

河角の方法に基づいた歴史地震資料と活断層資料を用いた 地震危険度解析

吉 田 隆 治

要 旨

構造物の耐震安全性を検討する場合、地震力をどう評価するかは重要な項目のひとつである。地震力評価の問題のひとつに地震危険度評価の問題がある。地震危険度解析は過去の地震発生データに基づいた研究が一般的であるが、用いる歴史地震資料の収録期間は十分な長さとは言い難く、長期間の地震活動の情報を取り入れる必要のあることが指摘されている。特に、1995年兵庫県南部地震をきっかけとして低頻度巨大地震外力の合理的な設定法の確立が求められ、その必要性が高まっている。

ここではこのことを踏まえ、河角の方法に基づいた地震危険度解析に陸上活断層の情報を取り込む方法を提案し、神戸を事例とした解析から提案手法の適用性を検討した。事例解析の結果、本手法は簡易な方法にも拘わらず、有効な方法である事がわかった。

キーワード 地震危険度解析／歴史地震資料／活断層資料／河角の方法

目 次

- | | |
|---------------|---------|
| 1. はじめに | 4. まとめ |
| 2. 解析方法 | 5. おわりに |
| 3. 神戸を事例とした解析 | |

SEISMIC RISK ANALYSIS BASED ON KAWASUMI'S METHOD CONSIDERING HISTORICAL EARTHQUAKES AND ACTIVE FAULTS

Takaharu YOSHIDA

Synopsis:

In this paper, a method of earthquake risk analysis is proposed. This method is based on Kawasumi's idea, and uses historical earthquake data and active fault data jointly in order to evaluate also the intensity of ground motion at a site due to inland earthquake.

From the results for Kobe on trial, it is found that this method is in effect for low frequency-high impact earthquakes in spite of using the simple method.

1. はじめに

構造物の耐震安全性を検討する場合、地震力をどう評価するかは重要な項目のひとつである。地震力評価の問題のひとつに将来のある期間における地震動強度の発生確率を推定する地震危険度解析がある。この地震危険度解析は過去の地震発生データ（歴史地震資料）に基づいた研究が一般的であるが、用いる歴史地震資料の収録期間は十分な長さとは言い難い。すなわち、発生頻度の低い地震、例えば活断層による地震を推定するには十分な収録期間とは言えず、長期間の地震活動の情報を取り入れる必要がある。

長期間の地震活動の情報を有する資料に活断層資料がある。活断層資料に基づいた地震危険度解析からはその有用性が示され¹⁾、最近では歴史地震資料と活断層資料に基づいた地震危険度解析に関する研究が各所^{2)～5)}で進められている。特に、1995年兵庫県南部地震をきっかけとして活断層による強震動が検討用地震動として耐震設計基準⁶⁾に盛り込まれたことから、低頻度巨大地震外力の合理的な設定法の確立が求められ、その必要性が高まっている。

ここではこのことを踏まえ、河角の方法⁷⁾に基づいた地震危険度解析に長期間の地震活動の情報、すなわち陸上活断層の情報を取り込む方法を提案し、それをを用いて神戸を事例とした解析を行った。以下では解析の方法と事例解析から得られた結果を報告する。

2. 解析方法

歴史地震資料と活断層資料を用いた地震危険度解析には幾つかの研究があるが、ここでは河角の方法⁷⁾に基づいた方法を提案する。

この種の解析では歴史地震の情報に活断層の情報をどのように組み入れるかが問題となる。本研究では活断層から想定される地震も歴史地震とみなす方法を採用する。すなわち、歴史地震と活断層から想定される地震を区別せず、同一のデータ群として解析する。

2.1 用いる歴史地震資料

歴史地震資料には有史以来のおもな被害地震を納めた理科年表⁸⁾に記載されている資料を用いる。ここで、明らかに活断層による地震と判断されるデータは除外する。

表 2.1 歴史地震資料に関する片山⁹⁾の区分

地震規模 M	採用期間 ^{注)}
$5.5 \leq M < 6.1$	1926 年以降
$6.1 \leq M < 7.5$	1885 年以降
$7.5 \leq M$	1600 年以降

注) 1926 年以降：気象庁カタログに含まれる期間
1885 年以降：計器観測が開始された以降
1600 年以降：江戸幕府より中央集権が確立された以降

歴史地震資料は古い時代ほど規模の大きな地震のみが記録される傾向が強い。大きな地震に限ればかなり時代をさかのぼって地震資料を使うことができるが、比較的小規模な地震については計器観測が開始された以降でないと信頼できない特徴を有する。ここでは、この点を考慮した表 2.1 の片山⁹⁾の区分に従い、地震規模別に採用期間を定める。

2.2 用いる活断層資料と想定する地震

ここで扱う活断層は内陸活断層のみを考え、想定する地震は石川ほか¹⁰⁾の研究を参考にした。

活断層の情報は「新編 日本の活断層¹¹⁾」にまとめられている。しかし、1回の地震で複数の活断層が同時に活動したり、長い活断層ではその全部が一度に破壊して地震を発生させるとは限らない。ここでは、このような点を考慮した松田¹²⁾による起震断層を活断層資料として用いる。

活断層（起震断層）から発生する地震としては最大規模の地震だけを考える。すなわち、個々の活断層（起震断層）から想定される最大規模の地震のみが繰り返し発生すると仮定する。また、その再現期間（起震断層の平均活動間隔）は次式で算出する。

$$T_r = D / (S \times 10^{-3}) \quad [1]$$

T_r : 地震の再現期間 (年)

D : 断層のすべり量 (m)

S : 断層の平均変位速度 (mm/年)

再現期間の算出には [1] 式のとおり断層のすべり量と平均変位速度を知る必要がある。断層のすべり量は地震規模との関係式¹³⁾

$$\log D = 0.6M - 4.0 \quad [2]$$

D : 断層のすべり量 (m)

M : 地震規模

から求め、断層の平均変位速度は活断層（起震断層）の活動度ごとに平均的な変位速度を与える方法を採用する。ここでは、表 2.2 に示す杉山ほか¹⁴⁾による平均変位速度を用いることとする。

表 2.2 活断層の活動度に対応する平均変位速度

活動度	日本の活断層 ¹¹⁾ で定義された変位速度 (mm/年)	杉山ほか ¹⁴⁾ による変位速度 (mm/年)
A 級	1～10	5
B 級	0.1～1	0.5
C 級	0.01～0.1	0.05

2.3 歴史地震資料と活断層資料を用いた解析

個々の歴史地震および活断層から想定した地震より評価地点の地震動強度を推定し、以下に示す方法で年間発生率と地震動強度の関係を求める。

(1) 歴史地震から推定される地震動強度

評価地点周辺で発生した歴史地震の規模、評価地点からの距離から距離減衰式を用いて最大加速度などの地震動強度を推定する。また、それが地震規模に対応した採用期間（表 2.1）に 1 回の発生確率を有すると考える。

(2) 活断層（起震断層）から推定される地震動強度

評価地点周辺に存在する活断層（起震断層）から想定した地震の規模、評価地点からの距離から距離減衰式を用いて地震動強度を推定する。また、それが想定した地震の再現期間に 1 回の発生確率を有すると考える。

(3) 地震動強度に関する年間発生率

評価地点周辺の歴史地震および活断層（起震断層）より推定した地震動強度を小さい順に並べ、そのデータ $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_m)$ から強度 y_i を越える地震動の年間発生率を次式で求める。

$$f_i = \frac{m}{\sum_{j=i+1}^m} (1/t_j) \quad [3]$$

f_i : 地震動強度 y_i を越える地震動の年間発生率
(回/年)

t_j : 小さい方から j 番目の地震動強度に対応する再現期間 (年)

m : データ個数

3. 神戸を事例とした解析

ここでは、石川ほか¹⁰⁾の研究を参考に神戸を事例とした地震危険度解析を行い、前章に示した方法の適用性を検討する。

3.1 解析条件

(1) 評価地点

神戸を地震危険度の評価地点とする。

(2) 対象とする歴史地震

神戸周辺で発生した地震のうち、半径 200 km 以内に震央を有し、1600 年から 1994 年までに発生した地震規模 5.5 以上の地震を解析対象とする。図 3.1 に解析に用いる地震の震央分布を示す。また、表 3.1 に主な地震の諸元を示す。

(3) 対象とする活断層（起震断層）

神戸周辺の起震断層のうち、半径 200 km 以内に存在する起震断層を解析の対象とする。図 3.2 に解析に用い

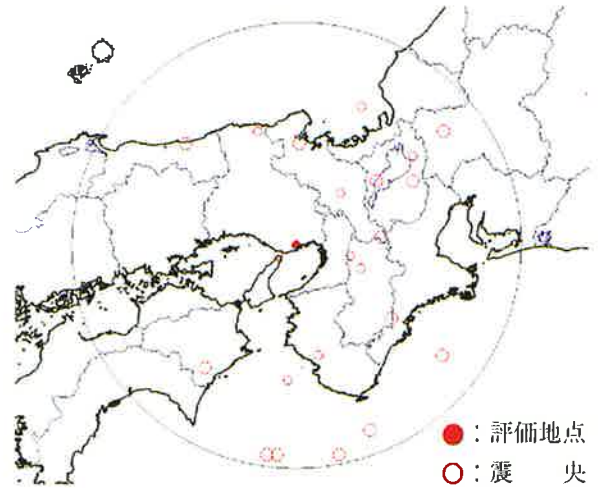


図 3.1 解析に用いた地震の震央位置

表 3.1 解析に用いた主な地震の諸元

発 生 年 月 日	地 震 名	M	X (km)
1707.10.28	宝永地震	8.4	181
1854.12.24	安政南海地震	8.4	191
1916.11.26	神戸	6.1	20
1854.07.09	伊賀・伊勢・大和	7.3	77
1622.06.16	山城・大和・河内	7.4	92

M: 地震規模 X: 震源距離

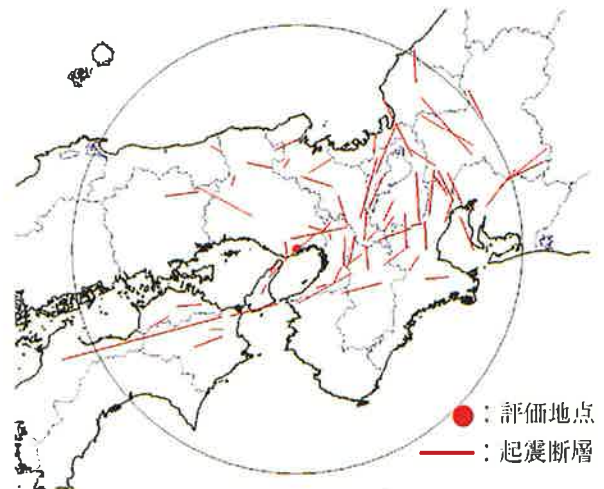


図 3.2 解析に用いた起震断層の位置

表 3.2 解析に用いた主な起震断層の諸元

起 震 断 層 名	活動度	L (km)	M	X (km)
六甲断層帯	B	47	7.6	18
有馬・高槻断層帯	B	53	7.7	22
淡路島東岸断層帯	B	23	7.1	17
中央構造線和泉・金剛断層帯	A	75	8.0	49
中央構造線四国断層帯	A	165	8.6	98

L: 断層長 M: 地震規模 X: 震源距離 (最短距離)

る起震断層の分布を示す。また、表 3.2 に主な起震断層の諸元を示す。ここで、表中の震源距離は評価地点からの最短距離を示す。

(4) 距離減衰式

評価地点の地震動強度を推定する距離減衰式には多くの提案があるが、ここでは地震基盤面での値を与える金井¹⁶⁾による最大加速度の距離減衰式を用いる。

$$A=10^{\{0.16M-(1.66+3.60/X)\log X+0.167-1.83/X\}}/T \quad [4]$$

A : 地震基盤面における最大加速度 (gal)

M : 地震規模

X : 震源距離 (km)

T : 地震動の卓越周期 (sec)

ここで、地震動の卓越周期は $T=1.0\text{sec}$ として最大加速度を算定する。

3.2 解析結果

以上の条件より

- ① 歴史地震資料だけを用いた場合
- ② 活断層資料だけを用いた場合
- ③ 両者を組み合わせた場合

について解析し、比較検討した。以下に検討結果を示す。

(1) 歴史地震資料を用いた解析

表 3.3 に主な地震による評価地点の最大加速度を示す(最大加速度の大きい 5 つの地震)。歴史地震からは地震基盤面で最大で約 30gal の揺れが推定される。

表 3.3 表 3.1 の主な地震による評価地点の最大加速度

発 生 年 月 日	地 震 名	A (gal)
1707.10.28	宝永地震	31
1854.12.24	安政南海地震	28
1916.11.26	神戸	26
1854.07.09	伊賀・伊勢・大和	22
1622.06.16	山城・大和・河内	22

A : [4] 式で求めた最大加速度

図 3.3 には対象となる地震すべてに対して最大加速度を求め、年間発生率と最大加速度の関係求めた結果を濃い実線で示す。年間発生率の大きなところで勾配が小さく、発生率が小さくなるに従い勾配が徐々に大きくなる傾向が見て取れる。図 3.3 には比較のため、歴史地震の採用期間を地震規模に関係なく一律に 1600 年以降として求めた結果を薄い実線で示した。採用期間を一律とすると、年間発生率の大きなところで差が見られ、最大加

速度を小さめに評価することがわかる。歴史地震資料の古い時代ほど規模の大きな地震のみが記録されることの影響が採用期間を地震規模に関係なく一律にしたことで現れている。また、この結果は年間発生率の高い、すなわち再現期間の短い地震動を評価する場合(たとえば、施工時の設計地震力の評価がこれにあたる。)には地震規模別の採用期間を考慮しないと、設計上危険側の評価をする可能性があることを示唆している。また、採用期間を一律とした場合は曲線の勾配の変化も大きい。

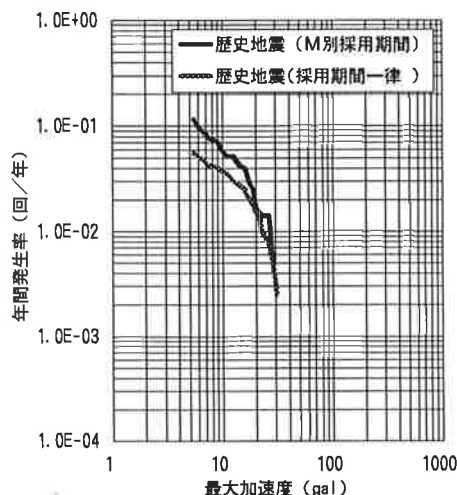


図 3.3 歴史地震資料から求めた年間発生率と最大加速度の関係(採用期間の定義の違いによる影響)

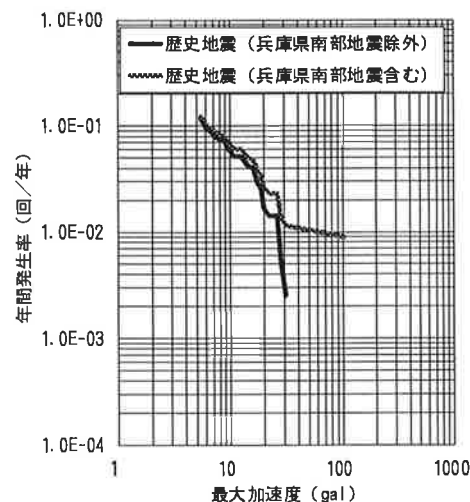


図 3.4 歴史地震資料から求めた年間発生率と最大加速度の関係(兵庫県南部地震の有無による影響)

ここでは、1995年に発生した兵庫県南部地震のデータは除いているが、図 3.4 にこれを含めた場合と比較した結果を示した。薄い実線の年間発生率 1×10^{-2} 、最大加速度 100gal の点がこの地震によるものであるが、明らかに

特異な結果を与えていることが分かる。また、発生頻度が低く評価地点に大きな影響を与える地震はその再現期間を個別に考慮するか、歴史地震資料から除外する方が望ましいことがこの図から判断できる。

(2) 活断層資料を用いた解析

表 3.4 に主な起震断層による評価地点の最大加速度を示す（最大加速度の大きい 5 つの地震）。起震断層からは地震基盤面で最大で約 240gal の最大加速度が推定され、その再現期間も約 7000 年と推定される。

表 3.4 表 3.2 の主な起震断層による評価地点の最大加速度と再現期間

起震断層名	A (gal)	T _r (年)
六甲断層帯	237	7300
有馬・高槻断層帯	217	8300
淡路島東岸断層帯	125	3600
中央構造線和泉・金剛断層帯	121	1300
中央構造線四国断層帯	104	2900

A: [4] 式で求めた最大加速度
T_r: [1] 式で求めた再現期間

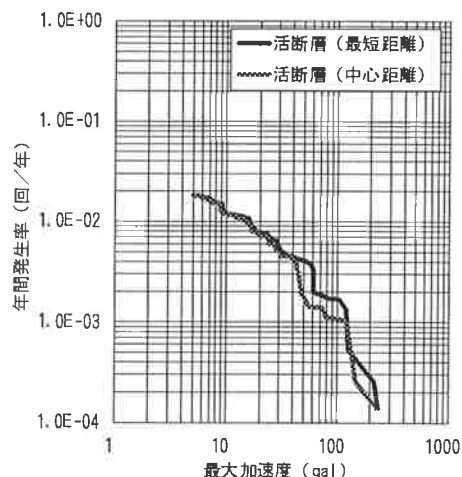


図 3.5 活断層資料から求めた年間発生率と最大加速度の関係（震源距離の定義の違いによる影響）

図 3.5 には対象となる起震断層すべてに対して最大加速度を求め、年間発生率と最大加速度の関係を求めた結果を濃い実線で示す。歴史地震資料に関する結果と同じように年間発生率が小さくなると勾配が大きくなる傾向がある。図 3.5 には比較のため、震源距離に断層中心からの距離を用いた結果も薄い実線で示した。両者を比較すると、年間発生率の小さい範囲で差が見られ、中心距離を用いると最大加速度を小さめに評価する傾向がある。すなわち、中心距離で震源距離を評価した場合、年間発

生率の小さい（再現期間の長い）地震動強度を過小評価する可能性があることを示している。

(3) 歴史地震資料と活断層資料を組合わせた解析

図 3.6 に歴史地震資料を用いた結果（地震規模別の採用期間を考慮）と活断層資料を用いた結果（震源距離に最短距離を用いた結果）を重ねて示した。歴史地震資料を用いた結果は年間発生率の大きな領域では活断層からの結果を上回る最大加速度値を与えるが、年間発生率が 6×10^{-3} 以下になると活断層から想定される最大加速度を下回る。すなわち、歴史地震資料だけから年間発生率の低い地震動強度を評価する場合には過小評価の可能性があるのでこの結果は示している。

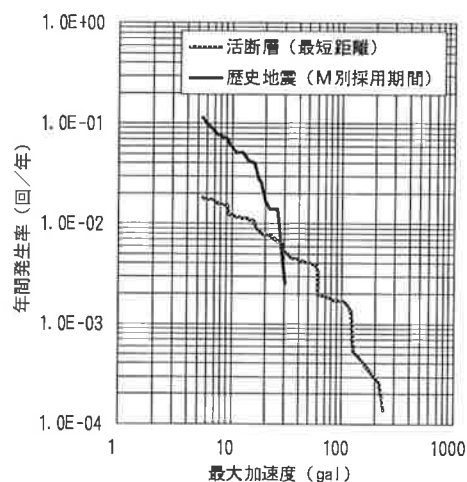


図 3.6 年間発生率と最大加速度の関係（歴史地震資料と活断層資料から求めた結果の比較）

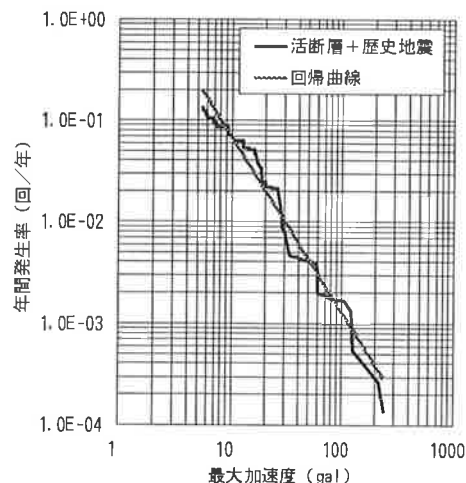


図 3.7 年間発生率と最大加速度の関係（歴史地震資料と活断層資料の組み合わせによる結果と回帰曲線）

図 3.7 には歴史地震資料と活断層資料を組み合わせた場合の年間発生率と最大加速度の関係を示した。年間発生率と地震動強度の関係には年間発生率の広い範囲で直線関係（両対数軸上で）が見られ、歴史地震資料だけの場合や、活断層資料だけの場合のような年間発生率と最大加速度の関係に年間発生率が低くなるに従って勾配が大きくなる傾向は見られない。図 3.7 には回帰曲線を当てはめた結果を併記したが、年間発生率と地震動強度の両対数軸上で無理なく直線を当てはめることができる。

4. まとめ

河角の方法に基づいた歴史地震資料および活断層資料を用いた地震危険度解析の方法を提案し、神戸での事例解析からその適用性を検討した。検討結果を以下にまとめる。

- ① 歴史地震資料に対して地震規模に拘わらず採用期間を一律とすると、発生率の高い領域、すなわち再現期間の短い領域で地震動強度を過小評価する可能性がある。例えば、施工時の設計震度の評価がこれに該当するが、この点に注意し、地震規模ごとに適切な採用期間を設定する必要がある。
- ② 歴史地震資料に極めてまれに発生する地震が含まれていると、歴史地震資料の採用期間がたかだか 400 年であるために特異な結果、すなわち地震動強度に対して発生率を過大に評価する場合がある。例えば、神戸を評価地点とした場合の 1995 年兵庫県南部地震がこれに該当する。このような歴史地震データは除外するか、またはその地震に見合った再現期間を考慮する必要がある。
- ③ 活断層資料に対して震源距離に断層の中心からの距離を用いると、最短距離を用いた場合に比べて発生率の小さい領域（再現期間の長い領域）で地震動強度を過小評価する可能性がある。レベル 2 地震動のような極めてまれに発生する強地震動を評価する場合にはこの点に注意する必要がある。
- ④ 歴史地震資料だけを用いた解析では発生率の小さい（再現期間の長い）地震動強度は外挿して求めることになるが、今回の事例解析からは過小評価の可能性が示された。
- ⑤ 歴史地震資料と活断層資料を組み合わせた結果、発生率と地震動強度の関係には発生率の広い範囲で直線関係（両対数軸上で）が見られる。すなわち、発生率と地震動強度の両対数軸上で直線を無理なく当てはめることができ、簡易な方法を用いたにも拘わらず、両者の欠点を補い合う結果が得られたと言えよう。

5. おわりに

ひとつの事例解析からではあるがここで示した方法が

有効であろうことがわかった。今後は他地点での事例解析を行うとともに、他の提案手法とも比較検討する必要がある。

最後に、解析の一部は技術研究所研究第 2 グループの龍神研究員の協力を得た。ここに感謝します。

参考文献

- 1) 戸松征夫, 安田実, 片山恒雄: 陸上活断層に基づく地震危険度解析の特徴, 第 17 回地震工学研究発表会講演概要, pp.21-24, 1983 年 7 月。
- 2) 亀田弘行, 奥村俊彦: 活断層データと歴史地震データを組み合わせた地震危険度解析, 第 362 号 / I -4, pp.407-415, 1985 年 10 月。
- 3) 佐藤一郎, 平川倫生, 神田順: 活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第 1 分冊, pp.145-150, 1998 年 11 月。
- 4) 吉田伸一, 今塚善勝: ブロック構造に基づく震源領域モデルを用いた地震ハザード評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第 1 分冊, pp.483-488, 1998 年 11 月。
- 5) 長縄卓夫, 王海波, 西村昭彦, 鈴木一成: 活断層データおよび歴史地震データを用いた地震危険度解析による地域特性の検討, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, 第 1 分冊, pp.513-518, 1998 年 11 月。
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成 8 年 12 月。
- 7) 土木学会: 動的解析と耐震設計 第 1 巻 地震動・動的物性, 技報堂, pp.43-44, 1989 年。
- 8) 国立天文台編: 理科年表 日本付近のおもな被害地震年代表, 丸善, pp.789-825, 1998 年。
- 9) 土木学会: 動的解析と耐震設計 第 1 巻 地震動・動的物性, 技報堂, p.36, 1989 年。
- 10) 石川裕, 奥村俊彦, 亀田弘行: 活断層を考慮した神戸における地震危険度評価, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.61-68, 1996 年 1 月。
- 11) 活断層研究会編: 新編 日本の活断層一分布図と資料, 東京大学出版会, 1991 年。
- 12) 松田時彦: 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 地震研究所彙報, Vol.65, No.1, pp.289-319, 1990 年 6 月。
- 13) 松田時彦: 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, 第 28 巻, pp.269-283, 1975 年 3 月。
- 14) 杉山武, 前田耕司, 石井清, 鈴木誠: 中部地方における最大加速度期待値マップ 歴史地震と活断層資料に基づく計算結果の比較及び統合, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 411 号, pp.19-27, 1990 年 5 月。
- 15) 金井清: 地震工学, 共立出版, p.95, 1969 年。