12-16 第191 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(その2)」概要 及び 「第 190 回地震予知連絡会以降に明らかになった知見」 Intensive Discussion Subject "on 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Ⅱ)" and New knowledge on the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake that appeared after the 190th meeting of CCEP

> 山岡 耕春(名古屋大学環境学研究科) Koshun Yamaoka (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

「東北地方太平洋沖地震に関する検討(その2)」概要

第191回地震予知連絡会では、2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受けて臨時に開催した190回地震予知連での検討につづき、この地震がどのような地震であったかについて各機関の観測・解析結果を持ち寄って検討を行った。

まずは前回の地震予知連絡会以降に明らかになった知見について整理をした.190回地震予知連 以降に地球惑星科学連合大会があり,様々な研究報告がなされている.大会で報告された研究成果 も踏まえて検討を行った.次に海溝沿いの問題を取り上げた.190回地震予知連絡会において今回 の地震波海溝沿いで非常に大きなすべりが起きた可能性が明らかになった.海溝沿いは陸から離れ ており,観測が相対的に困難であることから十分な知見の蓄積がない.そこで津波地震という観点 及び浅部プレート境界における調査という観点から検討を行った.最後に,国民的な関心事である, 今回の地震の短期的・長期的影響について検討した.短期的な余震・誘発地震・余効変動について 各機関の観測・解析結果を検討した.さらに長期的な影響の可能性として,地形学的事実から推論 される東北地方の隆起現象への影響についても検討を行った.

「第190回地震予知連絡会以降に明らかになった知見」

東北地方太平洋沖地震について第190回地震予知連絡会以降に明らかになった知見をまとめた. 知見は「本震発生前の過程」「地震時のすべり及び地殻変動」に分けてまとめることにする.

1. 本震発生前の過程

東北地方太平洋沖地震の発生前の過程について,第190回地震予知連絡会以降に各機関が解析し て判明した新しい知見をまとめた.具体的には陸上のGPSによる地殻変動観測解析,地震活動の 統計的解析,海底における地殻変動観測などが新しい知見であった.また少し変わったところでは, 電離圏全電子数の異常が地震の前に観測されていたという報告もあった.

1.1 長期的変動

2000年以降福島・茨城県沖でプレート境界のすべりが始まっていたことが第190回地震予知連 絡会で国土地理院から報告されていた.それを支持,あるいは明瞭に示すデータが国土地理院と気 象庁から示された.国土地理院はGEONETの解析結果から東日本のひずみ速度分布を計算した. その結果 1990 年代の後半に比較して明らかに 2006 年以降はひずみ速度が小さくなっていることが わかる(図1).気象庁も東北地方を北西 – 南東に横断する基線における距離変化を調べた.その 結果,基線長は 2000 年以降に伸びていることが示された.これらのデータは,福島・茨城県沖に おけるプレート境界のゆっくりとしたすべりが始まっていたことを示唆している.

福島·茨城県沖でのすべりを示唆するデータは地震活動からも得られている.統計数理研究所は, 統計的除群処理(デクラスタリング)を行った地震活動の時間変化の解析結果から日本列島各地の 地震活動の活発化と静穏化を精査し,やはり多くの地域で2000年以降の地震活動の静穏化を検出 している.福島・茨城沖のすべりを仮定したΔ CFF の解析結果によると,日本列島の広い範囲の 地震活動が静穏化したことを説明できる.

東京大学地震研究所は,震源域における 2000 年以降の b 値変化を解析した.その結果,本震の 破壊開始点付近の地震活動の b 値が 2004 年以降徐々に減少していったことが明らかになった(図 2).

このように、東北地方太平洋沖地震の震源域においては、プレート境界の固着やすべりを表すデー タに長期的な変化があったことが確認されつつある.

1.2 前震

本震の2日前に発生した M7.3 の地震についてもいくつかの新しい知見が得られている.東北大 学・東大地震研・海洋研究開発機構では海底地震計を震源域に設置してあった.2010年以来,宮 城県沖に設置してあった海底地震計のうち,5台を回収,うち4台のデータと,陸上観測点(含三 陸沖ケーブルシステム)のデータとあわせて,3月9日の前震と本震の間の地震の震源を再決定し た.その結果,3月9日の前震は,従来からM6程度の地震が群発的に起こる傾向にある場所で発 生したことがわかった.また,その余震活動も,従来地震活動が高いところの範囲内であった.

東北大学では、東北地方のプレート境界で発生する地震の余震の特徴を調べた.3月9日の前震 の余震活動は明瞭にb値が小さく、比較的大粒の余震が大きかったことがわかっている.過去の 地震についても同様な傾向がないかどうかを調査した.その結果、東北日本の海溝近傍の活動では、 マグニチュードの差が小さい余震をもつ地震は、いくつか例があり、2011年の M7.3の地震を含め、 このような活動は海溝近傍で発生する地震の特徴である可能性が高いことがわかった.

この地震の余効変動は,前震の余震の地震活動の移動から,本震の破壊開始点に向けて拡大して いったと推測されていた.これを地殻変動データから確かめるため,東北大学は牡鹿半島を周辺と したGPS観測点のデータを整理した.その結果,前震の地震時の変動と比較して前震と本震間の 変動は有意に南の方向を向いている.これは前震後の余効変動が南に拡がっていったとする考え方 と整合する.

1.3 前兆

北海道大学は、GPSの観測から得られる電離圏全電子数異常に着目し、本震を挟んだ時間変 化を解析した.電離圏全電子異常は、本震のおよそ40分前からM9.0の震源域全体に対応する領 域で異常が現れている様子がわかる(図3).同様な異常は、2004年スマトラ・アンダマン地震、 2010年2月のチリ地震、1994年北海道東方沖地震(M8.2)においても見ることができる.ただ、 この異常は、それぞれの観測点において検出される変動をあらわす曲線の近似による見かけのもの であるとの議論があり、今後の検討が必要である.

## 2. 地震時のすべり・地殻変動

地震時のすべりや地殻変動についても,第190回地震予知連絡会以降新たな観測データや解析結 果が示された.観測データとしては海上保安庁が報告した東北地方の太平洋沖における海底地殻変 動観測結果が注目された.海洋研究開発機構からは地震発生前後の海溝沿いの地形またすべりの解 析については,海底地殻変動のデータも用いた解析結果が国土地理院・海上保安庁や北海道大学か ら報告された.またすべりの時間発展についても防災科学技術研究所から詳細な解析結果が示され た.さらに海溝沿いで大きなすべりとなった原因についても,すべりの物理モデルを用いて検討し た結果が東京大学地震研究所から報告された.

## 2.1 地殻変動·津波

地震時の断層面上のすべり分布は、従来は陸上で観測された地殻変動を本に推定されていた。今回の地震では、海上保安庁が常磐沖から釜石沖にかけて設置して観測をしていた海底地殻変動の海底局の測量により非常に大きな変動が計測された。最大の変位は宮城沖海溝寄りの海底局の位置であり、地震後の測量によって東南東に24mの移動と3mの隆起が捉えられた。釜石沖の海溝寄りでも23mの移動が捉えられており、海溝沿いでの滑り量が大きいことを示している。

また産業技術研究所は、仙台平野において今回の地震による津波堆積物と実際の津波と到達限界 との関係を調べた.地質調査によって得られる過去の地震の津波到達限界は土壌中の砂層の分布か ら推定する.しかしながら、津波の末端では流れが緩やかに成り砂を運搬することができず、砂層 による推定は実際の津波到達限界よりは小さな値となる.今回の地震では津波の到達限界が得られ ているため、実際の砂層との比較が可能となる.比較の結果、砂質堆積物の到達限界は津波の浸水 限界と1-2kmの差があることが判明した.

## 2.2 地震時すべり

国土地理院・海上保安庁は陸上の GEONET 観測点に加え,海底地殻変動のデータを用いた解析 を行った.プレート境界のすべりのピークは陸上のデータのみを用いた場合に比較して海溝寄りに 推定されて,約60mとなっている.北海道大学は,さらに津波の記録を説明するモデルをインバー ジョンで推定している.その結果,すべりのピークはやはり宮城沖の海溝寄りにあり,約50mと 推定されている(図4).

防災科学技術研究所は、東北地方に設置されている K-net,KIK-net 観測点のうち 36 観測点のデー タを用いて断層面すべりの時間発展を推定した.その結果、岩手県南部から福島県北部にかけて の海溝近傍に大きなすべりの領域が推定された.すべりは、最初の 60 秒間は宮城県沖で生じ、60-100 秒後に海溝近傍で大規模なすべりに発展した.100 秒以降、すべりは福島・茨城県沖へと伝搬 したことがわかった(図5).

東北大学は、地震時のすべりを迅速に推定する手法としてリアルタイムキネマティック解析のG PSデータを用いる手法を提案した. 地震時のすべりの発展をリアルタイムキネマティック解析で 即時に取得し、迅速に永久変位を推定することによってマグニチュードの成長を計算している. 計 算によると、今回の地震の場合地震発生後85秒で Mw8.0、145秒で Mw8.6 の震源断層を推定する ことができている. 2.3 すべりの物理モデル

東京大学地震研究所は、海溝沿いの浅部のすべりが大きくなった原因としてプレート境界面の間 隙水圧分布の影響を指摘している.海溝沿いの深さ20kmよりも浅い領域では、それ以深と比較し て非常に透水率が大きく、その結果として間隙水圧が小さくなり、実効応力が大きくなる.このこ とが海溝沿いですべりが大きくなった原因であるとしている.また宮城沖と福島沖の地震時すべり 様式の違いは、福島沖浅部が a-b が負であるもののスティフネスが臨界スティフネスよりも大きい 「条件付き準安定領域」であったため、地震間で固着と準安定すべりを繰り返していた可能性があ ると指摘した.

宮城沖では、陸よりの宮城沖,沖合の三陸南部海溝より、海溝沿いの津波地震を発生する領域で 地震の繰り返し周期が異なることが推定されていた。地震研究所はそれそれの領域におけるすべり 残しの蓄積が2011年東北地方太平洋沖地震で一度に解放されたとすると発生間隔が約700年とな ることを示した。これは通常発生している比較的小さな地震の発生周期よりも長い周期(スーパー サイクル)で発生する規模の大きな地震が存在するという階層構造を示している。



- 図1. GEONETの連続データから推定した東北地方のひずみ変化。1997年から 2010年までの期間で代表的な4年について1年間のひずみ変化を示した。福 島県周辺(○印)のひずみ速度が徐々に小さくなっていく様子が明らかであ る。(国土地理院資料)
- Figure 1. Temporal variation of strain rate in four one-year periods from 1997 to 2010. The strain rate has been decreasing around the Fukushima prefecture before the 2011 Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake (GSI).



- 図 2. 東北地方太平洋沖地震の震源域周辺の b 値とその時間変化。気象庁一元化カ タログのうち 2002 年 1 月から本震直前までのM 2.5 以上の地震を用いている。 2007 年以降の b 値を 2002 年 1 月から 2006 年 12 月までに起きた地震に基づ く b 値の空間分布を比較すると、本震震源付近の b 値は 2007 年以降の方が 小さくなっていることがわかる。その領域(37.8-39.0N, 142.6-144.0E)の b 値 は時間とともに顕著な現象を示している。(東京大学地震研究所)
- Figure 2. Spatial distribution of b-value in and around the source area of 2011 Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake. JMA catalog data above M2.5 between 2002 and the time immediately before the main shock are used. The b-value near the epicenter of the mainshock is significantly smaller in the period after 2007 than that between 2002 and 2006. The b-value in the region (37.8-39.0N, 142.6-144.0E) decreased with time after 2005.



- 図 3. 右図の GEONET 観測点から GPS 1 5 番衛星を見たときの電離圏電子以上 (TEC). なめらかな曲線は TEC の変化を 2 次関数で近似したもの。本震の 約 40 分前から異常が見られる。
- Figure 3. Ionosphere Total Electron Content (TEC) for the GPS satellite #15 seen from the GEONET station in the map. The TECs are approximated by quadratic functions. Observed TECs began to deviat from the function about 40 minutes before the mainshock.



- 図4.陸上・海底の地殻変動および津波波形のデータを用いて推定した、プレート境 界の地震地すべり(北海道大学).
- Figure 4. Slip distribution of the 2011Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, which is estimated with tsunami data in addition to the data of land and sea-bottom crustal deformation (Hokkaido University).



- 図5. 東北地方の K-net, KIK-net の観測データを用いた震源過程解析の結果. 左は 解析に用いた観測点とすべり分布。右は10秒ごとのすべり量で破壊進展を 表したもの。
- Figure 5. Source process of 2011 Off Pacific Coast of Tohoku Earthquake using data of K-net and KIK-net in the Tohoku area. The left figure shows the seismic stations for analysis and final slip distribution. The right figure shows the snap-shot at every 10 second period from the initial rupture.