

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4648676号
(P4648676)

(45) 発行日 平成23年3月9日(2011.3.9)

(24) 登録日 平成22年12月17日(2010.12.17)

(51) Int.Cl. F I
 GO 1 N 29/04 (2006.01) GO 1 N 29/10
 GO 1 N 29/44 (2006.01) GO 1 N 29/22 5 0 1

請求項の数 8 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2004-307782 (P2004-307782)	(73) 特許権者	390041542
(22) 出願日	平成16年10月22日(2004.10.22)		ゼネラル・エレクトリック・カンパニー
(65) 公開番号	特開2005-128018 (P2005-128018A)		GENERAL ELECTRIC CO
(43) 公開日	平成17年5月19日(2005.5.19)		MPANY
審査請求日	平成19年10月18日(2007.10.18)		アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ
(31) 優先権主張番号	10/692, 608		クタデイ、リバーロード、1番
(32) 優先日	平成15年10月24日(2003.10.24)	(74) 代理人	100137545
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 荒川 聡志
		(74) 代理人	100105588
			弁理士 小倉 博
		(74) 代理人	100106541
			弁理士 伊藤 信和
		(74) 代理人	100129779
			弁理士 黒川 俊久

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 初期機械的破損を判定するための検査方法及び装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

対象物の初期機械的破損を判定する方法(100)であって、
 選択基本周波数の超音波エネルギーを対象物に音波投射する段階と、
 前記音波投射された対象物から、前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データを収集する(108)段階と、
 前記基本周波数及び二次高調波周波数での振幅データから、非線形音像を生成する(110)段階と、
 を含み、
振幅データを収集する前記段階が、前記基本周波数の約1.5倍の中心周波数を有する広帯域変換器(202、204)を使用して実施され(104)、
超音波エネルギーを対象物に音波投射する前記段階が、を前記基本周波数での励起パルスの波長とした場合に、少なくとも10 のパルス長を有する励起パルスを用いて実施され、
該方法が、後方散乱スキャン及び表面波スキャンの少なくとも1つを実施する(106)段階をさらに含み、
前記後方散乱スキャンの場合には、前記変換器(202)が、対象物の外部表面に対して少なくとも約20 の対象物内深さに焦点合わせされ、
前記表面波スキャンの場合には、前記変換器(204)が、波投射された材料のレイリー波臨界角を含むように焦点合わせされかつさらに直接反射波から表面波を分離するように

10

20

焦点合わせされる、
ことを特徴とする方法 (1 0 0)。

【請求項 2】

前記非線形音像が、前記二次高調波周波数での振幅データと前記基本周波数での振幅データの二乗との比率を用いることによって生成され、

前記非線形音像が、次式、

$$= 8 c^2 / (a 4^2 f_0^2) (A_1^2 / A_2)$$

ここで、 A_2 は前記二次高調波周波数 ($2 f_0$) の振幅であり、 A_1 は前記基本周波数 (f_0) の振幅であり、 $k = 2 f_0 / c$ であり、ここで、 c は対象物材料内での音響信号の速度であり、 a はスキャニングパラメータである、

によって構成された 像である、

請求項 1 記載の方法 (1 0 0)。

【請求項 3】

前記変換器 (2 0 2、2 0 4) がまた、超音波エネルギーを対象物に音波投射する前記段階にも使用される、

請求項 1 記載の方法 (1 0 0)。

【請求項 4】

前記音波投射された対象物から前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データを検出する (1 0 8) ように、広帯域変換器 (2 0 2、2 0 4) を焦点合わせする段階と、

前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データをデジタル化しかつ格納する段階と、

を含む請求項 1 に記載の方法 (1 0 0)。

【請求項 5】

前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データをデジタル化しかつ格納する前記段階が、前記基本周波数を中心周波数とする第 1 の帯域フィルタ (2 1 0) と前記基本周波数の二次高調波を中心周波数とする第 2 の帯域フィルタ (2 1 2) とを使用して実施される、

請求項 4 記載の方法 (1 0 0)。

【請求項 6】

前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データをデジタル化しかつ格納する前記段階が、波形解析ソフトウェア (2 0 6) を使用して実施される、

請求項 4 記載の方法 (1 0 0)。

【請求項 7】

対象物の初期機械的破損を判定するためのシステム (2 0 0) であって、

後方散乱スキャン及び表面波スキャンの少なくとも 1 つによって選択基本周波数の超音波エネルギーを対象物に音波投射するための広帯域変換器であって、前記音波投射された対象物から前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データを検出するように焦点合わせされた広帯域変換器 (2 0 2、2 0 4) と、

前記広帯域変換器 (2 0 2、2 0 4) から検出信号を受信するためのパルス受信器 (2 0 6) と、

前記基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データをデジタル形式で格納するデータ収集コンピュータ (2 2 4) と、

を含み、

前記格納した前記基本周波数及び二次高調波周波数での振幅データを使用して非線形音像を生成し、

前記広帯域変換器 (2 0 2、2 0 4) は、前記基本周波数の約 1 . 5 倍の中心周波数を有し、超音波エネルギーの対象物への前記音波投射が、 を前記基本周波数での励起パルスの波長とした場合に、少なくとも 1 0 のパルス長を有する励起パルスを用いて実施され

前記システム(200)は、
後方散乱スキャン及び表面波スキャンの少なくとも1つを実施する(106)よう構成され、
後方散乱スキャンの場合には、前記変換器(202)が、対象物の外部表面に対して少なくとも約20の
対象物内深さに焦点合わせされ、
表面波スキャンの場合には、前記変換器(204)が、波投射された材料のレイリー波臨界角を含むように
焦点合わせされかつさらに直接反射波から表面波を分離するように焦点合わせされる
ことを特徴とするシステム(200)。

【請求項8】

前記基本周波数を中心周波数とする、前記パルス受信器(206)から検出信号を受信するための第1の帯域フィルタ(210)と、
 前記基本周波数の二次高調波を中心周波数とする、前記パルス受信器(206)から検出信号を受信するための第2の帯域フィルタ(212)と、
 を含み、
 前記第1及び第2の帯域フィルタ(210、212)の出力が、前記データ収集コンピュータ(224)内での格納のためにデジタル形式に変換される、
 請求項7記載のシステム(200)。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、統括的には超音波非破壊検査方法に関し、より具体的には初期機械的破損を判定するための超音波検査方法及びシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

多くの機械的破損モードは、微細構造破損及び/又は変化が領域内に蓄積し、その後観測可能なクラック及び破損の発生に至る、長期間にわたる第1の段階を含む。一旦クラックが観察可能となれば、部品の全耐用寿命のうちで、わずかな量の寿命が残存するだけである。

【0003】

一定の閾値以上の寸法を有しかつある特定の領域内に存在するクラックは、現存の超音波法又は渦電流法によって検出可能である。例えば、従来の超音波高調波イメージングでは、超音波信号又はパルスを基本周波数で送信し、変換器によってエコー信号を受信する。そのエコーがバックグラウンドノイズ(暗騒音)のエコーよりも大きい時に、クラックのような不連続部を検出することができる。

【0004】

残念なことには、クラックがそのような方法によって検出可能となる時までに、部品は本質的に破損してしまっている。例えば、チタニウム対象物内の疲労クラックは、残存寿命が僅か約10%になって初めて検出可能となる。識別されたクラックの存在は、部品がその寿命を使い果たしたことを表す。加えて、特定の部品内でのクラックの存在は、その部品を修理し実使用に戻すことを不能にする可能性がある。従って、部品が修理可能な間に初期破損を検出することができることが望ましい。

【0005】

初期機械的破損解析を適用することが可能な少なくとも2つの注目に値する適用例がある。第1の適用例は、チタニウム合金製航空機エンジン圧縮機鍛造品での初期ドウェル時間疲労の検出に関し、第2の適用例は、航空機エンジン及び陸上ガスタービンの翼形部及びディスクのような構造的な使用分野でのクリープ破壊の検出に関する。ドウェル時間疲労は、チタニウムにおける弾性率及び有限滑り組織の異方性に起因して生じる。従って、周期的応力(降伏応力近傍の)がチタニウム体に保持時間で加えられた場合、粒子は、加えられた応力に対するその個々の結晶方位に起因して異なる程度まで弾性変形する。さらに

10

20

30

40

50

、一部の粒子は塑性降伏を開始するが、他の粒子は塑性降伏を開始しない場合がある。この周期的に加えられる過程により、結晶粒（コロニー）界に高い応力の蓄積を招くことになる。不利な方位の粒子又は粒子のコロニーは、劈開によってクラックを生じるおそれがあり、このような劈開クラックにより部品が永久破損に至ることになる。

【特許文献 1】米国特許 6,408,695 号公報

【特許文献 2】米国特許 6,312,379 号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、ドウェル時間疲労は、クラックが出現するまでは現行の技術では検出不可可能である。先行技術の上記の及び他の欠点及び欠陥は、対象物の初期機械的破損を判定する方法によって克服されるか又は軽減される。

【課題を解決するための手段】

【0007】

例示的な実施形態では、本方法は、選択基本周波数の超音波エネルギーを対象物に音波投射する段階を含む。振幅データは、音波投射された対象物から基本周波数及び該基本周波数の二次高調波で収集され、非線形音像は、基本周波数及び二次高調波周波数での振幅データから生成される。

【0008】

別の態様では、対象物の初期機械的破損を判定する方法は、後方散乱スキャン及び表面波スキャンの少なくとも 1 つを使用して、選択基本周波数の超音波エネルギーを対象物に音波投射する段階を含む。広帯域変換器は、音波投射された対象物から基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データを検出するように焦点合わせされる。基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データは、デジタル化されかつ格納され、非線形音像が、基本周波数及び二次高調波周波数での振幅データから生成される。

【0009】

さらに別の態様では、対象物の初期機械的破損を判定するためのシステムは、後方散乱スキャン及び表面波スキャンの少なくとも 1 つによって選択基本周波数の超音波エネルギーを対象物に音波投射するための広帯域変換器を含む。広帯域変換器は、音波投射された対象物から基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データを検出するように焦点合わせされる。パルス受信器は、広帯域変換器から検出信号を受信し、またデータ収集コンピュータは、基本周波数及び該基本周波数の二次高調波での振幅データをデジタル形式で格納する。格納した基本周波数及び二次高調波周波数での振幅データは、非線形音像を生成するために使用される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

幾つかの図面において同じ要素には同様の参照符号を付した例示的な図面を参照されたい。

【0011】

本明細書で開示するのは、機械的破損が初期状態（即ち、微小欠陥の核生成が実際に起こる前）である対象物のそのような領域を非破壊検出する方法である。簡潔に言えば、本方法は、1 つ又は複数の入力周波数で対象部品に音波投射する段階と、バックグラウンドより高い入力周波数の高調波が発生する部品の領域に注目する段階とを含む。この情報は、C - スキャンと類似するが従来の C - スキャン法とは入力周波数に対する高調波の比率の強度を表示する点及び / 又は反射又は伝送された全ての音の全体強度そのものではなく音の強度の空間導関数を表示する点で従来の C - スキャン法と区別される方法で、部品をスキミングすることによって生成されかつ表示されることができる。

【0012】

最初に図 1 を参照すると、本発明の実施形態による、対象物の初期機械的破損を判定する方法 100 を示すブロック図を示す。本方法 100 は、ブロック 102 で始まり、そこ

10

20

30

40

50

では特定のスキャンタイプ（例えば、表面波、後方散乱）と共にテスト周波数 f_0 が選定される。スキャンタイプもまた、対象物の表面に対する関心領域の位置に基づいて決定されることになる。次に、ブロック 104 で、適切な変換器は、基本テスト周波数 f_0 及び該基本周波数の二次高調波 $2f_0$ の両方が検出可能となるように、選定される。例えば、少なくとも f_0 の -3 dB の帯域幅と約 $1.5f_0$ の中心周波数とを有する広帯域変換器は、周波数 f_0 の集束ビームを送信しかつ f_0 及び $2f_0$ の後方散乱信号を受信することができるべきである。

【0013】

変換器は、同一の曲率によって共通の焦点域に焦点合わせされた一対の共焦点素子を含むことができる。2つの共焦点素子のうちの薄い方は、 $2f_0$ の信号を受信するのに使用
10
ことができ、また送信素子における整合層として使用することができる。共焦点素子を使用することによって、送信素子はパルスエコーの形で基本周波数を受信可能であり、受信素子は二次高調波を受信可能である。

【0014】

1つの実施形態では、入力音波投射励起は、多数（ N ）の基本周波数の波長を入力バーストとして使用して、パルス無線周波数（RF）ドライバによって実行される。パルス長は、パルスパワースペクトルの二次高調波成分が十分に（例えば、基本周波数の振幅に対して約 20 dB 又はそれ以上ほど）減衰されるのに十分なほど長く選定されるべきである。一方、パルス長はまた、基本成分及び二次高調波成分の両方を含むエコーを生成する材料領域が変換器による入射表面エコーから分離可能となるのに十分なほど短く選定される
20
べきでもある。RF入力音波投射パルスのパワースペクトル振幅の近似値は以下の式で与えられる。

【0015】

【数1】

$$\frac{\sin[(N\pi/f_0)(f_0 - f)]}{[(N\pi/f_0)(f_0 - f)]}$$

【0016】

従って、上記の式は、基本周波数での入力パルスに対する適切な波長（ ）の個数は10
30
であることを示す。

【0017】

次に図1のブロック106に進むと、方法100では、スキャン自体のパラメータを設計することが続き、このパラメータには、例えば対象物のレイアウト面積及びボリュームと、ビームのジオメトリと、線間及びパルス間増分とが含まれる。後方散乱イメージの場合には、変換器は、その焦点距離が励起パルス長の少なくとも2倍の長さの対象物内深さに対応する位置に設置されるべきである。従って、例えば10の入力パルスを使用する場合、関心面積は、該関心面積からの望ましい一次及び二次高調波信号を対象物表面での反射信号から分離するために、対象物表面から少なくとも20下方にあるべきである。周波数 $2f_0$ での -6 dB のビーム直径は、ほぼ $1.03 F/d$ に等しく、ここで波長
40
は $2f_0$ での波長を意味し、従って、 $1.03 (c/2f_0) (F/d)$ と表わされ、ここで c は対象物材料内の音響信号の速度であり、 F は変換器レンズの焦点距離であり、 d は変換器レンズの直径である。さらに、後方散乱スキャンにおける変換器の焦点深度は、ほぼ $4 (F/d)^2$ 又は $4 (c/2f_0) (F/d)^2$ に等しい。

【0018】

それからの二次高調波エコーが変換器によって受信されるボリュームは、二次高調波の波長によって定まり、入力基本周波数によって音波投射される領域よりもかなり小さい。焦点深度の長さの差は、信号ゲート（その間にわたって各パルスによる信号が記録される時間領域）を二次高調波の焦点深度の長さとなるように設定するか又は該長さよりも短く設定することによって調整可能であり、焦点の断面積の差は、二次高調波信号の増幅度を適切にすることによって調整可能であり、この場合増幅度は、材料微細構造の性質及び微
50

細構造の音響散乱特性を考察した後を選定されることになる。

【 0 0 1 9 】

表面波イメージを生成し/検出する場合には、変換器は、表面波（又はレイリー波）入射角を含むのに十分な数値の開口で焦点合わせされる。変換器の焦点位置は、表面波を入力励起の直接反射から分離して同時にゲート表面波パルスが直接反射パルスから分離されるようになるのに十分な入射表面下方の深さに置かれる。

【 0 0 2 0 】

実施するスキャンタイプに関係なく、得られた対象物の超音波イメージが、図1のブロック108で示すように、 f_0 及び $2f_0$ の両方において振幅データを捕捉するような方法で収集される。後でさらに詳しく説明するように、 f_0 信号及び $2f_0$ 信号は、多数の方法で取得可能である。1つの実施形態では、信号がデジタル化されかつデータ収集コンピュータに格納される前に、別個の帯域フィルタを使用して f_0 信号及び $2f_0$ 信号を検出する。取り込まれた各イメージに対して、ピクセル当たり8ビット（又はそれ以上）が、2つの周波数の各々での振幅データを表現するのに使用可能である。別の実施形態では、変換器と相互通信状態になったパルス受信器の出力を波形デジタルイザに結合して、各超音波パルスにおける全ゲート波形が収集されてデータ収集ファイル内に格納されるようにすることができる。この実施形態では、デジタル処理速度は、記録されることになる全ゲート信号に対して $8f_0$ （又はそれ以上）であるべきである。従って、10パルスの場合、ソフトウェアで全波形を収集しかつ処理するには約80バイトが必要となる。

【 0 0 2 1 】

一旦 f_0 及び $2f_0$ における振幅データが収集されると、ブロック110に示すように、非線形音響イメージ（音像）を生成するために振幅データが処理される。一般的に、この非線形音像は、二次高調波信号の振幅と基本周波数信号の振幅の二乗との比率として表される。1つの特定の実施形態では、「ベータ（ β ）」像が、次式によって構成される。

【 0 0 2 2 】

【数2】

$$\beta = \left(\frac{8}{ak^2} \right) \left(\frac{A_2}{A_1^2} \right) = \frac{8c^2}{(a4\pi^2 f_0^2) (A_2/A_1^2)}$$

【 0 0 2 3 】

ここで、 A_2 は二次高調波周波数（ $2f_0$ ）成分の振幅であり、 A_1 は基本周波数（ f_0 ）成分の振幅であり、 $k = 2f_0 / c$ であり、ここで、 c は対象物材料内での音響信号の速度であり、 a は焦点深度（後方散乱スキャンの）又は入射円（表面波スキャンの）を表すスキャンングパラメータである。像の生成に加えて、強度の空間導関数イメージを生成することもできる。

【 0 0 2 4 】

最後にブロック112に示すように、処理した振幅データを使用して、対象物の残存寿命を評価するために $2f_0$ 対 f_0 振幅比が最も高い領域を識別する。評価は、例えば、 $2f_0$ 対 f_0 振幅比が最も高い領域を強調したカラー又はグレースケールに基づくグラフィック表示を含むことが可能であり、或いは二次高調波と基本周波数との非線形振幅比に関する空間導関数の表示/解析を含むこともできる。

【 0 0 2 5 】

図2は、本発明の別の態様による、初期機械的破損検査方法100の実施に使用可能な例示的なシステム200を示す概略図である。本システム200は、後方散乱スキャン用に構成された第1の広帯域変換器202と、表面波スキャン用に構成された第2の広帯域変換器204とを示す。いずれのケースでも、変換器202又は変換器204によって検出された反射信号は、パルス受信器206によって受信されて増幅器208で増幅される。

【 0 0 2 6 】

前に述べたように、 f_0 信号と $2f_0$ 信号の分離は、中心周波数が f_0 の第1の帯域フ

フィルタ 210 と中心周波数が $2f_0$ の第 2 の帯域フィルタ 212 とを使用することによって実行することができる。付加的増幅器 214 を使用して、 $2f_0$ 帯域フィルタ 212 を通過する信号を増幅することができる。一对のピーク検出器 216、218 は、それぞれ f_0 帯域フィルタ 210 及び $2f_0$ 帯域フィルタ 212 からフィルタ処理された信号を受信する。次に、 f_0 信号及び $2f_0$ 信号は、A/D コンバータ 220、222 によってデジタル化されて、後で f_0 及び $2f_0$ 振幅データに基づいて非線形音像を生成するためにデータ収集コンピュータ 224 によって格納される。図 2 に破線で示すように、パルス受信器 206 からの増幅信号は、そのフーリエ解析のために波形デジタル化 226 に入力されるか、或いはデジタル化振幅データは、データ収集コンピュータ 224 内に直接格納されるかのいずれかにされることができる。

10

【0027】

図 3 は、内部に潜在的な機械的損傷の領域 302 を有する例示的な対象物 300 を概略的に示す。第 1 の入出力信号の組で示すように、入力エネルギーが対象物 300 の「非損傷」区域上に焦点合わせされた場合には、出力信号での二次高調波歪みの量は、無視できる程度である。一方、入力エネルギーが損傷領域 302 上に焦点合わせされた場合には、得られた出力信号は、損傷に関連する大きな二次高調波成分を有することになる。従って、スキミングした場合に、比較的高い二次高調波信号の振幅に対応する対象物内の位置は、初期機械的破損位置に対する候補である。図 4 には、機械的損傷領域 402 を含む対象物ディスク 400 を示す。スキミングと、上述した f_0 及び $2f_0$ 振幅データの非線形イメージの生成とによって、図 5 の例示的な振幅強度プロットに示すように、 $2f_0$ 対 f_0 振幅比が最も高い領域を識別しかつ表示することができる。

20

【0028】

十分理解されたように、上記の方法及びシステムの実施形態は、特定の方法での振幅データの生成に限定するように解釈されるべきではない。例えば、較正された高調波強度がバックグラウンドから大きく外れる（又は、高調波強度の大きな空間的変動が存在する）領域が機械的損傷（例えば、初期ドウェル時間疲労損傷）の領域として識別される限り、 $2f_0$ 及び f_0 振幅の他の組合せ（線形又は非線形）を、スキミング方法において使用可能であることが予測される。従って、破損が初期状態である部品を、従来の方法によるよりも高い信頼性でかつ早期に検出することが可能になる。このことによって、より信頼性がある部品の作動が可能となり、同時に特定の適用分野に対してより長い検査周期が可能になることになる。さらに、部品を検査して、修理し実使用に戻すのに適しているか否かを判定することが可能となり、その場合、存在する（及び従来検出不可能な）初期損傷による早期段階のクラック核生成によって修理部品が破損することはないことを保証する尺度を提供することになる。

30

【0029】

本発明を好ましい実施形態に関して説明してきたが、本発明の技術的範囲から逸脱することなく、種々の変更を加えることができまた好ましい実施形態の要素を均等物で置き換えることができることは当業者には明らかであろう。さらに、本発明の本質的な技術的範囲から逸脱することなく、特定の状況又は材料を本発明の教示に適合するように、多くの改良を加えることができる。なお、特許請求の範囲に記載された符号は、理解容易のため

40

【図面の簡単な説明】

【0030】

【図 1】本発明の実施形態による、対象物の初期機械的破損を判定する方法を示すブロック図。

【図 2】本発明の別の態様による、図 1 に示す初期機械的破損検査方法を実施するのに使用できる例示的なシステムを示す概略図。

【図 3】内部に潜在的な機械的損傷領域を有する例示的な対象物を示す概略図。

【図 4】機械的損傷領域を含む対象物ディスクを示す図。

【図 5】図 4 の対象物ディスクに対応する、 $2f_0$ 対 f_0 振幅比強度を例示的に示す図。

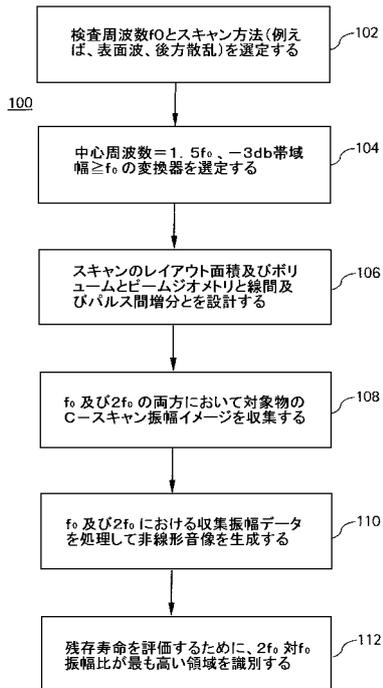
50

【符号の説明】

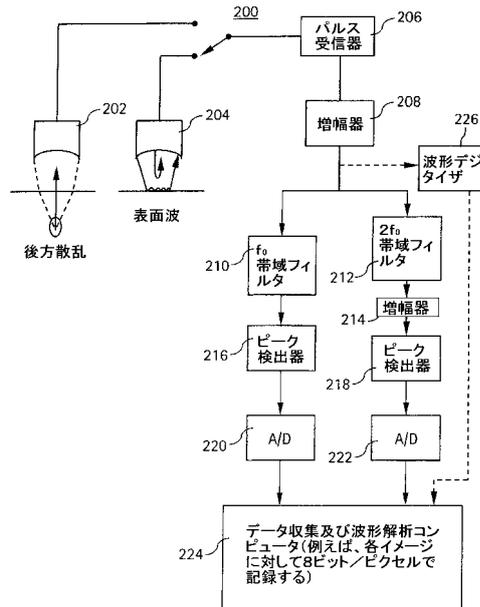
【0031】

- 400 対象物ディスク
- 402 機械的損傷領域

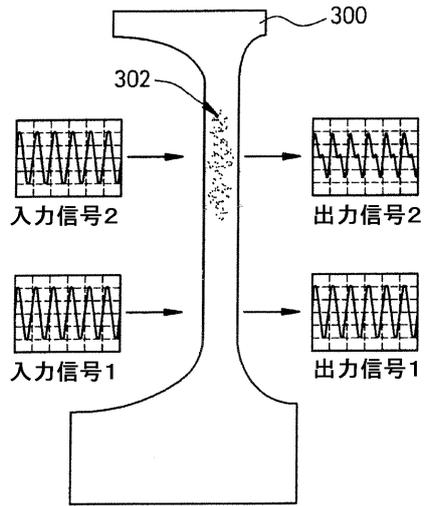
【図1】



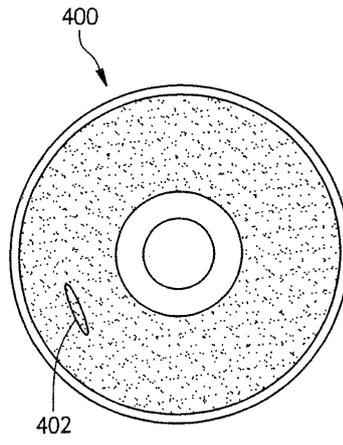
【図2】



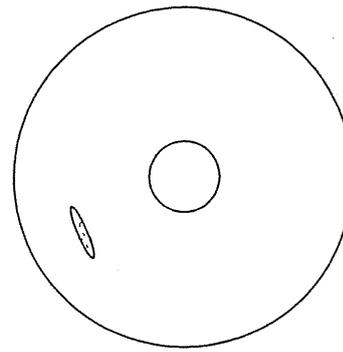
【図3】



【図4】



【図5】



フロントページの続き

- (72)発明者 ロバート・スニー・ギルモア
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、バートン・ヒルズ、イースタン・アベニュー、1111番
- (72)発明者 マイケル・フランシス・ザビエル・ジリオッティ、ジュニア
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スコシア、キール・ドライブ、41番

審査官 比嘉 翔一

- (56)参考文献 特開平02-128760(JP,A)
特開2001-305109(JP,A)
米国特許第06197130(US,B1)
特開2001-327492(JP,A)
特開平10-014921(JP,A)
特開2004-150875(JP,A)
特開平02-246946(JP,A)
特開2002-011004(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N29/00-29/52
G01B17/00-17/08
A61B 8/00- 8/15
JSTPlus(JDreamII)