

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-242852

(P2006-242852A)

(43) 公開日 平成18年9月14日(2006.9.14)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 N 29/00 (2006.01)	GO 1 N 29/18	2 G O 4 7
A 6 1 B 8/08 (2006.01)	GO 1 N 29/20	4 C 6 0 1
	A 6 1 B 8/08	

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2005-61145 (P2005-61145)  
 (22) 出願日 平成17年3月4日(2005.3.4)

(71) 出願人 504157024  
 国立大学法人東北大学  
 宮城県仙台市青葉区片平2丁目1番1号  
 (74) 代理人 100066153  
 弁理士 草野 卓  
 (74) 代理人 100121706  
 弁理士 中尾 直樹  
 (74) 代理人 100128705  
 弁理士 中村 幸雄  
 (72) 発明者 櫛引 淳一  
 宮城県仙台市太白区山田本町2-7-1  
 (72) 発明者 小田川 裕之  
 宮城県仙台市泉区虹の丘4-15-10

最終頁に続く

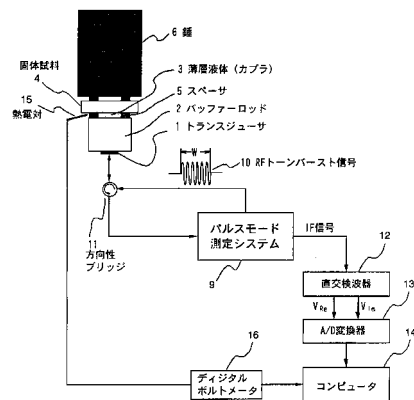
(54) 【発明の名称】 超音波速度・減衰係数計測装置及び計測方法

(57) 【要約】

【課題】 固体、液体、及び生体試料の超音波速度及び減衰係数を、UHF帯の周波数まで簡便且つ高精度に計測する装置及び計測方法を提供する。

【解決手段】 減衰の大きい液体カプラ、液体試料或いは生体試料を薄層化することにより、UHF帯までの超音波速度及び減衰係数を計測可能とする。また、バッファローッドと、固体試料（或いは固体参照試料）との間にスペーサを設置することにより、バッファローッドと固体試料（或いは固体参照試料）との距離、及び、平行度を調節する機構を不要とし、装置の小型化と計測の簡便化を可能とする。また、この装置を用いてUHF帯で計測するには、薄層液体媒体（または生体試料）での超音波の多重反射を分離することができないため、多重反射を含んだまま計測する手法を確立することで、UHF帯での計測を可能にする。

【選択図】 図4



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

厚さ  $d_3$  の板状の固体試料における超音波速度  $v_3$  及び減衰係数  $\alpha_3$  の周波数特性を計測する装置において、パルス幅  $W$  の RF トーンバースト信号により所望の周波数範囲の超音波を放射するバッファローッドと計測する上記固体試料との間に所定の厚さのスペーサを超音波測定経路の外側で挟んで設け、上記バッファローッドと上記固体試料との間隙を満たす超音波速度  $v_2$  の液体の薄層をカブラとして設置し、上記固体試料を上記バッファローッドに対し押圧する加重印加手段を設け、上記薄層の厚さ  $d_2$  が  $2d_2/v_2 < W$  を満たすように上記スペーサの厚さが選択されており、上記薄層で超音波を多重反射及び透過させることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測装置。

10

## 【請求項 2】

液体試料または生体試料における超音波速度  $v_2$  及び減衰係数  $\alpha_2$  の周波数特性を計測する装置において、パルス幅  $W$  の RF トーンバースト信号により所望の周波数範囲の超音波を放射するバッファローッドと、音響特性が既知の固体試料との間に、所定の厚さのスペーサを超音波測定経路の外側で挟んで設け、上記バッファローッドと上記固体試料との間隙を埋める計測対象である推定超音波速度  $v_2'$  の液体、或いは、生体試料の薄層を設置し、上記固体試料を上記バッファローッドに対し押圧する加重印加手段を設け、上記薄層の厚さ  $d_2$  が  $2d_2'/v_2 < W$  を満たすように上記スペーサの厚さが選択されており、上記薄層で超音波を多重反射及び透過させることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測装置。

20

## 【請求項 3】

請求項 1 記載の超音波速度・減衰係数計測装置において、上記バッファローッドの材料として、合成石英ガラス、或いは Z 軸伝搬の  $\alpha$ -水晶、或いは Z 軸伝搬のサファイアのいずれかを用い、純水を上記カブラとして用いることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測装置。

## 【請求項 4】

請求項 2 に記載の超音波速度・減衰係数計測装置において、上記バッファローッドの材料として、合成石英ガラス、或いは Z 軸伝搬の  $\alpha$ -水晶、或いは Z 軸伝搬のサファイアのいずれかを用い、上記固体試料として合成石英ガラスあるいは Z 軸伝搬の  $\alpha$ -水晶のいずれかを用いることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測装置。

## 【請求項 5】

請求項 1 記載の装置を使用した超音波速度・減衰係数計測方法であり、

- (a) 上記薄層からの第 1 反射信号と上記固体試料からの第 2 反射信号を上記バッファローッドを介して受信し、
- (b) 上記固体試料の超音波速度と減衰係数の仮定値を決め、
- (c) 上記仮定値を使って上記固体試料内における回折の影響を計算により求め、
- (d) 上記第 1 および第 2 反射信号と上記回折の影響を使って回折の影響を補償した超音波速度と減衰係数を計算し、
- (e) 上記補償した超音波速度と減衰係数が上記仮定値と所定誤差範囲内で一致するか判定し、

30

- (f) 所定誤差範囲内で一致しない場合は上記仮定値を変化させて上記工程 (c), (d), (e) を実行することを繰り返すことにより得られた最終の仮定値を上記固体試料の超音波速度と減衰係数とする。

40

## 【請求項 6】

請求項 2 記載の装置を使用した超音波速度・減衰係数計測方法であり、

- (a) 上記薄層からの第 1 反射信号と上記固体試料からの第 2 反射信号と、上記カブラを挿入しない状態での第 3 反射信号を上記バッファローッドを介して受信し、
- (b) 上記薄層の厚さを測定し、上記薄層の超音波速度と減衰係数の仮定値を決め、それら仮定値から上記薄層の伝搬定数を求め、
- (c) 上記既知の超音波速度及び減衰係数から上記固体試料内における回折の影響を計算により求め、

50

(d) 上記第 1、第 2 及び第 3 反射信号と、上記回折の影響と、上記薄層の厚さと伝搬定数とを使って回折の影響を補償した上記固体試料の超音波速度と減衰係数を計算し、

(e) 上記補償した超音波速度と減衰係数が上記固体試料の上記既知の超音波速度及び減衰係数と所定誤差範囲内で一致するか判定し、

(f) 所定誤差範囲内で一致しない場合は上記仮定値を変化させて上記工程(c), (d), (e)を実行することを繰り返すことにより得られた最終の仮定値を上記薄層の超音波速度と減衰係数とする。

#### 【請求項 7】

請求項 5 に記載の超音波速度・減衰係数計測方法において、上記バッファローッドの材料として、合成石英ガラス、或いは Z 軸伝搬の -水晶、或いは Z 軸伝搬のサファイアのいずれかを用い、純水を上記カプラとして用いることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測方法。

10

#### 【請求項 8】

請求項 6 に記載の超音波速度・減衰係数計測方法において、上記バッファローッドの材料として、合成石英ガラス、或いは Z 軸伝搬の -水晶、或いは Z 軸伝搬のサファイアのいずれかを用い、上記固体試料として合成石英ガラスあるいは Z 軸伝搬の -水晶のいずれかを用いることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測方法。

#### 【発明の詳細な説明】

#### 【技術分野】

#### 【0001】

20

本発明は、固体、液体、及び、生体試料における超音波速度、及び、減衰係数の周波数特性を、UHF帯まで簡便且つ高精度に計測する超音波速度・減衰係数計測装置及びその計測方法に関する。

#### 【背景技術】

#### 【0002】

固体、液体材料における物性研究や材料開発や生体試料の病理診断を目的として、試料を伝搬する超音波速度（以下、音速とも呼ぶ）と減衰係数の計測から試料の音響特性を求める研究が行なわれている。その際、一般に、伝搬させる超音波の周波数によって音響特性が変化するため、それを計測することでより詳細な情報を得ることが可能となる。そのため、広範囲な周波数帯で計測可能な超音波計測装置と計測手法が必要とされている。（

30

[非特許文献 1]、[非特許文献 2]、[非特許文献 3]）  
従来技術では、固体試料の音速及び減衰係数の計測において、VHF帯以下ではバッファローッドから固体試料へ超音波を伝導するための音響カプラとして水などの液体が用いられており、また UHF帯では液体での超音波の減衰が大きいため、液体の代わりに減衰の小さいサロール（サリチル酸フェニル）などで接着する方法が用いられている。このような技術は、例えば[非特許文献 4]、[非特許文献 5]に開示されている。しかし、接着剤を用いると、接着状態や凝固条件により音響特性が大きく変化するため安定した計測には熟練とプロセスの安定化が必要となるとともに、計測を開始するまでの準備に時間がかかるという欠点がある。

#### 【0003】

40

一方、液体試料及び生体試料の音速及び減衰係数の計測においては、従来技術では、超音波の減衰が小さい VHF帯以下では計測が行われていたが、UHF帯では減衰が大きいため計測が困難であった。

また、固体試料、液体試料及び生体試料の音速及び減衰係数の計測を高精度に行なう場合には、バッファローッドと固体試料との距離と平行度の調整が不可欠である。しかし、試料の交換の都度、試料を乗せている試料台をバッファローッドから大きく離して試料交換し、再びバッファローッドの近くに近づける必要があるため、距離及び角度を調節可能な機構を有する大掛かりな装置が必要になるとともに、計測前の調整に時間がかかるという問題があった。

【非特許文献 1】 J. Kushibiki, N. Akashi, N. Chubachi and F. Dunn, " VHF/UHF Range Bi

50

ultrasonic Spectroscopy System and Method”, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 42, pp. 1028-1039 (1995).

【非特許文献2】J. Kushibiki and M. Arakawa, “Diffraction effects on bulk-wave ultrasonic velocity and attenuation measurements”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 108, pp. 564-573 (2000).

【非特許文献3】J. Kushibiki, R. Okabe, and M. Arakawa, “Precise measurements of bulk-wave ultrasonic velocity dispersion and attenuation in solid materials in the VHF range,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 113, pp. 3171-3178 (2003).

【非特許文献4】櫛引、荒川、岡部、信学技報, “超高周波超音波材料解析システムによる固体試料の縦波音響特性の測定” Vol. US2003-46, pp.7-12 (2003.9).

【非特許文献5】櫛引、荒川、信学技報, “超高周波平面超音波材料解析システムによるUHF帯における固体試料の縦波音響特性の測定” Vol. US2004-11, pp.37-42 (2004.11).

【非特許文献6】J.Kushibiki, T.Sannomiya and N.Chubachi, “A useful acoustic measurement system for pulse mode in VHF and UHF ranges,” IEEE Trans.Sonics and Ultrason., Vol.SU-29, pp.338-342 (1982).

【非特許文献7】W. Kroebel and K. -H. Mahrt, “Recent results of absolute sound velocity measurements in pure water and sea water at atmospheric pressure,” Acustica, Vol. 35, pp. 154-164 (1976).

【非特許文献8】A. O. Williams, Jr., “The piston source at high frequencies,” J. Acoust. Soc. Am., vol. 23, pp. 1-6 (1951).

【非特許文献9】M. Arakawa, J. Kushibiki, and N. Aoki, “An evaluation of effective radiuses of bulk-wave ultrasonic transducers as circular piston sources for accurate velocity measurements,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 51, pp.496-501 (2004).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

上記のように、従来の技術は、UHF帯の計測において、計測対象である液体試料及び生体試料中での超音波減衰が大きいため計測が困難であり、固体試料では液体カプラでの超音波減衰が大きいため音響特性が不安定な固体接着剤を用いなければならない欠点があった。即ち、固体試料においても、液体及び生体試料においても、液体部分での超音波減衰が大きいために、UHF帯では高精度且つ高安定な計測ができなかった。また、バッファローッドと固体試料との距離と平行度を調節するための機構が必要であるため装置が大掛かりになり、計測前の調整に時間がかかるという問題があった。

【0005】

本発明は、これらの問題点を解決し、固体、液体、及び、生体試料における音波、或いは、減衰係数の周波数特性をUHF帯まで、簡便且つ高精度に計測する超音波速度・減衰係数計測装置及びその計測方法を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明によれば、固体試料における超音波速度及び減衰係数の周波数特性を計測する装置において、バッファローッドと計測する固体試料との間にスペーサを介在させて間隙を形成し、その間隙にカプラとしての薄層液体を満たし、加重印加手段により固体試料をバッファローッドに対し押圧することでUHF帯まで高精度に計測できることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測装置が得られる。

また、本発明によれば、液体試料及び生体試料における超音波速度及び減衰係数の周波数特性を計測する装置において、バッファローッドと、音響特性が既知の固体参照試料との間にスペーサを介在させて間隙を形成し、その間隙に計測する液体試料、或いは、生体試料を薄層化して挿入し、加重印加手段により固体参照試料をバッファローッドに対し押圧することでUHF帯まで高精度に計測できることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測

10

20

30

40

50

装置が得られる。

【0007】

また、本発明によれば、固体、液体及び生体試料における超音波速度・減衰係数計測装置において、超音波を放射するバッファローッドの材料として、合成石英ガラス、或いはZ軸伝搬の -水晶、或いはZ軸伝搬のサファイアを用い、液体試料計測の場合は固体参照試料として合成石英ガラスあるいはZ軸伝搬の -水晶を用い、固体試料計測の場合は純水をカブラとして用いることで、高精度に計測できることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測装置が得られる。

また、本発明によれば、固体、液体及び生体試料における超音波速度・減衰係数計測装置によって行う計測法において、超音波を放射するバッファローッドの材料として、合成石英ガラス、或いはZ軸伝搬の -水晶、或いはZ軸伝搬のサファイアを用い、液体試料計測の場合は固体参照試料として合成石英ガラスあるいはZ軸伝搬の -水晶を用い、固体試料計測の場合は純水をカブラとして用いることで、高精度に計測できることを特徴とする超音波速度・減衰係数計測が得られる。

10

【発明の効果】

【0008】

本発明によれば、超音波計測における減衰の大きい液体カブラ、液体試料、或いは生体試料を薄くすることにより、UHF帯までの超音波速度及び減衰係数を計測可能とする効果が得られる。また、バッファローッドと、固体試料等との間にスペーサを設置することにより、バッファローッドと固体試料等との距離、及び、平行度を調節する機構が不要となり、装置の小型化と計測の簡便化、及び、高精度化が可能となるという効果が得られる。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0009】

以下、本発明の実施の形態について図面を参照しながら説明する。まず、固体試料の計測の場合を例にとって計測装置を説明する。図1は本発明の超音波速度・減衰係数計測装置の概略構成を示す図である。本装置は、超音波を発生するトランスジューサ1と、超音波を伝導するバッファローッド2と、超音波を固体試料に伝導する目的で用いられる薄層液体3と、計測対象である固体試料4と、バッファローッド2と固体試料4間の距離と平行度を設定するためのスペーサ5と、バッファローッド2と固体試料4間の距離を安定にするための荷重印加手段としての錘6から構成される。荷重印加用の錘6は固体試料4をスペーサ5に押さえつけるためのものである。加重印加手段として錘6を用いる代わりにばねにより力を加えてもよい。固体試料4の計測の場合には、薄層液体3には音響特性が既知のものとして純水を用いる。液体試料、生体試料の場合には、被測定液体試料または生体試料を薄層液体3として挿入し、固体試料4として音響特性の既知である固体参照試料を使用する。固体参照試料としては、例えば合成石英ガラスを用いる。いずれの場合も、計測を行う周波数の高周波(RF)トーンバーストパルス信号をトランスジューサ1に印加し、後述する複素型測定法を用いて音速及び減衰係数を測定する。このように、液体媒体を薄層化することで、液体層での超音波減衰量を低減することができるため、UHF帯での計測が可能となる。

30

【0010】

また、計測対象である固体試料4とバッファローッド2間の距離と平行度を設定するためのスペーサ5を超音波測定経路の外側に設置することで、距離と平行度を調節するための機構が不要となり、簡便、且つ、高精度に所望の値に設定し維持することが可能となる。このスペーサ5の厚さを変えることで薄層液体3の厚さは任意に設定することが可能である。例えば、VHF帯での計測のように薄層液体3が厚い場合でも適用可能である。また、固体試料4に荷重を印加することで、バッファローッド2と固体試料4間の距離を安定にすることが可能となる。

40

【0011】

ここで、本発明の特徴の一つである薄層液体3での多重反射を含んだ計測法の必要性を従来法と比較して説明する。図2Aは、図1のようにトランスジューサ1、バッファロー

50

ッド 2、薄層液体 3、固体試料 4 が一列に接続されたときの超音波の伝搬と反射の様子を表した図であり、図 2 B、図 2 C、図 2 D、図 2 E は、超音波トランスジューサ 1 から放射された幅  $W$  の超音波パルスがトランスジューサ 1 から見て薄層液体 3 の前表面から反射された信号  $V_A$  と、固体試料 4 の前表面から反射された信号  $V_F$  と、固体試料 4 の裏端面から反射された信号  $V_B$  が再びトランスジューサ 1 に戻ってきたときの超音波の波形を模式的に示したものである。図 2 B は薄層液体 3 の厚さが十分厚い従来法の場合 ( $W < 2d_2 / v_2$  の場合)、図 2 D は薄層液体 3 の厚さが薄い場合 ( $W > 2d_2 / v_2$  の場合)、図 2 C は  $W = 2d_2 / v_2$  の場合で、それぞれ一度だけ反射された信号のみを図示している。図 2 E は図 2 D と同じ場合で、 $V_F$  の一部が更にトランスジューサ 1 から見てバッファード 2 の裏端面で反射され再び固体試料 4 の前表面で反射されるという薄層液体 3 での多重反射を含めて図示したものであり、実際の測定で得られる波形に相当する。

10

## 【 0 0 1 2 】

トランスジューサ 1 に戻ってくる、 $V_A$  信号と  $V_F$  信号の時間間隔及び  $V_F$  信号と  $V_B$  信号の時間間隔は、それぞれ  $2d_2 / v_2$ 、 $2d_3 / v_3$  と表せる。但し、 $d_2$ 、 $d_3$  はそれぞれ薄層液体 3 及び固体試料 4 の厚さ、 $v_2$ 、 $v_3$  はそれぞれ薄層液体 3 及び固体試料 4 での音速である。ここで、図 2 A の場合は、 $V_A$ 、 $V_F$ 、 $V_B$  信号がそれぞれ時間的に分離しているので、それらを分離して受信し解析できる。しかし、薄層液体 3 の厚さが薄くなるにつれて、トランスジューサ 1 に戻ってくる  $V_A$  信号と  $V_F$  信号の時間間隔は短くなり  $W = 2d_2 / v_2$  のときにそれらは接する。さらに、 $d_2$  が薄くなり  $W > 2d_2 / v_2$  となると、 $V_A$  信号と  $V_F$  信号は完全に重なり合い分離できなくなる。一般に液体は減衰係数が大きいため、高周波での計測を可能とするためには、 $d_2$  を薄くして薄層液体 3 での減衰を低減しなくてはならない。よって本発明は、 $V_A$  信号に  $V_F$  信号が多重反射され重なり合い分離できない場合でも、音速と減衰係数を精密かつ簡便に計測できる計測装置と計測法を与えるものである。

20

## 【 0 0 1 3 】

次に、本装置を用いた超音波速度・減衰係数計測法について説明する。図 3 は、デバイス設計と解析に用いる音響伝送線路モデルを示している。図 3 A において、薄層液体 3 の、トランスジューサ 1 から見て前表面からの超音波の反射信号を  $V_2$ 、固体試料 4 の裏面からの反射信号を  $V_3$  とする。また、バッファード 2 の、トランスジューサ 1 から見て後端面に何も接続していない状態 (図 3 B に空気 8 と接している状態を示す) におけるバッファード 2 の後端面からの反射信号を  $V_0$  とする。計測では、この  $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_0$  信号の振幅と位相を複素型計測法により計測する。

30

## 【 0 0 1 4 】

ここで、複素型計測法について説明する。複素型計測システムのブロックダイアグラムを図 4 に示す。計測システムはパルスモード測定システム 9 を中心に構成されている ([非特許文献 2]、[非特許文献 6])。RF トーンバースト信号 10 をトランスジューサ 1 に入力し超音波パルスに変換する。バッファード 2、薄層液体 3、固体試料 4 などを伝搬し、境界で反射されて戻った超音波パルスはトランスジューサ 1 で再びパルス電気信号に変換され、方向性ブリッジ 11 を介してパルスモード測定システム 9 で IF 信号に変換された後、直交検波回路 12 に入力され、複素信号の実部  $V_{Re}$ 、虚部  $V_{Im}$  に分けて出力される。 $V_{Re}$ 、 $V_{Im}$  は、次式のように表せる。

40

## 【 0 0 1 5 】

## 【 数 1 】

$$V_{Re} = B \cdot \cos \chi \quad (1)$$

$$V_{Im} = B \cdot \sin \chi \quad (2)$$

ここで、 $B$  は振幅、 $\chi$  は位相である。振幅、位相は  $V_{Re}$ 、 $V_{Im}$  から次式により求められ、振幅と位相を計測することができる。

## 【 0 0 1 6 】

【数 2】

$$B = \sqrt{V_{Re}^2 + V_{Im}^2} \quad (3)$$

$$\chi = \tan^{-1} \left( \frac{V_{Im}}{V_{Re}} \right) \quad (4)$$

図 3 において、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_0$  信号は以下のように表せる。

$$V_2 = A \cdot ATT_2 \cdot R_{M13} \cdot \exp(-2\gamma_1 d_1) \quad (5)$$

$$V_3 = A \cdot ATT_3 \cdot T_{M13} \cdot R_{34} \cdot T_{M31} \cdot \exp(-2\gamma_1 d_1 - 2\gamma_3 d_3) \quad (6)$$

$$V_0 = -A \cdot ATT_0 \cdot \exp(-2\gamma_1 d_1) \quad (7)$$

10

【0017】

バッファード 2、薄層液体 3、固体試料 4 をそれぞれ媒体  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  と表し、媒体  $M_3$  の外側に空気または薄層液体 3 と同一の液体の媒体  $M_4$  が接しているものとする。ここで、 $A$  は振幅係数、 $ATT_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) は各信号の伝搬に伴う回折の影響、 $\gamma_i$  は媒体  $M_i$  の伝搬定数 ( $\gamma = \alpha + jk$ ;  $\alpha$ : 減衰係数、 $k (= \omega/v)$ : 波数、 $\omega$ : 角周波数、 $v$ : 超音波速度)、 $d_i$  は媒体  $M_i$  の厚さ、 $R_{ij}$  は媒体  $M_i$  から隣接媒体  $M_j$  を見た反射係数を表している。また、 $R_{M13}$  は媒体  $M_1$  から媒体  $M_2$  を介して媒体  $M_3$  を見た反射係数、 $T_{M13}$  は媒体  $M_1$  から媒体  $M_2$  を介した媒体  $M_3$  への透過係数、 $T_{M31}$  は媒体  $M_3$  から媒体  $M_2$  を介した媒体  $M_1$  への透過係数である。

20

【0018】

上述のとおり、UHF帯での計測を可能とするためには、媒体  $M_2$  の厚さを薄くして媒体  $M_2$  での減衰を低減する必要がある。媒体  $M_2$  の厚さを薄くすると、媒体  $M_2$  内の超音波の往復時間  $\{=2 \times (d_2/v_2)\}$  が計測で用いる超音波パルスの幅  $W$  より短くなる場合がある。その場合、媒体  $M_2$  内で反射を繰り返す超音波信号を時間軸上でそれぞれ分離することができないため、多重反射を考慮する必要がある。言い換えると、UHF帯での計測を実現するには、超音波の往復時間  $\{=2 \times (d_2/v_2)\}$  が超音波パルスの幅  $W$  より短かい状態となるまで媒体  $M_2$  の厚さを薄くしても、音速及び減衰を高精度に計測可能な手法を確立する必要がある。

30

【0019】

多重反射が生じる条件では、 $R_{M13}$ 、 $T_{M13}$ 、 $T_{M31}$  は以下のように表せる。

【数 3】

$$R_{M13} = \frac{R_{12} + R_{23} \cdot \exp(-2\gamma_2 d_2)}{1 + R_{12} \cdot R_{23} \cdot \exp(-2\gamma_2 d_2)} \quad (8)$$

$$T_{M13} = \frac{(1 + R_{12}) \cdot (1 + R_{23}) \cdot \exp(-\gamma_2 d_2)}{1 + R_{12} \cdot R_{23} \cdot \exp(-2\gamma_2 d_2)} \quad (9)$$

$$T_{M31} = \frac{(1 + R_{32}) \cdot (1 + R_{21}) \cdot \exp(-\gamma_2 d_2)}{1 + R_{32} \cdot R_{21} \cdot \exp(-2\gamma_2 d_2)} \quad (10)$$

40

これらは、各媒体  $M_i$  の音響パラメータ ( $\gamma_i$ 、 $d_i$ 、 $v_i$ 、 $\rho_i$ ) が分かれば求まる値である。密度  $\rho_i$  はアルキメデスの原理に基づき測定する。

薄層液体 3 は非常に薄いため  $ATT_2 = ATT_0$  と近似すると、 $V_2/V_0$  の絶対値は、

【0020】

【数 4】

$$\left| \frac{V_2}{V_0} \right| = \frac{|A \cdot ATT_2 \cdot R_{M13} \cdot \exp(-2\gamma_1 d_1)|}{|-A \cdot ATT_0 \cdot \exp(-2\gamma_1 d_1)|} = |R_{M13}| \quad (11)$$

と表せる。

また、 $V_3/V_2$ は次式のように表せる。

【0021】

【数 5】

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{|ATT_3|}{|ATT_2|} \cdot \left| \frac{T_{M13} \cdot R_{34} \cdot T_{M31}}{R_{M13}} \right| \cdot \exp(-2\alpha_3 d_3) \cdot \exp\{j(-2k_3 d_3 + \theta_{TR} + \Delta\theta + \pi)\} \quad (12)$$

ここで、薄層液体3中を反射・透過する際の位相変化を

$$\theta_{TR} = \angle T_{M13} + \angle T_{M31} - \angle R_{M13}$$

と置いている。また  $\theta_{TR} = \theta_3 - \theta_2$  であり、固体試料4内での回折による位相変化である。

【0022】

【数 6】

$$\phi \equiv \angle \frac{V_3}{V_2} = -2k_3 d_3 + \theta_{TR} + \Delta\theta + \pi \quad (13)$$

とすると、固体試料の音速  $v_3$  は、

$$v_3 = -\frac{2\omega d_3}{\phi - \pi - \theta_{TR} - \Delta\theta} \quad (14)$$

と表せる。ここで、 $\theta_{TR}$  以外は既知であるので、 $\phi$  が求めれば、音速  $v_3$  が決定できることになる。また、固体試料の減衰係数  $\alpha_3$  は(12)式より、以下のように表される。

【0023】

【数 7】

$$\alpha_3 = \frac{1}{2d_3} \ln \left\{ \left| \frac{V_2}{V_3} \right| \cdot \left| \frac{T_{M13} \cdot R_{34} \cdot T_{M31}}{R_{M13}} \right| \right\} - \frac{1}{2d_3} \ln \left| \frac{ATT_2}{ATT_3} \right| \quad (15)$$

ここで、 $|ATT_2/ATT_3|$  は固体試料内での回折損失比である。 $|ATT_2/ATT_3|$  以外は既知であるので、 $|ATT_2/ATT_3|$  がわかれば  $\alpha_3$  が求まることになる。

しかし、 $\alpha_3$  も  $|ATT_2/ATT_3|$  も回折の影響を表しているため、 $v_3$  及び  $\alpha_3$  をそれぞれ(14)式、(15)式から直接求めるためには、回折の影響を高精度に求める必要があるが、 $\alpha_3$  も  $|ATT_2/ATT_3|$  もそれぞれ自体に  $v_3$  及び  $\alpha_3$  の項を含んでいるため、求めるのが困難である。そこで、 $v_3$  及び  $\alpha_3$  を求める手法として、 $v_3$  及び  $\alpha_3$  をある値に仮定し、それらの仮定した値を使って  $\alpha_3$  及び  $|ATT_2/ATT_3|$  をWilliamsの厳密式[非特許文献8]に従って数値計算により求め、それらの計算値を用いて(14)式、(15)式から  $v_3$  及び  $\alpha_3$  を改めて求めたときに、それらの値が仮定した値と、所定の誤差の範囲内で一致した場合に、仮定した  $v_3$  及び  $\alpha_3$  の値を真の  $v_3$  及び  $\alpha_3$  として決定する、という方法を用いる。

【0024】

これは、固体試料を測定する場合の説明であるが、この手法を用いると、液体試料或いは生体試料の測定でも、同じ(14)式、(15)式を用いて、液体試料或いは生体試料の音速  $v_2$  及び減衰  $\alpha_2$  を求めることが可能である。即ち、 $v_2$  及び  $\alpha_2$  をある値に仮定し、特性が既知である固体参照試料の  $v_3$  及び  $\alpha_3$  を用いて  $\alpha_2$  及び  $|ATT_2/ATT_3|$  をWilliamsの厳密式により



数値計算で求め、前記仮定した $v_2$ 、 $\alpha_2$ 及び計算した $\beta_2$ 、 $|ATT_2/ATT_3|$ の値を用いて(14)式、(15)式から $v_3$ 及び $\alpha_3$ を改めて求めたときに、それらの値 $v_3$ 、 $\alpha_3$ が計算に用いた固体参照試料の $v_3$ 及び $\alpha_3$ の値と、所定値以下の誤差の範囲内で一致した場合に、仮定した $v_2$ 及び $\alpha_2$ の値を真の $v_2$ 及び $\alpha_2$ として決定するという方法を用いることで、液体試料或いは生体試料の測定も可能となる。

#### 【0025】

ここで、仮定した $v_2$ 及び $\alpha_2$ を用いて(14)式、(15)式から $v_3$ 及び $\alpha_3$ を求める過程は次のとおりである。まず、媒体 $M_2$ の厚さ $d_2$ を測定し、 $v_2$ 及び $\alpha_2$ から媒体 $M_2$ の伝搬定数 $\beta_2$  ( $= \alpha_2 + jk_2$ ;  $\alpha_2$ :減衰係数、 $k_2$  ( $= \omega/v_2$ ):波数、 $\omega$ :角周波数、 $v_2$ :媒体 $M_2$ での超音波速度)を求める。それら $d_2$ 、 $\beta_2$ を用いて(8)、(9)、(10)式から $R_{M13}$ 、 $T_{M13}$ 、 $T_{M31}$ を求める。これらの値が求まると、(12)、(13)、(14)式から $v_3$ を、(15)式から $\alpha_3$ を求めることができる。

次に、具体的な超音波デバイスの設計手順と、被計測試料の超音波速度及び減衰係数の導出の手順について、図5のフローチャートを用いて説明する。

#### [超音波デバイスの設計手順]

ステップS1:使用する超音波周波数帯により、バッファローッド2の材料を選択する。UHF帯で計測を行う場合には、バッファローッド2での超音波の減衰が大きくなるため、伝搬損失が小さい材料を選択する必要がある。例えば、合成石英ガラスを固体試料(或いは固体参照試料)とした場合には、バッファローッド2としては、500 MHz以下では合成石英ガラスまたはZ軸伝搬の $\alpha$ -水晶、500MHzを超え1.5 GHz以下ではZ軸伝搬の $\beta$ -水晶、1.5 GHz超ではZ軸伝搬のサファイアを選択する。

ステップS2:選択したバッファローッド2にトランスジューサ1を設置し、薄層液体(或いは生体試料)と固体試料等を設置したときの $V_3$ 信号の周波数特性を数値計算により求め、 $V_3$ 信号の値が一定以上の強度(音速、減衰を高精度に測定できる信号レベルであり、例えば-60 dBm以上)となる周波数範囲内に計測に使用する周波数範囲が含まれるようにトランスジューサ1の厚さを選択する。通常は、基本共振モードがトランスジューサの変換損失が小さいため、上記測定周波数に基本共振モード内の周波数を用いる場合が多いが、高次の共振モードの周波数を用いてもよい。このとき、 $V_3$ 信号の値は、 $d_2$ の厚さによっても変化するので、トランスジューサ1の厚さだけでは測定周波数範囲での $V_3$ 信号の値が所定の強度以上とならない場合には、 $d_2$ の厚さを薄くして媒体 $M_2$ での減衰量を減らす必要がある。

ステップS3: $V_2$ 信号の周波数特性を数値計算或いは実際に測定し、 $V_2$ の最小値が一定以上の強度(例えば-60 dBm以上)となる周波数範囲内に計測に使用する周波数範囲が含まれるようにスペーサ厚を選択する。このとき、ステップS2の条件( $V_3$ 信号の値が一定以上の強度となること)も同時に満たす必要がある。

#### 【0026】

超音波デバイスの設計に用いる $V_0$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 信号の計算結果の例を図6A、B、Cに示す。バッファローッド2の長さは8 mm、固体参照試料4の長さは2.7 mmで、両者の材質は合成石英ガラスとし、トランスジューサ1は厚さ3.7  $\mu$ mのZnOとした。薄層液体3には水、シリコンオイル、ひまし油を用い、厚さを1.147  $\mu$ mとした場合の計算結果である。

ステップS4: $d_2$ の精密値を(11)式で表される $|R_{M13}|$ のディップ周波数から求める場合には、更に、 $V_2$ 信号の周波数特性が一定値以上の強度(例えば-60 dBm以上)となる周波数範囲内に $|R_{M13}|$ のディップの周波数が含まれるようにスペーサ厚を決定する。このとき、ステップS2の条件( $V_3$ 信号の値が一定以上の強度となること)、及び、ステップS3の条件( $V_2$ 信号の値が一定以上の強度となること)、も同時に満たす必要がある。 $d_2$ の精密値を光干渉計を用いるなど別の方法で求める場合には、このステップは省略できる。

$|R_{M13}|$ が最小となるディップの周波数 $f_d$ は、

#### 【0027】

【数 8】

$$f_d = \frac{nv_2}{2d_2} \quad (16)$$

で表される。但し、 $n=1, 2, 3, \dots$ 。このため、 $d_2$ が $n=1$ のときの $v_2/(2f_c)$  ( $f_c$ : トランスジューサの基本共振周波数)と一致するときには、超音波トランスジューサの基本共振モードの周波数に $|R_{M13}|$ のディップが現れる。 $d_2$ が $v_2/(2f_c)$ より短いとき、 $|R_{M13}|$ のディップは基本共振モードの周波数範囲内に1つ以下となる。基本共振モードの周波数範囲内に複数の $|R_{M13}|$ のディップがあっても構わないが、高周波数帯においては薄層液体中の減衰が大きくなるため、十分な信号のS/N比を得るために $n$ を制限しなければならない。 $d_2$ が $v_2/(4f_c)$ より短いときは、超音波トランスジューサの基本共振モードの周波数範囲に $|R_{M13}|$ のディップが現れないが、 $|R_{M13}|$ の測定値と計算値のフィッティングにより $d_2$ を求めることができる。

【0028】

[音速と減衰係数の計測手順]

ステップS5: 固体試料4の音速 $v_3'$ と減衰係数 $\alpha_3'$ を仮定する。

ステップS6: 薄層液体3の厚さ(伝搬長) $d_2$ を(16)式から求める。 $d_2$ はスペーサの厚さとほぼ同じとなるが、液体の表面張力や粘性により必ずしも一致しないため、 $d_2$ を精密に求める必要がある。具体的には、薄層液体3が純水で固体試料4が合成石英ガラスの場合には、熱電対15の起電力をデジタルボルトメータ16で測定することにより得られた温度に対応する純水の音速 $v_2$ を[非特許文献7]より求め、ディップの周波数 $f_d$ を求め、(16)式の関係から液体試料の厚さ $d_2$ が求まる。レーザー干渉計を用いるなどして、別途精密な $d_2$ を求めることが可能な場合はこの手順は省略可能である。

【0029】

一例として、薄層液体の厚さ $d_2$ を(16)式により導出した実験結果を示す。固体試料として合成石英ガラスを用い、薄層液体には純水を用いた。そのときの反射係数 $|R_{M13}|$ と周波数の関係を図7に示す。これより、 $d_2$ を求めると $1.108 \mu\text{m}$ となり、薄層液体の厚さを求めることができる。

ステップS7: 信号 $V_0, V_2, V_3$ を測定し、仮定した音速 $v_3'$ と減衰係数 $\alpha_3'$ 、およびステップS6で求めた $d_2$ を使って式(8), (9), (10), (14), (15)により回折の影響を補正した固体媒体4の音速 $v_3$ 、減衰係数 $\alpha_3$ を求める。式(14), (15)中の回折の影響 $|ATT_2/ATT_3|$ は仮定した $v_3'$ と $\alpha_3'$ からWilliamsの厳密式[非特許文献8]を用いた数値計算により補正する。

ステップS8: ステップS7で求めた音速 $v_3$ 、減衰係数 $\alpha_3$ と、ステップS5で仮定した音速 $v_3'$ 、減衰係数 $\alpha_3'$ とが所定の誤差以内(音速は $\pm 0.03\%$ 、減衰係数は $\pm 10\%$ )で一致すれば、その値を固体試料の音速、減衰係数とする(ステップS9)。もし一致しなければ、ステップS5に戻り、仮定する音速と減衰係数を変えて、それらの差が所定誤差以下となるまで同様の手続きを繰り返し行なう。仮定する音速と減衰係数を変えたときのステップS7で求められる音速と減衰係数とそれらの仮定値との差の変化をあらかじめ調べることにより、それらの差が小さくなるように、仮定する音速と減衰係数を変化させる。

【0030】

次に、被計測試料が液体試料または生体試料の場合について説明する。この場合は、図1、図3において、薄層液体3として、計測する液体試料或いは生体試料4を使用し、固体試料4として音響特性の既知である固体参照試料を使用する。固体参照試料としては、例えば合成石英ガラスを用いる。そのときの、音響伝送線路モデルは固体試料計測の場合と同様に取り扱うことができる。この場合も、液体試料、或いは生体試料を薄くすることで、UHF帯での計測が可能となる。

ここで、液体試料(或いは生体試料)3の音速と減衰係数の導出手順は、図5のステップS5において、固体試料の音速 $v_3'$ と減衰係数 $\alpha_3'$ の代わりに、液体試料(或いは生体試料)の音速 $v_2'$ と減衰係数 $\alpha_2'$ の値を仮定する。ステップS6以降は、固体試料の

場合と同様で、仮定した値 $v_2$ と $\alpha_2$ を用いて前述したように計算により固体参照試料の音速 $v_3$ と減衰係数 $\alpha_3$ を求める。求めた値と、実際の固体参照試料の音速 $v_3$ 、減衰係数 $\alpha_3$ (既知の値)が所定の誤差範囲内(音速は $\pm 0.03\%$ 、減衰係数は $\pm 10\%$ )で一致すれば、仮定した音速 $v_2$ と減衰係数 $\alpha_2$ を液体試料(或いは生体試料)に対する音速、減衰係数とする。もし一致しなければステップS5に戻り、仮定する $v_2'$ と $\alpha_2'$ の値を変えて、同様の手続きを一致するまで繰り返し行なう。

#### 実施例 1

まず、スペーサの効果について確認した実験結果を示す。図6に示すような直径3mmの円形状のスペーサ5をバッファローッド2上に直径1.5mmの円周上に等間隔で5つ配列形成した。スペーサ5としては、RFプレーナマグネトロンスパッタリング装置を用いてZnO薄膜(厚さ1.05 $\mu\text{m}$ )をバッファローッド2上に形成した。ここではスペーサの材料としてZnOを用いたが、スペーサは固体試料4とバッファローッド2間の距離と平行度を維持する目的であるので、 $\text{SiO}_2$ 等のガラスやアモルファスSi等、強度が確保できるものであれば他の材料でも良いことはもちろんである。スペーサとしては、内側と外側を連通するスリットを1つ以上形成した円環状薄膜でもよい。図8のバッファローッド2の中央に純水を1滴(約0.008 cc)滴下し、その上に図1で示したように合成石英ガラスの固体試料4を置いて、薄層液体の厚さの時間に関する変動を調べた。

#### 【0031】

図9Aは荷重を加えていない場合、図9Bは荷重を加えた場合の薄層液体3の厚さの時間変化である。加重しない場合は、厚さが時間と共に大きく変化して安定しないが、加重した場合は、短時間で安定していることが分かる。また加重した場合の厚さは、スペーサ5の厚さとほぼ一致している。厳密に一致しないのは、液体の粘性及び表面張力の影響であると思われる。このように、スペーサを用い加重を行なうことで、調節機構を用いずに薄層液体の厚さを簡便に一定の厚さに設定し維持することが可能である。

#### 実施例 2

次に固体試料4の音速と減衰係数を計測した実験結果を示す。固体試料4として合成石英ガラスを用い、カプラには純水を用いた。用いたRFパルスの幅 $W$ は500nsで、計測して求めた $d_2$ は、1.108 $\mu\text{m}$ であった。図10Aは音速の計測結果である。比較のために液体を薄層化せず、多重反射する信号を分離してVHF帯で計測したときの値(5953.36m/s)を記入してある。本装置での測定値は、従来法での測定値と良く一致している。673MHz付近で測定値に変動が見られるのは、反射係数 $|R_{M13}|$ のディップ付近であるためであり、600MHz付近におけるわずかな変動は回折の補正に関連するものと考えられる。音速がほぼ一定の値に計測されている300MHzから550MHzまでの平均の音速を、同図に併せて記入すると、従来法での計測値と差が0.04m/sという極めて高い精度で計測されていることがわかる。一方、図10Bは減衰係数の計測結果である。音速の場合と同様に比較のために液体を薄層化せず、多重反射する信号を分離してVHF帯で計測したときの値( $1.3 \times 10^{-16} \text{s}^2/\text{m}$ )で表される曲線を記入してある。本装置での測定値は、従来法での測定値と良く一致している。音速の場合と同様に673MHzと600MHz付近で測定値の変動が見られる。このように、本計測の有効性が確認できている。

#### 実施例 3

次に液体試料の音速と減衰係数を計測した実験結果を示す。液体試料3としては綿実油を用い、固体参照試料4には合成石英ガラスを用いた。図11Aは音速の計測結果であり、図11Bは減衰係数の計測結果である。比較のために液体を薄層化せず、多重反射する信号を分離して計測したときの値( $f$ 掃引型:周波数掃引して計測したもの、 $z$ 掃引型:液体試料厚を掃引して計測したもの)を記入してある。音速、減衰係数ともに、従来法と今回の方法は非常によく一致しており、本計測の有効性が液体試料の場合でも確認できている。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0032】

本発明に係る超音波速度・減衰係数計測装置及び計測法は、固体試料、液体試料、或

10

20

30

40

50

いはそれらが混合した材料など広範囲な材料の弾性定数決定、材料の選別、特定など物性研究や材料開発に広く用いることができる。また、生体試料の病理診断など医療の現場や、医療分野での研究開発にも適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図1】固体試料計測の場合の本発明の超音波速度・減衰係数計測装置の概略構成を示す図。

【図2】媒質境界での超音波パルスの反射信号を示す図であり、Aは媒体と反射波を表した図で、B、C、Dはそれぞれ薄層液体の厚さが厚い従来法、薄層液体の厚さが薄い本発明及びその中間の場合の第一回目の反射パルスのみを模式的に表した図で、EはDの条件で第二回目以降の反射パルスが多重反射している様子を示した図。 10

【図3】測定原理を説明するための音響伝送線路モデルの図であり、Aは試料を設置した場合で、Bは試料をはずした場合。

【図4】複素型測定法のブロックダイアグラム。

【図5】超音波デバイスの設計手順と、音速、減衰係数の計測手順を示すフローチャート。

【図6】計算により求めた信号強度の周波数特性を示し、Aは $V_0$ の周波数特性、Bは $V_2$ の周波数特性、Cは $V_3$ の周波数特性の例を示す。

【図7】反射係数 $|R_{M13}|$ の計測結果。

【図8】バッファローッド上に形成したスペーサの図であり、Aは上面から見た図、Bは側面から見た図。 20

【図9】薄層液体の厚さの時間変化の測定結果であり、Aは荷重を加えていない場合の図で、Bは荷重を加えた場合の図。

【図10】固体試料の音速と減衰係数を計測した実験結果であり、Aは音速の計測結果で、Bは減衰係数の計測結果。

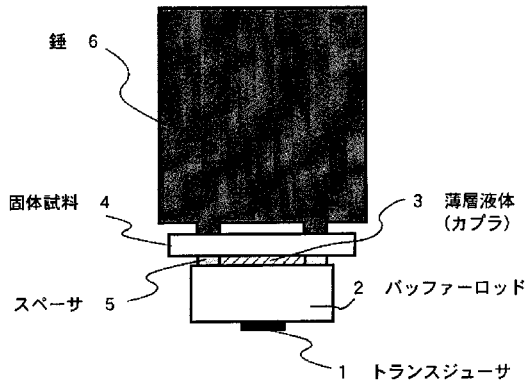
【図11】液体試料の音速と減衰係数を計測した実験結果であり、Aは音速の計測結果で、Bは減衰係数の計測結果。

【符号の説明】

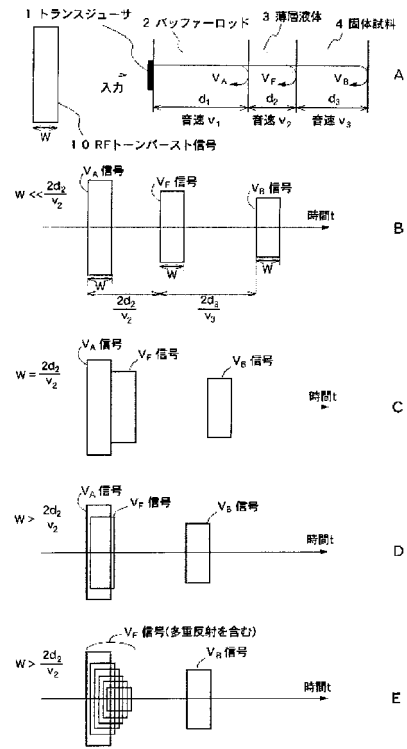
【0034】

1：トランスジューサ、2：バッファローッド、3：薄層液体、4：固体試料、5：スペーサ、6：錘、7：媒体4、8：空気、9：パルスモード測定システム、10：RFトーンバースト信号、11：方向性ブリッジ、12：直交検波器、13：A/D変換器、15：熱電対、16：デジタルボルトメータ 30

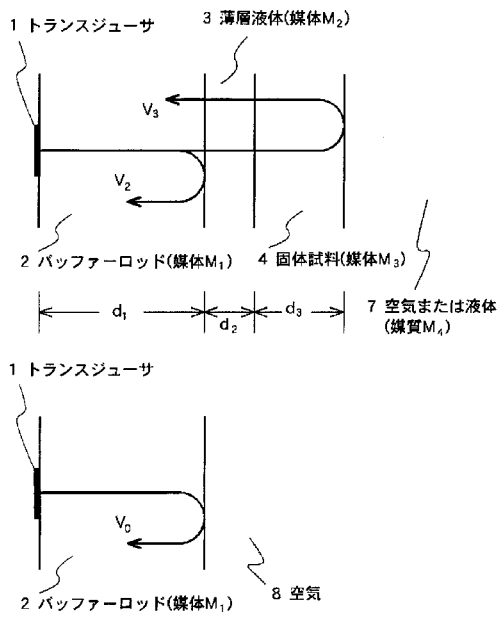
【 図 1 】



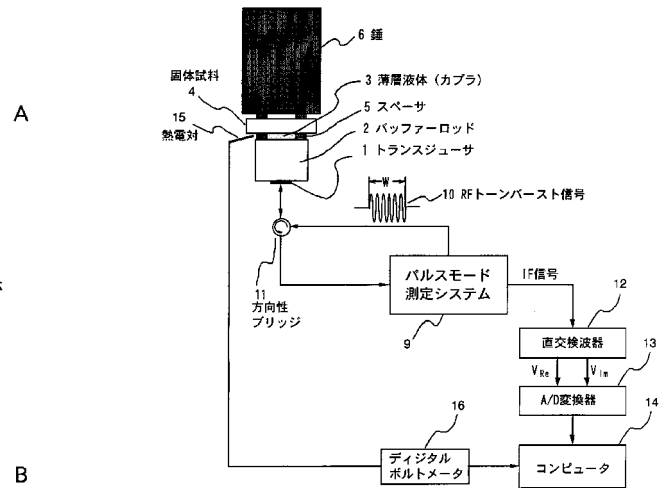
【 図 2 】



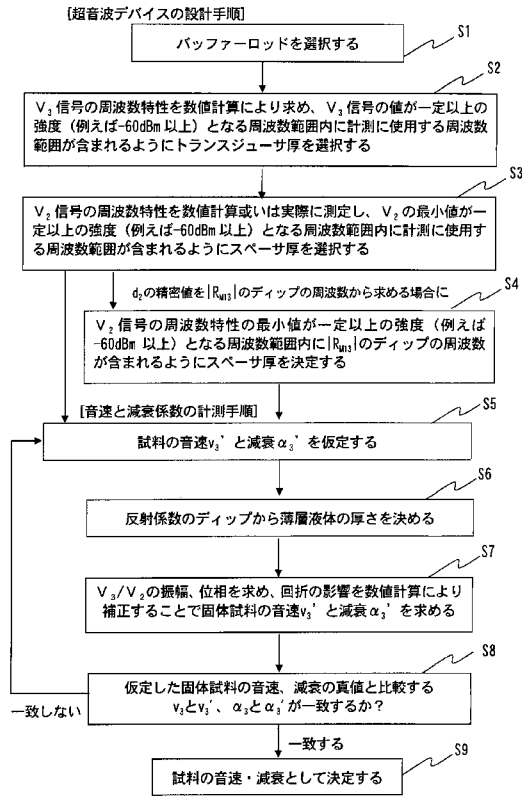
【 図 3 】



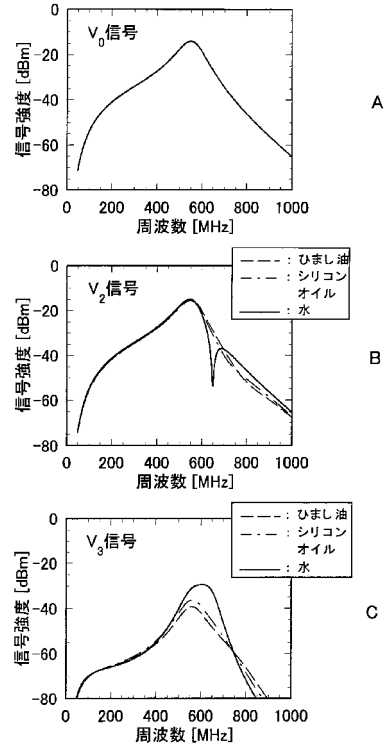
【 図 4 】



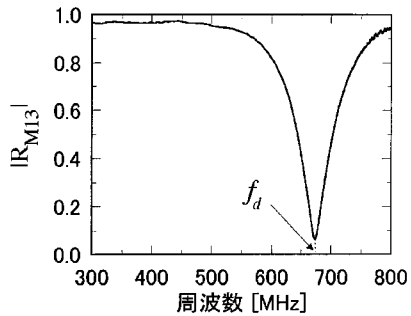
【 図 5 】



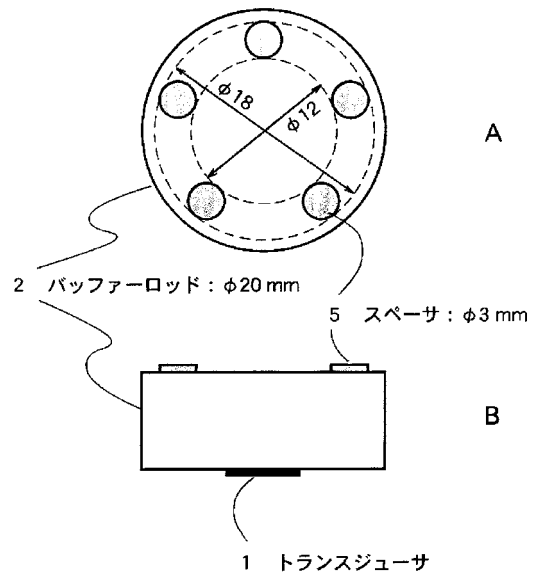
【 図 6 】



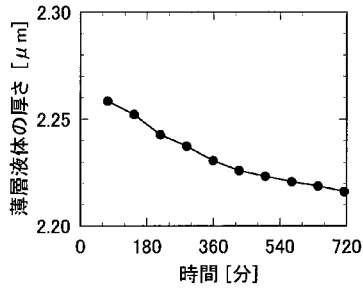
【 図 7 】



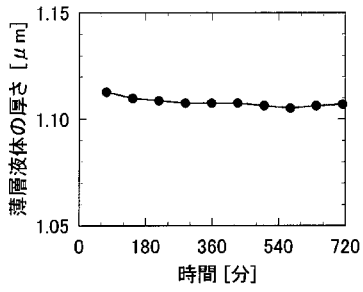
【 図 8 】



【 図 9 】

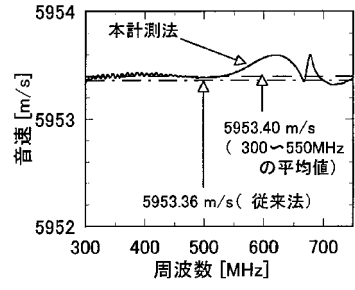


A

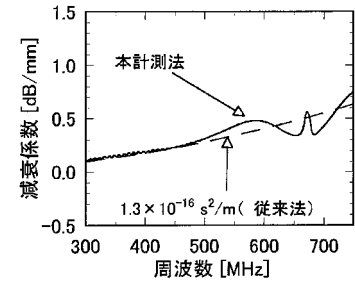


B

【 図 10 】

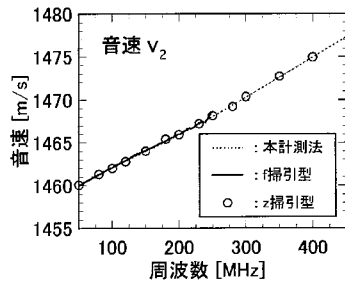


A

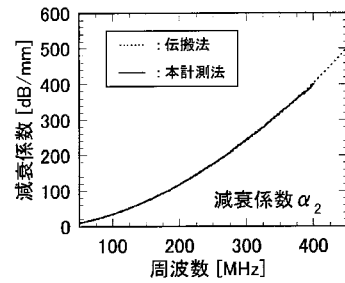


B

【 図 11 】



A



B

---

フロントページの続き

(72)発明者 荒川 元孝

宮城県仙台市太白区八木山本町2 - 8 - 8 レーベンハウス101

Fターム(参考) 2G047 AA01 AA05 AA12 AC13 BA01 BA03 BB01 BC02 BC03 BC04  
BC14 CA01 EA10 EA12 EA15 GA02 GB28 GB37 GB38 GE02  
GF08 GF11 GG09 GG32 GG41 GG43 GG44  
4C601 DD20 DD21 EE09 EE11 EE13 FF20 GA03 GB24 GB46 GC02  
HH06 HH08 JB24 JB39 JB51 JB52