

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月29日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656029

研究課題名（和文）振幅変調波による閉口欠陥・微視損傷の非線形超音波スペクトロスコピー

研究課題名（英文） Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy for Closed Defects and Microscopic Damage by Amplitude-Modulated Waves

研究代表者

琵琶 志朗 (BIWA SHIRO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90273466

研究成果の概要（和文）： 振幅変調波に対する接触界面や微視損傷の非線形超音波特性について検討した。具体的には、金属ブロックの接触界面に二周波数を含むパースト波を入射した場合に差周波数成分の発生を確認した。また、一方向強化炭素／炭素複合材料に振幅変調波を入射した場合に低周波数成分発生をともなって透過波形が変化することを実験的に示し、非線形弾性体に対する超音波伝搬の摂動解析によりこの現象を検討した。これらの非線形低周波数成分は、高調波測定が困難な場合に欠陥・損傷を特徴づけるパラメータになり得ると期待される。

研究成果の概要（英文）： Nonlinear ultrasonic characteristics of contacting interfaces and micro-damage for amplitude-modulated waves have been investigated. First, for the burst wave containing two frequency components, the transmitted wave through a contacting interface between metal blocks has been shown to contain the difference frequency component. Second, for amplitude-modulated waves propagating in a unidirectional carbon/carbon composite, the transmitted wave has been shown to change significantly accompanying low-frequency component generation. This phenomenon has been discussed based on the perturbation analysis of ultrasonic wave propagation in a nonlinear elastic medium. It is expected that these nonlinear low-frequency components can characterize defects and damage when the higher-harmonic measurements are difficult to perform.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	0	2,200,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,200,000	300,000	3,500,000

研究分野：連続体力学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：非破壊評価，超音波，非線形特性，接触界面，複合材料

1. 研究開始当初の背景

線形超音波散乱に基づく従来の超音波非破壊材料・欠陥評価法では、外部負荷や残留応力で欠陥面が閉じている場合に明瞭なエコーが得られないことや、微視構造による散乱ノイズに埋もれてエコーが判別困難となることが問題となっていた。また、微視損傷の評価では、超音波伝搬速度や減衰係数等の

線形特性量には、損傷の影響が敏感に反映されない場合があり、損傷に高感度な評価法の開発が望まれていた。

近年、これら閉じた欠陥や不完全接合面、微視的損傷の評価を目的として、大振幅超音波を入射して非線形スペクトル成分を観測する、いわゆる非線形超音波法が、近年国内外で盛んに研究されている。その主流は連続

波入射の際の高調波発生（入射波周波数の整数倍の周波数成分の発生）に着目するものである。しかしながら、複合材料や多結晶金属など、微視構造に起因した不均質性を有する材料の場合、高周波信号成分の減衰が大きく、高調波成分の検出が難しいという問題点がある。

研究代表者らは、熱損傷を与えた花崗岩サンプルに矩形バースト超音波（一定振幅、数周期分の正弦波）を入射した場合に、透過波時間波形が大きく変化し、振幅スペクトルにおいて低周波数成分が顕著となることを実験的に見出した。さらに、この結果を理論的に考察することにより、この現象は振幅変調波（正弦搬送波を、時間的に緩やかな包絡線関数で振幅変調した波束）が非線形材料中を伝搬する際に生じる非線形効果の一つとして解釈できることを示した。

このような現象が複合材料をはじめとする工業材料及各種界面でも生じるものであれば、それを非破壊評価に応用する可能性が広がる。そこで、振幅変調波を材料・構造に入射した場合の低周波数成分の発生という、高調波発生とは異なる非線形超音波特性に着目して、閉口欠陥や微視損傷を特徴づけることを着想した。低周波数成分は、高減衰材料であっても比較的良く透過することから、高調波測定が困難な材料に対して補完的な非線形超音波法となると期待できることから、低周波数成分の発生特性を明らかにすることに意義があると考えた。

2. 研究の目的

振幅変調した大振幅超音波を入射した際に材料・構造物中の閉口欠陥や微視損傷において発生する非線形低周波スペクトル成分に着目した新しい非破壊評価法につなげるための基礎的研究として、閉口欠陥を模擬した接触界面や損傷材料における振幅変調超音波の伝搬特性、特に透過波の振幅スペクトルにおける低周波数成分の発生特性を、実験的ならびに理論的に明らかにすることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 接触面における振幅変調波の透過特性

振幅変調した正弦波形を信号発生器に記憶させ、これを高出力超音波パルサー・レーザ（RITEC 製 RPR4000）に入力し、増幅して圧電超音波探触子を駆動し、試験体中に振幅変調した縦波超音波を入射した。パルサー・レーザにおいて増幅度を変化させることにより、探触子に加わる駆動電圧の大きさを変化させた。また、パルサー・レーザと探触子の間には減衰器（-6dB）を設けることにより、両者のインピーダンス整合を行うことで入力波形のひずみを抑制した。

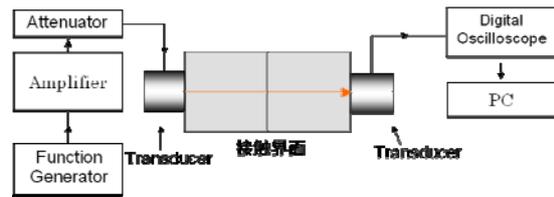


図1 実験方法の模式図

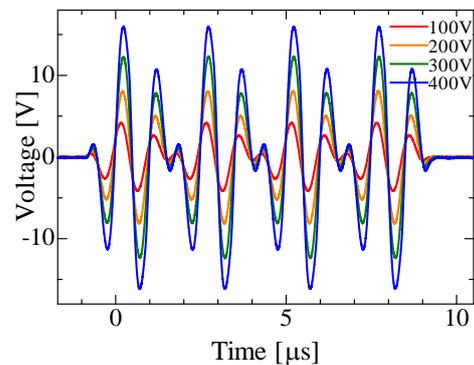


図2 二周波数を含むバースト波（1MHz 正弦波を 0.2MHz 正弦波で変調した波形。図はパルサー・レーザのモニタ波形）

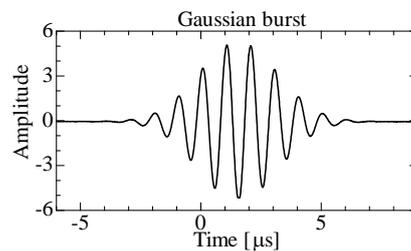


図3 ガウス関数で振幅変調した送信波形（搬送周波数：1MHz）

図1には、2個の金属ブロック間の接触界面に振幅変調超音波を入射し、透過波を測定する実験の模式図を示す。また、振幅変調波の一例として、二周波数からなるバースト波（正弦波で正弦波を振幅変調した波形）による探触子駆動電圧波形を図2に示す（図は1MHz 正弦波を 0.2MHz 正弦波で変調した場合）。この場合、入射波形は、0.8MHzと 1.2MHzの二つの周波数成分を主に含んでいる。

透過波形は同様の圧電超音波探触子により検出し、デジタルオシロスコープを通してデジタル波形としてパーソナルコンピュータに収録した。その後、収録波形のスペクトル解析を行い、透過波形に含まれるスペクトル成分を解析した。

(2) 微視損傷を有する材料における振幅変調波の透過特性

図1と同様の実験方法により、一方向強化炭素/炭素複合材料試験片に、振幅包絡線がガウス関数で与えられる振幅変調波(搬送周波数 0.5MHz および 1MHz)を入射し、透過波形に含まれる周波数成分を解析した。搬送周波数が 1MHz の場合の送信波形を図3に示す。なお、比較のため、送信波形として矩形バースト波(10周期分の周波数 1MHz 正弦波)を入射した場合の測定も行った。

また、実験結果を理論的に考察するため、応力-ひずみ関係に非線形性を有する材料中を振幅変調波が伝搬する場合の一次元理論解析を行った。

4. 研究成果

(1) 接触面における振幅変調波の透過特性

2個のアルミニウム合金ブロックを対向接触させ、圧縮荷重を加えることによって、材料中の閉口欠陥を模擬した試験体を構成した。この試験体に、図2に示した波形で探触子を駆動して超音波を入射した場合の透過波形を図4に示す。図4には、探触子駆動電圧振幅を異なる値に設定した場合の透過波形を示している。また、探触子駆動電圧振幅が 200V (peak-to-peak 値) の場合の透過波形の振幅スペクトルを図5に示す。図5には、接触界面を有する2個のブロックに対する結果(2Pと表示)に加えて、接触界面を持たない1個のアルミ合金ブロックに対する結果(1Pと表示)を示す。図5より、接触界面の存在により、0.8MHz, 1.2MHz成分のスペクトルの形状はほとんど変わらないものの(両者はそれぞれ最大値を1として規格化)、非線形効果によると考えられる0.4MHz成分、1.6MHz成分、2MHz成分、2.4MHz成分の周辺のピーク値が相対的に大きくなっていることがわかった。これらは、基本波周波数(0.8MHz, 1.2MHz)それぞれの2倍、および和、差の周波数成分が現れたものと解釈することができる。また、探触子駆動電圧の増加とともに、接触界面の存在によるこれらの成分の増加傾向はより顕著となった。接触界面の影響によるこれらの周波数成分のうち、差の周波数に相当する成分は、高減衰材料中でも比較的良く透過するから、閉口欠陥の検出に応用できる可能性があると考えられる。

なお、研究代表者らの、接触面における高調波発生の理論解析を拡張した解析により、二つの異なる調和波の重ね合わせで表される入射波に対して、接触面におけるこれらの周波数成分の発生を説明できることを確認した。

図5からわかる通り、接触界面がない場合でも、透過波スペクトルは同様の周波数成分を含んでおり、これは測定機器(探触子)の

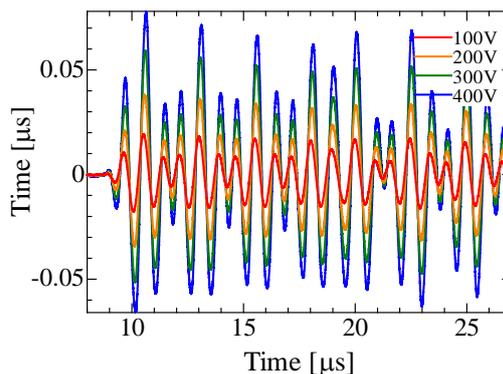


図4 異なる探触子駆動電圧に対する透過波形

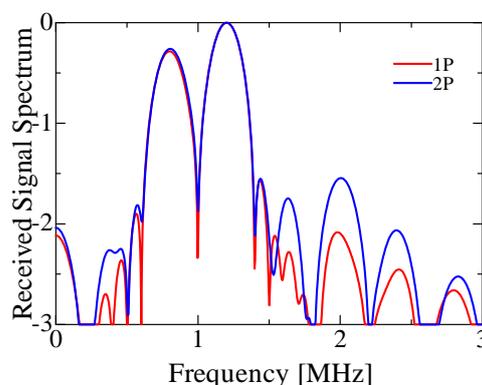


図5 接触界面がある場合(2P)とない場合(1P)の透過波の振幅スペクトル

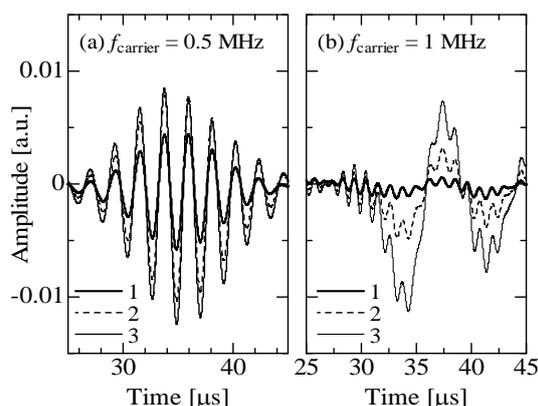


図6 一方向炭素/炭素複合材料における振幅変調超音波の透過波形

特性によると考えられる。したがって、これらの周波数成分を非破壊評価に応用する場合には、測定機器の影響による同様の周波数成分との識別方法を確立する必要があり、今後の課題として残る。

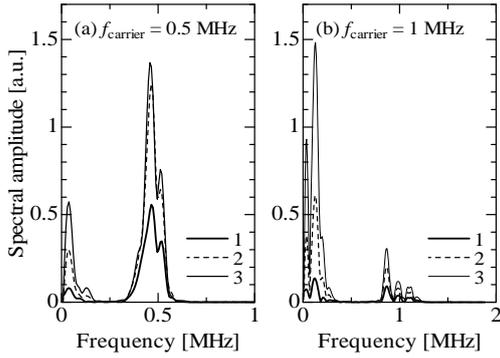


図7 異なる探触子駆動電圧に対する透過波形

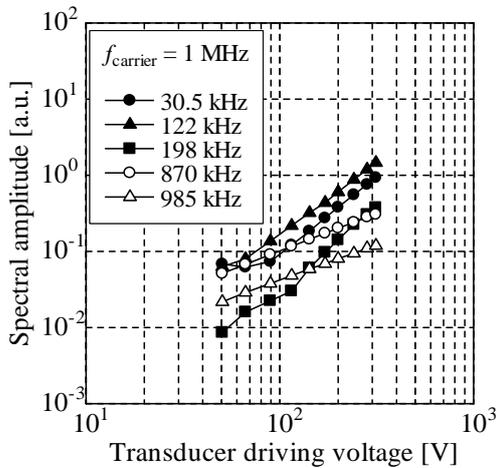


図8 透過波に含まれる低周波数成分のスペクトル振幅と探触子駆動電圧振幅の関係

(2) 微視損傷を有する材料における振幅変調波の透過特性

一方向強化炭素／炭素複合材料に、振幅変調超音波を入射した場合の結果の一例として、ガウス関数で振幅変調した搬送周波数(a) 0.5MHz および(b) 1MHz の縦波を入射した場合の透過波形を図6に示す。図からわかる通り、特に搬送周波数 1MHz の場合の透過波形は入射波形からかなり大きく変化しており、その振幅スペクトル(図7)には、低周波数成分の発生が確認できる。また、これらの低周波数成分は、探触子駆動電圧に対して比例せず、非線形に増加することもわかった(図8)。

また、振幅包絡線関数の違いによる影響の検討として、ガウス関数による振幅変調波を入射した場合と矩形バースト波を入射した場

合の違いを調べた。その結果、矩形バースト波を用いた場合、入射波のスペクトルが広範囲に広がっているため、非線形効果により発生した低周波数成分を埋没させてしまう傾向があることがわかった。したがって、材料の非線形効果を評価する上では、ガウス関数のような比較的緩やかな振幅包絡線関数を用いる方が望ましいと考えられる。

次に、以上の実験結果を検討するために行った理論解析の概略を以下に示す。

微視損傷を有する材料は、巨視的には非線形応力-ひずみ関係を有する材料としてモデル化することができる。そこで、二次非線形性を含む応力(σ) - 変位(u) 関係式を次式で与える。

$$\sigma = \rho c^2 \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + \beta_s \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \right\}. \quad (1)$$

ここに、 β_s は非線形性を表す材料定数である。このとき、一次元運動方程式は次式で与えられる。

$$\left\{ \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} u = c^2 \beta_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2. \quad (2)$$

支配方程式が式(2)で与えられる非線形弾性体内部を、以下の振幅変調波が基本波として伝搬する場合を考える。

$$u(x, t) = u_0 E(\tau) \sin(\omega\tau), \quad (3)$$

$$\tau = t - x/c. \quad (4)$$

ここで u_0 は振幅を表し、 $E(\tau)$ は振幅包絡線を表す。また、 ω 、 k は搬送波の角周波数、波数である。

材料の非線形性は十分弱いとし、微小パラメータ $\varepsilon = u_0 \beta_s \omega / c$ を定義して、摂動解析により式(2)の解を求めると、波による変位は

$$u(x, t) \cong u_0 E(\tau) \sin(\omega\tau) - \frac{\beta_s u_0^2 \omega^2}{4c^2} \left[\{E(\tau)\}^2 + \frac{\{E'(\tau)\}^2}{\omega^2} \right] x \quad (5)$$

となる。また、波による粒子速度は

$$v(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} \cong u_0 \omega E(\tau) \cos(\omega\tau) - \frac{\beta_s u_0^2 \omega^2}{4c^2} \frac{\partial}{\partial t} \left[\{E(\tau)\}^2 + \frac{\{E'(\tau)\}^2}{\omega^2} \right] x \quad (6)$$

となる。ただし $E' = dE/d\tau$ である。なお、式(3)の基本波からは角周波数 2ω の高調波成分が発生するが、高減衰材料の挙動を想定しているためここでは無視している。また、もしも振幅包絡線関数 E が十分緩やかに変化する関数の場合、式(5)、(6)の右辺括弧内の第一項

が第二項に比べて支配的となる。

以上の結果によると、非線形弾性体に振幅変調した弾性波を入射した場合、透過波の速度波形には振幅包絡線関数のある種の導関数に相当する信号が発生することがわかる。この包絡線が搬送波周波数に比べて時間的に緩やかな変化を示す場合、この発生信号は低周波数領域にスペクトルを有する。さらに、媒質が高減衰性質を有する場合には、基本波成分は伝搬とともに顕著に減衰する結果、この低周波数成分のみが支配的に観測されることが考えられる。なお、式(5)、(6)の摂動解は、右辺第2項が第1項に比較して十分小さい範囲でのみ有効であることに注意しておく。

式(6)より、発生する低周波数成分の大きさは基本波振幅の2乗に比例している。一方、図8では、透過波の基本波成分(985kHz \approx 1MHz)の大きさは駆動電圧に比例(図8の両対数プロットで傾き1)しているのに対して、低周波数成分の大きさは2倍近くの傾きを有しており、理論解析による結果と定性的に対応している。

本測定で用いた炭素/炭素複合材料は、微視的空隙を有するため、空隙部での接触効果によって顕著な非線形超音波効果が見られたものと考えられる。その他の複合材料に対して、損傷が付与された場合に本測定を応用して評価を行うことは今後の課題である。

(3) 成果のまとめと今後の課題

本研究では、閉口欠陥や微視損傷を含む材料・構造に振幅変調した超音波を入射した場合に、非線形性により発生する低周波スペクトル成分に着目した非破壊評価法の提案を目的として、閉口欠陥を模擬した接触界面や、一方向強化炭素/炭素複合材料における振幅変調超音波の非線形特性を明らかにすべく検討を行った。その結果、接触界面に対する実験では、二周波数を含むバースト波に対して差周波数成分が、炭素/炭素複合材料に対する実験では、振幅変調波に対して低周波数成分が発生することが明らかとなった。

流体や粒状物質(砂、岩石など)に比較的低周波数の搬送周波数からなる振幅変調波を伝搬させた場合に低周波数成分が発生することは以前から知られていた。本研究は、接触界面や複合材料といった工学的に重要な材料・構造において、超音波周波数域の搬送周波数からなる振幅変調波に対して低周波数成

分の発生を明らかにしたもので、非破壊評価への応用という観点から意義のあるものと考えられる。閉口欠陥(接触界面)や微視損傷によるこれらの非線形成分は、高調波と異なり、高減衰材料中でも比較的良く透過するから、高調波測定が困難な材料に対する補完的な非線形超音波法の一つとなり得ると期待される。

この手法をさらに進めて実際の材料評価に応用するためには、接触面の接触状態(密着度)や複合材料の損傷と、発生する低周波スペクトル成分の大きさの関係を定量的にさらに詳しく調べる必要がある。また、測定系(特に探触子)の特性に起因して混在する低周波スペクトル成分との識別を客観的に行う方法を確立することが必要である。

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1件)

- ① S. Biwa, K. Nagae, C. Inserra and E. Matsumoto, Nonlinear Propagation of Amplitude-Modulated Ultrasonic Wave in Composite Material, Key Engineering Materials, Vols. 452-453 (2011), pp. 757-760, 査読有, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.757

[学会発表](計4件)

- ① S. Biwa, Nonlinear Ultrasonic Characteristics of Materials and Interfaces (Invited), The WCU-PIRE Joint Workshop on Advanced NDE/SHM, 韓国・釜山(釜山国立大学), 平成23年8月31日.
- ② S. Biwa, K. Nagae, C. Inserra and E. Matsumoto, Evaluation of Nonlinear Low-Frequency Components Generated by Amplitude-Modulated Waves in a Carbon/Carbon Composite, International Congress on Ultrasonics (ICU 2011), ポーランド・グダンスク(グダンスク大学), 平成23年9月6日.
- ③ 琵琶志朗, 微視損傷を有する材料における振幅変調波の非線形特性, 日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会 非線形現象を利用した非破壊的損傷評価の調査自主フォーラム主催シンポジウム「非線形現象を利用した非破壊的損傷評価」, 横浜(横浜国立大学), 平成24年3月29日.

[図書](計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

琵琶 志朗 (BIWA SHIRO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90273466

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

松本 英治 (MATSUMOTO EIJI)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・

教授

研究者番号：30093313