

境峠断層屈曲部における大規模破砕帯の構造と形成過程

中島由記子¹, 大塚勉²¹ 信州大学大学院工学系研究科, ² 信州大学全学教育機構Geologic structure and development of the shear zones in the bend of
the Sakai-Toge Fault, Nagano Prefecture, central JapanYukiko Nakashima¹ & Tsutomu Otsuka²¹ Graduate School of Science and Technology, Shinshu University² School of General Education, Shinshu Universityキーワード: 活断層, 境峠断層, 梓川断層群, 断層破砕帯, 横ずれ圧縮応力場, フラワー構造
Keywords: active fault, Sakai-Toge Fault, Azusagawa Faults, fracture zone, transpression, flower structure

1. はじめに

境峠断層は、長野県北アルプス南部、焼岳火山付近から松本市奈川地区を経て伊那盆地に至る総延長約 50km の活断層であり、美濃帯中生界および花崗岩を約 4.5km 左横ずれ変位させている。美濃帯中生界および花崗岩、段丘堆積物などの第四系に変位を与えており、近年のトレンチ調査により、完新世における活動履歴が明らかにされている(吉岡ほか, 2005, 2006)。

境峠断層は、松本市奈川地区黒川渡から寄合渡にかけての地域において、その走向を北西-南東方向から南-北方向に変化させるとともに複雑に枝分かれする。また、同時にこの地域では、東西幅約 1.5km の幅広い破砕帯が形成されている。この幅広い破砕帯の形成要因について、狩野・佐藤(1988)や狩野ほか(2002)は、境峠断層の屈曲と左横ずれ運動により横ずれ圧縮応力(transpression)がはたらいたためであると指摘している。このほか、大塚(1996)は、この地域は境峠断層と東北東-西南西走向の右横ずれ活断層である梓川断層群との交差地域にあたり、梓川断層群と境峠断層の相互活動により境峠断層の屈曲が形成され、その結果、横ずれ圧縮応力場が生じ、複雑な破砕帯が発達したと指摘しているが、その詳細は明らかではない。

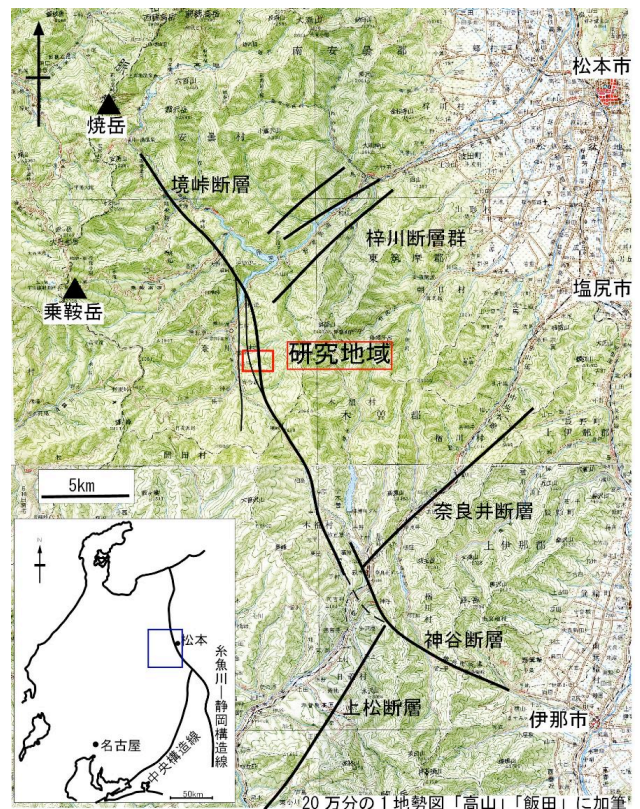


図-1. 研究地域の位置と周辺の主な断層

本研究では、松本市奈川地区黒川渡から寄合渡にかけて発達する幅広い破砕帯内において、地質構造および断層のトレースを明らかにした。

そのうえで、花崗岩中に発達するカタクレーサイトを伴う小断層の記載をおこない、それらの結果をあわせて破碎帯の形成過程を考察した。

2. 研究地域の地形とリニアメント

研究地域（図-1, 2）は、松本市西部、奈川地区に位置する。梓川支流の奈川右岸には河岸段丘が広く分布しており、山間盆地状の地形が発達する。この地域には、沢の屈曲や逆向き低崖、鞍部地形や分離小丘の連続などの断層地形が多数認められる。研究地域は、奈川支流のソグラ沢の中流域に位置する。

研究地域周辺の地質構造、とくに断層のトレースを明らかにするための参考として、空中写真によるリニアメント判読を行なった。梓湖周辺および大白川周辺では、北-南～北西-南東方向および北東-南西方向のリニアメントが顕著である。L1 は北-南～北西-南東方向のリニアメントのなかでも特に連続性が良く、鞍部の連続によって特徴づけられる。L2・L3・L4 は北東-南西方向に発達するリニアメントのなかでも連続性が良く、鞍部の連続や河川の屈曲によって特徴づけられる。

これらのリニアメントは、地質調査の結果明らかとなった境峠断層および梓川断層群のトレースと調和的である。

3. 地質の概要

研究地域には、美濃帯ジュラ紀付加コンプレックスを構成する堆積岩類と、それに貫入する白亜紀後期の奈川花崗岩、それらを不整合に覆う第四紀後期の段丘堆積物が分布する。研究地域西部には、美濃帯中生界を構成するチャート・珪質泥岩・泥岩・砂岩が分布する。チャートおよび珪質泥岩の層理面は、一般に南北走向でほぼ垂直である。接触変成作用により、チャート・珪質泥岩には石英や雲母累の再結晶が認められる。泥岩・砂岩は一般にホルンフェルス化し、堇青石・紅柱石・黒雲母が晶出している。また、断層運動による脆性破壊の影響を強く受けており、しばしばカタクレーサイト化および角礫化している。研究地域東部に分布する奈川花崗岩はおもに中粒の等粒状角閃石黒雲母花崗岩からなり、まわりの中生界に接触変成作用を与えている。貫入年代は、 $68.9 \pm 3.4\text{Ma}$ 、 $66.7 \pm 1.5\text{Ma}$

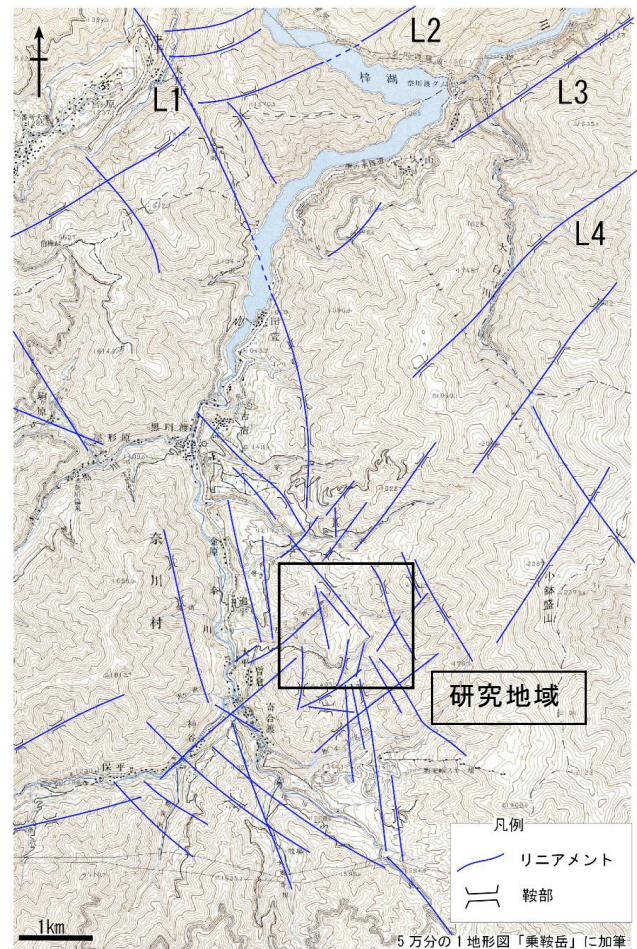


図-2. 研究地域周辺のリニアメント図

(K-Ar 年代) である（中野ほか，1995）。断層活動による破碎の影響を強く受けており、未固結破碎帯およびカタクレーサイトを伴う断層が密に発達する。

4. 断層

研究地域には、断層ガウジや断層粘土などの未固結断層岩およびカタクレーサイトを伴う断層が発達する。それらの断層を、断層岩の産状、破碎帯の幅、断層粘土および断層ガウジの幅、母岩、断層面の姿勢、運動センス、条線、他の断層との関係などに着目して記載をおこなった。

4-1. 未固結断層岩を伴う断層

未固結破碎帯を伴う断層は、断層面の姿勢、運動センスの相違によりおもに 4 つのグループに分類することができる。以下、それぞれのグループの特徴と各グループを構成する代表的な

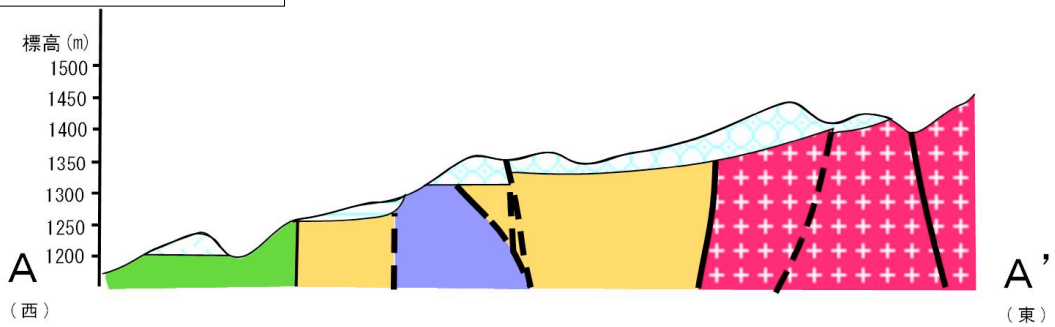
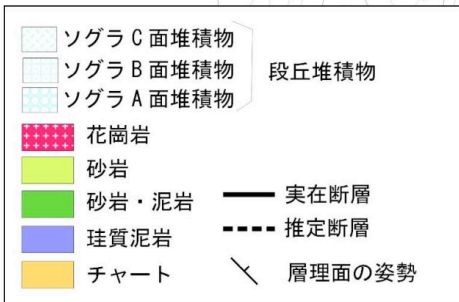
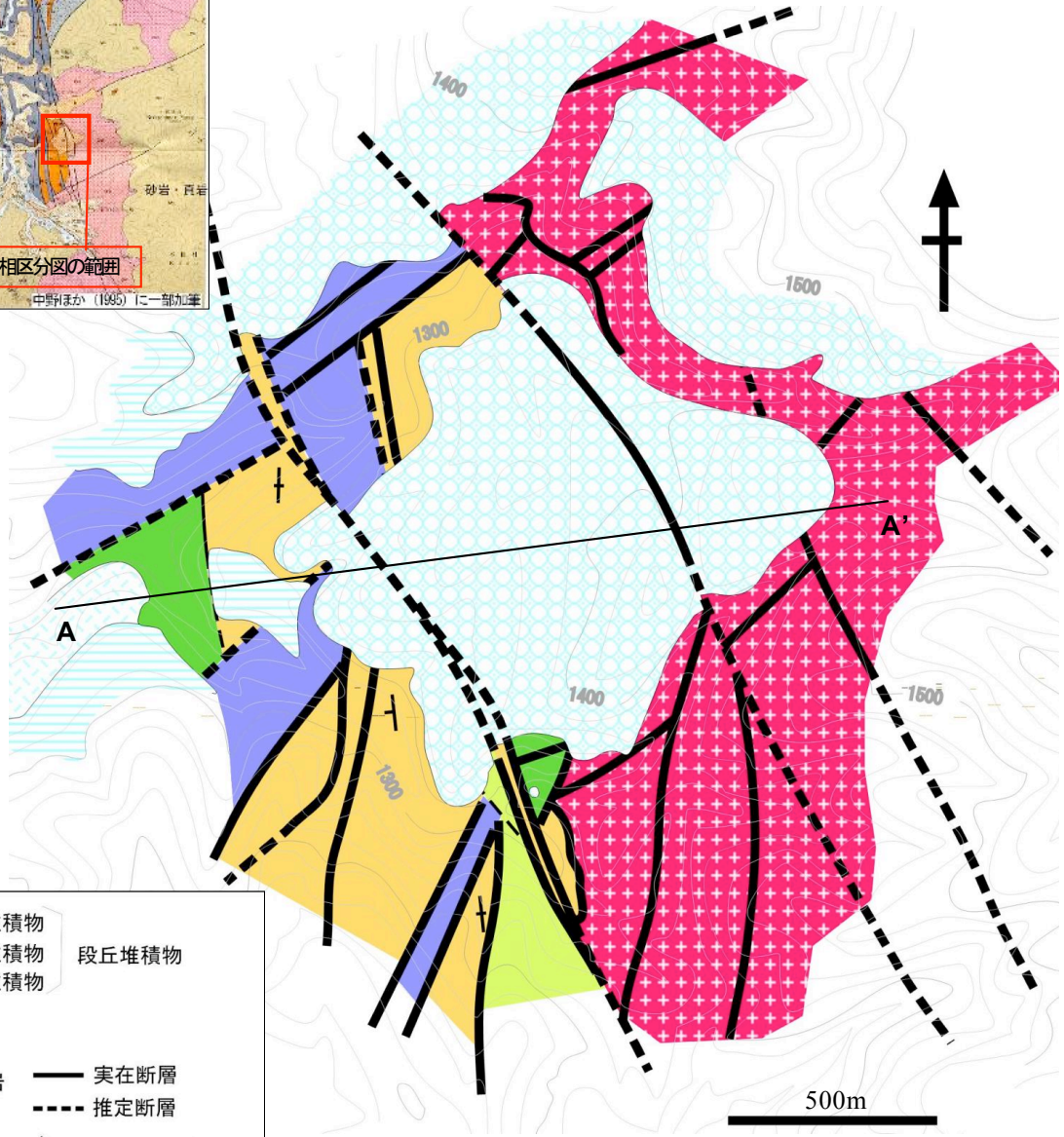
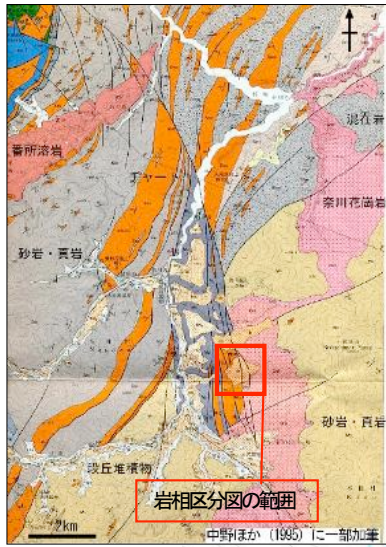


図-3. 研究地域の岩相区分図と断面図

断層について記述する。

グループ A

南-北ないし北西-南東走向, 50° ~ 90° 西または東傾斜の断層。一般に左横ずれを伴う運動センスをもつ。一部第四系に変位を与える。連続性がよく, 逆向き低崖や鞍部に特徴づけられる明瞭なリニアメントを形成する。

F1 および F2 (図-4) は, 段丘堆積物に変位を与える。F1 は中生界に幅 10m 以上の破砕帯を形成している。破砕帯中の引きずり構造などにより, 左横ずれを伴い, 東側が上昇する運動センスを読み取ることができる。F2 は, 吉岡ほか (2005) などによって段丘面上でトレンチ調査がなされており, 活断層としての活動履歴が明らかにされている。F3 はチャート中の断層で, 幅 1.5m 以上のカタクレーサイト帯中に, 幅 15 ~ 30cm の未固結破砕帯 (断層粘土幅 1.5cm, 断層ガウジ幅 15cm) 発達する。

グループ B

北北東-南南西ないし北東-南西走向, 高角度西

または東傾斜の断層。連続性は比較的良好。運動センスは不明。一部中生界と花崗岩の境界をなす。露頭スケールではしばしばグループ A から派生して発達し, 同様の運動センスを示すことが多い。

F4 は, 花崗岩と中生界の境界をなす断層で, 幅 3m 以上の未固結破砕帯 (断層粘土幅 1cm) を伴う。露頭では, グループ C の断層に変位を与える。

グループ C

北東-南西ないし東北東-西南西走向, 高角度北または南傾斜の断層。連続性は悪く, 明瞭であるが連続性に欠けるリニアメントを形成する。一般に右横ずれ成分を伴う運動センスをもつ。しばしば同方向のアプライト脈が貫入する。

F5・F6 は, チャートおよび珪質泥岩中の断層で, 幅 3m 以上のカタクレーサイト帯中に幅 1.5m 以上の未固結破砕帯が発達する。F7 は破砕帯幅約 10m で, 断層粘土 5cm を伴う。断層面の姿勢は, N56° E, 88° S で, 断層ガウジ中の引きずり構

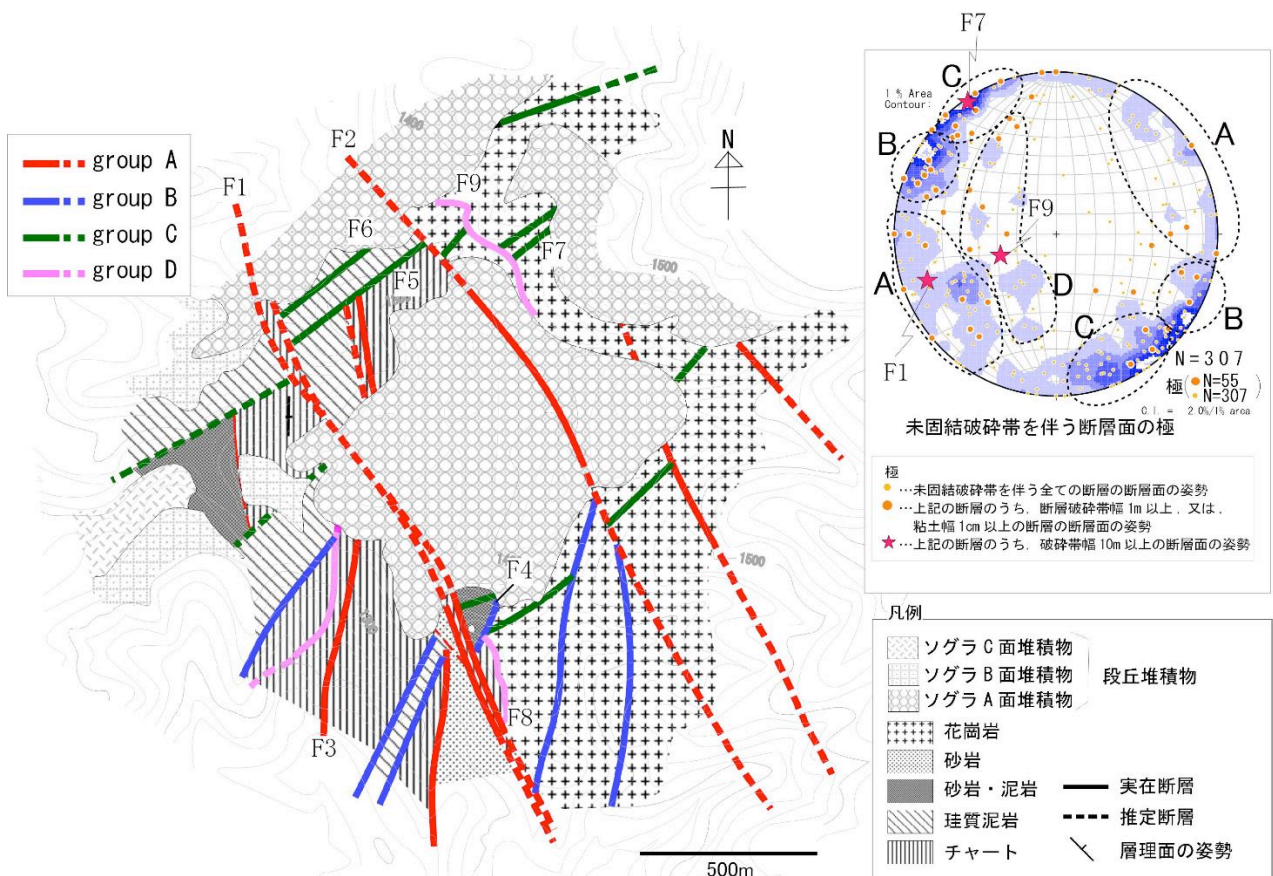


図-4. 未固結破砕帯を伴う断層。
断層面の姿勢, 運動センスの相違により 4つのグループに分類される。



図-5. F1の露頭写真. 破碎帯幅 10m 以上
チャートブロックの引きずりより東側上昇の運動センスを読み取ることができる.



図-6. F8の露頭写真. グループBとグループD
が互いに変位を与えながら発達する.

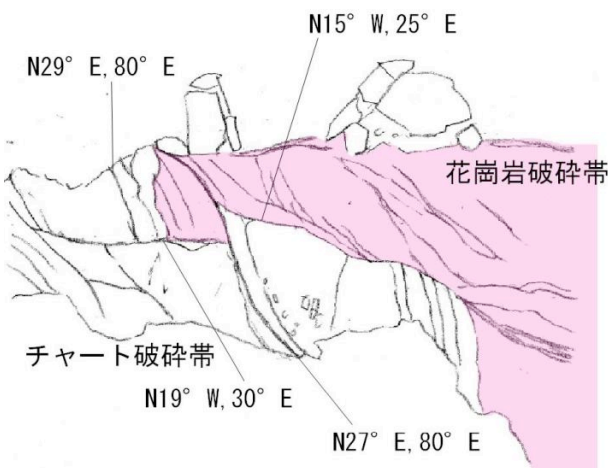


図-7. 図-6 (F8) のスケッチ

造より, 右横ずれを伴う運動センスを有する.

グループD

北東-南西ないし北西-南東走向, $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 東傾斜の断層. 走向傾斜はかなりばらつく. 左横ずれ成分を伴う逆断層で, 連続性は悪い. 一部中生界と花崗岩の境界をなす. F8 は, チャートと花崗岩の境界をなす断層で, 幅 1cm の断層粘土および幅 1m 以上の未固結破碎帯を伴う. 断層面の姿勢は $N15^{\circ} W, 25^{\circ} E$. 花崗岩中の引きずり構造より, 左横ずれ成分を伴う逆断層である. 北北東-南南西走向, 高角度東傾斜の断層 (グループ B) と互いに変位を与えながら発達する (図-6, 図-7). F9 は, 花崗岩中の断層で, 幅約 30m の未固結破碎帯を伴い, 幅 2m 以上のカタクレーサイトが断片的に発達する. 断層面の姿勢は, $N20^{\circ} W, 30^{\circ} E$. 破碎帯中には幅 1~5cm の断層粘土を伴う剪断面が多数発達する. 断層ガウジ中の引きずり構造から, 左横ずれを伴う運動センスを有する.

露頭スケールでは, 各グループを構成する断層は互いに変位を与え合う関係にある. また, グループ B はグループ A から派生して発達し, しばしばグループ A と同様な運動センスをもつ.

4-2. カタクレーサイトのみを伴う断層

研究地域に分布する花崗岩中には, カタクレーサイトを伴う小断層が多数発達する. 特に,

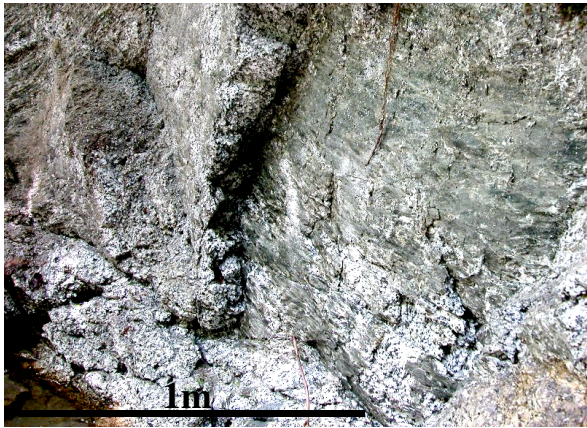


図-7. カタクレーサイトのみを伴う小断層断層面上に刻まれた条線

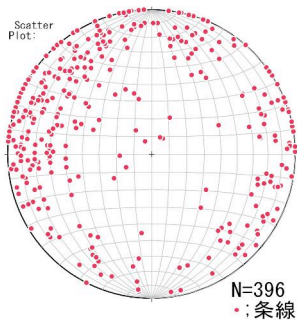


図-8. カタクレーサイトのみを伴う小断層の断層面上に刻まれた条線の姿勢

研究地域南部のモスケ沢中流部には、幅 1mm から数 10cm で密に発達した黒色帯状のカタクレーサイト脈を伴う小断層が見出される。黒色帯状のカタクレーサイトのほとんどは、肉眼観察で 10% 以下の破碎岩片を含むウルトラカタクレーサイトである。それらはしばしばシャープで平らな鏡肌を形成しており、鏡肌上には条線が刻まれていることが多い。プランジ角度 0° ~ 30° の低角度を示すものが顕著である (図-7, 図-8)。黒雲母などの鉱物の引きずり構造や他の小断層との関係によりしばしば運動センスの判定が可能である。産状は、黒色のウルトラカタクレーサイト脈を伴い、単独で発達するもの、または複数に分岐連結しあいながらある程度の幅をもつ剪断帯を形成して発達するものが圧倒的に多く、茶～淡褐色のカタクレーサイトを伴うものがまれに見出される。

ここでは、これらのカタクレーサイトを伴う小断層 (計 1172 例) を産状、姿勢、運動センス、条線、他の断層との関係に着目して記載をおこなった。また、可能な場所ではサンプルを採取し、室内で固化・切断・研磨した後、断面および薄片の鏡下観察をおこなった。鏡下では、黒色のウルトラカタクレーサイト脈は、角礫化し

* 下半球等積投影図

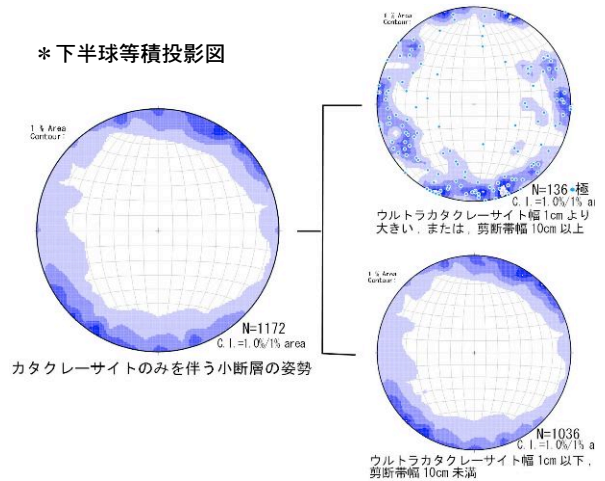


図-9. カタクレーサイトのみを伴う小断層の姿勢

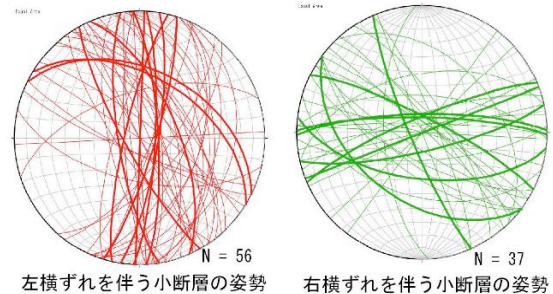


図-10. 運動センスの判定可能であった断層の姿勢 (カタクレーサイトのみを伴う小断層)

た石英・長石・雲母類とその間を埋める細粒物質からなる。剪断面に沿って黒雲母が延性的に変形している。一方、茶～淡褐色のカタクレーサイトを伴うものでは、破碎岩片の間を方解石が充填している。

カタクレーサイトのみを伴う小断層は、一般に傾斜が高角で様々な走向を示す。全体で見ると、北西-南東走向のものがやや多い (図-9)。幅 1cm より大きいまたは剪断帯幅 10cm 以上のものに限定すると、いくつかピークが認められるものの、走向方向は様々である (図-9)。また、左横ずれを伴うものと右横ずれを伴うもので分類すると、左横ずれを伴う運動センスを示す小断層は、北-南～北北西-南南東走向もの (以下、L-NS 系と称する) が多く、次いで、北西-南東～東西走向を示すもの (以下、L-NW 系と称する) が顕著である。右横ずれを伴う運動センスを示す小断層は、東-西～西北西-東南東走向を示すもの (以下、R-ENE 系と称する)、および北西-南東走向を示すもの (以下、R-NW 系と称する)

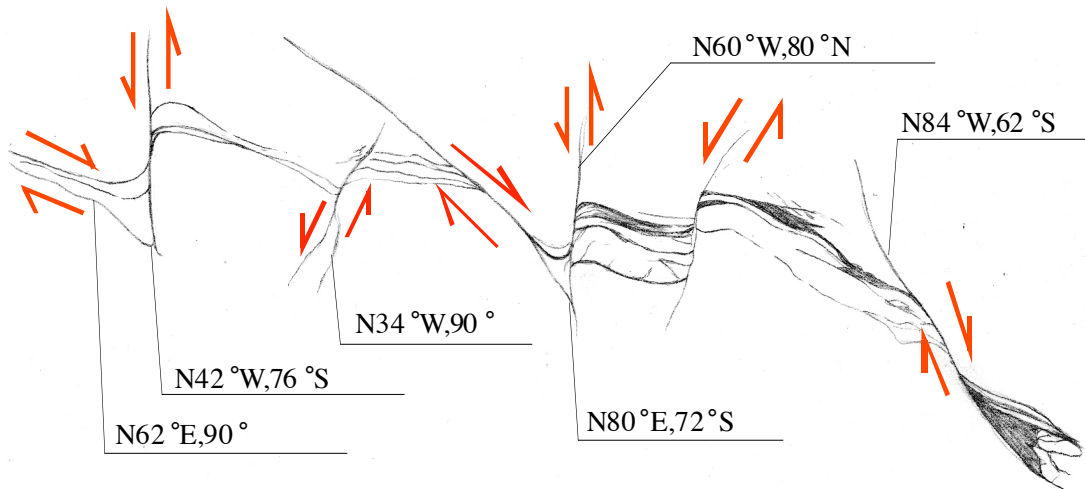


図-11. カタクレーサイトのみを伴う小断層の露頭写真とスケッチ。
左横ずれを伴うものと右横ずれを伴うものが互いに変位を与えながら発達する。

が顕著である (図-10)。左横ずれを伴うものと右横ずれを伴うものは、互いに変位を与えながら発達する (図-11)。

5. 考察

未固結断層岩を伴う断層について

研究地域に発達する未固結破碎帯を伴う断層は、その姿勢・運動センスの違いから、グループ A~D の 4 グループに分類される。

グループ A は、南-北ないし北西-南東走向、 50° ~ 90° 西または東傾斜の断層系である。第四紀段丘堆積物に変位を与える活断層 (F1,F2) を含み、一般に左横ずれを伴う運動センスを有する。その姿勢・運動センスが境峠断層に調和的なことから、境峠断層の活動に伴って形成されたと考えられる。また、F3 では、カタクレーサイト中に未固結断層岩 (断層ガウジおよび断層粘土) が発達する。

グループ B は、北北東-南南西ないし北東-南西走向、高角度西または東傾斜の断層である。北北東-南南西走向を示すものは、露頭スケールでは、グループ A から派生またはグループ A に近接して発達することが多く、しばしばグループ A に調和的な運動センスを示す。このことから、グループ B は、グループ A から派生して発達する断層系でグループ A の活動、すなわち境峠断層の活動に伴って活動した可能性が高い。グループ B がグループ A すなわち境峠断層の姿勢とは異なる姿勢を示す理由としては、グループ C として形成された断層面が、グループ A の左横ずれ運動によって反時計回りに回転した可能性が考えられる。また、過去の研究 (吉岡ほか, 2005; 吉岡ほか, 2006 など) および今回の露頭での観察結果から、境峠断層は、何度も繰り返し活動していることが明らかである。これらのことから、反時計回りに回転させられたグルー

プ C の断層が、グループ A (境峠断層) の再活動の際に、グループ A (境峠断層) と同様の運動をしたものと考えられる。

グループ C は、北東-南西ないし東北東-西南西走向、高角度北又は南傾斜の断層である。一般に右横ずれ成分を伴う運動センスをもつ。研究地域北東方には、境峠断層と斜交して、東北東-西南西走向で右横ずれ活断層である梓川断層群が発達する。断層面上に刻まれた条線の姿勢から、横ずれ成分が卓越した運動センスをもつと考えられる。グループ C の姿勢・運動センスは、梓川断層群に調和的であることから、グループ C は、梓川断層群の活動に伴って形成された可能性が高い。

グループ D は、北東-南西～北西-南東走向、 20° ～ 60° 東傾斜の断層である。走向傾斜はかなりばらつくが、一般に左横ずれ成分を伴う逆断層である。断層面の姿勢が一定しないこと、左横ずれを伴う逆断層の運動センスを示すこと、低角な姿勢を示す場合も多いことから、グループ D の断層は、地表付近で新たに形成された可能性が高い。横ずれ断層の屈曲部には、本研究地域を含む奈川地域では、境峠断層は逆 S 字型に屈曲しており、そのため、この地域には境峠断層の左横ずれ運動に伴う横ずれ圧縮応力場 (transpression) が生じていると指摘されている (狩野・佐藤, 1988 ; 狩野ほか, 2002 など)。グループ D は、境峠断層の活動に伴って発生した横ずれ圧縮応力によって形成されたフラワー構造に伴って発達した可能性が高い。

グループ A・B・C では、カタクレーサイト中に未固結断層岩 (断層ガウジおよび断層粘土) が発達していることが多い。また、断層ガウジ中にカタクレーサイトの岩片が含まれる露頭が普通に見出される。一般に、未固結断層岩は封圧が小さい地表近くで形成されるのに対し、カタクレーサイトは、より封圧の大きい地下 3～10km 付近で形成される (Passchier & Trouw, 1996 ; Scholz, 1988 など) これらのことから、カタクレーサイトを伴う断層が比較的地下深部 (地下 3～10km) で形成された後、上昇、地表付近に達し、新たに未固結断層岩を伴う断層が形成されたと考えられる。また、カタクレーサイト中に未固結断層岩が発達することから、カタクレーサイトを伴う既存の断層面を利用して再び断層活動

が起こった可能性が高い。

カタクレーサイトのみを伴う断層について

花崗岩中には、カタクレーサイトを伴う小断層が多数発達する。一般に、カタクレーサイトは、未固結断層岩形成場よりも封圧の大きい地下 3～10km 付近で形成される (Passchier & Trouw, 1996 ; Scholz, 1988 など) ことから、現在地表に露出しているカタクレーサイトのみを伴う断層は、未固結断層岩を伴う断層形成以前の断層の活動を記録していると考えられる。カタクレーサイトを伴う小断層は、他の断層や黒雲母などの引きずり構造に基づいて、左横ずれを伴うものと右横ずれを伴うものに分類される。

左横ずれを伴う小断層は、北-南～北西-南東走向のもの (L-NS 系) が最も優勢である。一方、右横ずれを伴う小断層は、東-西～北西-東南東走向 (R-ENE 系) のものが優勢である。L-NS 系は、姿勢・運動センスが境峠断層に調和的なことから、境峠断層の活動の結果、形成されたと考えられる。R-ENE 系は、その姿勢・運動センスが梓川断層群に調和的なことから、梓川断層群の活動の結果、形成されたと考えられる。L-NS 系と R-ENE 系は、互いに変位を与え合いながら複雑に発達することから、境峠断層と梓川断層群は、交互に繰り返し活動した可能性が高い。

また、左横ずれを伴う小断層おとび右横ずれを伴う小断層には、ともに北西-南東走向を示すもの (L-NW 系および R-NW 系) が存在する (図-10)。この方向は、境峠断層と梓川断層群の R1 面方向にほぼ一致する。R1 面とは、破碎帯が形成最初期に発達する破断面で、断層が成長していくこうとする方向 (Y) から、 $\phi/2$ ($0^{\circ} < \phi/2 < 30^{\circ}$) 程度斜交した方向に発達する。断層と同様の運動センスを有し、多少の開口成分を伴う雁行状の破断面である。一般に断層面は、R1 面を含む複数の複合面が互いに連結しあいながら発達することが実験および露頭での観察によって知られている (Tchalenko, 1970 など)。左横ずれを伴う北西-南東走向の小断層は、境峠断層の R1 面として、右横ずれを伴う北西-南東走向の小断層は、梓川断層群の R1 面として発達した可能性がある。

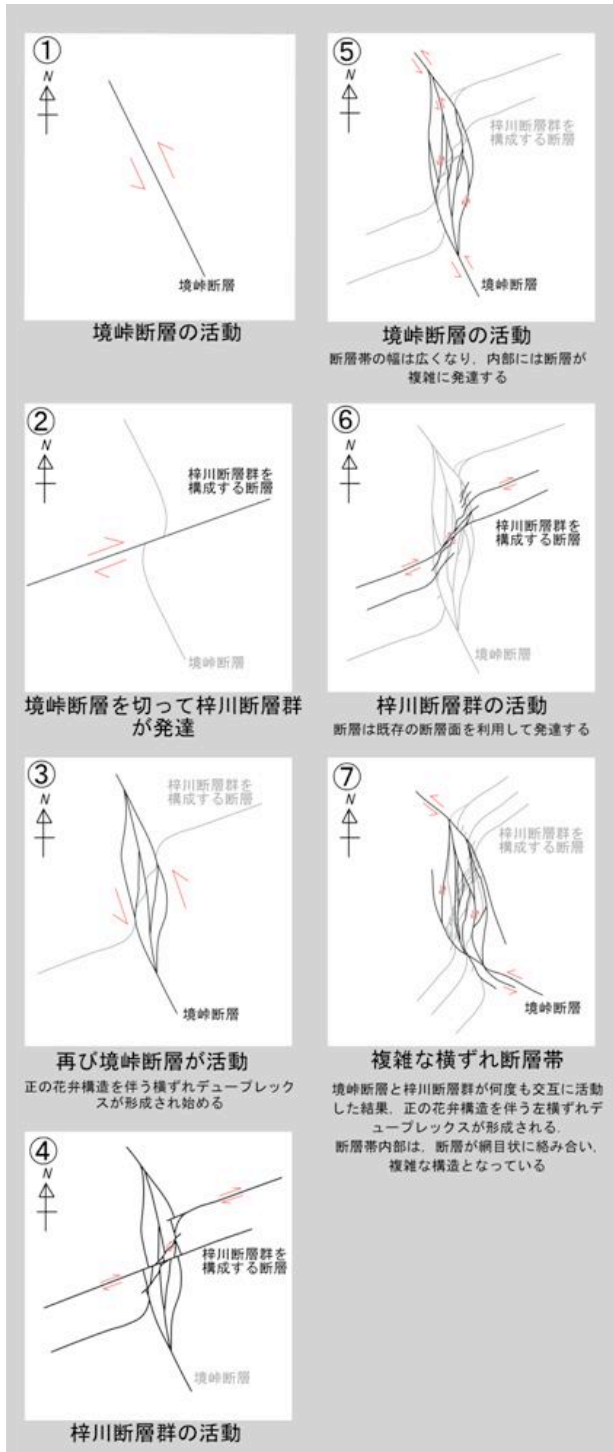


図-12. 境峠断層屈曲部における大規模破砕帯の形成モデル

破砕帯の構造と形成過程

未固結断層岩を伴う断層では、低角逆断層がしばしば認められるのに対し、カタクレーサイトのみを伴う断層では、高角度傾斜を示すものがほとんどである。研究地域は境峠断層の屈曲

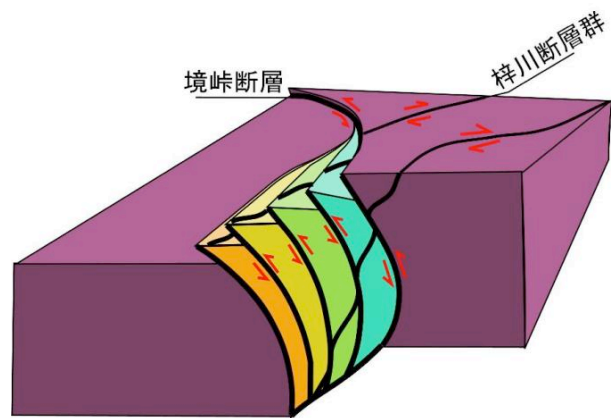


図-13.

境峠断層屈曲部における大規模破砕帯の模式断面図

部に位置することから、横ずれ圧縮応力により、地表付近ではフラワー構造が発達することが期待される。低角逆断層（グループ D）が左横ずれの運動センスをもつことから、屈曲部に生じたフラワー構造を構成する断層であると考えられる。「4-1. 未固結断層岩を伴う断層」で述べたように、低角逆断層（グループ D）は、連続性が悪く、断片的で、姿勢がばらつき一定しない。このことから、ここでは、フラワー構造は、既存の断層面に規制を受けながら複雑に発達したと考えられる。

未固結断層岩を伴う 4 系統の断層は、互いに変位を与えながら複雑に発達する。また、カタクレーサイトのみを伴う小断層においても、境峠断層と梓川断層群の活動に伴う断層が互いに変位を与えながら複雑に発達する。このことから、境峠断層と梓川断層群は共役関係にあると考えられる。また、境峠断層屈曲部に発達する大規模破砕帯は、境峠断層と梓川断層群の活動および境峠断層の屈曲と左横ずれ運動に伴うフラワー構造の発達により、幅広く発達したと考えられる。

6. まとめ

1. 研究地域には、美濃帯中生界および奈川花崗岩、それらを不整合に覆う段丘堆積物が分布すし、カタクレーサイトおよび未固結断層岩を伴う多数の断層によって幅広い破砕帯が形成されている。
2. 境峠断層と梓川断層群の活動、および境峠断

層の屈曲部に生じた左横ずれ圧縮応力によるフラワー構造の発達により，未固結断層岩を伴う断層が発達し，幅広い破砕帯が形成された。

3. 花崗岩中に発達するカタクレーサイトのみを伴う小断層は，境峠断層と梓川断層群の相互活動の結果，未固結断層岩形成以前に形成された。
4. 未固結断層岩およびカタクレーサイトの姿勢・運動センス・相互関係から判断すると，境峠断層と梓川断層群は交互に活動した。
5. 境峠断層屈曲部における幅広い破砕帯は，境峠断層と梓川断層群が交互に活動した結果生じた横ずれ圧縮応力により形成された。

謝辞

住鉦コンサルタント株式会社の棚瀬充史氏，水落幸弘氏，二ノ宮淳氏，入野寛彦氏，日本原子力研究開発機構の丹羽正和氏には，フィールドにご同行いただき，有意義なご意見をいただいた。また，信州大学理学部小坂共榮教授をはじめとする地質科学教室層位・構造談話会の方々には，研究内容に関して議論・アドバイスをいただいた。以上の方々へ心より感謝申し上げます。

文献

- 1) 狩野謙一・佐藤博文，1988，境峠断層（木曾山地北部-飛騨山地南部の活断層）基盤岩変位量。

地質学雑誌，94，1，51-54.

- 2) 狩野謙一・丸山 正・林 愛明，2002，飛騨山地南部，境峠断層の後期更新世-完新世における活動。地質学雑誌，108，5，291-305.
- 3) 中野 俊・足立 守・大塚 勉・原山 智・吉岡敏和，1995，乗鞍岳地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）。地質調査所。
- 4) 大塚 勉，1996，中部山岳地域南西部の境峠断層。平成7年度 文部省特定研究 中部山岳地域の地殻活動と物質循環(代表 塚原弘昭)，3.
- 5) Passchier, C. W. & Trouw, R. A. J., 1996, *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- 6) Scholz, C. H., 1988, The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting. *Geologische Rundschau*. 77, 319-328.
- 7) Tchalenko, J. S., 1970, Similarities between Shear Zone of Different Magnitudes. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 81, 1625-1640.
- 8) 吉岡敏和・細矢卓志・橋本智雄・水野清秀・宍倉正展・石山達也，2005，境峠-神谷断層帯北部，境峠断層の完新世における活動履歴。地質学雑誌，111,9,547-560.
- 9) 吉岡敏和・細矢卓志・橋本智雄・金田平太郎，2006,境峠・神谷断層帯，境峠断層および霧訪山断層における古地震調査。活断層・古地震研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター，6，39-54.

(原稿受付 2008.2.29)