

## 2次元差分格子に対して斜交する亀裂のモデル化

谷中貴一・河原 純(茨城大学)・椎名 高裕(東北大学)・岡元太郎(東京工業大学)

### 背景

亀裂群による地震波散乱の波動シミュレーションを行う際、境界積分方程式法(Boundary Integral Equation Method; 以下、BIEM)が好んで用いられる。しかし、BIEMは、散乱体を含む媒質自体にランダム不均質が存在する場合を扱うことが容易でないこと、離散的散乱体の増加に伴い計算コストが加速度的に増大すること、数値計算のアルゴリズムが複雑であることなどの欠点をもつ。そこで、これらの欠点において優位性をもつ有限差分法(Finite Difference Method)を用いて、亀裂群による地震波散乱を数値的に扱う検討が行われてきた(例えばSuzuki *et al.*, 2006, 2013)。近年、那須野・他(2014, JpGU)は、Suzuki *et al.*(2006)のSH波散乱の波動シミュレーションの手法を拡張し、2次元差分格子に対して傾斜した中空亀裂によるSH波散乱を実用上十分な精度で数値的に扱えることを示した。

本研究では、那須野・他(2014)の手法を拡張し、差分格子に対して傾斜した中空亀裂によるP-SV波散乱の数値計算を試みる。ここでは、傾斜した中空亀裂を表現するために、2種類の亀裂のモデルを検討する。そして、それらの計算精度について、BIEMとの比較により検証を行う。

### 那須野・他(2014, JpGU)

最初に、那須野・他(2014, JpGU)の研究をレビューする。彼らは、Suzuki *et al.* (2006)の手法を、2次元差分格子に対して傾斜した亀裂の場合にも適用できるように拡張した。具体的には、スタガード格子内に面外剪断応力 0 の格子点を階段状に並べることにより中空亀裂をモデル化した(図 1)。さらに、その亀裂に対して平面正弦 SH 波を斜め入射させ、亀裂を振動させるという差分シミュレーションを行った。そして振動が安定した時点で変位食い違い量の振幅を計測し、その結果を BIEM (Murai *et al.*, 1995) による計算結果と比較したところ、亀裂の傾斜角によらず両手法の結果はよく一致した(図 2)。このことは、那須野・他(2014)の手法の妥当性を示唆する。

### P-SV 波問題への拡張

本研究では、那須野・他(2014)の手法を P-SV 波問題に拡張し、2次元差分格子に対して傾斜した中空亀裂をモデル化した。モデル化において、Suzuki *et al.* (2013)と同様、標準的な空間 2 次精度・速度-応力型のスタガード格子(Virieux, 1986)を使用した。Model 1(図 3)は、那須野・他(2014)と同様、階段状に並べた格子点に対し、Suzuki *et al.*(2013)に準じて、面内剪断応力  $\tau_{xz}$  を 0 に固定する。また、変位速度  $v_x, v_z$  を 2 値化して変位食い違いを表現することで、亀裂をモデル化する。2 値化された変位速度は、Suzuki *et al.*(2013)の手法に基づき前方また後方差分で計算する。Model 2 (図 4)は、有限の厚さを持つ扁平な空洞として亀裂をモデル化する。亀裂の両面は、Ohminato and Chouet (1997)の手法を用いて、階段状の自由表面として表現する。

### 計算精度の検証

今回の方法の計算精度を検証のため、Suzuki *et al.* (2013), 那須野・他(2014)に準じて、

以下の実験を行う。まず、単一亀裂に正弦波を入射し、振動がほぼ安定した時点の計算結果と BIEM の計算結果と比較した。比較に際し、厚さ無限小の亀裂を扱う Kawahara and Yamashita (1992)の BIEM を使用した。

Model 1 に基づく波動シミュレーションの例を図 5 に示す。この図は、平面正弦 P 波を単一の亀裂(Model1, P 波入射)に対して斜め 45 度に入射させたときの、ある時刻における変位波動場のスナップショットを示したものである。シミュレーションでは亀裂による波の回折が明瞭に認められ、数値計算は問題なく行われているように見える。そこで、シミュレーション結果から得られる亀裂面上の食い違い量を、BIEM を用いて計算された結果と比較した(図 6)。Model 1 では、 $\Delta h$  を小さくするにつれ一定値に収束する傾向が見られたが、BIEM の結果とは若干の系統的なずれが見られた。次に Model 2 においては、 $\Delta h$  を小さくするにつれ BIEM の結果に収束する傾向が見られた。以上より、2 次元 P-SV 波散乱問題における、差分格子に対して傾斜した亀裂の表現法として、これらのモデルは概ね妥当であり、特に Model2 が適当と考えられる。ただし、SH 波の場合に関する那須野・他(2014)の方法に比べると、同じ格子間隔に対する計算精度は良くない。

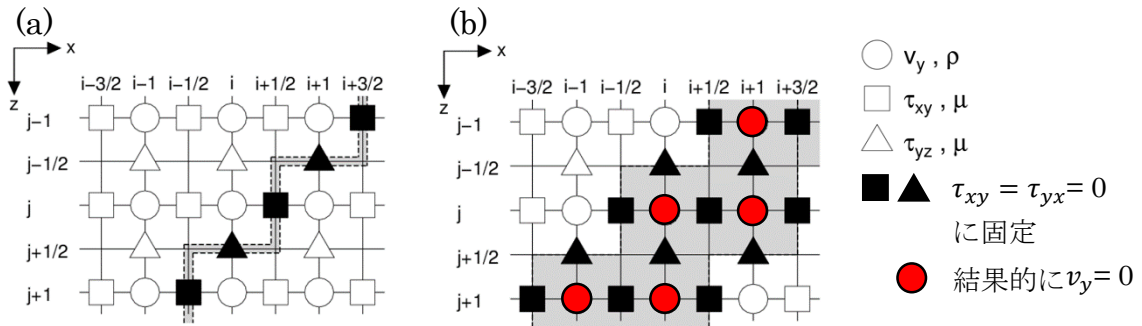


図 1. スタガード格子内に面外剪断応力 0 の格子点を階段状に並べて中空亀裂をモデル化(那須野・他, 2014)。(a) 亀裂の厚さ $\ll \Delta h$ 、(b) 亀裂厚さ $> \Delta h$  ( $\Delta h$  は格子間隔)。

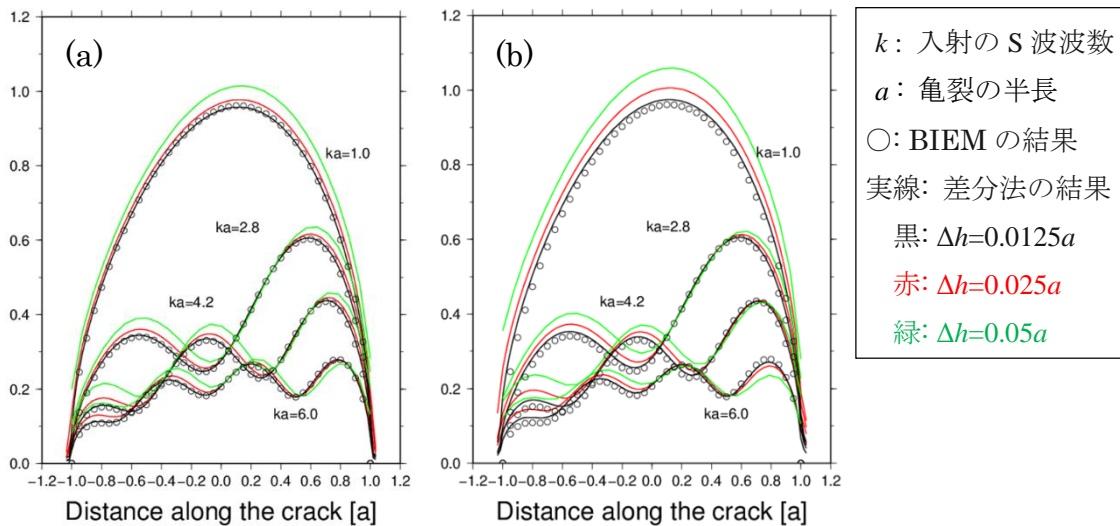


図 2 . シミュレーション結果から得られる亀裂面上の食い違い量を BIEM (Murai *et al.*, 1995) で計算された結果と比較。亀裂は格子に対して 45 度傾斜(SH 波の入射角 45 度)。横軸は亀裂の半長  $a$  で規格化。(a) 厚さ $\ll \Delta h$  のモデル、(b) 厚さ $> \Delta h$  のモデル(那須野・他, 2014)。

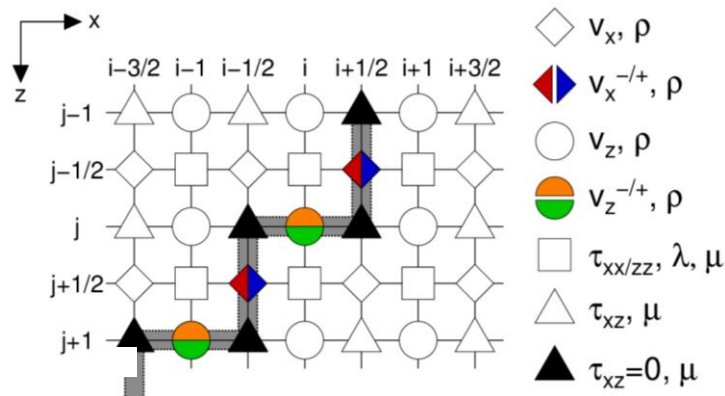


図 3 . Model 1.

階段状に並べた格子点に対し、面内剪断応力  $\tau_{xz}$  を 0 に固定。変位速度  $v_x$  ,  $v_z$  を 2 値化し、Suzuki *et al.* (2013) の手法を用いて計算。

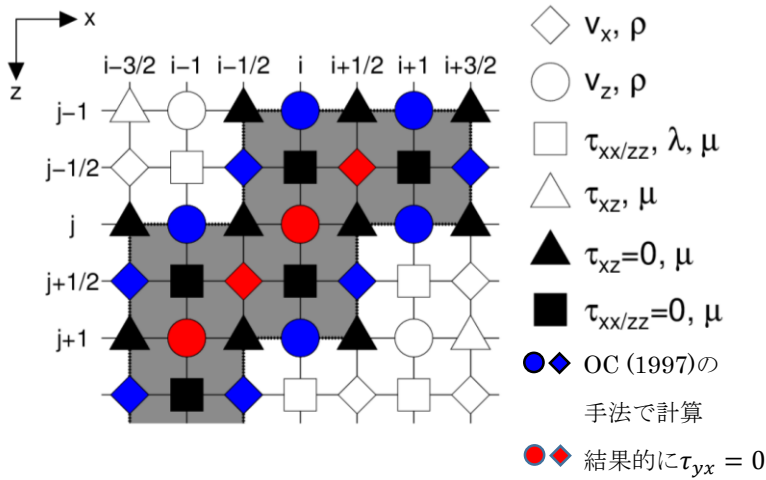


図 4 . Model 2.

有限の厚さを持つ扁平な空洞として亀裂をモデル化。亀裂の両面は、Ohminato and Chouet (1997) の手法を用いて、階段状の自由表面として表現。

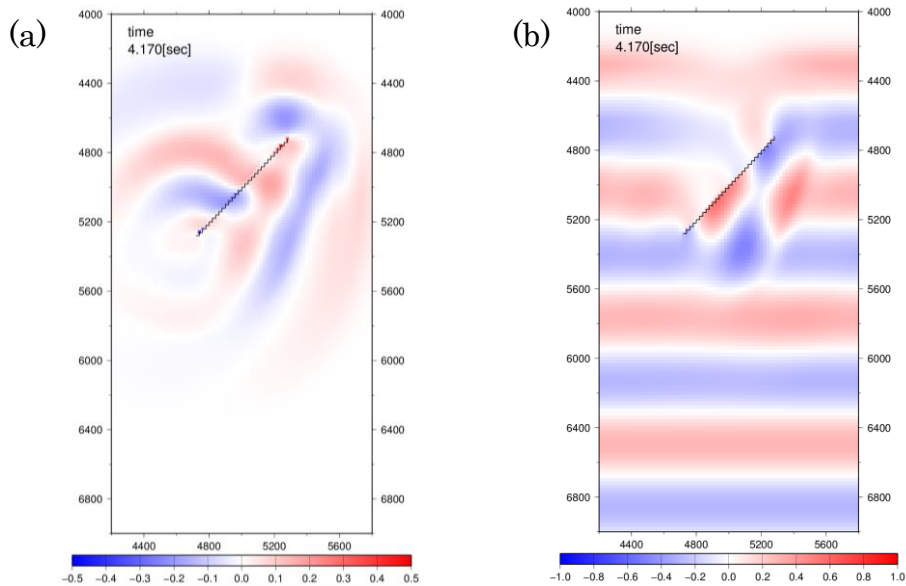
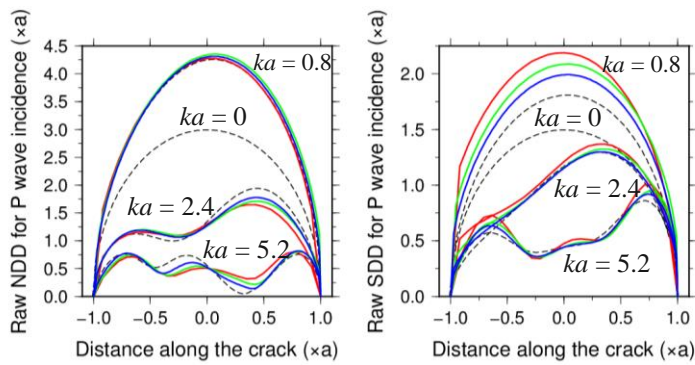


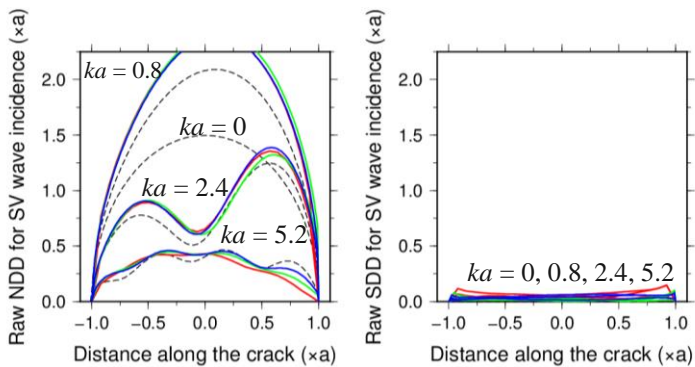
図 5.

Model 1 に基づく波動シミュレーションの例。差分格子に対して 45 度に傾斜した亀裂に対して平面正弦 P 波を入射したときの変位波動場 (a : 水平成分, b : 上下成分) のスナップショット。色と濃淡が変位の符号と振幅を表す。

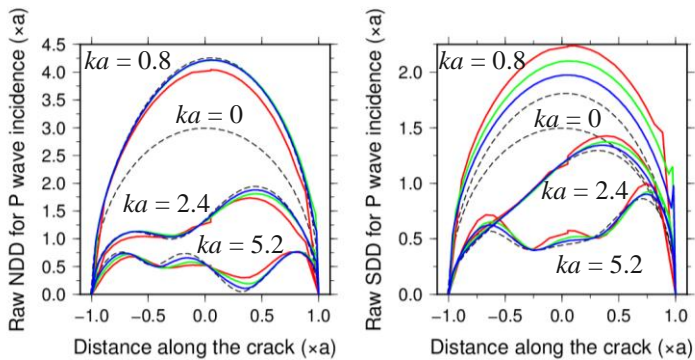
(a) Model 1 (P 波入射の場合)



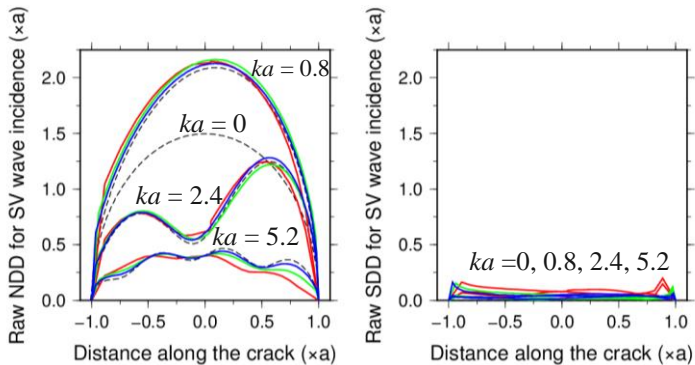
(b) Model 1 (SV 波入射の場合)



(c) Model 2 (P 波入射の場合)



(d) Model 2 (SV 波入射の場合)



$\Delta h$ : 格子間隔  
 $\Delta t$ : 時間間隔  
 $k$ : 入射波の波数  
 $a$ : 亀裂の半長  
点線: BIEM の結果  
実線: 差分法の結果  
緑:  $\Delta h=0.0125a$   
青:  $\Delta h=0.025a$   
赤:  $\Delta h=0.05a$

図 6 . Model 1 の単一亀裂に平面正弦波を入射するシミュレーションから得られた亀裂面上の変位食い違い量(NDD: 法線成分, SDD: 面内剪断成分)を、BIEM の計算結果と比較。横軸は亀裂の半長  $a$  で規格化。Model 1 (a, b)、Model 2 (c, d)のそれぞれについて P 波(a, c)または SV 波(b, d)を入射。