12-6 2011 年東北地方太平洋沖地震前に見られた前兆的現象 Precursory phenomena observed before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

気象研究所

Meteorological Research Institute

2011年東北地方太平洋沖地震(以下本震と呼ぶ)発生前に現れた地震活動や地殻変動などに関す る前兆的な変化について,報告されている事象を収集し,とりまとめた.その結果,本震発生の数 十年前から地震発生直前に至る幅広い時間スケールで,本震発生と関連する可能性のある複数の現 象が報告されていた.ただし,これらの現象と本震の規模や発生時期との定量的な関係や因果関係 は必ずしも明らかにされていない.なお,直前予知に有効と期待されている前駆すべりについては, 明瞭に加速するような前駆すべりは観測されなかった.それぞれの前兆的現象の特徴は以下のとお りである.

1. 地震活動関連

1.1 静穏化現象

静穏化現象については複数の報告があり、本震発生の4~23年前から震源域の深部や北部の他, 西南日本を含む日本全国で静穏化がみられたようである.ただし、データの処理方法や解析手法の 違いによって静穏化域や期間は異なっている.具体的には以下のような報告がある.

Katsumata¹⁾は気象庁一元化震源を用いてZ値の時空間変化を計算することにより,本震の23.4年前の1987年11月頃から,本震で大きく滑った領域の深部縁辺での静穏化を捉えた(ただし,静穏化は本震までは継続していない).また,統計数理研究所²⁾は時空間ETASおよび時間ETASモデルを使用し,確率論的デクラスタを行い常時地震活動を抽出した結果,本震の約15年前の1996-2006年頃から日本全国で静穏化していたと報告した.また,地震活動指数³⁾を計算して面的に静穏化域の抽出を試みた結果,本震の約10年前の2001年ごろから青森県および岩手県の陸域から海域にかけての領域で静穏化がみられ,過去に発生したM7-8クラスの地震前の静穏化の特徴^{4),5)}から本震規模などの推定が可能,との報告^{6),7)}もある.さらに,本震の余震域にあたる東北沖海域の広い範囲で2007年の一年間だけ(北半分では2008年前半まで)静穏化がみられた,との報告^{8),9),10)}がある.

1.2 地球潮汐との相関

田中¹¹⁾(Tanaka¹²⁾)は、本震の約10年前から、本震や2011年3月9日の前震が発生した付近で、 地震活動と地球潮汐との強い相関が見出された、との報告を行った。それによると、GCMTカタロ グから1976-2011年、M_w5.0以上、70km以浅の541イベントを取り出し、地震発生と地球潮汐(に よる断層面上のせん断応力)との相関を検定したところ次のようなことが明らかとなった。空間的 には、本震前3000日間の地震データを用いて検定した結果、ほとんどの場所で有意な相関があると はいえないが、前震・本震が発生した周辺では有意な相関があった。また、時間的には上記の有意 な相関があった領域について、3000日(約8.2年)の時間ウィンドウを500日(約1.4年)ずつ移 動させながら検定した結果、1976年以降約25年間は有意な相関は認められないが、2000年頃から 本震直前まで徐々に相関が強くなった。なお、大地震の前に地震発生と地球潮汐との相関が認めら れた事例は、スマトラ沖やトンガなどのプレート境界地震についても報告^{13,14)}されており、本震の 規模と潮汐相関が現れる先行時間の間に相関がある可能性も示唆されている¹²⁾.

1.3 b 値の変化

b 値の変化については、遅くとも本震発生の約 6 年前頃から値が低下し始め、更に本震の約 1 ヶ 月前からの前震活動に伴い急降下した、という報告^{15),16)}がある.空間的には低 b 値域と本震で大き く滑った領域には相関がみられる.具体的には以下のとおりである. Nanjo et al.¹⁵⁾は,2000 年以降, M≧2.5,60 km 以浅の気象庁一元化震源を用い、M の下限 (M_{th})を EMR 法¹⁷⁾で推定し、M_{th}以上 のイベントに対して最尤法で b 値を推定した.その結果、本震時に大きく滑った領域で b 値は小さ いことを明らかにするとともに、その領域では、2005 年頃から b 値が徐々に低下していたことを示 した.同様な解析を 1965 年以降の地震 (M≧5.0,100 km 以浅) についても行った結果、長期的な b 値の低下も同領域内でみられた.また、弘瀬・前田¹⁶は、2003 年以降、M≧2.0、深さ 0-90 km の 気象庁一元化震源について、Wiemer and Wyss¹⁸⁾の手法で M_{th}を推定し、M_{th}以上のイベントに対し て最尤法で b 値を推定した.その結果、本震の約 1 か月前以降の前震活動により b 値が低下し、本 震発生後に b 値は大きく増加したことを示した.また、Nanjo et al.¹⁵⁾と同様に本震時に大きく滑っ た領域と b 値が小さい領域には相関がある事を示した.なお、b 値の推定には M_{th}の推定が大きく 影響することに注意する必要がある.

1. 4 前震活動

Kato et al.¹⁹⁾は、震源域に近接する地震観測網の連続波形データに着目し、地震波形との相互相関 解析を施すことで、気象庁カタログに含まれていない多数の微小地震を検出し、新たな前震の震源 カタログを構築した.このカタログを分析することで、本震の破壊開始点へ向かう震源移動が、本 震の約1か月前の2月中旬から下旬までと、3月9日のM7.3の最大前震の発生後の2度にわたり見 られたことがわかった.これらの前震活動には、小繰り返し地震が含まれていたことから、震源の 移動は、本震の破壊開始点へ向かうプレート境界面上のゆっくりすべりの伝播が示唆される.一方、 前震活動による本震の発生確率を求めた報告 ^{20),21),22),23)}がある.前田・弘瀬 ²⁰⁾は,Maeda²⁴⁾の方法を 拡張し、東日本太平洋沖海域でどのような地震活動を直前の前震活動とみなせば統計的に本震発生 の予測に有効かについて調査した. その結果,過去50年(1961年~2010年)のデータから地震の 続発性が強い東北沖の3領域に限ると、最適なパラメータを用いて前震候補を選択した場合、30% 程度の適中率で M≥6.0 の地震を予測可能であり, 2011 年東北地方太平洋沖地震の前震活動でも同様 の適中率であるとした.また,Ogata and Katsura²³⁾は群れとしての地震活動に着目し,前震活動につ いて, 1994-2011 年 4 月のデータを解析した結果, ある地域で新規の地震活動(M≧4.0) が始まっ た時,その後,規模が0.5以上大きい地震が発生する確率は,全国平均では3.8%,また,複数のイ ベントが発生し、それらが前震となる確率は全国平均で7.2%であると計算した.東北地方太平洋沖 地震の前の地震活動に適用した場合, 2011 年 2 月の前震活動では平均 7.2%以下の予測確率であっ たが、3月9日の最大前震 M7.3 に向かって増加し、最大前震時に 20%近くになった.なお、日本付 近の前震活動の統計的性質については、明田川・福満による報告²⁵⁾もある.

2. 地殼変動関連

2.1 長期的スロースリップ

気象研究所²⁶⁾は, GPS の基線長変化を解析し,非定常変位が2003年頃から始まっていることを 指摘した.その変動源をプレート境界上と仮定し,すべり分布を求めると,東北地方太平洋沖地震 の破壊開始点から主に南側の福島県,茨城県沖に分布していた.また,国土地理院²⁷⁾は,10年前 (1997年1月~2000年1月)と最新(2007年1月~2010年1月)の3年間のGPS観測点 の平均変動速度から推定したすべり欠損速度分布を求めた結果,10年前には宮城県から福島県沖を 中心に最大8cmを超えるすべり欠損が推定されていたが,最新では、宮城県北部沖で最大6cmの すべり欠損にとどまり,特に福島県沖ではほとんどすべり欠損が推定されなかったことを明らかに した.海上保安庁²⁸⁾は,海底基準点を宮城沖に2点,釜石沖に2点設置し,キネマティックGPS/ 音響測距方式による海底地殻変動観測を実施し,地震発生前までの観測結果からユーラシアプレー ト安定域に対する移動速度を求めた.その結果、宮城沖では2006年12月~2011年2月に約5~6cm/ 年の速度で西北西に移動しており,福島沖では2002年7月~2011年2月に約2cm/年の速度でほぼ 西向きに移動しているという結果が得られた.このことは,福島県沖の固着が弱かったことを示し ている.Ozawa et al.²⁹⁾は,GPSデータにより本震前,本震時,本震後のすべりについての時空間発 展の推定を行い,2003年1月頃から始まった本震前のスロースリップについては2011年1月まで にその規模はMw7.7相当に達したと推定した.一方,東北地方太平洋沖地震の震源域では、2005年 以降いくつかのM7クラスの地震が発生したが,その余効変動が異常に大きかった事例が報告され ている^{30,31)}.

2.2 短期的スロースリップ

Ito et al.³²⁾によると、本震の約2年半前の2008年11月下旬と、本震の約1ヶ月前の2011年1月 下旬から3月9日の最大前震の直前まで、震源に近い位置に設置された海底圧力計に変化が見られ、 解析の結果、本震から海溝寄りの領域で M_w7程度のスロースリップが発生していたと推定された. 陸上でも金華山の体積ひずみ計で海底圧力変化に同期した変化が観測されている³²⁾.また、Ohta et al.³³は3月9日の最大前震(M7.3)の余効変動について解析し、ひずみ計、GPS、海底圧力計のデ ータなどから余効すべりが前震の震源域から南側の本震に向かって拡大したと推定した.ただし、 加速的な変動は観測されなかった.国土地理院の報告²⁷⁾においても、GPSの観測では3月9日の 最大前震の余効変動を除いて、本震直前には顕著な変化は見られないとされている.国土地理院に よるプレート境界上のすべりの検知能力は、本震震源付近では約M_w6.7~7.1程度であった.なお、 防災科学技術研究所の報告³⁴⁾によれば、Hi-net 併設の高感度加速度計(傾斜計)について、前震お よび本震に先立つ顕著な傾斜変動は観測されていない.傾斜計の検知能力は、本震震源域下端付近 もしくは深部延長上で M_w6.2、本震の震源付近では M_w7.3 である.

3. その他の現象

その他の現象として、電離層関係の現象については以下のような報告がある.日置³⁵⁾(Heki³⁶⁾) は GPS 観測から得られる電離圏全電子数(TEC)の異常が本震の1時間ほど前から震源域全体に見 られるとした.同様の異常は2004年スマトラ・アンダマン地震、2010年チリ地震、1994年北海道 東方沖地震においても見られるという.ただし、Kakinami et al.³⁷⁾は、同じくTECの解析を行い、 本震後にTECが大きく変動している原因は、津波による海面変動が電離層擾乱をもたらしたためと 指摘しており、Kakinami et al. に示されている図からは前兆的変化は明瞭ではない.上記の他、地 震の数日前から大気・電離層における4つの異なる観測要素(外向き長波放射、TEC、低軌道電離 層トモグラフィ、電離層 F2 領域臨界周波数)で異常な変化が観測されたという報告^{38),39)}がある. なお、地磁気観測所⁴⁰⁾によると2011年3月10~12日にかけては磁気嵐が発生しており、電離層の 異常が現れやすい条件にあった. 以上の各種前兆的現象の先行時間の分布を第1図にまとめて示す.

(前田憲二・弘瀬冬樹・小林昭夫)

引用文献

【地震活動関連】

- Katsumata, K., 2011, A long-term seismic quiescence started 23 years before the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M = 9.0), Earth Planets Space, 63, 709-712.
- 統計数理研究所,2011,東北地方太平洋沖地震の前震活動と広域的静穏化について,連絡会報, 86,134-141.
- 3) 塚越利光・石垣祐三, 2003, 東海地域の地震活動レベルの評価, 月刊地球号外, 41, 101-109.
- 4) 太田健治・他,2010, プレート境界型繰り返し地震発生前の静穏化域検出(2), 日本地球惑星 科学連合予稿集, SSS012-03.
- 5) 気象庁・他, 2011, 客観的手法による地震活動静穏化の検出, 連絡会報, 85, 8-18.
- 吉川澄夫,2011,平成23年東北地方太平洋沖地震前の地震活動静穏化現象,日本地震学会講演 予稿集,A32-07.
- 吉川澄夫・林元直樹, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震前の静穏化現象-再考, 日本地球惑星 科学連合予稿集, SSS25-03.
- 8) 気象庁, 2008, 東北地方の地震活動の静穏化, 連絡会報, 79, 69-73.
- 9) 気象庁, 2008, 東北地方とその周辺の地震活動, 連絡会報, 80, 55-65.
- 10) 気象庁, 2009, 東北地方とその周辺の地震活動, 連絡会報, 81, 84-97.
- 11) 田中佐千子, 2011, 月や太陽の引力が地震の引き金に-東北地方太平洋沖地震に先行した地球 潮汐の地震トリガー現象, 科学, 81, 1060-1062.
- Tanaka, S., 2012, Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (M_w 9.1), Geophys. Res. Lett., 39, L00G26, doi:10.1029/2012GL051179.
- Tanaka, S., M. Ohtake, and H. Sato, 2004, Tidal triggering effect on earthquake occurrence precursory to large thrust earthquakes in subduction zones, Eos Trans. AGU, 85(47), Fall Meet. Suppl., Abstract, S21B-0275.
- 14) Tanaka, S. , 2010, Tidal triggering of earthquakes precursory to the recent Sumatra megathrust earthquakes of 26 December 2004 (Mw 9.0), 28 March 2005 (Mw 8.6), and 12 September 2007 (Mw 8.5), Geophys. Res. Lett., 37, L02301, doi:10.1029/2009GL041581.
- 15) Nanjo, K. Z., N. Hirata, K. Obara, and K. Kasahara, 2012, Decade-scale decrease in b value prior to the M9-class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes, Geophys. Res. Lett., 39, L20304, doi:10.1029/2012GL052997.
- 16) 弘瀬冬樹・前田憲二, 2011, 東北太平洋沈み込み帯のb値の時空間変化, 日本地球惑星科学連合 予稿集, MIS036-P96.
- 17) Woessner J., and S. Wiemer, 2005, Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty, Bull. Seism. Soc. Am., 95, 684-698.
- Wiemer, S., and M. Wyss, 2000, Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 90, 859-869.

- Kato, A. et al., 2012, Propagation of slow slip leading up to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki Earthquake, Science, 335, 705-708, doi: 10.1126/science.1215141.
- 20) 前田憲二・弘瀬冬樹, 2011, 前震の経験則に基づく東北地方太平洋沖地震の予測可能性, 日本地 震学会講演予稿集, P3-10.
- 21) Maeda, K., and F. Hirose, 2012, Prediction Performance of Empirically Defined Foreshocks and Its Application to the 2011 Off Tohoku Earthquake, Abstracts of international symposium on statistical modeling and real-time probability forecasting for earthquakes, 14, <u>http://bemlar.ism.ac.jp/sympo/all-abstract_merged-3-v2.pdf</u>
- 22) 統計数理研究所, 2011, 前震の確率予報の実施と評価: 東北地方太平洋沖地震までの15年間, 連絡会報, 86, 123-125.
- Ogata, Y. and K. Katsura, 2012, Prospective foreshock forecast experiment during the last 17 years, Geophys. J. Int. 191(3): 1237-1244 doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05645.x
- Maeda, K., 1996, The use of foreshocks in probabilistic prediction along the Japan and Kuril trenches, Bull. Seism. Soc. Am., 86, 242-254.
- 25) 明田川保・福満修一郎, 2011, 震度 5 弱を観測するなどの顕著な地震が前震であった事例について, 験震時報, 74, 17-28.

【地殻変動関連】

- 26) 気象研究所, 2011, 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震の数年前からの震源域内の非地 震性すべり, 連絡会報, 86, 182-183.
- 27) 国土地理院, 2011, 東北地方の地殻変動, 連絡会報, 86, 184-272.
- 28) 海上保安庁, 2011, 海底地殻変動観測結果から得られた平成 23 年(2011 年) 東北地方太平洋沖 地震発生前後の海底の動き, 連絡会報, 86, 284-293.
- 29) Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, J. Geophys. Res., 117, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.
- 30) Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa, 2011, Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake as inferred from GPS data, Earth Planets Space, 63, 615-619.
- 31) 西村卓也, 2012, 測地観測データに基づく東北日本の最近120年間の地殻変動, 地質学雑誌, 118, 278-293.
- 32) Ito, Y., et al., 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.022
- 33) Ohta, Y., et al. ,2012, Geodetic constraints on afterslip characteristics following the March 9, 2011, Sanriku-oki earthquake, Japan, Geophys. Res. Lett., 39, L16304, doi:10.1029/2012GL052430.
- 34) 防災科学技術研究所, 2011, 2011 年東北地方太平洋沖地震前の傾斜記録, 連絡会報, 86, 298-302.

【電離層関連】

- 35) 日置幸介, 2011, 超高層大気は巨大地震の発生を知っていたか?, 科学, 81, 1063-1064.
- Heki, K., 2011, Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku Oki earthquake, Geophys. Res. Lett., 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908.

- 37) Kakinami, Y., M. Kamogawa, Y. Tanioka, S. Watanabe, A. R. Gusman, J.-Y. Liu, Y. Watanabe, and T. Mogi, 2012, Tsunamigenic ionospheric hole, Geophys. Res. Lett., 39, L00G27, doi:10.1029/2011GL050159.
- 38) He, L., L. Wu, S. Pulinets, S. Liu, and F. Yang, 2012, A nonlinear background removal method for seismo-ionospheric anomaly analysis under a complex solar activity scenario: A case study of the M9.0 Tohoku earthquake, Advances in Space Research, 50, 211-220.
- 39) Ouzounov D, Pulinets S, Romanov A, Romanov A, Tsybulya K, Davidenko D, Kafatos M, Taylor P, 2011, Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results, Earthquake Science, 24, 557-564.
- 40) 地磁気観測所, 2011, 2011 年3月の磁気嵐,
 <u>http://www.kakioka-jma.go.jp/obsdata/mstorm2011/mstorm201103.html</u>



第1図 各種前兆的現象の先行時間の分布図. 地震活動関連, 地殻変動関連, 電離層関連によって 色分けして表示した.

Figure1. Lead times for reported precursory phenomena that are colored by their categories of seismic anomaly, crustal deformation, and ionospheric anomaly.