

高知県須崎湾における潮位観測 —1946 年南海地震前の海水位変化の検証のため—

梅田康弘^{1,*}・板場智史²・細 善信³

Yasuhiro Umeda, Satoshi Itaba and Yoshinobu Hosono (2016) The sea level observation at Susaki Bay in Kochi Prefecture –To validate the sea level changes before the 1946 Nankai earthquake–. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.67 (1), p.11–25, 14 figs, 7 tables.

Abstract: In the coastal areas of the Pacific Ocean of Shikoku, some sea level changes have been witnessed from a few days before the 1946 Nankai earthquake. Just before the main shock, sea level lowering of 2–3 m has been witnessed at Susaki Bay in Kochi Prefecture. It is considered that the small tsunami had generated in the open ocean. To assume the generation of the tsunami, it is necessary to some extent quantitative information about the period and amplitude. In order to obtain the amplification and predominant period of tsunami in the bay, the observation of sea level changes was carried out at 7 points in Susaki Bay, for 15 months from November 2010. The tsunami of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake was recorded at the open ocean by the other agencies or institutes. By comparison of the tsunami double amplitude, it is found that the tsunami amplitude at the sea depth of 100 m in Tosa Bay and of 1,500–2,300 m near the Nankai Trough is amplified by maximum 8.6 and 21 times in Susaki Bay, respectively. A predominant long period of 50 and 85 minutes was observed. This period is estimated to be resonance period in the open ocean than Susaki Bay. Observation results support the hypothesis that the small tsunami had occurred.

Keywords: 1946 Nankai earthquake, sea level change, witness testimony, Susaki Bay, 2011 tsunami waveform observation

要 旨

四国太平洋沿岸部では、1946年南海地震の数日前から海水位の変化が目撃されていた。高知県の須崎湾内では、本震直前に2～3 mの海水位低下も目撃されていた。このことから地震前に外洋で小規模な津波が発生していた可能性が指摘された。津波の発生を仮定するには、周期や振幅に関してある程度の定量的な情報が必要である。外洋から須崎湾内に津波が侵入した場合の増幅度と卓越周期を推定するため、須崎湾の7カ所で、2010年11月から15か月間、海水位変化の観測を行った。外洋における観測は、他機関によって行われており、2011年東北地方太平洋沖地震による津波が観測された。土佐湾の水深100 mと、南海トラフに近い1,500～2,300 mで観測された津波複振幅は、須崎湾に入ると、それぞれの複振幅で最大8.6倍と21倍増幅されることがわかった。50分と85分という長い卓越周期が観測されたが、この周期は須崎湾より外洋での共振周期と推定された。これらの観測結果は、地震の前に小規模な津波が発生していたという

仮説を支持するものである。

1. はじめに

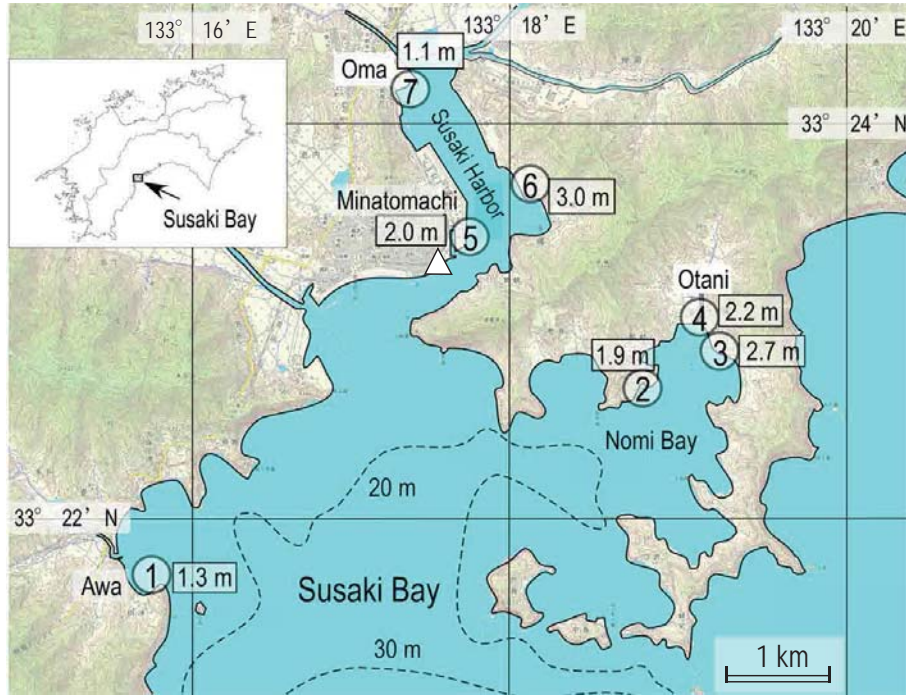
四国太平洋沿岸部では、1946年南海地震(以下では本震と呼ぶ)の数日前から「潮の狂い」や「潮の流れの変化」が目撃されており、梅田・板場(2014)は本震の数日前から小規模な津波が繰り返し発生していた可能性を指摘した。本震発生は12月21日午前4時19分頃であるが、前日の夕方から本震発生直前までの夜間は、漁から帰港した船が接岸できないほど海水位が低下したという報告が数多くある。その一方、海水位変化は無かった、あるいは気付かなかったという証言も多くある。このような相異なる証言は同じ湾内でもある。もし津波が発生していたとすれば、海水位が低下した時に帰港した人と、通常潮位に戻った時に帰港した人とで目撃証言が異なることの説明も可能である。しかし津波の発生を考える場合には、その周期や振幅について、ある程度の定量的データがなければ、異なる目撃証言の説明が可能かどうかの議

¹ 元産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター (Former affiliation: AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center)

² 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

³ 元京都大学防災研究所 (Former affiliation: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

* Corresponding author: Yasuhiro Umeda, Daigo Nishioji-cyo 128-10, Fushimi-ku, Kyoto, 601-1374, Japan. Email: umedaya@nike.eonet.ne.jp



第1図 須崎湾における観測点位置. 丸付数字は観測点番号, 四角内の数値は水深. 白抜き△印は, 国土交通省四国地方整備局の検潮場. 背景の色彩地図は日本地図センター(2015)の1:25,000段彩陰影画像を使用.

Fig. 1 Observation points in Susaki Bay. Numeral with a circle and a square indicates the observation number and water depth, respectively. White triangle indicates the Susaki tide station of Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Shikoku Regional Development Bureau. Color map of the background is taken from 1:25,000 of gradient tints image (2015) of Japan Map Center.

論は困難である. 本研究では, 本震直前に大幅な海水位低下が目撃された高知県須崎湾内の7点で海水位の連続観測を行い, 外洋から入ってくる波が湾内の各点でどの様に異なるかを, 振幅と周期について調べた.

2. 観測

2.1 観測点位置

高知県須崎市大谷漁港では, 本震発生の1時間ほど前に寄港した漁船が, 海水位が低下していたため接岸できなかったが, しばらく経って水位が上昇してきて接岸できた, という報告がある. 漁師たちの一部は帰宅後に本震に遭遇したそうである(森光, 1995). 須崎湾(第1図)は沈降地形特有の複雑な海岸線を有し, かつ湾口が広く湾奥に向かって狭くなっている. このような海岸地形では外洋から入ってくる津波は湾奥で大きく増幅される. 高山・平石(1986)は1946年南海地震による津波シミュレーションと須崎湾の模型実験によって, 湾口に対する湾奥での津波増幅度を調べ, 模型実験では最大1.8倍, シミュレーションで最大2.5倍との結果を得ている.

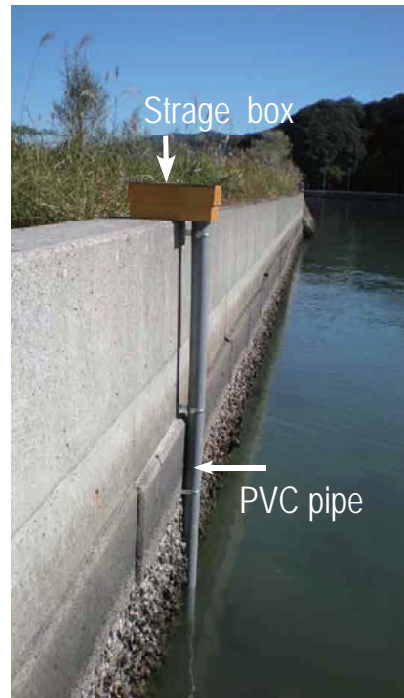
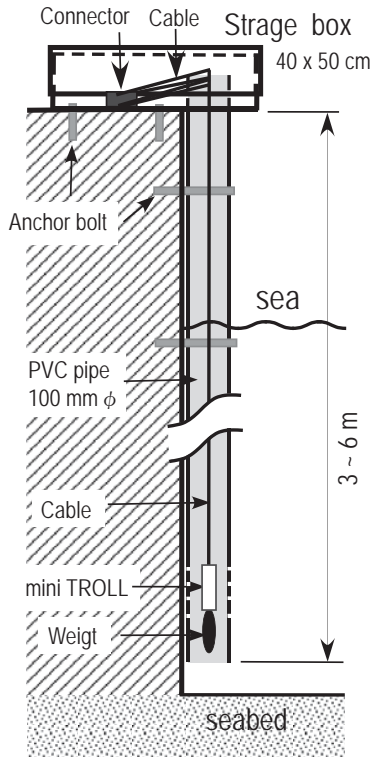
須崎湾には東の野見湾と北側の須崎港の2つの湾奥がある. いずれも複雑な海岸地形をしており, わずかな場

所の違いによって海水位の振幅は大きく異なる可能性もあることから, 本観測では第1図に示した7点で同時に連続観測を行い, 実測によって各点における増幅度を調べることにした. 図中No.1の安和は須崎湾の入口であり, No.2, 3, 4は野見湾の奥に配置されている. 本震の1時間余り前に大幅な海水位低下が目撃されたのはNo.4の大谷である. 須崎港にはNo.5, 6, 7の3か所に配置した. No.5の港町には高知県の験潮場があり, 比較のため筆者らの水位計もそこに併設した.

2.2 観測機器と設置

使用した水位計はIn-Situ Inc.製のmini TROLLで, 水位測定精度は21 mmである. 長さ約30 cm, 直径1.8 cmの本体には, 圧力センサー(16 bit A/D変換付)と記録媒体(1 Mb), バッテリー(単3, 2本)が内蔵されている. データサンプリングは1分間隔で, データは現地回収方式である.

設置は第2図の左に示したように, 直径10 cmの塩化ビニールパイプを岸壁に取り付け, 水位計本体とケーブルを通し, 余ったケーブルとその端のコネクタは収納箱に収めた. mini TROLLの下端には錘が付けてある. 塩化ビニールパイプの長さは海底から岸壁上部までの高さ



第2図 左：水位計設置の側面図，右：No.7(大間)における設置風景。

Fig. 2 Left: Side view of the installation of the water level meter. Right: Photograph of installation at observation point No.7 (Oma).

にもよるが、3～6 mで、パイプの下端が海底からは30～50 cmになるよう設置した。mini TROLLのセンサー付近にはパイプに直径10 mm程度のストレーナ(穴)が複数あけてある。観測点No.7(大間)の設置風景を第2図の右に示した。

水位計は淡水測定用のため、淡水を入れたビニール袋に本体を封入して使用した。7観測点の水位計の感度検定は水槽内の水位を変化させてチェックし、上記の測定精度以内で一致することを確かめた。

2.3 観測点の水深、観測期間

第1図の観測点番号に付けてある四角枠内の数値(m)は各点における水深である。水深は各点で観測された水位の平均値(各点の平均海面)から海底までの深さである。水位の平均値は2010年11月21日から2011年2月9日までの80日間(ただし、観測点No.1とNo.5は欠測があったため、2011年2月11日から同年3月11日0時までの28日間)の観測水位の平均である。

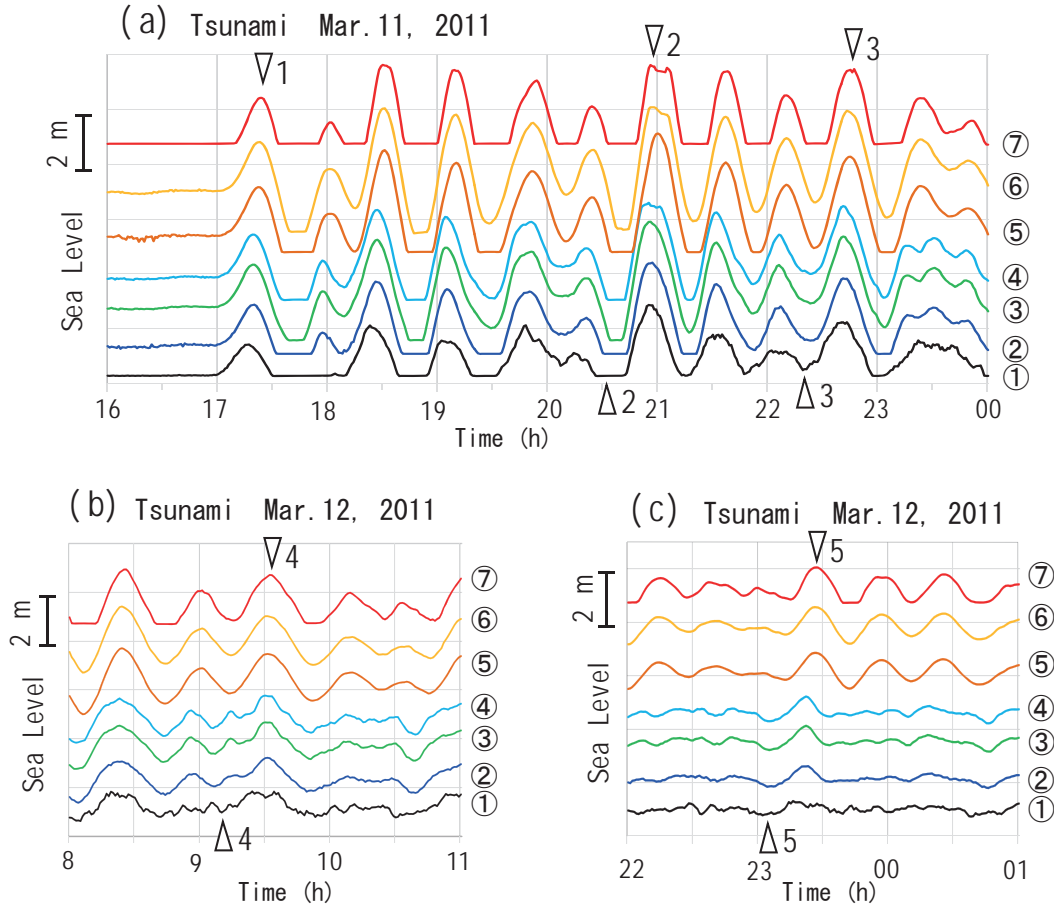
No.4の大谷は、1946年南海地震の直前に2～3 mの海水位低下が目撃された所ではあるが、当時の船着場付近はすでに埋め立てられ、現在は当時のそれより50 mほど沖に新たな岸壁が設けられている。本観測で設置し

た岸壁における水深は2.2 mであるが、当時の船着場はもっと浅かったのではないと思われる。なお当時の船着場の様子は森光(1995)に詳しいスケッチがあるが、水深は不明である。観測点No.7の大間の水深は1.1 mと浅く、大潮の干潮時の海水位は水位計センサーを下まわった。このことは観測前に予測されたことではあるが、目撃証言の多くは水深の浅い所であったことから敢えてこの点を選んだ。

観測期間は2010年11月下旬から2012年3月上旬までの15か月余である。データ回収とバッテリー交換は3～4か月毎に行ったが、欠測期間もある。

3. 2011年東北地方太平洋沖地震津波による振幅比と周期

当初の予定では気象による波浪を用いて、須崎湾内における増幅度や卓越周期を調べる予定だったが、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による津波を観測したので、本章では津波波形を用いて振幅比などを検討する。気象による波浪の振幅に比べ、津波は振幅が大きいため信号対雑音比(S/N)が良いこと、外洋における津波波形との比較が出来るという利点がある。



第3図 2011年東北地方太平洋沖地震による須崎湾内での津波波形. 丸付番号は第1図の観測点番号に対応.

Fig. 3 Waveform of tsunami in Susaki Bay caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Numeral with a circle corresponds to the observation number in Fig. 1.

3.1 須崎湾内での振幅比

須崎湾内の7観測点における津波波形を第3図に示した. 同図右の丸付番号は第1図の観測点番号である. 同図(a), (b), (c) 共, 津波波形の一番下が湾の入口にあるNo.1の安和で, 次の寒色で示した3つのトレースが野見湾, 上3つの暖色トレースは須崎港の観測点の津波波形である. 波形からは天文潮位は除いていないが, 参考のため, 須崎湾における天文潮位(気象庁, 2015)を第4図に載せた.

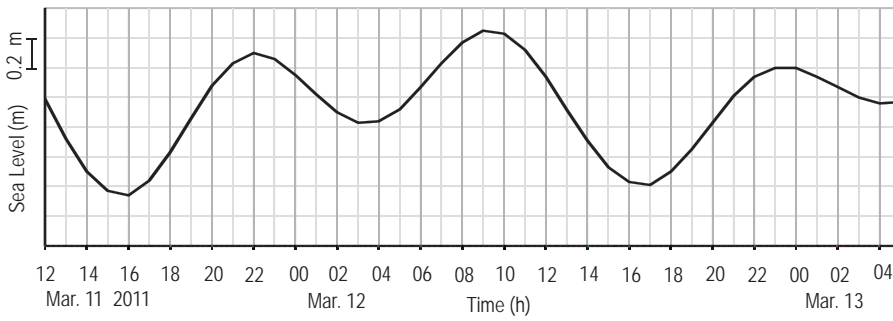
第3図(a)は11日16時以降, 同日中の津波波形である. 第1波の到達時刻は17時過ぎであるが, 干潮時(最低潮位は16時頃)であったため, 水深の浅いNo.7では津波到達前から潮位が水位計より低下している. No.1のAwaも同図では潮位が水位計より低下しているように見えるが, 元データでは16時58分頃から, 上昇してくる潮位を記録しており, かろうじて第1波を初めから記録している. 第3図(a)で17時00分の潮位と第1波の潮位(図中の▽1)

との潮位差を, 津波第1波の振幅とし, 読み取り値を第1表に示した. 須崎湾内の各観測点における振幅の違いを見るため, 湾口のNo.1(安和)に対する振幅比を見ることとし, 各観測点の振幅をNo.1の振幅で除した値を同表の4行目「Amp. Ratio」に示した. この振幅比を第5図に水色の棒で図示した.

津波の最大波は21時頃のピーク(第3図(a)の▽2)付近と推定されるが, その前の引き潮(同図中の△2)では全点が振り切れている. 当日2回目の満潮時は22時頃で, 同図(a)の△3と▽3を付けたところでNo.7以外は, ようやく振り切れない波形が観測された. 3月12日の満潮は9時頃と23時頃で, その付近の津波波形を第3図(b)と(c)に示した. 振幅は振り切れなくなるが, 湾口のNo.1ではS/Nが悪くなっている.

他の位相における複振幅についても, 各観測点での振幅を比較するため, 3つの津波波形図で, ▽3, ▽4, ▽5を付けたところの複振幅を読み取り, 第2表に示した. 湾

高知県須崎湾における潮位観測（梅田ほか）



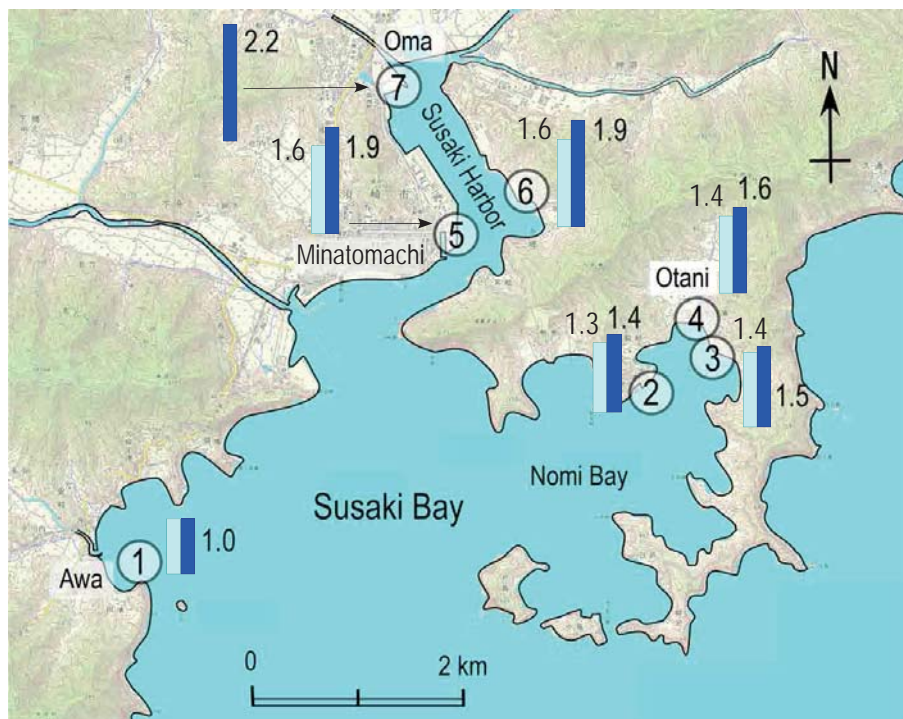
第4図 須崎湾の天文潮位.

Fig. 4 Astronomical tide level at Susaki Bay.

第1表 各観測点における津波第1波の片振幅と，No.1(安和)の振幅を1.0とした時の各観測点の振幅比. 各観測点の水深が2行目に記されている.

Table 1 1st half amplitude of tsunami at each observation point and amplitude ratio for No.1 (Awa). The water depth at each point is shown in the 2nd line.

Obs. point No.	1	2	3	4	5	6	7
Water Depth (m)	1.3	1.9	2.7	2.2	2.0	3.0	1.1
Half Amp. (m)	1.1	1.45	1.55	1.57	1.77	1.78	—
Amp. Ratio	1	1.3	1.4	1.4	1.6	1.6	—



第5図 No.1(安和)を1.0とした時の，各観測点での津波の振幅比を棒の長さで示した。水色と紺色の棒は第1波の片振幅の比と最大複振幅の比である。背景の色彩地図は日本地図センター(2015)の1:25,000段彩陰影画像を使用。

Fig. 5 When the amplitude at No.1 (Awa) is 1.0, the amplitude ratio of the tsunami at each observation point is indicated by the height of the bar with numeral. Light and deep blue bar corresponds to the 1st half and the maximum double amplitude ratio, respectively. Color map of the background is taken from 1:25,000 of gradient tints image (2015) of Japan Map Center.

第2表 3つの期間(第3図のa, b, c)の各点の津波複振幅(単位はメートル).

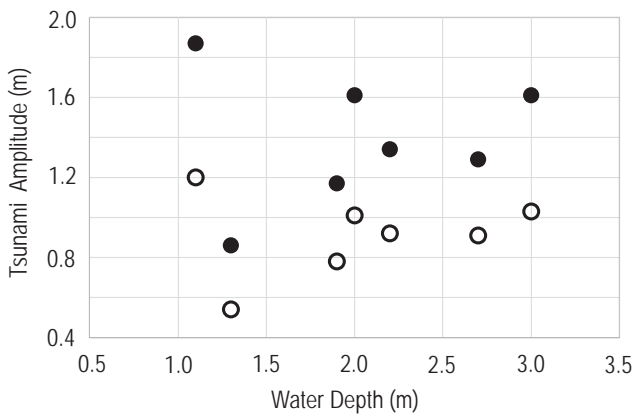
Table 2 Tsunami double amplitudes (unit is meters) of each observation point at three periods (a, b, c in Fig. 3).

Obs. point No.	1	2	3	4	5	6	7
(a) Mar.11 22-23	1.72	2.27	2.45	2.48	3.34	3.29	—
(b) Mar.12 09-10	0.86	1.17	1.29	1.34	1.61	1.61	1.87
(c) Mar.12 23-00	0.54	0.78	0.91	0.92	1.01	1.03	1.2

第3表 観測点 No.1(安和)の振幅を1.0とした時の各観測点の振幅比とその平均の比.

Table 3 When the amplitude at No.1 (Awa) is 1.0, the amplitude ratio and average ratio at each observation point.

Obs. point No.	1	2	3	4	5	6	7
(a) Mar.11 22-23	1.0	1.3	1.4	1.4	1.9	1.9	—
(b) Mar.12 09-10	1.0	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2.2
(c) Mar.12 23-00	1.0	1.4	1.7	1.7	1.9	1.9	2.2
Average Ratio	1.0	1.4	1.5	1.6	1.9	1.9	2.2



第6図 観測点の水深と津波複振幅との関係。黒丸と白丸は第3図の(b)と(c)の振幅に対応している。

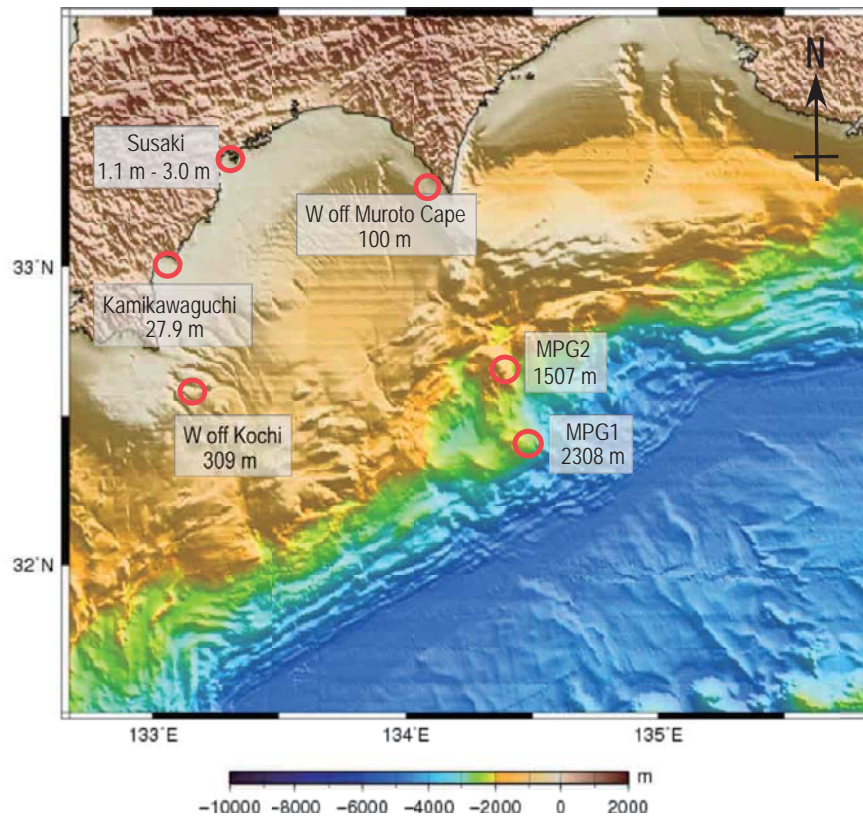
Fig. 6 The relations between the water depth of each observation point and tsunami double amplitude. Closed and open circle corresponds to the amplitude in (b) and (c) in Fig. 3.

内での振幅を比較するため、湾口のNo.1(安和)に対する振幅比を見ることとし、第2表の3回分の読み取り複振幅を、同表No.1の複振幅で除した値を第3表に示した。第3図(b)と(c)ではNo.1のS/Nはあまり良くなかったが、振幅比は3回とも大きくは変わらず、3回の平均値を同表の5行目に示した。この平均の振幅比を第5図に紺色の棒で示した。野見湾奥のNo.4(大谷)で1.6倍、須崎湾奥のNo.7(大間)では2.2倍になっている。

各観測点における水深との関係を見るため、7点共読み取り値のある第2表の(b)と(c)の振幅を、第1表の各点における水深に対して図示したのが第6図である。水深との相関は認められず、各点の振幅は港湾の形状と観測点位置に依存しているようである。第2.1節で述べた、高山・平石(1986)による模型実験によれば、湾口と湾内での振幅比は、最大で1.8倍、シミュレーションで最大2.5倍となっており、本観測の結果とおおむね一致している。

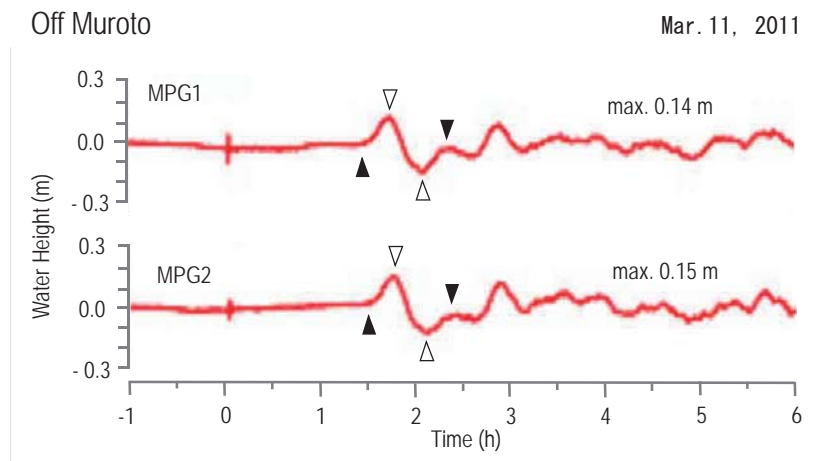
3.2 他機関の津波データ

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による津波は、四国沖では海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センターと、当時の科学研究費基盤研究チームによって観測されていた。第7図に示すように、前者は室戸沖の水深2,308 m (MPG1)と1,507 m (MPG2)とで水圧計により、後者は室戸岬西方沖の水深100 mでGPS沿岸波浪計によって観測された。MPG1とMPG2における津波波形は、同センターのウェブサイト(海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター, 2011)から津波波形をダウンロードし、加筆のうえ第8図に示した。なお元図の時間軸は地震発生時刻(14時46分(JST))を0としている。波形には100~10,000秒のフィルター処理が施されていることが、同センターの説明文にある。水深が深く波形は比較的シンプルで、最初の波が最大波となっている。図中に記されているmax. 0.14 mとmax. 0.15 mは同センターによる片振幅の読み取り値であるが、須崎湾



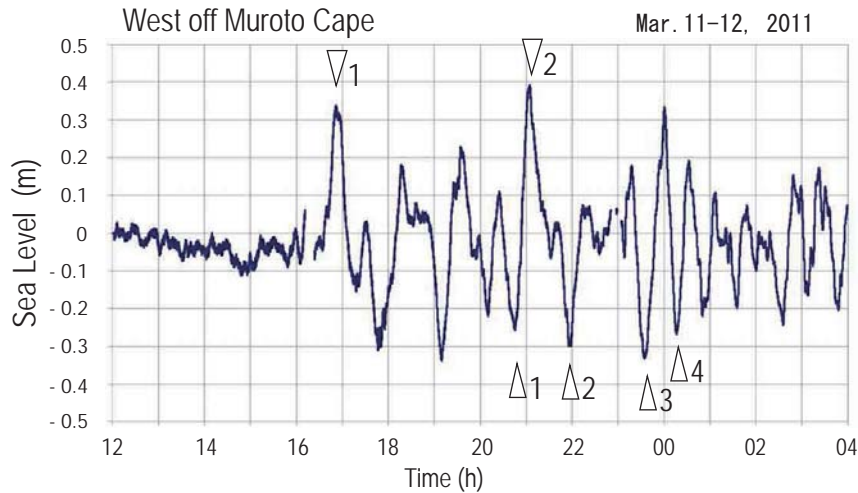
第7図 四国沖の津波観測点. 数字は水深. 基図は海上保安庁海洋情報部(2013)による.

Fig. 7 Tsunami observation points off Shikoku. Numerals indicate the sea depth. Base map is quoted from Japan Coast Guard Hydrographic and Oceanographic Department (2013).



第8図 MPG1とMPG2における2011年東北地方太平洋沖地震による津波波形. 基図は海洋研究開発機構地震津波海域観測研究開発センター(2011)による. 時間軸の0値は地震発生時(14時46分)を示す.

Fig. 8 Waveforms of tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake at MPG1 and MPG2. Base figure is quoted from the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Research and Development Center for Earthquake (2011). Zero on time axis indicates that of earthquake occurrence (14:46).



第9図 室戸岬西方沖における2011年東北地方太平洋沖地震による津波波形. 基図は寺田(2013)による.

Fig. 9 Waveform of tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake at the west off Muroto Cape. Base figure is quoted from Terada (2013).

での津波振幅と比較するため、図中白三角を記したところの複振幅を読み取って最大波の振幅とした。読み取り結果は、MPG1で0.28 m、MPG2で0.30 m であり、同センターによる片振幅値のちょうど2倍である。

室戸岬西方沖の津波波形は寺田(2013)の資料からダウンロードし、やはり加筆のうえ第9図に示した。土佐湾内で水深も浅いため、津波波形は複雑で振幅も大きくなっている。第1波の片振幅は、図中▽1と記したピークを0.33 mと読み取り、最大複振幅は▽2と△2とで0.69 mを読み取った。なお、第7図に示した室戸岬西方沖の観測点位置と水深は永井・里見(2005)の記載によるものである。2つの機関による3ヶ所の津波振幅の読み取り値を第4表にまとめた。

須崎湾内では複数の機関によって潮位観測が行われていた。そのうち最大複振幅が振り切れなかった高知県土木部河川課による潮位データ(以下、高知県データと呼ぶ)の提供を受けることができたことと、筆者らの観測点No.5は同験潮場に併設していたことから、波形の比較のために高知県データを利用する。提供を受けたのは未公表の10分サンプリングの数値データであるが、それをグラフ化し第10図に示した。同図中、三角印のところを最大複振幅とすると5.09 mとなる。振り切れた筆者らの観測(No.5)の最大複振幅も、これと同じ、すなわち5.09 mだったと仮定して次節以降の増幅度を求める。

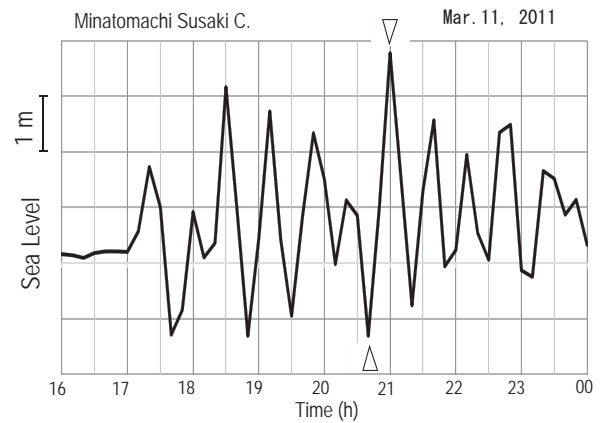
3.3 須崎湾での増幅度の推定

外洋での水深の異なる3か所で得られた津波の振幅と、須崎湾内で観測されたそれとを比較し、湾内各点における津波の増幅度を推定する。第1波については、第3.1節で読み取った須崎湾での各観測点の片振幅(第5表の

第4表 外洋の3観測点における津波振幅.

Table 4 Tsunami amplitudes at three observation points of the open ocean.

	1st. Half Amp. (m)	Max.Amp.p-p (m)
W off Muroto Cape	0.33	0.69
MGP2	0.15	0.30
MGP1	0.14	0.28



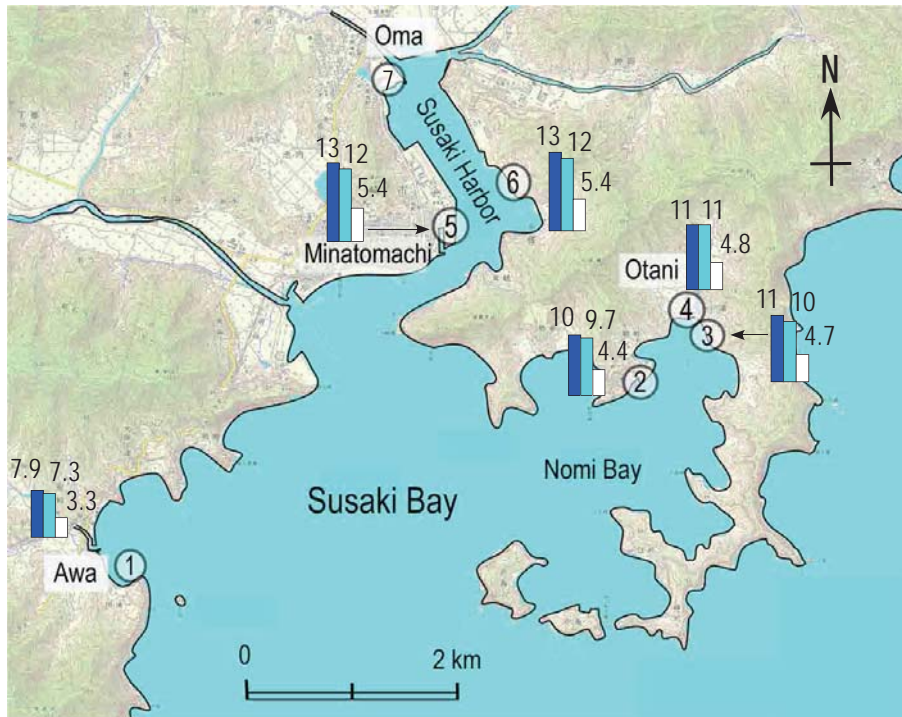
第10図 港町における2011年東北地方太平洋沖地震による津波波形. 元のデジタルデータ(10分値)は高知県土木部河川課から提供された.

Fig. 10 Waveform of tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake at Minatomachi. Original digital data (10 minutes sampling) were provided by Kochi Prefecture Civil Engineering Department River Division.

第5表 外洋3観測点の津波第1波の片振幅(左欄の3から5行のかつこ内)に対する須崎湾内7点における第1波の片振幅(2行目)の比。

Table 5 The ratios of 1st half amplitudes (2nd line) at seven points in Susaki Bay to 1st half amplitudes (in parentheses of 5th from 3rd lines of the left column) of tsunami at three points of the open ocean.

Obs.point No.	1	2	3	4	5	6	7
Susaki Half Amp. (m)	1.1	1.45	1.55	1.57	1.77	1.78	—
W off Muroto Cape (0.33 m)	3.3	4.4	4.7	4.8	5.4	5.4	—
MGP2 (0.15 m)	7.3	9.7	10	11	12	12	—
MGP1 (0.14 m)	7.9	10	11	11	13	13	—



第11図 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の第1波の片振幅比。白、水色、紺色の棒と数値は、室戸岬西方沖、MPG2、MPG1の振幅と須崎湾内の各観測点のそれとの比。背景の色彩地図は日本地図センター(2015)の1:25,000段彩陰影画像を使用。

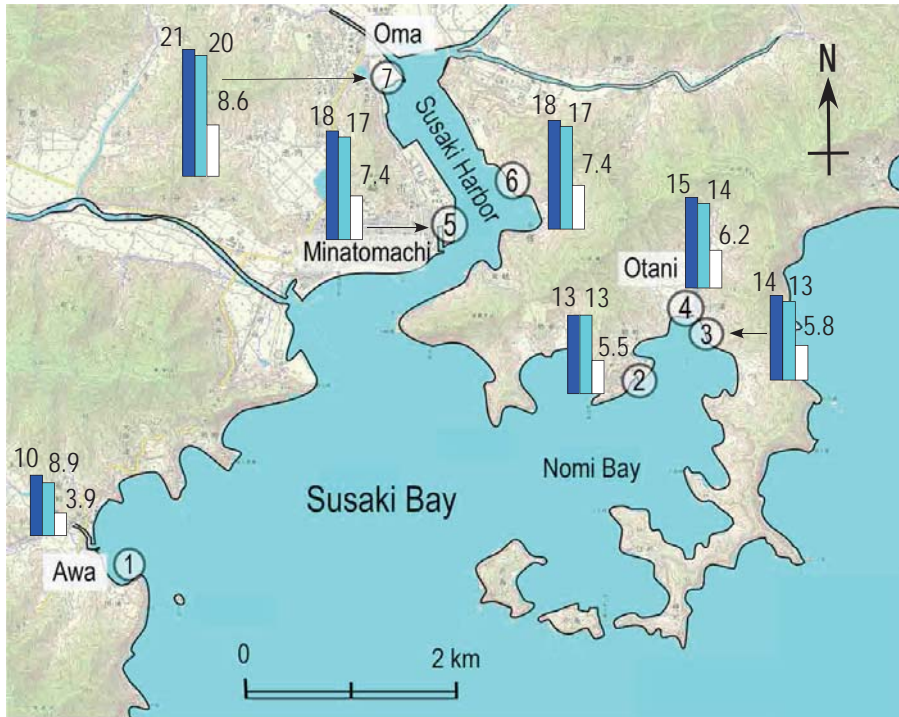
Fig. 11 Ratio of 1st half amplitude of tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Height of the bar of white, light blue and deep blue attached numeral indicates the ratio of 1st half amplitude at each point in Susaki Bay against that of west off Muroto Cape, MPG2 and MPG1, respectively. Color map of the background is taken from 1:25,000 of gradient tints image (2015) of Japan Map Center.

2行目にも記載)を、第4表に示した外洋の3観測点のそれで除したものを増幅度とし、第5表に示した。

第11図には、第1波の増幅度を地図上に示した。図中白い棒とそれにつけた数値は、水深100mの室戸岬西方沖の津波振幅に対する各点の増幅度を示しているが、須崎湾内では3.3～5.4倍増幅されていることがわかる。同様に、水深1,507mのMPG2と2,308mのMPG1のそれらに対しては水色と紺色の棒及び数値で示したが、前者

で7.3～12倍、後者で7.9～13倍増幅されたことがわかる。

証言による海面変動は本震の数日前から目撃されていることから、前日から複数の小津波が発生していたと推定される。複数の小津波は海岸および海底地形で反射を繰り返し、互いに重なり合って湾内に入ってきたものと考えられる。そういう意味では、湾内で目撃された海水位変化を検討するには最大複振幅を見ることに意味があるだろう。



第12図 2011年東北地方太平洋沖地震による津波の最大複振幅の比。白、水色、紺色の棒と数値は、室戸岬西方沖、MPG2、MPG1の最大複振幅と須崎湾内の各観測点のそれとの比。背景の色彩地図は日本地図センター(2015)の1:25,000段彩陰影画像を使用。

Fig. 12 Ratio of maximum double amplitude of tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. Height of the bar of white, light blue and deep blue attached numeral indicates the ratio of maximum double amplitude at each point in Susaki Bay against that of west off Muroto Cape, MPG2 and MPG1, respectively. Color map of the background is taken from 1:25,000 of gradient tints image (2015) of Japan Map Center.

残念ながら、須崎湾内での筆者らの観測した最大振幅は全点で振り切れているので、以下のような手順でそれを推定した。前節で述べたように、高知県の験潮場に併設していたNo.5の最大複振幅は、高知県データのそれ(5.09 m)と同じとし、それを基準の振幅とする。No.5を基準とするため、第3.1節で求めたNo.1に対する比率(第3表の5行目)を、No.5を1.0とした比率に書き換え、第6表の2行目の「Ratio」に記した。この比率「Ratio」に、基準とした振幅(5.09 m)を掛けた値を、他の観測点における推定最大複振幅とし、第6表3行目の「M. Amp (m)」に示した。この推定最大複振幅を、外洋3か所の最大複振幅(第4表)で除した値が、外洋に対する湾内各点における増幅度とし、第6表の4行から6行に記した。第12図には、推定最大複振幅の増幅度を地図上に示した。

推定最大複振幅は、湾内での振幅比が、最大複振幅についても、またそれ以外の振幅についても同じに保たれているという仮定に基づいて求められたので、誤差は少ないが、本論で議論する増幅度に関しては大きな影響はないと考える。第12図で白い棒とそれにつけた数値は、水深100 mの室戸岬西方沖の津波振幅に対する各

点の増幅度を示しているが、須崎湾内では3.9～8.6倍増幅されていることがわかる。同様に、水深1,507 mと2,308 mのそれらに対しては水色と紺色の棒及び数値で示したが、前者で8.9～20倍、後者で10～21倍の増幅が見込まれた。最大複振幅について、この程度の増幅効果があれば、須崎湾で目撃された大幅な海水位低下も、外洋における小規模な津波によって説明が可能と思われる。しかしながら、本震直前には、海水位が大幅に上昇したという目撃証言はないこともあり、津波だけで証言を説明することは難しい。地殻変動も考慮した議論は第6.2節で行う。

3.4 津波の周期と須崎湾の共振周期

室戸沖の津波波形(第8図)で、黒三角印を付したところの時間間隔を周期とすると、MPG1、MPG2共に53分と読み取れる。土佐湾の沖、水深1,500～2,300 mにおける津波の第1波の周期である。室戸岬西方沖の水深100 mでの津波波形(第9図)において、第1波の押し波のピーク(▽1)から最大振幅を読んだ第6波(▽2)までの平均繰り返し間隔をとると49分となる。この周期は室

第6表 外洋の3観測点の津波最大複振幅(左欄の4行から6行のかっこ内)に対する、須崎湾内7点における推定最大複振幅(3行目)の比。

Table 6 The ratios of assumed maximum double amplitudes (3rd line) at seven points in Susaki Bay to observed maximum double amplitudes (in parentheses of 6th from 4th lines of the left column) of tsunami at three points of the open ocean.

Obs.point No.		1	2	3	4	5	6	7
Susaki	Ratio	0.53	0.74	0.79	0.84	1.00	1.00	1.16
	M. Amp.p-p (m)	2.68	3.77	4.02	4.28	5.09	5.09	5.90
W off Muroto Cape (0.69 m)		3.9	5.5	5.8	6.2	7.4	7.4	8.6
MGP2 (0.30 m)		8.9	13	13	14	17	17	20
MGP1 (0.28 m)		10	13	14	15	18	18	21

戸沖で観測された津波の周期53分に近い。その他の主な周期に注目すると、最大振幅付近の $\Delta 1$ と $\Delta 2$ 、および0時を挟む $\Delta 3$ と $\Delta 4$ の時間間隔は、それぞれ70分と40分と読み取れる。もう少し長い周期も見られ、例えば $\Delta 2$ と $\Delta 3$ の間をとるとおよそ100分である。土佐湾では長い周期の波も卓越していることがわかる。

須崎湾内では、第3図(a)で第1波の押し波のピーク(▽1)から第10波(▽3)までの平均繰り返し間隔をとると32分となり、これが須崎湾内の卓越周期と思われる。この卓越周期が須崎湾の共振周期なのかどうかを知るために簡単な方法で検討した。須崎湾の湾口が波の腹になるとして、共振周期(T)を $T = 4 \times L (9.8 \times H)^{-1/2}$ を用いて求めた。第1図で、No.1の安和と東側の島を湾口として、そこから湾奥のNo.7(大間)までの距離(L)を6 km、平均水深(H)を15 mとすると、須崎湾の共振周期は33分となる。高山・平石(1986)は1946年南海地震による須崎湾での津波波形を模型実験によって求めているが、本論の第1図のNo.7の地点での彼らの波形(高山・平石(1986)の図-9, No.6)を見ると卓越周期は34分と読み取れ、上記のように簡単な方法で推定した共振周期や、筆者らの観測結果共おおむね一致している。

4. 津波及び荒天時・好天時のスペクトル

前章では須崎湾内で観測された津波の周期について述べたが、本章ではスペクトルを取ってやや詳しく述べると共に、地震による津波以外の期間についてもスペクトル解析を行い比較議論する。津波波形については、須崎湾内7観測点の全点で波形が振り切れなくなった3月14日のデータを用いる。スペクトル解析をする際には須崎における天文潮位を除去した。天文潮位は気象庁のホームページ(気象庁, 2015)から潮位表(須崎)をダウンロードした。同表のデータは毎時潮位なので、毎時値の内挿によって1分値を得、須崎の観測値から差し引いた。第13図(a)の左側が同日0時から17時までの津波の原波形、

右側はその時間帯の天文潮位を除去したパワースペクトルである。スペクトル解析にはFFTを用い、サンプリングは1分、解析長は1,024ポイント(17.066時間)である。フィルターはかけていないが、グラフ上には、極長周期と極短周期はプロットせず、17分~341分の間をプロットした。

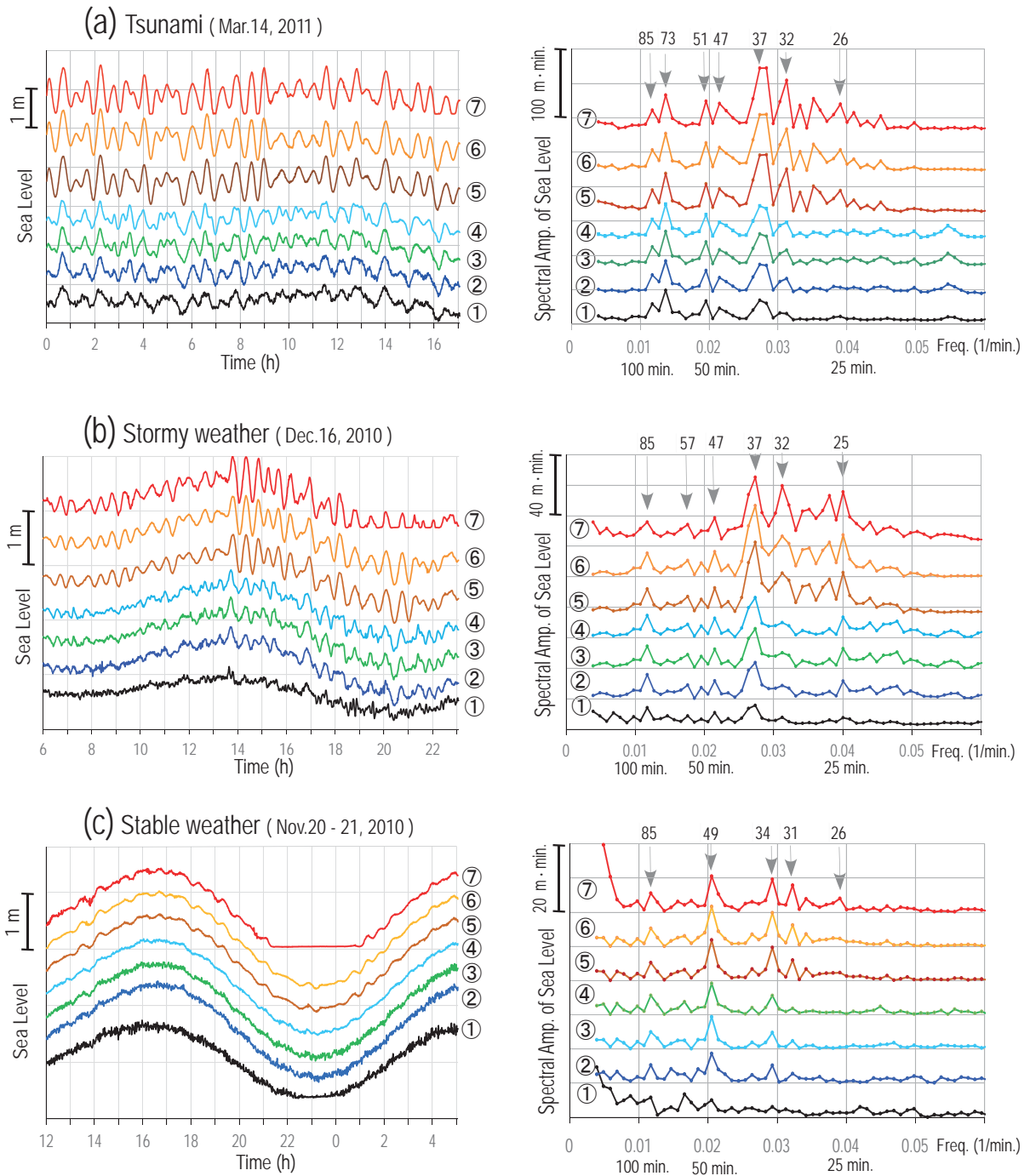
図中の丸付数字は第1図の観測点番号である。暖色で示したNo.5, 6, 7は須崎港、寒色のNo.2, 3, 4は野見湾、一番下の黒色トレースは湾口のNo.1である。スペクトルの図では、特徴的なピークに矢印を付け、その周期を分で示してある。

32分より短く20分付近までのピークは、須崎港の3点には見られるが、湾口のNo.1や野見湾ではほとんど見られないことから、須崎港内の共振周期と思われる。37分のピークは最も大きく、全点共通して見られることから、須崎湾全体の共振周期と思われる。この周期は前章で検討した須崎湾の共振周期に近い。

47分と51分のピークは、室戸沖の水深1,500~2,300 mにおける津波の周期(53分)や室戸岬西方沖の平均周期(49分)に対応すると思われる。73分と85分に見られるピークは、室戸岬西方沖でも見られた70分ないしは、それより長い周期の波に対応するものと思われる。

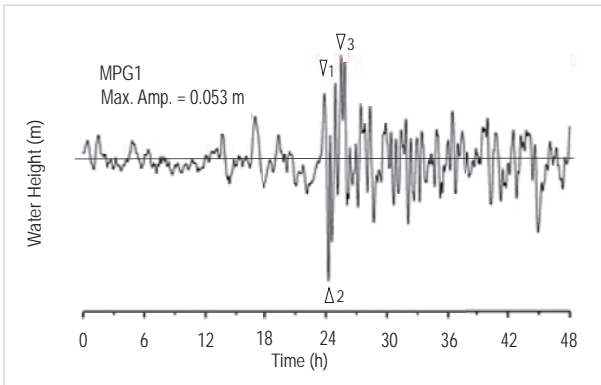
津波ではない荒天時と、安定した好天時の海水位の波形とスペクトルを、第13図の(b)と(c)に示した。解析方法も表示も津波の場合と同じである。2つのスペクトルと、津波のそれとを見比べると、特徴的なピークはほぼ同じ周期のところにある。30分付近の2つのピーク、50分付近(47分から57分の間)、それと85分のピークは、津波、荒天時、好天時の3つの場合共に同じである。

このことは、本震前の海水位変化が気象によるものだった可能性も示唆するが、第6.2節で検証するように本震前の気象は穏やかであり、気象によるものとは考えられない。上記に示されたいくつかの特徴的なピークは、証言から推定された本震前の小規模な津波に関して、波源の如何にかかわらず、須崎湾において常に存在するこ



第13図 (a)津波, (b)荒天, (c)好天時の海水位変化(左)とスペクトル(右).

Fig. 13 (a), (b) and (c) is the sea level at the time of tsunami, stormy and stable weather, respectively. Sea level change (left) and Spectrum (right).



第14図 MPG1における2010年チリ地震による津波波形。基図は海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター(2010)による。時間軸の0値は地震発生時(2月27日06時34分(UTC), 15時34分(JST))を示す。中央の細い横線は筆者らが記入したものである。

Fig. 14 Waveform at MPG1 of tsunami caused by the 2010 Chili earthquake. Base figure is quoted from the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Research and Development Center for Earthquake (2010). Zero on time axis indicates that of earthquake occurrence (06:34 UTC, 15:34 JST). A thin horizontal line in the middle is drawn by authors.

第7表 2010年チリ地震による各点での津波振幅。Ratio-1とRatio-2は、室戸沖(MPG1)と高知県西部沖の津波振幅に対する各点のそれとの比。

Table 7 Tsunami amplitude at each point by 2010 Chili earthquake. Ratio-1 and Ratio-2 shows the amplitude ratio at each point against to that of off Muroto (MPG-1) and west off Kochi, respectively.

Observation	Water depth (m)	1st wave			Max. wave		
		Amp. (m)	Ratio-1	Ratio-2	Amp.p-p (m)	Ratio-1	Ratio-2
off Muroto (MPG1)	2308	0.032	1.0	—	0.094	1.0	—
West off Kochi	309	0.139	4.3	1.0	0.339	3.6	1.0
Kamikawaguchi	27.9	0.272	8.5	2.0	1.105	11.8	3.3
Susaki	—	0.402	12.6	2.9	2.248	23.9	6.6

とを示すものである。また、須崎湾の共振周期と推定された37分付近より長い、50分付近と85分のピークは同湾より外の、例えば土佐湾全体の海岸地形、ないしはそれよりも外洋の海底地形によるものと推定される。

5. 2010年チリ地震津波による振幅の検討

第3章では、筆者らの観測中に記録した2011年東北地方太平洋沖地震による津波を基に、須崎湾内での増幅分布を調べたが、波源が異なる津波についても同じ程度の増幅度になるのか否かの検証をすることも必要である。本章ではその一例として、2010年チリ地震(Mw 8.8)津波について、他機関で得られたデータを参考に増幅効果を調べ、本論での議論の補足としたい。

同地震の津波データのうち、第7図に示した室戸沖のMPG1の津波波形を、海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター(2010)のウェブサイトから引用し、第14図に転載した。元図には津波振幅を示す縦軸のスケールが入っていないので、第14図では筆者らが細い横線を入れ、これを基準線として振幅を読み取ることとした。元図には「Max. Amp. = 0.053 m」と記入されていることと、文中に「室戸観測点で約10 cm弱の変動量があった」と記載されていることから、基準線からΔ2まで

を0.053 mとした。この比率を基に、第1波の片振幅は横線から図中の∇1までを読み取り0.032 mを得た。また図中にΔ2と∇3記した部分を最大複振幅とし、0.094 mと読み取った。それぞれの読み取り値を第7表の「Amp. (m)」と「Amp. p-p (m)」の列に示した。波形の分解能が良くないのでΔ2の部分にはノイズが重なっている可能性があり、MPG1の最大複振幅は過大評価しているかも知れない。なお、同図の時間軸は地震発生時刻(15時34分(JST))を0としている。

第7図に示したW off Kochi(高知西部沖)とKamikawaguchi(上川口)及び第1図に白三角印で示した須崎湾の3点に関しては、河合ほか(2010)の図-5.26に3点の波形をまとめた図が、また個々の振幅の読み取り値は表-5.5に掲載されている。第1波の振幅(片振幅)は同表の読み取り値(正の偏差値)を採用した。最大複振幅は、波形図で位置を確認し、同表の読み取り値から求めた。それぞれの値は第7表の「Amp. (m)」と「Amp. p-p (m)」の列に示した。

室戸沖(MPG1)で観測された第1波及び最大複振幅と、他の3点でのそれらとを比較するため、後者の各振幅を前者のそれで除した値を、第7表の「Ratio-1」に示した。なお「Ratio-2」は高知西部沖の振幅に対する同様の比である。室戸沖に比べると須崎湾では、第1波で13倍弱、

最大複振幅で24倍弱増幅されたことが分かる。2011年東北地方太平洋沖地震では、室戸沖に対し須崎湾のNo.5の増幅度は第1波で13倍、最大複振幅で18倍だったので、第1波はほぼ同じ、最大複振幅はチリ地震津波の方が大きい。本章では2010年チリ地震津波について、須崎湾での増幅度を調べたが、波源の異なる2011年東北地方太平洋沖地震津波による同湾での増幅度と比べて、最大複振幅で3割強の違いはあるものの、オーダーとしてはほぼ同じということがわかった。

6. 観測結果は目撃証言と津波仮説をどの程度説明できるか

6.1 証言の概要と疑問点およびその検討

1946年南海地震前の海水位変化に関する目撃証言は、四国太平洋沿岸部で70件余あるが、梅田・板場(2014)からそれらを要約すると、1)本震の数日前から、傾斜のある海岸で気付く程度の海水位の変化が目撃された。2)前日午後には変化の大きさが0.2～0.3 mで、繰り返し間隔は30分程度という海水位変化が目撃された。3)高知県宇佐港では本震の4時間前に、須崎湾では1時間前に2～3 mの海水位低下が目撃された。一方で4)海水位の変化はなかった、あるいは気付かなかったという証言は、数日前からも、前日午後から本震直前にかけても数多くある。その数は変化があったという証言と同数近くある。5)本震直前に海水位が上昇したという証言は無い。

上記の1と2の目撃は、小規模な津波が発生していたという仮説の元になったが、3の本震直前に2～3 mもの海水位低下が起こりうるかどうかは大きな疑問であった。また前日までは、海水位変化の振幅も大きくはなかったのに、気付かなかった人がいてもおかしくはないが、直前の大きな変化にも気付かなかった人たちが居たということの説明は難しいように思えた。

2011年東北地方太平洋沖地震津波の須崎湾での観測結果から、水深100 mのところ津波が来れば、須崎湾では最大で8.6倍の増幅が、津波が水深1,507 mと2,308 mに来れば、最大で20倍と21倍の増幅効果が見積もられた。このことから本震の数時間前に目撃された2～3 mの海水位低下は、水深100 mでは0.3～0.4 m程度の、南海トラフに近い水深1,500～2,300 mであれば0.1～0.15 m程度の海水位変化があれば説明出来ることがわかった。ただし、ここでは海水位の低下のみの説明である。

大幅な海水位低下が目撃された一方、4)のように直前においてもそのような異常変化に気付かなかったことについては、海水位が大きく低下した時に帰港した漁師は異常に気付いたが、通常潮位に戻っている時に帰港した者は気付かなかったということも考えられる。スペクトルをとって卓越周期を見たところ、50分、85分という長い周期の波が存在することがわかった。長い周期の

波は、海水位を目撃した時刻に十分長い時間差があったことを意味するので、相反する証言の説明も可能である。しかしながら、海水位の上昇が目撃されていないことの説明も含め、証言の全てを津波だけで説明することは難しい。

6.2 気象および地殻変動について

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による津波によっても、安定した天候の時でも、嵐の時も、スペクトルのピークの位置はほぼ同じであった。このことは、本震前に起こった海水位変化は気象による変化である可能性も排除されないことを意味する。前日までの気象に関しては、水路要報(水路局, 1948)の津波編 p.33には紀伊半島から四国にかけての証言が8件記載されているが、本震前の天候は「どんよりした生暖かい天候であった」という意味の事が記載されている。

数日前からも海岸で塩焼き(製塩)などの作業が行われていたことや、多くの漁船が出漁していたことから、少なくとも荒天ではなかったと思われる。本震当夜については水路要報(水路局, 1948)の津波編 p.10に、足摺岬の清水測候所の記録として「21日00時雲なし快晴、01時雲極く少量快晴、02時、03時、04時共に同じ…」と記されている。従って気象による海水位変化とは考えにくい。

四国太平洋沿岸部における、本震に至るまでの長期的な地殻変動は、梅田・板場(2013)によって示されているが、須崎をはじめ土佐湾の湾奥では本震発生直前までは、隆起が進行していたことが示されている。この隆起分だけ、海水位が低下したように目撃されるので、海水位が上昇したという証言は少なくなることは想像できる。また本震前に小規模な津波が発生していたとすれば、それを引き起こした海底地殻変動も、将来は検討する必要があるだろう。

数日前から小規模な海水位変化が目撃されていることから、小規模な海底地殻変動も数日前から繰り返し起こっていたのではないと思われる。証言数は少ないが、前日には激しい潮流の変化(港では引き潮)も目撃されている。しかしながら揺れを感じたという報告が無いことから、この地殻変動は小さなものであったか、震動を発生させない程度にゆっくりした変動だったのかもしれない。

7. まとめ

1946年南海地震前の海水位に関する目撃証言から、梅田・板場(2014)は本震の前に小規模な津波が発生していた可能性を指摘した。目撃証言が小津波によって説明しうるかどうかは、津波の振幅や周期に関して、ある程度定量的なデータが必要であり、目撃証言のあった港湾の1つである高知県須崎湾の7ヶ所において、2010年11月から2012年3月まで、海水位の連続観測を行った。

2011年東北地方太平洋沖地震による津波を観測したことにより、須崎湾内の津波振幅と外洋における他機関のそれらとを比較し、須崎湾内での津波の増幅度の分布を求めた。土佐湾内の水深100 mのところに津波が来れば、最大で8倍強の、南海トラフに近い水深1,500～2,300 mのところからであれば20倍程度増幅されることがわかった。2010年チリ地震津波による増幅効果も補足的に調べたが、2011年東北地方太平洋沖地震の場合と同様、オーダーとしてはほぼ同程度の増幅度であることがわかった。湾内での大きな増幅効果は、本震直前の大幅な海水位低下を説明することができた。しかしながら、水位の上昇に関する証言がないことの説明は津波だけではできない。

周期に関しては、2011年東北地方太平洋沖地震による津波、荒れた天気の際の海水位及び好天時の3つの場合についてスペクトル上で比較した。須崎湾の固有周期と思われる34分付近のスペクトルピークと、それより長い50分付近と85分付近の周期については、3つの場合とも共通したピークが観測された。長い周期の波は、目撃された時刻の違いによって相異なる証言になりうることを指摘した。

本震の前日から当夜の天候は穏やかだったようで、証言による海面変動は気象によるとは考えられない。本震前には揺れ(地震動)に関する証言がないことから、小規模な津波を引き起こしたと思われる海底地殻変動も揺れを感じさせない程度の小さなものか、ゆっくりした変動だったのかも知れない。本論では津波観測を基に証言がどの程度説明できるかを検討したが、津波のみで証言の全て、特に海水位の上昇に関する目撃証言がないこと、の説明はできず、今後は地殻変動に関する定量的な研究も合わせて行う必要がある。

謝辞：観測点選定などにご尽力いただいた当時の野見漁協組合長 川崎敏幸氏をはじめ、観測実施にあたっては須崎市産業課、同市大谷漁協、国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所並びに同事務所須崎港出張所にお世話になりました。観測点設置並びに潮位データの提供をいただいた高知県須崎土木事務所と同県土木部河川課に御礼申し上げます。本研究を支援していただいた産総研活断層・火山研究部門の小泉尚嗣元総括研究主幹、同部門地震・地下水研究グループの松本則夫グループ長をはじめグループの皆様へ感謝します。匿名査読者と吉岡敏和編集委員のコメントは論文改善に有効でした。感謝します。

文 献

海上保安庁海洋情報部(2013) プレート境界域の精密海底地形 四国沖, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/jishin/>

- sokuryo/A2/Bath2DA2.html (2015年4月25日参照)
- 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター (2010) 2010年チリで発生した地震の解析, <http://www.jamstec.go.jp/donet/j/topics/201002chile/index.html> (2015年9月24日参照)
- 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター (2011) 2011年東北地方太平洋沖地震の観測と解析, <http://www.jamstec.go.jp/donet/j/topics/201103tohoku/index.html> (2015年4月24日参照)
- 河合弘泰・佐藤 真・永井紀彦・川口浩二(2010) GPS波浪計ネットワークを用いた平成22年(2010年)チリ地震津波の日本沿岸における変形特性の解析. 港湾空港技術研究所報告, 第49巻, 第4号3-7, <http://www.pari.go.jp/search-pdf/vol049-no04.pdf> (2015年9月17日参照)
- 気象庁(2015) 潮位表(須崎), <http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php> (2015年9月10日参照)
- 森光次男(1995) 我が住家海の底. 海からの警告, 高知県須崎市, 23-42.
- 永井紀彦・里見 茂(2005) 2004年東海道沖地震津波の観測結果. 港湾空港技術研究所資料, No.1096, 1-22 (p.5.表-1) <http://www.pari.go.jp/search-pdf/no1096.pdf> (2015年6月12日参照)
- 日本地図センター (2015) 25000段彩陰影画像(須崎市), http://net.jmc.or.jp/MF_SearchDigitalMap.asp (2015年4月25日参照)
- 水路局(1948) 昭和21年南海大地震調査報告. 水路要報増刊号201号. 津波編10p, 33p, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/> (第五管区, 防災・環境保全情報) (2015年5月25日参照)
- 高山知司・平石哲也(1986) 須崎湾における南海地震津波の水理模型実験. 海岸工学講演会論文集, 33, 90-94, https://www.jstage.jst.go.jp/article/proce1970/33/0/33_0_90/_article/-char/ja/ (2015年5月16日参照)
- 寺田幸博(2013) GPS海洋ブイを用いた津波早期検知システムの開発. PPT資料, 27p, <http://ictfss.nict.go.jp/yokohama2013/DL/lecture4.pdf> (2015年4月24日参照)
- 梅田康弘・板場智史(2013) 1946年南海地震前の四国太平洋沿岸の上下変動曲線. 地質調査研究報告, 64, 201-211.
- 梅田康弘・板場智史(2014) 1946年南海地震前に四国太平洋沿岸部で目撃された井戸水及び海水位の変化. 地質調査研究報告, 65, 129-144.

(受 付 : 2015年6月24日 ; 受 理 : 2016年3月4日)

