

# 地質環境の長期安定性に関する研究

## これまでの研究成果と今後の計画について

### 断層の活動性に係る調査技術

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
バックエンド研究開発部門

### 第3期中期計画(H27～33)

#### ① 調査技術の開発・体系化

##### ①-1) 断層の活動性に係る調査技術

##### ①-2) 地殻構造の高空間分解能イメージング技術

##### ①-3) 深部流体の分布に関する調査技術

#### ② 長期予測・影響評価モデルの開発

##### ②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

##### ②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

#### ③ 年代測定技術の開発

##### ③-1) ウラン系列放射年代測定法の実用化

##### ③-2) 光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化

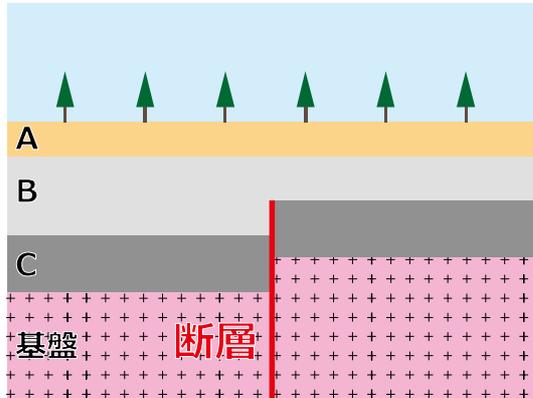
##### ③-3) アルミニウム-26年代測定法, 塩素-36年代測定法の実用化

##### ③-4) 高分解能のテフラ同定手法の開発

##### ③-5) 地質試料を対象とした年代測定法及び化学分析手法の高度化

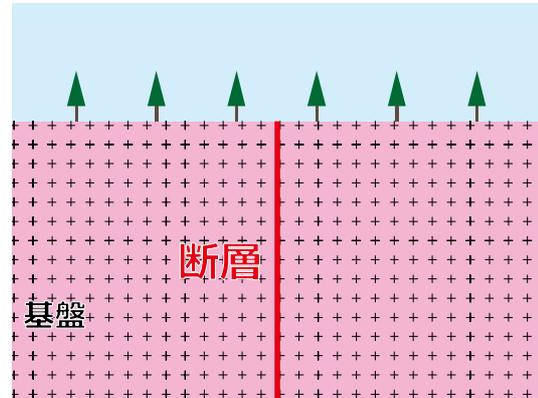
# 断層の活動性の評価

一般的には、断層を被覆する上載地層のずれに基づき評価



A, B, C層の年代から断層の最新活動時期が推定できる

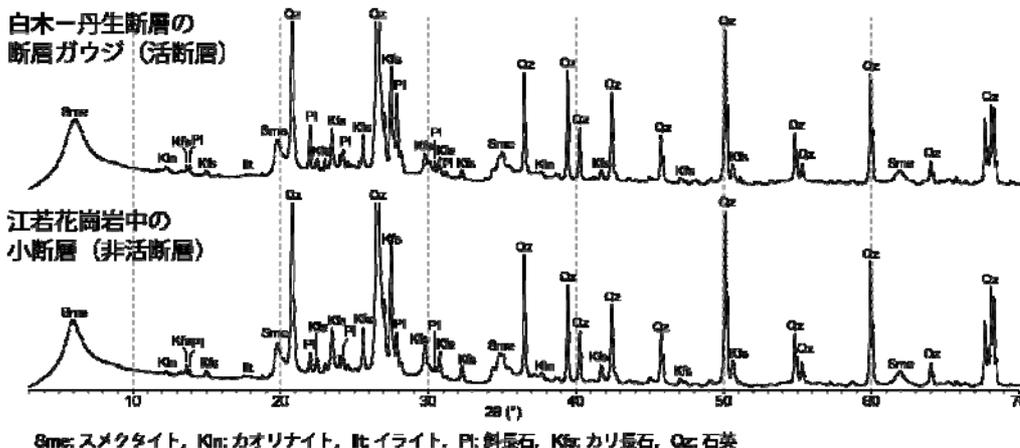
断層の活動時期推定に使える被覆層が無い  
(例えば、**基盤岩中のボーリングコア**や**地下坑道**で出現した断層)



上載地層法に基づく活動性評価は困難  
⇒断層内充填物質は使えないか？

## 断層や割れ目を充填する細粒物質

X線回折による細粒物質の定性・半定量分析  
(土岐地球年代学研究所の Rigaku UltimaIV で分析)



(敦賀半島の破碎帯の例)



RIR (Reference Intensity Ratio) 法による鉱物組成の半定量計算

	石英	斜長石	カリ長石	スメクタイト	イライト	カオリナイト	(wt. %)
白木-丹生断層(活断層)	26.9	4.7	5.9	59.9	1.3	1.3	
江若花岗岩中の小断層(非活断層)	35.3	2.2	2.5	57.3	1.9	0.8	

- 細粒物質は石英などの碎屑鉱物と、スメクタイトなどの粘土鉱物からなる
- 一般的に、活断層と非活断層とで構成物質に明瞭な違いが無いことが多い

# 研究手法

## ①断層内充填物質全体についての検討

✓ 粒度分布の比較

## ②粘土鉱物に着目した検討

✓ 粘土鉱物粒子の形状観察(透過型電子顕微鏡:TEM)

✓ 自生雲母粘土鉱物(イライト)のK-Ar年代測定

✓ 化学的検討(例:スメクタイトの安定同位体比)

## ③碎屑鉱物(代表的な鉱物として石英)に着目した検討

✓ 石英粒子の表面構造観察(走査型電子顕微鏡:SEM)

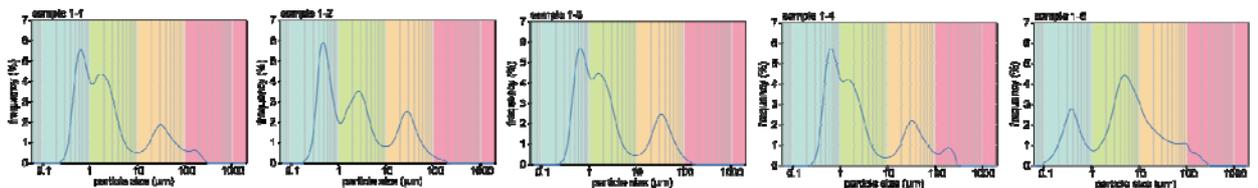
✓ ESR(電子スピン共鳴), OSL(光ルミネッセンス), TL(熱ルミネッセンス)信号による検討

## 粒度分布の比較

- レーザ回折/散乱式粒子径分布測定装置(HORIBA LA-950V2)による測定
- 敦賀半島の破砕帯における研究例(各断層に対し5地点で分析)

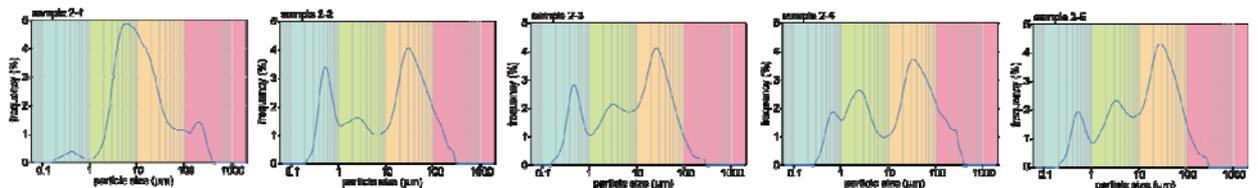
### 白木-丹生断層 (活断層)

平均値:13.9 $\mu$ m  
中央値:1.98 $\mu$ m  
最頻値:0.584 $\mu$ m



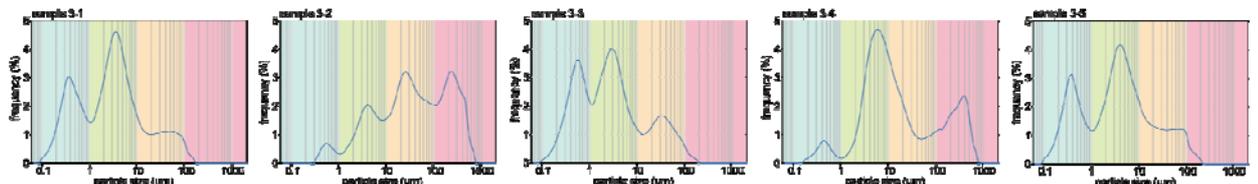
### 非活断層1

平均値:31.8 $\mu$ m  
中央値:13.2 $\mu$ m  
最頻値:26.1 $\mu$ m



### 非活断層2

平均値:43.4 $\mu$ m  
中央値:5.12 $\mu$ m  
最頻値:3.91 $\mu$ m



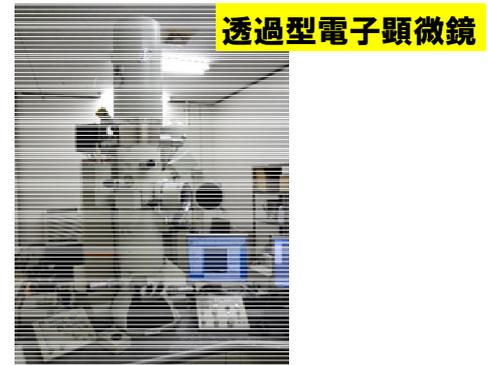
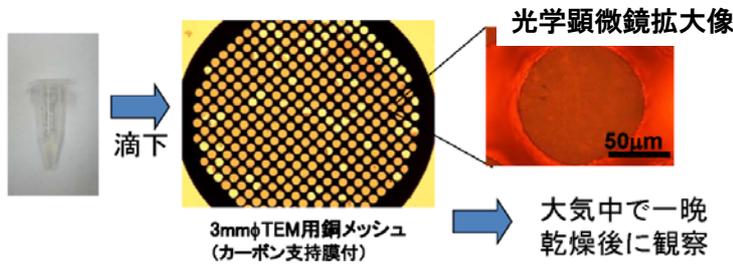
- 活断層の断層ガウジの方が細粒化が進んでいるようにみえるが、同じ断層内でもばらつきがある

# 粘土鉱物粒子のTEMによる形状観察

- 凍結-融解の繰り返しによる粉碎と超高速遠心分離により、約 $<0.2\mu\text{m}$ の極細粒の粒子を人為的に壊さないように濃集

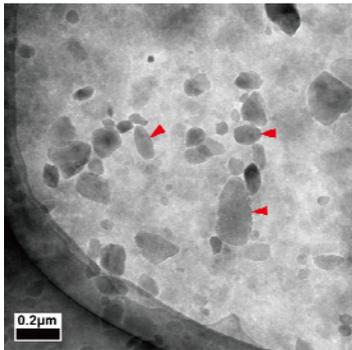


JEOL JEM-2100Fで観察

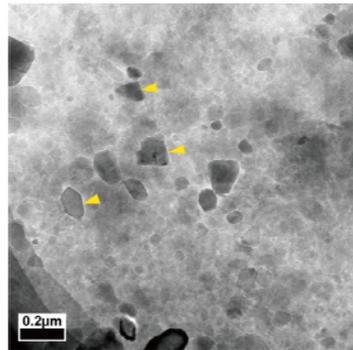


## 粘土鉱物粒子のTEMによる形状観察(結果)

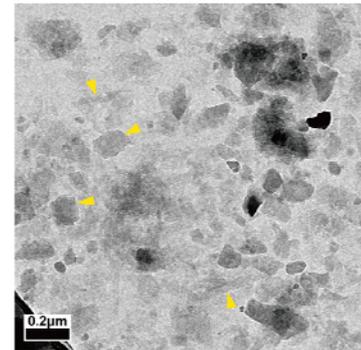
白木-丹生断層(活断層)



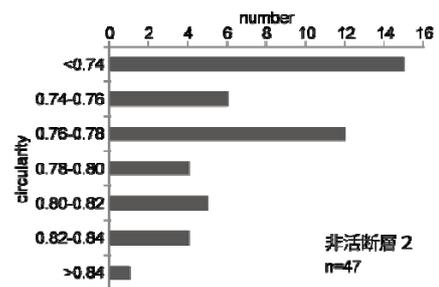
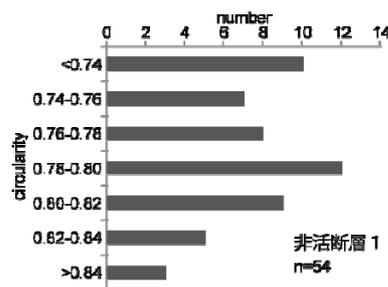
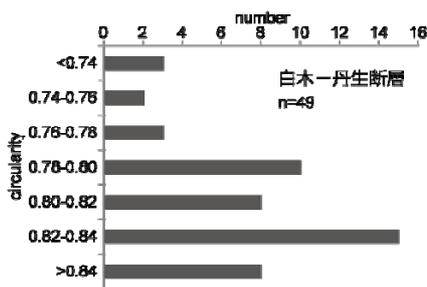
非活断層1



非活断層2



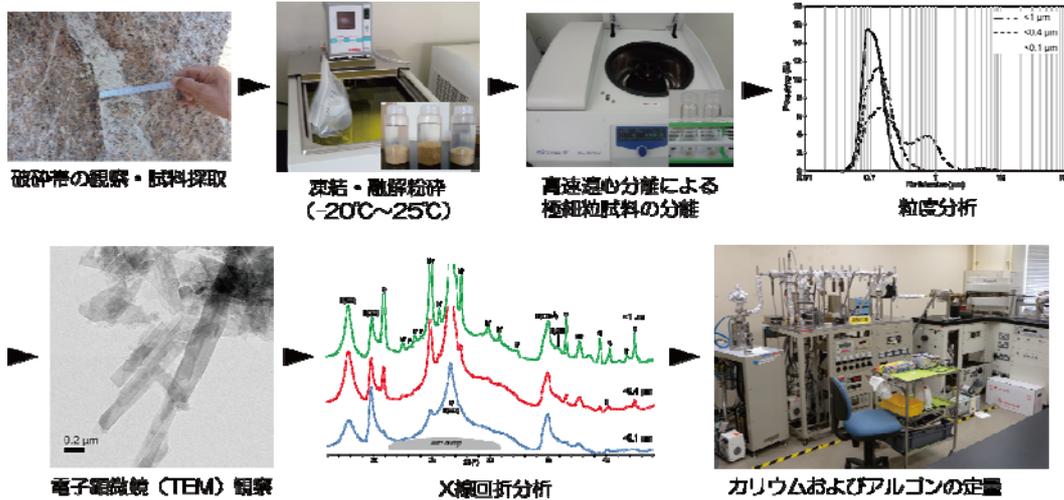
- アスペクト比1.5未満の粒子について円形度を計測(1に近いほど円形に近い)



- 繰り返し活動している活断層の粘土鉱物の方が、摩耗が進んで角が取れているように観察される

# 自生雲母粘土鉱物(イライト)のK-Ar年代測定

- 粘土鉱物のうち、カリウムを含むイライトはK-Ar放射年代測定が適用できる
- イライトは熱水活動+断層活動で形成が促進されるので、断層の活動時期を知ることができる可能性がある
- 凍結-融解の繰り返しに伴う鉱物粒子間の緩みを利用した粉碎(カリ長石などの粗粒な碎屑鉱物の物理的な破壊を防ぐ)
- 感度法によるAr定量(数十万年~数万年オーダーの若い年代測定に有利)
- X線回折分析, SEM/TEM観察によるイライトの性状の確認

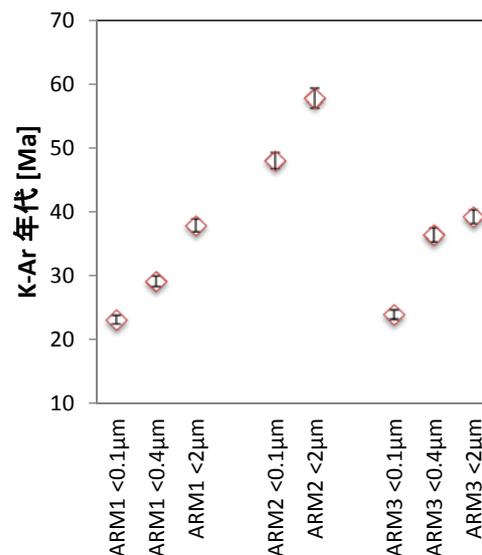
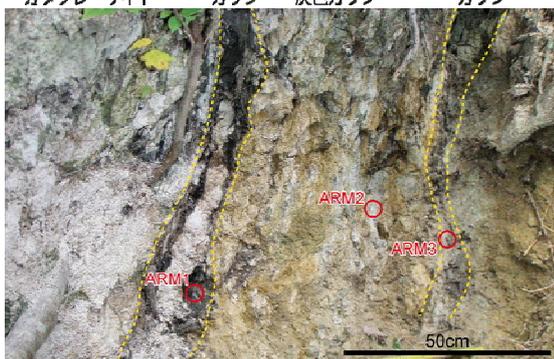


## 自生雲母粘土鉱物(イライト)のK-Ar年代測定(事例)

兵庫県の六甲断層(1596年慶長伏見地震で活動した活断層)における適用事例



花崗岩起源のガウジと茶褐色ガウジ 溶結凝灰岩起源の灰色ガウジ 茶褐色ガウジ



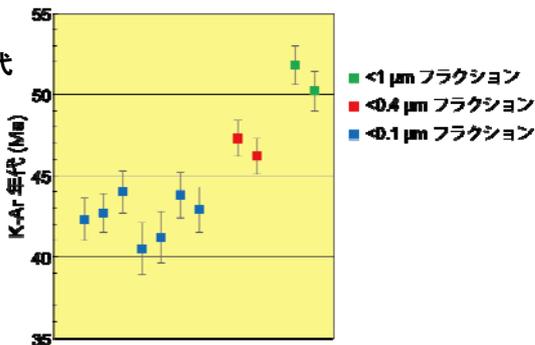
分離した粒度ごとのK-Ar年代

- イライトに富む細粒フラクションの年代は周囲の花崗岩中の粘土脈の年代(61~65Ma:宮原ほか, 2007)より有意に若い
- ただし、細粒フラクションの年代=活断層の最新活動時期とはならない

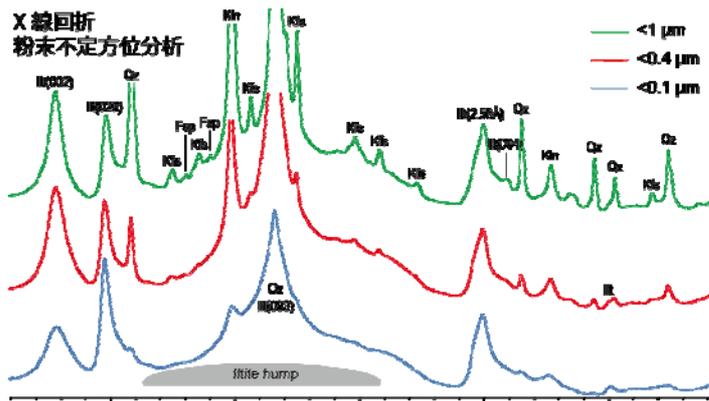
# 自生雲母粘土鉱物(イライト)のK-Ar年代測定(事例)

## 江若花崗岩の非活断層における適用事例

分離した粒度ごとのK-Ar年代

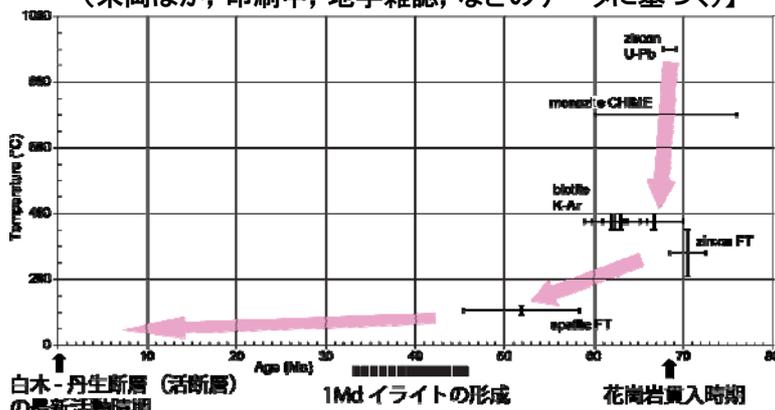


X線回折  
粉末不定方位分析



Kln: カオリナイト, Ill: イライト, Fsp: 長石類, Kfs: カリ長石, Qz: 石英

【江若花崗岩の冷却史との関係  
(末岡ほか, 印刷中, 地学雑誌, などのデータに基づく)】



- <0.1μmフラクションはカリ長石を含まず, K含有鉱物は低温型の1Mdイライトのみからなるので, このフラクションの年代(約40Ma)は断層の活動時期を示す
- 上記のフラクションの年代は母岩の花崗岩の冷却史と調和的であり, 断層に沿って顕著な2次的な加熱イベントを経験していないことを示す

## 粘土鉱物の化学的検討(スメクタイトの安定同位体比)

- 酸素同位体分別の計算式(Sheppard and Gilg, 1996)に基づき, 現在の天水との反応でスメクタイトが形成される場合の温度を計算
- 粘土鉱物を集めるため, 水簸で<2μmの粒子を濃集させた試料を分析
- スメクタイトは一般に, イライトよりも低温の条件下で形成されるので, 地質学的により新しい時代のイベントを記録している可能性がある

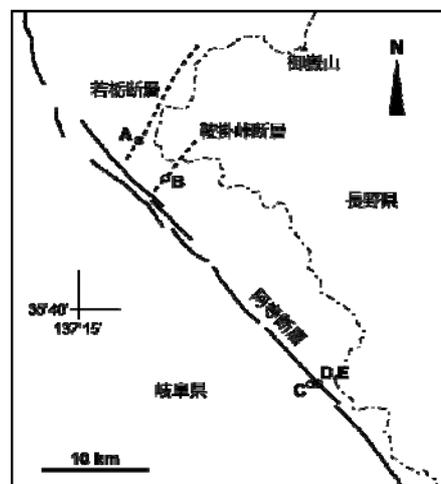
$$1000 \ln \alpha_{\text{smeectite-water}} = 2.55 \times 10^6 \times T^{-2} - 4.05$$

$$\alpha_{\text{smeectite-water}} = (1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{smeectite}}) / (1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{water}})$$

地点	V-SMOW	推定温度
	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$	$^{\circ}\text{C}$
A (若柵断層)	7.8	77
B (鞍掛峠断層)	3.9	115
C (阿寺断層より外側の割れ目)	6.5	91
D (阿寺断層)	17.9	16
E (阿寺断層)	16.9	21

活断層

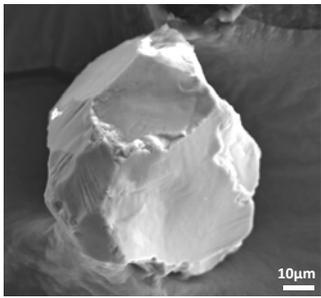
※当該地域の天水の酸素同位体比は長江(1996)に基づく



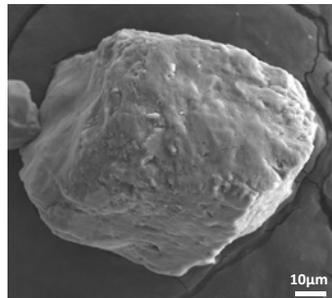
- 活断層である阿寺断層のスメクタイトについてのみ, 現在の天水との常温での反応による形成で説明できる
- それ以外の断層や割れ目を充填するスメクタイトは, 地質学的に古い時期(現在とは異なる天水組成または温度)で形成されたものである

# 石英粒子の表面構造観察

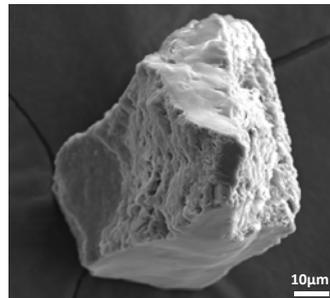
- 一般的に形成時期の古い石英粒子ほど化学的腐食が進行(Kanaori et al., 1985など)  
⇒活動時期の新しい断層では新鮮な表面構造を持つ石英粒子が多い傾向が期待
- 断層内物質から20~75 μm径の石英粒子を抽出し, SEMで表面の特徴の違いを観察



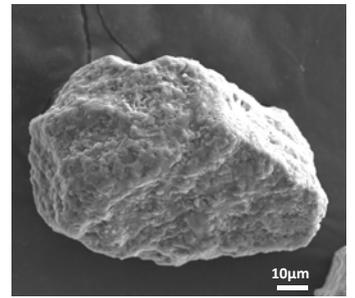
Type 1  
ほぼ全面が新鮮な表面構造を有する



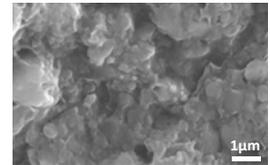
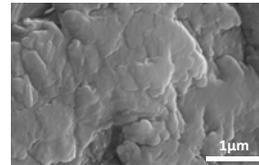
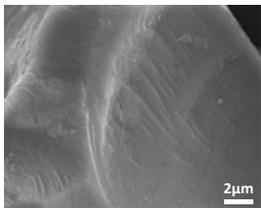
Type 2  
摩耗, または弱い腐食により円磨された表面を有する



Type 3  
部分的に腐食が進行し, 凹凸の発達した表面が半分近くを占める



Type 4  
全体的に腐食が進行し, ほぼ全面が凹凸の発達した表面を持つ



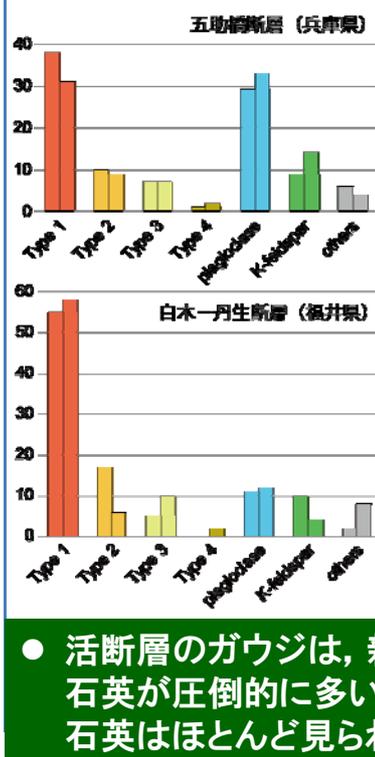
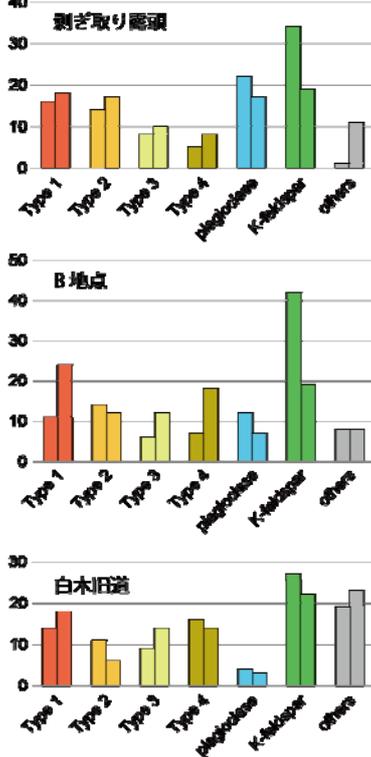
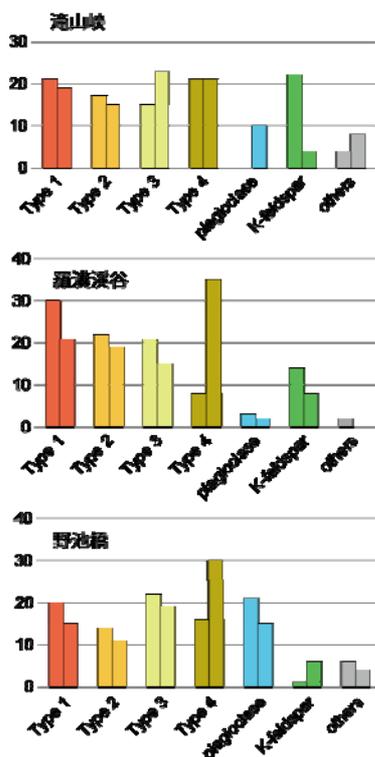
## 石英粒子の表面構造観察(結果)

- 平均的な傾向を評価するため, 試料ごとにn=100で2回, 種類分けを実施

### 広島花崗岩中の粘土

### 江若花崗岩中の粘土

### 活断層のガウジ

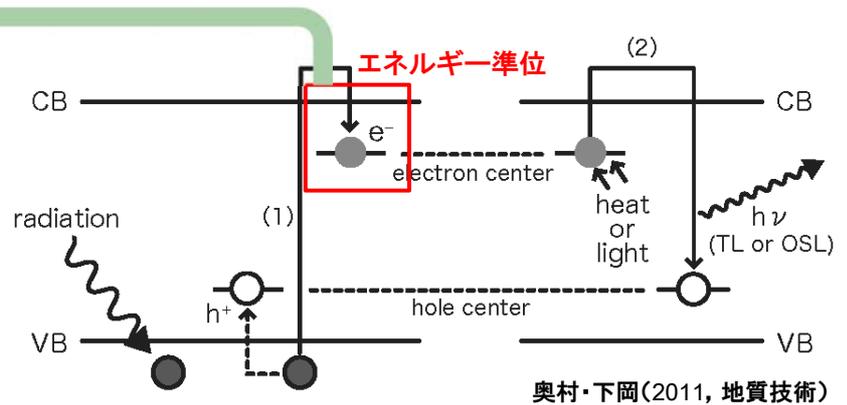
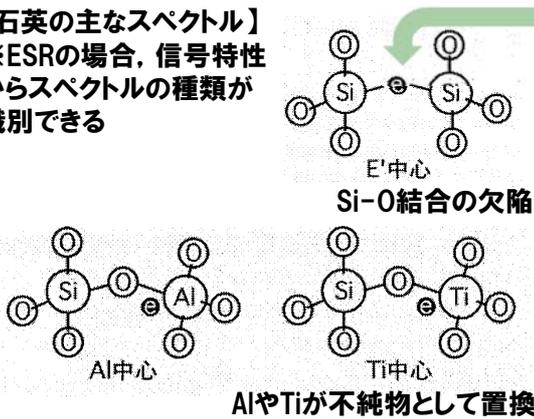


● 活断層のガウジは, 新鮮な表面構造を持つ石英が圧倒的に多い一方, 腐食が進行した石英はほとんど見られない

# ESR, OSL, TL信号による検討

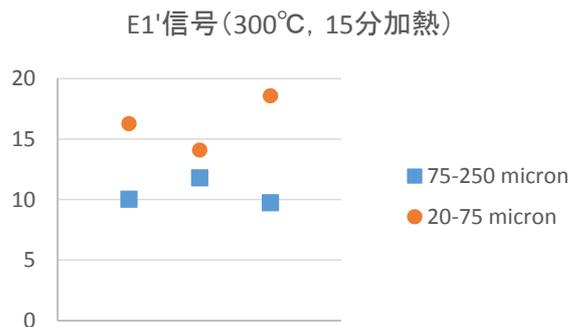
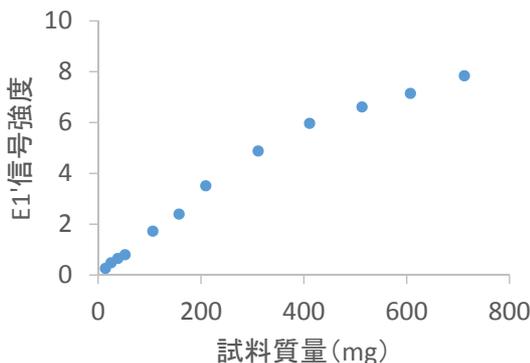
- 自然放射線(放射性鉱物由来, 宇宙線など)によって電離した電子(または正孔)は, 格子欠陥や不純物に起因するエネルギー準位に捕獲され, 準安定的な状態となる →これをESR, OSL, TL信号として測定する
- 何らかのイベント(例えば, 断層活動)により捕獲されていた電子(正孔)が放出されると, ESR/OSL/TL信号強度は減少するので, 信号強度の違いに基づき, 活断層と非活断層が区別できる可能性がある
- イベント時に信号がゼロリセットされていれば, 信号強度(総被ばく線量に相当)と年間線量率との関係により, ESR/OSL/TL年代が計算できる可能性がある

【石英の主なスペクトル】  
※ESRの場合, 信号特性からスペクトルの種類が識別できる



## ESR信号の測定

- 凍結-融解の繰り返しによって破碎した試料から, ふるい分け, 薬品処理(フッ酸など)により, 粒度をそろえた石英試料を濃集して測定
- 試料量が多いほど信号強度が大きい(十分な信号強度を検出するには, 200mg程度あったほうが望ましい:左図)
- E1' 信号については, 細粒ほど信号強度が大きい傾向がある(右図: Si-O結合の欠陥に起因する信号なので, 断層活動と相関?) → **今後, 細粒試料を測定し断層ごとの比較を試みる**
- ただし, 細粒ほど分析必要量の回収, および石英の純化が難しくなるため, 試料採取の容易さの観点からの適用性検討も必要



- OSL/TLについては, 基盤岩の断層ガウジを対象とした研究事例(雁澤ほか, 2013, 地質雑など)が少なく, 実験的研究も含め今後の検討課題

# 現在までのまとめと課題

手法	活断層と非活断層との区別(比較)における課題
粒度分布	・同条件下で測定した上での相対的な比較となる ・同一の断層の中でのばらつきの評価が課題
粘土鉱物粒子の形状観察 (TEM)	・粒子形状を高精度で計測するための、懸濁液の濃度調整などの前処理手法が課題
イライトのK-Ar年代測定	・年代値が直接、断層の最新活動時期を示すものではないことに注意が必要 ・母岩がK含有鉱物に乏しい場合は適用困難
スメクタイトの化学組成 (酸素同位体比)	・断層活動以外の要因(風化変質)によるものとの区別が困難な場合がある(あくまで傍証としての適用)
石英粒子の表面構造観察	・母岩や活動時期の異なる様々なタイプの断層に対して検証する必要あり

断層内充填物質を用いた断層活動性評価(活断層と非活断層との比較)に係る複数の研究手法を提示した。

## 今後の計画

- 石英の表面構造など、断層活動性評価の一助となり得る手法も見出されたが、母岩の種類による違いの検証など課題も残されているため、引き続き事例研究を蓄積していく
- 現在進行中のESR, OSL, TL信号強度による評価に加え、微小領域の鉱物・化学分析や、変形実験との対比も行っていく
- 断層ガウジのみならず、変位マーカとなり得る鉱物脈を対象とした年代測定(例えば、ウラン系列の年代測定など)の適用性の検討も進めていく