

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1082 June 2004

平成15年（2003年）十勝沖地震津波による被害と津波の特性

富田 孝史
河合 弘泰
柿沼 太郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
1.1 平成15年(2003)年十勝沖地震とそれに伴った津波の発生	4
1.2 津波被害に関する現地調査の概要	4
1.3 津波の数値計算の実施	4
1.4 用語の定義	4
2. 地震の規模と津波予報	4
2.1 断層モデル	4
2.2 津波予報	5
3. 津波に関する現地調査	6
3.1 調査方法	6
3.2 調査場所	6
3.3 浦河港および類似漁港	6
3.4 十勝港	8
3.5 大津漁港	9
3.6 釧路港	10
3.7 千代ノ浦漁港	11
3.8 丸太の流出	11
4. 津波の数値計算	11
4.1 計算手法	11
4.2 断層モデル	12
4.3 観測結果との比較	12
4.4 数値計算結果からみた津波の特性	15
5. まとめ	22
6. 今後の課題	22
6.1 防災上の課題	22
6.2 研究上の課題	23
謝辞	23
参考文献	23
写真等のまとめ	25

Tsunami Disasters and Tsunami Characteristics Due to the Tokachi-oki Earthquake in 2003

Takashi TOMITA*
Hiroyasu KAWAI**
Taro KAKINUMA***

Synopsis

The Tokachi-Oki Earthquake in 2003, whose magnitude was 8.0, occurred at 4:50, September 26, 2003 (Japan time) and caused a series of tsunamis. The tsunami struck the Pacific coasts in the Hokkaido and Tohoku regions and caused coastal flood in low-lying areas, resulting in containers and cars floated, especially in the Hokkaido region. There was, however, little serious damage of port facilities by tsunami attack. Victims by the tsunami were two people.

Immediately after this earthquake, the Port and Airport Research Institute (PARI) dispatched field investigation teams to the southeast coast in the Hokkaido. The Storm Surge and Tsunami Division in PARI investigated the characteristics of the tsunami run-up and damages, especially in port and harbor areas.

This report described the characteristics of this tsunami based on the results of the field investigations. Numerical simulations of the tsunami were also conducted using the fault models of the earthquake proposed until now, to obtain overall feature of the tsunami in the Hokkaido and Tohoku regions. Finally, we summarized the problems for disaster reduction and more detailed estimation of tsunami damage.

Key Words: tsunami, the Tokachi-oki Earthquake in 2003, field survey, numerical simulation, inundation height, tsunami height

* Head, Storm Surge and Tsunami Division, Marine Environment and Engineering Department
** Senior Researcher, Marine Environment and Engineering Department
*** Researcher, Surge and Tsunami Division, Marine Environment and Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5052 Fax: +81-46-844-1274 e-mail: tomita@pari.go.jp

平成 15 年(2003 年)十勝沖地震津波による被害と津波の特性

富田 孝史*
河合 弘泰**
柿沼 太郎***

要 旨

2003 年 9 月 26 日 4 時 50 分頃に発生した平成 15 年(2003 年)十勝沖地震(マグニチュード 8.0)によって引き起こされた津波が、北海道および東北地方の太平洋沿岸に襲った。特に、北海道では津波による床上浸水の被害が発生している。しかし、港湾施設には津波による大きな被害は発生しなかった。人的被害としては十勝川河口部で 2 名の行方不明者が報告されている。

港湾空港技術研究所は、地震の発生後すぐに北海道開発局等と連絡を取り、構造震動研究室および高潮津波研究室は連携をとりながら現地調査チームを派遣し、津波に関しては高潮津波研究室が調査に当たった。津波調査では、津波の遡上高さや被害が測量やヒアリングにより調査された。

本報告は、これらの現地調査による津波の調査結果を主体として、今回の津波の特性を調べたものである。さらに、現状で報告されている断層モデルを使って津波の数値計算を行い、広域的な視点から津波特性についても検討した。津波の遡上高さは十勝沿岸において高く、十勝港では T.P.+2.5m を超え、大津漁港では T.P.+3.0m を超えた。こういった津波の特性を数値計算は再現できた。また、最後により詳細な被害推定を行うための今後の課題についても取りまとめた。

キーワード：津波，平成 15 年(2003 年)十勝沖地震，現地調査，数値計算，痕跡高さ，津波高さ

* 海洋・水工部高潮津波研究室長

** 海洋・水工部主任研究官(防災評価担当)

*** 海洋・水工部高潮津波研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5052 Fax：046-844-1274 e-mail: tomita@pari.go.jp

1. まえがき

1.1 平成 15 年(2003 年)十勝沖地震とそれに伴った津波の発生

2003 年 9 月 26 日午前 4 時 50 分頃に襟裳岬から東南東に約 80km 離れた海底(気象庁の発表によると、北緯 41.78°, 東経 144.079°, 深さ 42km)で発生した平成 15 年(2003 年)十勝沖地震はマグニチュード 8.0 の大地震であった。一般的に日本近海の海底で大きな地震があると津波が発生し、わが国沿岸に押し寄せる。このときも津波が北海道の太平洋沿岸を主として来襲し、東北地方の沿岸にも達した。

地震の発生した当日から大学、気象庁等の多くの機関により現地調査が行われ、北海道大学の調査団が襟裳岬の東側に位置するえりも町百人浜で 4m 近い津波の遡上高さを発見している。また、その後の気象庁の再調査により厚岸の末広で 4.2m の津波遡上があったことが報告されている。

この津波による被害としては、漁船の打ち上げや沈没、自動車の海中への転落、コンテナの流出、生け簀などの損傷、浸水、および十勝川河口付近における 2 名の釣り人の行方不明が報告されている。しかし、津波の直接的な作用による港湾の施設の大きな被害は発生していない。

1.2 津波被害に関する現地調査の概要

港湾空港技術研究所では、地震直後から国土交通省港湾局、北海道開発局やマスコミによる被害状況等の情報から、地震や津波の実態および被害に関する迅速な現地調査が可能であると判断して、北海道において現地調査を実施した。調査に当たっては、国土交通省港湾局、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絡をとりつつ、津波調査は高潮津波研究室が実施した。

主要な調査ポイントは事前に検討していたが、現地での情報も参考にしながら、最終的には以下に示すようなポイントで津波に関する現地調査を行った。現地調査の構成員および行程を以下に示す。

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，とから帯広空港着，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

29 日，釧路港，釧路貯木場，千代ノ浦漁港，釧路空港発

調査においては、北海道開発局の港湾建設事務所および事業所、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、確認を行った。

なお、その後、土木学会が実施した以下の現地調査にも職員を派遣している。

期 間：平成 15 年 10 月 4 日～10 月 5 日

調査者：津波調査班のみ示す。

藤間功司(防衛大学校助教授)，小田勝也(国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部沿岸防災研究室長)，安田浩保(北海道開発土木研究所環境水工部河川研究室)，柿沼太郎(当所職員)

行 程：4 日，十勝港，大津漁港

5 日，十勝川河口，襟裳岬周辺

1.3 津波の数値計算の実施

今回の津波の広域的な特性を検討するために数値計算を実施した。十勝沖では今回の地震だけでなく 1952 年にも同じような場所でマグニチュード 8.2 の大地震が発生し、津波が北海道の太平洋沿岸を中心に来襲している。記録によると、このときには十勝沿岸には大きな津波は来襲しなかったが、厚岸や浜中には大きな津波が来襲し、浜中では 6m の津波遡上があった(渡辺, 1998)。そこで、1952 年の十勝沖地震による津波とも数値計算を使って今回の津波と比較した。

1.4 用語の定義

ここに、本資料で用いる用語を定義する。

津波偏差：推定天文潮位を基準として上下する津波による水位変動

津波高さ：推定天文潮位を基準とした津波の 1 波 1 波の波峰高さ(1 波中における最大津波偏差)

遡上高さ：津波が陸上に遡上したときの、T.P.を基準とした高さ

浸水高さ：津波が陸上に遡上したときの、地表面を基準とした高さ

2. 地震の規模と津波予報

2.1 断層モデル

気象庁による地震マグニチュード M_j は 8.0 である。モーメントマグニチュード M_w は 8.0 である。また、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 M_t は 8.0 である。ここに、モーメントマグニチュードは、地震モーメント $M_o = \mu DS$ (μ は岩石の剛性率、 D は断層変位量、 S は断層面積) から求める地震規模である。また、津波マグニチュード (Abe, 1981) は、観測された

津波高さと震央から観測点までの距離を使って算定されるものであり、平均的には津波マグニチュードはモーメントマグニチュードに合う。したがって、地震規模に比べて津波規模が大きくなる津波地震の場合には $M_t > M_w$ となるが、今回は $M_t = M_w$ であるので地震規模に相応した津波が発生したといえる。

地震による地殻の破壊をモデル化した断層モデルには、断層面が一様にすべるとしたモデルやアスペリティを考慮して断層内におけるすべり量を局所的に変化させるモデルがある。今回の地震についても様々な機関から断層モデルが発表されており、例えば、一様にすべるモデルとしては、表-1 に示すような、山中・菊地モデル（東京大学地震研究所ホームページ）や国土地理院モデル（国土地理院ホームページ）がある。これらのモデルによると、典型的な低角逆断層であり、プレート境界型の地震である。

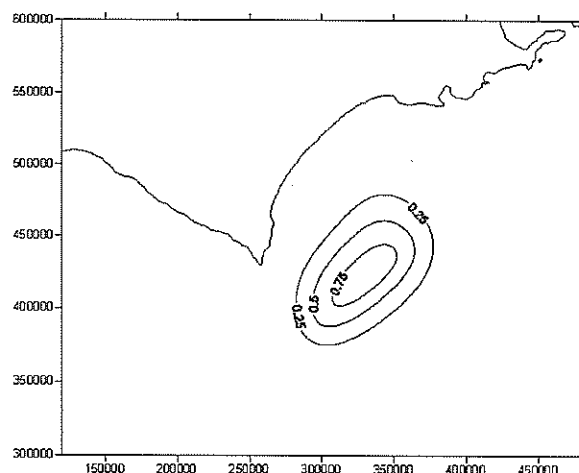
また、表-1 には 1952 年に発生した十勝沖地震に対する相田モデルの断層パラメータ（佐藤，1989）を示している。1952 年十勝沖地震のモーメントマグニチュードは 8.2 であり、地震のエネルギーとしては今回の地震の約 4 倍に相当する。震源位置について、今回の地震と 1952 年の地震を比較してみると、図-1 に示した津波の初期波形（算出方法の概略は第 4 章に記述）からわかるように、今回の地震は 1952 年の地震よりも若干西側で起こっているものの、ほぼ同じ所で発生している。

表-1 断層モデル

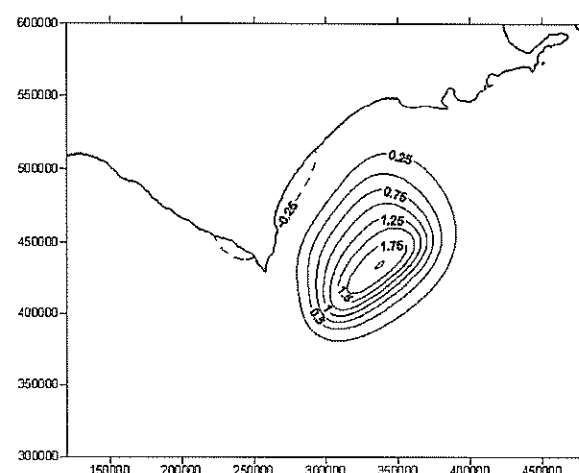
断層モデル	2003年地震		1952年地震
	山中・菊地モデル	国土地理院モデル	相田モデル
緯度(deg)	41.78(震央)	42.12	42.33
経度(deg)	144.079(震央)	144.55	145.22
長さ(km)	90	85.7	130
幅(km)	70	83	100
深さ(km)	25	19.7	1
走向(deg)	230	231	220
傾斜角(deg)	20	21	20
すべり角(deg)	109	110	76
すべり量(m)	2.6(平均)	5.19	3.5
	5.8(最大)		

2.2 津波予報

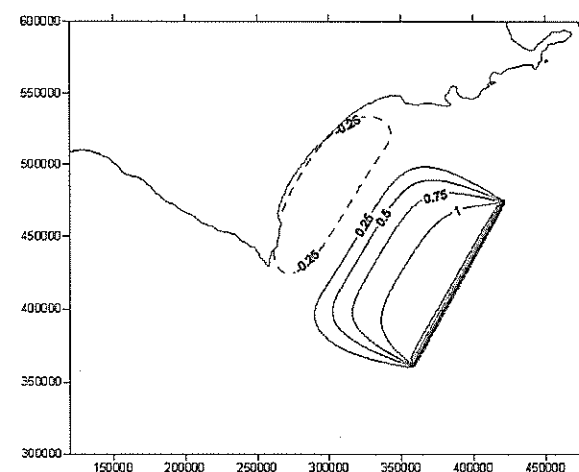
気象庁は、4時50分頃の地震発生から約6分後の4時56分に津波警報を北海道太平洋沿岸東部および北海道太平洋沿岸中部に、津波注意報を北海道沿岸西部、青森県日本海沿岸、青森県太平洋沿岸、岩手県、宮城県および福島県に発表した。9時には警報の出ていた全ての地域で注意報に切り替えられた。15時には宮城県および福



(a) 2003年十勝沖地震（山中・菊地モデル）



(b) 2003年十勝沖地震（国土地理院モデル）



(c) 1952年十勝沖地震（相田モデル）

図-1 平成15年(2003年)十勝沖地震および1952年十勝沖地震の津波の初期波形

島県の注意報が解除され、16時30分には岩手県および青森県沿岸で注意報解除、北海道沿岸における注意報解除は18時30分であった。すなわち、津波に対する警戒が解かれたのは、地震発生から13時間40分後になる。ただし、今回の津波の継続時間が特に長かったとは言えないようである。例えば、1983年の日本海中部地震の際には、5月26日の正午頃に地震が発生した日の夜から翌朝にかけて最大偏差やそれに近い偏差が出現した地域があったことが報告されている（谷本ら、1983）。

このように今回の地震では12時間以上の間、津波に対する警戒が必要であったが、これらの津波情報と避難勧告などの避難情報が必ずしもリンクしていなかった。津波警報が発表されたにもかかわらず避難勧告を出さなかった地域や警報解除の前に避難勧告が解除される地域があったことが指摘されている（松尾ら、2003）。

3. 津波に関する現地調査

3.1 調査手法

現地調査においては、北海道開発局の港湾建設事務所や事業所において被害状況のヒアリングを行うとともに、潮位データの有無などの確認を行った。さらに、住民や漁師などへも当時の状況についてヒアリングを行った。

こうしたヒアリング情報や現地観察に基づいて、津波の痕跡高さを測量した。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。その後、各測量場所に最も近い検潮所における調和定数（海上保安庁、1992）を使って算出した推定天文潮位と測量時の実測水位を関係づけて、測量した痕跡高さをT.P.（標高の基準）上の値としての遡上高さに換算した。

3.2 調査場所

現地に向かうまでの間および現地で収集した情報に基づいて、調査場所を決定した。事前に入手した情報は以下のようなものである。

浦河 : 5時7分に0.2m, 5時37分に0.4m, 6時24分に1.3mの津波を観測した。車や漁船が流された。

笛舞 : 駐車中の軽ワゴン車が海中に引き込まれた。

えりも漁港 : 岸壁を超えて市場まで浸水した。しかし、人の被害は無かった。

十勝港 : 5時6分に漁船が避難した。5時17分に海水が岸壁を越え、5時31分に引き波となった。コンテナが漂流した。

大津漁港 : 6時20分までに4回の津波が来襲し、4回目の津波は岸壁を越えた。海水は岸壁を1m越え、軽トラックの荷台まで達した。しかし、車は流されなかった。

釧路港 : 5時18分に1m, 9時3分に1.2mの津波高さを記録した。海から数10m離れた道路が冠水した。貯木場から丸太が流れ出た。

このように港湾において津波被害の情報が多いことと調査人員の制約から、浦河港、釧路港、大津漁港、釧路港、釧路貯木場を中心に現地調査を行った。

しかし、防波堤によって守られている港内は、一般に港外に比べて津波高さは低いと言われている。谷本ら（1983）は、港湾の水域面積が広くなるほどあるいは津波の波長が短くなるほど、港外に比べて港内の遡上高さが低くなることを、日本海中部地震津波における事例をもとに示している。さらに、明田ら（1994）は、谷本ら（1983）のデータに北海道南西沖地震津波によるデータを加えて、港内の遡上高さが港外に比べて低いことを示している。また、北海道南西沖地震津波で最大の遡上高さを記録したのはポケットビーチ背後のV字状の谷間の斜面であり（首藤ら、1994；高山ら、1994）、このような局所的な地形により津波が収れんする場所で高い津波遡上が発生する。このため、港湾内だけでなく港外における調査も大切である。

ただし、谷本ら（1983）の結果は、津波の空間的なスケールに比べて港湾のスケールが小さいと港内外の遡上高さの差異は小さくなることも同時に示しており、港内で共振が起こったときなどは港内の方が港外よりも津波高さが高くなる場合もある。今回の現地調査では、「湯沸かしポットに水を入れるときに水位が上がるような感じで津波がやってきた」というような現地調査時に聞いた話に代表されるように、波のような津波ではなかったという証言が数多くあった。こういった周期の長い津波の場合、局所的に津波が収れんするようなV字地形のように地形的な大きな特徴がなければ天文潮位と同じように港湾内とその周辺での大きな津波高さの差異は生じにくくなると考えられる。

3.3 浦河港および様似漁港

浦河港の概略を図-2に示す。浦河港においては、地震により岸壁の背後地盤の沈下、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。しかし、当時の状況目撃者による「港内の物

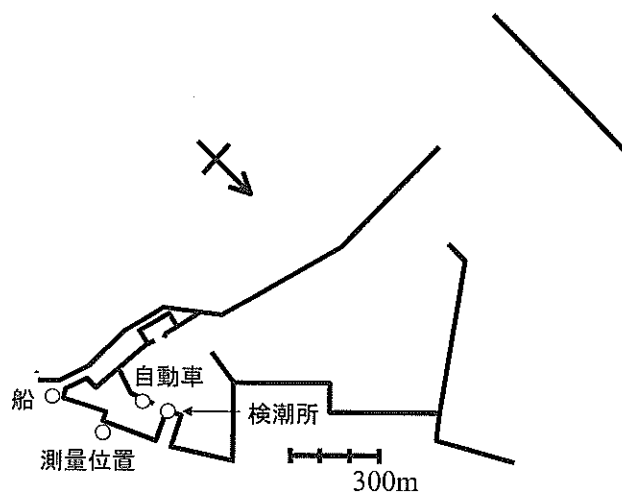


図-2 浦河港の概略

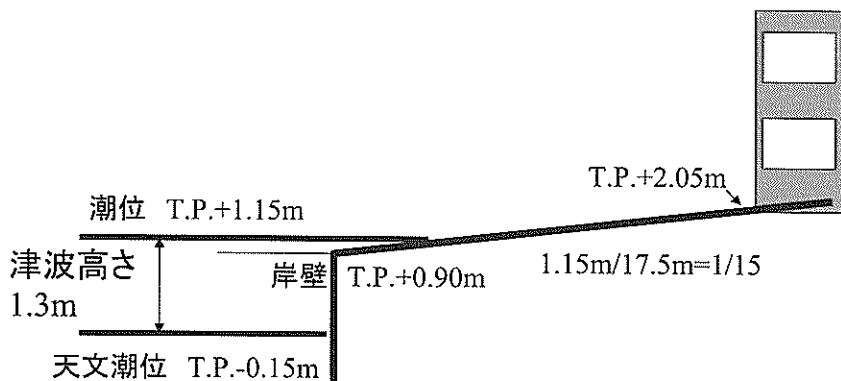


図-3 浦河港における浸水状況の推定

揚場上に駐車中の自動車（図-2 中に位置を示す）が、津波によって浮き上がり港内に転落しそうになったものの、その前に津波が引いたため港内に落ちなかった」という話や、写真-1（写真は本資料の最後にとりまとめている）に示すように岸壁上に砂や泥が残されていることから、港湾内に数 10cm 程度の浸水があったことは明らかである。なお、岸壁上に残された砂や泥は岸壁背後地の未整地の場所から流出したものである。

図-3 は、写真-2 に示す港湾の水面に隣接して住宅などがある場所で測量した結果をとりまとめたものである。この場所を含めて港湾内の建物の壁に残っている水跡は見つけることができなかったが、岸壁上に砂や泥が残っていることや、「外は見えていないが、家の中まで海水が上がってきたことはなかった」（注、この家の床面は地面よりも 1m 程度高い）という証言を参考にすると、エプロンの途中辺りまで津波が遡上したものと推察される。

なお、図-3 には、港湾内にある検潮所（図-2 中に位置を示す）で観測された津波高さ 1.3m のときの海面の高さを示しており、この高さは岸壁上 0.25m に達する。推定した浸水状況から判断すると、この岸壁周辺では検潮所で観測された津波高さと同程度の津波が来襲したと考えられる。

また、「上架してあった漁船が地震により港内に流出し、漂流した。そのため、漁船が避難するときに漂流した船にぶつかりそうになり危険であった」との証言が漁師からあった。その漁船の位置は図-2 に示してあり、その漁船および周辺状況は写真-3 および 4 のようである。これは、大型漂流物の問題点が示された事例である。

また、地震直後に沖合に避難した漁船では、「2 回目の地震（6 時 8 分頃に発生したマグニチュード 7.1 の地震のことと思われる）は海上でも大きな振動として感じ、通常の波と異なり突き上げられるようであった」というよ

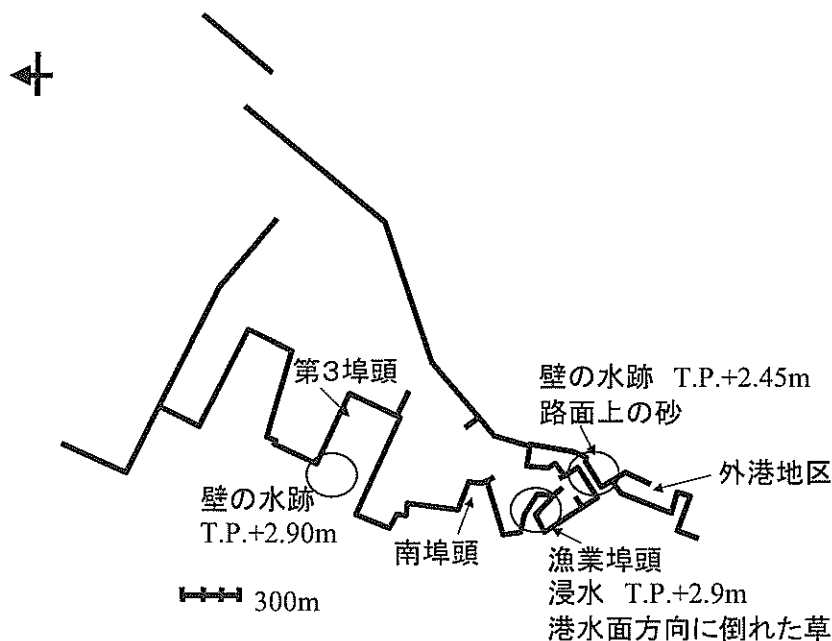


図-4 十勝港における津波の痕跡高さのまとめ

うに海震を捉えている。

さて、浦河港よりも東に13kmほど東に離れた様似漁港にも調査に赴いたが、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。

3.4 十勝港

十勝港における津波の痕跡高さのまとめを図-4に示す。図中の数値が、津波の痕跡高さである。十勝港では、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できた。場所によっては床上浸水しているところもあった。また、十勝港湾建設事業所の職員の確認によると、港内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(写真-5)、さら埠頭背後直ぐ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-6)。倉庫のある場所の地盤高はT.P.+2.25mであり、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。この倉庫周辺は写真-7に示すように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、壁面であるために検潮所で観測された津波の高さよりも若干高めになったと推察される。

なお、この倉庫から第3埠頭方向に道1本隔てたところにある会社事務所では、壁の水跡を見つけることができなかった。しかし、職員が津波後に出勤したときの状況に関する証言から判断すると、床上数十cm程度の浸水があり、この高さは倉庫における水跡の高さと概ね同じであった。

写真-8に示す2枚の写真は、津波来襲当時に広尾海上保安署において撮影されたものであり、漁業埠頭(前出の図-4参照)における浸水状況である。写真から浸水高さを推定すると地盤上約1m程度であり、埠頭の標高を測量したところT.P.+1.85mであったので、津波の遡上高さはT.P.+2.9m程度になる。この遡上高さは第3埠頭におけるものと同じである。

十勝港の最も奥にある水産関連区域では、物揚場に砂利が残されていた(写真-9)。そのそばにある漁協施設は床上0.17mまで浸水し(写真-10)、その高さはT.P.+2.45mであった。さらに、その玄関には、家内の浸水高さよりも0.05m高いところに水跡が残っていた(写真-11)。この高さは、第3埠頭における遡上高さよりも0.4m低くなっている。この場所は、前出の図-4に見られるように漁業埠頭があることによって前面水域に狭窄部が形成されており、そこで津波の勢力が弱められたことにより津波高さが低くなったと推察される。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。

また、津波来襲時にこの床上浸水した施設にいた関係者からは、「津波は前面の岸壁を超えてきただけでなく、背後からも来襲し、背後からの浸水の方が早かった」という証言を得ている。施設背後は防潮堤により防護されているが(写真-12)、外港地区への通路(写真-13)が開いているため、外港地区に來襲して越波した津波がこの開口部を通して侵入したものと推察される。なお、防潮堤前面の消波工上には写真-12 に示すように丸太が多数残されており、津波は防潮堤を越えなかったことを示している。もし、防潮堤を超えるような津波であれば、防潮堤を越波する海水に加えて開口部からの強い津波の來襲により甚大な被害になっていたと考えられる。

一般論として、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。今回の津波によってコンテナなどの流出が発生している。写真-14~16は、広尾海上保安署や十勝港湾建設事業所により撮影された津波によるコンテナの流出および漁船の打ち上げの写真である。静的な状態を仮定すれば、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。かなり浅い浸水高さでも浮き上がってしまうが、これは重量に比べて底面積が広いためである。

また、調査当時、漁業埠頭前面の水域において、津波により海中に転落した3台の自動車を捜査中であった。関係者の話によると、自動車のあった場所を中心に海中を探索したが見つからず、港内を探しているとのことであった。港内においても、津波の流れが無視できないこ

とを示している。なお、津波による漁船の被害に関しては、町田ら(1994)や河田ら(2003)が日本海中部地震津波や北海道南西沖地震津波での被害事例を調査した結果、漁船の被害は津波の痕跡高さが1.5mを超えるあたりから発生し始め、痕跡高さの増大にともなって被害率が高くなることが報告されている。今回の津波では、遡上高さは2.5mを超えているので、漁船が港内に停泊していれば漁船被害が多数発生していたと予想されるが、出漁中であつたり、地震直後に避難したために被害は少なかった。

3.5 大津漁港

図-5に、大津漁港における津波の痕跡高さのまとめを示す。また、写真-17は、十勝港湾建設事業所から提供された津波時の浸水状況の写真である。

大津漁港の最奥部は、写真-18に示すように1/10程度の勾配の斜路になっており、その上部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、その一部が船揚場の脇にある建物に衝突しそうなといった証言があつた。その建物には写真-19に示すようにはっきりと水跡が残っており、その高さは地盤上1.55m、T.P.+3.15mであつた。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(写真-20)、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い。また、建物前面にあるコンテナには写真-21に示すように斜めの水跡が残っていた。斜めの水跡が残っていた面は港の水面の方を向いているため、通常の津波の痕跡であれば水平になると考えられる。コンテナ右側の水跡の高さは地盤上1.15m程度と周辺の痕跡高さよりも0.4m低い

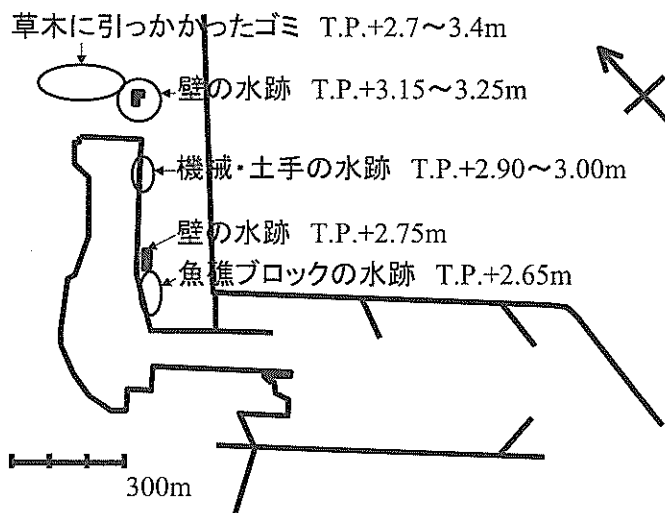


図-5 大津漁港における津波の痕跡高さのまとめ

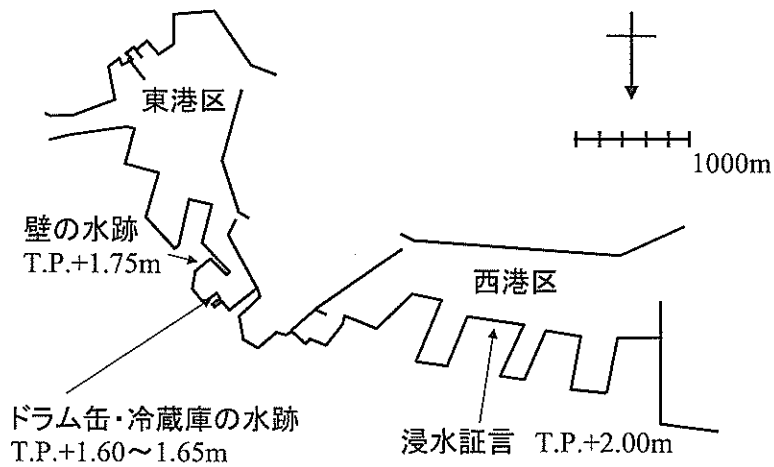


図-6 釧路港における津波の痕跡高さのまとめ

ことを考え合わせると、このコンテナは津波による浸水により斜めに浮き上がったのではないかと推察される。

船揚場の背後では、写真-22~24に示すようにビニル袋、ロープの切れ端、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、最大遡上高さ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遡上したことを示している。とくに、写真-24に示した樹木上の緑の草は、前出の写真-19の建物に残った痕跡の高さよりも0.25m高くなっており、我々が大津漁港内で見つけた最も高い痕跡である。

このように高い遡上高さを記録した漁港奥部から港口部に向かうにつれて、遡上高さは低くなっている。写真-25は、漁港側面の隣接道路脇にある機械に残った水跡であり、その高さは T.P.+3.00m である。この機械の背後にある土手にも、写真-26に示すように水跡（油跡）が残っており、その高さは T.P.+2.90m である。機械に付いた水跡に比べて低くなっており、岸壁から横に離れるにつれて浸水高さが低くなっていることを示している。

さらに、港口部に近い漁協施設の壁にも水跡が残っており、T.P.+2.75mの高さであった。これよりもさらに港口に近い岸壁上の置かれていた魚礁ブロックには T.P.+2.65mの高さに一様に水跡が残っていた（写真-27）。

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回りでは、2.4m程度であったと思われる。

3.6 釧路港

図-6に釧路港における津波の痕跡高さのまとめを示す。西港区では、第1埠頭から第4埠頭までにおいて倉庫などの壁に水跡は見つけられなかったことから、大きな浸水は起こっていない。これは、埠頭の高さが高いためである。しかし、現場において作業中の関係者の話では、第2埠頭と第3埠頭でエプロンの途中まで浸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、海水到達位置は T.P.+2.00m であったので、岸壁天端上に約0.2mの浸水があったことになる。

一方、東港区では背後地まで浸水が広がった箇所があった。特に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-28）やその周囲に水跡が残っており、その高さは T.P.+1.60m~1.65m であった。およそ0.7mの浸水高さである。水域を挟んで反対側にある物揚場回り（写真-29）では、岸壁天端高は T.P.+1.25m であり、写真-30に示すように物揚場の倉庫の扉には 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。こうした浸水は港に隣接する道路にまで達し、道路を冠水させた。

釧路港では、検潮所で9時3分に1.2mの津波高さを記録しているが、天文潮位が足し合わされたときの海水位が最も高くなったのは、満潮時刻に近い14時22分である。このときに上記の浸水が発生したと考えれば、そのときの津波高さは西港区で1.4m、東港区の奥部で1.0mとなる。東港区は図-6に見られるように西港区に比べて開口部が狭く、さらに港内水面には埠頭により狭窄部が形成されているため、津波の威力が西港区よりも弱くなったと推察される。

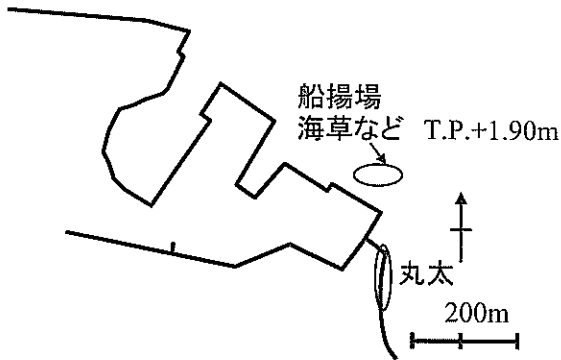


図-7 千代ノ浦漁港における津波の痕跡高さのまとめ



図-8 貯木場と別保川 (国土地理院の電子国土を利用)

3.7 千代ノ浦漁港

釧路港から東に 3km 程度離れた所にある千代ノ浦漁港における津波の痕跡高さを図-7 に示す。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が、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写真-31 に見られるようにゴミや海草などが列をなして残されている。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。この高さと同架中の船舶との関係を示したのが写真-32 である。海水は船底程度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、写真-33 に示したように丸太が打ち上げられている。この打ち上げられた高さは、目視によると漁港内の遡上高さと概ね一致している。

千代ノ浦漁港における津波遡上高さは、釧路港西港における遡上高さの T.P.+2.0m よりは若干低い、概ね同じ高さになっている。

3.8 丸太の流出

旧釧路川の河口近くにある貯木場 (図-8) から丸太が流出している。地震後 2 日たった調査日には、旧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写真-34 のように残されていた。津波による数回の押し引きの流れによって、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、写真に示したように水門の直ぐ脇にも丸太が残されていることから、流出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今後十分に考えられる。

4. 津波の数値計算

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、これを空間的にはスタaggerド・メッシュ、時間的にはリープフロッグ法で差分化したモデル (後藤・佐藤, 1993) である。この種のモデルは、現在、実務レベルの計算で最もよく使われている。

(2) 計算格子

水深データは、日本海洋データセンター (JODC) が公開している 500m 水深データを使用し、これを 600m 格子に再合成した。数値モデルでは、計算効率を上げるために深海から浅海に向かうにつれて、大きな計算格子サイズの大領域から細かなサイズの計算格子に順次つないでいくネスティング手法が使用できるが、今回の計算では全領域を 600m 格子としている。このため、港湾や 600m 以下の局所的な地形の効果を計算に取り入れることができない。港湾内や沿岸部周辺においてさらに細かな計算格子サイズを使った計算は今後行うこととし、今回は広領域における津波の特性を検討する。

水深データは、北緯 41° 、東経 144° を原点として北緯 $38^{\circ}\sim 46^{\circ}$ 、東経 $136^{\circ}\sim 148^{\circ}$ の範囲を概ねカバーし、東を x 方向、北を y 方向とする直交座標系で整理している (図-9 参照)。格子点数は 1070×1102 である。また、500m 格子から 600m 格子に変換する際には kriging 法を使用している。

(3) 計算時間

数値モデルは非線形長波方程式を陽解法で差分化したモデルであるため、計算時間間隔 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。

積分時間は、釧路港において地震発生から 9 時間半た

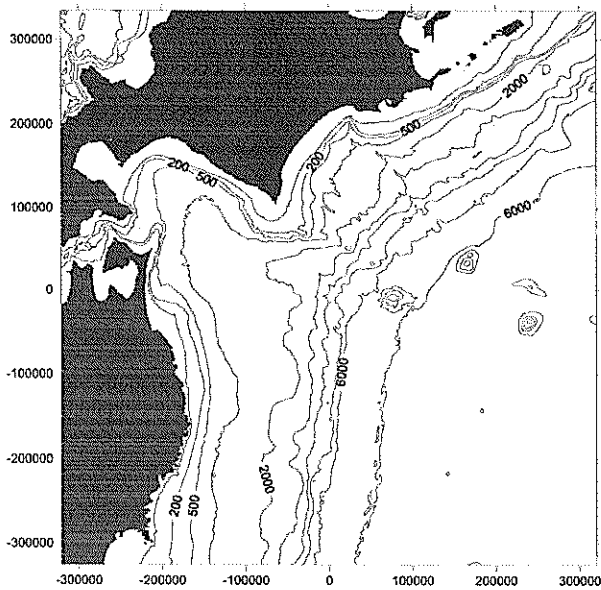


図-9 水深マップ

った後でも 1m 程度の津波が観測されたので、地震発生からの 9.7 時間にした。

(4) 境界条件

陸境界においては、今回の数値計算では、海岸に無限高さの鉛直壁を仮定し、陸上への浸水は考慮していない。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に評価している可能性がある。

津波のような長時間にわたる現象を数値計算する場合には、計算領域の外縁境界で反射される波を極力低減させる必要がある。このため、本数値モデルでは、線形長波理論に基づいた特性曲線法（例えば、Anderson et al., 1984）を使って、計算領域の外縁から出て行く津波成分が外縁境界を自由透過して計算領域内に反射されないようにしている。

4.2 断層モデル

今回使用した津波の数値モデルでは、前出した表-1 に例示されるように震源の位置並びに断層の規模およびすべり方を 9 つのパラメータによって断層をモデル化した断層モデルを使い、Mansinha and Smylie(1971)の手法により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（前出の図-1）となり、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、例えば、大町ら（2003）により断層の破壊継続時間は津波の波高にほとんど影響しないことが明らかにされているので、これは津波計算の実施においては良い近似である。

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、ここでは、津波の広域的な特性を捉えることを主目的として、従来の断層モデルのように断層は一様にすべると仮定した断層モデルを使用した。

使用した断層モデルは表-1 に示した山中・菊地モデル（すべり量として平均値を使用）と国土地理院モデルである。さらに、1952年にほぼ同じ場所で発生した十勝沖地震による津波との比較を行うために表-1 に示した相田モデルも使用して計算した。それぞれの初期波形は図-1 に示している。

さらに、仮想地震として、今回の地震の断層規模やすべり量は変化させずに、震源位置を 1952 年の地震の位置に移動させた場合の計算も実施した。

4.3 観測結果との比較

(1) 水位波形

図-10 に北海道太平洋沿岸および東北地方で観測された津波（永井・小川，2003）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、国土地理院モデルおよび山中・菊地モデルによる断層モデルを使って計算した結果である。各図の横軸は、地震発生を 4 時 50 分として、それからの経過時間を分で示している。

計算結果同士を比較してみると、山中・菊地モデルによる結果の方が全体的に津波の水面変動は小さい。これは山中・菊地モデルにおけるすべり量として断層内の平均的なすべり量を採用しており、その値は表-1 に示したように国土地理院モデルのおよそ半分と小さいためである。

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・菊地モデルを用いた結果が観測結果と概ねよく一致しており、国土地理院モデルを用いた結果は若干大きめになっている。十勝港沖（実際には大津漁港沖）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。とくに、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

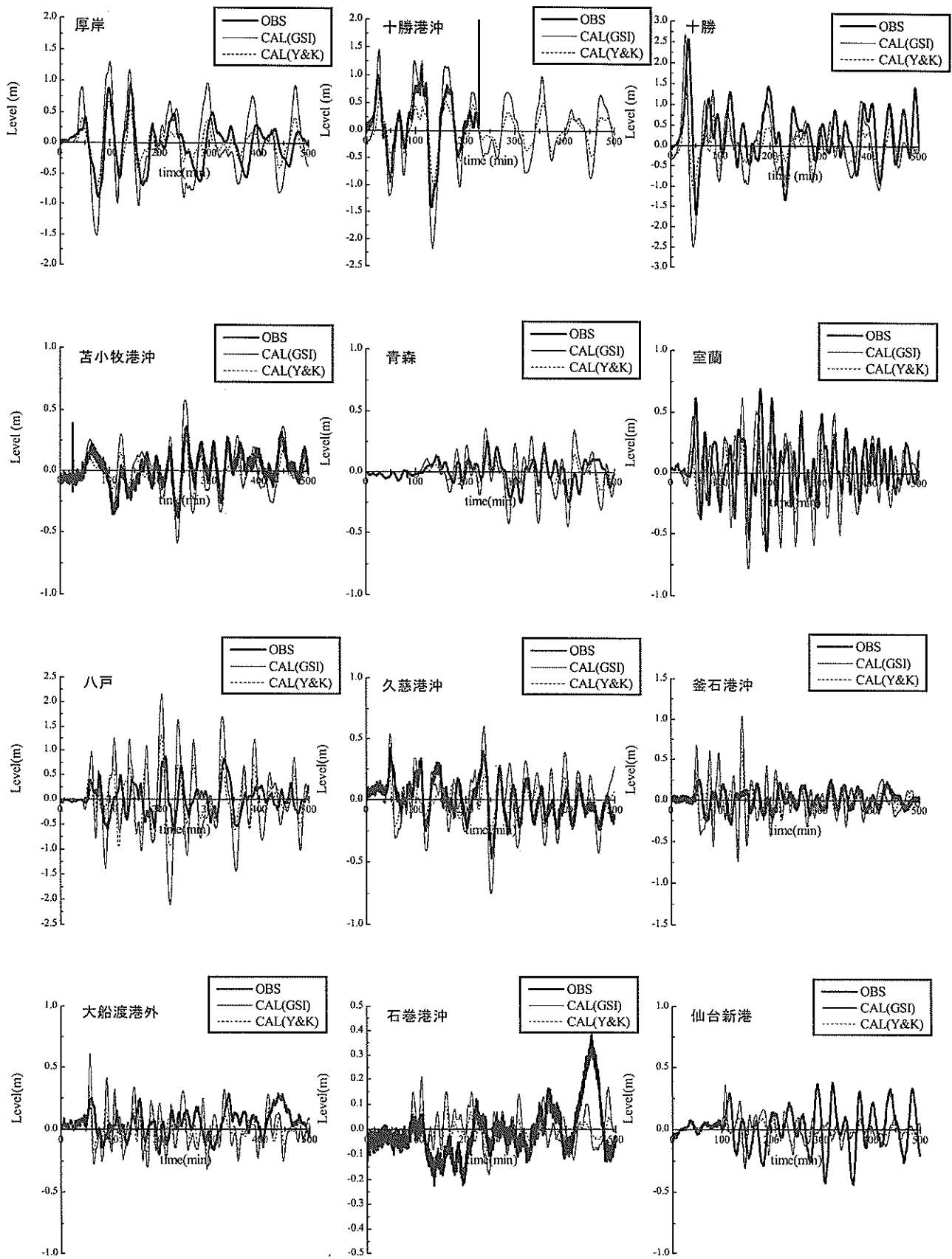


図-10 津波の観測波形と計算波形の比較

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 分早くになっている。

標葉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、室蘭や仙台新港の最大津波高さは、国土地理院モデルの方がよく対応している。

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言い難いが、震源に近い十勝ではすべり量の大きなモデル、震源から離れた東北地方沿岸では断層内の平均的なすべり量を与えるモデルが比較的良い結果をもたらすようである。なお、津波高さの実測値と計算値を比較するために相田 (1977) による統計的指標 (幾何平均 K と幾何標準偏差 κ) がよく使われるが、今回の計算では沿岸における空間解像度があまり細くないことからこの指標による検討は行わなかった。

また、港内においては、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モデルの結果と港内の検潮所で測った観測結果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早くなる。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、これは今後の課題とする。

(2) 流速波形

図-11 は、十勝港沖 (大津漁港沖) における水位と流速の絶対値 (x 方向流速の自乗と y 方向流速の自乗の平方根) の時間変化を示したものであり、国土地理院の断層モデルによる計算結果とを比較したものである。

永井・小川 (2004) は、十勝港沖の海象計で観測された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、地震により海底地盤あるいは観測機器の架台が沈下した可能性を指摘している。こういった沈下が起これば、観測機器の向きが変わってしまう可能性も否定できない。そのため、ここでは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-11 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よく再現している。とくに、第 1 波中の引き波時の速い流速については定量的にも良い一致が認められる。

水位と流速の絶対値の変動における主要な特徴は、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である。これは重複波の特徴である。一方

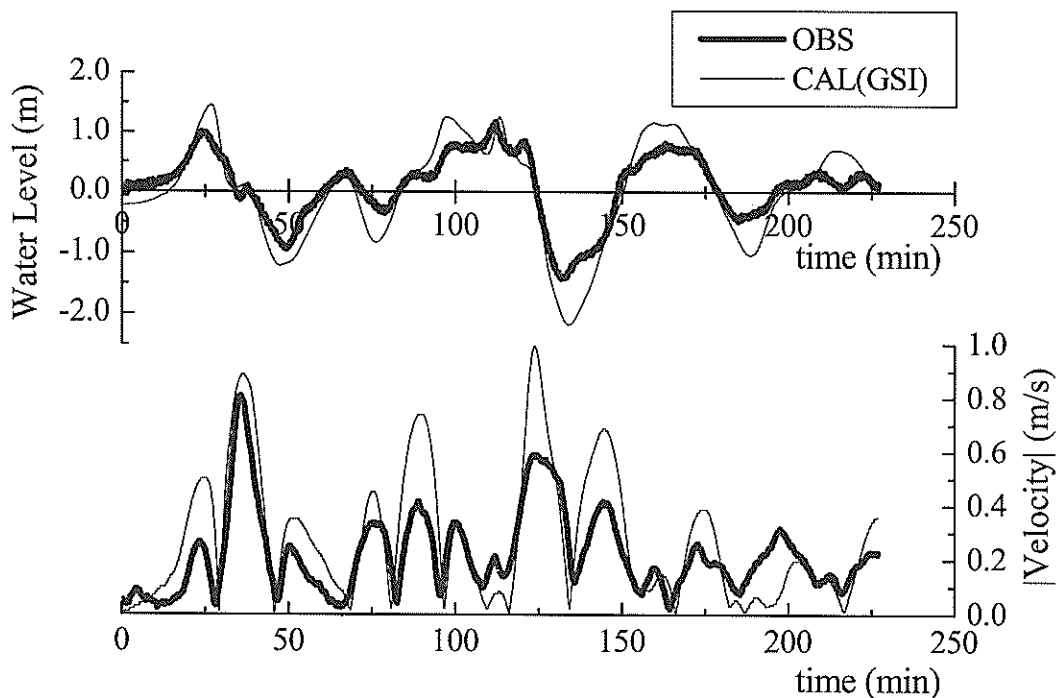


図-11 十勝港沖における水位と流速の絶対値の時間変化

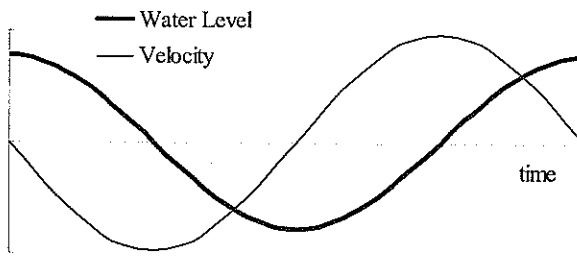


図-12 重複波における水位と流速の関係のイメージ
(壁から8分の1波長離れた位置)

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、微小振幅波理論に基づく、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。一方、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。それらの間の位置では図-12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。複雑な波の重合があったことが予想される。

4.4 数値計算結果からみた津波の特性

(1) 十勝沖の津波

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-13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推察すると、十勝沖の津波の特性は以下のである。

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(X-Velにおける負の値)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。

第1波目の引き波時(46分程度まで)

- ・ 流れが東向き(沖向き)に大きくなるに伴って水位は低減し、流れが西向き(岸向き)に反転する頃に最低水位になっている。これは、前述したように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(平均水深を11mとしたときの波長は約37km)の場合、約1/7波長しか岸から離れて

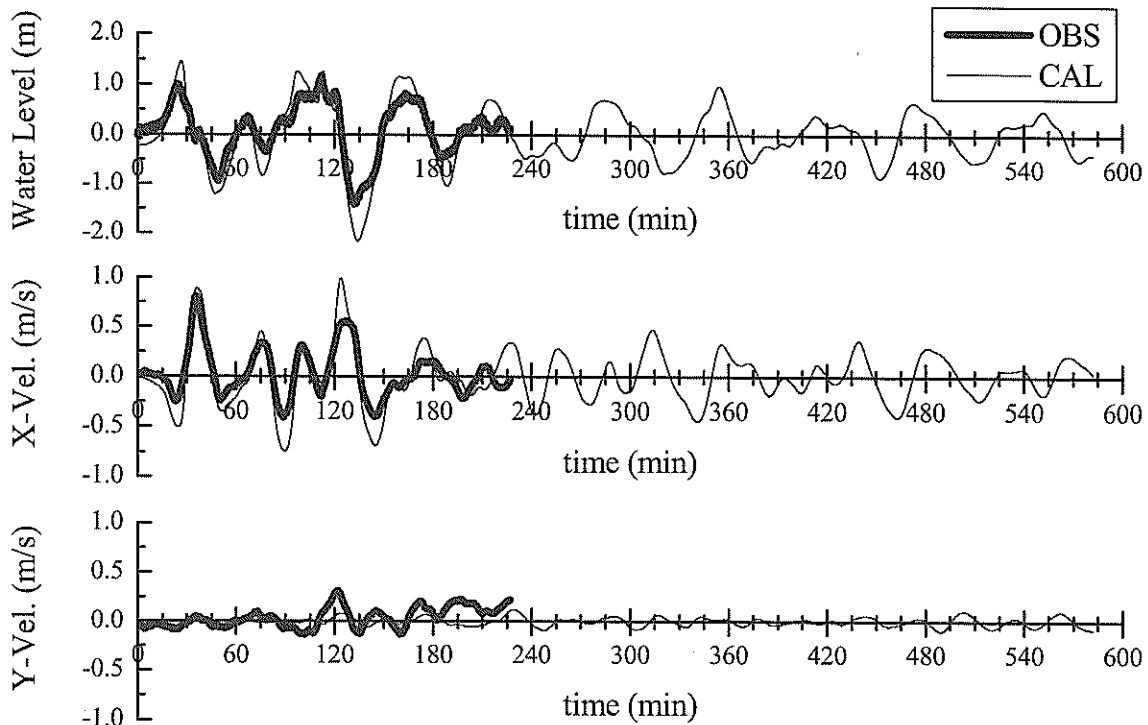


図-13 十勝沖における水位と水平2成分流速の時間波形

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。

110分程度まで

- ・ 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、70～81分の間は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、津波の第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。

110分以降

- ・ 南北方向の流速成分が出現し始める。これは、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。

(2) 釧路の津波

図-14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。観測値からは最大偏差は、9時6分の1.22mである。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分に満潮に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(14時23分)に0.80mの津波が出現している。この地震発生から約10時間後の津波は、今回の港湾を再現していない津波計算でも出現していることから、港湾内の副振動ではなく、釧路周辺の地形の影響を受けて発生したものである。

流速は、震源の位置関係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.)の時には弱い東向きの流れ(正のX-Vel.)、南向きの流れの時には弱い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。これは、釧路周辺の海底地形とよく対応する現象である。

南から少し西の流れの時には水位は下降し、流れの向きが北から少し東に変わるときに水位は極小になる。すなわち、重複波の特性が現れている。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。

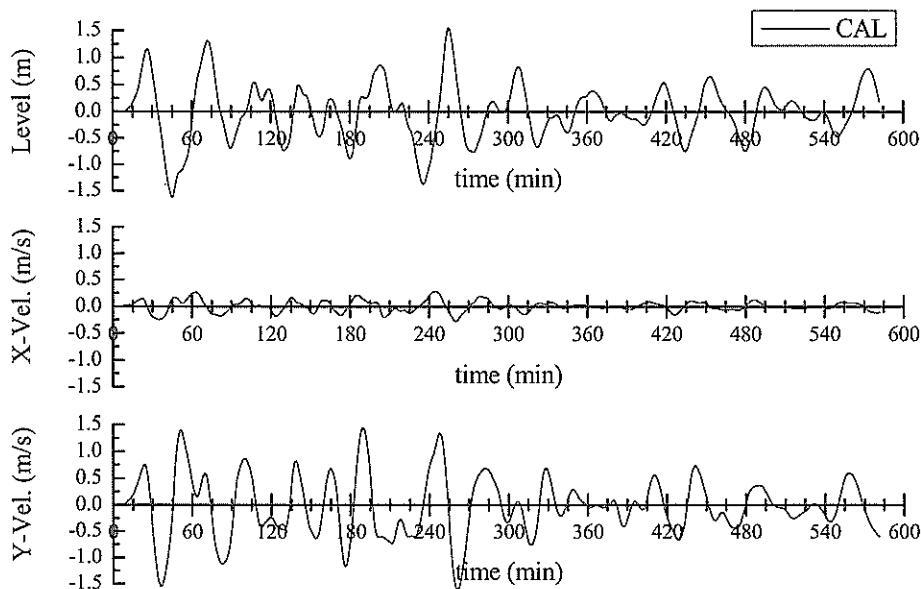
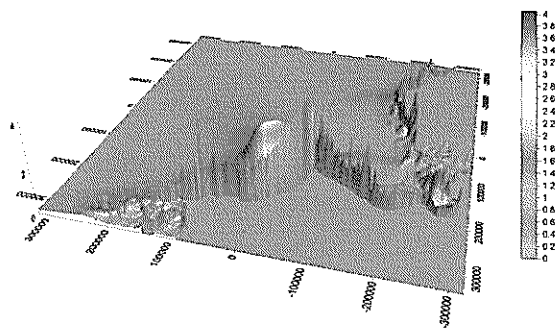
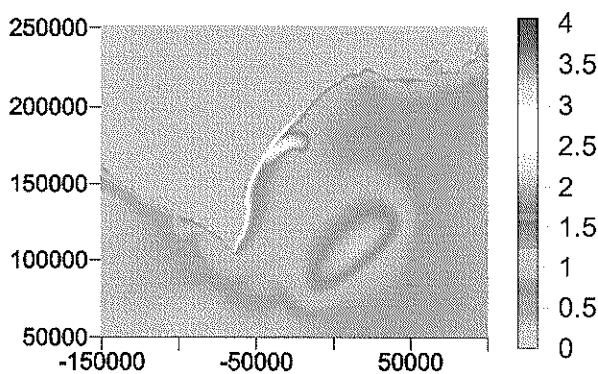


図-14 釧路における水位および流速の時間変動



(a) 立体図



(b) 平面図

図-15 最大津波高さの分布 (巻末にカラー版を掲載)

(3) 最大津波高さの分布

図-15に、津波高さの最大値の空間分布を示す。なお、平面図は襟裳岬から釧路地方をクローズアップしている。前述したように港湾等の詳細な地形は再現していない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。

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、4.0mである。この位置は600m計算格子の空間解像度の範囲で局所的に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計算では2.8mの津波高さになっている。

また、大津漁港辺りから沖側に向けて1.5~2.5mの高い津波高さの領域が舌状に伸びているのが認められる。この発生には、十勝沿岸に粗って進行する津波が重要な役割を果たしており、詳細は後述する最大津波高さの発生時刻のところで示す。

道東部では、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、今回の津波でも襟裳岬を津波が回り込んで、岬背後に津波が伝播している。襟裳岬西側の歌別辺りまでは1.5m程度の津波高さであり、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。

(4) 津波到達時刻

図-16は、国土地理院による断層モデルに基づいた数値計算の結果から、地震が発生してから津波が到達するまでの時間を示している。ここで、津波の到達時刻は、地震発生時刻を基準として、津波による海面変動(正負を問わず)が発生し始めた時刻であり、津波の極大が到達した時刻ではない。

地震発生時刻を4時50分とした場合、観測結果(永井・小川, 2004)によると、霧多布:5分、厚岸:14~18分、釧路:13分、十勝沖:1分、十勝港内:6分、苫小牧沖:47分、室蘭:58分、むつ小川原:40分、八戸:55~57分、久慈港沖:41分、宮古:39分、釜石沖:35分、大船渡港沖:46分、石巻港沖:88分等となっている。

計算結果において、震源位置では、初期水位としての海面の上昇および下降があるため、瞬時に津波が伝達したことになる。観測においても震源近くある十勝港沖の海象計のデータに地震発生時に水位の時間波形に10cm程度の水位上昇としての不連続が発生していたことが永井・小川(2004)により報告されている。彼らはこの水位上昇は、地震によって地盤あるいは観測器の架台が沈んだことによる見かけ上のものであると説明しているが、計算結果から判断すると地盤の沈降があった可能性が高いと考えられる。

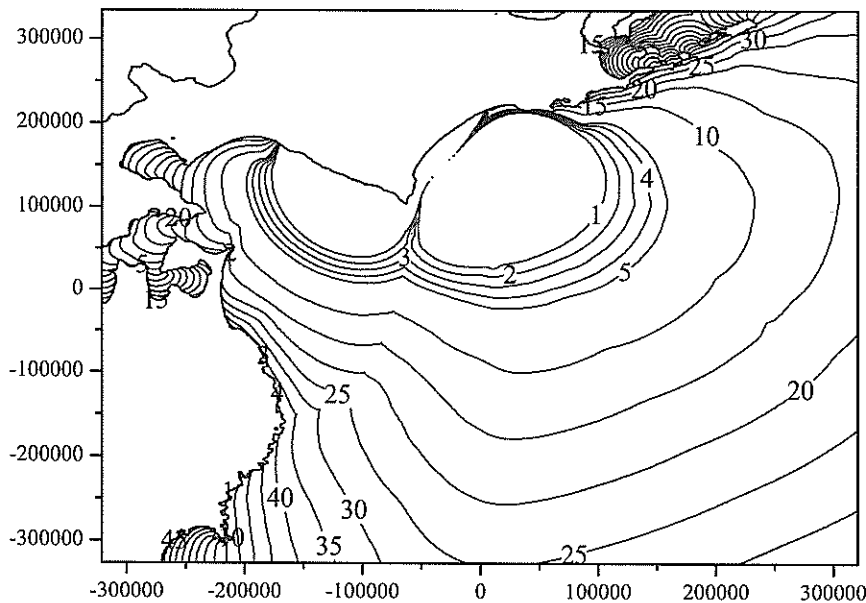


図-16 津波の到達時刻

計算結果を見ると、釧路周辺およびそれ以东においては、釧路へは10分、厚岸へは26分、霧多布へは28分程度掛かって津波が伝播している。釧路においては、600m 計算格子では映されない細かな地形条件による影響を考慮すれば、観測結果と概ね合っていると判断できる。一方、霧多布と厚岸とを比較してみると、厚岸よりも震源から離れている霧多布の方が、計算では2分程度遅く津波が来襲しているのに対して、観測結果では逆に9分以上も早く到達している。一般的には震源から離れるにつれて津波の到達時刻は遅くなるので、計算結果の方が妥当なように思えるが、この観測と計算の差異については詳細な地形データに基づいた再計算が必要である。

苫小牧沖においては、計算では引き波から津波は始まっており、その到達時刻は地震発生から18分程度してからであり、その引き波の最小水位は0.08mである。観測結果では最初の引き波はほとんど現れていなく、押し

波から始まったように見える。ただし、計算による押し波は46分後であり、これは観測結果とよく一致している。

下北半島の東岸から金華山周辺までの東北地方沿岸には、津波は15~60分かけて伝播しており、南に下がるほど到達時間は遅くなっている。例えば、表-2に示すように、計算結果は、釜石港沖を除けば、観測結果に概ね一致している。

(5) 最大津波高さの発生時刻

図-17は、最大津波高さの発生した時刻を、地震発生時刻を基準に示している。特徴的なのは、釧路前面の沿岸では、その周りが60分までに最大の津波が来襲しているにもかかわらず、200分程度経ってから最大津波高さが発生していることである。これは、釧路周辺の沿岸が弓状の形状をしており、そのなかで津波の反射が繰り返り起こされて多重反射となったことに起因している。これと同じように、最大津波高さの発生する時刻が周辺に比べて遅いところが、苫小牧沿岸等のように沿岸地形の影響でパッチ状に存在している。

また、十勝沖においては、大津漁港周辺から沖合に向けて舌状に、最大津波高さの発生時刻が100~120分程度と遅い領域が伸びている。この領域は、前出の図-15における最大津波高さの高いところに一致している。さらに、この時刻は、十勝沖における流速の時間波形（前出の図-13）において、沿岸方向の流速が出現し始める時刻にも相応している。こういったことから、十勝沖に

表-2 津波の到達時刻（東北沿岸）

	国土地理院の 断層モデル	山中・菊地の 断層モデル
久慈港沖	39.4分 * 3cmの引き波が 35分後に到達	37.0分 * 2cmの引き波が 33分後に到達
釜石港沖	43.2分	41.5分
大船渡港沖	49.4分	47.7分
石巻港沖	85.1分	84.0分

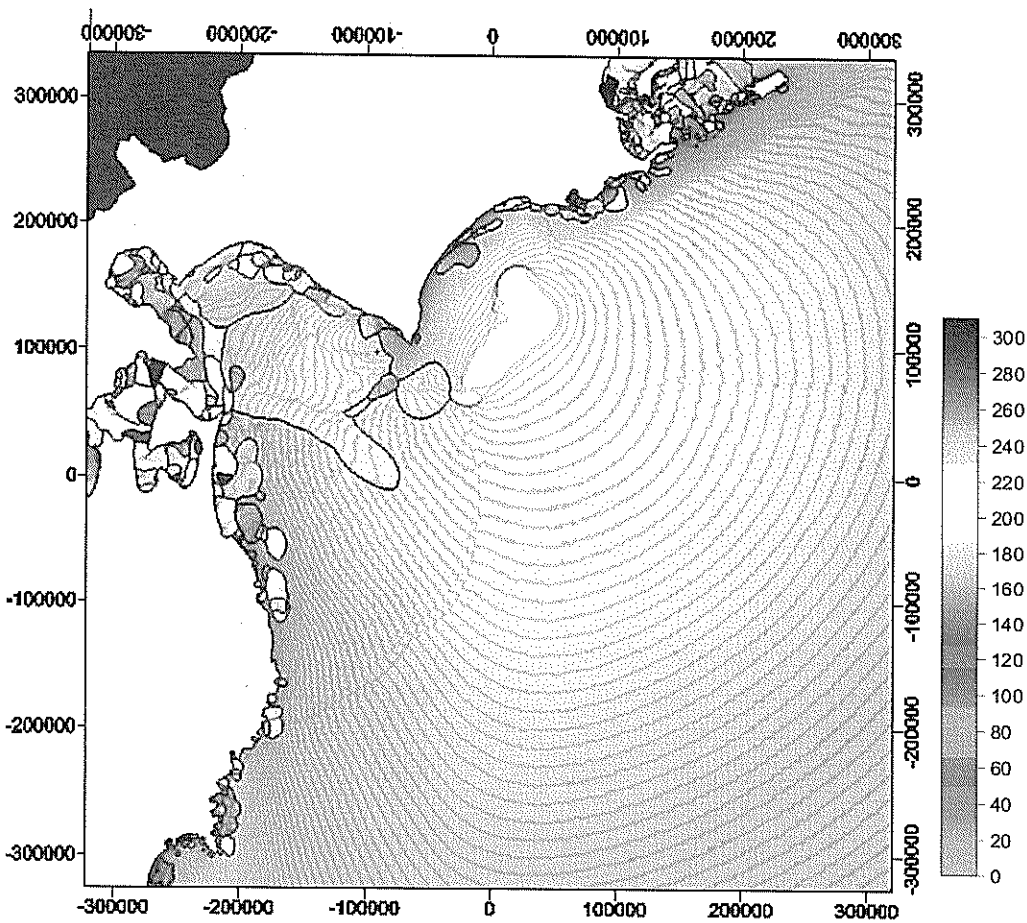


図-17 最大津波高さの発生時刻 (巻末にカラー版を掲載)

おいては、釧路の様な比較的狭い領域における地形の影響ではなく、広尾辺りから音別辺りまでの広い弓形の地形を沿岸方向に伝播したエッジ波としての津波が大きな役割を果たしている。その中でも特に広尾方面から伝達する津波の影響が大きい。

津波が海岸で反射され斜めに沖合に戻る際には、水深が深いほど波速が速いので屈折により次第に沿岸に平行に進行するようになる。すなわち、津波のエネルギーが沿岸に捕らわれることになる。そして、以下の関係式を満たす波成分が波として伝播する。式(1)は、エッジ波の理論から導かれる、沖合に向かって一様な海底勾配の海岸におけるエッジ波の分散関係式である (例えば、宇野木, 1993)。

$$\sigma^2 = gk \sin\{(2n+1)\theta\} \quad (1)$$

ここに、 σ : 角周波数 ($=2\pi/T$)、 T : 周期(s)、 g : 重力加速度(m/s^2)、 k : 波数 ($=2\pi/L$)、 L : 波長(m)、 θ : 海底勾配、 n : エッジ波のモードである。0次モード ($n=0$) の場合、海岸で振幅が最も大きく沖に向かって振幅0に

収束する空間波形となる。長波の場合には、波速は波の周期によらず水深のみで決定されるが、エッジ波の場合には、式(1)を満たすような無数の波が存在することになる。式(1)を波速の式に変形すると、

$$c = \frac{g \sin\{(2n+1)\theta\}}{\sigma} \quad (2)$$

となり、海底勾配が緩い場合では0次モードの波速は

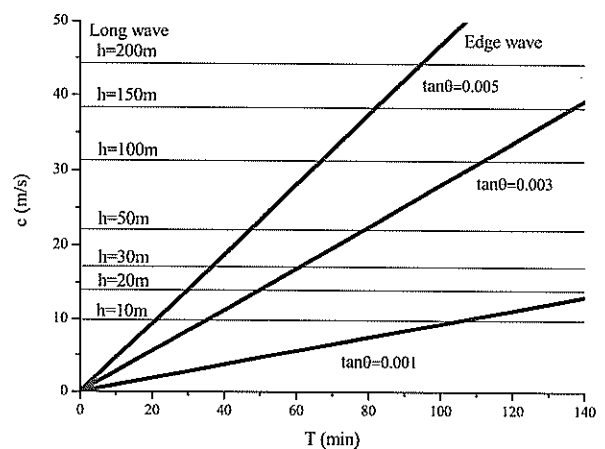


図-18 エッジ波と長波の波速

1.56 θ T(m/s)となる。図-18は、海底勾配 $\tan \theta = 0.001$, 0.003 および 0.005 の場合の0次モードのエッジ波の波速と、水深を 10~200m までのそれぞれの水深に対応した長波の波速を示したものである。

水位に関する計算結果に基づくと、十勝港沖から大津漁港沖の水深 40m の等深線付近における水位の時間波形から、地震後 100 分前後では津波は約 25m/s で北上している。図-18 によると、十勝沖における平均的な海底勾配 $\tan \theta = 0.005$ の場合、周期約 55 分のエッジ波の波速がこれに一致する。この周期は十勝沖に襲った津波の周期に概ね一致している(図-13 参照)。また、大津漁港よりも北にある音別方向からも南下する津波があり、これらの津波が大津漁港沖辺りで重畳したため、津波の第1波の到達時間よりも遅い時刻に大きな津波高さが出現した。

(6) 1952年十勝沖地震津波との比較

図-19は、今回の津波と1952年の津波とを、各地の水位変化により比較したものである。図中の太線は今回の津波に対する国土地理院の断層モデルを使って計算した結果、細線は1952年の津波に対する相田モデルで計算した結果、および細破線は今回の国土地理院の断層モデルを1952年の震源位置に移動して計算した結果を示している。

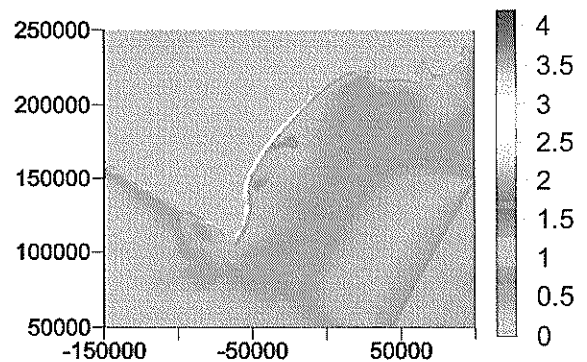
どの津波においても、十勝港沖や十勝では第1波目が最大津波になること、霧多布では第4波目に4m近い最大偏差が生じること、苫小牧港沖では250分頃に高い水位上昇が発生すること、釜石港沖や大船渡港沖では北海道沿岸よりも周期の短い水位変動が生じることなど、ほぼ同じような特徴がある。震源の位置が近いことに合わせて、1952年の地震の場合には断層の面積は大きかったがすべり量が小さかったため、似たような特徴が現れたのであろう。

ただし、異なる特徴もある。1952年の津波や震源位置を1952年の位置にずらした場合には、全体的に周期の短い成分波が含まれている。特に厚岸では200分以降の周辺地形のから多重反射した津波の周期が短い。さらに、釧路においては、今回の津波では地震から250分程度経ってから最大の水位上昇が発生したのに対して、1952年の震源位置の場合には第1波目に最大津波が来襲している。第1波目に大きな津波が来襲することは、人命損失に直接つながるので特に注意が必要である。一方、大船渡港沖においては、震源位置をずらした場合に、地震から150分程度経ってから、今回の津波よりも高い津波が来襲している。計算格子のサイズを小さくして計算を行えば、局所地形と津波の入射方向に関する差異が顕著に

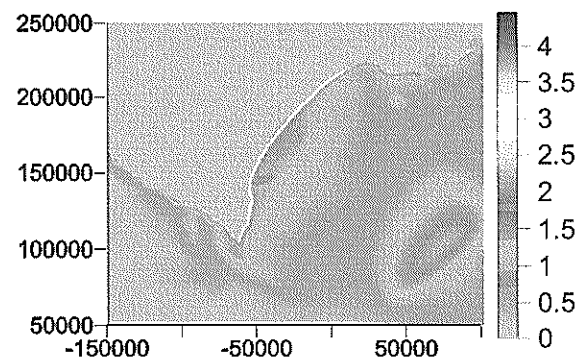
現れるので、第1波に続く津波の特徴は今回よりもさらに異なる可能性がある。

図-20は北海道沿岸における最大津波高さを示したものであり、同図(a)が1952年の津波の場合、(b)が震源位置を移動させた場合、および前出の図-15(b)が今回の津波の場合である。1952年の津波の場合にも今回と同様に大津沖において舌状に1.5~2.0m程度の高い津波高さの領域が出現している。ただし、その高さは今回よりは低い。さらに、1952年のときには広尾沖にも津波高さの高いところが沖合に伸びている。また、厚岸沖で津波高さの高いところが、今回の津波や震源位置をずらした場合よりも沖合まで広がっている。これは、1952年には厚岸で6mにも達する津波遡上があったことに対応している。一方、十勝沿岸では3mを超えるような所は極めて局所的になっている。

震源位置をずらした場合には、大津沖の広い範囲で津



(a) 1952年十勝沖地震津波(相田による断層モデル)



(b) 2003年の十勝沖地震津波(国土地理院の断層モデル)を1952年の震源位置に移動させた場合

図-20 1952年十勝沖地震と今回の地震の震源位置を1952年の震源位置に移動させたときの最大津波高さ(巻末にカラー版を掲載)

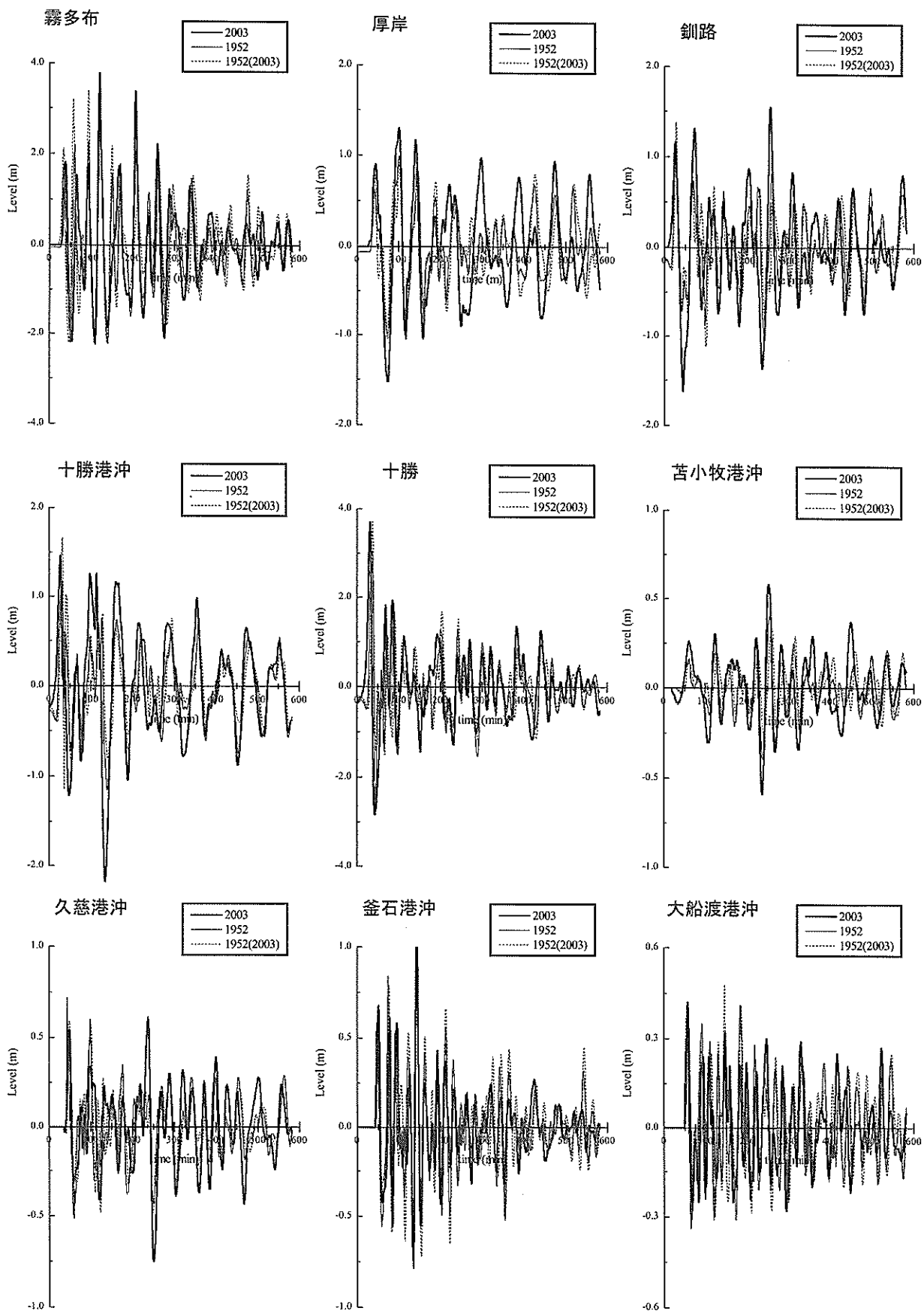


図-19 1952年十勝沖地震津波との比較

波高が高くなっているが舌状にはなっていない。ただし、今回の津波と同様に十勝沿岸では 3m を超える領域が沿岸に帯状に広がっている。

極めて局所的なポイントで津波波形を比較したときには、顕著な差異は認められなかったが、これらの 3 種類の津波の空間的な特徴には差異が認められた。ただし、霧多布および十勝広尾では、いずれの場合にも津波高さは周囲に比べて高く 3m を超えている。これには局所的な地形効果が顕著に現れたためであり、津波に対して特に注意を払う必要のある地域といえる。霧多布の場合には、**図-19** に示したように第 4 波目で最大津波高さになるので、浜中湾における津波の共振による影響があったと考えられる。一方、広尾の場合には第 1 波目で最大津波高さになるので、今回や 1952 年における震源からの第 1 波目の津波とそれが若干凹型になった地形から反射された波とが高い津波高さを作りだしている。

5. まとめ

今回の津波は、1993 年北海道南西沖地震による津波以来の大きな津波であった。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ている道東南岸では、今回は 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厚岸の海岸では 4m を超える遡上高さがあった。

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。凹の弓形地形に津波が来襲したことによって、海岸で反射された津波が屈折作用により沿岸に沿ってエッジ波として進行し、その中で多重反射したことにより生じたものである。例えば、数値計算によると、十勝沖では、第 1 波の到達よりも遅い時刻（地震発生から 2 時間程度後）に最大の津波高さが発生している。また、釧路港では、釧路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も 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場所であった。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。

津波被害としては、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は、十勝沿岸の港湾で発生している。山本ら（1985）や明田ら（1994）は、それぞれ日本海中部地震津波および北海道南西沖地震津波による漁船の被害と港内の津波遡上高さの関係を調べ、遡上高さが 1.5m 位から漁船被害が生じ始め、3m を超えると 1/3 程度の漁船が被害を受けることを示している。今回の津波では、十勝港奥部の漁港区域では遡上高さ 2.5m 程度、大津漁港では 3m を超えているので、漁船の被害が発生している。

6. 今後の課題

6.1 防災上の課題

現地調査時にある沿岸住人にヒアリングしたところ、津波の来襲はわかっていたが、怖くて家の中に留まっていたとのことであった。その家屋は港湾の水面から 20m 程度離れた位置にあったけれども、地面よりも 1m 程度かさ上げしたところに建てられていた。今回の津波は家屋にまで達せず被害も発生しなかったが、巨大津波が襲ってきたときには極めて危険である。津波の危険性があるときに沿岸住民に避難しようという気になるためには、その地域において発生しそうでかつ最大規模の津波によってどのような浸水などが発生するのかを、住民が理解している必要がある。そのためには、現在精力的取り組まれている津波ハザードマップや浸水予測図が有効なツールとなる。

漁師にヒアリングしたときに、最初の地震で沖に船を出したが、その際に陸上に上架してある漁船が地震により港内に滑り出して漂流していた船にぶつかりそうになった船もあったとの話を聞いた。今回に津波では、漁船だけでなくコンテナも津波により流出し港内を漂流する被害が発生している。こういった大型の漂流物による影響把握も必要である。とくに、**写真-16**には岸壁に打ち上げられた漁船が撮影されているが、その背後には燃料の貯蔵施設があり、こういったものに大型漂流物が衝突した際には大きな 2 次災害につながる。

また、避難体制についても問題点が指摘されている。避難勧告は多くの自治体において 5 時台の前半に出され、解除は津波警報が注意報に切り替わった 9 時以降であった。しかし、避難勧告を出さなかった沿岸自治体も幾つかあり、警報が継続中のときに避難勧告を解除した自治

写真等のまとめ



写真-1 浦河港の岸壁場に残る砂

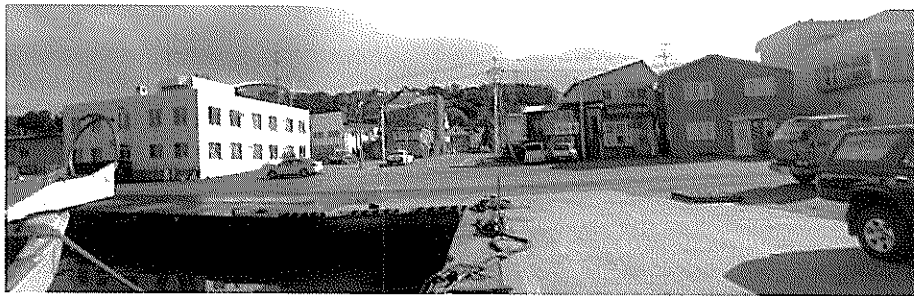


写真-2 図-3 において浸水状況推定をした場所



写真-3 上架した漁船（浦河港）

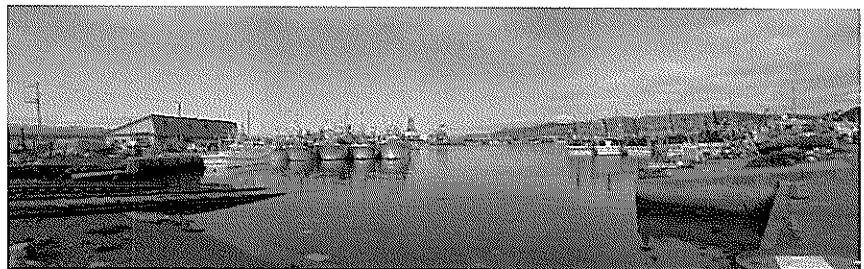


写真-4 写真-3の漁船上架位置の前面水域



写真-5 十勝港第3埠頭上に残った砂

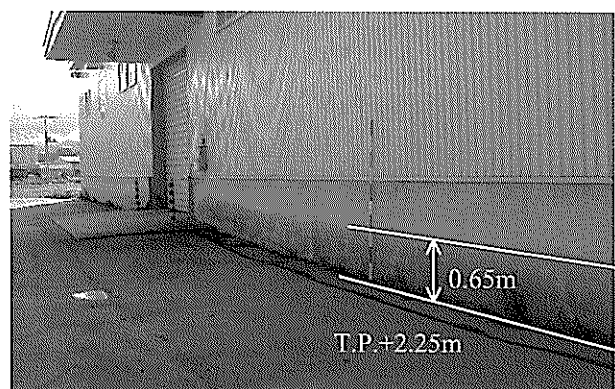


写真-6 十勝港第3埠頭背後地の建物に残った水跡

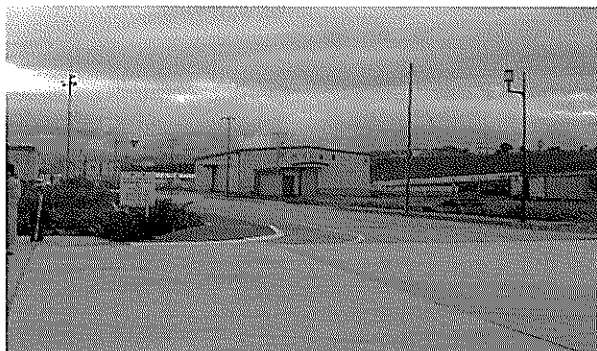


写真-7 写真-6 に示した建物の周辺状況

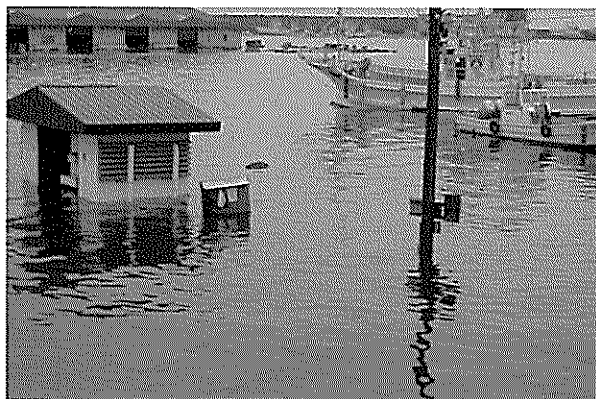


写真-8 十勝港漁業埠頭における津波時の浸水状況（広尾海上保安署撮影）

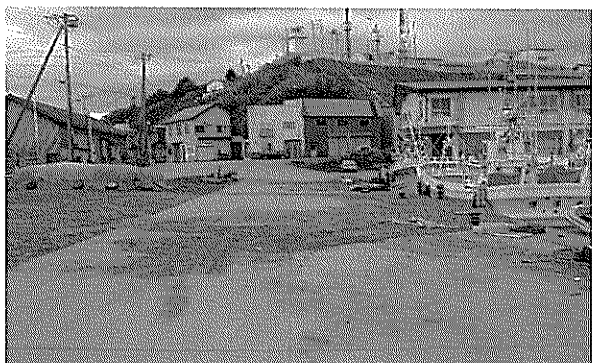


写真-9 十勝港水産関連区域の物揚場に残された砂利

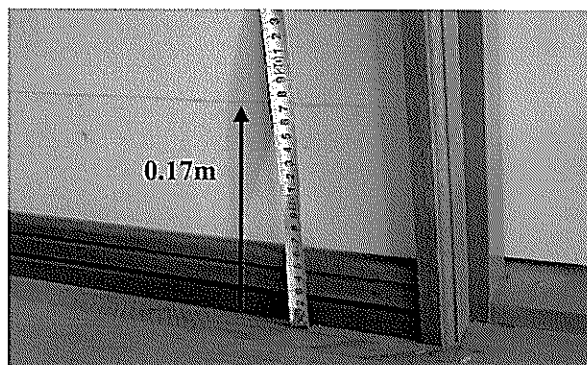


写真-10 写真-9 そばの漁協施設内における床上浸水



写真-11 写真-10 の施設の玄関に残る2本の水跡



写真-12 写真-10 の施設背後の防潮堤と消波工上の丸太

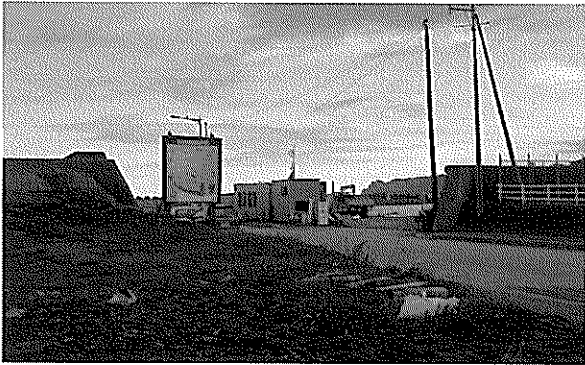


写真-13 十勝港外港地区への開口部
(写真-12の左側にある)



写真-14 津波による流出コンテナの港内漂流
(十勝港：広尾海上保安署撮影)

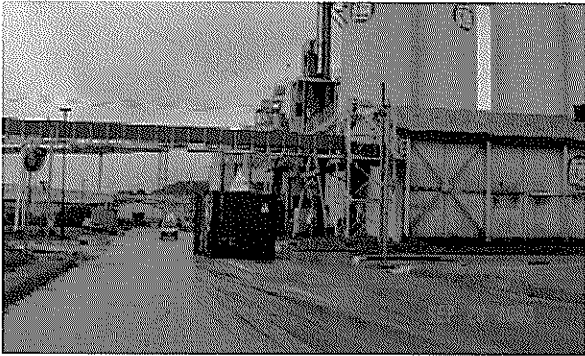


写真-15 津波によるコンテナの移動
(十勝港：十勝港湾建設事業所撮影)



写真-16 津波による漁船の打ち上げ
(十勝港：十勝港湾建設事業所撮影)

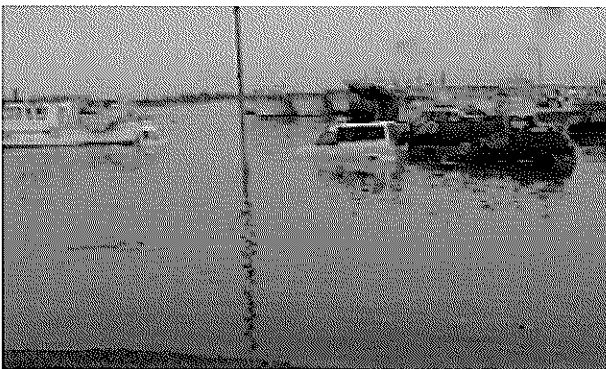


写真-17 大津漁港の浸水状況 (十勝港湾建設事業所提供)



写真-18 大津漁港の最奥部における斜路上の船舶

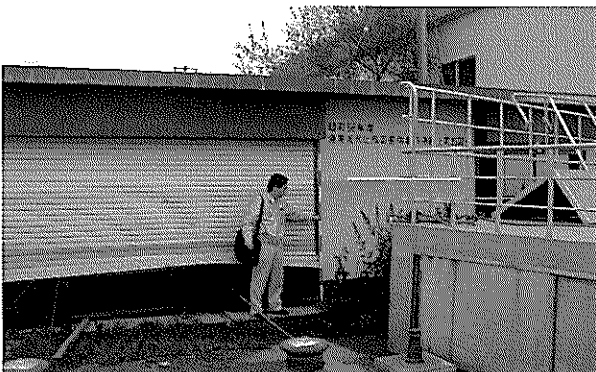


写真-19 大津漁港の最奥部にある建物に残った水跡



写真-20 写真-19の建物前の倉庫に残る水跡

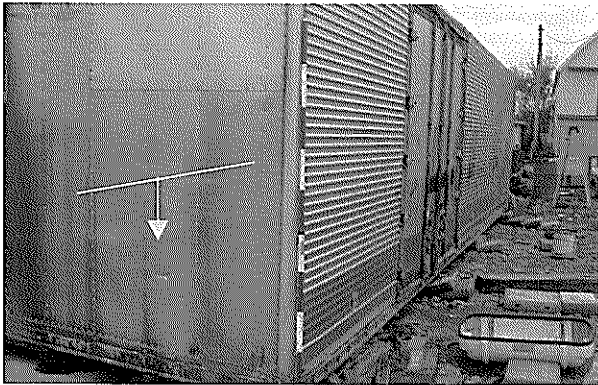


写真-21 コンテナに残った斜めの水跡



写真-22 大津漁港の奥部の津波痕跡（ビニル袋）



写真-23 大津漁港の奥部の津波痕跡（ロープ）



写真-24 大津漁港の奥部の津波痕跡（緑の草）



写真-25 大津漁港の側面にある機械に付いた痕跡
(写真-19の建物は写真左奥の見える建物の左横)



写真-26 写真-25の右奥の土手に残った油跡

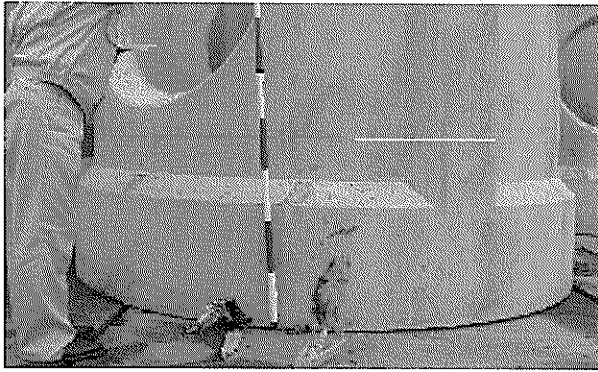


写真-27 岸壁上のブロックに残った水跡（大津漁港）

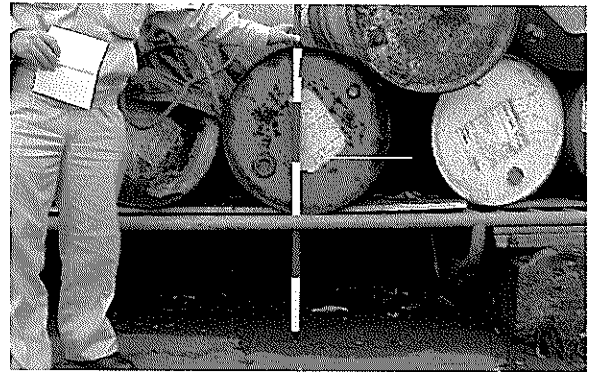


写真-28 釧路港東港区の奥部における津波の痕跡



写真-29 釧路港東港区の奥部にある物揚場

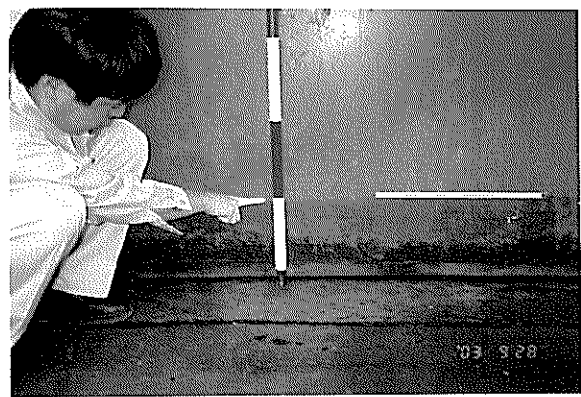


写真-30 写真-29の場所にある倉庫に残った水跡

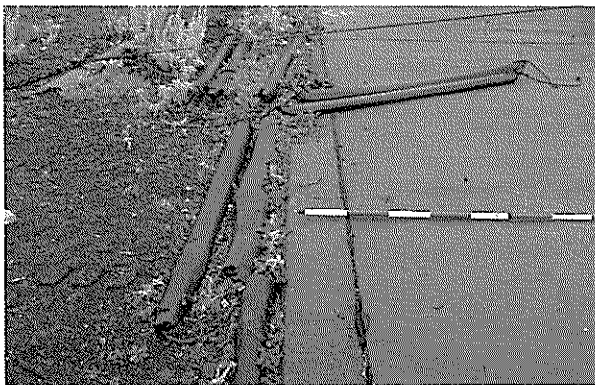


写真-31 千代ノ浦漁港における痕跡



写真-32 浸水高さと上架船舶の関係（千代ノ浦漁港）



写真-33 千代ノ浦漁港隣接海岸に打ち上げられた丸太

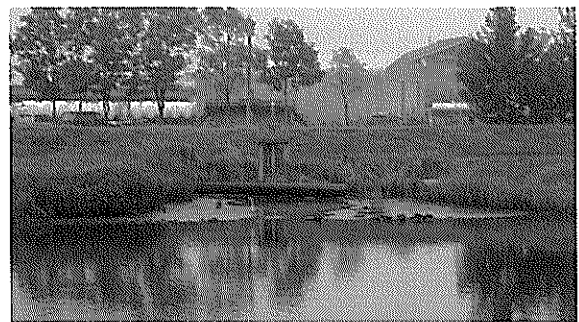
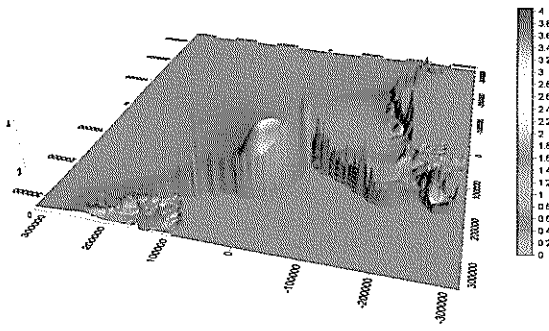
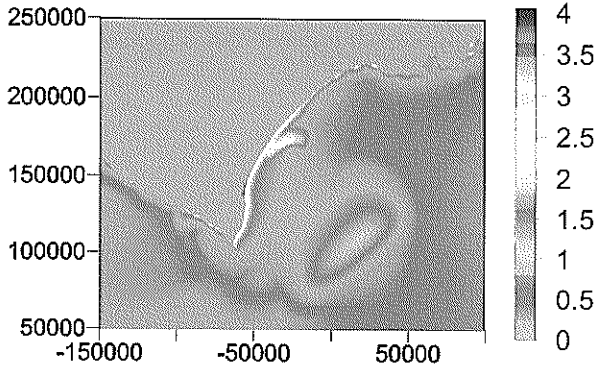


写真-34 別保川に残された丸太

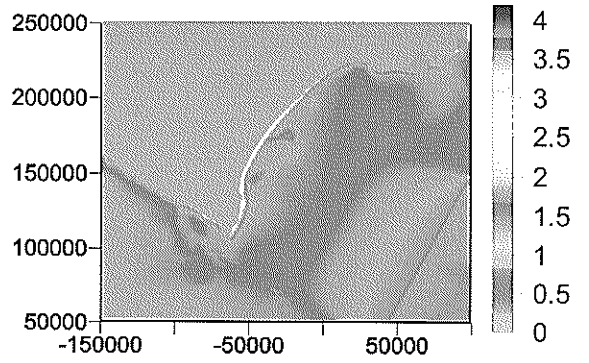


(a) 立体図

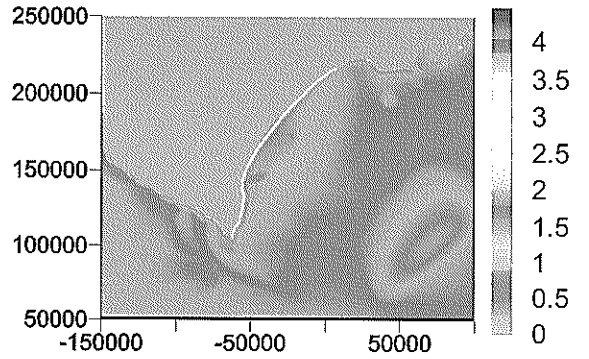


(b) 平面図

図-15 最大津波高さの分布



(a) 1952年十勝沖地震津波(相田による断層モデル)



(b) 2003年の十勝沖地震津波(国土地理院の断層モデル)を1952年の震源位置に移動させた場合

図-20 1952年十勝沖地震と今回の地震震源位置を1952年の震源位置に移動させたときの最大津波高さ

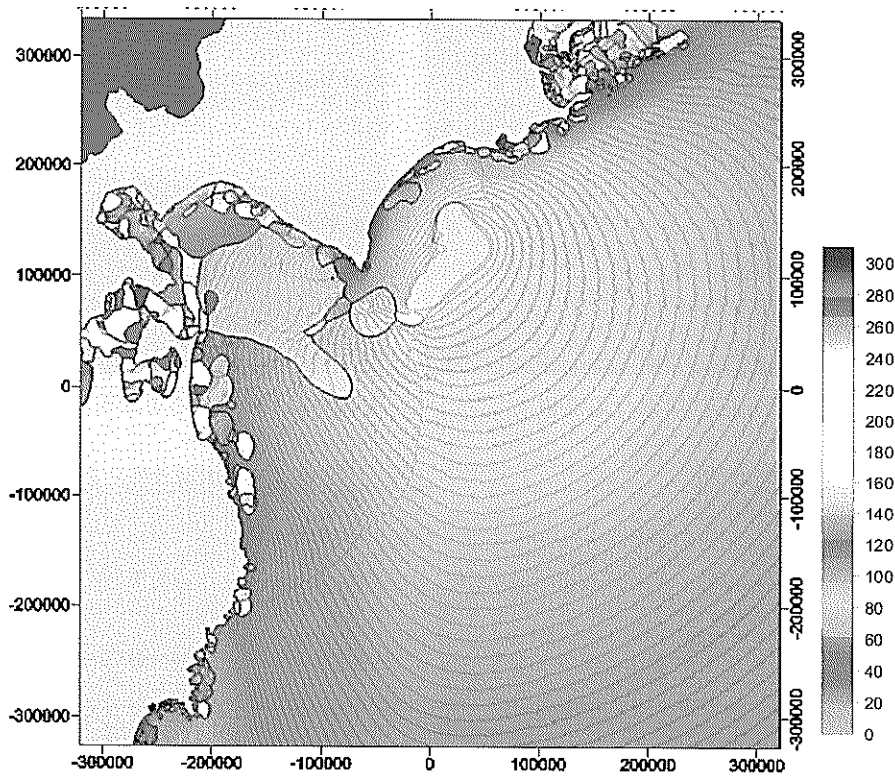


図-17 最大津波高さの発生時刻

体も3つある。例えば、釧路港では地震から10時間経っても1m程度の津波が来襲し、それが満潮に重なって陸上に海水が押し寄せている。この津波は、港内における津波の副振動ではなく、周辺地形によって生じた釧路周辺における現象であるので、港湾内だけの問題ではない。

6.2 研究上の課題

今回の数値計算では、港湾や局所的な地形の影響を考慮できていない。そのため、港湾内における津波の挙動については、今後、詳細な計算が必要である。また、港内における津波による流動と合わせて、コンテナなどの大型漂流物の挙動を明らかにすることが必要であり、現在モデル開発に取り組んでいるところである。さらに、今回の計算では行っていないが、浸水被害が十勝港などで発生していることから、こういった被害データを基に数値モデルの検証を行っていきたく考えている。

また、住民の避難に関して、今回の津波ではないが、2002年3月に石垣島沖と台湾沖の地震により津波警報が2回発表されたときに、避難した人も多かったが、避難しなかった人も少なくなかったことが知られている。実際に来襲した津波は数10cm程度と小さかったので大きな災害にはつながらなかった。しかし、避難しなかった理由の一つとして、「前面に防波堤があるから」というのが朝日新聞4月12日朝刊のコラムに書かれていた。この理由は、台風による高波から防護している施設に対する住民の信頼感によるものであろうが、防護施設の津波に対する安定性や防護能力をきちんと評価して、それを具体的に示す必要がある。

さらに、今回の津波では、対象港湾あるいは海岸の前面における沖合の津波観測が数分程度（海底地形に依存するけれども）の避難活動等への時間的な猶予を与えることが、観測データにより示された。同様なことは、1996年のイリアンジャヤ地震津波が日本に来襲した際に、東京湾の湾口沖に位置する伊豆大島の波浮港の沖合波高計が港湾技術研究所（当時）前面岸壁における観測よりも30分程度早く津波を検出している（小舟ら、1996）。これらは、沖合における津波観測データを活用したリアルタイム防災の可能性を示している。

謝辞

現地調査においては、北海道開発局港湾空港部、同局室蘭開発建設部浦河港湾建設事務所、同局釧路開発建設部釧路港湾建設事務所、同局帯広開発建設部十勝港湾建設事業所に災害直後の忙しい中、情報や資料の提供に協力頂きました。海上保安庁広尾海上保安署からは貴重な

写真の提供を受けました。また、国土交通省港湾局海岸・防災課からも協力を得ています。

また、現地調査結果の一部を、京都大学防災研究所の特定共同研究(14P-2)「都市域における氾濫災害危険度評価法の研究開発」（代表：高山知司教授）の成果報告会に発表した際に、貴重な意見交換ができました。

現地調査の実施に当たっては、港湾空港技術研究所の菅野構造振動研究室長から貴重なアドバイスを頂くとともに、小和田理事長を始めとする研究所幹部からは、現地調査の実施に際して速やかな対応を頂きました。

ここに深甚なる謝意を表します。

(2004年2月16日受付)

参考文献

- 相田 勇(1977)：三陸沖の古い津波のシミュレーション，東京大学地震研究所彙報，Vol. 52，pp. 71-101.
- 明田定満・谷野賢二・水野雄三・佐藤 仁・寺内 啓(1994)：港湾漁港施設による津波被害の低減効果について，海岸工学論文集，第41巻，pp. 1176-1180.
- 宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理，東海大学出版会，672p.
- 大町達夫・戸畑真弘・井上修作(2003)：津波地震の発生原因に関する解析的検証，海岸工学論文集，第50巻，pp. 331-335.
- 海上保安庁(1992)：日本沿岸潮汐調和定数表，日本水路協会，267p.
- 河田恵昭・佐々木基充・高橋智幸・鈴木進吾(2003)：南海地震津波による水産被害の評価手法の開発，海岸工学論文集，第49巻，pp. 301-305.
- 国土地理院ホームページ：<http://www.gsi.go.jp/>
- 後藤智明・佐藤一央(1993)：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発，港湾技術研究所報告，Vol. 32，No. 2，pp. 3-43.
- 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義(1996)：1996年イリアンジャヤ地震津波の特性，港湾技研資料，No. 842，96p.
- 佐藤良輔編著(1989)：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，390p.
- 首藤伸夫・松富英夫・卯花政孝(1994)：北海道南西沖地震津波の特徴と今後の問題，海岸工学論文集，第41巻，pp. 236-240.
- 高山知司・鈴木康正・鶴谷広一・高橋重雄・後藤智明・永井紀彦・橋本典明・長尾 毅・細山田得三・下迫健一郎・遠藤仁彦・浅井 正(1994)：1993年北海道南西沖地震津波の特性と被害，港湾技研資料，No. 775，

225p.

谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也(1983)：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料，No. 470，299p.

東京大学地震研究所ホームページ：

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index.html>

永井紀彦・小川英明(2004)：平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特徴，港湾空港技術研究所資料，印刷中。

日本海洋データセンターホームページ：

<http://www.jodc.go.jp/>

町田定満・谷野賢二・水野雄三・佐藤 仁・寺内 啓(1994)：港湾漁港施設による津波被害の低減効果について，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1176-1180.

松尾 修・飯場正紀・小田勝也(2003)：平成15年に発生した地震災害とその教訓，平成15年度国土技術政策総合研究所講演会講演集，国総研資料，第137号。

山本正昭・中山哲蔵・坂井 淳・三橋宏次(1985)：日本海中部地震津波による漁港内の漁船被害，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 460-464.

渡辺偉夫(1998)：日本被害津波総覧，第2版，東京大学出版会，pp. 140-141.

Abe, K. (1981): Physical Size of Tsunamigenic Earthquakes of the Northwestern Pacific, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 27, 194-205.

Anderson, D.A., J.C. Tannehill and R.H. Pletcher (1984): *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Taylor and Francis, 599p.

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.

港湾空港技術研究所資料 No.1082

2004.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.046(844)5040 URL:<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2004) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。