

平成 28 年 5 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400441

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解明：複雑形状XBIMの実現

研究課題名(英文) Earthquake Dynamic Rupture Processes Interacting with Bimaterial Interface:
Development of XBIM with Geometrical Complexity

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々が提案する拡張積分方程式法(XBIM)は元々メッシュフリーで境界面・破壊面形状に制限のない解析法であるが、我々がこれまでに開発した数値計算コードは平面媒質境界を横切る平面亀裂の単純な幾何配置の問題に留まる。これを前進させ、複雑な媒質境界との力学的相互作用を厳密に考慮しながら破壊経路が自在に選択可能な高度化された計算コードを開発をその数学的基礎づけと共にこなす。

研究成果の概要(英文)：Extended Boundary Integral Equation Method (XBIM) is originally proposed for mesh-free method of dynamic rupture propagation with arbitrary geometry of crack and medium interface. However, the existing numerical code is only for a planar crack growth along/across a planar biomaterial interface. In the present study, I extend XBIM into curvilinear geometry of interface and crack, giving its mathematical basis.

研究分野：地震学

キーワード：地震 断層 動的破壊 協会積分方程式法 亀裂

1. 研究開始当初の背景

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現象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均質媒質中に限られ対応できない状況が続いてきた。不均質媒質を取り扱う地震破壊の理論的研究分野の立ち上げは、地震の規模予測など地震学における急務の課題と考え、我々は H22-24 年度基盤 (C) で取り組み始めた。

2. 研究の目的

我々が提案し開発している拡張積分方程式法 (XBIEM) は元々メッシュフリーで境界面・破壊面形状に制限のない解析法であるが、これまでに開発した数値計算コードは平面媒質境界を横切る平面亀裂の単純な幾何配置の問題に留まる。これを前進させ、複雑な媒質境界との力学的相互作用を厳密に考慮できる計算コードを開発を、その数学的基礎づけと共におこなった。

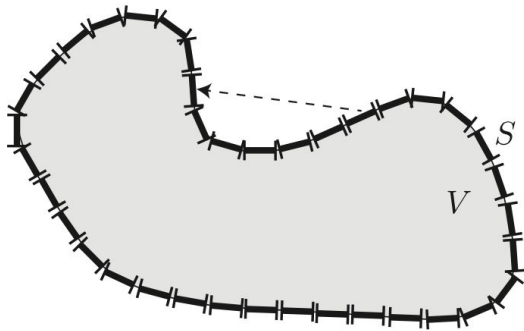


図1. 下向きに凹んだ表面 S に囲まれた体積 V の領域。表面は境界要素に分割される。

3. 研究の方法

XBIEM 定式化において必要となる数学的基礎づけをおこなう。我々は、複雑形状の媒質境界を取り扱うことのできる XBIEM 計算コードを開発している際に、物理的に一見矛盾している場合に直面した。XBIEM を用いて全無限グリーン関数を用いて下向きに凹んだ表面地形をモデル化する場合を考える(図 1)。全無限グリーン関数は問題とする領域の変位場とは由来が別の変位場である。問題とする凹んだ表面地形の領域に表現定理を適用した場合、全無限グリーン関数を用いるが故に、媒質の存在しない外部においても直達波の存在を示すように見える。実際、境界積分方程式法の数値計算コードの内部表現では、凹んだ表面地形表面の 2 要素間の相互作用は全無限グリーン関数から計算され確かに直

達波が届いている。この物理的破綻の真偽を確かめる為に、表現定理の数学的検討を行った。そして下向きに凹んだ表面地形をモデル化した計算コードを開発し、破綻しているか否かを確認した。

4. 研究成果

(1) 数学的基礎づけ

全無限グリーン関数 G を用いて任意の有限領域の変形場が近似を必要とせず完全に表現されることを示す。媒質は不均質非等方であっても良い。一般的に、任意の有限領域において斉次境界条件(固定変位, 自由表面, あるいはそれらの混合)を満たすグリーン関数を求めることは、それ自体困難な問題である。そこで、全無限グリーン関数の有限領域への適用を検討する均質等方媒質の場合には、全無限グリーン関数は閉じた形の解析解が存在し、実用上大変有用である。閉じた形のグリーン関数は、それを用いて有限領域の物理的応答を頭の中で定性的に模擬することができ問題の見通しが良くなるという利点もある。

Betti の定理が「不均質非等方性媒質の共通する領域の同じ運動方程式を満たす」ことしか要求していなかったことを思い出そう。これを満たすように特定の問題の解きたい有限領域 V を、全無限媒質 V^∞ の部分集合にとる(図 2)。こうすれば、相反定理は二組の変位場 u_i と $v_i = G_{in}^\infty$ に対して有限領域 V 内で相変わらず成り立つ。

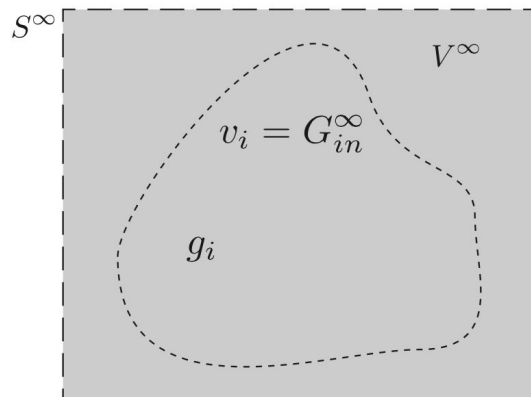
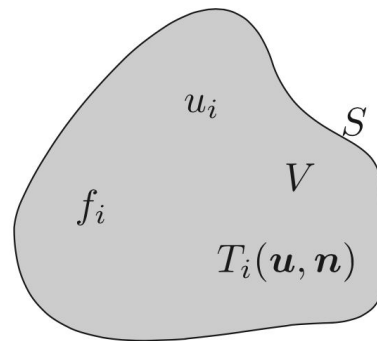


図 2. 上: 有限領域 V と u_i . 下: 無限媒質中に埋め込まれた有限領域 V と v_i .

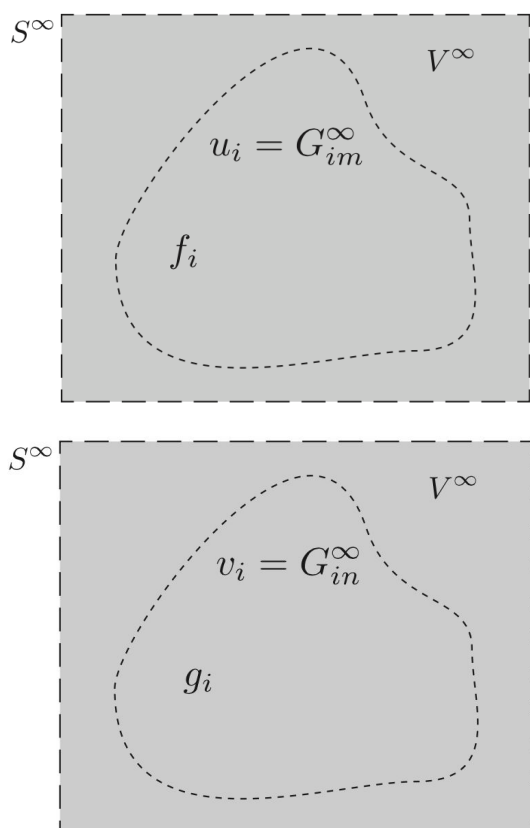


図 3. グリーン関数を決定するための無限遠 S を考慮した二つの変形. 上: u_i . 下: v_i .

一方、グリーン関数を決定する無限領域の表面 S は無限遠に飛ぶ(図 3)。無限媒質グリーン関数は、 S 上でのある意味「斉次」な境界条件を満たすものとして定義される。ある意味「斉次」とは、 S の表面積分項の寄与の合計が 0 になることである。そしてこの条件は空間の相反性が成り立つ必要十分条件である。この条件を満たす G は空間の相反性が成り立ち、基本的な表現定理において G に差し変えることで、基本式が導かれることになる。

(2) 数値計算法における意味付け

複雑形状の媒質形状にたいする XBIEM 計算コードを開発し、検証を行った。数値計算において変位の評価点を問題とする領域の外側に取った場合、個々の要素からの寄与は値を持つ(直達波が存在する)が、全ての要素からの寄与の合計は確かに 0 となった。すなわち、表現定理が意味するのは、境界面に沿って全ての要素からの全無限グリーン関数の寄与を合計すれば、外部できれいに打ち消し合い 0 になることが数理的に保証されることであった。従って、地表面が下向きに凹であれ上向きに凸であれ、表現定理に基づく定式化では、境界要素間の相互作用を全無限グリーン関数により評価し、それらを境界面上で足し算(積分)するだけで良いことを意味している。こうして、拡張積分方程式法

(XBIEM)において、「全無限グリーン関数を用いた任意の有限領域の変形場の表現」が、媒質境界の任意の形状に対して有効であることが示された。

無限グリーン関数表現定理は、XBIEM 数値計算プログラムの作成において、媒質の境界面の凹凸の形状に特別の注意を払うことなく、式通りに境界上の諸量の積分をすれば弾性変形場が正しく計算できることを保証する。

(3) 今後の展望

複雑な媒質境界の取り扱いについての問題は解決され、今後、現実的な境界面形状を考慮した複雑形状亀裂の破壊解析へと進めることが課題である。

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 4 件)

(1) Ichihara, M., T. Kusakabe, N. Kame, and H. Kumagai, On volume source representations based on the representation theorem, *Earth, Planets and Space*, 68:14, 2016, 1-10, doi: 10.1186/s40623-016-0387-3. 査読有

(2) 日下部哲也・亀 伸樹・市原美恵・熊谷博之, 表現定理とグリーン関数(2) 体積震源のモーメントテンソル表現, *地震*, 68, 2016, 169-176, doi: 10.4294/zisin.68.169. 査読有

(3) Mizuno, N., M. Ichihara, and N. Kame, Moment tensors associated with the expansion and movement of fluid in ellipsoidal cavities, *Journal of Geophysical Research*, 120, 2015, 1-13, doi: 10.1002/2015JB012084. 査読有

(4) 日下部哲也・亀 伸樹, 表現定理とグリーン関数 全無限グリーン関数による有限領域の弾性変形場の表現, *地震*, 68, 2015, 83-89, doi: 10.4294/zisin.68.83. 査読有

[学会発表](計 9 件)

(1) Kusakabe, T. and Kame, N., Derivation of XBIEM kernels for anti-plane/in-plane problems and implementation in anti-plane rupture simulation crossing bimaterial interface, AGU 2015 Fall Meeting, 2015 年 12 月 18 日~2015 年 12 月 18 日, Moscone Convention Center. San Francisco, USA.

(2) 日下部哲也・亀 伸樹, 表現定理とグリーン関数(2) 体積震源のモーメントテンソル表現-, SSJ 2015 年度秋季大会, 2015 年

10月27日～2015年10月27日，神戸国際会議場，兵庫県神戸市。

(3) 日下部哲也・亀 伸樹，表現定理とグリーン関数 (1) -全無限グリーン関数による有限領域の弾性変形場の表現-，SSJ 2015 年度秋季大会，2015年10月27日～2015年10月27日，神戸国際会議場，兵庫県神戸市。

(4) Kame, N., Ichihara, M., Kusakabe, T. and Kumagai, H., Volume Source Representations: A Unified Explanation Based on the Representation Theorem, IUGG, 2015年06月29日～2015年06月29日，Prague, Czech Republic.

(5) 水野尚人・日下部哲也・市原美恵・亀 伸樹，楕円体体積震源のモーメントテンソル，JpGU 2014 Meeting, 2014年05月02日～2014年05月02日，パシフィコ横浜，神奈川県横浜市。

(6) 市原美恵・日下部哲也・亀 伸樹・熊谷博之，体積震源モーメントテンソルの表現定理に基づく統一的な理解，JpGU 2014 Meeting, 2014年05月02日～2014年05月02日，パシフィコ横浜，神奈川県横浜市。

(7) Kusakabe, T. and Kame, N., Development of an extended BIEM and its Application to the Analysis of Earthquake Dynamic Rupture Interacting with a Medium Interface, AGU 2013 Fall Meeting, 2013年12月12日～2013年12月12日，Moscone Convention Center. San Francisco, USA.

(8) 日下部哲也・亀 伸樹，XBIEM で調べる媒質境界剥離の力学効果，JpGU 2013 Meeting, 2013年05月22日～2013年05月22日，幕張メッセ，千葉県千葉市。

(9) Kusakabe, T. and Kame, N., Extended Boundary Integral Equation Method (XBIEM) for Rupture Dynamics Interacting with Medium Interfaces - Mode III Implementation in a Bimaterial -, EGU 2013 Meeting, 2013年04月09日～2013年04月09日，Austria Center Vienna, Vienna Austria.

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