

「津波シナリオの多様性の解析とその利活用」

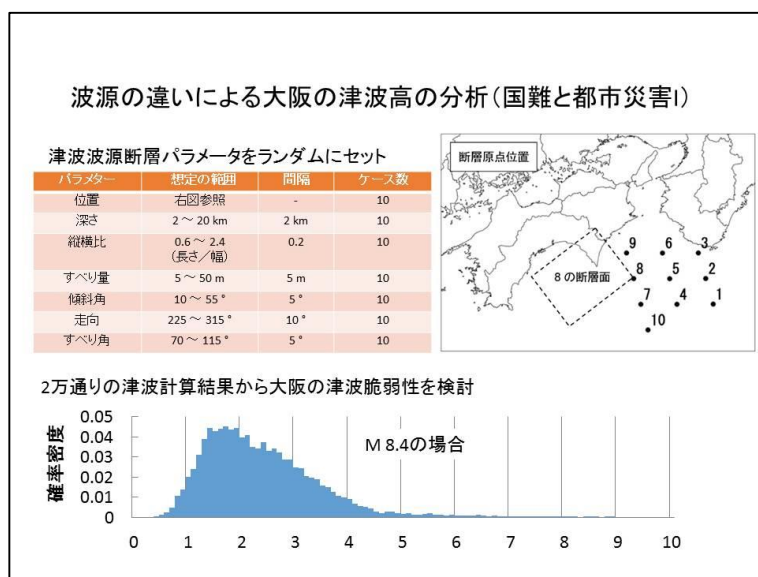
鈴木 進吾(防災科学技術研究所レジリエント防災・減災研究推進センター 主幹研究員)

津波への備えや緊急時の対応を考えるに当たって、津波がどのように発生するのか、また、どのような津波が地域に来襲するのかということは非常に重要になってきます。現在は最大クラスの津波が発生したらどこまで来るかという観点で想定がされており、それを元にして対策を立てていくことはもちろん重要ですが、必ずしもその最大クラスのものが起きるとは限りません。地域に来襲する津波の高さや到達時間を規定するパラメータには、マグニチュード、位置（どこで起きるか）、すべり量（どのくらい断層が滑るか）など、さまざまなものがあります。それらを仮定した上で想定がなされるわけですが、パラメータが少しでも変われば、来襲する津波も変わる可能性があります。必ずしも想定通りのパラメータで地震が発生するとは限りません。想定されているもの以上に、われわれは日本近海で発生する津波のことをよく知らなければならないと思います。日本近海で起こる津波のシナリオをできるだけ把握しておく必要があるのではないかと思います。そして、そのためにはさまざまなパターンを計算する必要があります。さまざまなシナリオを検討することで地域の脆弱性を検討し、それに基づいて予測・予防・対応を考え、新たな津波対策のやり方を考えていけないかという思いで検討を行っています。

1. 津波シナリオの多様性

1-1. 波源の違いによる大阪の津波高の分析

この比較防災学ワークショップで国難と都市災害をやった1回目に、大阪を対象にパラメータをランダムにセットして、約2万通りの計算を行ったことを発表しました(図表1)。パラメータには位置、深さ、縦横比、すべり量、傾斜角、走向、すべり角があります。これらがさまざまに変化する可能性があるわけです。これらを考えられる組み合わせ全てを計算して結果を出すと、大阪に来る津波がどのくらいになるのかが分かってくるというこ



1

とを報告させていただきました。

1-2. 11 ケースの比較分析にみる地域の津波特性

また、これは、国難プロジェクトの方で年に2回東京と大阪で開催している研究会で発表したことですが、現在想定されている南海トラフ巨大地震には、11 ケースの津波のシナリオがあります。その中でも津波の浸水域は大きく変わってくるということがわかります。図表2の左は、11 ケースのうち何ケースで浸水するかを表した地図です。11 ケースのうち1 ケースでしか浸水しない地域もあれば、その隣に11 ケースのほとんどで浸水する地域があるということが分かります。このように、波源が変わると地域の浸水範囲は大きく異なります。そうすると、1 ケースでしか浸水しない地域と全ケースで浸水する地域の対策が同じでいいのかという議論にもなってくると思います。

図の右は11 ケースで浸水深がどのくらい変わるかを地図に表したものです。大阪湾から瀬戸内海などでは、ほとんど変わりませんが、太平洋側ではシナリオによって6m 以上も津波の高さが変わってくる地域があります。そのくらい変わる恐れがあるわけです。従って、津波のシナリオにはいろいろなパターンがあって、それによって津波の高さや浸水域が変わるのをわれわれは考慮できているかということが懸念事項になります。

1-3. 日本海溝の津波の多様性

今、防災科学技術研究所では、わが国の近海で発生する津波のシナリオを全て網羅するための計算を行っています。伊豆・小笠原海溝、日本海溝、千島海溝のプレート形状モデルに沿って、プレート境界面上に多数の断層を考えられる津波のシナリオとして設置し(図

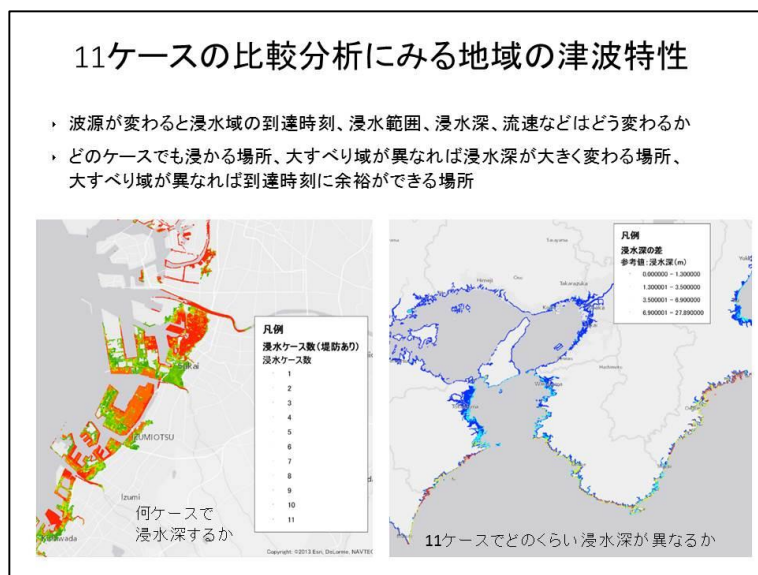
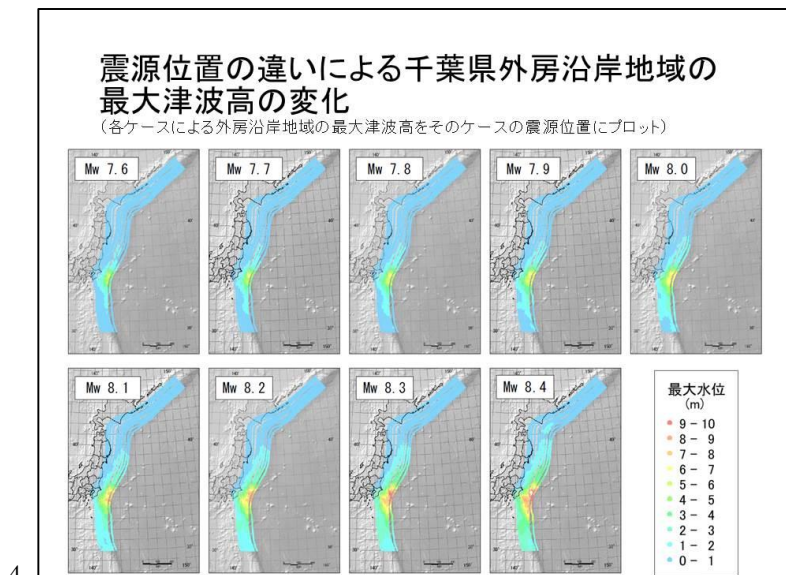
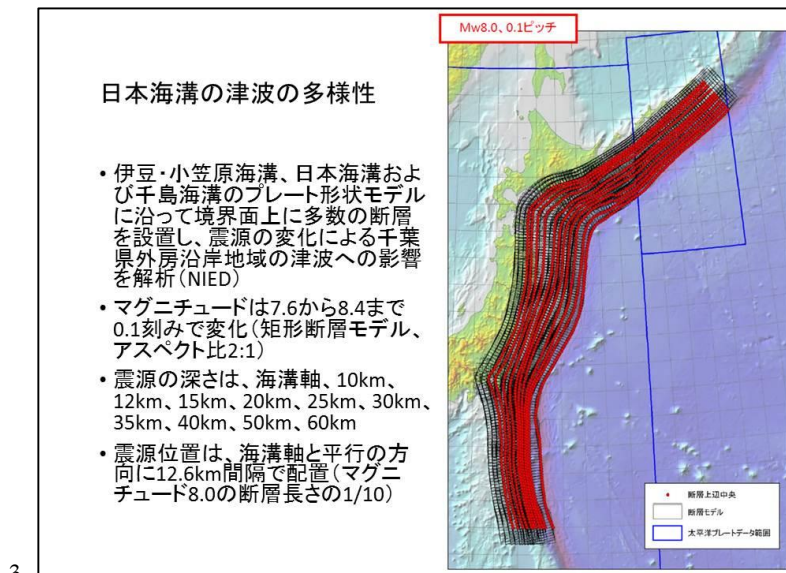


表3)、震源の変化による千葉県外房沿岸地域への津波の影響を解析しました。マグニチュードは7.6~8.4まで0.1刻みで変化させ、震源の深さは海溝軸、10km、12km、15km、20km、25km、30km、35km、40km、50km、60kmと変化させます。また、震源位置は海溝軸と平行方向に12.6km間隔で設置しています。これはマグニチュード8.0の断層の長さの10分の1に相当しますが、このように膨大な数の断層をセットするわけです。

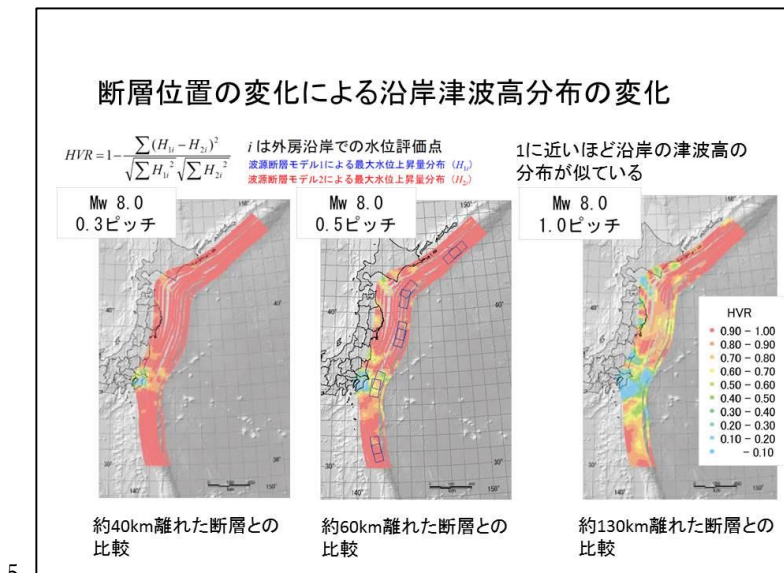
計算結果ですが、まず、断層位置の違いによる千葉県外房沿岸地域の最大津波高の変化についてです。図表4は、各ケースによる外房沿岸地域(房総半島南端から銚子までの区間)の最大津波高をそのケースの震源位置にプロットしたものです。例えば青色の点で発生した津波は、千葉県外房沿岸に0~1mで来るということです。マグニチュードを変化させていった場合に、どこで起きたら千葉県外房沿岸で津波高が大きくなるかということを示しています。この図から、津波高は近くになればあるほど高くなること、また、海溝軸付近の水深が深いところで発生すると高くなるのが分かります。この成果から、マグニチュードがいくつで、どこで発生したのかという情報から、地域にどのくらいの津波が来る、



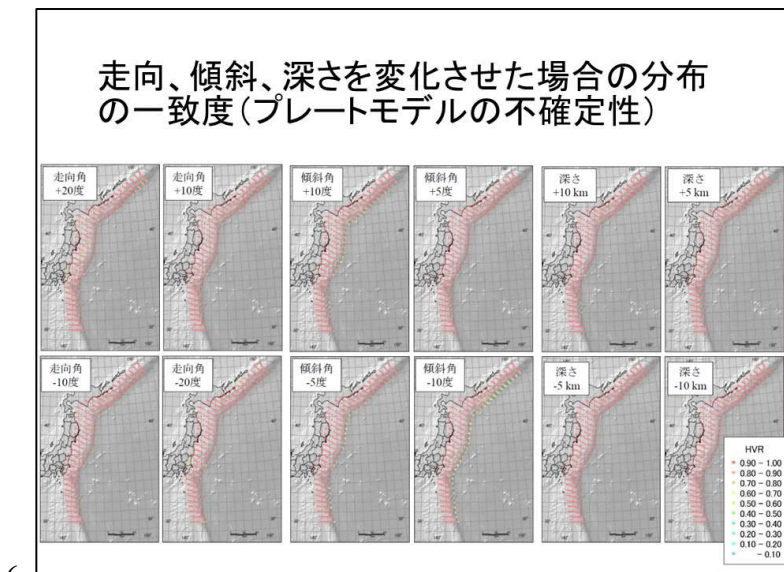
どのくらいの規模の対応をしないといけないということがわかるようになって考えています。

図表5は、断層位置がどのくらいずれると沿岸津波高分布が変化するかを解析した結果です。千葉県外房沿岸の津波高分布図（房総半島南側から銚子までを横軸に並べ、縦軸に津波高をプロットした図）を、隣り合う断層で比較して、その類似度をプロットした図です。例えば0.3ピッチの図は、断層の長さの10分の3だけ走行（断層の向き）方向にずらした2つのシナリオで、津波高の分布がどれだけ異なってくるかを示しています。類似度はHVRという指標で計算されるのですが、この値が1に近いほど2つのシナリオの津波高分布図が似ているということになります。例えば房総沿岸付近で発生した場合、少しでも断層がずれると津波高の分布が変わってきますが、遠くで発生した場合は断層がちょっとずれても津波高の分布はそれほど変わりません。

図表6は、走行、傾斜、深さを变化させた場合における津波高の分布の一致度をプロットしたものです。ここでも津波高の分布がどれだけ一致しているかをHVRで表示しています。



5



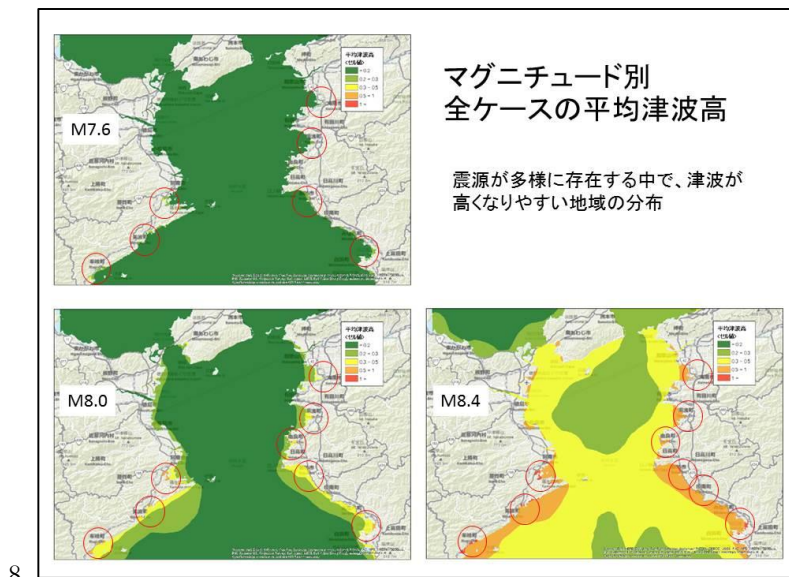
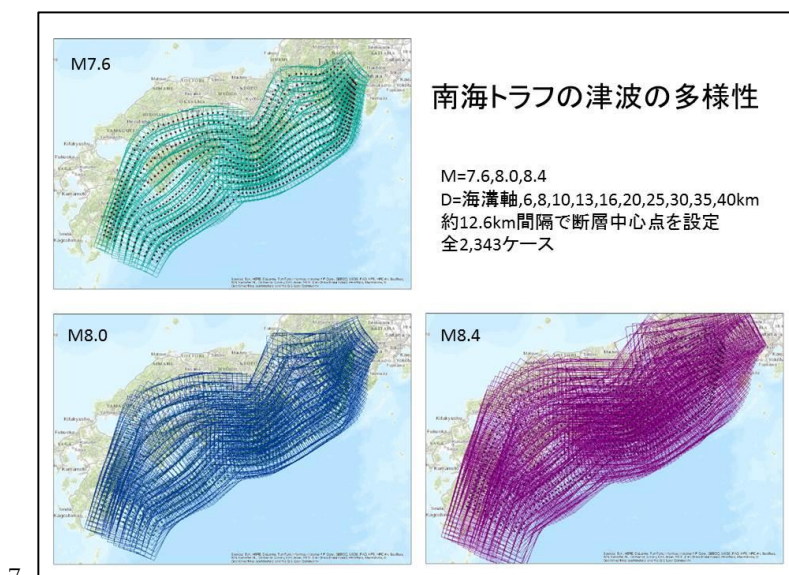
6

すが、走向、傾斜、深さを変化させてもあまり津波の高さの分布には影響してこないことが分かります。ただ、傾斜角については、断層位置が海溝軸に近くなればなるほど、変化した場合に津波の高さが変化してきます。

1-4. 南海トラフの津波の多様性

同じような解析を南海トラフでも行いました（図表7）。南海トラフを想定して、プレートモデルのプレート境界面上に多数の断層を設置しています。そして、マグニチュードを7.6、8.0、8.4と変化させ、深さ（D）も変化させました。断層中心点は12.6km間隔で設定しています。このようにシステムティックに断層面を設定して解析しています。

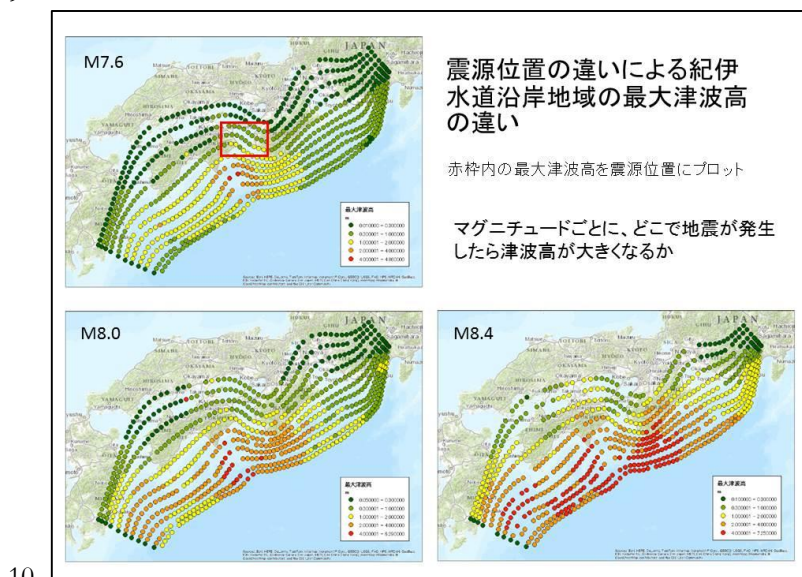
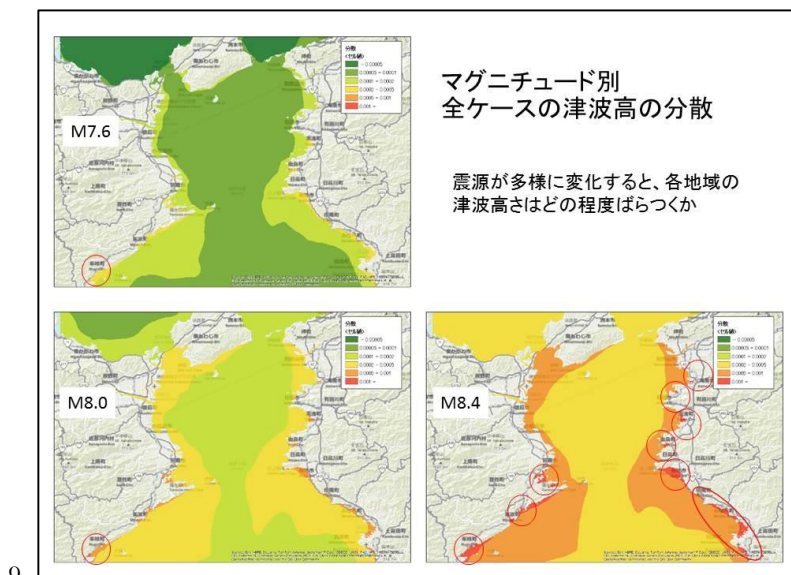
図表8は、マグニチュード別の全ケースの平均津波高を地図上に示したものです。例えばマグニチュード7.6だと781ケースあるので、それらの平均の津波高が表示されているということです。結果はほとんど0.2m以下になりますが、中にはマグニチュード7.6で起きた場合でも津波高が高い地域があることが分かります。もちろんマグニチュードが大き



なっていくと平均津波高は高くなっていくのですが、この解析によって、特に徳島県の太平洋側の阿南、紀伊半島の田辺や御坊、広川といった地域で津波の高さが高くなりやすいことが分かりました。この結果には 781 ケースのうち多数のケースで高い津波が押し寄せるとということが反映されています。

図表9は、マグニチュード別の全ケース津波高の分散（数値のばらつき）です。震源位置が変化した場合に、津波の高さがどのくらい変化するかということが示されています。丸で示した地域で分散が比較的大きくなっているのですが、このような地域では震源位置によって津波の高さが大きく変わる可能性があります。そうすると、どこで発生した場合に津波の高さが大きくなるのか、知っておかなければいけないということになります。

図表10は、震源位置の違いによる紀伊水道沿岸地域の最大津波高の違いです。赤枠内で示した地域の最大の津波高を震源位置にプロットしています。これを見ると、地震がどこで発生したときに赤枠内の津波高が大きくなるかが分かってきます。マグニチュード 7.6 の場合、赤い点で示した位置で発生すると津波高は高いところで 4m 以上になります。マ



マグニチュード9の地震が発生しなくても、それくらいの高さの津波が発生する可能性があるということで、7.6だから大丈夫だろうと思っはいけないということです。もちろんマグニチュードが上がると津波の高さも上がってきますが、このように、どこで発生した場合に警戒すべきかということがある程度分かっています。

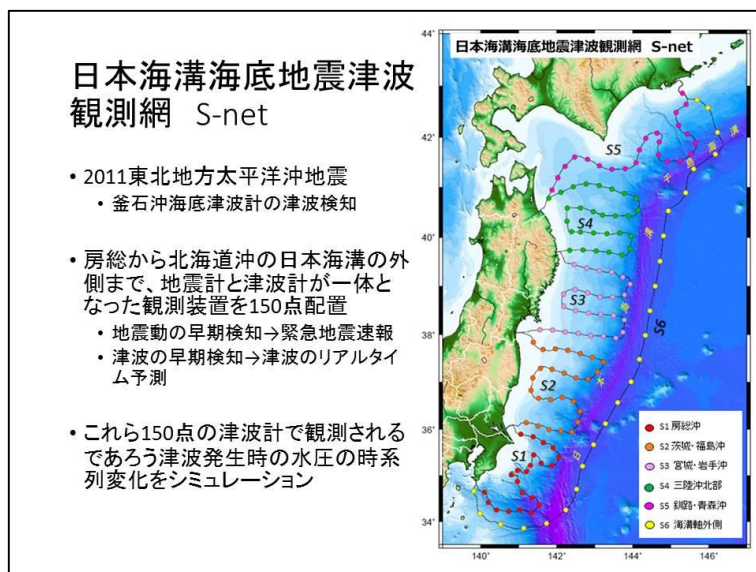
2. 利活用

2-1. 機械学習を用いた津波のリアルタイム予測

こういった解析結果は、実際に起きたときに、どこで起きたのか、どのくらいの津波の高さが来るのかというリアルタイム予測にも使うことができます。私はそれを最近さまざまな分野で応用されている人工知能、機械学習を用いてできないかと考えています。膨大な津波計算結果を活用し、その計算結果をコンピューターが学習することで、人間が処理できないような膨大なデータから、沖合でどのくらいの波形が発生したら沿岸でどれくらいの津波が来るかという分析をするわけです。データを入れるとコンピューターが学習してくれます。学習した結果、頭が良くなったコンピューターが沖合の波形パターンを認識し、沖合の波形、沿岸の津波の関係性から即時に津波が到達する高さを予測してくれるということを実現しようとしています。

沖合の津波の高さを観測するために、日本海溝海底地震津波観測網（S-net）が北海道から房総沖に至る東日本の沖合に敷設されています（図表11）。3.11のとき、釜石沖にあった海底津波計が津波をキャッチし、海域での津波観測の重要性が示されました。そのときは海域で津波を観測する施設が少なかったのですが、それが津波が発生する海域まで広域かつ高密度で整備されています。

地震計と津波計が内蔵された観測装置が150点配置されています。地震計と津波計を置くことによって、まず、地震動を早期に検知することができ、地震計で観測したデータから発出される緊急地震速報がさらに早く出せるようになります。それから、津波の早期検知として水圧計も埋め込まれています。この水圧計で観測した結果を使ってリアルタイム



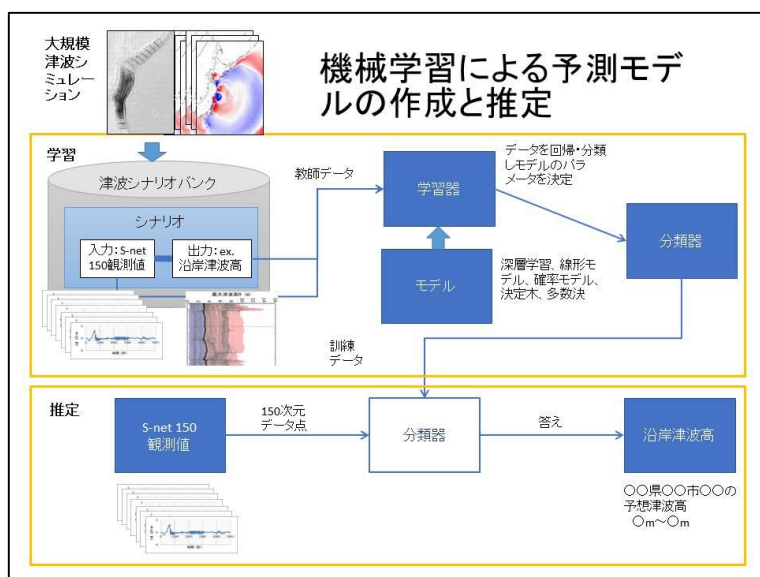
予測を行います。それにはまず、津波発生時にこれら 150 の観測点で観測されるであろう水圧と沿岸の津波の高さを津波シミュレーションにより求める、これを大量の津波シナリオのそれぞれについて行いました。

その解析結果を機械学習に入れていくわけですが、まず、シミュレーションによって得られた 150 地点の観測地の時系列的波形とそのときの沿岸の津波高をセットにして、データベースに入れていきます (図表12)。そして、この二つを教師データとして学習器に入れます。機械学習といってもコンピューターが勝手に学んでくれるわけではなく、あるモデルに沿ってコンピューターがデータを解析して学んでくれるという仕組みなので、まず、モデルを決めて学習器にセットし、データを読み込んで学習させるわけです。そうすると、分類器ができます。これはどういった入力があったらどの出力を返すかという分類をしてくれます。そして、実際のリアルタイムの推定の場合は、それに実際のデータを流し込み、分類器がどのくらいの津波の高さが来るかを予測するという流れになります。

予測時刻は地震発生後 5 分経過時点に設定しました (表 16)。地震発生から 5 分待つてから予測するという事です。水圧計は海底に設置してありますが、震源直上の水圧は、地震によって地面が盛り上がったとき、その上の水も同様に盛り上がるので、地震後、水圧は全てまだ一定です。そこから津波が伝播することによって水圧が変わってくるので、それを 5 分間待つて得られた水圧データを入力します。

入力データは、S-net の 150 の観測点において観測される最大水圧変動量です。最初の水圧からどのくらい水圧が変動したかの量の絶対値の最大値を入れます。また、出力データは、千葉県勝浦市勝浦の沿岸観測点における地震発生 6 時間後までの最大水位上昇量 (津波の高さ) です。予測として出される情報は、1m 未満、1~2m、2~4m、4~8m、8~16m と区切って出します。

このようにして機械学習に即時予測をさせるのですが、このとき、学習モデルをどのように設定するかが非常に重要になってきます。そこで、複数の学習モデルを使ってみて、それぞれの評価を行いました。学習モデルの評価は、全体のデータを五つに分割し、その



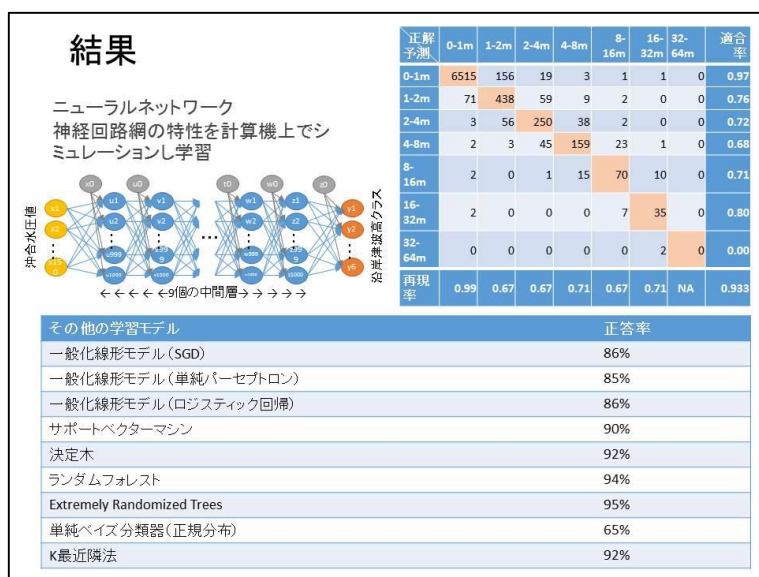
12

うち四つを使って学習させて、残りの一つを使ってテストするという形で行いました（交差検定）。そのようにして、学習したことのない入力データが入ってきた場合の予測精度を評価しています。なお、合計6万ケース近くの津波シミュレーションを実施しましたので、学習用データ数は4万7229ケース、テスト用データ数は1万1808ケースになりました。

結果の1例をお示しします。まず、学習モデルに、ニューラルネットワークを使いました。ニューラルネットワークは深層学習（Deep Learning）とって自動運転などにも使われていますが、脳内の神経回路網の特性を計算機上でシミュレーションして学習します。つまり、ニューロンがあって、それがシナプスでつながっており、ある程度の入力があるとニューロンが発火して次のニューロンに信号を伝達するというモデルです。これに入力として水圧のデータ、出力として沿岸の津波高のデータを入れて学習させたわけです。

予測結果は図表13のようになっています。縦に機械学習の予測、横に正解を示しています。対角線に来るのが正解です。正答率は93%とまあまあで、本当は16mぐらいの津波が来るのに0~1mなどと言うときもありますが、どんどんデータを放り込んで学習させ、より賢くなってくれることを期待しています。

その他の学習モデルの場合ですが、まず、一般化線形モデル（水圧と津波の高さの相関関係を捉えて予測する）の場合は、正答率は85%程度でした。サポートベクターマシンというのは、150点のデータを150次元超空間上にプロットし、その中で危ないかどうかで超平面で切るというものです。この正答率は90%です。また、決定木とは、ある観測点でこのぐらいの津波の高さが来たら、次に別の観測点でどのぐらいの津波になっているかを見て、それが閾値を超えていけば次という形で、データから分岐していく決定木を作るというものです。これは92%の正答率です。それから、ランダムフォレストというのは、そういう決定木を大量に作り、それぞれの木が出してきた答えの多数決を取るという方法で、正答率は94%です。単純ベイズ分類器というのは、データから沿岸の津波の高さが〇メートルの場合にどのぐらいの観測値が得られるかという条件付き確率を出し、条件付き確率の定理から、沖合の観測点でどのぐらいの水圧が出ると沿岸にどのぐらいの確率でどのく

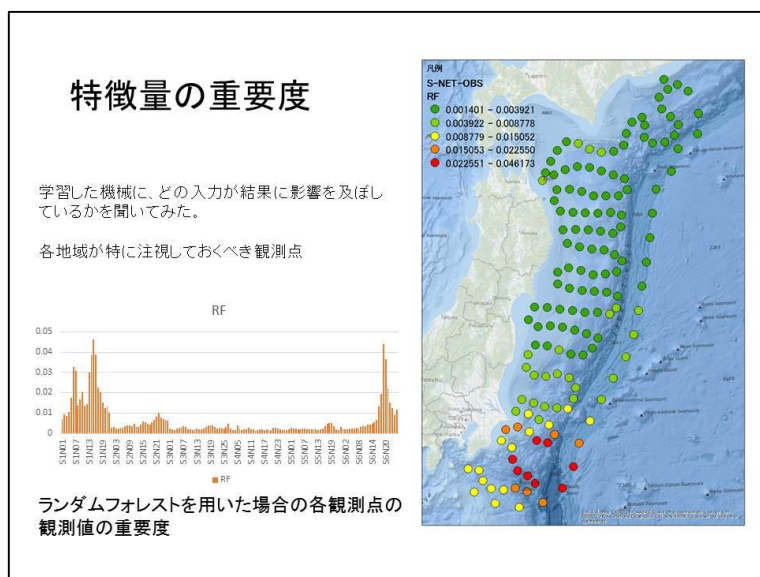


13

らの津波高が来るかを求める方法です。正答率は65%です。最後にK最近隣法というのは、入力データに対して学習したもののうちの一番近いものを取ってきて、多数決を取るという方法です。これでも正答率は92%です。

学習した機械にどの入力からそう判断したのかを聞いてみました。それが図表14の特徴量の重要度です。重要度が高いものを赤色、低いものを緑色でプロットしています。ランダムフォレストを用いると各観測点の観測値の重要度が出るので、赤色やオレンジ色の観測点の水圧がどのように変動するかを見ていけば、勝浦での津波の高さが分かるということになります。

ここまでやってきましたが、やはり精度を上げるためには、どれだけ津波のシナリオを網羅できているかが重要です。試験などもそうですが、ヤマをかけたところだけを勉強すると、全く違う問題が出たりしますから、できるだけ全部網羅したいのです。そうしなければ、学習による予測精度は上がっていかないだろうと思います。また、逆に学習した機械が自分で考えて津波シミュレーションをするということも、将来はできるようになってきます。どこで津波が発生したらどのくらいの高さの津波が来るかということを、コンピューター(AI)が自分でシミュレーションし、学習して、さらにまたシミュレーションしていくというサイクルで、自動的に予測精度を上げていくということです。



14

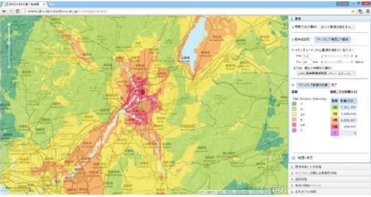
2-2. あなたのまちの津波の開発

もう一つの計算結果の活用法として、「あなたのまちの津波」の開発があります(図表15)。既に「あなたのまちの直下型地震」という、日本全国を対象に、地震が発生した場合にどれぐらいの震度でどれぐらいの被害が発生するかをウェブで計算してみられるというシステムを作っているのですが、その津波版です。まず、これは自分のまちの津波脆弱性を知るためのものです。どこでどのぐらいの規模の地震が発生したらどうなるか、また、自分のまちには何分後にどのぐらいの津波が来襲するかということを自ら学んでいただきたいと思います。

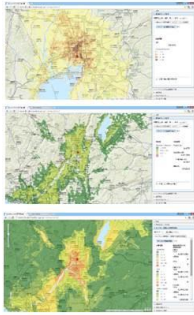
このとき、津波災害のシナリオは多数あるということを知ってもらうことが重要ではないかと思います。津波の計算をするのは非常に大変で、1 ケースに何時間もかかるのが現状です。そのため、あまり多くの想定をすることはできません。従って、想定は限られていますから、想定の後には計算できなかったケースが多数存在することになります。そういうことも知ってもらいたいと思います。

また、こういったものを発災後に使えば、震源パラメータを入れることで、迅速に浸水範囲などを推定することができるだろうと考えています。それから、一生懸命算出した計算結果をできるだけ共有できるようにしたいと思います。同じような計算はいろいろなどころで行われていますが、その結果は共有されていないので、それぞれでまた同じ計算をしているのが現状です。ですから、データベースにして共有、活用したいと思っています。

あなたのまちの津波の開発



- あなたのまちの津波脆弱性を知る
 - どこで、どのぐらいの規模の地震が発生したら
 - 自分のまちには何分後にどのぐらいの津波が来襲するのか
- 津波災害のシナリオが多数あることを知る
 - 限られた想定が実際に起こるとは限らないことを知る
 - 想定の後には計算できなかった様々なケースが存在する
- 発災後の迅速な状況把握のための推定を得る
 - 発災後の失検討期における浸水範囲の推定
- 津波計算結果データベース
 - 膨大な津波計算結果を知見として蓄積し、共有、活用

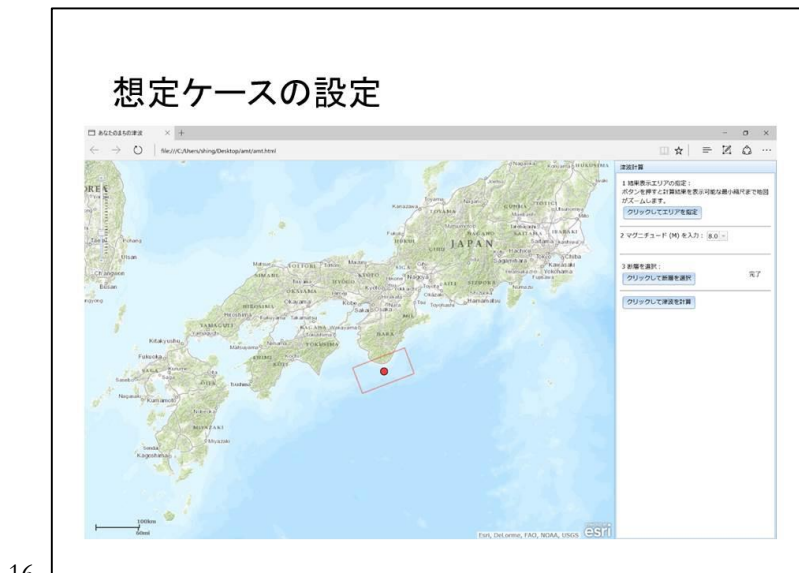


15

図表16は想定ケースの設定画面です。実際に使う場合、まず、ユーザーは南海トラフ上のある点を指定します。そうすると、システムがその点を基にデータベースを検索し、「この断層ですね」と返してくるので、それによれば計算結果を表示させるという流れになります。どこにどのくらいの津波の高さが来るかということが即時に出てきます。

最初にどこの津波を見るか、自分のまちを拡大して地点を設定します。その後、マグニチュードを入力します。今はマグニチュード 7.6、マグニチュード 8.0、マグニチュード 8.4 の三つしかないのですが、例えばマグニチュード 7.6 にセットすると、次は断層を選択するというので、南海トラフ巨大地震のどこかにポイントします。そうすると、計算されているものの中から断層を選んでくれます。

図表17が計算結果です。このように、ある断層で発生した場合の津波の高さがすぐに表示できます。これを使って、マグニチュードを変えたらどうなるか、あるいは位置を変えたらどうなるかを見てもらって、自分で想定して学んでもらうということを考えています。



2-3. 今後

今後、さらに津波シミュレーションを充実させていきたいと思います。具体的にはマグニチュード8.4以上の巨大地震を追加し大すべり域等を考慮できるようにすること、また、浸水計算をより細かなメッシュで追加することを考えています。また、潮位や防潮堤の破損度によっても変わってくるので、より複雑になっていくのですが、そういったことも考慮する必要が出てくると思います。そして、各種被害計算も組み込んで、最終的にはそれを使って地域防災や地区防災、BCP、事前復興について考えられるようなものにしたいと思っています。

