

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360053

研究課題名(和文) ガイド波による不完全界面・不完全結合部の定量的非線形超音波スペクトロスコピー

研究課題名(英文) Quantitative Nonlinear Ultrasonic Spectroscopy for Imperfect Interfaces and Imperfect Bonding by Guided 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)： 接触界面または接着界面を有する板材に大振幅ラム波を送信し、伝搬波形の時間一周波数解析により非線形スペクトル成分(高調波)を抽出した。その結果、接触(接着)状態に応じて、界面の非線形性により発生する高調波成分の大きさが変化し、高調波情報に基づく板材の接触(接着)状態の評価が可能であることがわかった。また、不完全界面モデルを用いた板の曲げ波伝搬解析や、ラム波分散関係に基づく累積的高調波発生条件の理論的導出を行い、本評価法を適用するうえで有用な幾つかの理論的知見を得た。

研究成果の概要(英文)： High-amplitude Lamb waves were excited on plates with contact or adhesive interfaces, and the propagated waveforms were analyzed by the time-frequency analysis to extract the nonlinear spectral components such as higher harmonics. As a result, the harmonic components were found to change their amplitude depending on the contact or adhesive conditions. Therefore, nonlinear Lamb wave characteristics are promising as a tool for evaluating the contact or adhesive conditions of plates. From a theoretical point of view, the flexural wave propagation was examined based on the Mindlin plate theory with nonlinear interface model. Furthermore, the conditions for cumulative growth of Lamb wave harmonics were derived based on the dispersion relation of Lamb waves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	11,900,000	3,570,000	15,470,000

研究代表者の専門分野：固体力学

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，ラム波，ガイド波

## 1. 研究開始当初の背景

近年関心を集めている非線形超音波法による欠陥・損傷評価では、大振幅超音波を入射した際の非線形スペクトル成分(高調波、分調波等)に着目することにより閉じた欠陥は微視損傷の評価を行うことを目的としている。一方、接着構造や表面コーティング等の層状構造に生じるはく離欠陥や不完全

結合部の健全性評価には、ガイド波と呼ばれる超音波伝搬モードが用いられるが、現状では微小振幅範囲での線形超音波挙動に着目した評価である。大振幅で励起したガイド波の非線形伝搬挙動が実験的、理論的に明らかにできれば、接着構造や層状部材の新しい健全性評価手法が提案できると期待される。しかしながら、ガイド波の非線形伝搬特性に関

する研究は、特に不完全界面や不完全結合部の非線形性に起因するものに関してはほとんど行われていなかった。

研究代表者らは、超音波スペクトロスコピー手法を用いた固体間接触状態の定量評価や、固体接触界面を伝わるガイド波（界面波）の伝搬特性に関する研究を行ってきた。また、非線形界面モデルに基づいて固体接触界面における高調波発生特性と接触圧力依存型界面剛性との関係を明らかにし、実験的検証も行っている。そこで、これらの研究を進展させて、線形領域に限定されていたガイド波による評価を非線形性まで含めて拡張することにより、新しい界面健全性評価手法を構築することを着想した。界面非線形性に起因した非線形ガイド波伝搬挙動に関する研究は国内外でもほとんど行われていなかったことから、ガイド波に非線形超音波法を適用する場合、研究代表者らのこれまでの研究で得られた知見に加えて、分散性や多重モード性による複雑な伝搬挙動に対する基礎的な知見の蓄積が重要であった。

## 2. 研究の目的

不完全界面や不完全結合部を有する構造・機能部材に対して、ガイド波の非線形伝搬特性の定量評価に基づく非破壊評価手法（ガイド波の定量的非線形超音波スペクトロスコピー）を提案することを本研究の目的とした。具体的には、圧電探触子やレーザードップラー振動計により、接触界面や接着界面を有する板状部材を伝搬するガイド波（ラム波）を測定し、計測波形に含まれる非線形スペクトル成分を定量的に抽出する手法を構築すること、およびガイド波（ラム波）の非線形伝搬挙動を実験的、理論的に明らかにすることを主な目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、以下の方法により、接触界面および接着界面を有する板状構造におけるガイド波伝搬特性を実験的および理論的に検討した。

(1) 接触界面を有する板を伝わるラム波における高調波発生特性の実験的検討

アルミニウム合金板を2個のアルミニウム合金ブロックの間に挟み込んで加圧接触させ、接触界面を有する板材試験片を構成した。これに対して、ガウス関数で振幅変調した周波数 1MHz の信号をバースト波パルサー（RITEC 製 RPR4000）で増幅して斜角入射圧電探触子を駆動して大振幅ラム波を励起し、固体ブロックとの接触部を伝搬したラム波の表面振動速度をレーザードップラー振動計（電子技研工業製 V1002）により測定した（図 1 参照）。収録した波形から、短時間フーリエ変換を用いてスペクトルを求め、基本

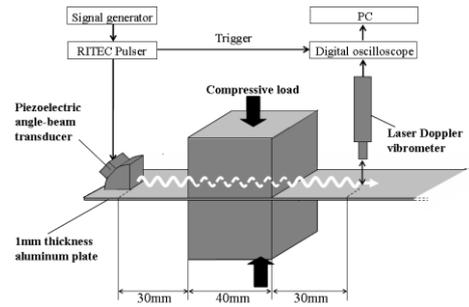


図 1 接触界面を有する板に対するラム波測定の模式図

波（1MHz）成分および高調波成分の大きさを抽出し、接触圧力との関係を調べた。

(2) 接着界面を有する板を伝わるラム波における高調波発生特性の実験的検討

2枚のアルミニウム合金板を、エポキシ系接着剤を用いて異なる接着条件（接着剤硬化時の加圧力、未接着部寸法）で接着したものを試験片とし、上記と同様に周波数 1MHz のラム波を送信し、伝搬波形を測定して高調波成分を評価した。ただし、本測定では受信にも圧電探触子を用いた。測定したラム波伝搬波形に対して短時間フーリエ変換によりスペクトル特性を調べ、接着条件と高調波発生特性との関係を調べた。

(3) 接触界面を有する板を伝わる曲げ波の非線形界面モデルによる定式化と解析

上記(1)の実験的検討に対応する理論的検討として、板に及ぼす固体ブロックとの接触の効果をも、3次非線形性まで考慮した非線形界面モデルによりモデル化し、板を伝わる曲げ波の伝搬挙動をミンドリンの理論により定式化した。これに基づき、曲げ波の分散特性に及ぼす界面剛性の影響を理論的に検討した。また、高調波発生特性に及ぼす界面剛性や非線形パラメータの影響について、導出した支配方程式を差分法により数値的に解析することにより検討した。

(4) 応力-ひずみ非線形性による非線形ラム波伝搬挙動の解析

上記(1)～(3)の検討を通して、ラム波非線形特性に基づく板状構造の非破壊評価のためには、分散性を有するラム波の非線形挙動に関する理論的理解が極めて重要であることが明らかとなった。そこで、界面非線形性の効果とは異なるが、材料自体の応力-ひずみ非線形性に由来するガイド波非線形特性を明らかにすることを目的として、2次の応力-ひずみ非線形性を有する弾性板をラム波が伝搬する際の高調波発生挙動を理論的に検討した。特に、板を伝搬する基本波と、

非線形効果により発生した高調波の位相速度が一致して、高調波が伝搬距離とともに単調に増大するための条件、すなわち累積的高調波発生条件の理論的導出を行った。このため、線形理論におけるラム波の分散関係（レーリー・ラム周波数方程式）に着目して、基本波と高調波の位相速度（および群速度）が一致するための条件を系統的に導出した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 接触界面を有する板を伝わるラム波における高調波発生特性の実験的検討

図2に、異なる接触圧力（見かけの圧力）のもとでのラム波伝搬波形に対して、短時間フーリエ変換により求めた時間一周波数プロットを示す。この図から、接触圧力0.41MPaの場合に高調波が顕著に含まれていることがわかる。また、図3に異なる接触圧力に対するラム波の振幅スペクトルを示す。この結果から、固体ブロックに接触させない場合（contact-free）に比べて、接触界面の非線形効果により、3MHz、5MHz付近に奇数次の高調波が発生していることがわかった。

各高調波成分の大きさと接触圧力の関係を調べたところ、基本波（1MHz）振幅は接触圧力とともにほぼ単調に減少するのに対して、3MHz、5MHzの高調波振幅はある接触圧力で極大値を取った後に減少している傾向があることがわかった。以上の結果から、ラム波基本波成分の減衰および高調波成分に着目することにより、板状構造の接触状態（不完全界面状態）を評価できる可能性があることがわかった。

##### (2) 接着界面を有する板を伝わるラム波における高調波発生特性の実験的検討

図4に、接着剤硬化時の加圧力（見かけの圧力）が異なる場合のラム波伝搬波形に対して短時間フーリエ変換を施すことにより求めた時間一周波数プロットを示す。これより、加圧力が低い場合に、2次高調波（2MHz）が発生している様子がわかる。2次高調波の大きさは、加圧力に対して単調減少の関係にあることもわかった。一方、ラム波波形自体は、複数の伝搬モードの存在する複雑なものであり、解釈が容易ではなかった。このことから、高調波の大きさに着目すれば、接着状態を比較的簡単に判別できる可能性があることがわかった。また、2次高調波振幅と未接着部寸法の間にも単調な関係があることが実験の結果わかった。

##### (3) 接触界面を有する板を伝わる曲げ波の非線形界面モデルによる定式化と解析

導出した微分方程式は、ミンドリンの平板理論の運動方程式に非線形界面の効果を取り入れたものである。また、ミンドリン理論

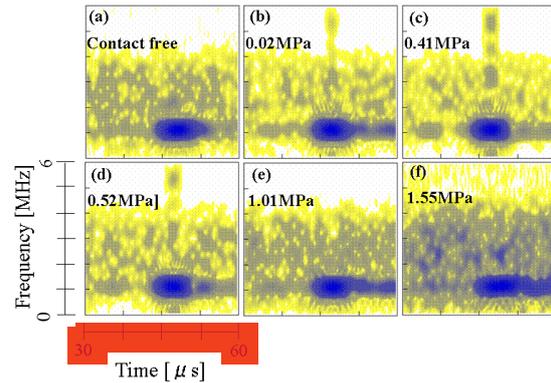


図2 接触界面を有するアルミニウム板におけるラム波伝搬波形の時間一周波数プロット

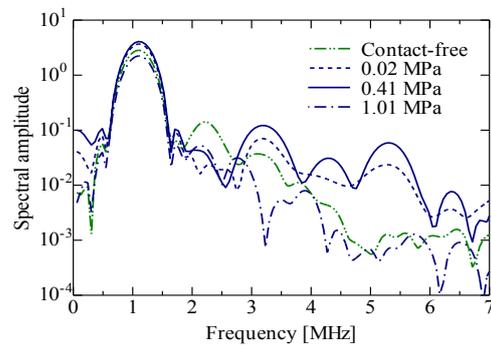


図3 接触界面を有するアルミニウム板におけるラム波伝搬波形の振幅スペクトル

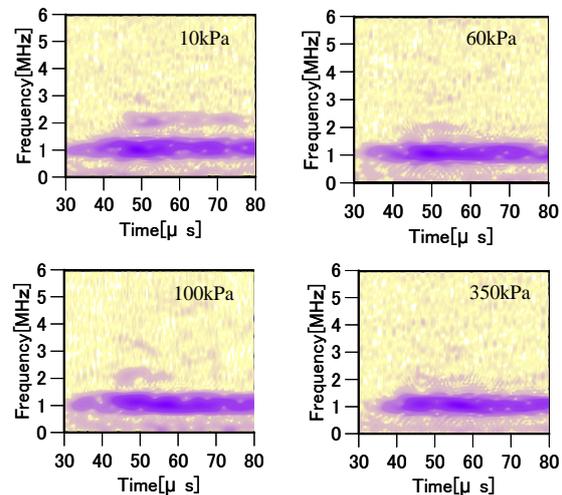


図4 異なる接着剤硬化時圧力に対するアルミニウム接着板におけるラム波伝搬波形の時間一周波数プロット

によれば、板を伝わるラム波モードのうち、最低次の反対称モード（屈曲モード）の分散関係を良く表せることが分かっている。

得られた方程式に基づいて、差分法により、

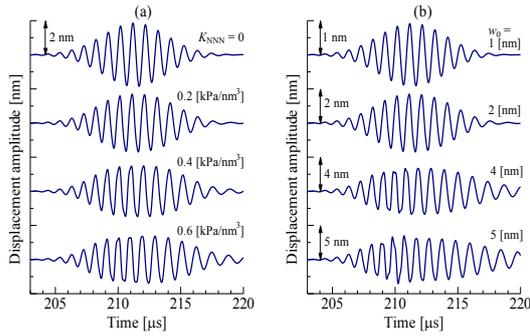


図5 (a)異なる非線形剛性パラメータ, (b)異なる入射波振幅, に対する曲げ波の伝搬波形の計算結果

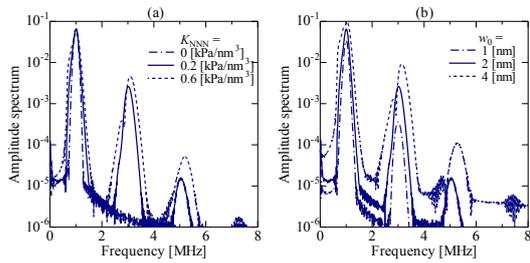


図6 (a)異なる非線形剛性パラメータ, (b)異なる入射波振幅, に対する曲げ波の伝搬波形の振幅スペクトル

種々の条件下での曲げ波の伝搬特性を計算した。図5は3次の非線形性パラメータが異なる場合、および入射波振幅（ガウス関数で振幅変調した1MHz正弦波の励振変位振幅）が異なる場合の曲げ波波形を示している。また、これらの波形の振幅スペクトルを図6に示す。これらの結果から、界面非線形性の効果により、伝搬波形には3MHz、5MHz等の奇数次高調波が大きく含まれることが明らかとなった。これは、定性的には、上記(1)の実験的検討で得られた結果と合っている。このように、本解析により、ミンドリン理論という比較的単純な理論モデルを用いて、接触界面を有する板における非線形超音波特性を検討することができることがわかった。

#### (4) 応力-ひずみ非線形性による非線形ラム波伝搬挙動の解析

本解析によれば、ある周波数 $f$ のラム波基本波と、周波数 $nf$  ( $n$ は整数)のラム波高調波が同一の位相速度 $c_p$ を有するのは、板厚を $d$ 、縦波速度を $c_L$ 、横波速度を $c_T$ として、位相速度が次の4種類の値を取る場合に限られることが示された。

(i) ラメ(Lamé)モード型： $c_p = \sqrt{2}c_T$

(ii) 縦波変位支配の対称モード型：

$$c_p = c_L$$

(iii) 対称・反対称モード交点型：

$$c_p = c_T \sqrt{\frac{1-\eta^2}{\zeta^2-\eta^2}}$$

ただし、 $\zeta = c_T/c_L$ で、 $\eta = m/n$ は二つの整数（ともに偶数またはともに奇数）の比。

(iv) 派生レーリーモード型：

$$c_p = c_T \sqrt{\frac{8}{3} + \frac{4}{3} \left( \frac{-Q \pm \sqrt{3R}}{2} \right)}$$

ただし、 $Q$ と $R$ は $\zeta = c_T/c_L$ を用いて

$$Q+iR = \sqrt[3]{-17+45\zeta^2 + 3\sqrt{3}\sqrt{(64\zeta^2 - 107\zeta^4 + 62\zeta^2 - 11)i}}$$

により与えられる実数。

また、以上の(i)から(iv)のそれぞれに対して、累積的高調波発生条件を満たす周波数の値について具体的に導出を行った。ラム波基本波の周波数、位相速度がこれらの値のとき、非線形効果により発生するラム波高調波の振幅は伝搬距離とともに単調に増大する。すなわち、材料の損傷や劣化を、非線形性の変化として検出する場合、用いるラム波を以上の条件を満たすように選べば、より感度良く材料特性変化を測定することができる。したがって、本解析で得られた結果はラム波を用いた非線形超音波測定において極めて有用である。

#### (5) 成果のまとめ

本研究により得られた成果は以下のよう

にまとめることができる。本研究では、ガイド波の定量的非線形超音波スペクトロスコピーの提案を目的として、圧電探触子を用いて板材に大振幅ラム波を送信し、圧電探触子またはレーザードップラー振動計を用いてラム波伝搬波形を測定するシステムを構築し、時間一周波数解析手法（短時間フーリエ変換）を用いて、伝搬波形に含まれる非線形スペクトル成分を求める方法を確立した。この方法を用いて、固体ブロックとの接触界面を有するアルミニウム板、および接着剤層を有するアルミニウム接着板を伝搬するラム波に対して、高調波発生特性を調べた。その結果、ラム波高調波発生特性は板の接触条件または接着条件に応じて変化することが明らかとなった。したがって、分散性や多重モード性のため伝搬波形が複雑で解釈が困難なラム波を用いた非破壊

評価において、非線形特性に着目することにより相補的な情報が得られることが期待できる。

また、理論的観点からは、ミンドリン理論と非線形界面モデルを組み合わせることで、接触界面を有する板を伝わる曲げ波の伝搬解析を行った。これにより、界面の非線形効果により伝搬とともに奇数次の高調波が顕著に発生することを明らかにし、本研究における実験的知見を一部定性的に説明できる結果を得た。

さらに本研究では、分散性、多重モード性を有するラム波の非線形伝搬挙動を明らかにしておくための基礎的検討として、応力一ひずみ非線形性に起因する高調波が伝搬距離とともに増大する基本波周波数や位相速度を解析的に導いた。導出した結果は、応力一ひずみ非線形性に反映される材料特性変化を高感度に検出するための測定条件の選定に役立てることができる。さらに、本研究の課題とした界面由来型の非線形ラム波伝搬特性を明らかにし、評価を高度化する上でも、このような知見が有用であると考えられる。例えば、累積的高調波発生条件を接着構造に対してあらかじめ調べておくことにより、より高感度な非線形ラム波測定を行うことができると考えられる。

以上、本研究では、ラム波をはじめとするガイド波の非線形特性を板状構造の非破壊評価に適用するうえでの基礎的知見を得ることができ、研究の意義は大きいと考えている。ガイド波を用いた非線形超音波法の研究はまだ緒に就いたばかりであり、今後ますますの研究が必要と考えられる。

## 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3件)

- ① N. Matsuda and S. Biwa, Phase and group velocity matching for cumulative harmonic generation in Lamb waves, *Journal of Applied Physics*, Vol. 109, Issue 9 (2011), 094903(計11頁) (査読有).
- ② S. Biwa, S. Kishiwada, C. Inserra and E. Matsumoto, Modeling of flexural wave propagation in a plate with contacting interfaces, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 4, No. 8 (2010), pp. 1186-1197 (査読有).
- ③ 琵琶志朗, 固体接触界面および損傷固体の非線形超音波伝搬特性, 数理解析研究所講究録1701「非線形波動現象の数理と応用」(2010), pp. 51-62 (査読無).

[学会発表] (計8件)

- ① 松田直樹, 琵琶志朗, ラム波における累積的高調波発生に関する基礎的検討, 日本機械学会2010年度年次大会, 名古屋(名古屋工業大学), 平成22年9月7日.
- ② M. Eto, S. Biwa and E. Matsumoto, Harmonic generation in Lamb wave in a plate with contacting interfaces, 第30回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 京都(同志社大学), 平成21年11月18日.
- ③ S. Kishiwada, S. Biwa, C. Inserra and E. Matsumoto, Nonlinear ultrasonic characterization of Lamb wave in a plate with contacting interfaces, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 福岡(福岡国際会議場), 平成21年8月19日.

## 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

無し

### (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

教授

研究者番号：30093313