



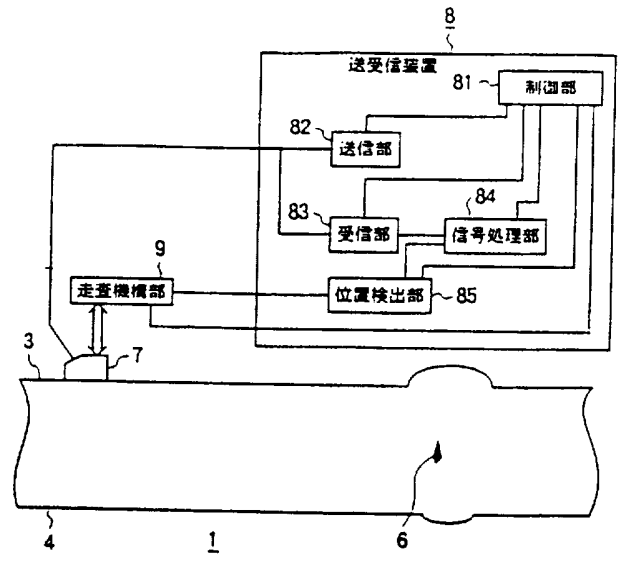
(51) 国際特許分類6 G01N 29/06, 29/10, 29/22	A1	(11) 国際公開番号 WO97/36175 (43) 国際公開日 1997年10月2日(02.10.97)
---	-----------	--

(21) 国際出願番号 PCT/JP97/00362 (22) 国際出願日 1997年2月12日(12.02.97) (30) 優先権データ 特願平8/74405 1996年3月28日(28.03.96) JP 特願平8/116528 1996年5月10日(10.05.96) JP 特願平8/280839 1996年10月23日(23.10.96) JP (71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について) 三菱電機株式会社 (MITSUBISHI DENKI KABUSHIKI KAISHA)[JP/JP] 〒100 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 Tokyo, (JP) (72) 発明者 ; および (75) 発明者 / 出願人 (米国についてのみ) 木村友則(KIMURA, Tomonori)[JP/JP] 和高修三(WADAKA, Shusou)[JP/JP] 亀山俊平(KAMEYAMA, Shumpei)[JP/JP] 小池光裕(KOIKE, Mitsuhiro)[JP/JP] 馬目裕一(MANOME, Yuuichi)[JP/JP] 〒100 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内 Tokyo, (JP)	(74) 代理人 弁理士 曾我道照, 外(SOGA, Michiteru et al.) 〒100 東京都千代田区丸の内三丁目1番1号 国際ビルディング8階 曾我特許事務所 Tokyo, (JP) (81) 指定国 CN, JP, KR, US, 欧州特許 (DE, FR, GB). 添付公開書類 国際調査報告書
---	--

(54)Title: **ULTRASONIC FLAW DETECTOR AND ULTRASONIC FLAW-DETECTING METHOD**

(54)発明の名称 **超音波探傷装置及び超音波探傷方法**

(57) Abstract
 An ultrasonic flaw detector comprising a probe which is driven by a signal to emit ultrasonic pulses obliquely to the surface of a sample and receive echoes from defects in the sample; and a scanning mechanism which moves the probe over a predetermined scanning range on the sample and outputs a spatial position of the probe. The detector further comprises a transmitter-receiver which includes a transmitter unit for transmitting signals to the probe, a receiver unit for receiving echoes through the probe, a position detector unit for inputting a spatial position of the probe from the scanning mechanism, and a signal processing unit for detecting defects based upon the stored spatial position of the probe and the stored echoes by taking into consideration the expansion of the ultrasonic beam caused by diffraction. It is possible to improve the precision of checking the samples using ultrasonic waves, and to detect and accurately measure the shapes, sizes and positions of acoustically discrete portions (defects).



- 8 ... transmitter-receiver
- 9 ... scanning mechanism
- 81 ... control unit
- 82 ... transmission unit
- 83 ... reception unit
- 84 ... signal processing unit
- 85 ... position detector unit

(57) 要約

送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の表面に対して斜めに送信するとともに、試験体中の欠陥によって反射された超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、この探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、探触子の空間的位置を出力する走査機構部とを備え、さらに、送信信号を発生して探触子へ出力する送信部と、探触子から受信されたエコーを入力する受信部と、走査機構部から探触子の空間的位置を入力する位置検出部と、前記記憶した探触子の空間的位置及び前記記憶したエコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して欠陥を検出する信号処理部とを有する送受信装置を備えた。試験体中の超音波による検査の精度を向上することができ、音響的不連続部（欠陥）などの形状や大きさ、位置などの検出能力、計測精度を向上することができる。

情報としての用途のみ

PCTに基づいて公開される国際出願をパンフレット第一頁にPCT加盟国を特定するために使用されるコード

AL	アルバニア	EE	エストニア	LR	リベリア	RU	ロシア連邦
AM	アルメニア	ES	スペイン	LS	レソト	SDE	スウェーデン
AT	オーストリア	FI	フィンランド	LT	リトアニア	SE	スウェーデン
AU	オーストラリア	FR	フランス	LU	ルクセンブルグ	SG	シンガポール
AZ	アゼルバイジャン	GA	ガボン	LV	ラトヴィア	SI	スロベニア共和国
BB	バルバドス	GB	イギリス	MC	モナコ	SK	スロバキア共和国
BE	ベルギー	GE	グルジア	MD	モルドバ	SN	セネガル
BG	ブルガリア	GH	ガーナ	MG	マダガスカル	SZ	スワジランド
BJ	ベナン	GN	ギニア	MK	マケドニア旧ユーゴスラ	TD	チャド
BR	ブラジル	GR	ギリシャ	VI	ヴィア	TG	トーゴ
BY	ベラルーシ	HU	ハンガリー	ML	マリ	TJ	タジキスタン
CA	カナダ	IE	アイルランド	MN	モンゴル	TM	トルクメニスタン
CC	中央アフリカ共和国	IS	アイスランド	MR	モーリタニア	TR	トルコ
CG	コンゴ	IT	イタリア	MW	マラウイ	TT	トリニダード・トバゴ
CH	スイス	JP	日本	MX	メキシコ	UA	ウクライナ
CI	コート・ジボアール	KE	ケニア	NE	ニジェール	UG	ウガンダ
CM	カメルーン	KG	キルギスタン	NL	オランダ	US	米国
CN	中国	KP	朝鮮民主主義人民共和国	NO	ノルウェー	UZ	ウズベキスタン共和国
CZ	チェコ共和国	KR	大韓民国	NZ	ニュージーランド	VN	ベトナム
DE	ドイツ	KZ	カザフスタン	PL	ポーランド	YU	ユーゴスラビア
DK	デンマーク	LI	リヒテンシュタイン	PT	ポルトガル		
		LK	スリランカ	RO	ルーマニア		

明細書

超音波探傷装置及び超音波探傷方法

技術分野

この発明は、溶接部の検査や、板材や管材等の検査に用いられる超音波探傷装置及び超音波探傷方法に関するものである。

特に、試験体の探傷面に対して傾いた角度で進行する超音波を用いた、いわゆる超音波斜角探傷法に関するものである。なお、検査、検出という文言とは別の文言として、測定、計測などといった文言があるが、ここでは、測定や計測などという文言は、検査、検出という文言に含まれるとして取り扱っている。また、検査結果という文言も、試験結果や探傷結果などという文言を含んでいるものとして取り扱っている。

背景技術

従来、この種の超音波斜角探傷法については、例えば、「超音波探傷法（改訂新版）」、日本学術振興会・製鋼第19委員会編、日刊工業新聞社、昭和49年7月30日改訂新版発行、昭和52年12月20日改訂新版3刷発行、第180頁～第199頁（以下、「文献A」と略称する。）に詳しく記述されている。

従来の超音波探傷装置及び超音波探傷方法について図80を参照しながら説明する。図80は、上記文献Aから引用した従来の超音波斜角探傷法を説明するための図である。

図80において、試験体1は、母材部2と、表面3と、底面4と、溶接部5とを有する。また、試験体1の溶接部5の内部には、音響的不連続部（欠陥）6が存在する。この音響的不連続部6には種々のものがあり、溶接時の初層溶接部の割れ、溶接終始端のクレータ割れ、融合不良、溶け込み不良、スラグ巻き込み、ブローホール、ウォームホール、高温割れ、異物混入などによる周辺媒質からの

材質的差異部等々がある。また、溶接作業に関連しないで材料そのものに既に存在している混入異物部や、クラック、きず等々も音響的不連続部に相当する。以下、これらの音響的不連続部を簡単のために欠陥6と呼んで説明する。さらに、同図において、試験体1の表面3には、探触子7が載置されている。

探傷面に相当する試験体1の表面3に置かれた探触子7から、試験体1の内部へ超音波パルスが送信される。図中、超音波パルスの伝搬方向を矢印を付した実線で示しており、角度「 θ 」は超音波ビームの屈折角である。欠陥6に照射されそれにより反射されたエコーは、再度、探触子7によって受信される。

欠陥6は次のようにして検出される。図示はしていないが探触子7に電氣的に接続された超音波探傷器によって、探触子7から超音波パルスが送信された時間とエコーが再び受信された時間との時間差、すなわち、超音波パルスが試験体1中を伝搬するのに要した時間を計測する。この時間は、超音波パルスが探触子7から欠陥6まで往復するのに要した時間であるから、2で割って片道の時間を求め、この片道の時間と試験体1中の音速とから片道のビーム路程を求める。このビーム路程は、図中、「Wy」で示している。

図中に示すように、試験体1の厚さを「t」とすると、探触子7から欠陥6までの水平距離「y」、及び、試験体1の表面3から欠陥6までの深さ「d」は、次の式1、式2で求められる。

$$y = W y \times \sin(\theta) \quad \dots \text{式1}$$

$$d = 2t - W y \times \cos(\theta) \quad \dots \text{式2}$$

なお、上記式2で与えられる深さdについては、探触子7から送信された超音波パルスが試験体1の底面4で1回反射して欠陥6に照射された場合の式である。底面反射を利用せず、直射で、すなわち、探触子7から送信された超音波パルスが欠陥6に直接照射されエコーが直接受信された場合には、同様の幾何学的な関

係から成立する次の式3が用いられる。

$$d = W y \times \cos(\theta) \quad \dots \text{式3}$$

ここでは示さないが超音波パルスが試験体1の底面4や表面3で何回か反射を繰り返して欠陥6に照射されエコーが受信された場合には、同様の幾何学的な関係から成立する式が用いられる。

超音波斜角探傷法では、試験体1中を伝搬する超音波として横波がよく使用されるが、例えば、特公昭55-36108号公報、特公昭56-17024号公報、特開昭53-74485号公報、特公昭57-1788号公報、特開昭61-169760号公報、特開昭61-239158号公報、特開昭63-261156号公報に開示されているように縦波が用いられることもある。

また、図80においては1つの探触子7を超音波の送受信に兼用して用いる1探法について示しているが、送信と受信に別々の探触子を用いる2探法も、例えば、特開昭62-222160号公報、特開昭60-73453号公報、特開昭64-59152号公報、特開平5-322857号公報、特開平7-120439号公報、特公昭57-51062号公報、特開昭55-13845号公報、特開平5-288722号公報に開示されているように使用される。

また、探触子7を試験体1の表面3において前後左右に機械的に手動ないしは自動で走査して探傷する代わりに、例えば、特開昭57-141549号公報、特公平1-46027号公報、特公平5-84464号公報、特公平6-64017号公報、特公平6-64027号公報、特公平3-50989号公報、特公平4-16174号公報、特開昭60-66159号公報、特開昭64-57165号公報、あるいは特開平7-229879号公報に開示されているように、探触子7にアレイ形の探触子を用いて電子的走査や屈折角 θ を変化させたりする方法も知られている。

さらに、例えば、特開平5-288722号公報、特公昭62-28870号公報、特開昭64-9361号公報、あるいは特開昭56-67750号公報に開示されているように、同じ屈折角 θ を有する2つの探触子を用いた2探法においてタンデム法と呼ばれる機械的走査を使った方法も使われている。

しかし、以上述べたいずれの方法についても、欠陥6の検出は、超音波ビームが実際には回折により拡がるが、このことを無視して超音波ビームの中心線だけに注目して幾何学的関係から決まる上述したような式を用いて行い、エコー高さから欠陥6の大きさを推定している。このため、欠陥6の形状や大きさ、位置などの計測精度に問題があった。

一方、超音波ビームの回折による拡がり積極的に使って、欠陥6の計測精度を向上させようとした試みがある。例えば、特開平2-278149号公報、特開平2-248855号公報、あるいは特開平5-172789号公報に開示された合成開口信号処理を適用した方法がこれに相当する。

しかし、これらの合成開口信号処理を適用した方法においては、探触子7から欠陥6に到達し、欠陥6から反射されて再び探触子7までに到る超音波ビームのビーム路程は直射による1つの路程のみしか考慮しておらず、この前提のもとで信号処理が施されている。このため、欠陥6の形状や大きさ、位置などの計測精度に未だ問題がある。

上述したような従来の超音波探傷装置及び超音波探傷方法では、欠陥6の検出は、超音波ビームが実際には回折により拡がるが、このことを無視して超音波ビームの中心線だけに注目して幾何学的関係から決まる上述したような式を用いて行い、エコー高さから欠陥6の大きさを推定していたので、欠陥6の形状や大きさ、位置などの計測、検出精度があまりよくないという問題点があった。

また、他の従来の超音波探傷装置及び超音波探傷方法では、超音波ビームの回折による拡がりを考慮はしていても、探触子7から欠陥6に到達し、欠陥6から反射されて再び探触子7までに到る超音波ビームのビーム路程は直射による1つの路程のみしか考慮しておらず、この前提のもとで信号処理が施されていたりしたので、欠陥6の形状や大きさ、位置などの計測、検出精度があまりよくないという問題点があった。

この発明は、前述した問題点を解決するためになされたもので、試験体中の超音波による検査の精度が向上し、欠陥などの形状や大きさ、位置などの検出能力、計測精度を向上することができる超音波探傷装置及び超音波探傷方法を得ることを目的とする。

発明の開示

この発明に係る超音波探傷装置は、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して斜めに送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、前記探触子を前記試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、前記探触子の空間的位置を出力する走査機構手段と、前記送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶し、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して前記音響的不連続部を検出する送受信手段とを備えたものである。

また、この発明に係る超音波探傷装置は、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して斜めに送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、前記探触子を前記試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、前記探触子の空間的位置を出力する走査機構手段と、前記送信信号を発生して前記

探触子へ出力し、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶し、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出する送受信手段とを備えたものである。

この発明に係る超音波探傷方法は、走査機構手段により探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるステップと、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して斜めに送信するステップと、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信するステップと、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶するステップと、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して前記音響的不連続部を検出するステップとを含むものである。

さらに、この発明に係る超音波探傷方法は、走査機構手段により探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるステップと、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して斜めに送信するステップと、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信するステップと、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶するステップと、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出するステップとを含むものである。

図面の簡単な説明

- 図1はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の構成を示す図、
- 図2はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の探触子の構成を示す図、
- 図3はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図4はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図5はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図6はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図7はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図8はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図9はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図10はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図11はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図12はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図13はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、
- 図14はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャート図、
- 図15はこの発明の実施例1に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するため

のビーム伝搬経路を示す図、

図 16 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の構成を示す図、

図 17 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 18 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 19 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 20 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 21 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 22 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 23 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 24 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 25 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 26 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 27 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 28 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャート図、

図 29 はこの発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 30 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の構成を示す図、

図 3 1 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の探触子の構成を示す図、

図 3 2 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 3 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 4 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 5 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 6 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 7 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 8 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 3 9 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 4 0 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 4 1 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 4 2 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 4 3 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 4 4 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 4 5 はこの発明の実施例 3 に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図46はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図47はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図48はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図49はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図50はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図51はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図52はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャート図、

図53はこの発明の実施例3に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのビーム伝搬経路を示す図、

図54はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の構成を示す図、

図55はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の探触子の構成を示す図、

図56はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図57はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図58はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図59はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図60はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図61はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超

音波ビーム伝搬経路を示す図、

図62はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図63はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図64はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図65はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図66はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図67はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図68はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図69はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図70はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図71はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図72はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図73はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路の伝搬モードを示す図、

図74はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路の伝搬モードを示す図、

図75はこの発明の実施例4に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャート図、

図 76 はこの発明の実施例 4 に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 77 はこの発明の実施例 4 に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 78 はこの発明の実施例 4 に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 79 はこの発明の実施例 4 に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図、

図 80 は従来の超音波斜角探傷法を説明するための図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、この発明の各実施例について図面に基づき説明する。

実施例 1.

この発明の実施例 1 に係る超音波探傷装置の構成について図 1 及び図 2 を参照しながら説明する。図 1 は、この発明の実施例 1 に係る超音波探傷装置の構成を示すブロック図である。また、図 2 は、この実施例 1 に係る超音波探傷装置の探触子の構成を示す図である。なお、図 2 は、「新非破壊検査便覧」、(社)日本非破壊検査協会編、日刊工業新聞社、1992年10月15日発行、第291頁～第292頁(以下、「文献B」と略称する。)から引用したものである。また、各図中、同一符号は同一又は相当部分を示す。

図 1 において、超音波探傷装置は、試験体 1 に載置された探触子 7 と、探触子 7 に接続された送受信装置 8 と、探触子 7 のための走査機構部 9 とを備える。

また、同図において、送受信装置 8 は、制御部 81 と、送信部 82 と、受信部 83 と、信号処理部 84 と、探触子 7 の位置検出部 85 とを含む。なお、走査機構部 9 は、図示はしていないが探触子 7 の位置検出センサーを含んでいる。

また、同図において、探触子 7 は、信号線により送信部 82 及び受信部 83 に

接続されている。受信部 8 3 は、信号処理部 8 4 に接続されている。位置検出部 8 5 は信号処理部 8 4 に接続されている。制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4、位置検出部 8 5、そして走査機構部 9 に接続されている。

さらに、同図において、走査機構部 9 は、位置検出部 8 5 に接続されている。走査機構部 9 の位置検出センサーからの出力信号が位置検出部 8 5 に入力される。位置検出部 8 5 で検出された探触子 7 の位置の情報は信号処理部 8 4 に入力される。

なお、信号処理部 8 4 は、図示はしていないが、内部にメモリを有する。このメモリに演算・算出された種々の結果が適宜記憶されるとともに、信号処理部 8 4 に入力された入力信号が適宜記憶される。

また、図示はしていないが、信号処理部 8 4 からは、処理状況を示す信号が適宜、制御部 8 1 に入力される。その入力信号に基づき、制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4、位置検出部 8 5、及び走査機構部 9 に対し、制御信号を出力して、それらの制御を司る。

図 2 において、探触子 7 は、アクリルなどの材料からなるくさび 7 1 と、圧電セラミックなどの圧電材料からなる矩形あるいは円形の振動子 7 2 とを含む。また、符号 7 2 A は見かけの振動子であり、「H」は試験体 1 の表面 3 から見かけの振動子 7 2 A の中心までの高さである。さらに、「W」は振動子 7 2 の幅、「W'」は見かけの振動子 7 2 A の幅、「p 1」はくさび内距離、「p 1'」は見かけのくさび内距離、「 α 」はくさび 7 1 と試験体 1 の表面 3 の境界面における超音波の入射角、「 θ 」は屈折角である。

なお、本明細書で使用しているこれらの記号や名称は、説明の都合上、上記文献 B とは異なっている。本明細書と文献 B との対応は次の通りである。矢印 (→) の左側が文献 B での名称と記号、右側が本明細書でのそれらである。なお、本明

細書で使用している記号Hに相当する高さは、文献Bには記載されていない。また、原点Oの位置は、文献Bとは異なり、図2に示すように、見かけの振動子72 Aの中心を試験体1の表面3に垂直に投影した点としている。

振動子の高さH	→	振動子72の幅W
振動子の見かけの高さHR	→	振動子72の見かけの幅W'
くさび内距離l1	→	くさび内距離p1
試験体中距離に換算したくさび内距離l2	→	見かけのくさび内距離p1'

以上、「見かけの」という表現を用いたが、これは、文献Bに記述されているように、振動子72からくさび71内に送信された超音波が、試験体1との境界面、すなわち、表面3でスネルの屈折の法則にしたがって屈折するため、試験体1側から見た振動子72の幅Wが等価的にW'に見えることや、くさび内距離p1を試験体1中の距離に換算すると等価的にp1'に見えるという意味で用いたものである。これらの見かけの物理量を用いると、くさび71があたかも試験体1であるかの如く見なして種々の計算や信号処理が行える。そこで、以下の説明においては、見かけの振動子72 A、その幅W'、見かけのくさび内距離P1'、及び見かけの振動子72 Aの中心に関連した高さHを用いて説明する。

つぎに、この発明の実施例1に係る超音波探傷装置の動作について図3から図15までを参照しながら説明する。

図3から図13までは、この実施例1に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図である。また、図14は、この実施例1に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャートである。さらに、図15は、図14に示した信号処理のフローチャートを説明するためのビーム伝搬経路を示す図である。

送受信装置8の送信部82からインパルスと見なしても差し支えない程度の狭

いパルス、ないしは、あるキャリア周波数を有するバースト信号などの送信信号が発生され、探触子7に伝達される。探触子7は、送信信号によって駆動され、超音波パルスを試験体1の探傷面、すなわち、試験体1の表面3に対して斜めに送信する。なお、各実施例では探傷面が表面である場合を例にとって説明するが、探傷面は表面に限らず、底面であったり、側面である場合もある。超音波パルスは、試験体1中を伝搬して欠陥6によって反射、散乱、回折される。ここでは、反射という文言が、単に反射のみでなく、散乱や回折などの物理的現象も含んだものとして取り扱う。すなわち、反射という文言は、超音波の伝搬が欠陥6によって影響を受け欠陥6が存在しない場合に比べてその挙動が異なった伝搬に関する振る舞いをした現象を全て含んでいるものと解釈することとする。特に、欠陥6の先端部において発生するとされている先端回折エコーないしは端部エコーと呼ばれているエコーも、欠陥6によって反射したエコーに含まれているものとして説明する。この反射、散乱、回折された超音波パルスは、試験体1中を伝搬して再び探触子7によって受信される。この受信されたエコーは、受信部83で増幅され、信号処理部84へ送られる。

一方、走査機構部9によって探触子7の空間的位置の情報が検出され、位置検出部85に送られる。この位置検出部85から探触子7の空間的位置の情報は信号処理部84へ送られる。この信号処理部84では、探触子7の空間的位置の情報と受信されたエコーが記憶される。

次に、走査機構部9によって探触子7は別の空間的位置（座標）に移動される。そして、送信信号によって探触子7から超音波パルスが送信され、欠陥6からの受信エコーと、探触子7の空間的位置の情報が、先ほどと同様に、信号処理部84に伝達され記憶される。

この一連の動作が探触子7の所要の走査範囲にわたって行われる。その後、信号処理部84において、後述する信号処理が実行される。

ここで、信号処理部 8 4 における信号処理手順を説明する前に、試験体 1 中の超音波ビームの伝搬特性について説明する。まず、超音波ビームの伝搬経路について図 3 を参照しながら考えてみる。図中、横方向を x 軸、垂直方向を y 軸に取っている。

欠陥 6 に相当する点反射源が (x_0, y_0) にあるものとする。見かけの振動子 7 2 A から送信された超音波ビームが回折により拡がるが、図中、実線は超音波ビームの中心線を示し、点線は上記中心線上の音圧から、例えば、送受往復での総合の超音波ビームにおいて、 -6 dB の音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2 本の点線の間が送受総合での実効的なビーム幅に相当する。2 本の点線に対応する屈折角を図中に示すように、「 θ_L 」、「 θ_H 」とする。なお、ここでは、 -6 dB となるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途、目的に応じて -3 dB でも -12 dB でも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

次に、図 4 から図 9 までを参照しながら上述したビーム幅内の音線を考えてみる。図 4 ~ 図 9 において、座標の原点 $(0, 0)$ は、図 2 と同じく見かけの振動子 7 2 A の中心を y 軸に沿って試験体 1 の表面 3 に投影した点に取ってある。点 Q は、見かけの振動子 7 2 A の中心を示し、その座標は $(0, -H)$ である。また、 (x_0, y_0) に位置する白丸印は欠陥 6 に対応する反射源である。

図 4 に示すように、屈折角 θ_1 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_L \leq \theta_1 \leq \theta_H$ であれば、矢印で示すような超音波ビームの伝搬経路が存在し得る。このとき、探触子 7 から送信された超音波は欠陥 6 に直射で当たり直接反射されて探触子 7 によってエコーとして受信される。ここで、 θ_1 は次の式 4 で与えられる。

$$\theta_1 = \tan^{-1} [x_0 / (y_0 + H)] \quad \dots \quad \text{式 4}$$

また、このときの往復の全ビーム路程は $2 \times L_1$ であり、 L_1 は次の式 5 で与えられる。なお、 $SQRT []$ は、 $[]$ 内の平方根を取る演算操作を表す。

$$L_1 = SQRT [x_0^2 + (y_0 + H)^2] \quad \dots \text{式 5}$$

また、図 5 に示すように、屈折角 θ_1 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_2 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_L \leq \theta_1 \leq \theta_H$ であり、かつ、 $\theta_L \leq \theta_2 \leq \theta_H$ であれば、探触子 7 から送信された超音波は矢印で示すように底面 4 で 1 回反射された後で欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で反射されて直接、探触子 7 に到達しエコーとして受信される伝搬経路が存在し得る。

図では示していないが、この逆の伝搬経路もあり得る。すなわち、探触子 7 から送信された超音波は直射で欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で反射され底面 4 で 1 回反射されてその後、探触子 7 に到達しエコーとして受信される。ここで、 θ_2 は次の式 6 で与えられる。なお、「 t 」は試験体 1 の厚さである。

$$\theta_2 = \tan^{-1} [x_0 / (2t - y_0 + H)] \quad \dots \text{式 6}$$

また、上述の 2 つの場合の全ビーム路程は、 $L_1 + L_2$ であり、 L_2 は次の式 7 で与えられる。

$$L_2 = SQRT [x_0^2 + (2t - y_0 + H)^2] \quad \dots \text{式 7}$$

また、 $\theta_L \leq \theta_2 \leq \theta_H$ であれば、図 6 に示すような伝搬経路も存在し得る。すなわち、探触子 7 から送信された超音波は矢印で示すように底面 4 で 1 回反射された後、欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で反射された超音波はその後、底面 4 で 1 回反射されて探触子 7 に到達しエコーとして受信される。このときの全ビーム路程は、 $2 \times L_2$ である。

また、図7に示すように、屈折角 θ_1 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_3 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_L \leq \theta_1 \leq \theta_H$ であり、かつ、 $\theta_L \leq \theta_3 \leq \theta_H$ であれば、次の伝搬経路も存在し得る。

すなわち、探触子7から送信された超音波は矢印で示すように底面4で1回反射され、さらに、表面3で1回反射され、その後、欠陥6に当たり、欠陥6で反射されて直接、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図では示していないが、この逆の伝搬経路もあり得る。すなわち、探触子7から送信された超音波は欠陥6に直射で当たり、欠陥6で反射され、その後、表面3で1回反射され、さらに、次に、底面4で1回反射されて探触子7に到達しエコーとして受信される。ここで、 θ_3 は次の式8で与えられる。

$$\theta_3 = \tan^{-1} [x_0 / (2t + y_0 + H)] \quad \dots \text{式8}$$

また、上述の2つの場合の全ビーム路程は、 $L_1 + L_3$ であり、 L_3 は次の式9で与えられる。

$$L_3 = \text{SQRT} [x_0^2 + (2t + y_0 + H)^2] \quad \dots \text{式9}$$

また、 $\theta_3 \leq \theta_2 \leq \theta_1$ の関係があるから、屈折角 θ_1 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_3 に相当する音線が上述したビーム幅内に存在するならば、 $\theta_L \leq \theta_2 \leq \theta_H$ が成立するから、図8に示すようなビーム伝搬経路も存在し得る。

すなわち、探触子7から送信された超音波は矢印で示すように1回底面4で反射され、さらに表面3で1回反射された後、欠陥6に当たり、欠陥6で反射され

た超音波は底面4で1回反射された後、探触子7に到達しエコーとして受信される。

また、図示はしていないが、この逆の伝搬経路もあり得る。すなわち、探触子7から送信された超音波は1回底面4で反射された後、欠陥6に当たり、欠陥6で反射された超音波は表面3で1回反射され、その後、底面4で1回反射され、その後、探触子7に到達しエコーとして受信される。上述の2つの場合の全ビーム路程は、 $L_2 + L_3$ となる。

さらに、 $\theta_L \leq \theta_3 \leq \theta_H$ であれば、図9に示すようなビーム経路も存在し得る。すなわち、探触子7から送信された超音波は矢印で示すように、底面4で1回反射し、さらに表面3で1回反射して欠陥6に当たり、欠陥6で反射され、その後、表面3で1回反射し、さらに底面4で1回反射されて探触子7に到達しエコーとして受信される。このときの全ビーム路程は、 $2 \times L_3$ となる。

以上は、説明の簡単のため、屈折角 θ_3 に相当する音線までが実効的な超音波ビーム幅内に存在する場合について考えた。すなわち、ビーム経路において、底面4で1回、表面3で1回の反射まで考慮した場合について考えた。

次に、ビーム幅が以上の考察で対象とした幅よりも更に広い場合について図10から図13までを参照しながら考えてみる。

このような場合には、図10に示すように、探触子7から送信された超音波が底面4で1回反射し、その後、表面3で1回反射し、さらに、その後、底面4で1回反射して、欠陥6に当たるビーム経路、及びこの逆の経路も考慮する必要がある。したがって、図11～図13に示すような種々のビーム経路、及びこれらの図の各々においてその逆の伝搬経路が図4～図9に加えて存在することがあり得る。なお、図中、 θ_4 は次の式10で与えられる。

$$\Theta 4 = \tan^{-1} [x 0 / (4 t - y 0 + H)] \quad \dots \quad \text{式 10}$$

図10では、底面4で2回、表面3で1回反射する経路までを考えているが、ビーム幅がさらに広い場合には、合計で、底面4で2回、表面3で2回反射する経路も考慮する必要がある。以下、ビーム幅が広くなるにしたがって、考慮すべき経路に関して底面4や表面3での反射回数が増えることになる。

この実施例1は、以上のように、超音波ビームの拡がり considering 斜角で探傷する装置及び方法を提供する点が従来と大きく異なる点の1つである。さらに、表面3や底面4での反射も考慮に入れている点が、従来の特開平2-278149号公報、特開平2-248855号公報、あるいは特開平5-172789号公報に開示された技術と全く異なる。

さて、次に、上述したビーム経路に関する考察結果に基づいて、図14及び図15を参照しながら信号処理部84における信号処理手順を説明する。なお、図15における座標原点は、図2～図13とは異なっている。原点は当然のことであるがどこにとっても構わない。無論、探触子7が走査した際の原点と異なれば適宜、座標変換を行う必要があることは言うまでもない。

信号処理部84において、前述したように、探触子7を所要の走査範囲にわたって走査した際の、走査範囲内の各空間（座標）点におけるエコー波形と、そのエコー波形を受信した際の探触子7の空間位置情報（座標）がメモリに記憶されている。なお、エコー波形は生波形、すなわち、整流、検波などの処理は施されず、AC波形として記憶されている。

図14のステップ11において、所要の像再生範囲を決める。すなわち、図15において、例えば、点線で囲って示すように試験体1の探傷結果として像表示を行いたい範囲を決める。

ステップ12において、像再生点を決める。像再生点は、上記像再生範囲内の1点である。この点の座標を図15に示すように (x_i, y_i) とする。

ステップ13において、この再生点 (x_i, y_i) に対応する出力を $P(x_i, y_i)$ とし、この値を零に設定する。すなわち、初期化のため、 $P(x_i, y_i) = 0$ とする。

ステップ14において、探触子7の空間的位置、すなわち座標と、この位置で受信したエコー波形をメモリの中から選択する。図15に示すように、探触子7の位置は点Qで代表させて考え、座標を $(x_t, -H)$ とする。なお、点Qの意味は、図4～図13と同じである。

ステップ15において、図15に示す角度（屈折角） $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ を計算する。ここで、 n は整数であり、像再生範囲と探触子7の走査範囲とから、探触子7の実効ビーム幅を考慮して予め決める。 $\theta_1 \sim \theta_n$ は、次の式11、式12、式13、式14、式15で与えられる。なお、 m は次のように与えられる。 n が偶数のときは、 $m = n$ であり、 n が奇数のときには、 $m = n - 1$ である。

$$\theta_1 = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (y_i + H)] \quad \dots \quad \text{式11}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (2t - y_i + H)] \quad \dots \quad \text{式12}$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (2t + y_i + H)] \quad \dots \quad \text{式13}$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (4t - y_i + H)] \quad \dots \quad \text{式14}$$

$$\theta_n = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (mt - (-1)^n y_i + H)] \quad \dots \quad \text{式15}$$

なお、これらの角度 $\theta_1 \sim \theta_n$ は、像再生点を仮に反射源とみなして、探触子7から送信された超音波がその像再生点 (x_i, y_i) まで到達するビーム経路、及び探触子7から像再生点までの片道のビーム路程を対応させて考えると次のよ

うになる。

角度 θ_1 は、探触子 7 から送信された超音波がその像再生点 (x_i, y_i) を直射した場合の経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_1 とすると、 w_1 は次の式 16 で与えられる。

$$w_1 = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (y_i + H)^2] \quad \dots \quad \text{式 16}$$

角度 θ_2 は、探触子 7 から送信された超音波が底面 4 で 1 回反射した後で像再生点 (x_i, y_i) に当たる場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_2 とすると、 w_2 は次の式 17 で与えられる。

$$w_2 = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (2t - y_i + H)^2] \quad \dots \quad \text{式 17}$$

角度 θ_3 は、探触子 7 から送信された超音波が底面 4 で 1 回反射した後、更に、表面 3 で 1 回反射した後で像再生点 (x_i, y_i) に当たる場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_3 とすると、 w_3 は次の式 18 で与えられる。

$$w_3 = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (2t + y_i + H)^2] \quad \dots \quad \text{式 18}$$

角度 θ_4 は、探触子 7 から送信された超音波が底面 4 で 1 回反射した後、更に、表面 3 で 1 回反射し、更に、底面 4 で 1 回反射した後で像再生点 (x_i, y_i) に当たる場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_4 とすると、 w_4 は次の式 19 で与えられる。

$$w_4 = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (4t - y_i + H)^2] \quad \dots \quad \text{式 19}$$

以下、 $\theta_5 \sim \theta_n$ については、同様であり特に説明は要せずとも類推できるも

のと考えられるので説明は省略するが、角度 θ_n に対応する片道のビーム路程を w_n とすると、 w_n は次の式20で与えられる。

$$w_n = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (m_t - (-1)^n y_i + H)^2] \quad \dots \text{式20}$$

なお、以上は、角度 $\theta_1 \sim \theta_n$ を、それぞれ、探触子7から送信された超音波が像再生点に到るビーム経路に対応させて考えた。逆に、これらのビーム経路のそれぞれに対して、像再生点で反射した超音波が探触子7に到る全く逆の進行方向を辿るビーム経路をそれぞれ対応させて考えれば、角度 $\theta_1 \sim \theta_n$ は、それぞれ、これらの反射に係わるビーム経路にそれぞれ対応させて考えることもできる。当然、探触子7から送信された超音波が像再生点に到るビーム経路の路程 $w_1 \sim w_n$ は、これらのビーム経路と逆進行方向のビーム経路の路程にそれぞれ等しい。

ステップ16において、ステップ15で計算で求めた角度 $\theta_1 \sim \theta_n$ が、超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、 $\theta_1 \sim \theta_n$ の中から実効ビーム幅内に入っているものを選び出す。すなわち、 k を1から n までの整数として、次の条件の式21を満足する θ_k を選び出す。

$$\Theta_L \leq \theta_k \leq \Theta_H \quad \dots \text{式21}$$

ここで、上記条件を満足する θ_k として選出されたものを、角度 $\theta_p \sim \theta_q$ とする。 p 及び q は、1から n までの範囲内にある整数である。なお、上記条件を満足する θ_k が存在しない場合には、ステップ22へ進む。このステップ22については後述する。

ステップ17において、ステップ16で選出された角度 $\theta_p \sim \theta_q$ にそれぞれ対応する上述した超音波ビームの伝搬経路を抽出する。すなわち、各角度 $\theta_p \sim \theta_q$ において、探触子7から送信された超音波が像再生点 (x_i, y_i) に到る

超音波ビーム伝搬経路（以下、「往時の伝搬経路」と呼ぶ。）と、これと逆の伝搬経路、つまり像再生点 (x_i, y_i) で反射された超音波が探触子 7 に到る伝搬経路（以下、「復時の伝搬経路」と呼ぶ。）を抽出する。かつ、角度 $\theta_p \sim \theta_q$ にそれぞれ対応するビーム路程 $w_p \sim w_q$ を計算する。

次に、各角度 $\theta_p \sim \theta_q$ ごとに、このようにして抽出した超音波ビームの往時及び復時の伝搬経路からなる往復の伝搬経路の全ての組み合わせを抽出し、その往復のビーム路程を計算する。ここで、往復の伝搬経路とは、探触子 7 から送信された超音波が像再生点 (x_i, y_i) に到り、像再生点で反射され、像再生点 (x_i, y_i) で反射された超音波が探触子 7 に到る伝搬経路をそう呼ぶものとする。往時の伝搬経路が角度 $\theta_p \sim \theta_q$ のうちどれかの 1 つの角度に対応し、復時での伝搬経路も角度 $\theta_p \sim \theta_q$ のうちどれかの 1 つの角度に対応するが、往時の伝搬経路に対応する角度と復時の伝搬経路に対応する角度とは同じ角度である組み合わせもあるし、異なる角度の組み合わせであることも当然あり得る。

次に、以上のようにして抽出した往復の伝搬経路の全ての組み合わせに対して、それぞれ、往復のビーム路程を、上記 $w_p \sim w_q$ に基づき計算する。以上により、存在しうる全ての往復のビーム路程が計算できることになる。

ステップ 18 において、ステップ 17 で得られた全ての往復のビーム路程の各々について、試験体 1 中の音速に基づき、エコーの受信されるべき時間を割り出す。すなわち、時間 = ビーム路程 / 音速となる。そして、その時間に対応するエコーの振幅を呼び出す。なお、このエコーはステップ 14 で選択したエコー波形である。

次に、往復のビーム路程の各々について呼び出されたエコーの振幅を加算して、その加算結果を $P(x_i, y_i)$ に加算する。

ステップ 19 において、探触子 7 の全走査範囲、あるいは定めた走査範囲にわ

たって、ステップ14～ステップ18の信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合はステップ22に進み、完了した場合には次のステップ20へ進む。

ステップ20において、 $P(x_i, y_i)$ の値、あるいは、その絶対値、あるいは、絶対値の自乗値などを、像再生点 (x_i, y_i) における再生像として出力する。

ステップ21において、所要の像再生範囲内の所要の全再生点、あるいは定められた再生点に関して、ステップ12からステップ20までの信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合はステップ23に進み、完了した場合には信号処理部84における信号処理は全て完了したことになる。

ステップ22において、探触子7の走査範囲内の別の空間位置（座標）を指定して、ステップ14からステップ19までの信号処理を続行する。

ステップ23において、所要の像再生範囲内の所要の別の像再生点（座標）を指定して、ステップ12からステップ21までの信号処理を繰り返す。なお、以上は、ステップ18において、全ての往復のビーム路程の各々について、エコーの受信されるべき時間を割り出し、その時間に対応するエコーの振幅を呼び出して加算したが、この加算演算において、次のことに注意する必要がある。すなわち、底面4で超音波が1回反射すると位相が変化する。同様に、表面3で反射しても位相が変化する。従って、このような反射に係る位相の変化量を補正して加算する必要がある。反射に係る位相の変化が逆相（180度）の場合について例示すると次のようになる。例えば、往復のビーム経路が、探触子7から送信された超音波パルスが直射で欠陥6に当たり直接探触子7で受信された経路（第1の経路）と、探触子7から送信された超音波パルスが直射で欠陥6に当たり欠陥6で反射された後、底面4で1回反射されその後探触子7で受信された経路（第2の経路）と、探触子7から送信された超音波パルスが直射で欠陥6に当たり欠陥

6で反射された後、表面3で1回反射されその後底面4で1回反射されてその後探触子7で受信された経路（第3の経路）とがあったとする。このような場合、第2の経路では底面4で1回反射されているから第1の経路と比較して位相が180度回転している。第3の経路では、表面3で1回、さらに底面4で1回反射されているから合計で位相は、第1の経路と比較して360度回転し、結果として第1の経路と同相になっている。従って、第1の経路に対応するエコーの振幅と、第3の経路に対応するエコーの振幅はそのまま加算し、第2の経路に対応するエコーの振幅は位相を逆転させた後の値、すなわち、-1を乗算した値を、第1及び第2の経路に対応する振幅に加算することになる。同様の位相の変化量の補正を行った後で、全ての往復のビーム経路の各々について、エコーの振幅を加算する必要がある。

なお、以上示した信号処理のステップ18において、往復のビーム路程に対応する時間のエコーの振幅が所要の信号対雑音比（S/N比）以下の値しか有していない場合には、むしろ、この振幅は零として処理を行った方が最終結果として得られる再生像に及ぼす雑音の影響が軽減されることがある。このような場合には、ステップ17で抽出した存在し得る全ての往復のビーム路程の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有するビーム路程のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅を加算して、その加算結果を $P(x_i, y_i)$ に加算する方が好ましい結果を得ることができる。

また、屈折角を選択し、これに基づいて往復のビーム伝搬経路を抽出する方法は、抽出方法の1つに過ぎず、これ以外の方法もあり得る。さらに、往復のビーム伝搬経路の全てを洗い出す必要は必ずしもなく、幾つかの候補を洗い出せばよい。

さて、以上の信号処理の結果として、試験体1の中の検査結果が像として得られた。次に、この実施例1の作用効果について説明する。

この実施例 1 においては、従来とは異なり、試験体 1 の底面 4 や表面 3 での超音波の反射も考慮して、存在し得る超音波ビーム伝搬経路の候補を洗い出し、これらの候補に対応する超音波ビーム路程を演算で求め、これらの超音波ビーム路程に対応する時間位置におけるエコーの振幅を加算した。さらに、この加算結果を、探触子 7 の走査範囲内の各探触子 7 の位置と対応するエコーに関して加算した。この加算結果を像再生点における像として出力した。これによって、従来は考慮されていない超音波ビーム伝搬経路まで考慮に入れた像を再生できるので、従来に比べより精度の良い検査結果が得られる作用、効果がある。

また、存在し得る上記超音波ビーム伝搬経路の超音波ビーム路程に対応する時間位置におけるエコーの振幅が所要の信号対雑音比以下の値しか有していない場合には、上記超音波ビーム伝搬経路の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有する超音波ビーム経路のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅のみを加算して、その加算結果を $P(x_i, y_i)$ に加算するようにしたので、より鮮明な像が得られ精度の良い検査が行える作用、効果が得られる。

また、上記角度 θ_L 及び θ_H で規定される超音波ビーム幅として、送信超音波ビーム並びに受信超音波ビームにおいてそれぞれ、 -3 dB のビーム幅を用いれば、主ビームを対象とした信号処理が行えるので、より鮮明な像が得られる作用、効果がある。

さらに、上記実施例 1 では、図示はしないが、 x 軸及び y 軸に垂直な z 軸上の、ある特定の z の値、すなわち、 (x, y) 断面内で探触子 7 を走査し、再生像を信号処理によって再生する場合を対象として説明した。この発明の実施例 1 は、これに限らず、 z 軸方向に沿っても、すなわち種々の z の値において同様の探触子 7 の走査並びに信号処理を行い、最終結果として試験体 1 中を 3 次元像として再生し表示すれば、欠陥 6 の z 軸方向に沿った情報も得られるので、欠陥 6 の種別、分類などに有効に利用できる作用、効果が得られる。

この発明の実施例1に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法は、次のような作用、効果も奏する。例えば、溶接部のビード部などのように試験体の表面の凹凸が激しくて欠陥の近くまで探触子を移動させて試験体の表面を介した超音波の送受信を行うことが困難な場合がある。このような場合、試験体の表面近くに欠陥が存在すると超音波の送受信が良好にできる探触子の移動範囲に上述のような制限があることから直射では欠陥からのエコーを捉えられないことがある。また、試験体の表面における探触子の移動範囲に上述のような制限がない場合でも、表面近傍に欠陥がある場合、送信信号を送信した時間からエコーが受信されるまでの時間が短くなり、一方、送信信号が受信回路側、すなわち受信部側に漏れ込んでいるので、エコーがこの送信信号の漏れ込みに埋もれてしまい、正常にエコーを受信できないことがある。以上のような場合には、試験体の底面側に探触子を配して探傷面を底面側にして探傷試験する必要がある。しかし、試験体が構造物の一部であるような場合には、底面側には物理的にアクセスできず、底面を探傷面として利用できない場合がある。以上のように表面近くに欠陥があって上述のような探触子の移動範囲に制限があったり送信信号の漏れ込みが問題になるような場合でも、この発明の実施例1に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法では、直射のみでなく、底面における超音波の反射や表面における超音波の反射を用いているので、このような反射をもちいることで上記のような制限を克服でき、また上記のような問題を回避でき、ひいては探傷試験が可能となる。

なお、以上は、探触子を試験体の探傷面に直接接触させて探傷試験する場合について説明したが、この発明はこれに限らず、試験体を水などの液体中に浸して、この液体を介して探触子から試験体に超音波を送受信するいわゆる浸漬法や水浸法に適用しても良い。あるいは、探触子の前面である音響送受信面、すなわち、探触子と試験体の探傷面との間の局所的な空間のみに水膜を設けて試験体に超音波を送受信するいわゆる局部水浸法に適用しても良い。このような浸漬法や水浸法や局部水浸法においても本発明と同様の作用、効果が得られる。

また、図1においては、走査機構部9が探触子7の空間的走査の機能と、探触

子 7 の空間的位置の情報を出力して位置検出部 8 5 に入力されるものとして説明したが、探触子 7 の空間的位置の情報収集と出力する機能は、走査機構部 9 とは独立して設けた位置情報発生部で行い、すなわち位置情報発生部で収集し出力して位置検出部 8 5 に入力する構成でも構わない。この場合には、走査機構部 9 は、探触子 7 の空間的走査の機能のみを担当することになる。また、この場合には位置情報発生部も制御部 8 1 に接続され制御部 8 1 と各種信号をやりとりする必要がある。

また、図 1 においては、探触子 7 の空間的位置の情報を走査機構部 9 から出力して位置検出部 8 5 に入力されるものとして説明したが、探触子 7 の空間的走査範囲や移動距離などの情報は、制御部 8 1 から制御して発生しているので、走査機構部 9 は探触子 7 の空間的走査の機能のみを持たせ、位置検出部 8 5 は設けないうで、制御部 8 1 からの探触子 7 の走査に関する情報を直接信号処理部 8 4 に入力し記憶させる構成でも構わない。

実施例 2.

この発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の構成について図 1 6 を参照しながら説明する。図 1 6 は、この発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の構成を示すブロック図である。

図 1 6 において、超音波探傷装置は、試験体 1 に載置された送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B と、探触子 7 A、7 B に接続された送受信装置 8 A と、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B のための走査機構部 9 A 及び 9 B とを備える。

また、同図において、送受信装置 8 A は、制御部 8 1 と、送信部 8 2 と、受信部 8 3 と、信号処理部 8 4 A と、探触子 7 A、7 B の位置検出部 8 5 とを含む。なお、走査機構部 9 A、9 B は、図示はしていないが送信用探触子 7 A、受信用探触子 7 B の位置検出センサーを含んでいる。

また、同図において、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B は、信号線によりそれぞれ送信部 8 2 及び受信部 8 3 に接続されている。受信部 8 3 は、信号処理部 8 4 A に接続されている。位置検出部 8 5 は信号処理部 8 4 A に接続されている。制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4 A、位置検出部 8 5、そして走査機構部 9 A 及び 9 B に接続されている。

さらに、同図において、走査機構部 9 A 及び 9 B は、位置検出部 8 5 に接続されている。走査機構部 9 A、9 B の位置検出センサーからの出力信号が位置検出部 8 5 に入力される。位置検出部 8 5 で検出された探触子 7 A、7 B の位置の情報は信号処理部 8 4 A に入力される。

なお、信号処理部 8 4 A は、実施例 1 と同様に、図示はしていないが、内部にメモリを有する。このメモリに演算・算出された種々の結果が適宜記憶されるとともに、信号処理部 8 4 A に入力された入力信号が適宜記憶される。

また、図示はしていないが、信号処理部 8 4 A からは、処理状況を示す信号が適宜、制御部 8 1 に入力される。その入力信号に基づき、制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4 A、位置検出部 8 5、及び走査機構部 9 A、9 B に対し、制御信号を出力して、それらの制御を司る。

送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の構成は図 2 に示したものと同様である。送信用探触子 7 A に関する、図 2 で示した屈折角 θ に対応する屈折角 θa と、受信用探触子 7 B に関する、同様の屈折角 θb とは、同じであってもよいし、互いに異なっても良い。互いに異なる場合には、欠陥 6 の検出能力をより向上できる場合がある。

つぎに、この発明の実施例 2 に係る超音波探傷装置の動作について図 1 7 から図 2 9 までを参照しながら説明する。

図17から図27までは、この実施例2に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図である。また、図28は、この実施例2に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャートである。さらに、図29は、図28に示した信号処理のフローチャートを説明するためのビーム伝搬経路を示す図である。

上記実施例1と同様に、送信部82からインパルスと見なしても差し支えない程度の狭いパルス、ないしは、あるキャリア周波数を有するバースト信号などの送信信号が発生され送信用探触子7Aに伝達される。この送信用探触子7Aは、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体1の探傷面、すなわち、試験体1の表面3に対して斜めに送信する。超音波パルスは、試験体1中を伝搬して欠陥6によって反射・散乱される。反射・散乱された超音波パルスは試験体1中を伝搬して、受信用探触子7Bによって受信される。受信されたエコーは受信部83で増幅され、信号処理部84Aへ送られる。

一方、走査機構部9A及び9Bによって送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報が検出され位置検出部85に送られる。この位置検出部85からの送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報は信号処理部84Aへ送られる。

信号処理部84Aでは、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報と受信されたエコーが記憶される。

さて、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bを共にある空間的位置に固定した状態で、上述した動作が遂行され、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報とエコーの情報とが記憶される。

次に、送信用探触子7Aはその空間的位置を固定された状態に保って、走査機

構部 9 B によって受信用探触子 7 B は別の空間的位置に移動される。そして、送信信号によって送信用探触子 7 A から超音波パルスが送信され、欠陥 6 からの受信エコーと、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の空間的位置の情報が、先ほどと同様に信号処理部 8 4 A に伝達され記憶される。この受信用探触子 7 B の空間的走査を含む一連の動作が受信用探触子 7 B の所要の走査範囲にわたって行われる。

次に、走査機構部 9 A によって送信用探触子 7 A が別の空間的位置に移動されその点で固定される。そして、送信信号によって送信用探触子 7 A から超音波パルスが送信され、欠陥 6 からの受信エコーと、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の空間的位置の情報が、先ほどと同様に信号処理部 8 4 A に伝達され記憶される。この一連の動作が受信用探触子 7 B の所要の走査範囲にわたって行われる。

以上の送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の空間的走査を含む一連の動作が、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の所要の走査範囲にわたって実行される。

以上の動作によって、送信用探触子 7 A を空間的に所要の走査範囲にわたって走査し、この走査範囲内における送信用探触子 7 A の各位置において、受信用探触子 7 B を所要の走査範囲にわたって走査して、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の各空間的位置の情報と、これらの位置におけるエコーの情報とが信号処理部 8 4 A に記憶される。その後、信号処理部 8 4 A において、後述する信号処理が実行される。

信号処理部 8 4 A における信号処理手順を説明する前に、試験体 1 中の超音波ビームの伝搬特性について、図 1 7 ~ 図 2 2 を参照しながら説明する。

図 1 7 は、送信用探触子 7 A から送信される超音波ビームに関する超音波ビー

ム伝搬経路図である。図17において、横方向をx軸、垂直方向をy軸に取っている。図3と同様に、点反射源が (x_0, y_0) にあるものとする。符号72Aは、送信用探触子7Aに関する見かけの振動子である。「Ha」は、試験体1の表面3から見かけの振動子72Aの中心までの高さである。送信用探触子7Aに関する見かけの振動子72Aから送信された超音波ビームは回折により広がるが、図中、実線はビームの中心線を示し、点線は中心線上の音圧から、例えば、 -3 dBの音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2つの点線の間が送信超音波ビームの実効的なビーム幅に相当する。2つの点線に対応する屈折角を図中に示すように、「 θ_{La} 」、「 θ_{Ha} 」とする。

図18は、受信用探触子7Bによって超音波を受信する際の超音波ビームに関する超音波ビーム伝搬経路図である。図18においても、横方向をx軸、垂直方向をy軸に取っている。図3及び図17と同様に、点反射源が (x_0, y_0) にあるものとする。符号72Bは、受信用探触子7Bに関する見かけの振動子である。「Hb」は、試験体1の表面3から見かけの振動子72Bの中心までの高さである。見かけの振動子72Bで受信される超音波ビームは超音波の回折を考慮するとある広がった角度で受信されるが、図中、実線はビームの中心線を示し、点線は中心線上の音圧から、例えば、 -3 dBの音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2つの点線の間が受信超音波ビームの実効的なビーム幅に相当する。2つの点線に対応する屈折角を図中に示すように、「 θ_{Lb} 」、「 θ_{Hb} 」とする。

図17及び図18においては、それぞれ -3 dBとなるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて -6 dBでも -9 dBでも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。さらに、送信の場合と受信の場合とでそれぞれ異なった値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

さて、図19～図22を参照しながら上述した送信超音波ビーム幅内、及び、

受信超音波ビーム内の音線を考えてみる。図19～図22において、座標の原点は、図17と同じく送信用探触子7Aの見かけの振動子72Aの中心をy軸に沿って試験体1の表面3に投影した点に取ってある。点「Qa」は、見かけの振動子72Aの中心を示し、その座標は(0, -Ha)である。点「Qb」は、受信用探触子7Bの見かけの振動子72Bの中心を示し、その座標は、(xr, -Hb)としている。また、(x0, y0)に位置する白丸印は欠陥6に対応する反射源である。

説明の簡単化のため、試験体1の底面4での1回反射までに限定して図19～図22を参照しながら、まず考えてみる。

図19に示すように、屈折角 $\theta 1 a$ に相当する音線が上述した送信超音波ビーム幅内に存在し、屈折角 $\theta 1 b$ に相当する音線が上述した受信超音波ビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta L a \leq \theta 1 a \leq \theta H a$ で、かつ、 $\theta L b \leq \theta 1 b \leq \theta H b$ であれば、矢印で示すような超音波ビームの伝搬経路が存在し得る。このとき、送信用探触子7Aから送信された超音波は欠陥6に直射で当たり直接反射されて受信用探触子7Bによってエコーとして受信される。ここで、 $\theta 1 a$ 及び $\theta 1 b$ はそれぞれ次の式22及び式23で与えられる。

$$\theta 1 a = \tan^{-1} [x 0 / (y 0 + H a)] \quad \dots \text{式 2 2}$$

$$\theta 1 b = \tan^{-1} [(x 0 - x r) / (y 0 + H b)] \quad \dots \text{式 2 3}$$

また、このときの往復の全ビーム路程は、 $L 1 a + L 1 b$ であり、 $L 1 a$ 及び $L 1 b$ はそれぞれ次の式24及び式25で与えられる。

$$L 1 a = \text{SQRT} [x 0^2 + (y 0 + H a)^2] \quad \dots \text{式 2 4}$$

$$L 1 b = \text{SQRT} [(x 0 - x r)^2 + (y 0 + H b)^2] \quad \dots \text{式 2 5}$$

また、図20に示すように、屈折角 $\theta 1 a$ に相当する音線が上述した送信超音

波ビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 $\theta 2 b$ に相当する音線が上述した受信超音波ビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta L a \leq \theta 1 a \leq \theta H a$ であり、かつ、 $\theta L b \leq \theta 2 b \leq \theta H b$ であれば、矢印で示すように、送信用探触子7 Aから送信された超音波は直射で欠陥6に当たり、欠陥6で反射され底面4で1回反射されて、その後受信用探触子7 Bに到達しエコーとして受信されるビーム経路が存在し得る。ここで、 $\theta 2 b$ は次の式26で与えられる。

$$\theta 2 b = \tan^{-1} [(x 0 - x r) / (2 t - y 0 + H b)] \quad \dots \text{式} 26$$

このときの全ビーム路程は、 $L 1 a + L 2 b$ であり、 $L 2 b$ は次の式27で与えられる。

$$L 2 b = \text{SQRT} [(x 0 - x r)^2 + (2 t - y 0 + H b)^2] \quad \dots \text{式} 27$$

また、図21に示すように、屈折角 $\theta 2 a$ に相当する音線が上述した送信超音波ビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 $\theta 1 b$ に相当する音線が上述した受信超音波ビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta L a \leq \theta 2 a \leq \theta H a$ であり、かつ、 $\theta L b \leq \theta 1 b \leq \theta H b$ であれば、送信用探触子7 Aから送信された超音波は矢印で示すように底面4で1回反射された後で欠陥6に当たり、欠陥6で反射されて、直接受信用探触子7 Bに到達しエコーとして受信される伝搬経路が存在し得る。ここで、 $\theta 2 a$ は次の式28で与えられる。

$$\theta 2 a = \tan^{-1} [x 0 / (2 t - y 0 + H a)] \quad \dots \text{式} 28$$

このときの全ビーム路程は、 $L 2 a + L 1 b$ であり、 $L 2 a$ は次の式29で与えられる。

$$L 2 a = \text{SQRT} [x 0^2 + (2 t - y 0 + H a)^2] \quad \dots \quad \text{式 2 9}$$

また、 $\theta L a \leq \theta 2 a \leq \theta H a$ で、かつ、 $\theta L b \leq \theta 2 b \leq \theta H b$ であれば、図 2 2 に示すような伝搬経路も存在し得る。すなわち、送信用探触子 7 A から送信された超音波は矢印で示すように底面 4 で 1 回反射された後、欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で反射された超音波はその後、底面 4 で 1 回反射されて受信用探触子 7 B に到達しエコーとして受信される。このときの全ビーム路程は、 $L 2 a + L 2 b$ である。

以上は、説明の簡単化のため、屈折角 $\theta 2 a$ に相当する音線までが実効的な送信超音波ビーム幅内に存在し、屈折角 $\theta 2 b$ に相当する音線までが実効的な受信超音波ビーム幅内に存在する場合について考えた。すなわち、ビーム経路において、底面 4 で 1 回の反射まで考慮した場合について考えた。

次に、ビーム幅が以上の考察で対象とした幅よりも更に広い場合について図 2 3 ~ 図 2 7 を参照しながら考えてみる。図 2 3 ~ 図 2 7 は、底面 4 で 1 回、表面 3 で 1 回までの反射を考慮した場合について、すなわち、屈折角 $\theta 1 a \sim \theta 3 a$ に相当する音線が上述した送信超音波ビーム幅内に存在し、屈折角 $\theta 1 b \sim \theta 3 b$ に相当する音線が上述した受信超音波ビーム幅内に存在する場合について、存在し得るビーム経路を示したものである。図 2 3 ~ 図 2 7 に示すビーム伝搬経路は、図 1 9 ~ 図 2 2 に加えて存在し得る。ここで、 $\theta 3 a$ 及び $\theta 3 b$ は、それぞれ次の式 3 0 及び式 3 1 で与えられる。

$$\theta 3 a = \tan^{-1} [x 0 / (2 t + y 0 + H a)] \quad \dots \quad \text{式 3 0}$$

$$\theta 3 b = \tan^{-1} [(x 0 - x r) / (2 t + y 0 + H b)] \quad \dots \quad \text{式 3 1}$$

次に、図 2 3 ~ 図 2 7 について説明する。図 2 3 は、送信用探触子 7 A から送信された超音波が矢印で示すように底面 4 で 1 回反射されて、さらに、表面 3 で

1回反射されて、その後、欠陥6に当たり、欠陥6で反射されて、直接受信探触子7Bに到達しエコーとして受信される経路である。このとき、全ビーム路程は、 $L3a + L1b$ であり、 $L3a$ は次の式32で与えられる。

$$L3a = \text{SQRT} [x0^2 + (2t + y0 + Ha)^2] \quad \dots \text{式32}$$

図24は、送信用探触子7Aから送信された超音波が欠陥6に直射で当たり、欠陥6で反射されて、その後表面3で1回反射されて、さらに、底面4で1回反射されて受信探触子7Bに到達しエコーとして受信される経路である。このとき、全ビーム路程は、 $L1a + L3b$ であり、 $L3b$ は次の式33で与えられる。

$$L3b = \text{SQRT} [(x0 - xr)^2 + (2t + y0 + Hb)^2] \quad \dots \text{式33}$$

図25は、送信用探触子7Aから送信された超音波が矢印で示すように1回底面4で反射され、さらに表面3で1回反射された後、欠陥6に当たり、欠陥6で反射された超音波が底面4で1回反射された後、受信探触子7Bに到達しエコーとして受信される経路である。このときの全ビーム路程は、 $L3a + L2b$ である。

図26は、送信用探触子7Aから送信された超音波が1回底面4で反射された後、欠陥6に当たり、欠陥6で反射された超音波が表面3で1回反射され、その後底面4で1回反射され、その後で受信探触子7Bに到達しエコーとして受信される経路である。このときの全ビーム路程は、 $L2a + L3b$ である。

図27は、送信用探触子7Aから送信された超音波が矢印で示すように、底面4で1回反射し、さらに表面3で1回反射して欠陥6に当たり、欠陥6で反射されて、その後表面3で1回反射し、さらに底面4で1回反射されて受信探触子7Bに到達しエコーとして受信される経路である。このときの全ビーム路程は、

L3a + L3bである。

実効的な送信超音波ビーム幅及び受信超音波ビーム幅が、以上の考察で対象とした場合よりももっと広い場合には、送信用探触子7Aから送信された超音波が底面4で1回反射し、その後、表面3で1回反射し、さらに、その後、底面4で1回反射して、欠陥6に当たるビーム経路、及び、欠陥6で反射された超音波が底面4で1回反射され、表面3で1回反射され、さらに、底面4で1回反射され、その後、受信用探触子7Bで受信される経路も考慮する必要がある。

送信並びに受信の実効ビーム幅が更に広くなると、底面4で2回、表面3で2回反射する経路も考慮する必要がある。以下、ビーム幅が広くなるにしたがって、考慮すべき経路に関して底面4や表面3での反射回数が増えることになる。

この実施例2は、以上のように、超音波ビームの拡がり considering 斜角で探傷する装置及び方法を提供する点が従来と大きく異なる点の1つである。さらに、表面3や底面4での反射も考慮に入れている点が、従来の特開平2-278149号公報、特開平2-248855号公報、あるいは特開平5-172789号公報に開示された技術と全く異なる。

さて、次に、図17～図27に示した超音波ビーム経路に関する考察結果に基づいて、図28及び図29を参照しながら信号処理部84Aにおける信号処理手順を説明する。なお、図29においては座標原点は、図19～図27とは異なっている。原点は当然のことであるがどこにとっても構わない。無論、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bを走査した際の原点と異なれば適宜、座標変換を行う必要があることは言うまでもない。

信号処理部84Aにおいて、前述したように、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bを所要の走査範囲にわたって走査した際の、走査範囲内の各空間点におけるエコー波形と、そのエコー波形を受信した際の送信用探触子7Aの空間位置

情報、並びに、受信用探触子 7 B の空間位置情報が記憶されている。なお、エコー波形は生波形、すなわち、整流・検波などの処理は施されず、AC 波形として記憶されている。

ステップ 3 1 において、所要の像再生範囲を決める。すなわち、図 2 9 において、例えば、点線で囲って示すように試験体 1 の探傷結果として像表示を行いたい範囲を決める。

ステップ 3 2 において、像再生点を決める。像再生点は上記像再生範囲内の 1 点である。この点の座標を図 2 9 に示すように (x_i, y_i) とする。

ステップ 3 3 において、この再生点 (x_i, y_i) に対応する出力を $P(x_i, y_i)$ とし、この値を零に設定する。すなわち、 $P(x_i, y_i) = 0$ とする。

ステップ 3 4 において、送信用探触子 7 A の走査範囲内においてエコーを受信した場所である送信用探触子 7 A の空間的 1 つの位置を選択する。図 2 9 に示すように、送信用探触子 7 A の位置は点 Q_a で代表させて考え、座標を $(x_t, -H_a)$ とする。点 Q_a の意味は、図 1 7 ~ 図 2 7 と同じである。

ステップ 3 5 において、図 2 9 に示す角度 $\theta_{1a}, \theta_{2a}, \theta_{3a}, \theta_{4a}, \dots, \theta_{na}$ を計算する。ここで、 n は整数であり、像再生範囲と送信用探触子 7 A の走査範囲とから、送信用探触子 7 A の実効ビーム幅を考慮して予め決める。 $\theta_{1a} \sim \theta_{na}$ は次の式 3 4 ~ 3 8 で与えられる。

$$\theta_{1a} = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (y_i + H_a)] \quad \dots \quad \text{式 3 4}$$

$$\theta_{2a} = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (2t - y_i + H_a)] \quad \dots \quad \text{式 3 5}$$

$$\theta_{3a} = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (2t + y_i + H_a)] \quad \dots \quad \text{式 3 6}$$

$$\theta_{4a} = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (4t - y_i + Ha)] \quad \dots \text{式37}$$

$$\theta_{na} = \tan^{-1} [(x_i - x_t) / (mt - (-1)^n y_i + Ha)] \quad \dots \text{式38}$$

ここで、 m は次のように与えられる。 n が偶数のときは、 $m=n$ であり、 n が奇数のときは、 $m=n-1$ である。

なお、これらの角度 $\theta_{1a} \sim \theta_{na}$ は、像再生点を仮に反射源とみなして、送信用探触子7Aから送信された超音波がその像再生点 (x_i, y_i) まで到達するビーム経路を対応させて考えると次のようになる。

角度 θ_{1a} は、送信用探触子7Aから送信された超音波がその点 (x_i, y_i) を直射した場合の経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{1a} とすると、 w_{1a} は次の式39で与えられる。

$$w_{1a} = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (y_i + Ha)^2] \quad \dots \text{式39}$$

角度 θ_{2a} は、送信用探触子7Aから送信された超音波が底面4で1回反射した後で点 (x_i, y_i) に当たる場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{2a} とすると、 w_{2a} は次の式40で与えられる。

$$w_{2a} = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (2t - y_i + Ha)^2] \quad \dots \text{式40}$$

角度 θ_{3a} は、送信用探触子7Aから送信された超音波が底面4で1回反射した後、更に、表面3で1回反射した後で点 (x_i, y_i) に当たる場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{3a} とすると、 w_{3a} は次の式41で与えられる。

$$w_{3a} = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (2t + y_i + Ha)^2] \quad \dots \text{式41}$$

角度 θ_{4a} は、送信用探触子 7A から送信された超音波が底面 4 で 1 回反射した後、更に、表面 3 で 1 回反射し、更に、底面 4 で 1 回反射した後で点 (x_i, y_i) に当たる場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{4a} とすると、 w_{4a} は次の式 42 で与えられる。

$$w_{4a} = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (4t - y_i + Ha)^2] \quad \dots \text{式42}$$

以下、 $\theta_{5a} \sim \theta_{na}$ については、同様であり特に説明は要せずとも類推できるものと考えられるので説明は省略するが、角度 θ_{na} に対応する片道のビーム路程を w_{na} とすると、 w_{na} は次の式 43 で与えられる。

$$w_{na} = \text{SQRT} [(x_i - x_t)^2 + (mt - (-1)^n y_i + Ha)^2] \quad \dots \text{式43}$$

ステップ 36 において、ステップ 35 の計算で求めた $\theta_{1a} \sim \theta_{na}$ が、送信用探触子 7A に係わる送信超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、 $\theta_{1a} \sim \theta_{na}$ の中から送信超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているものを選択し選び出す。すなわち、 k_a を 1 から n までの整数として、次の条件式 44 を満足する θ_{ka} を選び出す。ここで、上記条件式を満足する θ_{ka} として選出されたものを、 $\theta_{pa} \sim \theta_{qa}$ とする。 pa 及び qa は、1 から n までの範囲内にある整数である。

$$\Theta_{La} \leq \theta_{ka} \leq \Theta_{Ha} \quad \dots \text{式44}$$

なお、上記条件式を満足する θ_{ka} が存在しない場合には、ステップ48へ進む。このステップ48については後述する。

ステップ37において、ステップ36で選出された $\theta_{pa} \sim \theta_{qa}$ にそれぞれ対応する上述した送信に係わる超音波ビームの伝搬経路を抽出する。すなわち、 $\theta_{pa} \sim \theta_{qa}$ の各角度において、送信用探触子7Aから送信された超音波が像再生点 (x_i, y_i) に到る超音波ビーム伝搬経路（往時の伝搬経路）を抽出する。かつ、角度 $\theta_{pa} \sim \theta_{qa}$ にそれぞれ対応するビーム路程 $w_{pa} \sim w_{qa}$ を計算する。

ステップ38において、ステップ34で選出した送信用探触子7Aの位置において、受信用探触子7Bを走査した走査範囲内において、エコーを受信した際の受信用探触子7Bの1つの空間的位置を選出する。図29に示すように、受信用探触子7Bの位置は点 Q_b で代表させて考え、座標を $(x_r, -H_b)$ とする。なお、点 Q_b の意味は、図17～図27と同じである。

ステップ39において、図29に示す角度 $\theta_{1b}, \theta_{2b}, \theta_{3b}, \dots, \theta_{ub}$ を計算する。ここで、 u は整数であり、像再生範囲と受信用探触子7Bの走査範囲とから、受信用探触子7Bの実効ビーム幅を考慮して予め決める。 $\theta_{1b} \sim \theta_{ub}$ は次の式45～49で与えられる。

$$\theta_{1b} = \tan^{-1} [(x_i - x_r) / (y_i + H_b)] \quad \dots \quad \text{式45}$$

$$\theta_{2b} = \tan^{-1} [(x_i - x_r) / (2t - y_i + H_b)] \quad \dots \quad \text{式46}$$

$$\theta_{3b} = \tan^{-1} [(x_i - x_r) / (2t + y_i + H_b)] \quad \dots \quad \text{式47}$$

$$\theta_{4b} = \tan^{-1} [(x_i - x_r) / (4t - y_i + H_b)] \quad \dots \quad \text{式48}$$

$$\theta_{ub} = \tan^{-1} [(x_i - x_r) / (vt - (-1)^u y_i + H_b)]$$

・・・ 式49

ここで、 v は次のように与えられる。 u が偶数のときは、 $v = u$ であり、 u が奇数のときは、 $v = u - 1$ である。

なお、これらの角度 $\theta_{1b} \sim \theta_{ub}$ は、像再生点を仮に反射源とみなして、この点反射源から反射された超音波が受信用探触子7Bに到達しエコーとして受信されるまでのビーム経路を対応させて考えると次のようになる。

角度 θ_{1b} は、像再生点で反射された超音波が受信用探触子7Bに直接到達する場合の経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{1b} とすると、 w_{1b} は次の式50で与えられる。

$$w_{1b} = \text{SQRT} [(x_i - x_r)^2 + (y_i + H_b)^2] \quad \dots \text{式50}$$

角度 θ_{2b} は、像再生点で反射された超音波が底面4で1回反射した後で受信用探触子7Bに到達する場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{2b} とすると、 w_{2b} は次の式51で与えられる。

$$w_{2b} = \text{SQRT} [(x_i - x_r)^2 + (2t - y_i + H_b)^2] \quad \dots \text{式51}$$

角度 θ_{3b} は、像再生点で反射された超音波が表面3で1回反射した後、更に、底面4で1回反射した後で、受信用探触子7Bに到達する場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{3b} とすると、 w_{3b} は次の式52で与えられる。

$$w_{3b} = \text{SQRT} [(x_i - x_r)^2 + (2t + y_i + H_b)^2] \quad \dots \text{式52}$$

角度 θ_{4b} は、像再生点で反射された超音波が底面4で1回反射した後、更に、表面3で1回反射し、更に、底面4で1回反射した後で受信用探触子7Bに到達する場合のビーム経路に対応する。このときの片道のビーム路程を w_{4b} とすると、 w_{4b} は次の式53で与えられる。

$$w_{4b} = \text{SQRT} [(x_i - x_r)^2 + (4t - y_i + H_b)^2] \quad \dots \text{式53}$$

以下、 $\theta_{5b} \sim \theta_{ub}$ については、同様であり特に説明は要せずとも類推できるものと考えられるので説明は省略するが、角度 θ_{ub} に対応する片道のビーム路程を w_{ub} とすると、 w_{ub} は次の式54で与えられる。

$$w_{ub} = \text{SQRT} [(x_i - x_r)^2 + (vt - (-1)^u y_i + H_b)^2] \quad \dots \text{式54}$$

ステップ40において、ステップ39で計算で求めた $\theta_{1b} \sim \theta_{ub}$ が、受信用探触子7Bに係わる受信超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、 $\theta_{1b} \sim \theta_{ub}$ の中から受信超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているものを選択し選び出す。すなわち、 k_b を1から u までの整数として、次の条件式55を満足する θ_{kb} を選び出す。ここで、上記条件式を満足する θ_{kb} として選出されたものを、 $\theta_{pb} \sim \theta_{qb}$ とする。 p_b 及び q_b は、1から u までの範囲内にある整数である。

$$\Theta_{Lb} \leq \theta_{kb} \leq \Theta_{Hb} \quad \dots \text{式55}$$

なお、上記条件式を満足する θ_{kb} が存在しない場合には、ステップ49へ進む。このステップ49については後述する。

ステップ41において、ステップ40で選出された $\theta_{pb} \sim \theta_{qb}$ にそれぞれ対応する上述した受信に係わる超音波ビームの伝搬経路を抽出する。すなわち、 $\theta_{pb} \sim \theta_{qb}$ の各角度において、像再生点 (x_i, y_i) で反射された超音波が受信用探触子7Bに到る伝搬経路(復時の伝搬経路)を抽出する。かつ、角度 $\theta_{pb} \sim \theta_{qb}$ にそれぞれ対応するビーム路程 $w_{pb} \sim w_{qb}$ を計算する。

ステップ42において、ステップ37で抽出した超音波ビームの往時の伝搬経路、及び、ステップ40で抽出した復時の伝搬経路に基づき、これらの往時、及び、復時の伝搬経路からなる往復での伝搬経路の全ての組み合わせを抽出する。ここで、再び説明すると、往時の伝搬経路とは、送信用探触子7Aから送信された超音波が像再生点 (x_i, y_i) に到る経路であり、復時の伝搬経路とは、像再生点 (x_i, y_i) で反射された超音波が受信用探触子7Bに到る伝搬経路である。往時の伝搬経路が角度 $\theta_{pa} \sim \theta_{qa}$ のうちどれかの1つの角度に対応し、復時での伝搬経路が角度 $\theta_{pb} \sim \theta_{qb}$ のうちどれかの1つの角度に対応する。したがって、往復での伝搬経路は、様々な経路が存在し得る。

次に、以上のようにして抽出した往復での伝搬経路の全ての組み合わせに対して、それぞれ、往復でのビーム路程を、上記の往時のビーム路程である $w_{pa} \sim w_{qa}$ 、並びに、上記の復時のビーム路程である $w_{pb} \sim w_{qb}$ に基づき計算する。以上により、存在しうる全ての往復でのビーム路程が計算できることになる。

ステップ43において、ステップ34で選出した送信用探触子7Aの空間的位置と、ステップ38で選出した受信用探触子7Bの空間的位置との組み合わせの位置に対応するエコー波形において、ステップ42で得られた全ての往復でのビーム路程の各々について、試験体1中の音速に基づき、エコーの受信されるべき時間を割り出し、対応する時間のエコーの振幅を呼び出す。次に、往復でのビーム路程の各々について呼び出されたエコーの振幅を加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算する。

ステップ44において、受信用探触子7Bの全走査範囲、あるいは定めた走査範囲にわたって、ステップ38～ステップ43の信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ49に進む。完了した場合にはステップ45へ進む。

ここで、ステップ49において、受信用探触子7Bの位置を別の空間位置に移動して、ステップ38からステップ43までの信号処理を続行する。すなわち、ステップ38において、受信用探触子7Bの走査範囲内において、前回までに選出した空間位置を除いて受信用探触子7Bの新たな空間位置（上記の移動後の位置）を選出して、ステップ44までの信号処理を遂行する。

ステップ45において、送信用探触子7Aの全走査範囲、あるいは定めた走査範囲にわたって、ステップ34～ステップ44の信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ48に進む。完了した場合にはステップ46へ進む。

ここで、ステップ48において、送信用探触子7Aの位置を別の空間位置に移動して、ステップ34からステップ45までの信号処理を続行する。すなわち、ステップ34において、送信用探触子7Aの走査範囲内において、前回までに選出した空間位置を除いて送信用探触子7Aの新たな空間位置（上記の移動後の位置）を選出して、ステップ45までの信号処理を遂行する。

ステップ46において、 $P(x_i, y_i)$ の値、あるいは、その絶対値、あるいは、絶対値の自乗値などを、像再生点 (x_i, y_i) における再生像として出力する。

ステップ47において、所要の像再生範囲内の所要の全再生点、あるいは定めた再生点に関して、ステップ32からステップ46までの信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ50に進む。完了した

場合には、信号処理部 8 4 A における信号処理は全て完了したことになる。

ステップ 5 0 において、所要の像再生範囲内の所要の別の像再生点を指定して、ステップ 3 2 からステップ 4 7 までの信号処理を繰り返す。

なお、以上示した信号処理のステップ 4 3 において、上記実施の形態 1 と同様に、往復でのビーム路程に対応する時間のエコーの振幅が所要の信号対雑音比以下の値しか有していない場合には、むしろ、この振幅は零として処理を行った方が最終結果として得られる再生像に及ぼす雑音の影響が軽減されることがある。このような場合には、ステップ 4 2 で抽出した存在し得る全ての往復でのビーム路程の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有するビーム路程のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅を加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算する方が好ましい結果を得ることができる。

また、屈折角を選択し、これに基づいて往復のビーム伝搬経路を抽出する方法は、抽出方法の 1 つに過ぎず、これ以外の方法もあり得る。さらに、往復のビーム伝搬経路の全てを洗い出す必要は必ずしもなく、幾つかの候補を洗い出せばよい。

さて、以上の信号処理の結果として、この実施例 2 において試験体 1 の中の検査結果が像として得られた。次に、実施例 2 の作用効果について説明する。

この実施例 2 においては、従来とは異なり、上記実施例 1 と同様に、試験体 1 の底面 4 や表面 3 での超音波の反射も考慮して、存在し得る超音波ビーム伝搬経路の候補を洗い出し、これらの候補に対応する超音波ビーム路程を演算で求め、これらの超音波ビーム路程に対応する時間位置におけるエコーの振幅を加算した。さらに、この加算結果を、実施例 1 とは異なり、送信用探触子 7 A の走査範囲内の送信用探触子 7 A の各位置、並びに、受信用探触子 7 B の走査範囲内の受信用探触子 7 B の各位置の位置の組み合わせの時間位置に対応するエコーに関して加

算した。この加算結果を像再生点における像として出力した。これによって、実施例 1 と同様に従来は考慮されていない超音波ビーム伝搬経路まで考慮に入れた像を再生できるので、従来に比べより精度の良い検査結果が得られる作用、効果があると同時に、送信用探触子 7 A とともに受信用探触子 7 B も空間的に走査したので実施例 1 に比べてより加算回数が増加できるので、実施例 1 に比べてより精度の良い検査結果が得られる作用、効果がある場合がある。

また、存在し得る上記超音波ビーム伝搬経路の超音波ビーム路程に対応する時間位置におけるエコーの振幅が所要の信号対雑音比以下の値しか有していない場合には、実施例 1 と同様に、上記超音波ビーム伝搬経路の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有する超音波ビーム経路のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅のみを加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算するようになったので、より鮮明な像が得られ精度の良い検査が行える作用、効果が得られる。

また、上記 $\theta L a$ 及び $\theta H a$ で規定される超音波ビーム幅として、送信超音波ビームにおいて -3 dB のビーム幅を用い、並びに、上記 $\theta L b$ 及び $\theta H b$ で規定される超音波ビーム幅として、受信超音波ビームにおいて -3 dB のビーム幅を用い、送信及び受信とも主ビームを対象とした信号処理が行えるので、実施例 1 と同様に、より鮮明な像が得られる作用、効果がある。

また、実施例 2 では、図示はしないが、 x 軸及び y 軸に垂直な z 軸上の、ある特定の z の値、すなわち、 (x, y) 断面内で送信用探触子 7 A 並びに受信用探触子 7 B を走査し、再生像を信号処理によって再生する場合を対象として説明したが、この発明はこれに限らず、 z 軸方向に沿っても、すなわち種々の z の値において同様の送信用探触子 7 A 並びに受信用探触子 7 B の走査、及び信号処理を行い、最終結果として試験体 1 中を 3 次元像として再生し表示すれば、実施例 1 と同様に、欠陥 6 の z 軸方向に沿った情報も得られるので、欠陥 6 の種別、分類などに有効に利用できる作用、効果が得られる。

また、この実施例2では、上述のような実施例1と同様の作用、効果に加え、次の作用、効果が得られる。すなわち、欠陥6の形状によっては、欠陥6からの反射特性が空間的指向性を有する場合がある。例えば、面状の形状をしている場合は、この欠陥6を照射した超音波パルスは、鏡面反射ないしは鏡面反射に近い反射特性を示す。このような場合には、欠陥6に入射した超音波は、入射した方向には反射されない。入射方向とは、全く別の方向に強く反射される。したがって、超音波パルスを送信した送信用探触子7Aには、欠陥6で反射された超音波パルスはほとんど戻って来ないことが生じる。このような場合には、実施例1では、欠陥6からのエコーを探触子によってほとんど受信できない。これに対し、この実施例2では、送信用探触子7Aとは別個に受信用探触子7Bを設け、受信用探触子7Bを走査してエコーを受信しているから、上述のような欠陥6からの反射特性に空間的指向性があっても、エコーを受信できる確率が高い。これによって、実施例1に比べ、欠陥6の検出能力、すなわち、欠陥6を見逃さない能力が向上できる作用、効果が実施例1の作用、効果に相乗して得られる。

さらに、送信用探触子7Aと受信用探触子7Bのそれぞれの屈折角として異なったものを用い、さらに種々の異なった組み合わせを用いて実施例2をこれらの組み合わせ毎に遂行すれば、上述したような欠陥6からの反射特性が指向性を有していても、更に高い確率で欠陥6を見逃すことなく検出できその鮮明な像を得ることができる作用、効果が得られる。

この発明の実施例2に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法は、次のような作用、効果も奏する。例えば、溶接部のビード部などのように試験体の表面の凹凸が激しい場合、欠陥の近くまで送信用探触子及び受信用探触子を移動させて試験体の表面を介した超音波の送受信を行うことが困難な場合がある。このような場合、試験体の表面近くに欠陥が存在すると超音波の送受信が良好にできる送信用探触子及び受信用触子の移動範囲に上述のような制限があることから直射では欠陥からのエコーを捉えられないことがある。このような場合には、試験体の底

面側に送信用探触子及び受信用探触子を配して探傷面を底面側にして探傷試験するか、ないしは、送信用探触子を表面側に配置し、受信用探触子を底面側に配置して探傷試験する必要がある。しかし、試験体が構造物の一部であるような場合には、底面側には物理的にアクセスできず、底面を探傷面として利用できない場合がある。以上のように表面近くに欠陥があるような場合でも、この発明に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法では、直射のみでなく、底面における超音波の反射や表面における超音波の反射を用いているので、このような反射を用いることで上記のような制限を克服でき、探傷試験が可能となるという作用、効果が得られる。

なお、この発明の実施例2では、試験体の表面側に、送信用探触子と受信用探触子を配置した構成について説明したが、試験体の底面側も、探傷面として利用できる場合には、送信用探触子と受信用探触子の一方を表面側に配置し他方を底面側に配置して、実施例2と同様の手順にしたがって探傷試験を行っても構わない。

なお、以上は、探触子を試験体1の探傷面に直接接触させて探傷試験する場合について説明したが、この発明はこれに限らず、試験体1を水などの液体中に浸して、この液体を介して探触子から試験体1に超音波を送受信するいわゆる浸漬法や水浸法に適用してもよい。あるいは、探触子の前面である音響送受信面、すなわち、探触子と試験体の探傷面との間の局所的な空間のみに水膜を設けて試験体に超音波を送受信するいわゆる局部水浸法に適用してもよい。このような浸漬法、水浸法や局部水浸法においても上述したのと同様の作用、効果が得られる。

なお、図1及び図16においては、走査機構部9、9A、9Bが、探触子7、7A、7Bの空間的走査の機能と、探触子7、7A、7Bの空間的位置の情報を出力して位置検出部85に入力されるものとして説明したが、探触子7、7A、7Bの空間的位置の情報収集と出力する機能は、走査機構部9、9A、9Bとは独立して設けた位置情報発生部で行ってもよい。すなわち、探触子7、7A、7

Bの空間的位置の情報は、位置情報発生部で収集し出力して位置検出部85に入力する構成でも構わない。この場合には、走査機構部9、9A、9Bは、探触子7、7A、7Bの空間的走査の機能のみを担当することになる。また、この場合には位置情報発生部も制御部81に接続され制御部81と各種信号をやりとりする必要がある。

また、図1及び図16においては、探触子7、7A、7Bの空間的位置の情報を走査機構部9、9A、9Bから出力して位置検出部85に入力されるものとして説明したが、探触子7、7A、7Bの空間的走査範囲や移動距離などの情報は、制御部81から制御して発生しているので、走査機構部9、9A、9Bは探触子7、7A、7Bの空間的走査の機能のみを持たせ、位置検出部85は設けなくて、制御部81からの探触子7、7A、7Bの走査に関する情報を直接信号処理部84Aに入力し記憶させる構成でも構わない。

実施例3.

この発明の実施例3に係る超音波探傷装置の構成について図30及び図31を参照しながら説明する。図30は、この発明の実施例3に係る超音波探傷装置の構成を示すブロック図である。また、図31は、この発明の実施例3に係る超音波探傷装置の探触子の構成を示す図である。なお、図31は、文献Bから引用したものである。

図30において、超音波探傷装置は、試験体1に載置された探触子7と、探触子7に接続された送受信装置8Bと、探触子7のための走査機構部9とを備える。

また、同図において、送受信装置8Bは、制御部81と、送信部82と、受信部83と、信号処理部84Bと、探触子7の位置検出部85とを含む。なお、走査機構部9は、図示はしていないが探触子7の位置検出センサーを含んでいる。

また、同図において、探触子7は、信号線により送信部82及び受信部83に

接続されている。受信部 8 3 は信号処理部 8 4 B に接続されている。位置検出部 8 5 は信号処理部 8 4 B に接続されている。制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4 B、位置検出部 8 5、そして走査機構部 9 に接続されている。

さらに、同図において、走査機構部 9 は位置検出部 8 5 に接続されている。走査機構部 9 の位置検出センサーからの出力信号が位置検出部 8 5 に入力される。位置検出部 8 5 で検出された探触子 7 の位置の情報は信号処理部 8 4 B に入力される。

なお、信号処理部 8 4 B は、図示はしていないが、内部にメモリを有する。このメモリに信号処理部 8 4 B において演算・算出された種々の結果が適宜記憶されるとともに、信号処理部 8 4 B に入力された入力信号が適宜記憶される。

また、図示はしていないが、信号処理部 8 4 B からは、処理状況を示す信号が適宜、制御部 8 1 に入力される。その入力信号に基づき、制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4 B、位置検出部 8 5、及び走査機構部 9 に対し、制御信号を出力して、それらの制御を司る。

図 3 1 において、探触子 7 は、アクリルなどの材料からなるくさび 7 1 と、圧電セラミックなどの圧電材料からなる矩形あるいは円形の振動子 7 2 とを含む。

ここで、探触子 7 の動作について説明する。超音波斜角探傷においては、探触子 7 から試験体 1 中に送信される超音波のモードとして横波が広く用いられている。このような横波専用の探触子 7 では、振動子 7 2 からくさび 7 1 内へ縦波超音波を送信する。くさび 7 1 内へ送信された縦波超音波は、くさび 7 1 と試験体 1 の間の境界面、すなわち、試験体 1 の表面 3 で、スネルの反射、屈折の法則にしたがって、反射、屈折し、試験体 1 内へは、設計上は、横波超音波しか屈折伝搬しないように設計されている。すなわち、くさび 7 1 と試験体 1 との境界面に

において、スネルの反射、屈折の法則を利用して計算したとき、振動子 7 2 からくさび 7 1 内へ送信された縦波が、上記境界面で屈折する際、試験体 1 内へは屈折縦波は入射せず、屈折横波のみが入射するような入射角「 α 」を有するように探触子 7 が設計されている。試験体 1 中を伝搬してきた横波超音波を受信する場合は、上述したプロセスと逆のプロセスを辿って受信されるので、横波専用として設計された探触子 7 は、設計上は、試験体 1 中を伝搬してきた横波超音波のみを受信する。

このように設計された横波専用の探触子 7 においては、次のように考えるとその動作を考えやすい。図 3 1 において、符号 7 2 A は見かけの振動子であり、「 H_s 」は試験体 1 の表面 3 から見かけの振動子 7 2 A の中心までの高さである。さらに、「 W 」は振動子 7 2 の幅、「 W_s' 」は見かけの振動子 7 2 A の幅、「 p_1 」はくさび内距離、「 $p_1 s'$ 」は見かけのくさび内距離、「 α 」はくさび 7 1 と試験体 1 の表面 3 の境界面における超音波の入射角、「 θ_s 」は横波屈折角である。

なお、本明細書（実施例 3 の説明）で使用しているこれらの記号や名称は、説明の都合上、文献 B とは異なっている。本明細書と文献 B との対応は次の通りである。矢印（ \rightarrow ）の左側が文献 B での名称と記号、右側が本明細書でのそれらである。なお、本明細書で使用している記号 H に相当する高さは、文献 B には記載されていない。また、原点 O の位置は、文献 B とは異なり、図 3 1 に示すように、見かけの振動子 7 2 A の中心を試験体 1 の表面 3 に垂直に投影した点としている。

振動子の高さ H	\rightarrow	振動子 7 2 の幅 W
振動子の見かけの高さ H_R	\rightarrow	振動子 7 2 の見かけの幅 W_s'
くさび内距離 p_1	\rightarrow	くさび内距離 p_1
試験体中距離に換算したくさび内距離 p_2	\rightarrow	見かけのくさび内距離 $p_1 s'$

以上、「見かけの」という表現を用いたが、これは、文献 B に記述されている

ように、振動子72からくさび71内に送信された縦波超音波が、試験体1との境界面、すなわち、表面3でスネルの屈折の法則にしたがって屈折し、試験体1内へ横波超音波として送信されるため、試験体1内へ送信される横波超音波に対しては、試験体1側から見た振動子72の幅 W が等価的に W_s' に見えることや、くさび内距離 p_1 を試験体1中の距離に換算すると等価的に p_{1s}' に見えるという意味で用いたものである。これらの見かけの物理量を用いると、くさび71があたかも試験体1であるかの如く見なして種々の計算や信号処理が行える。そこで、以下の説明においては、見かけの振動子72A、その幅 W_s' 、見かけのくさび内距離 P_{1s}' 、及び、見かけの振動子72Aの中心に関連した高さ H_s を用いて説明する。また、点 Q_s を、見かけの振動子72Aの中心とする。点 Q_s の座標は、 $(0, -H_s)$ である。

ところで、超音波斜角探傷で広く用いられている横波専用の探触子7として設計された探触子7においても、探触子7の振動子72の幅 W が有限であることから、屈折縦波も、屈折横波に比べてレベルは小さいが存在する。すなわち、レベルは小さいが屈折縦波も試験体1内へ送信される。受信に関しては、上述の逆のプロセスを辿るので、横波専用として設計された探触子7でも、試験体1中を伝搬してきた縦波を、試験体1中を伝搬してきた横波に比べれば受信レベルは小さいが受信してしまう。このように、探触子7からは、試験体1中に縦波を送信し、逆に、試験体1中を伝搬してきた縦波を探触子7で受信してしまうが、これらの送信される縦波、及び、受信される縦波についても、我々（発明者）の実験によると、横波の場合と同様に、縦波に対して、見かけのくさび内距離や、見かけの振動子なる概念を用いても良いことが分かっている。そこで、図示はしないが、縦波に対する見かけの振動子の中心を、点 Q_L で表す。この点 Q_L の座標は、一般には横波に対する点 Q_s とは異なる。点 Q_L の座標を、 $(x_L, -H_L)$ で表す。

次に、この発明の実施例3に係る超音波探傷装置の動作について図32から図53までを参照しながら説明する。

図32、図33及び図34は、試験体と空気との境界面における超音波の反射に係わる性質を説明するための図である。図35から図51までは、この実施例3に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図である。また、図52は、この実施例3に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャートである。さらに、図53は、図52に示した信号処理のフローチャートを説明するためのビーム伝搬経路を示す図である。

送受信装置8Bの送信部82からインパルスと見なしても差し支えない程度の時間幅の狭いパルス、ないしは、あるキャリア周波数を有するバースト信号などの送信信号が発生され、探触子7に伝達される。探触子7は送信信号によって駆動され、超音波パルスを試験体1の探傷面、すなわち、試験体1の表面3に対して斜めに送信する。なお、本実施例では探傷面が表面である場合を例にとって説明するが、探傷面は表面に限らず、底面であったり、側面である場合もある。超音波パルスは試験体1中を伝搬して欠陥6によって反射、散乱、回折される。ここでは、反射という言葉が、単に反射のみでなく、散乱や回折などの物理的現象も含んだものとして取り扱う。すなわち、反射という言葉は、超音波の伝搬が欠陥6によって影響を受け欠陥6が存在しない場合に比べてその挙動が異なった伝搬に関する振る舞いをした現象を全て含んでいるものと解釈することとする。特に、欠陥6の先端部において発生すると言われている先端回折エコーないしは端部エコーと呼ばれているエコーも、欠陥6によって反射したエコーに含まれているものとして説明する。この反射、散乱、回折された超音波パルスは、試験体1中を伝搬して再び探触子7によって受信される。この受信されたエコーは、受信部83で増幅され、信号処理部84Bへ送られる。

一方、走査機構部9によって探触子7の空間的位置の情報が検出され、位置検出部85に送られる。この位置検出部85から探触子7の空間的位置の情報は信号処理部84Bへ送られる。この信号処理部84Bでは、探触子7の空間的位置の情報が受信されたエコーが記憶される。

次に、走査機構部 9 によって探触子 7 は別の空間的位置（座標）に移動される。そして、送信信号によって探触子 7 から超音波パルスが送信され、欠陥 6 からの受信エコーと、探触子 7 の空間的位置の情報が、先ほどと同様に、信号処理部 8 4 B に伝達され記憶される。

この一連の動作が探触子 7 の所要の走査範囲にわたって行われる。その後、信号処理部 8 4 B において、後述する信号処理が実行される。

ここで、信号処理部 8 4 B における信号処理手順を説明する前に、試験体 1 と空気との境界面における超音波の反射に係わる性質を図 3 2、図 3 3、及び図 3 4 を参照しながら説明しておく。これらの図において、矢印を付して示す実線は、横波に相当し、矢印の方向が伝搬方向を示す。また、矢印を付して示す点線は、縦波に相当し、同様に矢印の方向が伝搬方向を示す。この実施例 3 の説明では、縦波と横波とを区別するため、実施例 3 の全ての図において、横波には実線、縦波には点線をそれぞれ対応させて示すことにする。また、縦波、横波ともに、それらの伝搬方向は矢印の方向とする。なお、試験体 1 と空気との境界面の例として、試験体 1 の底面 4 を例にとって説明する。また、以下に説明する超音波の反射に係わる性質は、言うまでもなく、スネルの反射の法則にしたがって生じるものである。

図 3 2 と図 3 3 は、試験体 1 中を伝搬してきた横波が底面 4 に斜めに入射したときの反射の様子を示した図である。図 3 2 と図 3 3 との差異は、図 3 2 の場合の方が、図 3 3 の場合に比べて、各図中、記号「 α_s 」を付して示す入射角度が大きい。図 3 2 に示すように、横波の入射角度 α_s が大きい場合には、底面 4 における反射によって生じる超音波は横波のみである。しかし、図 3 3 に示すように、横波の入射角度 α_s がある値より小さくなると、 α_s が零の場合を除いて、すなわち、垂直に入射した場合を除いて、底面 4 における反射によって、横波と縦波との両方が生じる。なお、図 3 2 及び図 3 3 において、記号「 β_s 」を付し

て示す横波の反射角度は、入射角度 α_s に等しい。また、図 3 3 において、記号「 β_L 」を付して示す縦波の反射角度は、横波の反射角度 β_s よりも大きい。

一方、図 3 4 は、試験体 1 中を伝搬してきた縦波が底面 4 に斜めに入射したときの反射の様子を示した図である。図中、記号「 α_L 」を付して示す角度は、縦波の入射角度である。また、記号「 β_L 」を付して示す角度は、縦波の反射角度であり、記号「 β_s 」を付して示す角度は、横波の反射角度である。縦波が斜めに底面 4 に入射した場合は、入射角度 α_L が大きくても小さくても、零度の場合を除いて、すなわち、垂直に入射した場合を除いて、底面 4 での反射によって、縦波と横波との両方が生じる。なお、縦波の反射角度 β_L は、縦波の入射角度 α_L に等しい。また、横波の反射角度 β_s は、縦波の反射角度 β_L よりも小さい。

次に、図 3 2、図 3 3、及び図 3 4 を参照しながら説明した超音波の反射に係わる上述した性質を考慮して、試験体 1 中の超音波ビームの伝搬特性について説明する。まず、超音波ビームの伝搬経路について図 3 5 を参照しながら考えてみる。図中、横方向を x 軸、垂直方向を y 軸に取っている。

欠陥 6 に相当する点反射源が (x_0, y_0) にあるものとする。試験体 1 に入射した超音波が横波である場合を以下考える。見かけの振動子 7 2 A から送信された横波超音波ビームは回折により拡がるが、図中、太い実線はビームの中心線を示している。また、細い実線は、送信あるいは受信での超音波ビームにおいて、中心線上の音圧から、例えば、 -3 dB の音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2 つの細い実線の間が横波の送信あるいは横波の受信での実効的なビーム幅に相当する。2 つの細い実線に対応する屈折角を図中に示すように、 θ_{sL} 、 θ_{sH} とする。なお、ここでは -3 dB となるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて -6 dB でも、 -9 dB でも、あるいは、 -12 dB でも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

なお、図35において、太い点線は縦波に関するビームの中心線を示している。また、細い点線は、送信あるいは受信での縦波超音波ビームにおいて、中心線上の音圧から、例えば、 -3 dB の音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2つの細い点線の間が縦波の送信あるいは縦波の受信での実効的なビーム幅に相当する。2つの細い点線に対応する図中に示す角度を、 θ_{LL} 、 θ_{LH} とする。これらの角度は、それぞれ、横波に関する屈折角 θ_{sL} 、 θ_{sH} に対応する。なお、ここでは -3 dB となるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて -6 dB でも、 -9 dB でも、あるいは、 -12 dB でも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

次に、図36から図51までを参照しながら上述したビーム幅内の音線を考えてみる。図36～図51において、座標の原点(0, 0)は、図31と同じく見かけの振動子72Aの中心をy軸に沿って試験体1の表面3に投影した点に取ってある。点 Q_s は見かけの振動子72Aの中心を示し、その座標は(0, $-H_s$)である。また、(x0, y0)に位置する白丸印は欠陥6に対応する反射源である。

図36に示すように、屈折角 θ_{s1} に相当する音線が上述したビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s1} \leq \theta_{sH}$ であれば、矢印を付した実線で示すような超音波ビームの伝搬経路が存在し得る。このとき、探触子7から送信され、試験体1に入射した横波超音波は欠陥6に直射で当たり、欠陥6で直接、横波として反射されて探触子7によってエコーとして受信される。

図37において、欠陥6に直射で当たった横波超音波は、欠陥6の性状によっては、縦波にモード変換されて縦波として反射される成分が生じることがある。この反射された縦波超音波は、図中、矢印を付した点線で示すように、図中、記号「 θ_{L1} 」を付して示す角度が、縦波の受信に関する実効ビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L1} \leq \theta_{LH}$ であれば、直接、探触子7によって、レベルは小さいがエコーとして受信される。なお、図中、点 Q_L は縦波に対

する見かけの振動子の中心である。点 Q_L は、実際は、点 Q_s の近傍に存在するが、図を見やすくするため、図37では、これら2つの点 Q_L と点 Q_s とは、かなり離して描いている。以下、同様である。

次に、図38に示すように、屈折角 θ_{s1} に相当する音線が上述した横波のビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{s2} に相当する音線が上述した横波のビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s1} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s2} \leq \theta_{sH}$ であれば、探触子7から試験体1中に送信された横波超音波は矢印を付した実線で示すように底面4で1回、横波超音波として反射され、その後、欠陥6に当たり、欠陥6で横波超音波として反射されて、直接、探触子7に到達しエコーとして受信される伝搬経路が存在し得る。

図では示していないが、この逆の伝搬経路もあり得る。すなわち、探触子7から試験体1中に送信された横波超音波は直射で欠陥6に当たり、欠陥6で横波超音波として反射され、さらに底面4で1回、横波超音波として反射されて、その後、探触子7に到達しエコーとして受信される。

さらに、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s1} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s2'} \leq \theta_{sH}$ であれば、図39に示す伝搬経路も存在し得る。すなわち、探触子7から試験体1中に矢印を付した実線で示すように送信された横波超音波は、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射され、その後、欠陥6に当たり、欠陥6でモード変換されて横波超音波として反射されて、直接、探触子7に到達しエコーとして受信される伝搬経路が存在し得る。

図では示していないが、図39に示す伝搬経路と逆の伝搬経路も存在し得る。すなわち、探触子7から試験体1中に送信された横波超音波は、欠陥6でモード変換されて縦波超音波として反射されて、その後、底面4で1回、横波超音波として反射され、その後、直接探触子7に到達しエコーとして受信される伝搬経路が存在し得る。

さらに、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s1} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s2} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s2'} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L1} \leq \theta_{LH}$ であり、かつ、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L2} \leq \theta_{LH}$ であり、かつ、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L2'} \leq \theta_{LH}$ であれば、図40から図43に示す伝搬経路も存在し得る。

図40においては、探触子7から試験体1中に矢印を付した実線で示すように送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射され、その後、欠陥6に当たり、欠陥6でモード変換されて、矢印を付した点線で示すように、縦波超音波として反射されて、直接、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図41においては、探触子7から試験体1中に矢印を付した実線で示すように送信された横波超音波は、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射され、その後、欠陥6に当たり、矢印を付した点線で示すように、欠陥6で縦波超音波として反射されて、直接、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図42においては、探触子7から試験体1中に矢印を付した実線で示すように送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、直接、欠陥6に当たり、矢印を付した実線で示すように、欠陥6で横波超音波として反射され、その後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射されて、直接、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図43においては、探触子7から試験体1中に矢印を付した実線で示すように送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、直接、欠陥6に当たり、矢印を付した点線で示すように、欠陥6でモード変換されて縦波超音波として反射され、その後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射されて、直接、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図40から図43までに示した伝搬経路においては、図37で示した伝搬経路の場合と同様に、試験体1中を伝搬してきた縦波を探触子7で受信しているため、上述したような横波専用の探触子7では、受信レベルは小さい。

また、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s2} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{sL} \leq \theta_{s2'} \leq \theta_{sH}$ であり、かつ、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L2} \leq \theta_{LH}$ であり、かつ、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L2'} \leq \theta_{LH}$ であれば、図44から図51までに示すような伝搬経路も存在し得る。

図44においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した実線で示すように、欠陥6で横波超音波として反射され、その後、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図45においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した点線で示すように、欠陥6で縦波超音波として反射され、その後、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図46においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した実線で示すように、欠陥6で横波超音波として反射され、その後、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図47においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、

矢印を付した点線で示すように、欠陥6で縦波超音波として反射され、その後、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図48においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した実線で示すように、欠陥6で横波超音波として反射され、その後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図49においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した点線で示すように、欠陥6で縦波超音波として反射され、その後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図50においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した実線で示すように、欠陥6で横波超音波として反射され、その後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図51においては、探触子7から送信された横波超音波は、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射された後、欠陥6に当たり、矢印を付した点線で示すように、欠陥6で縦波超音波として反射され、その後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射されて、探触子7に到達しエコーとして受信される。

図48から図51までに示した伝搬経路においては、探触子7は、試験体1中

を伝搬してきた縦波を受信しているのので、受信レベルは小さい。

以上は、探触子7から試験体1中へ横波のみが送信される場合について考えたが、上述したように、探触子7からは、レベルは小さいが、試験体1中へ縦波も送信される。したがって、上記のビーム伝搬経路に加えて、更に、次の伝搬経路も存在し得る。

$\theta_{LL} \leq \theta_{L1} \leq \theta_{LH}$ である場合について考えてみる。以下において、最も左側に記したモードは、探触子7から試験体1中へ送信される超音波のモードを示し、矢印を介して、左から2番目に記したモード（最も右側に記したモード）は、欠陥6で反射され直接、探触子7で受信されるモードを示す。

縦波 → 縦波

縦波 → 横波

次に、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L1} \leq \theta_{LH}$ であり、かつ、 $\theta_{LL} \leq \theta_{L2} \leq \theta_{LH}$ である場合について、考えられるビーム経路を次に示す。以下において、最も左側に記したモードは、探触子7から試験体1中へ送信される超音波のモードを示し、矢印を介して、左から2番目に記したモードは、探触子7から試験体1中へ送信された超音波が底面4で反射された後のモードを示し、さらに矢印を介して、左から3番目（最も右側）に記したモードは、底面4で反射された上記モードが欠陥6に当たり、欠陥6で反射されて直接、探触子7で受信されるモードを示す。

縦波 → 縦波 → 縦波

縦波 → 横波 → 縦波

縦波 → 縦波 → 横波

縦波 → 横波 → 横波

さらに次に示す伝搬経路も考えられる。以下において、最も左側に記したモー

ドは、探触子7から試験体1中へ送信される超音波のモードを示し、矢印を介して、左から2番目に記したモードは、探触子7から試験体1中へ送信された超音波が欠陥6で反射された後のモードを示し、さらに矢印を介して、左から3番目（最も右側）に記したモードは、欠陥6で反射された上記モードが底面4に当たり、底面4で反射されて直接、探触子7で受信されるモードを示す。

縦波 → 横波 → 縦波

縦波 → 縦波 → 横波

縦波 → 横波 → 横波

さらに次に示す伝搬経路も考えられる。以下において、最も左側に記したモードは、探触子7から試験体1中へ送信される超音波のモードを示し、矢印を介して、左から2番目に記したモードは、探触子7から試験体1中へ送信された超音波が底面4で反射された後のモードを示し、さらに矢印を介して、左から3番目に記したモードは、底面4で反射された上記モードが欠陥6に当たり、欠陥6で反射された後のモードを示し、左から4番目（最も右側）に記したモードは、欠陥6で反射された上記モードの超音波が底面4で反射された後、探触子7で受信されるモードを示す。

縦波 → 縦波 → 縦波 → 縦波

縦波 → 縦波 → 横波 → 縦波

縦波 → 横波 → 縦波 → 縦波

縦波 → 横波 → 横波 → 縦波

縦波 → 縦波 → 縦波 → 横波

縦波 → 縦波 → 横波 → 横波

縦波 → 横波 → 縦波 → 横波

縦波 → 横波 → 横波 → 横波

さて、以上は、説明の簡単のため、横波に関する屈折角 θ_s 2、および、縦波

に関する屈折角 θ_{L2} に相当する音線までが実効的な超音波ビーム幅内に存在する場合について考えた。すなわち、ビーム経路において、底面4で1回の反射まで考慮した場合について考えた。

ビーム幅が以上の考察で対象とした幅よりも更に広い場合については、以上に示した伝搬経路とは異なる更に多くの経路が存在し得る。すなわち、例えば、横波に関する屈折角 θ_{s3} 、および、縦波に関する屈折角 θ_{L3} に相当する音線までが実効的な超音波ビーム幅内に存在する場合には、底面4で1回、表面3で1回の、合計2回の反射が伴う伝搬経路が存在し得る。このとき、底面4、表面3、さらに欠陥6での各々において、横波から縦波、逆に、縦波から横波へのモード変換を考慮に入れて定まる種々の伝搬経路が存在し得る。

さらに、ビーム幅が広くなるにしたがって、底面4で2回、表面3で1回反射する経路までを考慮し、モード変換も考慮する必要性が生じる。ビーム幅がさらに広い場合には、底面4で2回、表面3で2回反射する経路までを考慮し、モード変換も考慮する必要がある。

以下、ビーム幅が広くなるにしたがって、考慮すべき経路に関して底面4や表面3での反射回数が増え、かつ、各反射に際してモード変換を考慮する必要性が生じることになる。

この実施例3は、以上のように、超音波ビームの拡がり considering して斜角で探傷する方法及び装置を提供する点が従来と大きく異なる点の1つである。さらに、表面3や底面4での反射も考慮に入れている点が、従来の特開平2-278149号公報、特開平2-248855号公報、あるいは特開平5-172789号公報に開示された技術と全く異なる。さらに、底面4、表面3、並びに、欠陥6の各々における各反射において、横波から縦波へのモード変換、及び、縦波から横波へのモード変換を考慮に入れている点が従来技術と異なる。

さて、次に、以上に述べたビーム経路に関する考察結果に基づいて、図5 2及び図5 3を参照しながら信号処理部8 4 Bにおける信号処理手順を説明する。なお、図5 2においては座標原点は、図3 1、及び図3 5～図5 1とは異なっているが構わない。原点は当然のことであるがどこにとっても構わない。無論、探触子7を走査した際の原点と異なれば適宜、座標変換を行う必要があることは言うまでもない。

信号処理部8 4 Bにおいて、前述したように、探触子7を所要の走査範囲にわたって走査した際の、走査範囲内の各空間点におけるエコー波形と、そのエコー波形を受信した際の探触子7の空間位置情報が記憶されている。なお、エコー波形は生波形、すなわち、整流・検波などの処理は施されず、AC波形として記憶されている。

図5 2のステップ5 1において、所要の像再生範囲を決める。すなわち図5 3において例えば点線で囲って示すように試験体1の探傷結果として像表示を行いたい範囲を決める。

ステップ5 2において、像再生点を決める。像再生点は上記像再生範囲内の1点である。この点の座標を図5 2に示すように (x_i, y_i) とする。

ステップ5 3において、この再生点 (x_i, y_i) に対応する出力を $P(x_i, y_i)$ とし、この値を零に設定する。すなわち、 $P(x_i, y_i) = 0$ とする。

ステップ5 4において、探触子7の空間的位置、すなわち座標と、この位置で受信したエコー波形をメモリの中から選択する。図5 3に示すように、探触子7の位置は、試験体1中へ送信される超音波が横波である場合、及び、試験体1中を伝搬してきた横波を探触子7で受信する場合には、点 Q_s で代表させて考え、座標を $(x_s, -H_s)$ とする。なお、点 Q_s の意味は、図3 1と同じである。また、試験体1中へ送信される超音波が縦波である場合、及び、試験体1中を伝

搬してきた縦波を探触子7で受信する場合には、探触子7の位置は、点QLで代表させて考え、座標を $(x_L, -H_L)$ とする。なお、点QLの意味は、図31と同じである。

ステップ55において、像再生点を欠陥6と見なしたとき、横波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{sL} より大きく、 Θ_{sH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点Qsから横波として送信され、欠陥6に到達し、欠陥6で反射されて、横波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{sL} より大きく、 Θ_{sH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点Qsで横波として受信されるビーム伝搬経路を洗い出す。

また、横波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{sL} より大きく、 Θ_{sH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点Qsから横波として送信され、欠陥6に到達し、欠陥6で反射されて、縦波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{LL} より大きく、 Θ_{LH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点QLで縦波として受信されるビーム伝搬経路を洗い出す。

さらに、縦波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{LL} より大きく、 Θ_{LH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点QLから縦波として送信され、欠陥6に到達し、欠陥6で反射されて、縦波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{LL} より大きく、 Θ_{LH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点QLで縦波として受信されるビーム伝搬経路を洗い出す。

また、縦波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{LL} より大きく、 Θ_{LH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点QLから縦波として送信され、欠陥6に到達し、欠陥6で反射されて、横波に関する実行ビーム幅、すなわち、 Θ_{sL} より大きく、 Θ_{sH} より小さい範囲内において、探触子7を代表する点Qsで横波として受信されるビーム伝搬経路において、考えられる全ての伝搬経路を洗い出す。

以上のビーム伝搬経路の洗い出しにおいては、試験体1の底面4や表面3におけるモード変換の有無、欠陥6における反射に伴うモード変換の有無を全て考慮して行う。

図53においては、これらの伝搬経路の全てを図示すると図が複雑になるので、伝搬経路の内の数例のみを示している。なお、上記の伝搬経路が存在しない場合もあり得る。この場合には、ステップ60へ進む。このステップ60については後述する。

ステップ56において、ステップ55で得られた全てのビーム伝搬経路の各々について、試験体1中の縦波音速、及び、横波音速に基づき、エコーの受信されるべき時間を割り出し、対応する時間のエコーの振幅を呼び出す。なお、このエコーはステップ54で選択したエコー波形である。次に、各ビーム伝搬経路の各々について呼び出されたエコーの振幅を加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算する。

ステップ57において、探触子7の全走査範囲、あるいは定めた走査範囲にわたって、ステップ54～ステップ56の信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ60に進み、完了した場合にはステップ58へ進む。

ステップ58において、 $P(x_i, y_i)$ の値、あるいは、その絶対値、あるいは、絶対値の自乗値などを、像再生点 (x_i, y_i) における再生像として出力する。

ステップ59において、所要の像再生範囲内の所要の全再生点、あるいは定めた再生点に関して、ステップ52からステップ58までの信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ61に進む。完了した

場合には、信号処理部 8 4 B における信号処理は全て完了したことになる。

ステップ 6 0 において、探触子 7 の走査範囲内の別の空間位置（座標）を指定して、ステップ 5 4 からステップ 5 7 までの信号処理を続行する。

ステップ 6 1 において、所要の像再生範囲内の所要の別の像再生点を指定して、ステップ 5 2 からステップ 5 9 までの信号処理を繰り返す。

なお、以上示した信号処理のステップ 5 6 において、全てのビーム経路の各々について、エコーの受信されるべき時間を割り出し、その時間に対応するエコーの振幅を呼び出して加算したが、この加算演算において、次のことに注意する必要がある。

すなわち、底面 4 で超音波が 1 回反射すると位相が変化する。同様に、表面 3 で反射しても位相が変化する。したがって、このような反射に係わる位相の変化量を補正して加算する必要がある。反射に係わる位相の変化が逆相（180度）の場合について例示すると次のようになる。

例えば、ビーム経路が、探触子 7 から送信された横波超音波パルスが直射で欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で横波として反射されて直接、探触子 7 で受信された経路（第 1 の経路）と、探触子 7 から送信された横波超音波パルスが直射で欠陥 6 に当たり欠陥 6 で横波として反射された後、底面 4 で 1 回、横波として反射されその後、探触子 7 で受信された経路（第 2 の経路）と、探触子 7 から送信された横波超音波パルスが直射で欠陥 6 に当たり欠陥 6 で横波として反射された後、表面 3 で 1 回、横波として反射され、その後、底面 4 で 1 回、横波として反射されてその後、探触子 7 で受信された経路（第 3 の経路）とがあったとする。

このような場合、第 2 の経路では底面 4 で 1 回反射されているから第 1 の経路と比較して位相が 180 度回転している。第 3 の経路では、表面 3 で 1 回、さら

に底面4で1回反射されているから合計で位相は、第1の経路と比較して360度回転し、結果として第1の経路と同相になっている。したがって、第1の経路に対応するエコーの振幅と、第3の経路に対応するエコーの振幅はそのまま加算し、第2の経路に対応するエコーの振幅は位相を逆転させた後の値、すなわち、 -1 を乗算した値を、第1及び第2の経路に対応する振幅に加算することになる。欠陥6での反射の位相変化に関しても同様に考慮に入れる必要がある。以上述べたと同様の位相の変化量の補正を行った後で、全てのビーム路程の各々について、エコーの振幅を加算する必要がある。

なお、以上示した信号処理のステップ56において、ビーム経路に対応する時間のエコーの振幅が所要の信号対雑音比（S/N比）以下の値しか有していない場合には、むしろ、この振幅は零として処理を行った方が最終結果として得られる再生像に及ぼす雑音の影響が軽減されることがある。このような場合には、ステップ55で抽出した存在し得る全てのビーム経路の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有するビーム路程のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅を加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算する方が好ましい結果を得ることができる。

また、屈折角を選択し、これに基づいて往復のビーム伝搬経路を抽出する方法は、抽出方法の1つに過ぎず、これ以外の方法もあり得る。さらに、往復のビーム伝搬経路の全てを洗い出す必要は必ずしもなく、幾つかの候補を洗い出せばよい。

さて、以上の信号処理の結果として、試験体1の中の検査結果が像として得られた。次に、この実施例3の作用効果について説明する。

この実施例3においては、従来とは異なり、試験体1の底面4や表面3での超音波の反射を、反射に伴う横波から縦波へのモード変換や、縦波から横波へのモード変換を考慮して、さらに、欠陥6での同様のモード変換も考慮して、存在し

得る超音波ビーム伝搬経路の候補を洗い出し、これらの超音波ビーム経路に対応する時間位置におけるエコーの振幅を加算した。さらに、この加算結果を、探触子7の走査範囲内の各探触子7の位置と対応するエコーに関して加算した。この加算結果を像再生点における像として出力した。これによって、従来は考慮されていない超音波ビーム伝搬経路まで考慮に入れた像を再生できるので、従来に比べより精度の良い検査結果が得られる作用、効果がある。

また、存在し得る上記超音波ビーム伝搬経路に対応する時間位置におけるエコーの振幅が所要の信号対雑音比以下の値しか有していない場合には、上記超音波ビーム伝搬経路の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有する超音波ビーム経路のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅のみを加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算するようにしたので、より鮮明な像が得られ精度の良い検査が行える作用、効果が得られる。

また、横波に関連する上記 θ_{sL} 及び θ_{sH} で規定される超音波ビーム幅として、送信超音波ビーム並びに受信超音波ビームにおいてそれぞれ、 -3 dB のビーム幅を用いれば、主ビームを対象とした信号処理が行えるので、より鮮明な像が得られる作用、効果がある。

また、縦波に関連する上記 θ_{LL} 及び θ_{LH} で規定される超音波ビーム幅として、送信超音波ビーム並びに受信超音波ビームにおいてそれぞれ、 -3 dB のビーム幅を用いれば、主ビームを対象とした信号処理が行えるので、より鮮明な像が得られる作用、効果がある。

さらに、上記実施例3では、図示はしないが、 x 軸及び y 軸に垂直な z 軸上の、ある特定の z の値、すなわち、 (x, y) 断面内で探触子7を走査し、再生像を信号処理によって再生する場合を対象として説明したが、この発明はこれに限らず、 z 軸方向に沿っても、すなわち種々の z の値において同様の探触子7の走査並びに信号処理を行い、最終結果として試験体1中を3次元像として再生し表示

すれば、欠陥6のz軸方向に沿った情報も得られるので、欠陥6の種別、分類などに有効に利用できる作用、効果が得られる。

この発明の実施例3に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法は、次のような作用、効果も奏する。例えば、溶接部のビード部などのように試験体の表面の凹凸が激しくて欠陥の近くまで探触子を移動させて試験体の表面を介した超音波の送受信を行うことが困難な場合がある。このような場合、試験体の表面近くに欠陥が存在すると超音波の送受信が良好にできる探触子の移動範囲に上述のような制限があることから直射では欠陥からのエコーを捉えられないことがある。また、試験体の表面における探触子の移動範囲に上述のような制限がない場合でも、表面近傍に欠陥がある場合、送信信号を送信した時間からエコーが受信されるまでの時間が短くなり、一方、送信信号が受信回路側、すなわち受信部側に漏れ込んでいるので、エコーがこの送信信号の漏れ込みに埋もれてしまい、正常にエコーを受信できないことがある。以上のような場合には、試験体の底面側に探触子を配して探傷面を底面側にして探傷試験する必要がある。しかし、試験体が構造物の一部であるような場合には、底面側には物理的にアクセスできず、底面を探傷面として利用できない場合がある。以上のように表面近くに欠陥があって上述のような探触子の移動範囲に制限があったり送信信号の漏れ込みが問題になるような場合でも、この発明に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法では、直射のみでなく、底面における超音波の反射や表面における超音波の反射を用いているので、このような反射を用いることで上記のような制限を克服でき又上記のような問題を回避できて探傷試験が可能となるという作用、効果が得られる。

なお、以上は、探触子を試験体の探傷面に直接接触させて探傷試験する場合について説明したが、この発明はこれに限らず、試験体を水などの液体中に浸して、この液体を介して探触子から試験体に超音波を送受信するいわゆる浸漬法や水浸法に適用しても良い。あるいは、探触子の前面である音響送受信面、すなわち、探触子と試験体の探傷面との間の局所的な空間のみに水膜を設けて試験体に超音波を送受信するいわゆる局部水浸法に適用しても良い。このような浸漬法や水浸

法や局部水浸法においても本発明と同様の作用、効果が得られる。

また、図30においては、走査機構部9が探触子7の空間的走査の機能と、探触子7の空間的位置の情報を出力して位置検出部85に入力されるものとして説明したが、探触子7の空間的位置の情報収集と出力する機能は、走査機構部9とは独立して設けた位置情報発生部で行い、すなわち位置情報発生部で収集し出力して位置検出部85に入力する構成でも構わない。この場合には、走査機構部9は、探触子7の空間的走査の機能のみを担当することになる。また、この場合には位置情報発生部も制御部81に接続され制御部81と各種信号をやりとりする必要がある。

また、図30においては、探触子7の空間的位置の情報を走査機構部9から出力して位置検出部85に入力されるものとして説明したが、探触子7の空間的走査範囲や移動距離などの情報は、制御部81から制御して発生しているので、走査機構部9は探触子7の空間的走査の機能のみを持たせ、位置検出部85は設けなくて、制御部81からの探触子7の走査に関する情報を直接信号処理部84Bに入力し記憶させる構成でも構わない。

実施例4.

この発明の実施例4に係る超音波探傷装置の構成について図54及び図55を参照しながら説明する。図54は、この発明の実施例4に係る超音波探傷装置の構成を示すブロック図である。また、図55は、この発明の実施例4に係る超音波探傷装置の探触子の構成を示す図である。なお、図55は、文献Bから引用したものである。

図54において、超音波探傷装置は、試験体1に載置された送信用探触子7A及び受信用探触子7Bと、探触子7A、7Bに接続された送受信装置8Cと、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bのための走査機構部9A及び9Bとを備える。

また、同図において、送受信装置 8 C は、制御部 8 1 と、送信部 8 2 と、受信部 8 3 と、信号処理部 8 4 C と、探触子 7 A、7 B の位置検出部 8 5 とを含む。なお、走査機構部 9 A、9 B は、図示はしていないが送信用探触子 7 A、受信用探触子 7 B の位置検出センサーを含んでいる。

また、同図において、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B は、信号線によりそれぞれ送信部 8 2 及び受信部 8 3 に接続されている。受信部 8 3 は信号処理部 8 4 C に接続されている。位置検出部 8 5 は信号処理部 8 4 C に接続されている。制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4 C、位置検出部 8 5、そして走査機構部 9 A 及び 9 B に接続されている。

さらに、同図において、走査機構部 9 A 及び 9 B は、位置検出部 8 5 に接続されている。走査機構部 9 A、9 B の位置検出センサーからの出力信号が位置検出部 8 5 に入力される。位置検出部 8 5 で検出された探触子 7 A、探触子 7 B の位置の情報は信号処理部 8 4 C に入力される。

なお、信号処理部 8 4 C は、図示はしていないが、内部にメモリを有する。このメモリに演算・算出された種々の結果が適宜記憶されるとともに、信号処理部 8 4 C に入力された入力信号が適宜記憶される。

また、図示はしていないが、信号処理部 8 4 C からは、処理状況を示す信号が適宜制御部 8 1 に入力される。その入力信号に基づき、制御部 8 1 は、送信部 8 2、受信部 8 3、信号処理部 8 4 C、位置検出部 8 5、及び走査機構部 9 A、9 B に対し、制御信号を出力して、それらの制御を司る。

図 5 5 において、送信用探触子 7 A は、アクリルなどの材料からなるくさび 7 1 と、圧電セラミックなどの圧電材料からなる矩形あるいは円形の振動子 7 2 とを含む。なお、受信用探触子 7 B は、図 5 5 に示した送信用探触子 7 A と同様の

構成である。

ここで、探触子7A(7B)の動作について説明しておく。超音波斜角探傷においては、探触子7Aから試験体1中に送信される超音波のモードとして横波が広く用いられている。このような横波専用の探触子7Aでは、振動子72からくさび71内へ縦波超音波を送信する。くさび71内へ送信された縦波超音波は、くさび71と試験体1の間の境界面、すなわち、試験体1の表面3で、スネルの反射、屈折の法則にしたがって、反射、屈折し、試験体1内へは、設計上は、横波超音波しか屈折伝搬しないように設計されている。すなわち、くさび71と試験体1との境界面において、スネルの反射、屈折の法則を利用して計算したとき、振動子72からくさび71内へ送信された縦波が、上記境界面で屈折する際、試験体1内へは屈折縦波は入射せず、屈折横波のみが入射するような入射角「 α 」を有するように探触子7Aが設計されている。試験体1中を伝搬してきた横波超音波を受信する場合は、上述したプロセスと逆のプロセスを辿って受信されるので、横波専用として設計された探触子7Aは、設計上は、試験体1中を伝搬してきた横波超音波のみを受信する。

このように設計された横波専用の探触子7Aにおいては、次のように考えるとその動作を考えやすい。図55において、符号72Aは見かけの振動子であり、「Hs」は試験体1の表面3から見かけの振動子72Aの中心までの高さである。さらに、「W」は振動子72の幅、「Ws'」は見かけの振動子72Aの幅、「p1」はくさび内距離、「p1s'」は見かけのくさび内距離、「 α 」はくさび71と試験体1の表面3の境界面における超音波の入射角、「 θs 」は横波屈折角である。

なお、本明細書(この実施例4)で使用しているこれらの記号や名称は、説明の都合上、文献Bとは異なっている。本明細書と文献Bとの対応は次の通りである。矢印(→)の左側が文献Bでの名称と記号、右側が本明細書でのそれらである。なお、本明細書で使用している記号Hに相当する高さは、文献Bには記載さ

れていない。また、原点Oの位置は、文献Bとは異なり、図55に示すように、見かけの振動子72Aの中心を試験体1の表面3に垂直に投影した点としている。

振動子の高さH	→	振動子72の幅W
振動子の見かけの高さHR	→	振動子72の見かけの幅W s'
くさび内距離l1	→	くさび内距離p1
試験体中距離に換算したくさび内距離l2	→	見かけのくさび内距離p1 s'

以上、「見かけの」という表現を用いたが、これは、文献Bに記述されているように、振動子72からくさび71内に送信された縦波超音波が、試験体1との境界面、すなわち、表面3でスネルの屈折の法則にしたがって屈折し、試験体1内へ横波超音波として送信されるため、試験体1内へ送信される横波超音波に対しては、試験体1側から見た振動子72の幅Wが等価的にW s'に見えることや、くさび内距離p1を試験体1中の距離に換算すると等価的にp1 s'に見えるという意味で用いたものである。これらの見かけの物理量を用いると、くさび71があたかも試験体1であるかの如く見なして種々の計算や信号処理が行える。そこで、以下の説明においては、見かけの振動子72A、その幅W s'、見かけのくさび内距離P1 s'、及び、見かけの振動子72Aの中心に関連した高さH s'を用いて説明する。また、点Q s'を、見かけの振動子72Aの中心とする。点Q s'の座標は、(0, -H s')である。

ところで、超音波斜角探傷で広く用いられている横波専用として設計された探触子7Aにおいても、探触子7Aの振動子72の幅Wが有限であることから、屈折縦波も、屈折横波に比べてレベルは小さいが存在する。すなわち、レベルは小さいが屈折縦波も試験体1内へ送信される。受信に関しては、上述の逆のプロセスを辿るので、横波専用として設計された探触子7Aでも、試験体1中を伝搬してきた縦波を、試験体1中を伝搬してきた横波に比べれば受信レベルは小さいが受信してしまう。このように、探触子7Aからは、試験体1中に縦波を送信し、逆に、試験体1中を伝搬してきた縦波を探触子7Aで受信してしまうが、これら

の送信される縦波、及び、受信される縦波についても、我々（発明者）の実験によると、横波の場合と同様に、縦波に対して、見かけのくさび内距離や、見かけの振動子なる概念を用いても良いことが分かっている。そこで、図示はしないが、縦波に対する見かけの振動子の中心を、点QLで表す。この点QLの座標は、一般には横波に対する点Qsとは異なる。点QLの座標を、(xL, -HL)で表す。

送信用探触子7Aに関する屈折角 θ_{sa} と、受信用探触子7Bに関する、同様の屈折角 θ_{sb} とは、同じであってもよいし、互いに異なってもよい。互いに異なる場合には、欠陥6の検出能力をより向上できる場合がある。

次に、この発明の実施例4に係る超音波探傷装置の動作について図56から図79を参照しながら説明する。

図56、図57及び図58は、試験体と空気との境界面における超音波の反射に係る性質を説明するための図である。図59から図74までは、この実施例4に係る超音波探傷装置の動作を説明するための超音波ビーム伝搬経路を示す図である。また、図75は、この実施例4に係る超音波探傷装置の信号処理を説明するためのフローチャートである。さらに、図76から図79は、図75に示した信号処理のフローチャートを説明するためのビーム伝搬経路を示す図である。

送受信装置8Cの送信部82からインパルスと見なしても差し支えない程度の狭いパルス、ないしは、あるキャリア周波数を有するバースト信号などの送信信号が発生され、送信用探触子7Aに伝達される。送信用探触子7Aは送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体1の探傷面、すなわち、試験体1の表面3に対して斜めに送信する。超音波パルスは試験体1中を伝搬して欠陥6によって反射、散乱、回折される。ここでは、反射という言葉が、単に反射のみでなく、散乱や回折などの物理的現象も含んだものとして取り扱う。すなわち、反射という言葉は、超音波の伝搬が欠陥6によって影響を受け欠陥6が存在しない場合に

比べてその挙動が異なった伝搬に関する振る舞いをした現象を全て含んでいるものと解釈することとする。特に、欠陥6の先端部において発生すると言われていた先端回折エコーないしは端部エコーと呼ばれているエコーも、欠陥6によって反射したエコーに含まれているものとして説明する。この反射、散乱、回折された超音波パルスは、試験体1中を伝搬して、受信用探触子7Bによって受信される。この受信されたエコーは受信部83で増幅され、信号処理部84Cへ送られる。

一方、走査機構部9A及び9Bによって送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報が検出され位置検出部85に送られる。位置検出部85から送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報は信号処理部84Cへ送られる。

信号処理部84Cでは、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報が受信されたエコーが記憶される。

さて、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bを共にある空間的位置に固定した状態で、上述した動作が遂行され、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報がエコーの情報が記憶される。

次に、送信用探触子7Aはその空間的位置を固定された状態に保って、走査機構部9Bによって受信用探触子7Bは別の空間的位置に移動される。そして、送信信号によって送信用探触子7Aから超音波パルスが送信され、欠陥6からの受信エコーと、並びに、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bの空間的位置の情報が、先ほどと同様に信号処理部84Cに伝達され記憶される。この受信用探触子7Bの空間的位置の走査を含む一連の動作が受信用探触子7Bの所要の走査範囲にわたって行われる。

次に、走査機構部9Aによって送信用探触子7Aが別の空間的位置に移動され

その点で固定される。そして、送信信号によって送信用探触子 7 A から超音波パルスが送信され、欠陥 6 からの受信エコーと、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の空間的位置の情報が、先ほどと同様に信号処理部 8 4 C に伝達され記憶される。この一連の動作が受信用探触子 7 B の所要の走査範囲にわたって行われる。

以上の送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の空間的走査を含む一連の動作が、送信用探触子 7 A 及び受信用探触子 7 B の所要の走査範囲にわたって実行される。

以上の動作によって、送信用探触子 7 A を空間的に所要の走査範囲にわたって走査し、この走査範囲内における送信用探触子 7 A の各位置において、受信用探触子 7 B を所要の走査範囲にわたって走査して、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の各空間的位置の情報と、これらの位置におけるエコーの情報とが信号処理部 8 4 C に記憶された。その後、信号処理部 8 4 C において、後述する信号処理が実行される。

ここで、信号処理部 8 4 C における信号処理手順を説明する前に、試験体 1 と空気との境界面における超音波の反射に係わる性質を図 5 6、図 5 7、及び図 5 8 を参照しながら説明しておく。これらの図において、矢印を付して示す実線は、横波に相当し、矢印の方向が伝搬方向を示す。また、矢印を付して示す点線は、縦波に相当し、同様に矢印の方向が伝搬方向を示す。この実施例 4 の説明では、縦波と横波とを区別するため、実施例 4 の全ての図において、横波には実線、縦波には点線をそれぞれ対応させて示すことにする。また、縦波、横波ともに、それらの伝搬方向は矢印の方向とする。なお、試験体 1 と空気との境界面の例として、試験体 1 の底面 4 を例にとって説明する。また、以下に説明する超音波の反射に係わる性質は、言うまでもなく、スネルの反射と屈折の法則にしたがって生じるものである。

図56と図57は、試験体1中を伝搬してきた横波が底面4に斜めに入射したときの反射の様子を示した図である。図56と図57との差異は、図56の方が、図57の場合に比べて、各図中、記号「 αs 」を付して示す入射角度が大きい。図56に示すように、横波の入射角度 αs が大きい場合には、底面4における反射によって生じる超音波は横波のみである。しかし、図57に示すように、横波の入射角度 αs がある値より小さくなると、 αs が零の場合を除いて、すなわち、垂直に入射した場合を除いて、底面4における反射によって、横波と縦波との両方が生じる。なお、図56及び図57において、記号「 βs 」を付して示す横波の反射角度は、入射角度 αs に等しい。また、図57において、記号「 βL 」を付して示す縦波の反射角度は、横波の反射角度 βs よりも大きい。

一方、図58は、試験体1中を伝搬してきた縦波が底面4に斜めに入射したときの反射の様子を示した図である。図中、記号「 αL 」を付して示す角度は、縦波の入射角度である。また、記号「 βL 」を付して示す角度は、縦波の反射角度であり、記号「 βs 」を付して示す角度は、横波の反射角度である。縦波が斜めに底面4に入射した場合は、入射角度 αL が大きくても小さくても、零度の場合を除いて、すなわち、垂直に入射した場合を除いて、底面4での反射によって、縦波と横波との両方が生じる。なお、縦波の反射角度 βL は、縦波の入射角度 αL に等しい。また、横波の反射角度 βs は、縦波の反射角度 βL よりも小さい。

次に、図56、図57及び図58を参照しながら説明した超音波の反射に係わる上述した性質を考慮して、試験体1中の超音波ビームの伝搬特性について説明する。まず、超音波ビームの伝搬経路について図59及び図60を参照しながら考えてみる。両図中、横方向（試験体1の表面3に平行な方向）をx軸、垂直方向（試験体1の深さ方向）をy軸に取っている。欠陥6に相当する点反射源が（ x_0, y_0 ）にあるものとする。

図59は、送信用探触子7Aから送信される超音波ビームに関する超音波ビーム伝搬経路図である。図59において、点 Qsa は、送信用探触子7Aの横波に

関する見かけの振動子 7 2 A の中心であり、その点の座標を、 $(0, -H s a)$ とする。ここで、「 $H s a$ 」は試験体 1 の表面 3 から送信用探触子 7 A の横波に関する見かけの振動子 7 2 A の中心までの高さである。また、図 5 9 において、点 $Q L a$ は、送信用探触子 7 A の縦波に関する見かけの振動子の中心であり、その点の座標を、 $(x L a, -H L a)$ とする。ここで、「 $x L a$ 」は、送信用探触子 7 A の横波に関する見かけの振動子 7 2 A の中心と、縦波に関する見かけの振動子の中心との間の x 軸方向に沿った距離である。「 $H L a$ 」は、試験体 1 の表面 3 から送信用探触子 7 A の縦波に関する見かけの振動子の中心までの高さである。なお、図中、送信用探触子 7 A の縦波に関する見かけの振動子の中心を表す点 $Q L a$ は、実際は、送信用探触子 7 A の横波に関する見かけの振動子 7 2 A の中心を表す点 $Q s a$ の近傍に存在するが、図を見やすくするため、図 5 9 では、これら 2 つの点 $Q L a$ と点 $Q s a$ とは、かなり離して描いている。以下、同様である。

また、以上の説明において、送信用探触子 7 A の横波に関する見かけの振動子については、符号 7 2 A を付して説明をしてきたが、縦波に関する見かけの振動子については、特に符号を付して説明はしなかった。以下、同様にして説明する。また、受信用探触子 7 B についても、以下、同様に、横波に関する見かけの振動子については、符号 7 2 B を付して説明をするが、縦波に関する見かけの振動子については、特に符号は付けないで説明する。

図 5 9 において、送信用探触子 7 A から試験体 1 に入射した超音波が横波である場合を、まず考えてみる。送信用探触子 7 A の横波に関する見かけの振動子 7 2 A から試験体 1 へ送信された送信横波超音波ビームは回折により拡がるが、図中、太い実線は、このビームの中心線を示している。また、細い実線は、この送信横波超音波ビームにおいて、中心線上の音圧から、例えば、 -3 dB の音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2 つの細い実線の間が、送信横波超音波ビームの実効的なビーム幅に相当する。2 つの細い実線に対応する屈折角を図中に示すように、 $\theta s L a$ 、 $\theta s H a$ とする。なお、ここでは -3 dB となる

ビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて -6 dB でも、 -9 dB でも、あるいは、 -12 dB でも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。また、超音波の伝搬モードとして縦波と横波とがあるが、この発明の明細書において説明のために用いている縦波超音波及び横波超音波という文言は、それぞれ、縦波のモードで伝搬する超音波及び横波のモードで伝搬する超音波という意味で用いている。

次に、図59において送信用探触子7Aから試験体1に入射した超音波が縦波である場合を考えてみる。送信用探触子7Aの縦波に関する見かけの振動子から試験体1へ送信された送信縦波超音波ビームも回折により拡がるが、図59中、太い点線は、このビームの中心線を示している。また、細い点線は、この送信縦波超音波ビームにおいて、中心線上の音圧から、例えば、 -3 dB の音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2つの細い点線の間が、送信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅に相当する。2つの細い点線に対応する図中に示す角度を、 θ_{LLa} 、 θ_{LHa} とする。これらの角度は、それぞれ、横波に関する屈折角 θ_{sLa} 、 θ_{sHa} に対応する。なお、ここでも、 -3 dB となるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて -6 dB でも、 -9 dB でも、あるいは、 -12 dB でも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

図60は、受信用探触子7Bによって超音波を受信する際の超音波ビームに関する超音波ビーム伝搬経路図である。図60において、点 Qsb は、受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bの中心であり、その点の座標を、 $(0, -Hsb)$ とする。ここで、「 Hsb 」は試験体1の表面3から受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bの中心までの高さである。また、図60において、点 QLb は、受信用探触子7Bの縦波に関する見かけの振動子の中心であり、その点の座標を、 $(xLb, -HLb)$ とする。ここで、「 xLb 」は、受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bの中心と、縦波に関する見かけの振動子の中心との間の x 軸方向に沿った距離である。「 HLb 」

は、試験体1の表面3から受信用探触子7Bの縦波に関する見かけの振動子の中心までの高さである。なお、図中、受信用探触子7Bの縦波に関する見かけの振動子の中心を表す点QLbは、実際は、受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bの中心を表す点Qsbの近傍に存在するが、図を見やすくするため、図60では、これら2つの点QLbと点Qsbとは、かなり離して描いている。以下、同様である。

図60において、受信用探触子7Bによって超音波を受信する際の超音波が横波である場合を、まず考えてみる。受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bで受信される横波超音波は、超音波の回折を考慮すると、ある広がった角度にわたって受信されるので、受信される横波超音波のビームはある角度範囲にわたって広がっているが、図中、太い実線は、この受信横波超音波ビームの中心線を示している。また、細かい実線は、この受信横波超音波ビームにおいて、中心線上の音圧から、例えば、-3dBの音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2つの細かい実線の間が、受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅に相当する。2つの細かい実線に対応する屈折角を図中に示すように、 θ_{sLb} 、 θ_{sHb} とする。なお、ここでも、-3dBとなるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて-6dBでも、-9dBでも、あるいは、-12dBでも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

次に、図60において受信用探触子7Bによって超音波を受信する際の超音波が縦波である場合を考えてみる。受信用探触子7Bの縦波に関する見かけの振動子によって受信される際の、受信縦波超音波ビームも回折により広がるが、図60中、太い点線は、このビームの中心線を示している。また、細かい点線は、この受信縦波超音波ビームにおいて、中心線上の音圧から、例えば、-3dBの音圧となる点を結んだ線を示している。すなわち、2つの細かい点線の間が、受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅に相当する。2つの細かい点線に対応する図中に示す角度を、 θ_{LLb} 、 θ_{LHb} とする。これらの角度は、それぞれ、横波に関

する屈折角 θ_{sLb} 、 θ_{sHb} に対応する。なお、ここでも、 -3 dB となるビーム幅を考えたが、この値はこれに限らず、用途・目的に応じて -6 dB でも、 -9 dB でも、あるいは、 -12 dB でも良いし、その他の値を用いて実効的なビーム幅を定義しても構わない。

次に、図61から図74までを参照しながら、上述した送信横波超音波ビーム幅内、送信縦波超音波ビーム幅内、受信横波超音波ビーム幅内、及び、受信縦波超音波ビーム幅内の音線を考えてみる。図61～図74において、座標の原点 $(0, 0)$ は、図59と同じく、送信用探触子7Aの横波に関する見かけの振動子72Aの中心をy軸に沿って試験体1の表面3に投影した点に取ってある。点 Q_{sa} は、送信用探触子7Aの横波に関する見かけの振動子72Aの中心を示し、その座標は $(0, -H_{sa})$ である。点 Q_{La} は、送信用探触子7Aの縦波に関する見かけの振動子の中心を示し、その座標は $(x_{La}, -H_{La})$ である。点 Q_{sb} は、受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bの中心を示し、その座標は $(x_r, -H_{sb})$ としている。点 Q_{Lb} は、受信用探触子7Bの縦波に関する見かけの振動子の中心を示し、その座標は $(x_r + x_{Lb}, -H_{Lb})$ である。また、 (x_0, y_0) に位置する白丸印は欠陥6に対応する反射源である。

まず、図61から図64までを参照しながら説明する。

図61に示すように、屈折角 θ_{s1a} に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{s1b} に相当する音線が上述した受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s1a} \leq \theta_{sHa}$ で、かつ、 $\theta_{sLb} \leq \theta_{s1b} \leq \theta_{sHb}$ であれば、図中、矢印を付した実線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。このとき、送信用探触子7Aから試験体1に送信された横波は、欠陥6に直射で当たり、欠陥6で横波として反射されて、直接、受信用探触子7Bによってエコーとして受信される。

図62に示すように、屈折角 θ_{s1a} に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{L1b} に相当する音線が、上述した受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s1a} \leq \theta_{sHa}$ で、かつ、 $\theta_{LLb} \leq \theta_{L1b} \leq \theta_{LHb}$ であれば、図中、矢印を付した実線と矢印を付した点線とで示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7Aから試験体1に送信された横波は、図中、矢印を付した実線で示すように、欠陥6に直射で当たる。欠陥6に直射で当たった横波は、欠陥6の性状によっては、縦波にモード変換されて縦波として反射される成分が生じることがある。この反射された縦波は、矢印を付した点線で示すように、直接、受信用探触子7Bによって、レベルは小さいがエコーとして受信される。

図63に示すように、屈折角 θ_{L1a} に相当する音線が上述した送信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{s1b} に相当する音線が、上述した受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{LLa} \leq \theta_{L1a} \leq \theta_{LHa}$ で、かつ、 $\theta_{sLb} \leq \theta_{s1b} \leq \theta_{sHb}$ であれば、図中、矢印を付した点線と矢印を付した実線とで示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7Aから試験体1に、横波成分に比べてレベルは小さいが、縦波が送信される。この送信された縦波は、図中、矢印を付した点線で示すように、欠陥6に直射で当たる。欠陥6に直射で当たった縦波は、欠陥6の性状によっては、横波にモード変換されて横波として反射される成分が生じることがある。この反射された横波は、矢印を付した実線で示すように、直接、受信用探触子7Bによって、エコーとして受信される。

図64に示すように、屈折角 θ_{L1a} に相当する音線が上述した送信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{L1b} に相当する音線が上述した受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{LLa} \leq \theta_{L1a} \leq \theta_{LHa}$ で、かつ、 $\theta_{LLb} \leq \theta_{L1b} \leq \theta_{LHb}$

であれば、図中、矢印を付した点線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7 Aから試験体1に縦波が、横波成分に比べればレベルは小さいが送信される。この送信された縦波は、欠陥6に直射で当たり、欠陥6で縦波として反射されて、直接、受信用探触子7 Bによって、レベルは小さいがエコーとして受信される。

以上は、送信用探触子7 Aから試験体1へ送信された超音波が、直接、欠陥6へ当たり、欠陥6で反射された超音波が、直接、受信用探触子7 Bで受信される伝搬経路について考えた。

次に、図6 5から図6 8までを参照しながら、存在し得る他の伝搬経路について考えてみる。

図6 5に示すように、屈折角 θ_{s2a} に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{s1b} に相当する音線が上述した受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s2a} \leq \theta_{sHa}$ であり、かつ、 $\theta_{sLb} \leq \theta_{s1b} \leq \theta_{sHb}$ であれば、図中、矢印を付した実線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7 Aから試験体1に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面4で1回、横波超音波として反射され、その後、欠陥6に当たり、欠陥6で横波超音波として反射されて、直接、受信用探触子7 Bに到達し、エコーとして受信される。

図6 6に示すように、屈折角 $\theta_{s2'a}$ に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{s1b} に相当する音線が上述した受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s2'a} \leq \theta_{sHa}$ であり、かつ、 $\theta_{sLb} \leq \theta_{s1b} \leq \theta_{sHb}$ であれば、図中、矢印の方向に沿って、矢印を付した実線と、これに続く矢印を付した点線、さらにこれに続く矢印を付した実線で示すような超音波の

伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子 7 A から試験体 1 に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面 4 に向かって伝搬する。その後、矢印を付した点線で示すように、底面 4 で 1 回、縦波超音波として反射され、欠陥 6 に向かって伝搬する。その後、この縦波超音波は、欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で横波超音波として反射される。この反射された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、直接、受信用探触子 7 B に到達し、エコーとして受信される。

図 6 7 に示すように、屈折角 θ_{s2a} に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{L1b} に相当する音線が上述した受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s2a} \leq \theta_{sHa}$ であり、かつ、 $\theta_{LLb} \leq \theta_{L1b} \leq \theta_{LHb}$ であれば、図中、矢印の方向に沿って、矢印を付した実線と、これに続く矢印を付した実線、さらにこれに続く矢印を付した点線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子 7 A から試験体 1 に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面 4 に向かって伝搬する。その後、矢印を付した実線で示すように、底面 4 で 1 回、横波超音波として反射され、欠陥 6 に向かって伝搬する。この横波超音波は、その後、欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で縦波超音波として反射される。この反射された縦波超音波は、矢印を付した点線で示すように、直接、受信用探触子 7 B に到達し、エコーとして受信される。

図 6 8 に示すように、屈折角 $\theta_{s2'a}$ に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{L1b} に相当する音線が上述した受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s2'a} \leq \theta_{sHa}$ であり、かつ、 $\theta_{LLb} \leq \theta_{L1b} \leq \theta_{LHb}$ であれば、図中、矢印の方向に沿って、矢印を付した実線と、これに続く矢印を付した点線、さらにこれに続く矢印を付した点線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子 7 A から試験体 1 に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、底面 4 に向かって伝搬する。そ

の後、矢印を付した点線で示すように、底面4で1回、縦波超音波として反射され、欠陥6に向かって伝搬する。この縦波超音波は、その後、欠陥6に当たり、欠陥6で縦波超音波として反射される。この反射された縦波超音波は、矢印を付した点線で示すように、直接、受信用探触子7Bに到達し、エコーとして受信される。

以上は、送信用探触子7Aから試験体1に送信される超音波が横波超音波である場合を対象として、この横波超音波が、試験体1の底面4で反射された後、欠陥6の方向へ向かって伝搬し、欠陥6で反射された後、直接、受信用探触子7Bへ到達する伝搬経路について考えた。この際、底面4と欠陥6におけるモード変換を考慮に入れた。

次に、図69から図72までを参照しながら、存在し得る他の伝搬経路について考えてみる。

図69に示すように、屈折角 θ_{s1a} に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 θ_{s2b} に相当する音線が上述した受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s1a} \leq \theta_{sHa}$ であり、かつ、 $\theta_{sLb} \leq \theta_{s2b} \leq \theta_{sHb}$ であれば、図中、矢印を付した実線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7Aから試験体1に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、欠陥6に直射で当たり、欠陥6で横波超音波として反射され、その後、底面4で1回、横波超音波として反射された後、受信用探触子7Bに到達し、エコーとして受信される。

図70に示すように、屈折角 θ_{s1a} に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 $\theta_{s2'b}$ に相当する音線が上述した受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\theta_{sLa} \leq \theta_{s1a} \leq \theta_{sHa}$ であり、かつ、 $\theta_{sLb} \leq \theta_{s2'b} \leq$

$\Theta s H b$ であれば、図中、矢印の方向に沿って、矢印を付した実線と、これに続く矢印を付した点線、さらにこれに続く矢印を付した実線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7 Aから試験体1に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、欠陥6に向かって伝搬する。この横波超音波は、その後、欠陥6に直射で当たり、欠陥6で縦波超音波として反射される。この反射された縦波超音波は、矢印を付した点線で示すように、その後、底面4に向かって伝搬する。この縦波超音波は、その後、底面4で1回、横波超音波として反射される。この反射された横波超音波は、その後、矢印を付した実線で示すように、受信用探触子7 Bに到達し、エコーとして受信される。

図7 1に示すように、屈折角 $\Theta s 1 a$ に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 $\Theta L 2' b$ に相当する音線が上述した受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\Theta s L a \leq \Theta s 1 a \leq \Theta s H a$ であり、かつ、 $\Theta L L b \leq \Theta L 2' b \leq \Theta L H b$ であれば、図中、矢印の方向に沿って、矢印を付した実線と、これに続く矢印を付した実線、さらにこれに続く矢印を付した点線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7 Aから試験体1に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、欠陥6に向かって伝搬する。この横波超音波は、その後、欠陥6に直射で当たり、欠陥6で横波超音波として反射される。この反射された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、その後、底面4に向かって伝搬する。この横波超音波は、その後、底面4で1回、縦波超音波として反射される。この反射された縦波超音波は、その後、矢印を付した点線で示すように、受信用探触子7 Bに到達し、エコーとして受信される。

図7 2に示すように、屈折角 $\Theta s 1 a$ に相当する音線が上述した送信横波超音波ビームに実効的なビーム幅内に存在し、かつ、屈折角 $\Theta L 2 b$ に相当する音線が上述した受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在するならば、すなわち、 $\Theta s L a \leq \Theta s 1 a \leq \Theta s H a$ であり、かつ、 $\Theta L L b \leq \Theta L 2 b \leq \Theta L H b$ であれば、図中、矢印の方向に沿って、矢印を付した実線と、これに続く矢

印を付した点線、さらにこれに続く矢印を付した点線で示すような超音波の伝搬経路が存在し得る。すなわち、送信用探触子7Aから試験体1に送信された横波超音波は、矢印を付した実線で示すように、欠陥6に向かって伝搬する。この横波超音波は、その後、欠陥6に直射で当たり、欠陥6で縦波超音波として反射される。この反射された縦波超音波は、矢印を付した点線で示すように、その後、底面4に向かって伝搬する。この縦波超音波は、その後、底面4で1回、縦波超音波として反射される。この反射された縦波超音波は、その後、矢印を付した点線で示すように、受信用探触子7Bに到達し、エコーとして受信される。

以上は、送信用探触子7Aから試験体1に送信された超音波が横波超音波である場合を対象として、この横波超音波が、欠陥6へ直射で当たり、欠陥6で反射された後、底面4で1回反射され、その後、受信用探触子7Bへ到達する伝搬経路について考えた。この際、欠陥6と底面4とにおけるモード変換を考慮に入れた。

次に、図73と図74とを参照しながら、送信用探触子7Aから試験体1に送信された超音波が縦波超音波である場合を対象として考えてみる。図73において示す伝搬経路Iから伝搬経路IV、及び、図74において示す伝搬経路Vから伝搬経路VIIは、送信用探触子7Aから試験体1へ送信された超音波が縦波の場合について、存在し得る他の伝搬経路である。

図73において、伝搬経路Iから伝搬経路IVまでは、図示はしていないが、送信用探触子7Aから送信された縦波超音波が、試験体1の底面4へ向かって伝搬し、その後、底面4で1回反射されて欠陥6へ向かって伝搬し、その後、欠陥6で反射されて、その後、直接、受信用探触子7Bへ向かって伝搬し、受信用探触子7Bによってエコーとして受信される経路である。

これらの4つの伝搬経路IからIVまでの内、伝搬経路Iは、送信用探触子7Aから底面4までの伝搬モードが縦波であり、底面4において横波超音波として

反射されて、底面 4 から欠陥 6 までの伝搬モードが横波となり、さらに、欠陥 6 において横波超音波として反射されて、欠陥 6 から受信用探触子 7 B までの伝搬モードが横波となる伝搬経路である。図 7 3 においては、この伝搬経路 I を簡単のため、この伝搬経路 I に沿って伝搬する伝搬モードのみで代表させて記している。すなわち、伝搬経路 I での伝搬モードとして、表中、左側から右側に向かって順番に、縦波、横波、横波と記している。すなわち、第 1 番目に記したモードが、送信用探触子 7 A から試験体 1 へ送信され試験体 1 の底面 4 へ向かって伝搬する伝搬モードに対応し、第 2 番目に記したモードが、底面 4 で反射された後、底面 4 から欠陥 6 まで伝搬する伝搬モードに対応し、さらに、第 3 番目に記したモードが、欠陥 6 で反射された後、欠陥 6 から受信用探触子 7 B まで伝搬する伝搬モードに対応する。参考のため、送信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅、受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅、及び、受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅との関連において、伝搬経路 I が存在し得る条件を、図 7 3 において、上記 3 つのモードを記した右側に記してある。さらに、参考のため、図 7 3 において、底面 4 における反射と、欠陥 6 における反射とに関して、モード変換を伴うか否かを備考として追記している。すなわち、「有」はモード変換を伴っていることを意味し、「無」はもモード変換は伴わないことを意味している。以下、図 7 3 において、伝搬経路 I I ~ I V についても、図の見方は同様である。

すなわち、図 7 3 において、伝搬経路 I I は、送信用探触子 7 A から底面 4 までの伝搬モードが縦波であり、底面 4 において縦波超音波として反射されて、底面 4 から欠陥 6 までの伝搬モードが縦波となり、さらに、欠陥 6 において横波超音波として反射されて、欠陥 6 から受信用探触子 7 B までの伝搬モードが横波となる伝搬経路である。

図 7 3 において、伝搬経路 I I I は、送信用探触子 7 A から底面 4 までの伝搬モードが縦波であり、底面 4 において横波超音波として反射されて、底面 4 から欠陥 6 までの伝搬モードが横波となり、さらに、欠陥 6 において縦波超音波として反射されて、欠陥 6 から受信用探触子 7 B までの伝搬モードが縦波となる伝搬

経路である。

図73において、伝搬経路I Vは、送信用探触子7 Aから底面4までの伝搬モードが縦波であり、底面4において縦波超音波として反射されて、底面4から欠陥6までの伝搬モードが縦波となり、さらに、欠陥6において縦波超音波として反射されて、欠陥6から受信用探触子7 Bまでの伝搬モードが縦波となる伝搬経路である。

次に、図74において、伝搬経路Vから伝搬経路V I I Iまでは、図示はしていないが、送信用探触子7 Aから送信された縦波超音波が、欠陥6へ向かって伝搬し、その後、欠陥6で反射されて底面4へ向かって伝搬し、その後、底面4で1回反射されて、その後、受信用探触子7 Bへ向かって伝搬し、受信用探触子7 Bによってエコーとして受信される経路である。

これらの4つの伝搬経路VからV I I Iまでの内、伝搬経路Vは、送信用探触子7 Aから欠陥6までの伝搬モードが縦波であり、欠陥6において横波超音波として反射されて、欠陥6から底面4までの伝搬モードが横波となり、さらに、底面4において横波超音波として反射されて、底面4から受信用探触子7 Bまでの伝搬モードが横波となる伝搬経路である。図74においては、この伝搬経路Vを簡単のため、この伝搬経路Vに沿って伝搬する伝搬モードのみで代表させて記している。すなわち、伝搬経路Vでの伝搬モードとして、表中、左側から右側に向かって順番に、縦波、横波、横波と記している。すなわち、第1番目に記したモードが、送信用探触子7 Aから欠陥6へ向かって伝搬する伝搬モードに対応し、第2番目に記したモードが、欠陥6で反射された後、欠陥6から底面4まで伝搬する伝搬モードに対応し、さらに、第3番目に記したモードが、底面4で反射された後、底面4から受信用探触子7 Bまで伝搬する伝搬モードに対応する。参考のため、送信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅、受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅、及び、受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅との関連において、伝搬経路Vが存在し得る条件を、図74において、上記3つのモードを記

した右側に記してある。さらに、参考のため、図74において、底面4における反射と、欠陥6における反射とに関して、モード変換を伴うか否かを備考として追記している。すなわち、「有」はモード変換を伴っていることを意味し、「無」はモード変換は伴わないことを意味している。以下、図74において、伝搬経路VI~VIIについて、図の見方は同様である。

すなわち、図74において、伝搬経路VIは、送信用探触子7Aから欠陥6までの伝搬モードが縦波であり、欠陥6において縦波超音波として反射されて、欠陥6から底面4までの伝搬モードが縦波となり、さらに、底面4において横波超音波として反射されて、底面4から受信用探触子7Bまでの伝搬モードが横波となる伝搬経路である。

図74において、伝搬経路VIIは、送信用探触子7Aから欠陥6までの伝搬モードが縦波であり、欠陥6において横波超音波として反射されて、欠陥6から底面4までの伝搬モードが横波となり、さらに、底面4において縦波超音波として反射されて、底面4から受信用探触子7Bまでの伝搬モードが縦波となる伝搬経路である。

図74において、伝搬経路VIIIは、送信用探触子7Aから欠陥6までの伝搬モードが縦波であり、欠陥6において縦波超音波として反射されて、欠陥6から底面4までの伝搬モードが縦波となり、さらに、底面4において縦波超音波として反射されて、底面4から受信用探触子7Bまでの伝搬モードが縦波となる伝搬経路である。

さて、以上は、説明の簡単のため、送信用探触子7Aから試験体1へ送信される横波超音波に関する屈折角 θ_{s1a} に相当する音線と、横波超音波に関する屈折角 θ_{s2a} に相当する音線と、横波超音波に関する屈折角 $\theta_{s2'a}$ に相当する音線とが、送信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、送信用探触子7Aから試験体1へ送信される縦波超音波に関する屈折角 θ_{L1a} に相当する

音線と、縦波超音波に関する屈折角 θ_{L2a} に相当する音線と、縦波超音波に関する屈折角 $\theta_{L2'a}$ に相当する音線とが、送信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、受信用探触子7Bによって受信される横波超音波に関する屈折角 θ_{s1b} に相当する音線と、横波超音波に関する屈折角 θ_{s2b} に相当する音線と、横波超音波に関する屈折角 $\theta_{s2'b}$ に相当する音線とが、受信横波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在し、さらに、受信用探触子7Aによって受信される縦波超音波に関する屈折角 θ_{L1b} に相当する音線と、縦波超音波に関する屈折角 θ_{L2b} に相当する音線と、縦波超音波に関する屈折角 $\theta_{L2'b}$ に相当する音線とが、受信縦波超音波ビームの実効的なビーム幅内に存在する場合について考えた。すなわち、超音波ビーム伝搬経路において、底面4において1回の反射まで考慮した場合について考えた。

送信横波超音波ビーム、送信縦波超音波ビーム、受信横波超音波ビーム、及び、受信縦波超音波ビームのそれぞれの実効的なビーム幅が以上の考察で対象とした幅よりも更に広い場合については、以上に示した伝搬経路とは異なる更に多くの伝搬経路が存在し得る。すなわち、例えば、底面4で1回、表面3で1回の、合計2回の反射が伴う伝搬経路が存在し得る。このとき、底面4、表面3、さらに欠陥6での各々において、横波から縦波、逆に、縦波から横波へのモード変換を考慮に入れて定まる種々の伝搬経路が存在し得る。

さらに、ビーム幅が広くなるにしたがって、底面4で2回、表面3で1回反射する経路までを考慮し、各反射において、モード変換も考慮する必要が生じる。ビーム幅がさらに広い場合には、底面4で2回、表面3で2回反射する経路までを考慮し、各反射において、モード変換も考慮する必要がある。

以下、ビーム幅が広くなるにしたがって、考慮すべき経路に関して底面4や表面3での反射回数が増え、かつ、各反射に際してモード変換を考慮する必要が生じることになる。

この実施例4は、以上のように、送信超音波ビームと受信超音波ビームの拡がりを考慮して斜角で探傷する方法及び装置を提供する点が従来と大きく異なる点の1つである。また、送信超音波ビームとして、送信横波超音波ビームと送信縦波超音波ビームを考慮に入れ、受信超音波ビームとして、受信横波超音波ビームと受信縦波超音波ビームを考慮に入れている点も、従来と異なる点の1つである。さらに、表面3や底面4での反射も考慮に入れている点が、従来の特開平2-278149号公報、特開平2-248855号公報、あるいは特開平5-172789号公報に開示された技術と全く異なる。さらに、底面4、表面3、並びに、欠陥6の各々における各反射において、横波から縦波へのモード変換、及び、縦波から横波へのモード変換を考慮に入れている点が従来技術と異なる。

さて、次に、以上に述べた超音波ビームの伝搬経路に関する考察結果に基づいて、図75から図79までを参照しながら信号処理部84Cにおける信号処理手順を説明する。なお、図76から図79までにおいては座標原点は、図56、図57、及び図61～図72とは異なっている。原点は当然のことであるがどこにとっても構わない。無論、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bを走査した際の原点と異なれば適宜、信号処理部84Cにおける信号処理において座標変換を行う必要があることは言うまでもない。

信号処理部84Cにおいて、前述したように、送信用探触子7A及び受信用探触子7Bを所要の走査範囲にわたって走査した際の、走査範囲内の各空間点におけるエコー波形と、そのエコー波形を受信した際の送信用探触子7Aの空間位置情報、並びに、受信用探触子7Bの空間位置情報が記憶されている。なお、エコー波形は生波形、すなわち、整流・検波などの処理は施されず、AC（交流）波形として記憶されている。

信号処理部84Cで実行する信号処理手順については、説明を簡単にするため、試験体1の底面4における1回反射までを考慮した場合を例にとって、図75を参照しながら説明する。表面3における1回ないしは2回以上の反射や、底面4

における2回以上の反射を考慮に入れる場合については、以下に説明する信号処理手順を拡張することによって達成できる。

図75のステップ71において、所要の像再生範囲を決める。すなわち図76から図79までにおいて、例えば点線で囲って示すように、試験体1の探傷結果として像表示を行いたい範囲を決める。

ステップ72において、像再生点を決める。像再生点は上記像再生範囲内の1点である。この点の座標を図76から図79までに示すように (x_i, y_i) とする。

ステップ73において、この像再生点 (x_i, y_i) に対応する出力を $P(x_i, y_i)$ とし、この値を零に設定する。すなわち、 $P(x_i, y_i) = 0$ とする。

ステップ74において、送信用探触子7Aの走査範囲内においてエコーを受信した場所である送信用探触子7Aの空間的1つの位置を選択する。図76に示すように、送信用探触子7Aの位置は、送信横波超音波ビームに関して考える場合は、送信用探触子7Aの横波に関する見かけの振動子72Aの中心である点 Q_{sa} で代表させて考え、座標を $(x_t, -H_{sa})$ とする。点 Q_{sa} の意味は、図59～図72と同じである。また、図77に示すように、送信縦波超音波ビームに関して考える場合は、送信用探触子7Aの位置は、送信用探触子7Aの縦波に関する見かけの振動子の中心である点 Q_{La} で代表させて考え、座標を $(x_t + x_{La}, -H_{La})$ とする。点 Q_{La} の意味は、図59～図72と同じである。

ステップ75において、図76に示す角度 θ_{s1a} 、 θ_{s2a} 、 $\theta_{s2'a}$ 、及び、図77に示す角度 θ_{L1a} 、 θ_{L2a} 、 $\theta_{L2'a}$ を計算する。

なお、これらの角度 θ_{s1a} 、 θ_{s2a} 、 $\theta_{s2'a}$ 、 θ_{L1a} 、 θ_{L2a} 、

$\theta L 2' a$ は、像再生点を仮に反射源とみなして、送信用探触子 7 A から送信された超音波がその像再生点 (x_i 、 y_i) まで到達するビーム伝搬経路を対応させて考えると次のようになる。

角度 $\theta s 1 a$ は、送信用探触子 7 A から送信された横波超音波が像再生点 (x_i 、 y_i) を直射した場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta s 1 a$ に対応する往時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度は $\theta s 2 a$ は、送信用探触子 7 A から送信された横波超音波が、底面 4 で 1 回、横波超音波として反射された後で像再生点 (x_i 、 y_i) に到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta s 2 a$ に対応する往時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度は $\theta s 2' a$ は、送信用探触子 7 A から送信された横波超音波が、底面 4 で 1 回、縦波超音波として反射された後で像再生点 (x_i 、 y_i) に到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta s 2' a$ に対応する往時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 $\theta L 1 a$ は、送信用探触子 7 A から送信された縦波超音波が像再生点 (x_i 、 y_i) を直射した場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta L 1 a$ に対応する往時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 $\theta L 2 a$ は、送信用探触子 7 A から送信された縦波超音波が、底面 4 で 1 回、縦波超音波として反射された後で像再生点 (x_i 、 y_i) に到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta L 2 a$ に対応する往時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 $\theta L 2' a$ は、送信用探触子 7 A から送信された縦波超音波が、底面 4 で 1 回、横波超音波として反射された後で像再生点 (x_i 、 y_i) に到達する場合

のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta L 2' a$ に対応する往時の伝搬経路と呼ぶことにする。

なお、ここでは、底面 4 における反射回数として 1 回のみを考慮し、さらに、表面 3 における反射を考慮していないので、上記の 6 個の角度 $\theta s 1 a$ 、 $\theta s 2 a$ 、 $\theta s 2' a$ 、 $\theta L 1 a$ 、 $\theta L 2 a$ 、 $\theta L 2' a$ のみを計算している。底面 4 における反射回数が 2 回以上の場合や、表面 3 における 1 回ないしは 2 回以上の反射までを考慮に入れる場合には、上記 6 個の角度に加えて、それぞれの面における反射とこれらの反射に伴って生じるモード変換を考慮して、送信用探触子 7 A から送信された横波超音波及び縦波超音波が、像再生点 (x_i 、 y_i) に到達する往時の伝搬経路に対応する角度を計算する必要がある。

ステップ 76 において、ステップ 75 で計算で求めた角度 $\theta s 1 a$ 、 $\theta s 2 a$ 、 $\theta s 2' a$ が、送信用探触子 7 A に係る送信横波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、角度 $\theta s 1 a$ 、 $\theta s 2 a$ 、 $\theta s 2' a$ の中から送信横波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているものを選択し選び出す。すなわち、 k を、1、2、2' とし、次の条件を満足する $\theta s k a$ を選び出す。

$$\Theta s L a \leq \theta s k a \leq \Theta s H a$$

ここで、上記条件を満足する $\theta s k a$ として選出されたものを、 $\theta s p a \sim \theta s q a$ とする。p 及び q は、1、2、2' の中に存在する整数である。

さらに、ステップ 76 において、ステップ 75 で計算で求めた角度 $\theta L 1 a$ 、 $\theta L 2 a$ 、 $\theta L 2' a$ が、送信用探触子 7 A に係る送信縦波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、角度 $\theta L 1 a$ 、 $\theta L 2 a$ 、 $\theta L 2' a$ の中から送信縦波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているものを選択し選び出す。すなわち、 k を、1、2、2' とし、次の条件を満足する $\theta L k a$ を選び出す。

$$\Theta L L a \leq \theta L k a \leq \Theta L H a$$

ここで、上記条件を満足する $\theta L k a$ として選出されたものを、 $\theta L p' a \sim \theta L q' a$ とする。 p' 及び q' は、1、2、2' の中に存在する整数である。

ステップ76において、底面4での1回の反射までを考慮した条件の下で、送信用探触子7Aから送信された超音波が、像再生点 (x_i, y_i) に到る超音波ビームの伝搬経路（往時の伝搬経路）が抽出された。

なお、上記条件を満足する $\theta s k a$ も、 $\theta L k a$ も、共に存在しない場合には、ステップ86へ進む。このステップ86については後述する。

ステップ77において、ステップ74で選出した送信用探触子7Aの位置において、受信用探触子7Bを走査した走査範囲内において、エコーを受信した際の受信用探触子7Bの1つの空間的位置を選出する。受信用探触子7Bの位置は、図78に示すように、受信横波超音波ビームに関して考える場合は、受信用探触子7Bの横波に関する見かけの振動子72Bの中心である点 Q_{sb} で代表させて考え、座標を $(x_r, -H_{sb})$ とする。点 Q_{sb} の意味は、図59～図72と同じである。また、図79に示すように、受信縦波超音波ビームに関して考える場合は、受信用探触子7Bの位置は、受信用探触子7Bの縦波に関する見かけの振動子の中心である点 Q_{Lb} で代表させて考え、座標を $(x_r + x_{Lb}, -H_{Lb})$ とする。点 Q_{Lb} の意味は、図59～図72と同じである。

ステップ78において、図78に示す角度 $\theta s 1 b$ 、 $\theta s 2 b$ 、 $\theta s 2' b$ 、及び、図79に示す角度 $\theta L 1 b$ 、 $\theta L 2 b$ 、 $\theta L 2' b$ を計算する。

なお、これらの角度 $\theta s 1 b$ 、 $\theta s 2 b$ 、 $\theta s 2' b$ 、 $\theta L 1 b$ 、 $\theta L 2 b$ 、 $\theta L 2' b$ は、像再生点 (x_i, y_i) を仮に反射源とみなして、この点反射源から反射された超音波が受信用探触子7Bに到達しエコーとして受信されるまで

のビーム経路を対応させて考えると次のようになる。

角度 θ_{s1b} は、像再生点で反射された横波超音波が、受信用探触子 7 B に直接到達する場合のビーム経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 θ_{s1b} に対応する復時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 θ_{s2b} は、像再生点で反射された横波超音波が、底面 4 で 1 回、横波超音波として反射された後で受信用探触子 7 B に到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 θ_{s2b} に対応する復時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 $\theta_{s2' b}$ は、像再生点で反射された縦波超音波が、底面 4 で 1 回、横波超音波として反射された後で受信用探触子 7 B に到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta_{s2' b}$ に対応する復時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 θ_{L1b} は、像再生点で反射された縦波超音波が、受信用探触子 7 B へ直接、到達した場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 θ_{L1b} に対応する復時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 θ_{L2b} は、像再生点で反射された縦波超音波が、底面 4 で 1 回、縦波超音波として反射された後で受信用探触子 7 B へ到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 θ_{L2b} に対応する復時の伝搬経路と呼ぶことにする。

角度 $\theta_{L2' b}$ は、像再生点で反射された横波超音波が、底面 4 で 1 回、縦波超音波として反射された後で受信用探触子 7 B へ到達する場合のビーム伝搬経路に対応する。以下、このビーム伝搬経路を、角度 $\theta_{L2' b}$ に対応する復時の伝搬経路と呼ぶことにする。

なお、ここでも、超音波ビームの復時の伝搬経路において、底面4における反射回数として1回のみを考慮し、さらに、表面3における反射を考慮していないので、上記の6個の角度 θ_{s1b} 、 θ_{s2b} 、 $\theta_{s2'b}$ 、 θ_{L1b} 、 θ_{L2b} 、 $\theta_{L2'b}$ のみを計算している。底面4における反射回数が2回以上の場合や、表面3における1回ないしは2回以上の反射までを考慮に入れる場合には、上記6個の角度に加えて、それぞれの面における反射とこれらの反射に伴って生じるモード変換を考慮して、像再生点で反射された横波超音波及び縦波超音波が、受信用探触子7Bへ到達する復時の伝搬経路に対応する角度を計算する必要がある。

ステップ79において、ステップ78で計算で求めた角度 θ_{s1b} 、 θ_{s2b} 、 $\theta_{s2'b}$ が、受信用探触子7Bに係る受信横波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、角度 θ_{s1b} 、 θ_{s2b} 、 $\theta_{s2'b}$ の中から受信横波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているものを選択し選び出す。すなわち、kを、1、2、2'として、次の条件を満足する θ_{skb} を選び出す。

$$\Theta_{sLb} \leq \theta_{skb} \leq \Theta_{sHb}$$

ここで、上記条件を満足する θ_{skb} として選出されたものを、 $\theta_{sp' ' a} \sim \theta_{sq' ' a}$ とする。p' ' 及びq' ' は、1、2、2'の中に存在する整数である。

さらに、ステップ79において、ステップ78で計算で求めた角度 θ_{L1b} 、 θ_{L2b} 、 $\theta_{L2'b}$ が、受信用探触子7Bに係る受信縦波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているか否か判定する。そして、角度 θ_{L1b} 、 θ_{L2b} 、 $\theta_{L2'b}$ の中から受信縦波超音波ビームの実効ビーム幅内に入っているものを選択し選び出す。すなわち、kを、1、2、2'として、次の条件を満足する θ_{Lkb} を選び出す。

$$\Theta_{LLb} \leq \theta_{Lkb} \leq \Theta_{LHb}$$

ここで、上記条件を満足する $\theta L k b$ として選出されたものを、 $\theta L p' ' ' b \sim \theta L q' ' ' b$ とする。 $p' ' ' b$ 及び $q' ' ' b$ は、1、2、2' の中に存在する整数である。

ステップ79において、底面4での1回までの反射を考慮した条件の下で、像再生点で反射された超音波が、受信用探触子7Bへ到る超音波ビームの伝搬経路（復時の伝搬経路）が抽出された。

なお、上記条件を満足する $\theta s k b$ も、 $\theta L k b$ も、共に存在しない場合には、ステップ87へ進む。このステップ87については後述する。

ステップ80において、ステップ76で抽出した超音波ビームの往時の伝搬経路、及び、ステップ79で抽出した復時の伝搬経路に基づき、これらの往時、及び、復時の伝搬経路からなる往復での伝搬経路の全ての組み合わせを抽出する。ここで、再び説明すると、往時の伝搬経路とは、送信用探触子7Aから送信された超音波が像再生点 (x_i, y_i) に到る経路であり、復時の伝搬経路とは、像再生点 (x_i, y_i) で反射された超音波が受信用探触子7Bに到る伝搬経路である。往時の伝搬経路が、角度 $\theta s p a \sim \theta s q a$ と、角度 $\theta L p' ' ' a \sim \theta L q' ' ' a$ とのうちのどれかの1つの角度に対応し、復時での伝搬経路が、角度 $\theta s p' ' ' b \sim \theta s q' ' ' b$ と、角度 $\theta L p' ' ' b \sim \theta L q' ' ' b$ のうちのどれかの1つの角度に対応する。したがって、往復での伝搬経路は、様々な経路が存在し得る。

ステップ81において、以上のようにして抽出した往復での伝搬経路の組み合わせに対して、それぞれ、これらの往復での伝搬経路を超音波が伝搬するのに要する伝搬時間（以下、往復での伝搬時間と呼ぶことにする。）を計算する。なお、これらの往復での伝搬時間の計算においては、往復での伝搬経路が、縦波として伝搬する伝搬経路と、横波として伝搬する伝搬経路とから成り立っている場合に

は、言うまでもなく、縦波として伝搬する伝搬経路に対応するビーム路程（距離）には、縦波の音速を対応させ、横波として伝搬する伝搬経路に対応するビーム路程には、横波の音速を対応させて、往復での伝搬時間を求める必要がある。無論、往復での伝搬経路が、縦波として伝搬する伝搬経路のみから成り立っている場合には、このビーム路程には、縦波の音速を対応させて、往復での伝搬時間を求めればよい。また、往復での伝搬経路が、横波として伝搬する伝搬経路のみから成り立っている場合には、このビーム路程には、横波の音速を対応させて、往復での伝搬時間を求めればよい。以上のようにして往復での伝搬経路のそれぞれについて、それぞれ求めた往復での伝搬時間から、ステップ 74 で選出した送信用探触子 7A の空間的位置と、ステップ 77 で選出した受信用探触子 7B の空間的位置との組み合わせの位置に対応するエコー波形において、エコーの受信されるべき時間を割り出すことができた。

ステップ 81 において、このようにして求められた往復での伝搬経路のそれぞれについて、エコーの受信されるべき対応する時間のエコーの振幅をそれぞれ呼び出す。さらに、ステップ 81 において、往復での伝搬経路のそれぞれについて呼び出されたエコーの振幅のそれぞれを加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算する。

ステップ 82 において、受信用探触子 7B の全走査範囲、あるいは定めた走査範囲にわたって、ステップ 77 ～ステップ 81 の信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ 87 に進む。完了した場合にはステップ 83 へ進む。

ここで、ステップ 87 において、受信用探触子 7B の位置を別の空間位置に移動して、ステップ 77 からステップ 82 までの信号処理を続行する。すなわち、ステップ 77 において、受信用探触子 7B の走査範囲内において、前回までに選出した空間位置を除いて受信用探触子 7B の新たな空間位置（上記の移動後の位置）を選出して、ステップ 82 までの信号処理を遂行する。

ステップ 83 において、送信用探触子 7A の全走査範囲、あるいは定めた走査範囲にわたって、ステップ 74～ステップ 82 の信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ 86 に進む。完了した場合にはステップ 84 へ進む。

ここで、ステップ 86 において、送信用探触子 7A の位置を別の空間位置に移動して、ステップ 74 からステップ 83 までの信号処理を続行する。すなわち、ステップ 74 において、送信用探触子 7A の走査範囲内において、前回までに選出した空間位置を除いて送信用探触子 7A の新たな空間位置（上記の移動後の位置）を選出して、ステップ 83 までの信号処理を遂行する。

ステップ 84 において、 $P(x_i, y_i)$ の値、あるいは、その絶対値、あるいは、絶対値の自乗値などを、像再生点 (x_i, y_i) における再生像として出力する。

ステップ 85 において、所要の像再生範囲内の所要の全再生点、あるいは定めた再生点に関して、ステップ 72 からステップ 84 までの信号処理が完了したか否かを判定する。判定の結果、未完了の場合には、ステップ 88 に進む。完了した場合には、信号処理部 84C における信号処理は全て完了したことになる。

ステップ 88 において、所要の像再生範囲内の所要の別の像再生点を指定して、ステップ 72 からステップ 85 までの信号処理を繰り返す。

なお、説明を簡単にするため、試験体 1 の底面 4 における 1 回反射までを考慮した場合を例にとって、往復での伝搬経路の候補の洗い出しの手順を説明した。底面 4 における反射回数が 2 回以上の場合や、表面 3 における 1 回ないしは 2 回以上の反射までを考慮に入れる場合には、ステップ 75 から 80 において、底面 4 ないしは表面 3 における反射とこれらの反射に伴って生じるモード変換を考慮

して、送信用探触子 7 A から像再生点を経由し受信用探触子 7 B に到る往復での伝搬経路の候補を洗い出せば良い。

また、ステップ 75 からステップ 80 は、送信用探触子 7 A の空間的位置（座標）、受信用探触子 7 B の空間的位置、及び、像再生点の空間的位置が与えられたとき、送信用探触子 7 A から送信され、像再生点を経由し、受信用探触子 7 B へ到る往復での伝搬経路の候補を洗い出すための信号処理手順の 1 つの具体的な例を示したものに過ぎない。これらの往復での伝搬経路の候補の洗い出しは、ステップ 75 からステップ 80 に示した信号処理手順とは別の手順にしたがって行っても良い。要は、送信用探触子 7 A の空間的位置、受信用探触子 7 B の空間的位置、及び、像再生点の空間的位置が与えられたとき、送信用探触子 7 A から送信され、像再生点を経由し、受信用探触子 7 B へ到る往復での伝搬経路を洗い出せる手順であれば図 75 に示したものと別の手順でも構わない。無論、上記の往復での伝搬経路の候補の洗い出しにおいて、底面 4 並びに表面 3 での超音波パルスの反射を伴う往復での伝搬経路の候補を想定する必要がある場合には、往復での伝搬経路の候補の洗い出しにおいて、底面 4 並びに表面 3 での反射を伴うものも考慮する必要がある。

また、以上示した信号処理のステップ 81 において、往復での伝搬経路の各々について、エコーの受信されるべき時間を割り出し、その時間に対応するエコーの振幅を呼び出して加算したが、この加算演算において、次のことに注意する必要がある。すなわち、底面 4 で超音波が 1 回反射すると位相が変化する。同様に、表面 3 で反射しても位相が変化する。したがって、このような反射に係わる位相の変化量を補正して加算する必要がある。反射に係わる位相の変化が、例えば、逆相（180 度）の場合について例示すると次のようになる。往復での伝搬経路として、例えば、送信用探触子 7 A から送信された横波超音波パルスが直射で欠陥 6 に当たり、欠陥 6 で横波として反射されて直接、受信用探触子 7 B で受信された経路（第 1 の経路）と、送信用探触子 7 A から送信された横波超音波パルスが直射で欠陥 6 に当たり欠陥 6 で横波として反射された後、底面 4 で 1 回、横波

として反射されその後受信用探触子7Bで受信された経路（第2の経路）と、送信用探触子7Aから送信された横波超音波パルスが直射で欠陥6に当たり欠陥6で横波として反射された後、表面3で1回、横波として反射され、その後底面4で1回、横波として反射されてその後受信用探触子7Bで受信された経路（第3の経路）とがあったとする。このような場合、第2の経路では底面4で1回反射されているから第1の経路と比較して位相が180度回転している。第3の経路では、表面3で1回、さらに底面4で1回反射されているから合計で位相は、第1の経路と比較して360度回転し結果として第1の経路と同相になっている。したがって、第1の経路に対応するエコーの振幅と、第3の経路に対応するエコーの振幅はそのまま加算し、第2の経路に対応するエコーの振幅は位相を逆転させた後の値、すなわち、-1を乗算した値を、第1及び第2の経路に対応する振幅に加算することになる。欠陥6での反射の位相変化に関しても同様に考慮に入れる必要がある。以上は、位相変化が180度の場合について説明したが、これ以外の角度の場合は、何らかの基準となる位相を決めて、反射に伴って生じる位相変化分の上記基準値からのずれ量を補正してエコーの振幅を加算すれば、より鮮明な再生像が得られる。

また、以上示した信号処理のステップ81において、他の実施例と同様に、往復での伝搬経路に対応する時間のエコーの振幅が、所要の信号対雑音比以下の値しか有していない場合には、むしろ、この振幅は零として処理を行った方が最終結果として得られる再生像に及ぼす雑音の影響が軽減されることがある。このような場合には、ステップ80で抽出した存在し得る全ての往復での伝搬経路の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有する往復での伝搬経路のみを選んでそれらに対応するエコーの振幅を加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算する方が好ましい結果を得ることができる。

また、以上説明した信号処理のステップ75からステップ80において、または、これらのステップと同じ目的を有する手順、すなわち、往復での伝搬経路の候補の洗い出しの手順において、存在し得る往復での伝搬経路の全てを、候補と

して洗い出す必要は必ずしもない。存在し得る往復での伝搬経路であっても、有為なレベルを有するエコーとしては受信されないことが、理論や実験によって、あらかじめ分かっている場合には、その経路は候補から、あらかじめ除外して、残りの候補の洗い出しを行えば、洗い出しの手順を簡略化できる。あるいは、高いレベルのエコーとして受信される往復での伝搬経路が、理論や実験によって、あらかじめ分かっている場合には、その経路をあらかじめ特定しておいて信号処理を行えば、信号処理手順を簡略化できる。この場合には、ステップ75、ステップ76、ステップ78、ステップ79、及び、ステップ80は、不要となる。ステップ81において、ステップ74で選択された送信用探触子7Aの空間的位置とステップ77で選択された受信用探触子7Bの空間的位置とから、上述の特定された往復での伝搬経路についてステップ81を実行すればよい。すなわち、ステップ81において、ステップ75からステップ80までの手順で洗い出された候補の代わりに、上述の特定された往復での伝搬経路を用いればよい。

また、屈折角を選択し、これに基づいて往復のビーム伝搬経路を抽出する方法は、抽出方法の1つに過ぎず、これ以外の方法もあり得る。さらに、往復のビーム伝搬経路の全てを洗い出す必要は必ずしもなく、幾つかの候補を洗い出せばよい。

さて、以上の信号処理の結果として、この実施例4において試験体1の中の検査結果が像として得られた。次に、この実施例4の作用効果について説明する。

この発明の実施例4においては、従来とは異なり、試験体1の底面4や表面3での超音波の反射も考慮して、存在し得る往復での伝搬経路の候補を洗い出し、これらの往復での伝搬経路に対応するエコーの受信時間におけるエコーの振幅を加算した。さらに、上述の往復での伝搬経路の候補の洗い出しにおいて、送信用探触子7Aから試験体1へ送信される超音波として横波のみでなく縦波も考慮に入れるとともに、受信用探触子7Bによって受信される超音波として横波のみでなく縦波も考慮に入れて候補の洗い出しを行った。さらに、上述の往復での伝搬

経路の候補の洗い出しにおいて、試験体1の底面4と、表面3と、欠陥6とにおける横波から縦波へのモード変換、並びに、底面4と、表面3と、欠陥6とにおける縦波から横波へのモード変換も考慮に入れて候補の洗い出しを行った。さらに、候補として選ばれた往復での伝搬経路に対応するエコーの受信時間におけるエコーの振幅の加算結果を、送信用探触子7Aの走査範囲内の送信用探触子7Aの各位置、並びに、受信用探触子7Bの走査範囲内の受信用探触子7Bの各位置の位置の組み合わせの位置に対応するエコーに関して加算した。以上のようにして得られた加算結果を像再生点における像として出力した。これによって、従来は考慮されていない超音波ビーム伝搬経路まで考慮に入れた像を再生できるので、従来に比べより精度の良い検査結果が得られる作用、効果がある。さらに、送信用探触子7Aとともに受信用探触子7Bも空間的に走査することによって加算回数がより増加したので、より精度の良い検査結果が得られる作用、効果があるとともに、この発明の他の実施例では考慮に入れていない超音波ビーム伝搬経路まで考慮に入れた像を再生できるので、他の実施例に比べ、より精度の良い検査結果が得られる作用、効果がある。

また、上記洗い出した往復での伝搬経路の候補において、往復での伝搬経路に対応するエコーの受信時間におけるエコーの振幅が所要の信号対雑音比以下の値しか有していない場合には、（この発明の他の実施例と同様に）、上記往復での伝搬経路の中から、対応するエコーの振幅が有為な値を有する往復での伝搬経路のみを選んで、それらに対応するエコーの振幅のみを加算して、その加算結果を、 $P(x_i, y_i)$ に加算するようにしたので、より鮮明な像が得られ精度の良い検査が行える作用、効果が得られる。

また、上記 θ_{sLa} 及び θ_{sHa} で規定される横波に関する送信横波超音波ビーム幅として、送信横波超音波ビームにおいて -3dB のビーム幅を用い、並びに、上記 θ_{sLb} 及び θ_{sHb} で規定される横波に関する受信横波超音波ビーム幅として、受信横波超音波ビームにおいて -3dB のビーム幅を用い、送信及び受信とも横波に関する主ビームを対象とした信号処理が行えるので、より鮮

明な像が得られる作用、効果がある。

また、上記 $\Theta L L a$ 及び $\Theta L H a$ で規定される縦波に関する送信縦波超音波ビーム幅として、送信縦波超音波ビームにおいて -3 dB のビーム幅を用い、並びに、上記 $\Theta L L b$ 及び $\Theta L H b$ で規定される縦波に関する受信縦波超音波ビーム幅として、受信縦波超音波ビームにおいて -3 dB のビーム幅を用いれば、送信及び受信とも縦波に関する主ビームを対象とした信号処理が行えるので、より鮮明な像が得られる作用、効果がある。

また、この実施例4では、図示はしないが、 x 軸及び y 軸に垂直な z 軸上の、ある特定の z の値、すなわち、 (x, y) 断面内で送信用探触子7A並びに受信用探触子7Bを走査し、再生像を信号処理によって再生する場合を対象として説明したが、この発明はこれに限らず、 z 軸方向に沿っても、すなわち種々の z の値において同様の送信用探触子7A並びに受信用探触子7Bの走査、及び信号処理を行い、最終結果として試験体1中を3次元像として再生し表示すれば、欠陥6の z 軸方向に沿った情報も得られるので、欠陥6の種別、分類などに有効に利用できる作用、効果が得られる。

また、この実施例4では、次の作用、効果が得られる。すなわち、欠陥6の形状によっては、欠陥6からの反射特性が空間的指向性を有する場合がある。例えば、欠陥6が面状の形状をしている場合は、この欠陥6に照射された超音波パルスは、欠陥6での反射においてモード変換を伴わない場合においては、鏡面反射ないしは鏡面反射に近い反射特性を示す。このような場合には、欠陥6に入射した超音波は、入射した方向には反射されない。入射方向とは、全く別の方向に強く反射される。さらに、欠陥6での超音波の反射において、横波から縦波へのモード変換、あるいは、縦波から横波へのモード変換が生じると、モード変換された超音波パルスに関しては、鏡面反射ないしは鏡面反射に近い反射特性ではなく、図56から図58までに示したように、欠陥6への超音波パルスの入射角と反射角とが異なった反射特性を示す。さらに、欠陥6へ入射した超音波パルスのモー

ドとは別のモードの超音波の方が強く反射されることがある。したがって、このようなモード変換が生じた場合にも、欠陥6に入射した超音波は、入射した方向には反射されない。入射方向とは、全く別の方向に強く反射されることが生じる場合がある。以上のように、欠陥6からの反射特性が空間的指向性を有する場合には、超音波パルスを送信した送信用探触子7Aには、欠陥6で反射された超音波パルスはほとんど戻って来ないことが生じるとともに、送信された超音波のモードとは別のモードの超音波の方が高いレベルで反射されることが生じる場合がある。

さらに、試験体1の底面4や表面3における超音波パルスの反射においても、モード変換を伴わない場合には、鏡面反射ないしは鏡面反射に近い反射特性を示す。また、試験体1の底面4や表面3における超音波パルスの反射において、モード変換を伴う場合には、超音波パルスの入射角と反射角とが異なった反射特性を示すとともに、入射した超音波のモードとは別のモードの超音波の方が高いレベルで反射されることが生じる場合がある。以上のように、欠陥6での反射の場合と同様に、試験体1の底面4や表面3における超音波パルスの反射において、反射特性は空間的指向性を有する。このため、送信用探触子7Aから送信された超音波パルスは、送信用探触子7Aの方向に大きなレベルで戻って来ないことが考えられる。

さらに、送信用探触子7Aから送信された超音波のモードとは、別のモードの超音波の方が、高いレベルで反射することも考えられる。以上のように欠陥6からの反射特性が空間的指向性を有する場合や、試験体1の底面4ないしは表面3における反射特性が空間的指向性を有していても、この実施例4においては、送信用探触子7Aとは別個に受信用探触子7Bを設け、送信用探触子7A並びに受信用探触子7Bを走査してエコーを受信しているから、受信用探触子7Bによって、欠陥6によって反射された超音波パルスを、横波あるいは縦波のエコーとして受信できる確率が高い。これによって、欠陥6の検出能力、すなわち、欠陥6を見逃さない能力が向上できる作用、効果が得られる。

さらに、この実施例4では、送信用探触子7Aと受信用探触子7Bの各空間的位置ごとに受信された横波あるいは縦波のエコーに関して、送信用探触子7Aと受信用探触子7Bとを空間的に走査して、信号処理部84Cにおいて、これらのエコーに上述したような加算操作を施しているため、加算結果として得られるエコーのレベルが大きくなる。これによって、欠陥6の検出能力を更に向上できる作用、効果が得られる。

また、送信用探触子7Aと受信用探触子7Bのそれぞれの屈折角として異なったものを用い、さらに種々の異なる組み合わせを用いて実施例4をこれらの組み合わせ毎に遂行すれば、上述したような欠陥6からの反射特性が空間的指向性を有している場合においても、また、試験体1の底面4ないしは表面3からの反射特性が空間的指向性を有していても、更に高い確率で欠陥6を見逃すことなく検出できその鮮明な像を得ることができる作用、効果が得られる。

この発明の実施例4に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法は、次のような作用、効果も奏する。例えば、溶接部のビード部などのように試験体の表面の凹凸が激しい場合、欠陥の近くまで送信用探触子及び受信用探触子を移動させて試験体の表面を介した超音波の送受信を行うことが困難な場合がある。このような場合、試験体の表面近くに欠陥が存在すると超音波の送受信が良好にできる送信用探触子及び受信用探触子の移動範囲に上述のような制限があることから直射では欠陥からのエコーを捉えられないことがある。このような場合には、試験体の底面側に送信用探触子及び受信用探触子を配して探傷面を底面側にして探傷試験するか、ないしは、送信用探触子を表面側に配置し、受信用探触子を底面側に配置して探傷試験する必要がある。しかし、試験体が構造物の一部であるような場合には、底面側には物理的にアクセスできず、底面を探傷面として利用できない場合がある。以上のように表面近くに欠陥があるような場合でも、この発明に係る超音波探傷装置及び超音波探傷方法では、直射のみでなく、底面における超音波の反射や表面における超音波の反射を用いているため、このような反射を用いる

ことで上記のような制限を克服でき、探傷試験が可能となるという作用、効果が得られる。

なお、この発明の実施例 4 では、試験体の表面側に、送信用探触子と受信用探触子を配置した構成について説明したが、試験体の底面側も、探傷面として利用できる場合には、送信用探触子と受信用探触子の一方を表面側に配置し他方を底面側に配置して、実施例 4 と同様の手順にしたがって探傷試験を行っても構わない。

また、以上は、送信用探触子及び受信用探触子を試験体の探傷面に直接接触させて探傷試験する場合について説明したが、この発明はこれに限らず、試験体を水などの液体中に浸して、この液体を介して送信用探触子及び受信用探触子から試験体に超音波を送受信するいわゆる浸漬法や水浸法に適用しても良い。あるいは、送信用探触子及び受信用探触子の前面である音響送受信面、すなわち、送信用探触子及び受信用探触子と試験体の探傷面との間の局所的な空間のみに水膜を設けて試験体に超音波を送受信するいわゆる局部水浸法に適用しても良い。このような浸漬法や水浸法や局部水浸法においても本発明と同様の作用、効果が得られる。

また、図 5 4 においては、走査機構部 9 A と 9 B が、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の空間的走査の機能と、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の空間的位置の情報を出力して位置検出部 8 5 に入力されるものとして説明したが、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の空間的位置の情報収集と出力する機能は、走査機構部 9 A と 9 B とは独立して設けた位置情報発生部で行ってもよい。すなわち、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の空間的位置の情報は、位置情報発生部で収集し出力して位置検出部 8 5 に入力する構成でも構わない。この場合には、走査機構部 9 A と 9 B は、送信用探触子 7 A と受信用探触子 7 B の空間的走査の機能のみを担当することになる。また、この場合には位置情報発生部も制御部 8 1 に接続され制御部 8 1 と各種信号をやりとりする必要がある。

また、図54においては、送信用探触子7Aと受信用探触子7Bの空間的位置の情報を走査機構部9Aと9Bから出力して位置検出部85に入力されるものとして説明したが、送信用探触子7Aと受信用探触子7Bの空間的走査範囲や移動距離などの情報は、制御部81から制御して発生しているので、走査機構部9Aと9Bは探触子7の空間的走査の機能のみを持たせ、位置検出部85は設けなくて、制御部81からの送信用探触子7Aと受信用探触子7Bの走査に関する情報を直接信号処理部84Cに入力し記憶させる構成でも構わない。

産業上の利用の可能性

この発明に係る超音波探傷装置は、以上説明したとおり、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して斜めに送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、前記探触子を前記試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、前記探触子の空間的位置を出力する走査機構手段と、前記送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶し、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりやを考慮して前記音響的不連続部を検出する送受信手段とを備えたので、試験体中の超音波による検査の精度を向上することができ、音響的不連続部などの形状や大きさ、位置などの検出能力、計測精度を向上することができるという効果を奏する。

また、この発明に係る超音波探傷装置は、以上説明したとおり、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して斜めに送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、前記探触子を前記試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、前記探触子の空間的位置を出力する走査機構手段と、前記送

信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶し、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出する送受信手段とを備えたので、試験体中の超音波による検査の精度を向上することができ、音響的不連続部などの形状や大きさ、位置などの検出能力、計測精度を向上することができるという効果を奏する。

この発明に係る超音波探傷方法は、以上説明したとおり、走査機構手段により探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるステップと、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して斜めに送信するステップと、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信するステップと、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶するステップと、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して前記音響的不連続部を検出するステップとを含むので、試験体中の超音波による検査の精度を向上することができ、音響的不連続部などの形状や大きさ、位置などの検出能力、計測精度を向上することができるという効果を奏する。

さらに、この発明に係る超音波探傷方法は、以上説明したとおり、走査機構手段により探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるステップと、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して斜めに送信するステップと、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信するステップと、前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶すると

もに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶するステップと、前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出するステップとを含むので、試験体中の超音波による検査の精度を向上することができ、音響的不連続部などの形状や大きさ、位置などの検出能力、計測精度を向上することができるという効果を奏する。

請求の範囲

1. 送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して斜めに送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、

前記探触子を前記試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、前記探触子の空間的位置を出力する走査機構手段と、

前記送信信号を発生して前記探触子へ出力し、

前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶し、

前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して前記音響的不連続部を検出する送受信手段と

を備えた超音波探傷装置。

2. 前記探触子は、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを前記探傷面に対して前記送信角度とは異なる傾いた受信角度でエコーとして受信する請求項1記載の超音波探傷装置。

3. 前記探触子は、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを前記探傷面に対して前記送信角度と同じ傾いた受信角度でエコーとして受信する請求項1記載の超音波探傷装置。

4. 前記送受信手段は、

前記送信信号を発生して前記探触子へ出力する送信手段と、

前記探触子から前記受信されたエコーを入力する受信手段と、

前記走査機構手段から前記探触子の空間的位置を入力する位置検出手段と、

前記記憶した探触子の空間的位置及び前記記憶したエコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して前記音響的不連続部を検出する信号処理手段と

を有する請求項 1、2 又は 3 記載の超音波探傷装置。

5. 前記信号処理手段は、

前記探触子を所定の走査範囲にわたって走査した際に受信したエコーと、前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の座標とを記憶する生データ記憶手段と、

前記試験体の定めた像再生範囲内の定めた再生点と、前記生データ記憶手段に記憶された前記探触子の座標とに基づき、前記探触子の実効ビーム幅内に入っている送受往復でのビーム伝搬経路の候補を洗い出す経路候補洗出手段と、

前記送受往復でのビーム伝搬経路の候補の各々について、エコーの受信されるべき時間を求め、この時間に対応するエコーの振幅を前記生データ記憶手段から取り出し、取り出した各々のエコーの振幅を加算する振幅加算手段と、

前記探触子の定めた走査範囲にわたって前記エコーの振幅を加算した値を前記定めた再生点における再生像として出力する像再生手段と

を有する請求項 4 記載の超音波探傷装置。

6. 前記信号処理手段は、前記像再生範囲内の定めた再生点における各再生像を 3 次元像として出力する請求項 5 記載の超音波探傷装置。

7. 前記振幅加算手段は、前記求めた時間に対応するエコーの振幅が有為な値のときにはその振幅を加算する請求項 5 又は 6 記載の超音波探傷装置。

8. 前記実効ビーム幅は、 -3 dB のビーム幅である請求項 5 又は 6 記載の超音波探傷装置。

9. 前記探触子は、前記送信手段に接続された送信用探触子と前記受信手段に接

続された受信用探触子とからなり、前記走査機構手段は、前記送信用探触子に対応して設けられた送信用走査機構部と前記受信用探触子に対応して設けられた受信用走査機構部とからなる請求項 4、5 又は 6 記載の超音波探傷装置。

10. 送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して斜めに送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信する探触子と、

前記探触子を前記試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるとともに、前記探触子の空間的位置を出力する走査機構手段と、

前記送信信号を発生して前記探触子へ出力し、

前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶し、

前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出する送受信手段と

を備えた超音波探傷装置。

11. 前記探触子は、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを前記探傷面に対して前記送信角度とは異なる傾いた受信角度でエコーとして受信する請求項 10 記載の超音波探傷装置。

12. 前記探触子は、送信信号によって駆動され超音波パルスを試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信するとともに、前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを前記探傷面に対して前記送信角度と同じ傾いた受信角度でエコーとして受信する請求項 10 記載の超音波探傷装置。

1 3. 前記送受信手段は、

前記送信信号を発生して前記探触子へ出力する送信手段と、
前記探触子から前記受信されたエコーを入力する受信手段と、
前記走査機構手段から前記探触子の空間的位置を入力する位置検出手段と、
前記記憶した探触子の空間的位置及び前記記憶したエコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出する信号処理手段と

を有する請求項 1 0、1 1、又は 1 2 記載の超音波探傷装置。

1 4. 前記信号処理手段は、

前記探触子を所定の走査範囲にわたって走査した際に受信したエコーと、前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の座標とを記憶する生データ記憶手段と、

前記試験体の定めた像再生範囲内の定めた再生点と、前記生データ記憶手段に記憶された前記探触子の座標とに基づき、前記探触子の実効ビーム幅内に入っている送受往復でのビーム経路の候補を洗い出す経路候補洗出手段と、

前記送受往復でのビーム経路の候補の各々について、エコーの受信されるべき時間を求め、この時間に対応するエコーの振幅を前記生データ記憶手段から取り出し、取り出した各々のエコーの振幅を加算する振幅加算手段と、

前記探触子の定めた走査範囲にわたって前記エコーの振幅を加算した値を前記定めた再生点における再生像として出力する像再生手段と

を有する請求項 1 3 記載の超音波探傷装置。

1 5. 前記信号処理手段は、前記像再生範囲内の定めた再生点における各再生像を 3 次元像として出力する請求項 1 4 記載の超音波探傷装置。

1 6. 前記振幅加算手段は、前記求めた時間に対応するエコーの振幅が有意な値のときにはその振幅を加算する請求項 1 4 又は 1 5 記載の超音波探傷装置。

17. 前記実効ビーム幅は、横波に関する超音波ビームの -3 dB のビーム幅である請求項14又は15記載の超音波探傷装置。

18. 前記実効ビーム幅は、縦波に関する超音波ビームの -3 dB のビーム幅である請求項14又は15記載の超音波探傷装置。

19. 前記探触子は、前記送信手段に接続された送信用探触子と前記受信手段に接続された受信用探触子とからなり、前記走査機構手段は、前記送信用探触子に対応して設けられた送信用走査機構部と前記受信用探触子に対応して設けられた受信用走査機構部とからなる請求項13、14又は15記載の超音波探傷装置。

20. 走査機構手段により探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるステップと、

送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して斜めに送信するステップと、

前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信するステップと、

前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶するステップと、

前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がりを考慮して前記音響的不連続部を検出するステップと

を含む超音波探傷方法。

21. 前記送信ステップは、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信し、前記受信ステップは、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを前記探傷面に対して前記送信角度とは異なる傾い

た受信角度でエコーとして受信する請求項 20 記載の超音波探傷方法。

22. 前記送信ステップは、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信し、前記受信ステップは、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の座標とを記憶し、

前記検出ステップは、

前記試験体の定めた像再生範囲内の定めた再生点と、前記記憶された前記探触子の座標とに基づき、前記探触子の実効ビーム幅内に入っている送受往復でのビーム伝搬経路の候補を洗い出すステップと、

前記送受往復でのビーム伝搬経路の候補の各々について、エコーの受信されるべき時間を求め、この時間に対応するエコーの振幅を取り出し、取り出した各々のエコーの振幅を加算するステップと、

前記探触子の定めた走査範囲にわたって前記エコーの振幅を加算した値を前記定めた再生点における再生像として出力するステップと

を含む請求項 20、21 又は 22 記載の超音波探傷方法。

24. 前記検出ステップは、前記像再生範囲内の定めた再生点における各再生像を 3 次元像として出力する請求項 23 記載の超音波探傷方法。

25. 前記振幅加算ステップは、前記求めた時間に対応するエコーの振幅が有為な値のときにはその振幅を加算する請求項 23 又は 24 記載の超音波探傷方法。

26. 前記実効ビーム幅は、 -3 dB のビーム幅である請求項 23 又は 24 記載

の超音波探傷方法。

27. 前記探触子は、送信用探触子と受信用探触子とからなり、前記走査機構手段は、前記送信用探触子に対応して設けられた送信用走査機構部と前記受信用探触子に対応して設けられた受信用走査機構部とからなり、前記送信用探触子による前記超音波パルスの空間的送信位置と、前記受信用探触子による前記エコーの空間的受信位置とが異なる請求項20、21、22、23又は24記載の超音波探傷方法。

28. 走査機構手段により探触子を試験体上の所定の走査範囲にわたって移動させるステップと、

送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して斜めに送信するステップと、

前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスをエコーとして受信するステップと、

前記探触子から前記受信されたエコーを入力して記憶するとともに、前記走査機構手段から前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の空間的位置を入力して記憶するステップと、

前記探触子の空間的位置及び前記エコーに基づき、超音波ビームの回折による拡がり、前記超音波ビームが反射する際の縦波から横波へのモード変換、及び横波から縦波へのモード変換とを考慮して前記音響的不連続部を検出するステップと

を含む超音波探傷方法。

29. 前記送信ステップは、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを前記試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信し、前記受信ステップは、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを前記探傷面に対して前記送信角度とは異なる傾いた受信角度でエコーとして受信する請求項28記載の超音波探傷方法。

30. 前記送信ステップは、送信信号を発生して前記探触子へ出力し、前記探触子により超音波パルスを送信した際、前記探触子により前記試験体の探傷面に対して傾いた送信角度で送信し、前記受信ステップは、前記探触子により前記試験体中の音響的不連続部によって反射された前記超音波パルスを送信した際、前記探傷面に対して前記送信角度と同じ傾いた受信角度でエコーとして受信する請求項28記載の超音波探傷方法。

31. 前記記憶ステップは、前記探触子を所定の走査範囲にわたって走査した際に受信したエコーと、前記超音波パルスを送信した際及び前記エコーを受信した際の前記探触子の座標とを記憶し、

前記検出ステップは、

前記試験体の定めた像再生範囲内の定めた再生点と、前記記憶された前記探触子の座標とに基づき、前記探触子の実効ビーム幅内に入っている送受往復でのビーム経路の候補を洗い出すステップと、

前記送受往復でのビーム経路の候補の各々について、エコーの受信されるべき時間を求め、この時間に対応するエコーの振幅を取り出し、取り出した各々のエコーの振幅を加算するステップと、

前記探触子の定めた走査範囲にわたって前記エコーの振幅を加算した値を前記定めた再生点における再生像として出力するステップと

を含む請求項28、29又は30記載の超音波探傷方法。

32. 前記検出ステップは、前記像再生範囲内の定めた再生点における各再生像を3次元像として出力する請求項31記載の超音波探傷方法。

33. 前記振幅加算ステップは、前記求めた時間に対応するエコーの振幅が有意な値のときにはその振幅を加算する請求項31又は32記載の超音波探傷方法。

34. 前記実効ビーム幅は、横波に関する超音波ビームの-3dBのビーム幅である請求項31又は32記載の超音波探傷方法。

35. 前記実効ビーム幅は、縦波に関する超音波ビームの -3 dB のビーム幅である請求項31又は32記載の超音波探傷方法。

36. 前記探触子は、送信用探触子と受信用探触子とからなり、前記走査機構手段は、前記送信用探触子に対応して設けられた送信用走査機構部と前記受信用探触子に対応して設けられた受信用走査機構部とからなり、前記送信用探触子による前記超音波パルスの空間的送信位置と、前記受信用探触子による前記エコーの空間的受信位置とが異なる請求項28、29、30、31又は32記載の超音波探傷方法。

図 1

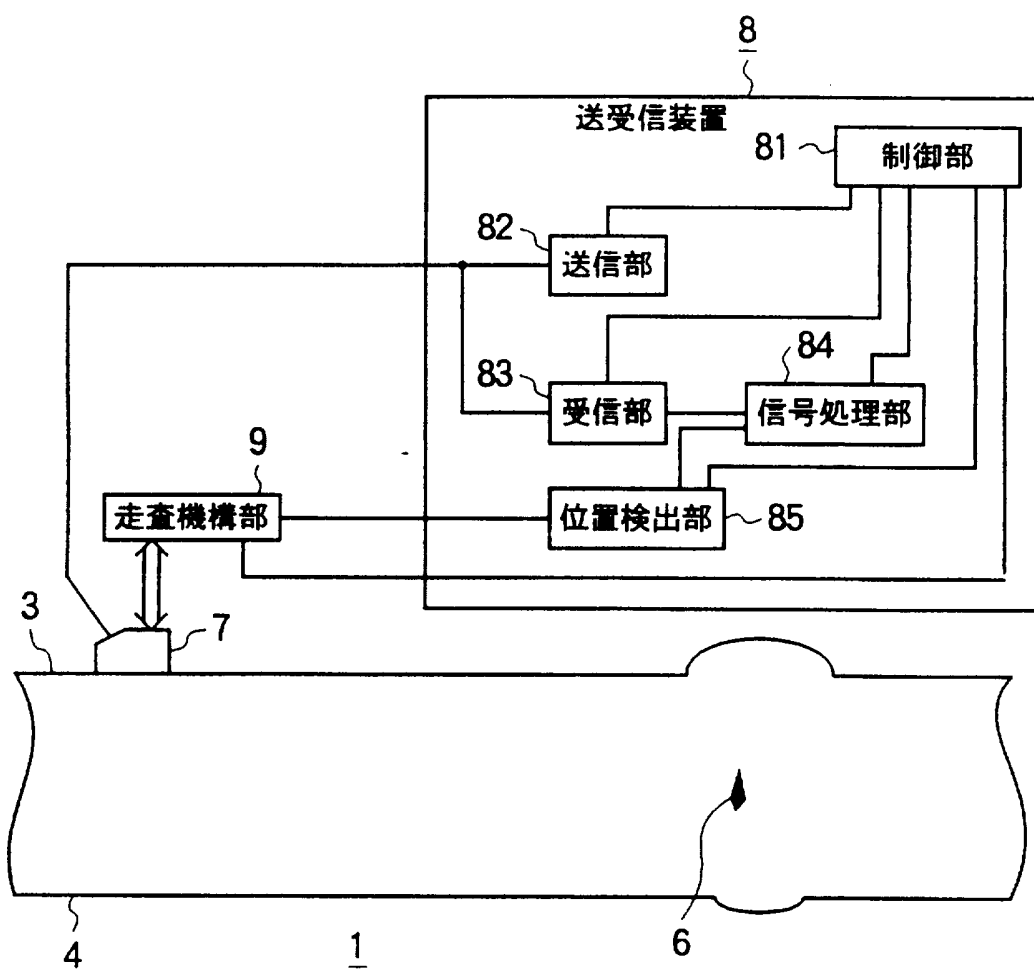


図 2

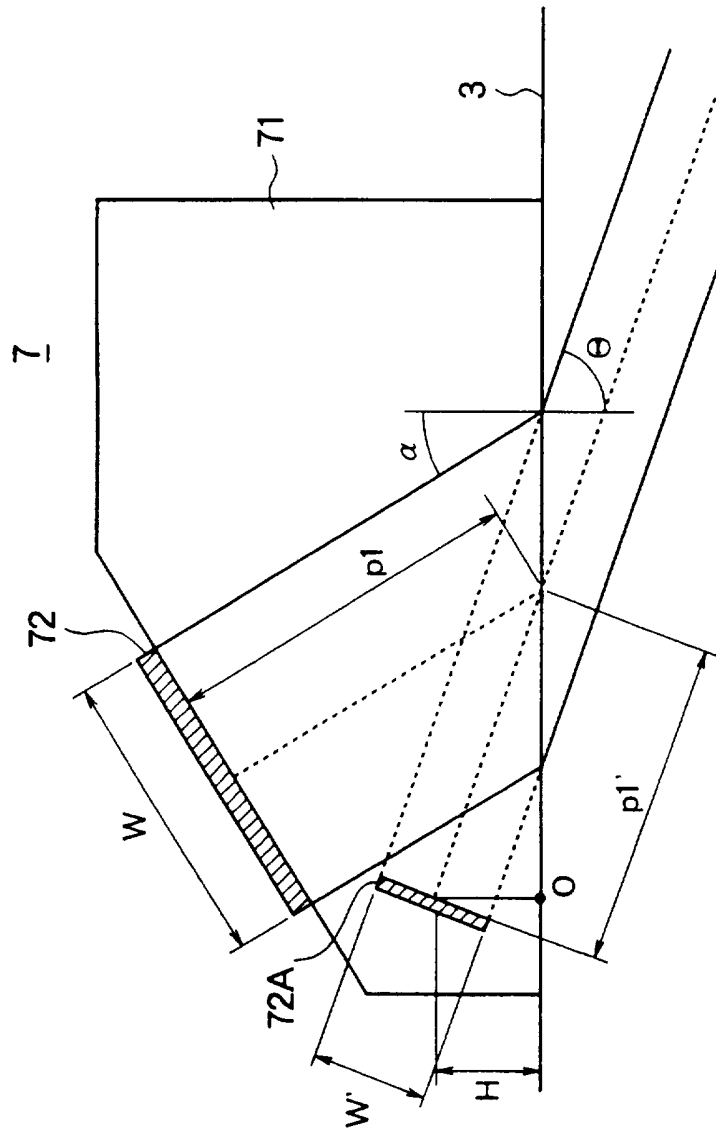


図 3

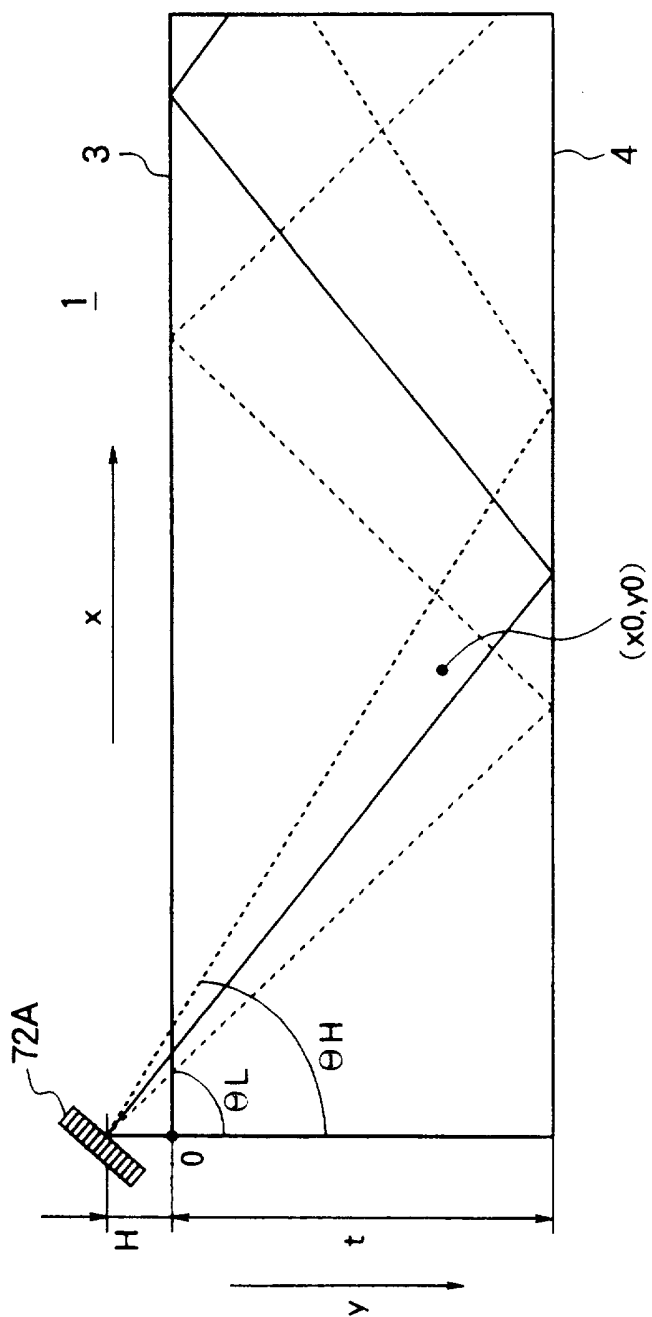


図 4

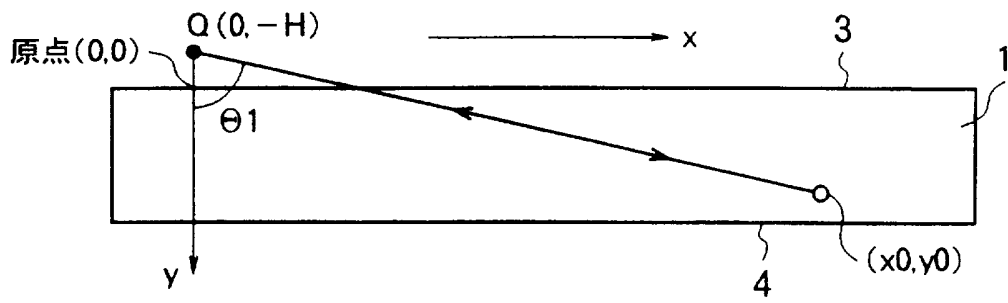


図 5

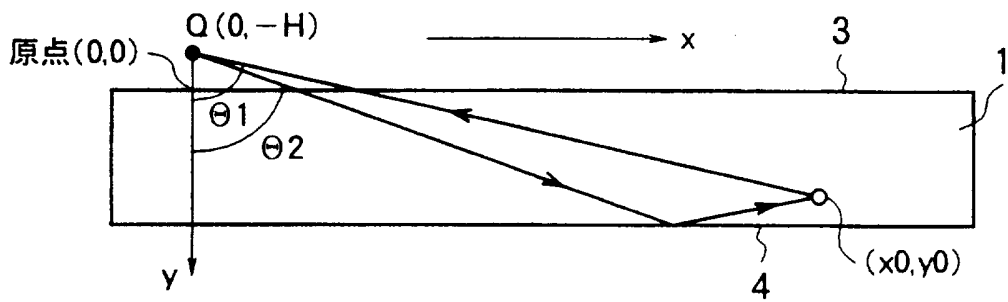


图 6

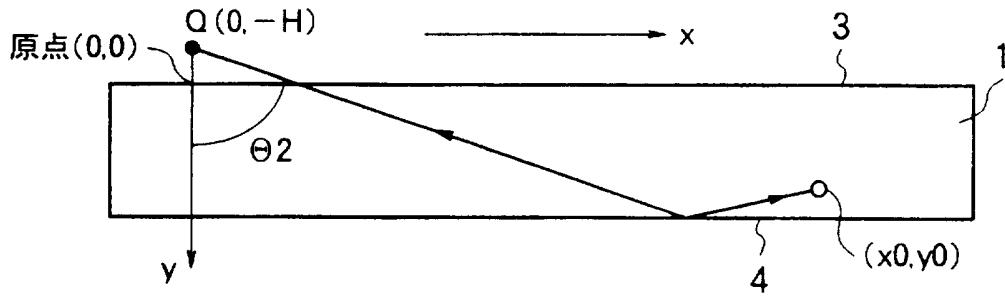


图 7

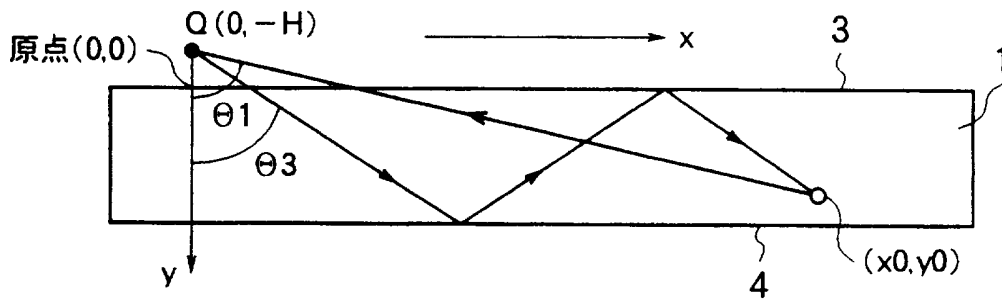


図 8

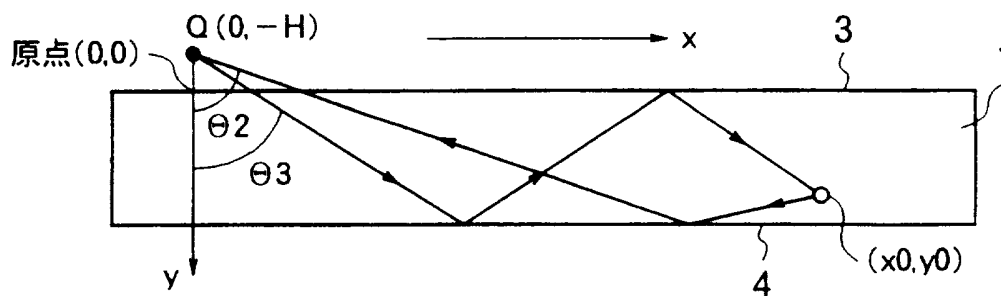


図 9

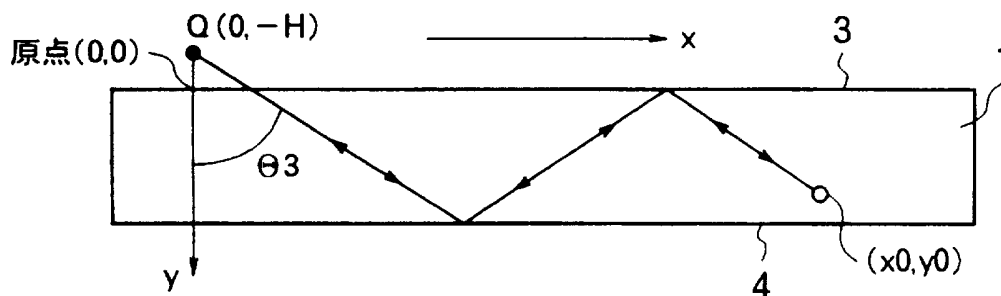


图 10

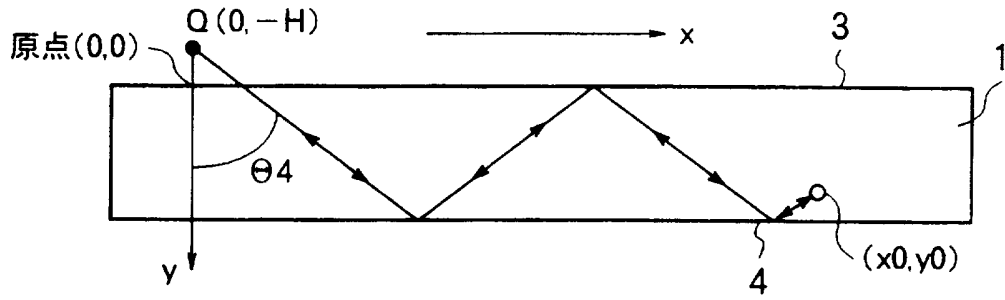


图 11

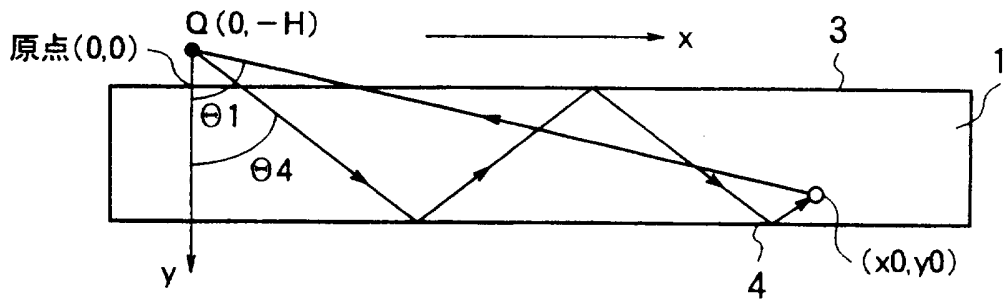


图 12

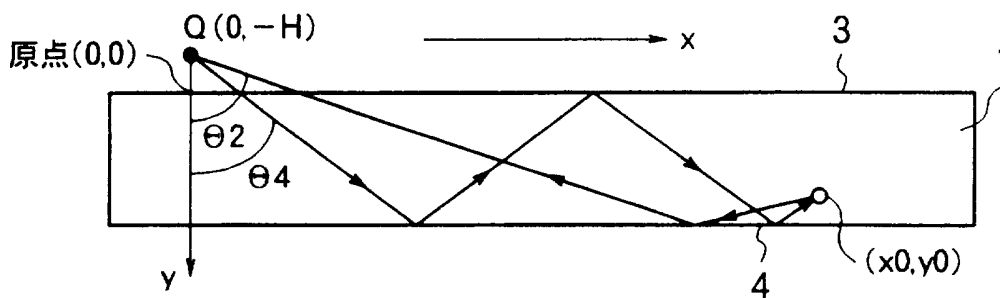


图 13

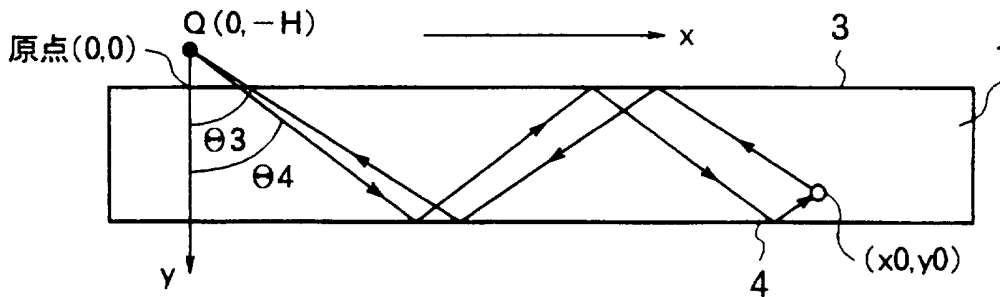


図 14

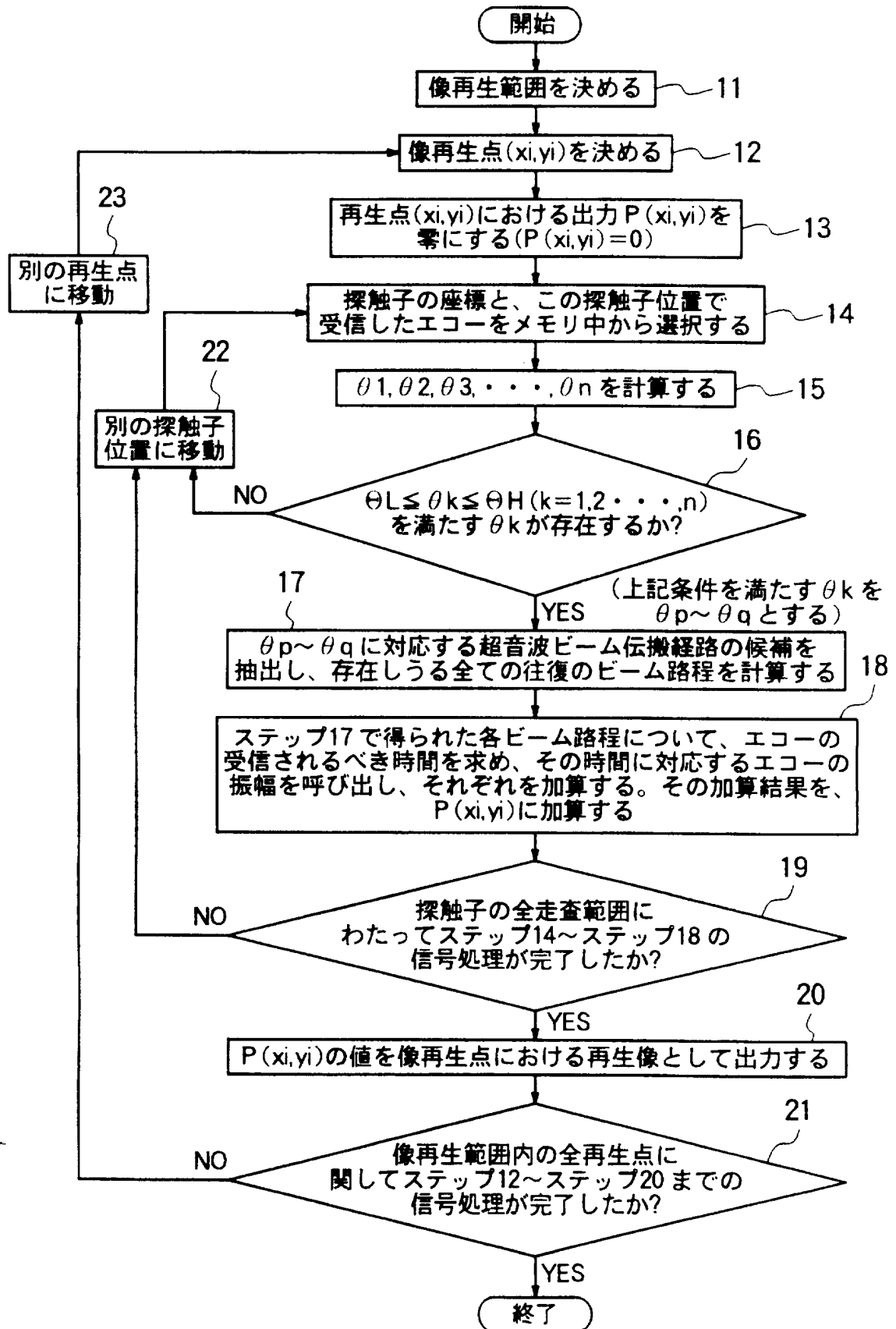


图 15

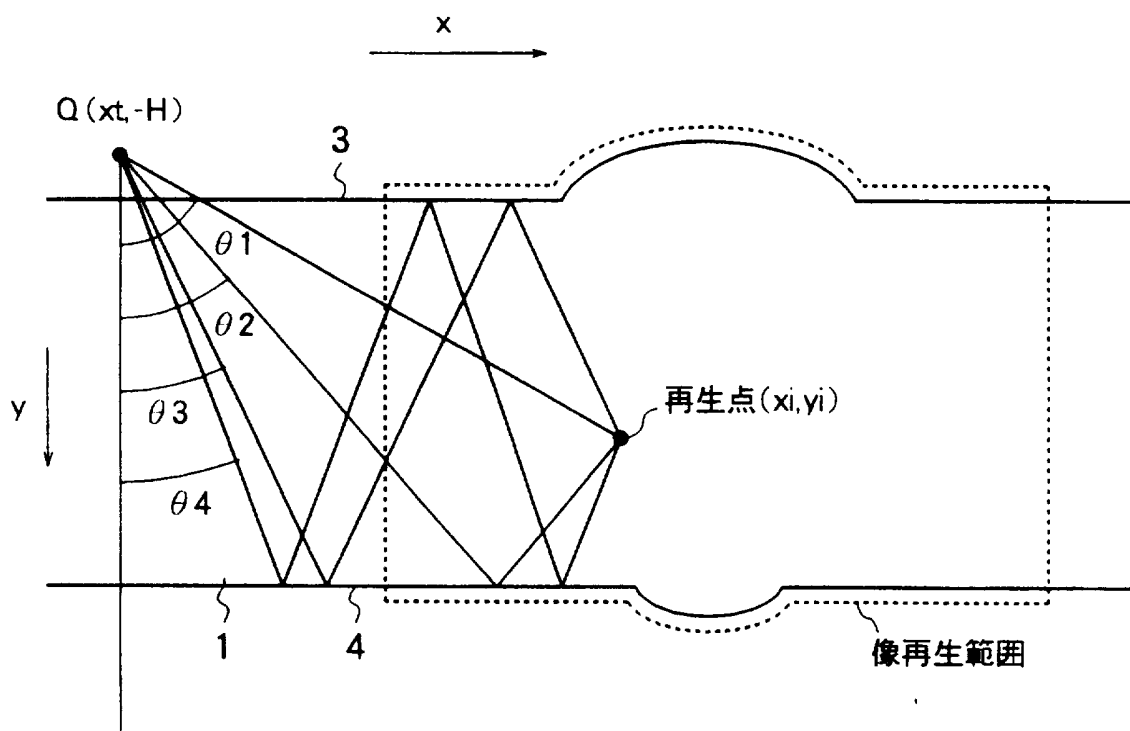


図 16

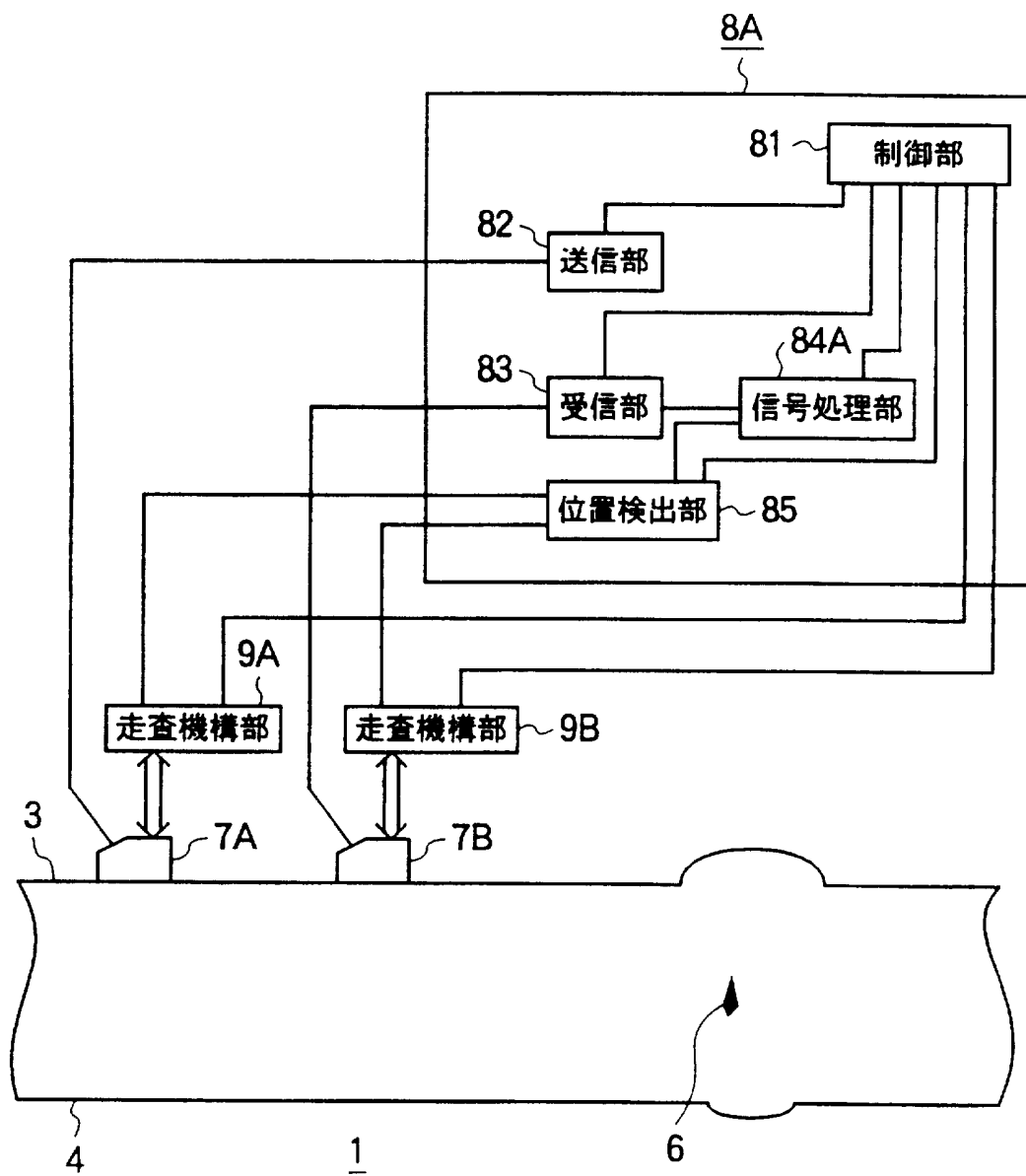


図 17

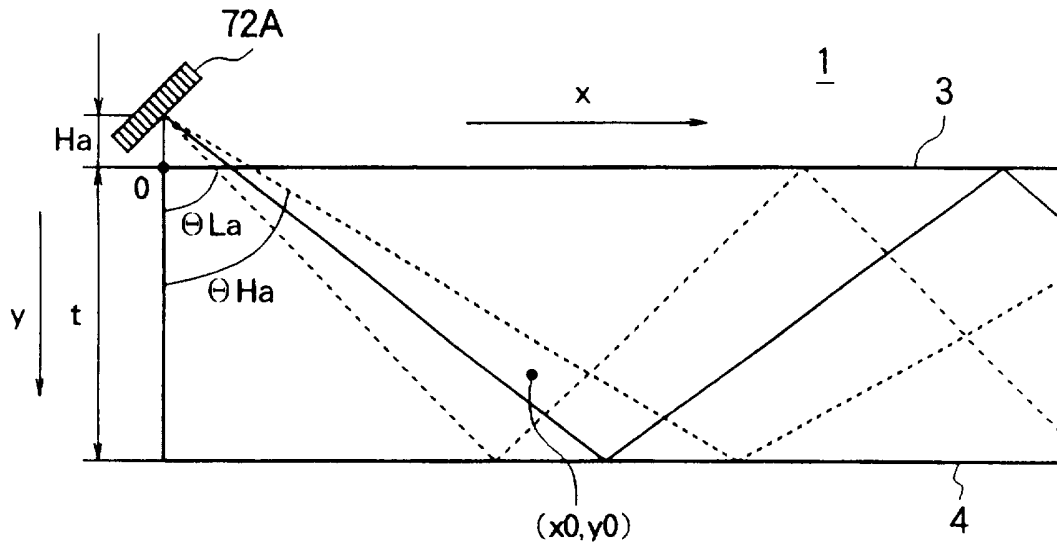


図 18

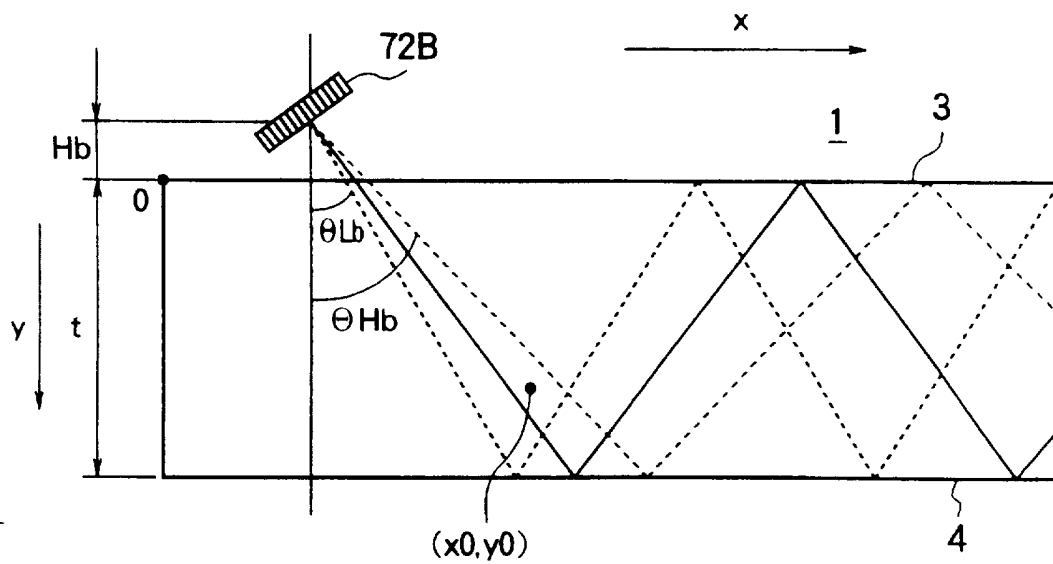


图 19

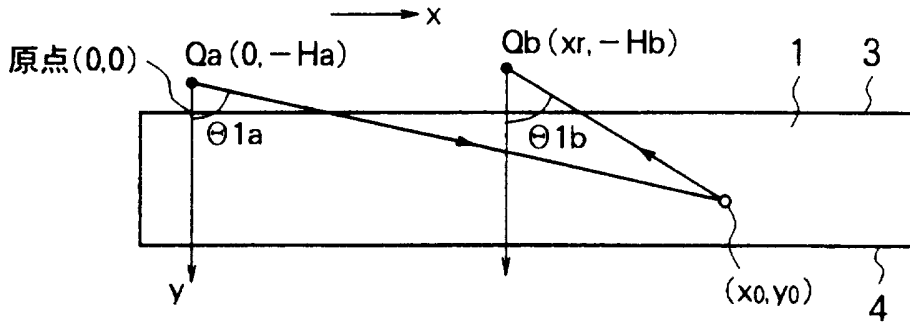


图 20

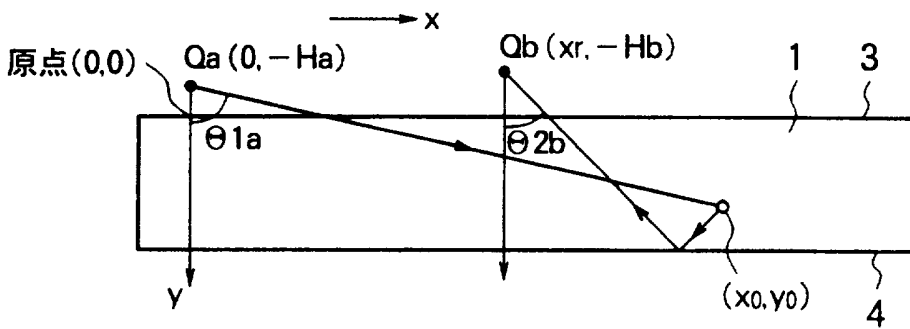


图 21

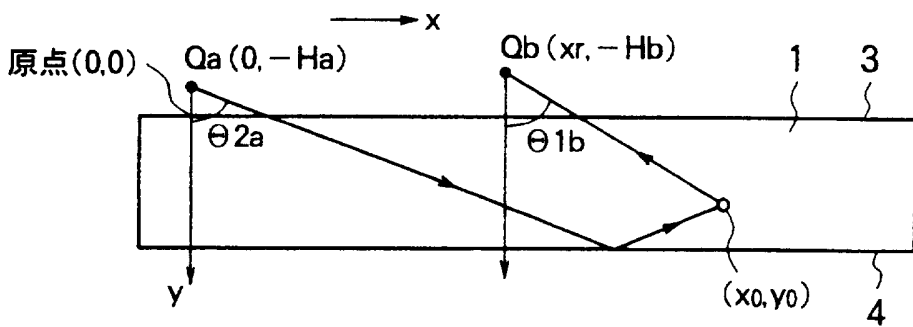


图 22

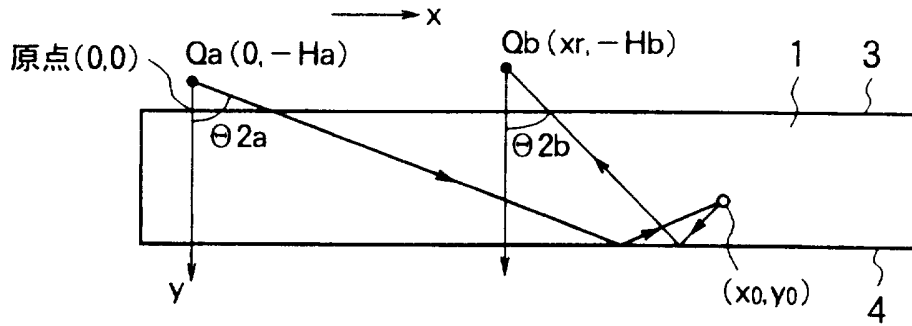


图 23

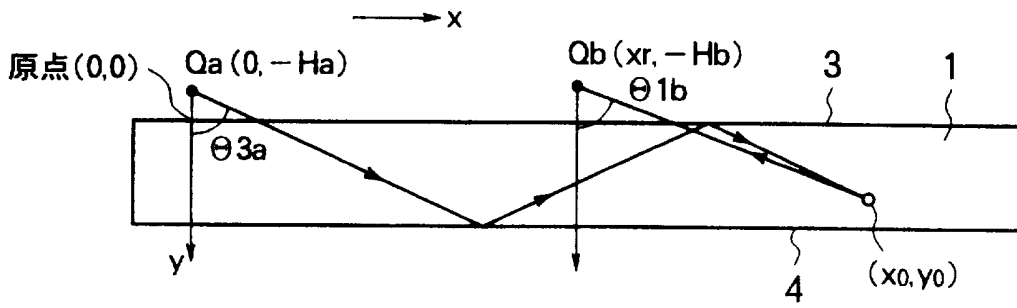


图 24

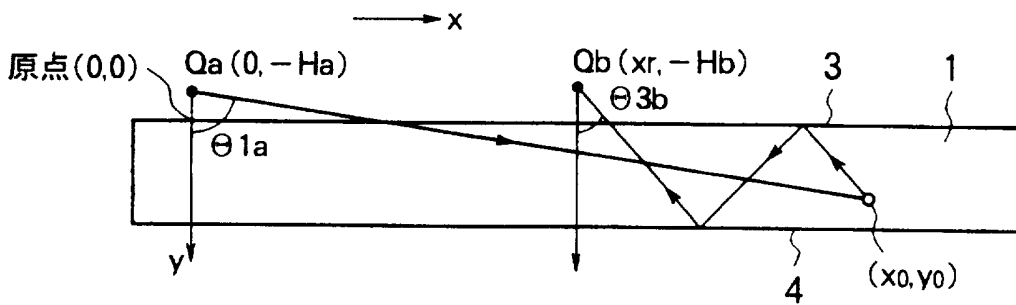


图 25

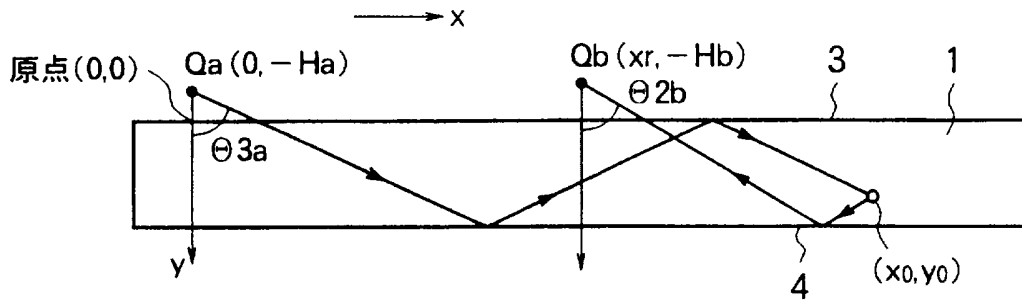


图 26

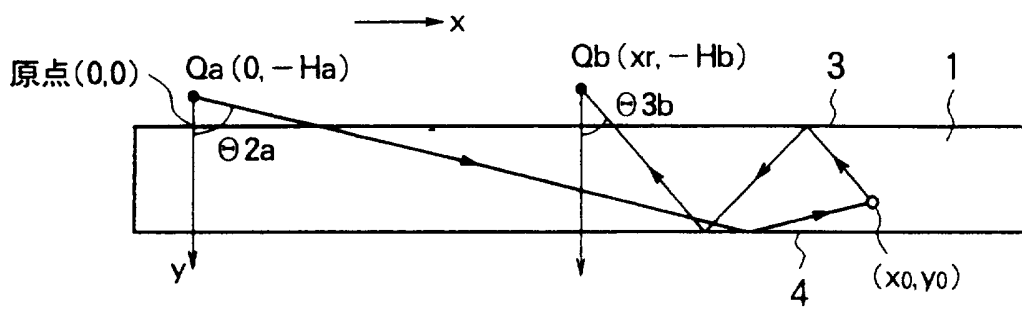


图 27

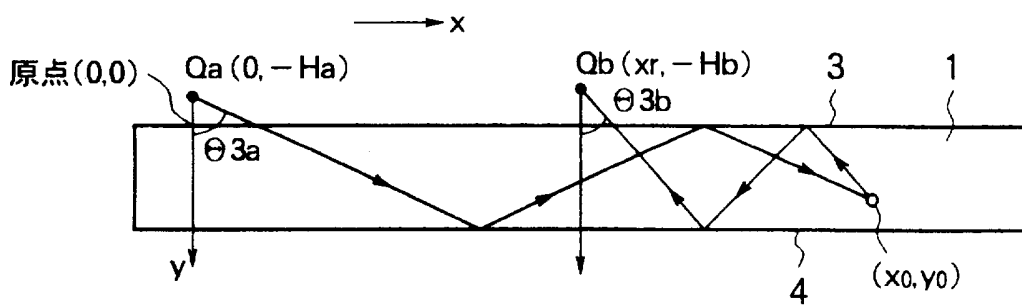


図 28

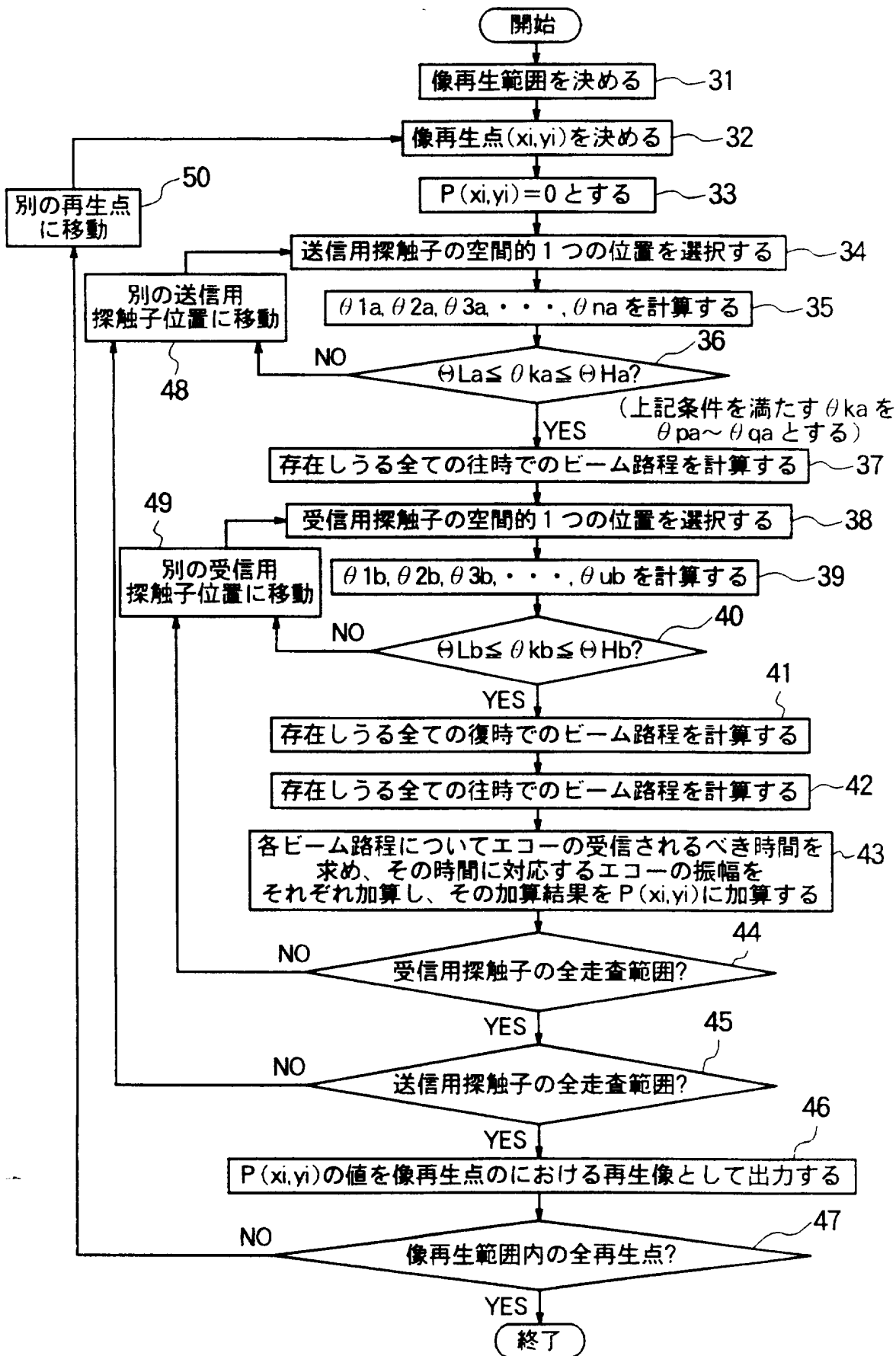


図 29

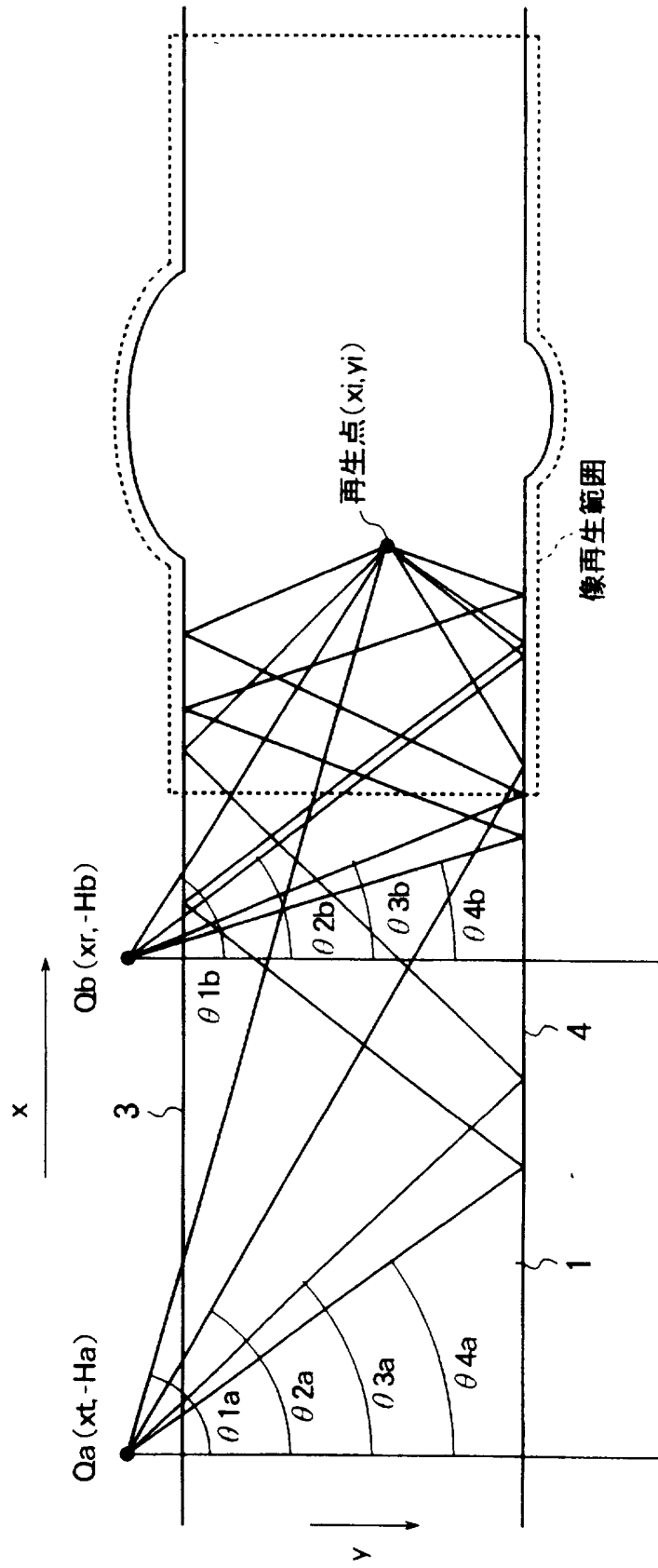


図 30

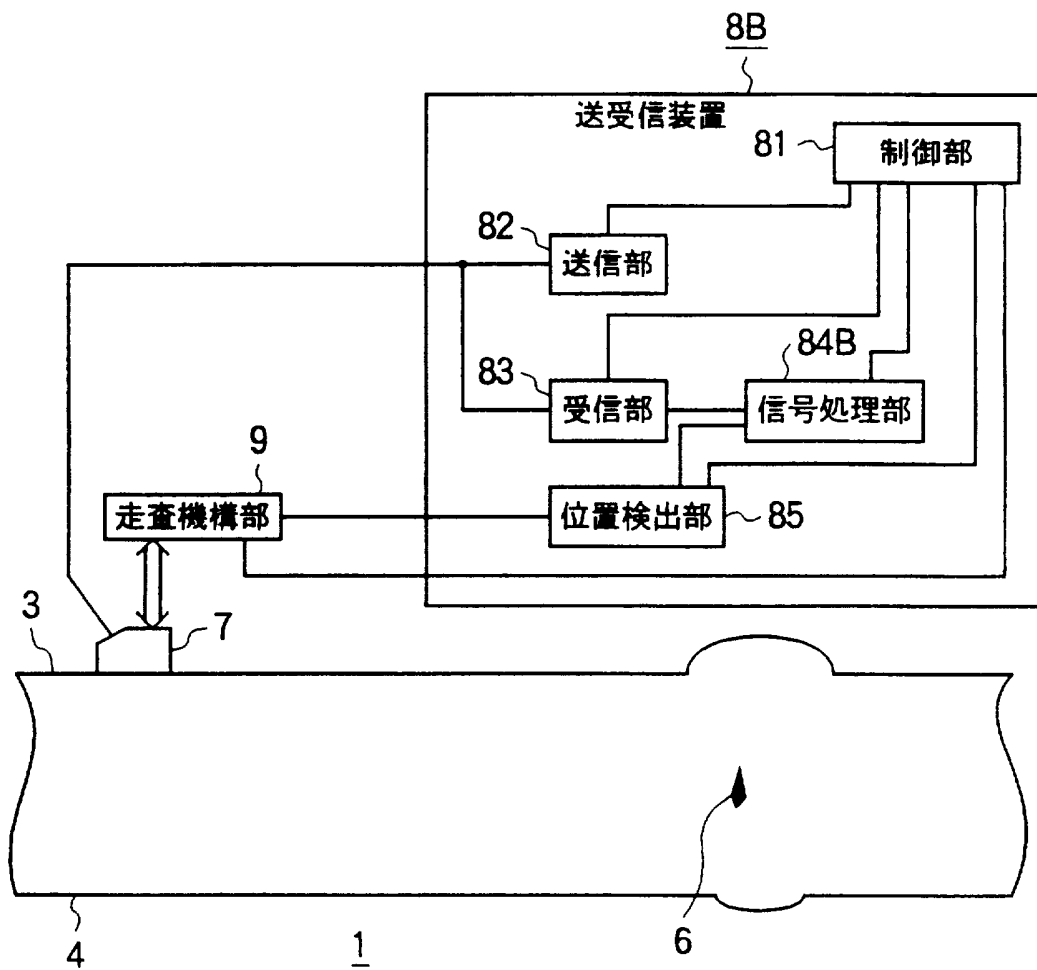


図 31

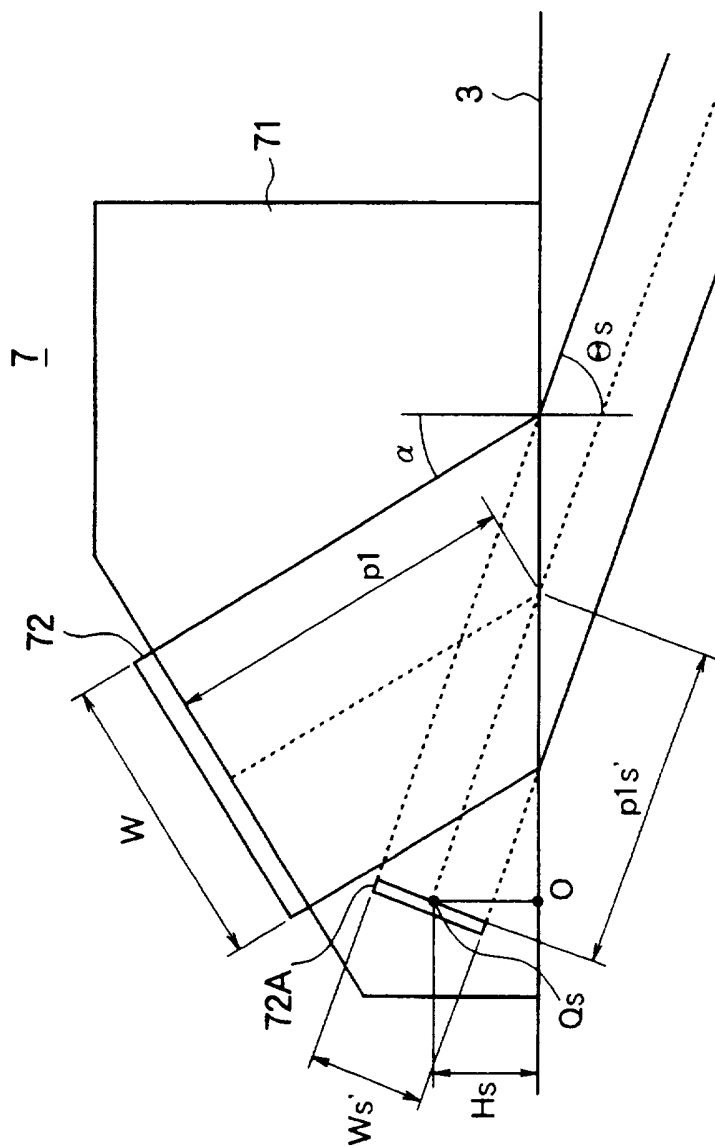


図 32

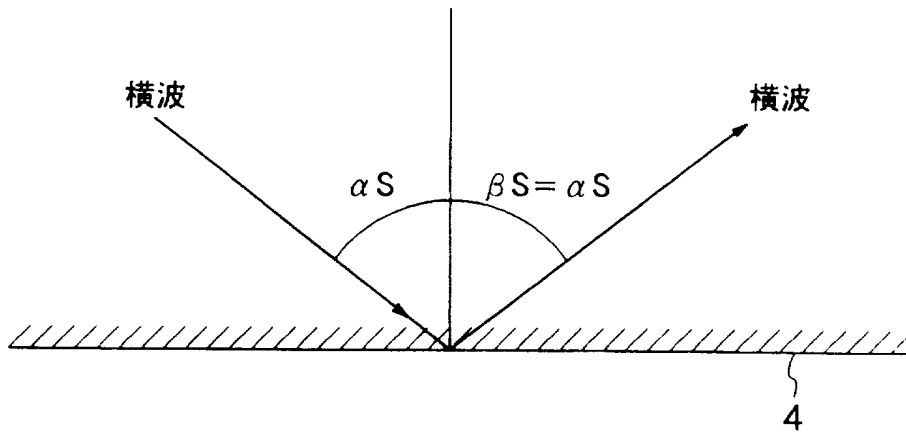


図 33

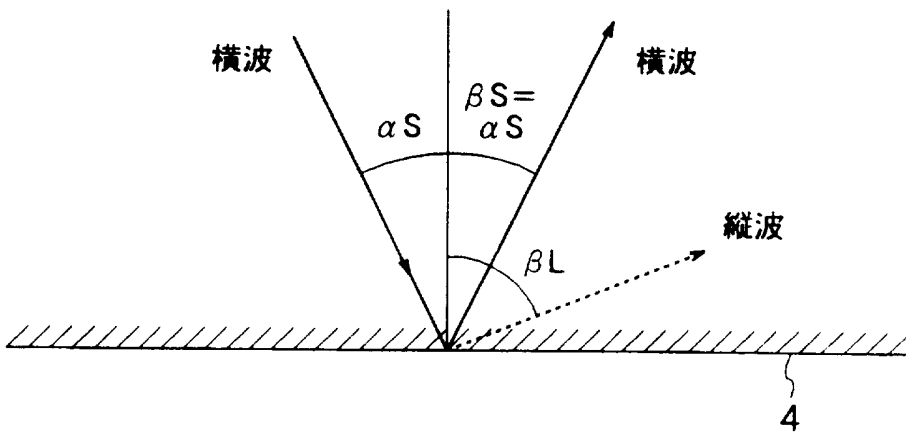


図 34

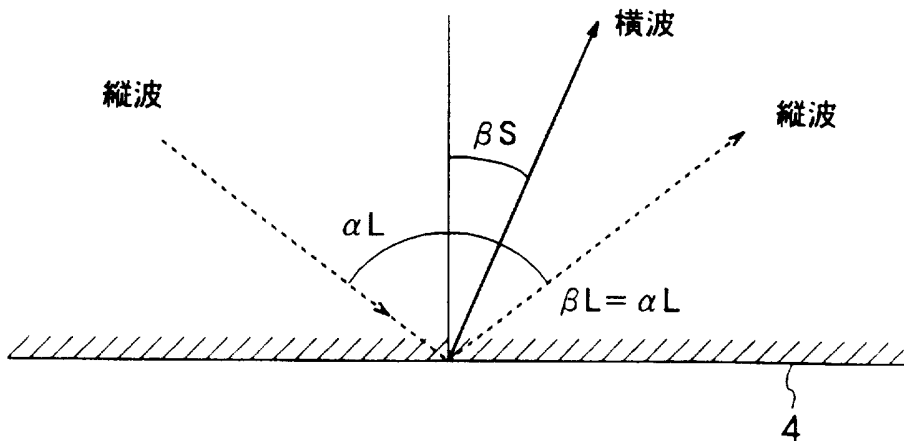


図 35

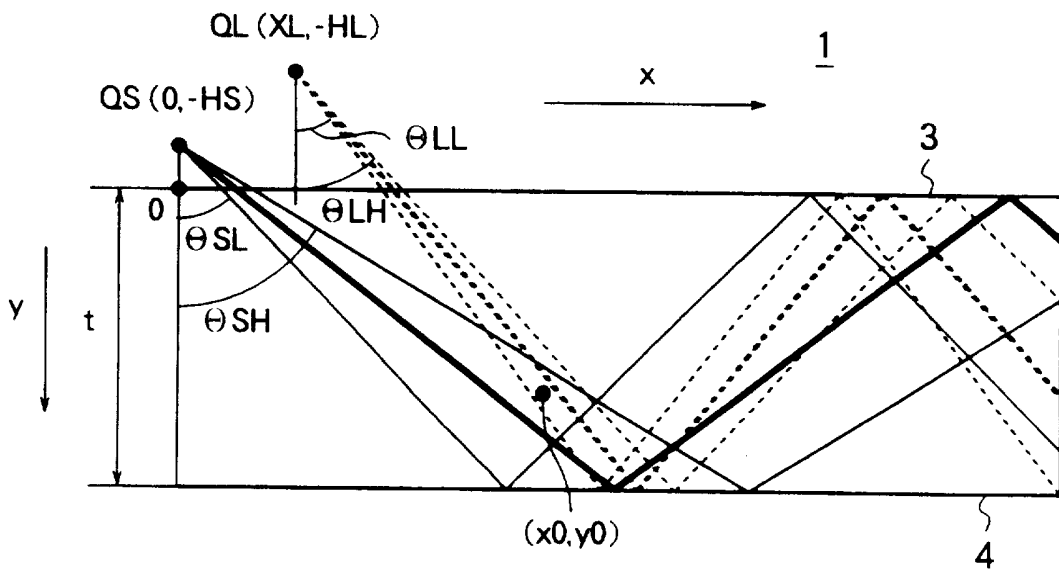


図 36

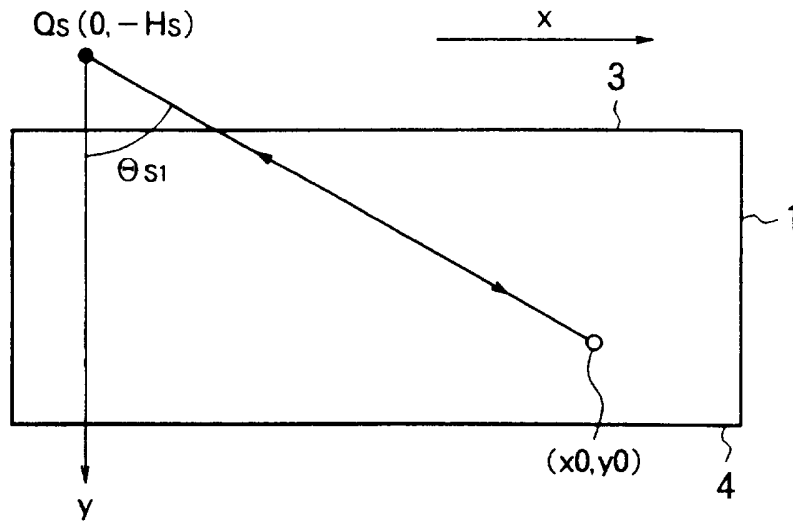


図 37

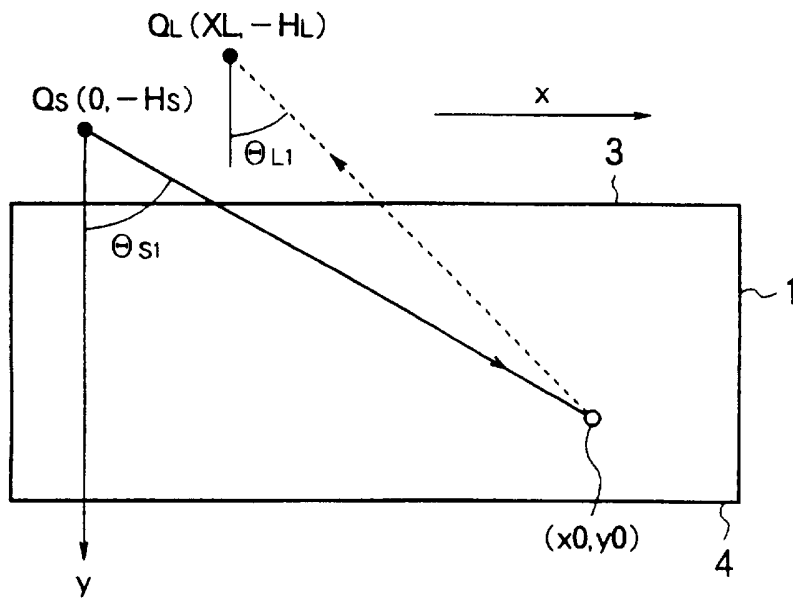


図 38

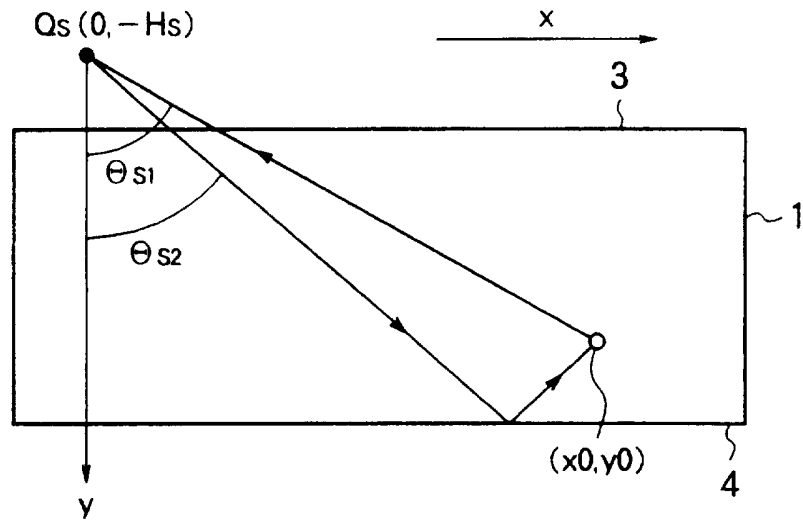


図 39

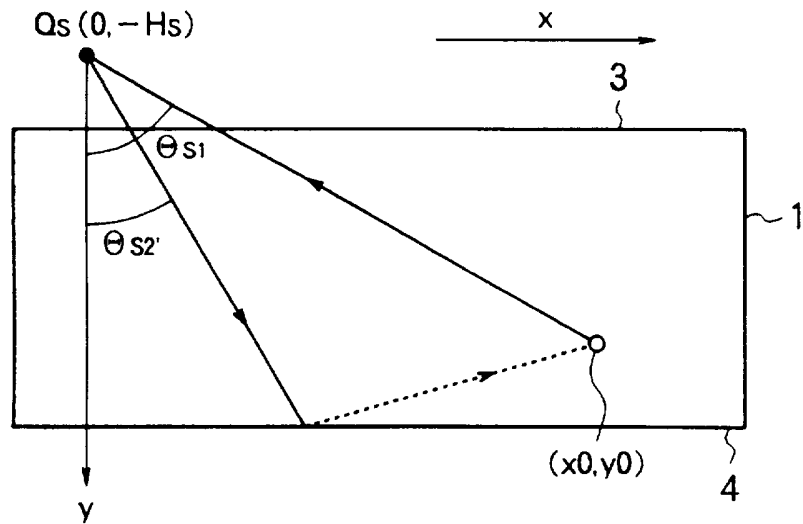


図 40

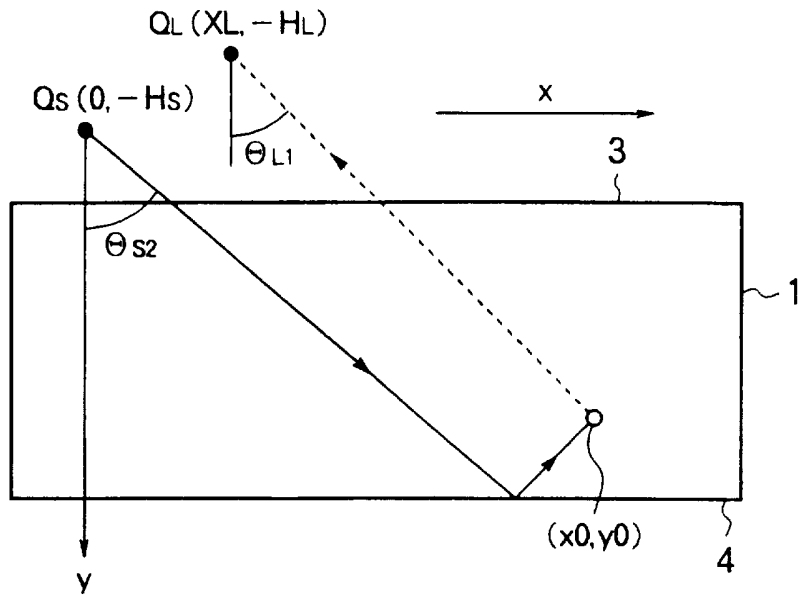


図 41

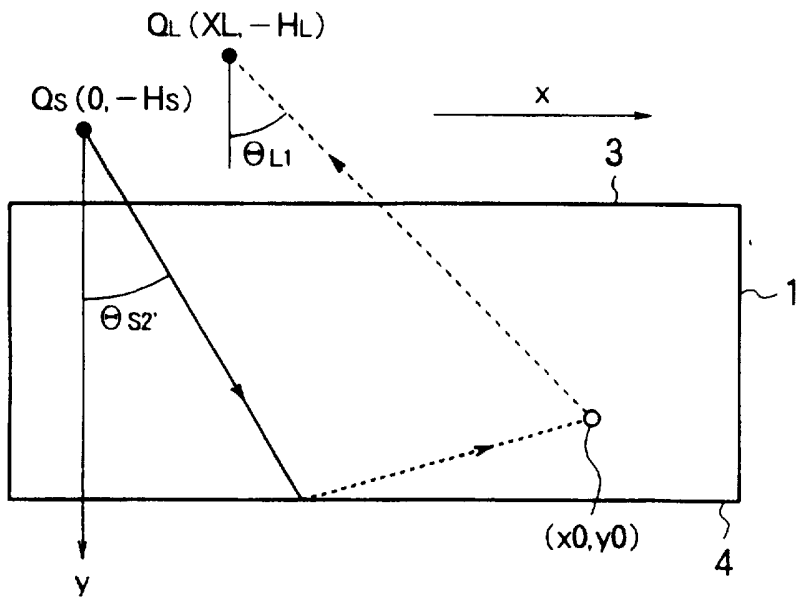


図 42

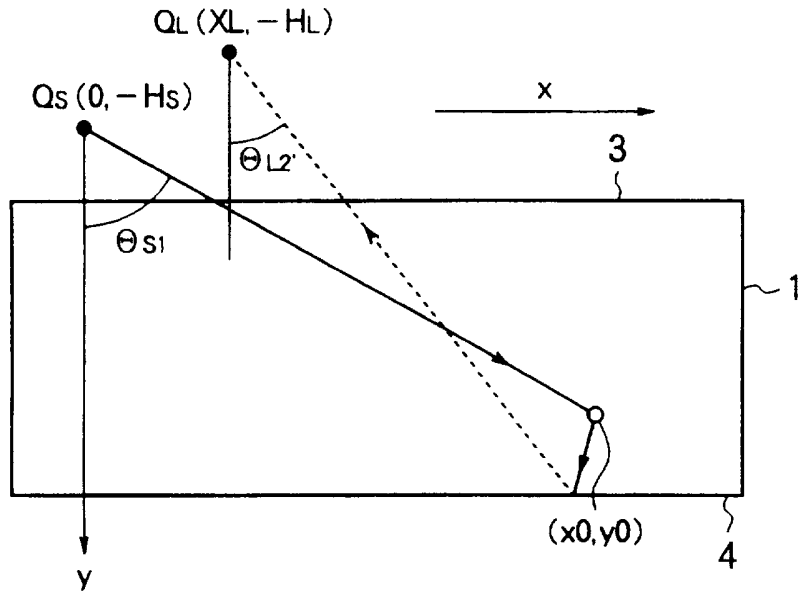


図 43

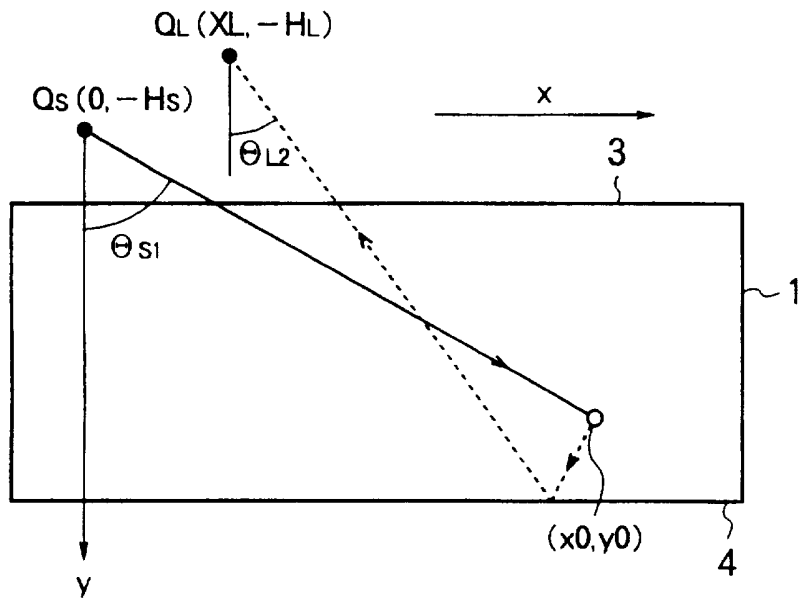


図 44

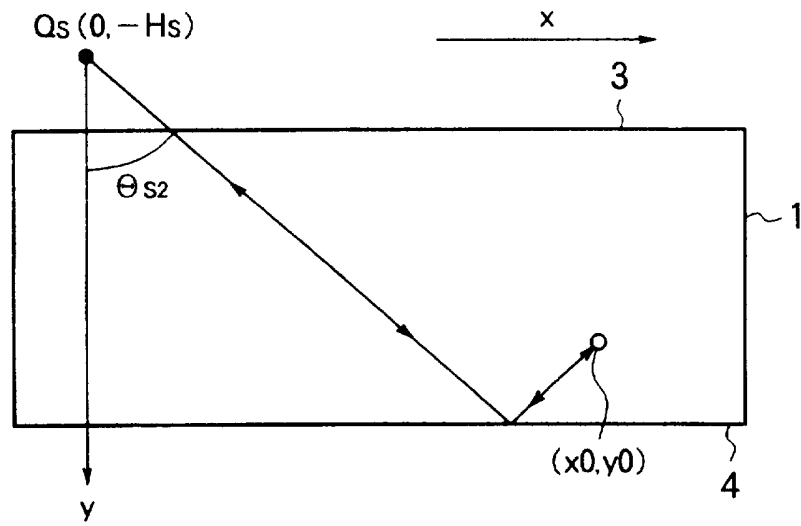


図 45

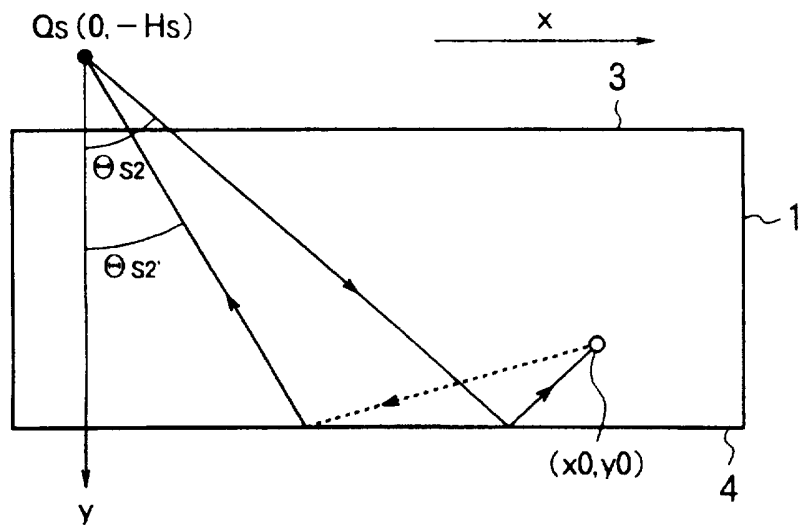


図 46

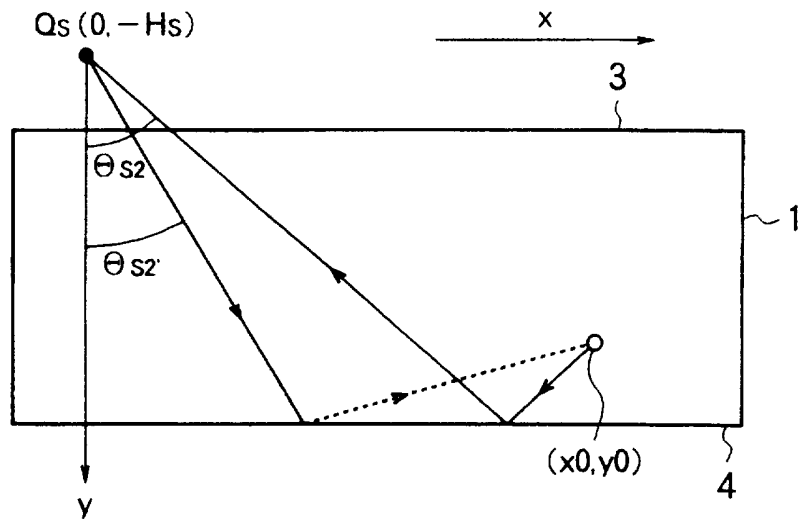


図 47

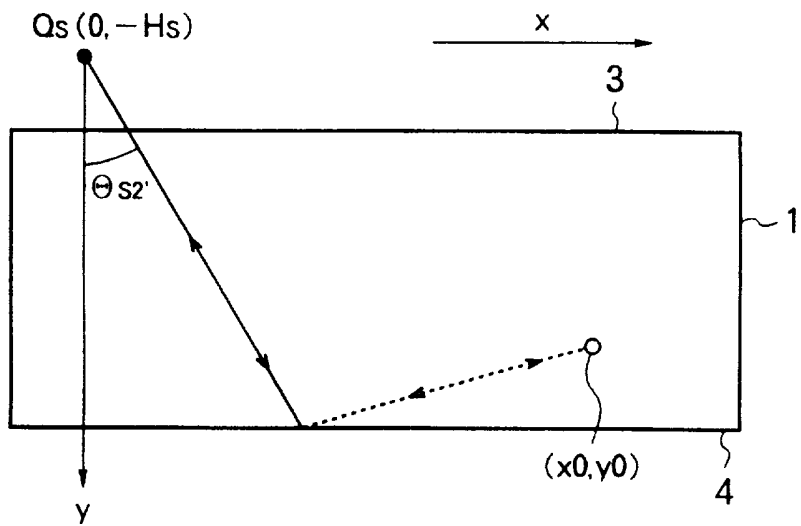


図 48

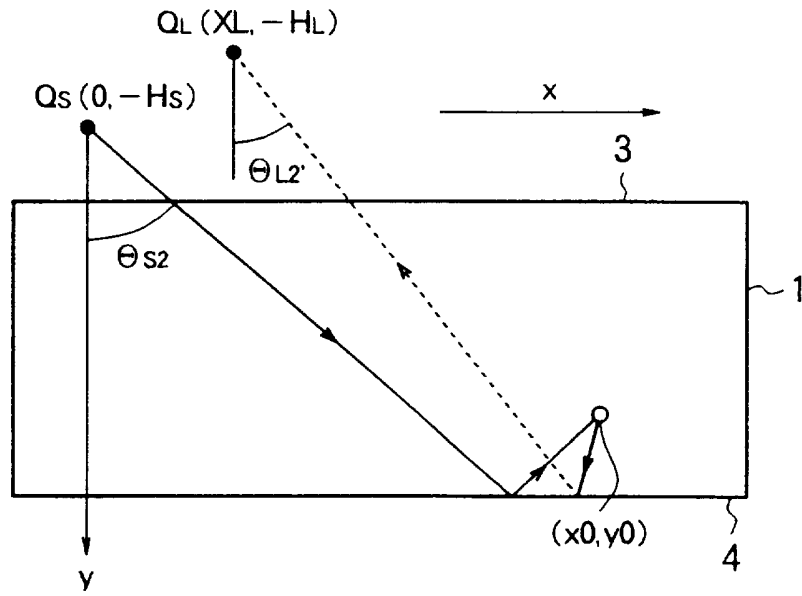


図 49

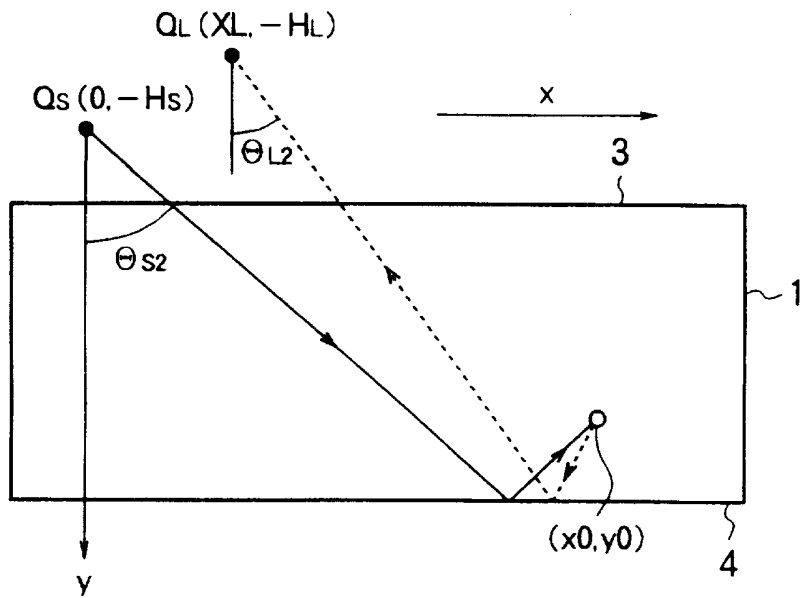


図 50

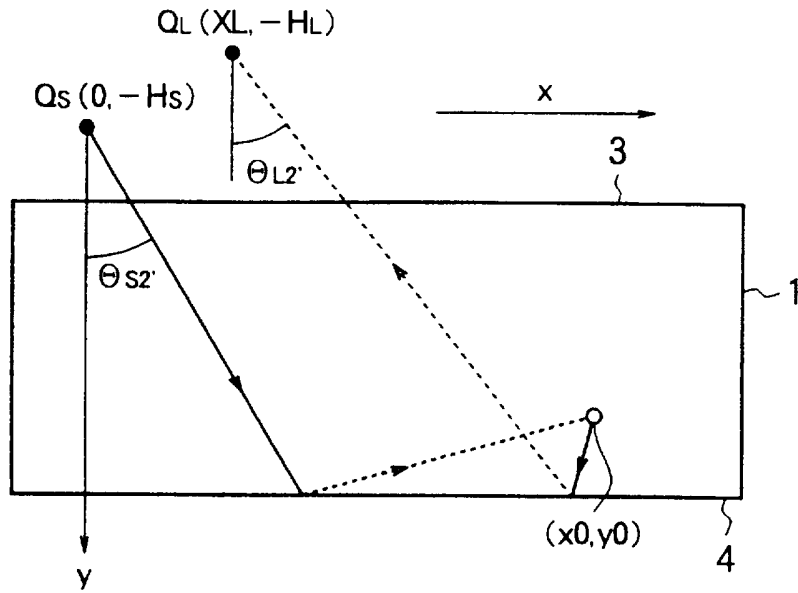


図 51

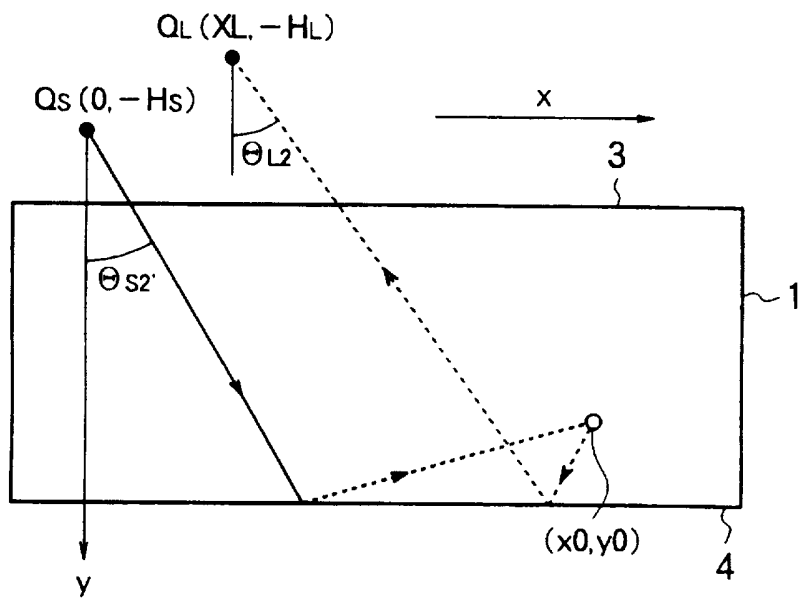


図 52

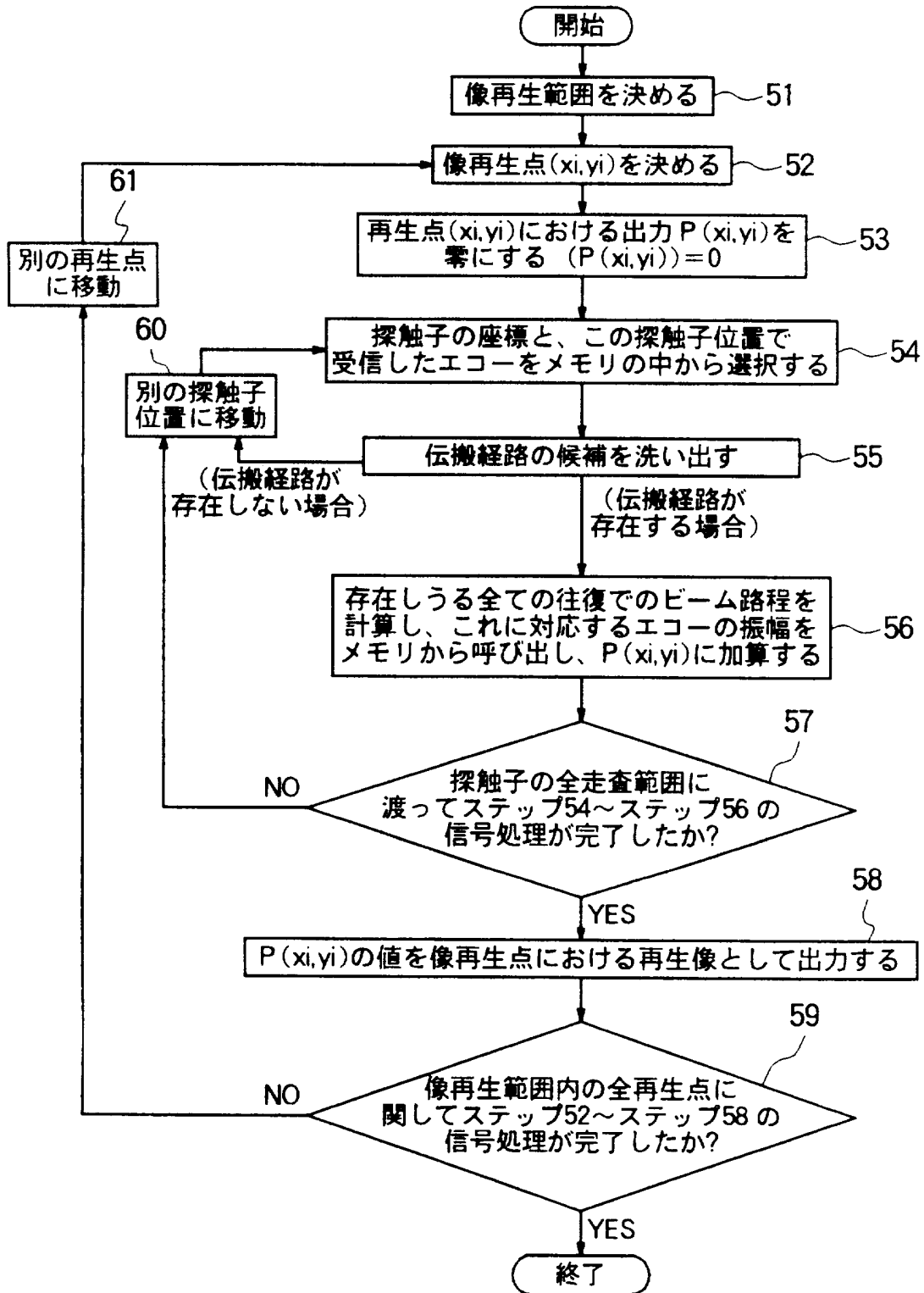


図 53

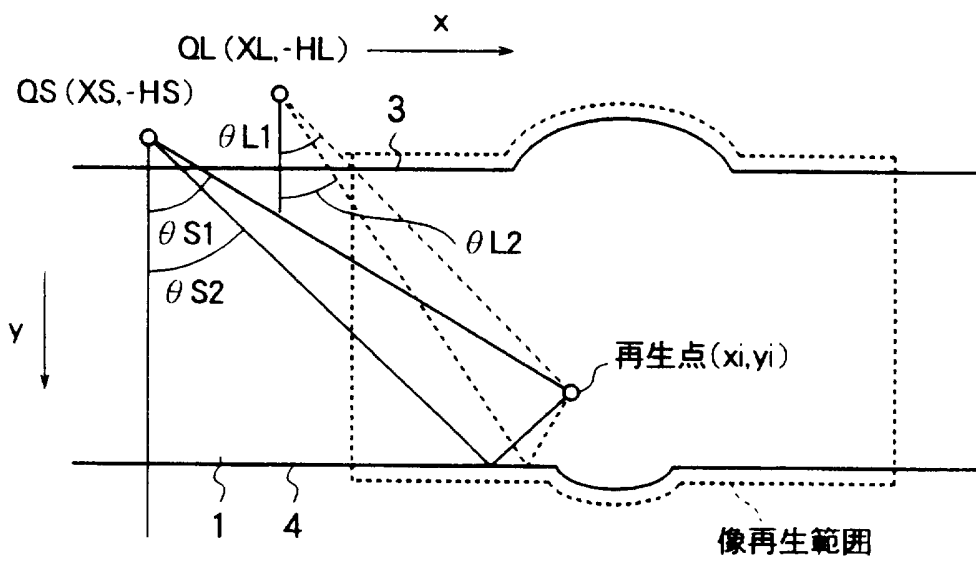


図 54

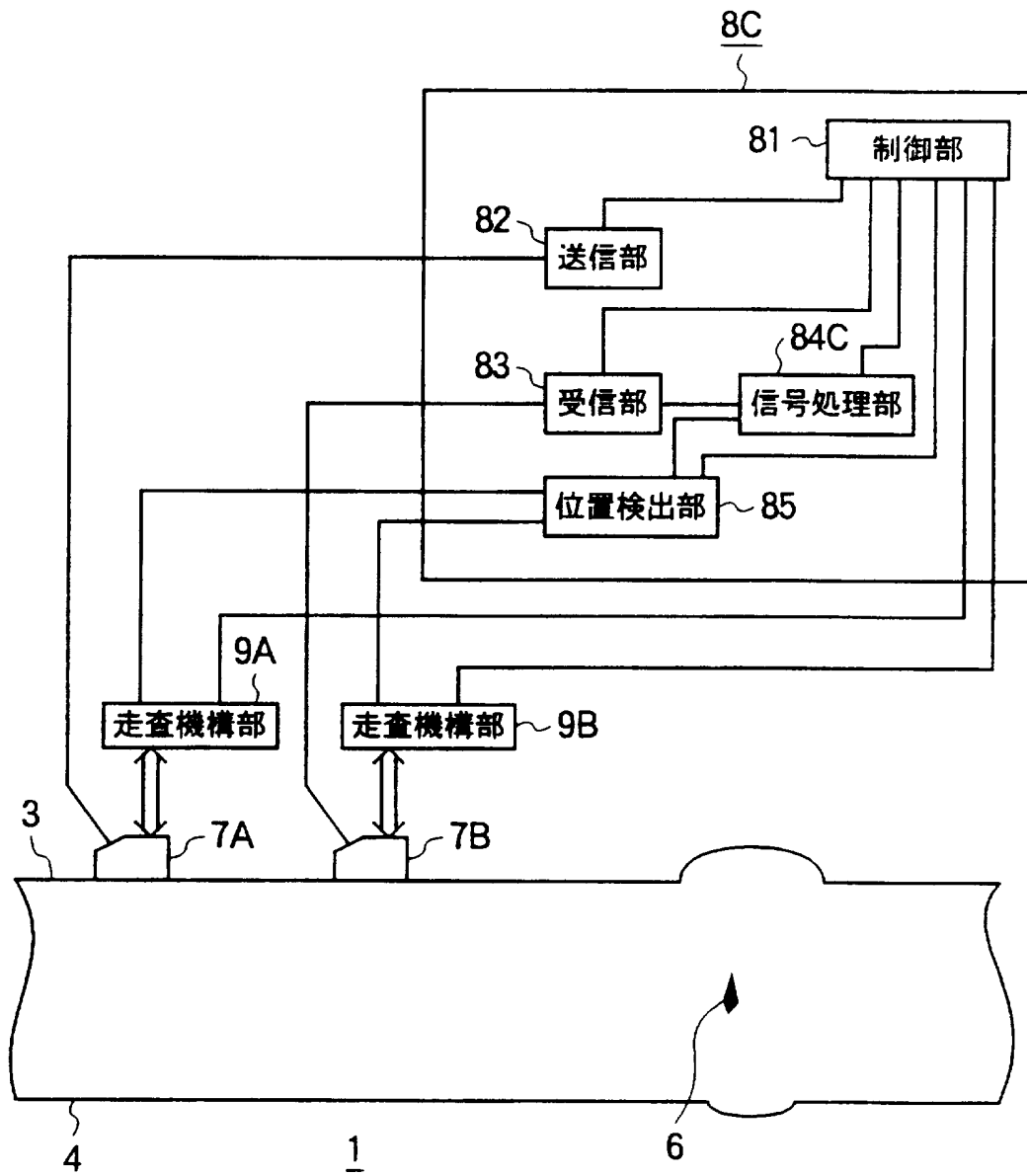


图 55

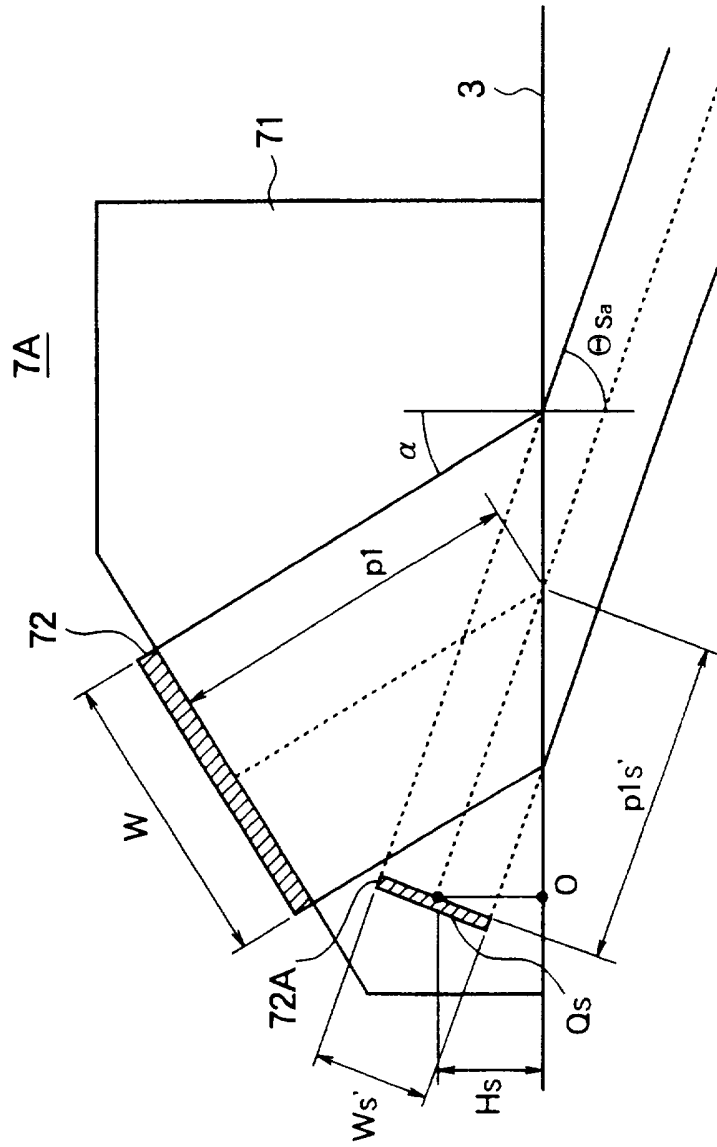


図 56

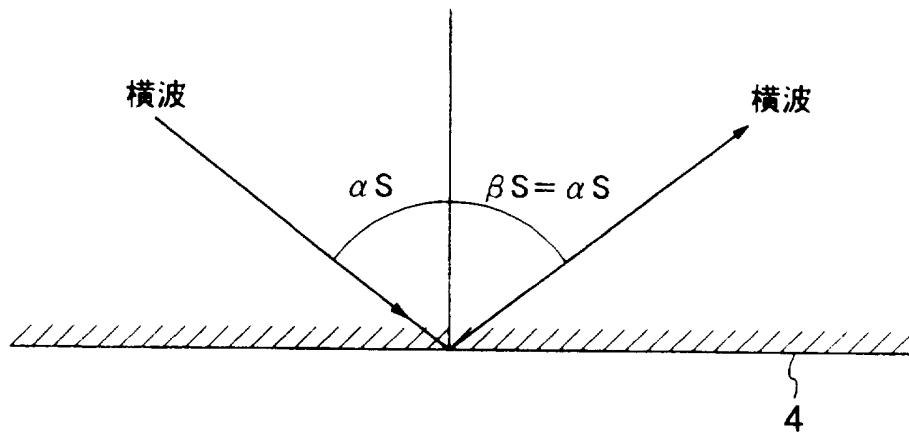


図 57

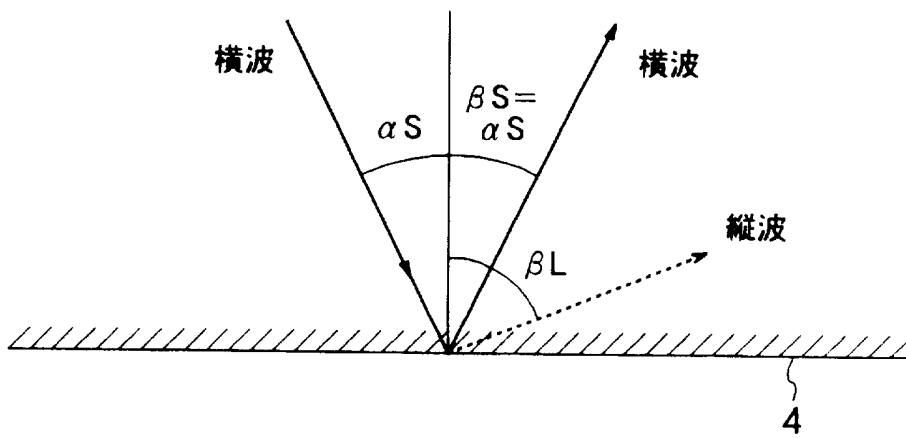


図 58

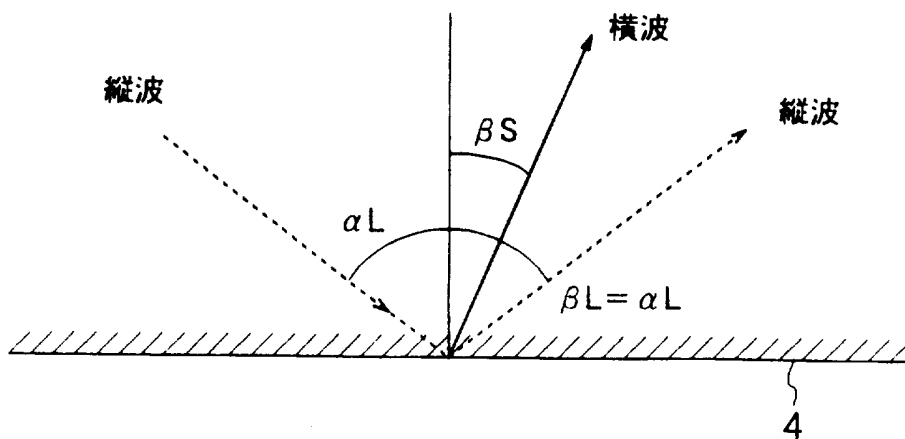


図 59

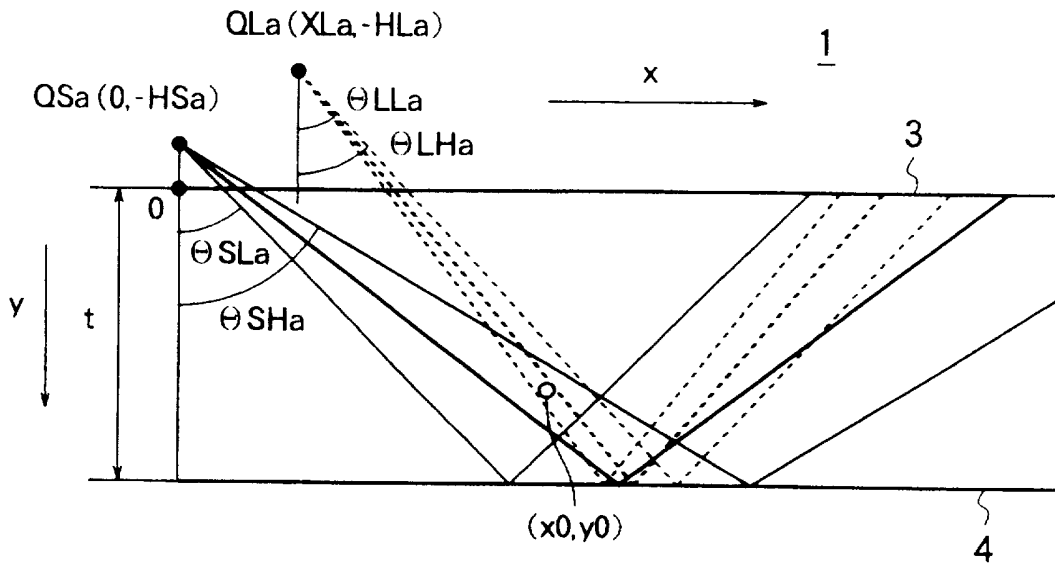


図 60

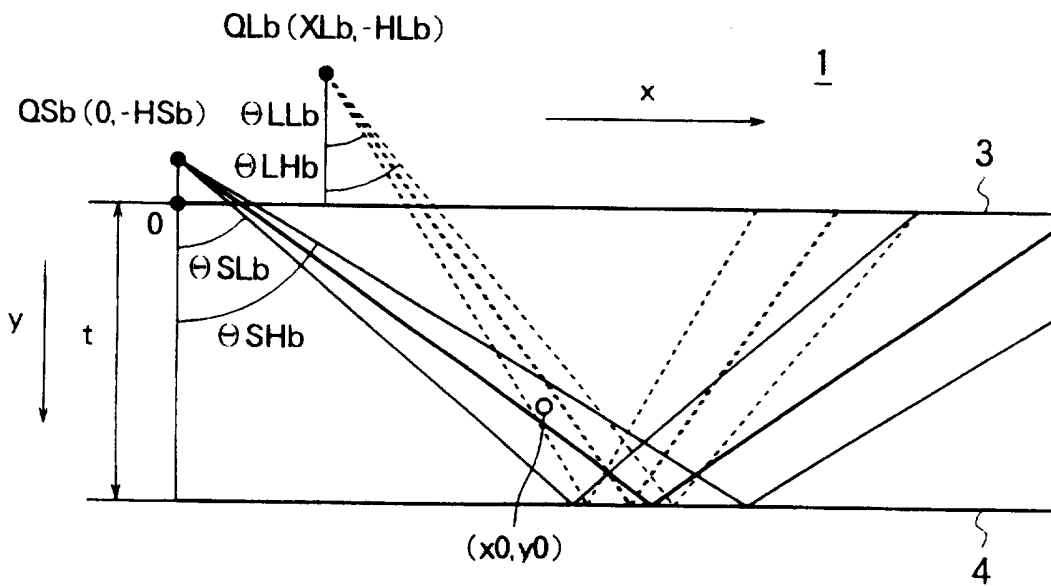


図 61

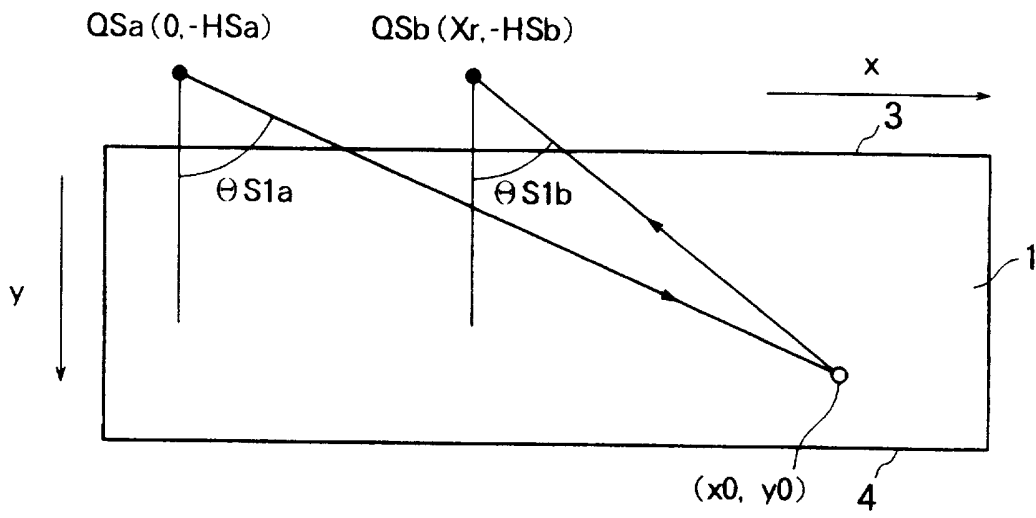
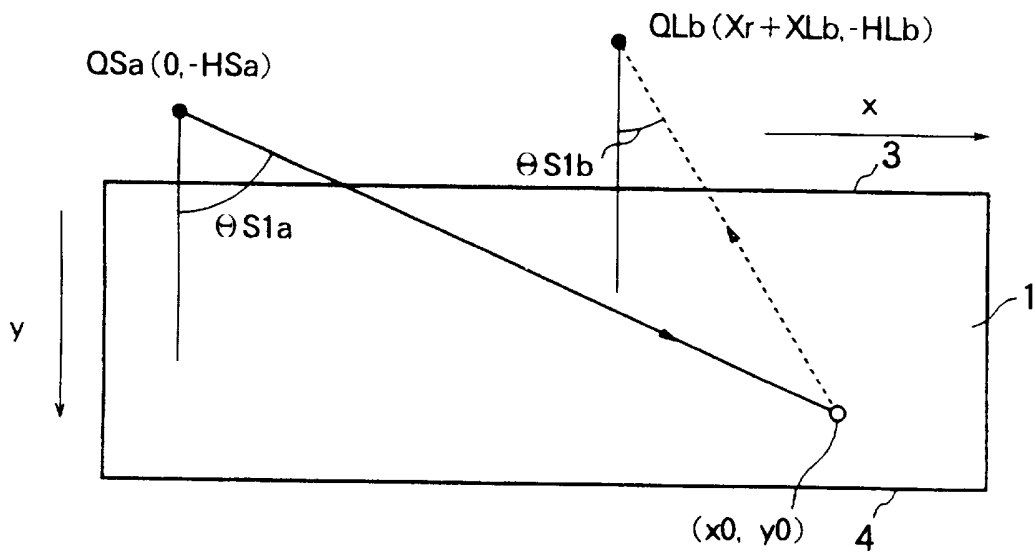
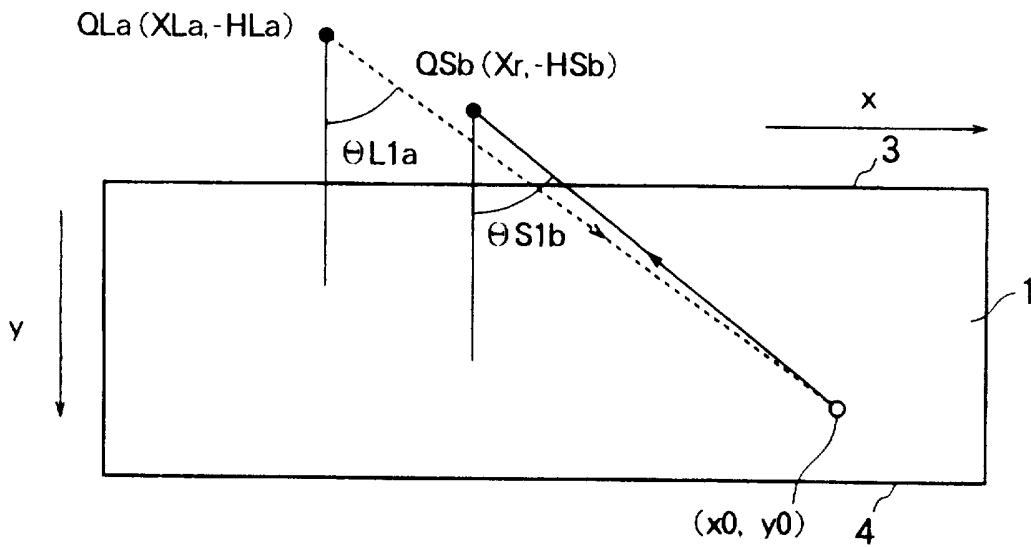


図 62



63



64

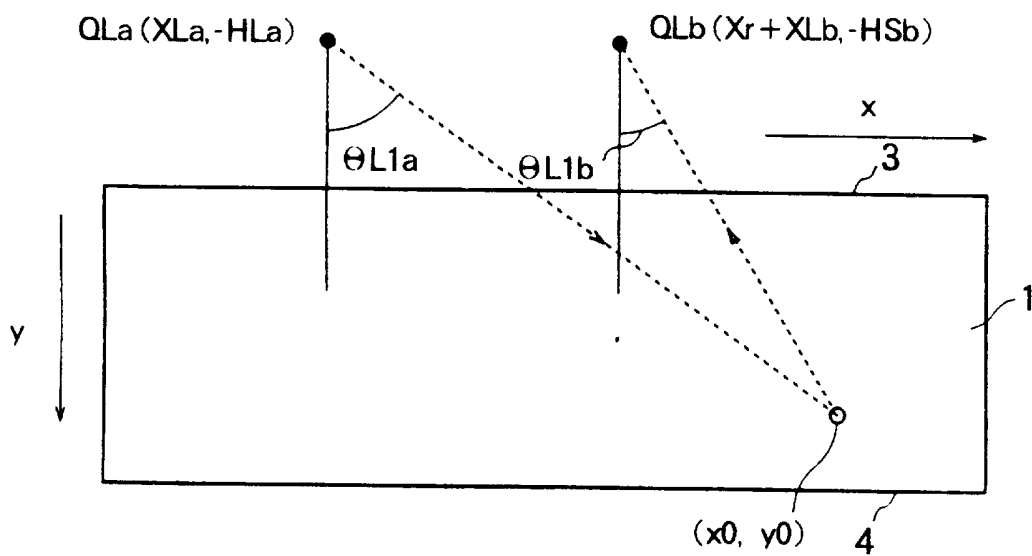


図 65

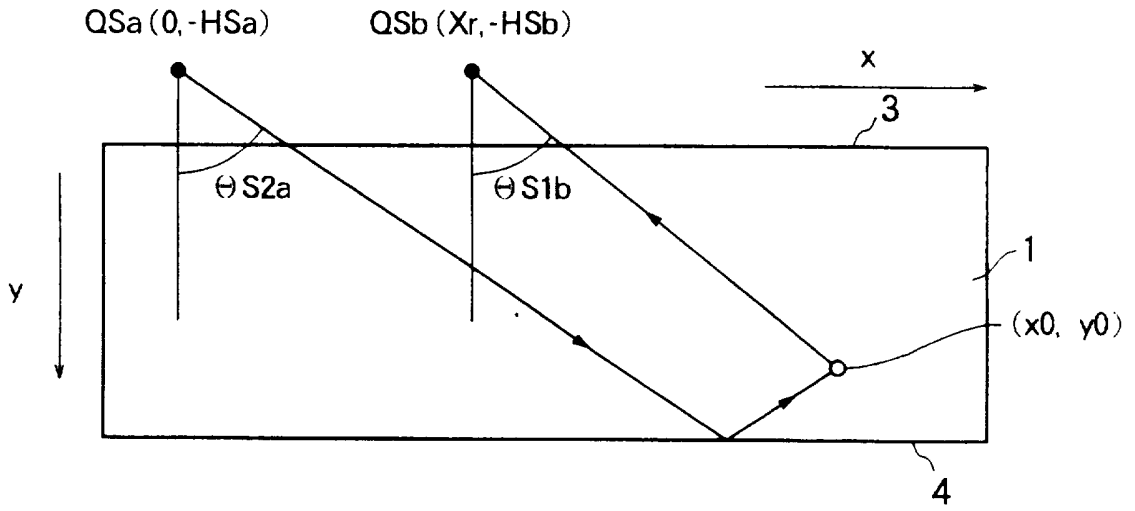


図 66

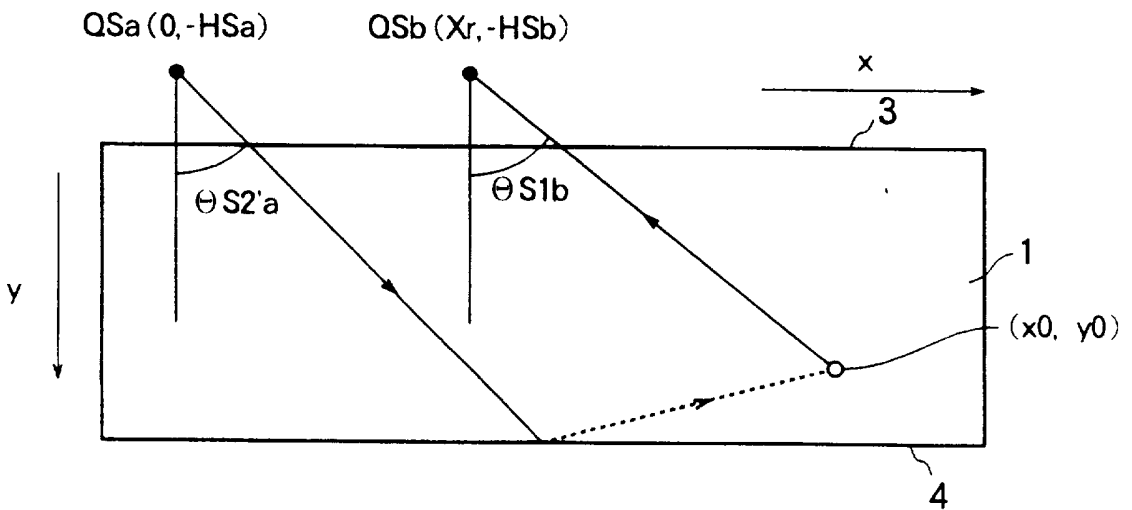


図 67

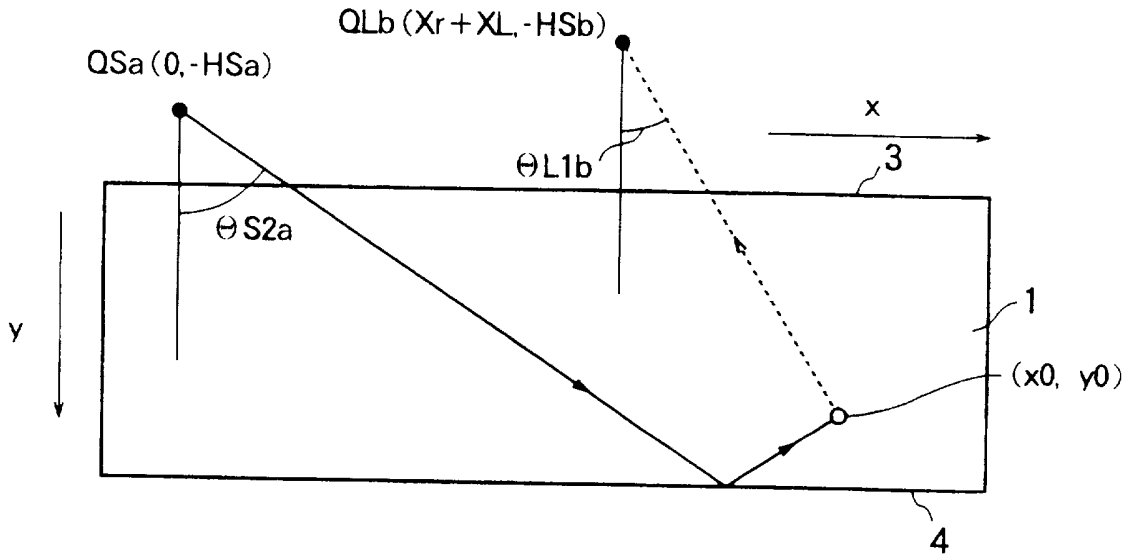


図 68

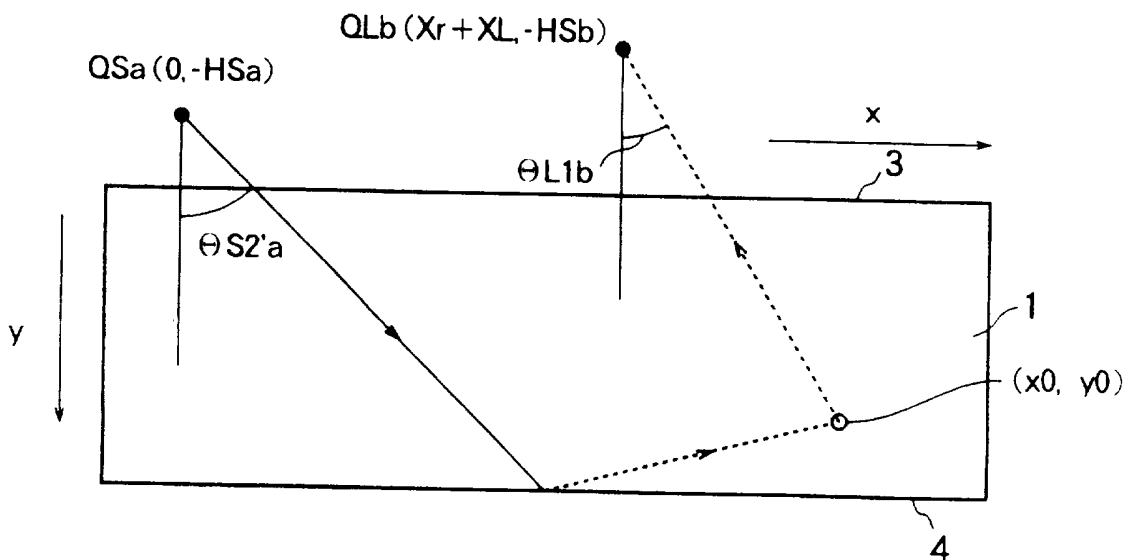


図 69

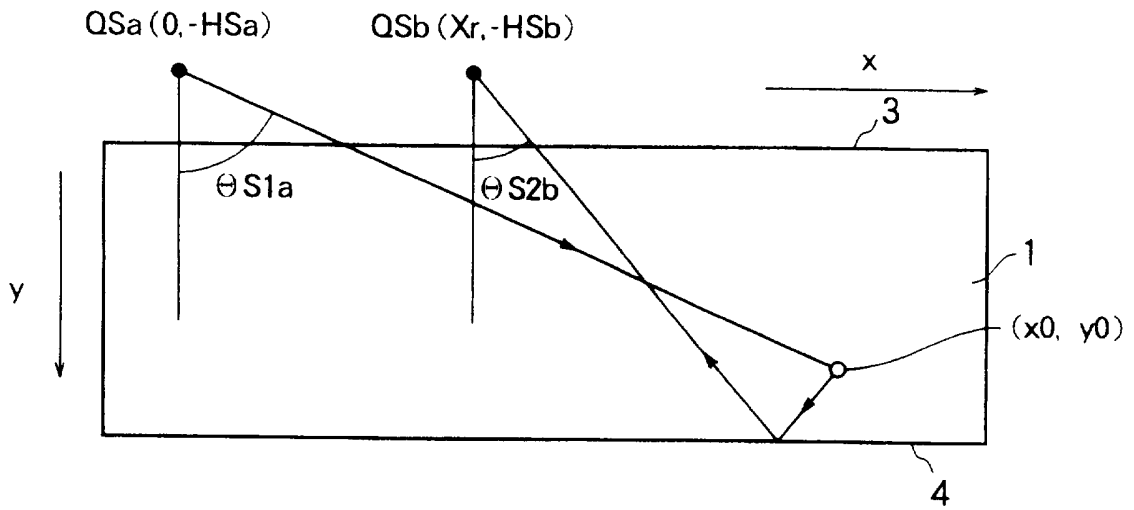


図 70

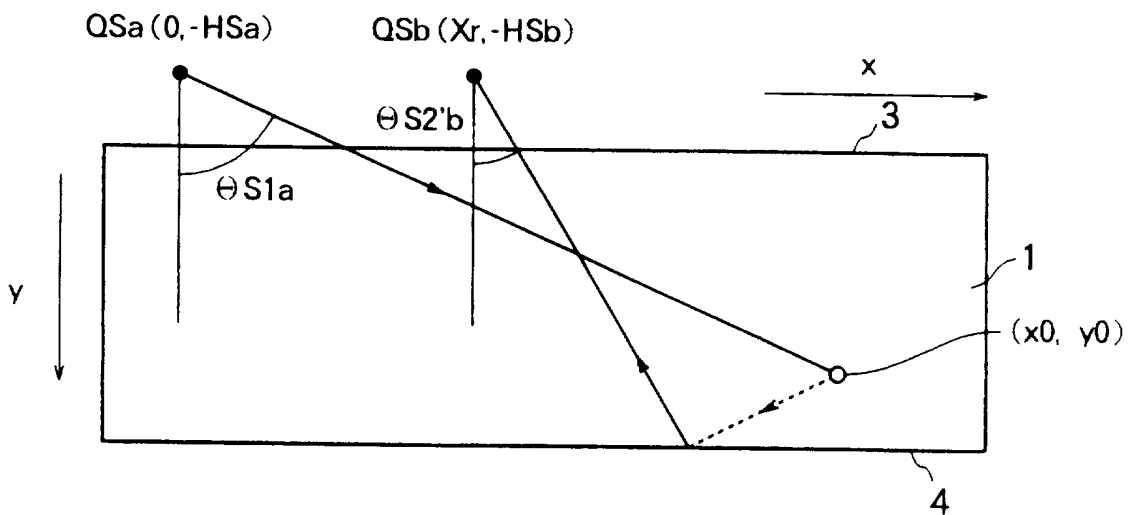


図 71

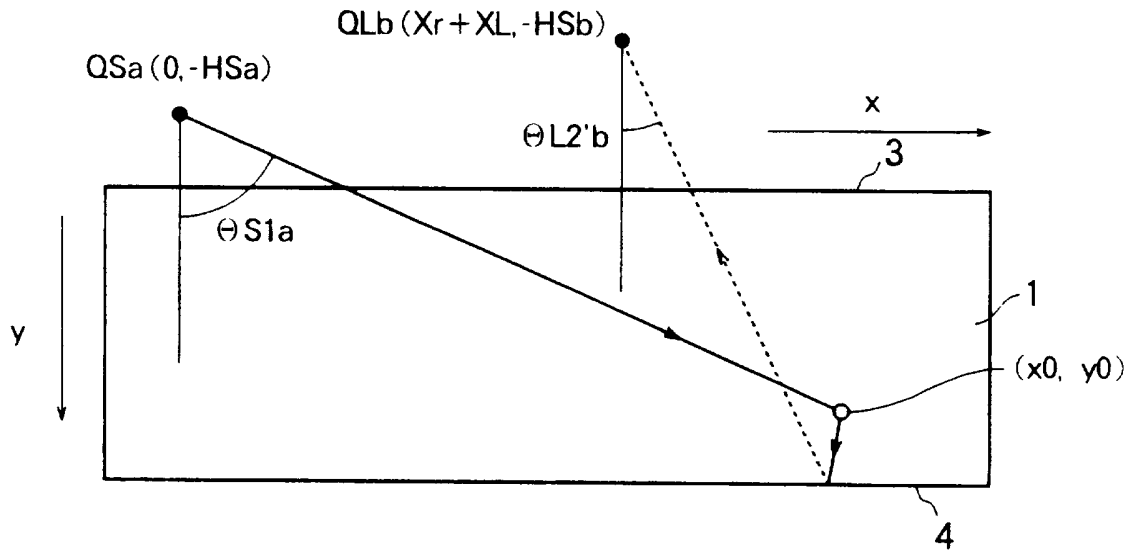


図 72

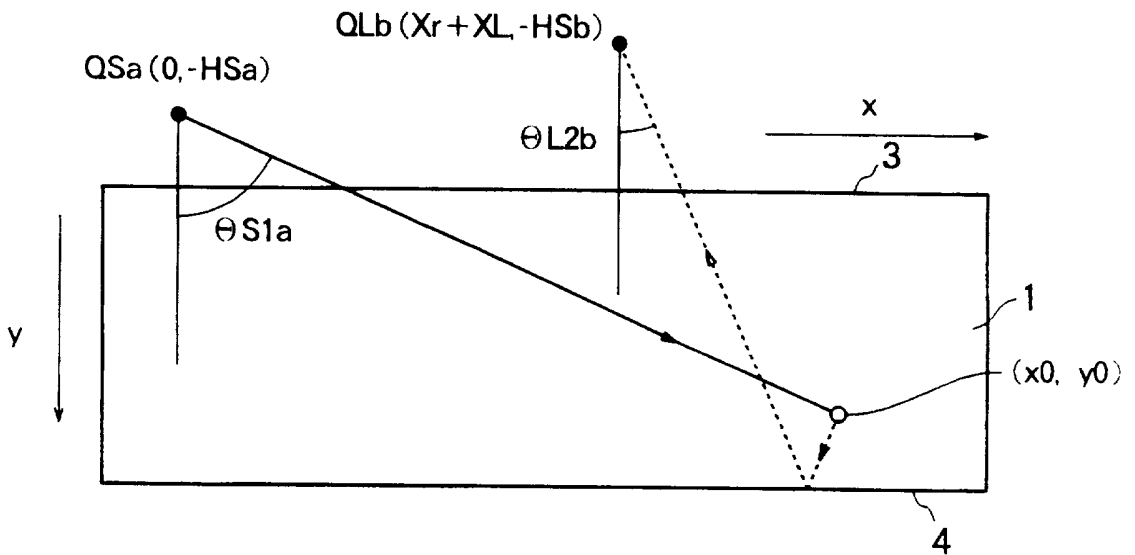


図 73

	送信用探触子から底面までの伝搬モード	底面から欠陥までの伝搬モード	欠陥から受信用探触子までの伝搬モード	存在条件	備考	
					底面でのモード変換	欠陥でのモード変換
伝搬経路 I での伝搬モード	縦波	横波	横波	$\theta_{LLa} \leq \theta_{L2'} a \leq \theta_{LHa}$ $\theta_{SLb} \leq \theta_{S1b} \leq \theta_{SHb}$	有	無
伝搬経路 II での伝搬モード	縦波	縦波	横波	$\theta_{LLa} \leq \theta_{L2a} \leq \theta_{LHa}$ $\theta_{SLb} \leq \theta_{S1b} \leq \theta_{SHb}$	無	有
伝搬経路 III での伝搬モード	縦波	横波	縦波	$\theta_{LLa} \leq \theta_{L2'} a \leq \theta_{LHa}$ $\theta_{LLb} \leq \theta_{L1b} \leq \theta_{LHb}$	有	有
伝搬経路 IV での伝搬モード	縦波	縦波	縦波	$\theta_{LLa} \leq \theta_{L2a} \leq \theta_{LHa}$ $\theta_{LLb} \leq \theta_{L1b} \leq \theta_{LHb}$	無	無

図 74

	送信用探触子から欠陥までの伝搬モード	欠陥から底面までの伝搬モード	底面から受信用探触子までの伝搬モード	存在条件	備考	
					底面でのモード変換	欠陥でのモード変換
伝搬経路 V での伝搬モード	縦波	横波	横波	$\theta LLa \leq \theta L1a \leq \theta LHa$ $\theta SLb \leq \theta S2b \leq \theta SHb$	無	有
伝搬経路 VI での伝搬モード	縦波	縦波	横波	$\theta LLa \leq \theta L1a \leq \theta LHa$ $\theta SLb \leq \theta S2' b \leq \theta SHb$	有	無
伝搬経路 VII での伝搬モード	縦波	横波	縦波	$\theta LLa \leq \theta L1a \leq \theta LHa$ $\theta LLb \leq \theta L2' b \leq \theta LHb$	有	有
伝搬経路 VIII での伝搬モード	縦波	縦波	縦波	$\theta LLa \leq \theta L1a \leq \theta LHa$ $\theta LLb \leq \theta L2b \leq \theta LHb$	無	無

図 75

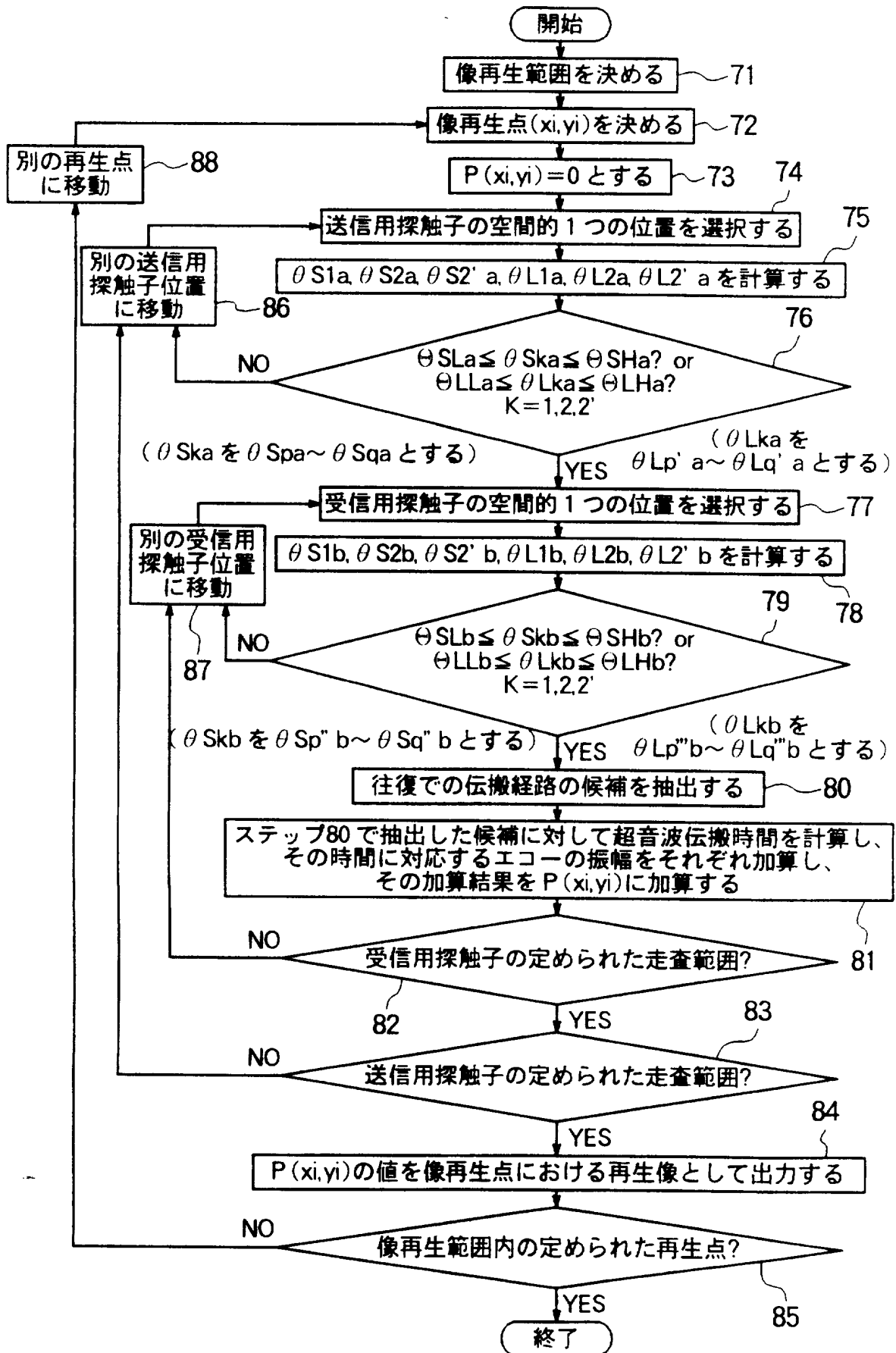


図 76

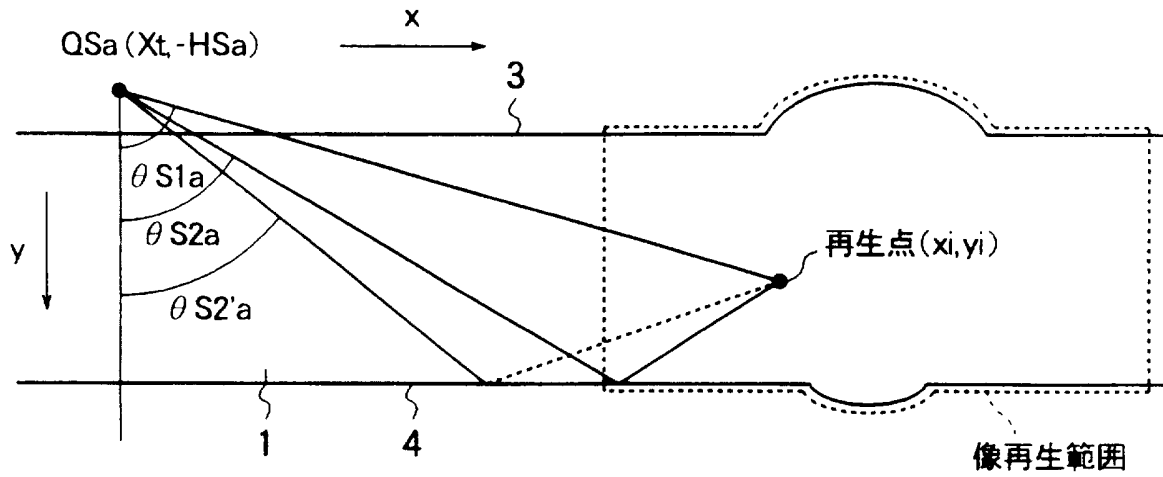


図 77

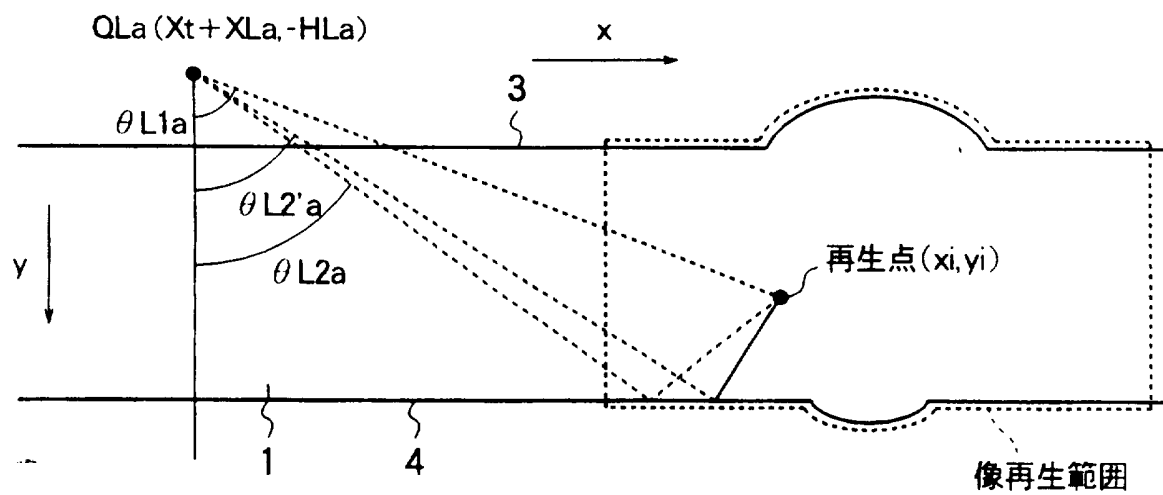


図 78

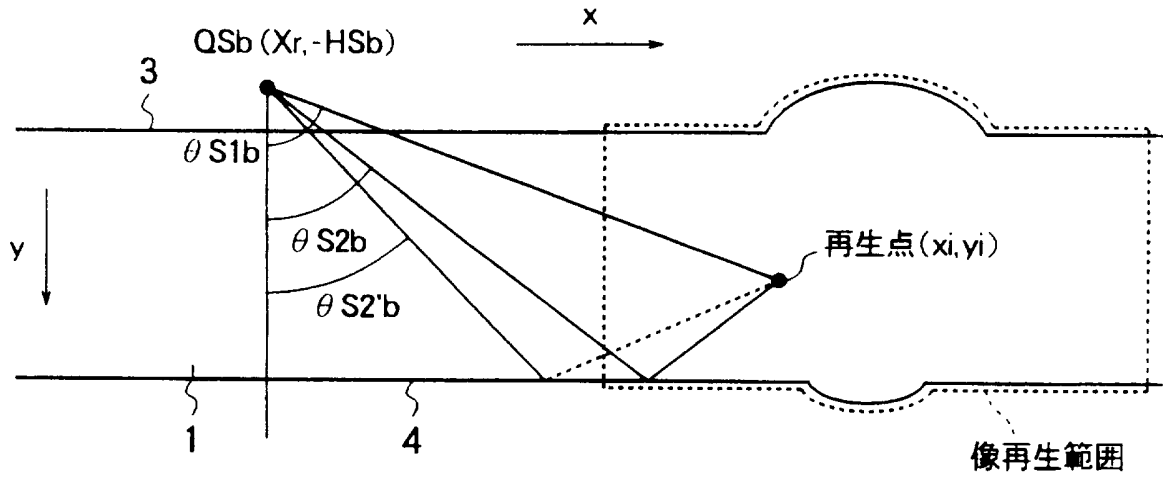


図 79

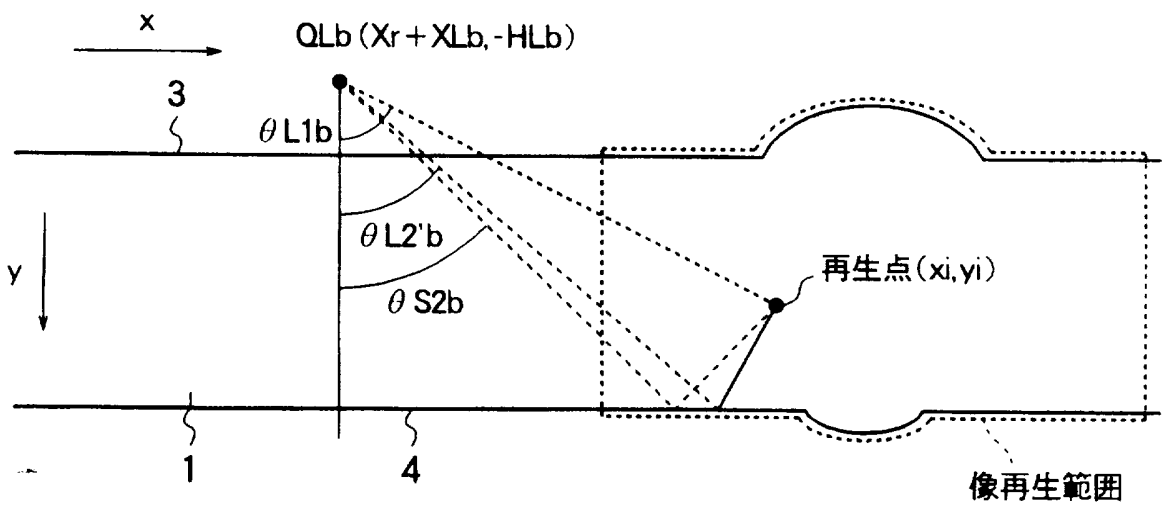
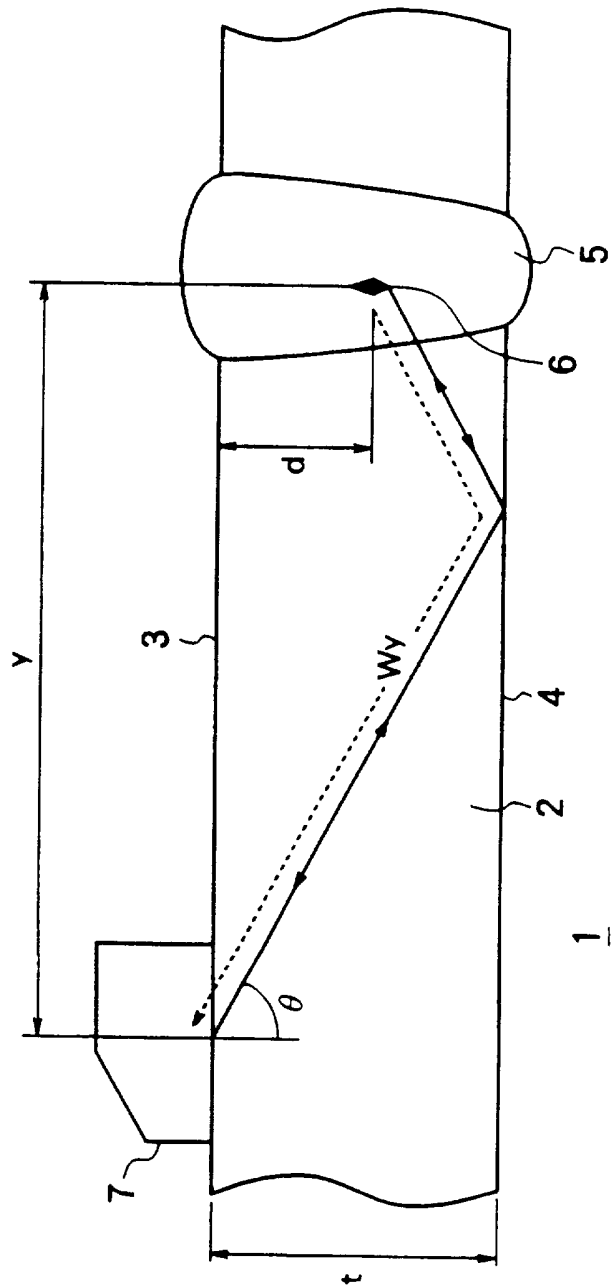


図 80



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP97/00362

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
Int. Cl ⁶ G01N29/06, G01N29/10, G01N29/22		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
Int. Cl ⁶ G01N29/00-28		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Jitsuyo Shinan Koho 1926 - 1997		
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971 - 1997		
Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994 - 1997		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP, 3-46555, A (Mitsubishi Electric Corp.), February 27, 1991 (27. 02. 91), Page 1, lower left column, line 5 to page 2, upper right column, line 2; page 3, lower right column, lines 10 to 13; Fig. 1 (Family: none)	1, 3, 4 2, 9-13, 19-22, 27-30, 36 5-8, 14-18, 23-26, 31-35
Y	JP, 60-185539, A (Toshiba Corp.), September 21, 1985 (21. 09. 85), Page 1, lower left column, line 5 to upper right column, line 1; Fig. 1 (Family: none)	2, 9, 11, 19, 21, 27, 29, 36
Y A	JP, 3-128457, A (Akademiet For De Tekniske Videnskaber, Svejsecentralen), May 31, 1991 (31. 05. 91), Page 4, lower right column, line 9 to page 7, upper left column, line 20 & EP, 380436, A & US, 5111696, A	10-13, 19-22, 27-30, 36 1-9, 14-18, 23-26, 31-35
A	JP, 62-19711, B2 (Hitachi, Ltd.),	1 - 36
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents:		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance		"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"E" earlier document but published on or after the international filing date		"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)		"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means		"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report	
March 24, 1997 (24. 03. 97)	April 1, 1997 (01. 04. 97)	
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office	Authorized officer	
Facsimile No.	Telephone No.	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP97/00362

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
	April 30, 1987 (30. 04. 87), Column 4, line 20 (Family: none)	
A	JP, 59-46553, A (Sumitomo Chemical Co., Ltd.), March 15, 1984 (15. 03. 84), Page 1, lower left column, lines 5 to 9; page 2, lower left column, line 8 to lower right column, line 18; page 3, lower left column, line 18 to lower right column, line 2 (Family: none)	5, 14, 23, 31
A	JP, 59-197854, A (Toshiba Corp.), November 9, 1984 (09. 11. 84), Page 4, upper right column, lines 7 to 14 (Family: none)	5, 14, 23, 31
A	JP, 52-92778, A (Hitachi, Ltd.), August 4, 1977 (04. 08. 77), Page 2, upper right column, line 18 to lower left column, line 9; page 3, lower left column, lines 11 to 17 (Family: none)	5, 14, 23, 31
A	JP, 58-117452, A (Hitachi, Ltd.), July 13, 1983 (13. 07. 83), Page 3, lower left column, lines 15 to 20 (Family: none)	5, 14, 23, 31
A	JP, 63-173959, A (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.), July 18, 1988 (18. 07. 88), Page 1, lower left column, lines 5 to 12 (Family: none)	5, 14, 23, 31
A	JP, 5-146445, A (Toshiba Corp.), June 15, 1993 (15. 06. 93), Column 6, line 36 to column 7, line 10 (Family: none)	7, 16, 25, 33
A	JP, 2-218353, A (Toshiba Corp.), August 31, 1990 (31. 08. 90), Page 3, lower left column, lines 5 to 8 (Family: none)	7, 16, 25, 33

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl. ⁶ G01N 29/06 Int. Cl. ⁶ G01N 29/10 Int. Cl. ⁶ G01N 29/22	
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl. ⁶ G01N 29/00-28	
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1926-1997年 日本国公開実用新案公報 1971-1997年 日本国登録実用新案公報 1994-1997年	
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)	
C. 関連すると認められる文献	
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示
X Y A Y Y A	JP, 3-46555, A (三菱電機株式会社) 27. 2月. 1991 (27. 02. 91) 第1頁左下欄第5行~第2頁右上欄第2行, 第3頁右下欄第10-13行, 第1図 (ファミリーなし) JP, 60-185539, A (株式会社東芝) 21. 9月. 1985 (21. 09. 85) 第1頁左下欄第5行~右上欄第1行, 第1図 (ファミリーなし) JP, 3-128457, A (Akademiet For De Tekniske Videnskaber, Svejsecentralen) 31. 5月. 1991 (31. 05. 91) 第4頁右下欄第9行~第7頁左上欄第20行 & EP, 380436, A & US, 5111696, A
	関連する 請求の範囲の番号 1, 3, 4 2, 9-13, 19-22, 27-30, 36 5-8, 14-18, 23-26, 31-35 2, 9, 11, 19, 21, 27, 29, 36 10-13, 19-22, 27-30, 36 1-9, 14-18, 23-26, 31-35
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。	
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの 「E」 先行文献ではあるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願	
の日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 24. 03. 97	国際調査報告の発送日 01. 04. 97
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 鈴木 俊光 電話番号 03-3581-1101 内線 3252
	2 J 9 5 0 6 印

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP, 62-19711, B2(株式会社日立製作所)30. 4月. 1987(30. 04. 87)第4欄第20行(ファミリーなし)	1-36
A	JP, 59-46553, A(住友化学工業株式会社)15. 3月. 1984(15. 03. 84)第1頁左下欄第5-9行, 第2頁左下欄第8行~右下欄第18行, 第3頁左下欄第18行~右下欄第2行(ファミリーなし)	5, 14, 23, 31
A	JP, 59-197854, A(株式会社東芝)9. 11月. 1984(09. 11. 84)第4頁右上欄第7-14行(ファミリーなし)	5, 14, 23, 31
A	JP, 52-92778, A(株式会社日立製作所)4. 8月. 1977(04. 08. 77)第2頁右上欄第18行~左下欄第9行, 第3頁左下欄第11-17行(ファミリーなし)	5, 14, 23, 31
A	JP, 58-117452, A(株式会社日立製作所)13. 7月. 1983(13. 07. 83)第3頁左下欄第15-20行(ファミリーなし)	5, 14, 23, 31
A	JP, 63-173959, A(三菱重工業株式会社)18. 7月. 1988(18. 07. 88)第1頁左下欄第5-12行(ファミリーなし)	5, 14, 23, 31
A	JP, 5-146445, A(株式会社東芝)15. 6月. 1993(15. 06. 93)第6欄第36行~第7欄第10行(ファミリーなし)	7, 16, 25, 33
A	JP, 2-218353, A(株式会社東芝)31. 8月. 1990(31. 08. 90)第3頁左下欄第5-8行(ファミリーなし)	7, 16, 25, 33