

GNSS測定で探る潮岬周辺の地殻上下変動

濱田 真衣子

和歌山県立日高高等学校

要旨

地球表面はプレート運動によって常時変動しており、和歌山県では南海トラフに近い南部では沈降し、北上するほど隆起している。その隆起と沈降の境のことをヒンジラインという。

GNSS（全地球航法衛星システム）観測による全国の観測点の日々の高精度な位置データを用い、次の南海トラフ地震の被害が想定されている、紀伊半島（潮岬周辺）と、他の南海トラフのヒンジライン周辺部（室戸岬周辺、御前崎周辺）の地殻変動について調べた。

大規模な地震が発生すると、地震時変動と余効変動により、常時とは異なる変動が観測されるため、地震の影響のない期間のデータを解析することにより、ヒンジラインの位置を特定した。その結果、過去の研究に比べ、南海トラフに近い位置にヒンジラインが特定された。観測されたデータに見られる変動速度は時間的に変化しており、正確な推定には、その要因説明が必須で、そのためにはより多くの観測点でのより長期間のデータをもちいた解析結果の比較が必要である。

重要語句：GNSS, 南海トラフ, 地殻上下変動, ヒンジライン, プレート沈み込み

序論

東北日本は北米プレート、西南日本はユーラシアプレートに属し、東北日本では日本海溝沿いに太平洋プレートが、西南日本では南海トラフ沿いにフィリピン海プレートが常時沈み込み、地震を発生させている。

南海トラフでは、古文書や津波痕跡などのデータから、90年から200年の間隔で繰り返し巨大地震が発生していることがわかっており、次の巨大地震は今世紀前半に起こると言われている。

私の住む和歌山県は、南海トラフが付近に存在するために、巨大地震の影響が懸念されている。本コースの講義で、地球表面はプレート運動によって常時変動し、地震発生時には反対向きに変動すること、GNSSを用いて全国の観測点の日々の位置を高精度で決定し、地殻変動の様子をとらえることができること、また、和歌山県で

は常時運動としてプレートの沈み込む領域に近い場所では沈降し、北上するほど隆起することを学んだ。

ヒンジラインとは、このような沈降と隆起の境のことを言う。一般に、ヒンジラインは、海洋プレートと陸側プレートが固着しているプレート境界面の最深部の地表投影部分より、やや大陸側に位置する。そのため、ヒンジラインが海洋側に移動するとプレート同士が固着している面積が小さくなると考えられる。この時、初期の接触面積と同等の力が小さくなった面積にかかるため、大陸プレートがその力に耐えきることが困難になり、地震が発生しやすくなると考えられる。

和歌山県は南部が沈降し北部が隆起しているため、和歌山県内をヒンジラインが横断していると考えられる。例えば小林⁽¹⁾によると、和歌山県には図1のようにヒンジラインが通っていると考えられている。このことを確かめるため、南海トラフのヒンジライン周辺部の地殻変動について調べ、ヒンジラインの位置の再検討を行なった。

さらに、フィリピン海プレートが沈み込み、同様な状況にあると考えられる室戸岬、および御前崎付近の上下変動も併せて調べ、室戸岬周辺については吉川⁽²⁾と、また、御前崎周辺については、西村⁽³⁾と比較を行った。

方法

調査地域は、過去の文献よりヒンジラインが通っていると考えられている、和歌山県の潮岬周辺、高知県の室戸岬周辺、静岡県御前崎周辺を選び、データには、国土地理院により展開されているGEONET（GNSS Earth



図1. 小林⁽¹⁾によるヒンジラインの位置 (Google マップ <https://www.google.co.jp/maps/> より作成)

内容に関する連絡先：

平原 和朗（京都大学理学研究科）

hirahara.kazuro.6r@kyoto-u.ac.jp

Observation Network System) で観測された日々の観測点座標値を用いた。

GNSSを用いた測位方法は、大きく分けて、相対測位と単独測位の2つの方法がある。

相対測位とは、2台以上の受信機で同時に4個以上の同じGNSS衛星を観測し、GNSS衛星の位置を基準にGNSS衛星からの電波信号がそれぞれの受信機に到達する時間差を測定して、2点間の相対的な位置関係を求める方法である。2点の観測値の差をとることにより、観測値に含まれる衛星の位置の誤差や対流圏・電離層遅延量の共通の誤差が消去される。国土地理院の解析で使用されているが、基準観測点を必要とし、国土地理院では、筑波を基準観測点としている。

単独測位は、4個以上のGNSS衛星から送信される衛星の位置や時刻などの情報を1台の受信機で観測することで、受信機の位置を決定する方法である。単独測位には、カーナビなどで使用される通常の方法と、より高精度な位置が得られる精密単独測位とがあるが、精密単独測位では、相対測位と異なり二重差による誤差の消去がされないため、電離層遅延・対流圏遅延については推定パラメータを使った精密モデルで補正を行っている。

本研究では京大防災研西村准教授に提供していただいた、基準点を必要としない精密単独測位による解析値を使用した。

各観測点における日々の位置の変動は、図2に示す各観測点における日々の地心直交座標系 (X, Y, Z) の変動量 (dX, dY, dZ), および緯度 (lat_rad), 経度 (lon_rad) を、以下の計算式に代入することで、観測開始時からの南北、東西、上下方向の変動の変位 (dN, dE, dU) を求めた。

$$\begin{aligned} dN &= -\sin(\text{lat_rad}) * \cos(\text{lon_rad}) * dX \\ &\quad - \sin(\text{lat_rad}) * \sin(\text{lon_rad}) * dY \\ &\quad + \cos(\text{lat_rad}) * dZ \\ dE &= -\sin(\text{lon_rad}) * dX + \cos(\text{lon_rad}) * dY \\ dU &= \cos(\text{lat_rad}) * \cos(\text{lon_rad}) * dX \\ &\quad + \cos(\text{lat_rad}) * \sin(\text{lon_rad}) * dY \\ &\quad + \sin(\text{lat_rad}) * dZ \end{aligned}$$

図3は、GEONET0070串本観測点での日々の変動をグラフに示したものである。横軸は時間を表し、1994年9月28日から2016年12月31日の期間、縦軸は、1994年9月

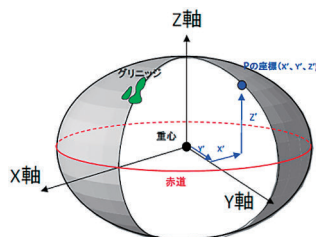


図2. 地球上の座標 (地心直交座標系)
(国土地理院HP参照 <http://www.gsi.go.jp/kanshi/faq.html#2-2>)

28日の観測点位置を基準とした変動を表す。赤が南北 (dN) 黄が上下 (dU), 灰が東西 (dE) 変動を示す。

図3から分るように、グラフにはプレートの沈み込みによる定常変動の他に色々な変動が現れている。

まず、2003年2月14日に見られるオフセットは、アンテナ交換による人為的なもので、交換日は国土地理院から公表されている。次に、2004年9月5日と7日には、観測点近くで発生したM7.1とM7.4の紀伊半島南東沖地震による地震時変動が見られる。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) では、紀伊半島南東沖地震より震央距離が大きいにも関わらず、大きな地震時変動が現れている。さらに、この巨大地震後には余効変動と呼ばれるゆっくりとした変動が見られる。

このように、図3には、アンテナ交換、地震時変動、大規模な地震発生に伴う余効変動といった常時とは異なる変動も含まれている。この内、地震時の上下変動の影響は、紀伊半島南東沖地震はプレート内部の水平横ずれ断層運動で、また東北地方太平洋沖地震は縦ずれ断層運動だが低角の逆断層のため、いずれも水平変動に比べ小さくなっている。一方、アンテナ交換では上下変動に大きなオフセットがでているため、本研究の対象である上下変動速度の推定においては、アンテナ交換の影響のみを補正した。

具体的には、アンテナ交換日の前後5日ずつの上下変動の平均の差をもとめ、その差を補正することで、常時変動のみのグラフを得た (図4)。

図4を詳細にみると、上下変動のデータには、大気中水蒸気量の推定誤差や、農業用水などでの地下水使用による地盤沈降など、年周期の変動が見られる。また、上記の2つの地震の影響は、小さいというものの避ける

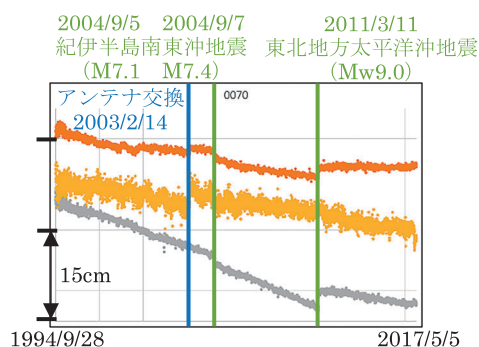


図3. GEONET0070串本観測点での日々の変動

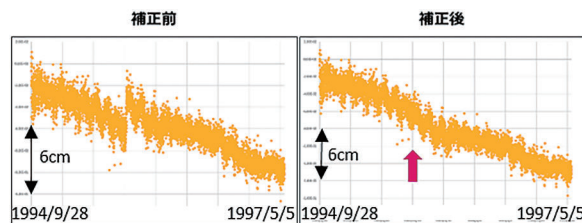


図4. GEONET0070串本観測点でのアンテナオフセットの補正前 (左) と補正後 (右)

方が望ましい。そこで解析期間は、紀伊半島南東沖地震発生後から東北地方太平洋沖地震発生前の6年間とし、年周変化の影響を避けるために解析開始と終了の日付を揃え、また、余効変動の影響をできるだけ小さくするために、開始日はできる遅い日とし、解析期間を2005年3月1日～2011年2月28日に設定した。ただし、観測開始日が2005年3月1日以降の観測点では、観測開始後の最初の3月1日からのデータを用いて解析を行った。このようにして得られた一日あたりの（傾き）（m/日）を用い、（年変動）は、以下で求めた。

$$\begin{aligned} (\text{年変動}) &= (\text{傾き}) (\text{m/日}) \\ &\quad \times 365.25 (\text{1年の日数}) \end{aligned}$$

このようにして得られた各点での（年変動）の結果を用い、以下に示す年間の上下変動速度の等値線図（1 mm/年間隔）を作成した。

結果

図5はこのようにして作成された紀伊半島の上下変動速度等値線図である。隣り合う観測地点の値の差をもとに等値線を引いたため、完全に正確とはいえないが、 ± 0 mmラインがヒンジラインと推定できる。

なお、図7および図8には、同様の方法で求めた室戸岬、および、御前崎での上下変動を示す。

考察

図6は、小林⁽¹⁾が1997年1月～2000年1月および2007年1月～2010年1月の3年ずつのデータを用いて、本研究とは異なる解析方法で求めた等値線図で、緑の枠内が本研究の図5の地域である。これらと比較すると、いずれ

も南部ほど沈降し北部になるほど隆起する同様の傾向を示している。しかし、図6のヒンジラインは、図5の「+2.0 mm/年」の等値線に近く、また、全体的に、図6の数値は図5より小さい値になっている。これは、2004年紀伊半島南東沖地震の余効変動が紀伊半島南部で隆起として現れるため、今回推定した沈降速度が小林⁽¹⁾の図より小さくなったものと考えられる。

図7は、室戸岬周辺の結果について、吉川⁽²⁾との結果と比較を行ったものである。ヒンジラインの位置と隆起・沈降速度の値は異なるが、2つとも南部が沈降し、北部が隆起していることがわかった。

次に、御前崎周辺の結果（図8）と西村⁽³⁾の解析結果（図9）の比較を行った。ヒンジラインの位置と隆起・沈降速度の値は異なるが、2つとも南部が沈降し、北部が隆起していることがわかった。また、（図9）に比べ、（図8）におけるヒンジラインが駿河トラフから遠い位置にある。

以上より、各地域においてヒンジラインを認めることはできたが、その位置や隆起・速度の値がこれまでの研究結果と少し異なっている。串本観測点でのアンテナオフセットを補正した上変動図（図4）に示したように、沈降速度がかなり時間変化しているように見える。その要因として、地震時変動および地震後の余効変動に加え、

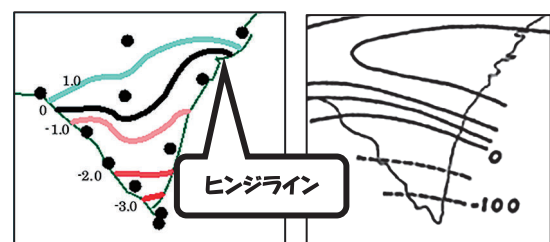


図7. 室戸岬の年間の上下変動の速度の等値線図
（左）本研究，（右）吉川⁽²⁾

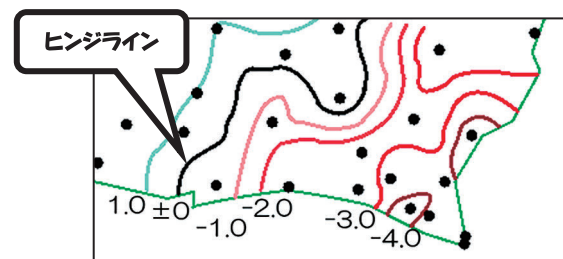


図8. 御前崎の年間の上下変動の速度の等値線図

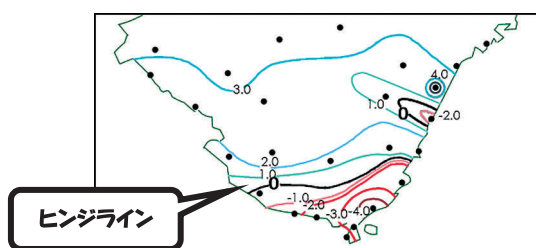


図5. 上下変動の速度の等値線図（mm/年）

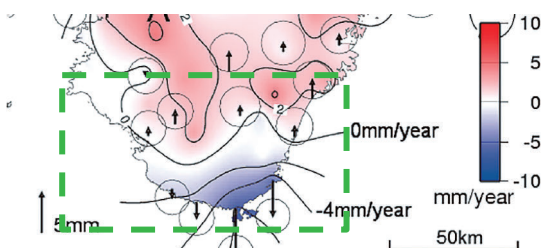


図6. 水準測量と潮位による紀伊半島の地殻上下変動（小林⁽¹⁾）

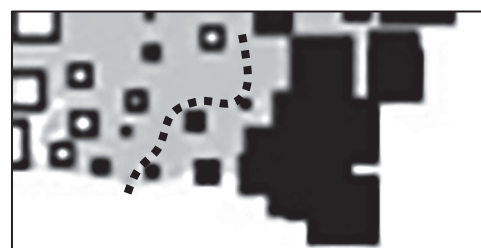


図9. 西村⁽³⁾の結果（■は沈降，□は隆起を表す）

最近発見された紀伊水道での長期的スロースリップおよび紀伊半島深部での短期スロースリップによる変動が考えられる。従って、本研究結果には更なる検討が必要と思われる。

プレートの沈み込みによる定常変動速度のより正確な推定には、観測された沈降速度の変動の要因解明が必須であり、そのためにはより多くの観測点での、より長期間のデータをもちいた解析を行い、より多くの結果を比較することが必要である。

結論

GNSSによる地殻変動データ解析手法を学び、GNSS上下変動データの解析により潮岬周辺における沈降・隆起域の分布を調べ、次期南海トラフ巨大地震の発生に向けて、プレートの沈み込みによる現在の上下地殻変動を調べた。その結果、隆起・沈降の境目であるヒンジラインは和歌山県南部に位置することが分かった。

本解析では、潮岬周辺ではこれまでの研究結果より南方にヒンジラインを推定することとなった。プレートの固着状態の変動により、上下変動そのものが移動している可能性がある。過去の研究結果と本研究の結果がこのような上下変動の移動を反映していると仮定すると、ヒンジラインは過去より南方に移動しているため、次期南海トラフ地震発生に向けて、固着域の下端が浅くなり、固着域が狭まっている可能性を示唆している。

しかしながら、こういった可能性を論じるには、より長期の、多くの地点の変動を解析し、より正確なデータを得ることで、様々な変動原因を明らかにする必要がある、更なる検討を要する。

謝辞

本研究を行うにあたり、さまざまな講義・巡検といった指導を行って下さった平原教授、風間助教、宮崎准教授、大学院生の我如古さん、大畑さん、横井さん、また、GEONET解析データを提供していただいた西村准教授に感謝致します。

参考文献

1. 小林昭夫. 水準測量と潮位による紀伊半島の地殻変動 (1972年～2009年). 測地学会誌, 66: 5-25. (2013).
2. 吉川寅雄. 西南日本外帯の地形と地震性地殻変動. 第四紀研究, 4: 157-170. (1968).
3. 西村卓也. 南海トラフ地震源域のひずみ蓄積状況比. 地震ジャーナル, 62. (2016).

Vertical crustal movement around the Shionomisaki region, Kii Peninsula, southwest Japan, estimated from GNSS measurements

MAIKO HAMADA

Wakayama Prefectural Hidaka High School

Abstract

The surface of the Earth is moving because of plate motion. In Wakayama Prefecture, the southern region near the Nankai Trough steadily subsides, and the region toward the north steadily uplifts. The border between them is called the hinge line.

GNSS (Global Navigation Satellite System) provides daily positions at observation stations. From these data, we can estimate crustal deformations currently in progress. Therefore, using the GNSS data, we investigated crustal deformations around the hinge line on the Kii Peninsula, where the great disaster caused by the next Nankai earthquake is anticipated.

Large earthquakes produce coseismic and postseismic deformations, which change the steady crustal deformations. In view of such changes, we analyzed the data that were not affected by earthquakes and estimated the location of the hinge line. Our analysis showed that the hinge line is located closer to the Nankai Trough than those estimated by previous studies. To make more accurate estimations, we have to clarify the changes in the vertical deformation rate. For that purpose, we need to compare many more results that are analyzed from data observed in more stations during longer time periods.

Key words: GNSS, the Nankai Trough, vertical crustal movement, hinge line, subduction of plate

Corresponding Researcher:

Kazuro Hirahara (hirahara.kazuro.6r@kyoto-u.ac.jp)

Graduate School of Science, Kyoto University