

最近の西日本の地震活動の活発化

地震の危険度評価の現状と課題

岡山大学 隈元 崇*

1. 日本列島で起こる被害地震

日本は地震国であるといわれ、アメリカ・カリフォルニア州やトルコ、ニュージーランドと並んで世界で地震が多く起こる地域として必ず取り上げられる。地震の起こる原因や地震分布の偏在は、現在プレートテクトニクス理論から統一的な説明がなされている。

日本列島に被害を及ぼすような地震は、(1)狭まるプレ-ト境界である海溝(日本の周辺では、北海道・東北沖の日本海溝や中部本州・四国沖の東海・南海トラフ)を発生源とするプレ-ト間地震、(2)沈み込むプレートの内部で起こるやや深い地震、そして(3)島弧地殻の深さ約20 km内を発生源とする内陸直下型地震に大別できる。さらに内陸直下型地震には、地表に断層のずれが現れ被害の程度も大きな地震と、やや規模の小さい地表に断層のずれは現れない地震に区分される。

(1)のタイプの地震は、1944年と1946年に起こった昭和の東南海・南海地震があげられる。(2)のタイプの地震としては、2001年の芸予地震、(3)のタイプで地表にずれが現れたものとして1995年の兵庫県南部地震、現れなかったものとして2000年の鳥取県西部地震があてはまると考えられる。これらの中で甚大な被害を及ぼすと考えられる地震の規模を示すマグニチュードMを比較すると、(1)の海溝型プレ-ト間地震はおおよそM8クラスであり、一方(3)の内陸直

下型地震はほとんどの場合M7.5以下となる。しかし、後者の発生源である「活断層」が社会活動の営まれる都市部に近接するので、ひとたび地震が生じたときの影響は非常に大きい。

活断層は「最近の地質時代(過去約50万年間)に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層」と定義されている。過去100年間の地震に関する調査によると、大規模な被害を及ぼした内陸直下型地震では、地形学的に認められる活断層に沿って地表に変位が現れている(活断層研究会、1991)。兵庫県南部地震の際にも、淡路島の野島断層に沿って道路や垣根にずれが生じたことは記憶に新しい。

このことから、内陸地震の危険度を評価するためには、過去の内陸地震の変位を記録している活断層地形を十分に調査する必要がある。カリフォルニア州などではこのようなデータに基づいた地震危険度マップが既に公にされている。一方日本では、1948年の福井地震を最後に1995年の兵庫県南部地震まで半世紀近くにわたって大地震が都市部直下で起こらなかったために、活断層研究者と一部の地震研究者を除けばその危険度評価に関する議論は十分には行われていなかった。しかし、兵庫県南部地震の発生以降、活断層や内陸地震への関心が高まり、地方自治体による活断層調査も進められている。ここで得られたデータは科学

*地震災害予測研究会委員、岡山大学・理学部・地球科学科

技術庁・地震調査研究推進本部など公の機関によって解析が進められ日本の地震危険度マップ作成のための資料として利用されようとしている。しかし、活断層として地表に現れないやや規模の小さな地震をどのように評価するかについて、今後に残されている課題も多い。

海溝型の地震に関しては、特に1978年に制定された「大規模地震対策特別措置法」が想定する「東海地震」に関しては、その前兆現象を捉えるべくさまざまな機器による監視体制がとられている。また、1944年

と1946年に相次いで地震を起こした南海トラフ沿いの海溝型地震についても、歴史時代の資料などとあわせてその周期性(100年から200年程度)が議論されるだけでなく、その活動周期の中で、列島内(特に西日本)の直下型地震の発生との関連性も話題となっている。

そこで本稿では、これまでの研究で明らかとなった地震発生モデルに関する研究成果を概観するとともに、地震の長期的な危険度評価の手法と結果の紹介、さらに現状での問題点の指摘を行う。

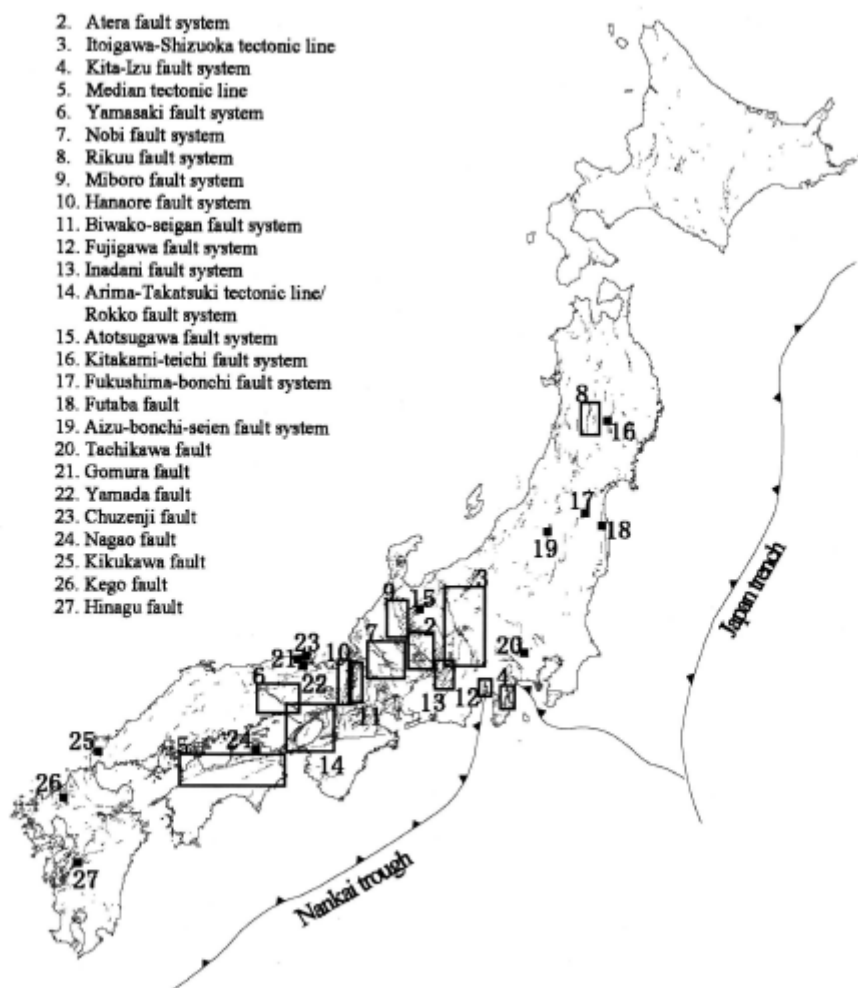


図1 日本の活断層分布図(活断層研究会, 1991)と1998年までに結果が学会誌等で公表されたトレンチ調査地点。

2. 地震の危険度評価に必要なパラメータ

地震の危険度評価を行うために必要な多くの要素のなかでも、(1)地震の起こる場所、(2)地震の規模、(3)地震の起こる時期、の3点はもっとも重要である。

特に(3)について月や日の単位で警報を出すことを目標とする短期的地震予知の試みが、日本での大規模地震対策特別措置法に則った東海沖地震を対象とする調査・観測やギリシャのVAN法など数多く行われているが、現在でもその可否についてさまざまな議論もある。

こうした短期予知とは別の地震危険度評価手法として、歴史地震調査や古地震調査、地震考古学の調査結果など、過去の地震の規模や頻度に関するデータを統計的に解析

することによる長期的な評価も研究されてきた(例えば、Kawasumi, 1951: 損害保険料率算定会, 1986: 総理府地震調査研究推進本部, 1998: 損害保険料率算定会, 2000)。歴史地震の調査は古文書など文献に残された過去の地震データを扱い、古地震調査では地形学的手法や活断層のトレンチ掘削調査などから歴史時代以前の地震の活動史を明らかとすることを目的とする。このようにして得られてきた地震の起こる場所と規模、地震の繰り返しに関する新しい知見は、対象とする期間を30年から100年といった長期に設定する場合の地震危険度を確率的に評価できるほどの質・量となりつつある。

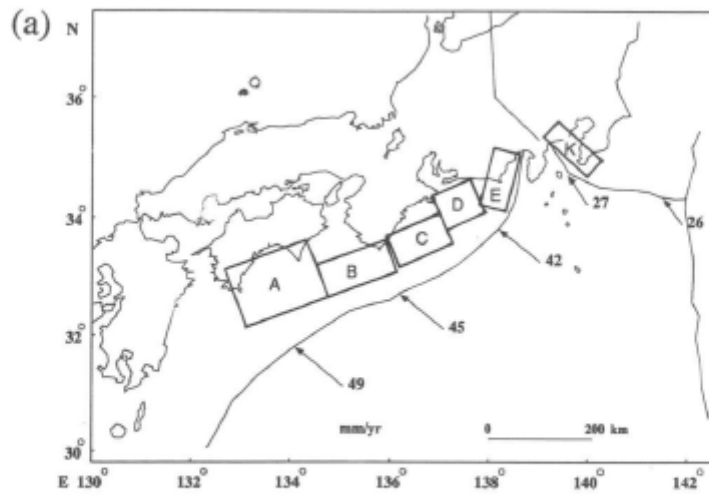
3. 繰り返す地震と地震発生モデル

兵庫県南部地震を起こした六甲-淡路活断層帯の活動間隔は、その後の活断層調査で1000~2000年と推定されている。ここで弾性反発説を地震発生の第一近似モデルとすると、大地震の発生にはそれに見合うだけのエネルギーの蓄積期間が必要となるので、例えば兵庫県南部地震の発生前後(例えば1994年と1996年)の同断層帯の地震危険度確率は大きく異なると考えた方が合理的である。つまり、より実際的な地震危険度評価には、過去の履歴を考慮することが必要である。このために内陸の活断層についてはトレンチ(掘削)調査が行われているし、プレート境界型の地震については歴史資料の収集・解析や地震考古学的手法により必要なデータが集められている。

ここでは具体例として、歴史資料や地震考古学的手法により明らかとなった南海

トラフに沿うプレート境界(海溝)型地震の活動履歴を紹介する(瀬野, 1995)。南海トラフに沿っては、東端の駿河湾下の駿河トラフより四国沖まで、4~5の地震断層面が推定されており、これらが、あるときは短い時間間隔をもって、またあるときにはいっしょに連動して地震を起こしてきた(図2)。その活動間隔は92年から262年であるが、1498年明応の地震までをみると平均116年とばらつきは小さい。これは地震の弾性反発説を支持するデータのひとつである。明応よりも古い時代の資料には欠落がある可能性もあり、さらに研究が進められている。

このように、この図の概観からは、地震の発生様式が規則的であるように思われるかもしれない。しかし、詳細に検討すると規則的とばかりはいえない面もある。

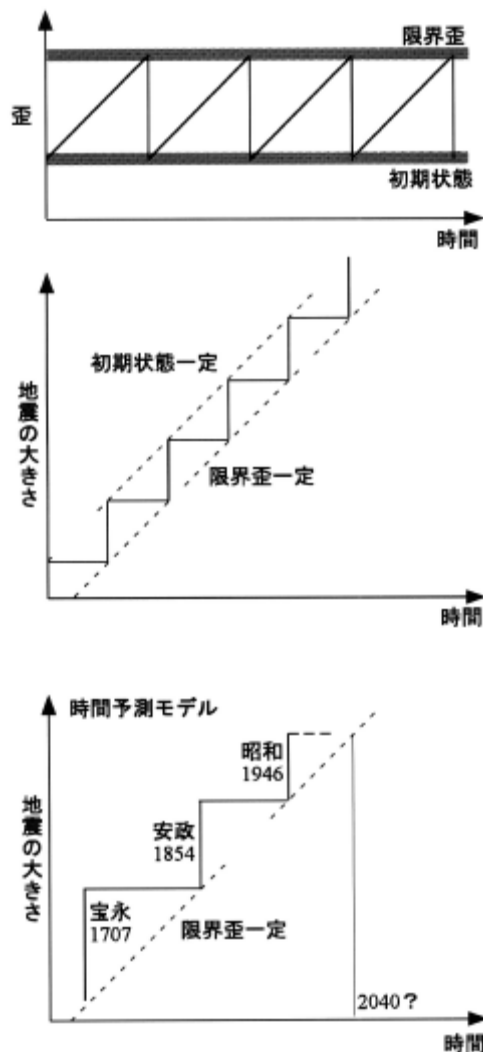


地震発生年 (year)	断層面	間隔	地震発生年 (year)	断層面	間隔
	A B C D E			K	
684	A B ? ? ?	203			
887	A B	209	878	K	
1096	C D ?				415
1099	A B	262			
1361	A B	137	1293	K	
1498	? ? C D E	107			410
1605	A B C D	102			
1707	A B C D E 12m 8m 8m 8m 4m	147	1703	K	
1854	C D E 4m 4m 4m	90			220
1854	A B 6m 4m		1923	K	
1944	C D 4m 4m				
1946	A B 6m 4m				

図2 南海トラフに沿う地震の断層と活動履歴 (瀬野, 1995, p169 より引用)

例えば、東海地震と南海地震の連動性について、1707年の宝永地震では一度に破壊が起こったが、1854年の安政の地震では東海地震から南海地震までは32時間の、昭和の地震では2年のタイムラグがある。一方、1498年明応の地震の新知見によると、南海地震の方が東海地震より2ヶ月先行したと考えられている。地震の破壊が及ぶ範囲についても、特に端部の断層面は連動する場

合としない場合があり、その挙動はいつも一定ではない。また、地震(断層面上での破壊)の起こり方についても、1605年の慶長の地震では各地に強震動が起こったという記録がなく、断層面がゆっくりすべる津波地震ではなかったかと指摘されるなど、同じ南海トラフ沿いの地震でも、その性格の違いは小さくない。



この問題について、Shimazaki and Nakata (1980)は、地震発生に必要な歪エネルギーの蓄積速度と地殻の限界歪、および歪エネルギー解放後の初期状態をモデル化し、地震の繰り返し時間間隔と地震の大きさ（マグニチュード）との関係を調べた（図3）。それによると、一つ前の地震の規模が大きいと次の地震までの時間間隔が長いという結果が明らかとなり、これを「時間予測モデル」と名付けた（図3）。1946年の南海地震はそれ以前の安政や宝永の地震と比べてやや規模が小さかったので次の地震までの間隔は短くなり、「時間予測モデル」をもとにすると西暦2040年ごろに発生するのではないかと考える研究者もいる。

こうした発展的なモデルがプレート境界型地震だけでなく内陸地震にも成り立つのかといった疑問に答えるべく、歴史資料や活断層調査といったデータの取得と解析の作業が多数の機関によって続けられている。

図3 繰り返す地震の規模と発生時間間隔のモデル（Shimazaki and Nakata, 1980 に加筆）

4. 南海トラフで起こる地震と西南日本内陸地震の相互作用

上で述べたように、南海トラフに沿うプレート境界型の地震の繰り返し間隔は100年から200年程度である。一方、内陸直下型地震を起こす活断層の活動間隔は、早いものでも1000年程度、ほとんどのものはそれ以上と推定されている。しかし、これまでの南海地震発生前後の内陸被害地震の活

動を詳細に検討すると、その発生は無関係ではなく、むしろ南海地震の発生が近づくと連れ内陸地震も活動的となり、南海地震の発生後しばらくは内陸地震が静穏期となることが指摘されている（例えば、都司, 1999；堀・尾池, 1999。図4）。

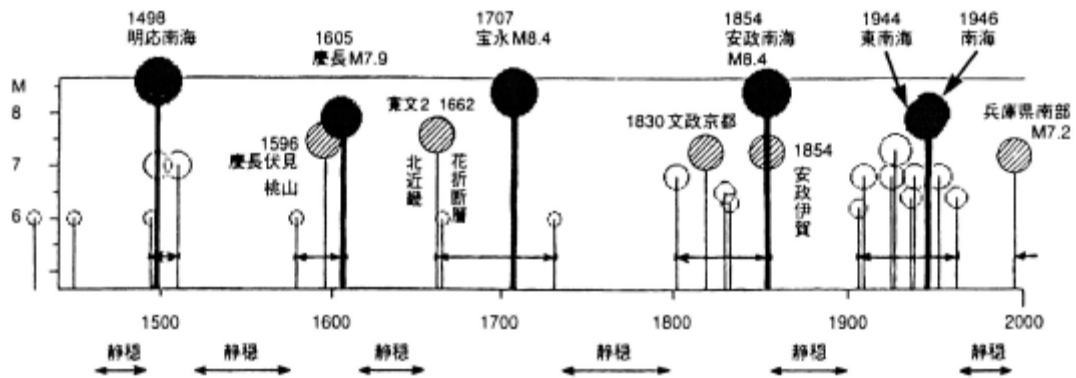


図4 中世以後現代までの南海地震（○）と近畿地方の内陸被害地震（◐）
（都司，1999より引用）。
斜線付の ◐ は内陸被害地震の中でも規模の大きかった地震。

実際，1946年の南海地震発生の50年程前からM6以上の内陸地震の活動は活発化し，特に地表に地震断層を生じた大きな被害地震として，1927年北丹後地震（M7.3）や1943年鳥取地震（M7.2）が挙げられる（例えば，京都大学防災研究所ホームページ，<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/main/hyogoken-nanbu/Nankai-Nairiku.GIF>）。一方，南海地震後の兵庫県南部地震（1995年）までの50年間の内陸地震の活動は非常に静穏であった。

このような南海トラフで起こる地震と西南日本内陸地震の相互作用のメカニズムとして，南海地震の発生が近づきプレート間の固着（カップリング）が強固になると活断層の定常的な歪エネルギーの蓄積速度が変化するという仮説や，地震発生による歪エネルギーの解放が周辺の活断層に大きな影響を及ぼすといった仮説が提唱されてお

り（図5），モデルシミュレーションなどの研究が行われている。

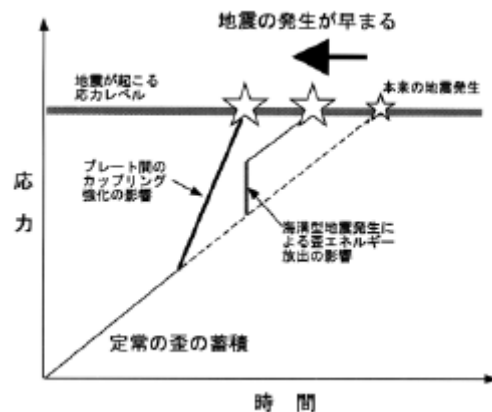


図5 プレート境界地震の内陸地震歪エネルギー蓄積過程への影響の概念図

5. 地震の確率論的長期危険度評価

地震データを統計的に扱って危険度評価を行った研究例として Working Group on California Earthquake Probabilities (WGCEP, 1988) を挙げることができる。そこでは、主に歴史地震データから得られた個々の活断層の活動間隔をその平均値で正規化した値をヒストグラムにまとめ、それらが同一の対数正規分布に従うと仮定して最終地震からの経過時間を考慮した危険度評価を行った。

兵庫県南部地震以降、日本でも同様の研究が行われ始めている(例えば 隈元, 1998) が、先に述べたように歴史地震、古地震データともに地震発生時期の推定誤差の評価が問題となる。ここでは、まず第一次近似として、年代推定誤差の中央値を用いた場合の分布が平均的な活動様式を表していると仮定する。この分布に極端に小さな値や大きな値がないことは、地震エネルギーの蓄積には時間が必要である(=ある大地震の直後に同じ活断層から同規模の地震は起こらない)こと、地殻応力は無尽蔵に蓄積されるものでなくある限界点が存在する(=同じ活断層からは規模の類似した地震が起こる)こと、を示唆していると考えられる。地殻の構成物質は不均質でありまた断層の破壊現象が複雑であることを考えれば、観測されたデータは地震の弾性反発説に大きく矛盾しないように見える。

このような分布が得られればこれを確率密度関数 $g(t)$ で近似し、危険度評価の対象とする地震の最新活動時期からの経過時間 t_j をトレンチ調査や歴史地震記録から求めることで、特定期間 D_r の条件付き危険度確率 P_c を次の(1)式で計算することができる。

$$P_c = \int_{\Delta_r} g(t) dt / (1 - \int_0^{\Delta_r} g(t) dt) \quad (1)$$

近似するための分布関数としてワイブル分布、ガンマ分布、対数正規分布などが考えられるが、長期評価手法検討分科会(1998)は赤池情報量基準(AIC)を用いた関数の当てはまり具合に関する比較を行った結果、これらに有意な違いはないことを示している。

これに対して過去の活動履歴を考慮せずに、地震はランダムに発生するという仮定を用いると、危険度確率 P_p は(2)式のポワソン過程から計算される。ここで f は地震の平均活動間隔の逆数で示される活動頻度である。

$$P_p = 1 - \exp(-f\Delta t) \quad (2)$$

これら2種類の地震危険度評価の違いを示す例として、1930年に北伊豆地震を起こした丹那断層(平均活動間隔は996年(丹那断層発掘調査研究グループ, 1983))と、841年に信濃地震を起こしたとされる糸魚川-静岡構造線に属する牛伏寺断層(平均活動間隔は677年(奥村ほか, 1994))について、21世紀中のある時点でそれ以降の50年間に地震の発生する確率をそれぞれ求めた。丹那断層では最新の地震からまだ70年しか経過していないので条件付き確率 P_c は21世紀中の前半はほとんど0に近い。一方 P_p は約6%で常に一定である。牛伏寺断層では経過時間は平均活動間隔を上回る1160年と考えられており、条件付き確率 P_c は2001年の12%から2050年の13%へ時間に連れて増加する。しかし、 P_p は時間によらず約6%と一定である(図6)。

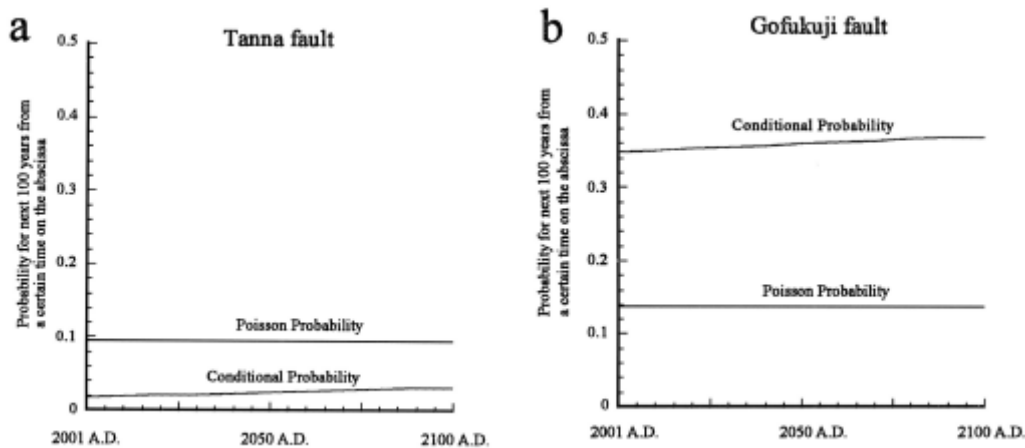


図6 丹名断層と牛伏寺断層でのポワソン過程による地震発生確率と活動履歴を考慮した条件付地震発生確率との比較。

丹那断層と牛伏寺断層を比較すると、地震の弾性反発説と最新地震からの経過時間を良く表すのは条件確率 P_c であり、最新の地震からの経過時間と平均活動間隔が明らかとなっている場合には、条件付き確率のほうがポワソン過程を用いた確率に比べて実際の危険度評価に有効であるといえる。

こうした計算結果の公表と利用について、政府の地震調査委員会では想定される地震の発生確率を、値の大小によって3段階にランク分けするという案を提示している(朝日新聞, 2001.5.16)。「確率だけでは、どう受けとめていいのかわかりにくい」という自治体などの声にこたえ、成果を実際

の防災対策に役立ててもらうことが目的である。具体的には、今後30年間に地震を起こす確率を計算し、その最大値をもとに「地震発生の可能性が高い」(3%以上)、「やや高い」(0.1-3%未満)、0.1%未満の3グループに分けることが考えられており、「可能性が高い」グループには、糸魚川-静岡構造線断層帯、神縄・国府津-松田断層帯、富士川河口断層帯など、全体の4分の1程度になると考えられている。また、地震調査委員会ではこれとは別に、地震による強震動の予測結果も含んだ総合的な「日本の長期危険度評価マップ」の作成も目標とした委員会の設置と作業も行っている。

6. 活断層として現れない内陸地震の危険度評価

鳥取県西部地震発生周辺域での気象庁による1926-1998年の間の地震活動と、日本被害地震総覧(宇佐美, 1996)にまとめられた歴史時代の被害地震をあわせて図7に示す。これをみると、鳥取県西部地震の発生域周辺は、880年出雲の国地震($M7.0$)、

1943年の鳥取地震($M7.2$)、1930年および1978年の島根県中部地震(いずれも $M6.1$)の地震活動には含まれた地域であったことがわかる。また、震央の鎌倉山付近では1989年以降 M_{JMA} で4~5の地震が7つ発生するなど最近地震活動が高まっていた。

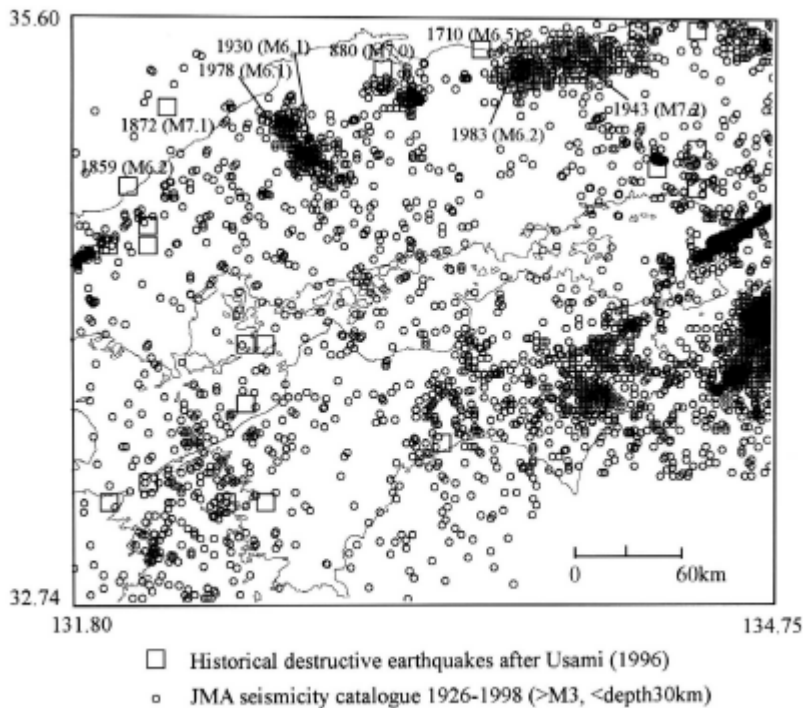


図7 気象庁カタログから 1926-1998 の浅い地震の活動と、宇佐美(1996)による被害地震の分布。

しかし、活断層分布図からはこの地域で M7 クラスの地震を起こすような顕著な活断層は認定されていなかった。このような顕著な活断層によらない地震について地震危険度評価を行なうために、地域的に見た地震活動から統計的に地震発生確率を計算することが行なわれている（例えば WGCEP, 1995）。その根拠としてこれまで多く用いられているのは、地震の（累積）個数の対数 N とマグニチュード M との間に線形性を認めるといふ Gutenberg-Richter の関係（式(3)）である。

$$\log N = a - b M \quad (3)$$

データを得るための領域の設定や、大地震による余震の取り扱いなどこの式をより

正確に使用するためには検討すべきことも多いが、この関係と(2)式を用いることで、想定する規模の地震の発生確率を計算することができる。

例えば、今回の鳥取県西部地震の震央地域で 1989 年以降活発化した地震活動を含むデータを用いて Gutenberg-Richter の関係より求めた M7.3 の地震の 50 年発生確率は 7~12%程度となる。参考までに、これら最近の活発化した地震を除いた場合の M7.3 の地震の 50 年発生確率は 3~8%と約半分となった。また、多数の地震データを含むより広い範囲（周辺 100 km）でみた M7.3 の地震の 50 年発生確率は 45%程度となりこの値は全国的に見ても決して低くない。対象領域はやや異なるが、20 万分の 1 地勢図の単位で発生確率の比較を行うと、今回の震央を含む「高梁」図幅は、123 図

幅の中で上位 30 番目に位置付けられる (Kumamoto, 2000). 中国地方全体を対象とすると, M7.3 の地震の 50 年発生確率は 90%を超えている.

既存の最大地震規模による地震地帯分布図 (例えば松田, 1990) でも中国地方の広い範囲を一括することで想定される最大地

震規模を 7.5 と示している. しかし, このような広範囲を対象とした地震活動のデータから局地的な評価を行うための手法の開発も今後の課題であり, そういう意味で鳥取県西部地震は南海トラフ沿いの地震活動との関連性も含めて, 新たな問題点を提起した地震であったといえる.

7. まとめにかえて

地震危険度評価のための活断層や地震活動データは, その数や精度についてまだまだ十分なものではなく, 今後も地道な基礎データの蓄積が必要である. 政府の地震調査研究推進本部では, 基盤的調査研究の 1 つとして今後 10 年間で全国約 100 の主要な活断層帯を基盤的調査観測の対象として調査を完了する予定である (総理府地震調査研究推進本部, 1998).

日本と同様に被害地震の多く起こっているアメリカ西海岸での地震・活断層のデータベースの整備状況をみると, Jennings and Scanedo(1994)のカリフォルニアの活断層分布図や Goter et al. (1994)のカリフォルニ

アとネバダの地震分布図といった従来の印刷物に加え, 最近ではインターネットを用いた地震や活断層の情報提供も行われている (例えば, UCB の北カリフォルニアの地震カタログ検索データベース, UCSB の強震動波形提供データベース, USGS の地震危険度マップの紹介, SCEC の南カリフォルニアの活断層データベースなど).

今後, 日本でも新しい知見をデータベース化して積極的に公開するとともに, その成果をもとにして地震の確率論的危険度評価を行いその成果を実生活に役立てていくためのリスク・コミュニケーション・システムを構築する必要がある.

引用文献

- 1) Goter, S.K., Oppenheimer, D.H., Mori, J.J., Savage, M.K. and Masse, R.P. (1994) "Earthquakes in California and Nevada", *U.S. Geological Survey Open-File Report* 94-647.
- 2) 堀 高峰・尾池和夫 (1999) 過去約1000年間の西南日本の地震活動に見られる南海トラフの地震との相関 『月刊地球』号外24, 50-55.
- 3) Jennings, C.W. and Sancedo, G.J. (1994) Fault activity map of California and adjacent areas with location of recent volcanic eruptions, *California Geologic Data Map Series No.6*, Division of Mines and Geology, Dept. Conservation, California State.
- 4) 活断層研究会(1991) 『新編日本の活断層』東京大学出版会, 437p
- 5) Kawasumi, H. (1951) "Measures of earthquake danger and expectancy of maximum intensity throughout Japan as inferred from the seismic activity in historical times", *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 21, 469-481.
- 6) 隈元 崇 (1998) 「活断層のトレンチ調査結果を用いて推定した日本の内陸地震の長期危険度評価」『地震2』50 (別冊), 53-71.
- 7) Kumamoto, T. (2000) Comparison of the estimated maximum earthquake/intensity inland Japan by the use of JMA seismicity catalogue, historical earthquake record

- and active fault data, *Geographical Report of Tokyo Metropolitan University*, 35, 71-82.
- 8) 奥村晃史・下川浩一・山崎晴雄・佃 栄吉 (1994) 「糸魚川-静岡構造線活断層系の最近の断層活動-牛伏寺断層-松本市並柳地区トレンチ発掘調査」『地震2』 46, 425-438.
 - 9) 瀬野徹三 (1995) プレートテクトニクス of 基礎, 朝倉書店, 190p.
 - 10) Shimazaki, K. and Nakata, T. (1980) Time-predictable recurrence model for large earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 68, 279-282.
 - 11) 損害保険料率算定会 (1986) 「活断層による地震危険度に関する研究」『地震保険調査研究』 1, 149pp.
 - 12) 損害保険料率算定会 (2000) 『活断層と歴史地震とを考慮した地震危険度評価の研究 - 地震ハザードマップの提案 - 』損害保険料率算定会, 91p.
 - 13) 総理府地震調査研究推進本部 (1998) 『日本の地震活動-被害地震から見た地域別の特徴-<追補版>』(財)地震予知総合研究振興会地震調査研究センター発行, 395pp.
 - 14) 丹那断層発掘調査研究グループ (1983) 丹那断層(北伊豆・名賀地区)の発掘調査『地震研究所彙報』 58, 797~830.
 - 15) 都司嘉宣 (1999) 南海地震とそれに伴う津波, 『月刊地球』号外24, 36-49.
 - 16) 長期評価手法検討分科会 (1998) 『長期的な地震発生確率の評価手法及びその適用例について(試案)』総理府地震調査研究推進本部・地震調査委員会・長期評価部会, 73p.
 - 17) 宇佐美龍夫 (1996) 『新編日本被害地震総覧 [増補改訂版416-1995] 』東京大学出版会, 493pp.
 - 18) SCEC (1999) FAULTS OF SOUTHERN CALIFORNIA
<http://www.scecdc.scec.org/faultmap.html>.
 - 19) UCB (1999) Northern California Earthquake Catalog Search
<http://quake.geo.berkeley.edu/ncedc/catalog-search.html>.
 - 20) UCSB (1999) The Strong Motion DataBase
<http://smdb.crustal.ucsb.edu/>.
 - 21) USGS (1999) Seismic Hazard Map of USA,
<http://geohazards.cr.usgs.gov/eq/>.
 - 22) Working Group on California Earthquake Probabilities (1988) Probabilities of large earthquakes occurring in California on the San Andreas fault, *U.S.G.S. Open-File Report*, 88-398, 62p.
 - 23) Working Group on California Earthquake Probabilities (1995) Seismic hazard in southern California: probable earthquake, 1994 to 2024, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 85, 379-439.