

大きな地震より小さな地震が多いのはなぜか

自ら止まる地震破壊の性質

亀 伸樹 山下輝夫

地震の大きさの観測データと従来の破壊理論による予測結果とはまったく正反対になる。理論の立場からは、いったん始まった破壊は非常に止まりにくいことが示される。しかし、観測によると地震はすぐに止まるのがほとんどであり、大地震にまで成長することはむしろまれである。みえない地中で、地震破壊はどのように進み、どのようにして止まっているのであろうか。それを解明する新たな破壊停止機構のモデルを示そう。

地震は、地殻内部に発生した亀裂(断層)が弾性波速度近く(2~3 km/秒)で成長する高速破壊現象である。地震には、断層の長さが数百 km に至るマグニチュード(M)8 クラスの巨大地震から、数 m 以下($M0$ 以下)の微小地震までが存在する。大きい地震と小さい地震の発生数の違いをみてみよう。観測によると、マグニチュードが1大きくなるごとに発生地震の数は約10分の1に減ることがわかっている。この関係は発見者の名前からグーテンベルグ-リヒター公式と呼ばれている⁽¹⁾。

マグニチュードが4違う場合、例えば、 $M3$ と $M7$ の地震(断層長さはそれぞれ0.4 kmと40 km程度)では、地震発生個数の比は1万対1になる。すなわち地震というものは、小さいマグニチュードのものが圧倒的多数を占め、大きな地震はほんの少数なのである。このような実際の地震のおき方をみる限りでは、地殻内部の破壊はいったん成長を始めてもすぐに止まってしまうのがふつうで、大きくなるほうがむしろみえにくい。

われわれの破壊現象に対する感じ方は、おそらくこれとは正反対であろう。例えば、ガラス板を両端から力をかけ、曲げて割ってみると、割れ目が一気にガラス板を横切る破壊ですべてが終了す

る。この場合、ガラスは引き裂かれて破壊する。われわれがふだんにする破壊は、この引っ張り破壊である。これに対して地震の場合は、圧縮応力が作用する中で互いにずれる方向で物が壊れる、いわゆる剪断破壊である。岩石を用いた剪断破壊の実験には強力な加圧装置が必要になる。10 cm程度の岩石試料で実験をおこなうと、いったん破壊が始まるとあっという間に試料全体が壊れてしまう。剪断破壊の停止をみるために、もっと大きな岩石破壊の実験をしたいところであるが、装置の大きさの制約から現状では不可能である。

破壊力学理論は、亀裂がどのように成長を始めるかについて多くのことを明らかにしてきた⁽²⁾が、いったん成長を開始した亀裂が、どのように自然に停止するのかということについては未解明のままである。しかし、地震破壊がどのように停止するかということ定量的に理解することは、地震の規模の予測の観点からも重要な課題である。

地震の力学モデル——破壊の開始と停止

これまでの破壊力学の立場から地震破壊現象を考えてみよう。破壊力学というのは、とくに亀裂の先端に注目して、先端がこれから成長するの

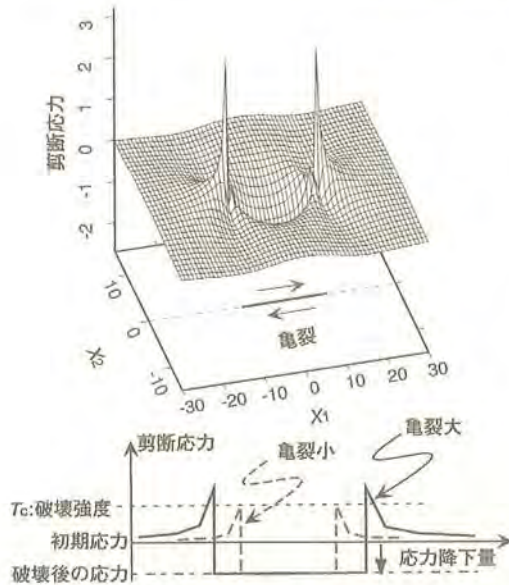


図1 亀裂によって引きおこされる剪断応力の変化。亀裂面上でずれが生じ、剪断応力が低下すると仮定する。なお、このようなずれを“右ずれ”といい、逆方向のずれ(二つの矢印の方向が逆になったもの)を“左ずれ”という。

否かを力学的に決定する理論である。地震破壊は、弾性体中にある剪断型の亀裂が高速に成長することによって蓄積した弾性エネルギーを解放する過程としてモデル化される。

理想化された状況として、亀裂の出現前に媒質の各点に作用している剪断応力(これを以下、初期応力と呼ぶ)、および、破壊強度の分布が場所によらず一様であるようなものを用意する。なお、剪断応力とはずれをおこそうとする応力であり、初期応力は、亀裂のはるか遠方で媒質に加わっている応力によって生ずるとする。

この媒質中に剪断型の亀裂が出現し、成長を始める前の状態をまず想定しよう。この亀裂の作り出す剪断応力は、図1のようになることがわかっている。亀裂面上ではすでにずれが生じているので剪断応力は、初期応力より低下している。いっぽう、亀裂の先端では剪断応力の集中がみられる。この応力の集中の度合いは、亀裂の長さとその亀裂面上で解放される応力の大きさ(応力降下量)に比例する。破壊現象は、この亀裂先端での応力集中の度合いと媒質の破壊強度の観点から記述される。この段階では、まだ亀裂先端での応力集中は

媒質の破壊強度を越えておらず、亀裂は静止したままである。この状態から先、しだいに遠方で加わっている応力が増すと亀裂先端の応力集中が媒質の破壊強度を越えるときがある。これが地震の始まりである。

上のような状況下でいったん破壊が始まると、亀裂の成長は急激に加速され弾性波速度(2~3 km/秒)程度で高速伝播するようになり、そのまま永遠に停止しないことが破壊力学によって示される。応力集中は、亀裂の長さに比例するから、亀裂の成長とともにどんどん増えていく。破壊が開始するときの応力集中がちょうど破壊強度と等しかったわけであるから、成長開始後、亀裂先端の応力集中が破壊強度を下回ることにはない。こうして、初期応力と破壊強度分布が場所によらず一様な場合、破壊が止まることがないことがわかる。

ではどうすれば地震は止まるのか

従来、地震破壊の停止は、“初期応力”と“破壊強度”の分布の非一様性から説明が試みられてきた。以下、この二つの量を破壊パラメタとよぶ。そもそも応力の加わっていない領域にまで亀裂先端が達すると、亀裂が進展しても応力が解放されなくなり、破壊は止まりやすくなる。これは実際、プレート境界で発生するような巨大地震の場合に当てはまる可能性はある。この場合、応力が十分加わっている領域全体を破壊しつくして止まることになる。しかし、これは地震破壊の停止機構のうちのほんの一部であろう。大地震発生前の十分広範囲に高い応力が加わっている場合にもなお、ほとんどの地震は小さいまま止まっているからだ。

つぎに破壊強度の非一様性の観点から、破壊の停止を考えてみよう。破壊強度が局所的に高く、亀裂が進むことができない領域は、バリアと呼ばれている。前に述べたように、亀裂先端の応力集中の度合いは亀裂の長さに比例して大きくなるので、大きく成長した亀裂ほど、その停止に強いバリアが必要になる。過去の定量的な研究の結果、ある程度より大きくなった亀裂を止めるには現実的でないほどの破壊強度が必要になることが明らか



図2 1943年鳥取地震の推定震源断層⁽⁴⁾。この地震では、震源断層の中央部分の一部が地表に現われただけで、残りの部分の形は地震発生後におこなわれた測地測量データから推定された。矢印は地震に伴う水平変位を表わす。記号—で示された部分は地表に現われた断層であり、----の部分は測量データから推定された地下断層。

かにされた⁽³⁾。このように、従来の力学モデルでは、いまだに地震破壊の停止を説明することができないのである。

破壊面の形

これまでの地震破壊の力学モデルでは、暗黙のうちに、破壊はまっすぐに成長すると仮定してきた。これには大きく二つの理由がある。一つには、地震断層は大まかにみると直線的な構造をしていて、地震破壊のモデル化の第一歩としては十分よい近似になっていたことがある。実際、破壊停止現象を除けば、まっすぐな破壊成長のモデルでほとんどの地震現象の説明がついてきた。

もう一つは、数学的なむずかしさから破壊の成長方向がまっすぐなモデルでしか高速破壊のシミュレーションができなかったからである。まっすぐに破壊が進むという暗黙の拘束条件の下、破壊パラメタの非一様性の観点から地震破壊の停止を理解しようとしたが、うまくいかなかった。これは、破壊の停止を考えるのに破壊パラメタの非一様性だけでは不十分であることを意味している。

そこでわれわれは破壊の成長を支配する要素として、破壊面の“形”に注目する。まっすぐでない破壊面の例として1943年の鳥取地震($M7.2$)の断層をみてみよう(図2)。

この鳥取地震の推定断層は、破壊停止端で大きく屈曲している。なぜ、このようなことがおきたのだろうか。実は、破壊面は曲がろうとする性質があることは、かなり昔に(約50年前!) YOFFE

によってすでに理論的に予測されている⁽⁵⁾。彼女は、高速成長している亀裂の先端付近で応力が最も大きくなる方向は亀裂面の延長方向からずれることを指摘した。これは、破壊面には自ら曲がろうとする性質があることを意味している。これまでのモデルでは、破壊面は曲がろうとしているにもかかわらず、計算手法がないという理由から、不本意にも無理矢理まっすぐ進めていたことになる。そういう意味で従来の破壊力学研究が意味をもつのは、亀裂が曲がり始める直前までに限られてしまう。したがって、この破壊面の形という要素をモデルに取り入れれない限り、本当の地震破壊の性質を知ったことにはならないであろう。この考えからわれわれは、“破壊面の形を完全に自由にした場合に、破壊はどのような形に成長するのであろう?”という基本的な問題に取り組んだわけである。この問題は従来の計算方法では解けないため、新しい計算手法を開発する必要があった。

われわれが新しく開発した計算手法は、破壊面の形を破壊成長開始に先だてて決める必要がなく、かつ、破壊の成長する方向にまったく制限がないという点において、画期的なものである。破壊面の形が時間とともに形を変えていく問題の解法は数学的に多くの困難があるが、これを何とか克服することに成功した⁽⁶⁾。ここに準備は整った。

形状が自由な破壊のシミュレーション

まず最初に、破壊パラメタが場所によらず一様である場合を考える。これは破壊パラメタの非一

様分布の影響をいっさい排除することによって、破壊そのものの性質を調べるのがねらいである。遠方で加わっている圧縮応力の方向、成長が始まる直前の亀裂の配置を図3に示す。また、ここでは、まず破壊面上の摩擦力が0、すなわち破壊面がもっとも滑りやすい場合を考える。

先端の応力集中が媒質の破壊強度ぎりぎりに達している亀裂を用意し、これを初期亀裂とよぶ。シミュレーションでは物理量はすべて無次元化してある。初期亀裂の長さ $l_0=5$ 、媒質の破壊強度 $T_c=1.21$ である。遠方で加わっている応力をほんの少し増してやると亀裂先端の応力集中が破壊強度を越えて破壊成長が開始する。この時間を $t=0$ にとり、これから後0.5ずつ時間を進めて破壊の成長がどうなっていくかを計算によって決定していく。

計算の手順は以下の通りである。(1)各時間ステップごとに亀裂先端のすぐ前方で、 ± 90 度の範囲で角度 ϕ の方向に沿って剪断応力を計算する。(2)剪断応力が最大になる方向(最大剪断応力軸)とその値を決める。(3)剪断応力の最大値が破壊強度を越えた場合は破壊面を最大剪断応力軸方向へ長さ1だけ進める。越えていなければ破壊面はそのままにする。(1)(2)(3)を繰り返すことによって破壊面形状の時間発展を求めた。

図4に、計算によって求められた破壊成長のようすを示す。時刻 $t=0$ の静止状態にある初期亀裂では、最大剪断応力軸は $\phi=0$ 度方向を向く、すなわち最も破壊が成長しやすいのは初期亀裂面の延長方向である。破壊の成長開始後、破壊速度は速やかに加速し高速化する。 $t=8$ ではまだ、最も成長しやすい方向は亀裂面の延長方向であり、亀裂はまっすぐに進み続ける。 $t=15.5$ になると最大剪断応力軸が亀裂面からずればじめ、 $\phi=\pm 42$ 度の方向で破壊強度を越える。

このとき破壊面はどちらに進みやすいかを、仮に摩擦力が働いていればという視点から考えてみる。亀裂は右ずれをおこしているので $t=8$ で+と書いた領域には圧縮応力、-と書いた領域には引っ張り応力を作り出す。摩擦力は押しつける力に比例するので+の方向と-の方向を比べる

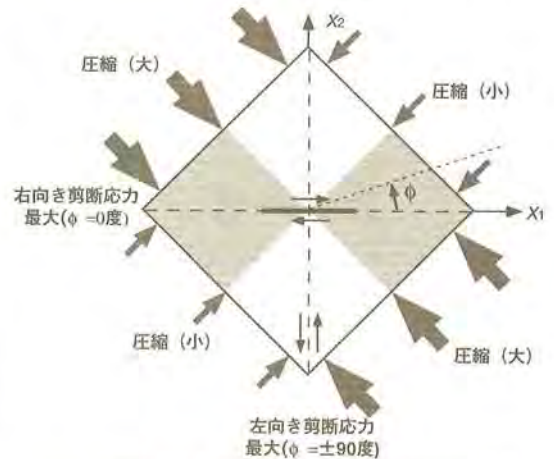


図3 亀裂のモデル配置図と座標系。初期亀裂のはるか遠方で ± 45 度の2方向から圧縮応力が加わっている。剪断応力が最大となる面は x_1 軸上と x_2 軸上の2方向にあり、加わっている剪断応力を解放するずれの向きは、それぞれ右ずれと左ずれで反対となる。ここでは右ずれをおこす x_1 軸上に初期亀裂を置く。 ϕ は x_1 軸から反時計方向に計った角度である。

と一方の亀裂面のほうが摩擦力が弱く、ずれがおりやすいと考えることができる。したがってここでは亀裂は摩擦力の低い側に進むと考えた。

さらに曲がった後の亀裂成長の計算を続けると $t=16.5$ に82度の方向、 $t=18$ に84度の方向で破壊強度を越え、曲がる角度が大きくなっていく。しかし、 $t=18$ から後、亀裂先端の応力を計算し続けても破壊強度を越えることはない。すなわち破壊の成長は $t=18$ で停止してしまう。驚くべきことに、形を自由にした破壊のシミュレーションをおこなうと、剪断型亀裂は自発的に曲がり、その後すぐに自然に止まってしまう結果になった。

自ら止まる地震破壊の性質

なぜ破壊は自分で曲がりその直後に止まってしまうのか、その力学について考えてみよう。亀裂が高速に進展することによって、亀裂先端に集中した剪断応力がつぎつぎに解放され弾性波が放射される。この波動が作り出す亀裂先端付近の応力場には、最大剪断応力軸を亀裂面からずらす効果があったのだ。破壊成長開始直後のまだ速度があまり高くない段階($t=8$)では、波動は亀裂先端のはるか前方を去っていくので波動が亀裂先端付近

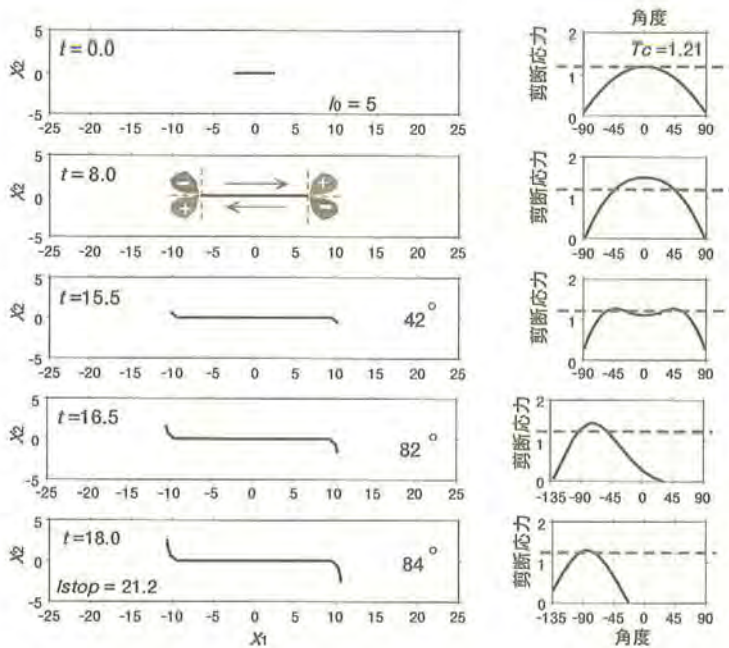


図4 形状を自由とした破壊成長のようす¹⁵⁾。図の右列は各時刻での亀裂先端から角度 ϕ ($-90 < \phi < +90$) の方向に沿う剪断応力を示す (ϕ については図3を参照)。点線は破壊強度である。右ずれの破壊をおこしている亀裂は、 $\phi > 0$ の領域には圧縮応力、 $\phi < 0$ の領域には引っ張り応力を作り出す。

の応力に与える影響は小さく、最大剪断軸は初期亀裂面と同じ方向のままである。したがって、この段階では破壊はまっすぐに進む。しかし、破壊成長速度が高速化し弾性波速度に近くなると、波動先端は亀裂先端のごく近くに存在し続け、波動が応力集中に支配的な役割を果たすようになる ($t=15.5$)。この段階で、亀裂先端の剪断応力軸が亀裂面方向からずれ、亀裂は自発的に曲がり始める。

さて、亀裂の成長速度が高速化すると、亀裂先端付近で波動が支配的な役割を果たすことによって破壊面が曲がるのがわかった。しかし、曲がった後に成長が停止するのはなぜであろう？ その答えは剪断型の破壊が2方向からの圧縮応力の下でおきる点に隠されていた(図3)。

このような応力場では、剪断応力が最大となる面が二つある。一つは ϕ が0度の方向であり、もう一つは90度の方向である。この二つの面にそれぞれ亀裂がある場合、剪断応力を解放するずれは右ずれと左ずれとなり互いに逆向きになる。先ほどのシミュレーションでは、右ずれによって初期応力を解放する0度方向に初期亀裂を置いた。破壊が始まった後、亀裂面上で解放される応力は亀裂自らの成長を加速し、破壊速度は高速化して

いく。亀裂は高速破壊の最中に自らの先端から放射する波動の効果によって自発的に曲がり始め、その後、破壊面の傾きを増していき、亀裂面の傾きが45度を越えると成長にブレーキがかかり始める。それは、そのようなところで右ずれの破壊がおきることによって、亀裂面に応力降下ではなく逆に応力上昇をもたらすことになるからである。亀裂面で応力が上昇する(負の応力降下をおこす)ことによって、亀裂先端の応力の集中の度合いがしだいに低下していくのである(亀裂先端の応力集中の度合いは亀裂面上の応力降下量に比例することを思い出そう)。一様に初期応力が分布している媒質中では、まっすぐに破壊が進む限り亀裂面上では常に正の応力降下をもたらされるはずであったのが、亀裂面が曲がることによって自動的に応力降下が負に転じてしまう。

こうして $t=18$ 以降、亀裂先端の応力の集中は破壊強度を越えることができなくなり、亀裂の進展は停止してしまうのである。

非一様性の“逆”効果

破壊シミュレーションの結果、破壊パラメタの分布が場所によらず一様な場合には、破壊は自ら

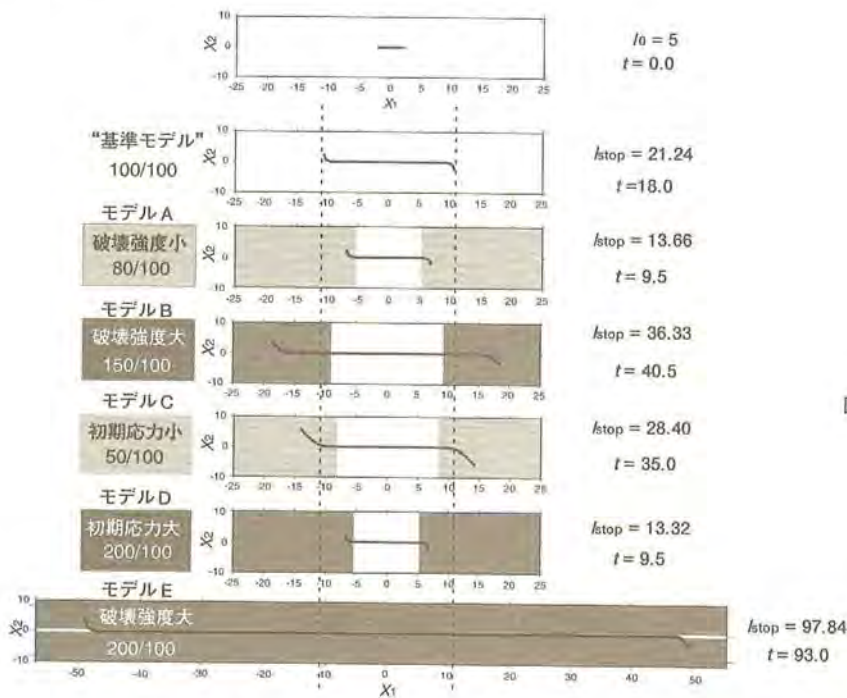


図5 破壊パラメタの分布に非一様性がある場合の最終亀裂長の比較⁽⁹⁾。灰色で表わした領域の力学的性質は、基準モデルと異なっており、基準モデルからの相違を百分率で示した。 l_{stop} は破壊が停止したときの亀裂長、 t は停止時刻を示す。モデルEは、外部の岩石より破壊強度が低くなっている、断層帯のモデル。

すぐに止まってしまうことがわかった。この自発的に止まる剪断破壊の観点から、ほとんどの地震が小さい理由が説明できる。剪断破壊はすぐに止まることが本性であり、止まらないことを心配する必要がそもそもなかったのである。しかし、今度は逆に“どうすれば破壊は止まらずに大きくなるのだろうか？”という問題が生じることになる。

先の計算では破壊パラメタが一様に分布する場合を考えてきたが、地震がおきる断層帯にはこれらは完全一様に分布しているわけではない。非一様性がある場合に、破壊はどこまで成長できるであろうか。

破壊パラメタの分布が一様なモデルを基準にとり“基準モデル”と呼ぶことにしよう。“基準モデル”では初期亀裂の長さ $l_0=5$ 、破壊強度 $T_c=1.21$ で計算を始め、最終亀裂長 $l_{stop}=21.24$ であった（これは初期亀裂の長さの約4倍の大きさである）。

では、非一様性を導入したモデルで破壊シミュレーションを実行し、その結果を“基準モデル”と比較してみよう。最初に考えた非一様性は、初期応力の大小と破壊強度の大小を考慮した計4種類の非一様性モデルである。ここで用いた非一様性の度合いは、従来のまっすぐな形の破壊計算の

際には破壊停止にまったく効果がないほど弱いものである。初期亀裂の周辺(図5の白地領域)での破壊パラメタの値は基準モデルと同じにそろえ、亀裂がある程度成長してからその値が異なる領域(灰色地)に先端が進入するように設定した。それぞれについて、破壊成長の計算をおこない成長停止後の破壊面形状を決定した(図5)。

計算結果をみると、“基準モデル”より最終亀裂長が小さくなったモデルA、Dと大きくなったモデルB、Cに分かれる。それぞれの非一様性をみていこう。モデルA、Dでは、それぞれ、初期亀裂の外側に破壊強度が低い領域と、初期応力の大きい領域を考えている。従来の考え方に従って破壊はまっすぐに進むものとする限りでは、これらの非一様性は破壊をより促進し、止まりにくくする要素である。しかし、形が自由な場合には破壊成長が促進されると速やかに高速化し、より早く曲がり始める。したがって、より短い亀裂長で破壊が停止してしまう。モデルB、Cでは、それぞれ、破壊強度が高いか、または、初期応力が小さい領域を初期亀裂の外側に想定している。これらの非一様性は、破壊の成長を抑制する要素と従来考えられてきた。しかし、形が自由な場合に

は破壊がなかなか高速化しないため、曲がりをはじめるのが遅くなる。その結果、最終亀裂長が大きくなってしまふ。このように、初期応力と破壊強度の非一様性は、従来の破壊停止の考えとはまったく正反対の効果をもたらすことがわかる。

もう一つ、地震がおきる場所に特徴的な、強度の非一様性について調べておく。地震が繰り返しおこることによって、断層帯と呼ばれる厚さが数cmから数百mの破碎帯が形成される。断層帯内部の岩石は、繰り返し破壊を受けることによって、外部の岩石よりも破壊強度が低くなっている。この断層帯を単純化して、強度の高い岩石に強度の低い断層面がサンドイッチされているとしたのが、図5のモデルEである。この単純化は、亀裂の長さが断層帯の厚さに比べて十分に大きくなった場合に意味をもつ。

この場合、亀裂は曲がろうとしても周囲の破壊強度の高い部分に阻止され、なかなか曲がれない。したがって、弱面に沿って長く成長を続け基準モデルよりも大幅に大きい最終亀裂長 $l_{stop} = 97.84$ にまで達した。これは亀裂先端の応力集中が亀裂面から傾き、かつ、周囲の破壊強度の高い領域を破壊するには、亀裂が大きくなり破壊速度が十分に高速化する必要があるからである。

このように、断層帯の非一様構造は、最終亀裂長を大きくしやすい性質を備えていることがわかる。ただ、それが断層帯が力学的に弱く破壊が容易だからではなく、外側の強度が高く、曲がって止まることがむずかしくなるからだという点には注意すべきである。

自然断層の屈曲方向のパラドックス

先の計算では破壊面が枝分かれしようとしたとき、二つの成長方向のうち摩擦力が減り剪断破壊がおきやすい方向を選択して計算をおこなった。しかし、このときの破壊面の曲がる向き(図4)は、鳥取地震の際の断層の曲がる向き(図2)とは反対になっている。日本の活断層の調査によると、鳥取地震の場合と同じく地震断層は摩擦力が増す方向に曲がっていることがふつうであることが報告

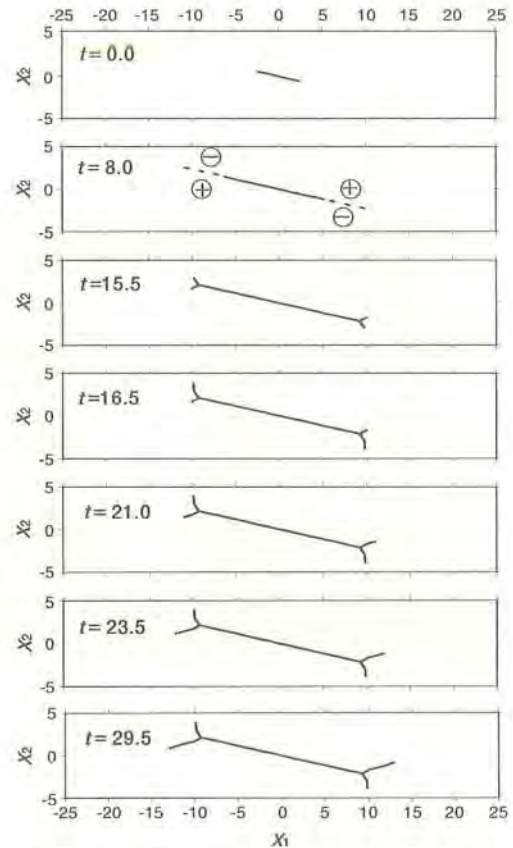


図6 摩擦力を考えた場合の破壊成長のようす⁽¹⁰⁾。摩擦係数は0.5とした。破壊面は枝分かれした後、最終的には亀裂の作り出す応力場が圧縮(摩擦力が大きく、すべりを抑制する)の+方向への成長が大きくなる。

されている⁽⁷⁾。断層が摩擦力が増す方向にわざわざ伸びる力学的なパラドックスはなぜ生じるのであろうか。

ここでは亀裂が分岐できるように条件をゆるめ、亀裂が枝分かれした後の亀裂面上に作用する摩擦力の違いが破壊面の形をどのように変えていくかシミュレーションによって調べてみよう。摩擦力が亀裂面に作用する場合、亀裂先端の応力集中が最大になり最も破壊が始まりやすい初期亀裂の方向は、基準モデルの場合から少し傾く。この場合の破壊成長のようすを図6に示す。

順を追って破壊成長のようすをみていこう。 $t = 15.5$ で初期亀裂の延長方向からずれた2方向で破壊強度を越える。そして破壊面が分岐する。 $t = 16.5$ で亀裂の作り出す応力が引っ張りの方向に

伸びた分枝では摩擦力が低く、ずれがおきやすくなり成長が促進される。圧縮の方向では、ずれにくくなるので亀裂の先端は伸びない。ここまでは、摩擦力が低い方向に破壊が進むと考えた“基準モデル”と同じ結果になる。

しかし、引っ張り方向に伸びた分枝の進展は、 $t=16.5$ 以降その成長を停止してしまう。なぜなら、破壊が成長しやすいために亀裂面がすぐに大きく傾いてしまうからである。前に述べたように、大きく傾くほど成長に急激なブレーキ効果がかかる。いっぽう、摩擦力が大きくなる方向の分枝では、成長しにくいために亀裂面はあまり広角度に曲がらない($t=21$)。したがって、成長を止める効果が相対的に小さくなり、亀裂はしばらくの間成長を続け($t=23.5$)、 $t=29.5$ にやっと停止する。こうして、最終的な分枝の長さは、亀裂による応力場が摩擦力を増す方向に長くなる。一見すると力学的に矛盾しているようにみえる地震断層の屈曲方向が、実は摩擦法則に従う破壊成長の自然な結末であることを、われわれの計算結果は示している。

断層帯の形成と地震活動

長い地質学的時間の中に地震が繰り返し起こることによって、断層帯は形成される。地質学的な時間で変化していく断層帯構造と地震活動の関係を、自発的に止まる地震破壊の性質から考えてみよう。

断層帯がまだ未発達な段階では、地殻は比較的一様な破壊強度分布をしており、地震破壊は自発的に曲がりすぐ止まってしまう。断層がないところに大地震がおきないことがわかる。このような小さな地震がおこり続けるにつれ、小規模の既存破壊面が増えていく。こうなると破壊成長の最中に他の既存破壊面と結合することができるようになり、中規模な準直線的な破砕帯構造がつぎに構築されていく。それぞれの破壊過程において、破壊停止端では分枝、屈曲の枝構造を作り出すが、これが若い断層帯に存在するステップ構造(破壊面の雁行配列)の成因の一つとして考えられる。

この後、さらに繰り返し地震がおこると断層帯のステップ構造はしだいに平滑化されなめらかな(直線的な)弱面の構造が形成される。断層帯が成熟するにつれ内部物質と周辺岩石との破壊強度のコントラストが高くなっていく。こうなると上に示したように破壊が非常に止まりにくい条件になり、断層帯全体を破壊する大地震がおきるようになると考えられる(図5のモデルE)。

地震破壊の停止機構の理解への大きな一歩が踏み出され、破壊の始まりから停止までシミュレーションをすることが可能になり、原理的に地震の規模予測ができる場所に到着したといえる。今回われわれが考えた破壊の状況は単純であるが、地震破壊の性質そのものを抽出することに適していた。しかし、現実の断層帯で発生した地震破壊に適用する場合には、より実際の破壊過程をモデルに含める必要がある。例えば、断層帯内の亀裂同士が合体する場合だとか、破壊強度の高い塊に亀裂先端がぶつかったときにそれを避けるようにして破壊が進む場合などである。

もう一つ克服すべき課題として現実の断層の破壊パラメタの非一様分布をシミュレーションに必要な精度で知ることが可能かということがある。こちらに関しては、地震学だけでなく他の地球科学的な手法による断層の詳細構造の解明が不可欠である。

文 献

- (1) 宇津徳治: 地震学, 共立出版(1977)
- (2) 石橋克彦・深尾良夫編: 阪神・淡路大震災と地震の予測, 岩波書店(1996)に関連解説が収録されている。
- (3) M. I. HUSSEINI et al.: Geophys. J. R. Astr. Soc., 42, 367(1975)
- (4) 佐藤良輔: 日本の地震断層パラメター・ブック, 鹿島出版会(1989)
- (5) E. H. YOFFE: Philosophical Magazine, 42, 739(1951)
- (6) 亀伸樹: 東京大学大学院理学系研究科学学位論文(1998)
- (7) 松田時彦: 日本の地震学の概観, 地震, 記念特集号, 20, 230(1967)

科学

Science Journal *KAGAKU*

VOL.68 1998 別刷

岩波書店

