

令和 3 年 4 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14841

研究課題名（和文）ラム波の非線形周波数ミキシングを用いた平板屈曲部の高感度健全性評価

研究課題名（英文）Nondestructive evaluation of a bent plate using nonlinear Lamb wave mixing

研究代表者

石井 陽介 (Ishii, Yosuke)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70781706

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ラム波（平板を長手方向に伝搬する弾性波）の平板屈曲部における伝搬特性を、モード分解法を用いた理論的検討により明らかにした。そして、動的有限要素法を用いた直接的な数値シミュレーションおよび実験結果との比較により、その妥当性を検証した。また、平板の長手方向に有限な領域で材料非線形性（応力-ひずみ関係の非線形性）が存在するときの、線形弾性領域との境界におけるラム波の非線形周波数ミキシングについて、摂動法により理論的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機や自動車をはじめとする様々な産業分野で、薄板を屈曲させた構造が実用されており、このような屈曲部において損傷が発生することが多い。そのため、構造健全性を確保するための超音波非破壊評価が重要である。本研究で着目したラム波の非線形周波数ミキシングは、疲労損傷の早期段階などの従来法では検出が難しい損傷も高感度に評価できる可能性があり、本研究で得られた成果に基づいて本研究をさらに発展させることで、平板屈曲部の新しい超音波非破壊評価法の構築につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：Lamb wave propagation in a bent plate has been studied theoretically, numerically, and experimentally. Using a modal decomposition approach, the scattering of Lamb waves in a bent region has been found to be influenced by the bend angle, bend radius, and frequency. Furthermore, the reciprocal relation between the incident and reflected/transmitted Lamb wave modes has been shown theoretically. These results have been verified by comparing with those of the numerical analysis using a finite element method as well as experiment. In addition, the nonlinear Lamb wave generation at a boundary between regions with and without a weak material nonlinearity has been investigated theoretically with a perturbation approach.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：超音波非破壊評価 ラム波 平板屈曲部 モード分解法

1. 研究開始当初の背景

薄板構造は、航空機や自動車をはじめ様々な産業分野で実用されており、それらの構造健全性を確保するための超音波非破壊検査が重要である。薄板構造の非破壊検査では、板中を長手方向に伝搬する弾性波（ラム波）の散乱振幅、伝搬速度、減衰率といった伝搬特性に着目した探傷や力学的特性評価が一般的であり、これまでに平板中のラム波伝搬特性に関して多くの理論的・実験的研究が行われている。

薄板構造物では平板に曲げ加工を行うことで屈曲部構造を作製することが多く、このような箇所において損傷が発生しやすいため、特に屈曲部の健全性評価が重要である。屈曲部に超音波を明示的に散乱させるようなマクロなき裂が発生している場合には、例えばラム波を屈曲部に入射し、欠陥部からの反射波を測定することで非破壊検査が可能であると考えられる。それに対して、マクロなき裂の発生に至る前のマイクロなき裂の集積や疲労損傷の早期段階など、明示的な散乱波を生じない欠陥の場合には、このような手法の適用は一般に難しい。

疲労の早期段階で応力-ひずみ関係の非線形性（材料非線形性）が顕著な変化を示すことが知られており、ラム波の非線形特性（二次高調波発生や非線形周波数ミキシングなど）に着目することで材料非線形性評価を試みる研究が近年報告されている。二次高調波（送信周波数の二倍周波数の信号）は材料非線形性のみならず、測定装置の有する非線形性によっても発生するため、本来測定したい材料非線形性の寄与だけを分離することが一般に難しいとされている。それに対して、非線形周波数ミキシング（二つの異なる周波数のラム波を送信し、材料非線形性により発生する和・差周波数成分に着目する手法）は材料非線形性の寄与だけを測定できる利点を持ち、注目されている。しかし、このようなラム波の非線形性に関する先行研究は平板構造を対象としている。もし、非線形周波数ミキシングを屈曲部へ適用することができれば、これまで評価困難とされてきた屈曲部の損傷を高感度に評価できる可能性がある。

2. 研究の目的

ラム波は平板を伝わる弾性波モードであるため、ラム波を屈曲部に入射した場合、屈曲部が健全な状態（損傷が無い状態）でも散乱が生じると予想され、その特性を正しく理解することは、非線形周波数ミキシングを考える際に重要であると考えられる。そこで本研究では、平板屈曲部におけるラム波の反射・透過メカニズムの解明を目的に、モード分解法を用いた理論的検討、動的有限要素法を用いた数値的検討、および実験的検討を行った。

また、材料非線形性を有する屈曲部における非線形周波数ミキシング挙動を解明するためには、材料非線形性が板の有限領域に限定されているような状況下でのラム波伝搬特性の理解が必要不可欠であるが、既往の研究では材料非線形性が空間的に一様分布しているような状況が扱われている。そこで、本研究では屈曲部での非線形周波数ミキシングのための基礎的検討として、材料非線形性が平板の長手方向に局在するときの、線形領域-非線形領域境界におけるラム波の非線形周波数ミキシングの解明を目的に、摂動法による理論的検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 平板屈曲部におけるラム波反射・透過挙動の理論的検討

図1に示すような、半無限平板部（領域1）-屈曲部（領域2）-半無限平板部（領域3）から成る等方性弾性板（密度 ρ 、縦波音速 c_L 、横波音速 c_T ）内の二次元平面ひずみ弾性波伝搬問題を考えた。領域1と領域3は厚さ d とし、領域2は曲げ角度 α 、曲げ内半径 R_1 、曲げ外半径 $R_0 (= R_1 + d)$ とした。

領域1から屈曲部へラム波を入射したときに、領域1に発生する反射波および領域3に発生する透過波の入射波

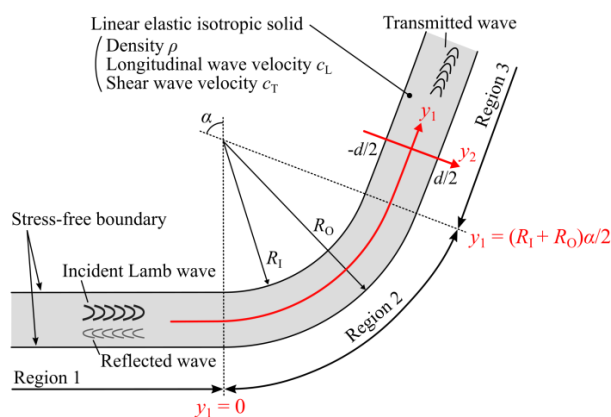


図1 理論解析モデル。

に対する振幅比（振幅反射率および振幅透過率）をモード分解法により理論的に求めた。

(2) 動的有限要素法を用いた数値的検討

理論解析の妥当性を検証するために、図 2 に示すような解析モデルに対して二次元平面ひずみ動的有限要素法による数値シミュレーションを行った。材料はアルミニウム合金（板厚 $d = 1$ mm, 密度 $\rho = 2.70 \times 10^3$ kg/m³, 縦波音速 $c_L = 6.40$ km/s, 横波音速 $c_T = 3.10$ km/s）とした。

解析モデルの左端に理論的な最低次対称ラム波モード（S0 モード）または最低次反対称ラム波モード（A0 モード）の理論的な変位分布を強制変位として与えることで、屈曲部への入射波を励起した。そして、屈曲部から入射側および透過側に 50 mm 離れた平板部の上面で反射波および透過波の変位の時間変化を記録し、それを高速フーリエ変換することで各モードの振幅反射率および振幅透過率の周波数依存性を求めた。

理論解析では半無限平板部を仮定しているため、有限要素解析においても平板部端部からの反射波の影響が生じないように（解析時間内に端部からの反射波が観測点に到達しないように）、図 2 において $L_1 = L_2 = 200$ mm と十分長く設定した。解析領域は 4 節点アイソパラメトリック要素（最小要素のサイズは約 0.1 mm × 0.1 mm）で離散化し、Newmark- β 法による陰解法を用いて時間積分（時間ステップは 10 ns）を行った。これらは、自作の Fortran90 プログラムにより実装した。

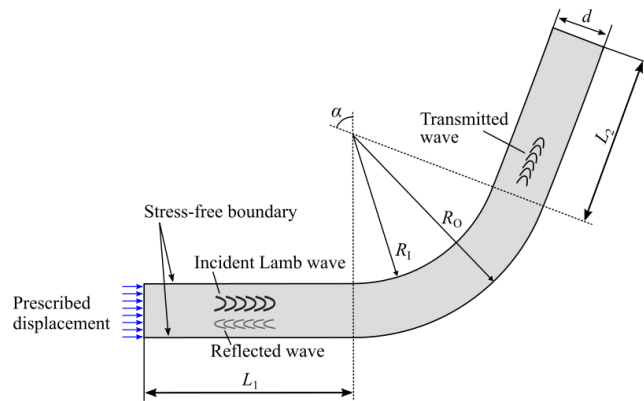


図 2 動的有限要素シミュレーションの解析モデル。

(3) ラム波反射・透過特性の実験的検討

理論および数値解析の結果を検証するために、図 3 に示す実験系を用いて、平板屈曲部に単一のラム波モードを入射したときの振幅反射率・透過率と周波数の関係を測定した。試験片には 300 mm × 150 mm × 板厚 1 mm の A1050 アルミニウム合金平板（密度 $\rho = 2.70 \times 10^3$ kg/m³, 縦波音速 $c_L = 6.48$ km/s, 横波音速 $c_T = 3.14$ km/s）を用い、万能試験機を用いた三点曲げにより屈曲部を作製した。

本実験では、ラム波の高次モードのカットオフ周波数（約 1.5 MHz）以下の周波数範囲を対象とした。この周波数範囲では、平板部を伝搬可能なモードは S0 モードおよび A0 モードのみに限定されるため、屈曲部から十分離れた平板部における反射波・透過波には一般に S0 モードおよび A0 モードだけが含まれる。

任意信号発生器（AFG1062, Tektronix）により正弦波をガウス関数で振幅変調した電圧時間波形を生成し、増幅器（75A250A, Amplifier Research）により増幅した後、公称中心周波数 1 MHz の縦波用圧電探触子（V401-SB, Olympus）に印加した。そして励起された縦波を斜角ウェッジを介して試験片に入射させることで、単一のラム波モードを効率よく発生させた。板中に S0 モードを発生させるときは入射角 30° の PMMA 製ウェッジを用い、A0 モードを発生させるときは入射角 36° の PTFE 製ウェッジを用いた。屈曲部両側の平板部において、レーザドップラ振動計（V100A, 電子技研工業）により板表面の面外変位を測定し、反射波（入射波を含む）の時間波形をデジタルオシロスコープ（HDO4024A, Teledyne LeCroy）で取得した。

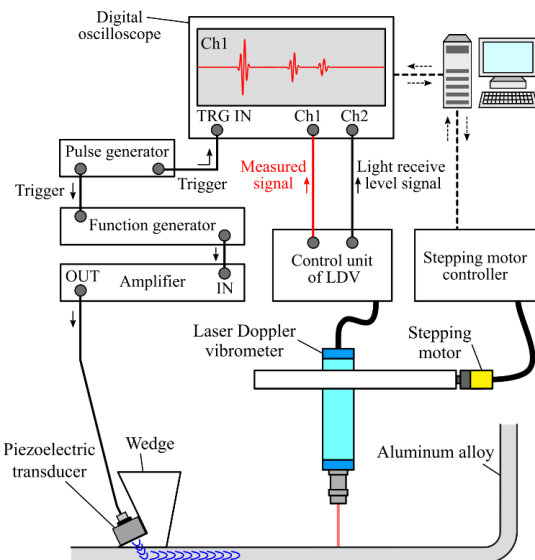


図 3 屈曲部におけるラム波伝搬挙動の測定系。

測定波形に対して、S0 モードおよび A0 モードの理論的な群速度から算出した到達時刻をもとに矩形窓を掛けてフーリエ変換し、板断面の単位面積あたりを通過するエネルギー流束の時間平均が 1 のときにモード振幅が 1 となるような補正を行った後、振幅スペクトルを入射波のスペクトルで除して各モードの振幅反射率を求めた。

(4) 線形弾性領域-非線形弾性領域境界におけるラム波の非線形特性の理論的検討

図 4 に示すような解析モデルを用いて、平板中の線形弾性領域と弱い材料非線形性を有する領域との境界におけるラム波の非線形特性を検討した。二つの領域は同じ線形弾性特性（ラメ定数 λ, μ ）を有すると仮定し、線形弾性領域側から非線形弾性領域へ周波数 f_1 および f_2 のラム波（基本波）を入射する場合を考えた。

このとき、二つの領域で同じ線形特性を有することから、基本波は境界で反射することなく非線形弾性領域へと伝搬する。しかし、それだけでは境界での変位と応力の連続性が満足されず、その結果として二次高調波（周波数 $2f_1$ および $2f_2$ ）やミキシング波（周波数 $f_1 \pm f_2$ ）が境界で発生する。これらの成分の基本波モードや基本波周波数依存性を、摂動解析により理論的に検討した。

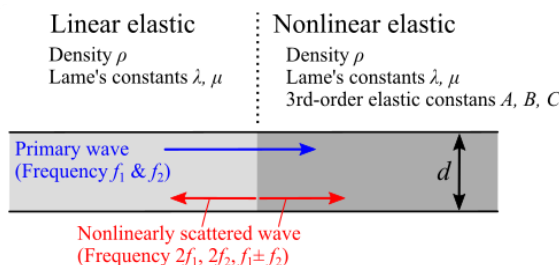


図 4 線形弾性領域-非線形弾性領域境界におけるラム波伝搬特性の理論解析モデル。

4. 研究成果

(1) 平板屈曲部におけるラム波反射・透過挙動の理論的検討

理論解析結果の一例として、屈曲部に S0 モードまたは A0 モードが入射する場合の、S0 モードおよび A0 モードの理論的な振幅反射率・透過率と周波数の関係を図 5 に示す。S0 モードまたは A0 モードのどちらかを屈曲部に入射した場合、反射波・透過波として S0 モードと A0 モードの両方が発生し、そのモード振幅は周波数、曲げ角度、曲げ半径に強く依存することが明らかとなった。特に、反射波振幅がほぼ 0 になるような周波数（図 5(a)の規格化周波数 $\omega d / (\pi c_T) =$ 約 0.66 など）が出現し、これは屈曲部内を伝搬するガイド波が平板部と屈曲部の境界で多重反射し、干渉が起こったことに起因すると考えられる。

さらに、S0 モードを屈曲部に入射したときに発生する A0 モードの振幅は、A0 モードを入射したときに発生する S0 モードの振幅に等しくなり、入射波振幅と反射・透過波振幅の間に相反定理が成り立つことがわかった。このような相反定理は、 $\omega d / (\pi c_T) > 1$ のような高周波数領域で伝搬モードが多数存在する場合であっても、二つの異なる伝搬モードの間で必ず成り立つことを解析的に示すことができた。

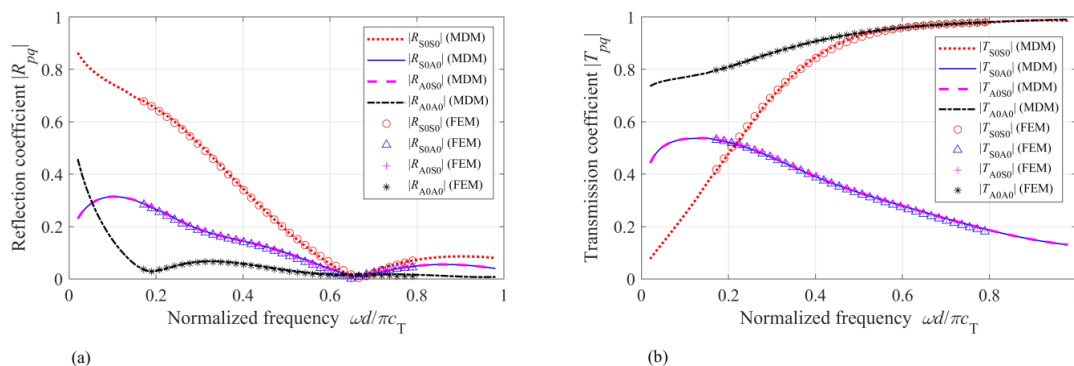


図 5 屈曲部（曲げ角度 $\alpha = 90^\circ$ 、曲げ内外径比 $R_1/R_0 = 0.6$ ）における S0 モードおよび A0 モードの(a)振幅反射率の周波数依存性、(b)振幅透過率の周波数依存性。

(MDM: モード分解法で求めた理論解析値, FEM: 有限要素法で求めた数値解析値, $|R_{IJ}|$, $|T_{IJ}|$ ($I, J = \text{'S0'}, \text{'A0'}$): 単位振幅の I モードを入射したときに、反射波および透過波として発生する J モードの振幅)

(2) 動的有限要素法を用いた数値的検討

数値シミュレーションの結果から算出した S0 モードおよび A0 モードの振幅反射率・透過率の周波数依存性を図 5 に併せて示す。これより、理論解析により求めた振幅反射率・透過率が数

値解析の結果と良く一致していることがわかり、理論解析の妥当性が確認できた。

(3) ラム波反射・透過特性の実験的検討

理論解析および数値解析により得られた結果を検証するために、アルミニウム合金板（板厚 $d = 1 \text{ mm}$ ，屈曲部の曲げ角度 $\alpha = 70^\circ$ ，曲げ内半径 $R_1 = 1.5 \text{ mm}$ ，外半径 $R_0 = 2.5 \text{ mm}$ ）に対して測定した振幅反射率の結果を図 6 に示す。

これより、屈曲部に S0 モード（または A0 モード）を入射したとき、入射波とは異なるモードが反射波として観測され、解析で予想されたモード変換が実際に生じることがわかった。そして、S0 モードを入射したときの A0 モードの反射率が、A0 モードを入射したときの S0 モードの反射率とほぼ同程度となっており、理論解析および数値解析で示された相反定理の妥当性を示唆する結果が得られた。

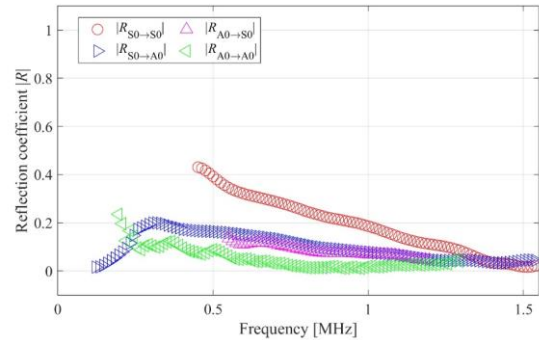


図 6 実験的に測定した屈曲部での S0 および A0 モードの振幅反射率と周波数の関係

(4) 線形弾性領域-非線形弾性領域境界におけるラム波の非線形特性の理論的検討

線形弾性領域と非線形弾性領域の境界において発生するミキシング波の振幅は、基本波の伝搬モードや周波数に顕著に依存することが明らかとなった（図 7）。また、境界で生じる二次高調波振幅に比べて、和周波数成分の振幅の方が大きくなるような基本波周波数の組み合わせが存在することもわかった。このような周波数を用いてミキシングを行えば、二次高調波に基づく評価よりも、材料非線形性が存在する領域を高感度に評価できる可能性があり、有用であると考えられる。

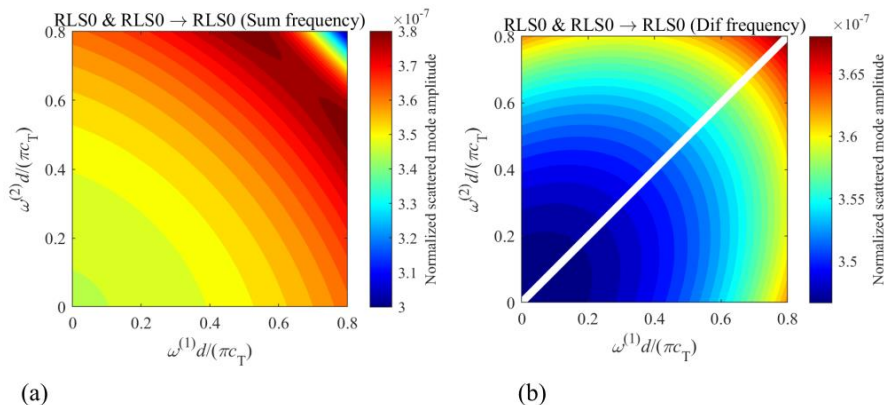


図 7 線形弾性領域-非線形弾性領域境界において発生するミキシング波振幅の基本波周波数依存性 (a) 和周波数成分, (b) 差周波数成分

(5) まとめおよび今後の展望

本研究では、平板屈曲部のラム波伝搬特性に関して、理論解析・数値解析・実験による検討を行い、屈曲部での反射・透過メカニズムを明らかにすることができた。また、屈曲部における非線形周波数ミキシングのための基礎的検討として、材料非線形性が有限領域に存在する際の、その境界からのミキシング波の発生挙動を摂動解析により明らかにした。

本研究では、屈曲部が周辺平板部と同じ板厚を有すると仮定して理論解析や数値解析を実施した。しかし実際は屈曲部が曲げ加工等により作製されることから、屈曲部の板厚は減少し、その曲げ半径も必ずしも一定ではないと予想される。このような影響を考慮できるように本研究を拡張することが次の課題として挙げられる。その後本研究をさらに、平板屈曲部での非線形周波数ミキシングの解析へと発展させれば、屈曲部の高感度な非破壊損傷評価へとつながる知見が得られると期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松下 浩基, 石井 陽介, 足立 忠晴
2. 発表標題 平板屈曲部におけるラム波伝搬挙動の実験的検討
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井 陽介
2. 発表標題 積層構造および薄板構造の非破壊検査に向けた超音波伝搬解析
3. 学会等名 日本機械学会材料力学部門 材料力学における異分野融合に関する研究会 第10回研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井 陽介
2. 発表標題 平板屈曲部におけるラム波反射・透過挙動
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2020年度秋季講演大会講演
4. 発表年 2020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
---------	---------