

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15077

研究課題名（和文）き裂面の接触を利用した非線形超音波法に対する定常散乱解析の高度化

研究課題名（英文）Advanced steady-state scattering analysis for nonlinear ultrasonic testing based on contact of crack faces

研究代表者

丸山 泰蔵（Maruyama, Taizo）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・講師

研究者番号：90778177

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、構造物や機械に生じたき裂に対する高精度な非破壊評価のための数値解析手法の改良を行った。具体的には、研究代表者らがこれまでに開発を行ってきた調和バランス-境界要素法は小規模な2次元解析のみしかできなかったため、実際の問題を考慮した場合に必要な3次元解析、及び材料表面を考慮した解析を実施できるように拡張した。また、より複雑な問題を解析することを考えると計算の大規模化が懸念されるため、H行列法の適用を行い、計算量の低減を図った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果によって、材料表面のき裂を含む系の共振特性とき裂面の接触の相互作用によって分調波共振が発生することが数値解析モデルの中で確認できた。そのため、これまでの非線形超音波法で不明確だった分調波発生現象について非線形動力学の観点から調べられる数値解析手法を提案し、解析結果によるメカニズムの説明ができたと考えられる。また、非線形境界値問題に対してもH行列法は計算効率改善に一定の効果があることが確かめられた。

研究成果の概要（英文）：In this study, we improved a numerical method for nondestructive evaluation for cracks in structures and machines. Specifically, we extended a harmonic balance-boundary element method (HB-BEM) into wave scattering by 2-D surface cracks and 3-D interior cracks to solve realistic problems. Furthermore, the H-matrix method was applied to the HB-BEM to solve large-scale problems.

研究分野：計算力学

キーワード：弾性波 非線形超音波法 接触音響非線形性 境界要素法 調和バランス法

1. 研究開始当初の背景

現存する機械・土木構造物の安全な運用、適切な補修時期の選定には非破壊検査による定期的な点検が重要である。数ある検査手法の中でも、超音波法は材料内部の探傷が可能であり、比較的安価・手軽に検査を行えるため、様々な分野で広く用いられている。非破壊評価の対象として、発電プラントにおける疲労き裂や応力腐食割れ、及びコンクリート部材におけるひび割れといった不連続界面が挙げられる。しかしながら、これらの不連続界面は残留応力の状況によっては閉じた状態となっている。通常の超音波法は、母材ときずとの音響インピーダンス差異による入射波の線形な散乱現象を利用しているため、閉じた不連続界面では散乱波がほとんど発生せず、見落としや過小評価に繋がりがかねない。そこで、固体の不連続界面における接触音響非線形性(CAN: Contact Acoustic Nonlinearity)を利用した非線形超音波法が提案され、閉口き裂に対して有効な検査手法となることが期待されている。CANを用いた非線形超音波法では、大振幅(数~数十 nm 程度の変位)の超音波を入射することによって閉口き裂を強制的に振動させ、き裂面の開閉や摩擦を伴う滑りを誘発させる(図1参照)。この非線形振動の結果により受信波に含まれる非線形超音波を解析し、閉口き裂の検出・サイズ測定を行う。ここで、非線形超音波とは、基本周波数(入射波の中心周波数)の整数倍の周波数成分を有する高調波、及び整数分の一の周波数成分を有する分調波から構成される波のことである。高調波はきずの非線形性(不連続面の接触や塑性変形等)の他にも、探触子、接触媒質等によって発生し得る。一方、経験的にはあるが、分調波はきずの非線形性によってのみ発生すると考えられており、非破壊検査に用いることができれば、より高精度なきずの評価が期待できる。

高精度かつ信頼度の高い非線形超音波法には、高調波・分調波発生現象の詳細を把握することが必要である。そのためには適切なモデル化を行い、数値シミュレーションによって現象の予測を可能にすることが重要である。これまでに非線形超音波法に対する数多くの時間領域解析が行われてきたが、非線形共振の詳細を明らかにするには至っていないと思われる。一方、研究代表者らは調和バランス-境界要素法(HB-BEM)という定常解析手法を用いて分調波共振の詳しい解析は行っているものの、2次元無限領域中の単一のき裂に対する数値シミュレーションに留まっていた。

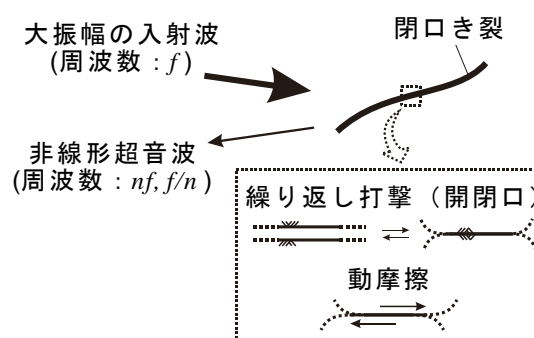


図1 CANに基づいた非線形超音波法

2. 研究の目的

実問題、もしくはそれと近い状況での数値シミュレーションを実行できるように、HB-BEMを発展させることを本研究の目的とした。研究開始当初は2次元無限領域中に存在するき裂に対してのみ手法の開発が行われている状況だった。そのため、本研究では、2次元半無限領域中の表面き裂、3次元問題への手法の拡張、及び問題の大規模化に対応するための解析手法の高速化を具体的な実施目標とした。

3. 研究の方法

HB-BEMの利点は、放射条件を厳密に取り扱いながら局所的な非線形共振を解析できることである。その利点を失わないように放射条件を適切に取り扱いながら手法の拡張を行う。そのため、2次元半無限弾性体中の表面き裂への解析手法の拡張は、半無限弾性波動問題に対するGreen関数を用いる。一方、3次元問題への拡張では、き裂は開曲面で表現されるため、CANを考慮した境界条件の設定が必要となる。特に、き裂面内の任意方向に対して摩擦が発生することをモデル化する必要がある。数値シミュレーション手法の高速化については、主要な計算コストを要する連立非線形方程式を解くときの逆行列計算を効率化する。HB-BEMでは、Numerical Continuation Method (NCM) というパラメータを変化させたときの解を追跡する手法によって、解構造を調べている。解の追跡の際にNewton法を実行するため、その際の逆行列計算を高速化する。行列の性質が悪い場合が多いことが経験的にわかっているため、直接解法(LU分解)を用いることができるH行列法による高速化を行う。

4. 研究成果

(1) これまでに開発を行ってきたHB-BEMをベースとして、2次元半無限弾性体への解析手法の拡張を行った。半無限弾性波動問題に対するGreen関数を用いて定式化し、プログラムを実装した。一例として、図2のような材料表面に対して45°傾いた表面き裂による散乱問題の解析

結果を図3に示す。図3は入射周波数を変化させたときのき裂開口変位の応答であり、き裂面の接触を考慮していない場合の結果を黒線で示している。一方、き裂面の接触を考慮した場合の基本波成分を赤線、分調波成分を青線で示している。また、実線は安定解、破線は不安定解を表している。丸印は非定常解析結果であり比較のため同図に示している。図3より、き裂面の接触を考慮した場合、特定の入射周波数において分調波成分が値を持つ分調波共振が発生していることがわかる。このとき、定常解が安定解と不安定解に枝分かれする分岐が起こっており、非定常解は安定解と一致することが確かめられた。

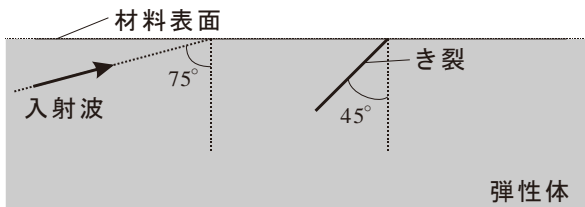


図2 材料表面き裂による散乱問題の解析モデル

(2) 3次元問題に対する調和バランス-境界要素法の拡張では、き裂が開曲面で表されることを想定して境界条件の拡張を行い、き裂面内の任意方向に対して摩擦を伴う滑りが発生することをモデル化した。解析結果の一例として、図4に示すように円盤型き裂に対して横波を垂直入射したときの結果を示す。図5はき裂中心における接線方向開口変位の時刻歴波形である。非定常解析結果も比較のため同図に示している。定常解析の次数は調和バランス法におけるフーリエ級数の次数を意味している。定常解析は次数が増大するにつれて非定常解析結果の十分時間が経過した部分と合っている様子が見られる。そのため、妥当な3次元解析ができたと考えられる。

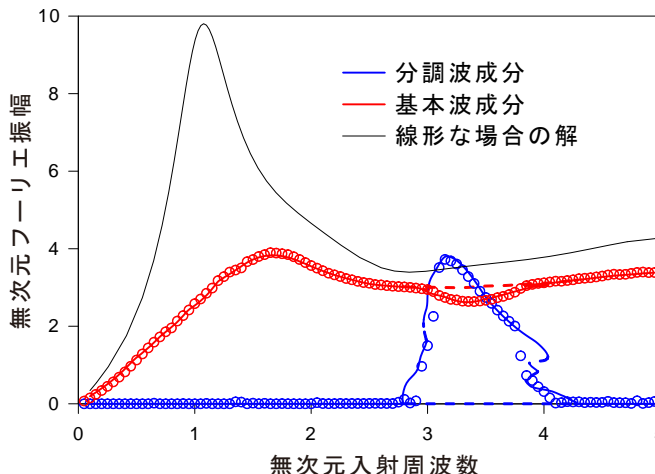


図3 分調波共振の解析結果の例

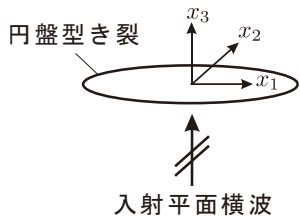


図4 3次元解析モデル

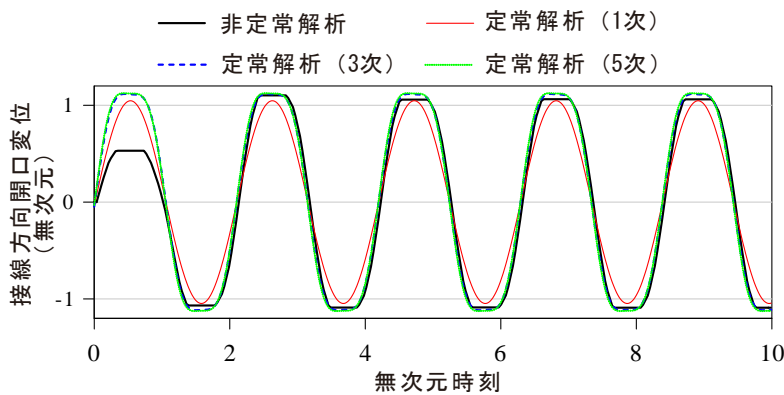


図5 き裂中心における接線方向開口変位の時刻歴波形

(3) 調和バランス-境界要素法の計算効率化のために、NCMのNewton法を用いている部分にH行列法による高速化を施した。その結果、空間方向の未知数増大に対して一定の高速化に成功した。図6に示すように、H行列法を用いた場合、総節点数が1万程度から従来の直接解法(LAPACK)よりも計算時間が短くなる。また、計算量のオーダーは $O(N)$ から $O(N^2)$ の間であった。

しかしながら、調和バランス法において考慮する周波数の数 N_h に対する計算量について高速化できてお

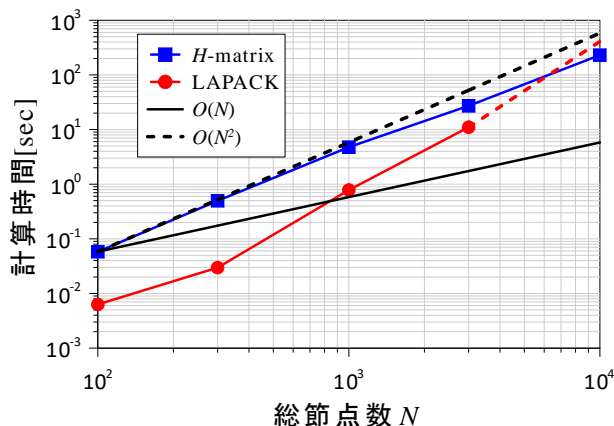


図6 総節点数と計算時間の関係

らず、 $O(N_h^3)$ の計算量である。そのため、考慮する周波数の数に対してHB-BEMの効率化を行うことは課題として残されている。また、計測実験との比較を行い、き裂の接触による非線形共振について実現象と照らし合わせながら詳しく調べることは今後、重要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Maruyama Taizo	4. 巻 210-211
2. 論文標題 Harmonic balance-boundary element and continuation methods for steady-state wave scattering by interior and surface-breaking cracks with contact acoustic nonlinearity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 310 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijsoistr.2020.11.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 丸山泰蔵	4. 巻 76
2. 論文標題 閉口き裂による散乱問題に対する調和バランス-境界要素法へのH行列法の適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_173 ~ I_181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_173	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 丸山泰蔵, 中畑和之	4. 巻 77
2. 論文標題 閉口き裂による3次元散乱問題に対する調和バランス-境界要素法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_137 ~ I_143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.77.2_I_137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 丸山泰蔵
2. 発表標題 閉口き裂による散乱問題に対する調和バランス-境界要素法へのH行列法の適用
3. 学会等名 第23回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸山泰蔵
2. 発表標題 波動・振動解析技術の融合による接触音響非線形問題の周波数応答解析
3. 学会等名 日本学会議 第10回計算力学シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸山泰蔵, 東平光生
2. 発表標題 半無限弾性体中の接触条件を有する表面き裂による散乱問題のための調和バランス-境界要素法
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山泰蔵, 東平光生
2. 発表標題 2次元半無限弾性体中の接触音響非線形性を伴う表面き裂による 散乱問題のための調和バランス-境界要素法
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taizo Maruyama and Terumi Touhei
2. 発表標題 A Continuation Approach to Boundary Integral Equation for Steady-state Wave Scattering by a Crack with Contact Acoustic Nonlinearity
3. 学会等名 14th International Conference on Mathematical and Numerical Aspects of Wave Propagation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taizo Maruyama and Terumi Touhei
2. 発表標題 Steady-state wave scattering by a surface breaking crack with contact acoustic nonlinearity in an elastic half-plane using harmonic balance-boundary element method
3. 学会等名 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanic (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山泰蔵
2. 発表標題 2次元半無限弾性体中の表面き裂による非線形超音波発生現象の定常解析
3. 学会等名 第27回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丸山泰蔵, 中畑和之
2. 発表標題 閉口き裂による3次元散乱問題に対する調和バランス-境界要素法
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taizo Maruyama and Kazuyuki Nakahata
2. 発表標題 3-D steady-state wave scattering by a crack with contact acoustic nonlinearity
3. 学会等名 IUTAM symposium (Computational methods for large-scale and complex wave problems) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------