

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23540503

研究課題名(和文) 高時空間分解能での地殻歪場の推定によるゆっくり地震の発生過程と条件の解明

研究課題名(英文) Estimation of the spatio-temporal structure of strain-field associated with slow slip events using GPS and strainmeter networks

研究代表者

大谷 竜(Ohtani, Ryu)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報研究部門・主任研究員

研究者番号：50356648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：GPS連続観測網と歪計ネットワークによる歪観測を長期に比較することで、歪計による数週間以上の時間スケールでの歪場変動の計測特性を調べたところ、場所によっては歪計とGPS歪との間に相関が見られるところがあるものの、広域的に離れた7点の異なる観測点において、歪計とGPSとの間にははっきりした相関は見られず、歪計に不規則な大きな変動があることが分かった。また先島諸島で繰り返し発生しているゆっくり地震による歪場について、断層すべりの発生間隔を同定するとともに、ゆっくり地震に含まれる様々な空間成分の時間変動を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Comparison of strain variations measured by borehole strainmeters with GPS-derived strain is carried out to investigate the characteristics of the long-term measurement of strainmeters over the time scale of several weeks. The result shows that there are seasonal variations both in strainmeter and GPS where the amplitudes are consistent each other at some stations, but they are not always in phase and many other stations do not show good agreement between GPS and strainmeter. Strain-field variations during and inter slow slip events are also investigated at Sakishima archipelago using wavelet analysis to reveal the spatio-temporal structure of slow slip events' process.

研究分野：地球惑星物理学

キーワード：ゆっくり地震 GPS連続観測網 歪計 ウェーブレット変換 地殻変動

1. 研究開始当初の背景

近年、地殻変動の観測点の数や観測精度が向上するとともに、通常の地震時の破壊（数十秒）に比べ、地震断層面がゆっくり（数日～数年）とすべる「ゆっくり地震」と呼ばれる現象が多数見つかってきた。例えば、想定される東海地震や東南海・南海地震の震源域（図1のA, B, C）の沈みこむプレートの深部延長域では、様々な継続時間を持つ「ゆっくり地震」が多数見つかってきている（図1の青網の領域）。ゆっくり地震は、通常の地震だけでは説明できなかった、プレートの沈み込みに伴う歪の解放の一部を担う重要な役割を果たしていると考えられることから、ゆっくり地震の発生メカニズムを解明することは、大地震の予測の上でも大変重要である。しかしながら現状では、ゆっくり地震がどのような歪蓄積過程を通じて発生するのかはよく分かっていない。その原因として、特に数週間程度のタイムスケールで歪を精度よく推定する手法がないことが挙げられる。

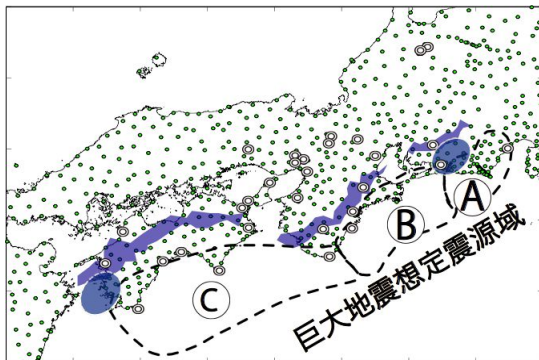


図1 南海トラフ沿いの想定震源域とゆっくり地震の発生領域（青色）。GPS 連続観測点（●）と歪計観測点（○）の分布も示す。

一般に地殻歪を知るには、ボアホール歪計（以下、歪計）や GPS 連続観測網を使う方法がある。歪計による観測では、測定精度は非常に高いものの、観測機器が高価で設置作業の手間が掛かるため展開できる数が限られ、面的な観測が難しい。また歪計設置後の

ドリフトの影響等もあり、地球潮汐等数日程度の比較的短期的な地殻変動現象については検出能力が高いものと考えられているが、それより長い、数週間から数ヶ月以上といったタイムスケールを持つ信号に対する歪計の計測特性がよく分かっていない。そのためその分解能の高さにも関わらず、現在のところは数日～1週間程度のタイムスケールの信号の検出に限定された使われ方に留まっている。また、歪計は観測機器の設置した近傍の歪を計測していると考えられているが、これがどの程度の拡がりの歪場を代表しているのか不明な点が多い。

一方、全国に稠密に展開された GPS 連続観測網では、衛星からの電波を地上に設置した GPS で受信し、その変位を測定するため、広域的な地殻変動の検出に威力を発揮している。また、GPS の観測点間の平均間隔は 20～30km であり、時間的・空間的な分解能も高いため、より微小な地殻変動を捉える研究が続けられている。

2. 研究の目的

従来、歪計による計測と、GPS から求められる歪とを比較した例は多くなかった。こうした調査がこれまで余り行われていなかった一因とし、歪計の展開できる数が少なく、系統的な調査が難しかったことによる。そうした中、産業技術総合研究所では複数の歪計観測点をネットワークとして展開して連続観測を継続しており、全国に稠密に展開されている国土地理院の GPS 連続観測網（GEONET）の情報とあわせて使うことで、ある程度の数の観測点で比較的長い期間に渡った比較ができるようになってきた（図1参照）。

そこで、本研究では、GPS 連続観測網と、特に近畿地方に設置された産業技術総合研究所の歪計ネットワークを比較し、歪計による数週間程度の時間分解能で計測特性を明

らかにするとともに、歪計のネットワークによるゆっくり地震の断層すべりを推定する際の精度について評価を行った。更に半年周期でゆっくり地震が繰り返し発生し、数ヶ月程度の時定数で歪蓄積と解放が行われていると考えられる沖縄県先島諸島で、ゆっくり地震発生時の歪場の時空間構造を調査するとともに、推定された断層すべりモデルの妥当性についての検証も行った。

3. 研究の方法

まず歪計を使ったゆっくり地震推定の精度を評価するため、紀伊半島沖で発生しているゆっくり地震などを対象として、沈み込むプレート面上でのすべり面同定やすべり量推定のための手法について精査した。そのためゆっくり地震を模したデータから歪計ネットワークを用いて、ゆっくり地震の断層すべり分布の推定をいくつかの条件下で行って、歪計による推定の精度を調べた。

また近畿地方に設置された産業技術総合研究所の7点の歪計の記録と、歪計観測点の周囲の GEONET 観測点から求められた GPS 歪と比較することで、特に数ヶ月程度のタイムスケールでの歪計の時空間特性について比較を行った。その際、GPS 観測点直近の3点と、更にそれを取り囲む3点で歪を計算することで空間スケールの違いについても調べた。歪計においては、卓越している器械的なドリフトを指数関数と直線フィットで除去し、その残差時系列を GPS 歪と比較した。

次にゆっくり地震が多数観測されている沖縄県先島諸島を対象として、ゆっくり地震に伴う歪場の変動の時空間構造を調査した。具体的には GPS の水平変位から各観測点間の様々な組み合わせによる面積歪を計算し、異なる空間スケールでの歪変動の相関を調べた。またその時間変動の詳細を調べるために、ウェーブレット変換を行ってウェーブレッ

ト係数の時間変化を求めた。いくつかのウェーブレット基底を用いて係数変化を求め、最適なウェーブレットを選定した。これらにより、断層すべりの開始時期を同定するとともに、ゆっくり地震に含まれる異なる空間スケール毎の時間変動を求めた。更に、ゆっくり地震による断層すべり過程を明らかにするために、過去発生したゆっくり地震について GPS から断層すべりを推定した。そのためにまずユーラシアプレートの剛体回転成分による見かけ上の変動を除去するとともに、各ゆっくり地震のイベントについて、指数関数をフィッティングしてその時定数を求め、ゆっくり地震の変位量を各イベントに対して推定した。その妥当性を評価するため、独立な観測量として同地で行われている重力計による連続観測の結果とも比較した。

4. 研究成果

まず紀伊半島沖で発生しているゆっくり地震について、プレート境界上でゆっくり地震が発生すると仮定して任意のすべり量を与え、各観測点における歪変動の計算値と観測量との残差二乗和を最小にするように、断層の位置や拡がり、すべり量をグリッドサーチで推定した。この手法により、どの程度の微弱なゆっくり地震を捉えられるかを確認するため、産業技術総合研究所の歪計ネットワークを模したシミュレーションを行なった。具体的には松本・北川(2005)等から得られている歪計の精度やノイズレベル等の現実的な数値を使い、ゆっくり地震のすべり量 10mm(モーメントマグニチュードで 5.7 程度)を与えてみたところ、均一なすべり分布の場合、精度よく各種断層パラメータ(主なすべり域やその大きさ)を推定することができた。一方、不均質なすべり分布を与えた場合、推定される断層面上のすべり域の拡がりには実際のものよりも小さくなること、その反面すべり量は大きくなる傾向が見られ、SN 比

を変えた実験を行ってもこの傾向は変わらなかった。しかし全体的に見て、すべり量の大きな領域に断層面が推定され、トータルとしてのモーメントマグニチュードは与えられたものと大きく相違せずに推定できることが分かった。

こうした結果から、歪計ネットワークを使ったゆっくり地震に伴うすべり域の推定は、観測点密度がたとえ GPS 観測網程には高くなくても有効であると考えられる。

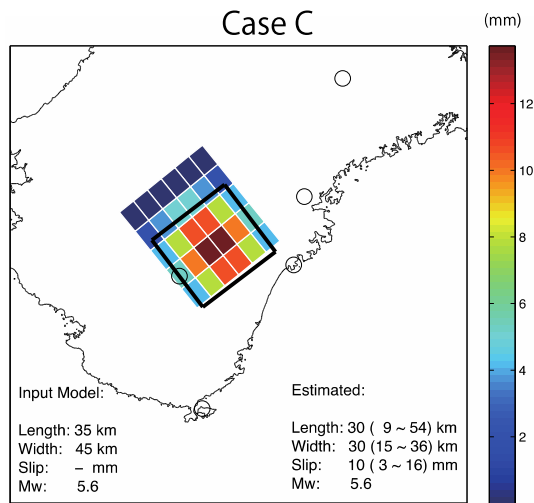


図 2 不均質なすべり分布によるゆっくり地震の推定精度の評価。歪計観測点。

数ヶ月程度のタイムスケールでの歪計の特性を調べるため、ポアホール歪計で観測された水平面内の 3 方向の線歪と、歪計観測点を取り囲む周囲の GEONET の GPS 連続観測点から計算された歪との比較を行った。

全体に共通する特徴としては、第一に歪計による計測値(日値)のばらつきは、GPS に比べると格段に小さく、歪計による計測分解能の高さを示すものの、GPS では経年的なトレンドを基準としてそこから偏差する変動は、せいぜい $0.2 \sim 0.3 \mu$ ストレイン程度に収まっているのに対して、歪計の場合は最大で 2μ ストレインにも及び大きな変動が見られ、両者の変動の様相に大きな違いが見られた。また、多くの歪計の記録には季節変動的な成分が認められ、これは GPS 歪にも観測さ

れている。一部の観測点では両者が振幅・位相ともにより相関を持っているところも存在したが(図 3)、他の多くの観測点では GPS では季節変動の振幅はおおよそ $0.05 \sim 0.2 \mu$ ストレイン程度の範囲に収まっているのに対し、歪計によるものは GPS よりも格段に大きな振幅を示すものがあり、かつ季節変動のパターンも GPS ほど周期的ではない傾向が見られた。こうした観測点では、季節変動成分の間にはっきりした相関は見られなかった。

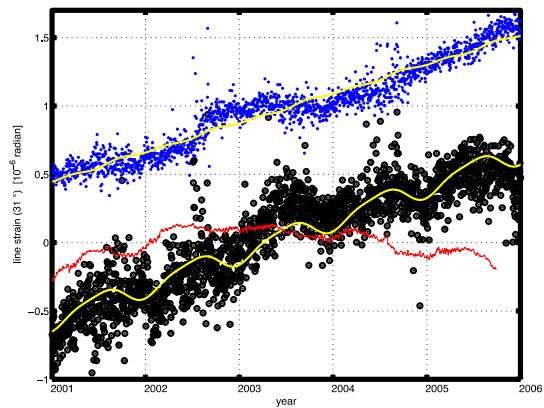


図 3 板東観測点の歪計による線歪(赤線)と、周囲の GPS 観測点から求めた線歪(黒点, 青点)とそのフィッティング(黄色)。

以上のように、場所によっては歪計と GPS との間に相関が見られるところがあるものの、広域的に離れた 7 点の異なる観測点においてははっきりした相関が見られず、歪計に不規則な大きな変動があることから、歪計には観測点固有のローカルな影響を強く受けていることが考えられ、数ヶ月程度の時定数の信頼ある地殻変動を捉えることは難しいことが示唆された。

次に、沖縄県先島諸島の GEONET の GPS データを用いて、ゆっくり地震に伴う歪場の変動の時空間構造を調査した。まず GPS の水平変位から各観測点間の面積歪を計算し、その時間変動の詳細を調べるために、トレンド成分を除去した後に連続ウェーブレット変換を行ってウェーブレット係数の時間変化を求めた(図 4)。その際、ウェーブレット基底

の選択のため, Haar, Gauss, Coiflet, Daubechies, Symlet の各種ウェーブレットを用いたが, 対称性の高いウェーブレットは一方でその形が複雑であることから変換されたウェーブレット係数の解釈が難しいことが分かり, 最もシンプルな Haar ウェーブレットによる方法を用いた.

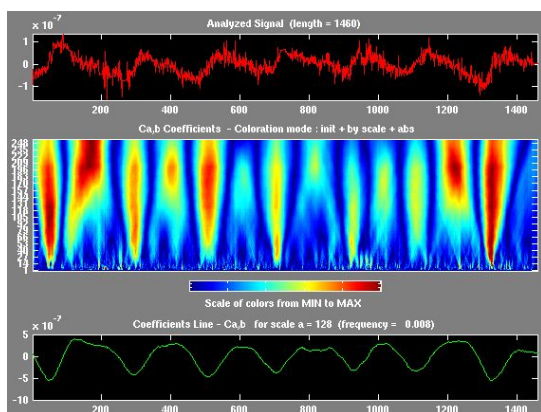


図 4 八重島諸島における GPS 歪 (上段) とそのウェーブレット変換 (中段), ウェーブレット係数の時間変化 (下段). 横軸は日.

事前にゆっくり地震による変位を似せた合成信号を用いて, Haar ウェーブレットを基底としてウェーブレット変換を行い, 各スケールの係数の時間変化の構造と元の時系列の比較からゆっくり地震の検出動態を確認したところ, 同様の手法を用いた Melbourne et al. (2005) や Szeliga et al (2008) の主張とは異なり, 推定された係数のピークは必ずしもゆっくり地震の開始時期には対応していません, ゆっくり地震が発生している期間の中間周辺に対応していることが分かった. そこで同一スケールの係数の時間変化における極値の間隔が, ゆっくり地震の繰り返し間隔に対応するものとして, ゆっくり地震の発生の間隔を同定した. 先島諸島全体を覆う GPS 観測点による歪については, スケールによって極値の位置は変動するものの, ゆっくり地震の周期に対応するおおよそのスケールに対しては, 発生間隔の平均は 208.3 日と

同定できた. 更にこの領域を分割するような区画について同様の方法で歪を求め, そのウェーブレット係数の相互の時間変動, 及び領域全体の歪のウェーブレット係数の時間変動を比較してみたが, 明瞭な関係性は見られなかった. これはゆっくり地震の断層面が先島諸島全体を覆い, 各区画でのゆっくり地震による歪変化が同じような時期に観測されるため, 歪変換における S/N の低さと相まって小区画間で変動を分離できるほどの時空間分解能がなかったためだと考えられる.

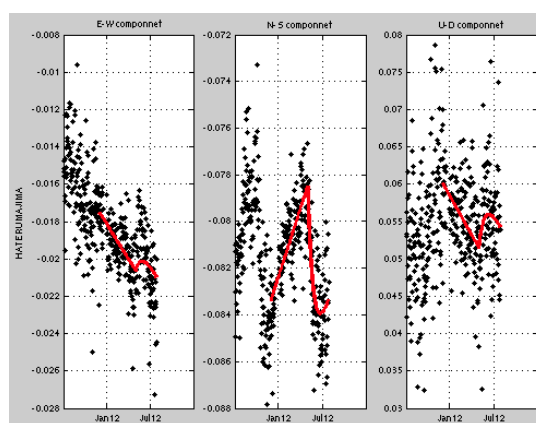


図 5 2012 年の波照間島 GPS 観測点の変位 (黒点) と, ゆっくり地震のフィッティングの結果 (赤色). それぞれ東西 (左段), 南北 (中段), 上下 (右段) 変位 (単位は m).

ゆっくり地震による断層すべり過程を推定するにあたって, 上記のように, 指数関数をフィッティングしてゆっくり地震の変位量をイベント毎に推定した (図 5). そして断層面モデルとして, 中村・兼城 (2000) によって求められたフィリピン海プレート上面のデータや Heki and Kataoka (2008) 等を検討し, 求められたゆっくり地震による変位量を使って, 断層面上のすべり量や方向を推定した (図 6).

推定されたモデルの妥当性の検証のため, 独立な観測量として同地で行われている重力計による連続観測の結果と比較を行った. そのために求められたゆっくり地震の断層

モデルによって期待される上下変位を重力変動に換算し、重力計による変動と比較したが、両者は必ずしも調和的ではなかった。この不整合の原因の一つとして、推定された断層すべりモデルに何らかのバイアスがあることが示唆された。

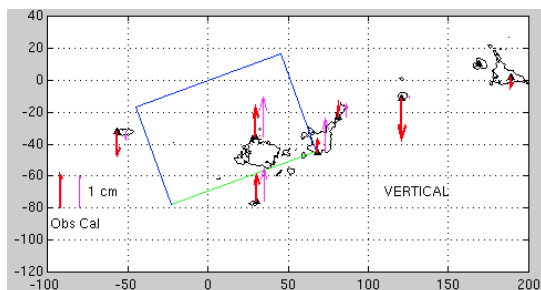


図 6 GPS の観測（赤矢印）と推定されたゆっくり地震による変位（桃矢印）。2012 年 5 月のイベント。図中矩形は用いた断層面。

< 引用文献 >

Heki and Kataoka(2008), J. Geophys. Res., 113, B11402, doi:10.1029/2008JB005739.

松本・北川(2005), 測地学会誌, 51, 131-145.

Melbourne et al.(2005), Geophys. Res. Lett., 32, L04301, doi:10.1029/2004GL021790.

中村・兼城(2000), 琉球大学理学部紀要, 70, 73-82.

Szeliga et al(2008), J. Geophys. Res., 113, B04404, doi:10.1029/2007JB004948.

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)

1. 大谷 竜・板場智史, 産総研地下水等総合観測網の歪計を使ったゆっくり地震断層面の簡易な推定方法, 地質調査研究報告, 64, 331-340, 2013. (https://www.gsj.jp/data/bulletin/64_11_02.pdf)

2. 大谷 竜・名和一成・松本則夫・板場智史, 産総研ボアホール歪計で計測された歪変動の GPS 観測との比較, 地質調査研究報告, 63, 93-105, 2012. (https://www.gsj.jp/data/bulletin/63_03_02.pdf)

[学会発表](計 0 件)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 竜 (OHTANI RYU)

国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門・主任研究員

研究者番号: 50356648

(2) 研究分担者

名和 一成 (NAWA KAZUNARI)

国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門・研究グループ長

研究者番号: 20262082

(3) 連携研究者