予知への新しい手がかり
地震連鎖のメカニズム

1つの大地震をきっかけに地震が連鎖して発生する
こんな新発見によって地震学の常識が変わりつつある
カギを握るのは断層にかかる応力だ
それが別の断層に飛び火して新たな地震を引き起こすのだ

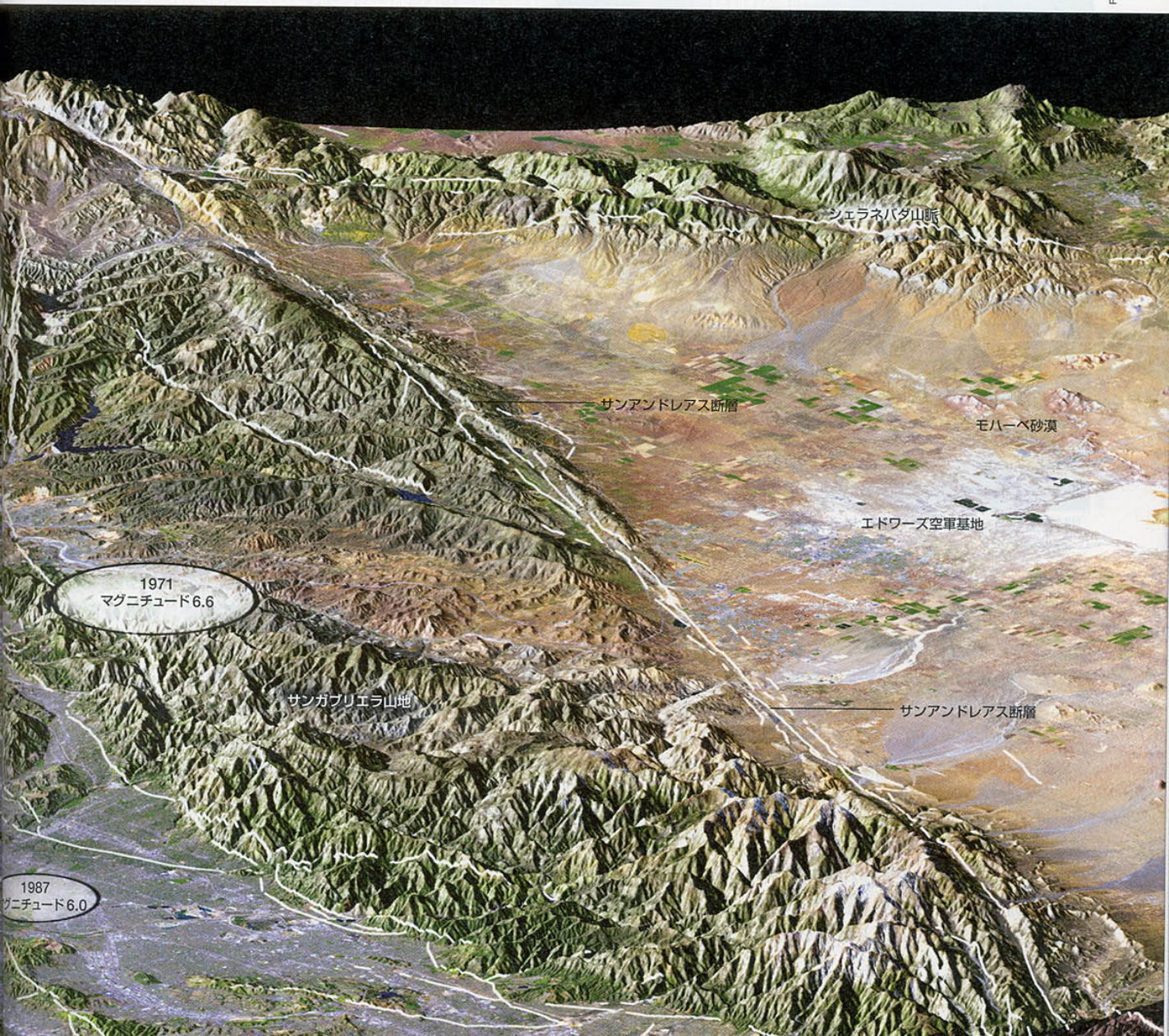
R. S. スタイン（米国地質調査所）

網の目状に伸びる断層　1300万の人々が住むロサンゼルス市内やその周辺には，サンアンドレアス断層など地震が多発している断層（図中の白線）があり，それらが網の目状に複雑に入り組んでいる。1850年以来，この地域を襲った大地震（楕円）が，それに続いて起こった地震の位置や時期に影響を及ぼしていた。こう考える科学者もいる。

次の大規模地震は世界のどこでいつ起こるのか――。それを予知することは地震研究者にとって長年の夢だった。1990年代初めまでは，地震の原因となる断層運動は非常に複雑であり，史上最大級の地震でも何の前ぶれもなくいきなり発生し，予測はできないと結論づけるしかなかった。大地震が起こり，それに続く余震が収まれば，一般に数百年から数千年かけて地殻に応力が蓄積するまで，断層は静穏化した状態を保つ。多くの地震学者は今でもそう考えている。

しかし，最新の発見によってこの前提が覆り始めている。従来の予想と違って，地震は相互に影響し合っているというのだ。いったん大地震が起こると蓄積した応力が解放されるため，次の大地震が発生する確率は低くなると考えられている。これに対して新説では，震源となった断層の別の場所や近くの断層で，地震発生確率が実際には3倍に高まることもある。救助部隊を配置したり保険料を設定したりする必要に迫られたとき，被害を受けやすい場所はどこかを見定めるうえで，こうした精度の高い予測は欠かせなくなるだろう。

この新しい仮説は「ストレストリガリング（応力誘発）説」と呼ばれる。その核心にあるのは，隣接する断層の変動や地震動によって生じるわずかな応力の変化に，意外にも断層は敏感に反応するという新たな事実だ。これまでの地震記録や断層運動に関する計算結果から，次のようなことがわかった。地震によって解放される応力は消えてしまうわけではなく，震源断層から周辺の地域に再分配され，その後も集積



ROBERT E. CRIPPEN Jet Propulsion Laboratory

したままとなるのだ。

こうした応力の急激な増加によって，次の地震が起こりやすくなる。さらに1992年から20あまりの断層を調べた結果，自動車タイヤを膨らませるのに必要な空気圧の1/8ほどの応力が増えただけでも，地震が誘発される可能性があると考えられるようになった。

これまでは，大地震の間にこうした微妙な相関関係が存在するとは誰も考えておらず，地震予知に役立てようという発想もなかった。だから，新たな地震予知の手法として受け入れることに懐疑的な科学者が多かったのも無理はない。しかし，カリフォルニア州や日本，トルコで，大地震の後に続いて起こった地震の発生地点やその頻度をうまく説明できたことから，応力誘発説への信頼が高まっている。

地震災害に対して精度の高い警報を発信したい――。この願いを実現するために，私たちは地震の相互作用の解明に取り組んでいる。

無視されてきた余震

大地震はランダムに起こるという誰もが支持している理論を覆すのは，困難を極めた。それは，多くの科学者が世界中の地震活動から予知に使える規則性を見つけようと30年以上も調査してきたのに，成果が出ていないことからも明らかだ。微小地震の発生頻度の変化を調べたり，肉眼では見えないような地殻の傾きや伸び，移動を高感度の計器を使って測定したり，地下のガスや水，電磁波を追跡したり，岩盤の小さな裂け目が大地震の直前に開閉しないかを観察したり……。だがいくら調べても，これらの事柄は地震によってさまざまで，一貫した傾向は見られなかった。

だが古い記録を調べると，世界各地で記録された地震の約1/3は時間的にも空間的にも集中して発生している。これらは一般的に余震と呼ばれる。本来，余震は最初に起こった大地震（本震）の震源断層に沿って発生すると考えられてきた。大森房吉（おおもり・ふさきち）が1894年（明治27年）の濃尾地震で初めて余震を観測し，「余震の大森公式」と呼ばれる基本法則を見い出した（編集部注：大森は縦波と横波の到着時間差から震源までの距離を求める「震源距離の大森公式」も考案している）。それによると，時間の経過に伴う余震発生回数の変化には一定のパターンがある。余震は本震の直後に最も多く発生し，10日後にその10％，100日後には1％に減るといった具合だ。

このように余震発生回数の急激な増減が予測できることから，最初の地震によって地殻は地震を続発させやすい状態に変わったといえる。これは地震は時間的にランダムに発生するという考え方と相いれない。しかし，科学者が予測したいと望む大地震と比べて余震は一般的に規模が小さいため，地震活動の秘密を解くカギだとはみなされなかった。

地震記録から余震を取り除くと，残りは一見するとランダムに発生しているように見えてしまう。だが，余震を無視するような考え方では，残りの地震がランダムだとも言い切れないだろう。そこで，私たちはどうして余震の発生が規則的なのか，その理由を追究することにした。

存在した規則性

まず，最初に世界有数の地震発生地帯を調査した。カリフォルニア州を縦断するサンアンドレアス断層だ。この地域の地震や余震の記録を調べると，マグニチュード（M）7.3の地震発生後24時間以内に半径100km圏内で大地震が起こる確率は67％になることがわかった。これは通常（大地震が起こらなかった日）と比べると2万倍も大きい。最初の大地震によって，地震が続発する確率が急上昇するようだ。その原因はいったい何なのか。

1992年6月，南カリフォルニアのランダースでM7.3の地震が発生。そのわずか3時間後に，震源断層から40km離れたビッグベアー地区をM6.5の地震が襲った。ところが，誰一人としてこの地震を不思議に思わなかった。余震として地震が続発しやすくなっていたことは暗黙のうちに了解されていたからだ（幸い，いずれもほとんど人が住んでいない砂漠地帯で起こり，ロサンゼルスでは被害が出なかった）。

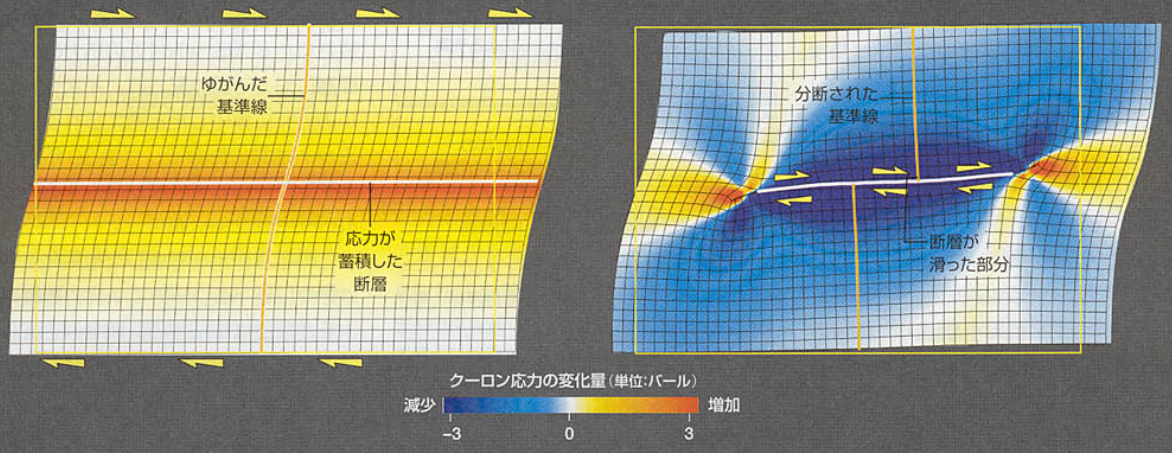
だが，これまでの知見と大きく矛盾

応力誘発――地震学の新展開

- これまで，多くの科学者は1つの大地震が次の地震の発生時期や場所に著しい影響を及ぼすことはないと考えてきた。しかし意外な新発見によって，その“常識”が疑われ，新たな展望が開けつつある。
- 活断層は近くで発生した地震によるわずかな応力に予想よりも敏感に反応することがわかった。
- 応力が増加した地域は，それがわずかな量だとしても，次の地震の発生場所となる。
- この説が正しいとわかれば，政府や地方自治体，一般市民が迫りつつある地震の危険性をより正確に知ることができるようになるだろう。

地震発生で変化する応力

地球内部の2枚のプレートが動いて擦れ合う間にゆっくりと蓄積する応力の増減によって，巨大地震のサイクルが特徴付けられる。トルコの北アナトリア断層（白線）では，断層より北側の地盤は断層に沿って東へ，南側は西へ移動している（黄色の矢印）が，断層面は通常は固着している。応力が断層面の最大静止摩擦力を上回ると，両側の岩盤が激しく滑って地震が起こる。1999年8月17日，マグニチュード7.4の地震がイズミットを襲い，市内や周辺地域で2万5000人もの命が奪われた。イズミット地震前後の応力を計算したところ（下の左右の図），地震後の応力は断層が滑った部分で激減する一方で，その他のところでは増加していることがわかった。（R. S. スタイン）



SERKAN BOZKURT U.S. Geological Survey

地震の前

北アナトリア断層のイズミットに近い部分には，200年前の大地震によって解放された応力がかなり蓄積していた（赤色）。地図上に仮想的に引いた基準線や格子の歪みは応力の高まりを示す。正方形の格子が平行四辺形になっている（図は1万5000倍に誇張）。形が最もゆがんでいる，つまり強い応力が生じているのは断層に最も近いところだ。

地震の後

地震のときに滑った断層に沿った部分では，応力が解放されている（青色）。ゆがんでいた基準線が地震の衝撃によって分断され，断層部分では数メートルもずれた。また，大きく変形していた格子の形状が元の正方形に戻っている。滑った断層の両端の部分には新たに応力が集中した。そこでは地震の前よりも格子のゆがみがひどくなっている。

する点があった。ビッグベアー地震が発生したのは，ランダース地震の震源断層から離れた場所だったのだ。発生時間で見ると従来の余震の分類に入るが，位置的には違っていた。この不可解な位置のずれが探し求めていた手がかりなのではないか，と私たちは考えた。

ランダースやビッグベアー，さらにカリフォルニア州で起こった数百の地震をグラフに描いたところ，本震と本震の間にも目立った規則性があることに気がついた。本震に続いて数日，数週間，ときには数年間に発生する小さな地震にも，同じような規則性が見つかった。これらはビッグベアー地震も含めて，本震の震源断層から少し離れた場所に集中する傾向がある。通常の余震が起こると考えられていた場所よりも離れたところで発生するのだ（38ページの囲み記事）。

この規則性を支配する要因を見つけ出せれば，本震にも当てはまるかもしれない。この推論が正しければ，新しい地震予測法を開発するという目的へ向かって，私たちの研究はうまく進んでいるといえるだろう。

応力変化が地震の引き金

まず，大地震後の地殻の変動に注目することから始めた。大地震が発生すると，地殻内のプレート同士が擦れ合う間に少しずつ蓄積してきた応力が解放される。例えば，サンアンドレアス断層は北米プレートと太平洋プレートの境界にあり，北米プレートは断層に沿って南へ移動している。2つのプレートが反対方向に移動しようとすると，断層面に平行な方向に剪断応力が

予知に組み込め 地震の相互作用

地震活動について解明できない謎はあまりにも多すぎる。科学者は限られた考察結果から地震発生確率を計算するしかない。

では，どうすれば身近に迫る地震の脅威を察知できるのか。全面的に信頼できるのはどの警告なのか。

現在の地震予測法の多くは，ある地震とその次に起こる地震との間には相関関係がないと想定している。あらゆる断層が規模に応じてほぼ決まった間隔（規模が大きくなるほど発生間隔は長くなる）で地震を起こす。だが地震はランダムに起こるという前提のため，発生時期は特定できないと考えられてきた。

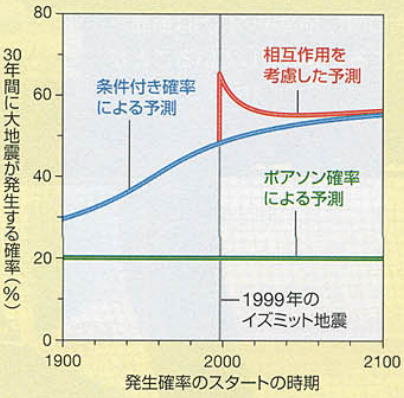
「ポアソン確率」と呼ばれるこの手法の最大の利点は，最後に大地震が起こった時期が不明でも発生の危険度を評価できることだ。断層沿いに発生した大昔の地震の地質学的な記録を使って，大地震の起こる平均的な時間間隔を簡単に推定できる。この方法による発生確率は時間が経過しても変わらない。

これに対して，より精度の高い手法である「条件付き確率」では，前の地震発生から時間が経過するほど次の地震が起こる可能性が高くなる。このように時間とともに確率が上がっていくのは，断層に蓄積する応力は大地震の後で徐々に増加していくと仮定しているからだ。

この手法に，近くの断層で起こった地震による応力変化の効果も考慮して，私たちは発生確率を求めた。イスタンブールに近い北アナトリア断層について3種類の方法で計算したところ，それらの違いが明らかになった。特に，地震発生直後が最も顕著だった。

イスタンブールから半径50km圏内にある4つの断層では，それぞれ100～500年前に大地震が発生していた。条件付き確率によると，1999年8月にイズミット市に大きな被害をもたらした地震が発生するまでの間，マグニチュード7以上の地震が発生する確率は徐々に上昇していった。8月の地震の直後に，イズミット市周辺を第2の大地震が襲う確率は急激に下がる。イズミット地震の震源断層に蓄積した応力が解放されたからだ。

しかし，イズミットから西に100kmのところにあるイスタンブールで大地震が起こる確率には，まったく影響しない。その数字は48％と変わらず，その後30年間で見てもほとんど変化しない。むしろ，時間の経過とともに徐々に増加していく。ポアソン確率だと，別の地震がイスタンブール付近で発生する可能性があるにもかかわらず，20％のままでまったく変化しない。



見方で変わる発生確率　イスタンブールの半径50kmで大地震が発生する確率は，考え方によってまったく違ってくる。従来の手法では，一定（緑線）か時間とともに徐々に上昇する（青線）。これに対して，1999年のイズミット地震による応力の転移を考慮すると，急激に上昇する（赤線）。

条件付き確率に応力誘発作用の影響を加えると，これまでとは状況が大きく変わった。最も違うのは，第2の大地震がイスタンブールを襲う可能性が急激に高まった点だ。1999年の地震によって解放されたイズミット付近の応力の一部が断層に沿って再分配され，イスタンブールの近くに集中したと考えられる。イズミット地震の影響で，今後30年間にイスタンブールで大地震が発生する確率は48％から62％に高まった。

この相互作用を考慮した地震発生確率は徐々に低下し，一方で条件付き確率による危険度は増加する。両者は2060年ごろに54％程度に収束するだろう。ただ，それまでに大地震が発生しないと仮定しての話だが。　（R. S. スタイン）

怖い連鎖地震の被害　1999年11月のデュズジェ地震（トルコ）で倒壊した建物。この地震がイズミット地震によって誘発されたのではないかと推測する科学者もいる。

CORNELIA BLIK (graph); AFB Corbis (photograph)

生じる。また，双方のプレートに乗った岩盤が押し付け合うことで，断層面の垂直方向に別な応力（法線応力）が働く。剪断応力が断層面の摩擦抵抗（最大静止摩擦力）を超えたり，断層を両側から押し付けている法線応力が緩んだりすると，岩盤が急に滑って地震が発生し，膨大なエネルギーが放出される。

剪断応力と法線応力を足し合わせた「クーロン応力」は断層が動いたところでは減る。だが，単純に消滅してしまうのではなく，震源断層に沿った別の場所や近くにある他の断層に再分配されることがわかってきた。こうしたクーロン応力の増加が地震の引き金になりうる，と私たちは推測した。

クーロン応力自体は多くの研究者によって計算されてきたが，地震活動の説明には使われなかった。理由は簡単だ。クーロン応力の変化は非常に小さく，地震発生に影響を及ぼさないと決め込んでいたのだ。実際，再配分される応力は極めて小さく，3バール（0.3メガパスカル，3気圧弱）にも満たない。これは震源断層に生じる応力の変化量の10％ほどだ。こんなわずかな応力が加わっただけで断層が大きく動くのか，私は半信半疑だった。

しかし，パリ地球物理研究所のキング（Geoffrey King）やマサチューセッツ州にあるウッズホール海洋研究所のリン（Jian Lin）と協力して，南カリフォルニアで大地震後に応力が増加した地域（応力増加域，トリガーゾーン）を見積もったところ，驚くべき結果が得られた。応力の増加量は小さかったものの，後続の地震が集中した場所とぴったり一致していたのだ。この相関関係から，大地震に続いて起こる地震は規模の大小にかかわらず，応力増加域に集中することは明らかだ。

このほかにも，驚くべき現象がもう1つ見えてきた。わずかな応力の減少によって，その後の地震活動が抑制されることだ。最初の大地震によって応力が減少した地域はストレスシャドー（応力減少域）と呼ばれ，そこでは地震活動が急激に静穏化していた。

トルコでは被害を未然に阻止

クーロン応力の計算によって，過去に起こった地震の発生地点をうまく説明できた。だが重要なのは，この手法を使って新たに地震が発生する場所を確実に予測できるのかという点だろう。

6年前，私は米国地質調査所（USGS）の地球物理学者ディートリック（James H. Dieterich）やイスタンブール工科大学の地質学者バルカ（Aykut A. Barka）と共同で，世界有数の断層密集帯であるトルコの北アナトリア断層を調査した。過去の地震によるクーロン応力増加域を考慮すると，1997～2027年の30年間にトルコ北西部の都市イズミット周辺の断層でM7以上の地震が発生する確率は12％と見積もられた。この数字は決して低くはない。なぜなら，1000kmに及ぶこの断層のほとんどの地域では1～2％にすぎないからだ。

この予測はまもなく検証されることとなった。1999年8月，M7.4の揺れがイズミットを襲い（イズミット地震），2万5000人が死亡し，経済的な損失は65億ドルを上回った。この地震は1939年以降に北アナトリア断層でドミノ倒しのように起こった12番目の大地震だ。特に活動の激しかった5年間には，震源を西に移しながら4つの大地震が発生し，1000kmの断層のうち700kmにも及ぶ部分がずれた。それぞれの地震の震源断層の末端部分を越えて応力が転移した結果，イズミット地震のような後続の地震が誘発されるのではないか。私たちはこう推測した。

そして1999年11月，13枚目のドミノが倒れた。イズミット地震の震源断層から転移したクーロン応力が引き金となって，M7.1のデュズジェ地震が発生したのだ。震源はイズミットから東へ約100kmのところだった。

幸運にも，デュズジェ地震の2カ月前に発行された*Science*誌で，バルカがイズミット地震による応力の増加を指摘していた。デュズジェ市ではイズミット地震の被害が少なかったことに

海溝型地震にもある応力による誘発

応力誘発作用を使って地震の連鎖を予測する手法は，あらゆる種類の地震に適用できる。これまで内陸の直下型地震，特に断層が横方向にずれる地震の例が研究されているのは，発生数が多く，予測や検証を行いやすいからだ。これには，内陸の断層だと距離が近いため，応力が他の断層に転移しやすいことも影響している。今後，東海地震をはじめとする海溝型と海溝型，海溝型と内陸型の連鎖，群発地震についても研究が進むだろう。

例えば，過去に東海・東南海・南海地震が連動することが多かったのは，最初に起こった地震によって隣りの巨大断層に応力が転移したためだと考えられる。また海溝型地震によって直下型地震が誘発される場合もある。例えば，1944年12月7日の東南海地震（M7.9）から1カ月あまり後の1945年1月13日に愛知県南部を震源とする三河地震（M6.8）が起こり，約2000人もの命が奪われた。これは東南海地震に伴う応力誘発によって起こった地震だと考えられている。

（遠田晋次）

加え，「他に授業をする場所がない」という学校関係者の反対があったにもかかわらず，バルカの発表に促された建築技術者は校舎の閉鎖を決めた。11月のデュズジェ地震では倒壊した校舎もあり，被害を未然に防げた。

米国地質調査所のパーソンズ（Tom Persons）や日本の産業技術総合研究所・活断層研究センターの遠田晋次（とおだ・しんじ，監修者紹介参照），バルカ，ディートリック，そして私が手がけた計算が正しいとすれば，イズミット地震の余波はデュズジェ地震で終わりではないだろう。イズミット地震に伴って応力が転移したことで，イスタンブール周辺で大地震が今年発生する確率は1.9％から4.2％に高まった。私たちは今後30年間に発生する確率を62％と見積もっている。もし大地震がランダムに発生するのなら，20％ほどにすぎないだろう（36ページの囲み記事）。

活発化する断層と静穏化する断層

応力誘発説は危険な側面だけでなく，私たちに安心感をもたらしてもくれる。ある地域で地震が発生する危険が高まったら，他の地域では必ず下がるのだ。トルコで今回，地震発生確率が低下したのは偶然，イスタンブールに比べると人口の少ない地域だったが，それとは逆になる場合もある。

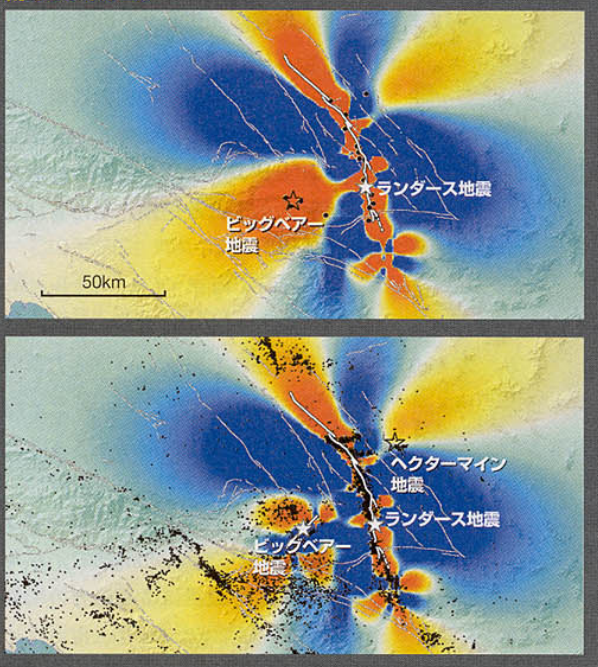
地震活動が静穏化した最も顕著な例として，サンフランシスコ湾岸地区があげられる。同地区では，1906年にM7.9の大地震（サンフランシスコ地震）を経験した後は大きな被害をもたらすような地震は少なく，現在は500万人が住んでいる。1998年に，米地質調査所の同僚であるハリス（Ruth A. Harris）とシンプソン（Robert W. Simpson）が分析したところ，1906年のサンフランシスコ地震に伴って，サンアンドレアス断層と並走する湾岸地区内の複数の活断層で応力が減少する一方で，同地区から南北に遠くはずれた地域では応力が増加していた。これによって，大きな被害をもたらすような地震の発生が1906年以前の75年間と比べて1ケタも少なくなった理由を説明できる。

応力が再び断層に蓄積していくにつれ，サンフランシスコ湾岸地域の地震活動は現在の静穏化した状態から少しずつ活発になっていくと予測される。幹線道路が陥没・倒壊するなどの被害が出た1989年のロマプリエタ地震は，地震活動が再び活発化する前兆なのかもしれない。

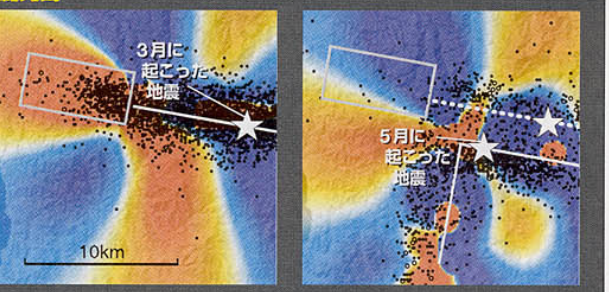
続発する大小の地震

大地震（白い星印）の後に応力が増加した地域（赤）では，小地震（黒点）が多発するだけでなく，大地震も続発しやすくなる（塗りつぶしていない星）。反対に，震源断層（白線）に近くても応力が減少した地域（青）では，地震はまず起こらない。（R. S. スタイン）

南カリフォルニア



鹿児島

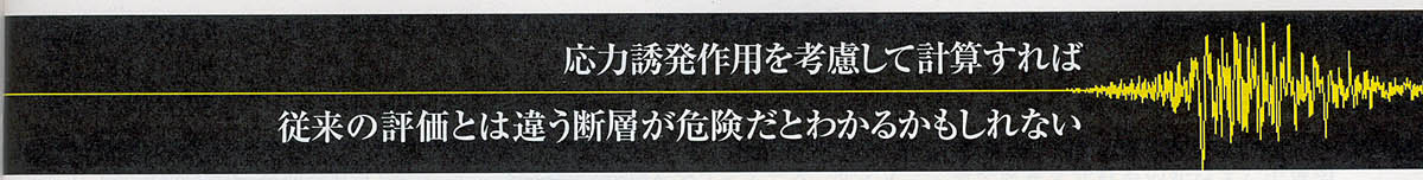


1組の地震によって，特定の場所で地震発生確率が増減し，地震活動が活発になったり静穏化したりすることがある。1997年3月，M6.5の地震が発生し，滑った断層の西側で応力が増加，地震活動が活発になった（上図左）。その48日後に，震源断層から南へ3kmのところでM6.3の地震が発生すると，今度は応力が減少して地震活動は収まった（上図右）。

1992年，ランダース近くの砂漠地帯でマグニチュード（M）7.3の地震が発生した。これによって震源から南西方向で地震の発生確率が上昇し，3時間後にはM6.5の地震がビッグベアー地区を襲った（左上図）。ほぼ同時に起こった2つの地震によって解放された応力が再分配された地域では，その後7年間にわたって地震が多発した。その中で最も大きかったのが1999年に発生したM7.1のヘクターマイン地震だ（左下図）。

SERKAN BOZKURT USGS, KEITH RICHARDS-DINGER U.S. Navy AND SHINJI TODA Japan's Active Fault Research Center

応力誘発作用を考慮して計算すれば
従来の評価とは違う断層が危険だとわかるかもしれない



CALIFORNIA STRONG MOTION INSTRUMENTATION PROGRAM AND CONSORTIUM OF ORGANIZATIONS FOR STRONG-MOTION OBSERVATION SYSTEMS (seismogram of Hector Mine, Calif., earthquake)

変化する断層面の摩擦

わずかな応力の変化でさえ，地震活動を静穏化させたり猛烈に活発化させたりする。トルコや南カリフォルニアの地震の調査によって，私たちのこの主張は裏付けられた。この説を後押しする事例が数多く見つかったにもかかわらず，ある重要なポイントだけはうまく説明できなかった。調査した地震のうち約1/4は応力減少域で発生していたのだ。

応力減少域では地震が起こらないはずだ。本震によって周辺地域の応力がいくぶん解放され，断層が動きにくくなっているからだ。私たちの説に懐疑的な地震学者たちはこう反論してきた。

しかし，今ならその疑問に答えられる。応力減少域で地震活動が完全に止まるわけではないし，応力増加域での地震活動がいつも活発だとも限らない。単位時間内に発生する地震の数（地震発生率）が以前に比べて応力減少域では低下し，応力増加域では上昇するだけだ。

1994年にディートリックが提唱した理論によって，応力誘発説の説得力が増した。物体が静止しているときは大きく，滑っているときはやや小さいといったように，摩擦は2つの値（静止摩擦と動摩擦）の間を変化する。しかし，「すべり速度・状態依存摩擦構成法則（摩擦法則）」と呼ばれるディートリックの理論は，この単純な概念を放棄している。断層の滑り速度の変化や，どのように動いてきたかという履歴に応じて断層の滑りやすさが変わってくるという考え方だ。乗用車サイズの花崗岩に断層に似せた小さな切れこみを1本入れ，微小な地震を発生させるという実験から，ディートリックらはこの結論を導き出した。

摩擦を定数ではなく変数ととらえて地震活動を計算すると，大森公式はすべての地震に当てはまる基本的な性質だとわかる。余震発生確率は本震の直後に急激に上昇し，その後は時間とともに減少するという大森公式の考え方に立てば，応力の増加によって地震活動が活発化した地域がそのままの状態を保たないという理由も説明できる。

だが，それだけではない。摩擦法則は大森公式が完全に見落としていた地震活動の特性を明らかにした。本震によって応力が解放された地域では，直後は地震発生率が極端に低下するものの，その後は少しずつ地震直前の状態に戻っていく。しかもその回復には規則性があって，予測可能だ。

この点は些細なことに見えるかもしれないが，摩擦法則によって，時間の経過に伴う地震発生率の増減を初めて予測できるようになったのだ。単純なクーロン応力の計算だけでは，新たに地震が起こる場所を大まかに決められても，時期までは予測できない。

裏付けられた新説

応力誘発作用を考慮して地震発生確率を求めるという私たちのアイデアは，2002年初めに実施された世界規模の研究によってさらに確かめられた。

パーソンズは過去25年間に世界各地で発生したM7以上の地震100あまりを抽出，その震源から半径250km圏内で後続したM5以上の地震をすべて調べた。リストアップした2000を超える地震のうち61％は，最初の大地震によってわずかでも応力が増加した場所で起きた。こうして誘発された地震のうち，最初の地震から近い場所で起こったもの（余震と考えられるもの）はごくわずかだった。また，すべての事例で摩擦法則や大森公式が示すように，一連の誘発地震の発生率は減っていった。

私たちの地震分析に摩擦法則を組み込むことで，クーロン応力の解析だけでは手に余るような複雑な相互作用を明らかにできるようになった。つい最近まで，私たちはカリフォルニアやトルコのように，1つの大地震によって地震活動が活発になる地域と静穏化する地域に分かれるといった単純なケースだけを研究してきた。しかし，応力誘発作用を研究するうえでさらに注目すべきケースは，連続的に発生した大地震によって，その周辺の地震活動が活発化と静穏化を繰り返すような場合だ。

産総研の遠田と私はこのような現象の顕著な例を見つけ，「トグル地震活動」と名づけた（トグルは切り替わるという意味）。1997年にM6.5とM6.3の地震がそれぞれ3月と5月に鹿児島北西部を襲った。非常にまれなケースだが，トグル地震活動の解析には最適な例だ。3月の地震発生直後，震源断層の西端のはずれ約25km^{2}の範囲で地震活動が急に活発になった。最初の地震によって応力が再分配された場所を計算したところ，まさにこの地震活動が活発になった場所とぴったり一致した。さらに摩擦法則が示すように，活発な地震活動が急激に減衰す

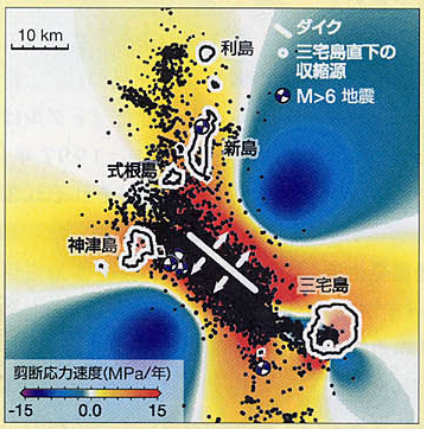
クーロン応力で解明
群発地震のメカニズム

地震活動には，単発型，本震-余震型，群発地震型の３つのタイプがある。特に，中・大規模地震は後者の２つのタイプとなる。群発地震とは特定の地域で継続的に活発化する地震活動だ。本震-余震型（広域的に本震-続発地震型）は，本震による周辺地殻への応力転移で説明できる。

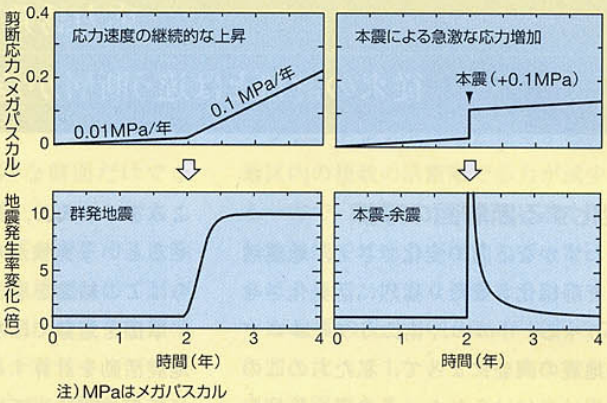
しかし，群発地震については不明な点が多く，通常とは異なった「何か特別な地震活動」とされてきた。有力な発生原因として，マグマや地下水が断層へ直接浸透するモデルや地殻の特殊な不均質性などがあげられてきた。私たちは2000年に起こった伊豆諸島群発地震を解析し，その発生原因は応力速度（地下15kmよりも浅い地殻にかかる応力の単位時間当たりの変化率）の継続的な上昇にあることを新たに発見した。

2000年６月から８月にかけて伊豆諸島北部で発生した群発地震活動は，マグニチュード（M）３以上の地震7000個，M6以上の地震５個を含む観測史上世界最大規模の群発地震活動となった。この地震活動では，国土地理院の全地球測位システム（GPS）を使った連続観測や気象庁・東京大学による地震活動の詳細な観測データが得られ，地表の伸び縮みと地震活動の関係がほぼリアルタイムで追跡された。

GPS観測から，群発地震の活動期間中に，新島と神津島の距離は約80cm以上離れ，逆に新島・利島間は20cmほど近づいたことがわかった。２島間の距離が２カ月間かけて徐々に変化していることが重要な特徴である。この地殻変動を説明するために，私たちは三宅島北西沖に長さ15km，幅5kmの鉛直板状のマグマ（ダイク）があると仮定し，それが継続的に成長するというモデル（ダイクモデル）を考えた。



応力速度増加と群発地震　ダイクモデルによる伊豆諸島群発地震の応力速度の増減で，黒丸は2000年６月26日～８月23日の震源（東京大学地震研究所調べ）。地震の多くは鉛直板状マグマ（ダイク）の貫入や成長によって応力速度が上昇した地域で発生した。



注）MPaはメガパスカル

応力変動で異なる地震活動　応力速度が通常よりも上昇し，それが継続した場合に群発地震活動となり，応力が瞬時に増加した場合に本震-余震型（本震-続発地震型）となる。

次に，このダイクモデルによって周辺の横ずれ断層（地震の多くが横方向に断層がずれる）にかかる剪断応力速度の増減を計算したところ，応力速度が通常よりも増加する地域と減少する地域に分かれた（下の図）。ダイクに近い三宅島北西沖では１年間に10メガパスカル以上，ダイクから離れた新島でも同数メガパスカルの応力速度が計算された。通常の応力速度は年間0.01メガパスカル程度と推定されている。したがって，応力速度の増加率は三宅島北西沖で1000倍以上，新島周辺で数百倍程度となり，短期間にしかも継続的に極めて高い応力が加わっていたことになる。

驚くべきことに，この応力速度増加域では，実際に観測された地震のほぼすべてが発生していた。定量的に地震活動を調べたところ，通常の地震活動を基準とした場合の群発地震期間中の地震発生率の増減と，計算された応力速度変化とに相関があることがわかった。つまり，応力速度が地震発生率をコントロールしていたわけだ。これは実験室におけるすべり速度・状態依存摩擦構成法則（39ページ参照）から予測されていたが，自然地震で検証されたのは今回が初めてだった。さらに今回の活動で観測された活動域が時間とともに拡大したこと，M6以上の地震の余震活動が極端に短かったことなども，摩擦法則から予想されていた現象だ。

以上のことから，連鎖的な地震活動は応力変動様式によって２つに大別できる（上の図）。①急な応力増加によって地震活動の一時的なバースト現象，すなわち余震活動が発生し，時間とともに減衰する（本震-余震型，本震-続発地震型）。②応力速度が増加し一定期間継続することによって，その変化量に比例して地震活動が活発化する（群発地震活動型）。

今後，このような応力変動と地震応答の特性を利用すれば，精度の高い地震発生確率予測手法の開発が期待できる。

（遠田晋次）

産業技術総合研究所・遠田晋次

ることも見つけた。

しかし，わずか7週間後に2番目の地震が3km南の地点で起こると，地震発生率はさらに85％以上も急減した。この例では，最初の地震では応力増加域だったところが2番目の地震では応力減少域に変わっていた。つまり，最初の地震で活発になった地震活動が2番目の地震で元に戻ったのだ。

新世代の地震予知

地震同士の会話に聞き耳を立てることで明らかになったのは，少なくとも地震活動は強く相互作用しているという点だ。この相互作用に影響を及ぼす要素は応力転移の他にも存在するかもしれないが，従来の確率的な地震予知の見直しを迫るだけの証拠が十分にそろったと，私たちは考えている。

わずかな応力の増減に左右される地震発生確率の予測精度が上がれば，こうした新たな手法は政府や保険会社，一般市民が地震の危険性をより正確に見極めるのに役立つだろう。従来の手法でもある程度の優先順位を付けることは可能で，建物の補強をはじめとする対策を他に優先して進めてきた都市や地域がある。だが応力誘発作用を考慮すると，警戒すべき断層は従来の手法で予測したものとは違う場合も出てくるだろう。同様に，従来から要警戒とされてきた断層が実は地震発生の危険がほとんどないというケースもあるかもしれない。

ただ，どんな予測法も正しいと証明するのは難しく，それが間違いだと証明するのもほぼ不可能だ。どんな要因を考慮しても，大地震が起こるかどうかは暴風雨の予報のように偶然に左右される部分が極めて大きい。ただ，予報の見直しに役立つ重要な観測例が豊富な点で，気象学者は地震学者よりも有利だ。地球内部の応力に比べて気圧配置はずっと測定しやすいうえに，嵐は地震よりも頻繁に起こるからだ。

地震予知の精度を上げるには，たとえ時間がかかっても気象予報と同じ道をたどらなければならない。私たちがイスタンブールやランダース，サンフランシスコ，神戸など地震が起こりやすい都市の周辺で大地震が発生する確率を予測してデータを蓄積してきたのはそのためだ。さらに，ロサンゼルスや東京など大地震によって数百兆円の損害が出そうな大都市についても，発生確率を評価する準備を進めている。

2002年秋，地震による応力転移が次の地震を誘発した新たな事例が観測された。アラスカのデナリ断層で発生した2つの大地震（10月23日にM6.7，11月3日にM7.9を記録。震源間の距離は約25km）だ。私たちの計算では，最初の地震によってその後10日間に次の大地震が周辺地域で起こる確率は通常の100倍まで高まっていた。私たちは数多く発生し予測の機会が多い小規模地震を予測することで，理論を検証しようと考えている。

確率論的な予測法がどの程度まで人命や財産を守れるのかはまだ不透明だ。しかし，科学者には地震予知・予測の夢を追い求め続ける理由がある。それは，全世界で数億もの人々が活発な断層の近くで生活しているという事実だ。夢の実現のためにも，応力誘発作用など大地震の発生に影響を与える可能性のあるどんな現象も見逃してはならない。（翻訳協力：勅使河原まゆみ）

監修　遠田晋次（とおだ・しんじ）
産業技術総合研究所・活断層研究センター研究員。クーロン応力の変化によって起こる活断層運動の連鎖などを調べ，地震のメカニズム解明や予知に役立てようと研究している。1996～1997年に米国地質調査所の客員研究員として著者のスタインの下で過ごし，その後も共同研究を続けている。

著者　Ross S. Stein
スタインは地球物理学者で，カリフォルニア州メンローパークにある米国地質調査所（USGS）の地震災害部門に所属している。1980年にスタンフォード大学でPh.D.を取得後，コロンビア大学のポスドク（博士研究員）を経て，1981年に地質調査所に入所した。米国海外災害援助局（OFDA）など政府機関や欧州の再保険会社であるスイスリー社といった民間企業から資金供給を受け，地震災害査定法の精度向上に努めてきた。この記事で取り上げた研究に対して，USGSから2000年にユージン・M・シューメーカー賞を贈られた。2001年には，米国地球物理学会の年次総会での講演「地球物理学の最前線」の中で研究成果を発表。CATVや衛星放送で放映されるラーニングチャンネルの「トルコ大地震」などのドキュメンタリー番組にも出演した。

原題名
Earthquake Conversations（SCIENTIFIC AMERICAN January 2003）

もっと知るには…

EARTHQUAKES CANNOT BE PREDICTED. Robert J. Geller, David D. Jackson, Yan Y. Kagan and Francesco Mulargia in *Science*, Vol. 275, page 1616; March 14, 1997.この論文はウェブサイトhttp://scec.ess.ucla.edu/~ykagan/perspective.htmlからも参照できる。

HEIGHTENED ODDS OF LARGE EARTHQUAKES NEAR ISTANBUL: AN INTERACTION-BASED PROBABILITY CALCULATION. Tom Parsons, Shinji Toda, Ross S. Stein, Aykut Barka and James H. Dieterich in *Science*, Vol. 288, pages 661–665, April 28, 2000.

断層運動によるクーロン応力・地殻変形計算ソフトウエア Coulomb 2.2（マッキントッシュ用）はhttp://quake.usgs.gov/~rossからダウンロードできる。

EVIDENCE FROM THE AD 2000 IZU ISLANDS SWARM THAT STRESSING RATE GOVERNS SEISMICITY. Shinji Toda, Ross S. Stein, and Takeshi Sagiya in *Nature*, Vol. 419, page 58-61;September 5, 2002.このニュースリリースは産業技術総合研究所のウェブサイトhttp://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2002/pr20020905/pr20020905.html#bから参照できる。