各種確率論的津波ハザード解析手法の 高頻度から極低頻度までの評価能力の比較

信岡 尚道¹・尾上 義行²

¹正会員 茨城大学教授 工学部都市システム工学科 (〒310-8156 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

E-mail: hisamichi.nobuoka.311@vc.ibaraki.ac.jp

²正会員 鹿島建設株式会社 (〒028-2631 岩手県宮古市区界第2地割466-2)

E-mail: onoue@kajima.com

津波の防災および減災対策, リスク管理を進めるために, 幅広い頻度を対象とした津波高を確率で適切に算定することは重要と考えられる. 本研究では茨城県沿岸を対象に, 高頻度に来襲する津波からL2津波を超える極低頻度の津波を対象に, GR則, ロジックツリー手法および極値統計法を用いた確率論的津波ハザード解析手法で算定される津波高を比較評価すること, 既存の公的な津波想定と比較することから適用性を示すことを目的とした. ロジックツリー手法で算定した波源域ごとの平均ハザード曲線を合算したものは, 極値統計手法によるハザード曲線の不確実性の幅の中に収まる結果となった. また, 自治体が定めたL1津波とL2津波と矛盾しない結果を得ることもできたなど, ロジックツリー手法の確率論的津波ハザード解析への有効性を示した.

Key Words : logic-tree analysis, GR-law, extreme value theory, hazardmap, beyond expectation

1. 序論

「想定外を無くす」ことを含め津波の防災および減災対策, リスク管理を進めるために, 幅広い頻度を対象とした津波高を確率で適切に算定することは重要と考えられる. 例えば, 海岸堤防や高台造成などを計画する場合, 地方では人口変動が大きいことが費用対効果に関わってくるので, 費用便益の計算のために年超過確率の津波高を算出することに意義がある. 「人命を守る」, 「クリティカルなインフラストラクチャーを守る」視点で言えば, 人類が許容できるまでの低頻度の災害までを想定することも必要不可欠になる.

確率論的地震ハザード解析で代表的なものは, Gutenberg and Richter¹⁾が米国カリフォルニア周辺の地震記録をもとに, 地震マグニチュードと発生回数の対数に線形の関係があることを示したのが始まりである, GR則が有名である. これを津波ハザード解析に対して検討された例もいくつかある²⁾. 原子力発電所の津波評価にはAnnaka³⁾が提案した津波用のロジックツリー手法が用いられるのが一般的となっている⁴⁾. 高波に対する設計の検討では極値統計手法⁵⁾が用いられ, 津波に対して検討された事例もある⁶⁾.

本研究では, 高頻度に来襲する津波高からL2津波を超える極低頻度の津波高を対象に, これら3種類の確率論的津波ハザード解析手法で算定される津波高を比較評

価すること, 既存の公的な津波想定と比較することから適用性を示すことを目的とする.

2. 対象とする解析手法と解析条件

(1) 確率論的津波ハザード解析手法

3種の確率論的津波ハザード解析手法, Gutenberg-Richter則の活用した手法, ロジックツリー手法と極値統計理論を活用した手法を対象とした. なお, 解析の対象域は茨城県沿岸としたので, 地震調査推進研究本部⁷⁾が示す波源区域図のうち, そこに一定の影響のある地震域

図-1 対象とした主な波源域

表-1 本研究で用いた波源モデルの諸元 (文献4), 8), 9)を元に設定)

波源域	地震マグニチュードM	長さ(km)	幅(km)	上端深さ(km)	走向	傾斜角	すべり角	剛性率	小断層メッシュサイズ(km)
福島沖	7.8	110	140	13~59	200	20	90	3.5	6
茨城沖	7.7	130	120	13~59	200	20	90	3.5	6
房総沖	7.9	120	110	13~59	200	20	90	3.5	6
JIT	8.6	130	300	7.7~18.8	204	8.7	90	5.0	6
3.11型	9.0	500	200	0.0~36.3	193	14.0	81	5.2	40

図-2 本研究で設定した茨城県沿岸津波を対象としたロジックツリー

である、福島沖、茨城沖、房総沖とJITを基本にした(図-1)。JIT波源は青森県から千葉県沿岸まで全体で南北約800kmにおよび、およそ200kmの長さで1度の地震が起こるとされているが、ここでは便宜的に南側300kmの長さの波源域を対象とした。

a) Gutenberg-Richter則

GR則¹⁾の基本の形は式(1)で示される。

$$\log_{10} n = a - bM \quad (1)$$

ここに M は地震マグニチュード、 n は年発生回数、 a, b は係数であり、地震記録の M, n にあうように定めるものである。本研究では、気象庁地震データベースより波源毎の地震規模別累積度数分布図を作成し、式(1)を適用してマグニチュードと発生確率の関係式を定めた。地震ニチュードと断層モデルの関係については、茨城県²⁾および原子力土木委員会⁴⁾を参考にして表-1のように設定した。ただし、3.11型はデータ数の不足によりGR則の計算から除外した。

計算で設定する各モーメントマグニチュードと断層の平均すべり量の関係は式(2), (3)で定めた。

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (2)$$

$$M_0 = \mu DS \quad (3)$$

ここに、 M_w : モーメントマグニチュード、 M_0 : 地震モーメント、 S : 断層面積 (km^2)、 D : 平均すべり量 (m) である。

b) ロジックツリー手法

確率論的津波ハザード解析では、偶然的ばらつき (aleatory variability) と認識論的不確定性 (epistemic uncertainty) の2つを考えるべきとされている。これらは研究が進めば確定できるものと言えなくはないが、確定以前の対処する手法として、ロジックツリー手法が適切な一つとされている。近年、津波に対しては、Annakaら³⁾の方法を元にした原子力土木委員会⁴⁾が提案しているロジックツリー手法がよく用いられ、本研究もそれに従った。

本研究で設定したロジックツリーを図-2に示す。波源域は平成23年東北地方太平洋地震を対象とした連動型巨大地震(以下、3.11型と呼ぶ)を加えた5種類である。3.11型の断層モデルについては、藤井・佐竹のVer4.2⁹⁾を基本とした。マグニチュードについては、地震調査研究推進本部⁷⁾による長期評価結果のモーメントマグニチュードの値を中央値とし、原子力土木委員会⁴⁾にならい±0.1の分岐幅を与えることで不確定性を考慮した。ただし、JTT波源については、モーメントマグニチュードの代わりに、津波マグニチュード⁷⁾の値を基準にした。マグニチュードと断層の平均すべり量の関係は前節と同様の取扱にした。平均発生間隔についても地震調査研究推進本部による長期評価結果⁷⁾の値を中央値として設定し、ポアソン変数の信頼区間を適用することで上下に分岐を設けた。波源モデルには、「一様すべりモデル」と、断層のアスペリティ（大すべりが発生する領域）を考慮した「不均質モデル」の二分岐を設定した。アスペリティの設定位置については、波源域の「北端」、「中央」、「南端」の3ケースの分岐として設定した。なお、「3.11型」のアスペリティ位置「南端」のケースにおいては、大すべり領域が茨城県沖に位置することとなる。歴史上、茨城県沖に大すべり域を持つ連動型の巨大地震が観測されたという記録は残っていないが、原子力土木委員会⁴⁾の手法に従う方針の下、茨城県沖にアスペリティを持つケースについても解析を行った。原子力土木委員会⁴⁾は、津波の推定値のばらつきが対数正規分布で近似できることを示しており、この考え方を基に対象地点での計算津波高を中央値として設定し対数正規分布化することで津波ハザード曲線を得る。その際に対数標準偏差については、津波の計算値のばらつきを表す相田の幾何標準偏差 κ ($=1.25\sim1.55$) を基に算出し、分岐を設けた。計算した対数正規分布の打ち切りは、1つの極限として「打ち切りを考慮しない場合」と「分布の両端1パーセントに入る現象は実際には起こらない」と判断した場合の2経路を設けた。

c) 極値統計理論を用いた手法

津波観測記録から極値統計理論を用い、茨城県沿岸の中央にあたる大洗町を対象地点に確率津波高を求めた既往の研究成果を活用した⁶⁾。ここではその概要を示す。極値分布関数の候補には、合田の方法⁵⁾を採用し、極値Ⅰ型分布、極値Ⅱ型分布で形状母数 k を2.5、3.33、5.0と10.0とした4種類および3パラメータのワイブル分布で形状母数を $k=0.75$ 、1.0、1.4と2.0とした4種類による、計9種類の関数とした。過去の大洗町とその周辺における津波高が0.1m以上のもの15個の記録（文献¹⁰⁾と気象庁）を基礎資料とした。資料期間の最大は、延宝房総沖地震津波の1677年から平成23年度東北地方太平洋沖地震津波の2011年までの、300年を超える。データの偏りを検討するた

め、資料の採択や平均発生間隔に関わる資料期間を含め便宜的に11ケースを設定して解析をおこなった。最大値資料の対象期間の間隔は10年とした。

DOL 基準とREC 基準により分布関数の棄却検定をおこなった後、採択された各極値関数に対して、津波高の小さい範囲にデータ数が多いことによるデータの不均一性を、Jackknife法¹¹⁾により補正した。補正した各分布関数での年超過確率別に津波高を求め、各確率における最高値と最低値を「津波高の不確実性の幅」とした。SLSC¹¹⁾によって最小分散となる関数（以降、代表関数と呼ぶ）を求め、その関数による津波高を確率別の代表津波高として取り上げ、不確実性の幅の値との比較に用いた。上述の11ケースに対して、東北地方太平洋沖地震津波の再現期間を十分に満たすものは、1ケースのみであった(文献⁶⁾のcase-10)。そのケースを本研究の比較に用いることにした。

(2) 津波数値計算

津波の数値計算は、海底面の摩擦を考慮した非線形長波理論をもとに、差分法の一つである Leap-Frog 法を用いて解く方法を採用した。津波数値計算における計算条件の諸元は表-2に示すとおりである。

日本原子力発電所(株)は茨城県沿岸の東海第二原子力発電所を対象に、ロジックツリー手法を用いた解析¹²⁾をおこなっている。本研究の方法でも可能な限り同一条件にして計算したところ、津波平均ハザード曲線が概ね一致する結果となり、構築手法の妥当性を担保できた。

表-2 本研究における津波数値計算条件

項目	内容
計算領域	北海道から静岡県までの太平洋沿岸とその沖合
空間メッシュ間隔	2592m~12m
計算スキーム	スタガード格子、Leap-frog 法
初期変位・水位	Mansinha and Smylie の方法
境界条件	沖側：自由透過、陸側：遡上有り
計算時間間隔	段階的可変 最小0.1s
計算対象時間	津波発生後 180 分間

3. 確率論的津波ハザード解析結果の比較

(1) 3つの手法の比較結果

GR則、ロジックツリー手法と極値統計手法のそれぞれで、茨城県大洗における確率津波高を算定した結果を図-3に示す。縦軸が年超過確率であり下に向かうほど発生頻度が低くなり、横軸が津波高で右に向かうほど高くなるものである。GR則およびロジックツリー手法の結果は波源域ごとの平均ハザード曲線を合算したものであ

る。極値統計手法の結果は、DOL 基準とREC 基準による分布関数の棄却検定を通過したもののうち、最大と最小の津波高を描いたもの（オレンジ色の破線）とSLSCにより代表値と定めたもの（赤の実線）で描いている。代表値を基準に両破線の間は、新たな津波高の資料によって比較的容易に代表関数に変更となる可能性がある範囲ととらえ、不確実性の幅としたものである。

まず、ロジックツリー手法と極値統計手法による確率津波高との関係を見ていく。計算前に予想していたこととは異なり、ロジックツリー手法による津波高は、極値統計手法の不確実性の幅の中にはほぼ入る結果となった。ただし、詳細を見ていくと変化の傾向の違いが見られる。10²/年(100年に1回程度)の津波では、ロジックツリー手法の方が津波高が高い結果となっている。それから10³/年(1000年に1回程度)さらにその先の低頻度に向けて、ロジックツリーでは徐々に津波高が高くなるのに対して、極値統計の方は比較的急に高くなる傾向がみられる。2×10³/年(2000年に1回程度)を超えるあたりから10⁴~10⁶/年に向けて極値統計手法の結果は津波高が益々高くなる結

図-3 各種確率論的津波ハザード解析の結果

図-4 ロジックツリーによる津波平均ハザード曲線

図-5 年超過確率に占める波源域の影響度

果となったが、ロジックツリー手法ではそれよりも緩やかに高くなっていく結果となった。

これらとGR則の関係を見ていく。GR則の結果そのものは、地震の発生頻度を表すもので津波の発生頻度とは一致しないものであるが参考として結果を図に灰色破線で示している。GR則補正は地震の発生間隔から津波の発生間隔に変換することを念頭に、整数倍して極値統計の結果に近づくものを探し、10倍に発生間隔を補正したものである。結果は低頻度で極値統計手法による結果に近いものとなった。なお今回、モーメントマグニチュードが9以上を対象外としたため超過確率は10³程度で留まる結果となった。

(2) ロジックツリー手法の波源域ごとの影響の分析

本研究では、ロジックツリー手法について原子力土木委員会⁴⁾に従い各波源域ごとの解析から順に行ったので、波源ごとの平均ハザード曲線が計算過程で存在する。それを示したものが図-4である。図-4のうち最右の黒実線が図-3で示したロジックツリー手法による結果と同一のもので、各波源域を重みを付けて計算した全波源域に対する超過確率と津波高の関係である。図-5は、全波源域の津波高に及ぼす各波源の津波高を超過確率ごとに表示し直したものである。これらの図から、2×10²/年(50年に1回)未満の津波には茨城県沖と房総沖を波源とする津波の寄与が支配的である。福島県沖の波源域は、その波源域の向きと茨城県沿岸までの海底地形の関係により、茨城県沿岸への寄与は小さくなっているが、計算対象時間をもっと長くした場合などはエッジ波や多重反射などにより到来する可能性があるので注意が必要である。10²/年(100年に1回)程度から10³/年(1000年に1回)程度にかけてはJTT波源が支配的である。

10³/年(1000年に1回)程度から低頻度では3.11型が支配的となり、津波高で示すとおよそ6m以上の津波がこれに該当する。平成23年東北地方太平洋沖地震津波では、大洗港における気象庁の津波計による津波高は4.0mであった。周辺や背後地の遡上高はこれよりも高かったの

であるが、年超過確率との関係では説明がやや難しい。
JTT波源の平均発生間隔を103年としたが、これは南北の日本海溝沿いの200kmの長さの範囲を特定せずにどこかで発生する津波と認識すべきであるので、今回のように茨城県沖沿いの300kmを対象とした場合には間隔年数が短すぎと考えるのが妥当であると思われる。言い換えると、図-4でJTT波源域が大きく影響した範囲では超過確率が示した結果よりも小さくなると考えられる。

4. 現時点での確率論的津波ハザード解析手法の選択を今後の展開に関しての考察

(1) 堤防高および津波ハザードマップへの活用

L1津波を50年~150年に1度(約 10^{-2} /年)、L2津波を500年~1500年に1度(約 10^{-3} /年)と設定して、茨城県沿岸の北部(大津港とそれを含む海岸区域)、中部(大洗港とそれを含む海岸区域)及び南部(波崎港とそれを含む海岸区域)のロジックツリー手法による結果および国土交通省の手順書に従った茨城県⁸⁾の検討結果を示したものが図-6(a)~(c)である。結果を見ると、茨城県の北部(大津港)のL2津波が設定した確率よりも超過確率が少し大きい、つまり津波高が小さめとなったり、中部(大洗)のL1津波が設定の年超過確率のほぼ下限、南部(波崎)のL2津波のほぼ上限となるなど見られたが、全体を通してみると、大きな矛盾がない設定を茨城県⁸⁾がおこなったことを表す結果となった。

ある対象とした年超過確率における、各波源による浸水域を確率的浸水域と呼ぶこととし、その地図を作成したものが図-7である。年超過確率 10^{-3} /年までの範囲(図の水色と黄色で塗りつぶされた範囲)は既往の津波浸水想定域(L2津波、茨城県)と矛盾がなかった。さらに、確率的津波浸水域は他の頻度も含めて段階的に浸水域の拡大を示せることも確認している。

(2) 今後の展開について

3章にて、ロジックツリー手法で求めた平均ハザード曲線が極値統計手法による確率津波高の不確実性の幅に収まることを示した。ただし、例えば年超過確率 10^{-3} /年を考えると、3.11型の波源が支配的となるロジックツリーモデル、大洗の観測値に対応する年超過確率が3.11型の平均発生間隔の中に納まるケースを選択した極値統計手法、3.11型で潮位など他の条件を最悪に設定した茨城県の浸水想定⁸⁾といった、いずれも同じ地震津波にすり寄り経過を踏んでいると言えなくもない。また、年超過確率 10^{-2} /年を考えるとロジックツリー手法ではJTT波源が支配的となるが、茨城県沖合のJTT波源を含む地震津波で観測されたのは房総沖と連動したと考えられる延宝房総沖地震津波のみで単独の波源のものはまだ記録上不

図-6 ロジックツリー手法による結果と設定されているL1、L2津波高との関係(破線はL1、L2津波の年超過確率の上下限を示す)

い。これらのことがGR則に対しては比較的頻度の高く津波高が低い茨城沖などを波源とする津波に限定させることに繋がっていると考えられる。

これらのことから推察するに、現時点から各方面の研究が発展するまでの間は、GR則、ロジックツリー手法と極値統計による確率津波高について、ある程度一致すること、その理由や限界の説明ができることが、矛盾の少ない取扱いになっていることを担保する手段になると考えられる。

図-7 ロジックツリー手法による結果から作成した確率的津波浸水域想定

6. 結論

高頻度から極低頻度の巨大津波までを含む確率論的津波ハザードについて、GR則、ロジックツリー手法と極値統計手法により示す値について検討してきた。

ロジックツリー手法で算定した波源域ごとの平均ハザード曲線を合算したものは、概ね極値統計手法による結果と一致しているが、平均1000年に1回 (10^3 /年) 付近を境に津波高の変化傾向が異なった。この変化の傾向は波源域ごとに異なる平均発生間隔と地震マグニチュードに関係する断層すべり量によるものである。茨城沿岸では、高頻度の低津波高には茨城県沖と房総沖を波源とする津波の寄与が大きく、低頻度の高津波高には連動型波源、その中間にはJTT波源の寄与が大きい。

GR則手法は、地震と津波の発生頻度の変換を感度分析的に補正すれば、高頻度の津波高に限定されるが他の手法と大差は異ならない結果が得られる。極値統計解析手法において波源域ごとの算定には、またGR則手法において地震動と津波発生頻度の関係を定めるには十分なデータが必要であるが、長期のデータを蓄積するには世紀を超える時間が必要である。したがって現代においては、高頻度から低頻度までの津波高を一括して求めるのには、ロジックツリー手法が適切と考えられた。

L1津波とL2津波の発生頻度を 10^2 /年と 10^3 /年とした場合、ロジックツリー手法による津波高は茨城県⁸⁾の津波浸水想定のもと沿岸域全体で矛盾しない結果となった。作成された確率的浸水図も、 10^3 /年の範囲は既往の津波浸水想定域⁸⁾(L2津波)と矛盾なく、他の頻度でも段階的に浸水域の拡大を示せることを確認した。

以上から長期の津波記録が蓄積されるまでの間、高頻度低津波高(L1津波)から低頻度高津波高(超L2津波)までを確率的に示すのに適した手法はロジックツリー手法であると言えた。GR則や極値統計手法はロジックツリー手法の適切さの確認として有効な方法である。それを踏まえたロジックツリー手法による津波の確率的风险管理や津波対策の費用便益算定への活用が期待される。

謝辞：本研究はJSPS科研費 25350503（基盤研究(c)「不確実性を考慮した確率的沿岸浸水リスクの時空間評価手法開発と評価結果の活用」）の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Gutenberg, B. and Richter, C.F.: frequency of earthquakes in California, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34 ; 185-188. 1944.
- 2) 例えば、泉宮 尊司, 内山 翔太, 尾島 洋祐: 領域区分による Gutenberg-Richter 則に基づいた. 地震津波発生確率の推定法, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp. I_431-I_436, 2013.
- 3) Annaka T., K. Satake, T. Sakakiyama, K. Yanagisawa and N. Shuto : Logic-tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its Applications to the Japanese Coasts, *Pure and Applied Geophysics*, Volume 164, Issue 2, pp 577-592, 2007.
- 4) 原子力土木委員会：確率論的津波ハザード解析の方法，2011，http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/PTHA20111209_0.pdf, 2017.1.27 閲覧
- 5) 例えば、合田良實 1990：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－，鹿島出版会，333p., 1990.
- 6) 信岡 尚道, 鍋谷 泰之, 住岡 直樹, 北野 利一：極値統計法に基づく極低頻度までを対象とした津波リスクマップの基礎的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol. 69, No. 2, pp: , I_1351-I_1355, 2013.
- 7) 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（第二版）について，2012 http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso_4.pdf, 参照 2016-11-22.
- 8) 茨城県：茨城県沿岸津波浸水想定図活動業務資料，2012.
- 9) Fujii Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa : Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, pp.815-820, 2011.
- 10) 渡辺偉夫：日本被害津波総覧[第2版]，238p., 1998.
- 11) 田中茂信・宝馨：河川流量の頻度解析における適合度安定性の評価，*水工学論文集*，43，pp.153-156., 1999.
- 12) 日本原子力発電(株)：東海第二発電所 確率論的リスク評価（PRA）について（津波レベル 1PRA），2016，http://www.japc.co.jp/shinsei/tokai/pdf/20160621_2.pdf 参照，2017.1.11

(2017.3.15 受付)

COMPARISON ON CAPACITY OF PROBABILISTIC TSUNAMI HAZARD ANALYSIS FROM HIGH FREQUENCY TO LOW FREQUENCY

Hisamichi NOUBOKA and Yoshiyuki ONOUE

Probabilistic tsunami heights are necessary for coastal risk managements. This paper shows capacity of three types of probabilistic tsunami hazard analysis methods; those are based on GR-Low, Logic Tree-approach and Extreme value theory with observed records. The target return periods are 10^2 year, 10^3 year, 10^4 year and more. The results of probabilistic tsunami heights by Logic Tree-approach along Ibaraki prefecture coast in Japan were good agreement with results by the Extreme value theory. And more, the results by Logic Tree-approach were also fit to the desing heights for sea walls (about 10^2 year of return period) and hazard area (about 10^3 year of return period) decided by expert judgements of the prefecture.