

## 2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較

Comparison of fault gouges in the aftershock area and the non aftershock area of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake

### Abstract

間中光雄<sup>\*1</sup> 福士圭介<sup>\*2</sup>  
宮下由香里<sup>\*3</sup> 伊藤順一<sup>\*1</sup>  
渡部芳夫<sup>\*1</sup> 小林健太<sup>\*4</sup> 亀井淳志<sup>\*5</sup>

Mitsuo Manaka<sup>\*1</sup>, Keisuke Fukushi<sup>\*2</sup>,  
Yukari Miyashita<sup>\*3</sup>, Jun'ichi Itoh<sup>\*1</sup>,  
Yoshio Watanabe<sup>\*1</sup>, Kenta Kobayashi<sup>\*4</sup>  
and Atsushi Kamei<sup>\*5</sup>

2011年6月28日受付.

2012年3月26日受理.

<sup>\*1</sup> 産業技術総合研究所深部地質環境研究コア  
Research Core for Deep Geological Environ-  
ments, Geological Survey of Japan, National  
Institute of Advanced Industrial Science and  
Technology, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Ja-  
pan

<sup>\*2</sup> 金沢大学環日本海域環境研究センター  
Institute of Nature & Environmental Technol-  
ogy, Kanazawa University, Kanazawa,  
Ishikawa 920-1192, Japan

<sup>\*3</sup> 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター  
Active Fault and Earthquake Research Cen-  
ter, National Institute of Advanced Industrial  
Science and Technology, Tsukuba, Ibaraki  
305-8567, Japan

<sup>\*4</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科  
Graduate School of Science and Technology,  
Niigata University, Niigata, Niigata 950-  
2181, Japan

<sup>\*5</sup> 島根大学総合理工学部地球資源環境学科  
Department of Geoscience, Interdisciplinary  
Faculty of Science and Engineering, Shimane  
University, Matsue, Shimane 690-8504, Ja-  
pan

Corresponding author; M. Manaka,  
mitsuo.manaka@aist.go.jp

We examined and compared mineralogical and geochemical prop-  
erties of fault gouges in the aftershock and non-aftershock areas of  
the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, to establish a new method for  
evaluating the activity of low-activity faults. The gouges were exam-  
ined using X-ray powder diffraction analysis, sequential selective ex-  
traction tests, and color measurements. Results show that the after-  
shock-area gouge is mainly composed of illite and chlorite, while the  
non-aftershock-area gouge is mainly composed of halloysite. Iron in  
the aftershock-area gouge is mainly contained in illite, while in the  
non-aftershock-area gouge, it is mainly in the form of amorphous  
and crystalline iron oxide. Results of color measurements ( $L^*a^*b^*$   
color space) show that differences in  $L^*$  values represent differences  
in the presence/absence of illite and halloysite, negative  $a^*$  values  
from the aftershock-area gouge represent the presence of chlorite,  
and positive  $a^*$  values from the non-aftershock-area gouge represent  
the presence of crystalline iron oxide. These results indicate that  
mineralogical and geochemical characteristics can clearly distinguish  
fault gouges in aftershock and non-aftershock areas of the 2000 Tot-  
tore-ken Seibu earthquake, and that color measurements can be an  
effective and simple proxy method for the screening of gouges that  
require further analysis in the field.

Keywords: 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, color measurement, fault  
gouge, low activity fault, selective extraction test, X-ray powder  
diffraction analysis

### はじめに

地震活動を予測するためには、日本における過去の地震活  
動履歴を基にして将来に外挿することが基本となる。地表を  
ずらすような陸域の震源の浅い大地震については、その多く  
がほぼ同一の既存の断層沿いで地形や地層のずれを繰り返し  
ていることが確認され、このような今後も活動する可能性が  
ある断層は活断層と呼ばれている。これまでに明らかになっ  
た活断層の分布は、「日本の活断層」(活断層研究会, 1991)  
や「活断層データベース」(産総研情報公開 DB, [02.ibase.aist.go.jp/activefault/\), 全国主要活断層活動確率  
地図\(吉岡ほか, 2005\)に詳しく記載されている。活断層の定  
義は研究者によって異なり、例えば「活断層データベース」で  
は、約10万年前から現在までに繰り返し活動した断層を活  
断層としている。しかし、これまでに実際の調査対象となっ  
てきた活断層は、数千年程度の平均活動間隔を持つものが大  
半である。したがって、将来10万年を超える長期予測を行  
う場合には、少なくとも過去同程度の期間における断層の活  
動性を評価しなければならない。](http://riodb</a></p></div><div data-bbox=)

2000年鳥取県西部地震以降、国内に被害を及ぼした内陸

地震は地形的にも不明瞭な断層の活動によってもたらされたものが大半であり、このことは空中写真判読により認定された活断層やその可能性のあるリニアメントの検出および認定が必ずしも十分なものではなく、未知の活断層(例えば、低活動性断層)が存在するという問題を提起した。そこで、この地震後、同地域において多岐にわたる調査、観測および探査が行われた。例えば、堤ほか(2000)、井上ほか(2002)は余震域の空中写真の再判読を実施しリニアメント群を新たに抽出した。井上ほか(2002)、伏島ほか(2002)はリニアメント直上や地表に変形を生じた地域の現地調査を実施し、2000年の地震以前の地震活動の存在を示した。他方、小林・杉山(2004)、相澤ほか(2005)は広域的な地質調査を実施し、余震域内外の断層岩の分布や性状に有意な差を認め、断層岩の性状から断層の活動性を推定できる可能性を指摘した。

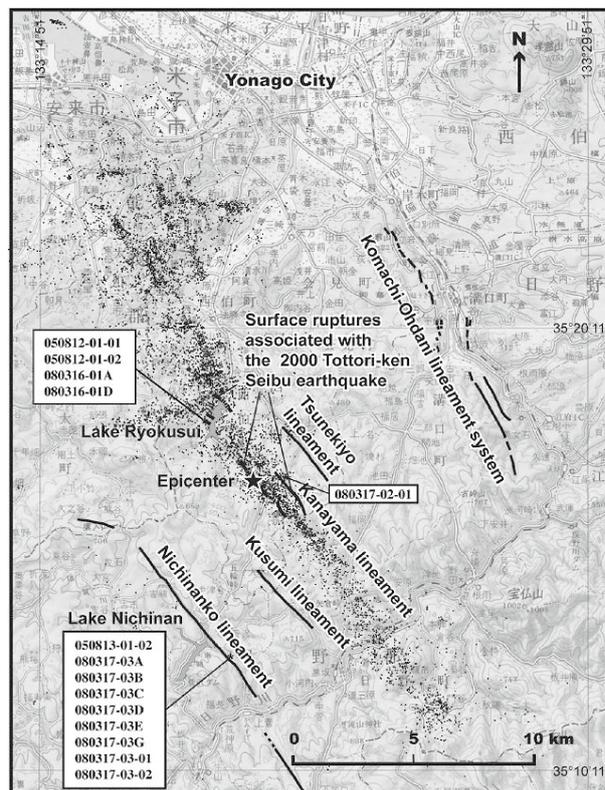
産総研深部地質環境研究コアでは、これらの成果を更に発展させ、変動地形がない場合においても基盤岩の断層破砕物質から直接断層の活動性を評価する手法開発を目標とする地層処分安全規制支援研究を実施している。具体的には、2000年鳥取県西部地震の余震域とその周辺の地質体に発達した低活動性断層の活動度と断層岩性状の特徴を明らかにするために、断層岩の粉末X線回折分析、逐次選択抽出試験および色調測定を行い、断層活動性と断層岩の鉱物学および化学的特徴との関連性についてまとめ、またこれらのデータを基に、断層岩形成に伴う岩石または鉱物反応に関して、理論的な裏付けを得るための検討を行っている(宮下ほか, 2011a, b)。これらの検討を踏まえて、最終的には色調測定を断層やリニアメントの活動性に対する定性的な評価手法の一つとしようとするものである。なお、この評価手法は、現場露頭で適用することによって、厳密な評価を必要とする断層の抽出を可能とする点で非常に有効であるが、鉱物学・化学的な裏付けをその都度得た上で本来の断層ないしリニアメントの活動性を評価することが前提となる。

本報告では、これまでの研究成果の一部として、2000年鳥取県西部地震の余震域と、非余震域としての日南湖リニアメント沿いに分布する断層ガウジの鉱物学および化学的特徴を述べるとともに、余震域と非余震域の断層ガウジの色調と鉱物組成の関係、断層ガウジ構成鉱物の形成プロセスおよび両ガウジの判別について議論し、断層の活動性評価に供すべき対象の抽出手段を考察する。

## 試料と分析方法

### 1. 分析試料

分析試料の採取地は、鳥取県米子市南部に位置する2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域として鳥取県日野郡日南町に位置する日南湖リニアメント沿いの地域である(Fig. 1)。Fig. 1のリニアメントの位置や名称について、小町—大谷リニアメント系は杉山ほか(2005)に、日南湖リニアメント系は杉山ほか(2004)に、その他のリニアメントは井上ほか(2002)に従った。両地域から多様な色調を呈する断層ガウジとその母岩である花崗岩を採取した。断層ガウジ試料採取にあたっては、地表面ないし露頭面の汚染・変質部の混入

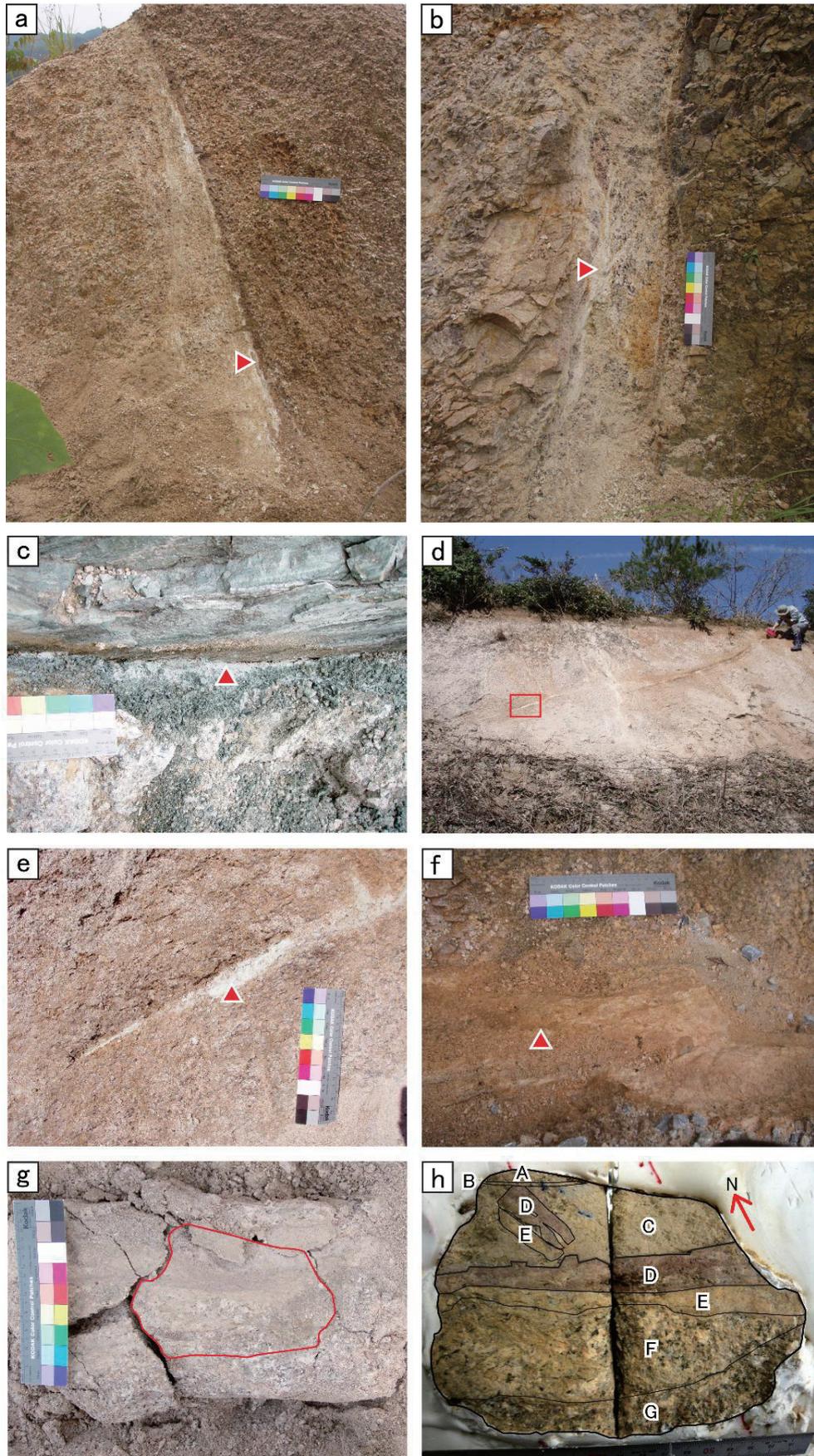


**Fig. 1.** Distribution of surface ruptures and aftershocks of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, and location of sampling sites. The aftershock distribution was provided by Dr. Eiichi Fukuyama, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. Lineament traces of the Komachi-Ohdani lineament system are from Sugiyama et al. (2005), the Nichinanko lineaments are from Sugiyama et al. (2004), and other lineament traces are from Inoue et al. (2002).

**Table 1.** Summary of the properties of fault gouges and granites.

Sample name	Color	Rock type (Photo No.)
Aftershock area		
050812-01-01	white	fault gouge (Fig.2a)
050812-01-02	pale-green	fault gouge (Fig.2b)
080316-01A	greenish gray	fault gouge (Fig.2c)
080317-02-01	pale-green	fault gouge (Fig.2d, e)
080316-01D	—	weathered granite
Non-aftershock area (Nichinanko lineament)		
050813-01-02	orange	fault gouge (Fig.2f)
080317-03A	—	cataclastic granite (Fig.2g, h)
080317-03B	greenish gray	fault gouge (Fig.2g, h)
080317-03C	gray	fault gouge (Fig.2g, h)
080317-03D	pink	fault gouge (Fig.2g, h)
080317-03E	beige~orange	fault gouge (Fig.2g, h)
080317-03G	—	cataclastic granite (Fig.2g, h)
080317-03-01	pink	fault gouge
080317-03-02	beige	fault gouge

を避けるために、ねじり鎌等で露頭表面を削り落とした後、ナイフ・スプーン等を差し込んで採取、あるいは、断層ガウ



**Fig. 2.** Photographs showing the occurrences and sampling points of fault gouges: (a) 050812-01-01, (b) 050812-01-02, (c) 080316-01A, (d, e) 080317-02-01, (f) 050813-01-02, (g, h) 080317-03A-E and G.

ジを含むブロックを切り出し、その後ガウジ層に沿って周辺部をはがして採取した。その際、周辺部分の混入を避けて均一な部位を対象とするよう留意した。採取試料の番号、色調および岩相を Table 1 に示す。余震域断層ガウジは緑色、非余震域断層ガウジは暖色系を呈するものが多く、両断層ガウジの厚さに差はなく数 cm 程度である。以下に個々の試料の産状について記載する。

#### <余震域>

**試料 050812-01-01**：法面より採取。弱い面構造を持つ粗粒黒雲母花崗岩中に幅 4~20 cm のカタクレサイト帯が存在する。このカタクレサイト帯の南側縁部を構成する厚さ 10 mm 程度の断層ガウジで、白色を呈する (Fig. 2a)。

**試料 050812-01-02**：法面より採取。粗粒黒雲母花崗岩と貫入玄武岩脈との境界部に幅 20 cm 程度のカタクレサイト帯が存在する。このカタクレサイト帯の花崗岩側に 5~10 cm 程度の幅でさらに変形が集中するゾーンが認められる。その変形集中ゾーン中の厚さ 5 mm 程度の脈状断層ガウジで、淡緑灰色を呈する (Fig. 2b)。

**試料 080316-01A**：法面より採取。粗粒黒雲母花崗岩に玄武岩脈が貫入し、さらにこの岩脈に流紋岩脈が貫入している。両岩脈の貫入境界付近において、流紋岩側には淡緑色を呈する厚さ 1~2 cm 程度の、玄武岩側には濃緑色を呈する厚さ 5 cm 以下程度の断層ガウジ帯が発達する。両ガウジの境界は明瞭であるが、厚さはそれぞれ膨縮し変化する。流紋岩側の淡緑色ガウジは、部分的に細粒岩片を多く含む。これらのうち、流紋岩側の断層ガウジを採取した (Fig. 2c)。

**試料 080317-02-01**：法面より採取。風化花崗岩中の厚さ数 mm~3 cm 程度の断層ガウジで淡緑色を呈する (Fig. 2d, 2e)。

**試料 080316-01D**：試料 080316-01A を採取した法面脇の転石を採取。淡桃色のカリ長石を特徴的に含む粗粒黒雲母花崗岩で、構成鉱物は主に斜長石・カリ長石・石英・黒雲母・不透明鉱物である。二次鉱物はほとんど認められず、斜長石の弱いソーシュライト化や、黒雲母の劈開に沿った緑泥石化や白雲母化がわずかに確認できる程度である。

#### <非余震域(日南湖リニアメント沿い)>

**試料 050813-01-02**：林道底面より採取。黒雲母花崗岩起源のカタクレサイト中に存在する厚さ 1 cm 程度の脈状断層ガウジで、橙色を呈する。カタクレサイト帯の厚さは、観察できる範囲内において 20 cm 程度で、Y, R1, P 面からなる左横ずれ複合面構造が発達する。複合面構造のいずれにも厚さ数 mm 程度の断層ガウジが伴われるが、その色調は、橙色のほか白色、灰色、褐色等変化に富む (Fig. 2f)。

**試料 080317-03A**：林道底面より採取。黒雲母花崗岩を原岩とするカタクレサイト。花崗岩の組織を残し、肉眼では斜長石・カリ長石・石英・黒雲母が一次鉱物として認められる (Fig. 2g, 2h)。ただし、斜長石は白濁化し、黒雲母の周囲には赤褐色の鉄鉱物が認められる。また、試料はもろく壊れやすい。この状況から、一次鉱物の多くは二次的な風化鉱物に置換された仮像と認識できる。この試料位置の近傍から得た比較的新鮮な花崗岩は、カリ長石と石英が弱い斑状組織を

つくる中粒黒雲母花崗岩であった。構成鉱物は主に斜長石・カリ長石・石英で、黒雲母・不透明鉱物を伴う。二次鉱物に関しては斜長石の弱いソーシュライト化が認められ、黒雲母の周囲や石英・長石の粒間に微細な茶褐色の鉄鉱物がわずかに散在する程度である。

**試料 080317-03B**：林道底面より採取。試料 080317-03A と後述する試料 080317-03C 間に存在する厚さ 2~4 mm の断層ガウジ帯で、淡緑色を呈する (Fig. 2g, 2h)。

**試料 080317-03C**：林道底面より採取。灰色を呈する断層ガウジであり、厚さは 1~5 cm 程度で膨縮する。後述する試料 080317-03D と試料 080317-03E の岩片を含む (Fig. 2g, 2h)。

**試料 080317-03D**：林道底面より採取。桃色を呈する厚さ 2~30 mm の断層ガウジ (Fig. 2g, 2h)。

**試料 080317-03E**：林道底面より採取。ページュから橙色を呈する厚さ 2 cm 以下の断層ガウジ (Fig. 2g, 2h)。

**試料 080317-03G**：林道底面より採取。試料 080317-03A と類似の花崗岩を原岩とするカタクレサイト。試料 080317-03A と同様の花崗岩で原岩の組織を残すものの、一次鉱物の多くは風化変質している。

**試料 080317-03-01**：試料 080317-03D の延長部より採取。

**試料 080317-03-02**：試料 080317-03E の延長部より採取。

## 2. 粉末 X 線回折分析

**2.1 全岩の不定方位試料** 断層ガウジと花崗岩試料を 50 °C 以下に設定した乾燥機で 24 時間以上乾燥させた後、振動ミル (平工製作所製 TI100; 10 ml 容タングステンカーバイト容器) を用いて粉碎・混合し、粉末 X 線回折 (XRD) 分析用試料 (200 mesh, 95 %pass) とした。微粉碎された粉末試料を、0.700 g を上限として秤取し、XRD 用アルミニウムホルダーに充填して不定方位試料を作成した。なお、試料量の少ないものについては、小型のアルミニウムホルダーに充填して不定方位試料を作成した。

全岩試料の XRD 分析には、理学電気製 MultiFlex を使用し、測定条件は以下の通りである。対陰極は Cu を使用し、管電圧値と電流値は 40 kV と 40 mA に設定し、走査速度は 1°/min で、走査範囲は 2~65° である。発散、受光および散乱スリットは 1°-0.3 mm-1° である。

**2.2 粘土粒子径の定方位未処理試料** 全岩粉末試料から、水ひ法により粘土画分 (< 2 μm 径粒子) を採取した。水ひ手順を以下に簡略に記す。試料の一定量をピーカーに取り蒸留水を加えて超音波洗浄機や攪拌機を用いて 30 分程度分散させる。室温で静置し、分散状態を確認した後、Stokes の法則に従って所定時間および所定深度を設定し、上澄み液を回収する。ただし、分散の不十分な試料については、分散剤として 1 M の水酸化ナトリウムを適量加える。この操作を数度繰り返し行い、所定時間経過後に懸濁状態が認められなくなった時点を終点とする。遠心分離機を用いて回収した懸濁液から粘土画分を濃集し、スライドガラス上に無限厚を保つように定方位に沈着させ、室温で風乾させる。これを定方位未処理試料として XRD 分析に使用する。なお、塩の析出により適切にスライドガラス上に試料が定置しない場合は、

遠心分離により粘土画分を数度、蒸留水で洗浄する。

定方位未処理試料のXRD分析にも、理学電気製 Multi-Flex を使用した。測定条件として、対陰極、管電圧値、管電流値および走査速度は全岩試料の分析時と同じである。ただし、走査範囲を $2\sim 50^\circ$ 、発散、受光および散乱スリットを $1/2^\circ-0.3\text{ mm}-1/2^\circ$ とした。

**2.3 定方位各種薬品処理試料** 定方位法による未処理XRDで測定した試料に対し、エチレングリコール処理、Kイオン飽和処理およびMgイオン-グリセロール飽和処理を行った。エチレングリコール処理はVapor法を用いた。処理方法は、台座を敷いて底上げした容器内にエチレングリコールを流し込み、台座上にスライドガラスに塗布した試料を置く。容器を密封し、 $70^\circ\text{C}$ 程度に加熱した乾燥機内で約半日間加熱する。試料が十分にエチレングリコール蒸気を吸収した後、直ちにXRD分析を行う。

Kイオン飽和処理として、粘土画分の固体を含む遠沈管に1Mの $\text{CH}_3\text{COOK}$ 溶液を加え、内容物をよく混ぜ、遠心沈降させて上澄みを棄捨(遠沈洗浄)後、蒸留水を加えて遠沈洗浄を行い過剰の塩溶液を除く。水をよく除き、再度少量の水を加えてスライドガラスに無限厚を保つように塗布し乾燥させた後、XRD分析を行う。

Mgイオン-グリセロール飽和処理として、1Mの $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Mg}$ 溶液を用い、Kイオン飽和処理と同じ手順でMgイオン飽和処理定方位試料を作成する。得られた試料をVapor法によりグリセロール処理した後、直ちにXRD分析を行う。なお、処理温度は $100^\circ\text{C}$ 、加熱時間は約4時間である。

測定装置と測定条件は、上記の定方位法による未処理XRD分析と同様である。

### 3. 逐次選択抽出分析

乾燥させ粉碎した断層ガウジと花崗岩試料2gを秤取りし、4段階の逐次選択抽出試験を実施した。なお、2gに満たない試料は、抽出試験に供与できる量で行った。逐次選択抽出試験の抽出条件や抽出手順は柳瀬ほか(1996)に準じた。第1段階は、TAO試薬(Tamm, 1932)を用いて非晶質鉄酸化物を溶解させTAO抽出液を得た。第2段階は、CDB試薬(Mehra and Jackson, 1960)を用いて結晶質(水酸化)鉄酸化物を溶解させCDB抽出液を得た。第3段階は、6M HCl溶液を用いて緑泥石等の粘土鉱物を溶解させHCl抽出液を得た。第4段階は、HF溶液を用いて残存する粘土鉱物やケイ酸塩鉱物を溶解させHF抽出液を得た。抽出後、各フラクションの鉄、マグネシウムおよびカリウムの分布を決定するために原子吸光法により定量し、抽出量を求めた。また、抽出試験実施前とTAO抽出試験後の試料の質量減少量をTAO抽出による固相の溶解量とした。同様に、TAO抽出試験以降の逐次抽出試験実施前後の質量減少量を、CDB抽出による固相の溶解量、HCl抽出による固相の溶解量とした。なお、HF抽出による固相の溶解量は、抽出試験実施前とHCl抽出試験後の質量減少量である。

### 4. 色調測定

野外での露頭観察時の色調確認に対応させるため、断層ガ

ウジと花崗岩試料を測色した。コニカミノルタ製土色計SPAD-503や分光測色計CM-2600dを使用し、本測色計付属の白色校正板による校正を実施した後、測色計と試料を密着させ、測色計内蔵の光源を用いて試料の色調を測定した。測色データは、国際照明委員会によって1976年に制定されたCIE  $L^*a^*b^*$ 表色系によって表した。 $L^*$ は明度を示し、その数値がゼロであると真黒に、100であると真白に対応する。 $a^*$ は赤色度を示し、その数値が正の値であると赤を、負の値であると緑に対応する。 $b^*$ は黄色度を示し、その数値が正の値であると黄を、負の値であると青に対応する。 $a^*$ や $b^*$ 値の絶対値が大きくなると彩度が増す。

試料の測色には、自作の簡易な色調測定セルを用いた。測定セルは、5mm厚の白色テフロン板に $\phi 13\text{ mm}$ 、深さ1mmの窪みをつけたものである。窪みに試料を入れ、ガラス板などで試料表面を平らにし、試料の色調を測定した。

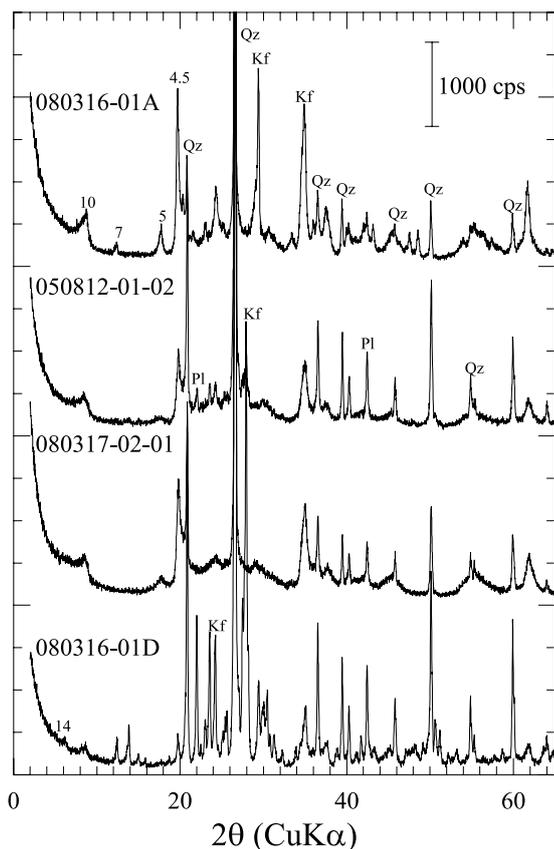
試料の測色は、逐次選択抽出試験と並行して実施した。具体的には、抽出試験の実施前(オリジナル)、TAO抽出後、CDB抽出後およびHCl抽出後の計4回試料の色調を測定した。なお、測色前には、試料を十分に乾燥させた。

## 結 果

### 1. 粉末X線回折結果

Fig. 3は緑水湖周辺と金山リニアメント上に位置する露頭から採取した試料(以下、余震域試料と呼ぶ)の全岩XRDパターンを示す。試料は、石英、カリ長石、斜長石と $14\text{ \AA}$ 、 $10\text{ \AA}$ 、 $7\text{ \AA}$ 、 $5\text{ \AA}$ 、 $4.5\text{ \AA}$ にピークをもつ層状ケイ酸塩鉱物のいずれかから構成される。ガウジ試料は周辺の破碎した花崗岩試料(080316-01D)よりも石英と斜長石のピークが著しく減少している。また $14\text{ \AA}$ と $7\text{ \AA}$ のピークは、080316-01A試料と080316-01D試料に認められるが強度は低い。 $10\text{ \AA}$ 、 $5\text{ \AA}$ および $4.5\text{ \AA}$ のピークは080316-01A、050812-01-02および080317-02-01試料で高く、080316-01D試料では低い。

Fig. 4aは各種処理を施した粘土画分( $< 2\text{ }\mu\text{m}$ )試料(080316-01A)のXRDパターンを示す。 $10\text{ \AA}$ と $5\text{ \AA}$ に現れるピークは雲母鉱物の $d(001)$ と $d(002)$ 反射に相当する。この雲母鉱物は粘土画分に認められるにも関わらず比較的結晶度がよいことからイライトであると判断される。したがって、全岩試料で認められた $10\text{ \AA}$ 、 $5\text{ \AA}$ および $4.5\text{ \AA}$ のピークはイライトに相当すると考えられる。050812-01-01試料の $10\text{ \AA}$ にピークをもつ鉱物は、エチレングリコールとMgグリセロール処理によりピークが $10\text{ \AA}$ と $11\text{ \AA}$ に分離したことから、 $10\text{ \AA}$ のピークはイライトで、 $11\text{ \AA}$ のピークはハロイサイト $10\text{ \AA}$ の可能性もある(Fig. 4b)。080317-02-01試料では、Mgグリセロール試料においての超周期反射が認められることからイライトとスメクタイトの混合層の存在も考えられる(Fig. 4c)。080316-01Dでスメクタイトのピークが明瞭に認められるが(Fig. 4d)、080316-01Aはブロードなピークが現れる。 $14.3\text{ \AA}$ 、 $7.1\text{ \AA}$ および $4.7\text{ \AA}$ に認められるピークは緑泥石の $d(001)$ 、 $d(002)$ および $d(003)$ に相当する。 $d(001)$ ピークよりも $d(002)$ ピークが卓

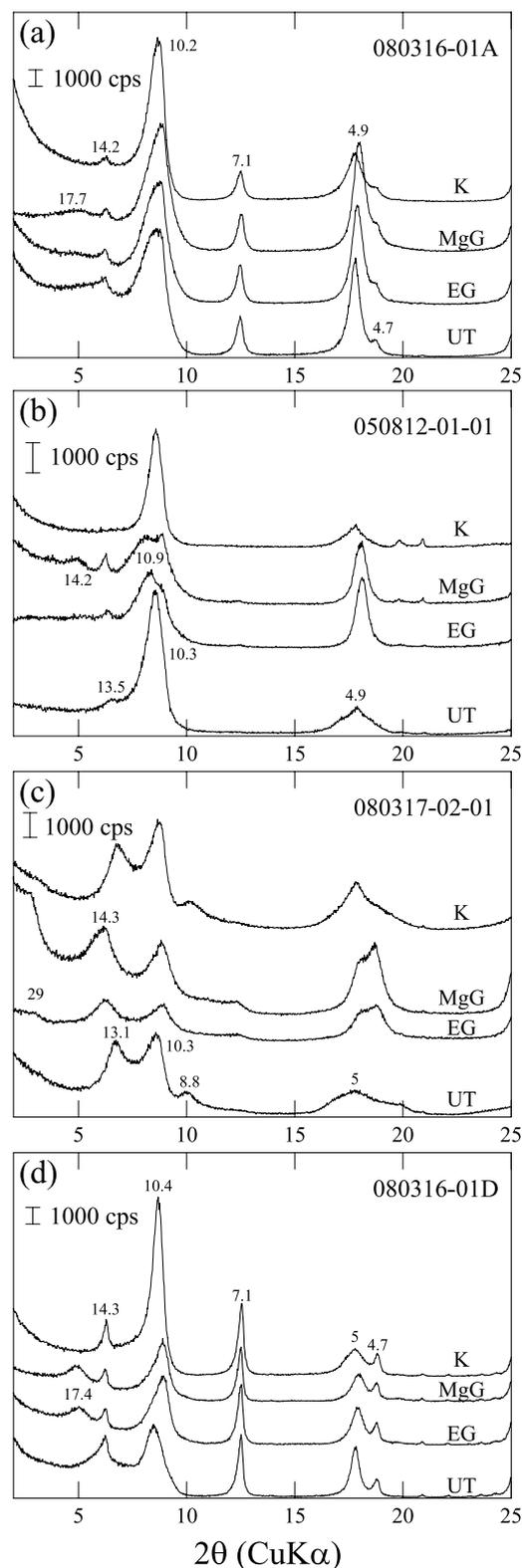


**Fig. 3.** X-ray powder diffraction patterns of whole-rock samples from aftershock areas. Qz = quartz, Pl = plagioclase, Kf = K-feldspar.

越することから、本試料に含まれる緑泥石は鉄に富むものであることが推測される(白水, 1988).

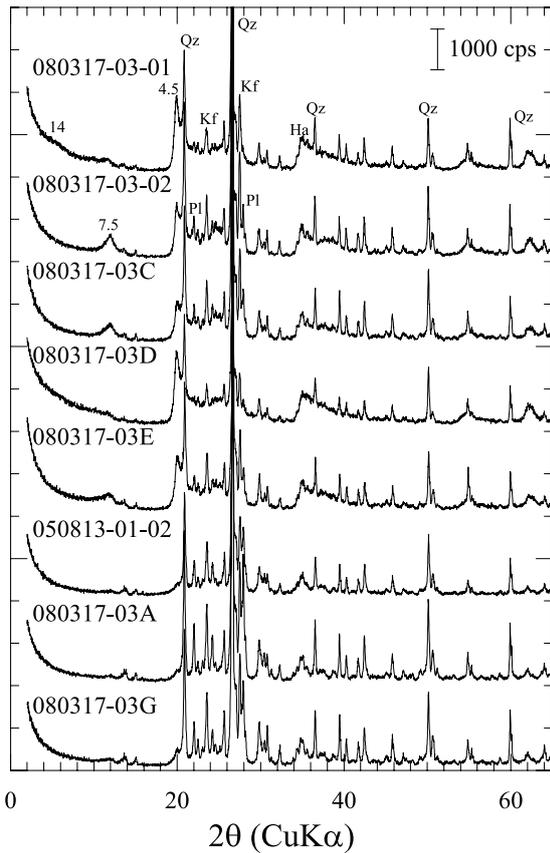
Fig. 5 は非余震域として日南湖リニアメント沿いに位置する露頭から採取した試料(以下、非余震域試料と呼ぶ)の全岩 XRD パターンを示す。いずれの試料も初生鉱物として石英、カリ長石、斜長石を含むが、ガウジ試料ではこれらの鉱物によるピーク強度は風化花崗岩試料である 080317-03A と 080317-03G よりも低い。080317-03-02, 080317-03C および 080317-03D 試料では  $7.5 \text{ \AA}$  にブロードなピークが認められる。このピークは他の試料では低い。080317-03-01 と 080317-03D 試料では  $14 \text{ \AA}$  に極めてブロードなピークが認められる。

Fig. 6a は各種処理を施した粘土画分( $< 2 \mu\text{m}$ )試料(080317-03-01)の XRD パターンを示す。080317-03-01 試料では未処理試料で現れる  $15 \text{ \AA}$  はエチレングリコール処理では変化しないが、Mg グリセロール処理ではより低角度に連続的な分布として現れる。通常スメクタイトはエチレングリコール処理によって  $18 \text{ \AA}$  に変化するが、高い層電荷を持つものは変化せずに、Mg グリセロール処理によってのみ低角度に変化することが知られる(白水, 1988)。一方、Mg グリセロールによってもピーク位置が変化しない場合はパーミキュライトと同定される。本試料では Mg グリセロー



**Fig. 4.** X-ray powder diffraction patterns of clay-size samples from aftershock areas: (a) 080316-01A, (b) 050812-01-01, (c) 080317-02-01, and (d) 080316-01D.

ル処理によって低角度に変化したことから、080317-03-01 に含まれる  $15 \text{ \AA}$  鉱物はスメクタイトであると推定される。



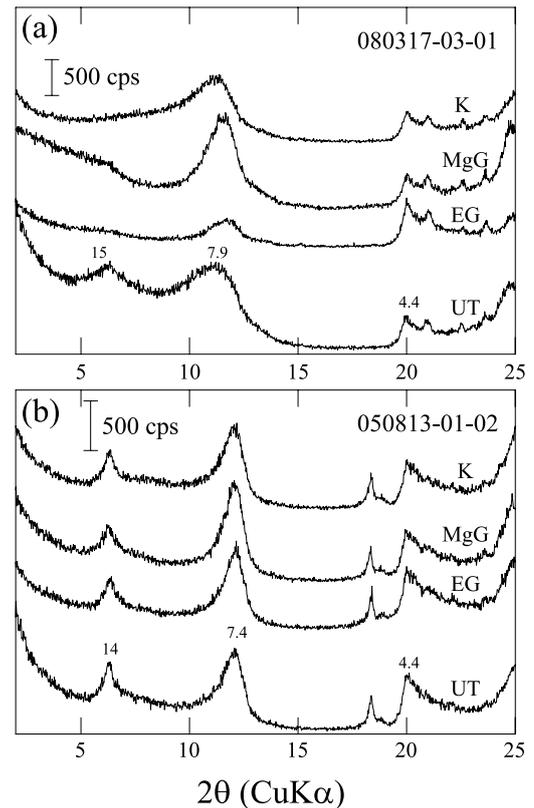
**Fig. 5.** X-ray powder diffraction patterns of whole-rock samples from non-aftershock areas (the Nichinanko lineament). Qz = quartz, Pl = plagioclase, Kf = K-feldspar, Ha = halloysite.

Fig. 6bの050813-01-02試料の14 Åにピークをもつ鉱物はエチレングリコール処理とMgグリセロール処理によりピークが移動しなかったため緑泥石に相当すると考えられる(白水, 1988). 7.4 Åのピークはいずれの処理によっても変化しない。これは含水カオリン鉱物であるハロイサイトのピークであると判断され、4.4 Åの位置に非対称なピークが存在することからハロイサイト7 Åの可能性がある。

上記の全岩と各種処理を施した粘土画分のXRD分析により得られた各試料の構成鉱物組合せをTable 2に示す。同定された鉱物は、分析試料の鏡下観察の結果と調和的であった。表から明らかのように、両産地の試料に共通に含まれる鉱物は石英と長石であるが、粘土鉱物の産出は産地によって異なる。イライトは余震域試料に特徴的に存在し、ハロイサイトは非余震域試料に特徴的に存在する。緑泥石やスメクタイトは、余震域試料に多い傾向がある。このことは、粘土鉱物の産出の違いによって余震域と非余震域のガウジを区別することが可能であることを示唆する。

**2. 逐次選択抽出分析結果**

Table 3に逐次選択抽出分析によって得られた各抽出フラクションからの鉄の溶出量を示す。また同表にはマグネシウムとカリウムの溶出量も示す。TAO試薬は非晶質・低結晶



**Fig. 6.** X-ray powder diffraction patterns of clay-size samples from non-aftershock areas (the Nichinanko lineament): (a) 080317-03-01, (b) 050813-01-02.

性鉄酸化物(フェリハイドライト)を選択的に溶解する。CDB試薬は結晶性鉄酸化物(ゲータイトやヘマタイト)を選択的に溶解する。HCl溶液は本検討で認められた粘土鉱物からは緑泥石を選択的に溶解すると考えられる。HF溶液はHCl溶液では溶解されない粘土鉱物(イライト, スメクタイト, ハロイサイト等)および石英, カリ長石, 斜長石を溶解する。

Table 3に示されるように、採取した両ガウジ試料の各抽出フラクションの固相の溶解量は、HF溶液による溶解量が最も多く、続いてHCl溶液による溶解量が多い。一方CDB試薬による溶解量とTAO試薬による溶解量は産地によって異なる。余震域ガウジ試料ではCDB試薬による溶解量はTAO試薬による溶解量よりも高い。一方、非余震域ガウジ試料は、TAO試薬による溶解量はCDB試薬による溶解量よりも高い。また、両産地とも、ガウジ試料とその周辺の変質した花崗岩において各抽出フラクションの溶解量の違いが認められる。余震域ガウジ試料では、TAO試薬とHCl溶液による溶解量が花崗岩試料よりも多い。非余震域ガウジ試料では、HCl溶液による溶解量が原岩と考えられる花崗岩試料よりも多い。このことは、ガウジ試料は周辺の変質した花崗岩よりもHClに可溶性の鉱物が多いことを示し、試料観察やXRD結果とも調和的である。

Table 3から、ガウジ試料の各抽出フラクションの鉄の溶

**Table 2. Mineral composition of gouges determined by X-ray powder diffraction analysis.**

Sample	Grain size (μm)	Chlorite	Illite	Illite-smectite	Smectite	Halloysite	Quartz	K-feldspar	Plagioclase
Aftershock area									
Gouge	050812-01-01	<2	▪	△		△(10A)			
	050812-01-02	Bulk		▪			○	▪	+
		<2		△		▪	▪		
	080316-01A	Bulk	▪				○	▪	
		<2	△	○		+			
	080317-02-01	Bulk		▪	▪		○		
	<2		△	△			▪		
Weathered granite	080316-01D	Bulk	▪	▪			◎	△	○
		<2	△	△		△			
Non-aftershock area (Nichinanko lineament)									
Gouge	050813-01-02	Bulk				▪	○	+	+
		<2	▪			▪	▪	▪	▪
	080317-03C	Bulk				▪	◎	△	△
		<2				△	▪	▪	
	080317-03D	Bulk				▪	○	+	▪
		<2				▪	△	+	
	080317-03E	Bulk				▪	◎	△	+
		<2				+	▪	▪	▪
	080317-03-01	Bulk				▪	▪	◎	+
		<2				+	+	▪	▪
	080317-03-02	Bulk				+	◎	△	△
		<2				△	▪	▪	
Cataclastic granite	080317-03A	Bulk				▪	◎	△	△
		<2	▪			△	▪	▪	+
	080317-03G	Bulk				▪	◎	△	△
		<2				+	▪	+	+

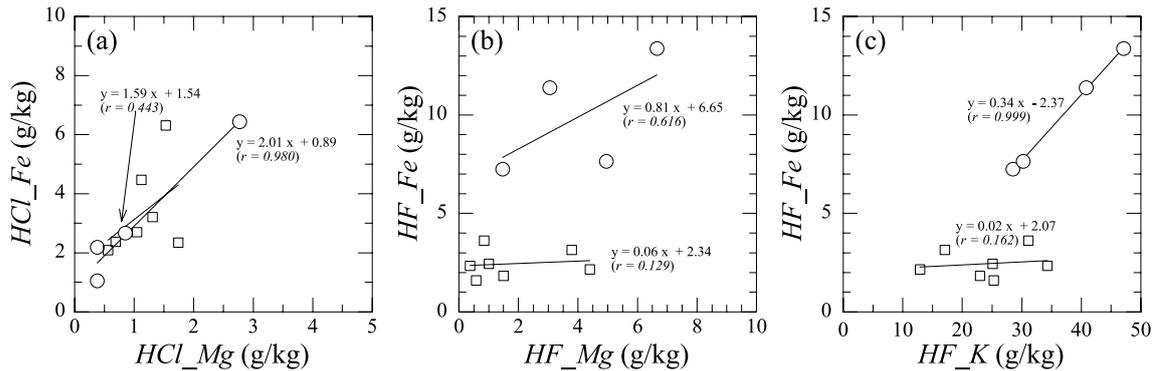
◎: >5000cps, ○: 2500-5000cps, △: 500-2500cps, +: 250-500cps, ▪: <250cps

**Table 3. Iron, magnesium, and potassium contents of gouges determined by a four-stage sequential selective extraction procedure.**

Sample	TAO fraction				CDB fraction				HCl fraction				HF fraction				Total Fe (g/kg)	Total Mg (g/kg)	Total K (g/kg)		
	Solid (g/kg)	Fe (g/kg)	Mg (g/kg)	K (g/kg)	Solid (g/kg)	Fe (g/kg)	Mg (g/kg)	K (g/kg)	Solid (g/kg)	Fe (g/kg)	Mg (g/kg)	K (g/kg)	Solid (g/kg)	Fe (g/kg)	Mg (g/kg)	K (g/kg)					
Aftershock area																					
Gouge	050812-01-01	40.5	0.12	1.03	0.17	56.2	1.34	0.06	0.20	70.5	2.67	0.85	1.09	832.8	11.39	3.05	40.75	15.52	4.99	42.21	
	050812-01-02	43.1	0.09	0.95	0.25	54.1	1.25	0.07	0.20	81.9	2.19	0.38	1.42	820.9	7.25	1.47	28.49	10.78	2.87	30.36	
	080316-01A	10.1	1.20	0.84	1.95	98.3	0.87	0.19	0.74	54.7	6.44	2.77	3.55	836.9	13.37	6.65	47.10	21.88	10.45	53.34	
	080317-02-01	39.9	0.10	1.38	0.25	34.4	0.86	0.06	0.22	70.9	1.05	0.38	1.47	854.8	7.65	4.95	30.24	9.66	6.77	32.19	
	mean	33.4	0.38	1.05	0.65	60.8	1.08	0.09	0.34	69.5	3.09	1.09	1.88	836.3	9.92	4.03	36.65	14.46	6.27	39.52	
	S.D.	15.6	0.55	0.24	0.86	26.9	0.25	0.06	0.27	11.2	2.34	1.14	1.12	14.1	2.97	2.25	8.82	5.56	3.21	10.58	
Weathered granite	080316-01D	11.4	5.60	0.44	1.01	65.6	0.76	0.06	0.42	34.5	6.62	2.54	0.84	888.5	2.06	0.64	21.32	15.04	3.68	23.59	
Non-aftershock area (Nichinanko lineament)																					
Gouge	050813-01-02	33.1	1.04	0.12	0.09	92.3	8.82	0.04	0.11	199.3	6.31	1.53	0.84	675.4	2.34	0.38	34.27	18.51	2.06	35.32	
	080317-03B	25.5	0.40	0.50	0.12	35.4	5.59	0.06	<0.05	49.4	4.47	1.12	0.23	889.8	3.62	0.85	31.15	14.08	2.53	31.50	
	080317-03C	55.0	2.81	0.64	0.52	26.9	3.31	0.12	0.14	105.6	2.37	0.69	0.35	812.5	1.59	0.58	25.32	10.08	2.03	26.33	
	080317-03D	47.7	1.45	2.60	0.25	13.7	2.31	0.25	<0.05	149.5	2.34	1.74	0.08	789.1	2.15	4.40	12.87	8.25	8.99	13.20	
	080317-03E	63.7	3.50	1.16	0.47	35.2	2.41	0.18	0.11	111.1	2.70	1.05	0.18	790.0	1.83	1.50	22.97	10.44	3.89	23.73	
	080317-03-01	38.8	1.19	1.80	0.18	6.1	3.42	0.17	<0.05	120.9	3.21	1.31	0.14	834.2	3.15	3.79	17.12	10.97	7.07	17.44	
	080317-03-02	33.4	1.51	0.52	0.23	28.7	3.31	0.08	<0.05	74.9	2.09	0.56	0.16	863.1	2.44	1.00	25.07	9.35	2.16	25.46	
	mean	42.4	1.70	1.05	0.27	34.0	4.17	0.13	0.12	115.8	3.36	1.14	0.28	807.7	2.44	1.79	24.11	11.67	4.11	24.71	
	S.D.	13.6	1.08	0.88	0.17	27.9	2.32	0.07	0.02	48.9	1.53	0.43	0.26	69.2	0.72	1.63	7.44	3.52	2.81	7.62	
	Cataclastic granite	080317-03A	50.7	7.91	0.49	2.00	27.5	2.47	0.09	0.65	50.0	2.15	0.96	1.09	871.8	0.67	0.12	33.37	13.20	1.66	37.11
		080317-03G	47.0	4.82	0.60	1.55	22.5	3.04	0.13	0.37	69.7	3.79	1.12	0.92	860.8	0.85	0.21	37.58	12.50	2.06	40.42
		mean	48.9	6.37	0.55	1.78	25.0	2.76	0.11	0.51	59.9	2.97	1.04	1.01	866.3	0.76	0.16	35.47	12.85	1.86	38.76
S.D.		2.7	2.18	0.08	0.32	3.5	0.40	0.03	0.20	13.9	1.16	0.11	0.12	7.8	0.13	0.06	2.98	0.49	0.28	2.34	

出量の総量について、試料間において有意差がないことが認められる。なお、以下、有意差の有無の判断は、余震域試料と非余震域試料のある構成成分の平均の差を検定した結果に

基づく。一方、各抽出フラクションの鉄の溶出量には試料間において有意差が認められる。すなわち、採取した試料は鉄含有量が均一であるが、鉄の存在形態が試料によって異なる



**Fig. 7.** Relationships between iron, manganese, and potassium contents derived by the sequential selective extraction procedure. ○ = gouge sample from the aftershock area, □ = gouge sample from the non-aftershock area. (a) *HCl\_Fe* versus *HCl\_Mg*, (b) *HF\_Fe* versus *HF\_Mg*, (c) *HF\_Fe* versus *HF\_K*.

る。TAO 処理により抽出した鉄の溶出量(*TAO\_Fe*)と CDB 処理により抽出した鉄の溶出量(*CDB\_Fe*)ともに非余震域ガウジ試料の方が多く、HF 処理により抽出された鉄の溶出量(*HF\_Fe*)は余震域ガウジ試料の方が多い。このことは、非余震域ガウジ試料では鉄は非晶質・低結晶性および結晶性の鉄酸化物に多く含まれ、余震域ガウジ試料はスメクタイトやイライト中に多く含まれることを示し、余震域と非余震域のガウジの区別には鉄の存在形態の差を明らかにすることが有効である。また、余震域ガウジ試料と変質した花崗岩では、*TAO\_Fe* は花崗岩試料の方が多く、*HF\_Fe* はガウジ試料の方が多い。同様に、非余震域ガウジ試料と変質した原岩と考えられる花崗岩に対しても、この傾向が認められる。このことは、ガウジ試料は花崗岩試料より HF に可溶性鉱物中に鉄を多く含み、花崗岩試料はガウジ試料よりも非晶質・低結晶性の鉄酸化物を多く含むことを示唆し、試料観察とも調和的である。

Table 3 に示すように、HCl 処理により抽出されたマグネシウムの溶出量(*HCl\_Mg*)には試料間において有意差が認められないが、HF 処理により抽出されたマグネシウムの溶出量(*HF\_Mg*)には試料間において有意差が認められる。両ガウジ試料を比較すると、*HF\_Mg* は余震域ガウジ試料の方が非余震域ガウジ試料より多い。余震域ガウジ試料と変質した原岩と考えられる花崗岩を比較すると、*HCl\_Mg* は花崗岩試料の方が多く、*HF\_Mg* はガウジ試料の方が多い。非余震域ガウジ試料と変質した原岩と考えられる花崗岩を比較すると、*HF\_Mg* はガウジ試料の方が多い。上記のことは、ガウジ試料は花崗岩試料よりも HF に可溶性マグネシウムを含む鉱物を多く含み、両ガウジ試料においては余震域ガウジ試料の方が非余震域ガウジ試料より HF に可溶性マグネシウムを含む鉱物を多く含むことを示す。

Table 3 から、HF 処理より抽出したカリウムの溶出量(*HF\_K*)は試料間において有意差が認められる。両ガウジ試料を比較すると、*HF\_K* は余震域ガウジ試料の方が非余震域ガウジ試料より多い。ガウジ試料と花崗岩試料との比較では、余震域ガウジ試料の *HF\_K* は花崗岩よりも多く、非余

震域ガウジ試料の *HF\_K* は花崗岩よりも少ない。このことは、本研究試料の中で余震域ガウジ試料が最も多く HF に可溶性カリウムを含む鉱物を多く含むことを示す。

Fig. 7 には、鉄溶出量とマグネシウムおよびカリウム溶出量の関係を示す。*HCl\_Fe* と *HCl\_Mg* の関係は産地間により相関の強弱が認められる (Fig. 7a)。余震域ガウジ試料は両者に相関があるが、非余震域ガウジ試料は相関が弱い。このことは、余震域ガウジ試料から HCl 処理により溶出した Mg と Fe の起源は緑泥石であることを示していると考えられる。Fig. 7b に示すように、*HF\_Fe* と *HF\_Mg* の関係は産地間に大きな差が認められる。非余震域ガウジ試料よりも余震域ガウジ試料の方が Fe/Mg 比が高い傾向にある。ただし、両ガウジ試料とも鉄とマグネシウムの溶出量の相関は弱い。Fig. 7c からは、*HF\_Fe* と *HF\_K* の関係は産地間に差が認められる。非余震域ガウジ試料よりも余震域ガウジ試料の方が Fe/K 比が高い傾向にあり、また余震域ガウジ試料は鉄とカリウムの溶出量に強い相関がある。このことは、余震域ガウジ試料から HF 処理により溶出した Fe と K の起源はイライトであることを示していると考えられる。

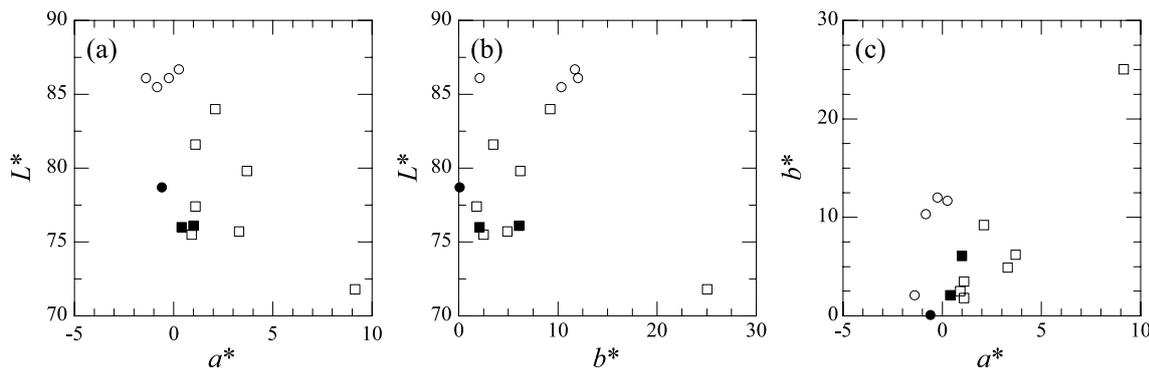
### 3. 色調測定結果

Table 4 に  $L^*a^*b^*$  表色系における各試料の測色結果を示す。これらの機器による色調測定結果は、野外や実験室内での肉眼観察とほぼ矛盾のないものとなった。Fig. 8 は、 $L^*-a^*$ 、 $L^*-b^*$  および  $a^*-b^*$  平面上への測色結果のプロットを示す。両産地のガウジ試料の肉眼観察の結果、余震域ガウジ試料の方が非余震域ガウジ試料よりも明度が高かった (白かった)。このことは、両ガウジ試料の  $L^*$  値の大小関係にも反映されている (Figs. 8a, 8b) (この関係は有意差あり)。一方、 $L^*$  値のばらつきを産地で比較すると、余震域ガウジ試料の  $L^*$  値は  $a^*$  値や  $b^*$  値に対してばらつきは小さいが、非余震域ガウジ試料はばらつきが大きい。

Fig. 8c では、 $L^*$  値の産地間による違いと同様に、 $a^*$  値や  $b^*$  値に対しても産地による違いを明瞭に確認できる。余震域ガウジ試料の  $a^*$  は負の値をとるものが多く、非余震域ガウジ試料の  $a^*$  は正の値をとる。また  $b^*/a^*$  の絶対値をみる

**Table 4. Color of gouges and weathered granitic rock after each extraction procedure.**

Sample	Original			After TAO extraction			After CDB extraction			After HCl extraction			
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$a^*$	$b^*$	
<b>Aftershock area</b>													
Gouge	050812-01-01	86.7	0.25	11.68	85.4	0.47	11.47	86.8	-2.03	4.85	92.7	-0.51	4.27
	050812-01-02	86.1	-0.24	12.01	86.5	-0.10	11.31	85.1	-1.94	5.75	91.2	-0.72	5.67
	080316-01A	86.1	-1.40	2.10	84.1	-1.10	3.80	85.9	-1.80	3.60	76.0	0.80	4.70
	080317-02-01	85.5	-0.84	10.34	86.9	-0.91	9.50	87.9	-2.09	7.51	91.7	-1.29	5.84
	mean	86.1	-0.56	9.03	85.7	-0.41	9.02	86.4	-1.97	5.43	87.9	-0.43	5.12
	S.D.	0.5	0.72	4.68	1.2	0.73	3.59	1.2	0.13	1.64	8.0	0.88	0.76
Weathered granite	080316-01D	78.7	-0.60	0.10	85.7	-0.40	1.50	85.4	-0.90	0.60	87.4	0.60	3.00
<b>Non-aftershock area (Nichinanko lineament)</b>													
Gouge	050813-01-02	71.8	9.14	25.04	70.6	8.73	24.69	75.8	-1.65	5.51	85.9	0.54	5.97
	080317-03B	84.0	2.10	9.20	84.7	1.50	8.90	86.1	-0.50	8.40	80.8	1.40	8.10
	080317-03C	77.4	1.10	1.80	83.4	2.20	4.20	87.1	-0.40	3.70	85.4	1.10	6.70
	080317-03D	75.7	3.30	4.90	77.5	4.30	6.90	83.5	-0.30	3.50	78.7	1.40	5.80
	080317-03E	75.5	0.90	2.50	84.7	2.80	6.10	86.7	-0.60	4.10	82.5	1.20	7.10
	080317-03-01	79.8	3.70	6.20	81.5	3.70	6.10	82.5	-0.20	5.90	78.6	1.70	5.50
	080317-03-02	81.6	1.10	3.50	84.9	1.50	4.00	87.8	-0.60	4.20	84.1	0.90	6.20
	mean	78.0	3.05	7.59	81.0	3.53	8.70	84.2	-0.61	5.04	82.3	1.18	6.48
	S.D.	4.1	2.91	8.09	5.3	2.52	7.24	4.2	0.48	1.73	3.0	0.38	0.90
Cataclastic granite	080317-03A	76.0	0.40	2.10	85.4	2.00	3.50	89.0	-0.40	2.50	91.5	0.50	3.50
	080317-03G	76.1	1.00	6.10	85.5	1.90	4.00	88.3	-0.40	3.70	89.8	0.70	4.60
	mean	76.1	0.70	4.10	85.5	1.95	3.75	88.7	-0.40	3.10	90.7	0.60	4.05
	S.D.	0.1	0.42	2.83	0.1	0.07	0.35	0.5	0.00	0.85	1.2	0.14	0.78



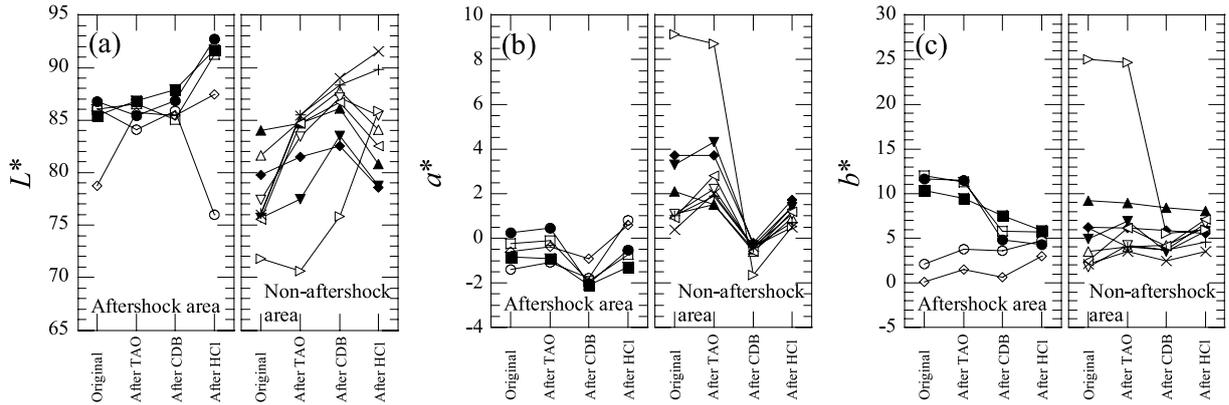
**Fig. 8. Colors of the original samples of fault gouges and weathered rocks.** ○ = gouge sample from the aftershock area, ● = weathered granitic rock from the aftershock area, □ = gouge sample from the non-aftershock area, ■ = weathered granitic rocks from the non-aftershock area. (a)  $L^*$  versus  $a^*$ , (b)  $L^*$  versus  $b^*$ , (c)  $a^*$  versus  $b^*$ .

と、余震域ガウジ試料はその値が大きい傾向があり(図中、 $(a^*, b^*)=(0, 0)$ より左上)、非余震域ガウジ試料は小さい傾向がある(図中、 $(a^*, b^*)=(0, 0)$ より右上)(この傾向は有意差あり)。一方、 $a^*$ 値や $b^*$ 値のばらつきは、 $L^*$ 値と同様に、余震域ガウジ試料よりも非余震域ガウジ試料の方が大きい。

両産地の試料ともに、肉眼観察によってガウジ試料と変質した原岩と考えられる花崗岩の色調に違いが認められ、ガウジ試料はその周辺の花崗岩よりも明度や赤みあるいは黄色みが高い。測色結果からも、余震域ガウジ試料の $L^*$ 値および $b^*$ 値は花崗岩よりも大きく、非余震域ガウジ試料の $L^*$ 値、 $a^*$ 値および $b^*$ 値は花崗岩よりも大きい傾向があることが示された。また、余震域ガウジ試料は非余震域ガウジ試料よりも花崗岩との色調差が大きいことから、前者の方が花崗岩よ

りも変質していることが示唆される。

つぎに Fig. 9 では、オリジナル試料と逐次選択抽出後の試料の測色結果を示し、鉱物化学的組成変化と色調の関連を示す。採取した試料を逐次選択抽出することによって、結晶性鉄鉱物等の有色鉱物が除去され、試料の $L^*$ は単調に増加すると予想されたが、Fig. 9a に示すように、逐次選択抽出に伴う $L^*$ の変化は二つのタイプに分けられる。一つは予想通り増加するタイプであり、余震域試料がこのタイプに当てはまる。もう一つは第2段階のCDB抽出後まで $L^*$ は増加するが第3段階のHCl抽出後に減少するタイプであり、非余震域試料がこのタイプに当てはまる。一方、逐次選択抽出に伴う $a^*$ と $b^*$ の変化は、有色鉱物の除去の順番に大きく依存することが予想される。 $a^*$ の変化は、Fig. 9b に示される



**Fig. 9.** Color changes of samples during the sequential selective extraction test. ○ = 080316-01A, ● = 050812-01-01, □ = 050812-01-02, ■ = 080317-02-01, ◇ = 080316-01D, ◆ = 080317-03-01, △ = 080317-03-02, ▲ = 080317-03B, ▽ = 080317-03C, ▼ = 080317-03D, ◁ = 080317-03D, ▷ = 050813-01-02, × = 080317-03A, + = 080317-03G. (a) changes in  $L^*$ , (b) changes in  $a^*$ , (c) changes in  $b^*$ .

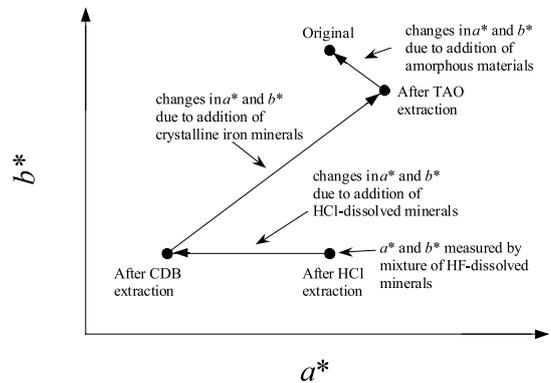
ように、第1段階のTAO抽出によって $a^*$ が増加し、第2段階のCDB抽出によって減少し、第3段階のHCl抽出によって増加するタイプのみである。非余震域試料の方が余震域試料よりも $a^*$ 値の変化が大きい。 $b^*$ の変化は、Fig. 9cに示されるように、二つのタイプに分けられる。一つは、オリジナルからHCl抽出後に向かって $b^*$ が増加するタイプである。もう一つは、オリジナルからHCl抽出後に向かって $b^*$ が減少するタイプである。両産地の試料ともに $b^*$ の変化はこのタイプが混在する。これらのことから、色調、とりわけ $L^*$ の変化タイプは、産地に依存していることが認められる。

考 察

1. 断層ガウジの色調と鉱物組成の関係

本項の議論では色調計測の結果を肉眼による認識色で表記する。まず余震域試料は緑色に卓越する。余震域試料では鉄酸化物の含有量が低かったことから、この色調は試料に含まれる緑泥石によると考えられる。また余震域試料では緑色と白色のガウジが認められたが、この差異は含まれる緑色を呈する緑泥石と白色のイライトとの存在比によって決められると考えられる。一方、非余震域試料は暖色系の色に卓越する。非余震域試料では鉄の酸化物の含有量が高いことから、この色調は試料に含まれる結晶性鉄酸化物によると考えられる。また非余震域試料ではベージュ、橙色および桃色のガウジが認められたが、この差異は含まれる結晶性鉄鉱物種の違いや結晶性鉄鉱物と粘土鉱物の存在比によって決められると考えられる。

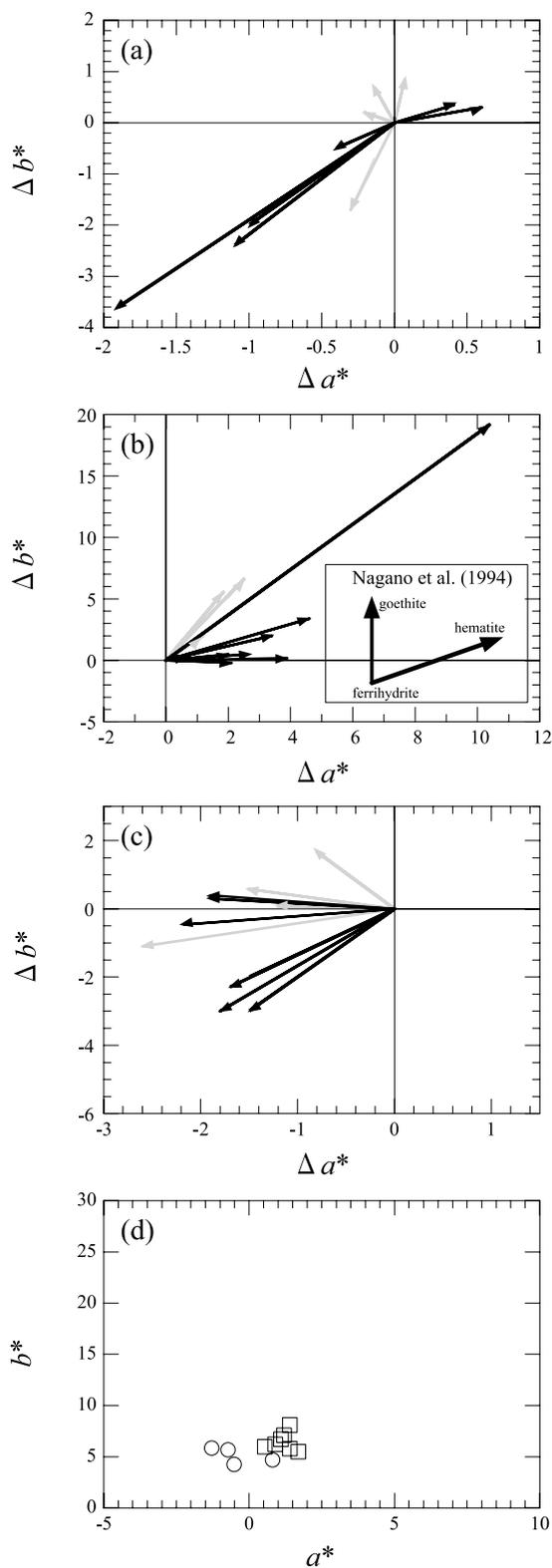
前述のように、断層ガウジの色調と鉱物組成の関係は定性的に理解されるが、より詳細な関係について以下のとおり検討する。オリジナル試料の色調は試料中のすべての構成成分の色を反映したものであることから、各構成成分の色が分かればガウジの色調と構成成分の関係が詳細に理解されるはずである。しかしながら、試料に含まれる鉱物を鉱物毎に分けるのは困難であるため、試料に含まれる鉱物の個別の色を測定することは困難である。それに代わり、逐次選択抽出によ



**Fig. 10.** Diagram representing color changes of a sample during the sequential selective extraction procedure.

る各鉱物フラクションの色調への寄与の程度を基に断層ガウジの色調と鉱物組成の関係を調査することで詳細な関係解明を試みる。断層ガウジの色調と鉱物組成の関係を $a^*-b^*$ プロットで表したFig. 10の逐次選択抽出による試料色調変化の概念図を用いて説明する。

各抽出によりそれぞれ選択的に試料からある物質を溶解するので、抽出前後の試料の色調の差はその物質の存在を反映したものとなる。抽出順にみていくと、オリジナル試料とTAO抽出後の色調の差は、非晶質物質の存在による寄与を反映している。TAO抽出後の色調を基準とした場合、この色調の差をベクトル表記するならば、ベクトルの長さが非晶質物質の存在量をベクトルの方向が非晶質物質の色調の方向を表現していると仮定できる。同様に、TAO抽出後とCDB抽出後の色調の差の関係から、CDB抽出後の色調を基準とするとTAO抽出後の色調に向けて結晶性鉄鉱物の存在量と色調の方向がベクトルとして表現される。CDB抽出後とHCl抽出後の色調の差の関係から、HCl抽出後の色調を基準とするとCDB抽出後の色調に向けてHClに可溶性な鉱物の存在量と色調の方向がベクトルとして表現される。最



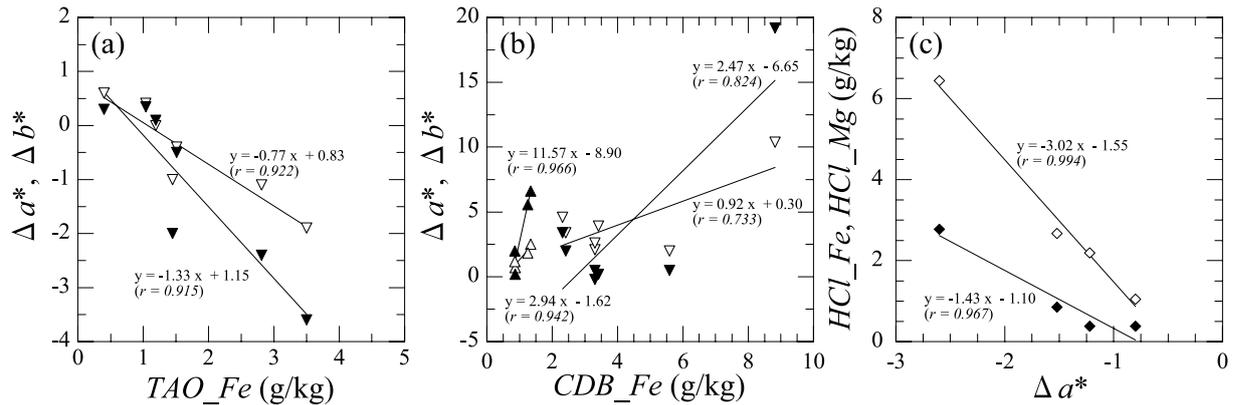
**Fig. 11.** Color vectors of each mineral phase determined in the sequential selective extraction procedure. Gray arrows = gouge samples from the aftershock area, black arrows = gouge samples from the non-aftershock area,  $\circ$  = gougues from the aftershock area,  $\square$  = gougues from the non-aftershock area. (a) color vector of amorphous materials, (b) color vector of crystalline iron minerals, (c) color vector of HCl-soluble minerals, (d) color of residual minerals.

後に、HCl抽出後の色調は、残存する粘土鉱物やケイ酸塩鉱物を合わせた集合体の色調を反映したものとなる。

Fig. 11aは、オリジナル試料とTAO抽出後の色調の差、すなわちガウジ試料内に含まれる非晶質物質による色調ベクトルを示したものである。余震域ガウジの非晶質物質のベクトルは、 $\Delta a^*$ 成分の差がほとんどなく $\Delta b^*$ 成分の差が多少ある程度で、顕著な傾向は認められない。一方非余震域ガウジの非晶質物質のベクトルは、 $\Delta a^*$ と $\Delta b^*$ ともに負の方向に認められる。 $TAO\_Fe$ は $\Delta a^*$ と $\Delta b^*$ と負の相関にあり(Fig. 12a)、非晶質物質の存在量の多寡が色調ベクトルの大きさを決定している。

Fig. 11bは、ガウジ試料内に含まれる結晶性鉄酸化物による色調ベクトル(TAO抽出後とCDB抽出後の色調の差)を示したものである。両ガウジ試料ともベクトルが認められ、余震域ガウジ試料の方が非余震域ガウジ試料よりもベクトルの傾きが急である。また両ガウジ試料とも $CDB\_Fe$ は $\Delta a^*$ や $\Delta b^*$ と正の相関にあり(Fig. 12b)、結晶性鉄酸化物の存在量が色調ベクトルの大きさを決定している。Nagano et al. (1994)は、フェリハイドライトを始源物質として、温度やpHをパラメータとしたゲーサイトとヘマタイトの結晶化実験を行った。その結果、ゲーサイトの結晶化は $b^*$ 軸にほとんど平行に進行するが、ヘマタイトの結晶化は $a^*$ と $b^*$ ともに増加することが明らかとなった。両ガウジをNagano et al. (1994)の結果と比較すると、非余震域ガウジのベクトルの方向はほぼNagano et al. (1994)のヘマタイトと一致し、余震域ガウジのベクトルの方向は、Nagano et al. (1994)のゲーサイトとヘマタイトの間に存在する。それゆえ、余震域ガウジにはゲーサイトとヘマタイト、非余震域ガウジにはヘマタイトが含まれることが推定される。なお、今後、他の分析手法を用いて結晶性鉄鉱物の同定を検討していく。

Fig. 11cは、ガウジ試料内に含まれるHClに可溶性鉱物による色調ベクトル(CDB抽出後とHCl抽出後の色調の差)を示したものである。余震域ガウジのベクトルの向きは $\Delta b^*$ 成分の差が少なく $\Delta a^*$ 軸におよそ平行で負の方向である。XRD分析より余震域ガウジのHClに可溶性鉱物は緑泥石である。 $HCl\_Fe$ と $HCl\_Mg$ は正の相関を示し(Fig. 7a)、 $\Delta a^*$ に対して鉄とマグネシウムが負の相関を示すことから(Fig. 12c)、緑泥石の存在量がこの色調ベクトルの大きさを表している。一方非余震域ガウジは2つのベクトルに分けられると考えられる。ひとつは緑泥石のベクトルと一致するもので、非余震域ガウジ試料で緑泥石を同定した試料も含まれる。ただし、XRD分析で緑泥石を同定できなかった試料でも、緑泥石のベクトル上にある試料はXRDでは検出限界以下の緑泥石を含んでいるのかもしれない。もうひとつは、 $\Delta a^*$ と $\Delta b^*$ ともに負の方向のベクトルである。このベクトルの向きは、非余震域の非晶質物質のベクトルの方向に類似している。本試料においてXRD分析では同定されていないが、HClに可溶性鉱物としてパーミキュライト(例えば、加納ほか、1962)がある。このベクトルの由来をパーミキュライトのものであると仮定すると、本試料においてXRD



**Fig. 12.** Relationship between color and amount of each element in the sample during the sequential selective extraction procedure. (a) *TAO\_Fe* versus color difference during TAO extraction for gouge samples from the non-aftershock area.  $\nabla$  = changes in  $a^*$ ,  $\blacktriangledown$  = changes in  $b^*$ . (b) *CDB\_Fe* versus color difference during CDB extraction for gouge samples.  $\triangle$  and  $\blacktriangle$  = changes in  $a^*$  and  $b^*$  for gouge samples from the aftershock area.  $\nabla$  and  $\blacktriangledown$  = changes in  $a^*$  and  $b^*$  for gouge samples from the non-aftershock area. (c) *HCl\_Fe* or *HCl\_Mg* versus changes in  $a^*$  for gouge samples from the aftershock area.  $\diamond$  and  $\blacklozenge$  = *HCl\_Fe*, solid circles = *HCl\_Mg*.

分析で同定できなかったのは、微量のパーミキュライトとして存在していたかもしれない。

Fig. 11dは、HCl抽出後の色調を示したものである。余震域ガウジの色調は $a^*$ が負の値(肉眼認識色として緑色)が多く、非余震域ガウジの色調は $a^*$ がすべて正(肉眼で赤色)である。なお、 $b^*$ については両ガウジとも正(肉眼で黄色)であり、その値もほぼ近似している。余震域ガウジが $a^*$ が負なのは、イライトを主体とし、わずかにスメクタイトを含むためと考えられ、当該イライトには鉄が含まれるため緑色を呈することが示唆される。なお、非余震域ガウジはハロイサイトを主体とするが、ハロイサイトの色調がこの $a^*$ - $b^*$ 領域にあるのか、残存する鉱物の集合体の色調が示すのかは現在のところ明らかではない。

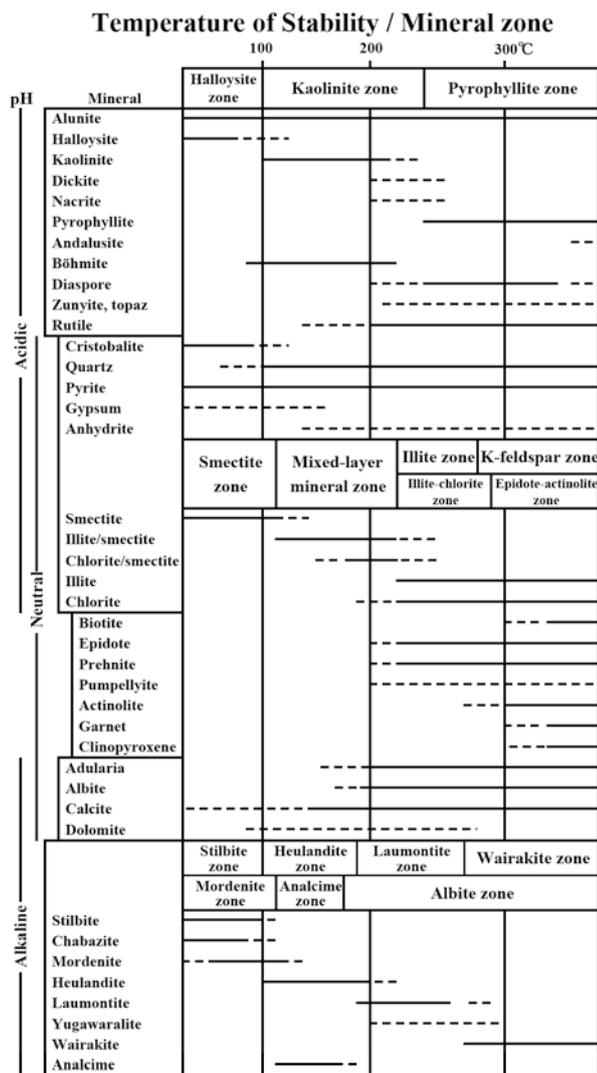
上述の断層ガウジの $a^*$ と $b^*$ の考察と同様に、 $L^*$ についても鉱物組成との関係を指摘できる。Fig. 9aからHCl抽出後の $L^*$ 値はオリジナルの値よりも高い(すなわち肉眼では白色化する)傾向があり、このことから $L^*$ 値の高低は粘土鉱物量に依存していると言える。また、主体となる粘土鉱物種によってもその値が異なることが分かる。つまり、イライト主体の余震域ガウジの方が、ハロイサイト主体の非余震域ガウジよりも $L^*$ 値が高い(肉眼ではより白い)ことが認められる。なお、緑泥石を含む試料はそれを含まない試料と比較するとHCl抽出後の $L^*$ 値は低くなる。さらに、非余震域ガウジの $L^*$ 値に関して、オリジナルよりもHCl抽出後の方がばらつきが小さくなったのは、逐次抽出により有色鉱物が除去されハロイサイトに濃集した結果であると考えられる。それゆえ、Fig. 8aと8bに示したように、断層ガウジの産地の違いによる $L^*$ 値の差は粘土鉱物由来によると考えられ、余震域と非余震域のガウジの区別には $L^*$ 値の測定が有効であると示唆される。

**2. 断層ガウジ構成鉱物の形成・変質プロセス**

上述の断層ガウジの色調を決定する主たる構成鉱物の形

成・変質プロセスについては、断層ガウジを構成する鉱物は熱水や地表水の流入によって引き起こされた化学反応により生じたものであることから、まずそれらの鉱物の生成環境を基に構成鉱物の形成プロセスについて述べる。なお、本項の考察では、構成鉱物の形成プロセスに注目するため、断層ガウジの生成時の活動を対象としない。余震域ガウジは、イライトと緑泥石に卓越していた。Fig. 13に示されるようにイライトと緑泥石が生成する条件は200℃以上の温度と中性の溶液を必要とする。また余震域ガウジに認められるイライトは緑色を呈することから鉄は3価で存在するのではなく、2価と3価の混合物として存在することが推測される(Velde, 2003)。余震域ガウジは断層によって破碎された断面に200℃以上の還元性かつ中性の熱水が作用したことで生成したことが推測される。また本試料から黒雲母やその変質鉱物であるパーミキュライトが認められないことから、緑泥石は黒雲母の熱水変質によって生成したと考えられる。その後、破碎断面の温度が低下し、イライト/スメクタイト混合層が生成したと考えられる。さらにその後の破碎断面温度の低下によって酸性溶液との作用でのハロイサイトが生成したと考えられる。イライト/スメクタイト混合層やハロイサイトの存在から、一連の変質作用というよりは複数回の変質作用が想定される。

つぎに余震域ガウジの鉄酸化物の含有量と生成種から生成環境やプロセスを推察する。余震域ガウジは非余震域試料と比較して結晶性にかかわらず鉄酸化物の含有量が低い。鉄酸化物は含鉄鉱物の溶解と酸化により生成するが、酸化には天水起源の酸化的な地下水の流入が考えられる。本試料中では含鉄鉱物は緑泥石もしくはイライトであり、これらの鉱物を鉄酸化物のソースとして生成したものと推測される。本試料において鉄酸化物の含有量が低いことは、1)ガウジが酸化的環境におかれてから時間があまり経過していない、2)緑泥石は地表環境において風化に対する安定性が高く含まれる



**Fig. 13.** Temperature stability of representative minerals in each hydrothermally altered zone, modified after Inoue (2008). Inoue (2008) is a compilation of Henley and Ellis (1983), Reyes (1990), Inoue (1995), Izawa (1996), and Yoshimura (2001).

鉄を容易に溶出しない、のどちらか、もしくは両方の要因を反映していると考えられる。一方、本試料の鉄酸化物の生成種として、ゲーサイトとヘマタイトの混合物が考えられ、これらの混合物は溶液の中性以外の条件で生成しやすいため (Schwertmann and Murad, 1983)、本試料に作用した溶液は酸性またはアルカリ性であると推察される。

前述の推察を基に断層の温度降下に伴って生成された余震域ガウジの構成鉱物を順記すると、1) イライトと緑泥石、2) イライト/スメクタイト、3) ハロイサイトと結晶性鉄酸化物の順となる。ただし、ハロイサイトと結晶性鉄酸化物の生成順序は不明である。

非余震域ガウジは、ハロイサイトを主成分とするものと、ハロイサイトとスメクタイトまたは緑泥石から構成されるものが認められた。Fig. 13 に示されるように、ハロイサイト

は 100 °C 以上では生成しないため、地表環境における水-鉱物相互作用によって生成したものと推測される。またハロイサイトは風化プロセスの最末期に生成することが知られる。スメクタイトまたは緑泥石とハロイサイトが双方認められたガウジは水との反応が十分ではない段階において生成し、ハロイサイトのみから構成されるガウジは十分に水と反応した段階にあることを示唆するものと考えられる。

非余震域ガウジの鉄酸化物の含有量を余震域ガウジと比較すると、非晶質と結晶性酸化物の鉄の含有量はともに高かった。このことは原岩の鉄含有量が高い、もしくは変質におよぼす酸性の水の寄与が大きく、緑泥石等に含まれる鉄が溶脱した後、酸化され沈殿し結晶化したことを反映すると考えられる。また鉄酸化物の生成種としてヘマタイトが考えられ、ヘマタイトの生成が卓越する溶液の pH は 7 から 8 の範囲 (Schwertmann and Murad, 1983) にあることから、本試料に作用した溶液は主として中性であると考えられる。ヘマタイトの生成は、酸性溶液により作用し生成されるハロイサイト生成より前であると考えられる。

前述の推察から断層の温度降下に伴って生成した順に非余震域ガウジの構成鉱物を記載すると、1) 緑泥石、2) スメクタイトとヘマタイト、3) ハロイサイトとなる。

両断層ガウジの構成鉱物について予想される生成順序を比較すると、結晶性鉄鉱物とハロイサイトの生成順序に違いが認められる。この違いは、断層面に作用した流入水の pH や温度以外に、断層面周辺の透水性にも影響されていた故に生じたものと考えられる。すなわち、断層面周辺の透水性の違いは地表面あるいは地下深部からの地下水の流動に影響を及ぼし、その結果として断層面周辺に酸化還元状態の差を生じさせ、結晶性鉄鉱物の生成順序を決定する可能性があると考えられる。また、非余震域に粘土鉱物としてハロイサイト以外に緑泥石等が残存する断層ガウジが存在することは、流入水が少ない断層面の存在を示唆し、このことから断層面周辺の透水性に差が存在したと考えられる。例えば、高橋ほか (2011) は断層ガウジの部位が異なると透水係数が異なることを確認した。それゆえ、今後は、断層面周辺の空間的構造も考慮しつつ、断層ガウジの生成環境や形成プロセスを解明する必要がある。

一方、近年、断層の活動履歴が地質学的アプローチにより解析されてきている。例えば、長友・吉田 (2009)、吉田ほか (2009) および Niwa et al. (2009) は活動度 A 級の阿寺断層について、Niwa et al. (2011) は同級の跡津川断層について、断層破碎帯の構造や断層岩から、つぎのような地質的履歴を推定している。① 地下の高封圧下におけるカタクレーサイトの形成、② ①の後、熱水変質を伴った断層ガウジの形成、③ ②の後、隆起と断続的な断層活動に伴う断層ガウジの発達と天水循環による変質の拡大。これらの断層の割れ目の充填鉱物や変質鉱物に焦点を当てると、②で形成された鉱物としてセリサイトあるいはイライト、緑泥石が検出され、③ではスメクタイトや水酸化鉄が検出されている。各断層について活動度は異なるが、本研究の余震域断層ガウジの鉱物組成と非余震域鉱物組成とを比較すると、余震域断層ガウジ

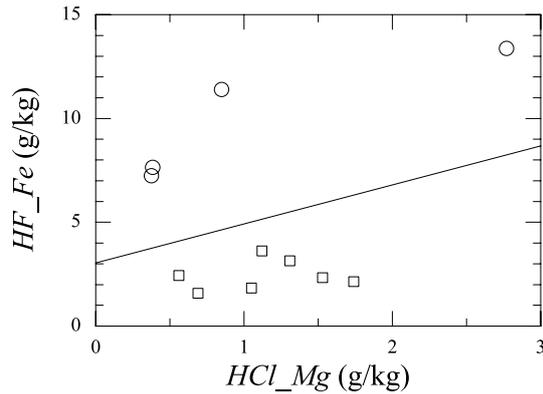


Fig. 14. Discriminating boundary of fault gouges from aftershock and non-aftershock areas. ○ = gouges from the aftershock areas, □ = gouges from non-aftershock areas.

にイライトやゲーサイトが存在することは Niwa et al. (2009, 2011) が検出した鉱物と整合的であると言える。

### 3. 断層ガウジの判別と色調の予測

余震域と非余震域の断層ガウジを区分する方法として、逐次選択抽出分析による鉄、マグネシウムおよびカリウムの存在状態の違いを確認することが有効であることが示された。これらの元素の存在状態の違いは、断層ガウジ中の構成鉱物の組合せの違いを反映していることも示された。それゆえ、各元素の存在状態を表す溶出量を把握することで余震域と非余震域の断層ガウジを判別することが可能となる。そこで、余震域ガウジと非余震域ガウジを判別する際に有効な鉄、マグネシウムおよびカリウムの溶出量の関係式を決定するために、7つの溶出量を説明変数として判別分析を行った。その結果、次のような判別関数を得た。

$$Z = -1.62 \text{HCl\_Mg} + 0.86 \text{HF\_Fe} - 2.62 \quad (1)$$

ただし、 $\text{HCl\_Mg}$  と  $\text{HF\_Fe}$  の単位は  $\text{g/kg}$  である。また、得られた関数を用いたときの余震域ガウジと非余震域ガウジの判別率はともに 100% であった。一方、(1) 式の判別関数の  $\text{HCl\_Mg}$  および  $\text{HF\_Fe}$  は、ガウジ試料中の緑泥石およびイライトに主として対応し、 $\text{HF\_Fe}$  の選択はガウジ試料中のイライトの有無が余震域と非余震域のガウジを判別可能としたことと一致している。

Fig. 14 には、 $\text{HCl\_Mg}$  と  $\text{HF\_Fe}$  の関係を示す。また Fig. 14 には、(1) 式の判別関数の左辺をゼロ ( $Z = 0$ ) とした、余震域ガウジと非余震域ガウジを判別する境界線も示した。この図から明らかなように、非余震域ガウジ試料の鉄溶出量は少なく、両ガウジを鉄の溶出量によって判別が可能であることを示している。そこで、判別を簡略化するために、 $\text{HF\_Fe}$  のみにて、再度判別分析を行った結果、次のような判別関数を得た。

$$Z' = 0.55 \text{HF\_Fe} - 2.85 \quad (2)$$

本式による余震域ガウジと非余震域ガウジの判別率はとも

に 100% であった。(2) 式の判別関数をゼロとおいた関係式は、 $\text{HF\_Fe} = 5.16 \text{ mg/kg}$  となる。この値以上の場合で XRD 分析において緑泥石が同定されないのは余震域ガウジとして、一方この値以下の場合で緑泥石が同定されるのは非余震域ガウジとして概略判別可能となる。

つぎに、オリジナル試料の色調は逐次選択抽出による各鉱物フラクションの色調の集合であることから、各試料の  $L^*$ 、 $a^*$  および  $b^*$  の色調を目的変数とし、それに対応した 7 次元の溶出量を説明変数とした重回帰分析を行った。その結果、次のような関係式が求められた。

$$\begin{aligned} L^* = & -4.10 \text{TAO\_Fe} - 3.65 \text{CDB\_Fe} + 2.40 \text{HCl\_Fe} \\ & - 2.52 \text{HCl\_Mg} - 1.62 \text{HF\_Fe} - 0.14 \text{HF\_Mg} \\ & + 0.41 \text{HF\_K} + 89.13 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a^* = & 1.46 \text{TAO\_Fe} + 2.85 \text{CDB\_Fe} - 1.03 \text{HCl\_Fe} \\ & + 0.55 \text{HCl\_Mg} + 1.58 \text{HF\_Fe} - 0.03 \text{HF\_Mg} \\ & - 0.41 \text{HF\_K} - 2.43 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b^* = & 1.69 \text{TAO\_Fe} + 5.89 \text{CDB\_Fe} - 0.78 \text{HCl\_Fe} \\ & - 5.68 \text{HCl\_Mg} + 3.84 \text{HF\_Fe} + 0.34 \text{HF\_Mg} \\ & - 0.75 \text{HF\_K} - 2.11. \end{aligned} \quad (5)$$

(3) 式、(4) 式および (5) 式の重相関係数は、それぞれ 0.952、0.981 および 0.905 であった。

得られた重回帰式の変数に各試料 7 つの溶出量を代入して回帰推定値を求めた。Fig. 15 は試料ごとの回帰推定値をプロットして作製したものである。全体では比較的良好な回帰性を有することが認められる。ただし、 $L^*$  や  $a^*$  の回帰性に比較して  $b^*$  の回帰性は劣る。なお、回帰推定値が実測値より比較的大きく外れる場合はつぎのとおりである。 $L^*$  については  $\text{CDB\_Fe}$  が  $3.4 \text{ g/kg}$  より多い場合で、 $a^*$  については  $\text{TAO\_Fe}$  が  $0.4 \text{ g/kg}$  より少ない場合で、 $b^*$  については非余震域ガウジで  $\text{TAO\_Fe}$  が  $1.4 \text{ g/kg}$  より多い、あるいは  $\text{HF\_Fe}$  が  $3.2 \text{ g/kg}$  より少ない場合である。

### 4. 断層の活動性評価における地質学的意義

先に述べた通り、近年国内に被害を及ぼしている内陸地震は低活動性断層を含む地形的に不明瞭な断層活動によってもたらされたものが多いため、活断層やその可能性のあるリニアメントの検出および認定方法としての空中写真判読法は必ずしも十分なものとは言えない。したがって、低活動性断層を含む地形的に不明瞭な断層の活動性評価手法を確立することは極めて重要な検討課題となる。

本研究の結果から、本研究地域の余震域と非余震域の断層ガウジの区分法として、つぎの 3 段階の方法を有効と考える。第 1 段階として、野外での断層ガウジの色調測定、第 2 段階として、XRD 分析による断層ガウジ中の粘土鉱物の同定、第 3 段階として、逐次選択抽出分析と色調測定による結晶性鉄鉱物種の推定。なお、第 1 段階の色調測定の結果は XRD 分析と逐次選択抽出分析の結果を反映しているため、野外での色調測定時にその結果に基づいて余震域あるいは非余震域のガウジであるかどうかについて予察的な判断が

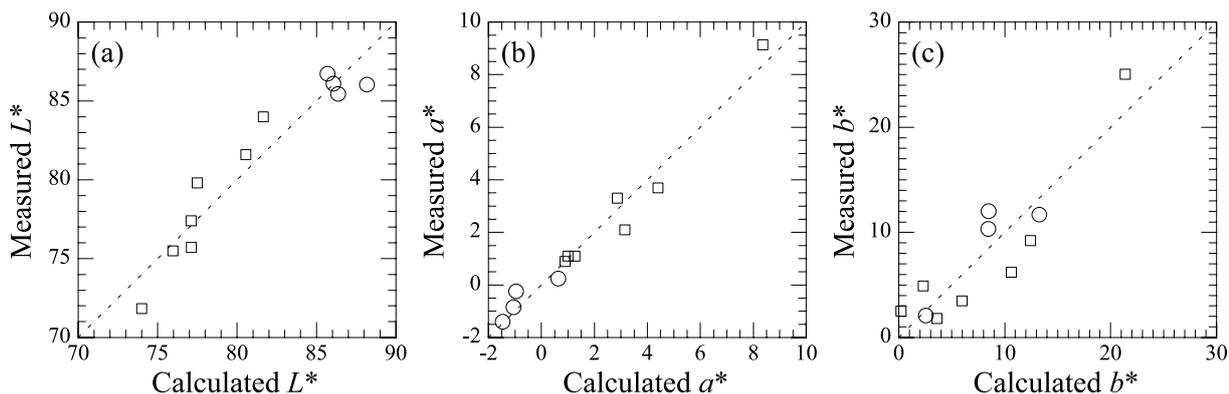


Fig. 15. Distribution of color values estimated by linear regression. (a)  $L^*$ , (b)  $a^*$ , and (c)  $b^*$ . Legend is the same as that in Fig. 14.

可能となることが期待される。

本研究結果は、断層ガウジの物質科学的特徴を指標とすることで、地形的に不明瞭な断層の活動性評価の定性的な指標となり得ることを示し、地形的に不明瞭な断層の活動性を評価する方法として、従来の活断層研究に、断層ガウジの物質科学的特徴を得るための手法、とりわけ鉱物学的かつ地球化学的手法を加えることが必要であることを示唆する。

### ま と め

本研究では、2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジに対して粉末X線回折分析、逐次選択抽出試験および色調測定を実施し、以下のことを明らかにした。

- 1) 2000年鳥取県西部地震の余震域断層ガウジの構成する主な鉱物はイライトと緑泥石であるが、非余震域断層ガウジはハロイサイトである。断層ガウジの生成環境として、余震域ガウジは200°C以上で、非余震域ガウジは100°C程度で生じている。
- 2) 余震域断層ガウジに含有する鉄は主としてイライト中に存在するが、非余震域断層ガウジの鉄は主として非晶質や結晶性鉄鉱物として存在する。また結晶性鉄鉱物として、余震域ガウジはゲーサイトとヘマタイトで、非余震域ガウジはヘマタイトであると推定される。
- 3) 余震域断層ガウジは負の値の $a^*$ が多く、非余震域断層ガウジは正の値の $a^*$ をとり、 $b^*/a^*$ の絶対値を比較すると余震域ガウジはその値が大きく、非余震域ガウジは小さい傾向がある。負の $a^*$ は緑泥石の存在に、正の $a^*$ 値は結晶性鉄鉱物の存在によって示している。
- 4) 各鉱物フラクションの鉄とマグネシウム溶出量から断層ガウジの判別を可能にする判別関数が得られた。

以上から、鉱物学的・化学的特徴にて、2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域の断層ガウジを明確に判別できることが示された。

### 謝 辞

本研究の一部は、原子力安全・保安院「平成20年度地層

処分に係る地質情報データの整備」, 「平成21年度地層処分に係る地質情報データの整備」および「平成22年度地層処分に係る地質評価手法等の整備」として実施した。窪島光志氏には現地巡検の案内をお引き受け頂き、高橋美紀氏には試料写真の一部を供与頂いた。これらの方々にして謝意を表する。

### 文 献

- 相澤泰隆・小林健太・梅津健吾・山本 亮(Aizawa, Y., Kobayashi, K., Umetsu, K. and Yamamoto, R.), 2005, 2000年鳥取県西部地震の余震域およびその周辺に分布する断層岩類. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **111**, 737–750.
- 伏島祐一郎・井村隆介・森野道夫・杉山雄一・水野清秀(Fusejima, Y., Imura, R., Morino, M., Sugiyama, Y. and Mizuno, K.), 2002, 2000年鳥取県西部地震断層のトレンチ調査. 活断層・古地震研究報告(Ann. Rep. Active Fault Paleoseismicity Res.), no.2, 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST), 183–208.
- Henley, R. W. and Ellis, A. J., 1983, Geothermal systems ancient and modern: A geochemical review. *Earth Sci. Rev.*, **19**, 1–50.
- Inoue, A., 1995, Formation of clay minerals in hydrothermal environments. In Velde, B., ed., *Origin and Mineralogy of Clays*, Springer, Berlin, 269–329.
- 井上厚行(Inoue, A.), 2008, 膨潤性粘土鉱物の特徴—鉱物としての見方—. 粘土科学(*Clay Sci. Soc. Japan*), **47**, 161–167.
- 井上大榮・宮腰勝義・上田圭一・宮脇明子・松浦一樹(Inoue, D., Miyakoshi, M., Ueda, K., Miyawaki, A. and Matsuura, K.), 2002, 2000年鳥取県西部地震余震域の活断層調査. 地震(Jour. Seismol. Soc. Japan (Zishin)), **54**, 557–573.
- 井沢英二(Izawa, E.), 1996, 資源の探査. 住 明正・平朝彦・鳥海光弘・松井孝典編(Sumi, A., Taira, A., Toriumi, M. and Matsui, T., eds.), 地球の観測, 岩波講座地球惑星科学4(*Observation of the Earth, Earth Planetary Science*, 4), 岩波書店(Iwanami Shoten), 291–323.
- 活断層研究会編(The Research Group for Active Faults, ed.), 1991, 新編日本の活断層: 分布図と資料(*Active Faults in Japan, New Edition: Distribution Map and the Related Materials*)\*. 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 437p.
- 加納 博・中沢圭二・志岐常正(Kano, H., Nakazawa, K. and Shiki, T.), 1962, 志高不整合の黒雲母起源パーミキュライトとその意義. 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **68**, 65–74.
- 小林健太・杉山雄一(Kobayashi, K. and Sugiyama, Y.), 2004, 2000年鳥取県西部地震の余震域とその周辺における断層と断層岩—“未知の活断層”の検出に向けて. 地質ニュース(*Chishitsu*

- News), no.602, 36–44.
- Mehra, O. P. and Jackson, M. L., 1960, Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, **7**, 317–327.
- 宮下由香里・小林健太・亀井淳志・伊藤順一・間中光雄・福士圭介 (Miyashita, Y., Kobayashi, K., Kamei, A., Itoh, J., Manaka, M. and Fukushi, K.), 2011a, 断層破砕物質を用いた断層活動性評価手法の開発(1): 鳥取県西部地域における断層岩の産状. 日本地球惑星科学連合2011年大会予稿集(*Japan Geosci. Union Meet. 2011, Abstr.*), CD-ROM, SSS032-P01.
- 宮下由香里・小林健太・伊藤順一・間中光雄・福士圭介・亀井淳志・渡部芳夫 (Miyashita, Y., Kobayashi, K., Itoh, J., Manaka, M., Fukushi, K., Kamei, A. and Watanabe, Y.), 2011b, 物質科学的手法による断層活動性評価手法の開発—鳥取県西部地域における研究事例—. 日本地質学会第118年学術大会講演要旨(118th *Ann. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*), T16-O-3.
- Nagano, T., Nakashima, S., Nakayama, S. and Senoo, M., 1994, The use of color to quantify the effects of pH and temperature on the crystallization kinetics of goethite under highly alkaline conditions. *Clays Clay Minerals*, **42**, 226–234.
- 長友晃夫・吉田英一 (Nagatomo, A. and Yoshida, H.), 2009, 断層と割れ目系およびその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **115**, 512–527.
- Niwa, M., Kurosawa, H. and Ishimaru, T., 2011, Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: A field-based study for understanding changes in underground environment caused by long-term fault activities. *Engin. Geol.*, **119**, 31–50.
- Niwa, M., Mizuochi, Y. and Tanase, A., 2009, Reconstructing the evolution of fault zone architecture: Field-based study of the core region of the Atera Fault, Central Japan. *Island Arc*, **18**, 577–598.
- Reyes, A. G. 1990, Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **43**, 279–309.
- Schwertmann, U. and Murad, E., 1983, Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. *Clays Clay Minerals*, **31**, 277–284.
- 白水晴雄 (Shirozu, H.), 1988, 粘土鉱物学—粘土科学の基礎— (*Introduction to Clay Mineralogy: Fundamentals for Clay Science*), 朝倉書店 (Asakura Publishing), 185p.
- 杉山雄一・宮下由香里・伏島祐一郎・小林健太・家村克敏・宮脇明子・新谷加代 (Sugiyama, Y., Miyashita, Y., Fusejima, Y., Kobayashi, K., Iemura, K., Miyawaki, A. and Shintani, K.), 2004, 鳥取県西部, 日南湖リニアメント上でのトレンチ調査. 活断層・古地震研究報告 (*Ann. Rep. Active Fault Paleoeearthquake. Res.*), no.4, 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 193–207.
- 杉山雄一・宮下由香里・小林健太・佐藤賢・宮脇明子・宮脇理一郎 (Sugiyama, Y., Miyashita, Y., Kobayashi, K., Sato, K., Miyawaki, A. and Miyawaki, R.), 2005, 鳥取県西部, 小町—大谷リニアメント系のトレンチ調査. 活断層・古地震研究報告 (*Ann. Rep. Active Fault Paleoeearthquake. Res.*), no.5, 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 115–138.
- 高橋美紀・上原真一・高橋学 (Takahashi, M., Uehara, S. and Takahashi, M.), 2011, 花崗岩を起源とする断層ガウジの剪断強度および水理特性. 資源・素材 (*Jour. MMLJ*), **127**, 165–168.
- Tamm, O., 1932, Über die Oxalatemethode in der chemischen Bodenanalyse. *Medd Statens Skogsförsöksanstalt*, **27**, 1–20.
- 堤浩之・隅元崇・奥村晃史・中田高 (Tsutsumi, H., Sumimoto, T., Okumura, K. and Nakata, T.), 2000, 鳥取県西部地震震源域の活断層. 月刊地球号外 (*Chikyū Monthly Extra ed.*), **31**, 81–86.
- Velde, B., 2003, Green clay minerals. In Mackenzie, F. T., ed., *Sediments, Diagenesis, and Sedimentary Rocks*, vol. 7, Elsevier, Amsterdam, 309–324.
- 柳瀬信之・佐藤努・磯部博志・関根敬一 (Yanase, N., Sato, T., Isobe, H. and Sekine, K.), 1996, ナチュラルアナログ研究での選択的抽出法の適用とその重要性—クンガラウラン鉱床の場合—. 放射性廃棄物研究 (*Radioact. Waste Res.*), **2**, 121–135.
- 吉田英一・大嶋章浩・吉村久美子・長友晃夫・西本昌司 (Yoshida, H., Oshima, S., Yoshimura, K., Nagatomo, A. and Nishimoto, S.), 2009, 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み—. 応用地質 (*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **50**, 16–28.
- 吉岡敏和・粟田泰夫・下川浩一・杉山雄一・伏島祐一郎 (Yoshioka, T., Awata, Y., Shimokawa, K., Sugiyama, Y. and Fusejima, Y.) 2005, 全国主要活断層活動確率地図. 構造図(14) (*Rupture Probability Map of Major Active Faults in Japan. Tectonic Map Series No. 14*). 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST).
- 吉村尚久編 (Yoshimura, T. ed.), 2001, 粘土鉱物と変質作用 (*Clay Minerals and Alteration*)\*. 地学双書 32, 地学団体研究会 (As-soc. Geol. Collab. Japan), 293p.

\* English translation from the original written in Japanese

### (要 旨)

間中光雄・福士圭介・宮下由香里・伊藤順一・渡部芳夫・小林健太・亀井淳志, 2012, 2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域に分布する断層ガウジの比較. 地質雑, **118**, 459–475. (Manaka, M., Fukushi, K., Miyashita, Y., Itoh, J., Watanabe, Y., Kobayashi, K. and Kamei, A., 2012, Comparison of fault gouges in the aftershock area and the non aftershock area of the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **118**, 459–475.)

本研究では, 低活動性断層の活動性を評価する手法開発のために, 2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域(日南湖リニアメント)から採取した断層ガウジに対して鉱物学的・化学的手法を用いて, 両断層ガウジを比較した. 粉末 X 線回折分析と逐次選択抽出試験の結果, 余震域断層ガウジはイライトと緑泥石を主とし, 非余震域断層ガウジはハロイサイトを主とする. 余震域ガウジの含有鉄は主にイライトに, 非余震域ガウジの鉄は主に非晶質と結晶性鉄鉱物に存在する.  $L^*a^*b^*$ 表色系の色調測定の結果,  $L^*$ 値の差はイライトとハロイサイトの違いを表し, 余震域ガウジの負値の  $a^*$ は緑泥石の存在を, 非余震域ガウジの正值の  $a^*$ は結晶性鉄鉱物の存在を示す. これら鉱物学的・化学的特徴にて, 2000年鳥取県西部地震の余震域と非余震域の断層ガウジを明確に判別でき, その見極めには現場露頭でも簡便に実施できる色調測定が有効であることが示唆された.