多様な津波発生を考慮した南海地震津波の再考

Revisiting the Great Nankai Trough Earthquake Tsunami Considering the Uncertainty of Source

鈴木進吾¹・河田恵昭²

Shingo SUZUKI and Yoshiaki KAWATA

The gap between predicted tsunami height and the realized that increased the amount of damage and delivered a lot of difficulties on the operations of the 2011 Great East Japan Earthquake Disaster. In this paper, the authors analyzed the stochastic property of resultant tsunami height considering the uncertainty in source parameters. Tsunami height at each site is estimated using probabilistic simulations and represented as a probability density function or inverse distribution function. Using these probabilistic description, we can evaluate not only probable maximum tsunami height but also most typical tsunami height at each site or the probability that tsunami will exceed the assumed tsunami height. And combining this with the level of tsunami preparedness, we can revisit the progress of countermeasures quantitatively.

1. 序論

平成23年東北地方太平洋沖地震によって発生した津波は、特に岩手、宮城、福島県の3県各沿岸域において、従前の想定外力を大幅に超え、想定を超える時空間の被害と災害対応の発生をもたらした（例えば、中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会、2011）。これは、次にどのような特性を持つ津波が発生するかを一意に決められないという状況下においてしかるべき対策を進めるためには、考える範囲内であらゆる津波外力の来襲可能性を評価し、その結果を用いて政府・自治体や地域住民が社会の防災力と比較し、防災・減災対策の整備目標を検討できるようにする必要性を示したといえる。

本研究では、多様な津波波源を考えた場合の、南海地震の想定被災地域沿岸部における津波高ごとの来襲可能性を評価した。波源特性を多様に変化させて考えた場合、地域に来襲する津波高は、波源に対するその地域の地理的かつ地形的条件からどのような確率分布を持つかを調べた。それと同時に、来襲する津波は地域によって特定の確率分布を持つことを示し、それぞれの地域でどのような津波高を想定するべきか、さらに、想定値を超える可能性がどれだけあるかを定量的に示すことによって、想定を超える事象の発生に備えた対策の検討に資することを目指した。

2. 津波災害の想定上の課題

これまでの津波による被害想定では、まず、地震研究

者による断層モデルの提示があり、それに基づいて数値計算を行って被害を推定してきた。しかしながら、東日本大震災のように地震マグニチュード（本稿では断らない限り、モーメントマグニチュードを指している）9.0という想定以上の地震が発生すると、事前に予測した津波高さを遥かに凌駕する巨大津波が来襲するため、ハザードマップに代表されるように、用意してきた事前・事中の対策効果は限定されたものとなる。それどころか住民に安全だと思わせたきらいもある。

このようなことの反省から、津波防災における想定に対する考え方を抜本的に見なおして、今後、想定が原因となって津波被害が拡大することがないように、工夫が必要である。本章ではその課題と対策を整理する。

(1) 断層モデルの固定化

地震研究により力学的な観点から断層パラメーターが提示されてきた。1つの断層モデルを、地震マグニチュードはもとより、断層パラメーターのすべてが、所与の条件として数値で与えられることによって、利用者により断層モデルのすべてのパラメーターは決定論的に捉えられる。一旦パラメーターが変化すれば、確率的に想定を超える津波が来襲することになる。利用者はこのことを念頭におかなければならない。

断層モデルは地震マグニチュードを含め、8個のパラメーターで記述される。このパラメーターセットは、プレート境界の制限に基づいた物理的に起こり得る範囲において、多様に存在すると考える。この範囲内において、各パラメーターを系統的に変化させ、それぞれのモデルを用いて地域に到達する津波の高さを求め、その統計を取ると、地域に到達する津波の高さは、1つに定まるものではなく、パラメーターの取り方、即ち地震の発生の仕方と、地域の地理的位置、および波源から地域までの海底地形

1 正会員 博(情) 京都大学助教防災研究所
2 フェロー 工博 関西大学教授大学院社会安全研究科

表-1 本研究で想定した7つのパラメーターの範囲、変化の間隔、ケース数

パラメーター	想定範囲	感覚	感覚
位置	図-1 参照	-	10
深さ	2 ~ 20 km	2 km	10
縦横比	0.6 ~ 2.4 (長さ/幅)	0.2	10
すべり量	5 ~ 50 m	5 m	10
傾斜角	10 ~ 55°	5°	10
走向	225 ~ 315°	10°	10
すべり角	70 ~ 115°	5°	10

図-1 本研究で想定した10通りの断層原点位置

を反映させて、ばらつくものであることがわかる。

その後で、巨大津波を与える各パラメーターの組み合わせが、地震学的不おかしさをチェックし、対策の基準となる想定津波を設定する。このように、1つの想定値のみならず、様々な想定値を出して、想定情報が決定論的なものとして固定化されるのを防ぐ必要があると考えられる。

(2) 最大の津波

過去に発生した最大規模の地震や津波は、津波堆積物の解析や海岸段丘の発生過程に関する検討によって、かなりの精度で推定できる。しかし、「起こり得る」巨大地震や巨大津波は、このような取り扱いから求めることは不可能である。「自然は二度と同じ姿を見せてくれない」と考えなければならない。過去の数回の地震の実績から、各地域に到達する津波の高さの最大を決定することは困難である。同時に最大であると決定することは、前述のような東日本大震災での事例もあり、その外側の住民にとっては非常に重大な決定となる。

最大値のみの情報だけではなく、津波高の発生確率分布、すなわち、その地域で発生する津波がどのくらいの高さになりやすいのか、どの程度の高さの津波がどの程度の確率で来襲するかを示す情報も、限られた時間と資源の中で対策を行う利用者側にとっては有用な情報と考えられる。重要であるのは、津波による被害をできるだけ軽減するよう発生に向けた準備を継続することである。初めから最大の津波に対して対策をとることができなくても、段階的に対応可能な津波高を上げていく必要がある。その上では現状の防災力あるいは目標を定量的に評価できる津波高の発生確率分布が重要となろう。ありとあらゆる可能性において津波の外力を考え、それをわかりやすい形、使いやすい形にすることが必要である。

(3) 自ら想定する社会

従来の対策は、外力の大きさが対策を決めるものであった。災害を起こす側が対策内容を決めるというものである。確たる「数値的」な根拠が無いと、対策が行えなく、また、外力の大きさが見直されるたびに、対策を修

正しなければならないということになってしまうだろう。

減災対策によって被害を最小化することを目指すならば、私たちの社会の側が対策の基準や内容を決める、想定値を決めるという本来の考え方が必要である。しかしながらそれを行うだけの現状での不確定性を考慮した津波高に関する十分な情報がない。

これまで述べた情報を作るためには、津波研究者と地震研究者、災害対応や復興研究者、行政、地域住民の共同研究によって可能となろう。しかし、長期間を要する作業となることは必定であるから、まず、第一歩として津波高の確率表示を次章以降で提案する。

3. 不確定性を考慮した津波数値解析

本研究では、上述のような視点に立脚して、南海地震の想定被災域の沿岸各地における、津波高の発生確率分布を求める。

まず、津波波源の位置や形状が不確定であることを所与条件とし、波源を規定するパラメーターを多様に変化させた、膨大な数の断層モデルを作成した。そして、その膨大なケースの津波に関して数値解析を実施し、沿岸各地における津波高の発生確率分布を算出した。

(1) 断層パラメーターの設定

津波の波源は、地震マグニチュード (M)、断層原点の位置、断層上端の深さ、断層面の縦横比（あるいは、断層面の長さまたは幅のいずれか）、すべり量、傾斜角、走向、すべり角の8つのパラメーターで規定される。

本研究では、まず、南海地震の地震マグニチュードをM8.0、8.2、8.4の3通りに固定して考える。そして、それぞれの地震マグニチュードについて、他の7つのパラメーターを表-1に示すように10通りずつ系統的に変化させて想定した。各断層パラメーターの取りうる範囲は次のように設定している。

- 断層のほとんどが海域に位置することを条件として、図-1のように断層原点を設定した。
- 断層深さは、断層原点位置におけるプレート境界

図-2 大阪における津波高さの確率密度分布

の深さを考慮して2～20 kmとした（例えば地震調査研究推進本部地震調査委員会，2001）。

- c) 断層面の形状については地震マグニチュードが変化しても同じ値を用いることができるので，縦横比を用いた。表-1に示した範囲はM8.4の場合に潮岬を端点とした場合，紀伊水道をカバーする範囲から，宮崎沖に至る範囲となる。
- d) すべり量は，これまでの想定 の程度から，最大で東北地方太平洋沖地震津波の最大すべり量程度までとした。
- e) 傾斜角は様々な波長の津波を検討するために，10度から55度の変化をつけた。
- f) 走向は陸側隆起の逆断層となるようにし，津波の指向性が紀伊半島西岸から土佐湾西部を向くようにした。
- g) すべり角については，90度を中心に，前後20～25度の範囲で変化させた。

(2) モンテカルロ・シミュレーション

これらの7つのパラメータが独立に各々10通り変化するとした場合，それらで規定される波源モデルは，地震マグニチュードごとに 10^7 (=1千万) 通りとなる。これらの波源モデルのすべてに対して，津波数値解析を行うことは計算資源と時間上の制約から不可能であったため，この中から乱数を用いたランダム・サンプリングにより2万通りを抽出し，それらに対して津波数値解析を実施するモンテカルロ・シミュレーションを行った。ここでサンプリングするケース数を2万通りに設定したのは，10万通りまで計算した結果を用いて，集計後の頻度分布の概形がほぼ固定され始めるケース数を調べたところ，ほぼ2万通りであったからである。

各ケースの津波数値解析は，非線形長波方程式を支配方程式として，差分法によって行った。数値解析は，大規模並列処理によって高速に計算させるため，画像処理装置による汎用計算（GPGPU）を利用した。空間解像度は1350mとし，房総半島から九州東岸までの範囲を計算領域とした。海岸は鉛直壁境界とし，陸上への遡上は考

表-2 大阪における津波高に関する超過確率

津波高	M8.4の場合	M8.2の場合	M8.0の場合
1 m	95 %	73 %	33 %
2 m	55 %	22 %	2 %
3 m	22 %	3 %	0.03 %
4 m	6 %	0.7 %	0 %
5 m	2 %	0.1 %	0 %
6 m	1 %	0 %	0 %
7 m	0.3 %	0 %	0 %
8 m	0.1 %	0 %	0 %
9 m	0 %	0 %	0 %

慮していない。地震発生から6時間後までをシミュレートした。その結果として沿岸の漁港・港湾414地点において津波の高さを出力した。1ケースあたりの計算実行にかかる時間は11秒，2万回の計算を2日半で実施した。

最後に，地点ごとに得られた2万個の津波高を集計し，各地点の津波高に関する発生頻度分布を求めた。ここでは，どの波源モデルが生起しやすいかを相対的に決定する資料が不足しているため，どの波源モデルに関してもその生起可能性は同じであるとして，頻度分布を試行回数で割ることにより，確率密度（相対確率）分布とした。これは即ち，津波波源の不確定性を考慮したときに，各地において，どのような津波高が発生しやすいか，どの程度，津波高がばらつきやすいかを示し，その地域の地理的・地形的条件を考慮した津波危険度を示す。

4. 津波外力の確率表示

(1) 地域における津波外力の到達確率

図-2は前章の方法によって計算された，大阪における津波高の確率密度分布である。本研究の範囲内で断層パラメータを多様に変化させ様々なモデルを検討した場合，大阪に來襲しうる津波の高さは，このモデルの多様性を反映したばらつきを示すことが分かる。分布の凹凸は試行回数を増やすことによってなめらかな曲線に近づく。

地震マグニチュードが大きくなると，断層パラメータの不確定性による影響が大きくなる。これは，地震マグニチュードが小さいときは，津波が局所的となり不確定性の影響が断層の周辺に限定的となるのに対して，地震マグニチュードが大きくなると，断層の位置や形状その他の幾何学的条件が多様になり，大阪に來襲する津波の大きさを大きく変化させるようになるからである。

また，それぞれのグラフにおいて，分布の特徴を考えると，津波高の小さい方へ傾くようになっている。最尤値を示す津波高と下限までの差より，最尤値を示す津波高と上限までの差の方が大きい。このことは，最も起こりやすい津波高は平均ではなく，それより大きい津波高

図-3 M8.4を想定した場合の各地に襲撃する津波高の標準偏差

が発生する確率が高く、その値は分散している、ということを表している。多様な津波波源を想定し計算することによって、このような地域での津波高の発生特性を表示することができるのである。

表-2は大阪における津波高に関する超過確率である。ある津波高以上の確率を積分すると超過確率を計算することができる。これまでの中央防災会議の東海・東南海・南海地震同時発生（M8.7）時の大阪における津波高さである平均潮位時T.P. 3.3mは、M8.4の場合においても、下限から84.7%の位置にあり、これを超える確率は15.3%あることが分かる。また、地震マグニチュードがM8.2と南海地震としては小さくても、この値を超える確率は1.8%存在するといったように評価することができる。

M8.4のとき、大阪では、最も相対的に確率が高くなるのが1.7m、超過確率が50%となるのが2.1mである。上下それぞれ5%程度を除いて考えると、90%の確率で、津波高は1.0m以上4.1m未満の範囲に入ることが分かる。さらに平均潮位時にT.P. 4.4m～5.9mで整備されている防潮堤を超える確率は1.1%～3.8%と評価され、大阪にとって最悪の波源がこの割合程度、存在することが分かった。さらに、それぞれの高さの津波が来た場合に発生する被害を想定して、この確率と掛け合わせることで津波のリスクを定量化することができる。

図-3はM8.4を想定した場合の各地における津波高のばらつき具合を標準偏差で示したものである。外海部において波源による津波高のばらつきが大きいことが分かるが、大阪湾の湾奥に位置する大阪においてもばらつきが大きくなることが分かる。高知県西部から豊後水道にかけては小さい値となっているが、これは、波源の設定に起因するものと考えられる。断層原点を紀伊水道沖に配置すると、すべり量が大きくなるケースにおいては断層面積が小さくなるため、高知県西部から豊後水道は波源が遠くなり、この種の津波が到達しない。今後、このようにすべり量が大きくなる場合に限り、断層原点を西方にも配置する工夫が必要である。

図-4 M8.4を想定した場合の各地で津波高が従来の想定を2m以上超える確率

(2) 従来の想定を超える確率

図-4はM8.4を想定した場合、各地においてこれまでの想定を2m以上超過する津波が来襲する確率を示したものである。図-3で述べたのと同じ理由により、紀伊水道沿岸で高い値を示しているものの、これに加え、宮崎県においても高い値を示しており、波源の不確実性を含んで、多様な津波を考えた場合、これまでの想定を大きく超える津波の発生可能性があることが分かった。これらの地域においてはこれまでの想定を超えることが有りうることに注意して対策を検討していく必要がある。

ここでは、全体で一律に津波外力の既往の想定からの超過幅を2m以上と設定しているが、この値は各地域での地形条件や現状の避難施設整備水準に鑑みて設定し、その超過率を計算することができる。このようにすれば、地域での住民の避難方法や、これから地震発生までのまちづくり、避難施設整備を考える上での指標となると考えられる。

(3) 大すべり域・超大すべり域の確率的想定

南海トラフの巨大地震モデル検討会（2012）は、東日本大震災を教訓に、津波断層面の中で、特に大きくすべる領域を「大すべり域」とし、大すべり域の中のトラフ沿いの津波断層の領域については、津波地震を発生させ「大すべり域」よりもさらに大きくすべる可能性があるとして「超大すべり域」とするなど、特に大きい津波を生起させる領域を設定している。

本研究では、この大すべり域を同様に確率的に検討した。これまでに想定されていた、中央防災会議の東海・東南海・南海地震の同時発生モデル（M8.7）を背景断層として、それに、M8.4程度の大すべり域を追加する。追加後の地震マグニチュードはM8.7で変わらないが、大すべり域の存在のために、大きな津波が来襲する地域が発生する。

図-5は和歌山・湯浅・御坊・田辺において、この解析を行った結果得られた、確率密度分布である。従来の想定津波に大すべり領域が発生した場合の、津波高の生起

図-5 和歌山・湯浅・御坊・田辺の津波高さの確率密度分布

確率を表示している。南海トラフの巨大地震モデル検討会の示した最大値のみではなく、最大でないケースの津波高がどのように生起する確率があり、どの程度ばらつくかを計算することができる。

(4) 大きな津波高をもたらす波源の特定

本研究の手法により行った2万ケースの断層モデルの中には、断層モデルの特性によって、地域に到達する津波の高さが大きくなったケースがある。このケースを特定することによって、各地域においてどのような断層モデルが生じた場合に津波高が大きくなるかといった知見を得ることができるのである。そして、そのような断層モデルがどの程度の確率で生起する可能性があるかを地震学的に検討することによって、どのようにそのタイプの地震に準備すべきかを検討することができる。

図-6は大阪において、2万回の試行結果を、各種パラメータとその時に大阪に来襲した津波高さとして1点ずつプロットし、その間の関係を比較したグラフである。大阪においては、断層原点位置、走向、断層長さ、すべり量の各パラメータで津波高に顕著な変化が見られた。この図から、断層原点位置は、徳島にもっとも近い位置において、走向は指向性が紀淡海峡の方向を向く走向において、断層長さは100 km弱付近で、すべり量が大きくなるにつれて大阪での津波の高さが大きくなる傾向にあることが分かった。

5. 結論

本研究では、津波を発生させる断層の断層パラメータが不確定であることを考慮し、南海地震の想定被災域沿岸への津波到達特性を再考した。その結果得られた結論を下記に列挙する。

- 波源を規定する断層パラメータの範囲を想定し、その範囲内にて多様な津波波源を生成し、数値計算を行うことによって、地域での津波高を波源の不確定性と地域の地理的地形的条件を反映した幅を持った分布で表示することができた。
- 地震マグニチュードが大きくなるにつれて波源の不確定性が影響し、津波高のばらつきの幅が大き

図-6 大阪の津波高さと各種パラメータの関係

くなることが分かった。

- 波源の不確定性を考慮した確率分布より、現在の地域での津波想定高を超える確率、防潮堤整備水準を超える確率、想定を2m以上を超える確率などが計算された。これは対策の定量的検討に有用であると考えられる。
- 各地における波源の不確定性による津波高のばらつき具合は、特に外海部において大きく、また大阪湾の湾奥部においても大きいことが分かった。
- これまでの想定を2m以上超過する確率は、紀伊水道沿岸、高知・宮崎県で高く、これまでの想定を超える確率が高いことに注意しておかなければならない。
- 本研究で提案した手法は、大すべり域の諸元が変化したときの津波の発生確率も計算することができ、最大値のみではなく、津波高の発生特性が検討できる。
- 多数の試行結果から、各地において津波が高くなる時の、断層パラメータの特性を知ることができる。

参 考 文 献

- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2001) : 南海トラフの地震の長期評価について、平成13年9月27日。
- 中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 (2011) : 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告、平成23年9月28日。
- 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (2012) : 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について (第一次報告)、平成24年3月31日。