

断層間の力学的相互作用を考慮した地震活動のシミュレーション

橋 本 学*

Simulation of Seismic Activity with an Interacting Fault System Model

Manabu HASHIMOTO *

Abstract

We attempt to simulate the activity of earthquakes of moderate to large sizes in and around the Japanese islands using a block and fault model, in which slip deficit rates were derived from triangulation and trilateration data covering one-hundred years. The original block and fault model has 104 faults. However, the original fault size is too large to simulate moderate earthquakes. Therefore, we divide each modeled fault into 5×5 elements to generate earthquakes as small as $M5$. In total there are 2600 elements. We assume stress accumulates according to the estimated slip deficit rates. Interaction between fault elements is represented by changes in Coulomb Failure Function (hereafter CFF) induced by the movement of other faults that are determined by the geometrical relationship and the direction of slip deficit rates. When stress reaches the threshold level, accumulated CFF is released by a forward slip and redistributed to surrounding faults according to the CFF changes calculated above. If the redistribution of CFF induces the next rupture, the same process is repeated until there are no more rupturing elements. We assume rupture thresholds to be 2.5 MPa for interplate boundaries and 10 MPa for inland faults, respectively. We simulate seismicity for 10000 years with a time step of 1 year.

In this simulation large events that rupture almost all elements of a fault rarely occur. This suggests that strain rates derived from geological data or historical earthquake catalog might be underestimated. Simulated seismicity does not satisfactorily fit the Gutenberg-Richter's law, because moderate events occur more frequently than small or large events. This suggests that we have to incorporate heterogeneity in the rupture threshold or the size of elements on a fault plane. The correlation between interplate earthquakes along the Nankai trough and inland events in southwest Japan is not clear, but there seems to be a complementary relationship in activities between both regions. Migration of large events along the Nankai trough is occasionally seen in this simulation, but its direction is different from time to time.

Key words : earthquake generation simulation , mechanical interaction, CFF, block and fault model, long-range correlation

キーワード : 地震発生シミュレーション , 力学的相互作用 , CFF , ブロック・断層モデル , 長距離相関

* 京都大学防災研究所地震予知研究センター

* Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

I. はじめに

地震活動が広域にわたって活発化したり、遠く離れた地域で連鎖的に発生したりする（ように見える）例が報告されている（例えば、茂木，1994 など）。例えば、日本海東縁から神戸に至る地域では 1990 年代に地震活動が活発化し、連鎖的に地震が発生したとされている。また、西南日本ではプレート境界地震の発生に先駆けて内陸地震活動が活発化することが報告されている（例えば、Hori and Oike, 1996；堀，2002）。はたして、このような地震活動の長距離相関は偶然なのか？それとも物理的なメカニズムが隠されているのだろうか？一方、橋本（1998）などの単純な弾性体を仮定した計算によれば、南海トラフのプレート間カップリングによる応力は西南日本内陸まで、あまり長距離には伝わらないことが示されており、もし偶然でないとするならば地震活動の長距離相関を引き起こす未知のメカニズムがあるのかもしれない。

ところで、近年の複雑系の理論的・数値的な研究では、構成要素が相互作用するシステムにおいて、臨界状態に近い場合に現象の長距離相関が見られるとされている。Nicolis and Prigogine（1989）の言葉を借りると、「散逸系においては、平衡より遠く離れたところで、その系は長距離相関を持つ」とされる。ニコリス・プリゴジンが示した例は化学反応の例であるが、アナロジーとして地震現象に適用できるかどうか考察することは興味深い。ここでは、力学的なメカニズムの候補として、相互作用する断層系の自己組織化臨界現象を考え、地震活動の長距離相関が生じうるかどうか検討する。

地震発生に関連する歪速度の評価に、日本においては測地測量、歴史地震および活断層の 3 種類のデータが用いられているが、測地測量データから得られた歪速度は後者より 1 桁近く大きいことが指摘されている（例えば、池田，1996；石川・橋本，1999）。このような歪速度の差はなぜ生じるのだろうか？池田（1996）は、前者はプレート間地震による内陸の歪蓄積を見ており、後者は

歪蓄積・解放のサイクルを積分した結果であると考えている。しかし、実際の日本列島は池田のモデルにあるような二次元断面モデルでは表現できるものではなく、三次元モデルで検討する必要がある。

このための有力なアプローチとして、数値シミュレーションがある。本研究では、日本列島のプレート境界および活断層帯をモデル化し、測地データから推定したすべり欠損速度を用いて、地震活動のシミュレーションを試みる。

II. モデル

ここで使用するモデルは、Hashimoto（1998，2001）と基本的に同じである。すなわち、Hashimoto and Jackson（1993）のブロック断層モデル（ブロック数 19，断層数 104）を使用して、断層間相互作用を Coulomb Failure Function の変化量（以下 CFF）で表現し、時間発展法（例えば、Rundle，1988a，b；Ward，1996，2000）により、地震活動をシミュレートしようとするものである。ここで CFF とは、Coulomb の破壊基準に基づいた応力成分の変化量で、

$$\text{CFF} = \mu(\sigma_n - P) \quad (1)$$

で表される。ここで、 σ_n は想定する断層面の仮定したすべりに対応するせん断応力、 μ は内部摩擦係数、 σ_n は法線応力（断層面が閉じるセンスを正）、 P は間隙水圧である。本研究では、 $P = B \sigma_n / 3$ （ B は Skempton 係数）として、

$$\text{CFF} = \mu' \sigma_n \quad (2)$$

を用いる。

Hashimoto and Jackson（1993）は、約 80 年間の測地測量データをインバージョンすることにより、このブロックの運動速度や断層のすべり欠損速度を推定した（図 1）。ここでも、この断層系の形状とすべり欠損速度を用いる。なお、すべり欠損速度とは、地震間の断層の固着を、地震時のすべりと逆方向の仮想的なすべりとして表現したものである（例えば、橋本，1995）。

Hashimoto（1998）では、図 1 に示したモデル断層をそのまま使用して、地震活動のシミュレーションを行った。しかし、サイズの大きな断層全

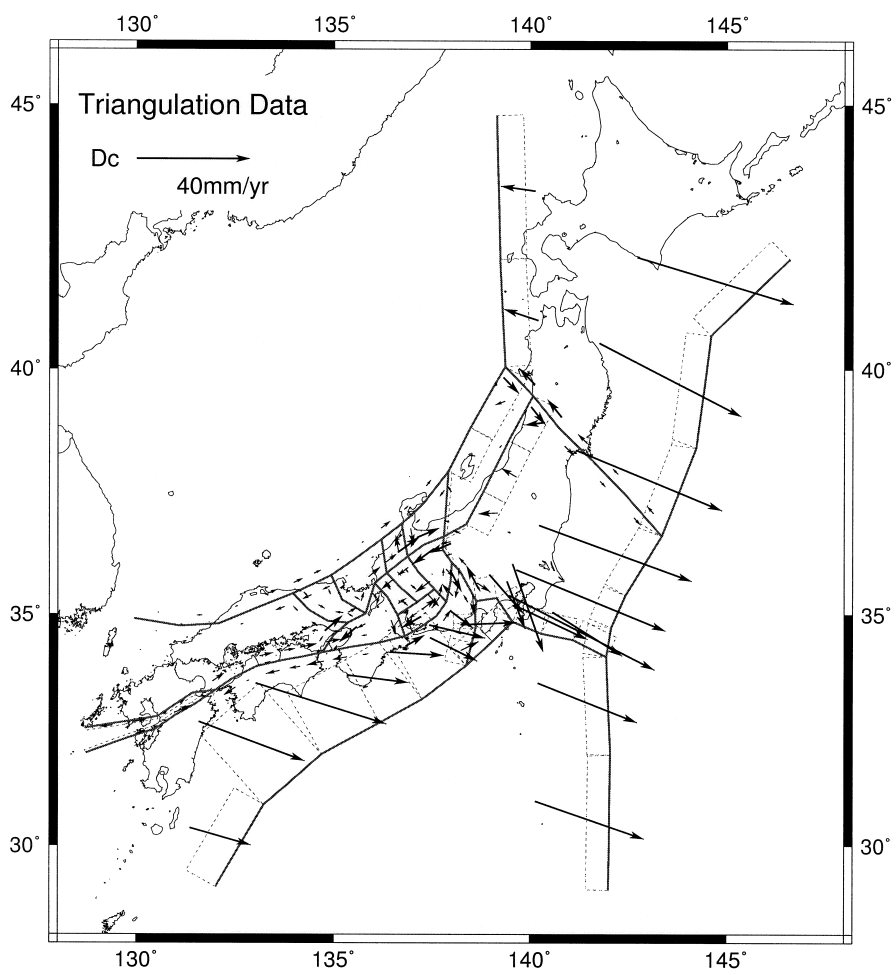


図 1 Hashimoto and Jackson (1993) のブロック 断層モデル .
矢印は推定された各断層のすべり欠損速度で、地震として解放された場合のすべり方向で描いている .

Fig. 1 A block and fault model from Hashimoto and Jackson (1993).
Arrows show slip deficit rates of faults derived from geodetic data. Their direction is the potential slip of coseismic movements.

体をひとつの要素としたため、全体が同時に破壊する大きな地震しかシミュレートできなかった。地震活動シミュレーションの結果の妥当性を検討する手段の一つは、Gutenberg-Richter 則が成立するかどうかを見ることである。このため Hashimoto (2001) は、断層を $2 \times 2 = 4$ 分割してシミュレーションを行った。これにより、ある程度規模の小さい地震が発生することになったが、

Gutenberg-Richter 則を再現できるまでにはいかなかった。そのため、本研究では規模の異なる断層を走向と傾斜方向に各々 5 分割 (計、 $5 \times 5 = 25$ 分割) した。これにより、最小の断層要素サイズは 4 km 前後となり、M5 クラスの地震まで再現することが可能となった。

モデルの媒質としては完全弾性体 (剛性率 $G = 40 \text{ GPa}$, ポアソン比 $= 0.25$) を仮定し、CFF

の評価に用いる内部摩擦係数 (μ') は 0.4 とした。

CFF は, Hashimoto and Jackson (1993) で推定されたすべり欠損と逆方向のすべりを促進するものとした。各断層を分割した要素に関するすべり欠損の方向と大きさは Hashimoto and Jackson (1993) の結果を用いた。なお, モデルの端の断層については, その応力変化の影響が小さいと考え, 特に拘束条件は課していない。

計算の手順は以下のとおりである。計算の始めに, 単位すべりに対する断層要素相互の CFF を, すべての断層要素の組み合わせについて求めておく。これは, 断層要素の傾斜, 走向およびすべり角により決まる。CFF の評価は, 分割された断層要素の中心で行う。各断層要素中心での初期値は, 0 から後述の破壊のしきい値の間でランダムに与える。なお, Hashimoto (2001) は断層サイズが大きいモデルについて初期値に 1 % の摂動を加えたケースによる計算結果との比較を行い, 初期値に対する依存性が大きいことを示しているが, 今回は一つの初期値のセットに対する結果を紹介する。次に, ある断層要素について, 単位時間ステップあたり, 先に推定した各断層要素の単位すべりによる CFF にそれぞれのすべり欠損速度を掛けた量を求め, すべての断層要素からの寄与の総和で CFF が蓄積していくものとする。蓄積した CFF が破壊のしきい値に達すると, 蓄積した CFF をすべて解放するようにフォワード・スリップを起こし, 解放された CFF はこの断層要素の単位すべりによる CFF にしたがって周辺の断層に再配分される。この結果, 応力が破壊のしきい値に達した断層要素が存在する場合には, その断層について応力解放・再配分を行い, すべての断層要素について応力が破壊のしきい値以下になるまで繰り返す。応力が破壊のしきい値を超える断層要素がなくなった場合, 時間ステップを進める。以上の過程を任意の時間まで繰り返す (図 2)。

破壊のしきい値として, 南海トラフなどのプレート境界断層については 2.5 MPa, 日本列島内陸の断層については 10.0 MPa を仮定した。これらの数値は, Hashimoto (1998) のモデルで採用した値の 5 倍である。Hashimoto (1998) の断層を

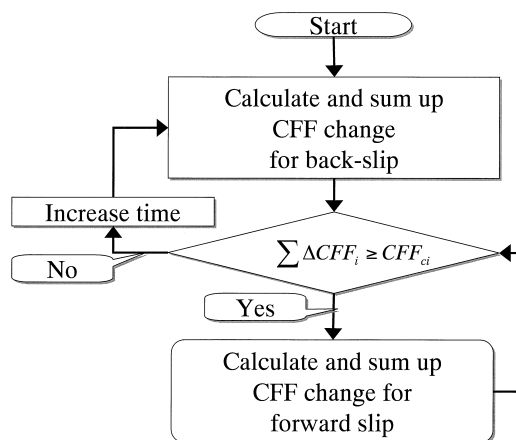


図 2 本シミュレーションにおける計算の流れ図。

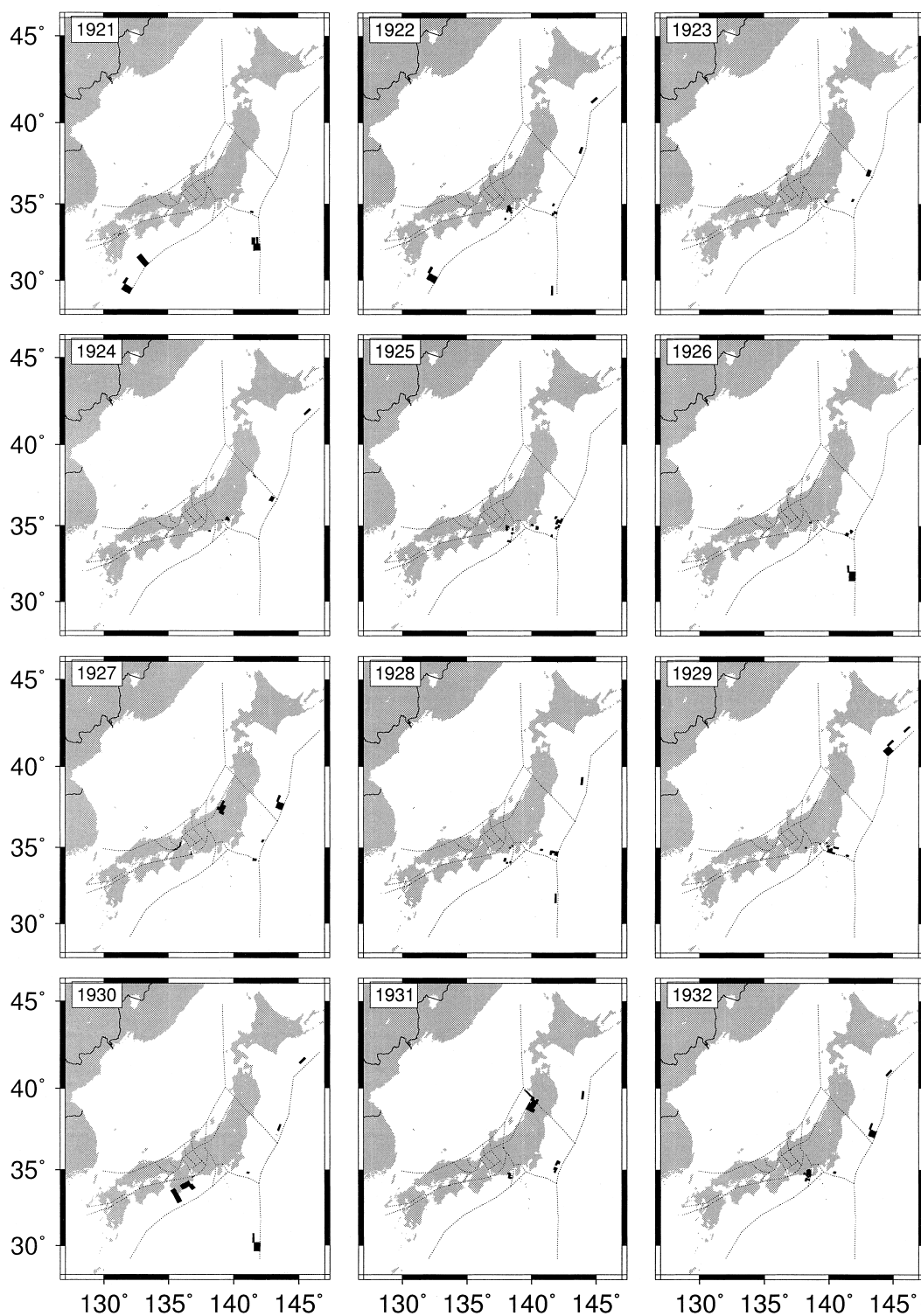
Fig. 2 A flow diagram of the present simulation.

分割しない場合にすべり量が観測と調和的な結果を与える値として, それぞれ 0.5 MPa と 2.0 MPa を採用したが, 断層が長さおよび幅方向に 5 分割されているので, 単位要素あたりの歪が 5 倍になることを考慮して, 上記の値を採用した。時間ステップは Hashimoto (1998, 2001) と同様 1 年とし, 任意の時点からの 10000 年間のシミュレーションを試みた。なお, 元の破壊のしきい値を用いた計算も参考のために行った。この場合, 計算時間の制限のため, 4000 年間のシミュレーションにとどまった。

III. 結 果

計算結果が大量に上るので, 日本列島全域の地震活動のスナップショットと, 西南日本内陸と南海トラフの地震活動の相関についてのみ結果を示す。

図 3 はシミュレートされた地震活動のスナップショットの一例で, 計算開始時点から 1921 年 ~ 1940 年までの 20 年間の活動である。黒い四角の領域が各年に破壊した断層要素を示す。日本周辺の各地で地震が発生する時期と, 逆に非常に不活発になる時期があることがわかる。この期間には, 1939 年に駿河・南海トラフの複数の断層が同年内に破壊するケースが見られる。しかし, 図には示していないが, 他の期間では, 破壊域が見かけ上



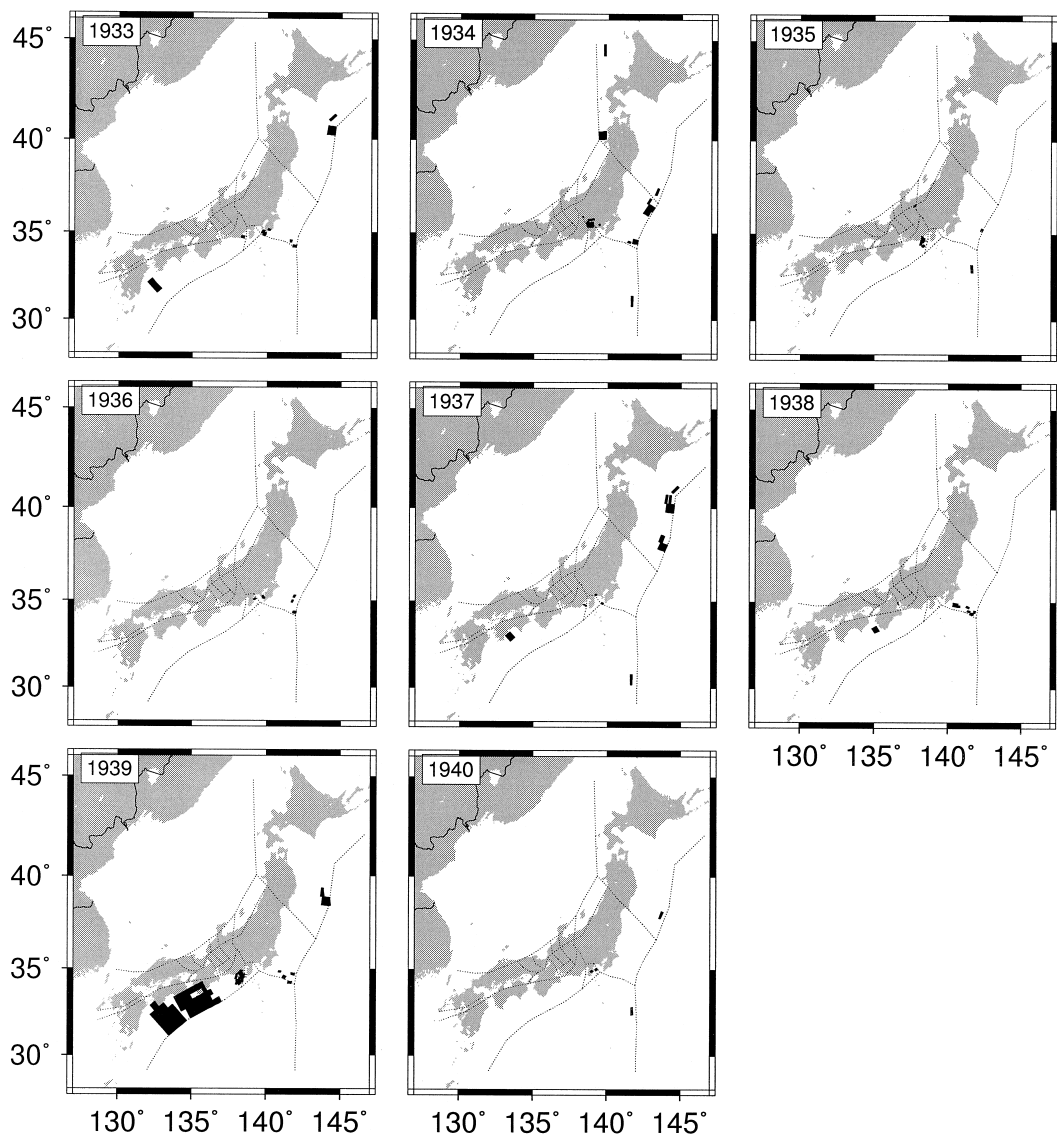


図 3 1921 年 ~ 1940 年間のシミュレートされた地震活動のスナップショット．
塗りつぶした矩形が破壊した断層要素を示す．

Fig. 3 Snapshots of simulated seismicity during 1921 ~ 1940.
Solid rectangles show ruptured fault elements in each year.

東あるいは西に移動するケースもあり，そのパターンは様々である。また，1927 年や 1934 年のように複数の $M7$ 級地震が内陸部で発生しているケースもあるが，大部分の期間では大きな地震の

発生が少ない。1927 年，1931 年および 1934 年の地震は，信濃川沿いから日本海東縁部に沿って，大地震が見かけ上南から北へ移動したように見える。

図4は、駿河・南海トラフ領域ならびにフォッサマグナより西、かつ中央構造線より北の西南日本内帯領域における断層要素の破壊個数の時間変化を示したものである。なお、ここでは時間ステップが1年であるので、1年間に同じ断層面上で複数の断層要素が破壊した場合は、駿河・南海トラフなどについては、これを一つの地震とみなして規模の大きい地震が発生したと考える。西南日本内帯については、上記の領域内で破壊した要素数の総和である。したがって、ある年の破壊個数が多くなることは、地震の規模にかかわらず、それぞれの地域で活発化したとみなせる。このように見ると、1939年駿河・南海トラフの規模の大きな地震（図4中の矢印）の前に、西南日本内帯では1927年の地震（図3の近畿地方のイベント、図4中の矢印）をはじめ、地震活動が活発化しているように見えるが、その他の期間では必ずしも明瞭ではない。

本モデル計算結果について、駿河・南海トラフと西南日本内陸の地震活動の関連性を定量的に調べるために、駿河・南海トラフと西南日本内帯の断層要素の同じ年毎の破壊個数をそれぞれ横軸と縦軸に取り、両者の相関を見た（図5）。ごく少数の例外を除いて各点の集合の上限を取ると、駿河・南海トラフで規模の大きい活動があるときは、内陸での活動が低い相補的な傾向が認められる。

なお、駿河・南海トラフの大地震の活動は、その再来間隔が50年以下になり、実際の観測より短い。破壊のしきい値を小さくしたモデルの場合、この再来間隔がさらに短くなる。一方、一つの地震のマグニチュードが図3～4に示した結果では、破壊面積に比べて大きくなる。なお、各イベントについて地震モーメントをすべり量と断層要素の面積から求め、同年内に同一断層で発生したイベントについて総和を取り、さらにマグニチュードに換算した。また、このモデルでは駿河トラフでの地震活動が高く、単独で発生する地震も多く、その再来間隔も短い。再来間隔やマグニチュードと破壊面積の関係を現実の観測に近づけるためには、しきい値とすべり欠損速度を調整する必要があることを示している。

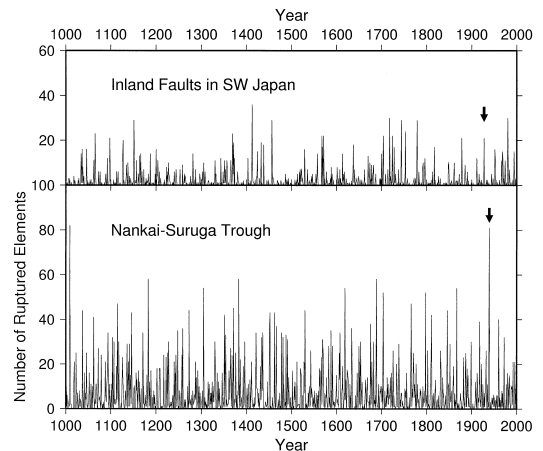


図4 駿河・南海トラフ沿いのプレート境界断層（下図）と西南日本内陸の断層帯全体（上図）での破壊した断層要素数の1000年～2000年間の時間変化。縦軸は個数。矢印は1927年（近畿地方）と1939年（南海トラフ）のイベントを示す。

Fig. 4 Temporal variation in the numbers of ruptured fault elements simulated for the period 1000 ~ 2000: (Upper) All inland faults in southwestern Japan, and (Lower) interplate boundaries along the Suruga and Nankai troughs. The ordinate shows the number. Arrows indicate events in the Kinki area in 1927 and along the Nankai trough in 1939.

また、図4で示した西南日本内帯における地震活動には、フォッサマグナより西で中央構造線より北の合計44のモデル断層（総要素数1100）において破壊した要素数を示している。ところが、同年内に破壊した要素数は最大で約30であり、この領域内の全断層要素のわずか40分の1程度しか破壊していない。すなわち、一つの断層面全域を同時に破壊する地震が非常に少ないことを示している。このことは、特定の断層面全域を破壊するような地震で評価した歪速度は過小評価している可能性を示唆している。

Gutenberg-Richter 則が成り立っているかどうかを確かめるため、地震モーメント 累積頻度分布を求めた（図6）。この結果を見ると、大きな地震の発生頻度がやや少なく、また $M6$ 以下の中規模の地震も少ないので、Gutenberg-Richter 則が必

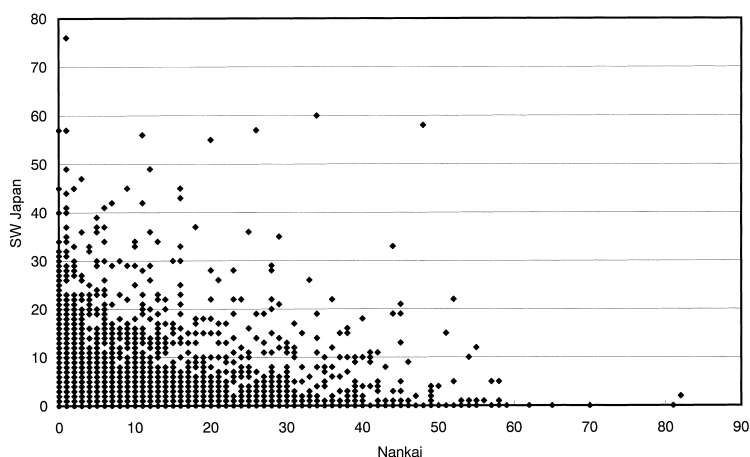


図 5 図 4 の駿河・南海トラフと西南日本における断層要素の破壊個数の相関。

Fig. 5 Correlation between the number of simulated events along the Suruga and Nankai troughs and along inland faults in Fig. 4.

ずしも成り立っていない。ただし、一つの断層で同年内に破壊した断層要素すべてについて総和を取って一つの地震とし、これのモーメントを表示している。そのため、隣接しない複数の断層要素が破壊する地震があった場合、本来別の地震として数えるべきものが一つの地震として数えられているため、小さい地震を過小評価している可能性があることに留意する必要がある。大きい地震については、駿河・南海トラフ沿いでは 1939 年の地震が最大級であり、今回の 10000 年間のシミュレーションではプレート境界断層を構成するすべての断層要素が同時に破壊する地震はない。内陸の断層についても同様である。

IV. 議 論

今回のシミュレーションにより、断層間の相互作用を考慮することにより複雑な地震活動のパターンが生じることがあらためて確認された。特に、全国的な地震活動の同時活発化や静穏化、駿河・南海トラフ沿いの地震が移動したりするような例が見られた。しかしながら、これらの現象は常に同じパターンでないことに注意が必要である。地震活動の長距離相関については、全国的な地震活動の同時活発化や静穏化が見られた。また、駿

河・南海トラフの活動と西南日本内陸の地震活動との関係についても、時期によって後者が先行するケースもあり、このような相互作用する系では様々な活動パターンが生じうることを示唆している。

一方で、断層の要素サイズを小さくしたことにより、大きな地震が起こりにくくなった。これは Hashimoto (2001) でも指摘したが、今回さらにその傾向が強くなり、Gutenberg-Richter 則に必ずしも適合しないことが明らかになった。今回のシミュレーションでは、各断層面で破壊のしきい値を一定と仮定しているが、実際の観測では断層面上に一定の大きさのアスペリティがあり（例えば、山中・菊地, 2001）、それが繰り返し破壊することが認められつつある。そのため、不均一な強度分布、アスペリティのサイズなどを考慮したモデル化が今後の検討課題の一つである。

さらに、地震の再来間隔や破壊面積とマグニチュードの関係を妥当な範囲に得るためには、破壊のしきい値やすべり欠損速度を調整する必要がある。現実には、プレート境界においてはスローイベントなどの高速度の破壊を伴わないすべり現象が発生している（例えば、川崎ほか, 1998; Hirose *et al.*, 1999; 小沢ほか, 2001）。地域に

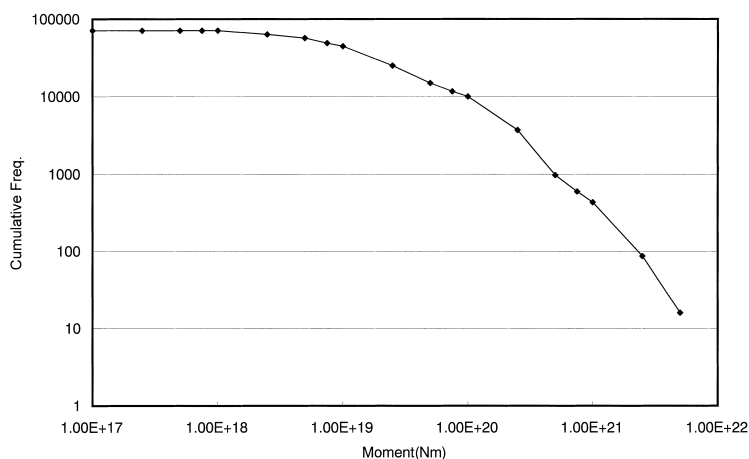


図 6 シミュレートされた地震のモーメント別累積頻度分布。

Fig. 6 Frequency distribution of cumulative number of simulated events against their moments.

よっては、プレート間カップリングのかなりの部分がこのようなスローイベントなどによって解消されていると考えられる。しかし、現在のモデルでは単純な破壊基準を用いているためにこのような運動の効果を評価できないので、これをできるだけ正確にモデルに取り込む必要がある。破壊の取り扱いについては、すでに Ward (1996, 2000) が、動的な破壊も取り込んでシミュレーションを行っている。摩擦の構成則の導入を含め、今後の大きな課題である。

今回、すべり欠損速度には測地歪速度から推定したものをを用いた。しかし、現実の地震の再来間隔や破壊面積とマグニチュードの関係を再現できていないことは、測地歪速度のすべてが実際の弾性エネルギーとして蓄積されているのではないことを示唆する。この割合の評価は、地震発生の長期予測に測地データを活用する場合に決定的な役割を果たすと考えられる。粘弾性などのレオロジーを仮定したモデル計算も必要であるが、このような弾性体のモデルですべり欠損速度を調整して現実の観測に合わせることで、この割合を評価することも可能であろう。もちろん、今回用いた断層系モデルについても議論の余地がある。

現実の地球を実験室内に再現することが不可能

である以上、シミュレーション研究は今後地震発生メカニズム研究のための強力な手段となることは間違いない。特に、多くの要素が複雑に絡み合う地震現象においては、それぞれの要素を取り出して、その影響を評価できるという利点がある。さらに、複数の要素が組み合わさることにより新しい現象が生じることもあり、これを確かめられるのがシミュレーション研究の最大の特徴であろう。最終的には、現在の気象における数値予報モデルのように、地殻活動を予測できるモデルの開発が目標となる。また、非専門家が地震科学への理解を深めるためのツールとしても、活用できることが期待される。アメリカでは、前述の Ward (1996, 2000) による“Standard Physical Earthquake Model”などと呼ばれるモデルによる研究が進められており、カリフォルニアの地震活動の特徴をかなり再現できるようになりつつある。日本では、「地球シミュレータ計画」による研究が進行中であり、不均質構造や粘弾性も扱える有限要素コードが開発されている。今後、これらの成果も参考にして、シミュレーション研究を進めたい。

V. まとめ

測地データに基づく日本列島のブロック 断層

モデルを用いて、地震活動のシミュレーションを行った。特に、断層を25分割したことにより、シミュレートされた地震活動に下記のような特徴が現れた。

- (1) 断層面全体を同時に破壊する地震はまれである。
- (2) 中規模地震の頻度が高く、そのため Gutenberg-Richter 則を必ずしも満たさない。
- (3) 駿河・南海トラフの大地震と西南日本内陸の地震活動の間には、相補的な関係が認められる。
- (4) 駿河・南海トラフ沿いの大地震の発生域が時間とともに空間を移動する現象が見られるが、その移動方向は活動時期により異なる。

謝 辞

平原和朗氏ならびに匿名の査読者から有益なコメントを頂いたことに感謝いたします。本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)10640407および科学技術振興調査費総合研究「高精度の地球変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」により実施された。図の作成には GMT3.3 (Wessel and Smith, 1998) を使用した。

文 献

- 橋本 学 (1995) 測地データのインバージョン：地殻変動の運動学的な解釈。地学雑誌, **104**, 1032-1046.
- 橋本 学 (1998) 兵庫県南部地震震源域におけるクーロン破壊関数の時間変化のシミュレーション。地震2, **50** 別冊, 229-249.
- Hashimoto, M. (1998) Simulation of activity of large earthquakes in and around southwest Japan on the basis of back-slip model. *Ann. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, **41**, 45-59.
- Hashimoto, M. (2001) Complexity in the recurrence of large earthquakes in southwest Japan: A simulation with an interacting fault system model. *Earth Planets and Space*, **52**, 249-259.
- Hashimoto, M. and Jackson, D. D. (1993) Plate tectonics and crustal deformation around the Japanese islands. *J. Geophys. Res.*, **92**, 16149-16166.
- Hirose, H., Hirahara, K., Kimata, F., Fujii, N. and

- Miyazaki, S. (1999) A slow thrust slip event following the two 1996 Hyuganada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3233-3236.
- 堀 高峰 (2002) 巨大地震発生域周辺の地震活動に見られる静穏期から活動期への移り変わり。地学雑誌, **111**, 192-199.
- Hori, T. and Oike, K. (1996) A statistical model of temporal variation of seismicity in the Inner Zone of Southwest Japan related to the great interplate earthquakes along the Nankai trough. *J. Phys. Earth*, **44**, 349-356.
- 池田安隆 (1996) 活断層研究と日本列島の現在のテクトニクス。活断層研究, **15**, 93-96.
- 石川典彦・橋本 学 (1999) 測地測量により求めた日本の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度()。地震2, **52**, 299-315.
- 川崎一朗・浅井康広・田村良明 (1998) 三陸沖におけるプレート間モーメント解放の時空間分布とサイスモ・ジオデティック・カップリング 中・長期予測の基礎。地震2, **50** 別冊, 293-307.
- 茂木清夫 (1994) 1993年北海道南西沖地震前の地震活動の特徴。地震予知連絡会会報, **51**, 30-36.
- Nicolis, G. and Prigogine, I. (1989) *Exploring Complexity an Introduction*. R. Piper GmbH & Co. KG Verlag. ニコリス, G.・プリゴジン, I. 共著, 安孫子誠也・北原和夫共訳 (1993) 複雑性の探求。みすず書房。
- 小沢慎三郎・村上 亮・海津 優・鷺谷 威・矢来博司・西村卓也・多田 堯 (2001) 2001年から見られる東海地方の異常地殻変動。日本地震学会講演予稿集 2001年度秋季大会, C02.
- Rundle, J. (1988a) A physical model for earthquake 1. Fluctuations and interactions. *J. Geophys. Res.*, **93**, 6255-6274.
- Rundle, J. (1988b) A physical model for earthquake 2. Application to southern California. *J. Geophys. Res.*, **93**, 6255-6274.
- Ward, S. N. (1996) A synthetic seismicity model for southern California: Cycles, probabilities, and hazard. *J. Geophys. Res.*, **101**, 22393-22418.
- Ward, S. N. (2000) San Francisco Bay area earthquake simulations: A step toward a standard physical earthquake model. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **90**, 370-386.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998) New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans, AGU*, **79**, 579.
- 山中佳子・菊地正幸 (2001) 日本付近のアスベリティマップ 東北編。地球惑星科学関連学会 2001年合同大会予稿集, Sy 005.

(2002年1月8日受付, 2002年2月25日受理)