

## 論文の内容の要旨

### 論文題目：媒質境界に沿う、および媒質境界と交わる断層の動的破壊に関する理論的解析

(Theoretical analysis for dynamic fault rupture propagating along and across a bimaterial interface)

氏名 平野 史朗

本論文の目的は、地震発生領域に普遍的に存在する媒質境界が、断層の動的振る舞いにいかなる影響を与えるかを理論的に考察することである。ここではこの問題を、断層が媒質境界に沿う場合、及び媒質境界と交差する場合の2通りについて考えることで、媒質境界がもたらす影響を包括的に理解しようとする世界でも類のない試みを行なう。そのため本論文は、序章、第1部「媒質境界を mode-II で動的に伝播する定常パルス型破壊の数理解析」、第2部「媒質境界と交差する mode-III 動的破壊伝播の数理解析」、及び終章から成る。

序章においては、地震学が断層周辺の不均質構造を厳密に考慮に入れるべき必要性を説き、そのような研究にとって現状不足し、将来要求されると考えられる数理解析的手法による考察の重要性を述べる。この考えを礎に、本文中で極力数理解析的手法によって物理的考察を導き出すという方針を取ることを掲げる。

第1部においては、媒質境界に沿う断層の動的挙動の問題を取り扱う。これについては1980年までに解析的研究によって先鞭が付けられ、1990年代以降は、多数の数値計算的研究によって豊富な現象論的提言がなされている。また近年ではこれまでの解析的および数値計算的研究から得られた定性的予想を支持するような観測データの報告が散見されるようになってきた。総括してみれば、この問題へのアプローチとしては数値計算的研究が最も豊富であるが、これまでなされた多数の数値計算的研究は、媒質境界の断層挙動を記述するために必要なパラメーターへの依存性を網羅的に調べているわけでもなく、それら成果の全貌と物理的背景を統一的に解釈するためには、多く

のパラメータを内包し詳細な考察を可能にする解析的研究の進歩が待たれる。しかし、この研究テーマにとって先駆的役割を果たした解析的研究は近年では非常に少ない。そこで本研究においては、媒質境界を動的に伝播する定常パルス型破壊というモデルに焦点を当て、その解析解について調べる。このモデルには定常性という強い仮定があるため、破壊の開始・成長や停止にまつわる議論はできないが、代わりに数学的簡略化が可能のために精密なパラメータ解析が可能になるという利点がある。このモデルを用いて、解析的先行研究では求められて来なかった、1) 任意の一定な破壊伝播速度で、2) 滑りに応じて摩擦係数が変化し、3) 滑り始めの瞬間に滑り速度がゼロ、という物理的に尤もらしい3条件を満たす解析解を導出する。その過程においては、モデル設定の工夫により問題を Carleman 型特異積分方程式と呼ばれる問題に帰着させ、既知の一般解を適切に変形することで実際に計算可能な形式を導き出す。この解を用いて得られる本研究の一つ目の成果は、このような条件を満たす解析解はいつでも必ず存在するわけではなく、初期応力と摩擦弱化解離、そして破壊伝播の方向と速度に依存して解が決まり、解が存在しないパラメータ領域もありうるということが具体的に示せることである。媒質境界を伝播する破壊の面内問題においては、均質媒質の場合と異なり変位場の対称性が崩れるために、破壊が伝播方向依存性を持つことは予見されてきたが、実際にそのような解析的考察を行なった事例は少なく、それも破壊伝播速度が非常に高速である場合に限られていた。それに対し今回の成果は、より一般の破壊伝播速度で破壊がいかなる伝播方向依存性を持つかを議論する上で有用である。また本研究の二つ目の成果は、媒質境界における破壊伝播速度の理論的上限値が、これまでの解析的研究によって予想されてきた値とはわずかに異なることを示している点である。これまでは弾性体の均質媒質の理論に登場する Rayleigh 関数が、媒質境界の場合には両媒質の物性比に依存する独特の形で登場し、均質媒質の理論同様に、その零点が破壊伝播速度の理論的上限値であると解釈されてきたが、今回の結果によって、破壊伝播速度がそのような値に達する前に、断層面上で滑りによる法線応力変化量が初期法線応力を上回り、断層面上で開口を生じないと仮定したモデルが破綻するという解釈が得られる。媒質境界では滑りに伴って法線応力が変化することは知られていたが、それが破壊伝播速度のモデル上の上限値を与えることを示すのは本研究が初めてである。最後に本研究三つ目の成果として、観測的研究への提言を行なう。断層面上でのエネルギー消費量を見積るため、これまでいくつかの先行研究において地震時の滑り-応力降下曲線を観測データから解析する研究が行なわれてきたが、その中では断層が媒質境界に存在する可能性やその場合の影響が加味されることはなかった。一方で本研究の結果は、それら観測的先行研究において見られる地震時の滑り-応力降下曲線のばらつきと同程度のばらつきが、媒質境界の影響によっても生じうることを明らかにしている。これらの成果により、媒質境界を動的に伝播する定常パルス型破壊について、パラメータ依存性の網羅的検証やモデルの限界、そして観測的研究にとっての重要性が理解可能となる。

第2部においては、媒質境界と交差する断層の動的挙動の問題を取り扱う。以前はこのような断層の存在自体が認識されることが少なく、その理論的解析も乏しかった。しかし近年の稠密地震観測により、断層が媒質境界と交差していると思われる事例の報告が増え始めている。これを受けて、そのような断層の挙動の理論的理解が要求されるところであるが、そのような断層を扱う理論的解析は、これまで準静的枠組みに留まっていた。実際には、そのような断層の動的挙動の解析のための数値計算手法の開発すらなされておらず、過去3年程度の間にその見通しがつけられ、2012年から2013年にかけて、2つの先行研究によってようやく解析が実践段階に入った。しかし新たな数

値計算手法の開発時には、その数値精度を評価するベンチマークとして解析解との比較が必要不可欠であるにもかかわらず、もっとも単純なモデルである 2 層媒質中の亀裂の面外問題についてすら、その波動場を記述する解析解は知られて来なかった。そこで本研究では一つ目の成果として、そのような解析解を導出している。その過程においては、2 層媒質中の変位場の Green 関数を Cagniard de-Hoop の方法により求める手順にまで立ち返り、複素積分を用いて、数値的取り扱いが不可能な Green 関数の発散を回避するという方針を取る。こうして得られる解析解は、先述のベンチマークとして重要なだけでなく、これを既存の境界積分方程式法 (BIEM) と呼ばれる手法に適用することで、媒質境界と交差する任意形状の断層の動的挙動を独自に数値計算することも可能にする。そこで本研究は二つ目の成果として、媒質境界と交差する屈曲断層の動的挙動について実際に数値計算を行なっている。その結果、破壊が相対的に弾性波速度の小さな媒質中で始まり、破壊先端が弾性波速度の大きな媒質との境界にぶつくと滑り速度の一時的な減少フェイズが媒質境界から破壊開始点に向かって伝播し、弾性波速度の大小を逆にすると滑り速度の一時的な増大フェイズが同様に伝播することが確認される。これについては、断層の屈曲や摩擦ゼロという仮定を置いたことなどが先行研究と異なる点ではあるものの、定性的には先行研究と整合的な結果である。これに加え独自の考察として、近年いくつかの先行研究で採用されている、高速滑りにおける速度状態依存型摩擦法則を導入した場合に予想される挙動について定性的に議論する。本研究の数値計算結果とこの摩擦則とを併せて考えることで、媒質境界から破壊開始点に向かって、滑りの停止フロントが伝播してゆく可能性を提唱する。断層破壊と滑りの停止については長年議論的であり、様々な要因が提唱されているが、媒質境界の存在がその一因であるという提言は他に類を見ない。また、地殻内部の一般的な構造を考えることで、これが破壊の停止だけでなく地表での強震動生成パターンにも影響しうることを、先行研究と併せて考察することで提唱する。最後に本研究三つ目の成果として、本研究で求めた解析解の応用可能性について言及する。先行研究において、2 層媒質よりも複雑な多層構造媒質を取り扱い可能な有限要素法と、均質媒質のみを高精度で取り扱い可能な旧来の BIEM とを組み合わせて、多層媒質中の亀裂の動的挙動の解析を高精度化する手法が提言されていたが、これに本研究で求めた解析解を用いた BIEM を導入することで、更なる高精度化が期待でき、今後、より複雑な構造中での破壊の挙動を解析する上で有用となる手法改良がなされる。これらの成果により、媒質境界と交差する断層の動的挙動解析について、他の数値計算手法への貢献可能性や今後の更なる数値計算の必要性が明らかとなる。

終章においては、全体の総括として、均質無限媒質から 2 層媒質へとモデルを拡張しただけで、如何にパラメータ依存性の網羅的検証が困難となっているかを改めて認識し、それを具体例として震源力学におけるモデル拡張の難しさについて議論する。モデルの拡張時には、ごく単純な拡張であっても、それによって生じるパラメータが複数ありうるということや、旧来のモデルでその依存性が十分に検証されてきたパラメータについても、新たなモデルの下では再び依存性を検証し直さなければならないという困難に直面することが、本論文全体を通じて分かった。この議論を通じて、モデル拡張の難しさと、数理解析的研究の発展の必要性と貢献の余地があることを述べる。