

地震はなぜ止まるのか

九州大学 大学院理学研究科 亀 伸樹¹

従来の震源モデルは、成長した亀裂が高速で破壊を続けてしまうため、破壊面の小さな地震ほど数多く発生するという観測事実とあわなかった。亀裂の形状を自由とした新しい剪断破壊のモデルでは、亀裂の先端が曲がるために破壊が停止することがわかった。このモデルによって、活断層の形状や、亀裂がまっすぐ進行する断層帯で大きな地震が発生することがきわめてうまく説明できる。

1 はじめに

地震は、地殻内部に発生した亀裂（断層）が弾性波速度近くの高速度（2～3 km/秒）で成長する剪断破壊現象である。地震破壊がいったん成長を始めたらどのように停止するのかと言う問題は、地震の規模の予測とも関係し、実際面での重要性もきわめて大きい。なぜなら、地震の規模は断層の大きさの対数に比例すると考えられているからである [1]。

いったん成長を開始した破壊は簡単には停止しないというのがこれまでの常識であった。例えば、ガラスの板を両端から力をかけて割ってみると、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。これは、亀裂先端の応力は亀裂の成長とともに単調に増大するということによる。したがって、破壊強度が媒質のどこでも同じ値をとる場合、いったん成長を開始した亀裂は決して止まらないということになる。このことから、もっとも想定しやすい断層成長の停止機構として破壊強度の局所的増大が考えられる（これは地震学では一般にバリアと呼ばれる [2]）。地殻の力学的性質はきわめて不均質であることが知られており、このようなことも十分に起きうる。しかし、「たまたま」どこかにバリアがあるから断層の成長は停止するのであろうか。グーテンベルグ・リヒターの式 [3] と呼ばれる地震の規模別頻度式は、地震の数と断層の大きさの関係に、ある種の明確な規則性の存在を示唆しており、このように「たまたま」停止するのでは、規則性を説明することはできない。さらに、定量的な研究によれば、ある程度より大きくなった断層の成長を止めるには現実的でないほど大きな破壊強度が必要となることも明らかにされている [4]。また、応力がほとんど蓄積されていない領域に断層の先端が突入することによりその成長が停止する可能性も想定されてきた [5]。地震は、一般に地殻に蓄積された歪みエネルギーを解放する過程と考えられるから、地殻応力が十分に蓄積されていなければ、地震の起こりようがないというわけである。しかし、応力が十分蓄積されていると考えられている場所でも

¹E-mail: kame@geo.kyushu-u.ac.jp

小さな地震は数多く起きている。前震がその良い例である。したがって、この考えも一般的ではない。

上に述べた断層の成長停止についての古典的な考え方は、断層はまっすぐであるという命題に基づいているということをもう一度考え直す必要がある。地表の断層のトレースを見ても、必ずしもまっすぐな一つの線ではなく、局所的には曲がった形状をしていることがわかる(図1)。このような断層の複雑な形状は断層のダイナミクスを強く反映しているはずだと我々は考える。断層はまっすぐなものであるという命題は、断層は大まかにみてまっすぐであるという観測事実にもとづいているが、細かな複雑さが断層のダイナミクスと密接に関係することもあるということを決して忘れてはならない。

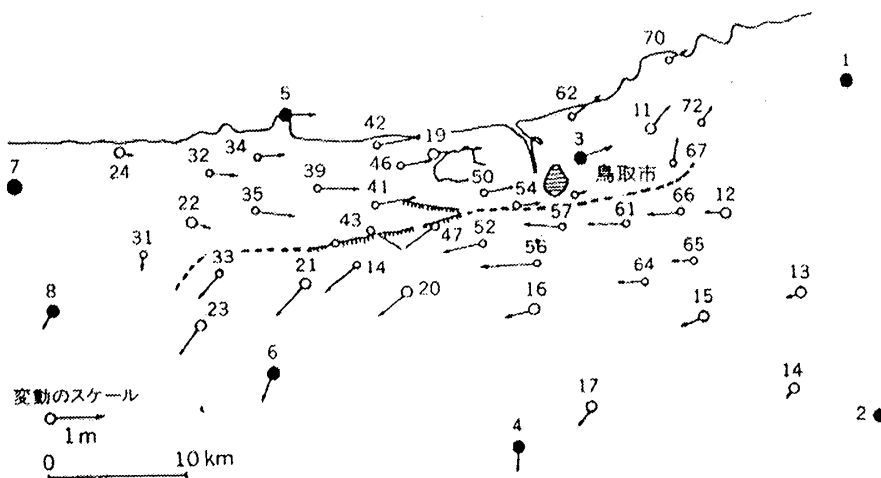


図1: 1943年鳥取地震の推定震源断層 [6]。矢印は地震に伴う水平変位を表す。記号— —で示された部分は地表に現れた断層であり、……の部分には測量データから推定された地下断層である。

我々は、亀裂の幾何学形状を自由にして剪断型破壊の自発的成長を過程をシミュレーションにより考察し、地震のような剪断型の破壊はむしろ停止しやすいのだということを説明する [7, 8, 9]。この考えはいくつかの面では、古典的な直感とは反する興味深い結果を導くものの、地震断層についての野外観測の結果などとたいへん調和的である。

2 亀裂の形状を自由にした破壊成長のシミュレーション

我々は、亀裂の屈曲や枝分かれを許す新たな計算手法を開発し [10]、断層のダイナミクスによりその形状はどのように変化し、また、形状変化が断層の成長過程にどのように影響を及ぼすのかという問題を考察した。その結果のいくつかを以下に紹介する。モードIIの2次元剪断型の破壊を取り扱う。媒質には遠方から圧縮応力が加わっていて、破壊している間も一定値に保たれるものとする。圧縮応力の方向や破壊成長直前の亀裂の配置を図2に示す(幅の大きい矢印ほど圧縮応力が大きいことを表す)。図2に示した応力状態で亀

裂を $X1$ 軸上に置いた場合は、右ずれにより破壊は起こる（つまり、右ずれによってのみ蓄積した剪断応力を解放する）。以下の計算では物理量はすべて無次元化してある。

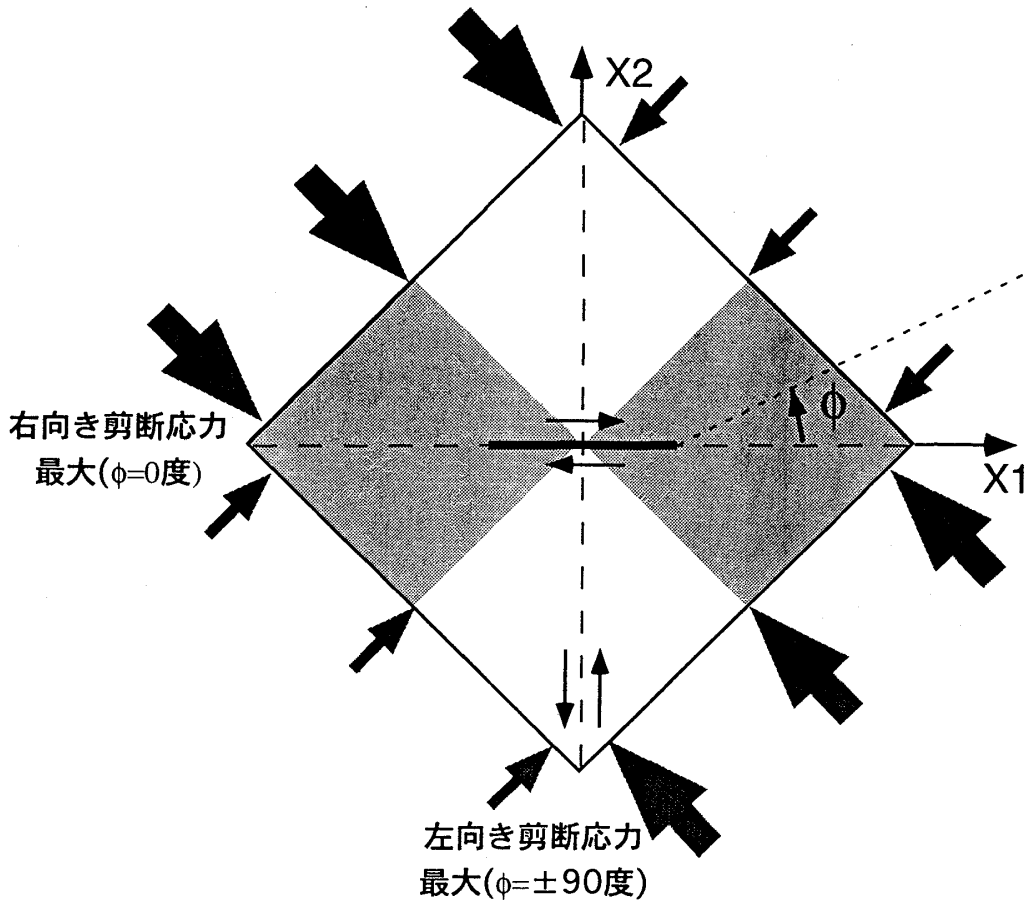


図 2: モデル配置図と座標系。初期亀裂のはるか遠方で $\pm 45^\circ$ の 2 方向から圧縮応力が加わっている。剪断応力が最大となる面は $X1$ 軸上と $X2$ 軸上の 2 方向にあり、加わっている剪断応力を解放するずれの向きは、それぞれ右ずれと左ずれで反対となる。ここでは右ずれを起こす $X1$ 軸上に初期亀裂を置く。 ϕ は $X1$ 軸から反時計方向に計った角度である。

破壊基準には最大応力破壊基準を採用した [11]。シミュレーションの各時間ステップにおいて亀裂先端グリッドでの周剪断応力を計算し、その最大値が破壊強度 T_c を越える時にはその最大値を取る方向に 1 グリッド亀裂を伸ばす。この作業を繰り返すことにより破壊成長の時空間履歴を求める。

まず最初に破壊強度 T_c が場所によらずどこでも一定 ($T_c = 1.21$) の場合を考察しよう。これは、破壊そのもののダイナミクスを調べるのがねらいである。図 3 に計算によって求められた亀裂の成長の様子を示す。時間 $t < 0$ では静止状態にある亀裂が、遠方に作用している応力の増大により、 $t = 0$ でその先端での剪断応力の値が破壊強度に等しくなり成長を開始する。応力値が破壊強度に等しくなるのは亀裂面の延長方向 $\phi = 0^\circ$ であるので、まず $X1$ 軸上を直線的に進み始めることになる ($t = 0.0$ と $t = 8.0$ 参照)。いったん成長を開始すると亀裂先端の成長速度は直ちに高速化し、S 波速度に漸近していく。そ

の際、亀裂先端付近の応力値は、亀裂の延長方向からずれ始め、時刻 $t = 15.5$ では、亀裂の延長面から $\pm 42^\circ$ だけずれた面の上で最大値をとり、そこで破壊強度を超える。

このとき、亀裂はどちらへ進む可能性が高いのかということを考えて見よう。右ずれ型の破壊が起きているわけだから、 $t = 8.0$ で + と書いた領域では圧縮、- と書いた領域では引っ張りの状態になっている。滑っている面に働く摩擦力は面を押しつける力に比例するから、- と書いた方向へ進んだほうが摩擦力が小さくずれが起こりやすいと考えられる。そこで、ここでは引っ張りの領域の方へ破壊は伸展していくと仮定した。計算を続けていくと、時間と共に亀裂先端の屈曲は高角度となり、 $t = 18.0$ では、亀裂の成長は停止してしまう。 $t = 18.0$ 以降計算を続けても亀裂先端の応力値が決して破壊強度を越えることがないからである。すなわち、破壊強度がどこでも一定でも破壊の成長は自然に停止してしまうのである。なお、 $t = 15.5$ で亀裂先端が分岐を起こし、圧縮および引っ張りの両方向へ進むとしても、屈曲後しばらくすると同様に成長を停止する。

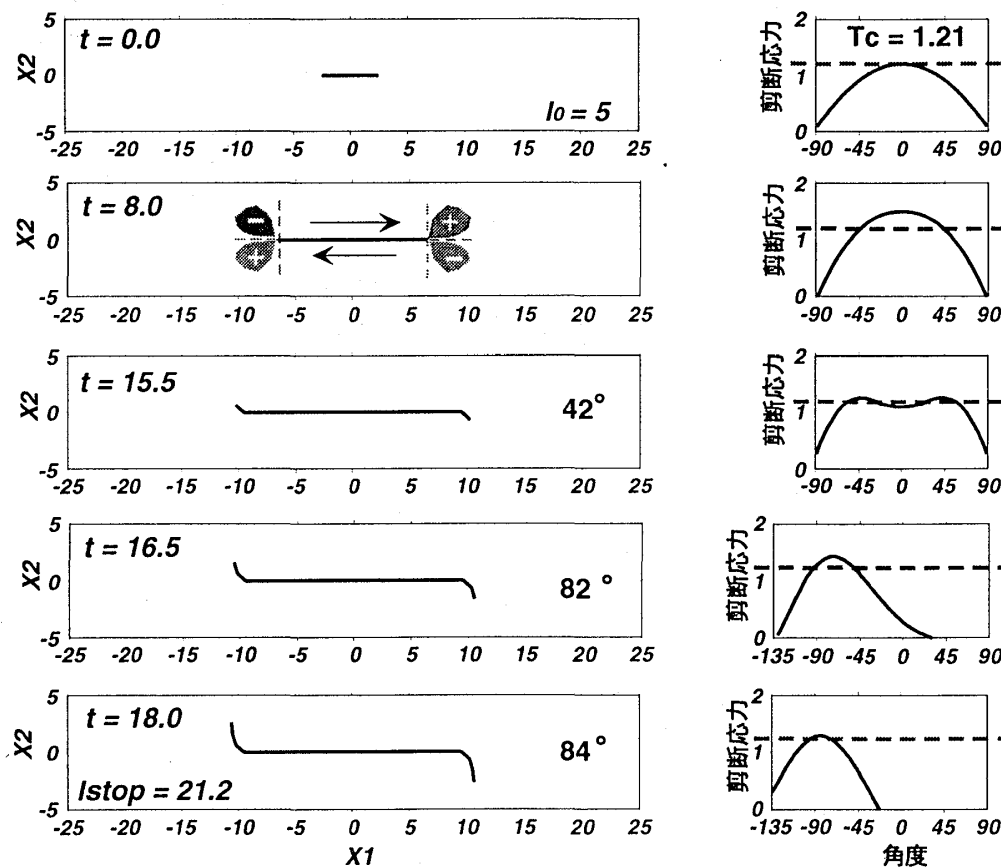


図 3: 形状を自由とした破壊成長の様子 [10]。図の右列は各時刻での亀裂先端から角度 ϕ ($-90 < \phi < +90$) の方向に沿う剪断応力を示す (ϕ については図 2 を参照)。点線は破壊強度である。右ずれの破壊を起こしている亀裂は $\phi > 0$ の領域には圧縮応力、 $\phi < 0$ の領域には引っ張り応力を作り出す。

3 なぜ曲がり、なぜ止まるのか

亀裂は、なぜ曲がり、また、なぜその成長を停止してしまうのか、その力学を簡単に考えてみよう。

亀裂が成長する際には、その前方に弾性波が放射される。亀裂先端の成長速度がS波速度に近くなると、弾性波が作り出す波動場が剪断応力が最大となる面を亀裂面の方向からずらす作用をする [12]。図3に示すように、亀裂先端の成長速度が余り大きくない段階 ($t = 8.0$) では、剪断応力は亀裂の延長方向で最大値をとり、まっすぐに進む。しかし、成長速度がS波速度に近くなると、剪断応力が最大となる面は、亀裂の延長方向からずれ始める。これは、波動エネルギーが亀裂先端付近に局在することと大きな関係があると思われる。これにより、亀裂先端は屈曲を始める。

曲がった後での停止機構は、破壊が図2に示した圧縮応力のもとで起こるということと密接に関係している。いったん亀裂が曲がり始めると徐々に屈曲角度は大きくなり、X1軸からの傾きが 45° を越える。図2からわかるように、亀裂面のX1軸からの傾きが 45° から 135° の間(または、 -45° から -135° の間)にあれば、左ずれの破壊でのみ、蓄積した剪断応力は解放される。また、X1軸からの傾きが -45° から 45° (または、 135° から 225° の間)の間にあれば右ずれ型の破壊でのみ、剪断応力の解放は起きる。我々のシミュレーションでは、初め亀裂はX1軸の方向を向いていたので右ずれの破壊が起きていた。ところが亀裂先端の屈曲が 45° を越すようになると、右ずれが引き続いて起きているわけだから、屈曲部では応力を解放せず、反対に応力を増大させるようになる。これは破壊の成長を阻害する役割を果たし、最終的に成長を停止してしまうことになるわけである。このようにして高角に亀裂が曲がれば自動的にその成長を停止してしまうことになる。

4 破壊強度の非一様分布の効果

以上の計算では、破壊の本性を知るために、破壊強度がどこでも一定というきわめて理想的な場合を仮定した。しかし、現実の地殻の強度はきわめて不均質であることが知られている。例えば、破壊が成長して行く際、破壊強度が不連続に変化する場合もありうる。また、大きな地震が繰り返し起きていると考えられる断層帯は、破碎がすすんでいるためまわりの媒質より破壊強度は、はるかに小さいと考えられている。

ここでは、破壊強度が場所により異なる場合、前節で得られた結果とどのように違うのか調べてみよう。そのため、破壊強度がどこでも一定であるモデルを「基準モデル」(図4)と呼び、これとの違いを考察する。亀裂が成長を開始した領域の破壊強度は、基準モデルで仮定したものと同一だが、しばらく成長すると、破壊強度が不連続的に変化する場合をまず仮定しよう(図4-AとB)。図4-Aでは、破壊強度が急に0.8倍に減少し、図4-Bでは、1.5倍に増大する。計算結果を見ると、まわりの領域の破壊強度が大きいモデル(4-B)の方が、基準モデルに比べて亀裂は大きく成長する。いままでの我々の素朴な直感によれば、破壊強度が大きければ亀裂はすすみにくく、あまり大きく成長しないはずであるが、

この直感とは正反対の結果が得られたわけである。この理由を簡単に考えて見よう。上に述べたように亀裂先端の成長速度が高速化することにより屈曲を起こし、その成長を停止する。したがって、成長を停止するためには、亀裂先端の成長速度がまず高速化する必要がある。破壊強度が大きな領域では、亀裂先端の成長がなかなか高速化できず、結果として屈曲を起こすまでにより長く進むことになる。反対に、破壊強度が小さければあつという間に高速化して、屈曲を起こし成長を停止してしまう。このことにより図4に示したような現象が生じるのである。これは、複雑な現象にたいする素朴な直感が必ずしも正当ではない例であろう。

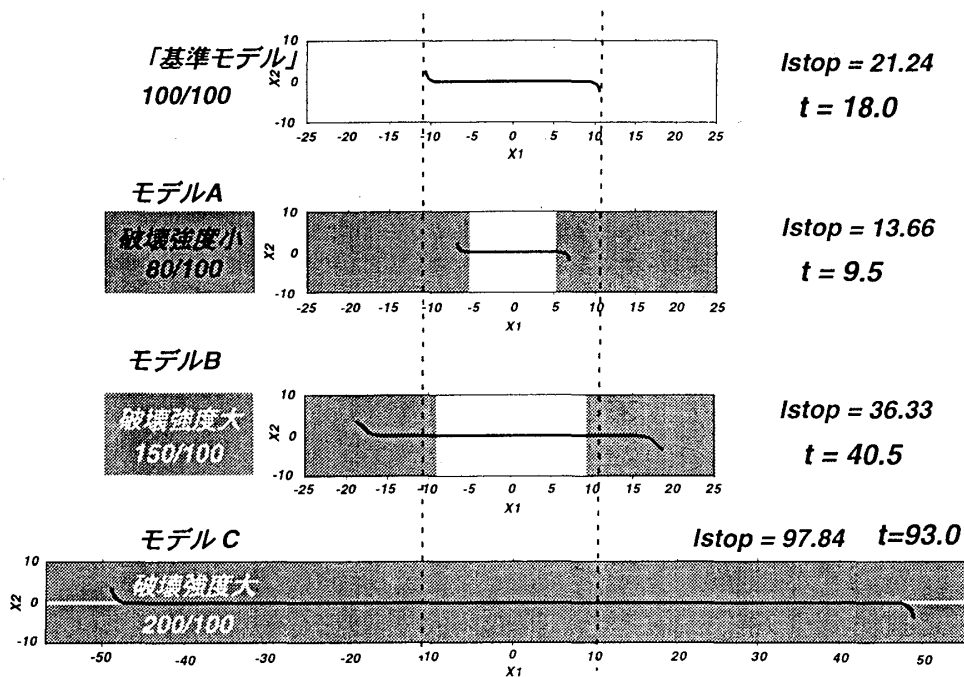


図4: 破壊パラメタの分布に非一様性がある場合の最終亀裂長の比較 [9]。灰色で表した領域の力学的性質は基準モデルと異なっており、基準モデルからの相違を百分率で示した。 l_{stop} は破壊が停止した時の亀裂長、 t は停止時刻を示す。

もう一つ、地震が起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。地震は繰り返しおきることにより断層帯と呼ばれる厚さが数c mから数百mの破碎帯を形成する。断層帯内部の岩石は繰り返し破壊を受けることにより、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4のモデルC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持つ。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 $l_{stop} = 87.84$ 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有るからである。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、注意すべきは、断層帯が力学的に弱く破壊が容易であるからではない。外側の強度が高く、曲がって止まるのが難しくなるからである。

5 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、2つの成長方向のうち摩擦力が減り剪断破壊が起きやすい方向を選択して計算を行った。しかし、この時の破壊面の曲がる向き(図3)は鳥取地震の際の断層の曲がる向き(図1)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普通であるということが報告されている[13]。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どのように起きるのであろうか?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り調べてみよう。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様子を図5に示す。

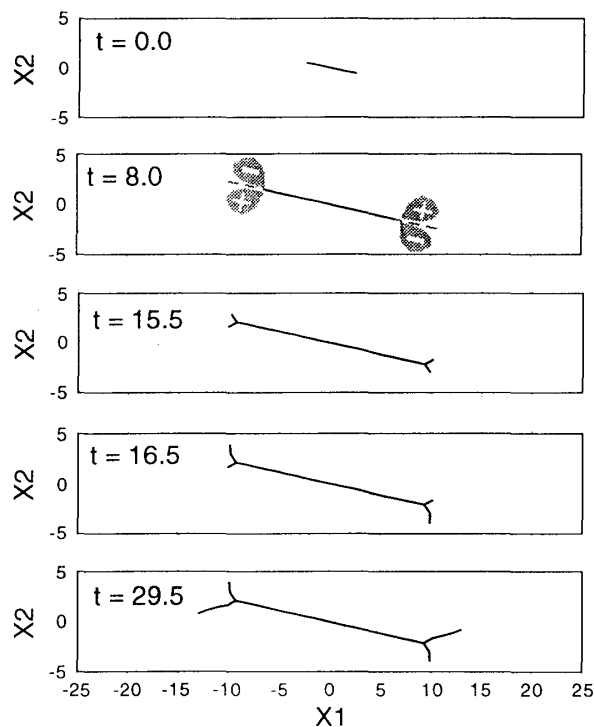


図5: 摩擦力を考えた場合の破壊成長の様子[7]。摩擦係数は0.5とした。破壊面は枝分かれした後、最終的には亀裂の作り出す応力場が圧縮(摩擦力が大きく、すべりを抑制する)の方向への成長が大きくなる。

順を追って破壊成長の様子を見ていこう。 $t = 15.5$ 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、ずれが起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。一方、摩擦力が大きくなる方向の分枝では、成長しにくい為に亀裂面はあまり広角度に曲がらない。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 $t = 29.5$ にやっと停止する。こうして、最終的な分岐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様に見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、我々の計算結果は示している。

6 終わりに

破壊強度や応力が一様に分布していても亀裂先端が自分自身のダイナミクスにより屈曲し、容易に成長を停止しうることがわかった。この屈曲部は全体の断層の大きさに比べてかなり小さいので、地震波の観測などで見つけるのは容易ではない。しかし、このような小規模な構造でも全体の運動を制御しうるのである。地震破壊のダイナミクスを考える際には、おおまかな構造の観察だけでは不十分であること、また、そのダイナミクスは断層形状と密接な関係があることをこれを示唆する。最近の詳細な野外観測によると活断層の端付近では、かなり一般的に枝分かれや屈曲などが観察されている [14]。今後は、地下深部での断層形状の精密な調査もあわせて行い、断層のダイナミクスについての考察を進めて行く必要がある。

謝辞

本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけました

参考文献

- [1] 宇津徳治、地震学 (1966)、共立出版。
- [2] S. Das and K. Aki, J. Geophys. R. **82** (1977), 5658.
- [3] B. Gutenberg and C. F. Richter, Bull. Seism. Soc. Am. **34** (1944), 185.
- [4] M. I. Husseini et al., J. R. astr. Soc. **42** (1975), 367.

- [5] S. M. Day, Bull. Seism. Soc. Am. **72** (1982), 1881.
- [6] 佐藤良輔、日本の地震断層パラメタブック (1989)、鹿島出版会.
- [7] 亀伸樹、大学院理学系研究科学位論文 (1997)、東京大学.
- [8] 亀伸樹、山下輝夫、科学 (1998)、702.
- [9] N. Kame and T. Yamashita, Geophys. Res. Lett **26**. (1999), 1997.
- [10] N. Kame and T. Yamashita, Geophys. J. Int. **139** (1999), 345.
- [11] M. G. Koller et al., Wave Motion **16** (1992), 339.
- [12] E. H. Yoffe, Philosophical Magazine **42** (1951), 739.
- [13] 松田時彦、地震第 20 卷記念特集号 (1967)、230.
- [14] 中田高ら、地質学雑誌 **107** (1998)、512.