

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760352

研究課題名(和文)

新しい波動解析手法による非線形超音波法特性の解明に関する研究

研究課題名(英文)

A study on nonlinear ultrasonic testing using a new wave propagation simulation tool

研究代表者

齋藤 隆泰 (SAITOH TAKAHIRO)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：00535114

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい時間領域境界要素法を開発し、開発した手法を非線形超音波シミュレーションへ応用した。本手法により、波動現象を小さい時間増分を扱った場合においても安定に解析できることが可能となった。解析対象としたモデルは、異種材料接合界面における界面き裂である。数値解析結果より、界面き裂の開口状態(stick-separation)に依存して分調波や2次高調波が発生し、向かい合う界面の水平方向摩擦現象(stick-slip)により3次高調波が発生したことを確認できた。

研究成果の概要(英文)：In this study, new time-domain boundary element method was developed for non-linear ultrasonic simulation. The use of the new time-domain BEM provided the stable transient solutions even for small time increments. Numerical results show that stick-separation and stick-slip contact states excite 2nd order harmonics and sub-harmonics, and 3rd order higher harmonics, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：境界要素法、時間領域、超音波非破壊評価、非線形超音波法

1. 研究開始当初の背景

近年、高度経済成長期に建設された土木構造物や、最大級の維持管理が要求される原子力施設といった重要構造物の維持管理手法の開発は急務となっている。一般には、これら重要構造物の日常点検手法には、線形超音波非破壊評価法が用いられてきた(以下、線形超音波非破壊評価法を、単に超音波非破壊評価法と呼ぶ)。しかしながら、超音波非破

壊評価は、構造材料と、空隙や異質物との間の音響インピーダンスの違いにより顕著に表れる反射波を用いて、欠陥を検出するメカニズムとなっている(図1(a))。そのため、例えば、構造物中の、閉じていて密着したき裂を検出することは難しいとされている。これは、き裂が閉じていると、入射超音波の大部分は透過することに由来する(図1(b))。一方、異種材料が接合された界面に存在する

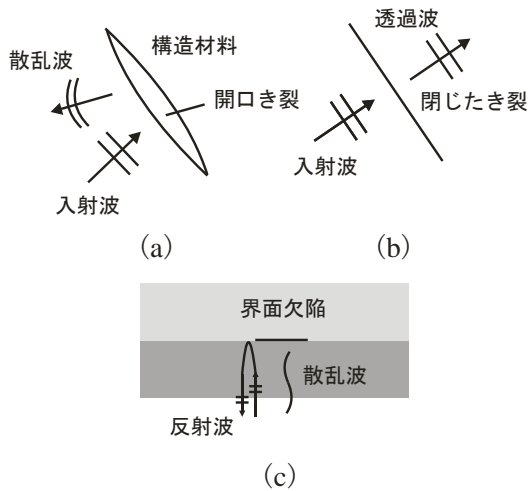


図 1：超音波非破壊評価法のモデル(a)開口き裂(b)閉じたき裂(c)異種材料接合欠陥の場合

剥離等の界面欠陥も、検出は難しい。この場合は界面欠陥からの反射超音波エコーが、界面自体からの反射波によりうもれてしまう可能性が指摘されている (図 1(c))。

そこで、近年、このような閉じたき裂や、異種材料接合界面における欠陥を検出する新たな超音波非破壊評価手法として、非線形超音波法が提案された。非線形超音波法では、欠陥からの反射波のみならず、欠陥を透過した超音波の周波数成分に着目して欠陥の有無等を判定する方法である。この方法では、まず、閉じたき裂や異種材料接合界面に、大振幅超音波を入射させ、閉じたき裂を開閉口させる等、欠陥に何らかの非線形動的相互作用を与える。このとき、透過波には、高調波や分調波が含まれる。この高調波や分調波は、通常の超音波非破壊評価では検出されないため、閉じたき裂や異種材料接合界面の欠陥を検出できる可能性が指摘されている。しかしながら、高調波や分調波の発生機構については、未知な部分も多い。

そこで、本研究では、異種材料接合界面における欠陥に対する非線形超音波法の数値シミュレーションを行い、高調波や分調波の発生機構について検討する。

2. 研究の目的

このような、研究の背景を踏まえ、本研究の目的として次の2つを掲げた。1つは、非線形現象を再現できる最新の波動解析手法を確立することである。非線形現象を追跡するため、解くべき問題は時間領域問題に限定される。また、超音波は構造材料中の弾性波動方程式を満たす。そのため、時間領域波動解析を行わねばならないが、波動解析に適し

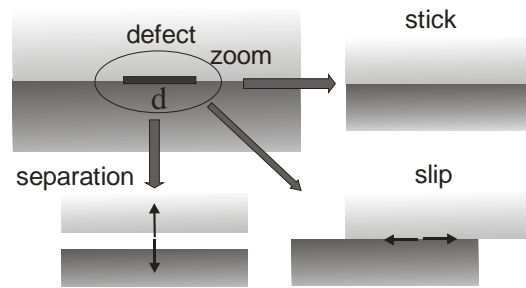


図 2：界面欠陥のモデル化

た手法として知られる通常的时间領域境界要素法では、数値解が不安定になる可能性も否定できず、より安定な時間領域境界要素法を開発・利用することが望まれる。もう1つは、非線形動的相互作用を如何なる境界条件で与え、分調波や高調波を励起させることができるかについて明らかにすることである。

3. 研究の方法

まず、波動解析に適した境界要素法を拡張し、新しい時間領域境界要素法を開発することを検討した。そのための方法として、演算子積分法と呼ばれる畳込み積分を数値安定に計算できる手法を、時間領域境界積分方程式の畳込み積分の近似計算に取り入れた。これにより、従来の時間領域境界要素法では安定に計算できないような場合でも、比較的安定に数値解を求めることが可能となった。

次に、開発した手法を用いて、異種材料接合界面に超音波を送信し、界面におけるき裂の動的相互作用を境界条件として与え、いかなる条件で高調波や分調波が発生するか、実際に検討することを行った。界面のモデル化には、界面が開いている場合 (図 2 左下)、界面の水平方向不連続を許容するが、鉛直方向は連続である場合 (図 2 右上)、界面が水平方向滑りを伴う場合 (図 2 右下) の合計 4 通りを考慮した。このとき、様々な入射超音波を界面欠陥に与え、開発した安定な時間領域境界要素法を用いて欠陥後方における透過波を計算する。そして、最終的に得られた透過波系のスペクトル解析を行うことで、高調波や分調波成分が如何なる場合に発生したかを検討した。

4. 研究成果

解析結果の例として、界面欠陥の長さが 2mm の場合に中心周波数 4MHz、振幅 10nm のバースト 5 波の P 波、および S 波を垂直に入射させた場合の結果を示す。

図 3(a)は欠陥上方 3mm の点での透過波を、図 3(b)はそのフーリエスペクトルを示している。図 3(b)より、中心周波数 4MHz に対して、その 2 倍、3 倍の 8MHz、12MHz に対応する 2 次高調波、3 次高調波が発生していること

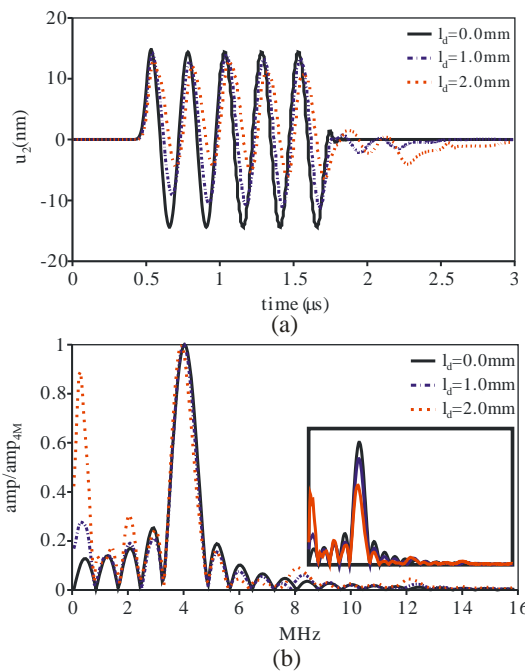


図 3: P 波垂直入射時の透過波形とそのフーリエスペクトル

が見て取れる。これらのスペクトルは中心周波数 4MHz に対するスペクトル値で正規化されているが、欠陥が長くなるほど、中心周波数 4MHz に対して高調波成分が増えていることがわかる。

一方、図 4 は S 波を垂直に入射させた場合の結果を示している。この場合は、8MHz でピークは見られず、12MHz の 3 次高調波成分のみピークが見られる。

また、図 3(b), 図 4(b) いずれにおいても、欠陥が長くなるにつれて、中心周波数に対する低周波成分の割合が増えている。特に図 3(b) より、P 波を垂直に入射させた場合は、2MHz の分調波成分が比較的多く検出されている。ただし、同様の計算を 3MHz で行った場合は顕著なピークは見られなかったこともあり、さらなる詳細な検討が必要である。このような数値シミュレーションを、様々な入射パターンで行って、得られた知見をいかにまとめる。

まず、欠陥を開口させるような入射波を用いた場合は、2 次高調波成分等の偶数次高調波および 3 次高調波といった奇数次高調波も発生する。また、界面欠陥が滑りを伴う場合は、3 次高調波といった奇数次高調波成分が検出される。これらの結果は先に示したように、超音波を垂直入射させた場合に顕著に確認できる。分調波については、中心周波数を変化させた場合に、顕著に確認出来ない場合があるため、分調波の発生メカニズムは共振現象等のように、周波数に依存することも考えられ、今後さらに検討していく必要がある

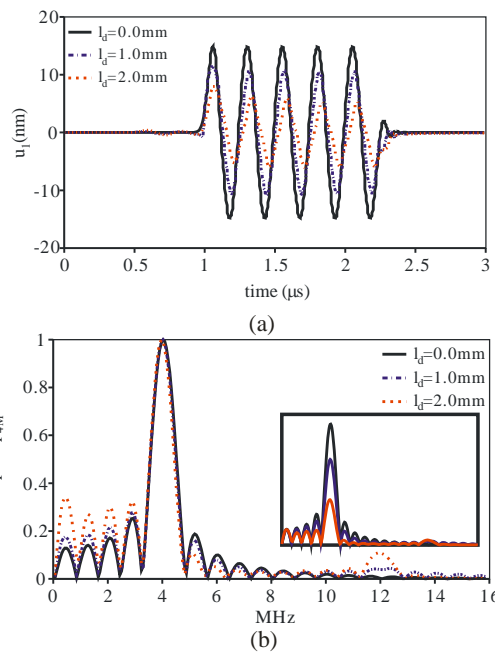


図 4: S 波垂直入射時の透過波形とそのフーリエスペクトル

と考えられる。特に、分調波の発生メカニズムを明らかにしていくことは、今後の非線形超音波法の実用化に向けて、非破壊評価の分野においては世界的にも最重要課題の 1 つであると考えられ、さらなる研究が必要とされる。

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 5 件)

① 齋藤隆泰: 境界要素法 (BEM) を用いた超音波シミュレーション, 非破壊検査, 特集号, 超音波シミュレーションの展開, 非破壊検査 vol. 60-4, pp. 210-215, (2011) (査読有)

② T. Saitoh and S. Hirose: Parallelized fast multipole BEM based on the convolution quadrature method for 3-D wave propagation problems in time-domain, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 10, 012242 (CD-ROM 収録), (2010) (査読有)

③ T. Saitoh, K. Nakahata and S. Hirose: Improved time-domain BEM analysis for a solid-solid interface with contact boundary conditions,

Theoretical and Applied Mechanics Japan, vol. 58, pp.9-17(2010) (査読有)

④ 齋藤隆泰・中畑和之・古田雄輔・廣瀬壯一：時間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，計算数理工学論文集，vol.9, pp.31-36, (2009) (査読有)

⑤ 福井卓雄・齋藤隆泰：Lubich の演算子積分法における高速多重極法，日本シミュレーション学会論文誌，小特集：境界要素法の新展開，vol.28 No.3, pp.17-22, (2009) (査読有)

[学会発表] (計 14 件)

① 廣瀬壯一・古田雄輔・齋藤隆泰・中畑和之：数値シミュレーションによる非線形超音波特性の解明について，平成 23 年度非破壊検査協会春季講演大会，2011 年 5 月 25 日，アルカディア市ヶ谷

② 古田雄輔・齋藤隆泰・廣瀬壯一・中畑和之：欠陥を有する材料接合界面における非線形超音波のシミュレーション，第 60 回理論応用力学講演会，2011 年 3 月 9 日，東京工業大学

③ 古田雄輔・齋藤隆泰・廣瀬壯一：異種材料接合界面に対する非線形超音波法のシミュレーション，平成 22 年度非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集，2010 年 10 月 28 日，沖縄県市町村自治会館

④ 齋藤隆泰・中畑和之・廣瀬壯一：面外波動を考慮した非線形超音波法における高調波励起シミュレーション，土木学会全国大会，2009 年 9 月 2 日，九州大学 (CD-ROM 収録)

⑤ 古田雄輔・齋藤隆泰・中畑和之・廣瀬壯一：演算子積分時間領域境界要素法による非線形超音波法の数値シミュレーション，第 59 回理論応用力学講演会講演論文集，2010 年 6 月 10 日，日本学術会議，東京

⑥ T. Saitoh, Y. Furuta and S. Hirose: Simulation of non-linear ultrasonic wave using new time-domain BEM, The Fourth Japan-US symposium, engineering NDE capabilities for a safer world, 2010 年 6 月 10 日，ハワ

イマウイ島マウイプリンスホテル

⑦ 古田雄輔・齋藤隆泰・廣瀬壯一：接触条件を考慮したき裂による非線形波動散乱解析，日本応用数理学会 2009 年度年会講演予稿集，2009 年 9 月 28 日，大阪大学

⑧ 齋藤隆泰・中畑和之・廣瀬壯一：接触境界条件を持つ固体 - 固体接合界面の改良型時間域境界要素法解析，第 58 回理論応用力学講演会講演論文集，2009 年 6 月 9 日，日本学術会議

[その他]

ホームページ

<http://www.cv.titech.ac.jp/~hiro-lab/tsaitoh/reference.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 隆泰

東京工業大学 大学院情報理工学研究科
情報環境学専攻

研究者番号：00535114