

活断層の出現範囲に関する研究

長谷川延広¹・清野純史²

¹正会員 JFEエンジニアリング株式会社 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)

E-mail:hasegawa-nobuhiro@jfe-eng.co.jp

²正会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

1995 年に起きた兵庫県南部地震を契機に活断層への関心が高まり、国土地理院では、活断層の調査・研究が進められるとともに「都市圏活断層図」を作成している。「都市圏活断層図」によって、地震時に地表面に出現が想定される断層の位置を知ることができる。また、これまでに地表に地震断層が現れた地震は数多くあり、近年では、測量技術の進歩により、より詳細な調査結果が報告されている。

本研究では、これらの資料をもとに、想定されていた断層位置と実際に出現した断層位置を比較することで、想定されていた断層位置に対してどの程度、範囲を持って出現するかを整理・考察する

Key Words : Active Fault, Shear Zone, Fault Displacement.

1. はじめに

2016 年に起きた熊本地震では、前震 (Mj6.5) およびに本震 (Mj7.3) により、日奈久断層帯および布田川断層帯が活動し、地表面に現れた断層変位は最大で水平方向に 2.2m にも達した。この断層変位による被害は甚大であり、地上構造物だけではなく、地中に埋設されているライフラインにも大きな影響を与えた。

活断層に関する研究では、1995 年の兵庫県南部地震を契機に、国土地理院では、活断層の情報整備及び公開の重要性が高まったことに応えるため、大地震が起きた時に被害が大きくなると予想される都市地域について活断層を詳細に示した「都市圏活断層図」¹⁾を作成した

これらの情報をもとに政府の地震調査委員会は、全国の主要活断層帯の地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率を予測した「地震発生可能性の長期評価」を実施し、発生確率や強震動予測を行って来た。さらに、同委員会は 2013 年に九州地方の地域評価²⁾を公表し、これまでの調査対象とする地震の発生規模を Mj7.0 から Mj6.8 まで拡大し、地表面だけでなく地下の断層面の長さを考慮するなど、より詳細に断層の情報を知ることができるようになった。また、近年においては、地震断層が出現した地震は兵庫県南部地震や熊本地震など、多数起こっており、地震発生後の詳細な調査によって、地表面に出現した地震断層の位置情報を簡単に知ることができるようになっ

た。

本研究では、地震で地表に地震断層が出現した断層位置と地震前に想定されていた断層位置を比較して、どの程度、振れ幅 (誤差範囲) をもって出現するかを整理した。地上構造物であれば、この振れ幅から避けて建設すべきであり、地中埋設管のような線状構造物では、避けて配管することが難しいため、断層の出現が想定される範囲では、断層変位に対する対策が必要となる。

2. 断層出現位置の不確実性

1) 断層の発達過程

断層の発達過程は、基盤層における断層の走向、傾斜角、断層タイプ、変位、表層地盤の特性などに影響される。地震時にせん断破壊が地下深部から地表に伝播するのに、基盤層までは断層面に沿って伝播するが、表層地盤に入ると、表層地盤は基盤層に比べて強度や剛性が非常に小さいので、その影響を受けて、せん断破壊の伝達方向が変わったり、分岐が起こるといった発達過程が変化する、。

また、断層タイプは、大別すると縦ずれ断層および横ずれ断層に分けることができる。それぞれの発達過程の違いを以下に示す。

(1) 縦ずれ断層

縦ずれ断層では、基盤面から表層地盤にせん断帯が伝わるとせん断帯による亀裂は分岐を繰り返しな

がら,地表面に向かう. 断層変位の大きさや表層地盤の剛性によって,断層面が表面まで達しない場合もあるが,達する場合には段差や亀裂が発達する. 表層地盤でのせん断帯の方向は,表層厚,傾斜角,表層地盤の剛性などが大きく影響しているおり,複雑であるため,リニアメントやトレンチ調査から判断するのは難しく,地表に出てくる地震断層の位置を正確に知るためには,反射波地震探査法などによって地下構造を調べることが重要である.

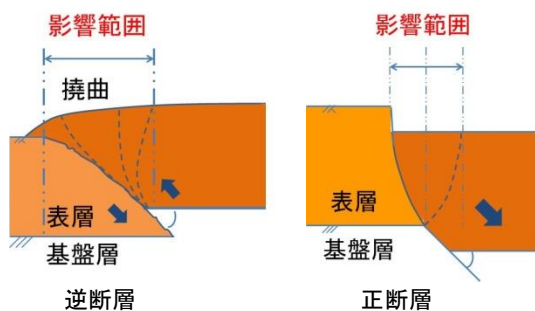


図1 縦ずれ断層

(2) 横ずれ断層

図2に示すように,横ずれ断層では,せん断帯が表層地盤まで達すると,鉛直断面のせん断帯は3次元的に変形し,フラワー構造を形成する. また,このフラワー構造が地表面まで達すると,雁行状にリーデルせん断帯となって現れ,さらに変形が進むと,新たに異なるせん断モードがいくつか現れ,最終的には網目状のせん断帯が地表に基盤の断層面に沿って形成される. このように横ずれ断層は,縦ずれ断層に比べると3次元方向への変形も含んだ複雑な断層形態を有している. このため,地表面での横ずれ断層の断層位置の調査では,3次元方向に,反射波地震探査法等を実施する必要がある.

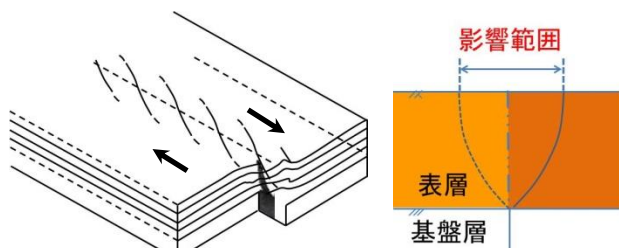


図2 横ずれ断層

2) 断層破碎帯

図3に示すように断層面周辺の岩盤には,断層面に作用する圧力により砕かれた断層破碎帯が存在する. 断層がすべる際の断層破碎帯の挙動については,現在のところ明らかにされておらず,断層破碎帯の区間では断層面がどの位置に生じるか分らない. この断層面が出てくる可能性がある範囲を断層幅³⁾と呼んでいる. また,複数の破碎帯が近接して発達している場合があり,この場合は断層幅を複数の破碎帯の幅としている.

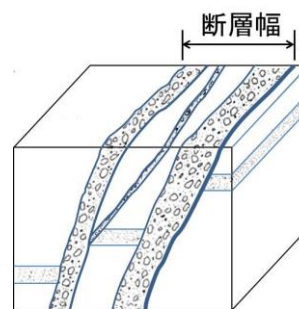


図3 断層破碎帯

3) 副断層

副断層は,主断層が動くことで主断層の周辺に新たにできる断層であるが,主断層とは直接的な関係を持たない. この副断層は,主断層と同じ断層変位量で動くものもあるので主断層と同じ扱いをすべきであり,振幅についても同様に検討を必要とする.

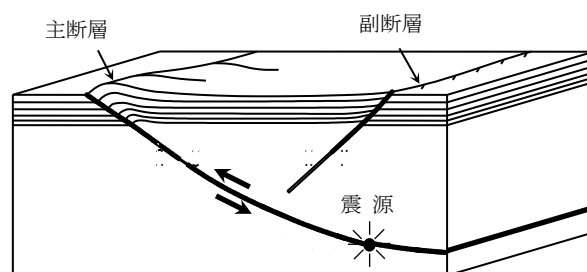


図4 副断層

4) 断層変位量の分布

一般的に断層変位量の大きさは,断層長さに関係しており,断層長さが大きいほど,最大断層変位量も大きくなる. 図5は断層面での断層変位量の分布状態を示している. 断層変位量は走行方向の中央位置で最も大きくなっており,離れるにつれて小さくなる傾向にある. また,深さ方向も震源位置から離れるにつれて小さくなる.

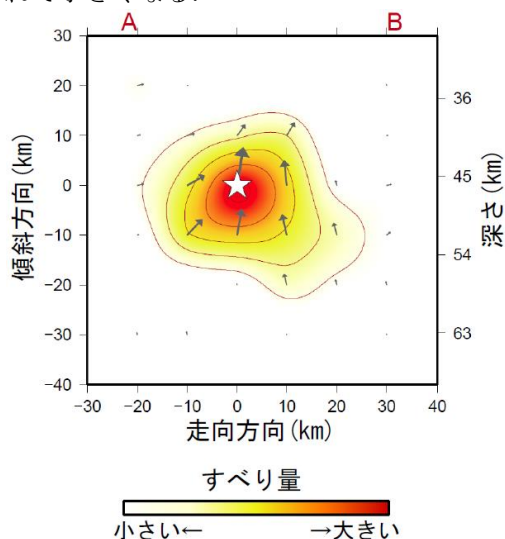


図5 断層変位量の分布例³⁾

3. 地表地震断層の出現位置の振れ幅

断層が震源となる断層型地震では、しばしば断層面が地表に現れる地表地震断層が見られる。近年、地表地震断層が見られた地震は 1995 年兵庫県南部地震, 2011 年東北地方太平洋沖地震余震, 2014 年長野県神城断層地震, 2016 年熊本地震などが挙げられる。

これらの断層は、地震が起こる以前に地震研究推進本部で断層について調査を行っており、想定断層位置として公表されている。このデータをもとに、図 6 に示すように、想定されていた地表地震断層位置から、地震で実際に出現した地表地震断層位置との差を 50m 間隔で計測し、どの程度の振れ幅を持っているのかを把握する。

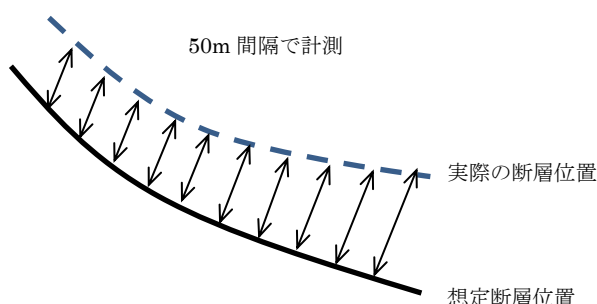


図 6 出現位置の振れ幅の計測

1) 井戸沢断層および湯ノ岳断層

2011 年 4 月 12 日に起きた東北地方太平洋沖地震の余震 (Mj7.0) では、福島県いわき市で地表地震断層が観測された。最大変位量は井戸沢断層で約 2.1m, 湯ノ岳断層で約 1.0m となっており、地表面に出現した地震断層の長さは井戸沢断層で 14km (出現率約 48%), 湯ノ岳断層では 15.5km (出現率約 119%) となっている。ここで、出現率とは、「地表に現れた断

層長さ/想定断層長さ」と定義する。

井戸沢断層および湯ノ岳断層は、断層長さ (セグメント長) が 20km 未満であることから、主要断層には含まれておらず、これまでの詳細な調査は行われていないが、リニアメントおよびプレートの動きから地盤に圧縮力が作用する場合に起こる横ずれ断層であると考えられていた。しかしながら、実際に現れた地震断層は地盤が引張方向へ作用する際に起こる正断層であり、これは、これまでプレートの動きにより圧縮方向へ動いていた地盤が、本震によって圧縮方向への歪みが解消され、大陸が引張方向へ引っ張られたためであると考えられる。

井戸沢断層および湯ノ岳断層は確実度Ⅱ、確実度Ⅲに分類されており、確実度Ⅱは断層の位置・ずれの向きは推定できるが、地形やごく新しい時代の地層が繰り返すれていることを示す確実な証拠に欠けるなど、確実度Ⅰとするには十分な資料に欠けるものを示し、確実度Ⅲは活断層である可能性はあるが、ずれの向きが不明であったり、河川や海の浸食作用など他の原因で形成された疑いが残るものを示す。

図 7 および図 8 は「4 月 11 日の余震でいわき市に出現した地表地震断層 (第 1 報)」(土木学会)⁴⁾より引用した図であり、実際に出現した地表地震断層位置と想定されていた地表地震断層位置 (活断層詳細デジタルマップ⁵⁾) の比較を示したものである。この図をもとに図上から 50m 間隔で計測を行った。図 9 は井戸沢断層、図 10 は湯ノ岳断層の振れ幅の分布をまとめたグラフを示す。

井戸沢断層での振れ幅は、図 9 が示すように 0-20m 区間が最も頻度が高く、平均値でも約 38m となっている。また、湯ノ岳断層での振れ幅は、図 10 が示すように 200-300m 区間が最も頻度が大きく、平均でも約 300m と井戸沢断層と比べると振れ幅が非常に大きい。

表 1 地震発生以前の断層緒元 (湯ノ岳断層, 井戸沢断層)

断層名	延長 (確実度)	走向・傾斜	変位方向・量 (変位基準)	その他
湯ノ岳断層	約 6km (確実度Ⅱ) 約 7km (確実度Ⅱ+Ⅲ)	走向: NW N30 ~ 50W, 70 ~ 80S の断層露頭 N60 ~ 90W, 60S の正断層露頭	北上がり 300m (小起伏面) 北上がり 250m (石城層/花崗岩) 右横ずれ>7km	活動度: B
井戸沢断層	約 10km (確実度Ⅱ) 約 19km (確実度Ⅱ+Ⅲ)	走向: NNW 傾斜: ほぼ鉛直	東上がり (山地頂面) 右横ずれ (谷)	活動度: 不明

※平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報⁶⁾より抜粋

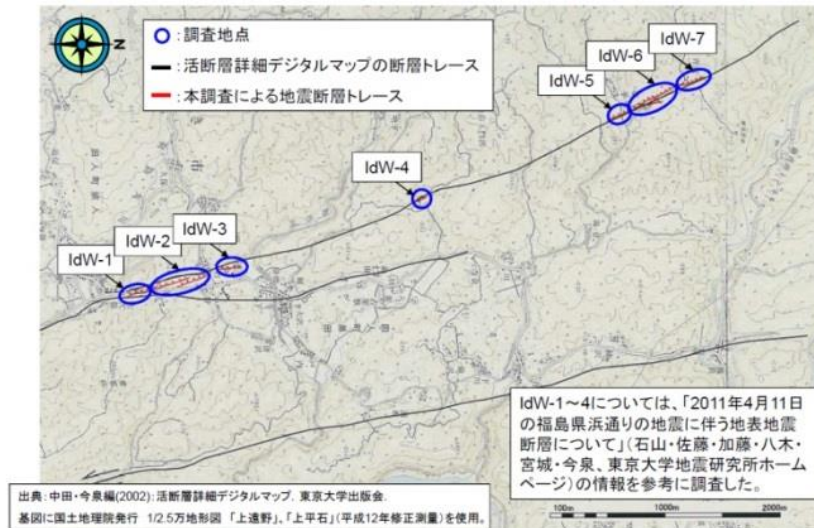


図7 想定断層位置および出現位置(井戸沢断層)

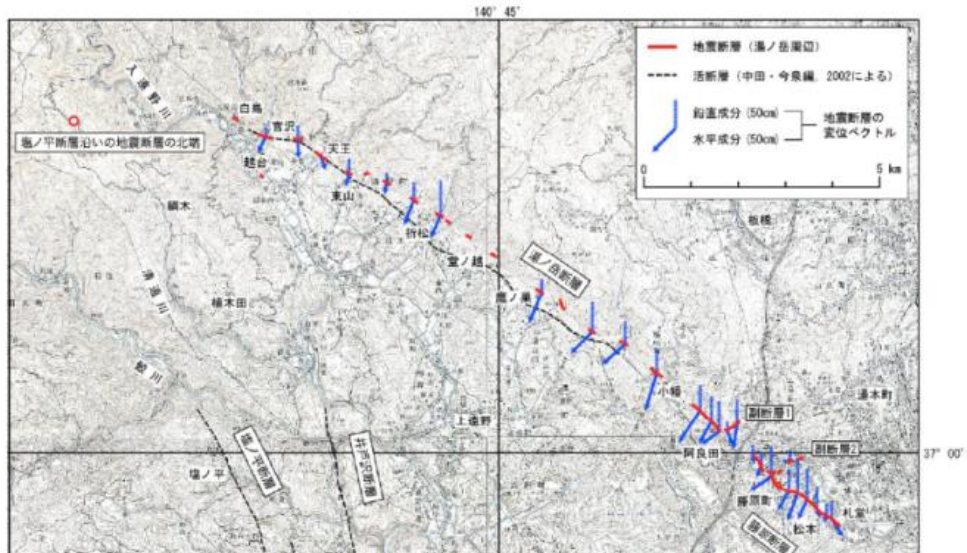


図8 想定断層位置および出現位置(湯ノ岳断層)

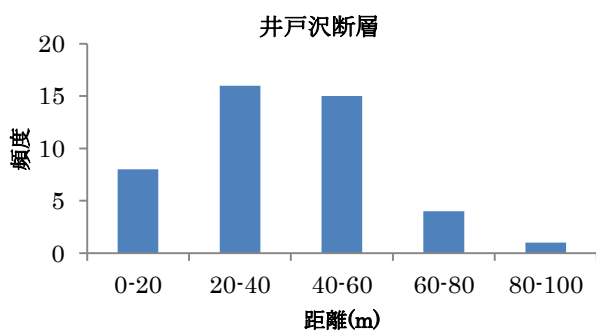


図9 断層の振れ幅の分布(井戸沢断層)

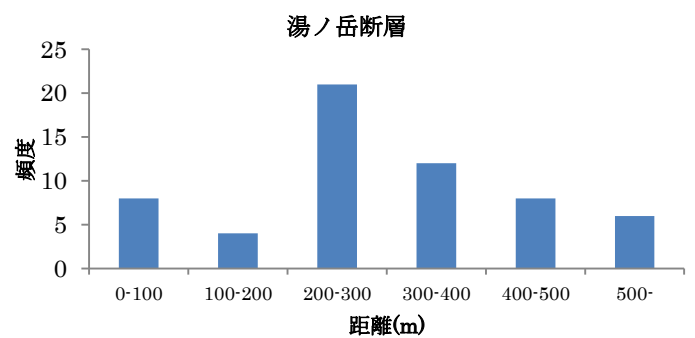


図10 断層の振れ幅の分布(湯ノ岳断層)

2) 神城断層

2014年11月22日に起きた、長野県神城断層地震は、北安曇郡白馬村を震源として発生した Mj6.7 の地震である。この地震により、地表に地震断層が約 8km（出現率約 30%）に渡って出現した。神城断層は南北を軸とした東側隆起の逆断層であり、今回の地震では最大変位量は約 1.0m であった。表 2 に地震発生以前の断層の緒元を示すが、断層のセグメント長は約 26km に対して、今回出現した地震断層は北部の一部ということになる。

また、図 11 は「長野県北部の地震にともなう地表地震断層」（災害科学国際研究所）⁷⁾より引用した図であり、実際に出現した地表地震断層位置と想定さ

れていた地表地震断層位置（活断層詳細デジタルマップ）の比較を示したものである。これを参考に図上から 50m 間隔で振れ幅の計測を行った。

図 12 は、神城断層における想定された地表地震断層と実際に出現した地表地震断層との出現位置の振れ幅の分布をグラフにまとめたものであり、振れ幅の大きいところでは 400～500m 離れているが、振れ幅のほとんど 100m 以内に入っていることが分かる。

次に図 13 は今回出現した地震断層の変位量の分布を示す。北端を起点として地表に出現した地震断層の延長約 8km を示しているが、変位量が大きい箇所は起点側に集中していることが分かる。

表 2 地震発生以前の断層緒元（神城断層）²⁾

断層名	延長 (確実度)	走向・傾斜	変位方向・量 (変位基準)	その他
神城断層	約 26km (確実度 II)	走向：N3W 傾斜：40°	東上がり	活動度：B

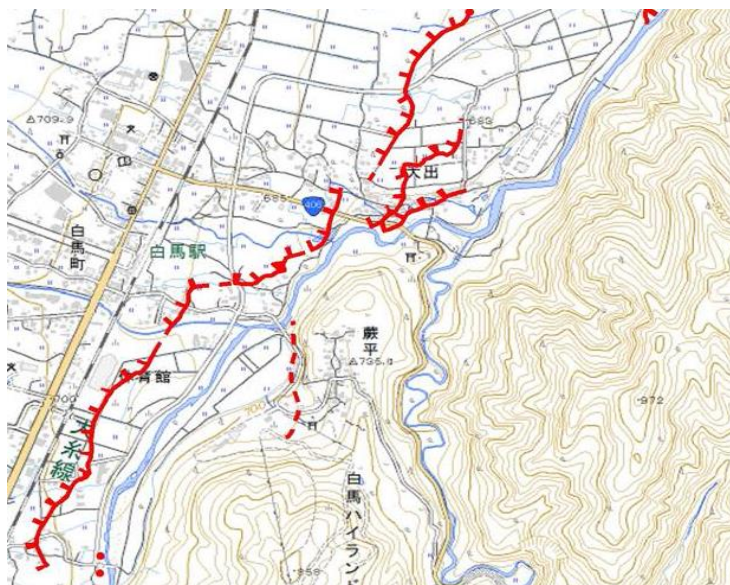


図 11 想定される断層位置（神城断層）

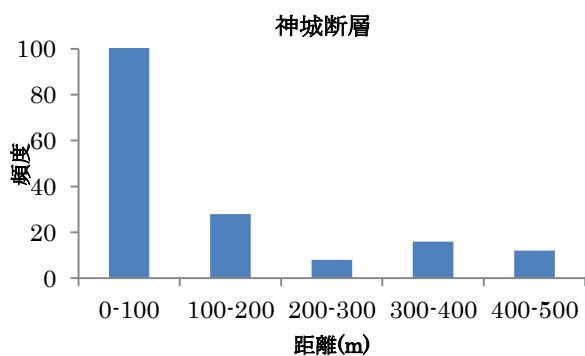


図 12 断層の振れ幅の分布（神城断層）

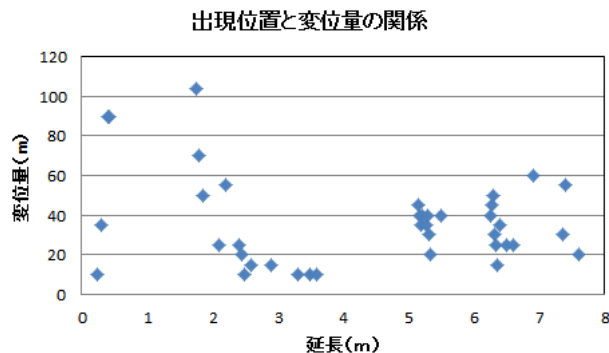


図 13 出現位置と変位量

3) 布田川断層帯, 日奈久断層帯

2016 年 4 月 14 日に起きた前震は日奈久断層帯の北側を震源とする Mj6.5 の地震, および 4 月 16 日に起きた本震は布田川断層帯の南部を震源とする Mj7.3 の地震であった.

表 3 に地震以前の断層の緒元を示すが, 今回出現した地震断層は布田川断層帯では全長 64km 以上の内, 布田川区間で約 28km (出現率約 44%), 日奈久断層帯では全長 81km の内, 高野-白幡区間で約 6km (出現率約 7%) であった. いずれも右横ずれ断層であり, 最大変位量は布田川断層帯で約 2.2m, 日奈久断層帯

で約 0.8m であった. また, この地震で地表面に現れた地震断層のほとんどは「都市圏活断層図」に示された活断層線上に現れた. しかしながら, この地図に示されていない副次的な断層が現れた箇所も多く, 特に益城町では総延長 4km の地震断層が現れ, 益城町市街地に甚大な被害を与えた.

図 14 は国土地理院 (国土交通省) が提供している地理院地図⁸⁾を利用して標準地図に「都市圏活断層図」および「布田川断層帯周辺の地表亀裂分布図」をトレースしたものである. これを参考に図上から 50m 間隔で計測を行った.

表 3 地震発生以前の断層緒元 (布田川断層帯および日奈久断層帯)²⁾

断層名	延長 (確実度)	走向・傾斜	変位方向・量 (変位基準)	その他
布田川断層	64km 以上 (確実度 I)	走向: N62° E 傾斜: ほぼ鉛直	右横ずれ	活動度: B
日奈久断層	約 81km (確実度 I)	走向: N41° E 傾斜: ほぼ鉛直	右横ずれ	活動度: B

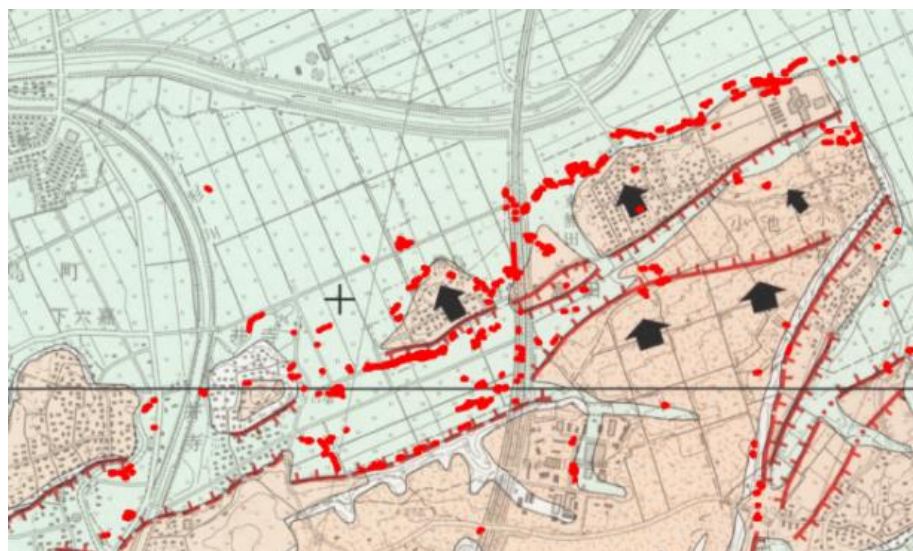


図 14 断層出現位置 (布田川断層一部抜粋)

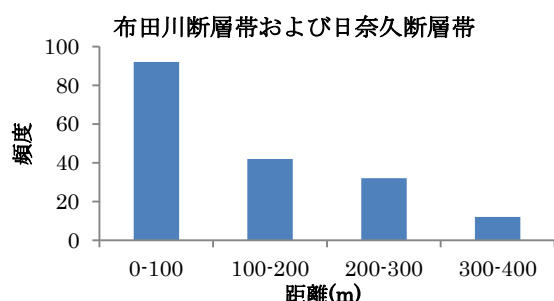


図 15 断層の振れ幅 (布田川および日奈久断層帯)

図 15 は, 布田川断層帯および日奈久断層帯における想定された地表地震断層と実際に出現した地表地震断層との出現位置の振れ幅の分布をグラフにまとめたものであり, 振れ幅の大きいところでは 100m

以上離れている箇所もあるが, 振れ幅のほとんどは 100m 以内に入っていることが分かる.

図 16 および図 17 に布田川断層帯および日奈久断層帯における地震断層と断層変位量の関係を示す. 図 16 に示すように, 布田川断層帯の変位量の分布では, 震源に近い堂園で最大変位 2.2m が記録されているが, 延長 10km~20km の間では分岐断層が多く, 変位量がよく分かっていない. おそらく同様の変位が続いていたと見られる. 変位量の分布では, 同延長でのバラツキが大きい, 端部に向かうに連れて変位量は小さくなる傾向にある. また, 図 17 に示すように日奈久断層帯の変位量の分布では, 震源は高野-白幡区間の中心付近で起こっており, 延長約 4km のところで最大変位量 75cm となり, 分布状態は山形となり, 最大変位量を中心に端部に向かうに連れて変位量は

小さくなる。

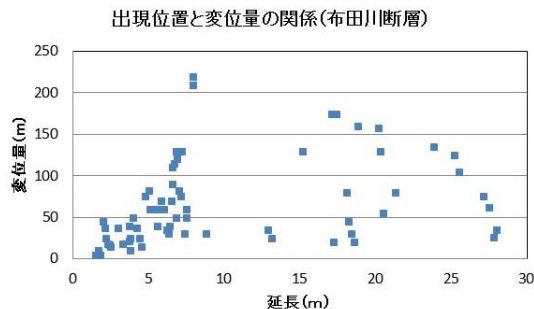


図 16 出現位置と変位量の関係（布田川断層帯）
出現位置と変位量の関係（日奈久断層）

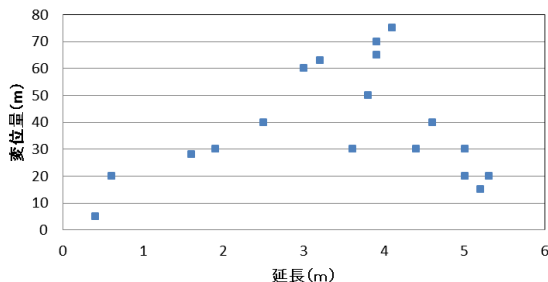


図 17 出現位置と変位量の関係（日奈久断層帯）

4. 考察

1) 井戸沢断層,湯ノ岳断層

図 20 に示すように,井戸沢断層では, 振れ幅のすべて 100m 以下であるが, 湯ノ岳断層では 100m~300m の間で分布している. この 2 つの断層は東北地方太平洋沖地震の余震で動いた断層であり, 当初は横ズレ断層であると想定されていたが, プレーートの歪みの開放により, 大陸が大きく西側に地殻変動したことで, 本来は圧縮場である大陸が引張に転じたため, 正断層が生じたと思われる. この 2 つの断層の相違点は傾斜角度にあり, 井戸沢断層がほぼ直角に対して, 湯ノ岳断層は約 70° となっている. 本来, 圧縮場であったために断層の傾斜角に沿って動いていたが, 引張場に転じることで, 断層変位の方向は両断層とも鉛直方向になったため, もともと傾斜が鉛直方向の井戸沢断層では振れ幅の差は小さいが, 湯ノ岳断層では傾斜が 70° となっていたために, 断層が動いた際に, 東側の地盤が鉛直方向へ崩れたために, 振れ幅が大きくなったと推定できる.

2) 神城断層

図 20 が示すように,神城断層の振れ幅の分布では, ほとんどが 100m 以下に集中しているものの, 300m 以上離れた箇所でも分布している. このバラツキが大きくなった要因としては, 震源となった北端の地震断層の出現位置が想定されていた地震断層とは方向が大きく異なることが挙げられる. しかしながら, 頻度のほとんどが 100m 以下となっており, さらに図 18 は振れ幅の距離 100m 以内のデータのみを摘出したものであり, 100m 以内の分布ではほぼ山なりの分

布を示しており, 20~40m 区間の頻度が大きい. このことから, 走向の異なる一部の地震断層を除けば, ほぼ出現位置は一致していたと思われる.

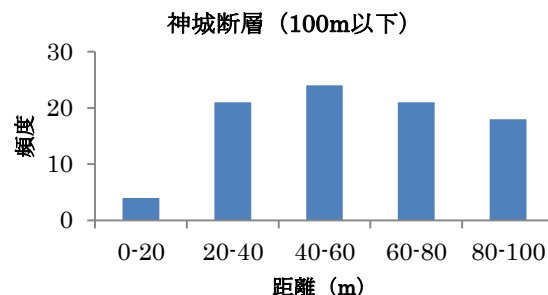


図 18 断層の振れ幅（神城断層 100m 以下）

3) 布田川断層帯および日奈久断層帯

布田川断層帯および日奈久断層帯は, 右横ずれ断層であり, 特に布田川断層帯の西原村付近 (延長の中心付近) では, 地表に現れた地震断層には, 分岐断層が多く見られた. 想定された地震断層と実際に出現した地震断層との出現位置の振れ幅の分布では, この分岐断層の影響により, 距離のバラツキが大きくなったと推測できる. しかしながら, 振れ幅の頻度としては 100m 以下がほとんどであり, 図 19 に示すように 100mm 以下の分布状態では, ほぼ山なりに分布しており, 想定および実際に出現した地震断層位置との振れ幅のバラツキは小さいものと判断できる.

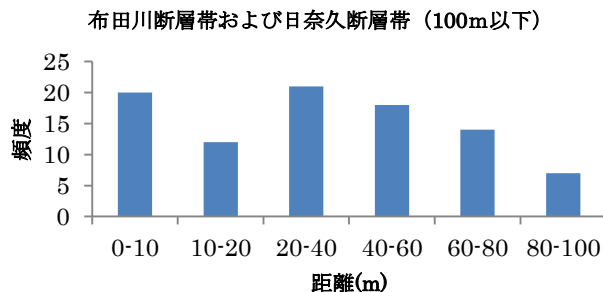


図 19 断層の振れ幅（布田川断層 100m 以下）

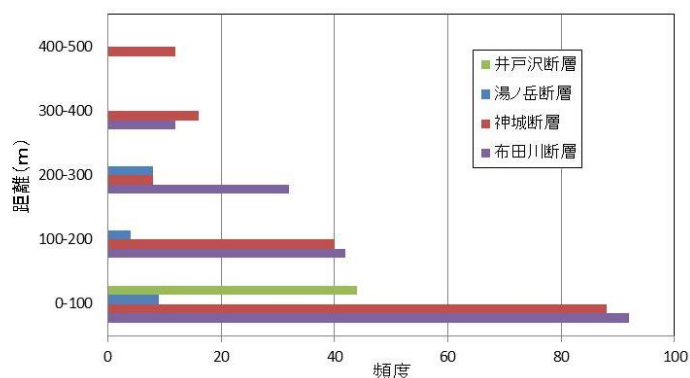


図 20 断層の振れ幅（全体）

5. まとめおよび今後の課題

本研究では、実際に地表に出現した断層位置と、地震以前から、想定されていた断層位置との距離の差を取り、その発生頻度を整理することで、実際に出現した地震断層が、どの程度の振れ幅をもって地表に出現しているかを確認した。この検討結果から、これまでに地表に出現した地表地震断層の位置から断層面は想定していた位置に対して数 100m 程度の振れ幅を持って地表面に出現しているが、そのほとんどは 100m 以内であることが分かる。

想定される断層位置の特定には、空中写真による判読調査が一般的であることから、トレンチ調査や反射波地震探査といった、より詳細な調査を行うことで、振れ幅をもっと小さくすることができると思われる。

今回、対象とした断層は正断層、逆断層、右横ずれ断層であり、各々で基盤層から地表までの異なる発達過程を持つことから、さらにサンプル数を多くすることができれば、各々の振れ幅の傾向を、より明確に知ることができると思う。

参考文献

- 1) 国土地理院, 地理院地図, 都市圏活断層図
http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/active_fault.html
- 2) 地震調査研究推進本部ホームページ,
<http://www.jishin.go.jp>
- 3) 気象庁ホームページ
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/abouut_srcproc.html
- 4) 4月11日の余震でいわき市に出現した地表地震断層(第1報), 東京大学地震研究所,
http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/PREV_HP/outreach/eqvolc/201103_tohoku/fukushimahamadoori
- 5) 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002
- 6) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報, 国総研資料第646号, 国土技術政策総合研究所, 2011
- 7) 災害科学国際研究所ホームページ, 長野県北部の地震にともなう地表地震断層, <http://irides.tohoku.ac.jp/>
- 8) 国土地理院, 地理院地図, 電子国土web
<http://maps.gsi.go.jp/>

Study on Appearance Position and Zone of Surface Fault Rupture

Since the Kobe earthquake, that occurred in 1995, the raised public interest in the active fault, at the Geographical Survey Institute, research and survey on active faults are being promoted and "Active Fault Map in Urban Area" has been published. "Active Fault Map in Urban Area", is utilized to know the location of the faults that is supposed to appear on the ground surface during the earthquake. In addition, there were many earthquakes that appear the surface ruptures so far, and in recent years with the progress of surveying technology the research results have been reported in more detailed.

This paper shows, the comparison between the assumed fault location and the actual fault location.