

北海道南西沖地震津波の伝播特性について

柴木秀之*・見上敏文**・後藤智明***

1. はじめに

1993年7月12日22時17分に発生した北海道南西沖地震津波は、死者・行方不明者が200名を超える大災害をもたらした。この津波の研究上特筆すべき点は、日本海沿岸の沖合波浪観測点で、津波の波形と流速が観測されたことである。これらの記録は強い浅水変形の影響を受けず、振幅も50cm程度であった。観測された津波の規模とデータ量は、過去に例を見ないものである。

現在実用化されている津波数値計算の精度検証は、ほとんどが計算値と痕跡高・検潮記録との照合のみである。痕跡高から得る情報は、津波の時空間規模から考えると、瞬間的かつ局所性が強い。また、検潮記録は津波の波形を正確に表さないことが、Satake et al. (1988)により指摘されている。したがって、直接観測された津波波形による数値モデルの精度検証は、新しい視点による試みであり、より現象に忠実な計算が要求される。

本論文では、今回の津波観測記録を利用すべく、日本海を伝播する津波に関する数値計算を行い、観測値と計算値との波形比較を行う。この比較結果から、計算モデルの伝播計算精度について考察する。さらに、計算によって拡張される時空間情報を用いて、日本海を伝播する津波の特性と陸棚上の応答特性について解析する。

2. 日本海全域を対象とする津波数値計算モデル

(1) 津波の基本方程式と計算モデル

津波の運動は、流速を海底から水面まで鉛直積分した非線形長波の式(1)(2)(3)で記述される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) \\ = +fM - gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{F}{D^2} MQ + A_H \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{F}{D^2} NQ + A_H \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、(x, y)は静水面にとった空間座標、tは時間、ηは水位変動、Dは(D=h+η)で表される全水深、hは静水深、(M, N)は各々(x, y)方向の流量フラックス、Q=√M²+N²、gは重力加速度、Fは底面摩擦係数、fはコリオリ係数、A_Hは水平渦動粘性係数である。渦動粘性項は従来の実用的な津波モデルでは考慮されていない。津波の支配方程式と数値解法の理論は、後藤・佐藤(1993)に詳しいので参考にされたい。

(2) モデルの計算領域と計算条件

津波の伝播計算を行う領域は日本海全域とする。図-1は、計算領域と等深線を表し、北海道から九州にかけての日本沿岸と大陸側の海岸線を含む南北1,620km、東西1,296kmの範囲である。格子間隔は全域1.8km、時間間隔は4秒とする。津波の追算期間は、地震が発生した

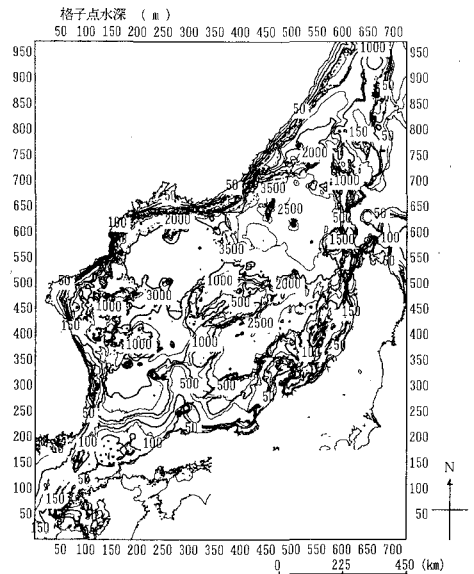


図-1 日本海を対象とする津波数値計算の計算範囲と等深線

* 正会員 工修 (株)エコー 第一技術部 解析調査課
 ** 正会員 (株)アルファ水工コンサルタンツ 技術開発部
 *** 正会員 工博 東海大学教授 工学部土木工学科 (前運輸省港湾技術研究所 水工部 海洋エネルギー利用研究室長)

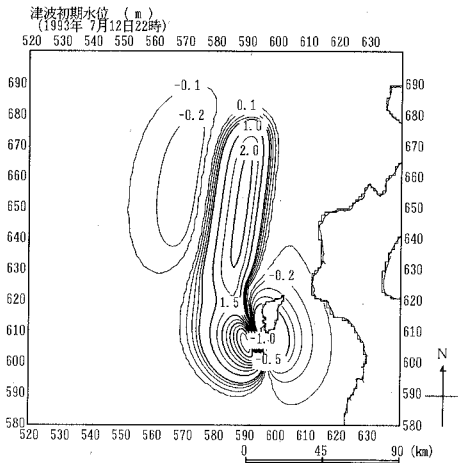


図-2 北海道南西沖地震津波の初期水位分布(東北大学波源モデル DCRC-17)

1993年7月12日22時17分から、8時間後の13日6時17分までとする。これは、津波が日本海全域に伝播し、陸棚上で応答する所要時間を追算するためである。

初期水位分布を与える波源モデルは、東北大学工学部災害制御研究センターで検討された研究段階のモデルDCRC-17を採用する。波源モデルDCRC-17の初期水位分布は、図-2のように表される。図に示す正の値は海面上昇を、負の値は低下を表す。断層は、北側・中央・南側の3断層である。

開境界からの津波の放射条件は、進行性長波の特性曲線をもとに自由透過させる方法を用いる。また、海岸線の境界は汀線を鉛直壁と考えて岸に直角な流量を0とし、陸上への遡上現象は取り扱わない。

3. 観測データと計算値の比較

(1) 津波の最大水位と伝播時間の計算精度

津波の痕跡調査は、秋田大学・東北大学と運輸省港湾技術研究所・北海道開発局開発土木研究所により実施された。図-3は、計算から得た最大津波水位の平面分布と、日本沿岸と大陸沿岸に沿って最大水位の計算値を抽出し、調査された痕跡高と比較した最大水位の沿岸分布を表す。最大水位平面分布の等値線は0.1m間隔である。最大水位の沿岸分布図は、m単位で、実線が計算値の分布を、黒丸が痕跡高を表す。同じ地点で痕跡高が複数ある場合は、最大・最小の幅を棒線で、平均値を黒丸で表した。

今回の津波は、奥尻島(沿岸分布図の青苗)で10mを越す痕跡高を、北海道南西岸(余市～静浦)で7.9m(大成町)を記録した。また、青森県から能登半島にかけて、2.0mに及ぶ高い痕跡高を記録した。

図-3によれば、計算最大水位の沿岸分布は、痕跡高よりも0.5m～数m程度低い値であった。この要因の1つに、1.8km格子による海岸線の近似では局所的な津波の増幅まで再現できなかったことが挙げられる。しかしながら、痕跡高の沿岸分布の特徴はよく再現している。

高い水位が計算された箇所は、波源域に近い奥尻島、北海道西岸と大陸側のロシア沿海州が挙げられ、津波の東西への強い指向性が確認できる。他に、津軽半島・新潟県沿岸・能登半島北岸で水位が高い。また、平面分布によれば、奥尻島・佐渡等の島や大和礁等、周辺より浅い海域でも高い水位が計算された。

次に、津波到達時刻に関する情報として、日本海沿岸の検潮記録から、第1波到達時刻が解析された(永井ら、1993)。図-3には、日本沿岸と大陸沿岸の津波先端の到達時刻(± 0.1 cmの水位変動を検出した時刻)の計算値を抽出し、潮位記録から求めた時刻と比較した到達時刻の沿岸分布も示されている。比較図は津波発生後の経過時間を表し、実線が計算値を、黒丸が観測値を表す。

計算値は観測値よりも10～15分程度早いのが、両者の沿岸分布の傾向は良く一致している。計算によれば、新潟県沿岸(新潟西港)の到達時刻が60～70分後であるのに対し、波源の遠方に位置する富山湾(新湊)が約60分後、能登半島北岸(輪島)が70分後とほぼ同時刻である点が特徴的である。また、石狩湾沿岸のように半島で遮蔽される沿岸も、回折波として伝播するため到達時間が遅くなる。

(2) 波高計・流速計の直接観測記録との比較

運輸省港湾局の全国波浪観測網により、日本海沿岸の複数地点で水位と流速が観測された。観測の詳細は永井らの報告を参考にされたい。このうち、輪島港沖(水深50m)で観測された23時50分から20分間の水位・流速の記録は、津波の第1波をとらえたものと推定される。また、秋田県港湾課と同県能代港港湾事務所は、能代港沖の水深25.5m地点において、津波到達直前の22時56分から翌朝に至るまで波高の連続観測を行い、完全な津波波形記録を観測した。

図-4は、能代港沖の津波波形の連続記録と計算値を比較したものである。上から観測値、線形計算、非線形計算で水平渦動粘性係数 A_H を $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $5.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした場合の追算結果である。

観測された第1波の到達時刻は23時頃で、6～8分周期の水位変動が津波到達後3時間程度まで明瞭に見られる。2時間経過する頃から60～80分程度の長周期の変動が顕著に現れ、3時間経過すると6～8分の短周期変動は次第に減衰する。計算値も同様の周期の変動が重なって現れている。しかしながら、線形計算は時間が経過しても短周期変動は減衰することなく継続する。非線形計

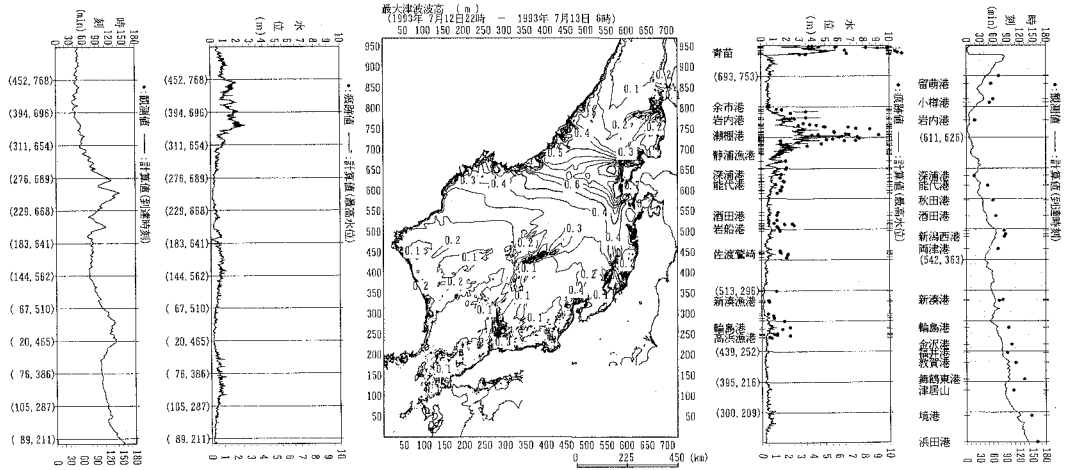


図-3 北海道南西沖地震津波の最大水位の平面分布および現地データから明らかにされた痕跡高・第1波到達時刻の沿岸分布と計算値との比較

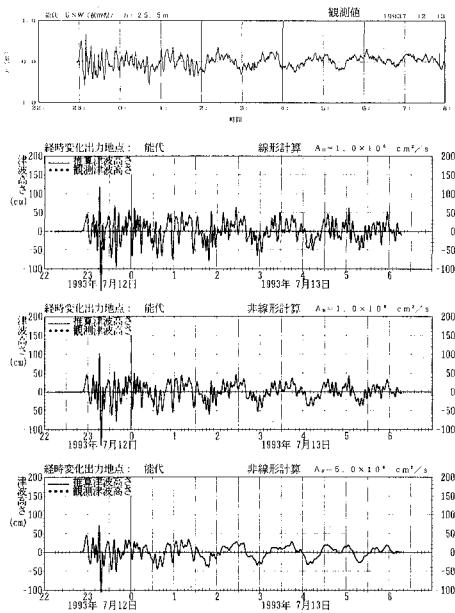


図-4 秋田県能代港沖で観測された津波波形の連続観測記録と計算値との比較

算では、 $A_H=1.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合に短周期変動の減衰は少なく、 $A_H=5.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の場合に急激な減衰をする。すなわち、 A_H を大きくすると、短周期変動の減衰は顕著になる。追算結果から判断すると、 $A_H=1.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ よりも幾分か大きい場合に、計算値と観測記録は一致すると推定される。

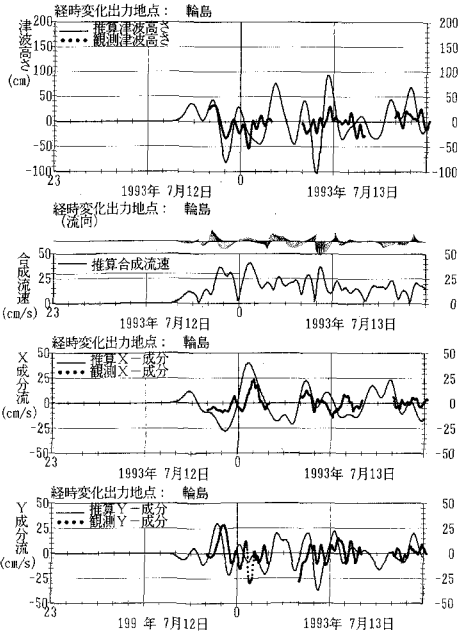
この結果は次のように説明される。短周期の水位変動は水深 100 m 以浅の沿岸に捕捉された振動によるものと考えられ、振動が発生する海域の水深は浅い。そのた

め、振動により発生する流速も比較的速くなる。流速が速くなると乱れによる粘性効果の寄与が大きくなる。すなわち、渦動粘性項が計算結果を左右することになる。一方、長周期の水位変動は、水深 400 m 以深の陸棚外縁が振動の節になり、海岸が腹になる陸棚上の第 1 モードの振動に一致する。この振動が発生する海域の水深は数 100 m に及ぶ。そのため、乱れによる粘性効果は無視できるほど小さくなり、振動は長時間にわたり継続する。なお、以降の追算では、非線形計算で $A_H=1.0 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ の条件を用いた。

図-5 は、輪島における津波到達直後の水位・流速の観測記録と計算値を比較したものである。図の上から水位・流向・合成流速・ N 成分流速（ほぼ岸沖方向）・ E 成分流速（ほぼ沿岸方向）を表す。観測値は、周期 6～8 分の振動に、3～4 分の短周期振動が重合している。また、第 1 波の振動は、水位と流速の極大発生時刻が一致する進行波型の波であるのに対し、その後の振動は、水位と流速の位相関係が明瞭でない。これは、第 1 波の入射波が沿岸に捕捉され、海岸からの反射波と重複して、複数の周期が共存する振動場が形成されたためと推定される。輪島の第 1 波の計算水位は、観測値の 0.45 m と良く一致している。しかし、その後続く短周期振動は、振幅・位相ともに大きくずれる。この傾向は能代についても同様である。

(3) 津波の周波数スペクトルの比較

図-6 は、能代沖の水位連続記録と計算値の時系列から求まる周波数スペクトルを比較したものである。太線が観測スペクトルを、細線が計算値を表す。観測スペクトルから求められる津波の卓越周期は、陸棚上の基本振動周期と推定される 68 分、津波の周期 7.4 分と、沿岸の



図一五 輪島における津波到達直後の水位・流速の観測記録と計算値との比較

応答から生ずる 10.5 分と 3.9 分である。計算スペクトルの卓越周期は、観測値に一致するものと違う周期のものがあるが、ほぼ周波数分布の傾向は再現している。しかし卓越周期のエネルギーは、計算値と観測値で差がある。

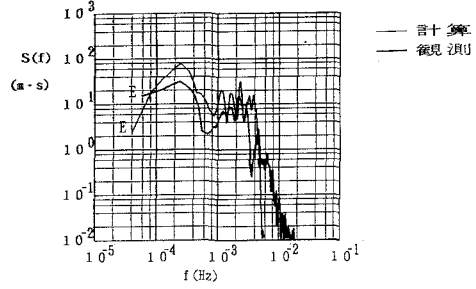
このように、津波の数値モデルは、陸棚上の応答により発生する卓越周期を再現することが可能で、定性的には現象を再現しうる水準にある。しかしながら、各々の振動のエネルギーレベルや波形のような定量的な再現が可能な水準には至っていない。本研究で導入した渦動粘性項は、短周期振動の振幅（エネルギーレベル）やその減衰傾向を再現する上で重要であるが、同時に最大水位を低下させる傾向もある。防災学的な観点から考えると危険性を含んでいる。モデル改良において、乱れの効果をどの程度導入するか、今後の課題である。

4. 津波の日本海伝播特性と陸棚上の応答特性

(1) 日本海を伝播する津波の特性

図一三に示した津波の最大水位の平面分布と到達時刻ならびに最大水位の沿岸分布から、日本海を伝播する津波の特性について考察を行う。

津波発生後 5 分以内に、波源域に位置する奥尻島へ第 1 波が到達し、5~10 分後に北海道南西岸へ到達した。その後、本州北部 (20 分)、佐渡 (50 分)、山形県沿岸 (55 分)、新潟県沿岸 (60 分) に到達する。そして、富山湾 (60



図一六 能代沖における観測値と計算値の周波数スペクトルの比較

分)、能登半島の輪島 (70 分)、島根県沿岸 (90 分)、山口県沿岸 (120 分)、対馬海峡 (180 分) に伝播する。山形県沿岸は佐渡よりも波源に近いが、津波の到達時間は遅い。また、新潟県沿岸と富山湾沿岸はほぼ同時刻に津波が到達する。このような到達時間の逆転現象は、深海域を伝播する津波の方が、陸棚上をゆっくり伝播する津波よりも先に到達することにより生ずる。特に、新潟県沿岸は遠浅な海岸であり、佐渡により遮蔽されているため、津波の伝播に時間を要する。

津波の伝播過程で、北海道西岸・新潟県沿岸・能登半島北岸で高い水位が発生する。この要因は場所により異なるが、屈折による集中、浅水変形、陸棚上における津波の捕捉等が考えられる。特に、陸棚上に津波が捕捉されると、複数の時空間スケールの振動が共存する場が形成される。このような振動は、能代や輪島の水位変動にも顕著に現れており、日本沿岸と大陸沿岸の陸棚上の随所で見られる。また、奥尻島・佐渡のような島回りや大和礁等の浅い海域でも、津波エネルギーの一部が捕捉され水位は高くなる。

(2) 陸棚上の津波の応答特性

水位変動に現れる卓越周期の振動が、どのような空間分布かを明らかにすることは、陸棚の津波の応答を理解するために意義がある。今、輪島港沖の陸棚海域を対象に、海域内の全格子点における水位の時系列データについて周波数スペクトルを求め、海域内の卓越周波数のエネルギーを各格子点で抽出し、エネルギーの平面分布を描いた。輪島の観測点において周波数スペクトルを求めた結果、周期 22.8 分、9.3 分、7.1 分が卓越していた。このうち周期 22.8 分と 9.3 分の 2 種類の卓越する振動について、振動の空間分布を明らかにする。

図一七は周期 22.8 分のエネルギー分布を、図一八は周期 9.3 分の分布を表す。各々の図は、海域内における対象周期の最大エネルギーで正規化し、百分率で表したエネルギー比率の分布である。

周期 22.8 分のエネルギー比率の分布では、輪島港沖に

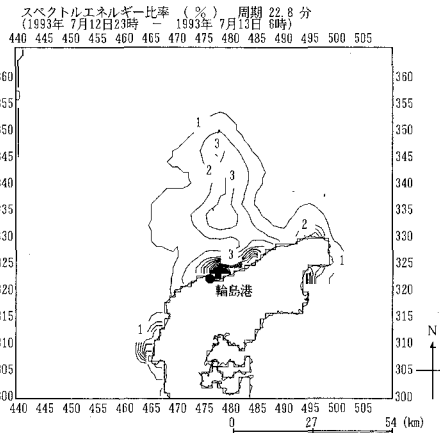


図-7 輪島港沖陸棚海域における周期22.8分の振動のエネルギー比率の分布

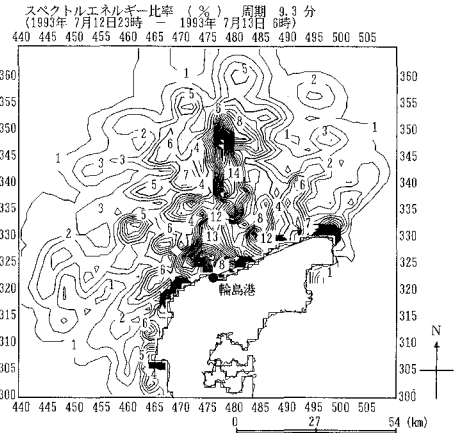


図-8 輪島港沖陸棚海域における周期9.3分の振動のエネルギー比率の分布

エネルギーが集中し、輪島港周辺海岸で際立って高く、輪島港沖合（水深50m以浅の浅瀬が存在する）で相対的に高くなっている。この振動系は、輪島港周辺海岸と沖側の浅瀬に腹を持ち、浅瀬外縁（100m等深線に相当する）に沿って節を持つ単純な系となる。

一方、周期9.3分の振動系は、エネルギー比率の分布に表すように複雑な系となる。能登半島の海岸沿いに数個の腹が存在し、輪島沖の浅瀬に沿っても腹が複数個存在する。これらの腹の位置では収束・発散が繰り返され、隣接する腹同士は 180° の位相差を持ち、腹と腹の間が節となる。すなわち、隣接する腹のなす距離が振動の $1/2$ 波長に相当する。個々の波の波長と振幅は、波が存在する海域の水深によって変化するため、波長の異なる波により構成された複雑な系が形成される。

これらの陸棚上で発生する振動系は、津波の周期や海岸地形・水深により、その卓越周期と波長が決定されると考えられる。このような陸棚上の応答と、津波の入射条件、海岸地形・水深との関係を明らかにすることは、現象を理解する上で重要な研究課題になる。

5. おわりに

本論文の成果は、次のようにまとめられる。

① 日本海沿岸で測定された痕跡高と潮位記録から求めた津波の第1波到達時刻を、計算値と比較した。最大水位の計算値は0.5m～数m程度低い値となり、到達時刻の計算値は10～15分程度早めとなった。しかし、水位・時刻とも沿岸分布傾向はよく一致した。

② 観測された津波波形と計算値を比較した。本研究では、数分周期の波形の再現のために、渦動粘性項を新たに導入した。ただし、最大津波水位を低下させる傾向

もあり、導入する渦動粘性係数値（ $10^6 \text{cm}^2/\text{s}$ 以上）は検討を要する。

③ 計算値と観測値の第1波の極大値はほぼ一致したが、その後の波形は振幅・位相ともに差が見られた。スペクトルの比較から、計算値は卓越する振動をほぼ再現した。しかし、波形やエネルギーレベルのような量的再現まで可能な水準には至っていない。

④ 波源からの距離と津波の到達時刻とは比例しない場合が多々ある。また、津波の伝播過程で、陸棚・沿岸・島・浅瀬等において変形・捕捉され、水位が増幅する。

⑤ 陸棚上では複数周期の振動系が形成され、振動の空間スケールは海岸地形と水深により変化する。輪島沖の陸棚上における振動系の分布解析によれば、長周期の振動系は単純な分布になり、短周期は複雑な分布になる。

謝辞：本研究を行うにあたり、東亜建設工業(株) 青野利夫氏から有意義な討論を得た。また、運輸省港湾技術研究所 永井紀彦氏、橋本典明氏、細山田得三氏より貴重な観測データを、東北大学工学部 高橋智幸氏より断層モデルの情報を提供していただいた。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 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. 33, No. 2, pp. 3-44.
- 永井紀彦・橋本典明・浅井 正 (1993): 平成5年北海道南西沖地震津波波形記録解析速報, 港湾技術研究所報告, Vol. 32, No. 4, pp. 49-95.
- Satake, K., M. Okada and K. Abe (1988): Tide gauge response to tsunamis measurements at 40 tide gauge stations in Japan, *Oceanogr. Mag.*, 46, pp. 557-571.