

単斜晶系異方性材料中の欠陥に対する 非線形超音波のシミュレーション

○群馬大学大学院理工学府
群馬大学大学院理工学府

正会員 斎藤隆泰
学生会員 金井翔平

1. はじめに

近年、非線形超音波法¹⁾と呼ばれる最新の超音波非破壊評価手法が注目を集めている。非線形超音波法とは、大振幅超音波をき裂等の微視欠陥に入射させ、欠陥との動的相互作用が原因で発生するとされる非線形超音波を用いて欠陥を検出する方法である。その際、入射超音波の中心周波数の整数倍の周波数成分を含む高調波、分数倍の周波数成分を含む分調波と呼ばれる非線形超音波を利用するが、それらの発生機構は十分に解明されているとはいえない。これまで、等方性材料に対して非線形超音波のシミュレーション^{2,3)}が行われ、それらの発生機構を理論的に解明する研究が行われてきた。そこで、本研究では、これまでの研究を拡張し、時間領域境界要素法を用いて単斜晶系異方性材料中の欠陥に対する非線形超音波のシミュレーションを行う。

2. 解くべき問題

図1(a)のような2次元無限単斜晶系異方性弾性体 V 中のき裂による入射波の散乱問題について考える。今、き裂は、 x_1 軸上にあると仮定し、 x_2 軸はき裂面に直交するものとする。通常のき裂解析では、き裂の上下面 S^+ 、 S^- （以下、上付き $\pm$ はそれぞれき裂の上下面を示す）の接触を考慮せず、表面力成分 $t_i^\pm(\mathbf{x}, t)$ は常にゼロとする。しかしながら、本研究では、き裂に対し、後に説明する接触境界条件を与えることで、き裂面が閉じた場合、すなわち $t_i^+ = t_i^-$ なる場合をも考慮する。この時、解くべき問題は、このような接触境界条件を持つき裂に、大振幅超音波を入射させた場合の高調波・分調波を求める問題に帰着できる。

3. 時間領域境界要素法

文献²⁾を参考に、接触を考慮した場合の時刻 t における表面力境界積分方程式は次のように表される。

$$t_i(\mathbf{x}, t) = t_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_S W_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) * \phi_j(\mathbf{y}, t) dS_y \quad (1)$$

ここで、 $\phi_j(\mathbf{y}, t)$ はき裂開口変位、 $*$ は畳込み積分を表す。また、 $t_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$ は入射波 $u_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$ に対応する表面力成分、 $W_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t)$ は動的基礎解の2階微分を含む超特異核である。式(1)に正則化を施した式に、時間に関しては演算子積分法を、空間に関しては区分一定要素を用いて離散化することで、き裂開口変位 $\phi_i(\mathbf{x}, t)$ を求めることができる。

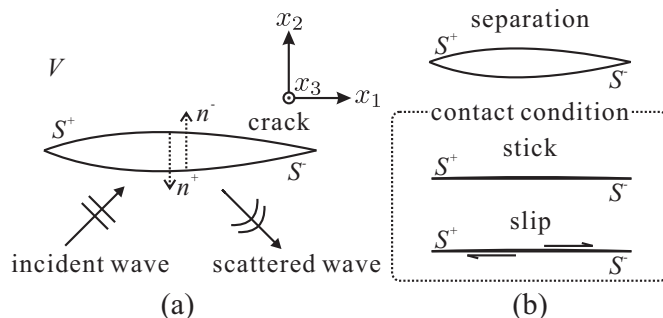


図1 非線形超音波シミュレーション (a) 解くべき問題 (b) き裂面の接触境界条件。

4. き裂面の接触境界条件

本研究では、き裂面においては、図1(b)のような separation, stick, slip の3つの接触状態について考慮する。separation 状態は、図1(b)の上側に示すように、向かい合うき裂面 S^+ 、 S^- が非接触、すなわち開口状態であるとして定義する。これより、separation 状態における接触境界条件は次のように与えられる。

$$t_1 = t_2 = 0 \quad (2)$$

次に、stick 状態は、図1(b)の中央に示すように、向かい合うき裂面 S^+ 、 S^- が接触している状態として定義する。このstick 状態では S^+ 、 S^- での水平方向変位の不連続状態を許容している。これより、stick 状態において規定される接触境界条件は次のように与えられる。

$$\phi_2 = 0, \dot{\phi}_1 = 0 \quad (3)$$

ここで、 $(\dot{})$ は時間微分である。一方、slip 状態は、図1(b)の下側に示すように水平方向滑りを許容した状態として定義する。slip 状態も、stick 状態と同様、向かい合うき裂面 S^+ 、 S^- が接触しているため、いずれの方向についても表面力は連続である。しかしながら、水平方向は滑りを許容しているため、摩擦力を考慮せねばならない。これより、slip 状態における接触境界条件は次のように与えられる。

$$\phi_2 = 0, t_1 = \text{sgn}(\dot{\phi}_1) \mu_d |t_2| \quad (4)$$

ただし、 μ_d は動摩擦係数、sgn は符号関数を表している。き裂面における接触境界条件は、各時刻において、separation, stick, slip のいずれかの状態を取り得る。ある状態から他の状態へと接触境界条件の遷移する条件は、例えば、文献³⁾を参照されたい。各時刻において、表面力境界積分方程式(1)

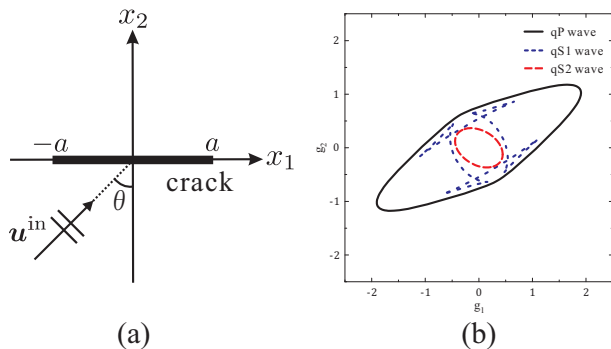


図2 解析対象 (a) 直線形状のき裂 (b) 媒質の群速度曲線。

を解いて、き裂面が separation, stick, slip いずれの状態であるか判断しながら解析を進める。そのため、解くべき問題は境界非線形問題となることに注意する。

5. 数値解析例

以下、数値解析例を示す。解析対象として、図2(a)に示す長さ $2a$ の直線形状のき裂に、平面波が $\theta = 0$ で入射する問題を考える。き裂は20個の境界要素に分割し、媒質は単斜晶系異方性材料であるグラファイトエポキシとした。この時、伝搬する弾性波の群速度曲線を参考までに図2(b)に示す。図2(b)より、解析の対象となる波動は、qP波、qS1波であり、いずれの波速も方向依存性を有していることがわかる。

(1) 通常のき裂による弾性波動散乱解析

まず、接触境界条件を考慮しない通常のき裂に対し、弾性波動散乱解析を行った。ここでは、入射波 $u_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$ を振幅 u_0 の平面 qP 波 1 波とした。なお、解析では、入射波の波長を $\lambda^{\text{in}}/a = 1.0$ で与え、総時間ステップ数 N は $N = L = 128$ 、時間増分を $c^{\text{in}}\Delta t/a \simeq 0.06$ で与えた。ただし、 c^{in} は入射波の位相速度を表す。図3は x_1 - x_2 平面におけるき裂周辺の全変位場の絶対値のスナップショットを示している。き裂に入射平面波が到達した後(図3(a))、散乱 qP 波 (qPsc) が発生していることが見て取れる(例えば図3(b))。また、散乱 qS1 波 (qS1sc) の発生も確認できる(例えば図3(c))。以上より、き裂近傍で散乱される波動は、群速度曲線(図2(b))の特徴を良く再現できており、概ね、解析を正しく実行できていることが確認できた。

(2) 接触境界条件を考慮したき裂による弾性波動散乱解析

次に、接触境界条件を考慮したき裂に対し、弾性波動散乱解析を行った。ここでは、入射波 $u_i^{\text{in}}(\mathbf{x}, t)$ を振幅 u_0 の正弦平面 qP 波 10 波とした。なお、解析では、入射波の波長を $\lambda^{\text{in}}/a = \pi$ で与え、総時間ステップ数 N は $N = L = 1024$ 、時間増分を $c^{\text{in}}\Delta t/a \simeq 0.06$ で与えた。図4は図2(a)における座標 $(x_1, x_2) = (0.0, -4.0a)$ において計算された散乱波のフーリエスペクトルをプロットした結果である。また、参考のため、通常のき裂に対する結果も青線で示している。ただし、縦軸は入射波の中心周波数に対応する無次元化波数

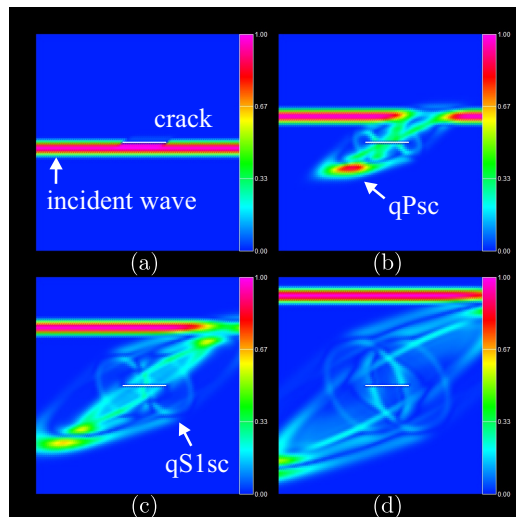


図3 通常のき裂による入射平面波の散乱解析結果 (a) $c^{\text{in}}t/a \simeq 0.24$ (b) $c^{\text{in}}t/a \simeq 1.71$ (c) $c^{\text{in}}t/a \simeq 3.18$ (d) $c^{\text{in}}t/a \simeq 4.65$ 。

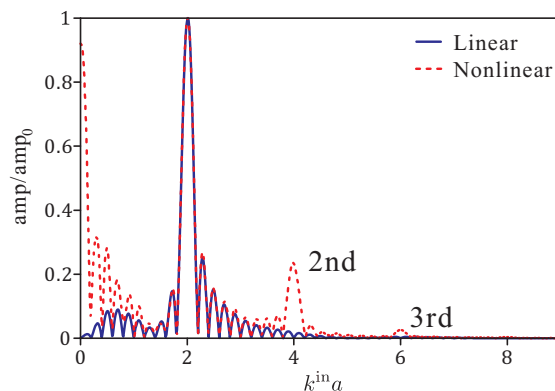


図4 通常のき裂 (Linear) および接触境界条件を考慮したき裂 (Non-linear) による散乱波のフーリエスペクトル。

$k^{\text{in}}a = 2.0$ でのフーリエスペクトル amp_0 で正規化していることに注意されたい。いずれの場合においても、 $k^{\text{in}}a = 2.0$ でスペクトルのピークが卓越していることがわかる。しかしながら、接触境界条件を考慮した場合の結果に着目すると、 $k^{\text{in}}a = 4.0, 6.0$ においてそれぞれ、2次、3次高調波を確認することができる。このことから、本研究は、等方性材料として計算した既往の研究結果^{2,3)}と同様の結果を得ることができたと言える。

6. まとめと今後の課題

時間領域境界要素法を用いて単斜晶系異方性材料中の欠陥に対する非線形超音波のシミュレーションを行った。接触境界条件を考慮したき裂による散乱波は、等方性材料の場合と同様、高調波を確認することができた。今後は、より複雑な異方性を考慮するために3次元解析への拡張を行う予定である。

参考文献

- 1) 非破壊検査, 検査と材料評価, 特集 非線形超音波法による非破壊検査・評価 V, Vol.64, No.12, (社) 日本非破壊検査協会, 2015.
- 2) 斎藤隆泰・金井翔平・丸山泰蔵・古川陽・廣瀬壮一: 演算子積分時間領域境界要素法を用いた接触境界条件を考慮した3次元クラックによる弾性波動散乱解析, 計算数理工学論文集, Vol.14, pp.31-36, 2014.
- 3) 斎藤隆泰・古田雄輔・廣瀬壮一・中畑和之: 2次元動弾性演算子積分時間領域境界要素法を用いた非線形超音波法における高調波の励起シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67, No.2, pp.161-169, 2011.