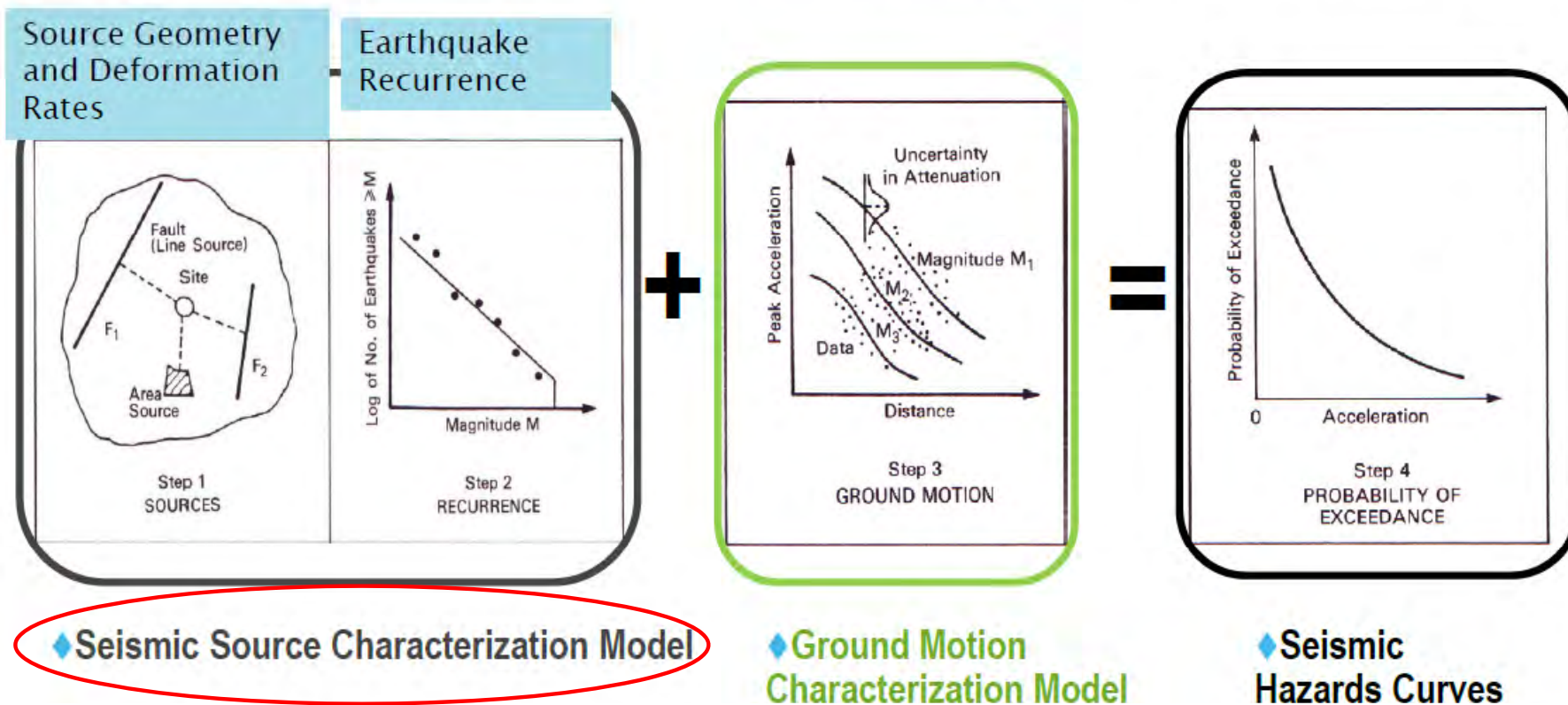


内陸地殻内地震を対象とした確率論的地震動ハザード評価課題とその解決に向けて

隈元 崇@岡山大学

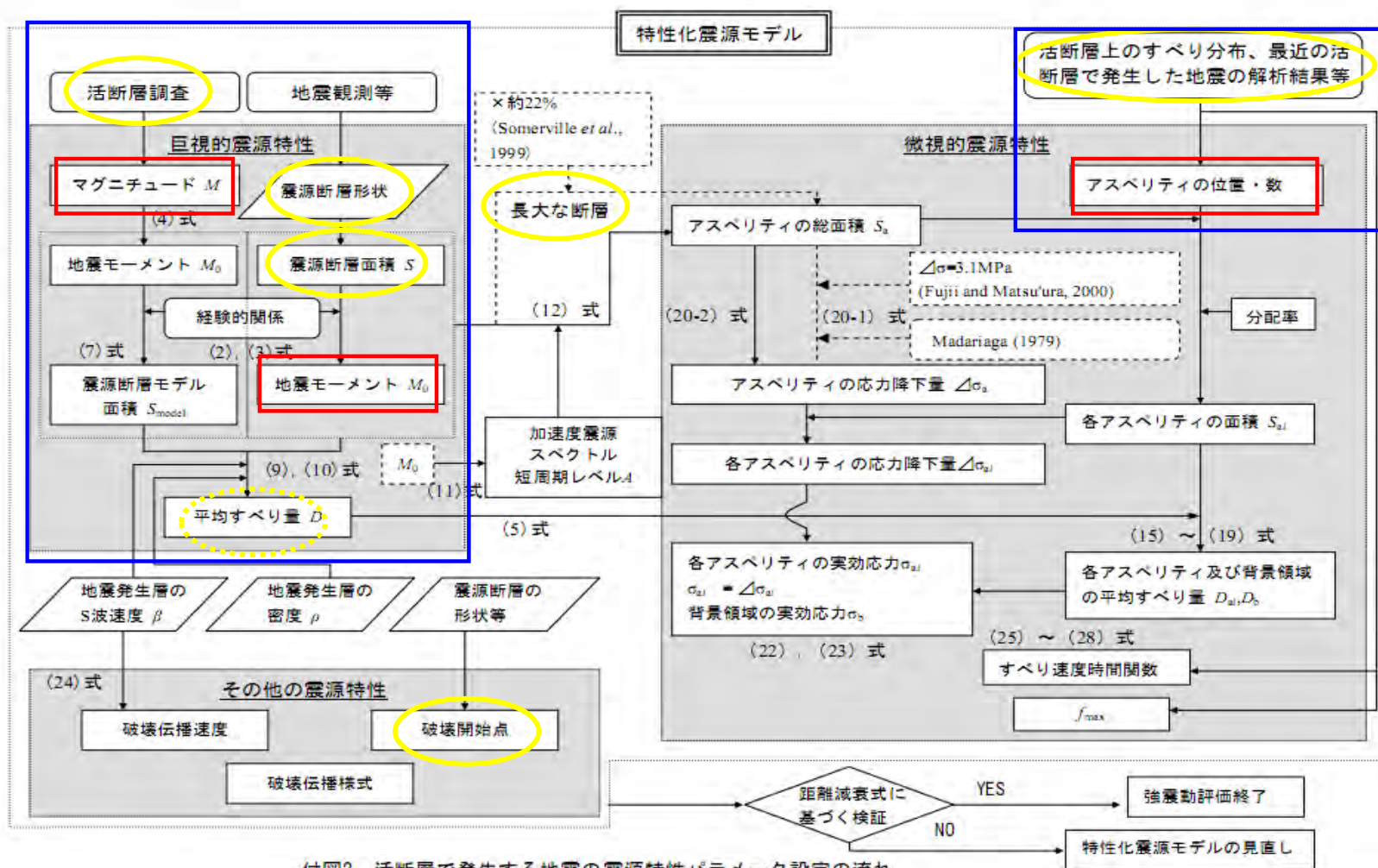
Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)



Lettis, 2013

<http://www.pge.com/includes/docs/pdfs/shared/edusafety/systemworks/dcpp/SSHAC/sugmworkshops/>

特性化震源モデル(地震本部, 2010)



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

活断層情報は、地震規模の推定など特性化震源モデルのパラメータ作成に重要

震源断層モデル構築のための活断層データの不確実性

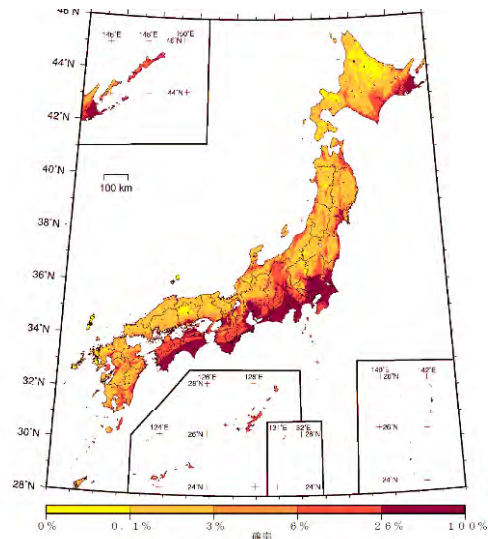
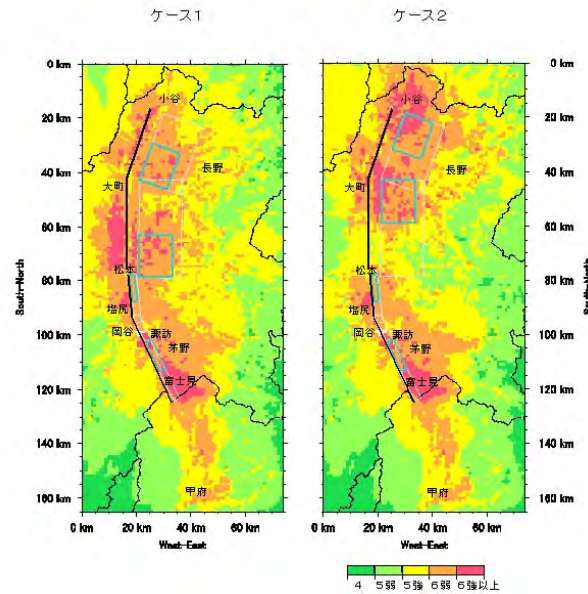
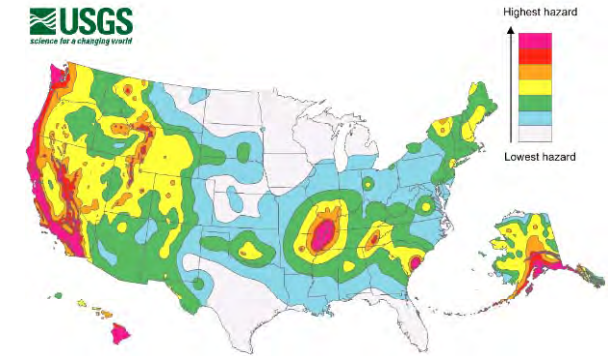


図 2.2-1 確率論的地震動予測地図：確率の分布
今後 30 年間に 震度 6 弱以上の揺れに見舞われる確率



地震本部による評価(左:確率論的地震動予測地図, 右:詳細法によるISTLの地震動)



・活断層の認定に係わる不確実性

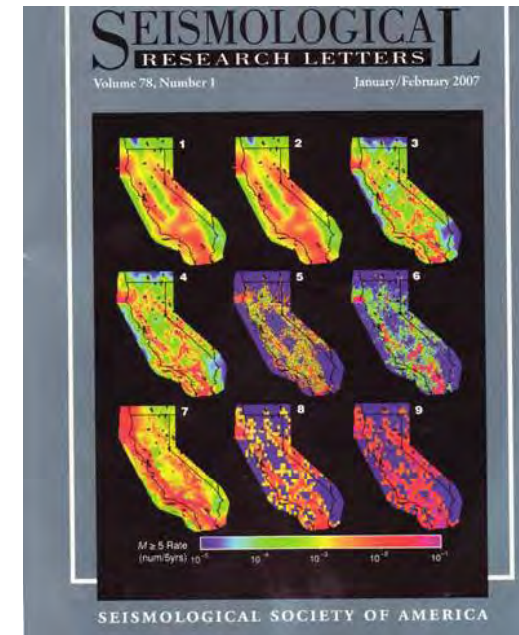
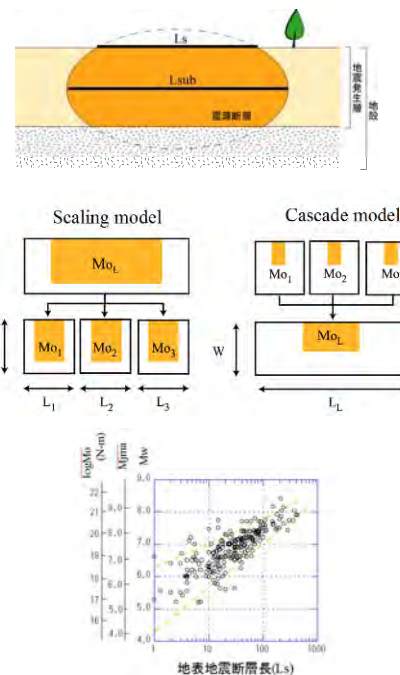
・規模の予測に関する不確実性

/ 短い活断層のモデル化

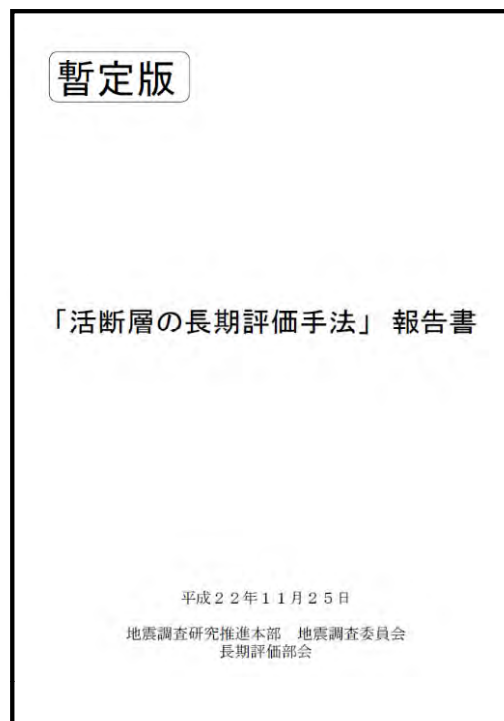
/ 長大断層のモデル化

/ ばらつきの評価

・頻度の予測に関する不確実性



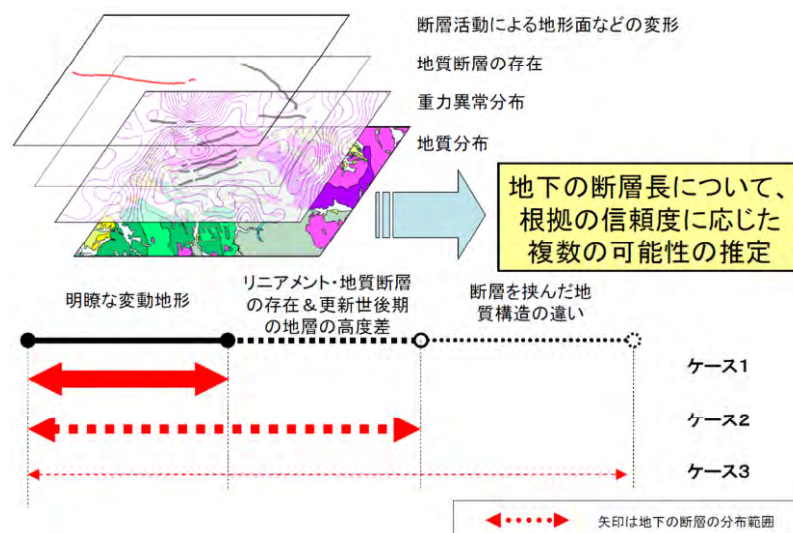
震源断層モデル構築のための活断層データの不確実性



[説明]

○ 地震の規模

- ① 地震の規模は、気象庁マグニチュード (M ; 以下では単に「マグニチュード」と記す) で表す。
- ② マグニチュードの大きさは0.1単位で表記する。
- ③ 活断層の長さに基づき地震の規模を推定する場合には、松田(1975)の $M-L$ 式を用いてマグニチュードを計算する。
- ④ 地震規模の推定の際の断層の長さには地下の断層の長さを用いることとする。
- ⑤ 過去における1回のずれの量が求められている場合には、松田(1975)の $M-D$ 式からマグニチュードを計算する。
- ⑥ 活断層の長さについて信頼度が低い場合には、 $M-L$ 式と $M-D$ 式を併用する。
- ⑦ 歴史地震の研究や観測によって地震の規模が分かっている場合には、その値を引用もしくは参照して、上記の手法により求めた地震の規模と包括して記述する。
- ⑧ 活動時の地震規模について、④、⑤、⑦により複数の値が得られた場合には、最も大きな値を評価に用いる。この際、地表に活断層が表れている場合は地震発生層の厚さに対応する規模以上の地震が発生すると想定されることを考慮する。
- ⑨ 地下の断層の位置及び長さについて、複数の可能性が想定される場合、シナリオ毎に地震の規模を評価するとともに、ロジックツリーを用いてシナリオの重み付けを行う。



「活断層の長期評価手法(暫定版)」報告書について(平成22年11月25日)
http://jishin.go.jp/main/choukihyoka/katsu_hyokashuho/index.htm

震源断層モデル構築のための活断層データの不確実性

「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。

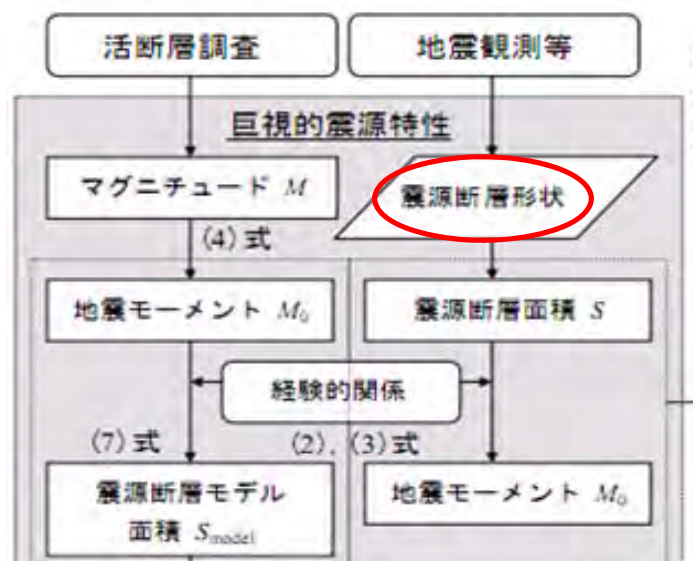
断層パラメータの不確定性: 断層傾斜角 (認識論的不確定性)

認識論的不確定性

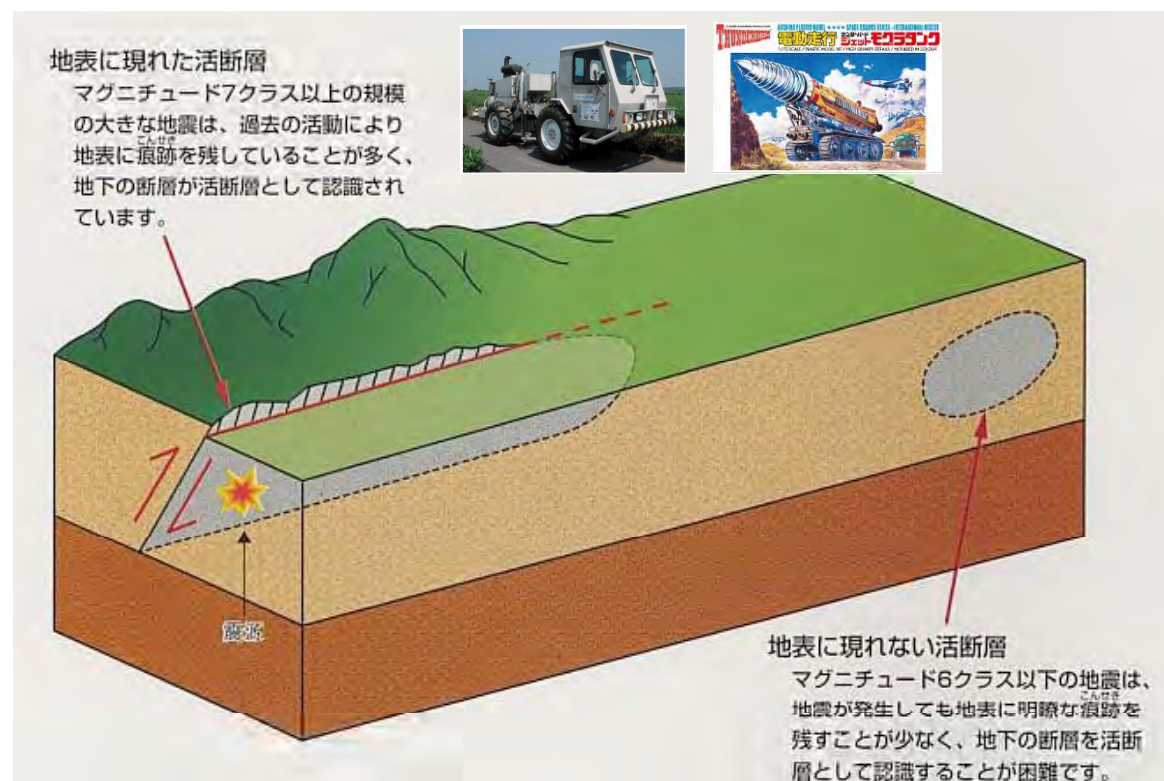
解は存在するが、
情報不足のために確定できない
↓
分岐に対する重みは主観的に評価

偶然的不確定性

パラメータの特性から確定できない
↓
分岐に対する重みは、
データにより統計的に評価



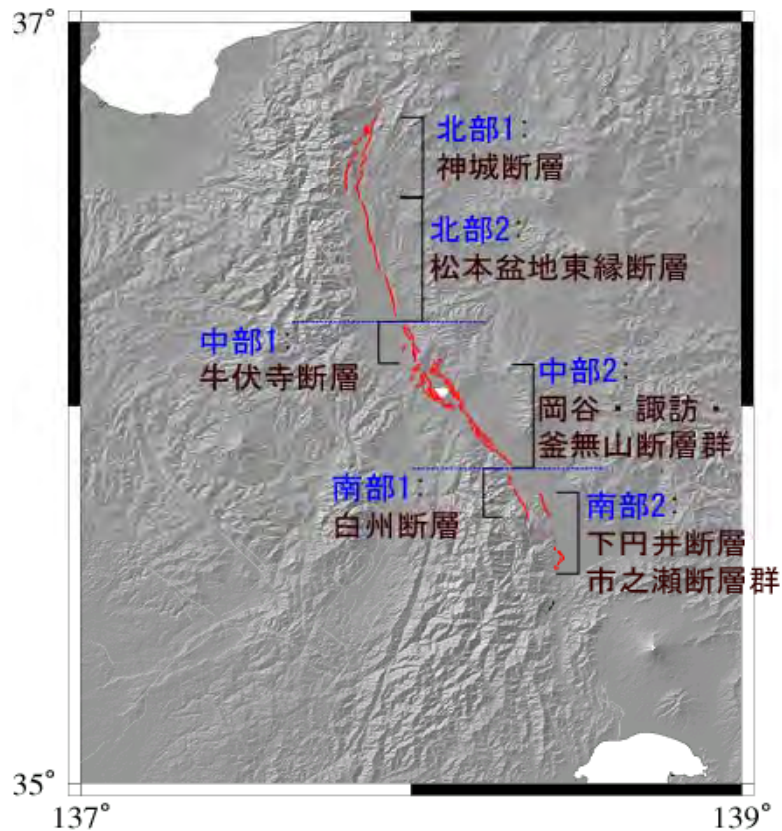
地震本部の評価手法(抜粋再掲)



地震本部(2010)に加筆

断層パラメータの不確定性: 断層傾斜角(認識論的不確定性)

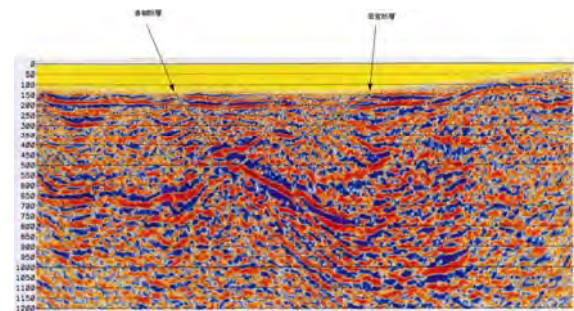
糸魚川ー静岡構造線活断層帯のロジックツリー評価事例 (隈元ほか, 2007)



- ・日本のほぼ中央に位置し, 全長約150km
- ・今後30年間の地震発生確率14%
平均活動間隔 700~3000年
最新活動時期 西暦762年又は841年
- ・走向・すべりタイプで6つのセグメントに区分



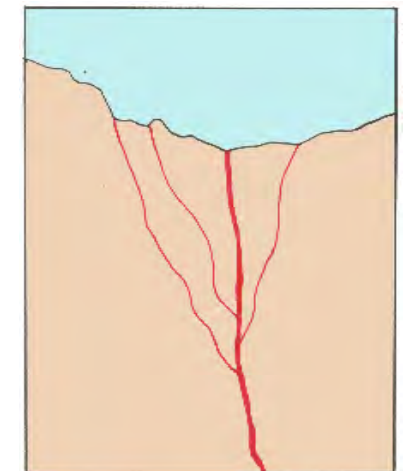
円井露頭



富士見反射断面 (松多ほか, 2007)



茅野トレンチ (山梨大WWW)



Flower structure

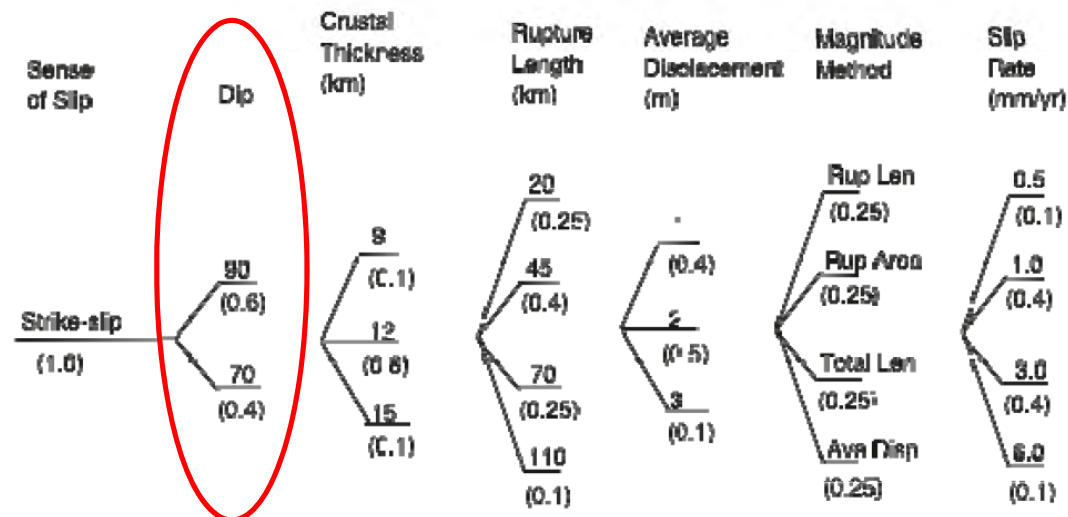
断層パラメータの不確定性: 断層傾斜角(認識論的不確定性)

Diablo Canyon Power Plant and Hosgri fault



PG&E

Hosgri Logic Tree



6.5.2 ロジックツリーで考慮すべき不確実さ要因の選定

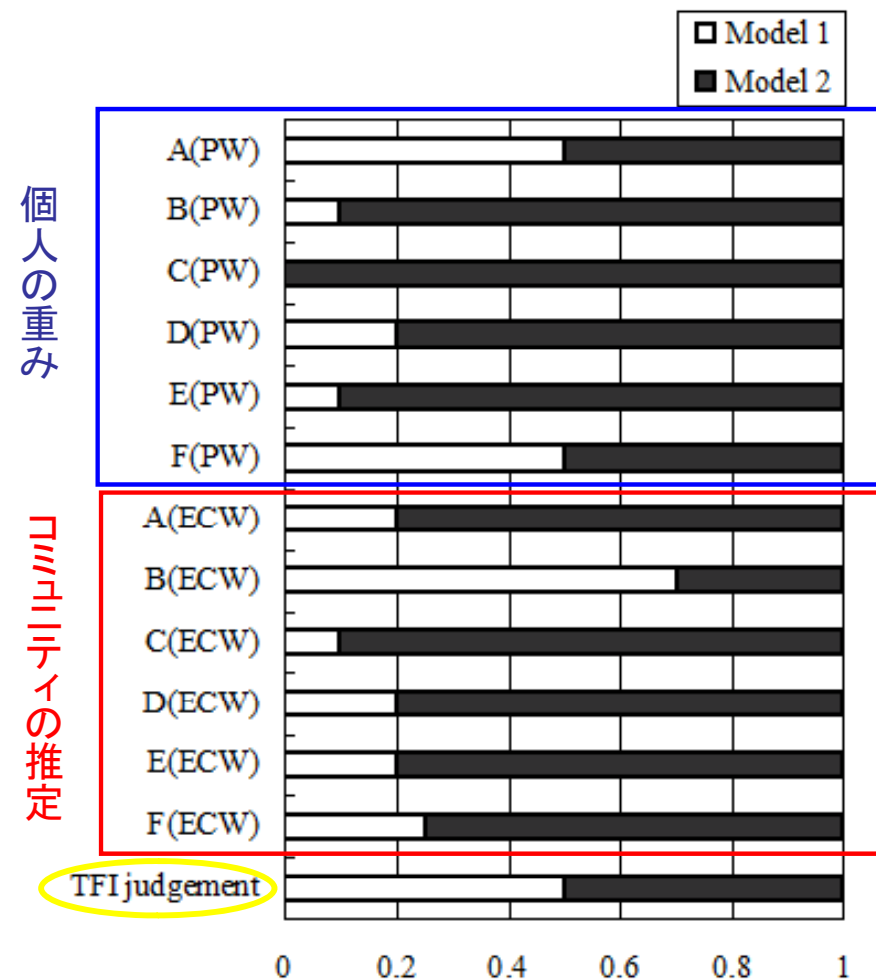
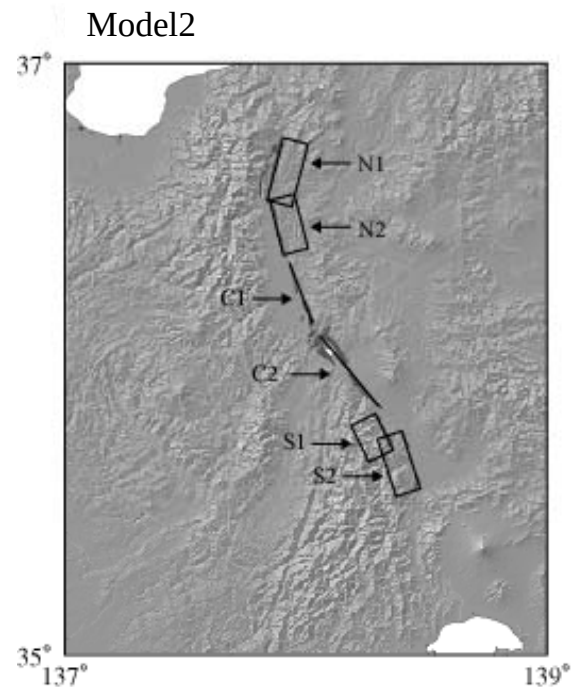
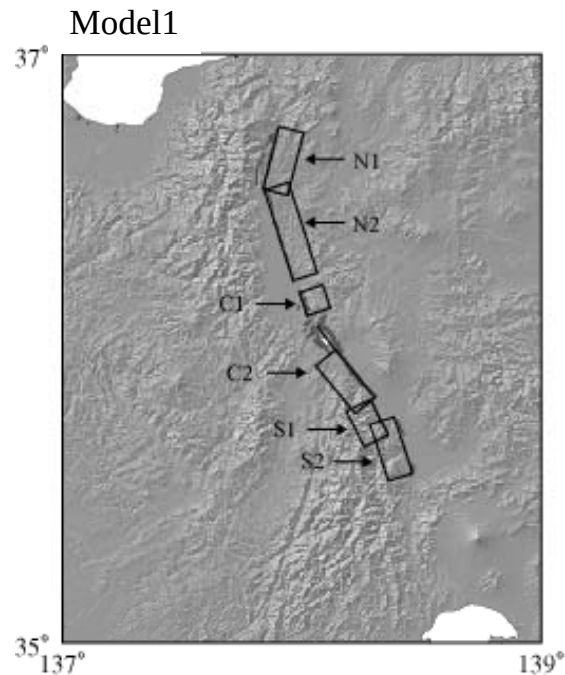
地震動ハザード評価者は、特定震源モデルの設定について 6.3.4.5、領域震源モデルの設定について 6.3.5.4、地震動伝播モデルの設定について 6.4.6 において、それぞれ選定した認識論的不確実さ要因を対象として、ロジックツリーを作成しなければならない。

対象とする認識論的不確実さ要因は、震源モデル及び地震動伝播モデルを設定する過程において、判断が分かれる項目、評価方法が複数存在する項目等とし、感度解析を適宜実施して、地震動ハザードに大きな影響を及ぼす項目をロジックツリーで考慮すべき認識論的不確実さ要因として選定する。

3) 専門家活用水準 3

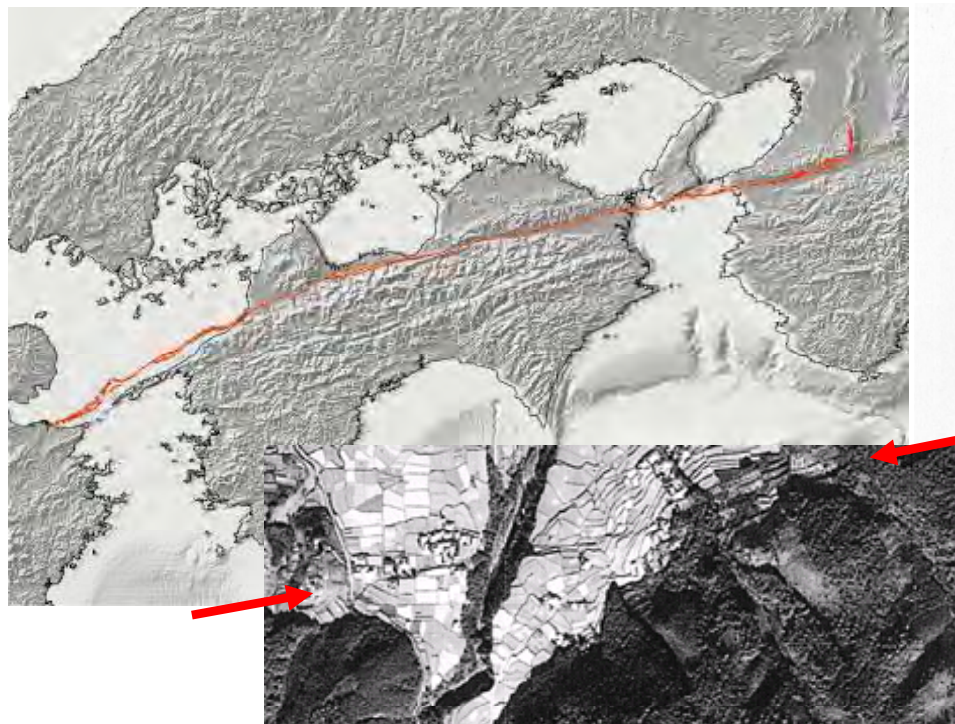
地震動ハザードの不確実さ要因が広範囲で多岐に渉り、重要かつ複雑と判断され、その評価に関して多大な時間・費用・人的資源を要し、場合によっては各種調査が必要となることを想定する。そして、TFI が専門家によるパネルを編成し、専門家をモデル提案者でなく不確実さの客観的評価者として活用し、パネルが評価したコミュニティ分布を公平に集約して、ロジックツリーを作成する。

断層パラメータの不確定性: 断層傾斜角(認識論的不確定性)

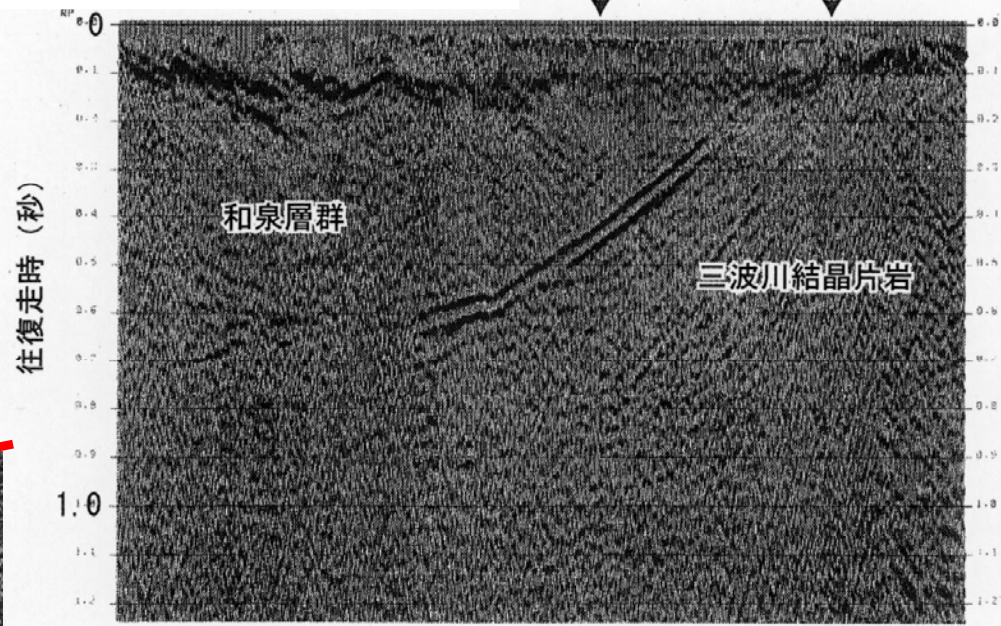


- 全体として, Model2が優勢 (反射断面に見えているものは?)
- 専門家Bの重みの相違の根拠
- 専門家Dの分布?
- TFIは50:50と判断 (地形vs.物理探査)

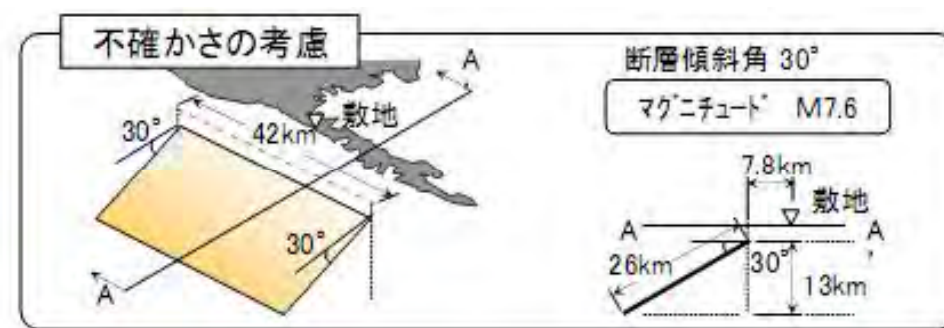
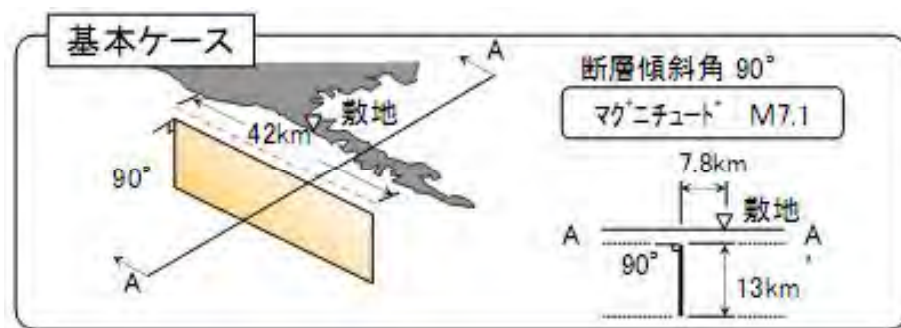
断層パラメータの不確定性:断層傾斜角(認識論的不確定性)



断層線は地形の起伏によらず直線的
=断層の傾斜角は垂直に近い



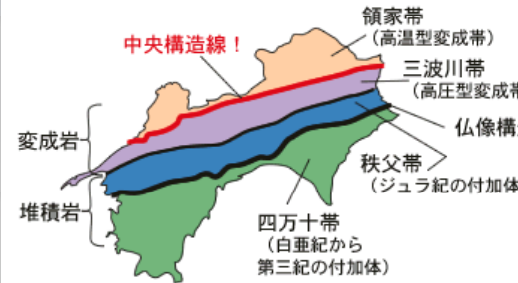
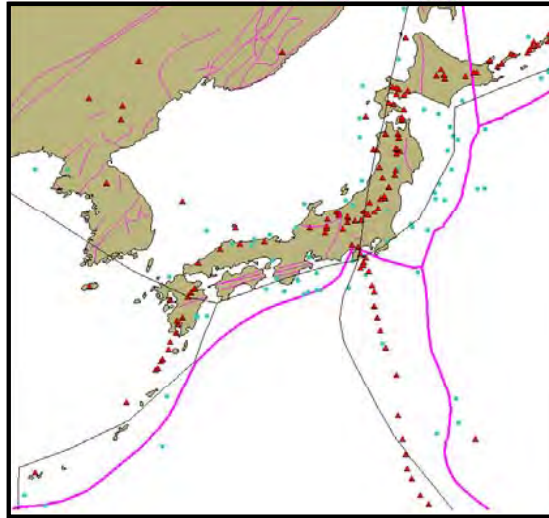
(堤ほか, 2005)



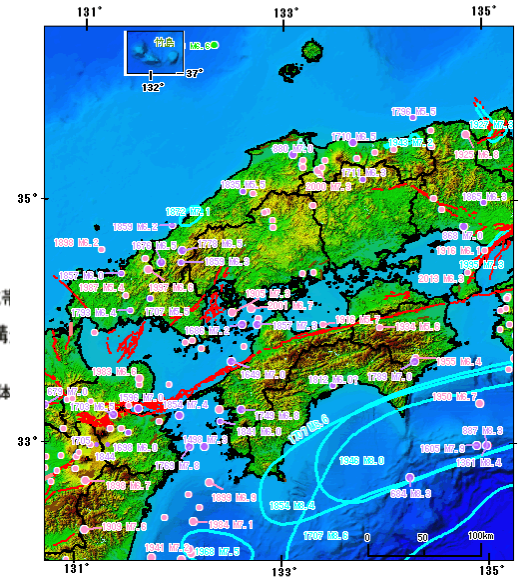
(原子力安全委員会WG3資料)

活断層としてのMTLの断層傾斜角は . . .

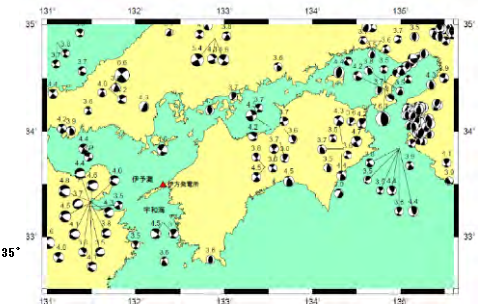
断層パラメータの不確定性: 断層傾斜角(認識論的不確定性): 関連資料の取り扱い



「四万十帯に便利」
<http://www.arito.jp/LecEQ03.shtml>



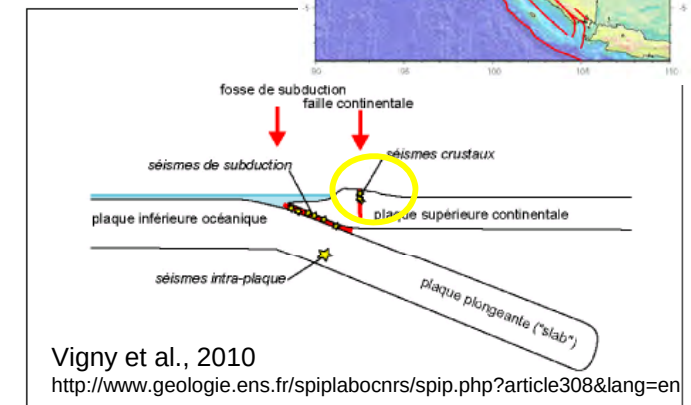
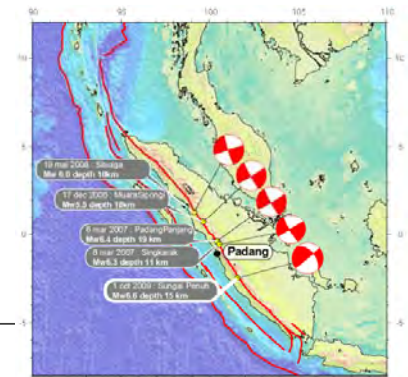
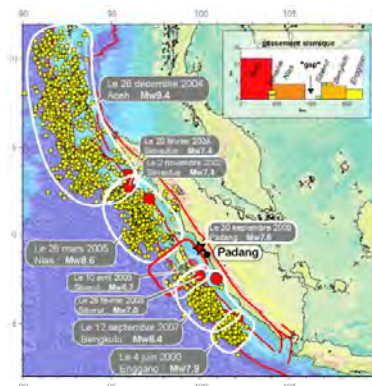
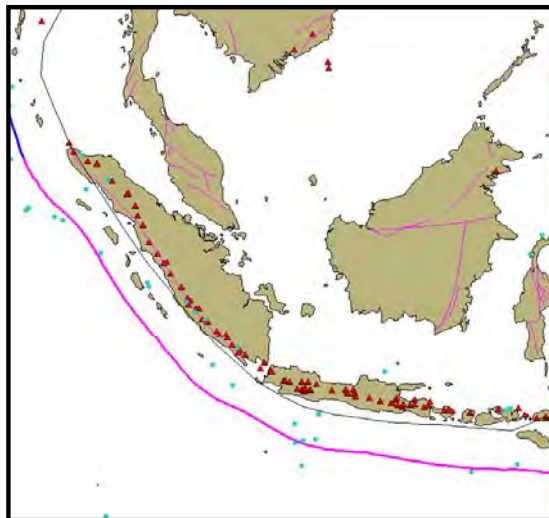
地震本部, 2010



四国電力, 2014



「四万十帯に便利」
<http://www.arito.jp/LecEQ03.shtml>



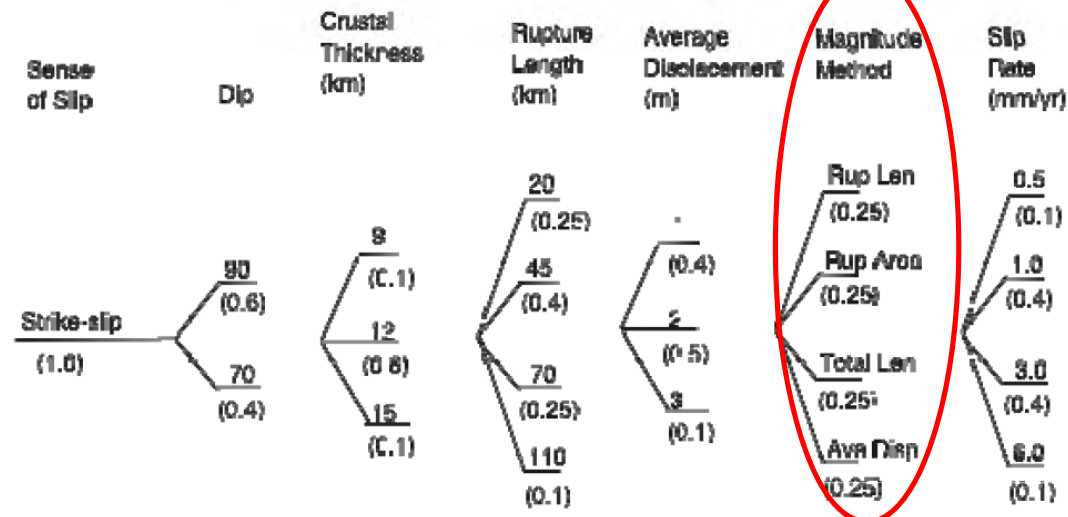
断層パラメータの不確定性:地震規模の推定(認識論的不確定性)

Diablo Canyon Power Plant and Hosgri fault



PG&E

Hosgri Logic Tree



断層パラメータの不確定性: 地震規模の推定(認識論的不確定性)

1. 松田(1975)

- ・推本の長期評価
- ・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

$$M_W = 3.606 + 2.27 \log L \quad (M_W < 6.5)$$

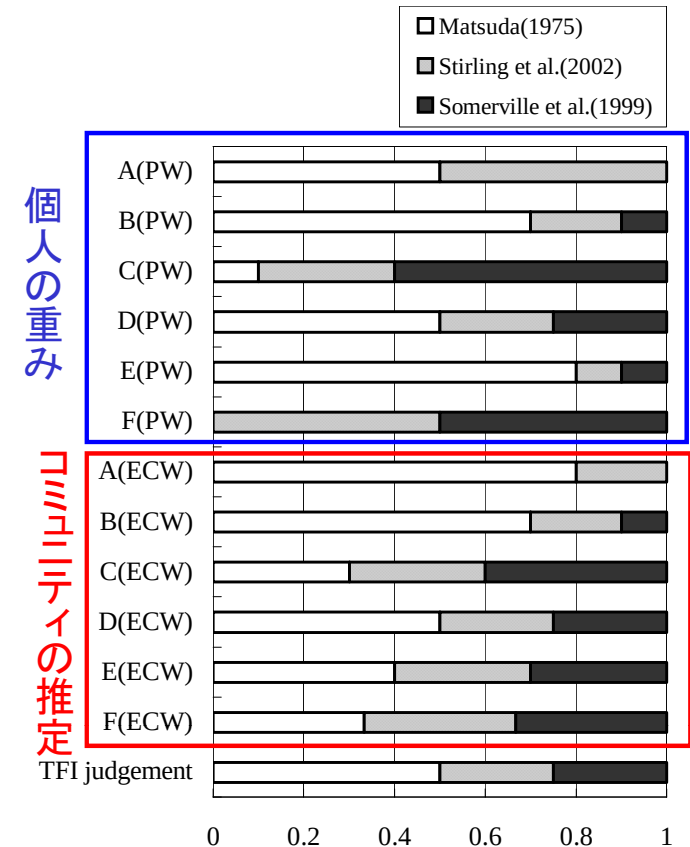
$$M_W = 4.743 + 1.375 \log L \quad (M_W \geq 6.5)$$

3. Somerville *et al.*(1999)

- ・推本の強震動評価
- ・断層面積 S と地震モーメント M_o 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

$$S = 2.23 * 10^{-15} M_o^{2/3} \quad (S < 291 \text{km}^2)$$

$$S = 4.24 * 10^{-11} M_o^{2/3} \quad (S \geq 291 \text{km}^2)$$



- ・専門家F (PW vs. ECW)
- ・専門家D...
- ・全体として松田式が優勢

- ・TFIは50:25:25と判断
/ vs. 平均
/ 責任
/ TIへの再確認の必要性

地震・活断層の連動に関する評価

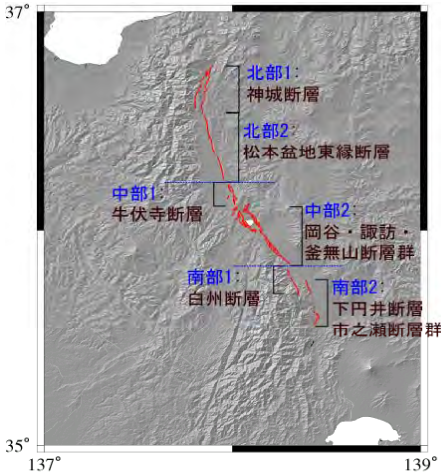


連動のシナリオ	発生年	南海地震	東南海地震	東海地震
1	1707年	←→		→
2	1854年		←→	→
3	32時間後	←→		
4	1944年		←→	
3	1946年	←→		

第7図 南海トラフと駿河トラフで発生した3つの地震起こった時期と連動のシナリオ



次の地震の破壊区間を決定論的には示せない!?



Coupling Scenario	segment					
	N1	N2	C1	C2	S1	S2
1	←→					
2		←→				
3			←→			
4				←→		
5					←→	
6						←→
7	←→					
8		←→				
9			←→			
10				←→		
11					←→	
12	←→					
13		←→				
14			←→			
15				←→		
16	←→					
17		←→				
18			←→			
19	←→					
20		←→				
21	←→					

ISTLで考えられる21通りの連動のシナリオソース

活断層の連動に関する評価(sources, scenarios, models)

AW.8 活断層の連動に関するロジックツリー作成における留意事項

既往の地震動ハザード評価において、活断層の連動に関して不適切なロジックツリーが用いられている例がある。その例を図 AW.30 に示す。角田・弥彦断層、気比ノ宮断層、片貝断層という3つのセグメントから構成される長岡平野西縁断層帯について、6つの分岐が考慮されており、各分岐が1つの震源モデルとしてハザード曲線が評価されている。これは、3つのセグメントが連動する場合に発生する6種類の地震をそのまま分岐としたものであり、分岐は相互に排他的なものを設定しなければならないというロジックツリーの趣旨に反している。特に上の3つの分岐は、他の2つの地震の発生がないとしたものであり、ハザードが過小評価となっている。

連動破壊モデルとして6種類の地震が実際に発生すると考えているのであれば、それは1つの分岐とし、6種類の地震の発生頻度あるいは発生確率を分岐の中の確率モデルとして処理しなければならない。そのためには、6種類の地震の発生頻度を決定するモデルが必要である。例えば、3つのセグメントの平均破壊間隔が同じとし、下記の4つのサイクルが等確率で発生すると仮定すれば、6種類の地震の平均発生頻度が決まる。

・連動破壊モデル：各種の組み合わせで活動する

サイクル①：角田・弥彦断層，気比ノ宮断層，片貝断層

サイクル②：角田・弥彦断層＋気比ノ宮断層，片貝断層

サイクル③：角田・弥彦断層，気比ノ宮断層＋片貝断層

サイクル④：角田・弥彦断層＋気比ノ宮断層＋片貝断層

連動破壊モデルに対して分岐になりうるものは、破壊パターンが固定している固定破壊モデルであり、下記の4つのパターンが考えられる。

固定破壊モデル①：角田・弥彦断層，気比ノ宮断層，片貝断層が別々に破壊

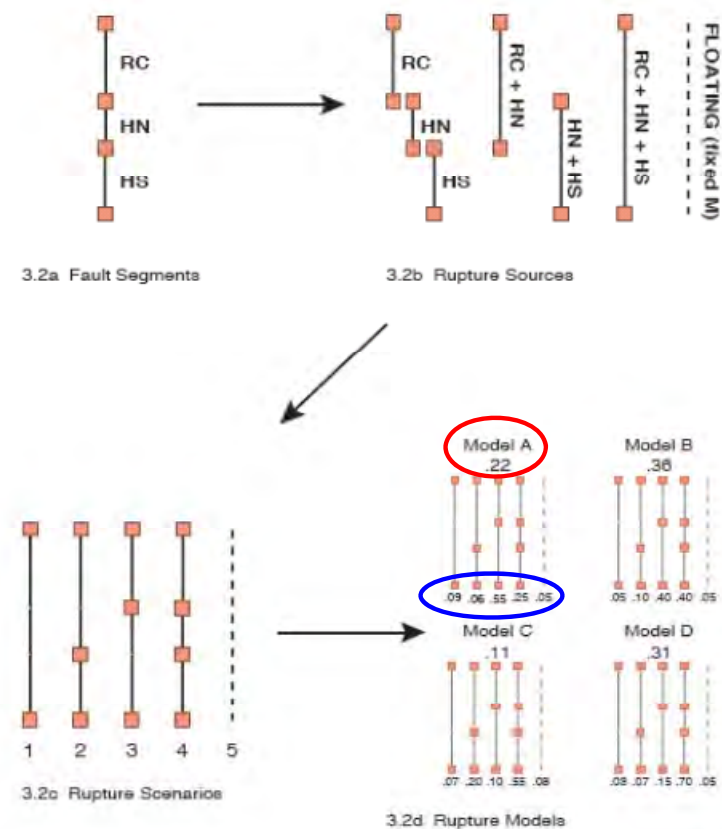
固定破壊モデル②：角田・弥彦断層と気比ノ宮断層が同時，片貝断層が別に破壊

固定破壊モデル③：角田・弥彦断層が別，気比ノ宮断層と片貝断層が同時に破壊

固定破壊モデル④：角田・弥彦断層，気比ノ宮断層，片貝断層の3つが同時に破壊
なお、同様の指摘は Abrahamson (2000)⁽¹⁶⁾ でも行われている (図 AW.31)

日本原子力学会標準

「原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的
リスク評価に関する実施基準：2015」

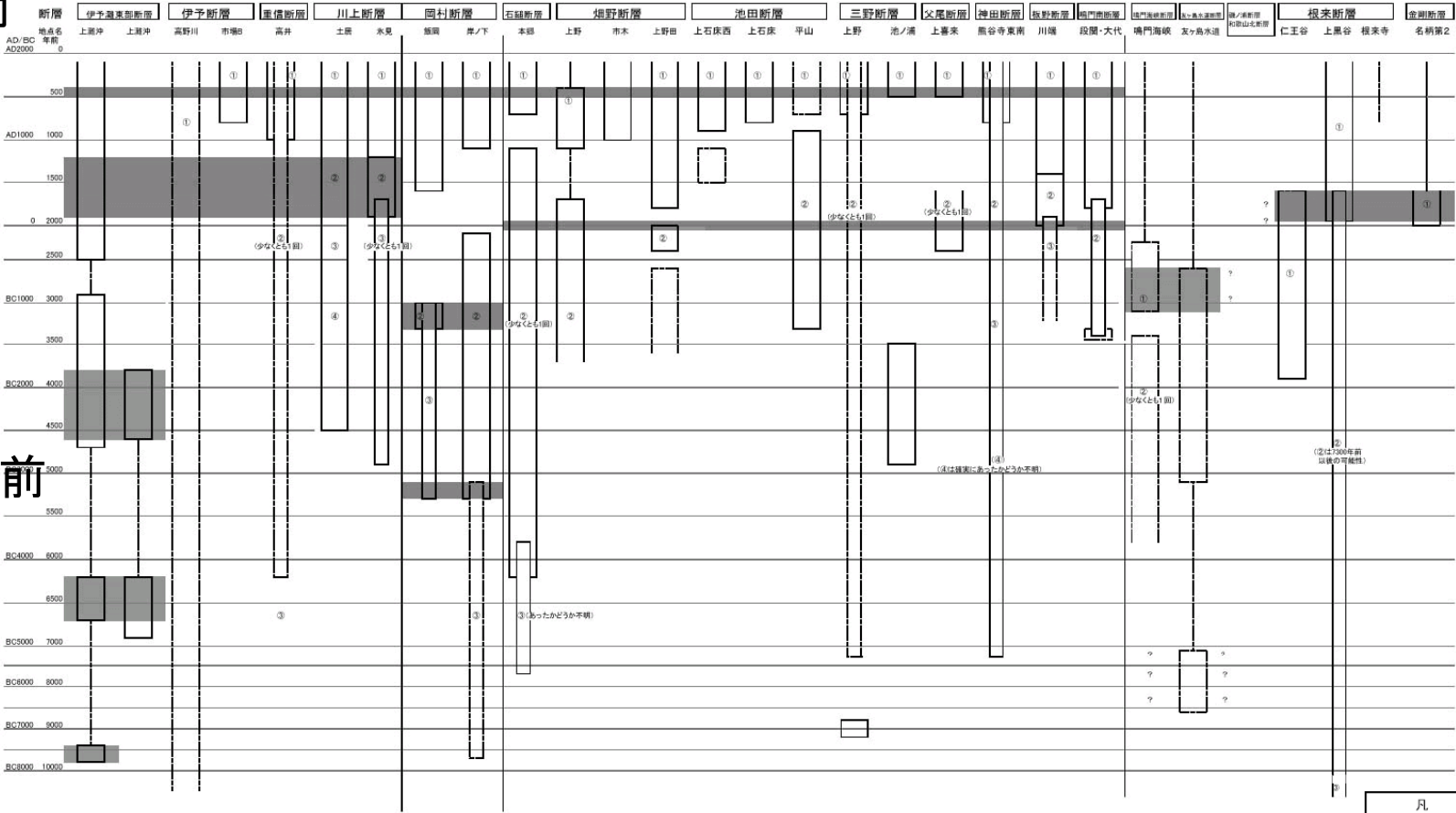


WGCEP (2003)

- ・地震本部での評価：
/地震発生確率；更新過程(BPT分布)
/詳細法；破壊開始地点の推定
- ・トレンチ調査の解釈と利用
- ・頻度推定の根拠，頻度と重みの設定法

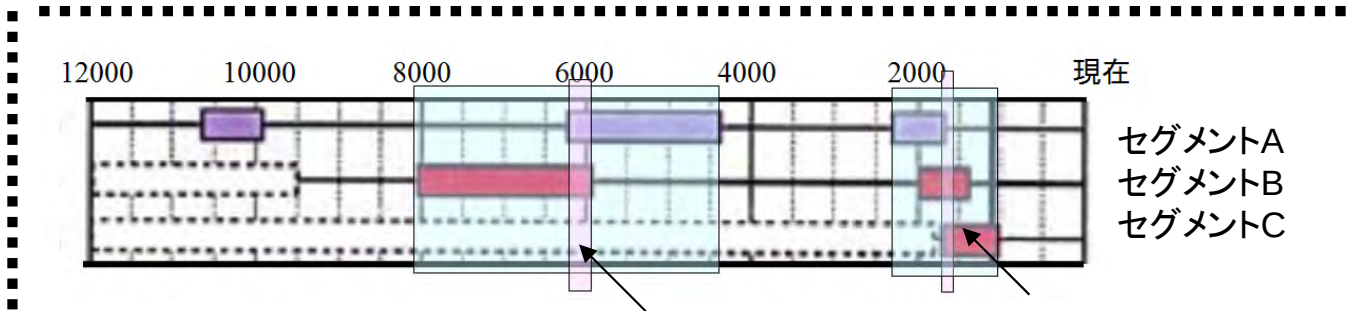
活断層の連動に関する評価(挙動セグメント)

18区間

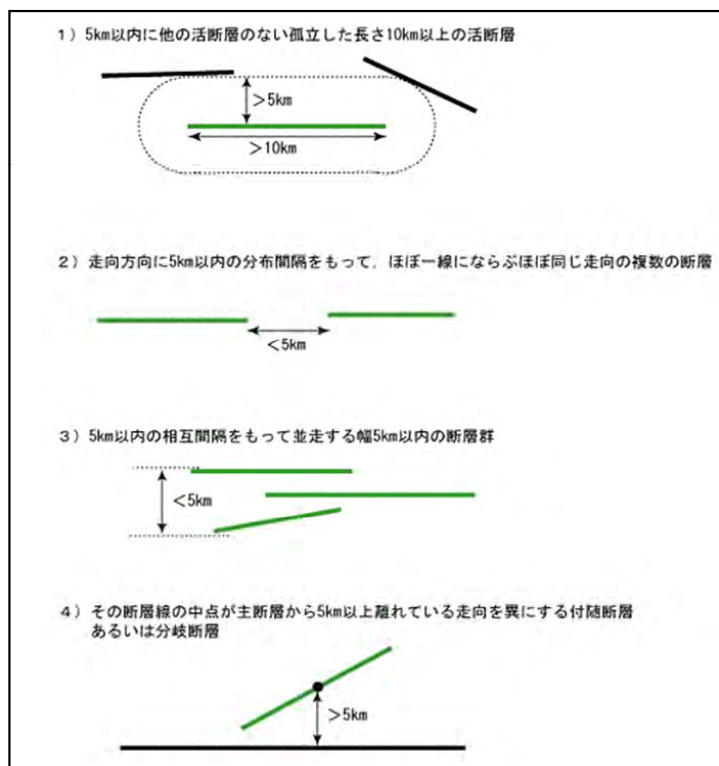
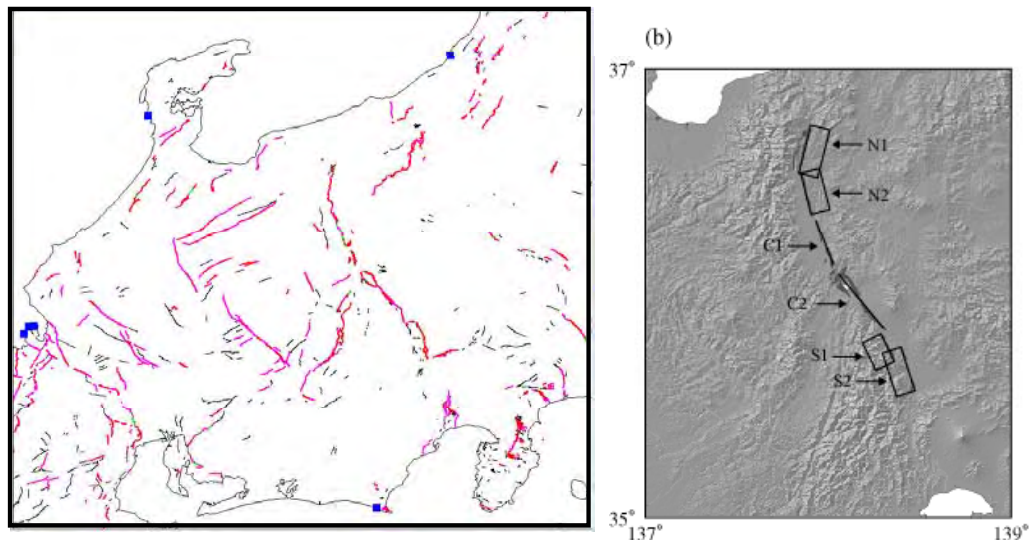


5000年前

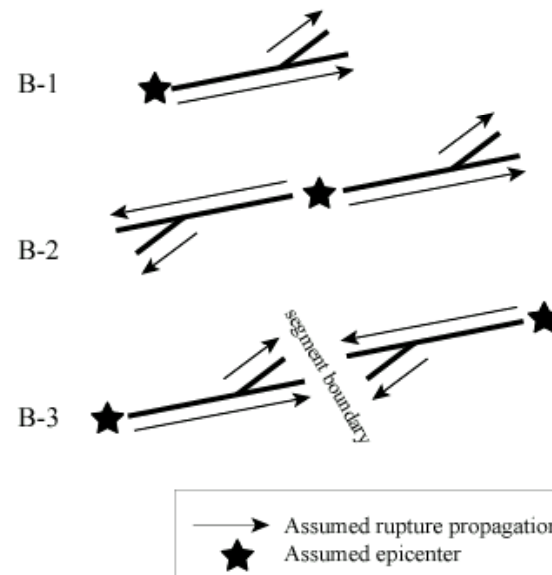
中央構造線断層帯イベント時空間分布：地震本部, 2003



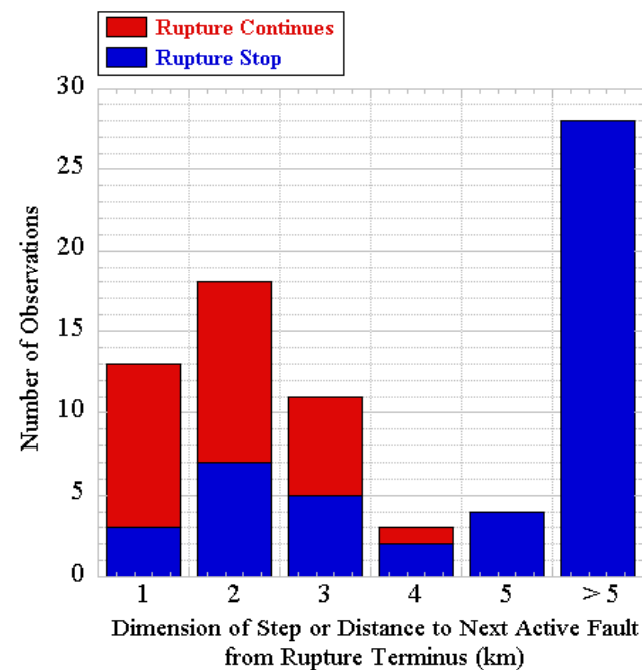
活断層の連動に関する評価(幾何セグメント)



松田(1990)による起震断層帯設定の模式図
(産総研のホームページより)



断層分岐形態と断層破壊伝播方向のモデル



Wesnousky(2007)

活断層の連動に関する評価

Coupling Scenario	segment					
	N1	N2	C1	C2	S1	S2
1	↔					
2		↔				
3			↔			
4				↔		
5					↔	
6						↔
7	↔	↔				
8		↔	↔			
9			↔	↔		
10				↔	↔	
11					↔	↔
12	↔	↔	↔			
13		↔	↔	↔		
14			↔		↔	
15				↔	↔	↔
16	↔		↔	↔		
17		↔			↔	↔
18			↔			↔
19	↔					↔
20		↔				↔
21	↔	↔				↔

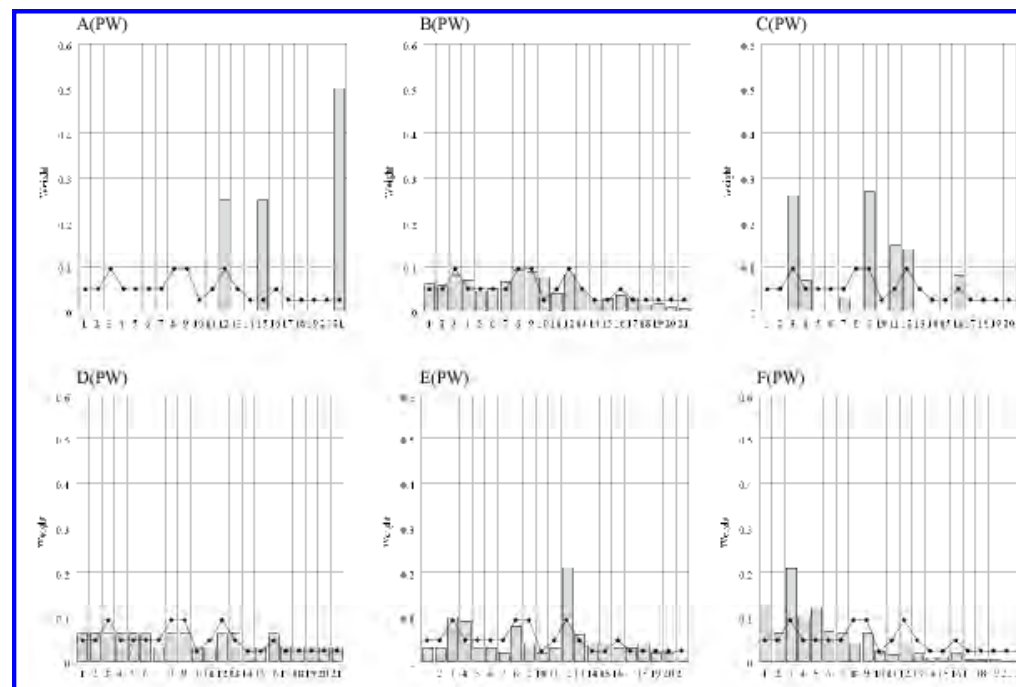
ISTLで考えられる21通りの連動のシナリオ

- ・専門家A(PW vs. ECW)
- ・専門家D・・・
- ・専門家Dだけでなく、BCEFも・・・

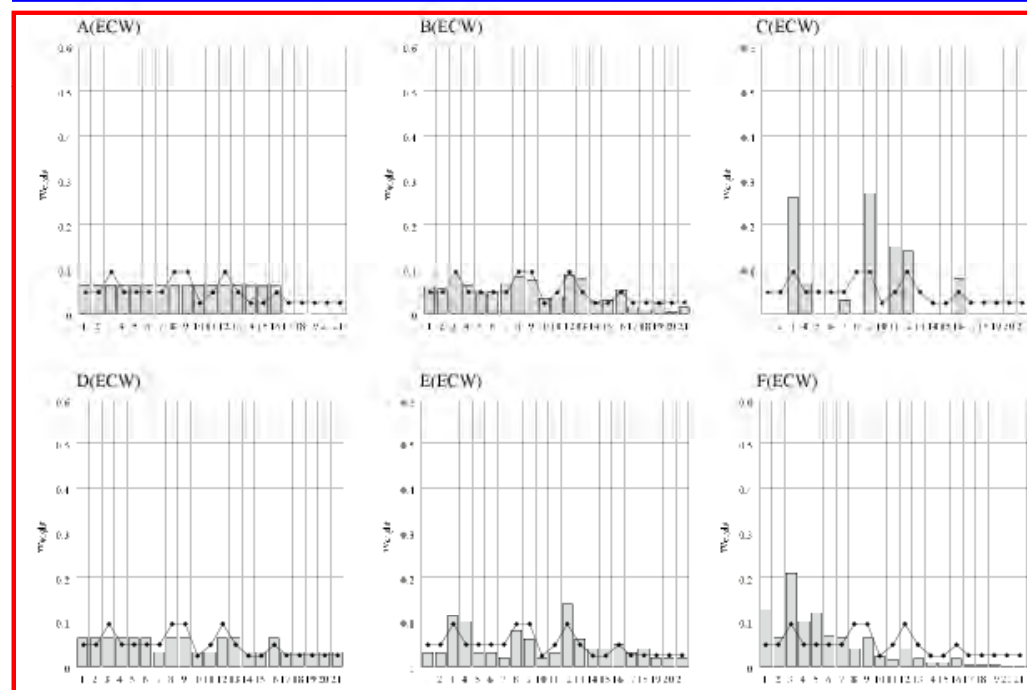
/ 議論がまとまらなかったため

- ・TFIはすべて等しい重み

個人の重み



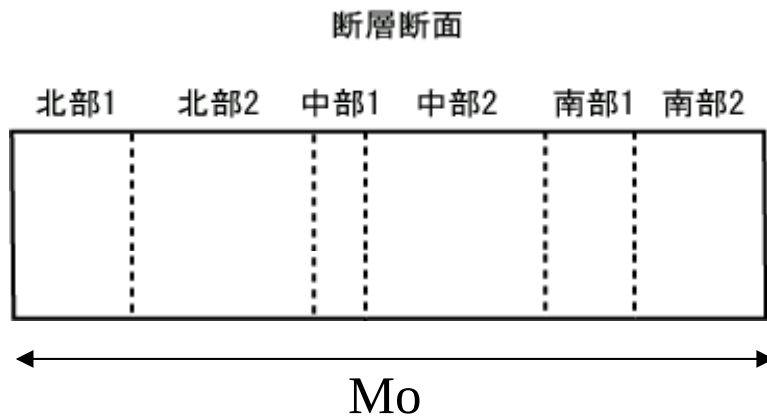
コミュニティの推定



断層パラメータの不確定性: 地震規模の推定(認識論的不確定性)

Lモデル(スケーリングモデル)

複数のセグメントが活動した場合, その全体からモーメントを算出



第12図 ISTL全体が活動したときのLモデル

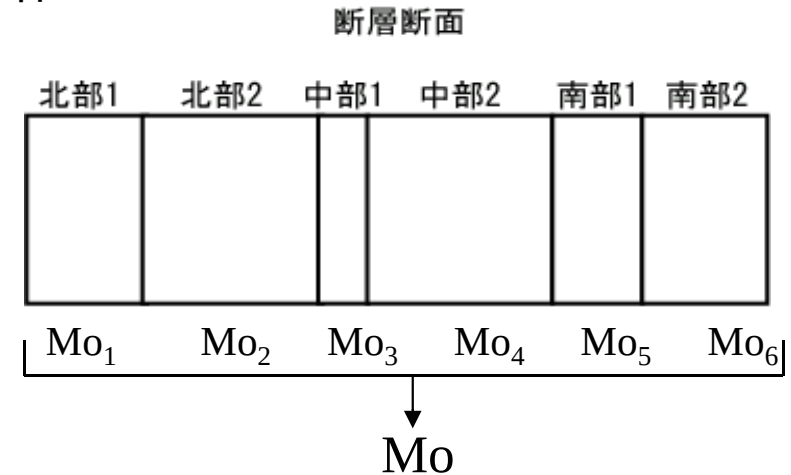
全長150kmから地震規模を算出

$$Mo = 4.15E+27(\text{dyne-cm})$$

$$M_w = 7.7$$

カスケードモデル

複数のセグメントが活動した場合, セグメント個別でモーメントを算出. 足し合わせたものが全体のモーメント



第13図 ISTL全体が活動したときのカスケードモデル

6つのセグメントで個別に地震規模を算出

$$\sum Mo_i = Mo = 8.58E+26(\text{dyne-cm})$$

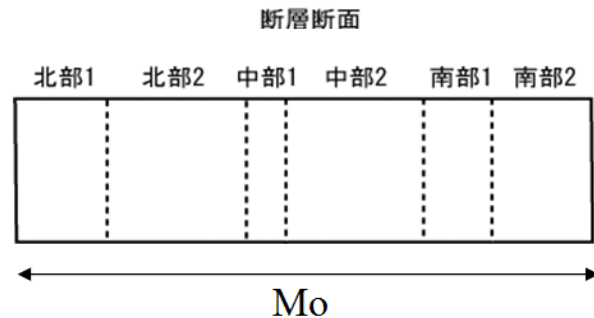
$$M_w = 7.2$$

固有地震モデル! ?

断層パラメータの不確定性: 地震規模の推定(認識論的不確定性)

Lモデル(スケーリングモデル)

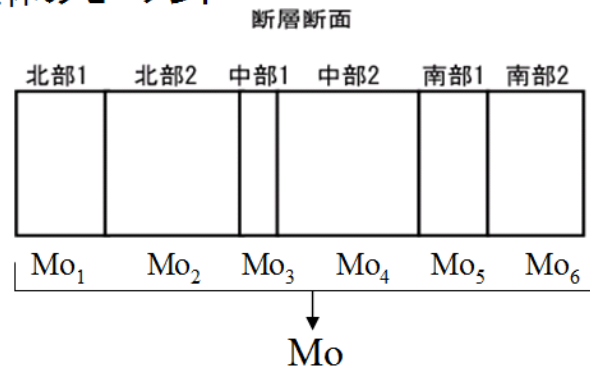
複数のセグメントが活動した場合, その全体からモーメントを算出



第12図 ISTL全体が活動したときのLモデル

カスケードモデル

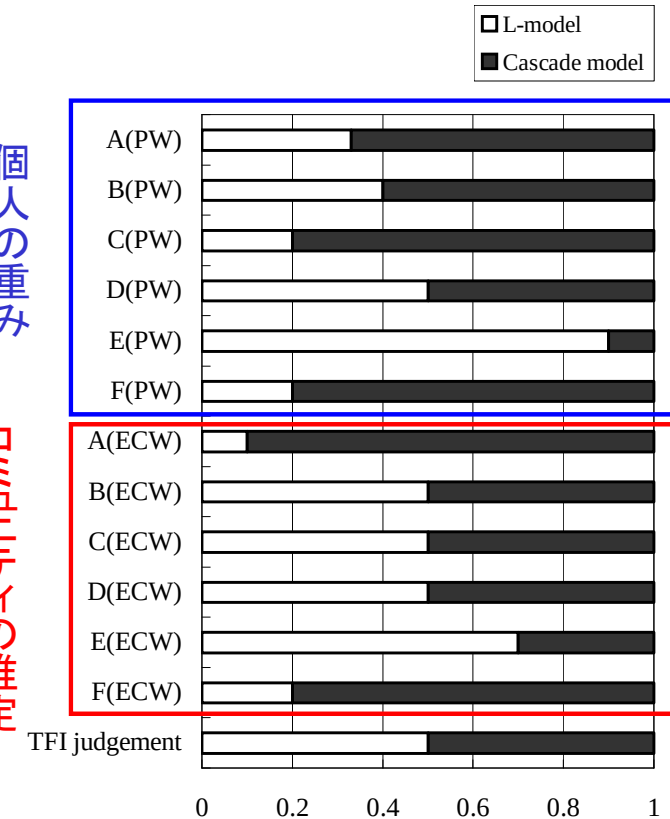
複数のセグメントが活動した場合, セグメント個別でモーメントを算出. 足し合わせたものが全体のモーメント



第13図 ISTL全体が活動したときのカスケードモデル

個人の重み

コミュニティの推定



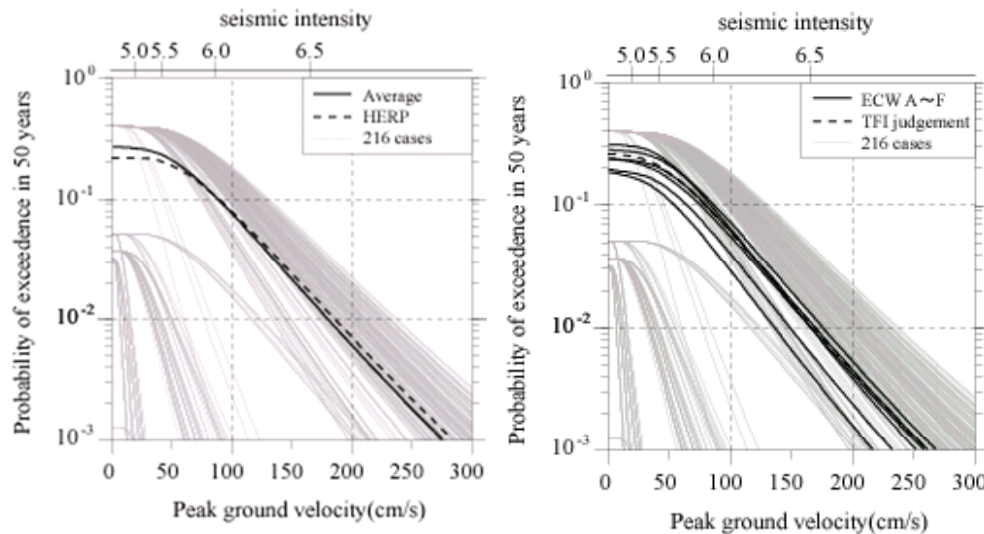
・専門家D...

・「両モデルは拮抗」..正しい表現?
/地震学vs.地形学

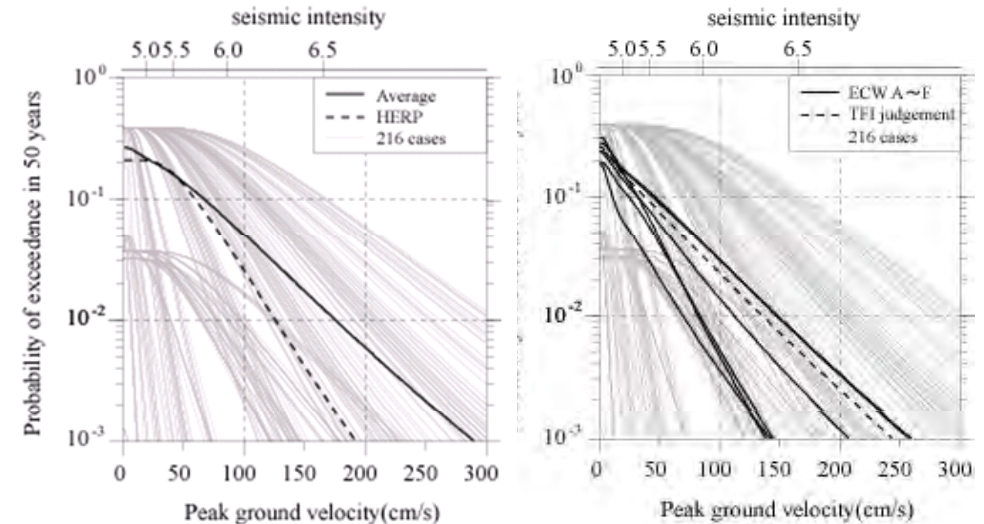
・TFIは50:50と判断

まとめ:

松本; HERPは平均的, TI判断もまとまりあり



甲府; HERPは平均以下, TI判断のばらつき大



司・翠川(1999), 松岡・翠川(1994), 表層地盤増幅率を用いてNGN012とYMN005の地震動を算出

- ・内陸地殻内地震の確率論的地震動ハザード評価を合理的なものとするためには、**不確実さを基準に則って定量的に取り扱う必要**があり、ロジックツリーを用いて専門家の意見を集約・評価する手法への期待は大きい
- ・先行事例では、コミュニティ全体の意見分布の推定値と専門家個人の意見の分離が十分でない回答事例や、細分化された研究分野に起因する偏った重み分布も確認
- ・評価手法の基準の策定と遵守, さらに, **評価事例の蓄積**が重要