

断層面間の相互作用が働く系における 地震発生の予測可能性

東京大学地震研究所* 亀 伸樹・山下輝夫

Possibility of the Prediction of Earthquake Occurrence in an Interactive Two-Fault System

Nobuki KAME and Teruo YAMASHITA

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

(Received June 26, 1997; Accepted January 30, 1998)

We analyze the dynamics of two interactive parallel faults on the basis of a discrete dynamical model. This fault model can be regarded as an extension of the Burridge-Knopoff model. Our main concern is about the temporal variation of characteristic events on the two interactive faults. The tendency is observed that the characteristic events continue to occur only on one of the faults for a period of time; the occurrence is quasiperiodic in this period as generally found for the Burridge-Knopoff model. However, the activity is suddenly transferred to the other fault at some time. The period of characteristic event occurrence tends to alternate on the two faults. The length of this period is generally larger when the interactions are weak between the two faults. This suggests that the recurrence of large events on neighboring faults is highly complex. It is also indicated from our analysis that long apparently quasiperiodic recurrence of large events on a fault may cease at some time if weak fault interactions exist.

Key words: Seismicity, Fault interactions, Characteristic events, Fracture.

§1. はじめに

地震活動の複雑さを理解するためには、地震断層を大規模な相互作用系として捉えることの重要性が最近の活発なモデルシミュレーションによる研究により明らかになりつつある〔例えば、BAK and TANG (1989), CARLSON and LANGER (1989), RICE (1993), YAMASHITA (1993, 1995)〕。これらの研究により、地震の規模別頻度分布についての Gutenberg-Richter の式の成因は、多数の断層要素間の力学的相互作用にあると理解されるようになってきた。すなわち、破壊強度や応力降下量など各種震源要素によらず、この相互作用のために地震モーメントの規模別頻度分布は幂分布となる。

しかし、上にあげた研究だけではなく、その他のほとんどの震源研究においては、孤立した1枚の断層面上の断層要素間の相互作用のみが仮定されているが、日本の

内陸など地殻活動が活発なプレート内の地震断層を考える時、これは現実とはほど遠いものであろう。Fig. 1に



Fig. 1. Distribution of active faults in the Hanshin area, Japan.

* 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

は、例として阪神地域の活断層分布を示しているが、活断層はたいへん密に分布していることが実感としてわかる。破壊力学に基づけば、亀裂が密に分布していれば互いに力学的相互作用を強く及ぼしあうことが知られている。相互作用の大きさは亀裂の相対的配置に依存し、その配置により互いに破壊成長を加速することもあるし、抑制することもある [大中・山下 (1995), 山下 (1994)]。従って、異なった断層間の相互作用も地震発生の予測という観点からは重要である。また、Fig. 1 に示したような活断層は、断層が地表を切った部分を表しているに過ぎず、このような図からは、地下深部での断層の幾何学的形状はわからない。地中深くでは、断層は1枚の面で表されるが地表付近では分岐を生じ、複数の活断層として地表に現れている可能性も指摘されている。このような場合も、分岐した断層間で強い相互作用が生じると考えられる [TADA and YAMASHITA (1997)]。浅い大地震に際して地表に現れた断層を見ても、多くの場合、不連続な断層セグメントからなっており [三雲・安藤 (1975), 中田・蓬田 (1995), 大中・山下 (1995)]、大地震発生の際には、これら断層セグメントの間に力学的な相互作用が強く生じたであろうと考えられる。密分布した断層群による相互作用は非線形的であり、時空間的にきわめて複雑な効果を及ぼし、一般に地震の発生予測を困難とする [YAMASHITA (1995)]。

近年、断層の摩擦構成則について大きな成果が得られつつある [例えば、RUINA (1983), OHNAKA *et al.* (1987)]。このような構成則の解明は、孤立断層の振る舞いの予測には大きな役割を果たすであろう。しかし、上に述べた密分布する断層系の振る舞いにおいては、むしろ相互作用の効果がより大きくなる可能性がある。その場合、相互作用の非線形性のため、相互作用する断層系の1要素としての各断層の振る舞いは、孤立断層を仮定した場合の振る舞いとは大きく異なるであろう。従って、地震発生の動力学の解明には、断層間(または断層セグメント間)の力学的相互作用の考察が欠かせない。

大規模相互作用系は、一般にはきわめて複雑な振る舞いをするが、地震発生予測が可能であるためには、そのような複雑さの中、統計的な意味でどのような規則性があり得るか、また、複雑さの程度はどのような要因によるのかということなどを明確にする必要がある。本論文では、そのような方向への理解の第一歩として、近接する2断層上での大地震の繰り返しの様子を簡単なモデルを用いて調べ、断層面間の相互作用の効果を考察する。

§2. 平行2断層間の力学的相互作用

最近の多くの地震活動についてのシミュレーション研究はバネ-質点系モデルに基づいている。その1次元モデルはBurrige-Knopoffモデルと一般には呼ばれ [BURRIDGE and KNOPOFF (1967)]、このモデルの特性が多くの研究者により明らかにされてきた [例えば、CARLSON and LANGER (1989), CARLSON *et al.* (1991), SCHMITTBUNH *et al.* (1996)]。しかし、これは、孤立断層の振る舞いをモデル化したものであり、近接した断層との相互作用を考慮に入れていない。我々は、相互作用する断層の振る舞いをモデル化するため、Burrige-Knopoffモデルを拡張しFig. 2に示すモデルを仮定する。これは、相互作用する平行な2断層のモデルである。1断層面と2断層面間で決定的に異なるのは、地殻歪みが断層面間の相互作用により分配されるようになることである。Fig. 1に示したように断層面が多数存在する場合、ある断層面で地震が起き断層周辺の歪みが解放されると近接断層面でも解放されるべき歪みは消失しそこでは地震が起きにくくなるであろう。このような実際の多数の断層系で生じる歪みの分配の役割を我々のモデルは最も簡単な形で表現した。Fig. 2のモデルでは、上面または下面のある質点にすべりが起これば(仮にFig. 2のAとする)、同一面内にある隣接する2質点(BとC)には作用する力を増大させ、従って、これら2質点のすべりを促進する。また他面上の隣接する質点(D)では、作用する力が減少し、そのすべりが抑制される。これは、弾性体中の亀裂群による相互作用に見られるものと定性的にはまったく同一である。実際、山下(1994)によれば、連続体中の同一面上にある亀裂は互いに成長を促進し、また、重なった状態にある平行亀裂は互いに成長を抑制することが示されている。ただし、Fig. 2のモデルはBurrige-Knopoffモデルと同じく、最近接相互作用しか考慮していないということや波動によるエネルギー拡散を考慮していないなどの短所はある。従って、我々は、Burrige-KnopoffモデルやFig. 2のモデルが、物理的または地学的に十分意味のあるモデルであると、ここで主張するわけではない。ここで強調したいのは、多くの研究者により用いられてきた「標準」に近いモデルに基づいて、相互作用の効果を調べるということである。従って、あ

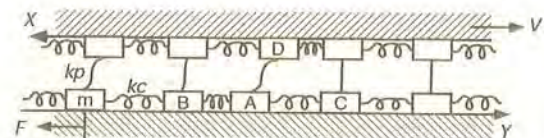


Fig. 2. A discrete dynamical model for two interactive parallel faults.

る意味では定性的な研究であると言えよう。

Fig. 2 の系の運動方程式は

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_j &= k_c(x_{j+1} - 2x_j + x_{j-1}) - k_p(x_j + y_j - V \cdot t) - F(\dot{x}) \\ m\ddot{y}_j &= k_c(y_{j+1} - 2y_j + y_{j-1}) - k_p(y_j + x_j - V \cdot t) - F(\dot{y}) \end{aligned} \quad (1)$$

(j=1, ..., N)

のように表される。なお、上付きの点は時間 t についての微分を表す。N は質点の数、 m は質点の質量、 k_c は横バネのバネ定数、 k_p は縦バネのバネ定数である。なお、 x 軸および y 軸は、上下の断層に沿って Fig. 2 のようにとる。V は、上側の剛体をゆっくりと移動させる速度であり、プレートの運動などテクトニクスに起因するゆっくりとした応力増大をモデルするものである。なお、上下両方の剛体がゆっくりと運動をしているとしても結果はまったく同じである。F は各質点に作用する摩擦力であり、CARLSON and LANGER (1989) や他の多くの研究者 [例えば SCHMITTBUHL *et al.* (1996)] が仮定したものと同じ滑り速度依存型のもの

$$F(\dot{x}) = F_0 / (1 + |\dot{x}|/\nu_0) \quad (2)$$

を仮定する。なお、滑りの反転は禁止するものとする。実際の計算は、式 (1) を次のように無次元化して行う。

$$\begin{aligned} \ddot{U}_j &= l^2(U_{j+1} - 2U_j + U_{j-1}) - (U_j + V_j - \nu) - \phi(\alpha \dot{U}) \\ \ddot{V}_j &= l^2(V_{j+1} - 2V_j + V_{j-1}) - (V_j + U_j - \nu) - \phi(\alpha \dot{V}) \end{aligned} \quad (3)$$

(j=1, ..., N)

ここで、 U_j および V_j は $D_0 (= F_0/k_p)$ で無次元化した j 番目の質点の座標である。また、 $\phi(x) = 1/(1+x)$ 、 $\alpha = D_0/k_p/m/\nu_0$ であり、上付きの点は無次元化された時間 $T = t/k_p/m$ についての微分である。さらに、 $l = \sqrt{k_c/k_p}$ であり、これは縦バネに対する横バネの相対的な強さを表す。従って、 l が大きければ、相対的に断層上の要素間の相互作用が卓越して、Fig. 2 における上下 2 断層間の相互作用は小さくなるということになる。なお、(3) の計算は 4 次精度の Runge-Kutta 法を用いて実行する。時間ステップの大きさ ΔT は 0.001 とする。また、(3) の計算は質点の滑り運動の間だけ行い、滑りの停止後は次に滑りが起きる時刻まで上側の剛体を進める。そして、再び動き出す質点の滑り運動を Runge-Kutta 法により決定する。本論文では、相互作用の効果に焦点を絞るため摩擦力の速度依存性の大きさを表す係数 α は 2.5 に固定する。また、剛体の移動速度として $\nu = V\sqrt{m/k_p}/D_0 = 0.001$ を仮定する。上下両面とも質点の数 N は 100 とし、質点列の両端については周期境界条件を仮定する。また、時刻 $T=0$ における質点の位置については、他の関連研究と同様にわずかの擾乱を与えるものとする。質点の滑りによる地震モーメント M_0 については、CARLSON and LANGER (1989) と同様に

$$M_0 = \sum_i W_i \quad (4)$$

から与えられるものとする。ここで W_i は、質点の滑りである ($W_i = U_i$ または V_i)。マグニチュード M は (4) の常用対数として与えられるものとする。

§ 3. 大地震の繰り返し特性

ここで平行 2 断層モデルと 1 断層モデルを比較して、大地震の繰り返し特性の相互作用依存性についての考察を行う。1 断層モデルとは、Burridge-Knopoff モデルと呼ばれているものであり、Fig. 2 の下面上のすべての質点が完全に剛体に固着し滑りが生じないとしたものである。また、ここで言う大地震とは、上面または下面どちらかのほとんどすべての質点をすべらせる規模のものであり、規模別頻度分布を図示したとき、規模の上限付近で幕分布からのずれを示すいわゆる固有地震規模のものである。これら大地震の規模は、本論文で定義したマグニチュードでは、1 から 2 程度である (Fig. 3)。平行 2 断層モデルおよび 1 断層モデルいずれの場合についても、 l の値としてまず 6 を仮定する。 l にこのような値を仮定するということは、縦バネの強さが横バネの強さにくらべ極端に小さいことを意味する。なお、CARLSON *et al.* (1991) は、 l の効果を調べたが、縦バネの強さが横バネの強さにくらべ極端に小さいという条件のもとでは計算結果は、 l にはほとんど依らないという結論を得ている。

平行 2 断層モデルおよび 1 断層モデルの両者について、時間ステップ 1.5×10^5 までの大地震発生の時間変化を Fig. 4 に示す。1 断層モデルの場合、大地震の発生

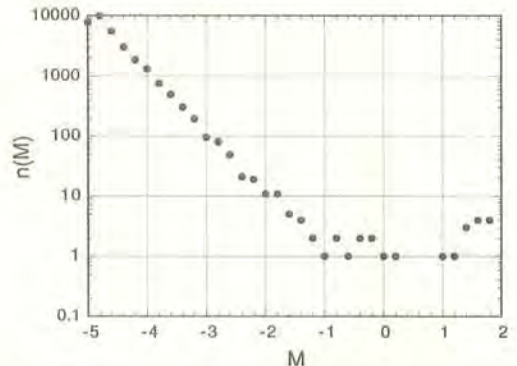


Fig. 3. Frequency distribution of event sizes; all the event occurred in the time range $0 < T < 10000$ are taken into consideration on both faults. The form of the distribution is almost invariable even if data for longer time range are employed.

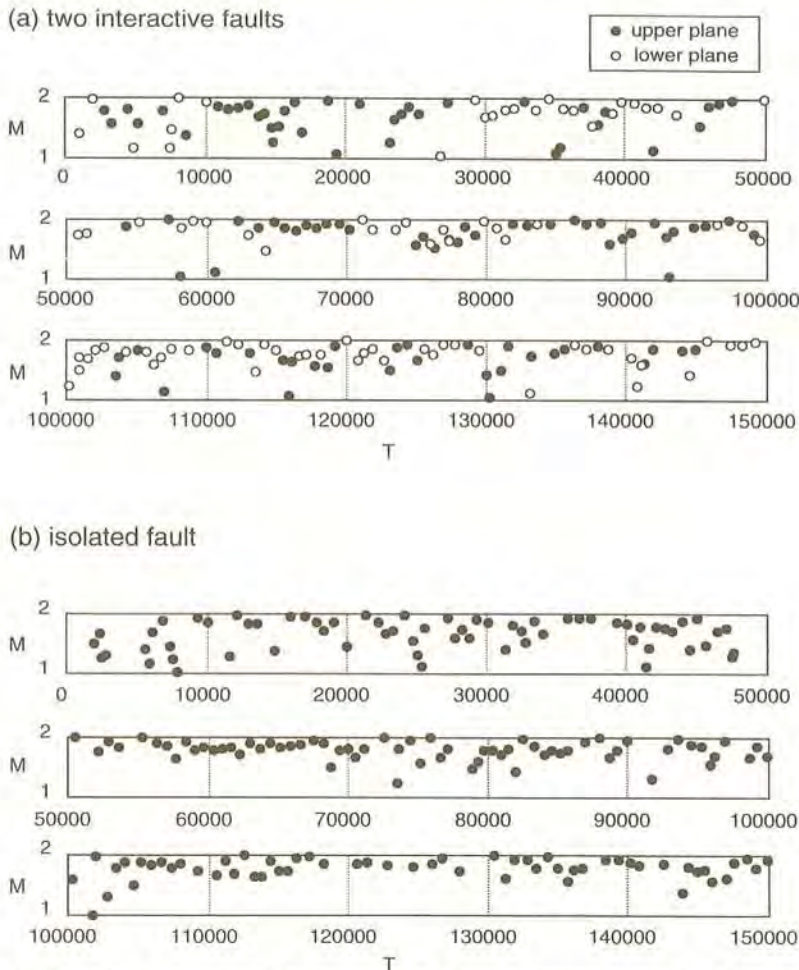


Fig. 4. Temporal variation of the occurrence of characteristic events; $l=6$ is assumed.

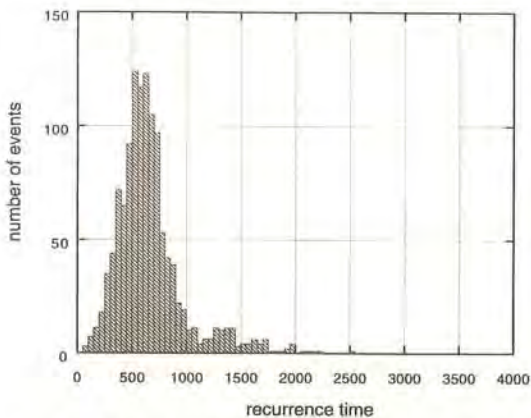
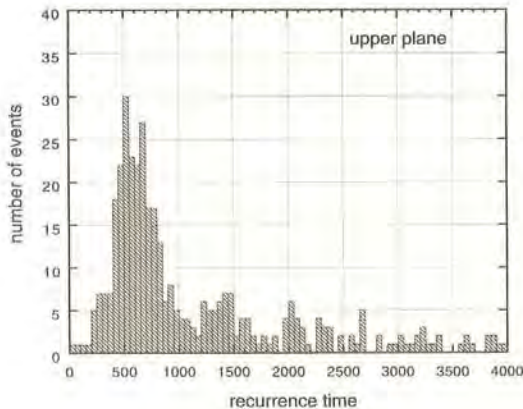
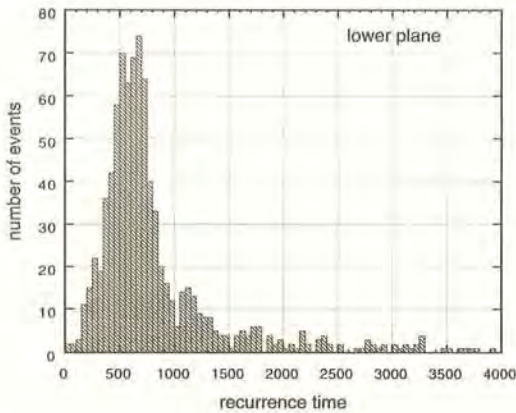


Fig. 5. Time interval of the occurrence of characteristic events for the isolated fault model.

はほぼ周期的であることがわかる。実際、大地震発生間隔の分布を見れば (Fig. 5), $T=500\sim 600$ 程度に比較的顕著な周期が見られる。しかし、2断層モデルの場合は、1断層モデルとは異なる顕著な特徴が観察される。すなわち、上下両断層を別々に見れば、ある一定期間の間、地震活動が静穏化する傾向がある。例えば、2断層モデルの下面断層の振る舞いを見れば、時間 $T=10000$ から 27000 の時期に顕著な活動静穏化が観察される (Fig. 4)。ただし、上下両断層で同時に活動の静穏化が見られるわけではなく、どちらかの面が静穏化している場合、他の面が活動を行っている。このことは、ある時間の後、活動が一つの断層から他の断層へ突然乗り移ることを示している。例えば Fig. 4 で言えば、 $T=10000\sim 27000$ では、上面断層のみが活動的であり、 $T=30000\sim 45000$ では、下面断層の活動が卓越的である。両面とも



(a)



(b)

Fig. 6. (a) Frequency distribution of the recurrence intervals of the characteristic events occurred on the upper fault. (b) Frequency distribution of the recurrence intervals of the characteristic events occurred on the lower fault.

活動的な期間もある（例えば、 $T=105000\sim 130000$ ころ）が、多くの場合、どちらか一方の断層のみが活動的である。上下それぞれの断層での大地震の発生間隔の分布を見ても（Fig. 6）、1断層モデルほど顕著な周期性がないことに気がつく。なお、ここで、下面断層のほうが活動度が高いのがわかるが、これは初期条件（ $T=0$ で与えたわずかな変位擾乱）の効果が及んでいるためである。

上下両断層の区別をなくし全体を一つの系と考えると、大地震の発生間隔の統計分布を示すと Fig. 7 のようになる。1断層モデルの場合の結果（Fig. 5）と比べれば、分布はほとんど同じであることに気がつく。これから、相互作用する断層群の大地震発生間隔を考える際には、

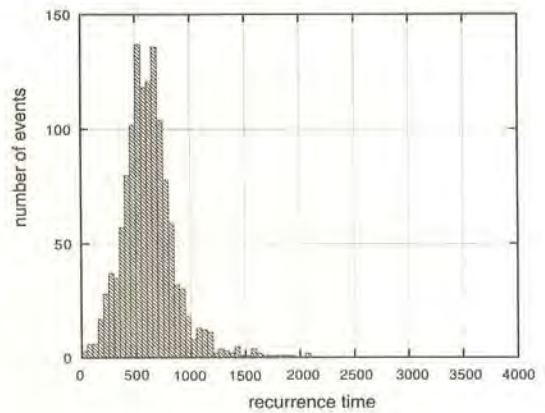


Fig. 7. Frequency distribution of the recurrence intervals of the characteristic events; the two interactive faults are regarded as a single system.

全体を一つの系と考えれば、大地震のおこりかたは比較的単純だが、構成要素としての個々の断層上で大地震の起こりかたを見れば、複雑さが現れる可能性があるということを示唆する。従って、地殻歪みの蓄積速度を説明できないような長い活動休止期間を持つ断層が野外調査により見つかった場合においても、近接する断層で相補的に地震活動が起きていた事が確認できれば、本研究のモデルで考慮した断層面間の相互作用による地震活動期の移動である可能性が高いと言える。

§ 4. 相互作用の強さの効果

断層間の相互作用の強さは、弾性体の場合は断層間の距離に反比例する。我々のモデルでは断層間の距離という概念がなくなるが、縦バネに対する横バネ定数の相対的な大きさ $l = \sqrt{k_s/k_p}$ が平行2断層間の相互作用の強さの指標になる。すなわち、 l が小さければ2断層はより接近していることと定性的には同等になる。よって、2つの断層面が非常に近い場合は $l \rightarrow 0$ 、遠い場合は $l \rightarrow \infty$ に対応する。断層面が互いに遠くなる極限では断層面間に働く相互作用は非常に弱くなり、それぞれの断層面はほぼ独立した $l \rightarrow \infty$ の Burridge-Knopoff モデルに近似される。今までの計算では $l=6$ を仮定したが、本節では、より小さな値3を仮定し、 l の違いによる効果を見る。大地震発生の時間変化についての計算結果を Fig. 8 に示す。この図においても、どちらかの断層で卓越的に大地震の活動が継続する期間の存在が観察される。しかし、Fig. 5 と Fig. 8 を比べると、このような卓越活動期間は、 $l=3$ の場合のほうがかなり短いことがわかる。これは、より頻繁に活動が断層間で移り変わることを意味

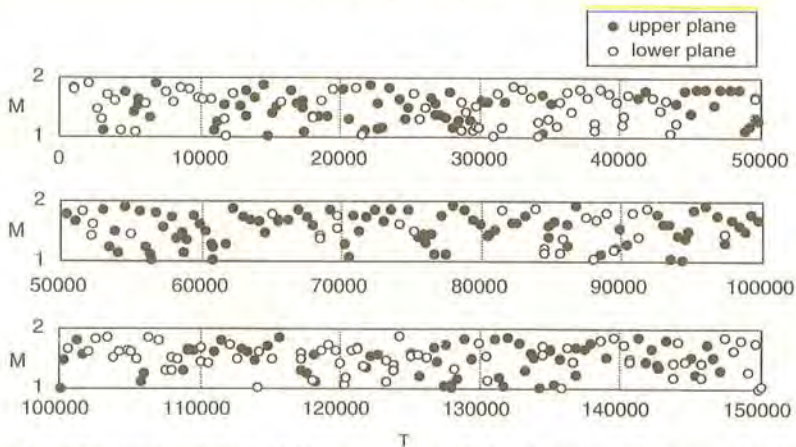


Fig. 8. Temporal variation of the occurrence of the characteristic events for $l=3$.

し、相互作用する断層群のなかのただ一つの断層のみに注目していれば、大地震の発生時期の予測は相互作用が強いとき、より困難であることを示唆する。

§5. おわりに

バネ-質点系の断層モデルを用いてシミュレーションを実行し、大地震の発生の断層間相互作用依存性について簡単な考察を行った。相互作用する平行2断層および孤立した1断層についてのシミュレーションにより、前者の場合、大地震の活動の断層間での乗り移りが起こりうるということがわかった。即ち、ある期間はどこか一方の断層のみで大地震が引き続いて起きるが、しばらくするとその活動は、他方の断層へ突然移る。

日本の内陸部などにおいては、大地震の再来時間はプレート境界地震に比べて長く、トレンチ調査が行われた活断層についても最近数回の活動履歴が解明されているにすぎない。しかし、本論文で示されたように大地震の再来が、しばらくの期間ほぼ周期的であったとしても、あるとき突然近隣の断層に活動が乗り移ることがありうる。従って、そのような場合、数少ないデータで将来の活動を予測するのは場合により危険であるということが言えよう。また、相互作用が強ければ、本論文において示されたように大地震活動の乗り移りはより頻繁となり、個々の断層上での大地震の繰り返しは複雑となる。相互作用が強い場合、大地震の再来特性を精度よく知るためには相互作用している断層群全体の挙動を評価する必要がある。しかし、何をもちて単一の相互作用系とみなすのかという実際の問題は残る。

謝 辞

東京大学地震研究所の宮武 隆氏と匿名査読者のコメ

ントは本論の改善に大いに役立ちました。記して感謝致します。

文 献

- BAK, P. and C. TANG, 1989, Earthquakes as a self-organized critical phenomenon, *J. Geophys. Res.*, **94**, 15,635–15,636.
- BURRIDGE, R. and L. KNOPOFF, 1967, Model and theoretical seismicity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **57**, 341–371.
- CARLSON, J. M. and J. S. LANGER, 1989, Properties of earthquakes generated by fault dynamics, *Phys. Rev. Lett.*, **62**, 2632–2635.
- CARLSON, J. M., J. S. LANGER, B. E. SHAW and C. TANG, 1991, Intrinsic properties of a Burridge-Knopoff model of an earthquake fault, *Phys. Rev. A*, **44**, 884–897.
- 三雲 健・安藤雅孝, 1975, 濃尾地震の解析的再現, *科学*, **45**, 50–58.
- 中田 高・蓬田 清, 1995, 地震断層から見た兵庫県南部地震, *科学*, **65**, 202–204.
- 大中康馨・山下輝夫, 1995, 地震はどう始まりどう終わるか, *科学*, **65**, 219–229.
- OHNAKA, M., Y. KUWAHARA and K. YAMAMOTO, 1987, Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagating slip zone during stick-slip shear failure, *Tectonophysics*, **144**, 109–125.
- RICE, J. R., 1993, Spatio-temporal complexity of slip on a fault, *J. Geophys. Res.*, **98**, 9885–9907.
- RUINA, A., 1983, Slip instability and state variable friction laws, *J. Geophys. Res.*, **88**, 10,359–10,370.
- SCHMITTBUHL, J., J. P. VILORTE and S. ROUX, 1996, A dissipation-based analysis of an earthquake fault model, *J. Geophys. Res.*, **101**, 27,741–27,764.
- TADA, T. and T. YAMASHITA, 1997, Boundary integral equation method for the analysis of 2D non-planar

- cracks, *Geophys. J. Int.*, **130**, 269–282.
- YAMASHITA, T., 1993, Application of fracture mechanics to the simulation of seismicity and recurrence of characteristic events on a fault, *J. Geophys. Res.*, **98**, 12,019–12,032.
- 山下輝夫, 1994, 震源の数理モデル, 「地震と断層」, 島崎, 松田編, 東京大学出版会, 105–124.
- YAMASHITA, T., 1995, Simulation of seismicity due to ruptures on non-coplanar interactive faults, *J. Geophys. Res.*, **100**, 8339–8350.