

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22540429  
 研究課題名（和文） 媒質境界と相互作用する地震の動的破壊機構の理論的研究：XBIEM による新展開  
 研究課題名（英文） Proposal of extended boundary integral equation method for rupture dynamics interacting with medium interfaces  
 研究代表者  
 亀 伸樹 (KAME NOBUKI)  
 東京大学・地震研究所・准教授  
 研究者番号：90304724

研究成果の概要（和文）：本研究では不均質媒質中での形状自由な断層挙動の解析を可能にする新たな計算法の開発に取り組んだ。定式化には、任意形状の亀裂の解析に適した境界積分方程式法（Boundary Integral Equation Method: BIEM）を基に、これを不均質媒質に拡張する（eXtended BIEM=XBIEM）。アイデアは、不均質媒質を区分的に均質媒質とみなして BIEM を適用し、媒質界面で解を接続する点にある。本研究ではモード III 型断層に対して手法開発を行った。まず、各均質媒質において追加で必要となる表面積分方程式を導いた。そこで新たに現れる表面トラクションがソースとなる核関数の離散表現式の完全に解析な導出を行った点が第一の貢献である。次に、この核関数を用いて XBIEM 数値計算コードの開発を行った。本研究の第二の貢献は、媒質表面要素と破壊要素が相互作用する場合に新たに必要となる陰解法時間更新スキームを提案したことである。これらを実装した計算コードを作成し、トラクション核関数の正しさ、および境界接続法の安定性と精度の検証を行った。

研究成果の概要（英文）： Here we propose an extended BIEM (XBIEM) that is applicable in an inhomogeneous bounded medium consisting of homogeneous sub-regions. In the formulation of the XBIEM, the interfaces of the sub-regions are regarded as extended boundaries upon which boundary integral equations are additionally derived. This has been originally known as a multiregional approach in the analysis of seismic wave propagation in the frequency domain and it is employed here for rupture dynamics interacting with medium interfaces in time domain. All of the boundary integral equations are fully coupled by imposing boundary conditions on the extended boundaries and then numerically solved after spatiotemporal discretization. This paper gives the explicit expressions of discretized stress kernels for anti-plane nonplanar problems and the numerical method for the implementation of the XBIEM, which are validated in two representative planar fault problems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地震学

キーワード：地震現象

## 1. 研究開始当初の背景

(1)最先端の観測研究は従来見えなかった媒質境界と地震の動的破壊（始まりから停止まで）の関係を明らかにしつつあり、今後の事例の蓄積は地震発生機構の理解への重要な手がかりとなろう。一方、このような地震破壊の定量的理解に必要となる「不均質媒質中の亀裂の動的進展の理論的研究」は、従来の理論的枠組みが媒質の不均質性に対応できず、全くで進んでいないのが正直なところである。不均質媒質を取り扱う地震破壊の理論的研究分野を立ち上げることは、地震の規模予測など地震学における急務の課題であった。

(2)断層破壊の理論的研究においては、均質無限媒質中に断層を仮定するのが一般的である。しかし、近年の詳細な観測研究によれば、媒質界面の存在が断層の挙動に強い影響を与えているように思える。それにもかかわらず、これに関係した理論的研究は進展を見せていない。理由の一つには、応力核関数（点震源にともなう応力変化についての解）を簡単な解析解の形に表現できていないという問題があった。静的変形の場合については、従来、複素関数の諸性質を考慮に入れることによりカーネル関数をきわめて簡単に表現することに成功している。これにより、2層媒質中の任意形状をした断層による静的変形を解析的・数値的に容易に取り扱うことができるようになった。しかし、動的破壊については、応力核関数を求めることは困難であり、解析できない状態が続いてきた。

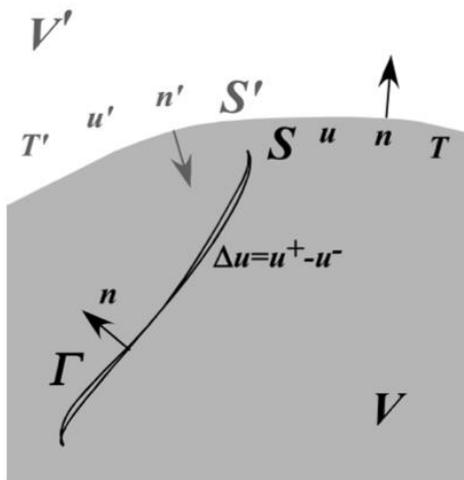


図1. XBIEMが解析の対象とする区分均質媒質で構成される不均質媒質

## 2. 研究の目的

(1)不均質媒質中の動的亀裂進展の理論的研究を世界に先駆けて行う。まず、必要となる解析手法を新しい定式化により実現し、次に媒質の不均質性が亀裂進展に及ぼす基本的な役割を明らかにする。

(2)本研究は、基本的な機構の理解のため二つの均質媒質が境界で接しているもっとも単純な不均質性（二媒質境界問題）に焦点をあててスタートする。解析法開発の技術的課題と解明すべき破壊の基本特性は、共に、この境界問題に全て含まれており、これが解ければ複雑な問題への適用は容易である。

## 3. 研究の方法

(1)拡張境界積分方程式法(XBIEM)の実現。不均質媒質中での形状自由な亀裂の解析を可能にする新たな計算法を開発する。定式化には、任意形状の亀裂(crack)の解析に適した境界積分方程式法(Boundary Integral Equation Method: BIEM)を基に、これを不均質媒質に拡張する(eXtend BIEM=XBIEM)。アイデアは、不均質媒質を領域分割し、各領域内部は均質媒質とみなしてBIEMを適用し、領域の境界で接続する点にある(図1)。異なる媒質の境界での接続は、地震波動伝播解析では周知の手法であるが、ここに破壊解析へ応用する。拡張した積分方程式には、表面トラクションを震源とする新たなトラクション応力核関数が現れ、ここで隣り合う媒質と境界条件を用いて場を接続すれば、不均質媒質中の弾性相互作用を完全に考慮した亀裂面上のBIEを得る。これを数値的に解く計算コードを完成させれば、破壊解析が可能になる。

(2)観測結果と定量的比較が可能な3次元変形を仮定した数学的解析は、自身の経験から多大な困難が予想される。そのため、むしろ動的な亀裂進展の定性的比較に重点を置き、取り扱いが容易な2次元モードIIIの変形を仮定する。まず、媒質境界を完全に考慮できる亀裂解析の新しい定式化に基づき、基礎方程式の導出を行う。これを離散化することにより動的な亀裂進展の数値解析プログラムを作成する。次に、媒質境界と相互作用する動的な亀裂進展の基礎的解析を行う。

## 4. 研究成果

(1)XBIEMの新たな定式化において媒質内部の破壊面と媒質境界における境界積分方程式をそれぞれ導出した(図2)。追加された表面積分方程式には、表面トラクションがソースとなる応力核関数が新たに現れる。数値解法に必須となるこの核関数の離散表現式

の完全に解析的な導出 (図 3) ができたことが開発の第一の鍵である。

$$\begin{aligned}
 T(\mathbf{x}, t)/2 &= n_k(\mathbf{x})t_i(\mathbf{x})\sigma_{ki}(\mathbf{x}, t) = T^0(\mathbf{x}) + T^{\Delta u}(\mathbf{x}, t) \\
 &+ T^T(\mathbf{x}, t)|_{(\eta, \tau) \neq (\mathbf{x}, t)} + T^u(\mathbf{x}, t) = T^0(\mathbf{x}) + T^{\Delta u}(\mathbf{x}, t) \\
 &+ \int_S dS(\eta) \int_0^t d\tau T_p(\eta, \tau) c_{klrs} n_k(\mathbf{x}) t_l(\mathbf{x}) \\
 &\times \frac{\partial}{\partial x_s} G_{rp}(\mathbf{x}, t - \tau; \eta, 0)|_{(\eta, \tau) \neq (\mathbf{x}, t)} \\
 &+ \int_S dS(\eta) \int_0^t d\tau u_i(\eta, \tau) c_{ijpq} c_{klrs} n_k(\mathbf{x}) t_l(\mathbf{x}) n_j(\eta) \\
 &\times \frac{\partial^2}{\partial x_q \partial x_s} G_{rp}(\mathbf{x}, t - \tau; \eta, 0) \quad (\mathbf{x}, \eta \in S)
 \end{aligned}$$

図 2. 媒質境界面上での境界積分方程式

$$\begin{aligned}
 I^{\sigma_{31}:T}(\mathbf{x}, t) &= -\frac{1}{4\pi} H\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \log \frac{t - \sqrt{t^2 - (r/\beta)^2}}{t + \sqrt{t^2 - (r/\beta)^2}} \\
 I^{\sigma_{32}:T}(\mathbf{x}, t) &= -\text{sgn}(x_2) H(x_1) H\left(t - \frac{|x_2|}{\beta}\right) \frac{1}{2} \\
 &+ \text{sgn}(x_1) \text{sgn}(x_2) H\left(t - \frac{r}{\beta}\right) \frac{1}{2\pi} \text{Arccos} \frac{|x_1|t}{ru\beta}
 \end{aligned}$$

図 3. 導出されたトラクション応力核関数

(2) まず、亀裂面外側での応力場・変位場・変位速度場のカーネル関数が正しく計算できるかをテストした。検証は、無限媒質の BIEM 計算結果と、これと等価な問題を半無限媒質に対する XBIEM を適用して計算した結果を比較することにより行った。その結果、両者は定量的に良い一致を示し、コードに組み込むカーネル関数が境界面外側の場の計算に対しても正しく働くことを確認することができた。それぞれの境界面における境界条件を課すことにより連立積分方程式を得て、これを時空間領域で離散化し、境界面上での解を数値的に求める計算コードの原型を作成した。そして、平面亀裂問題に対して亀裂上での応力および滑りが正しく計算できることを検証した (図 4)。また、これを非平面形状亀裂の計算に拡張するために必要となる境界面の外側の変形場を計算するコード開発および検証を行った。

(3) 次に、不均質媒質での破壊計算が正しくできるかについてテストを開始した。計算結果が検証可能となる理論解が存在する破壊問題は非常に限定される。その中で、媒質境界において一定速度で成長する半無限亀裂伸展問題における破壊速度の上限解 (媒質速度のコントラストの関数) を用いて、これが数値計算で再現できるかのシミュレーション計算を行った (図 5, 図 6)。次第に加速す

る自発的破壊成長において、その速度は媒質速度コントラストから理論的に予測される値に達した後、その上限速度で成長を続けた。これは不均質媒質における破壊計算における XBIEM の最初の成功例となった。

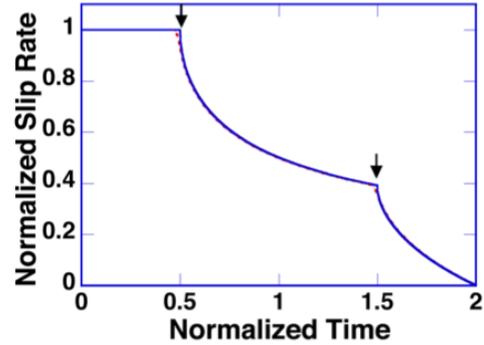


図 4. XBIEM 数値コードのテスト。均質媒質中の平面断層上の滑り速度と解析解との比較

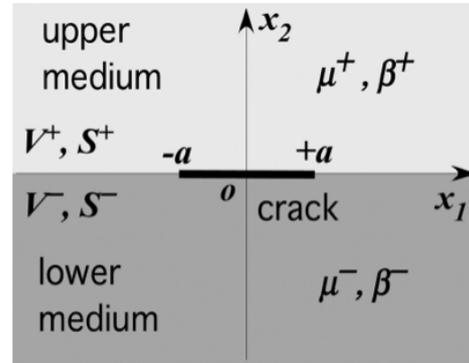


図 5. XBIEM 数値コードの検証にもちいた層構造媒質境界で自発的破壊成長するモデル

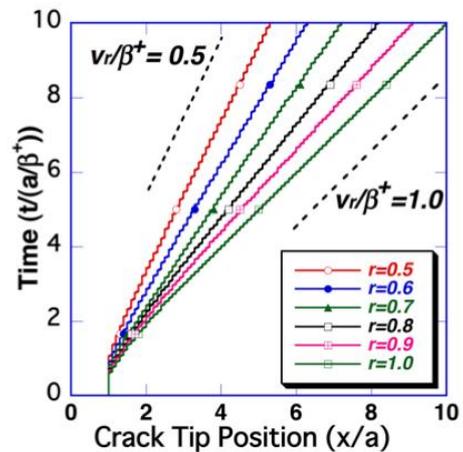


図 6. XBIEM 数値コードで解析された自発的破壊進展の破壊速度の上限値

(4) 導出した離散カーネル関数の解析的表現、および、それを利用した連立境界積分方程式の時間解法のスキームについては、Journal of Applied Mechanics に研究成果として投稿し受理された。

(5) 開発の第二の鍵となる、媒質表面要素と破壊要素が相互作用する場合に新たに必要となる陰解法 時間更新スキームを提案した。これらを実装した計算コードを作成し、トラクション核関数の正しさ、および境界接続法の安定性と精度の検証を行った。その一例として媒質境界が曲面の場合の計算も行った。本計算手法により破壊速度と滑り速度における効果を定量的に評価することができた。

(8) 開発した XBIEM の数値計算コードは、任意の非平面境界と任意の非平面亀裂に適応可能である。今後、媒質境界と相互作用し、その応力効果を考慮した非平面境界と非平面亀裂の解析に取り組んでいきたい。

(9) 本研究ではモード III 亀裂の数値計算コードの開発に取り組んだが、法線応力の効果を考慮したより現実的な地震破壊の解析にはモード II の XBIEM の開発が必要である。これは今後取り組むべき最優先の課題である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) Kame, Nobuki and Kusakabe, Tetsuya, Proposal of extended boundary integral equation method for rupture dynamics interacting with medium interfaces, Journal of Applied Mechanics, 査読有, 79, 2012, pp.031017=1-8, DOI:10.1115/1.4005899.

[学会発表] (計 8 件)

(1) Kusakabe, Tetsuya and Kame, Nobuki, Extended boundary integral equation method (XBIEM) for rupture dynamics interacting with medium interfaces - mode III implementation in a bimaterial -, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, 2012 年 12 月 04 日-2012 年 12 月 04 日, Moscone Convention Center, San Francisco, USA.

(2) 日下部 哲也・亀 伸樹, XBIEM を用いた二層媒質中の動的破壊計算コード開発, 日本地震学会 2012 年秋季大会, 2012 年 10 月

16 日-2012 年 10 月 16 日, 函館市民会館, 函館市.

(3) Kusakabe, Tetsuya and Kame, Nobuki, Proposal of extended boundary integral equation method for rupture dynamics interacting with medium interfaces, International conference on a new perspective of great earthquakes along subduction zones, 2012 年 2 月 28 日, 高知文化プラザカルポート, 高知.

(4) Kame, Nobuki and Kusakabe, Tetsuya, Proposal of extended boundary integral equation method (XBIEM) for rupture dynamics interacting with medium interfaces - part II, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, 2011 年 12 月 08 日, Moscone Convention Center, San Francisco, USA.

(5) 日下部 哲也・亀 伸樹, 媒質境界を考慮した XBIEM の応力核関数の導出と二層媒質中の破壊解析, 日本地震学会 2011 年秋季大会, 2011 年 10 月 14 日, 静岡県コンベンションアーツセンターグランシップ, 静岡.

(6) Kame, Nobuki, Proposal of XBIEM toward dynamic rupture simulation interacting with medium interface, Asian Oceania Geoscience Society, 2011 年 8 月 10 日, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan.

(7) Nobuki KAME, Proposal of an extended boundary integral equation method (XBIEM) for rupture dynamics interacting with medium interfaces, American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, 2010 年 12 月 14 日, Moscone Convention Center, San Francisco, USA.

(8) 亀 伸樹, 媒質境界と相互作用する地震の動的破壊機構の理論的研究: XBIEM による新展開, 日本地震学会 2010 年度秋期大会, 2010 年 10 月 22 日, 広島国際会議場, 広島.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

亀 伸樹 (KAME NOBUKI)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号: 90304724

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし