

## 駿河湾沿岸の検潮井戸応答特性調査と 2009 年駿河湾地震津波波形の補正

佐竹健治<sup>1)\*</sup>・行谷佑一<sup>2)</sup>・藤井雄士郎<sup>3)</sup>・岡田正実<sup>4)</sup>・阿部邦昭<sup>5)</sup>・今井健太郎<sup>1)</sup>・上野俊洋<sup>1)</sup>・山口和典<sup>6)</sup>・三和功喜<sup>6)</sup>・山本浩之<sup>7)†</sup>

<sup>1)</sup> 東京大学地震研究所・<sup>2)</sup> 産業技術総合研究所・<sup>3)</sup> 建築研究所・<sup>4)</sup> 気象研究所・<sup>5)</sup> 日本歯科大学新潟短期大学・<sup>6)</sup> 国土地理院・<sup>7)</sup> 気象庁静岡地方気象台

† 現所属: 気象庁予報部予報課

## *In Situ* Measurements of Tide Gauge Response and Corrections of Tsunami Waveforms from the 2009 Suruga Bay Earthquake

Kenji Satake<sup>1)\*</sup>, Yuichi Namegaya<sup>2)</sup>, Yushiro Fujii<sup>3)</sup>, Masami Okada<sup>4)</sup>, Kuniaki Abe<sup>5)</sup>, Kentaro Imai<sup>1)</sup>, Toshihiro Ueno<sup>1)</sup>, Kazunori Yamaguchi<sup>6)</sup>, Kouki Miwa<sup>6)</sup> and Hiroyuki Yamamoto<sup>7)†</sup>

<sup>1)</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, <sup>2)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, <sup>3)</sup> Building Research Institute, <sup>4)</sup> Meteorological Research Institute,

<sup>5)</sup> The Nippon Dental University College at Niigata, <sup>6)</sup> Geospatial Information Authority of Japan,

<sup>7)</sup> Shizuoka Local Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency (JMA)

† Present address: Forecast Department, JMA

### Abstract

*In situ* measurements of tide gauge response to tsunamis were conducted at five tide gauge stations on the coast of Suruga bay, where small tsunamis were recorded from the 2009 Suruga bay earthquake (M 6.5). At these stations, tide gauges are installed in wells connected to the outer sea by narrow intake pipes. To make the measurements, water was poured into the well to measure the outflow response through the intake pipe, and was then drained from the well to measure the inflow response. The estimated tide gauge response, expressed as recovery times for a 1 m difference, was 5 to 7 min at Tago and about 3 min at Yaizu. At Uchiura and Shimizu-ko, the estimated recovery times are less than 1 min, which is much shorter than the tsunami periods. At Omaezaki station, we could not measure the recovery because the tide gauge response was sufficient to record the short period component. The corrected tsunami waveforms from the 2009 Suruga bay earthquake are slightly different from those recorded at Tago and Yaizu, but they are almost identical at the other three stations.

**Key words:** tsunami, tide gauge response, in situ measurements, the 2009 Suruga bay earthquake

### 1. はじめに

2009 年 8 月 11 日午前 5 時 7 分に発生した駿河湾の地震 (M 6.5) によって津波が生じた。駿河湾沿岸には気象庁が管理する内浦検潮所 (UCR), 清水港検潮所 (SMZ),

御前崎検潮所 (OME), 国土地理院が管理する田子検潮場 (TGO), 焼津検潮場 (YIZ) が設置されており (Fig. 1), これらの検潮所 (以下では検潮場も含めて「検潮所」と呼ぶ) では明瞭な津波波形が観測された (Fig. 2). こ

\* e-mail: satake@eri.u-tokyo.ac.jp (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

のうち、焼津では振幅が約 0.6 m の顕著な引き波（下げ波）から始まり、その後約 0.3 m の最大波を記録した。内浦でも津波は若干の引き波から始まった。一方、清水港および田子での波形は押し波（上げ波）から始まった。御前崎では若干の押し波に続き、約 0.2 m の引き波が観測された後、約 0.4 m の押し波が観測された。

上記の 5 カ所の検潮所は検潮井戸の中にフロートを浮

かべ、その上下方向の動きから水位を測定する方式（Fig. 3）である。検潮井戸は導水管（Intake pipe）によって外海とつながっているが、この導水管は細長い構造をしていることが多く、外海における海面変動の周期に応じて異なる応答を示す。たとえば、天文潮汐のように周期が数時間以上の長周期の波は、検潮井戸内部でも正確に記録される。いっぽう、風波やうねりといった周

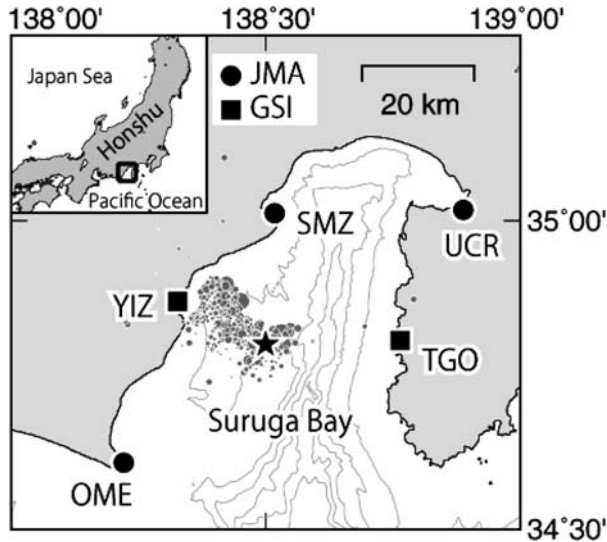


Fig. 1. Location of tide gauge stations whose responses were measured in this study. Circles and squares indicate the tide gauge stations operated by JMA (Japan Meteorological Agency) and GSI (Geospatial Information Authority of Japan), respectively. The station codes and names are as follows. TGO: Tago, UCR: Uchiura, SMZ: Shimizu-ko, YIZ: Yaizu, and OME: Omaezaki. The star shows epicenter of the 2009 Suruga bay earthquake, and gray dots show the aftershocks within one day of the mainshock, located by JMA. Bathymetry of the Suruga Bay is also shown by contours with 500 m interval.

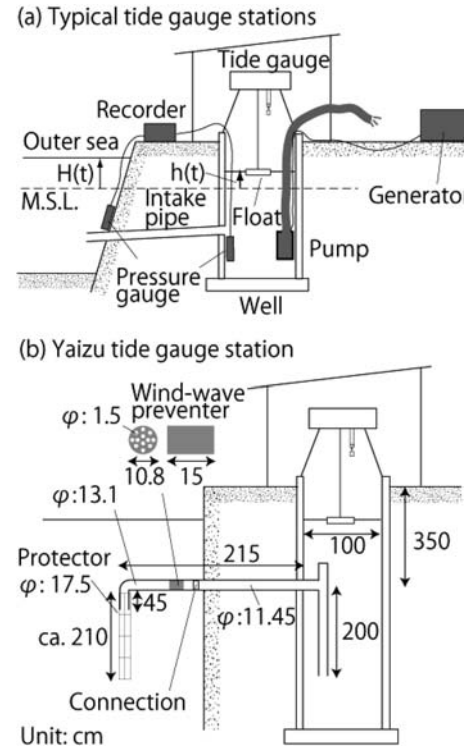


Fig. 3. Schematic diagrams of (a) typical tide gauge stations in Japan and (b) Yaizu tide gauge station. Pressure gauges, a recorder, pump, and generator (gray color in a) were set up temporarily for the *in situ* measurements.

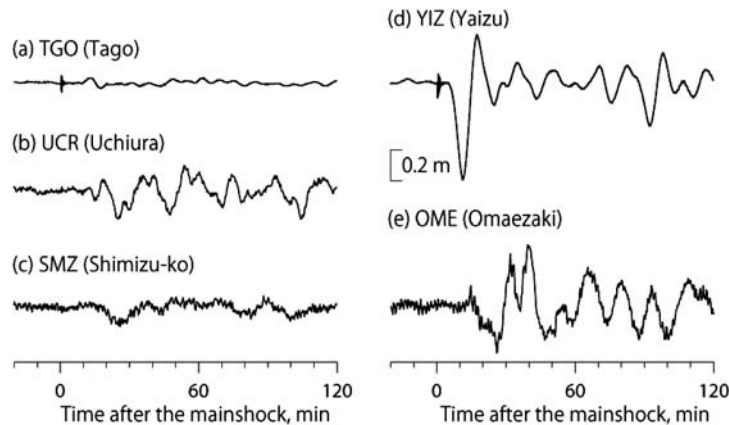


Fig. 2. Observed tsunami waveforms from the 2009 Suruga bay earthquake at the five tide gauge stations (see Fig. 1 for their locations).

期が数秒～数十秒の短周期の波は井戸内では記録されないよう、導水管がフィルターの役割をしている。津波のように周期が数分程度の波に対しては、その中間の応答特性を示すことが予想される。そのため、検潮井戸で観測された津波波形は、井戸の近傍における外海での津波波形を正確に記録していない可能性がある（たとえば、Satake *et al.*, 1988; Namegaya *et al.*, 2009）。観測津波波形を用いて地震の断層モデルなどを逆解析する場合には、検潮記録に井戸の応答特性を施して、外海での津波波形を推定する必要がある。

そこで、2009 年 11 月 4-6 日に上記 5 カ所の検潮所における検潮井戸の応答特性調査を行い、各検潮所の応答係数を推定した。その応答係数を用いて、2009 年駿河湾地震からの津波波形を補正した。

## 2. 検潮井戸の応答特性

### 2.1 応答特性の理論

検潮井戸の応答特性に関しては、これまでにいくつかの理論的研究がある（たとえば、Cross, 1967; Noye, 1974a; Noye, 1974b など）。また、その理論を用いて井戸内の水位が外海の水位と比べてどのように変化するかを調べた研究もある（たとえば、Loomis, 1983; Okada, 1985; Satake *et al.*, 1988; Namegaya *et al.*, 2009）。これらの研究については Namegaya *et al.* (2009) がレビューしている。本調査では、次に説明する線形応答や非線形応答を考慮して応答特性を調査する（Noye, 1974b; Namegaya *et al.*, 2009）。

まず、Fig. 3 のように外海の水位  $H(t)$  に対して井戸内の水位  $h(t)$  に強制的に水位差を与えた後、井戸内の水位が自然に回復する場合を考える。このとき線形応答と非線形応答の両方を加味した応答は、

$$\frac{dh(t)}{dt} = gW^2 \operatorname{sgn}\{H(t) - h(t)\} \cdot \left\{ -G + \sqrt{G^2 + \frac{2|H(t) - h(t)|}{gW^2}} \right\} \quad (1)$$

と表せる。ここで、 $dh/dt$  は井戸内水位の時間微分、 $g$  は重力加速度である。符号関数  $\operatorname{sgn}(x)$  は  $x$  の値の正負に応じてそれぞれ +1 および -1 の値をとる。 $G$  および  $W$  は、それぞれ線形応答係数（単位：秒）および非線形応答係数（無次元）であり、検潮井戸に固有の値である。Satake *et al.* (1988) は、設計図による導水管の長さや太さなどをもとに非線形応答係数  $W$  の理論値を推定して実測結果と比較した結果、理論的に推定した  $W$  の値は、実測から推定した値よりも最大で 10 倍程度大きいこと

を報告している。理論値と実測値とが大きく異なる理由として、導水管内には砂が堆積したり貝殻などが付着していたりするために、管の太さが設計図よりも実質的に細いことや、現場の摩擦係数が設計時と異なることがあげられる。したがって、検潮井戸の実際の応答特性を知るには応答係数を現場で実測することが必要である。

### 2.2 応答係数の推定

応答特性調査で観測された井戸内の水位回復およびその時の外海の水位を用いて、グリッドサーチ法により線形応答係数  $G$  および非線形応答係数  $W$  を推定する（Namegaya *et al.*, 2009）。まず  $W$ - $G$  平面を考え、 $0.00001 \leq W \leq 0.04$  および  $0 \leq G \leq 100$  秒の矩形領域を  $4000 \times 1001$  のグリッドに分割する。各応答係数のグリッド間隔は  $\Delta W = 0.00001$  および  $\Delta G = 0.1$  秒とした。つぎに、この矩形領域内の各グリッドの座標値 ( $W, G$ ) に対する井戸内の水位回復を、Runge-Kutta 法を用いて (1) 式により計算する。初期条件はポンプを止めた時刻に計測された井戸内水位を用いる。この際、計算された水位回復曲線と観測された水位回復曲線との残差二乗の時間平均 (TASR, temporally averaged-squared residual) も求める。TASR はポンプを止めてから井戸内水位が回復するまでの間について計算する。そして TASR が最小となる  $G$  と  $W$  の値を、その実験から推定される線形応答係数および非線形応答係数とする。応答係数は 3.1 節で述べる汲み出し実験および注ぎ込み実験の両方について計算する。

### 2.3 観測津波波形の補正

観測された津波波形の補正方法について述べる。式 (1) を変形すると、

$$H(t) = h(t) + G \frac{dh(t)}{dt} + \frac{1}{2gW^2} \left( \frac{dh(t)}{dt} \right)^2 \operatorname{sgn} \left( \frac{dh(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

と表せる。すなわち、井戸内で観測した津波波形  $h(t)$  を用いて外海での水位  $H(t)$  を推定することができる。井戸内水位の時間微分項  $dh/dt$  の正・負は、それぞれ導水管に海水が流入・流出することに対応する。 $G$  および  $W$  はそれぞれ応答特性調査から推定された線形応答係数および非線形応答係数であるが、これについても  $dh/dt$  の正負に応じて、汲み出し実験あるいは注ぎ込み実験から得られた応答係数をそれぞれ用いる。また、使用した  $G$  と  $W$  については、それぞれ 3 回の汲み出し、および注ぎ込み実験における TASR が最小の組み合わせを用いる。

Table 1. Location and structure of tide gauge stations

Station	Code	Operation	Latitude	Longitude	Intake pipe		Well diameter
					diameter	length	
Tago	TGO	GSI	34.8069	138.7642	10	850	100
Uchiura	UCR	JMA	35.0172	138.8903	16	500	94
Shimizu-ko	SMZ	JMA	35.0117	138.5175	20	798	120
					30	600	
Yaizu	YIZ	GSI	34.8706	138.3272	See Fig.3b		
Omaezaki	OME	JMA	34.6083	138.2222	10	240	120

Units of latitude and longitude are in degree (North and East, respectively), of diameters and lengths are in cm. At Shimizu-ko, the diameter of intake pipe is different for well side and outer sea side with a total length of 1,398 cm.

### 3. 応答特性調査の手法及び井戸の構造

#### 3.1 応答特性調査の手法

応答特性調査を行うにあたり、2 台の圧力式水位計、ポンプおよび発電機を用意した。そして一つの圧力式水位計を井戸内に設置し、もう一つを導水管の出口付近の外海に設置した (Fig. 3a)。水位計は、半導体式ゲージセンサによるものを使用した。測定レンジは 1.75 m で、測定精度はフルスケールの 0.1% 以内、すなわち 1.75 mm 以下、分解能は 1 mm という仕様である。測定時間間隔は 1 秒として井戸内外における水位を測定した。

検潮井戸の構造を考慮すると、井戸内へ海水が流入する場合と井戸から海水が流出する場合とで応答が異なる可能性がある。そこで、応答特性調査はつぎの 2 種類を行った。すなわち、一つは外海から井戸内への海水流入 (inflow) に対する検潮井戸の応答を調べるための汲み出し実験、もう一つは逆に井戸内から外海への海水流出 (outflow) に対する応答を調査するための注ぎ込み実験である。

汲み出し実験では、ポンプにより井戸内の海水を汲み出し、汲み出した海水は直接海に排出した。そして、井戸内の水位が外海の水位よりも十分に低くなるか、ほぼ一定の値になったらポンプを止め、その後海水が導水管を通じて流入し、水位が回復する過程を測定した。注ぎ込み実験ではポンプを外海に設置し、外海から海水を直接井戸内に注ぎ込んだ。そして井戸内の水位が外海よりも十分高くなるか、ほぼ一定の値になったらポンプを止め、回復する井戸内の水位を測定した。いずれの場合にも、導水管を閉じることは困難であるため、開放したままにしてある。したがって、導水管が太くて短い場合には、ポンプを止める前に海水が流入あるいは流出し、水位差を作り出すことが困難であった。

すべての検潮所において、汲み出し実験および注ぎ込

み実験をそれぞれ 3 回ずつ実施した。ポンプは 0.75 kW 容量のもの (200 V 電源) を使用し、電力は持参した発電機により供給した。ただし、内浦、清水港、および御前崎での汲み出し実験においては、この他に 0.4 kW 容量 (100 V 電源) のポンプも一緒に用いた。このほか、井戸内の水位変化については目視による観測及びビデオ撮影も行った。目視観測のサンプリング間隔はおおむね 3 秒程度である。これは水位計のバックアップという目的の他、どの程度水位差が得られたのかなどの目安を現場で知るという意味がある。

#### 3.2 検潮井戸の構造

検潮井戸応答特性に直接影響を与える部分は、検潮井戸の内径、導水管の長さおよび内径である。これらの諸元については Table 1 に示した。焼津以外の検潮所ではまっすぐな導水管が検潮井戸に接続されている (Fig. 3 a)。検潮井戸の内径については、いずれの検潮所も 94~120 cm と大差がないが、導水管の長さは、御前崎で 240 cm であるのに対し、清水港では約 1400 cm とかなり長い。焼津の導水管の形状は特殊で (Fig. 3b)、井戸内で T 字型、外海で L 字型となっている。外海側の導水管の中には波浪防止器 (Wind-wave preventer) が設置されており、水位変化の短周期成分がカットされる構造になっている。なお、同じ形状の波浪防止器が田子の導水管の外海側先端にも設置されている。

## 4. 結 果

#### 4.1 検潮井戸応答特性調査結果

全検潮所での応答特性調査を行った時間帯、すなわちポンプ稼働時刻、および井戸内水位測定時刻などを Table 2 にまとめた。井戸内水位測定の開始時刻から終了時刻までの間、井戸内の水位、すなわち検潮記録は本実験による擾乱を受けている。



Table 2. Time schedule of the *in situ* measurements

			Operating time of pump		Observed time of well		
			Date	Start	End	Start	End
TGO			2009.11.04			13:44:26	15:30:27
Inflow exp.	1st			13:58:50	14:00:30		
	2nd			14:09:30	14:13:45		
	3rd			14:22:00	14:27:30		
Outflow exp.	1st			14:52:00	14:55:30		
	2nd			15:04:00	15:06:30		
				15:14:00	Break		
	3rd			15:18:20	15:21:00		
UCR			2009.11.05			9:29:52	10:49:11
Outflow exp.	Preparatory exp.			9:51:30	9:51:30		
	Preparatory exp.			9:52:00	9:52:30		
	1st			10:11:00	10:12:20		
	2nd			10:16:00	10:17:30		
Inflow exp.	3rd			10:21:00	10:22:00		
	1st			10:35:00	10:36:00		
	2nd			10:39:00	10:40:00		
	3rd			10:43:00	10:44:00		
SMZ			2009.11.06			9:08:12	10:31:13
Outflow exp.	1st			9:23:00	9:25:00		
	2nd			9:29:00	9:31:00		
	3rd			9:35:00	9:37:00		
Inflow exp.	1st			10:12:00	10:14:00		
	2nd			10:19:00	10:20:00		
	3rd			10:25:00	10:26:00		
YIZ			2009.11.05			13:53:49	15:22:16
Inflow exp.	1st			14:07:00	14:12:00		
	2nd			14:18:00	14:22:00		
	3rd			14:28:00	14:33:00		
Outflow exp.				14:50:00	Break		
	1st			14:55:00	14:59:00		
	2nd			15:05:00	15:08:00		
	3rd			15:13:00	15:16:00		
OME			2009.11.06			14:42:01	15:52:34
Outflow exp.	1st			15:07:35	15:09:00		
	2nd			15:13:00	15:14:00		
	3rd			15:18:00	15:19:00		
Inflow exp.	1st			15:35:00	15:37:00		
	2nd			15:41:00	15:42:00		
	3rd			15:46:00	15:47:00		

調査時における井戸内水位および外海水位の観測データを Fig. 4 に示す。ただし、外海の水位については 15 秒幅の移動平均をかけている。田子 (TGO) および焼津 (YIZ) で大きな水位差を与えることができた。田子では汲み出し実験で 40~50 cm 程度、注ぎ込み実験で 60 cm 程度の水位差を、焼津では汲み出し実験で 30~40 cm 程度、注ぎ込み実験で 30 cm 程度の水位差を与えた。これらの検潮所ではポンプ停止 (Fig. 4 の灰色矢印部) 後に、最長 5 分程度をかけて回復する井戸内水位が明瞭に観測された。内浦や清水港では、最大で 5 cm 程度の水位差を与えることができた。そして、ポンプ停止後に回復する井戸内水位が観察されたが、その回復する時間は最長

でも十数秒と短かった。御前崎では汲み出し実験については若干の水位差を与えることができたものの、注ぎ込み実験では水位差を作ることができなかった。井戸内の水位記録 (Fig. 4) には短周期の水位変化が記録されており、流入、流出とも応答が良かったためであったと考えられる。この他の理由として、海面から井戸上端までの高度が大きいこと、注ぎ込みではさらに高い防波堤を越えてホースを渡したことなどから、ポンプの揚水量が少なかったことも考えられる。なお、田子と焼津での調査時の井戸内の水位変化については、フロートの動きによる測定値が国土地理院によって記録されている。圧力式水位計とフロートによる観測結果との比較を Fig. 5 に

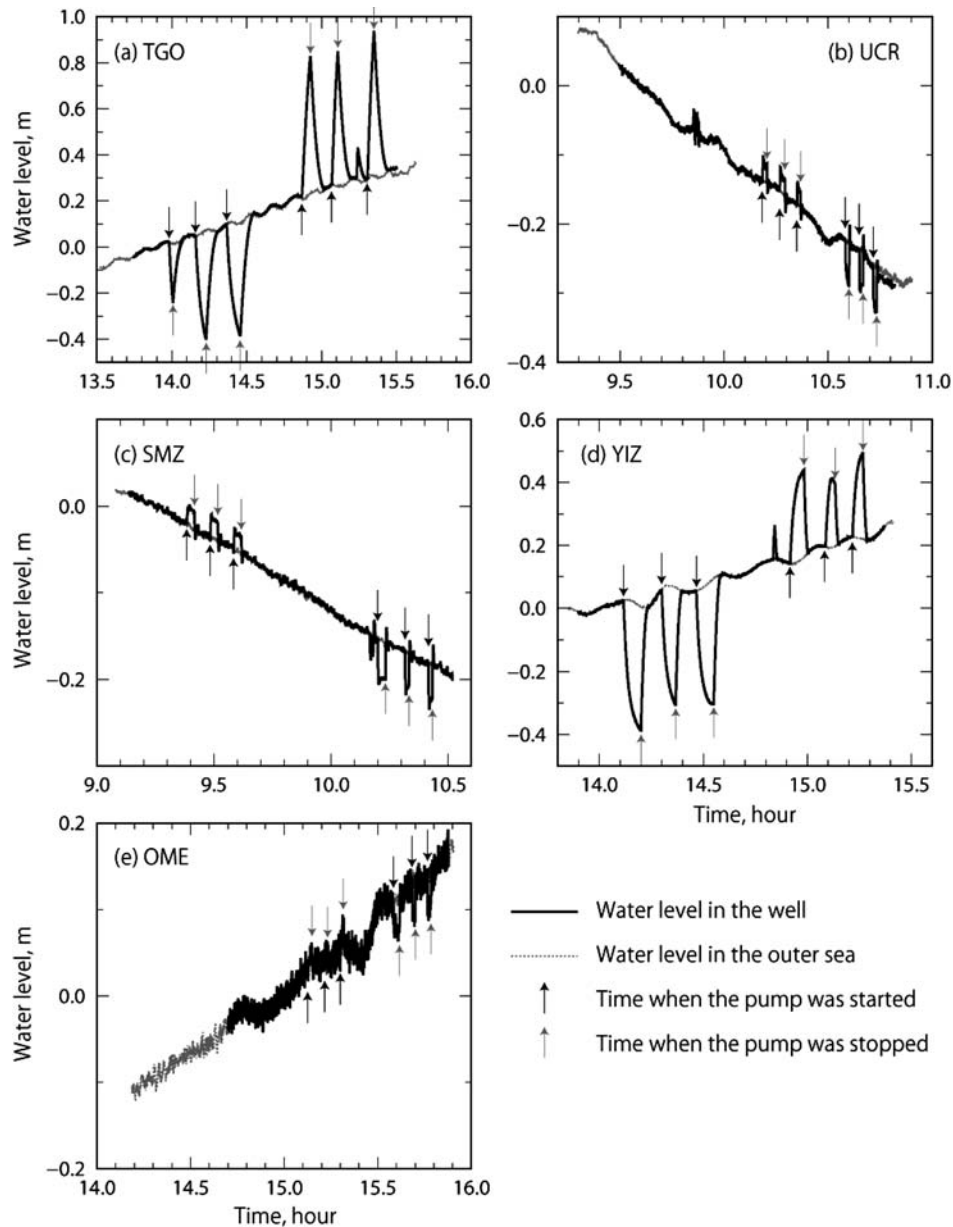


Fig. 4. Observed water levels in the wells (solid lines) and the outer sea (dotted lines) during the *in situ* measurement at (a) Tago, (b) Uchiura, (c) Shimizu-ko, (d) Yaizu, and (e) Omaezaki.

示した。両者はほぼ完全に一致しており、本実験で用いた圧力式水位計が正しく動作したことが確認できる。

#### 4.2 応答係数の推定

検潮井戸応答特性調査で得られた外海および井戸内水位を用いて、グリッドサーチ法により推定した応答係数  $G$  および  $W$  の値を Table 3 に示す。その  $G$  および  $W$  の値を用いて井戸内水位を計算した結果が Fig. 6 である。同表にある  $T$  は、非線形応答のみを考慮した場合の  $T = \sqrt{2/g} / W$  で定義される「回復時間」(Satake *et al.*, 1988) で、外海と井戸内の水位差が 1 m であった際の、井戸内水位が回復するまでの時間に対応する。すなわ

ち、この時間が長いほど井戸の応答は悪いことを意味する。明瞭な水位差を与えることができた田子や焼津では  $T$  は 5~7 分程度であるのに対し、内浦や清水では十数秒から 1 分未満と短い。御前崎の汲み出し実験では、小さいながらも水位差を与えることができたので、応答係数を推定した。一方、注ぎ込み実験では水位差を与えることができなかったため、応答係数が推定できなかった。そこで、御前崎の注ぎ込み実験では、同地点の汲み出し実験結果よりは応答係数の値が大きな値であろうと推測し、 $W > 0.00258$  とした。

なお、内浦や清水港ではポンプが稼働中に水位が回復

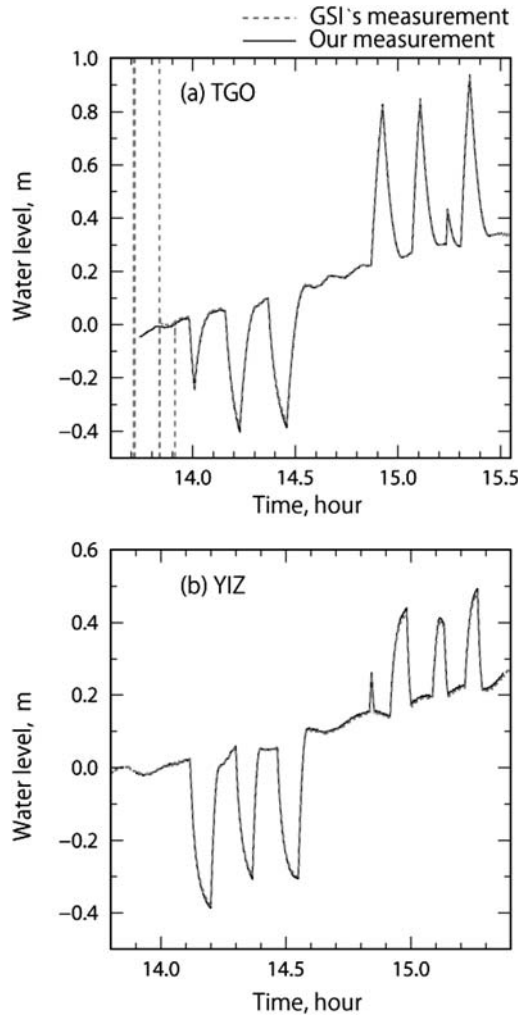


Fig. 5. Comparison of observed water levels in the wells by our measurements with those by GSI at (a) Tago and (b) Yaizu.

する現象がみられる（たとえば、Fig. 6b の A 部）。これはポンプで水位差を与えている最中に、導水管を通じて外海から海水が流出入したことが推定される。また、これらの検潮所では、井戸内水位が回復した後に振動現象をすることが観察されるが（Fig. 6b の B 部）、これについては 5.2 節にて考察を行う。

#### 4.3 2009 年駿河湾地震津波の津波波形の補正

本調査で推定された応答係数  $G$  および  $W$  を用いて 2009 年駿河湾地震津波の補正を行った。田子（TGO）および焼津（YIZ）については、観測波形のサンプリング間隔は 1 秒間で、30 秒幅のローパスフィルターをかけた。これらの検潮所では、原記録に短周期成分がほとんど含まれていないので、フィルターをかけても波形はほとんど変わらない。内浦（UCR）、清水港（SMZ）、および御前崎（OME）については、観測波形のサンプリング間隔

が 15 秒間であるが短周期成分が目立つため、これらの波形に 90 秒幅のローパスフィルターをかけた。これらのデータに対して、応答係数を用いて補正した波形を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。井戸の応答特性を補正した結果、田子では津波波形のピークの到達時刻が 1 分程度早まり、振幅が若干大きくなった。焼津についても補正波形は到達時刻が若干早まる結果となったが、ピークの高さはほとんど変化がなかった。内浦および清水港では補正によって波形に変化が見られなかった。御前崎では補正後の波形が補正前の波形に比べ若干傾化することが見られたが（地震発生から 28～31 分など）、ピークの振幅や出現時刻にはほとんど変化がなかった。波形の変化を定量的に表すため、観測波形に対する補正波形の変化率  $r$

$$r(\%) = \frac{\sum_k [h_o(t_k) - h_c(t_k)]^2}{\sum_k [h_o(t_k)]^2} \times 100 \quad (3)$$

を計算してみた。ここで、 $h_o$  は観測波形を、 $h_c$  は補正後の波形を表す。 $r$  の値が 0% の時の場合は元の波形と同じ波形であることを意味する。地震発生時刻から津波の第一波以降までの時間窓を設定して変化率を計算した結果、田子で 11%（時間窓は地震発生時刻から 25 分後まで）、焼津で 3%（25 分後まで）、御前崎で 1%（50 分後まで）となった。内浦や清水港では 0%（30 分後まで）、すなわち補正による波形の変化は認められなかった。

なお、本調査では汲み出し実験と注ぎ込み実験をそれぞれ 3 回ずつ行ったため、合計 9 種類の補正波形を考えることができる。その 9 種類の補正波形について、(3) 式の観測波形の代わりに TASR が最小となる応答係数による補正波形を用いて  $r$  を計算したところ、波形の違いは田子で最大 1% であったが、他の観測点は 0% であった。すなわち、3 回の測定による応答係数の違いは、補正波形にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。

## 5. 議 論

### 5.1 推定した $G$ および $W$ の解像度

グリッドサーチ法では TASR（残差二乗平均）の値が最小になるようにして応答係数  $G$  および  $W$  を推定した。この際、TASR の値が水位の測定精度よりも小さい場合には、解像度を超過して推定していることになる。

本研究で使用した圧力式水位計の測定精度は、3.1 節で述べたように 1.75 mm 以下、分解能は 1 mm である。従って、残差二乗平均（TASR, Table 3）が 1.75 mm の二乗値（ $=3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ）以下の際には、最小値を求める意味がない。Table 3 にまとめたように、ほとんどの実験では、TASR の値は  $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  よりも大きかったが、

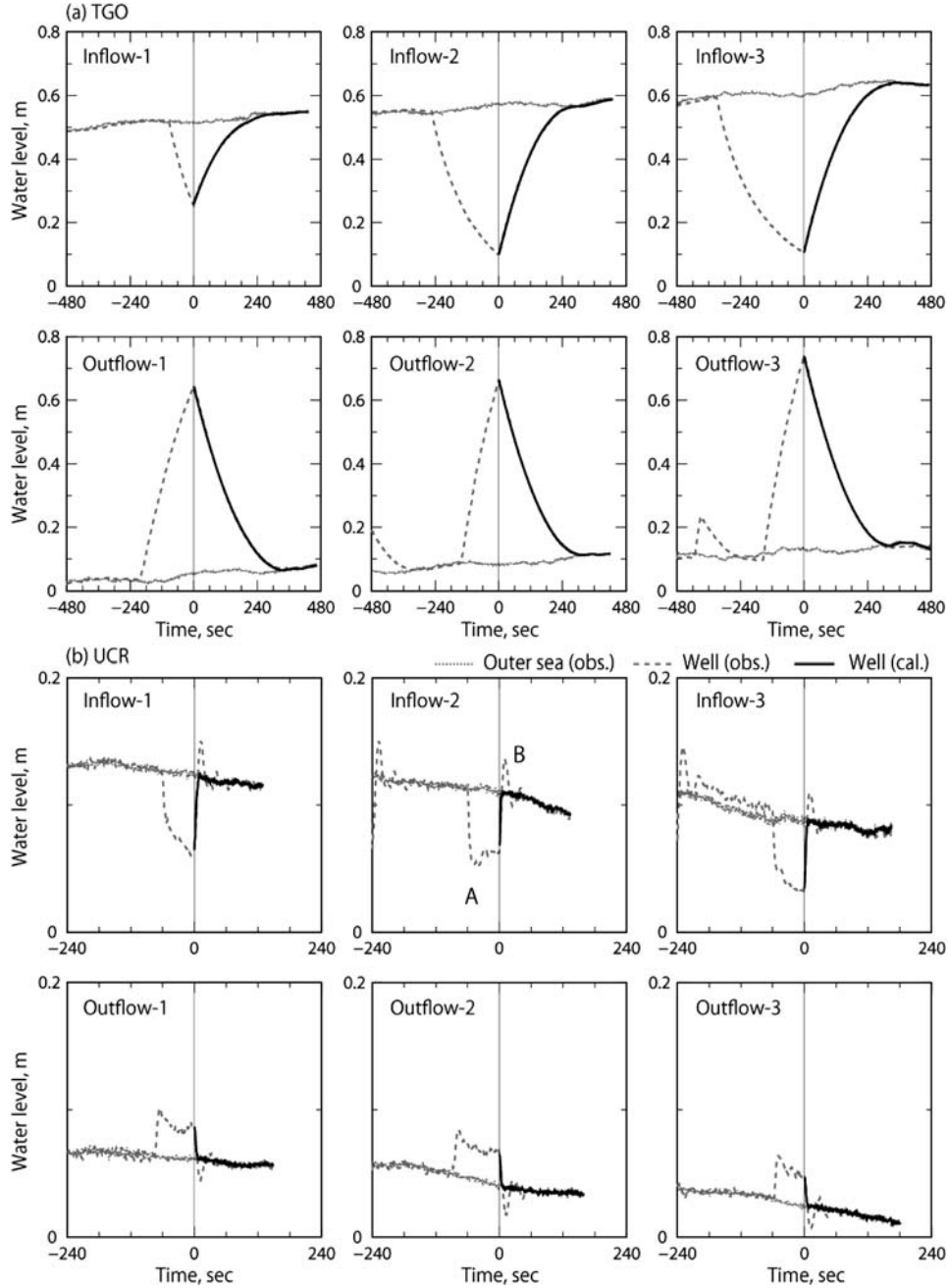


Fig. 6. Results of *in situ* measurements at (a) Tago, (b) Uchiura, (c) Shimizu-ko, (d) Yaizu, and (e) Omaezaki. The observed outer sea levels (dotted lines), the observed well levels (dashed lines), and the calculated well levels (solid lines) using the estimated linear and nonlinear coefficients  $G$  and  $W$  (see Table 3) are shown. Because differences of the water levels between the outer sea and the well are insignificant at the outflow experiments of Omaezaki, the linear and nonlinear coefficients were not estimated.

焼津における実験 (I-1, I-2, I-3, および O-3) では, 上記の値よりも小さかった. そこで, 焼津の実験について  $W$ - $G$  平面上に, 測定精度の上限 ( $1.75 \text{ mm}$ ) に相当する TASR ( $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ) のコンターを表してみた (Fig. 9). 汲み出し実験に注目すると, 3 回目の実験の TASR の分布が, 他の 2 回よりも大きく,  $G$ ,  $W$  の推定の解像度が

低いことがわかる. 注ぎ込み実験については 3 回目のみ TASR が  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  のコンターを描くことができた, すなわち  $G$ ,  $W$  の推定の解像度が低かった. なお, Fig. 9 の縦軸および横軸の刻みはそれぞれグリッドサーチ法における  $\Delta G$  および  $\Delta W$  の幅を表すが, この幅で推定した  $G$ ,  $W$  の値に対して, 焼津以外ではコンターを描く



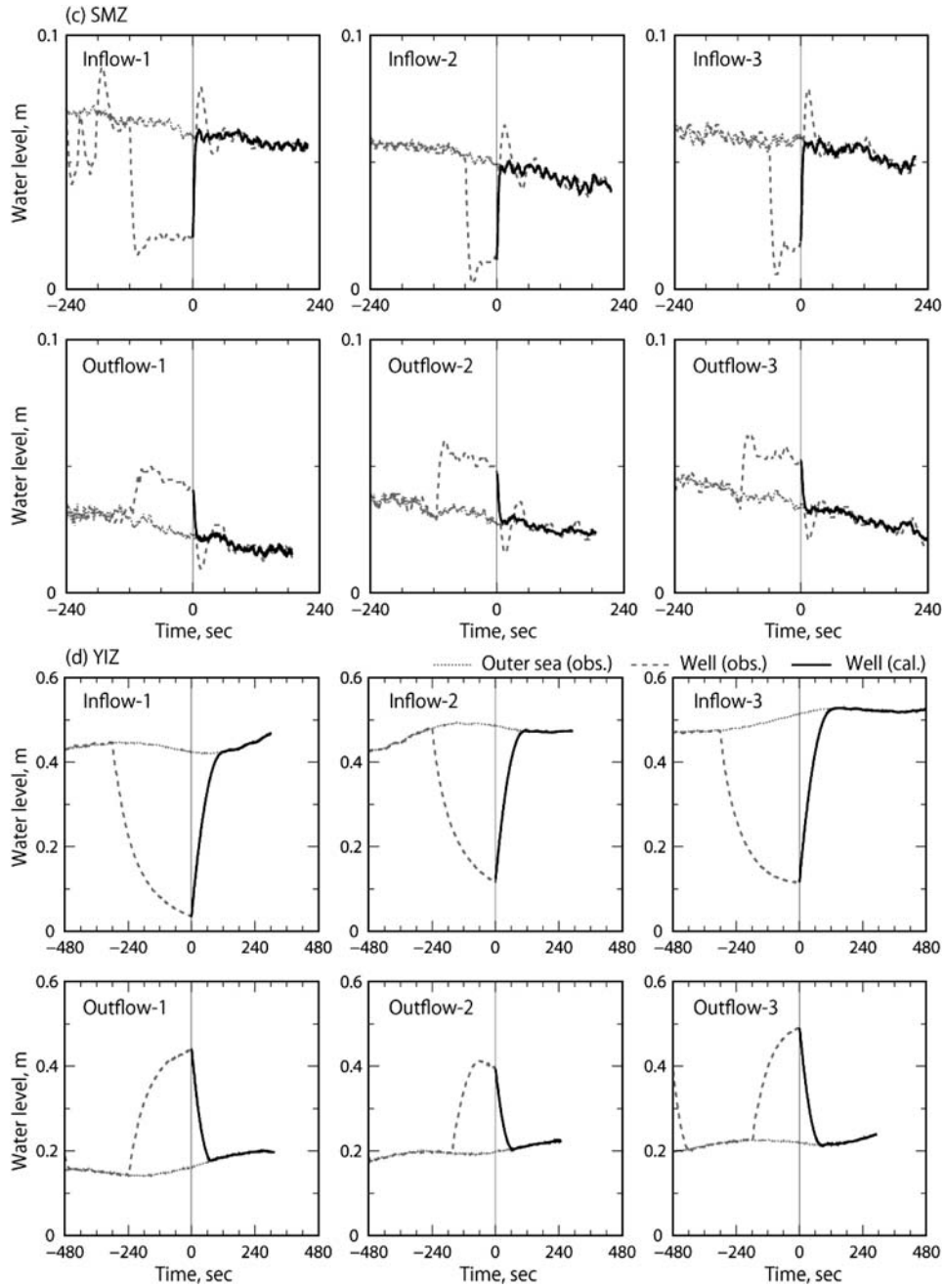


Fig. 6. (continued)

ことができなかった、すなわち焼津以外ではこの刻み幅の解像度で  $G$ ,  $W$  の値を推定できた。

焼津における応答係数の解像度が、2009年駿河湾地震津波の補正波形にどの程度影響するのか推定するために、Fig. 9の三角印で示した点における応答係数を用いて観測津波波形を補正した。汲み出し実験では2組の応答係数、注ぎ込み実験では3組の応答係数を用い、計6個の補正波形を計算した (Fig. 10)。この結果、6種類の補正波形は Fig. 7 および Fig. 8 における補正波形とは

とんど変わらず、変化率  $r$  はいずれも0%であった。すなわち、焼津における応答係数の解像度は水位測定精度に比べて低いものの、その推定値が2009年駿河湾地震津波の補正波形に対しては影響を与えないことがわかった。

## 5.2 慣性振動

内浦や清水では、Fig. 6bのB部のように、観測された回復曲線が回復の途中から振動する現象が見られた。これは、導水管を介して井戸内に慣性振動が卓越したと

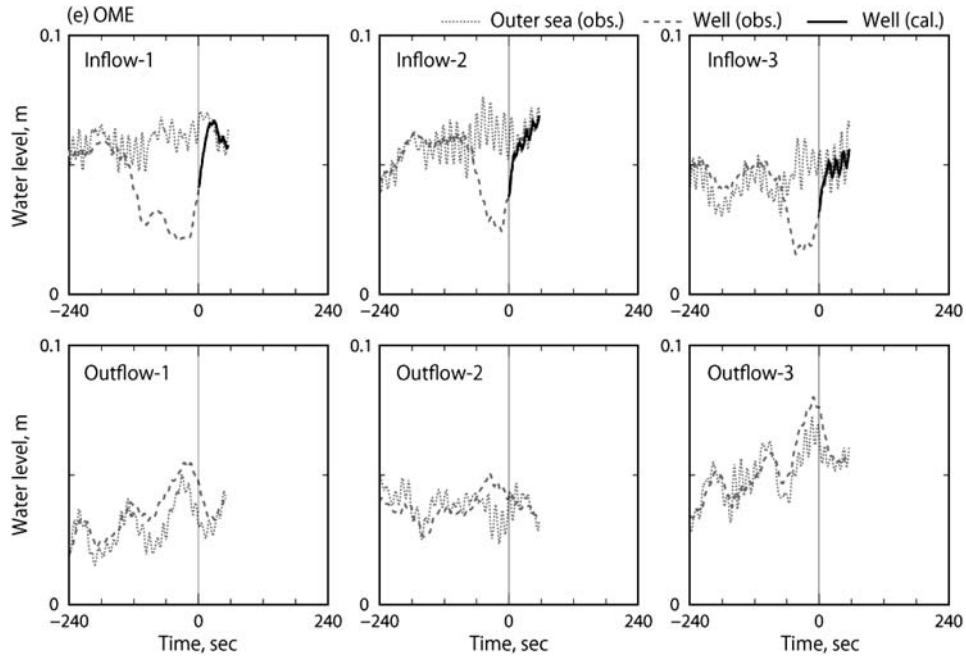


Fig. 6. (continued)

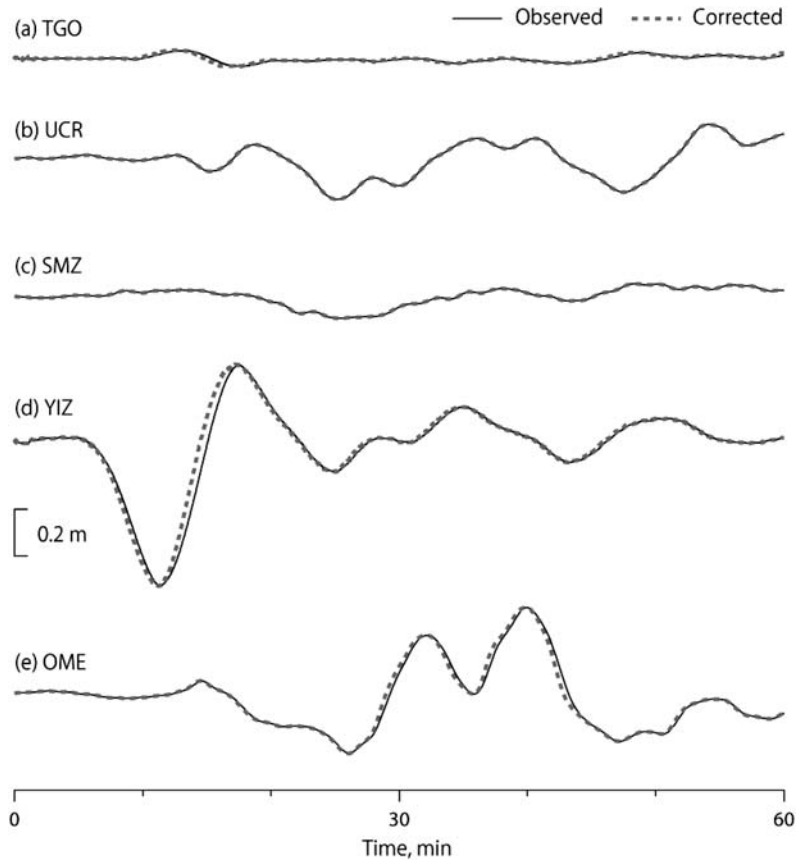


Fig. 7. The observed (solid lines) and corrected (dashed lines) tsunami waveforms from the 2009 Suruga bay earthquake. The coefficients used for the corrections are shown in Table 3. Time indicates the elapsed time (in minutes) from the earthquake origin time. Enlarged waveforms of TGO and YIZ are shown in Fig. 8.

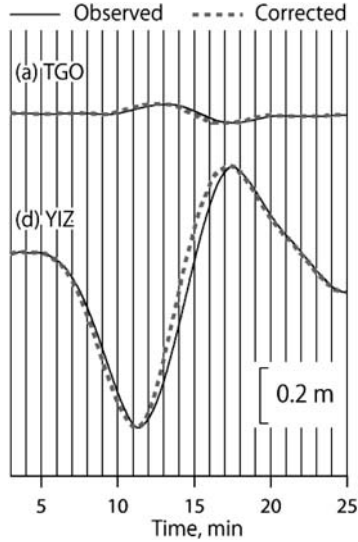


Fig. 8. Enlarged waveforms of TGO and YIZ. Symbols are the same as Fig. 7.

考えられる。慣性振動に関する定式化については岡田・阿部（1988）により議論されているが、線形応答を無視した場合、慣性振動は次のように表せる。

$$\frac{L}{g} \varepsilon^2 \frac{d^2 h}{dt^2} = H - h - \frac{1}{2gW_{\text{inert}}} \text{sgn}\left(\frac{dh}{dt}\right) \left(\frac{dh}{dt}\right)^2 \quad (4)$$

ここで、 $L$  は導水管の長さ、 $\varepsilon$  は井戸と導水管の内径比、 $W_{\text{inert}}$  は応答係数を表す。この式を用いてグリッドサーチ法により、内浦および清水での振動を再現する応答係数  $W_{\text{inert}}$  を推定した。なお、式(4)は、二階微分方程式をRunge-Kutta法で解き、初期条件としては、水位( $h$ )についてはポンプを止めたときの井戸内の水位、水位の一階微分( $dh/dt$ )については、ゼロとして扱った。なお、導水管の長さや内径比は、Table 1 の値を用いた。

計算された波形を Fig. 11 に示すが、慣性振動現象をよく再現していることがわかる。ただし、振動の最初のピーク（Fig. 11 の A 部）の大きさや位相が完全には再現できていない。本研究では井戸と導水管の内径比である  $\varepsilon$  について設計図からの読み取り値（Table1）を用いたが、2.1 節で述べたようにこの値が実際とは異なることが原因かもしれない。

慣性振動が2009年駿河湾地震津波波形の補正に与える影響を調べるために、本節で推定した慣性応答の応答係数と式(4)を用いて内浦と清水での津波波形を補正した（Fig. 12）。補正した津波波形は観測波形に比べほとんど変化がないことがわかった。すなわち、慣性応答を考慮しても2009年駿河湾地震津波に関しては波形の補正に影響を与えることはなかった。

Table 3. Estimated nonlinear and linear coefficients W and G

		W	G, sec	T, sec	TASR, m <sup>2</sup>
TGO	I-1*	0.00122	23.7	370	4.30E-06
	I-2	0.00120	16.2	376	1.25E-05
	I-3	0.00135	35.2	335	4.94E-06
	O-1	0.00106	13.6	426	1.34E-05
	O-2*	0.00109	17.4	414	4.19E-06
	O-3	0.00105	5.9	430	4.45E-05
UCR	I-1	0.01057	0.0	43	4.91E-05
	I-2	0.03102	0.0	15	4.78E-05
	I-3*	0.01908	0.7	24	3.13E-05
	O-1	0.01680	1.0	27	1.87E-05
	O-2	0.01533	0.0	29	2.69E-05
	O-3*	0.01473	0.8	31	1.85E-05
SMZ	I-1	0.01255	0.0	36	2.31E-05
	I-2*	0.01681	1.2	27	1.99E-05
	I-3	0.02119	1.7	21	2.92E-05
	O-1	0.00771	0.0	59	1.25E-05
	O-2	0.02392	2.6	19	1.52E-05
	O-3*	0.00952	0.9	47	9.93E-06
YIZ	I-1	0.00247	1.3	183	2.78E-06
	I-2	0.00265	4.9	170	2.66E-06
	I-3*	0.00266	5.9	170	1.27E-06
	O-1	0.00286	0.0	158	5.53E-06
	O-2	0.00289	0.0	156	3.60E-06
	O-3*	0.00293	0.0	154	2.05E-06
OME	I-1*	0.00258	0.0	175	3.22E-06
	I-2	0.00313	0.0	144	5.28E-06
	I-3	0.00314	0.0	144	6.60E-06
	O-1	> 0.00258	-	< 175	-
	O-2	> 0.00258	-	< 175	-
	O-3	> 0.00258	-	< 175	-

After the station code, the first character indicates inflow (I) or outflow (O) experiments and the numeral indicates the experiment number. For example, "I-1" and "O-2" indicate the 1st inflow and 2nd outflow experiments, respectively. The estimated coefficients with asterisks "\*" were used for the corrections of the tsunami waveforms. TASR is temporally-averaged squared-residual between the observed and calculated water levels of the *in situ* measurements.

## 6. まとめ

駿河湾沿岸に位置する田子験潮場、内浦験潮所、清水港験潮所、焼津験潮場、および御前崎験潮所において、2009年11月4日から6日にかけて検潮井戸の応答特性調査を行った。ポンプを用いて検潮井戸内と外海とに水位差を与え、ポンプを停止した後に自然回復する井戸内水位を観測した。このうち、田子験潮場および焼津験潮場では井戸内と外海とに30～60 cm程度の水位差を与えることができた。内浦験潮所や清水港験潮所では数cmの水位差を与えることができた。測定した水位回復

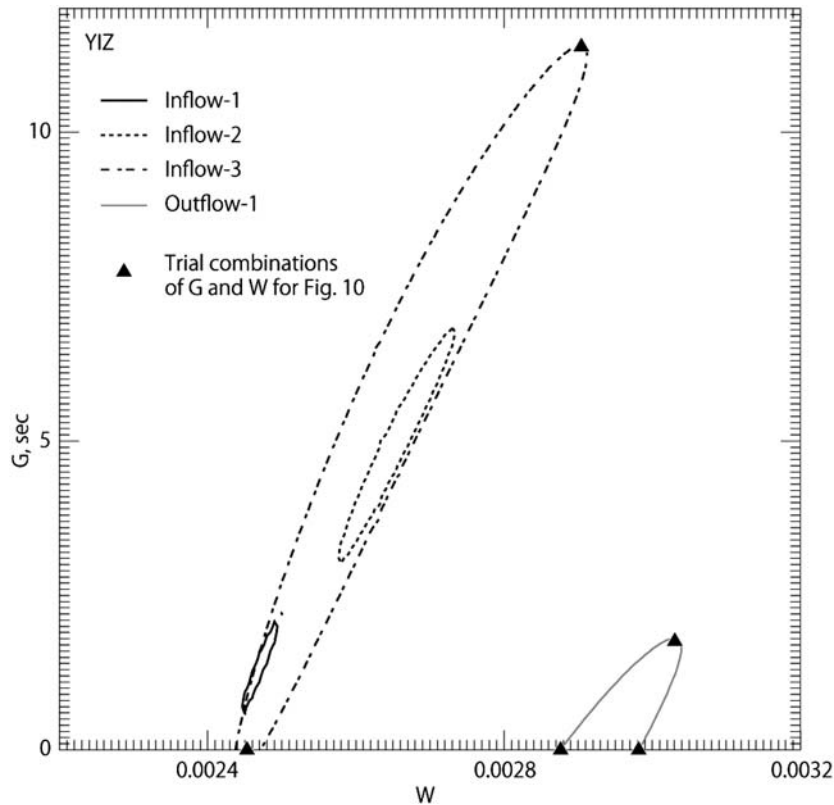


Fig. 9. Contours of the temporally-averaged squared residual (TASR) indicating the resolution limit associated with the observation at YIZ. Trial combinations of  $G$  and  $W$  (triangles) were used for the waveform corrections in Fig. 10.

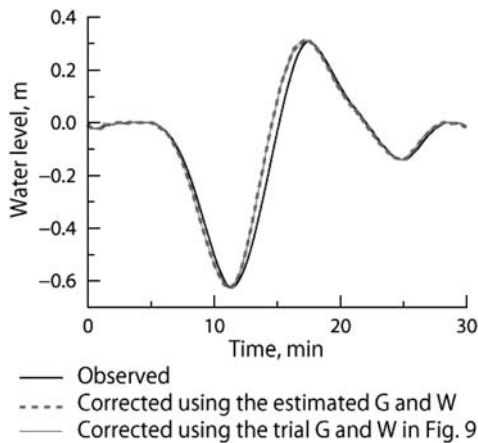


Fig. 10. Comparison of corrected tsunami waveforms using the estimated  $G$  and  $W$  (dashed line) and those using the trial  $G$  and  $W$  in Fig. 9 (gray thin lines). They are almost identical. The observed tsunami waveform is also shown by the solid line.

曲線から検潮井戸の線形応答係数  $G$  および非線形係数  $W$  を推定した。1 m の水位差についての回復時間  $T$  で表現すると、田子では5~7分、焼津では約3分と長かったが、内浦と清水港では1分以下と津波の周期に比べて

ずっと短かった。御前崎検潮所ではポンプによって水位変化を与えることが困難であったため、応答特性の推定は困難であったが、井戸内水位が短周期の変化を記録していることから、応答は良いとみなすことができる。

これらの応答係数を用いて2009年8月11日に発生した駿河湾の地震津波の観測波形を補正した。その結果、田子検潮場では、補正された津波波形は第1波ピークの到達時刻が1分程度早まり振幅が若干大きくなった。焼津検潮場においては第1波の到達が早まったが、ピークの振幅はほとんど変化しなかった。内浦検潮所や清水港検潮所では津波波形の変化はほとんどみられなかった。

## 謝 辞

検潮（験潮）井戸応答特性調査においては、気象庁および国土地理院から調査許可を戴きました。内浦検潮所、清水港検潮所、および御前崎検潮所の調査では、気象庁静岡地方気象台の永井 章台長と大井昌茂技術課長に、御前崎検潮所の調査では御前崎測候所の浅井一輝所長に、田子検潮場および焼津検潮場の調査では、国土地理院測地観測センター矢来博司地震調査官に、それぞれ調査の際の立ち会い及びお手伝いを戴きました。気象庁



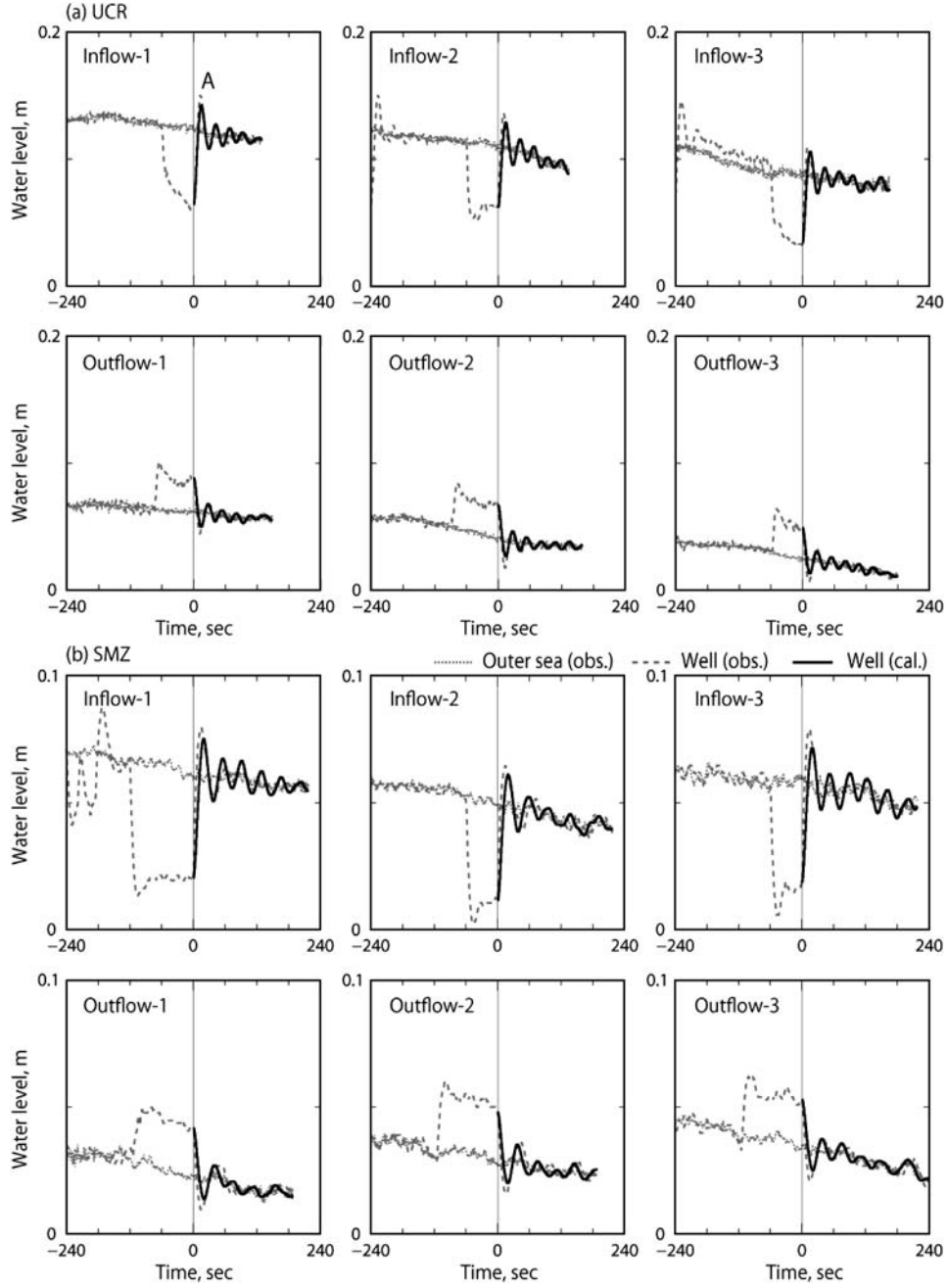


Fig. 11. Calculated inertial oscillations (solid lines) using the estimated inertial coefficients  $W_{\text{inert}}$  at (a) Uchiura and (b) Shimizu-ko. The observed outer sea levels (dotted lines) and the observed well levels (dashed lines) are also shown.

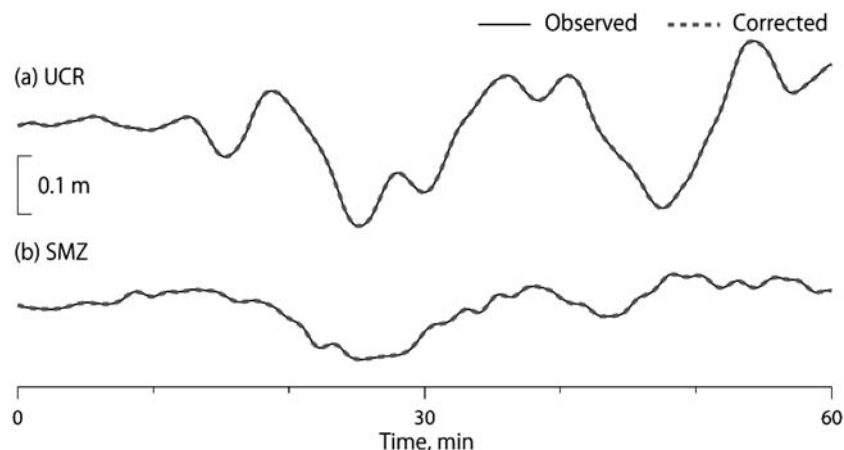


Fig. 12. Corrected (dashed lines) tsunami waveforms from the 2009 Suruga bay earthquake by using the inertial effect at Uchiura (a) and Shimizu-ko (b). The original waveforms (solid lines) are also shown. Time indicates the elapsed time (in minutes) from the earthquake origin time.

から、内浦検潮所、清水港検潮所、および御前崎検潮所における2009年駿河湾地震津波の観測データの提供を受けました。国土地理院から、田子検潮場および焼津検潮場における2009年駿河湾地震津波の観測データならびに、駿潮井戸応答特性調査時における観測データの提供を受けました。本研究の一部に科研費(21310113)を利用しました。記して感謝いたします。

#### 引用文献

- Cross, R.H., 1967, Frequency response of tide gages, *Technical Rep. Univ. California*, HEL 16-4, 16p.  
 Loomis, H.G., 1983, The nonlinear response of a tide gage to a tsunami, *Proc. 1983 Tsunami Symp.*, 177-185.  
 Namegaya, Y., Tanioka, Y., Abe, K., Satake, K., Hirata, K., Okada, M. and A.R., Gusman, 2009, In situ measurements of tide gauge response and corrections of tsunami

waveforms from the Niigataken Chuetsu-oki earthquake in 2007, *Pure Appl. Geophys.*, 166, doi: 10.1007/s00024-008-0441-6.

- Noye, B.J., 1974a, Tide-well systems II: The frequency response of a linear tide-well system, *J. Mar. Res.*, **32**, 155-181.  
 Noye, B.J., 1974b, Tide-well systems III: Improved interpretation of tide-well records, *J. Mar. Res.*, **32**, 183-194.  
 Okada, M., 1985, Response of some tide-wells in Japan to tsunamis, *Proc. Int. Tsunami Symp.*, 208-213.  
 岡田正実, 阿部邦昭, 1988, 検潮井戸の応答特性, 日本海中部地震津波の発生・増幅機構と破壊力, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. A-63-1, 57-86.  
 Satake, K., Okada, M. and Abe, k., 1998, Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan, *J. Mar. Res.*, **46**, 557-571.

(Received April 21, 2010)

(Accepted July 1, 2010)