

地震について

東北地方太平洋沖地震―特異な破壊過程と歪み解放―

京都大学防災研究所 准教授 深畑 幸俊

京都大学防災研究所の深畑と申します。宜しくお願いします。

本日は「東北地方太平洋沖地震―特異な破壊過程と歪み解放―」という題でお話しいたします。内容としましては、想定外という言葉がよく使われていますが、なぜ想定外であったのかということと、地震時にどういう地殻変動が起こったかをまず紹介します。ここまでは一般的なお話で、後半では筑波大の八木さんとの共同研究になりますが、この地震でいったいどのように破壊が進行して、またその物理的な意味はどういうことであるのかについてお話しします。

まず地震発生の簡単なイメージですけれども、地球表層は10数枚の剛体的な固いプレートというものに覆われていて、それらが相互に運動しているわけです。それで、東北地方の沖では太平洋プレートが、年に8センチから9センチの速度で沈み込んでいるということが分かっています。そこで、プレートが沈み込む際にするすると沈み込めば何も問題はないわけですが、何しろ岩盤が岩盤の下に入り込むわけなので、どうしても摩擦が生じてしまうのですね。それでその摩擦が生じることによって岩盤が歪む。歪んだ岩盤が耐えきれなくなると、地震が起こる。それでその上に海があると津波まで引き起こしてしまう。そういうことになるわけです。

これは地球の断面で見た絵ですけれども地図にプロットしてみますと一応、地震の起こり方にはクセがありまして、例えば、北海道や東北沖ですと約100キロくらいのスケールで地震が起きることが多いのです。つまり、地球全体を2つに割るように何千キロもの地震の破壊過程が起こることはなくて、大体あるサイズを持っていると。それで、20世紀後半になってからですね、北海道で起こった地震をプロットしてみますと、まず初めに1952年に十勝沖で起きて、さらに先ほどいろいろ話が合った択捉沖で起きて、さらにその北東で起きて、といった具合で大体1970年頃には根室沖だけ地震が起きていなかった。こういう領域を空白域というのですが、それが予想通り1973年にマグニチュード7.4の地震が起きたわけです。

さらに、年月が経って数年前には2003年十勝沖地震というのが、ほとんど前回の十勝沖地震と同じ領域で起きた。というわけでタイミングについてはやや不正確ですけれども、少なくとも大きさと場所に関してはかなり正確に見積もれたということで、地震学者はそれを誇ったわけです。

東北地方に関してはもう少し状況は複雑で、ここ数百年の歴史地震の分も含めて大地震の震源域をプロットしたものは、このような感じになっています。こうした図を基に地震調査研究推進本部という組織が、海溝型地震、つまり太平洋プレートやフィリピン海プレートの沈み込みに伴っ

て発生する大地震の「長期予測」として、向こう30年間にどれくらいの確率で地震が起こるかを見積っています。一番よく知られている例が宮城県沖地震でして、ここは最近6回ほど、ほぼ40年の周期で繰り返し地震が起こったということが知られています。それで、前回に地震が起こってから30年以上経っているので、M7.5前後のものが向こう30年では99%の確率で起こると。それで隣のセグメント、東隣といっしょに連動するとM8くらいになるだろうと思われていたのですが、この図で見て分かる通り、こちら辺り全体が全部割れるというのは想定されていなかったわけです。

報道でご存知の方も多いと思いますが、貞観地震というものがあるのではないかと。これは古文書にも記録が残っている西暦869年、およそ1200年近く前に起こった大地震でして、それでスマトラの大地震のあと、(もともとは東北大の先生が見つけていたのですが) そのスマトラ地震後に産総研のグループがお金と人員をつぎ込んで調査をしまして、それによると仙台平野のあたりでは、今回の津波と(津波についての詳しい話はまた次ありますけれども) だいたい同じようなところまで侵入してきたというわけで、産総研の人たちが福島原子力発電所の津波に対する安全性向上に対して警告を発していたのは紛れもない事実です。けれども、彼らが想定していた地震については、最小の見積もりと断ってはいるけれどもM8.5で、この領域で7mの滑りが起こるとしていました。つまり、大きい津波に対しては確かに警告していたけれども、今回の地震と比べるとやはり非常にはっきりしたギャップがあると言わざるを得ないわけです。というわけで、一部こういう巨大地震が起こると主張していた人はいるにはいるのですが、ほとんどの人、私も含めて95%以上の研究者は、まさかこの日本、東北でM9などという巨大地震が起こるとは想定していなかったわけです。

けれども、2011年3月11日に地震が起こってしまった。震央は宮城県の北の方の沖で、大体500×200キロ位の領域を破壊してM9.0。北海道から九州まで広い領域に渡って地震動が観測されたわけです。京都のあたりも揺れましたよね。私はちょっと感じ損ねてしまったのですけれども。

揺れの特徴は何しろ長かった。例えば阪神大震災の時は直下型だから揺れの強さとしては今回の地震と遜色なかった。けれども阪神大震災はたかだか20~30秒しか揺れが続いていないのですね。けれども宮城県のあたりだと阪神大震災に匹敵する揺れが3分も続いています。それが今回の地震の大きさを物語っていると思います。

これは、観測された地震動を南北にずらっと連ねた図です。東大の地震研のホームページから持ってきたのですが、それから読み取れるところは、まず初めは弱く始まったけれども、ここでもん、と2回大きなパルスが宮城県沖で出ていて、それからさらに福島、茨城県沖のところでもう一回強い波が出て、伝搬している様子が見てとれます。これは地震の波、つまり揺れを地震計で観測したのですが、地震の時には揺れが納まったあとに永久変形が起こります。地殻変動といっているのですが、それは国土地理院が展開しているGPS観測網で観測できます。そ

れによると凄まじい変形でして、例えば牡鹿半島では5.3メートルも東南東に動き、1.2メートルも沈降したというように、非常に幅広い大きな変形が起こったということがわかります。

今回注目を集めたのは海上保安庁がやっている海底GPSで、陸上のGPSに比べると精度は落ちます。また、その都度船で行って計測するのでお金も人員もかかるのですが、貴重なデータで、それによると震源の近傍で24メートルも東南東に動いたと。これは世界記録でギネスブックに申請すれば載るかもしれません。そんな冗談を言っている場合ではなくて、とにかくこんなに大きな変動があって、さらにその辺りで3メートルも隆起したということがわかっています。

こういった地殻変動や地震波のデータが得られていますが、それらは全て地表で観測されたもので、地震が起こった「結果」なわけです。我々は、観測された結果から、いったいこの地震はどのような地震だったのかということを推定する必要があります。ただ問題がありまして、例えばこれは遠地波形データといって震源から遠くの地震計で観測したP波波形から地震の破壊過程を推定したものですが、地震学の情けないところではあるのですが、人によって解がかなり違う。海溝寄りに大きな滑りがあるというのは、山中さんを除いて大体どれも一緒なのですが、それよりも細かい話になるとだいぶ違ってきます。USGSというアメリカの地質調査所によるとこちら辺だけに滑りが局在していますが、気象庁だと茨城沖のところも滑っていて、カルテックだと海溝全般に滑っているといった具合です。これのどれが本当かというのは大変議論になるわけです。

この問題を考えるための基本方程式が一番上の式でして、地震波で捉えた変位の観測値が u です。推定したいものがDドット。これが地震の断層面上での滑り速度を表します。この両者がグリーン関数 G で結びつけられています。 e が誤差で、これが結構重要で、これまでの解析方法だと誤差としては観測誤差だけを簡単に取り入れていたのですが、この式の最大の誤差源というのはグリーン関数にあります。なぜなら、我々は地球の正確な構造を知らないでグリーン関数を計算しようとすると必ず真のグリーン関数からズレが生じます。それで、これまでは構造探査をして、グリーン関数をなるべく正確に求めようと努力してきた。それはそれで重要ですが、我々は発想を180度逆転させまして、いくら頑張っても正確な構造はわからないし、正確なグリーン関数を計算するのはもっと難しいのであるから、グリーン関数がもともと誤差をもっているという前提に立って式をたてようと考えました。

その論文は最近受理されたわけですが、こういう形で定式化して解析すると、少ない仮定で解が安定かつ客観的に求まるという利点があります。それで我々は、地震の震源過程の推定の分野において、世界でトップを走っていると自負しています。その方法で得られた結果がこれです。破壊がどういう風に時間的に発展したか、はじめの20秒間は落ち着いたものでしたが、その後20秒から40秒、60秒とかけて海溝寄りへ非常に大きな滑りが生じました。また、40秒くらいから南北に広がっていき、約100秒後には茨城県沖まで到達し、約150秒ほどかかって破壊が終わりました。これは破壊の各時間毎のいわばスナップショットなのですが、それを集め

て足し合わせたのがこれで、この図からは、滑り量が最大で50メートルに達したことが分かります。50メートルというのはものすごく大きくて、スマトラの地震でもだいたい30メートル弱ではないかと言われていました。さらに各地点でどう滑ったか、代表的な点が3つほど示されています。その一番滑ったところに注目しますと、90秒間という異常に長い時間、滑っていたことがわかります。この一年前にチリ中部地震があり日本に小さな津波も来ましたが、それが今回の地震より一回り小さいM 8.8だったのですが、一番長く滑りが起こっていたところは24秒です。したがってその3倍ぐらい長い滑りが起こっていたことになります。

これだけ長い時間滑ったから、長い距離を滑ったということになり、これは何を意味するかというと、地震というのは断層面を境にして岩盤が動くのですが、その際にかかる摩擦力が極端に弱くなったのではないかとすることを強く示唆するわけです。

それから余震が非常に活発です。これは少し説明が必要ですが、地震というのは岩盤に力がかかるから起こるのですけれども、一様に力がかかっても決して起こらず、ある部分からは非常に強く押され、別の方向からはそうではないというときに起こるのです。この横ずれ断層型というのを見ていただくとわかるのですが、この図の見方は、白い部分で押すのですね、そして黒い部分からは相対的には引っ張られると、そうすると地震が起こる。

正断層型というのは上下から押されていて、横方向に引っ張られるという地震なのですが、日本列島というのは今回の地震が起こる前までは、非常に強い東西圧縮で、それだから奥羽山脈も隆起するし、飛騨山脈も隆起するという山がちで美しい国土になっているわけですが、今回の地震の後で、例えば福島県の辺りですと、このように真ん中が白い正断層型の地震が多発したわけです。今回の地震について、先ほど私はM 9の地震は想定外だったと言ったのですが、想像の範囲ではありましたので、起こった時には、やられた、失敗した思った訳ですが、福島の辺りで、こんなに正断層型の地震が頻発するというのは、これは想定どころか想像の範囲外のことでした。

福島の辺りだけではなく、先日も松本でやや強い地震がありましたが、この長野の辺りも元々は東西圧縮なのです。しかし、その東西圧縮の力が弱くなったために、また伊豆のあたりだけ東西圧縮ではなく伊豆の衝突の力が効いているので、おそらくその力がメインになって、むしろ南北圧縮が強くなった。また、震源領域の辺りでは正断層型の地震が非常にたくさん起こっていて、それで注目すべきは、ほぼプレート境界と同じ深さで非常に浅い角度の正断層地震が起こっている。本震の力のかかり方はこれですので、本震とちょうど逆方向になって、正負が入れ替わっています。というわけで、本震でひずみを解放するわけですが、解放しすぎたひずみが、逆に戻っているように見えます。

今まで説明したことをまとめますと、こういったような描像が考えられます。すなわち東北沖地震では例外的にほぼ全ての歪みが解放されたのではないかと考えられるという訳です。どういふことかということ、プレートが沈み込み始めた時には、初めはもちろん歪みはないわけです。それが時間とともに歪みが蓄積していき、限界になると歪みを解放するというのが地震です。普通

は蓄積、解放の繰り返しで、ほとんどの場合歪みは蓄積された一部分だけしか解放されない。だから宮城県沖地震が何回起こっても、その周辺に働いている力のかかり方というのは、全く目立った変化はない。けれど今回の地震は、どういうわけか例外的に非常に大きな地震で、ほとんどすべての歪みを解放してしまった。

これをもう少し説明しますと、地震というのは簡単にはバネ・ブロックのアナロジーで考えられます。摩擦のある面の上にブロックを置いて、それをバネで引っ張るとバネが伸びて、ある程度歪むとブロックが動く。その時、このバネの歪みは一部しか解放されずにまた残るわけです。けれども今回の地震は、バネで引っ張って動いた時に潤滑油のようなものが入ってしまって、そのためにほとんど全ての歪みを解消して、場合によっては一部滑りすぎてしまった。そういう風に考えると全てつじつまが合うわけです。しかし、なぜ潤滑油のようなものが入るかといいますと、例えば断層面上には普通少し水が入っています。そうすると断層面が滑った際にものすごい摩擦熱を発生しまして、その摩擦熱によって水が膨張して非常に大きく摩擦力を下げます。そのようなメカニズムは以前から知られているのですが、そういったのが強く効いたのではないかと考えられます。それで全ての歪みを解放したと。

もしそれが本当だとすると、いくつも重要なことが言えるわけですが、その中でも最も重要なものが巨大地震の発生間隔の問題です。南海トラフでも繰り返し大きな地震が起こっていて、それが今世紀前半に再び起こるのではないかとされているわけですが、実は南海トラフの巨大地震といったところで、繰り返し起こっているのは間違いないのですが周期性が良いかというところでもないのです。一番短いのは前回で90年の間隔でしたが、長いときには260年以上間隔が空いていたりします。ひょっとすると歴史記録が不完全だからかもしれませんが、どんどん調査が進んでも相変わらずこのままなのです。それから、北海道や先ほど紹介した仙台平野の辺りでも巨大津波の痕跡が調査されていますが、そういったものを見てみると巨大津波は繰り返し襲って来ているけれども、繰り返し間隔というのは100年～800年とか450～800年というわけで、周期的といってもせいぜいが擬周期的で、あんまり繰り返し間隔というのは良くない。

なぜそうなるかを考えてみますと、とにかく地震というのは歪みを蓄積すると、その蓄積された歪みが解放される過程であるというのは間違いないのですが、その歪みが蓄積と解放に分かれますが、歪みの蓄積はプレート運動による。だから相当程度、定常的です。しかし歪みの解放に関しては動的摩擦弱化のようなことが絡み、相当程度偶然的要素に支配されるのではないかと。そうするとやや悲観的ですが、M8の大地震については空白域の概念でそれなりに予測はできますが、M8の地震が8で止まるか9までいってしまうかというのは、実は予測が極めて困難である可能性が高いということになります。

全体をまとめますと、日本海溝でM9の地震は、残念ながら科学の水準が及ばなかったというところで想定外だったと認めざるを得ない。また、以下の特徴から、東北沖大地震では例外的

にほぼ全ての弾性歪みを解放したと考えられます。最大50メートルに達する大きな滑り、最大90秒に達する長い滑り時間。そして時間の都合で省きましたが、応力降下とよばれる物理量も今回大きかった。それから、地震のメカニズム解で推定される日本列島にかかる力のかかり方というのはガラッと変わってしまい、その結果余震が多くなるのです。最後に、これは示唆ですが、それでも超巨大地震の発生には、動的摩擦弱化などの非線形性の強い要因が絡んでいて予測には本質的な困難を伴う可能性が高いのではないかと思います。

