

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2016 年 11 月 24 日(24.11.2016)



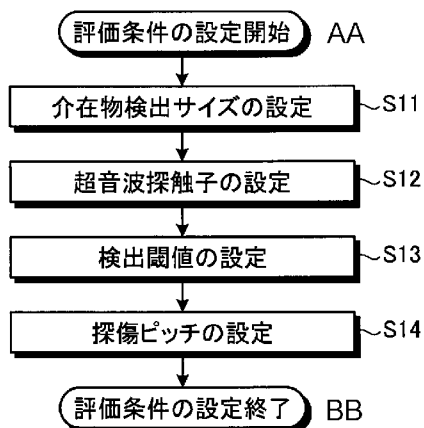
(10) 国際公開番号
WO 2016/185836 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 29/06 (2006.01) *G01N 29/44* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/061874
- (22) 国際出願日: 2016 年 4 月 13 日(13.04.2016)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2015-100181 2015 年 5 月 15 日(15.05.2015) JP
- (71) 出願人: J F E スチール株式会社 (JFE STEEL CORPORATION) [JP/JP]; 〒1000011 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 尾関 孝文(OZEKI, Takafumi); 〒1000011 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社 知的財産部内 Tokyo (JP). 東敬一(HIGASHI, Keiichi); 〒1000011 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社 知的財産部内 Tokyo (JP). 上井 清史(UWAI, Kiyoshi); 〒1000011 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社 知的財産部内 Tokyo (JP). 鍋島 誠司(NABESHI-MA, Seiji); 〒1000011 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社 知的財産部内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人酒井国際特許事務所 (SAKAI INTERNATIONAL PATENT OFFICE); 〒1000013 東京都千代田区霞が関 3 丁目 8 番 1 号 虎の門三井ビルディング Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC,

[続葉有]

(54) Title: STEEL MATERIAL CLEANLINESS EVALUATION METHOD AND CLEANLINESS EVALUATION DEVICE

(54) 発明の名称: 鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置



- S11 Inclusion detection size setting
S12 Ultrasonic testing probe setting
S13 Detection threshold value setting
S14 Testing pitch setting
AA Initiate evaluation condition setting
BB End evaluation condition setting

(57) Abstract: A steel material cleanliness evaluation method according to the present invention is characterized by comprising an inclusion detection size setting step that sets a minimum length d_3 in the width direction perpendicular to the extension direction of a steel material for inclusions in said steel material to be detected via ultrasonic examination, an ultrasonic testing step that, while transmitting and receiving an ultrasonic beam to and from the steel material via a water penetrant testing method using an ultrasonic testing probe 10 that forms a point-focused ultrasonic beam, two-dimensionally scans the steel material in such a way that the scanning surface is parallel to the extension direction, a one-dimensional processing step that obtains a two-dimensional distribution of reflected ultrasonic signal levels corresponding to the two-dimensionally scanned surface and performs one-dimensionally processing of the two-dimensional distribution and an evaluation step that, in the one-dimensionalized ultrasonic signal levels, determines and evaluates the total length of the extension direction in regions with the signal levels equal to or higher than the levels corresponding to the length d_3 .

(57) 要約:

[続葉有]



MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, 添付公開書類:
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, — 国際調査報告 (条約第 21 条(3))
KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

本発明に係る鋼材の清浄度評価方法は、超音波探傷によって検出しようとする鋼材中における介在物の、鋼材の圧延方向と垂直な幅方向における最小の長さ d_3 を設定する介在物検出サイズ設定ステップと、点集束超音波ビームを形成する超音波探触子 10 を用いて水浸探傷法により鋼材に超音波ビームを送受信しつつ、走査面が圧延方向と平行になるように鋼材上を 2 次元走査する超音波探傷ステップと、2 次元走査した面に対応する超音波反射信号レベルの 2 次元分布を取得し、2 次元分布を 1 次元化处理する 1 次元化处理ステップと、1 次元化された超音波反射信号レベルにおいて、長さ d_3 に相当する信号レベル以上となる領域の圧延方向の長さの総和を求めて評価する評価ステップと、を含むことを特徴とする。

明 細 書

発明の名称：鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置

技術分野

[0001] 本発明は鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置に関し、特に高い疲労特性が求められる高清浄度鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置に関する。

背景技術

[0002] 鋼材を加工して製造された製品の高い疲労特性を実現するためには、破損の原因となる非金属介在物(以下、介在物という)を低減する必要があることが知られており、そのために材料となる鋼材内部の介在物を調査することが従来から行われている。例えば特許文献1には、超音波探傷法を用いて介在物を評価することにより、鋼材の清浄度評価を行う方法が記載されている。ここで、特許文献1では、介在物の評価方法として反射波強度が一定以上となる介在物の個数を評価している。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2006-64569号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、特許文献1で提案された評価方法は、疲労特性の評価精度を十分に得られない場合があるという問題があった。すなわち、特許文献1で提案された評価方法は、検出された介在物の個数が多いほど鋼材の表面または表面近傍(以下、鋼材の表面という)に介在物が実際に存在する確率が高く、疲労特性が低いとしていた。しかし、このような介在物の個数の多寡と、鋼材の表面に介在物が実際に存在する確率とは必ずしも対応しておらず、この評価方法では鋼材の清浄度を正確に評価することができなかった。

[0005] 本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、鋼材の清浄度を正確に評

価することができる鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明に係る鋼材の清浄度評価方法は、鋳造された鋼片を圧延して形成される鋼材の清浄度を超音波探傷によって評価する鋼材の清浄度評価方法であって、前記超音波探傷によって検出しようとする前記鋼材中における介在物の、前記鋼材の圧延方向と垂直な幅方向における最小の長さ d_3 を設定する介在物検出サイズ設定ステップと、点集束超音波ビームを形成する超音波探触子を用いて、水浸探傷法により前記鋼材に超音波ビームを送受信しつつ、走査面が圧延方向と平行になるように前記鋼材上を2次元走査する超音波探傷ステップと、前記2次元走査した面に対応する超音波反射信号レベルの2次元分布を取得し、前記2次元分布を1次元化処理する1次元化処理ステップと、前記1次元化された超音波反射信号レベルにおいて、前記長さ d_3 に相当する信号レベル以上となる領域の前記圧延方向の長さの総和を求めて評価する評価ステップと、を含むことを特徴とする。

[0007] また、本発明に係る鋼材の清浄度評価方法は、前記超音波探傷ステップの前に、前記鋼片の圧延方向と垂直な方向における断面積を S_0 、前記鋼材の前記圧延方向と垂直な方向における断面積を S_1 としたとき、前記超音波探傷ステップで用いる前記超音波探触子の超音波ビームのビーム直径 d_2 を、下記式（1）を満たす場合には下記式（2）を満たすように、下記式（1）を満たさない場合は下記式（3）を満たすように設定する超音波探触子設定ステップをさらに含むことを特徴とする。

[0008]

[数1]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \quad \dots (1)$$

$$\frac{4d_3}{\pi d_2} \geq 0.02 \quad \dots (2)$$

$$\left(\frac{d_3}{d_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^{3/2} \geq 0.02 \quad \dots (3)$$

[0009] また、本発明に係る鋼材の清浄度評価方法は、介在物検出サイズ設定ステップにおいて、前記長さ d_3 を $20 \mu m$ 以下に設定することを特徴とする。

[0010] 上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明に係る鋼材の清浄度評価装置は、鋳造された鋼片を圧延して形成される鋼材の清浄度を超音波探傷によって評価する鋼材の清浄度評価装置であって、点集束超音波ビームを形成する超音波探触子を用いて、水浸探傷法により前記鋼材に超音波ビームを送受信しつつ、走査面が圧延方向と平行になるように前記鋼材上を2次元走査し、前記2次元走査した面に対応する超音波反射信号レベルの2次元分布を取得し、当該2次元分布を1次元化处理し、前記1次元化された超音波反射信号レベルにおいて、前記超音波探傷によって検出しようとする前記鋼材中における介在物の、前記鋼材の圧延方向と垂直な幅方向における最小の長さ d_3 に相当する信号レベル以上となる領域の前記圧延方向の長さの総和を求めて評価することを特徴とする。

発明の効果

[0011] 本発明によれば、介在物の延伸方向の長さの総和を基準として清浄度を評価するため、鋼材の表面または表面近傍に介在物が実際に存在する確率との対応が良好となり、鋼材の清浄度を正確に評価することができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]図1は、鋳造された鋼片が丸棒鋼（鋼材）へと圧延される様子を模式的に示す図である。

[図2]図2は、水浸探傷法による超音波探傷で用いる点集束超音波探触子を模

式的に示す図である。

[図3A]図3 Aは、介在物とビーム集束部との関係を模式的に示す図であって、介在物の長さがビーム直径を超えている場合を示す図である。

[図3B]図3 Bは、介在物とビーム集束部との関係を模式的に示す図であって、介在物の長さがビーム直径以下である場合を示す図である。

[図4A]図4 Aは、鋼材内に1つの介在物が存在する場合を模式的に示す図である。

[図4B]図4 Bは、鋼材内に2つの介在物が存在する場合を模式的に示す図である。

[図5]図5は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の内容を示すフローチャートである。

[図6]図6は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法における評価条件設定ステップの内容を示すフローチャートである。

[図7]図7は、ビーム直径の異なる4種類の点集束超音波探触子について、実際の超音波探傷と同等の条件で反射信号（超音波反射信号）とノイズレベルの比較を行った結果を示す表である。

[図8]図8は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法における探傷ピッチを模式的に示す図である。

[図9]図9は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法における被検体評価ステップの内容を示すフローチャートである。

[図10]図10は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法における被検体の切出し方法の一例を示す図である。

[図11]図11は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法において、探傷面が平面の場合の探傷方法の一例を示す図である。

[図12]図12は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法において、探傷面が曲面の場合の探傷方法の一例を示す図である。

[図13]図13は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法において、超音波反射信号レベルの2次元マップと、その1次元データの一例を示す図

である。

[図14]図 1 4 は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法において、検出された介在物の長さの総和評価の一例を示す図である。

[図15A]図 1 5 A は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の実施例において、評価材 1 に含まれる介在物を示す図である。

[図15B]図 1 5 B は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の実施例において、評価材 2 に含まれる介在物を示す図である。

[図16A]図 1 6 A は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の実施例において、評価材 1 を 2 次元走査した 2 次元マップと、その 1 次元データを示す図である。

[図16B]図 1 6 B は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の実施例において、評価材 2 を 2 次元走査した 2 次元マップと、その 1 次元データを示す図である。

[図17]図 1 7 は、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の実施例において、本発明に係る方法による評価結果と、従来技術に係る方法による評価結果をそれぞれ示す表である。

発明を実施するための形態

[0013] 以下、本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置について、図面を参照しながら説明する。なお、本発明は以下の実施形態に限定されるものではない。また、下記実施形態における構成要素には、当業者が置換可能かつ容易なもの、あるいは実質的に同一のものが含まれる。

[0014] 本実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法は、鑄造された鋼片を圧延して形成される鋼材の清浄度を、水浸探傷法（以下、水浸法という）を利用した超音波探傷によって評価する方法である。ここで、以下ではまず本発明の背景となる技術を説明した後、本発明の具体的内容について説明することとする。

[0015] 一般に、鋼材の製造工程としては、まず鋼片が鑄造され、その後その鋼片が圧延工程により延ばされて鋼材が製造される（例えば参考文献 1 参照）。

なお、圧延工程は複数であることもあり、また、その間に熱処理や表面処理が行われることもある。

[0016] 参考文献 1：特開 2009-285698 号公報

[0017] これらの製造工程において、介在物は鑄造時に鋼片中に混入すると推定される。またその際、介在物は図 1 左図に示すように、およそ球形であることが想定される。そして、このように鑄造時に混入した介在物は、同図右図に示すように、圧延工程を経て延伸されることが想定される。この場合、圧延後の鋼材（例えば丸棒鋼）における介在物の形状、すなわち介在物の圧延方向（延伸方向）における長さ（長径） L と、当該圧延方向と垂直な幅方向における長さ（短径） d_1 は、同図に示すように、鑄造時における鋼片の圧延方向と垂直な方向における断面積を S_0 、圧延後における丸棒鋼の圧延方向と垂直な方向における断面積を S_1 、鑄造時における介在物の直径を d_0 としたとき、それぞれ下記式（4）および下記式（5）に示すものとなる。なお、前記した「圧延方向」とは、鋼片が圧延される方向であり、鋼材の長さ方向と平行な方向を意味している。

[0018] [数2]

$$L = d_0 \cdot (S_0/S_1) \quad \dots (4)$$

$$d_1 = d_0 \cdot (S_1/S_0)^{1/2} \quad \dots (5)$$

[0019] ここで、上記式（4）および上記式（5）において、介在物の圧延方向における長さ L （以下、介在物の長さ L という）は、圧延比 S_0/S_1 に比例して延伸するものと仮定し、介在物の圧延方向と垂直な幅方向における長さ d_1 （以下、介在物の幅 d_1 という）は、幅方向に垂直な断面において円形であると仮定している。また上記式（4）および上記式（5）において、介在物の体積は圧延前後で不変であると仮定している。

[0020] このように圧延されて製造された鋼材に対して超音波探傷を行う場合、介在物の検出能および探傷効率を考慮して、例えば前記した特許文献 1 に記載されたような焦点型探触子を用いた水浸法によって行うことが一般的である。図 2 に、その際に用いられる点集束超音波探触子（以下、超音波探触子と

いう) 10と、当該超音波探触子10によって形成される点集束超音波ビーム(以下、超音波ビームという)を示す。

[0021] 図2に示したビーム集束部(焦点、集束領域)における介在物からの超音波反射信号(以下、反射信号という)は、ビーム集束部におけるビーム断面積 S_2 と、超音波ビーム内に含まれている介在物の断面積 S_3 との比 S_3/S_2 におよそ比例すると考えられる。図3Aおよび図3Bは、超音波ビームのビーム集束部に介在物が存在する場合を想定した断面図であり、鋼材における介在物が存在する領域を圧延方向と平行に切断し、その切断面を上から観察した様子を模式的に示す図である。なお、ここでは、鋼材の圧延方向と垂直に超音波ビームを入射させることを想定している。このように超音波ビームを圧延方向と垂直に入射すると、ビーム集束部における介在物の断面積が大きくなるため、微小な介在物の検出にも有利である。

[0022] このとき、図3Aに示すように、介在物の長さ L がビーム直径 d_2 を上回る場合($L > d_2$)、超音波ビームをどのように当てても介在物の一部が超音波ビームからはみ出てしまう。この場合、鋼材からの反射信号は超音波ビーム内の断面積にしか対応しないため、介在物全体の断面積がわからないという問題がある。なお、前記した「ビーム直径」とは、超音波ビームのビーム集束部における直径のことを意味している。

[0023] 一方、図3Bに示すように、介在物の長さ L がビーム直径 d_2 以下($L \leq d_2$)となるような超音波ビームを使えば、介在物全体を超音波ビーム内に収めることができる。しかし、この場合はビーム断面積 S_2 が大きくなってしまったため、ビーム断面積 S_2 と介在物の断面積 S_3 との比 S_3/S_2 が小さくなり、鋼材からの反射信号の強度が弱くなるため、介在物の検出能が低下してしまうという問題がある。

[0024] なお、図3Aに示すように、ビーム直径 d_2 を小さくした場合、介在物全体の断面積は分からないものの、超音波ビーム内の介在物の断面積が一定以上(ビーム集束部の断面積に対する介在物の断面積が一定以上)であれば、介在物を検出することは可能である。しかしこの場合も、介在物を評価するに

あたって以下のような問題点があった。

[0025] 例えば、鋼材である丸棒鋼が切断・加工されて機械部品等として使用される場合、機械部品の表面または表面近傍に介在物が存在すると破断の原因となり、寿命特性が低下する。ここで、図4 Aおよび図4 Bに示す丸棒鋼を切断することを考えた場合、切断面の位置をランダムとすると、表面に介在物が存在する確率（あるいは切断時に介在物が露出する確率）は、「丸棒鋼に含まれる介在物の長さの合計÷丸棒鋼の長さ」となる。そのため、図4 Aに示すように、1つの介在物（長さ L'_1 ）のみが含まれる丸棒鋼（長さ l ）の表面に介在物が存在する確率は、「 L'_1 / l 」となる。また、図4 Bに示すように、合計2つの介在物（長さ L'_2 , L'_3 ）が含まれる丸棒鋼（長さ l ）の表面に介在物が存在する確率は、「 $(L'_2 + L'_3) / l$ 」となる。従って、介在物の個数によらず、それぞれの介在物の長さを総和した長さ（以下、総長さという）が長いほど、上記確率は高くなる。

[0026] 一方、前記した特許文献1で提案された従来の評価方法は、検出された介在物の個数のみを評価し、介在物の個数が増えるほど鋼材の表面に介在物が存在する確率が高く、疲労特性が低いとしていた。そのため、特許文献1の評価方法は、介在物評価の結果と疲労特性の評価とが適切に対応していないという問題があった。そこで、本発明者らは、このような問題点を解決するために、鋼材の清浄度をより正確に評価することができる鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置を考案した。以下、本発明の内容について説明する。

[0027] 本発明の実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法を行うための装置の基本的構成は、前記した図2に示すものと同様である。すなわち、清浄度評価装置1は、超音波探触子10と、制御部20と、を備えている。なお、図2では本発明に係る構成のみを図示し、その他の構成は図示を省略している。

[0028] 超音波探触子10は、超音波ビームを形成し、水浸法によって超音波探傷を行うものである。また、制御部20は、超音波探触子10を制御するとともに、超音波探触子10によって取得された反射信号を処理するものである。

。この制御部20は、具体的にはCPU、ディスク装置、メモリ装置、入力装置、出力装置、通信装置等で構成される一般的なコンピュータを、本実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法の後記各ステップを行う手段として機能させる。

[0029] 本実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法は、図5に示すように、評価条件設定ステップ（ステップS1）と、被検体評価ステップ（ステップS2）と、を行う。そのうち、評価条件設定ステップでは、図6に示すように、介在物検出サイズ設定ステップ（ステップS11）と、超音波探触子設定ステップ（ステップS12）と、検出閾値設定ステップ（ステップS13）と、探傷ピッチ設定ステップ（ステップS14）と、をこの順番で行う。

[0030] まず、介在物検出サイズ設定ステップでは、介在物検出サイズを設定する。ここで、介在物検出サイズとは、超音波探傷によって検出しようとする鋼材中における最小（下限）の介在物のサイズのことである。より具体的には、検出しようとする最小の介在物の、圧延方向と垂直な幅方向における最小の長さのことを意味している。以下では、この介在物検出サイズのことを d_3 で示す。

[0031] 本ステップでは、図1に示すように、鋼材中の介在物が圧延によって延伸されたものと想定し、当該延伸後の介在物の幅 d_1 に対応させた介在物検出サイズ d_3 を設定する。そして、後段の超音波探傷ステップ（図9参照）において、 $d_1 > d_3$ となる介在物を検出する。なお、介在物検出サイズ d_3 は、値が小さいほど小さな介在物を検出できるため、なるべく小さな値とすることが好ましい。例えば以下の参考文献2には、 $20\mu\text{m}$ 以下の欠陥が疲労き裂の起点となることが示されているため、本ステップでは、介在物検出サイズ d_3 を $20\mu\text{m}$ 以下に設定することが好ましい。

[0032] 参考文献2：藤松威史ほか、「高炭素クロム軸受鋼の転がり疲れにおける内部欠陥からのき裂発生挙動」、鉄と鋼、一般社団法人日本鉄鋼協会、2008年、Vol.94、No.1、p13-20

[0033] 次に、超音波探触子設定ステップでは、超音波探傷に使用する超音波探触

子 10 を設定する。本ステップでは、超音波ビームによる超音波探傷の条件を、鑄造時に混入した介在物の圧延による延伸を考慮して決定する。以下、超音波探傷の条件を決定するための式について説明する。

[0034] まず、超音波探触子 10 のビーム直径 d_2 は、超音波探触子 10 の振動子直径を D 、水中焦点距離を F 、水中超音波音速を C 、超音波周波数を f としたとき、下記式 (6) のように示すことができる。

[0035] [数3]

$$d_2 = \frac{C \cdot F}{f \cdot D} \quad \dots (6)$$

[0036] なお、超音波ビームのビーム直径 d_2 は、当該超音波ビームが鋼材中に入射した場合であっても、基本的には変化しない。このとき、ビーム集束部におけるビーム断面積 S_2 は、下記式 (7) のように示すことができる。

[0037] [数4]

$$S_2 = \frac{\pi}{4} d_2^2 \quad \dots (7)$$

[0038] 一方、介在物に関して、介在物の長さ L は、上記式 (4) および上記式 (5) から、介在物の幅 d_1 および圧延比 S_0/S_1 を用いて、下記式 (8) のように示すことができる。

[0039] [数5]

$$L = d_1 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} \quad \dots (8)$$

[0040] このとき、介在物が超音波ビーム断面の中央にある場合 (図 3 A および図 3 B 参照) の超音波ビーム内に含まれる介在物の断面積 S_3 は、下記式 (9) および下記式 (10) のように示すことができる。なお、下記式 (9) および下記式 (10) では、 $L > d_2$ の場合は超音波ビーム内の介在物の断面を長方形として近似し、 $L \leq d_2$ の場合は超音波ビーム内の介在物の断面を楕円として近似している。

[0041]

[数6]

$$L > d_2 \text{ の場合、 } S_3 = d_1 \cdot d_2 \quad \cdots (9)$$

$$L \leq d_2 \text{ の場合、 } S_3 = \frac{\pi}{4} d_1 \cdot L \quad \cdots (10)$$

[0042] 次に、超音波ビームのビーム断面積 S_2 と、当該超音波ビーム内に含まれている介在物の断面積 S_3 との比である S_3/S_2 について考える。超音波探傷時に介在物から得られる反射信号 A_1 は、超音波ビーム全体から超音波が反射する場合の反射信号 A_0 を用いると、下記式 (11) のように示すことができる。なお、下記式 (11) では、反射信号 A_1 、 A_0 における単位面積当たりの反射率は同等と仮定している。

[0043] [数7]

$$A_1 = A_0 \cdot (S_3/S_2) \quad \cdots (11)$$

[0044] ここで、超音波探傷では、前記した介在物検出サイズ設定ステップで設定した介在物検出サイズ d_3 以上の介在物に対応する反射信号 A_1 を検出できるようにすれば良いため、超音波探傷におけるノイズレベルを A_n 、検出のための余裕値 (SN比) を α としたとき、反射信号 A_1 は、下記式 (12) に示すような値とする。

[0045] [数8]

$$A_1 \geq \alpha \cdot A_n \quad \cdots (12)$$

[0046] 以上より、 $d_1 \geq d_3$ となる介在物を検出するために超音波ビームのビーム直径 d_2 に求められる条件は、上記式 (8) ~ 上記式 (12) から、下記式 (13) および下記式 (14) に示すものとなる。

[0047] [数9]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \text{ の場合、 } A_0 \cdot \left(\frac{4d_3}{\pi d_2} \right) \geq \alpha \cdot A_n \quad \cdots (13)$$

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} \leq d_2 \text{ の場合、 } A_0 \cdot \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{3/2} \geq \alpha \cdot A_n \quad \cdots (14)$$

[0048] ここでさらに、上記式 (13) および上記式 (14) におけるノイズレベ

ル A_n について考える。発明者らは、超音波ビームのビーム直径 d_2 の異なる 4 種類の超音波探触子 10 について、図 7 に示すように、実際の超音波探傷と同等な条件で反射信号 A_0 とノイズレベル A_n の比較を行った。同図に示すそれぞれの「SN 比の逆数」から、ビーム直径 d_2 によらず、 $A_n \div 0.01 \cdot A_0$ とすれば良いことが分かる。これを考慮すると、上記式 (13) および上記式 (14) は、下記式 (15) および下記式 (16) となる。

[0049] [数10]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \text{ の場合、 } \frac{4d_3}{\pi d_2} \geq \alpha \cdot 0.01 \quad \dots (15)$$

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} \leq d_2 \text{ の場合、 } \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{3/2} \geq \alpha \cdot 0.01 \quad \dots (16)$$

[0050] そして、余裕値 α は、 $\alpha \geq 2$ が少なくとも必要となる。この場合、上記式 (15) および上記式 (16) は、下記式 (17) および下記式 (18) となる。

[0051] [数11]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \text{ の場合、 } \frac{4d_3}{\pi d_2} \geq 0.02 \quad \dots (17)$$

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} \leq d_2 \text{ の場合、 } \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{3/2} \geq 0.02 \quad \dots (18)$$

[0052] また、余裕値 α は、 $\alpha \geq 5$ とすることがより好ましい。この場合、上記式 (17) および上記式 (18) は、下記式 (19) および下記式 (20) となる。

[0053] [数12]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \text{ の場合、 } \frac{4d_3}{\pi d_2} \geq 0.05 \quad \dots (19)$$

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} \leq d_2 \text{ の場合、 } \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{3/2} \geq 0.05 \quad \dots (20)$$

[0054] 以上を踏まえ、本ステップでは、後記する超音波探傷ステップで用いる超音波探触子 10 の超音波ビームのビーム直径 d_2 を、上記式 (17) または上

記式（１８）（好ましくは上記式（１９）または上記式（２０））を満たすように設定する。言い換えると、ビーム直径 d_2 を、下記式（１）を満たす場合には下記式（２）を満たすように、下記式（１）を満たさない場合は下記式（３）を満たすように設定する。

[0055] [数13]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \quad \cdots (1)$$

$$\frac{4d_3}{\pi d_2} \geq 0.02 \quad \cdots (2)$$

$$\left(\frac{d_3}{d_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^{3/2} \geq 0.02 \quad \cdots (3)$$

[0056] 次に、検出閾値設定ステップでは、介在物の検出閾値 A_{th} を設定する。ここでは、介在物検出サイズ d_3 に相当する介在物の反射信号 A_1 を検出できれば良いため、上記式（８）～上記式（１１）から、検出閾値 A_{th} は、下記式（２１）および下記式（２２）を満たすように設定する。

[0057] [数14]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \text{ の場合、} A_{th} = A_0 \cdot \left(\frac{4d_3}{\pi d_2}\right) \quad \cdots (21)$$

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} \leq d_2 \text{ の場合、} A_{th} = A_0 \cdot \left(\frac{d_3}{d_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^{3/2} \quad \cdots (22)$$

[0058] 次に、探傷ピッチ設定ステップでは、探傷ピッチ p を決定する。探傷ピッチ p は、超音波ビームのビーム直径 d_2 を基に、探傷もれがないように設定すれば良い。探傷ピッチ p は、例えば図８のような測定点を考慮した場合、下記式（２３）を満たすように設定する。

[0059] [数15]

$$\sqrt{2} \cdot p \leq d_2 \quad \cdots (23)$$

[0060] 本実施形態に係る鋼材の清浄度評価方法は、以上のように評価条件設定ステップ（図５のステップＳ１、図６のステップＳ１１～Ｓ１４）を行った後

、被検体評価ステップ（図5のステップS2）を行う。被検体評価ステップでは、図9に示すように、被検体準備ステップ（ステップS21）と、超音波探傷ステップ（ステップS22）と、1次元化处理ステップ（ステップS23）と、評価ステップ（ステップS24）と、をこの順番で行う。

[0061] まず、被検体準備ステップでは、超音波探傷の被検体の準備を行う。本ステップでは、具体的には、例えば鋼材（丸棒鋼）の切出し、表面平滑化加工、結晶粒微細化のための熱処理等を行う。また、鋼材の切出しにおいては、図10に示すように、探傷面が圧延方向と平行になるようにする。また、後に水浸2次元探傷を効率良く行う上では、同図に示すように、探傷面が平面となるように被検体を切出すことが好ましい。

[0062] 次に、超音波探傷ステップでは、超音波探傷を実施する。本ステップでは、点集束の超音波探触子10による探傷を精度良く、かつ効率的に行うために水浸法を用いる。そして、本ステップでは、超音波探触子設定ステップで設定された超音波探触子10を用い、探傷ピッチ設定ステップで設定された探傷ピッチ p ごとに超音波ビームを送受信しつつ、それぞれの位置ごとに反射信号 A_1 を検出していくことで、反射信号レベル（反射信号強度）の2次元マップ（2次元分布）を生成する。

[0063] なお、前記した2次元マップは、鋼材の圧延方向が分かるように生成する。また、本ステップにおける超音波探傷の具体的方法としては、探傷面が平面の場合は、図11に示すように、例えば参考文献3に記載されているようなCスキャン探傷法を用いることが好ましい。

[0064] 参考文献3：特開2008-261889号公報

[0065] また、探傷面が曲面の場合は、例えば図12に示すように、軸方向の回転と軸方向に平行な方向の移動を組み合わせる2次元走査を行うことが好ましい。

[0066] このように、本ステップでは、超音波ビームを形成する超音波探触子10を用いて水浸法により被検体である鋼材に超音波ビームを送受信しつつ、走査面が圧延方向と平行になるように鋼材上を2次元走査する。

- [0067] 次に、1次元化処理ステップでは、反射信号レベルの2次元マップの圧延方向1次元化処理を行う。本ステップでは、前記した超音波探傷ステップにおいて2次元走査した面に対応する反射信号レベルの2次元マップを取得し、この2次元マップを1次元化処理する。本ステップでは、具体的には図13に示すように、2次元マップ上の指定した領域内において、被検体である鋼材の圧延方向に垂直な方向について最大値抽出等の集約を行うことにより、データを1次元化する。
- [0068] 最後に、評価ステップでは、被検体から検出された介在物の総長さ評価を行う。本ステップでは、前記した1次元化処理ステップにおいて1次元化された反射信号レベルにおいて、介在物検出サイズ d_3 に相当する信号レベル（検出閾値 A_{th} ）以上となる領域の圧延方向の総長さを求めて評価する。すなわち本ステップでは、具体的には図14に示すように、1次元化された反射信号レベルについて、前記した検出閾値設定ステップで設定された介在物の検出閾値 A_{th} 以上となる点数をカウントし、圧延方向のデータピッチを乗算することで、介在物の総長さを算出する。そして、本ステップでは、介在物の総長さが長いほど、鋼材の表面に介在物が存在する確率が高いと評価する。
- [0069] なお、前記した図13および図14に示す1次元化処理ステップおよび評価ステップでは、鋼材全体から得た反射信号レベルの2次元マップから、特に反射信号レベルの大きい領域を指定して（抜き出して）1次元化処理および総長さ評価を行っている。しかし、このような領域指定を行わず、広い範囲を一度に1次元化処理および総長さ評価しても良い。前者の場合は各領域の総長さ値が得られるという利点があり、後者の場合は領域指定の手間を少なくすることができるという利点がある。
- [0070] 以上説明した本発明に係る鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置1によれば、介在物の延伸方向の総長さを基準として清浄度を評価するため、鋼材の表面に介在物が実際に存在する確率との対応が良好となり、鋼材の清浄度を正確に評価することができる。

実施例

[0071] 以下、実施例を挙げて本発明をより具体的に説明する。本実施例では、本発明に係る方法および従来技術（特許文献１）に係る方法を利用して、圧延比 $S_0/S_1 = 10$ で圧延された丸棒鋼の清浄度を評価し、その結果を比較した。

[0072] 本発明に係る方法では、介在物検出サイズ $d_3 = 10 \mu m$ とし、超音波探触子としては、前記した図 7 の No. 2 に記載されたビーム直径 $d_2 = 0.20 mm$ のものを使用した。また、余裕値 $\alpha = 5$ とし、探傷ピッチ $p = 0.1 mm$ に設定した。これにより、以下に示すように、超音波探触子設定ステップにおける上記式（１９）の条件を満たすことになる。

[0073] [数16]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} = 0.32 mm > d_2 = 0.20 mm$$

$$\frac{4d_3}{\pi d_2} = 0.064 \geq \alpha \cdot 0.01 = 0.05$$

[0074] 本実施例における超音波探傷ステップでは、 $20 mm \times 10 mm$ の領域を探傷した場合において、図 15 A および図 15 B に示すように介在物が分布している 2 種類の評価材探傷の数値実験を行った。なお、ここでは圧延によって介在物が上記式（４）および上記式（５）に示すような形状に形成されたものと仮定している。

[0075] 上記のように超音波探傷ステップを行い、その後に 1 次元化処理ステップおよび評価ステップを経て、介在物の総長さを評価した結果を図 16 A および図 16 B に示す。ここで、反射信号レベルの 2 次元マップでは、反射信号が、上記式（１１）に示したレベルとなる。また、ノイズレベル $A_n \cong 0.01 \cdot A_0$ とし、検出閾値 A_{th} は以下の通りとした。

[0076] [数17]

$$A_{th} = A_0 \cdot \left(\frac{4d_3}{\pi d_2} \right) = 0.064 \cdot A_0$$

[0077] 次に、本発明に係る方法による評価結果と、従来技術に係る方法による評

価結果を図 1 7 に示す。評価材 1 と評価材 2 とでは、前記した図 4 A および図 4 B に示すように、鋼材の表面に介在物が存在する確率は評価材 1 の方が大きい。本発明に係る方法では、介在物の総長さの長い評価材 1 の表面に介在物が存在する確率が評価材 2 よりも高いと評価するため、実際の確率との対応が良好である。一方、従来技術に係る方法は、介在物の個数の多い評価材 2 の表面に介在物が存在する確率が評価材 1 よりも高いと評価するため、実際の露出確率とは対応しない結果となる。

[0078] 以上、本発明に係る鋼材の清浄度評価方法および清浄度評価装置について、発明を実施するための形態および実施例により具体的に説明したが、本発明の趣旨はこれらの記載に限定されるものではなく、請求の範囲の記載に基づいて広く解釈されなければならない。また、これらの記載に基づいて種々変更、改変等したものも本発明の趣旨に含まれることはいうまでもない。

産業上の利用可能性

[0079] 本発明は、鋼材の清浄度を正確に評価することができるため、高清浄度鋼材の製造工程を中心に広範な分野に適用することができる。

符号の説明

- [0080] 1 清浄度評価装置
- 1 0 点集束超音波探触子
 - 2 0 制御部

請求の範囲

[請求項1] 鋳造された鋼片を圧延して形成される鋼材の清浄度を超音波探傷に

よって評価する鋼材の清浄度評価方法であって、

前記超音波探傷によって検出しようとする前記鋼材中における介在物の、前記鋼材の圧延方向と垂直な幅方向における最小の長さ d_3 を設定する介在物検出サイズ設定ステップと、

点集束超音波ビームを形成する超音波探触子を用いて、水浸探傷法により前記鋼材に超音波ビームを送受信しつつ、走査面が圧延方向と平行になるように前記鋼材上を2次元走査する超音波探傷ステップと、

前記2次元走査した面に対応する超音波反射信号レベルの2次元分布を取得し、前記2次元分布を1次元化処理する1次元化処理ステップと、

前記1次元化された超音波反射信号レベルにおいて、前記長さ d_3 に相当する信号レベル以上となる領域の前記圧延方向の長さの総和を求めて評価する評価ステップと、

を含むことを特徴とする鋼材の清浄度評価方法。

[請求項2] 前記超音波探傷ステップの前に、

前記鋼片の圧延方向と垂直な方向における断面積を S_0 、前記鋼材の前記圧延方向と垂直な方向における断面積を S_1 としたとき、前記超音波探傷ステップで用いる前記超音波探触子の超音波ビームのビーム直径 d_2 を、下記式(1)を満たす場合には下記式(2)を満たすように、下記式(1)を満たさない場合は下記式(3)を満たすように設定する超音波探触子設定ステップをさらに含むことを特徴とする請求項1に記載の鋼材の清浄度評価方法。

[数1]

$$d_3 \cdot (S_0/S_1)^{3/2} > d_2 \quad \cdots (1)$$

$$\frac{4d_3}{\pi d_2} \geq 0.02 \quad \cdots (2)$$

$$\left(\frac{d_3}{d_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S_1}\right)^{3/2} \geq 0.02 \quad \cdots (3)$$

[請求項3] 前記介在物検出サイズ設定ステップは、前記長さ d_3 を $20 \mu m$ 以下に設定することを特徴とする請求項1または請求項2に記載の鋼材の清浄度評価方法。

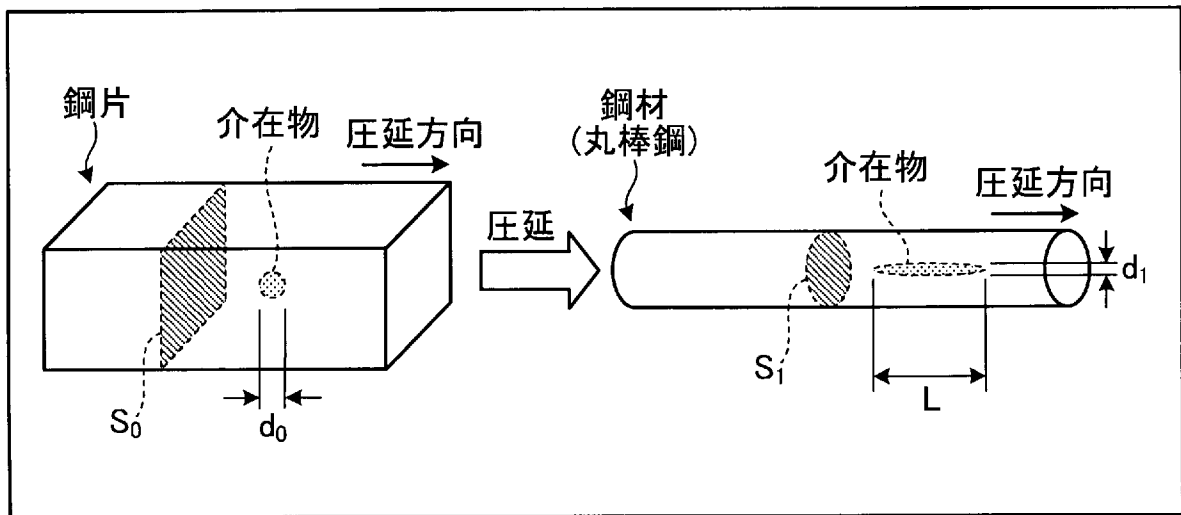
[請求項4] 鋳造された鋼片を圧延して形成される鋼材の清浄度を超音波探傷によって評価する鋼材の清浄度評価装置であって、

点集束超音波ビームを形成する超音波探触子を用いて、水浸探傷法により前記鋼材に超音波ビームを送受信しつつ、走査面が圧延方向と平行になるように前記鋼材上を2次元走査し、

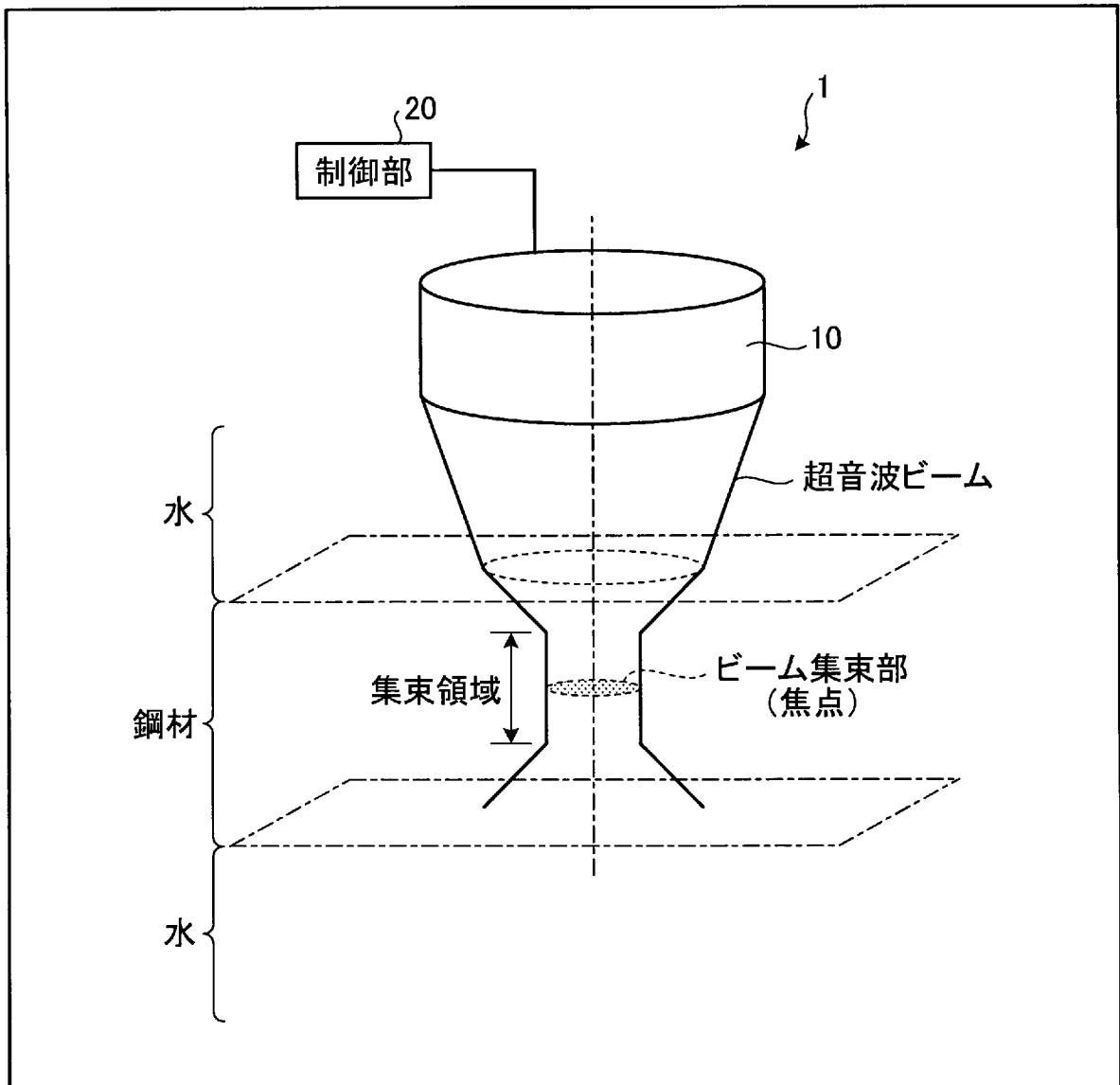
前記2次元走査した面に対応する超音波反射信号レベルの2次元分布を取得し、当該2次元分布を1次元化处理し、

前記1次元化された超音波反射信号レベルにおいて、前記超音波探傷によって検出しようとする前記鋼材中における介在物の、前記鋼材の圧延方向と垂直な幅方向における最小の長さ d_3 に相当する信号レベル以上となる領域の前記圧延方向の長さの総和を求めて評価することを特徴とする鋼材の清浄度評価装置。

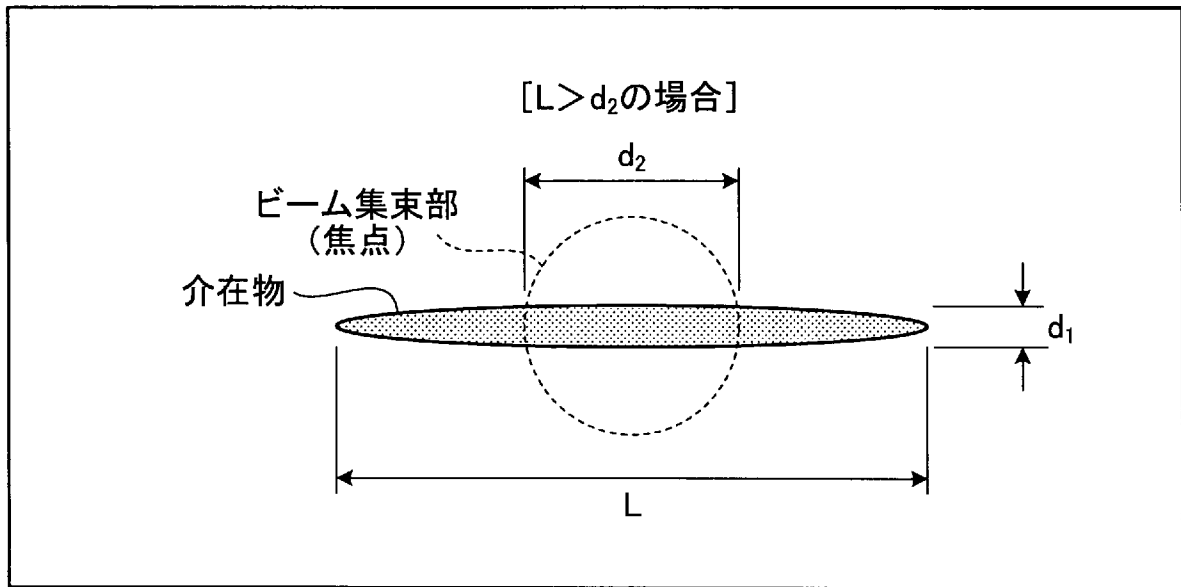
[図1]



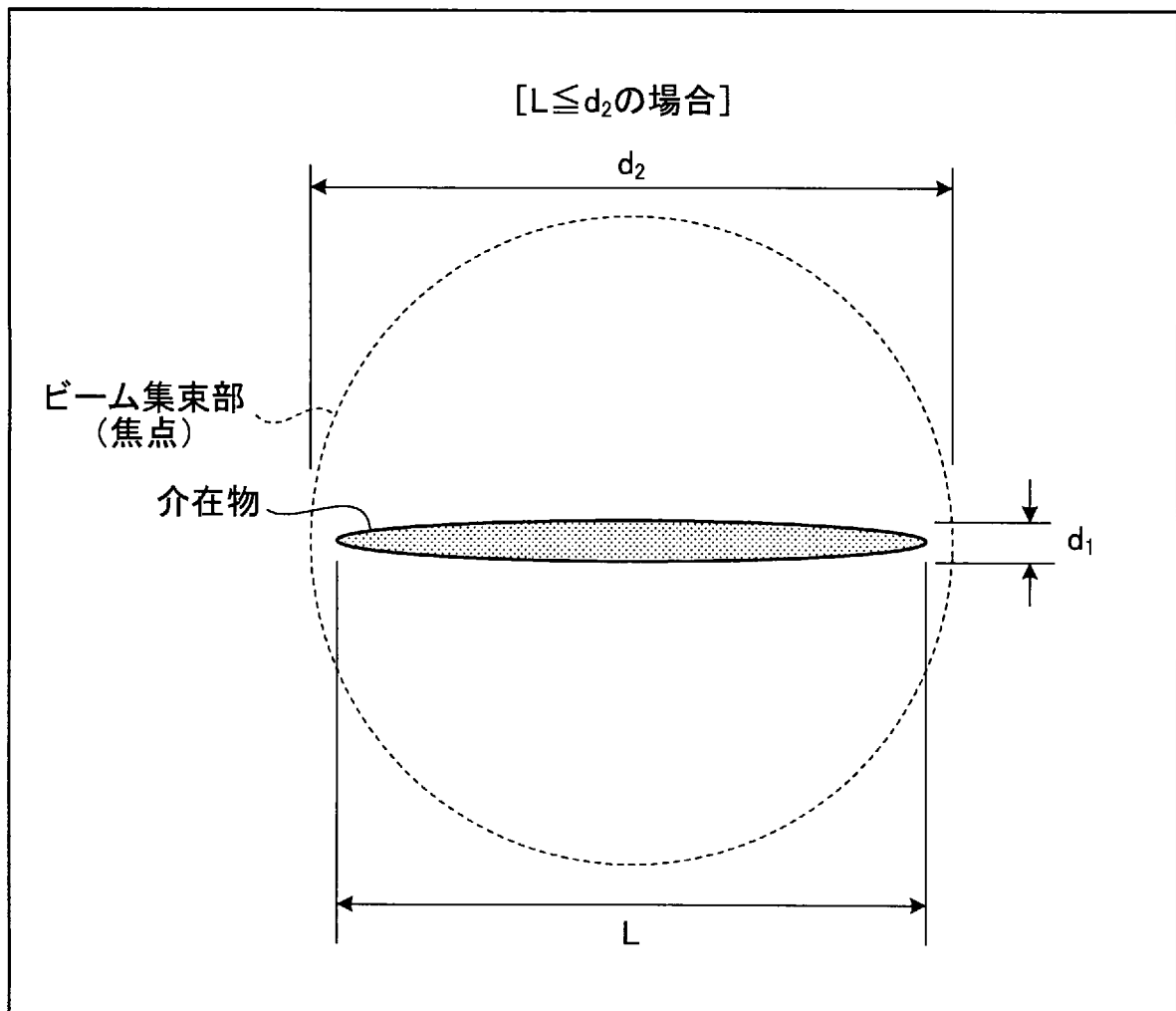
[図2]



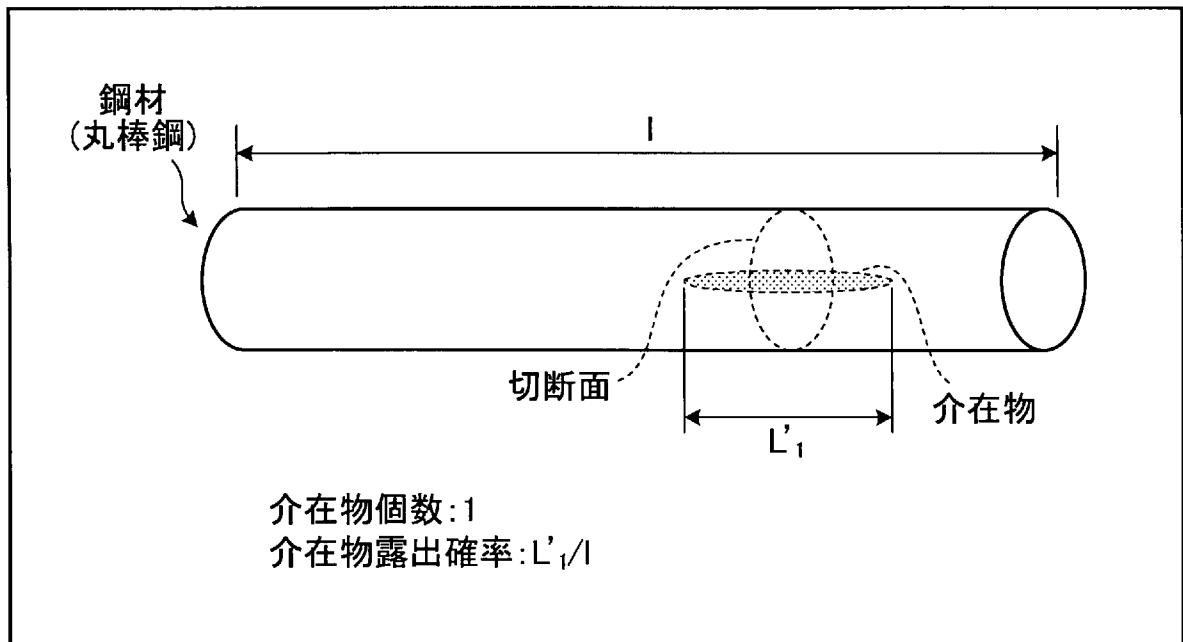
[図3A]



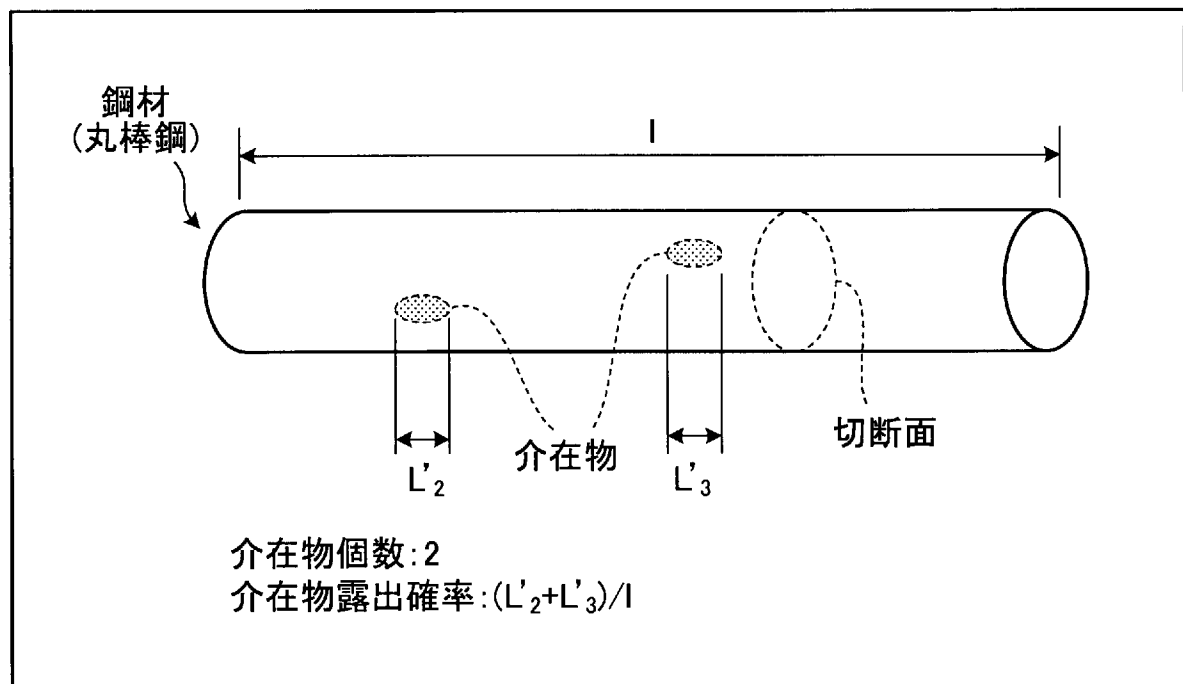
[図3B]



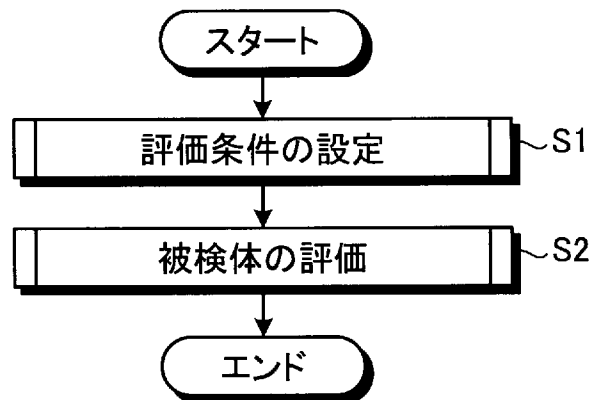
[図4A]



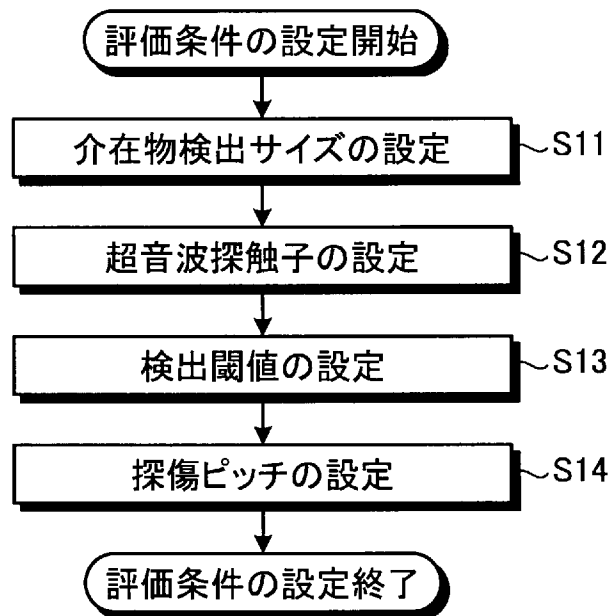
[図4B]



[図5]



[図6]

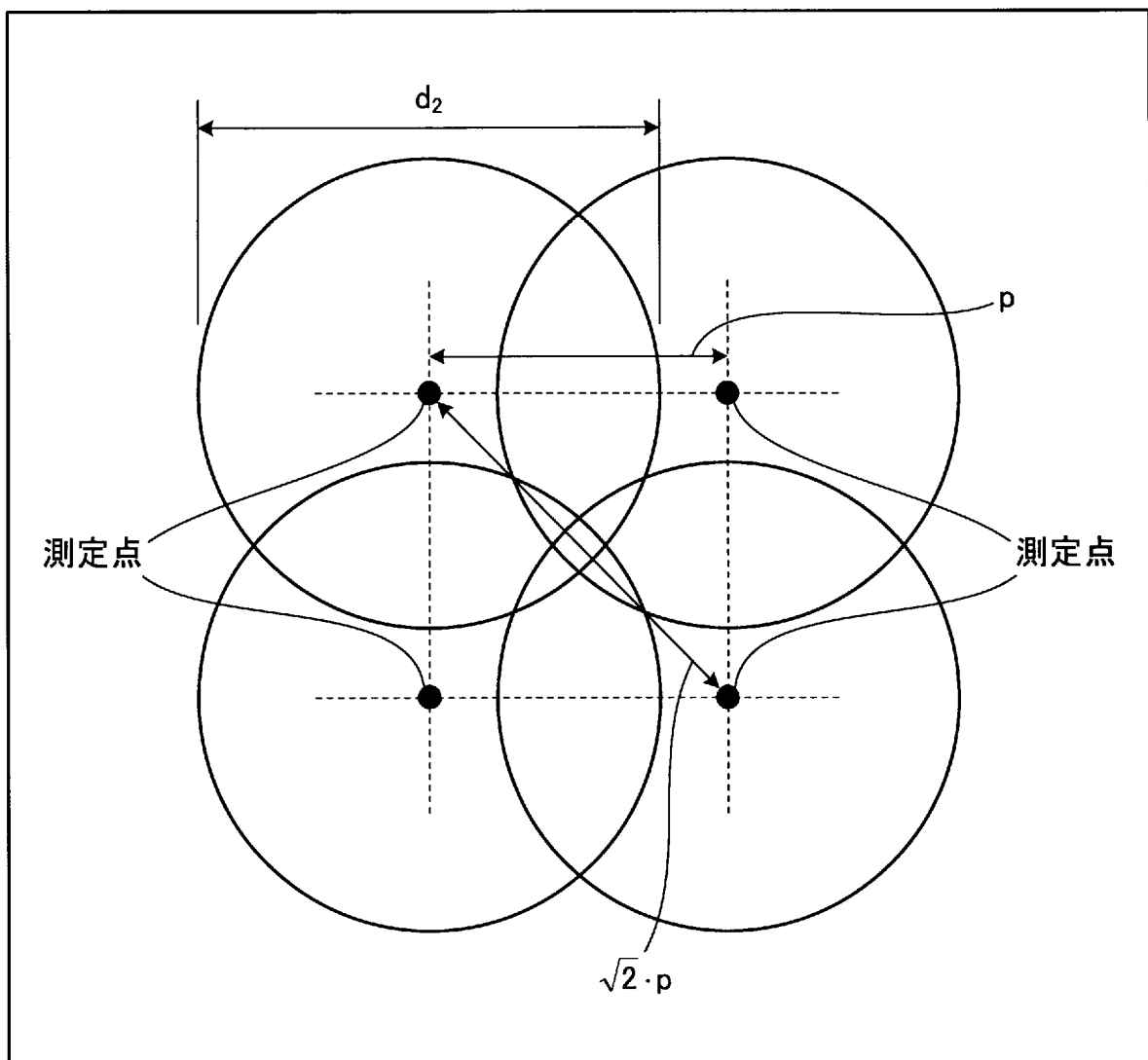


[図7]

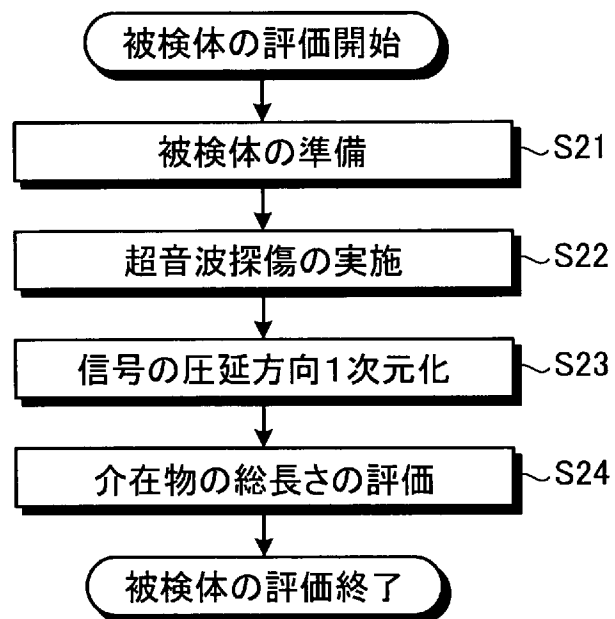
No.	超音波 周波数 f [MHz]	振動子直径 D [mm]	水中焦点距離 F [mm]	ビーム直径 d_2 [mm] ※	SN比の逆数 A_n / A_0
1	20	6.4	38	0.44	9.6×10^{-3}
2	50	6	40	0.20	6.1×10^{-3}
3	50	6	15	0.074	1.1×10^{-2}
4	50	6	12	0.059	6.1×10^{-3}

※ 水中超音波音速 $C=1480\text{m/s}$ として計算

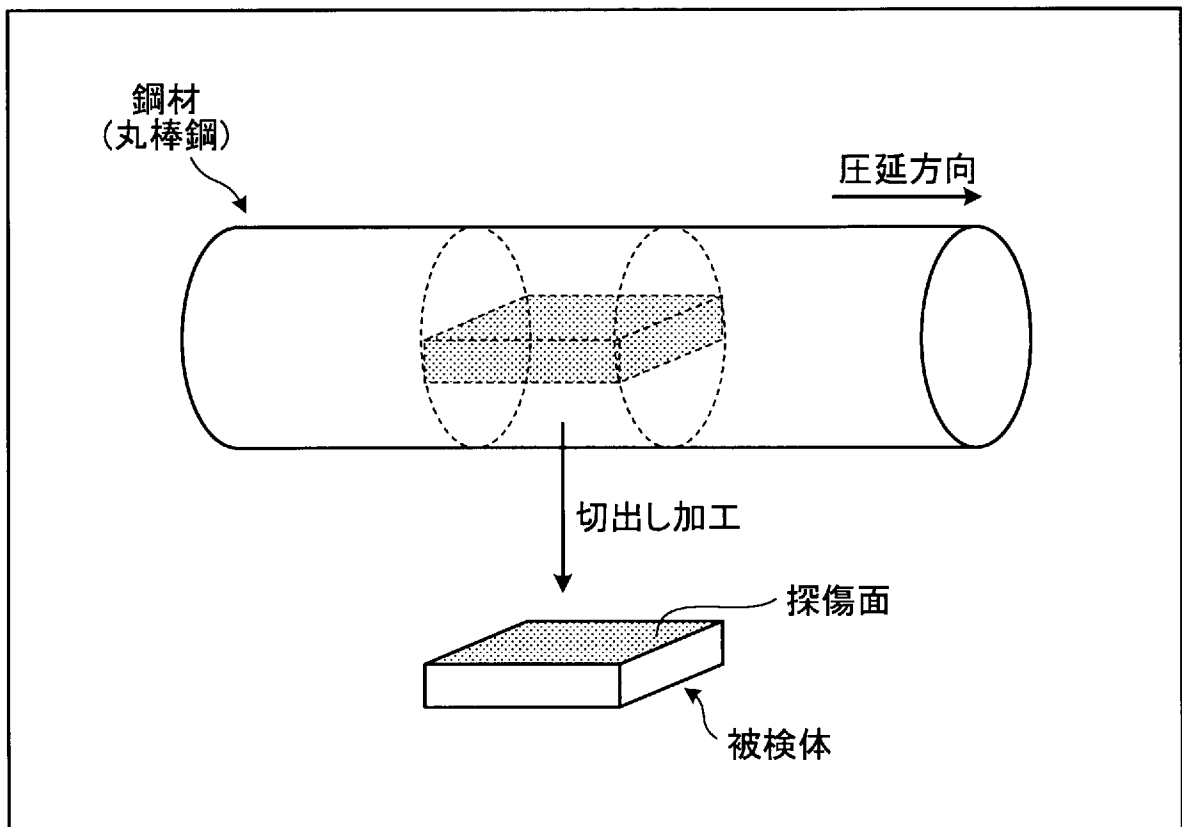
[図8]



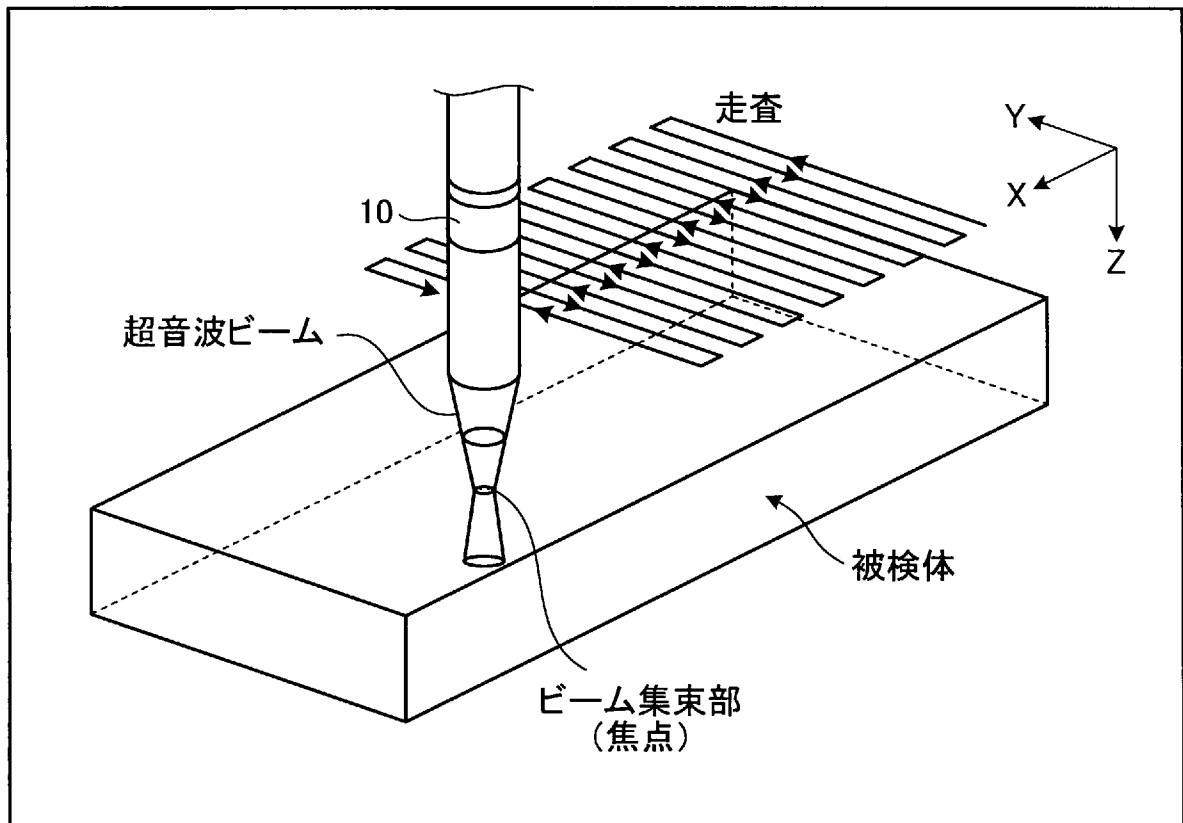
[図9]



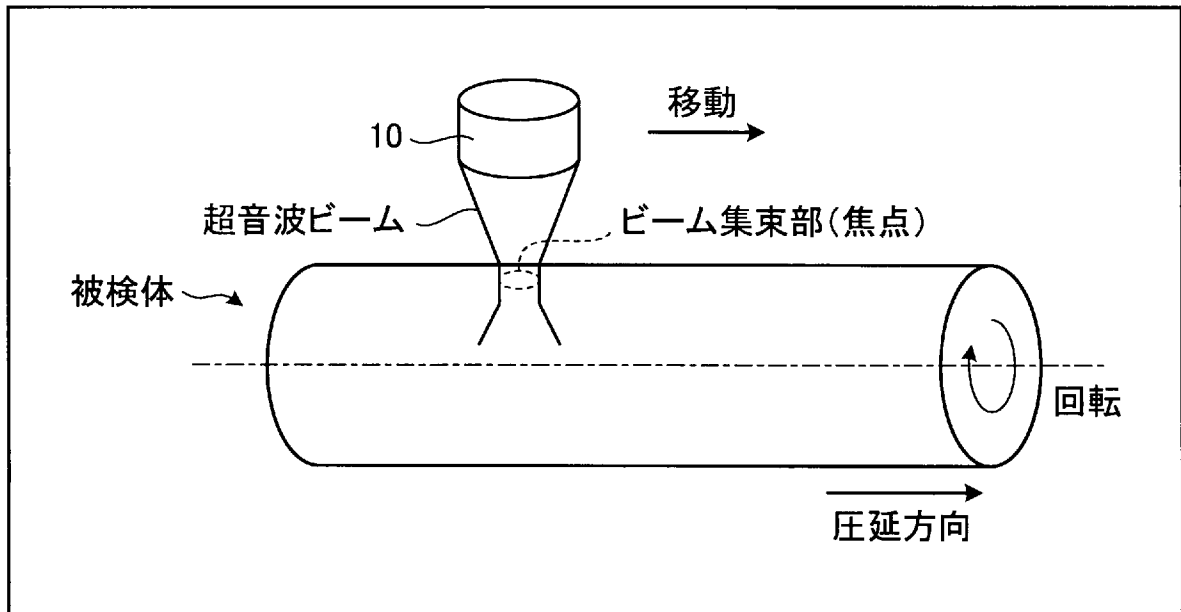
[図10]



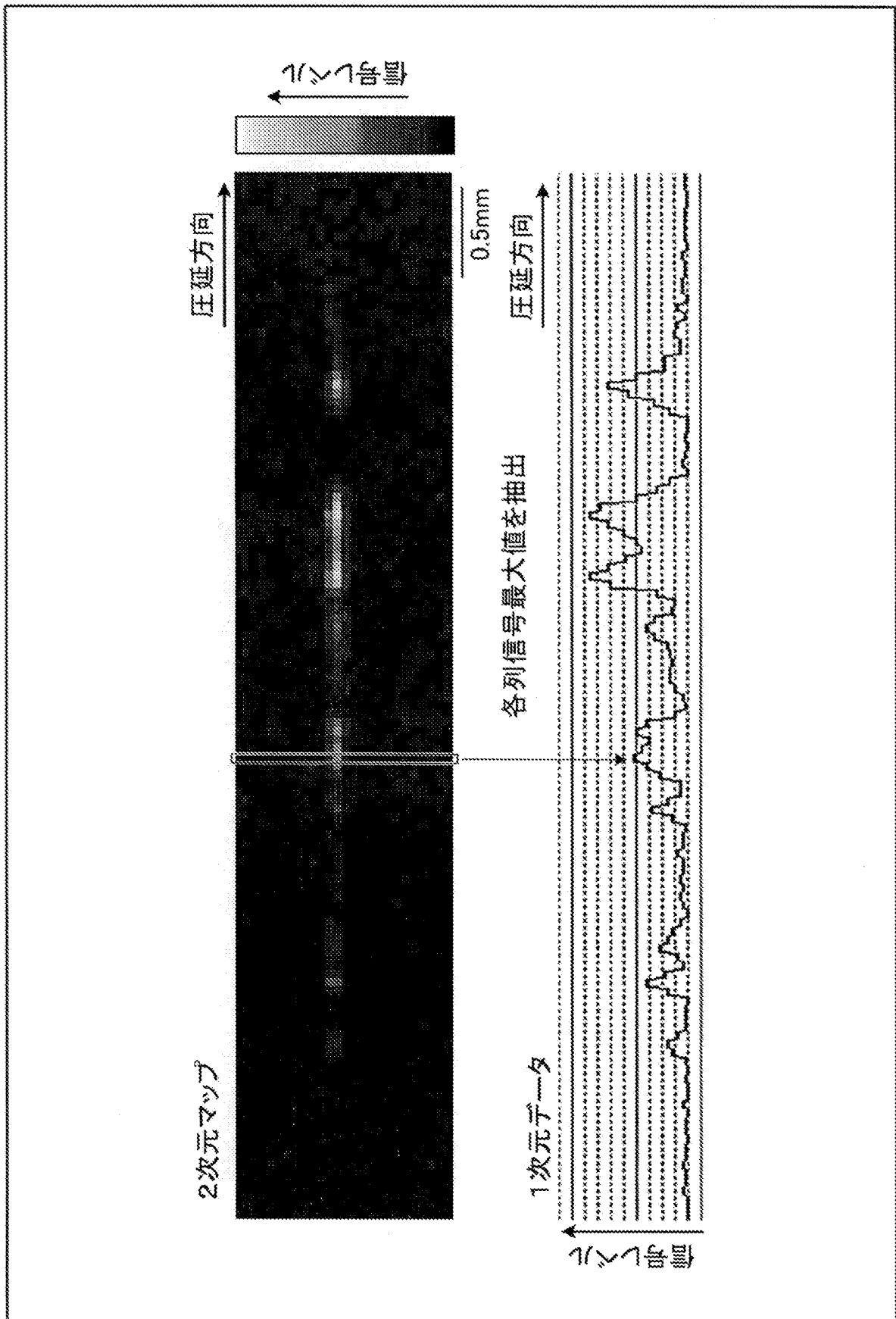
[図11]



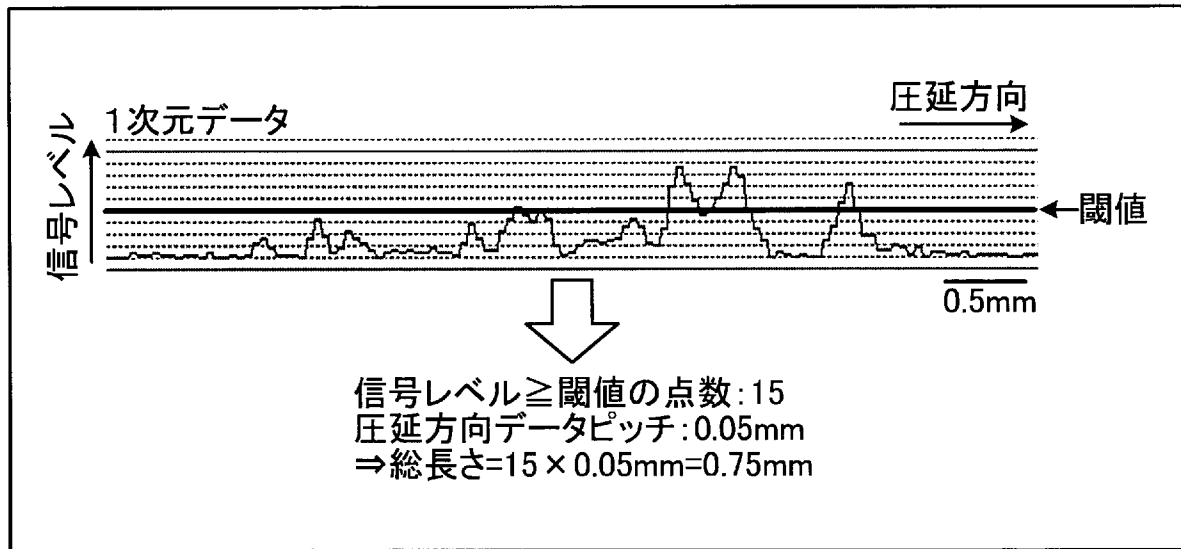
[図12]



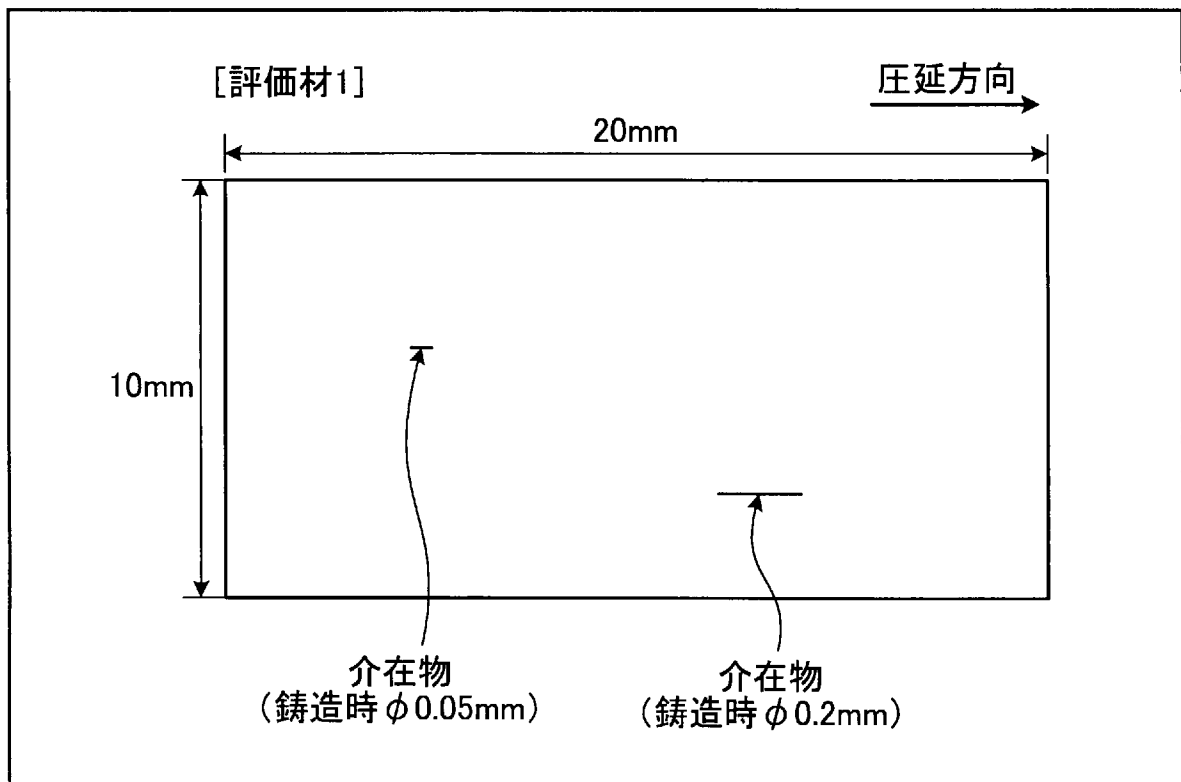
[図13]



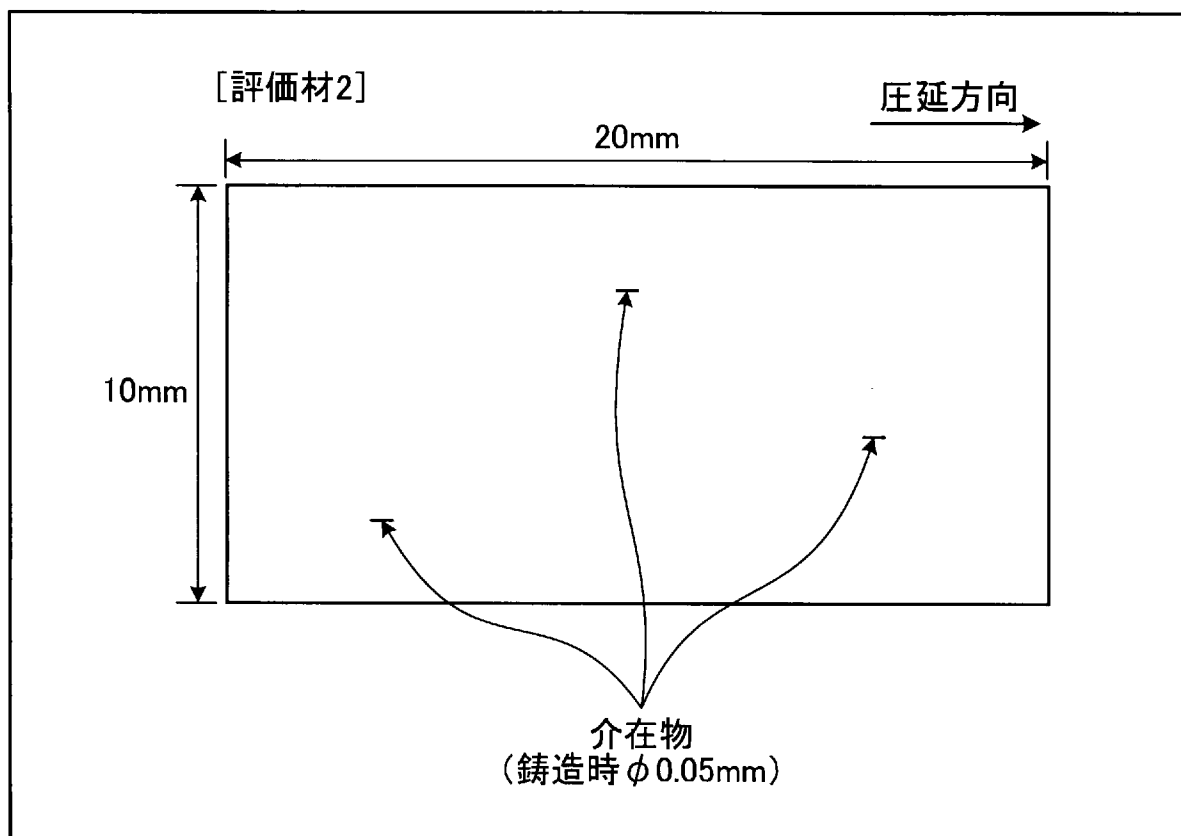
[図14]



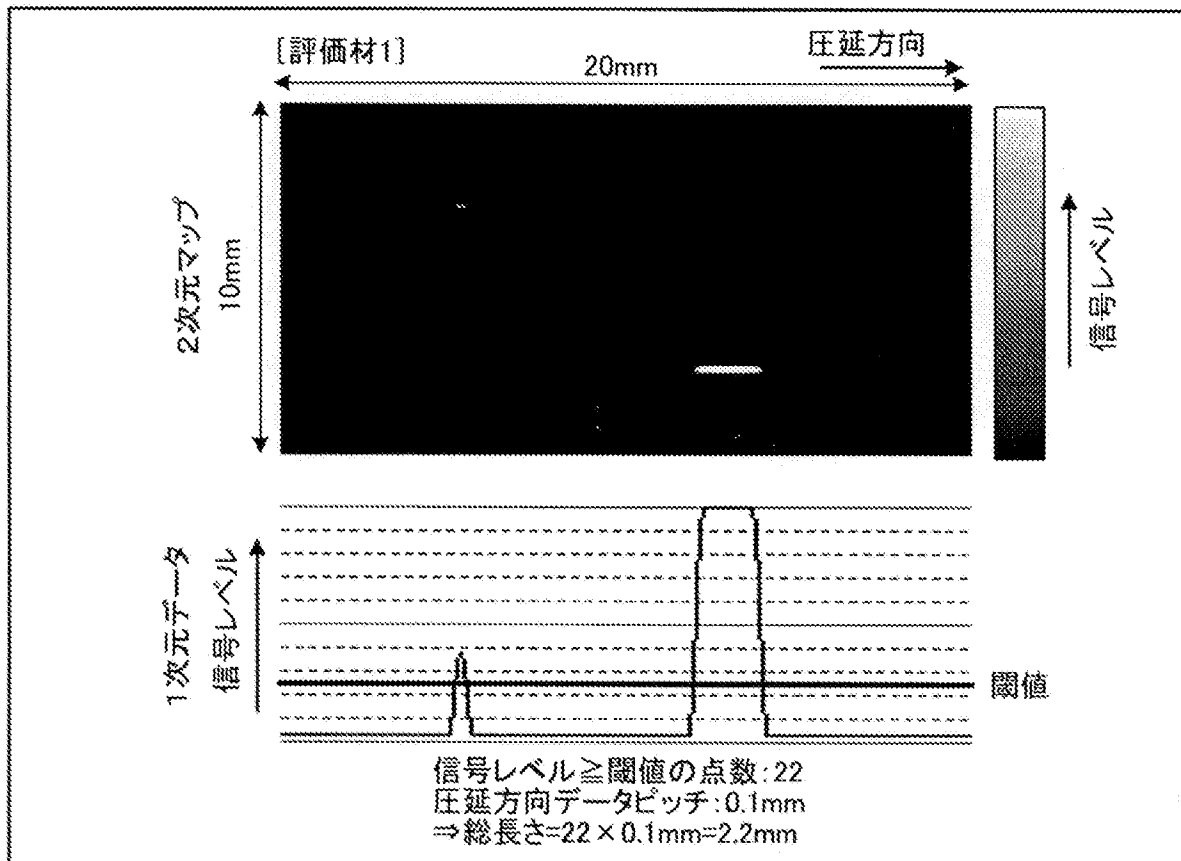
[図15A]



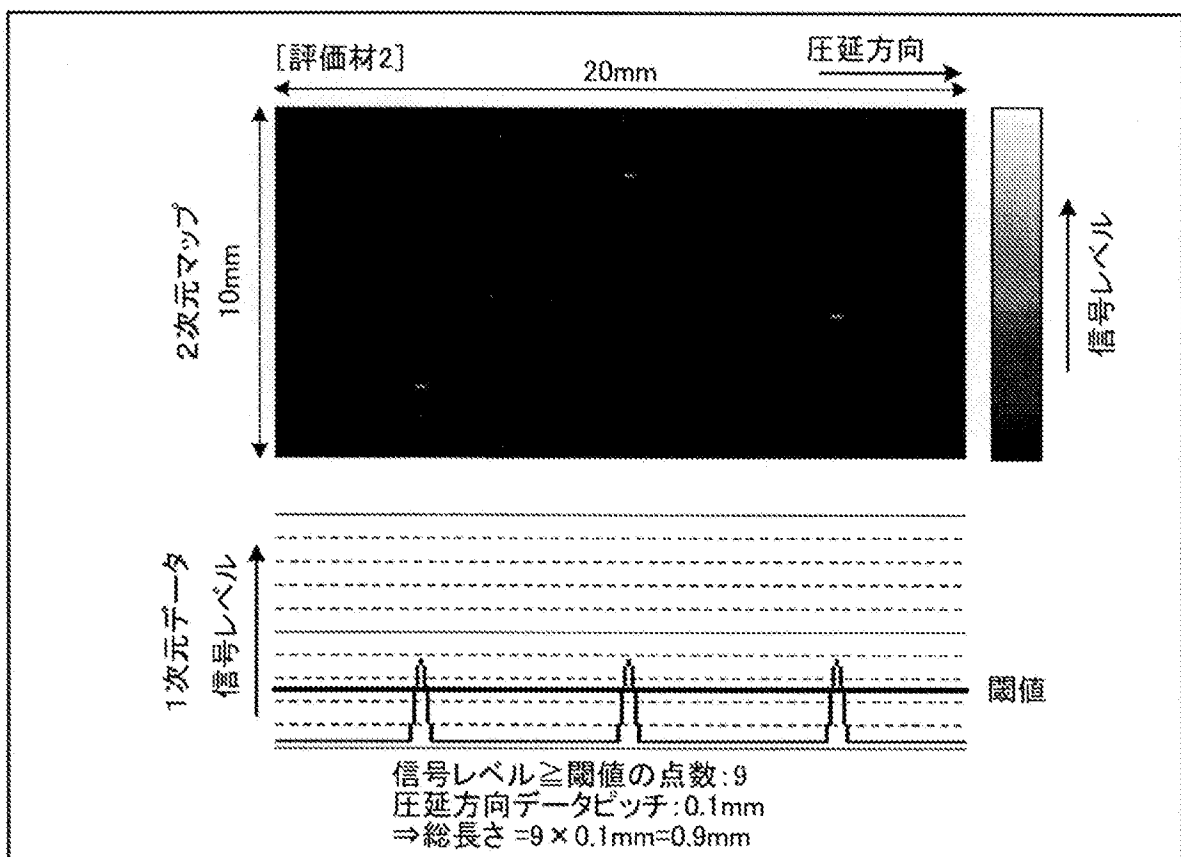
[図15B]



[図16A]



[図16B]



[図17]

No.	従来技術： 介在物個数	本発明： 介在物総長さ	介在物が切断面に 露出する確率
評価材1	2個	2.2mm	11%
評価材2	3個	0.9mm	7.5%

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/061874

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N29/06(2006.01) i, G01N29/44(2006.01) i

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)

G01N29/00-G01N29/52, G01B17/00-G01B17/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2016
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2016	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2016

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JSTPlus (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 6-258302 A (Mitsubishi Electric Corp.), 16 September 1994 (16.09.1994), paragraph [0015]; fig. 1 (Family: none)	1-4
Y	WO 2014/119454 A1 (Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.), 07 August 2014 (07.08.2014), paragraph [0002] & JP 5692474 B	1-4
Y	JP 2005-156305 A (Daido Steel Co., Ltd.), 16 June 2005 (16.06.2005), fig. 7 (Family: none)	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ 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

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
21 June 2016 (21.06.16)

Date of mailing of the international search report
05 July 2016 (05.07.16)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G01N29/06(2006.01)i, G01N29/44(2006.01)i

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. G01N29/00-G01N29/52,
G01B17/00-G01B17/08

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	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2016年
日本国実用新案登録公報	1996-2016年
日本国登録実用新案公報	1994-2016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）

JSTPlus (JDreamIII)

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	関連する 請求項の番号
Y	JP 6-258302 A（三菱電機株式会社）1994.09.16, [0015], 図1（ファミリーなし）	1-4
Y	WO 2014/119454 A1（新日鐵住金株式会社）2014.08.07, [0002] & JP 5692474 B	1-4
Y	JP 2005-156305 A（大同特殊鋼株式会社）2005.06.16, 図7（ファミリーなし）	1-4

C欄の続きにも文献が列挙されている。

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、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、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

21.06.2016

国際調査報告の発送日

05.07.2016

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100-8915

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）

比嘉 翔一

2W

4005

電話番号 03-3581-1101 内線 3258