3. 長野県北部の地震(2011年3月12日, M6.7, M5.9, M5.3)

1. はじめに

2011年3月12日午前3時59分に,長野県・新潟県 県境付近で,M6.7の地震が発生した(山田,2014¹⁾). 長野県栄村で震度6強,新潟県津南村,十日町市で震 度6弱を記録した(気象庁,2011²⁾).同12日,午前4 時31分にはM5.9最大余震,5時42分にはM5.3の余 震が発生し,いずれも最大震度6弱の地震となった(気 象庁,2011³⁾,気象庁地震予知情報課,2011⁴⁾).この地 震による被害は,長野県栄村を中心として災害関連死3 名,全壊73棟,半壊427棟に及んだ(長野県危機管理部, 2012⁵⁾;新潟県防災局危機対策課,2012⁶⁾).この地震は 2011年東北地方太平洋沖地震の約13時間後に発生した もので,規模の大きな誘発地震と考えられる.日本海拡 大時のリフト帯の東縁の厚い堆積物に覆われた逆断層 -褶曲帯で発生した地殻内地震であり,断層は地表には現 れていない.



2. 震源域の地質

新潟から長野県北部にかけての地域は,2000万から 1500万年前の日本海拡大期に大きな伸張変形を受けた 地域で,大規模な堆積盆地が形成され厚い堆積物が分 布している.盆地内の厚い堆積層はその後の短縮変形に より褶曲帯を形成している.2011年長野県北部地震の 震源は,堆積盆地の南東端に位置する.大局的には日本 海形成時の東北日本の反時計回転運動に伴って活動し た,西北西-東南東方向の断層との交差部に相当し(図 2),地質構造的には複雑な形状を示す地域である.震源 域西側の堆積盆地には厚さ6km程度の堆積層が分布し, 佐藤 比呂志 (東京大学地震研究所地震予知研究センター)

東側の越後山地では新第三系の堆積層は厚さ1km 程度 になる(佐藤ほか、2012⁸⁾). 震源域の周辺には、北方で は十日町断層帯が、南西方向には信濃川縁断層帯が分布 する(図3). 震源域は厚い堆積物の東縁が北東から南 西に移動し、その間ではこの境界は東西走向に変化する.



図2 本州中央部の地殻構造の概要(佐藤,2014⁷⁾)と 2011年長野県北部地震.星印:2011年長野県北部 地震の震央.



図3 震源域周辺の地質.地質図・活断層は産業技術総合研究 所 地質調査総合センター「地質図 Navi」による.震源 断層のモデルとすべり量分布は気象庁(2012)⁹⁾による. 矩形の実線部分が上面. Mz:中世界・古生界, Gr. 花崗岩 類, N2S:中新世堆積岩, N3S:後期中新世〜鮮新世堆積岩, N3V:後期中新世〜鮮新世火山岩, N3P:後期中新世〜鮮 新世深成岩, Qs:第四系堆積物, QV:第四系火山岩, Td: 段丘堆積物.A と B, 震源断層の北東側と南西側(防災科 学研究所, 2011¹⁰⁾による).

3. 地震活動と地震のメカニズム解

長野県北東部から中越地域にかけては,褶曲-断層帯 を形成し,被害地震が多数発生している.震源域南東方 では1848年の善光寺地震(M7.4)の他,マグニチュー ド6を越える地震が発生している.2011年東北地方 太平洋沖地震前の震源域周辺の広域応力場は,発震機 構解からは最大主圧力軸がWNW-ESE方向の逆断層 型の応力場が卓越している(Terakawa and Matsu'ura, 2010¹¹⁾).

2011 年長野県北部地震の本震の発震機構解は、P 波 初動解やモーメントテンソル解によって、NW-SE 方向 から WNW-ESE 方向に主圧力軸をもつ逆断層型である ことが報告されている(表1,図4)^{2,12,13)}. 気象庁による この地震の発震機構解¹⁾は、北西 - 南東方向に主圧力軸 をもつ逆断層型である. ただし、機関ごとに得られてい る断層面は必ずしも一致しておらず(泰ほか,2012¹⁴⁾)、 複雑な破壊が進行した可能性がある.

表 1	モーメン	・トテン	ソル解のハ	ペラメータ-
~ .				

	断層面解1			断層面解 2				
	走向	傾斜	すべ り角	走向	傾斜	すべ り角		
気象庁 12)	60	31	110	216	61	78		
防災科技 13)	29	56	70	242	38	117		
	単位: 度							



2011 年長野県北部地震の発生時,震源域では防災科 学技術研究所が「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」 の一環として,稠密なオフライン自然地震観測が実施さ れていた(図5).このデータを用いて波形相関データ を用いた DD 法により震源が決定されている.この震源 は,他機関のデータに比べ最も精度が高い.本震の震源 は深さ約8 km,12日9:00 までに発生した余震の分布は, 本震を中心として北北東 - 南南西方向に約17 kmの広 がりを持ち,深さ4~10 km に集中している.防災科学 技術研究所の研究グループによれば,余震域の北東側と



図5 波形相関データを用いた DD 法による精密震央分布 (2011 3/11, 21:00-3/12,9:00)(左) 稠密地震観測 網の位置図.防災科学技術研究所(2011)¹⁰⁾による.



図6 図5のA-A'断面に震源を投影した図(左は北東域, 右は南西域)¹⁰⁾.



図7 震央分布(防災科学技術研究所,2011¹⁰⁾). 北緯 36.9°以北は「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」 によるオフライン観測点データの解析から得られた精 密震央分布.2011 3/11_21:00-3/12_9:00). 北緯 36.9°以南は Hi-net 定常処理による震央分布を示す (2011_3/15_10:40-4/12_8:30). Hi-net および F-net の発震機構解を合わせて示す.

南西側では余震分布の特徴に違いがあり、北東側の余震 域では、余震が37[°]程度の南東傾斜の面状に分布する が、南西側では明瞭ではない.このことから、北東側と 南西側では断層面の形状が異なっている可能性が指摘さ れている.

3月12日午前3時59分の本震に続いて、4時31分に はM5.9の最大余震が、同日5時42分にはM5.3の余震 が発生した(図1). 一ヶ月後の2011年4月12日7時 26分頃に長野県北部を震源とするM5.6(気象庁暫定値) の地震が発生し、長野県栄村と木島平村で最大震度5



図8 3月12日長野県北部の地震 - 近地強震波形による震源過程解析(暫定)-. 気象庁(2012)⁹による.

弱の揺れが観測された. この地震の震央は3月12日の 震央から約20km南に位置し,震源の深さは約5kmで あった(図7). この地震のHi-netおよびF-netの発震 機構解はともに北北西-南南東圧縮の横ずれ断層型を 示す. こうした本震を発生させた方向と直交する方向の 断層は,日本海拡大時のリフト形成期に形成されたもの で,4月12日の余震もこうした断層が再活動したものと 推定される.

4. 近地強震波形による震源過程解析

気象庁の近地強震波形による震源過程解析(図8)で は、走向N35°E,南東方向に43°南東傾斜の断層面 を設定して解析している.この断層の傾斜は、防災科学 技術研究所の震源域北東部の余震分布から推定した傾 斜(約37°)よりやや角度が大きい.気象庁の解析では, 震源域全体を一つの矩形で近似している.得られた断層 面上でのすべり分布は断層の北東部で大きく,震源断層 面の南西部分の浅部でもすべり量の大きい解析結果が得 られている.すべりの大きな領域は,北東部と南東部に 孤立して分布するが,この境界は防災科学技術研究所に よって指摘されている北東部と南西部の境界(図5)と ほぼ一致する.

5. 地殻変動

2011 年長野県北部の地震に伴う地殻変動は、GNSS 観測点と合成開口レーダーの解析(宇宙航空開発機構、 2011¹⁶)から得られている.GNSS 観測点の変動は、震 源域の北方に位置する松之山の観測点が 23cm の隆起と



図9 長野県・新潟県県境付近の地震(3月12日, M6.7)に伴う地殻変動(国土地理院, 2011¹⁵⁾⁾.

37cm の北東への移動を示している(図9). 松之山観測 点の北西に位置する安塚では周辺の観測点に比べて隆 起成分が小さい. Lバンド合成開口レーダの SAR 干渉 画像(図10)では,松之山を中心として隆起パターン が観測されている.松之山観測点は,松之山背斜の北東 側に位置する.松之山背斜は軸跡が北東 - 南西方向で軸 長6km,ドーム状の背斜である(竹ノ内ほか,2000¹⁷⁾). 余震分布からは南東傾斜の逆断層が推定されており,そ の浅部の地表部が松之山背斜周辺に相当することにな る.この領域は,近地強震記録から推定されたすべりの 大きい領域の地表延長部に相当することになり(図2), 地殻変動の観測結果とも調和的である.

6. 地表地震断層

震源付近には、活断層として東北東-西南西走向の宮 野原断層が認定されている(池田ら、2002¹⁹⁾. 地表地震 断層については、松多ほか(2011)²⁰⁾・廣内ほか(2012) ²¹⁾・中埜ほか、2012¹⁸⁾などによって調査されている. 宮 野原断層周辺を含め、明確な地表地震断層を確認するに は至っていない.



 図10 SAR 干渉画像¹⁶⁾と主な被害分布(中埜ほか, 2012¹⁸⁾). 星印は本震と最大余震の震央, AとBは, それぞれ本震および最大余震に伴う地殻変動. 白波 線は,中埜ほか(2012¹⁸⁾)による震源断層の地表投 影位置. 背景は電子国土基本図を使用.



図 11 震源域を北西 - 南東方向に横切る構造断面概念図.測 線位置は、図 5 の A-A'による.円:震源(防災科学 技術研究所,2011¹⁰⁾による).

7. 地殻構造と震源断層

震源域を通過する制御震源による地殻構造探査は実施されていないが、近傍を横切るものとしては、六日町 - 直江津測線、飯山 - 小谷測線がある(佐藤、2014²²⁾). 新潟 - 北部フォッサマグナ地域は、日本海拡大時のリフ ト帯であり、厚い堆積物が堆積している(図1).二つ の測線の速度構造からは、Vpが5.3km/sより早い層は、 震源域のリフト内では深さ6kmほどに位置し、リフト 内は約5kmほどの堆積物が充填していると推定される. 自然地震トモグラフィではリフト構造は下部地殻の高 速度領域として抽出できる(佐藤、2014⁷⁾; Matsubara et al., 2017²³⁾).このようなリフト帯の縁では苦鉄質岩の迸 入により、リフト軸から離れる方向に傾斜した岩質境界 が形成され、そのシステムが短縮変形を受けるとリフト 軸の外側に傾斜した逆断層が形成される.飯山 - 小谷測 線ではこうした楔型の断層が判別され、深部の断層の傾 斜と堆積層を変位させる断層が逆の傾斜になっている。 1847年の善光寺地震は震源断層が南東傾斜であったと 推定され、今回の2011年長野県北部地震と類似の構造 形態をとるものと考えられる.こうした震源断層の形状 はその直上での栄村や津南村に大きな被害をもたらした ものと推定される.

東頸城山地では厚い堆積物が褶曲 - 断層帯を構成する が、松之山背斜などに代表されるように軸長が短い褶曲 をなし、リフト内では顕著な隆起帯が形成されていない。 塑性変形が卓越し、とくに新第三系下部の泥岩が流動変 形している可能性が高い。こうした物性を反映して、東 頸城山地の中では泥火山が形成されている(加藤ほか、 2009²⁴⁾)。したがって、堆積層中での断層は複雑な形状・ 連結性を示し、こうした地質構造が明瞭な地表地震断層 の出現を困難にしている可能性が高い(図 11)。

8. 誘発地震としての 2011 年長野県北部地震

本地震が発生したのは 2011 年東北地方太平洋地震発 生の 13 時間後であり, M9 の超巨大地震とは密接な関 係を有していることは想像に難くない.東北太平洋沖地 震に,上盤プレート内の応力状態が大きく変化したこと が知られている.この地震は逆断層型の地震であり,地 震前に比べ圧縮成分が減少した応力状態で発生したこと は矛盾する.Terakawa et al. (2013)²⁵⁾は,その余震も含 めて,発震機構解をモール円にプロットした上で,水の 関与について論じている.

9. まとめ

2011年長野県北部地震は、新潟-北部フォッサマグ ナ東縁の断層が WNW-ESE 方向の横ずれ断層と交差す る,複雑な地質構造が推定される箇所で発生した.防災 科学技術研究所の稠密な地震観測網で決定された震源 断層は南東方向の傾斜を示す. 断層の走向はリフト軸と 平行し傾斜の方向はリフト軸の外側に傾斜し、本震は日 本海拡大時のリフト縁の断層の再活動であるが高い. こ の震源断層は厚い堆積層の下で伏在断層となり、このた め地表地震断層は出現していない。東北地方太平洋沖 地震によって誘発された地震であるが、この巨大地震に よって上盤プレート内で生じた応力変化はむしろ地震の 発生を抑制する. 巨大地震によって発生した応力状態の 変化によって、間隙水圧が増大し、これによって誘発さ れた可能性が大きい(Terakawa et al., 2013)²⁵⁾. ブレー ト境界での巨大地震後には、誘発地震が発生する可能性 は極めて高い. こうした誘発地震を理解する上で、また 日本海東縁の褶曲 - 断層帯の伏在断層による地震を理解 する上で重要な地震であった.

参考文献

- 山田真澄,2014.2011年3月12日長野県北部の地 震東日本大震災合同調査報告,共通編1地震と地 震動,5.4節,pp.196-202,東日本大震災合同調査 報告書編集委員会.
- 2)気象庁,2011.報道発表資料,「平成23年3月12日03時59分頃の長野県北部の地震について」. https://www.jma.go.jp/jma/press/1103/12c/kaisetu 201103120500.pdf
- 3)気象庁,2011.報道発表資料,「平成23年3月12日 03時59分頃の長野県北部の地震について(第2報)」. https://www.jma.go.jp/jma/press/1103/12d/kaisetsu 201103120800.pdf
- 4)気象庁地震予知情報課、2011.2011年3月12日長野県・新潟県県境付近の地震(M6.7)について.地 震予知連絡会会報、8,468-473.
- 5) 長野県危機管理部, 2012. 長野県北部の地震による 県内への影響について. https://www.pref.nagano.lg.jp/bosai/kurashi/saigai/ documents/241001n.pdf
- 6)新潟県地震災害対策本部,2011.「平成23年312日
 03時59分頃の長野県北部の地震」の被害状況について(速報第10報).

https://www.pref.niigata.lg.jp/upload/attachment/ 59952.pdf

- 7) 佐藤比呂志, 2014. 日本列島の生い立ちと長期地殻 応力・歪の起源. 予知連会報, 92, 431-433.
- 8) 佐藤比呂志・岩崎貴哉・石山達也・加藤直子, 2012. 六日町 - 直江津沖測線地殻構造探査. ひずみ 集中帯の重点的調査観測・研究(平成23年度)成 果報告書,211-254.
- 9)気象庁,2012.3月12日長野県北部の地震-近地強 震波形による震源過程解析(暫定)-.
 http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/ event/201103120359near.pdf
- 10)防災科学技術研究所,2011.2011年3月12日-4月
 12日長野県北部の地震.
 http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/n-nagano11032/
- 11) Terakawa, T. and M. Matsu' ura, 2010. The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events, Tectonics, 29, TC6008, doi:10.1029/2009TC002626.
- 12) 気象庁, 主な地震の発震機構解.https://www.data. jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/index.html
- 防災科学技術研究所、「防災科学技術研究所 F-net Project による広帯域地震波形を用いたメカニズム 解析結果.https://www.fnet.bosai.go.jp/event/joho.

php?LANG=ja

- 14) 秦吉弥・村田晶・野津厚・宮島昌克,2012.サイト 特性置換手法に基づく2011年長野・新潟県境地震 における栄村横倉集落での地震動の評価.日本地震 工学会論文集12(2),60-77.
- 15) 国土地理院,2011. 平成23年(2011年)3月12日3 時59分頃の長野県北部の地震に伴う地殻変動について.http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_ naganohokubu.html
- 16) 宇宙航空開発機構, 2011, 陸域観測技術衛星「だ いち」(ALOS) による中部地方の観測結果. http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/img_up/jdis_pal_ chubueq_110411.htm
- 17)竹内圭史・吉川敏之・釜井俊孝,2000.松之山温 泉地域の地質.地域地質研究報告(5万分の1地 質図幅),地質調査所,76p.
- 18) 中埜貴元・小荒井衛・乙井康成・小林知勝, 2012.
 2011 年 3 月 12 日長野県・新潟県県境付近の地震に伴う災害の特徴,国土地理院時報, No.123, 35-48.2012.
- 19)池田安隆·今泉俊文·東郷正美·平川一臣·宮内崇裕・ 佐藤比呂志,2002.第四紀逆断層アトラス.東京大 学出版会.
- 20) 松多信尚, 杉戸信彦, 廣内大助, 2011. 2011 年 3 月
 12 日長野県・新潟県県境付近の地震に伴う地表変状 (速報).
 http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/INFO/tohoku20110311/ chihyou_110317.pdf
- 21) 廣内大助・松多信尚・杉戸信彦・竹下欣宏,2012,3 月12日長野県北部の地震に伴う地変と栄村周辺地 域の活断層,長野県北部地震災害調査研究報告書, 9-15,2012-01-27,信州大学山岳科学総合研究所.
- 22) 佐藤比呂志, 2014. 反射法・屈折法による地殻構造 調査. 文部科学省委託研究「ひずみ集中帯の重点的 調査観測・研究」総括成果報告書, 57-63, 2014.
- 23) Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, A. Van Horne, 2017. Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands derived from threedimensional seismic tomography, Tectonophysics, 710-711, 97-107.
- 24) 加藤 進・早稲田 周・西田英毅・岩野裕継, 2009. 新潟県東頸城地域における泥火山および周辺の原 油・ガスの地球化学.地学雑誌,118,455-471.
- Terakawa, T., C. Hashimoto and M. Matsu'ura, 2013. Changes in seismic activity following the 2011 Tohoku-oki earthquake: Effects of pore fluid pressure. Earth and Planetary Science Letters, 365, 17-24.