



2014年度バックエンド週末基礎講座

地層処分と地質環境の長期安定性

平成26年10月19日（於：電力中央研究所）

（独）日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門

浅 森 浩 一

1

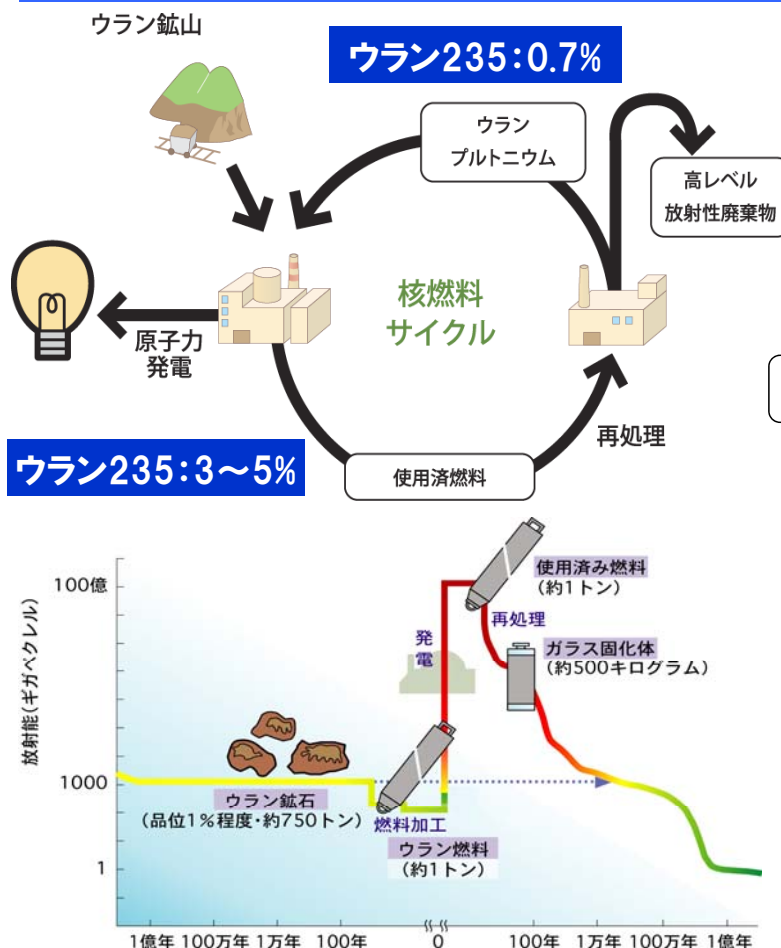
本日の講義内容



- 我が国における地層処分の安全確保の考え方
- 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- サイト選定や安全性の検討に際して考慮すべき時間スケール
- ネオテクトニクスと将来予測の考え方
- 地質環境の長期安定性に関する研究開発の現状

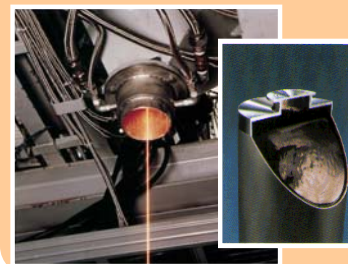
2

核燃料サイクルと高レベル放射性廃棄物の地層処分

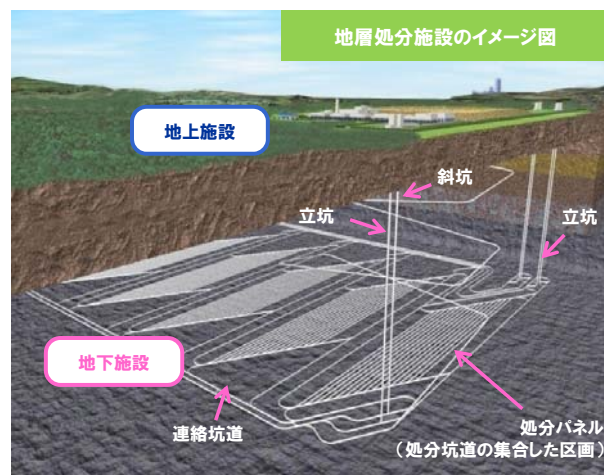


ストロンチウム90
コバルト60
セシウム135
セレン79
ネプツニウム237など

ガラス固化



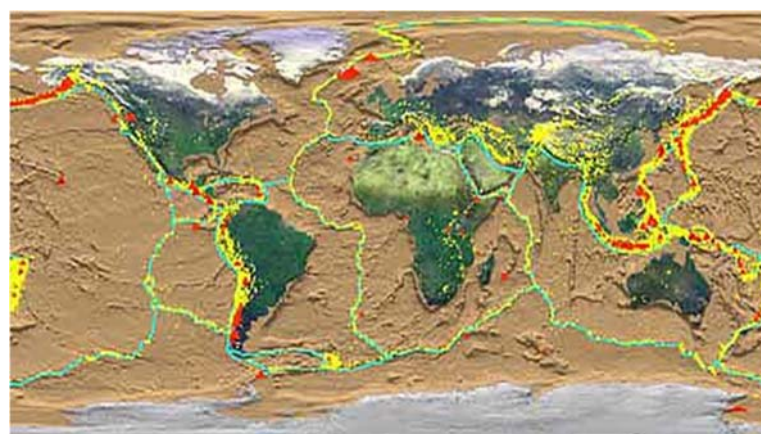
地下300m以深の地層の中に埋めて処分



出典:原子力発電環境整備機構(NUMO)

3

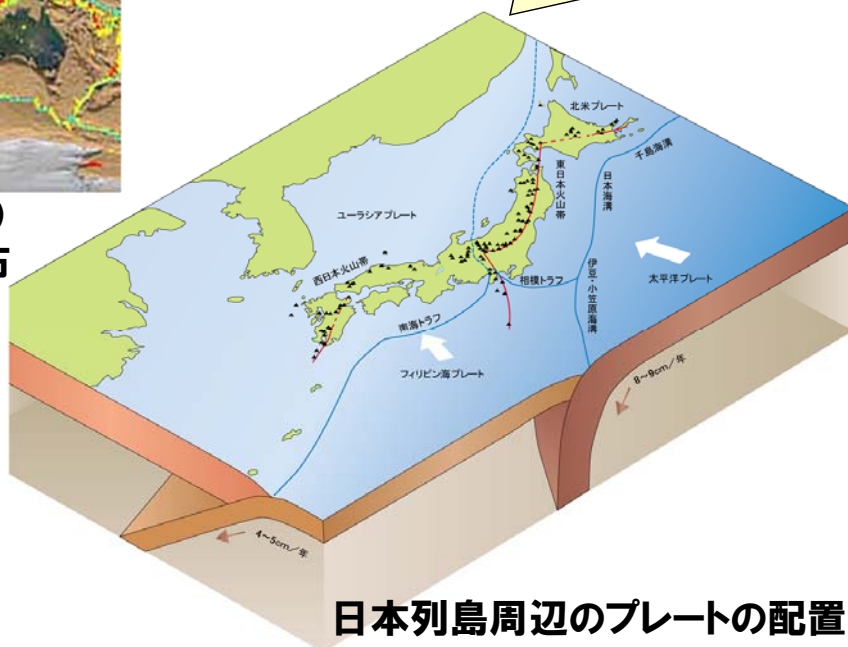
環太平洋造山帯に位置する日本列島



地球上のプレート境界と地震(●)
・火山(●)の分布

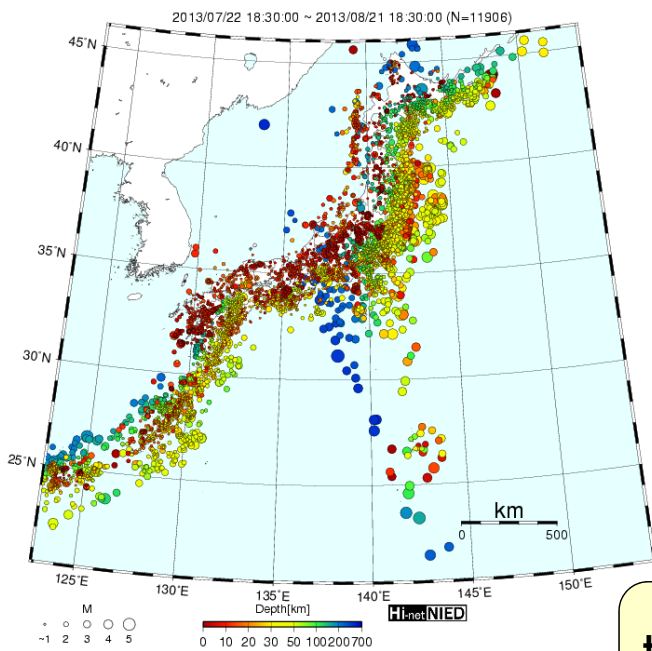
日本付近で発生する地震のエネルギーは、世界中で起きている地震のエネルギーの約10%にもなる。また、世界中の活火山のうちの1割が日本に存在する。

日本列島は、プレートの沈み込み帯に位置する。

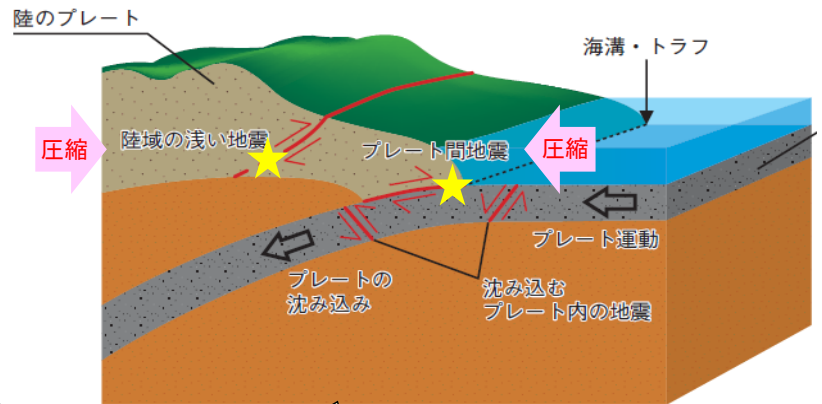


4

プレート運動と地震・断層



日本列島および周辺における1ヶ月間の地震活動(防災科学技術研究所)

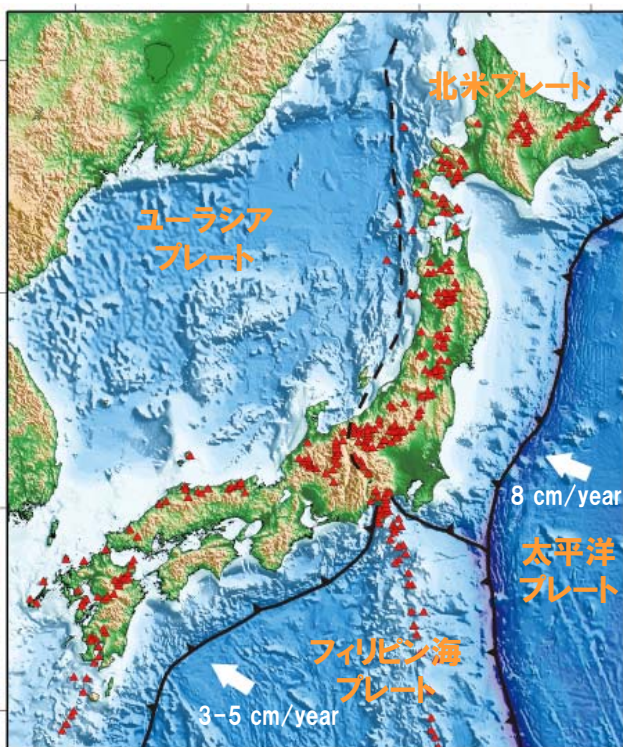


地震の発生にはプレートの沈み込みが深く関与

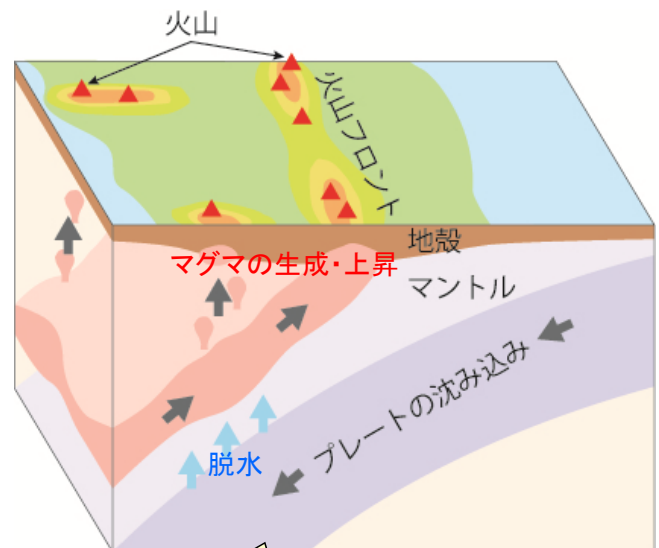


5

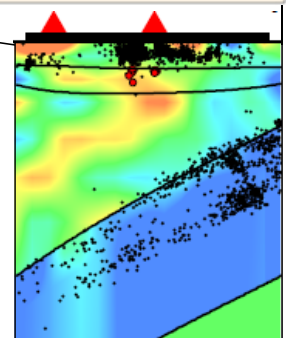
プレート運動と火山



日本列島のプレート配置と第四紀火山の分布



マグマの生成・火山の形成にはプレートの沈み込みが深く関与



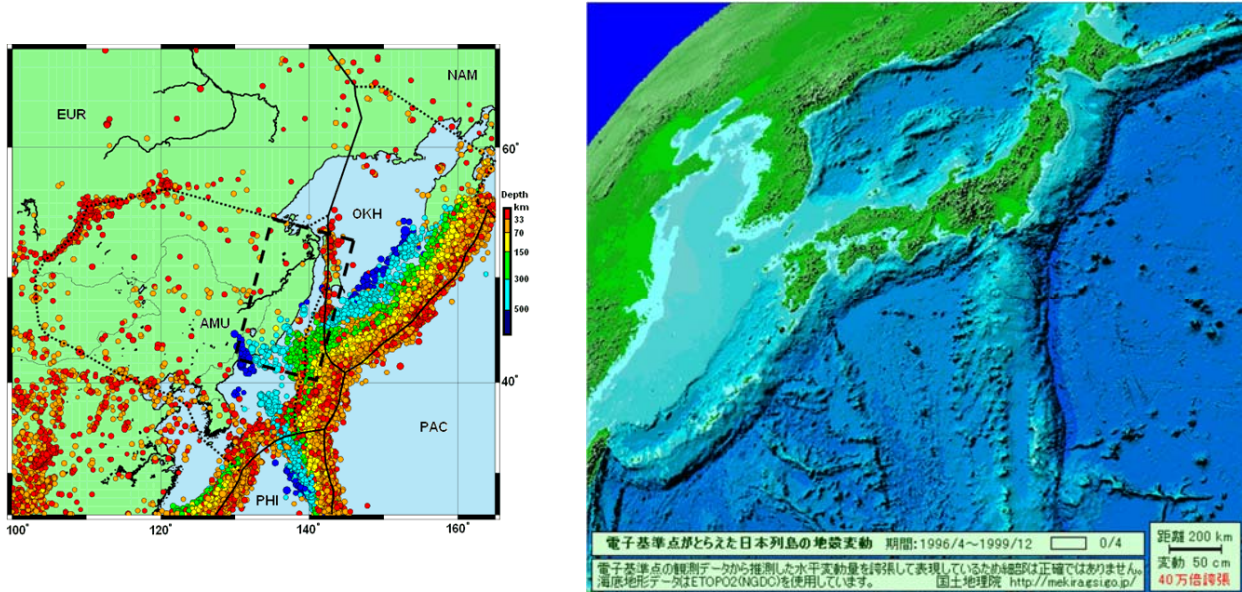
Nakajima et al. (2001) 6

プレート運動と圧縮テクトニクス

【第四紀テクトニクスの特徴】(松田・衣笠, 1988)

第四紀は新第三紀(数～10数Ma)に比べて特異な時代である。

①増起伏, ②陸化, ③断裂, ④高変形速度→圧縮テクトニクス→プレート衝突



日本列島の第四紀の地殻変動は、それまでの太平洋・フィリピン海プレートの北西～西方向への沈み込みに加えて、第四紀初頭に開始したアムールプレートの東方向の運動が関連していると考えられている。

* 1996年4月～1999年12月のGPSで観測された日本列島の地殻変動(変動を40万倍に誇張: 120万年間に相当)

我が国における地層処分の安全確保の考え方

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

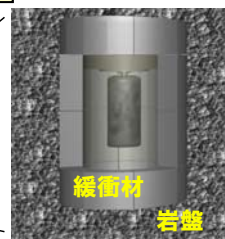
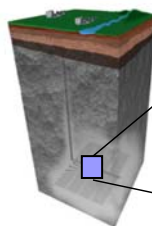
・人間環境との離間距離の短縮
例) マグマ貫入・噴火, 急激な削剥
(接近シナリオ)

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
例) 地殻変動に伴う地形変化
(変動シナリオ)

対策

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**)



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**)

地層処分システムが備えるべき性能を確保

安全性の確認

構築された地層処分システムの安全性を評価(**安全評価**)

地層処分研究開発の展開と成果の反映

地層処分研究開発の開始(1976年)

地層処分の技術的可能性(第1次取りまとめ(1992年9月))

地層処分の技術的信頼性(第2次取りまとめ(1999年11月))

原子力長期計画(2000年11月)等

地層処分技術の
信頼性向上等
(基盤的な研究開発)

成果

処分事業

最終処分法制定

原環機構設立

概要調査地区等の選定

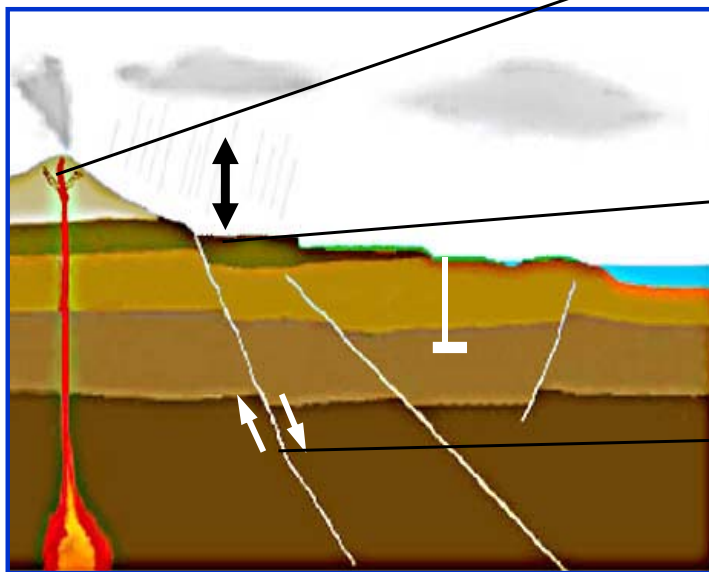
安全規制

安全規制の
基本的考え方

指針・基準
等の策定

9

地層処分において考慮すべき自然現象



【火山・地熱活動】

- ・マグマの貫入・噴出による廃棄体の破壊
- ・地温上昇・熱水対流の発生, 熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化 等

【隆起・侵食/気候・海水準変動】

- ・処分施設及び廃棄体の地表への接近
- ・地下水の流動特性や水質の変化による放射性物質の移行 等

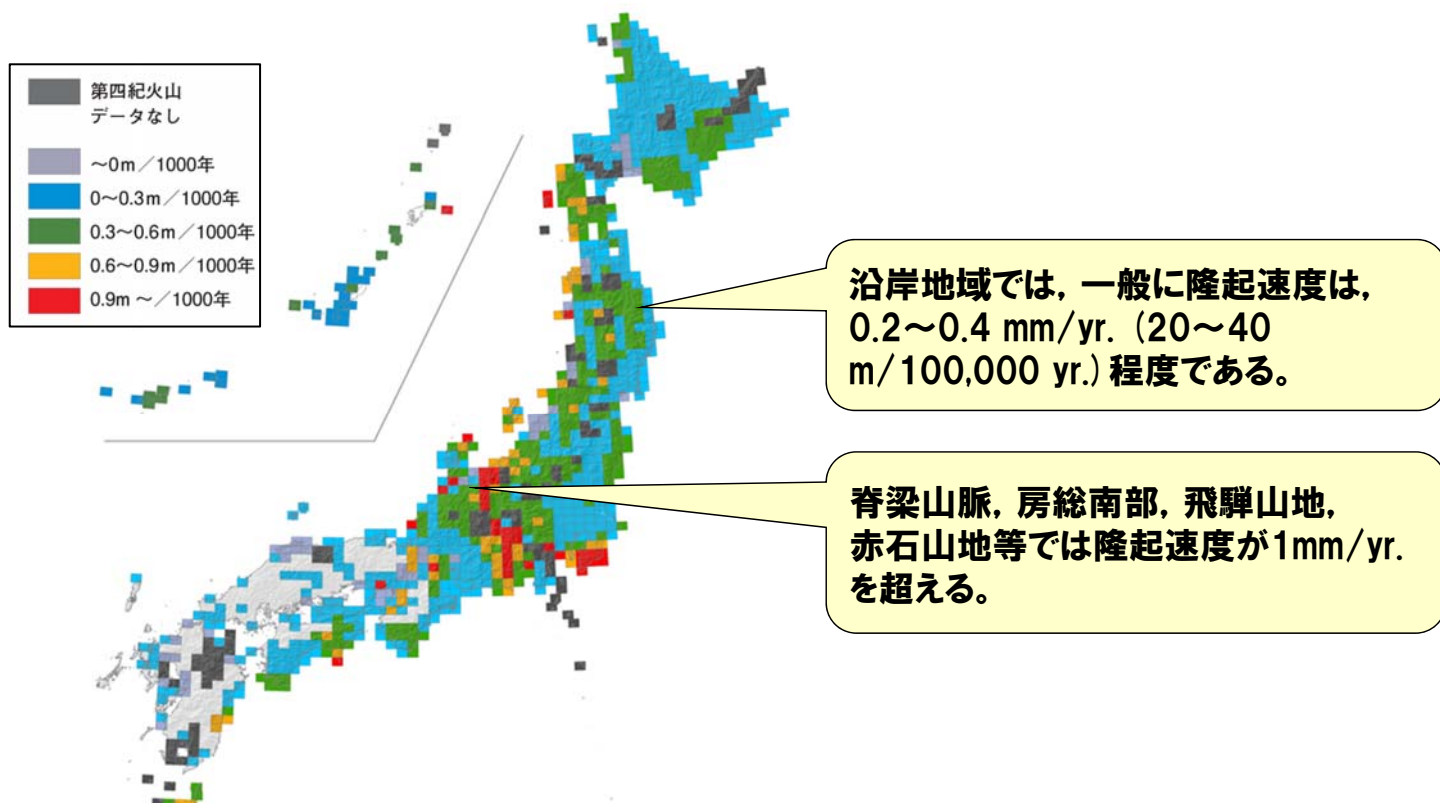
【地震・断層】

- ・岩盤の破断・破砕による処分施設及び廃棄体の破損
- ・岩盤の破断・破砕による地下水移行経路の形成, 岩盤歪に起因する地下水圧の変化 等

(原子力委員会バックエンド対策専門部会, 1997)

10

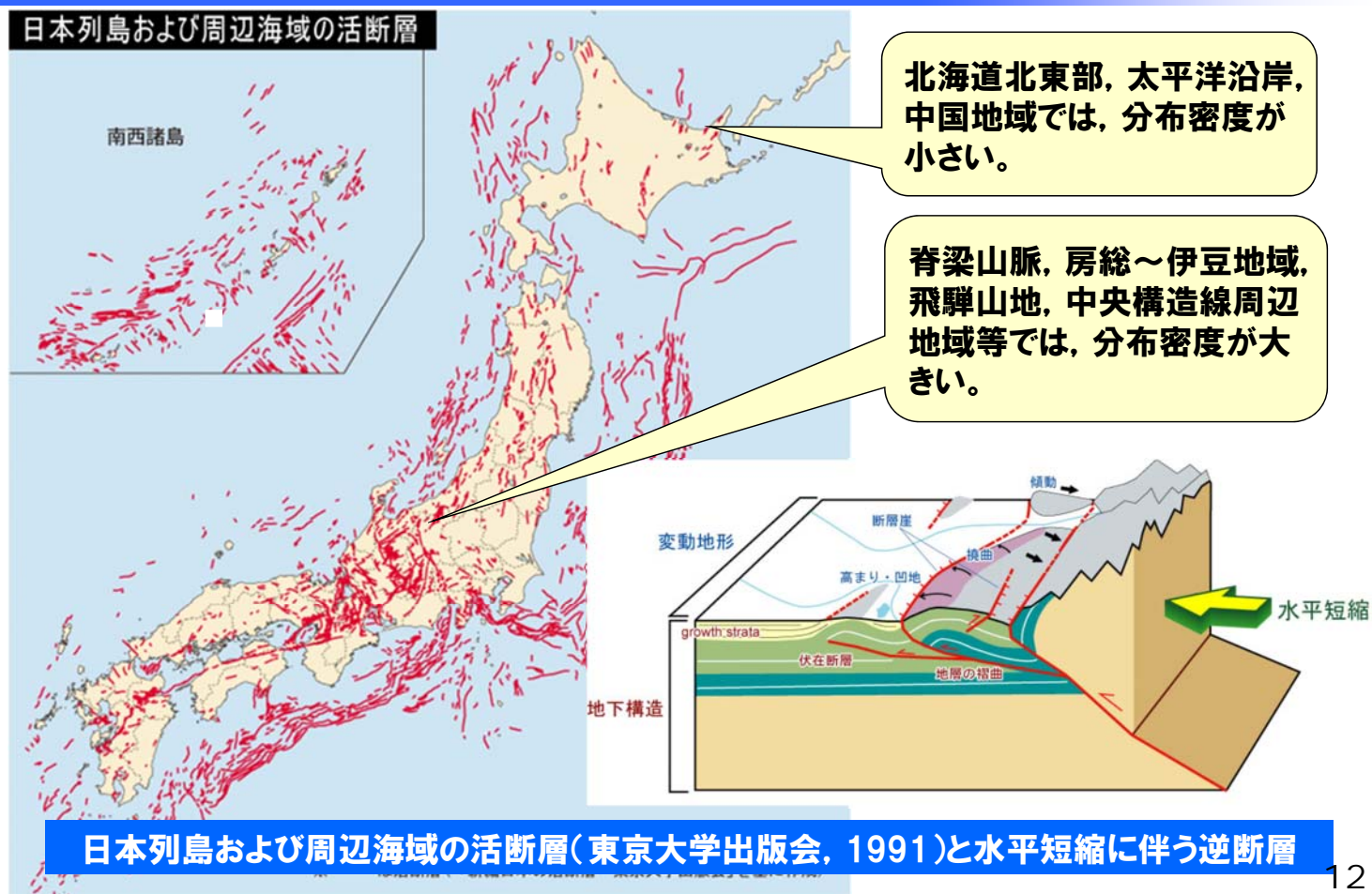
日本列島の隆起・沈降運動の特徴



日本列島の最近10万年間の隆起速度(藤原ほか, 2004)
海成段丘・河成段丘堆積物の年代および段丘面の比高から計算した。

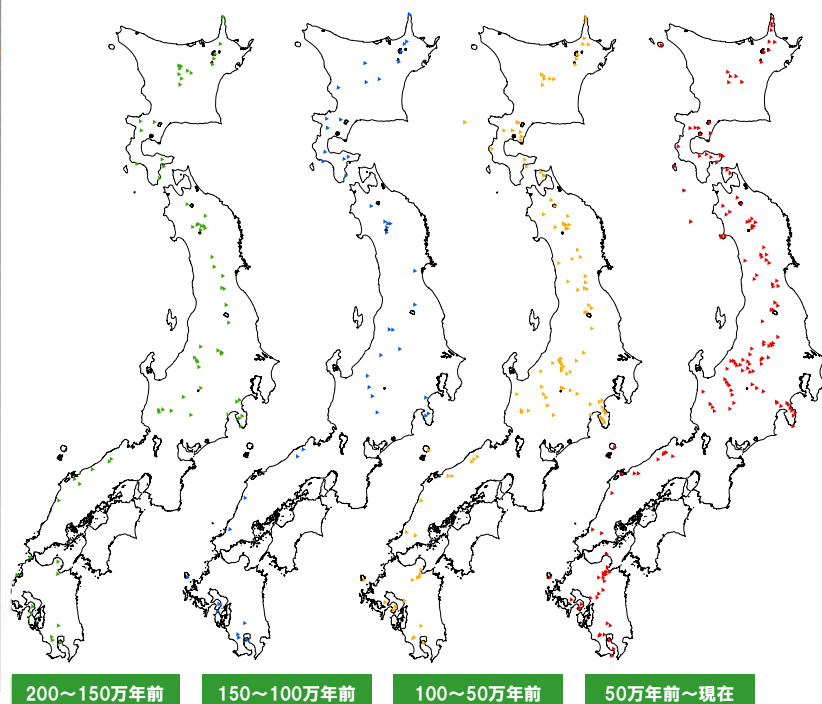
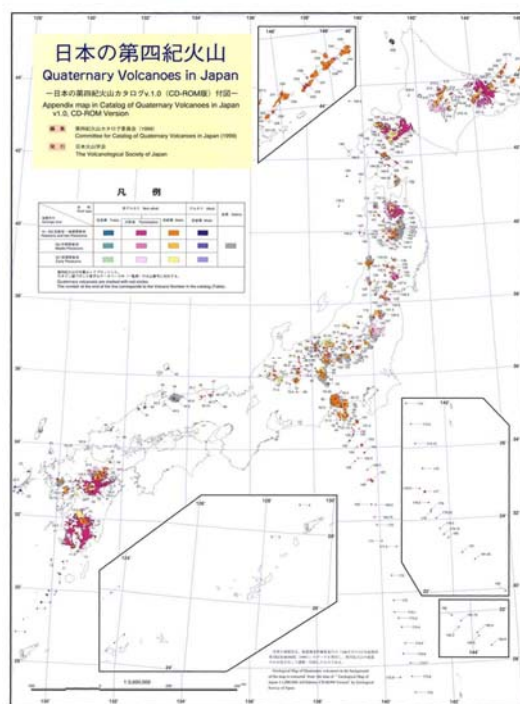
11

日本列島の断層運動の特徴



12

日本列島の火山活動の特徴

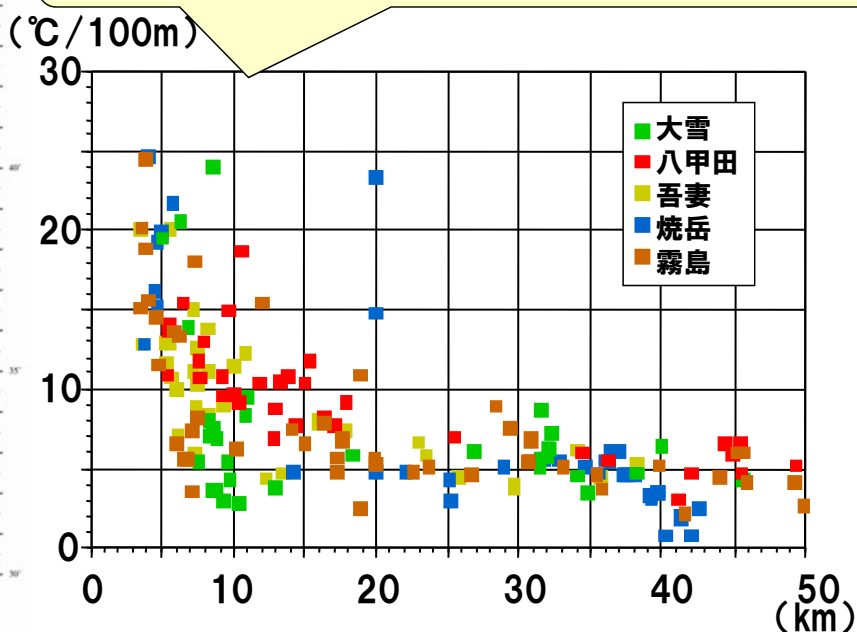
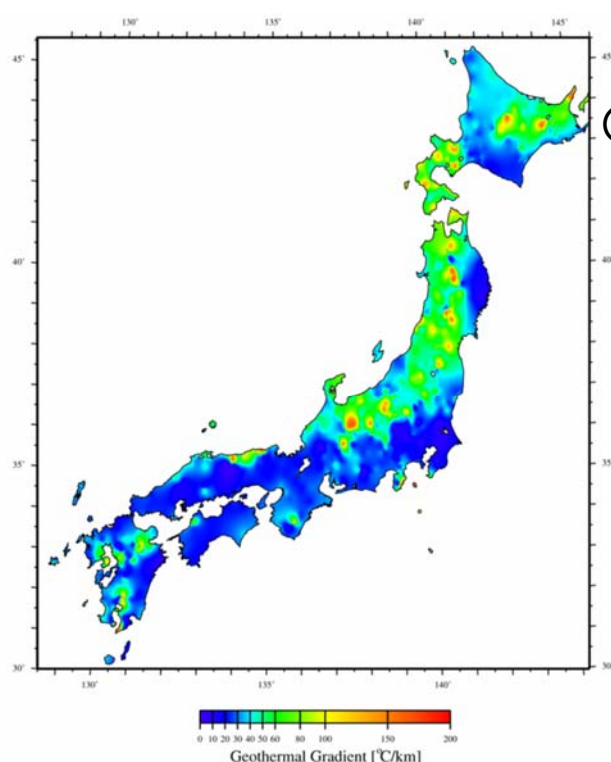


日本列島の50万年ごとの火山の発生の状況(日本火山学会, 1999を基に作成)
日本列島の第四紀火山の体積, 噴出物の分類, 噴火年代などの情報をまとめたデータベースを作成。
第四紀火山は, 200万年以降, 東日本火山帯および西日本火山帯に偏在して発生している。

13

火山活動が地質環境に及ぼす影響(地熱)

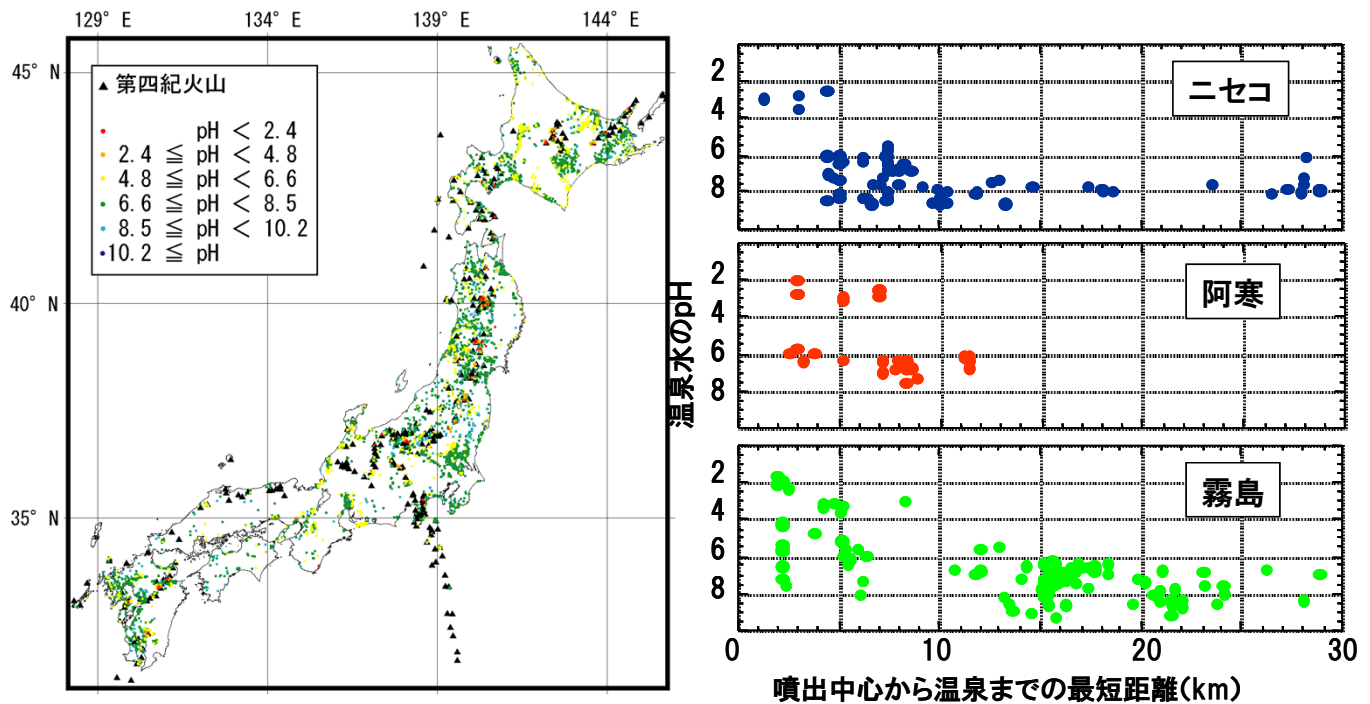
火山活動に伴う熱的な影響は, 個々の火山によって異なるものの概ね20~30kmの範囲に限定される。



日本列島地温勾配図と火山周辺の坑井の地温勾配(梅田ほか, 1999)
高温異常の背景となるバックグラウンドは東日本で3~5°C/100m, 西日本で2°C/100m程度である。また, 火山周辺の地温勾配値は一般的に高いが, 噴出中心から離れるにしたがって低減。

14

火山活動が地質環境に及ぼす影響(水質)



日本列島温泉pH分布と火山周辺の温泉の距離とpHの関係(浅森ほか, 2002)
火山周辺の温泉水のpHは、一般的に低く(酸性), 噴出中心から離れるにしたがって中性に変化する。
pH<4.8の酸性地下水は、噴出中心より概ね数km~20kmの範囲に多く分布する。

15

「第2次取りまとめ」の結論・評価(原子力委員会, 2000)

地震・断層活動, 火山・火成活動のような急激かつ局所的な自然現象については、活動地域の時間的な変化や地質環境への影響に関する過去の事例調査の知見に基づき、その**活動及び影響の範囲が限定**されることが明らかにされている。

☞ **サイト選定に反映(処分システムへの著しい影響の回避)**

隆起・沈降・侵食, 気候・海水準変動のような緩慢かつ広域的な現象については、変動の規模及びその地域性や周期性に関する知見に基づき、**個々の地域における変動量が概ね推定**できることから、想定される変動を考慮して、地層処分システムの設計や安全評価に反映できることが示されている。

☞ **工学的対策・安全評価に反映(将来の変動幅の予測)**

16

我が国における地層処分の安全確保の考え方

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

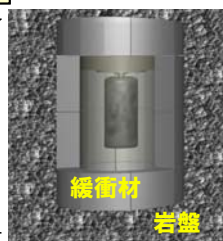
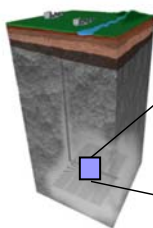
・人間環境との離間距離の短縮
例) マグマ貫入・噴火、急激な削剥
(接近シナリオ)

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
例) 地殻変動に伴う地形変化
(変動シナリオ)

対 策

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**)



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**)

どの位の将来の安全性を
考えればいいの？

地層処分システムが備えるべき性能を確保

安全性の確認

構築された地層処分システムの安全性を評価(**安全評価**)

17

概要調査地区等の選定(特に評価期間)に係る動向

【特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律, H12. 6】

①地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと。②将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること。

【高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について, 原子力安全委員会, H14. 9】

①対象地域の隆起・侵食量から処分場及びその周辺の地質環境に対し著しい変動をもたらすおそれ、②処分施設を合理的に配置することが困難となるような活断層の存在、③第四紀に活動したことのある火山の存在が文献調査で明らかな地域は、これを概要調査地区には含めない。

【概要調査地区選定上の考慮事項, 原子力発電環境整備機構, H14. 12】

①文献に示されている活断層がある場所は含めない、②将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮し、第四紀火山の中心から半径15kmの円の範囲内にある地域は含めない、③過去10万年間の隆起の総量が300mを超えていることが明らかな地域は含めないように概要調査地区を選定する。

18

地層処分の安全規制(特に評価期間)に係る動向

【高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第1次報告), 原子力安全委員会, H12. 11】

一般公衆に対する評価線量が最大となる時期(10^5 年以上)においても, 基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することが基本である。

【高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会, H15. 7】

評価期間が長期になると, 処分システム領域に対する外乱の発生予測の不確実性が増加することに起因して, 計算結果の信頼性が低下する可能性もある。評価期間の設定に際しては, 計算上のピーク発生時期と関連する外乱事象発生の予測可能性とを併せ考慮していく必要がある。

【放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 原子力安全委員会, H16. 6】

評価期間が長いことによって派生する不確実性等については, シナリオの発生の可能性を踏まえた放射線防護の基準を検討することが重要(→ 余裕深度処分)。超長期の防護基準については, 天然の放射能濃度との相対的比較等の補完的指標も考慮すべきである。

19

地質学的現象の将来予測の方法論

1) 外挿法による予測

過去から現在までの変動の履歴を検討し, そのなかから時間的, 空間的な変動の普遍性, 法則性を見いだすことによって, その傾向を将来に延長(外挿)して予測する方法。プレート運動の枠組みで生じる永続性がある現象には, 外挿法が特に有効(日本地質学会, 2011)。

2) 類推法による予測

予測しようとする現象と類似の事例を過去のデータから探索し, そのアナロジーによって将来の変動を予測する方法。

3) 確率論による予測

過去から現在までに発生した現象の発生頻度, 規模と範囲等から将来の発生確率を求める方法。

4) モデルを用いたシミュレーションによる予測

現象に関与する物理法則を見いだして, 物理(数学)モデルを作成し, それを用いた数値実験によって予測を行う。

20

【ネオテクトニクス】(Wegmann, 1955)

現在進行中の変動およびそれと同様な特性の続く最近の時代の変動。
なお、最近の時代の範囲は地球上の地域によって異なる。

【第四紀後期の地殻変動】(垣見・松田, 1987)

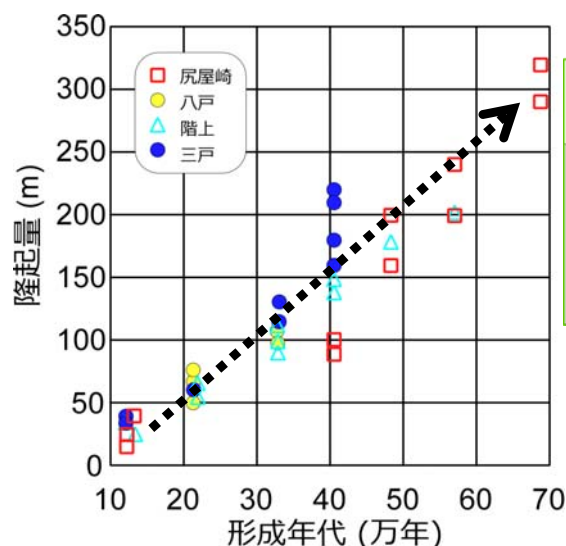
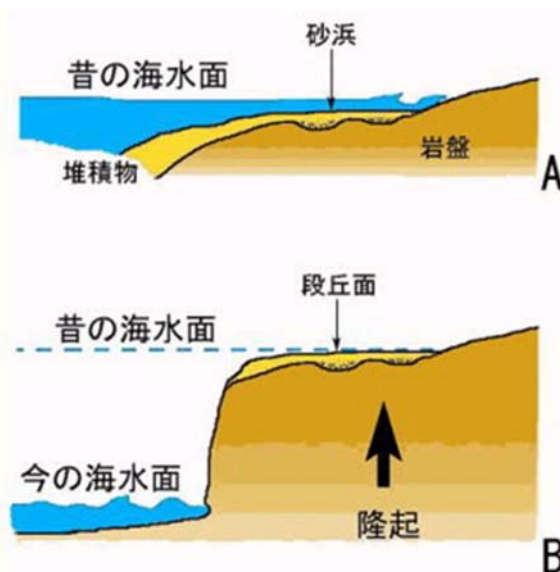
- ① 第四紀を通じて一方向に進行してきた(変位の累積性)
- ② その運動方向はほぼ等速的であった(速さの一樣性)
- ③ その運動をもたらした応力場は第四紀を通じて持続している(地殻応力の持続性)
- ④ 地殻変動は地域ごとに特有のくせをもっている(変動様式の地域性)

【地殻変動の一樣継続性に基づく外挿による予測の考え方】

第四紀後期の地殻変動の一樣継続性(変位方向の一樣性, 変位の等速性)が成立している場合には, 過去から現在までの変動傾向・速度を同程度の将来まで外挿することは可能である(松田, 1987, 1988)。

21

第四紀後期の地殻変動の一樣継続性の例



下北半島の海成段丘の形成年代と高度の関係
(核燃料サイクル開発機構, 1999)

➤ 段丘からみた過去数十万年間の変動の方向・速度はほぼ一定

22

外挿法による地質学的現象の予測可能性の検討

外挿法による予測が可能な期間を検討するためには、現在のネオテクトニクスの枠組みの中で変動の一様継続性(変位方向の一様性, 変位の等速性)がどの地域でいつ頃に成立したかを地形・地質学的な情報から検討する必要がある。

【パラメトリックな時系列解析モデルによる予測可能性】

過去から現在までの現象の履歴が、どのような相互関係があったか(自己回帰性)を解析し、その関係性が比較的短い時間は継続すると仮定して、予測値として取り扱う方法。

時系列解析モデル(例えば、自己回帰移動平均モデル)の研究例によると、**過去の期間(N)**に成り立っていた関係性(定常性)は、将来になればなる程、その関係性そのものが変化していると考えられるので、 **$0.1N \sim 0.2N$ 程度**であれば関係性が継続する確率が高いと考えられている。

23

日本列島の第四紀の隆起・沈降運動

- 上部更新統(1万年前以降に隆起)
- 中部更新統(12.5万年前以降に隆起)
- 下部更新統(78万年前以降に隆起)
- 上部中新統～鮮新統(約260万年前以降に隆起)

78～12.5万年前に海域で堆積した地層が現在、陸域に分布
⇒
12.5万年前以降に隆起した証拠

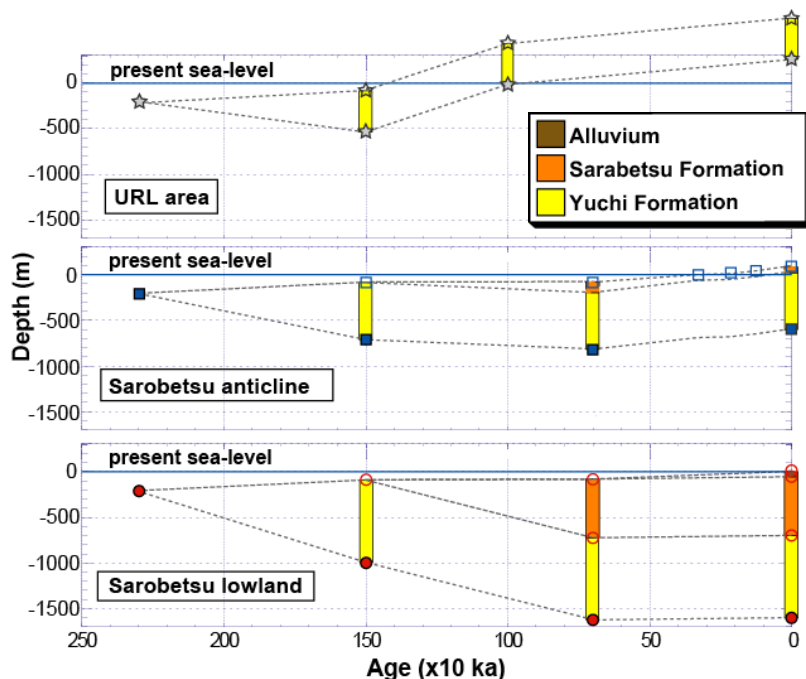
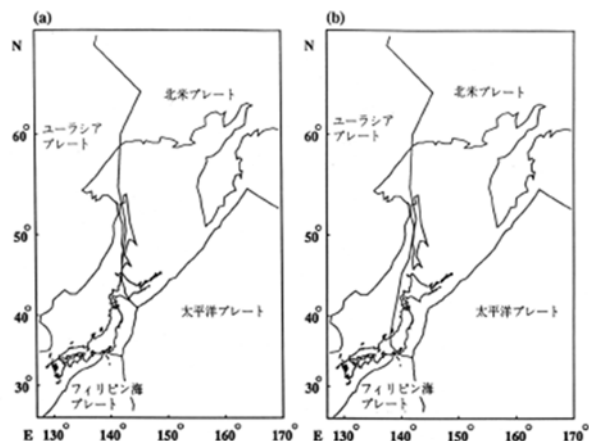
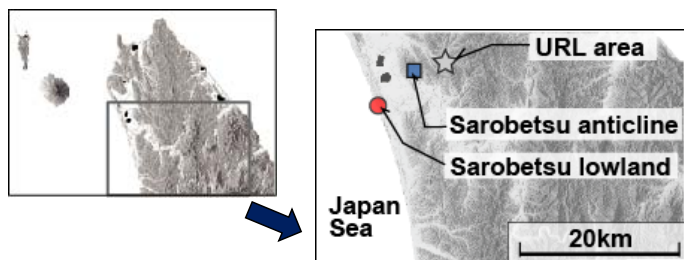


日本列島の第四系(上部～下部更新統)分布図

日本列島の沿岸域では、第四紀(約260万年前以降)になって沈降場から隆起場に変動方向が反転している地域も存在。

24

沈降場から隆起場への転換の事例（幌延の例）

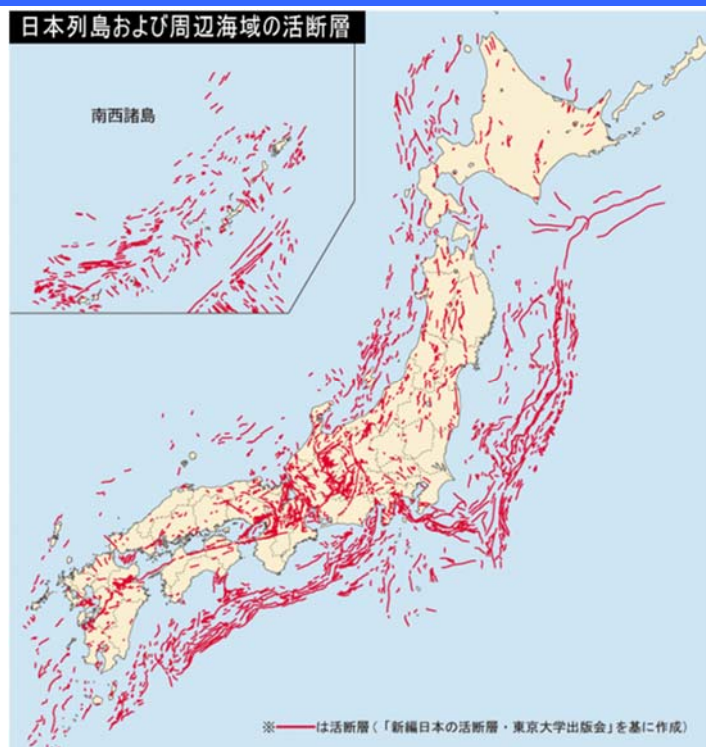


50万年前のプレート境界のジャンプ(瀬野, 1997) 幌延地域の250万年以降の地殻変動(梅田ほか, 2013)

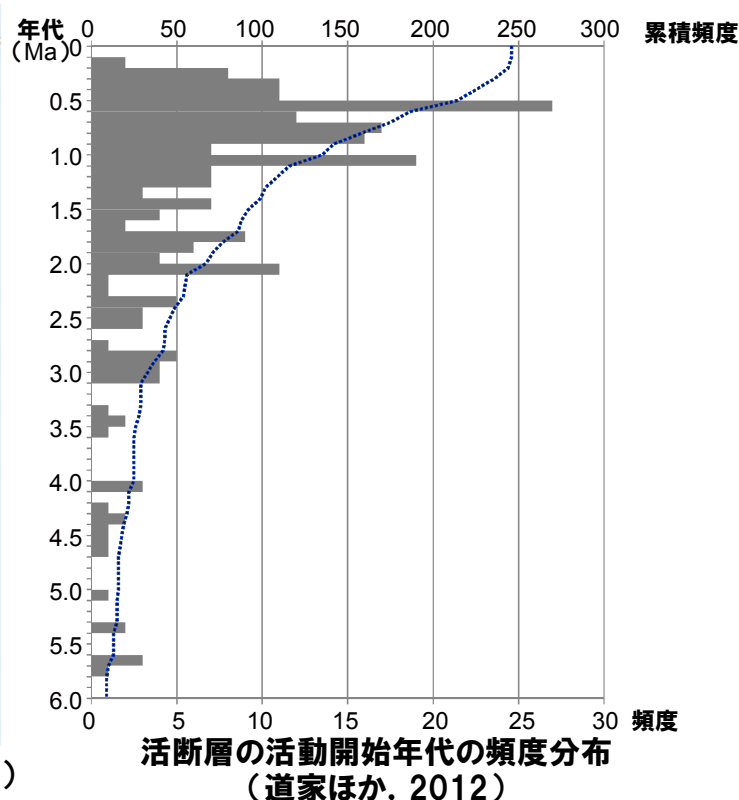
幌延地域では、約50万年前頃に沈降場から隆起場に地殻変動のセンスが逆転。中期更新世にはユーラシア・北米プレートの境界が北海道中軸部(日高山地付近)から日本海東縁(幌延の沖)にジャンプしたというモデル(仮説)が提唱されている。

25

活断層の活動の開始時期



日本列島の活断層の分布(活断層研究会編, 1991)

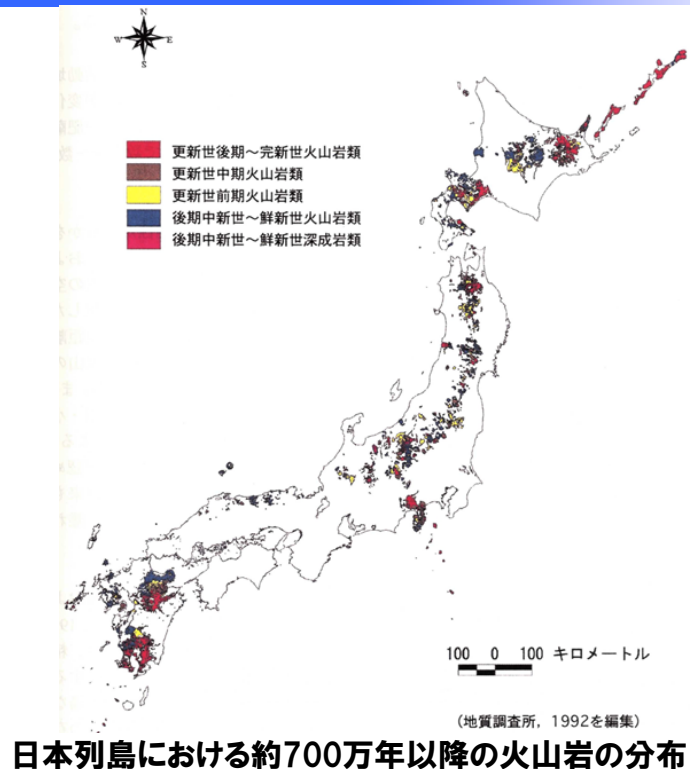
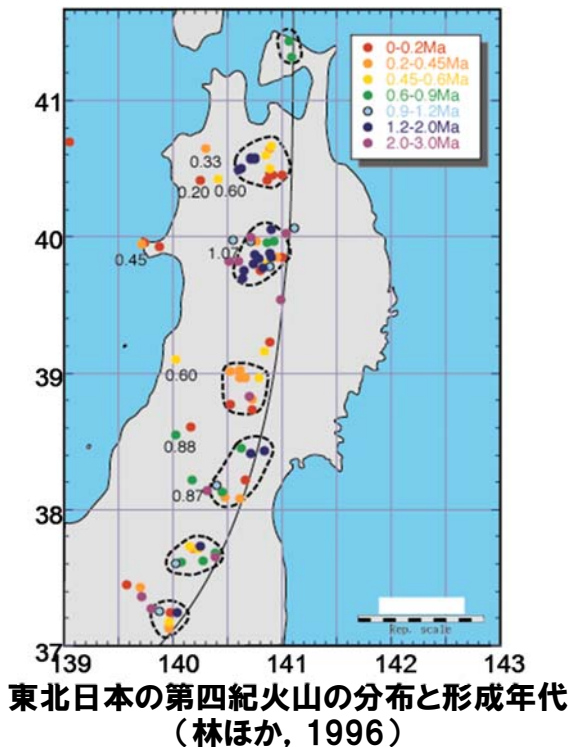


活断層の活動開始年代の頻度分布
(道家ほか, 2012)

日本列島の活断層の約80%は、第四紀以降に活動を開始している。そのうち、約50万年前頃に活動を開始した断層が最も多い。

26

新第三紀以降の火山活動の時空変遷



約700万年以降は火山フロントの日本海側(東・西日本火山帯)において活動が限定。但し、火山フロントの日本海側では、過去数10万年間では既存火山の15km以遠においても新規の火山が形成。

27

地質学的現象の将来予測

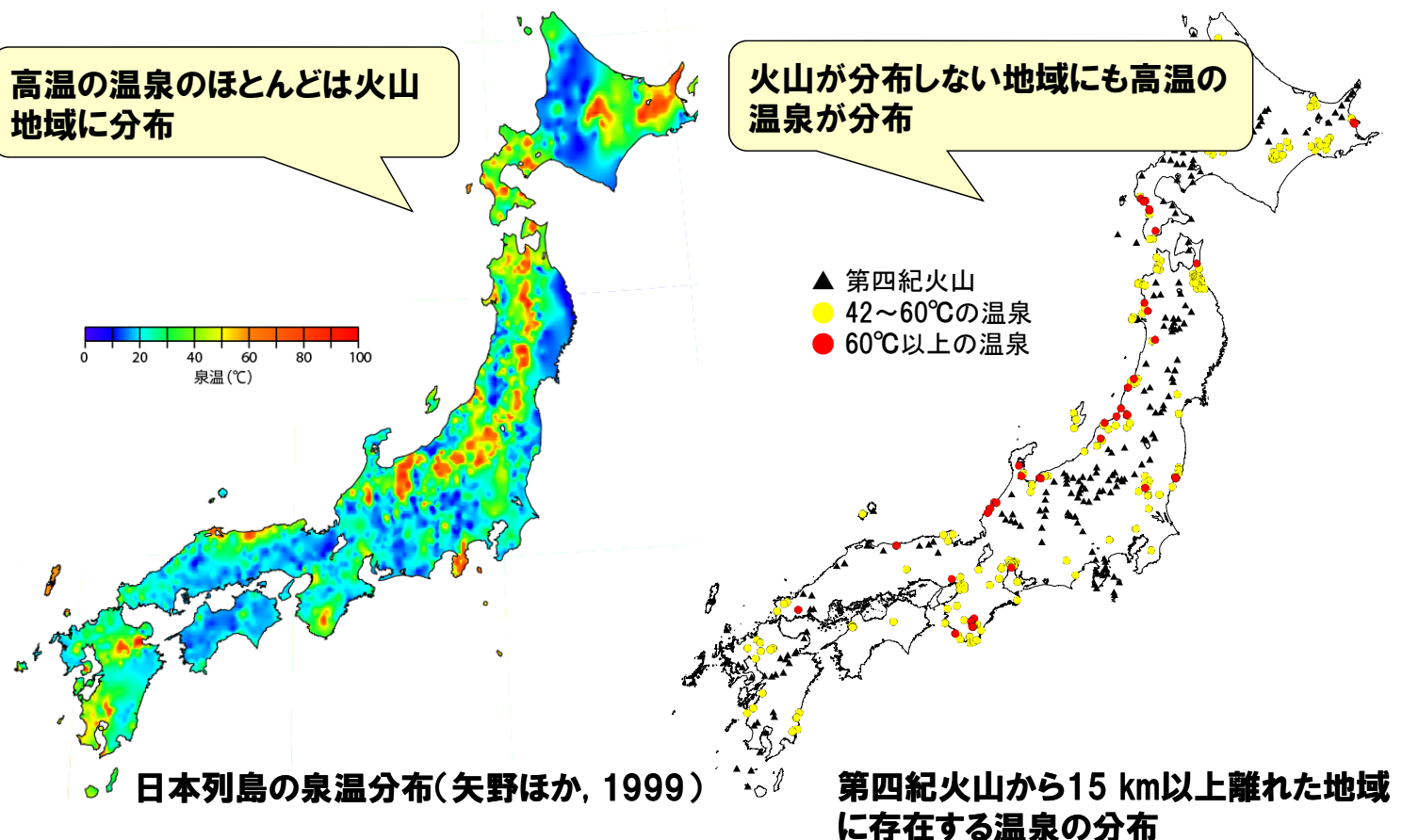
- 地形・地質学的情報によると日本列島の多くの地域で、現在の変動方向・速度(一様継続性)が成立したのは、中期更新世(数十万年前)以降と考えられる。
- 山地発達モデルによると、日本海東縁変動帯や新潟-神戸歪集中帯等の地域では、中期更新世以降に現在の隆起速度と同程度になったと推定できる。
- 中期更新世以降に地殻変動の一様継続性が成立した地域では、外挿法による信頼性が高い予測が行われる期間は、将来十万年程度と考えることが妥当と思われる。



- 我が国における地層処分の安全確保の考え方
- 地層処分において考慮すべき自然現象とその特徴
- サイト選定や安全性の検討に際して考慮すべき時間スケール
- ネオテクトニクスと将来予測の考え方
- **地質環境の長期安定性に関する研究開発の現状**

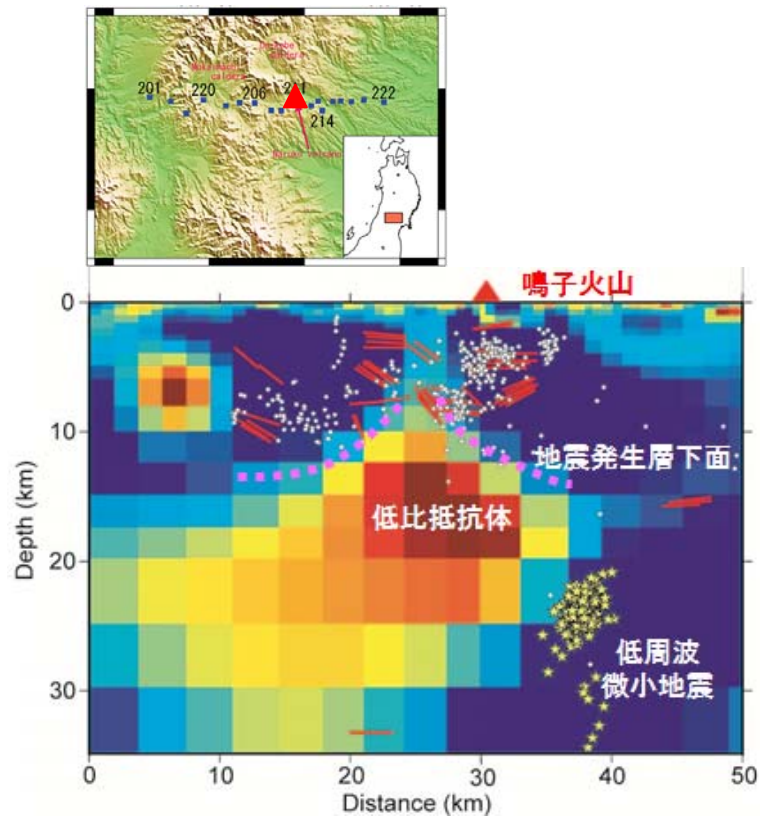
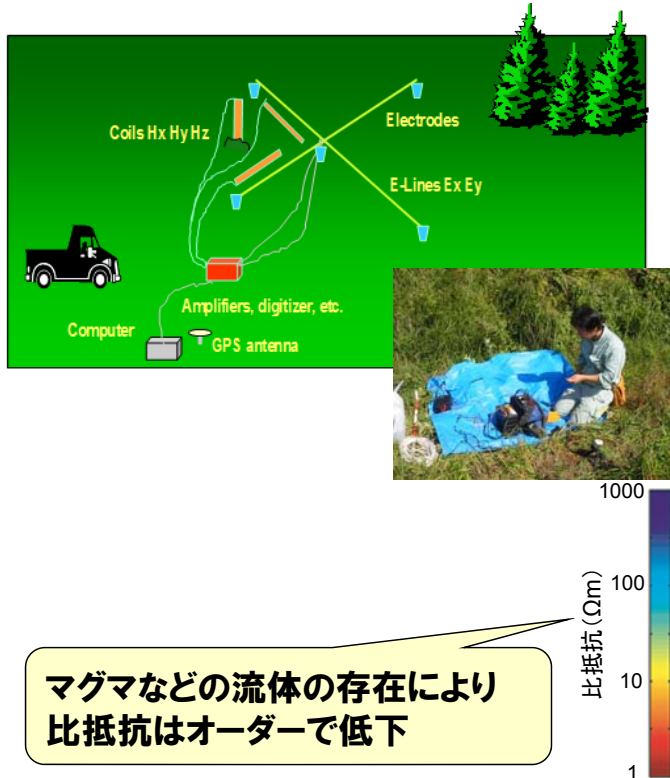
29

地下深部のマグマ・高温流体の調査技術



30

地磁気・地電流法



Asamori et al. (2010)

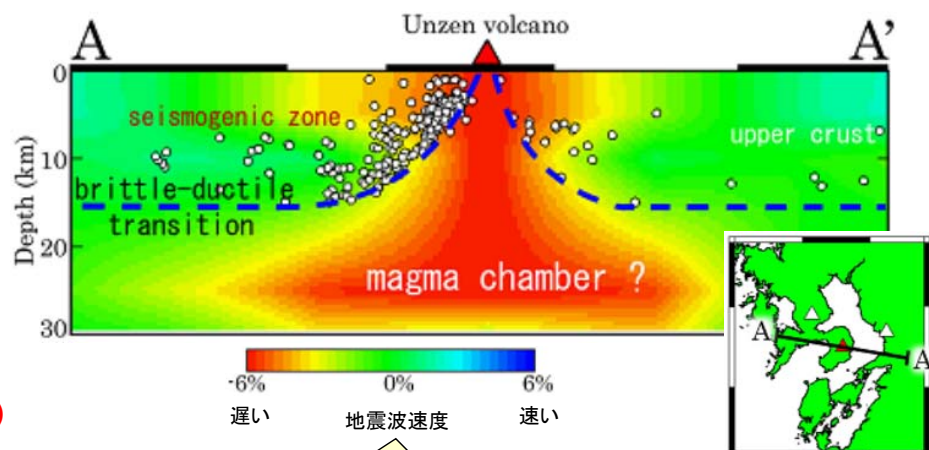
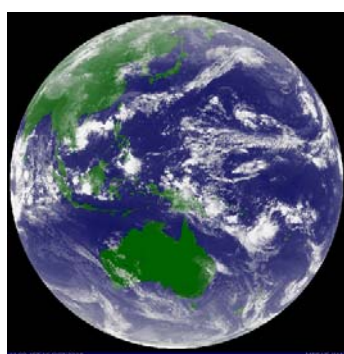
31

地震波トモグラフィー法



対象：人体 → 地球(地下)

観測データ：X線 → 地震波



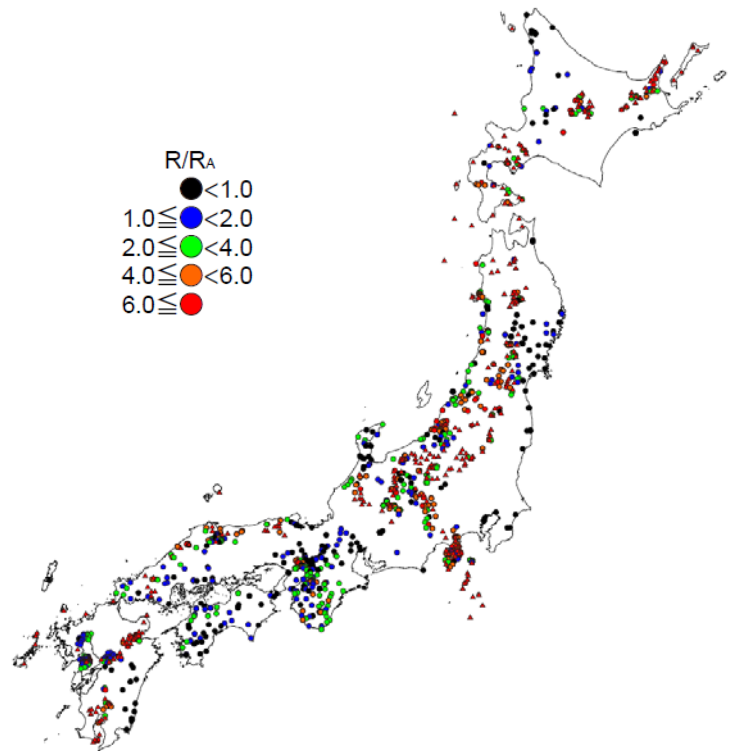
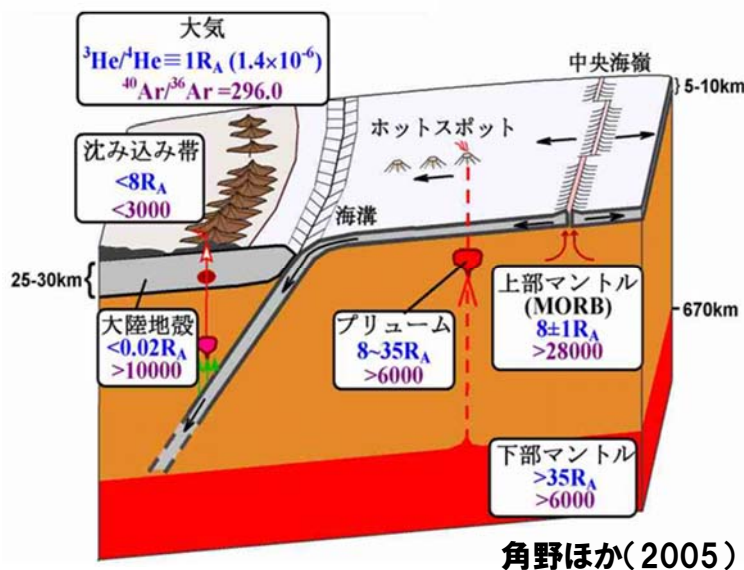
高温や流体を含む領域(マグマなど)では地震波速度が低下

Zhao et al. (2002)

地磁気・地電流法や地震波トモグラフィー法を用いてマグマなどの高温流体の分布を推定

32

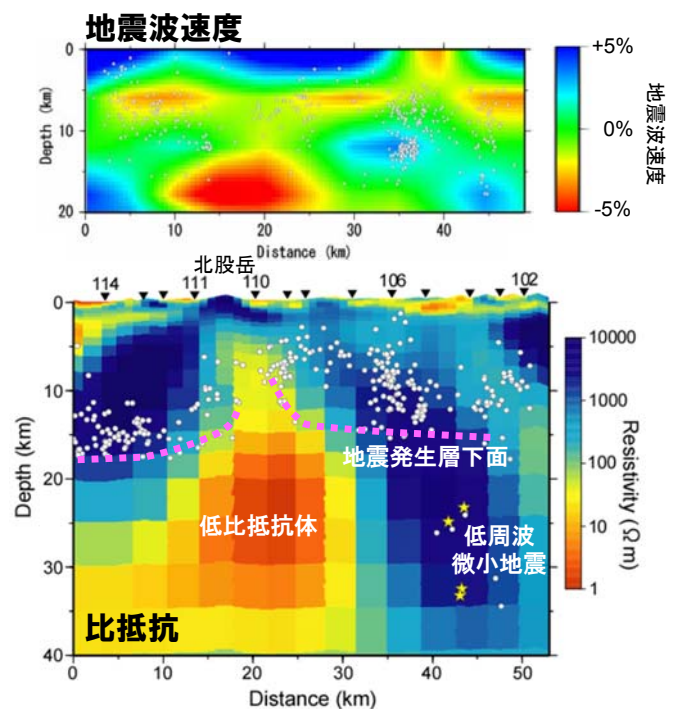
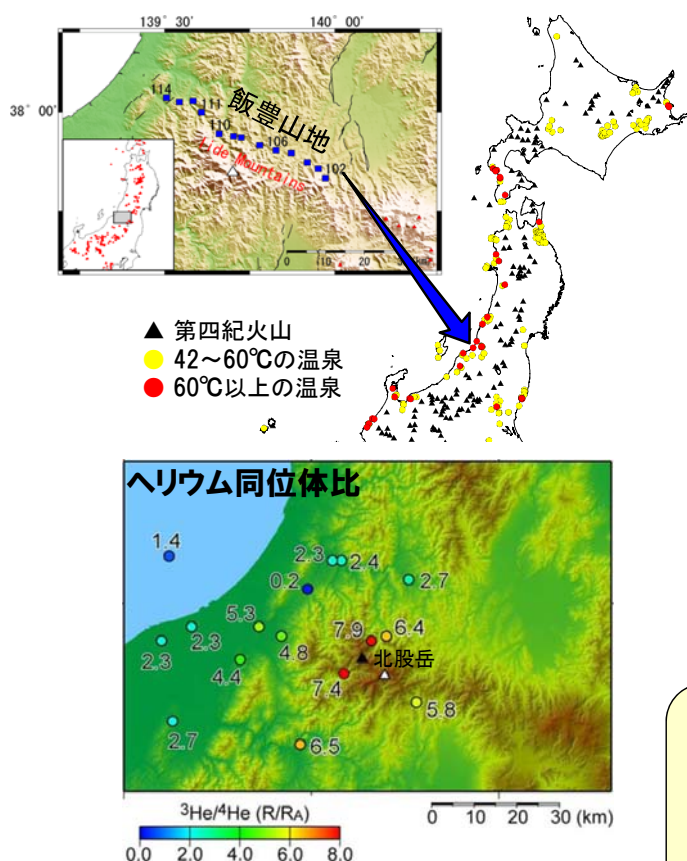
ヘリウム同位体比



マントル起源の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は、大気の8倍、radiogenic (crustal) Heの50倍以上

日本列島のヘリウム同位体比の分布図
 (R/R_A は大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比(1.4×10^{-6})で規格化;
 草野ほか, 2012)

33

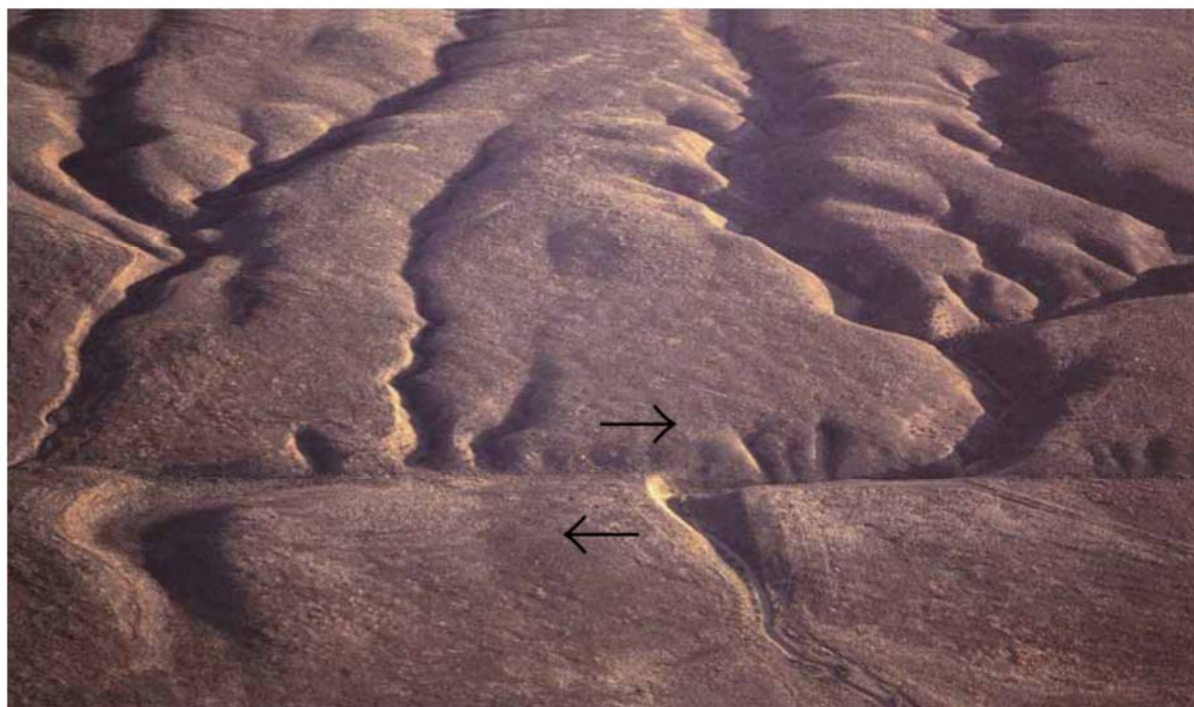


✓ 飯豊山地下に高温流体の存在を示唆する
 低地震波速度・低比抵抗体
 ✓ ヘリウム同位体比は北股岳近傍で高く、離れるにつれて低下する傾向
 ⇒ 伏在するマグマの存在を示唆

34

活断層とは

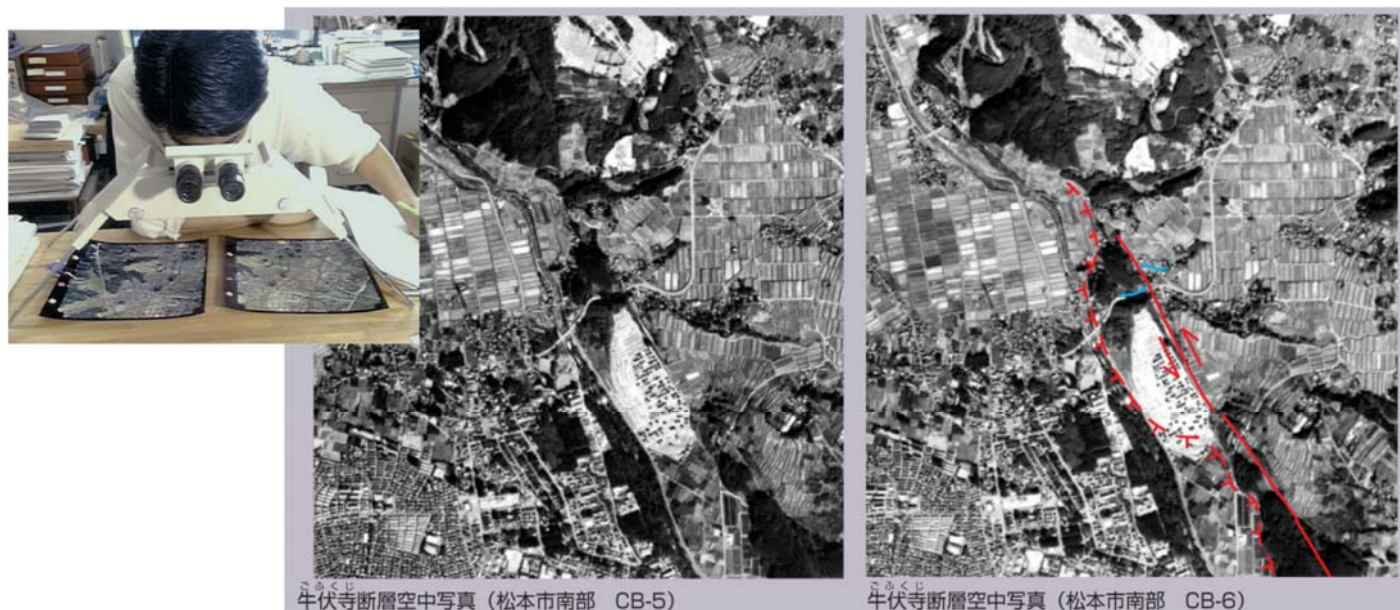
「活断層」とは第四紀(約180万年前以降)に活動した断層であって、将来も活動する可能性のある断層をいう。活断層の周辺には、ずれの累積によって段丘や尾根のずれ、河川の屈曲等、様々な地形的な特徴が認められる。



米国、サンアンドレアス断層の変位地形(右横ずれ断層)

35

空中写真による活断層の調査



(右写真参照)写真の赤線の位置が活断層で、ケバをつけた側が落下側を示す。
矢印は断層がずれた方向、青線は断層によって横にずれた河川を示す。

空中写真判読により、活断層等の存在を判断する手掛かりとなる変動地形(地殻の変動に起因する特徴的な地形のこと。地形の切断・屈曲、撓曲、傾動・逆傾斜等)やリニアメント等の地形を抽出する。

36

変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術

① 伏在断層

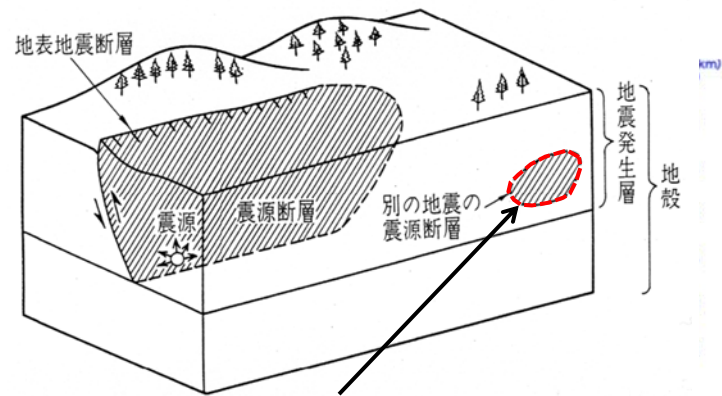
最近1万年に形成された沖積層等、新しい地層に厚く覆われた断層のため、変動地形が地表に現れない断層。

② 低活動性の断層

活動性が低い(再来間隔が長い)ため、侵食等によって明瞭な変動地形の特徴を有さない断層。

③ 未成熟な断層

震源断層が地表にまで成長していない未成熟な断層。

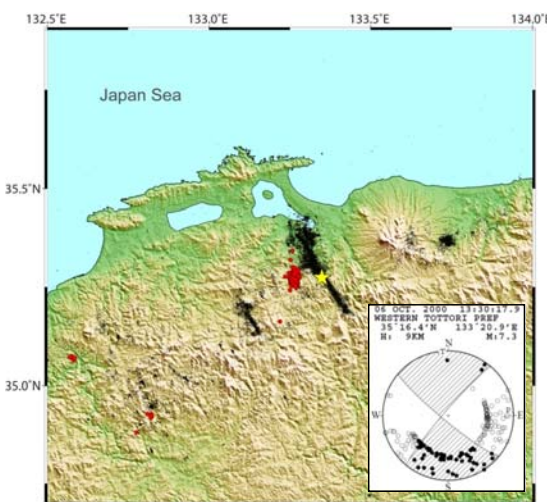


地表まで達していない震源断層

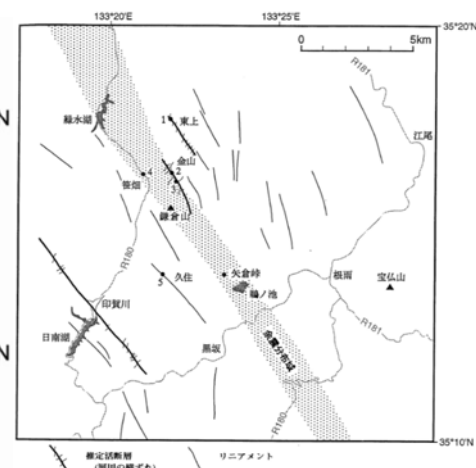
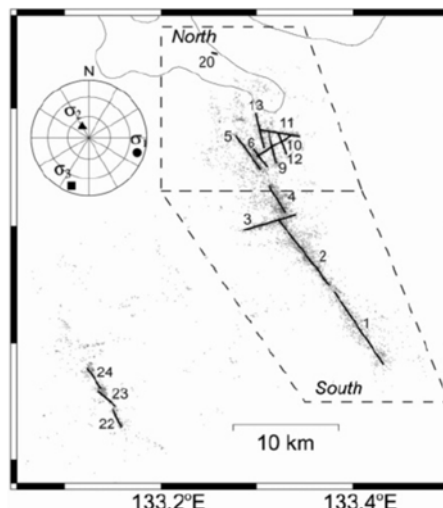
- **変動地形学的調査**は、地形発達の原因を考察し、断層の存在する可能性を検討。
- **地表地質調査**は、トレンチ調査等によって断層の存否および活動性を検討
- **地球物理学的調査**では、反射法波探査等によって、活断層の存否、形状等を検討

活断層等に関する安全審査の手引き(原子力安全委員会, H20.6.13) 37

鳥取県西部地震の特徴



● Low-frequency event (JMA, 2006)

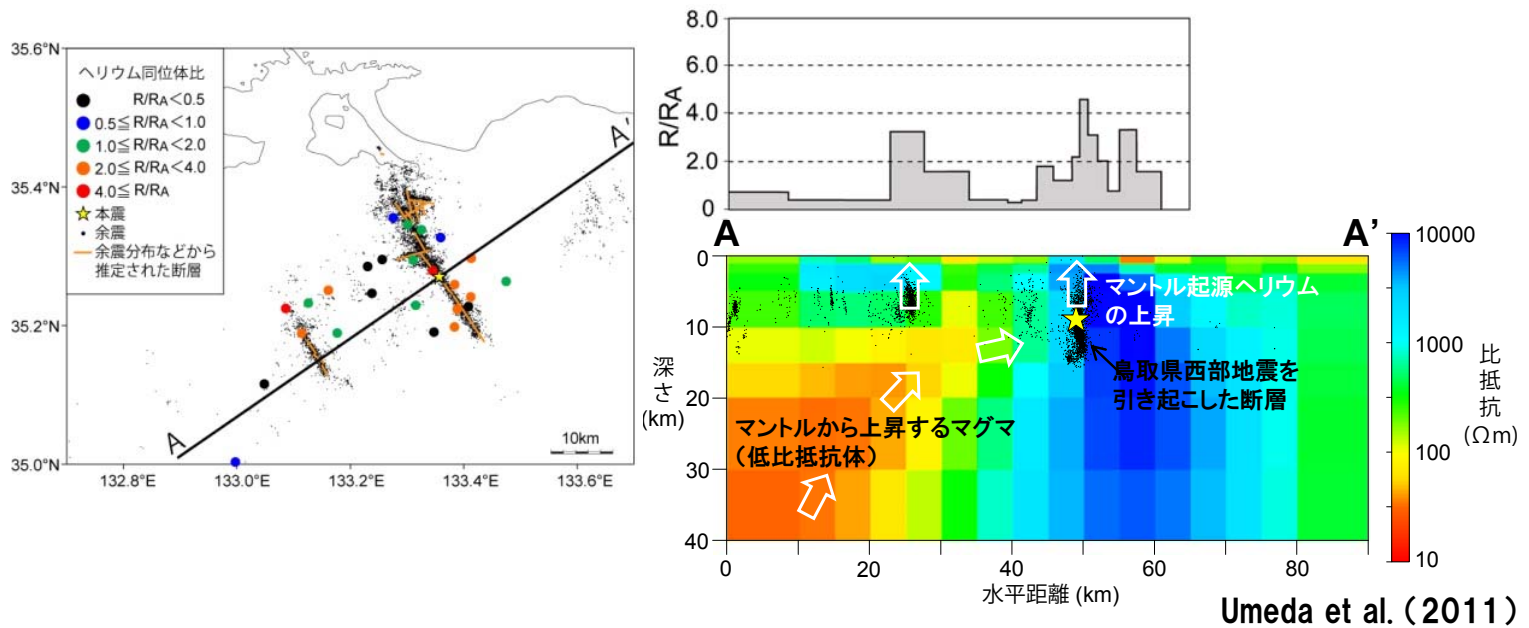


震源域周辺の活断層及びリニアメント
微小地震及び低周波イベントの分布断層モデル(Fukuyama et al., 2003)(堤ほか, 2000)

2000年(平成12年)10月6日 鳥取県米子市南方約20km 深さ9km $M_j=7.3$, $M_w=6.6\sim6.8$

1. 地殻の剪断歪速度が小さい地域で大地震が起こったこと。
2. 浅い大地震であるのに、震源域に活断層がないこと。
3. 震源断層の上端が極めて浅い(約1km)のに、地表地震断層が(ほとんど)現れなかったこと。(垣見, 2002)

比抵抗構造とヘリウム同位体比の関係



- ✓ヘリウム同位体比は、震源断層の周辺で高く、離れるにつれて低下する傾向を示す。
- ✓マントルから震源断層の近傍まで連続し、流体を示唆する低比抵抗体が認められる。
- ⇒大地震の発生に流体が関与
- ⇒マントル起源のヘリウムが断層を通じて地表に供給

39

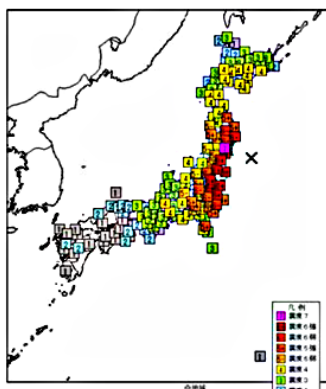
2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）

○地震の概要（気象庁）

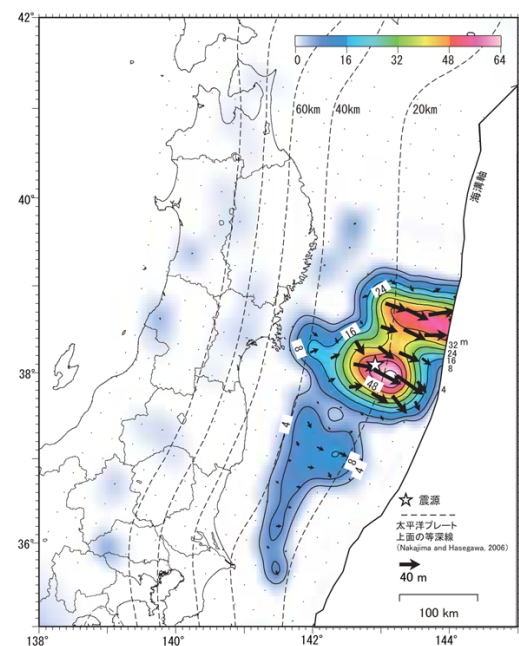
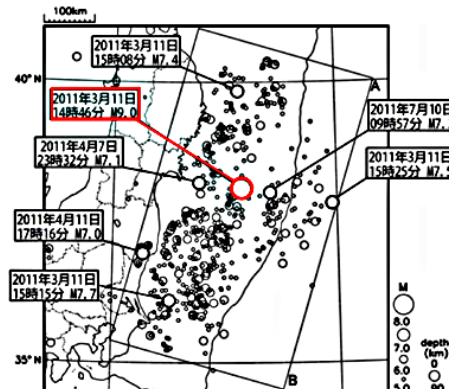
1. 発生日時 平成23年3月11日（金）14時46分頃
2. 震源及び規模（推定）
モーメントマグニチュード **Mw9.0**、深さ約 24km
三陸沖（牡鹿半島の東南東130km付近（北緯38.1度、東経142.9度））
3. 余震：**M7.0以上6回**、M6.0以上 93回、M5以上 560回

出典：「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」について（第55報）（H23.9.8 16:00）

平成23年3月11日14時46分頃の三陸沖の地震
震度分布図



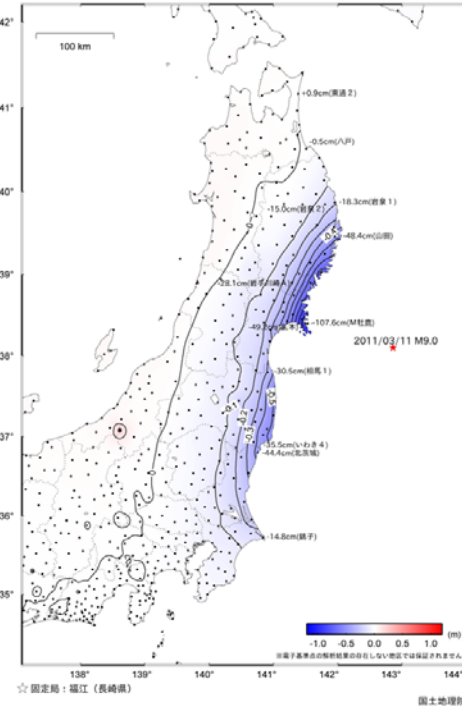
震央分布図
（2011年3月9日～9月8日16時00分、深さ0～90km、M≥5.0）



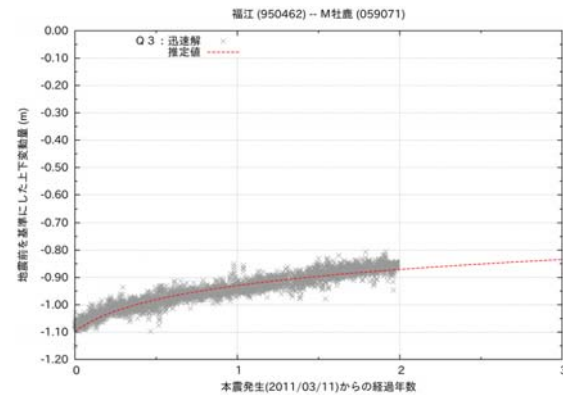
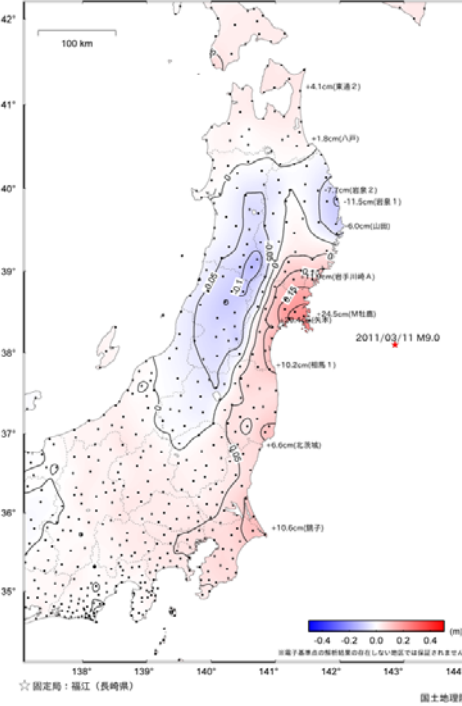
40

地震に伴う地殻変動(地震前後の変動)

東北地方太平洋沖地震 (M9.0) による地殻変動 (上下)
基準期間: 2011/03/01 ~ 2011/03/08 [F 3: 最終解]
比較期間: 2011/03/12 ~ 2011/03/12 [F 3: 最終解]



東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 後の地殻変動 (上下) - 累積 -
基準期間: 2011/03/12 ~ 2011/03/12 [F 3: 最終解]
比較期間: 2013/02/17 ~ 2013/02/23 [R 3: 速報解]



余効変動は地震によって破壊された断層の周辺部に蓄積した歪が、地震後にゆっくりとすべることで徐々に解消していく理論に基づく。

地震時変動(地震前1週間) 地震後(余効)変動(地震後2年間)

41

地震時の体積歪と地下水位の変化の関係

被圧地下水は地震に伴う地殻の膨張・圧縮の影響を受けやすいことが知られている。

(Wang, 1997; Ge and Stover, 2000; Hamiel et al., 2005など)

地球潮汐による変動からの推定によれば、被圧地下水の水位変化に対する体積歪応答感度は、

～数mm/n strain(1 n strainは10の-9乗の歪)
(膨張の時に水位低下)

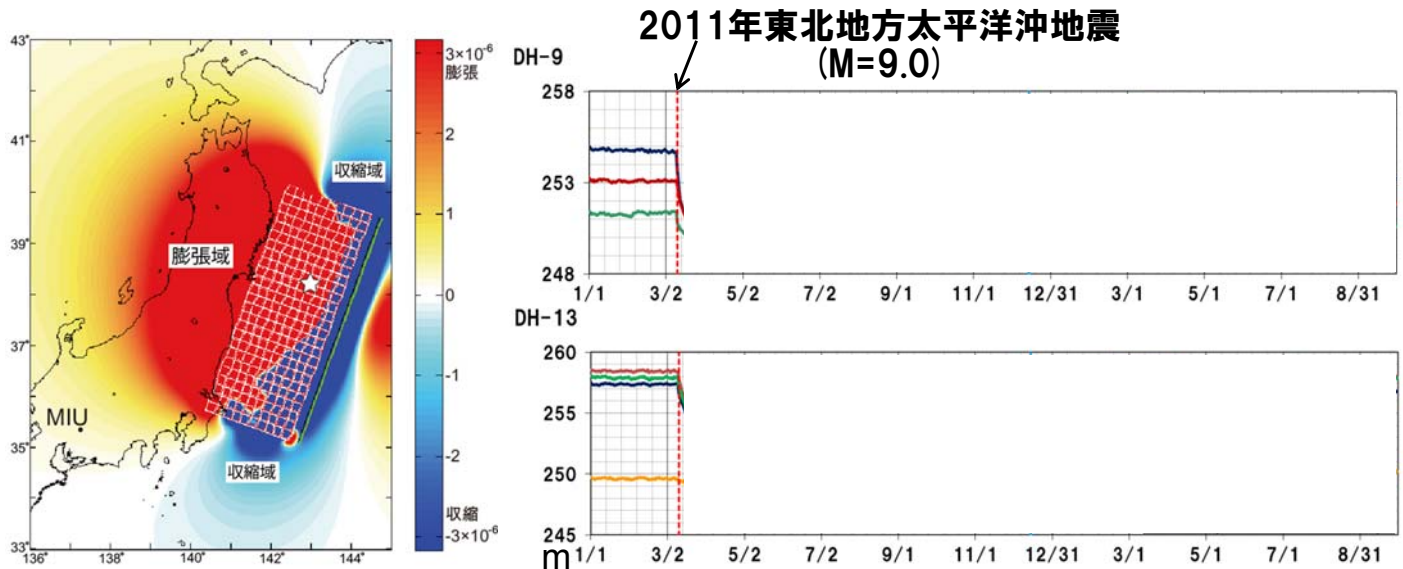
(Roeloffs, 1988; 川辺, 1991など)

断層モデルを用いたディスロケーション解析によって体積歪の分布は推定可能。

(Lin and Stein, 2004; Toda et al., 2005)

42

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地下水変化のシミュレーションと観測結果



2011東北地方太平洋沖地震に伴う体積歪のシミュレーション結果

東濃地域(DH-9, 13)の地下水圧の経時変化
(2011.1.1~2012.9.30)

Niwa et al. (2012)

- 地震前後に観測された地下水位の変化は、断層モデルを用いた体積歪の変化に基づく計算結果と概ね整合的であった。
- 地震後に変化した地下水圧も、時間の経過につれて変化前の状態に回復していく傾向が認められる。

43

現在取り組んでいる研究課題(H22~26)



① 調査技術の開発・体系化

- 変動地形が明瞭でない活断層等に係る調査技術
- 断層の発達段階の評価に係る調査技術
- 地下で遭遇した断層の活動性に係る調査技術
- 地殻内の震源断層等に係る調査技術
- 内陸部の隆起・侵食速度の算出に係る調査技術

② 長期予測・影響評価モデルの開発

- 地形変化シミュレーション技術の高度化
- 地質断層の再活動性に関する評価技術
- 断層運動に伴う地下水流動系の変化に関する評価技術
- 超長期における予測・評価手法に関する検討
- 古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価手法の開発

③ 年代測定技術の開発

- 加速器質量分析計を用いた宇宙線生成核種年代測定法
- 四重極型質量分析計等を用いた(U-Th)/He年代測定法
- 希ガス質量分析計等を用いたK-Ar年代測定法
- 高分解能のテフラ同定手法

計画・成果の詳細は報告書をご覧ください。



http://www.jaea.go.jp/04/tono/antei/seika_01.html

44