

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420031

研究課題名(和文) Zero-group velocity ラム波を用いた接着性状の非接触非破壊評価

研究課題名(英文) Nondestructive and noncontact characterization of bond quality in a polymer adhesive connection with zero-group velocity Lamb waves

研究代表者

長 秀雄 (Hideo, Cho)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：60296382

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)：適用分野が拡大している高分子接着剤による金属の接合の接着性状を超音波を用いて非破壊で評価する技術の構築を試みた。本研究では群速度が0となる板波(Zero-group-velocity (ZGV) ラム波)をレーザーを用いて励起・検出することで高空間分解能・高精度での接着性状を評価できる可能性を示した。本手法で計測したZGVラム波の周波数(位相速度に対応)は、破壊試験による得られた接着部のせん断強度が低いものでは低下しており、両者の間には良い相関が得られた。この相関は、時間領域差分法によって数値計算したところ接着界面の剛性に低下に対応していることが予想される。

研究成果の概要(英文)：The bonding technique with a polymer adhesive agent is expected to be one of alternative bonding technique for a metal/metal interface due to its high bonding rigidity and light weight. Nondestructive characterization of a bond quality is attempted with zero-group-velocity (ZGV) Lamb waves which have finite phase velocity. ZGV Lamb waves was generated with a pulsed YAG laser and detected with a laser interferometer. The frequencies of ZGV Lamb waves corresponding to the phase velocity of ZGV Lamb waves decreased with decreasing shear strength in the bonding area. The numerical simulation revealed that the decrease of the frequency would be caused by reduction of the rigidity on the interface between an adherent and a bonding layer. The frequency of ZGV Lamb waves would be one of good indicators of the bond quality.

研究分野：超音波計測

キーワード：高分子接着剤の接着性状評価 零群速度板波による非破壊検査 レーザ超音波 接着剛性 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

構造物の各部材の接合は、溶接やボルトによってなされてきたが、近年では接合部の剛性向上や軽量化のために接着剤を用いた接合方法が検討されている。しかし、接着剤は外観上問題がなくても接着面の状態（粗さや清浄度）や接着環境（温度や湿度）によって接着性状が変化することが知られている。また、長期間の使用によって水分の侵入や紫外線などによって接着剤自身が劣化し、接着性状が低下する。そのため、接着剤を安全に使用するためには非破壊によって接着性状を評価する必要がある。いままでも超音波を用いた方法が検討されてきた。超音波の伝搬速度は材料の弾性的性質をはじめとする材料の状態を反映する。伝搬速度計測は超音波を一定距離伝搬させ、その伝搬時間と伝搬距離から決定するため、接着性状評価のような高精度な伝搬速度計測を必要とする場合は、比較的長い伝搬経路が必要となる。しかしながら接着性状は局所的に計測する必要がある。また、接合部は一般的に板状構造となっており、接着部の状態を評価するには厚み方向に伝搬する超音波を使用する必要があるが、この場合、板厚よりも十分に短い波長の波動を用いる必要があるうえ、接着層の厚さは、板厚に比べてかなり薄いため接着の良否を伝搬速度から判断することはほとんど不可能である。これらの問題に対しては、水浸縦波超音波の接着界面における反射率を利用する方法が提案されている。その場合、正確な反射率を計測するためには被計測対象を水槽に入れる必要があるという問題がある。一方、2004年以降に S.D.Holland らや C.Prada らによって Zero-group-velocity ラム波による材料評価の可能性について報告された。Zero-group-velocity ラム波は、板状構造物を伝搬するラム波のうち伝搬速度が 0 となる伝搬モードである。この波動では位相速度は有限の値を有することから、そのモードの位相速度を計測すれば局所的な弾性的性質や板状構造物の厚さに関する情報を得られると報告されている。S.D.Holland らによれば、この伝搬モードを用いてアクリル板の厚さを計測し、接着テープが試験片表面に存在する場合の厚さ 1% 程度の変化を確実に捕らえたことを報告している。C.Prada らは、レーザ超音波を用いた手法を提案しており、2つの振動形態の異なる Zero-group velocity ラム波を用いることで比較的薄い材料のポアソン比を決定できることや線状の音源を用いることで弾性異方性を示す材料の音響異方性を計測できることを示しめされている。この方法では、局所的な特性を高い精度で評価できることから接着性状を評価が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、接着層を有する積層材料の接着状態の評価を行うことを目的としている。その目的のために伝搬しない波動 (Zero

group velocity (ZGV) ラム波) を使用する。ラム波は、板状構造物を伝搬する波動であるが、ある特定の周波数では位相は進むが、波動のエネルギー自体は伝搬せず、その場で留まるというモードが存在する。位相速度は、伝搬媒体の特性を反映する。つまり伝搬しない波動の位相速度を求めることで超音波励起領域内 (励起にレーザを使用することで直径 2 mm 程度) の材料特性評価が可能うえ、特性変化に対する感度が高いため接着性状の評価の可能性がある。

3. 研究の方法

ZGV ラム波の励起及び検出の実験装置を図 1 に示す。ZGV ラム波は、レーザ直径 4mm、レーザーエネルギー 20mJ のパルス YAG レーザを試験片表面に照射して励起し、レーザ照射面の真裏にプローブ直径 0.3mm のレーザ干渉計を用いて面外変位を測定した。ZGV ラム波の評価は検出波形に FFT を施すことでその周波数スペクトルから行った。この際、周波数分解能を向上させるために Zero-padding 処理を施し 0.76kHz とした。

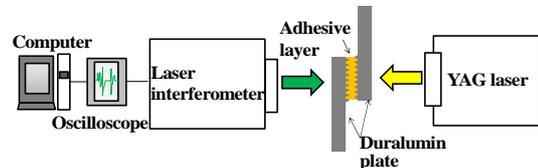


図 1 ZGV ラム波計測装置

試験片は、同じ厚さのジュラルミン板 (W:25mm、L:100mm、t:3mm) をエポキシ系接着剤で接着した試験片 29 本を用意した。試験片は、図 2 に示すような lap-joint 型に作製した。また接着強度は接着面粗さに依存するので接着面を #30 研磨することで接着性状の良い試験片を、また鏡面仕上げ後にグリースを塗布することで接着性状の悪い試験片を作製した。また接着層の厚さは接着後の試験片全体の厚さから二枚のジュラルミン板の厚みを減算することで求めた。接着強度は ZGV ラム波測定後、インストロン引張試験機 (最大引張荷重 10kN) で引張せん断試験を行い測定した。

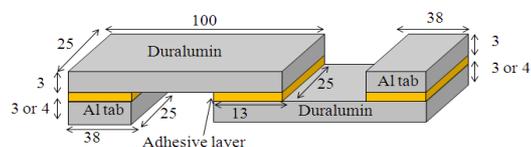


図 2 ラップジョイント型接着試験片

4. 研究成果

(1) ZGV ラム波の周波数と接着せん断強度の関係

図 3 に ZGV ラム波計測後に接着良好および不良材に対して引張せん断試験した結果を示す。この際、クロスヘッド速度は 0.1m/s で行った。接着良好材は不良材に比べて強度が高くなっていた。また、破断後の接着剤層には大きな空孔は観察されなかった。

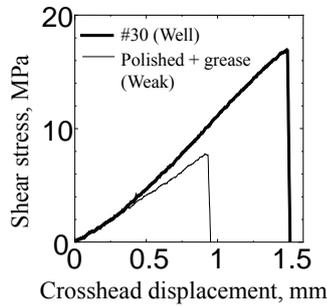


図3 引張せん断試験結果

図4に接着良好および不良材のせん断強度の分布を示す。接着良好材ではせん断強度は16 MPa~19 MPaの範囲に集中していたが、接着不良材では2 MPa~18 MPaの範囲で大きくばらついていた。

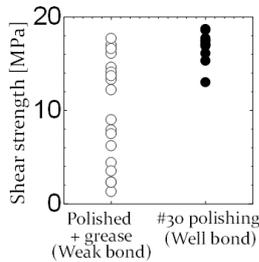
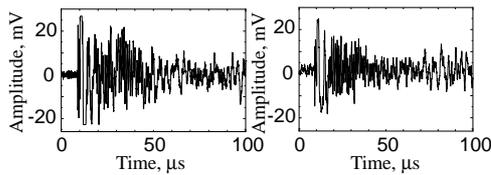
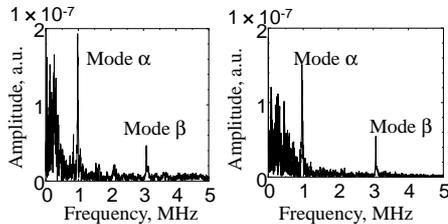


図4 接着良好および不良材に接着強度

次にこれらの試験片に対してZGVラム波を計測した結果を示す。ZGVラム波は各試験片に対して接着部中央を2mm間隔8点で3列の計24点の測定を行った。接着良好および不良材における検出波形と周波数スペクトルの代表例を図5に示す。



(a) 接着良好材での検出波形 (b) 接着不良材での検出波形

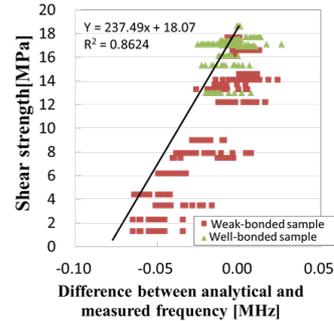


(c) 接着良好材での周波数スペクトル (d) 接着良好材での周波数スペクトル

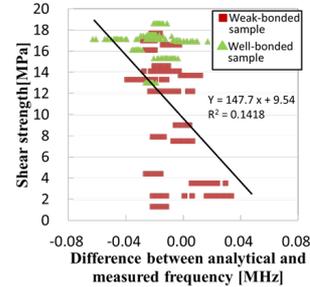
図5 接着良好および不良材でのZGVラム波の検出波形と周波数スペクトル

いずれの試験片でも二つの卓越したピークが得られた。これらのピークがZGVラム波に対応しており、ここでは1.0MHz付近と3.0MHz付近のピークをそれぞれMode α、

Mode βと定義する。この二つのモードのZGVラム波の解析的周波数をジュラルミン板の物性(縦波速度:6320 m/s、横波速度:3130 m/s、密度:2.7 g/cm³)とエポキシ系接着剤の物性(縦波速度:2610 m/s、横波速度:1100 m/s、密度:1.17 g/cm³)と厚さから求め、各試験片で検出されたピーク周波数との差を求め、各試験片のせん断強度と比較した結果を図6に示す。また各グラフに示す直線は解析解と実験値の周波数差の負方向の最大値を用いて最小二乗法によって求めた。



(a) 低周波(モード α)側のZGVラム波



(b) 高周波(モード β)側のZGVラム波

図6 ZGVラム波周波数とせん断強度の関係

Mode αではせん断強度が高くなるにつれて解析周波数との差は小さい。解析解は、基材/接着剤界面において応力と変位が連続している条件で求められており、今回の測定において接着強度が高いほど接着界面において応力と変位は連続的であると考えられる。一方、接着強度が低い場合では、界面において変位の食い違いが許容され、界面での剛性が低下するためZGVラム波の周波数は解析解よりも低下したと推測される。せん断強度は、接着部内における最弱部が支配すると考えて、各試験片におけるZGVラム波の測定値のうち最小の周波数とせん断強度の関係を最小二乗法によって求めた。近似曲線におけるR²値はMode αでは0.8624と高い相関を示していた。一方、Mode βのR²値は0.1418と接着強度に対するZGVラム波の相関は得られなかった。つまり、ZGVラム波のうち接着強度と相関を示すモードを使用すれば密着性状を推定できる可能性があることがわかった。

接着性状を界面の剛性で表現した場合、接着性状が良いときは界面剛性が高く、界面において応力と変位が連続する。一方、接着性状が悪い場合、界面の剛性が低く、界面において”すべり”が起こるとモデル化できる。こ

ここでは、界面剛性変化を厚さ 0.09mm の接着層全体の横弾性率が低下したと考え、接着層の横弾性率を 1.4GPa(完全接合時)から低下させたときの ZGV ラム波の周波数差を求めた。各モードの ZGV ラム波の周波数変化と横弾性係数との関係を図 7 に示す。

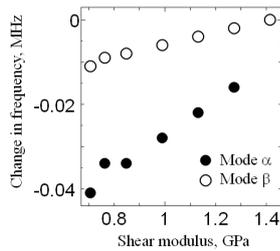


図 7 接着層の横弾性率と ZGV ラム波周波数

いずれのモードでも接着層の横弾性係数が低下すると ZGV ラム波の周波数は低下した。Mode α のせん断弾性係数の低下率(傾き)は Mode β に比べて 4 倍程度大きく、接着強度に対して敏感であると推察できる。すなわち、ZGV ラム波の伝搬モードを適切に選択することができれば、その周波数から接着面の性状を推定できることがわかった。

(2) FDTD 法を用いた ZGV ラム波の数値計算結果

FDTD 法は粒子速度変位と応力の格子が交互に存在するスタッガード格子を用いて差分化する方法で、支配方程式は運動方程式とフックの法則である。最初に FDTD 法で ZGV ラム波が正しく計算できるのかを検討するために図 8 に示すような Al 合金板単体を想定した計算モデルを作成した。表 1 に計算に用いた物性値を示す。なお、表 1 には後に使用する接着剤も物性値も示している。数値計算は空間離散間隔 dx と空間離散間隔 dt の比 $dx/dt=10000$ m/s 一定として $dx=50 \mu\text{m}$ 、 $25 \mu\text{m}$ 、 $12.5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ としと板厚 $d=1 \text{mm}$ 、 2mm 、 3mm として行った。また音源として板幅中央の表面に下向きの図 1 右上に示した時間波形を有する変位速度を与えた。また、音源の空間分布は半値幅 $\pm 2.5 \text{mm}$ のガウス分布に従うように与えた。

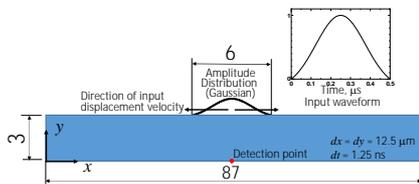


図 8 板状構造物の計算モデル

表 1 計算に使用した物性値

	縦波速度, m/s	横波速度, m/s	密度 $\times 10^3 \text{kg/m}^3$
アルミニウム合金	6348	3164	2.663
接着剤	2610	1100	1.170

図 9 に $dx=12.5 \mu\text{m}$ 、 $d=3 \text{mm}$ での震央裏面の面外方向の変位速度波形とその周波数スペクトルを示す。0.5 μs から始まる振動は縦波の到達時間に相当し、その後には連続的な振動が観察された。一方、スペクトルには 0.9 MHz、1.5 MHz および 3 MHz 近傍に 3 つピークが観測された。表 1 に示した物性値を用いて商用の速度分散計算プログラム (Disperse) を用いて求めた ZGV ラム波 S_1 (1 次の対称モード) A_2 (2 次の非対称モード) および S_4 モードの周波数の解析解はそれぞれ 0.959 MHz、1.582 MHz、3.156 MHz と概ね一致していることから数値計算で求めたピークが ZGV ラム波に対応している。

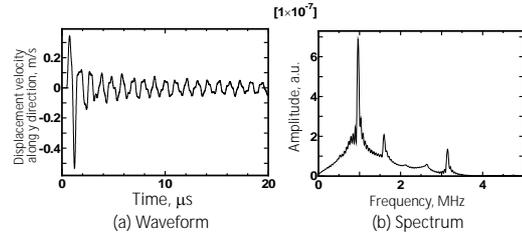


図 9 離散間隔 12.5 mm、厚さ 3mm のモデルでの震央での面外方向変位速度とそのスペクトラム

図 10 には各計算条件で求めた ZGV ラム波の周波数を商用プログラムで計算した解析解との差を示す。ラム波の位相速度は板厚と周波数の積である fd に依存して変化することから ZGV ラム波の周波数差 fd を用いた表現した。また、横軸には離散間隔 dx を厚さ d で除した値を用いた。図中、白抜きのは S_1 モードを、黒塗りは S_4 モードを示し、シンボルの違いは dx を表している。解析解と数値計算の差は dx/d とともに小さくなり、板厚の 1/100 以下の空間離散間隔では解析解との差 fd は 0.06 MHz \times mm 以下であった。これは S_1 での fd 値(2.28 MHz \times mm)の 2.6% 程度であり、FDTD 法を用いた ZGV ラム波を十分な精度で計算可能であることが分かった。次に ZGV ラム波はどのように形成されるのを検討した。一般にラム波は、弾性波の波長が板厚よりも長い場合に存在し、縦波と横波が

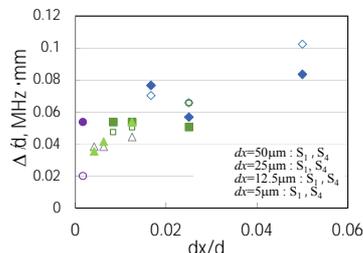


図 10 計算によって求めた ZGV ラム波の離散間隔依存性

表面で反射する際にモード変換しながら干渉することで振動モードが形成される。つまり ZGV ラム波も同様な現象であると予想される。

しかし、一般的に板厚方向の定在波としては縦波や横波に多重反射に伴う振動である厚み共振がある。そこで厚み共振と ZGV ラム波の振動を区別することを目的として入力波に半値持続時間 62 ns のガウス形状のパルス波を用いて計算を行った。

図 11 に表 1 に示した物性値を用いた場合（黒線）と横波速度のみを 3350 m/s と上昇させた場合（赤線）の震央での面外変位速度波形の最初の 4 μ s までとそれぞれの周波数スペクトルを示す。図 11(a)中の縦の点線は黒線で示した波動のピークに対応した時間を示しており、図中の文字は P、S は縦波、横波は示している。たとえば PSP は、最初縦波で伝搬したのち、最初の反射で横波にモード変化し、次の反射で縦波にモード変換したことを示している。

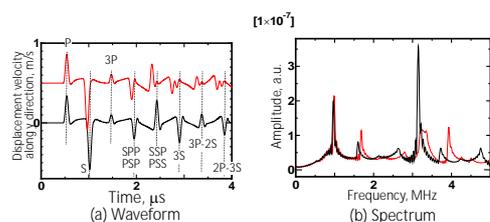


図 11 横波速度を 3350m/s にした場合の検出波形とその周波数スペクトル

この計算では、入力波の持続時間が短いため波動は板厚内を多重反射することになり、反射の際にモード変換を起こしている。本来、垂直入射であればモード変換は起こらないが、現実には波面はわずかなら球面になっており、反射の際にモード変換を起こしていることを確認している。横波速度を上昇させた場合では、反射波の伝搬過程に横波での伝搬を含む場合は、黒線で示したピークよりも短時間側にピークが得られており、そのずれ量は横波として伝搬した距離に依存していた。つまり、ZGV ラム波は、縦波と横波が反射しながらモード変換を繰返し、干渉した結果として得られる波動である。そのためその周波数は伝搬するラム波と同様に板厚や板の弾性的な性質に依存することが理解できる。また、接着層を有する積層構造材では接着層/基材界面における反射における位相遅れを反映することが予想される。一方、スペクトルでは両者とも 0.9 MHz、1.4 MHz と 3MHz 近傍にはどちらの場合もピークが観察され、ZGV ラム波の解析解で求めたピークと一致している。横波速度を上昇させた場合ではいずれのモードも高周波数側にシフトしており、高い周波数ほどシフト量が大きい傾向があり、横波速度の約 6%の上昇を感度よく捉えていた。また、3MHz 近傍のモードではピークが分離していた。

次に接着性状を考慮した数値計算を行った。図 12 に接着層を有する計算モデルと接着不良状態を示す接着層/母材界面の境界条件であるスプリングモデルの概念を模式的

に表したものを示す。計算は同一の厚さと物性を有する厚さ 3 mm の板を厚さ 0.1mm の接着剤で接着したモデルに対して行った。界面において完全に接着されている場合は、界面において変位と応力が連続であるとし、接着状態が悪い場合は図 12 右側に示すように接着剤/基材界面においてせん断方向の変位の食い違いを与えることで表現した。

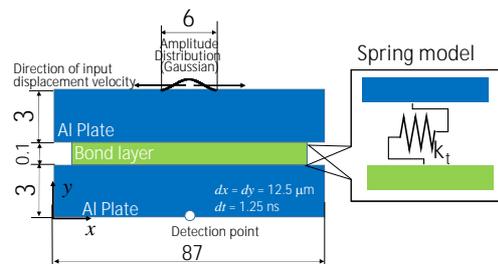


図 12 積層材計算モデルと接着界面の境界モデル

変位の食い違い量は、界面に作用する応力に比例すると考えるとばね要素を境界条件として与えることができ、ばね要素のばね定数が接着性を示すことになる。すなわちばね定数が k_t の時は、完全接合と同じとなり、0 では液体が存在することを示している。なお垂直方向の変位については、はくりが起こらない限り食い違いを起こさないと考え、ここでは連続の条件を満たしているとした。

図 13 に完全接合の場合と界面のばね要素の定数を 1.0×10^5 N/m としたときの震央での変位速度波形とそれぞれの周波数スペクトルを示す。

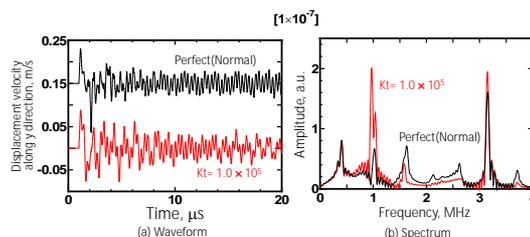


図 13 完全接合（黒線）と接着性状が悪い場合（赤線）での ZGV ラム波とその周波数スペクトル

いずれの場合、0.5 μ s および 1 μ s 近傍はそれぞれ直接伝搬してきた縦波および横波であり、それ以降は板単体の場合と同様に多重反射とモード変換によって表れたパルス列であり、6 μ s 以降は周期性の高い振動が観察されており、それらの振幅には大きな違いはなかった。また、界面接着が弱いモデルでは低周波成分がやや強く観察されている。また、スペクトルでもほぼ同じ周波数にピークが観察されており、界面接着が弱いモデルは低周波数側の 1 MHz 近傍のピークの振幅が大きくなっており、そのピークが分岐していた。また、0.4 MHz 近傍と 3.1 MHz 近傍のピークでは周波数は同じ値を示したが、それ以外のピークでは界面接着が弱いモデルの方が低周波数側にシフトしていた。つまり、ZGV ラ

△波の周波数は界面せん断剛性の低下にもなって低下するが、モードごとに界面せん断剛性に対する感度が異なるっており、実験結果と定性的に一致する結果を得ることができた。

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 2 件)

H.Cho, Y. Yaguchi and H. Ito, Characterization of the bond quality of adhesive plates utilizing zero-group-velocity Lamb waves measured by a laser ultrasonics technique, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 1, Article ID 14-00335, DOI: 10.1299/mej.14-00335, (2015) 査読有

H.Cho, Y. Hara and T. Matsuo, Evaluation of the thickness and bond quality of three layered media using Zero-group-velocity Lamb waves, Journal of physics conference series Vol.502, PaperNo.012023, DOI: 10.1088 /1742-6596/520/1/012023 (2014) 査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

長 秀雄、数値計算を用いた接着接合材における Zero-group-velocity Lamb 波の振動形態の評価、日本機械学会第 23 回機械材料・材料加工技術講演会、2015 年 11 月 14 日、広島県・広島市

H.Cho, Y. Yaguchi and H. Ito, Characterization of the bond quality of adhesive plates utilizing zero-group-velocity Lamb waves measured by a laser ultrasonics technique, 2014 international conference on material and processing, Detroit USA, 2014 年 6 月 9 日～6 月 13 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長 秀雄 (Hideo CHO)

青山学院大学・理工学部機械創造工学科・教授

研究者番号：60296382