

和歌山県北部の隆起

Uplift in the Northern Wakayama Prefecture

橋本 学

Manabu HASHIMOTO

Synopsis

Imamura (1929) found an uplift between the Wakayama and Kainan cities in the northern Wakayama Prefecture based on leveling data. Yoshida et al. (2011) also found another uplift along the Kinokawa River, east of the Wakayama city. I reexamined leveling data from the first survey in the 1890's to the latest one in this region and found that these two uplift episodes are not overlapped each other in space and time. Uplift found by Imamura was rapid till 1960's and decelerated afterward. This deceleration may be correlated to the uplift at the Kainan Tide gauge station during early 1970's - mid 1990's. Area of uplift by Yoshida et al. had subsided till 1980's and turned to rapid uplift then. Recent observations with InSAR reveal two spots of uplift in the Wakayama city and south of the Kinokawa River. These observations suggest that at least 5 episodes of uplift occurred in northern Wakayama Prefecture during 130 years.

キーワード: 和歌山県北部, 隆起, 水準測量, 潮位, InSAR

Keywords: Northern Wakayama Prefecture, uplift, leveling, tide, InSAR

1. はじめに

和歌山県北部は、我が国でも有数の微小地震発生地域である。これまで三雲先生はじめ諸先輩方が地震観測や種々の調査を実施し、その特異な性質を明らかにされてきた。今村 (1929) は、陸地測量部が実施した水準測量のデータから南海地震前の紀伊半島南部の沈降とならんで、和歌山県北部に局所的な隆起が生じていることを指摘した

(Fig.1)。1896年から1928年の約30年間に、和歌山市～海南市間に7cmを越える隆起を検出した(湯浅町付近を基準)。同時に地震観測を実施し、微小地震や地質との関係を論じている。東京大学地震研究所は和歌山観測所を中心に、当地で顕著な地震活動が発生した場合、国土地理院が実施した水準測量に加え独自の測量も実施し、地殻変動の検出を試みている [宮村・岡田, 1960; 岡田・

他, 1968]。しかし、その後この地域において、顕著な地殻変動は報告されていない。

Yoshida *et al.* (2011) は、国土地理院のGNSS観測および水準測量の結果から、和歌山県北部紀ノ川沿いに隆起を検出し、微小地震の分布・地殻構造との関係を議論している。Yoshida *et al.* (2011) はGEONET打田観測点(950368)が周囲より隆起が顕著であり、さらにその南部に伸張ひずみが生じていることを示した。また、隣接する水準点1580を中心に隆起が生じていることも明らかにした。

Fig.2は2014年から2018年の気象庁一元化震源による深さ30kmより浅い地震の震央分布と、GEONETの上下変位を示したものである。Yoshida *et al.* (2011)の調査期間とは異なるが、和歌山県北部の内陸のGEONET観測点は隆起が目立つ。一方、地震活動は一樣に発生しているわけではない。和歌山市～有田市の沿岸部から紀伊水道にかけて密

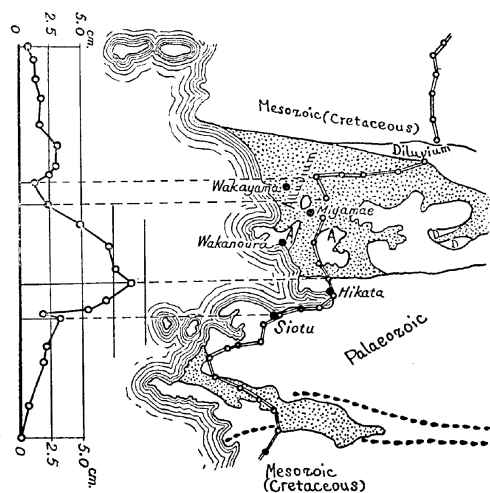


Fig.1 Uplift in the northwestern Wakayama area detected by leveling survey during 1896 - 1928 [Imamura, 1929]. Thick solid line indicates leveling route. Open circles are leveling benchmarks. Thin solid and dotted lines are geological boundaries.

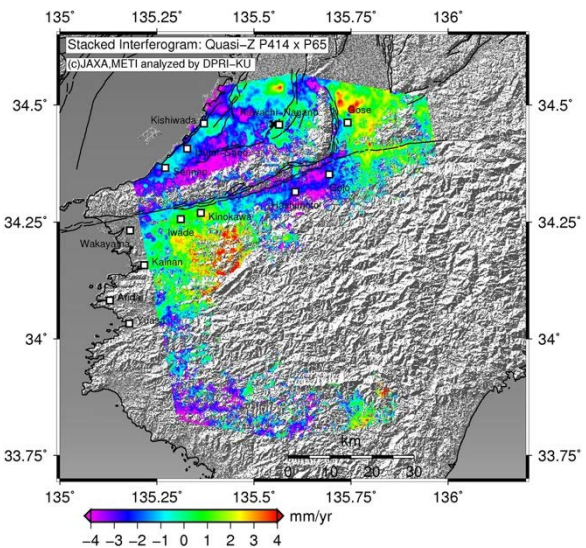


Fig.3 Quasi-vertical movement derived from decomposition of stacked interferograms of ALOS-1/PALSAR-1 from ascending (P414) and descending (P65) orbits. All images were acquired during 2007 - 2010. Positive value indicates uplift. White squares are center of the city after Hashimoto (2016).

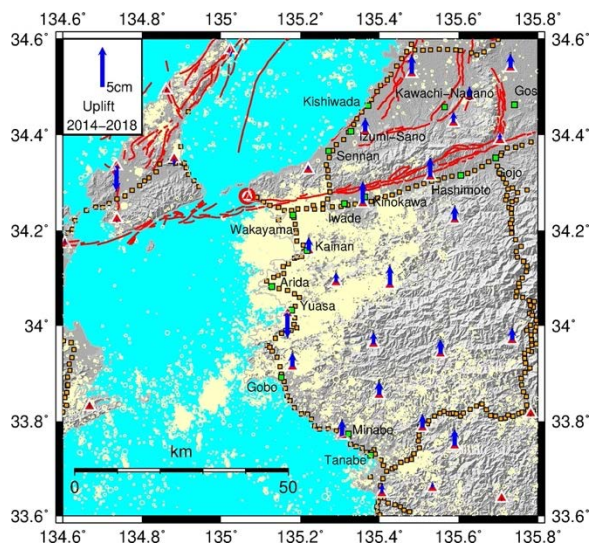


Fig. 2 Epicentral distribution of shallow earthquakes (depth < 30 km) in the northwestern Wakayama area from the JMA catalog [Japan Meteorological Agency, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018] with vertical displacements (blue arrows) at GEONET site (red triangle) relative to the Wakayama site (950369; red circle) during 2014 -2018. GEONET F5 solution (Muramatsu *et al.*, 2021) is used [https://terras.gsi.go.jp]. Green and orange squares are city center and leveling benchmarks, respectively.

集しているが、内陸部ではいくつかのクラスターあるいは帯状の分布が認められる。

橋本 (2016) は、中央構造線断層帯周辺の地殻変動を調査するために ALOS/PALSAR データを解析した (Fig.3) . その結果、紀ノ川の南岸に Yoshida *et al.* (2011) の推定した隆起と整合する隆起を検出した。ただし、山地でのコヒーレンスが低かったため、隆起域の全体像を示すまでに至っていない。

和歌山県北部は、紀ノ川の沖積平野の和歌山平野を除き三波川変成帯が占める (Fig.4) . 紀ノ川の北側には和泉山脈が位置し、その南麓に中央構造線がある。また、三波川帯の南縁は四十十帯に接し、その境界は有田川構造線と呼ばれている [例えば、牧本・他, 2004] . 前述の隆起はいずれも三波川帯内部で発生しており、地質構造との関係が示唆される。

このように和歌山県北部はテクトニクスの観点からも興味深い現象が出現している。しかし、過去の研究は、時間・空間的に断片的なデータに基づいており、相互の関係についての議論ができていない。そこで、過去の水準測量や潮位データを収集・解析し、この地域の上下変動の時空間変化を調べ、その特徴を整理する。

2. 海南駿潮場～和歌山市間の隆起

今村明恒は、昭和初期に南海地震に関する調査研究を精力的に行ってきた。その一つが当時の陸地測量部に依頼した水準測量である。紀伊半島西岸については、1896年、1928年、1932年の3回実施された。それによると、Fig.1に示すように、和歌山市南部から海南市に至る地域で、湯浅町付近を基準にして、7 cmを越える隆起が検出された[今村, 1929]。海南駿潮場 (Fig.1の siotu (塩津)のあたり。水準点等の詳細な位置については Fig.5を参照のこと) を基準にしても、5 cmを越える。宮村・岡田 (1960) と岡田・他 (1968) は、1960年代までに隆起は継続していることを報告している。

この変動のその後の長期的な変化を調べるために、国土地理院の一等水準点検測成果集録 [国土地理院, 1955～2020] から、海南駿潮場に相対的な水準点の比高の時間変化を計算してみた (Fig.4)。各水準点の詳細な位置をFig.5に示す。これによると、和歌山市～海南市間の隆起は、①1896年から現在にいたるまで継続し、もっとも隆起している水準点4880と4881は1960年ころまでに10 cm以上隆起していること、③隆起の中心は135.2°E, 34.2°N付近にあること、④隆起速度は時間的に変化しており、1960年代以降低下していること、などがわかる。また、1946年南海地震時をはさんで、隆起の傾向に変化が認められないことも興味深い。

ところで、Fig.6で基準とした海南駿潮場の安定性を確認する必要がある。幸い、国土地理院の海岸昇降検知センターが、1950年代からの月平均潮位データを加藤・津村の方法で解析した結果を公開しているので [海岸昇降検知センター, 2003]、紀ノ川河口にある和歌山検潮所を合わせて収集・解析した。

海南駿潮場は1960年代後半に隆起が始まり、1990年代前半まで約2.2 mm/年の速度で隆起が続いた。しかし、1990年代前半から隆起速度が1 mm/年以下に低下し、現在まで続いている (Fig.7)。上記の和歌山市～海南市間の水準点の隆起の時間変化が1960年代前半に起きていることから、これらは関連性が示唆される。和歌山検潮所に近いJ273は、1932年まで沈降していたが、その後隆起に転じた。1950年ころにその隆起も収まり、以後安定している。このことから今村が指摘した隆起は、海南市から和歌山市中央部あたりに及んでいたものと考えられる。

和歌山検潮所は複数回移転や計器の置き換えがなされていて、長期間の変動を見るのには問題が残る。しかし、1980年以降は顕著な変動は見られない。

3. 紀ノ川沿いの隆起

紀ノ川沿いの隆起を指摘したのは、国土地理院 (2009) が最初である。Yoshida *et al.* (2011) は、このデータとGEONETのデータを元に、紀ノ川市周辺の

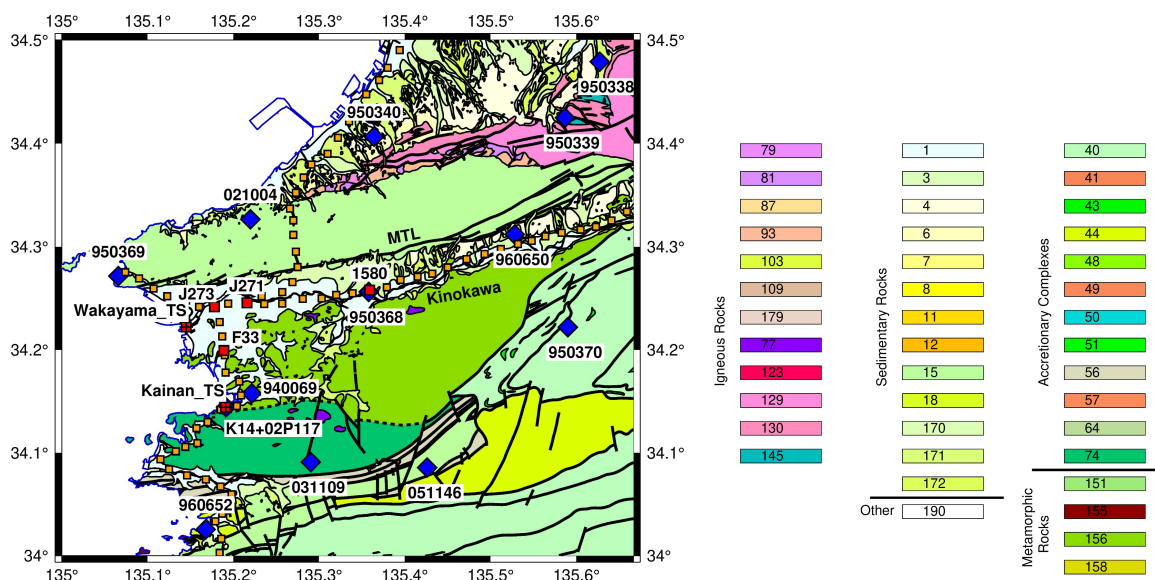


Fig. 4 Distribution of leveling benchmarks in northern Wakayama area overlaid on the Seamless Geological Map of AIST (2015). Orange rectangles are leveling benchmarks. Red rectangles are key benchmarks: K14, attached benchmark at the Kainan tide gauge station; F33, fundamental benchmark #33; J273 and J271, junction benchmarks J273 and J271; 1580, benchmark, 1580. Blue diamonds are GEONET sites. Legend of geology is given on the right side. Numbers shows geological units defined by AIST. 156 is the Sanbagawa metamorphic rock.

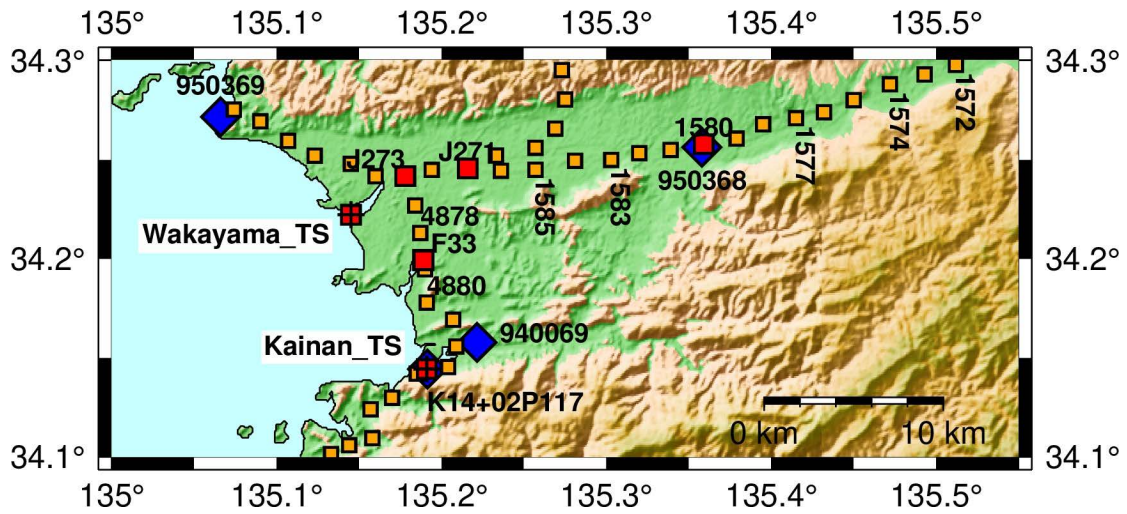


Fig.5 Index map of benchmarks, GEONET stations, and tide gauge stations in the northwestern Wakayama area.

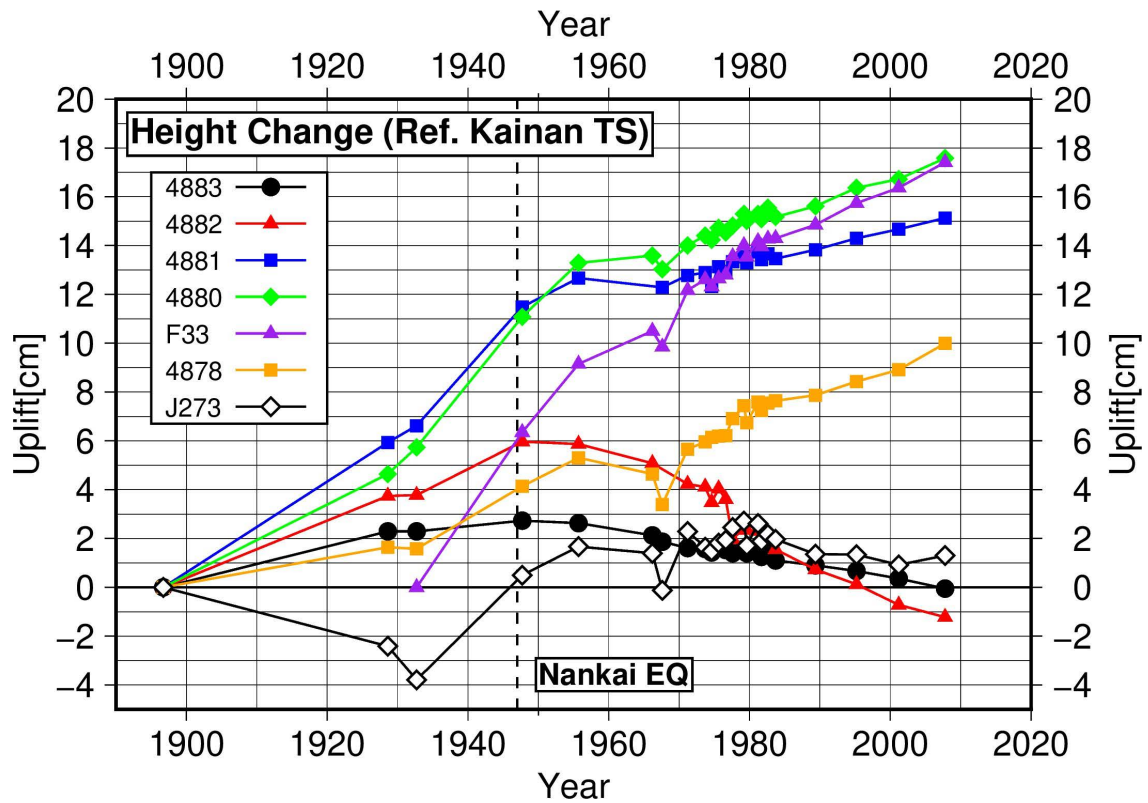


Fig. 6 Temporal variation in height changes of selected benchmarks relative to the benchmark at the Kainan tide gauge station (K14 in Fig. 1) during the period from 1896 to 2007. Data was taken from Annual Report of 1st order Leveling Surveys (Ittoh Suijunten Kensoku Syuroku) by GeoSpatial Information Authority (<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/level/KENSOKUSYUROK/collection.htm>).

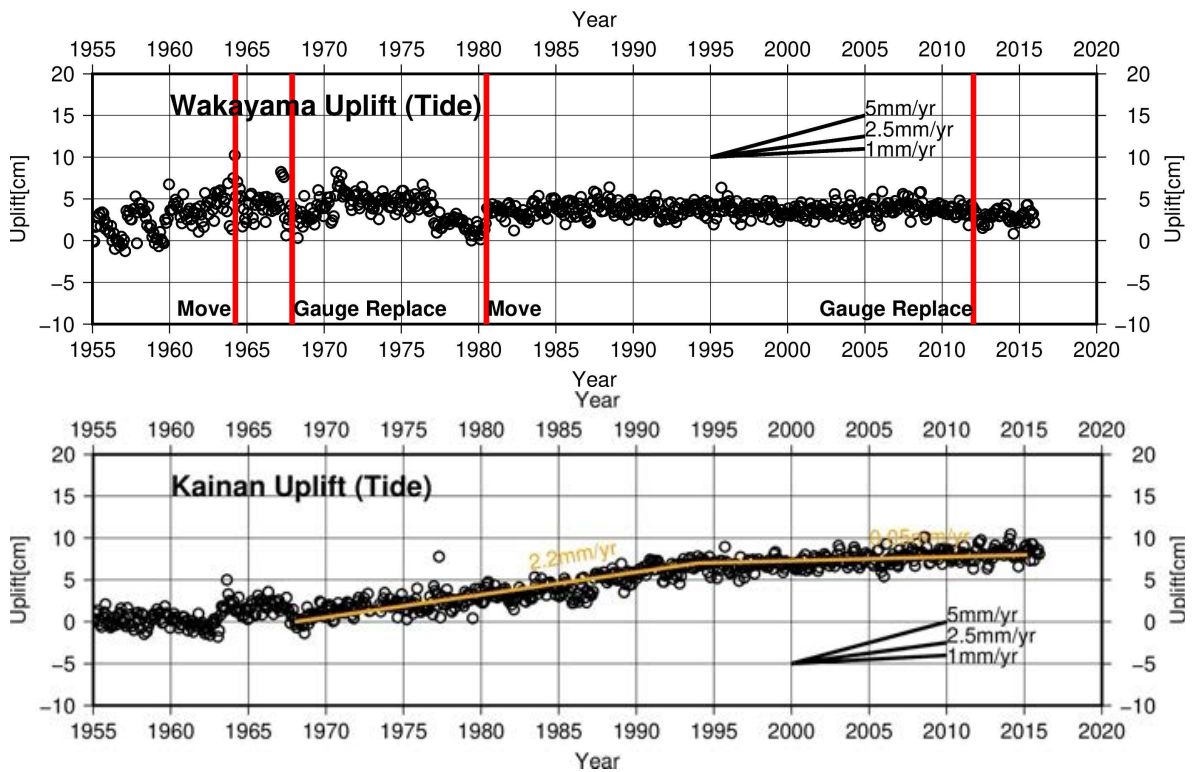


Fig. 7 Temporal variation in uplift at the Wakayama (Top) and Kainan (Bottom) tide gauge stations during 1955 - 2015. Result of the analysis with the method by Kato and Tsumura (1980). Orange lines for the Kainan tide gauge station are regression lines for two periods: 1968 - 1994 and 1994 - 2015.

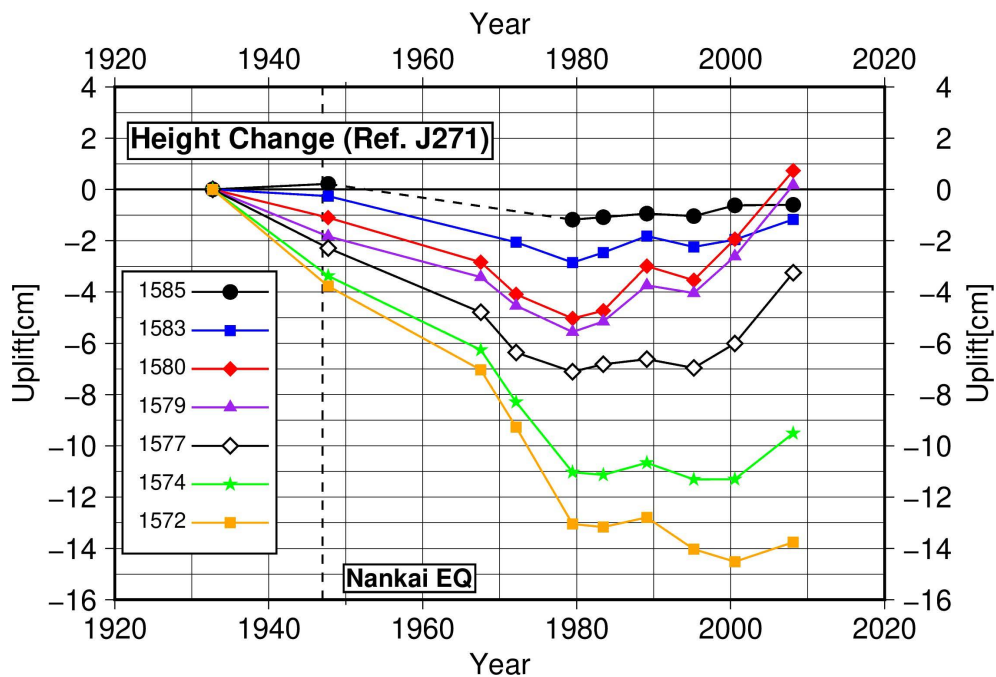


Fig. 8 Temporal variation in height changes of four benchmarks along the Kinokawa River relative to J271 from 1932 to 2008. Data was taken from Annual Report of 1st order Leveling Surveys.

隆起を議論した。これらによると、1979年以降一等水準点1580～1579付近で顕著な隆起が観測されている。

これらの水準点について、1930年以降の比高の経年変化を調べてみた (Fig.5)。和歌山市北東部のJ271に対し、紀ノ川市にある水準点1580などは1980年代まで、50年間で約5 cm沈降していた。その後、隆起に転じ、1990年代以降は約4 mm/年の速さで隆起している。水準点1585の変動は顕著ではないので、変動域の中心はこれよりも東にあると考えられる。1580より東側の1577, 1574は、1980年頃まで沈降し、その後停滞、そして2000年ころから隆起に転じている。1572は、1979年からの積算では沈降となる。したがって、隆起は1580付近で始まり、2000年前後に加速し、東西約20 kmの領域まで拡大したと考えられる。なお、GEONETの観測は1994年以降なので、2000年前後以降の加速された隆起を捉えているといえる。

4. 最近のSAR観測の結果

変動の時間変化を追跡するには、GEONETの日座標を見るのが最適であるが、GEONETの観測点間隔ではここで議論しているスケールの変動を捉えきれない。また、1観測点のデータをもって一定の拡が

りのある地域を代表させるのは危険である。このため、SARのデータに基づく議論が不可欠である。

Fig.3に、橋本 (2016) によるALOS-1のSARデータの解析から推定した上下変動図を示す。2007年から2010年のALOS-1の北行軌道 (Path 414) と南行軌道 (Path 65) の画像をそれぞれ干渉処理し、コヒーレンスの高い干渉画像のみをスタッキングした結果である。解析には、Gamma@を使用した。使用した画像が沿岸部をカバーしていないため、海岸線付近の変動をみることができない。また、山地部はコヒーレンスが低く、変動が得られていない。しかし、和歌山県北部紀ノ川市の南側に、3 mm/年を越える隆起が検出された。

ALOS-1は2011年で運用停止したため、その後の経過を見るためには2014年に打ち上げられたALOS-2の画像を使用する。なお、同時期に打ち上げられた欧州宇宙機関のSentinel-1は観測頻度が高いものの、CバンドSARを用いているため、和歌山県北部のような山地が多い地域には適さない。

2014年9月から2020年12月までのALOS-2の北行軌道 (Path128) と南行軌道 (Path20) の画像を収集し、干渉処理しスタッキングした結果を、Fig.9に示す。北行軌道の画像 (Fig.9a) は135.3°Eあたりまでしかカバーしないため、Fig.3にある紀ノ川市南側の隆起

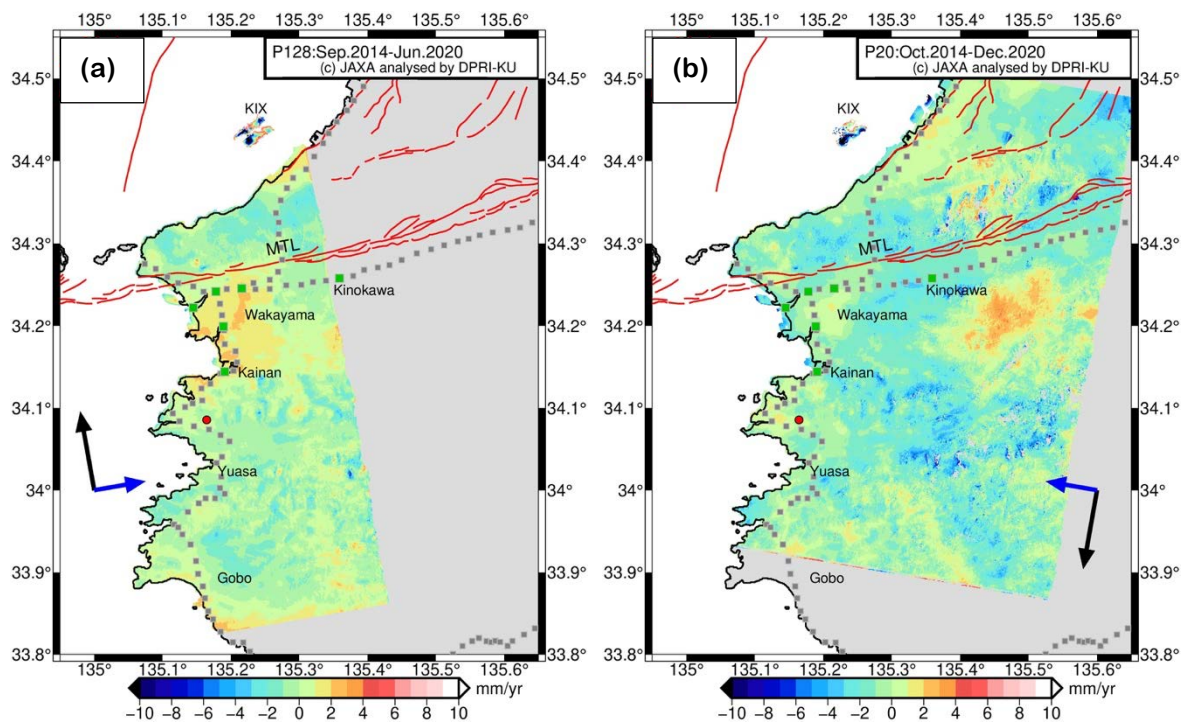


Fig.9 Average rate of line-of-sight derived from stacking of interferogram of ALOS-2/PALSAR-2 from the ascending orbit (P128) during September 2014 to June 2020: (a) ascending (P128) and (b) descending (P20) images. Positive value means movement toward satellite. Red dot indicates reference point. Black and blue arrows show directions of flight and emission of microwave, respectively. Green and gray squares are benchmarks. Benchmarks painted in green corresponds to those in red in Figs. 4 and 5.

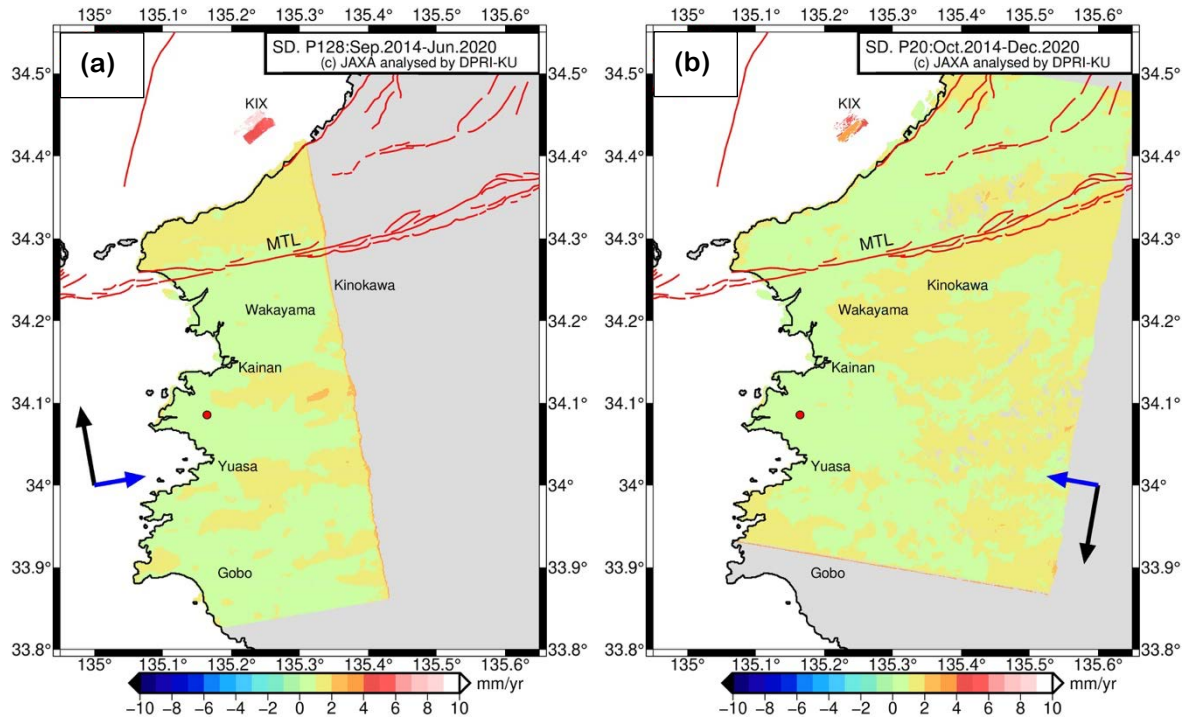


Fig.10 Estimated error of rates of line-of-sight changes for Fig.7: (a) ascending (P128) and (b) descending (P20) images. Red dot indicates reference point. Black and blue arrows show directions of flight and emission of microwave, respectively. Green and gray squares are benchmarks.

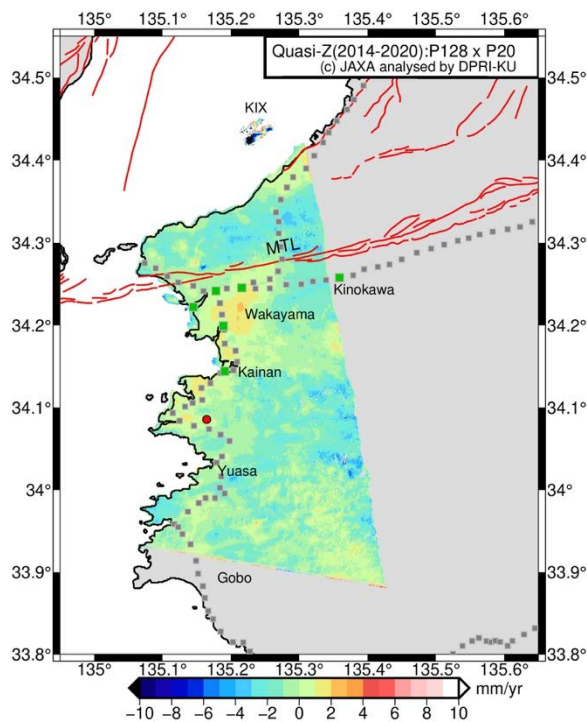


Fig.11 Quasi-vertical movement in the northwestern Wakayama area derived from decomposition of stacked interferograms from two directions in Figs. 7 and 8. Red dot indicates reference point.

域は見えない。しかし、沿岸部をカバーしている。これによると、わずかながら和歌山平野から沿岸部に衛星に近づく変位（約3 mm/年）が認められる。一方、南行軌道の画像（Fig.9b）は、沿岸部から135.6°E付近までカバーするので、Fig.3の隆起も確認できる。135.5°E、34.2°N付近を中心とする最大4 mm/年程度の衛星に向かう変動は、Fig.3中の隆起が2014年以降も継続していることを示唆する。なお、観測誤差は、いずれの画像についても最大で3 mm/年程度で、平野部などのコヒーレンスが高い領域では1 mm/年程度である（Fig.10）。Fig.11に2方向の画像から合成した上下変動を示す。和歌山平野に最大約3 mm/年の隆起が認められる。

5. これらの隆起の関係

過去の水準測量データを再解析し、さらに最近のSARデータ解析を検討した結果、複数の隆起エピソードがあったことが示唆される。

時間順に整理すると、

- (1) 1896年以降1960年代までの和歌山市～海南市間の隆起、
- (2) 海南験潮場の1970年ころから1990年代半ばまでの隆起、
- (3) 1979年以降の紀ノ川沿い紀ノ川市付近の隆起、

- (4) 2007年以降の紀ノ川市南方の隆起,
 - (5) 2014年以降の和歌山市内の隆起,
- の5つのエピソードが確認される。

(1) は今村らが検出した隆起で, (3) がYoshida *et al.* (2011)で議論された隆起である。両者は, 隆起の中心となっている水準点 (F33と1580) は, 約20 km 離れており, 明らかに空間的に別な現象と考えられる。(2) の海南駿潮場の隆起は, 1970年ころから始まっており, (1) の水準点の隆起が減速する時期と符合する。これは和歌山市の水準点の隆起は一定速度で継続し, 隆起が南方に拡大したと考えることができる。ただし, 1990年代以降は海南駿潮場の隆起は減速しているのに対し, Fig.6の水準点の隆起速度に変化が見られないことを説明できない。また, (5) のSARで検出された和歌山市内の隆起は, F33より北側にある。水準測量で検出された隆起とは期間も重複しないので, 別のイベントの可能性もある。

紀ノ川沿いの変動は, 1980年前後で明瞭な反転が生じている。Fig.8のデータは, 和歌山市内の水準点を基準にしているため, 和歌山市内の地盤変動を反映している可能性がある。しかし, 度重なる移転や維持管理作業のためにデータに不連続があるものの, 和歌山検潮所に大きな変動は認められない。したがって, Fig.8の変化は水準点1580周辺で生じたと考える。1980年ころに反転していることから, それ以前の地盤沈下からの回復とも見ることが出来る。この水準路線は, 紀ノ川に沿って敷設されている。地理院地図 [<https://maps.gsi.go.jp/>] で確認すると, 水準点1580は紀ノ川北岸の標高約30 mの河岸段丘の上にある。一方, GEONET950368 (打田) は水準点1580の一段下の河川敷に近いところにある。周囲は水田も広がっていることから, 地下水位変動の影響を受けやすいと考えられる。しかし, 東西約20 kmにおよぶ領域の変動であるため, 地殻内の力源による可能性も否定できない。

1980年以降の紀ノ川沿いの隆起が, SARで検出された紀ノ川市南方の隆起に含まれるかどうかに興味深いところである。Fig.3では隆起を示す黄色い領域が紀ノ川市に認められるが, 紀ノ川市南方の隆起域とのあいだに不連続がある。また, Fig.9bを見ると, オレンジ色の隆起は水準路線まで及んでいない (Kinokawaの表示のすぐ左上の水準点が1580)。これらのことから, 紀ノ川沿いの隆起と紀ノ川南部の隆起は別のイベントであろう。紀ノ川南方の隆起は規模が最も大きく, 長径約20 kmの広さがある。領域内に大きな河川もないので, 地殻内の力源により生じているものと推察される。

以上の議論から, 和歌山県北部には, 和歌山市内に2箇所, 海南駿潮場付近, 紀ノ川沿い紀ノ川市付近,

紀ノ川南方の山間部, の少なくとも5つほどの力源があり, これらがエピソードに活動してきたと考えられる。

9. おわりに

今村(1929)はじめ複数の研究者が指摘した和歌山県北部の隆起について, 過去の水準測量データ, 潮位データおよびSARデータを収集し, これらの時間・空間関係について議論した。その結果, 以下の5つの隆起イベントを検出した。

- (1) 1896年以降1960年代までの和歌山市～海南市間の隆起,
- (2) 海南駿潮場の1970年ころから1990年代半ばまでの隆起,
- (3) 1980年以降の紀ノ川沿い紀ノ川市付近の隆起,
- (4) 2007年以降の紀ノ川市南方の隆起,
- (5) 2014年以降の和歌山市内の隆起。

(1) (2) および (5) は, 和歌山市から海南市にかけての狭い地域で生じており, 活動時期が異なる力源の存在が示唆された。(3) の紀ノ川市付近の変動は, 1980年を境に沈降から隆起に転じており, 地下水変動の影響が考えられる。(4) の紀ノ川南方の隆起は, SARの観測がある2007年ころから最近まで継続しており, 規模も大きい。地殻内の力源により生じている可能性がある。

本論で取り上げたデータ以外にも, GEONETの時系列やALOS-2/PALSAR-2の北行軌道の東隣の画像など, さらに追加して議論すべきものがある。また, SARについては時系列解析手法を適用し, 興味ある地点の時系列を追跡することも必要である。さらに, 地震活動の時空間変化との関連も, 検討すべき課題である。今後, これらの課題に取り組み, この地域の地殻変動・地震活動の発生機構を議論したい。

謝 辞

本研究で使用したALOS/PALSARおよびALOS-2/PALSAR-2データは, 国土地理院地震予知連絡会地震SAR解析WGおよび東京大学地震研究所共同利用特定研究(B)2021-B-03「高頻度SAR観測による地殻・地表変動研究 (研究代表者: 奥山哲気象庁気象研究所主任研究官)」に基づくコンソーシアムPixelを通じて, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) より提供されました。ALOS/PALSAR および ALOS-2/PALSAR-2データの所有権・著作権はそれぞれJAXA/経済産業省およびJAXAにあります。

一等水準点検測成果集録およびGEONET解析座標F5は, 国土地理院の当該サイトより取得しました。

シームレス地質図データは、産総研地質調査総合センターのサイトより取得しました。気象庁一元化震源データは、気象庁の地震月報サイトより取得しました。

JAXA, 国土地理院, Pixel, 産業技術総合研究所地質調査総合センターおよび気象庁に感謝します。

本論文の図は、Generic Mapping Tool 6.0 [Wessel et al., 2019] を用いて作成しました。

参考文献

今村明恒 (1929): 紀伊半島に於ける慢性的並に急性的の地形變動に就いて, 地震第1輯, 第1巻, 第5号, pp. 321-335.

岡田惇・井筒屋貞勝・伊藤裕・角野行栄 (1968): 地震研究所彙報, 第46巻, pp. 413-416.

海岸昇降検知センター(2003): 潮位観測から推定された地盤変動, 国土地理院,
<https://cais.gsi.go.jp/cmdc/center/katoutumura.html>
(2021年8月31日アクセス)

気象庁(2014-2018): 地震月報 (カタログ編),
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html> (2021年8月29日アクセス)

国土地理院 (2009): 近畿地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 第82巻, pp. 359-365,
http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou82/08_02.pdf.

国土地理院 (1955~2020): 一等水準点検測成果集録, 国土地理院技術資料,
<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/level/KENSOKUSYUROKU/collection.htm> (2021年8月30日アクセス)

国土地理院 (2013): 地理院地図,
<https://maps.gsi.go.jp/>, (2021年8月31日アクセス)

国土地理院: 電子基準点データ提供サービス,
<https://terras.gsi.go.jp/>, (2021年8月31日アクセス)

産業技術総合研究所地質調査総合センター (編)
(2015): 20万分の1日本シームレス地質図 2015年5月29日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
<https://gbank.gsj.jp/seamless/index.html?lang=ja&>
(2021年8月29日アクセス)

橋本学 (2016): SAR で観測した中央構造線断層帯 (金剛山地東縁—和泉山脈南縁) 周辺の地殻変動, 日本測地学会第126回講演会要旨集, pp. 89-90.

牧本博・宮田隆夫・水野清秀・寒川旭 (2004): 粉川地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 産総研地質調査総合センター, 89p.

宮村摂三・岡田惇 (1960): 和歌山—御坊間水準測量結果, 地震研究所彙報, 第38巻, pp. 355-359.

村松弘規・高松直史・阿部聡・古屋智秋・加藤知瑛・大野圭太郎・畑中雄樹・攪上泰亮・大橋和幸 (2021): 新しいGEONET解析ストラテジによる電子基準点日々の座標値 (F5解・R5解) の公開, 国土地理院時報, Vol.134,
<https://www.gsi.go.jp/common/000234817.pdf>

Yoshida, A., K. Hosono, H. Takayama, A. Kobayashi, and K. Maeda (2011): Seismic and geodetic evidence for the existence of hot materials beneath the Wakayama swarm activity, southwestern Japan, Tectonophysics, Vol. 510, pp. 124-131.

Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., and Tian, D. (2019): The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Vol. 20, pp. 5556-5564.
<https://doi.org/10.1029/2019GC008515>

(論文受理日 : 2021年8月31日)