活断層で起きた歴史地震の大きさ

国土地理院地理地殻活動研究センター* 小田切聡子

東京大学地震研究所** 島崎邦彦

Size of the Historical Earthquake Which Occurred on an Active Fault in Japan

Satoko ODAGIRI

Crustal Dynamics Laboratory, Geography and Crustal Dynamics Research Center,
Geographical Survey Institute, Kitasato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-0811, Japan

Kunihiko SHIMAZAKI

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Yayoi 1-1-1,
Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

(Received May 18, 1999; Accepted March 31, 2000)

For a prediction of magnitude of future earthquake on an active fault, it is important to estimate what portion of the fault will move in a single earthquake. Using a data set of 36 historical inland earthquakes which can be correlated to previously mapped active faults, we estimate the ratio of rupture length of historical events to the length of "seismogenic faults" proposed by MATSUDA (1990) (Matsuda model). We found that the ratio is distributed from 1/4 to 1, indicating that there are a significant number of events in which only portions of "seismogenic faults" of MATSUDA (1990) moved, although these "seismogenic faults" were thought to rupture in a single earthquake. Among thirty Matsuda model faults examined in this study, fifteen can be divided into segmented faults according to KUMAMOTO (1998) who proposed each segmented fault ruptures in a single earthquake (Kumamoto model). The ratio of rupture length to the length of Matsuda model fault for those fifteen faults is also distributed from 1/4 to 1 and this cannot be explained by Kumamoto model. We propose a new fault model which includes Matsuda model, Kumamoto model, and groups of faults composed of neighboring fault segments. We assumed equal probability for earthquake occurrence on all the modeled faults. A numerical simulation for reproducing nineteen historical earthquakes correlated with the fifteen Matsuda model faults which are divided into segments by KUMAMOTO (1998), shows that our proposed model best explains the observed distribution of fault length ratio of historical earthquake data.

Key words: Active faults, Historical earthquakes, Seismogenic faults, Segmentation, Earthquake magnitude.

§1. はじめに

日本列島には活断層が無数に刻まれており、陸域に震源をもつ大地震の多くは活断層の活動によって発生している。これらの地震は、プレート境界で起こる地震に比べれば繰り返し間隔も長く、規模も小さいが、人々が生活する土地の直下で発生するため被害は甚大であり、我々は1995年兵庫県南部地震でそれを目の当たりにし

た。地震災害を軽減させるためには、地震の発生時期と規模の長期予測に基づく対策が重要となる。発生時期の予測については、最近確率論に基づく手法が提案されている [地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会 (1999)]。しかし、地震規模の予測に関する研究はあまり進んでいない。

陸域で発生する大地震はしばしば地表地震断層を伴

* 〒305-0811 茨城県つくば市北郷一番

** 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

う。1998年岩手県内陸北部の地震($M6.1$)では地表地震断層が現れたが、日本において、地表地震断層が現れる地震の規模は一般に地震モーメント 7.5×10^{25} dyne·cm 以上と考えられており [SHIMAZAKI (1986)], 気象庁マグニチュードでは $M6.8$ 以上と求められる [武村 (1998)]。既知の陸域活断層は過去に生じた地表地震断層の痕跡であり、それらの長さは過去の大地震の規模を推定する上で1つの指標となる。しかし、これまでの活断層調査により、1つの活断層は、全体が一度に動くこともあれば、一部分しか動かないこともあり、またある場合には、周辺の活断層と同時に動くこともあるなど、地震ごとに動く活断層の長さは必ずしも一定ではない。活動する活断層の長さが異なれば、予測される地震規模も変わるので、1回の大地震で活断層がどのように動くかということは、地震規模の予測において最も重要な問題である。本研究では日本列島の陸域活断層を全体的、統計学的に扱い、大地震発生時にまとまって活動する活断層群 (あるいは活断層の区間) と地震の規模の関係について議論を進めていく。

§2. 大地震発生時の活動単位となる断層設定

1つの活断層のどの範囲が動くか (セグメンテーション)、あるいはいくつの活断層が同時に動くか (グルーピング)、を把握することが、その地域で生じる大地震の規模を予測する上で必要である。松田 (1990) はこのような観点から、1回の地震で同時に動く可能性のある活断層 (群) を「起震断層」と呼び、次のような基準で設定した。(1) 5 km 以内に他の活断層のない孤立した長さ 10 km 以上の活断層、(2) 走向方向に 5 km 以内の分布間隙をもって、ほぼ一線に並ぶほぼ同じ走向の複数の断層、(3) 5 km 以内の相互間隔をもって並走する幅 5 km 以内の断層群、(4) その断層線の中点の位置が主断層から 5 km 以上はなれている走向を異にする付随断層あるいは分岐断層。

松田 (1990) は、上記の基準で再編成された起震断層について、特定断層 (そこで発生しうる最大の地震マグニチュードが、付近で発生した歴史地震と比較して例外的に大きくなる断層) に指定されたもの以外は、おおむね1つの大地震でその全部分が活動し、その長さに応じた規模の地震を起こす (地震エネルギーの一括放出型) と考えても大きな誤りではないとしている (特定断層は地震エネルギーの分割放出型としている)。

これに対して、これまでのトレンチ調査などから、松田 (1990) の特定断層以外の起震断層も全体が一度に動く場合と、一部分しか活動しない場合のあることが明らかになっている [隈元 (1998)]。それを踏まえて隈元

(1998) は、活断層研究 (1991) の活断層分布図をもとに、松田 (1990) の基準を用いて日本全国の活断層をグループ化した (一括放出モデル)。さらに長さ 30 km 以上にグループ化された活断層群について、トレンチ調査結果および断層ステップや断層ジョグなどの活断層分布の不連続に基づき、長さ 15~20 km になるようにいくつかのセグメントに分割した (分割放出モデル)。本研究では、松田 (1990) の起震断層を「松田モデル」、隈元 (1998) の分割放出モデルを「隈元モデル」と呼ぶ。

以上のように大地震発生時の活動単位となる断層設定として、松田モデルと隈元モデルが提唱されているが、歴史地震における活断層の動きが、全国的に見て松田モデルと隈元モデルのどちらの傾向をもつのかは把握されていない。そこで本研究では、(1) 歴史地震データ調査により、歴史地震と松田 (1990) の起震断層を対応付け、歴史地震の推定規模と、松田モデルから計算される地震の規模を比較することにより、松田モデルの断層設定の妥当性を検証する。(2) 隈元モデルを用いて、シミュレーションにより歴史地震の規模と発生頻度の関係を求め、(1) の歴史地震データ調査結果と比較することにより隈元モデルの断層設定の妥当性を検証し、より現実的な断層設定を考察する。(3) (1)、(2) の結果を踏まえ、日本陸域活断層で発生する大地震の規模の特徴について議論する。

大地震と活断層の活動に関する研究は、San Andreas 断層などにおいて数多く進められている。SCHWARTZ and COPPERSMITH (1984) は、地形・地質学的調査および地震データの検討から、San Andreas 断層等の1つのセグメントにおいて、発生する大地震の規模は一定で、ずれの量は断層に沿って変化するが、ある点 (あるいは区間) においては一定であるという証拠を得て、固有地震モデルを提唱した。SIEH *et al.* (1989) や ARROWSMITH *et al.* (1997) は、詳細なトレンチ調査結果などをもとに、地震サイクルごとに破壊される領域 (断層の範囲) が異なることを指摘している。Working Group on California Earthquake Probabilities (1995) は、San Andreas 断層の各セグメントの地震データと活動パターンを調べ、複数のセグメントが同時に動くことを考慮して地震発生確率を求めた。本研究では、これらの研究結果を参考にしつつ、日本列島の陸域活断層の振る舞いについて検討を進める。ただし、San Andreas 断層はプレート境界の断層であるのに対し、本研究で扱う陸域活断層はプレート内の断層であり、その挙動は異なる可能性がある。

§ 3. 歴史地震データ調査

3.1 調査手法

まず歴史地震に関する文献から陸域に震源をもつ地震を抽出し、活断層の活動履歴に関する既存の文献・資料を用い、歴史地震と松田(1990)の起震断層の対応付けを行う。次に、対応付けられた歴史地震の推定規模(主に宇佐美(1996)によった)をもとに、地震発生時に動いた断層の長さを推定する。この時、佐藤・他(1989)の「日本の地震断層パラメーター・ハンドブック」に記載されている地震の場合は、求められたパラメータの1つである震源断層の長さの値を引用し、それ以外の地震については、松田(1975)のマグニチュード M と断層の長さ

L (km) の関係式に、宇佐美(1996)による歴史地震のマグニチュード値を代入し断層の長さを計算した。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (1)$$

この場合、断層の長さ L は地表地震断層の長さと考えられているが、式を導く際に使用されたデータには震源断層の長さが含まれている。武村(1998)は、 M 6.8 以上の地震については(1)式から算出される断層の長さを震源断層の長さと考えてよいとしており、よって以下でも震源断層の長さとして取り扱う。

最後に、起震断層の長さに対する地震時に動いた断層の長さの割合を計算し、その割合別地震発生頻度分布を求めた。集計の際には、起震断層の長さに対する地震時

Table 1. Correlation of a "seismogenic fault" of MATSUDA (1990) with historical earthquakes.

No.	Matsuda (1990)'s Seismogenic Faults	Eq (M)	Rank	Lf(km)	Lr(km)	Ratio (Lr/Lf)
1	Tsugaru_sanchi_seien	1766 (7.25)	c	30	28	0.93
2	Noshiro ¹⁾	1694 (7.00)	c	24	20	0.83
3	Yokote_bonchi_toen	1896 (7.20)	a	54	26	0.48
4	Gokurakuji_Nanamagari_toge	1914 (7.10)	d	18	23	1.28
5	Shonai_heiya_toen	850 (7.00)	b	22	20	0.91
		1894 (7.00)	a	22	20	0.91
6	Aizu_bonchi_seien	1611 (6.90)	a	35	17	0.49
7	Nagaoka_nisi	1828 (6.90)	c	25	17	0.68
8	Sekiya	1683 (7.00)	c	40	20	0.50
9	Fukaya ²⁾	818 (7.50)	c	50	40	0.80
10	Hirai_Kushibiki	1931 (6.90)	c	20	20*	1.00
11	Arakawa	1855 (6.90)	d	20	17	0.85
12	Isehara	878 (7.40)	b	20	35	1.75
13	Tanna	841 (7.00)	a	30	20	0.67
		1930 (7.30)	a	30	24*	0.80
14	Shinanogawa	1847 (7.40)	a	60	35	0.58
15	Itoshizusen_chubu	762 (7.00)	c	112	20	0.18
16	Atotsugawa	1858 (7.05)	a	61	21	0.34
17	Atera	1586 (7.80)	a	62	60	0.97
18	MTL_Akaishi_nishi	715 (7.00)	c	52	20	0.38
		715 (6.75)	c	52	14	0.27
19	Fukui_heiya_toen	1948 (7.10)	c	30	30*	1.00
20	Neodani	745 (7.90)	b	67	69	1.03
		1891 (8.00)	a	67	85*	1.27
21	Yanagase	1909 (6.80)	d	56	15	0.27
22	Kizugawa	1854 (7.25)	c	30	28	0.93
23	Gomura ³⁾	1927 (7.30)	a	13	35*	2.69
24	Hanaore	1185 (7.40)	c	54	35	0.65
		1662 (7.40)	b	54	35	0.65
25	Arima_Takatsuki	827 (6.75)	c	53	14	0.26
		1596 (7.00)	a	53	20	0.38
26	Rokko-Awaji ⁴⁾	1995 (7.20)	a	62	45**	0.73
27	Ikoma	734 (7.00)	b	30	20	0.67
28	Uemachi ⁵⁾	1510 (6.75)	c	43	14	0.33
29	Yamasaki	868 (7.00)	b	55	20	0.36
30	Mino	679 (7.00)	a	20	20	1.00

All the "seismogenic faults" are from MATSUDA (1990), except for 1) and 3) from RESEARCH GROUP for ACTIVE FAULTS OF JAPAN (1991), 2) from SATAKE *et al.* (1997), 4) from MATSUDA (1995), and 5) from SUGIYAMA (1997). The year of historical earthquake (Eq) and magnitude (M) are taken from USAMI (1996). The rank shows the reliability of the correlation in alphabetical order; the highest reliability is shown by rank a and the lowest by rank d. The length of Matsuda model fault is shown by L_f and the estimated rupture length is by L_r . The rupture length listed in SATO *et al.* (1989) is shown by an asterisk and that taken from HASHIMOTO *et al.* (1995) is by double asterisks. The other values of rupture length are estimated from the earthquake magnitude on the basis of MATSUDA (1975)'s empirical formula. The ratio of L_r to L_f is shown in the last column.

に動いた断層の長さの割合を 1/4 単位の階級 (中央値が 1/4 の倍数) に分類した。

3.2 調査結果と松田モデルの検討

本研究では 36 の歴史地震に対して、松田 (1990) の起震断層 30 本が対応付けられた [Table 1, 対応付けに関する詳細は小田切・島崎 (2000) を参照]。ただし、対応付けに適した松田 (1990) の起震断層がないため、別の文献から新たに設定した起震断層を含む (その場合は Table 1 の説明に典拠を記載)。その際、対応付けの確実性を示す 4 つのランク (確実性の大きい順に a~d) を設定した。

- a: 地表地震断層の出現や活断層の最新活動時期が一定期間に限定できる地質年代資料により、対応付けが確実と考えられるもの。
- b: トレンチ調査などにより活断層の最新活動時期の推定に有用な地質年代資料がえられており、対応付けがほぼ確実と考えられるもの。
- c: 地質年代資料に欠けるが、歴史地震と活断層の対応付けを推定した文献・資料が存在するもの。
- d: 地質年代資料や対応付けを推定した文献・資料はないが、地震規模、震央位置、被害状況などから可能性のあるもの。あるいは、文献・資料はあるが、その情報に対する信頼性に問題があるもの。

Table 1 には、起震断層名、歴史地震の年代とマグニ

Fig. 1. Histogram of ratios of rupture lengths during historical earthquakes to MATSUDA (1990)'s "seismogenic faults" (Matsuda model) listed in Table 1. Shading shows data with reliability ranks a and b in Table 1. If all fault segments within a Matsuda model fault rupture simultaneously in a single event, the rupture length (L_r) should be equal to the length of Matsuda model fault (L_f).

チュード、対応付けのランク、起震断層の長さ (L_f)、地震時に動いたと推定される断層の長さ (L_r)、起震断層長に対する地震時に動いた断層の長さの割合 (L_r/L_f) が記載されている。Table 1 に基づいて、起震断層長に対する地震時に動いた断層の長さの割合別地震発生頻度分布図 (Fig. 1) を作成した。Fig. 1 より、対応付けられた全歴史地震数 36 のうち約 89% にあたる 32 の歴史地震が、割合が 1/4~1 の間に分布することがわかった。対応付けの確実性ランク上位の 2 つ (a, b) の数を見ても、割合が 1/4 の地震はやや少ないものの、類似した傾向を示すことから、過去の大地震において、松田 (1990) の起震断層はその全長に対して 1/4~1 の部分が動くという傾向があると言える。

Fig. 1 には割合が 5/4 を超える地震が 2 つある。このうちの 1 つは 1927 年北丹後地震で、当地震で活動したのは郷村断層と山田断層である。松田 (1990) は山田断層のみ起震断層と設定しているが、推定された震源断層 [MATSU'URA (1977)] の走向は主として郷村断層の走向と一致することから、本研究では郷村断層を対応付けた。郷村断層の長さは活断層研究会 (1991) から引用したが、それは陸上で確認できる部分だけの長さである。一方、推定された震源断層は陸から北の沖合まで延びており、そのために割合が 1 を大きく超えたと考えられる。もう 1 つは 878 年の地震で、当地震で活動した松田 (1990) の起震断層は伊勢原断層と推定されている [松田・他 (1988)]。伊勢原断層は特定断層に指定されていないことから、この対応付けが確実であるならば、松田 (1990) の起震断層の設定基準は、1 つの大地震でまとまって活動する活断層群として適さない場合がある可能性を示唆している。しかし、松田・他 (1988) の 878 年地震と伊勢原断層の対応付けの根拠に対する異論もあることから [小山 (1999)]、対応付けに関して問題が残されているかもしれない。また、松田 (1990) の起震断層は、活断層研究会 (1980) の活断層分布図を用いているため、その後確認された活断層が含まれていないこと、海底活断層が十分確認されていないため、1 つの起震断層にグルーピングされるべき活断層が別々の起震断層に編成されている場合があること、などを考慮すると、起震断層の編成が不適切である可能性もある。

歴史地震データ調査結果において、割合が 1 であることは全体が一度に動くことを示し、1 未満であることは部分的に動くことを意味する。したがって Fig. 1 より、松田 (1990) の起震断層は、一括放出型だけでなく、分割放出型も多いことがわかり、隈元 (1998) の主張が裏付けられた。

もし松田 (1990) の起震断層の編成が適切であれば、

割合が1を超える地震は存在しないと考えられる。しかし、先に述べたような対応付けや起震断層の編成の問題がない場合でも、割合が確実に1を超える地震が存在する。それは1891年濃尾地震で、その震源断層の長さは根尾谷断層帯の長さより約30%長い。しかし、割合が1を超えると地震数は明らかに急減することから、松田(1990)の起震断層の設定基準は、最大規模の地震発生時における活動単位となる断層設定として妥当であると考えられる。この結果より、以下松田(1990)の起震断層は、基本的に最大規模の地震発生時における活断層の活動単位として正しくグルーピングされているものとして扱う。

§4. 断層設定より推定される歴史地震の規模と発生頻度

4.1 限元モデルを用いた歴史地震のシミュレーション

§3の歴史地震データ調査より、松田(1990)の起震断層は、つねに全体が一度に動くわけではなく、部分的にも動くことがわかり、部分的に動く場合、松田モデルは1つの大地震の活動単位としての断層設定としては適さない。それに対して限元モデルは、松田モデルのうち分割放大型と考えられる起震断層について、1つの大地震における活動単位となる断層区間として、いくつかのセグメントを設定している。Fig. 1について、限元(1998)で断層セグメントに分割されなかった起震断層と複数の断層セグメントに分割された起震断層のグラフに分けた(Fig. 2)。

断層セグメントに分割されなかった起震断層のグラフ[Fig. 2(a)]は、割合が1および3/4の地震が同程度に分布する。割合が3/4の地震の存在は、歴史地震のマグニチュードの過小評価が原因である可能性があり、歴史地震のマグニチュードが正しく評価されていれば、割合が1の地震しか発生せず、つねに全体が一度に割れると考えることができる。しかし、断層セグメントに分割されない起震断層の長さは20~30 km程度であり、本研究で扱う歴史地震はM6.8以上のため、割合が1/2や1/4である地震が存在してもグラフには表れない。断層セグメントに分割されない起震断層においても、複数の断層セグメントに分割される起震断層で起こる地震のような分布[Fig. 2(b)]をする可能性がある。しかし現在のデータからはこれ以上のことは言えない。

複数の断層セグメントに分割された起震断層のグラフ[Fig. 2(b)]は、割合が1/4~1の範囲で地震が分布する。限元モデルでは、分割された断層セグメントは独立して活動するとされているため、割合が3/4や1の地震が

存在する Fig. 2 (b) の結果は、限元モデルと合わないように見える。歴史地震のマグニチュードの過小評価により、割合が3/4である地震が発生している可能性もあるが、データ数が少ないためこれ以上議論することはむずかしい。

本研究では、限元モデルが1つの大地震における活動単位となる断層設定としてより現実的であるかどうかを検証するため、限元モデルの断層セグメントのいずれかが過去の歴史地震で動いたと仮定し、限元モデルから推定される地震規模別発生頻度分布を数値シミュレーションにより求め、§3の歴史地震データ調査結果と比較した。シミュレーションには、限元(1998)で複数のセグメ

Fig. 2. Histogram of ratios of rupture lengths during historical earthquakes to Matsuda model faults listed in Table 1. (a) Matsuda model faults which cannot be divided. (b) Matsuda model faults which KUMAMOTO (1998) divided into more than two segmented faults. See captions of Fig. 1.

ントに分割された15本の起震断層に属する断層セグメント (Table 2) と、この起震断層に対応付けられた19の歴史地震を用いた。

過去の歴史地震において、隈元(1998)のどの断層セグメントが活動したかは明確にわからないことから、歴史地震発生時に活動した断層セグメントを数値シミュレーションにより推定した。具体的には、起震断層ごとに属する断層セグメントに通し番号を振り、対応付けられた歴史地震の数だけ乱数を発生させる。発生させる乱数は1から各起震断層に属する断層セグメント数までの整数値で、乱数に対応する断層セグメントが歴史地震発生時に活動したと考える。このようにして抽出された断層セグメントについて、それぞれが属する松田(1990)の起震断層の長さ(L_f)に対する断層セグメントの長さ(L_r)の割合(L_r/L_f)を計算し、S3の歴史地震データ調査と同様に割合(L_r/L_f)別地震発生頻度分布を求めた。以上の操作を1回の試行として1000回の試行を行い、 L_r/L_f の各区間ごとの地震発生頻度について平均と信頼率95%の区間を求めた。

4.2 シミュレーション結果と隈元モデルの検討

隈元モデル (Table 2 の断層セグメント) を用いた場合のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。(a) は Table 2 のすべての断層セグメントが1回ずつ活動した場合の割合(L_r/L_f)別地震発生頻度分布、(b) は4.1のシミュレーションにより抽出された断層セグメントが活

動した場合の割合(L_r/L_f)別地震発生頻度分布である。

シミュレーションの結果 [Fig. 3(b)] を歴史地震データ調査結果と比較すると、割合が1/4と1/2の地震の発生頻度はよく対応しているが、割合が3/4や1の地震は全く発生しない。Table 2 よりわかるように、隈元モデルはもともと起震断層の長さに対する断層セグメントの長さの割合が3/4になる断層セグメントが存在しない。また、隈元モデルの定義により、割合が1になる断層セグメントは含まれない。したがって必然的に割合が3/4や1である地震は発生せず、歴史地震データ調査結果 [Fig. 2(b)] をうまく説明することができない。隈元(1998)は、一括放出モデルとしてグルーピングした活断層群 [松田(1990)の起震断層に相当] のうち、全体の長さが30 km以上のものを、複数のセグメントに分割したが、分割された個々のセグメントは独立してセグメント全体が一度に動くと考えているので、各断層セグメントは本質的には松田(1990)の起震断層と同じであり、歴史地震データ調査結果とうまく対応しないと考えられる。

4.3 連動セグメントモデル

4.2より隈元モデルもS3の歴史地震データ調査結果を十分説明することができない。そこで、隣接するセグメントはしばしば同時に活動しているという事実を考慮し、隈元(1998)の隣接する断層セグメントの可能な組合せすべてを、1回の大地震の活動単位となる断層区間

Table 2. Segmented faults of KUMAMOTO (1998).

No.	Kumamoto (1998)'s Segmented faults		$L_f(\text{km})$	$L_r(\text{km})$	Ratio	No.	Kumamoto (1998)'s Segmented faults		$L_f(\text{km})$	$L_r(\text{km})$	Ratio
1	Yokote_bonchi_toen	a	54	24	0.44	27	MTL_Akaishi_nishi	e	52	23	0.44
2		b	54	32	0.59	28	Neodani	a	67	18	0.27
3	Sekiya	a	40	22	0.55	29		b	67	18	0.27
4		b	40	18	0.45	30		c	67	17	0.25
5	Fukaya ¹⁾	a	50	30	0.60	31		d	67	19	0.28
6		b	50	20	0.40	32		e	67	16	0.24
7	Shinanogawa	a	60	15	0.25	33		f	67	15	0.22
8		b	60	16	0.27	34	Yanagase	a	56	21	0.38
9		c	60	16	0.27	35		b	56	18	0.32
10		d	60	29	0.48	36		c	56	18	0.32
11	Itoshizusen_chubu	a	112	23	0.21	37	Hanaore	a	54	25	0.46
12		b	112	27	0.24	38		b	54	22	0.41
13		c	112	23	0.21	39		c	54	12	0.22
14		d	112	20	0.18	40	Arima_Takatsuki	a	53	26	0.49
15		e	112	26	0.23	41		b	53	24	0.45
16	Atotsugawa	a	61	18	0.30	42	Rokko-Awaji ²⁾	a	62	18	0.29
17		b	61	18	0.30	43		b	62	28	0.45
18		c	61	27	0.44	44		c	62	13	0.21
19	Atera	a	62	19	0.31	45	Uemachi ³⁾	a	43	11	0.26
20		b	62	20	0.32	46		b	43	18	0.42
21		c	62	18	0.29	47		c	43	14	0.33
22		d	62	17	0.27	48	Yamasaki	a	55	28	0.51
23	MTL_Akaishi_nishi	a	52	23	0.44	49		b	55	12	0.22
24		b	52	23	0.44	50		c	55	18	0.33
25		c	52	26	0.50	51		d	55	19	0.35
26		d	52	28	0.54	52		e	55	11	0.20

Segmented faults of KUMAMOTO (1998) are shown except for 1), 2) and 3). For 1) and 3), new segmented faults are identified in this study. For 2), segments a and b are taken from KUMAMOTO (1998) and segment c is identified on the basis of MATSUDA (1995). The length of Matsuda model fault is shown by L_f , and the length of Kumamoto model fault by L_r . The ratio of L_r to L_f is shown in the last column.

Fig. 3. Histogram of ratios of the length of Kumamoto model to that of Matsuda model listed in Table 2. (a): all segments, (b): simulation results. In (b), the shaded area indicates 95% confidence interval. The closed circle illustrates the observed frequency for all the data shown in Fig. 2(b). The open circle shows the relative frequency for the data with reliability ranks a and b in Fig. 2(b).

として、隈元(1998)の断層セグメントに加えた (Table 3).

松田(1990)の起震断層の1つである跡津川断層帯を例にすると (Fig. 4), 隈元(1998)は、松田(1990)の跡津川断層帯を3つの断層セグメントに分割している。便宜上一方の端から順に個々の断層セグメントをa, b, cと呼ぶと、隣接するセグメントの組合せはa+b+c, a+b, b+cとなる。このうち、組合せa+b+cは松田(1990)の起震断層に相当する。この隣接する断層セグメントの組合せを隈元モデルa, b, cに加えるので、最終的に、a+b+c, a+b, b+c, a, b, cの全ての区間が、1つの大地震における活動単位として設定される。本研究では、このような断層設定を連動セグメントモデルと呼ぶことにする。

連動セグメントモデルを用いて4.1のシミュレーションを行い、その結果をFig. 5に示した。Fig. 5(a)は連動セグメントがすべて1回ずつ活動した場合の地震発生頻度、Fig. 5(b)はシミュレーション結果である。Fig. 5(b)より、割合が3/4の地震の発生頻度がやや小さいものの、95%の信頼区間で見れば、連動セグメントモデルを用いたシミュレーション結果は歴史地震データ調査結果と非常によく対応している。本研究のシミュレーションでは、大地震が発生しうる断層セグメント (連動セグメントも含む) は、すべて均しい確率で活動すると想定されているが、現実には、1つの起震断層に属するすべての断層セグメントが同時に活動する確率より、起震断層全体の長さよりやや短い連動セグメントが活動する確率が高い可能性がある。

§ 5. 日本陸域活断層で発生する大地震の規模の特徴

全ての地震データを用いて地震の規模と発生頻度の関係を求めると、大きな地震ほど少なく、小さな地震ほど多く発生するというグーテンベルグ・リヒターの式 (以下G-R式と呼ぶ) で表される統計学的傾向をもつことが知られている。1つの活断層系 (ここでは、ある一定の地域において、最大規模の地震でまとまって動く活断層群あるいは区間という意味で用いる) で起こる地震についても、固有地震モデル [1つの活断層系では、規模とある点 (あるいは区間) における1回のずれ量がいいつも同一である固有な大地震が繰り返し発生するというモデル] が提唱 [SCHWARZ and COPPERSMITH (1984)] される以前は、G-R式に従うと考えられていた。しかし、地形・地質学的証拠に加えて、1つの活断層系で生じた地震データのみを用いて規模と発生頻度の関係を見た場合、最大規模の地震はいつも同程度の大きさで発生し、それよりやや小さな地震は発生せず、地震マグニチュードと累積地震数 (対数) の分布は、最大余震より小さなマグニチュードの範囲では直線となりG-R式に従うが、本震である最大規模の地震は余震データによって決定されるG-R式の直線から外れる、という結果になり、固有地震モデル説が優勢となった [STIRLING *et al.* (1996)]。

しかし、本研究の歴史地震データ調査結果は、1つの活断層系で起こる大地震 (本震) の規模はつねに一定ではないことを示している。それでは、日本列島の陸域における1つの活断層系で発生する大地震 (本震) は、規模の固有性がなく、1回の地震ごとに規模は様々に変化するのだろうか。ここではこの問題を中心に議論し、日

Table 3. Proposed fault model in this study.

No.	Proposed Model Faults		Lf(km)	Lr(km)	Ratio	No.	Proposed Model Faults		Lf(km)	Lr(km)	Ratio
1	Yokote_bonchi_toen	ab	54	54	1.00	46	Neodani	abcdef	67	67	1.00
2		a	54	24	0.44	47		abcd	67	58	0.87
3		b	54	32	0.59	48		cdef	67	55	0.82
4	Sekiya	ab	40	40	1.00	49		cde	67	39	0.58
5		a	40	22	0.55	50		def	67	37	0.55
6		b	40	18	0.45	51		ab	67	36	0.54
7	Fukaya	ab	50	50	1.00	52		cd	67	36	0.54
8		a	50	30	0.60	53		de	67	35	0.52
9		b	50	20	0.40	54		ef	67	31	0.46
10	Shinanogawa	abcd	60	60	1.00	55		a	67	18	0.27
11		abc	60	47	0.78	56		b	67	18	0.27
12		bcd	60	52	0.87	57		c	67	17	0.25
13		ab	60	31	0.52	58		d	67	19	0.28
14		bc	60	32	0.53	59		e	67	16	0.24
15		cd	60	36	0.60	60		f	67	15	0.22
16		a	60	15	0.25	61	Yanagase	abc	56	56	1.00
17		b	60	16	0.27	62		ab	56	39	0.70
18		c	60	16	0.27	63		bc	56	36	0.64
19		d	60	20	0.33	64		a	56	21	0.38
20	Itoshizusen_chubu	abcde	112	112	1.00	65		b	56	18	0.32
21		cde	112	69	0.62	66		c	56	18	0.32
22		ab	112	50	0.45	67	Hanaore	abc	54	54	1.00
23		cd	112	43	0.38	68		ab	54	47	0.87
24		de	112	46	0.41	69		a	54	25	0.46
25		a	112	23	0.21	70		b	54	22	0.41
26		b	112	27	0.24	71		c	54	12	0.22
27		c	112	23	0.21	72	Arima_Takatsuki	ab	53	53	1.00
28		d	112	20	0.18	73		a	53	26	0.49
29		e	112	26	0.23	74		b	53	24	0.45
30	Atotsugawa	abc	61	61	1.00	75	Rokko-Awaji	abc	62	62	1.00
31		ab	61	36	0.59	76		ab	62	47	0.76
32		bc	61	45	0.74	77		a	62	18	0.29
33		a	61	18	0.30	78		b	62	28	0.45
34		b	61	18	0.30	79		c	62	13	0.21
35		c	61	27	0.44	80	Uemachi	abc	43	43	1.00
36	Atera	abcd	62	62	1.00	81		ab	43	29	0.67
37		ab	62	39	0.63	82		bc	43	32	0.74
38		cd	62	35	0.56	83		a	43	11	0.26
39		a	62	19	0.31	84		b	43	18	0.42
40		b	62	20	0.32	85		c	43	14	0.33
41		c	62	18	0.29	86	Yamasaki	abc	55	55	1.00
42		d	62	17	0.27	87		ab	55	40	0.73
43	MTL_Akaishi_nishi	ab	52	52	1.00	88		bc	55	30	0.55
44		a	52	26	0.50	89		a	55	28	0.51
45		b	52	28	0.54	90		b	55	12	0.22
						91		c	55	18	0.33

A new fault model is proposed by adding faults combining neighboring segments in Table 2, to Kumamoto and Matsuda models. The length of Matsuda model fault is shown by L_f , and the length of our proposed fault by L_r . The ratio of L_r to L_f is shown in the last column.

本列島の陸域活断層で起こる地震の規模の特徴を考察する。

前章までは、地震の規模と発生頻度の関係を、松田(1990)の起震断層の長さに対する各断層セグメントの長さの割合別頻度分布で示した。一般に地震の規模別発生頻度分布は、地震のマグニチュードとそのマグニチュード以上の総地震数の関係として表される。そこで、Fig. 2(b), 5(b)について、横軸の割合(L_r/L_f)を地震のマグニチュードに、縦軸の地震数を累積地震数の対数に置き換えた図を作成し、歴史地震データ調査結果と連動セグメントモデルを用いたシミュレーション結果を比較することにした。

本来1つの活断層系で起こる地震の規模別頻度分布を考える場合、その活断層系で起きた地震のみを用いるべきであるが、最大規模の地震の1サイクルにわたる長期間のデータは少ない。そこで、日本の陸域活断層で発生する大地震ならば、いずれの活断層系においても、発生する大地震の規模のパターンは同様の性質をもつと仮定し、全国の活断層系の規模別地震発生頻度分布を重ね合わせても、1つの活断層系を解析した場合と同様の特徴が現れるものと考えた。ただし、各活断層系の全体の長さが異なる(つまり最大地震規模が異なる)ため、絶対的な大きさとしての地震マグニチュードではなく、活断層系全体の長さ[松田(1990)の起震断層長]で基準化

Fig. 4. Example of a “seismogenic fault” and “segmented faults” for the case of the Atotsugawa fault, central Japan. Segments a, b and c are proposed by KUMAMOTO (1998), and the seismogenic fault $a+b+c$ is proposed by MATSUDA (1990). Our proposed model includes MATSUDA (1990)’s “seismogenic fault” ($a+b+c$), KUMAMOTO (1998)’s “segmented faults” (a, b and c) and faults formed by combining neighboring segments ($a+b$ and $b+c$).

Fig. 5. Histogram of ratios of the length of our proposed model faults to that of Matsuda model faults listed in Table 3. (a) All our proposed model faults, (b) simulation results. In (b) the shaded area indicates 95% confidence interval. The closed circle illustrates the observed frequency for all the data shown in Fig. 2(b). The open circle shows the relative frequency for all the data with reliability ranks a and b in Fig. 2(b).

した地震マグニチュード (ΔM) を用いる。地震のマグニチュードと断層の長さの関係式 (1) を用いると

$$\log (Lr/Lf)=0.6 [M(Lr)-M(Lf)] \\ \equiv 0.6 \Delta M \quad (2)$$

ここで、 $M(Lr)$ は地震時に活動した断層の長さから推定される地震マグニチュードを、 $M(Lf)$ は起震断層の

長さから推定される地震マグニチュードを表す。

次に地震モーメント (M_0) と断層パラメータの相似則を用いて、割合 (Lr/Lf) から地震マグニチュードへの置き換えを行う。地震モーメントは断層長の 3 乗に比例する [KANAMORI and ANDERSON (1975)] という断層パラメータの相似則が成り立つが、日本では、陸域で発生す

Fig. 6. Cumulative number of simulated and observed events versus relative magnitude. The relative magnitude means a difference in magnitude between a simulated or observed event and a hypothetical earthquake which ruptures all the segments within Matsuda model fault with which the historical event is correlated. The solid square shows a result of simulation for our proposed fault model shown in Table 3 with a bar showing 95% confidence interval. The closed and open circles show all historical events and events with reliability ranks a and b shown in Fig. 2(b), respectively.

る大地震の場合は、断層面の幅が地震発生層によって限られ一定と考えることができる [SHIMAZAKI (1986)]. よって、 $M_0 \propto L^2$ が成り立ち、地震モーメント (dyne·cm) と断層の長さ (km) との関係は、

$$\log M_0 = 2 \log L + 23.58 \quad (3)$$

となる [YAMANAKA and SHIMAZAKI (1990)].

一方、地震モーメントとモーメントマグニチュード (M_w) の関係式 [KANAMORI (1977)] は次のとおりである。

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 16.1 \quad (4)$$

(3), (4) 式より M_0 を消去して断層の長さ (L) とモーメントマグニチュード (M_w) の関係式を導く。

$$M_w = 1.33 \log L + 4.99 \quad (5)$$

(5) 式から

$$\log (Lr/Lf) \equiv 0.75 M_w \quad (6)$$

が成り立つ。前に導いた (2) 式とは、係数が 0.6 と 0.75 で少し異なるが、後述の結論には影響しない。以下では (6) 式を用いる。

Fig. 6 は歴史地震データ調査結果 [Fig. 2(b)] と連動セグメントモデルのシミュレーション結果が重ねて示されている。Fig. 6 において、基準化したマグニチュード 0

は割合 (Lr/Lf) が 1、つまり 1 つの活断層系の全体が一度に動いた時の地震の大きさを意味する。エラーバーはシミュレーション結果の信頼率 95% の範囲を示す。また、G-R 式に従うモデルと固有地震モデルの場合のグラフも参考に載せている。Fig. 6 をもとに、1 つの活断層系で起こる大地震 (本震) の規模に固有性があるかどうかという問題を考える。

歴史地震データ調査結果における地震の大きさと累積地震数 (対数) の関係は、マグニチュード $-0.1 \sim -0.9$ の範囲において一定の傾きでほぼ直線として現れ、固有地震モデルより G-R 式に従うモデルに適合するように見える。しかし、マグニチュード $0 \sim -1.0$ 間の b 値を求めると 0.70 [宇津 (1965) の式による] であり、G-R 式に従う場合の b 値である 1 とは傾きが異なる。すなわち、どちらのモデルとも適合しない。

本研究で扱っている地震はほぼ $M 6.8$ 以上で、文献・資料より余震と考えられている地震は除かれているため、Fig. 6 は 1 つの活断層系で起こる地震の最大マグニチュード付近だけを示していると考えられる。本震と最大余震の規模の差は、一般にマグニチュード 1 以上であり、余震も含めて地震の規模と発生頻度の関係を求められ

ば、余震分布を表すと考えられるマグニチュード-1.0以下のグラフ部分と、本震の分布と考えられるマグニチュード0付近のグラフの部分では、その傾きが大きく変化し、固有地震モデルに類似した、最大マグニチュード付近で直線が前に突出するように折れるグラフになると考えられる。

また、Fig. 2(b)のグラフにおいても、割合が1の地震に対して割合が1/2や1/4の地震の発生頻度はそれほど急激に高くないことから、G-R式よりも固有地震モデルの傾向を示していると考えられる。

以上より、本研究結果は、基本的に1つの活断層系で起こる大地震(本震)は固有の大きさをもつが、その大きさにはやや幅があると解釈するのが妥当と考える。また、その幅は各活断層系の断層セグメントの構成(数、組合せなど)に関係すると考えられる。

8.6. ま と め

本研究は、歴史地震データ調査により、1つの活断層系における大地震発生時の活断層の活動パターンを推定し、シミュレーションにより1回の大地震における活動単位としてより現実的な断層設定を検討した。結果は以下のとおりである。

1) 歴史地震データ調査により、松田(1990)の起震断層は、最大規模の地震発生時における活動単位となる断層(1つの活断層系)として妥当であり、その場合、歴史地震の多くは、1つの活断層系全体の長さに対する地震時に動いた断層の長さの割合が1/4~1の範囲に分布し、1つの活断層系は、全体が1度に動く場合と部分的に動く場合の両方が考えられる。

2) 1つの大地震の活動単位となる断層設定として、これまで松田モデル[松田(1990)]、隈元モデル[隈元(1998)]が提案されたが、これらでは歴史地震データ調査結果を十分に説明できない。松田(1990)の起震断層、隈元(1998)の個々の断層セグメントとともに、隣接する断層セグメント[隈元(1998)による]の組合せを考慮した断層設定である連動セグメントモデルが歴史地震データ調査結果を最もよく説明できる。

3) 1つの活断層系において発生する大地震の規模は固有性をもつが、常に同じマグニチュードではなく、地震ごとに活動する断層の長さが活断層系全体の長さに対して1/4~1の範囲で変化するため、大きさには幅がある。その幅については、1つの活断層系に属する断層セグメントの数や連続性等が関係していると考えられる。

8.7. おわりに

現段階で可能な限り多くの歴史地震と活断層を対応付

けたが、対応付けられた地震数は36と少なく、その中には確実性の低いものも含まれる。今後さらに活断層に関する調査を進め、より多く確実に歴史地震と活断層を対応付けることが重要である。

また、当面強震動予測を試みる場合には、1回の大地震で活動する断層の長さが、松田(1990)の起震断層長の1/4~1の範囲に分布することを考慮すべきであろう。論理ツリー[地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会(1999)]などの手法によって、その不確定性を組み入れることが考えられる。

謝 辞

本研究は、小田切が「国立試験研究機関等に従事する研究職員のための国内留学制度」に基づき、科学技術庁より東京大学地震研究所に10ヶ月間派遣され、実施したものである。その際、科学技術庁科学技術振興局および地震研究所の方々には大変お世話になった。また、査読者の松田時彦氏、遠田晋次氏、および編集者の堤 浩之氏には丁寧に読んで頂き、有益なコメントは本論文の改善に非常に役立った。これらの方々に深く感謝する。

文 献

- ARROWSMITH, R., K. McNALLY and J. DAVIS, 1997, Potential for earthquake rupture and $M7$ earthquakes along the Parkfield, Cholame, and Carrizo segments of the San Andreas Fault, *Seism. Res. Lett.*, **68**, 902-916.
- HASHIMOTO, M., T. SAGIYA, H. TSUJI, Y. HATANAKA and T. TADA, 1995, Co-seismic Displacement of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 255-279.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会, 1999, (改訂試案) 長期的な地震発生確率の評価手法について, 74 pp.
- KANAMORI, H., 1977, The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2981-2987.
- KANAMORI, H. and D. L. ANDERSON, 1975, Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **65**, 1073-1095.
- 活断層研究会, 1980, 日本の活断層一分布図と資料一, 東京大学出版会, 363 pp.
- 活断層研究会, 1991, [新編] 日本の活断層一分布図と資料一, 東京大学出版会, 437 pp.
- 小山真人, 1999, 日本の史料地震学研究の問題点と展望 一次世代の地震史研究に向けて一, *地学雑誌*, **108**, 346-369.
- 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.
- 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* **2**, **28**, 269-283.

- 松田時彦, 1990, 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, **65**, 289-319.
- 松田時彦, 1995, 1995年兵庫県南部地震はどこまで予測されていたか, 月刊地球号外, **13**, 90-94.
- 松田時彦・由井将雄・松島義章・今永 勇・平田大二・東郷正美・鹿島 薫・松原彰子・中井信之・中村俊夫・松岡数充, 1988, 伊勢原断層(神奈川県)の試錐による地下調査—過去約7000年間の堆積環境と元慶2年地震の変位—, 地震研究所彙報, **63**, 145-182.
- MATSU'URA, M., 1977, Inversion of geodetic data, Part II, Optimal model of conjugate fault system for the 1927 Tango earthquake, J. Phys. Earth, **25**, 233-255.
- 小田切聡子・島崎邦彦, 2000, 歴史地震と起震断層との対応(投稿中).
- 佐竹健治・石田瑞穂・杉山雄一, 1997, 地震構造図, 50万分の1活構造図「東京」(第2版)説明書, 地質調査所, 9-12.
- 佐藤良輔・阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典, 1989, 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, 390 pp.
- SCHWARTZ, D. P. and K. J. COPPERSMITH, 1984, Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones, J. Geophys. Res., **89**, 5681-5698.
- SHIMAZAKI, K., 1986, Small and large earthquakes: the effects of the thickness of seismogenic layer and the free surface, in "Earthquake Source Mechanics", ed. by S. Das, J. Boatwright and C. Scholz, AGU Geophys. Monograph, **37**, AGU, Washington D. C., 209-216.
- SIEH, K., M. STUIVER and D. BRILLINGER, 1989, A more precise chronology of earthquakes produced by the San Andreas Fault in southern California, J. Geophys. Res., **94**, 603-623.
- STIRLING, M. W., S. G. WESNOUSKY and K. SHIMAZAKI, 1996, Fault trace complexity, cumulative slip, and the shape of the magnitude-frequency distribution for strike-slip faults: a global survey, Geophys. J. Int., **124**, 833-868.
- 杉山雄一, 1997, 上町断層系の反射法地震探査, 地質調査所研究資料集, 303 (平成8年度活断層研究調査概要報告書), 105-113.
- 武村雅之, 1998, 日本列島における地殻内地震のスケーリング則, 地震 **2**, **51**, 211-228.
- 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, 493 pp.
- 宇津徳治, 1965, 地震の規模別度数の統計式 $\log n = a - bM$ の係数 b を求める一方法, 北海道大学地球物理研究報告, **13**, 99-103.
- WORKING GROUP ON CALIFORNIA EARTHQUAKE PROBABILITIES, 1995, Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024, Bull. Seism. Soc. Am., **85**, 379-439.
- YAMANAKA, Y. and K. SHIMAZAKI, 1990, Scaling relationship between the number of aftershocks and the size of the main shock, J. Phys. Earth, **38**, 305-324.