

令和 4 年 5 月 20 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14614

研究課題名（和文）接着接合継手における超音波共振現象の解明と健全性評価原理の確立

研究課題名（英文）Investigation of ultrasonic resonance phenomena in adhesively bonded joints and establishment of the integrity evaluation principle

研究代表者

森 直樹 (Mori, Naoki)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：00802092

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）：本研究課題では、2種類の超音波モードに対して、接着接合継手で生じる共振現象に関する理論的・実験的検討を行った。縦波垂直入射の検討では、炭素繊維強化樹脂の同材継手と、金属と樹脂の異材継手を取り扱い、被着体や接着層および界面の特性が共振特性に及ぼす影響を明らかにした。シングルラップジョイントへのラム波入射では、透過波が示すスペクトルの共振特性が、接着長さと継手のせん断剛性に依存することを示した。以上の結果から、超音波共振特性に基づく接着継手の特性評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、接着継手に含まれる各層の弾性特性や厚さ、継手の寸法が超音波による共振特性に及ぼす影響を理論的・実験的に明らかにし、その結果を国際学術誌や学会で報告することができた。また、得られた基礎的知見を基に構築した接着継手の特性評価法は、既存の欠陥検出法とは異なるアプローチによって健全性評価の高度化を目指す端緒になると期待している。以上のように、本研究課題によって学術的に意義のある成果が得られたと同時に、接着技術の高度化という社会的な課題解決に向けて継手評価手法の深化に貢献できたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we performed theoretical and experimental investigation on the resonance phenomena in adhesively bonded joints subjected to two different ultrasonic wave modes. For normal incidence of a longitudinal wave, the effect of adherends, adhesive layer, and interfaces on the resonance characteristics was clarified for similar joints of carbon fiber reinforced plastics and dissimilar joints of metal and plastic. For Lamb wave incidence on a single lap joint, it was shown that the resonance characteristics of the transmission spectrum depend on the bond length and the shear bond stiffness of the joint. Using the above results, we proposed characterization methods for adhesive joints based on the ultrasonic resonance characteristics.

研究分野：非破壊評価工学

キーワード：接着接合 非破壊評価 超音波 共振 ガイド波 界面 干渉 機械材料・材料力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車など種々の構造において、異なる材料を適材適所に用いるマルチマテリアル化が進行している。マルチマテリアル化によって、構造の強度を維持しつつ軽量化を実現することが期待される。マルチマテリアル化の普及には、接合技術の更なる発展が不可欠である。接合技術の中では、締結具を用いる機械的接合が代表的なものとして挙げられるが、近年では締結具数の削減が期待できる接着接合に注目が集まっている。一方、十分な強度を発現する接着接合継手を製造するためには、接着前の被着体が有する表面状態や接着剤の硬化状態について慎重な管理が必要となる。

製造された接着継手の品質評価において、非破壊評価法の適用が期待される。種々の非破壊評価法の中で、継手内部の状態を評価できる超音波法は有効な選択肢の一つである。超音波探傷法は、接着層内の空孔や接着層のはがれなどの欠陥を検出できるが、接着強度の低下を招く接着剤の不完全硬化部や接着界面の異常を欠陥として検出することは困難である。このため、超音波による継手内の欠陥評価ではなく、継手の特性を定量的に評価することが有効であると申請者は考えた。

超音波を用いて接着継手の特性評価を行う場合、時間波形から音速や層厚を直接評価することは難しいため、超音波が示す振幅スペクトルに着目することが有効であると考えられる。これまで研究代表者らは、超音波スペクトルに着目した接着継手の特性評価法について研究を進めてきた。その中で、継手内で超音波が示す共振現象に着目することが有効であると示唆される結果を得ていた。

2. 研究の目的

接着継手に対する特性評価法の高度化に向けて、継手における超音波共振特性を理論的・実験的に明らかにし、健全性評価法の基盤を構築することを本研究の目的とした。従来の超音波 C スキャン法でも使用されているバルク波と、より効率的な評価を可能にするガイド波の 2 種類の伝搬形態に着目し、接着不良を招く種々の要因が共振特性に及ぼす影響について実験的・理論的検討を行った。得られた結果を基に、特性評価法の構築を図った。

3. 研究の方法

以下の 2 種類の超音波モードについて検討を行った。いずれのモードに対しても、実験的検討と理論解析の両方を行い、継手の健全性評価に対する適用可能性を検討した。

(1) 縦波垂直入射による接着層/界面特性の独立推定法の検討

試験片として、エポキシ系接着剤で接着した炭素繊維強化樹脂 (CFRP) の接着継手と、シアノアクリレート系接着剤で接着したアルミニウム合金 (AL)・ポリスチレン (PS) の接着継手を測定対象とした。後者は金属・樹脂の異材接合継手であると同時に、被着体/接着剤の二層積層板のモデル試験片としても使用した。不完全な接着前処理や加圧条件によって、接着不良の試験片を故意に作製し、参照試験片と併せて実験的検討を行った。

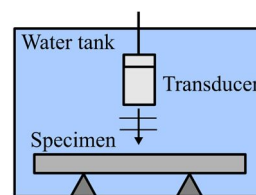


図 1 縦波測定 of 概略図

測定系の概略図を図 1 に示す。水槽中に接着継手を配置し、水浸探触子から発生させた超音波パルスを試験片に対して垂直に入射した。試験片で反射した成分をパルスエコー法により取得し PC に転送した。測定波形に対して、高速フーリエ変換を用いた周波数解析を適用し、反射スペクトルを算出した。

さらに、実験条件に相当する理論モデルを構築し、弾性波理論に基づく解析を行った。被着体や接着層の粘弾性特性や層厚、接着界面の特性が超音波スペクトルに及ぼす影響を明らかにし、実験結果との定量的な比較によって接着継手試験片の特性評価可能性を検討した。

(2) ラム波干渉法による継手せん断剛性の評価法の検討

試験片として、エポキシ系接着剤で接着したアルミニウム合金のシングルラップジョイント (SLJ) を測定対象とした。測定系の概略図を図 2 に示す。信号発生器で作成したパルスを空中超音波探触子に入力し、発生した超音波を SLJ に対して斜角に入射した。このとき、スネルの法則よりラム波 0 次反対称 (A0) モードが強く発生する角度を入射角として用いた。重ね部を透過した波動をピン型の接触型超音波探触子で受信し、PC に転送した。前項 (1) と同様に周波数解析を行い、透過スペクトルを算出した。

さらに、研究代表者らが実施した理論解析の結果に基づき、透過スペクトルが極値を示す周波数に着目する継手の特性評価法を構築し、実験結果への適用を試みた。被着体の接着前処理や接着長が異なる試験片に対して提案法を適用し、SLJの特性評価可能性を検証した。さらに、ラム波評価に用いた試験片と同等の接着条件で作製した継手に対して引張せん断試験を実施し、強度との相関について考察した。

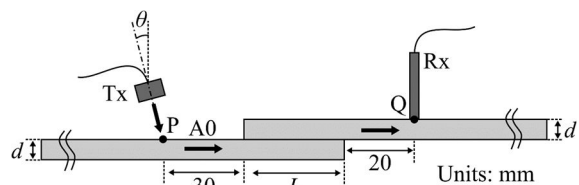


図2 ラム波測定 of 概略図

4. 研究成果

上で述べた各項目について、得られた研究成果をまとめる。

(1) 縦波垂直入射による接着層/界面特性の独立推定法の検討

接着継手に対する理論解析の結果、各層が示す共振の影響により反射波（透過波）のスペクトルに極小（極大）が現れることがわかった。また、共振周波数によって接着部は異なる振動分布を示した。このような特徴的な周波数は接着層の弾性特性や厚さ、界面特性で変化することが示された。すなわち、接着部の共振周波数から接着層と界面の特性評価が可能であることが示唆された。

以上の結果に基づいた特性評価法を提案し、CFRP接着継手に適用した。参照試験片として健全な接着継手を使用し、一方のCFRP表面に離型剤を故意に塗布し接着した試験片を接着不良継手として評価した。超音波による評価の結果、共振特性から接着層の厚さが良好に推定できること、および接着不良継手では接着界面剛性が低下することがわかった。この結果は、提案手法の有効性を示唆している。さらに、離型剤の塗布量が多い継手では、離型剤を塗布したCFRP側から超音波を入射した場合と、その反対側から入射した場合で測定される共振スペクトルが異なる分布を示した。

この現象についてさらに考察を行うため、AL/PS接着継手を対象とした理論的・実験的検討を行った。理論解析の結果、継手に現れる共振特性は、AL層とPS層の影響が支配的なものにそれぞれ分類できることがわかった。すなわち、層間の結合が弱い場合、超音波入射側の層の特性が強く現れることを意味する。さらに、この検討によって、金属・樹脂接合板に対する特性評価の可能性が示された。接着層の厚さと弾性特性を推定できたことに加え、界面に空孔が存在する場合についても検出できることが示唆された。

(2) ラム波干渉法による継手せん断剛性の評価法の検討

理論解析の結果、SLJにラム波A0モードを入射すると、継手での干渉によって透過スペクトルに共振/反共振が出現することがわかった。この現象が現れる周波数は、接着層と界面の影響を反映した実質せん断剛性によって変化した。この結果を基に、実験的検討を行った結果、理論予測と同じく透過スペクトルに極値が出現した。これらの極値周波数を理論結果と比較することで、継手のせん断剛性を推定した。サンディングや離型剤残留など接着前処理が異なるSLJ試験片に対して検討したところ、前処理の不備によってせん断剛性の推定値が低下する傾向を示した。さらに、同等の接着条件で強度試験用のSLJを作製し、引張せん断試験を実施した。その結果、本実験で想定した接着不良により継手の強度が4分の1程度まで低下することが示唆された。しかし、接着のばらつきによる影響が考慮されていないため、今後はラム波評価した試験片をそのまま強度評価するなど、さらなる検討が必要であると考えている。

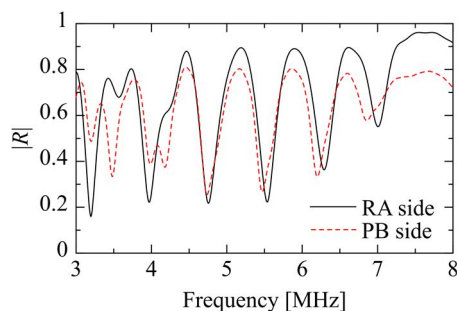


図3 CFRP接着継手に対する超音波反射スペクトル

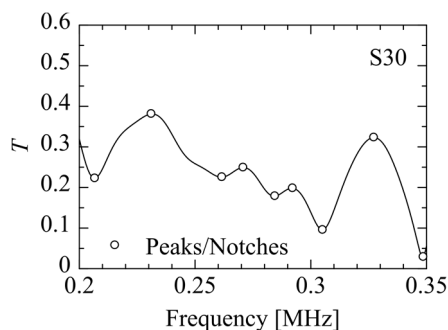


図4 SLJにおけるラム波透過スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mori Naoki, Wakabayashi Daichi, Hayashi Takahiro	4. 巻 113
2. 論文標題 Tangential bond stiffness evaluation of adhesive lap joints by spectral interference of the low-frequency A0 Lamb wave	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Adhesion and Adhesives	6. 最初と最後の頁 103071 ~ 103071
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijadhadh.2021.103071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 森 直樹
2. 発表標題 超音波スペクトル解析による接着接合継手の特性評価
3. 学会等名 NDEネットワーク 2020年度 WEB交流会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 直樹
2. 発表標題 超音波スペクトル解析による接着継手の特性評価法 弱接着の検出・評価に向けた取り組み
3. 学会等名 接着・接合技術コンソーシアム 第2回 非破壊検査ワーキンググループ（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shohei Ito, Naoki Mori, Naoki Matsuda, Yasuaki Furuta, Takayuki Kusaka, Masaki Hojo
2. 発表標題 Interfacial evaluation of adhesively bonded CFRP joints based on ultrasonic reflection spectrum - Stiffness estimation of two interfaces
3. 学会等名 The 41st Symposium on Ultrasonic Electronics（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 直樹, 若林大智, 林 高弘
2. 発表標題 シングルラップ接着継手におけるラム波の透過スペクトル特性
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩田優佑, 森 直樹, 林 高弘
2. 発表標題 金属・樹脂接合平板に対する超音波反射スペクトルの検討
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田純也, 森 直樹, 林 高弘
2. 発表標題 平板段差部に斜角入射したガイド波の三次元反射・透過特性解析
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022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
---------	---------