

1946 年南海地震前の井戸水の減少から推定される土地の隆起量 —高知県黒潮町佐賀地区を例に—

梅田康弘^{1,*}・板場智史¹

Yasuhiro Umeda and Satoshi Itaba (2011) Ground Upheaval Estimated from Decreased well water before the 1946 Nankai Earthquake— As an Example at Saga District in Kuroshio-town, Kochi Prefecture —. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.62 (11/12), p.455-459, 3 figs, 1 table.

Abstract: There are the witness testimonies of the inhabitants that the water level of well water decreased 2-3m before the 1946 Nankai earthquake (M8.0). In the small delta or the sandbar where fresh water balanced with seawater, Umeda et al. (2010) showed that the well water largely decreased by a little upheaval of the ground, qualitatively. The quantitative relation between the water level of well water and the upheaval of the ground was obtained based on Umeda's model and the structure of underground water at Saga district which is small delta.

Keywords: the 1946 Nankai earthquake, well water, ground upheaval

要 旨

1946 年南海地震 (M8.0) の前に井戸水が 2-3 m 低下したという証言が、四国から紀伊半島の太平洋沿岸部で得られている。梅田ほか (2010) は、海水と淡水が重力バランスをとっている小さな三角洲などではわずかな土地の隆起でも大幅に地下水位が低下することを示した。このモデルと高知県黒潮町佐賀地区での地下水構造の調査結果を基に、土地の隆起量と地下水位の低下量との関係式を求めた。

1. はじめに

四国から紀伊半島の太平洋沿岸部で、1946 年南海地震 [M8.0 (国立天文台, 2010)] の前に井戸水が涸れた、あるいは水位が大きく低下したという証言がある (例えば、水路局, 1948; 中村, 2009 年)。目撃された水位の低下量は 2-3 m という場合が多い。梅田ほか (2010) は地震前に水が涸れたという井戸の再調査を行った結果、地震前に涸れたという井戸は、大きな河川を有する平野部ではなく、背後の三方が山に囲まれた小さな三角州か、砂州にあること、また同じ三角州内でも涸れた井戸は少なく、涸れなかった井戸のほうが多いことなどを確認した。

透水性の良い三角州や砂州における地下水構造の特徴は、淡水の下に比重の大きい海水 (塩水) が浸み込んでいることである。Gyben-Herzberg の法則 [例えば、ド

ミニコ, P.A・F.W. シュワルツ (1996)] によれば、水平線より上の淡水の高さは、約 40 倍の深さの淡水と重力的バランスをとっている。そういう地下水構造の三角州で、わずかな土地の隆起が生じると、重力的バランスを保つため、地下水位の高いほうから多量の淡水の移動が起こり、山手の井戸は涸れてしまうことを梅田ほか (2010) が明らかにした。このモデルを地下水構造がわかっている高知県黒潮町佐賀地区に適用し、土地の隆起量と地下水の低下量との関係式を求めた。

2. 黒潮町佐賀地区の地下水構造と地下水移動

2.1 地下水移動のモデル化

高知県幡多郡黒潮町佐賀地区 (第 1 図) では利水のために、同町による地下水調査が行われた (高知県幡多郡佐賀町, 2000)。また浅田ほか (2004) は潮位変化が浅井戸の水位に及ぼす影響を調べるため、第 1 図に丸印で示した 4 か所で打ち抜きボーリングを行って水位の連続観測を行った。前者の調査資料と後者の測定結果を基に、第 1 図の X-Y に沿った地下水断面を描いた (第 2 図 (I))。透水層の厚み (d) や、海水 (塩水)・淡水の境界 (interface) と水平線 (horizon) とのなす角 (θ) などの実際の数値は 2.2 節で詳しく述べるが、同図は横スケールに対して縦のそれをおよそ 25 倍拡大している。地下水位の移動を考える上で重要な点は、塩水と淡水とがバランスを取っているのは同図で AC 間であって、C 点から山手 (図の右側) では、AC 間のようなバランス

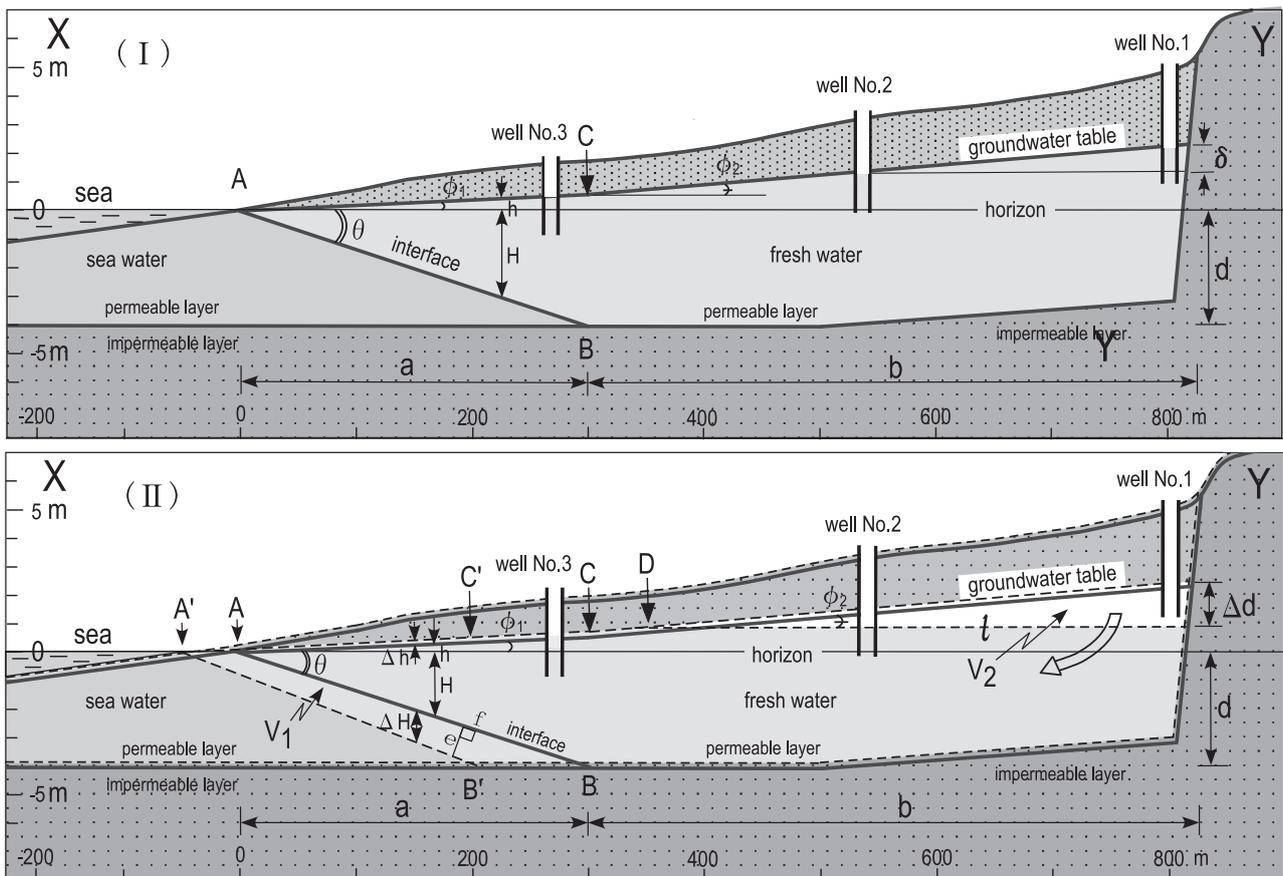
¹ 活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active fault and Earthquake Research Center)

* Corresponding author: Y. Umeda, Nakoji 3-11-46, Amagasaki Hyogo 661-0974, Japan. Email: umeda-y@aist.go.jp



第1図 高知県黒潮町佐賀地区の地形図。赤○印は地下水位の測定地点。直線 X-Y に沿った断面は図2に示される。

Fig.1 Map shows Saga district where is small delta. Red circles show the measuring points of ground water table. The vertical section along a straight line X-Y shows in Fig.2.



第2図 佐賀地区における地下水構造 (I) と隆起による地下水の移動 (II)。縦方向は横に対しておよそ 25 倍拡大されている。Well No.1,2,3 は実際に存在した井戸ではなく、説明のための仮想の位置に描いてある。

Fig.2 The structure of the underground water (I) and the flow of underground water (II) according to the upheaval of the ground at Saga district. Vertical length is extended approximately 25 times to a lateral direction. Well No.1,2,3 were not really wells which existed and were drawn on the virtual position for explanation.

をとる必要はなく、地下水位 (groundwater table) の勾配 (ϕ_2) は急になることが出来るという点である。

このような地下水構造を持つ三角州全体がわずかに隆起した場合を考える (第2図 (II))。同図で実線は隆起前、点線は隆起しつつある状態を表す。梅田等のモデル (梅田ほか, 2010) によれば、塩水と淡水とがバランスを取っている区間では、わずかな土地の隆起 (Δh) が起こっても常にバランスを取ろうとする。そのため地下水位の高い山手 (図の右側) から図中白抜き矢印で示したように淡水が流れ、塩水・淡水境界は ΔH だけ下がる。この帯水層に他からの淡水の供給が無ければ、境界 A-B が A'-B' に移動するのに必要な淡水の量 (V_1) は、供給源である山手の淡水量 (V_2) に等しい。いま、第2図に直交方向の幅 W の水の量を考えると、 V_1, V_2 はそれぞれ $V_1 = nWS_1$, $V_2 = nWS_2$ である。 n は間隙率である。面積 S_1 は四辺形 ABA'B' であるが、隆起前の境界面 AB と隆起後の境界面 A'B' とは勾配がわずかに異なるので (AA' と BB' は平行でない)、完全な平行四辺形ではないが、近似的に塩水・淡水境界の長さ (f) と新旧の境界面がなす幅 (e) との積とすると、

$$S_1 = e \cdot f$$

であり、帯水層の厚さを d とすると、 $e = \Delta H \cos \theta$,
 $f = d / \sin \theta$ であるから、
 $S_1 = e \cdot f = \Delta H \cdot d / \tan \theta$
 $V_1 = nW \cdot \Delta H \cdot d / \tan \theta$ (1)

となる。

土地の隆起に伴い山手の水位が Δd 低下し、新たな地下水位 (図中水平の点線) の長さが l になった状態を考えると、 S_2 は第2図 (II) で groundwater table と記入された点線と、それが Δd だけ低下した時の点線との間の面積 (第2図 (II) で山手の白抜きの部分) である。この場合も近似的に S_2 は長さ l を底辺とする三角形と仮定すると、

$$S_2 = l \cdot \Delta d / 2$$

であり、また、 $\Delta d / l = \tan \phi_2$ であるから、
 $V_2 = nW \cdot \Delta d^2 / (2 \tan \phi_2)$ (2)

を得る。

外部からの淡水の供給が無い場合は $V_1 = V_2$ であるので、(1), (2) 式から

$$\Delta d^2 = 2 \Delta H \cdot d \tan \phi_2 / \tan \theta$$

が得られる。 $H/h = \Delta H / \Delta h = \alpha$ とすると、
 $\Delta d^2 = 2 \alpha \Delta h \cdot d \tan \phi_2 / \tan \theta$ (3)

であり、土地の隆起量 (Δh) と地下水位の低下量 (Δd) との関係が得られた。

2.2 土地の隆起量と地下水位の低下量

佐賀地区における帯水層は浅部と深部の2層あるが、深部は20 mより深いところにあるので、ここでは浅部の第1層について議論する。高知県幡多郡佐賀町(2000)

の「淡水と塩水との平衡実態図 (同資料中の図 2-5-11)」によれば、第1帯水層の厚さ (d) は4 mであり、塩水・淡水境界面は海岸から300 mのところ、第1帯水層の底に接している。したがって、水平線 (horizon) と塩水・淡水境界 (interface) とのなす角 (θ) は

$$\tan \theta = d/a = 0.0133, \theta = 0.764^\circ \approx 0.76^\circ$$

である。

AC間の地下水位面は浅田ほか (2004) によっても測定されているが、海岸付近では堤防構築による擾乱が見受けられるため、ここでは Gyben-Herzberg の法則にしたがって、海水と淡水の密度差から見積もることとする。海水と淡水の密度をそれぞれ ρ_s, ρ_f , 重力加速度を g とすると Gyben-Herzberg の法則は

$$\rho_s g H = \rho_f g (H+h) \quad (4)$$

であり、 $\rho_f = 1.000, \rho_s = 1.025$ とすると、

$$H/h = 40 \quad (5)$$

となる。AC間の地下水面と水平面のなす角を ϕ_1 とすると、

$$\tan \theta / \tan \phi_1 = H/h$$

であるから、 $\phi_1 \approx 0.02^\circ$

となる。

浅田ほか (2004) は第1図に丸印で示した4地点で地下水位面を実測し、海岸線より360 m地点では地下水位面の水平面からの高さは0.49 m、670 m地点でのそれは1.66 mを得ている。山手側における地下水位面と水平面とのなす角を ϕ_2 とすると、

$$\tan \phi_2 = 3.774 \times 10^{-3}, \phi_2 = 0.2162^\circ \approx 0.22^\circ$$

であり、これらを (3) 式に代入すると、

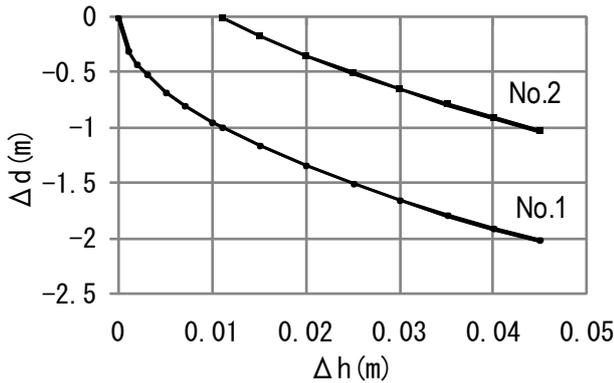
$$\Delta d = 9.53 \sqrt{\Delta h} \quad (6)$$

が得られる。

(6) 式は最も山手の地下水位の高い井戸 (第2図で well No.1) について成り立つものである。同式に基づき、地殻隆起量 (Δh) に対する、地下水位の低下量 (Δd) を第3図に示すと共に代表的な値について第1表に示した。これによると、土地が1 cm隆起した時、最も山側の井戸では約95 cmの水位低下が見込まれる。逆に井戸水が2 m低下したとしても土地の隆起は4.4 cmだったことになる。

2.3 水位低下の限度

前節の (6) 式が成り立つのは、隆起に伴って低下する地下水位面 (第2図IIで l と記された水平の点線) と隆起前の地下水位面 (第2図IIで groundwater table) との交点 D が C 点に達するまでである。それ以上に隆起が進行した場合、地下水位面の低下に伴って、 ϕ_1 と θ は共に小さくなり、B' が山手のほうに伸びるため、地下水位の低下は非常に鈍くなる。更に地下水位面が水平線以下に下がる時は、隆起量と水位低下量は同じになる。すなわち、1 mの水位低下を生じるには土地の隆起



第3図 佐賀地区における隆起量 (Δh) に対する地下水位の低下量 (Δd).

Fig.3 Decrease of well water level (Δd) for the upheaval of the ground (Δh) at Saga district. No.1 and No.2 correspond to the well number in Fig.2.

は 1 m 必要になる。

C点から山際までの距離 (b) はおよそ 530 m であるから、(6) 式が成り立つΔdの最大は、 $\Delta d_{max} = b/\tan\phi_2 = 530 \times 3.77 \times 10^{-3} \approx 2$ m である。このことは、佐賀地区においては、地下水位の高い山際付近にある井戸でも、その水深が 2 m 以上あれば、わずかな土地の隆起では井戸は涸れないことを示している。

ここまでの議論は、最も地下水位の高い山際の井戸 (第2図で No.1) について述べたが、第2図で中間にある No.2 の井戸の水位については次のようになる。隆起前の No.1 と No.2 の井戸の水位の差を δ とすると、 Δd が δ になるまでは No.2 の水位に変化は無く、 $\Delta d > \delta$ においては $\Delta d = 9.53 \sqrt{\Delta h} - \delta$ にしたがって低下する。 $\delta = 1$ m の場合について第3図の No.2 の曲線に、及び第1表の No.2 の欄に示した。更に海側の No.3 の井戸については梅田ほか (2010) も述べているように、わずかな土地の隆起では井戸水の低下は認められない。

3. まとめと議論

南海地震の前に目撃された水位低下量は 2 m から 3 m という証言が多い。本震前に 2-3 m の土地の隆起は考えづらいが、梅田ほか (2010) は、外部からの淡水の供給が乏しい三角州や砂州で、地下水位の高い位置にある井戸であれば、わずかな土地の隆起でも大幅な水位低下が起こりうることを示した。黒潮町佐賀地区では地下水構造が調査されていたため、梅田ほか (2010) の考えに基づき、土地の隆起量と地下水位の低下量を関連づけることができた。

2.2 節では外部からの淡水の供給は無いと仮定したが、実際に井戸水が涸れた三角州では背後の 3 方向を山に囲まれており、特に南海地震の発生した 12 月という潟

第1表 佐賀地区における隆起量 (Δh) に対する地下水位の低下量 (Δd).

Table 1 Decrease of well water level (Δd) for the upheaval of the ground (Δh) at Saga district. No.1 and No.2 correspond to the well number in Fig.2.

Δh (m)		0.01	0.02	0.03	0.04	0.044
Δd (m)	No.1	-0.95	-1.35	-1.65	-1.9	-2
	No.2	—	-0.35	-0.65	-0.91	-1

水期には、外部からの淡水の供給は無かったと思われる。逆に大きな河川を有する平野部では井戸涸れという現象は起きなかったようだ。

佐賀地区での地震前の水位について、水路要報 (水路局, 1948) には「ごく一部に水位が震前に低下した所が見られた」とある。記述にある「震前」とは 12 月 21 日午前 4 時 19 分に発生した昭和南海地震の前のことである。我々は 2004 年と 2010 年に現地でも聞き取り調査を行ったが、「地震の前に井戸水が引いたという話は聞いた」と証言する人はいたものの残念ながら、どの井戸だったかという特定はできなかった。第2図の No.1-3 に示した井戸は実際にあった井戸ではなく、説明のために仮想の位置に描いたものである。

本論で求めた関係式を他の地域に応用するには、塩水・淡水境界と水平線とのなす角 (θ)、山手の地下水位の勾配 (ϕ_2)、帯水層の厚さ (d)、及び海岸から山際までの距離 (第2図で、a+b) を知る必要がある。これらのうち、 θ は海水と淡水との比重の違いによって決まる値であり、他の地域でもほぼ同じと考えられる。また距離 (a+b) は地形図上でも測ることができる。したがって地下水位の勾配 (ϕ_2) と帯水層の厚さ (d) を知ることができれば、本論で述べた定量化の手法は他の地域にも応用することができる。

謝辞：高知県幡多郡黒潮町佐賀支所では地下水調査報告書の写しをいただいた。また現地調査でもお世話になった。査読者行谷佑一氏の助言は本論改善におおいに役立った。合わせて御礼申し上げる。

文献

浅田照行, 重富國宏, 梅田康弘, 辰巳賢一, 木村昌三, 川谷和夫, 大村 誠 (2004) 高知県佐賀町における地下水のアレー観測, 京都大学防災研究所年報, 47-B, 721-724.
 ドミニコ, P.A・F.W. シュワルツ (1996) 地下水の科学Ⅲ (大西有三監訳), 土木工学社, 26-28.
 高知県幡多郡佐賀町 (2000) 平成 11 年度伊与木川地下水調査委託業務報告書, 相愛株式会社。

昭和南海地震前の地下水位の低下量と地殻の上下変動量（梅田・板場）

国立天文台（2010）理科年表（平成 23 年版），p. 739.
中村不二夫（2009）南海地震は予知できる，高知新聞
企業，301 p.
水路局（1948）昭和 21 年南海大地震調査報告（地変
及び被害編），小向良七編，水路要報増刊号 201 号，
1-117.
梅田康弘・重富國宏・尾上謙介，浅田照行・細 義信・

近藤和男・橋本 学・木村昌三・川谷和夫・大
村 誠（2010）南海地震前の井戸水の低下につい
て一次の南海地震の予知に向けて－. 地震 ii，**63**，
1-10.

（受付：2011 年 10 月 24 日；受理：2011 年 12 月 27 日）