日本災害情報学会 第 13 回災害情報勉強会（詳録）

■テーマ：東北地方太平洋沖地震 －どこまで分かったかその実態と課題
■講　師：古村孝志氏（東京大学情報学環総合防災情報研究センター・地震研究所教授）
■開催日：２０１１年７月２２日
■会　場：東京大学地震研究所

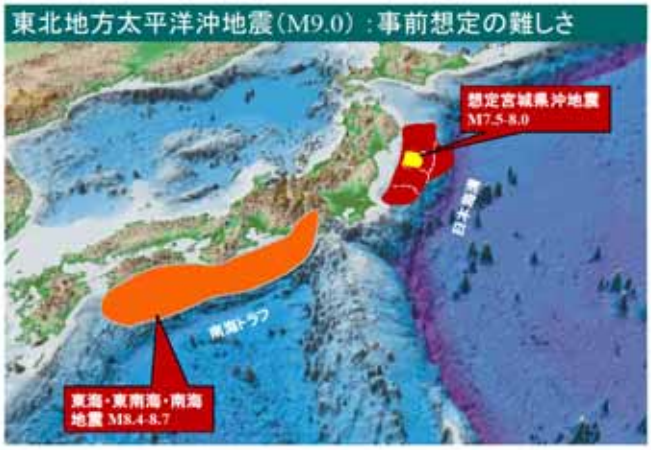
はじめに

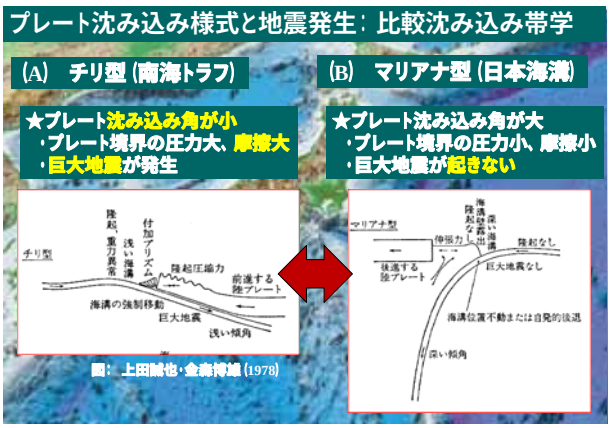
今回の 3.11 の地震が M9 まで大きくなるとは全く思わなかった。一体どうしてこれだけ規模が拡大し、大きな津波が出たのか。その一方で、長周期地震動や短周期の地震動は、地震の規模から見ると意外に小さい。どうしてなのかということの議論も少ししたいと思います。

それから、これだけ大きな規模の M9 地震が起きると、最近、余震は少しずつ減ってきてはいますが、このまま終息に向かうとはとても思えません。今は第一ステージが終わって、次に向けた準備が進んでいると考えた方がいいでしょう。これから一体何が起きるのかについても考えたいと思います。

想定しなかった M9 地震

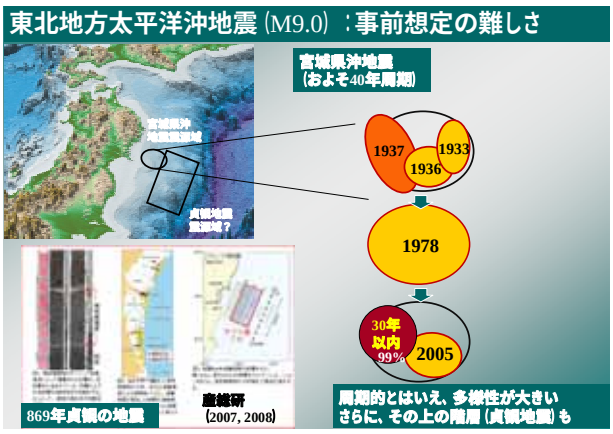
実は私たちは東海・東南海・南海地震の連動性、昭和の東南海・南海からかなり時間がたっているので、これがいつ起きるのかということばかり注目していました。30～40 年の周期の宮城県沖での地震発生のことを勉強して、それを東海・東南海・南海に当てはめようともくろんでいた。ところがこちらで巨大な地震が起きました。想定していた宮城県沖地震だけではなく、岩手、宮城、福島、茨城の四つの領域が連動して、プラスアルファで日本海溝付近のプレート境界の浅い部分、プレートが沈み込み始める部分まで震源域が拡大したことによって、浅い部分の海底地殻変動が起きて、巨大な津波が出た。それがこの地震の本質だと思います。





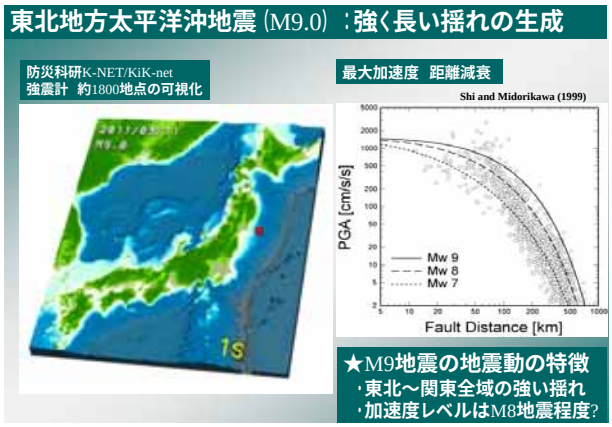
南海トラフでは大きな地震が起きるのに、宮城県沖などの日本海溝では大きな地震が起きないのかというのは、何となく納得がいくような説明は過去にありました。プレートの沈み込み帯は極端なことを考えると、プレートの沈み込みが緩い角度で沈み込んでいくチリ型と、プレートが急角度で沈み込むようになっているマリアナ型があって、そこではプレートの固着や大きな地震発生の要素が違うのだという考えが昔からありました。

どちらかというと、南海トラフのところはゆっくり沈み込むので、プレート境界の広い範囲が固着して、そこでは摩擦も大きいので、広範囲にひずみがたくさんたまって、大きな巨大地震が起きる。一方、日本海溝の辺りでは、プレートが急角度でするする沈み込んでいて、陸のプレートとの間でしっかり固着しておらず、摩擦も小さい。このような環境では巨大地震は起きにくいというすっきりとした説明がありました。だから、日本海溝では起きるとしても比較的小規模の地震だし、一方、南海トラフでは巨大な地震が起きると何となく思い込みがあった。



とはいっても、宮城県沖地震では約 40 年の周期で地震が規則正しく起きるといわれてはいても、実は一個一個を見てみると様子はばらばらです。例えば 1933 年、1936 年、1937 年の 3 回に分かれて宮城県沖地震が起きたこともあれば、その次の 1978 年のように一気に起きたこともあれば、今回起きたところも実は 2005 年に M7.0 の地震が起きていている。宮城県沖地震と一緒くたに見えても、一つ一つは多様でばらついている。

その一方、869 年に貞観地震という、宮城県沖をはるかに上回るような地震が昔の古文書の記録である「日本三代実録」に記述されていた。産業総合技術研究所が仙台平野でボーリング調査をしたところ、確かに仙台の内陸何キロものところに当時の年代の津波の堆積物があり、どうも地震は本当に起きたらしいということも分かっていた。しかし、だからといって、この限られたデータだけから次に起きる地震がこのタイプなのか、これまで数百年間ずっと起きてきたタイプなのかを想定するのは難しかったのではないかと思います。

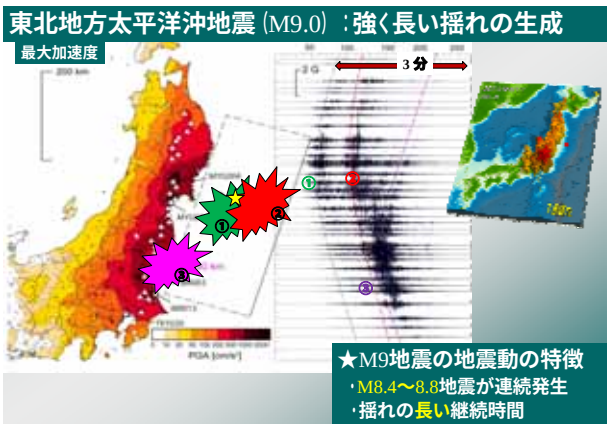


とはいえ、事実 M9.0 の巨大地震が起きました。当日、緊急地震速報を受け、ついに宮城県沖地震が起きたことを直感した。ところが、どんどんマグニチュードが大きくなり、とんでもないことになりました。この図はコンピュータシミュレーションの結果ではなくて、日本にある 1800 カ所の地震計のデータを集めて、時間とともに揺れがどう広がっていくか可視化したものです。

岩手から茨城までの 500km と 200km ぐらいの範囲が震源域になっているので、その巨大な震源域が約 170 秒で一気に破壊して、強い揺れが日本全体に広がっていく様子が見えます。この揺れがどのぐらい強かったか。この図は震源からの距離（断層面からの最短距離）と加速度の強さの関係を示したものです。

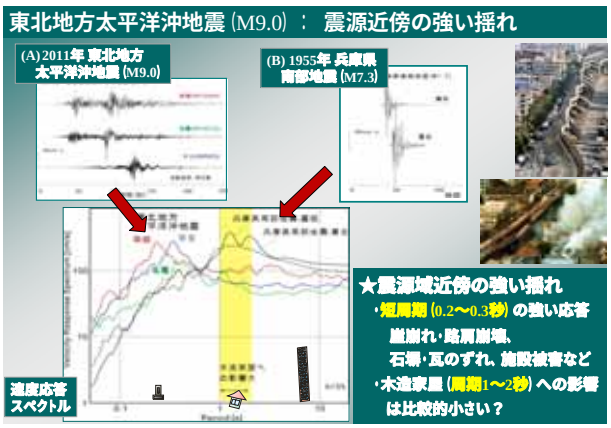
一個一個の点は 1800 カ所の地震計の揺れの記録で、とうぜんながら、距離が大きくなると揺れが弱くなっていきます。これを過去に起きた地震から経験的に描いた距離減衰カーブと比べると、実は今回は M9 の地震だから、今までの M8 の地震よりもっと揺れは強いかと思うと、そうはいかず、揺れ自体はせいぜい M8 程度と言えそうです。これが今回の M9 の地震の実態ではないかと思います。

どうしてこのようなことになるのかというと、M9 の地震といっても 1 カ所から強い揺れが出るのではなくて、強い揺れが放射された範囲が広くなるためです。例えば岩手で見ると、この辺の大きな滑りは、宮城の方には影響を受けないし、茨城で見ると岩手の方の大きな断層滑りの影響は直接受けないので、自分いるところのすぐ近くの断層滑りだけを考えればよい。M9 地震の揺れは、M8 程度の地震が幾つも起きたものと等価と考えるのがいいかもしれません。



地震波形を見てみます。岩手からずっと東京にかけて、例えば宮城の辺りではがたがたと揺れて、1 回揺れが収まった後にまたがたがたと揺れて、最後に三つ目でがたがたと来るように、1 カ所ここでまず M8.4 クラスの大きい地震が起きて、またここで M8.8 程度の地震が約 50 秒の時間を空けて 2 回起きたと考えればいいのです。つまり、岩手から見ても、M9 の地震が起きたというよりは、M8.4 の地震が起きて、それから約 50 秒休んで、また M8.8 の地震が起きたというように、何回かに分かれて M8 クラスの地震が複数起きたと考えればいいと思います。

こうした、マルチプルのショックのために、第 1 波、2 波、3 波と次々と強い揺れが来ることによって、各地では揺れが長く続きました。これは連動型の巨大地震の性質として非常に重要なことではないかと思います。つまり、M9 の地震といっても、揺れの強さ自体は M8 の地震以上に大きくはならない。ただし、大きい揺れが来る範囲が広がることと、揺れの時間が長くなることが M9 の地震の特色ではないかと思います。



それとはまた別に、木造家屋の様子を見ると、津波で

倒された家は多いけれども、地震動で壊れた家はそれほど多くないような印象を受けます。

例えば、木造家屋だと 1～2 秒の周期で一番引き倒されやすいといわれています。だから、1～2 秒の周期の地震動がたくさん含まれていると、木造家屋は危ないのです。

今回の地震で卓越した地震動はそれよりもっと短周期で、0.2～0.3 秒に強いパワーがありました。つまり 1 秒に 2～3 回繰り返す揺れですので、工事現場の削岩機のような揺れの成分が圧倒的に強かったのです。一方で、木造家屋に影響を与える 1～2 秒のパワーは、阪神・淡路のときに比べると半分や 3 分の 1 程度です。おそらく、「がたがたがた」とした揺れが長く続いたので、天井の落ちるような施設被害や崖崩れなどの影響が大きかったかもしれません。しかし、木造家屋への影響はそれほど大きくはなかったと思います。

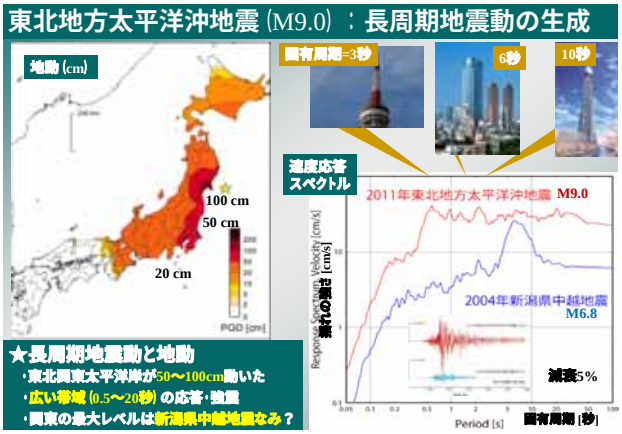
では、なぜ今回の地震がそうだったのか。M9 になるとそうなのか。これははっきり言ってまだよく分かりません。過去の地震をいろいろ調べてみると、宮城県沖で起きるような地震は、いつも短周期ばかり出ています。2008 年の岩手・宮城内陸地震のときも、たくさん道路が崩壊したり、天井落下や壁の損傷が大きかったのに対して、木造家屋の全壊・倒壊は少なかったのです。あどうも宮城やこの辺りの地盤の影響なのか、あるいは海で起きる地震もそうなので、この辺で起きる地震の特色なのか、もう少し事例を集めて検証が必要です。

では、なぜ今回の地震がそうだったのか。M9 になるとそうなのか。これははっきり言ってまだよく分かりません。過去の地震をいろいろ調べてみると、宮城県沖で起きるような地震は、いつも短周期ばかり出ています。2008 年の岩手・宮城内陸地震のときも、たくさん道路が崩壊したり、路肩が崩れたり、天井落下や塀の損傷が大きかったのに対して、木造家屋の全壊・倒壊は少なかったのです。どうも宮城やこの辺りの地盤の影響なのか、あるいは海で起きる地震もそうなので、この辺で起きる地震の特色なのか、もう少し事例を集めて検討が必要です。

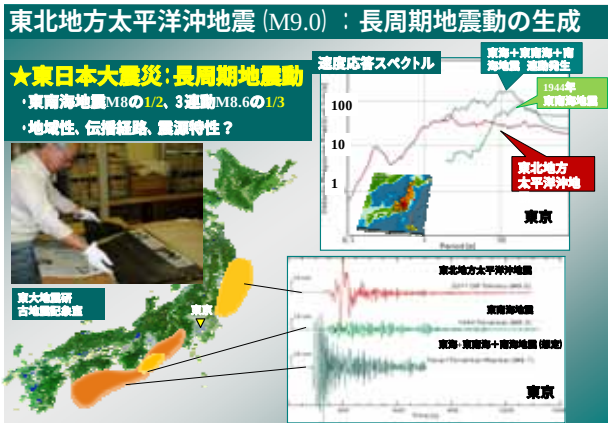
ただはっきり言えることは、今回の地震で木造家屋の被害が意外に少ないのは、宮城の家が強いからだけではなくて、地震動がたまたま木造家屋にとって厳しくなかったということを考えておく必要があります。つまり、次の地震、東海・東南海・南海地震はこういうわけにはいきません。

次に、長周期地震動が意外に弱かったことを述べます。

この図は、日本列島が最大どれだけ大きく揺れたかを描いたものですが、一番色の濃いところ、宮城の辺りは地震時に最大 1m ぐらい大きく揺れたことがわかります。岩手から関東、横浜、千葉にかけては 50cm の揺れですので、ここ東大地震研究所の辺りも地震時に最大 50cm は揺れていたことが分かります。これだけ巨大な地震では、500km、200km の断層面が平均で 20m ないしもっと大きくずれ動いたため、大きな地震動発生して、遠く離れた東京でも地面はこれだけ大きく揺れたのです。



これだけ大きな変位で揺れるということは、強い加速度をもたらす短周期の地震動だけではなく、大きな変位を作り出す長周期の地震動も強かったことが考えられます。東大地震研の地震記録をもとに速度応答スペクトル（いろいろな固有周期を持つ建物の揺れの強さ毎）を計算すると、固有周期 0.5～20 秒の範囲でかなり大きな応答が出ています。よって、固有周期の短い低層建築から、固有周期 5～6 秒というと 60～70 階建ての建物、もっと長い 10 秒というとスカイツリータワーが該当しますが、さらに 20 秒という、低い建物から高い建物まで等しく大きく揺れたことが分かります。これが今回の地震の特色です。高層ビルにいた人だけではなくて、低い建物も含めて多くの建物が大きく揺れたとの報告が上がってきています。ただし、そのレベルは、実は中越地震（M6.8）のときに港区の超高層ビルが初めて経験したような長周期地震動の揺れのレベルと大きく変わらなかった。これは今回の地震の謎です。地震の規模の違いを考えると、もっと大きく揺れてもおかしくないからです。

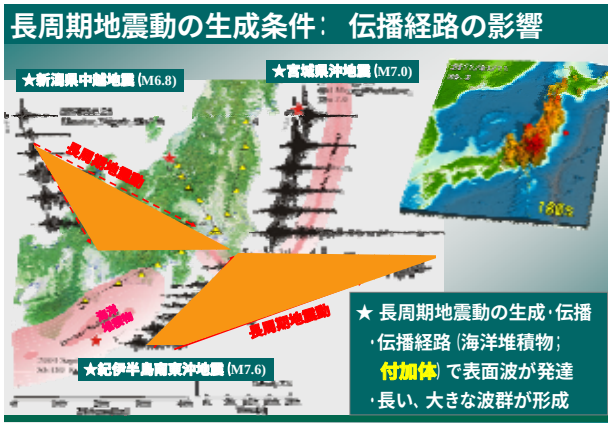


今度は東海・東南海・南海地震に話を変えます。これは今回の地震の東京での速度応答スペクトルですが、これを見て分かるように。固有周期 8 秒以上では 1944 年の東南海地震のレベルを下回っていたのです。

東南海地震は東京からいうと震源距離は 400km と遠く、

しかも、マグニチュードは7.9ないし8です。東北地方太平洋沖地震とは同等の震源距離で、しかも地震規模は圧倒的に小さいにもかかわらず、関東での7～8秒以上の長周期地震動の強さは約半分だったのです。それから、東南海地震だけでなく、プラスアルファで東海地震が同時に起きることを想定したコンピュータシミュレーションを行うと、そのレベルは今回の地震の3倍ほど大きくなります。そう考えると、今回の地震は特別なものであり、過去に起きた東南海、あるいは次に起きる東海地震の場合には長周期地震動のレベルはずっと大きくなると考えるべきです。

では、なぜそうなのか。これも今回の地震と過去の地震の揺れの特徴を詳しく比べてみると、宮城県沖で起きる地震はいつも長周期地震動は出ていなかったのです。2005年に起きた宮城県沖地震（M7）、2004年新潟県中越地震（M6.8）、少し地震規模が大きい2004年紀伊半島南東沖地震（M7.6）の三つを比較して、震源から関東に揺れが伝わる間に長周期地震動がどう発達するかを見てみます。例えば、新潟県中越地震では群馬や埼玉の県境から長周期地震動を作る表面波が発達しています。紀伊半島南東沖はもっとすごくて、震源のすぐそばから長周期地震動を作る表面波がずっと発達し続けています。



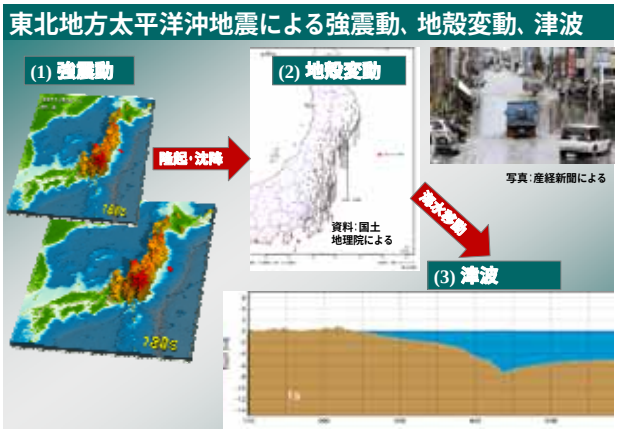
それなのに、宮城県沖の地震では長周期地震動は全然発達していません。関東平野に入ってやっと少し出るという感じです。この三つの違いは、明らかに通ってくる伝播経路によるものです。関東に向かって新潟から来る場合、宮城から来る場合、紀伊半島から来る場合とでは、長周期地震動の発達が全然違うということが分かります。

例えば長周期地震動が強く発達する紀伊半島南東沖はどういう構造かと言うと、ここはフィリピン海プレートが緩く沈み込んでいて、上に付加体と呼ばれる堆積物が、ブルドーザーでゴミを押して固めるような感じで厚く覆っています。一方、宮城県沖は最初に話したように、太平洋プレートが急激に沈み込んでおり、堆積物を巻き込んで沈むこむために、付加体が発達していない場所です。こちら（紀伊半島南東沖）は震源域のすぐ上にふかふかの布団があるので、そこで表面波すなわち長周期地震動が発達して、その中を誘導されるように関東に向けて運ばれてきて、もう一回、関東平野で増幅されます。まさに、長周期地震動を作ってくださいと言わんばかりの地下構造がここにはあります。一方、ここ（宮城県沖）にはそういう構造はない。こういう地下構造の違いがあるのではないかと思います。

こうした理由から、南海トラフで起きる東海・東南海・南海地震では長周期地震動が発達するのは当然です。今回の地震のようなわけにはいきません。東京もそうだし、途中にある大阪、名古屋も長周期地震動が強く発生するということです。

巨大津波の発生

次に、今回の地震の特徴である巨大津波について考えます。大きな地震が起きると、地震の揺れとは別に、揺れが起きている間に地殻変動が発生します。揺れながら地面が隆起する、あるいは沈降する。これだけの広い範囲の海底の盛り上がり、あるいは盛り下がりによって生まれた巨大な水の塊が沿岸に津波として一気に到達する、これが津波の怖いところです。



今回の地震地殻変動によりどれだけ海水が盛り上がったかを考えます。巨視的に見ると、500km、200km、平均5mの海水の塊ですので、東京ドーム何倍分といったいつもの単位ではとても勘定できないような水量になります。それだけの巨大な水が、この地震によって生まれ、ぶわっと広がって地球の表面全体にまんべんなく広がるまで津波は収まりません。

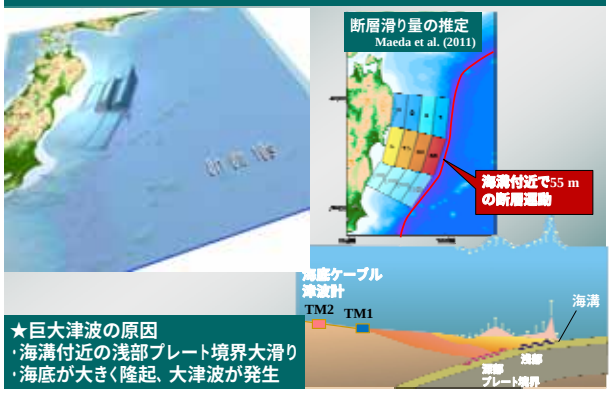
こうして震源域の直上で盛り上がり/下がりした海水は、重力を復元力として両側に広がっていきます。これは地震が起きて8分後ですが、そして20分後、もう少しすると沿岸に到達します。34分後には海岸に到達した津波が海岸にへばりつくように大きく振動している。海岸付近は津波が伝わる速度が遅いため、周囲から回り込んでいきます。仙台湾のような場所は遠浅になっているので、そこでは津波の伝わる速度が遅く、湾に吸い込まれるように津波が集まってきて、海水がどんどん供給されて、内陸へ浸水が始まります。リアス式海岸では沖からきた海水が奥へ奥へと入り込み、波高は一気に高まる。沿岸に到着した津波はなかなか帰っていかない。これが

津波の怖いところだと思います。

このように地震が起きると、すぐに気象庁は津波警報を出しますが、もちろんこのような津波シミュレーションをしている時間的猶予などありません。10 万通りともいわれるデータベースの中から、この地震のメカニズムに一番近いものを取り出して、予想津波高や予想到着時刻を予測します。あらかじめ想定していなかったような今回の地震では、当然ながら津波の高さは正しく評価できません。

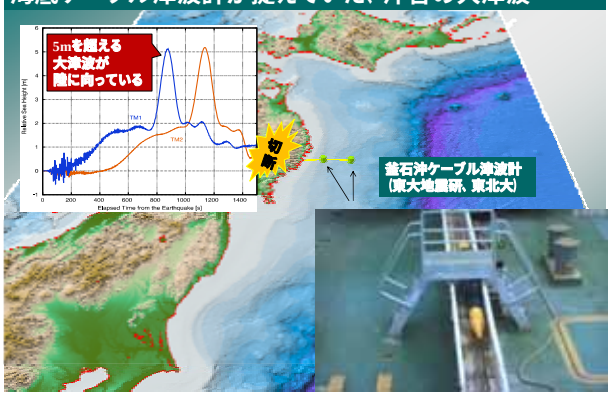
最近では沖合に海底ケーブル津波計が多数設置されるようになったため、沖合を陸に向かって進んでいる津波を、陸に到達する 10 分も 20 分も以前に検出することが可能にはなってきています。例えばこれは東大地震研と東北大学によって釜石沖の陸から 35km と 75km のところに設置されていた海底ケーブル津波計です。沖合 75km の地点にあった津波計は、地震直後に地震動や水中音波

巨大津波の原因：海溝付近の浅部プレート境界大滑り



を記録して、それから海面が徐々に上がって 2m 近く盛り上がる様子を捉えていました。沖合で 2m というと大変な津波です。その後、海面が下がるはずなのですが、さらに急激に壁のように津波が高くなって 5m にもなりました。沖合 75km のところで既に 5m の大津波になっていますので、これが沿岸に来たらどれだけの津波の高さに成長するのか。これが 3 倍、4 倍に増幅されて 15m、20m と大変なものになることは予想されます。ただ、このデータはあくまでも研究途上のものに過ぎず、津波警報として使う枠組みができていなかったために、気象庁などいろいろな機関にも参考データとして送られていましたが、今回は十分津波警報に生かされなかったのは残念です。

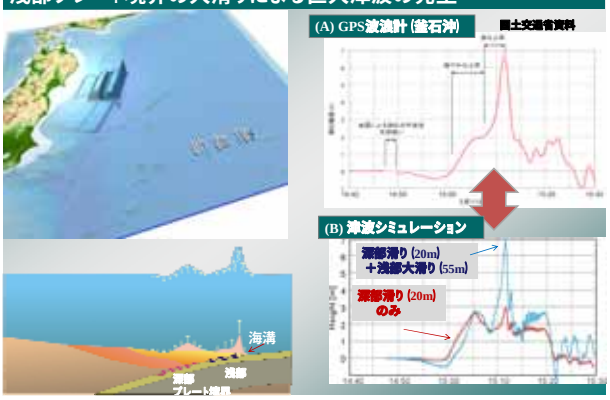
海底ケーブル津波計が捉えていた、沖合の大津波



このように見たこともない巨大な津波から、プレート境界がどこがどれだけ大きく滑ったのかを逆算してみると、とんでもないことが分かりました。いつも地震を起こす、深さ 10～50km のプレート境界は 20m、15m、5m ぐらい大きく滑った。これなら普通の M9 クラスの地震です。ところが、普段は地震が起きないと考えられていた浅いプレート境界、すなわち海溝からプレートが沈み始めてすぐのところで、プレートが固着していないと思われていた深さ 5～10km の部分が、55m も大きく滑ったことが津波計の記録の解析から分かったのです。どうもこの地震は、普通の地震ではなくて、プレート境界の浅い部分が大きく滑ったために、海底に巨大な隆起が生まれて巨大な津波を作った、特別なメカニズムを持っていたらしいのです。これは、沖合津波計の観測データがなければわからなかったかもしれません。

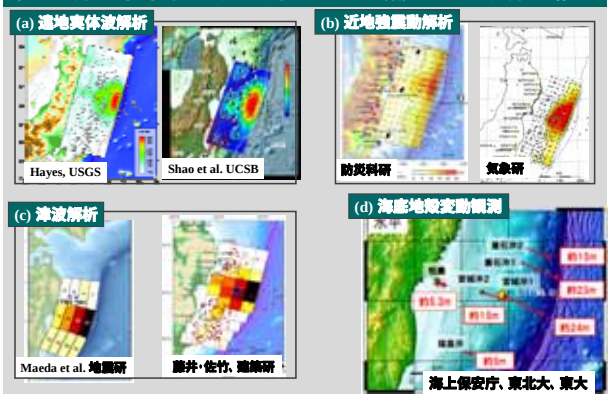
やや沿岸に近い場所にあった GPS 波浪計も同様の津波を記録していました。深部プレート境界の滑りだけを考えた津波は、この GPS 波浪計の最初の盛り上がりを説明しますが、その後、下がってしまいます。今回の浅い部分の 55m の滑りを入れて計算すると、GPS 波浪計の記録もぴったり合うのです。

浅部プレート境界の大滑りによる巨大津波の発生



こうした現象は、沖合のケーブル津波計があったからこそ分かったことです。最初の津波の盛り上がりと、2 番目の急激な海面の盛り上がりも、二つが陸に伝わってくると集まって一個になってしまい、分離できません。沖合のケーブル津波計がなければ、今回の地震の巨大津波の発生原因はわからずじまいだったかもしれません。

東北地方太平洋沖地震の震源モデル：浅部プレート境界大滑り



とはいえ、この結果には最初は半信半疑でしたが、その後、いろいろな震源モデル解析が行われて、例えば(a)は遠地実体波解析で、世界中にある地震計の波形を使って、プレート境界がどれだけ大きく滑ったかを調べたものですが、みんな同じように海溝付近の浅いところが大きく滑ったことを示しています。(b)のように、日本にある強震計を使った強震動解析の結果もそうです。

陸の観測だけでなくて、海上保安庁の海に沈めた GPS の観測点の変動を見ても、地震の前と後で 15m 動いたとか、24m 動いたとか実測データが出てきました。こうなると、海溝付近でプレートが数十m大きく動いたことは疑いようがありません。やはり今回の地震は海溝付近が巨大に大きく動いた特殊なものであったということが分かったのです。

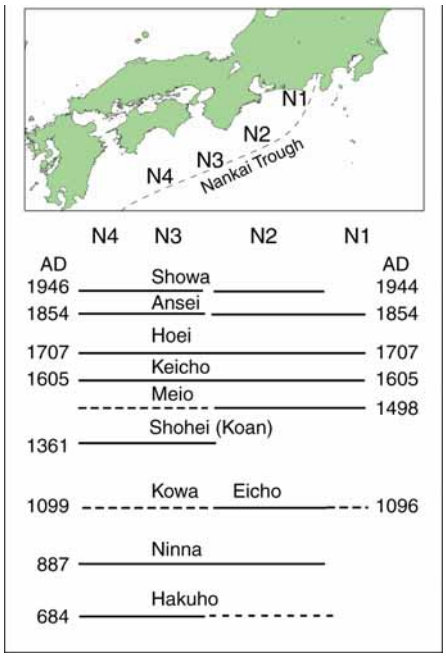
まとめますと、今回の地震でプレート境界が大きく滑ったところは、三陸はるか沖中南部、宮城県沖、福島県沖、茨城県沖の 4 カ所です。ただし、これらが大きく連動して巨大な地震になっただけではありません。もう一つは、海溝付近のプレートの沈み込み始めの浅い部分が大きく動いて、巨大な津波をつくったこと、この二つが重要です。

では、海溝付近のプレート境界では過去に何が起きていたのか、ここでは、1896 年の明治三陸地震が起きたのです。その南では延宝地震(1677 年)が起きていました。この二つは津波地震です。大きく揺れを感じないのに突然津波がやってきたという、ものすごく厄介な地震です。例えば明治三陸地震のときには2万1000人以上が亡くなったように、巨大な津波の発生に対して揺れの警戒心がなく不意打ちを食ったという二重の怖さがあるためです。

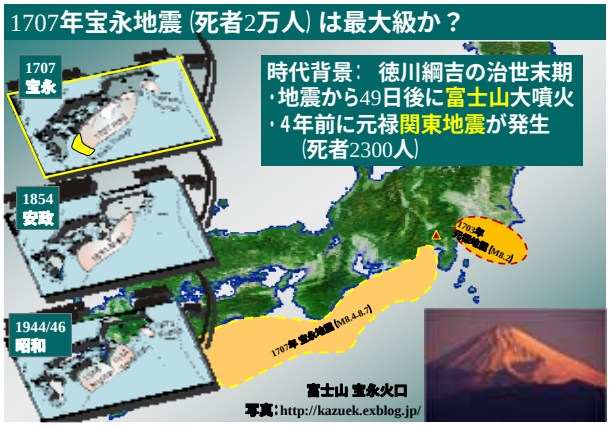
延宝地震も津波地震であり、房総半島の辺りで最大 5m～8m の津波が来たといわれています。それから考えると、ここでは明治三陸の津波地震が起きて、延宝房総沖の津波地震が起きて、その間のちょうど津波地震として空いていた空白域が、今回の地震で大きく動いたと考えることができると思います。もしかすると、ここで単独で津波地震が起きていたかもしれません。それが起きないうちに、今回の地震が宮城県沖から発生して、それが連動して大きくなったために、こちらも一緒に連動してさらに大きくなったというのが今回の地震のメカニズムではないかと思います。

ここの浅い部分のプレート境界にも過去何百年分もひずみがたまっていました。それが海嘯地震としてゆっくり数分から数十分もかけて滑れば、ゆっくり滑るので強い揺れはうまれず、大きな地殻変動だけができて津波だけが発生することになったはずです。ところが今回の地震は津波地震にならず、深部プレート境界の滑りにつられてずどんと急激に滑ってしまった。だから津波だけでなく、強い地震動も出したのです。普通はゆっくり滑って津波地震となるところが、今回はどうも高速に滑った。すなわち、海溝付近で起きる地震は二つの顔をもっているらしいことが分かります。

東海・東南海・南海地震を再評価する



東海・東南海・南海地震に視点を移します。次の東海・東南海・南海地震を想定するとき、比較的よく分かっている昭和の東南海・南海地震、安政の東海・南海地震、宝永地震 3 連動地震を考えます。その一つ前の慶長や明応地震というと、突然資料が少なくなるためです。



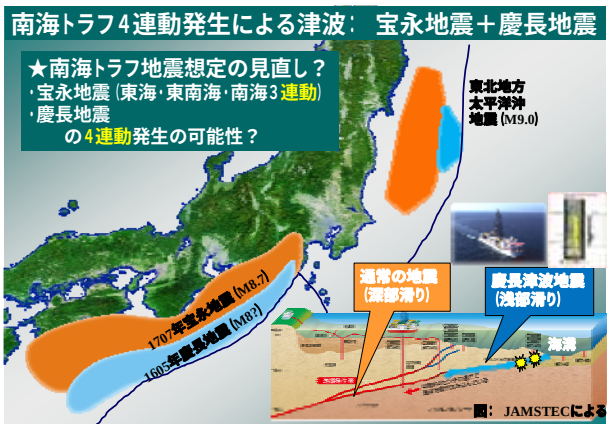
ですから、次に起きる最大級の地震をどう考えるか。昭和の地震は小さかったので論外ですが、安政の地震は大きく、特に東海の方の津波は高かった。宝永地震は 3 連動であり、最近は日向灘まで震源域が安政南海よりもず

っと大きく、日向灘の一部まで延びていたらしいことがわかってきた。宝永地震が南海トラフで起きる地震の最大級と考えればいいでしょう。それから 49 日後には富士山も噴火しているし、その前には元禄関東地震も起きているし、これ以上のものはあるのか。

確かに宝永地震は大きなものでした。高知にある蟹ヶ池の津波堆積物を調べると、ここには毎回津波が来るのではなくて、昭和の南海地震でも安政の南海地震でも津波は来ていなくて、宝永地震のみ来ています。慶長、明応、正平の地震でも津波はここにきていなくて、康安地震では来ているという、およそ 3 回に一度大きな津波が来る。つまり、3 回に一度は連動して 3 連動になって大きな津波が来たらしい。つまり、3 回に一度は東海・東南海・南海地震が連動していつもよりも大きな地震となり、そして大きな津波が来るらしいことがわかっていました。いわゆる南海地震の 100 年から 150 年の周期とは別に、500 年から 800 年に一度大きな宝永地震級の地震が起きるらしい。次に起きる地震としてそれに備えるべきではないかという考えが一般的でした。

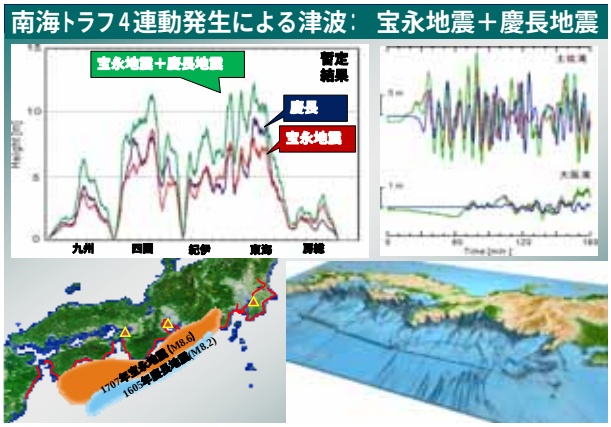
ただし、一つ納得がいかなかった現象がありました。それが、この巨大な津波堆積物です。宝永地震などの普段の津波堆積物の暑さはせいぜい 5cm なのに、50cm の堆積物が過去に見つかっていたのです。この年代を測ってみると、紀元前後ぐらい、すなわち今から 2000 年前の弥生時代です。どうも納得がいきません。宝永地震よりも大きい津波などどのようにつくるのか。誰も答えが出せなかったので「不思議ですね、超超巨大地震が 2000 年前にあったのですね」というところまで議論をしても、「では次」とそれ以上に議論を深めることができなかったのです。

でも、3 月 11 日に地震が起きてぼんやり分かってきたのは、東海・東南海・南海が連動して大きくなった宝永地震のような地震に加えて、津波地震が一緒に起きる可能性。そういうメカニズムでは、普通の地震では起きないような巨大な津波が生まれる。という現象を知った途端ひらめいたのです。つまり、東海・東南海・南海の連動だけではなくて、もう一つ津波地震、海溝付近、こちらはトラフ軸付近で起きる慶長地震のような地震をプラスで考えれば、津波の高さが高くなるのではないかとひらめいたわけです。



慶長地震が起きたのは 1605 年のことですいから、実は実体がよくわかっていません。どうも津波地震が起きて、房総半島から九州にかけて大きな津波が来たらしいということだけは言われています。それから、最近、深海掘削船「ちきゅう」が隈田灘沖のトラフ付近の浅部プレート境界を掘ったところ、海溝付近で大きな滑りが過去にあったらしいこと、ゆっくり滑りではなくて、高速に滑って温度が上がっているらしいことが議論されている。これが慶長地震によるものかどうか分かりませんが、ここで大きな地震が起きたらしいという研究結果もちょうど 1～2 年前に出ていました。

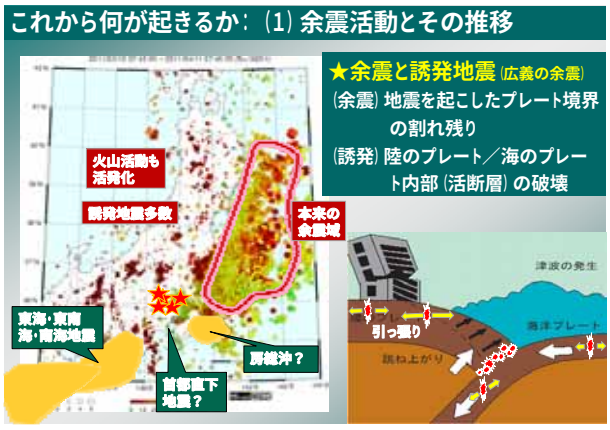
こうした最近の知見をいろいろ集めて考えると、南海トラフでも今回の東日本大震災と同じように、大きな地震が連動して巨大化するだけでなく、さらに海溝付近の津波地震を起こすところが同時に大きくくずれ動くという新しいメカニズムを南海トラフでも考えなければならないのではないかと思うようになりました。



では、こうした地震が起きたと仮定して、それにより津波高がどうなるかを計算してみました。この図は、九州から房総にかけての津波の高さの計算結果です。赤線は宝永地震が単独で起きた場合の津波の高さで、5～8m 程度です。慶長地震が単独で起きた場合の津波の計算をしてみると、同じぐらいの高さになります。ということは、二つが同時に起きればその分高くなることは自明で、津波の高さは宝永地震単独発生の場合よりも 1.5 倍ないし 2 倍程度高くなることを考えなければいけません。

もっとも、慶長地震が過去に起きたらしいことはわかっていても、その震源域がどこまで広がっていたのか、あるいは遠地地震の可能性はないのかなど、まだよく分かっていません。そのような不確かな地震を相手にして議論を進めてもよいのか不安ですが、今ここで可能性を否定すると、3 月 10 日まで貞観地震を無視していた時代に戻ってしまいます。3.11 の地震の教訓を生かすためにも、あらゆる可能性を否定することなく、科学的な検討を進める必要があります。

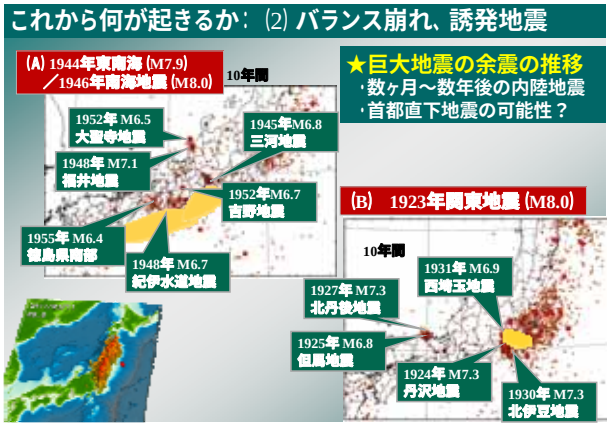
長引く地震の影響



では、この地震の後について話をしたいと思います。

東北地方太平洋沖地震の後に、多数の余震が起きて、さらに内陸では誘発地震が起きました。海のプレートが陸のプレートをぐっと今までここに一緒に引きずり込んで押し続けていたところに、地震が起きてここの蝶番が外れて、陸のプレートが東南東にどんと何十メートルも急激に滑ったのです。この赤で囲った範囲に起きているのが余震です。地震から 1 カ月で 1 万 8000 の余震がここで起きました。これは納得いく現象です。

ところが、それだけではありません。震源域から遠く



離れた内陸まで地震が起きているのは、なかなか納得がいきません。これは余震というよりは、むしろ誘発地震と呼ぶべき現象です。今までずっと押されていたプレートが、地震で逆に伸びて引っ張られてしまったために、プレート自身が壊れて地震が起きているのです。

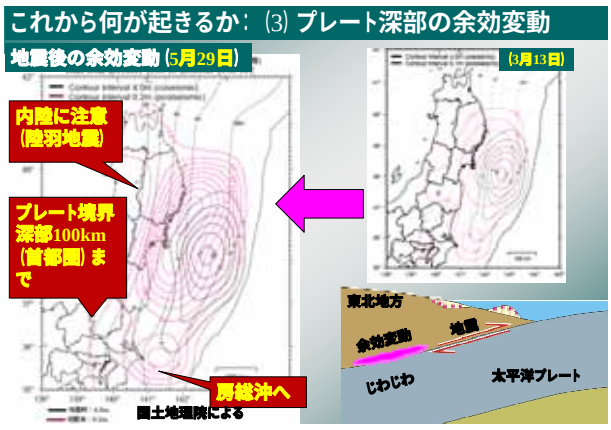
影響は、沈み込んでいる太平洋プレートにも起きています。4 月 7 日に宮城県沖に起きた地震は、余震というより誘発地震であり、沈み込むプレートが壊れるような地震でした。また、海溝付近のアウターライズと呼ばれる場所で起きた昭和三陸タイプの地震も今後起きるかもしれません。今回の地震の規模はあまりにも大きかったので、その影響はいろいろなところに出ています。今後、余震域が拡大すると、房総沖に大地震が起きるかもしれないし、誘発地震の一つが首都直下でたまたま一個起きても大変な影響が出てくることになります。

というのも、例えば過去に起きた東海・東南海地震など、M8 クラスの地震が起きた後には、数年間ないし 10 年間は日本中が騒がしい時代が続いていたのです。今回の地震が起きてからはまだ 4 カ月です。これで収まるとはとても思えません。東南海地震が起きた 1 年後で南海地震が起きる。1 年前には三河地震が名古屋の下で起きていますし、6 年後には吉野地震が起きています。さらに 3 年後には福井地震が起きたり、徳島南部で地震が起きたように、東海・東南海の震源域の周辺の内陸部では 10 年程度に大地震が頻発しています。

東京では 1923 年に関東大震災が起きた後も、半年後に丹沢地震、すなわち関東大震災の最大の余震が起きていますし、北伊豆も地震の数年後に起きています。こう考えると、今回の地震がこれで終わるとは思わない方がよいでしょう。M8 クラスの地震ですら影響は数年間続きましたが、M9 クラスの地震では、より大きな範囲、すなわち関東全体も含めて誘発地震に注意すべきではないかと思います。

ただ、これらの誘発地震は巨大地震が起きた直後の数ヶ月には起きていません。もっと後に何年かたってから起きていることも注意しなければいけません。だから現地点で活動が静かなのは当然のことであり、もっと静かになったころに大地震が起き始めるのではないかと心配します。

というのも、今回の地震が起きてプレート境界のちょうつがいが外れて大きく伸びましたが、まだプレート境界の深部では、余効変動としてじわじわ動き始める現象が起き始めているのです。



地震でプレート境界がずれ動いた場所の下は温度が400 度以上もあって、岩石が柔らかくなっており粘弾性的に時間をかけてじわじわ動く性質があるので、影響が現れるまでに数年の時間がかかります。国土地理院のGPS 観測データを見ると、この黒いコンターが地震時の滑りの場所であるのに対して、その範囲で地震が起きた後に余震変動がじわじわ起きています。これは 5 月 29 日の余震変動の分布です。内陸の方に広がっており、南は房総沖の方まで広がっています。もう少しで東京まで来ようとしています。今後注意深く監視を続け、どこまで余効変動が広がっていくのか、首都直下の方まで来るのかどうかを見極めないといけないと思います。以前はこうしたGPS 監視網がなく、余震変動を捉えることは難しかったのですが、今では毎日の変化を見ることができるようになり、今後の大地への地震の推移と注意が喚起できると思います。

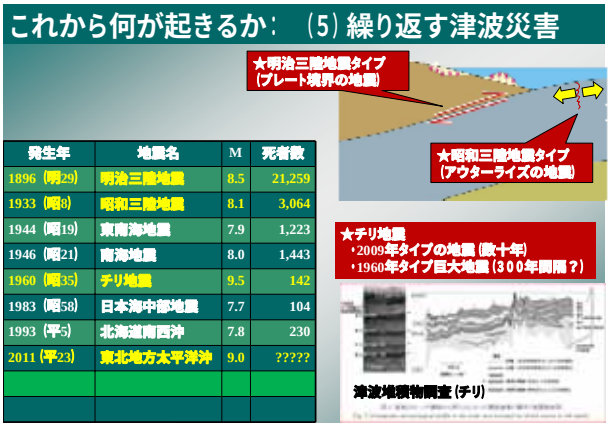
それから、この余効変動がどんどん進行していくと、日本中でいろいろなことが起きます。余震変動が何年もかけて日本列島を大きく変動させます。

最近の議論の一つを紹介します。東北地方は、地形学的に見ると、過去 12 年間ずっと隆起を続けていたと考えられています。その結果、リアス式海岸ができ海岸段丘ができています。東北地方はどんどん隆起し続けているというのが地形学的な解釈です。

でも、測地学による解釈は逆なのです。過去 50 年間の水準測量や GPS で変動を観測すると、東北はどんどん下がる一方で、年間 1cm というすざましい速度で下がる一方だったのです。では、一体いつになったら隆起するのだろうかというのが大きな議論でした。恐らく将来巨大地震が起きて、そのときに東北は一気に隆起に転じるのではないかともいわれていました。確かに巨大地震がおきました。ところが、今回の地震が起きて隆起したかというと、先にお話をしたように、東北地方の太平洋沿岸はさらに沈降してしまったのです。

この矛盾はいつになったら解消するのか。一つの解釈としては、今回のプレート境界のやや深部から浅部が滑っただけであり、いよいよこれから深い部分で余効変動が大きく起きて、東北地方が隆起に転じるのではないかという考えがあります。地震研の加藤照之先生や、理学系研究科の池田先生らのグループが検討されています。こうしたことが将来起きると、日本列島のバランスが崩れ始めますので、いろいろなところで誘発地震が起き始めるのではないかという心配があります。太平洋沿岸が一気に数 m 隆起すれば、現行の海岸線が高くなり津波の問題が解決するのではないかという期待もあります。

これから何が起きるか。過去を振り返ると、明治三陸地震のプレート境界型地震の後には昭和三陸地震が数十年の感覚で引き続いて起きました。昭和三陸地震はアウターライズの地震と呼ばれ、プレートの沈み込む直前にいったん盛り上がっているために、上部が引っ張られて折れる正断層型の地震でした。これが明治三陸の後、30～40 年後に起きたことを考えると、次に起きる地震として警戒する必要があります。それは、今日明日ではないかもしれませんが、10～20 年のスパンでの警戒が必要です。



発生年	地震名	M	死者数
1896（明29）	明治三陸地震	8.5	21,259
1933（昭8）	昭和三陸地震	8.1	3,064
1944（昭19）	東南海地震	7.9	1,223
1946（昭21）	南海地震	8.0	1,443
1960（昭35）	チリ地震	9.5	142
1983（昭58）	日本海中部地震	7.7	104
1993（平5）	北海道南西沖	7.8	230
2011（平23）	東北地方太平洋沖	9.0	?????

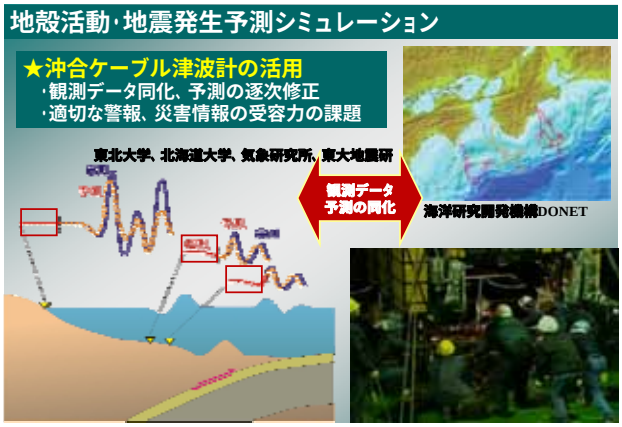
そしてまた、チリ地震の心配も必要です。チリ地震の津波堆積物から発生間隔を探ると、去年（2009 年）起きたような m8.8 級のチリ地震または数十年以内に起きます。M9.5 の 1960 年チリ地震タイプの超巨大地震は約 300 年の間隔で起きている可能性も津波堆積物調査結果が示しています。目下、防潮堤の応急対応や復旧が進められていますが、あまり時間をかけてはいられません。すぐにも津波がくることを考えなければいけないのです。

地震研究の挑戦

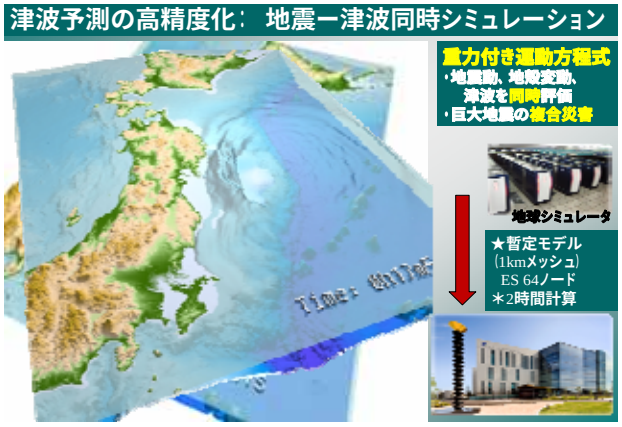
最後に最新の地震津波研究の話を紹介します。

先にもお話ししたように、事前に地震と津波の規模を予測することはできなくても、海底ケーブル津波計があれば、沖合でこれだけの津波が来ているので、数分後の陸の津波がこうなるというのを予測する、つまり観測データに基づく予測は可能ではないか。こうしたリアル津波予測を今後考えなければいけないのではないかと思います。

南海トラフにも目下海底ケーブル津波計の施設が進められています。日本海溝にも同様に海底ケーブル津波計を敷設をする計画が進められているという話を聞きました。それができれば、沖合での津波監視を進め、予測をして、これから陸にどれだけの津波が行くのか、町ではどこまで浸水するのかを予測する。観測データをリアルタイムに取り入れ、刻々と入電する最新のデータを用いて予測を修正しながら津波の予測を高精度化していく新しい予測が今後可能になるのではないかと思います。



ただ、津波警報の予測精度が上がり、1 分ごとに津波警報が変わっても人の情報受容力には限界がありますので、リアルタイム津波情報をどのように伝えていくか、むしろこちらが今後の重要な研究課題になるのではないかと思います。



これは私たちが今進めている研究ですが、地震動のシミュレーション、津波のシミュレーション、地殻変動のシミュレーションをこれまでのようにばらばらに進めるのではなくて、一気に行う。ここでは重力項を持つ運動方程式をスパコンで解くことによって、地震、地殻変動、津波を同時に評価する研究を進めています。この動画で、まず地面や海面がばたばた振動しているのは地震お揺れによるのです。それから地殻変動が徐々に現れ宮城県から関東にかけて海岸線が下がっています。一方、海では海底が押し上げられて海面が上がり、やがて津波として沿岸に向かう。地震動、地殻変動、津波を地球シミュレーターの上で動いたので、コンピュータの上で評価することに成功し、目下、神戸の京コンピュータに移植しているところです。このように、新しい津波情報に向けた観測とシミュレーション技術を融合させ、それらをリアルタイムで進める研究を進めているところです。

（まとめ　日本災害情報学会事務局）