最新400年間の地震記録に基づく 過去と将来のグローバル津波ハザード評価

大竹 拓郎¹・Anawat SUPPASRI²・Panon LATCHAROTE³・今村 文彦⁴

¹学生会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

E-mail:takuro.ohtake.q2@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学准教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

³正会員 東北大学研究員 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

⁴正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

人々が津波の脅威を理解することは重要であり、海洋全域に伝播する津波を理解するには、海域を見渡せる地球規模で津波のハザード・リスクを評価する必要があるが、そういった研究はまだ少ない。そこで本研究では、地球全域を対象に、過去に津波を発生させた地震の代表事例を選定し、津波数値解析を用いて水位、伝播時間を算出した。さらにそれらを基に、将来発生し得る津波イベントを想定し、過去と将来の津波についてグローバルスケールでハザードを評価した。過去の津波を地球全域で評価したことで、近地津波と遠地津波、両方の影響を定量化することができ、グローバルスケールで評価を行うことの重要性を示した。また、過去の津波と将来起こり得る津波を地球全域で比較したことで、地震空白域における津波を評価する手法を提案した。

Key Words : tsunami, numerical analysis, tsunami hazard assessment, global scale, seismic gap

1. はじめに

津波は低頻度だが広く甚大な被害をもたらす災害であり、2004年インド洋津波のように、津波の脅威に対する人々の理解がなければ、大きな被害につながり得る¹⁾。2011年東北地方太平洋沖地震津波においては、巨大津波の来襲に対して、ハード対策の限界を補うソフト対策の重要性が教訓として挙げられた²⁾。一方、近年の社会的な動きとして「仙台防災枠組2015-2030」では、災害リスク低減に向けて、災害リスクの理解や国境を越えた協力の必要性が取り上げられている³⁾。また、2015年第70回国連総会本会議において、津波に関する意識向上や国際的な津波防災推進を目的とし「世界津波の日」が採択され⁴⁾、2016年11月5日にその第1回を迎えた。このことから、津波防災におけるソフト対策として、現代の人々の、津波に対する理解や意識啓発が社会的に要請されていることがわかる。つまり、人々が津波を理解することでその脅威を知ることができ、それがソフト対策となる。巨大津波は発生するとその海域に伝播するため、その現象を人々が理解するためには、海洋全体を見渡せるようなスケールで津波を表現しなければならない。よって、地域を限定した研究だけではなく、より広域な津波ハザード・リスク

に関する評価も重要である。

広域の津波ハザード評価を行った既往研究として、Suppasriら⁵⁾は東南アジアで発生した過去の津波について、地震のマグニチュードと津波の発生確率の関係を整理し、また、津波マグニチュードという指標を用いてハザードを評価し、ハザードマップを作成した。しかし、人々が津波を理解する上で重要な遠地から来襲する津波や遠地へ伝播する津波を表すには、さらに広域なスケールで評価する必要があると考えられる。また、Løvholtら⁶⁾は初めてグローバルスケールで津波ハザードを評価し、曝露人口やGDPとハザードを合わせることで、世界各地における被害人数や経済損失額などを算出した。また、沖合の津波水位から沿岸での水位を簡易的に求める手法を提案し、地球全域の津波最大水位に関するハザードマップを作成した。しかし、地震のリターンペリオドが不明な地域については、評価の対象外とし、地球全域を評価していなかったことが課題として残っている。

そこで本研究では、地球全域で過去の津波災害の評価を行い、それを基に将来発生し得る津波災害を想定し、その危険性を地球全域で評価することを目的とした。また本研究は、各国や国連が津波について啓発活動を行う際に有効活用できると考えられる。

図-1 選定 103 イベントと地震空白域の分布

2. グローバル津波ハザードの評価手法

(1) 津波イベントの選定方法

本節では、まず津波データベースから選定した過去の津波について、その選定方法を記述する。その後、選定した津波を基に、将来津波を発生させ得る、地震空白域における地震の決定方法を記述する。

a) 過去のイベントの選定基準

アメリカ海洋大気庁（NOAA）が提供する世界の歴史津波データベース⁷⁾を基に、過去に津波を発生させた地震を選定した。ここでは、過去に各国や各地域に來襲した津波の代表事例を選定するために、4つの条件を設定した。1つ目の条件として、1600 - 2016年の過去約400年間に起きた地震であることを設定した。これは、NOAAのデータベースにおいては1600年以前の津波の記録が少ないためである。2つ目の条件は、選定したイベントのマグニチュードが7.5以上であることを設定した。これは、Suppasriら⁸⁾が太平洋においてマグニチュード7.5以上の地震が発生した場合、津波発生確率を50%と経験的に算出しているためである。3つ目の条件は、NOAAのデータベース上の地域区分に即して、17地域全てからイベントを選定することとした。この条件により、地球全域で、発生した津波を評価することができる。4つ目の条件として、同じ地点で発生したイベントから、地震の規模が最も大きいものを選定することを設定した。これは、繰り返し地震や津波が発生している場合、規模の小さいものに比べて、大きな地震による津波の方が、災害発生に影響するためである。このようにして選定された103イベントの分布を図-1に、103イベントの地域別の分類を図-2に示す。図-1では、1600 - 1969年に発生した64イ

図-2 選定イベントの地域別の分類、図中の数字の分母は1600年以降にマグニチュード7.5を超える地震により発生した津波の総数を、分子は本研究で選定したイベント数を各々示す。

イベントと1970 - 2016年に発生した39イベントを分けて図示した。1970年を境に2つの年代に分類したのは、正確な地震記録が残っているのは1964年以降であること⁴⁾、Global Centroid Moment Tensor(CMT)の地震観測が1976年に開始したこと、アメリカ海洋大気庁(NOAA)の設立が1970年であること、などを理由とした。本研究では、以降、1600 - 1969年に発生したイベントを過去、1970年 - 2016年に発生したイベントを近年と呼ぶ。図-2では、分母にその地域で過去400年に発生したマグニチュード7.5以上の、地震の総数を、分子に本研究で選定した地震の総数を記した。それを見ると、津波は低頻度な災害だが地域によっても頻度に差があることがわかる。本研究では、全地域からイベントを選定したため、地球全域をカバーできているといえる。

b) 将来のイベントの設定方法

前項で過去のイベントを選定した際に、図-1に示すような地震空白域が存在することがわかった。地震空白域とは一般に、過去に地震を発生させたが近年地震を発生させていない地域⁹⁾を指し、将来地震を発生さ

表-2 地震空白域における地震の断層パラメータ

No.	Region	Mw	Lon.	Lat.	Depth	Slip	Dip	Strike	Slip angle	Length	Width
1	Aleutian Is.	8.7	169.4	53.5	5.00	6.14	21.77	302.8	90	394	117
2	W.Guatemala	8.9	-91.7	14.4	37.48	8.24	23.00	297.6	90	507	135
3	Costa Rica	8.7	-84.4	9.1	5.00	6.14	7.00	296.6	90	394	117
4	Panama	8.7	-80.7	7.6	17.94	6.14	18.00	269.5	90	394	117
5	Columbia	8.7	-77.7	4.5	5.00	6.14	6.00	24.1	90	394	117
6	W.Ecuador	8.7	-81.4	-4.3	5.00	6.14	5.33	4.8	90	394	117
7	W.Peru	8.6	-80.5	-7.7	56.4	5.30	21.75	335.4	90	347	109
8	E.Philippine	8.2	125.9	10.8	7.64	2.94	37.80	155.0	90	209	82
9	NE.Philippine	8.2	123.7	15.1	6.38	2.94	23.00	117.6	90	209	82
10	New Zealand	8.3	176.5	-41.4	5.00	3.40	19.56	250.7	90	237	88
11	New Zealand	8.3	178.3	-39.7	5.00	3.40	12.48	196.7	90	237	88
12	New Zealand	8.3	179.4	-37.1	5.00	3.40	17.48	202.2	90	237	88
13	Solomon Is.	8.1	149.8	-6.5	5.00	2.54	13.13	260.1	90	184	76
14	Solomon Is.	8.1	151.3	-5.9	5.00	2.54	21.88	238.2	90	184	76
15	Vanuatu	8.1	166.6	-15.1	5.00	2.54	28.75	365.6	90	184	76
16	Vanuatu	8.1	167.9	-18.3	5.00	2.54	22.32	348.6	90	184	76
17	New Caledonia	8.1	169.0	-20.6	5.00	2.54	40.25	332.9	90	184	76
18	New Caledonia	8.1	170.1	-22.0	5.00	2.54	20.03	311.9	90	184	76

せる可能性が高いと考えられる。しかし本研究ではそれを、地震イベントの選定の際に設定した4つの条件に該当しない、プレート境界上の地域であることと定義する。これは、プレート境界上では巨大地震が発生しやすく、また、過去400年間マグニチュード7.5以上の地震が発生していない地域では、将来的に巨大地震が発生する可能性が高いと考えられるためである。さらに、本研究では、表-1に示したLayら¹⁰⁾による沈み込み帯の分類に基づき、カテゴリ1からカテゴリ3に属するものを対象とし、カテゴリ4に属する沈み込み帯は対象外とした。ここで、カテゴリ3までを対象としたのは、2011年東北地方太平洋沖地震が発生した日本海溝が、カテゴリ3に属するためである。また、カテゴリによる分類の結果、本研究で対象とする地震空白域は太平洋沿岸域のみとなった。

(2) 断層パラメータの決定方法

本節では、まず過去に実際に発生した津波の断層パラメータについて、その後地震空白域における断層パラメータについて、それらの決定方法を記述する。

a) 過去のイベントの断層パラメータ

過去に発生した103イベント各々の断層パラメータは、主に既往の研究から決定したが、中にはパラメータが不足しているものもある。そこで本研究では、断層の長さ、幅、すべり量が不足していた場合は、モーメントマグニチュードの大きさからそれらの値を求めるPapazachosら¹¹⁾の式を用いた。また、断層の深さ、傾斜角、走向角、すべり角についてはGlobal Centroid Moment Tensor(CMT) catalog¹²⁾のメカニズム解から補完した。また、津波は地震以外の要因で発生する場合もあり、1771年明和津波のみ、地すべりの影響を断層パラメータに組み込んだ宮澤ら¹³⁾の断層モデルを用いた。その他の選定イベントは、地震の影響のみ考慮した断層パラメータとなっている。

表-1 沈み込み帯のアスペリティによる分類

Layら(1982)より

カテゴリ	沈み込み帯	巨大地震特性
1	南チリ カムチャッカ アラスカ アリューシャン列島中央(?)	500km以上に及ぶ破壊領域を持つ 巨大地震が周期的に発生
2	アリューシャン列島西部 コロンビア 南海トラフ ソロモン諸島 スマトラ(?)	セグメントが個別に断層破壊をする場合と、 500km程度の断層破壊をする場合がある
2-3	ニューヘブリディーズ 中央アメリカ ケルマディック諸島中央	破壊領域は100-150kmと小さいが、 同時に複数の領域が破壊する傾向にある
3	千島列島 日本海溝 ペルー 中央チリ ニュージーランド(?) フィリピン海溝(?)	同じセグメントで100-300km程度の破壊を 繰り返すが、同時に複数のセグメントが 破壊するのは稀である
4	マリアナ 伊豆 トンガ ケルマディック諸島南 ジャワ島 琉球	地震の発生に影響するすべりの割合が小さく、 巨大地震は発生しないとされている

b) 将来のイベントの断層パラメータ

地震空白域における地震の断層パラメータを表-2に示す。地震空白域に設定する断層は1枚断層と仮定し、以下の手順でパラメータを決定した。まず地震空白域の長さを基におおよその断層長さを決定し、Papazachosら¹¹⁾の式を用いてモーメントマグニチュードを算出し、続けて断層の幅とすべり量を決定した。このとき、モーメントマグニチュードの上限を地震空白域が属する地域の既往最大規模とした。これは、マグニチュードの上限を設けないことによる、発生し得る津波の過大評価を防ぐためである。次に、緯度経度、深さ、傾斜角、走向をアメリカ海洋大気庁(NOAA)¹⁴⁾を参考に決定した。最後にすべり角は、逆断層型地震を想定して90°に統一した。これは、プレート境界性の巨大地震は、逆断層型地震であり、津波の発生にも大きく起因するためである。

(3) 津波数値解析条件

本研究では、球面座標系における線形長波理論に基

図-3 津波最大水位分布の年代比較

A : 1600 - 1969年に発生した 64 イベント B : 1970 - 2016年に発生した 39 イベント

図-4 アフリカ北西部の過去のハザード

A : 1755年リスボン津波と 1843年グアドループ津波, B : 1843年グアドループ津波の伝播時間

ついて津波数値解析を行った。マニングの粗度係数は0.025を用いた。地形データは大洋水深総図(GEBCO)¹⁵⁾が提供する空間格子間隔が30秒の地形データを元に作成しており、格子間隔を5分(約9.1km)へ拡張し、接続を行わず津波数値計算を行った。陸域との境界では完全反射を境界条件とした。本研究の目的は、人々の津波の理解に向けてグローバルスケールで津波の挙動を見ることであり、地球規模における津波の挙動を議論するために、これは十分な格子間隔であると考えられる。しかし、5分格子では水深が50m以下の浅海域の津波の挙動については議論できないので、詳細な格子間隔での解析については今後の課題としたい。

4. 解析結果

(1) 過去のハザード評価

図-1に赤色と緑色で示した、過去に実際に発生し、

津波をもたらした地震について、その地震による津波の伝播計算を実施し、全イベントの最大水位分布を年代毎に重ね合わせたものを図-3に示す。図-3のAは図-1で赤色で示した1600 - 1969年に発生した津波を、図-3のBは図-1において緑色で示した1970 - 2016年に発生した津波の水位の重ね合わせを各々表す。図-3のAを見ると、北アメリカ大陸の1700年カスカディア津波、ポルトガル沖の1755年リスボン津波、カリブ海東部の1843年グアドループ津波など、近年では津波が発生していない地域が複数存在することがわかる。図-3のBを見ると、2004年スマトラ島沖地震津波と2011年東北地方太平洋沖地震津波による最大水位が大きな値を示していることがわかる。図-3より、近年津波が起きていないような地域でも過去には津波が発生しており、そのような地域では過去を遡ったハザード・リスク評価を行う必要があるといえる。例えば、アフリカ北西部に焦点を当てて詳しく考察する。図-4には、アフリ

図-5 地震空白域に設定した18イベントの最大水位分布

カ北西部における津波数値解析結果を示す。図-4のAは、1755年のリスボン津波と1843年のグアドループ津波（カリブ海東部）の最大水位分布を示している。アフリカ北西部では、リスボン津波による最大水位は約2-3mであり、グアドループ津波による最大水位は約2mであった。図-4のBは1856年のグアドループ津波の津波伝播時間を示している。波源に近いリスボン津波は、約1時間程度で津波が到達するが、Bで示すように、波源が遠いグアドループ津波は約7時間で津波が到達する。したがって、アフリカ北西部では、同等の最大水位の津波が異なる時間シナリオで来襲していたことがわかり、グローバルスケールで評価することの必要とともに、遠地から来襲する津波についても詳細に検討する必要があると言える。

(2) 将来のハザード評価

図-1の太線で示した地震空白域において、将来津波が発生し得る計18イベントの最大水位分布を図-5に示す。ただし先に述べたように、今回対象とした地震空白域が太平洋域のみであったので、太平洋域のみを示す。本研究における地震空白域の例として、アリューシャン列島（図-5の北西部）が挙げられる。地震空白域の長さが約400 - 500kmで、将来津波が発生する可能性があり、図-5より、日本や東南アジアの太平洋側諸国へ伝播する危険性があるとわかる。ここで、過去に発生した津波最大水位の重ね合わせを示した図-3と将来発生し得る津波最大水位の重ね合わせを示した図-5を比較すると、例えば、ニュージーランドにおいて、過去は南米から来襲する津波が代表的であった。1687年南ペルー津波、1730年中央チリ津波、1960年南チリ津波などがニュージーランドに到達している。過去最大の水位をもたらしたのは1960年のチリ津波では、最

図-6 1960年チリ津波の解析結果

A：津波最大水位分布

B：津波伝播時間

大水位は約3mであった。しかし、図-5より、将来はニュージーランド近海から津波が来襲する可能性がある。ここで、ニュージーランドについて詳しく考察を行う。ニュージーランドに過去最大の水位をもたらした1960年チリ津波の伝播時間と最大水位を図-6に示す。図-6のAを見ると、ニュージーランドの東岸全域に水位が約2mの津波をもたらしていることがわかる。また、Bを見ると1960年チリ津波は、発生してから約12時間後にニュージーランドへ到達したことがわかる。一方、ニュージーランド近海で発生し得る将来の津波は、最大水位は地点によるが2-4m程度で、1時間以内にニュージーランドに到達し得ることがわかった。このことからニュージーランドでは遠地から津波が来襲した場合と比較して、近地から来襲した場合は、避難時間が不足するといった問題が生じる可能性があると言える。ニュージーランドを事例として、過去と将来のハザードをグローバルスケールで比較したことで、地震空白域においては、過去に発生した津波と異なる特徴を持つ津波が発生し得ることがわかり、地震空白域を評価することの必要性を明らかにした。

5. おわりに

本研究では、新しく地球全域で過去の津波災害の評

価を行い、それを基に将来発生し得る津波災害を想定し、その危険性を地球全域で評価することを目的とした。まず、過去103イベントに基づく津波数値解析により、グローバルスケールで定量的に津波ハザードを評価した。次に、地震空白域の評価から、将来起こり得る津波ハザードを評価した。このように、グローバルスケールで評価したことで、海洋を伝播する津波の特徴を示すことができた。

得られた結論としては、アフリカ北西部を例に、遠地から津波と近地からの津波を比較したことで、遠地津波を考慮する必要性がわかり、グローバルスケールでの評価の重要性を示すことができた。また、ニュージーランドの事例から、実際過去に起きた津波と将来発生し得る津波をグローバルスケールで評価したことで、過去に発生した津波と異なる特徴を持つ津波が発生することがわかり、地震空白域を評価することの必要性を明らかにした。

課題として、まず選定した103イベントの妥当性を評価することが挙げられる。本研究では、マグニチュードの大きさのみを考慮してイベントを選定したので、横ずれ断層や断層位置が深い場合など、津波が小さいイベントもあった。また、選定した空間格子間隔について、本研究の議論のためには格子間隔が5分で十分だったが、地形の再現が困難であったり浅海域の伝播を議論できないという課題も残った。

参考文献

- 1) 河田恵昭：スマトラ沖地震津波災害，京都大学防災研究所年報，第48号A，2005年。
- 2) 国土交通省，防災のあり方の転換，
<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/hakusho/h24/html/n1131000.html> (2016.12.10 参照)
- 3) 外務省：第3回国連防災世界会議における成果文書の採択，2015。http://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/gic/page3_001128.html (2016.12.2 参照)
- 4) 外務省：世界津波の日，2016。

http://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/gic/page25_000294.html
(2016.12.2 参照)

- 5) Suppasri, A., Futami, F., Tabuchi, S., Imamura, F.: Mapping of historical tsunamis in the Indian and Southwest Pacific Oceans, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, pp. 62-71, 2012.
- 6) Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Zamora, N., Nadim, F., Peduzzi, P., Dao, H., Smebye, H.: Tsunami hazard and exposure on the global scale, *Earth-Science Reviews*, 110(1), pp. 58-73, 2012.
- 7) アメリカ海洋大気庁(NOAA)，
https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (2016.6.10 参照)
- 8) Suppasri, A., Imamura, F., and Koshimura, S.: Tsunamigenic Ratio of the Pacific Ocean earthquakes and a proposal for a Tsunami Index, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, pp. 175-185, 2012
- 9) アメリカ地質調査所(USGS)：seismic gap, 2016.
<https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=seismic%20gap>
(2016.12.20 参照)
- 10) Lay, T., Kanamori, H., Ruff, L.: The Asperity and the Nature of Large Subduction Zone Earthquakes, *Earthquake Prediction Research* 1, pp. 3-71, 1982.
- 11) Papazachos B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C. B., & Karakaisis, G. F.: Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes, *Bulletin of the Geological Society of Greece*, vol. 36(3), pp. 1482-1489, 2004.
- 12) Global Centroid Moment Tensor(CMT) catalog,
<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (2016.12.15)
- 13) 宮澤啓太郎，後藤和久，今村文彦：痕跡調査と数値解析に基づく 1771 年明和大津波の波源推定，土木学会東北支部技術研究発表会，II-47，2012。
- 14) Uslu, B., Eble, M., Titov V. V., Bernard E. N.: Tsunami Hazard Assessment Special Series: Vol.2 Distant tsunami threats to the ports of Los Angeles and Long Beach, California, 2010
- 15) General Bathymetric Chart of the Oceans(GEBCO)：Gridded bathymetry data.
http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/
(2016.7.5 参照)

(2017.3.15 受付)

A Global Assessment of Historical and Future Tsunami Hazards based on Seismic Records over the last 400 years

Takuro OTAKE, Anawat SUPPASRI, Panon LATCHAROTE and Fumihiko IMAMURA

An assessment of tsunami hazard and risk on global scale is important as it can be non-structural measure to increase awareness of coastal residents against tsunami hazards in their locations. However, there are still less number of studies that were focusing on tsunami hazards across the ocean. Therefore, representative cases of tsunamigenic earthquakes were selected based on seismic records over the last 400 years. For each events, distribution of maximum wave amplitudes and arrival times were calculated using tsunami numerical analysis in the global scale. In addition, future tsunami hazard assessment was also performed based on the seismic gap. A necessity of assessing both historical and future tsunami hazards in the global scale is then represented in terms of hazard map comparing both scenarios in the global scale.