

我が国の津波警報システムの現状と高度化への試み — 2006 年千島列島沖地震津波と 2008 年福島沖地震津波の事例 —

今村 文彦*, 阿部 郁男*

1. 津波避難できない実態

地震国である我が国の沿岸では過去から津波による多大な被害を受け続けており、特に人的被害は著しい。明治 29 (1896) 年三陸地震津波では、2 万 2 千名もの犠牲者を出し、「TSUNAMI」を世界語にした理由ともなった。世界における津波犠牲者の 3 割強が我が国において生じていることになる。「つなみ」という言葉を知らない日本国民はいないほどである。また、国際的には専門家や一部地域に限られていたが、2004 年 12 月 26 日のインド洋津波以降では、世界のメディアは「TSUNAMI」を使用している。

恐ろしい自然災害であるが、地震発生から沿岸到達まで僅かの時間的余裕があるので、来襲前に安全な場所に移動し避難できれば人的被害をゼロにすることも可能である。しかし、現在、この避難行動が予想以上に適切に行われていない危惧がある。

現在、世界最先端の津波予報システムを持つ我が国であるが、津波情報の発信側、受信側の両方において課題がある。適切な避難を促すことが出来る津波情報の要件としては、

(1) 迅速性、(2) 正確性、(3) 詳細性、がある。本文は、過去の警報システムの歩みを振り返りながら、将来に、緊急地震速報などによる情報を活かし、2006 年千島列島沖地震津波と 2008 年福島沖地震津波の事例にしながら、津波に関する情報を如何に向上させ、適切な避難に結びつけさせる課題と提案を紹介したい。

2. 津波予報システム

2.1 初めての津波予報

我が国の津波予報システムは、世界でも最も実用的で歴史のあるものである。このシステムの現在に至るまでの過程を振り返りたい。昭和三陸津波の大災害を教訓に、昭和 16 年に三陸沿岸を対象とした津波警報組織が出来た。この時、仙台測候所で使用されていた予報図が図-1 である (今村・首藤, 2000)。当時は、まだ予報中枢がなく、測候所毎にその管轄区域に対して予報が行われていた。住民へは、ラジオ及び警察署への電話連絡によって、発震後 10 ~ 20 分以内に予報が伝達されていた。

昭和 24 (1949) 年 10 月 3 日付で、「津波警報機構を 60 日以内に組織し、それより 30 日以内に警報機構の実施テストを完了する」旨、連合国総司令官名の覚え書きが出された。これを受けて、政府は同年 12 月 2 日に、「津波予報伝達総合計画」を閣議了承し、12 月 20 日に第 1 回総合テストが実施されたのである。この津波予報伝達総合計画は、若干の修正後、昭和 27 (1952) 年 6 月に制定された気象業務法の体系に取り込まれた。正式決定の直前、3 月 4 日に十勝沖地震津波が発生したが、この予報システムは成功を収めた。

当初の予報作業は、各地震観測地点で観測された地震の P 波と S 波の到達時刻が電話又は電報で津波予報中枢官署に送られ、そこで地図、チャート、鉛筆、コンパス、定規およびある種の計算機を使う手作業で地震の震源と規模 (マグニチュード) を決定し、その後担当者が「津波予報図」(地震の震度や初期微動継続時間と全振幅との関係から、津波発生の可能性を判断できるよう、過去の

*東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター

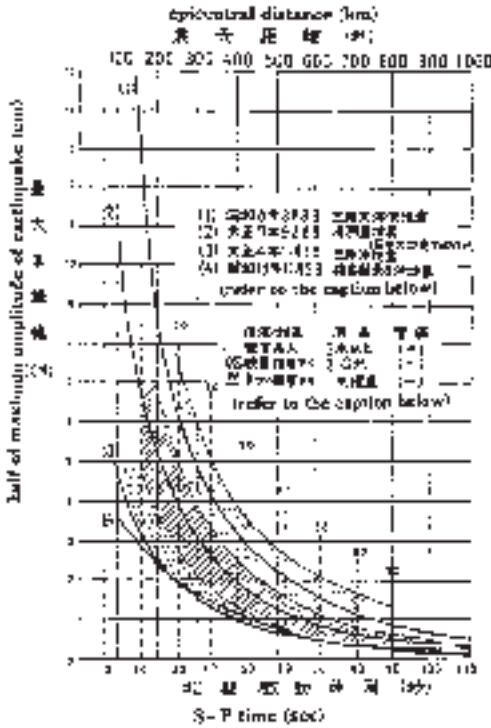


図-1 気象庁の津波予報図 (昭和 16 (1941) 年頃仙台測候所で使用)

津波予報図

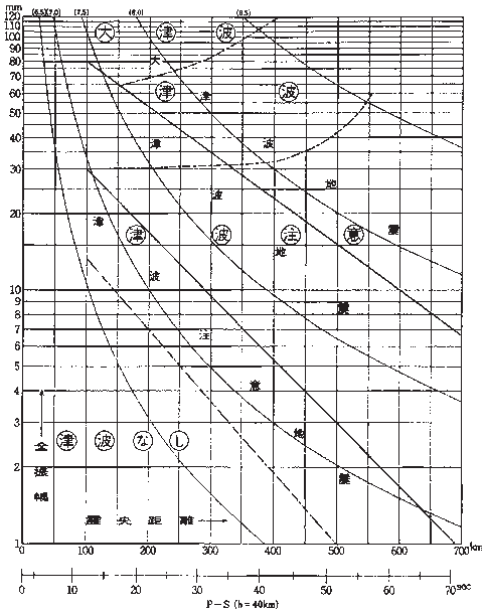


図-2 津波予報図 (現在使用されている予報図)

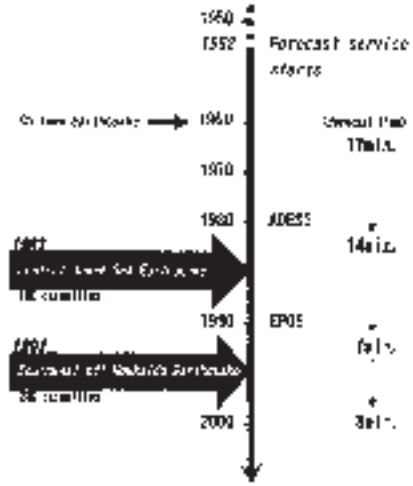


図-3 予報サービスの歴史および短縮による影響をもとにした主要な地震

図-3 津波予報システムと発表までの所要時間 (気象庁資料)

データに基づいて経験的に作成した図) により津波発生の有無を判断するものであった。

2.2 予報時間の短縮に向けて

当時、予報を発表までに平均して17分ほどかかっていた。さらに、その結果を津波来襲地域へ伝達する手段は、電報や電話であった。津波予報までの時間を短縮化するために、まず地震の震源及び規模の決定をできるだけ迅速に行う目的で、気象庁は観測データ収集のための伝送網の整備や処理の自動化等を行った。

昭和 55 (1980) 年には、コンピュータを使用した通信システム (L-ADESS : Local Automated Data Editing and Switching System) を取り入れて地震観測データの迅速な収集が可能となり、津波予報に要する時間が約 14 分に短縮された。その3年後の昭和 55 (1983) 年 5 月 26 日の日本海中部地震の際には地震発生後 14 分で津波予報 (警報) を発表することに成功した。しかし、一部の沿岸には予報が出るよりも早く、地震発生後 7 分後に津波の第一波が到達していた。

このため、地震発生後 7 分以内の予報を

目指して、地震を自動探知して、地震の位置・規模の計算、津波の可能性の判定及び発表に至る一連の処理を自動的に行うシステム

(EPOS: Earthquake Phenomena Observation System, ETOS: Earthquake and Tsunami Observation System) が導入され、同時に津波予報は報道機関からの緊急放送でも送出されることとなった。このシステムは、平成5年(1993)年7月12日の北海道南西沖地震で実際に稼働し、目標時間を下回るわずか5分で津波警報が発表された。しかしながら、奥尻島には最大10mの津波が早いところで3分で来てしまった。

このように、時間短縮の努力がなされていた。また同時に、津波有り無しという予報の内容についても課題が指摘されていた。

2.3 津波予報の向上 — 経験則から数値計算の応用へ —

適切な避難行動のためには、迅速で正確な情報が不可欠である。気象庁では、従来使用してきた津波予報図に変えて、津波数値計算結果を使用する新しいシステムを開始した。10万回程度の詳細な数値計算を前もって行い、その結果をデータベースとして保存しておく。地震発生時に、震源と地震のマグニチュードが決まれば、瞬時に計算結果を引き出して予報できるようになった。世界で初めての量的予報システムである。

その結果を、全国の海岸を、長さ(直線距離)100kmから200km程度の66の海域に分割して、それぞれの海域における津波高を予報している。これは、ほぼ各県の海岸毎といって良い長さである。予報される内容(津波高さ)は、これまでどおりであるが、その中身は「大津波」で3m, 4m, 6m, 8m, 10m以上の5段階、「津波」で1m, 2mの2段階、「津波注意」で0.5mの1段階となる。高さに加え、津波到達予想時間も発表される。平成11(1999)年4月から量的津波予報システムが運用開始された。

なお、このように詳細に予報されるようになったが、ここでもまだ問題は残る。予報

区の長さが各県あたり程度と短くなったとしても、予報値は予報区あたりの代表値(平均値よりも少し大きい)であるから、当該予報区内での来襲津波高は、これより大きな所も小さな所もある。一つの湾でも、湾口と湾奥とでは、津波高に相当な違いが出るのが現実の津波である。こうした差を明確に出すには、気象庁予報値に対応する対象海岸毎の値にするため、もっと詳細な検討が必要である。

2.4 様々な津波に関する情報

地震発生後に表-1から3に示されたように3種類の津波に関する情報が提供される(表-1が津波警報・注意報、表-2が津波情報、表-3が津波予報)。津波の挙動そのものも複雑であるが、それに関する情報も多種にわたる。これらを全国民に周知することが如何に大変であるかが理解できよう。

図-2に示される対応で津波に関する情報が作成される。まず、津波による災害の発生が予想される場合に、地震が発生してから約3分(一部の地震については最速2分以内)を目標に津波警報(大津波、津波)または津波注意報を発表する。津波警報・注意報を発表した場合、津波の到達予想時刻や予想される津波の高さなどが提供される。さらに、地震発生後、津波による災害が起こるおそれがない場合には、表-3の内容を津波予報として発表される。

3. 避難できない実態と課題整理

冒頭に津波避難の実態を紹介した。最近の津波来襲状況と被害の事例を通じて、津波情報のような緊急情報に関する課題は以下にまとめられる。

- (1) 情報の即時性(津波が来襲し避難できるまでに情報を伝達出来るか?)
- (2) 提供の確実性(災害発生時においても確実に、必要な人に伝達できるか?)
- (3) 内容の理解性(切迫する自然外力や被害の程度を予測できる内容になっているか?)

表-1 津波警報・注意報の種類 (気象庁)

		解 説	発表される津波の高さ
津波警報	大津波	高いところで 3m 程度以上の津波が予想されますので、厳重に警戒してください	3m, 4m, 6m, 8m, 10m 以上
	津 波	高いところで 2m 程度の津波が予想されますので、警戒してください	1m, 2m
津波注意報		高いところで 0.5m 程度の津波が予想されますので、注意してください	0.5m

表-2 津波情報の種類 (気象庁)

種 類	内 容
津波到達予想時刻・予想される津波の高さに関する情報	各津波予報区の津波の到達予想時刻や予想される津波の高さを発表します
各地の満潮時刻・津波の到達予想時刻に関する情報	主な地点の満潮時刻・津波の到達予想時刻を発表します
津波観測に関する情報	実際に津波を観測した場合に、その時刻や高さを発表します

表-3 津波予報 (気象庁)

発表される場合	内 容
津波が予想されないとき	津波の心配なしの旨を地震情報に含めて発表します
0.2m 未満の海面変動が予想されたとき	高いところでも 0.2m 未満の海面変動のため被害の心配はなく、特段の防災対応の必要がない旨を発表します
津波注意報解除後も海面変動が継続するとき	津波に伴う海面変動が観測されており、今後も継続する可能性が高いため、海に入ってから作業や釣り、海水浴などに際しては十分な留意が必要である旨を発表します。

(4) 対応方法の確保 (いざ避難行動を開始するときに、安全な手段や場所は確保できるか?)

(1) に関しては、最も向上が図られている項目であり、現在では 3 分程度で第一報が出される状況ではある。現在、緊急地震速報により平成 19 (2007) 年 3 月 25 日の能登半島地震では、僅か 1 分 40 秒で発表できた。しかし、予報時間が十分避難に間に合う時間であるかは、津波発生からの来襲時間と地域での避難所要時間との比較で決められることである。後者についての事前確認はほとんどされていない点に大きな問題がある。陸上での住民等の避難だけでなく船舶についても同様である。

(2) に関しても、確実な災害情報の伝達・提供を目指して、マスメディア、防災無線、携帯電話などが整備されているが、ここにも盲点がある。沿岸には不特定多数の利用者がおり、彼らが最も津波に対して危険性が高いうえに情報提供が難しいという事である。昭和 58 (1983) 年日本海中部地震津波では、地元の住民よりも、遠足、つり客、港湾工事従事者の犠牲者の方が多く、平成 15 (2003) 年 9 月 26 日十勝沖地震津波でもつり客が 2 名死亡している。

(3) については、深刻である。平成 14 (2002) 年 3 月に初めて量的津波予報 (津波警報 2M) が沖縄で、翌年 9 月に十勝沖で出された。だが、この時も課題になった点である。



図-4 津波量的予報の事例（2003年十勝沖地震津波）

オレンジ色は津波警報高さ2m，黄色は注意報高さ0.5m

単なる「2M」という数字では、一般の人にとってどれだけの津波の脅威なのか？今いる場所で2Mの津波により命の危険があるのか？という想像や判断が出来ず、そのために避難行動がとれない。さらには、通常の風波「2M」と同等と見なして、安心情報になっている状況もある。

緊急情報を提供し、その内容を住民が理解しさらに行動までとるには、図-6に示すようないくつかの段階がある。まず、情報の発信側と受け取り側で災害や防災に関する経験・知識を共有し、自分の課題として認識しておく必要がある。個人的な経験には、内容が限定しているために、他へ適用すると誤った情報になる場合がある。より正しい経験・知識の共有および認識のためには、ハザードマップの作成・活用、避難訓練、防災講演会などを実施すると効果的である。これらは事前に実施しなければならない。災害が発生した際には、状況を共有し、必要な対応に関する情報を行政側が発信しそれを住民側がそれを理解し、判断する。判断基準は、事前の学習などで整備していれば問題は多くないと考える。

最後に(4)については、(1)と同様であるが、情報を得たとしても、安全に避難出来なければ人的被害を軽減することは出来ない

訳であり、事前に、いつ、どのような手段で、どの経路で避難を実施すべきであるのかを各個人・家庭で確認していなければならないことである。

以上、(1)～(4)の課題は、津波情報に関係するものであるが、地震発生直後に対応すれば解決できるというものではなく、発生する前の段階から個人が対応すべき事が多い。この点を忘れてはならない。

4. リアルタイム津波予測に向けて — 2006年千島列島津波の事例 —

4.1 アップデートされる津波予報・情報

地震発生から津波が沿岸部まで到達し、最大波が出現し、最終的に収束するまで、緊急地震速報などの地震情報、津波観測情報などが様々な情報が得られる。迅速性を優先すれば限られた情報での予報になるので信頼性（精度）が低くなるので、時間経過と共にアップデートする津波予報システムが望まれる。また、データベースを改良することにより、県単位での予報値ではなく、沿岸での詳細な値を提供することも可能となる。

ここでは、事例として平成18(2006)年11月15日に千島列島で発生した地震津波を取り上げる(阿部・今村,2003,2007a,2007b)。この津波により、太平洋沿岸各地で長時間にわたり津波が影響し、注意報解除の後に漁船転覆などの漁業被害が発生した。当時、地震発生後、およそ15分で津波警報・注意報が発表され、地震発生後5時間を過ぎた16日1時30分には、全ての津波警報・注意報が解除された。しかし、津波警報解除後に、各地での津波の最大波が観測され、漁船転覆の被害が発生しており、季節や天候によっては重大な被害が発生する危険性があった。特に、住民の避難率が極めて低かったこと、更には避難勧告などの行政対応が隣接する市町村でも統一されていないなどの問題も報道されている。

表-4 津波予報発表の状況

20:29	津波警報, 北海道太平洋沿岸東部, 北海道オホーツク海沿岸, 高いところで 2m
	津波注意報, 北海道から静岡県, 高いところで 0.5m
23:30	津波警報→津波注意報へ切替, オホーツク海沿岸, 静岡県
01:30	全ての津波注意報を解除

表-5 震源情報

	M	緯度	経度	深さ
速報値	8.1	46.6	153.6	30km
暫定値	7.9	46.7	154.05	30km



図-5 2006年千島沖地震震源

表-6 速報値による断層パラメータの推定

断層長	141.2km	断層の相似則から設定 (M8.1)
断層幅	70.6km	
すべり量	7.08m	
走向	223 度	1963 択捉島沖地震の研究実績から設定

4.2 千島列島津波の概要

千島列島地震は、北米プレートの下に太平洋プレートが沈み込む千島海溝付近で発生した典型的なプレート境界の逆断層地震である。地震発生後の1時間15分後には根室で0.4mの第一波が観測されたほか、名瀬や那覇でも津波が観測された遠地津波である。この地震発生に伴い、気象庁から発表された津波予報および震源情報の一覧を以下に掲載する。

4.3 計算条件

地震発生後に気象庁から発表される震源情報には、速報値、暫定値、確定値の3種類がある。速報値は、地震発生直後に得られる情報であるが、暫定値は数時間後、確定値は数ヶ月後の発表にもなるため、リアルタイム津波予測には利用できない。そこで、地震発生直後に得られる速報値を利用して津波予測を行うことを試みた。速報値には、断層の大きさや走向などの津波数値解析に必要な情報が含まれない。また、震源が断層原点と一致するとは限らないために、津波数値解析の断層パラメータを設定する際には、最も危険なケースを想定できるように配慮することが必要となる。そこで、震源位置を四隅に設定した4枚の断層を元に津波数値解析を実施して、波高が高くなるケース、到達時間が早くなるケースを津波予測のケースとして求める。そのほかの断層パラメータは表3の通り設定する。

計算領域は、震源域が十分に含まれるよう設定し、短時間で広域的な津波伝播を把握することを目的とした格子サイズ1350mの計算領域と、より詳細な解析を目的とした格子サイズ450mの計算領域を設定した。また、リアルタイム津波予測では早期の情報発信が必要であるため、計算時間を短縮できるように線形長波方程式とCFL安定条件を満たす計算時間間隔を設定した。

4.4 震源速報値による計算結果

A領域(格子サイズ1350m)の計算には4台のPCを利用した。4つのケースのうち、

表-7 計算条件

	A領域	B1領域	B2領域	B3領域	
領域	格子サイズ	1350m	450m	450m	450m
	格子数	2000 × 2000	780 × 630	420 × 840	720 × 600
計算時間間隔	1.5 秒	0.5 秒			
支配方程式	線形長波理論				
陸側境界条件	完全反射				

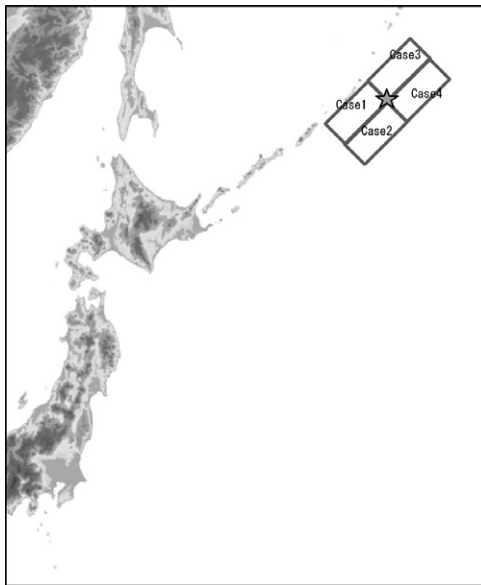


図-6 リアルタイム津波予測で設定した

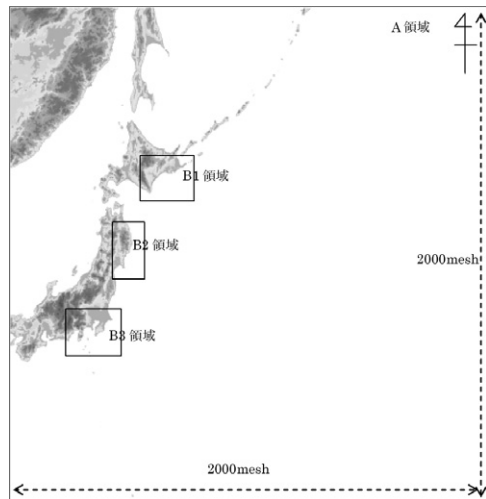


図-7 計算領域の設定

震源に最も近い北海道太平洋沿岸東部に津波が到達する65分より早く計算を完了させるために計算時間を1時間と設定してリアルタイム津波予測の限界となる再現時間を求めた。計算時間を測定した結果、各ケースを個別のPCで計算することにより実時間の約3分の1で計算を完了することができたため、再現時間を3時間に設定して最大波高を求めた。2006年千島列島津波では東北太平洋沿岸全域に0.5mの津波注意報が発表されたが、今回の検討によって気象庁の量的津波予報のようなデータベース検索による地域ブロックごとの津波予測に加えて、地域ごとにより詳細な津波予測情報をリアルタイムで提供することが可能であることが分かった。

今回の検討では、東北地方における最大波高かつ最も早く到達するケースはCase2であ

り、その波高は概ね注意報レベルの0.5m以下であったが、局所的には1mに達する場所もあった。さらに、格子サイズ450mの領域における数値計算結果を気象庁の検潮記録とも比較したところ、震源速報値から相似則により求めた初期波源では、東北地方では到達時間は計算結果のほうが遅く、波高も小さくなった。図-9は気象庁のホームページで公開されていた検潮データ(画像)ファイルを、数値解析の結果と合成したものである。

地震動解析による断層パラメータ決定後の計算結果について、地震発生後、数十分で断層パラメータの詳細が決定されるため、より正確な数値解析が可能となる。今回の津波においては東京大学地震研究所E I C地震学ノートNo.183に掲載された断層モデルを利用して、断層パラメータ決定後の再現計算も

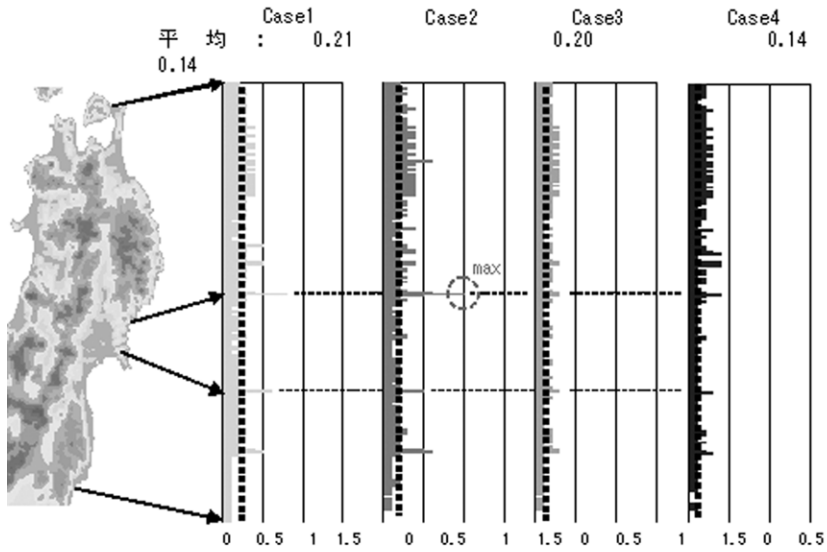


図-8 1350m メッシュでの東北地方の最大波高分布

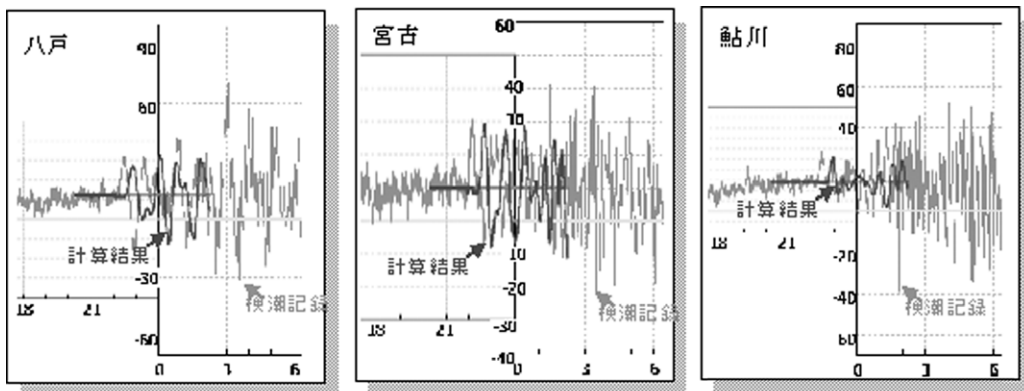


図-9 東北地方での計算結果 (Case2) と検潮記録との比較

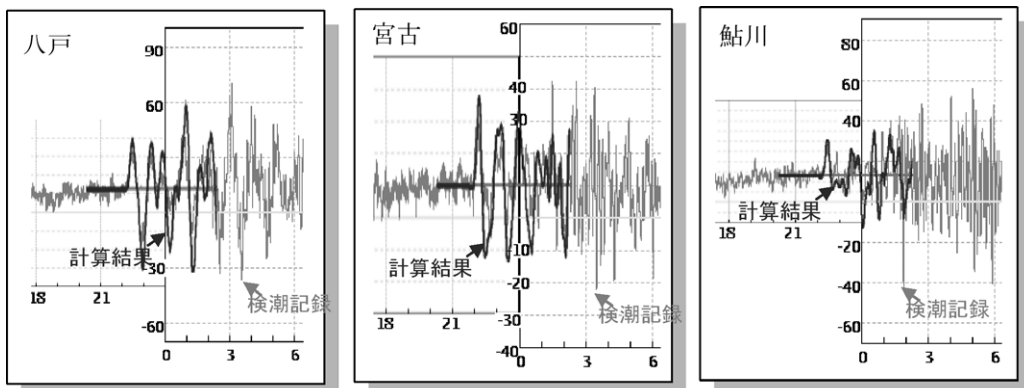


図-10 断層パラメータ決定後の計算結果と検潮記録との比較

実施した。断層パラメータ決定後の計算結果は、第一波の到達時間および波高において、検潮記録に近い値となった。

4.5 震源速報値と断層パラメータ決定後の計算結果の比較

震源速報値から相似則により断層パラメータを決定した断層モデルでは、到達時間が実際のものより遅く、また波高が小さくなるという結果が得られた。到達時間については、地震動解析によるモデルのほうが、断層長が1.4倍も長く、その波源域が日本列島によ

り近くまで延びているためと考えられる。また、波高についても、地震動解析によるモデルのほうが、すべり量が1.3倍も大きく設定されたこと、および断層サイズが大きくなったことが影響し、相似則による推定より波高が大きくなり、検潮記録とより一致するようになったと考えられる。

このように今回の検討結果では、震源速報値に基づく推定が過小評価となった。これは、全ての地震を概観するような相似則によって設定した断層パラメータと、実際に個々の地震動を解析することによって得られたパラメータの相違を示すものであるが、このような震源速報の不確実性による影響を取り除くためにも、事例検証により推定できる精度の幅を検討して、それらを見込んだ数通りの計算を行うことがリアルタイム津波予測の精度を確保する点で重要である。

今回の津波では天皇海山群による散乱波により、最大波高の出現が遅れたことが報道されているが、天皇海山群までを含めた広い範囲で数値計算を行った場合においても、必要な計算時間は実時間の37.9%となった。これまでのリアルタイム津波予報は、気象庁の津波警報システム（事前の数値計算によるデータベース）のみであったが、計算機の高性能化に伴い、複数台のPCを同時に利用して、領域や役割を分担することによって、より詳細な格子サイズでリアルタイムに数値解析が可能であることが分かった。また、今回の検討で示したように、リアルタイム数値解析の精度を上げるためには、地震動の解析によるメカニズム情報の早期取得が大変重要である

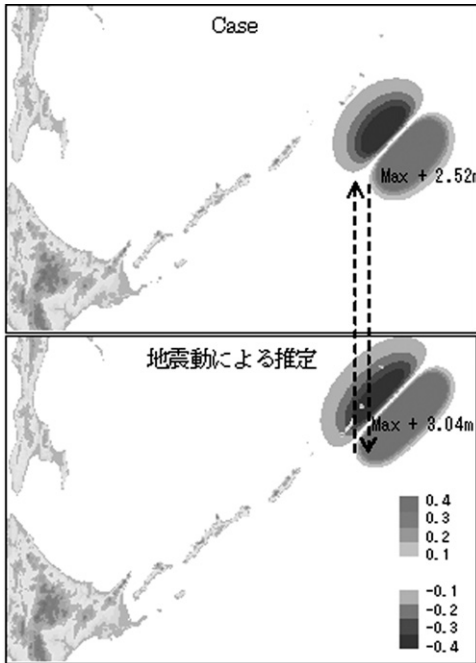


図-11 震源速報値と地震動解析による初期波源域の比較

表-8 震源速報と地震動解析による断層パラメータの比較

	震源速報値からの推定	地震動解析による推定	地震動解析／震源速報の比
断層長	141.2km	200km	141.6%
断層幅	70.6km	50km	70.8%
すべり量	7.08m	9.4m	132.8%
走向	223 度	225 度	—
傾斜角	22 度	30 度	—
すべり角	90 度	94 度	—

が、津波観測データを利用した精度の向上も必要と考えられ、今後、検討を進めてゆく必要がある。

5. 思わぬ津波増幅と警報の解除 -2008年7月福島県沖地震津波の事例

5.1 地震概要

7月19日11時39分頃に福島県沖（牡鹿半島の南東120km付近）で、福島県沖の深さ32kmでM6.9の地震が発生した。この地震は、太平洋プレートと陸のプレートとの境界で発生した地震で、発震機構（気象庁CMT解）は西北西－東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型と推定している。この地域の周辺では、過去、1938年塩屋崎地震などの群発地震あり、当時、小規模な津波も発生している。この日は、夏休みに入った最初の週末であり、各地で海開きが行われ、天候にも恵まれ沿岸には多くの海水浴客や利用客がいたと報告されている（河北，2008）。当時、地震メカニズムの情報としては、以下のようにまとめられる。

5.2 気象庁発表と各地での対応

(1) 気象庁による情報

気象庁の津波注意報は2分後の11時41分に発表した。到達予想時間は、11時42分発表で、その内容は、

宮城県 津波到達11時50分 津波高さ0.5m
福島県 津波到達12時10分 津波高さ0.5m
岩手県 なし

であった。表-11にあるように、実際の観測は、鮎川が12時16分押し波0.23m、相馬が12時42分押し波0.15mであった。一方、気象庁ではない独自の観測データによると、気仙沼市で25cmの津波高さが14時11分に観測されている。気象庁による津波高さの値は妥当であるが、津波到達の時間は実際よりも早く、最大波の出現が警報解除（13時20分）後に出現した場所もあった。また、後で示される数値解析によると岩手県側も宮城・福島両県と同程度の津波が来襲した可能性がある。

(2) 仙台市での対応

以下に、報告された対応をまとめる。

警戒配備体制

- ・11時41分 警戒対象部局に警戒体制を発令
- ・11時41分 消防局・宮城野・若林消防署 第1次非常配備発令
- ・13時20分 警戒体制を解除

対応状況

- ・11時41分 津波情報伝達システム自動起動 1回目
- ・11時43分 仙台ヘリ2（けやき）フライト 沿岸部警戒広報、ヘリテレ映像伝送
- ・12時35分 宮城野区・若林区にパトロール指示
- ・12時40分 宮城野区パトロール1台出場
- ・12時43分 仙台ヘリ2（けやき）フライト 沿岸部警戒広報、ヘリテレ映像伝送
- ・12時45分 若林区パトロール1台出場
- ・13時20分 津波注意報 解除

深沼海水浴場において、海水浴客約800名に対し、避難誘導を実施した。

(13時30分遊泳禁止を解除)

蒲生及び荒浜において、サーファーに対し、避難誘導を実施した。

(3) 海水浴場での状況と課題

河北新報（2008）によると、宮城県の沿岸各地での状況が以下のように報告されている。

約300人の海水浴客がいた七ヶ浜町の菖蒲田浜海水浴場では、津波注意報が出ると同時に、監視員がスピーカーで避難を呼び掛けた。家族連れは子どもの手を引いて、波打ち際から防波堤に向かって慌てて逃げていた。

南三陸町志津川の人工海水浴場「サンオーレそではま」には、約300人の海水浴客がいた。海水浴を切り上げて帰宅する人の姿も目立った。

本吉町によると、大谷、小泉の両海水浴場では計約450人が遊泳していたが、正午までに全員が避難した。

東松島市の野蒜海水浴場には、約350人が訪れていた。津波注意報発令で避難したものの、解除を待ちきれずに海に入る人も。監視

表-9 気象庁による地震規模

震源時刻 (日本時間)	震央地名	震源位置		深さ	推定マグニチュード	
		緯度	経度		M	Mw
2008年7月19日 11時39分	福島県沖	北緯 37 度 31.2 分	東経 142 度 15.8 分	32km	6.9	6.9

表-10 各研究機関による地震メカニズム

情報源	震源	マグニチュード / モーメント	CMT 解 strike,dip,slip	深さ
USGS	37.511N, 142.691E	Mw=7.0, Mo=4.2*10**19	24,80,89/207,10,93	20km
防災科研 (16:38 に Web を 保存したデータ)	37.47N, 142.44E	M=6.9	44.6,42.4/200.9,50.1	3km
防災科研 (AQUA システムの データベースに登録 されたメカニズム解)	37.5N, 142.6E	Mw=6.8,	200.9,20.1,88.2/22.8,69.9,90.7	33km

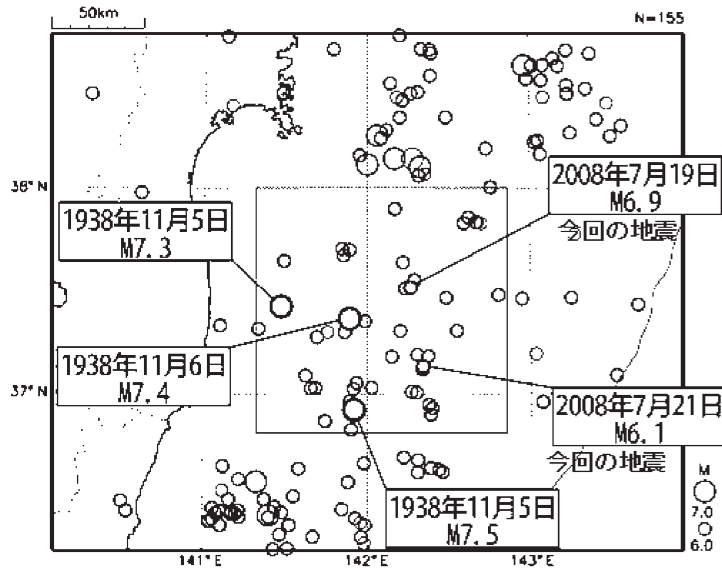


図-12 今回と過去の震源位置 (気象庁資料)

表-11 気象庁発表による津波高さとの観測値

津波予報区	予報 (津波の高さ)	予報区内で観測した津波の 高さの最大	沿岸で観測された津波高さ
宮城県	津波注意報 (0.5m)	23cm	25cm (気仙沼市)
福島県	津波注意報 (0.5m)	15cm	-

員がその都度注意を促した。

以上のような状況と津波観測 (5.2 (1)) の比較を通じて、到達予想時間の改善、津波継続時間という情報も必要 (すぐに、沿岸に戻る人がいた) であると言える。

5.3 地震による津波の即時解析

(1) 解析方針

地震発生直後に得られる震源情報は震源の位置、震源の深さおよびマグニチュードの 3 つの情報のみである。一方、津波の数値解析には、断層の幅や長さ、すべり量、向き (走向)、すべり角など、数多くの情報が必要である。このように、地震発生直後に得られる情報は限られているため、過去の観測データを統計的に分析した相似則によって、震源情報のマグニチュードから断層の幅や長さ、すべり量を推定することとなる。一方、走向やすべり角などは、同じような場所で過去に発生した地震を参考にして設定することができる。

さて、初期段階の数値解析において、条件の推定に利用する情報は震源情報のマグニチュードであるが、地震発生直後に得られる値には誤差が含まれる。また、震源情報では位置の情報を緯度経度で得ることができるが、実際の津波の波源は広がっているため、緯度経度による点の情報から広がりのある波源を推定することにも誤差を生じる可能性がある。このため、震源情報を元に推定される津波予測にも、推定誤差による幅を生じることとなる。この推定誤差を小さくして、より正確な津波予測を行うために津波観測による見直しが重要である。特に、沖合で津波を観測することができれば、沿岸に津波が到達する前に、より正確で具体的な予測情報を発信することができると考えられる。

今回の福島県沖地震では、初期の震源情報やその後得られる C M T 解を用いて、沿岸での津波観測データと比較しながら、試行錯誤しながら津波の波源とその規模を特定してゆく手順を行った。今回の福島県沖地震の場合は、表 -10 のように断層の大きさやすべ

り量を試行錯誤しながら、沿岸での津波観測データを再現できる津波の波源と規模が決定された。

このように、津波警報など、津波予測の内容を高度化するためには、従来の津波警報システムのような初期の震源情報による予報だけではなく、津波観測に基づく予報の見直しが必要であり、我々が、即時的かつ試行錯誤的に行っている手順をシステム化する必要がある。このシステム化には、リアルタイムでの数値解析のプロセスそのものを、一種のエキスパートシステムとして考え、その手順をシステム化してゆくことが必要である。

(2) 思わぬ津波増幅 (仙台湾中央部と三陸沿岸)

津波数値解析の結果が沿岸での津波観測データによく一致するような断層パラメータを求めて、津波の伝播状況を再現したところ、今回の津波の特徴として思わぬ場所と思わぬタイミングで津波の増幅があったことが推定された。

思わぬ場所とは、仙台湾の中央部である。仙台湾は概観すると弓なりの緩やかな海岸線を持っており、凹面鏡の断面図のような形状にも見てとれる。凹面鏡に光が反射すると、どこかで焦点を結ぶ。今回の津波も、仙台湾の沖のほうから浸入した津波が、弓なりの形状をした仙台湾の海岸線に反射し、中央部に集まる様子を数値解析により明らかにすることができた。通常、津波は沿岸に近づくほど高くなるために、船舶は沖に避難したほうがよいとされ、海上ハザードマップもそのような観点で作成されている。今回の津波での数値解析の結果から、「沖に行くほど安全である」ということが絶対ではないことが教訓として得られた。

また、13 時 20 分に津波注意報が解除されたが、注意報解除後の 14 時過ぎに気仙沼市の 2 つの波高計が津波のピークを観測している。これは、数値解析の結果から、仙台湾の沿岸に反射して中央部に集まった津波が牡鹿半島を回り込んで、岩手県南部から宮城県北部に到達したことが原因であると推定できた。

表-12 試行錯誤により決定された地震断層パラメータ

名称	地震断層の設定内容				評価内容
	配置	長さ (km)	幅 (km)	すべり量 (m)	
Case 05	震源の南側	40	20	1.50	規模が過大
Case 06	震源の北側	40	20	1.50	規模が過大
Case 07	震源の南側	28	14	1.40	規模が過大
Case 08	震源の北側	28	14	1.40	規模が過大
Case 51	震源の北側	32	16	1.12	周期が一致せず
Case 52	震源の南側	32	16	1.12	周期が一致せず
Case 53	震源が中央	30	20	0.96	
Case 54	震源が中央	30	24	0.80	
Case 55	震源の南側	30	20	0.96	観測記録に最も近い
Case 56	震源の南側	30	24	0.80	
Case 57	震源の南側	24	24	1.00	
Case 58	震源の南側	26	22	1.00	
Case 59	震源の南側	26	24	0.90	

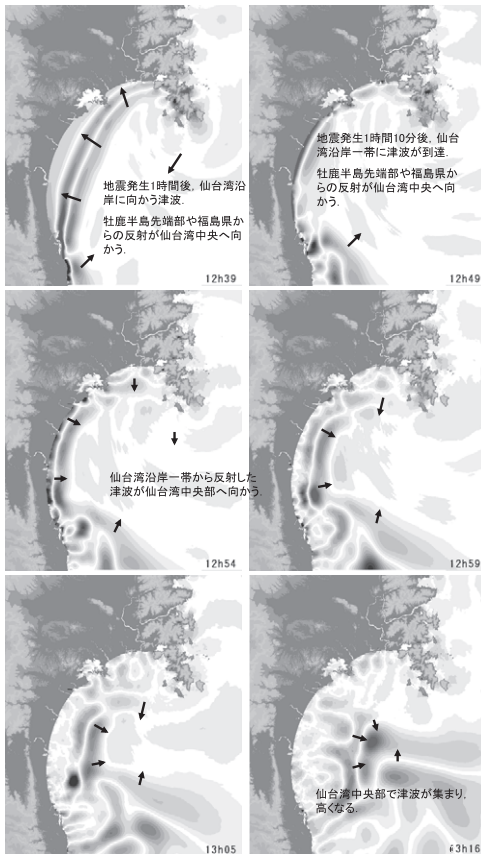


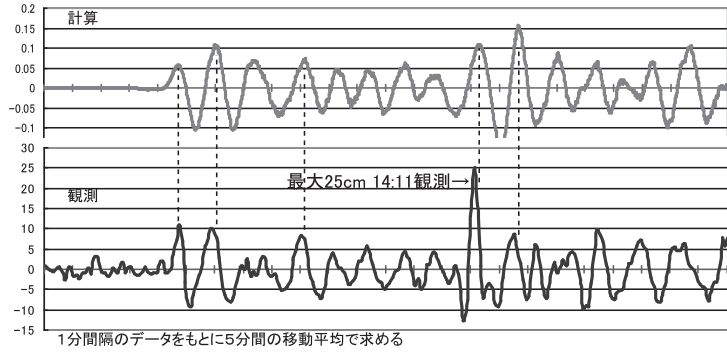
図-13 仙台湾への入射、反射、中央部への集中

これらの地域には、国関係機関が所轄する津波観測機器は設置されておらず、今回の現象も、市が設置し管理している波高計があったために知ることができ、その原因を数値解析によって明らかにすることができた。

6. おわりに

過去の津波予報システムの開発からいくつかの津波被害を経験する中で技術や情報内容を向上してきた歴史を紹介した。いまや、世界最先端な技術が、24時間我々の安全な暮らしを守り続けている。ただし、近年の津波発生後の状況を見ると、沿岸域で僅か1割程度しか避難できない実態がある。情報の受け手側の課題もあるが、情報提供側でも、迅速で信頼性の高く詳細な内容に改良しなければならない。ただし、迅速性と信頼性を同時に上げることは難しく、図-14に示したような、時々刻々得られる観測情報を基に、津波の予報を提供しつづけることが重要であると考えられる。今回の緊急地震速報により、第一報の発表時間が格段に短くなると考えられる。地震直後からの情報を得ることができ、最終的に収束するまで様々な情報をマルチメディア

■ 気仙沼市・杉の下での比較



■ 気仙沼市・石浜での比較

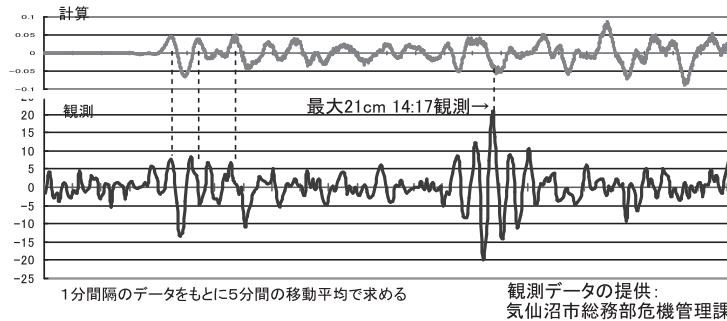
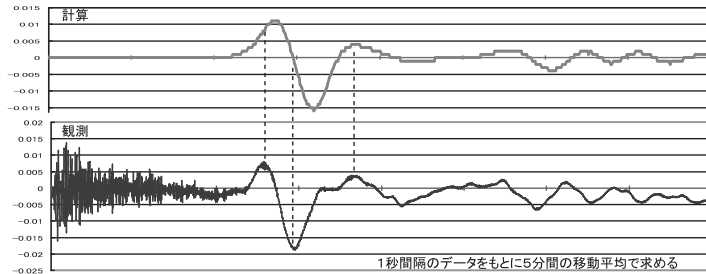


図-14 (a) 気仙沼市での津波記録と数値解析結果 (最大波が遅れて出現)

■ 釜石沖海底ケーブルTM1との比較



■ 釜石沖海底ケーブルTM2との比較

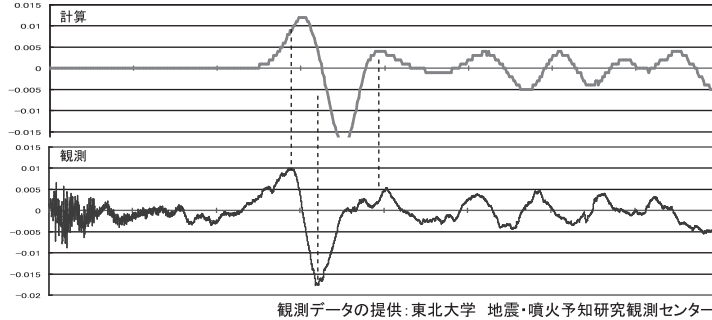


図-14 (b) 釜石沖津波海底ケーブルによる津波記録と数値解析結果

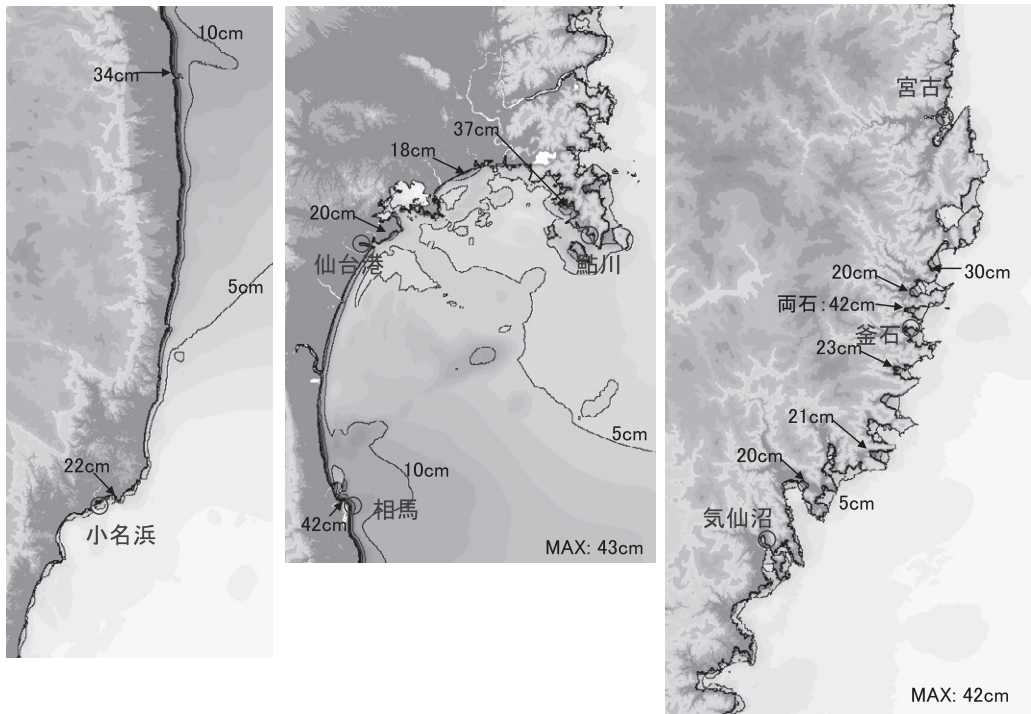


図-15 福島・宮城・岩手各県での沿岸津波高さ分布

で提供でき、今後予想される地震津波による被害軽減が大いに期待できるであろう。

参考文献

- 阿部郁男, 今村文彦: リアルタイム津波予測実現に向けた計算方式の評価と改良, 土木学会地震工学論文集, No.27, pp.319-325, 2003.
- 阿部郁男・今村文彦, 2006年千島列島津波から見たリアルタイム津波予測の可能性, 東北地域災害科学研究, 第43巻, pp.103-108, 2007a
- 阿部郁男・今村文彦, 2006年11月15日千島列島津波を事例としたリアルタイム津波予測の可能性, 津波工学研究報告, 第24号, pp.23-28, 2007b
- 今村文彦・首藤伸夫: 世界語になったTSUNAMIの研究・技術, 土木学会誌, 12月号, pp.59-64, 2000.
- 牛山素行・今村文彦, 2003年5月26日「三陸南地震」時の住民と防災情報(基礎資料, 東北大学津波工学研究報告, 第21号, pp.57-82, 2004.
- 鹿島出版会(1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, pp.230-235
- 河北新報(2008), 2008年07月20日日曜日
気象庁: 津波予報, <http://www.jma.go.jp/jp/tsunami/>
- 仙台市危機管理室(2008), 地震津波報告
東京大学 地震研究所: EIC 地震学ノート No.3,
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2006/EIC183.html
- 防災科学技術研究所: 強震動の基礎,
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/>