

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25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22540437

研究課題名（和文）

プレート沈み込み帯における大規模余効変動と断層強度回復過程の解明

研究課題名（英文）

Research on postseismic deformation and healing process at plate subduction zones

研究代表者

鷺谷 威 (SAGIYA TAKESHI)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授

研究者番号：50362299

研究成果の概要（和文）：

本研究では、東北地方太平洋沖地震に関わる地殻変動の問題を検討した。この巨大地震の発生が事前に予測されなかった原因の一つとして、明治時代に三角測量とともに行われた基線測量が1894年庄内地震に起因するスケール誤差があることを初めて見出した。また、東北地方の太平洋岸における地震間および地震時の沈降と長期的な隆起を説明可能な地震サイクルの運動学的モデルを構築した。観測データを説明するためにはプレート境界浅部で長期間固着が継続する必要があり、マンツルの粘性緩和の影響も不可欠である。

研究成果の概要（英文）：

In this project, problems related to crustal deformation associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake were investigated. This giant earthquake was not foreseen before its occurrence. I found that one of the reasons of this failure was a scale error in the baseline survey conducted with the first triangulation in the Meiji era, which was caused by the 1894 Shonai earthquake. I also constructed a kinematic earthquake cycle model that can reproduce interseismic as well as coseismic subsidence, and long-term slight uplift along the Pacific coast of the Tohoku area. The long recurrence interval of earthquake in the shallow portion of the plate boundary is responsible for the vertical movement. Viscoelastic relaxation effects are indispensable.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：地殻変動学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球物理学

キーワード：余効変動、巨大地震、地震サイクル、粘弾性緩和

1. 研究開始当初の背景

プレート境界で発生する大地震は顕著な地殻変動を伴うが、地震後にも顕著な地殻変動を伴う事例がある。例えば、1946年南海地震(M8.1)の後には、地震時に大きく沈降し

た高知市付近で急激な隆起が生じる一方で、地震時の変動が小さかった瀬戸内海沿岸で地震後20年程度の間数十cmにおよぶ沈降が生じた(Thatcher, 1984)。また、17世紀に千島海溝で発生したと考えられる大地震

の後には、大規模な地震後の隆起運動があったことが、湿地の堆積物調査から指摘されている (Sawai et al., 2004)。本研究では、こうした大地震後の大規模余効変動に注目したが、特に、地震サイクルの観点からこうした現象が重要であると考えたのが研究のきっかけであった。

2. 研究の目的

本研究を開始して半年後の 2011 年 3 月 11 日に、東北地方の太平洋沖で M9.0 の巨大地震が発生した。この地震こそ本研究で対象とするプレート境界の巨大地震そのものであった。当初の予定では、過去に巨大地震やそれに続く余効変動が検出された過去の大地震を扱う予定であったが、今まさに目の前で発生した巨大地震を措いておく手はなく、当初の計画を変更し、この地震に伴う地殻変動の問題を解決することに注力した。

本研究では、東北地方太平洋沖地震に関して、地震間の地殻変動に関する以下の 2 点を主に検討した。一つは、この巨大地震発生を事前に予見できなかった原因に関する検討である。東北地方では明治時代以降に繰り返し行われてきた三角測量から、プレートの沈み込む東西方向の短縮歪みが蓄積していないことが指摘されてきた (橋本, 1990)。結果的にこうした指摘が誤っており、地震発生ポテンシャルを見逃す一因となったが、明治時代の測量データの調査を通してその原因を探った。

第二の検討内容は、東北地方の太平洋沿岸における上下変動に関することである。東北地方の太平洋岸では、20 世紀中頃から 50 年以上にわたり、5mm/年程度の顕著な沈降が続いてきた (El-Fiky and Kato, 1999)。この沿岸部の沈降は、太平洋プレートの沈み込みおよびプレート境界の固着によるものと理解されていた (例えば Suwa et al., 2006)。また、Heki (2004) のように、プレートの沈み込みに伴う造構性浸食の効果と解釈する研究もあった。しかしながら、この沿岸部には完新世の海岸段丘が存在し (小池・町田, 2001)、近年発生した地震よりも巨大な地震が将来発生し、その時に大規模な隆起が起きるといふ仮説も出された (池田, 1996)。実際には 2011 年の地震で沿岸部は最大 1m も沈降し、地震後になって余効変動による隆起が観測されている。こうした様々なデータを一元的に説明するモデルの構築が本研究の 2 番目の目的であった。

3. 研究の方法

(1) 基線測量に起因する三角測量のスケール

誤差の可能性

辺長測量を行わない三角測量はそもそもスケールに関して自由度が大きい。また、東北地方では明治時代以降の 100 年間に南北の伸張歪みが観測されていた。こうしたパターンは東西方向の短縮歪みと等方的な伸張歪み (スケール誤差) の足し合わせとして解釈可能である。こうした推論に基づき、スケール誤差の原因として最も可能性の高い基線測量に注目し、当時の測量原簿を調査した。具体的には、山形県新庄市に設置されていた塩野原基線の記録を詳細に検討した。また、基線測量誤差の可能性を発見した後、この推定の妥当性を検討する材料とするため、現時点における基線長を確認するために塩野原基線の再測量を実施した。

(2) 東北地方太平洋沿岸の地殻上下変動のモデル化

本研究では、地震サイクルの運動学的なモデルによって東北地方太平洋沿岸の上下変動の再現を試みた。地球表面付近の構造を厚さ 40km の弾性リソスフェアと粘弾性アセノスフェアで表現し、太平洋プレートの沈み込み境界は浅部と深部の 2 枚の断層 (海溝軸と平行な方向に 400km の長さを持つと仮定) で表現した。この断層は、地震間に完全固着し、一定周期で地震が発生し、地震間のプレート運動量に相当する断層運動が生じる。こうした断層のすべりは、プレート運動速度に伴う定常的なすべりと、地震間にすべり遅れ地震時に遅れた分を取り戻す周期的なすべり擾乱との重ね合わせで表現できる (Savage and Prescott, 1978)。このうち、定常的なプレート沈み込みは、プレート沈み込み帯周辺の長期的な地殻変動に寄与し、太平洋沿岸をわずかに隆起させる効果を持つ (Hashimoto et al., 2004)。この効果は東北地方太平洋沿岸に見られる完新世の海岸段丘 (小池・町田, 2001) などの長期的な地殻変動に対応するものと考えられる。

本研究では地震サイクルに伴う周期的なすべり擾乱がもたらす周期的な地殻変動成分を検討した。すべり擾乱の時間変化は以下の式で表現できる。

$$s(t) = -vt + vT \sum_{n=1}^k \dot{a} H(t - nT)$$

このうち、第 1 項は地震間のすべり遅れの蓄積を、第 2 項は地震時のすべり遅れの解消を意味する。この式を地殻変動の表現式に代入すると、

$$\begin{aligned} u(t) &= \int_{-\infty}^t \dot{s}(t) G(t-t) dt \\ &= -v \int_0^t G(t-t) dt + vT \sum_{n=1}^k \dot{a} G(t-nT) \end{aligned}$$

となる。ここで $G(t)$ は断層すべりに対する地表変位の粘弾性応答関数である。時刻 t が粘弾性応答の緩和時間よりも十分長い場合には、この式は以下のように有限個の和で表現される、数値積分は不要となる。

$$u(t) = -vG(\infty)t + vT \sum_{n=1}^k \dot{A}G(t - nT) + const.$$

地震サイクルに伴う地殻変動パターンはこのように単純な式で表現することができることが分かったので、この式を用いて具体的な地震サイクルを想定して地殻変動の時空間変化を計算した。粘弾性応答の計算には、PSGRN/PSCMP (Wang, 2006) を使用した。

本研究では、プレート境界の浅部と深部の断層について、それぞれ 50 年と 500 年という地震発生間隔を仮定した。50 年の発生間隔は、仮定した構造が持つ緩和時間 (100 年程度) より短く、500 年の場合は緩和時間よりも長い。また、宮城県沖では 40 年程度の間隔で M7.5 から M8 程度の大地震が繰り返し発生していたことが知られていたが、2011 年東北地方太平洋沖地震は 500 年から 1000 年に 1 度しか起きない稀な巨大地震だったと考えられるため、このように仮定した。プレート運動速度は 0.1m/年と仮定したので、地震時の断層すべり量は、50 年間隔で地震が発生する場合は 5m、500 年間隔の場合は 50m となる。

4. 研究成果

(1) 基線測量に起因する三角測量のスケール誤差の可能性

測量原簿の調査により塩野原基線は 1894 年 5~6 月に測量されていたことを見出した。同年 10 月には、塩野原基線から西に 30km 程の場所で庄内地震 (M7.0) が発生している。庄内地震の震源断層と考えられる庄内平野東縁断層帯にマグニチュード 7.0 相当の断層モデルを仮定し、塩野原基線に生じる基線長変化を計算すると、35-56mm 程度 (断層の傾斜角が 20 度から 40 度の範囲) の基線長の伸びが起きると予想され、長さ約 5km の基線に約 10ppm のスケール誤差をもたらす可能性のあることが分かった。この誤差は、三角網のサイズを過小評価するように働き、その後の地殻変動で東北地方が東西方向に短縮しても、短縮変形は検出されにくく、逆に南北方向の伸張歪みを生むことになり、観測データと一致する (橋本, 1990)。最近の GPS 観測によれば、東北地方における東北地方太平洋沖地震発生前の東西短縮速度は 0.1ppm/年程度であり、10ppm のスケール誤差はほぼ 100 年分の地殻変動量に匹敵し、三角測量の解釈を左右するのに十分な大きさだったと言える。

塩野原基線は、両端の一等三角点が現存し、両端を結ぶ測量道路も残り、測量可能な日本で唯一の基線である。塩野原基線の基線長変化を明らかにすることは、東北地方太平洋沖地震の準備過程を理解する上で重要と考え、2012 年 8 月 6 日から 8 日に塩野原基線の再測量を実施した。測量には二周波の GPS 受信機 (Leica GRX1200GGPro) を使用したが、両端の三角点がともに GPS 観測に適さなかったため、トータルステーション (Leica TPS1200) を用いた偏心観測を実施した。GPS 観測結果に偏心補正を加味して求めた両端点の座標値は東端 (北緯 38 度 50 分 1.16550 秒、東経 140 度 21 分 35.45986 秒)、西端 (北緯 38 度 49 分 50.39528 秒、東経 140 度 18 分 3.25970 秒) となり、基線長 (球面距離) は 5129.6767m であった。器械の設置誤差も含め、本観測による基線長の測定誤差は 10mm 程度と考えられる。1894 年に陸地測量部が測量した基線長を GRS80 楕円体に投影すると、基線長は 5129.6096m であったことから、2012 年までの 118 年間に、基線長は約 6.7cm (約 13ppm) 伸びたことになる。近隣の GPS 基線 (最上~新庄、新庄~立川) では、2011 年東北地方太平洋沖地震に伴い、それぞれ 15-16ppm の伸びが観測されており、上記の基線の伸びは 2011 年の地震時の伸びとほぼ同等と見なすことができる。一方、2011 年以前の GPS 観測からは、年間 0.1ppm 程度の短縮が生じていたことが分かっており、これを 1894 年まで遡って外挿すると、1894 年の庄内地震後における基線長は、陸地測量部の測定値よりも 5cm 程度長くなっていたことになり、上記の考察と整合的である。

このように、明治時代の三角測量のデータは基線測量の誤差に起因するスケール誤差の影響を受けていた可能性が高い。結果的に得られていた地殻歪み分布は、最近の GPS 観測結果と矛盾するものだったが、プレート間相互作用の時間変化等の別の要因を持ち出す説明が横行していた。外国においては、三角測量がスケール誤差を持つ可能性を考慮し、網平均した座標値ではなく、個々の角度変化やスケール誤差の影響を受けない剪断歪みの変化に基づく議論が行われていた。ひるがえって、こうした三角測量データを無批判に受け入れていた姿勢は、東北地方太平洋沖地震発生以前の地震学における健全な批判精神が欠如していたことを示す一例と言えるかも知れない。

(2) 東北地方太平洋沿岸の地殻上下変動のモデル化

浅部、深部ともに 50 年周期で地震が発生する場合、地震間の地殻変動はどこでもほぼ

一定速度で生じ、太平洋沿岸部に相当する場所では地震間に隆起が生じる。これは、プレート間固着の弾性変形の影響である。一方、浅部、深部ともに500年周期で地震が発生する場合には、粘弾性緩和の影響により、地震間に地殻変動パターンが変化する。地震発生直後から100年程度の間顕著な余効変動が生じ、徐々にそれが収まって定常的な地震間の変動に遷移する。この場合、太平洋沿岸部は地震後の100年程度沈降し、その後隆起に転じる。隆起は50年周期の場合と同様に、深部の断層固着による弾性変形および粘弾性応答の影響である。次に、浅部の断層で500年、深部の断層で50年という異なる周期を仮定すると、太平洋沿岸部において、地震直後の100年ほど余効変動で隆起し、その後沈降に転じるパターンが現れた(図1)。地震前に観測されていた5mm/年という沈降速度も定量的に再現されている。地震間に沿岸部を沈降させるのは、浅部における500年周期のサイクルの影響である。深部の断層における地震間の固着は沿岸部を隆起させる効果を持つが、発生間隔が短いために大きな振幅を持たず、振幅の大きい500年周期の成分が優勢となる。

以上の結果から、東北地方沿岸で見られていた地震間の沈降は、プレート境界の浅部と深部で異なる周期の地震サイクルが生じていた結果であると示唆される。2011年東北地方太平洋沖地震では、プレート境界浅部で50mを越える巨大な断層すべりが生じたと考えられているが、そうした断層運動を引き起こした長期間にわたるプレート間固着の影響こそ沿岸部の沈降を引き起こしていた原因ということになる。この結果は、プレート境界の固着域下端付近で地震間に沈降が見られる場合、プレート境界浅部で長期にわたり固着が継続している可能性があると言える。プレート境界の固着の弾性的な効果のみに注目すると、プレート境界浅部に関する情報を得ることは通常大変困難であるが、沿岸部の上変動に注目することで巨大な地震や津波の発生ポテンシャルを評価できる可能性がある。こうした長期にわたる沈降は、日本周辺では北海道の千島海溝沿いでも見られており、プレート境界浅部を震源とする巨大地震が発生し、大規模な津波を引き起こす可能性に注目する必要があると考えられる。

実際のプレート境界では、本研究では考慮しなかった余効すべりやプレート境界の固着の時空間的な変化があると考えられる。しかし、東北地方で見られていた地殻変動の特徴は、最も単純な地震サイクルのみを仮定し

ても、その発生間隔の空間的不均質で再現が可能であることが示された。また、こうした地震サイクルに伴う地殻変動を考慮する際に、マンツルの粘性緩和の影響が非常に重要であることも改めて明らかになった。

Case 3 ($T_1=500$ years, $T_2=50$ years)

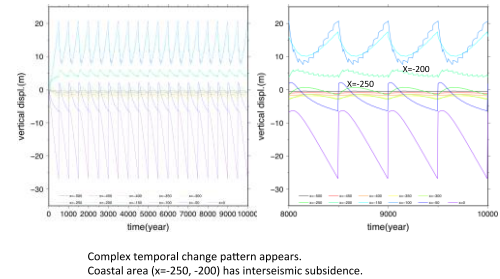


図1 浅部が500年周期、深部が50年周期で地震が発生する場合の地殻上下変動の様子。X=-200 および-250 が太平洋沿岸部に相当する。

(3) 今後の課題

本研究では、東北地方太平洋沖地震に関連して、東北地方の地殻変動における2つの問題に対する新たな解釈を提示することができた。これは、M9の巨大地震発生に関わる多くの謎を解明する上で重要なステップになるものと考えられる。しかしながら、こうした研究を着想し成果を得たのが東北地方太平洋沖地震の発生後だった点は大いに悔やまれる。問題の所在は従前から明らかであったにも関わらず、それらに真摯に向き合ってこなかったことは事実であり、これまでの研究に対する取り組みの不十分さを反省している。今後に向けては、こうしたデータ、解釈等の見落としが無いよう、先入観に囚われずに様々な問題を主体的に考えていきたい。

プレート沈み込みに伴う変形のモデル化においては、構造を弾性-粘弾性の成層構造に簡略化し、プレート形状も2枚の矩形断層で近似するなど、事象の本質を捉えるためにあえて問題を単純化して扱った。実際のプレート境界では3次元的な不均質構造が存在し、またそれが沈み込み過程に有意な影響を与えていると考えられる。また、プレート境界のすべりについても、地震後の余効すべりや地震前の固着のはがれに伴うすべりなど時空間的な変化があると考えられるため、こうした現象の評価も行っていく必要がある。

西南日本の南海トラフにおいては、100~150年の発生間隔でM8級の巨大地震が発生してきており、次の巨大地震は今世紀半ばに発生するのではないかと懸念されている。次の

巨大地震が発生する際に、改めて過去のデータの見直しなどする必要が無いよう、研究を進めていきたい。

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 Sagiya, T., H. Kanamori, Y. Yagi, M. Yamada, and J. Mori, Rebuilding seismology, *Nature*, 査読無, 473, 146-148, 2011.
 - ② Ito, T., K. Ozawa, T. Watanabe, and T. Sagiya, Slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake inferred from geodetic data, *Earth Planets Space*, 査読有, 63, 627-630, 2011.
 - ③ 鷲谷威, 東北地方太平洋沖地震-何が起きたのか、何を考えたのか, 日本の科学者, 査読無, 46, 1340-1346, 2011.
 - ④ 鷲谷威, 地震の予知・予測とその不確実性, オペレーションズ・リサーチ, 査読有, 57, 545-550, 2012.
 - ⑤ Hirai, T. and T. Sagiya, Biased geodetic inference on asperity distribution on a subducted plate interface: a quantitative study, *Earth Planets Space*, 査読有, in press, 2013.
- [学会発表] (計 6 件)
- ① Sagiya, T., Crustal deformation associated with the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0), *Seismological Society of America Annual Meeting*, Memphis, Tennessee, USA, April 14, 2011.
 - ② 鷲谷威, 地震前・地震時・地震後の応答から見る東北日本弧の変形特性, 日本地震学会 2011 年秋季大会, 静岡, 2011 年 10 月 13 日.
 - ③ Sagiya, T., Asymmetry between interseismic strain accumulation and coseismic strain release in northeastern Japan associated with the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *American Geophysical Union 2011 Fall Meeting*, San Francisco, California, USA, December 8, 2011.
 - ④ 鷲谷威, 東北地方の地殻水平歪みの再検討-基線測量に起因するスケール誤差の可能性-, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉市, 2012 年 5 月 25 日.

⑤ 鷲谷威・太田雄策・松多信尚・Angela Meneses・野村晋一・鈴木翔太, 塩野原基線の再測量, 日本測地学会第 118 回講演会, 仙台市, 2012 年 11 月 1 日.

⑥ Sagiya, T., N. Matta, A. Meneses, S. Nomura, S. Suzuki, and Y. Ohta, Triangulation scale error as a possible cause for overlooking seismic potential along the Japan Trench, *American Geophysical Union 2012 Fall Meeting*, San Francisco, California, USA, December 6, 2012.

[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

鷲谷 威 (SAGIYA TAKESHI)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授
研究者番号: 50362299

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし