

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06749

研究課題名（和文）界面に沿って伝搬する超音波を用いた接着界面の性状評価

研究課題名（英文）Evaluation of bond quality of an adhesive joint by the interface waves

研究代表者

長 秀雄（Cho, Hideo）

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：異種材料の高分子接着剤による接合の状況を評価するために接合界面に沿って伝播する超音波の基礎的な伝搬挙動と接着層の変化に伴う伝搬速度および振幅をガラス板を使ったモデル試験片を用いて評価した。界面波には2つの異なる伝搬モード（対称および非対称モード）が存在することが確認でき、それらの波動は分散を示していることが分かった。また、伝搬に伴う減衰は対称モードの減衰が大きいため広範囲の接着部を評価するためには非対称モードが有用であることが分かった。また、特に低周波数成分非対称モードは接着層の変化に対してその振幅や速度の変化が大きいことが確認でき、低周波の非対称モードが検査には有用であろう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物の軽量化や高強度化には異なる特性を有する材料を組み合わせたマルチマテリアル設計が必要であるが、異なる材料（例えば金属と繊維強化型複合材料）ではスポット溶接などの従来の接合技術が使用できない。そのため様々な接合方法が検討されているが、その中でも高分子接着剤による接合は1)接着が容易、2)軽量、3)接着部が高剛性などの理由から期待が大きい。有効な検査手段が確立されていない。そのような状況のなか本研究は接着部全体の健全性を短時間でスクリーニングできる可能性を有しており、構造物の高強度・軽量化に資する内容である。

研究成果の概要（英文）：Basic propagation behavior of the interface waves propagating in the bonding layer sandwiched by dissimilar materials (glass and aluminum blocks) was evaluated by observing the waves directly. The interface waves possessed two modes (symmetric and anti-symmetric modes) with different propagation velocity and attenuation coefficients. Large attenuation in the symmetric mode was observed. The propagation velocity and amplitude of anti-symmetric mode depend on bonding condition and should be efficient for inspecting quality of bonding condition.

研究分野：非破壊評価，超音波計測

キーワード：接着性状評価 超音波 非破壊検査 異種接合材料 高分子接着剤

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高分子接着剤による接合は融点の異なる材料、たとえば金属とCFRP(炭素繊維強化型複合材料)などの接着を容易にし、広い面積での接合を可能とすることから接合部の剛性の向上も期待できる。このように高分子接着技術は、複数の素材用いた構造材の使用によるマルチマテリアル化による構造の高強度・軽量化のためには欠くことのできない技術であるが、高分子接着剤は温度や湿度、紫外線によって特性が変化することが知られている。そのため、接着性状を評価できる方法の確立が望まれている。接着部は被接着部材によって覆われているため目視による検査が難しい。X線などによる評価は空孔などの密着部は比較的容易に評価できるが、接着性状もしくは接着強度を評価することはできない。一方で縦波や横波などのバルク波の接着面での反射強度や波形の歪みから接着状態を評価する試みは行われているが、広い面積に渡る接着部を短時間で評価することは難しいうえ、接着状態による反射強度の変化や波形の歪みはわずかであり、現場での計測手法にはなりにくい。そのため広い接着部の性状を短時間で評価できる手法の開発が望まれている。

2. 研究の目的

広い面積を有する接着部を短時間で評価するためには接着界面に沿って伝播する超音波(界面波)を用いる必要がある。しかし、界面波には2つの伝搬モードが存在することが報告されているが、その詳細な伝搬挙動については不明な部分も多い。そこで研究では、界面波の伝搬挙動を解明することを目的としガラスブロックと金属ブロックを高分子接着剤で接合した異種接合モデル試験片中を伝搬する界面波をレーザードップラ振動計を用いて直接計測することを試みた。また、界面波の二つの伝搬モードの特長を詳細に検討し、接着性状と各モードの伝搬挙動の関連について検討することで接着性状を評価する可能性を検討した。

3. 研究の方法

図1に界面波を計測するための実験装置を示す。試験片は上基板をガラス板、下基板をA5052板とし、2液混合型高分子系接着剤(主剤:エポキシ樹脂、硬化剤:脂肪族ポリアミン)を用いて室温で接着して作成した。接着層の厚さは0.1 mmである。界面波は下側Al基板の左端に設置した周波数1 MHzの斜角探触子(入射角64.9°)によって表面波を励起し、接着界面に入射することで励起した。なお、図中左上に示した波形は、界面到達前の表面波の波形である。界面波の検出には、3軸ステージ上に設置されたレーザードップラ振動計を用いて図1に示す7点(A,B,C:界面波、D:表面波)で計測を行った。その際、界面波はそれぞれの検出点位置で界面の上下面を計測した。なお、計測位置のガラス表面には薄い金をスプッターリングによって作成し、ドップラ振動計のプローブ光のハーフミラーとなるようにした。

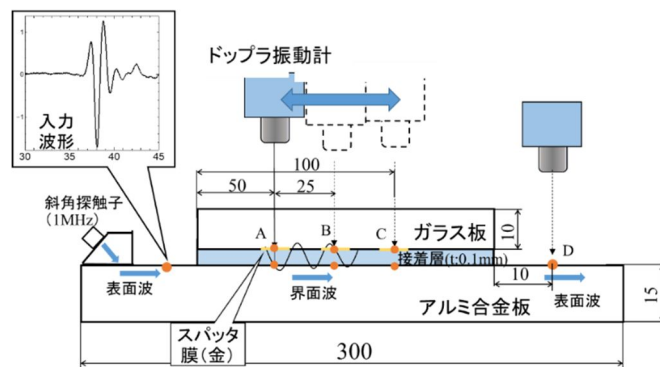


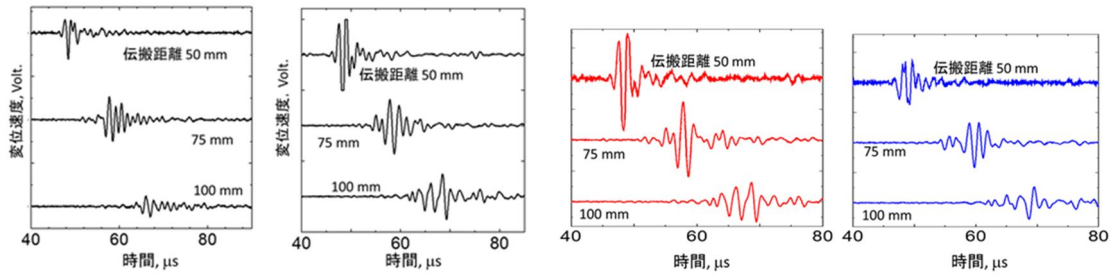
図1 異種接着接合材をモデル化したガラス/Al板接合試験体を用いた界面波の直接間接による伝搬挙動の評価のための実験装置

4. 研究成果

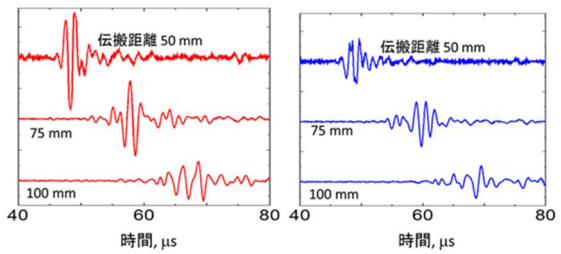
(1) 界面波の伝搬波形の計測と減衰の評価

図2にガラス/Al接合試験片の各検出位置における界面上および下側での波形を示す。界面上下面で検出された波動は同じ伝搬距離でも異なっていた。また、伝搬距離が長くなるにしたがって振幅は小さくなっているが、その度合いは必ずしも伝搬距離に対応していない。これは界面波には2つの伝搬モード(対称モード(S)、非対称(A)モード)が存在し、それぞれのモードの伝搬速度差は小さいうえ、伝搬速度は周波数依存性を示すことから2つの異なるモードの干渉の結果として観測されたと考えられる。そこで、それぞれのモードの振動特性を利用して各モードの抽出を試みた。具体的には対称モードは上下の界面での振動の差を、非対称モードは和を求めることで抽出を行った。図3に抽出後の各モードの波形を示す。それぞれのモードにおいて振幅は伝搬距離とともに小さくなり、波束も広がっている。また、伝搬距離100 mmの波形では低周波数成分が早く検出されている様子が明瞭に観察できた。また、振幅はAモードの方が大きく、Sモードでは伝搬に伴って低周波数成分が著しく小さくなっている様子が観察された。そこで、伝搬距離50 mmと100 mmの波形を用いて各モードの減衰率の周波数依存性を評価した。その結果を図4に示す。Aモードの減衰係数は広い周波数帯でほぼ0であるが、Sモードの減衰

はAモードよりも大きく、その傾向は低周波数域で顕著であった。界面波は接着界面および接着層内にエネルギーを集中させて伝搬しており、その特性は界面の性状や接着層自身の特性を反映すると期待できることが実験的にも明らかになった。さらに、長距離伝搬した後の界面波の低周波数成分では、そのほとんどの成分がAモードになると予想されることから検査には低周波数帯の非対称モードを用いたほうがよいと考えられる。



(a) ガラス側界面 (b) AI 板側界面
図2 ガラス側およびAI板側界面で計測した界面波の波形



(a) 非対称モード (b) 対称モード
図3 図2の波形から抽出した界面波の各モードの波形

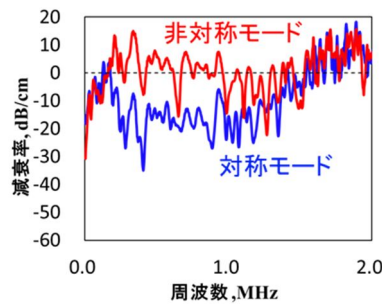


図4 抽出した界面波の各モードの減衰係数の周波数依存性

(2) 接着剤層の硬化過程における界面波の伝搬挙動

硬化過程では界面を透過したのちの界面から10 mm離れた位置の下側基材での表面の面外方向の変位速度を検出した。測定は接着開始から1時間おきに24時間計測した。図5に0.5時間、13時間、18時間後の検出波形を示す。いずれの時間においても波束は長くなっており、界面を伝搬したことによる分散の影響が観察された。振幅は硬化時間との相関はなかった。なお、目視や触診で硬化剤を手で触ったところ13時間~14時間ぐらいで接着剤はほぼ硬化していた。また、18時間以降は波形に大きな変化は観察されなかった。低周波帯における波動の変化を検討するためウェーブレット変換によって周波数200 kHz~800 kHz帯の成分を100 kHzごとに抽出した。図6にウェーブレット変換によって抽出した400 kHzの成分の硬化過程における波形を示す。硬化初期には2つのピークが観察されるが、その後2つのピークが歪みはじめ、触診で硬化が終了したと思われる13~14時間後には単一のピークになり、その後は振幅が

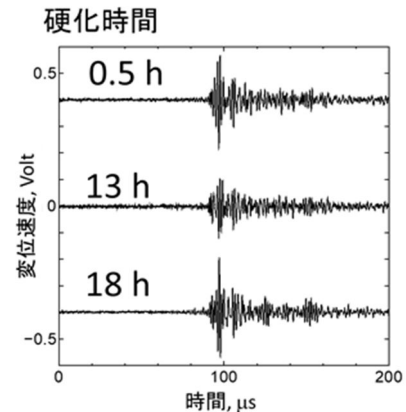


図5 硬化中の高分子接着層を通過した後の検出波形

時間とともにわずかに低下していた。接着層の状態が大きく変化する硬化初期に波形も大きく変化しており、界面波が接着層や接着界面の状態に敏感であることが確認できた。図7にウェーブレット変換後の各周波数成分から求めた硬化過程における振幅および群速度の変化を示す。図中の縦の点線は触診によって硬化したと考えられるタイミングを示している。振幅は硬化初期では硬化とともに低下する傾向になるが、200 kHzと600 kHzでは硬化後大きくなり、400 kHzでは硬化前から上昇し始めて、硬化後に低下していた。一方群速度は振幅とはおおむね逆の傾向をしていた。振幅は接着層の粘性に、群速度は弾性的な特性を反映していると考えられる。一般に粘性は硬化に伴い低下し、弾性的な性質は上昇すると考えられる。硬化初期での振幅の低下は、硬化に伴って下側基材のエネルギーが接着層に漏洩することで低下したと考えられ、硬化後ではさらに重合が進み、減衰が低下したためと予想され、群速度の変化は硬化に伴う弾性率の上昇に対応すると考えられるが、周波数帯によっては異なる変化をしている。今後はこのような複雑な変化が起こるのかを検討したいと考えているが、いずれにしても界面波は接着層の変化に対応してその挙動が変化することから接着層やその界面の評価への適用が期待できる。

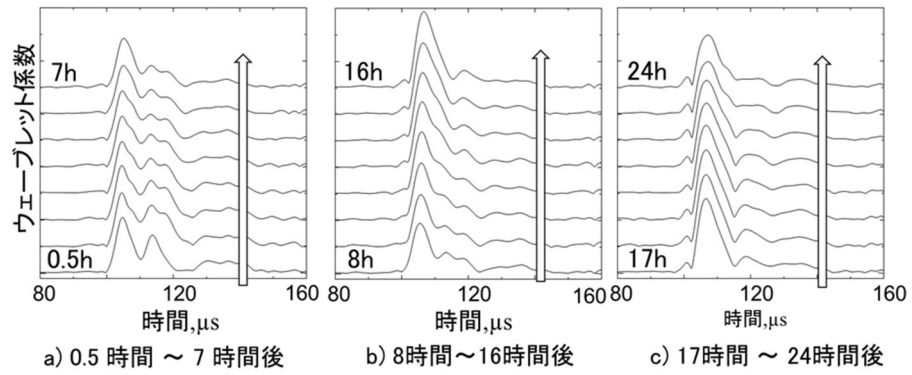


図 6 ウェーブレット変換によって抽出した周波数 400 kHz の界面波成分の経過時間変化

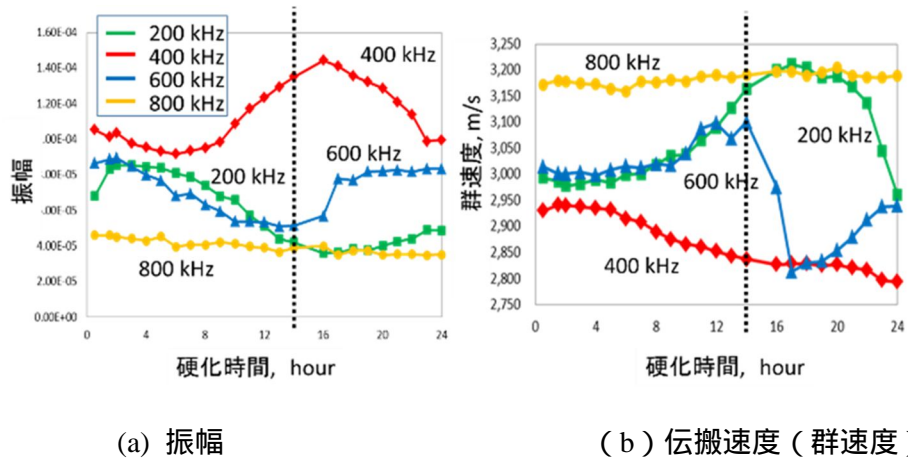


図 7 硬化過程における界面波の振幅および伝搬速度 (群速度) の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Cho, K. Okamura and K. Nishimiya
2. 発表標題 Estimation of bonding quality of polymer glue agent with interface waves for identical and dissimilar bonding components
3. 学会等名 The 5th Asian Symposium on Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長 秀雄, 岡村憲利, 西宮康治朗
2. 発表標題 接着界面を伝搬する超音波の伝搬挙動の評価とそれを用いた硬化過程の評価
3. 学会等名 第50回応力・ひずみ計測と強度評価のシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長 秀雄
2. 発表標題 ガラスモデル試験片を用いた接着界面に沿って伝搬する波動の直接観察とそれを用いた接着性状評価
3. 学会等名 日本機械学会 第24回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長 秀雄, 大貫光星, 西宮康治朗
2. 発表標題 接着接合薄板におけるZero-group-velocity Lamb波の伝搬挙動の可視化
3. 学会等名 第27回機械材料・材料加工部門技術講演会 (M&P2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長 秀雄, 大貫光星, 西宮康治朗
2. 発表標題 光弾性法を用いた高分子接合ガラス板を伝搬するラム波の伝搬挙動と接着性状の評価
3. 学会等名 日本実験力学会2019年度年次講演会
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
--	---------------------------	-----------------------	----