

兵庫県南部地震のメカニズムと今後の地震を予測する

京都大学防災研究所地震予知研究センター

安藤 雅 孝

1. 地震とは

地下岩石に加わる力がだんだん増し、それが岩石の強度を越えると岩石は壊れる。この岩石の破壊が地震である。この壊れ方はぐっしゃっつつぶれるような破壊ではなく、剪断破壊と呼ばれ、破壊の面に沿って両側の壁がすべる、そんな壊れ方である(図1)。ヒビの入った板ガラスに力を加えると、割れ目がすうーっと伸びることがあるが、地震の破壊の拡がり方も同じである。地下岩石の破壊(=地震)の大きさは、破壊面の大きさ(面積)とその面上のすべった量(ずれ)の積に比例する。大きさを表す物理量はモーメント(回転させる力)であって、これは地震のマグニチュードに対応した値である。地震を調べることは、この破壊の様子を明らかにさせることであり、地震の予知とは、この破壊に至る過程を明らかにし、それを予測することである。

1-1. 地下岩石の変形

地下岩石がどの程度変形したら地震に至るのだろうか。場所や地殻の性質など様々であるが、 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ になったら、地震が起きると考えて良い。つまり、1 kmの長さの地下の岩石を、1 cmだけ縮めたら確実に地震は起きる。一方、変形のスピードはどの程度か。これも場所によって様々であるが、一年間に、日本列島内陸部では 10^{-7} 、海溝部では 10^{-6} の変形が進んでいる。つまり1 kmの長さの棒が、1年間に、内陸部では0.1mm、海溝部では1mmの速度で変形するのに等しい。小さな歪みであるが、時間がたてば蓄積され、応力が高まり地震発生にいたる。一つの地震が起きて、次の地震が起きるまで長い時間が掛かるのも歪みの蓄積の割合が低いからである。

1-2. 断層の多いところ少ないところ

1本の断層が応力解放できる範囲は限られている。断層のまわりのわずかばかりの範囲と考えたらよい。例えば、兵庫県南部地震の場合だったら、長さ60kmの断層から30kmの範囲の楕円の中と考えたらよい。したがって、近畿一円がこの地震だけで、解放されることはない。

上記のように、一つの断層が応力解放できる範囲は限られている。このため、日本列島全体の応力を下げるには、断層がいくつも必要になる。活断層の数はこのた

め多い。もちろん、場所により断層の密度は違う。中部・近畿には活断層は多いが、紀伊半島や四国南半分などにはほとんどない。これは、地殻の下の深い部分に活断層があり、それが代わりに応力を解放するからである。紀伊半島や四国の下には大きな断層が斜めに入り込んでいる。海洋プレートが陸のプレートの下にもぐり込みの際に生じる大断層である。この活断層の上に、100年に一度ぐらいの割合で、大きな地震が起きる。貯められた応力は、この断層で解放されてしまう。このため、陸上には活断層がほとんどない。

この他、応力を貯めずに、つきつき放出してしまう断層もある。さらに、岩石が曲がって応力を吸収してしまうこともある。のれんに腕押しの状態になる。

1-3. 安全弁としての活断層

実験室で新鮮な岩石を壊すには、高い応力が必要である。地下で起こる地震が解放する応力の10倍程度にも達する。もし、キズのない新鮮な岩石の中に地震が起きたとしたら、それはとてつもないものになるだろう。たぶん、断層のまわりの建物や人は激しい揺れで、吹き飛ばされてしまうだろう。もちろん、地球上にはそのような地震は起きない。地殻に弱いところ（活断層）が数多くあり、それほど高い応力を貯えることができないからである。活断層は、応力が異常に高まるのを防ぐ、いわば地球の安全弁である。

1-4. 水と地震

地震と水は密接な関係を持つ。地下深くの断層には大きな摩擦が働く。深くなればなるほど摩擦力は大きくなる。しかし岩石の実験からはとても無理としか思えないような深さに地震が起る。この関係は室内実験と、人間が不用意に起こした誘発地震からしだいに明らかにされた。大きな摩擦が働く断層の中に水が力づくで入り込み、面と面を押し広げ、すべりやすくする。これが深い所でも地震を起す鍵となっていた。水と地震は切っても切り離せない。

2. 兵庫県南部地震

兵庫県南部地震の最初の破壊は、明石海峡の下、深さ 17 km の所から始まった。地震の破壊は時間をかけ順番に割れて行く。最初の破壊は、マグニチュードにするとせいぜい5程度のものだが、そこで止まってしまうと大きな地震にはならない。破壊は淡路島と神戸側の両方へ広がった。断層の全長は大体 60 km 程度に達した。これはは精度良く決められた余震の分布からも良く分かる（図2）。

2-1. 断層上の破壊の広がり

現在、地震が始まってから破壊がどのようにひろがって行くか、詳細にわかった。ここで地震の経過を10秒間だけを、2.5秒毎に追ってみる。図3の右端は宝塚付近、左端は淡路島北淡町で、長さは60 km ぐらいの破壊面になる。断層の深さは、地表から15 kmまで広がっている。5時46分、明石海峡直下深さ17 kmに、最初のヒビが入った。これが最初の地震の始まりである。黒い輪が大きく破壊しているところで、うすい部分がやや小さく破壊している。黒い部分は破壊を全くしないか、すでに破壊が終わった所である。この図を見てわかることは、大きい破壊は淡路島側に集中している。最初から5秒頃になると、神戸側には地震波は到達しているが、破壊はまだそれほど大きくなっていない。その後、神戸側では断層面上の破壊は消えていく。これは、いろいろなところで記録された地震の波形を使って求められた。これが今度の地震の全貌です。特徴はいくつかあるが、被害と地下断層とが必ずしも対応していない。

2-2. 地下地盤の段差

神戸側を見てみるとあまり地下での破壊（断層のずれ）は大きくない。それでは、どうしてあんなに被害が大きくなったのだろうか。地下の破壊（地震）が大きい、小さいだけでは被害の大きさは決まらないことである。今回の地震に対し「大地震」という言葉が使われるが、自然の地震の規模としては大地震ではなく、中規模地震といえる。地震の規模が大きいから被害が大きいとは言えない。今回の地震は地盤条件が大きく影響したらしい。

神戸市灘区の南北の断面では、神戸大学から阪急電車付近に来ると、この辺から明らかに被害は集中して大きくなる。地下探査の結果、ここで地下構造が急激に変わっていることがわかった。そこには堆積層が急激に厚さを増し2 kmも堆積している。この急激な構造の変化が、新たな波が発生させる源となり、激しい被害を引き起こす原因となった。従来柔らかい堆積物が厚くなると被害が大きくなると言われていたが今回は、それほど振幅が大きくならないで、むしろ堆積層に地震波の振幅を押さえる作用が働いたようである。

2.3 関西の活断層

関西の活断層は、地形にはっきり現れており、人工衛星から撮った写真からよくわかる。山崎断層は直線上の谷の中をに走っており、ちそこには中国自動車道がこつ作られている。大阪平野を見てみると、これが自然が作った地形かと思うほど真四角な形をしている。四方は断層で囲まれている。北限は有馬・高槻構造線、中央構造線、五条断層なども他の3辺を限る。さらに、京都、奈良の盆地も断層で限ら

れているのがわかる。大阪市内には上町断層が、さらに大阪湾内にも今まで考えられたものより長い断層であることが明らかになってきた。もともと関西が断層に囲まれていなかったらこんな大きな平野はできなかったから関西は断層の恩恵を受けている町とも言える。断層によって作られた平野があると思えば、我々は地震からは逃れることはできないだろう。しかし、どの活断層が動きやすいかなどと言うことは、現在はほとんど不可能である。ほとんど、すべての断層が地震発生の可能性があると考えべきであろう。

3. 地震予知

地殻の応力が高まり、それが岩石の強度を越えれば、岩石は破壊する。この破壊現象を「地震」と呼んでいる。この地震の起こる前に、その位置、大きさ、時間が判るのだろうか？この三つが揃って、はじめて地震予知ができたといえる。これで、地震に対する備えができるからである。しかし、それぞれの予測の精度は現在ほどの程度までに達しているのだろうか？

3-1. 位置と大きさの予測

地震は、すでに存在する断層（岩石のキズ）の上に生ずる。このためには、まず、過去に地震が起きた活断層を洗いださなければならない。陸上では地形学や地質学の方法でまず選び出される。さらに、活断層の存在は、地震、重力、電磁気などの手法を用いた地下探査からも見つけられる。微小地震が線上に並ぶことから活断層がわかることもある。海洋底であれば、音波を海底に向けその跳ね返りから地下の様子が調べられる。プレート境界であれば、プレートの動きから、断層の存在を予測することもできる。このように断層の位置の精度はかなり高いといえよう。一方、大きさは、活断層の長さからおおよそ推定できる。プレート境界の地震でもほぼ同じである。

3-2. 長期的な時間の予測

断層上の大まかな地震の繰り返し間隔から、現在の地震発生の危険性がある程度推定できる。たとえば、繰り返し間隔が1000年の活断層上に、300年前に地震が起きたら、現在はまず地震が起きないと、結論できるだろう。もちろんこれは粗い推定法であるが、目安を知ることにはできる。現在は断層発掘調査を主に、陸上の活断層の時間が調べられている。繰り返し間隔が短い海溝型の地震では、歴史に残された資料も重要な手がかりである。

3-3. 短期的な発生時間の予測

応力が高まり、破壊強度を越えれば、破壊＝地震が起きる。しかし、もし何の前触れがなく、突然地震が起きてしまうものだったら、短期的地震予測は不可能になる。現在の地震予知計画は、何らかの信号を自然は我々に知らせるはずである、との考えを基に進められている。地震予知とは、地下に起る破壊の予測と呼べるものである。

一般に破壊現象の予測は難しい。物質の曲げに対する抵抗などは、全体を平均化した性質が現れる。しかし破壊強度というのは、むしろ媒質の最も弱い部分の性質が現れる。これが予測を困難とさせている。ガラスに力を加えて曲げていくと、どこかで破壊する。弾性体内での加えた力とガラスの曲がりの関係は、実験する前からかなりわかっている。しかしこのガラスがいつ壊れるかは個々のガラスでかなりのバラつきがある。ガラスのような物質は突然破壊することが多い。小さな割れ目が種となり急激に破壊が成長するためである。一方、不均質な物質の破壊は、ピチピチと小破壊が発生し、弱い部分からしだいに壊れて大きな破壊に至る。つまり前兆的な現象が伴う可能性が高いと言えよう。これが地震予知の可能性の根拠である。

3-4. 前兆現象

地震直前にどんなことが起きるのだろうか。大きな破壊前に小さな破壊が起きることが多い。周辺域でも起こり、また初期破壊域に起こることもある。初期破壊域とはとは、地震の破壊はいっぺんに起こるものではなく、最初に入ったキズから進行し大きな破壊に至る、その最初のきっかけである。「堤防に空けた蟻の一穴」といえよう。

本破壊の前に、バリリンと破壊せずズルズルとすべり出すことがあることが知られている。さらに、前震といわれるような、微小な破壊が起こることも多い。周辺域の地震活動が変化することも知られている。このような動きは、地震計や地殻変動を観測する測器にも捉えられる。もちろん、地下岩石中にはわずかであるが水も含まれている。地下水の上昇や下降も起こる。地下水の流れの変化による化学組成の変化なども予測される。さらに、地下電流の変化、比抵抗などの変化も考えられる。したがって、これらの変化に応じて動物が異常行動を起すことは十分に考えられる。

3-5. 兵庫県南部地震

兵庫県南部地震の発生1年前は震源域の北側の地震活動が活発であった。そして、2週間前に地震活動が急に静かになった。六甲山では、半年前頃から地殻変動や湧水量の変化に異常が見られている(図4)。さらに、地震断層のまわりでは1～2年前より地震が発生しなくなるなどの地震活動の変化が見られた。本震の11時間前

に前震が起きた。前震は全部で4回発生した。前震は本震の震源のすぐ近くに起きた。地震50分前の電波の異常は、野島断層付近で発生しといわれている。もちろん、これらのデータがすべて地震前に明らかになって、これを事前にまとめて見ることができても、兵庫県南部地震の発生を予測するのは難しかっただろう。

3-6. 西日本の今後の課題

西日本における地震活動の問題としては、南海道地震の前に内陸の地震が活発化することであろう。南海道地震が起こる前40年間の内陸の地震活動（図5）と、最近40年間（図6）を比べるとその違いが良くわかる。南海道地震の前には、内陸地震が連発しております。さらに、日向灘地域でも結構活発になっている。一方、最近40年を遡ってみると、地震はずっと少なくなっている。兵庫県南部地震を入れても、マグニチュード6以上は3個しか起きていない。内陸地震の起こり方が明らかに大きな地震の前後で変わっている。これは、かなり以前からわかっていたことであるが、その理由はまだ明確ではない。いずれにしても、今後内陸地震が活発になることは十分考えられる。

4. おわりに

現在の地震学は、断層面上の破壊過程を克明にとらえることができる。つまり、地震は何者であったかを明らかにすることができるようになった。しかし、地震に至る過程はまだ未知の部分があまりにも多い。一步一步解明しているのが現在の段階である。

図の説明 安藤 雅孝

第1図 (図中に説明があり)

第2図 兵庫県南部地震の余震分布図と断面図の一部。連携震源決定法に基づき決定したもの。番号は断面図の位置を示す (Nakamura and Ando, 1996)。

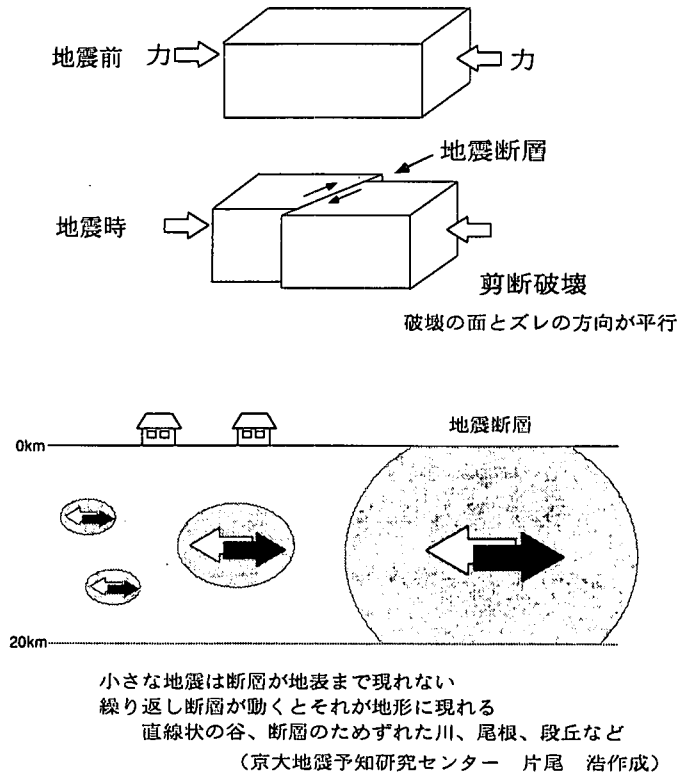
第3図 断層面上の破壊の伝搬図。(右図)。破壊が始まってから、1秒ごとに破壊の様子を示した。それぞれの時間内で、最も変位(ずれ、単位メートル)を起こしているところが、黒く描かれている。破壊は12秒後には終了している。断層の深さは最大16km。(左図)地図の上に重ねた、断層面上の最終変位。断層の位置は黒実線で示されている。最終変位が淡路島側が大きいのが特徴。

第4図 (a)湧水量の変化、(b)日別雨量、(c)湧水量、(a)の図のスケールを40分の1に縮め全体の変動を見やすくしたもの、(d)歪み変化、(e)塩素濃度変化、(f)ラドン濃度の変化。兵庫県南部地震前年は渇水期であったが、秋に湧水量が増えるのは異常である。湧水量と歪みは、新幹線六甲トンネルに近接した観測トンネル中の観測。塩素濃度は「六甲のおいしい水」中の変化。ラドン濃度は西宮の宮水中の変化。

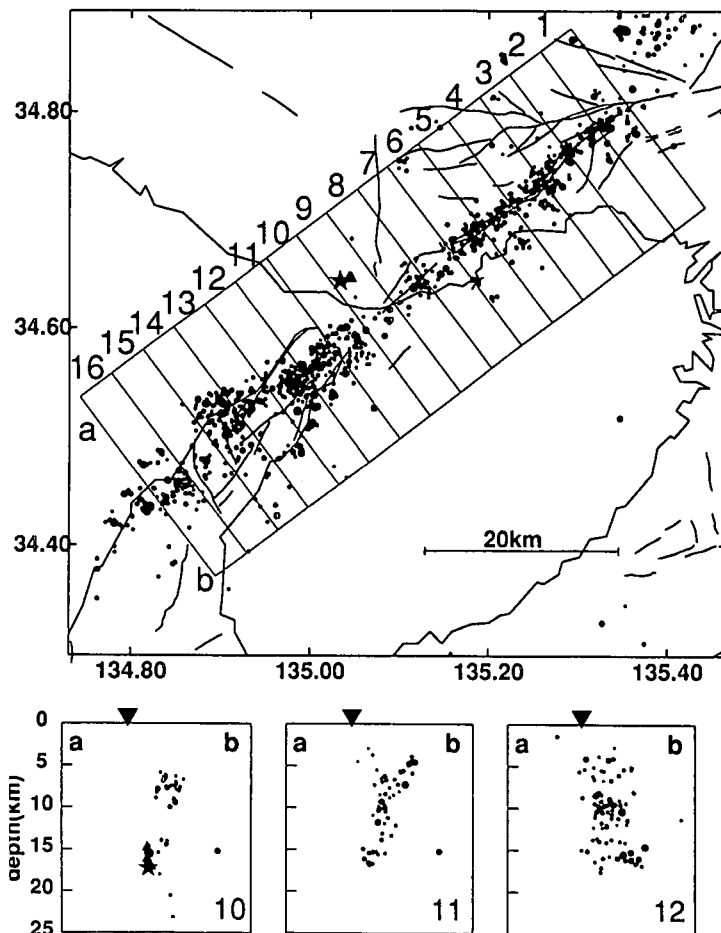
第5図 南海地震前40年間(1906-1946)の $M > 6$ の地震。かなり地震が頻発しているの。

第6図 最近40年間(1956-1996)の $M > 6$ の地震。第5図に比べ、地震の数は極端に少ないのが特徴。

地震とは？

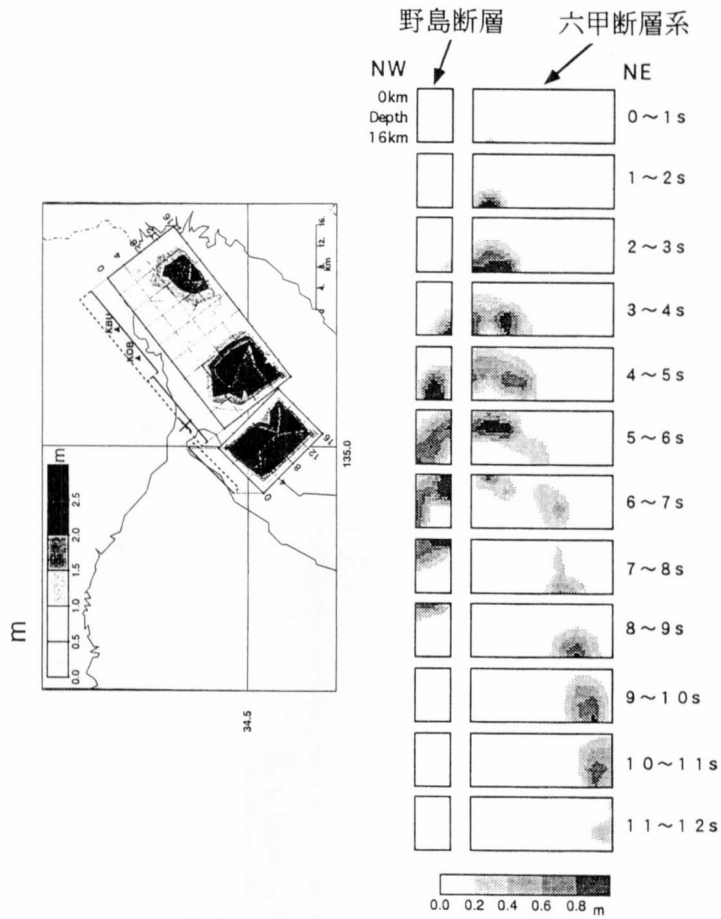


兵庫県南部地震の余震分布



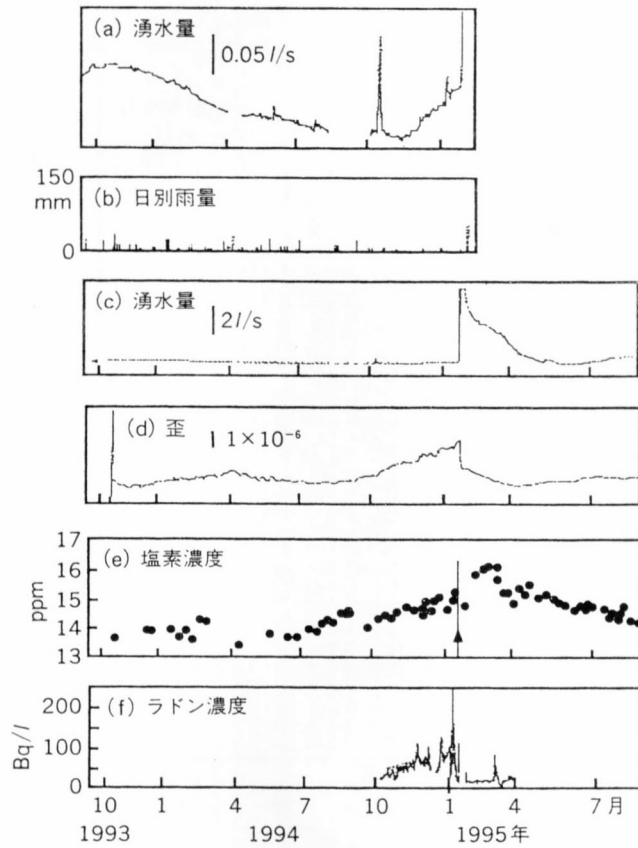
断層面上の破壊の伝播

第3図

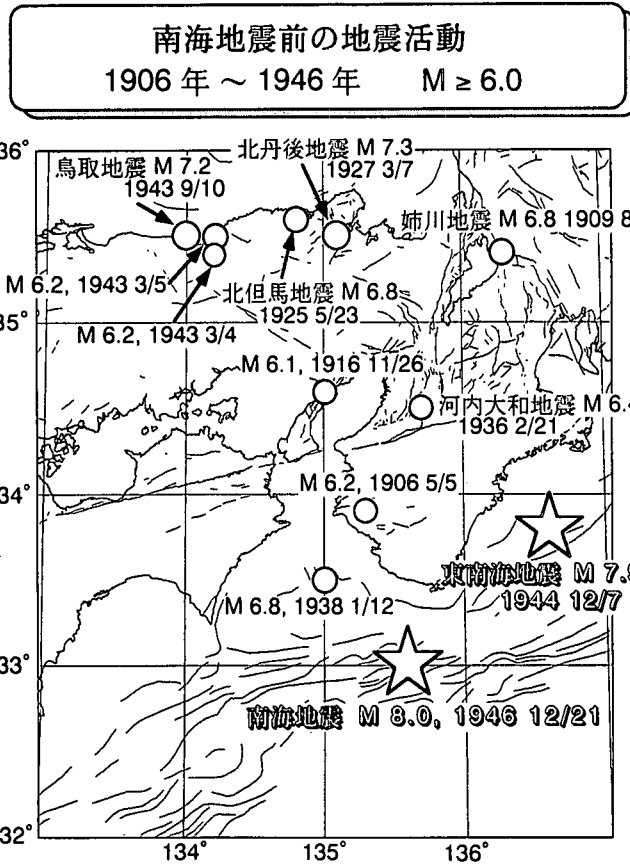


兵庫県南部地震前に現れた前兆的現象

第4図



第5図



第6図

