世界的にも初めてである。

2018年度は、前年度に得られたスロースリップ中の流体の時間的挙動の理解を深めるため、流体移動が重力変化のみならず地表の地殻変動も引き起こしている可能性を検討した。前年度開発したモデルは、流体の通り道である断層破砕帯の外側は剛体と仮定されていたため、地殻変動は原理的に生じない。そこで、地殻全体を弾性体と仮定して球状圧力源が引き起こす地殻変動、重力変化を見積もることのできる茂木モデルを用いて、間隙流体圧が変化した際に生じる地表変形を見積もった。流体圧を様々に変化させシミュレーション計算を行った結果、GNSSで観測したスロースリップ中の地表地殻変動と、同期間に相対的に減少した重力変化の両方を説明できる間隙流体の増加量が、スロースリップを引き起こした断層破砕帯の体積の1%より小さいことが分かった。この上限値は地質学的に十分あり得る範囲であり、流体移動が重力観測だけでなく地殻変動も引き起こす可能性が示された。

現在、上で得られた流体移動の挙動をよりはっきり捉えるため、新学術領域研究「スロー地震学」プロジェクトと共同で、石垣島において連続観測に適した重力計の観測点を増やすことを計画している。本研究のGNSS・重力観測、物理モデリングの構築によって、外的要因である海洋の変動と内的要因である流体移動の影響によって潮汐の効果が増幅するという、振幅変調に関する新たな知見が得られた。この知見に基づいて新たな観測を推進することで、潮汐がスロースリップの増減に及ぼすメカニズムがさらに解明されることが期待できる。

図2 スロースリップとそれ以外の時期の重力変化速度のちがい



丸印が観測値、赤線がモデル  
（上から御前崎、菊川、豊橋）

計算された  
重力変化速度

$\mu\text{Gal/yr}$

左：重力変化。OMZ、KKG、TYH はそれぞれ国土地理院御前崎観測局、名古屋大学菊川・三河観測所における結果を示す。スロースリップ中に重力の変化速度が相対的に減少している。右上：流体移動モデル。スロースリップ中にプレート境界に沿って流体が上昇すると仮定して、間隙弾性体モデルを構築した。モデルによる重力変化が左図の赤の線で示されている。右下：計算された重力異常のパターンと観測点の分布。

#### < 引用文献 >

Obara, K. and A. Kato (2016) Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353, 253-257.

Tanaka, Y. (2013) An approximately 9-yr-period variation in seismicity and crustal deformation near the Japan Trench and a consideration of its origin, *Geophys. J. Int.*, 196, 760-787.

Ide, S. and Y. Tanaka (2014) Controls on plate motion by oscillating tidal stress: Evidence from deep tremors in western Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3842-3850.

#### 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

Tanaka, Y., T. Suzuki, Y. Imanishi, et al. (2018) Temporal gravity anomalies observed in the Tokai area and a possible relationship with slow slips, *Earth, Planets and Space*, 70, 25, doi:10.1186/s40623-018-0797-5. 査読有

Tanaka Y. and S. Yabe (2017) Two long-term slow slip events around Tokyo Bay found by GNSS observation during 1996-2011, *Earth Planets and Space*, 69, 43-52, doi 10.1186/s40623-017-0628-0. 査読有

Tanaka Y., S. Yabe and S. Ide (2015) An estimate of fluctuating plate subduction velocities caused by tidal modulations and decadal variations in the ocean, *Earth Planets and Space*, 67, 141-151, DOI 10.1186/s40623-015-0311-2. 査読有

[学会発表](計 19 件)

Tanaka, Y., et al., Temporal gravity anomalies observed in the Tokai area and a possible relationship with slow slips, JpGU-AGU-EGU-AOGS joint meeting, 2018

Tanaka, Y., et al., Anomalous gravity changes observed during long-term slow slip events and a possible interpretation based on fluid flow, IAG-IASPEI joint meeting, 2017

Tanaka, Y., S. Yabe and S. Ide Long-term slow slip events in the Kanto district in Japan found by GNSS observation during 1996-2011 and relationships with variations in the ocean bottom pressure, American Geophysical Union Fall meeting, 2016

田中愛幸, 矢部優, 井出哲, 潮汐・非潮汐海洋変動によるプレート沈み込み速度のゆらぎ 東海地方の例, 日本測地学会, 2015

[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

<http://www-solid.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~y-tanaka/>

#### 6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。