南海トラフ地震による 高知県沿岸地盤上下変動の再現

蒋景彩¹·李傑龍²·中野晋³

¹正会員 徳島大学准教授 大学院理工学研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地) E-mail: jiang@ce.tokushima-u.ac.jp

²非会員 元徳島大学大学院生 中国化工中藍晨光化工研究設計院(中国成都市) E-mail: lijielong@scchenguang.cn ³正会員 徳島大学教授 環境防災研究センター(〒770-8506 徳島市南常三島町2丁目1番地) E-mail: nakano.susumu@tokushima-u.ac.jp

過去の南海地震による高知県沿岸の地盤上下変動の記録が多数残されている.昭和南海地震(1946年)で は室戸岬・足摺岬の先端がそれぞれ約 1.2m, 0.6m 隆起したのに対し,高知市や須崎等では地震直後の地盤 が約 1.2m 沈降した.安政南海地震(1854年)と宝永南海地震(1707年)の際にも,高知県沿岸部で 50cm~ 2m に達する地盤沈下の記録が史料に記載されている.本研究は次の南海トラフ巨大地震による地盤変動 予測に繋げるべく,食違い弾性理論に基づく地震時の地殻変動量を求める手法を用い,過去の南海トラフ 地震による高知県沿岸の地盤上下変動の再現を試みた.

Key Words: Nankai trough Earthquakes, Co-seismic vertical displacements, Dislocation theory

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震では、岩手県や宮城 県の沿岸部の広い地域において地盤沈降が発生し、地震 直後の沈下量は数十センチから1メートル余りに達して いる¹⁾. 地盤沈下が大きい沿岸部では地震による津波の 被害が増幅されると共に、地震後の高潮や台風による高 波の度に浸水が繰り返され、復旧・復興の支障がもたら されている.

過去の南海地震による地盤変動の記録が多数残されて いる.昭和南海地震(1946年)によって,室戸岬・足摺 岬の先端がそれぞれ約 1.2m, 0.6m 隆起し,これらに隣 接する高知市や須崎等では地震直後の地表面が約 1.2m 沈降した²⁾⁴⁾.この地盤沈下によって高知市・須崎・宿 毛付近でそれぞれ 9.3, 3.0, 3.0 km²の広い地域に海水が 浸入した²⁾.安政南海地震(1854年)と宝永南海地震 (1707年)の際にも,高知県や徳島県南部沿岸で 50cm~ 2m に達する地盤沈降が発生したと記録されている²⁾. さらに康和南海地震(1099年)や天武南海地震(684年)等 においても,土佐国内(現高知市付近)の沿岸平野部が沈 下して海になるという記載が「日本書紀」などの史料に 残されている⁹.

南海地震による沿岸部の地盤沈下は津波被害の増幅と

長期浸水の被害をもたらす.また,地盤沈下によって津 波の到達よりも早く沿岸部の市街地に海水が入り込むと, 避難や救助が難航することが考えられる,南海地震によ る地盤沈下に伴う被害軽減を図り,本格的な事前対策を 検討するためには,地震による地盤沈下量を適切に予測 することが必要不可欠である.本研究は次の南海トラフ 巨大地震発生時の地盤変動予測に繋げるべく,食違い弾 性論に基づく地震時の地殻変動量を求める手法を用い, 過去の南海地震による四国太平洋沿岸地盤変動の再現を 試みた.

2. 過去の南海地震による高知県沿岸の地盤変動

沢村³⁴⁴は昭和南海地震よる地盤の水準変化量を調査 し、地震直後室戸岬と足摺岬がそれぞれ 1.2m, 1.0m 隆 起し、逆に高知市や須崎周辺の地盤が約 1.2m 沈降した 事実を見出した(図-1).またその中央地点の安田と伊 野岬を結んだライン付近では、地盤の上下変動が殆んど 発生しなかったことも明らかにした.この事実は、安田 ~伊野岬を繋ぐラインの南側(室戸岬や足摺岬、土佐清 水等)の地盤が上がり、その北側(高知市や須崎等)の 地盤が下がったことを物語っているのである.このよう な地震直後の地盤変動はプレートテクトニクスの理論で



図-1 昭和南海地震による四国太平洋沿岸の地盤変動 3)

も説明できる⁹. 一方,宇佐美²によれば,昭和南海地 震の発生によって室戸岬,足摺岬の先端が南上がりの傾 動を示し,地盤隆起量はそれぞれ 1.27m,0.6m に達した とされている.また,高知市・須崎付近の地盤は 1.2m 沈降したとされている. 宍倉ら⁷は当時の水路局が港湾 を中心に行った地震時の隆起・沈降量の測量調査結果を 引用し,室戸岬で 1.2m の地盤隆起に対し,須崎付近は 1.2m 沈降したと報告している.

安政南海地震(1854 年)による四国太平洋沿岸の地盤 変動に関する研究がいくつかなされている.例えば、宇 佐美³⁰は安政南海地震では室戸岬の地盤隆起量は 1.2m とし、高知市付近沿岸部の地盤沈下量は 1.1m としてい る(図-2).また、都司⁵⁰は史料や古文書に記載されてい る安政南海地震の被害を取り調べ、安政南海地震による 四国沿岸での地盤変動分布図を作成している(図-3).それによれば、室戸岬の先端部にある津呂と室津で地盤が 約12m 隆起し、足摺岬の先端部にある伊佐等で地盤隆 起量は1.5m にも達している.これに対し、高知市や海 岸部の浦戸付近、上ノ加江付近で地盤が大きく沈下し、 沈下量は高知市や浦戸付近では1.1~1.2m に達し、上ノ 加江周辺では1.2~1.5m にも上ったとされている.なお、 宍倉ら^つによれば、高知県土佐清水市にある「嘉永七寅 年地震津浪記」に安政南海地震に伴う足摺岬周辺の地盤 変動が記録されている.それによると、足摺半島の付け 根の少し南をヒンジとして、南側が隆起、北側が沈下と いうことが明確に示されている.特に半島南端の伊佐で



図-2 安政南海地震による地盤変動²⁾



図-3 安政南海地震による四国沿岸の地盤変動 5



は 1.5m 程度隆起したと推定され、都司 ⁹により示された地盤隆起量とほぼ一致する.

宝永南海地震に伴う四国沿岸の地盤変動は宇佐美²⁾, 都司⁵等によって報告されている.宇佐美²⁾によれば, 宝永地震の発生と共に室戸岬は約 2~2.5m 隆起し,高知 市付近沿岸の地盤は約 2m 沈下した可能性がある(図-4). また都司⁵の研究によると,宝永地震によって室戸岬先 端部に近い室津の地盤隆起量は約 1.8m に達し,高知市 や浦戸付近では地盤の沈下量は 1.0~1.2m に達したとい うことが分かる.なお,宝永地震で足摺岬周辺の地盤は 沈降したとの指摘もある².

過去の南海地震の発生に伴い四国太平洋沿岸で隆起し た地盤は時間の経過と共に徐々に沈下し、逆に沈下した 地盤は徐々に隆起し、元の状態に戻ろうとするのである. 図-5 は室戸岬の地盤隆起と沈降の歴史を模式的に示し たものである。 南海地震が発生するたびに地盤が大き く隆起し、地震発生後は徐々に沈降していく様子が示さ れている. 高知市や須崎付近などでは図-5 に示す地盤 変動と逆の動きを取ることになる. すなわち, 地震発生 と共に地盤が大きく沈下し、その後は徐々に隆起してい くのである.鈴木によると、南海地震が発生するたびに、 上述した地盤変動が発生し、高知県の東海岸に発達して いる高位・中位・低位海岸段丘の形成にも大きく影響を 与えている ⁹ 宍倉ら ⁷は土佐清水付近において地盤中 の生物遺骸の年代を測定し、昭和・安政南海地震による 地盤隆起を示す証拠があったが、宝永地震による地盤隆 起の痕跡が見つからなかった.

3. 地盤変動の計算手法の概要

南海地震による地盤変動の再現は大別して地震と共に 発生する地盤の隆起または沈下の再現と地震後地盤回復 の再現に分けることができる⁸.地震と共に発生する地 盤変動状況は地震被害軽減のための事前対策に重要であ



り,地震時変動した地盤の回復状況の把握は地震後の復 旧・復興対策に資すると共に,次の南海地震の発生時期 をある程度予知できる可能性を秘めている.本報告は前 者のみに注目し,過去の南海トラフ地震に伴い発生した 地盤上下変動の再現を試みる.

本研究は地震による地盤変動の計算手法として Wang ら⁹の提案法を採用している.彼らの提案法は、食違い の弾性理論に基づく震源断層モデルによる応力場・変位 場を計算する手法であり、日本で広く用いられ計算プロ グラムも公表されている Okada¹⁰の方法を発展させたも のである.Okada¹⁰は半無限均質弾性地盤(地殻)の中に傾 いた長方形の断層モデルを想定し、断層の食違いによる 地盤変位やひずみ、及び地盤中で生じた応力を計算でき るプログラムを作成し公開している.この方法は横ずれ 断層だけでなく、いわゆる open crack も含めたより一般 的な断層モデルにも対応可能である.断層モデルから地 表変位を計算するためには、地盤の弾性係数を仮定した 上で、三次元空間における断層の位置(x, y, z 座標)、走 向、傾き、断層面の大きさ(長さと幅)、食違いの方向と 大きさの計9つのパラメータが必要となる.

Okada の手法に比べると, Wang ら⁹の提案法は次の二 つの大きな特徴を有している.一つは地盤の層状構造を 考慮すると共に重力の影響も取り入れていることである. もう一つは地震にとともに発生する地盤変動のみならず, 地盤の粘弾性特性を考慮しつつ,地震と伴に隆起・沈下 した地盤が元の状態に徐々に戻るいわゆる回復変動(余 効変動とも呼ぶ⁸⁾)も評価できることである.本研究は 南海地震震源付近の地殻が層状構造になっているため, Wang ら⁹の手法を採用することにした.この手法の入 カパラメータは,地震断層に関しては Okada の提案法と ほぼ同じであるが(図-6),地盤モデルとしては弾性係数 の代わりに各層の弾性波速度を入力することとなってい る.本稿は Wang ら⁹により開発された計算プログラム を用い,過去の南海地震による高知県沿岸部の地盤変動 量を再現してみた.



図-6 地震断層モデル及び入力パラメータ

4. 過去の南海地震による地盤上下変動の再現

昭和・安政・宝永南海地震による高知県沿岸等の地盤 変動量を求めてみた.断層付近の地盤モデルは南海トラ フ沈み込み帯の地盤構造¹¹⁾⁻¹²⁾を採用し,各層の深度,弾 性波速度と密度の値を**表-1**に示した.昭和・安政・宝 永南海地震に対しそれぞれ複数の震源断層モデルが示さ れているが¹³⁾,既往の研究結果と比較するため,**表-2**の 断層モデル及び断層パラメータの値を採用した¹⁴⁾.

まず昭和南海地震の地盤変動の再現結果について述べ る.表-1の地盤構造と表-2の中の昭和南海地震断層モ デルを用い,高知県安芸市から高知市にかけての計22 個の一等水準点における地盤の上下動を計算したが,す べての水準点で地盤沈下の値が示された.22個水準点 のうち,計9個における地盤沈下量の計算値を図-7に示 す.同図にはこれら水準点におけるOkada 手法による計 算値¹⁴と昭和南海地震前後の地盤変動実測値¹⁴も併記し た.図中の結果からわかるように,地盤沈下量の計算値 は高知市や南国市付近では実測値より幾分大きく,安芸 市東部では実測値より幾分小さくなっているが,Okada 手法の結果と比べると,本研究は昭和南海地震に伴う地 盤沈下量をほぼ再現できていると言ってよい.

次に安政・宝永南海地震による地盤変動の再現結果を 報告する. 安政南海地震については、地盤変動の歴史記 録がある津呂,室津,伊佐,高知及び浦戸の5箇所にお いて地表の上下変動量を求めた.計算値と歴史記録の地 盤変動量をまとめて表-3 に示す. 表の数値からわかる ように、地盤の隆起・沈下現象はよく再現されているが、 得られた地盤隆起量・沈下量は、伊佐を除いていずれも 歴史記録の数値より小さくなっている. 宝永南海地震に ついては、地盤変動の歴史記録がある室津港、室戸岬及 び高知市の3箇所で地表の上下変動量を計算した.得ら れる計算値を歴史記録の値とともに表-3に示す.表の 数値からわかるように, 地盤隆起量の計算値は室戸岬で は歴史記録とほぼ一致しているが、室津港では歴史記録 よりも幾分大きくなっている.一方,高知市で計算され た地盤沈下量は小さく,歴史記録から推定された値の約 2/3となっている.

5. おわりに

本研究は食違い弾性論に基づく地震時の地殻変動量を 求める手法を用い,昭和・安政・宝永南海地震による高 知県沿岸地盤上下変動の再現を試みた.今後は精度の高 い過去の南海地震の地盤変動データに基づき,震源断層 パラメータ及び深部地盤の物性値を合理的に推定できる 逆算手法を構築し,次の南海トラフ巨大地震による地盤 変動予測に繋げていく予定である.

	地表からの深さ	縦波の速度Vp	横波の速度 Vs	岩石の密度
	(km)	(km/s)	(km/s)	ρ(kg/m³)
付加体	0~7.5	3.5	1.59	2105
海洋性地殼第2層	7.5~9.5	5.4468	2.8076	2621
海洋性地殼第3層	9.5~11.5	6.5578	3.5068	2918
海洋性マントル	11.5~∞	8.2934	4.7122	3377

表-1 南海トラフ付近の沈み込み帯地盤層状モデル 11-12

表2	昭和•	安政・	宝永南海地震断層	ペラ	メータ	13)
----	-----	-----	----------	----	-----	-----

	断層領域	N(°N)	E (°E)	d (km)	θ(°)	δ(°)	λ(°)	L (km)	W(km)	U(m)
昭和	1	32.68	134.74	0	250	20	117	150	120	6
Model 3	2	33.13	136.25	0	250	25	117	150	70	4
安政	1	32.70	134.74	1	250	20	117	150	120	6.3
Model 1	2	33.41	136.15	10	250	10	127	150	70	4.7
宝永	1	32.68	134.74	0	250	20	117	150	120	12
Model 1	2	33.13	136.25	0	250	25	117	150	70	8



図-7 安芸市から高知市にかけての一等水準点と地盤沈下量の実測値・計算値

衣う 女政・玉水用御地長の地路変動計昇旭と歴史

	安政南海地震				4	宝永南海地震		
計算箇所	津呂	室津	高知市	浦戸	伊佐	室津港	室戸岬	高知市
地盤変動歴史記録(m)	1.2	1.2	-1.2	-1.0	1.5	1.8	2.2	-2.0
本研究の計算値 (m)	0.7	0.6	-0.7	-0.7	1.4	2.2	2.3	-1.4

参考文献

- 国土地理院:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 に伴う地盤沈下調査結果について、国土地理院HP: http://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/sokuchikijun60008.html, 2011年4月.
- 字佐美 龍夫:最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001,東 京大学出版会,2003.
- 3) 沢村武雄:南海大地震と地殻運動,高知大学研究報告 自然科学,第1号, pp.1-14, 1951.
- 4) 沢村武雄:南海地震に伴った四国の地盤変動に関する
 一考察,地学雑誌, Vol. 60, pp. 190-194, 1951.
- 5)都司嘉宣:歴史地震の話~語り継がれた南海地震~, 高知新聞社, 2012.
- 6) 鈴木堯士:四国はどのようにしてできたか一地質学的・地球物理学的考察一,南の風社,1998.
- 7) 宍倉正展・行谷佑一:足摺岬における宝永・安政・昭 和南海地震の地殻変動,歴史地震,第26号,2011.
- 8) 加藤照之:地殻変動研究の立場からみた地震・地球動

力学研究の最近の発展. 地震, 第2輯, 第44巻特集号, pp. 365-379, 1991.

- 9) Wang, R., Lorenzo-Martin, F. and Roth, F.: PSGRN/PSCMP—A new code for calculating co- and postseismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, Computers & Geosciences, Vol. 32, No. 4, pp. 527-541, 2006.
- 10) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 75, No. 4, pp.1135-1154, 1985.
- 11) 馬場俊孝・伊藤亜紀・金田義行・早川俊彦・古村孝

志:制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の3 次元地震波速度モデル,日本地球惑星科学連合大会講 演予稿集,2006.

- 12) 文科省研究開発局・東京大学大学院:東海・東南海・ 南海地震の連動性評価研究プロジェクト② 連動性を考 慮した強震動・津波予測及び地震・津波被害予測研究, 平成20年度成果報告書,2009.
- 13) 佐藤良輔:日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会,1989.
- 14) 雲田浩平:南海トラフ地震における四国の地盤変動特性,徳島大学修士論文,2014.

ESTIMATION OF CO-SEISMIC VERTICAL DISPLACEMENTS INDUCED BY THE PAST NANKAI TROUGH EARTHQUAKES

Jing-Cai JIANG, Jilong Li and Susumu NAKANO

The occurrence of a Nankai trough earthquake in Japan leads to ground settlements around Kochi city that enlarge the damage of tsunami. This paper simulated the co-seismic vertical ground displacements induced by the past Nankai earthquakes using an existing crustal deformation method. This method considers the multi-layered, viscoelastic material and gravity effect which are close to the actual geological and geotechnical conditions around the Nankai trough. It is shown that the vertical displacements obtained from this paper are agreed with the measured values for the 1946 Showa Nankai Earthquake.