2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震の地震断層と活動履歴

Surface rupture associated with the April 11, 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake and paleoseismic history of the causative fault

Abstract

堤 浩之* 遠田晋次**

Hiroyuki Tsutsumi and Shinji Toda***

2012年3月13日受付.

2012年7月10日受理.

* 京都大学大学院理学研究科地球物理学教室
Department of Geophysics, Graduate School
of Science, Kyoto University, Kyoto, Kyoto
606-8502, Japan

** 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター
Research Center for Earthquake Prediction,
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto
University, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Corresponding author; H. Tsutsumi,
tsutsumh@kugi.kyoto-u.ac.jp

The devastating 11 March 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake ruptured a 500-km-long and 200-km-wide plate interface between the North American and Pacific plates along the Tohoku coast of north-east Japan. The large source area and huge amount of slip (up to 50 m) of this earthquake caused a drastic change in the crustal stress of northeast Japan and triggered widespread seismic activity. Iwaki City at the southeast corner of Fukushima Prefecture is an example of an area that has experienced significantly elevated seismic activity since the 11 March 2011 earthquake. The most striking characteristic of seismicity in this area is that the majority of the earthquakes have normal faulting mechanisms, contrasting significantly with the geotectonically, seismologically, and geologically identified E–W compressional stress field of northeast Japan. This suggests that the dominant E–W tensional stress regime in this area may be transient and related to coseismic and post-seismic eastward movement of the northeast Japan Arc. The largest Mw 6.6 normal faulting event (JMA magnitude 7.0) in this area occurred on 11 April 2011 and ruptured two previously mapped faults: the NW-trending Yunodake fault and the NNW-trending Itozawa fault. A clear ~15-km-long surface rupture of the Yunodake fault and ~14-km-long rupture of the western trace of the Itozawa fault appeared during the earthquake, with a normal down-to-the-west sense of slip. The maximum vertical offset on the Yunodake fault is 0.9 m, with the western trace of the Itozawa fault having a maximum vertical offset of 2.1 m. We suggest that the 11 April 2011 earthquake was caused by reactivation of these two sub-parallel normal faults, caused by transient extensional stress related to the 11 March 2011 mega-thrust earthquake. Paleoseismic trenching across the western trace of the Itozawa fault revealed that the penultimate surface-rupturing earthquake occurred sometime between 12,500 and 17,000 cal. yr BP, suggesting that the fault was not activated by the 869 Jogan earthquake, which may have been the last mega-thrust earthquake before the 2011 event.

Keywords: triggered earthquake, Fukushima-ken Hamadori earthquake, normal faulting, surface rupture, trenching

はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)では、長さ約500 kmで幅約200 kmのプレート境界が破壊した(例えば, Simons et al., 2011). 最大変位量が50 mを超える大きなすべりを伴ったこの地震は東北日本の応力状態を大きく変え、いくつかの地域で地殻内地震が多数誘発されている(Fig. 1; 遠田, 2011; Toda et al., 2011). 福島県南東部のいわき市周辺も3月11日以降に地殻内地震活動が活発になった地域であり、ほとんどの地震が正断層型の地震であることが特徴である(Fig. 2). 2011年4月11日17時16分に、いわき市直下で M_{JMA} 7.0の正断層型の地震が発生

し、「福島県浜通りの地震」と命名された(気象庁, 2011). この地震のモーメントマグニチュードはMw 6.6と見積もられている(地震調査研究推進本部, 2011). この地震に伴って、活断層研究会編(1991)や中田・今泉編(2002)で確実度Ⅱあるいは推定活断層とされていた湯ノ岳断層や井戸沢断層の一部に沿って、明瞭な正断層型の地震断層が現れた(Fig. 3).

福島県浜通りの地震は、以下のような点において、これまでの活断層研究の常識を覆す地震であった. すなわち、1) プレートの沈み込みによる東西圧縮応力場にあり、南北走向の逆断層が卓越する東北日本において、内陸活断層上で正断層型の大地震が発生した、2) 断層変位地形が明瞭とはいえ

Fig. 1. Diagram showing the spatial relationship between post-Tohoku-oki earthquakes and increased Coulomb failure stress for normal faults caused by the 2011 Tohoku-oki earthquake; beach balls are color-coded using the Frohlich diagram (Frohlich, 2001) and represent focal mechanisms determined by the NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention) F-net (depth ≤ 20 km, occurring between 2011/03/11 and 2011/08/10). Coulomb stress change is resolved for normal faults with strike 155° , dip 60° , and rake -90° at a depth of 10 km. Source fault models of Wei et al. (2011) were used during computation; note that the majority of the shallow normal faulting events may have been at least partially induced by the main shock.

ない確実度Ⅱあるいは推定活断層が活動して、明瞭な地震断層を伴う大地震が発生した、3)ひとつの地震で、独立した2条の断層(湯ノ岳断層・井戸沢断層)が同時に破壊した、4)海溝型超巨大地震の発生に誘発されて活動する内陸活断層が存在することが明らかとなった、ことである。2011年3月の海溝型超巨大地震およびそれに誘発された2011年4月の内陸直下型地震は、近代的な地震・活断層研究が始まって以降の100年間では非常に特異なイベントであった。一方、より長期間(数百～千年)の地震サイクルの中では繰り返してこってきた定常的な事象であるという指摘もある(佐竹, 2011)。よって、東北地方太平洋沖地震に誘発された2011年4月の地震の地形・地質学的背景を明らかにすることは、活断層から発生する地震の適切な評価および海溝型超巨大地震と活断層の相互作用を理解する上で極めて重要である。

2011年4月11日に出現した地震断層については、地震直後から多くの大学・研究機関が調査を行い、その調査速報がホームページで公開されてきた(例えば、東京大学地震研究所、(独)土木研究所、応用地質株式会社、(独)産業技術総合研究所など)。我々も上記の観点から、4月16～17日の調査を皮切りに、数次の現地調査を実施してきた。地震断層は、アクセスの困難な山地域を通過する箇所も多く、全域を

踏査し詳細にマッピングするにはかなりの時間を必要とする。我々の調査も未踏査の区間をいくつか残しており、調査は現在も継続中であるが、地震断層の分布の概要や特徴についてはほぼ解明できたと考えている。また、地震断層の分布や特徴を記載するのに加え、2011年9月には、井戸沢断層に沿って現れた地震断層のトレンチ掘削調査を行い、4月の地震のひとつ前の断層活動の地質学的痕跡を見いだした。

本論文では、地震断層の出現位置や変位量分布および井戸沢断層の活動履歴について、我々自身の調査結果を速報的に報告する。地震断層やトレンチ壁面の詳細な記載は、別稿にて行う予定である。また、多くの機関による調査結果は速報としてホームページに公開されている段階であるので、これらを網羅的に紹介することはしない。

2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震の概要

1. 東北地方太平洋沖地震に誘発された正断層型の地震活動

東北地方太平洋沖地震に伴って震央付近の海底は東南東に約24 m移動し(Sato et al., 2011)、陸上では牡鹿半島が東南東に5.3 m移動した(Ozawa et al., 2011)。これにより、東北地方の地殻が東西方向に大きく引き伸ばされた。これまで東北日本弧は太平洋プレートに押され東西に圧縮されてい

Fig. 2. Large, shallow earthquake focal mechanisms for events after the 2011 Tohoku-oki Mw 9.0 mainshock in Iwaki area, including the 11 April 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake; data derived from the NIED F-net catalog. Small dots indicate earthquakes after the Tohoku-oki mainshock that occurred between 2011/03/11 and 2011/08/10 at a depth of ≤ 20 km; active fault traces are from The Research Group for Active Faults of Japan (1991).

たことがわかっており (Suwa et al., 2006), 2011 年 3 月 11 日の地震の前後で東北日本弧の応力場が一時的に反転したと考えられている (Toda et al., 2011)。

このような大規模な地殻変動によって, 東北地方では地震の発生域とメカニズムが大きく変化した (Fig. 1)。東北地方太平洋沖地震の発生後に地震活動が低下した地域がある一方, 発生前までは地震活動が低調で, 本震後に活動が活発になった地域がある。前者は, 東北地方の逆断層にかかるクーロン応力の低下によって説明される (Toda et al., 2011)。地震活動が著しく活発になった地域では, 正断層型や横ずれ断層型の地震が卓越するといった特徴がある。そのような地域の代表として, 福島県南東部のいわき市周辺が挙げられる (Figs. 1, 2)。本震後の半年間で数千個以上の M 1 以上の地震が記録され, 群発地震活動の様相を呈している。また, メカニズム解のほとんどが正断層型である。この正断層型の地震活動の原因を, 応力場が東西圧縮から東西伸張へと反転したためとする解釈がある (例えば, Kato et al., 2011)。それに対して, いわき市周辺は東北地方太平洋沖地震の発生前から, 北西-南東方向に引張軸を持つ正断層型の応力場であったとの解釈も提示されている (Imanishi et al., 2012)。すなわち, 元々正断層型の応力場であった地域に東北地方太平洋沖地震による東西引張の応力変化が加わったことで, 正断層地震活動が活発化したという解釈である。いずれの解釈にせよ, この地域の顕著な地震活動が 3 月 11 日の地震に誘発さ

れたことは間違いない。海溝型超巨大地震によって内陸で正断層型地震が誘発された例は東北地方太平洋沖地震だけではない。同様な例は, 2010 年 2 月 27 日にチリの沖合で発生した Maule 地震 (Mw 8.8) でも報告されている。この海溝型巨大地震から約 2 週間後の 2010 年 3 月 11 日に, 陸域で正断層型の地震 (Mw 6.9 と 7.0) が発生したが, これらの地震は先行した Maule 地震による上盤側の大陸地殻の伸張と応力場の転換に起因すると考えられている (Fariás et al., 2011)。

Fig. 2 に, 福島県と茨城県の県境付近の群発地震活動の震央と主な地震の発震機構を示す。ほとんどが正断層型の地震であることが特徴的である。2011 年 4 月 11 日には, いわき市を震央とする気象庁マグニチュード 7.0 (Mw 6.6) の地震が発生し, 斜面崩壊や家屋の損壊が多数生じ 4 名が亡くなった。この地震に伴って, 湯ノ岳断層と井戸沢断層に沿って顕著な地震断層が現れた (Fig. 3)。この地震に伴う断層変位は, 地球観測衛星「だいち」(ALOS) のデータを使った InSAR 解析からも, 干渉縞の顕著な不連続として明瞭に捉えられている (福島ほか, 2011; 国土地理院, 2011)。

2. 震源域の地形・地質・活断層

2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震の震源域は, 阿武隈山地の南部に位置し, 行政区分では福島県いわき市に含まれる (Figs. 2, 3)。湯ノ岳断層の北東と井戸沢断層の西には標高 1000 m 以下の山地が広がるが, 両断層の間には標高 300 m 以下の定高性のある丘陵が分布する。震源域のほぼ全域が鮫川流域に属するが, 北東部の一部のみ藤原川流域に含まれる。地質学的には, 山地部は阿武隈帯の花崗岩と低圧型変成岩からなる (Fig. 4)。御簾所変成岩は, 塩基性岩起源の緑色片岩や細粒角閃岩を主とし, 細粒雲母片岩, 砂質片岩および珪岩をはさみ, 白亜紀に変成したと考えられている (加納ほか, 1973)。湯ノ岳断層の北東には, 地表での分布幅が東西・南北共に 5 km に達する花崗岩体が分布し, 入遠野複合岩体と呼ばれている。湯ノ岳断層と井戸沢断層の間には, 第三系がくさび状に分布する。この区域は, 常磐炭田を形成する第三系堆積盆地の西縁部にあたり, 中新統の湯長谷層群が御簾所変成岩を不整合に覆う (加納ほか, 1973)。

震源域周辺では, 福島県浜通りの地震で活動した湯ノ岳断層と井戸沢断層を含む数条の北西-南東~北北西-南南東走向の活断層が認定されていた (Fig. 2)。湯ノ岳断層は, 南西落ちの上下変位成分を持つ, 長さ 6 km の確実度 II の断層として認定されていた (活断層研究会編, 1991)。この断層は, 湯ノ岳を含む北東側の山地と南西側の小起伏の丘陵地との地形境界をなす。しかし, 第四紀後期の地形面や堆積物を切る変位地形や断層露頭は報告されていない。地質学的には, 北東側の御簾所変成岩や入遠野複合岩体と南西側の第三系との地質境界をなし, 南西傾斜の正断層であることが露頭で確認されている (Fig. 4; 岩生・松井, 1961; Mitsui, 1971; 加納ほか, 1973)。岩生・松井 (1961) は, 湯ノ岳断層を挟んだ地質の対比に基づき, 北東側の地塊が南西側に対して 7 km 以上東側に (右ずれのセンスに) 移動しているとした。井戸沢断層は, 西落ちの上下変位成分を持つ主に 3 条のトレースか

Fig. 3. Diagram showing the spatial relationship between the surface rupture of the 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake and the location of active and presumed active faults identified from aerial photographs during this study. The shaded relief map was constructed using 10 m mesh digital elevation data from the Geospatial Information Authority of Japan.

らなる長さ 10 km の確実度Ⅱの断層として認定されていた (Fig. 2; 活断層研究会編, 1991). 本論文では, これら 3 条のトレースを, 井戸沢断層の東側トレース・井戸沢断層の西側トレース・井戸沢断層の南側トレースと呼ぶことにする (Fig. 3). 2011 年 4 月 11 日の地震では, 井戸沢断層の西側トレースに沿って明瞭な地震断層が出現し, また東側のトレースに沿って小規模な地変が断続的に現れた. 井戸沢断層の東側トレースは, 加納ほか (1973) の地質図に示されている狭義の井戸沢断層に沿う. この狭義の井戸沢断層を境に御斎所変成岩類の岩相の不連続があり, マイロナイトも確認されている. また各所で, 中新世の堆積岩類を変位させている (加納ほか, 1973). 井戸沢断層の西側トレースは, 御斎所変成岩類の分布域を通過する (Fig. 4). 活断層研究会編 (1991) は, 山地高度の不連続に基づき井戸沢断層に沿って西側低下の上下変位を認定しているが, 第四紀後期の地形面の変位は報告されていない. また井戸沢断層の東側トレースに沿って, 河谷の右屈曲が認定されているが, 本研究で行った空中写真判読では, 河谷や尾根の系統的な横ずれ変位を認めることはできなかった.

湯ノ岳断層の北東側にも, 赤井断層や二ツ箭断層など, 湯ノ岳断層と走向が同じで, 南西側低下の確実度Ⅱの断層が認定されている (Fig. 2; 活断層研究会編, 1991). これらの断層も, 断層露頭の観察から南西傾斜の正断層であると考えられている (岩生・松井, 1961; Mitsui, 1971).

地震断層調査

1. 地震断層の位置・変位量分布・形態

明瞭な正断層型の地震断層が, 湯ノ岳断層と井戸沢断層の西側トレースに沿って現れた. ここでは, 地震断層の位置や変位量分布, および形態についてその概略を記載する. 現地調査では, 断層の出現位置は携帯型 GPS で記録した. 変位量の計測にあたっては, 舗装道路・農道・畦などではオートレベルやハンドレベルを用いた断面測量を行い, 断面図を作成して変位量を計測した. 山地域では, 斜面に現れた断層崖の比高をハンドレベルや折り尺を使って計測した.

湯ノ岳断層に沿う地震断層は, いわき市遠野町入遠野官沢から常磐藤原町礼堂まで, 一般走向 N50°W の方向に約 15 km にわたって追跡できる (Figs. 3, 5a). 地震断層トレー

Fig. 4. Location of rupture zones associated with the 2011 earthquake superimposed on the Seamless Digital Geological Map of Japan (Geological Survey of Japan, AIST (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), 2007), indicating that both rupture traces were produced by the reactivation of faults associated with Miocene basin formation.

スは、ステップ・屈曲・不連続を含み、やや複雑な形状を示す。地震断層北端の官沢から遠野町入遠野東山の区間では、断層トレースは約 2 km にわたって連続的に追跡できる (Fig. 6)。東山の東方で断層トレースは約 300 m 左ステップすると共に、長さ約 500 m にわたって地震断層が確認できない区間が存在する。遠野町上根本冷水から南東方では、山地と丘陵の傾斜変換線に沿って地震断層が出現した (Figs. 3, 5a)。このトレースは南東方に約 10 km にわたって連続性よく追跡できるが、常磐藤原町阿良田^{あらだ}でほぼ直角に屈曲し、この北東走向のトレースは約 700 m で消滅する。阿良田の南東方には、約 700 m の断層トレースのギャップを挟んで、常磐藤原町田場坂^{たばさか}から礼堂までのびる長さ約 2.5 km のトレースが分布する。また常磐藤原町別所^{べつし}では、N60°E の走向を示す長さ約 400 m の地震断層が確認された。この断層に沿う変位は、北西落ちと左横ずれが共に約 10 cm である。

湯の岳断層に沿って出現した地震断層の変位は、西落ちの垂直変位が卓越する。最大変位量は約 90 cm で、大まかには台形状の変位量分布を示す (Fig. 5a)。田場坂以南のトレースの最大変位量は約 80 cm である。断層が山地域を通過するため、横ずれ変位を計測できた地点数は少ないが、計測された地点の多くで 10 cm 程度の左横ずれが観察された。また多くの地点で断層面が露出し、南西に高角度で傾斜する断層面に沿って、南西側の地盤がずり落ちる正断層変位が起こったことが確認された。

井戸沢断層の西側トレースに沿う地震断層は、いわき市田人町石住綱木^{つなぎ}の北西方から田人町旅人滑石^{たびうとなめいし}まで、N20°W の方向に約 14 km にわたって追跡できる (Figs. 3, 5b)。起伏

の大きな山地域を通過するものの、地震断層のトレースは非常に直線的である。また、田人町黒田塩ノ平で断層トレースが北方に分岐するのを除いて、断層トレースの連続性は良い (Figs. 5b, 7)。地震断層に沿う変位は西落ちが卓越し、崖面が山地斜面の上方を向く逆向き低断層崖を形成する。そのため、多くの地点で断層の低下側が水没した (Figs. 8a, 8b, 8c)。最大変位量は、塩ノ平の南で計測された 2.1 m であり、そこから南北へ変位量が減少する山型の分布を示す (Fig. 5b)。最大変位量が計測された地点が断層トレースの中央よりもやや南に位置するため、変位量の減少の度合いは北へ緩やかで、南に急である。横ずれ変位は、最大変位量が計測された塩ノ平を境に、断層の南半部で右ずれが、北半部で左ずれが観察される (Fig. 7)。最大変位量が計測された地点に向かって断層の上盤がひばられることで、このような横ずれ変位パターンが生じたと考えられる。井戸沢断層の西側トレースに沿った地震断層でも、断層面が多くの地点で露出した (Fig. 8d)。断層面は高角西傾斜からほぼ垂直であり、地形の起伏にかかわらず直線性が高い断層トレースと調和的である。

井戸沢断層の東側トレースに沿っては、田人町黒田塩ノ平で、未舗装道路を N5°W 方向に横切る開口幅 3 cm の亀裂が認められた (Fig. 3)。また遠野町入遠野諏訪^{すわ}と羽黒^{はぐろ}では、舗装道路を横切る開口クラックが直線上に並んで出現し (Fig. 6)、諏訪では約 10 cm の西落ち変位が認められた。これらの地変は、井戸沢断層の東側トレースの 300~400 m 東側に位置し、断層にほぼ平行な直線上に並ぶ。InSAR 解析では、井戸沢断層の東側トレースに沿っても 10 cm 程度の変位があったと推定されており (福島ほか, 2011)、これらの地変は井戸沢断層の東側トレースの地表変位を表す可能性がある。変位量が小さかったため、地表変位を断続的にしか認定できなかった可能性が高い。

この地震で出現した地震断層は、日本内地で近年初めて出現した正断層型の地震断層であり、正断層地形や地質構造の発達過程を理解するのに貴重な情報を提供する。地震断層が基盤岩からなる山地を横切るところでは、高角に西傾斜する断層面が露出し断層崖を形成した (Fig. 8d)。また多くの地点で、断層面には条線が観察された (Fig. 8e)。このような場所では、断層によってシャープに切断される以外には地表の変形は認められなかった。一方、沖積低地を横切るところでは、地震断層は西側低下の撓曲崖として出現し、崖の頂部に開口亀裂を伴っていた (Figs. 8f, 8g)。これは基盤岩中の断層変位が堆積層の中では分散し、撓曲変形するためと考えられる。このような地表変形様式は、撓曲崖とその頂部の開口割れ目からなる「ギャウ」と呼ばれるアイスランドの正断層地形 (植村, 2001) と類似する。開口亀裂は、地震断層が右ずれ変位を伴う場合には左雁行配列し (Fig. 8g)、左ずれを伴う場合は右雁行配列する (Fig. 8f) ように、リーデル剪断の方向に出現した。

2. 地震断層と断層変位地形

地震断層の調査と並行して、震源域の空中写真の判読を行った。判読した空中写真は、1960 年代と 70 年代に撮影

Fig. 5. Distribution of vertical slip and plan views of surface ruptures of (a) the Yunodake fault and (b) the western strand of the Itozawa fault during the 2011 earthquake; possible maximum displacements along rupture zones were preferentially selected and are outlined in gray.

された縮尺2万分の1のモノクロ空中写真、および1970年代に撮影された縮尺4万分の1のモノクロ空中写真である。活断層の判読基準は、国土地理院都市圏活断層図の判読基準(国土地理院地理調査部, 1996)に従った。

判読結果をFig. 3に示す。湯ノ岳断層は、2条のトレースから構成される。北西側のトレースは、遠野町入遠野貝那夫から冷水まで、長さ約5 kmである。このトレースは、遠野町入遠野白鳥以東では連続する鞍部列を通過する(Fig. 6)。また断層を横切る河谷が系統的に左屈曲し、断層分離丘・截頭谷などの変位地形が認められる。河谷の屈曲量は最大でも50 m程度である。地震断層は、このトレースの東半部の官沢から東山の区間に現れ、その位置は断層の地表トレースの位置にほぼ一致する。湯ノ岳断層の南東側のトレースは、そこから200~300 m北東側で、山地と丘陵の地形

境界に位置する(Figs. 3, 6)。このトレースは、遠野町入遠野天王から常磐藤原町別所まで約11 kmにわたって認定される。北西側のトレースと南東側のトレースは約2 kmにわたって並走(オーバーラップ)する。しかし、地震断層はこれらのトレースの端には出現せず、約500 mにわたって地震断層が出現しなかった区間(ギャップ)がある。南東側のトレースは山地と丘陵の明瞭な地形変換線に沿っており、鞍部列・シャッターリッジ・分離丘・截頭谷などの変位地形が認められる。また遠野町深山田鷹ノ巣以西では、河谷の系統的な左屈曲が認められ、屈曲量は最大で約100 mである。藤原川以東では、断層変位地形が不明瞭になり、断層トレースの位置も不明確になる。地震断層は南東側のトレースにほぼ沿って現れたが、厳密にはトレースの位置よりも斜面の上方に現れる場合が多かった。これは斜面上方からの崖錐堆積物

Fig. 6. Detailed map of the 2011 rupture along the northwestern part of the Yunodake fault and the northern part of the eastern strand of the Itozawa fault; traces of faults and tectonically derived geomorphic features delineated by interpretation of aerial photographs during this study are also shown. Base map is derived from the 1:25,000 topographic “Kato-no” and “Joban-Yumoto” map sheets published by the Geospatial Information Authority of Japan.

の崩落によって、断層トレースの位置を示す傾斜変換線の位置が時間と共に下方に移動したためと考えられる。湯ノ岳断層に沿っては、沖積面を変位させる断層変位地形は認められず、第四紀後期の活動の有無を判断できる材料に乏しいことから、活断層研究会編(1991)では確実度Ⅱ、中田・今泉編(2002)では推定活断層とされていたと思われる。今回の判読では、河谷の系統的な左屈曲を認定できたことから、湯ノ岳断層は活断層と認定されるに十分な地形学的証拠を伴っていると判断した。

阿良田から北東にのびる地震断層や常磐自動車道の南東に現れた地震断層に沿っては、断層変位地形を見出すことはできない。またこの区間では、地震断層は南西落ちの変位を示すが、これは南西が段丘で北東が開析谷という地形の大局的な配置とは逆である。よってこの区間の地震断層は、第四紀後期に繰り返して活動した断層が破壊して生じたとは考えがたい。

井戸沢断層については、短いトレースも含めて多くの断層トレースが認められた(Fig. 3)。東側のトレースは遠野越台からいわき市川部町成作まで直線的にのびる。このトレースから南に分岐し、川部町佐倉から北茨城市関本町富士ヶ丘までのトレースが南側のトレースである。西側のトレースは、田人町黒田齊道から川部町佐倉付近まで直線的に連続するが、鮫川の北では断続的な短いトレースからなる。また、並走する西側と東側トレースの間には、これらに並走および斜交する短い推定断層が認められる。井戸沢断層はその全域にわたって、山地斜面上に西向き(逆向き)の低断層崖を形成する。東方へ流下する河川の下流側が隆起するので、河谷がせき止められて形成された低地が連続する(Fig. 7)。また、断層トレースの東側には、風隙地形が多く認め

られる。井戸沢断層に沿っては沖積低地が変位している箇所は認められず、第四紀後期の活動の確実な地形学的証拠がないため、中田・今泉編(2002)と同様に推定活断層と認定した。

地震断層は、井戸沢断層の西側トレースに沿って現れた(Fig. 7)。Fig. 8aは塩ノ平上空から南に向かって撮られた空撮写真である。東に流下する河川が西向きの断層崖でせき止められ南北方向にのびる低地が形成されている。その断層崖の基部に地震断層が現れた。また南方には、東へ高度を低下する山地斜面に断層鞍部が連続し(Fig. 8aの白抜き三角印)、地震断層がまさにその位置に現れた。

井戸沢断層の西側トレースのトレンチ掘削調査

東北地方沖の海溝型超巨大地震の発生履歴を解明するために、津波堆積物の調査などが精力的に進められている(例えば、澤井ほか, 2007)。本研究では、誘発された正断層大地震(2011年4月11日福島県浜通りの地震)の地震断層の活動史を調べることによって海溝型超巨大地震の履歴を間接的に明らかにできる可能性があると考え、井戸沢断層の西側トレースでトレンチ掘削調査を行った。調査は、2011年9月に田人町黒田掛橋の別当川南岸で実施した(Fig. 7)。この地点では、別当川が形成した河岸段丘を横切って、35 cmの右横ずれ変位を伴う高さ1.2 mの西落ちの地震断層が出現した(Fig. 8h)。当地点を調査地として選定したのは、地震断層が東向きの山地斜面の基部に逆向き(逆向き)の崖として出現したためである。すなわち、2011年のような西側低下の断層運動が繰り返されたならば、断層の低下側が細粒な堆積物で埋められている可能性が高いと考えた。なお、掘削地は地震前には1枚の水田であり、崖地形は存在しなかった。

Fig. 7. Detailed map of the 2011 rupture along the central portion of the western strand of the Itozawa fault; traces of faults and tectonically derived geomorphic features delineated by interpretation of aerial photographs are also shown. Base map is derived from the 1:25,000 topographic "Katono" and "Kamihiraishi" map sheets published by the Geospatial Information Authority of Japan. Study areas of other authors mentioned in the text are also shown.

掘削したトレンチは長さ約 15 m、幅約 7 m、深さ約 3.5 m である (Fig. 8i)。トレンチ壁面には、別当川が運んできた礫層とそれを覆う砂層・シルト層・腐植土層、およびそれらを変位させる高角度西傾斜の正断層が露出した (Fig. 9)。断層帯の東西両側に分布する地層を層相に基づいて A～F 層に区分し、さらに断層の低下側 (西側) のみに分布するあるいは厚く堆積する地層を X・Y 層として区分した。F 層は別当川が運んできた段丘礫層であり、それより上位の地

層はシルト～礫からなるフラッドロームやチャネル堆積物である。断層は地表の開口割れ目の約 50 cm 西側に位置する。地表の上下変位量は 1.2 m であるが、トレンチ壁面に露出した地層の断層による食い違い量はそれよりも著しく小さく、段丘礫層 (F 層) 上面の食い違い量は約 40 cm である。また C 層の最下部より上位では断層による地層の切断は認められず、かわりに幅約 3 m の範囲で撓曲変形している。すなわち、堆積物中では断層の上下変位が撓曲として解消されていることがわかる。

地層の上下変位量や変形構造に基づき、2011 年 4 月 11 日の地震に先行する 1 回の地震イベントを解読した。A～C 層の上下変位量は、地表と同様に約 1.2 m である。それに対して、下位の D～F 層の上下変位量は約 1.5 m であり、地表や上位の地層の変形量よりも大きい。また A～E 層は変形帯を挟んで層厚がほぼ同じであるのに対して、断層の低下側の C 層と D 層の間には低地を埋めた堆積物である X 層と Y 層が分布する。X 層と Y 層は、D 層上面をオンラップで覆い、傾斜不整合の関係にある。また、S4.5～5 付近の D 層と E 層には開口クラックとそれを埋めた構造が見られ (Fig. 9c)、北面では同じ層準に腐植質シルト層に挟まれた粗～中粒砂層が液状化して流動した痕跡が認められる (Fig. 9b)。これらの観察事項に基づき、2011 年地震に先行する断層活動のイベント層準を D 層の上面に認定した。ただし、このイベントに伴う西落ち変位量は約 30 cm であり、最新イベント時の上下変位量と比べて有意に小さい。また、開口クラックの出現位置が撓曲構造の頂部ではなく基部付近にあるのは、最新イベントと同様な断層運動では説明が困難である。開口クラックの下位に、先行するイベントに関連した断層が存在する可能性があるが、そのような断層はトレンチ壁面では確認できなかった。よって、先行するイベントの際の断層運動が 2011 年地震時と比べて大きく異なっていた可能性は指摘できるが、具体的にどの断層がどのように変位したのかについては本トレンチ調査では明らかにすることができなかった。

2011 年地震と先行する地震の上下変位量が大きく異なることは井戸沢断層の西側トレースで行われた他の調査でも指摘されている。丸山ほか (2012) は、斉道において、始良 Tn (AT) テフラ (2.6～2.9 万年前、町田・新井, 2003) の降灰以前に離水した地形面が、井戸沢断層の西側トレースによって 1.7～1.9 m 西落ち変位していることを見いだした (調査地点は Fig. 7 参照)。この地点での 2011 年地震時の上下変位量は約 1.3 m であるため、先行する断層活動に伴う上下変位量は 0.4～0.6 m となり、本トレンチ調査結果と同様に、先行する断層活動の上下変位量が 2011 年地震時の上下変位量よりも有意に小さい (丸山ほか, 2012)。また黒澤ほか (2012) は、塩ノ平において地震断層を貫くボーリングを掘削し (調査地点は Fig. 7 参照)、断層の上盤側に存在する傾斜不整合に基づき 2011 年地震を含む複数回の断層活動の可能性を指摘した。

2011 年地震に先行する地震イベントの時期を特定するために、壁面から採取された木片や炭の年代測定を行った。

Fig. 8. (a) Surface rupture along the western strand of the Itozawa fault cutting across rice paddy field at Shionohira; open triangles indicate fault saddles along which the surface rupture appeared. Photograph taken by Go Sato of Teikyo Heisei University. (b) En echelon surface rupture along the western strand of the Itozawa fault cutting across rice paddy field at Nakano; photograph taken by Go Sato of Teikyo Heisei University. (c) Fault scarp (<1 m) of the western strand of the Itozawa fault at Shionohira; down-slope side of the rice paddy field was uplifted and downthrown side filled with water. (d) Exposed bedrock along a ~2-m-high fault scarp associated with the western strand of the Itozawa fault at Shionohira. (e) Close-up of part of the exposed fault plane shown in (d), showing oblique slip-related fault plane striations that are consistent with the measured oblique slip. (f) Right-stepping en echelon fissures observed at Shionohira on the western strand of the Itozawa fault, suggesting a small left-lateral slip component. (g) Left-stepping en echelon fissures observed at Nakano on the western strand of the Itozawa fault, suggesting a small right-lateral slip component. (h) Surface rupture of the western strand of the Itozawa fault cutting across Betto River terraces at Kakehashi; the trench shown in (i) was excavated across this surface rupture during September 2011. (i) Paleoseismic trench across the western strand of the Itozawa fault at Kakehashi.

Fig. 9 に示す年代は、 $\delta^{13}\text{C}$ 補正を行ったうえで、Ox-Calv4.1 較正プログラム (Bronk Ramsey, 2009) によって暦年較正を行ったものである。すべての年代は標準偏差の 2 倍範囲 (2 σ) で表示している。イベント層準の下位の D 層や E 層からは 19400 年~16820 cal. yBP の 4 つの年代値が得られ、イベント層準の直上の X 層からは、12890~12620 cal. yBP の年代値が得られた。よって先行するイベントは、12500~17000 年前に発生したと考えられる。この結果は、井戸沢断層の西側トレースに沿って沖積面を切る変動崖が認められないという観察結果と調和的である。また、2011 年 3 月の地震に匹敵する津波を仙台平野にもたら

したと考えられている西暦 869 年の貞観地震 (Minoura et al., 2001; 澤井ほか, 2007; 佐竹ほか, 2008) 前後には、井戸沢断層の西側トレースは活動しなかったことが判明した。福島県南東部には、湯ノ岳断層や井戸沢断層と同様の北西走向の正断層が数条分布しているが (Fig. 2), これらの活動履歴は不明である。東北沖で発生する海溝型超巨大地震とこれらの正断層群の関係を明らかにするためには、これらの正断層群のトレンチ掘削調査を進める必要がある。

おわりに

本論文では、2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震で

Fig. 9. (a) Photo mosaic and logging of the south wall of the trench excavated at Kakehashi; trench wall slopes at $\sim 70^\circ$ but the log and photo mosaic are projected onto a vertical surface. Two- σ ranges of dendrochronologically calibrated radiocarbon dates (cal. yBP) are shown with sampling points. (b) Close-up showing liquefied sand associated with the penultimate seismic event exposed on the north wall of the trench. Two- σ ranges of dendrochronologically calibrated radiocarbon dates (cal. yBP) are shown with sampling points. (c) Close-up of open crack associated with the penultimate event on the south wall of the trench.

出現した地震断層のマッピングとトレンチ掘削調査の概要を紹介した。地震断層の調査は現在も継続中であり、トレンチ掘削調査も井戸沢断層の西側トレースの1地点で行ったのみである。InSAR解析によると、福島県浜通りの地震では湯ノ岳断層・井戸沢断層の西側トレースのみならず、井戸沢断層の東側トレースも同時に変位した可能性が指摘されている。また井戸沢断層の東側トレースと西側トレースが地下数kmで収斂するモデルも提案されている(福島ほか, 2011)。よって、震源域の正断層群の第四紀後期～完新世における活動履歴を欠落なく明らかにするためには、湯ノ岳断層や井戸沢断層の東側トレースの古地震調査が必要である。今後古地震学的調査を継続し、調査地域の断層群の活動履歴と津波堆積物などから推定される海溝型超巨大地震の発生履歴の関係を詳細に検討する予定である。

謝 辞

地震断層の現地調査とトレンチ掘削調査に当たっては、(株)クレアリアの小俣雅志氏・郡谷順英氏・森 良樹氏、名古屋大学の杉戸信彦氏、京都大学の安田大剛氏・杉山達哉

氏・石村大輔氏・廣瀬志保氏にご協力いただいた。(株)加速器分析研究所には、放射性炭素年代測定に際して便宜を図っていただいた。トレンチ掘削地点の地権者には、土地の掘削許可をいただいた。帝京平成大学の佐藤 剛氏には空撮写真を提供していただいた。京都大学防災研究所の福島 洋氏には、InSARの解析結果についてご教示いただいた。井戸沢断層のトレンチ掘削調査は、平成23年度京都大学防災研究所特別緊急共同研究(「誘発された内陸活断層地震の発生履歴から読み解く海溝型超巨大地震の再来周期」, 研究代表者: 堤 浩之)を受けて実施した。現地調査費用の一部には、(独)科学技術振興機構の国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)(「東北日本沈み込み帯における古地震・古津波研究: 東北地方太平洋沖地震と巨大地震サイクルの解明」, 日本側研究代表者: 遠田晋次)を使用した。本論文は、深畑幸俊氏と匿名査読者、および担当編集委員の池田安隆氏の査読により大きく改善された。以上の方々ならびに諸機関に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Bronk Ramsey, C., 2009, Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, **51**, 337–360.
- Fariás, M., Comte, D., Roecker, S., Carrizo, D. and Pardo, M., 2011, Crustal extensional faulting triggered by the 2010 Chilean earthquake: The Pichilemu Seismic Sequence. *Tectonics*, **30**, TC6010, doi: 10.1029/2011TC002888.
- Frolich, C., 2001, Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanism. *Geophys. Jour. Intern.*, **144**, 300–308.
- 福島 洋・高田陽一郎・橋本 学・遠田晋次・堤 浩之 (Fukushima, Y., Takada, Y., Hashimoto, M., Toda, S. and Tsutsumi, H.), 2011, 2011 年 4 月 11 日いわき地震 (Mw = 6.6) の地表地震断層と断層モデル. 日本地震学会講演予稿集 2011 年度秋季大会 (*Progr. Abstr. SSJ 2011 Fall Meet.*), 27.
- Imanishi, K., Ando, R. and Kuwahara, Y., 2012, Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L09306, doi: 10.1029/2012GL051491.
- 岩生周一・松井 寛 (Iwao, S. and Matsui, H.), 1961, 平・川前 (付井出). 5 万 分の 1 地 質 図 幅 (*Geological Map of Taira and Kawamae including Ide. 1: 50,000*), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 103p.
- 地震調査研究推進本部 (The Headquarters for Earthquake Research Promotion), 2011, 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震の評価. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11apr_fukushima/index.htm (2012 年 6 月 15 日参照).
- 加納 博・黒田吉益・宇留野勝敏・濡木輝一・蟹沢聰史・丸山孝彦・梅村隼夫・光川 寛・瀬戸延男・大平芳久・佐藤 茂・一色直記 (Kano, H., Kuroda, Y., Uruno, K., Nureki, T., Kanisawa, S., Maruyama, T., Umemura, H., Mitsukawa, H., Seto, N., Ohira, Y., Sato, S. and Isshiki, N.), 1973, 竹貫地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万 分の 1 図 幅) (*Geology of the Takumiki District. With Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 109p.
- Kato, A., Sakai, S. and Obara, K., 2011, A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate. *Earth Planets Space*, **63**, 745–748.
- 活断層研究会編 (The Research Group for Active Faults of Japan, ed.), 1991, 新編日本の活断層: 分布図と資料 (*Active Faults in Japan: Sheet Maps and Inventories, Revised Edition*)*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 437p.
- 気象庁 (Japan Meteorological Agency), 2011, 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」について (第 35 報). <http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/11b/201104111820.html> (2012 年 6 月 15 日参照).
- 国土地理院地理調査部 (Geographic Department, Geographical Survey Institute), 1996, 都市圏活断層図の作成について. 国土地理院時報 (*Jour. GSI*), **86**, 69–81.
- 国土地理院 (Geospatial Information Authority of Japan), 2011, 平成 23 年 (2011 年) 4 月 11 日福島県浜通りの地震 (M7.0) に伴う地殻変動. <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110425-index.html> (2012 年 1 月 10 日参照).
- 黒澤英樹・楮原京子・三輪敦志・佐藤ふみ・今泉俊文・宮内崇裕・橋本修一・中島秀敏・白澤道生・内田淳一 (Kurosawa, H., Kagohara, K., Miwa, A., Sato, F., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Hashimoto, S., Nakajima, H., Shirosawa, M. and Uchida, J.), 2012, 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層—いわき市田人町塩ノ平における露頭観察とボーリング調査 (速報)—. 活断層研究 (*Active Fault Res.*), **36**, 23–30.
- 丸山 正・吉見雅行・斎藤英二・齋藤 勝 (Maruyama, T., Yoshimi, M., Saito, E. and Saito, M.), 2012, 変動地形・古地震学的検討に基づく 2011 年 4 月 11 日福島県浜通りの地震に関連する断層の活動性. 活断層・地震研センターニュース (*Active Fault and Earthq. Res. Center News*), **34**, 1–9.
- 町田 洋・新井房夫 (Machida, H. and Arai, F.), 2003, 新編火山灰アトラス—日本列島とその周辺 (*Atlas of Tephra in and Around Japan (Revised Edition)*)*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 336p.
- Minoura, K., Imamura, F., Sugawara, D., Kono, Y., and Iwashita, T., 2001, The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of north-east Japan. *Jour. Nat. Disast. Sci.*, **23**, 83–88.
- Mitsui, S., 1971, Studies on the mechanism of deformation of sedimentary rocks in the Iwaki area of the Joban coal-field, Fukushima Prefecture. *Tohoku Univ. Sci. Rep. 2nd Ser. (Geol.)*, **42**, 199–272.
- 中田 高・今泉俊文編 (Nakata, T. and Imaizumi, T., eds.), 2002, 活断層詳細デジタルマップ (*Digital Active Fault Map of Japan*)*. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), DVD2 枚, 解説書 68p., 付図 1 枚.
- Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., and Imakiire, T., 2011, Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, **475**, 373–376.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター編 (Geological Survey of Japan, AIST, ed.), 2007, 20 万 分の 1 日本シームレス地質図データベース (*1: 200,000 Seamless Digital Geological Map of Japan*). 産業技術総合研究所研究情報公開データベース DB084, 産業技術総合研究所地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST).
- 佐竹健治 (Satake, K.), 2011, 東北地方太平洋沖地震の断層モデルと巨大地震発生のスーパーサイクル. 科学 (*Kagaku*), **81**, 1014–1019.
- 佐竹健治・行谷佑一・山本 滋 (Satake, K., Namegaya, Y. and Yamamoto, S.), 2008, 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション. 活断層・古地震研究報告 (*Ann. Rep. Active Fault Paleoearthq. Res., Geol. Surv. Japan, AIST*), **8**, 71–89.
- Sato, M., Ishikawa, T., Ujihara, N., Yoshida, S., Fujita, M., Mochizuki, M. and Asada, A., 2011, Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **332**, 1395.
- 澤井祐紀・穴倉正展・岡村行信・高田圭太・松浦旅人・Than Tin Aung・小松原純子・藤井雄士郎・藤原 治・佐竹健治・鎌滝孝信・佐藤伸枝 (Sawai, Y., Shishikura, M., Okamura, Y., Takada, K., Matsuura T., Aung, T. T., Komatsubara, J., Fujii, Y., Fujiwara, O., Satake, K., Kamataki, T. and Sato, N.), 2007, ハンディジオスライサーを用いた宮城県仙台平野 (仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町) における古津波痕跡調査. 活断層・古地震研究報告 (*Ann. Rep. Active Fault Paleoearthq. Res., Geol. Surv. Japan, AIST*), **7**, 47–80.
- Simons, M., Minson, S. E., Sladen, A., Ortega, F., Jiang, J., Owen, S. E., Meng, L., Ampuero, J.-P., Wei, S., Chu, R., Helmberger, D. V., Kanamori, H., Hetland, E., Moore, A. W. and Webb, F. H., 2011, The 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki earthquake: Mosaicking the megathrust from seconds to centuries. *Science*, **332**, 1421–1425.
- Suwa, Y., Miura, S., Hasegawa, A., Sato, T. and Tachibana, K., 2006, Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three-dimensional displacement field. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, B04402, doi: 10.1029/2004JB003203.
- 遠田晋次 (Toda, S.), 2011, 東北地方太平洋沖地震による地震発生場の変化. 科学 (*Kagaku*), **81**, 1049–1054.
- Toda, S., Stein, R. S. and Lin, J., 2011, Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M = 9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G03, doi: 10.1029/2011GL047834.
- 植村善博 (Uemura, Y.), 2001, 比較変動地形論: プレート境界域の地形と第四紀地殻変動 (*A Study of Comparative Tectonic Geomorphology: Tectonic Landforms of Plate Boundary Zones and Quaternary Crustal Movement*)*. 古今書院 (Ko-

kon Shoin), 203p.
Wei, S., Sladen, A. and the ARIA project, 2011, 2011 Tohoku
source model v. 1. <http://www.tectonics.caltech.edu/slip>.

history/2011_taiheiyo-oki/(2012 年 2 月 22 日参照).

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

堤 浩之・遠田晋次, 2012, 2011 年 4 月 11 日に発生した福島県浜通りの地震の地震断層と活動履歴. 地質雑, 118, 559–570. (Tsutsumi, H. and Toda, S., 2012, Surface rupture associated with the April 11, 2011 Fukushima-ken Hamadori earthquake and paleoseismic history of the causative fault. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 118, 559–570.)

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震(Mw 9.0)によって東北日本弧の応力場が大きく変化し, 誘発地震が多発している. 2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震(Mw 6.6)は, これまでに発生した最大の内陸地殻内誘発地震である. この地震に伴って, 従来推定活断層と認定されていた湯ノ岳断層や井戸沢断層の西側トレースに沿って明瞭な正断層型の地震断層が出現した. 地震断層の長さはともに約 15 km であり, 最大上下変位量は前者が約 0.9 m, 後者が約 2.1 m である. 井戸沢断層の西側トレースのトレンチ掘削調査では, ひとつ前の活動時期が 12500~17000 年前と求められ, 869 年の貞観地震の際に活動した痕跡は見出せなかった. 2011 年 4 月の福島県浜通りの地震は, 海溝型超巨大地震に誘発されて活動する内陸活断層が存在することを示すと共に, 変位地形が不明瞭な推定活断層もそのような状況下で大地震を発生させ得ることを示した.