

続きまして関西大学社会安全学部・教授 高橋智幸より「津波のメカニズムと特性」について報告いたします。

高橋智幸

ご紹介いただきました高橋です。よろしくお願いたします。

私は津波の話をしていただきます。まず津波というものが地震でどのように引き起こされるのか、ということをごさんと一緒に確認させていただきたいと思ます。今、地震が海域で発生しました。海底の下の方で発生しています。そうするとこれは断層運動と見なせますので、この断層運動によって海底がこのようにずれるわけです。すなわち海底が変動します。海底の上にはたくさん海水がのっています。その海水も一緒に動かされていますから、海面変化として現れて、最終的にこれが津波となります。この海面の変動が沿岸部に押し寄せることによって、津波災害が引き起こされます。とすると、津波の規模を正確に知るためにはこの断層運動、すなわち地震をしっかりつかまなくてははいけません。

では今回の東日本の震災ではどういう地震が起こったのでしょうか。林先生から詳しいお話がありましたので簡単にご紹介します。この星印で示した場所が震源で、マグニチュード9.0という地震が起きています。震源というのは地震の起きた場所と思われませんが、そうではありません。これは地震が始まった場所です。こちらの図は、実際の地震の断層運動が生じた広さを示していますが、大体この範囲が断層運動を起こしていて、長さが約450キロメートル、幅が200キロメートル、場所によっても違いますが、最大で20メートルから30メートルぐらいの断層がずれており、大きなエネルギーが発生しています。この範囲が全て海底を動かしますので、ここが津波を引き起こしているということで、津波にもものすごいエネルギーが供給されて、そのエネルギーが沿岸を襲い、このような大災害を起こしてしまいました。もちろんすぐに気象庁でもわかりますので、全国に津波警報、注意報が出されています。

これは22時53分ですから、地震が起きてから約8時間後の津波警報、津波注意報です。この赤色で示しているのが大津波警報、オレンジ色が津波警報、黄色が津波注意報です。大津波警報というのは3メートル以上の津波が来るところを示したものです。北海道から高知にかけて真っ赤な大津波警報が出ています。それぞれの地域では、場所によっては6メートル以上の津波や、8メートル、東北地方では10メートルを超える津波の警報が気象庁から出ており、そのような警報を皆さんも聞かれたわけです。

実際にどのような津波が沿岸部を襲ったのか、これも気象庁のデータですが、これが北海道、東北地方、関西、九州というように、この地図上に棒グラフを載せてあります。これが津波の高さです。これは実際に観測された津波の高さを棒グラフにしており、高いほど津波が大きいのですが、地図が見えないくらい大きな津波が来たということです。例えば東北地方の相馬では7.3メートル以上、釜石や宮古で

は4.1メートル以上、「以上」と何故ついているかという、実はあまりにも大きすぎて検潮記録では観測できなかった、検潮記録が振り切れてしまいました。我々が想定していたより、もっと大きな津波が来てしまったので、検潮所という津波を観測するところで針が振り切れて測れなかったということです。これだけ大きな津波が来襲しているわけです。

実際どのようにそれが町を襲ったのか、いくつかメディアが載せてありますのでそれらを参考にご紹介します。例えばこれはABCニュースの画像で、仙台港です。これが津波の前です。津波によって流されてしまった後です。これは仙台の荒浜です。津波の前ですが、津波が来襲することによってこのように広い範囲が津波によって流されています。これは同じく仙台の藤塚、荒浜の少し南です。これも津波が来る前ですが、津波によって町中が流されてしまって、このような被害が発生しています。これは来襲している時の様子ですが、共同通信の写真です。このように荒浜を津波が来襲する様子などがメディアのサイトに今回はたくさん掲載されています。これは非常に重要な資料で、これから防災のことを学んでいく人達にも見ていただいて、考えていただくことが重要だと思います。

これは仙台港で、正に津波が押寄せて来ているところです。これは仙台空港が、津波によって滑走路が埋まってしまっているところです。これも荒浜に津波が押寄せているところです。このような津波が実際発生しているわけです。

では、地震が発生してから我々研究者は何をしていたのか、そのながれをご紹介します。3月11日に地震が発生しました。実際に岩手県や宮城県など一番被害の大きかったところに我々が入ったのは3月21日です。ではその10日間何をしていたのか、よく聞かれるのですが、実はこの期間我々は調査を自粛しております。岩手、宮城、福島といった大きな被害が発生したところの調査は自粛しておりました。何故かと言うと、被災直後というのは捜索とか救出活動が最優先されるタイミングです。しかも食糧や燃料が無くなると言うのはわかっていましたので、我々学術調査が入るのではなくて、被災者の方々を支援をする方がまず優先的に入って頂きます。ですから我々は調査を自粛しています。ただ調査を自粛しているのは岩手、宮城、福島であって、実際には例えば関西圏や東海、関東のような被害が小さかったところの調査は行っています。

メディアでは津波が高かったところに注目が集まるのは当然ですが、高い津波も重要なのですが、ここでは津波が低かった、という情報も実は重要なのです。低い高いという分布が分かって初めて、それからどんな現象が起こったかと言うことが分かります。ですから、津波が低かったところの調査も行っています。

あと調査を行った結果については、情報を共有しなくてははいけません。通常、研究者というのは自分が取ったデータは自分で持っていて論文を書きます。けれども、こういう災害が起きてしまったらそんな状態ではないので、みんながそれぞれ自分達で取ったデータを共有します。例えば、我々の方では情報共有のサイトを立ち上げています。海岸工学と地震の名前で検索して頂ければすぐに出てくると思います。全国の土木学会だけではなくて、地球惑星科学関連の地震学会や地理学会など、ま

た気象庁、国土交通省などが合同で調査に当ろうといったことでこういった情報共有のサイトを作っています。このサイトには先程お見せした被害の写真へもリンクが張られていますので、ここから見て頂けます。現在進行中の現地調査の結果もリアルタイムで入ってきています。ここに掲載していますので関心のある方はご覧になっていただければと思います。

こうした情報共有をしながら 10 日間ぐらいたちましたが、そのあと東北でも調査を始めました。実は調査はなるべく早く入るほどよいのです。と言うのは実際の現場で災害の痕跡を調べるわけです。災害の痕跡というのはどんどん消失してしまうので、本来はなるべく早く現地に入ったほうがいいのですが、現地では捜索活動、救出活動が続いています。そこへ我々が入って邪魔になれば本末転倒ですからバランスを取らなくてははいけません。ただ災害の痕跡をしっかりと調べてちゃんとしたデータを残さないといけません。それだけでなく、被災地の復興計画や将来どのような防災計画にするのかを考えられません。更に東日本だけではなく、我々が住んでいる南海トラフの周辺やまた日本海側といったその他の地域でもどうやって想定を見直せばいいのかということは調査をして、データを調べないとわからないわけです。調査はすぐに入らないといけないのですが、被災地の状況も考えないといけないということです。

まず我々は先遣隊を派遣します。実際調査を開始するための情報収集ということです。どの地域で調査が開始できるのか、どの地域が少数のグループだったら入っていけるのか、という情報収集を行います。実は私は先遣隊の方で入らせて頂きました。我々先遣隊で調べた結果を基に調査隊を派遣します。この調査隊の計画を立てるために先遣隊として入りましたので、この様子を今日はご紹介したいと思いません。

現地を見てまいりますと、やはり津波災害の特徴というのがわかります。例えば、ひとつ目としては、想定されている浸水範囲をかなり超えています。この地図は、宮城県が想定していた津波の浸水範囲、つまりここまで津波が来ます、ということです。こういう範囲に津波が来ます、と考えていたわけです。これは航空写真ですが、このように津波が来ます、と宮城県は考えていました。ところが実際現場に行きますと、もうここまで津波が来ています。こういう状態です。途中の家々を壊した瓦礫が流されて、山の麓に流れ着いたり、船なども流されてきています。想定されている範囲を遥かに超えているところまで津波が来ていますので、特に東北地方の方で防災意識がある程度高く、こういった防災ハザードマップ見ていると、ここにいれば大丈夫じゃないかと考えがちです。そうすると、地震が起きて津波はここまで、ハザードマップをしっかりと見ているがために、ここまでは来ないと思って流された方もたくさんおられたということです。

ここまで浸水が来ていますので、当然市街地ではかなりの被害が発生しているということがわかると思います。今この中学校の高台からみると、市街地はこのようになっていますが、ほぼ全滅状態、街が全滅状態になっています。海岸付近に志津川の公立病院があり、ここが拠点になりますが、この病院さえもこういった

状態で、入院されていた方の半分が亡くなったり行方不明になっています。

少し東の方へ行くと3階建てのビルがあるのですが、ここに津波によって車が乗ってしまいました。ここではこのような被害が発生していました。本当にはじめ想定していたものに比べてとても大きな被害が発生しています。

今回の特徴として、私は10回以上災害調査や津波調査を行っているのですが、多くは発展途上国、インドネシアやパプアニューギニアというところで、日本では1993年の北海道南西沖地震以来これだけの津波被害が発生しています。やはり発展途上国と先進国では決定的に違うことがあります。それは町の中をたくさん走っている自動車です。この写真は我々が調査に行った時の釜石市の様子ですが、既に渋滞しています。生き残った方のお話を伺うと、津波が来る時もこの様に車で避難される方が渋滞を作っていたと。で、その車で避難されている方が車ごと流されてしまっている。すなわち自動車による避難がどれだけ危険かということがわかります。

更にその流された車というのは、今度は障害物となって町を襲うわけです。車は元々軽いので、すぐに流されてそのまま町を襲ってしまいます。だから車による被害そして車自体の被害というのが、先進国の都市部では多く見られたというのが特徴かと思えます。

また市街地では、これは釜石市のメイン道路ですが、当然車が通りやすいところは水も流れやすいので、ここにたくさん水が入ってきます。ただ市街地の場合は、こういったメインの道路と並行してサブの道路が走っていたり、路地が沢山あります。そうするとメインストリートから津波が襲ってくるし、更に路地からもどんどん津波が入って、とても複雑な流れが発生しています。こういった特徴が市街地では見ることができました。

4つ目の特徴は、これは良い方向に働いた特徴ですが、先程河田先生のお話にありました釜石湾の湾口防波堤です。この湾口のところでとても大きな防波堤、地図では分かりづらいですが、約1キロメートルの防波堤が湾口に出来ています。水深63メートルぐらいのとても深いところに出来ています。日本が誇る大きな構造物です。これが津波の後で写真を撮りますと、こういう状態になっていました。かなり多くのところが破損しているのがわかるかと思えます。ただそうすると、津波が来て壊れてしまったのではないか、と考える方もおられるかと思えますが、実はそうではなく、越えること自体でエネルギーが減衰されたわけです。残っているところがあるわけですから、それが津波に対して抵抗になっています。それでは、それはどういふようにわかるかと言いますと、これは釜石市の浸水想定ハザードマップですが、右下の方に湾口防波堤があって、それが津波の侵入を防いで抵抗していたわけです。この市街地を歩いてみると、例えばこの場所は緑ですので、1メートルから2メートルぐらいの高さの津波が来ます、ということが想定されています。小さくて見づらいと思いますが、津波がここまで来たという線が、上の壁に付いています。だいたい2階に上がるか上がらないかということで、2メートル程度です。この地域は2メートルぐらいの津波が来ます、といわれたところで、若干想定を越

えているぐらいです。先程の地図の例えば荒浜に比べると、とても想定に近い状態になっています。これは川のそばで、想定では4メートルぐらいのところですが、このビルの2階までいっています。約4メートル程度で想定プラス α ぐらいの被害で収まっています。だからその他の地域に比べると、この釜石港辺りは想定されていたものに近いようになっています。これは湾口防波堤があることによって、津波のエネルギーが減衰されたのであろうということがわかります。

最後の特徴ですが、これは仙台の荒浜です。とても被害の大きかったところです。宮城県では、海岸付近まで津波が来ます、ということをはじめに想定していましたが、実際には数キロ内陸まで入っています。ここに東部道路という自動車専用道路が走っているのですが、ここまで津波が来ています。この東部道路の周辺、例えばこの東部道路の海側を調査してみます。東部道路は盛土されて、街を縦断するように走っています。東部道路の周りには津波が襲っていますので、沢山の瓦礫や車が溜まっています。海のほうを見てみますと、町が全部流されているのがわかります。これらが東部道路の海側のところです。この東部道路の陸側のところがどうなっているのかを見てみますと、こちらにゲートがありますが、ゲートからも津波が来ていますが、こちらの海側に比べると、実はそれほど瓦礫もありません。その周辺の家も水は来ているのですが、壊れるほどではないし、車も残っています。これほど違うわけです。この東部道路という盛土が、ある意味バリアーになったわけです。東部道路は津波のために造られたわけではないのですが、たまたまこういうところに盛土されていたがために、防災機能が付加されたのです。

実はこういった例というのは、他にも見ております。例えば2004年のインド洋津波、この時タイのプーケットに調査に行ったのですが、これはプーケットのカロンビーチというきれいなところです。この写真の左側が海で、気持ちのいい海岸道路が走っています。この右手の方にリゾートホテルがたくさん並んでいます。このようなきれいなホテルが並んでいるのですが、カロンビーチのこの場所では、このホテルが全然壊れていません。水は来ているのですが、このホテルを破壊するほどの力はありませんでした。実際には、ここに5~6メートルの津波が来たので、なぜここで被害がなかったのだろう、良かったなと思っていました。しかし、少し南側の方に行きますと、同じビーチですが、そちらではホテルが全壊状態になっています。どうしてこんな近い距離なのに、こちらのホテルが無傷で、こちらは全壊なのだろう、とわからなかったのです。よく調べてみると、実はこの無傷のホテルの前の海岸道路が原因だったのです。この無傷のホテルの前の海岸道路が海岸より高いところを走っていました。それでこの道路が堤防の役目を果たして、ホテルを守ってくれたのです。ところが同じカロンビーチでも、少し南の方では、道路が低くてちょうど海岸と同じ高さを走っていたので、このような堤防の役目を果たすこともなく、すぐ裏のホテルが全壊して、多くの方が亡くなっています。つまり同じ場所でも、道路の高さでこれだけ被害が違ってきます。つまり防災の機能が付加されています。もちろんこの道路を作るときに、津波に備えて高くしたわけではありません。たまたま地形的に高かっただけだと思います。でもそのようなちょっとした

工夫によって防災機能を付け加えることが出来ます。

大規模公共事業は大変だと思いますが、やはり公共事業は続くので、その時ちょっとした工夫、ちょっとした事を考えて防災機能を追加する、付加価値を高めるということがこれからのハードウェアにとっては重要ではないかと今回思った次第です。

最後のトピックになります。これは気象庁の津波警報・注意報の状況です。14時46分マグニチュード9の地震が発生しました。気象庁は約3分後には津波警報・注意報を発表しています。この黄色が津波注意報、オレンジが津波警報、赤が大津波警報です。岩手、宮城、福島は大津波警報が出ています。ただ、この時迅速に対応していますが、残念ながらマグニチュードは7.9とみてしまっているのです。来る津波は3メートルか6メートルと出したわけです。それから26分ぐらい経ちますと、そんなことはないということで大急ぎで大津波警報を広げ、高さも3~6メートル、場所によっては10メートル以上の津波が来ます、と言って迅速に対応しています。が、こんなものじゃないと、どんどん津波警報、大津波警報が広がっていきます。16時8分、1時間30分後ぐらいになりますと、実はマグニチュード8.4だったということで、これだけ広い範囲で大津波警報が出て、大変なことが起きています、と気象庁の方から情報が出てきます。徐々に情報が修正されて、18時47分ですから4時間後ぐらいには、実はマグニチュード8.8でしたと出てくるわけです。22時53分、地震から8時間後が日本の一番広い範囲で大津波警報が出たタイミングです。地震から8時間後、殆ど北海道から高知まで大津波警報が発表されています。その後は徐々に大津波警報は津波警報に、津波警報は津波注意報に、注意報は解除され終息していき、このようにだんだん黄色が増えていきます。終息していき、最終的には13日の17時58分、2日経つと注意報が解除されて大丈夫です、ということになります。その時には、実はマグニチュードは9でした、と気象庁の方から出ています。このような情報の流れでした。

やはり、こうしてお見せすると、初めの段階で過小評価過ぎるのではないかとお感じになるかもしれません。それは確かにそうですが、気象庁の味方をするわけではないのですが、客観的に見て現在の日本の気象庁の解析レベルは世界のトップです。ですからむしろこれは、日本の気象庁でさえ難しいということです。逆に私としては良くやっているほうだと思います。なぜかという別例をお見せしますが、これは2004年のスマトラ沖地震、インド洋津波の原因になった地震です。インドネシアのスマトラ島沖でマグニチュード9.1の地震が起きて、約1,000キロメートルにわたって津波が発生しています。この時も各防災機関からマグニチュード8と発表されています。WCATWC、ちょっとわかりづらいですがアメリカの津波警報センターです。その津波警報センターも、地震発生からわずか15分後には大きな地震が発生しました、津波の危険があります、と言ってくれているわけですが、その時発表されているマグニチュードは8.0です。本当は9クラスなので、徐々に1時間後、4時間後にどんどんマグニチュードは修正されていきます。マグニチュードが実際の9クラスになるのは19時間後です。ですがこの時出てきたハーバー

ド大学は防災機関ではないので、こういった防災機関がマグニチュードを9に修正するのは1日半ぐらい経ってからです。ですから、とても大きい、超巨大地震が発生した場合は、どうしても発生した直後は地震を過小評価してしまいます。これは実は失敗ではなく、現在のシステムを使って超巨大地震を本当に短時間で解析する難しさを示しています。現在の我々の使える検知システムとしての限界であると言えます。

では津波検知システム、警報システムとはどのように行っているのかをおさらいしてみます。これは初めにお見せした地震によって津波が起こる図ですが、地震で断層運動が起きると当然地震波が発生して陸地に伝わっていきます。陸地には地震計があります。地震計が地震波を観測するわけです。我々はこの地震計が観測したデータを使って、地面の中でどのような断層運動が起こっているのを推定します。断層運動が推定できれば、その上の海底がどのように動くかということも推定できるし、最終的に海面がどう動くか、つまり津波がどう発生するかということも推定できるわけです。津波を推定することは、断層を推定することで、推定、推定、推定を繰り返しています。初めに地震計で観測した地震の情報を基に、津波がどのように起きるのか推定を繰り返すわけです。この方法はとても良い方法で、通常地震では上手く働くことはわかっています。ところが、ある種の地震が発生すると津波を過小評価してしまう危険性があります。その一つが2004年のスマトラ地震であり、今回の東日本の震災であり、超巨大地震が発生するとどうしても地震の発生直後は津波を過小評価してしまう危険性があります。

あと今日は時間がないのでご説明しませんが、津波地震と言われるタイプの地震が発生したり、アスペリティといった場所によりすべり方が違うような地震が発生すると、現在のシステムだと津波を過小評価してしまう危険性があります。これは仕方がないことですが、改良しなくてははいけません。そのためには、なぜこのような過小評価が起きてしまうかということを考えなくてははいけないわけです。それは実は地震波から推定、推定、推定を繰り返して、海面変動を推定しているからなのです。しかし、我々がほしいのはこの推定ではなくて、海面の変動です。津波というのは海面の変動が伝わって来るわけですから、とすると地震波ではなくて、海面を直接測ればよいのです。海面をダイレクトに測る、しかも津波というのはすごい規模の現象ですので、ものすごい広範囲を測らなくてはなりません。そうすると点でポン、ポンと取るのではなくて面的、平面的に観測しなくてはならない、しかもリアルタイムで、こういった事は今まで実はできませんでした。だから地震から推定、推定、推定を繰り返して来たわけです。ところが最近の技術で、リモートセンシングという言葉聞いたことがあると思いますが、リモートセンシングという技術を使うと、直接海面をとらえることができるようになって来ています。例えば人工衛星しかり、海洋レーダーしかり、海洋レーダーというのは空港などのレーダーと同じです。空港のレーダーは、飛行機に向けて電波を出して反射を見ていますが、海洋レーダーは海に向かって発信して、その反射を見て海の状況を調べるのです。このようなリモートセンシング技術を使って海面を直接測ってどんな津波が起き

たかを知ることができます。つまり地震が発生した直後に迅速にどんな津波が引き起こされたかを観測するシステムが必要だということです。どうしても我々人間がすることですので、想定を上回ることもあるわけです。我々は謙虚になって、実際にはどのような津波が発生しているのかを、その場でなるべく早く観測して知ること、そうすることによって災害が拡大する前に色々な対応を考えることができるわけです。

今後は地震が発生した後に、どのような津波が引き起こされているかを調べるリアルタイムの観測システムを装備していくことが津波災害の被害を少しでも減らすことに必要だと思います。

これからの津波災害で必要なことをご紹介します、私の話を終わります。ありがとうございました。