

津波災害の予測技術の現状と将来

PRESENT AND PROSPECTIVE VIEWS OF THE PREDICTION TECHNIQUE FOR TSUNAMI DISASTERS

高橋智幸
Tomoyuki TAKAHASHI

正会員 博士(工学) 秋田大学助教授 工学資源学部土木環境工学科
(〒010-8502 秋田市手形学園町1-1)

To improve tsunami disaster prevention, reliable prediction techniques for tsunami disasters are required. In this paper, the present techniques are reviewed and their directivities in tsunami research are discussed. Those techniques are divided into two periods. They are before and after a tsunami generation. In the former period, seismic information takes part in the prediction, and in the later period, tsunami information does. Offshore tsunami observation system, however, is not yet sufficient. The system which covers broad offshore region is expected.

Key Words : *Tsunami forecasting, ocean bottom tsunami gage, GPS tsunami gage, tide gage, tsunami deposits, seismograph, paleogeography*

1. はじめに

多くの津波研究者の目標は津波による被害を防ぐことあるいは減らすことである。そのためには津波防波堤などのハードウェアや津波ハザードマップなどのソフトウェアによる防災が重要となるが、これらの防災技術をより効果的に活用するためには津波災害の予測が不可欠である。そこで本稿では津波災害を予測する技術の現状を整理し、将来的にどのような方向性で技術を進歩させていくべきかを考察する。

ところで「津波災害」という言葉は「津波」や「津波防災」とは異なる意味を持つ。しかし、混同されがちであり、一般的には明確に区別されないで用いられていることも多いため、それぞれの言葉の定義を最初にしておく。まず「津波」とは気象以外の地球物理学的原因（例えば地震や海底火山など）で発生する純粋な自然現象を意味している。すなわち、人的、物的被害の有無などはこの定義には含まれていない。次に「津波災害」とは津波という自然現象によって人間の社会生活に何らかの被害が発生することを意味する。よって、たとえ津波が発生したとしても、人間になら被害が発生していなければ津波災害とは言えないし、人類の誕生以前には津波災害は存在しない。最後に「津波防災」とは津波災害の防災あるいは軽減を意味している。厳密に言うところ、防災は災害を防止することであり、被害の軽減には減災という言葉も用いられるが、ここではま

とめて「防災」と表現している

本稿で取り上げているのは「津波災害」であるが、その予測といった場合は沿岸部へ来襲する津波の水位や流速、流体力などの物理的情報とそれらによって発生する人的および物的、経済的被害に関する情報の2種類が対象となる。後者については、限られた紙面の都合上割愛するが、既往災害のデータを統計的あるいは実例として整理し、将来の被害予測に用いられる指標が幾つか提案されていることを述べておく。ただし、津波は地震や高潮などと比較すると発生頻度が低いためデータにばらつきが大きいこと、都市や産業の構成および形態が大きく変遷して来ていること、数mの格子間隔での詳細計算が可能になっていることなどを踏まえ、力学的に被害の発生をモデル化し、その検証材料として既往災害のデータを用いることも検討すべき時期に来ていると思われる。

さて、沿岸部での津波災害の予測には、外洋での津波の発生を予測し、数値計算と連携させることも有効である。すなわち、津波の発生を初期条件あるいは境界条件として取り扱い、沿岸部を含んだ計算範囲を設定して数値計算を実施する¹⁾。先に「津波災害」の予測と「津波」の予測は異なることを説明したが、「津波」の発生を予測することは間接的に「津波災害」の予測を実現することになるため、以下では津波発生の予測も津波災害の予測に含まれるとして説明する。

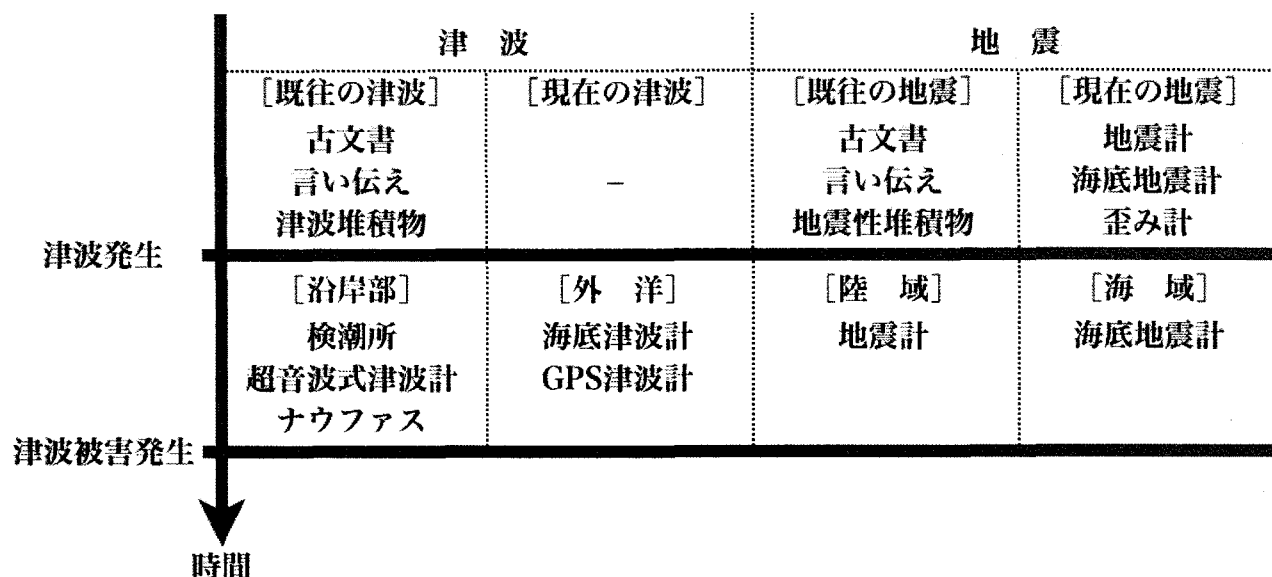


図-1 津波災害予測技術の分類

2. 津波災害の予測技術の分類

時間軸でみた場合、津波災害の予測技術は図-1に示すように、津波の発生を境にして大きく二つに分けることができる。一つは津波発生前の期間、もう一つは津波発生後から津波が沿岸部へ来襲して被害を発生させるまでの期間である。前者は時間的に余裕があるが、これから発生する未知の津波を予測しなくてはならないため不確定要素が大きくなる。一方、後者は既に発生した津波を対象とするため津波災害の予測に必要なパラメータはある程度限定されてくるが、時間的な余裕がない。この時間的余裕は津波の到達時間あるいは来襲時間というが、対象地域および対象津波によって大きく異なる。例えば、1993年北海道南西沖地震津波は地震発生から数分後に奥尻島の青苗に來襲しているが、南海地震津波では大阪湾に第一波のピークが來襲するのは約2時間後と推定されている。また、遠地津波の1960年チリ地震津波では約1日後に日本の太平洋側沿岸部に來襲している。よって、この到達時間も予測すべきパラメータであり、津波発生前の期間に予測しておくべきものである。

また、津波災害を予測するためには調査や観測を行う必要があるが、その対象が津波そのものであるのか、それとも津波の発生原因であるのかで分類することができる。津波の発生原因としては、地震や海底火山、海底地滑り、隕石衝突など多岐にわたるが、9割は地震によって発生している。また、地震以外の予測技術は、津波災害の予測に用いることを考えた場合、地震のそれに比べて不十分なものが多い。そこで本稿では津波の発生原因としては地震のみを取り扱うこととする。

3. 津波発生前の予測技術

津波発生前においては、津波そのものに関する予測技術は限定され、過去の津波災害の調査が主になる。すなわち、将来の津波災害も既往のものと同様に発生する可能性が高いとする立場で、既に発生した津波災害を調べて予測値とすることである。例えば、内閣府の中央防災会議は東南海・南海地震津波の被害想定において既往最大と考えられている宝永地震津波を予測の基本に用いている²⁾。

過去に発生した津波災害の調査方法としては古文書や言い伝えが主に用いられてきた。日本においては古来より多くの史料に津波災害の記録が残っているため、世界有数の歴史津波データを保持している³⁾。しかし、環太平洋諸国のように繰り返し津波の被害を受けているにも関わらず、史料としては残っていない国々も多い。また、史料が作成される以前に発生した先史津波については知ることができない。

このような問題点を踏まえて、近年、津波堆積物を用いた解析が多く行われている^{4), 5), 6), 7), 8), 9), 10)}。津波堆積物とは津波の遡上に伴い陸上へ運搬され堆積した海砂などである。この津波堆積物に地質学的手法を適用することにより、歴史津波の発生や来襲状況を知ることができる。さらに水理実験や数値計算と連携することにより定量的に歴史・先史津波の解析を行おうという試みも始まっている^{11), 12), 13)}。

一方、地震の場合は、津波と同様に過去に発生したイベントを調査する方法に加えて現在の地震活動を調査する方法も行われている。すなわち、将来発生する地震も既往のものと同様性を持つと同時に、現在の地震活動の延長上にあるとの立場である。文部科学省の地震調査研究推進本部より、南海トラフ

14), 日本海溝¹⁵⁾, 千島海溝¹⁶⁾, 日本海東縁部¹⁷⁾における地震活動の長期評価が発表されている。一例として図-2に日本海東縁部において想定されている震源域およびそこで発生すると予想されるマグニチュード、今後30年間の発生確率を示す。図中の赤い四角は想定震源域、青い四角は既往地震である。

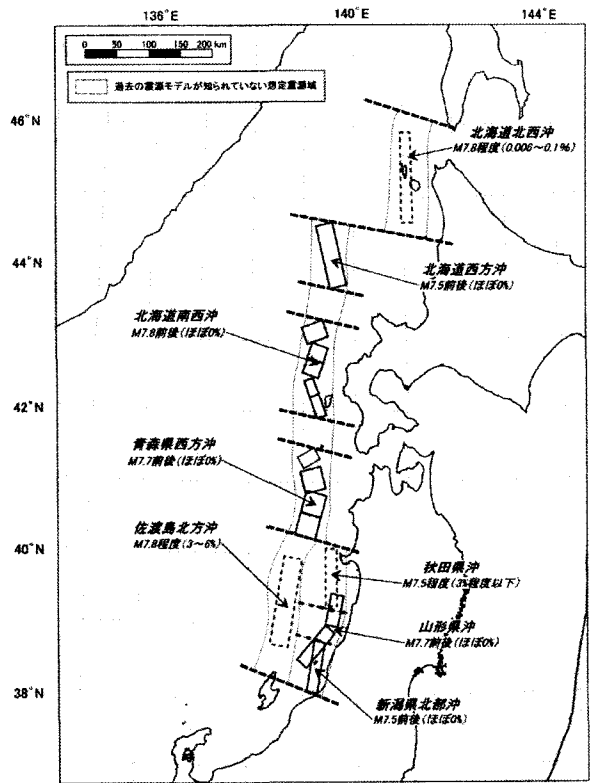


図-2 想定地震の震源域・規模および30年確率¹⁷⁾

過去に発生した地震の調査には、津波と同様に古文書や言い伝えがよく用いられており、日本においては多くの史料から歴史地震データが得られている¹⁸⁾。また、地震動により周りの流体と混合し流動化して発生する混濁流によってもたらされる地震性堆積物¹⁷⁾もよく用いられており、歴史地震のみならず先史地震の解析にも有効である。さらに日本の歴史地震については多くの研究から断層モデルが推定されている¹⁹⁾。断層モデルが与えられると海底の隆起や沈降の分布を求める^{20), 21)}ことができるため、津波数値計算の初期条件として用いることが可能になる。

現在の地震活動については、陸域にある地震計や海底地震計を用いて観測が行われている。また、国土地理院などがGPSを用いて全国の地殻変動を測定しており²²⁾、歪みエネルギーのモニタリングが整備されてきている。

地震の発生予測はそれだけでは津波災害の予測とはなり得ないため、津波数値計算を実施して沿岸部へ来襲する津波の水位や流速の時間変化が求められる¹⁾。計算結果は地図上にプロットし、津波ハザー

ドマップを作成する²³⁾ことが防災上は有効である。また、防災GISに入力し、避難場所や災害時要援護者などの地域情報と連携することによる防災上の付加価値を与える試みも始まっている。

4. 津波発生後の予測技術

津波警報に関する日本の責任機関は気象庁であるため、地震が発生すると気象庁は迅速に津波災害の予測を開始する²⁴⁾。具体的には、全国に設置した地震計から構成される地震観測網のデータを用いて、地震発生後2分程度で震源とマグニチュードを決定する。次に図-3に示す津波予報図を用いて、津波の有無や規模の判定を行う。さらに、図-4に示す10万通り以上の津波を予め計算してあるデータベース²⁵⁾から発生した地震に最も近いケースを検索し、より詳細な津波災害の予測を行っている。

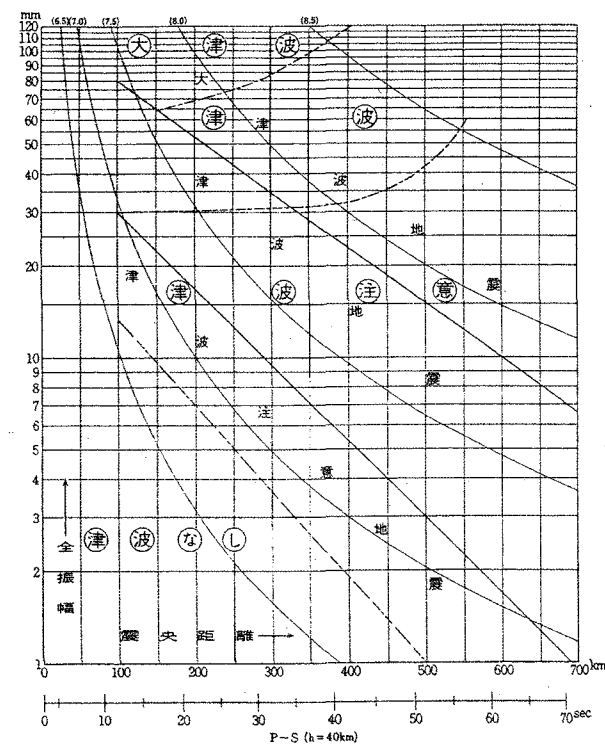


図3.1.2-5 津波予報図

図-3 気象庁による津波予報図²⁴⁾

このように公的な津波予報は気象庁が担当しているが、予測精度の向上や各地域の防災力の向上を目的とした調査および観測も各機関で行われている。従来から観測を行っているのは検潮所であるが、沿岸部の港湾などに設置されているため、ここでの観測データを用いて津波災害の予測を行うことは時間的に困難である。むしろ、発生した津波の特徴を明らかにし、次の津波災害に備えるための防災データ

として捉えるべきであろう。ただし、図-5に示す気仙沼湾のように細長い湾の場合では、湾口部の潮位計で地震発生後の異常な潮位（津波）を観測し、湾奥への津波来襲を予測できる可能性はある。なお、この気仙沼湾では従来の検潮井戸ではなく超音波式の潮位・津波計を用いている²⁶⁾。

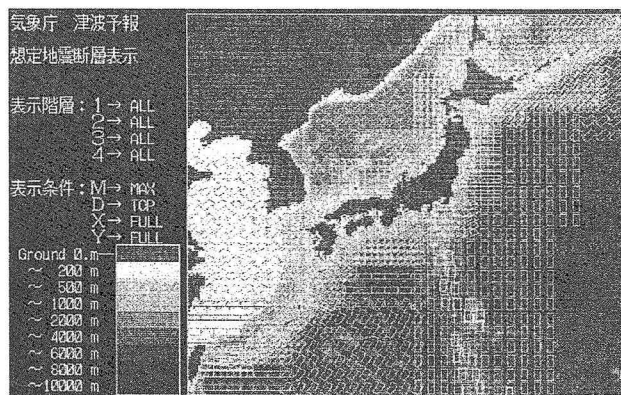


図-4 気象庁による津波データベース²⁵⁾



図-1 センサー設置位置図

図-5 気仙沼湾の湾口と湾奥における潮位計の位置

他に沿岸部で海面の変動を観測するシステムとしては独立行政法人港湾空港技術研究所などが構築・運営しているナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）がある²⁷⁾。ナウファスは図-6に示す54観測地点（2003年12月現在）において、水深数十mの場所で

波高や周期、波向、流速などを測定している。図中、USWは超音波式波高計、CWDは流速計型波向計を意味している。沖に設置されているため港湾などの地形的影響を受けにくい上、デジタルデータであるため数値計算の境界条件や検証材料にも適している。しかし、津波災害の予測に用いるためには沿岸部に近過ぎる。むしろ、発生した津波の特性を明らかにするための解析に適している。

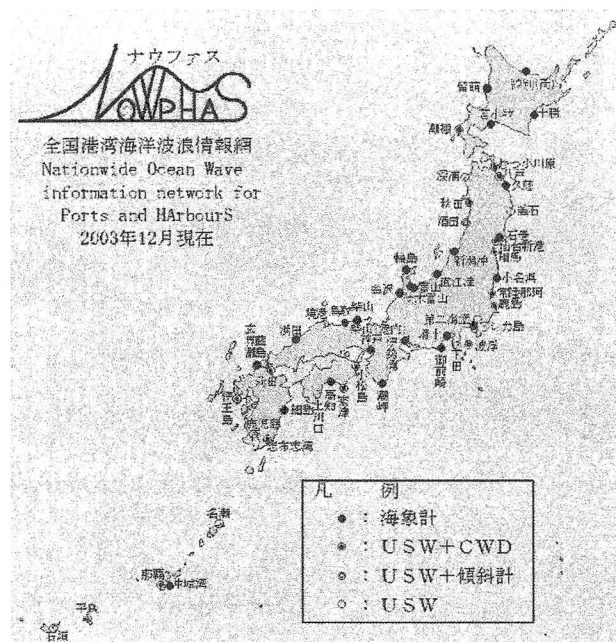


図-6 ナウファスの観測網²⁷⁾

津波災害の予測に用いるためにはより外洋で津波を観測する必要があり、その一つとして開発されているのが海底津波計である。釧路・十勝沖、三陸沖、房総沖、室戸岬沖などの40km～140km沖合の海底に設置されている。海水の圧力を測定することにより、千島海溝、日本海溝、南海トラフなどで発生するプレート境界型地震津波による海面変動を捉えることが可能である。実際、2003年9月26日に発生した十勝沖地震津波を海洋科学技術センターの釧路・十勝沖の海底津波計（図-7）²⁸⁾が観測に成功している。

海底津波計は沖合に設置されているため、ここでの観測結果を基にして沿岸へ来襲する津波の予測精度を向上させることが期待されている。ただし、設置には海底ケーブルの敷設も必要なため1台あたり数億円程度となることから、外洋において密に設置することは困難である。そのため、津波の波源（発生域）を面的に捉えることができず、地震情報との併用が必要である。

海底津波計の他に外洋での津波観測を目的としたものにGPS津波計がある²⁹⁾。これは測位アルゴリズムとしてリアルタイムキネマティック（RTK）方式を採用したGPS受信機を外洋に浮かべたブイに搭載し、陸域に設置した固定基準局との位置関係を高精度で計測するものである。これまで相模湾および大

船渡市沖合での試験が終了し、新たに室戸沖での実証実験（図-8）が開始されている³²⁾。

GPS津波計は、上述の海底津波計に比べて安価（数千円程度）に導入できるため、沿岸部の広い範囲に配備することが現実的に可能である。ただし、現在のGPS受信機は固定基準局から10km程度沖合に設置されており、より外洋での観測が期待されている。

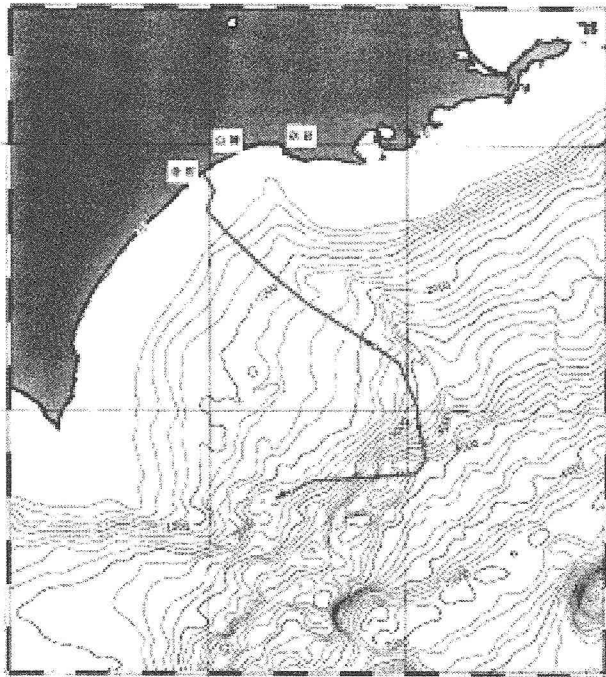


図-7 鉋路・十勝沖の海底津波計の設置位置²⁸⁾

4. おわりに

津波災害の予測技術を整理するにあたり、津波発生以前の段階と発生以後の段階に分けて検討した。また、調査および観測の対象が津波そのものである方法と津波の発生原因である方法に区別した。ただし、津波の発生原因としては、最も頻度の高い地震のみを対象とした。

津波発生以前の段階および発生時は地震に関する情報に大きく頼ることになるため、地震学との連携を効果的に行うことが重要である。一方、津波発生以後の段階では、各種の方法で観測された津波データを用いて、沿岸部へ来襲する津波の予測精度を向上させることが重要となる。そのためには外洋において津波を迅速に観測し、数値計算と連携を図る時間的余裕の確保が必要である。

しかし、外洋における津波の観測体制は沿岸付近に比べると不十分であり、今後の展開が期待される。特に現在導入されている海底津波計やGPS津波計は点的に測定しており、津波の波源全体を把握することは困難である。よって、観測網の整備を行っていくと同時に、面的に津波の発生を検知できるシステ

ムの開発も重要となる。

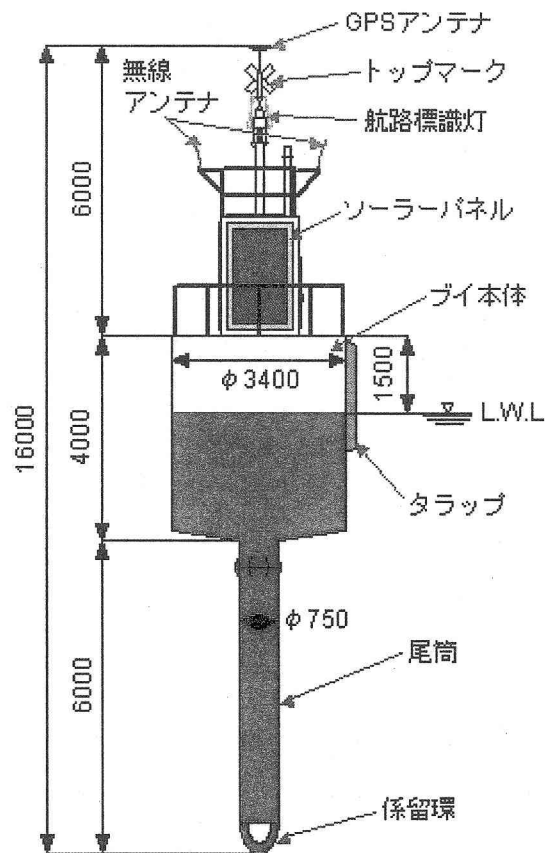


図-8 室戸沖で実証実験中のGPS津波計³²⁾。

参考文献

- 1) 高橋智幸：津波の解析技術- 南海地震津波を例として - , 土木学会水工学シリーズ, 02-B-5, 2002.
- 2) 中央防災会議事務局：中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」（第7回）説明資料1, 20p., 平成14年12月24日.
- 3) 例えば, 渡辺偉夫：日本被害津波総覧, 第2版, 東京大学出版会, 238p., 1998.
- 4) Dawson, A.G., Shi, S., Dawson, S., Takahashi, T. and Shuto, N.: Coastal Sedimentation Associated With The June 2nd And 3rd, 1994 Tsunami In Rajegwesi, Java, Quaternary Science Reviews, Vol.15, pp.901-912, 1996.
- 5) 今村文彦, 箕浦幸治, 高橋智幸, 首藤伸夫：1992年フローレス島地震津波による堆積作用に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.686-690, 1996.
- 6) Minoura, K., Imamura, F., Takahashi, T. and Shuto, N.: Sequence of sedimentation processes caused by the 1992 Flores tsunami : Evidence from Babi Island, Geology, Vol.25, No.6, pp.523-526, 1997.
- 7) 今村文彦, 箕浦幸治, 高橋智幸, 首藤伸夫：エーゲ海における歴史津波堆積物に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.321-325, 1997.
- 8) Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T. and Yalciner, A.C.: Discovery of Minoan tsunami deposits, Geology, Vol.28,

- No.1, pp.59-62, 2000.
- 9) 今村文彦, 箕浦幸治, 高橋智幸, 首藤伸夫: エーゲ海における歴史津波堆積物に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.321-325, 1997.
 - 10) Minoura, K., Imamura, F., Kuran, U., Nakamura, T., Papadopoulos, G.A., Takahashi, T. and Yalciner, A.C.: Discovery of Minoan tsunami deposits, *Geology*, Vol.28, No.1, pp.59-62, 2000.
 - 11) 高橋智幸, 首藤伸夫, 今村文彦, 浅井大輔: 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610, 1999.
 - 12) 長谷川史郎, 高橋智幸, 上畑義行: 津波遡上に伴う陸域での堆積物形成に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.311-315, 2001.
 - 13) 菅原正宏, 大窪慈生, 菅原大助, 箕浦幸治, 今村文彦: 津波により一様斜面上を移動する土砂および津波石に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.266-270, 2003.
 - 14) 地震調査研究推進本部: 南海トラフの地震の長期評価, 26p., 平成13年9月27日.
 - 15) 地震調査研究推進本部: 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価, 35p., 平成14年7月31日.
 - 16) 地震調査研究推進本部: 千島海溝沿いの地震活動の長期評価, 31p., 平成15年11月12日.
 - 17) 地震調査研究推進本部: 日本海東縁部の地震活動の長期評価, 35p., 平成15年6月20日.
 - 18) 例えば, 宇佐美龍夫: 新編日本被害地震総覧 [増補改訂版], 第5版, 東京大学出版会, 493p., 1999.
 - 19) 佐藤良輔ら: 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., 1989.
 - 20) Mansinha, L. and Smylie, D.E.: The displacement fields of inclined faults, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.61, No.5, pp.1433-1440, 1971.
 - 21) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
 - 22) 国土地理院の地殻変動情報に関するHP: <http://www.gsi.go.jp/CRUST/index.html>
 - 23) 内閣府, 農林水産省, 水産庁, 国土交通省: 津波・高潮ハザードマップマニュアル, 128p., 平成16年3月.
 - 24) 国土庁, 消防庁, 気象庁: 津波災害予測マニュアル, 104p., 平成9年3月.
 - 25) 館畑秀衛: 津波数値計算技術の津波予報への応用, 月刊海洋, 号外No.15, pp.23-30, 1998.
 - 26) 佐藤健一ら: 潮位・津波観測システムー気仙沼市における潮位観測システムの実施例ー, 津波工学研究報告, 第9号別冊, pp.1-18, 1992
 - 27) ナウファスに関するHP: <http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/kaisho/>
 - 28) 海洋科学技術センターの海底津波計に関するHP: http://www.jamstec.go.jp/scdc/top_j.html
 - 29) 加藤照之ら: GPS津波計の開発, 月刊海洋, 号外No.15, pp.38-42, 1998.
 - 30) 室戸沖GPS津波計沖合実証実験に関するHP: <http://www.tsunamigps.com/index.html>