(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5240218号
(P5240218)
(45)発行日　平成25年7月17日(2013.7.17)　(24)登録日　平成25年4月12日(2013.4.12)

(51)Int.Cl.　F I
G01N 29/00 (2006.01)　G01N 29/20

請求項の数 5　(全 18 頁)

(21)出願番号　特願2010-36475(P2010-36475)
(22)出願日　平成22年2月22日(2010.2.22)
(65)公開番号　特開2011-169872(P2011-169872A)
(43)公開日　平成23年9月1日(2011.9.1)
審査請求日　平成24年2月9日(2012.2.9)

(73)特許権者　000006655
新日鐵住金株式会社
東京都千代田区丸の内二丁目６番１号
(74)代理人　100090273
弁理士　國分　孝悦
(72)発明者　永田　泰昭
東京都千代田区丸の内二丁目６番１号　新日本製鐵株式会社内

審査官　比嘉　翔一

最終頁に続く

(54)【発明の名称】結晶粒径計測装置、方法及びプログラム

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
被計測板の表面の所定位置に配置された送受信プローブを介して、前記被計測板の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する超音波発振手段と、
前記被計測板の板厚方向に伝播した前記所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形を、前記送受信プローブを介して検出する波形検出手段と、
前記波形検出手段で検出した超音波の波形に基づいて、前記所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出するエネルギー値算出手段と、
前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値の中から、前記共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する最大エネルギー値検出手段と、
前記最大エネルギー値検出手段で検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とを、前記送受信プローブの温度情報及び前記被計測板の温度情報のうち少なくともいずれか一方を用いてそれぞれ補正する補正手段と、
前記補正手段で補正した最大のエネルギー値と、前記補正手段で補正した他のエネルギー値との比を算出する比算出手段と、
前記比算出手段で算出したエネルギー値の比に基づいて、前記被計測板における結晶粒径を算出する結晶粒径算出手段とを備えることを特徴とする結晶粒径計測装置。
【請求項２】

前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値を除いた各エネルギー値の平均値を、前記他のエネルギー値とすることを特徴とする請求項１に記載の結晶粒径計測装置。

【請求項３】

前記補正手段は、前記最大エネルギー値検出手段で検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とをそれぞれ室温時換算することを特徴とする請求項１又は２に記載の結晶粒径計測装置。

【請求項４】

被計測板の表面の所定位置に配置された送受信プローブを介して、前記被計測板の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する超音波発振ステップと、

前記被計測板の板厚方向に伝播した前記所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形を、前記送受信プローブを介して検出する波形検出ステップと、

前記波形検出ステップで検出した超音波の波形に基づいて、前記所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出するエネルギー値算出ステップと、

前記エネルギー値算出ステップで算出したエネルギー値の中から、前記共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する最大エネルギー値検出ステップと、

前記最大エネルギー値検出ステップで検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出ステップで算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とを、前記送受信プローブの温度情報及び前記被計測板の温度情報のうち少なくともいずれか一方を用いてそれぞれ補正する補正ステップと、

前記補正ステップで補正した最大のエネルギー値と、前記補正ステップで補正した他のエネルギー値との比を算出する比算出ステップと、

前記比算出ステップで算出したエネルギー値の比に基づいて、前記被計測板における結晶粒径を算出する結晶粒径算出ステップとを有することを特徴とする結晶粒径計測方法。

【請求項５】

被計測板の表面の所定位置に配置された送受信プローブを介して、前記被計測板の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する超音波発振処理と、

前記被計測板の板厚方向に伝播した前記所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形を、前記送受信プローブを介して検出する波形検出処理と、

前記波形検出処理で検出した超音波の波形に基づいて、前記所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出するエネルギー値算出処理と、

前記エネルギー値算出処理で算出したエネルギー値の中から、前記共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する最大エネルギー値検出処理と、

前記最大エネルギー値検出処理で検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出処理で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とを、前記送受信プローブの温度情報及び前記被計測板の温度情報のうち少なくともいずれか一方を用いてそれぞれ補正する補正処理と、

前記補正処理で補正した最大のエネルギー値と、前記補正処理で補正した他のエネルギー値との比を算出する比算出処理と、

前記比算出処理で算出したエネルギー値の比に基づいて、前記被計測板における結晶粒径を算出する結晶粒径算出処理とをコンピュータに実行させるためのプログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、超音波を用いて被計測板の結晶粒径を計測する結晶粒径計測装置、方法及びプログラムに関する。

【背景技術】
【０００２】
鋼板等の材料の結晶粒径を非破壊試験で計測する方法として、電磁超音波（ＥＭＡＴ：Electro Magnetic Acoustic Transducer）による共振法を利用した計測が提案されている。この電磁超音波による共振法を利用した従来の結晶粒径の計測方法の一例について、以下に説明する。図１５は、電磁超音波（ＥＭＡＴ）による共振法を説明するための概略図である。図１５において、１１１は電磁超音波振動子であり、電磁超音波の発信と受信の両方に用いられる。１１２は板状材料からなる板厚ｄの被計測板である。電磁超音波振動子１１１に交流電圧を加えつつ、その交流電圧の周波数を連続的に変化させると、次の数式１が成り立つときに被計測板１１２内部に超音波の共振がおこる。
【０００３】
【数１】

$$d = n\frac{1}{2}\lambda \qquad \cdots\cdots(数式1)$$

【０００４】
数式１において、ｄは被計測板１１２の板厚、λは超音波の波長、ｎは正の整数である。すなわち、被計測板１１２の板厚ｄが超音波の波長λの半分の整数倍のときに超音波の共振がおこる。ここで、ｎが１、２、３、…のときの共振をそれぞれ１次、２次、３次、…の共振という。図１５には、一例として２次の共振状態時に形成される定在波を示している。一方、超音波の速度Ｖ、波長λ、周波数ｆの間には、次の数式２が成り立つことが一般的によく知られている。
【０００５】
【数２】

$$V = f\lambda \qquad \cdots\cdots(数式2)$$

【０００６】
また、数式１、数式２から、次の数式３を導くことができる。
【０００７】
【数３】

$$f = \frac{nV}{2d} \qquad \cdots\cdots(数式3)$$

【０００８】
そして、数式３のｆはｎ次の共振のときの周波数であるので、これを明確に示すためにf_nと書き直すと、次の数式４となる。
【０００９】
【数４】

$$fn = \frac{nV}{2d} \qquad \cdots\cdots(数式4)$$

【００１０】
この共振周波数の測定に関しては、例えば、電磁超音波振動子１１１において、周波数を連続的に変化させた超音波を被計測板１１２に対して発振し、被計測板１１２の板厚方向に伝播した超音波の共振スペクトルを計測することによって行われる。図１６に、共振スペクトルの計測結果の一例を示す特性図を示す。

【００１１】
ここで、図１６は、横軸に発振した超音波の周波数（ＭＨｚ）をとり、縦軸に検出した超音波波形（減衰波形）のエネルギー値をとったものを示している。また、図１６には、被計測板１１２として、板厚が０．３５ｍｍで平均結晶粒径が４０．４μｍのものと、板厚が０．３５ｍｍで平均結晶粒径が８７．５μｍのものの２種類の共振スペクトルが示されており、それぞれ最大のエネルギー値Ｐ１及びＰ２における周波数は共振周波数に相当するものである。
【００１２】
そして、従来の結晶粒径計測装置では、共鳴周波数における減衰係数や共振周波数における受信信号振幅から、被計測板１１２の結晶粒径を算出するものであった（例えば特許文献１、２を参照）。
【００１３】
ところで、図１６に示した共振スペクトルの計測結果からもわかるように、結晶粒径の大きいもの（図１６の例では平均結晶粒径が８７．５μｍのもの）は、結晶粒径の小さいもの（図１６の例では平均結晶粒径が４０．４μｍのもの）に比べて、共振周波数における超音波波形（減衰波形）のエネルギー値が小さくなり、また、共振しない他の周波数における超音波波形（減衰波形）のエネルギー値の割合が大きくなっている。これは、結晶粒径が大きいほど、発振した超音波における結晶粒の界面での散乱が大きいためであると考えられる。
【００１４】
図１６の例では、被計測板１１２の板厚ｄが共に０．３５ｍｍ（３５０μｍ）であるため、平均結晶粒径が４０．４μｍのものでは被計測板１１２の板厚方向に約８～９個の結晶粒が存在し、平均結晶粒径が８７．５μｍのものでは被計測板１１２の板厚方向にわずか４個程度の結晶粒が存在することになる。すなわち、被計測板１１２の板厚ｄに対して結晶粒径の大きさの比率が高くなってくると、換言すれば、被計測板１１２の結晶粒径に対して被計測板１１２の板厚ｄが薄くなってくると、上述したように、共振周波数における超音波波形（減衰波形）のエネルギー値が小さくなり、また、共振しない他の周波数における超音波波形（減衰波形）のエネルギー値の割合が大きくなっていく。
【００１５】
従来の結晶粒径計測装置では、共振周波数域に基づいて被計測板１１２の結晶粒径を算出するようにしていたため、被計測板１１２の板厚ｄが薄いものであるほど、結晶粒径の大きさに起因した超音波の散乱による結晶粒径の計測誤差が大きくなってしまい、結晶粒径を高精度に計測することが困難であるといった問題があった。
【００１６】
上述の問題点に鑑みて、本出願人は、特許文献３において、被計測板の板厚が非常に薄い場合であっても、被計測板の結晶粒径を高精度に計測することができるようにするために、共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値と、その最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値との比を算出して平均結晶粒径を計測することを提案している。
【先行技術文献】
【特許文献】
【００１７】
【特許文献１】特開２００１－３４３３６６号公報
【特許文献２】特開平６－３４７４４９号公報
【特許文献３】特開２００７－１０１３６０号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【００１８】
ところで、製鉄所で製造プロセスの過程にある鋼板を被計測板とするような場合、鋼板の温度や雰囲気温度が常に室温であるとは限らない。例えば加熱された状態にある鋼板の

結晶粒径を計測することが求められることもある。

【００１９】

しかしながら、鋼板の温度や雰囲気温度が高温である場合、室温時と比べて、鋼板の温度依存性の物性値が変化したり、電磁超音波振動子を含む送受信プローブの感度特性が変化したりすることが考えられるため、計測精度が落ちてしまうおそれがある。上述したいずれの特許文献でも、室温であることが前提とされており、被計測板の温度や雰囲気温度が高温である場合は想定されていない。

【００２０】

本発明は上記のような点に鑑みてなされたものであり、室温時だけでなく高温時においても被計測板の結晶粒径を高精度に計測できるようにすることを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【００２１】

本発明の結晶粒径計測装置は、被計測板の表面の所定位置に配置された送受信プローブを介して、前記被計測板の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する超音波発振手段と、前記被計測板の板厚方向に伝播した前記所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形を、前記送受信プローブを介して検出する波形検出手段と、前記波形検出手段で検出した超音波の波形に基づいて、前記所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出するエネルギー値算出手段と、前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値の中から、前記共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する最大エネルギー値検出手段と、前記最大エネルギー値検出手段で検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とを、前記送受信プローブの温度情報及び前記被計測板の温度情報のうち少なくともいずれか一方を用いてそれぞれ補正する補正手段と、前記補正手段で補正した最大のエネルギー値と、前記補正手段で補正した他のエネルギー値との比を算出する比算出手段と、前記比算出手段で算出したエネルギー値の比に基づいて、前記被計測板における結晶粒径を算出する結晶粒径算出手段とを備えることを特徴とする。

本発明の結晶粒径計測装置の他の特徴とするところは、前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値を除いた各エネルギー値の平均値を、前記他のエネルギー値とする点にある。

本発明の結晶粒径計測装置の他の特徴とするところは、前記補正手段は、前記最大エネルギー値検出手段で検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出手段で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とをそれぞれ室温時換算する点にある。

本発明の結晶粒径計測方法は、被計測板の表面の所定位置に配置された送受信プローブを介して、前記被計測板の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する超音波発振ステップと、前記被計測板の板厚方向に伝播した前記所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形を、前記送受信プローブを介して検出する波形検出ステップと、前記波形検出ステップで検出した超音波の波形に基づいて、前記所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出するエネルギー値算出ステップと、前記エネルギー値算出ステップで算出したエネルギー値の中から、前記共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する最大エネルギー値検出ステップと、前記最大エネルギー値検出ステップで検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出ステップで算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とを、前記送受信プローブの温度情報及び前記被計測板の温度情報のうち少なくともいずれか一方を用いてそれぞれ補正する補正ステップと、前記補正ステップで補正した最大のエネルギー値と、前記補正ステップで補正した他のエネルギー値との比を算出する比算出ステップと、前記比算出ステップで算出したエネルギー値の比に基づいて、前記被計測板における結晶粒径を算出する結晶粒径算出ステップとを有することを特徴とする。

本発明のプログラムは、被計測板の表面の所定位置に配置された送受信プローブを介して、前記被計測板の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する超音波発振処理と、前記被計測板の板厚方向に伝播した前記所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形を、前記送受信プローブを介して検出する波形検出処理と、前記波形検出処理で検出した超音波の波形に基づいて、前記所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出するエネルギー値算出処理と、前記エネルギー値算出処理で算出したエネルギー値の中から、前記共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する最大エネルギー値検出処理と、前記最大エネルギー値検出処理で検出した最大のエネルギー値と、前記エネルギー値算出処理で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値とを、前記送受信プローブの温度情報及び前記被計測板の温度情報のうち少なくともいずれか一方を用いてそれぞれ補正する補正処理と、前記補正処理で補正した最大のエネルギー値と、前記補正処理で補正した他のエネルギー値との比を算出する比算出処理と、前記比算出処理で算出したエネルギー値の比に基づいて、前記被計測板における結晶粒径を算出する結晶粒径算出処理とをコンピュータに実行させる。

【発明の効果】

【００２２】

本発明によれば、室温時だけでなく高温時においても被計測板の結晶粒径を高精度に計測することができる。

【図面の簡単な説明】

【００２３】

【図１】本発明の実施形態に係る結晶粒径計測装置の概略構成を示すブロック図である。

【図２】本発明の実施形態に係る結晶粒径計測装置で行う結晶粒径計測方法の一例を示すフローチャートである。

【図３】超音波発振手段から発振する超音波波形の一例を示す図である。

【図４】波形検出手段で検出したある周波数における超音波の波形の一例を示す図である。

【図５】図４の超音波の検出波形に対するエネルギー値の算出イメージを示す図である。

【図６】エネルギー値算出手段で算出した、所定の周波数領域（周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）の各周波数における超音波のエネルギー値の特性図である。

【図７】最大のエネルギー値と他のエネルギー値との比と、平均結晶粒径との関係を示す特性図である。

【図８】各被計測板における結晶方位、音速及び共振周波数の結果を示す図である。

【図９】温度による結晶粒径計測の精度について考察を行う試験のための装置概要を示す図である。

【図１０】試験の結果を示す図である。

【図１１】試験の結果を示す図である。

【図１２】透磁率μと電気抵抗率Ｒの温度依存性を示す特性図である。

【図１３】室温時換算した結果を示す特性図である。

【図１４】室温時換算した結果を示す特性図である。

【図１５】電磁超音波（ＥＭＡＴ）による共振法を説明するための概略図である。

【図１６】共振スペクトルの計測結果の一例を示す特性図である。

【発明を実施するための形態】

【００２４】

以下、添付図面を参照して、本発明の好適な実施形態について説明する。

図１は、本発明の実施形態に係る結晶粒径計測装置の概略構成を示すブロック図である。図１において、２は鋼板等からなる板厚ｄの被計測板、３は被計測板２を支持する支持体である。１は支持体３上の被計測板２の結晶粒径を計測する結晶粒径計測装置である。被計測板２の表面温度を測定する不図示の温度センサ（例えば放射温度計）が設置されており、その温度情報T_1が結晶粒径計測装置１に入力される。

【００２５】
結晶粒径計測装置１において、１０は送受信プローブであり、被計測板２の表面の所定位置に配置され、被計測板２に対して超音波を送信するとともに被計測板２の板厚方向に伝播した当該超音波を受信する。この送受信プローブ１０は、例えば電磁超音波振動子等で構成される。送受信プローブ１０の例えば側面には、不図示の温度センサ（例えば熱電対）が設置されており、その温度情報T_2が取得される。
【００２６】
２０は超音波を発振する超音波発振手段であり、被計測板２の表面の所定位置に配置された送受信プローブ１０を介して、被計測板２の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を発振する。
【００２７】
３０は波形検出手段であり、超音波発振手段２０から発振され、被計測板２の板厚方向に伝播した所定の周波数領域の各周波数における超音波の波形（減衰波形）を、被計測板２の表面の所定位置に配置された送受信プローブ１０を介して検出する。
【００２８】
４０はエネルギー値算出手段であり、波形検出手段３０で検出した超音波の波形（減衰波形）に基づいて、所定の周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値を算出する。
【００２９】
５０は最大エネルギー値検出手段であり、エネルギー値算出手段４０で算出したエネルギー値の中から、共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する。
【００３０】
６０は補正手段であり、最大エネルギー値検出手段５０で検出した最大のエネルギー値を被計測板２の温度情報T_1を用いて補正し、また、エネルギー値算出手段４０で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値を送受信プローブ１０の温度情報T_2を用いて補正する。
【００３１】
７０は物性値記憶部であり、補正手段６０での補正に使用する物性値を記憶する。本実施形態では、後述するように、結晶粒径計測の対象材（被計測板２の種類）ごとに、温度に依存する透磁率μと、温度に依存する電気抵抗率Ｒとを記憶する。
【００３２】
８０は比算出手段であり、補正手段６０で補正した最大のエネルギー値と、補正手段６０で補正した他のエネルギー値との比を算出する。
【００３３】
９０は相関値記憶部であり、予め実験等により算出した、最大のエネルギー値と他のエネルギー値との比に対する平均結晶粒径の相関値を記憶する。
【００３４】
１００は結晶粒径算出手段であり、比算出手段８０で算出したエネルギー値の比に基づいて、相関値記憶部９０に記憶されている相関値を参照することにより、被計測板２における平均結晶粒径を算出する。
【００３５】
次に、結晶粒径計測装置１による結晶粒径計測方法について説明する。図２は、本発明の実施形態に係る結晶粒径計測装置１で行う結晶粒径計測方法の一例を示すフローチャートである。
【００３６】
まず、送受信プローブ１０を被計測板２の表面の所定位置に配置した後、ステップＳ１０１で、超音波発振手段２０は、この送受信プローブ１０を介して、被計測板２の板厚方向における共振周波数を含む所定の周波数領域の超音波を、それぞれ各周波数ごとに独立して発振する。

【００３７】
このステップＳ１０１では、例えば、図３に示すような、いわゆるバースト波を各周波数ごとに発振する。図３には、バースト波として周波数３ＭＨｚのものを５波発振する例を示している。また、本実施形態においては、発振する超音波の所定の周波数領域として、周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚを例にして以下に説明を行う。
【００３８】
続いて、ステップＳ１０２で、波形検出手段３０は、超音波発振手段２０から発振され、被計測板２の板厚方向に伝播した所定の周波数領域（周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）の各周波数における超音波の波形（減衰波形）を送受信プローブ１０を介して検出する。
【００３９】
図４は、波形検出手段３０で検出したある周波数における超音波の波形の一例を示す図である。図４に示された超音波の波形は、その縦軸に超音波の振幅の大きさを電圧（Ｖ）で示しており、その横軸に経過時間（ｔ）を示したものである。本実施形態では、波形検出手段３０において、第１波の超音波を検出してから所定時間Ｔまでに到達した超音波の波形を検出している。
【００４０】
続いて、ステップＳ１０３で、エネルギー値算出手段４０は、波形検出手段３０で検出した超音波の波形（減衰波形）に基づいて、所定の周波数領域（周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）の各周波数における超音波のエネルギー値を算出する。図５は、図４の超音波の検出波形に対するエネルギー値の算出イメージを示す図である。図５の斜線で示した部分の積分値の合計が算出されるエネルギー値となる。
【００４１】
続いて、ステップＳ１０４で、最大エネルギー値検出手段５０は、ステップＳ１０３においてエネルギー値算出手段４０で算出した、所定の周波数領域（周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）の各周波数におけるエネルギー値の中から、共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を検出する。
【００４２】
図６は、エネルギー値算出手段４０で算出した、所定の周波数領域（周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）の各周波数における超音波のエネルギー値の特性図である。図６には、縦軸に超音波のエネルギー値を示し、横軸に周波数を示している。また、図６は、平均結晶粒径が１２．０μｍ、２０．５μｍ、３５．７μｍ及び５３．６μｍである各被計測板２の所定の周波数領域（周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）の各周波数における超音波のエネルギー値の特性図を示している。そして、最大エネルギー値検出手段５０は、図６の例では、平均結晶粒径が１２．０μｍである被計測板２の場合には最大のエネルギー値Ｐ３を検出し、平均結晶粒径が２０．５μｍである被計測板２の場合には最大のエネルギー値Ｐ４を検出し、平均結晶粒径が３５．７μｍである被計測板２の場合には最大のエネルギー値Ｐ５を検出し、平均結晶粒径が５３．６μｍである被計測板２の場合には最大のエネルギー値Ｐ６を検出する。ここで、これらの最大のエネルギー値Ｐ３～Ｐ６は、各被計測板２の板厚方向における共振周波数の超音波のエネルギー値に相当するものである。
【００４３】
続いて、ステップＳ１０５で、補正手段６０は、ステップＳ１０４において最大エネルギー値検出手段５０で検出した最大のエネルギー値を、被計測板２の温度情報T_1を用いて室温時換算する。また、補正手段６０は、ステップＳ１０３においてエネルギー値算出手段４０で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値を、送受信プローブ１０の温度情報T_2を用いて室温時換算する。
【００４４】
ここで、他のエネルギー値の具体的な算出方法としては、エネルギー値算出手段４０で算出したエネルギー値のうち、共振周波数における超音波のエネルギー値である最大のエネルギー値を除いた各エネルギー値の平均値を、当該他のエネルギー値とする方法が考えられる。最大のエネルギー値を除く具体的な方法は、共振周波数付近におけるエネルギー

値がパルス状になる特徴を利用して、以下の通りにすることが考えられる。まず周波数とエネルギーのデータは、（$f_{i,}P_i$)のようにデジタルデータとして記録されており、（$f_{imax,}P_{imax}$)が最大のエネルギー値となる共振周波数値とそのエネルギー値であるとする。但し、ｉは１，２，３，・・・，Ｎの整数であり、f_Nが計測し記録した最大周波数値とし、ｉｍａｘは１以上Ｎ以下の整数である。ここで、ｉ＝ｉｍａｘ＋１，ｉ＝ｉｍａｘ＋２のようにｉｍａｘから１つずつ増加させ、最初に$P_i < P_{imax}\times$（１／１００）となるｉを探しｉｕｐｐｅｒとし、同様にｉ＝ｉｍａｘ－１，ｉ＝ｉｍａｘ－２のようにｉｍａｘから１つずつ減少させ、最初に$P_i < P_{imax}\times$（１／１００）となるｉを探しｉｌｏｗとし、ｉｌｏｗからｉｕｐｐｅｒまでを除いた、それ以外のｉにおけるP_iの平均値を算出するようにする。このような方法で、最大エネルギー値となる共振周波数から十分離れた周波数に対応した他のエネルギー値の平均値を算出することができる。なお、本発明においては、他のエネルギー値の算出方法としては、これらの具体的な算出方法に限定されるものではない。

【００４５】

この場合に、数式４に示されるように複数次（ｎが１、２、３、…）の共振周波数f_nが存在し、後述する図１０、図１１等にも示されるように、各共振周波数で波形のピークが表われる。他のエネルギー値を算出するに際しては、これら共振周波数における超音波のエネルギー値は含まないようにする。そのために、所定の周波数領域（本実施形態では周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）を複数次の共振周波数（波形のピーク）が含まれないように適宜設定する。或いは、所定の周波数領域（本実施形態では周波数３ＭＨｚ～５ＭＨｚ）に複数次の共振周波数（波形のピーク）が含まれる場合には、これら複数次の共振周波数における超音波のエネルギー値を除いて他のエネルギー値を算出する。

【００４６】

このステップＳ１０５では、ステップＳ１０４において最大エネルギー値検出手段５０で検出した最大のエネルギー値S_{T1}（被計測板２の表面温度T_1における最大エネルギー値）を、次の数式９により室温時換算する。数式９で用いられる透磁率μ_{T1}及び電気抵抗率R_{T1}は、結晶粒径計測の対象材（被計測板２の種類）に応じて、被計測板２の温度情報T_1に対応するものが物性値記憶部７０から抽出される。

$$S_{room}=(R_{T1}/R_{room})*(\mu_{room}/\mu_{T1})^{2}*S_{T1}\quad\cdots\text{（数式９）}$$

但し、R_{room}は室温での電気抵抗率、μ_{room}は室温での透磁率を表す。

【００４７】

また、このステップＳ１０５では、ステップＳ１０３においてエネルギー値算出手段４０で算出したエネルギー値のうち、前記最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値N_{T2}を、次の数式１０により室温時換算する。他のエネルギー値N_{T2}は送受信プローブ１０で生じる熱雑音（送受信プローブ１０の温度T_2における熱雑音）と考え、熱雑音は$\sqrt{T}$に比例することに基づくものである。

$$N_{room}=(\sqrt{室温}/\sqrt{T_2})*N_{T2}\quad\cdots\text{（数式１０）}$$

【００４８】

続いて、ステップＳ１０６で、比算出手段８０は、ステップＳ１０５において補正手段６０で室温時換算した最大のエネルギー値と、同じくステップＳ１０５において補正手段６０で室温時換算した他のエネルギー値との比を算出する。

【００４９】

続いて、ステップＳ１０７で、結晶粒径算出手段１００は、ステップＳ１０６において比算出手段８０で算出したエネルギー値の比に基づいて、被計測板２における平均結晶粒径を算出する。

【００５０】

ここで、具体的に、被計測板２の平均結晶粒径の算出方法について説明する。まず、被計測板２と同一工程で形成したサンプル板に対して、最大のエネルギー値と他のエネルギー値との比と、平均結晶粒径との関係を予め実験等により求める。図７は、最大のエネルギー値と他のエネルギー値との比と、平均結晶粒径との関係を示す特性図である。そして

、図７に示すように、求めた特性値に対して近似処理を行って、最大のエネルギー値と他のエネルギー値との比に対する平均結晶粒径の相関値を算出し、算出した各相関値を予め相関値記憶部９０に記憶しておく。結晶粒径算出手段１００は、比算出手段８０で算出したエネルギー値の比に基づいて、相関値記憶部９０に記憶されている該当する平均結晶粒径の相関値を抽出して、被計測板２における平均結晶粒径を算出する。

【００５１】

これらステップＳ１０１～ステップＳ１０７までの処理を経ることにより、共振スペクトルにおける超音波の最大のエネルギー値と、当該最大のエネルギー値以外の他のエネルギー値との比に基づいた被計測板２の平均結晶粒径の算出が行われる。

【００５２】

特許文献３では、平均結晶粒径が小さい被計測板（図１６の例では平均結晶粒径が４０．４μｍのもの）に対して平均結晶粒径が大きい被計測板（図１６の例では平均結晶粒径が８７．５μｍのもの）の共振周波数における超音波波形（減衰波形）のエネルギー値が小さくなり、かつ、共振しない他の周波数における超音波波形（減衰波形）のエネルギー値の割合が大きくなるという事象の考察を行っている。

【００５３】

まず、上述した事象が生じる要因として、結晶粒の結晶方位に注目し、図１６における被計測板とは異なるサンプルではあるが、平均結晶粒径が小さい被計測板と、当該被計測板に比べて平均結晶粒径が大きい被計測板のそれぞれについて、板厚方向の主な結晶方位について計測を行った。この際、被計測板として鋼板を用いて計測を行った。図８にその結果を示す。

【００５４】

図８に示すように、板厚方向の主な結晶方位については、平均結晶粒径が小さい被計測板では結晶方位＜１１１＞となり、平均結晶粒径が大きい被計測板では結晶方位＜１１１＞と＜１１０＞となる結果が得られた。そして、この結晶方位から、各被計測板の板厚方向における共振周波数を算出することを試みた。以下に、その算出方法を示す。

【００５５】

被計測板として鋼板を用いた場合、その結晶は立方晶であり、ｘ、ｙ、ｚ軸を結晶軸にとったときの弾性率テンソルＴは、次の数式５で表わせることがわかっている。

【００５６】

【数５】

$$T=\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad \cdots\cdots(\text{数式5})$$

【００５７】

また、横波超音波の伝播方向が結晶方位＜１１１＞の場合には、その横波超音波の音速Ｖｓが、次の数式６で表わせることがわかっている。

【００５８】

【数６】

<111>の場合

$$Vs=\sqrt{\frac{(c_{11}-c_{12}+c_{44})/3}{\rho}}=3023(m/s) \quad \cdots\cdots(数式6)$$

【００５９】

また、横波超音波の伝播方向が結晶方位＜１１０＞の場合には、その横波超音波の音速が２種類存在し、それぞれの音速Ｖｓ１及びＶｓ２が、次の数式７及び数式８で表わせることがわかっている。

【００６０】

【数７】

<110>の場合

$$Vs1=\sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}}=3871.3(m/s) \quad \cdots\cdots(数式7)$$

$$Vs2=\sqrt{\frac{(c_{11}-c_{12})/2}{\rho}}=2492.3(m/s) \quad \cdots\cdots(数式8)$$

【００６１】

ここで、数式６～数式８において、鉄の単結晶の場合には、弾性定数C_{11}が２．３３１×10^{11}（Ｎ／m^2）、弾性定数C_{44}が１．１７８×10^{11}（Ｎ／m^2）、弾性定数C_{12}が１．３５４×10^{11}（Ｎ／m^2）であり、密度ρが７．８６×10^3（ｋｇ／m^3）であることがわかっている。

【００６２】

平均結晶粒径が小さい被計測板では、主な結晶方位が＜１１１＞であるため、数式６に基づいて横波超音波の音速を算出すると、図８に示すように３０２３（ｍ／ｓ）となる結果が得られた。一方、平均結晶粒径が大きい被計測板では、主な結晶方位が＜１１１＞と＜１１０＞であるため、数式６～数式８に基づいて横波超音波の音速を算出すると、図８に示すように３０２３（ｍ／ｓ）、２４９２（ｍ／ｓ）及び３８７１（ｍ／ｓ）の３種類の音速が混在する結果が得られた。

【００６３】

そして、各被計測板での横波超音波の音速から、数式４に基づいて共振周波数を算出すると（この場合、ｎ＝１とする）、図８に示すように、平均結晶粒径が小さい被計測板では、共振周波数が４．３１８（ＭＨｚ）の１種類のみ存在するのに対して、平均結晶粒径が大きい被計測板では、共振周波数が４．３１８（ＭＨｚ）、３．５６（ＭＨｚ）及び５．５３（ＭＨｚ）の３種類が存在する結果となった。

【００６４】

これにより、平均結晶粒径が小さい被計測板では、共振周波数が１種類のみ存在するため、最大のエネルギー値が大きくなるとともに、共振しない他の周波数におけるエネルギー値の割合が小さくなることが判明した。一方、平均結晶粒径が大きい被計測板では、共振周波数が３種類も存在するため、最大のエネルギー値が小さくなるとともに、当該最大のエネルギー値以外の他の周波数におけるエネルギー値の割合が大きくなることが判明した。すなわち、被計測板を伝播する超音波のエネルギー値が当該被計測板の結晶方位に起因することを実証した。

【００６５】

ここで、本発明者は、送受信プローブ１０の温度及び被計測板２の温度による結晶粒径

計測の精度について考察を行った。図９に示すように、高温試験槽５１内にサンプル板５２を置き、サンプル板５２の表面の所定位置に送受信プローブ５３を配置する。送受信プローブ５３は、２００℃耐熱のエポキシ系樹脂を使用したＥＭＡＴセンサを使用している。また、サンプル板５２の表面及びＥＭＡＴセンサ５３の側面にそれぞれ熱電対を設置して、サンプル板５２の表面温度（サンプル温度と称する）及びＥＭＡＴセンサ５３の側面温度（センサ温度と称する）を測定する。

【００６６】

まず、２．３ｍｍ厚の一般構造用圧延鋼材（ＳＳ４００）のサンプル板５２について、高温試験槽５１内を室温にした場合と２００℃にした場合とで試験を実施した。図１０（ａ）は、１ＭＨｚ～５ＭＨｚの周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値の特性図であり、縦軸に超音波のエネルギー値を示し、横軸に周波数を示している。図中の破線が室温時での特性を表わし、実線が２００℃時での特性を表わす。図１０（ａ）に示すように、５種類の共振周波数が存在する結果となったが、いずれにおいても室温時と２００℃時とでずれが発生していることがわかる。

【００６７】

図１０（ｂ）には、室温から２００℃まで温度上昇させながら約３分間隔で測定したサンプル温度及びセンサ温度を示す。図中の◆がサンプル温度を表わし、■がセンサ温度を表わす。本試験では固定されたサンプル板５２の表面の所定位置に送受信プローブ５３を配置しているので、両温度にほとんど差はない。

【００６８】

図１０（ｃ）には、図１０（ｂ）の各測定回において算出した、最大のエネルギー値とそれ以外の他のエネルギー値との比（以下「共振ピークＳＮ値」と呼ぶ）を示す。なお、図１０（ａ）では１ＭＨｚ～５ＭＨｚの周波数領域を示しているが、ここでの共振ピークＳＮ値の算出では、実際の計測に対応させて、１．５ＭＨｚ～２．８ＭＨｚの周波数領域で評価している。図１０（ｃ）に示すように、同一のサンプル板５２、すなわち同じ結晶粒径であるのに、温度上昇に伴って共振ピークＳＮ値が減少する結果となった。

【００６９】

また、２ｍｍ厚のオーステナイト系ステンレス鋼（ＳＵＳ３０４）のサンプル板５２について、高温試験槽５１内を室温にした場合と２００℃にした場合とで試験を実施した。図１１（ａ）は、１ＭＨｚ～５ＭＨｚの周波数領域の各周波数における超音波のエネルギー値の特性図であり、縦軸に超音波のエネルギー値を示し、横軸に周波数を示している。図中の破線が室温時での特性を表わし、実線が２００℃時での特性を表わす。図１１（ａ）に示すように、３種類の共振周波数が存在する結果となったが、いずれにおいても室温時と２００℃時とでずれが発生していることがわかる。

【００７０】

図１１（ｂ）には、室温から２００℃まで温度上昇させながら約３分間隔で測定したサンプル温度及びセンサ温度を示す。図中の◆がサンプル温度を表わし、■がセンサ温度を表わす。本試験では固定されたサンプル板５２の表面の所定位置に送受信プローブ５３を配置しているので、両温度にほとんど差はない。

【００７１】

図１１（ｃ）には、図１１（ｂ）の各測定回において算出した共振ピークＳＮ値を示す。なお、図１１（ａ）では１ＭＨｚ～５ＭＨｚの周波数領域を示しているが、ここでの共振ピークＳＮ値の算出では、実際の計測に対応させて、１．５ＭＨｚ～２．８ＭＨｚの周波数領域で評価している。図１１（ｃ）に示すように、同一のサンプル板５２、すなわち同じ結晶粒径であるのに、温度上昇に伴って共振ピークＳＮ値が減少する結果となった。

【００７２】

これら試験の結果から、結晶粒径計測を行う際には温度補正を行わなければ精度が落ちてしまうことがわかる。

【００７３】

本発明者は、共振周波数における超音波のエネルギー値を、透磁率や電気抵抗率等の温

度依存性の物性値から室温時換算できる可能性があると考えた。ＥＭＡＴセンサ５３の検出信号である受信電圧V_Rを、磁束密度Ｂ、ＥＭＡＴセンサ内の送受信コイルと検査体による形状係数Ｇ、周波数や密度等による定数Ｚ、渦電流I_Eを用いて、次の数式１１で表わす。磁束密度Ｂは透磁率μに依存し、渦電流I_Eは電気抵抗率Ｒに依存する。ＳＳ４００及びＳＵＳ３０４について、これら透磁率μと電気抵抗率Ｒの温度依存性をデータブック等から調査すると、図１２（ａ）、（ｂ）に示すものとなる。

【００７４】

【数８】

$$V_R \propto \frac{B^2 G^2}{Z} I_E \qquad \cdots \text{(数式１１)}$$

【００７５】

数式１１によれば、ＥＭＡＴセンサ５３の検出信号である受信電圧V_RはB^2に比例し、渦電流I_Eに比例する。ただし、渦電流コイルには一定電圧をかけているので、対象材の電気抵抗率Ｒに反比例することになる。したがって、対象材の表面温度がT_1のときの最大エネルギー値が数式９で表わされることになる。

【００７６】

図１３、図１４に、数式９、１０を用いて室温時換算して求めた共振ピークＳＮ値を示す。図１３は、ＳＳ４００を対象材とした図１０に対応する結果である。図１４は、ＳＵＳ３０４を対象材とした図１１に対応する結果である。なお、透磁率μと電気抵抗率Ｒは図１２に示す情報を利用した。

【００７７】

図１３、図１４において、●が生データの結果（図１０（ｃ）、図１１（ｃ）と同じ結果）を表わし、○が室温時換算した結果を表わす。室温時換算することにより、温度上昇に伴って共振ピークＳＮ値が減少する現象がなくなり、温度上昇したときにも室温時での共振ピークＳＮ値と略一致していることがわかり、室温時換算する補正に妥当性があるといえる。

【００７８】

以上述べたように、本発明を適用した結晶粒径計測によれば、被計測板２の板厚が非常に薄い場合であっても、被計測板２の結晶粒径を高精度に計測することができる。

【００７９】

しかも、室温時だけでなく高温時においても被計測板の結晶粒径を高精度に計測することができる。これにより、オンラインでの各種対象材の結晶粒径の計測が可能になる。例えば、ある種の鋼材の場合、結晶粒径が大きくなると硬度が増加するため、製造プロセスの圧延段階において鋼板の破断が生じる等の問題が発生することがある。このような場合に、圧延段階の前段で結晶粒径を計測し、それに応じて圧延速度を制御すれることにより、破断防止が可能になる。

【００８０】

以上、本発明を種々の実施形態と共に説明したが、本発明はこれらの実施形態にのみ限定されるものではなく、本発明の範囲内で変更等が可能である。例えば上述した実施形態では、被計測板２の温度情報T_1及び送受信プローブ１０の温度情報T_2をそれぞれ測定するようにしたが、図１０、図１１の試験例でも述べたように、被計測板２が固定されているような場合は両温度にほとんど差はない。したがって、いずれか一方の温度のみを測定するようにしてもよい。ただし、被計測板２が搬送されている状態では、両温度に差が生じることもありえるので、被計測板２の温度情報T_1及び送受信プローブ１０の温度情報T_2をそれぞれ測定するのが好適である。

【００８１】

また、上述した実施形態では、数式９、１０を用いて室温時換算したが、例えば予め実験等により図１０（ｃ）、図１１（ｃ）のようなデータを計測しておき、そのデータを用いて室温時換算することも考えられる。しかしながら、その場合、結晶粒径計測の対象材

ごとにデータを採取しておく必要がある。したがって、多種の鋼板を対象材とするような場合には、事前にデータを採取する必要性のない、数式９、１０を用いた室温時換算が優位である。

【００８２】

（その他の実施形態）

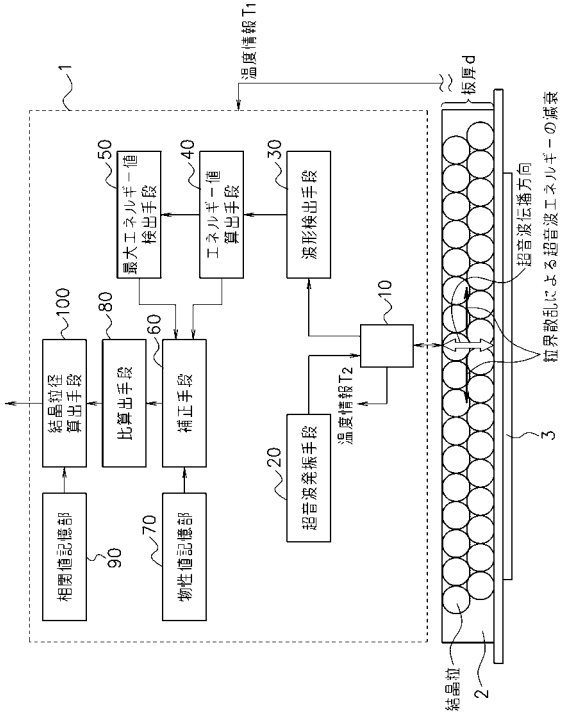
また、本発明は、以下の処理を実行することによっても実現される。すなわち、上述した実施形態の機能を実現するソフトウェア（プログラム）を、ネットワーク又は各種記憶媒体を介してシステム或いは装置に供給し、そのシステム或いは装置のコンピュータ（又はＣＰＵやＭＰＵ等）がプログラムを読み出して実行する処理である。

【符号の説明】

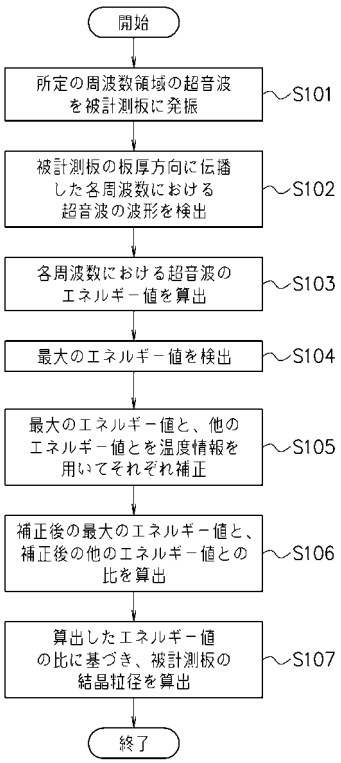
【００８３】

１：結晶粒径計測装置
２：被計測板
３：支持体
１０：送受信プローブ
２０：超音波発振手段
３０：波形検出手段
４０：エネルギー値算出手段
５０：最大エネルギー値検出手段
６０：補正手段
７０：物性値記憶部
８０：比算出手段
９０：相関値記憶部
１００：結晶粒径算出手段

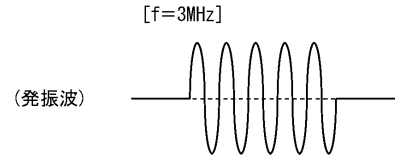
【図１】



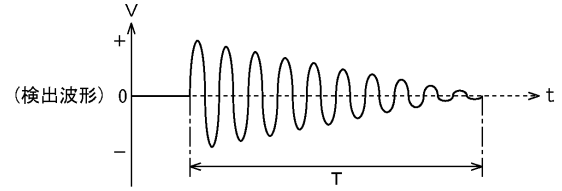
【図２】



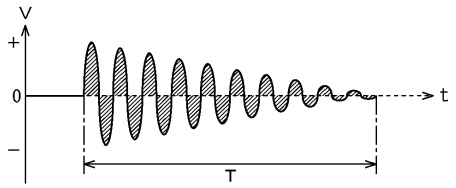
【図３】



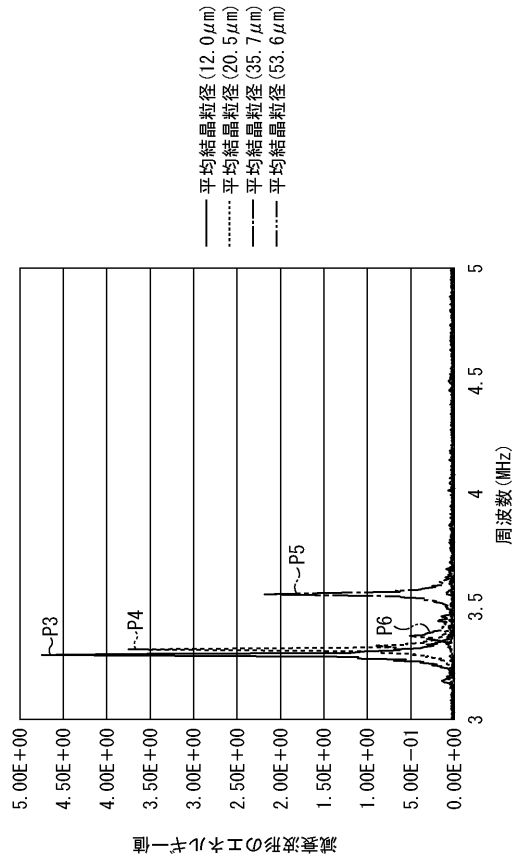
【図４】



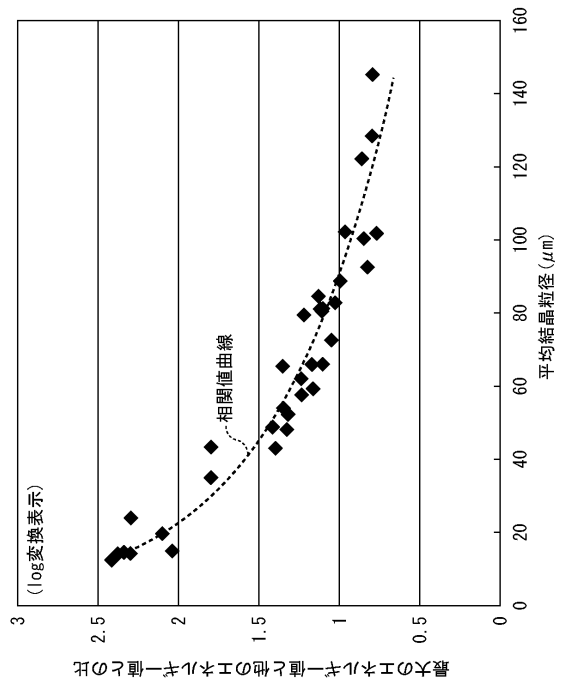
【図５】



【図６】



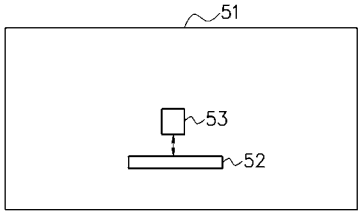
【図７】



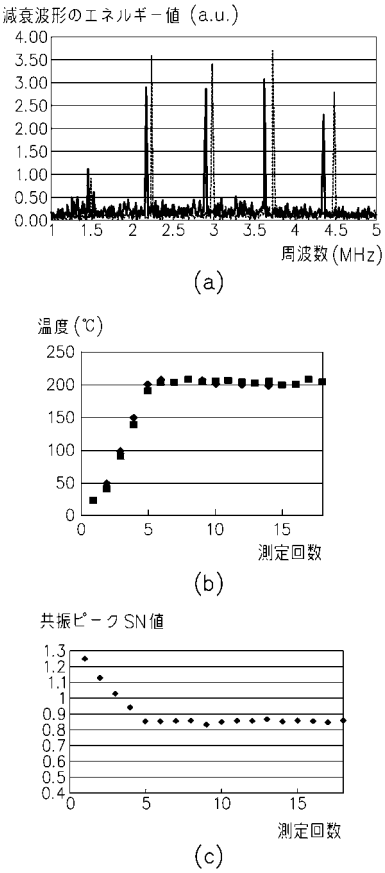
【図８】

被計測板の結晶粒	被計測板の板厚方向の主な結晶方位	音速(m／s)	共振周波数(MHz)
結晶粒径が小さい	<111>	3023	4.318
結晶粒径が大きい	<111>と<110>	3023,2492,3871が混在	4.318±α となる〔早い音速(3871m/s)による高い共振周波数5.53と、遅い音速(2492m/s)による低い共振周波数3.56が発生〕

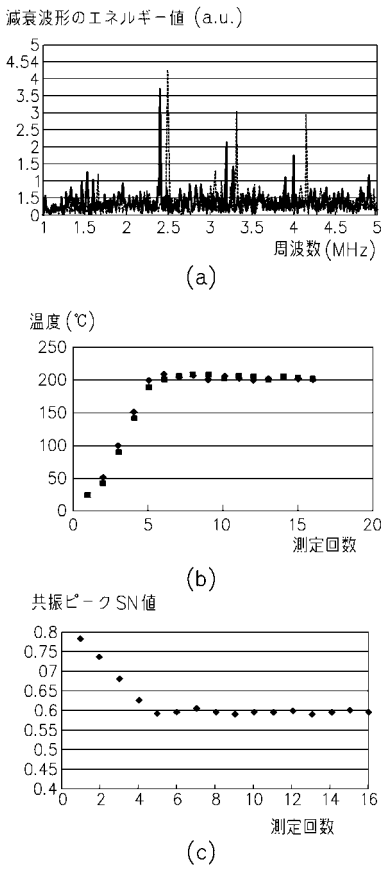
【図９】



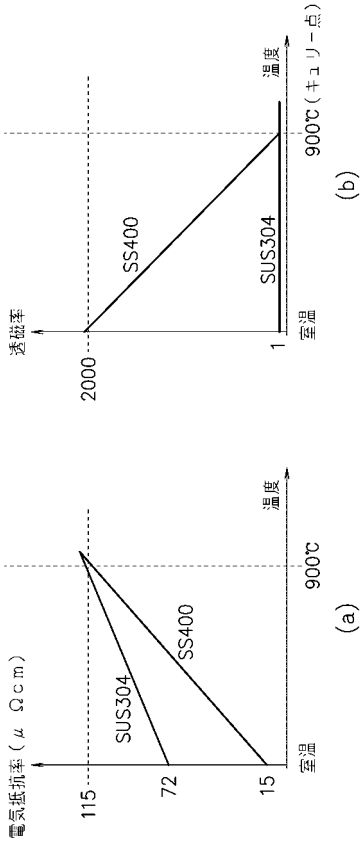
【図１０】



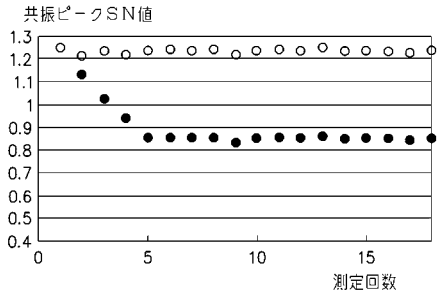
【図１１】



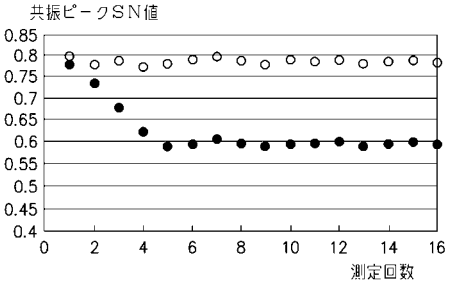
【図１２】



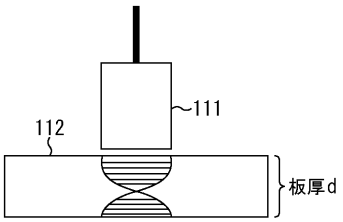
【図１３】



【図１４】

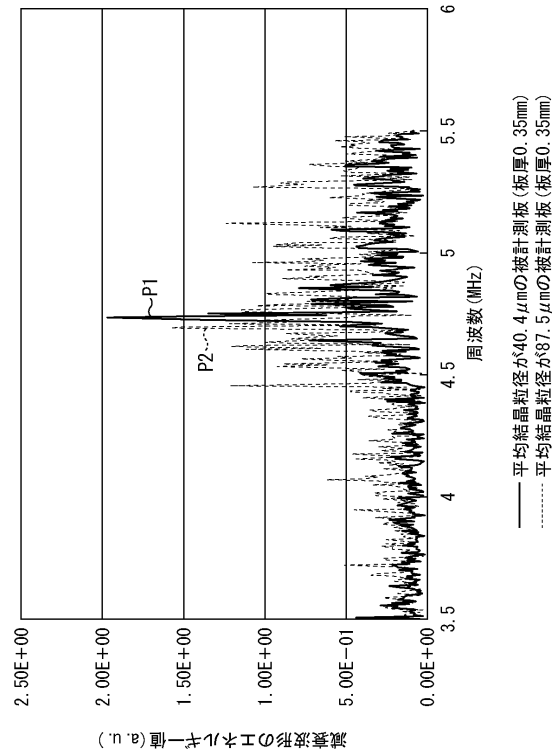


【図１５】



（定在波形成の状態）

【図１６】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開２００７－１０１３６０（ＪＰ，Ａ）
特開平１１－１０１６３２（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－１８５５４８（ＪＰ，Ａ）
特開２００７－２７１３３８（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０１Ｎ ２９／００－２９／５２
ＪＳＴＰｌｕｓ（ＪＤｒｅａｍＩＩ）