

第 18 回 東海・東南海・南海地震津波研究会 講演要旨

講演：米国北西部海岸における津波危険度について

講師：人と防災未来センター 主任研究員 越村 俊一 氏

日時：平成 14 年 5 月 14 日

会場：人と防災未来センター(神戸市)

発表の要旨

Tsunami Research Program について

- ・シアトルの NOAA (アメリカ海洋大気局: National Oceanic & Atmospheric Administration) には、Tsunami Research Program という津波を研究する部署があり、常時 6 ~ 10 名の研究者が様々なアプローチで津波を研究している。
- ・Tsunami Research Program は、リアルタイムでの津波測定、ハザードマップ作成、モデリング、津波災害調査など幅広く活動しており、アメリカにおける津波対策の総本山ともいえる組織である。

アメリカにおける津波災害

- ・ここ数十年におけるアメリカ西海岸およびハワイを襲った津波は、5 つのイベントで構成されており、そのうちチリで発生したものを除く 4 イベントのすべてが、いわゆるプレート境界型の大地震で、アラスカ - アリューシャン沈み込み帯で発生している。
- ・西海岸には、アラスカ - アリューシャン沈み込み帯 (Alaska-Aleutian Subduction Zone) と、カスケード (Cascade) 沈み込み帯という 2 つのプレート境界が存在する。
- ・アメリカ西海岸のシアトル (ワシントン州) は、プージェット・サウンド (Puget Sound) という入り組んだ湾内に位置し、ウォーターフロント下を逆断層が走っているため、プレート境界型地震による津波だけでなく、活断層による津波の可能性も示唆されている。
- ・今回は「プレート境界地震による津波とその危険」、「内陸性活断層による津波」の 2 点について説明する。

< プレート境界地震による津波とその危険について >

- ・1946 年に発生したアリューシャン津波は、マグニチュード 7.8 と規模はそれほど大きくなかったが、最高津波高さが 35m もあった。
- ・この津波で、アリューシャン列島 Unimak 島の Scotch Cap 灯台が被害に遭い、死者は職員 5 名のみであったが、太平洋を縦断した津波によって、ハワイでの死者は 165 名にも上った。
- ・ハワイは太平洋の真ん中に位置するため、環太平洋での地震発生による被害を受けやすいにもかかわらず、津波に関する予報や警報がなかった当時、多くの犠牲者を出し、これがハワイに太平洋津波警報センターを設立する契機となった。

- ・ 1964 年 4 月のアラスカ地震（マグニチュード 9.2）は、1,000km ほどの長さで地殻変動が起こり、Valdez という町で 9 ~ 12m の津波が観測され、津波による死者は 110 名であった。
 - ・ Valdez では地震によって沿岸部の地盤が瞬間的に液状化したため、ガスタンク・オイルタンクが一気に倒壊・引火し、湖や川の水は凍って使えない状況の下、町中が火事になった。
 - ・ この津波は波源域だけでなく、ワシントン州、オレゴン州、カリフォルニア州にも被害を及ぼした。
 - ・ 4 m の津波がアメリカ西海岸を襲い、十数名の死者が出た。
 - ・ このイベントが起きるまでは、アラスカを除いたアメリカ西海岸に津波の被害はあまりなく、アラスカで発生した大地震が太平洋を伝わり、ワシントン、オレゴン、カリフォルニアにまで被害をもたらしたことが契機となり、西海岸 / アラスカ津波警報センターは設立された。
 - ・ 現在、アメリカ西海岸には、ハワイにある太平洋津波警報センター、西海岸 / アラスカ津波警報センター、シアトルにある NOAA と 3 つの警報組織があり、それぞれ連携を図っている。
-
- ・ カナダのブリティッシュコロンビア（バンクーバー）からカリフォルニア北部まで、カスケード沈み込み帯（Cascadia Subduction Zone）が存在し、ファンデフューカ・プレート（Juan de Fuca Plate）と北米プレートの境界線となっている。
 - ・ 1993 年以降の地震分布からみても、カスケード沈み込み帯は他のプレート境界に比べて地震の活動度が非常に低いことが分かる。
 - ・ 通常、プレート境界は 100 ~ 数百年間隔で大地震が発生し、そのほかにも小さな変動やひずみの解放が行われ、マグニチュード 4 クラスの小規模地震が頻繁に起きる。
 - ・ しかし、カスケード沈み込み帯は小規模地震でさえ全くと言っていいほどであったため、バンクーバーやシアトルのような大都市は地震慣れしておらず、住民はアラスカやロサンゼルス、サンフランシスコよりも安全であると思いこんでいた。
 - ・ 二十数年前まで、カスケード沈み込み帯において、ファンデフューカ・プレートが北米プレートへの沈み込みをやめてしまったと考えられていた。
 - ・ しかし、1980 年ワシントン州とオレゴン州にまたがるセントヘレンズ火山が噴火したことで、付近の住民に、まだカスケード沈み込み帯は活動しており、いわゆる Ring of Fire の一部を構成していると再認識された。
 - ・ なぜ、今まで巨大地震が発生しなかったかについては、以下の 2 点が考えられる。
 - 2 つの断層が固着することで小さな応力も解放せず、どんどんひずみをため込んだ状態である。
 - プレートがなめらかに沈んでいくことによって地震が起きない状態である（ゆっくり地震）。
 - ・ 過去に地震があったと歴史資料から分かる場合、固着説を支持できるが、アメリカ西海岸は歴史が浅いため 150 年分ほどの歴史資料しか存在せず、また、その中大

地震が起こったという記述はない。

- ・このため、カスケード沈み込み帯が固着してひずみがたまっている状態なのか、滑りながら沈み込んでいるのかについては判断できなかった。
- ・アメリカ西部の先住民の「大昔、冬の夜に大きな地震が起きた」という言い伝えが佐竹氏らの調査で分かり、これを元に2つの研究グループがカスケード沈み込み帯での歴史地震を突き止めた。
- ・一つは、アメリカにある地質調査所の Brian Atwater 氏のグループで、カスケード沈み込み帯で大地震が発生すれば津波も発生するはずであると推測し、津波堆積物に着目して、地震発生の年代測定を行った。
- ・カスケード沈み込み帯は逆断層であり、陸側の陥没した部分に水が入ったことで死んだ植物の年輪から年代測定を行い、300年前の1700年にカスケード沈み込み帯で大地震が発生したことを突き止めた。
- ・もう一つは以前研究会でも講演された佐竹氏のグループで、カスケード沈み込み帯で大地震が発生した場合、津波が日本にも到達しているはずであると推測し、日本の古文書の記述を解析した。
- ・古文書より、「地震の揺れもないのに、2mの津波が来た」との記述を発見し、数値シミュレーションと総合して、カスケード沈み込み帯の大地震の発生日時を推定した。
- ・以上の研究から、最近発生したカスケード沈み込み帯の巨大地震は、現地時間で1700年1月24日21時頃だと推定されている。
- ・アメリカ西海岸には300年前に大地震が発生しており、次回の発生時期とそれに伴う津波の可能性についても、認識を改める必要がでてきた。
- ・その後、カスケード沈み込み帯の固着域や滑りについて地震学的な研究が進められ、最終的に長さ1050km、幅70m、想定するマグニチュード9.1という津波波源域が求められた。

< アメリカにおける具体的な津波対策 >

- ・アメリカではNOAAを中心として U.S. National Tsunami Hazard Mitigation Program が立ち上がっている。
- ・その目的は、津波のインパクトを減らすこと (Reduce the Impact of Tsunami on U.S. Coastal Community) であり、対象はアラスカ・カリフォルニア・ハワイ・オレゴン・ワシントンの五州である。
- ・プログラム運営は、NOAA・アメリカ地質調査所・危機管理局 (FEMA) の三ヶ所で行われ、予算の確保、各州の大学や研究機関に対する津波ハザードマップ作成における契約、それに伴うレポート提出などの活動を行っている。
- ・プログラムの具体的な内容は、以下の通りである。

Warning Guidance

警報 (Warning) をできる限り早く出すことを目的とするプロジェクト。

NOAAではDART Projectとして、沈み込み帯沖合の海底に水圧計を沈め、情報を海上ブイに海中音波で送信、人工衛星を通じてリアルタイムで海面

変動を測定しており、地震発生時の津波予報に役立っている。

(D A R T : Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunami)

Mitigation

津波発生を阻止することはできないので、住民に津波の性質や津波到達時の避難場所をできる限り周知させ、津波被害の軽減のために努力することを目的とするプロジェクト。

各州に担当者(State Representative)を配置し、津波対策を進めていく。担当者は必ず海岸での津波避難ルートを策定しなければならず、同時に避難路を設けた場合、避難路の説明について情報公開を行わなければならない。

津波への理解を深めるための活動としては、防災教育の一環としての利用目的で、津波の性質や避難についてなどをプリントしたカップを住民に配布したり、また、オレゴン州や太平洋岸には、津波危険ゾーンや避難経路(Evacuation Route)を示す標識の設置を行っている。

Hazard Assessment

Tsunami Inundation Mapping Efforts は、カスケード沈み込み帯の波源域を想定し、ハザードマップ作成へ金銭的な支援をするためのプロジェクト。

大学や研究機関はモデルを開発し、地震か地滑りなのかを設定した上でシミュレーションを行い、ハザードマップや想定津波波形を作成する。その後、州は結果を元に津波被害回避のためのツール、避難経路や近隣住民に周知するためのパンフレットを作成し、最終的には津波対策準備の整ったコミュニティを確立していく。

津波ハザードマップの達成状況は2001年5月現在、ワシントン州はほぼ整備されており、オレゴン州はまだ計画段階のものが多いので、数年中にはハザードマップが完成する予定である。

< 内陸の活断層による津波発生の問題 >

- ・氷河で削られたような内湾、ピュージェット・サウンドに位置する、シアトルのダウンタウン下には活断層が走っており、最近、地震活動が活発化している。
- ・2001年には地上から深い部分でマグニチュード6.8の地震が発生し、それによって地殻の活動度が高まり、いつ浅い部分での地震が発生するか分からない状況である。
- ・シアトルは、神戸と同様に東西に活断層が走っており、Seattle Fault という逆断層となっている。
- ・逆断層は断層がずれた場合、鉛直方向の変動が大きくなり、海底では津波を発生させる可能性が高くなる。
- ・この活断層は1000年前に地震として活動しており、シアトル対岸には7 m、南でも4 mの隆起があったという地質学的証拠が見ついている。
- ・Atwater 氏のグループは、シアトルから40km離れたカルタス湾(Cultus Bay)で、現在の海面から1.9mの高さの地層中に津波堆積物の存在を確認しており、少なくともこの高さまで津波が到達したという証拠になっている。
- ・歴史文書からも1000年以上前のことは分からないため、この地震を既往最大イベント

トと想定して、ハザードマップを作成する必要があった。

- ・しかし、1000年前の地震についてシミュレーションするためには、各要素の1000年前のデータを元に考慮しなければならない。
- ・また、ピュージェット・サウンドは潮位差が3m以上あり、地震発生は満潮時か干潮時のどちらなのかについて考える必要もある。
- ・これまでの研究結果から、Seattle Faultは南西向きの逆断層で、断層の長さが60km、幅44km、深さ5kmまでは60度、それ以下は25度の逆断層がペアで存在することが分かっている。
- ・想定マグニチュードは7.6、断層上の滑りは経験値の平均から3.7mとした。
- ・「隆起があった」という地質学的証拠を満足させる、矛盾のない断層モデルを決定するためには、アスペリティ(asperity)を考慮する必要がある。
- ・断層モデルを考える際に実測値を採用しすぎると、局地的な現象によってデータが引っ張られてしまい、地震規模や経験値との整合性がとれなくなる可能性があるため、断層モデルの地盤変容から、隆起は7m 5.3m、4m 4.5mに、沈降は0.3mに補正して計算した。
- ・海岸線については、ピュージェット・サウンドでのコア・サンプリングによって、10年間で1cm海面が上昇するとした研究結果をそのまま利用し、単純に1000年で1m上昇したと考えた。
- ・潮位差は3.3m、満潮位と平均水面の誤差は1.2mだったことが分かっており、これらの値をパラメータとして用い、1000年前の海底地形のデータ(90m格子)を作成した。
- ・カルタス湾の津波堆積物は、当時、少なくともそのあたりまで津波が到達したことを示しているので、シミュレーションでそのあたりまで津波が到達すれば、想定したイベントに正当性を持たせることができる。
- ・まず、比較的細かい30m格子を使って、カルタス湾での計算を行った。
- ・ピュージェット・サウンド内の津波伝播をアニメーションで表すと、南北に分かれた波がカルタス湾には約20分後、シアトルのウォーターフロントには約3分後に到達する事が分かる。
- ・カルタス湾の計算は、1000年前の平均海面、満潮時の2通りで行い、いずれの状態でも津波が発生したのか検討した。
- ・平均海面時の計算結果では、津波堆積物の見つかったあたりまでは津波が到達せず、一つの見通しとして、平均海面時にこのイベントが起こったのではないといえる。
- ・一方、満潮時の計算結果では、津波の浸水域は津波堆積物の位置まで届く程にあり、1000年前の既往最大イベントは満潮時に発生したと分かり、以降のシアトルでの津波災害想定は満潮時を考慮しなければならないことが分かった。
- ・シアトルのウォーターフロントには活断層が南北に走っており、マグニチュード7.6の地震発生を想定したアニメーションより、発生後5分以内に約8mの波が北部に、3分以内に約4mの波が南部に到達し、地震発生から約3分後、陸側約1kmにわたって浸水するとの結果が得られた。
- ・マグニチュード7.6の地震が発生すると、阪神・淡路大震災の経験から、ウォーター

- フロントにいる人々は、何もできずに立ちすくむか座り込んでしまうと考えられる。
- ・ 背後には高層ビルや高架道路があるため、なかなか避難することができないままに3分後津波が到達する、非常にクリティカルな場所となっている。
 - ・ 現状では必ず被害を受ける、あるいは受ける可能性は高いが、人的被害の軽減を目指して、あらかじめ避難路を策定し、ガイダンスする必要がある。
 - ・ 最善の避難路策定には、人的被害発生条件を求める必要があり、それらを踏まえて、最終的に効果的なハザードマップを表示することになる。

津波による人的被害

- ・ 既往の研究によると、水際の津波高さが2 m以上、あるいは経験的に津波の浸水深が50cm以上になると人的被害が発生するといわれている。
- ・ しかし、実際には浸水深のみでの人的被害の定義は難しく、当然のように激しい津波の流れを考慮して、人的被害発生を論じていく必要がある。
- ・ 想定モデルで人的被害を定義するため、シミュレーション中に円柱で近似した人体モデルを設置し、津波による浸水深と流速、および人体にかかる流体力と歩行面の摩擦力を考慮して安全に避難できるかを判定する。
- ・ 市街地では、人的被害を発生させるような水の流れが地震発生3～16分で終了しており、この時間をしのげば助かる可能性が非常に高いことが分かった。
- ・ また、人的被害インデックスを用いることで、空間的・相対的に人的被害を発生させるポテンシャルがある、あるいはその可能性が高い場所を示すことができる。

$$\text{人的被害インデックス}(H_0) = \frac{\text{人的被害発生時間(累積)}}{\text{各計算グリッドにおける累積氾濫時間}}$$

- ・ しかし、現在の格子サイズは比較的粗い30mであり、避難路を決定することは難しい。
- ・ 将来的には、以下の流れを考えている。

人的被害インデックスに、より詳細な地形情報（家屋の分布や通路など）を取り込む

GISを用いて、土地利用属性や・人工分布を取り入れる

住民避難行動の把握

最善の避難経路策定へのガイドライン作成

質疑応答

Q . 当時の地形条件はどのように考慮し、再現計算しているのか。また、浸水域を出す際に、現状の建造物をどのように考慮してハザードマップを作成しているのか。

(四国総研 山本)

A . 1000 年前の地形をより正確に再現するため、海面上昇(1 m)を用いた。他にも、1800 年代に作成されたカルタス湾の地図と、現在の地形を組み合わせてみたが、津波の氾濫には影響を及ぼさないだろうと考え、実質的に考慮したのは海面の高さだけである。詳細な地形について、正確には分からなかったが、津波堆積物のあった地形ではボーリングが行われており、津波堆積物の上にはそれほど堆積物がなかったため、今回はボーリング結果をそのまま現代に持ち込んで計算した。ビル情報、建物情報については、30m 格子で地盤高のみを使っており、今回は全く考慮していない。建物情報をどのように組み込むか、今後の課題としていきたい。

(越村)

Q . コーヒーカップが啓発資材として使われていることは、非常におもしろかった。もう少し具体的に、何が書かれてあるのか。また、これは一般家庭に向けて配布しているのか、店舗販売しているだけなのか教えてもらいたい。

(愛知県防災研 大久保)

A . 具体的に、「地震発生時に自分の身を守って、揺れが収まったら高いところに逃げるか、あるいは避難路を使ってオールクリアといわれるまでそこにじっとしていること」などが書かれてある。コーヒーカップは店舗販売されておらず、通信販売されている。ワークショップを行う際には、自由に持って帰ってもらうなどの使い方をしている。

(越村)

Q . 津波の水位変動測定システムは、圧力センサーと水面上のブイ、それから衛生の組み合わせで行うとの説明だったが、ブイからは超音波でデータ送信するのか。日本でもこのシステムを設置すると聞いたことがある。日本でもすでに導入されているのか。

A . 底面にある圧力計からのデータは、音波で送信する。日本では現在、深海に津波計をおく場合に、ケーブルでデータ送信する。例えばGPSなどを使っている場合、無線でデータを送信する。海中では音波を使うのが日本の方針だと思われる。

(越村)

Q . シアトルでは、津波に関する標識を町中に設置しているのか。ハワイでは、電話帳の裏に避難路などかかっているが、米国本土ではこういった周知方法、あるいは問題提起を行っているのか。

(四国総研 山本)

A . シアトルでは、海岸でも津波の看板を見ることはできない。これは非常に大きな問題で、地震発生後に津波が到達すると、知っている人がほとんどいないのが現状である。避難路策定も実際には行われていないので、今、地震があるとかなり

の被害者が出ると、私は考えている。オレゴンやカリフォルニアの海岸では、避難路策定は行われており、そのルートも示され、海岸や海水浴場では津波の看板も設置されている。また、定期的にパンフレットを配布し、情報を流している。ハワイは特に進んでおり、電話帳に浸水域が分かるしくみになっているが、西海岸ではまだそこまでしていない。 (越村)

Q . 圧力計を海底におろす際、バッテリーは入れっぱなしなのか、それとも回収できる仕組みがあるのか。 (ニュージェック 榊原)

A . 圧力計はおもりに引っかかっている形で設置されており、おもりから音波を出すことで切り離し装置が働き、全体が浮き上がる仕組みになっている。ケーブルで結ぶと故障が起きやすく、装置などが盗まれることもあるので、リスクを分散して盗まれたときの被害を小さくしている。 (河田)