

平成27年度における個別研究開発の現状および今後の予定

② 地質環境の長期安定性に関する研究

平成28年3月14日

日本原子力研究開発機構
バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター 地層科学研究部

地層処分の安全確保の考え方と研究課題

考慮すべきわが国の地質環境の特徴

環太平洋変動帯に位置
噴火・地震など地殻変動が活発

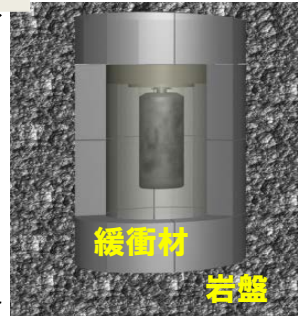
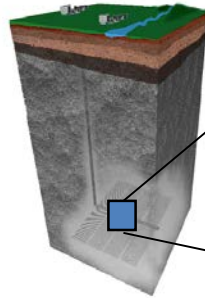
・生活環境との離間距離の短縮
(接近シナリオ)

地層処分の長期的な
安全性への影響

・自然現象による地下水の変化
(地下水シナリオ)

地層処分システムの性能
が著しく損なわれないよう
長期にわたって安定な地
質環境を選定
(**サイト選定**)

対 策



想定される自然現象の変
動を見込んで処分施設を
適切に設計・施工および
長期的な安全性を評価
(**工学的対策・安全評価**)

① 調査技術の開発・体系化
過去の自然現象の記録や現在の状況を調
査するための体系的な技術の整備

② 長期予測・影響評価モデルの開発
将来の自然現象に伴う地質環境の変化を予
測・評価するための手法の整備

③ 年代測定技術の開発
最先端の機器分析装置による放射年代測定技術(世界初)を含めた編年技術の高度化

地層処分の技術的信頼性向上に向けた研究課題

「最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価」

(総合資源エネルギー調査会 地層処分技術WG:H26.5)

【地層処分の技術的信頼性向上に向けた研究課題】

- 繰り返し活動し、変位の規模が大きな断層の評価に反映するための、**地形的に不明瞭な活断層**の調査事例の蓄積および調査や評価方法の整備。
- 隆起量・侵食量の評価に反映するための、地形学的手法や**堆積物の年代測定**に基づく評価方法の整備。
- **深部流体および非火山性熱水**の流出の評価に反映するための、深部流体および非火山性熱水に関する形成・移動メカニズム等の調査事例の蓄積。
- 断層の活動性の評価に反映するための、地質断層の再活動性に関する調査事例および上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法(**断層岩や充填鉱物の年代測定方法**)の整備。
- 地震活動の評価に反映するための、**東北地方太平洋沖地震後に誘発された地震や湧水**(たとえば、2011年4月11日の福島県浜通り地震)に関する調査事例の蓄積。
- 地下水の動きが緩慢であることを評価するための**地下水年代測定**などの技術の確保や調査事例の蓄積。

地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する。

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

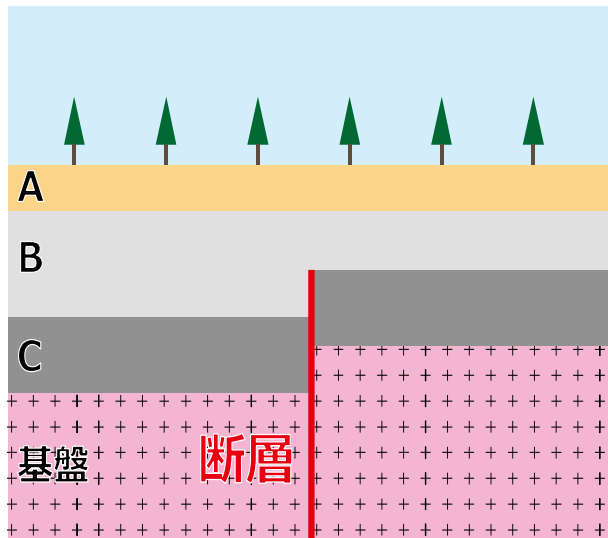
- ②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術
- ②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

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) 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化

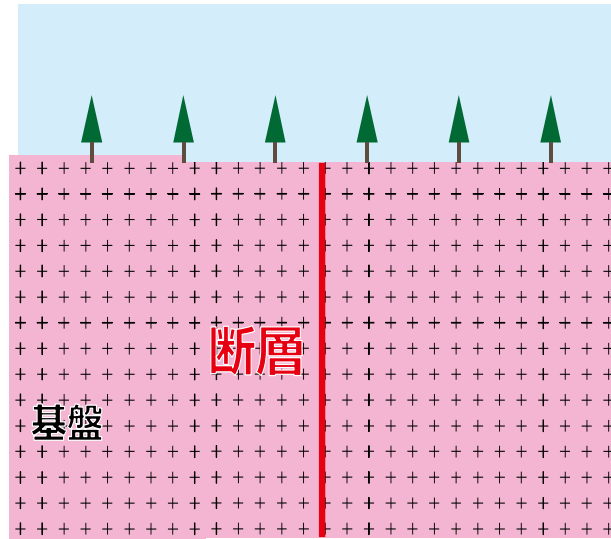
断層の活動性に係る調査技術

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

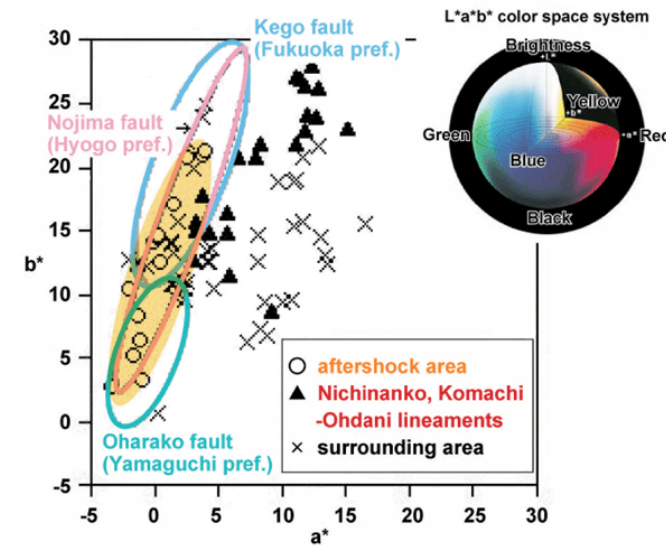


A, B, C層の年代から断層の最新活動時期が推定できる

断層の活動時期推定に使える被覆層が無い
(例えば、ボーリング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？



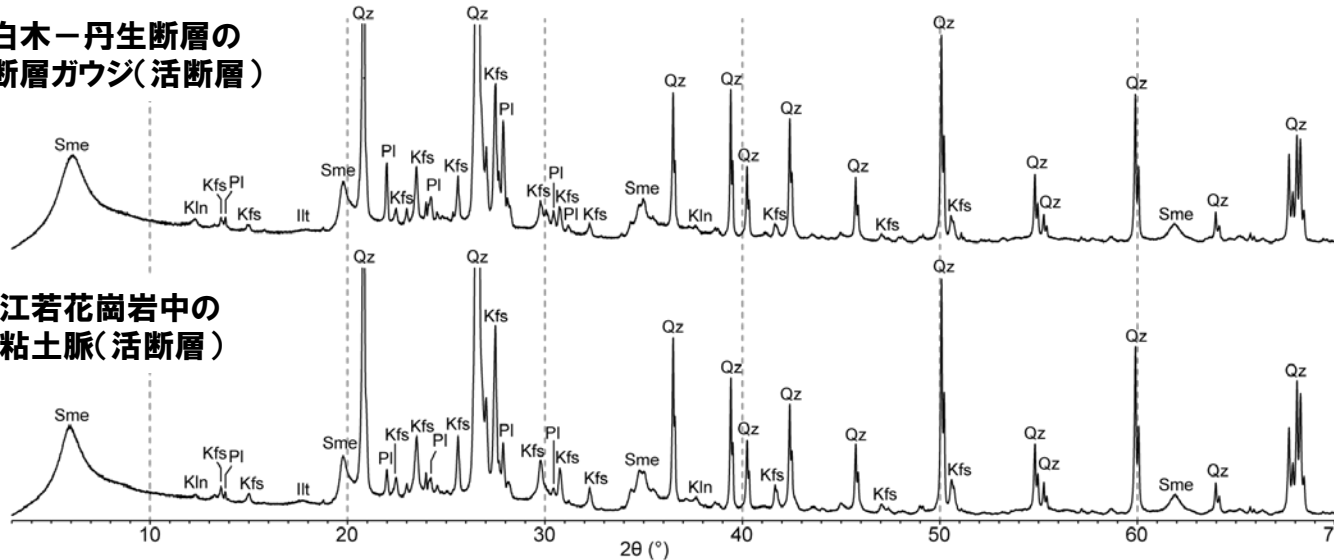
2000年鳥取県西部地震の余震分布域においては無彩色-還元色の断層ガウジが卓越し、活動間隔が長い周辺域では酸化色の断層ガウジの卓越する(小林, 2003)

- ✓ 断層岩中の石英粒子の表面構造による活動性評価(金折ほか, 1982)
- ✓ 断層岩のESR信号による活動性評価(幡谷ほか, 1992; 福地, 2003)
- ✓ 断層岩中の自生イライトのK-Ar年代による評価(van der Pluijm et al., 2001)
- ✓ 断層岩の分光測色系を用いた定量測色による活動性評価(宮下ほか, 2011)

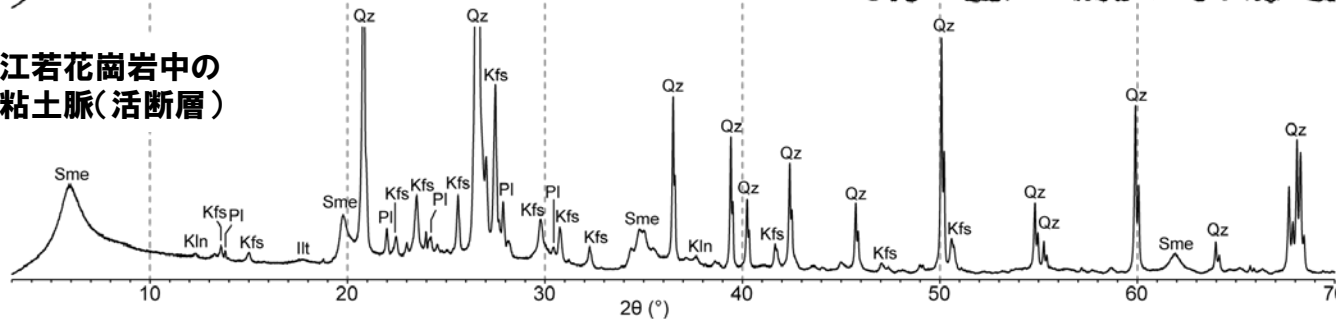
断層の活動性に係る調査技術

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リガク Ultima IVで分析)

白木－丹生断層の
断層ガウジ(活断層)



江若花崗岩中の
粘土脈(活断層)

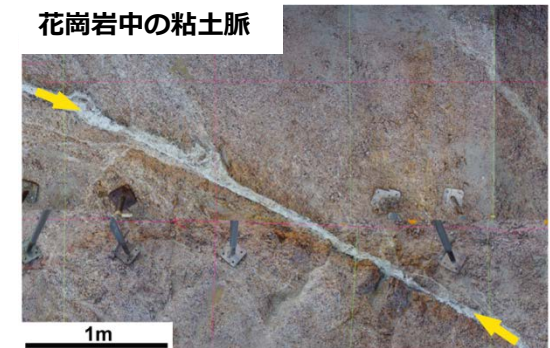


Sme: スメクタイト, Kln: カオリナイト, Illt: イライト, Pl: 斜長石, Kfs: カリ長石, Qz: 石英

回折X線強度比である参照強度比(RIR)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	
江若花崗岩中の粘土脈(非活断層)	35.3	2.2	2.5	57.3	1.9	0.8	

(敦賀半島の破碎帯の例)



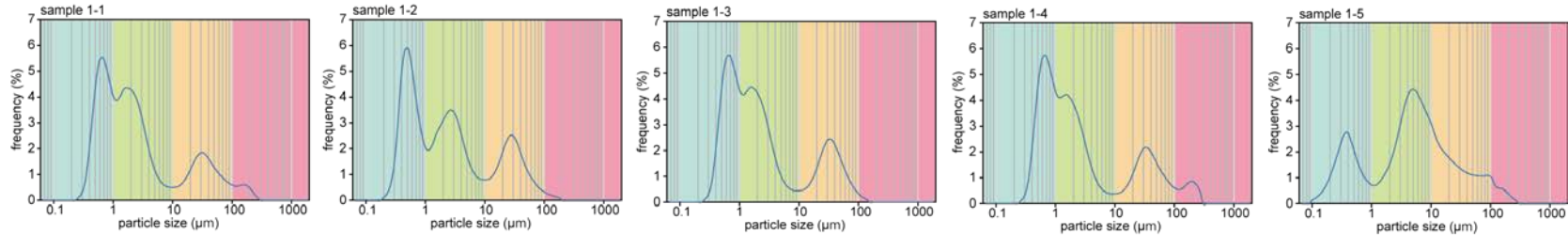
- 細粒物質は一般的に、石英、斜長石、カリ長石などの碎屑鉱物と、イライト、スメクタイトなどの粘土鉱物によって構成される。
- ✓ しかしながら、活断層と非活断層とで構成物質に明瞭な違いが無いことが多い。

断層の活動性に係る調査技術

- 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)

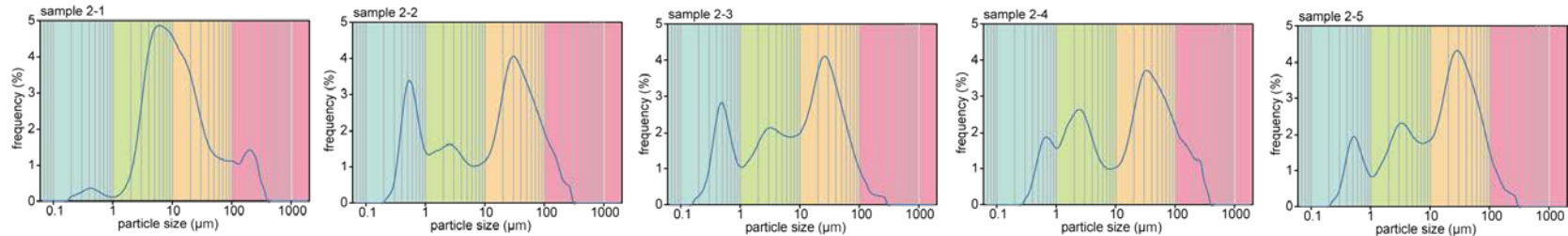
白木一丹生断層 (活断層)

平均値:13.9 μm
中央値:1.98 μm
最頻値:0.584 μm



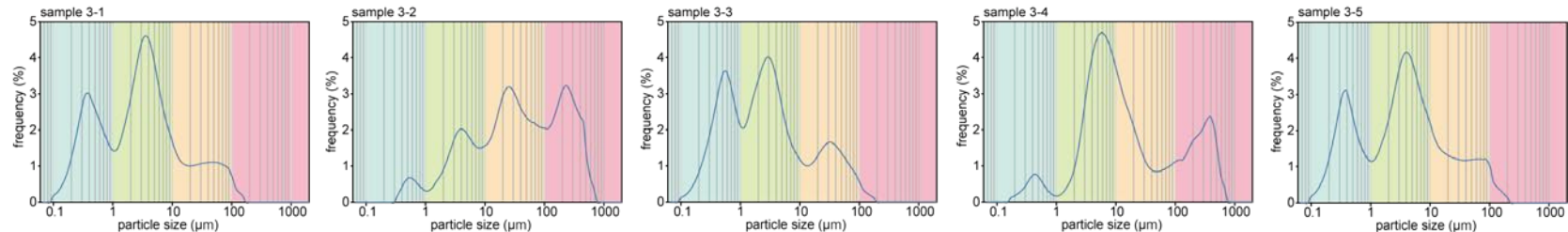
粘土脈1

平均値:31.8 μm
中央値:13.2 μm
最頻値:26.1 μm



粘土脈2

平均値:43.4 μm
中央値:5.12 μm
最頻値:3.91 μm



- 白木一丹生断層の断層岩は, 1 μm 付近をピークに粗粒側に裾の長い頻度分布を示す。
- ✓ しかしながら, 同じ断層岩の中でも採取地点によってばらつきがある。

断層の活動性に係る調査技術

- Sheppard and Gilg(1996)に基づき①スメクタイトの酸素安定同位体比と②スメクタイト生成時の水の酸素安定同位体比よりスメクタイトの生成温度を計算
- 粘土鉱物を集めるため、水簸で $<2\mu\text{m}$ 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

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

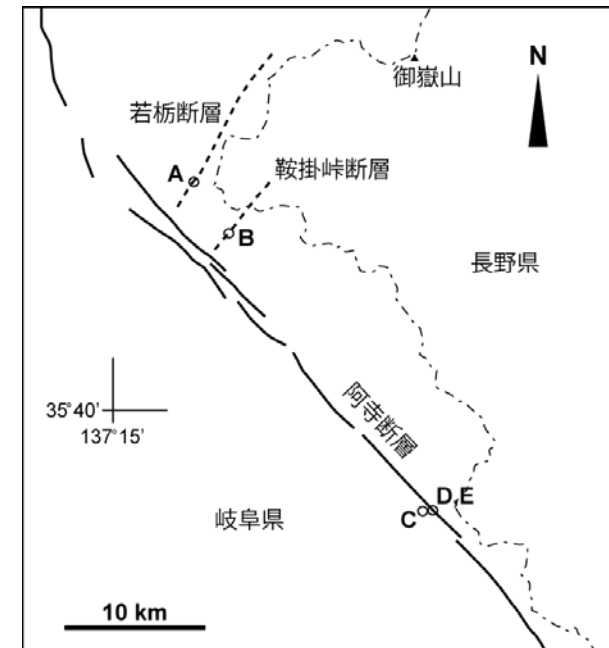
$\alpha_{\text{smeectite-water}}$: スメクタイトと水の酸素同位体分別係数
 $= (1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{smeectite}}) / (1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{water}})$

T: 生成温度(絶対温度)

地点	V-SMOW	推定温度
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{smeectite}} \text{ ‰}$	$^{\circ}\text{C}$
A(若栃断層)	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 {

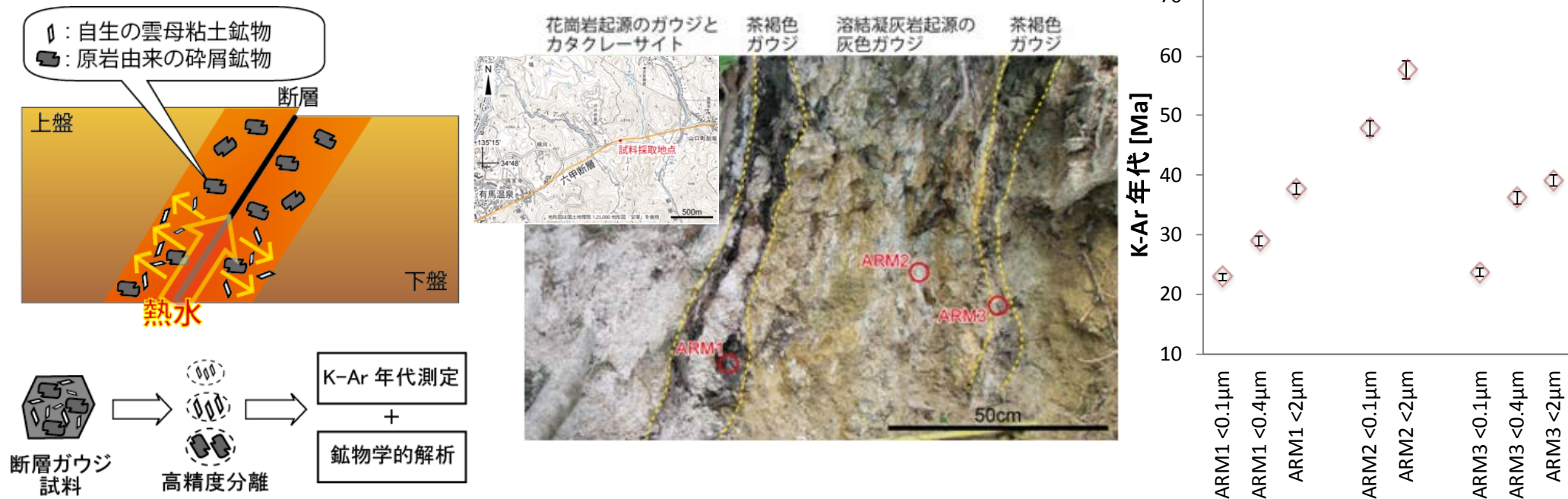
※当該地域の天水の酸素同位体比は長江(1996)に基づく



- 活断層である阿寺断層のスメクタイトは、現在の天水との常温での反応による生成で説明可能。
- 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)で生成したことを示唆。

断層の活動性に係る調査技術

- 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可能。
- 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(Zwingmann et al., 2010)。



- イライトに富む細粒フラクシヨ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
 - 六甲断層の最新活動は, 1596年慶長伏見地震と考えられており, 細粒フラクシヨンの年代＝活断層の最新活動時期とはならない。
- ⇒ 坑道やボーリングで得られた母岩や粘土脈の鉱物の年代値より有意に若い年代の割れ目(断層)は, 工学的な対処を検討する上での指標となる。

地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する。

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

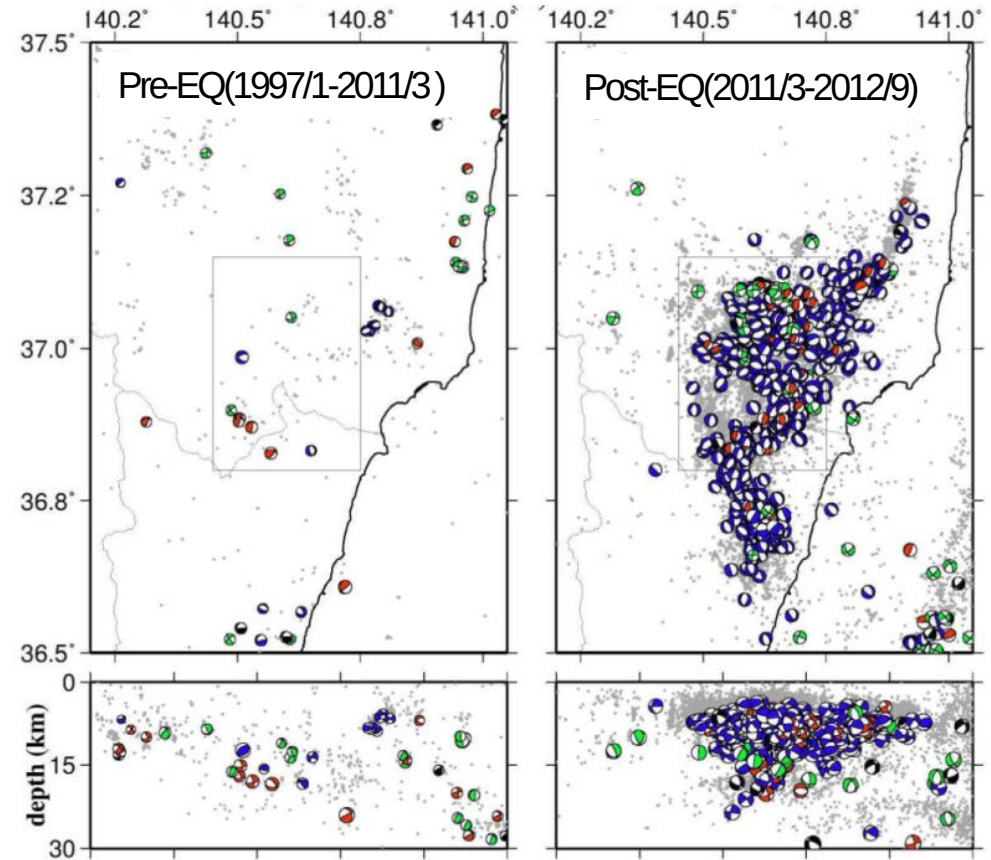
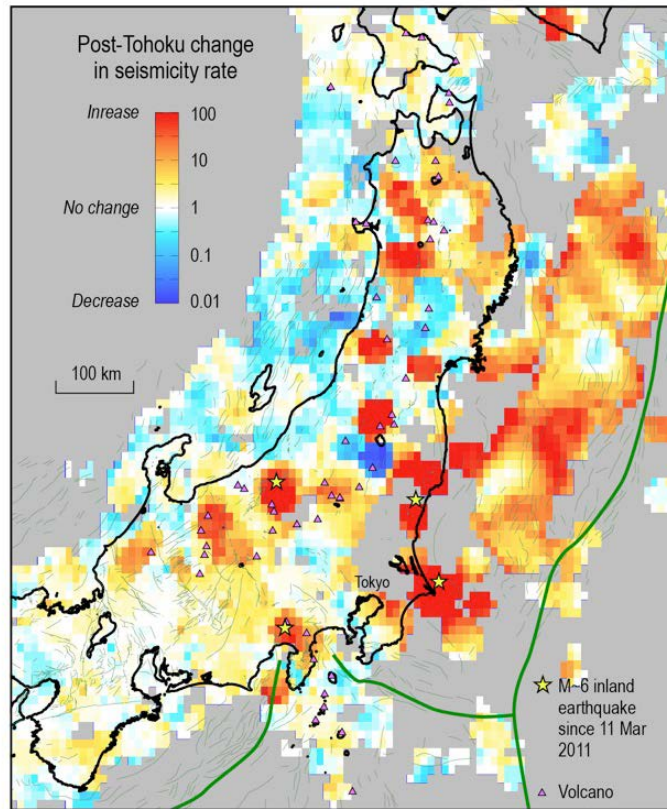
② 長期予測・影響評価モデルの開発

- 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) 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化

稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術

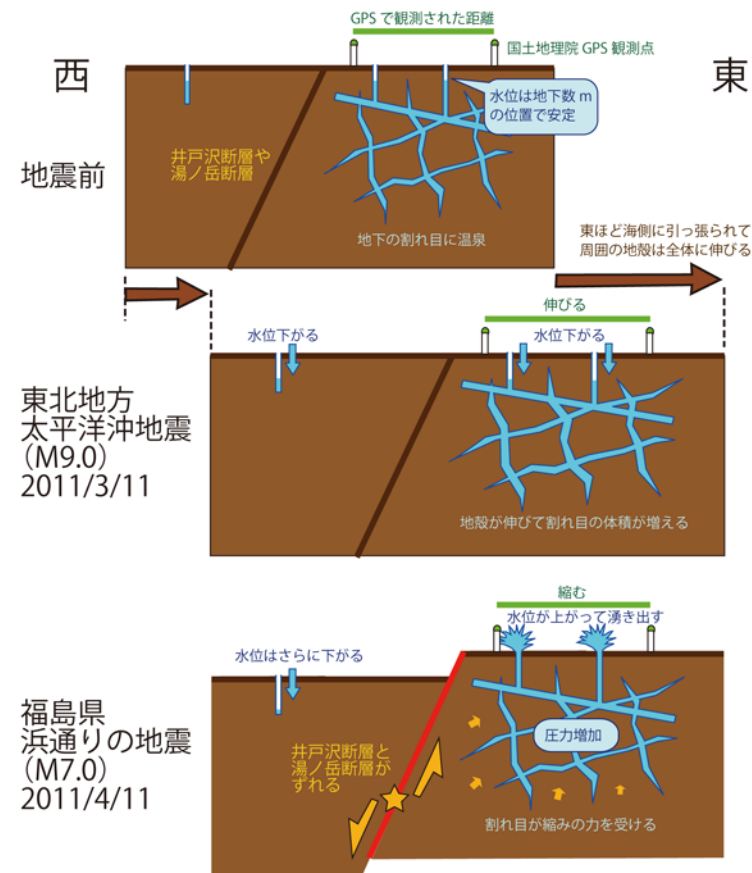
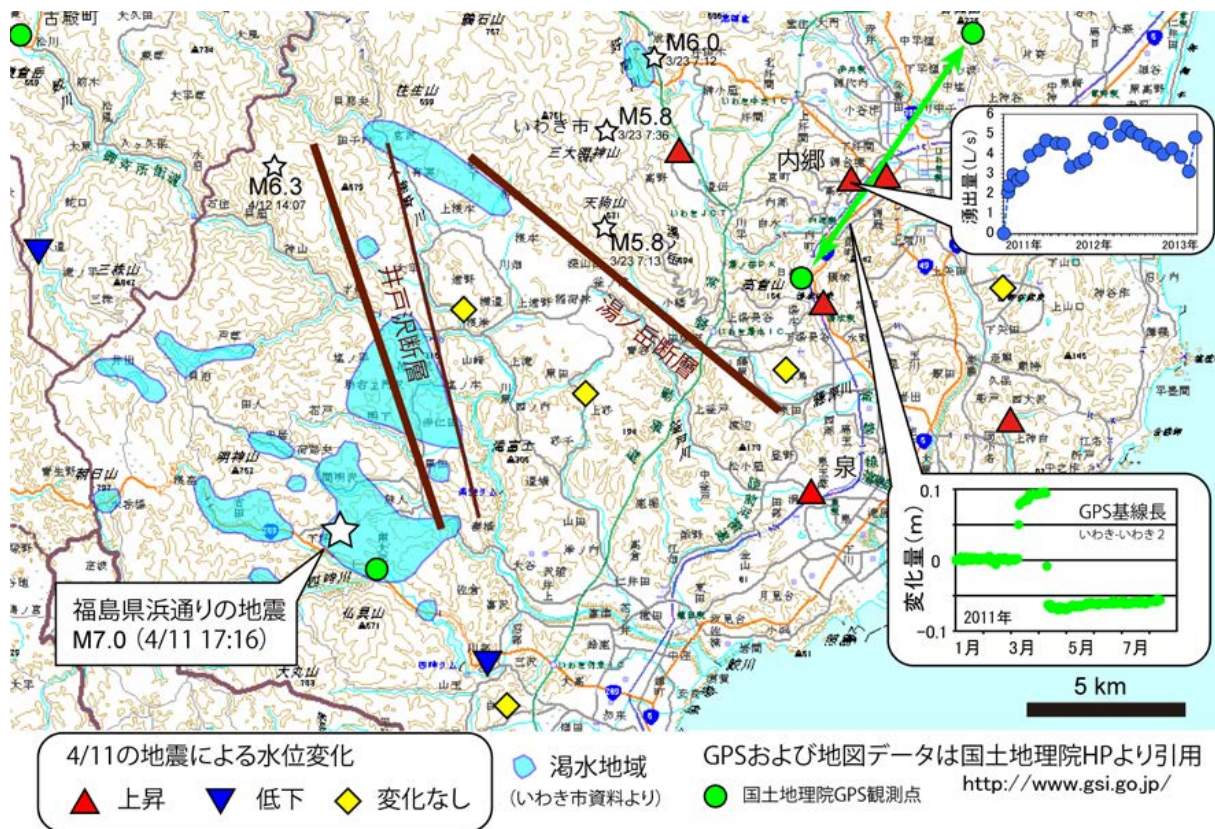


3月11日以降の地震発生頻度 (Toda et al., 2011)

東北沖地震前後の発震機構解 (Yoshida et al., 2015)

- ✓ 東北地方内陸を中心にいくつかの地域でスポット的に地震活動が活発。
- ✓ 茨城県北部～福島県浜通りの群発地震は深度10km以浅で正断層型の地震が卓越。
- ✓ 4月11日のM7.0の地震時には既知の地質断層・活断層である湯ノ岳断層と井戸沢断層に沿って最大約2mの正断層崖が出現。

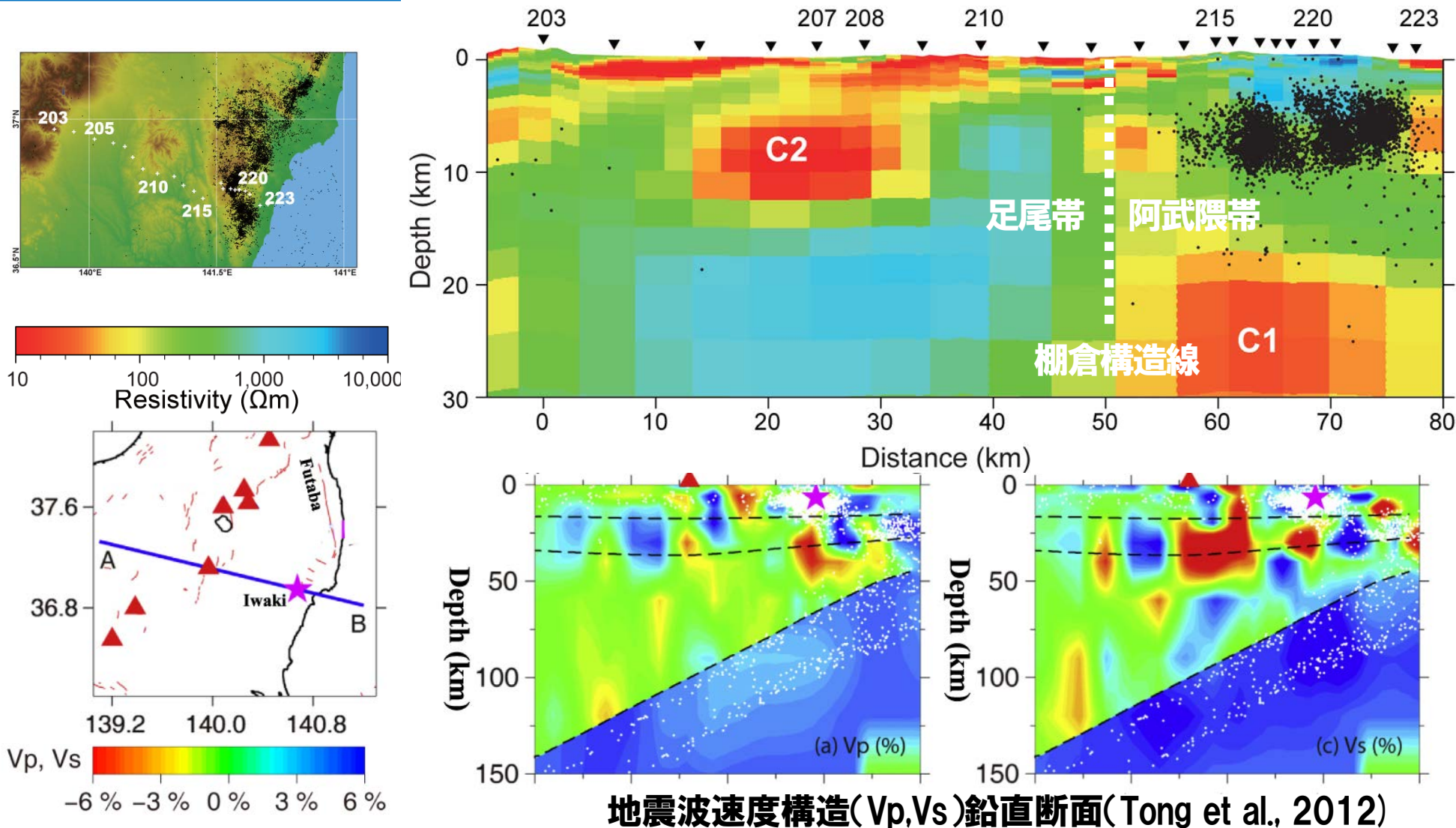
稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術



4月11日福島県浜通りの地震に伴う地下水変化(AIST, 2013)

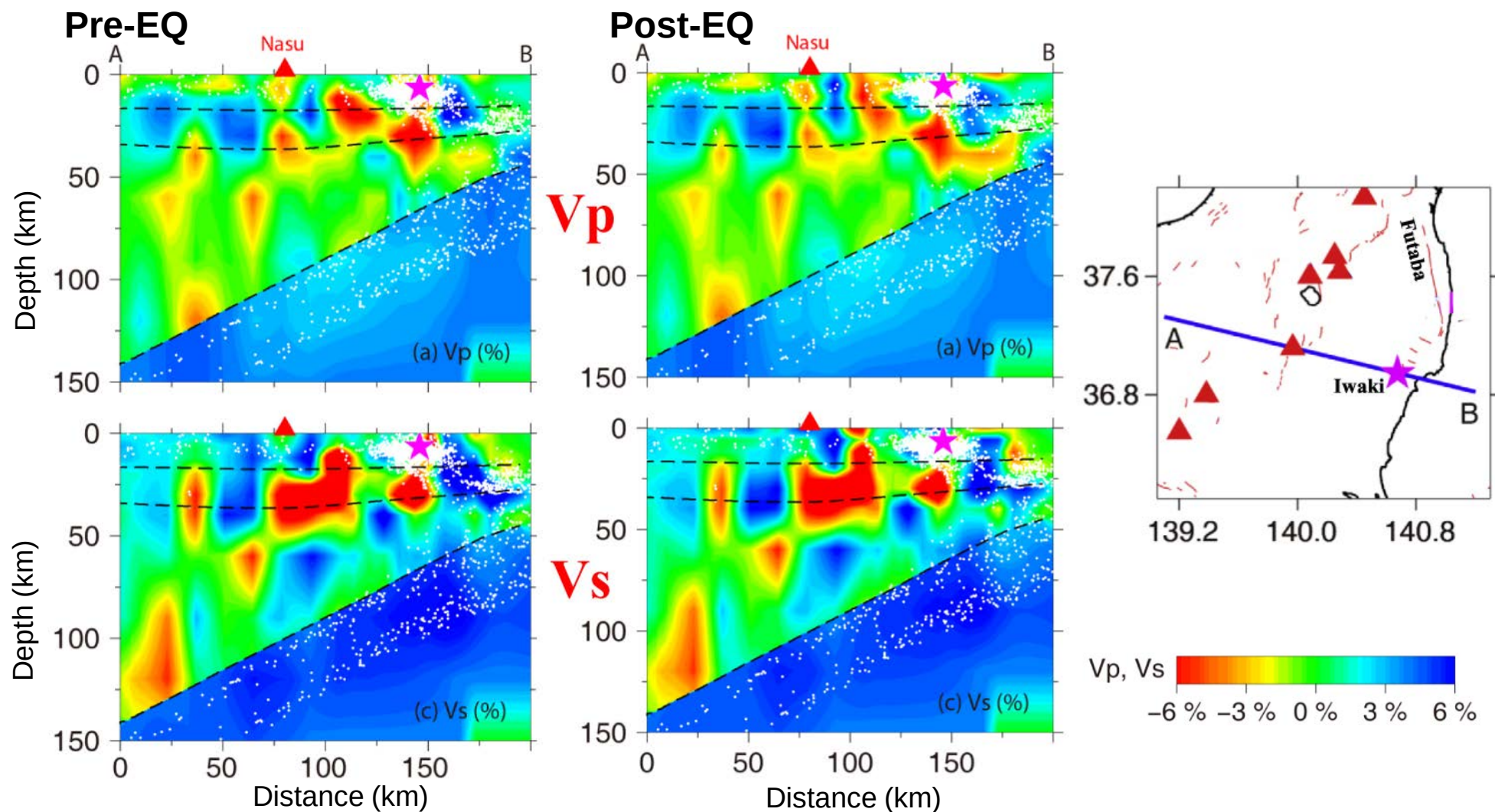
- 東北地方太平洋沖地震によって、いわき周辺の地殻全体が伸び、割れ目が開口し水位が低下。
- 福島県浜通りの地震に関連する断層運動によって、断層の東側の地殻の短縮によって水圧が上昇し、地下水が地表から湧出。
- ✓ しかしながら、東北沖地震から5年が経過した現在でも群発地震や湧水が継続。

稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術



- 福島県浜通り～茨城県北部の群発地震下の下部地殻に低比抵抗体(C1)が存在する。
- 地震波トモグラフィーの低速度域と低比抵抗体(C1)の分布は整合的である。

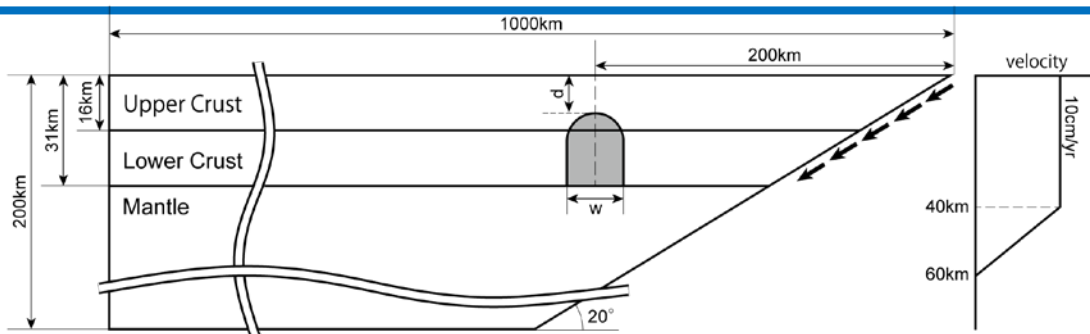
稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術



3/11前後の福島県浜通りの地震波速度構造(Vp,Vs)鉛直断面(Zhao, 2015)

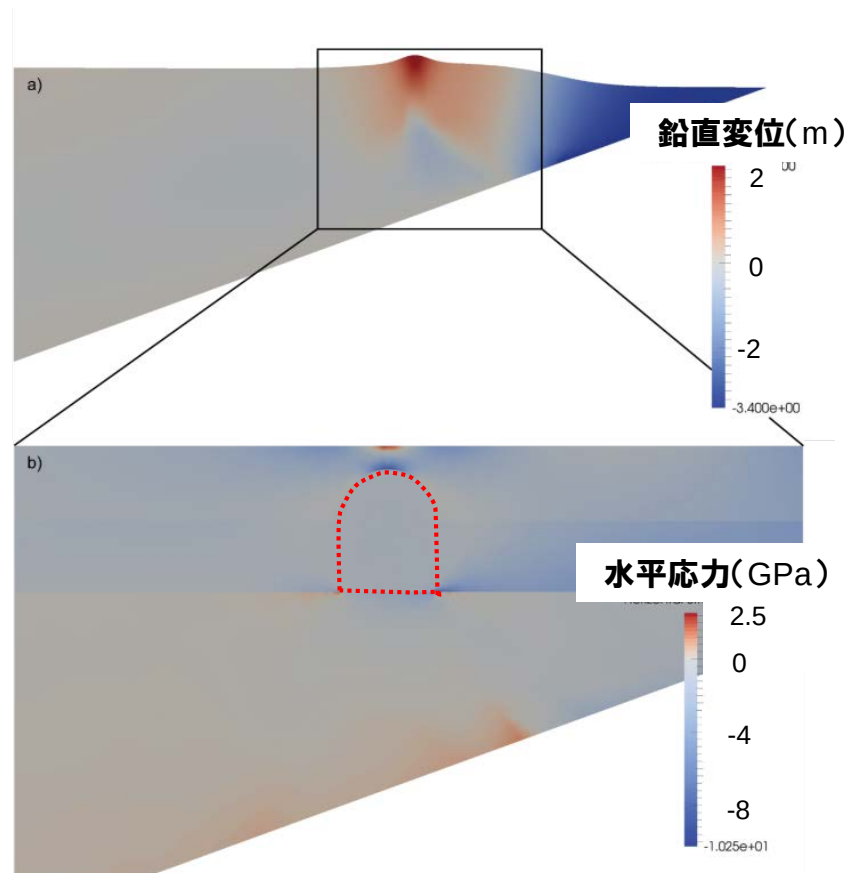
- 東北沖地震前後の地震波速度構造に違いは認められない。⇒低比抵抗体も地震前から存在？

稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術



二次元有限要素法による粘弾性シミュレーション(Pylith: Aagaard et al., 2013)

領域	パラメータ	値
上部地殻 (UC) 弾性体	P波速度 (V_{pUC})	5850 m/s
	S波速度 (V_{sUC})	3350 m/s
	密度 (ρ_{UC})	2725 kg/m ³
下部地殻 (LC) 弾性体	P波速度 (V_{pLC})	6600 m/s
	S波速度 (V_{sLC})	3700 m/s
	密度 (ρ_{LC})	2950 kg/m ³
マントル (M) 粘弾性体	P波速度 (V_{pM})	7800 m/s
	S波速度 (V_{sM})	4200 m/s
	密度 (ρ_M)	3250 kg/m ³
	粘性係数 (η_M)	10^{19} Pa · s
低比抵抗域 粘弾性体	含水率 (θ)	0.01
	P波速度	$0.94V_{pBG}^*$
	S波速度	$0.94V_{sBG}^*$
	密度	$1000\theta + (1 - \theta)\rho_{BG}^*$
	粘性係数	10^{18} Pa · s



深部流体分布域の幅20km, 上端深さ5km, 粘性係数を 1.0×10^{18} Pa · s として, 100年間の地殻変動を計算

- 低比抵抗体上の地殻浅所では引張応力場で鉛直上向きの変位が卓越(観測事実を概ね再現)。
- ⇒ 深部流体等の存在や分布は, 地質環境の長期安定性を検討する際には重要な指標となる。

地質環境の長期安定性に関する研究(第3期中長期計画)

自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を、地球年代学に係る最先端の施設・設備も活用しつつ整備する。

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

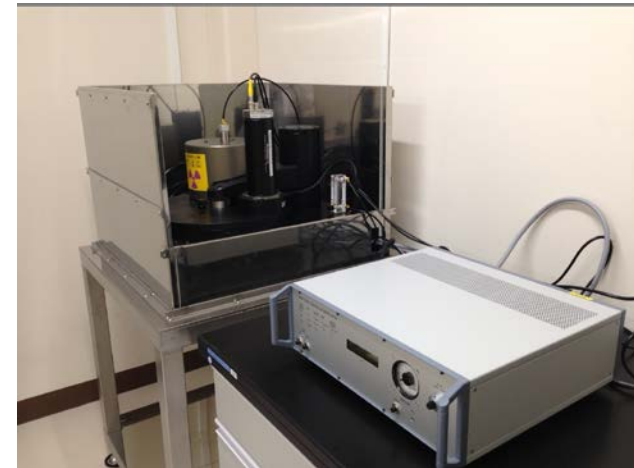
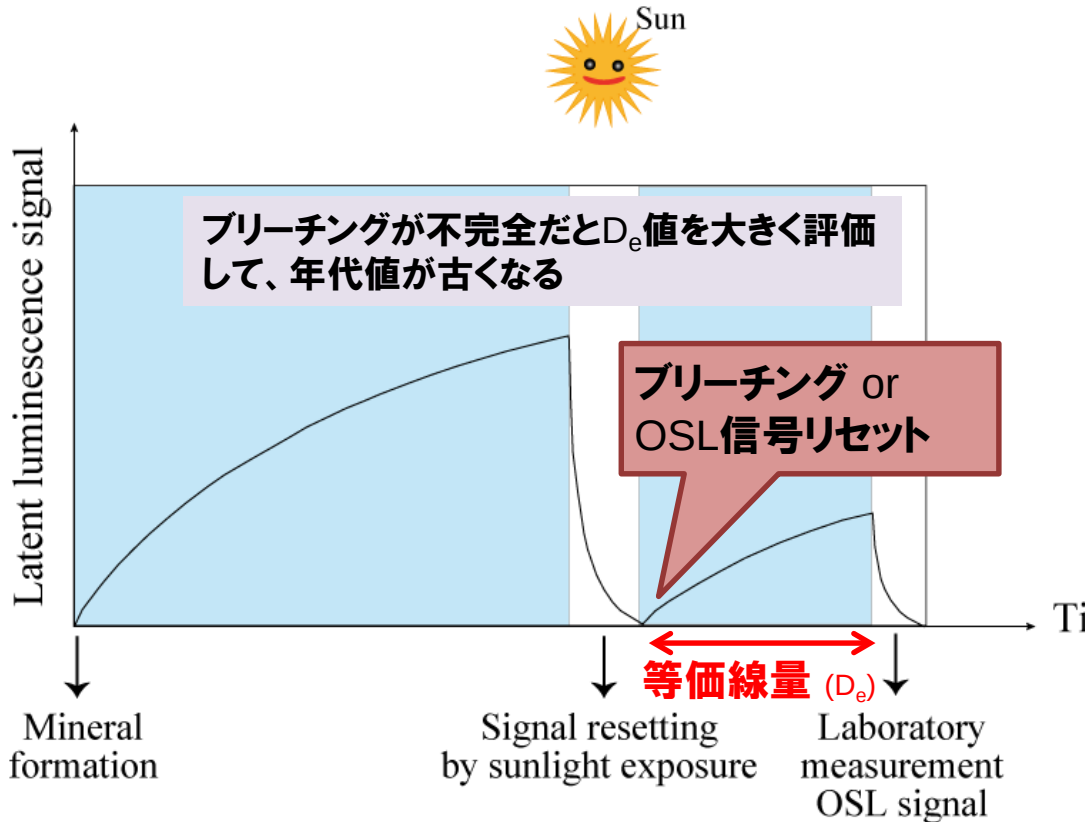
- ②-1) 稀頻度自然現象による地質環境への影響の評価技術
- ②-2) 時間スケールに応じた地圏環境変動の予測技術

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) 希ガス同位体を用いた地下水年代測定法の実用化

光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化

- ある波長の光を鉱物・結晶にあてたときに、不対電子が再結合することによってそれらが発光する現象
- OSL年代測定法では、鉱物が自然放射線を浴びることで、鉱物結晶内に生成される不対電子が時間とともに増加する現象を利用している



(Risø DTU製 TL/OSL DA-20)

年代値の求め方

$$\text{OSL年代値} = D_e / \text{Dose rate}$$

D_e: equivalent dose: 等価線量 (Gy)

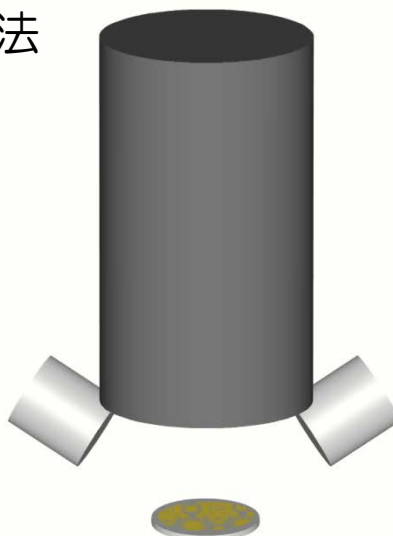
Dose rate: 年間線量 (Gy/kyr)

特長

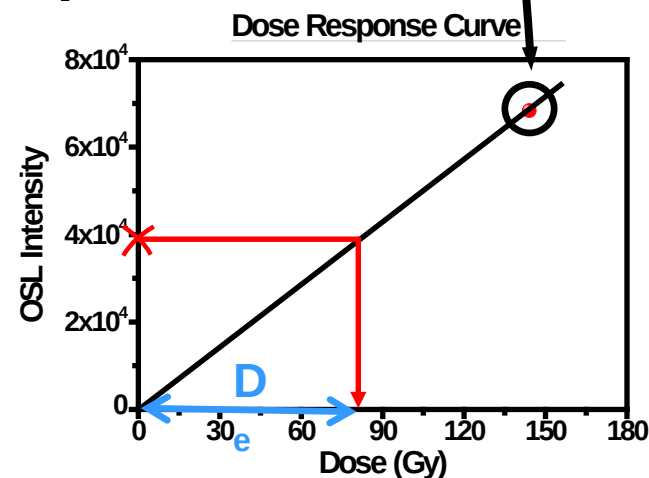
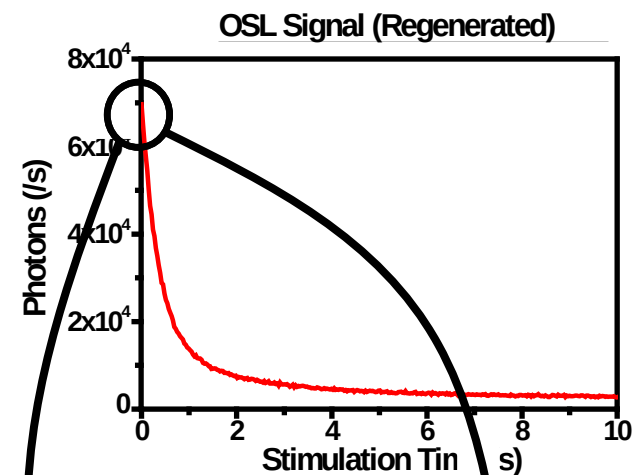
- 堆積物に普遍的に存在する鉱物(石英、長石)を用いて、**堆積年代を直接測定**することができる
- 十数万年前～数十年前の年代を測定することができる

光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化

Single aliquot regenerative dose (SAR)法

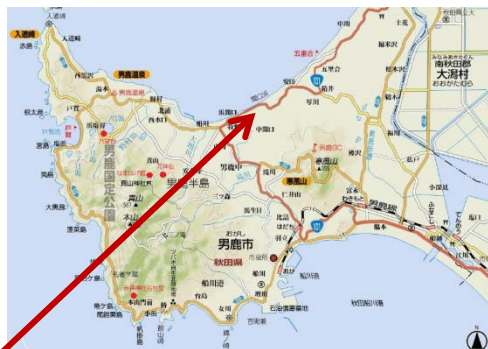


- 試料を励起し, Natural信号を測定する
- 人工放射線を照射する
- 試料を測定し, 再生された信号を測定する
- 再生された信号から放射線応答曲線を求め, Natural信号をあてはめて D_e 値を得る.

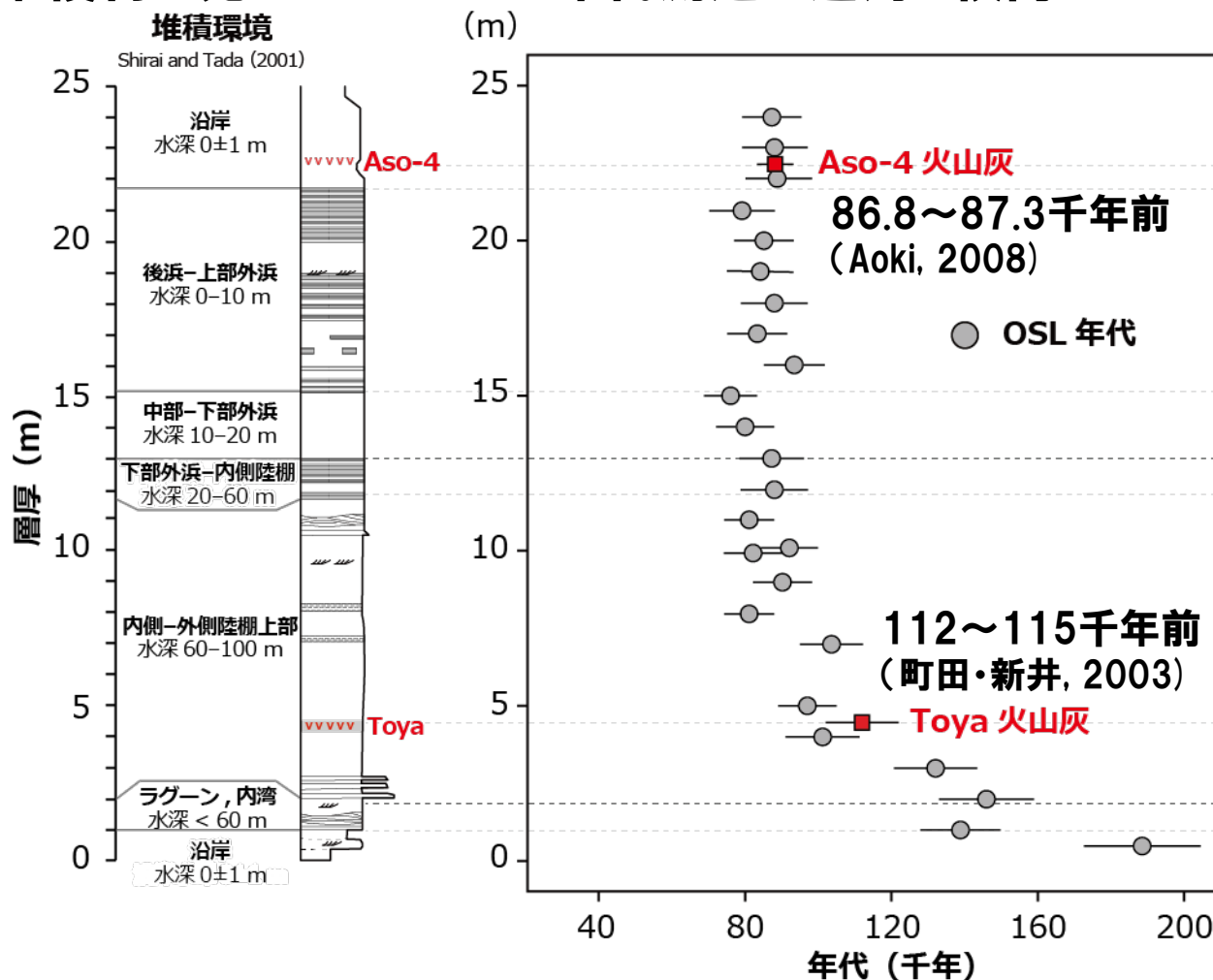


光ルミネッセンス(OSL)年代測定法の実用化

長石を用いた海成段丘堆積物の光ルミネッセンス年代測定の適用を検討



海成段丘堆積物の露頭
(男鹿半島の安田海岸)



- 連続的な長石の光ルミネッセンス年代値は火山灰層序と調和的。
- ⇒ 火山岩起源の長石を用いた光ルミネッセンス年代測定は海成段丘堆積物の対比に有効

平成28年度計画(案)

① 調査技術の開発・体系化

- 断層充填物質の鉱物学的・地球化学的データによる活動性評価の検討
- 沿岸域におけるマグマ・深部流体等の調査技術の検討

② 長期予測・影響評価モデルの開発

- 南九州を事例とした測地学・地形学・地質学データの収集・解析
- 地質環境変動モデルの構築(地形・地質, 水理, 地球化学モデルの統合化)

③ 年代測定技術の開発

- ^4He 法による地下水年代測定および ^{14}C 法によるクロスチェック
- ジルコンのU-Pb年代測定法の実用化
- ^{26}Al 年代測定法の実用化