

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7420344号
(P7420344)

(45)発行日 令和6年1月23日(2024.1.23)

(24)登録日 令和6年1月15日(2024.1.15)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 N 29/12 (2006.01)

G 0 1 N 29/12

G 0 1 N 29/44 (2006.01)

G 0 1 N 29/44

請求項の数 12 (全23頁)

(21)出願番号	特願2019-222750(P2019-222750)	(73)特許権者	000006208
(22)出願日	令和1年12月10日(2019.12.10)		三菱重工業株式会社
(65)公開番号	特開2021-39082(P2021-39082A)		東京都千代田区丸の内三丁目2番3号
(43)公開日	令和3年3月11日(2021.3.11)	(73)特許権者	504132272
審査請求日	令和4年7月11日(2022.7.11)		国立大学法人京都大学
(31)優先権主張番号	特願2019-159852(P2019-159852)		京都府京都市左京区吉田本町3番地1
(32)優先日	令和1年9月2日(2019.9.2)	(73)特許権者	593006630
(33)優先権主張国・地域又は機関			学校法人立命館
	日本国(JP)		京都府京都市中京区西ノ京東堀尾町8番地
特許法第30条第2項適用	日本非破壊検査協会 超音波部門 第26回超音波による非破壊評価シンポジウム	(74)代理人	110002147
開催日	平成31年1月31日		弁理士法人酒井国際特許事務所
(出願人による申告)平成28年度、国立研究開発法人新エネルギー・産業総合開発機構、次世代構造部材創製・加工技術開発委託事業、「高レート設計・製造技術		(72)発明者	加茂 宗太
	最終頁に続く		東京都千代田区丸の内三丁目2番3号
			三菱重工業株式会社内
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 接着層評価システム及び接着層評価方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、
前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、
前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、
前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価し、
前記弾性波発生装置は、前記評価対象物において超音波を発生させ、前記評価対象物へ向けて前記超音波を照射する超音波照射装置であり、
前記弾性波検出装置は、前記評価対象物で前記超音波が反射される反射波を検出する超音波検出装置であり、
前記超音波照射装置及び前記超音波検出装置は、前記評価対象物の前記超音波が反射される側に設けられ、
前記制御装置は、前記実測値の前記周波数特性となるノッチ周波数に、前記理論値の前記周波数特性となるノッチ周波数を、前記理論モデルにおける前記接着層に関するパラメータを変化させて合わせ込むことで、前記接着層に関するパラメータを導出し、導出した前記接着層に関するパラメータが、健全な接着を形成している時の前記接着に関するパラメータよりも下回っている場合、前記接着層は弱接着を有すると評価する接着層評価シス

10

20

テム。

【請求項 2】

前記制御装置は、

前記評価対象物の代わりに配置された反射体によって反射された前記超音波である参照波と、前記超音波検出装置により検出した前記超音波とに基づいて、前記超音波の周波数特性の実測値を解析する請求項 1 に記載の接着層評価システム。

【請求項 3】

接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、
前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、
前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、
前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価し、
前記弾性波発生装置は、前記評価対象物において超音波を発生させ、前記評価対象物へ向けて前記超音波を照射する超音波照射装置であり、
前記弾性波検出装置は、前記超音波が前記評価対象物を透過した透過波を検出する超音波検出装置であり、
前記超音波照射装置及び前記超音波検出装置は、前記評価対象物を挟んで両側に設けられ、
前記制御装置は、前記実測値の前記周波数特性となるピーク周波数に、前記理論値の前記周波数特性となるピーク周波数を、前記理論モデルにおける前記接着層に関するパラメータを変化させて合わせ込むことで、前記接着層に関するパラメータを導出し、導出した前記接着層に関するパラメータが、健全な接着を形成している時の前記接着に関するパラメータよりも下回っている場合、前記接着層は弱接着を有すると評価する接着層評価システム。

10

20

【請求項 4】

前記制御装置は、

前記評価対象物を配置せずに検出した前記超音波である参照波と、前記超音波検出装置により検出した前記超音波とに基づいて、前記超音波の周波数特性の実測値を解析する請求項 3 に記載の接着層評価システム。

30

【請求項 5】

前記評価対象物は、前記接着層と、前記接着層により接着される被着体と、を有し、
前記超音波照射装置は、前記接着層の界面に対して前記超音波を垂直方向に照射し、
前記評価対象物に関する理論モデルは、前記接着層をスプリング界面で前記被着体に結合した理論モデルであり、
前記スプリング界面は、前記垂直方向における成分の剛性が設定されており、
前記制御装置は、剛性マトリックス法を用いて前記理論モデルに基づく前記超音波の周波数特性の理論値を算出する請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の接着層評価システム。

【請求項 6】

前記評価対象物は、前記接着層と、前記接着層により接着される被着体と、を有し、
前記超音波照射装置は、前記接着層の界面に直交する垂直方向に対して傾斜する傾斜方向に前記超音波を照射し、
前記評価対象物に関する理論モデルは、前記接着層をスプリング界面で前記被着体に結合した理論モデルであり、
前記スプリング界面は、前記垂直方向における成分の剛性と、前記界面の面内方向における成分の剛性とが設定されており、
前記制御装置は、剛性マトリックス法を用いて前記理論モデルに基づく前記超音波の周波数特性の理論値を算出する請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の接着層評価システム。

40

【請求項 7】

50

前記評価対象物は、前記接着層を介して２つの前記被着体が接着され、

前記理論モデルは、一方の前記被着体と前記接着層との間を第１のスプリング界面で結合し、他方の前記被着体と前記接着層との間を第２のスプリング界面で結合し、

前記第１のスプリング界面及び前記第２のスプリング界面の少なくとも一方において設定される剛性は、健全な接着であるとされる剛性として設定される請求項５または６に記載の接着層評価システム。

【請求項８】

接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、
前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、
前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、
前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価し、
前記弾性波発生装置は、前記評価対象物において超音波を発生させ、前記評価対象物へ向けて前記超音波を照射する超音波照射装置であり、
前記弾性波検出装置は、前記評価対象物で前記超音波が反射される反射波を検出する超音波検出装置であり、
前記超音波照射装置及び前記超音波検出装置は、前記評価対象物の前記超音波が反射される側に設けられ、
前記評価対象物は、前記接着層と、前記接着層により接着される被着体と、を有し、
前記超音波照射装置は、前記接着層の界面に対して前記超音波を垂直方向に照射し、
前記評価対象物に関する理論モデルは、前記接着層をスプリング界面で前記被着体に結合した理論モデルであり、
前記スプリング界面は、前記垂直方向における成分の剛性が設定されており、
前記制御装置は、剛性マトリックス法を用いて前記理論モデルに基づく前記超音波の周波数特性の理論値を算出する接着層評価システム。

10

20

【請求項９】

接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、
前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、
前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、
前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価し、
前記弾性波発生装置は、前記評価対象物において超音波を発生させ、前記評価対象物へ向けて前記超音波を照射する超音波照射装置であり、
前記弾性波検出装置は、前記超音波が前記評価対象物を透過した透過波を検出する超音波検出装置であり、
前記超音波照射装置及び前記超音波検出装置は、前記評価対象物を挟んで両側に設けられ、
前記評価対象物は、前記接着層と、前記接着層により接着される被着体と、を有し、
前記超音波照射装置は、前記接着層の界面に対して前記超音波を垂直方向に照射し、
前記評価対象物に関する理論モデルは、前記接着層をスプリング界面で前記被着体に結合した理論モデルであり、
前記スプリング界面は、前記垂直方向における成分の剛性が設定されており、
前記制御装置は、剛性マトリックス法を用いて前記理論モデルに基づく前記超音波の周波数特性の理論値を算出する接着層評価システム。

30

40

【請求項１０】

接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、

50

前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、
前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、
前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価し、
前記弾性波発生装置は、前記評価対象物において超音波を発生させ、前記評価対象物へ向けて前記超音波を照射する超音波照射装置であり、
前記弾性波検出装置は、前記評価対象物で前記超音波が反射される反射波を検出する超音波検出装置であり、
前記超音波照射装置及び前記超音波検出装置は、前記評価対象物の前記超音波が反射される側に設けられ、
前記評価対象物は、前記接着層と、前記接着層により接着される被着体と、を有し、
前記超音波照射装置は、前記接着層の界面に直交する垂直方向に対して傾斜する傾斜方向に前記超音波を照射し、
前記評価対象物に関する理論モデルは、前記接着層をスプリング界面で前記被着体に結合した理論モデルであり、
前記スプリング界面は、前記垂直方向における成分の剛性と、前記界面の面内方向における成分の剛性とが設定されており、
前記制御装置は、剛性マトリックス法を用いて前記理論モデルに基づく前記超音波の周波数特性の理論値を算出する接着層評価システム。

10

20

【請求項 1 1】

接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、
前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、
前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、
前記制御装置は、
前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価し、
前記弾性波発生装置は、前記評価対象物において超音波を発生させ、前記評価対象物へ向けて前記超音波を照射する超音波照射装置であり、
前記弾性波検出装置は、前記超音波が前記評価対象物を透過した透過波を検出する超音波検出装置であり、
前記超音波照射装置及び前記超音波検出装置は、前記評価対象物を挟んで両側に設けられ、
前記評価対象物は、前記接着層と、前記接着層により接着される被着体と、を有し、
前記超音波照射装置は、前記接着層の界面に直交する垂直方向に対して傾斜する傾斜方向に前記超音波を照射し、
前記評価対象物に関する理論モデルは、前記接着層をスプリング界面で前記被着体に結合した理論モデルであり、
前記スプリング界面は、前記垂直方向における成分の剛性と、前記界面の面内方向における成分の剛性とが設定されており、
前記制御装置は、剛性マトリックス法を用いて前記理論モデルに基づく前記超音波の周波数特性の理論値を算出する接着層評価システム。

30

40

【請求項 1 2】

接着層を有する評価対象物からの弾性波を検出するステップと、
検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価するステップと、を備え、
前記パラメータを評価するステップは、

50

検出した前記弾性波と、前記弾性波を補正するための参照波とをそれぞれ周波数解析して周波数特性を算出するステップと、

前記周波数解析によって得られた前記弾性波と前記参照波とのスペクトルの強度比に基づいて、前記周波数特性である弾性体係数の実測値を算出するステップと、

算出した前記弾性体係数の実測値と、理論モデルに基づいて算出される前記弾性体係数の理論値とを比較して、前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価するステップと、を有する接着層評価方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、接着層評価システム及び接着層評価方法に関する。

【背景技術】

【0002】

接着層を有する試料に超音波を照射して、照射した超音波が接着層で反射した反射波を検出して、検出した反射波の時間波形に基づいて、接着層における接着不良を検出する技術が知られている（特許文献1参照）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開2015-125008号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

特許文献1の技術は、試料等の評価対象物を破壊することなく、接着層における接着不良、すなわち、評価対象物における接着層を挟む2枚の被着体の間の空隙を検出することができる。しかしながら、2枚の被着体の間に空隙を有さないものの、その接着強度が弱い弱接着を検出することができないという問題があった。また、従来の弱接着を検出する技術は、いずれも評価対象物の破壊を伴うものであったため、評価対象物を破壊することなく弱接着を検出することができないという問題があった。

【0005】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、評価対象物を破壊することなく、接着層を適切に評価することができる接着層評価システム及び接着層評価方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の接着層評価システムは、接着層を有する評価対象物において弾性波を発生させる弾性波発生装置と、前記評価対象物からの前記弾性波を検出する弾性波検出装置と、前記評価対象物の前記接着層に関するパラメータを評価する制御装置と、を備え、前記制御装置は、前記弾性波検出装置により検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価する。

【0007】

本発明の接着層評価方法は、接着層を有する評価対象物からの弾性波を検出するステップと、検出した前記弾性波の周波数特性の実測値と、前記評価対象物に関する理論モデルに基づいて算出される前記弾性波の周波数特性の理論値と、を比較し、比較結果に基づいて前記接着層に関するパラメータを評価するステップと、を備える。

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、評価対象物を破壊することなく、接着層を適切に評価することができる。

10

20

30

40

50

【図面の簡単な説明】

【 0 0 0 9 】

【図 1】図 1 は、実施形態 1 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。

【図 2】図 2 は、実施形態 1 に係る接着層評価方法のフローチャートである。

【図 3】図 3 は、図 2 の検出波評価ステップを説明するグラフの一例である。

【図 4】図 4 は、実施形態 1 に係る理論モデルの一例を示す説明図である。

【図 5】図 5 は、理論モデルを用いて算出された係数の理論値の一例を示すグラフである。

【図 6】図 6 は、実施形態 2 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。

【図 7】図 7 は、実施形態 3 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。

【図 8】図 8 は、実施形態 3 に係る理論モデルの一例を示す説明図である。

10

【図 9】図 9 は、実施形態 4 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 0 】

以下に、本発明に係る実施形態を図面に基づいて詳細に説明する。なお、この実施形態によりこの発明が限定されるものではない。また、下記実施形態における構成要素には、当業者が置換可能かつ容易なもの、あるいは実質的に同一のものが含まれる。さらに、以下に記載した構成要素は適宜組み合わせることが可能であり、また、実施形態が複数ある場合には、各実施形態を組み合わせることも可能である。

【 0 0 1 1 】

〔実施形態 1〕

20

図 1 は、実施形態 1 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。接着層評価システム 10 は、被着体 1 B と被着体 1 C とを接着する接着層 1 A を有する評価対象物 1 からの弾性波を検出して、評価対象物 1 の接着層 1 A に関するパラメータを評価する装置である。

【 0 0 1 2 】

具体的に、実施形態 1 の接着層評価システム 10 は、評価対象物 1 へ向けて弾性波としての超音波を照射し、評価対象物 1 から反射された超音波を検出して、接着層 1 A に関するパラメータを評価している。接着層 1 A に関するパラメータは、接着層 1 A の界面に関するパラメータ（以下、界面パラメータともいう）と、接着層 1 A の形状に関するパラメータ（以下、形状パラメータともいう）と、接着層 1 A の物性に関するパラメータ（以下、物性パラメータともいう）と、を含む。界面パラメータとしては、例えば、接着層 1 A の界面剛性であり、接着層評価システム 10 は、界面パラメータに基づいて、接着層 1 A が弱接着（Weak Bond、WB）であるか否かを評価している。また、形状パラメータとしては、例えば、接着層厚であり、接着層評価システム 10 は、形状パラメータに基づいて、接着層 1 A の厚みを評価している。さらに、物性パラメータとしては、例えば、接着層 1 A の音速、質量密度及び弾性率等であり、接着層評価システム 10 は、物性パラメータに基づいて、接着層 1 A の物性を評価している。なお、実施形態 1 では、接着層 1 A に関するパラメータとして、界面剛性（弱接着であるか否か）を評価する場合について説明するが、上記のように、接着層 1 A に関するパラメータとして、接着層厚を評価してもよいし、界面剛性及び接着層厚の両方を評価してもよいし、界面剛性及び接着層厚以外のパラメータを評価してもよく、特に限定されない。

30

40

【 0 0 1 3 】

評価対象物 1 は、接着層 1 A と、接着層 1 A を介して接着された 2 つの被着体 1 B、1 C を含む。実施形態 1 では、被着体 1 B 及び被着体 1 C が共にアルミニウム片であり、接着層 1 A が高温耐性に優れた接着フィルムである。なお、接着層 1 A、被着体 1 B 及び被着体 1 C は、特に限定されず、いかなる種類の接着層 1 A 及び被着体 1 B、1 C によって形成された形態であってもよい。

【 0 0 1 4 】

接着層評価システム 10 は、図 1 に示すように、超音波照射装置 11 と、超音波検出装置 12 と、設置部 14 と、水槽 20 と、制御装置 30 と、を備える。

50

【 0 0 1 5 】

超音波照射装置 1 1 は、照射波 1 1 B として、例えば一般的な超音波探傷で使用される 1 0 M H z の超音波を照射しており、超音波を照射する照射面 1 1 A を有する。超音波検出装置 1 2 は、超音波である反射波 1 2 B を検出する検出面 1 2 A を有する。本実施形態では、超音波照射装置 1 1 と超音波検出装置 1 2 とは、一体となって超音波探触子 1 3 を構成しており、さらに、超音波探触子 1 3 を構成する超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A と超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A とが一体となっていてよい。また、超音波照射装置 1 1 と超音波検出装置 1 2 とは、一体となって超音波探触子 1 3 を構成する形態に限定されず、別々に設けられていてもよい。

【 0 0 1 6 】

設置部 1 4 は、評価対象物 1 を設置する部位であり、評価対象物 1 を固定する図示しない固定部材や、評価対象物 1 を嵌め込む図示しない窪み等が適宜設けられている。設置部 1 4 は、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A と対向する位置に設けられている。また、設置部 1 4 は、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A と対向する位置に設けられている。このため、超音波探触子 1 3 (超音波照射装置 1 1 及び超音波検出装置 1 2) は、評価対象物 1 の超音波が反射される側に設けられる。また、設置部 1 4 は、評価対象物 1 の接着層 1 A の界面に対して、超音波が垂直方向に照射されるように、また、超音波が垂直方向に反射されるように、評価対象物 1 を設置している。このため、実施形態 1 では、照射波 1 1 B の入射角度と反射波 1 2 B の射出角度とは、評価対象物 1 の接着層 1 A の接着界面に対して、いずれも 0 度となっている。

【 0 0 1 7 】

水槽 2 0 は、超音波を伝達する媒体の一例である水 2 1 を貯留する。水槽 2 0 は、例えば、矩形状のケースが用いられる。本実施形態では、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A と、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A と、設置部 1 4 とが、水槽 2 0 の内側の水 2 1 の貯留領域内に設けられており、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A とは反対側の一部分と、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A とは反対側の一部分と、制御装置 3 0 とが、水槽 2 0 の外側に設けられている。なお、水槽 2 0 は、この形態に限定されず、少なくとも超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A 及び超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A を含む照射波 1 1 B の経路及び反射波 1 2 B の経路を、内側の水 2 1 の貯留領域内に設けていれば、どのような形態であってもよい。

【 0 0 1 8 】

接着層評価システム 1 0 は、超音波照射装置 1 1 、超音波検出装置 1 2 、設置部 1 4 及び水槽 2 0 が以上のような配置をしている。このため、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A から照射波 1 1 B が照射される。すると、照射波 1 1 B は、水槽 2 0 に貯留された水 2 1 を媒介として、評価対象物 1 に照射される。照射波 1 1 B は、評価対象物 1 において一部が反射して反射波 1 2 B となり、反射波 1 2 B は、超音波検出装置 1 2 へ向かって伝播する。このため、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A は、反射波 1 2 B を検出する。

【 0 0 1 9 】

また、接着層評価システム 1 0 では、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A と、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A と、設置部 1 4 に設置される評価対象物 1 の接着層 1 A と、が、互いに平行になるように配設されている。つまり、接着層評価システム 1 0 では、評価対象物 1 の接着層 1 A の界面に対して、超音波が垂直方向に照射されるように、また、超音波が垂直方向に反射されるように、評価対象物 1 が配置されている。このため、接着層評価システム 1 0 は、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A から、接着層 1 A に対して垂直方向に照射波 1 1 B を照射する。また、接着層評価システム 1 0 は、評価対象物 1 からの反射波 1 2 B が、照射波 1 1 B と真逆の方向に伝播し、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A で反射波 1 2 B を検出する。

【 0 0 2 0 】

制御装置 3 0 は、接着層評価システム 1 0 を制御するコンピュータシステムを含む。図 1 に示すように、制御装置 3 0 は、C P U (Central Processing Unit) のようなマイ

10

20

30

40

50

クロプロセッサを含む処理部 31 と、ROM (Read Only Memory) 又はストレージのような不揮発性メモリ及び RAM (Random Access Memory) のような揮発性メモリを含む記憶部 32 と、信号及びデータを入出力可能な入出力回路を含む入出力インターフェース 33 と、を有する。

【0021】

制御装置 30 の処理部 31 は、図 1 に示すように、超音波照射制御部 34 と、超音波検出制御部 35 と、検出波評価部 36 と、を有する。超音波照射制御部 34、超音波検出制御部 35 及び検出波評価部 36 は、いずれも、処理部 31 が、接着層 1A を評価するための接着層評価プログラムを実行することにより、実現される機能部である。制御装置 30 の処理部 31 の詳細な機能、すなわち、超音波照射制御部 34、超音波検出制御部 35 及び検出波評価部 36 の詳細な機能は、各部の構成の詳細な説明の箇所に加えて、後述する実施形態に係る接着層評価方法の詳細な説明の箇所でも説明する。

10

【0022】

超音波照射制御部 34 は、超音波照射装置 11 を制御して、超音波照射装置 11 に照射面 11A から照射波 11B を照射させる。

【0023】

超音波検出制御部 35 は、超音波検出装置 12 を制御して、超音波検出装置 12 に検出面 12A で反射波 12B を検出させる。超音波検出制御部 35 は、実施形態 1 では、超音波検出装置 12 に、設置部 14 に設置された接着層 1A を有する評価対象物 1 によって反射された超音波である反射波を検出させる。また、超音波検出制御部 35 は、実施形態 1

20

【0024】

検出波評価部 36 は、超音波検出制御部 35 が超音波検出装置 12 に検出させた反射波の実測値と、評価対象物 1 に関する理論モデルに基づいて算出される反射波の理論値とを比較して、評価対象物 1 の接着層 1A が健全な接着（完璧な接着 (Perfect Bond、PB) と考える) を形成しているか否か、すなわち、評価対象物 1 の接着層 1A が弱接着を有するか否かを評価する。

【0025】

ここで、評価対象物 1 に関する理論モデルとは、評価対象物 1 をモデル化した解析モデルのことである。検出波評価部 36 は、評価対象物 1 に関する理論モデルとして、接着層 1A をスプリング界面で結合した理論モデルを採用し、剛性マトリックス法を用いて算出処理をすることが好ましい。

30

【0026】

また、健全な接着とは、例えば、評価対象物 1 を複数作製して所定の破壊試験を実施して得られた接着強度が上位 5% に含まれる場合に接着層 1A が形成している接着を言うこととする。

【0027】

検出波評価部 36 は、周波数解析部 37 と、係数算出部 38 と、係数比較部 39 と、を有する。周波数解析部 37、係数算出部 38 及び係数比較部 39 は、いずれも、検出波評価部 36 と同様に、処理部 31 が、接着層 1A を評価するための接着層評価プログラムを実行することにより、実現される機能部である。検出波評価部 36 の詳細な機能、すなわち、周波数解析部 37、係数算出部 38 及び係数比較部 39 の詳細な機能は、各部の構成の詳細な説明の箇所に加えて、後述する実施形態に係る接着層評価方法の詳細な説明の箇所でも説明する。

40

【0028】

周波数解析部 37 は、反射波 12B と、反射体によって反射された超音波である参照波とをそれぞれ周波数解析する。周波数解析部 37 は、より詳細には、時間関数である反射波 12B と参照波とのそれぞれについて、高速フーリエ変換を施すことで、振幅スペクトルを取得する。

50

【 0 0 2 9 】

係数算出部 38 は、周波数解析部 37 によって得られた反射波 12 B と参照波との振幅スペクトルから、反射波 12 B と参照波との振幅スペクトルの強度比を算出し、この強度比に基づいて、周波数特性としての反射係数 R の実測値を算出する。係数算出部 38 は、より詳細には、周波数 f ごとに、反射波 12 B の振幅スペクトルの強度から参照波の振幅スペクトルの強度を除すことにより、反射係数 R の実測値の周波数関数を取得する。なお、反射係数 R は、その性質上、超音波が全く透過しない時（超音波が全て反射する時）に 1 をとり、超音波が完全に透過する時（超音波が全く反射しない時）に 0 を取り、0 以上 1 以下の値を取る係数である。なお、反射係数 R は、理論上においては、1 以下となるが、実測上においては、1 以上の値を取り得る。

10

【 0 0 3 0 】

係数比較部 39 は、係数算出部 38 が算出した反射係数 R の実測値と、理論モデルに基づいて算出される反射係数 R の理論値とを比較して、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを評価する。

【 0 0 3 1 】

係数比較部 39 は、具体的に、検出される超音波が反射波 12 B であることから、係数算出部 38 が算出した反射係数 R の実測値が極小となる周波数 f と、接着層 1 A が弱接着を有せずに健全な接着をしていると仮定をした場合の理論モデルに基づいて算出される反射係数 R の理論値が極小となる周波数 f とを比較して、それらが所定の誤差の範囲内で一致する場合に、接着層 1 A は弱接着を有さない旨の評価をし、それらが所定の誤差を超えた有意差を有する場合に、接着層 1 A は弱接着を有する旨の評価をする。

20

【 0 0 3 2 】

また、以下において、反射係数 R の実測値の周波数関数及び反射係数 R の理論値の周波数関数の双方について、その値が極小となる周波数 f のことを、ノッチ周波数と称する。反射係数 R の実測値の周波数関数及び反射係数 R の理論値の周波数関数の双方とも、ノッチ周波数は、一般に複数存在する。

【 0 0 3 3 】

ここで、反射係数 R の実測値の周波数関数と反射係数 R の理論値の周波数関数とを比較及び対照する際に、反射係数 R のノッチ周波数を用いる理由は、評価対象物 1 において実際に起こり得る超音波の吸収及び散乱を完全に考慮しないことで計算容量を低減した理論モデルを用いているため、反射係数 R の絶対値自体には実測値と理論値との間で所定の誤差を超えて差異が生じ得るが、反射係数 R のノッチ周波数については実測値と理論値との間で所定の誤差を超えて差異が生じないことによる。

30

【 0 0 3 4 】

反射係数 R の実測値のノッチ周波数は、その一部が、接着層 1 A の界面パラメータに依らず一定であり、その他の一部が、接着層 1 A の界面パラメータに依って一対一の関係で変化する傾向を有する。また、反射係数 R の理論値のノッチ周波数は、接着層 1 A に関する界面パラメータに対して、反射係数 R の実測値のノッチ周波数が接着層 1 A の界面パラメータに対して示す傾向と同様の傾向を有する。これに鑑み、反射係数 R について生じ得る所定の誤差は、接着層 1 A の界面パラメータに依らず一定となるノッチ周波数において生じ得る差異に基づいて、予め適切に設定することができる。ここで、接着層 1 A に関する界面パラメータとは、スプリング界面で結合した理論モデルを採用した場合におけるスプリング界面のパラメータであり、接着層 1 A の接着強度を定量的に評価するものとなっている。なお、実施形態 1 では、接着層 1 A に関するパラメータとして、界面パラメータを適用したが、接着層 1 A の接着層厚を評価する場合、接着層 1 A の接着層厚に関する形状パラメータを適用してもよい。この場合、理論モデルにおいて、接着層厚 h_{ad} に関する形状パラメータを採用する（設定する）。また、接着層 1 A に関するパラメータとして、上記した界面パラメータ、形状パラメータ及び物性パラメータの全てを適用してもよい。この場合、物性パラメータとしては、例えば、接着層 1 A の音速、接着層 1 A の質量密度、接着層 1 A の弾性率に関するパラメータを採用し、理論モデルに適用する。

40

50

【 0 0 3 5 】

また、係数比較部 3 9 は、係数算出部 3 8 が算出した反射係数 R の実測値におけるノッチ周波数 f が、理論モデルに基づいて算出される反射係数 R の理論値におけるノッチ周波数 f と所定の誤差の範囲内で一致する時の、理論モデルにおける接着層 1 A に関するパラメータのパラメータ値を、評価に供した評価対象物 1 の接着層 1 A に関するパラメータのパラメータ値として算出する。

【 0 0 3 6 】

また、係数比較部 3 9 は、上記を合わせてより効率的に処理をすることができ、反射係数 R の実測値のノッチ周波数に、理論モデルにおける接着層 1 A に関するパラメータを変化させて反射係数 R の理論値のノッチ周波数を合わせ込むことで、接着層 1 A に関するパラメータを導出し、接着層 1 A に関するパラメータが、健全な接着を形成している時の接着層 1 A に関するパラメータよりも下回っている場合、接着層 1 A は弱接着を有すると評価することができる。

10

【 0 0 3 7 】

制御装置 3 0 の記憶部 3 2 は、制御装置 3 0 の処理部 3 1 で用いられる種々のデータを記憶している。制御装置 3 0 の記憶部 3 2 は、具体的には、評価対象物 1 に関するデータである接着層 1 A、被着体 1 B 及び被着体 1 C の材料及び厚み等の形状に関するデータ、超音波照射制御部 3 4 によって用いられる超音波照射装置 1 1 による照射波 1 1 B の超音波の周波数及び接着層 1 A の垂線に対する照射条件に関するデータ、超音波検出制御部 3 5 によって用いられる超音波検出装置 1 2 による反射波 1 2 B の検出条件に関するデータ、検出波評価部 3 6 の周波数解析部 3 7 によって用いられる高速フーリエ変換処理に関するデータ、検出波評価部 3 6 の係数算出部 3 8 によって用いられる反射係数 R の実測値の周波数関数の導出処理に関するデータ、検出波評価部 3 6 の係数比較部 3 9 によって用いられる理論モデルに関するデータ、及び、検出波評価部 3 6 の係数比較部 3 9 によって用いられる反射係数 R の実測値と反射係数 R の理論値との比較処理に関するデータ等を記憶している。なお、接着層 1 A、被着体 1 B 及び被着体 1 C の厚み等の形状に関するデータは、接着層 1 A に関するパラメータとして算出してもよい。

20

【 0 0 3 8 】

また、制御装置 3 0 の記憶部 3 2 は、制御装置 3 0 の処理部 3 1 で取得される種々のデータを記憶することができる。制御装置 3 0 の記憶部 3 2 は、具体的には、超音波検出制御部 3 5 によって取得される超音波検出装置 1 2 による反射波 1 2 B の検出データ及び参照波の測定データ、検出波評価部 3 6 の周波数解析部 3 7 によって取得される反射波 1 2 B の周波数関数のデータ及び参照波の周波数関数のデータ、検出波評価部 3 6 の係数算出部 3 8 によって取得される反射係数 R の実測値の周波数関数のデータ、検出波評価部 3 6 の係数比較部 3 9 によって算出される反射係数 R の理論値の周波数関数のデータ、及び、検出波評価部 3 6 の係数比較部 3 9 によって算出される評価対象物 1 の接着層 1 A に関するパラメータ等を記憶することができる。

30

【 0 0 3 9 】

制御装置 3 0 の入出力インターフェース 3 3 には、超音波照射装置 1 1 及び超音波検出装置 1 2 によって構成される超音波探触子 1 3 が接続される。制御装置 3 0 は、入出力インターフェース 3 3 を介して、超音波照射装置 1 1 及び超音波検出装置 1 2 を含む超音波探触子 1 3 を制御するとともに、超音波検出装置 1 2 による反射波 1 2 B の検出データを取得する。また、制御装置 3 0 の入出力インターフェース 3 3 には、不図示の入力装置が接続されていてもよい。制御装置 3 0 は、入出力インターフェース 3 3 を介して、処理部 3 1 の処理に使用する種々の情報の入力を当該入力装置から受け付けることができる。また、制御装置 3 0 の入出力インターフェース 3 3 には、不図示の表示装置が接続されていてもよい。処理部 3 1 の処理によって得られた種々の情報を出力して、文字、画像、動画等により、当該表示装置に表示させることができる。

40

【 0 0 4 0 】

次に、図 2 を参照して、接着層評価システム 1 0 による接着層評価方法について説明す

50

る。図 2 は、実施形態 1 に係る接着層評価方法のフローチャートである。接着層評価システム 10 によって実行される実施形態に係る接着層評価方法について、接着層評価システム 10 の処理部 31 における超音波照射制御部 34 と、超音波検出制御部 35 と、検出波評価部 36 の詳細な機能、並びに、検出波評価部 36 における周波数解析部 37、係数算出部 38 及び係数比較部 39 の詳細な機能と併せて、以下に説明する。

【0041】

実施形態 1 に係る接着層評価方法は、図 2 に示すように、反射波検出ステップ S11 と、参照波検出ステップ S12 と、検出波評価ステップ S13 と、を有する。

【0042】

反射波検出ステップ S11 は、接着層 1A を有する評価対象物 1 に超音波を照射し、評価対象物 1 において反射した超音波である反射波 12B の実測値を検出するステップである。

10

【0043】

反射波検出ステップ S11 では、具体的には、まず、図 1 に示すように、接着層 1A を有する評価対象物 1 を設置部 14 に設置した状態を形成する。反射波検出ステップ S11 では、次に、この状態下で、超音波照射制御部 34 が超音波照射装置 11 を制御して、超音波照射装置 11 に照射面 11A から、設置部 14 に設置した評価対象物 1 に向けて、照射波 11B を照射させる。そして、反射波検出ステップ S11 では、超音波検出制御部 35 が超音波検出装置 12 を制御して、超音波検出装置 12 に検出面 12A で反射波 12B を検出させる。これにより、反射波検出ステップ S11 では、超音波検出制御部 35 が、超音波検出装置 12 に、接着層 1A を有する評価対象物 1 の反射波 12B の実測値を検出させる。

20

【0044】

参照波検出ステップ S12 は、評価対象物 1 の代わりに設置した反射体から反射される超音波である参照波の実測値を検出するステップである。

【0045】

参照波検出ステップ S12 では、具体的には、まず、評価対象物 1 の代わりに反射体を設置部 14 に設置した状態を形成する。参照波検出ステップ S12 では、参照波検出ステップ S12 では、次に、この状態下で、超音波照射制御部 34 が超音波照射装置 11 を制御して、超音波照射装置 11 に照射面 11A から、設置部 14 に設置した反射体に向けて、照射波 11B を照射させる。そして、参照波検出ステップ S12 では、超音波検出制御部 35 が超音波検出装置 12 を制御して、超音波検出装置 12 に検出面 12A で反射波 12B を検出させる。これにより、参照波検出ステップ S12 では、超音波検出制御部 35 が、超音波検出装置 12 に、反射体から反射される超音波である参照波の実測値を検出させる。

30

【0046】

なお、参照波検出ステップ S12 は、以前に、超音波照射装置 11 及び超音波検出装置 12 の位置関係並びに水槽 20 に貯留された水 21 等が等しい条件下で、参照波の実測値を検出している場合、実施を省略して、以前に検出した参照波の実測値を再び使用に供してもよい。

40

【0047】

検出波評価ステップ S13 は、反射波検出ステップ S11 で検出した反射波 12B の実測値と評価対象物 1 に関する理論モデルに基づいて算出される反射波 12B の理論値とを比較して、接着層 1A が弱接着を有するか否かを評価するステップである。検出波評価ステップ S13 は、より詳細には、図 2 に示すように、周波数解析ステップ S21 と、反射係数算出ステップ S22 と、反射係数比較ステップ S23 と、弱接着有無判定ステップ S24 と、弱接着パラメータ算出ステップ S25 と、を有する。

【0048】

周波数解析ステップ S21 は、反射波検出ステップ S11 で得られた反射波 12B と、今回または以前の参照波検出ステップ S12 で得られた参照波とをそれぞれ周波数解析す

50

るステップである。

【 0 0 4 9 】

周波数解析ステップ S 2 1 では、具体的には、周波数解析部 3 7 が、時間関数である反射波 1 2 B と参照波とのそれぞれについて、高速フーリエ変換を施すことで、振幅スペクトルの強度の周波数関数を取得するステップである。

【 0 0 5 0 】

反射係数算出ステップ S 2 2 は、周波数解析ステップ S 2 1 で得られた反射波 1 2 B と参照波との振幅スペクトルの強度比に基づいて、評価対象物 1 から反射された反射波 1 2 B に関するパラメータである反射係数 R の実測値を算出するステップである。

【 0 0 5 1 】

反射係数算出ステップ S 2 2 では、具体的には、係数算出部 3 8 が、周波数 f ごとに、反射波 1 2 B の振幅スペクトルの強度から参照波の振幅スペクトルの強度を除すことにより、反射係数 R の実測値の周波数関数を取得する。

【 0 0 5 2 】

図 3 は、図 2 の検出波評価ステップを説明するグラフの一例である。図 3 のグラフは、横軸が周波数 f [単位 ; MHz]、縦軸が反射係数 R の 2 次元グラフである。図 3 のグラフは、参照波の振幅スペクトルの強度を除したときの反射波 1 2 B の反射係数 R の実測値である。反射係数算出ステップ S 2 2 では、係数算出部 3 8 が、例えば、図 3 において実線で示す反射係数 R の実測値の周波数関数曲線 4 1 を取得する。

【 0 0 5 3 】

反射係数比較ステップ S 2 3 は、反射係数算出ステップ S 2 2 で算出した反射係数 R の実測値と、理論モデルに基づいて算出される反射係数 R の理論値とを比較して、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを評価するステップである。

【 0 0 5 4 】

図 4 は、実施形態 1 に係る理論モデルの一例を示す説明図である。反射係数比較ステップ S 2 3 で使用する反射係数 R の理論値を算出する際に用いる理論モデルについて、図 4 を用いて、以下に説明する。

【 0 0 5 5 】

反射係数比較ステップ S 2 3 で係数比較部 3 9 が用いる理論モデルでは、評価対象物 1 は、図 4 に示すように、被着体 1 B と接着層 1 A との界面にスプリング界面 (第 1 のスプリング界面) 1 D が設けられ、接着層 1 A と被着体 1 C との界面にスプリング界面 (第 2 のスプリング界面) 1 E が設けられ、接着層 1 A を 2 箇所のスプリング界面 1 D , 1 E で結合したものとしている。この理論モデルでは、スプリング界面 1 D における接着界面剛性をバネ定数 K_{N1} [単位 ; MPa / nm] によって設定し、スプリング界面 1 E における接着界面剛性をバネ定数 K_{N2} [単位 ; MPa / nm] によって設定している。なお、これらのバネ定数 K_{N1} , K_{N2} は、その値が接着界面剛性そのものを表すという性質を持つパラメータである。また、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} は、スプリング界面 1 D , 1 E における接着界面剛性が、垂直方向における成分の剛性となるように設定されている。実施形態 1 では、このような理論モデルを採用しているので、超音波の反射波 1 2 B について、実際に弱接着の要因が発生しやすい接着層 1 A の両面に界面応力を設定して剛性解析する実施形態 1 にとって妥当性の高い計算手法を用いて、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを評価することができるため、現実 に 即した理論モデル及び計算手法に裏付けがなされた弱接着の検出を実行することができる。

【 0 0 5 6 】

また、反射係数比較ステップ S 2 3 では、実際の接着層 1 A を有する評価対象物 1 が剥離破壊をする際に、接着層 1 A と被着体 1 B との界面または接着層 1 A と被着体 1 C との界面で破壊する場合が多いことを考慮して、係数比較部 3 9 が、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} のうち一方のバネ定数 K_{N1} は健全な接着を形成しており、他方のバネ定数 K_{N2} は健全な接着または弱接着を形成しているものとして、この理論モデルを用いている。つまり、一方のバネ定数 K_{N1} は、健全な接着であるとされるバネ定数として設定され、固定された値

10

20

30

40

50

となる一方で、他方のバネ定数 K_{N2} は、健全な接着または弱接着であるとされるバネ定数として設定され、可変する値となる。なお、本発明では、理論モデルにおけるバネ定数 K_{N1} , K_{N2} の扱いはこの方法に限定されず、例えば、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} のうち他方のバネ定数 K_{N2} は健全な接着を形成しており、一方のバネ定数 K_{N1} は健全な接着または弱接着を形成しているものとして取り扱ってもよいし、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} とが共に同じ値であり、かつ、共に健全な接着または弱接着を形成しているものとして取り扱ってもよい。

【0057】

また、理論モデルにおけるバネ定数 K_{N1} , K_{N2} 等の設け方は上記した方法に限定されず、評価対象物 1 の性質に応じて適宜扱い方を変更してもよい。例えば、被着体 1 B と接着層 1 A との界面、及び、接着層 1 A と被着体 1 C との界面のいずれか一方のみにスプリング界面を設け、接着層 1 A を 1 箇所のスプリング界面で結合した理論モデルを用いてもよい。

10

【0058】

反射係数比較ステップ S 2 3 では、まず、係数比較部 3 9 が、上記した理論モデルに入力するための接着層 1 A、被着体 1 B 及び被着体 1 C の密度及び厚みの情報、超音波照射装置 1 1 による照射波 1 1 B の超音波の周波数の情報を、記憶部 3 2 より取得する。

【0059】

次に、反射係数比較ステップ S 2 3 では、係数比較部 3 9 が、接着層 1 A、被着体 1 B 及び被着体 1 C の密度及び厚みの情報と、照射波 1 1 B の超音波の周波数の情報を上記した理論モデルに入力して、剛性マトリックス法を用いて、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} と周波数 f と反射係数 R との間で成立する関係式を導出する。

20

【0060】

そして、反射係数比較ステップ S 2 3 では、係数比較部 3 9 が、理論モデルを用いて導出したバネ定数 K_{N1} , K_{N2} と周波数 f と反射係数 R との間で成立する関係式を用いて、バネ定数 K_{N1} に健全な接着を形成している場合の値を入力して固定し、予め設定した範囲内で周波数 f を逐次代入し、0 以上バネ定数 K_{N1} の設定値以下の範囲内でバネ定数 K_{N2} を逐次代入することで、予め設定した範囲内の周波数 f ごと、かつ、0 以上バネ定数 K_{N1} の設定値以下の範囲内のバネ定数 K_{N2} ごとの反射係数 R の理論値を算出する。

【0061】

30

ここで、健全な接着を形成している場合のバネ定数 K_{N1} の値は、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} が等しいとして、別の強度試験等から健全な接着を形成していると考えられる評価対象物 1 についての反射係数 R の実測値の周波数関数と、反射係数 R のノッチ周波数が一致する反射係数 R の理論値の周波数関数を算出する際のバネ定数 K_{N1} , K_{N2} の値を採用することが好ましい。

【0062】

図 5 は、理論モデルを用いて算出された反射係数 R の理論値の一例を示すグラフである。図 5 のグラフは、横軸が周波数 f [単位 ; MHz]、縦軸がバネ定数 K_{N2} 、濃淡が反射係数 R [単位 ; MPa / nm] の 3 次元グラフである。図 5 において、任意のバネ定数 K_{N2} を選択して横軸に平行に切断して現れる断面が、反射係数 R の実測値の周波数関数曲線 4 1 と比較可能な横軸が周波数 f [単位 ; Hz] であり縦軸が反射係数 R である 2 次元グラフとなる。反射係数比較ステップ S 2 3 では、係数比較部 3 9 が、図 5 の 3 次元グラフに示すような各バネ定数 K_{N2} における反射係数 R の理論値の周波数関数の束を取得する。

40

【0063】

反射係数比較ステップ S 2 3 では、係数比較部 3 9 が、反射係数算出ステップ S 2 2 で取得した反射係数 R の実測値の周波数関数と、反射係数比較ステップ S 2 3 におけるここまでの処理の中で取得した各バネ定数 K_{N2} における反射係数 R の理論値の周波数関数の束のうち、健全な接着を形成しておりバネ定数 K_{N2} がバネ定数 K_{N1} と等しいとした場合の反射係数 R の理論値の周波数関数とを比較する。反射係数比較ステップ S 2 3 では、そ

50

して、係数比較部 39 が、これらの 2 つの周波数関数の反射係数 R の複数のノッチ周波数がいずれも所定の誤差の範囲内で一致する場合に、接着層 1 A が弱接着を有さない旨の評価をし、これらの 2 つの周波数関数の反射係数 R のノッチ周波数が所定の誤差を超えた有意差を有する場合に、接着層 1 A が弱接着を有する旨の評価をする。

【0064】

反射係数比較ステップ S 23 では、係数比較部 39 が、例えば、反射係数算出ステップ S 22 で係数算出部 38 が図 3 の反射係数 R の実測値の周波数関数曲線 41 を取得した場合、図 3 の反射係数 R の実測値の周波数関数曲線 41 と、健全な接着を形成しておりバネ定数 K_{N2} がバネ定数 K_{N1} と等しいとした場合の図 3 において破線で示す反射係数 R の理論値の周波数関数曲線 42 との間で複数のノッチ周波数がいずれも所定の誤差の範囲内で一致するので、図 3 で反射波 12 B を検出する際に使用した評価対象物 1 の接着層 1 A が弱接着を有さない旨の評価をする。

10

【0065】

弱接着有無判定ステップ S 24 は、係数比較部 39 が、反射係数比較ステップ S 23 において接着層 1 A が弱接着を有さない旨の評価をした図 3 の場合、弱接着で無いと判定して（弱接着有無判定ステップ S 24 で No）、弱接着パラメータ算出ステップ S 25 を実行せずに実施形態 1 に係る接着層評価方法を終了させる。一方で、弱接着有無判定ステップ S 24 は、係数比較部 39 が、反射係数比較ステップ S 23 において接着層 1 A が弱接着を有する旨の評価をした場合、弱接着で有ると判定して（弱接着有無判定ステップ S 24 で Yes）、弱接着パラメータ算出ステップ S 25 へ処理を進めるステップである。

20

【0066】

弱接着パラメータ算出ステップ S 25 は、接着層 1 A が有する弱接着に関するパラメータを算出するステップである。弱接着パラメータ算出ステップ S 25 では、具体的には、係数比較部 39 が、反射係数算出ステップ S 22 で取得した反射係数 R の実測値の周波数関数におけるノッチ周波数と、反射係数比較ステップ S 23 で取得した反射係数 R の理論値の周波数関数における複数のノッチ周波数とがいずれも所定の誤差の範囲内で一致する場合のバネ定数 K_{N2} の値を、評価に供した評価対象物 1 の接着層 1 A に関するパラメータとして算出する。

【0067】

反射係数算出ステップ S 22 で取得した反射係数 R の実測値の周波数関数におけるノッチ周波数は、図 5 に示すように、実施形態 1 で説明している理論モデルを使用する場合、その一部が、バネ定数 K_{N2} の値に依存して変化している。また、バネ定数 K_{N2} の値に依存してノッチ周波数が変化するピークについて、図 5 に示すように、バネ定数 K_{N2} の値とノッチ周波数とは一対一の関係にあることがわかる。このため、弱接着パラメータ算出ステップ S 25 では、係数比較部 39 が、反射係数 R の実測値の周波数関数におけるノッチ周波数に基づいて、反射係数算出ステップ S 22 で取得した反射係数 R の実測値の周波数関数を用いて、バネ定数 K_{N2} の値を一意に算出することができる。

30

【0068】

弱接着パラメータ算出ステップ S 25 では、係数比較部 39 が、弱接着と評価された反射係数 R の実測値における周波数関数曲線のノッチ周波数に、反射係数 R の理論値における周波数関数曲線のノッチ周波数を、バネ定数 K_{N2} を変化させて合わせ込む。これにより、弱接着パラメータ算出ステップ S 25 では、弱接着と評価された反射係数 R の実測値における周波数関数曲線のノッチ周波数と、反射係数 R の理論値における周波数関数曲線のノッチ周波数とが、バネ定数 K_{N2} のバネ定数 K_{N1} に対する比が所定の比率となったときに、複数のノッチ周波数がいずれも所定の誤差の範囲内で一致する。弱接着パラメータ算出ステップ S 25 では、反射係数 R の実測値における周波数関数曲線のノッチ周波数と、反射係数 R の理論値における周波数関数曲線のノッチ周波数とが、所定の誤差の範囲内で一致したときのバネ定数 K_{N2} のバネ定数 K_{N1} に対する所定の比率を、健全な接着を基準としたときの弱接着の接着強度であるとして算出する。

40

【0069】

50

なお、実施形態 1 では、上記のように、接着層 1 A の弱接着を評価した後に、弱接着である場合に、接着層 1 A に関するパラメータを取得したが、この構成に限定されない。反射係数比較ステップ S 2 3 について、実質的に、上記した弱接着有無判定ステップ S 2 4 及び弱接着パラメータ算出ステップ S 2 5 の処理を含む形で、効率的な処理を実行することができる。この場合、反射係数比較ステップ S 2 3 では、係数比較部 3 9 が、具体的には、反射係数 R の実測値のノッチ周波数に、理論モデルにおける接着層 1 A に関するパラメータであるバネ定数 K_{N2} を変化させることで反射係数 R の理論値のノッチ周波数を合わせ込むことで、接着層 1 A に関するパラメータであるバネ定数 K_{N2} を導出し、接着層 1 A に関するパラメータであるバネ定数 K_{N2} が、健全な接着を形成している時の接着に関するパラメータであるバネ定数 K_{N1} よりも下回っている場合、接着層 1 A は弱接着を有すると評価することができる。

10

【0070】

また、反射波検出ステップ S 1 1、参照波検出ステップ S 1 2 及び検出波評価ステップ S 1 3 を有する実施形態に係る接着層評価方法を、評価対象物 1 の接着層 1 A の面内方向の複数の位置で実施することで、接着層 1 A における弱接着の有無の面内方向の分布、並びに、接着層 1 A における接着強度の面内方向の分布を算出することができる。

【0071】

以上のように、実施形態 1 によれば、超音波の反射波 1 2 B を使用して、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを評価することができるので、評価対象物 1 を破壊することなく弱接着を検出することができる。つまり、評価対象物 1 の片側から超音波探触子 1 3 を用いて、反射波 1 2 B となる超音波を検出することで、弱接着を検出することができる。

20

【0072】

また、実施形態 1 によれば、反射波 1 2 B と参照波とをそれぞれ周波数解析して得られた反射波 1 2 B と参照波との振幅スペクトルの強度比に基づいて反射係数 R の実測値を算出し、この反射係数 R の実測値を理論モデルに基づいて算出される反射係数 R の理論値とを比較して、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを評価する。このため、超音波の反射波 1 2 B について、接着層 1 A の接着性を顕著に表す係数を用いるので、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを高い精度で評価することができる。

【0073】

また、実施形態 1 によれば、検出波評価部 3 6 が、反射係数 R の実測値のノッチ周波数に、理論モデルにおける接着層 1 A に関するパラメータであるバネ定数 K_{N2} を変化させることで、反射係数 R の理論値のノッチ周波数を合わせ込む。これにより、接着層 1 A に関するパラメータであるバネ定数 K_{N2} を導出し、バネ定数 K_{N2} が、健全な接着を形成している時の接着に関するパラメータであるバネ定数 K_{N1} よりも下回っている場合、接着層 1 A は弱接着を有すると評価することができる。このため、接着層 1 A が弱接着を有するか否かをより高い精度で効率よく評価することができる。

30

【0074】

また、実施形態 1 によれば、評価対象物 1 に関する理論モデルとして、接着層 1 A を 2 箇所のスプリング界面 1 D、1 E で結合した理論モデルを採用して、剛性マトリックス法を用いて、反射係数 R の理論値等を算出処理する。このため、超音波の反射波 1 2 B について、実際に弱接着の要因が発生しやすい界面に界面応力を設定して剛性解析する妥当性の高い理論モデル及び計算手法を用いて、接着層 1 A が弱接着を有するか否かを評価することができるので、現実に応じた理論モデル及び計算手法に裏付けがなされた弱接着の検出を実行することができる。

40

【0075】

なお、実施形態 1 では、超音波照射装置 1 1 及び超音波検出装置 1 2 として、超音波を評価対象物 1 へ向けて照射すると共に、評価対象物 1 から反射された超音波を検出する超音波探触子 1 3 を用いたが、これに限定されない。例えば、評価対象物 1 を励起させ、評価対象物から発生した弾性波を検出するものであってもよい。評価対象物 1 を励起させる装置として、例えば、超音波トランスデューサ、レーザーまたは E M A T 等を用いた音場

50

・弾性波動場、電磁波または電場・磁場等による電磁場により、評価対象物 1 を励起させる装置であってもよい。

【 0 0 7 6 】

また、実施形態 1 では、接着層 1 A に関するパラメータとして、バネ定数 K_{N1} , K_{N2} に基づく接着界面剛性を算出したが、理論モデルにおいて接着層の厚さ h_{ad} も接着層 1 A に関するパラメータとして組み込むことで、同様の方法を用いて、接着層厚 h_{ad} を算出することも可能である。同様に、接着層 1 A に関するパラメータとして、上記した界面剛性の界面パラメータ、接着層厚 h_{ad} の形状パラメータの他、物性パラメータを組み込むことで、同様の方法を用いて、物性パラメータを算出することも可能である。

【 0 0 7 7 】

また、実施形態 1 では、周波数特性として、ノッチ周波数の振幅スペクトルを適用したが、特に限定されない。超音波検出装置 1 2 により検出された反射波 1 2 B の周波数特性の実測値と、理論モデルを用いて算出された反射波 1 2 B の周波数特性の理論値と合わせ込んで、接着層 1 A に関するパラメータの評価が可能であれば、何れの周波数特性を適用してもよい。

【 0 0 7 8 】

[実施形態 2]

次に、図 6 を参照して、実施形態 2 に係る接着層評価システム 5 0 及び接着層評価方法について説明する。なお、実施形態 2 では、重複した記載を避けるべく、実施形態 1 と異なる部分について説明し、実施形態 1 と同様の構成である部分については、同じ符号を付して説明する。図 6 は、実施形態 2 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。

【 0 0 7 9 】

実施形態 2 の接着層評価システム 5 0 は、実施形態 1 の超音波照射装置 1 1 及び超音波検出装置 1 2 をそれぞれ別体とし、評価対象物 1 を挟んで、評価対象物 1 の両側に配置されている。つまり、超音波照射装置 1 1 と超音波検出装置 1 2 との間には、評価対象物 1 を設置する設置部 1 4 が位置している。

【 0 0 8 0 】

接着層評価システム 5 0 は、超音波照射装置 1 1 、超音波検出装置 1 2 、設置部 1 4 及び水槽 2 0 が以上のような配置をしている。このため、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A から照射波 1 1 B が照射される。すると、照射波 1 1 B は、水槽 2 0 に貯留された水 2 1 を媒介として、評価対象物 1 に照射される。照射波 1 1 B は、評価対象物 1 を透過して透過波 1 2 C となり、透過波 1 2 C は、超音波検出装置 1 2 へ向かって伝播する。このため、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A は、透過波 1 2 C を検出する。

【 0 0 8 1 】

また、接着層評価システム 5 0 では、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A と、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A と、設置部 1 4 に設置される評価対象物 1 の接着層 1 A と、が、互いに平行になるように配設されている。つまり、接着層評価システム 5 0 では、評価対象物 1 の接着層 1 A の界面に対して、超音波が垂直方向に照射されるように、また、超音波が垂直方向に透過されるように、評価対象物 1 が配置されている。このため、接着層評価システム 5 0 は、超音波照射装置 1 1 の照射面 1 1 A から、接着層 1 A に対して垂直方向に照射波 1 1 B を照射する。また、接着層評価システム 5 0 は、評価対象物 1 を透過する透過波 1 2 C が、照射波 1 1 B と同じ方向に伝播し、超音波検出装置 1 2 の検出面 1 2 A で透過波 1 2 C を検出する。つまり、照射波 1 1 B の入射角度と透過波 1 2 C の出射角度とは、評価対象物 1 の接着層 1 A の接着界面に対して、いずれも 0 度となっている。

【 0 0 8 2 】

制御装置 3 0 の係数算出部 3 8 は、検出される超音波が透過波 1 2 C であることから、透過波 1 2 C の周波数特性としての透過係数 T の実測値を算出する。係数算出部 3 8 は、より詳細には、周波数 f ごとに、透過波 1 2 C の振幅スペクトルの強度から参照波の振幅スペクトルの強度を除すことにより、透過係数 T の実測値の周波数関数を取得する。なお

10

20

30

40

50

、透過係数 T は、その性質上、超音波が全く透過しない時に 0 をとり、超音波が完全に透過する時に 1 を取り、0 以上 1 以下の値を取る係数である。なお、透過係数 T は、理論上においては、1 以下となるが、実測上においては、1 以上の値を取り得る。

【0083】

制御装置 30 の係数比較部 39 は、係数算出部 38 が算出した透過係数 T の実測値が極大となる周波数 f と、接着層 1A が弱接着を有せずに健全な接着をしていると仮定をした場合の理論モデルに基づいて算出される透過係数 T の理論値が極大となる周波数 f とを比較して、それらが所定の誤差の範囲内で一致する場合に、接着層 1A は弱接着を有さない旨の評価をし、それらが所定の誤差を超えた有意差を有する場合に、接着層 1A は弱接着を有する旨の評価をする。つまり、透過係数 T の実測値の周波数関数及び透過係数 T の理論値の周波数関数の双方について、その値が極大となる周波数 f のことを、ピーク周波数としている。

10

【0084】

なお、実施形態 2 の接着層評価システム 50 を用いた接着層評価方法では、実施形態 1 の接着層評価方法における反射係数 R のノッチ周波数を、透過係数 T のピーク周波数に読み替えても成立する。つまり、透過係数 T の実測値の周波数関数におけるピーク周波数と、バネ定数 K_{N2} がバネ定数 K_{N1} と等しいとした場合の透過係数 T の理論値の周波数関数における複数のピーク周波数とがいずれも所定の誤差の範囲内で一致する場合に、接着層 1A が弱接着を有さない旨の評価をする。一方で、透過係数 T の実測値の周波数関数におけるピーク周波数と、バネ定数 K_{N2} がバネ定数 K_{N1} と等しいとした場合の透過係数 T の理論値の周波数関数における複数のピーク周波数とが所定の誤差を超えた有意差を有する場合に、接着層 1A が弱接着を有する旨の評価をする。

20

【0085】

以上のように、実施形態 2 によれば、超音波の透過波 12C を使用して、接着層 1A が弱接着を有するか否かを評価することができるので、評価対象物 1 を破壊することなく弱接着を検出することができる。

【0086】

[実施形態 3]

次に、図 7 及び図 8 を参照して、実施形態 3 に係る接着層評価システム 60 及び接着層評価方法について説明する。なお、実施形態 3 でも、重複した記載を避けるべく、実施形態 1 及び 2 と異なる部分について説明し、実施形態 1 及び 2 と同様の構成である部分については、同じ符号を付して説明する。図 7 は、実施形態 3 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。図 8 は、実施形態 3 に係る理論モデルの一例を示す説明図である。

30

【0087】

実施形態 3 の接着層評価システム 60 は、実施形態 1 の超音波照射装置 11 及び超音波検出装置 12 をそれぞれ別体とし、評価対象物 1 の接着層 1A の接着界面に対して、所定の傾斜角度をもって超音波を照射する斜角入射を行っている。つまり、超音波照射装置 11 及び超音波検出装置 12 は、評価対象物 1 の超音波が反射される側に設けられる。また、超音波照射装置 11 は、評価対象物 1 の接着層 1A の接着界面に対して、所定の入射角度で照射波 11B を照射する。超音波検出装置 12 は、所定の反射角度で反射した反射波 12B を検出する。

40

【0088】

接着層評価システム 60 は、超音波照射装置 11、超音波検出装置 12、設置部 14 及び水槽 20 が以上のような配置をしている。このため、超音波照射装置 11 の照射面 11A から照射波 11B が照射される。すると、照射波 11B は、水槽 20 に貯留された水 21 を媒介として、評価対象物 1 に照射される。照射波 11B は、評価対象物 1 において一部が反射して反射波 12B となり、反射波 12B は、超音波検出装置 12 へ向かって伝播する。このため、超音波検出装置 12 の検出面 12A は、反射波 12B を検出する。

【0089】

50

また、接着層評価システム 60 では、超音波照射装置 11 の照射面 11A が、設置部 14 に設置される評価対象物 1 の接着層 1A の界面に対して、傾斜するように配設され、超音波検出装置 12 の検出面 12A が、設置部 14 に設置される評価対象物 1 の接着層 1A の界面に対して、傾斜するように配設されている。つまり、接着層評価システム 60 では、評価対象物 1 の接着層 1A の接着界面に対して、超音波が垂直方向に対して傾斜する傾斜方向に照射されるように、また、超音波が傾斜方向に反射されるように、評価対象物 1 が配置されている。このため、接着層評価システム 60 は、超音波照射装置 11 の照射面 11A から、接着層 1A に対して傾斜方向に照射波 11B を照射する。また、接着層評価システム 60 は、評価対象物 1 から反射した反射波 12B が、垂直方向に対して照射波 11B と対称となる傾斜方向に伝播し、超音波検出装置 12 の検出面 12A で反射波 12B を検出する。

10

【0090】

制御装置 30 の係数比較部 39 は、検出される超音波が傾斜方向となる反射波 12B であることから、反射係数比較ステップ S23 で使用する反射係数 R の理論値を算出する際に用いる理論モデルは、図 8 に示すものが用いられる。

【0091】

図 8 に示す理論モデルでは、評価対象物 1 は、被着体 1B と接着層 1A との界面にスプリング界面 1D が設けられ、接着層 1A と被着体 1C との界面にスプリング界面 1E が設けられ、接着層 1A を 2 箇所のスプリング界面 1D、1E で結合したものである。この理論モデルでは、スプリング界面 1D における接着界面剛性をバネ定数 K_{N1} [単位; MPa/nm] 及びバネ定数 K_{T1} [単位; MPa/nm] によって設定し、スプリング界面 1E における接着界面剛性をバネ定数 K_{N2} [単位; MPa/nm] 及びバネ定数 K_{T2} [単位; MPa/nm] によって設定している。バネ定数 K_{N1} 、 K_{N2} は、スプリング界面 1D、1E における接着界面剛性が、垂直方向における成分の剛性となるように設定されている。バネ定数 K_{T1} 、 K_{T2} は、スプリング界面 1D、1E における接着界面剛性が、垂直方向に直交する接着界面の面内方向における成分の剛性となるように設定されている。

20

【0092】

なお、実施形態 3 の接着層評価システム 60 を用いた接着層評価方法では、実施形態 1 の理論モデルに代えて、実施形態 3 の理論モデルを用いることで成立する。つまり、実施形態 3 の理論モデルを用いて算出される反射係数 R は、垂直方向における成分の剛性のバネ定数 K_{N2} と、面内方向における成分の剛性のバネ定数 K_{T2} とを考慮できる。このため、接着層 1A の垂直方向における接着界面剛性だけでなく、面内方向（せん断方向）における接着界面剛性を評価することができる。

30

【0093】

以上のように、実施形態 3 によれば、接着層 1A の界面における垂直方向と面内方向とにおいて弱接着を有するか否かを評価することができるので、評価対象物 1 を破壊することなく弱接着を検出することができる。

【0094】

[実施形態 4]

次に、図 9 を参照して、実施形態 4 に係る接着層評価システム 70 及び接着層評価方法について説明する。なお、実施形態 4 では、重複した記載を避けるべく、実施形態 2 と異なる部分について説明し、実施形態 2 と同様の構成である部分については、同じ符号を付して説明する。図 9 は、実施形態 4 に係る接着層評価システムの具体的な構成例を示す図である。

40

【0095】

実施形態 4 の接着層評価システム 70 は、実施形態 2 の超音波照射装置 11 と超音波検出装置 12 との間に配置された評価対象物 1 の接着層 1A の接着界面に対して、所定の傾斜角度をもって超音波を照射する斜角入射を行っている。つまり、設置部 14 に設置された評価対象物 1 は、照射波 11B の照射方向に対して、傾斜するように配置されている。

50

このため、超音波照射装置 11 は、評価対象物 1 の接着層 1 A の接着界面に対して、所定の入射角度で照射波 11 B を照射する。超音波検出装置 12 は、所定の出射角度で透過した透過波 12 C を検出する。

【0096】

また、接着層評価システム 70 では、設置部 14 に設置される評価対象物 1 の接着層 1 A の界面が、超音波照射装置 11 の照射面 11 A に対して、傾斜するように配置されるとともに、超音波検出装置 12 の検出面 12 A に対して、傾斜するように配置される。なお、超音波照射装置 11 の照射面 11 A と、超音波検出装置 12 の検出面 12 A とは、互いに平行になるように配設されている。このとき、超音波は評価対象物 1 中において屈折することから、屈折する分だけ、超音波照射装置 11 の照射面 11 A と、超音波検出装置 12 の検出面 12 A との位置が異なるものとなっている。つまり、接着層評価システム 70 では、評価対象物 1 の接着層 1 A の界面に対して、超音波が垂直方向に対して傾斜する傾斜方向に照射されるように、また、超音波が傾斜方向に透過するように、評価対象物 1 が配置されている。このため、接着層評価システム 70 は、超音波照射装置 11 の照射面 11 A から、接着層 1 A に対して傾斜方向に照射波 11 B を照射する。また、接着層評価システム 70 は、評価対象物 1 を透過した透過波 12 C が、垂直方向に対して傾斜する傾斜方向に出射し、超音波検出装置 12 の検出面 12 A で透過波 12 C を検出する。

10

【0097】

制御装置 30 の係数比較部 39 は、検出される超音波が傾斜方向となる透過波 12 C であることから、実施形態 2 と同様に、透過係数 T の実測値が極大となるピーク周波数が用いられ、また、反射係数比較ステップ S23 で使用する透過係数 T の理論値を算出する際に用いる理論モデルは、実施形態 3 と同様に、図 8 に示すものが用いられる。

20

【0098】

なお、実施形態 4 の接着層評価システム 70 を用いた接着層評価方法では、実施形態 2 のピーク周波数と、実施形態 3 の図 8 の理論モデルとを用いて、実施形態 1 と同様のステップを実行することで、接着層 1 A に関するパラメータを評価することができる。

【0099】

以上のように、実施形態 4 によれば、超音波の透過波 12 C を使用して、接着層 1 A の界面における垂直方向と面内方向とにおいて弱接着を有するか否かを評価することができるので、評価対象物 1 を破壊することなく弱接着を検出することができる。

30

【0100】

なお、実施形態 1 から 4 では、超音波として、反射波 12 B または透過波 12 C を用いたが、評価対象物 1 から発生する散乱波を用いてもよい。

【符号の説明】

【0101】

- 1 評価対象物
- 1 A 接着層
- 1 B , 1 C 被着体
- 1 D , 1 E スプリング界面
- 10 接着層評価システム
- 11 超音波照射装置
- 11 A 照射面
- 11 B 照射波
- 12 超音波検出装置
- 12 A 検出面
- 12 B 反射波
- 12 C 透過波
- 13 超音波探触子
- 14 設置部
- 20 水槽

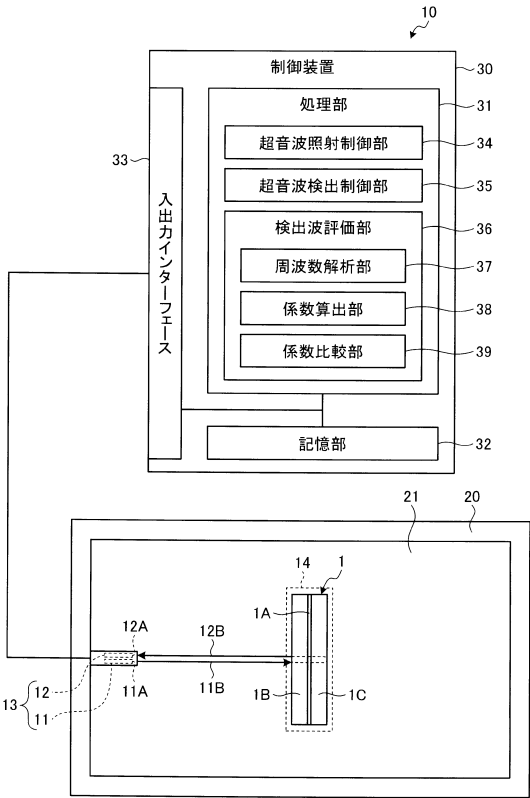
40

50

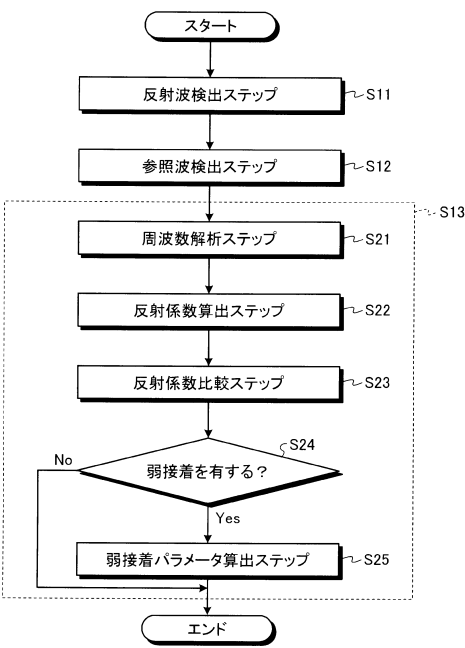
- 2 1 水
- 3 0 制御装置
- 3 1 処理部
- 3 2 記憶部
- 3 3 入出力インターフェース
- 3 4 超音波照射制御部
- 3 5 超音波検出制御部
- 3 6 検出波評価部
- 3 7 周波数解析部
- 3 8 係数算出部
- 3 9 係数比較部
- 4 1 実測値の周波数関数曲線
- 4 2 理論値の周波数関数曲線
- 5 0 接着層評価システム
- 6 0 接着層評価システム
- 7 0 接着層評価システム

【図面】

【図 1】



【図 2】



10

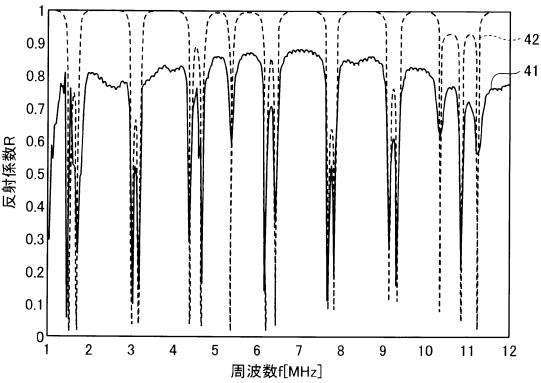
20

30

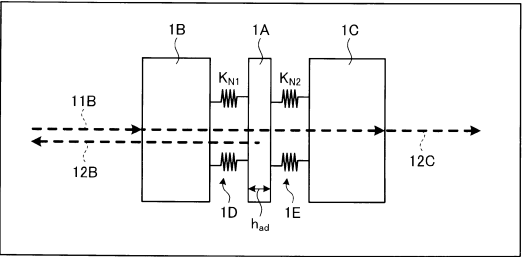
40

50

【図 3】

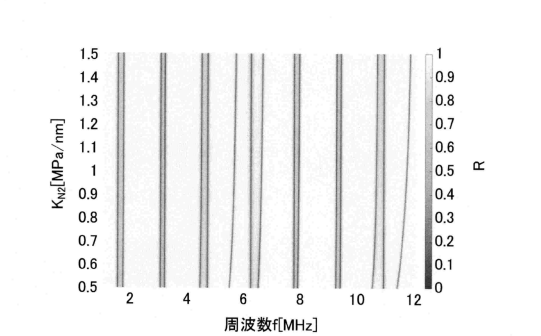


【図 4】

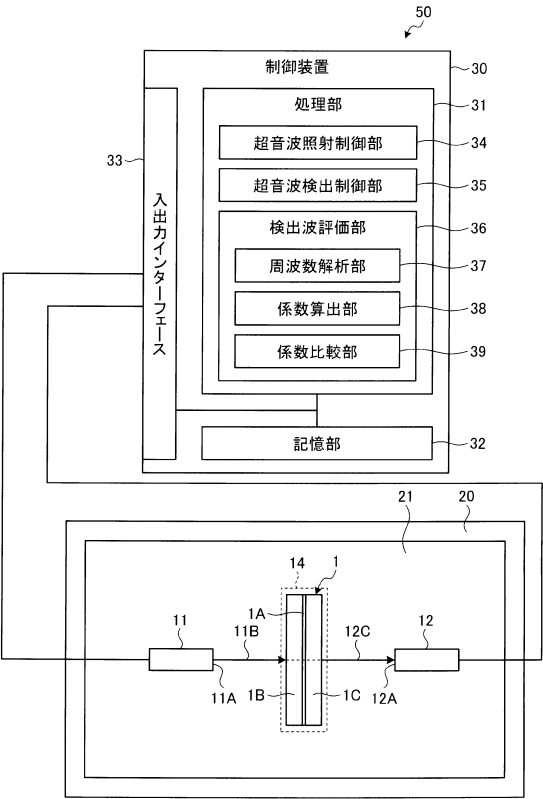


10

【図 5】



【図 6】



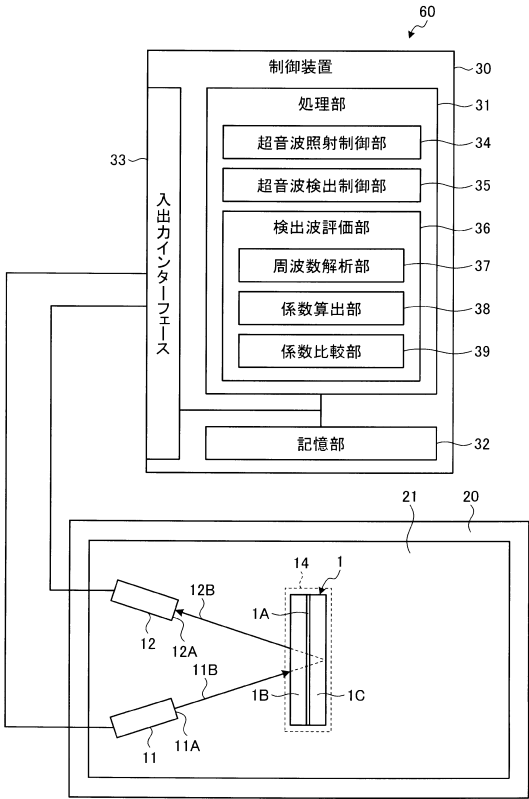
20

30

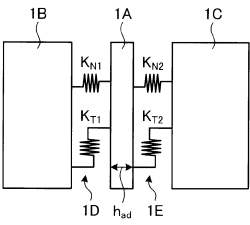
40

50

【図 7】



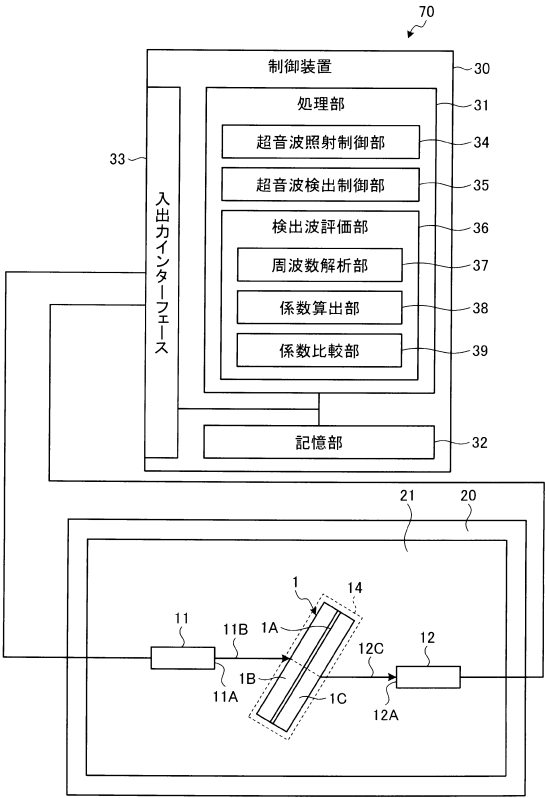
【図 8】



10

20

【図 9】



30

40

50

フロントページの続き

開発」、産業技術力強化法第 17 条の適用を受ける特許出願

- (72)発明者 ▲高▼木 清嘉
東京都千代田区丸の内三丁目 2 番 3 号 三菱重工業株式会社内
- (72)発明者 松田 直樹
京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 国立大学法人京都大学内
- (72)発明者 森 直樹
滋賀県草津市野路東 1 - 1 - 1 立命館大学 びわこ・くさつキャンパス内

審査官 田中 洋介

- (56)参考文献 特開平 09 - 005305 (JP, A)
Naoki Mori, 外 2 名, Effect of interfacial adhesion on the ultrasonic interaction with adhesive joints: A theoretical study using spring-type interfaces, The Journal of the Acoustical Society of America, 米国, Acoustical Society of America, 2019年06月18日, 第 145 巻第 6 号, 第 3541 頁 ~ 第 3550 頁, <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article/145/6/3541/940296/Effect-of-interfacial-adhesion-on-the-ultrasonic?searchresult=1>
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB 名)
G 01 N 29 / 00 - 29 / 52
JSTPlus / JMEDPlus / JST7580 (JDreamII)