

第10回もんじゅ安全性調査検討専門委員会
2002年7月26日／福井原子力センター（敦賀市）

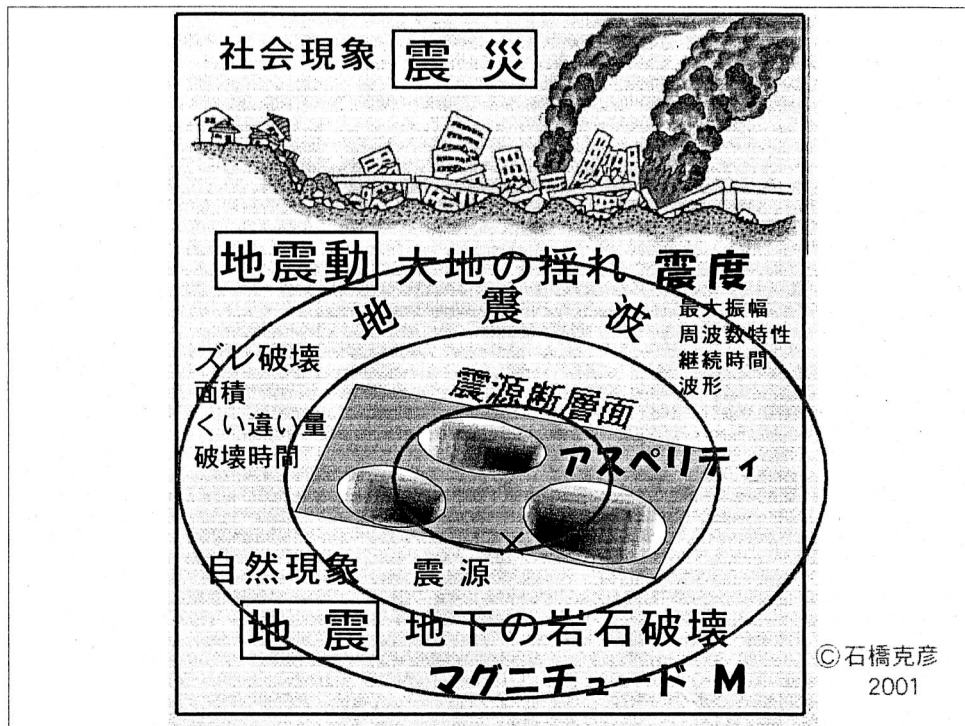
原子力施設の耐震安全性（地震学から）
地震と地震動の想定
— 活断層を中心として —

石橋 克彦

神戸大学・都市安全研究センター
同・理学部地球惑星科学科

概 要

- A. 地震とは何か？
「地震」と「地震動」は違うもの
キーワードは震源断層面とアスペリティ
 - B. 従来の原子力発電所の耐震設計の概略
「地震」と「地震動」の想定が適切か？
 - C. 活断層とは何か？
活断層は、地震の実体を適切に示さない場合のほうが多い
「松田式」の無意味性
 - D. 基準地震動策定の慣用的手法の問題点
「松田式＋金井式＋大崎の方法」は経験的・観念的で不適切
政府による現在の標準的な強震動予測手法
「吊るし」ではなく「オーダーメイド」を！
- 付. 敦賀半島付近は大地震発生能力が高いと考えられる
花崗岩地帯の地中での強震動（2000年鳥取県西部地震）



地震とは 震源断層運動

地下の岩盤が面状にズレ破壊して地震波を放出する現象
(くい違い／すべり)

地震の本体は：地下のズレ破壊の面 震源断層面
(その存在領域：漠然と震源域。震源は破壊の出発点)

面上には、何カ所か、強い固着域がある アスペリティ
激しくズレ破壊して地震波を強く生成

地震の規模 (マグニチュード M) とは

大略, 震源断層面の大きさ (～長さ, ズレの量, 破壊時間)

震源断層面の長さ, 幅, ズレの量, 破壊時間

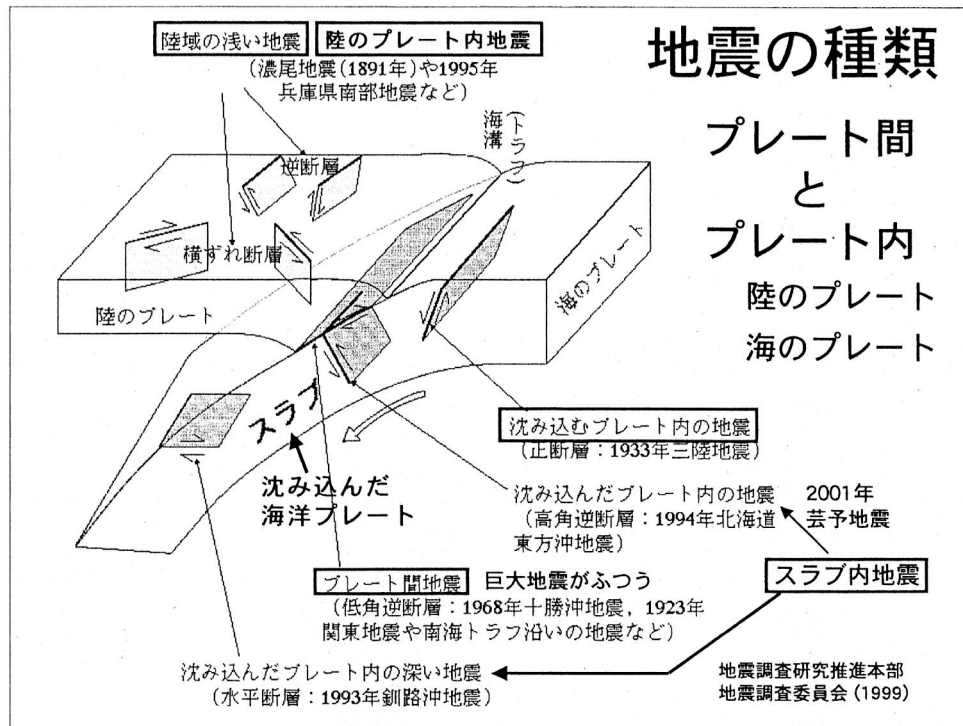
M 6 級: 約 15 km, 約 5 km, 約 0.5 m, 約 5 秒

M 7 級: 30～50 km, 15～20 km, 約 2 m, 10～15 秒

M 8 級: 100～150 km, 約 50 km, 約 5 m, 約 1 分
(巨大地震)

地震モーメント のほうが本質的で重要

(岩石の剛さ×ズレの量×断層面積)



従来の原子力発電所の耐震設計の概略

考えられる最大の地震動でも「止める・冷やす・閉じ込める」機能を確保
耐震重要度分類 (As, A, B, C)

地震の想定：設計用最大地震，設計用限界地震

→ 地震動の策定：基準地震動 S_1 , S_2 (解放基盤表面で)
M, 最大速度振幅, 周波数特性 (応答スペクトル) など → 模擬地震波を作成
地震動には様々な周期の波が含まれている。ある地震動について, 各周期で,
その固有周期の構造物がどれほど揺れやすいかを示したものが応答スペクトル

→ 動的応答解析

(モデル化した建物・機器を計算機上で揺すり, 変形・応力をみる)

『発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針』

1978年策定, 1981年一部見直し

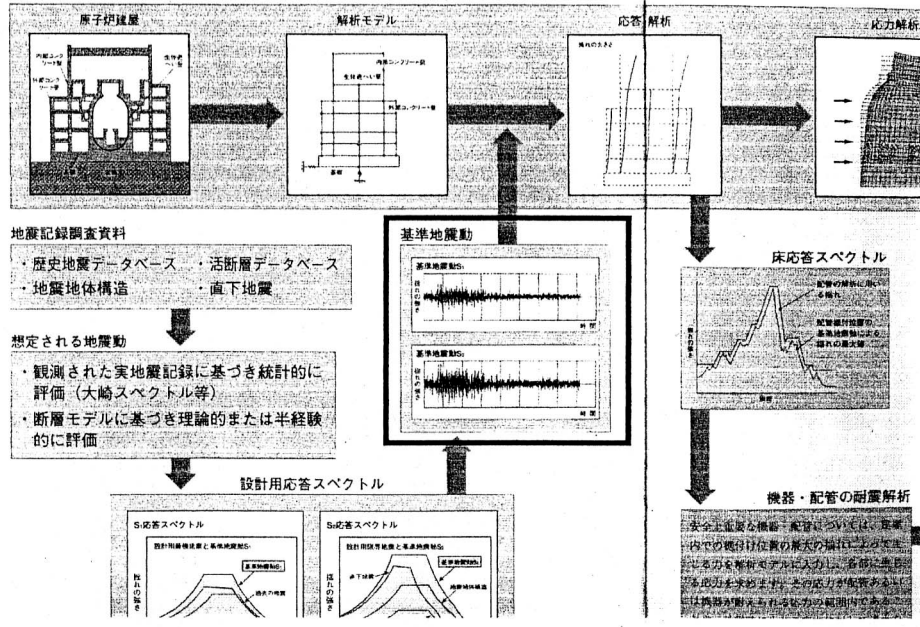
建物・構築物は原則として剛構造にする

重要な建物・構築物は岩盤に支持させなければならない

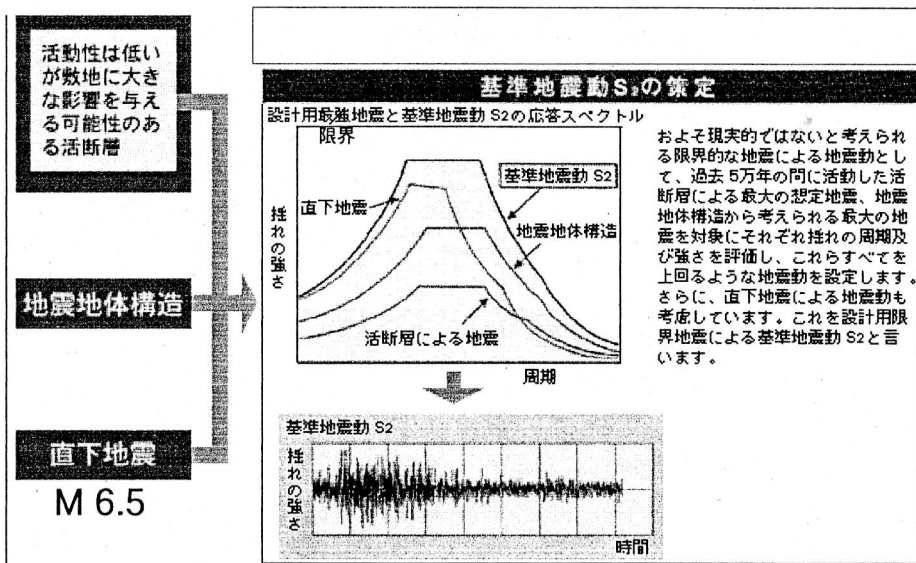
原子炉建屋などの耐震解析 (BWRの例)

原子炉建屋などの耐震解析 (BWRの例)

通商産業省資源エネルギー庁パンフレット (99.10) より



およそ現実的ではないと考えられる限界的な地震による地震動 (設計用限界地震による基準地震動 S₂) の策定



資源エネルギー庁ホームページより (<http://www.atom.meti.go.jp/siraberu/anzen/04/index01s.html>)

「もんじゅ」の例

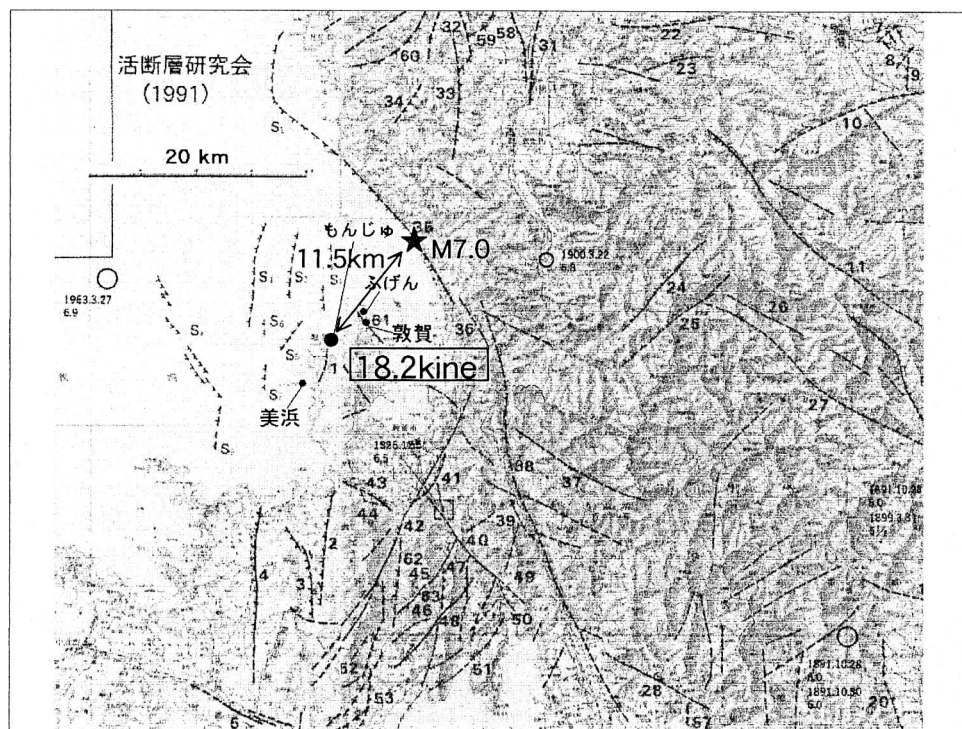
考慮すべき地震と、それによる
地震動の最大速度震幅 (kine)
設計用限界地震と S_2 の場合

1. 活断層を選定し長さを設定
Ex. 甲斐城断層, 20 km
2. 松田式で M を想定
Ex. 甲斐城断層地震, M 7.0
3. 断層の中央を震央として
震央距離 Δ を計算
Ex. 甲斐城断層地震, Δ 11.5 km
4. 金井式で S_2 の最大速度振幅
を計算 ($M, \Delta \rightarrow V_{max}$)
Ex. 甲斐城断層地震, 18.2 kine

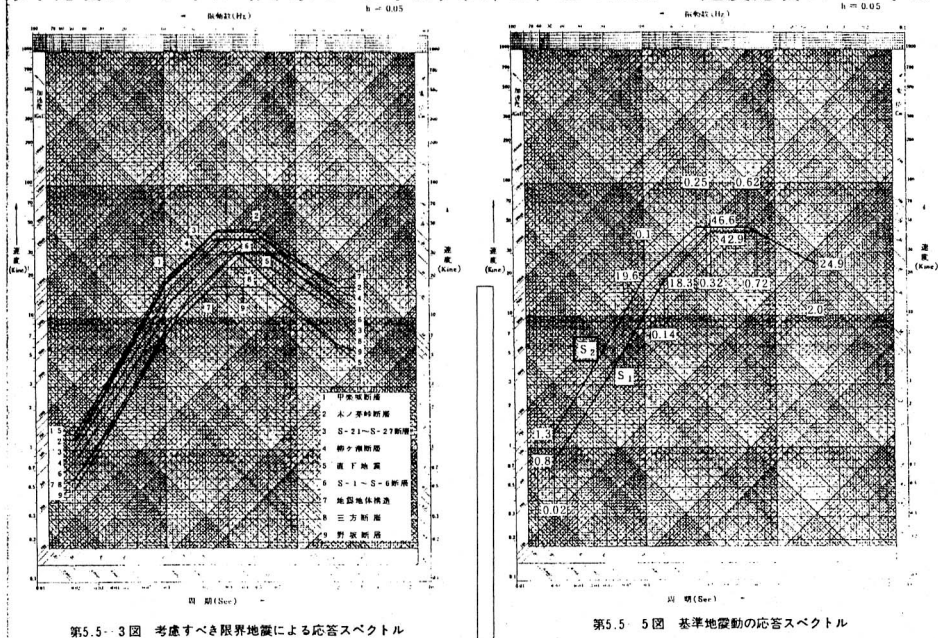
第 5.5-1 表 考慮すべき地震とそれによる地震動の最大速度振幅

項目	規模 M	震央距離 △ (km)	最大速度 振幅 V _{max} (Kine)	遠近距離 の別	備考 (番号は文献5の地震番号)	
考慮すべき最悪地震	歴史地震	8.0	57.2	13.8	遠	300 濃尾地震
		7.9	57.2	12.2	遠	300 濃尾地震
		7.8	54.1	11.5	遠	115 寛文近江の地震
		7.9	61.1	11.2	遠	8 天平美濃の地震
		6.9	21.0	10.5	近	556 越前岬内地震
		8.1	78.8	10.4	遠	78 天正畿内の地震
		6.7	18.2	9.3	近	51 正中近江の地震
		7.3	44.6	7.6	遠	515 福井地震
		7.4	49.7	7.6	遠	42 元暦近江の地震
		7.4	66.0	5.2	遠	229 文政近江の地震
	7.5	82.1	4.4	遠	445 北丹後地震	
活断層	7.0	27.3	9.1	近	柳ヶ瀬断層 (南)	
統計的	—	—	11.5	—	300 年期待値	
期待値	—	—	9.0	—	200 年期待値	
考慮すべき限界地震	活断層	7.0	11.5	18.2	近	甲斐城断層
		7.2	16.5	18.0	近	木ノ芽峠断層
		6.9	12.1	15.9	近	S-21～S-27断層
		7.2	21.0	14.9	近	柳ヶ瀬断層
		7.0	20.2	12.2	近	S-1～S-6断層
		6.9	24.0	9.2	近	三方断層
		6.3	14.0	7.0	近	野坂断層
	地震地体構造	7.8	60.0	10.1	遠	
	面下地震	6.5	—	13.4	近	

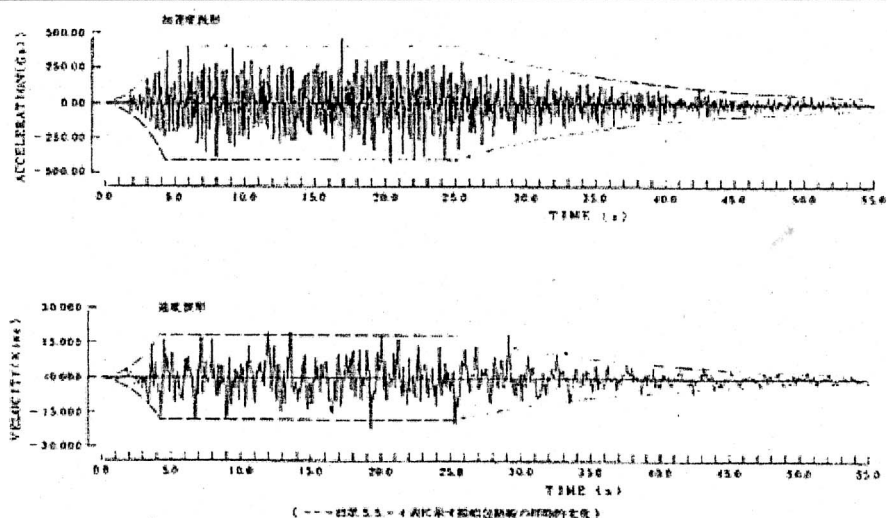
『高速増殖炉もんじゅ発電所・原子炉設置許可申請書/添付書類六』(動燃事業団, 1980) より



標準応答スペクトル(大崎スペクトル)(M, Δ)と Vmax → 速度応答スペクトル



『高速増殖炉もんじゅ発電所・原子炉設置許可申請書/添付書類六』(動燃事業団, 1980) より



M → 地震動継続時間
振幅包絡線の経時的変化 模擬地震波 (S₂) 全条件を満たすように地震動の時刻歴波形を数学的に合成

第5.5-7図 模擬地震波 (S₂)

『高速増殖炉もんじゅ発電所・原子炉設置許可申請書/添付書類六』(動燃事業団, 1980) より
「サイクル機構・もんじゅ建設所」ホームページより

活断層とは何か？

資源エネルギー庁(1999)：一般に第四紀に活動し将来活動する可能性のある断層

文部科学省(2001)：断層は大地の傷のようなもの。いつまた動くかもしれない、治りきっていない傷のようなものが活断層。活断層が動くことによって発生する地震を、陸域の浅い地震と呼ぶ。

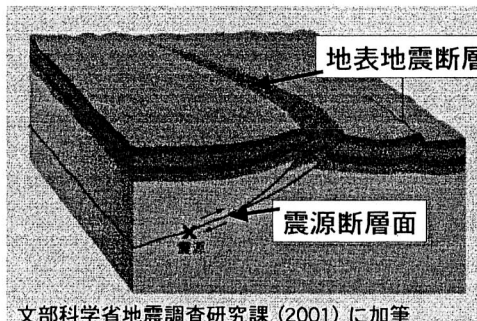
活断層研究会(1991)：一般に、最近の地質時代にくりかえし活動し、将来も活動することが推定される断層

いずれも曖昧な定義！ 地下に隠れている弱面も「活断層」か？

「活断層」の調査、認定、記載：地表の空中写真判読や地形地質調査による
(長さ、走向、傾斜、確実度、活動度、断層変位、平均変位速度など)

地形学、地質学、地球物理学的観察によって地表付近の形態が確認される断層で、最近の地質時代に繰り返し動いていて、将来もずれ動くことが推定されるものを、活断層という。

(石橋, 2000)



文部科学省地震調査研究課(2001)に加筆

累積すると
活断層として
認識される

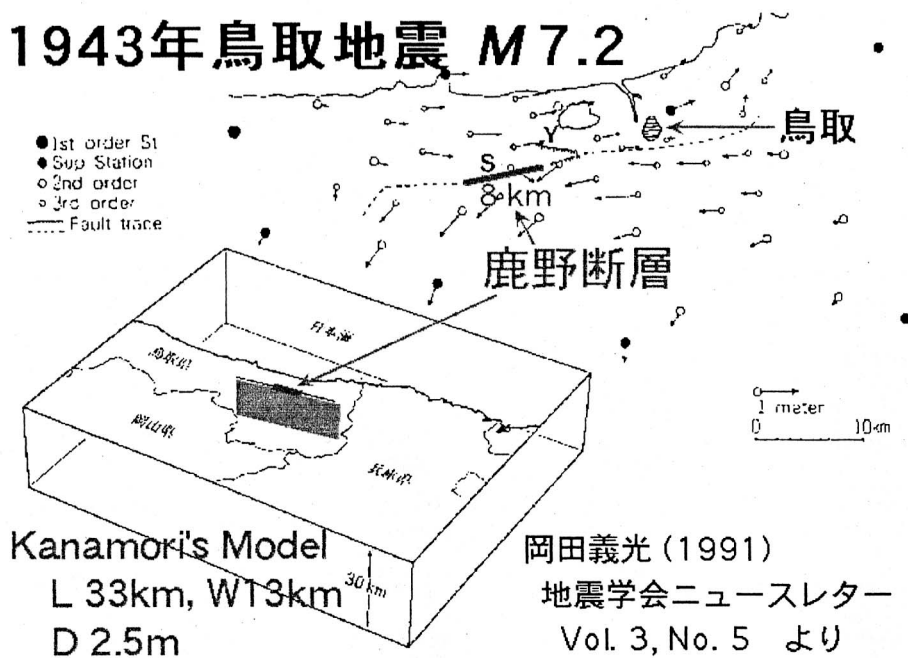
地下への広がりや暗黙に前提するが、地下の実態は分からない

陸域の浅い大地震が(過去及び将来)繰り返し発生しても
活断層が認められないことが少なくない

- 1 回ごとの大地震で地表地震断層が生じない場合
例：2000年鳥取県西部地震(M 7.3)
- 次の大地震までの間に地表地震断層が浸食・消滅する場合
例：1927年北丹後地震(M 7.3)

活断層が無くても浅い大地震は起こりうる！
活断層が有れば一層要注意(短くても大地震が起こりうる)

1943年鳥取地震 M7.2



測地学審議会地震火山部会／平成9年6月
地震予知計画の実施状況等のレビューについて (報告)

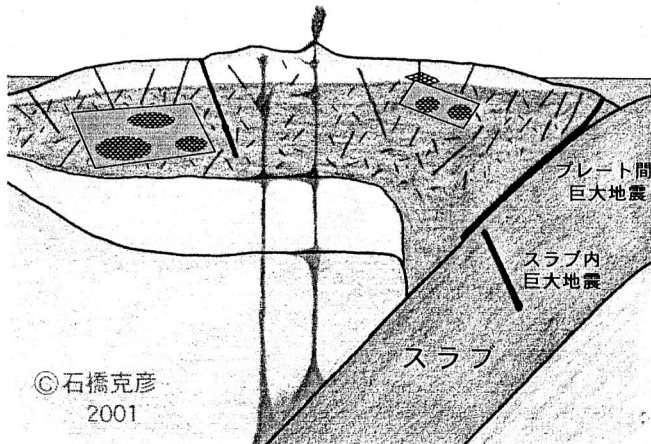
以上をまとめると、M7.2以上の陸域の地震は、認知されている活断層で起こることが多いが、認知されていないC級の活断層で起こることもある。また、M6.8未満の地震はどこで起こるか分らず、M6.8～M7.1の地震でも活断層が認められない場所で起こる可能性がある。ただしM6.5以上の地震は、活断層の多い地域に起こり易いことが分っている。(p. 26)

日本列島の「陸のプレート内地震」は深さ15~20km程度まで(上部地殻)

ほとんどの地震は地下の古傷の再破壊

小さい地震ほど沢山起こる(Mが1小さくなると発生数が約10倍増える)

日本列島の上部地殻には大中小の古傷(亀裂・割れ目・断層)が無数にある
小さいもののほど数が多い



既存の大きな古傷が大地震を起こすこともあるが、小さな割れ目が繋がって大地震になることもあるだろう。

「活断層が地震を起こす」とは限らない!

日本地震学会 2002 年度秋季大会のお知らせ

秋季大会を下記の通り開催します。発表を行うためには、講演申し込みと予稿原稿の送付が必要です。講演申し込み要領を2に、予稿原稿作成・送付方法を3に示します。

1. 秋季大会の日程・場所

日 程: 11月11日(月)~13日(水)

場 所: 横浜市パシフィコ横浜・会議センター

(JRおよび東急東横線桜木町駅より徒歩13分)

社団法人 日本地震学会ニュースレター

Vol. 14 No. 2/July 10, 2002

【特別セッション】

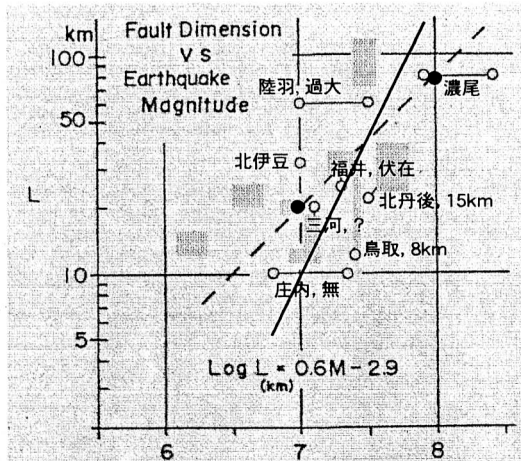
(S22) 内陸地震発生予測の学問的課題 — 活断層の意義を中心として — [コンビーナ: 遠田晋次, 松澤暢, 石橋克彦] 阪神・淡路大震災以降、活断層調査とそれにもとづく内陸地震の長期評価が重点的におこなわれ、一定の成果をあげている。しかし、活断層の概念は活断層研究者・地震研究者のなかで十分な一致をみているとは言い難く、活断層が震源断層をどの程度反映しているのか、活断層調査から内陸地震の地震像・発生確率・強震動がどの程度の確度で予測できるのかは、まだ多くの議論の余地が残されている。本セッションは、これらの問題について活断層研究者と地震研究者の根元的な議論の場を提供し、活断層調査と内陸地震予測のいっそうの発展を図りたい。

「松田式」とは何か？

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ii, 28, 269-283.

$$M = (\log L + 2.9) / 0.6 \quad \text{例えば, } L 10 \text{ km} \rightarrow M 6.5, L 20 \text{ km} \rightarrow M 7.0$$

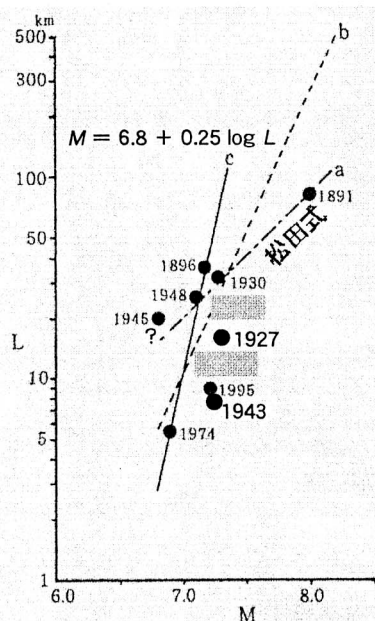
- L は活断層の長さではない
- 数値には意味がない



松田論文の Fig. 1 (a) M

- 黒丸は, 地震学的に推定された地下の震源断層面の長さ
それらは削除すべき
- 白丸は, 地表地震断層の長さ
活断層の長さではない!
しかも誤りと恣意性が多い
- データが少なく, M も古い値
- 直線の当てはめがおかしい
- 論文に「 $M 8$ の地震では $L = 80 \text{ km}$, $M 7$ では $L = 20 \text{ km}$ として決めた」と明記.
こんな決め方は不適切

「松田式」はご本人によって改訂された

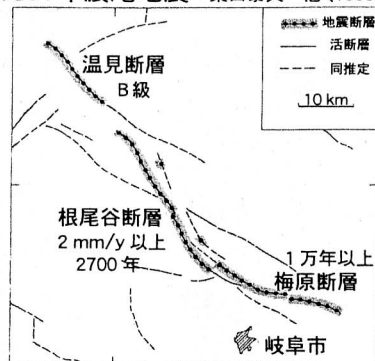


松田時彦, 1998, 活断層からの長期地震予測の現状—糸魚川-静岡構造線活断層系を例にして—, 地震ii, 50 別冊, 23-33.

- 1894年庄内地震を削除.
1974年伊豆半島沖地震と1995年兵庫県南部地震を追加.
- M の値を気象庁の改定値に修正.
一部の L も修正.
- 最小二乗法で直線を当てはめた.
 $M 8.0$ の1891年濃尾地震を除くと
 $M = 6.8 + 0.25 \log L$
例えば, $L 10 \text{ km}$ で $M 7.1$
 $L 20 \text{ km}$ でも $M 7.1$
- まだ L の値に疑問あり.
- 改訂式も, 活断層の長さとは関係ではない! $M 6.8 \sim 7.3$ の範囲で,
地表地震断層の長さは M とほとんど
相関がないことを表わしている!

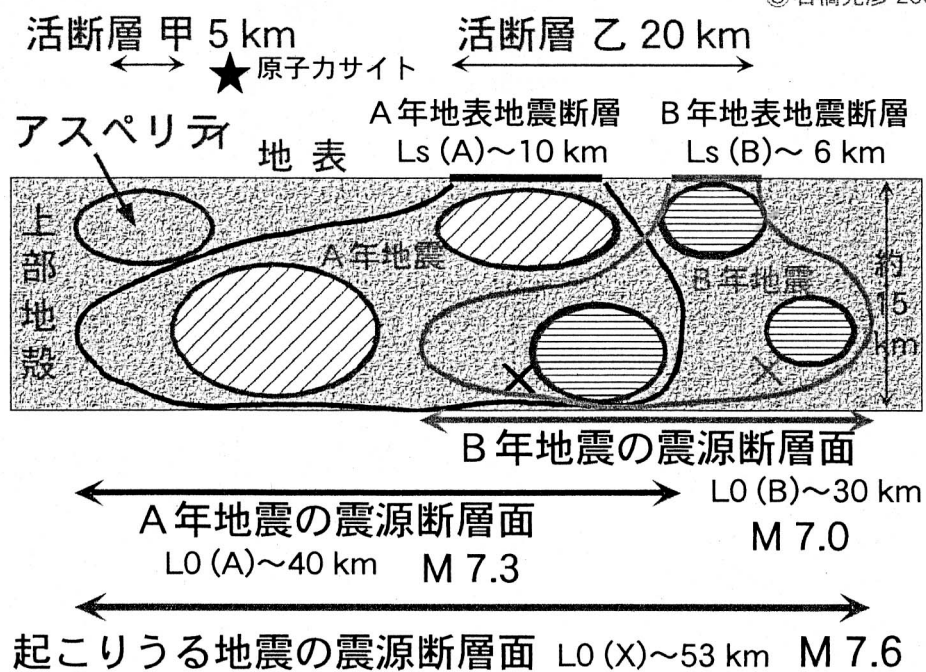
要するに、活断層の長さに対して単純に松田式を当てはめて
地震のマグニチュードを算定してはいけない
総合的な考察によって地下の震源断層面を想定することが本質的
短くても活断層があれば M 7 級大地震が起こりうる；1927年の例
隣接する活断層が連動すること多い 活断層帯 起震断層

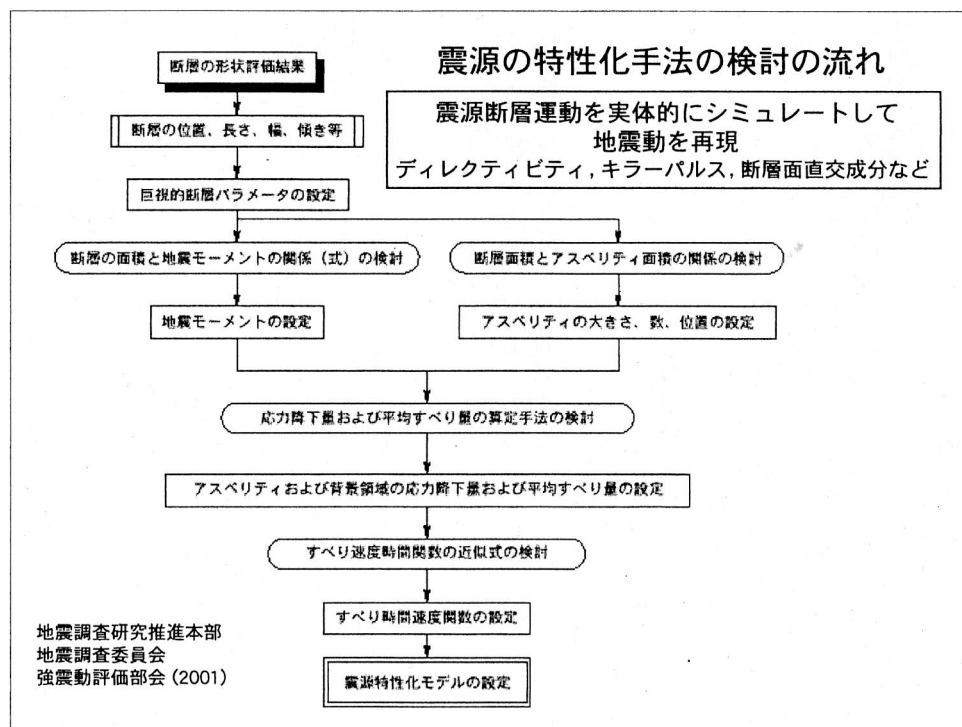
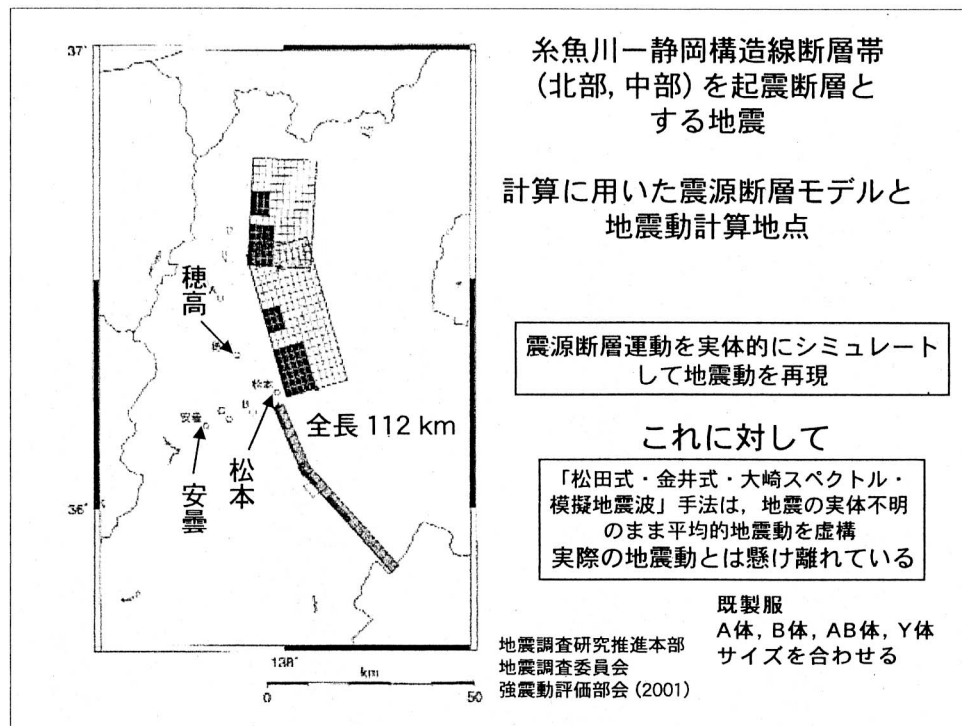
1891年濃尾地震 栗田泰夫・他 (1999)

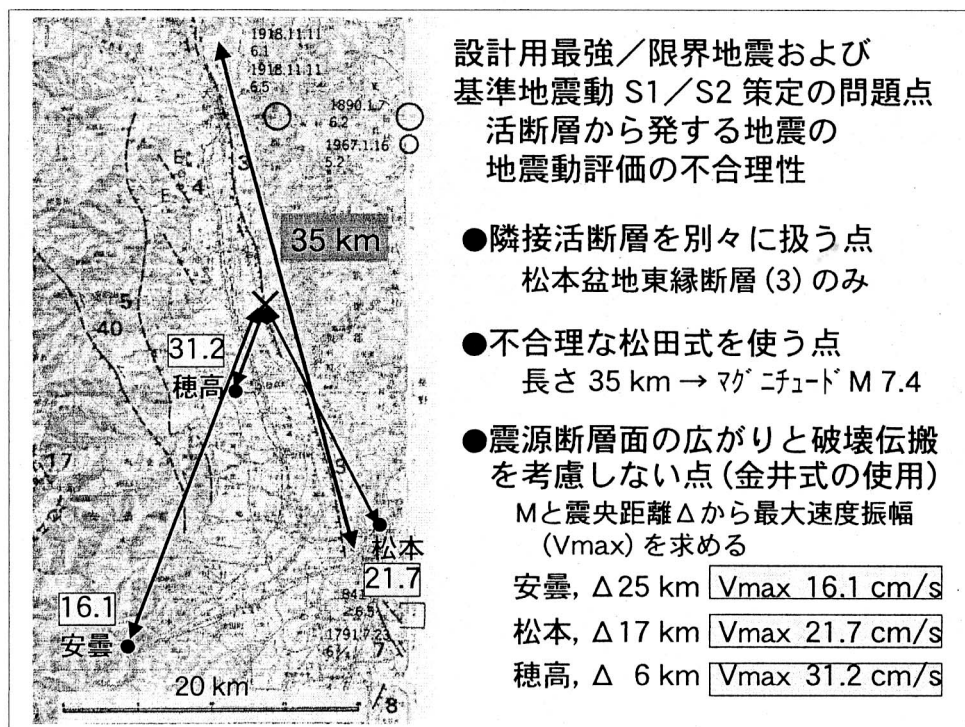
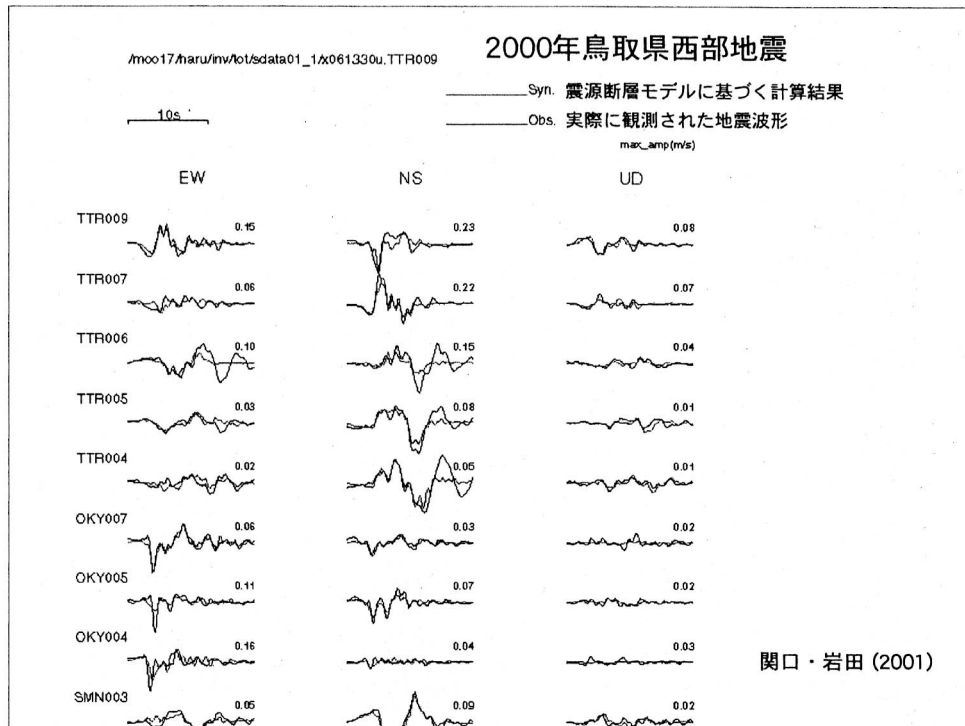


地震調査研究推進本部地震調査委員会 (1999)

©石橋克彦 2001



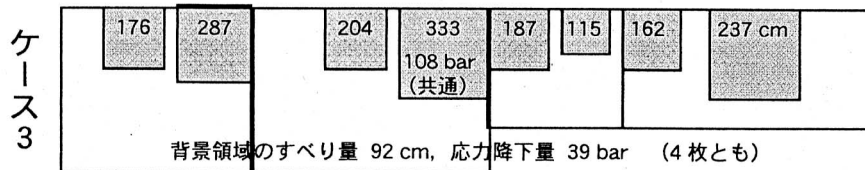




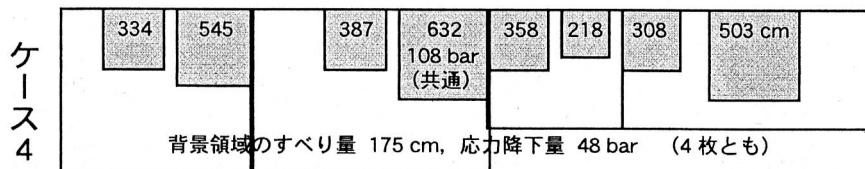
糸魚川－静岡構造線断層帯 (北部, 中部) を起震断層とする地震 設定した震源特性の例

ケース 3 : $M_0 = 7.9 \times 10^{26}$ dyne.cm, $M_{JMA} \sim 7.8$, $f_{max} = 6$ Hz

ケース 4 : $M_0 = 1.5 \times 10^{27}$ dyne.cm, $M_{JMA} \sim 8.1$, $f_{max} = 6$ Hz



北部 1 (26km) 北部 2 (35km) 中部 1 (17km) 中部 2 (34km)

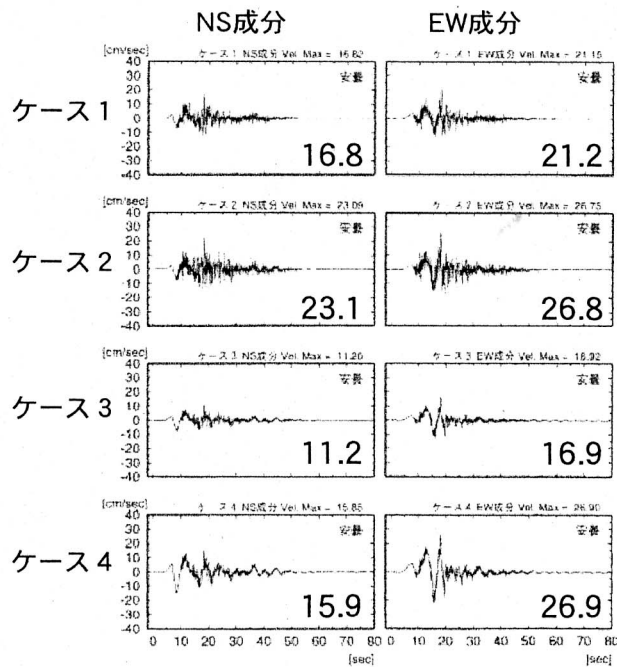


地震調査研究推進本部地震調査委員会強震動評価部会 (2001)

ケース別 速度波形 安曇 (16.1)

紫数字は
最大速度振幅
(cm/sec)

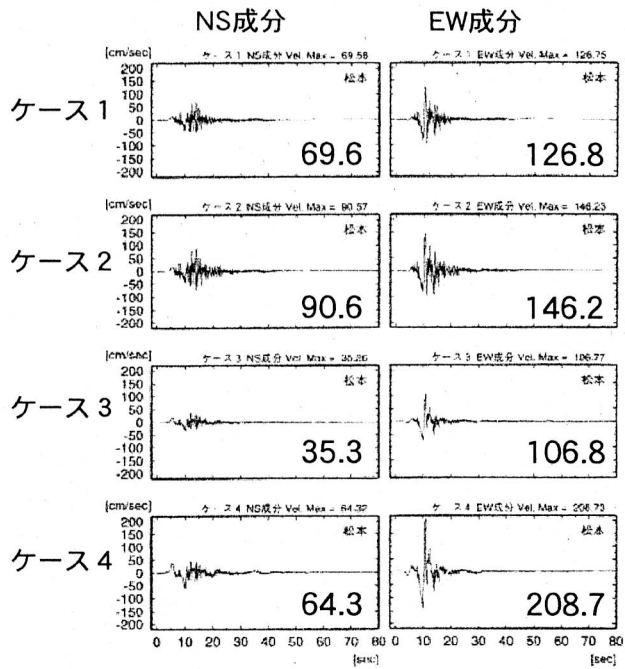
地震調査研究推進本部
地震調査委員会強震動
評価部会 (2001)



ケース別
速度波形
松本 (21.7)

紫数字は
最大速度振幅
(cm/sec)

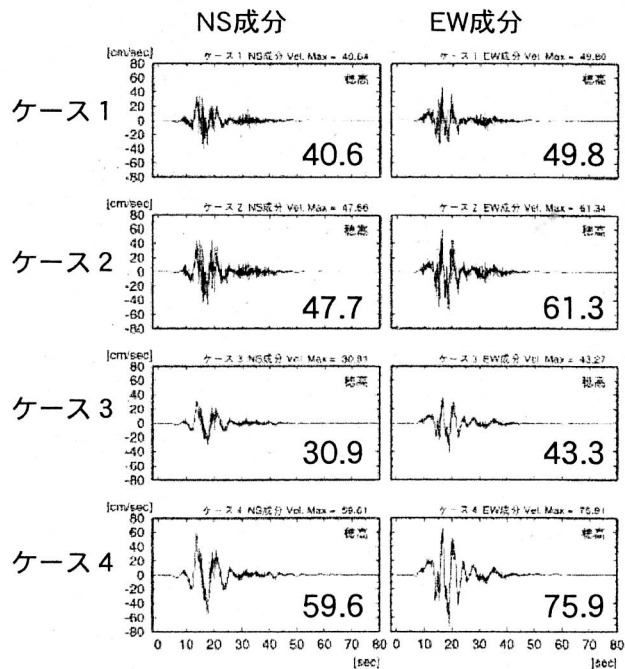
地震調査研究推進本部
地震調査委員会強震動
評価部会 (2001)

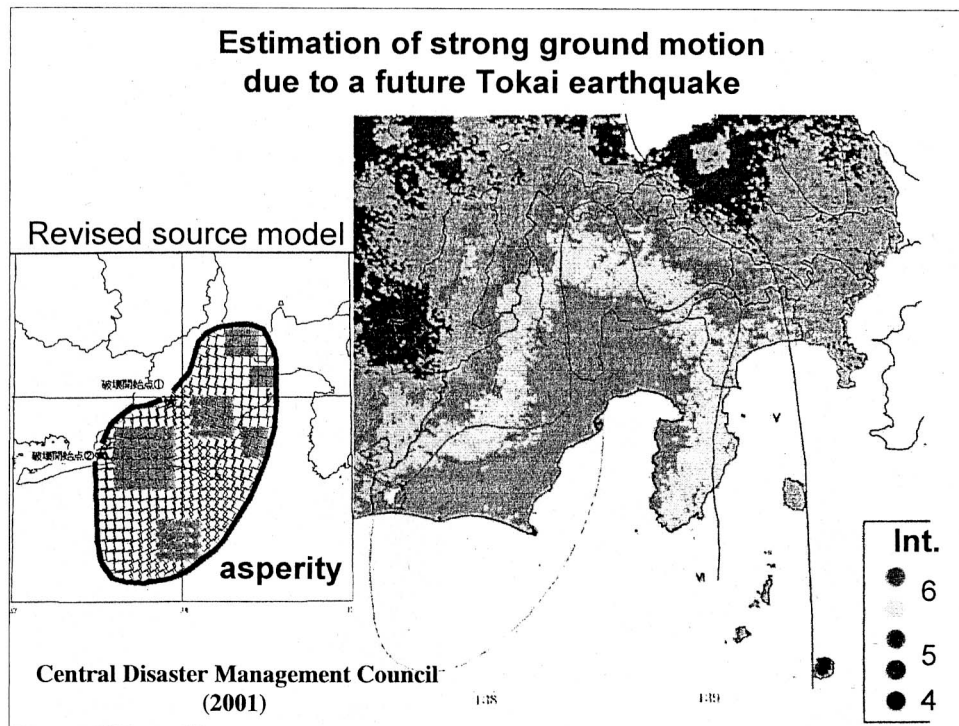


ケース別
速度波形
穂高 (31.2)

紫数字は
最大速度振幅
(cm/sec)

地震調査研究推進本部
地震調査委員会強震動
評価部会 (2001)





日本列島の地震情勢

(スラブ内大地震は、いつ・どこで起こるか分からない)
長期的には、ほぼ日本列島全体が大地震活動期に入るだろう
特に首都圏と「アムールプレート東縁変動帯」

アムールプレート東縁変動帯

(サハリン～日本海東縁～中部・近畿衝突帯～駿河・南海トラフ)

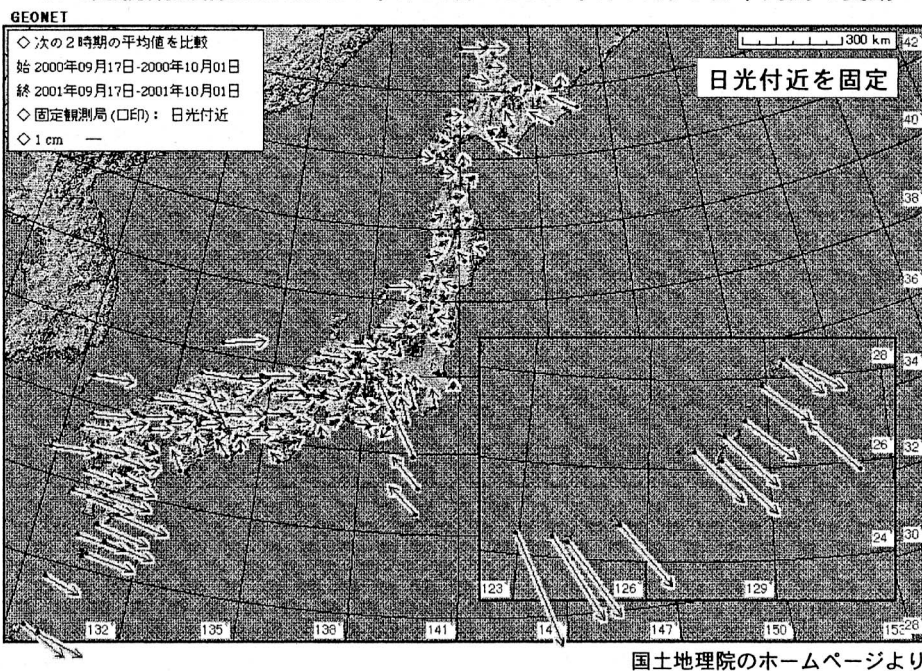
- ・ 93年北海道南西沖 (M7.8) → 95年兵庫県南部 (M7.3) → 以後の活動
- ・ 1854年, 1944・46年の東海・南海巨大地震の前数十年間; 大地震続発
- ・ 今後数十年以内に次の東海・南海巨大地震が発生することはほぼ確実
- ・ 日本海東縁(海陸, 脊梁まで)～信越～北陸～中部・西南日本～中央構造線～九州で大地震が起こりやすくなるだろう(どこで/いつ, は別問題)

→ 東海・南海巨大地震につながる(今世紀半ばまで)

アムールプレート東縁変動帯
(作業仮説)



GPS連続観測網による2000年9/10月～2001年9/10月の日本列島の変動



No.	年月日	場所	M (マグニチュード)
1	1791. 7. 23	松本付近	約 6 3/4
2	1792. 6. 13	積丹岬沖	約 7.1
3	1793. 2. 8	西津軽	6.9~7.1
4	1799. 6. 29	金沢付近	6.6~7.0
5	1802. 12. 9	佐渡	6.5~7.0
6	1804. 7. 10	象潟地震	7.0±0.1
7	1810. 9. 25	男鹿半島	6.5±1/4
8	1819. 8. 2	近江	7 1/4 ± 1/4
9	1828. 12. 18	三条付近	6.9
10	1830. 8. 19	京都付近	6.5±0.2
11	1833. 12. 7	庄内沖	7 1/2 ± 1/4
12	1847. 5. 8	善光寺地震	7.4
13	1847. 5. 13	頸城地方	6 1/2 ± 1/4
14	1853. 1. 26	信濃北部	6.5±1/4
15	1854. 7. 9	伊賀上野	7 1/4 ± 1/4

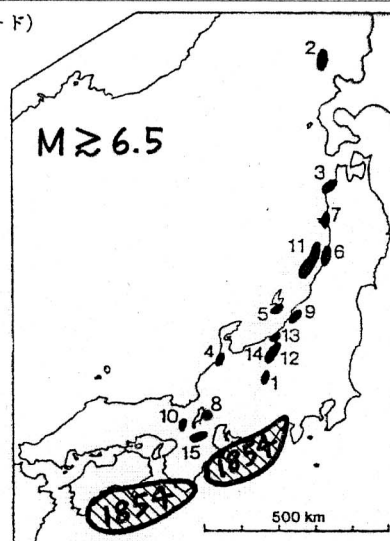
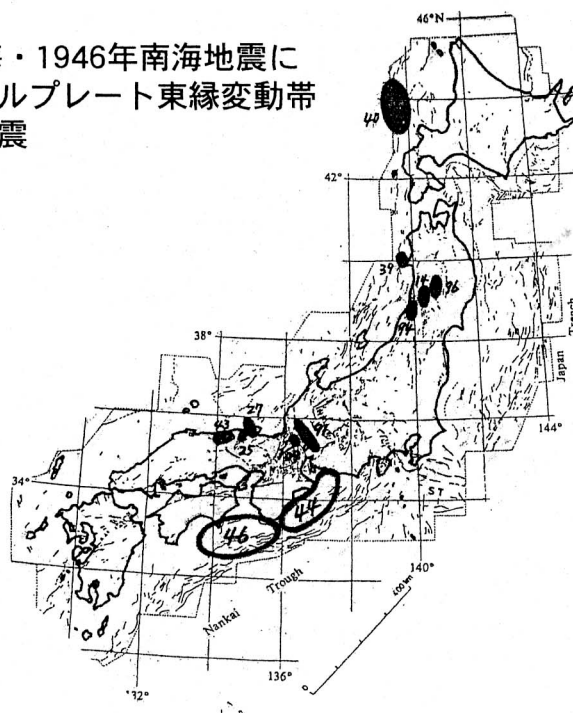
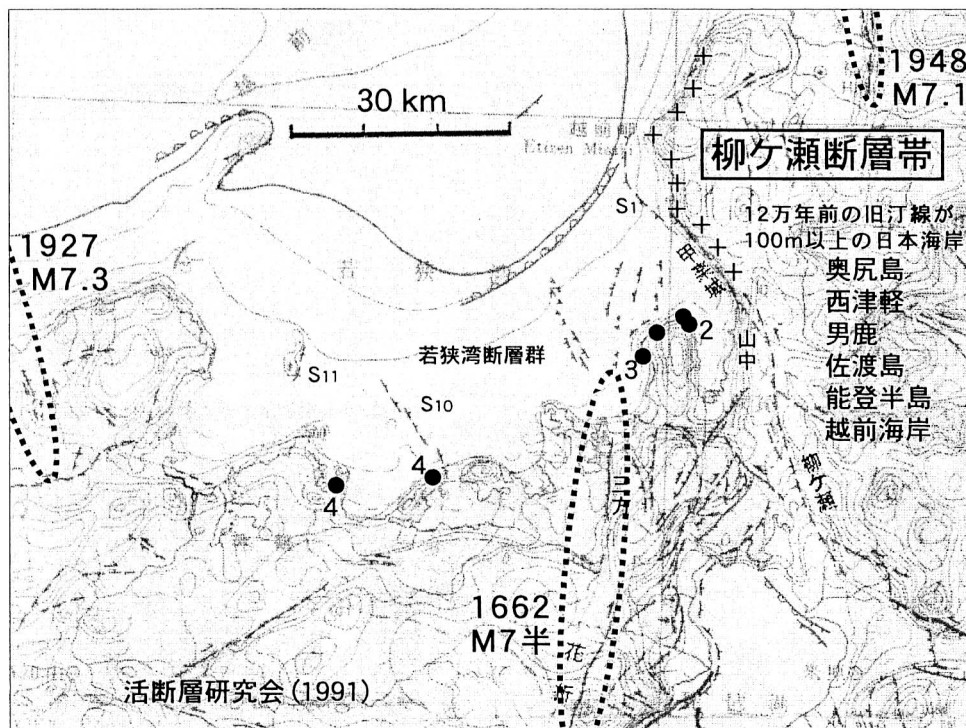


図3 1854年安政東海・南海地震(ハッチ)に先立つ数十年間に、アムールプレート東縁変動帯で発生した大地震(M6.5以上)。地図の数字は、左表の地震No. Mは、No.4は寒川(1992)、それ以外は宇佐美(1987)による。

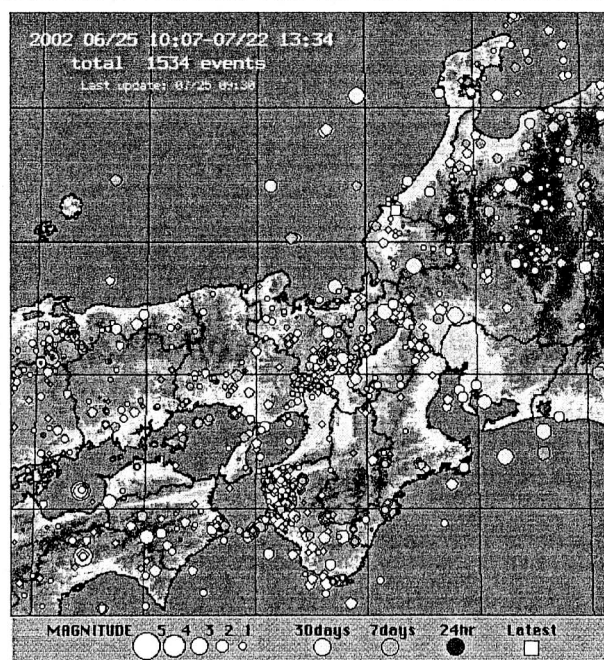
石橋(1995)

1944年東南海・1946年南海地震に
先立つアムールプレート東縁変動帯
のおもな大地震





最近1月間に近畿地方とその周辺で発生した浅い地震(30km以浅)の震央分布

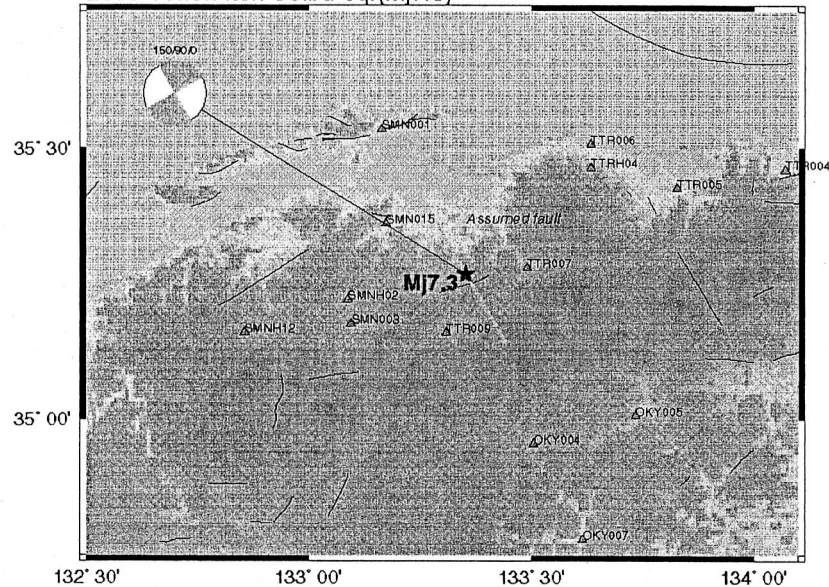


京都大学防災研究所地震予知研究
センターのホームページより

2000年鳥取県西部地震 (M 7.3)

関口・岩田 (2001)

2000 Tottori-ken Seibu eq. (Mj7.3)



2000年鳥取県西部地震 (M7.3) 震源断層面上のすべり量分布

