

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6161161号  
(P6161161)

(45) 発行日 平成29年7月12日(2017.7.12)

(24) 登録日 平成29年6月23日(2017.6.23)

(51) Int.Cl. F I  
**GO 1 N 29/11 (2006.01)** GO 1 N 29/11  
**GO 1 N 29/46 (2006.01)** GO 1 N 29/46

請求項の数 8 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2013-266732 (P2013-266732)	(73) 特許権者	504132272 国立大学法人京都大学
(22) 出願日	平成25年12月25日(2013.12.25)		京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(65) 公開番号	特開2015-121516 (P2015-121516A)	(73) 特許権者	000000974
(43) 公開日	平成27年7月2日(2015.7.2)		川崎重工業株式会社
審査請求日	平成28年2月24日(2016.2.24)		兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号
		(74) 代理人	110000556 特許業務法人 有古特許事務所
		(72) 発明者	琵琶 志朗 京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学 大学院工学研究科内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 複合材料内のポロシティ評価方法およびポロシティ評価装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

プリプレグを複数枚積層した後に硬化させて得られる、多層構造の複合材料の一方の面を入射面として、当該入射面から前記複合材料の厚さ方向に向かって超音波を入射するとともに、当該入射面側において反射波を受信し、

受信した前記反射波を全体反射波とし、当該全体反射波に含まれる、前記多層構造の層間界面からの反射波を層間反射波としたときに、

前記全体反射波を時間-周波数解析することにより、前記複合材料に含まれるポロシティの厚さ方向の分布を評価するために用いられる、前記層間反射波の時間的な変化情報である減衰を取得することを特徴とする、

複合材料内のポロシティ評価方法。

【請求項2】

前記複合材料の他方の面である底面から反射される底面反射波の減衰に基づいて、当該複合材料に含まれる前記ポロシティを総量的に評価するために用いられる超音波の入射周波数を、標準周波数としたときに、

前記超音波の入射周波数は、前記標準周波数よりも、高く設定されることを特徴とする、  
請求項1に記載の複合材料内のポロシティ評価方法。

【請求項3】

前記入射周波数は、前記複合材料を構成するプライの厚さに応じて変更可能となってい

ることを特徴とする、

請求項 1 または 2 に記載の複合材料内のポロシティ評価方法。

【請求項 4】

前記複合材料内における前記ポロシティの分布を推測するために、評価用情報と、実際に受信した前記層間反射波からの前記変化情報と、を対比し、

前記評価用情報としては、

モデル化した前記ポロシティを含む前記複合材料と、当該複合材料に対する前記超音波の入射および前記反射波の受信と、を模擬的に再現する数値シミュレーションを行うことにより得られる模擬的な前記層間反射波の変化情報、および、

既知の前記ポロシティを含む前記複合材料の試験片に対して、前記超音波の入射および前記反射波の受信を行うことにより取得される、前記層間反射波の既知情報、の少なくとも一方が用いられる

ことを特徴とする、

請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の複合材料内のポロシティ評価方法。

【請求項 5】

プリプレグを複数枚積層した後に硬化させて得られる、多層構造の複合材料の一方の面である入射面に対して、当該複合材料の厚さ方向に向かって超音波を入射するとともに、当該入射面からの反射波を受信する、超音波検出器と、

受信した前記反射波を全体反射波とし、当該全体反射波に含まれる、前記多層構造の層間界面からの反射波を層間反射波としたときに、

前記全体反射波を時間 - 周波数解析することで、前記複合材料に含まれるポロシティの厚さ方向の分布を評価するために用いられる、前記層間反射波の時間的な変化情報である減衰を取得する、時間 - 周波数解析器と、を備えていることを特徴とする、  
複合材料内のポロシティ評価装置。

【請求項 6】

前記変化情報から表示用情報を生成する表示用情報生成器と、

前記表示用情報を用いて前記変化情報を表示可能とする表示器と、をさらに備えていることを特徴とする、

請求項 5 に記載の複合材料内のポロシティ評価装置。

【請求項 7】

前記時間 - 周波数解析器より得られる前記変化情報を、評価用情報と対比することにより、前記複合材料内における前記ポロシティの分布を推測する、ポロシティ評価器、を備え、

前記評価用情報として、模擬的な前記層間反射波の変化情報、および、予め取得した前記複合材料の前記層間反射波の既知情報の少なくとも一方が用いられ、

模擬的な前記層間反射波の前記変化情報は、モデル化した前記ポロシティを含む前記複合材料に対する、前記超音波の入射および前記反射波の受信を、数値シミュレーションにより模擬的に再現して得られるものであり、

前記既知情報は、既知の前記ポロシティを含む前記複合材料の試験片に対して、前記超音波の入射および前記反射波の受信を行うことにより取得されたものであることを特徴とする、

請求項 5 または 6 に記載の複合材料内のポロシティ評価装置。

【請求項 8】

前記数値シミュレーションを行う超音波送受信シミュレータ、および、前記評価用情報を複数記憶する評価用情報データベースの少なくとも一方を備え、

前記ポロシティ評価器は、前記超音波送受信シミュレータ、および、前記評価用情報データベースの少なくとも一方から、前記評価用情報を取得することを特徴とする、

請求項 7 に記載の複合材料内のポロシティ評価装置。

10

20

30

40

50

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、繊維強化樹脂複合材料の内部に残存するポロシティ（分散した多数の微小な空孔状の欠陥）の評価方法および評価装置に関し、特に、繊維強化樹脂複合材料に含まれるポロシティの総量的な評価だけでなく、ポロシティの厚さ方向での偏在等についても評価することが可能な評価方法および評価装置に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

近年、これまで金属材料が用いられてきた分野において、繊維強化樹脂複合材料（以下、適宜「複合材料」と略す。）が広く用いられるようになってきている。例えば、強化繊維材として炭素繊維（カーボンファイバ）を用い、これにエポキシ樹脂等を含むマトリクス樹脂材を含浸させて成形した炭素繊維強化型のもの（一般に、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）と称する。）は、金属材料よりも軽量であることに加え、より高強度であることから、特に近年では、スポーツ用品、産業機械、車両（自動車および自転車等）、航空宇宙等の分野に広く採用されている。

10

## 【0003】

複合材料からなる成形物は、一般的には、複数枚のプリプレグ（強化繊維材からなるシートにマトリクス樹脂材を含浸等させたもの）を積層し、得られる積層物をオートクレーブ（圧力釜）により加圧および加熱して硬化させることにより得られる。

20

## 【0004】

ここで、硬化前の積層物を硬化させる際に与えられる圧力または加熱温度によっては、複合材料の内部に「ポロシティ」と呼ばれる微小な空孔状の欠陥が多数分散して生じることがある。複合材料内にポロシティが一定量以上存在すると、当該複合材料の構造強度の低下につながる。特に、複合材料が航空宇宙分野に用いられる場合には、他の分野に比べて構造強度に関する要求が厳しいため、ポロシティの量をできるだけ少なくする必要がある。そのため、複合材料を製造する際には、ポロシティについて非破壊的に評価する必要がある。

## 【0005】

従来、複合材料の欠陥を非破壊的に評価する技術としては、例えば、特許文献1に開示されている超音波探傷検査方法、あるいは、特許文献2に開示されている超音波探傷装置が挙げられる。これらの技術は、いずれも主として航空分野で用いられる複合材料を対象としている。そして、いずれの技術も、複合材料（複合材）の表面から厚さ方向に向けて超音波を入射し、裏面で反射される反射波または裏面で計測される透過波を測定し、反射波または透過波の減衰度合い、もしくは反射波または透過波の減衰特性に基づいて、複合材料の欠陥を検査している。

30

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0006】

【特許文献1】特開平06-018488号公報

40

【特許文献2】特開平06-317568号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0007】

しかしながら、特許文献1および2に開示される技術では、いずれも、複合材料の内部に含まれるポロシティの板厚方向の偏りを評価することが困難となっている。

## 【0008】

特許文献1および2に開示されるいずれの技術も、複合材料の裏面で反射される反射波の減衰率に基づいて欠陥を検査している。この反射波の減衰率は、超音波の伝搬経路に沿って積分された（または総量的な）材料特性が反映されたものとなるため、複合材料の厚

50

さ方向全体についての総量的な評価は可能であるが、厚さ方向に対するポロシティの偏在状態の評価は困難となっている。

【0009】

言い換えれば、反射波の減衰率は、基本的に、複合材料内に含まれるポロシティの総量に依存するため、特許文献1または2に開示される技術では、ポロシティの分布が一様であるか偏在しているか等を区別することができない。

【0010】

近年、航空機分野では、複合材料製の部品を製造する場合、複数の部品を同時に一体成形して製造する手法が拡大しつつある。このような製造手法では、同時に成形された部品であっても、互いにポロシティの発生または分布の程度が異なっていることがある。特許文献1または2に開示される技術では、部品にポロシティが生じているか否かを検査することができても、ポロシティの分布については評価することができない。そのため、例えば、一体成形した成形品全体としてポロシティが一定量以上発生していれば、十分な強度を有する部品を含め、成形品全体を使用不可とせざるを得ないことになる。

【0011】

本発明はこのような課題を解決するためになされたものであって、複合材料に含まれるポロシティの総量的な評価だけでなく、厚さ方向の分布も評価可能とする技術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】

【0012】

本発明に係るポロシティ評価方法は、前記の課題を解決するために、プリプレグを複数枚積層した後に硬化させて得られる、多層構造の複合材料の一方の面を入射面として、当該入射面から前記複合材料の厚さ方向に向かって超音波を入射するとともに、当該入射面側において反射波を受信し、受信した前記反射波を全体反射波とし、当該全体反射波に含まれる、前記多層構造の層間界面からの反射波を層間反射波としたときに、前記全体反射波を時間-周波数解析することにより、前記複合材料に含まれるポロシティの厚さ方向の分布を評価するために用いられる、前記層間反射波の時間的な変化情報を取得する構成である。

【0013】

前記構成によれば、全体反射波を時間-周波数解析することにより、層間反射波の時間的な変化情報を得ることができる。この変化情報には、ポロシティに由来する反射波の減衰を表す情報が含まれているので、この変化情報に基づいて、複合材料中のポロシティの厚さ方向の分布を良好に評価することができる。

【0014】

前記構成のポロシティ評価方法においては、前記複合材料の他方の面である底面から反射される底面反射波の減衰に基づいて、当該複合材料に含まれる前記ポロシティを総量的に評価するために用いられる超音波の入射周波数を、標準周波数としたときに、前記超音波の入射周波数は、前記標準周波数よりも、高く設定される構成であってもよい。

【0015】

また、前記構成のポロシティ評価方法においては、前記入射周波数は、前記複合材料を構成するプライの厚さに応じて変更可能となっている構成であってもよい。

【0016】

また、前記構成のポロシティ評価方法においては、前記複合材料内における前記ポロシティの分布を推測するために、評価用情報と、実際に受信した前記層間反射波からの前記変化情報と、を対比し、前記評価用情報としては、モデル化した前記ポロシティを含む前記複合材料と、当該複合材料に対する前記超音波の入射および前記反射波の受信と、を模擬的に再現する数値シミュレーションを行うことにより得られる模擬的な前記層間反射波の変化情報、および、既知の前記ポロシティを含む前記複合材料の試験片に対して、前記超音波の入射および前記反射波の受信を行うことにより取得される、前記層間反射波の既知情報、の少なくとも一方が用いられる構成であってもよい。

10

20

30

40

50

## 【0017】

前記構成によれば、数値シミュレーションにより得られる変化情報は、実測された層間反射波を時間 - 周波数解析して得られる変化情報に現れる特徴を、良好に再現した評価用情報である。また、前記層間反射波の既知情報は、既知のポロシティを含む試験片から得られた評価用情報である。それゆえ、これら評価用情報を、実測に基づく変化情報と対比することで、複合材料内におけるポロシティの分布を、より精細に推測することが可能となる。

## 【0018】

本発明に係るポロシティ評価装置は、前記の課題を解決するために、プリプレグを複数枚積層した後に硬化させて得られる、多層構造の複合材料の一方の面である入射面に対して、当該複合材料の厚さ方向に向かって超音波を入射するとともに、当該入射面からの反射波を受信する、超音波検出器と、受信した前記反射波を全体反射波とし、当該全体反射波に含まれる、前記多層構造の層間界面からの反射波を層間反射波としたときに、前記全体反射波を時間 - 周波数解析することで、前記複合材料に含まれるポロシティの厚さ方向の分布を評価するために用いられる、前記層間反射波の時間的な変化情報を取得する、時間 - 周波数解析器と、を備えている構成である。

10

## 【0019】

前記構成のポロシティ評価装置においては、前記変化情報から表示用情報を生成する表示用情報生成器と、前記表示用情報を用いて前記変化情報を表示可能とする表示器と、をさらに備えている構成であってもよい。

20

## 【0020】

また、前記構成のポロシティ評価装置においては、前記時間 - 周波数解析器より得られる前記変化情報を、評価用情報と対比することにより、前記複合材料内における前記ポロシティの分布を推測する、ポロシティ評価器、を備え、前記評価用情報として、模擬的な前記層間反射波の変化情報、および、予め取得した前記複合材料の前記層間反射波の既知情報の少なくとも一方が用いられ、模擬的な前記層間反射波の前記変化情報は、モデル化した前記ポロシティを含む前記複合材料に対する、前記超音波の入射および前記反射波の受信を、数値シミュレーションにより模擬的に再現して得られるものであり、前記既知情報は、既知の前記ポロシティを含む前記複合材料の試験片に対して、前記超音波の入射および前記反射波の受信を行うことにより取得されたものである構成であってもよい。

30

## 【0021】

また、前記構成のポロシティ評価装置においては、前記数値シミュレーションを行う超音波送受信シミュレータ、および、前記評価用情報を複数記憶する評価用情報データベースの少なくとも一方を備え、前記ポロシティ評価器は、前記超音波送受信シミュレータ、および、前記評価用情報データベースの少なくとも一方から、前記評価用情報を取得する構成であってもよい。

## 【発明の効果】

## 【0022】

本発明では、以上の構成により、複合材料に含まれるポロシティの総量的な評価だけでなく、厚さ方向の分布も評価可能とする技術を提供することができる、という効果を奏する。

40

## 【図面の簡単な説明】

## 【0023】

【図1】(a)は、本発明の評価対象である複合材料であって、ポロシティを含まない健全複合材料の一例を示す模式的断面図であり、(b)および(c)は、ポロシティを含む欠陥複合材料の一例を示す模式的断面図である。

【図2】図2は、本発明の実施の形態1に係る複合材料のポロシティ評価方法の一例を示す工程図である。

【図3】(a)は、ポロシティ評価のために複合材料に入射された超音波の反射波について説明する模式図であり、(b)および(c)は、ポロシティによる反射波の減衰につい

50

て説明する模式図である。

【図４】図４は、図２に示すポロシティ評価方法を実施するためのポロシティ評価装置の一例を模式的に示すブロック図である。

【図５】図５は、図４に示すポロシティ評価装置の変形例を示すブロック図である。

【図６】図６は、本発明の実施の形態２に係る複合材料のポロシティ評価方法の一例を示す工程図である。

【図７】図７は、図６に示すポロシティ評価方法を実施するためのポロシティ評価装置の一例を模式的に示すブロック図である。

【図８】図８は、図７に示すポロシティ評価装置の変形例を示すブロック図である。

【図９】図９は、図７または図８に示すポロシティ評価装置の変形例を示すブロック図である。

10

【図１０】図１０は、本発明の実施例の結果であって、ポロシティ評価用サンプルから得られた反射波の波形を示す波形図である。

【図１１】(a)～(d)は、本発明の実施例の結果であって、ポロシティ評価用サンプルから得られた反射波の時間-周波数解析の結果を示すグラフである。

【図１２】(a)および(b)は、本発明の実施例の結果であって、ポロシティ評価用サンプルから得られた反射波の時間-周波数解析の結果と、反射波の数値シミュレーションの結果との対比を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【００２４】

20

以下、本発明の好ましい実施の形態を、図面を参照しながら説明する。なお、以下では全ての図を通じて同一又は相当する要素には同一の参照符号を付して、その重複する説明を省略する。

【００２５】

(実施の形態１)

[複合材料]

まず、本発明においてポロシティの評価対象となる複合材料について図１(a)～図１(c)を参照して具体的に説明する。なお、本発明においては、「ポロシティ」とは、前述したように、「分散した多数の微小な空孔状の欠陥」を意味する。「ポロシティ」という用語には、空孔状の欠陥の含有率を含む場合もあるが、本実施の形態では、「ポロシティ」は欠陥そのものを指すものとする。

30

【００２６】

図１(a)～図１(c)に示すように、本発明における複合材料１００Ａ～１００Ｃは、複数のプライ１０１が積層された多層構造となっている。各プライ１０１は、基本的に、強化材料である繊維材料とマトリクス材料である熱硬化性樹脂組成物とで構成されており、このプライ１０１が複数積層されて一体化されることで、単一の複合材料１００Ａ～１００Ｃとなる。

【００２７】

複合材料１００Ａ～１００Ｃのうち、図１(a)に示す健全複合材料１００Ａは、その内部に欠陥を有さない理想的な状態であるが、図１(b)に示す欠陥複合材料１００Ｂまたは図１(c)に示す欠陥複合材料１００Ｃは、いずれもその内部に複数のポロシティ１０２(微小な空孔状の欠陥)を含んでいる。ポロシティ１０２としては、図１(b)または図１(c)に示すように、プライ１０１同士の間を生じているポロシティ１０２Ａと、プライ１０１の内部に生じているポロシティ１０２Ｂとが存在する。このうち図１(b)に示す欠陥複合材料１００Ｂでは、ポロシティ１０２Ａおよび１０２Ｂのいずれも比較的分散して存在しているが、図１(c)に示す欠陥複合材料１００Ｃでは、ポロシティ１０２Ａおよび１０２Ｂは一方の面側に偏在している。

40

【００２８】

なお、図１(a)～図１(c)では、複合材料１００Ａ～１００Ｃは、それぞれ平板状の部材として図示しているが、この図示は便宜的なものであり、実際の評価対象となる複

50

合材料は、その用途に応じた様々な形状に成形された成形品となっている。本実施の形態における「複合材料」とは、「材料」としての複合材料そのものを指すだけでなく、評価対象である「複合材料製の成形品」についても指すものとする。また、下記の説明では、健全複合材料100Aと欠陥複合材料100Bおよび100Cとの区別なく、「複合材料」を指すときには、「複合材料100」と表記する。

#### 【0029】

複合材料100は、一般的には、プリプレグを所望の形状に合わせて積層（プライアップ）してから、オートクレーブ（圧力釜）により加熱および加圧して硬化させることにより製造される。プリプレグは、繊維材料に熱硬化性樹脂組成物を含浸させて半硬化状態としたものである。

#### 【0030】

複合材料100に用いられる熱硬化性樹脂は特に限定されず、複合材料の分野で公知の熱硬化性樹脂、例えば、エポキシ樹脂、ビスマレイミド樹脂、ビニルエステル樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、フェノール樹脂、シリコン樹脂等の熱硬化性樹脂が挙げられる。これら樹脂は単一種類のみを用いてもよいし、複数種類を適宜組み合わせ用いてもよい。

#### 【0031】

また、熱硬化性樹脂に対しては、溶剤、硬化剤、硬化促進剤、安定剤、帯電防止剤等の種々の添加剤が含まれてもよい。それゆえ、複合材料100を構成するマトリクス材料は、1種類以上の熱硬化性樹脂のみで構成されてもよいが、他の成分を含む熱硬化性樹脂組成物として構成されてもよい。したがって、本実施の形態における「熱硬化性樹脂組成物」には、熱硬化性樹脂とともに他の成分を含む組成物だけでなく、複数種類の熱硬化性樹脂からなる樹脂混合物、あるいは、単一種類の熱硬化性樹脂も含まれるものとする。

#### 【0032】

複合材料100に用いられる繊維材料は、熱硬化性樹脂組成物とともに用いることで得られる成形品（複合材料）を強化できるものであれば特に限定されない。具体的には、例えば、炭素繊維、ポリエステル繊維、PBO（ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール）繊維、ポロン繊維、アラミド繊維、ガラス繊維、シリカ繊維（石英繊維）、炭化ケイ素（SiC）繊維、ナイロン繊維、等が挙げられる。これら繊維材料は単一種類のみを用いてもよいし、複数種類を適宜組み合わせ用いてもよい。例えば航空機分野では、炭素繊維が好適に用いられる。また、繊維材料の長さおよび直径等も特に限定されず、複合材料100の用途に応じて適宜設定すればよい。

#### 【0033】

複合材料100において、繊維材料と熱硬化性樹脂組成物との比率は特に限定されず、その用途または使用条件等に応じて適宜設定することができる。さらに、複合材料100には、繊維材料および熱硬化性樹脂組成物以外に、公知の他の材料を含んでもよい。

#### 【0034】

本発明における複合材料100は、スポーツ用品、産業機械、車両、航空宇宙等の様々な分野に用いられるものであり、その用途は特に限定されない。特に代表的な用途としては、航空機用部品等の航空宇宙分野を挙げることができる。

#### 【0035】

航空宇宙分野では、強度等に関する基準が他の分野よりも厳しいが、あらゆる部品について一律に強度等が規定されているわけではなく、部品の種類または役割等に応じて強度低下の許容性に差がある。また、前述したように、航空機分野では、複合材料製部品を製造するに際して、複数の部品を同時に一体成形する手法を用いることができるため、同時に成形された部品であっても、ポロシティの発生状況は一律ではない。本発明においては、このような航空機用部品について、それぞれポロシティを良好に評価することが可能となる。

#### 【0036】

[ポロシティ評価方法]

10

20

30

40

50

次に、本実施の形態 1 に係るポロシティ評価方法について、図 2 および図 3 ( a ) ~ 図 3 ( c ) を参照して具体的に説明する。

【 0 0 3 7 】

本発明に係るポロシティ評価方法は、複合材料 1 0 0 に含まれるポロシティ 1 0 2 を総量的に評価できるだけでなく、厚さ方向の偏在等の分布についても評価可能とする方法である。例えば、図 1 ( b ) に示す欠陥複合材料 1 0 0 B と、図 1 ( c ) に示す欠陥複合材料 1 0 0 C とは、内部に含まれるポロシティ 1 0 2 の分布が異なるものの、ポロシティ 1 0 2 の総量が実質的に同じであるとする。このとき、従来の評価方法であれば、健全複合材料 1 0 0 A と、欠陥複合材料 1 0 0 B または 1 0 0 C との違いを評価することはできるものの、同量のポロシティ 1 0 2 を含む欠陥複合材料 1 0 0 B と欠陥複合材料 1 0 0 C との違いを評価することは実質的に困難である。

10

【 0 0 3 8 】

これに対して、本実施の形態に係るポロシティ評価方法は、図 2 に示すように、複合材料 1 0 0 に対して入射された超音波の反射波を時間 - 周波数解析する。これにより、複合材料 1 0 0 内において、ポロシティ 1 0 2 が偏在しているか否か等の分布を評価することができる。このポロシティ評価方法について、例えば、図 3 ( a ) に示す 3 層構造の欠陥複合材料 1 0 0 B または 1 0 0 C と、図 3 ( b ) および図 3 ( c ) に示す 5 層構造の欠陥複合材料 1 0 0 B または 1 0 0 C とを想定して、模式的に説明する。

【 0 0 3 9 】

図 3 ( a ) ~ 図 3 ( c ) では、複合材料 1 0 0 の一方の面 ( 例えば表面 ) を入射面 1 0 3 とし、他方の面 ( 例えば裏面 ) を底面 1 0 4 とし、プライ 1 0 1 同士の界面を多層構造の層間界面 1 0 5 としている。なお、図 3 ( a ) ~ 図 3 ( c ) では、説明の便宜上、各プライ 1 0 1 内部に存在するポロシティ 1 0 2 ( 図 1 ( b ) および図 1 ( c ) におけるポロシティ 1 0 2 B ) のみを図示し、プライ 1 0 1 の界面に存在するポロシティ 1 0 2 ( 図 1 ( b ) および図 1 ( c ) におけるポロシティ 1 0 2 A ) については図示していない。

20

【 0 0 4 0 】

さらに、図 3 ( a ) ~ 図 3 ( c ) では、入射面 1 0 3 から超音波を入射すると、超音波の入射波  $W_i$  の一部は底面 1 0 4 で反射されて底面反射波  $W_r 1$  となるとともに、底面 1 0 4 に至る前に層間界面 1 0 5 で一部が反射されて層間反射波  $W_r 2$  となる。したがって、入射面 1 0 3 で受信される反射波  $W_r$  には、底面反射波  $W_r 1$  および層間反射波  $W_r 2$  が含まれる。そこで、説明の便宜上、受信される全ての反射波  $W_r$  を「全体反射波  $W_r$ 」と称する。

30

【 0 0 4 1 】

ここで、全体反射波  $W_r$  は、複合材料 1 0 0 の入射面 1 0 3 側 ( 入射面 1 0 3 に近接する位置 ) で受信 ( 検出 ) される超音波の反射波であって、図 3 ( a ) の細い破線に示すように、底面反射波  $W_r 1$  および層間反射波  $W_r 2$  に加えて、表面反射波  $W_r 0$  も含まれる。この表面反射波  $W_r 0$  は、超音波が入射面 1 0 3 で反射されることにより生じる反射波である。

【 0 0 4 2 】

なお、複合材料 1 0 0 の入射面 1 0 3 に対して超音波を入射した場合、実際の超音波の挙動は複雑なものとなる。具体的には、超音波が複合材料 1 0 0 の入射面 1 0 3 に対して垂直に入射した場合に、当該超音波は底面 1 0 4 に向かって下向きに伝搬する経路と、底面 1 0 4 で反射された後に、入射面 1 0 3 に向かって上向きに伝搬する経路とで、それぞれ同一のポロシティ 1 0 2 により散乱されて減衰する。しかしながら、図 3 ( a ) ~ 図 3 ( c ) では、説明の便宜上、上向きに伝搬する経路で散乱される状態のみを図示している。それゆえ、入射波  $W_i$ 、底面反射波  $W_r 1$  および層間反射波  $W_r 2$  についても単純な矢印と見なして、いずれも太い破線で図示している。また、図 3 ( a ) ~ 図 3 ( c ) において入射波  $W_i$  および反射波  $W_r 0$ 、 $W_r 1$  および  $W_r 2$  が成す角度も便宜上の図示であって、実際の超音波の挙動を表すものではない。

40

【 0 0 4 3 】

50



さらに、図3(a)では、層間反射波 $W_r 2$ としては、上から第一層および第二層のプライ101同士の層間界面105で反射されたものと、第二層および第三層のプライ101同士の層間界面105で反射されたものの2つを図示している。このうち、後者の層間反射波 $W_r 2$ は、第二層のプライ101に存在するポロシティ102で一部が散乱されて減衰したものと、蛇行した点線矢印で図示している。この減衰した層間反射波 $W_r 2$ の図示については、図3(b)および図3(c)でも同様である。

【0044】

また、図3(b)および図3(c)では、いずれも向かって左側に、ポロシティ102が分散して存在する欠陥複合材料100Bを図示しており、向かって右側に、入射面103側にポロシティ102が偏在する欠陥複合材料100Cを図示している。図3(b)および図3(c)のいずれにおいても、ポロシティ102は、左右それぞれ2つずつのみ図示している。欠陥複合材料100Bでは、ポロシティ102は、上から第二層のプライ101と、下から第二層(上から第四層)のプライ101と、に図示している。また、欠陥複合材料100Cでは、上から第二層のプライ101と、上から第三層のプライ101と、に図示している。

【0045】

図2に示すポロシティ評価方法では、まず、入射面103から複合材料100の厚さ方向に向かって超音波を入射し(図3(a)の入射波 $W_i$ 参照)、当該入射面103から超音波の全体反射波 $W_r$ を受信する(工程S11)。次に、受信した全体反射波 $W_r$ を時間-周波数解析することにより、全体反射波 $W_r$ に含まれる層間反射波 $W_r 2$ の時間的な変化情報を取得する(工程S12)。そして、取得した変化情報に基づいて、複合材料100の厚さ方向について、ポロシティ102の分布を評価する(工程S13)。

【0046】

従来の一般的なポロシティ評価方法では、底面反射波 $W_r 1$ の減衰率(または減衰特性等)に基づいてポロシティ102を評価しているのが、実質的に総量的な評価しかできない。例えば、図3(b)に示す模式例では、欠陥複合材料100Bおよび100Cのいずれにおいても、底面反射波 $W_r 1$ は、2つのポロシティ102で一部が散乱され減衰して入射面103に到達する。

【0047】

それゆえ、底面反射波 $W_r 1$ の減衰率は、複合材料100の厚さ方向の総量を反映したものになるが、厚さ方向の分布の違いを十分に反映していない。したがって、底面反射波 $W_r 1$ の減衰率のみでは、厚さ方向におけるポロシティ102の分布の違いを考慮した評価を行うことはできない。つまり、底面反射波 $W_r 1$ の減衰率のみを測定する場合、ポロシティ102が分散している欠陥複合材料100Bと、入射面103側に偏在している欠陥複合材料100Cとの違いについては十分に評価できないことになる。

【0048】

これに対して、図3(c)に示す模式例では、第三層および第四層の間の層間界面105で反射された層間反射波 $W_r 2$ を示している。図3(c)における向かって左側の欠陥複合材料100Bでは、層間反射波 $W_r 2$ は、底面104側のポロシティ102で散乱されずに、入射面103側のポロシティ102のみで散乱されるので、その減衰率は、1つのポロシティ102に対応する。一方、向かって右側の欠陥複合材料100Cでは、層間反射波 $W_r 2$ は、入射面103側の2つのポロシティ102で散乱されるので、その減衰率は、2つのポロシティ102に対応する。それゆえ、図3(c)に示す例では、欠陥複合材料100Cの層間反射波 $W_r 2$ の方が、欠陥複合材料100Bの層間反射波 $W_r 2$ よりも減衰率が大きくなる。

【0049】

層間反射波 $W_r 2$ は、第三層および第四層の間の層間界面105だけでなく、第一層~第五層のそれぞれの間の層間界面105でも発生する。また、実際の層間反射波 $W_r 2$ は、図3(b)および図3(c)に示すような単純な矢印として伝搬するわけではなく、欠陥複合材料100Bまたは100Cの各層間界面105で反射と透過とを繰り返しながら

10

20

30

40

50

伝搬する。

【0050】

全体反射波 $W_r$ を時間-周波数解析すれば、全体反射波 $W_r$ を構成する個々の周波数成分について、それぞれの時間的な変化を捕捉することができる。そこで、層間反射波 $W_r2$ に対応する周波数成分について、その時間的な変化(減衰)を変化情報として取得すれば、この変化情報から、欠陥複合材料100Bまたは100Cの厚さ方向におけるポロシティ102の分布を評価することが可能となる。この変化情報は、時間-周波数解析の結果得られる情報であって、かつ、ポロシティ102の分布を評価することが可能な情報であれば特に限定されない。例えば、後述する実施例では、特徴的な周波数域の持続振動を変化情報として取得している。この周波数域は、複合材料100の構造(積層数、層厚、成形品としての形状等)に応じて適宜異なるものであって、特定の周波数域に限定されない。

10

【0051】

図3(b)または図3(c)では、複合材料100を模式的に5層構造として図示しているが、実際の複合材料100は、数十層から百層以上の多層構造となっている。それゆえ、このような多層構造の複合材料100に超音波を入射すれば、多数の層間界面105それぞれで層間反射波 $W_r2$ が発生することになる。これにより、底面104のみで生じる底面反射波 $W_r1$ に比べて、層間反射波 $W_r2$ は、複合材料100の厚さ方向内で全体的に生じるため、その減衰率も多岐にわたることになる。このような層間反射波 $W_r2$ を利用することができれば、多層構造を構成する各層の状態を含む変化情報を取得することができる。これにより豊富な情報を得ることができるので、複合材料100内のポロシティ102の分布をより詳細に評価することも可能となる。

20

【0052】

ここで、超音波(入射波 $W_i$ )の周波数は特に限定されず、超音波探傷検査の分野で公知の周波数域を選択することができる。ただし、本発明では、底面反射波 $W_r1$ の減衰に着目した従来のポロシティ評価方法とは異なり、層間反射波 $W_r2$ に着目するので、入射面103において層間反射波 $W_r2$ を受信しやすい周波数域を選択することが好ましい。具体的には、従来のポロシティ評価方法の入射周波数(底面反射波 $W_r1$ の減衰に基づいてポロシティ102を総量的に評価するために用いられる周波数)を、例えば「標準周波数」とすれば、本発明に係るポロシティ評価方法の入射周波数は、標準周波数よりも高く設定されてもよい。

30

【0053】

超音波探傷検査の分野では、一般に、伝搬距離に対して超音波の波長が短すぎると、超音波の減衰が大きくなって反射波(特に底面反射波 $W_r1$ )を良好に受信できなくなることが知られている。それゆえ、従来のポロシティ評価方法では、複合材料100の厚さ方向全体を往復しても減衰が大きくなり過ぎないように、入射周波数としては、相対的に低い周波数域を選択している。これに対して本発明では、従来のポロシティ評価方法における技術常識とは逆の発想に基づき、相対的に高い周波数域を選択する。これにより、個々の層間界面105から良好な層間反射波 $W_r2$ を得やすくすることができる。

【0054】

例えば、底面反射波 $W_r1$ が良好に受信できない程度に入射周波数を高くした場合、底面104からの底面反射波 $W_r1$ 、または、底面104に近い層間界面105から良好な層間反射波 $W_r2$ が得られない可能性がある。しかしながら、ポロシティの分布を評価する上では、入射面103に近い層間界面105から層間反射波 $W_r2$ を受信することを優先すればよい。それゆえ、入射周波数としては、従来よりも高い周波数域を選択して設定することが可能となる。

40

【0055】

前述したように、入射波 $W_i$ は、入射面103から見て手前に位置するポロシティ102で散乱されて減衰し、層間反射波 $W_r2$ となる。そのため、本発明では、前記の通り、入射面103側に近い層間反射波 $W_r2$ を取得することを優先すればよい。逆に、底面反

50

射波  $W_r 1$ 、あるいは、底面 104 に近い層間界面 105 から層間反射波  $W_r 2$  を得るために、入射周波数を低く設定すると、入射面 103 に近い層間界面 105 から良好な層間反射波  $W_r 2$  が受信できない可能性がある。

【0056】

なお、各層間界面 105 から層間反射波  $W_r 2$  を良好に受信できる入射周波数は、複合材料 100 を構成するプライ 101 の厚さに応じて設定すればよい。複合材料 100 の厚さ方向において、どの程度の深さまで層間反射波  $W_r 2$  を受信できるか否かは、複合材料 100 の材質等の条件によって決定される。例えば、約半分程度の深さまで層間反射波  $W_r 2$  を受信できれば、複合材料 100 の厚さ全体について層間反射波  $W_r 2$  を受信することが可能となる。つまり、表面を入射面 103 として表面から層間反射波  $W_r 2$  を受信し、入射面 103 を裏面に変えて、裏面から層間反射波  $W_r 2$  を受信すれば、結果的に、複合材料 100 の厚さ全体についてポロシティ 102 の分布を評価することができる。

10

【0057】

また、本発明においては、ポロシティ 102 の分布評価だけでなく総量的な評価も行ってよい。前述したように、本発明では、入射面 103 に近い層間界面 105 から優先して層間反射波  $W_r 2$  を受信すればよい。それゆえ、底面反射波  $W_r 1$  は基本的に不要な反射波となる。しかしながら、総量的な評価を行う場合には、層間反射波  $W_r 2$  と底面反射波  $W_r 1$  との双方が良好に受信できるような周波数域を選択してもよいことは、言うまでもない。

【0058】

20

さらに、本発明においては、入射周波数は、複合材料 100 を構成するプライ 101 の厚さに応じて変更可能とすることが好ましい。実際の評価対象となる複合材料 100 は、所定の形状を有する成形品であるため、1つの成形品であってもその厚さ（または積層数）が異なる場合がある。それゆえ、入射周波数を変更可能とすることにより、様々な形状または用途の複合材料 100 について、汎用的にポロシティ評価を実施することが可能となる。

【0059】

ここで、入射周波数の変更手法は特に限定されず、入射波  $W_i$  として用いる超音波の周波数を、好適な周波数に設定（特定の周波数を選択）すればよい。本実施の形態では、諸条件に応じた好適な周波数を含む広帯域の超音波を、入射波  $W_i$  として用いればよい。この点について具体的に説明する。

30

【0060】

層間反射波  $W_r 2$  が顕著に生じる場合とは、複合材料 100 における各プライ 101 同士の間（層間）からの層間反射波  $W_r 2$  の位相が概ね揃う場合とすることができる。そこで、各層間からの層間反射波  $W_r 2$  が全て揃う場合を想定し、そのための条件について模式的に検討する。プライ 101 の厚さ方向の超音波伝搬速度を  $c$  とし、プライ 101 の厚さを  $h$  とし、入射波  $W_i$  の周波数（入射周波数）を  $f$  とし、入射波  $W_i$  の波長を  $\lambda$  とすると、 $c$ 、 $h$ 、 $f$  および  $\lambda$  の関係は、下記式（1）として概算することができる。

【0061】

$$\lambda = c / f = 2h \quad \dots (1)$$

40

それゆえ、入射周波数  $f$  は、超音波伝搬速度  $c$  およびプライ 101 の厚さ  $h$  を用いて下記（2）式として表現することができる。

【0062】

$$f = c / (2h) \quad \dots (2)$$

プライ 101 が CFRP 製であれば、超音波伝搬速度  $c$ （縦波伝搬速度）の代表的な値は約 3,000 m/s となることが知られている。そこで、この超音波伝搬速度  $c = 3,000$  m/s およびプライ 101 の厚さ  $h$  から、上記式（2）に基づいて入射周波数  $f$  を概算することができる。例えば、CFRP 製のプライ 101 の厚さ  $h = 0.15$  mm であれば、その入射周波数  $f = 10.0$  MHz に概算できる。また、プライ 101 の厚さ  $h = 0.19$  mm であれば、入射周波数  $f = 7.9$  MHz に概算できる。また、プライ 101

50

の厚さ  $h = 0.40 \text{ mm}$  であれば、入射周波数  $3.8 \text{ MHz}$  に概算できる。

【0063】

超音波の送受信を実際に計測する場合には、入射波  $W_i$  として、上述した概算値のように、式(2)の条件を満たすような周波数(好適な周波数)を含む比較的広帯域の超音波を選択して用いればよい。このような広帯域の超音波を複合材料100に入射し、少なくとも層間反射波  $W_{r2}$  を受信して、時間-周波数解析すれば、好適な周波数の付近において、層間反射波  $W_{r2}$  が顕著に生じていることを確認することができる。

【0064】

[ポロシティ評価装置]

本実施の形態に係るポロシティ評価方法を実施する具体的な構成は特に限定されないが、当該ポロシティ評価方法を実施するための代表的なポロシティ評価装置(本実施の形態1に係るポロシティ評価装置)の一例について、図4および図5を参照して具体的に説明する。

【0065】

図4に示すように、本実施の形態に係るポロシティ評価装置10Aは、超音波検出器11、時間-周波数解析器12、表示用情報生成器13、および表示器14を備えている。

【0066】

超音波検出器11は、探触子111および超音波送受信器112から構成され、複合材料100の一方の面を入射面103として、当該入射面103から厚さ方向に向かって超音波を入射するとともに、当該入射面103からの全体反射波  $W_r$  を受信する。超音波検出器11の具体的な構成は特に限定されず、超音波探傷検査の分野で公知の構成を好適に用いることができる。

【0067】

また、この超音波検出器11は、入射周波数が変更可能になっていることが好ましい。通常、公称中心周波数の異なる複数種の探触子111を準備しておき、複合材料100の諸条件(材質、厚さ等)に応じて、好適な探触子111を適宜取り替えて用いればよい。また、入射周波数を変更する構成(周波数調整器)は、超音波送受信器112に設けられてもよいし、超音波送受信器112とは別体としてポロシティ評価装置10Aが備えてもよい。

【0068】

なお、図4に示すブロック図では、探触子111が複合材料100に直接接触したかたちで図示しているが、通常は、超音波の送受信面と入射面103との間に緩衝材(ディレータ)を介在させる必要がある。この緩衝材の具体的な種類は特に限定されないが、後述する実施例も含めて一般的には水が用いられる。したがって、超音波検出器11は、複合材料100を水中に浸漬した状態で超音波を送受信するように構成されていけばよい。また、緩衝材としては、表面反射波  $W_{r0}$  およびこれに続く層間反射波  $W_{r2}$  の波形が受信できるような材料であれば、必ずしも水に限定されず、公知の樹脂材料等であってもよい。

【0069】

時間-周波数解析器12は、複合材料100の入射面103から超音波検出器11によって受信される全体反射波  $W_r$  を時間-周波数解析することで、全体反射波  $W_r$  に含まれる層間反射波  $W_{r2}$  の時間的な変化情報を取得する。この変化情報は、前記の通り、複合材料100に含まれるポロシティ102の厚さ方向の分布を評価するために用いられる情報である。時間-周波数解析器12の具体的な構成は特に限定されず、公知のスイッチング素子、減算器、比較器等による論理回路等として構成されてもよいし、公知のプロセッサ(CPU等)が記憶器(メモリ)に格納されるプログラムに従って動作することにより実現される構成、すなわちプロセッサの機能構成であってもよい。

【0070】

ここで、時間-周波数解析の具体的な手法は特に限定されない。本実施の形態では、後述する実施例で説明するように、短時間フーリエ変換(STFT)を採用している。また

10

20

30

40

50

、S T F Tを実施する上のパラメータも特に限定されず、後述する実施例では、S T F Tを行う時間範囲、時間範囲の分割数、窓関数の種類、および窓関数の幅等を適宜設定している。

#### 【 0 0 7 1 】

表示用情報生成器 1 3 は、時間 - 周波数解析器 1 2 により得られた変化情報から、表示用情報を生成する。表示用情報生成器 1 3 の具体的な構成は特に限定されず、表示器 1 4 で画像を表示するための公知のプロセッサ ( G P U 等 ) であればよい。また、時間 - 周波数解析器 1 2 と表示用情報生成器 1 3 とは、それぞれ、1 つのプロセッサがプログラムに従って動作する機能構成であってもよい。

#### 【 0 0 7 2 】

表示器 1 4 は、表示用情報生成器 1 3 で生成された表示用情報に基づいて変化情報を画像情報または数値情報等として表示する。表示器 1 4 の具体的な構成は特に限定されず、公知の液晶ディスプレイ等を好適に用いることができる。

#### 【 0 0 7 3 】

また、図 5 に示すように、本発明では、少なくとも、超音波検出器 1 1 および時間 - 周波数解析器 1 2 のみでポロシティ評価装置 1 0 B が構成されてもよい ( なお、図 5 では、説明の便宜上、探触子 1 1 1 および超音波送受信器 1 1 2 をまとめて超音波検出器 1 1 のブロックとして図示している ) 。図 5 に示すポロシティ評価装置 1 0 B は、表示器 1 4 ( および表示用情報生成器 1 3 ) を備えていないが、図 5 に示すように、外付けの表示装置 2 3 が接続可能な構成となっていればよい。さらに図示しないが、本発明に係るポロシティ評価装置 1 0 A または 1 0 B は、時間 - 周波数解析器 1 2 以外の他の解析構成を備えていてもよい。具体的には、例えば、超音波の反射波を受信することによって得られる、ポロシティ評価以外に関する情報に基づいて、複合材料 1 0 0 の解析、評価または検査等を行う公知の構成を挙げることができる。

#### 【 0 0 7 4 】

なお、本実施の形態に係るポロシティ評価装置 1 0 A または 1 0 B は、いずれも、変化情報を表示器 1 4 または表示装置 2 3 で表示する構成である。それゆえ、前述した工程 S 1 3 のポロシティ評価に関しては、ポロシティ評価装置 1 0 A または 1 0 B のオペレータ ( 複合材料 1 0 0 の検査の担当者 ) が表示される画像情報等に基づいて評価することになる。もちろん、後述する実施の形態 2 のように、ポロシティ評価器を備えることによって、ポロシティ評価装置 1 0 A または 1 0 B そのものがポロシティ評価を行うように構成されてもよい。

#### 【 0 0 7 5 】

このように、本実施の形態に係るポロシティ評価方法およびポロシティ評価装置では、複合材料中におけるポロシティの厚さ方向の分布状態を良好に評価することができるので、例えば、一体成形された複数の複合材料製の部品について、異なる部品別に良好にポロシティレベルを評価することができる。例えば、航空機用部品であれば、前記の通り、各部品の種類または役割等に応じて強度低下の許容性に差がある。そこで、本発明に係るポロシティ評価方法により、部品別にポロシティ評価を行うとともに、ポロシティに由来する強度低下も評価することで、より効率的かつ良好な部品評価が可能となる。

#### 【 0 0 7 6 】

( 実施の形態 2 )

前記実施の形態 1 に係るポロシティ評価方法 ( およびポロシティ評価装置 1 0 A 、 1 0 B ) は、複合材料 1 0 0 からの反射波に基づいて、ポロシティ 1 0 2 の厚さ方向の分布を評価する構成であったが、本実施の形態 2 に係るポロシティ評価方法は、さらに、数値シミュレーションを併用することにより、複合材料 1 0 0 内におけるポロシティ 1 0 2 の分布をより精細に推測する構成となっている。本実施の形態に係るポロシティ評価方法について、図 6 を参照して具体的に説明する。

#### 【 0 0 7 7 】

[ ポロシティ評価方法 ]

10

20

30

40

50

図6に示すように、本実施の形態に係るポロシティ評価方法は、工程S21およびS22は前記実施の形態1に係るポロシティ評価方法における工程S11およびS12と同様であるが、工程S23および工程S24を含んでいる点が異なっている。

【0078】

図6に示すポロシティ評価方法では、前記実施の形態1と同様に、まず、入射面103から複合材料100の厚さ方向に向かって超音波を入射し、当該入射面103から超音波の全体反射波 $W_r$ を受信する(工程S21)。次に、受信した全体反射波 $W_r$ を時間-周波数解析することにより、全体反射波 $W_r$ に含まれる層間反射波 $W_r2$ の時間的な変化情報を取得する(工程S22)。

【0079】

さらに、本実施の形態では、ポロシティ評価のための評価用情報を取得する(工程S23)。そして、取得した変化情報と評価用情報とを対比することにより、複合材料100内におけるポロシティ102の分布を推測する(工程S24)。

【0080】

工程S23で取得する具体的な評価用情報は特に限定されないが、代表的には、(1)モデル化したポロシティ102を含む欠陥複合材料100Bまたは100Cと、当該欠陥複合材料100Bまたは100Cに対する超音波の入射および反射波の受信と、を模擬的に再現する数値シミュレーションを行うことにより得られる模擬的な層間反射波 $W_r2$ の変化情報(模擬的な再現結果)、(2)既知のポロシティ102を含む複合材料100の試験片を準備し、当該試験片に対して超音波の入射および反射波の受信を行うことにより取得される、層間反射波 $W_r2$ の既知情報が挙げられる。なお、説明の便宜上、前者(1)を模擬的な変化情報と称し、後者(2)を既知情報と略する。

【0081】

まず、(1)模擬的な変化情報の取得について説明すると、当該模擬的な変化情報を取得するための数値シミュレーションとしては、公知の手法を好適に用いることができ、その具体的な手法は特に限定されない。後述する実施例では、数値シミュレーションを行うに当たって、欠陥複合材料100Bまたは100Cの模擬的な再現は、ポロシティ102を辺長がガウス分布にしたがって分布した長方形断面としてモデル化し、模擬的な欠陥複合材料100Bまたは100Cの断面中にランダムに分布させることによって行っている。さらに、欠陥複合材料100Bまたは100Cに対する超音波の入射および反射波の受信の模擬的な再現は、実際の超音波の入射波形を用いて、有限要素解析法(FEM)を用いて行っている。

【0082】

また、前記数値シミュレーションは、複合材料100についてのポロシティ評価を行うときに、工程S22で得られる実際の変化情報を参考にして毎回行ってもよいし、予め複数回の数値シミュレーションを行ってデータベースを作成しておいてもよい。さらに、工程S22を行った後に、実際の変化情報に基づいて、数値シミュレーションを毎回実施し、得られた再現結果をデータベースに登録してもよい。つまり、数値シミュレーション結果のデータベースは、ポロシティ評価の実施に並行して徐々に構築してもよい。データベースを徐々に構築する場合でも、ポロシティ評価を開始する前に、代表的な条件で数値シミュレーションを実施して、予備的なデータベースを予め作成してもよい。

【0083】

次に、(2)既知情報の取得について説明すると、当該既知情報を取得するための試験片の作製方法は特に限定されず、ポロシティ102の分布状況が予め判明するように、欠陥複合材料100Bまたは100Cを公知の手法で作製すればよい。また、評価のために改めて試験片を作製するのではなく、本実施の形態に係るポロシティ評価方法により得られたポロシティ102の分布の推測結果(評価結果)を蓄積して、既知情報として用いてもよい。この場合、評価対象となる複合材料100が、既知情報を取得するための試験片に相当する。また、試験片から取得された既知情報は、(1)模擬的な変化情報と同様に、データベースに記憶され、適宜読み出されればよい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 8 4 】

なお、本実施の形態に係るポロシティ評価方法は、図 6 に示す 4 工程に限定されない。例えば、評価用情報を取得する工程 S 2 3 は、実際の変化情報を取得する工程 S 2 2 の後に実施されているが、最初に評価用情報を取得（先に工程 S 2 3 を実施）してから、実際の変化情報を取得（後で工程 S 2 1 および S 2 2 を実施）してもよい。また、工程 S 2 1 ~ S 2 4 以外の工程が含まれてもよい。

## 【 0 0 8 5 】

また、前記の通り、工程 S 2 3 では、評価用情報が（ 1 ）模擬的变化情報であっても（ 2 ）既知情報であっても、データベースに記憶された情報を適宜読み出して用いることができる。それゆえ、評価用情報が（ 1 ）模擬的变化情報であれば、工程 S 2 2 が行われた後に、数値シミュレーションを行わずに、データベースから適宜シミュレーション結果を読み出せばよい。また、データベースは、ポロシティ評価方法を実施する現場に準備されている必要はなく、通信ネットワークを介して別の場所に準備されてもよい。この場合、工程 S 2 3 では、通信により評価用情報を取得することになる。このように、工程 S 2 3 における評価用情報の取得の方法は特に限定されない。

## 【 0 0 8 6 】

さらに、工程 S 2 4 で用いられる評価用情報は、1 種類のみでもよいし 2 種類以上であってもよい。例えば、工程 S 2 4 では、取得された実際の変化情報と（ 1 ）模擬的变化情報と対比させてもよいし、実際の変化情報と（ 2 ）既知情報とを対比させてもよいし、実際の変化情報に対して（ 1 ）模擬的变化情報および（ 2 ）既知情報の双方を対比させてもよいし、評価用情報として（ 1 ）模擬的变化情報および（ 2 ）既知情報以外の他の情報を 1 種類以上用いることができるのであれば、これら 3 種類以上の情報をそれぞれ実際の変化情報に対比させてもよい。

## 【 0 0 8 7 】

## 〔 ポロシティ評価装置 〕

本実施の形態に係るポロシティ評価方法を実施する具体的な構成は特に限定されないが、前記実施の形態 1 と同様に、代表的なポロシティ評価装置（本実施の形態 2 に係るポロシティ評価装置）の一例について、図 7、図 8 および図 9 を参照して具体的に説明する。

## 【 0 0 8 8 】

図 7 または図 8 に示すように、本実施の形態に係るポロシティ評価装置 1 0 C または 1 0 D は、基本的には前記実施の形態 1 に係るポロシティ評価装置 1 0 A または 1 0 B と同様の構成を有しているが、ポロシティ評価器 1 5 を少なくとも備えている点が異なっている。

## 【 0 0 8 9 】

ポロシティ評価器 1 5 は、前記時間 - 周波数解析器より得られる変化情報を、前述した評価用情報と対比することにより、複合材料 1 0 0 内におけるポロシティ 1 0 2 の分布を推測する。評価用情報としては、前述した通り、（ 1 ）模擬的变化情報または（ 2 ）既知情報、もしくはその両方を（あるいは他の情報も）用いることができる。これら評価用情報は、図 7 に示す超音波送受信シミュレータ 1 6（模擬的变化情報のみ）、または、図 8 に示す評価用情報データベース 1 7（模擬的变化情報および既知情報の少なくとも一方）から取得すればよい。

## 【 0 0 9 0 】

ポロシティ評価器 1 5 の具体的な構成は特に限定されず、公知のスイッチング素子、減算器、比較器等による論理回路等として構成されてもよいし、公知のプロセッサがプログラムに従って動作する機能構成であってもよい。また、ポロシティ評価器 1 5 によって行われるポロシティ評価は、前述した工程 S 2 4 の評価、すなわち、実際の変化情報と評価用情報とを対比して、ポロシティ 1 0 2 の分布を推測する評価に限定されず、公知の他の評価手法を採用してもよい。

## 【 0 0 9 1 】

図 7 に示すポロシティ評価装置 1 0 C では、ポロシティ評価器 1 5 は、超音波送受信シ

10

20

30

40

50

ミュレータ 16 から模擬的变化情報を取得する構成となっている。それゆえ、このポロシティ評価装置 10C は、前述したポロシティ評価方法のうち、数値シミュレーションを毎回行う構成に対応する。超音波送受信シミュレータ 16 は、前述した模擬的变化情報を取得するための数値シミュレーションを実施する構成である。その具体的な構成は特に限定されず、数値シミュレーションのプログラムにしたがって公知のプロセッサが動作することにより実現される機能構成であればよい。

【0092】

一方、図 8 に示すポロシティ評価装置 10D は、ポロシティ評価器 15 が、評価用情報データベース 17 から、模擬的变化情報および既知情報の少なくとも一方を取得する構成となっている。それゆえ、このポロシティ評価装置 10D は、前述したポロシティ評価方法のうち、データベースから再現結果を取得する構成に対応する。評価用情報データベース 17 の具体的な構成は特に限定されず、データベースを記憶可能とする公知の記憶装置等であればよい。

10

【0093】

さらに、図 7 または図 8 に示すポロシティ評価装置 10C または 10D は、超音波送受信シミュレータ 16 のみ、または、評価用情報データベース 17 のみを備える構成であるが、本発明はこれに限定されず、図 9 に示すように、超音波送受信シミュレータ 26 および評価用情報データベース 27 の双方を備える構成のポロシティ評価装置 10E であってもよい。

【0094】

20

図 9 に示すポロシティ評価装置 10E は、公知の超音波探傷装置 21 および公知の情報処理装置 22 を利用した「ポロシティ評価システム」として構成されている。公知の超音波探傷装置 21 としては、ポロシティ 102 以外の欠陥を検査する検査装置または従来のポロシティ評価（総量的評価）を行う検査装置等を挙げることができ、公知の情報処理装置 22 としては、例えば、パーソナルコンピュータ等を挙げることができるが特に限定されない。したがって、本発明に係る「ポロシティ評価装置」は、図 4、図 5、図 7 および図 8 に示すような、単一の「評価装置」に限定されず、複数の「装置」が互いに接続された「評価システム」も本発明の範囲に含まれる。

【0095】

また、図 9 に示す例では、図 5 に示すポロシティ評価装置 10B と同様に、外付けの表示装置 23 を備える構成となっているが、図 4 に示すポロシティ評価装置 10A、図 7 または図 8 に示すポロシティ評価装置 10C または 10D と同様に、情報処理装置 22 そのものが表示器 14 を備える構成であってもよい。

30

【0096】

さらに、図 9 に示す例では、超音波送受信シミュレータ 26 および評価用情報データベース 27 は、図 7 または図 8 に示すポロシティ評価装置 10C または 10D のように内部構成として備えられているのではなく、独立した「装置」として、情報処理装置 22 に接続されている。それゆえ、図 7 または図 8 に示すポロシティ評価装置 10C または 10D においても、超音波送受信シミュレータ 16 または評価用情報データベース 17 は、内部構成ではなく外付け構成として備えられてもよい。

40

【0097】

このように、本実施の形態に係るポロシティ評価方法およびポロシティ評価装置では、実測に基づく結果と、数値シミュレーションによる模擬的な再現結果（模擬的な変化情報）とを対比しているため、複合材料製の部品中におけるポロシティレベルをより精細に評価することができる。それゆえ、部品の評価精度の向上を図ることが可能となるとともに、ポロシティに由来する強度低下の評価についても精度の向上を図ることが可能となる。

【0098】

なお、本実施の形態に係るポロシティ評価装置 10C ~ 10E は、いずれも、実測に基づく結果と数値シミュレーションによる模擬的な再現結果とを対比するポロシティ評価器 15 を備えている構成である。しかしながら、本発明はこれに限定されず、前記の通り、

50



他の評価手法によりポロシティ 102 の分布を評価してもよいし、前記実施の形態 1 のように、ポロシティ評価装置 10C ~ 10E のオペレータが、ポロシティ評価器 15 の評価結果（表示器 14 で画像情報等として表示される）に基づいて、さらなる評価を行ってもよい。また、ポロシティ評価器 15 そのものが 1 種類のみではなく、2 種類以上設けられてもよい。

【実施例】

【0099】

本発明について、実施例および比較例に基づいてより具体的に説明するが、本発明はこれに限定されるものではない。当業者は本発明の範囲を逸脱することなく、種々の変更、修正、および改変を行うことができる。なお、以下の実施例および比較例における測定方法または解析方法は次に示すようにして行った。

【0100】

（サンプルからの反射波の測定）

インサイト株式会社製 FlexScan、および、公称中心周波数 10 MHz の水浸用探触子を用いて、ポロシティ評価用サンプルまたは比較健全サンプルの一方の面または他方の面に対して超音波パルスを入射し、反射波を受信した。

【0101】

（反射波の時間 - 周波数解析）

ポロシティ評価用サンプルまたは比較健全サンプルから得られた超音波の反射波の測定時間波形を、短時間フーリエ変換（STFT）することにより、時間 - 周波数応答をグラフ化して解析した。このとき、STFT を行う時間範囲、並びに、窓関数の種類およびその幅は、着目する周波数範囲および時間範囲に応じて適宜設定した。また、グラフ化に際しては、時間波形をサンプリング周期毎に離散化して数値処理した。

【0102】

（数値シミュレーションによる解析）

ISHII, Yosuke, and BIWA, Shiro, Journal of Applied Physics 111, No. 084907 (2012) に開示されている有限要素解析（FEM）に基づいて、陰解法を用いて、数値シミュレーションを行うことにより、ポロシティ評価用サンプルまたは比較健全サンプルにおける超音波の反射波を解析した。なお、数値シミュレーションにおいては、前記反射波の測定に用いた入射波形を模擬して用いた。この入射波形は、中心周波数 7 MHz 程度の広帯域波となる。

【0103】

（実施例）

東邦テナックス株式会社製の航空機用複合材料 UTS50 / 135（商品名）を用いて、真空度 750 mmHg、加圧無し、硬化温度 180 の成形条件（オートクレーブ条件）で成形を行うことにより、120 mm x 100 mm かつ積層数（プライ数）24（全体の厚さが約 4.6 mm）の寸法のポロシティ評価用サンプルを作製した。積層構成は、24 プライの繊維方向が全て同一方向の積層構成（ $[0]_{24}$ ）、および、繊維方向が  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$  の角度に均等に分配した擬似等方積層構成（ $[45/0/-45/90]_{3s}$ ）の 2 種類とした。なお、UTS50 / 135 に用いられる炭素繊維は、同社製 UTS50（商品名）の UD（Uni-Direction）材であり、用いられるマトリクス材料は、同社製の高靱性エポキシ樹脂である。

【0104】

また、得られたポロシティ評価用サンプルは、一方の面（表面）側の半分がポロシティを 4% 含む欠陥複合材料となっており、他方の面（裏面）側の半分がポロシティを含まない健全複合材料となっている（図 1（c）参照）。それゆえ、ポロシティ評価用サンプル全体としては、ポロシティの総量が 2% となる。

【0105】

得られたポロシティ評価用サンプルの表面（欠陥偏在側）から、前述した通り超音波を入射して反射波を測定するとともに、裏面（健全側）からも超音波を入射して反射波を測

10

20

30

40

50

定した。得られた結果のうち、擬似等方積層構成のポロシティ評価用サンプルについての結果を図10の「実施例（表面）」および「実施例（裏面）」に示す。

【0106】

また、表面または裏面で測定された反射波について、前述した通り時間 - 周波数解析を行ってグラフ化した。その結果を図11(a)（表面側の解析結果）および図11(b)（裏面側の解析結果）に示す。

【0107】

さらに、前述した数値シミュレーションにより、ポロシティ評価用サンプルにおける表面側および裏面側の反射波を再現してグラフ化した。この数値シミュレーションに際して、ポロシティは、ポロシティ評価用サンプルの断面全体において、平均値  $0.1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 、かつ、辺長がガウス分布にしたがって分布した長方形断面としてモデル化し、表面側（図1(c)参照）に偏在させた。その結果を図12(a)（表面側の解析結果）および図12(b)（裏面側の解析結果）に示す。なお、図12(a)および図12(b)の上側のグラフは実測結果を示しており、下側のグラフは数値シミュレーションによる結果を示している。

【0108】

（比較例）

ポロシティを含まないこと、並びに、成形条件の加圧を  $400 \text{ kPa}$  としたこと以外は、実施例と同様にして、 $120 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  かつ積層数（プライ数）24（全体の厚さが約  $4.6 \text{ mm}$ ）の寸法の比較健全サンプルを作製した。

【0109】

得られた比較健全サンプルについて、実施例と同様にして、表面または裏面からそれぞれ超音波を入射して反射波を測定した。得られた結果のうち、擬似等方積層構成のポロシティ評価用サンプルについての結果を図10の「比較例（表面）」および「比較例（裏面）」に示す。

【0110】

また、表面または裏面で測定された反射波について、前述した通り時間 - 周波数解析を行ってグラフ化した。その結果を図11(c)（表面側の解析結果）および図11(d)（裏面側の解析結果）に示す。

【0111】

（実施例および比較例の対比等）

図10に示すように、ポロシティ評価用サンプルにおいては、表面および裏面のいずれの全体反射波  $W_r$  においても、表面反射波  $W_{r0}$ （ $1.6 \sim 1.7 \mu\text{s}$  付近）に続く層間反射波  $W_{r2}$ （実線の円で囲んだ箇所、 $1.8 \sim 2.2 \mu\text{s}$  付近）が確認されるが、表面から入射した場合の層間反射波の振動は比較的早期に消失している。また、比較健全サンプルにおいては、表面および裏面のいずれの全体反射波  $W_r$  においても底面反射波  $W_{r1}$ （破線の円で囲んだ箇所、 $4.6 \mu\text{s}$  付近）が確認されるが、ポロシティ評価用サンプルにおいては、底面反射波  $W_{r1}$  は確認されない。

【0112】

また、図11(c)および図11(d)に示すように、時間 - 周波数解析の結果、比較健全サンプルにおいては、図10の結果と同様に、底面反射波  $W_{r1}$  に相当する信号（破線の円で囲んだ領域）が確認できるが、図11(a)および図11(b)に示すように、ポロシティ評価用サンプルでは、底面反射波  $W_{r1}$  に対応する信号は確認できない。

【0113】

また、比較健全サンプルにおいては、表面（図11(c)）および裏面（図11(d)）のいずれにおいても、図中実線の円で囲んだ領域に、表面反射波  $W_{r0}$  に続く周波数  $8 \text{ MHz}$  付近の成分の持続振動が確認できる。ポロシティ評価用サンプルでも、健全側である裏面から超音波を入射した場合には、図11(b)の実線の円で囲んだ領域に、周波数  $8 \text{ MHz}$  付近の持続振動が確認できる。一方、ポロシティ偏在側である表面から超音波を入射した場合には、図11(a)に示すように、周波数  $8 \text{ MHz}$  付近の持続振動は十分に

10

20

30

40

50

確認することはできない。

【0114】

なお、図11(a)～図11(d)は、いずれも擬似等方積層構成のポロシティ評価用サンプルの結果であるが、同一方向の積層構成のポロシティ評価用サンプルについても、図示しないが、同様の傾向を示す結果が得られている。

【0115】

このように、ポロシティ評価用サンプルでは、表面および裏面のいずれから超音波を入射しても、底面反射波 $W_{r1}$ は確認できず、また、表面反射波に続く持続振動の成分には違いが認められる。それゆえ、全体反射波を時間-周波数解析して、層間反射波の時間的な変化情報を取得することにより、複合材料に含まれるポロシティの厚さ方向の分布を評価できることが分かる。

10

【0116】

また、図示しないが、ポロシティ評価用サンプルにおいて、表面(欠陥偏在側)から超音波を入射した場合の数値シミュレーション結果と、裏面(健全側)から超音波を入射した場合の数値シミュレーション結果と、ポロシティが均一に分布した場合の数値シミュレーション結果と、を比較すると、健全側の面(裏面)から超音波を入射した方が、均一なポロシティを有する場合よりも、表面反射波 $W_{r0}$ に続く持続振動が長く持続し、表面から超音波を入射した方が、均一なポロシティを有する場合よりも表面反射波 $W_{r0}$ に続く持続振動が早く減衰することが分かった。

【0117】

20

また、図12(a)および図12(b)の上グラフは、ポロシティ評価用サンプルにおいて反射波を実際に測定した場合の時間-周波数解析結果を示し、図12(a)および図12(b)の下グラフは、数値シミュレーションによる模擬的な時間-周波数解析結果を示すが、上下のグラフの対比から明らかなように、実測された反射波の時間-周波数解析結果の特徴は、数値シミュレーションの結果に良好に対応していることがわかる。

【0118】

それゆえ、数値シミュレーションにより得られる模擬的な層間反射波の変化情報(もしくは、ポロシティの分布が既知の試験片から取得される層間反射波の既知情報)を、予めデータベース化しておけば、実測した層間反射波からの変化情報を、模擬的な変化情報(もしくは、既知のポロシティ評価結果)に対比させることにより、複合材料内におけるポロシティの分布を精細に推測することが可能となることが分かる。

30

【0119】

上記説明から、当業者にとっては、本発明の多くの改良や他の実施形態が明らかである。従って、上記説明は、例示としてのみ解釈されるべきであり、本発明を実行する最良の態様を当業者に教示する目的で提供されたものである。本発明の精神を逸脱することなく、その構造及び/又は機能の詳細を実質的に変更できる。

【産業上の利用可能性】

【0120】

本発明は、繊維強化樹脂複合材料に含まれるポロシティを評価する分野に、広く好適に用いることができる。特に、本発明は、他の構造強度に関する要求が厳しい航空宇宙分野に用いられる複合材料のポロシティ評価に好適に用いることができる。

40

【符号の説明】

【0121】

- 10A ポロシティ評価装置
- 10B ポロシティ評価装置
- 10C ポロシティ評価装置
- 10D ポロシティ評価装置
- 11 超音波検出器
- 12 時間-周波数解析器
- 13 表示用情報生成器

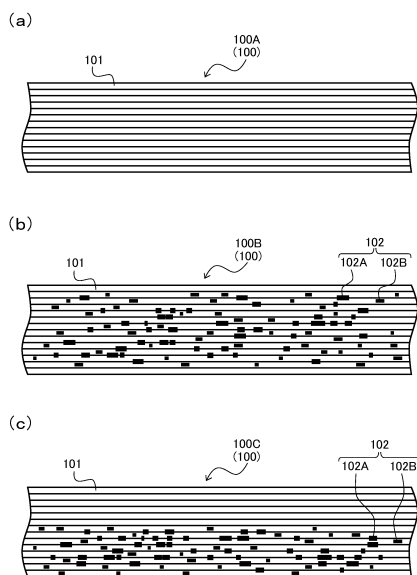
50

- 1 4 表示器
- 1 5 ポロシティ評価器
- 1 6 超音波送受信シミュレータ
- 1 7 評価用情報データベース
- 2 1 超音波探傷装置
- 2 2 情報処理装置
- 2 3 表示装置
- 1 0 0 複合材料
- 1 0 0 A 健全複合材料
- 1 0 0 B 欠陥複合材料
- 1 0 0 C 欠陥複合材料
- 1 0 1 プライ
- 1 0 2 ポロシティ
- 1 0 3 入射面
- 1 0 4 底面
- 1 0 5 層間界面
- 1 1 1 探触子
- 1 1 2 超音波送受信器
- W i 入射波
- W r 全体反射波
- W r 0 表面反射波
- W r 1 底面反射波
- W r 2 層間反射波

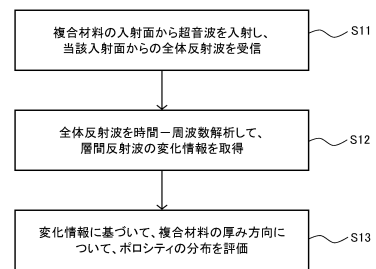
10

20

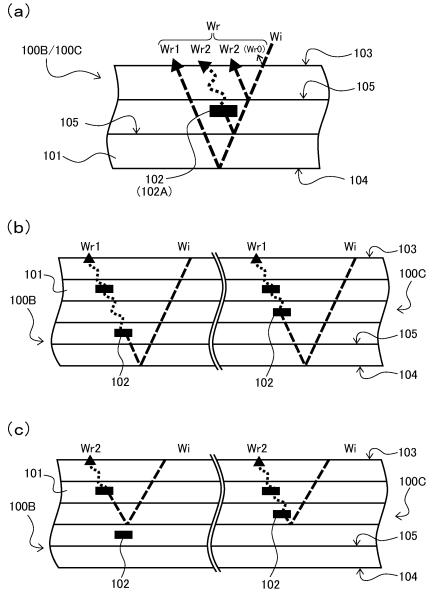
【図1】



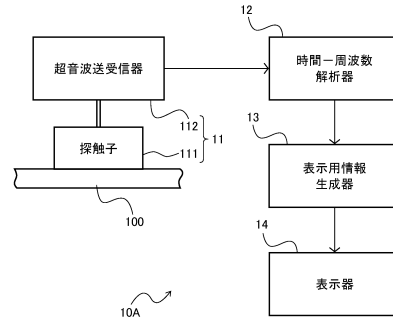
【図2】



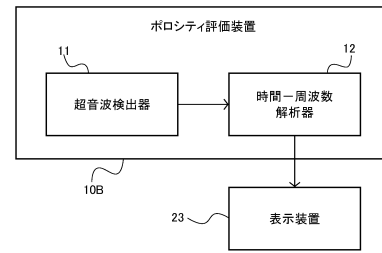
【図3】



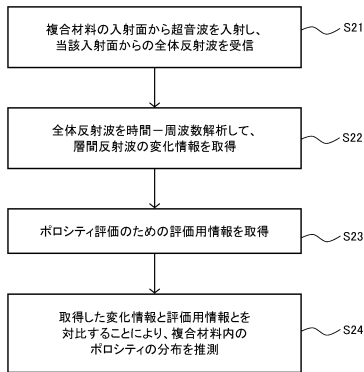
【図4】



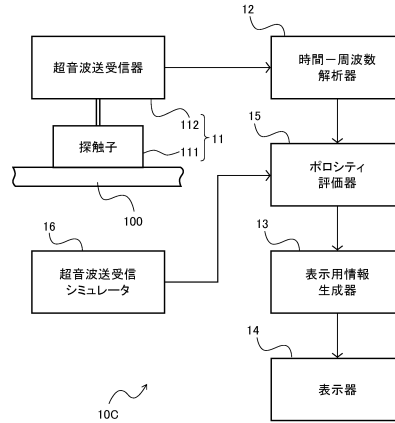
【図5】



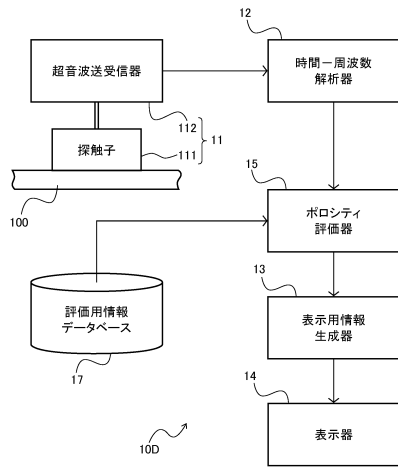
【図6】



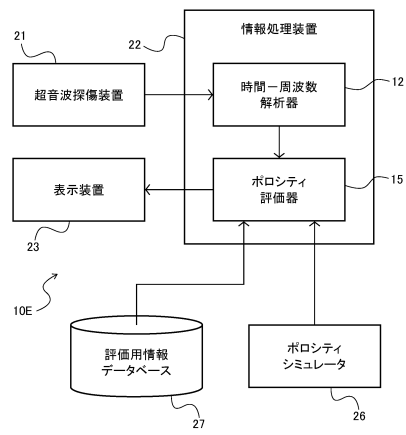
【図7】



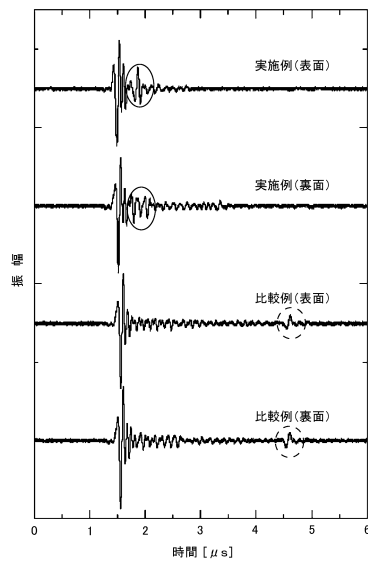
【図8】



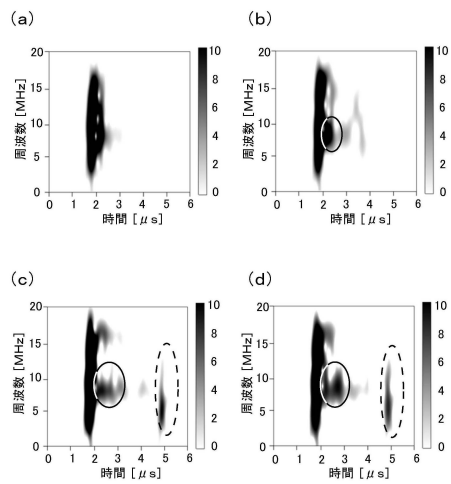
【図9】



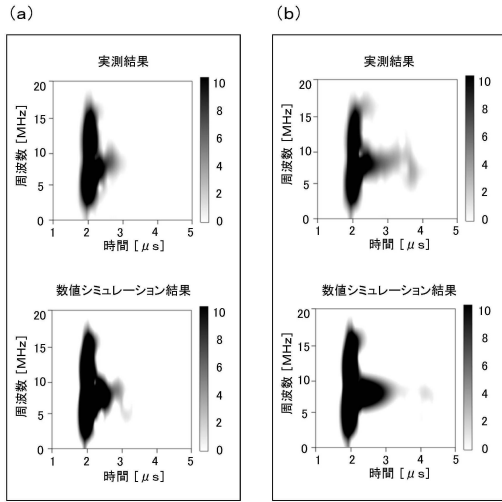
【図10】



【図11】



【 図 1 2 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 倉石 晃

岐阜県各務原市川崎町1番地 川崎重工業株式会社 岐阜工場内

審査官 森口 正治

(56)参考文献 特開2010-169558(JP,A)

特開2008-233048(JP,A)

特開平06-317568(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 29/00-29/52