

4. 津波特性

4. 1 概要

2003年（平成15年）9月26日4時50分頃、襟裳岬の東南東約80kmを震源とするマグニチュード8.0の大地震により津波が発生し、北海道の太平洋沿岸を主として、東北地方にまで津波が来襲した。東京大学地震研究所の阿部教授によると津波マグニチュードは8.0であった。各機関が行った津波の痕跡調査の結果、北海道大学の調査団により襟裳岬の東側の海岸で4m程度、気象庁により厚岸で4.2mが確認されている。また、襟裳岬から東西にそれぞれ沿岸にトラップされて伝播する津波、十勝川を遡る津波（独立行政法人北海道開発土木研究所により報告）、地震から9.5時間後に釧路で約1mの津波が観測されている。

この津波による被害としては、漁船の打ち上げ、自動車の海中への転落、生け簀などの破損などが発生しているが、大きな施設被害は無かった。一方、人的には十勝川河口付近において2名の行方不明者がでている。

本章においては、検潮所や波浪観測所における津波観測の結果、地震後直ぐに行った被害に関する現地調査の結果および数値計算の結果の概要を示す。

4. 2 観測記録から見た津波の特性

ここでは、観測データに基づいた津波の特性を示す。ここに示す結果およびスペクトル解析結果については、永井・小川¹⁾に詳述されている。

4. 2. 1 観測の概要

今回の津波は、図4.1に示すように北海道開発局、気象庁、海上保安庁などの検潮所（験潮所）において観測されており、インターネット等によりデータが公開されている。また、沖合においても、沿岸沖合の波浪観測ネットワーク（ナウファス）により津波が観測されている。

十勝港（大津漁港）沖水深23m、苫小牧港（白老）沖水深50m、久慈港沖水深50m、石巻港沖水深20m、および小名浜港沖水深24mでは、海象計によって沖合の津波波形を捉えることができた。海象計では、超音波による水面変動ばかりでなく、海底

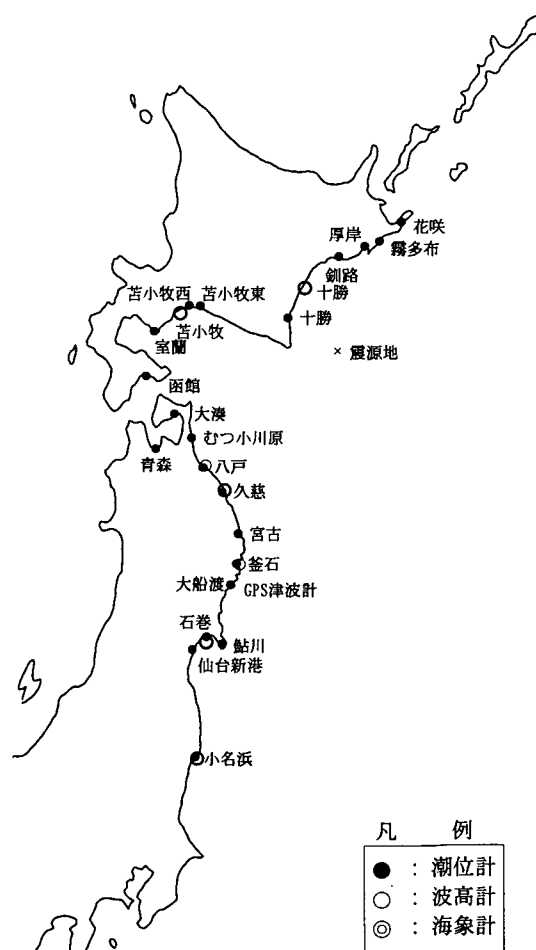


図 4.1 波浪観測機器と検潮所の設置位置

の水圧変動や、海面下 10m の層における水平 2 成分流速が、連続的に観測されている。ただし、十勝港（大津漁港）沖の海象計は、初期の津波波形を捉えることには成功したものの、26 日 8:40 以降はケーブル切断事故のため欠測となった。

ナウファスネットワーク中の釜石港沖合水深 50m では、超音波式波高計による連続観測によって津波波形を捉えることができた。大船渡港では、ナウファスによる集中処理ネットワークには組み込まれていないが、東北地方整備局が湾口防波堤外側の水深 16m と内側の水深 25m に水圧式波高計を設置しており、これらから得られた波形記録の解析を行った。防波堤外側の観測記録には強いノイズが多く含まれていたが、数値フィルターをかけた波形から異常値と判定されるノイズを人為的に取り除くことによって、津波波形を再生することができた。また、同じ東北地方整備局による八戸港沖合水深 24m の超音波式波高計と流速計型波向計による観測結果は、アナログ記録紙に長周期連続波形記録として残されていたので、初期の記録は読み取り不能で測得できなかったものの、読み取り可能であった 26 日 9:00 から 13:00 の間のデータに関して解析を行った。

検潮器の形式は、霧多布漁港および厚岸漁港で採用されている超音波式空中発射型を除き、全てフース型である。フース型検潮器は、北海道開発局および東北地方整備局管内ばかりでなく、海上保安庁海洋情報部や気象庁でも汎用的に採用されている機種である。フロート式検潮器で最も一般的なものであり、感度が高く、読み取り、取扱いが簡単である。構造は一般には、プーリーから細いワイヤーで吊り下げた浮標を水面に浮かせ、水面が昇降してもワイヤーがゆるまないように重錘でバランスさせている。フース型では、フロートと重錘はそれぞれ別のワイヤーでプーリーに固定されており、水面が昇降するとプーリーが回転し、その動きが歯車機構を介してペンに伝えられ、回転ドラム上の用紙に水位を記録するようになっている。

4. 2. 2 解析方法

各観測点における波浪・潮位記録をもとに、津波到達時刻と第 1 波の水位の偏差（水位の天文潮位からの差）、最大偏差（水位の天文潮位からの差が最大の値）とその起時、ならびにゼロアップクロス法で定義した周期の範囲を、**図 4.2** に示す例に従って整理した。津波到達時刻は、潮位記録から天文潮位と見なす成分を除いた、津波の影響と思われる水位変動が発生し始めた時刻として読み取った。

4. 2. 3 津波到達時刻

表 4.1 は、上記に述べた手法で、各観測点における津波の到達時刻と諸元をとりまとめたものである。

今回の津波は、各観測点の記録から判断すると、水面上昇（押し波）から始まった。このため、津波到達時刻としては、津波による水面上昇が始まった時刻と定義して整理を行った。到達時刻を比較する上で注意を要するのが、各観測点の時計誤差である。リアルタイムデータ収集を行っているナウファス観測地点では、1 分程度以上の時計

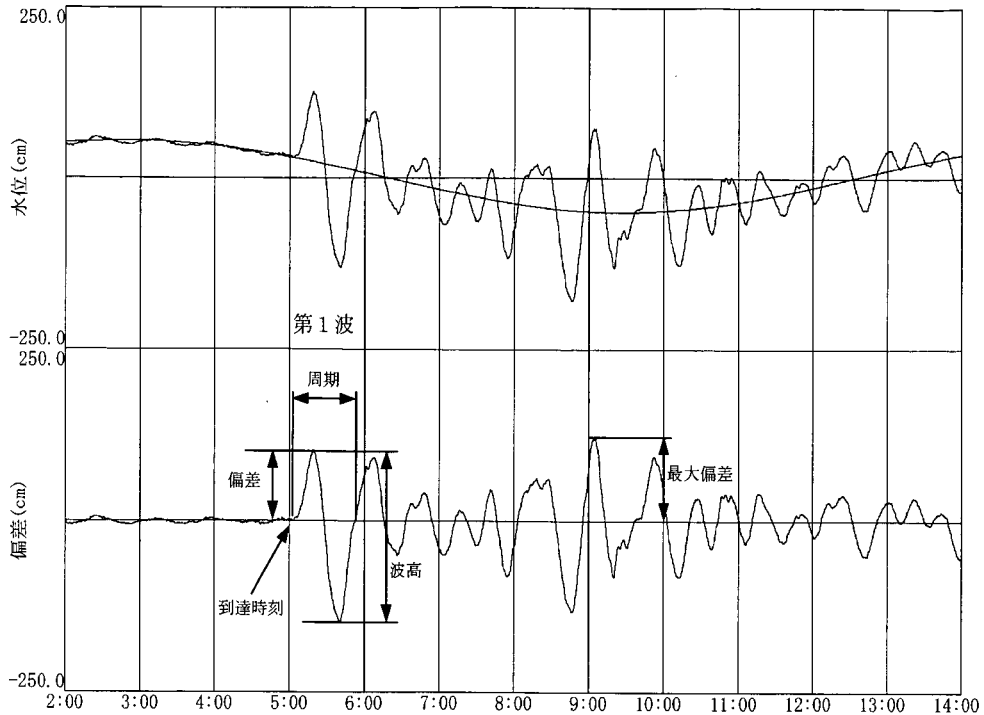


図 4.2 津波の波形記録のとりまとめ例

誤差が生じた場合、時計あわせを行っているので、時刻の絶対誤差は1分以下と考えてよい。また、十勝港や久慈港のように、沖合波浪観測記録と港内検潮記録を、同じシステムでリアルタイム収集している場合には、沖合波浪観測記録と港内検潮記録との相対的な時間差は、正確に表現されている。他方、オフラインで観測記録を収集した各地点の観測記録は、観測点の管理状況にもよるが、最大で数分程度の時間誤差がある可能性が否定できない。

津波の到達時刻を比較すると、もっとも早く津波が到達した観測点は、十勝港（大津漁港）沖合の海象計であり、超音波水面変動記録および海底水圧変動記録ともに4:51となっている。両者の波形記録はきわめてよく類似している（後出の図 4.5 参照）。十勝港内の検潮所では、この後、4:56 に津波が到達している。大津漁港は十勝港の北東約 40km に位置しており、厳密な意味では十勝港沖とは言えないが、大津漁港から十勝港にかけての海岸線は単調であり、平行で直線状の等深線が続いているため、岸近くでは津波の波峰線方向は屈折の影響で海岸線と平行になると考えれば、両者の関係は、同一港湾における沖合と港内の観測点としてみなしても大きな間違いはないと思われる。

霧多布における 4:55 の津波到達は、厚岸よりも約 10 分、根室（花咲）よりも約 30 分早かったことは注目に値することであり、霧多布における津波検出が、道東の港湾沿岸の津波防災に有効に機能しうる可能性を示している。岩手県北の久慈港沖では、5:31 に津波が到達したが、これは、苫小牧沖の 5:37 よりも 6 分も早い。津波が襟裳岬を回りこんで苫小牧まで到達する前に、対岸の東北地方沿岸に到達したことになる。

表 4.1 津波の到達時刻と諸元

整理 番号	観測地点		到達 時刻	第1波		最大偏差波			最大波			港内/沖合増幅率			
				偏差 (cm)	ピーク 時刻	No.	偏差 (cm)	ピーク 時刻	No.	波高 (cm)	周期 (分)	ゼロアップ クロス時刻	第1波 偏差	最大偏差	最大波
01	花咲	フース	5:28	88.1	5:40	1	88.1	5:40	1	210.2	29	5:28			
02	霧多布	空中発射	4:55	44.2	5:32	6	123.8	8:26	6	216.5	46	8:18			
03	厚岸	空中発射	5:08	42.3	5:39	3	102.1	7:11	3	165.8	55	6:56			
04	厚岸	フース	5:04	41.5	5:40	3	96.3	7:11	3	166.7	56	6:56			
05	釧路	フース	5:03	102.6	5:19	7	122.1	9:06	1	249.6	50	5:03			
06	十勝港沖	海象計	4:51	100.2	5:14	4	118.0	6:42	4	260.2	66	6:13			
07	十勝	フース	4:56	256.4	5:24	1	256.4	5:24	1	426.4	58	4:56	2.56	2.17	1.64
08	苫小牧港沖	海象計	5:37	22.0	5:54	6	36.9	9:06	5	58.6	31	8:25			
09	苫小牧東港	フース	5:49	34.6	6:00	6	99.3	9:06	6	181.7	30	8:59	1.57	2.69	3.10
10	苫小牧西港	フース	5:48	33.1	6:15	11	93.5	12:31	11	119.5	24	12:25	1.50	2.53	2.04
11	室蘭	フース	5:58	28.5	6:22	1	28.5	6:22	2	60.5	63	7:14			
12	函館	フース	6:09	24.5	6:22	3	73.3	8:20	3	111.0	31	8:10			
13	青森	フース	6:46	12.8	7:13	4	25.6	8:53	4	50.8	83	8:46			
14	大湊	フース	7:16	13.0	8:01	4	25.9	12:06	4	31.3	73	11:17			
15	むつ小川原	フース	5:30	61.4	5:40	6	69.3	7:51	6	133.2	26	7:43			
16	八戸港沖	波高計・流速計	—	—	—	—	44.7	10:21	—	79.3	67	10:06			
17	八戸(新湊)	フース	5:47	57.4	5:54	5	95.6	8:18	5	189.5	39	8:08	—	—	—
18	八戸(鮫)	フース	5:45	50.5	6:08	5	86.8	8:21	5	150.4	36	8:10	—	—	—
19	久慈港沖	海象計	5:31	42.2	5:38	1	42.2	5:38	7	86.8	49	8:23			
20	久慈	フース	5:35	113.5	5:48	6	174.9	7:08	13	238.9	26	9:14	2.69	4.14	2.75
21	宮古	フース	5:29	59.7	5:45	1	59.7	5:45	1	110.7	35	5:29			
22	釜石港沖	波高計	5:35	25.2	5:46	11	25.7	10:12	1	50.5	34	5:35			
23	釜石	フース	5:39	42.1	5:48	4	42.9	6:38	4	90.3	25	6:34	1.67	1.67	1.79
24	大船渡港沖	GPSプイ	5:36	15.5	5:50	13	17.6	10:25	15	32.0	94	11:47			
25	大船渡港外	水圧計	5:38	24.9	5:51	10	28.6	12:06	1	40.4	55	5:38	1.61	1.63	1.26
26	大船渡港内	水圧計	5:39	26.5	5:54	6	36.0	10:31	3	45.8	44	7:12	1.71	2.05	1.43
27	大船渡	フース	5:39	26.1	5:49	13	28.7	10:27	12	40.7	57	9:14	1.68	1.63	1.27
28	鮎川	フース	5:58	18.3	6:05	20	34.7	12:00	13	50.7	24	8:57			
29	石巻港沖	海象計	6:18	5.9	6:20	8	38.4	12:22	8	51.1	105	11:47			
30	石巻	フース	6:23	16.2	6:36	6	57.1	12:23	6	76.5	88	11:39	2.75	1.49	1.50
31	仙台新港	フース	6:32	29.3	6:44	8	37.6	10:13	7	79.9	32	9:34			
32	小名浜港沖	海象計	6:05	11.6	6:17	7	25.5	13:03	7	37.9	83	12:32			
33	小名浜	フース	6:12	13.7	6:24	11	23.3	12:57	4	43.4	59	8:11	1.18	0.91	1.15

これは、津波の伝播速度は水深の $1/2$ 乗に比例し、水深が大きいほど速く津波が伝わるためである。同様に、津波が小名浜沖に到達した 6:05 は、石巻沖に到達した 6:18 よりも早かったことも注目される。しかし、これは、石巻や小名浜では、津波の高さそのものが低かったため、到達時刻の定義がより一層むずかしく、時刻の誤差も大きかったためであったかもしれない。

4. 2. 4 津波の第 1 波の偏差

図 4.3 は、沖合観測地点における津波偏差をボックスの高さとし、その波の周期をボックスの幅として、津波 1 波 1 波の津波偏差と周期の経時変化を示したものであり、図 4.4 は、同様な整理によって検潮所における経時変化を示したものである。各観測点では、津波到達後、10–30 分程度で、第 1 波の最大偏差を観測している。例えば、十勝港では、沖合海象計は 5:14 に偏差 100cm、港内検潮所では 5:24 に偏差 256cm であった。十勝港の場合、沖合から港内への津波の伝播によって偏差が 2.5 倍程度に増幅され、こういった津波が港内に到達する 5 分程度前に水深 23m の沖合で捉えている。これは、対象海域の沖合で捉えられた津波情報を活用することによって、津波到達前の早めな避難が可能になり、防災に役立てることができることを示している。

なお、沖合から港湾内への津波の増幅特性は、港湾の空間的なスケールのみならず周辺海域の特性にも強く影響されるので、港湾毎に異なる。さらに、同じ港湾内でも場所により増幅率は異なる。以下に、沖合と港内で対比が可能な場所について、沖合から港内への津波第 1 波の偏差の増幅率をまとめる。

①十勝港（沖合海象計は大津漁港沖水深 23m）

十勝港内検潮所：2.56 倍

②苫小牧港（沖合海象計は白老沖水深 50m）

苫小牧東港検潮所：1.57 倍

苫小牧西港検潮所：1.50 倍

④久慈港（沖合海象計は水深 50m）

久慈港内検潮所：2.69 倍

⑤釜石港（沖合波高計は水深 50m）

釜石港内検潮所：1.67 倍

⑥大船渡港（沖合 G P S 計は水深 53m）

大船渡港外水圧計（水深 16m）：1.61 倍

大船渡港内水圧計（水深 25m）：1.71 倍

大船渡港内検潮所：1.68 倍

⑦石巻港（沖合海象計は水深 20m）

石巻港内検潮所：2.75 倍

⑧小名浜港（沖合海象計は水深 20m）

小名浜港内検潮所：1.18 倍

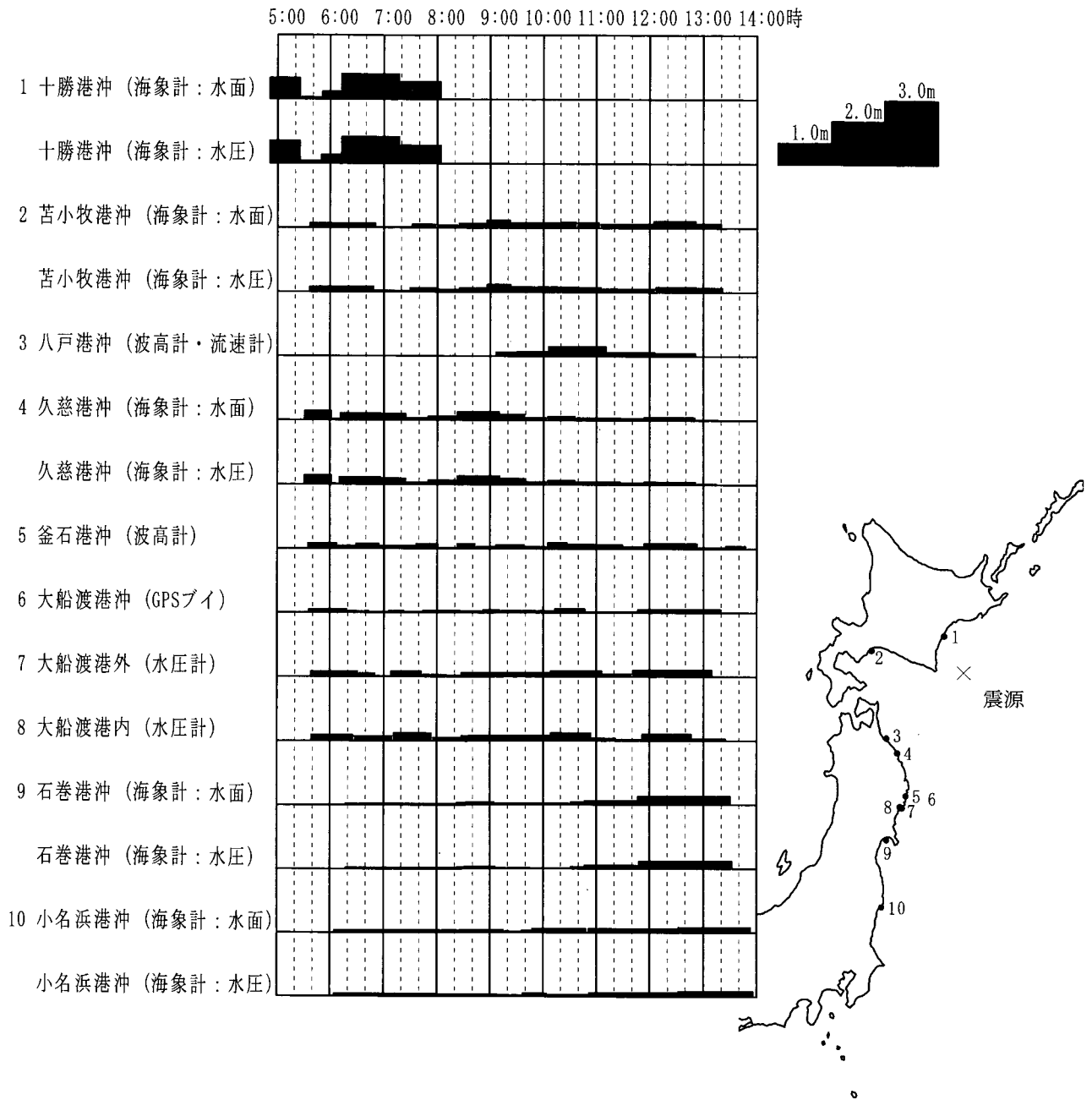


図 4.3 沖合津波偏差の経時変化

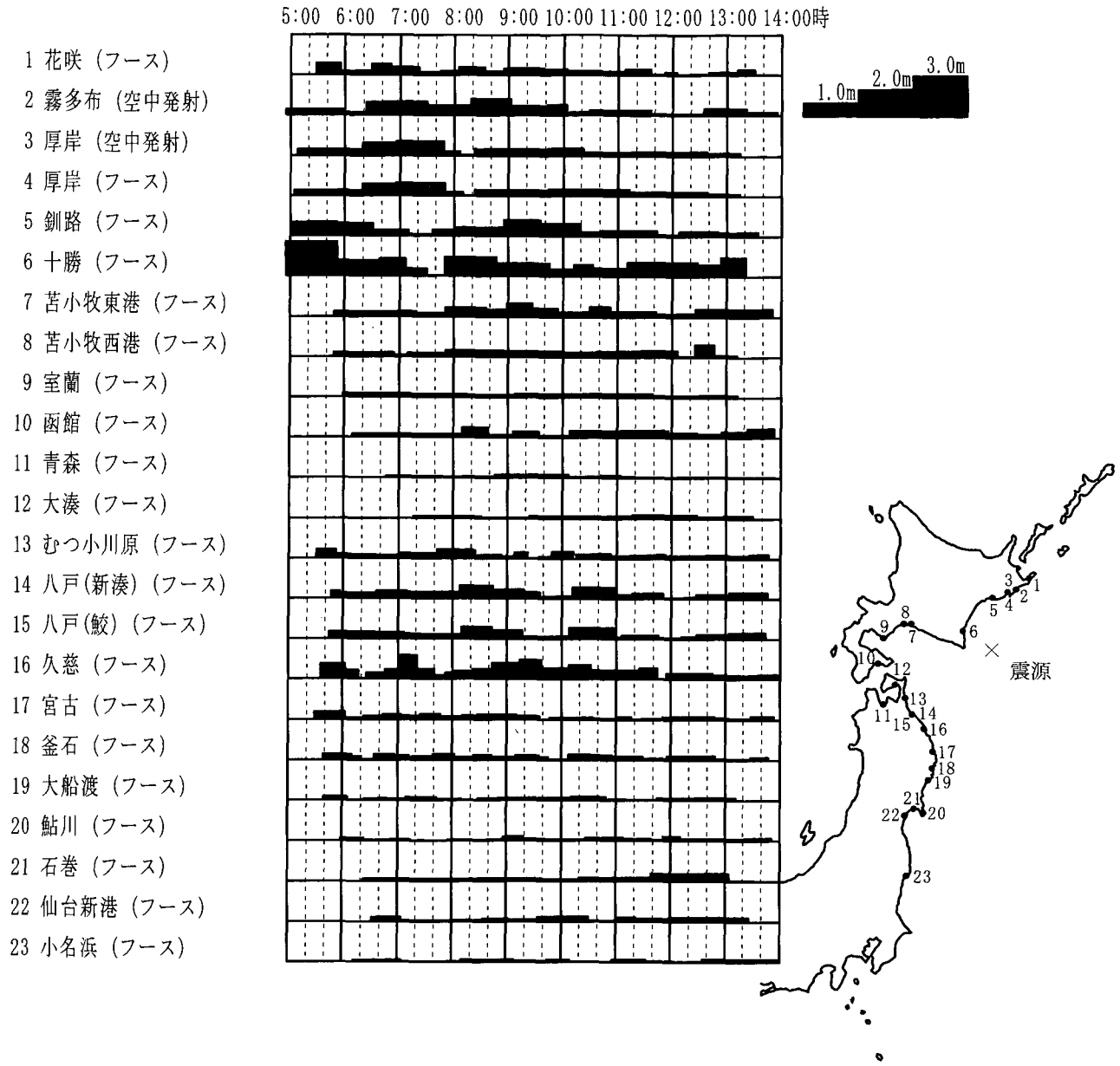


図 4.4 検潮所津波偏差の経時変化

4. 2. 5 津波の最大偏差

前出の図 4.3 および 4.4 に示されるように、津波偏差は第 1 波目が必ずしも最大とはならず、数波目の偏差が最大となる場合も多いことが、実測データから改めて明らかになった。十勝港や花咲港のように第 1 波の偏差が最大である場合もあったが、釧路港では、第 1 波到達から 4 時間近くたった 9:06 に最大偏差 122cm を記録している。

沖合波浪観測点として第 1 波が最大偏差となったのは、久慈沖だけであった。検潮所として第 1 波が最大偏差となったのは、花咲、十勝、室蘭、宮古だけであり、ともに、第 1 波が最大偏差になった観測場所は限られていたようである。

第 1 波が、必ずしも最大偏差とならないのは、沿岸あるいは港湾周辺の海底地形の条件によるものと考えられる。その代表例は港内における共振現象である。厚岸では、空中発射型とフース型の両観測記録は、港内の近接した 2 箇所で観測しているため、極めてよく一致している。一方、八戸港の新湊検調所（気象庁、北緯 $40^{\circ} 31'54''$ 、東経 $141^{\circ} 31'40''$ ）と鮫検潮所（東北地方整備局、北緯 $40^{\circ} 31'59''$ 、東経 $141^{\circ} 31'20''$ ）では、第 1 波の偏差がそれぞれ 57cm と 51cm、最大偏差がそれぞれ 96cm と 87cm、最大波高が 190cm と 150cm となっており、前者が後者より 10–20% 程度大きな津波を観測している。

こうした地形の影響は、同じ波源から発生した津波であるにもかかわらず、最大波の津波周期が観測点によって大きく異なっていることにも現れている。例えば、久慈港沖の観測点で 8:23 に得られた第 7 波目の最大波の周期は 49 分である。一方、久慈検潮所では、9:14 の第 13 波目が最大波高 239cm を記録し、この波の周期は沖合よりも明らかに短い 26 分である。この周期の差は久慈港周辺の海底地形の影響で、10–30 分程度の周期成分が顕著な増幅を受けたためであると考えられる。久慈検潮所の最大偏差である第 6 波目の 7:08 の 175cm という、東北沿岸では他の観測点に比べて非常に大きな値となっているのも、こうした共振現象によるものであろう。一方、十勝港検潮所における記録はこれとは性格が大きく異なったものである。十勝港では 5:24 の第 1 波目の 256cm が最大偏差であり、波高も第 1 波が最大 426cm でその周期が 58 分であった。すなわち、地形による共振の影響は少なく、津波波源域近くにおける強い津波を観測したものと考えられる。

4. 2. 6 十勝沿岸における津波の特性

十勝港沖合では水位だけでなく流速も観測されているので、このデータを解析して十勝沿岸における津波の特性を検討する。

図 4.5 は、沖合海象計と港内検潮器による津波波形を示したものである。ナウファスで採用されている数値フィルターによって周期 30 s 程度以下の波浪変動成分を除去し、これと合わせて潮汐変動も除去している。上から順に、水位変動、水圧変動、港内検潮記録、岸沖流速（海岸線直角方向として $N50^{\circ} W$ 方向を正方向とした方向成分流速）、沿岸流速（ $N40^{\circ} E$ 方向を正方向とした方向成分流速）、および流れベクトルであり、4:00 から 9:00 までの 5 時間の記録を示したものである。図からつぎのよ

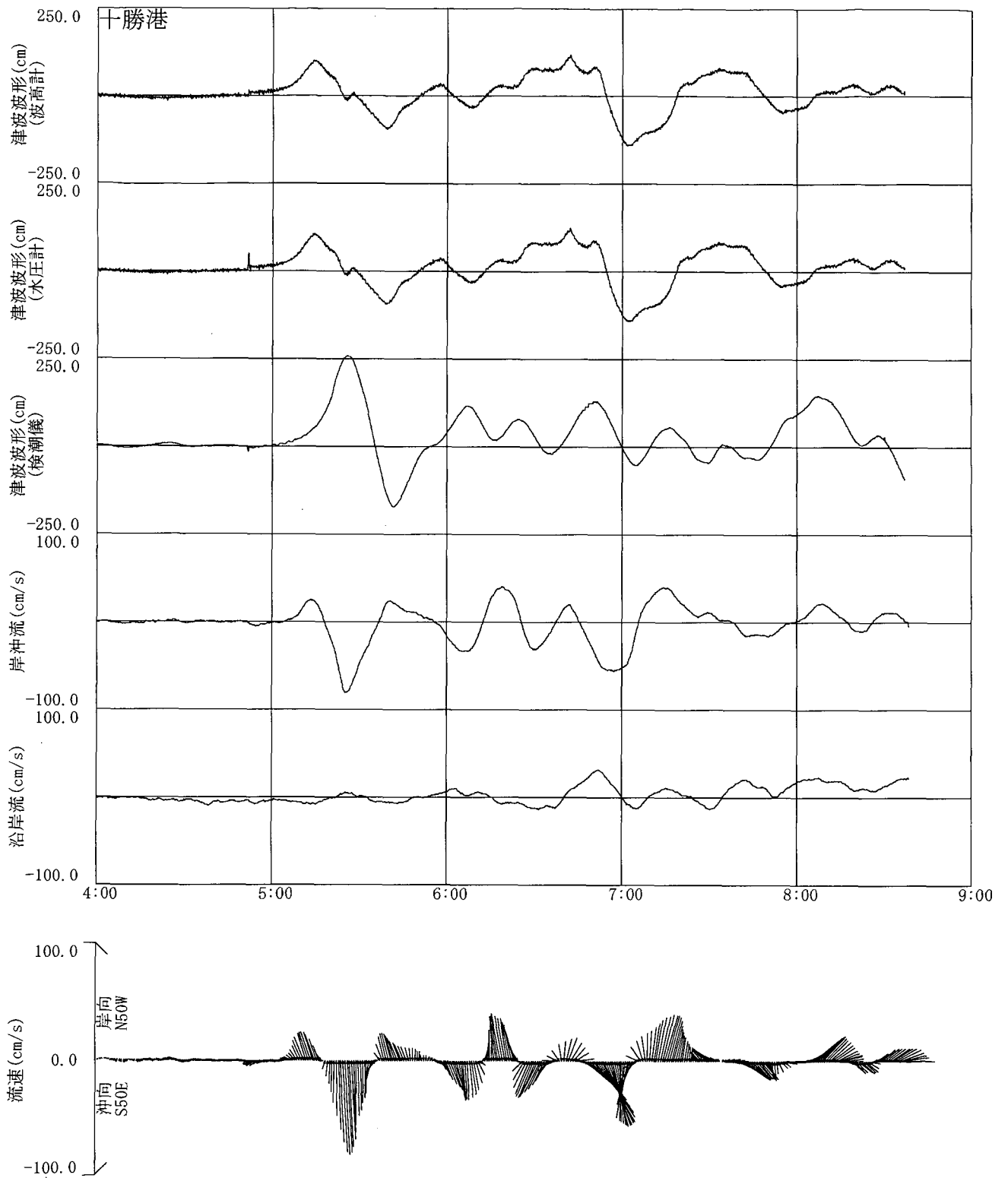


図 4.5 潮汐補正後の十勝港沖と港内の津波波形

うな特徴が認められる。

- ① 4:50 頃に水圧変動記録の中にスパイク状の変動が見られる。これは海底地震に伴って震源付近で水中の圧力が急増し、その圧力変動が観測点まで伝播した、いわゆる海震現象ではないかと想像される。海震の伝播速度は、約 1500m/s であり、いわゆる重力波としての津波よりもはるかに速く伝達するため、津波波形に先行して地震発生直後に現れたものと考えられる。
- ② 上述したスパイク状の変動を除けば、最上段の水面変動記録と 2 段目の水圧変動記録とは、きわめてよく一致している。このことは、観測記録の信頼性が高いことを意味している。
- ③ 津波は押し波から始まった。第 1 波は、5:00 頃から水位 (水圧) 上昇が始まり、5:14 頃に第 1 波の最大偏差が観測されている。その高さは約 1 m であった。他方、十勝港内検潮記録における第 1 波は、少し遅れて 5:24 頃に極大偏差となったが、その大きさは約 2.5m であり、沖合から港内にかけての顕著な津波の増幅が見られた。
- ④ 第 1 波の来襲から 1 時間半以上経過した 6:40 を過ぎてから、沿岸方向の流速変動が顕著に現れ始めている。この沿岸方向の津波に伴う流況変動は、襟裳岬と霧多布岬との間の凹状の海岸においてトラップされた津波が沿岸方向に伝播する様子を示しているものと考えられる。
- ⑤ 今回の津波は、周期の長い空間的スケールの極めて大きな津波であったことが、流速変動ベクトルからよく理解できる。岸沖方向の極大流速の発生時刻を見ると、5:14 頃、5:41 頃、6:19 頃、6:42 頃、7:15 頃というように、それぞれの発生間隔は、27 分間、38 分間、23 分間、33 分間であり、概ね 30 分程度となっているようである。

4. 3 被害状況²⁾

4. 3. 1 現地調査の概要

港湾空港技術研究所では、地震発生直後から北海道開発局および独立行政法人北海道開発土木研究所と連携をとりつつ、北海道沿岸において現地調査を実施した。津波の調査に当たっては、大きな津波の来襲が報告された北海道南部から釧路方面へ北上する行程をとった。津波の現地調査を行った場所を図 4.6 に示し、調査者および行程をつぎに示す。

期 間：平成 15 年 9 月 26 日～9 月 29 日

調査者：富田孝史、河合弘泰

行 程：26 日夕刻、とちち帯広空港着、浦河
へ移動

27 日、浦河港、様似漁港、十勝港

28 日、大津漁港、釧路港

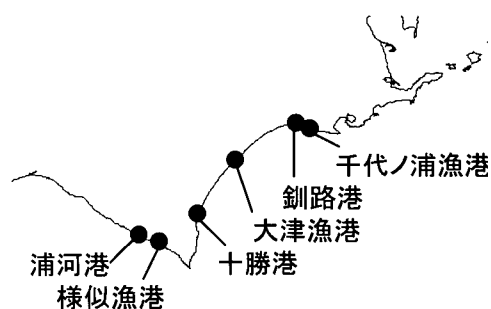


図 4.6 現地調査の位置

29日、釧路港、釧路貯木場、千代ノ浦漁港、釧路空港発

現地調査では、北海道開発局の各港湾建設事務所や住民等へのヒアリング、津波の痕跡高さの測量、検潮資料等の収集および確認を行った。測量は、ハンドレベルと測量ポールを使って、測量時における海水位を基準に行った。基準とした海水位は、最も近い検潮所における調和定数³⁾を使って算出した推定天文潮位により T.P. 基準の高さに換算した。

4. 3. 2 浦河港および様似漁港

浦河港の概略を図 4.7 に示す。浦河港においては、地震に起因したエプロンの沈下、防波堤消波ブロックの沈下などの被害があったものの、津波による施設被害はなかった。さらに、港内にいた漁船も地震直後に避難したために、被害は無かったようである。

しかし、写真 4.1 に示すように岸壁上に泥や砂などがあるところから判断すると、津波は岸壁上にまで達したと考えてよい。当時の目撃者による「港内の物揚場に駐車中の自動車が津波によって浮き港内に落下しそうになった」という話からも、陸上に数十 cm 程度の浸水があったことが推察できる。ただし、近隣の建物などには特に水跡などの痕跡を見つけることができなかった。浦河港内における検潮所での記録では、津波の高さは 1.3m であったので、天文潮位に加えて、この程度の高さの津波が T.P.+0.9m の天端高の岸壁に來襲したと仮定すれば、岸壁上 0.25m 程度の浸水深となる。これは岸壁には泥が残る一方、建物には浸水の痕跡がないことから、検潮所で観測された津波とほぼ同じような高さの津波が岸壁に押し寄せたと推察される。

浦河港よりも東に 13km ほど離れた様似漁港においては十分な調査時間が無いこともあって、水跡などの津波の痕跡を見つけることはできなかった。参考として岸壁の高さを測ったところ、T.P.+1.3m であった。

4. 3. 3 十勝港

十勝港における痕跡調査結果のまとめを図 4.8 に示す。十勝港においては、港全体にわたって所々に泥や水たまりが残っており津波による浸水があったことが推察され、

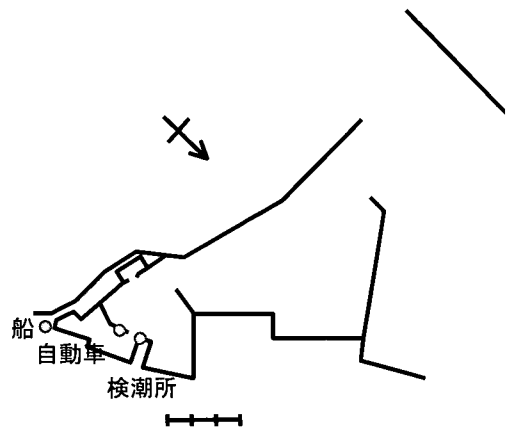


図 4.7 浦河港の概略



写真 4.1 浦河港の岸壁上の泥

場所によっては床上浸水しているところがあった。また、北海道開発局十勝港湾建設事業所の職員の確認によると、港内の第3埠頭にある検潮所の記録では5時24分に3.63mの最大潮位を記録し、そのときの推定天文潮位が1.1mであるので、津波の高さとしては2.53mであった。

第3埠頭には砂や泥が残っており、さらに埠頭直背後の港湾関連用地にある倉庫の壁に水跡が残っていた(写真4.2)。倉庫の位置における地盤高はT.P.+2.25m、そこから0.65m上のT.P.+2.90mに水跡がある。最大潮位を記録した時刻の調和定数に基づいた推定天文潮位からの高さは約2.66mである。この倉庫周辺には建物が建て込んでおらず、隣接した建物により津波が収れんして高くなった、あるいは逆に建物の陰になり津波が低くなったというようなことはないと思われるため、浸水高さは検潮所における津波の高さと概ね同じであるが、岸壁前面では検潮所で観測された津波の高さよりも若干高めになっていたと推察される。

十勝港の最も奥にある水産関連の区域では、漁協施設の床上0.17mまで浸水した(写真4.3)。これは、測定の結果T.P.+2.45mであった。さらに、漁協施設の玄関には、家内の浸水高さよりもさらに0.05m高いところに水跡が残っており、この高さは第3埠頭における浸水高さよりも0.40m低い。この場所は、前出の図4.8に見られるように漁業埠頭により狭窄部が前面水域に形成されており、そこで津波の勢力が弱められ

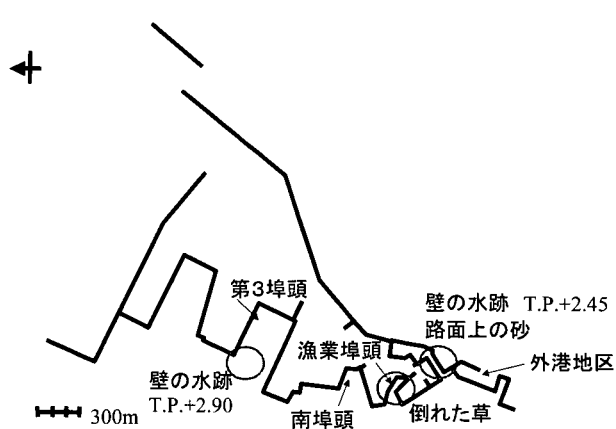


図 4.8 十勝港における痕跡調査結果のまとめ

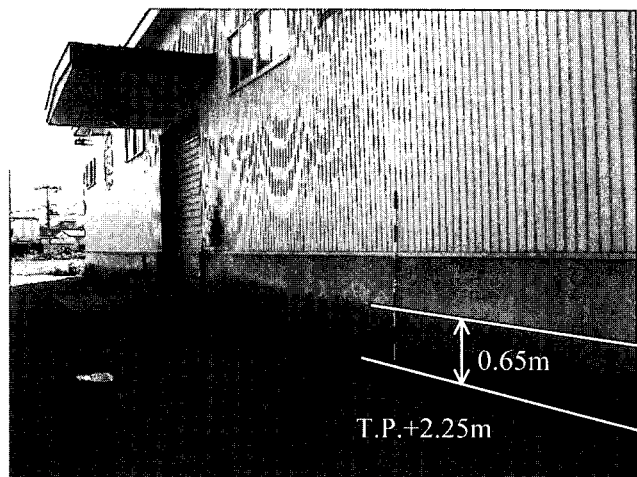


写真 4.2 倉庫の壁に残る水跡

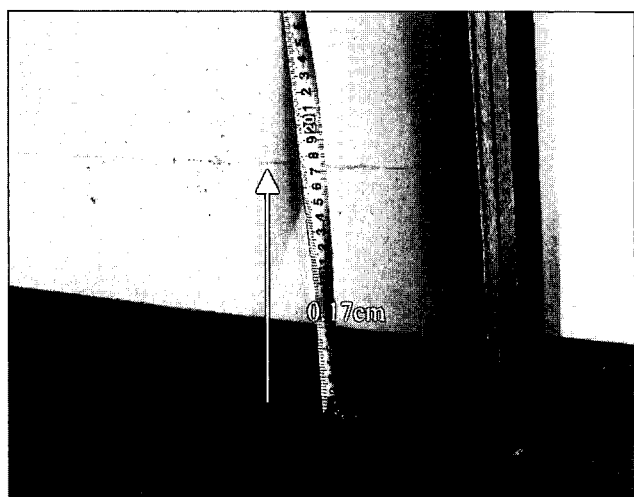


写真 4.3 漁協施設における床上浸水の痕跡

ることにより津波の高さが低くなったものと推察される。ただし、港内における津波の挙動を解明するためには、詳細な数値計算を行う必要があり、これは今後の課題とする。

巨大津波による船舶、自動車、コンテナなどの流出およびそれによる2次災害の発生が懸念されているが、今回の津波においてもそれが発生している。静的状況を仮定すれば、20ftコンテナの場合、中身が空であれば約0.2mの浸水深でコンテナは浮き上がる。

4.3.4 大津漁港

図4.9に、大津漁港における浸水状況のまとめを示す。図中の数値は、T.P.を基準とした浸水高さである。大津漁港の最奥部は、1/10程度の勾配の斜路になっており、その上部の船揚場に多くの船が上架されている。これらの船が津波により流出・漂流した。その一部は船揚場の脇にある建物に衝突しそうなったとの証言もある。その建物や隣接する倉庫には写真4.4に示すようにはっきりと水跡が残っており、その高さは地面上1.55m、T.P.+3.15mであった。また、これらの前面にあるロッカーにも水跡が残っており、その高さはT.P.+3.25mと背後の建物等の痕跡よりも若干高くなっている。

船揚場の背後には草原が広がっており、そこには写真4.5~4.7に示すようにロープの切れ端、ビニル袋、緑の草が樹木などに引っかかっていた。これらの高さは、それぞれT.P.+2.7m、T.P.+3.0mおよびT.P.+3.4mである。津波による流出物が樹木に引っかかったものであるため、最大浸水深を示しているとは限らないが、少なくともこの高さまでは浸水したことを示している。とくに、写真4.7に示した樹木上の緑の草は、前出の写真4.4の建物に残った痕跡の高さよりも高くなっており、我々が大津漁港内で見つけた痕跡のなかで最も高いものである。

浸水高さは、漁港奥部から港口部に向かうにつれて低くなっている。前出の図4.9に示した漁港屈曲部辺りの岸壁上に置かれていた多くの魚礁ブロックには

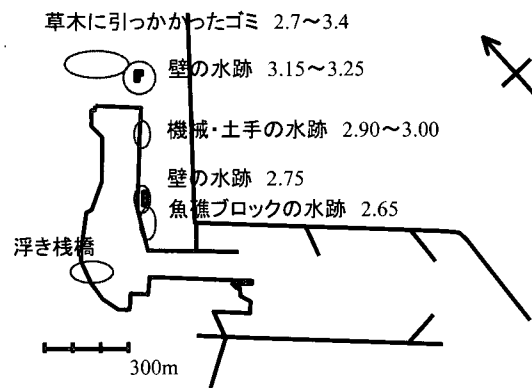


図4.9 大津漁港における痕跡調査結果のまとめ



写真4.4 大津漁港奥部における痕跡



写真 4.5 草に掛かったロープ



写真 4.6 樹木に掛かったビニル片

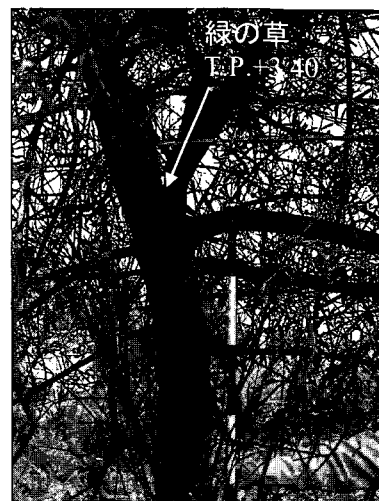


写真 4.7 樹木に掛かった緑の草

T.P.+2.65m の高さに一様に水跡が残っていた。この高さは、漁港奥部の建物に残っていた痕跡高さよりも 0.5m 低い。

以上の痕跡の高さから大津漁港内における津波の高さを推定すると、推定天文潮位よりも最奥部では 2.9~3.1m 程度であり、そこから港口部に向かうにつれて高さは低くなって、ブロックがある漁港屈曲部辺りでは、2.4m 程度であったと推察される。こうした港の奥に向けて津波高さが増大する傾向は、港内における共振の現われであろうと思われる。

4. 3. 5 釧路港

図 4.10 に釧路港における津波の痕跡調査結果のまとめを示す。西港区では、埠頭上の倉庫などの壁には水跡は認められず、大きな浸水は起こっていない。これは埠頭の天端高が高いためである。しかし、現場における関係者の証言によると、第 2 埠頭と第 3 埠頭でエプロンの途中まで浸

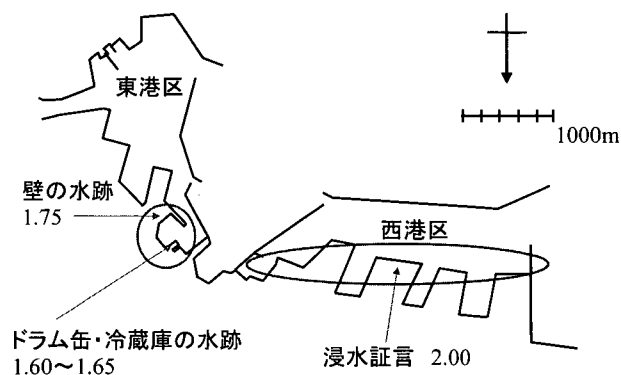


図 4.10 釧路港における痕跡調査結果のまとめ

水があったとのことである。その証言位置における岸壁天端高は T.P.+1.80m であり、海水到達位置は T.P.+2.00m である。岸壁天端上約 0.2m の浸水があったことになる。

一方、東港区では大きな浸水箇所があった。特に東港区の奥部では岸壁の高さが低いところで T.P.+0.95m であり、その辺りで 3 段横積みされたドラム缶の 1 段目（写真 4.8）やその周囲に水跡が残っており、その高さは T.P.+1.60~1.65m であった。お

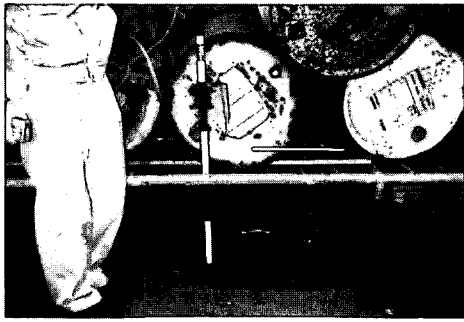


写真 4.8 ドラム缶に付いた水跡



写真 4.9 倉庫の扉に付いた水跡

よそ 0.7m の浸水深になる。物揚場辺りにおける岸壁天端高は T.P.+1.25m であり、写真 4.9 に示すように物揚場背後の倉庫の扉には T.P.+1.75m の高さに水跡が残っていた。ここでも約 0.5m の浸水深である。こうした浸水は臨港道路にまで達し、道路を冠水させた。

4. 3. 6 千代ノ浦漁港

釧路港から約 3km 東に離れた所にある千代ノ浦漁港の奥部には斜路があり、その上に幾つもの漁船が上架されていた。漁師の話によると船舶が津波によって動かされた様子は無かったとのことであった。しかし、斜路に接続する物揚場の上端にはゴミや海草などが線をなして残されていた。おそらくこの辺りまで海水が遡上したと考えられる。この高さは T.P.+1.90m である。この高さで上架中の船舶との関係を調べてみた結果、海水は船底辺りまでしか達しておらず、このため津波によって船舶が浮き上がって漂流するようなことがなかったと推察される。さらに、この漁港に隣接する海岸には、丸太が打ち上げられており、その打ち上げ高さは、目視によると漁港内の遡上高と概ね一致している。

4. 3. 7 丸太の流出

旧釧路川の河口近くにある貯木場から丸太が流出している。地震後2日たった調査日には、釧路川には丸太は残されていなかったが、支流の別保川の浅瀬に残されていた(写真4.10)。津波による数回の押し引きによって、丸太は支流に入り込み、浅瀬にトラップされたと考えられる。特に、水門をふさぐように丸太が残されていることから、丸太が流出した際には、丸太が水門に直接ぶつかりこれを破壊するような危険性も十分に考えられる。

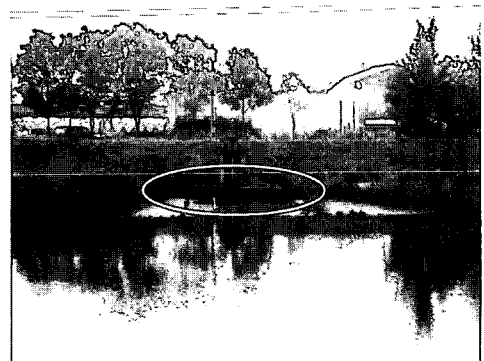


写真 4.10 貯木場から流出し別保川に取り残された丸太

4. 4 数値計算から見た津波の特性²⁾

4. 4. 1 計算手法

(1) 数値モデル

数値計算に使用した数値モデルは平面 2 次元の非線形長波方程式を基礎方程式としたモデルであり、空間的にはスタッガード・メッシュ、時間的にはリーブフロッグ法を使用し、現状の津波計算において使われる最も一般的なモデルである。また、今回の数値計算では、海岸に無限高さの鉛直壁を仮定し、陸上への遡上は考慮していない。このため、浸水が実際に発生したような所では津波の高さを過大評価する可能性があるが、とくに北海道の海岸では崖になっているような所も多いため、こういったところでは適用可能であると考えられる。

(2) 計算格子

水深データは、日本海洋データセンター (JODC)⁴⁾ が公開している 500m 格子上的水深データを使用し、これを 600m 格子に再合成した。再合成する際に、北緯 41°、東経 144° を原点にして、東を x 方向、北を y 方向とする直角座標系に変換した。計算領域は、概ね北緯 38° から北緯 46°、東経 136° から 148° の範囲であり、格子数は 1070×1102 である。

(3) 計算時間

数値モデルは陽解法であるのでタイムステップ Δt は、CFL 条件の制約を受ける。今回の計算では、CFL 条件を満足する、 $\Delta t=1s$ に固定した。

総計算時間は、釧路港において地震発生から 9 時間半たった後でも 1m 程度の津波が観測されたことを考慮して、9.7 時間にした。

4. 4. 2 断層モデル

今回使用した津波の数値モデルでは、表 4.2 に示した山中・菊地あるいは国土地理院による断層モデルを使い、Mansinha and Smylie⁵⁾ の方法を使って海底面の変位を計算し、これと同じ変位を海面に与える。この海面の変位が津波の初期波形となり (図 4.11)、後は重力の作用によって周囲に津波が伝播する。なお、初期波形は地震発生と同時に起こることを仮定しているが、海水の移動現象である

表 4.2 断層モデル

断層モデル	山中・菊地モデル	国土地理院モデル
緯度(deg)	41.78(震央)	42.12
経度(deg)	144.079(震央)	144.55
長さ(km)	90	85.7
幅(km)	70	83
深さ(km)	25	19.7
走向(deg)	230	231
傾斜角(deg)	20	21
すべり角(deg)	109	110
すべり量(m)	2.6(平均) 5.8(最大)	5.19

津波を計算するには、これは良い近似である。

最近では、断層内におけるアスペリティを考慮して断層内を空間的に細かく分割してそれぞれにおいてすべり量を設定する断層モデルも提案されるようになってきており、今回の地震についても提案されている。しかし、筆者らの数値計算では、津波の広域的な特性を捉えることを主目的として、断層は一様にすべると仮定した断層モデルを使用した。

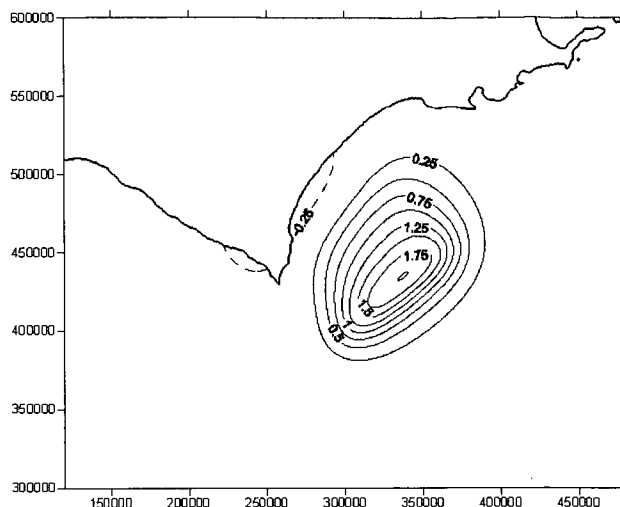


図 4.11 津波の初期波形の例（国土地理院による断層モデルを使用）

4. 4. 3 観測結果との比較

(1) 水位波形の比較

図 4.12 に北海道太平洋沿岸および東北地方で観測された津波と数値計算結果との比較を示す。図中、OBS が観測結果であり、厚岸、十勝、青森、室蘭、八戸、仙台新港がフース型検潮器、十勝港沖、苫小牧港沖、久慈港沖、釜石港沖および石巻港沖が海象計、大船渡港外が水圧式波高計により計測された結果である。また、GSI および Y&K は、それぞれ国土地理院および山中・菊地による断層モデルを使って計算した結果を示している。各図の横軸は地震の発生した 4 時 50 分からの経過時間を分単位で示している。2つの計算結果を比較してみると、すべり量の小さい山中・菊地モデルによる結果の方が全体的に津波による水面変動は小さくなっている。

観測結果と比較してみると、襟裳岬よりも東側の北海道沿岸では、厚岸で山中・菊地モデルによる結果が観測結果と概ねよく一致しており、国土地理院モデルの結果は若干大きめになっている。十勝港沖（大津漁港沖）では国土地理院モデルの結果は観測結果よりも 1.5 倍程度大きく、山中・菊地モデルの結果は逆に小さい。十勝では、山中・菊地モデルの結果は小さくなっているが、国土地理院モデルの結果は観測結果とよく一致している。特に、第 1 波目が最大になっていることや、地震発生から 200 分程度後に現れた 1m 程度の津波が再現できている。ただし、最大値が出現したのは観測結果では地震後 34～35 分後であったのに対し計算では 29 分であるので、計算の方が約 5 分早くなっている。襟裳岬の西側の苫小牧港沖では、国土地理院モデルおよび山中・菊地モデルの両結果ともに観測結果とよく一致しており、特に地震後 200 分頃に最大波が出現することが再現できている。東北地方沿岸では、山中・菊地モデルによる結果の方が、観測結果を比較的よく表現している。ただし、室蘭や仙台新港では、2つの計算結果はともに過小評価となっている。

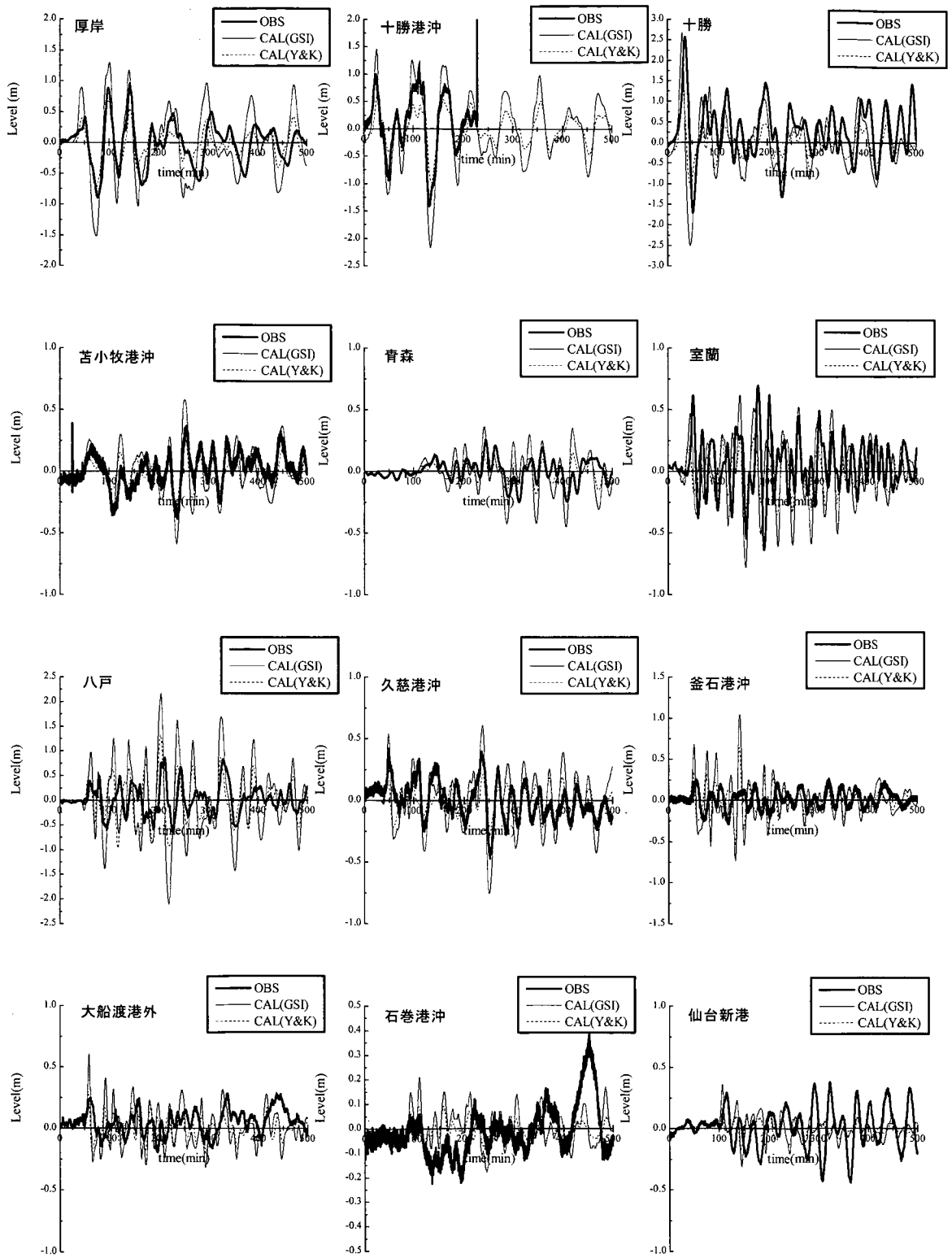


図 4.12 津波波形に関する観測結果と計算結果の比較

以上のように、どちらの断層モデルが観測結果をうまく表現しているかということはいきなりは言い難いが、港内においては、4. 2. 5で述べたように、港内の地形に伴った共振が発生するため、港内地形を再現していない今回の数値計算モデルとの比較は必ずしも適当でない。例えば、重複波の腹に近いところでは港外の津波よりも大きな津波になり、逆に重複波の節に近いところでは水位変動は小さくなるものの流速が速くなる。このため、港内における津波の挙動については、港内地形を取り入れた数値計算を行う必要があり、今後の課題とする。

(2) 流速波形の比較

図 4.13 は、十勝港沖における水位と流速の絶対値（x 方向流速の自乗と y 方向流速の自乗の和の平方根）の時間変化を示したものであり、国土地理院モデルによる計算結果を併記している。

永井・小川¹⁾ は、十勝港沖の海象計と水圧計による水位データを詳細に検討したところ、地震の前後で水位差が 10cm 程度認められていることから、海底地盤の沈下あるいは観測機器の架台の沈下の可能性を指摘している。こういった変動があれば、観測機器の向きが変わってしまった可能性も否定できないので、その影響が現れない流速の絶対値の変化について検討する。図に示されるように、計算結果は観測結果の定性的な特性を非常によく再現しており、第 1 波目においては、定量的にも良い一致が認められる。

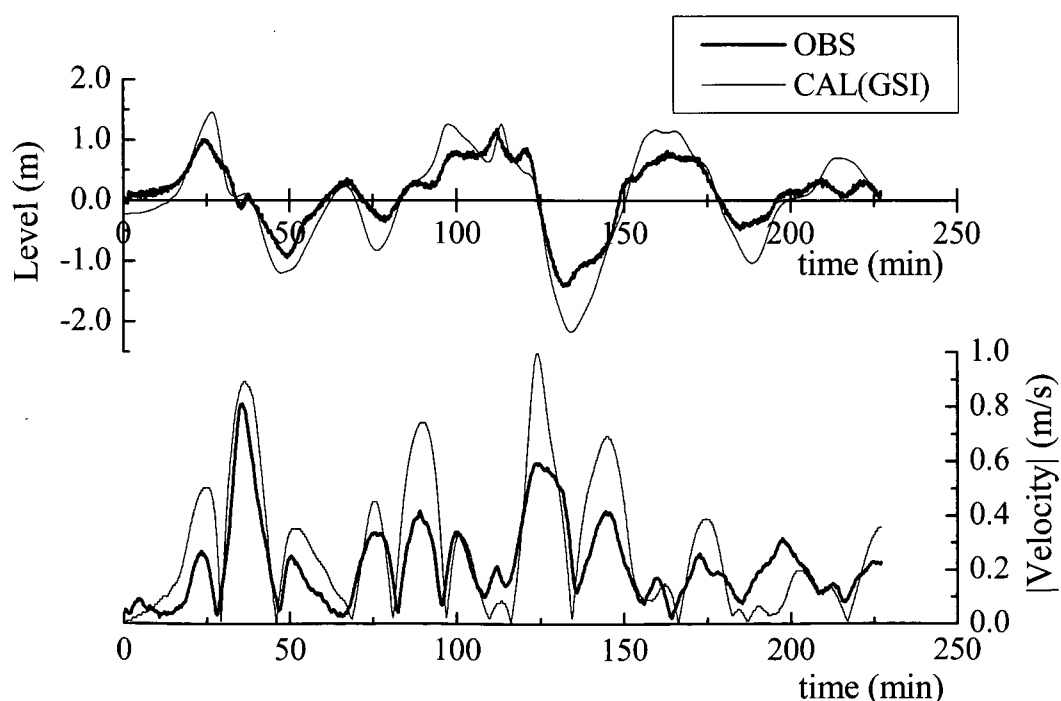


図 4.13 十勝港沖における水位と流速の絶対値の時間変化

水位と流速の絶対値の変動特性における主要な特徴としては、水位が正の値から負の値に変わるときに流速の絶対値が大きくなることがあげられる。この特徴は重複波の特徴である。一方向に進む波が壁により反射されて壁面前面にできる重複波の場合では、微小振幅波理論によると、重複の腹の位置では水位変動が大きくなり、水平方向流速は 0 になる。逆に、重複の節の位置では水位変動が 0 になり、水平方向流速が大きく変動する。こういった特性はよく知られているが、その間の位置では図 4.14 に例示するように、水位が正の値から負の値に変わるときに大きな流速が発生する。現象としては、負の流速により水が流出するのに伴って水位が低下することを示している。ただし、単純な重複波の場合には、水位が負の値から正の値に変わるときにも大きな流速がでるが、十勝沖の観測値および計算値ともにそれは顕著には認められない。実現象における津波の挙動の複雑さが現れている。

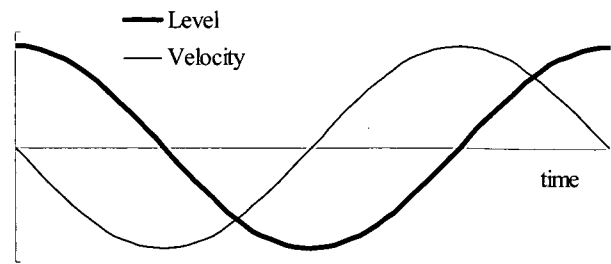


図 4.14 重複波における水位と流速の関係のイメージ(壁から 8 分の 1 波長離れた位置)

4. 4. 4 十勝沖（大津漁港沖）の津波

十勝沖における水位、x 方向および y 方向流速の時間変化を図 4.15 に示す。この図にも観測結果を併記しているが、その際、観測した南北方向流速と東西方向流速の変化傾向が計算結果と概ね一致するように、観測機器の向きを西側に 40° 回転させている。この仮定が正しいか否かは今後の調査結果を待たなければならない。

数値計算の結果を基にすると、十勝沖の状況は以下のように推察できる。

① 第 1 波目の押し波時（25 分程度まで）

- ・ 水位の上昇時には、ほぼ同じような位相で、西向きの流れ（負の X-Vel）が大きくなっている。一方、南北方向流速（Y-Vel）は大きくない。これらのことから、押し波の津波は進行波として東から沿岸に襲った。

② 第 1 波目の引き波時（46 分程度まで）

- ・ 流れが東向きに大きくなるに伴って水位は低減し、流れが西向きに反転する頃に最低水位になっている。これは、進行波ではなく前述した重複波の特性である。観測点は岸から約 5km 離れた水深 23m の所にあるため、周期 1 時間程度の津波（平均水深 11m のとき波長は約 37km）に対しては、約 1/7 波長しか岸から離れていない。岸で反射された津波は約 9 分で観測点に戻ってくる。このため、第 1 波目のピークを過ぎた頃には反射波の影響が現れ始めることになる。

③ 110 分程度まで

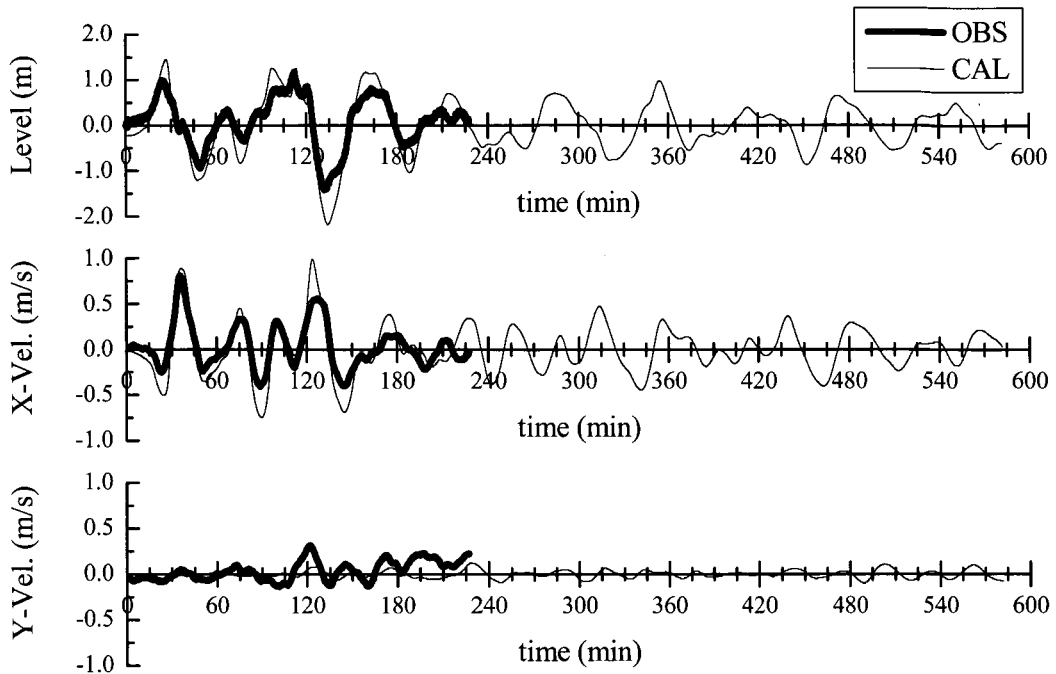


図 4.15 十勝沖における水位と水平 2 成分流速の時間波形

- ・ 流れが西向きの際には水位は上昇し、東向きの流れになると水位は下降する特性が全体にわたって認められる。
- ・ ただし、75～81 分の間は、東向きの流れであるにもかかわらず水位は上昇しており、さらに東西方向流速と水位はほぼ同位相で変化している。これは進行波の特性である。これらの変化特性は、第 1 波目と同様に第 2 波目の反射波が自分自身と干渉しただけでなく、他の波、すなわち離れたところで反射された津波、が混入していることを表していると思われる。

④ 110 分以降

- ・ 南北方向の流速成分が出現し始める。すなわち、沿岸方向に伝達する津波が発達し始めたことを示している。
- ・ 特に、130 分程度までは、強い東向きの流れと弱い北向きの流れがあり、水位が急激に低下している。これは、南方の海岸で反射された津波が北東向きの流れを発生させ、さらに近隣の海岸で反射された津波が南東方向に伝播することから生じたものと思われる。
- ・ それ以降は、60～70 分程度の時間スケールを持った水位変動が続くのに対し、東西および南北方向の流速変動の時間スケールはそれよりも小さく、さらに変動幅も小さい。このことは、近隣、南方、および北方の海岸で反射された津波が複雑に干渉しあっていることを表していることを示していると思われる。

4. 4. 5 釧路の津波

図 4.16 は、国土地理院の断層モデルを使った数値計算から得られた、釧路における水位および水平 2 成分流速の時間波形である。観測値による最大偏差は、9 時 6 分の 1.22m である（前出の表 4.1 参照）。数値計算では、最大偏差は地震から 255 分後の 9 時 5 分に 1.55m となっている。偏差は若干大きいが出現時刻は観測結果とよく一致している。また、釧路では、14 時 22 分の満潮時に 1m 程度の高さの津波が重なって最高潮位を記録しているが、数値計算においても 573 分たった 14 時 23 分に 0.80m の津波が出現している。

流速は、震源との位置関係や周辺の海底地形の影響から南北向きが卓越しているが、多くの場合、北向き流れ（正の Y-Vel.）の時には東向きの流れ（正の X-Vel.）、南向きの流れの時には西向きの流れが発生していることから、北から少し東-南から少し西方向の流れになっている。南から少し西向きの流れの場合には、釧路から海水が流出するので水位は下降し、北から少し東に流れが変わるときに水位は極小になる。一方、北から少し東向きの流れの時には水位が上昇するが、流れが反転する前から水位が低下し始める場合が多い。

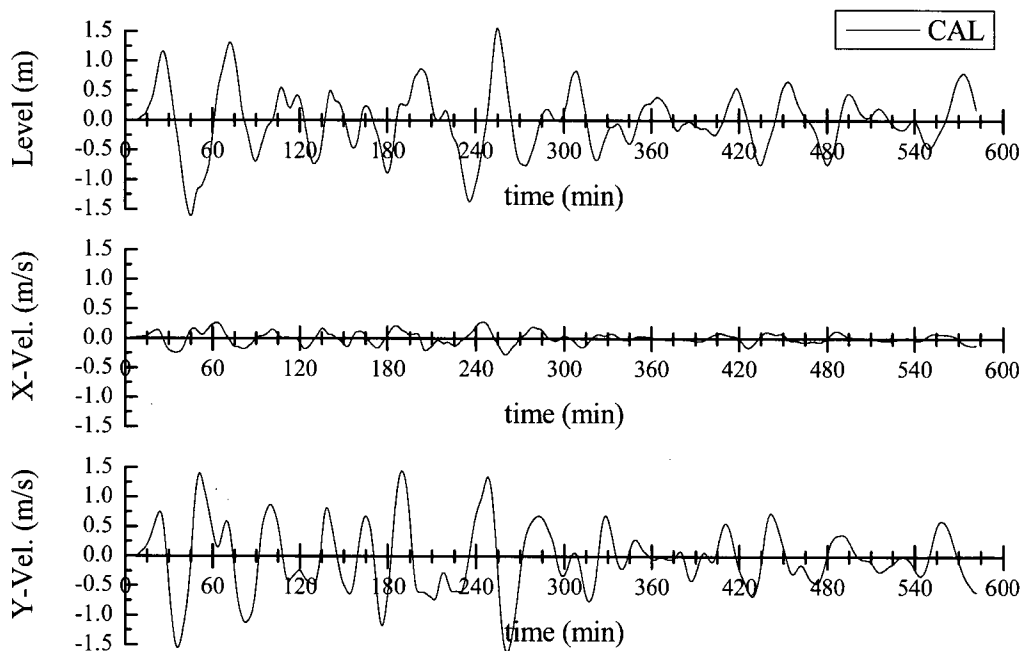


図 4.16 釧路における水位および流速の時間変動

4. 4. 6 最大津波高さの分布

図 4.17 に、津波高さの最大値の空間分布を示す。前述したように港湾等の詳細な地形を再現できない 600m 格子の計算結果であるので、港湾内などで観測された津波高さ

とは異なることに注意が必要であるが、津波の広域的な特性はこれにより議論できよう。

図によると、襟裳岬の東海岸で3mを超える津波高さになっており、海岸に沿って北上するにつれて高さは低くなっていく傾向がある。

高い津波が押し寄せた襟裳岬の東側の中でも最も高いのは、十勝港よりも5km程度南にある美幌辺りであり、津波の高さは4.0mである。この位置は若干凹状の地形になっているため隣接地域よりも高くなっているが、隣接地域においても3.5~3.8mの高い津波が計算されている。こういった高い津波は、美幌の南側で海側に張り出した地形が影響していると考えられる。なお、現地調査において4m程度の津波の遡上が見つかった百人浜でも2.8mの津波高さになっている。

また道東部においては、霧多布において3.8mの津波高さになっている。ただし、今回用いた水深データでは霧多布の南側にあるけん暮帰島がないため、これによる遮蔽効果が反映されていない。この島を考慮することによって霧多布の津波高さはもう少し低くなるのではないかと予想される。

北海道南西沖地震の際には奥尻島の南側の岬を津波が屈折して島の反対側にも高い津波が押し寄せたが、今回の津波では襟裳岬西側の歌別辺りまでは1.5m程度の津波高さになっている。それよりも西側ではえりも町旭辺りなどで地形性の影響で3.0mの高さになるところも出現している。

東北地方においても、地形の影響で津波の高さは局所的に変化しており、高いところは岩手県野田湾の奥で1.9m、久慈湾で1.7mである。

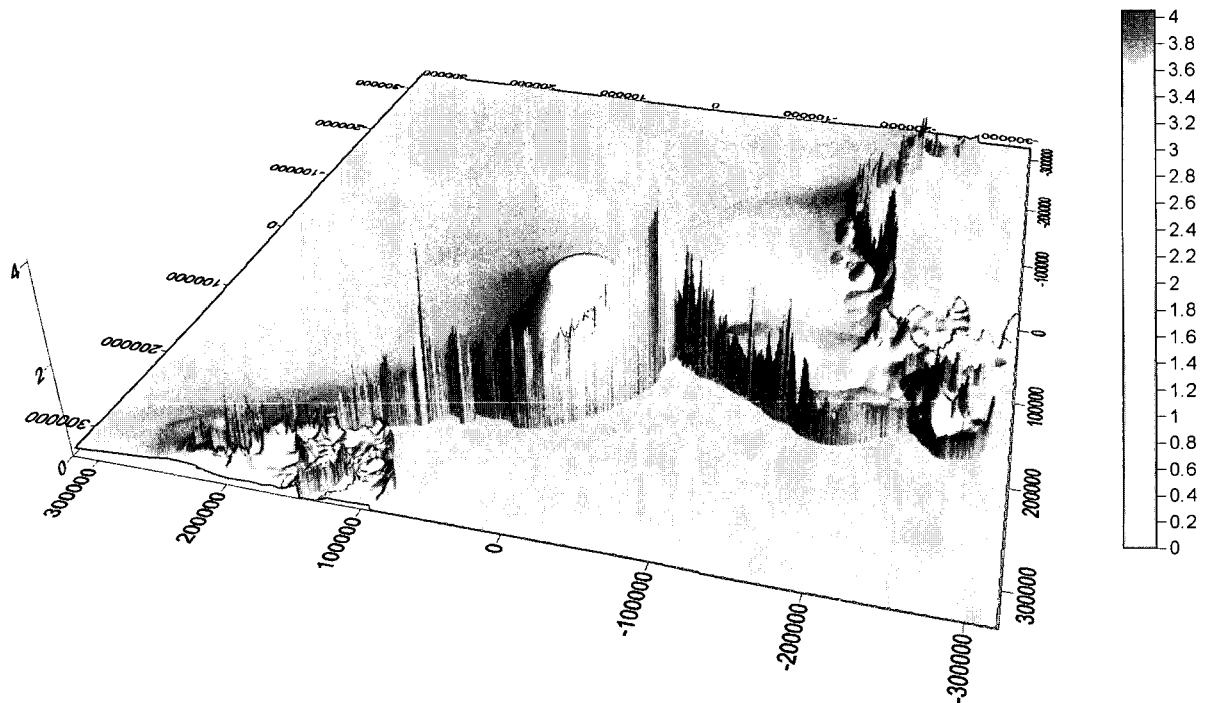


図4.17 計算された最大津波高さの分布

4. 5 情報伝達・避難体制

4. 5. 1 津波警報等の発令状況

地震発生が4時50分。4時56分に気象庁から北海道太平洋沿岸東部及び北海道太平洋沿岸中部に津波警報が、北海道沿岸西部、青森県日本海沿岸、青森県太平洋沿岸、岩手県、宮城県、福島県に津波注意報が発令された。発令時刻、津波警報から津波注意報に切り替えられた時刻、これらの通報が解除された時刻を図4.18に示す。

津波が比較的大きかった北海道太平洋沿岸中部・東部では、4時56分に津波警報が発令され、9時に津波注意報に切り替えられ、18時30分に津波注意報が解除された⁶⁾。

一方、北海道沿岸部への津波の到達は、震源に近い十勝港では地震発生後数分で潮位の上昇が観測され、釧路港で5時6分、浦河港で5時7分に第1波が観測され、数分から10数分で海岸まで達している。今回の津波の特徴として、最大の津波高さが遅れて観測されている地点が多いことと津波継続時間が長かったことがあげられる。警報等の解除までの時間が比較的に長かったことは、津波の観測結果からも伺われる。

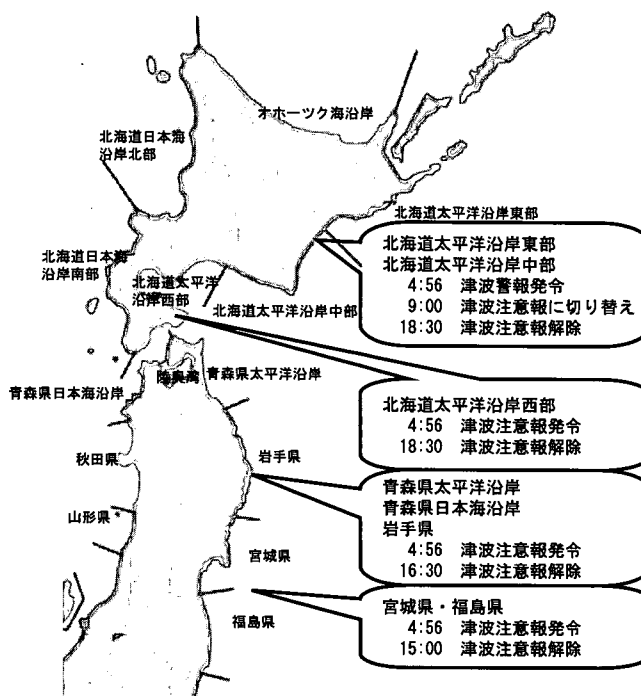


図4.18 津波警報・津波注意報の発令状況^{6)、7)}

4. 5. 2 情報伝達・避難体制

津波警報等の発令後、自治体から住民への避難勧告の発令の有無、発令時間、解除時間がそれぞれの自治体で異なっていたことが指摘されている。表4.3に示すように避難勧告が出された最も早いところで5時00分、多くの自治体が5時台の前半である。また、一部避難勧告を発出しなかった自治体もあった。解除時間は、多くが津波注意報に切り替わった9時以降の9時台から10時台であるが、津波警報発令中の9時前に解除した自治体もある⁸⁾。

この点については、既に総務省消防庁から各自治体に向けて、津浪対策に関する地域防災計画の修正、浸水予測図の作成と避難対象地域の把握等避難対策の改善、強化を図る旨通知されている⁹⁾。避難勧告を行った自治体数は、北海道で14(内2自治体はそれぞれ2地区で勧告)、岩手県で1である。北海道の14自治体で津波に対する勧告対象は、13,731世帯35,740人であったが、実際に避難した住民は6,206人と北海道庁により集計されている。これ以外に9自治体で982人が自主避難している⁸⁾。

表 4.3 北海道における避難勧告・発令時刻

避難勧告発令時刻	自治体数	避難勧告解除時刻	自治体数
5:00- 5:10	5	8:30- 9:00	3
5:10- 5:20	4	9:00- 9:30	11
5:20- 5:30	2	9:30-10:00	0
5:30- 6:00	2	10:00-10:30	0
6:00- 6:30	1	10:30-11:00	1
6:30 以降	2	11:00 以降	1(17:00)
合 計	16	合 計	

(注1)複数地区で発令している自治体は、地区毎に計上した。

(注2)参考文献8)より作成。

上述のように今回の津波では、早いところでは数分程度で第1波が到達しており、釧路、浦河でも10数分で到達している。避難勧告が発令された時点で既に津波が到達していたところが多い。住民への情報伝達のより一層の迅速化を図ることはもちろんであるが、地震発生後あるいは避難勧告発令後直ちに住民が避難行動に移れるように、予め避難場所や避難ルートを周知しておくことが不可欠である。このための手段として住民も参加した形で津波ハザードマップを作成し、周知を図ることが有効な手段である。また、ハザードマップは住民それぞれが自分の住む場所のリスクを理解することや、自治体が避難勧告等を出す対象となるエリアをよりきめ細かく設定する上でも重要な役割を果たす。しかし、ハザードマップの作成には浸水シミュレーションの実施など高度な技術的知見と多額のコストを要し、一自治体のみで対応しがたい課題であり、広域的な津波シミュレーションデータの提供など国としての技術的支援を強化することが必要であると考えられる。

筆者のうちの1人が直接ヒアリングした自治体の対策から今後の参考になる事例を示す。

- (1) 防災無線の受信機を全戸に設置し、住民への同時通報体制が整っていたことが有効に働いた。
- (2) 避難勧告の対象が小さなコミュニティであることから住民の相互協力による避難が可能であった。
- (3) 過去の津波の記憶・教訓を風化させない。

上記以外の課題として、避難勧告の発令が比較的長時間にわたり、避難勧告解除までに時間がかかるため、臨海部や港頭地区への立ち入りができず、救援活動の初動をどうするか、漁業者や立地企業からの立ち入りの要請にどのように対処していくのか等の課題が明らかにされた。

十勝川河口部で2名の行方不明者が発生した。地域住民への情報伝達については自治体間で対応が不統一であるという課題はあるものの、住民の意識も高く、避難は比

較的スムーズに行われた。今後、釣り客・観光客等海岸・沿岸利用者や来訪者に対する情報伝達手段の確立や情報伝達のあり方を検討することが必要である。

4. 6 まとめ

今回の津波の遡上高さは、十勝沿岸において高く 3m 程度であり、特に襟裳岬の東海岸では 4m である。一方、1952 年の十勝沖地震津波で高い遡上高さが記録された道東南岸では、2m 程度の遡上高さになっている。ただし、局所的な地形の影響を受けて 4m を超える遡上高さがあった。こういった津波により、港湾の岸壁等の低い地盤高のところで浸水が発生した。しかし、津波による防波堤や岸壁などの損傷は発生していない。その一方で、漁船の沈没や陸上への打ち上げが、十勝沿岸で発生した。

津波の継続時間が長かったことも、今回の津波の特徴の一つである。これは、十勝沿岸の弓形の地形に津波エネルギーが捕捉されたことによるものである。また、釧路港でも、周辺の沿岸地形に影響されて、地震発生から 10 時間近く経った後に 1m 程度の高さの津波が来襲し、それが満潮と重なって最高潮位を記録した。

こういった津波の特性は、断層が一様にすべる断層モデルを使った津波の数値計算により、北海道沿岸だけでなく東北地方沿岸を含めてよく再現できた。特に、1952 年の十勝沖地震津波と比較したところ、両津波において十勝沿岸の広尾や道東の霧多布は高い津波高さになるところであった。ただし、計算格子サイズの大きさよりも細かな地形変化による津波の収れんや港湾内の現象などは再現できないので、これは今後の課題としている。

参考文献

- 1) 永井紀彦・小川英明：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震津波波形の特性，港湾空港技術研究所資料，No.1070，92p.，2004.
- 2) 富田孝史・河合弘泰・柿沼太郎：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震津波による被害と津波の特性，港湾空港技術研究所資料，印刷中.
- 3) 海上保安庁：日本沿岸潮汐調和定数表，日本水路協会，1992.
- 4) 日本海洋データセンター：ホームページ <http://www.jodc.go.jp/>.
- 5) Mansinha, L. and D. E. Smylie, The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440, 1971.
- 6) 内閣府：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震について(第 22 報)(平成 15 年 10 月 15 日 19 時 00 分現在)，内閣府ホームページ <http://www.bousai.go.jp/>.
- 7) 気象庁：津波予報区について，気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/>.
- 8) 北海道総務部総合防災対策室防災課：「平成 15 年 十勝沖地震」対策・災害状況(第 23 報)，北海道ホームページ <http://www.pref.hokkaido.jp/>.
- 9) 総務省消防庁防災課長：平成 15 年(2003 年)十勝沖地震に関する津波避難対策の状況と今後の対策について(平成 15 年 10 月 9 日付け消防災第 190 号)，2003.