

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K14018

研究課題名(和文) 分調波発生機構の解明と新しい超音波非破壊評価への挑戦

研究課題名(英文) Elucidation of subharmonic generation mechanism and challenge to new ultrasonic nondestructive evaluation

研究代表者

齋藤 隆泰 (SAITOH, Takahiro)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：00535114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、き裂や異種材料接合界面中の接合不良箇所が発生する非線形超音波を用いた非破壊評価法に注目が集まっている。しかしながら、非線形超音波の一つとして知られる分調波の発生機構は明らかにされていない。本研究では、演算子積分時間領域境界要素法や、MPS法、動弾性有限積分法等を駆使して、き裂や異種材料接合界面中の欠陥による散乱問題を解析し、分調波発生機構を解明することを行った。その際、き裂等の欠陥には接触境界条件を考慮した。また、非線形超音波を用いた欠陥形状再構成手法についても検討した。数値解析結果より、分調波は欠陥形状や入射角、欠陥の擬似固有振動等に依存して発生することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In recent years, a new ultrasonic nondestructive evaluation method that utilizes nonlinear ultrasonic behavior generated in cracks or at a bi-material interface defect has emerged. However, the mechanism of generating subharmonics is theoretically still not well understood. Therefore, in this research, dynamic contact problems of a bi-material interface defect and a crack with contact boundary conditions are investigated by using numerical methods such as the convolution quadrature time-domain boundary element method (CQBEM), moving particle semi-implicit simulation, and elastodynamic finite integration technique. In addition, some crack shape reconstruction methods are developed based on the inverse scattering theory, and the applicability is considered. Numerical results show that the subharmonic generation is depend on the angle of incident ultrasonic waves, quasi-natural resonance frequency, and contact boundary conditions.

研究分野：応用力学、計算力学、非破壊評価

キーワード：非線形超音波 高調波 分調波 境界要素法 粒子法 非破壊評価

1. 研究開始当初の背景

現在、インフラ点検・診断技術の筆頭の1つとして現場で用いられている方法として、非破壊評価法がある。特に、超音波を用いた非破壊評価法(超音波非破壊評価法)は、現場での測定が比較的容易であることから、土木構造物や原子力機器に至る様々な分野で利用されてきた。実際、研究代表者は、その超音波非破壊評価法に焦点を当て、これまで研究を続けてきたが、応力腐食割れや、残留応力下で生じる閉じたき裂等の検出は、困難を極める。

そこで、このような閉じたき裂や、異種材料接合界面における不完全結合部等を検出するためには、従来の超音波非破壊評価法(音響インピーダンスの差で発生する散乱波を用いる方法)とは異なる新しい欠陥検出原理を用いた**新たな定量的超音波非破壊評価法**を検討する必要があると考えた。その開発の鍵を握るのは、**分調波**と呼ばれる波動である。ある閉じたき裂に対し、中心周波数の超音波を入射すると、ある条件下で超音波が透過・散乱された場合に限り、分調波と呼ばれる元の入射超音波の中心周波数の分数倍の周波数を持つ波動が励起されることが知られている。しかしながら、現在まで、分調波の発生機構は明らかにされておらず、世界中の研究者が諸説提案し、議論している状況にある。そのため、もし、その分調波発生機構をいち早く解明できれば、分調波の発生を利用して、閉じたき裂等の従来の超音波非破壊評価法では検出の難しい欠陥を精度良く、定量的に検出できる可能性がある。

このような中、研究代表者らは、分調波と同様、非線形超音波の一種として知られている、**高調波**と呼ばれる入射超音波の中心周波数の整数倍の超音波が発生するメカニズムを明らかにする研究に従事し、その発生機構について明らかにしてきた。実際、き裂の開閉口時や、向かい合うき裂面がせん断変形する場合に、高調波が発生することを、時間領域境界要素法シミュレーションにより再現している。したがって、本研究では、そのような高調波発生機構の知識を応用し、分調波発生機構を明らかにすれば、超音波非破壊評価法分野の新しい道が開けると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

1. で述べた学術的背景より、本研究の目的を、以下のA、Bとして定めた。

A: 最新の数値解析手法を駆使した分調波発生機構の解明

B: 分調波を利用した新しい定量的超音波非破壊評価への挑戦

と定める。ただし、ここで意図する新しい定量的超音波非破壊評価への挑戦とは、分調波発生メカニズムを明らかにした上で、如何に分調波を利用して閉じたき裂を検出し、かつ画像化までを行う一連の評価方法を、数値解

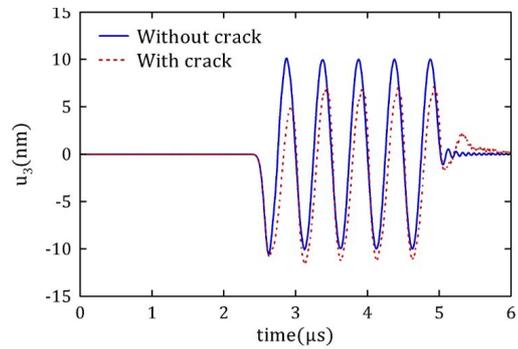


図1: 等方性材料中のき裂に対する非線形超音波シミュレーション結果。(青線)き裂なし(赤点線)き裂あり。

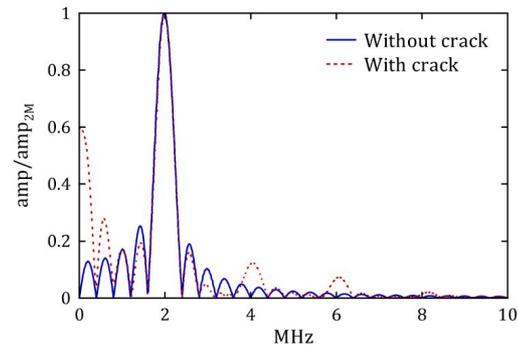


図2: 図1の結果のフーリエスペクトル。

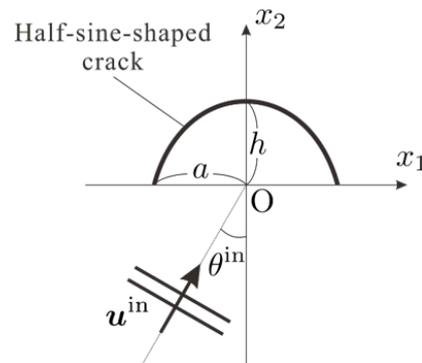


図3: 2次元クラックによる入射波の散乱解析モデル。

析ベースで提案できるかを検討するものであり、超音波探傷機器の開発や、作成したプログラムコードの販売等は含まれないものとする。

3. 研究の方法

本研究が、萌芽的課題であること、研究期間が3年間と限られていること、分調波の発生機構自体、研究開始時点で明らかにされていないことから、やみくもに複数の試験体を用意し、計測実験をすることは、必ずしも得策ではなく、研究効率や経済面でもデメリットがある。

そこで、本研究では、研究方法を数値シミュレーションに絞り、申請者がこれまで開発を続けてきた最新の時間領域境界要素法で

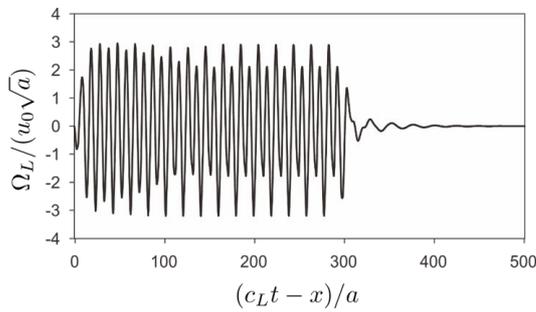


図 4：曲線き裂に対する 3 次元超音波シミュレーション波形の例．

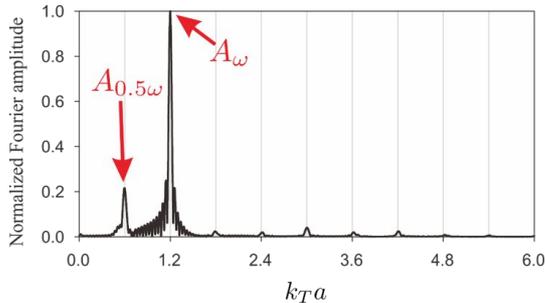


図 5：図 3 の波形のフーリエスペクトル．

ある演算子積分時間領域境界要素法を応用し，研究を実施することとした．ただし，演算子積分時間領域境界要素法は，差分法や有限要素法に比べ，比較的多くの計算時間を必要とする数値解析手法である．分調波の発生機構が未知である状況で，数多くの数値計算を実行することも，多くの労力がかかるのが実情である．そこで，本研究では，将来の応用も考え，最新の数値解析手法である粒子法を応用した非線形超音波シミュレーションについても一部，検討した．

4．研究成果

(1) 高調波発生機構から見た分調波発生モデルの考察

1. の研究開始当初の背景で述べたように，高調波発生機構は，申請者らの研究で概ね明らかになっている．しかしながら，既往の高調波発生解析の結果によっては，散乱波のフーリエスペクトル成分に，高調波成分のみならず，分調波成分も比較的多く含まれる場合が確認されている．そのため，これまでに行った高調波発生解析結果を再考察し，如何なる場合に低周波数成分が相対的に増加しているかについて考察することで，分調波発生状況について検討することも必要であると考へた．ただし，3. で述べたように，演算子積分時間領域境界要素法は，比較的多くの計算時間を必要とする．そこで，本研究では，新たに最新の数値解析手法である粒子法を用いた高調波シミュレーターを開発し，非線形超音波の発生に関するパラメータ解析を実行することで，分調波発生機構に関する検討を行った．粒子法は，これまでの研究でいくつか提案されているが，本研究では，

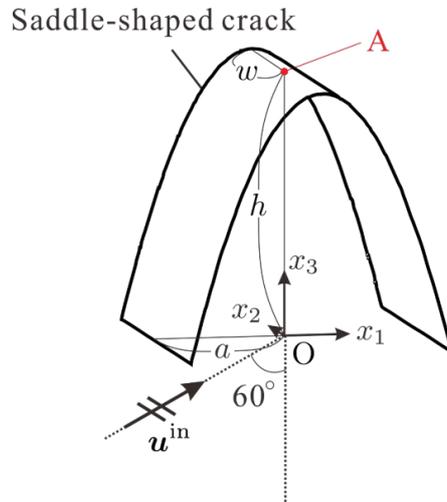


図 6：3 次元クラックによる入射波の散乱解析モデル．

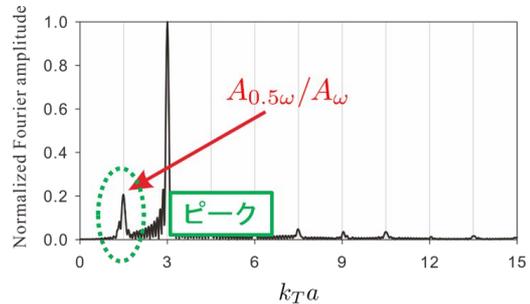


図 8：図 6 の波形のフーリエスペクトル．

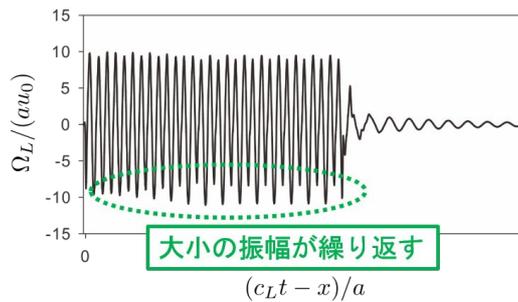


図 7：曲線き裂に対する 3 次元超音波シミュレーション波形の例．

MPS(Moving Particle Simulation)法を基本として解析コードを作成した．

図 1 に開発した MPS 法を用いて行った非線形超音波シミュレーション結果の一例を示す．ただし，ここで行ったモデル化は，研究代表者らが既往の研究で行った，き裂面の接触モデル(Stick, Slip, Separation モデル, 斎藤隆泰・古田雄輔・廣瀬壮一・中畑和之：2 次元動弾性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 (応用力学論文集 Vol. 14)，1_161-1_169, 2011 参照)を，新たに MPS 法に適用したものである．図 1 より，赤点線で示

されたき裂面の接触を考慮した場合のき裂からの散乱波形は、波形がやや歪んでいることが見て取れる。

一方、図2に図1の両波形のフーリエスペクトルを示す。図2より、き裂を考慮した場合は、入射超音波の中心周波数2MHzの2倍、3倍の周波数成分である、2次、3次高調波を確認することができる。しかしながら、このき裂面の接触モデルだけでは、明確な分調波の発生を得ることはできなかった。詳細は省略するが、分調波は、不安定現象から引き起こされるものであり、かつ、ここで用いたき裂面の接触モデル以外の何らかの条件が満たされた場合に分調波が発生すると考えられる。そのため、次の(2)では、その付加条件を、波動論的に考察することを行った。

(2) 波動論的立場から見た分調波発生機構の解明に関する考察

続いて(1)の結果を踏まえ、波動論的立場から、分調波が如何にして発生するかについて考察した。例えば、非破壊評価と弾性波動論の世界的権威であるJ. D. Achenbachらのグループは、き裂とき裂面を伝わる表面波の関係が、ある特定の条件を満たす場合に共振現象が起こるといった、いくつかの興味深い結果を明らかにしている(Achenbachら Scattering of obliquely incident Rayleigh waves by a surface-breaking crack, Review of Progress in QNDE, 1984等)。そこで、本研究では、き裂と超音波の入射角との関係、超音波の周波数(波長)との関係等について考察し、波動論的立場から見た分調波発生に対する条件について考察した。解析には、演算子積分時間領域境界要素法を用い、2次元、3次元いずれの場合のシミュレーションも実施した。

まず、2次元解析の結果を示す。共振現象の発生を意識して、曲線上のき裂を検討し、入射超音波の散乱問題を解析した。この時、き裂に対する入射超音波の入射角と、曲線き裂の形状(図3における a や h)を変化させ、それらの様々な組み合わせ下における分調波の発生について考察した。考察結果を整理すると、通常の条件下では、分調波の発生を確認することは難しいが、ある特定の条件下では、図4に示すように、散乱超音波の振幅が交互に大小となる散乱波を得ることができた。実際に分調波が発生していることを確認するために、図4の波形のフーリエスペクトルを取った結果を図5に示す。図5より、入射波の中心周波数の丁度半分のフーリエスペクトルが卓越しており、分調波が発生していることが見て取れる。一方、この分調波が発生した場合について、接触を考慮しないき裂に対する線形な周波数応答解析を、周波数領域の境界要素法を用いて行くと、入射波の中心周波数付近とその半分の周波数付近で周波数応答解析結果が大きな値を示すことを確認できた。また、同様の計算を、2つ

の並行き裂に対して行ったところ、同様に特定の入射角とき裂の位置に対してのみ、分調波の発生を確認することができた。すなわち、これらの結果から、特定の形状、配置のき裂に対して、特定の中心周波数、入射角を持つ平面波を入射したとき、分調波発生現象が確認されるばかりか、き裂を有する系の擬似固有振動特性と、き裂面の接触が分調波の発生要因となっていることが明らかとなった。すなわち、高調波発生条件にプラスアルファ、系の疑似固有振動特性が加味された場合に、分調波が発生すると考えられる。

次に、3次元解析の結果についても、2次元解析と同様な非線形超音波シミュレーションを行った。3次元解析の例として、図6に示すような曲線き裂に対して、2次元解析と同様、演算子積分時間領域境界要素法を用いて入射超音波のき裂による散乱問題を解析した。この時、2次元解析と同様に、き裂の大きさ(図6における a や h)や入射角等を適宜変更し、パラメータ解析を行うことで、非線形超音波が発生する場合について検討した。結果として、2次元解析と同様に、ある特定のき裂の大きさと入射角の場合に限り、図7で示すように、大小の振幅を交互に繰返す分調波が励起された。実際、図8に図7の散乱波系のフーリエスペクトルを示す。2次元解析と同様に、中心周波数の1/2倍における周波数で、スペクトルピークが卓越しており、分調波が発生していることをはっきりと確かめることができる。なお、3次元解析においても、2次元解析と同様に、周波数領域境界要素法を用いて対応する3次元解析を行った。以上の2、3次元解析結果より、分調波の発生は、き裂を有する系の固有振動特性と関係があることを示した。

このように本研究で、分調波発生現象について力学的な解明を目指し、一定の成果を得ることができたが、依然として、分調波発生機構には未知の部分も多い。また、本研究では、き裂を有する欠陥に対する逆散乱解析手法等の開発も行っている。これらの結果については、随時論文投稿を行う予定である。解析結果の詳細等については、次節に載せた主な発表論文等を適宜、参照されたい。

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12件)

野口豪気・斎藤隆泰：MPS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.17，pp.13-18，(2017)，<http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JA/SCOME/denshi-journal/17/JA173.pdf>，査読有

T. Maruyama, T. Saitoh and S. Hirose : Numerical study on sub-harmonic

generation due to interior and surface breaking cracks with contact boundary conditions using time-domain boundary element method, *International Journal of Solids and Structures*, vol.126-127, pp.74-89, (2017), DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.07.029, 査読有

野口豪気・齋藤隆泰: MPS 法を用いた等方性材料中の欠陥に対する非線形超音波シミュレーション, 第 64 回理論応用力学講演会講演論文集, USB 収録, (2017), 査読無

A. Ibrahim, K. Nakahata, H. Yamawaki and I. Watanabe: One dimensional EFIT modeling and experimental validation of dynamic interfacial bonding, *Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Letters*, vol.3, pp.1-9, (2017), DOI:10.1299/mel.16-00605, 査読有

T. Saitoh, T. Maruyama and A. Furukawa: Simulation of nonlinear ultrasonic waves in anisotropic materials using convolution quadrature time-domain boundary element method, *Civil, Architecture and Environmental Engineering*, vol.1, pp. 451-456, (2017), DOI: 10.1201/9781315116259-76, 査読有

野口豪気・齋藤隆泰: MPS 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, 先進的非破壊評価合同シンポジウム論文集, pp.3-4, (2017), 査読無

松田健吾・イブラヒムアスリアナ・中畑和之・山脇寿・渡邊育夢: 開閉口するき裂の散乱波のモデル化と映像化シミュレーション, 第 24 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, vol.24, pp.125-126, (2017), 査読無

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: き裂面の接触音響非線形性による分調波発生現象の 3 次元数値シミュレーション, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol.72, No.2, pp.217-226, (2016), https://doi.org/10.2208/jscejam.72.1_217, 査読有

金井翔平・齋藤隆泰: 等方性・異方性材料接合界面中の欠陥に対する非線形超音波のシミュレーション, 第 23 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.179-180, (2016), 査読無

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 接触条件を考慮したき裂による 2 次元分調波励起シミュレーション, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol.71, No.2, I_299-I_310, (2015), https://doi.org/10.2208/jscejam.71.1_299, 査読有

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 2 次元時

間領域境界要素法を用いた閉口き裂による分調波励起シミュレーション, 第 20 回計算工学講演会論文集(CD-ROM 収録), (2015), 査読無

齋藤隆泰・金井翔平・古川陽・廣瀬壯一: 接触を考慮した異方性弾性体中のき裂による弾性波動散乱解析, 第 28 回機械学会計算力学講演会講演論文集, 講演番号 177(CD-ROM 収録), (2015), 査読無

〔学会発表〕(計 19 件)

森川光・市川諒・齋藤隆泰: 等方性および異方性弾性体の接着不良箇所に対する非線形超音波法適用の検討, 第 44 回土木学会関東支部技術発表会, (2017)

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: き裂面の接触音響非線形性による分調波発生現象の 3 次元数値シミュレーション, 第 19 回応用力学シンポジウム, (2016)

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 材料表面のき裂による分調波発生現象の 2 次元数値シミュレーション, 平成 28 年度土木学会全国大会, (2016)

齋藤隆泰・金井翔平: 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, 平成 28 年度土木学会全国大会, (2016)

金井翔平・齋藤隆泰: 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, 第 43 回土木学会関東支部技術発表会, (2016)

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 時間領域境界要素法を用いた 2 次元分調波励起シミュレーション, 平成 27 年度非破壊検査総合シンポジウム, (2015)

丸山泰蔵・齋藤隆泰・廣瀬壯一: 接触条件を考慮したき裂による 2 次元分調波励起シミュレーション, 第 18 回応用力学シンポジウム若手ワークショップ, (2015)

〔その他〕

ホームページ等

<http://civil.ees.st.gunma-u.ac.jp/~applmech/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋藤 隆泰 (SAITOH, Takahiro)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号: 00535114

(2) 研究分担者

中畑 和之 (NAKAHATA, Kazuyuki)
愛媛大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 20380256

(3) 連携研究者

丸山 真一 (MARUYAMA, Shin-ichi)
研究者番号: 60344925