

2007 年新潟県中越沖地震震源域周辺の検潮井戸応答特性調査および津波波形補正

行谷佑一¹, 谷岡勇市郎², 阿部邦昭³, 佐竹健治⁴,
平田賢治⁵, 岡田正実⁵, Aditya R. Gusman²

アブスト

2007 年新潟県中越沖地震震源域周辺に位置する 10 カ所の井戸式検潮所において、その線形および非線形応答特性を調査した。すなわち、ポンプにより海水を検潮井戸へ注ぎ込み、あるいは海水を検潮井戸から抜き出し、強制的に外海と水位差を設けその後自然回復する井戸内の水位を測定した。その結果、粟島、岩船および姫川検潮所では、それら周辺の外海の水位変化が井戸内に同時に伝わるのがわかった。しかしながら、7 カ所の検潮所すなわち、鼠ヶ関、両津、小木、寺泊、番神、鯨波、および直江津では外海の水位変化が必ずしも同時に井戸内に伝わらないことがわかった。これらの検潮所において記録された津波波形は、必ずしも検潮井戸外海の津波波形を表すとは限らないと考えられる。

つぎに、2007 年新潟県中越沖地震の観測津波波形を、上記の 7 カ所の検潮所においてその応答特性を用いて補正した。番神や鯨波および小木では、補正後の第一波および第二波の振幅が原記録よりも大きくなり、ピーク出現時刻が数分早まった。とくに番神では、補正後の波形変化が顕著であり、第一波および第二波の押し波が、原記録でそれぞれ 95 cm、および 88 cm であったのに対し、補正後では 102 cm、および 114 cm の高さとなった。その他の検潮所では補正による津波波形の変化は顕著ではなかった。

1. はじめに

2007 年新潟県中越沖地震により発生した津波は、震源域にもっとも近い柏崎市番神検潮所（新潟県管理）において 1 m 程度の押し波が観測されたほか、震源域周辺の多くの検潮所（場）（以下検潮所に表記を統一）において明瞭に観測された。

わが国の検潮儀は大きく分けてつぎの 3 種類の検潮儀がある。すなわち、外海と導水管により接続された検潮井戸に浮きを浮かべ、その浮きの上下運動により水位の変化を計測する方式（検潮井戸方式）、水圧計で水圧を測ることにより水位の変化を計測する方式（圧力計方式）、および測器と海面までの距離を超音波によって計測する方式（超音波方式）である。

上記の番神検潮所は検潮井戸方式によるものである。この方式はその細長い導水管の存在により入力である外海の海面振動の周期に応じて応答特性がある。たとえば天文潮汐のような周期が数時間以上の長周期の波は正確に記録されるが、風波やうねりといった周期が数秒～数十秒の短周期の波はほぼ完全にカットされる。津波のように周期十分程度の中程度の周期の波に対しては、その中間の応答特性が存在することが予想される。したがって、検潮井戸方式で記録された津波波形は外海の津波波形を表しているとは必ずしも言えない。とくに、冬場の日本海は荒天であることが多く短周期波が卓越するが、検潮井戸によっては導水管に詰め物をしてこの短周期成分を落としているものもある。すなわち、検潮井戸で観測された真の津波波形を知るには、その検潮井戸の応答特性を正しく知り記録された津波波形を補正する必要がある。

1. 産業技術総合研究所活断層研究センター
2. 北海道大学大学院理学研究院
3. 日本歯科大学新潟短期大学
4. 東京大学地震研究所
5. 気象研究所

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) は導水管のない、外海と小さな穴 (orifice) で接続されている検潮井戸を考え、ベルヌーイの式を参考に、井戸内の水位時間 1 階微分は外海と井戸内の水位差の平方根に比例する、という非線形応答を提案した。Noye (1974a) は長い導水管により外海と接続された検潮井戸を考え、この長い導水管内の水の流れはポアズイユ流れとなり、井戸内の水位時間 1 階微分は外海と井戸内の水位差 (の一乗) に比例する、という線形応答を提案した。また、Noye (1974b) は導水管の長さや太さが小さければ線形・非線形混合応答を考慮すべきだと述べている。

検潮井戸の応答特性により井戸内の水位変化が外海の変化と比べてどのように変化するかについてもいくつかの研究がある。Loomis (1983) は非線形応答をする仮想的な検潮井戸に白色雑音を乗せた擬似津波波形を入力波形として与え、その津波の振幅やスペクトル幅が大きければ大きいほど入力波形と補正波形との間に大きな差異が生まれることを示した。Okada (1985) は京都府舞鶴検潮所において検潮井戸応答を実測し、線形応答よりも非線形応答の方がより良く実測値を説明することを述べた。同時に、1983 年日本海中部地震津波の青森県深浦検潮所における観測波形を、実測で得られた非線形応答を用いて補正した。Satake et al. (1988) は北日本に位置する 40 ヶ所の検潮所の応答特性を実測し、各検潮所で観測された同地震津波を実測で得られた非線形応答を用いて補正した。この地震津波は検潮所周辺で目撃された浸水高さに比べ検潮儀に記録された津波高さが小さかったことが指摘されているが (国立防災科学技術センター, 1984), Satake et al. (1988) により補正された津波の最大値は目撃による浸水高さと良い一致を示された。また、Satake et al. (1988) は水工学的な見地から応答特性を理論的に求める試みをしているが、実測による応答特性を再現するには至っていない。

以上のように、これまでの研究例は検潮井戸の非線形応答の効果を考えたものがほとんどであった。しかしながら、わが国の検潮井戸の導水管の長さや太さはさまざまであり、Noye (1974b) に従い非線形応答だけではなく線形応答も考慮するほうが、より正しい応答特性を知ることにつながるであろう。さらに前回の調査 (Satake et al., 1988) からすでに 20 年が経過しており、検潮井戸の構造も変化している可能性がある。事実、直江津および小木検潮所は前回の調査以後に移動している。

そこで本研究では、2007 年新潟県中越沖地震震源域周辺の 10 ヶ所の検潮所、すなわち鼠ヶ関 (38°33'47"N, 139°32'46"E), 小木 (37°48'53"N, 138°16'53"E), 鯨波 (37°21'24"N, 138°30'32"E) (以上国土地理院管理), 粟島 (38°28'04"N, 139°15'18"E, 海上保安庁管理), 岩船 (38°11'29"N, 139°25'29"E), 両津 (38°05'00"N, 138°26'10"E), 寺泊 (37°38'36"N, 138°45'58"E), 番神 (37°21'55"N, 138°31'51"E), 直江津 (37°11'06"N, 138°15'12"E), および姫川 (37°02'22"N, 137°50'11"E) (以上新潟県管理) について (図 1), その線形応答特性および非線形応答特性を現地で実測した。そして得られた両応答特性を用いて同地震津波の観測波形を補正した。

2. 検潮井戸応答特性調査および津波波形補正の手法

2.1 線形応答特性および非線形応答特性

わが国の典型的な検潮井戸方式による検潮儀は、図 2 のように細長い導水管により外海と接続されている。このような検潮儀にはその細長い導水管の存在により応答特性が存在する。すなわち、天文潮汐などの長周期波や永年のゆっくりとした地殻変動による鉛直変位を正しく記録するいっぽうで、風波やうねりなどの短周期波はカットされる。津波のように周期数分から数十分の中程度の周期の波は、細長い導水管の影響で外海の変化が同時に井戸内に伝わることはできない場合があり、

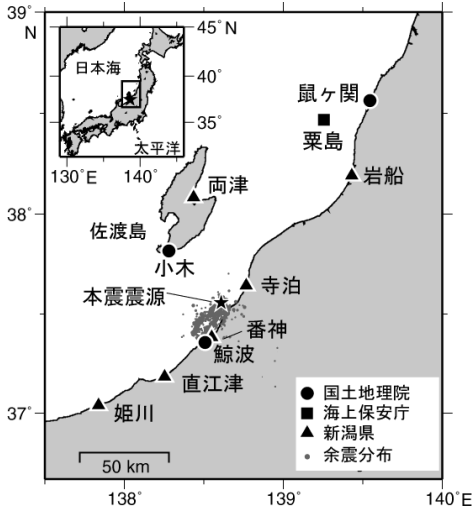


図1 検潮応答特性調査を行った検潮所の位置

●印, ■印, および▲印はそれぞれ国土地理院, 海上保安庁, および新潟県管理の検潮所を表す。灰色の点は気象庁により決定された本震発生後1日以内の余震分布である。

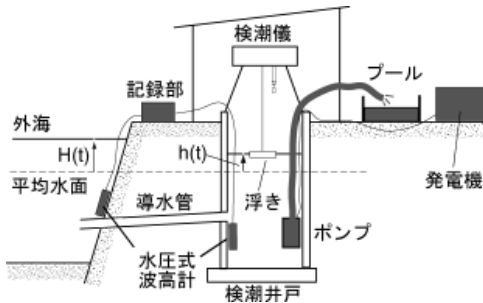


図2 わが国の典型的な井戸型検潮所の模式図

灰色で示された水圧式波高計, データレコーダー, ポンプ, プール, および発電機は検潮井戸応答特性調査のために一時的に設置した器材を表す。 $H(t)$ および $h(t)$ はそれぞれ平均水面上の外海の水位および井戸内の水位を表す。

検潮井戸で観測された津波波形が必ずしも外海の真の波形を表しているとは限らない。

いま, 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設けたあと,

井戸内の水位が自由に外海の水位に戻る場合を考える。このときベルヌーイの式から得られる井戸の非線形応答は,

$$\frac{dh(t)}{dt} = W \operatorname{sgn}\{H(t) - h(t)\} \sqrt{2g|H(t) - h(t)|} \quad (1)$$

と表せる。ここで, $dh(t)/dt$ は井戸内水位の時間1階微分項, 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。また, W は非線形応答定数 (無次元) であり, 検潮井戸の応答特性調査により求められる (Satake et al., 1988)。

いっぽう, 導水管が細長い場合には, 導水管内は定常ポアズイユ流になり検潮井戸は線形応答を示す (Noye, 1974a)。すなわち, 強制的に外海との水位差を設けたあとの井戸内の水位変化は,

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{G} \{H(t) - h(t)\} \quad (2)$$

と表せる。ここで, G は線形応答定数 (単位: 秒) であり, 非線形応答係数 W と同様に応答特性調査により求めることができる。

さらに, 導水管の長さがさほど長くなくその直径もさほど細くない場合には, 線形応答と非線形応答を混合した次の式

$$\frac{dh(t)}{dt} = gW^2 \operatorname{sgn}\{H(t) - h(t)\} \left\{ -G + \sqrt{G^2 + \frac{2|H(t) - h(t)|}{gW^2}} \right\} \quad (3)$$

を考慮すべきである (Noye, 1974b)。本研究では, この (3) 式で表せる線形・非線形混合応答特性を実際の検潮所で調査し, その結果を用いて2007年新潟県中越沖地震による津波の波形補正を行うことを目的とする。

2.2 検潮井戸応答特性調査の手順

非線形応答係数 W については水工学的な見地から理論的に求める試みがある。しかしながら, 非線形応答について Satake et al. (1988) は, 理論から求めた非線形応答係数 W を用いて計算した井戸内水位が外海と同じ高さになるまでの回復時間は, 実測で求め

た非線形応答係数 W を用いた場合に比べ 10 倍程度後者のほうが長くなることを指摘している。この差異は導水管内に付着する海棲生物や砂などにより導水管内の摩擦係数を正しく評価できないことに大きな原因がある。したがって、応答係数を正確に見積もるためには、実際の検潮井戸でその応答特性を調査する必要がある。

そこで本節では実際の検潮所での検潮井戸応答特性調査の手順について記す。調査を行うにあたり、まず 2 つの圧力式波高計、ポンプ、簡易ビニールプール、および発電機を用意する。そして、図 2 の灰色で示されているように、片方の圧力式波高計を井戸内に設置し、もう片方を導水管の出口付近の外海に設置する。ポンプはその吸引口を井戸内に設置しプールおよび発電機は検潮井戸近くに設置する。つぎに、ポンプにより井戸内の海水を汲み出し、汲み出した海水はプールに溜めておく。そして、井戸内の水位が外海の水位よりも十分に低くなったらポンプを止め、その後海水が導水管を伝わって自然に回復する水位の変化を圧力式波高計により測定する。この調査は外海から井戸内への海水流入に対する検潮井戸の応答を調べるものである（汲み出し実験）。

また、われわれは井戸内から外海への海水

流出に対する応答も調査した（注ぎ込み実験）。この場合、汲み出し実験により海水で満杯になったプールにポンプの吸い込み口を置き、この海水をポンプにより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ったらポンプを止め、自然回復する井戸内の水位を圧力式波高計で測定した。プールは注ぎ込み実験のために用意したが、両津や姫川では検潮井戸が外海からすぐ近くの所にあるために、プールから海水を供給するのではなく直接外海から海水を供給した。

2.3 線形応答係数 G および非線形応答係数 W の算出

前項で説明した検潮井戸応答調査により得られた回復時の井戸内水位および外海水位を用いて、式 (3) から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 を求める。まず W - G 平面を考え、 $0.00001 \leq W \leq 0.01$ および $0 \leq G \leq 100$ 秒の矩形領域を 1000×1000 のグリッドにわけ、各方向のグリッド間隔は $\Delta W=0.00001$ および $\Delta G=100$ 秒である（図 3a）。つぎに、この矩形内の各グリッドの座標値 (W , G) における井戸内回復水位を、Runge-Kutta 法を用いて (3) 式により計算する。初期条件は原則としてポンプを止めた時刻に計測された井

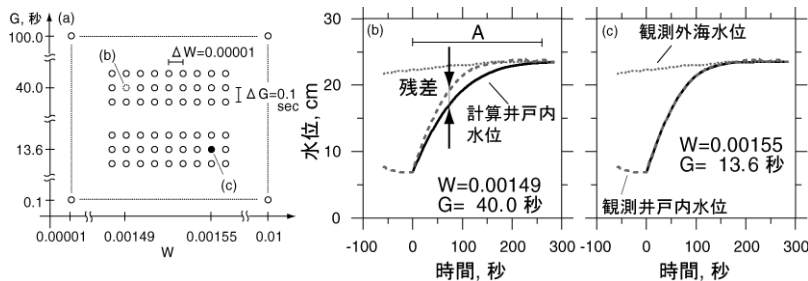


図 3 グリッドサーチ法の説明図

- (a) W - G 平面の概念図 (b) 汲み出し実験における観測回復曲線（灰太鎖線）と暫定応答係数を用いた Runge-Kutta 法による計算回復曲線（実線）。外海の水位は灰細鎖線で表されている。残差自乗和平均 TASR はポンプを止めてから回復曲線が回復を終了するまでの A で示された区間で計算されている。(c) 残差自乗和平均 TASR がもっとも小さくなる応答係数を用いた場合の計算回復曲線。観測回復曲線ならびに外海の水位は図 (b) と同じである。このときの暫定応答係数 W および G をこの汲み出し実験における応答係数とする。

井戸水位を用いる。この Runge-Kutta 法による水位計算と同時に、計算井戸内回復水位と観測井戸内水位との残差自乗和の時間平均 (TASR, temporal averaged squared residual) を計算する (図 3b)。時間平均はポンプを止めてから井戸内水位が外海と同じ高さになるまでの間 (図 3b の区間 A) をとった。そして TASR が最も小さくなる G と W の値を、それぞれ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した。応答係数は汲み出し実験および注ぎ込み実験の両方について算出した。なお、井戸内水位の回復終了時とは、井戸内水位が安定的に変化しなくなった時を意味する。このとき井戸内水位は外海水位と一致していると考えられるので、井戸内水位が回復した時の水位と外海水位とが一致するように外海水位をオフセットして Runge-Kutta 法により回復水を計算している。

2.4 検潮記録の補正

線形・非線形混合応答を考慮した場合、外海での水位 $H(t)$ は井戸内で観測された水位変化 $h(t)$ を用いて、

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

と表せる (Noye, 1974b)。ここで、 G および W はそれぞれ前節 2.3 で求められた線形応答係数および非線形応答係数である。また、井戸内水位の時間 1 階微分項 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。すなわち、 dh/dt が正か負かにより用いる応答係数 G および W もそれぞれ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用いる必要がある。

3. 検潮井戸応答特性の調査結果

3.1 線形応答係数および非線形応答係数

われわれは 2007 年新潟県中越沖地震震源域周辺の 10ヶ所の井戸型検潮所について汲み出し実験および注ぎ込み実験を行い、線形応答係数 G および非線形応答係数 W をグ

リッドサーチ法により推定した。その結果を図 4 および表 1, 2 に示す。これらにあるように、鼠ヶ関、両津、小木、寺泊、番神、鯨波、そして直江津ではポンプにより外海と井戸内の水位の間に明確な差が設けることができた。そして自然回復する井戸内水位をもっとも良く再現する G と W の組み合わせがグリッドサーチ法により推定された。非線形応答係数 W の最小値は 0.00061 (鯨波、汲み出し実験 2 回目) および 0.00055 (鯨波、注ぎ込み実験 2 回目) であり、最大値は 0.00684 (寺泊、汲み出し実験 2 回目) および 0.00321 (直江津、注ぎ込み実験 5 回目) である。式 (3) および (4) から、非線形応答係数 W が小さければ小さいほど回復時間が長くなり、ポンプで作ることができる水位差も大きくなることがわかる。実際に、非線形係数 W が小さかった鯨波では回復時間が長いっぽうで、直江津や寺泊では水位の回復時間は短いことがわかる。

鼠ヶ関では実験時に激しい嵐があったため、短周期成分の波が井戸内に強く伝わった。それゆえ残差自乗和平均 TASR は大きくなり、推定された係数 G および W には誤差が含まれている可能性がある。さらに鼠ヶ関での汲み出し実験と注ぎ込み実験とを比較すると、汲み出し実験の方が注ぎ込み実験よりも回復時間が長かつ得られた水位差も大きい。注ぎ込み実験における回復時間が短くなった理由としては、実験時に十分な水位差を設けることができなかつたことが考えられる。すなわち、注ぎ込み実験は汲み出し実験によりプールに蓄えられた海水を井戸に戻すことで水位差を設けるが、十分な水位差を設ける (定常状態) 前にプールの海水を使い切ってしまった。したがって、鼠ヶ関の汲み出し実験は信頼性に欠ける。

直江津の汲み出し・注ぎ込み、および寺泊の注ぎ込みでは線形応答係数 G がゼロであると推定されている。すなわち直江津の流入および流出応答および寺泊の流出応答は完全非線形応答であるということがいえる。

粟島、岩船、および姫川では汲み出し実験

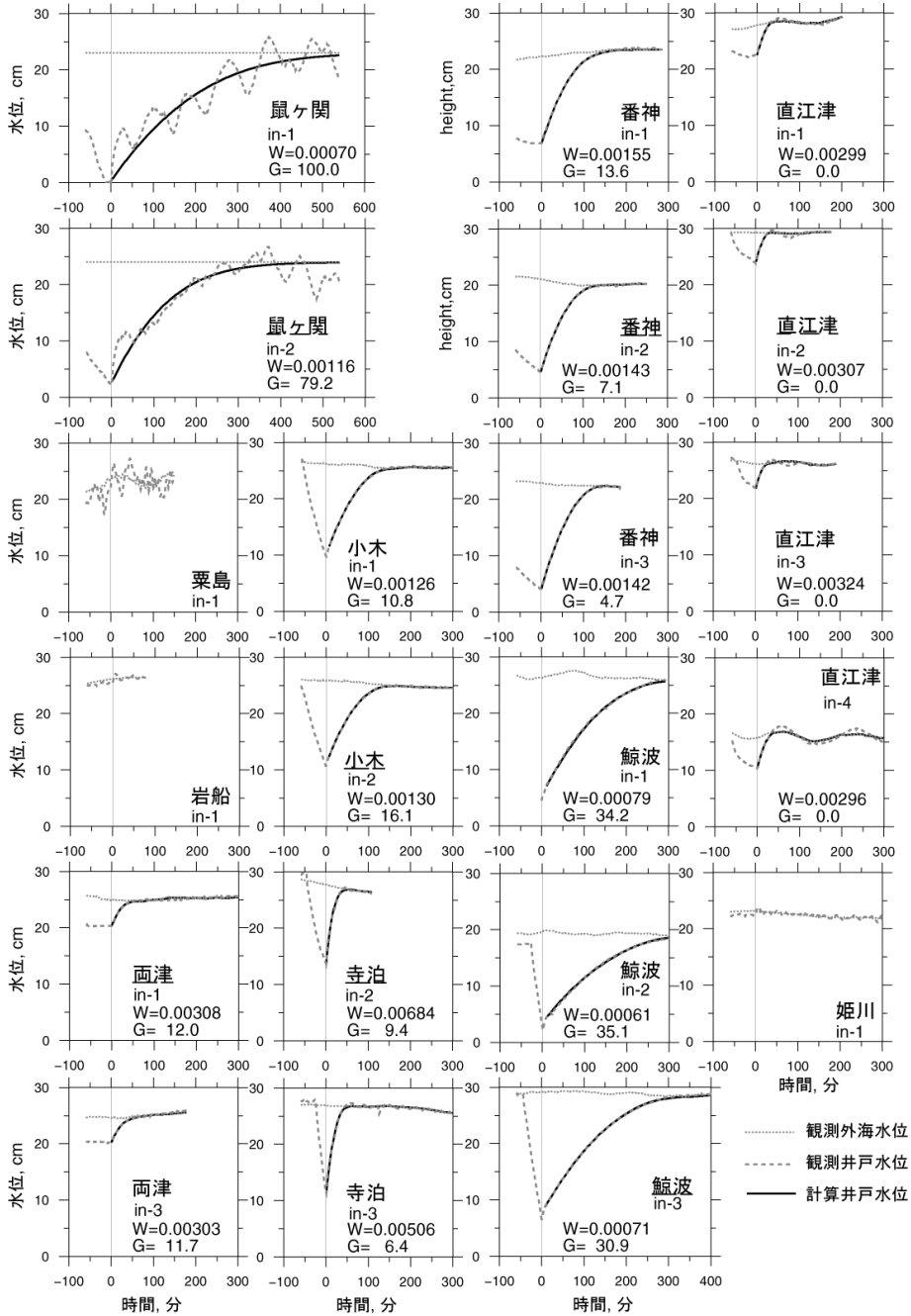


図 4 (a) 汲み出し実験の結果

汲み出し実験における観測回復曲線 (灰太鎖線), 外海水位 (灰細線), および応答係数を用いて計算された回復曲線 (実線) との比較。in-1 は汲み出し (inflow) 実験 1 回目を意味する。地点名に下線が引いてあるものは検潮記録補正に用いた代表応答係数を決定した実験を意味する。粟島, 岩船, および姫川では十分な水位差を設けられなかったため計算回復曲線を与えていない。鼠ヶ関では調査時に外海に設置した圧力式波高計が故障したために, 図のように外海的水位を仮定した。

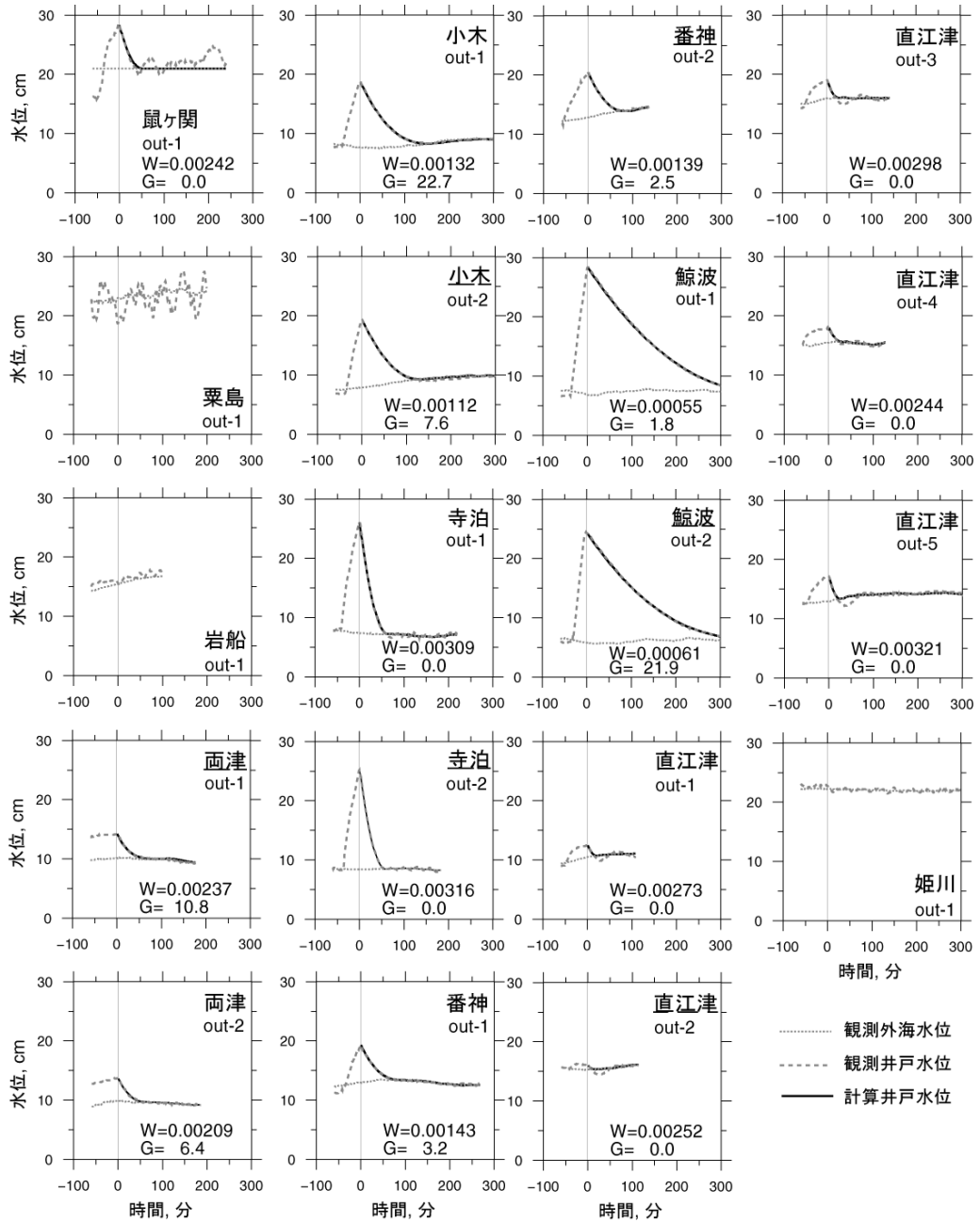


図4 (b) 注ぎ込み実験の結果
 図中の意味は (a) と同じ。

表 1 汲み出し実験により推定された線形および非線形応答係数

検潮所	No.	W	G (秒)	TASR (m ²)	A	Ww	TASRw	実験日
鼠ヶ関	1	0.00070	100.0	8.14E-04		0.00743	1.33E-03	22 Nov., 07
	2	0.00116	79.2	2.89E-04	*	0.00705	3.00E-03	
粟島	-							23 Nov., 07
岩船	-							13 Sep., 07
両津	1	0.00308	12.0	5.95E-07	*	0.00183	2.29E-06	19 Sep., 07
	3	0.00303	11.7	7.85E-07		0.00180	2.49E-06	
小木	1	0.00126	10.8	5.68E-07		0.00113	1.81E-06	19 Sep., 07
	2	0.00130	16.1	2.79E-07	*	0.00109	2.65E-06	
寺泊	2	0.00684	9.4	8.33E-06	*	0.00404	2.16E-05	13 Sep., 07
	3	0.00506	6.4	1.13E-05		0.00389	1.74E-05	
番神	1	0.00155	13.6	7.25E-07		0.00130	4.41E-06	11 Sep., 07
	2	0.00143	7.1	5.00E-07	*	0.00132	1.23E-06	
	3	0.00142	4.7	7.68E-07		0.00135	1.23E-06	
鯨波	1	0.00079	34.2	2.62E-06		0.00065	8.92E-06	11 Sep., 07
	2	0.00061	35.1	2.34E-06		0.00051	5.30E-06	
	3	0.00071	30.9	8.34E-07	*	0.00061	5.10E-06	
直江津	1	0.00299	0.0	5.41E-07		0.00299	5.41E-07	12 Sep., 07
	2	0.00307	0.0	5.40E-07	*	0.00307	5.40E-07	
	3	0.00324	0.0	6.15E-07		0.00324	6.15E-07	
	4	0.00296	0.0	8.00E-07		0.00296	8.00E-07	
姫川	-							20 Sep., 07

A 列に * 印が付いている応答係数 W および G の値がその検潮所での代表応答係数である。TASR は観測回復水位と Runge-Kutta 法により計算された回復水位との残差自乗和平均を意味する。添え字 w は非線形応答のみを意味し線形応答係数をゼロに固定して計算した値である。

表 2 注ぎ込み実験により推定された線形および非線形応答係数

検潮所	No.	W	G (sec)	TASR (m ²)	A	Ww	TASRw	実験日
鼠ヶ関	1	0.00242	0.0	9.59E-07		0.00242	9.59E-07	22 Nov., 07
粟島	-							23 Nov., 07
岩船	-							13 Sep., 07
両津	1	0.00237	10.8	8.21E-07	*	0.00160	1.75E-06	19 Sep., 07
	2	0.00209	6.4	1.06E-06		0.00168	1.37E-06	
小木	1	0.00132	22.7	6.83E-07		0.00100	3.80E-06	19 Sep., 07
	2	0.00112	7.6	4.19E-07	*	0.00103	7.76E-07	
寺泊	1	0.00309	0.0	5.81E-06		0.00309	5.81E-06	13 Sep., 07
	2	0.00316	0.0	5.68E-07	*	0.00316	5.68E-07	
番神	1	0.00143	3.2	8.13E-07		0.00135	8.95E-07	11 Sep., 07
	2	0.00139	2.5	3.26E-07	*	0.00134	3.67E-07	
鯨波	1	0.00055	1.8	1.33E-06		0.00055	1.61E-06	11 Sep., 07
	2	0.00061	21.9	8.61E-07	*	0.00055	2.70E-06	
直江津	1	0.00273	0.0	5.46E-07		0.00273	5.46E-07	12 Sep., 07
	2	0.00252	0.0	2.86E-07	*	0.00252	2.86E-07	
	3	0.00298	0.0	1.58E-06		0.00298	1.58E-06	
	4	0.00244	0.0	1.09E-06		0.00244	1.09E-06	
	5	0.00321	0.0	2.53E-06		0.00321	2.53E-06	
姫川	-							20 Sep., 07

各値の意味は表 1 と同じである。

および注ぎ込み実験の両方において十分な水位差を設けることができなかった。このことはそれぞれの導水管内の海水の通りが良く外海の擾乱が井戸内にほぼ同時に伝わる、すなわち井戸内で記録された津波波形はまさに外海の津波波形を表しているといえる。そのため本研究ではこれらの検潮所における応答係数を求めることや観測津波波形に対する補正を行わなかった。栗島に見られる井戸内の振動は、おそらくは導水管における固有振動と考えられる。ところで、ポンプで汲み出しをしても水位差を得られない状態は、導水管内で水の流れが定常状態にあることを意味する。そこでこの定常状態の時のポンプから汲み出される水量をバケツで簡易的に測定すると、岩船で 2.6 liter/sec、姫川で 3.5 liter/sec であった。なお、岩船では津波来襲の 5 ヶ月前すなわち本実験の 7 ヶ月前の 2007 年 2 月に導水管内を清掃していた。それゆえ応答特性がよかった（なかった）と考えられる。県職員の方によると、清掃前は潮汐すら記録されないくらい導水管が詰まっていたようである。鼠ヶ関でも 2007 年 10 月に導水管が清掃されたが、これは津波来襲の 4 ヶ月後（本調査の 1 ヶ月前）であるため、本調査で得られ

た線形応答係数および非線形応答係数は津波来襲時のものではない。

鯨波や小木での汲み出し実験のさい、ポンプを止めたときにポンプから井戸へ逆流が発生した。すなわち、ポンプを止めたときにホースに溜まった海水が井戸内に落下し、導水管から流入する海水とホースから落ちる海水により、井戸内水位の回復速度が速くなった（図 5a）。この場合、Runge-Kutta 法を用いて回復水位を計算するさいの初期条件は逆流が終わったあとの水位を用いることにした（図 5b）。

寺泊および直江津では汲み出し注ぎ込み実験終了後に井戸内水位が慣性振動を行っているようにみえる（図 5c）。この現象は式 (3) では説明できない現象であるから、この振動の平均水位（図 5c 中の区間 A）が外海の水位と一致するように外海の水位をオフセットし、Runge-Kutta 法による計算値と観測回復曲線の残差自乗和平均 TADR を計算した。

3.2 代表線形応答係数ならびに代表非線形応答係数

応答特性調査では、一つの検潮所で汲み出し実験および注ぎ込み実験をそれぞれ複数回

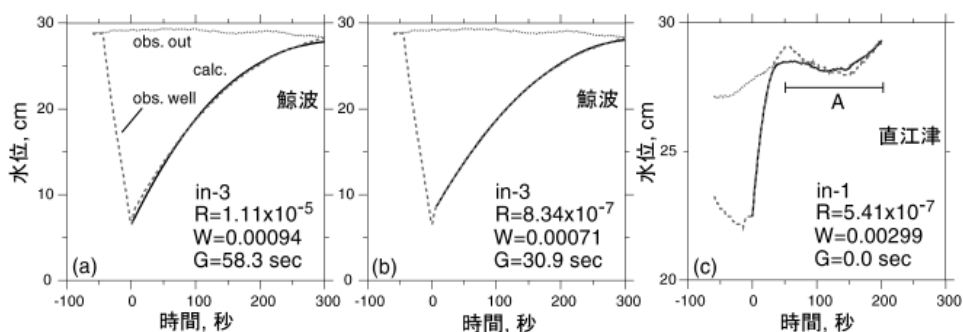


図 5 (a) 鯨波における汲み出し実験 3 回目における観測回復曲線（灰太鎖線）とポンプを停止したときの観測井戸内水位を初期条件として Runge-Kutta 法により計算された回復曲線（実線）。外海の水位は灰点線で表されている。(b) ポンプを停止し逆流が収まった時（ポンプ停止の 7 秒後）の観測井戸内水位を初期条件として Runge-Kutta 法により計算された回復曲線（実線）。観測回復曲線ならびに外海の水位は (a) に同じ。(a) よりも (b) のほうが観測回復曲線と良い一致をしている。(c) 直江津における汲み出し実験 1 回目の結果。井戸内水位が慣性振動が卓越していることがわかる。本研究では図中 A の区間で観測井戸内水位の平均をとり、この平均水位と一致するように外海の水位をオフセットした。

行い、それぞれの実験に対してグリッドサーチ法により線形応答係数および非線形応答係数を算出している。本研究ではこれらの係数の中で残差自乗和平均 TASR がもっとも小さい係数の組み合わせをその検潮所での代表応答係数とし、この代表応答係数を用いて後述の検潮記録を補正した。たとえば、番神では 3 回の汲み出し実験ならびに 2 回の注ぎ込み実験を行っている。それぞれ 2 回目の汲み出し実験ならびに注ぎ込み実験のときの残差自乗和平均 TASR が最小であった。そこで、これら 2 回目の汲み出し実験および注ぎ込み実験における応答係数の組、すなわち $(W, G) = (0.000143, G=7.1)$ および $(W, G) = (0.00139, G=2.5)$ をそれぞれ番神での汲み出しおよび注ぎ込みに対する代表応答係数とした。

また、実験に再現性があるのか確認するために、汲み出しおよび注ぎ込み実験の残差自乗和平均 TASR の分布を各検潮所ごとに図化したものが図 6 である。この図からわかるように、TASR の分布は各検潮所の汲み出し実験および注ぎ込み実験ごとに似た形になっている。これは、この実験に再現性があることを示している。

3.3 非線形応答について

本研究では検潮井戸の応答が式 (3) で表せる線形・非線形混合応答に従うものとしてその応答係数を求めた。しかしながら、先行研究、たとえば Satake et al. (1988) では非線形応答のみを考えている。そこで本研究においても非線形応答のみの係数すなわち線形応答係数 G を強制的にゼロにして得られる非線形応答係数を求めた。その結果が表 1 および表 2 の Ww であり、それに対する残差自乗和平均が $TASRw$ である。当然のことながら残差自乗和を比べると $TASRw$ は $TASR$ よりも等しいか大きな値になっている。言い換えれば、井戸内の回復水位は線形・非線形混合応答を用いた方が非線形応答のみを用いるよりも現象を良く説明することを意味する。なお、 W を用いた場合あるいは Ww を津波波形補正に用いた場合については次の 4 章で

扱う。

4. 2007 年新潟県中越沖地震津波の波形補正

4.1 代表応答係数および代表非線形応答係数を用いた津波波形補正

前章で明らかになったように、鼠ヶ関、両津、小木、寺泊、番神、鯨波、および直江津の各検潮所では観測された津波波形が必ずしも外海の津波波形を表しているとは限らず、粟島、岩船、おおび姫川では観測された津波波形がほぼ外海の津波波形を表していることがわかった。本章では、これらの前者 7ヶ所の検潮所で観測された 2007 年新潟県中越沖地震津波の津波波形を、式 (4) および 3 章で得られた代表応答係数を用いて補正する。

津波波形の記録方式は、デジタルデータとして電子媒体に残されるデジタル方式と記録紙に直接波形が描かれる記録紙方式の 2 方式がある。鼠ヶ関、小木、および鯨波では 30 秒サンプリングのデジタル方式で記録され、寺泊では 6 秒サンプリングのデジタル方式で記録されている。われわれはこれらのデジタルデータを 60 秒間隔でリサンプリングした波形を補正に用いた。他の 3ヶ所すなわち両津、番神、および直江津では記録紙方式で記録されている。それゆえ、これら 3ヶ所についてはデジタルでその津波波形を読み取った。そして読み取ったデータを同じく 60 秒間隔でリサンプリングした。一般に、手動で波形をデジタル化するとその読み取りの誤差により高周波成分の波が入りやすい。そこでこの読み取り誤差を最小にするためにフィルタ (4 分幅, Hanning window) をデジタル化した波形にかけた。この場合、フィルタが原因で波形のピークが鈍ってしまうが、ピーク部の値のみを元波形と一致するように置き換えた。天文潮汐に関しては整関数のあてはめにより取り除いた。

つぎに、これら 60 秒サンプリングした津波波形を式 (4) および代表応答係数を用いて補正した。式 (4) にある代表応答係数は、

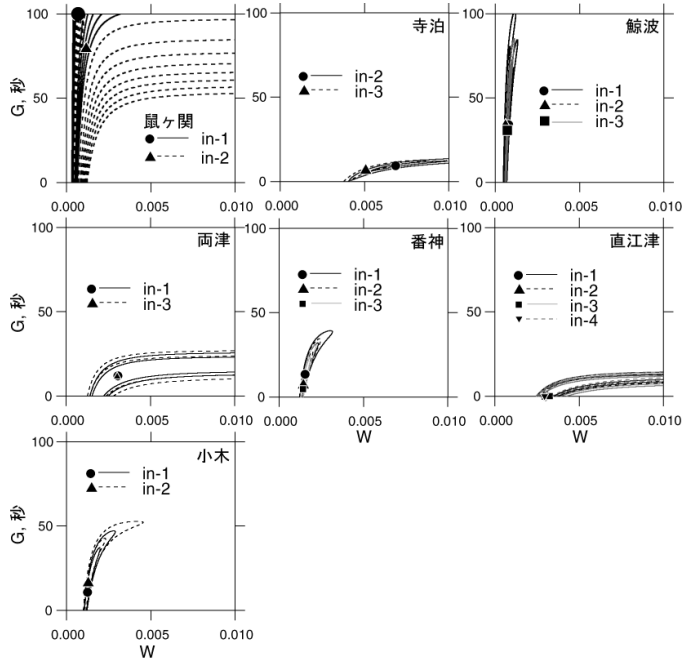


図6 (a) 汲み出し実験における観測回復曲線と計算回復曲線の残差自乗和平均 TADR を W-G 平面上に表したコンター図。図示しているコンターの範囲ならびにコンター間隔は次の通りである。鼠ヶ関では $0 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ の間をコンター間隔 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ で描かれており、他の地点では $0 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ の間をコンター間隔 $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ で描かれている。異なる線種（実線，鎖線，点線）および印は汲み出し実験の違いを表す。粟島，岩船，および姫川では検潮井戸応答特性が良いために TADR を評価していない。

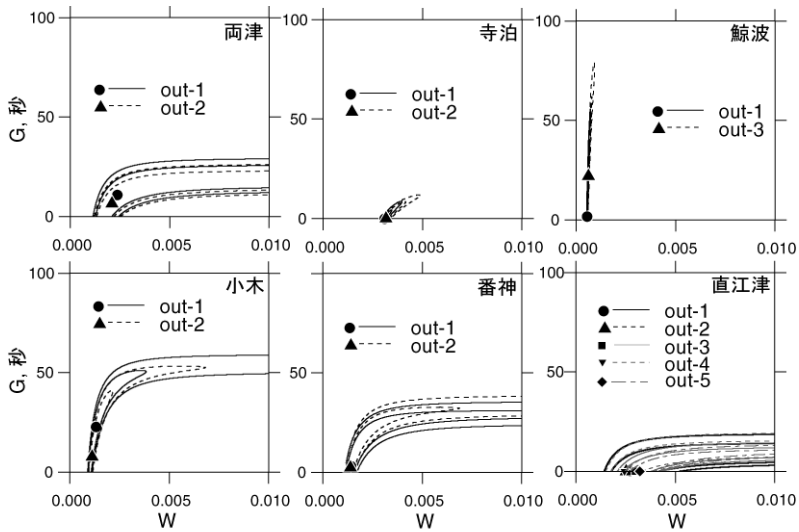


図6 (b) 注ぎ込み実験における観測回復曲線と計算回復曲線の残差自乗和平均 TADR を W-G 平面上に表したコンター図。図中の意味は (a) に同じ。ただし鼠ヶ関では汲み出し実験を1回しか行っていないのでここでは載せていない。

押し波時には汲み出し実験の係数を用い、引き波時には注ぎ込み実験の係数を用いた。その結果が図 7 である。この図から明らかなように、補正前にもっとも振幅が大きかった番神では、補正前での第 1 波の押し、引き、および第 2 波の押しが津波来襲時の平均海面上それぞれ +95 cm, -137 cm, および +88 cm であったのに対し、補正後はそれぞれ +102 cm, -163 cm, および +114 cm となり、全体的に大きな振幅へ補正されている。とくに、第 2 波の押しのほうが第 1 波の押しよりも大きくなっている。また、ピークの出現時刻も数分早くなっている。さらに、番神港では津波が岸壁を乗り越え少々浸水したとの目撃情報があり、そこでの浸水高さを測ると津波来襲時の平均海面上 110 cm の高さであった(図 8)。この値は補正後の最大波 +114 cm と良い一致を示している。鯨波や小木でも補正により同様の変化が得られており、鯨波では補

正前の第 1 波の押し引きがそれぞれ +33 cm および -17 cm であったのに対し、補正後は +41 cm および -31 cm と補正されており、ピークの出現時刻も数分早くなっている。

しかしながら、両津、寺泊、および直江津では、線形応答係数がさほど小さくなく非線形応答係数がさほど大きくないにもかかわらず、補正前後で波形はほとんど変化がなかった。この理由としては津波波形が比較的小さい振幅で長い周期を持っていたためと考えられる。なお、鼠ヶ関は前章で述べたとおり、津波来襲後に導水管が清掃されたために津波来襲時の応答係数は不明である。したがって、図 7 の鼠ヶ関での補正波形は参考程度としてご覧頂きたい。ただし、ここでの注ぎ込み実験の代表応答係数は信頼性に欠けるのですべて汲み出し実験の代表応答係数を用いて補正した。

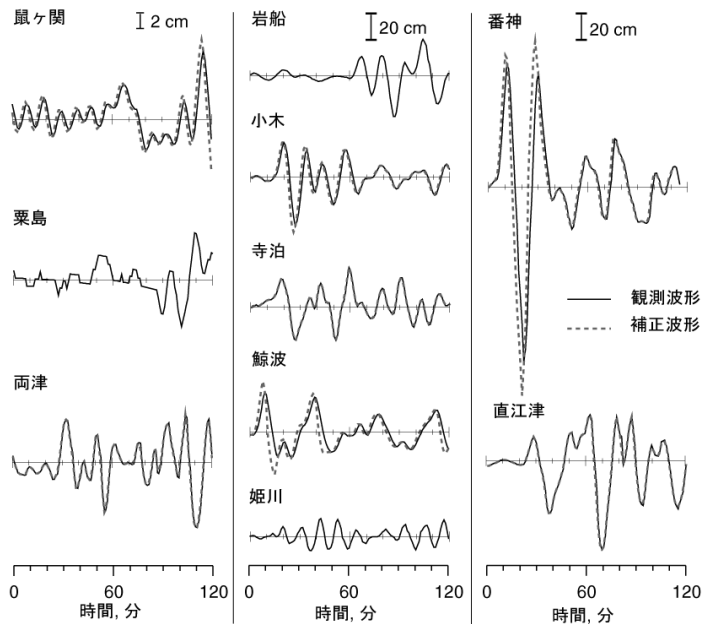


図 7 2007 年新潟県中越沖地震津波の補正された津波波形(灰鎖線)および観測津波波形(実線) 左列にある鼠ヶ関、粟島および両津の津波波形と、右側のそれ以外の地点の津波波形とは縮尺が異なることに注意を要する。粟島、岩船、および姫川ではその応答特性が良いために補正を行わなかった。

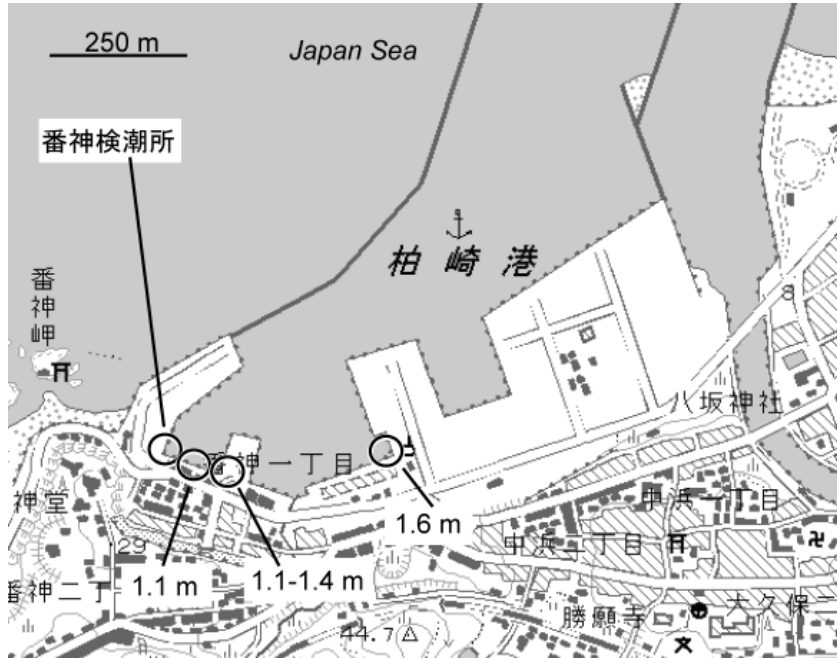


図8 番神港周辺での聞き取り調査による津波浸水高

記入されている数字は、聞き取り調査により明らかになった2007年新潟県中越沖地震津波の浸水高を表す。この周辺では数cmの沈降が起きているが(Nishimura et al., 2008), 津波浸水高に比べたらわずかな量なのでここでは無視した。地形図は国土地理院発行の2万5千分の1地形図を用いた。

4.2 線形応答係数と非線形応答係数の波形補正に対する効果

本研究では一組の代表応答係数を求めるのに何回か実験を行い、それぞれの実験で応答係数を求め、さらにその中で残差自乗和平均TASRが小さい組を代表応答係数とした。そしてその代表応答係数を用いて津波波形を補正した。ここでは、代表応答係数ではなくほかの応答係数を用いた場合補正波形がどの程度異なるのかを調べるために、すべての応答係数を用いて津波波形を補正し、その補正波形を比較した。たとえば、鯨波では3回の汲み出し実験、および2回の注ぎ込み実験を行っている。それゆえ汲み出し実験で3組の応答係数、および注ぎ込み実験で2組の応答係数がグリッドサーチ法により推定される。津波波形補正では押し波時に汲み出し実験で得られた応答係数を、引き波時に注ぎ込み実験で得られた応答係数を用いることから、計

6種の補正波形を得ることができる。これら6種類の補正波形を互いに比較することで応答係数の違いによる補正波形の違いを見ることができる。以上のことを4.1で補正を行った7ヶ所の検潮所での津波波形について検討したところ、鯨波のみにわずかな違いが現れた。わずかな違いではあるがその中でもっとも大きな差が出たのは、3回目の汲み出し実験で得られた応答係数と2回目の注ぎ込み実験で得られた応答係数を用いて補正された波形と、2回目の汲み出し実験で得られた応答係数と2回目の注ぎ込み実験で得られた応答係数を用いて補正された波形である(図9)。しかしながら、補正前の波形の振幅に比べればその差異は小さい。このことは、複数の応答調査によって得られた応答係数のばらつきは、補正津波波形にさほど影響を与えないことを意味する。

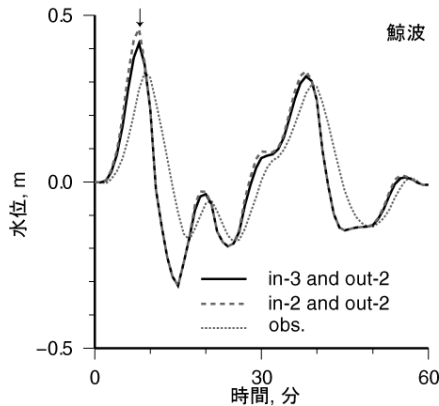


図9 鯨波における汲み出し実験3回目と注ぎ込み実験2回目の応答係数を用いて補正した津波波形(実線)と汲み出し実験2回目と注ぎ込み実験2回目の応答係数を用いて補正した津波波形(鎖線)との比較。矢印で示した第1波押しにわずかな違いが見られる。点線は補正前の津波波形である。

4.3 線形応答と非線形応答の効果

従来の研究は非線形応答のみを考慮して応答特性を調査し津波波形を補正していた。しかしながら前章で触れたように、鼠ヶ関、両津、

小木、寺泊、番神、および鯨波では線形応答係数 G がゼロではなかったことから、津波波形補正に線形応答も考慮する必要があった。では、この線形応答は津波波形補正にどの程度の影響を与えるのであろうか? この影響を調べるために、グリッドサーチ法で線形応答係数 G を強制的にゼロとして求めた非線形応答係数 Ww (表1) を用いて津波波形を補正した。そして線形・非線形混合応答を用いて得た津波波形(図7)と比較した。その結果、鼠ヶ関では非線形応答のみすなわち Ww を用いた津波波形はほとんど補正前波形と変わらなかったが、線形・非線形混合応答では補正後のピーク出現時刻が補正前に比べ早くなった(図10a)。さほど大きな変化ではないが、線形応答の効果は若干ながら現れたことを意味する。

鯨波では、非線形応答のみすなわち Ww を使って補正された引き波が、混合型により補正された引き波よりも若干大きかった。しかしながら原波形の振幅に比べれば十分に小さいものであった。ほかの検潮所ではその差異が見られなかった(図10b)。すなわ

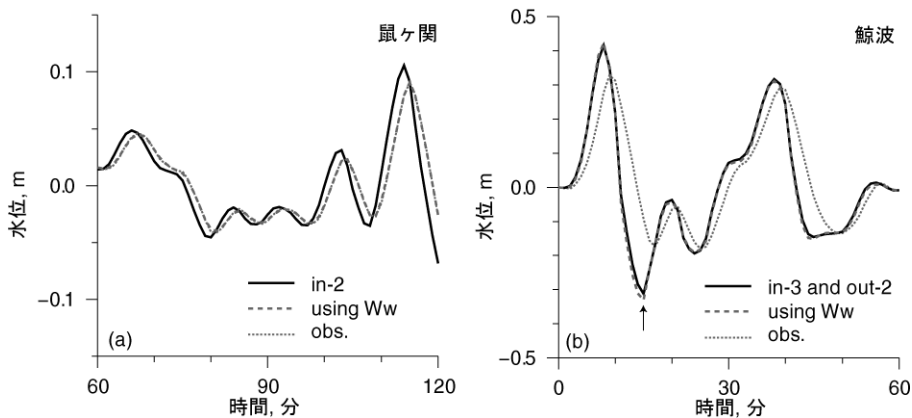


図10(a) 鼠ヶ関における汲み出し実験2回目の応答係数を用いて補正した津波波形(実線)と、線形応答係数 G をゼロに固定して得られた非線形応答係数 Ww を用いて補正した津波波形(鎖線)の比較。線形応答を考慮すると波のピークが早く現れていることがわかる。点線は補正前の津波波形である。(b) 鯨波における汲み出し実験3回目および注ぎ込み実験2回目の応答係数を用いて補正した津波波形(実線)と、線形応答係数 G をゼロに固定して得られた非線形応答係数 Ww を用いて補正した津波波形(鎖線)の比較。第1波の引き(矢印部)に若干の差異が見えるが、補正前の波形の振幅(点線)に比べれば無視しうるものである。

ち、2007年新潟県中越沖地震津波の場合には、線形応答は津波補正に関して無視しうることが言えよう。しかしながら、このことはどのような津波波形においても常に線形応答を無視することができる、という意味には必ずしもならないことに注意を要する。

5. まとめ

2007年新潟県中越沖地震の震源域周辺に位置する10カ所の井戸型検潮所（鼠ヶ関、粟島、岩船、両津、小木、寺泊、番神、鯨波、直江津、および姫川）について、線形および非線形応答特性を調査し、同地震による津波波形の補正を行った。その結果は次のようにまとめられる。

- (1) 鼠ヶ関、両津、小木、寺泊、番神、および鯨波の検潮井戸は津波のような中程度の周期を持つ波に対して線形および非線形の応答特性を持っており、直江津では非線形のみで応答を持っていることがわかった。いっぽう、粟島、岩船、および姫川では検潮井戸の応答特性はほとんどなく、検潮儀に記録された津波波形がそのまま外海の津波波形を表すことがわかった。
- (2) 鼠ヶ関、両津、小木、寺泊、番神、鯨波、および直江津で観測された2007年新潟県中越沖地震津波の波形を、応答特性を用いて補正した。その結果、番神、鯨波、および小木で補正前よりも補正後の方が、波形の振幅が高くなりかつピーク出現も数分早まることがわかった。とくに番神では補正前の第1波押し、引き、第2波押しがそれぞれ+95 cm, -137 cm, +88 cmであったのに対し、補正後は+102 cm, -163 cm, +114 cmとなった。この114 cmという値は目視による津波浸水高とおおむね一致する。その他の検潮所では補正前と補正後の津波波形の間大きな差は見られなかった。
- (3) 非線形応答のみを用いて補正された鯨波での津波波形は、線形・非線形混合応

答により補正された津波と比べ若干の差異が認められた。しかしながらその量は補正前の津波の振幅に比べたら大変小さいものであった。ほかの検潮所ではこの差は認められなかった。それゆえ2007年新潟県中越沖地震津波に限って言えば、線形応答補正は無視しうると言える。

謝辞

国土地理院、海上保安庁、新潟県からは2007年新潟県中越沖地震津波の貴重な津波波形を提供、ならびに検潮井戸においての応答調査の許可を下さいました。本研究は文部科学省による科学技術振興調整費「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」（代表者：杉山雄一）による援助をいただきました。

文献

- CROSS, R. H. (1967), *Frequency response of tide gages*, Technical Rep. Univ. California HEL 16-4, pp. 16.
- LOOMIS, H. G. (1983), *The nonlinear response of a tide gage to a tsunami*, Proc. 1983 Tsunami Symp., 177-185.
- NISHIMURA, T., M., TOBITA, H., YARAI, S., OZAWA, M., MURAKAMI, T., YUTSUDO, M., ISHIMOTO, T., UMESAWA, T., TOYO-FUKU, S., KAWAMOTO, T., AMAGAI, M., FUJIWARA, A., SUZUKI, S., ENYA, T., SASAKI, M., YOKOKAWA, S., OOMORI, S., TANOUE, H., IKEDA, M., NEMOTO, H., SUITO, F., HAYASHI, H., UNE, M., KOA-RAI, and M., TSUZAWA (2008), *Crustal deformation and a preliminary fault model of the 2007 Chuetsu-oki earthquake observed by GPS, InSar, and leveling*, Earth Planets Space, submitted.
- NOYE, B. J. (1974a), *Tide-well systems II: The frequency 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.
- 国立防災科学技術センター (1984) , 昭和 58 年 (1983 年) 日本海中部地震による災害現地調査報告, 主要災害調査, 23, pp. 164.
- SATAKE, K., OKADA, M., and ABE K. (1988), *Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan*, J. Mar. Res. 46, 557-571.