

INTERNATIONAL WORKSHOP ON LESSONS LEARNED FROM STRONG EARTHQUAKES

原子力安全委員会における耐震安全性の検討 の概要および2007年新潟県中越沖地震の教訓

入倉孝次郎: 愛知工業大学、耐震性安全評価特別委員会委員長



Kashiwazaki Civic Plaza Auditorium, Kashiwazaki, Japan, 19-21 June 2008

講演内容

1. 1995年阪神・淡路大震災の衝撃と教訓
地震に関連する基盤観測網が整備された。
強震動予測方法の研究が大きく発展した。
2. 発電用原子炉施設の耐震設計審査指針の改訂
3. 2007年新潟県中越沖地震がもたらした新たな教訓
4. まとめと今後の課題

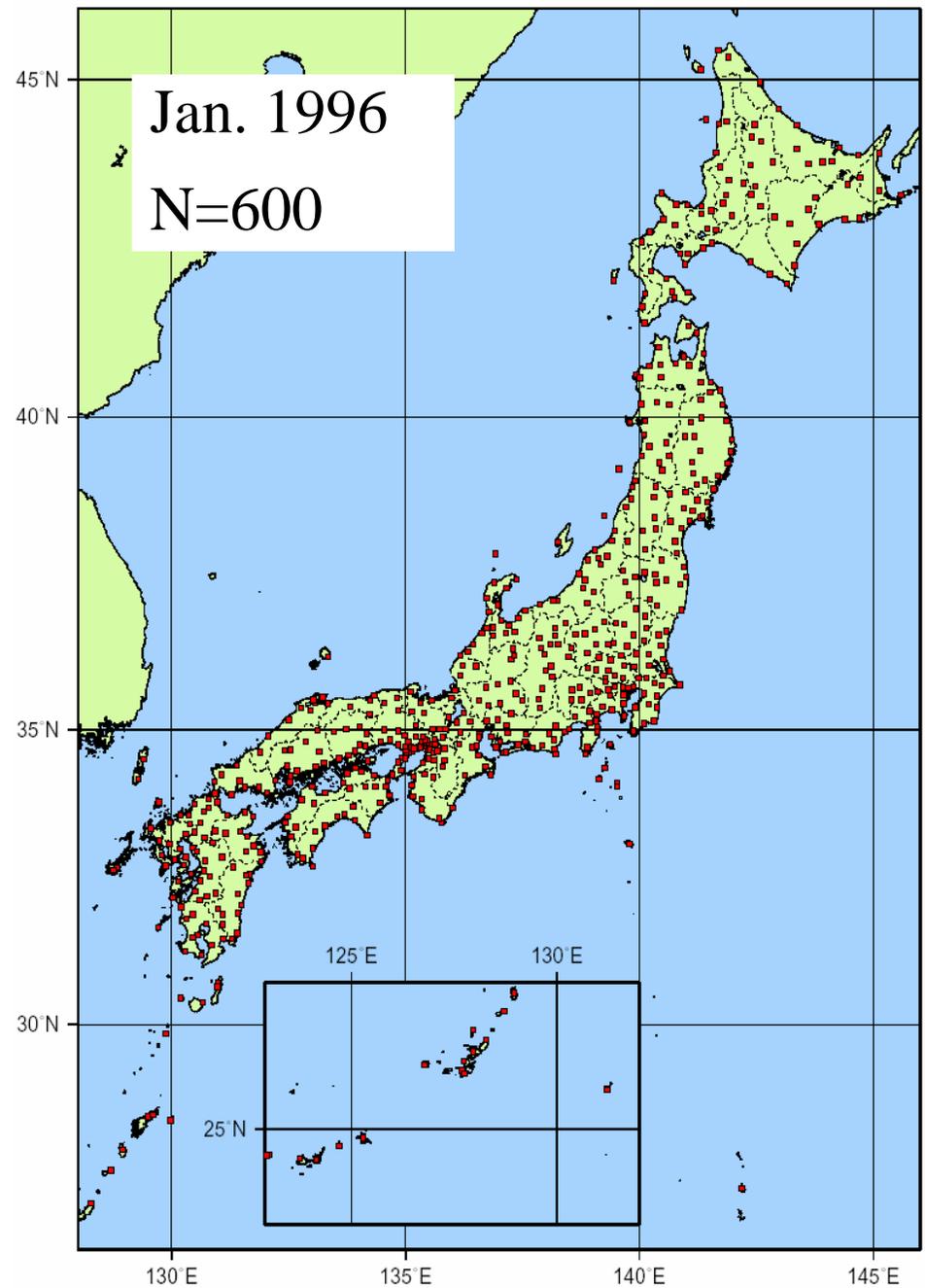
1. 1995年阪神・淡路大震災の衝撃とその教訓

- 地震予知に基づいた地震災害軽減対策はこの地震では機能しなかった。

地震に関連する基盤観測網の整備・充実および基礎的研究の

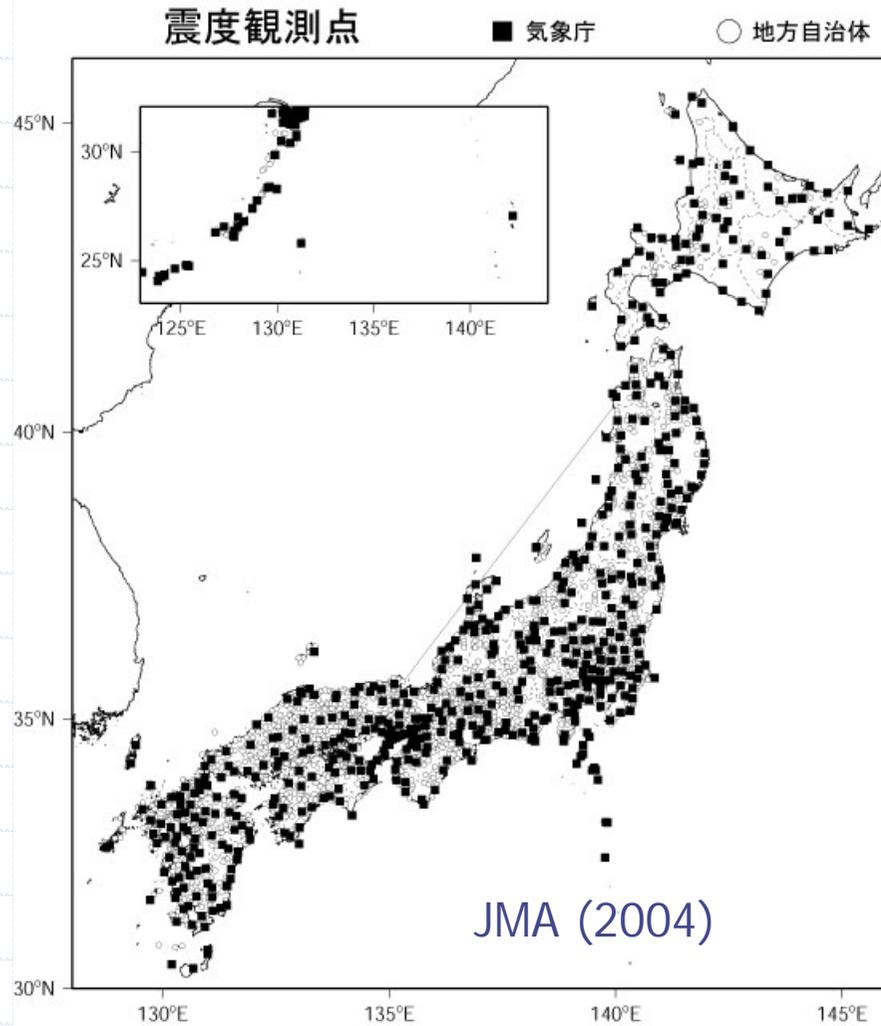
- 地震が不可避およびリスク評価が全国および地方レベルで行う必要。
- 地震災害のために、地震の震源メカニズム、強震動、耐震工学、防災の社会科学の研究を、地球科学、工学、社会科学の研究者が連携して取り組む必要がある。

強震動観測網の設置台数 その1

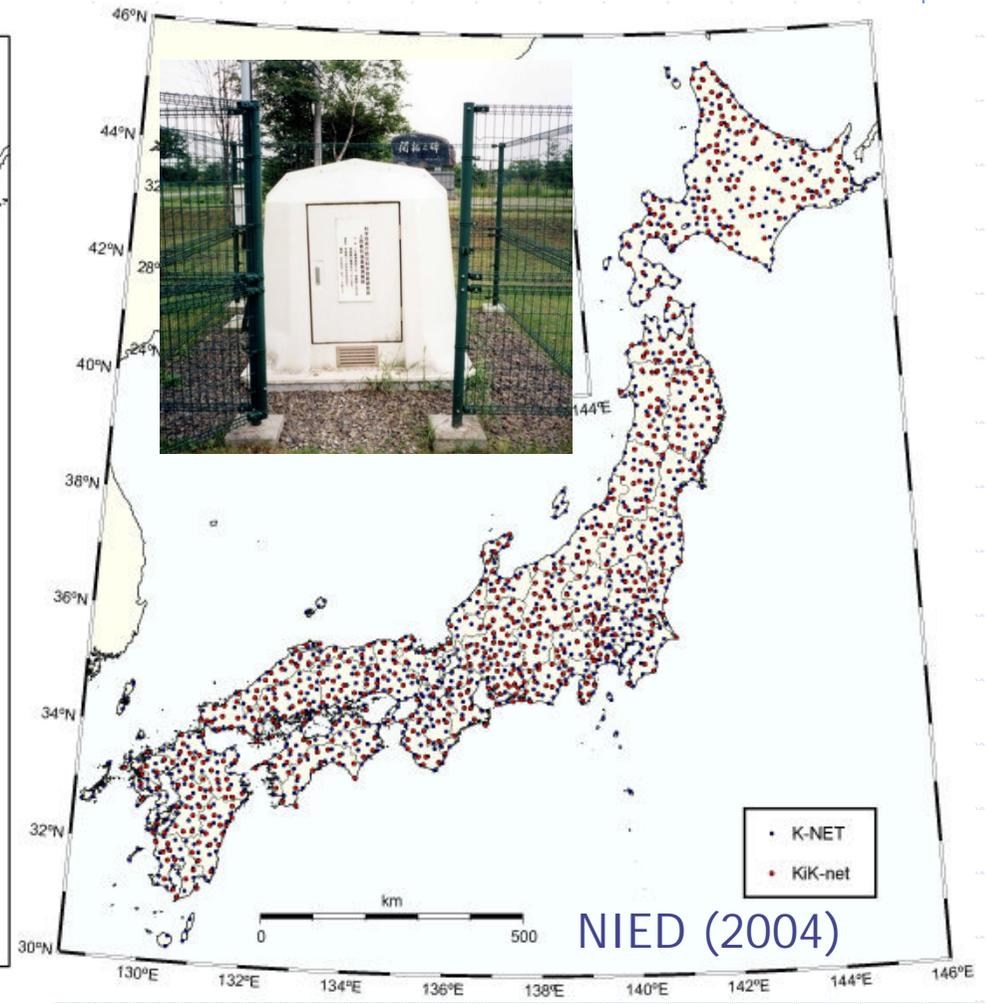


強震動観測網の設置台数 その2

JMA: About 3500 stations



NIED: About 1800 stations



日本における地震防災のための主要なプログラム

1. 地震調査推進本部(1995年に設置)

地震発生の長期評価:

主要な活断層および海溝沿いの沈み込み帯に発生する大地震の発生確率の評価を行う。

強震動の評価

Construct seismic hazard maps, 確率論的および決定論的な地震ハザード地図を作成する。

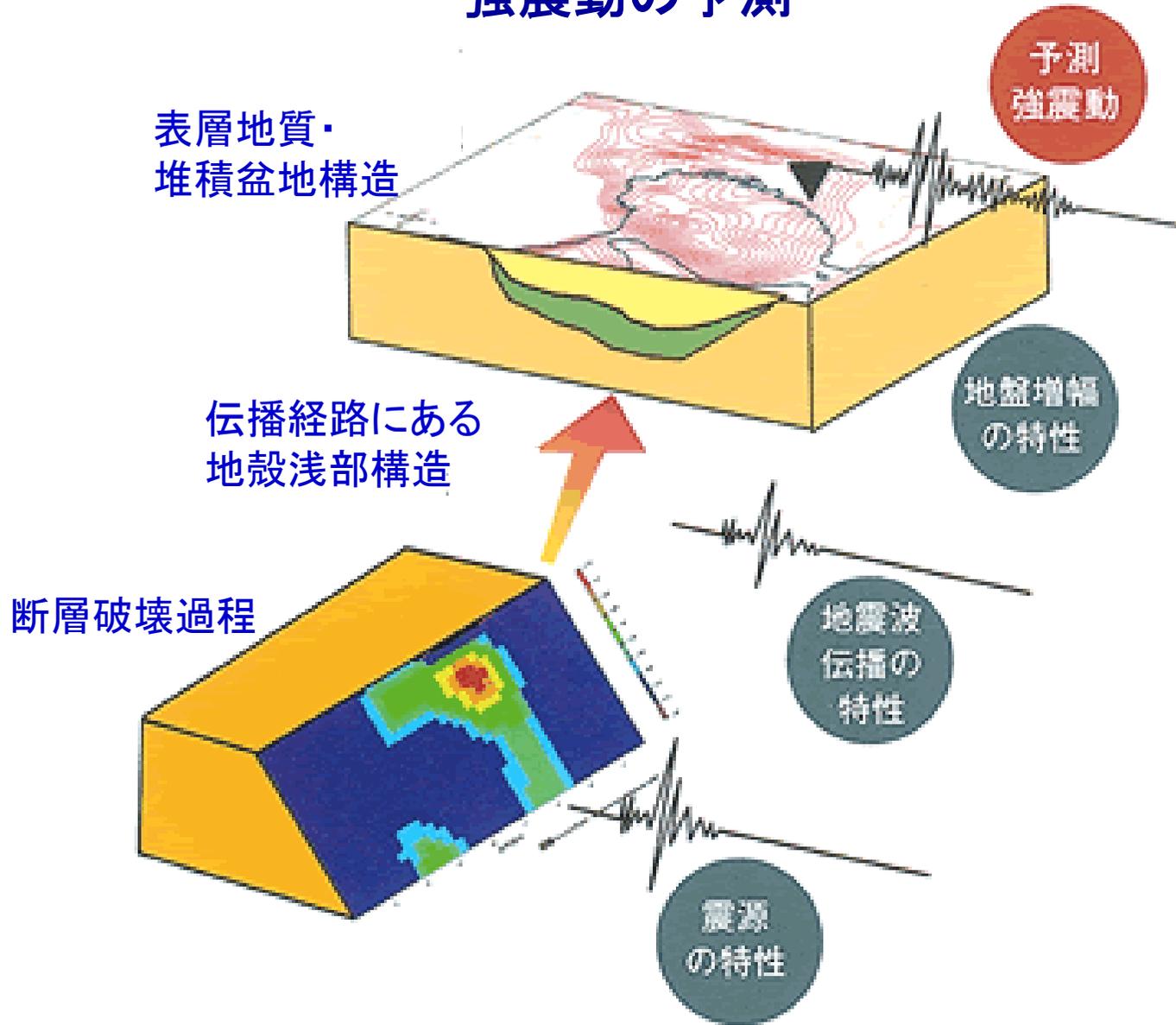
確率論的地震動予測地図: 各地点で今後の一定期間内に強い揺れに見舞われる可能性を示す。

震源断層を特定した地震動予測地図: 特定の震源断層に発生する地震による揺れの分布を示す。

2. 中央防災会議(1961年設置)

特定の大被害をもたらす可能性の高い地震に対して震源断層を想定した強い揺れの分布の評価し、それに基づく構造物・施設の被害の大きさ、避難のあり方、さらに社会的・経済的な影響を評価し、対応策の策定などを行う。

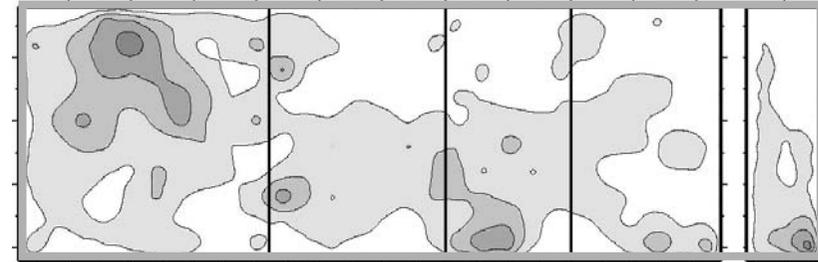
強震動の予測



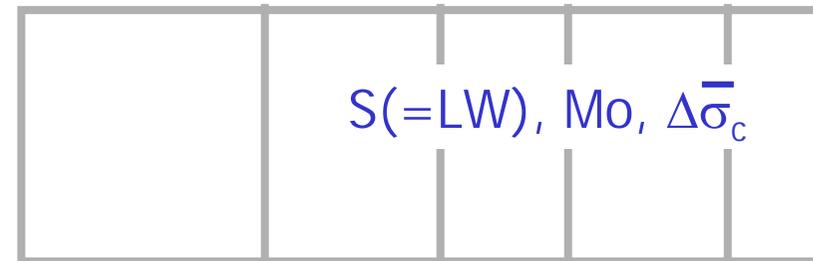
$$(\text{予測強震動}) = (\text{震源特性}) * (\text{伝播特性}) * (\text{表層地盤効果})$$

レシピ： 特性化震源モデルの構築

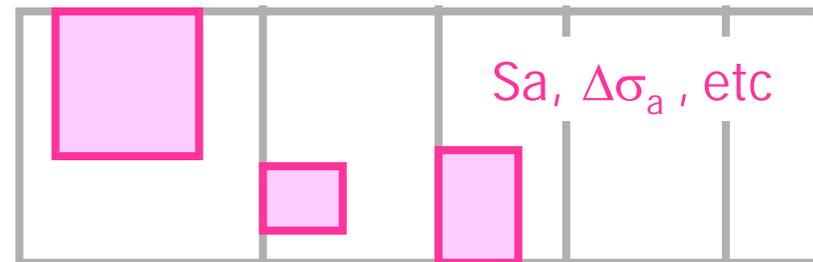
震源インバージョンによる
断層すべり分布



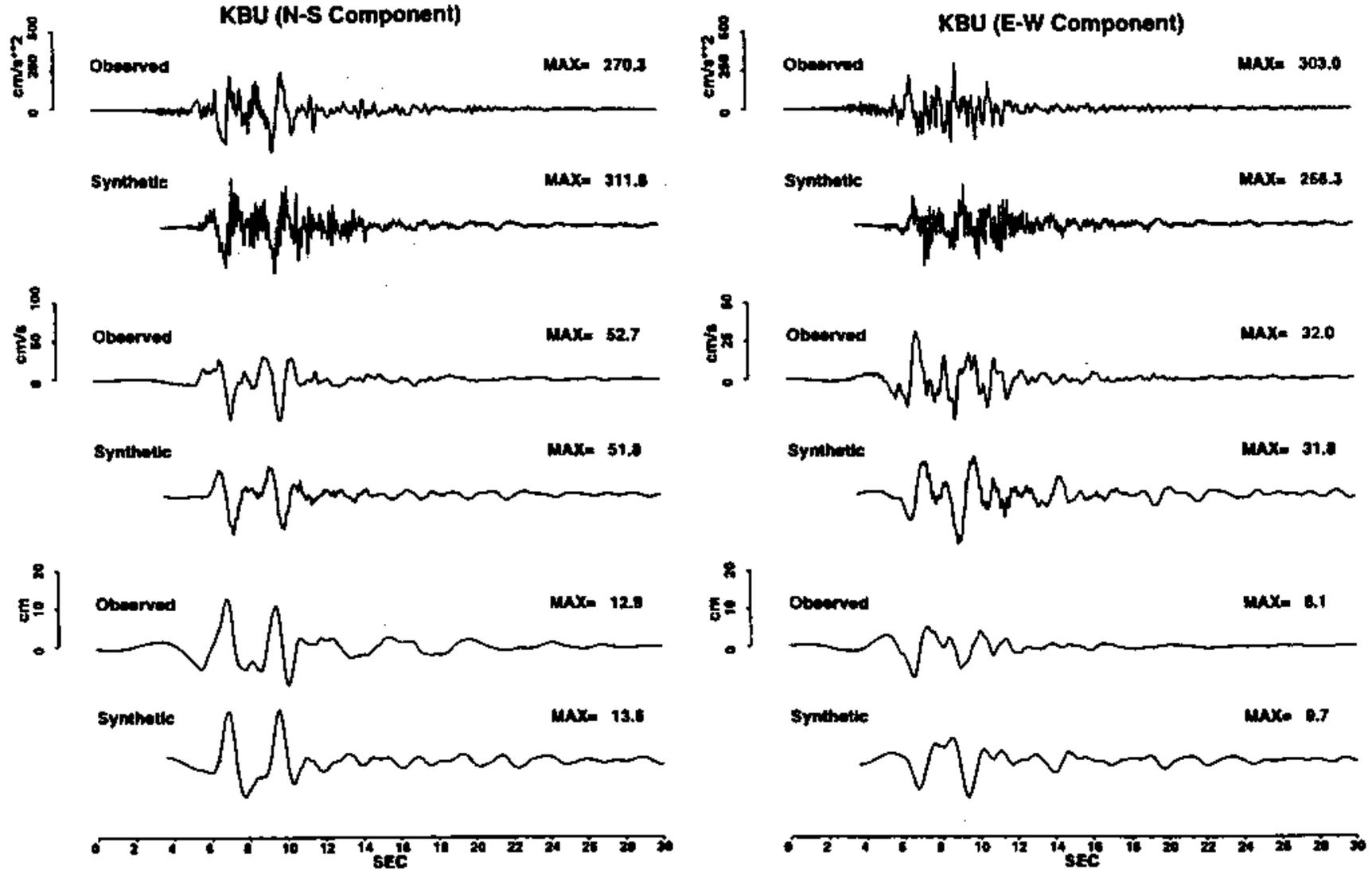
巨視的断層パラメータ:
断層面積(長さX幅)、地震モーメント
平均応力降下量



微視的断層パラメータ:
アスペリティの面積および応力降下量
(アスペリティの数と位置)

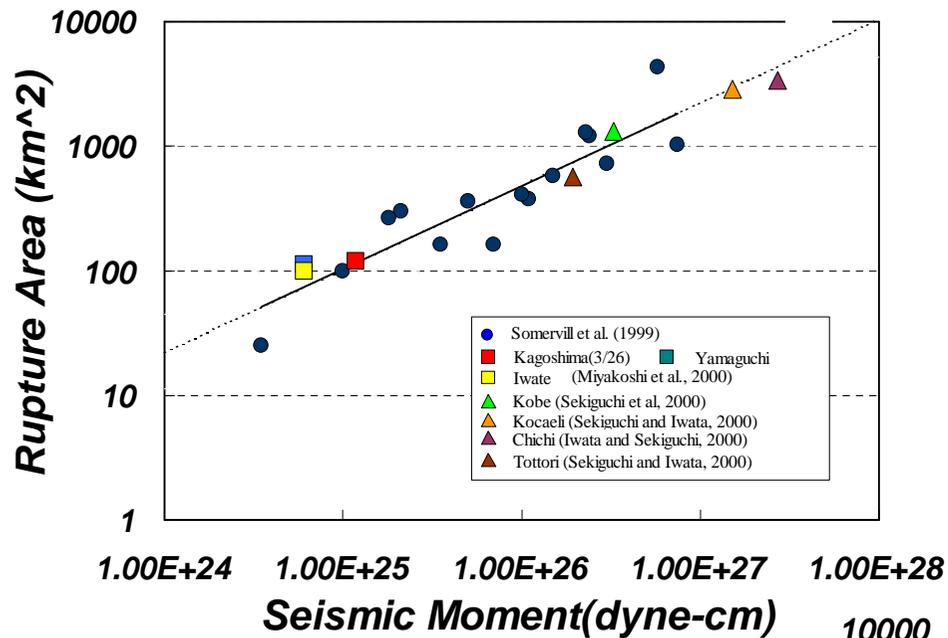


1995年兵庫県南部地震 合成波形と観測記録の比較 KBU地点(神戸大学)



Kamae and Irikura (1998, BSSA)による震源断層モデルを用いて評価。

巨視的および微視的断層パラメータのためのスケーリング則

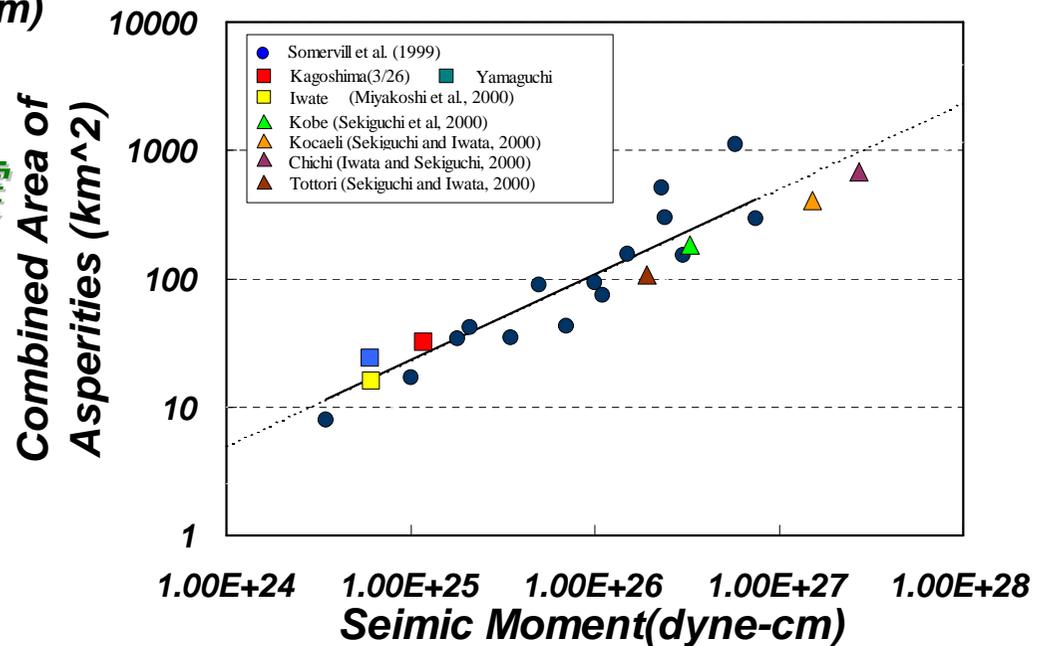


断層面積と地震モーメント M_0
の関係

→ 巨視的断層パラメータ

アスペリティの総面積と地震
モーメント M_0 の関係

→ 微視的断層パラメータ



Somerville *et al.* (1999) and Miyakoshi *et al.* (2001)

強震動予測レシピの概説

1. 将来の大地震の強震動を予測するための「**レシピ**」は活断層、震源メカニズム、構造物の耐震性評価など、**地震学および地震工学の最近の成果**に基づいて作られている。
2. **震源モデル**は巨視的、微視的断層パラメータ、およびその他の**パラメータ**で構築される。巨視的、微視的断層パラメータは地震の大きさの尺度(地震モーメントあるいは地震規模)に関するそれぞれのスケーリング則を基に推定される。
3. **広帯域の地震動**は、長周期成分を3-D FDMなどで理論的に評価、短周期成分を統計的グリーン関数法など半経験的手法で評価、する**ハイブリッド合成法**を用いて効果的に評価される。
4. 「**レシピ**」に基づく強震動予測手法は「**全国を概観する強震動予測地図**」や「**東海・東南海・南海地震の被害予測**」などに用いられている。

2. 原発の耐震設計審査指針の改訂の経緯

耐震設計審査指針は昭和53年(1978年)に当時の地震学、地震工学の知見を結集して原子力委員会が定めた。昭和56年7月(1981年)に静的地震力の算定法等の見直し。平成18年(2006年)に全面改訂。

□旧指針の果たした役割と問題点

□指針改訂の背景

□改訂のポイント

なぜ耐震設計審査指針を改訂する必要があるのか？

□改訂の背景

旧指針は1981年(昭和53年)当時の最先端の知見(活断層調査、応答スペクトルによる地震動評価、静的地震力の算定法など)に基づいて定められた。

1981年(昭和56年)から現在まで(25年間)に、
地震学および地震工学に関する新たな知見の蓄積。
原子炉施設の耐震設計技術の改良および進歩。

1995年兵庫県南部地震の経験:

原子力施設に特段の影響を及ぼしたものはなかったが、断層の活動様式、震源破壊過程と地震動特性、構造物の耐震性、等に係わる貴重な知見が得られた。

原子力施設の耐震安全性に対する信頼性の向上に上記の新たな知見の反映させる必要があるとの認識が高まる。

原子力発電所の耐震安全性について社会的説明責任の声が高まる。

海外、とくに米国で原子力耐震設計にPSA(確率論的安全評価)評価を取り入れる動きに合わせて、日本でも一部の研究者からPSAを導入すべきとの強い意見が出されるようになった。

新耐震設計審査指針（新指針）の特徴と意義

- ① 信頼性の高い詳細な地形・地質調査等に基づく活断層に起因する地震、及び地震テクトニック・文献等の調査に基づく海溝型地震、を認定し、検討用地震を選定。

考慮すべき活断層：旧指針では、5万年前以降に活動したもの→新指針では、後期更新世以降の活動が否定できないもの。

- ② 基準地震動 S_s の評価は、従来の応答スペクトルを用いた経験的な手法に加え断層モデルによる s 手法、で行う。

経験的手法は限られたデータで作られるため、震源近傍域で精度が十分ではない可能性がある。

断層パラメータの設定で、不確実さを適切に考慮することが要求されている。

- ③ S_s を超える地震動の可能性を認識して「残余のリスク」を評価（解説で努力すべきものとして記載）

十分な調査を行って基準地震動を策定してもそれを上回るレベルの地震動に襲われる可能性は否定できない。「残余のリスク」を可能な限り小さくするための努力を求める。

新指針に基づく既存原発のバックチェック

- 耐震設計審査指針の改訂(2006年9月)を受けて、原子力安全委員会は、行政庁に原子力事業者に対して既設も含めて原子力施設の耐震安全性の評価の実施とその結果の速やかな報告を指示。**
- 原子力安全保安院は、原子力施設について新耐震指針に照らした耐震安全性の評価(バックチェック)を原子力事業者に要請。それを受けて原子力事業者は、耐震安全性の評価の実施計画書を行政庁に提出、既設原発の耐震安全性の評価のために地形・地質調査と基準地震動の評価の検討を開始した。**

そのような状況の中で、2007年7月16日新潟県中越沖地震(M 6.8)が起こった。

3. 2007年新潟県中越沖地震と原子力発電所

- この地震は世界で最大の出力をもつ柏崎刈羽原子力発電所の極近傍域に発生した。発電所の建物・施設が震度7の強震動の直撃を受けた。
- 原子力発電所の被害として、変圧器の火災、貯蔵庫内のドラム缶の転倒、極微量ではあるが放射性物質の放出などはあった。
- 国際原子力機関や原子力安全・保安院のこれまでの調査で、原子炉や原子炉建屋など安全上重要な設備には目立った損傷はなかったと報告されている。

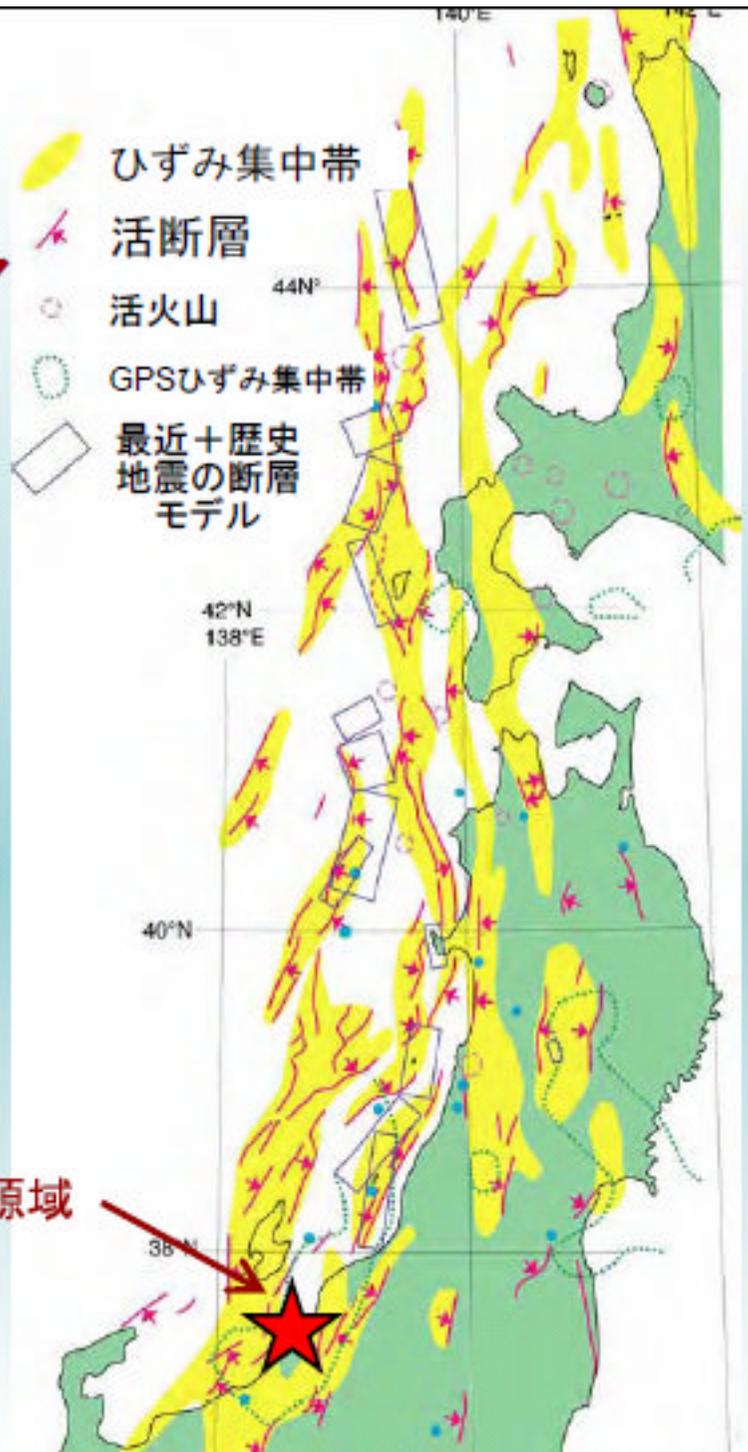
3.1 2007年新潟県中越沖地震の概要

- この地震を引き起こした断層はどこか？**
- この地震の強震動は大きかったのか？**
- この地震の強震動は数値的に再現可能か？**
- 柏崎刈羽の強震動は中越沖地震発生前に予測可能だったのか？**

3. 2. この地震の地質学的および地震学的特徴

- この地震はプレート境界と考えられている日本海東縁部の延長に位置し、活褶曲構造調査 (岡村, 2002) やGPS観測によって日本海西岸・新潟から南西方向に延びるひずみ集中帯の中で起こった(鷺谷, 2007)。
- この地震の気象庁マグニチュードは6.8、遠地地震データのインバージョンから推定されたモーメント・マグニチュードは約6.6であった。
- 本震の発生機構は北西—南東方向に圧力軸をもつ逆断層型であった。
- 震源断層面は、当初余震分布の精度が悪く決まらなかったが、海底地震計による余震観測に基づき推定された地下構造モデルを用いて再決定の結果、南東傾斜の断層の存在を示唆(地震調査推進本部, 2008)。

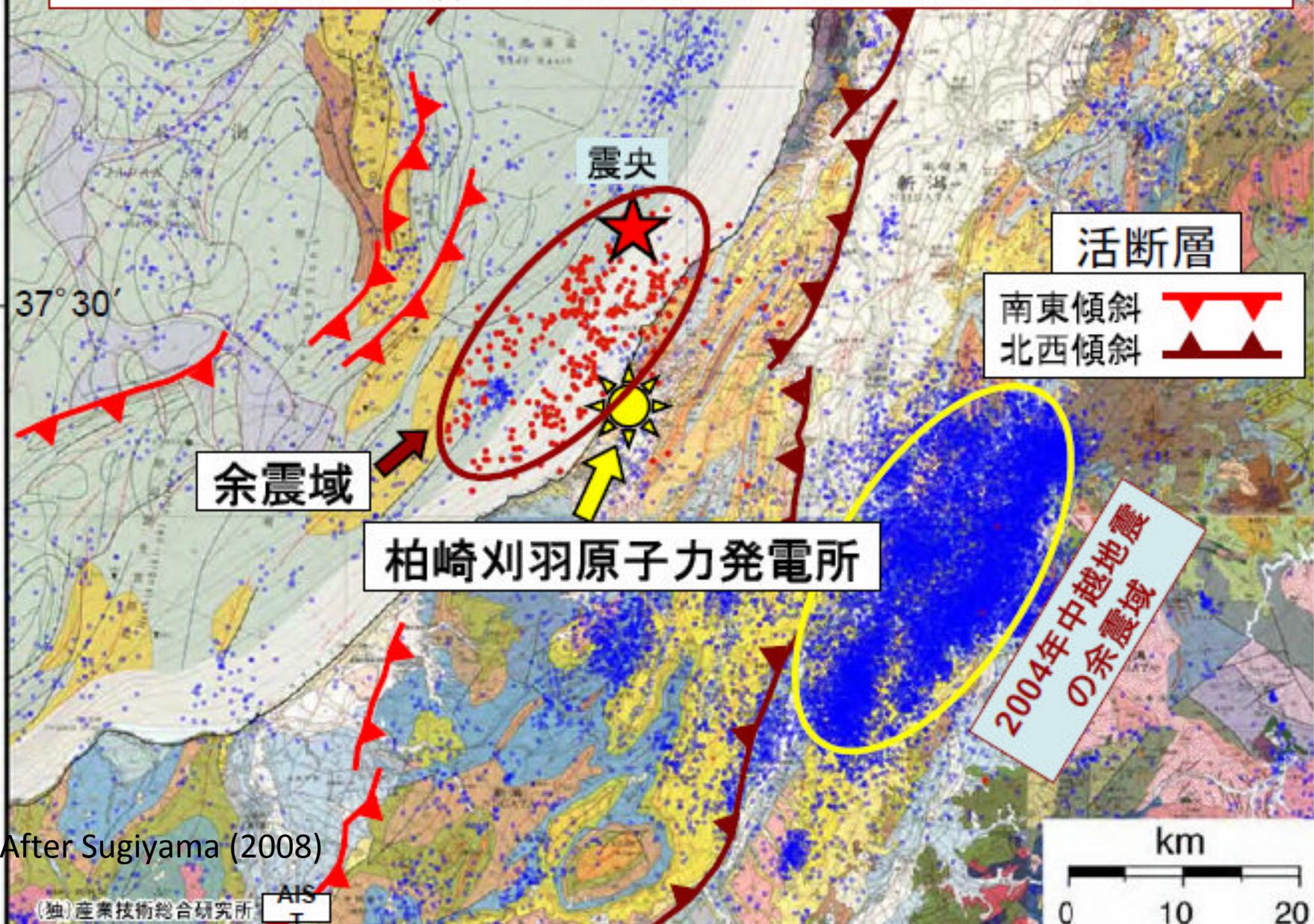
日本海東縁のひずみ集中帯 北アメリカプレートとユーラシア プレートとの収斂境界域



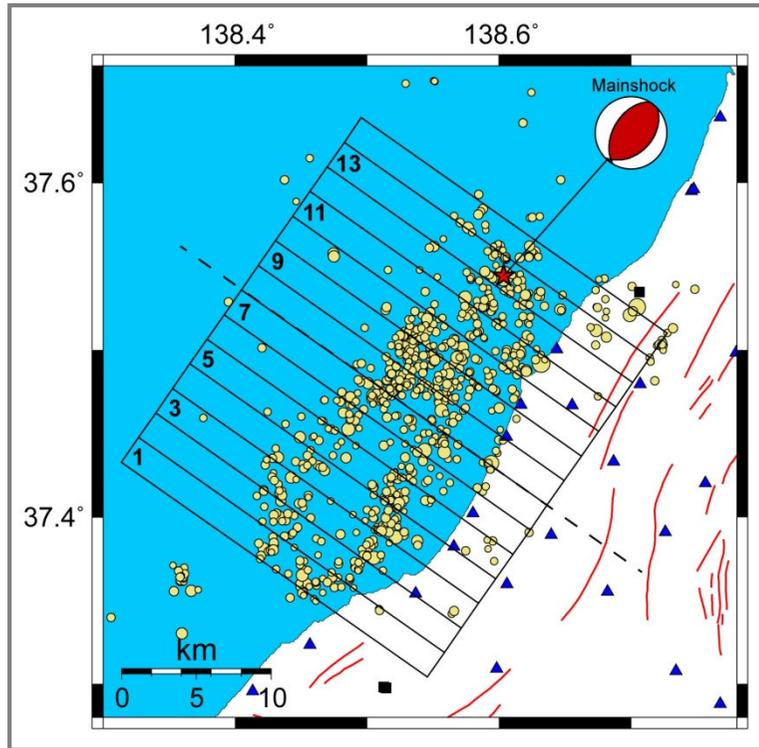
中越沖地震の震源域

東大出版会
岡村行信氏による

中越沖地震の余震域と地震前に認定されていた活断層(海域では第四系を切る断層)の分布



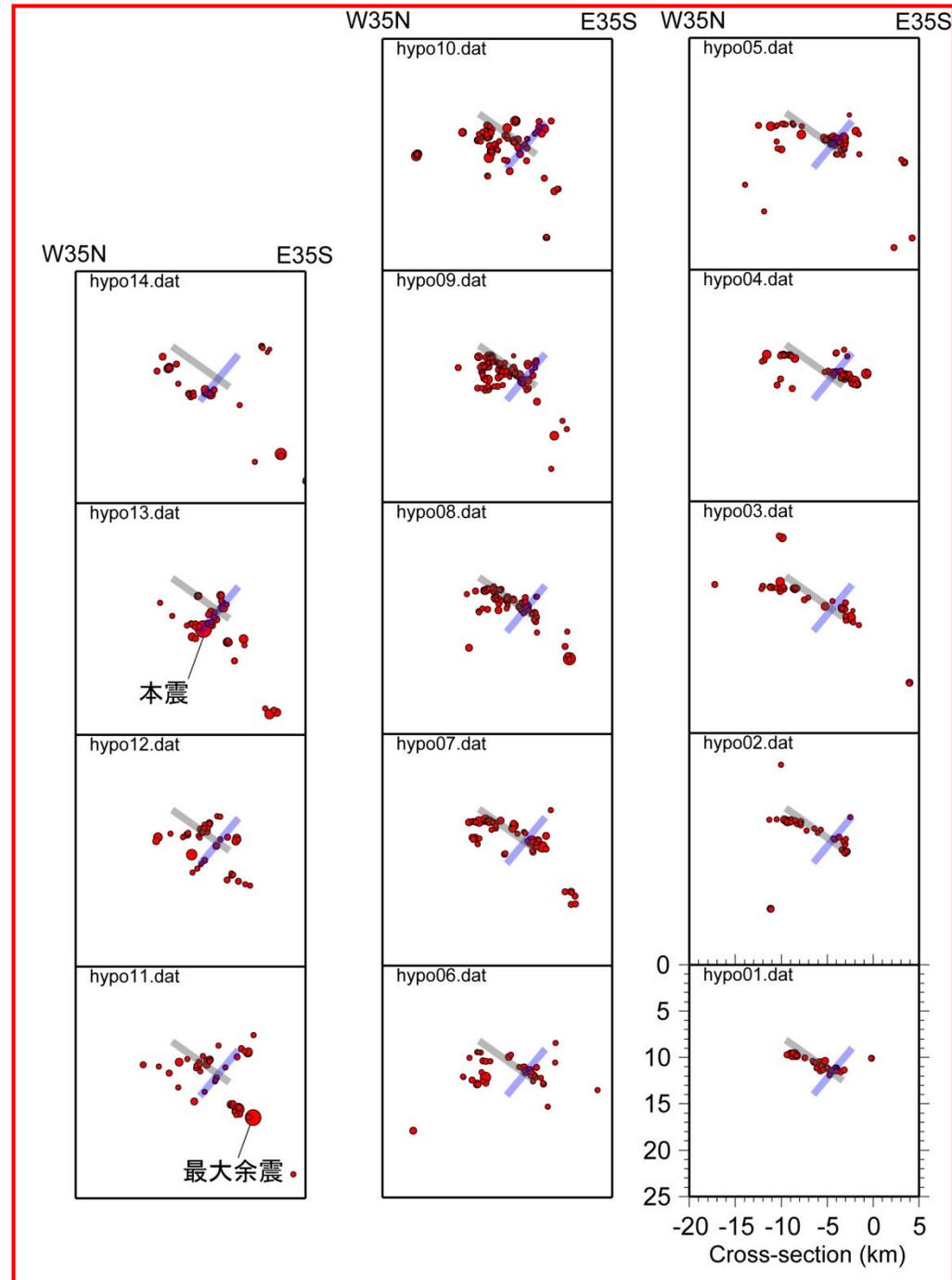
詳細な震源分布



幅2kmのビン

- 北西傾斜の断層面は走向方向に長さ約8kmの大きさ
- 南東傾斜の断層面は、北西部で深部にオフセットする

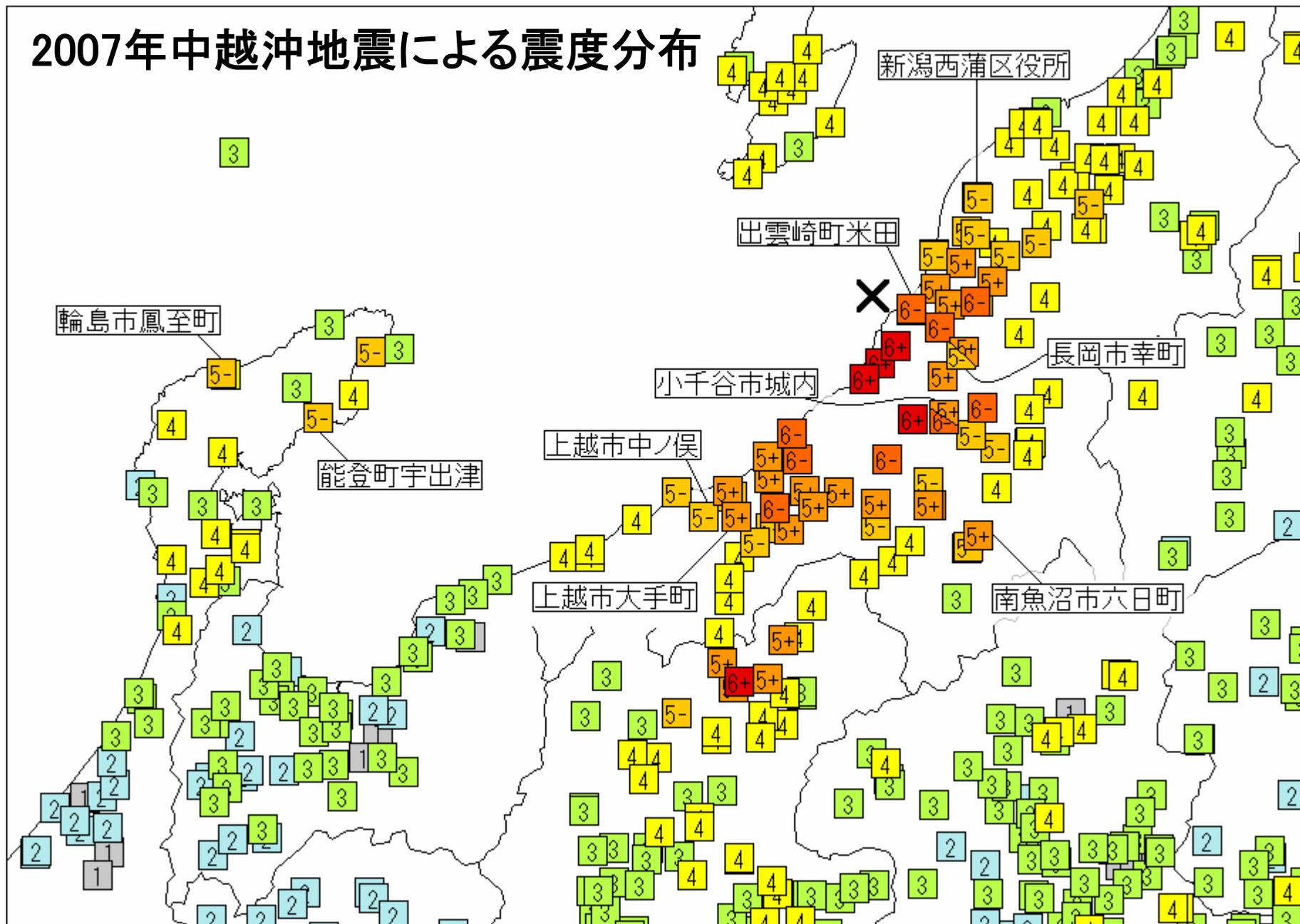
ERI, Univ. of Tokyo (2008)



3.3. 強震動の概要

- 震源の南東方向の刈羽村や柏崎市で震度6強。柏崎刈羽の地表観測記録から震度7(相当値)。5号機地震小屋 地表1223gal、1号機地震小屋 地表890gal。
- 柏崎刈羽原子力発電所の7機の発電炉の基礎版での観測記録は建設時の設計レベルを超えた。特に、1号機の基礎版で記録された680ガルの加速度は設計レベルの2.5倍になる。
- この地震に関係する活断層は建設時(1号機から7号機まで)に特定されなかった。
- なぜ活断層が見逃されたか、またどうして設計用の地震動は過小評価されたか、について慎重さ調査が必要とされる。

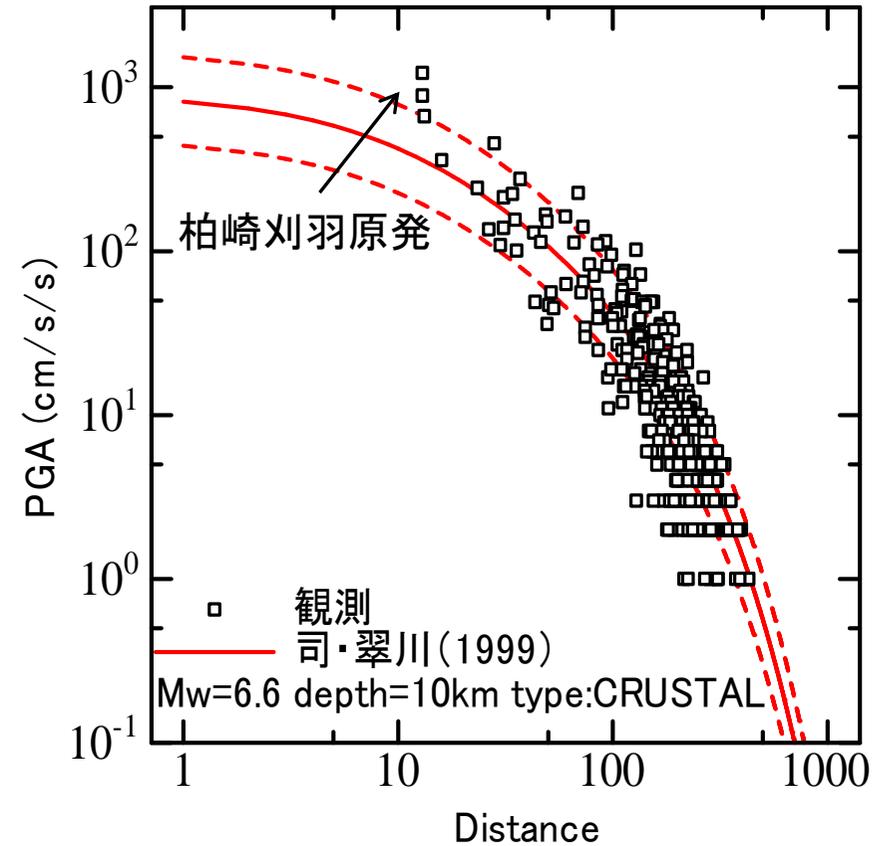
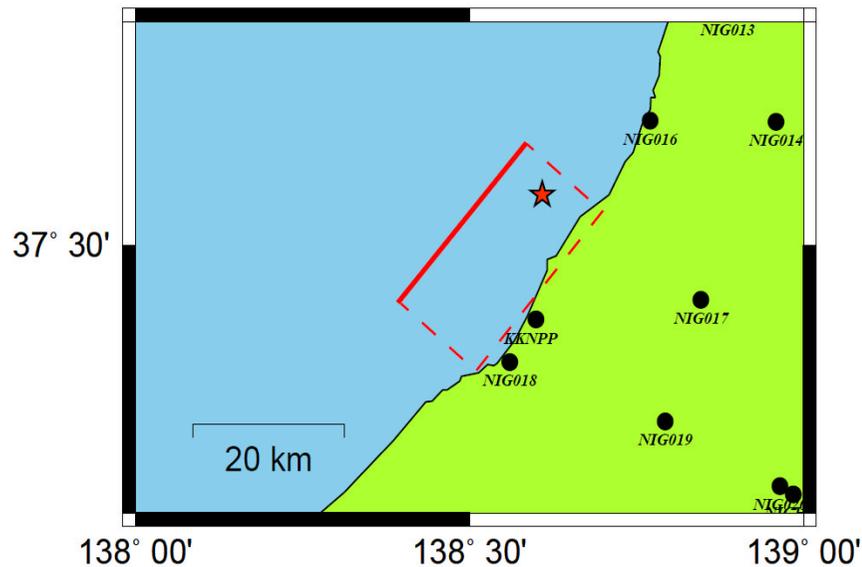
2007年中越沖地震による震度分布



(気象庁, 2007)

最大加速度(地表観測)の距離減衰

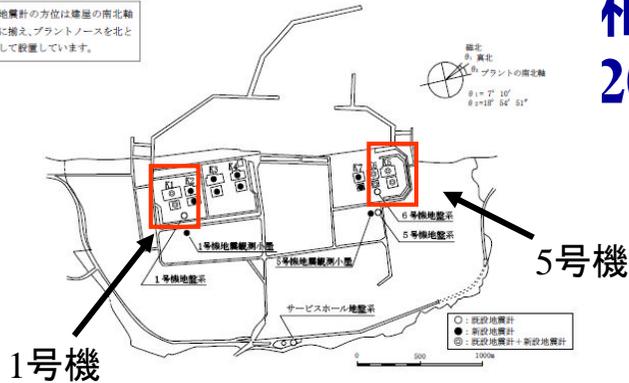
震源断層として堀川モデルを参考に設定
走向: 40° , 傾斜角: 45°



地表で観測された最大加速度は全般的に標準的距離減衰式(司・翠川, 1999)によく一致しているが、震源断層に近い柏崎刈羽原発(断層最短距離約10km)では経験式に比べ大きい。

柏崎刈羽原子力発電所で観測された 2007年中越沖地震の加速度記録

地震計の方位は建屋の南北軸
に揃え、プラントノースを北と
して設置しています。

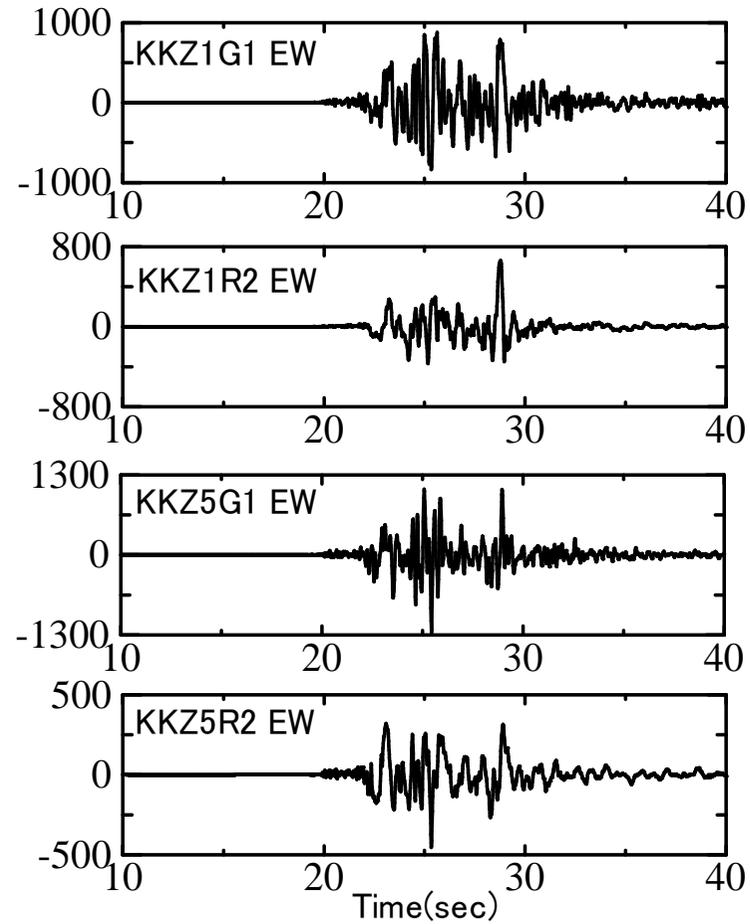
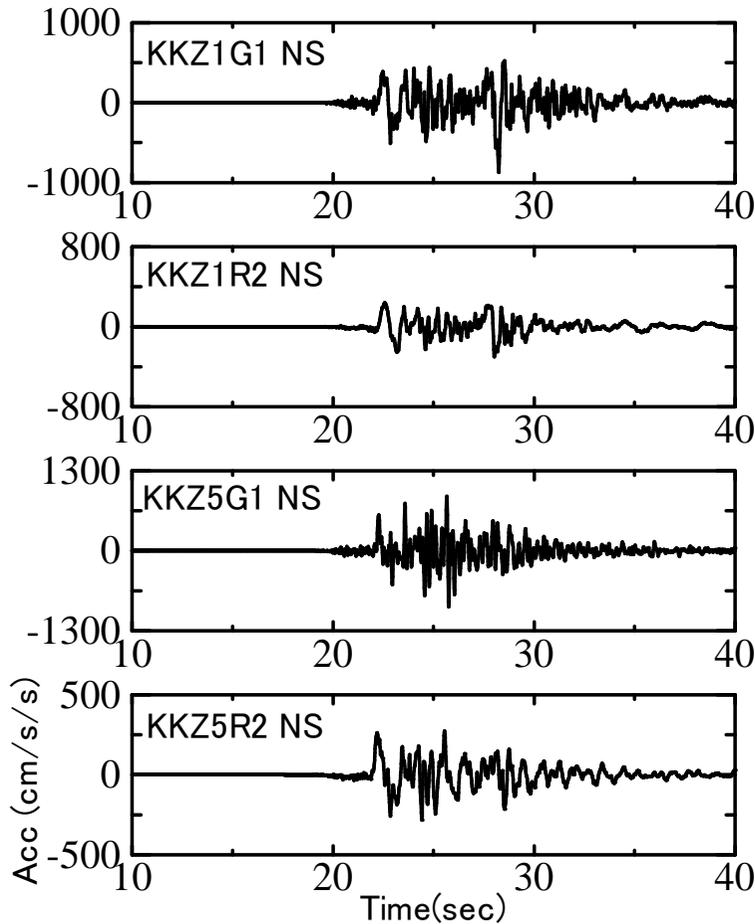


KKZ1G1:1号機地震小屋(地表)

KKZ1R2:1号機基礎マット上(地中)

KKZ5G1:5号機地震小屋(地表)

KKZ5R2:5号機基礎マット上(地中)



強震動は大きかったのか？

- 地表で観測された地震動の最大加速度は経験的距離減衰式(司・翠川, 1999)にほぼ従っている。しかし、震源域近くの柏崎刈羽原発での地表の最大加速度は経験式に比べて大きい。
- 岩盤上で観測された地震動の最大加速度の経験的距離減衰式(Fukushima and Tanaka, 1989)と比べると、柏崎刈羽原発の敷地における岩盤地中で得られた最大加速度は極めて大きい。
- 柏崎刈羽原発の敷地で強震動記録に、3つの顕著なパルス波がみられる。

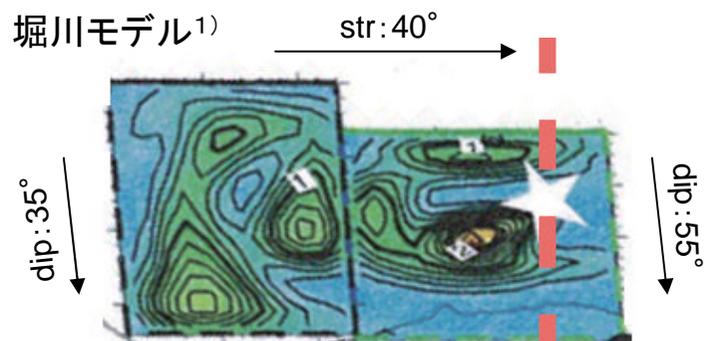
考えられる原因

1. 破壊の放射特性・指向性効果など震源の性質による
2. 敷地近傍の地盤の増幅効果による
3. フォーカシングなど伝播経路の性質による

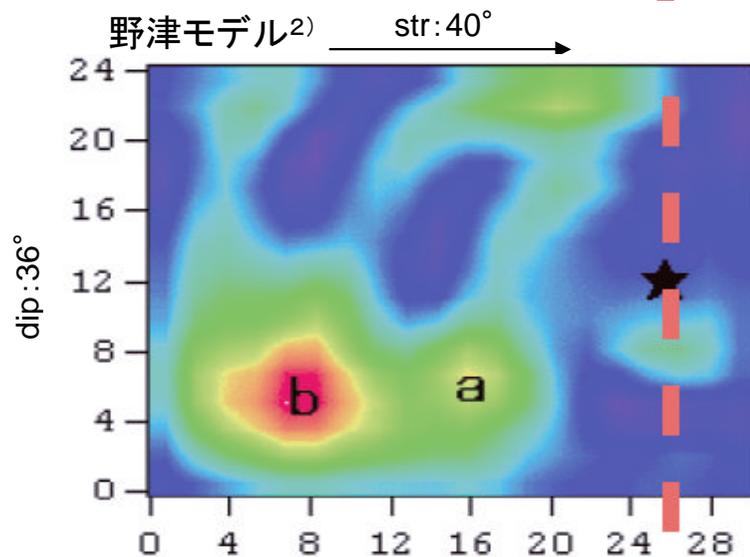
波形インバージョンにより推定された震源モデルの比較

・アスペリティ3に関して、断層の深い所に推定されるモデルと断層の浅い所に推定されるモデルが報告されている。

アスペリティ3が深い場所のモデル

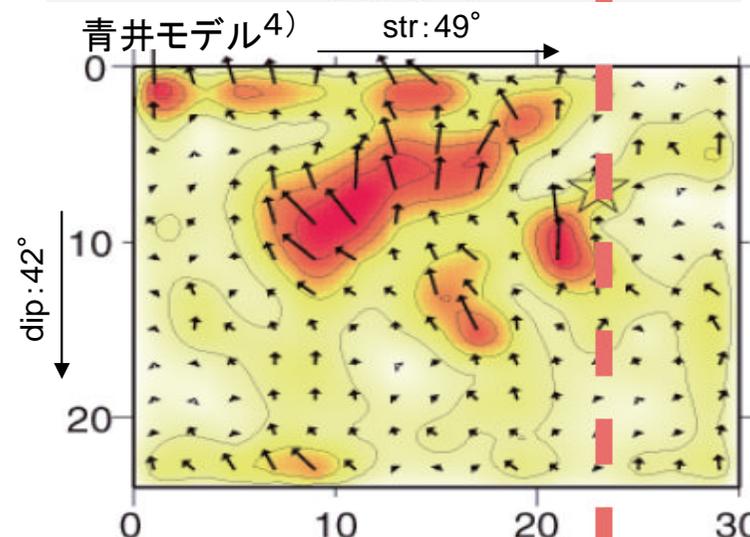
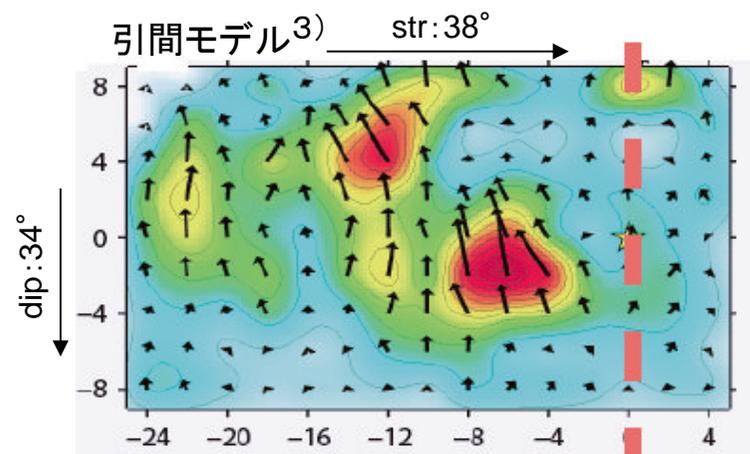


2枚断面を仮定. 北東側のdip: 55°, 南西側のdip: 35°



★印は震源(破壊開始点)を示す

アスペリティ3が浅い場所のモデル

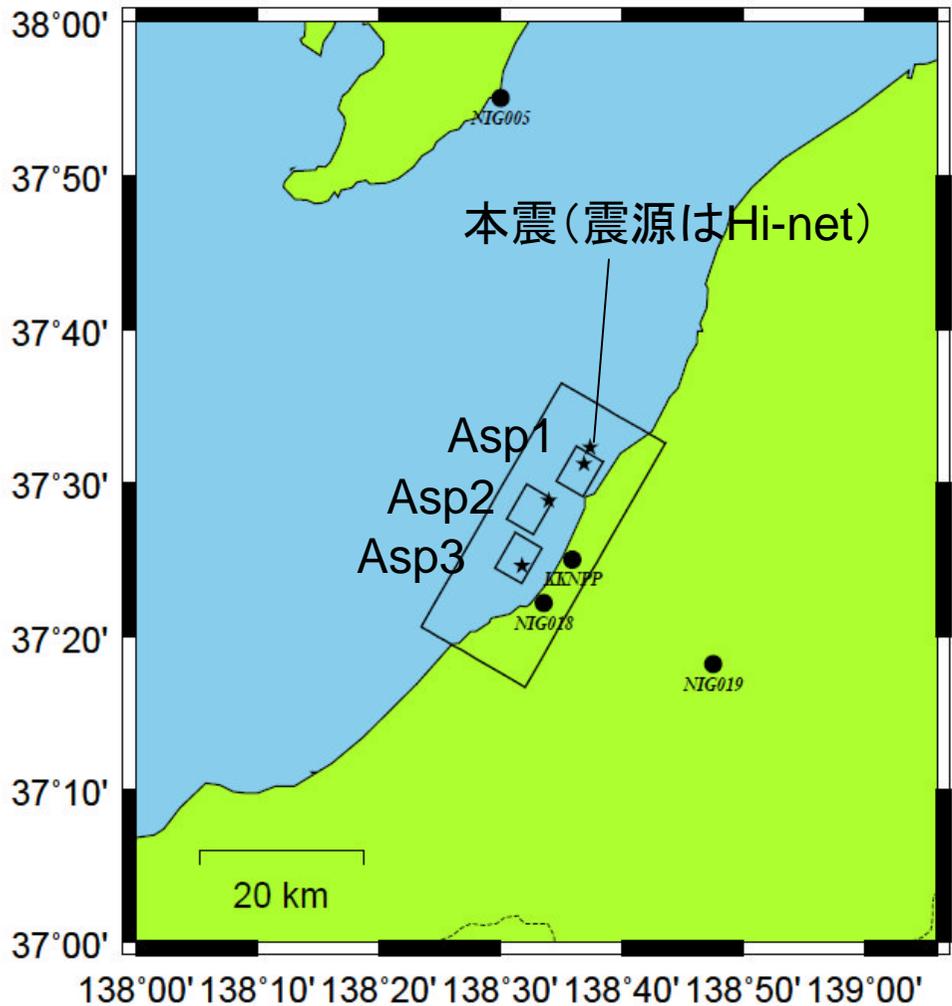


1)地震調査委員会資料(2007), 2)野津(2007), 3)地球惑星連合大会(2008), 4)防災科研HP, 2007

構築した震源モデル



経験的グリーン関数法により合成した波形と観測波形から最適な震源モデルの構築を行った。



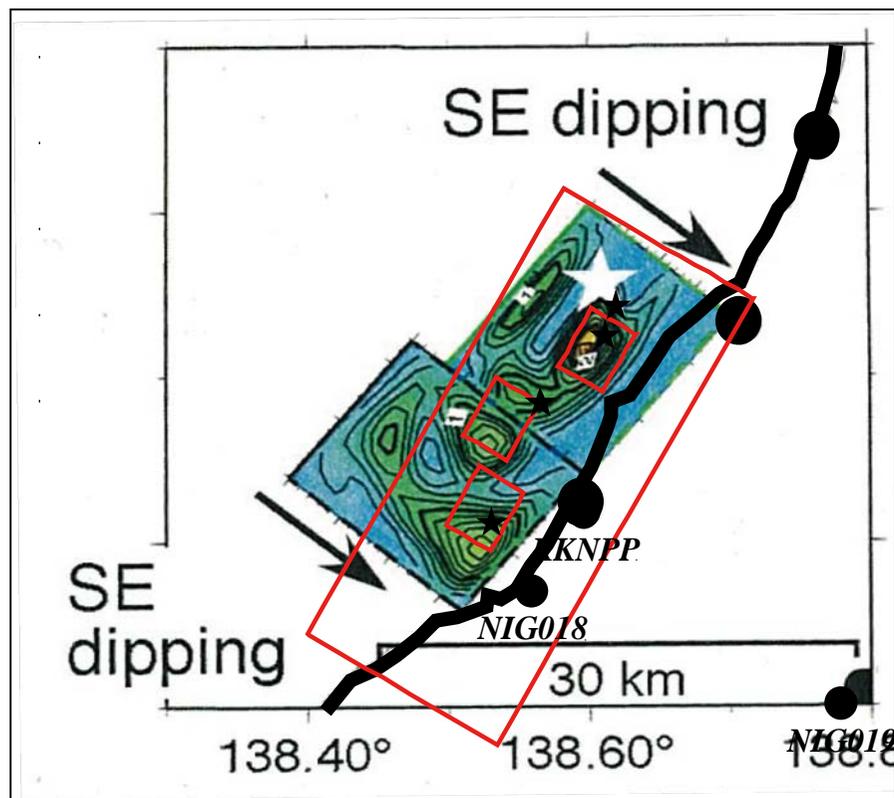
- ・ 走向：30°， 傾斜角：40°
- ・ ASP1とASP2は余震1， ASP3は余震2を用いて波形合成

	L (km) × W (km)	$\Delta\sigma$ (MPa)	M_0 (Nm)
ASP1	5.5 × 5.5	23.7	1.69×10^{18}
ASP2	5.5 × 5.5	23.7	1.69×10^{18}
ASP3	5.04 × 5.04	19.8	1.02×10^{18}

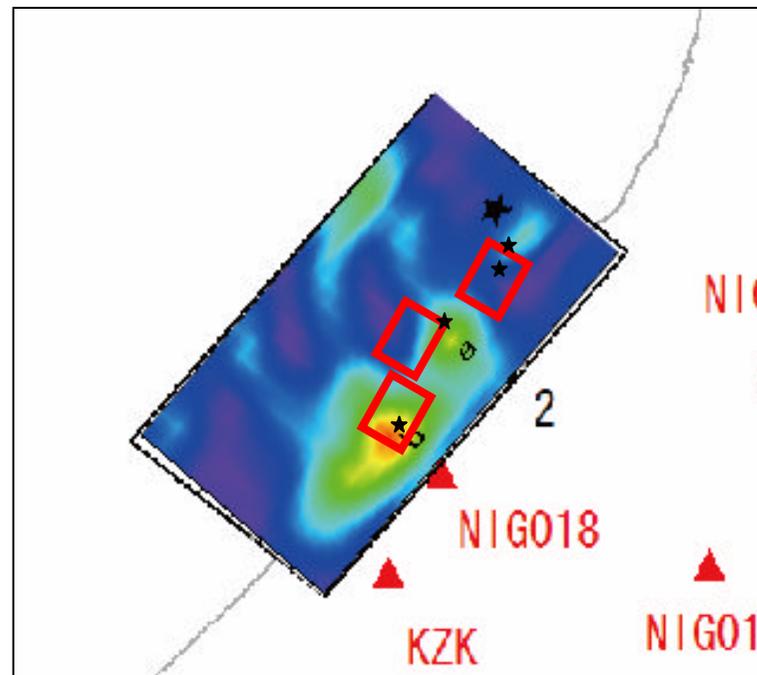
アスペリティ内の星印は破壊開始点を示す。

波形インバージョンから推定されたすべり分布と経験的グリーン関数法による強震動生成域の比較

堀川 (2007)



野津 (2007)



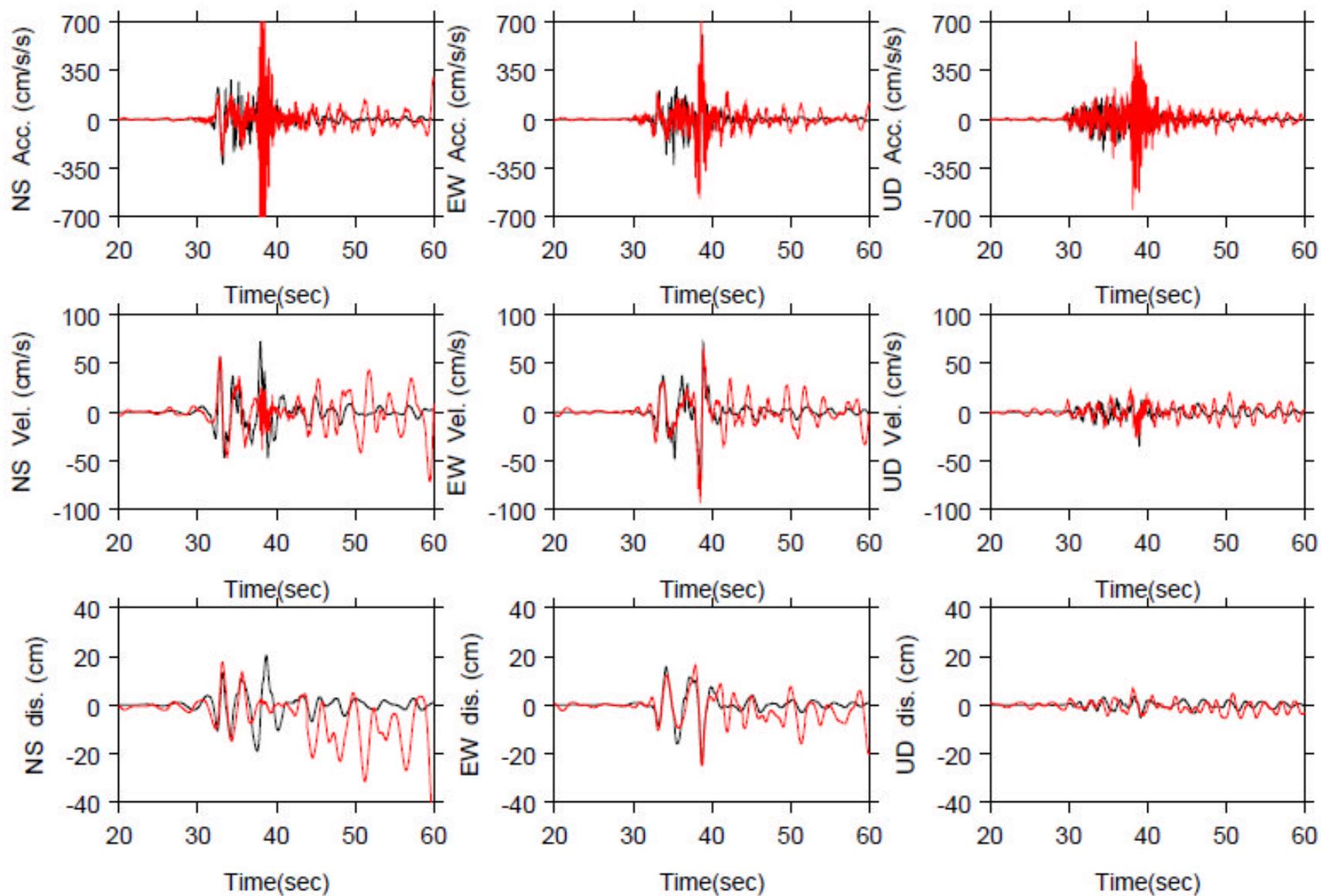
赤の小矩形は強震動生成域を示す。

KKZ1R2

Mainshock:07/07/16_10:13

EGF:07/07/16_21:08

— obs
— syn

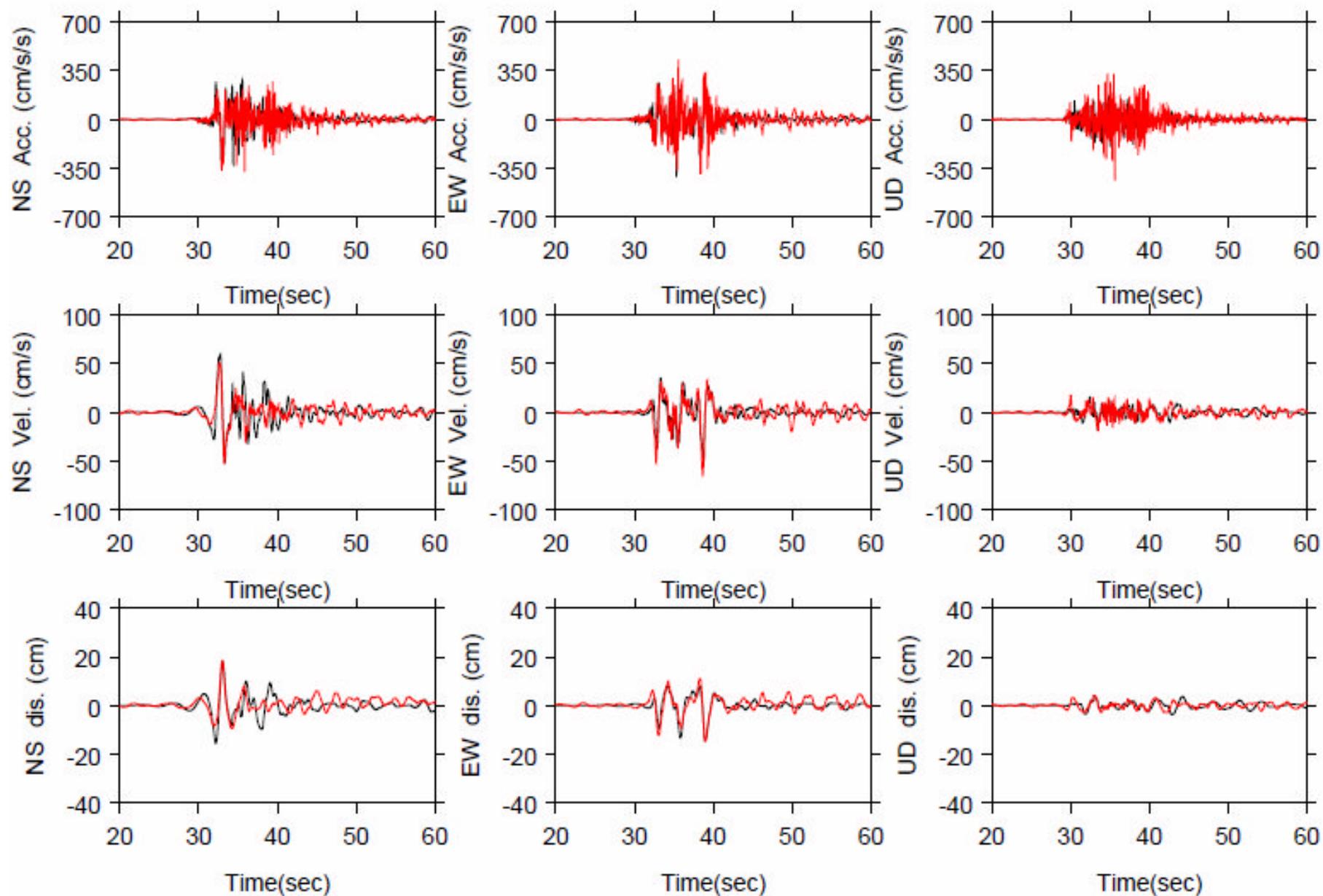


KKZ5R2

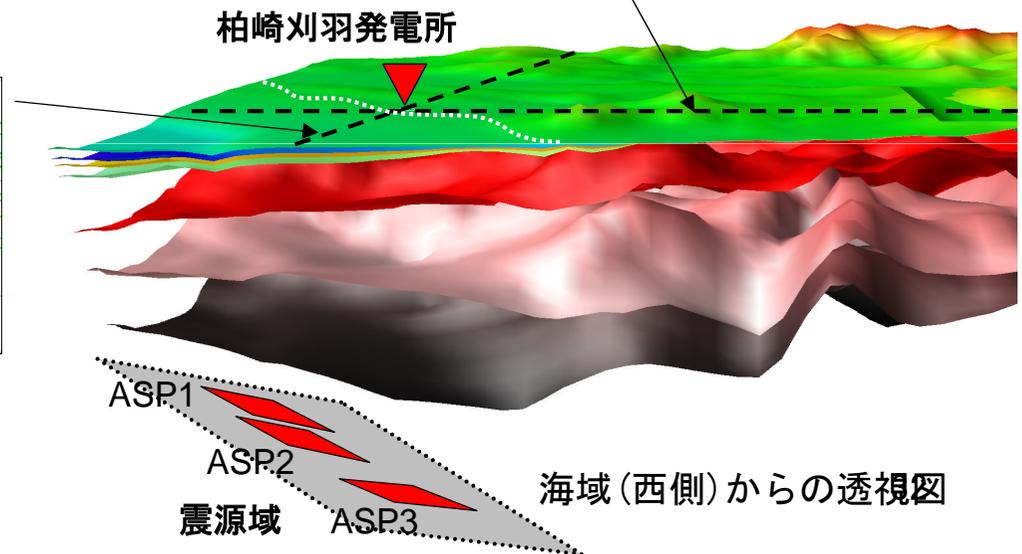
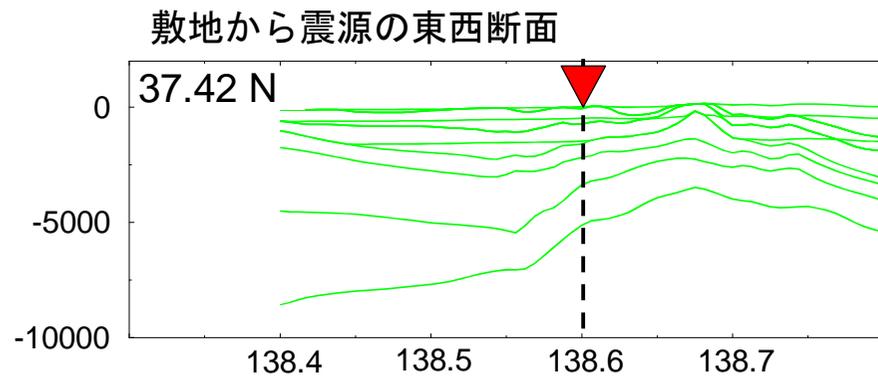
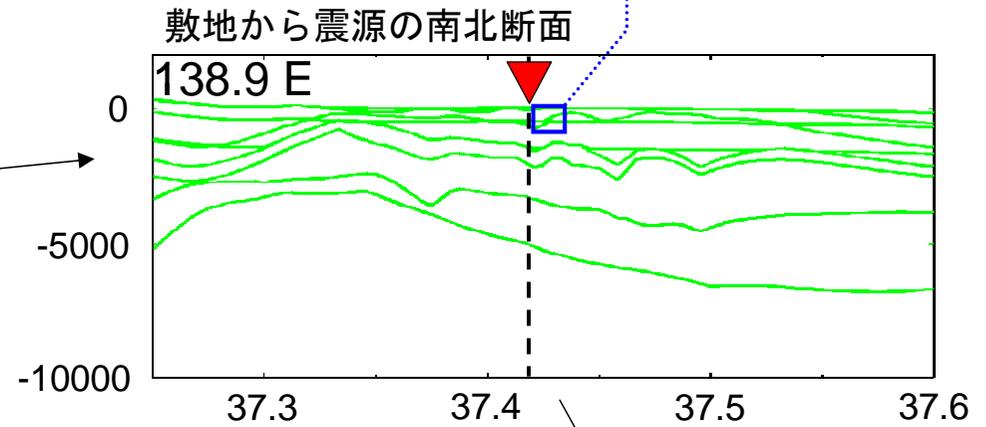
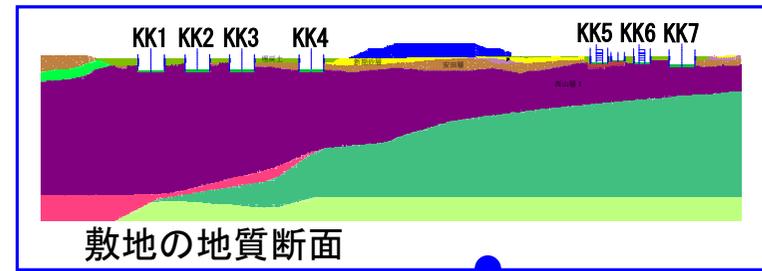
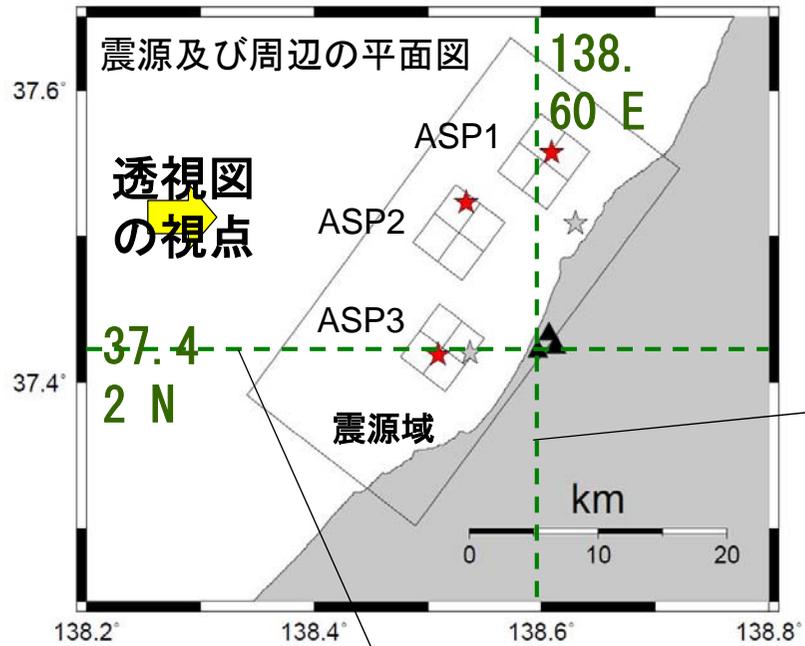
Mainshock:07/07/16_10:13

EGF:07/07/16_21:08

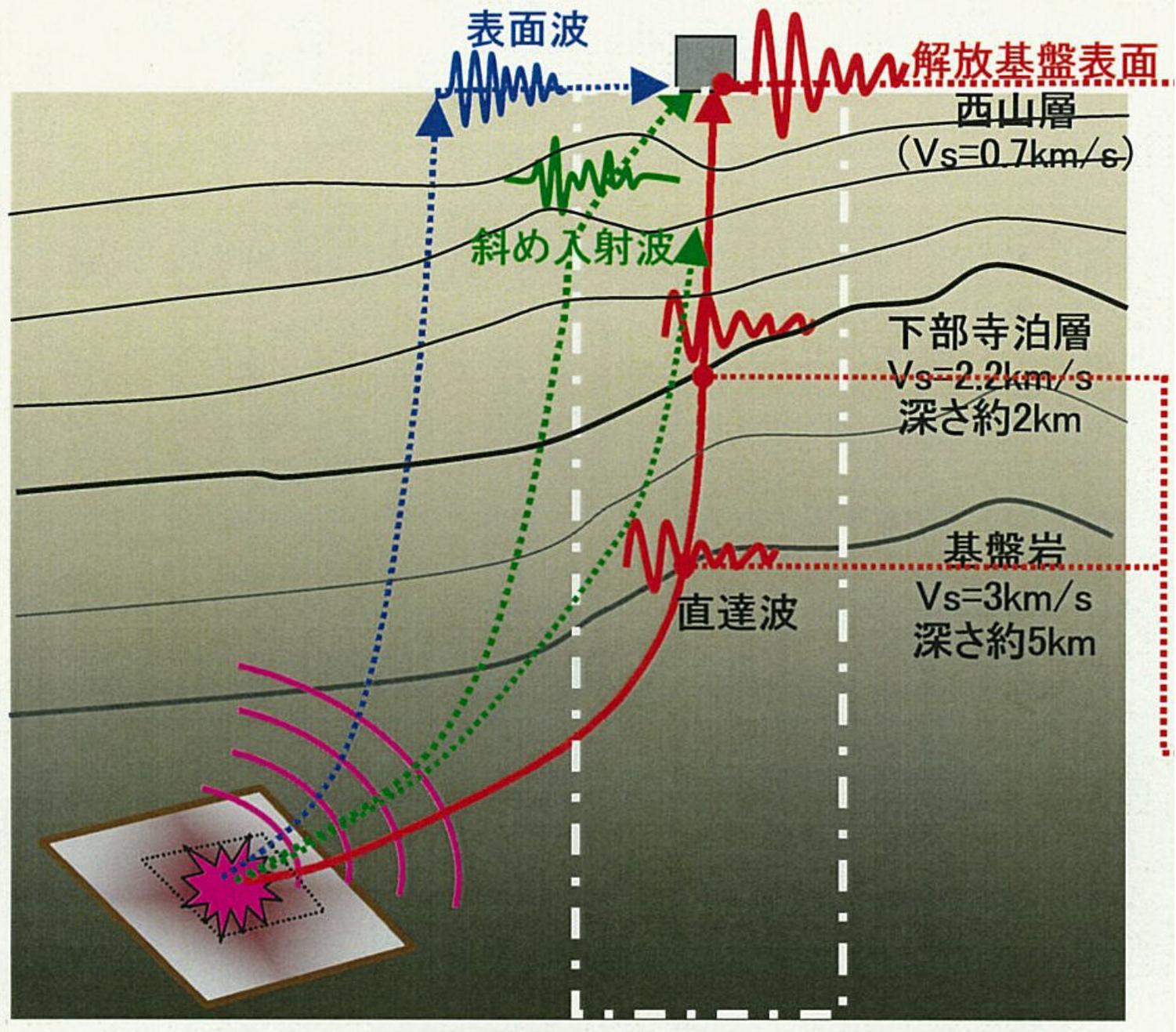
— obs
— syn



東京電力 柏崎刈羽原子力発電所 サイト近傍の地下構造



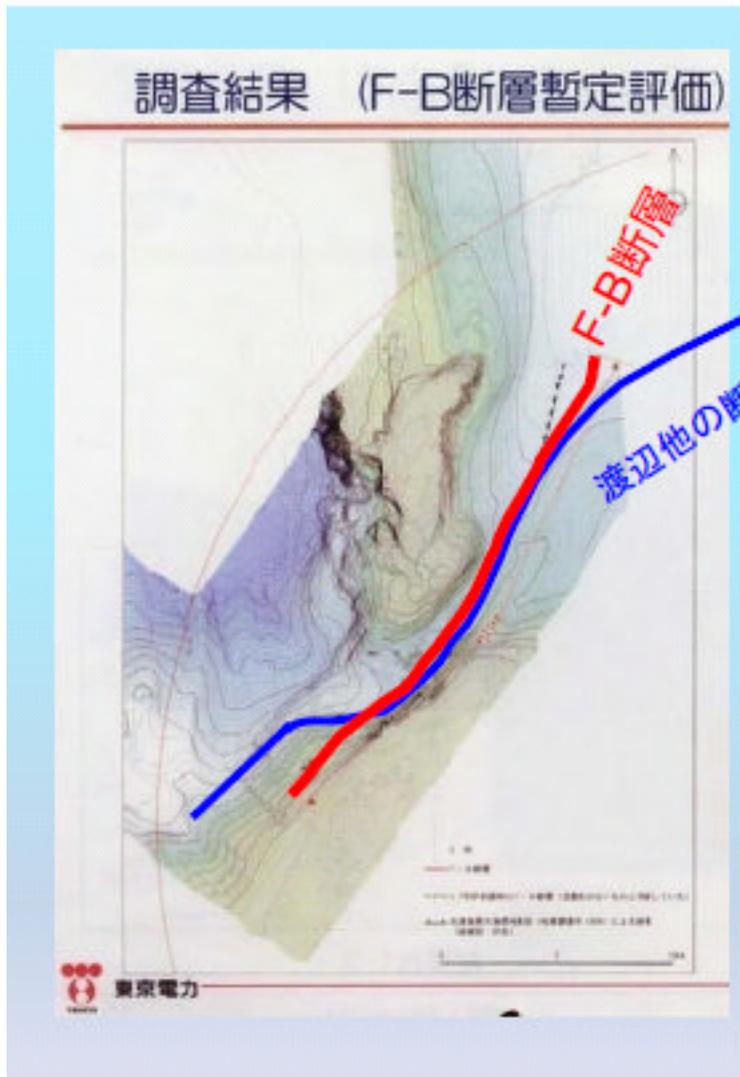
柏崎刈羽原発周辺地域で大きくなった一因(フォーカシング効果)



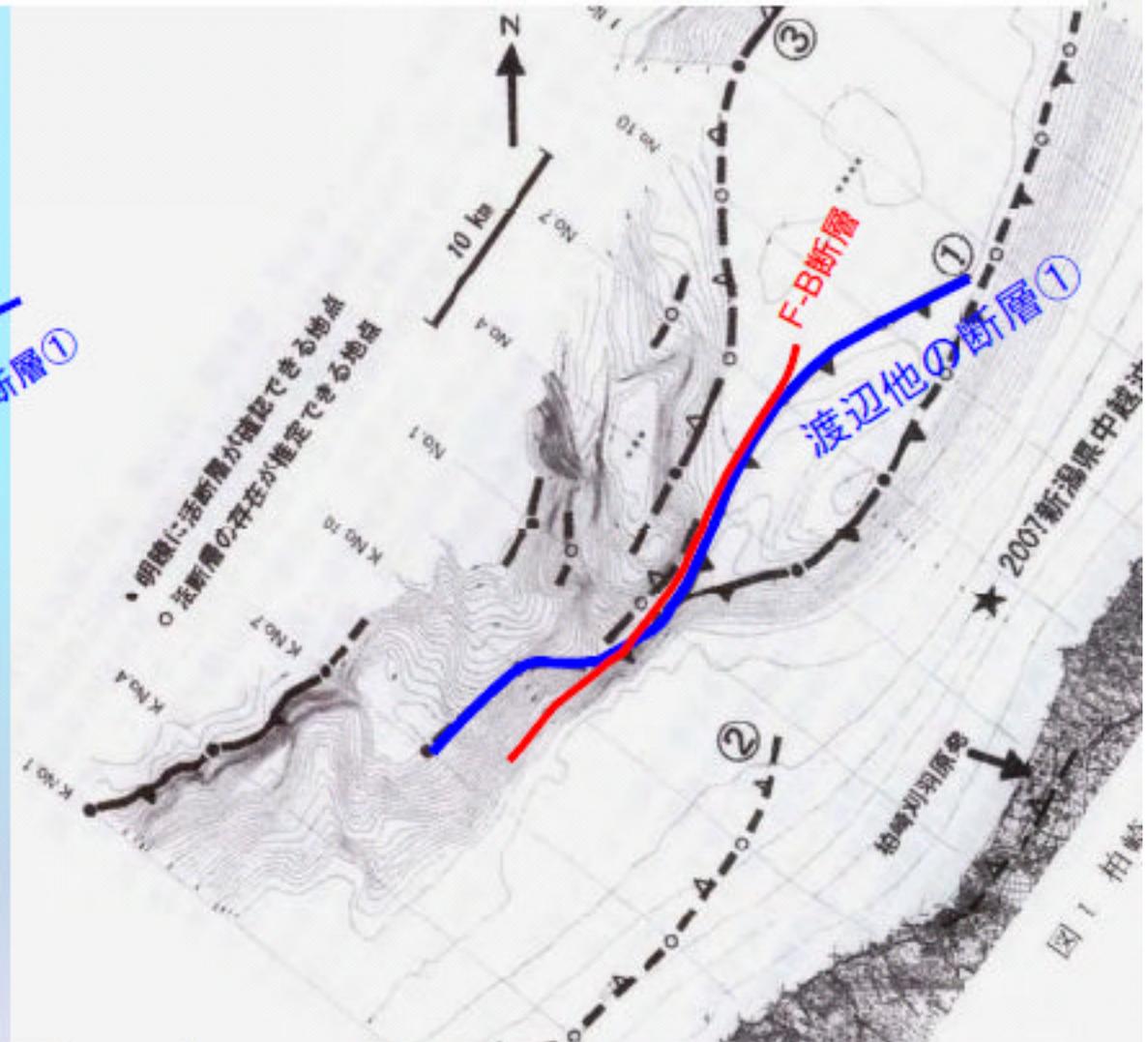
新潟県中越沖地震の経験から学ぶ発電用原子炉の耐震設計の課題

1. 耐震安全審査の時点で特定されてなかった活断層に起こった地震：
 - この地震に関係する可能性のある活断層の存在は、2000年頃に専門家により指摘されていた（岡村, 2003）。
 - 東電は指摘された活断層に地震を想定して旧指針に従って設計用地震動（大崎スペクトル）の評価を行った。
 - その結果、評価された地震動は建設時点の設計用地震動のレベルを超えないと結論づけた。
2. 耐震安全設計のための地震動をはるかに超える強震動。
 - たとえ活断層が認定されても、震源断層モデルが適切に設定されなければ、地震動は過小に評価されてしまう。
 - 強震動を正しく評価するためには、巨視的、微視的断層パラメータの適切な推定および不確かさの考慮が重要。

地震を引き起こした改訂活断層は事前に活断層と認定されていたもの



東京電力によるF-B断層の暫定評価。
昨年12月の第176回地震調査委員会
資料. 調176-(3)-7から抜粋.



東電設置許可申請書に付随する音波探査記録
の変動地形学的観点からの再検討結果。
渡辺・鈴木・中田(2007). 日本第四紀学会講
演要旨集, 37別冊, p. 5から抜粋.

4. まとめと今後の方向

1. 発電用原子炉の耐震安全性のための設計用地震動は、活断層の位置形状と震源断層モデルが適切に設定されれば、評価可能。

そのためには、最新の知見を取り入れた活断層の調査、地下構造の調査および震源断層のモデル化に基づく地震動の評価が必要。

2. 孤立した短い断層、活褶曲・活撓曲などの活構造、に対する震源断層のモデル化の手法、などの地震動評価の高度化が不可欠。
3. 震源断層を特定せずに策定する地震動の評価方法の再検討。
4. 原子力安全委員会は新指針に基づいて適切な設計用地震動評価するために、活断層の認定、震源断層のモデル化、設計用地震動の評価、地盤の安定性評価、に関して手引きの策定を検討している。