

## 巨大地震の問題

David D. Jackson<sup>1)</sup> (訳: 佐竹健治<sup>2)</sup>)

将来の地震の限界マグニチュードは、活断層や断層セグメントの長さから推定可能だとされている。これは、マグニチュードと断層の長さ(または面積)との経験式に基づくのだが、地震学的な観測事実や他の妥当な仮定とは矛盾する。例えば、地震モーメント収支が一定(訳者注)という仮定や地震の発生が定常的という仮定と矛盾するのだ。マグニチュードが断層の長さによって決まるとすると、地形・地質学的に観測される地震モーメント率から予測される地震の数は、多くの地域で実際の歴史地震データが示すよりも大きくなってしまふ。

この矛盾は、まれに発生する巨大地震(モーメントマグニチュードが8以上)を考えることによって解決できる。マグニチュード8の地震1個でマグニチュード7の地震約30個分のモーメントを解放するので、普通の大地震の数を増やさずにモーメント解放率を大きくできるのだ。1つの巨大地震による被害は、質的には異なるであろうが、量的にはむしろ、多数の大地震による被害の合計より小さいかもしれない。巨大地震の発生頻度は、地震災害研究におけるもっとも重要な未知数の1つである。中規模~大地震の発生率や、深刻な被害の確率はこれによって決まるからだ。

### 3つの仮定

ふつう、明確には書かれていなくても、地震モーメント収支は一定であると仮定される。地質学的に測られる変位速度と地震時の平均変位量とから、地震の平均繰り返し間隔を推定することが多い。

このとき、断層はセグメントに分かれており、そこで繰り返す地震の変位量はほぼ一定であるとする。変位量は断層セグメント上での平均値とみなされているので、このモデルは地震モーメント収支が一定であることを暗に示している。発生時予測可能モデルでは、前回の地震の変位量と断層の累積変位量とから、次の地震までの時間を予測する。ここでも地震モーメント収支が一定であると暗に仮定している。これらに比べてずっとゆるい仮定は、非常に長期間にわたって、また断層の長さ方向及び弾性的厚さ全体にわたって、地震時の変位量は一定で、それは断層の平均変位速度と経過時間との積に等しい、というものだ。地震モーメント収支が一定であることは、カリフォルニア地震発生確率のワーキンググループ報告(1988, 1990)において暗に仮定されており、同グループの1995年の報告では仮定であることが明確にされている。

将来の地震発生率が過去の発生率から推定できるという仮定も、モーメント収支一定の仮定よりは弱そうに見えるが、広く受け入れられている。多くの影響力のある被害研究、例えば1982年のAlgermissenらによる報告などは、定常性を仮定している。もちろん、地震発生率は観測期間によって変わるのだが、それはランダム過程では当たり前のことだ。従って、観測される地震活動に時間変動があるからといって、地震発生の基になる過程にも時間変化があるとは限らない。

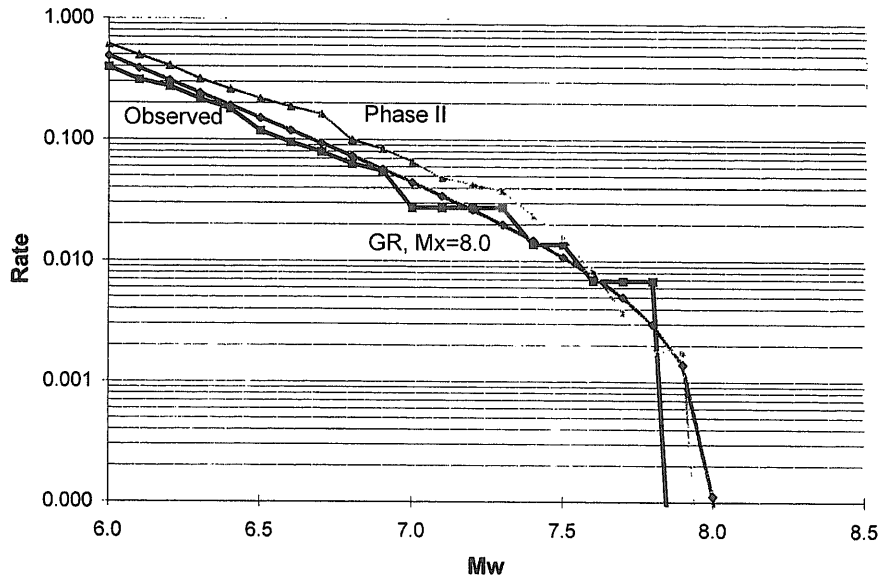
地震のマグニチュードは断層やセグメントの長さによって決まるという仮定は、マグニチュードが大きくなるにつれて地表地震断層や余震域の長さも

1) カリフォルニア大学ロスアンゼルス校  
University of California, Los Angeles (UCLA):  
Los Angeles, CA 90095-1567 U.S.A.

2) 地質調査所 地震地質部

キーワード: 地震, マグニチュード, 地震モーメント, 固有地震, 活断層

## Southern California 1850-1996



第1図 南カリフォルニアにおける地震の規模(マグニチュード)別頻度分布。「Observed」は過去1世紀半に実際に発生した地震を、「Phase II」はカリフォルニア地震発生確率ワーキンググループの1995年報告の計算値を、「GR,  $M_x=8.0$ 」はグーテンベルグ・リヒターの関係式で最大地震を $M=8$ として計算したものを表す。固有地震モデルに基づいて計算した「Phase II」は、 $M=7.5$ 以下の地震の頻度が実測よりも多く、その差は特に $M=6.5\sim 7.0$ の範囲で著しい。 $M=8$ の巨大地震まで含めれば、グーテンベルグ・リヒターの関係式で観測データを説明できる。

大きくなるという経験則に基づく。この経験則は、マグニチュード・断層長さ・断層面積の関係式を最小二乗法、最尤法、その他の最適化法によって求めることで、定量化される。この関係式を使えば、将来の地震は個々のセグメント内で発生するとして、調査された断層やセグメントの長さから将来の地震のマグニチュードを推定できる。

## 固有地震モデルの抱える矛盾

上に述べた3つの仮定に基づいて、プレートテクトニクスや断層の変位速度からモーメント率を推定し、実際の中規模～大地震の発生率と比べると、それらは一致しない。これは、3つの仮定のうちのどれかが間違っているか、地震や変位速度のデータが大きく誤っているためであろう。この矛盾が特にはっきりするのは、個別の断層における地震発生頻度を見積もるのに固有地震モデルを用いるときだ。ここでいう固有地震モデルとは、ある断層セグメントにおいて、変位または地震モーメントは、毎回同じ程度の大きさの地震によって解放される、と

いうものである。このとき、固有地震の発生頻度は、断層の変位速度と固有地震時の変位量との比として簡単に計算できる。UCLA(カリフォルニア大学ロサンゼルス校)において同僚のYan Kaganとともにやってきた研究の結果、上のようにして計算した発生率の合計は、観測される地震の発生率よりも大きく、その差は、固有地震のマグニチュード付近で2倍から5倍もあった。このことは、環太平洋全域、カリフォルニア州全域、そして南カリフォルニアの3地域において、各地域の地震カタログに応じた期間について、確認できた(第1図)。1995年のDolanらの研究は、ロサンゼルス付近のトランスバースレンジ中央部において、似た結論を得ている。すなわち、1994年のノースリッジ地震が固有地震であったとすると、地震発生率の予測値が観測値よりもずっと大きくなる、というものだ。

カリフォルニアの結果については、地震発生率が時間とともに変化する、つまり、定常性の仮定を破棄することで説明できるかもしれない。じじつ、観測された地震の数が予測されたものより少ないことを表す「地震欠損」という新たな地震学用語が

生まれた。個々の例にみられる地震欠損を発生率の時間的な変化で説明するのは可能だが、環太平洋全域の場合には、非常な偶然を必要とする。カリフォルニア州全域が過去1世紀半にわたって地震の静穏期であったとしても、環太平洋全域がそうであったと言えるだろうか？

たしかに、これらの予測の細かい点には誤差が入り込んでいる可能性がある。例えば、固有マグニチュードが過小評価されていて、固有地震の発生頻度は過大評価されているかもしれない。主要な断層について、変位速度が大きく見積もられ過ぎているかもしれない。観測と予測の不一致をこれらの影響で説明することは、いくつかの断層については可能であろうが、広い地域にわたって予測値が大きすぎることを説明するのは困難だ。別の要因として、実際にはいろんな規模の地震がモーメント解放率に寄与しているのに、固有地震モデルが形式的に適用されているためとも考えられる。だが、多くの研究では、真の固有地震モデルではなく、グーテンベルグ・リヒターのマグニチュード分布の頭を切ったものが使われている。累積頻度分布の頭を切ったものもあれば、密度分布で切ったものもある。固有マグニチュード付近で切ると、そこでの発生率は、固有地震モデルとよく似たものとなる。地震モーメントはマグニチュードが大きくなると急速に大きくなるので、小・中規模地震はモーメントにほとんど寄与しないからだ。別の言い方をすれば、小さい地震を繰り返しモデルに含めても、非常に大きい地震が関与しない限り、発生率の予測はほとんど変わらないのだ。

地震モーメント収支のつりあいはリソスフェアの地震発生域のみで仮定されており、それより深いところではモーメントは非地震的にのみ解放される。もし、この深さを大きく見積もり過ぎたならば、モーメントの蓄積率をも大きく見積もることになり、固有地震の規模も過大評価することになるだろう。もしそうならば、地震発生域の厚さを小さくしてやれば、地震発生率の不一致をなくすることができるはずだ。ところが、この説明は固有地震モデルとは相容れない。なぜならほとんどの断層セグメントにおいて、実際に観測される地震のマグニチュードは、従来の仮定どおりの断層の長さ・変位量・弾性的厚さから期待されるマグニチュードとよく合ってい

るからだ。あるいは、震源断層における変位の一部分は非地震的に起きているのかもしれない。しかし、もしそうならば、ほとんどの地震断層でクリープ（非地震すべり）が観測されなければならない。たしかに、クリープというものは、特に断層の形状が明らかでない場合、我々の観測よりもずっと大規模に発生しているかもしれない。しかし、幾つかの重要な断層については、測地学的研究によって上限が押さえられているので、拡がったクリープによって大きなモーメントが解放されているとは考えにくい。

### 巨大地震の必要性

これらの矛盾を解決するには、地震の規模は活断層や断層セグメントの長さによって決まるのではない、とするのがよさそうだ。地震モーメント収支は一定に保たれるが、それはめったに起きない巨大地震によって保たれるのだ。そういう巨大地震は、サンアンドレアス断層のような長大な断層だけでなく、もっと短い断層でも発生しなければならないことに注意しよう。さもないと、短い断層では、地震カタログが示すよりもずっと多くの中規模地震が起きなければならない。この仮説によれば、実測による地震カタログは、あるマグニチュード上限（例えば5個以上の地震が起きているようなマグニチュード）までの地震発生率を表すことができる。ほとんどの地域では、地震カタログ上の発生率はグーテンベルグ・リヒターの関係式とよく一致する。グーテンベルグ・リヒターの関係式を、これまでに発生したことのないような大きな地震へ外挿すると、地質学的に観測されたモーメント率も説明できるのだ。その結果、モーメント率を説明するのに必要な最大マグニチュードは非常に大きなもの、普通は8から9になる。実際の数字は仮定したマグニチュード分布によって変わるが、それが何であれ、繰り返し間隔が数千年のオーダーであるような巨大地震が必要となる。

次のような反論がすぐに出てくるだろう。地震の大きさと断層長さとの経験式によれば、マグニチュード8の地震は断層の長さが500kmかそれ以上、平均変位量は10m近くあるはずだ。「そんな大きい地震をどこで起こすのだ？」という質問をよく聞く。

たしかに、調査された活断層セグメントのほとんどは500kmよりもずっと短い。しかしながら、回帰式から予想されるものによって地震の大きさが制限されるはずだという考えは、いかにも論拠が弱い。回帰式とは、ある長さの断層に対しての平均マグニチュードを与える(あるいはその逆)のものであって、巨大地震のように極端な場合の答えを与えるものではない。大きな地震はまれにしか起きないので、マグニチュードの大きな方では回帰式はほんのわずかなデータに基づいている。回帰式についてのいちばんの問題は、地震が起きた後で断層の長さを決め、それを使っていることだ。このような断層の長さは、特に超巨大地震については、地震前に予測されていたはずのものよりずっと大きいかもしれない。断層の端が知られていても、その標識を無視して破壊が進行した地震の例が最近いくつもある。カリフォルニアでは、1952年カーン郡地震(モーメントマグニチュード7.5)が起きた断層は、この地震以前にははっきりとは知られておらず、現在の調査手法を使ったとしても、こんなに大きな地震が起きるとは予測できなかったであろう。1992年のランダース地震は、それまでの調査では別々であるとされていた幾つかの断層をつなぎ、それらのどれから予測されるよりも大きい規模であった。1957年のゴビ・アルタイ地震はマグニチュードが8以上であったが、30kmも離れている横ずれ断層と縦ずれ断層の両方を破壊したようだ。これらの例から、地震は既存の線状に連続した断層セグメントに収まらない、ということがわかる。地震というものは、既存の断層を延ばしたり、全く新しい断層をつくりだすことができるのだ。今日存在する断層は、過去につくりだされ、延ばされたものなのだから。

いくつかの巨大地震がサンアンドレアス断層で発生している。これは予期されていたことであろうが、巨大地震がニューマドリッドでも発生したことは断

層のセグメンテーションからは予測が不可能であったろう。ニューマドリッドで巨大地震が起きるのなら、どうして他の地震発生域で起きないのか? もし巨大地震はどこでも起きるとすると、これは地震災害予測や、地震をプレートテクトニクスや地形的変形と関係づける科学的なモデルにとって非常に重要なことだ。マグニチュード8クラスの地震が、ロスアンジェルス、サンフランシスコ、シアトル、ソルトレークシティ、デンバーなどの大都市地域で発生すれば、空前の被害が発生し、我々の生活基盤のハード・ソフト両面の破滅をもたらすであろう。被害額は何兆ドルにも上るかもしれない。しかし、皮肉なことではあるが、少なくとも一部の人にとっての朗報は、巨大地震の確率が低いことだ。巨大な地震は非常にまれな現象なので、その発生可能性は非常に低いことを考慮して、被害ポテンシャルを見積もる必要がある。さらに、この巨大地震が、多くの中規模~大地震の発生を防いでいるのかもしれないのだ。

この記事は、米国地震学会ニュースレター67巻第1号(1996年)に掲載された記事を、著者及び米国地震学会の承諾を得て和訳したものである。原題は以下の通りである。

---

David D. JACKSON (1996) : Case for Huge Earthquakes, Seismological Research Letters, Volume 67, Number 1, 3-5. (transl. : SATAKE Kenji)

---

<受付: 1998年2月9日>

(訳者注) 一般に、地震モーメントはテクトニックな変形によって蓄えられ、地震および非地震すべりとして消費される。カリフォルニアでは、一部の地域を除けば地震発生域(深さ12km以浅)での非地震すべりはほとんどないと考えられているので、テクトニックな変形と地震によるモーメントの収支は一定であると仮定される。