津波予報システムと津波の観測*

Tsunami Forecast and Observation System in Japan

永井 章**

Akira NAGAI

Key words

the Indian Ocean tsunami 26 Dec. 2004, mechanism of tsunami generation, efforts for speed up of tsunami forecast, quantitative tsunami forecast system, development of tsunami forecast technology

1. 緒 言

平成 16 年 12 月 26 日 9 時 58 分頃（日本時間）、インドネシアのスマトラ島西方沖で発生したマグニチュード 9.0 の巨大地震が引き起こした大津波はインド洋広域に達し、少なくとも 28 万人以上の犠牲者という空前の大災害をもたらした（マグニチュードと犠牲者数は米国地質調査所による）。このような大災害となった要因としては、今回の地震や津波の規模自体が地震津波観測史上でも 5 本の指に入る大規模なものであったこと以外に、インド洋に津波を警戒する国際的なしくみがなかったことや沿岸各国の国内での津波対策が不十分な状況であったことが指摘されている。この大災害への教訓と反省から、国際社会とインド洋沿岸各国は、平成 17 年 1 月神戸市で開催された国連防災会議で、気象庁などが急遽主催した特別セッション「インド洋沿岸地域における津波被害軽減の推進」での報告を踏まえ、インド洋での津波警報システムの構築に向かって具体的な歩みを進めているところである。

翻って、世界的にも有数な地震活動の活発な地域で、海に囲まれたわが国は、過去幾度も津波被害を蒙り、津波対策は国や地方公共団体の最重要な防災施策として取組まれてきた（図 1 参照）。

本稿では、わが国の津波対策のうちソフト面での対策の基幹である津波予報業務とそれを生み出すシステムの変遷と概要を紹介する。

2. 津波予報の原理

地震は急激な断層の食い違い運動であり、そこから発生する地震波の P 波（縦波、初期微動）や S 波（横波、主

要動）などを地面に設置した多数の地震計で観測し、それらを解析することで、地震の発生地点として震源がポイントとして計算できる。しかし、実際の震源は、3 次元的な広がりをもつ震源域というものである。

図 1 100 人以上犠牲者を出した地震・津波（明治以降）

図 2 平成 16 年 12 月 26 日スマトラ島西方沖の地震から

平成 17 年 8 月 31 までの余震などの発生状況

（12/26 の M 9.0 の本震の震源域は、余震活動からスマトラ島北部の西方沖から北へニコバル・アンダマン諸島近海まで広がっていると見られる。スマトラ島中部の西方沖北緯 0° 付近の塊は平成 17 年 3 月 28 日に発生した M 8.7 の地震およびその余震群である。震源データは、米国地質調査所による）

*原稿受付 平成 17 年 9 月 13 日

**気象庁地震火山部地震津波監視課（東京都千代田区大手町 1-3-4）

永井 章

1980 年 3 月気象大学校卒。気象庁地震観測所（現精密地震観測室）、国土庁防災局（現内閣府）、福岡管区気象台などで防災業務や地震観測研究業務に従事。現在、地震や津波を 24 時間体制で監視する地震津波監視課に所属。

図3 地震による津波発生の様式図

先のスマトラ島西方沖の巨大地震の震源は、北緯 3.30° 、東経 95.96° 、震源の深さ 30 km と計算されているが、実際の震源域は、長さ $1,000\text{ km}$ 以上、幅 200 km 程度の大きな広がりを持っている（図2参照）。地震が海底の地下の比較的浅い所で発生すれば、震源域全体で断層のくい違いによる地形変動が海底まで及び、海底の上の海水全体を押し上げたり、引き落とししたりする。この広範囲にわたる海底から海面までの間のすべての海水の移動が、波として四方へ伝播していく現象が津波である（図3参照）。津波の伝播現象は、波長に比べ波高が小さく流体力学の浅水波方程式によって表現できる。津波の伝播速度は海水深の平方根に比例する。海洋の平均水深 $4,000\text{ m}$ では約 200 m/s とジェット機並である。水深の深い海洋上ではたかだか数 10 cm や 1 m にも満たない波高の津波も水深が浅くなるにつれ速度を落とし、沿岸に近づき自動車並の速度となった先端部には後続の波がどんどん追いつき、津波はその高さを増し沿岸を襲うことになる。

一方、地震波のP波は地中を平均約 7 km/s 、S波でも平均 5 km/s という、津波の何百倍の早さで伝播する。地震波を観測し震源を求め、海底の地形変動に直接関係する震源域の大きさを想定できれば、津波の発生やその規模を津波が来襲する前に予測できる。これが津波予報の原理である。発生場所からの地震波と津波の到達時間差を利用した津波予報は、沿岸近くの地震ではこの時間差の猶予は期待できなくなる。また、地震に起因しない海水の大移動、広範囲・大規模な海底地すべりや海底火山の大噴火などでは、地震観測による津波予報の原理は利用できない。

3. わが国の津波予報と予報システムの変遷

わが国の津波予報は、昭和16年、当時の中央気象台が、昭和三陸地震の津波被害への教訓から三陸沿岸を対象に警報組織を構築したことが始まりであるが、全国沿岸を対象に組織的な予報体制ができ上がったのは昭和27年からである。震源と地震のマグニチュードの決定には、各地の気象台や測候所の職員が地震計の記録からP波、S波の発現時刻と最大振幅を読み取り、電報として津波予報センターである管区気象台に打電した。管区気象台では、その電報データを元に、コンパスと専用の地図を使って作図法で震源を求めた。また最大振幅から地震のマグニチュードを求

図4 気象庁本庁のEPSO-IIIでの津波予報作業

めるとともに、津波予報図といわれる統計的な手法で津波の規模と震央距離毎の各観測点での最大振幅の関係を示した図を使って、津波の規模を、「大津波」、「津波」、「津波注意」、「津波なし」の4つのグレードに判定した。津波予報発表に要する時間は、地震観測から20分程度以上かかっていた。以降、我々が最も力を注いだのは、発表までに要する時間の短縮であった。

昭和55年以降、徐々に地震計の観測データを津波予報センターへ常時テレメータできるようになり、また、センターではデジタイザを使って、地震波の到達時刻を読み取り、コンピュータで地震の震源やマグニチュードを決定できるようになった。津波予報発表までにかかる時間は、12、3分までに短縮した。しかしながら、昭和58年5月26日、日本海中部地震（マグニチュード7.7）に伴って発生した津波は、早いところでは7分程度で沿岸に到達し、100名が津波の犠牲となった。

昭和58年度、気象庁は、地震データ処理専用のコンピュータを導入し、検測処理や情報発信の自動化を進めた。これにより、津波予報発表までに要する時間は、7、8分になった。このコンピュータは、地震活動等総合監視システム（EPOS：Earthquake Phenomena Observations System）と称され、津波予報や地震情報の発表、地震活動の監視、それに懸念されている東海地震の前兆現象の監視を行う汎用型電子計算機であった。現在のEPOSは、平成15年度に更新された3代目となって、業務ごとに分散処理また互いに業務支援可能なワークステーション群からなるネットワークコンピュータに進化し、マンマシンの操作性も格段に向上している（図4参照）。EPOSは、多数の地震計、震度計、潮位計や歪計などからリアルタイムでテレメータされる膨大な連続データを常時秒単位で各種の処理成果を生産し続けるわが国でも特異なコンピュータであり、わが国において地震津波の観測監視業務の象徴的なシステムとなっている。このEPOSの技術に基づく地震津波監視システム（ETOS：Earthquake and Tsunami Observations System）が、札幌、仙台、大阪、福岡、沖縄（那覇）のほかの国内津波予報センターである管区などの気象台にも整備され、それぞれ管轄内の地震津波の観測監視業務に活用されている。

平成5年7月12日、北海道南西沖地震（マグニチュー

2003 年十勝沖地震 32 分後

図5 量的津波予報，津波シミュレーション結果をデータベース化し，津波判定の分解能を上げ，予報区を細分化（18区→66区）

ド7.8)が発生し，札幌管区気象台は地震発生から5分で津波警報を発表したが，震源直近の奥尻島には3～5分で大津波が来襲し，奥尻島の津波被害を中心に，30名が犠牲となった。

平成5年度，予報発表時間の短縮化にとってほとんど限界といえる地震発生後約3分での発表を目指し，地震観測網の全面見直しを行なった。加速度計と速度計からなる地震観測施設を全国に約180箇所設置し，観測施設側で加速度記録から変位記録を算出し，加速度，速度，変位の地震観測データを，複数の観測点分をNTT局舎で集約し基幹回線に乗せ，多重化したルートで気象庁本庁や管区気象台へテレメータ化した。津波地震早期検知網である。また，これまで，S波以降での最大振幅から算出してきた気象庁マグニチュード以外に，変位データのP波部分のみからマグニチュードを算出する手法を開発した。これにより，マグニチュードをS波の到達を待たずして求めることが可能となった。

一方，予報精度の改善の歩みは，発表の迅速化に比べれば必ずしも早くはなかった。時間との闘いである津波予報においては，コンピュータの計算速度が向上したとはいえ，地震が発生してから津波の伝播シミュレーションを実行するような時間的余裕はないのである。ところが，津波シミュレーション計算を分単位で実行できなくとも，その計算結果をデータベース化しておき，そこから結果を検索するだけなら秒単位の時間があればよく，定量的な精度の高い津波判定が迅速に実施できることに気付いた。データベース駆動型の定量的な津波予報である（図5参照）。わが国近海を埋め尽くすように，約3000カ所に想定震源を置き，そのマグニチュードを8.0から6.0まで0.5きざみで5通り，震源の深さは0 kmから100 kmまで20 kmきざみで6通りとした。震源モデルの断層形状は効率的に津波を励起する傾斜角45°の逆断層型とした。断層の走向は，過去の地震データからその震源域で卓越している方向を採用し

た。こうして想定した約10万通りの震源モデルに対して，2または4 kmの計算メッシュとして，沿岸間際までの津波波形データをシミュレーションした。1地震分の計算に，当時の気象庁の大型汎用計算機で25分前後要した。

平成11年4月，約50年間利用してきた津波予報図は廃止され，新たな津波予報へ移行した。大津波，津波，津波注意の津波のグレードとともにm単位で津波の波高予測値を発表できるようになり，津波予報区はそれまでの18区からほぼ都道府県の沿岸毎66区に細分された。

4. 遠地津波予報

3項に述べた，津波予報とそのシステムの変遷は，主に近地津波予報への対策が中心であった。気象庁では，概ね沿岸から約600 km以内で発生し来襲する津波を近地津波，それより遠方から来襲する津波を遠地津波と称している。遠地津波予報業務は，昭和35年5月23日発生したチリ地震津波が，太平洋を約22時間かけ横断し，三陸地方を中心に来襲し，全国で142名の犠牲者を出した苦い教訓を経て確立した。このチリ地震津波は，わが国だけでなく，太平洋沿岸各国へも大きな被害を及ぼした。このため，遠地津波災害の防止・軽減を目指した国際的な観測情報の交換体制の確立が急務とされ，米国，当時のソビエト連邦，そしてわが国が中心的な役割を担い，昭和43年，国連の政府間海洋学委員会の下に太平洋津波警報組織が成立した。沿岸28カ国（平成17年9月現在）が加盟する本組織で，太平洋沿岸全域の津波情報を提供する実務を，米国海洋大気庁の太平洋津波警報センター（PTWC）があたっている。現在，わが国の遠地津波予報は，全世界約80カ所に配置されインターネット上で公開されている地震観測データを気象庁本庁でほぼリアルタイムで取得し，震源決定を行い，津波発生や規模の評価を行うとともに，PTWCが提供する津波情報を参考に，さらに気象衛星経由で入手する海外の潮位データを常時監視しながら，わが国沿岸に津

図6 遠地津波予報のしくみ

波が到達する概ね2時間前に発表するように努めている(図6参照)。遠地津波予報においても、津波の波高予測を行った上で、警報や注意報のグレードを決めて発表するしくみは、近地津波予報と同じデータベース駆動型の量的津波予報技術を利用している。

5. 津波予報システムの概要

気象庁の津波予報システムは、

- ・全国約180カ所に配置された地震計とそこからの観測波形データを、EPOSやETOSへ常時テレメータする地震観測ネットワーク
- ・全国約100カ所の検潮所の潮位データを、EPOSやETOSへ常時テレメータする津波観測ネットワーク
- ・観測データを解析処理し、津波予測を行い、予報を発表するEPOSやETOS
- ・EPOSやETOSが発表した津波予報を都道府県や報道機関などへ伝達する通信ネットワークからなる。

気象庁の現在の地震観測施設は、3項で紹介した津波地震早期検知網と称するもので、多種類の地震観測データを常時取得・収集するだけでなく、加速度計データから計測震度演算を行い、震度観測し、結果を送信する震度計としての機能も有している。さらに、このうち、20カ所には広帯域地震計が配備されている。

津波観測施設は、観測手法によっていくつかの型がある。一般的な検潮所に見られるフロート式のほか、超音波式、水圧式のほか、気象庁独自のものとして、遡上した津波の陸上での水深を測定する巨大津波計がある。これらの潮位データは、実際の津波の挙動を観測したものとして、津波予報の修正やその解除を判断する際には重要な要素であるが、津波の挙動は沿岸に近く海底や港湾・海岸など局地的な地形の影響を受けるため、検潮所のないところへ津波が早く来襲したり、波高が高くなったりすることは否定で

きない。量的津波予報では、予報区内に多数の計算ポイントを設定し、そこでの到達予想時刻と波高を求め、予報区内での最速の到達予想時刻と最大の波高から津波のグレードを判定しており、津波の判定や内容では安全サイドに立った予報をするように努めている。実際の観測データは予測の評価・改善にも役立つとともに、観測特性を知った上で実況監視に活用すれば発表中の津波予報の修正にも有効である。さらに、津波を沖合で観測しいち早く検知するシステムも開発されている。気象庁の東海沖や房総沖に展開しているケーブル式海底地震計には、沿岸約100kmの海底に水圧式津波計が海底地震計とともに設置されており、常時、潮位変化を監視している。また、近年では、GPSによる海面の上下変動データや海底水圧計のデータを衛星回線や無線で中継して、潮位変化として監視する津波計も内外で開発されている。これら沖合での潮位変化の監視は、沿岸の検潮所よりいち早く津波を検知できる他、沿岸付近の局所的な地形などの影響を受けないより均質なデータが採取できる可能性もある。ただし、沿岸から100km程度沖で発生する地震などでは津波の来襲までに約10～20分程度しか猶予がなく、結局、津波を観測してから避難しては間に合わないため、津波予報の評価や修正あるいは津波発生の検知など、沖合での津波観測データの有効な活用策はこれからさらに検討していかなばならない。

気象庁は、津波予報の精度向上や内容の充実化のため、国土交通省の海上保安庁、国土地理院、港湾局や都道府県など他機関が整備した津波観測施設の観測データの有効利用に努めることとしている。

EPOSやETOSの津波予報の中核となるデータ解析処理システムは、地震波形データの検出・震源決定を行う地震緊急処理、震源から津波発生の有無・規模を判定する量的津波予報処理、震度データを解析処理する震度データ編集処理、そしてそれら解析結果を津波予報や地震情報として

図7 津波予報システムの構成概念図

図8 津波予報・地震情報の発表と伝達の流れ

発信する情報通信処理などで構成される（図7参照）。

EPOS などから発信された予報などは、気象庁が24時間連続運用している気象資料等自動編集収集装置（ADESS）へ送られ、そこから全国の気象台へ伝達され、気象台から緊急防災情報提供装置を通じて都道府県など防災機関や報道機関へオンライン・リアルタイムで伝達される。またADESSからは、民間気象業務支援センターを通じて、テレビ局や気象情報会社などへも予報などが提供される（図8参照）。気象庁は、これらオンラインルート以外に気象衛星「ひまわり」経由の衛星回線を使ったバックアップルートも用意し、確実・迅速な予報などの伝達体制を敷いている。国民へは地方公共団体の防災行政無線やテレビ・ラジオを通じて周知される。

6. 今後の課題とまとめ

明治29年の明治三陸地震の約22,000人という津波災害は、世界的にも最大規模の津波災害の1つである。この地震は、地震動の大きさに比べ津波の大きい、いわゆる津波

地震として知られ、海岸付近でせいぜい震度4程度の揺れしか感じなかったが、津波は高さ25mに達した地点もあった。このような津波地震は、海溝軸沿い周辺で発生する震源の浅い逆断層型のものに多いといわれ、周期10秒を越えるような長周期の地震波の発生が特徴的である。現行の観測帯域が周期5秒程度までの地震計からのデータの最大振幅でマグニチュードを推定しても過小評価してしまい、津波の判定が難しい。この予報精度を向上させるため、広帯域地震計の地震波形データ全体から震源過程（CMT解：セントロイドモーメントテンソル解）を推定する手法を使い、モーメントマグニチュード（ M_w ）を求め、津波予報に利用する手法を開発している。

また、沿岸に近い地震に対して約3分がほぼ限界となっている津波予報発表に要する時間をより短縮するため、地震観測網のデータを一括して処理するのではなく、1番最初に観測し始めた観測点でのP波観測から地震の震源やマグニチュードを推定するなど、地震波を順次観測した地点のデータをその都度処理に参加させ、逐次震源決定結果を

図9 緊急地震速報の発表イメージと津波予などへの利用イメージ

更新していく緊急地震速報の技術を開発している（図9参照）。気象庁は、津波地震早期検知網の地震計を緊急地震速報の処理機能を持った多機能型地震計への置き換えを進めている。緊急地震速報の震源精度は、観測データが増えるにつれ上がっていくという特性がある。気象庁では、最速2分以内に津波予報の発表を可能とすることを目標に、どのタイミングで、どの海域で、どの程度の規模の地震で、震源精度を確保して、津波予報の迅速化に寄与するかの試行を進めている。

これまで、気象庁の津波予報システムが現在の姿になるまでのさまざまな取り組みを紹介してきた。それは現在のインド洋沿岸各国となんら変わらない、重い教訓を技術開発と国内外の関係機関との連携で克服しようという姿であ

った。スマトラ島西方沖の地震津波以来、わが国の津波予報システムは、インド洋沿岸各国を中心に世界的な評価を受けつつ、北西太平洋域やインド洋沿岸に対しても津波情報を提供する支援作業を実施している。しかしながら、津波地震への対応のみならず、気象庁の津波予報や津波観測技術には、なお改善していかなければならない課題も多い。

我々は、インド洋での巨大地震津波被害の教訓を真摯に受け止め、わが国周辺で懸念されている大地震を含む海域すべての地震に対して、現行技術の成果をフルに発揮するとともにその限界を克服するため、一層の訓練と技術開発に努めるとともに、これまでに積み上げてきた経験や技術は国際的な共有財産としてそれらを必要とする各国への技術支援に役立てていかなければならないと確信している。