

令和元年5月12日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14557

研究課題名（和文）薄板構造における非線形三波相互作用の解明と新しい超音波非破壊評価原理への展開

研究課題名（英文）Non-collinear interaction of guided elastic waves in plates

研究代表者

石井 陽介 (Yosuke, Ishii)

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：70781706

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、理論解析、数値解析、実験により、板波の非線形三波相互作用（平板中で二つの超音波が交差したときに応力-ひずみ関係の非線形性により和・差周波数を有する第三の波が生じる現象）に関する基礎的知見を得ることを目的としている。
昨年度と今年度の研究を通じて、非線形三波相互作用により生じる第三波の発生挙動の理論的解明、数値シミュレーションによる妥当性評価、実験による実証を行い、非線形三波相互作用を用いた新しい非破壊評価原理の確立につながる理論的基盤を構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、発電所といった薄板構造からなる大型構造物の高経年化、特に金属疲労が問題視されており、国民の安全性を保障するための超音波非破壊評価の重要性が増している。特に、疲労の早期段階（主き裂発生前の塑性ひずみの蓄積段階）などのように明示的な波動散乱を伴わない場合には従来法による損傷評価が困難であることが指摘されており、それらを検出可能な評価手法の確立が喫緊の課題となっている。本研究で着目した板波の非線形三波相互作用は疲労の早期段階を高感度で捉えられる可能性を秘めており、本研究で得られた知見は今後薄板構造の新しい非破壊評価法を構築する際の理論的基盤になると期待される。

研究成果の概要（英文）：Non-collinear interaction of elastic guided waves in plates due to material nonlinearity has been investigated theoretically, numerically, and experimentally. Using a perturbation analysis, it has been theoretically shown that the interaction of two monochromatic plane guided waves significantly produces a third wave when the resonance condition is met, i.e., when the wavevector and frequency of third wave coincide with the sum/difference of those of the primary waves. This feature has been found to be valid even when the primary waves have finite beam widths and time durations by numerical simulations with a three-dimensional dynamic finite-element method. Furthermore, these results obtained by the theoretical and numerical studies have been validated experimentally for the interaction in an aluminum alloy plate.

研究分野：超音波による非破壊評価

キーワード：三波相互作用 板波 材料非線形性 摂動解析 動的有限要素解析 超音波非破壊評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、発電所などの大型構造物の高経年化、特に金属疲労が問題視されており、安全性を確保するための超音波非破壊評価の重要性が増している。これらの構造物においては薄板構造が広く使用されていることから、薄板を長手方向に伝搬する弾性波モードである板波を用いた非破壊評価に関する研究がこれまで盛んに行われている。しかし、先行研究の多くは、損傷が十分に進行し主き裂が発生した状況を想定しており、き裂部からの散乱波を受信することで欠陥検出を行うことに主眼を置いている。そのためこのような手法では、疲労の早期段階（主き裂発生前の塑性ひずみの蓄積等）のように明示的な波動散乱を伴わない場合はその評価が困難である。

一方で、材料の応力-ひずみ関係の非線形性（材料非線形性）が疲労の早期段階で顕著な変化を示すことが知られており、最近では材料非線形性に起因する板波の非線形特性（特に送信波の二倍周波数を有する二次高調波成分が伝搬距離とともに累積的に増加する性質）に着目することで材料非線形性を評価する研究が行われている。しかし、二次高調波の累積的な成長は、板波の伝搬モードが多数存在し波動場が非常に複雑になる高周波数領域に限られる。さらに、二次高調波と送信波は同じ方向へ伝搬するため、材料非線形性により発生した微小振幅の二次高調波信号が送信波に埋もれてしまう可能性もある。このような観点から、二次高調波の累積的な増加はその実測が難しく、材料非線形性評価への適用には至っていないのが現状である。

したがって、上記問題点を解決できるような板波の新たな非線形特性を明らかにすることができれば、喫緊の課題とされている薄板構造の材料非線形性評価（疲労の早期段階評価）につながる知見が得られると期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、二つの板波を交差させたときに材料非線形性に起因して送信波の和・差周波数成分を有する三つ目の板波が発生する現象（非線形三波相互作用）に着目した。これにより発生する第三波は、送信波とは異なる方向に伝搬させることができるため、送信波（基本波）に埋もれることなく微小振幅の第三波を測定できる可能性がある。さらに、基本波の板波モードを適切に選べば、波動伝搬特性の解釈が比較的容易な低周波数領域においても第三波を効率よく発生させられる可能性もあり、二次高調波発生で見られる問題点を解決できると考えられる。

そこで、摂動法を用いた理論解析、三次元動的有限要素法を用いた数値シミュレーションおよび実験により板波の非線形三波相互作用を解明し、薄板構造の新しい材料非線形性評価原理の確立に向けた基礎的知見を得ることを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 摂動法による非線形三波相互作用の理論的検討

板波の非線形三波相互作用を理論的に解明するため、図1に示すような材料非線形性を有する均質等方弾性平板において二つの板波（基本波）が交差し、第三波が発生する状況を想定した。平板は、ひずみエネルギーをひずみに関して三次の項まで考慮した超弾性体としてモデル化した。そして、非線形性による寄与が十分小さい仮定の下で支配方程式を線形化し、線形解および摂動解が満たすべき運動方程式と境界条件を導出した。ここで、線形解は基本波に対応する。そして摂動解は、材料非線形性に起因して生じる信号（各基本波の二次高調波成分・整流成分および二つの基本波の相互作用による和・差周波数成分）に対応し、本研究ではこれらのうちの和・差周波数成分の発生挙動に着目した。板波の双直交性を利用することにより第三波を板波モードの重ね合わせで表現し、各モードの振幅を理論的に導出した。そして、第三波のモード振幅に及ぼす基本波モードや基本波交差角度の影響を検討した。

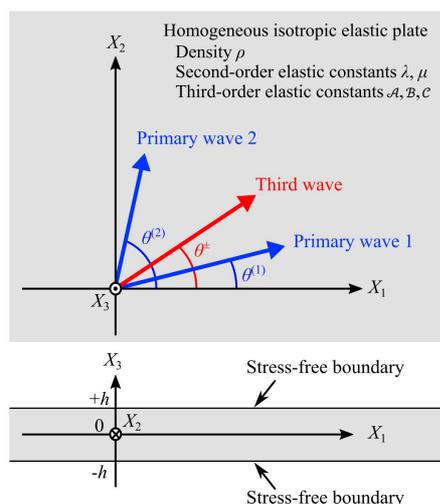


図1 板波の非線形三波相互作用の理論解析モデル

(2) 三次元動的有限要素法による非線形三波相互作用の数値的検討

(1)の理論解析では、最も理想的な状況として、基本波が空間的に無限幅を有するような連続波を仮定している。これは、平板のいたるところで常に二つの基本波が交差していることを表す。一方で実際の測定では、空間的にも時間的にも有限な幅を有する板波を使用するため、二つの基本波はある限られた空間・時間領域でのみ交差する。このような状況でも(1)で得られた知見が有用であるかどうか検討するため、三次元動的有限要素法を用いた直接的な非線形超音波伝搬シミュレーションを実施した。

図2に示すような解析モデル(厚さ1 mmのアルミニウム合金平板)において, 板側面に強制変位を与えることで空間的・時間的に有限な幅を有する二つの基本波を励起した. 本解析では, 基本波をどちらも最低次対称モードラム波(基本波周波数の和が高次モードのカットオフ周波数以下になるように設定)とし, このときの和周波数成分の発生挙動を検討した. (1)の理論解析に基づく, この状況では第三波として最低次対称モードラム波および最低次対称モードSH波が発生すると予想される. そして, 平板上面変位の時間履歴を記録し, 二つの基本波を励起したときの結果から各基本波を個別に励起したときの結果を引くことで, 第三波の変位成分を抽出した. シミュレーションにはFortran90により自作したプログラムを使用し, 京都大学のスーパーコンピュータを用いて並列計算させた. 二つの基本波の空間的・時間的幅が第三波の振幅に及ぼす影響を検討し, (1)の理論解析結果との関連性について考察した.

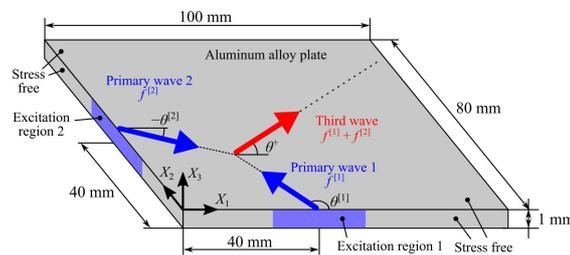


図2 非線形三波相互作用の数値解析モデル

(3) アルミニウム合金平板中の非線形三波相互作用の実験的検討

(1)および(2)の解析結果を実験的に検証するため, 図3に示すような測定系を用いて板波の非線形三波相互作用実験を実施した. 試験片は厚さ2 mmの健全なA2017-T3アルミニウム合金平板とし, PTFE製の斜角ウェッジ(入射角度32°)と圧電探触子(公称中心周波数0.5 MHz, 振動子径0.5インチ×1インチ)を用いて板厚・周波数積1 MHz mmの最低次対称モードラム波を基本波として励起した. このとき, (1)の理論解析結果に基づく, 二つの基本波が122°で交差するときに和周波数成分(2 MHz mm)の最低次対称モードラム波が大きく発生すると予想される. そこで, 第三波が伝搬すると予想される方向にPMMA製の斜角ウェッジ(受信角度34°)を設置し, 第三波の実測を試みた. また, 第三波の振幅に及ぼす送信用探触子の印加電圧や基本波交差角度の影響についても検討した.

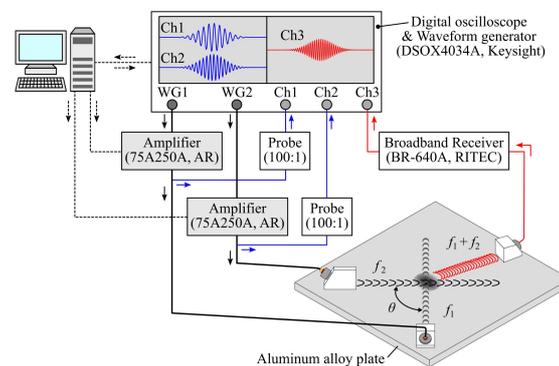


図3 非線形三波相互作用の測定系概略図

4. 研究成果

(1) 摂動法を用いた非線形三波相互作用の理論的検討

摂動解析により, 任意モードの二つの基本波が任意角度で交差するときに, 非線形相互作用により生じる第三波を構成する各モードの振幅を導出することができた. これより, 第三波のモード振幅が基本波のモード, 周波数, 交差角度に依存することを示した. そして, 二つの基本波の波数ベクトルの和・差および周波数の和・差が第三波を構成するモードの波数ベクトルおよび周波数に等しくなるときに, そのモードが伝搬距離とともに線形的に増大すること(共鳴条件)を解析的に示した. これは, 第三波振幅の基本波交差角度依存性について考える場合, 共鳴条件を満たすような交差角度(共鳴角度)で第三波振幅が大きくなることを示している(図4). このような共鳴条件は, 非分散性のバルク波(縦波や横波)の非線形三波相互作用に関しては先行研究で既に明らかにされており, 本研究で初めて, 分散性・多モード性を有する板波の相互作用についても同様の条件が成立することを示した. さらに, 対称

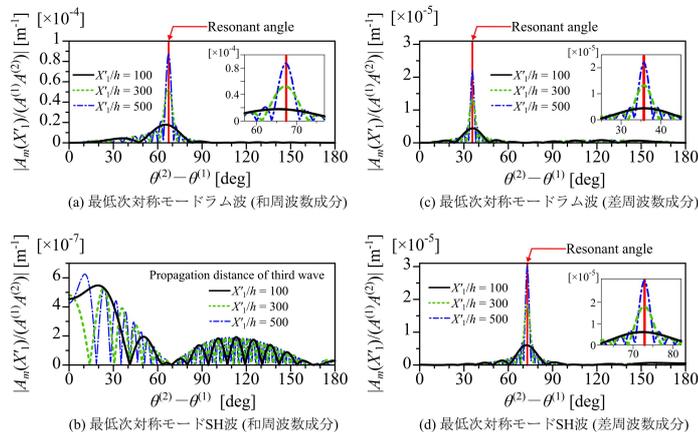


図4 最低次対称モードラム波と最低次対称モードSH波の相互作用で発生する第三波モード振幅の基本波交差角度依存性

モード同士または反対称モード同士を交差させたときは第三波が必ず対称モードになること、一方で対称モードと反対称モードを交差させたときは第三波が必ず反対称モードになることも解析的に示した。これらの結果の詳細は雑誌論文 で論じている。

(2) 三次元動的有限要素法による非線形三波相互作用の数値的検討

(1)の理論解析では、基本波を空間的に無限幅を有する連続波と仮定した下で共鳴条件を導出した。ここでは、基本波が空間的・時間的に有限な幅を有するような場合においても導出した共鳴条件が有効なのかどうか検討した。

その結果、基本波が空間的・時間的に有限な幅を有している場合でも、理論解析で導出した共鳴条件を満たすような交差角度近傍で第三波振幅が極大値を取ることがわかった。例として、二つの最低次反対称モードラム波（周波数は 0.4 MHz と 0.6 MHz）を交差させたときの第三波の発生する様子を図 5 に示す。また、(1)の理論解析において、共鳴条件を満たすときに第三波が伝搬距離とともに線形増大することを示したが、これは基本波が空間的に有限幅を有する（基本波の交差領域が有限範囲になる）場合では交差領域の第三波伝搬方向への長さが増加するにつれて第三波振幅も大きくなることを意味している。これを検証するために、基本波の空間的な幅を変化させることで基本波交差領域を変化させたところ、交差領域長さの増加とともに第三波がほぼ線形に増加する結果が得られた。

数値解析の結果より、実際の実験のように有限の大きさの超音波探触子を使用する場合においても、理論で求めた共鳴条件を満たすように基本波を交差させれば第三波が大きく発生し、それを実測できると予想される。本数値解析で得られた結果の詳細は雑誌論文 で論じている。

(3) アルミニウム合金平板中の非線形三波相互作用の実験的検討

アルミニウム合金平板において二つの最低次反対称モードラム波の非線形相互作用で発生する和周波数成分を観測することができた。また、受信用 PMMA ウェッジと基本波音軸交差点の距離を 1 mm 間隔で変化させて第三波を測定し、得られた空間-時間分布を二次元フーリエ変換することで波数-周波数分布を求めたところ、第三波は最低次対称モードラム波であることがわかり、(1)の理論解析で予想された通りのモードが発生することが確認された。

また、(1)の理論解析では、第三波の変位振幅が二つの基本波変位振幅の積に比例することがわかっている。そこで、送信用探触子への印加電圧を変化させたところ、第三波の電圧は二つの送信用探触子の電圧の積に比例する結果が得られた。本測定で用いた圧電探触子は、印加電圧と励起される変位振幅がほぼ線形関係であると予想されるため、この結果は第三波の変位振幅が二つの基本波変位振幅の積に比例することを示しており、理論解析と整合する結果を得ることができた。

さらに、印加電圧を固定して基本波の交差角度（音軸の交差角度）を変化させながら第三波の測定を行った（図 6）。本測定で考えている基本波モードの組み合わせでは、交差角度が 122° のときに(1)の理論解析で導出した共鳴条件を満足する。図 6 より、測定された第三波は 122° 近傍で最大値を取っており、理論解析の妥当性を実証することができた。

(4) 成果のまとめおよび今後の展望

本研究では、材料非線形性を有する均質等方弾性平板中の非線形三波相互作用に関して、理

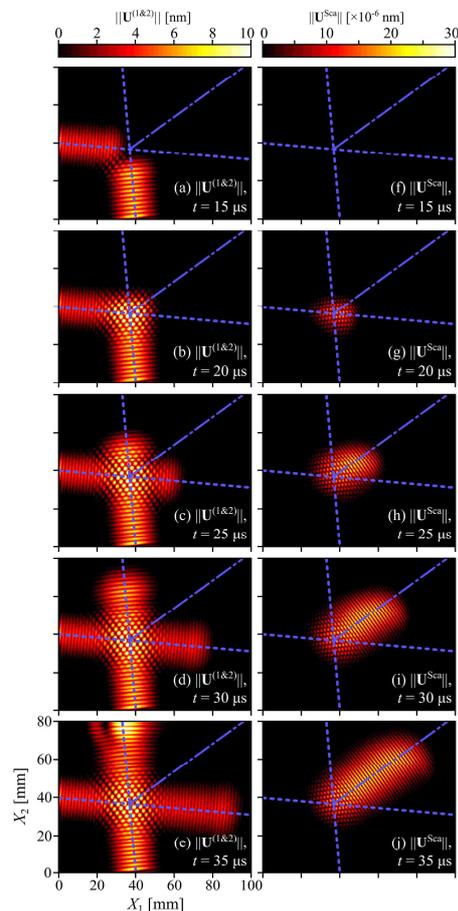


図 5 板上面変位のスナップショット。
(a)–(e)：基本波，(f)–(j)：第三波
(和周波数成分)

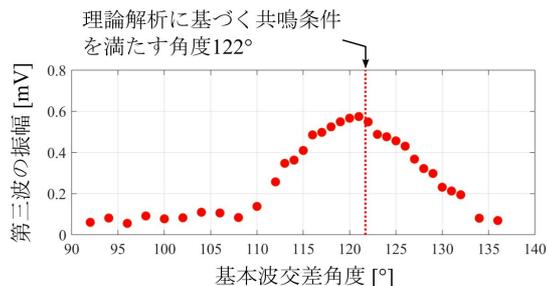


図 6 実験により測定した第三波振幅の基本波交差角度依存性

論解析・数値解析・実験による基礎的検討を行い、速度分散性・多モード性を有する板波の相互作用について理論的基盤を構築することができた。二つの基本波の波数ベクトルおよび周波数の和・差が第三波の波数ベクトルおよび周波数に等しくなるときに、第三波が大きく発生すること（共鳴条件）を解析的に導出できた。そして、実際の実験のように基本波が有限幅を有する場合でも、非線形三波相互作用により第三波が発生することを示した。さらに、アルミニウム合金平板において第三波を実測し、理論・数値解析で得られた結果を実証することもできた。

背景で述べたように、先行研究で着目されている板波の二次高調波発生では、二次高調波が累積的な成長を示すような条件が高周波数領域でしか満足されず、さらに基本波と二次高調波が同じ方向に伝搬するため二次高調波が基本波に埋もれる可能性がある。一方で、非線形三波相互作用では低周波数領域（高次モードのカットオフ周波数以下）においても共鳴条件を満足するような基本波の組み合わせが多数存在することが明らかになった。さらに、第三波は基本波とは異なる方向に伝搬するため送信波に埋もれることなく第三波を観測することができる。このように、非線形三波相互作用を用いれば二次高調波発生に見られる問題点を解決することが可能である。今後、損傷を有する試験片に対して第三波の測定を行い、損傷レベルと第三波振幅の関係性を考察することで、三波相互作用を用いた材料非線形性評価原理の確立に向けた更な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2件)

Y. Ishii, K. Hiraoka, and T. Adachi, "Finite-element analysis of non-collinear mixing of two lowest-order antisymmetric Rayleigh-Lamb waves," *Journal of the Acoustical Society of America* Vol. 144, No. 1 (2018), pp. 53-68, 査読有(DOI: 10.1121/1.5044422).

Y. Ishii, S. Biwa, and T. Adachi, "Non-collinear interaction of guided elastic waves in an isotropic plate," *Journal of Sound and Vibration* Vol. 419 (2018), pp. 390-404, 査読有(DOI: 10.1016/j.jsv.2018.01.031).

〔学会発表〕(計6件)

石井 陽介, 平岡 紘一, 足立 忠晴, 「等方性弾性平板中における弾性波の非線形周波数ミキシングに関する理論的および数値的検討」日本材料学会第 67 期学術講演会(高知工科大学永国寺キャンパス, 2018年5月25日)。

石井 陽介, 足立 忠晴, 「平板を伝わる弾性波の非線形周波数ミキシングの理論的・数値的検討」, 日本非破壊検査協会 平成 29 年度第 3 回応力・ひずみ測定部門講演会(豊橋技術科学大学サテライトオフィス, 2018年3月15日)。

石井 陽介, 琵琶 志朗, 平岡 紘一, 足立 忠晴, 「等方性弾性平板における非線形三波相互作用の理論解析と数値シミュレーション」, 日本非破壊検査協会 第 25 回 超音波による非破壊評価シンポジウム(東京都立産業技術研究センター青海本部, 2018年1月26日)。

石井 陽介, 琵琶 志朗, 足立 忠晴, 「板波の非線形三波相互作用に関する理論的検討」, 第 54 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会(京都大学桂キャンパス, 2017年11月11日)。

平岡 紘一, 石井 陽介, 足立 忠晴, 「等方性弾性平板における非線形三波相互作用の数値解析」, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス講演(北海道大学札幌キャンパス, 2017年10月7日)。

石井 陽介, 「等方性弾性平板における非線形三波相互作用の理論的検討」, 振動談話会第 4 回若手研究交流会(KKR ホテルびわこ, 2017年9月8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)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。