寄 書

平成 16 年 (2004 年) 新潟県 中越地震に伴い地表に 現れた地震断層と 既存地質構造との関係

産業技術総合研究所活断層研究センター*

丸山 正・伏島祐一郎

応用地質株式会社エネルギー事業部**

黒澤 英樹

Were Location and Style of Surface Rupture
Associated with the 2004 Mid Niigata
Prefecture Earthquake Guided by
Pre-existing Geologic
Structures?

Tadashi MARUYAMA and Yuichiro FUSEJIMA
Active Fault Research Center, National Institute
of Advanced Industrial Science and
Technology (AIST), Central 7,
1-1-1 Higashi, Tsukuba,
Ibaraki 305-8567, Japan

Hideki KUROSAWA
OYO Corporation, 2-2-19 Daitakubo, Minami-ku,
Saitama, Saitama 336-0015, Japan

(Received June 28, 2005;
Accepted December 1, 2005)

§ 1. はじめに

2004 年 10 月 23 日 17 時 56 分、新潟県中越地域を震源とするマグニチュード M_{JMA} 6.8 の新潟県中越地震が発生した (Fig. 1). その後約 2 カ月にわたって M_{JMA} 5 クラスの余震が観測されるなど活発な余震活動を伴った [例えば、気象庁 (2005a, 2005b)]. 本震および余震の分布は、今回の地震が魚沼丘陵東部において、主として北北東-南南西走向で西に傾斜する逆断層の破壊に伴ったものであることを示している [例えば、Hirata *et al.* (2005), Kato A. *et al.* (2005)]. これらの破壊面の地表延長にほぼ対応する余震域東部の魚沼市 (旧 広神村)

Fig. 1. Tectonic map around the epicentral region of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, showing major active tectonic features and aftershock region (base map is partly modified from Kato and Yamazaki (1979) and Watanabe *et al.* (2001)). Lower hemisphere focal mechanism of the main shock is from Japan Meteorological Agency (2005a).

小平尾地区で、南北-北北西-南南東方向に約 1 km にわたって、水田や畑を変位させる西側上がりの地震断層が確認された [丸山・他 (2004, 2005), Maruyama *et al.* (2005)] (Figs. 2-4). これは、既存の活断層図 (例えば都市圏活断層図 [渡辺・他 (2001)]) には、活断層として図示されていなかった。この地震断層が今回はじめて活動したのか、それとも既存の活断層もしくは地質構造に沿って現れたものなのかを明らかにすることは、断層運動に伴う地質構造の発達過程を理解する上で重要である。余震域周辺では、第三紀以降に堆積した厚い地層が褶曲や逆断層により複雑に変形している [例えば、新潟県農地部農地整備課 (1977), 岡村・柳沢 (2005), 柳沢・他 (1986)]. そのため、今回の地震断層の出現位置や変形パターンは、周辺の地質構造と関連している可能性が考えられる。そこで本研究では、小平尾地区に現れた地震断層の記載および周辺の地形・地質調査を実施するとともに既存の資料を整理して、地震断層と既存地質構造ならびに変位地形との関係を検討した。なお、地震断層と震源断層との関係については、Kato N. *et al.* (2005) により検討されている。

* 〒305-8567 つくば市東 1-1-1 中央第 7

** 〒336-0015 さいたま市南区太田窪 2-2-19

§ 2. 余震域周辺の地質概要

平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震は、羽越褶曲帯の東端にあたる魚沼丘陵で発生した (Fig. 1). 魚沼丘陵は主として中期中新世から前期更新世の堆積岩類および火山岩類から構成されており、それらが主に北北東-南南西-北東-南西方向に延びる褶曲や逆断層により複雑に変形していることで特徴づけられる [例えば、柳沢・他 (1986)] (Fig. 2). これらの褶曲や逆断層には、後述するように中期更新世以降に形成された地形面を変形させているものも報告されている [例えば、渡辺・他 (2001), 柳沢・他 (1986)] (Figs. 2, 3).

今回地震断層が確認された丘陵東部は、中新世の火山岩類とそれを覆って分布する後期鮮新世-前期更新世の陸成-海成層である魚沼層からなる。魚沼層は主としてシルト層、砂層、礫層の互層から構成される。丘陵縁部には、これらの地層を覆って中期更新世以降の段丘堆

Fig. 2. Simplified geologic map around the surface rupture (compiled from Niigata Prefecture (1977), Yanagisawa *et al.* (1986) and our original data). Bedding attitude of the Plio-Pleistocene Uonuma Formation is also shown. Note that the surface rupture occurs at the stepover area between the Muikamachi-Bonchi-Seien and Obiro faults and northeastern margin of the Koyagaragawa syncline, along which the Uonuma Formation changes its strike from NE-SW to NNW-SSE, comparable with attitude of the surface rupture. u and d indicate up- and down-thrown sides, respectively.

Fig. 3. General distribution of surficial deformation around Obiro, Uonuma-City. Note that the surficial deformations including well-defined surface rupture are distributed in nearly N-S- to NNW-SSE-trending narrow zone along which the topographic contrast between hilly land to the west and fluvial lowland to the east is developed. The higher, middle, and lower terrace surfaces are also mapped. Distributions of the pre-existing active tectonic features and the fluvial terraces are modified from Yanagisawa *et al.* (1986) and Watanabe *et al.* (2001) and based on interpretation of airphotos. Background topography is from 1/25,000 map published by Geographical Survey Institute.

積物が分布する [例えば、柳沢・他 (1986)]. 丘陵東縁部で中期更新世以降の地層や地形面を変形させる活構造として、北東-南西走向の六日町盆地西縁断層と小平尾断層 [例えば、渡辺・他 (2001)] のほか、六日町盆地西縁断層の北西側にこれとほぼ平行して発達する小屋柄川向斜が認定されている [柳沢・他 (1986)] (Figs. 2, 3). 六日町盆地西縁断層と小平尾断層は、和田川付近で左手方向にステップしている (Figs. 2, 3). 小屋柄川向斜は、小平尾地区の西方を北東-南西方向に延び、魚沼層だけでなく中期更新世に形成されたと推定される高位段丘にも変形を与えている [例えば、白井 (1967), 柳沢・他 (1986)].

§ 3. 地震断層の性状

今回の地震に伴う明瞭な地震断層は、余震域東端にあたる小平尾地区で確認された (Figs. 3, 4). 地震断層の出

現位置は、上述した周辺の既存地質構造との位置関係でみると、小屋柄川向斜の北東部にあたり、また六日町盆地西縁断層と小平尾断層とのステップ部にもあたる。地震断層はこれらと斜交もしくは直交する方向で、両断層をつなぐようにして現れた (Figs. 2, 3)。この地震断層は、活断層が認定されていない場所に出現した。

地震断層は、小平尾集落が分布する低位段丘面とその南方の水田が広がる沖積低地を横切って、南北-北北西-南南東方向に約 1 km にわたって断続的に認められる [Maruyama *et al.* (2005)] (Fig. 4a)。この地震断層は、(1) 形成時期の異なる複数の地形面を横切ること、(2) 断層に沿ってバルジなどの逆断層に特徴的な微地形が観察されること、(3) 背後に地震断層の分布や長さに匹敵するような地すべりの痕跡が認められないこと、などから、その成因として地すべりや不等沈下の可能性は否定される [Maruyama *et al.* (2005)]。

小平尾集落内でみられる変形は、圧縮に伴うコンクリート製消雪パイプの跳ね上がりや、コンクリート製側溝の破壊、アスファルト舗装道路の短縮・撓みなどで特徴づけられ、これら人工構造物の圧縮変形の延長上にあたる畑や小平尾集落の南方の沖積低地上に広がる水田では、西側上がりの明瞭な地震断層が確認された。

平坦な水田や畑を横切る地震断層は、緩やかに湾曲する平面形態を呈しており (Figs. 3, 4a)、そのうち走向が北北西-南南東の区間では左横ずれ成分を伴うのに対して、北東-南西走向区間では右横ずれ成分を伴っていることが、水田の畦や畝の配列から読み取れる。また、南北-北北東-南南西走向区間では有意な横ずれ成分は認められない。これらの断層の走向と変位センスとの関係から復元される最大圧縮方向は、西北西-東南東-東西と推定される。地震断層の上下変位量を明らかにするために、断層を横切る地形断面測量を行った結果、本来一続きであったと推定される畑や水田および堤防などに 10~20 cm の西側上がりの変形が生じていることが示された。また、相対的に上昇した西側の断層近傍では、バルジを伴う撓曲変形が系統的に認められた (Fig. 4b)。以上の平面・断面形状から、地震断層は西北西-東南東-東西の圧縮に伴う西傾斜の逆断層の可能性が高いと判断される [Maruyama *et al.* (2005)]。

一方、明瞭な地震断層が現れた小平尾地区周辺の六日町盆地西縁断層や小平尾断層においても地震断層の出現が予想されたため、広範囲にわたって詳細な現地調査を実施したが、これらに沿って地すべりや崩壊が断続的にみられたものの、小平尾地区で見られた地震断層に匹敵するような明瞭な変状は確認されなかった。なお、小平尾地区から約 6 km 南にあたる小出以南の六日町盆地西

Fig. 4. (a) Perspective view of the west-side-up surface rupture displacing the rice fields at Obi-ro. Red arrows mark the rupture which is demonstrated clearly by difference in dry and wet conditions of the fields. u and d indicate up- and down-thrown sides, respectively. The rupture segment of a NNW-SSE-strike has a sinistral component whereas that of NE-SW-strike has a dextral one, showing that the surface rupture was generated by E-W- to WNW-ESE-trending compression, which is consistent with focal mechanisms of the main shock and major aftershocks. (b) A topographic profile across the surface rupture. The surface rupture is characterized by flexure, bulge, and back-tilt on the rice fields, which are general topographic features of reverse faulting. For location of profile see Fig. 4a.

縁断層に沿っては、地すべりの可能性も否定できないものの、地震断層状の地表変形が確認されている [丸山・他 (2004, 2005), 鈴木・他 (2004)]。

§ 4. 地震断層周辺の地形・地質の特徴

地震断層の出現位置ならびに変形パターンと周辺の地質構造との関係を明らかにするため、地震断層周辺の丘陵を構成する魚沼層の地質構造を調査した。なお、余震域周辺は、新潟県農地部農地整備課 (1977), 柳沢・他 (1986) により詳細な表層地質に関するデータが収集されており、これらと合わせて両者の関係を検討した。

Fig. 2 に地震断層周辺の地質図を示す。これによると、地震断層を境に東西で地層の分布や構造に不連続が認められる。すなわち、地震断層西側の丘陵に分布する魚沼層の姿勢は、地震断層から離れた区間 (小屋柄川より西) では、一般的に北東-南西走向で、小屋柄川向斜の

軸跡に向かって緩く傾斜している。この走向は、六日町盆地西縁断層および小平尾断層の一般走向とほぼ平行である。ところが、地震断層が現れた小平尾地区のすぐ西側の和田川から小屋柄川までの区間は、小屋柄川向斜の北東部にあたり、魚沼層の姿勢がそれまでの北東-南西走向から南北-北北西-南南東走向で緩い西傾斜に変化する。ここでの姿勢は、上述した平面・断面形状から推定される地震断層のそれと調和的である。一方、地震断層の北東側には、中新世の火山岩類や段丘堆積物が広がり、地表には魚沼層がほとんど分布しない。

また、地震断層を境にその両側では、地形的特徴にも次のような不連続が認められる (Fig. 3)。地震断層の南西側には、丘陵および丘陵背面につながる高位段丘面群が発達するのに対し、北東側では、低位段丘面群が広く分布している [例えば、新潟県農地部農地整備課 (1977), 渡辺・他 (2001)]。このような地震断層を挟んで、南西側上がりの地形の特徴は、今回の地震断層の変形パターンと調和している。

地震断層の南西側に分布する、中期更新世に形成されたと推定される高位段丘面が小屋柄川向斜により変形していることが報告されている [白井 (1967), 渡辺・他 (2001), 柳沢・他 (1986)] (Figs. 2, 3)。この向斜構造に伴う高位段丘面の傾動方向は、魚沼層の傾斜方向と調和的である。すなわち、向斜南東翼部において、魚沼層の姿勢が北東-南西走向で北西傾斜する区間では、高位段丘面も北西に傾動しているのに対し、地震断層のすぐ南西側で魚沼層の姿勢が北北西-南南東-南北走向・西傾斜に変わる区間あたりでは、白井 (1967) でも指摘するように、段丘面が南西に傾動しているように見える (Fig. 3)。この傾動方向は、今回の地震断層の上盤側 (西側) にみられる傾動方向と調和的である (Fig. 4b)。なお、小屋柄川の東岸には、これと平行して中位段丘面相当と考えられる段丘面が細長く分布しているが、その勾配は小屋柄川の現河床勾配に比べて有意に緩く、本段丘面形成後に北西に傾動変形した可能性が示唆される (Fig. 3)。この傾動方向が、小屋柄川向斜の構造と調和的であることと、この段丘面の変形の程度が、高位段丘面に比べて小さいことから、小屋柄川向斜は中期更新世以降にも変形を累積させるような活動を繰り返している地質構造と推定される。一方、地震断層を挟んで北東側に分布する低位段丘面群には、小屋柄川向斜に伴う変形が認められない (Fig. 3)。

§ 5. 地震断層と既存地質構造との関係

今回、小平尾付近の和田川沿いで確認された地震断層の位置には、従来の活断層図では断層線が図示されてい

なかった。しかし、§ 4 で述べたように、1) 地震断層の出現位置を境に地形、地質の分布や構造に不連続が認められること、2) 地震断層の分布、変形パターンが、上盤側 (西側) の魚沼層の姿勢や高位段丘面の変形パターンと調和的であることから、地形・地質境界をなす断層の再活動によって出現した可能性が示唆される。従来この断層が認定されていなかった理由としては、断層が和田川とほぼ平行しているため、侵食・埋積により最近の活動を示す変位地形が保存されにくいと推定される。

地震後に小屋柄川沿いで実施された反射法地震探査によると、六日町盆地西縁断層と地震断層をつなぐ位置で魚沼層を変位させる北傾斜の断層がイメージされている [Kato N. *et al.* (2005)]。また、本研究による地形・地質調査および既存資料を検討した結果、魚沼層の構造および高位段丘面の変形パターンは、六日町盆地西縁断層と地震断層に沿って滑らかに連続している (Figs. 2, 3)。これらのことから、今回の地震断層は六日町盆地西縁断層の北東延長部 (末端部) にあたる可能性がある。

上述のように今回の地震に伴って地表に出現した地震断層は、周辺の活構造と調和的な形態とセンスを有するが、計測された鉛直変位量は最大 20 cm 程度と小さい。また、地震断層周辺の既知の活断層に沿って、明瞭な地震断層は確認されなかった。そのため、今回の地震が地震断層周辺の活構造の成長に大きく寄与したとは考えにくい。上述した地質構造 [柳沢・他 (1986)] や変動地形 [例えば、新潟県農地部農地整備課 (1977), 白井 (1967), 渡辺・他 (2001)] から推定される地震断層周辺の活構造の累積変形量を考えると、今回とは別のタイプ、つまり地形・地質に変形が記録・累積されるような、地表付近においてさらに大きな変形を伴う地震が存在する可能性がある。これらの可能性を検証するため、今後今回現れた地震断層をはじめ周辺活構造の古地震像解明に向けた調査を行う必要があろう。

謝 辞

産総研活断層研究センターの杉山雄一、吉岡敏和、栗田泰夫、吾妻 崇、石山達也、松浦旅人、金田平太郎の各氏には、有益な議論をしていただきました。現地調査を実施するにあたり、新潟県旧広神村、小出町の各役場には被災地の情報を提供していただくとともに、地形図を提供していただきました。鈴木康弘氏と佐藤比呂志氏のコメントにより、本論文は改善されました。以上の方々に厚くお礼申しあげます。

文 献

Hirata, N., H. Sato, S. Sakai, A. Kato and E. Kura-

- shimo, 2005, Fault system of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake and its aftershocks, Landslides, **2**, 153-157, doi: 10.1007/s10346-005-0050-8.
- Kato, A., E. Kurashimo, N. Hirata, S. Sakai, T. Iwasaki and T. Kanazawa, 2005, Imaging the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake and the evolution of a seismogenic thrust-related fold, Geophys. Res. Lett., **32**, L07307, doi:10.1029/2005 GL022366.
- 加藤碩一・山崎晴雄, 1979, 信越地域活構造図, 活構造図 5, 地質調査所.
- Kato, N., T. Echigo, H. Sato, M. Tateishi, S. Ogino, S. Sakai, S. Toda, S. Koshiya, T. Ito, T. Toyoshima, T. Imaizumi, H. Kato and S. Abe, 2005, Geologic fault model based on the high-resolution seismic reflection profile and aftershock distribution associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M 6.8), central Japan, Earth Planets Space, **57**, 447-452.
- 気象庁, 2005a, 地震概況 2004 年 10 月～2004 年 11 月, 日本地震学会ニュースレター, **16**(5), 75-86.
- 気象庁, 2005b, 地震概況 2004 年 12 月～2005 年 1 月, 日本地震学会ニュースレター, **16**(6), 28-36.
- 丸山 正・伏島祐一郎・松浦旅人・栗田泰夫・吉岡敏和・水野清秀・井村隆介・石山達也・小松原 琢, 2004, 2004 年新潟県中越地震に伴う地震断層の緊急調査, 地質ニュース, **604**, 1.
- 丸山 正・伏島祐一郎・吉岡敏和・栗田泰夫, 2005, 平成 16 年 (2004 年) 新潟県中越地震に伴い地表に現れた地震断層の性状, 地質ニュース, **607**, 9-12.
- Maruyama, T., Y. Fusejima, T. Yoshioka, Y. Awata and T. Matsu'ura, 2005, Characteristics of the surface rupture associated with the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, central Japan and their seismotectonic implications, Earth Planets Space, **57**, 521-526.
- 新潟県農地部農地整備課, 1977, 新潟県中越地域土地分類基本調査「小千谷」5 万分の 1, 65 pp.
- 岡村行信・柳沢幸夫, 2005, 新潟県中越地震と地質構造との関係, 地質ニュース, **607**, 13-17.
- 白井哲之, 1967, 魚野川下流域の段丘地形からみた地盤運動について, 東京教育大学地理学研究報告, **11**, 23-35.
- 鈴木康弘・渡辺満久・廣内大助, 2004, 2004 年新潟県中越地震の地表地震断層, 地学雑誌, **113**, 861-870.
- 渡辺満久・堤 浩之・鈴木康弘・金 幸隆・佐藤尚登, 2001, 1:25,000 都市圏活断層図「小千谷」, 国土地理院技術資料 D-1-No. 388.
- 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一, 1986, 5 万分の 1 地質図幅「小千谷」及び説明書 (地域地質研究報告), 177 pp.