

Mechanical Property of the Initial Break
in Earthquake Rupture Process Derived
from Broadband P Waveforms

（広帯域P波記録を用いた地震の初期破壊の力学的特性に関する研究）

学位論文内容の要旨

室内での岩石破壊実験や破壊の構成則に基づく理論的研究により、今日までに自然界における地震発生の初期状態には次の3つの段階があることが予想されている。すなわち、まず初めに本震の発生場所近くで、(I)準静的に震源核が成長していき、これがある臨界状態に達すると、(II)動的ではあるがその破壊先端の伝播速度が約50m/sec程度のゆっくりとした動的破壊伝播相に移行し、やがて伝播速度が爆発的に加速されて、ついには(III) 約2km/secから4km/secもの非常に早い速度で破壊先端が伝播する高速破壊伝播相に至ると考えられている。

通常、我々が感じることのできるような、ある程度の大きな地震の揺れを放射することができるのは高速破壊伝播相(III)だけである。もし震源近傍において高性能の地震計で地震を観測することができれば、高速破壊伝播相(III)の直前の爆発的加速過程も捉えることができる(例えば、Iio, 1992)。しかしながら、ゆっくりとした動的破壊伝播相(II)は室内実験で確認できる程度の小さな信号しか出さない。震源核の準静的成長過程(I)に至っては、室内実験でもこれを捉えることは難しい。

地震予知の研究において、地震発生に至る初期破壊過程はもっとも興味を持たれるところであり、震源核の形成や地震破壊の開始条件などに関して数多くの理論的研究がなされている。

しかしながら、地震予知の実際的な側面からすれば、破壊の開始そのものよりも、破壊が始まったのちに、その地震がどのような大きさにまで成長するかが大問題である。仮に震源核の形成に伴う歪み変化や前震活動を検知して地震の発生を予測することができたとしても、その地震の"種"が小さな地震で

終わるか、それとも大地震に発展するかを判別する、破壊成長予測の手法が同時に開発されないと、地震予知の実用化には役立たない。小さな地震の予知は不要なのである。

現在、地震の破壊成長に関して2つの決定論的モデルが提出されている。上述したように、破壊の爆発的加速過程の以前の状態を観測によって捉えることは現在のところ不可能であるので、これらのモデルはいずれも爆発的加速過程以降の破壊成長を取り扱っている。破壊の構成則に基づく理論的研究により、芝崎ら(1993)は高速破壊伝播相(III)に対応する地震波形の最初の立ち上がりが緩やかであるほど、大地震に発展するというモデルを提案した。一方、深尾ら(1992)はさまざまな地震の解析結果に基づき、破壊の階層構造モデルを提出した。これは深尾と古本(1985)のモデルを発展させたものと考えることができる。このモデルは地震波形の最初の立ち上がりが急なほど、その地震が大きくなることを予言するが、波形の最初の立ち上がりが影響を及ぼすのは最初のうちだけであり、さらに遠い将来の最終的な地震の大きさは波形の最初の立ち上がりによって規定されていないと主張する。微小地震の震源近傍における高性能の地震観測によって、飯尾ら(1993)は微小地震($M \approx 3$)では地震波形の最初の立ち上がりが急なほど大きな(微小)地震に発展することを見い出した。芝崎ら(1993)と飯尾ら(1993)は、地震波形の最初の立ち上がりがその地震の最終的な大きさを規定していると主張しているわけであるが、上述のように両者は地震波形の最初の立ち上がりが果たす役割に対して真っ向から対立している。

本研究では広帯域地震計記録の波形解析を行ない、地震の初期破壊過程の力学的特性を調べることを第1の目的とした。また、その結果に基づき、地震の破壊成長予測に関する上述の問題を論じることを第2番目の目的とした。

解析に使用したのは主にIRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) の広帯域P波波形記録である。この広帯域波形記録は0.005Hzから5Hzの周波数範囲において地動速度に比例している。解析に使用したもう一つの広帯域波形記録はいわゆる村松式速度計(村松, 1977)で記録されたものであり、この記録は0.025Hz から20Hzの周波数範囲において地動速度に比例している。第2章では解析の際に必要な理論波形の計算方法について述べた。本研究では幾何光学的な波線理論を用いた。この方法の長所は少ない計算時間と小さな記憶容量で理論波形が計算できる点にある。地球内部の速度構造としてJeffreys and Bullen(1940)のモデルを使用した。また上部マント

ルの非弾性減衰の効果はMikumo and Kurita (1968)のQ構造モデル使って補正した。地震の発震機構解としては、Harvard大学とアメリカ地質調査所によってルーチンの決定されているものを使用した。

まず、初めにどのような解析手法を使うのが地震の初期破壊過程を調べるのに最も適しているのかを第3章で考察した。時間領域あるいは周波数領域において定式化されたたくさんの解析手法の中から、[厳密な意味で初期破壊過程を客観的に推定しなければいけない]という観点に立って選び出されたのは、Lawson and Hanson (1974)が考案したNNLSという方法であった。

第4章では実際の地震32個(マグニチュード $M=5$ 以上)にこの方法を適用して、その初期破壊過程を推定した。その際、P波の立ち上がり付近の数秒間の部分だけを解析に用いた。これにより地球内部の不均質構造によって発生するP波の後続波の影響を最小限に抑えた。

第5章では、第4章で実際に推定した32個地震の初期破壊のいくつかの力学的性質(パラメーター)を調べた。それらは初期破壊に伴う実効応力 $\bar{\sigma}_c$ 、初期破壊の地震モーメント $\bar{m}_1$ 、初期破壊の継続時間 ΔT_1 、そして初期破壊の臨界サイズ $\bar{r}$ などである。このうち、実効応力 $\bar{\sigma}_c$ と臨界サイズ $\bar{r}$ はSato and Hirasawa (1973)の準動的割れ目モデルを仮定して推定した。臨界サイズ $\bar{r}$ は断層面内の不均質さの指標であると考えることができる。

第6章で、上記4つのパラメーターの間の経験的關係が主に調べられた。その結果わかったことの中で次の4点は重要である。

(1)深さ300kmよりも深い場所では初期破壊に伴う実効応力 $\bar{\sigma}_c$ は約10MPaから数百MPaの値を取る。このことから、沈み込んだプレートは数百MPaの応力に耐えうる固さを持っていることがわかった。

(2)地震が発生することが可能なすべての深さの範囲において、初期破壊の臨界サイズ $\bar{r}$ はほぼ同じ値を取り、1kmから10kmの間に分布している。すなわち、断層面内の不均質さの程度は浅くても深くても変わらない。このことは断層面内の不均質さは静水圧的な岩圧の影響を受けていないことを示していると考えられる。

(3)初期破壊に伴う実効応力 $\bar{\sigma}_c$ が大きい(すなわち、地震波形の最初の立ち上がりが急である)と、初期破壊のもの地震モーメント $\bar{m}_1$ が大きくなる(近い未来の地震の大きさが大きくなる)ことが確認された。

(4)初期破壊に伴う実効応力 $\bar{\sigma}_c$ (すなわち、地震波形の最初の立ち上がり)とその地震の最終的の大きさには明らかな因果關係が認められなかった。

(3)と(4)は深尾ら(1992)の階層構造モデルを支持している。階層構造モデルは決定論的部分と確率論的部分をもっているが、このうち、決定論的部分から予測される破壊の奇妙な伝播様式は観測事実としては認められていない。自然界に起こる地震の破壊成長を本当に支配しているであろう破壊成長のモデルは本研究で得られた、上記4点とそれ以外の解析結果を満足していなくてはならない。

本研究で得られた解析結果を踏まえて、第6章の最後で1つの定性的な破壊成長モデルを提出した。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	岡 田	廣
副 査	助教授	森 谷	武 男
副 査	助教授	中 西	一 郎
副 査	講 師	笹 谷	努

学 位 論 文 題 名

Mechanical Property of the Initial Break in Earthquake Rupture Process Derived from Broadband P Waveforms

(広帯域P波記録を用いた地震の初期破壊の力学的特性に関する研究)

近年の精密な岩石破壊実験や破壊の構成則に基づく理論的な研究により、地震発生には次の3つの段階が存在すると考えられている。すなわち、(Ⅰ)震源域における準静的な震源核の形成とその成長、(Ⅱ)破壊の伝播速度が約 50m/sec 程度のゆっくりとした動的な破壊伝播相、(Ⅲ)約 2km/sec から 4km/sec の破壊速度をもつ高速破壊相である。地震予知を成功させるためには、地震の発生に至るこれらの個々の段階を正確に把握することが肝要である。しかし、通常、我々が地震計でとらえることのできるのは、高速破壊相(Ⅲ)だけである。本研究は、この高速破壊相(Ⅲ)に関するものである。

一方、理論的研究および地震波の解析結果に基づき、破壊成長と関連して高速破壊相(Ⅲ)から放出される地震波に関して、次の対立する3つのモデルが提出されている。すなわち、①地震波形の最初の立ち上がりが緩やかなほど、大地震に発展する、②逆に、立ち上がりが急なほど、大地震に発展する、③立ち上がりが急なほど、その破壊が大きくなることを予言するが、その効果は破壊のごく初期だけであり、最終的な地震の大きさは最初の立ち上がりによっては規定されない(これは、特に、階層構造モデルと呼ばれている)。

本研究は、広帯域地震計記録の波形解析から、地震の初期破壊過程の力学的特性を明らかにし、それに基づき、破壊成長予測に関する上述の論争に決着をつけることを目的としている。

まず、申請者は、数多く提案されている震源過程の解析手法について種々検討し、地震の初期破壊過程を客観的かつ正確に推定する方法として、NNLS (Non-Negative Least Squares) インバース法が最適であるという結論に達した。そして、32個の地震(マグニチュード5以上)による波形データにこの方法を適用し、その初期破壊過程を推定した。解析には、主にIRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) の広帯域P波波形を用いている。解析区間は、P波立ち上がり付近の数秒間で、これは、地球内部の不均質構造によって発生するP波後続波の結果への影響を最小限にするためである。

初期破壊過程の力学的特性は、P波波形立ち上がり部分から推定された、以下の4つのパラメーターを基にして調べられた。それらは、①初期破壊に伴う実効応力(σ)、②初期破壊の地震モーメント(m)、③初期破壊の継続時間(T)、そして、④そのサイズ(r)である。このうちで、 σ と r は、準動的円形クラックモデルを仮定して推定されている。これらのパラメータに関して、次の特徴を明らかにした。(1) 深さ300kmよりも深い場所では、 σ は約10から数100MPaの値をとる。これは、沈み込んだプレートが数100MPaの応力に耐え得る強度を有することを意味している。(2) r は、地震の規模・深さに関係なく、1kmから10kmの値をとる。これは、断層面内の不均質さが、この程度のオーダーであることを意味し、破壊の成長を考える上で重要な量である。(3) σ が大きい(これは、波形の立ち上がりが急であることに対応する)ほど、初期破壊の地震モーメント m が大きくなる。(4) σ とその地震の最終的な大きさには、明確な関係が認められない。

上記(3)と(4)が、破壊の成長モデル3つの内で、③の階層モデルを支持していることを明らかにした。そして、破壊の成長は、その場の不均質な応力・強度の分布に支配されるという結論に達し、それを表わす定性的なモデルを提案している。

以上、申請者は広帯域P波記録を用いた地震の初期破壊過程の力学的特性に関する研究で、優れた研究成果を挙げた。審査員一同は、申請者が博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。