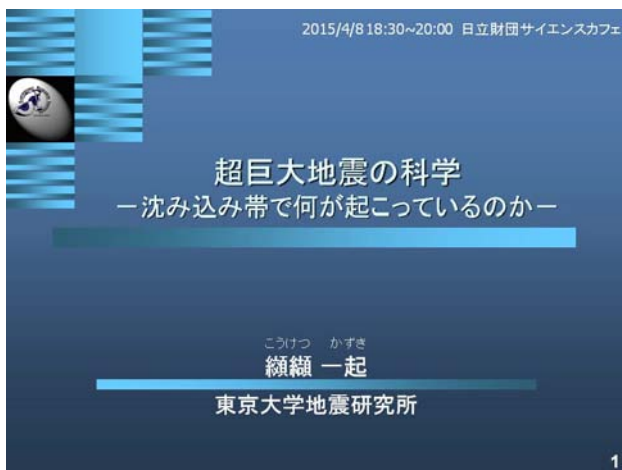


第26回 環境サイエンスカフェ

テーマ 超巨大地震の科学—沈み込み帯で何が起きているのか—
 講師 瀨瀬 一起 (こうけつ かずき) さん (東京大学地震研究所 教授)
 日時 2015年4月8日 (水) 18:30~20:00
 会場 サロン・ド・富山房 Folio
 参加者 46名



ご紹介いただきました瀨瀬と申します。きょうは、深刻な話をさせていただきたいと思います。先月、各地で3.11関連の行事がありました。われわれが想定外という怒の方が多いですけれども、3.11の地震は、本当に科学の上で想定外だったということを、きょう、主にお話ししたいと思います。なるべくサイエンス中心のお話をしてくださいということだったので、スライドの42ぐらいまでは、その話をさせていただきます。そのあとは、来て得をしたと思っていただきたいと思います。少し、一般的なお話も含めてあります。マウスを操作するので、座らせていただきます。

地震の科学を地震学と呼びます (図2)。あまり耳慣れないと思いますが、英語では Seismology と言います。

地震の科学を地震学と呼びます

- 著名な教科書: 宇津徳治著「地震学」第3版(2001年)の前文
 - 「地震学 (seismology) は地震とそれに関連する現象を研究する学問である。」
 - 「大別して、地震の発生に関連する問題と、地震波とそれによる地球内部構造探求の問題を扱っている。」
- 同じく宇津による大著「地震活動総説」(1999年)
 - 「巨大地震 (great earthquake) は大体M8弱より大きい地震を指すようである」(M = マグニチュードはのちほど説明します)
 - 東日本大震災の地震はM9.0で巨大地震の範疇を大きく超えるので、超巨大地震と呼ばれるようになっている。

地震学の分野の一番有名な日本語の教科書では、私どもの研究所の名誉教授で、もう亡くなられましたが、宇津徳治先生という方が書かれた『地震学』というそのものずばりの教科書があります。その前文には、こう書かれています。「地震学は、地震とそれに関連する現象を研究する学問である」と。そして大別して、地震の発生に関連する問題、つまり地震そのものを研究する分野と、地震から出てくる地震波で地球の中がどうなっているかを研究する、大きく分けるとその2つの分野があります。

きょうのお話は、主に地震そのものの科学、サイエンスについてご説明したいと思います。もうひとつ非常に分厚い百科事典みたいな『地震活動総説』という本がありますが、それには、こう書かれています。巨大地震、英語では Great Earthquake と言いますが、「大体、マグニチュード8弱よりも大きい地震を指すようである」。マグニチュードについては、後ほどご説明しますが、それだけ偉い先生が「ようである」と書いているということは、これは学術用語ではなくて、多分、メディアの用語で、厳密な定義はありません。案内に書かせていただいたように、関東大震災を起こした関東地震よりも大きい規模のものを、大体、巨大地震と呼ぶという感じです。

関東大震災はマグニチュード7.9ですので、マグニチュード8弱というのは、マグニチュード7.9という意味だと思いますけれども、それよりも大きい地震のことを巨大地震と言います。

東日本大震災の地震の、地震そのものの正式名称は、東北地方太平洋沖地震と言います。ですから、東日本大震災というのは、地震の名前ではないのです。地震によって起きた災害の名前です。どちらも政府機関が正式に名前を付けまして、地震の名前は気象庁が付けます。それから、震災の名前は、内閣が付けます。実際、持ち回りの閣議で閣議決定された名前です。

東日本大震災の地震はマグニチュード9.0ですから、巨大地震の範ちゅうを大きく越えますので超巨大地震、これも非常にあいまいな言葉ですけども、われわれ研究者も超巨大地震と呼ぶことが多くなっています。

◇◆日本はなぜ地震国なのか？



まず、なぜ日本は地震国かというところからお話しさせていただきたいと思います。お手元の資料は答えが出てしまっていますので、見ないようにしてください(図3)。線上にポツポツ点が打ってあるのが並んでいるのを見ていただけたと思いますが、これは何でしょう。これは、ここに書いてありますように、30年間に起こったマグニチュード5以上の地震を一つ一つ点にして、世界地図の上に置いたものです。点の色は地震が起こった深さを表していて、暖かい赤い色ほど浅い地震で、青、緑みたいな冷たい色は深い地震を表しています。

そうすると、先ほど見ていただいた線上の配列というのは何を意味するかというと、結局、地震が起こる場所というのは、そういう線上のあるものの境目であるということが、逆にこの地震の分布から分かってきました。

地球の表面というのは、プレートと呼ばれる岩盤の幾つかのピース、ジグソーパズルみたいなピースに分かれて、表面が覆われています。その境目がこの青い線で、まさにその境目で地震が起こると、基本的な原理はそういうことになっています。これを、われわれの分野ではプレートテクトニクスと言います。今申し上げた地球上の巨大な岩盤を、プレートと言います。

英語というのは、いろいろなことをなるべく単純に言います。こういう Window システムを Windows と言うくらいですので、プレートも同じで、単に板という名前と呼んでいます。それに基づく構造論ということで、Plate tectonics といっています。

それでは、なぜ、プレートの境界で地震が起こるかということですが、実は、ご存じのとおり、プレートは動いています。プレートは二十数枚ありますが、全部が同じ方向に動いていれば何事も起こらないわけです。しかし、一つ一つが全く勝手な方向に動いていると、プレートとプレートの間で衝突が起こって、その衝突のエネルギーが地震の発生の源になるという原理です。

日本付近をクローズアップすると、こうなります(図4)。先ほどと同じ描き方をすると、プレートの境界で地震が起こるわけですから、プレートの境界がたくさんあるほど、地震はたくさん起こります。日本付近というのはこれだけたくさんの

日本の周辺は...



プレートが集まっていて、その境界が集まっているということです。海側には太平洋プレートとフィリピン海プレートがあって、陸側は、ユーラシアプレートと、オホーツクプレートあるいは、もっと大きく北米プレートと呼ばれることもありますが、その4つが関係しています。4つがそれぞれ1対1で境目がこれだけたくさんあるわけですから、その境目で地震が起これば、日本付近は必然的に地震国になるという原理です。

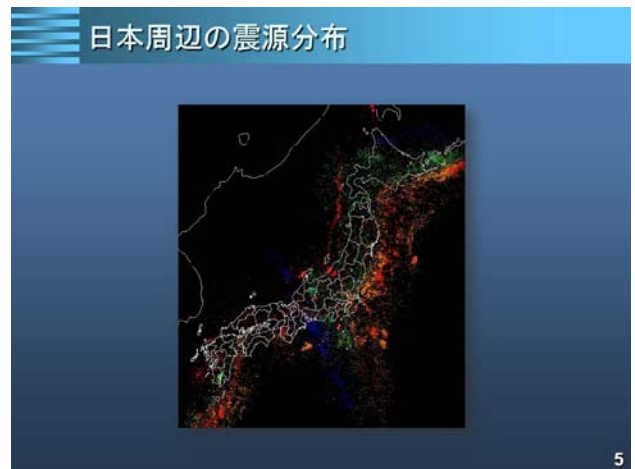
太平洋プレートは、主に西向きに動いています。それから、フィリピン海プレートというのは、大体、北向きに動いています。相対的に考えると、実は、絶対運動としてはユーラシアプレートやオホーツクプレートも動いているのですが、並行移動すれば何の影響もありません。陸側のプレートが静止したものと考えると、海側のプレートはこういうふうに動いているという原理です。太平洋プレートというのは年間8センチぐらい動いていると言われていて、8センチというどどのくらいかということ、大体、人間の爪が伸びる早さに相当します。

フィリピン海プレートというのは、それに比べるとやや遅くて、年間5センチぐらい移動しています。世界の地震の約10パーセントは、日本付近で起きています。地球の表面積のうち日本の国土が占める面積というのは1パーセントぐらいですから、単純な計算で、世界の地震発生率の10倍ぐらい、日本では地震が起きています。数え方にもよりますが、日本で1日300個ぐらい地震が起きていて、そうすると、5分に1回ぐらい地震が起きています。人間がほとんど感じないような地震も含めると、そのくらい起きています。

先ほどの世界地図のプロットを、日本付近をク

ローズアップしてすごく小さい地震も含めて、あらためてプロットし直したものが、この地図です(図5)。先ほどと同じように、赤い色ほど浅い地震で、青っぽい色ほど深い地震を表しています。そうしてみると、やや判然としませんが、目を細めて見ていただくと、太平洋のほうから日本列島を通過して、日本海に向かって、地震はだんだん深い位置で起こるようになってきているというのが見ていただけると思います。こういう非常に浅いところで起こる地震というのは日本列島のどこでも起こるので、それが気づらくしていますが、こういう赤い浅い地震を除くと、全体的には東側から西に向かってこういうふうに、だんだん地震の起こる場所が深くなっています。

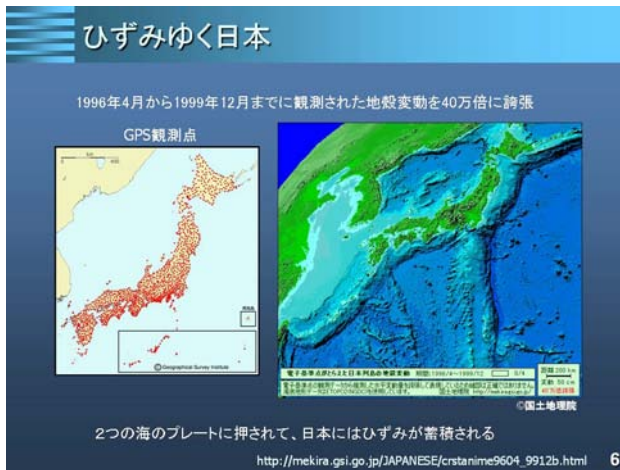
日本周辺の震源分布



それは、プレートの境目が西に向かってだんだん深くなっているということを意味しています。結局どういうことかということ、年間8センチ動いている太平洋プレートが陸のプレートの下側に沈み込んでいて、沈み込むことによって、同時に日本列島を押している状況になります。現在、国土地理院という役所が、日本全国にこれだけ高性能のGPS観測点を配置して24時間計測しています。それによると日本列島は、これは40万倍誇張してはいますが、太平洋プレートやフィリピン海プレートがこういうふうに押し込んでいくことによって押し縮められているということです。ですので、プレート境界だけではなくて、日本列島の内部にもひずみが蓄積されていることになります(図6)。

それを漫画的に描くと、こういう感じになります。こちらは、太平洋のど真ん中とか大西洋のど真ん中の話なので除外して見てください(図7)。大体、日本列島はこら辺にあって、太平洋プレートが沈み込む場所は日本海溝ですが、フィリピ

地震を、地殻内地震と呼びます。

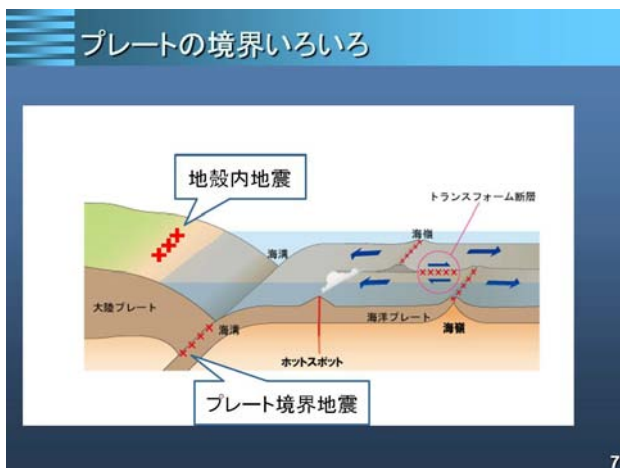


2種類の地震の比較

	プレート境界地震	地殻内地震
発生場所	プレート境界	活断層
発生原理	プレート境界の固着が一気に削られる現象	プレートの変形によるひずみを開放する現象
周期	数10年～数100年	数1000年～数10,000年
最大規模	M8～M9	M7～M8
起こりうる被害	震源が浅い場合、津波が発生	大都市直下で起きた場合、直撃
例:	<ul style="list-style-type: none"> ・2003年 十勝沖地震 ・2004年 スマトラ沖地震 ・1944年 東南海地震 ・志布東海地震 	<ul style="list-style-type: none"> ・2008年5月 四川地震 ・2008年6月 岩手・宮城内陸地震 ・1995年 阪神・淡路大震災 ・2004年新潟県中越地震

超巨大地震はプレート境界地震

8



海溝が沈み込む場所は、南海トラフという場所です。そういう海溝的なところから、太平洋プレートやフィリピン海プレートは陸のプレートの下に沈み込んでいます。その境目で衝突したりすれ違ったり、あるいはギューギュー押し込められたりしてひずみがたまってプレート境界の巨大地震につながりますが、それだけではなくて、この前のスライドで見ていただいたように、陸の内部にもひずみを蓄積させて、内陸の地震を起こします。

活断層という言葉が聞かれたことがあると思いますが、内陸部分の陸地の弱い面を活断層といいます。弱いので、そこに必然的にひずみがたまっていて、そのひずみが強度の限界に達すると内陸の地震が起きるとというのが、内陸の地震の起き方です。そういう活断層に伴う地震というのは、今申し上げた2番目のメカニズムになります。ですので、日本付近の地震を大別すると、プレート境界の地震と、地殻内の地震の2つがあるわけです(図8)。地殻というのは陸地の一番浅い、といっても20キロから30キロぐらいありますが、その部分を地殻と呼びます。その地殻の中で起こる

それぞれ特徴があります。プレート境界地震はもちろんプレート境界で起きますが、地殻内地震は、先ほどもご説明したように、活断層のところで起きます。発生原理では、プレート境界地震はプレート境界の固着が一気にはがれる現象です。これは、後で詳しく説明します。それから、地殻内地震のほうは、プレートの変形によるひずみが解放される現象です。

プレート境界地震のほうが、今の説明でご理解いただけると思いますが、プレートの運動の直接的な影響で起こる地震ですので、こちらのほうが頻繁に起こります。大体、数十年から数百年に一度くらい起きますが、それに比べると地殻内地震は、プレート境界のひずみが陸に伝わって、それがまた、ある限界に達すると地震が起こるという間接的な影響ですので、もう少し頻度は、ワンオーダーかツーオーダーぐらいまれにしか起きず、数千年から数万年に1回です。ひとつの活断層に注目すると、その程度しか起きません。ただし、日本列島には活断層がいっぱいあるので、結局、大体2、3年に1回ぐらい大きな地殻内地震は起きています。

規模もちろん直接的な影響のプレート境界地震のほうが大きくなってマグニチュード8から9ということになりますが、地殻内地震のほうは、マグニチュード7から8程度。最大の地殻内地震は、明治年間に起きた濃尾地震です。それは、マグニチュード8.0とされています。

起きる場所と被害の特徴としては、プレート境界地震の場合は海で起きますから津波が発生します。地殻内地震の場合は、規模はそれほど大きくないですが、陸地で起きますから、当然、都市直

下で起こるといいう可能性もありますので、都市直下で起きた場合、阪神大震災のように大変な被害になるという特徴があります。過去の例では、このような例があります（図8）。

規模のところで既にお分かりいただいたと思いますが、超巨大地震は、プレート境界地震です。世界でマグニチュード9以上の地震というのは、それほどたくさん起こっているわけではありません。大体、近代的な観測が第二次世界大戦以降ですが、その間で起こった超巨大地震は、これだけです（図9）。世界中で見ても、5つしかありません。その中でもマグニチュードが最大のものは、1960年のチリ地震です。どれほど巨大だったかという、その津波が三陸まで到達して、かなりの被害を出しました。



その次が、アラスカの地震です。一番古いのはカムチャッカの地震です。それからしばらくずっとなくて、2004年にスマトラ島沖地震が起きて、今回の3.11の地震ということになります。

実は、地震の科学者としての私の反省は、2004年のこの地震が起きたとき、私に限らないと思いますが、3.11がもしかしたらあるという心配をしなればいけなかったということです。それまでは全く起きていませんでしたから、こういう南米とか北米、それからアラスカ、カムチャッカみたいな所と日本付近は別なものであるというふうを考えられていました。これについては、後で詳しくご説明します。

ところが、2004年以前まではスマトラ、インドネシアの沈み込み帯に対しては日本と同じように考えられていたのに、これが起きたわけです。ですから、後から考えれば残念ですが、それをもって、日本ももしかしたらというふうを考えなければ

ばいけなかったということです。

◆◆地震と断層の深い関係

既に活断層という言葉が出てきてしまっていますが、地震のおおもととして、地震と断層の深い関係をご説明します。阪神淡路大震災のとき、淡路島側にこういう断層が現れました（図10）。それを空中写真で見るとこういうふうになります。線上に、上下方向にずれているのが見ただけだと思います。よく見ていただくと横方向に、これはもともと一本につながったあぜ道ですが、これだけずれています。メートル単位でずれている現象が起きます。こういうのを断層と言います。

同じく、先ほど申し上げた最大の地殻内地震の濃尾地震のときも、こういう段差と、これはだいぶ遠方から撮っているので横のずれはいまひとつはっきりしませんけれども、やっぱり、これと同じようです。規模は、こっちのほうがずっと大きいです。2、3メートルはあるような感じですが、そういうものが出現しました。

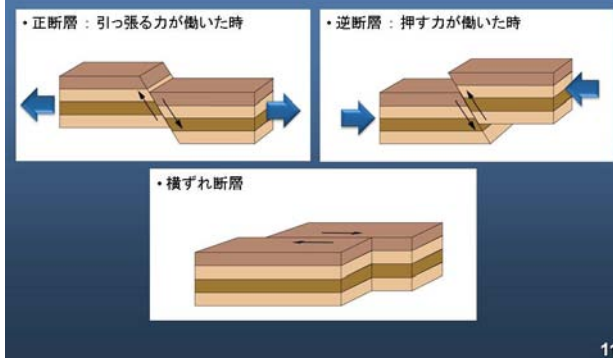


ちなみに、これは最近撮った写真ですが、実は、こういう崖地形というのはこれなのです。こういうのは、例えば山のほうに行ったりするとよく見掛けだと思いますが、そういう地形というのは全て、原因があります。そもそも日本列島というのは、要するに、地震で作られたようなものです。プレートの運動はもちろんおおもとですけれども、それによってどんどん隆起して高い山岳地形ができて、そこで地震が起きますと、盆地ができたり平地ができたりというシステムです。そういう国土の成り立ちになっている。ですから平地は基本的に地震の危険性が十分にあるということを最後に

詳しく申し上げますが、そういうことを念頭に置いて生活していただくというのが非常に重要です。

典型的な例でいくと、中国自動車道という高速道路がありますが、あれは結構山の中を走っています。それなりに平地を選んで走っているわけですが、結果として中国自動車道はほとんどが非常によく知られた活断層に沿って走っています。

「地震」= 断層での急激なすべり運動

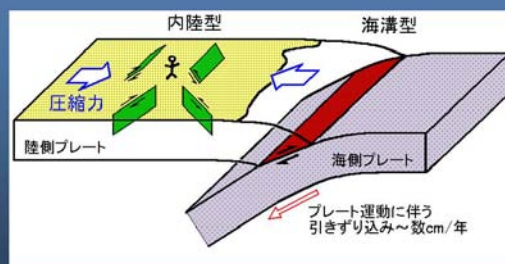


11

断層にもいろいろな種類があります(図11)。日本で多いのはこの逆断層のタイプです。それはどうしてかということ、最初に説明したように、太平洋プレートがグューグュー押していて、それに対して陸のプレートは抵抗するような、基本的にはそういう力学関係にあります。それに基づけば、こういう弱い面が断層面ですが、そういう面があると、必然的にこういう動きをします。これを逆断層と呼びます。どうして逆断層ということかという、こちら側の岩盤が斜めにあれば、どうしても上側に進むわけです。上側に行くのは重力に反していますから、逆断層と呼びます。逆に引っ張る力が働けば、これも必然的に下向きに動くので、これは重力と同じ方向に動くので、正断層と呼ばれます。

それから、縦方向に割れ目が入っているだけではなくて、こういうふうに横方向に割れ目がある場合もあって、両側にずれ動くような力が働くと、横ずれ断層というのが起きます。先ほども見ていただいたように、ほとんどの断層は、これとこれの組み合わせですね。ですから、こういうふうに片方の岩盤が上への上がる運動と、横にずれ動くものと、その組み合わせになっています。ですが、気象庁の発表でも最近時々ありますけれども、どっちがメインかということで、「逆断層タイプの地震でした」とか、「横ずれ断層タイプの地震

プレート境界地震なら...

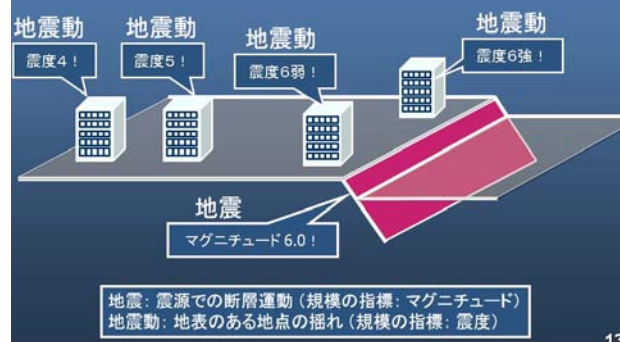


12

でした」とか言われます。

内陸の地殻内地震はそれでよく分かったけれどプレート境界地震はどうかというと、要するに、プレート境界が巨大な断層になっているということです(図12)。基本原理は同じです。地震のおおもとは断層ですが、プレート境界地震は、プレート境界そのものの一部、非常に巨大な部分が地震を起こします。だから規模も巨大になって巨大地震や超巨大地震になるということになります。

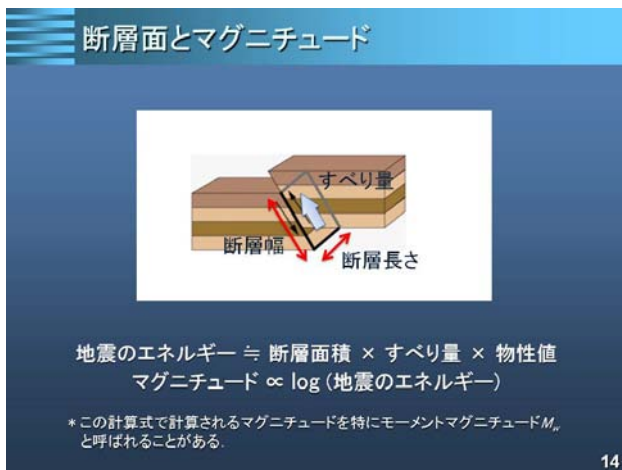
地震と地震動, マグニチュードと震度



13

ご希望があったので、このスライドを入れました(図13)。地震という言葉には2つの意味があります。われわれ科学者は、地震というと今ご説明した地震のおおもとのことを地震と呼びます。ところが、文字どおりこれを読めば地面が震えるということですから、地震のおおもとから出てきた揺れのことでも地震と呼ぶ場合があります。そうすると非常に混乱するので、ここに書いていますが、われわれは、揺れるほうは地震動と言います。ですので、この後詳しくご説明しますが、マグニチュードというのは地震のおおもとのほうの規模を表すもので、震度というのは地震動のほうの揺れの大きさを示す指標です。

ですから、各地が揺れるわけですから、震度というのは、ひとつの地震でたくさんありますけれども、マグニチュードは、ひとつの地震ならひとつしかないということです。結構、混同されます。うわさ話みたいなことで、マグニチュード6の地震がどこか遠い所で起こるらしいといううわさが伝わったときに、それが自分の所で震度6の揺れ、つまり地震動がそろそろ来るそうだという誤解が、割合、頻繁に起こります。最近でも、ネットのうわさ情報のケースがありますけれども、地震動のほうは、震源に近ければ小さい地震でも大きな地震動になりますけれども、震源がものすごく大きくても、距離がすごく離れていれば、全然、大したことがないというのがご理解いただけると思います。



マグニチュードの詳しい話をします(図14)。地震のエネルギーというのは、結局、地震が起こす断層の面積掛ける岩盤が滑る量掛ける物性値で表されます。この物性値とは断層の面の滑りにくさのようなものです。滑りにくいと、それを滑らせるためにはものすごく力が要りますから、結果的には起こる地震の規模も大きくなります。ということで、基本的には、地震のエネルギーというのはこの掛け算で表されていて、その対数、 \log をとったものがマグニチュードです。

対数って何と思われる方も多いと思いますが、高校で、皆さん、絶対に習っています。例えば、1,000というのは10の3乗です。ですから、1,000の対数というのは3です。100の対数は、10の2乗だから、2です。ですから2と3は、実は10倍違うわけです。マグニチュードも似たようなことで、係数が掛かるので10倍ではないのですが、マグニチュードが1違うと、エネルギーが30倍違い

ます。マグニチュード8とマグニチュード9の地震は、それほど違います。ですから、巨大地震と超巨大地震というのは、質的にまったく違うものです。

後で出てきますが、物理学的に厳密に計算したマグニチュードのことを、モーメントマグニチュードと呼びます。それ以外にもマグニチュードの測り方はいろいろあって、地震の揺れからおもとの地震のマグニチュードを推定するという方法のほうが、実は、数十年前までは主流でした。そういう場合もありますので、特にこういうふうに厳密に定義されたマグニチュードを言うときには、モーメントマグニチュードと呼ぶことがあります。

これは、最近起こった地殻内地震では一番大きい2008年の岩手・宮城内陸地震です(図15)。



地図上にこの地震の震源域、要するに、先ほど説明した断層の面積です、滑った断層の面積をプロットすると、こういうふうになります。岩手県から宮城県なので、土地勘がないと思いますので首都圏で言うと、こういうことになります。この地震、たかだかマグニチュード7ですけども、断層面積は千葉県の松戸から神奈川県横浜までカバーするくらい大きさがあります。

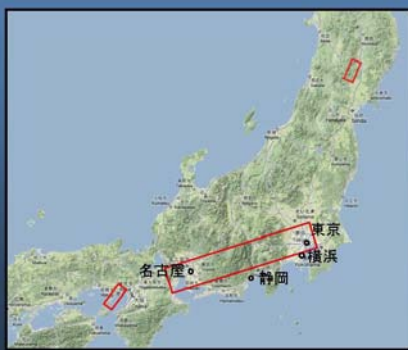
最近では、マグニチュード8というのでは、今の地震と同じ年に四川地震というのが起きました。四川地震は、この大きさです(図16)。これが、今ご説明した岩手・宮城内陸地震で、これが阪神大震災の地震ですが、マグニチュードが1違うと、これだけ面積の違いが出ます。日本に持ってくると、四川地震の断層面積がこのくらいになります(図17)。

断層の大きさ (2008年四川地震M8)



16

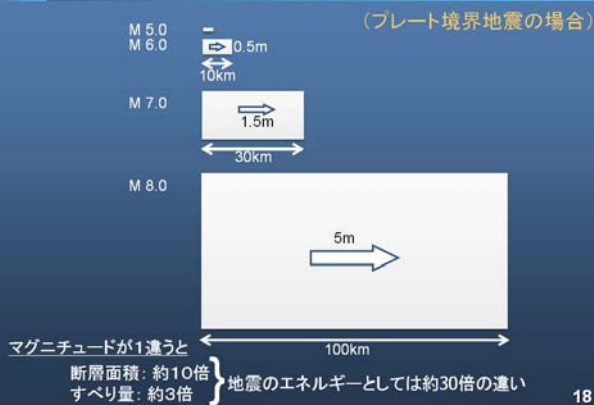
四川地震を日本に持ってくると



17

こういうふうに、地震の規模が大きくなると断層面積も大きくなります。実は、岩盤の滑り量も大きくなります。こういうのを、われわれの言葉ではスケーリング則と言います。マグニチュードに比例して、いろいろな計測量が大きくなっていくことを表しています。

マグニチュードが1違うと



18

この図 (図 18) はプレート境界地震のスケーリング則を示しています。先ほどの四川地震は地殻内地震だったので特別で、長さが非常に長くなってしまいますが、プレート境界地震だと、このくらいになります。マグニチュード8クラスだと、

大体、長さ 100 キロぐらいで滑り量が 5 メートルぐらいです。マグニチュード7ですと、長さ 30 キロぐらいで滑り量が 1.5 メートルほど、マグニチュード6だと、10 キロぐらいで 50 センチぐらいという感じです。マグニチュードが1違うと、断層面積が、大体、10 倍になります。滑る量は、3 倍くらいになります。両者の掛け算が地震のエネルギーですから、単純な計算で、地震のエネルギーとしては 30 倍の違いになるという先ほどご説明した数字になります。

東日本大震災の地震 (M9) との比較

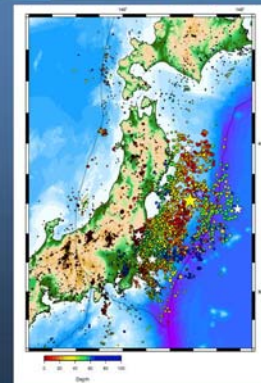


19

どうして四川地震というのはこれよりもずっと長くなったかということ、地殻内地震というのは、幅に制限があります。地殻の厚さというのは最大でも 30 キロぐらいしかないので、断層面積を稼ぐためには、長さをどんどん長くしなければならないということで、内陸の巨大地震は、非常に長い断層になります。ですから、こういうことです。こちらのほうがマグニチュードとしては大きいのですが、東日本大震災の地震というのは、こういう断層でした (図 19)。

◆◆東日本大震災の超巨大地震

東北地方太平洋沖地震と東日本大震災の特徴

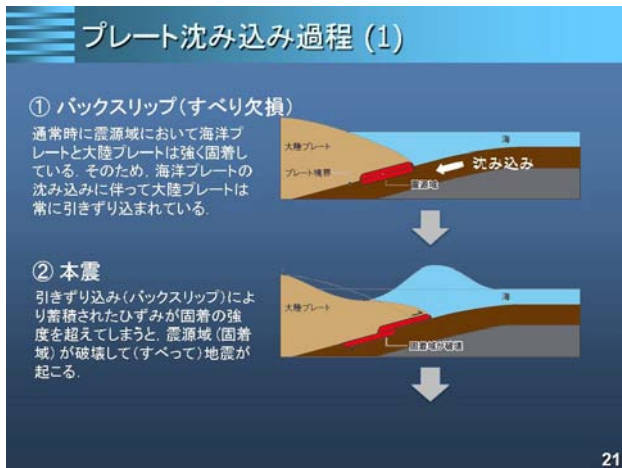


1. 超巨大なプレート境界地震(マグニチュード9.0)
2. 津波の被害が甚大だった
3. 津波に比べ揺れの被害は限定的だった
4. 本震後の活発な地震活動(大きな余震と大きな誘発地震)
5. 事前に発生が予測されなかった(地震学上の「想定外」)

20

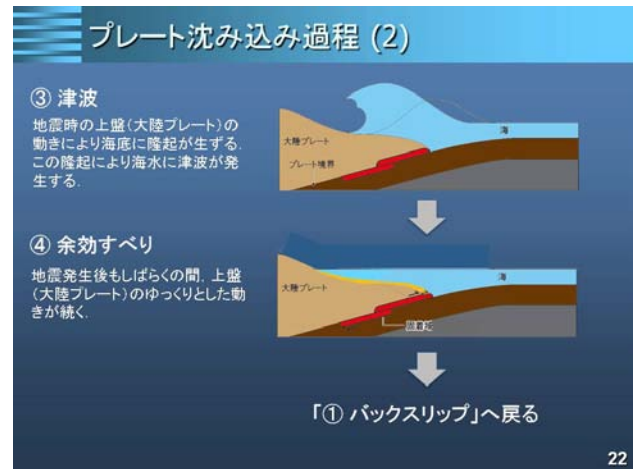
それでは、具体的に東日本大震災の超巨大地震のことをご説明いたします(図20)。われわれが考える大きな特徴としては、こういうものがあります。1. は既にご説明しましたが、次に津波の被害が甚大だったというのがあります。それに比べると、揺れによる被害は、ないとは決して言えないですけども、津波に比べれば限定的だったと言えます。それから4番目として、本震後の活発な地震活動があります。

5. は、実は社会にとっては一番重要なところですが、事前に発生が予見されていませんでした。先ほども申し上げましたけれども、地震学上の想定外だったということです。それで、最も基本的な原理はご説明しましたが、プレート境界地震をもう少し詳しく説明すると、こういう図になります(図21)。前のほうで固着という言葉が出てきましたが、それをご説明したいと思います。



実は、海のプレートと陸のプレートは、普段はくっついていきます。くっついているので、一緒に引きずり込まれるわけです。引きずり込まれるからこそ、ひずみがたまりまます。そのくっつくことを、固着と言います。また、この引きずり込まれるのことを、バックスリップと言います。どうしてバックスリップと言うかというのは、たまったひずみがくっつきの強度の限界に達すると地震が起こるわけですが、限界に達して固着がはがれれば、当然、陸側のプレートは元に戻ろうとします。そうすると、地震時の岩盤の動きというのは、海に向かって動きます。それに比べると、普段は陸に向かって引きずり込まれている。ですので、引きずり込まれる方向が、本震時のスリップの反対方向というので、バックスリップと呼ばれます。ですが、実はくっついていて滑っていないわけでは

から、バックスリップという言い方はけしからんという専門家もいて、正しい専門用語としては、すべり欠損と言います。何かわけの分からない言葉ですが、要するに、滑ることがない状態であるという意味合いです。



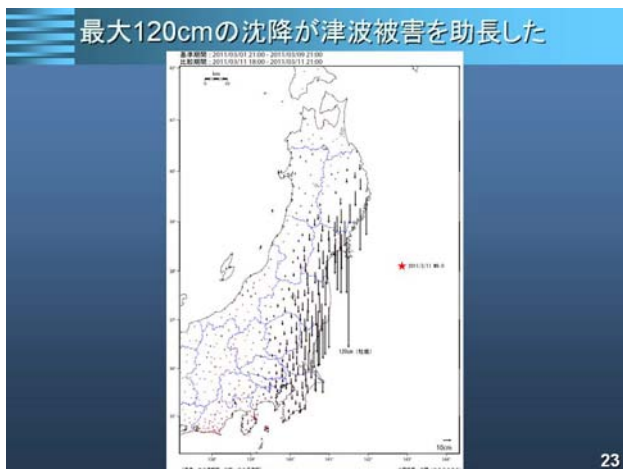
地震時に陸側の岩盤が海側に突入していけば、海の水というのはそれに伴って押し上げられて、いったん上がって、それが重力で下がって広がっていく結果が津波ということになります(図22)。また、ほとんどの大地震は発生の直後から、震源域やその周辺がゆっくりすべる現象が起こり、それを余効すべりと言いますが、そういうことが今回の地震だと10年くらい続く可能性があります。それが続いた後、最初の定常的な状態に戻るといいう、これはプレート境界地震の、地震のサイクルと呼ばれるものです。

このビデオ映像を見てください。津波はこのように大変なもので、直後に朝日新聞の飛行機でわれわれの同僚が写真を撮ってきましたけれども、「早く、早く、逃げろ」と消防団の方が言っていたのは、この陸前高田ですね。人が住めるような所は、全部、津波です。

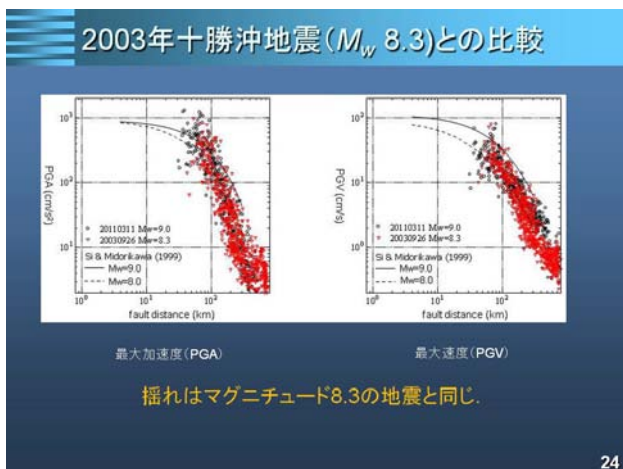
実は、ここまでなら明治三陸地震のときにも、ほぼ、同じようなことが起きたんです。女川もそうです。それが、石巻や仙台空港、仙台市の海側のほうとか、福島県まであれだけの規模の津波が来たというのは、多分、史上初めてだと思います。古文書にある、貞観の地震というのは聞かれましたが、その津波よりも大きい。特に南側にかつてない、大きな津波が来ました。

それから、地面が沈降するわけですが(図23)。その原理はなかなか難しいのですが、こう動いたとき、こういうふうに岩盤が動くと、こっち側は

質量を失われてしまうわけです。その部分が沈降するという、そういう現象が起きます。最大 120センチという沈降が起きて、いまだに海岸付近の道路が海の下という所もあります。それに比べると、揺れはこういう感じです。



確かに、ビデオ映像を見ていただくと大変な揺れだというのは分かると思いますが、それでも、阪神大震災のようにビルが倒壊するとか、そういうわけではなかったのです。ですので、津波に比べると、揺れはそれほどでもないという特徴があります。専門的になりますけれども、これは、揺れの強さを震度ではなくて加速度という指標で表したものです(図24)。それが縦軸で、震源からの距離を横軸にして、グラフに点を打っていったのです。そうすると、白丸が今回の地震で、赤の逆三角が2003年の十勝沖地震のときで、見ていただくと、両者はほぼ重なります。ということは、揺れにすると、マグニチュード0.7ぐらい小さい地震とほぼ同じだったということになります。



それから、余震や誘発地震がたくさん起きています。たくさん起きてわれわれ自身も驚いてはいますが、マグニチュード9なら当たり前前に起きて

いるという感じです。少し厳密な話をすると、震源域という先ほど赤い四角で見ていただいたような中で起こるものを余震と言います(図25)。し

4. 本震後の活発な地震活動 (大きな余震と大きな誘発地震)

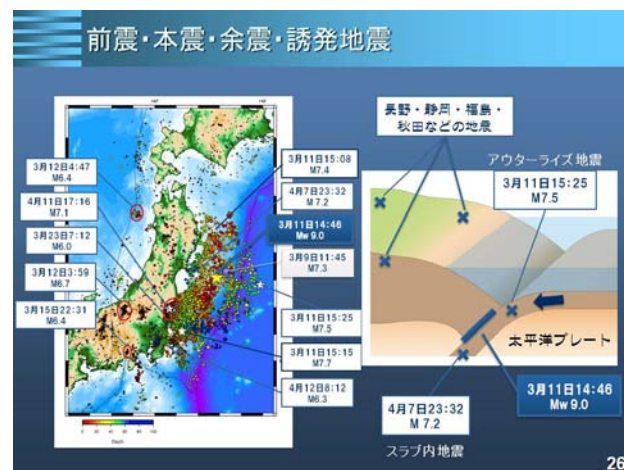
■ 余震(狭義の)

- 震源域及びその近傍で起こる。
- 本震と同じ発震機構である。
- 最大余震のマグニチュードは通常、本震より1.0程度小さい。

■ 誘発地震

- 本震の影響があった所ならどこでも起きる。
- 震源域内だが発震機構が違うものは誘発地震。
- 誘発された地殻内地震は最大でもM7程度。
- 誘発されたアウターライズ地震ならM8もあり得る。

25

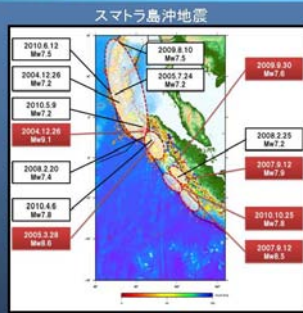


かも、基本的には逆断層とか正断層という地震のタイプが、本震と同じようなものを余震と言うべきなのですが、それ以外のものは誘発地震で、特に長野県とか静岡の富士宮とか、非常に遠くでかなり大きめの地震が起きましたが、それは明らかに誘発地震です(図26)。割合近い所では、気象庁もある意味いちいち決められないので、その領域に起こったら全て余震というふうに発表されています。

こういう状況ですが、今後どうなるのか(図27)。先ほどの、世界で5例しかないといううちのひとつのスマトラ島沖地震では、5年半後にマグニチュード7.5の余震が起きましたから、今回の場合も、それが起こらないということを保証することはできません。日本の例で言えば、安政の東海地震のときは、11カ月後にマグニチュード7クラス、それから、大正の関東大震災の地震のときは、4カ月後にマグニチュード7.3、明治三陸

余震・誘発地震はいつまで続くのか

- 2004年スマトラ島沖地震の例では、5年半後の2010年6月にM7.5の余震が起きている。
- 安政の東海地震(1854年, M8.4)では、11ヶ月後にM7.4の最大の余震が起きている。
- 大正の関東大震災(1923年, M7.9)では、4ヵ月半後にM7.3の余震が起きている。
- 明治三陸地震(1896年, M8.4)では、2ヵ月半後に陸羽地震(M7.2)が秋田と山形の県境で起きている。



■ 本震と誘発地震
□ 余震(誘発地震の余震を含む)

27

地震ですと、2 カ月半後に陸羽地震という誘発地震が起きています。ですから、マグニチュード 7 や 8 クラスだと、1 年か 2 年という感じですが、超巨大地震になると何ともいえず、非常によく分かっている例から言えば、少なくとも数年以上は続くと考えざるを得ないです。

最後の特徴として、事前に発生が予見されていなかったという点です(図 28)。2 時間後の気象庁の記者会見で、当時の横山博文地震津波監視課長が、「三陸沖でこれほどの地震が起こるとは想定していなかった」と。同じく、政府の地震調査委員会の当時の委員長の阿部先生が、「4 つの想定域が連動するとは想定できなかった。地震研究の限界だった」とおっしゃって、新聞に載っております。これらは、起きるか起きないかという問題、および起きたものの規模のことをおっしゃっています。特に下のほうを詳しく説明しますと、3.11 の前はどのようなふうと考えられていたかです。基本的な考え方ですが、以前、私どもの研究所にいらして、その後、アメリカのカリフォルニア工科大学に移られた非常に著明な金森先生という方が提唱された、アスペリティ・モデルというのが

5. 事前に発生が予見されていなかった



- 2時間後の気象庁記者会見
横山博文・地震津波監視課長(当時)「三陸沖でこれほどの地震が起こるとは想定していなかった」
- 数時間後の地震調査委員会記者会見
阿部勝征・地震調査委員長「4つの想定域が連動するとは想定できなかった。地震研究の限界だ」

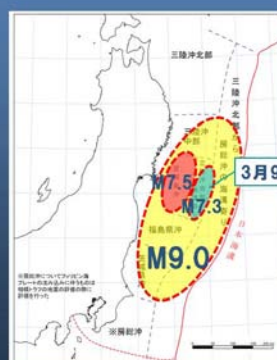
海溝型地震の長期評価

28

基になっています。

東北日本の海をこういうふうに分けます(図 29)。三陸沖北部、三陸沖中部、宮城県沖、三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖、房総沖、それからここです。三陸沖北部から房総沖の海溝寄り。この 8 つの区域で、基本的に、それぞれ独立に地震を起こすと、ずっと考えられていました。

東日本太平洋側の長期評価



規模	今後30年発生確率
M8.2前後 (M8.2未満の深さから求める地震の規模)	20%程度 (6%程度)*
M8.2前後	4%~7% (1%~2%)*
M8.0前後	0.5%~10%
7.1~7.6	90%程度
連動 M8.0前後	99%
7.4前後(複数の地震が連続する)	80%~90%
7.4前後	7%程度以下
6.7~7.2	90%程度以上

29

それが日本海溝付近の地震の起こり方の特徴であると、アスペリティ・モデルの中では言われていました。それに比べると南米では、いくつかの区域が連動してマグニチュード 9 の地震を起こすという地域特性があるというふうと考えられています。だから、日本はそういう地域特性がないからマグニチュード 9 の地震は起きないと考えられていたと言い換えることができると思います。

ひとつ例外があって、宮城県沖、1978年にマグニチュード 7.5 の地震が起きましたが、その隣の三陸沖南部海溝寄りというのは、ここだけは連動すると考えられていました。実は、三陸沖南部海溝寄りでマグニチュード 7.3 の、今回の地震の前震が 2 日前の 3 月 9 日に起きます。ここは連動する可能性があると考えられていたので、3 月 9 日にこの地震が起きたということを見て東北大学の先生は、「これが起きたので、連動するようなこの規模の地震は起きません」とインタビューで答えていて、新聞で大きく取り上げられました。

確かにそれは起きなかったのですが、起きたのはもっと大変なことであって、阿部委員長が言っていたように、結局、いくつかの区域が連動したかということ、5 つとその外側の三陸沖北部から房総沖の海溝寄りですから、結局、6 区域が連動して、

結果として、マグニチュード 9.0 になったということです。

連動が分からなくても、本当にわずかな可能性としてそういうことが起こると考えて、6 区域連動したらどのくらいの規模になるかと計算すると、マグニチュード 8.3 にしかありません。それは、前のほうで説明したスケーリング則が働いてしまうからです。区域ごとひとつひとつで起こると、滑り量としては区域の大きさに比例した滑りしかしません。ですから、6 個個別のものを足し合わせても、超巨大地震にはなりません。

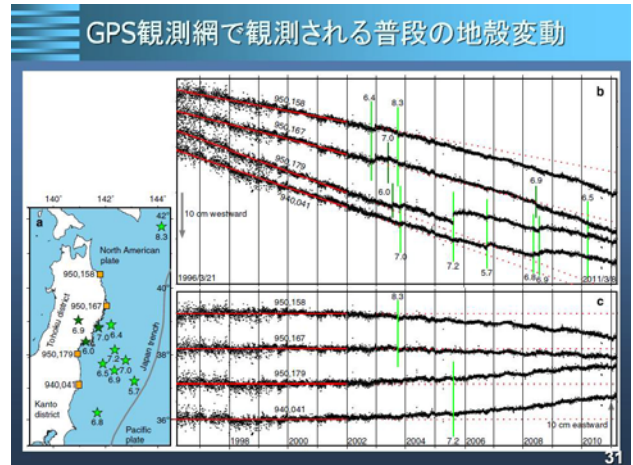
本当に同時に起きてしまうとスケーリング則が働いて、面積に比例したような非常に大きな滑り、今回は 30 メートルから 40 メートル岩盤が滑ったと言われていますが、そのくらいになってしまったために、マグニチュード 9 という規模になったということです。ですから、地震の発生の様式と地震の規模を、想定できていなかったということになります。

◇◆沈み込み帯で何が起きているのか

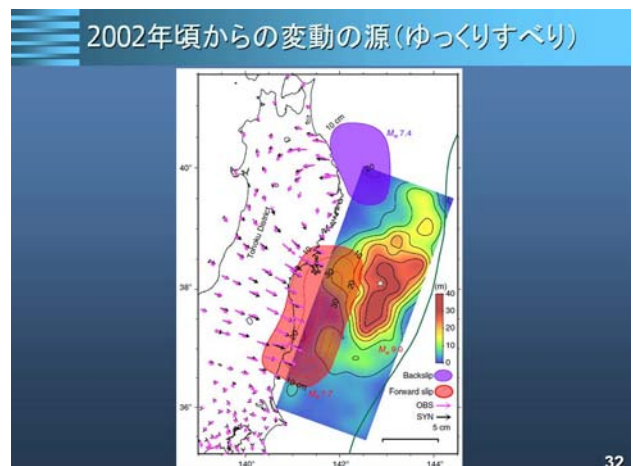


少し、サイエンスの話をして。今年の 1 月 6 日にこういう論文が出て、何社かに取り上げていただきました (図 30)。これでどうということが分かったかということ、最初のお話で、非常に稠密な GPS 観測網があるというご説明をしましたが、それを使うと、例えば東北地方で毎日地殻の中でどういふ変化が起きているかを見ることが出来ます。地殻の変動となるので地殻変動と言います。そうすると、ここの 4 つの四角の観測点、それよりもたくさんありますけれども、一番典型的に現れた 4 つの観測点を見ると、先ほどご説明したバックスリップ、あるいはすべり欠損によって、日

本列島の陸地が、基本的に、西に移動しています。それが、この斜めの線になっています (図 31)。その中に、所々こういうふうに、ここに星印で表したような地震、今回の地震ほどの大きさではないけれども、ある部分がバックスリップと反対のフォワードの方向の滑りを起こすので、その分、東向きに少し戻ります。そういうことが、この付近の地震のサイクルの日常的なことです。



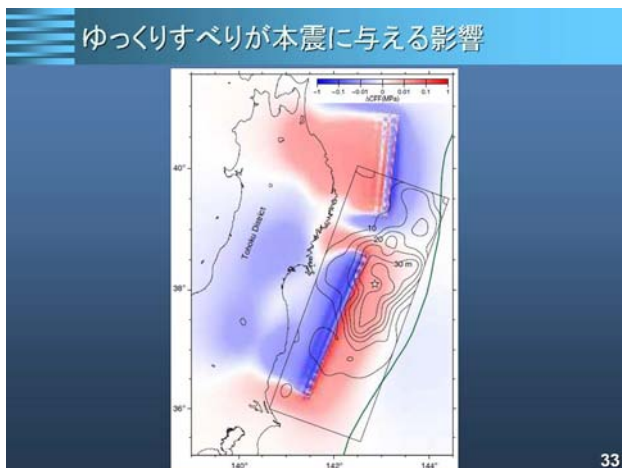
だから、それを見ているんだなと思っていたら、よく見ると 2002 年ぐらいから、この西向きの斜めの線の傾きが少し変わっています。こういうマグニチュード 7 の地震があると分かりづらいので、それを除いて 2002 年より前の部分を差し引くと、こういう図になります。これが何を表しているかということ、基本的には、バックスリップによる地殻変動に変化がない定常的なものならば、これは全部平らな直線にならなければいけないけれども、2002 年ぐらいから、それが変化しています。それも、かなり定常的に変化しているというのが見ていただけだと思います。



北側の観測点は全体的に西側に動いていますし、南側の観測点は、東側に動いています。そういう

データをたくさん集めると、この矢印がそのデータですが、そういう特殊な地殻変動を起こす震源を逆解析して、どういう震源があるかということが起こるのかというふうに計算してみたものがこの赤いものと紫色のものです(図3 2)。この背景にあるものが、3.11の本震の震源です。見ていただくと、南側の観測点の地殻変動は本震のときと同じ向きですよね。本震のときは固着はがれて、海に向かって東に岩盤が滑ります。それと同じ方向に向いていますから、この付近に逆断層があるというふうに求めることができます。

同じように北側は、今度は西向きに動いていますから、先ほどの定義で言えば、逆断層と反対の正断層がこの部分にあると求められます。これは9年間の地殻変動に基づいて求めた震源です。地震はほぼ瞬間的に起こり、長くても2、3分です。3.11の地震が最大で3、4分くらい続きましたが、普通の地震は瞬間ですよ。阪神大震災の地震は15秒間でしたけれども、それに比べると9年間のよう大变長い期間ずっと続いていた地震のことを、われわれはゆっくり滑り、スロースリップあるいはスロー地震といっています。ゆっくり地震というのは、こういうことです。

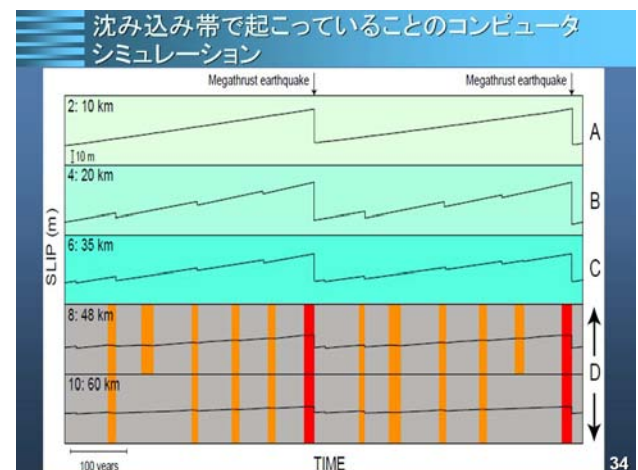


本震が起こる前の9年間に、このスロースリップが本震に対してどういう影響を与えたかという計算をしたのが次のスライドです(図3 3)。計算が非常に複雑なので詳細は省きますが、赤い所が、例えば南側のスロースリップが、本震を起きやすくする影響を与えた部分で、青い所は、本震が起きにくくする影響を与えた部分です。先ほど申し上げたように、この南側のスロースリップは本震と同じメカニズムで起こっていますから、その部分で、同じような地震が起これば、その分、ひず

みが解消されたこととなります。

ですから、スロースリップ自身の震源域においては、本震を抑制するような効果があります。一方、岩盤が東向きに進みますので、その岩盤の前にある部分、つまり本震のメインの震源域に対しては岩盤を押し付けるので、むしろひずみを増加させるような影響を及ぼします。ですから、この詳しい計算をしてみると、この9年間のスロー地震が起こることによって3.11の地震というのは、約1年間、発生が早まったという計算ができます。逆に北側のものは3.11の震源域のメインの部分で青い領域しかありませんので、これは、ほとんど影響を与えなかったという結果になります。

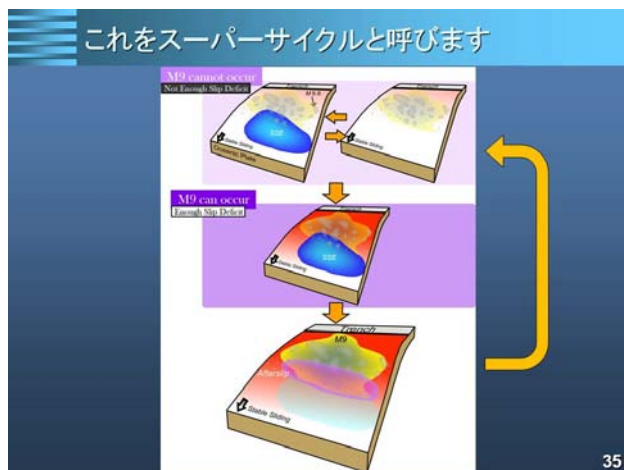
どうして、こういうスロースリップが起こるか。実は、東北日本では、これは初めて発見されたものです。西南日本では、たくさん発見されています。だから、日本海溝沿いというのはスロースリップを起こさない地域だとも言われていましたが、今回、初めて発見されました。地震というのは岩盤同士の摩擦現象であるということをごまごまご説明しましたが、それに対して、ある程度コンピューターシミュレーションができます。プレート境界の摩擦特性に関して岩石実験等からいろいろなパラメーターを得て、それに基づいてコンピューターシミュレーションをすると、こういうことができます(図3 4)。これが100年です。ですから、ここからここまでが700年ぐらいです。それは何を意味するかというと、貞観の地震というのはここです。六百八十何年ですね。その途中で、もう1回起きています。これは、あまり詳しく、よく分かっていないですけども、慶長の地震とか、そういうのが関係しているとも言われていますが、いずれにしろそこでもう一遍起きています。



ここが、今回の地震です。

すべり欠損で徐々にこういうふうにはずみが増えて、あるときストンと落ちるという状態を、図面として描いたものです。そうすると、貞観地震というのは1400年ぐらい前ですから、半分で割って、大体2回サイクルがあるとされていますから、この1回のサイクルは700年ということをして、このコンピューターシミュレーションで再現できます。それから、途中でマグニチュード7クラスの地震が複数起きていることも、同じく繰り返して再現できます。普段はこれしかわれわれは経験することができませんから、これを通常は地震のサイクルといっています。でも、このサイクルの外側に、もうひとつこういう、大体、600年から700年ぐらいの超巨大地震の繰り返しがあるとコンピューターシミュレーションで再現できましたし、実際に起こったことも、多分、そうだろうといわれています。

それとは別に、プレート境界の深い部分に非常に特別な摩擦特性を与えると、すべり欠損の増加の途中で増加が一時止まって、なだらかになる部分が計算できます。これがスロースリップに相当していて、それも、やはり、ある程度の繰り返しを起こしています。この計算例では、超巨大地震の直前にスロースリップが起きていて、それが先ほど私どもが観測したスロースリップであろうということを再現しています。



このようにスロースリップ自体も繰り返しますし、同じくマグニチュード7クラスの地震も繰り返すので、それは、それぞれサイクルなわけです。小さなサイクルと、その外側に、もうひとつの非常に大きいサイクルがあります。これは、実際に最近の学術用語として使われていますが、スーパ

ーサイクルというものがあると、つまり超巨大地震が起こる部分では、そういう現象が起こることが定説となりつつあります(図35)。ここにいろいろ書いているうち、SSE というのは、スロースリップイベントです。それから、アフタースリップというのは、前のほうでご説明しました余効変動の滑りです。そういういろいろな地殻変動の現象が全体として、内側のひとつの地震サイクルと外側のスーパーサイクル、そういう地震のサイクルを形成しているというのが最近の考え方です。大体、科学の話は以上です。



最後の部分は非常に最近の話で全くホットですけども、震災の年の6月に「超巨大地震に迫るー日本列島で何が起きているのか」という本を出しました(図36)。科学的な部分は、私が書きました。メインの部分は、当時の部下の、今は慶應義塾大学に行った大木聖子さんが書きました。おおよそのことは書いてありますので、もしご興味があれば読んでいただけたらと思います。

◇◆近くで起きた場合(直下型の強震動)

みなさんひとりひとりにとっては...

1. 近くで起きた場合(直下型の強震動)
2. 遠くで起きた場合(長周期地震動)

最後に、少しお役に立つようなお話をして終わ

りたいと思います。地震が起こるとどうなるかということ、想像することは非常に重要だと思います。想像できるからこそ対策が立てられますし、避難のことも計画していただければと思います。

震度7と震度6の揺れ



1995年兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)

- 死者: 6,434 人
- 行方不明者: 3 人
- 負傷者: 43,792 人

圧死8割+焼死1割 ⇒ 90%の人は自宅が凶器となった

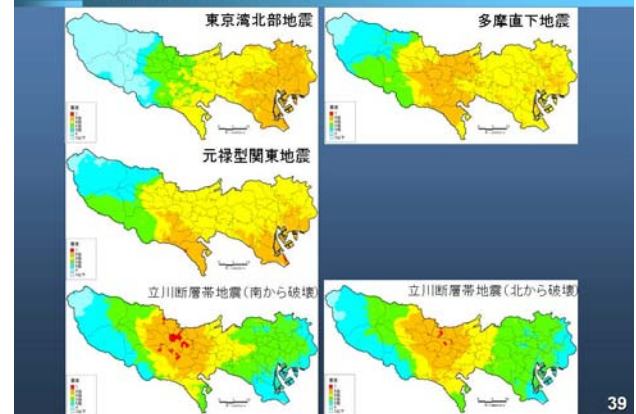
38

近くで起こるとどうなるでしょう。こちらは、阪神大震災のときのコンビニの防犯ビデオです。こちらが、NHK 神戸支局になります(図38)。NHKの支局というのは、地震に備えて常時防犯ビデオと同じように、ビデオコーダが回っているそうです。ここに宿直の方が寝ていらしたのですが、全然、起き上がれないくらい揺れて、家具もいっぱい倒れてきたけれど、なんとかかけがもなくいられたということです。

次は、兵庫県三木市という所に、実大の建物を揺らすことができる実大3次元振動台というのがあります。その映像です。これは、阪神大震災に対する実験です。明石市にあったので生き残ったのですけれども、生き残ったいわゆる文化住宅、建て売り住宅2軒を振動台の上に持ってきて、神戸と同じ強さで揺らしたという実験です。ここに書いてありますが、耐震補強をしたものは、なんとか生き残った。そうではない家は、神戸市内と同じようにやられてしまっていますので、ぜひ、耐震補強を検討いただきたいと思います。耐震補強はやはり200~300万くらい掛かりますから、もしそれはできないとなったら、Bのほうを見ていただくと分かるように、壊れるのは必ず1階です。どうしてかということ、日本の木造家屋というのは、1階と2階の柱の太さが同じです。でも、1階のほうは2階の重量が余計にかかりますから、壊れる柱は、必ず1階のほうです。ですから、耐震補強しないで寝られるときは、必ず2階に寝ていただきたい。お年寄りとか不自由がある方は、つい

つい面倒だから1階に寝てしまうということがありますが、それは、絶対に避けるべきです。

東京都の震度予測

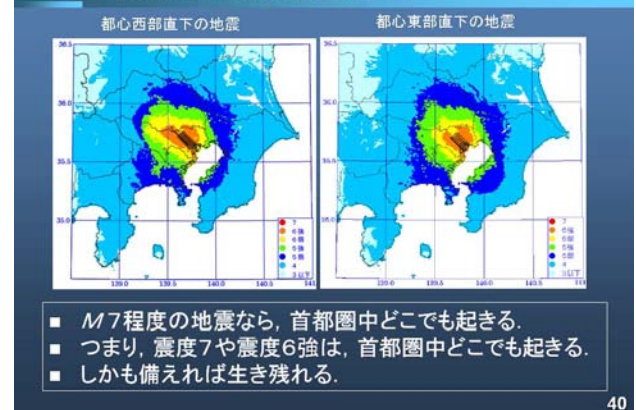


39

首都直下地震の震度予測というのがあります(図39)。これは、東京都の防災会議が出したものです。どんな地震でも決め打ちで想定するのは非常に危険だということをお分りいただきたくて、これから数枚のスライドを用意しました。

東京都もいろいろなものを考えて、いろいろなものに対して揺れの想定をしています。小さくて見えないですが、赤い色が震度7で、黄色っぽいのが震度6強か6弱かと、そういう所です。だから、地震の起こる場所によって、揺れ方は全然違います。もし、起こるべき地震がこれで全てを尽くしているとすれば、例えば、ここら辺が練馬区です。見ていただくと、黄色い所しかありません。基本的には6弱にしかならないのですが、政府の中央防災会議が別の想定をしていて、それだと6強や、7がかかっている部分もあります(図40)。

中央防災会議の震度予測



40

ですから被害想定というのは、地震をどこに想定するかで全然、結果が変わりますから、ひとつの想定だけ、極端に注目して見ることは危険なことです。

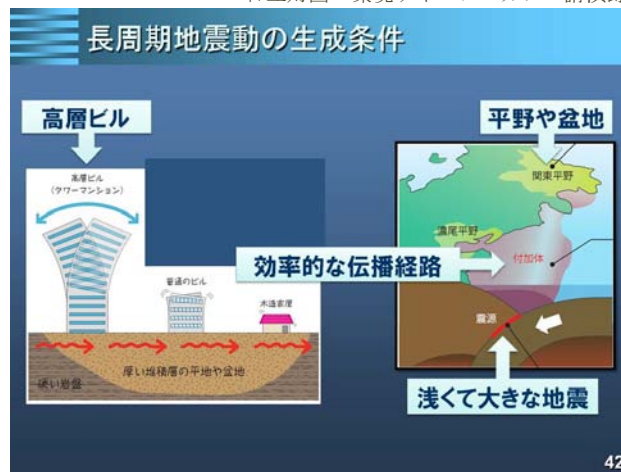
基本的には、こう考えていただく必要があります。マグニチュード7程度の地震なら、首都圏中、どこでも起こります。その直上では、この場合にありますように、震度7や震度6強が起きます。住んではいけないということは決してないですけども、そういうことも起こりうるということを念頭に置いて家を建てていただくということは、非常に大事です。備えるというのは、結局、そういうことです。東京消防庁が、実際に起きてしまったらどうしたらいいかということに関してこういうパンフレットを出していますので、ぜひ、注目してください(図4 1)。



◆◆遠くで起きた場合(長周期地震動)

今度は、遠くで起きた場合です。東日本大震災の際の長周期地震動をまとめた、このビデオ映像をみてください。大きい地震ほど、それから遠いほど、それから平野の中ほど、この長周期地震動というのが起きます(図4 2)。長周期というのは、揺れが行って帰ってくる時間を周期と言いますが、それが長いですから、非常にゆったり揺れる揺れということになります。ゆったりした揺れに対しては、大きい建物、あるいは橋とか石油タンクとかですね、大規模な構造物ほど、共振しやすい。だから、普通の木造家屋はあんまり心配する必要はないですが、今見ていただいたような高層ビル、あるいはタワーマンションですね。今、とても人気があると聞いていますけれども、そういうものが長周期地震動を、遠くの地震であっても注意する必要があります。どうことが起こるか見てみましょう。

このビデオ映像は長周期地震動が及ぼす影響



をまとめたものです。それでも、倒壊にはなかなか至らない。それよりも、むしろ心配しなければいけないのは室内の状況だと、今は言われています。先ほどと同じ実大3次元振動台の実験です。これは、ぜひみてください。長いので、途中でやめます。留めていない家具、特にキャスター付きのものは、走る凶器です。これは、家庭の台所の状況です。また、こちらは病院の場合はどうなるかの実験です。

直下地震と同じように、東京消防庁でこういった場合の対策のハンドブックというのを出されています(図4 3)。ダウンロードできますので、ぜひ、参照していただけたらと思います。すみません、ちょうど時間だと思いましたが、以上です。



◆◆質疑応答

会場：貴重な話を、ありがとうございました。伺いたいのですが、先ほどモーメントマグニチュードの話が出てきたと思います。その辺の計算の仕方のイメージが湧かないので、教えていただけ

るとありがたいです。

瀬瀬さん：断層面は、仮定して幾つか試行錯誤的に行うか、あるいは、速報の場合は、初動方向というので、大体、地震のメカニズムが分かります。各地の初動方向を地図上にプロットすると、こことここがこうになっているから、こういう断層面だというのが、大体、分かります。それから、震源の場所は、それも、速報ですぐに出せます。

その2つを踏まえた上で、振り切れていない地震の波形に対して、例えば、その場所で1メートル滑ったときに、ある観測点の揺れはこのくらいになるという計算を、あらかじめしておきます。それを基に、逆算していくわけです。こういう揺れだったから、おおもとは1メートルだろうと。それに対して2倍くらい揺れていたら、おおもとは2メートルだろうというような計算をします。実際はけっこう大変な計算なので、丁寧にやったら2日、3日はかかってしまいます。最近はその後、いろいろ反省があって、けっこう早くする工夫がされています。

会場：以前は2時間後、2回か3回あって、最後に2日後ぐらいだったと思うんですけども、今だと、今おっしゃったように、かなり速報として数分とかのオーダーで出るようなレベルに改善されていると思ってよろしいですか。

瀬瀬さん：はい。

ただ、振り切れていない記録が必要なので、振り切れていない遠くの観測点、あるいは強震計という特別な機械で観測するようなシステムを、今現在、作りつつあります。

会場：地殻内地震というのは活断層で起きるというお話しでした。活断層が最初にできる時というタイミングもあるのですか。何でもない所が割れて、活断層になるというのは？

瀬瀬さん：鋭い質問ですね。それは、永遠の謎です。まっさらな所に地震を起こすというのは大変なエネルギーが必要ですから、基本的には、地殻の中にいろいろな弱面があって、大昔、少なくとも1回か2回くらいは地震を起こした所があった

上で、そこで地震が起こるという考え方で、まっさらな所で地震を起こすというのは、大変なエネルギーが必要です。でも、やっぱり活断層にも最初にあるのだから、最初はどうなのと言われると永遠の謎、われわれも分からない。

会場：ニュースか何かで、東北沖の海溝近くから千葉沖まで、海底の地震計を設置しつつあるということと、それを使うと非常にリアルタイムの、例えば、本震の30分前とか10分か分からないですけれども、そういったものをマイクロクラッシュの状態をキャッチできて、それをシグナルとして予報みたいに使えり可能性がある。その運用とかいうのは、今、どうなっているのでしょうか。それから、南海トラフに対する設置の情報とかを、もしご存じでしたら教えていただきたいのですが。

瀬瀬さん：それこそ、沖縄ではないですけれども、粛々と進んでいるという感じです。ものすごくお金が掛かる話ですから、早々、急激にはいけません。進んでいる段階です。

予報には使えないと思います。そういう前兆現象に関する物理学は、今のところ確立できていません。一番期待していることは、津波を沖合で捉えて、事前に、陸地ではこのくらいの大きさになりそうだと分かる、つまり津波警報として利用するということが、一番、期待されています。

会場：まだ、予知には使えないということですか。分かりました。ありがとうございました。

以上

※講演内で紹介されている映像（動画）について、講演録では省略しています。