

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13663

研究課題名（和文）ガイド波による接着構造の健全性評価に向けた時空間逆フィルタリング法の構築

研究課題名（英文）Construction of spatio-temporal inverse filtering technique for the integrity evaluation of adhesively bonded structures by guided waves

研究代表者

森 直樹（Mori, Naoki）

立命館大学・理工学部・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）：薄肉構造の接着接合部に対する非破壊評価の高度化と高効率化に向けて、構造に沿って伝わる超音波（ガイド波）を用いた健全性評価法の構築に関する研究を行った。薄板の重ね接着部におけるラム波（板を伝わるガイド波）の反射・透過についての検討から、接着部の剛性評価について基礎となる知見を得た。また、重ね接着部に入射するガイド波の振幅増大を目指し、時空間逆フィルタに基づくガイド波の集束法について検討した。この手法により、接着部上の集束位置や集束時の時間波形を制御できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、ガイド波のみならず縦波などのバルク波が接着接合部で示す反射・透過特性に関しても検討した。これにより、接着部の特性評価におけるモデル化方法についての知見が得られ、ラム波についての検討では透過特性に基づく接着部の特性評価の可能性が示された。また、時空間逆フィルタリング法によって、超音波送信子の個数が少ない場合でも重ね接着部におけるガイド波の集束を確認した。この手法は、接着部に存在する欠陥の検出・評価に応用できると研究代表者は期待している。

研究成果の概要（英文）：To improve the quality and efficiency of the nondestructive evaluation (NDE) for adhesively bonded joints of thin-walled structures, studies were conducted for the construction of an NDE technique using guided ultrasonic waves. Useful results for the stiffness evaluation of adhesive joints were obtained by the investigation regarding the reflection and transmission of Lamb waves at an adhesive lap joint. In addition, a guided-wave focusing method based on the spatio-temporal filter was explored to enhance the amplitude of the incident guided wave in an adhesive lap joint. It was found that this method can control the focusing location on the joint and the focusing temporal waveform.

研究分野：非破壊評価工学

キーワード：非破壊評価 超音波 接着接合 ガイド波 ラップジョイント 接着界面 時空間逆フィルタ 機械材料・材料力学

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。

## 1. 研究開始当初の背景

構造物の経年劣化を検出・評価する非破壊評価法は、構造健全性を確保する上で重要な役割を担っている。代表的な非破壊評価法の1つとして、超音波を用いる手法が知られている。航空機構造などの薄肉構造の健全性評価において、薄板を伝わるガイド波の一種であるラム波を用いる手法が目ざされている。ガイド波は、バルク波に比べて伝搬距離が長いという特徴を有するため、一度に広範囲の検査が可能になるという利点を有する。

近年、接着剤の高機能化に伴って、さまざまな構造に対する接着接合の適用が拡大している。接着接合の利用によって、従来の機械的接合で用いられるボルトやリベットなどファスナの点数を削減でき、構造の軽量化につながると期待される。図1に示す薄肉構造の重ね接着部に対してラム波による健全性評価を行う場合、(1)波動の分散性による波束の拡がり、(2)接着部の端部(板厚変化部)における反射、の2点によって接着部を伝搬するガイド波の振幅が低下すると考えられた。重ね接着部の特性評価や欠陥評価の高度化に向けて、接着部への入射振幅低下の影響を考慮した手法の検討・構築が必要であると研究代表者は考えた。

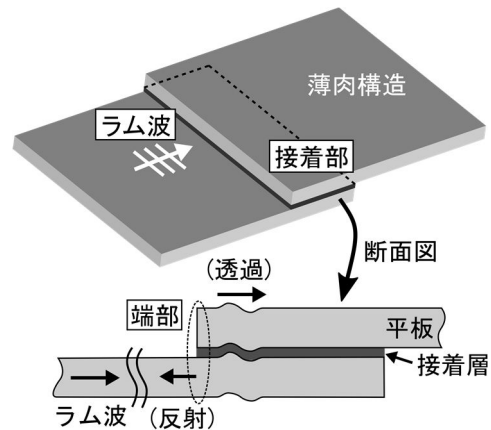


図1 重ね接着部に入射するラム波

## 2. 研究の目的

本研究課題では、薄肉構造の接着接合部に対する高効率かつ高感度な健全性評価の実現に向けて、接着部とガイド波の相互作用を解明することで評価原理の構築に必要な基盤的知見を得るとともに、波動の集束方法として知られる時空間逆フィルタリング法をガイド波に対して拡張し、接着構造の非破壊評価法として構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

研究目的の達成に向けて、以下の3点に関して検討を行った。項目別に研究方法の詳細を述べる。

### (1) 弾性波と接着接合部の相互作用に関する基礎的検討

弾性波と接着接合部の相互作用について基礎的な知見を得るため、バルク波を垂直入射した際の反射・透過特性に関して理論解析を行った。接着接合部を図2のように三層構造としてモデル化し、接着界面にはスプリング界面モデルを適用した。また、水中に設置したアルミニウム合金の接着接合材に対して超音波を垂直入射し、接着部における透過特性について予備的な検討を行った。

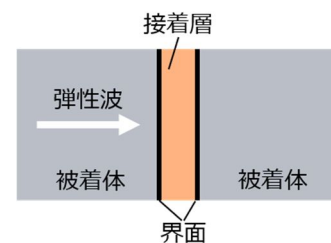


図2 基礎検討の解析モデル

### (2) 単一重ね接着部(シングルラップジョイント)におけるラム波反射・透過特性の解明

ラム波によるシングルラップジョイントの特性評価に向けて、接着部におけるラム波の反射・透過特性に関して数値解析を行った。ここでは弾性波の波長に比べて十分に薄い接着層を有する接着部を対象とし、モデル化には、前述の項目(1)で得られた知見を使用した。数値解析には、均質な単一平板におけるラム波の解析解と有限要素法を組み合わせたハイブリッド有限要素法を用いた。また、アルミニウム合金の薄板をエポキシ系接着剤により接着したシングルラップジョイントを作製し、ラム波の透過測定を行った。実験装置の構成図を図3に示す。縦波探触子を板の表面に接触させてラム波の送受信を行った。

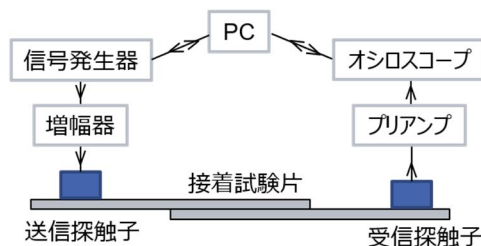


図3 ラム波透過測定のための実験装置

### (3) 時空間逆フィルタリングによるガイド波集束法の構築と集束特性の評価

時空間逆フィルタによるガイド波の集束法についての定式化に基づき、予備的な実験的検討を行った。試験片として、被着体をアルミニウム合金とするシングルラップジョイントを作製した。平板部に貼付けた単一の圧電振動子からラム波を発生させ、接着部におけるガイド波を縦波探触子で受信した。ガイド波の集束特性に関してさらに検討を行うため、三次元有限積分法(FIT)を用いた波動伝搬シミュレーションを行った。逆フィルタによる集束の時間的・空間的特性について検討を行い、代表的な波動集束法である時間反転による結果との比較を行った。

#### 4. 研究成果

研究の方法で述べた項目ごとに、得られた研究成果を以下で述べる。

##### (1) 弾性波と接着接合部の相互作用に関する基礎的検討

接着接合部における弾性波の反射・透過特性について理論解析を行い、振幅反射係数と振幅透過係数の周波数依存性を調べた。理論解析の結果、接着層厚が入射波の波長に比べて十分薄い場合、すなわち入射波の周波数が十分に低い場合、図2に示す接着層と2か所の接着界面をまとめて単一スプリング界面でモデル化できることを示し、その際の界面剛性がみだす関係式を導出した。このとき、周波数の増大に対して超音波の反射係数(透過係数)は単調に増加(減少)する。一方、周波数が増大し接着層厚が無視できなくなると、図2のような三層構造のモデル化が必要であることを示した。この場合、超音波の反射係数(透過係数)が極小値(極大値)を示す周波数が複数存在する。また、アルミニウム合金の接着接合継手に対して水中で超音波の透過波測定を行った結果、複数の周波数で透過係数が極大を示した。この周波数は接着条件によって変化することを確認し、弾性波(バルク波)による接着接合継手の特性評価の高度化に向けて基礎となり得る知見が得られた。

##### (2) 単一重ね接着部(シングルラップジョイント)におけるラム波反射・透過特性の解明

数値解析では、(1)で得られた知見に基づいて、接着層厚が薄いシングルラップジョイントのモデル化に単一スプリング界面を適用した。被着体の材質と板厚は同一であると想定した。低周波数域におけるラム波0次反対称(A0)モードを入射波として用いた場合、接着部におけるA0モードの反射・透過特性は周波数および接着部の界面剛性に対して複雑な依存性を示した。特に、透過係数(反射係数)は複数の周波数で極大値(極小値)を有した。この現象は、重ね接着部の端部で反射・透過した波が干渉することにより発生する。透過係数が極大を示す周波数(ピーク周波数)についてさらに検討した結果、ピーク周波数は接着部の接線剛性が増加すると単調増加する一方で、接着部の垂直剛性がピーク周波数に及ぼす影響は十分に小さいことがわかった。これらの結果から、透過係数のピーク周波数を調べることで、接着部の接線剛性を推定できる可能性が示唆された。

実験的検討では、A0モードの送受信が支配的となる低周波数域での測定を行った。入射波をパルスとした場合の透過波形を取得し、高速フーリエ変換による周波数解析を行った。その結果、複数の周波数で透過スペクトルが極大を示した。理論解析結果に基づき、これらのピーク周波数から接着部のせん断剛性を推定した。今後は、推定結果に対して接着条件や接着層厚が及ぼす影響をさらに検討する必要があると考えている。

##### (3) 時空間逆フィルタリングによるガイド波集束法の構築と集束特性の評価

圧電振動子を用いた実験的検討の結果、逆フィルタリング処理によって、接着部上の所望の位置にガイド波を時間的・空間的に集束できることがわかった。接着部上の異なる位置で測定した時間波形の例を図5に示す。図5(a)は集束位置、(b)は集束位置から14mm離れた点で測定した波形であり、図5(a)でおおよそ時刻170 $\mu$ sに現れる波形が集束波形に対応する。波源として単一の圧電振動子のみを用いたが、逆フィルタを構築する際に取得する波形データの時間範囲を十分広くとることによって、シングルラップジョイントの端部における反射の影響を取り入れることが可能となり、結果として集束点での振幅が増大させることができた。

また、逆フィルタリングによるガイド波の集束特性について数値シミュレーションを行った結果、集束のスポット径は時間反転による集束結果とほぼ一致したが、集束時刻外の波形高さを逆フィルタでは抑制できることがわかった。集束特性をさらに検討するためには、より空間分解能の高いガイド波測定系の構築が必要であると考えられる。

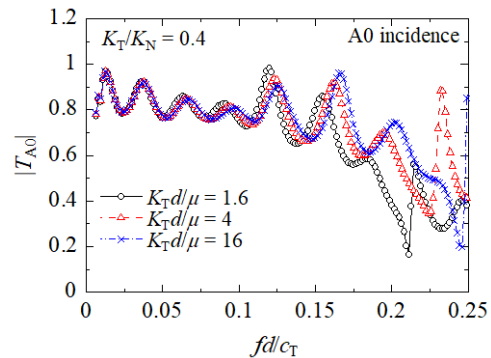


図4 A0モード入射に対するA0モード透過係数の理論解析結果。横軸は無次元化した入射波の周波数、 $K_T d / \mu$ は無次元化した接着部の接線界面剛性を表す。

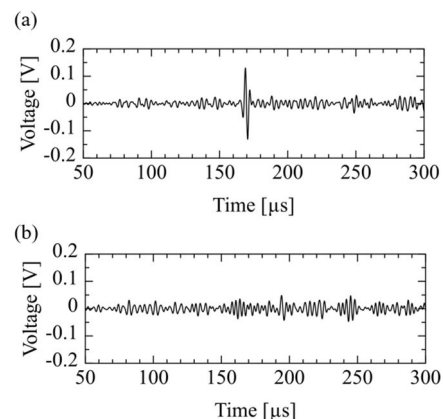


図5 逆フィルタリングによる(a)集束位置と(b)集束位置から離れた点におけるガイド波の測定結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Naoki Mori, Takayuki Kusaka	4. 巻 145
2. 論文標題 Reflection and transmission characteristics of Lamb waves at an adhesive lap joint of plates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 3075 ~ 3085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/1.5109098	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Mori, Naoki Matsuda, Takayuki Kusaka	4. 巻 145
2. 論文標題 Effect of interfacial adhesion on the ultrasonic interaction with adhesive joints: A theoretical study using spring-type interfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 3541 ~ 3550
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1121/1.5111856	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Naoki Matsuda, Naoki Mori, Yasuaki Furuta, Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, Takayuki Kusaka
2. 発表標題 Evaluation of interfacial characteristics of adhesive joints by ultrasonic reflection technique
3. 学会等名 2019 International Congress on Ultrasonics (2019 ICU) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Mori, Takayuki Kusaka
2. 発表標題 Reflection and transmission behavior of Lamb waves at an adhesive lap joint of plates
3. 学会等名 2019 International Congress on Ultrasonics (2019 ICU) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 直樹, 日下貴之
2. 発表標題 板厚変化を有する平板におけるラム波の逆フィルタによる集束
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 Muhamad Azrul Hadi Bin Ghazali, Kyota Nakagawa, Shohei Ito, Naoki Mori, Takayuki Kusaka, Naoki Matsuda, Masaki Hojo
2. 発表標題 超音波スペクトロスコーピーによるアルミニウム合金接着接合部の界面特性評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森 直樹, 日下貴之
2. 発表標題 平板の重ね接着部におけるラム波反射・透過特性の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川恭太, Muhamad Azrul Hadi Bin Ghazali, 森 直樹, 日下貴之, 松田直樹, 北條正樹
2. 発表標題 超音波透過スペクトルに基づくアルミニウム合金の弱接着部における界面剛性評価
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 第26回 超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----