

12-1 第198回地震予知連絡会重点検討課題「東北地方太平洋沖地震に関する検討（まとめ）」概要

Summary of intensive discussion subject "Investigation of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (summary)"

松澤 暢（東北大学大学院理学研究科）

Toru Matsuzawa

(Graduate School of Science, Tohoku University)

1. はじめに

2011年3月11日にM9.0の東北地方太平洋沖地震が発生したことを受けて、地震予知連絡会では、第190回地震予知連絡会以降、重点検討課題として、この地震の特徴や発生原因等について検討してきた。第190回、191回、193回では「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」と題して、3回にわたってこの地震についての検討が行われた。また、第192回、194回、195回では「プレート境界に関するわれわれのイメージは正しいか？」と題して、南海トラフ・南西諸島海溝、千島海溝、相模トラフ・首都圏直下におけるプレート境界に対する現状の考え方について整理・検討を行った。196回では内陸での誘発地震も取り上げ、また197回では「世界の巨大地震・津波」の検討を行った。さらに、この間に東北地方太平洋沖地震についての新たな知見が得られれば、「地殻活動モニタリングに関する検討」の中で検討を行ってきた。

第198回地震予知連絡会重点検討課題の検討では、これまでの議論や検討結果を踏まえ、このような地震がなぜ・どのように発生したのか、また今後、このような巨大地震の発生に備えるために何をどのようにモニタリングすべきかについて、本震発生から2年を経過した現時点でのまとめを行うことにした。

2. 議論の概要

2-1. 何が起こったのか？今後何をなすべきか？

今回の検討では、最初に、様々な観測研究によって、地震時および地震前後に何が起こったと考えられるのか、今後なにをすべきかについて、地震、地殻変動、津波、構造の観点から専門家にレビューをしていただいた。

まず、筑波大学の八木勇治氏に、断層すべり特性の深さ依存について、様々な地震学的データから得られた知見について講演をしていただいた。今回の地震のすべり速度関数の地域性を調べたところ、浅部の海溝近くのほうが単純なすべり速度関数で、深部のほうが複雑なすべり速度関数となるが、浅部でも最初の立ち上がりは普通の津波地震よりもはるかに急峻で、最初の加速度が極めて大きく、結果としてすべり速度の最大値も通常の津波地震の10倍大きくなっていたことが分かった。地震時のthermal fluid pressurization (TP) と初期応力の関係を数値シミュレーションで調べてみたところ、わずか10%の初期応力の違いで地震モーメントが2桁変化することがわかった。つまり、初期応力が小さいうちに地震が発生すると海溝付近でTPが発動せずに通常の地震になり、初期応力が大きいとTPが十分に発動して海溝付近を大きく破壊し、M9の巨大地震が発生することがわかった。さらに、その中間くらいの初期応力だと、中途半端にTPが発動して、応力降下が小さく、台形で近似されるような震源時間関数を持つ津波地震が発生することがわかった。この結果は、今回の地震

の前に絶対応力が通常より高まっていたことを示しているが、これは、本震の前にこの周辺の地震発生と潮汐との間に相関が高かったという報告と調和的である。

次に、東北大学の日野亮太氏に、今回の地震についての海陸の地殻変動観測からの描像と展望について講演をしていただいた。今回の地震の前、2005年頃からプレート境界の固着が弱まったことを示唆する結果が得られている。さらに2011年2月からスロースリップイベントが浅部で発生し、その後、3月9日の前震が発生して、その余効すべりが本震の破壊開始点に向けて広がっていったことがわかっている。しかし、地震発生に向けて加速するようなプレスリップは、少なくとも破壊開始点付近でノイズレベルを上回るようなものはなかった。地震時すべりについては、海底地殻変動データが重要な役割を果たし、海溝近くで大きなすべりが生じて、それが狭い範囲に集中していたことが明らかになった。一方、余効変動についてはパターンは複雑であり、陸上GPSの観測データをすべて余効すべりで説明しようとするれば、余効すべりは地震時すべり域よりも深部を中心に発生していることになるが、海底地殻変動観測データは、粘性緩和の影響が大きいことと、海溝軸近傍でも余効滑りがあったことを示唆している。薄い低粘性の物質が海洋性プレート下側境界面付近にあると仮定すれば、このような粘性緩和の影響は海溝付近でプレート収束速度が揺らいだのと等価となる¹⁾。今後の課題としては、固着強度の時間変化やM7級地震の余効すべりの多様性の理解、海溝付近の大きなすべりの原因究明、余効変動の様々な原因の寄与の大きさの推定、海岸の隆起の問題等、様々な問題があり、これらが解決してようやく太平洋沖地震が理解できたと言えるだろう。この解決のためには海底観測網の整備が重要であり、それはすでにスタートしている。

東京大学地震研究所の佐竹健治氏には、津波観測からの描像と展望について講演していただいた。地震学的データや測地学的データでは宮城県沖の海溝近くに大きな滑りがあるが、これでは津波高が岩手県の宮古付近で最大であった理由が説明できない。海溝付近のサブフォールトサイズを小さくし、すべり分布の時間的変化も考慮した詳細な解析を行った結果、最終すべりに達するまでに地震発生から2分半以上かかり、かつ3-4分後に岩手県沖の海溝軸付近で大きなすべりがあれば、津波波形データも、津波波高データも概ね説明できることがわかった。このような時間遅れがあることで、宮城県沿岸の津波高よりも宮古付近で津波高が大きかった現象を再現できる。一方、今回の地震や869年貞観地震で、平野部の内陸奥深くまで浸水したのは、海溝付近の浅いすべりではなくて、プレート境界の幅広いすべりの影響である。貞観地震で今回のように浅いすべりが発生していたかどうかは現状の津波堆積物のデータからだけではわからない。1896年明治三陸津波地震は、岩手県沖の海溝軸付近に今回と同様の滑り分布を与えれば説明できるが、溜まっていたすべり欠損を1896年の地震時に100%解放してしまったとすると、それ以降の100年で蓄積されたすべり欠損だけでは今回のすべり量は説明できないので、プレート境界のすべりだけで両方の地震を説明するのは難しいかもしれない。

海洋研究開発機構の中村恭之氏には、地震断層のイメージングと地震に伴う構造変化についての講演をお願いした。これまで予知連で報告してきたように、今回の地震のすべりが大きかった場所では、すべりが海溝まで突き抜けたことが、地震前後の地形変化から推定されている。他の測線でも同様の比較を行った結果、震源の約50km北の測線では地震に伴う変化が検知できたが、約70km南の測線では明瞭な変動は確認できなかった。地震時には地形変化のみならず、海溝軸付近では地下構造まで変化していることが明らかになり、かつ、その変形構造は今回のイベントだけで作られたものではなく、過去に同様のイベントが繰り返し発生していた可能性が高いことがわかった。今後、海溝軸に沿って、構造探査と掘削を行うことによって、過去の巨大地震の履歴を解明する上で

極めて重要なデータが得られると期待される。なお、震源付近で強い反射面を確認したが、顕著な地震時変動は認められず、また、先行研究で推定されていたプレート境界より深部に位置しているため、沈み込んだ地塁-地溝構造を見ている可能性がある。今後、この反射面の正体を突き止めることも重要である。

2-2. 地震の前に異常はなかったか？

上記のように今回の地震の地震像が次第に明らかになってきていることを踏まえたうえで、前駆的現象をレビューを行えば、それぞれの前駆的現象の解釈がしやすくなると考えられる。このような観点で、気象研究所の前田憲二氏に、2011年東北地方太平洋沖地震前に見られた前兆現象という演題で講演をお願いした。今回の地震の前には、地震活動、地殻変動および電離層に変化があったことがこれまでに報告されている。

地震活動の静穏化は、震源域の深部や南側（1987年頃から）や北側（1996-2001年頃から）、西南日本を含む日本全国（1996年頃から）で見られた。2007年は東北地方太平洋沖全域でM5以上の活動が静穏化していた。ただし、震源域の深部や南側の静穏化は2005年頃には解消していたように見える。2000年頃から、前震・本震付近での中規模地震の発生に地球潮汐との強い相関が見られるようになった。前震・本震の震源付近ではもともとb値が小さい傾向があったが、遅くとも2005年頃からb値が低下しはじめ、本震の1ヶ月前くらいからの前震活動期にはさらに小さくなった。b値の小さい領域では本震のすべり量が大きかった傾向が見られる。本震発生の約1ヶ月前から本震震源の北側で群発的な前震活動が2回あった。この前震活動は本震に向けてゆっくりと移動している様子が観測されている。前震の情報を用いた本震発生予測モデルによると、最大前震（M7.3）が発生した時点（本震の2日前）近傍では、M7.3以上の地震が発生する確率は約20-30%となっていた。

長期的な地殻変動としては2003年頃から福島県沖のプレート間固着が弱まっており、2008年と2010年に発生したM7地震の余効変動は、それぞれの本震時の変動と比較して同程度以上とかなり大きかった。震源近傍の海底圧力計で、本震の約2.3年前と1ヶ月前に短期的スロースリップによる変化が観測された。前震の余効変動は観測されたものの、本震にむけて加速する傾向は見られなかった。

本震の数日から数十分前に大気・電離層関係の複数の要素で変化が報告されている。ただし、3月10~12日にかけては磁気嵐が発生しており、電離層の異常が出やすい時期であったことに注意が必要である。

以上、地震活動と地殻変動は本震発生の10年くらい前から変化が見られ、また2011年2月頃からの前震活動とそれに関連するスロースリップが報告されているのに対して、電離層関係は数日前と数時間前という直前の異常が報告されている。

2-3. 何故起こったのか？

以上で報告された現象のうち、どこまでが我々の現在の知見で説明できるのかについて把握するために、京都大学の平原和朗氏に考えられるモデルのレビューをお願いした。特に宮城沖の日本海溝浅部で極めて大きなすべりが発生したことが我々にとって大きな衝撃であったため、その原因について説明しているモデルを中心に解説していただいた。

地震発生のモデル化とシミュレーションは、これまで速度状態依存則に基づく準動的な地震サイ

クルモデルの研究が多く行われてきたが、最近は動的破壊や TP (Thermal Pressurization) の効果、重力の影響についての検討が進んでいる。

速度状態依存則による準動的な地震サイクルモデルについては、主破壊域の B-A を大きくし、アスペリティ以外を速度強化域にした強パッチアスペリティ (Strong Asperity; SA) モデルと、破壊域全域を速度弱化解域としてその中に不均質性を入れた階層アスペリティ (Hierarchical Asperity; HA) モデル、低速すべり時と高速すべり時で挙動が変わる 2 状態変数モデルが提唱されている。いずれも、普段の M7 の地震発生サイクルを再現できるものの、HA モデルと 2 状態変数モデルでは、M9 の地震のあとは余効すべりがほとんどなく、しばらく地震活動が低調になるのに対して、SA モデルでは大きな余効すべりの影響で本震直後のほうが地震発生レートが高いことが予想される。

準動的モデルにおいては、海溝近傍の大すべり域での速度弱化解特性を他の M7 のアスペリティよりも強める必要がある。一方、摩擦熱による間隙圧上昇 (TP) を考慮したモデルでは、摩擦がほぼゼロとなることによってすべりが大きくなるため、強い速度弱化解特性を導入する必要はなく速度強化域で構わない。むしろ速度強化域のほうが高速では摩擦が大きいため発熱しやすいが、速度強化域単独では十分な摩擦発熱を起こすほどに高速すべりを生じることが難しい。しかし近接した領域で速度弱化解域があれば、摩擦強化域でも十分な高速すべりを起こし、そこで TP が発生する可能性がある。このようなシミュレーションを行うと、速度強化+TP の領域は、近くで発生した地震破壊を止めるバリアとして働いたり、逆に TP が発生して自らも破壊して大きな地震性すべりを起こしたりと様々な挙動を示すことがわかった。また、この速度強化+TP の領域では速度弱化解域よりも長周期の地震波を放出することもわかった。

上盤の海溝軸近くの先端部では、側方応力と重力とプレート境界の摩擦が釣り合って一定の角度を保つという Critical Taper (臨界尖形) モデルを考えた場合、プレート境界の間隙圧が高くなると、上盤内の断層が重力の影響で正断層的に動き、プレート境界に大きなすべりを作りうる。このような影響も無視できないであろう。

最後に、小さな破壊がカスケード的に大きな破壊に動的に成長していく Multi-scale cascade dynamic rupture モデルでは、100 年間の M6.6 以上の地震分布から、下位の階層のパッチを分布させ、さらに前震と仮想震源を導入すると、今回の M9 の地震の震源時間関数をうまく再現することができた。

3. まとめ

以上から、今回の地震発生に至る過程は、下記のようにまとめることができそうである。

今回の地震の前震や本震すべりの大きかった場所は、昔から b 値が小さい特異な場所であった。地球潮汐との相関を見ると、10 年くらい前から応力が上がっていた可能性があり、その頃から b 値の低下が見られ、また地震活動の静穏化もその周辺で見られていた。また、その後、福島県沖では、固着の剥がれが生じていた可能性があり、2011 年 2 月にはスローイベントの発生とそれに伴う前駆的地震活動があった。その後、3 月 9 日の前震があり、その余効すべりが南に広がるにつれて地震活動も南下し、これが本震のトリガとなったと思われる。

つまり主破壊域での応力は 2001 年頃にはかなり高くなっており、その後の震源域南部の固着の剥がれによって、そこへの応力集中がさらに進み、TP が発動しやすくなっていた条件のもとに、破壊が始まったことが大きなすべりを引き起こした原因の一つとなっていたと考えられる。応力が上がっていた理由としては、約 600 年間のひずみエネルギーの蓄積が、そろそろ「満期」になっていた

ことも関係していたかもしれない。

摩擦パラメータの分布については、複数の可能性が残されているが、今後、余効変動や余震活動を調べていく中で、モデルが絞り込める可能性があり、それは大きな前進である。ただし、海底地殻変動データに見られるように、今回の余効変動には、粘性緩和の影響が確実に入っており、それを無視してプレート境界にすべてを押し付けるのは危険である。逆に言えば、今回の地震の余効変動を正しく追いかけることにより、粘性構造についての情報も得られると期待される。このためには、今後数十年にわたって、陸域のみならず海域の地殻変動観測を継続することが必要である。

海底地形・構造探査から、海溝付近に今回のような地震の痕跡が蓄積されていることがわかってきた。今後、海溝に沿って、このような探査を行い、海底掘削調査を行うことによって、海溝付近のプレート境界すべりの挙動や過去の活動履歴が明らかになると期待される。特に、1896年三陸津波地震の震源付近で、100年位後に再び大きなすべりが生じた理由や、海溝に沿って破壊伝播が極めて遅かった理由等はまだわかっておらず、これを解明し、また海溝付近のTPの可能性を検証するために、海溝近くの構造探査・地殻変動観測が不可欠である。

今回の地震時に沈降した海岸が、いつ、どのように元に戻るのかすら、我々はまだ十分理解できていない。本震発生前の状況にまで戻るまでのデータが揃って、ようやく今回の地震像が明らかになったと言えることになる。その意味で、今後、数十年の地殻活動モニタリングが極めて重要となる。

引用文献

- 1) Heki, K., and Y. Mitsui, Accelerated Pacific plate subduction following interplate thrust earthquakes at the Japan trench, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 363, 44-49, doi:10.1016/j.epsl.2012.12.031, 2013.