

(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
2022年4月28日(28.04.2022)



(10) 国際公開番号

WO 2022/085591 A1

(51) 国際特許分類:

G01N 23/204 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2021/038273

(22) 国際出願日: 2021年10月15日(15.10.2021)

(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 2020-175252 2020年10月19日(19.10.2020) JP

(71) 出願人: 国立研究開発法人理化学研究所
(RIKEN) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広
沢2番1号 Saitama (JP).

(72) 発明者: 藤田 訓 裕 (FUJITA Kunihiro);
〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 国立研

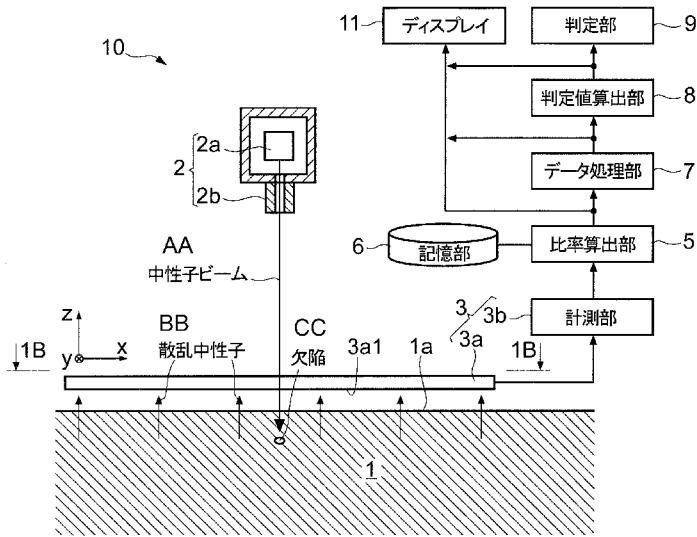
究開発法人理化学研究所内 Saitama (JP). 岩
本 ちひろ (IWAMOTO Chihiro); 〒3510198 埼
玉県和光市広沢2番1号 国立研究開発法
人理化学研究所内 Saitama (JP). 高梨 宇宙
(TAKANASHI Takaoki); 〒3510198 埼玉県和光
市広沢2番1号 国立研究開発法人理化学研
究所内 Saitama (JP). 大竹 淑恵 (OTAKE Yoshie);
〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 国立研
究開発法人理化学研究所内 Saitama (JP).

(74) 代理人: 堀田 実 (HOTTA Minoru); 〒1080014 東
京都港区芝五丁目14番16号 大正堂ビル
3階 アサ国際特許事務所 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,

(54) Title: NONDESTRUCTIVE INSPECTING DEVICE, AND NONDESTRUCTIVE INSPECTING METHOD

(54) 発明の名称: 非破壊検査装置と非破壊検査方法



3b Measuring unit
5 Ratio calculating unit
6 Storage unit
7 Data processing unit
8 Determination value calculating unit
9 Determining unit
11 Display
AA Neutron beam
BB Scattered neutron
CC Defect

(57) Abstract: A nondestructive inspecting device (10) is provided with: a neutron radiating device (2) which radiates a neutron beam onto a localized irradiation site on a surface (1a) of an inspection target object (1); a detecting device (3) which detects scattered neutrons arriving back from the inspection target object (1) as a result of the irradiation of the neutron beam onto the irradiation site, at each detecting position facing the surface (1a), and measures the detected number of scattered neutrons at each detecting position; and a ratio calculating unit (5) which, for each detecting position, obtains the ratio of the detected number at each detected position to a reference value for the detecting position. The reference value is set for each detecting position, as the detected number for a case in which it is assumed that there are no defects in the inspection target object (1).

CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, 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,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, 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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: 非破壊検査装置 (10) は、検査対象物 (1) の表面 (1a) における局所的な照射箇所中性子ビームを照射する中性子照射装置 (2) と、照射箇所へ中性子ビームの照射の結果、検査対象物 (1) から戻って来た散乱中性子を、表面 (1a) に対向する各検出位置で検出し、検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測する検出装置 (3) と、各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の検出数の比率を求める比率算出部 (5) とを備える。基準値は、検査対象物 (1) に欠陥が存在しないと仮定した場合の検出数として検出位置毎に設定されている。

明 細 書

発明の名称：非破壊検査装置と非破壊検査方法

技術分野

[0001] 本発明は、中性子ビームを用いて検査対象物を検査するための装置と方法に関する。より詳しくは、本発明は、例えばコンクリートや鋼鉄などにより構成された検査対象物に中性子ビームを入射し、その結果、検査対象物の内部で散乱して戻って来た散乱中性子に基づいて、検査対象物内における欠陥の有無や種類を検査するための装置と方法に関する。

背景技術

[0002] 空港の滑走路、自動車の道路（例えば高速道路）、トンネル、橋などのインフラストラクチャー構造物（以下でインフラ構造物という）は、その使用や経年劣化により欠陥が生じる場合がある。例えば、欠陥として、インフラ構造物の内部に、滞水箇所、鉄錆、空洞などが生じる場合がある。

[0003] このような欠陥の有無について中性子ビームを用いて検査する技術が特許文献1に開示されている。特許文献1では、インフラ構造物などの検査対象物にパルス中性子ビームを照射し、検査対象物において散乱して戻って来た散乱中性子を検出し、散乱中性子の検出数を時間に対して表した検出数データを生成し、この検出数データに基づいて、検査対象物内部における欠陥の有無を判断している。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：国際公開第2017／043581号

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 従来において、検査対象物内に存在する欠陥が小さい場合には、欠陥の有無を検出することが困難であった。例えば、検査対象物の内部に生じた数mmの欠陥（3mmの空隙や6mmの滞水箇所等）を検出することが困難であ

った。

[0006] そこで、本発明の目的は、検査対象物の非破壊検査において、小さい欠陥（例えば3 mm程度の欠陥）でも検出できるようにすることにある。

課題を解決するための手段

[0007] 上述の目的を達成するため、本発明による非破壊検査装置は、
検査対象物の表面における局所的な照射箇所中性子ビームを照射する中性子照射装置と、

前記照射箇所への前記中性子ビームの照射の結果、検査対象物から戻って来た散乱中性子を、前記表面に対向する各検出位置で検出し、検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測する検出装置と、

各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の前記検出数の比率を求めて出力する比率算出部と、を備え、

前記基準値は、前記検査対象物に欠陥が存在しないと仮定した場合の検出数として前記検出位置毎に設定されている。

[0008] また、本発明による非破壊検査方法では、
(A) 検査対象物の表面における局所的な照射箇所中性子ビームを照射し、
(B) 前記(A)の結果、検査対象物から戻って来た散乱中性子を、前記表面に対向する各検出位置で検出し、検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測し、
(C) 各検出位置について、比率算出部により、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の前記検出数の比率を求めて出力し、
前記基準値は、前記検査対象物に欠陥が存在しないと仮定した場合の検出数として前記検出位置毎に設定されている。

発明の効果

[0009] 本発明によると、検査対象物の表面における局所的な照射箇所中性子ビームを照射し、その結果、検査対象物から散乱中性子が戻って来る時に、検査対象物の表面に対向する各検出位置で散乱中性子を検出し、検出位置毎に

散乱中性子の検出数を計測する。また、各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の検出数の比率を求める。

[0010] 検査対象物内に存在する欠陥が小さくても、検出位置に関する上記比率の分布において、当該欠陥により比率の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部の一方又は両方が生じる。したがって、検査対象物内の欠陥が小さくても、各検出位置の上記比率に基づいて、当該欠陥の有無を検出することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1A]本発明の実施形態による非破壊検査装置の構成を示す。

[図1B]図1Aの1B-1B矢視図である。

[図2A-2B]検査対象物の内部に低密度部分（例えば空隙）が存在する場合に得られる比率分布を模式的に示す。

[図2C-2D]検査対象物の内部に滞水箇所が存在する場合に得られる比率分布を模式的に示す。

[図3]検査対象物における欠陥の有無と種類の判定の説明図である。

[図4]本発明の実施形態による非破壊検査方法を示すフローチャートである。

[図5A]実施例1における検査対象物の断面を示す。

[図5B]図5Aの5B-5B矢視図である。

[図5C]図5Aにおける各部の寸法を示す。

[図6A]実施例1において熱中性子を選択的に検出する場合の基準値の2次元分布を示す。

[図6B]実施例1において熱中性子を選択的に検出する場合の基準値の1次元分布を示す。

[図7A]実施例1において熱中性子を選択的に検出した場合の、検出面における比率の2次元分布を示す。

[図7B]実施例1において中速中性子を選択的に検出した場合の、検出面における比率の2次元分布を示す。

[図8]実施例1における検査結果を示す。

[図9A]実施例2における検査対象物の断面を示す。

[図9B]図9Aの9B-9B矢視図である。

[図10]実施例2において欠陥が空隙である場合の検出面における比率の2次元分布を示す。

[図11]実施例2において欠陥が空隙である場合の検出面における比率のx軸方向分布を示す。

[図12]実施例2において欠陥が空隙である場合のビームスキャンにより得られた S_p / S_n の値を示す。

[図13]実施例2において欠陥が水である場合の検出面における比率の2次元分布を示す。

[図14]実施例2において欠陥が水である場合の検出面における比率のx軸方向分布を示す。

[図15]実施例2において欠陥が水である場合のビームスキャンにより得られた S_n / S_p の値を示す。

発明を実施するための形態

[0012] 本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。なお、各図において共通する部分には同一の符号を付し、重複した説明を省略する。

[0013] (非破壊検査装置の構成)

図1Aは、本発明の実施形態による非破壊検査装置10の構成を模式的に示す。図1Bは、図1Aの1B-1B矢視図である。非破壊検査装置10は、中性子ビームを検査対象物1に照射し、その結果、検査対象物1から戻って来た散乱中性子を検出し、その検出結果に基づいて、欠陥の有無、種類などを検出するための装置である。

[0014] 検査対象物1は、上述したインフラ構造物であってもよいし、他の構造物であってもよい。例えば、検査対象物1は、コンクリートと鋼部材などの金属部材（例えば複数又は多数の金属部材）との一方又は両方を構成要素として含む構造体であってもよい。このような構成要素又は別の構成要素を含む検査対象物1の場合に、当該検査対象物1は、ポリエチレンで形成された有機

物を含むものであってもよい。この有機物は、一例では、検査対象物 1（例えば道路の路面を形成する構造物）内に設けられた防水シート又は光ファイバーケーブルの覆い（シース）である。

[0015] 非破壊検査装置 10 は、中性子照射装置 2 と検出装置 3 と比率算出部 5 とデータ処理部 7 と判定値算出部 8 と判定部 9 を備える。

[0016] 中性子照射装置 2 は、検査対象物 1 の表面 1 a における局所的な照射箇所 R に（実質的に当該照射箇所 R にのみ）中性子ビームを照射する。照射箇所 R は、照射スポットであってよい。照射箇所 R の形状は、例えば円形、楕円形、又は矩形であってよいが、これらに限定されない。

[0017] 照射箇所 R の寸法は、100 mm 以下、70 mm 以下、又は 50 mm 以下であってよい。照射箇所 R の寸法の下限は、特に無くてよいが、可能な限り小さくてよい（例えば、当該下限は、0.3 mm 以上であり 10 mm 以下の範囲内の値であってよい）。照射箇所 R の寸法は、表面 1 a における中性子ビームの断面の寸法である。また、照射箇所 R の寸法とは、表面 1 a における中性子ビームの断面の、各方向の寸法のうち最小の寸法を意味してよい。

[0018] 中性子照射装置 2 は、中性子を放出する中性子源 2 a と、コリメータ 2 b とを有する。

[0019] 中性子源 2 a は、一例では、荷電粒子ビームが照射されることにより中性子を放出するターゲットを有するものであってもよい。この場合、ターゲットは、リチウムであってよいが、これに限定されない。別の例では、中性子源 2 a は、可搬型 DD 核融合反応中性子源（DD 管）であってよい。更に別の例では、中性子源 2 a は、中性子を放出する放射性線源（R I（radioactive isotope）線源）であってよい。この場合、放射性線源は、 ^{252}Cf であってよいが、これに限定されない。

[0020] コリメータ 2 b は、中性子源 2 a からの中性子を断面が絞られた中性子ビームに整形する。このように中性子ビームの断面が絞られることにより、中性子ビームが表面 1 a における局所的な照射箇所 R に照射される。

[0021] コリメータ 2 b は、中性子ビームが通過する通過路を、中性子が透過し難

い材料で区画形成したものであってよい。コリメータ 2 b は、例えば、内部空間が上記通過路となっている筒状のものであってよい。

[0022] 中性子照射装置 2 は、パルス中性子ビームを照射箇所 R へ放出するように構成されていてもよいし、後述のように時間的に連続する中性子ビームを照射箇所 R へ放出するように構成されていてもよい。前者の場合、パルス中性子ビームのパルス時間幅（中性子ビームの持続時間）は、例えば 0.1 ミリ秒程度であり又は 0.1 ミリ秒よりも小さく、パルス中性子ビームの繰り返し周波数（検査対象物 1 への中性子ビームの照射周波数）は、例えば 100 Hz 程度であるが、欠陥の有無や種類の検出を妨げない限りで、これに限定されない。また、一例では、上述した荷電粒子ビームがパルス荷電粒子ビームであることにより、中性子照射装置 2 はパルス中性子ビームを放出するが、他の方法で、中性子照射装置 2 はパルス中性子ビームを放出するように構成されていてもよい。

[0023] また、中性子照射装置 2 が照射箇所 R へ放出する中性子ビームは、例えば、主に高速中性子を含んでいてもよいし、又は、高速中性子と熱中性子を含んでいてもよいし、又は主に熱中性子を含んでいてもよいが、これらに限定されない。

[0024] 検出装置 3 は、照射箇所 R への中性子ビームの照射の結果、検査対象物から戻って来た散乱中性子を、検査対象物 1 の表面 1 a に対向する各検出位置（連続的に配列された複数の検出位置の各々）で検出し、検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測する。例えば、検出装置 3 は、散乱中性子が入射する検出面 3 a 1 を有する。検出面 3 a 1 上の各位置が、上述の各検出位置であり、各検出位置の検出数は、当該検出位置へ入射した散乱中性子の数である。検出装置 3 は、検出位置毎に計測した検出数を比率算出部 5 に出力する。なお、検出面 3 a 1 は、図 1 B のように矩形であってもよいし、他の形状であってもよい。例えば、検出面 3 a 1 は、細長く延びる面であってもよい。

[0025] 検出装置 3 による上記検出数の計測は、所定の時間にわたって行われてよい。この所定の時間は、例えば、中性子照射装置 2 が中性子ビームを照射し

た直後から、単位時間あたりに検出面 3 a 1 へ入射する散乱中性子の数が少なくなる（例えば下限値以下になる）までの期間であってよい。この所定の時間は、例えば、10 秒以上 10 分以内の値であってよい。ただし、所定の時間は、これに限定されず、滞水箇所又は低密度部分（例えば空隙）等の欠陥が検査対象物 1 に存在する場合に後述する比率分布において増大ピーク形成部と減少ピーク形成部の少なくともいずれかが生じるように設定されていればよい。なお、以下において、検出数は、上記所定の時間にわたる中性子の検出数を意味してよい。

[0026] 滞水箇所は、単に水が存在している箇所であってもよいし、金属を含む検査対象物 1 の場合には、水分により金属の錆（例えば鉄錆）が進行している箇所であってもよい。低密度部分は、検査対象物の正常な部分よりも密度が低い部分である（検査対象物がコンクリートである場合には、低密度部分は、正常なコンクリートの部分よりも低密度な部分である）。詳しくは、低密度部分は、検査対象物の正常な部分の密度の $1/3$ 以下、 $1/5$ 以下、又は $1/10$ 以下の部分であってよい。例えば、低密度部分として、空隙を想定してもよい。ただし、これに限定されず、低密度部分として、検査対象物（例えばコンクリート）内に混入した低密度の木材を想定してもよいし、他のものを想定してもよい。

[0027] 検出装置 3 は、検出器 3 a と計測部 3 b とを有する。なお、以下において、検査時とは、検査対象物 1 の欠陥の有無などを検査するために中性子ビームを検査対象物 1 の表面 1 a の照射箇所 R に照射する時（後述のステップ S 3 を行う時）を意味する。また、以下において、検査とは、このように中性子ビームを照射して検査対象物 1 の欠陥の有無などを検査すること（後述のステップ S 3 ～ S 8 又はビームスキャンを行うこと）を意味する。

[0028] 検出器 3 a（検出面 3 a 1）は、検査時に、検査対象物 1 の表面 1 a に対向するように配置される。この配置では、検出器 3 a における多数の検出位置の一部（例えば検出器 3 a（検出面 3 a 1）の中央）は、照射箇所 R に対向している。この場合、検査時に、中性子照射装置 2 からの中性子ビームは

、検出器 3 a（検出面 3 a 1）を通過して検査対象物 1 の表面 1 a に照射される。一例では、検出器 3 a における 2 次元的な広がりを持つ（例えば仮想的な）面が、上述の検出面 3 a 1 である。図 1 A において、互いに直交する x 軸と y 軸と z 軸を有する x y z 座標系を示しており、図 1 A の例では、検出面 3 a 1 は、x y 平面に平行である。なお、図 1 A の x y z 座標系は、説明の便宜上のものであり、実際の運用では、どの座標軸がどの向きを示していてもよい（他の図における x y z 座標系も同様である）。

[0029] 検査時に、検出器 3 a（検出面 3 a 1）は、表面 1 a に近接又は接触した位置に配置される。ここで、表面 1 a に近接した位置とは、例えば表面 1 a から 30 mm 以内、50 mm 以内、100 mm 以内、又は 300 mm 以内の位置であってよいが、これらに限定されない。また、検査時に、検出面 3 a 1 は、検査対象物 1 の表面 1 a と平行であってよい。

[0030] 検出器 3 a は、位置敏感型検出器（PSD: Position Sensitive Detector）であってよい。検出器 3 a は、検出面 3 a 1 に中性子が入射する度に、当該中性子が入射した、検出面 3 a 1 の検出位置に対応する検出信号を出力する。

[0031] 検出器 3 a は、熱中性子を選択的に検出し、熱中性子以外の中性を検出しないように構成されていてよい。この場合、検出器 3 a は、ヘリウム 3 (^3He) 比例係数管を用いたものであってもよいし、リチウム 6 (^6Li) を含むシンチレータと光センサとを組み合わせた検出器であってよい。

[0032] あるいは、検出器 3 a は、中速中性子を選択的に検出し、中速中性子以外の中性を検出しないように構成されていてよい。この場合、検出器 3 a は、塩素 (^{35}Cl) と臭素 (^{79}Br , ^{81}Br) の少なくともいずれかを含んだシンチレータと光センサとを組み合わせた検出器であってよい。例えば、検出器 3 a は、CLYC 又は LaBr_3 を含んだシンチレータと光センサとを組み合わせた検出器であってよい。

[0033] なお、検出器 3 a は、上述に限定されず、例えば、 ^{155}Gd 、 ^{157}Gd 、 ^{10}B などを含むシンチレータと光センサとを組み合わせた検出器であってよい。

い。また、上述した各光センサは、光電子倍增管又はSiPM (Silicon Photomultiplier) であってよいが、これらに限定されない。

[0034] 熱中性子は、一般的には、室温で25 meV付近のエネルギー値以下のエネルギーを有する中性子を示し、中速中性子は、熱中性子よりも十分に高いエネルギー（数keV以上であり数百keV未満のエネルギー）を有する中性子を示し、高速中性子は、数百keV以上を有する中性子を示す。ここで、エネルギーによる中性子の名称の閾値に厳格な定義はないため、本願の定義においては、熱中性子は数十meV（例えば50 meV）以下のエネルギーを有する中性子であってよく、中速中性子は、数keV（例えば5 keV）以上であり、数百keV（例えば500 keV）未満のエネルギーを有する中性子であり、高速中性子は、数百keV（例えば500 keV）以上のエネルギーを有する中性子であってよい。

[0035] 計測部3bは、検出器3aから出力される多数の検出信号に基づいて、検出位置毎に当該検出位置へ入射して来た散乱中性子の検出数を計測する。なお、上述の光センサが用いられる場合、計測部3bは、SiPMなどの上述の光センサに組み込まれていてもよい。

[0036] 比率算出部5は、検出器3aにおける各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の上記検出数の比率（以下で単に比率ともいう）を求める。基準値は、検査対象物1に欠陥が存在しないと仮定した場合の検出数として検出位置毎に設定されている。すなわち、基準値は、欠陥が存在しない検査対象物1に仮に検査を行った場合に得られる検出数である。このような基準値は、検出位置に応じて異なっていてよい。すなわち、基準値は、少なくとも一部の検出位置同士の間で異なっていてよい。検出器3a（検出面3a1）における各検出位置の基準値は、照射箇所Rと当該検出位置との位置関係、および検査対象物1における中性子の散乱特性などに応じて予め設定されている。このような各検出位置の基準値は、検査対象物1の照射箇所毎に設定されていてもよいし、検査対象物1の構成（材質）が一様である場合等においては、異なる照射箇所について共通のものであってもよい。

[0037] <基準値の設定方法>

上述の基準値は、以下のように、検出器 3 a における検出位置毎に予め設定されていてよい。すなわち、以下の検出条件 (a) ~ (c) の下で、欠陥が存在しない検査対象物 1 に対して検査を行った場合に、所定の時間にわたって検出器 3 a の各検出位置で検出される中性子の数（例えば推定される検出数）を、当該検出位置の基準値として設定してよい。

[0038] (a) 検出器 3 a (検出面 3 a 1) と検査対象物 1 (照射箇所 R) と中性子照射装置 2 との位置関係および姿勢関係（向きの関係）が予め設定された位置関係と姿勢関係になっている。

(b) 中性子照射装置 2 から検査対象物 1 へ放出される中性子ビームのスペクトルが、定められたものとなっている。中性子ビームのスペクトルは、単位時間あたりに（例えば、パルス中性子ビームの場合には、パルス時間幅において）中性子照射装置 2 から検査対象物 1 に照射される多数の中性子のエネルギー分布であり、この分布において、各エネルギーについて、当該エネルギーを有する中性子の数が表される。

(c) 中性子ビームの強度が、定められたものとなっている。中性子ビームの強度は、単位時間あたりに、中性子照射装置 2 から検査対象物 1 における照射箇所 R（又は照射箇所 R における単位面積）に照射される中性子の数である。

[0039] 一例では、上記検出条件 (a) ~ (c) の下で、実際の検査対象物 1（例えば欠陥の存在確率が低いと想定されている検査対象物 1）における 1 つの照射箇所 R に中性子照射装置 2 が中性子を照射し、検出器 3 a における各検出位置の検出数を求める。その後、同じ検査対象物 1 において照射箇所 R を変えて再び同じ処理を行う。この処理を、繰り返し行うことにより、複数の照射箇所 R の各々について、検出器 3 a における各検出位置の検出数を求める。そして、検出器 3 a における各検出位置について、複数の照射箇所 R について求めた、当該検出位置の複数の検出数の平均値を、当該検出位置の基準値として設定する。

[0040] 別の例では、実際の検査対象物 1（例えば欠陥の存在確率が高いと想定されている検査対象物 1）と構成（材質等）が同じであるが欠陥が存在しない供試体を用意し、この供試体を検査対象物 1 として、上記検出条件（a）～（c）の下で、供試体における照射箇所 R に中性子照射装置 2 が中性子を照射し、検出器 3 a における各検出位置の検出数を求め、当該検出数を当該検出位置の基準値として設定する。

[0041] さらに別の例では、上記検出条件（a）～（c）の下で、欠陥が存在しない検査対象物 1 に検査を行った場合に検出器 3 a の各検出位置について得られる検出数をシミュレーションにより求め、当該検出数を当該検出位置の基準値として設定する。このようなシミュレーションは、例えば欠陥の存在確率が高いと想定されている検査対象物 1 に関して行ってよい。

[0042] 上述の検出条件（a）～（c）の下で中性子ビームが検査対象物 1 の表面 1 a に入射する方向に見た場合に、検出器 3 a（検出面 3 a 1）における各検出位置の基準値は、当該表面 1 a における当該中性子ビームの照射箇所から当該検出位置が離れるにつれて小さくなっている（例えば後述の図 6 A と図 6 B を参照）。

[0043] 検出器 3 a における各検出位置の基準値は、非破壊検査装置 10 の記憶部 6 に記憶されていてよい。この場合、比率算出部 5 は、検出器 3 a における各検出位置について、記憶部 6 の基準値と上述の検出数とに基づいて比率を算出する。

[0044] データ処理部 7 は、比率算出部 5 が出力した検出器 3 a の各検出位置の比率に対してデータ処理を行う。データ処理部 7 は、検出器 3 a 上の検出位置に関する上記比率の分布（以下で単に比率分布ともいう）において、比率の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部を特定する。また、データ処理部 7 は、特定した増大ピーク形成部の大きさと減少ピーク形成部の大きさを求める。

[0045] <比率分布>

図 2 A～図 2 D は、検出位置に関する比率分布を示す比率曲線 C 1～C 4

を模式的に示している。

[0046] 図2Aと図2Bは、検査対象物1の内部に欠陥として低密度部分（例えば空隙）が存在する場合を示し、図2Cと図2Dは、検査対象物1の内部に欠陥として水が存在する場合を示す。また、図2Aと図2Cは、検査対象物1内における欠陥が、検査対象物1に照射される中性子ビームの延長線上に存在する場合を示し、図2Bと図2Dは、検査対象物1内における欠陥が、検査対象物1に照射される中性子ビームの延長線からずれた位置に存在する場合を示す。

[0047] 図2A～図2Dにおいて、横軸は、図1Aのx軸方向（左右方向）における検出器3a上の検出位置（x座標）を示し、縦軸は、検出数の上記比率を示す。なお、図2A～図2Dの比率分布は、照射箇所Rと同じ一定のy座標（図1Bを参照）における分布を示す。図2A～図2Dは、検出数が熱中性子の検出数である場合を示す。ただし、検出数が中速中性子の検出数であっても、比率分布の傾向は、図2A～図2Dと同様である。

[0048] 図2A～図2Dの各々のように、検査対象物1内に存在する欠陥の影響で、比率分布に減少ピーク形成部と増大ピーク形成部が生じる。減少ピーク形成部は、比率が1よりも小さくなる部分であって、比率の減少ピーク（負方向のピーク）を形成する部分である。増大ピーク形成部は、比率が1よりも大きくなる部分であって、比率の増大ピーク（正方向のピーク）を形成する部分である。

[0049] 図2Aと図2Bでは、減少ピーク形成部は、比率分布を表わす比率曲線C1、C2における点D2から点D3までの部分であり、増大ピーク形成部は、比率曲線C1、C2における点D1から点D2までの部分と、比率曲線C1、C2における点D3から点D4までの部分である。

[0050] 図2Cと図2Dでは、減少ピーク形成部は、比率曲線C3、C4における点D1から点D2までの部分と、比率曲線C3、C4における点D3から点D4までの部分であり、増大ピーク形成部は、比率曲線C3、C4における点D2から点D3までの部分である。

[0051] また、減少ピーク形成部の大きさは、比率が1である部分（図2A～図2Dでは、破線で示す直線L）と、減少ピーク形成部とで挟まれた領域の面積（図2A～図2Dでは、符号Nが示す斜線部分の面積）であってよい。すなわち、 x を位置座標（図1Aの x 軸座標）であるとして、比率曲線が、比率 $=f(x)$ で表される場合に、 $\int \{1 - f(x)\} dx$ が、減少ピーク形成部の大きさであってよい。この積分は、減少ピーク形成部の x の区間にわたって行われる。

[0052] 同様に、増大ピーク形成部の大きさは、比率が1である部分（図2A～図2Dでは、破線で示す直線L）と、増大ピーク形成部とで挟まれた領域の面積（図2A～図2Dでは、符号Pが示す斜線部分の面積）であってよい。すなわち、 x を位置座標（図1Aの x 軸座標）であるとして、比率曲線が、比率 $=f(x)$ で表される場合に、 $\int \{f(x) - 1\} dx$ が、増大ピーク形成部の大きさであってよい。この積分は、増大ピーク形成部の x の区間にわたって行われる。

[0053] ・低密度部分の欠陥

以下で、低密度部分の欠陥として空隙を想定して説明するが、以下の内容は、他の低密度部分の欠陥を想定する場合にも当てはまる。この場合、以下において、各「空隙」は、低密度部分に読み替えられてよい。

[0054] 検査対象物1の内部に存在する欠陥が低密度部分である場合に、図2Aのように、検出器3aにおいて、空隙に対向する領域付近（すなわち空隙と同じ x 座標付近）では、比率分布において、比率の減少ピーク形成部が生じる。

[0055] この減少ピーク形成部は、次の理由で形成される。中性子は空隙では散乱しないので、検査対象物1に照射された中性子は、検査対象物1の表面1aから離れる側へ当該空隙を通過する時に当該空隙の箇所から検出器3aへ散乱することが無くなる。したがって、その分、検出面3a1において空隙に対向する領域付近では、散乱中性子の検出数が減るので、減少ピーク形成部が生じる。また、検査対象物に入射した高速中性子は、検査対象物（例えば

コンクリート）内を通過中に熱中性子に変わるが、検査対象物 1 内に空隙があることは、その分、熱中性子が生成されなくなることを意味する。したがって、検出面 3 a 1 において空隙に対向する領域付近では、散乱熱中性子の検出数が減る。

[0056] 一方、検出器 3 a において空隙に対向する領域付近（減少ピーク形成部）に隣接する領域では、図 2 A のように、比率分布（比率曲線 C 1）において、比率の増大ピーク形成部（正方向のピーク）が生じる。

[0057] この増大ピーク形成部は、次の理由で形成される。検出面 3 a 1 において空隙に対向する領域付近（減少ピーク形成部）に隣接する領域に入射する散乱中性子には、空隙よりも深い位置で散乱し当該隣接する領域へ向けて空隙を通過して来る散乱中性子が含まれる。この「空隙を通過して来る散乱中性子」は、空隙で他の方向へ散乱することが無く、空隙の存在により検査対象物（例えばコンクリート）で吸収され難くなる。したがって、その分、上記隣接する領域では、散乱中性子の検出数が増えるので、上記増大ピーク形成部が生じる。

[0058] また、図 2 B のように、空隙の位置が、照射箇所 R へ照射される中性子ビームの延長線上から多少ずれていても、図 2 A の場合と同様の比率分布が得られる。なお、図 2 B では、左側に、相対的に大きな増大ピーク形成部が生じている。図 2 B では、検査対象物 1 に入射した中性子ビームのうち、より多くの散乱中性子が空隙を通過して左側の増大ピーク形成部に対応する位置で検出されるからである。

[0059] ・水の欠陥

検査対象物 1 の内部に存在する欠陥が水（滞水箇所）である場合に、図 2 C のように、比率分布において、滞水箇所に対向する領域付近（すなわち滞水箇所と同じ x 座標付近）では、比率の増大ピーク形成部が生じる。

[0060] この増大ピーク形成部は、次の理由で形成される。検出面 3 a 1 において、滞水箇所に対向する領域に入射する散乱中性子には、滞水箇所からの散乱中性子が含まれる。ここで、中性子は水と反応しやすいので、滞水箇所から

の散乱中性子は、水と反応して熱中性子になっているものが多く含まれる。

したがって、その分、検出面 3 a 1 において、滞水箇所に対向する領域では、散乱熱中性子の検出数が増えるので、増大ピーク形成部が生じる。

[0061] なお、図 2 C のように、増大ピーク形成部の頂部において負方向への窪みが生じているのは次の理由による。中性子が検査対象物 1 の表面 1 a から離れる側へ滞水箇所を通過する時に当該滞水箇所から検出器 3 a へ散乱し難い。したがって、その分、検出面 3 a 1 において滞水箇所に対向する領域の中央では、熱中性子の検出数が減るので、上記窪みが生じる。

[0062] 判定値算出部 8 は、増大ピーク形成部の大きさと減少ピーク形成部の大きさをそれぞれ S_p と S_n としてデータ処理部 7 から受ける。判定値算出部 8 は、増大ピーク形成部の大きさと減少ピーク形成部の大きさとの和 ($S_p + S_n$) を求めるとともに、減少ピーク形成部の大きさを増大ピーク形成部の大きさを割った値 (S_n / S_p) を求める。また、判定値算出部 8 は、求めた $S_p + S_n$ と S_n / S_p を出力する。

[0063] なお、比率分布において複数の増大ピーク形成部が生じている場合には、 S_p は、当該複数の増大ピーク形成部の大きさの合計であってよい。同様に、比率分布において複数の減少ピーク形成部が生じている場合には、 S_n は、当該複数の減少ピーク形成部の大きさの合計であってよい。

[0064] 判定部 9 は、データ処理部 7 が出力した $S_p + S_n$ と S_n / S_p に基づいて、検査対象物 1 における欠陥の有無と欠陥の種類を判定する。図 3 は、この判定に関する 2 次元座標系を示す。図 3 において、横軸は $S_p + S_n$ を示し、縦軸は S_n / S_p を示す。

[0065] 検査対象物 1 に欠陥が存在しない場合には、比率分布において、増大ピーク形成部と減少ピーク形成部が生じず、又は、増加ピークと減少ピークが生じたとしても、これらのピーク形成部は小さいので、 $S_p + S_n$ は、0 又は 0 に近い値となる。したがって、第 1 しきい値 T_1 が 0 又は 0 に近い正の値であるとして、欠陥が存在しない場合には、図 3 のように、 $S_p + S_n$ が第 1 しきい値 T_1 以下となる。

[0066] 検査対象物 1 に欠陥としての空隙が存在する場合には、比率分布において、図 2 A のように、比較的大きな減少ピーク形成部が生じるとともに、増大ピーク形成部も生じる。したがって、空隙が存在する場合には、図 3 のように、 $S_p + S_n$ は、上述の第 1 しきい値 T_1 より大きくなり、 S_n / S_p は、正の値である第 2 しきい値 T_2 以上となる。

[0067] 検査対象物 1 に欠陥としての水（滞水箇所）が存在する場合には、比率分布において、図 2 C のように、かなり大きな増大ピーク形成部が生じ、減少ピーク形成部は、ほとんど現れない。したがって、水が存在する場合には、図 3 のように、 $S_p + S_n$ は、上述の第 1 しきい値 T_1 より大きくなり、 S_n / S_p は、上述の第 2 しきい値 T_2 未満となる。

[0068] 上述に従って、判定部 9 は次のように判定を行う。 $S_p + S_n$ が第 1 しきい値以下である場合には、判定部 9 は、検査対象物 1 内に欠陥が存在しないと判定し、その旨の欠陥不存在信号を出力する。

[0069] $S_p + S_n$ が第 1 しきい値より大きい場合には、判定部 9 は、検査対象物 1 内に欠陥が存在すると判定し、その旨の欠陥存在信号を出力する。この場合、当該信号には、次のように欠陥の種類を示す情報が含まれていてよい。 $S_p + S_n$ が第 1 しきい値 T_1 より大きく、且つ、 S_n / S_p が第 2 しきい値 T_2 以上である場合には、判定部 9 は、検査対象物 1 内に空隙が存在すると判定し、その旨の第 1 欠陥信号を出力する。 $S_p + S_n$ が第 1 しきい値 T_1 より大きく、且つ、 S_n / S_p が第 2 しきい値 T_2 未満である場合には、判定部 9 は、検査対象物 1 内に水（滞水箇所）が存在すると判定し、その旨の第 2 欠陥信号を出力する。

[0070] （非破壊検査方法）

図 4 は、本発明の実施形態による非破壊検査方法を示すフローチャートである。この非破壊検査方法は、上述の非破壊検査装置 10 を用いて行われ、ステップ S1 ～ S8 を有する。

[0071] ステップ S1 において、検出器 3a の各検出位置の基準値を上述のように設定する。

- [0072] ステップS 2において、検査対象物 1 に対して中性子照射装置 2 と検出器 3 a を配置する。
- [0073] ステップS 3において、中性子照射装置 2 により、検査対象物 1 の表面 1 a における局所的な照射箇所 R に中性子ビームを入射する。このようなステップS 2、S 3は、上述の検出条件 (a) ~ (c) の下で行われる。
- [0074] なお、ステップS 3において、照射箇所 R に照射される中性子ビームの進行方向は、表面 1 a と垂直な方向であってもよいし、表面 1 a と垂直な方向に対して斜めの方向であってもよい。
- [0075] ステップS 4において、ステップS 3の結果、検査対象物 1 から戻って来た散乱中性子を、検出装置 3 により、表面 1 a に対向する検出面 3 a 1 上の各検出位置で検出し、検出装置 3 により検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測する。
- [0076] ステップS 5において、ステップS 1で設定した各検出位置の基準値とステップS 4で計測した各検出位置の検出数とに基づいて、比率算出部 5 により、検出面 3 a 1 上の各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の検出数の比率を求めて出力する。
- [0077] ステップS 6において、データ処理部 7 により、ステップS 5で算出した比率の、検出位置に関する分布において、比率の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部を特定し、増大ピーク形成部の大きさ S_p と減少ピーク形成部の大きさ S_n を求める。
- [0078] ステップS 7において、判定値算出部 8 により $S_p + S_n$ を求め、判定部 9 により、 $S_p + S_n$ に基づいて、検査対象物 1 の内部に欠陥が存在するかどうかを判定する。ステップS 7において、 $S_p + S_n$ が第 1 しきい値 T_1 以下である場合には、判定部 9 は、検査対象物 1 の内部に欠陥が存在しないと判定し、その旨の欠陥不存在信号を出力する。一方、ステップS 7において、 $S_p + S_n$ が第 1 しきい値 T_1 より大きい場合には、判定部 9 は、検査対象物 1 の内部に欠陥が存在すると判定し、ステップS 8へ進む。
- [0079] ステップS 8において、判定値算出部 8 により S_n / S_p を求め、判定部

9により、 S_n/S_p に基づいて、欠陥の種類を判定する。ステップS8において、 S_n/S_p が第2しきい値 T_2 以上である場合には、判定部9は、検査対象物1の内部に欠陥としての低密度部分（例えば空隙）が存在すると判定し、その旨の第1欠陥信号を出力する。一方、ステップS8において、 S_n/S_p が第2しきい値 T_2 未満である場合には、判定部9は、検査対象物1の内部に欠陥としての水（滞水箇所）が存在すると判定し、その旨の第2欠陥信号を出力する。

[0080] <ビームスキャン>

ステップS8の次に、ステップS3での照射箇所Rを変えてステップS3～S6を繰り返し行ってもよい。すなわち、ステップS3で検査対象物1の表面1aにおいて中性子ビームが入射する照射箇所Rを、繰り返される複数回のステップS3の間で互いに異なるようにする。この場合、検査対象物1を中性子ビームでスキャンするように複数回のステップS3を行ってよい。

[0081] また、1回のステップS3～S6を1サイクルとして、各サイクルについて、当該サイクルのステップS6で求めた S_p と S_n から S_p/S_n 又は S_n/S_p を求める。この時、上述のステップS8で欠陥として低密度部分が存在すると判定された場合には、 S_p/S_n を求め、上述のステップS8で欠陥として水が存在すると判定された場合には、 S_n/S_p を求めてよい。

[0082] 複数のサイクルについてそれぞれ求めた複数の S_p/S_n 又は S_n/S_p のうち、最小の S_p/S_n 又は S_n/S_p を特定する。特定された最小の S_p/S_n 又は S_n/S_p に対応する照射箇所R（すなわち、この S_p/S_n 又は S_n/S_p を求めたサイクルでの照射箇所R）を上記低密度部分（空隙）又は上記水に最も近い箇所として特定する。このようなビームスキャンについては、後述の実施例2でより詳しく説明する。

[0083] （実施例1：熱中性子を検出する場合と中速中性子を検出する場合）

欠陥としての空隙の位置と寸法が既知である検査対象物1（供試体）に対して非破壊検査装置10を用いて検査を行った。図5Aは、検査を行った検査対象物1の断面を示し、図5Bは、図5Aの5B-5B矢視図である。図

5 Aの検査対象物1は、コンクリート1 bと、コンクリート1 bの内部に埋め込まれているH鋼1 cとを有する。図5 Cは、図5 Aにおける各部の寸法を記載した図である。

[0084] 図5 Aと図5 Bに示すように、検査対象物1の内部において欠陥としての空隙が存在する。図5 Aにおけるx、y、zは、xyz座標系において互いに直交するx軸とy軸とz軸を示す。

[0085] 上述のステップS 4で熱中性子を選択的に検出する検出器3 aを用いて、上述のステップS 2～S 7を行った。この時、ステップS 3において、図5 Bに示す照射箇所Rに、 10^8 個の中性子からなる中性子ビームを照射した。この照射箇所Rは、1辺が50 mmの正方形（図5 Bにおいて符号Rが示す破線で囲んだ領域）である。

[0086] 空隙のx軸方向とy軸方向の寸法をそれぞれ50 mmと300 mmに固定して、空隙のz軸方向の寸法を3 mmと10 mmと30 mmとした各場合について、条件を同じにして上述の実験を行った。

[0087] 図6 Aと図6 Bは、熱中性子を選択的に検出する場合に関してステップS 5で用いた基準値を示す。すなわち、図6 Aと図6 Bは、図5 Aの検査対象物1において空隙などの欠陥が存在しない場合の、検出器3 aにおける各検出位置の検出数（すなわち基準値）の具体例である。図6 Aと図6 Bは、検出器3 aがヘリウム3 (^3He) 比例係数管である場合に、上述のように供試体を用いて設定された基準値の分布を示す。図6 Aは、一点鎖線で囲んだ照射箇所Rと、2次元的な広がりを持つ面（検出面3 a 1）における基準値の分布を示し、図6 Bは、表面1 aにおける中性子ビームの照射箇所Rの中心と同じy軸座標に関する各x軸座標の基準値（検出数）を示す。

[0088] 図6 Aにおいて、基準値は、領域A～Hの順に小さくなっている。図6 Aにおいて、おおまかな値で示すと、基準値は、領域Aでは $2.7 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 以上であり、領域Bでは $1.9 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 以上 $2.7 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 未満であり、領域Cでは $1.4 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 以上 $1.9 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 未満であり、領域Dでは $1.0 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 以上 $1.4 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 未満

であり、領域Eでは $5.2 \times 10^2 / \text{cm}^2$ 以上 $1.0 \times 10^3 / \text{cm}^2$ 未満であり、領域Fでは $2.8 \times 10^2 / \text{cm}^2$ 以上 $5.2 \times 10^2 / \text{cm}^2$ 未満であり、領域Gでは $8.0 \times 10 / \text{cm}^2$ 以上 $2.8 \times 10^2 / \text{cm}^2$ 未満であり、領域Hでは $8.0 \times 10 / \text{cm}^2$ 未満である。

[0089] 図6Bにおいて、バツ印(×印)は基準値を示し、丸印と四角印と三角印は、図5Aにおいて上述の空隙が存在する場合の検出数を示す。これら丸印と四角印と三角印は、それぞれ、空隙のz軸方向の寸法が3mmと10mmと30mmの場合を示す。なお、図6Bにおいて、各種類の印は、x軸座標の原点から200mm程度以上離れた各位置では、互いにほぼ重なっており、原点から離れるにつれて互いの差が小さくなっている。

[0090] また、中速中性子を選択的に検出する検出器3aを用いて、他の条件は同じにして上述の実験を行った。なお、基準値は、中速中性子を選択的に検出する場合の値を用いた。

[0091] 図7Aと図7Bは、空隙のz軸方向の寸法が10mmである場合の、検出面3a1における比率の2次元分布を示す。図7Aは、熱中性子を選択的に検出する検出器3aを用いた場合を示し、図7Bは、中速中性子を選択的に検出する検出器3aを用いた場合を示す。図7Aと図7Bにおいて、横軸と縦軸は、図5Aに示すx軸とy軸の座標を示し、各座標の原点は、照射箇所Rの中心である。また、図7Aと図7Bにおいて、破線は、z軸方向に見た場合の、空隙が存在する範囲を示す。

[0092] 図7Aにおいて、検出面3a1における大まかな比率の分布を実線で囲まれた各領域A～Eで示している。比率は、領域Aでは0.93未満であり、領域Bでは0.93以上0.97未満であり、領域Cでは0.97以上1.00未満であり、領域Dでは1.00以上1.13未満である。なお、領域Eは、誤差が大きい領域である。

[0093] 同様に、図7Bにおいて、検出面3a1における大まかな比率の分布を実線で囲まれた各領域A～Dで示している。比率は、領域Aでは0.97未満であり、領域Bでは0.97以上1.00未満であり、領域Cでは1.00

以上 1.09 未満であり、領域 D では 1.09 以上 1.19 未満である。なお、領域 E は、誤差が大きい領域である。

[0094] 図 7 A と図 7 B から分かるように、検出する中性子が熱中性子であっても中速中性子であっても、空隙の存在を検出できる。例えば、図 7 A と図 7 B において、比率が 1 よりも減少している領域と比率が 1 よりも大きくなっている領域が存在すること（且つ照射箇所 R 付近で比率が最も小さくなっていること）から、空隙が存在していると判断できる。

[0095] また、比率が 1 よりも大きくなっている領域が中速中性子を検出した場合のほうが大きくなっていることにより、 $S_p + S_n$ の値は、中速中性子を検出した場合のほうが大きくなる。すなわち、中速中性子の検出により、空隙の存在に対する $S_p + S_n$ の値の感度を高くすることができる

[0096] 図 8 は、上述の実験における各場合の $S_p + S_n$ の値を示す。図 8 において、横軸は、空隙の z 軸方向寸法を示し、縦軸は、求められた $S_p + S_n$ の値を示す。また、図 8 において、丸印は、熱中性子を選択的に検出した場合を示し、四角印は、中速中性子を選択的に検出した場合を示す。

[0097] 図 8 に示されるように、空隙の z 軸方向寸法が 3 mm であっても、 $S_p + S_n$ は、その誤差により実際よりも小さくなったとしても、有意に、ゼロ又はゼロに近い第 1 しきい値 T_1 よりも大きくなる。また、中速中性子の検出数は、熱中性子の検出量よりも少なくなる傾向があるが、図 8 に示されるように、中速中性子を検出した場合の方が、空隙の存在に対する $S_p + S_n$ の値の感度が高くなる。したがって、十分な量の中速中性子が検出される場合には、検査において中速中性子を検出することで、空隙の存在を高感度に検出できる。

[0098] （実施例 2：ビームスキャン）

＜欠陥が空隙の場合＞

非破壊検査装置 10 を用いて上述のビームスキャンを行った。この実施例 2 では、熱中性子を選択的に検出する検出器 3 a を用いた。図 9 A は、ビームスキャンを行った検査対象物 1 の断面を示し、図 9 B は、図 9 A の 9 B -

9 B 矢視図である。図 9 A の検査対象物 1 は、図 5 A の場合と同じであり、各部の寸法も図 5 C の場合と同じである。

[0099] 図 9 A と図 9 B において、検査対象物 1 の内部において欠陥として存在する空隙の x 軸方向と y 軸方向と z 軸方向の寸法は、それぞれ、50 mm と 300 mm と 3 mm である。

[0100] 上述のステップ S 3 ～ S 6 をビームスキャンの 1 サイクルとして、3 回のサイクルの各々（ステップ S 3）において、検査対象物 1 の表面 1 a へ中性子ビームを照射した。また、3 回のサイクルで照射した中性子ビームを、それぞれ図 9 A において B 1 ～ B 3 で示す。また、3 回のサイクルでの照射箇所は、直径が 40 mm の円形である。図 9 B では、1 回目のサイクルでの照射箇所 R 1 とその中心 r 1 と、2 回目のサイクルでの照射箇所の中心 r 2 と、3 回目のサイクルでの照射箇所の中心 r 3 を示している。

[0101] また、空隙の z 軸方向寸法を 10 mm に変え、他の条件は同じにして、上述したビームスキャンの 3 回のサイクルを行った。更に、空隙の z 軸方向寸法を 30 mm に変え、他の条件は同じにして、上述したビームスキャンの 3 回のサイクルを行った。

[0102] 図 10 は、空隙の z 軸方向寸法が 10 mm である場合の 2 回目のサイクルの結果であり、検出面 3 a 1 における比率の 2 次元分布を示す。図 10 において、横軸と縦軸は、図 9 A に示す x 軸と y 軸の座標を示し、各座標の原点は、上述の中心 r 2（図 9 B を参照）である。また、図 10 において、破線で示す楕円 R は、照射箇所であり、別の破線は、z 軸方向に見た場合の、空隙が存在する範囲を示す。

[0103] 図 10 において、検出面 3 a 1 における大まかな比率の分布を実線で囲まれた各領域 A ～ D で示している。領域 A では、比率が 0.95 未満であり、領域 B では比率が 0.95 以上 1.00 未満であり、領域 C では、比率が 1.00 以上 1.10 未満であり、領域 D は、誤差が大きい領域である。

[0104] 図 11 は、空隙の z 軸方向寸法が 10 mm である場合の結果であり、検出面 3 a 1 における比率の x 軸方向分布を示す。図 11 において、横軸は、x

軸方向の位置座標を示し、縦軸は、比率（検出数／基準値）を示す。図 1 1 において、三角印は、検査対象物 1 の表面 1 a における中性子ビームの照射箇所 R 1 の中心が図 9 B の r_1 である場合を示し、四角印は、当該中心が図 9 B の r_2 である場合を示し、丸印は、当該中心が図 9 B の r_3 である場合を示す。なお、図 1 1 において、各位置座標での比率は、表面 1 a における中性子ビームの照射箇所 R 1 の中心と同じ y 軸座標での比率を示す。図 1 1 において、x 軸方向の位置座標の絶対値が 400 mm 程度を超えると、得られた比率は、誤差が大きくなるが、x 軸方向における位置座標の両端側で、照射箇所の中心から離れるにつれて 1 に近づく傾向がある。そのため、 S_n と S_p は、誤差が許容限度を超えない位置座標の範囲で求められてよい。

[0105] 図 1 2 は、ビームスキャンにより得られた S_p / S_n の値を示す。図 1 2 において、横軸は、照射箇所 R の中心と空隙の中心との x 軸方向距離を示し、縦軸は、ビームスキャンの各サイクルで求められた S_p / S_n の値を示す。ここで、 S_n と S_p は、誤差を考慮して、 $-300 \text{ mm} < x < 500 \text{ mm}$ の範囲で求めたものである。また、図 1 2 において、丸印は、空隙の z 軸方向寸法が 3 mm の場合を示し、四角印は、空隙の z 軸方向寸法が 10 mm の場合を示し、三角印は、空隙の z 軸方向寸法が 30 mm の場合を示す。

[0106] 図 1 2 のように、最小の S_p / S_n が得られたサイクルでの照射箇所 R は、検査対象物 1 内の空隙に最も近い。したがって、最小の S_p / S_n に対応する照射箇所 R を空隙に最も近い箇所として特定することができる。例えば、検査対象物 1 内の空隙の真上から検査対象物 1 の表面 1 a に中性子ビームを照射した場合には、多くの中性子が空隙を表面 1 a から離れる方向に通過するが、この時、これらの中性子は空隙において検出器 3 a 側へ散乱しない。その結果、検出面 3 a 1 において空隙の真上の領域では、検出数が大きく減少すると考えられる。また、空隙では熱中性子が生成されない。そのため、照射箇所 R が、空隙（空隙の真上）に近いほど、 S_n が大きくなり、 S_p / S_n が小さくなると考えられる。

[0107] <欠陥が水の場合>

図9 Aにおいて、欠陥が空隙の代わりに滞水箇所である場合について、上述のビームスキャンを行った。このビームスキャンでは、滞水箇所は、上述の空隙の場合と同じ位置にあり、そのx軸方向とy軸方向とz軸方向の寸法は、それぞれ、50 mmと300 mmと10 mmである。また、このビームスキャンでは、熱中性子を選択的に検出する検出器3 aを用いた。他の点は、欠陥が空隙であった上述のビームスキャンの場合と同じである。

[0108] 図1 3は、このようなビームスキャンの2回目のサイクルで得られた検出面3 a 1における比率の2次元分布を示す。図1 3において、横軸と縦軸は、空隙が滞水箇所に置き換えられた図9 Aに示すx軸とy軸の座標を示し、各座標の原点は、2回目のサイクルの照射箇所Rの中心である。図1 3において、破線で示す楕円Rは、照射箇所であり、別の破線は、z軸方向に見た場合の、滞水箇所が存在する範囲を示す。

[0109] 図1 3において、検出面3 a 1における比率の分布を実線で囲まれた各領域A～Dで示している。比率は、おおまかに、領域Aでは1.20以上であり、領域Bでは1.15以上1.20未満であり、領域Cでは1.10以上1.15未満であり、領域Dでは1.05以上1.10未満であり、領域Eでは1.00以上1.05未満であり、領域Fでは0.90以上1.00未満であり、領域Gは誤差が大きい領域である。

[0110] 図1 4は、検出面3 a 1における比率のx軸方向分布を示す。図1 4において、横軸は、x軸方向の位置座標を示し、縦軸は、比率（検出数／基準値）を示す。図1 4において、三角印は、検査対象物1の表面1 aにおける中性子ビームの照射箇所の中心が図9 Bのr 1である場合を示し、四角印は、当該中心が図9 Bのr 2である場合を示し、丸印は、当該中心が図9 Bのr 3である場合を示す。なお、図1 4において、各位置座標での比率は、中性子ビームの照射箇所Rの中心と同じy軸座標での比率を示す。図1 4において、x軸方向の位置座標の絶対値が400 mmを超えると、得られた比率は、誤差が大きくなるが、x軸方向における位置座標の両端側で、照射箇所の中心から離れるにつれて1に近づく傾向がある。

[0111] 図15は、z軸方向寸法が10mmの場合においてビームスキャンにより得られた S_n/S_p の値を四角印で示す。図15において、横軸は、照射箇所Rの中心と滞水箇所の中心とのx軸方向距離を示し、縦軸は、ビームスキャンの各サイクルで求められた S_n/S_p の値を示す。

[0112] 図15に示されるように、最小の S_n/S_p が得られたサイクルでの照射箇所Rは、検査対象物1内の滞水箇所に最も近いと判定することができる。これは、次の理由に基づく。中性子は滞水箇所の水と反応して熱中性子になり易い。したがって、照射箇所Rが、滞水箇所（滞水箇所の真上）に近いほど、検出される熱中性子の数が多くなり、その結果、 S_p が大きくなり、 S_n/S_p が小さくなると考えられる。

[0113] （実施形態の効果）

上述のように、検査対象物1の表面1aにおける局所的な照射箇所Rに中性子ビームを照射し、その結果、検出器3a上の検出位置毎に当該検出位置へ入射した散乱中性子の数を検出数として計測し、各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の検出数の比率を求める。このように得た、検出位置に関する比率分布は、欠陥の有無や種類を示す情報が含まれている。したがって、検出器3aにおける各検出位置の比率（比率分布）に基づいて、欠陥の有無や種類を検出できる。

[0114] 例えば、比率分布における比率の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部の大きさを、それぞれ S_p と S_n として、 $S_p + S_n$ が第1しきい値 T_1 よりも大きい場合には、水又は低密度部分（例えば空隙）の欠陥が存在すると判定できる。

[0115] また、 $S_p + S_n$ が第1しきい値 T_1 よりも大きく、且つ、 S_n/S_p が第2しきい値 T_2 以上である場合には、検査対象物1に欠陥としての低密度部分が存在すると判定できる。

[0116] $S_p + S_n$ が第1しきい値 T_1 よりも大きく、且つ、 S_n/S_p が第2しきい値 T_2 未満である場合には、検査対象物1に欠陥としての水が存在すると判定できる。

- [0117] また、照射箇所Rを局所的な箇所（例えばスポット）とすることにより、検査対象物1内に欠陥が存在する場合には、比率分布において上述の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部がより顕著に生じやすくなる。
- [0118] 低密度部分（例えば空隙）の有無を検出する場合に、検出器3aが中速中性子を選択的に検出することにより、低密度部分に対して高感度な $S_p + S_n$ を得ることができる。
- [0119] 上述したビームスキャンにより、各照射箇所Rについて S_p / S_n 又は S_n / S_p を求め、最小の S_p / S_n 又は S_n / S_p に対応する照射箇所Rが低密度部分又は滞水箇所に最も近いと判定できる。
- [0120] 本発明は上述した実施の形態に限定されず、本発明の技術的思想の範囲内で種々変更を加え得ることは勿論である。例えば、本発明の実施形態による非破壊検査装置10は、上述した効果の全てを奏するものなくてもよい。また、本発明の実施形態による非破壊検査装置10は、上述した複数の構成要素の全て有していなくてもよく、上述した複数の構成要素のうち一部のみを有していてもよい。
- [0121] また、本発明によると、以下の変更例1～8のいずれかを単独で採用してもよいし、変更例1～8の2つ以上を任意に組み合わせて採用してもよい。この場合、以下で述べない点は、上述と同じである。
- [0122] （変更例1）
- 上述では、中性子照射装置2は、パルス中性子ビームを照射箇所Rに照射したが、時間的に連続する連続中性子ビームを照射箇所Rに照射してもよい。この場合、検出装置3は、検査対象物1内に滞水箇所又は低密度部分等の欠陥が存在する場合に上述した比率分布において増大ピーク形成部と減少ピーク形成部が生じるようになる時間区間（所定の時間）わたって、検出器3aにおける各検出位置での検出数を計測してよい。
- [0123] （変更例2）
- 欠陥の種類を判定しない場合には、判定値算出部8は、 S_n / S_p を算出しなくてもよい。

[0124] (変更例3)

上述では説明しなかったが、図1Aに示すように、非破壊検査装置10は、ディスプレイ11を更に備えていてもよい。

[0125] ディスプレイ11を設ける場合、データ処理部7と判定値算出部8と判定部9を省略してもよい。この場合、比率算出部5は、検出器3aにおける各検出位置の比率を、検出位置に関する比率分布として、ディスプレイ11に出力してよい。この場合、出力された比率分布は、ディスプレイ11に表示され、人が、表示された比率分布を見て、欠陥の有無や種類を判定してもよい。

[0126] ディスプレイ11に表示される比率分布は、例えば図2A～図2Dのように、各検出位置を示す座標軸（例えば図1Aのx軸）と、比率を示す座標軸とを有する2次元の座標系で表されたものであってもよい。あるいは、ディスプレイ11に表示される比率分布は、各検出位置を示し互いに直交する2つの座標軸（例えば図1Aのx軸とy軸）と比率を示す座標軸とを有する3次元の座標系で表されたものであってもよい。または、ディスプレイ11に表示される比率分布は、図7Aや図7Bのようにディスプレイ11に表示された2次元的な面（検出面3a1）面内において各検出位置での比率の大きさを、複数の区画（例えば図7Aの区画A～E）、色、又は、濃淡などで表したものであってもよい。なお、複数の区画の間で、互いに比率の値の範囲が異なっており、各区画の比率の範囲の上限と下限もディスプレイ11に表示されてよい。

[0127] あるいは、ディスプレイ11を設ける場合、データ処理部7と判定値算出部8と判定部9のうち判定部9のみを省略してもよい。この場合、判定値算出部8は、求めた判定値としての $S_p + S_n$ と S_n / S_p を、ディスプレイ11に出力してよい。この場合、出力された各判定値は、ディスプレイ11に表示され、人が、表示された当該各判定値を見て、欠陥の有無や種類を判定してよい。この場合、ディスプレイ11には、上述のように更に比率分布が表示されてもよい。

[0128] または、ディスプレイ 11 を設ける場合、データ処理部 7 と判定値算出部 8 と判定部 9 のうち判定値算出部 8 と判定部 9 のみを省略してもよい。この場合、データ処理部 7 は、 S_p と S_n を、ディスプレイ 11 に出力してよい。この場合、出力された S_p と S_n の各値は、ディスプレイ 11 に表示され、人が、表示された当該各値を見て、欠陥の有無や種類を判定してよい。この場合、ディスプレイ 11 には、上述のように更に比率分布が表示されてもよい。

[0129] (変更例 4)

上述では、比率分布における増大ピーク形成部の大きさは、面積で表されたが、増大ピーク形成部における比率の最大値（正方向のピーク値）であってもよい。この場合、比率分布における減少ピーク形成部の大きさは、減少ピーク形成部における比率の最小値（負方向のピーク値）であってもよい。

[0130] (変更例 5)

比率算出部 5 が出力する比率分布（検出器 3 a における各検出位置の比率）は、図 2 A～図 2 D のように 1 次元座標（ x 座標）に対して表される分布、すなわち、 x 軸と比率の軸を有する 2 次元座標系で表される分布であってもよいし、2 次元座標（ x 軸座標と y 軸座標）に対して表される分布、すなわち、 x 軸と y 軸と比率の軸を有する 3 次元座標系で表されるものであってもよい。

[0131] 後者の場合、増大ピーク形成部の大きさは、比率が 1 である部分と、増大ピーク形成部とで挟まれた領域の体積であってよい。すなわち、 x と y を、検出面 3 a 1 上の 2 次元座標を表わす位置座標であるとして、比率分布を表わす比率曲面が、比率 = $f(x, y)$ で表される場合に、 $\int \{f(x, y) - 1\} dx dy$ が、増大ピーク形成部の大きさであってよい。この積分は、増大ピーク形成部の x の区間と y の区間にわたって行われる。この場合、減少ピーク形成部の大きさも、同様に、比率が 1 である部分と、減少ピーク形成部とで挟まれた領域の体積であってよい。すなわち、増大ピーク形成部の場合と同様に、 $\int \{1 - f(x, y)\} dx dy$ が、減少ピーク形成部の大

きさであってよい。

[0132] また、比率分布が、上述のように2次元座標系で表される場合、データ処理部7は、当該2次元座標系において比率分布を近似する曲線（例えば図2Aの比率曲線C1）を生成し、当該曲線に基づいて、上述の S_p と S_n を求めてもよい。比率分布が、上述のように3次元座標系で表される場合、データ処理部7は、当該3次元空間において比率分布を近似する曲面（例えば上述の $f(x, y)$ ）を生成し、当該曲面に基づいて、上述の S_p と S_n を求めてもよい。

[0133] （変更例6）

上述のステップS8は、検査対象物1内の欠陥が低密度部分（例えば空隙）と滞水箇所（あるいは鉄錆）のいずれかであるとの想定の下で行われたが、当該想定がなされない場合には、ステップS7での判定が否定となったら、想定される他の欠陥が存在すると判定してもよい。例えば、検査対象物1内に劣化判定対象物（例えば、上述した防水シート又は光ファイバーケーブル）が存在する場合には、ステップS7での判定が否定となったら、劣化判定対象物（例えば、防水シート又は光ファイバーケーブルの覆い（シース））の劣化を欠陥として、このような欠陥が存在すると判定してもよい。すなわち、ステップS7での否定の判定結果が、このような劣化を示していると仮定してもよい。

[0134] （変更例7）

上述では、検出器3aは、2次元的な広がりを持つ検出面3a1を有するものであったが、本発明は、これに限定されない。例えば、検出器3aは、棒状に（例えば図1Aのx軸方向）に延びていてもよい。この場合、このような棒状の検出器3aには、棒状に配列された複数（例えば多数）の検出位置が存在する。棒状の検出器3aを用いて、ステップS2～S4を行うことにより、1次元的な（棒状の）広がりを持つ範囲にわたる多数の検出位置での検出数が取得される。

[0135] 棒状の検出器3aを用いて、ステップS2～S4を複数回行ってもよい。

この場合、複数回の間で、検出器 3 a の位置を異ならせ、他の条件は同じにする。これにより、2 次元的な広がりを持つ範囲にわたる多数の検出位置での検出数を取得し、上述のステップ S 5 のように、これらの検出位置の各々での比率を求めてもよい。その後、これらの検出位置での比率（比率分布）に基づいて、上述のステップ S 7, S 8 のように欠陥の有無や種類を判定してもよいし、この比率分布をディスプレイ 11 に表示させてもよい。なお、ステップ S 2 ~ S 4 の各回の検出器 3 a の位置と向きは、適宜の手段により（例えば人が入力装置を操作することにより）検出装置 3 に入力され、この入力に基づいて、検出装置 3 は、各検出位置と検出数との対応関係を把握してよい。

[0136] なお、検出器 3 a は、1 つの検出位置が存在する点状の検出器であってもよい。この場合には、ステップ S 2 ~ S 4 を多数回行う。この場合、複数回の間で、検出器 3 a の位置を異ならせ、他の条件は同じにする。これにより、1 次元の又は 2 次元の広がりを持つ範囲にわたる多数の検出位置での検出数を取得し、これらの検出位置の各々での比率を求めてもよい。この場合、他の点は、棒状の検出器 3 a を用いてステップ S 2 ~ S 4 を複数回行う場合と同様である。

[0137] （変更例 8）

比率算出部 5 は、以下のように、正規化された基準値と正規化された検出数とを用いて上述の比率を求めてもよい。

[0138] 各検出位置 i （ i は検出位置の識別子である。以下同様）の基準値は、内部に欠陥が存在しない状態の検査対象物 1 に N_a 個の中性子を入射した結果、当該検出位置 i で検出される放出中性子の数 α_i を N_a で正規化した値であってよい。すなわち、各検出位置 i の各々の基準値 R_i は、 $R_i = \alpha_i / N_a$ であってよい。

[0139] 同様に、各検出位置 i の検出数は、上述のステップ S 3 において検査対象物 1 に中性子照射装置 2 が検査対象物 1 に N_b 個の中性子を入射させた結果、当該検出位置 i で検出される放出中性子の数 β_i を N_b で正規化した値で

あってよい。すなわち、各検出位置 i の各々の検出数 D_i は、 $D_i = \beta_i / N_b$ であってよい。

[0140] 比率算出部 5 は、各検出位置 i での比率を、 D_i / R_i により算出する。
なお、比率算出部 5 は、比率の算出の際に、既知の N_b と、計測部 3 b が計測した β_i とから、検出数 $D_i = \beta_i / N_b$ を算出してよい。また、正規化された基準値 R_i は、記憶部 6 に記憶されていてよい。

[0141] このような変更例 8 では、上述の N_a と N_b は、互いに異なっていてよく、ステップ S 3 で中性子ビームを検査対象物 1（照射箇所 R）に照射する時間は、基準値の設定での対応する時間（中性子ビームの照射時間）と異なってもよい。なお、変更例 8 では、ステップ S 4 で放出中性子の検出数を計測する時間と、基準値の設定での対応する計測時間とは、いずれも、単位時間あたりに検査対象物 1 から放出される中性子の数が十分に少なくなる（例えば実質的にゼロになる）までの時間であってよい。

符号の説明

- [0142] 1 検査対象物
1 a 表面
1 b コンクリート
1 c H鋼
2 中性子照射装置
2 a 中性子源
2 b コリメータ
3 検出装置
3 a 検出器
3 a 1 検出面
3 b 計測部
5 比率算出部
6 記憶部
7 データ処理部

- 8 判定値算出部
- 9 判定部
- 10 非破壊検査装置
- 11 ディスプレイ
- R 照射箇所

請求の範囲

- [請求項1] 検査対象物の表面における局所的な照射箇所中性子ビームを照射する中性子照射装置と、
- 前記照射箇所への前記中性子ビームの照射の結果、検査対象物から戻って来た散乱中性子を、前記表面に対向する各検出位置で検出し、検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測する検出装置と、
- 各検出位置について、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の前記検出数の比率を求めて出力する比率算出部と、を備え、
- 前記基準値は、前記検査対象物に欠陥が存在しないと仮定した場合の検出数として前記検出位置毎に設定されている、非破壊検査装置。
- [請求項2] 前記照射箇所は照射スポットである、請求項1に記載の非破壊検査装置。
- [請求項3] 前記中性子照射装置は、中性子を放出する中性子源と、中性子源からの中性子を断面が絞られた中性子ビームに整形するコリメータとを有する、請求項1又は2に記載の非破壊検査装置。
- [請求項4] 検出位置に関する前記比率の分布を表示するディスプレイを備える、請求項1～3のいずれか一項に記載の非破壊検査装置。
- [請求項5] 各検出位置の前記比率に対してデータ処理を行うデータ処理部を備え、
- 前記データ処理部は、
- 検出位置に関する前記比率の分布において、前記比率の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部を特定し、
- 前記増大ピーク形成部の大きさと前記減少ピーク形成部の大きさを求めて出力する、請求項1～4のいずれか一項に記載の非破壊検査装置。
- [請求項6] 前記増大ピーク形成部の大きさを S_p とし、前記減少ピーク形成部の大きさを S_n とした場合に、 $S_p + S_n$ と S_n / S_p を判定値として求めて出力する判定値算出部を備える、請求項5に記載の非破壊検査装置。

査装置。

[請求項7] 前記判定値算出部が出力した $S_p + S_n$ と S_n / S_p に基づいて、検査対象物における欠陥の有無と欠陥の種類を判定する判定部を備え、

前記判定部は、

$S_p + S_n$ が第1しきい値 T_1 以下である場合には、欠陥不存在信号を出力し、

$S_p + S_n$ が前記第1しきい値 T_1 よりも大きく、且つ、 S_n / S_p が第2しきい値 T_2 以上である場合には、第1欠陥信号を出力し、

$S_p + S_n$ が前記第1しきい値 T_1 よりも大きく、且つ、 S_n / S_p が前記第2しきい値 T_2 未満である場合には、第2欠陥信号を出力する、請求項6に記載の非破壊検査装置。

[請求項8] 前記増大ピーク形成部の大きさを S_p とし、前記減少ピーク形成部の大きさを S_n とした場合に、 $S_p + S_n$ を判定値として求めて出力する判定値算出部と、

$S_p + S_n$ が第1しきい値 T_1 より大きい場合には、欠陥存在信号を出力する判定部と、を備える、請求項5に記載の非破壊検査装置。

[請求項9] 前記検出装置は、各検出位置で、散乱中性子である熱中性子と中速中性子の一方を選択的に検出し、検出位置毎に当該一方の検出数を計測する、請求項1～8のいずれか一項に記載の非破壊検査装置。

[請求項10] (A) 検査対象物の表面における局所的な照射箇所中性子ビームを照射し、

(B) 前記(A)の結果、検査対象物から戻って来た散乱中性子を、前記表面に対向する各検出位置で検出し、検出位置毎に散乱中性子の検出数を計測し、

(C) 各検出位置について、比率算出部により、当該検出位置の基準値に対する当該検出位置の前記検出数の比率を求めて出力し、

前記基準値は、前記検査対象物に欠陥が存在しないと仮定した場合

の検出数として前記検出位置毎に設定されている、非破壊検査方法。

[請求項11]

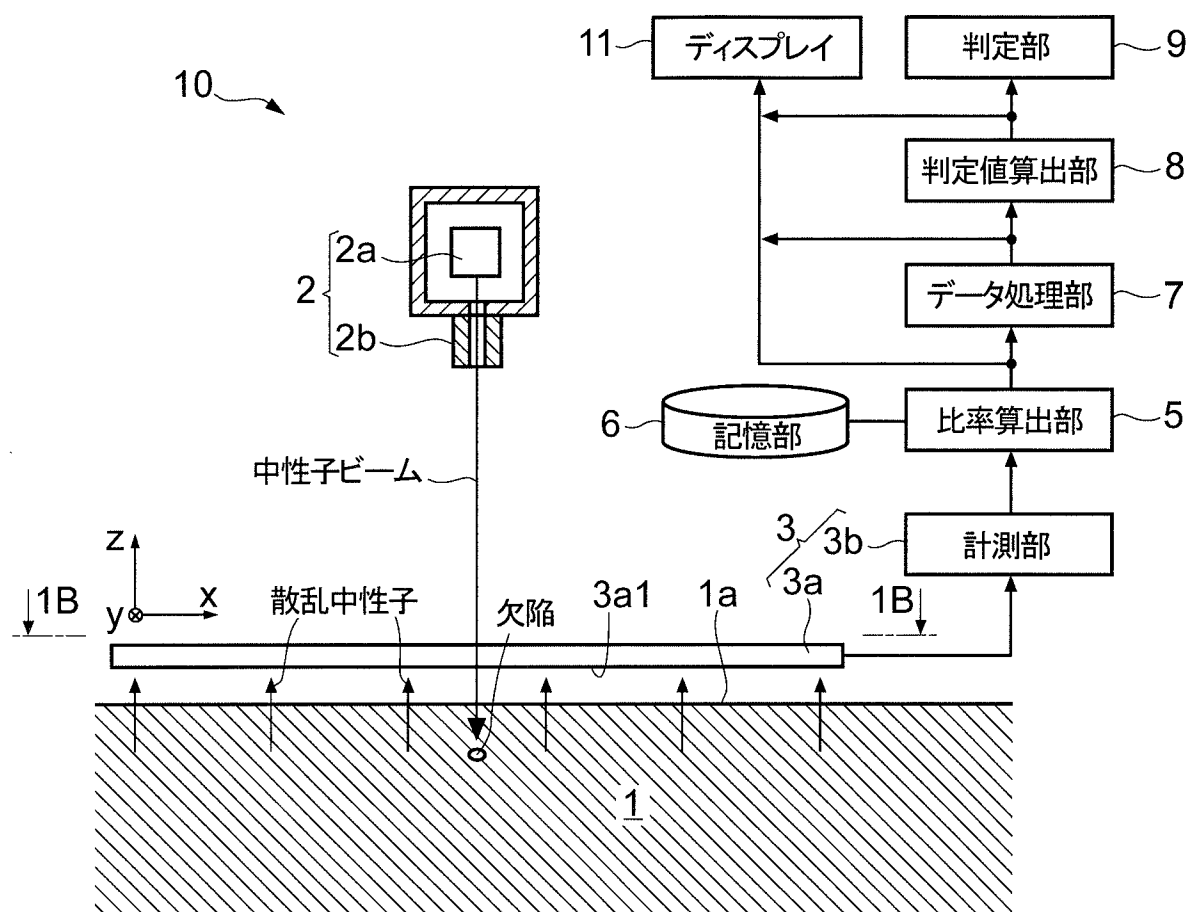
(D) 検出位置に関する前記比率の分布において、前記比率の増大ピーク形成部と減少ピーク形成部を特定し、前記増大ピーク形成部の大きさと前記減少ピーク形成部の大きさをそれぞれ S_p と S_n として求め、 S_p / S_n 又は S_n / S_p を求め、

前記 (A) において中性子ビームを入射する照射箇所を変えて、前記 (A) ～ (D) を繰り返し行い、

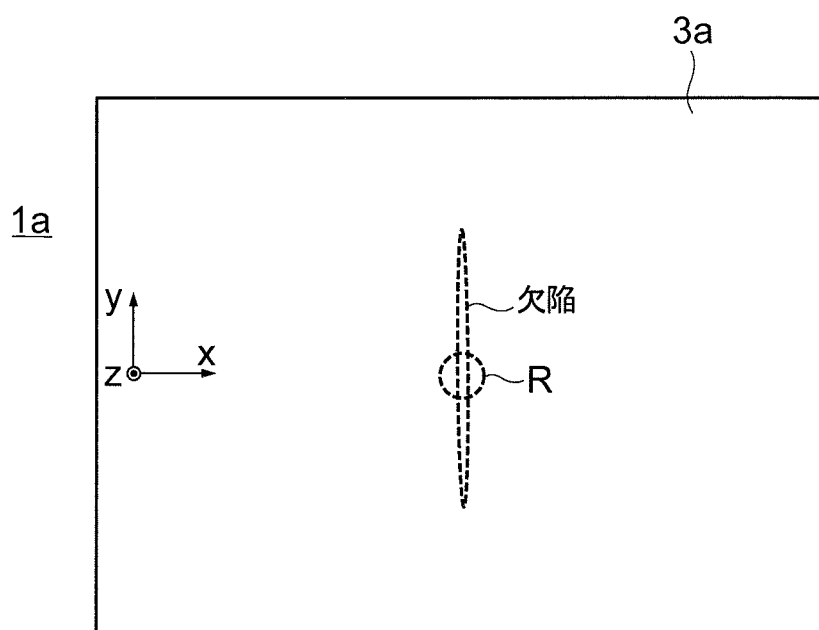
複数回の前記 (D) でそれぞれ求めた複数の S_p / S_n 又は S_n / S_p のうち最も小さい値に対応する前記照射箇所を、欠陥としての低密度部分又は滞水箇所にもっとも近い箇所として特定し、

前記低密度部分は、検査対象物の正常な部分よりも密度が低い部分である、請求項 10 に記載の非破壊検査方法。

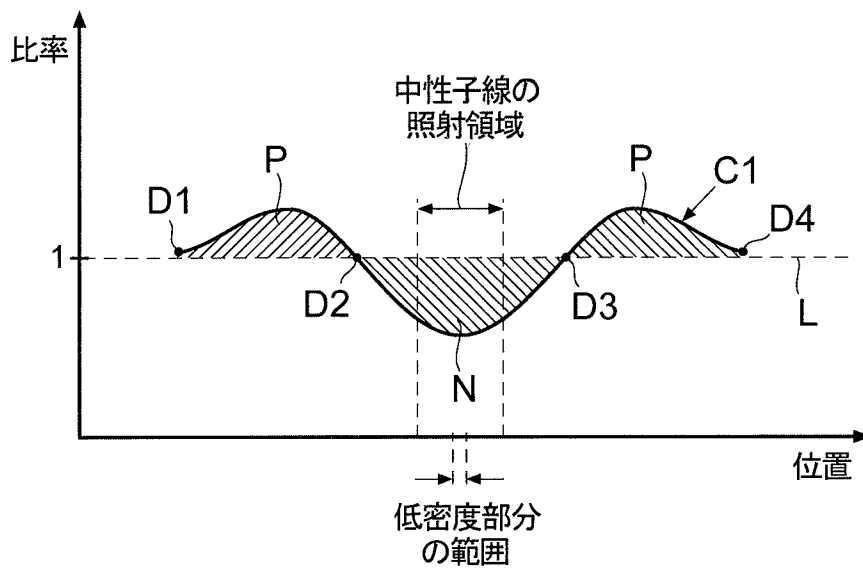
[図1A]



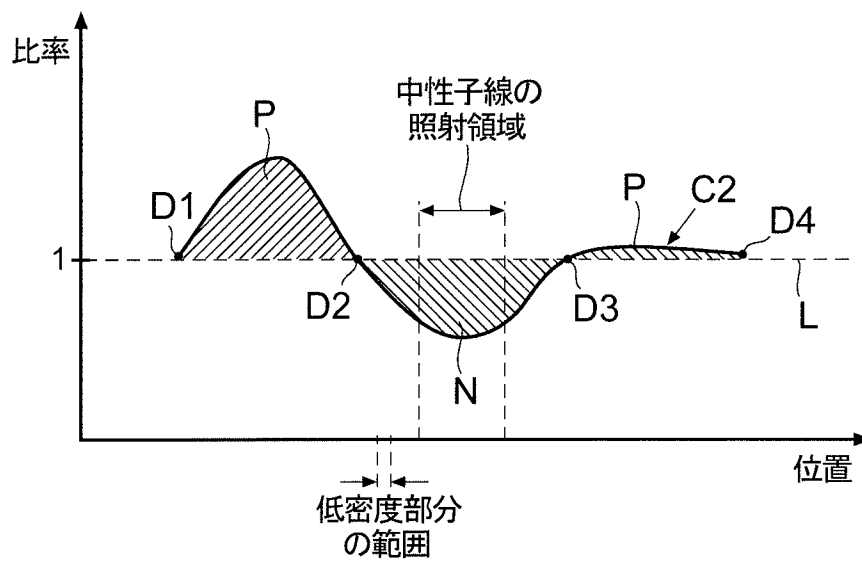
[図1B]



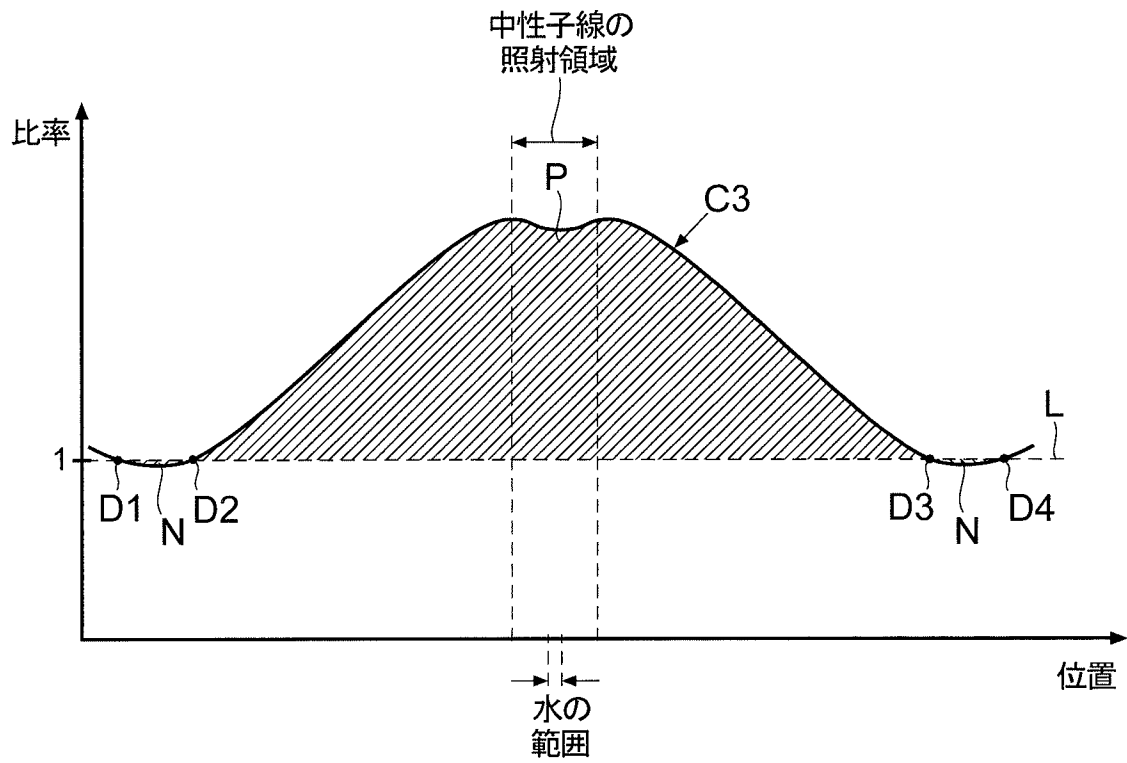
[図2A]



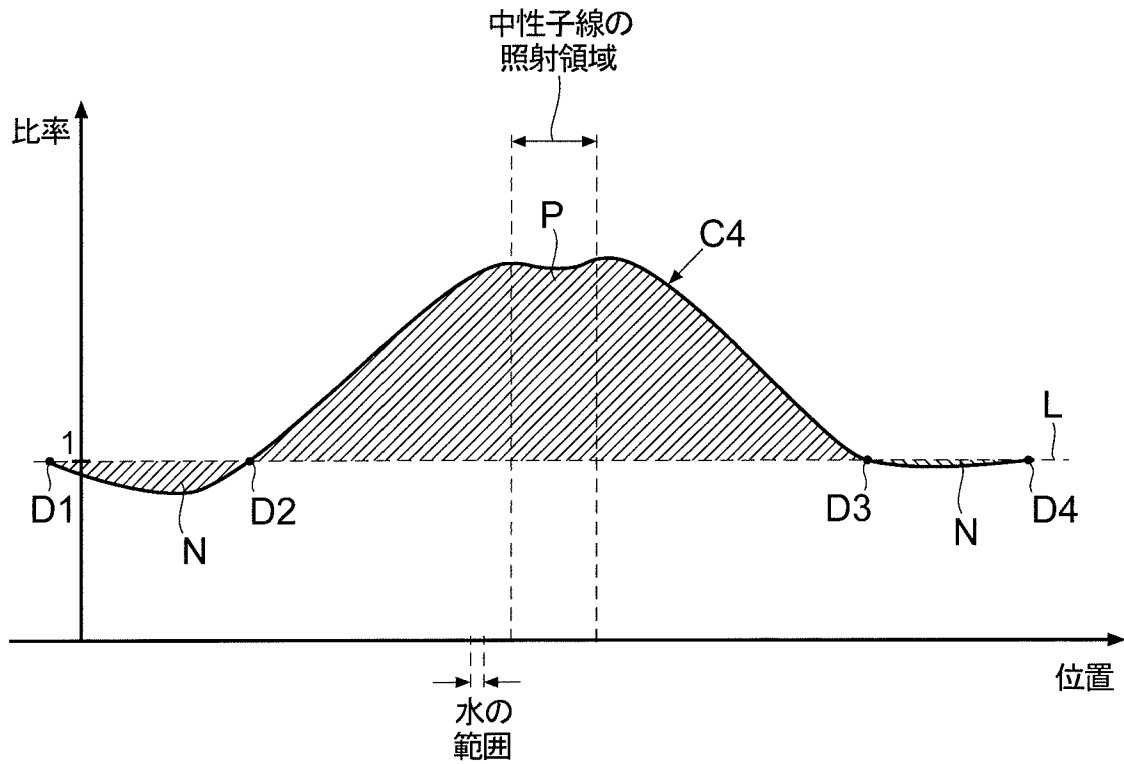
[図2B]



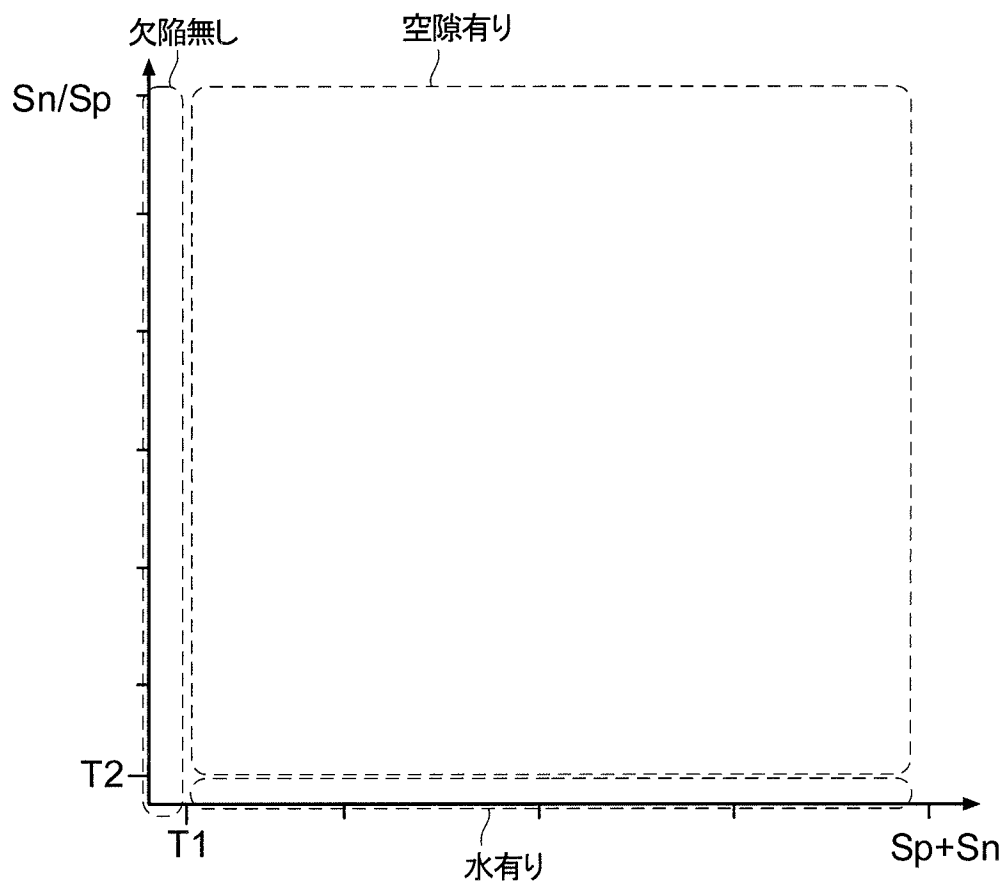
[図2C]



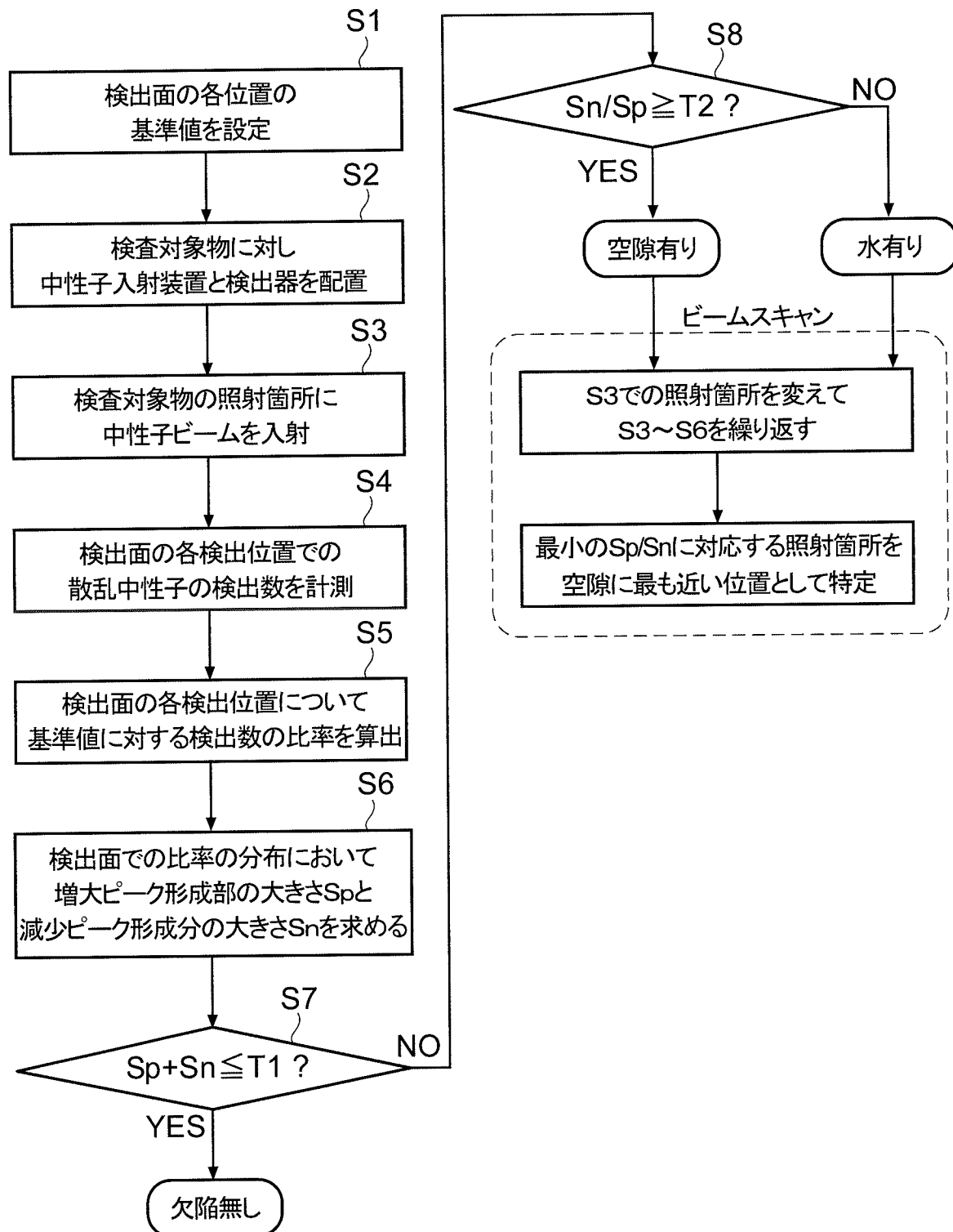
[図2D]



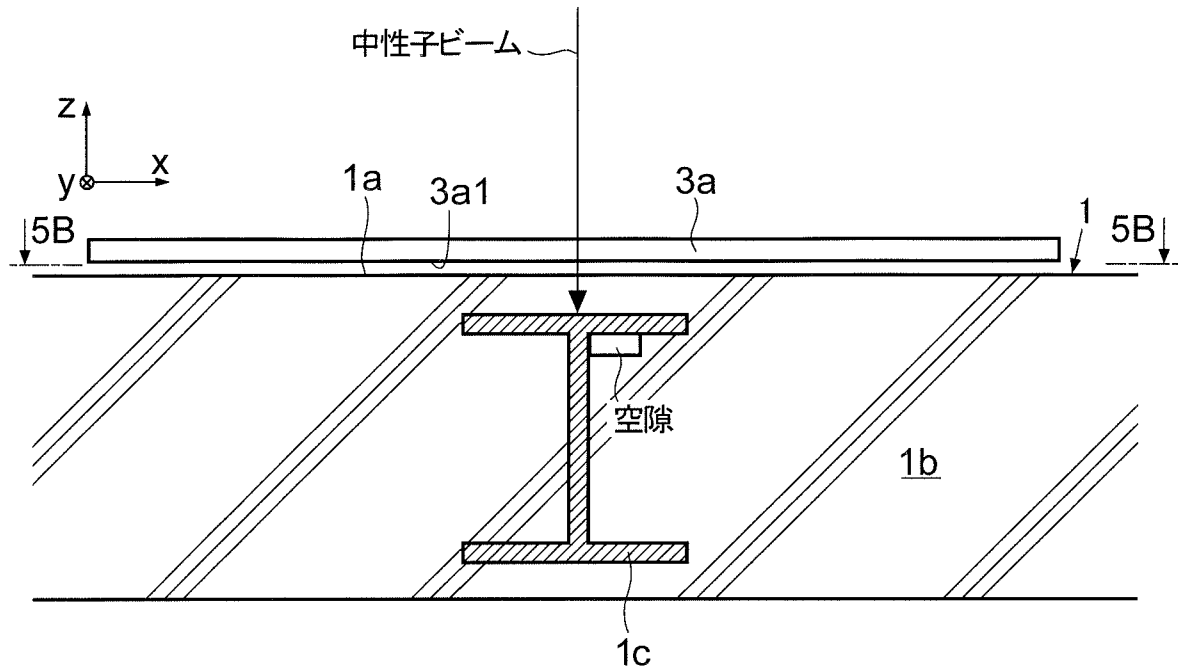
[図3]



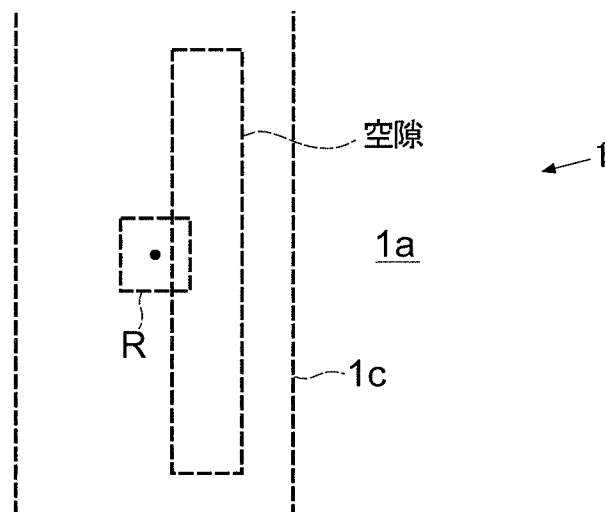
[図4]



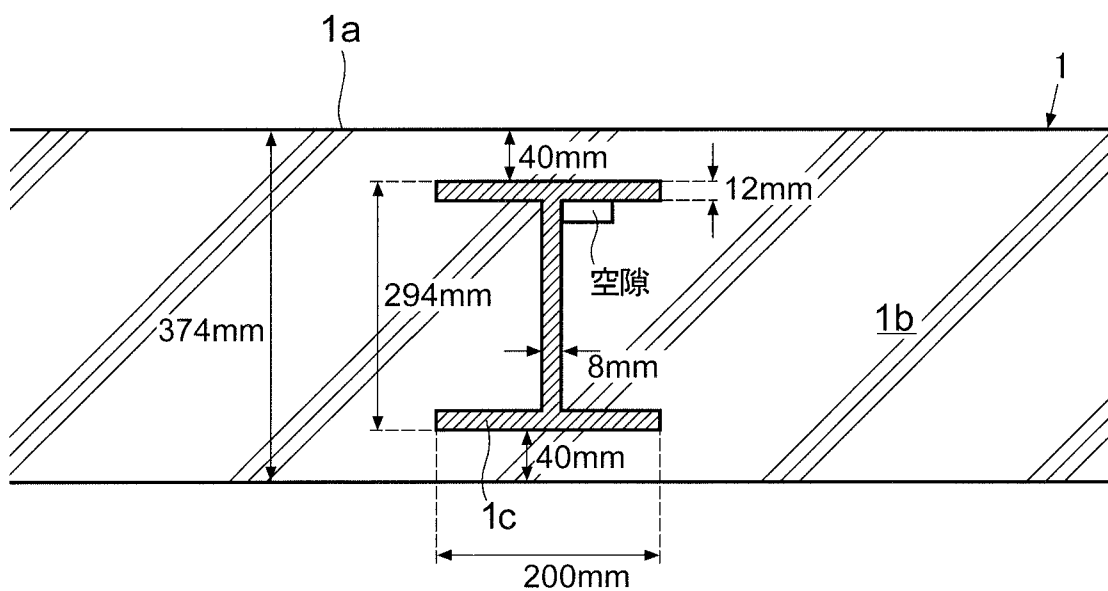
[図5A]



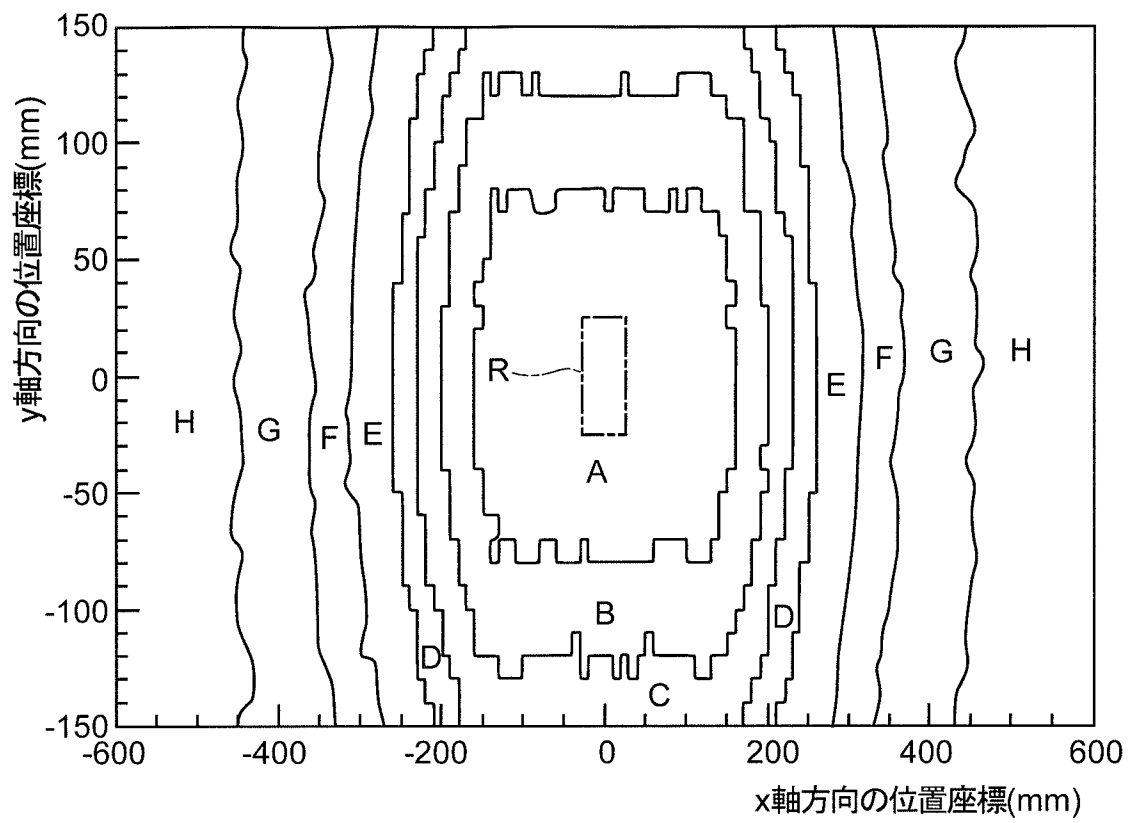
[図5B]



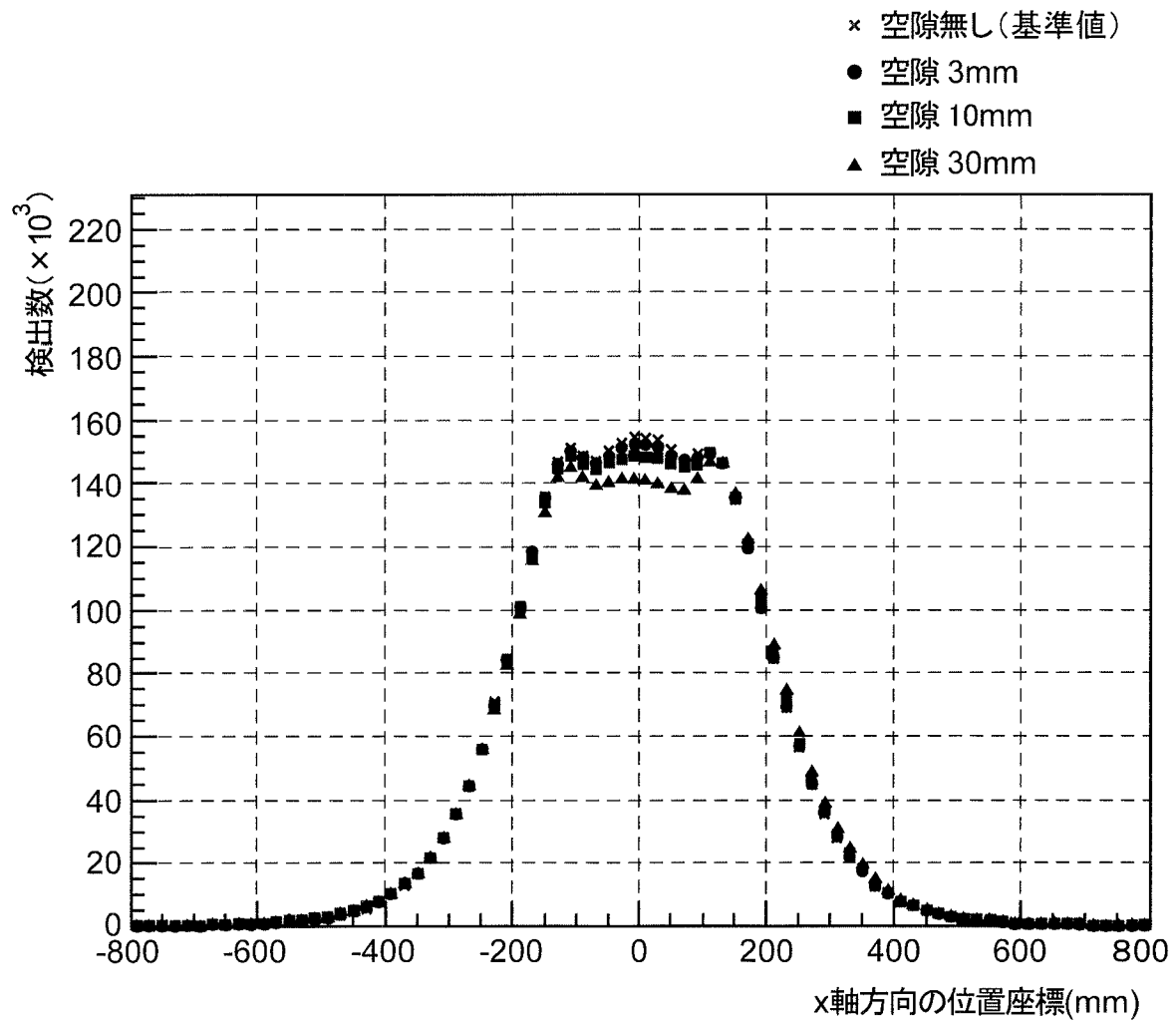
[図5C]



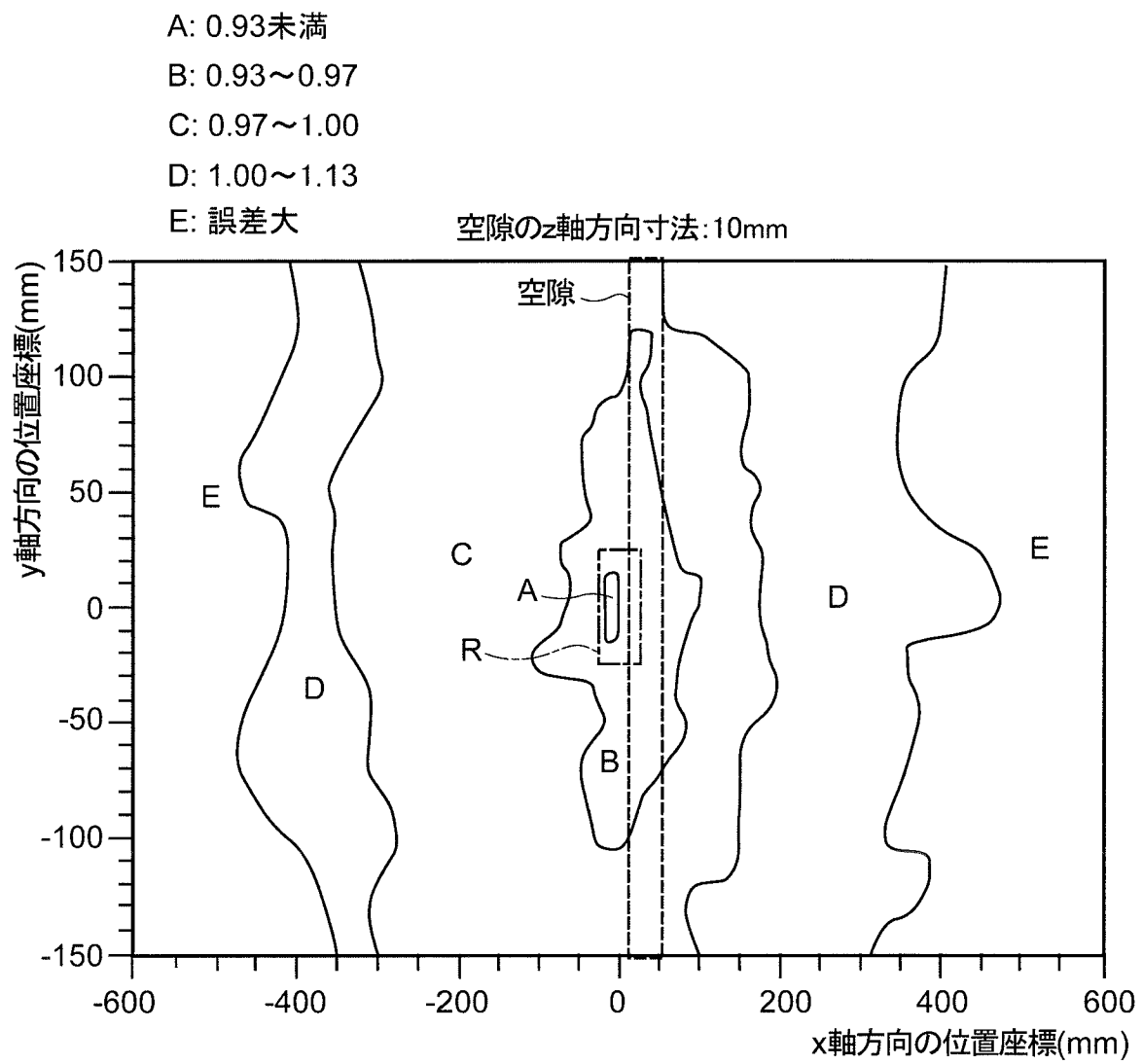
[図6A]



[図6B]

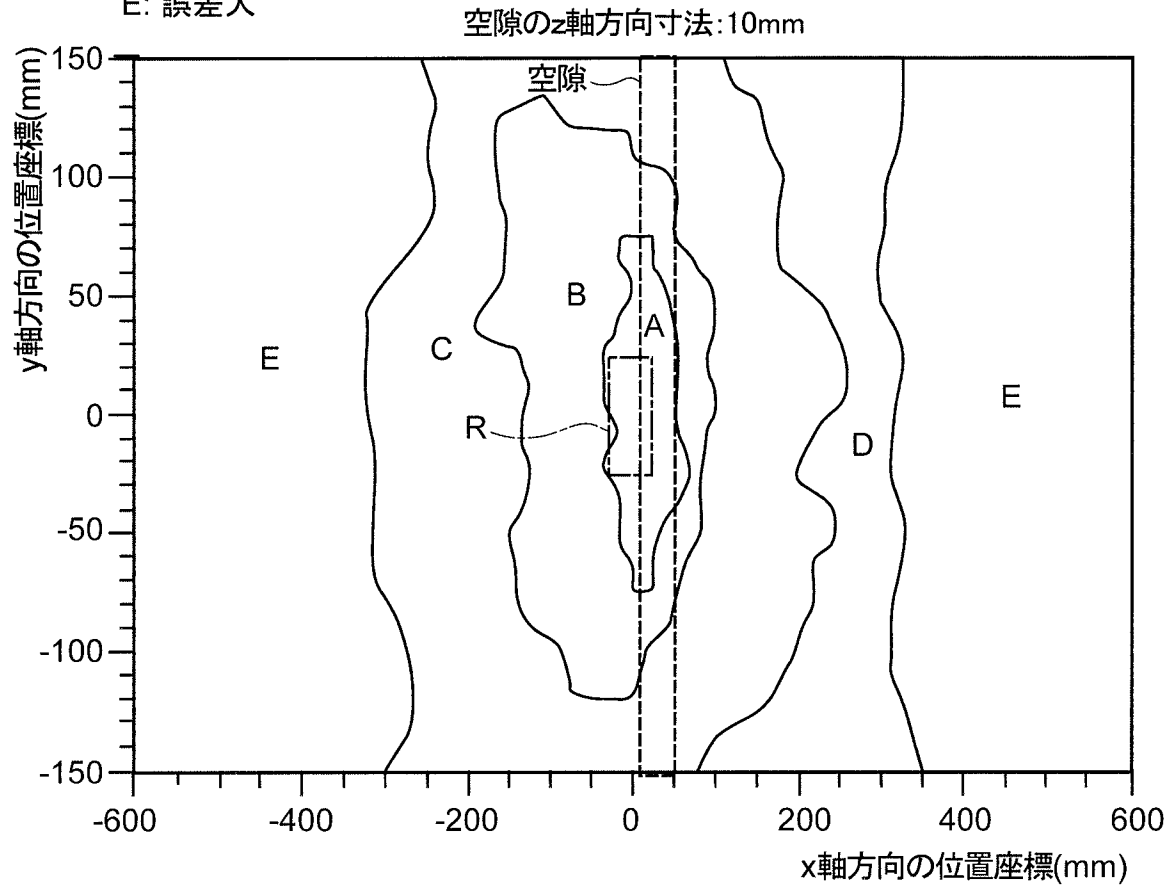


[図7A]

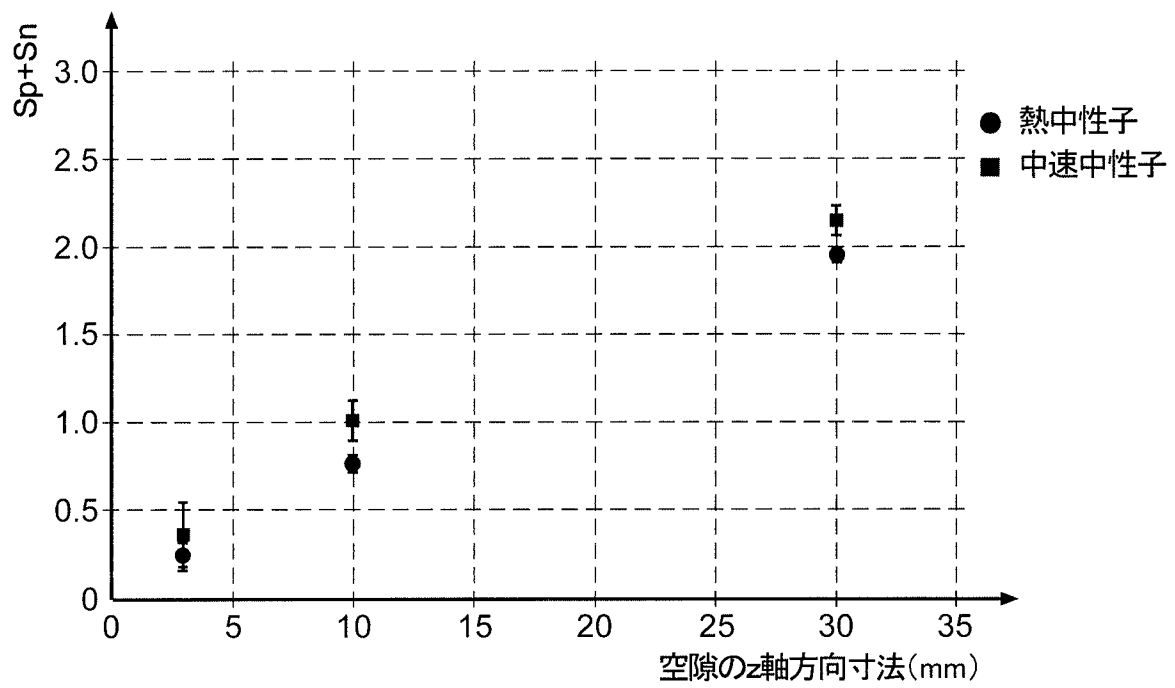


[図7B]

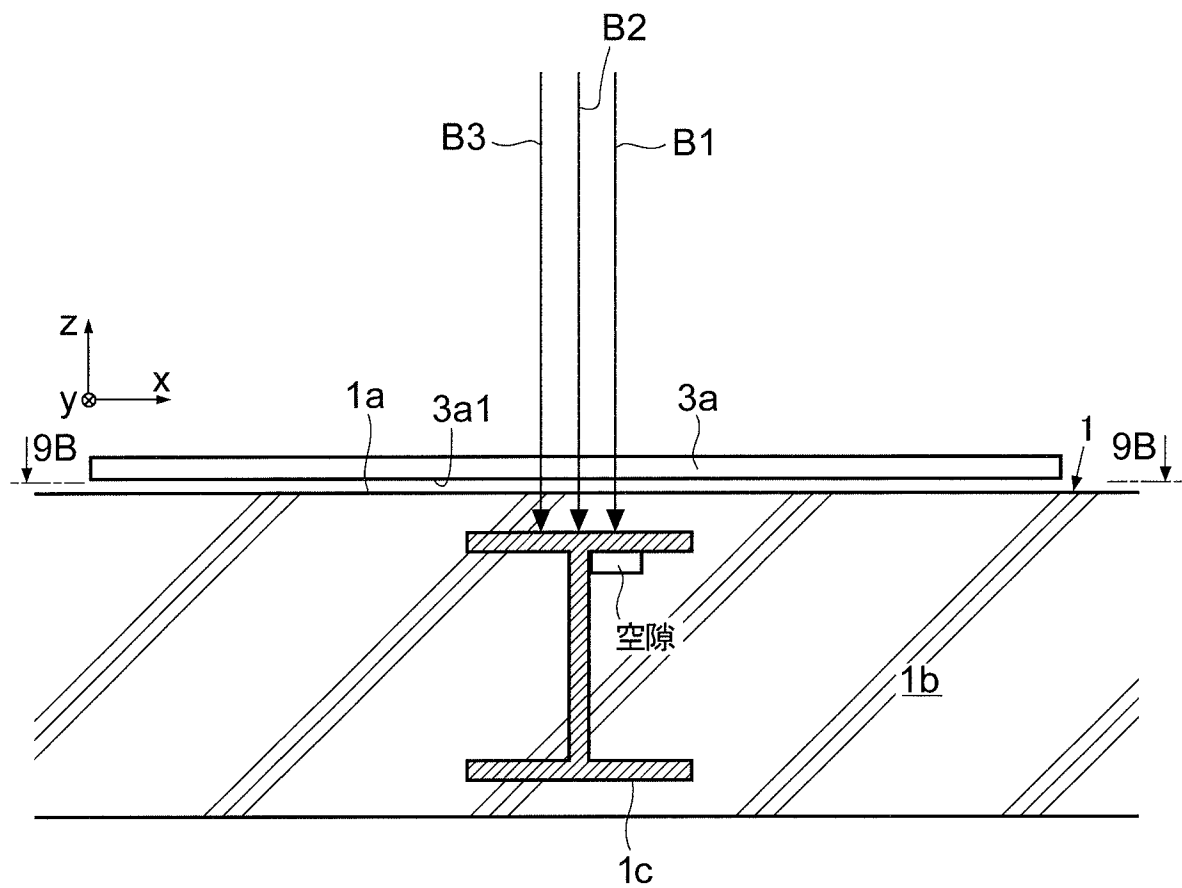
- A: 0.97未満
B: 0.97～1.00
C: 1.00～1.09
D: 1.09～1.19
E: 誤差大



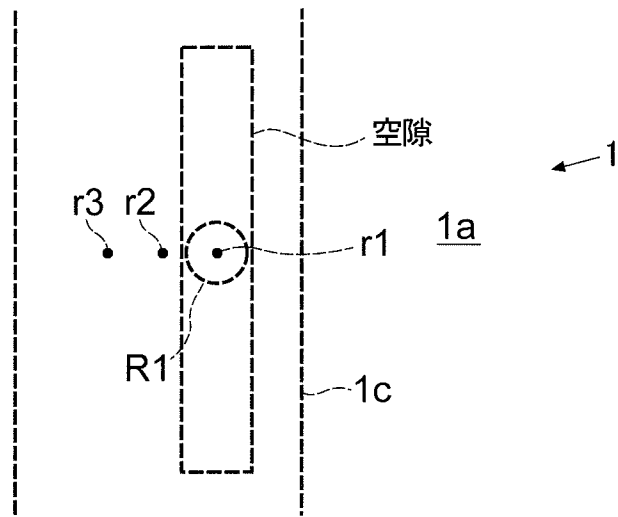
[図8]



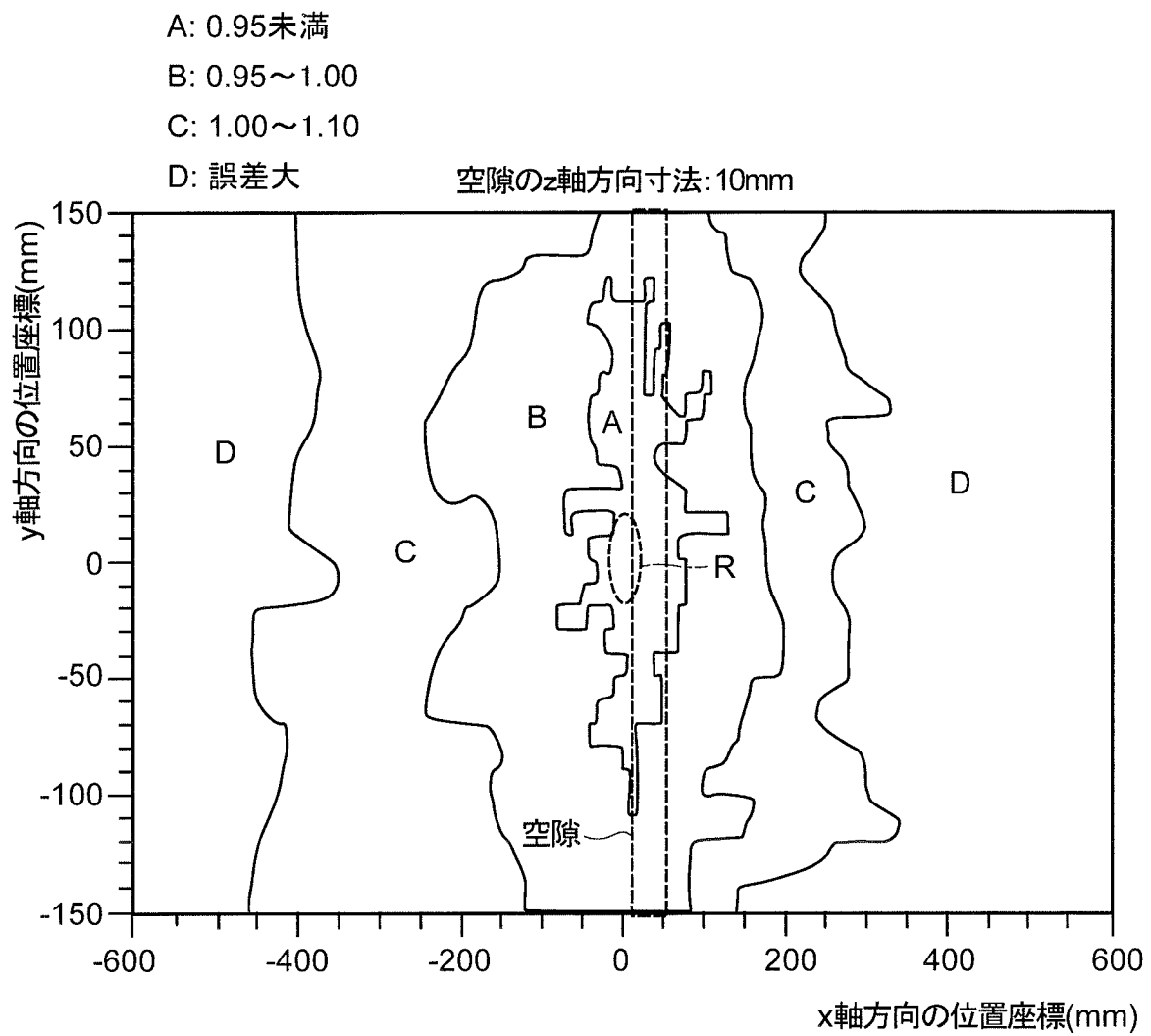
[図9A]



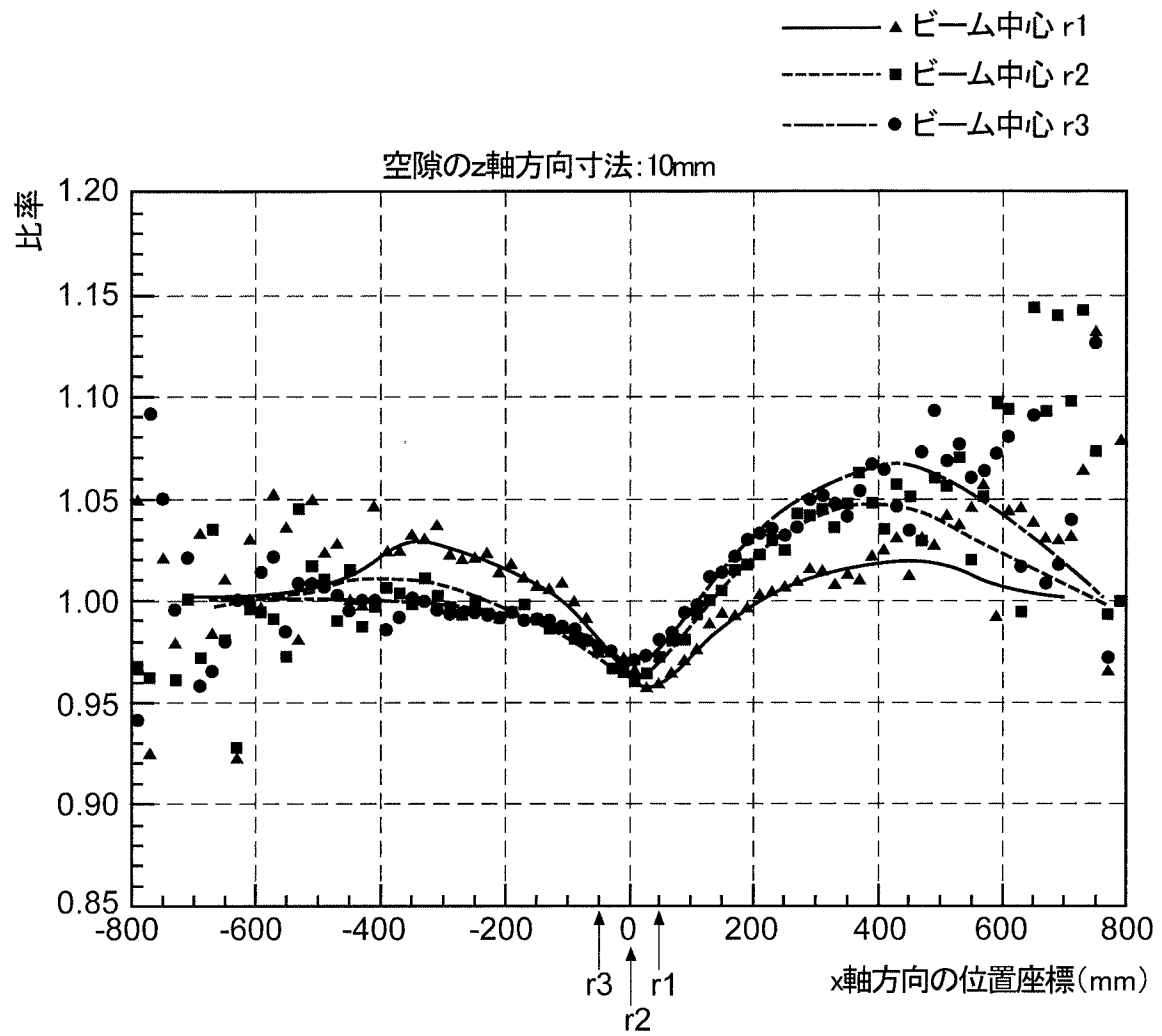
[図9B]



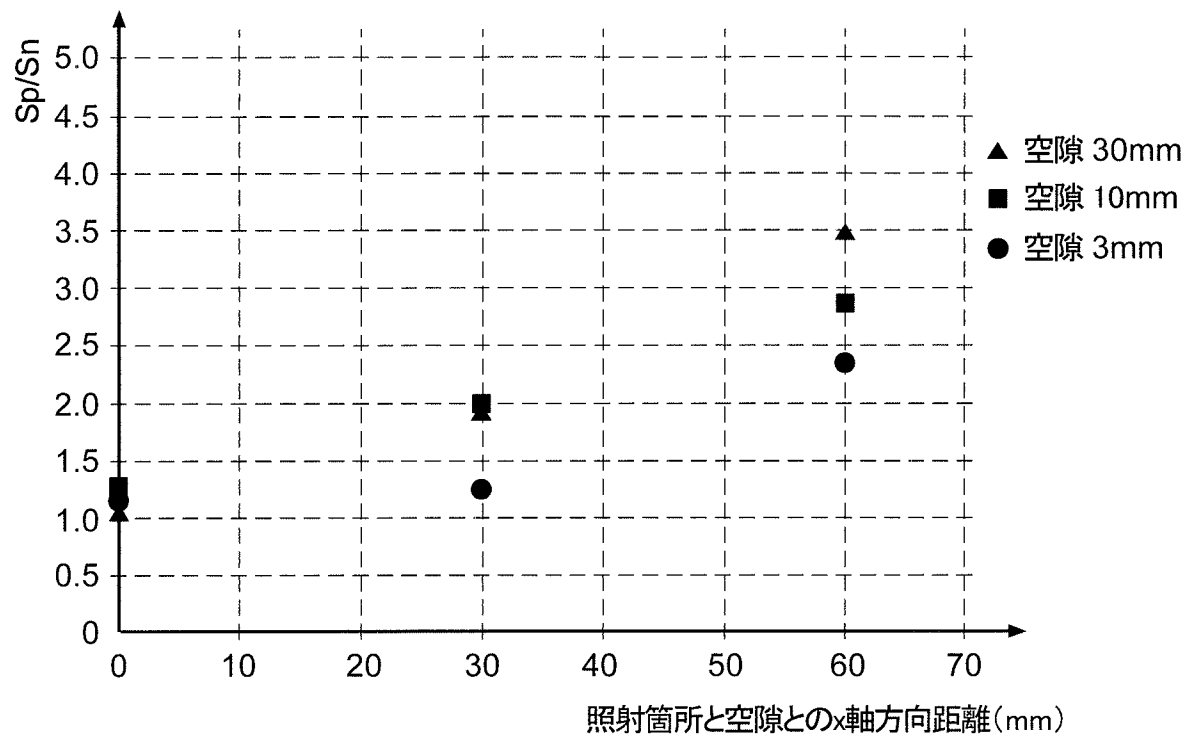
[図10]



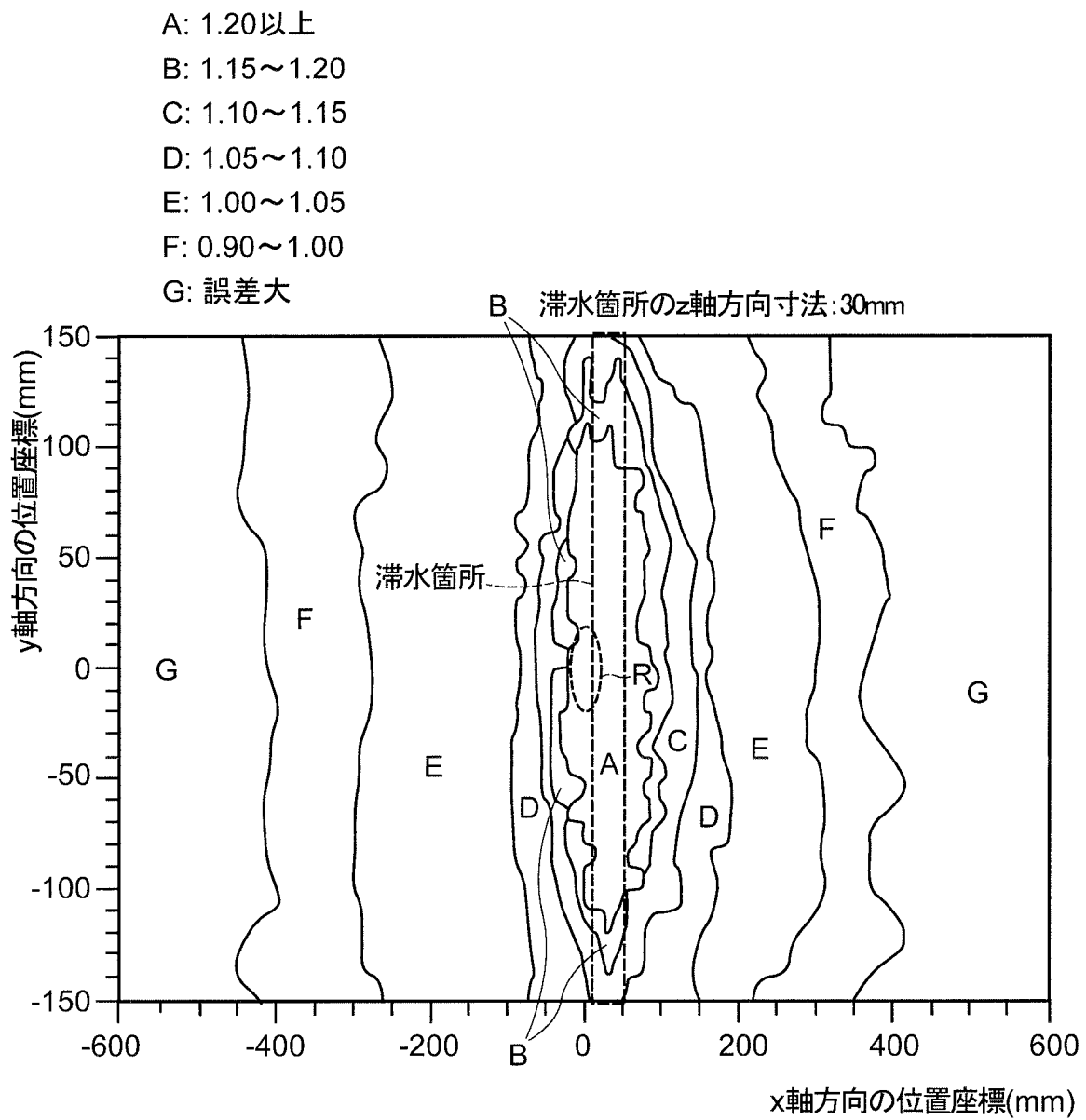
[図11]



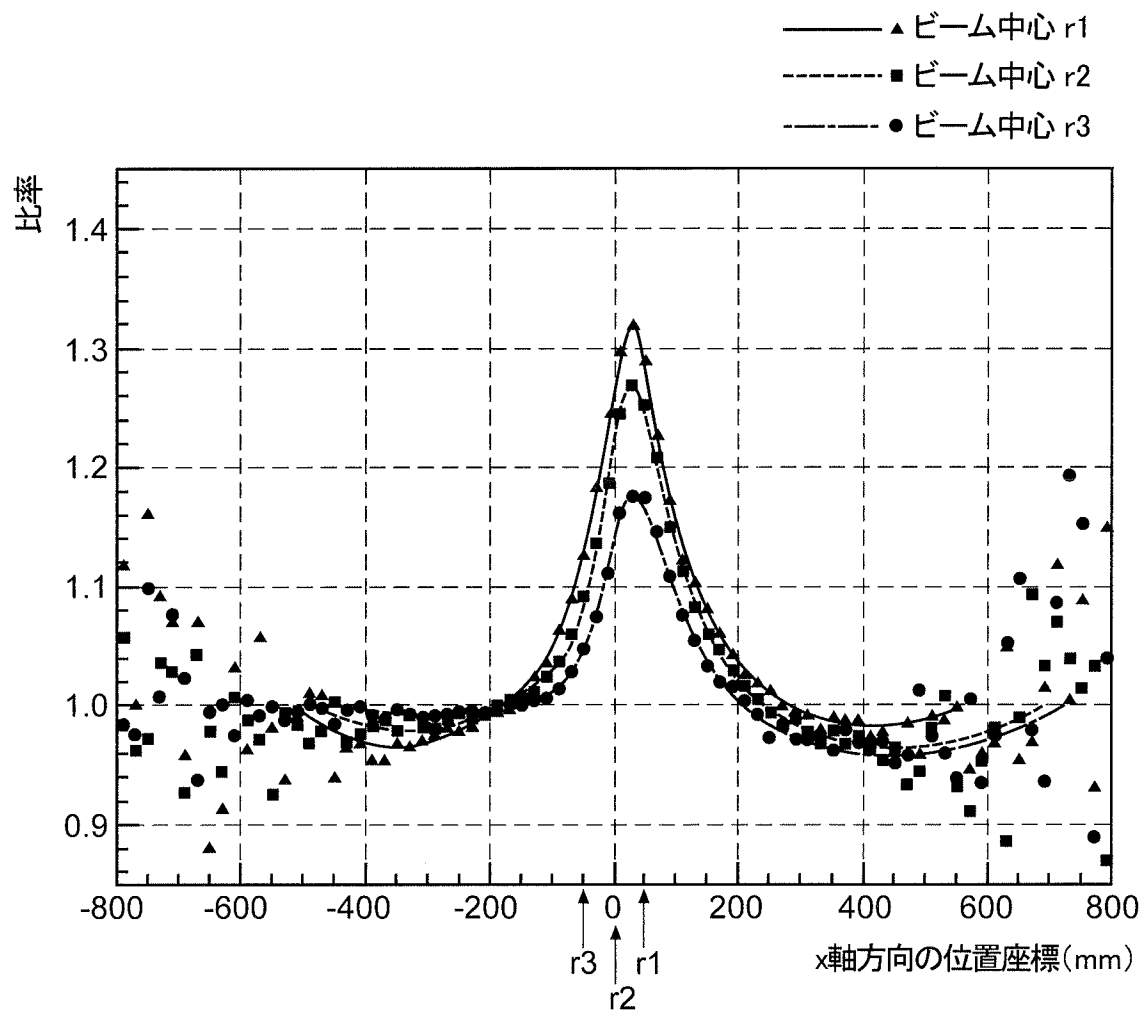
[図12]



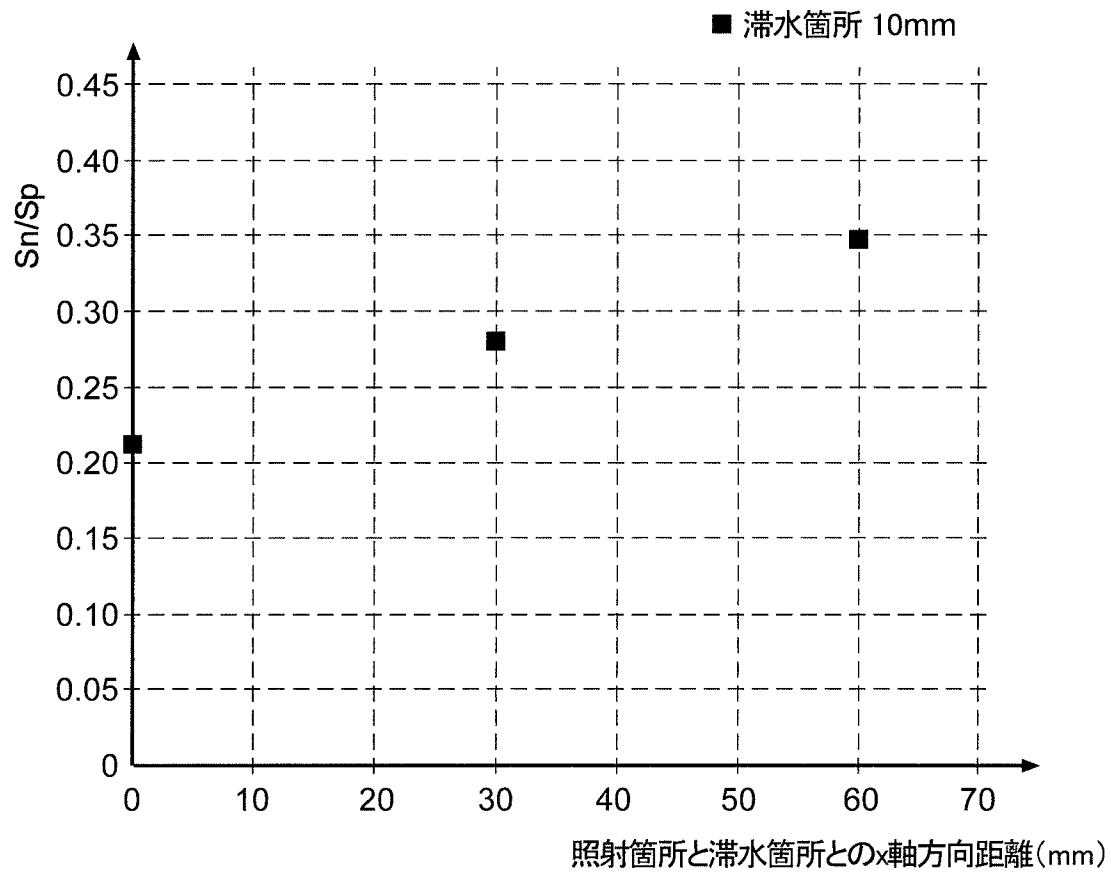
[図13]



[図14]



[図15]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/038273

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01N 23/204 (2006.01)i FI: G01N23/204 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) G01N23/204 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021 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	WO 2017/043581 A1 (RIKEN) 16 March 2017 (2017-03-16) paragraphs [0009]-[0082], fig. 1-13	1-4, 9-10
A	JP 2020-139806 A (TOPCON CORP) 03 September 2020 (2020-09-03)	1-11
A	JP 2019-190848 A (CANON ELECTRON TUBES & DEVICES CO LTD) 31 October 2019 (2019-10-31)	1-11
A	JP 4-504310 A (SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORPORATION) 30 July 1992 (1992-07-30)	1-11
A	US 2006/0226369 A1 (PEDERSEN, Hald Niels) 12 October 2006 (2006-10-12)	1-11
A	US 2549176 A (THE TEXAS COMPANY) 17 April 1951 (1951-04-17)	1-11
A	CN 110333547 A (INST NUCLEAR PHYSICS & CHEMISTRY CHINA ACAD ENG PHYSICS) 15 October 2019 (2019-10-15)	1-11
A	CN 110320564 A (INST NUCLEAR PHYSICS & CHEMISTRY CHINA ACAD ENG PHYSICS) 11 October 2019 (2019-10-11)	1-11
☐ 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 14 December 2021		Date of mailing of the international search report 28 December 2021
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/038273

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2017/043581	A1	16 March 2017	US 2018/0259462 A1 paragraphs [0011]-[0158], fig. 1-13	
JP	2020-139806	A	03 September 2020	WO 2020/175654 A1	
JP	2019-190848	A	31 October 2019	(Family: none)	
JP	4-504310	A	30 July 1992	US 5098640 A	
				WO 1991/011009 A1	
US	2006/0226369	A1	12 October 2006	JP 2006-520889 A	
				WO 2004/081551 A1	
				CN 1761872 A	
				CA 2519077 A	
				KR 10-1122908 B1	
US	2549176	A	17 April 1951	(Family: none)	
CN	110333547	A	15 October 2019	(Family: none)	
CN	110320564	A	11 October 2019	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01N 23/204(2006.01)i FI: G01N23/204														
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）） G01N23/204 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 <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2021年</td> </tr> </table> 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）			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年				
日本国実用新案公報	1922 - 1996年													
日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年													
日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年													
日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年													
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												
X	WO 2017/043581 A1 (国立研究開発法人理化学研究所) 16.03.2017 (2017 - 03 - 16) [0009]-[0082], Figures 1-13	1-4, 9-10												
A	JP 2020-139806 A (株式会社トプコン) 03.09.2020 (2020 - 09 - 03)	1-11												
A	JP 2019-190848 A (キャノン電子管デバイス株式会社) 31.10.2019 (2019 - 10 - 31)	1-11												
A	JP 4-504310 A (サイエンス・アプリケーションズ・インターナショナル・コーポレーション) 30.07.1992 (1992 - 07 - 30)	1-11												
A	US 2006/0226369 A1 (PEDERSEN HALD NIELS) 12.10.2006 (2006 - 10 - 12)	1-11												
A	US 2549176 A (THE TEXAS COMPANY) 17.04.1951 (1951 - 04 - 17)	1-11												
A	CN 110333547 A (中国工程物理研究院核物理与化学研究所) 15.10.2019 (2019 - 10 - 15)	1-11												
A	CN 110320564 A (中国工程物理研究院核物理与化学研究所) 11.10.2019 (2019 - 10 - 11)	1-11												
☐ 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。														
<table border="0"> <tr> <td>* 引用文献のカテゴリー</td> <td>"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの</td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td>"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</td> </tr> <tr> <td>"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）</td> <td>"&" 同一パテントファミリー文献</td> </tr> <tr> <td>"O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献</td> <td></td> </tr> <tr> <td>"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</td> <td></td> </tr> </table>			* 引用文献のカテゴリー	"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	"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	"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	"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	"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	"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）	"&" 同一パテントファミリー文献	"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	
* 引用文献のカテゴリー	"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抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの													
"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	"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													
"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	"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													
"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）	"&" 同一パテントファミリー文献													
"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														
国際調査を完了した日 14.12.2021	国際調査報告の発送日 28.12.2021													
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 佐藤 仁美 2W 4073 電話番号 03-3581-1101 内線 3258													

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/038273

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2017/043581	A1	16.03.2017	US 2018/0259462 A1 [0011]-[0158], Figures 1-13	
JP	2020-139806	A	03.09.2020	WO 2020/175654 A1	
JP	2019-190848	A	31.10.2019	(ファミリーなし)	
JP	4-504310	A	30.07.1992	US 5098640 A	
				WO 1991/011009 A1	
US	2006/0226369	A1	12.10.2006	JP 2006-520889 A	
				WO 2004/081551 A1	
				CN 1761872 A	
				CA 2519077 A	
				KR 10-1122908 B1	
US	2549176	A	17.04.1951	(ファミリーなし)	
CN	110333547	A	15.10.2019	(ファミリーなし)	
CN	110320564	A	11.10.2019	(ファミリーなし)	