Taxonomy and evaluation of uncertainties of active fault datasets for earthquake source fault model

KUMAMOTO, Takashi (Okayama Univ.)

震源断層モデル構築のための活断層データの不確実性の分類と評価

隈元　崇（岡山大学）

・stochastic uncertainties for magnitude estimation
規模の予測に関する不確実性

/ models for multi-segment faults
長大断層のモデル化

/ models for short faults
短い活断層のモデル化

/ new knowledge, new finding, new idea
最新の知見とは・実務への導入

・controversy of definition / judgment on active faults
活断層の認定に係わる不確実性

New Regulatory Requirements For Nuclear Power Plants (Earthquakes and Tsunamis)

「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」

平成25年6月19日　原子力規制委員会決定

4.4.2　内陸地殻内地震に関する震源断層の評価

（１）内陸地殻内地震においては、複数の連続する活断層や近接して分岐、並行する複数の活断層が連動してより規模の大きな地震を引き起こすことを考慮して、既存文献の調査、変動地形学的調査、地質調査及び地球物理学的調査の結果に基づいて起震断層が設定されていることを確認する。

（２）活断層（群）においては、破壊の開始点とアスペリティとの位置関係等によって、一括放出型地震（起震断層全体の活動による地震）よりも分割放出型地震（起震断層を構成する一部の活断層の活動による地震）の方が敷地に大きな影響を及ぼす可能性がある場合には、分割放出型地震に対応する活断層（群）から構成される活動区間が設定されていることを確認する。

（３）長大な活断層による地震や孤立した短い活断層による地震の規模は、最新の知見を十分に考慮して設定されていることを確認する。

（４）地震活動に関連した活褶曲や活撓曲等については、活断層と同様に調査対象とし、その性状に応じて震源として想定する断層の評価に考慮されていることを確認する。

（５）震源断層モデルの長さ又は面積、あるいは１回の活動による変位量と地震規模を関連づける経験式を用いて地震規模を設定する場合には、経験式の適用範囲を十分に検討されていることを確認する。その際、経験式は平均値としての地震規模を与えるものであることから、経験式が有するばらつきも考慮されていることを確認する。

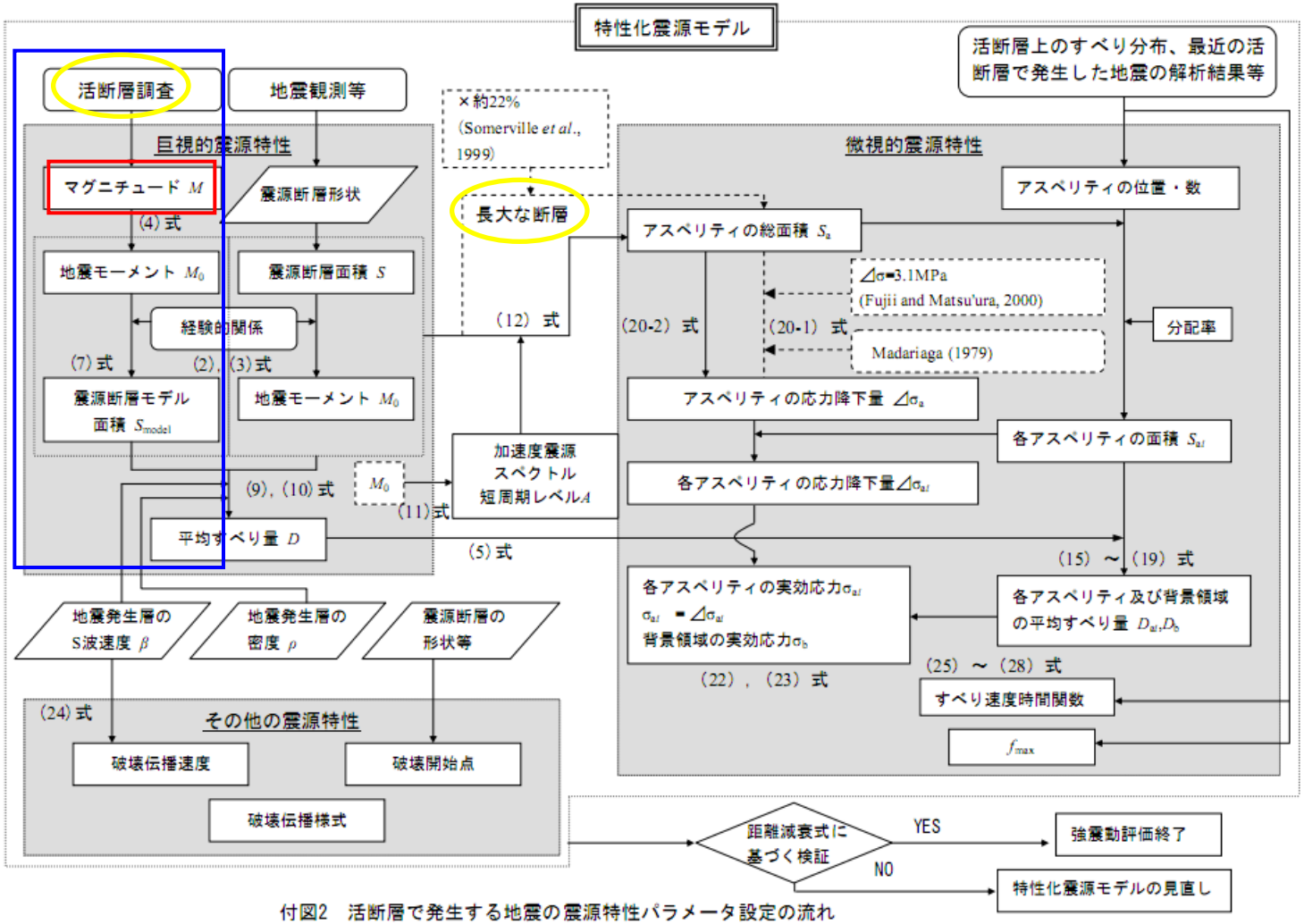
（６）震源として想定する断層の形状評価を含めた震源特性パラメータの設定に必要な情報が十分得られなかった場合には、その設定に当たって不確かさの考慮が適切に行われていることを確認する。

「最新の知見の十分な考慮」　　とは？
「経験式が有するばらつきも考慮」とは？
「不確かさの考慮を適切に」　　とは？

Flow-chart for characterized seismic source model (HERP, 2010)

特性化震源モデルのパラメータ設定

活断層情報は，地震規模の推定とそれ以降のパラメータ作成に必須・重要



付図2　活断層で発生する地震の震源特性パラメータ設定の流れ
（過去の地震記録や詳細な調査結果に基づき震源断層を推定する場合）

地震調査研究推進本部(2010)に加筆

Empirical equation (Matsuda, 1975)

松田式（断層長と地震規模）

Matsuda, T., 1975, Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault, Zishin2, **28**, 269-283.

松田時彦, 1975, 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第2輯, **28**, 269-283.

$$\log L(\mathrm{km}) = 0.6M - 2.9$$

20km→M7.0

80km→M8.0

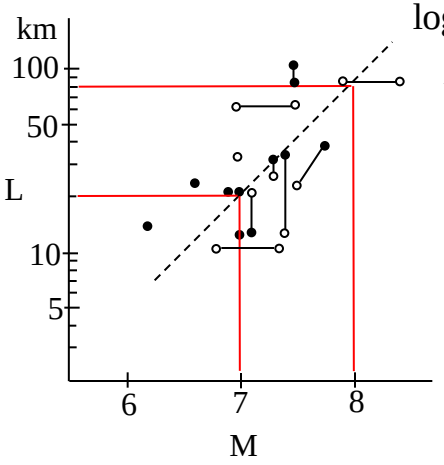


Fig.1. Magnitude-fault dimension relation and magnitude-displacement relation in historic earthquakes in Japan (inland). ○: values observed on the surface. ●:values estimated from seismological or geodetic data.

○ロジックツリーにおける地震規模の算出について、松田式のみではなく、入倉・三宅式等による評価を行い、重み付けすることを検討すること。

原子力規制庁WWW公開資料（2014/09/09）
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shinsa/data/shimane2/mendan/20140919_01giji.pdf

評価手法は検討段階か，既に確立されているか？
利用の目的は？

Weight for logic-tree model for empirical equations (Kumamoto et al., 2008)
地震規模推定の経験式に関するロジックツリーの重み（隈元ほか，2008）

1. 松田(1975)
   - 地震本部の長期評価
   - 断層長Lと気象庁マグニチュードM_{JMA}
   - 日本の地震から断層長20kmでM7，80kmでM8で評価

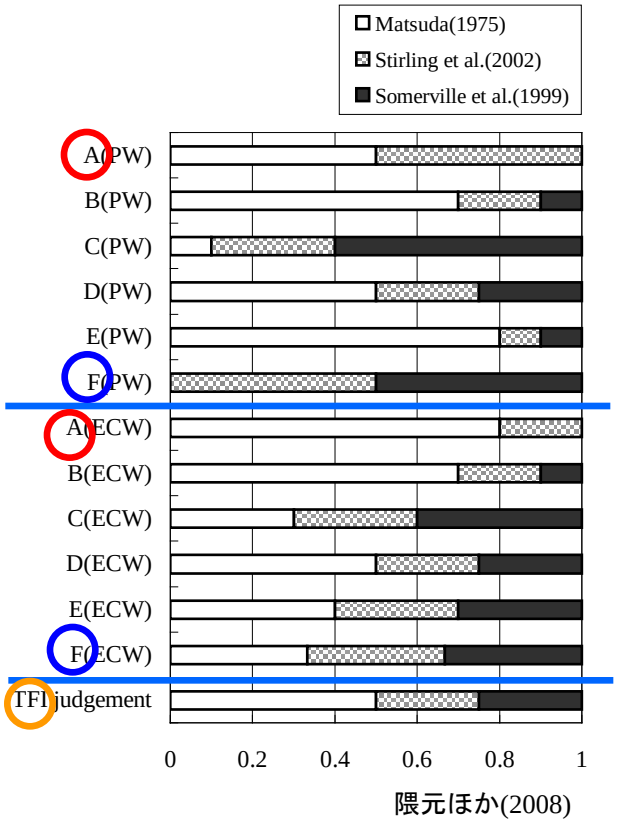
$$\log L = 0.6M_{JMA} - 2.9$$

2. Stirling *et al.*(2002)
   - 世界被害地震の最新のデータベース
   - モーメントマグニチュードM_Wと断層長Lとの回帰式
   - 日本とは異なるテクトニクスの地震が含まれている

$$M_w = 3.606 + 2.27\log L \qquad (M_W < 6.5)$$
$$M_w = 4.743 + 1.375\log L \qquad (M_W \geqq 6.5)$$

3. Somerville *et al.*(1999)
   - 地震本部の強震動評価
   - 断層面積Sと地震モーメントMoの回帰式
   - 断層面積には地震発生層の深さと断層の傾斜角が必要

$$S = 2.23*10^{-15} M_O^{2/3} \qquad (S < 291\text{km}^2)$$
$$S = 4.24*10^{-11} M_O^{2/3} \qquad (S \geqq 291\text{km}^2)$$

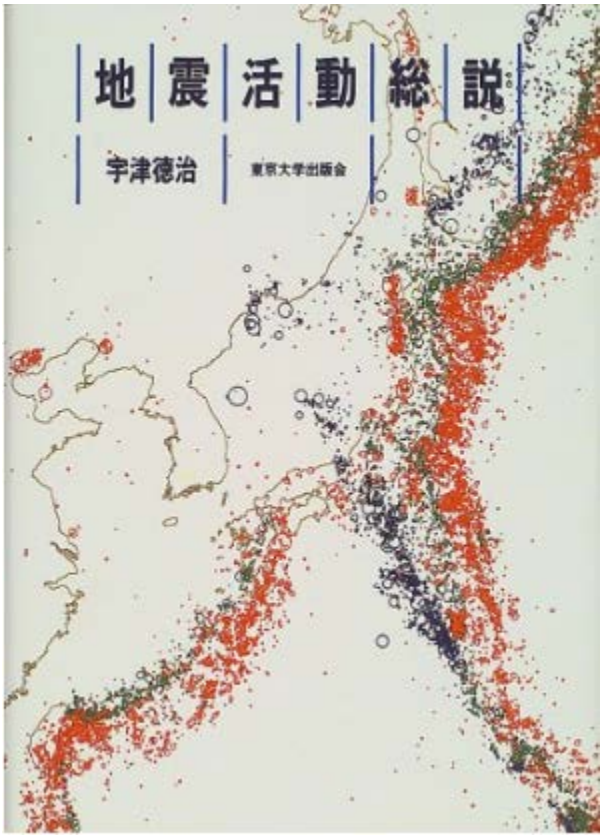


Empirical equations for magnitude estimation (Ttsu, 1999)
地震規模推定の経験式（宇津，1999）

○ロジックツリーにおける地震規模の算出について、松田式のみではなく、入倉・三宅式等による評価を行い、重み付けすることを検討すること。

原子力規制庁WWW公開資料（2014/09/09）
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shinsa/data/shimane2/mendan/20140919_01giji.pdf

宇津徳治，1999，『地震活動総説』，東京大学出版会，876p.



3.7.2 断層の長さ・面積（97～101p）

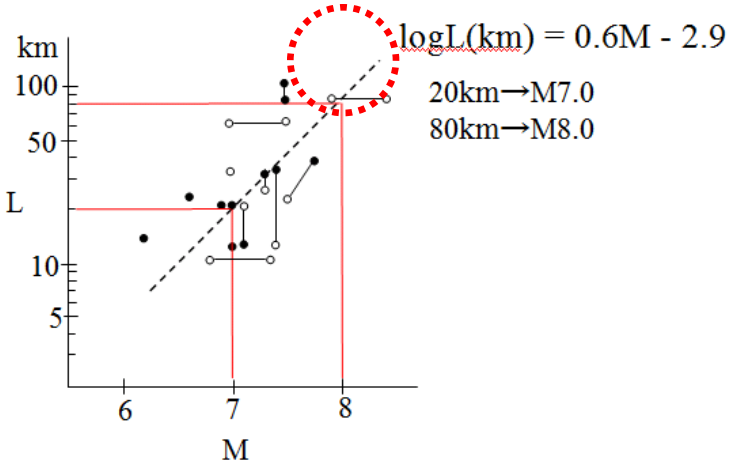
地震規模と断層長さ(M vs L)：52式

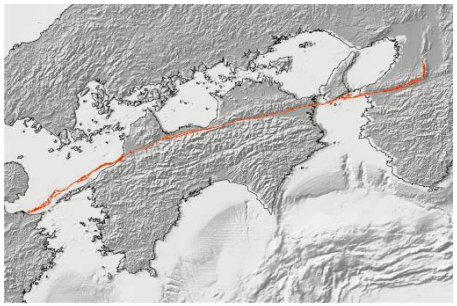
地震規模と断層幅(M vs W)　：　1式

地震規模と断層面積(M vs S)：　9式

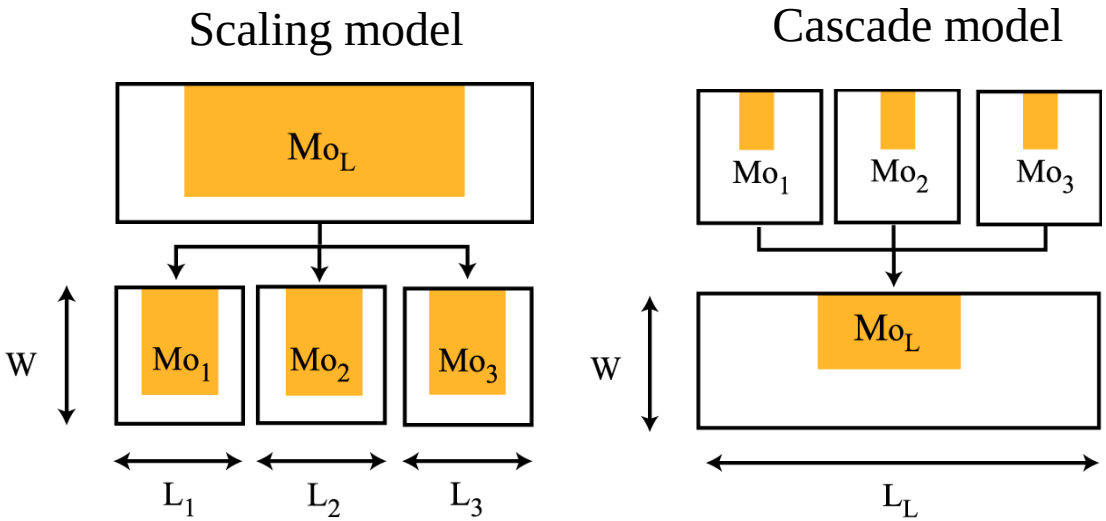
地震規模と断層変位(M vs D)：21式

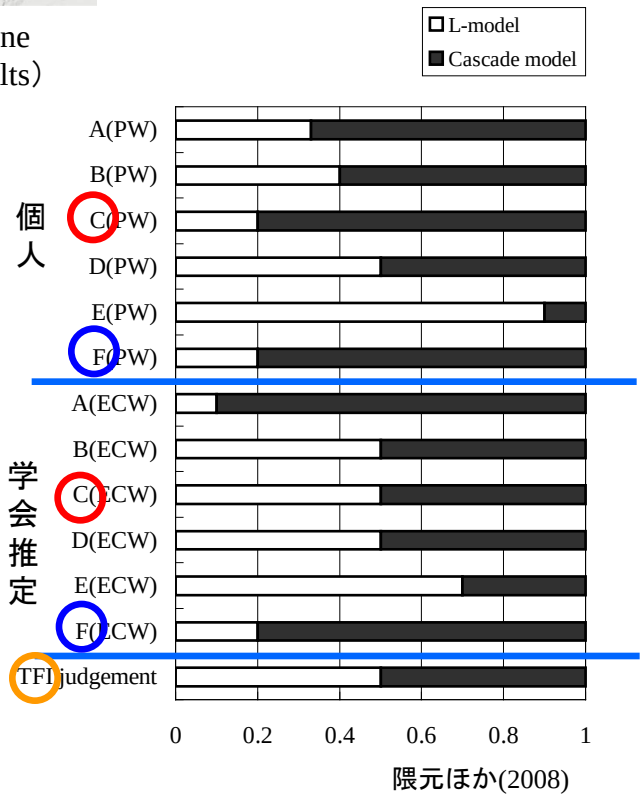
Weight for logic-tree model for multi-segment faults (Kumamoto et al., 2008)
長大断層の規模推定に関するロジックツリーの重み（隈元ほか，2008）





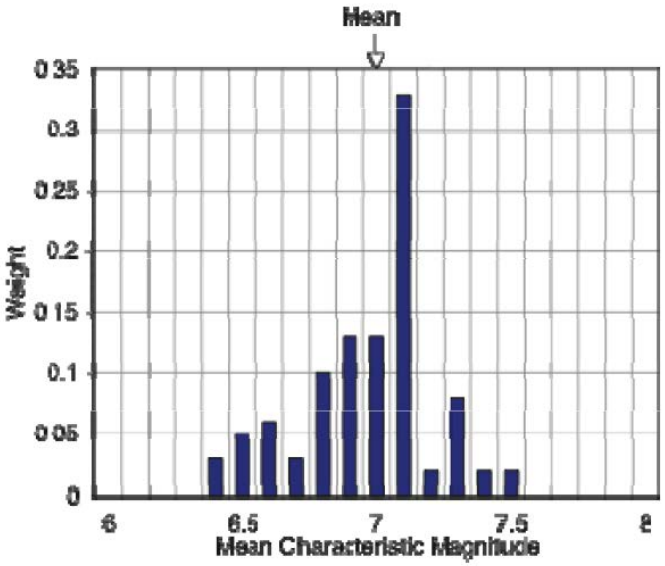
Median Tectonic Line
（multi-segment faults）





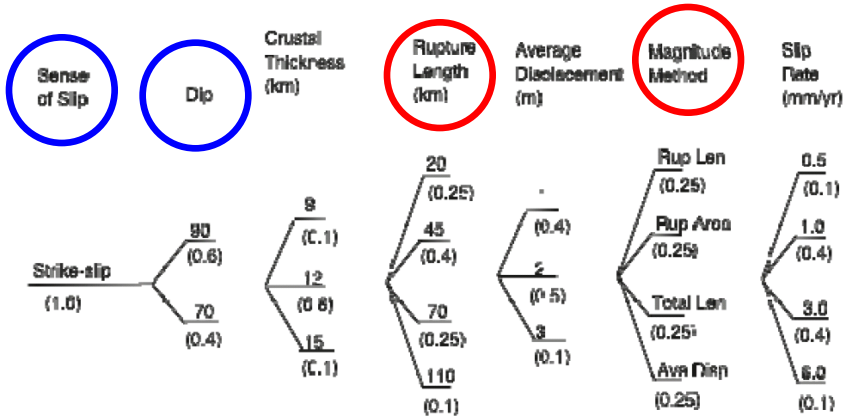
Logic-Tree: Diablo Canyon Power Plant and Hosgri fault
活断層についてロジックツリー活用事例

PG&E WWW public resources



Abrahamson(2010)

Hosgri Logic Tree



Magnitudes on Faults
What is Conservative?

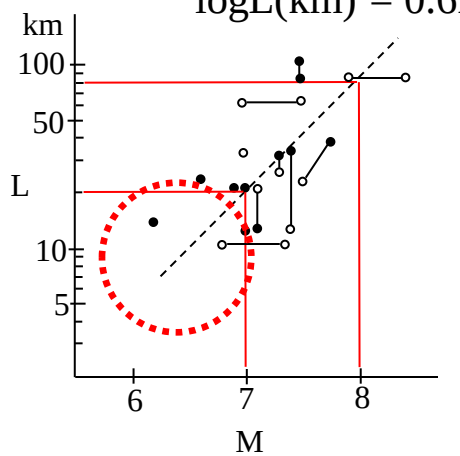
- Deterministic Approach
  - Larger magnitude leads to larger ground motion
- Probabilistic Approach
  - Larger magnitude leads to larger ground motion, but less frequent
  - For high frequency ground motion, reduction in rate reduces hazard more than the increase in ground motion
    - Larger magnitudes leads to lower hazard

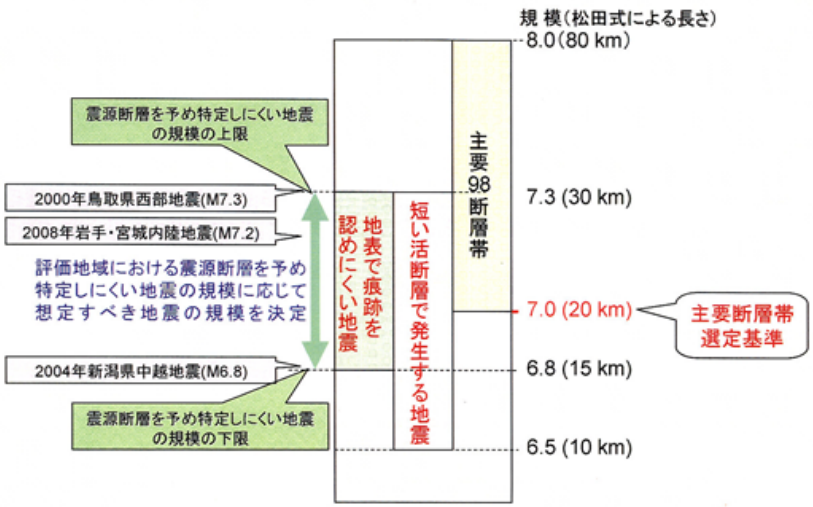
Abrahamson(2010)

New idea for short length faults
孤立した短い断層の規模推定の新知見

松田時彦, 1975, 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震第2輯, 28, 269-283.

$$\log L(\mathrm{km}) = 0.6M - 2.9$$





地震本部 (2010)

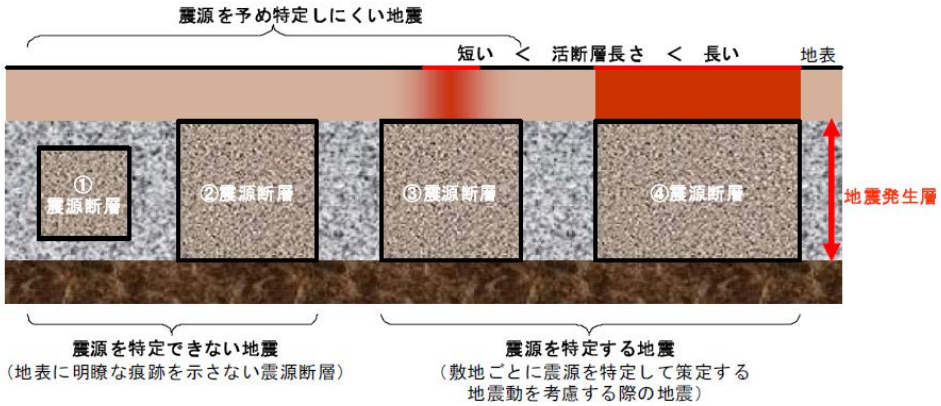


図1. 震源を特定できない地震とできる地震の震源断層のイメージ図

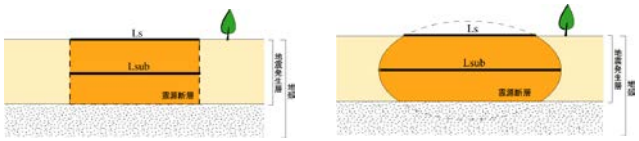
原子力安全委員会(2010)に加筆

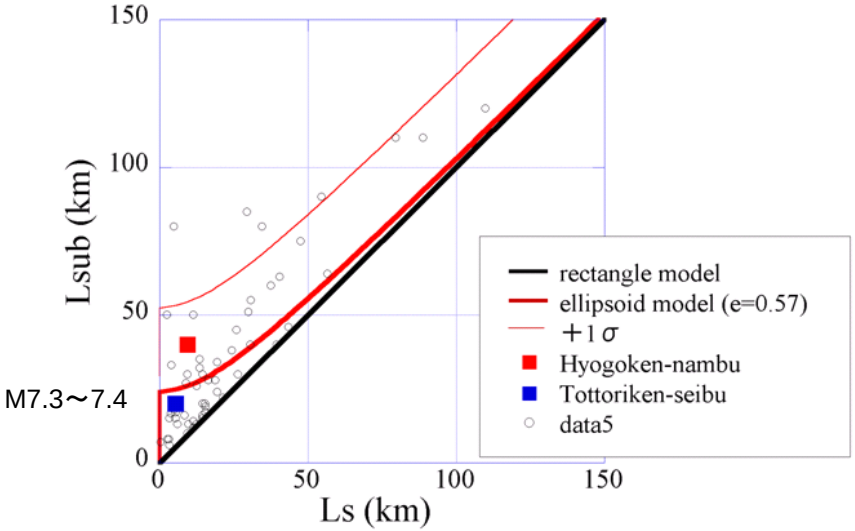
（3）長大な活断層による地震や孤立した短い活断層による地震の規模は、最新の知見を十分に考慮して設定されていることを確認する。

New Regulatory Requirements For Nuclear Power Plants (Earthquakes and Tsunamis)
「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」
平成25年6月19日　原子力規制委員会決定

New idea for short length faults
孤立した短い断層の規模推定の新知見

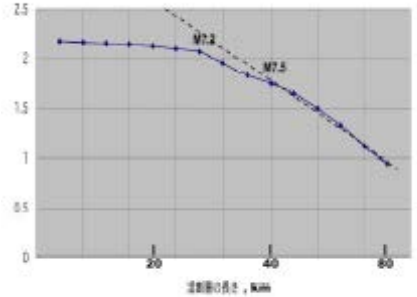
楕円断層モデル（沖野・隈元, 2006）





「そういう研究があることは承知している・・・」

活断層の長さと頻度の関係

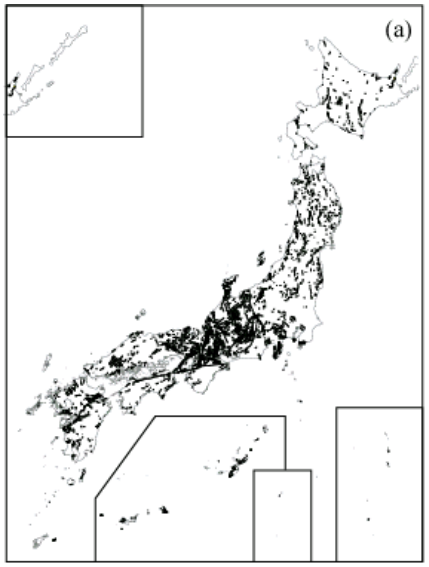


	最小規模	最大規模
予め震源を特定できない地震	－	7.1 程度
地表で認めにくい地震	－	7.1 程度
短い活断層で起こる地震	6.9 程度	7.4 程度

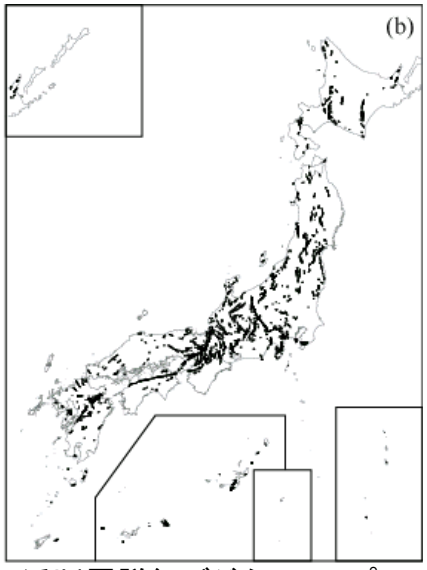
島崎(2008)

「全国を概観した検討であって，個別のサイトに適用可能か否かは，引き続き議論が必要」

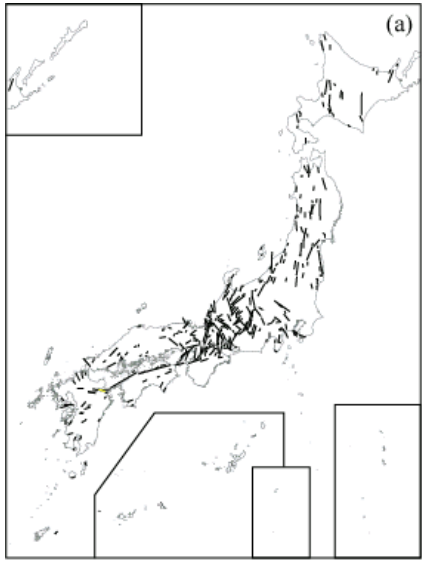
Distribution of active faults / short length faults
活断層分布図 / 短い長さの活断層



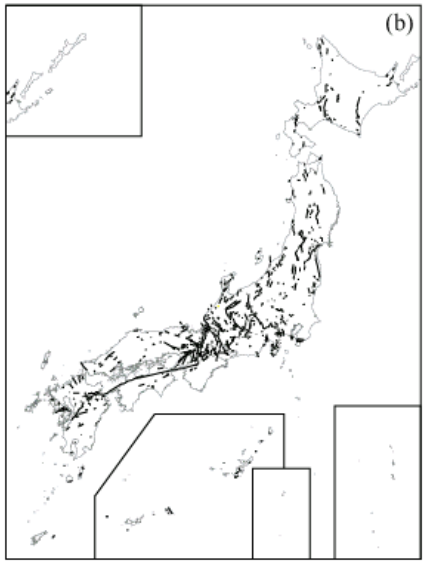
新編日本の活断層（4598線分）



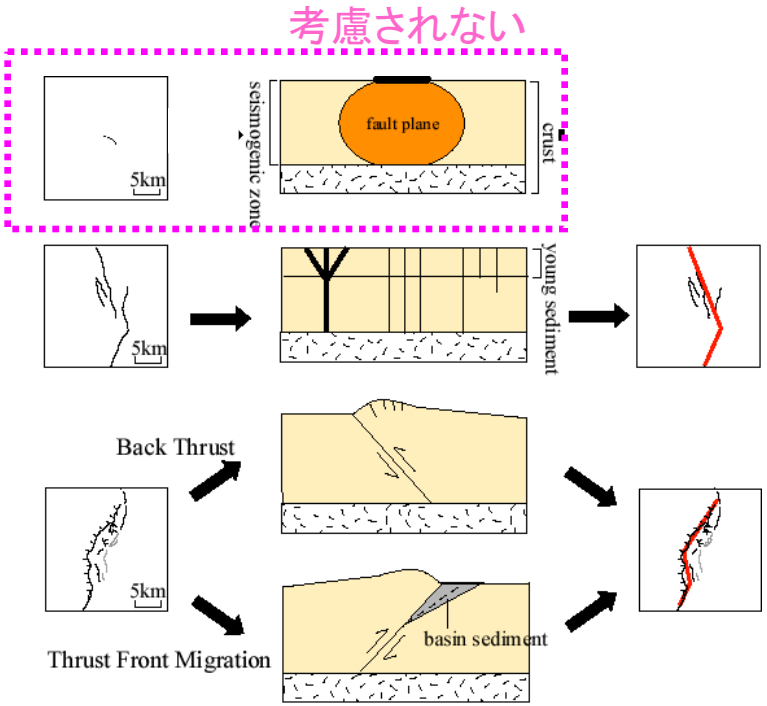
活断層詳細デジタルマップ
（22376線分）



地震本部（主要110＋それ以外178）



沖野・隈元（2006）



短い活断層のモデル化概略

短い長さの活断層・minor断層は，
これまで調査や研究が不十分！

Interim review 1
ここまでのまとめ1

（３）長大な活断層による地震や孤立した短い活断層による地震の規模は、最新の知見を十分に考慮して設定されていることを確認する。

New Regulatory Requirements For Nuclear Power Plants
(Earthquakes and Tsunamis)
「敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド」
平成25年6月19日　原子力規制委員会決定

○ロジックツリーにおける地震規模の算出について、松田式のみではなく、入倉・三宅式等による評価を行い、重み付けすることを検討すること。

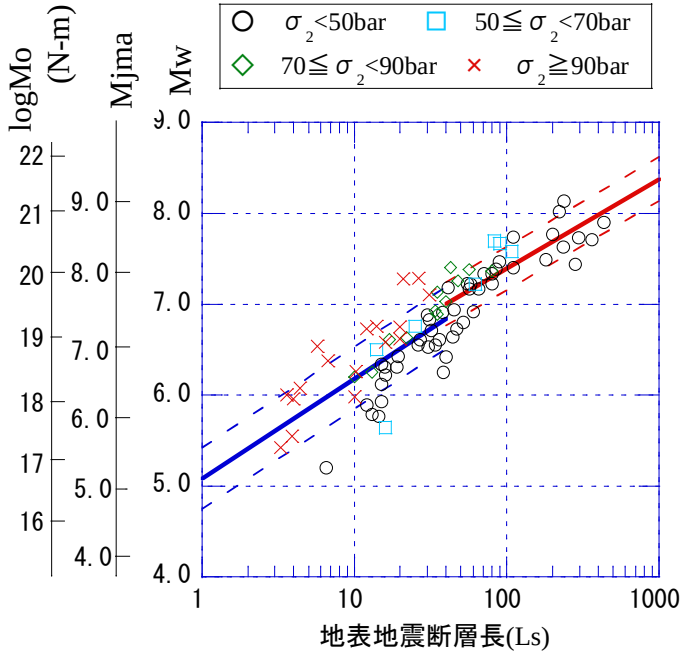
原子力規制庁WWW公開資料（2014/09/09）
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shinsa/data/shimane2/mendan/20140919_01giji.pdf

「経験式が有するばらつきも考慮」とは？　『データや結果の吟味』

「不確かさの考慮を適切に」　とは？　『ロジックツリー』

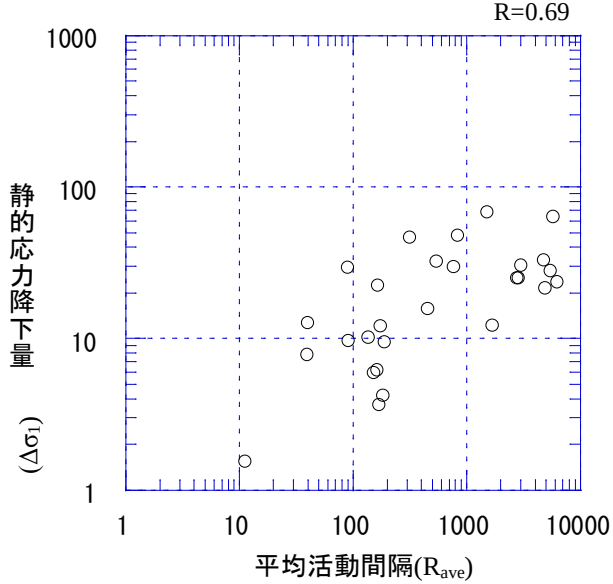
「最新の知見の十分な考慮」　とは？　『断層の成熟度』

Multiple regression for magnitude
重回帰分析による地震規模の推定－静的応力降下量・活動間隔



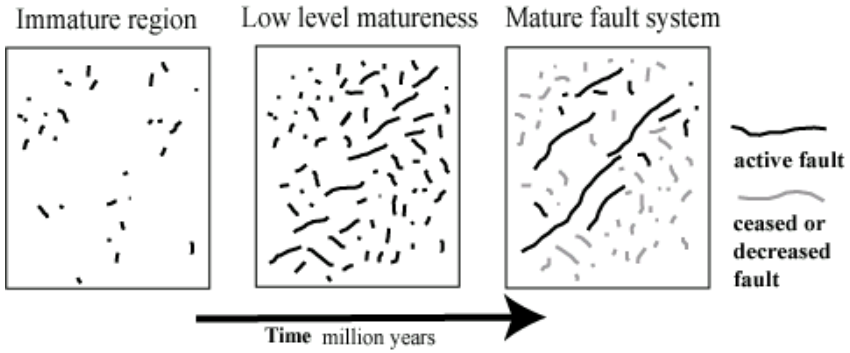
$\log \Delta\sigma 1 = 0.35 \log R(ave) + 0.27$

R=0.69



$$Mw = 1.13 \log Ls + 0.16 \log R + 4.62$$

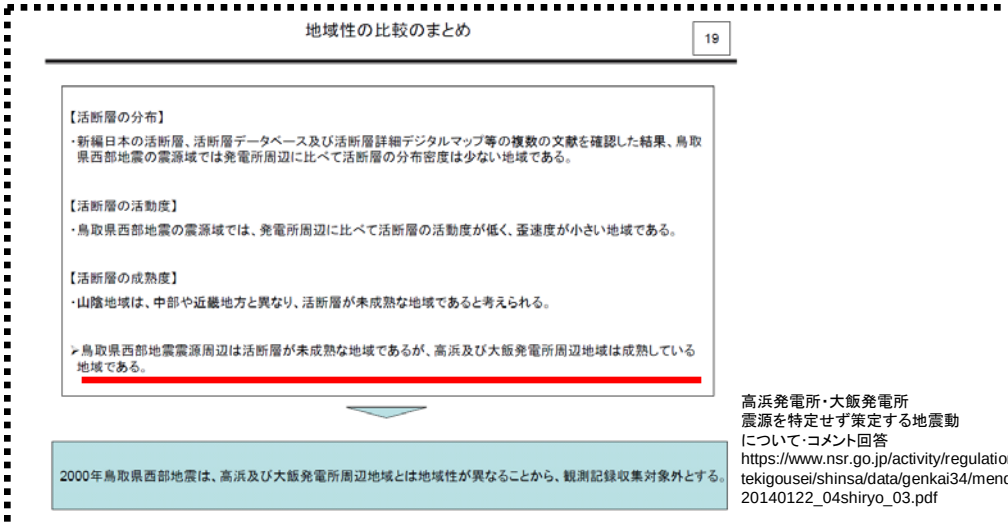
$R^2 = 0.76$, 説明変数間の相関係数 = 0.20



Fault evolution model（modified from Wesnousky(1999)）

活断層の成熟度

「松田式と値が異なるので・・・」



地域性の比較のまとめ

19

【活断層の分布】

・新編日本の活断層、活断層データベース及び活断層詳細デジタルマップ等の複数の文献を確認した結果、鳥取県西部地震の震源域では発電所周辺に比べて活断層の分布密度は少ない地域である。

【活断層の活動度】

・鳥取県西部地震の震源域では、発電所周辺に比べて活断層の活動度が低く、歪速度が小さい地域である。

【活断層の成熟度】

・山陰地域は、中部や近畿地方と異なり、活断層が未成熟な地域であると考えられる。

➢鳥取県西部地震震源周辺は活断層が未成熟な地域であるが、高浜及び大飯発電所周辺地域は成熟している地域である。

2000年鳥取県西部地震は、高浜及び大飯発電所周辺地域とは地域性が異なることから、観測記録収集対象外とする。

高浜発電所・大飯発電所
震源を特定せず策定する地震動
について・コメント回答
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shinsa/data/genkai34/mendan/20140122_04shiryo_03.pdf

Interim review 2
ここまでのまとめ2

Taxonomy and evaluation of uncertainties of active fault datasets for earthquake source fault model

震源断層モデル構築のための活断層データの不確実性の分類と評価

・stochastic uncertainties for magnitude estimation
規模の予測に関する不確実性

/ models for multi-segment faults
長大断層のモデル化

実務への導入は十分可能だが,
まだ研究や試行・経験も必要

/ models for short faults
短い活断層のモデル化

/ new knowledge, new finding, new idea
最新の知見とは

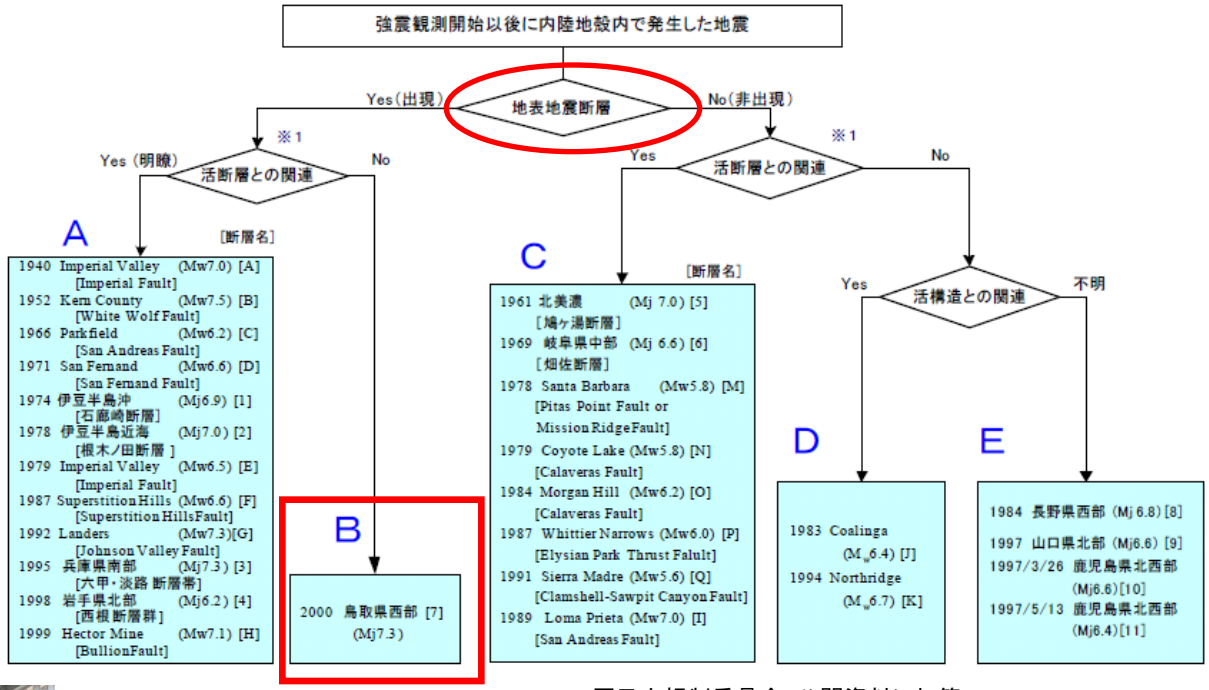
/ 引用からの解釈
/ 独自調査・研究

・controversy of definition / judgment on active faults
活断層の認定に係わる不確実性

Specified fault / specified earthquake
震源断層を特定できる / 特定できないとは？

震源を事前に特定できない地震の選定（加藤・他（2004）より）

・震源を事前に特定できない地震の地震動レベルの検討には、地表地震断層が出現せず、活断層や活構造との関連も不明な地震（Eに分類）を考慮している。



※1： 地震規模に見合う規模の既存活断層が示されているか否か

原子力規制委員会・公開資料に加筆
「震源を予め特定しにくい地震について」震基１１－２－２（事業者説明資料）
http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_taishinkijyun/data/0011_03.pdf

地表地震断層の出現では，「特定できる」としての根拠は薄い
1000年後に活断層として認識される変位量 ⇔ 変動地形が重要

Active fault / surface rupture
活断層と地表地震断層

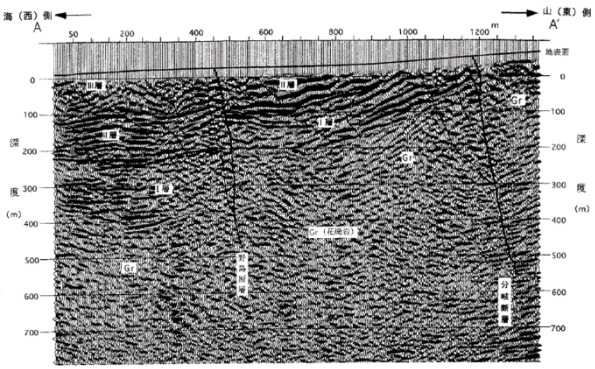


図12　基本地点を通るP波反射法地震探査の深度断面（皆川ほか，1995）　測線の位置は図11に示す。

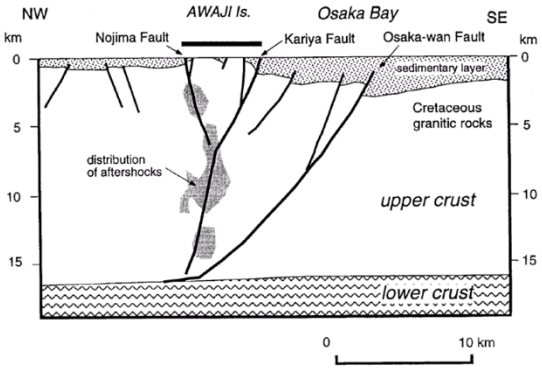
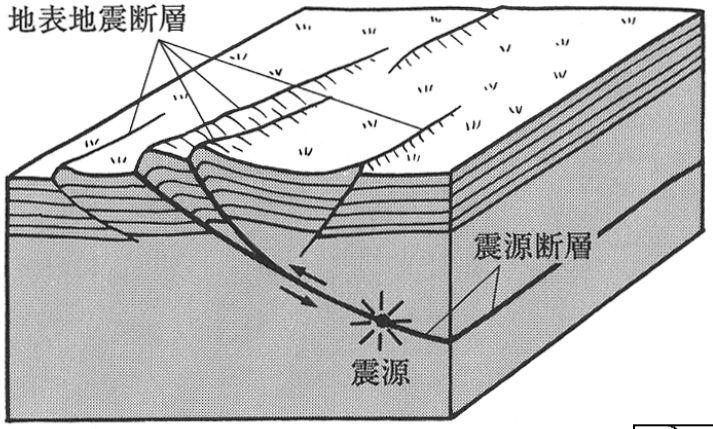


図13　反射法地震探査からみた播磨灘・淡路島北部・大阪湾の深部地下構造断面（岩崎ほか，1998）

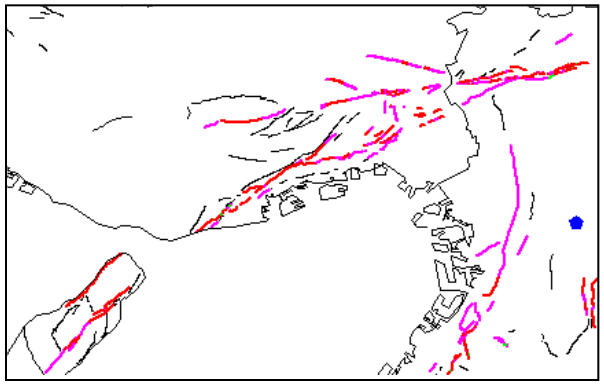
岡田(1998)



島崎ほか(1997)

短い長さの活断層・minor断層は，
これまで調査や研究が不十分！

どのような空間スケール？



Active fault / geologic fault / failure case
活断層と地質断層・失敗事例

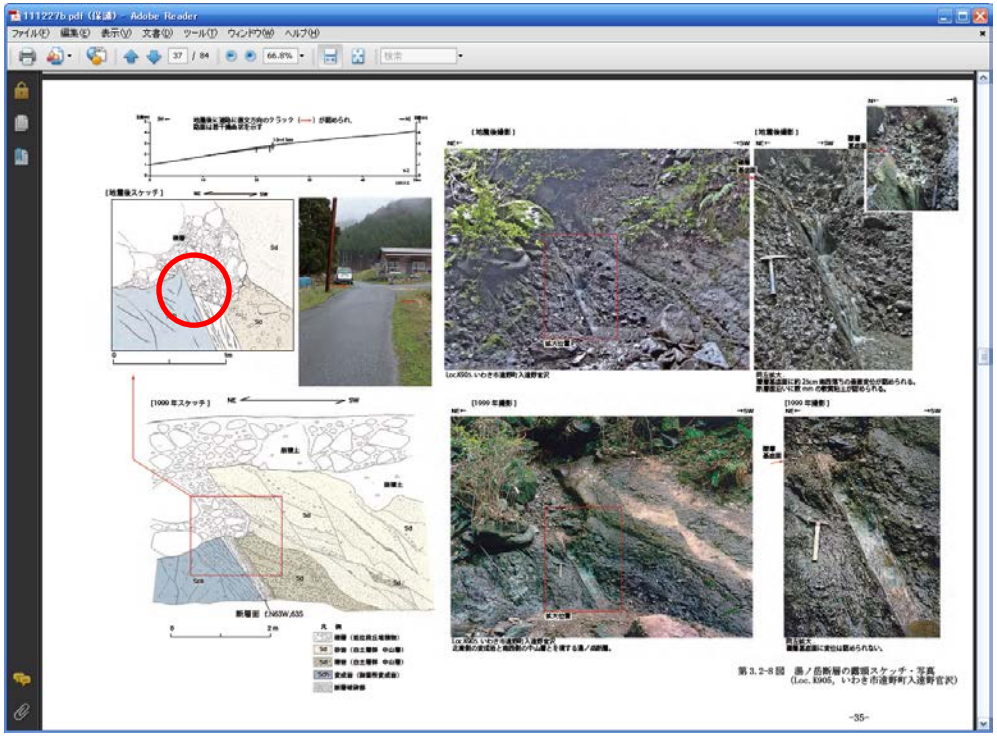
2011年4月11日福島県浜通り地震（M7.0）と湯ノ岳断層

(d) 総合評価

地表地質調査結果によると，湯ノ岳断層はいわき市遠野町入遠野久保目付近から同市常磐藤原町阿良田付近に至る間では北側の古期岩類と南側の中新統とを境する正断層であり，阿良田以東では北東側の古第三系と南西側の中新統とを境する断層である。いずれの断層露頭においても，破砕部は固結し，断層面は癒着しており，断層南部において，断層を覆って分布するM_1面などに変位・変形は認められないことが確認された。また，リニアメントは，古期岩類と中新統とが接している部分で判読され，断層が古第三系と中新統とを境する南部ではリニアメントが判読されないこと，また，湯ノ岳断層に対応していないリニアメントについては，いずれも異なる岩質の地層境界に対応していることから，空中写真判読によるいずれのリニアメントも岩質の差を反映した侵食地形であると判断される。

以上のことから，湯ノ岳断層の少なくとも後期更新世以降における活動はないものと判断される。

原子力安全保安院(2010):福島第一原子力発電所6号炉
審査資料，湯ノ岳断層の活動性評価



東京電力(2011):湯ノ岳断層に関する追加調査結果の報告
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111227b.pdf

・「結果的に，」変動地形の解釈が正しかった・・・

・現在の審査では，岩石化は物性値で計測・・・将来動かないとする基準値の妥当性

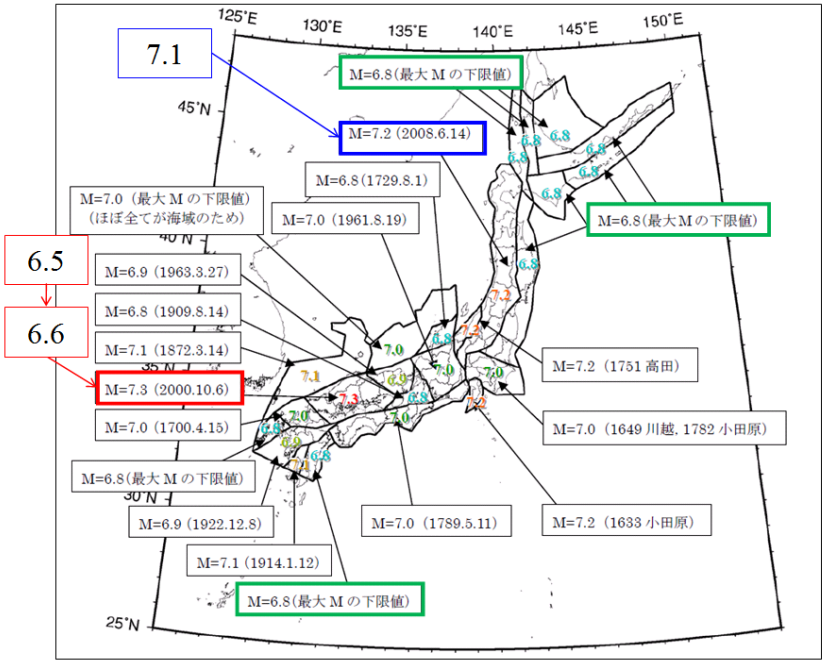
Safe side judgment in case of limited data / knowledge

研究や知識が不十分なときに求められる（安全側の）判断とは

Specified fault / specified earthquake

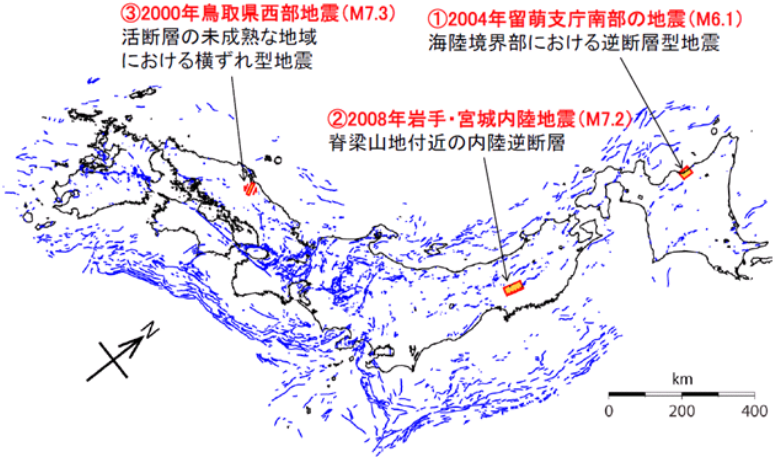
震源断層を特定できる / 特定できないとは？

地震地体構造区ごとの震源を特定せず評価する地震の規模



地震調査研究推進本部(2009)

2．震源を予め特定できるかどうかの検討



3．まとめ

・本日紹介した以下の地震については、原子力における詳細な地質調査を実施することにより、震源が特定できる可能性が高い。

2000年　鳥取県西部地震（M7．3）
2004年　留萌支庁南部の地震（M6．1）
2008年　岩手・宮城内陸地震（M7．2）

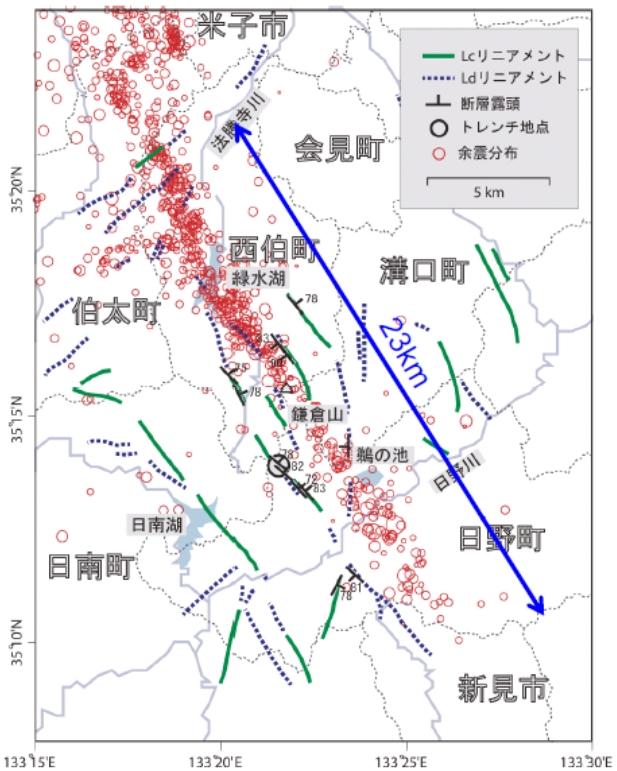
・従って、「震源を特定せず策定する地震動」として全国一律に考慮する対象とはならないと考えられる。

原子力規制委員会・公開資料
「震源を予め特定しにくい地震について」震基11-2-2（事業者説明資料）
http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_taishinkijyun/data/0011_03.pdf

Tottori-ken_seibu earthquake (2000/10/06, Mjma7.3)

2000年鳥取県西部地震（M7.3）と活断層・震源断層

2-3.　2000年10月6日鳥取県西部地震（M7.3）に関する活断層評価について



震源域のリニアメントと余震分布（井上ほか，2002を一部加筆修正）

震源断層との関連不明

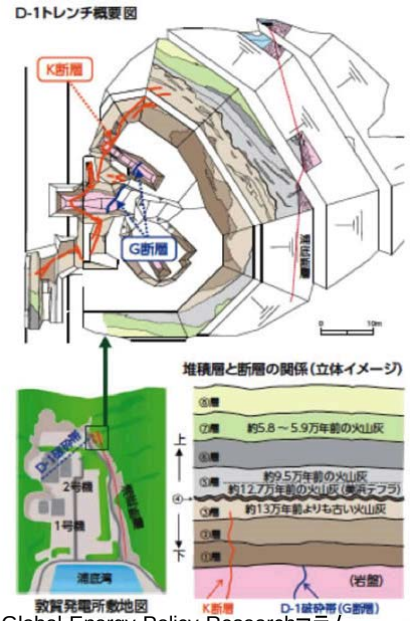
震源断層とリニアメントの関係（推定）

- 震源域周辺には、北西-南東方向のリニアメントが周囲と比較して密に分布する。その一部は推定活断層と評価されている。（別添（3）p7～8）
- リニアメント沿いには多数の断層露頭が確認され、一部は第四紀層を変位させている。また、トレンチ調査地点では、西暦770～1260年に断層活動が認められる。（別添（3）p8～9）
- 北西-南東方向のリニアメントは断続的に23kmにおよび、その直下では同方向に分布する前駆的な地震活動が認められていた。（別添（3）p8, 11）

◎詳細な調査を実施していれば、事前にある程度の規模の地震発生のポテンシャルがあることが推定可能であったと考えられる。

⟹【Bに分類】地表地震断層が出現し、活構造との関連あり。

原子力規制委員会・公開資料
「震源を予め特定しにくい地震について」震基１１－２－２（事業者説明資料）
http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_taishinkijyun/data/0011_03.pdf



Global Energy Policy Researchコラム
「敦賀原発の活断層判定、再考が必要」
http://www.gepr.org/ja/contents/20140630-03/

（活）断層 > リニアメントのはず
左の基準を適用させると・・・？

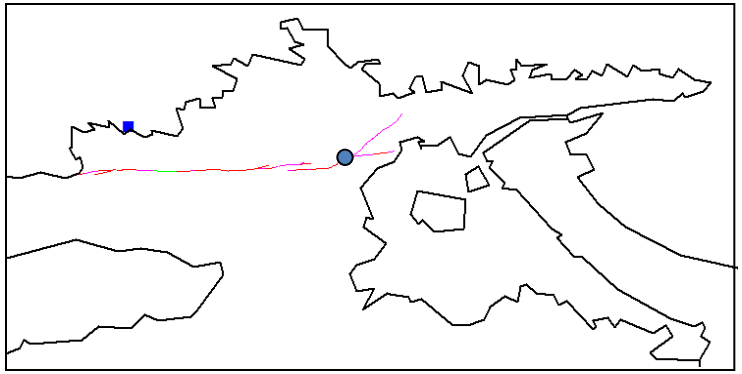
リニアメントに沿ってずれが出現

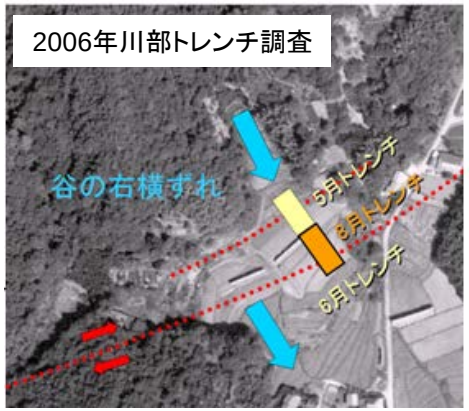
「2000年鳥取県西部地震地震断層の掘削調査速報」
産業技術総合研究所　活断層・地震研究センタ
https://unit.aist.go.jp/actfault-eq/katsudo/trench/tottori/index0202.html

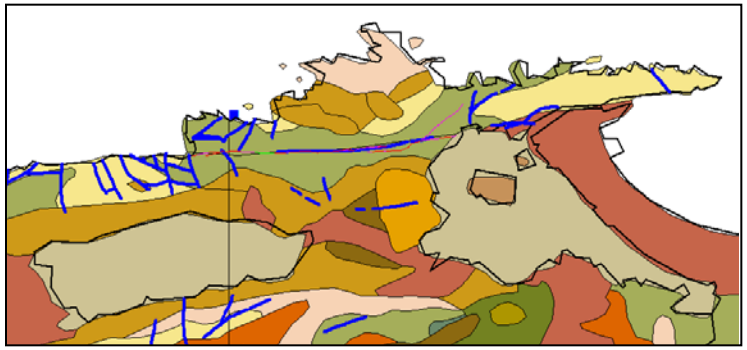
写真1．緑水園脇の空き地（地点1）で掘削されたp1-4北西側壁面．

Active fault / geologic fault
活断層と地質断層

鹿島断層（宍道断層）







産業技術総合研究所 地質調査総合センタ
20万分の1シームレス地質図
青線は地質断層

地質調査所5万分の1地質図「境港」

トレンチ調査をお願いしても
とりあってもらえなかった

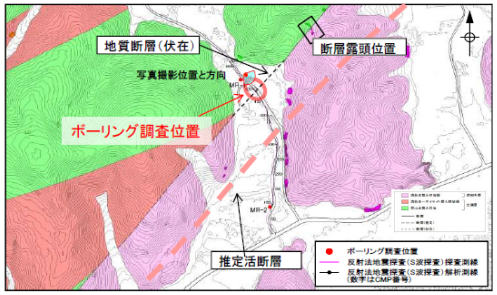
- 地質断層やリニアメントの解釈の任意性
- 最後は，トレンチ調査（指示した場所を調査して，断層が見えなかった時の結論）

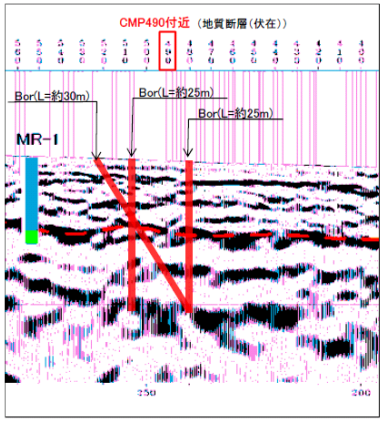
Further research for challenging theme
難しくても継続調査

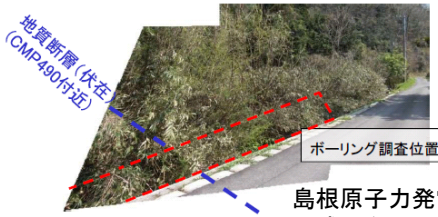
（参考）森山のボーリング調査計画案

ボーリング調査によりCMP490付近に想定される伏在断層を確認する。
・ボーリング調査：約25m×2孔（鉛直）
・ボーリング調査：約30m×1孔（傾斜）

（注）ボーリング数量については，調査状況に応じて追加等の変更を行う。







ボーリング調査位置付近の写真

島根原子力発電所・敷地周辺陸域の活断層評価（コメント回答）
平成26年5月1日
http://www.energia.co.jp/judging/pdf/gaiyou_h260529_1.pdf

トレンチ調査をお願いしても
とりあってもらえなかった

・peer reviewを受けた学術論文

・反論の対象は，国の審査結果

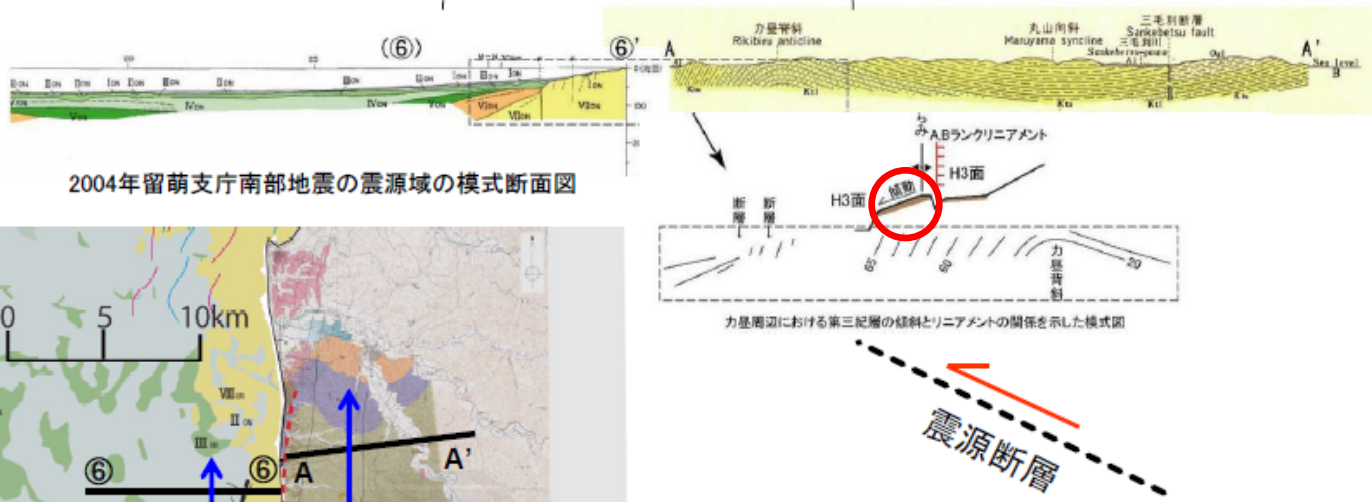
・急ぐ必要はない
（審査終了後でも良い）

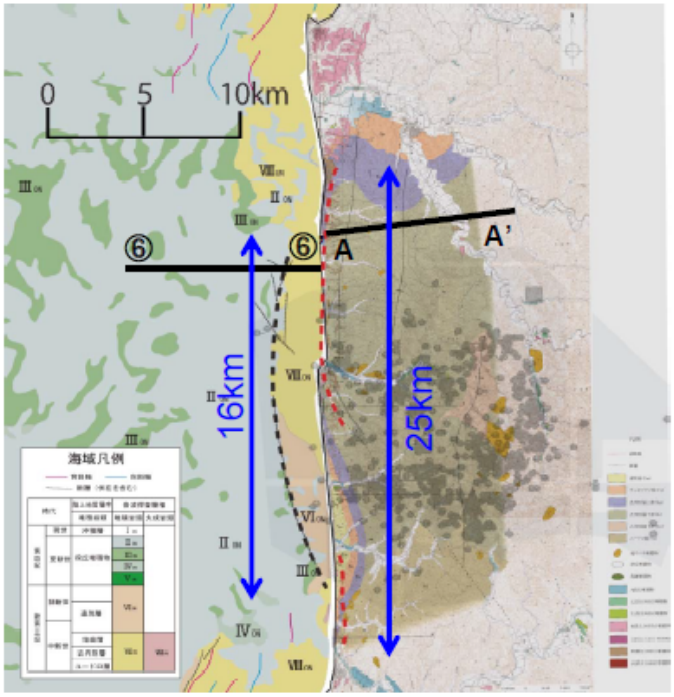
Tectonic landform / Tectonic deformation / characterized seismic source model
変動地形と震源断層

2-1. 2004年12月14日北海道留萌支庁南部の地震(M6.1)に関する活断層評価について

一体的な評価が重要

海側　　陸側





・北海道北西部は海岸線に沿う東西圧縮のひずみ集中帯で、陸側の第三紀層を隆起させている。(別添(1)p4～6)

・震源域前面海域には西に急傾斜する地質構造が陸域から張り出し、長さ16kmの活構造として認識されている。(別添(1)p10)

・西に急傾斜する地質構造は沿岸陸域まで連続し、その中に中位・高位段丘を変位させる逆向き低崖が約25kmにわたって断続的に分布している。(別添(1)p12～14)これらは逆断層上盤側の副断層と解釈される。(別添(1)p18～19)

◎これらのことから、沿岸海域の撓曲構造の基部から陸側に傾斜する長さ約16～25kmの活断層が伏在していると想定することができる。

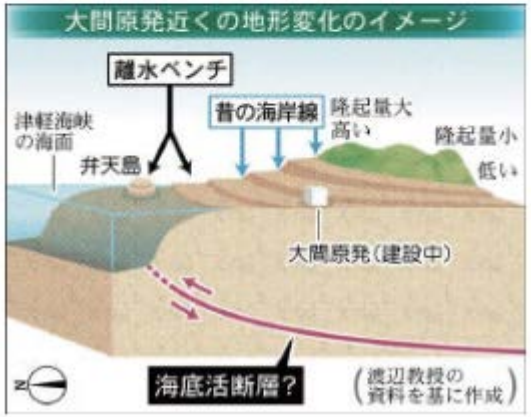
⟹ 【Dに分類】地表地震断層は出現していないが、活構造との関連あり。

原子力規制委員会・公開資料
「震源を予め特定しにくい地震について」震基11－2－2(事業者説明資料)
http://www.nsr.go.jp/committee/yuushikisya/shin_taishinkijyun/data/0011_03.pdf

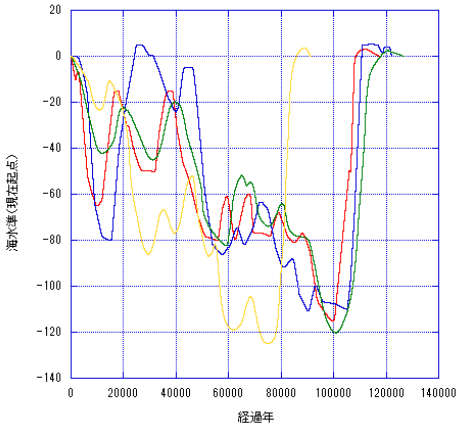
Tectonic landform / Tectonic deformation / simulation
変動地形と震源断層 / 変動地形形成シミュレーション

下北半島北端部の海岸地形

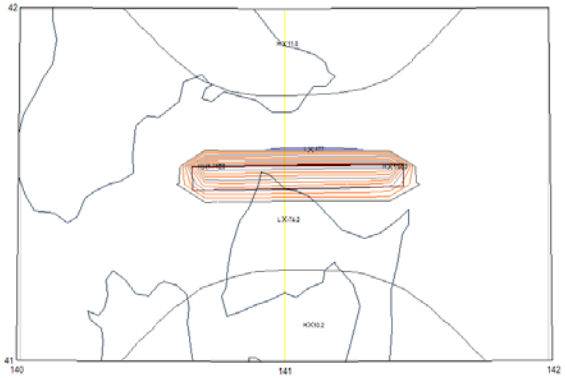
階段状の地形が特徴的な弁天島。専門家は未知の活断層の存在を警告する＝青森県大間町沖



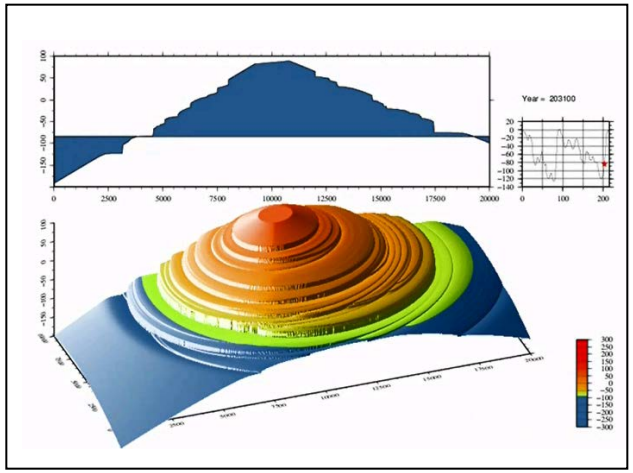
河北新報（2013年10月19日）



海水準変動曲線のばらつき



地殻変動の計算結果



シミュレーションより，段丘面の幅や傾斜は，気候変動と地殻変動に相互関連

こうした成果は，まだ「最新の知見」とは言ってもらえないかもしれないが．．．

Tectonic landform / Tectonic deformation / characterized seismic source model
変動地形と震源断層

2008年 岩手・宮城内陸地震（Mjma7.2）

図１：1976年撮影の航空写真の判読結果（予察図）
（赤線：活断層の可能性の高い。黒線：活断層の可能性のある。★：今回の地震時に撓みや傾動等の地変が生じた地点）

地震発生前の航空写真やトレンチ調査により
活断層の存在を認定は可能（鈴木，2010）

新知見を採用しないかぎり，規模の推定は難しい

Global Energy Policy Research www.gepr.org

敦賀原発の活断層判定、再考が必要（下）・行政権力の暴走

有識者会合のメンバーの構成も問題だ。これは4人の学者からなる。地質学にはさまざま分野があるが、地形から地質の変化を分析する変動地形学者が3人、堆積物などから分析する地質学者が1人からなる。これまで述べたように日本原電は堆積物からの年代推定で決定に反論をした。この構成ゆえに、会合メンバーは原電の主張に適切に答えることができなかった。

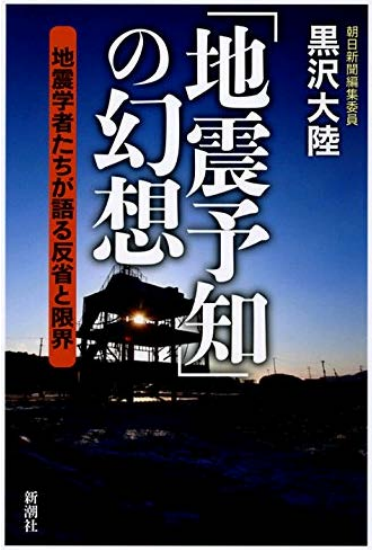
またこれらのメンバーは4人とも、過去に原発の地層の認定に関わっていない人が選ばれた。中立性を保とうとするものだが、これまでの経緯がまったく考慮されなくなった。討議からは原子炉の安全性への配慮や、規制ルールへの知見が乏しく、各有識者は「可能性があれば安全に判断する」という態度を示した。こうした態度は、経済性など多様な論点に配慮しなければならない企業設備である原子炉の安全性の判定に、ふさわしいとは言えないだろう。

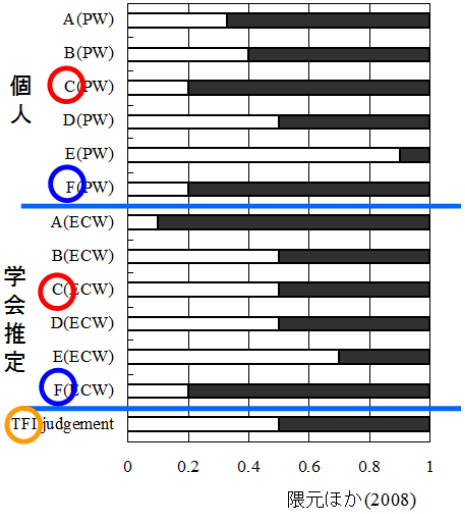
そして中立性の疑われるメンバーがいる。鈴木康弘名古屋大教授は、反原発色の強い岩波書店から原発のリスクを強調した本を出版。評価結果を確認するピア・レビュー（査読）をする学者のうち、渡辺満久東洋大教授は反原発の立場を公言し、政治集会に参加している。

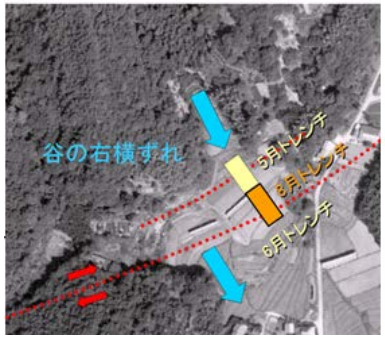
Global Energy Policy Researchコラム
「敦賀原発の活断層判定、再考が必要」
http://www.gepr.org/ja/contents/20140630-03/

関わってくれる活断層の研究者は大事に

Superfluity
蛇足







変動地形学者の数を渡辺に尋ねると,
「指折り数えられる・・・・・, 21人ですね」

経験
実績

中立性

やる気

・変動地形学とトレンチ調査は, 技量の必要な学問分野

・存否の議論は,「不確実性」の観点で解決できるのか？

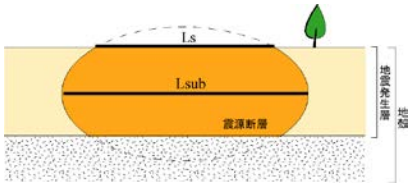
・「安全側の判断」を安易に使用すべきではない

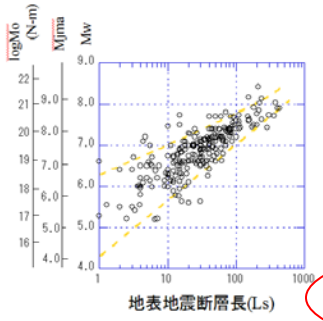
・それでも, 学問的経験・実績に基づく意見や決断は重要

Summary 1/2
まとめ1/2

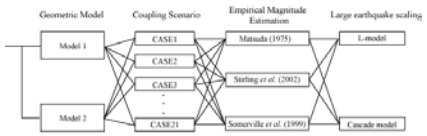
・stochastic uncertainties for magnitude estimation
規模の予測に関する不確実性

実務への導入は十分可能だが，
まだ研究や試行・経験も必要

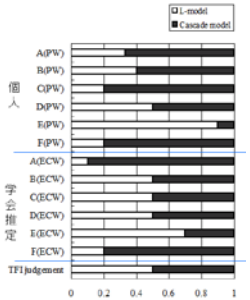




/ models for multi-segment faults
長大断層のモデル化



/ models for short faults
短い活断層のモデル化



/ new knowledge, new finding, new idea
最新の知見とは

・controversy of definition / judgment on active faults
活断層の認定に係わる不確実性

まだまだ議論が必要
しかし，決断も必要

規制委委員の島崎邦彦氏は地震の安全対策を取り扱う。この会議での島崎氏の態度も問題だった。日本原電の説明時間を減らし、説明中でも「時間がないので後にしましょう」と審議を強引に打ち切る場面もあった。さらに判定を左右しかねない地層中の堆積物の問題（後述）についても「重要な論点でない」と一蹴した。有識者委員も問題のある対応をした。鈴木康弘名古屋大学教授は、「活断層である」とした自らの判断に疑問を示す原電提出の資料を「見解の相違」というだけで説明もなしにはねつけた。

Global Energy Policy Researchコラム
「敦賀原発の活断層判定、再考が必要」
http://www.gepr.org/ja/contents/20140630-03/

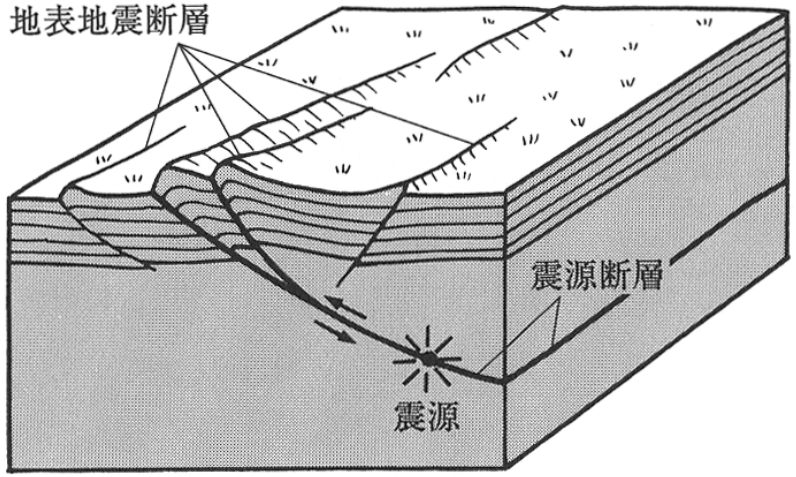
Summary 2/2
まとめ2/2

・controversy of definition / judgment on active faults
活断層の認定に係わる不確実性

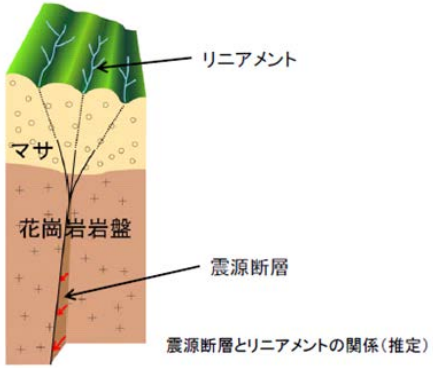
変動地形として残る条件 / 認定の確実度

活断層の定義
副断層
副次断層
2次断層
お付き合い断層
地変
地割れ・亀裂
表層変形

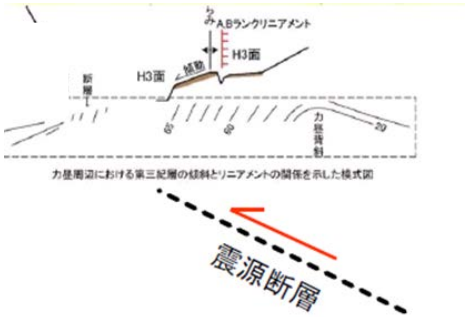
膨潤
地すべり



島崎ほか(1997)に加筆



震源断層とリニアメントの関係（推定）



・「良いとこ取り」の個別の適用ではなく，「論理的一貫性のある説明」が重要

・研究と議論がまだ十分ではない，そのときの安全側の判断
・「安全側」とは，リスクが「無」のことか？
/ 活断層とされた地層境界が地震時に変位すると仮定して，
*工学的に安全性を担保できるか
*地震時のずれの予測値の精度