

(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
2014年3月20日(20.03.2014)



(10) 国際公開番号

WO 2014/041675 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 23/04 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/073570
- (22) 国際出願日: 2012年9月14日(14.09.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社日立製作所(HITACHI, LTD.) [JP/JP]; 〒1008280 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 米山 明男(YONEYAMA Akio) [JP/JP]; 〒1858601 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地 株式会社日立製作所 中央研究所内 Tokyo (JP). 馬場 理香(BABA Rika) [JP/JP]; 〒1858601 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地 株式会社日立製作所 中央研究所内 Tokyo (JP). 上田 和浩(UEDA Kazuhiro) [JP/JP]; 〒1858601 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目280番地 株式会社日立製作所 中央研究所内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 井上 学, 外(INOUE Manabu et al.); 〒1008220 東京都千代田区丸の内一丁目6番1号 株式会社日立製作所内 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, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, 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, 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, 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,

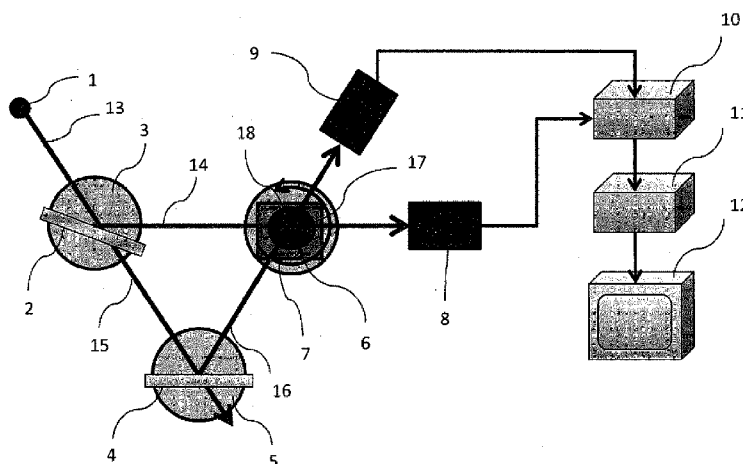
[続葉有]

(54) Title: X-RAY IMAGING DEVICE AND X-RAY IMAGING METHOD

(54) 発明の名称: X線撮像装置及びX線撮像方法

[図4]

図4



(57) Abstract: Polychromatic X-rays (13) emitted from an X-ray source (1) are incident to a plurality of crystal plates (2, 4), and X-rays with the required energy for measurement are selectively extracted by way of reflection of X-ray diffraction. Then, a specimen (18) is irradiated with the extracted X-rays for each energy at the same time and images are acquired. Thus, substances with equal linear absorption coefficients but different densities can be observed and specific elements can be made visible.

(57) 要約: X線源1から出射した多色X線13を複数の結晶板2、4に入射し、測定に必要なエネルギーのX線を、X線回折の反射により選択的に取り出す。そして、取り出した各エネルギーのX線を同時に試料18に照射して各画像を得る。これにより、線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。

WO 2014/041675 A1



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, ML, MR,
NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称： X線撮像装置及びX線撮像方法

技術分野

[0001] 本発明はX線撮像装置及びX線撮像方法に係わり、特に、物体の内部を非破壊に高い空間分解能で検査するのに適したX線撮像装置及び方法に関する。

背景技術

[0002] 被写体内部を非破壊で観察する方法として、X線CT（Computed Tomography）が医療診断や製品の検査等に広く利用されている。X線CTはX線の物質に対する非常に高い透過能を利用した撮像方法で、X線を被写体に対して相対的に回転させながら照射し、透過してきたX線の空間的な強度分布像（投影像、あるいは透過像と呼ぶ）を各角度毎に取得し、取得した透過像から再構成と呼ばれる計算により被写体の断面像を再生する方法である。

[0003] 図1に示したように y_r 軸方向（ x_r - y_r 座標系は原点を中心に角度 θ だけ x - y 座標系を回転した系）からX線を照射した場合、試料を透過したX線の強度分布 $I\theta(x_r)$ は、 y_r 軸に沿った線積分として

[0004] [数1]

$$I\theta(x_r) = I_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\mu(x_r, y_r)} dy_r \quad \text{数1}$$

[0005] で与えられる。ここで、 I_0 は入射するX線の強度、 $\mu(x_r, y_r)$ は試料内部の各位置 (x_r, y_r) における吸収率である。数1に対数変換を施し、さらに両辺を I_0 で除算すると、 $\ln(I\theta(x_r)/I_0)$ で定義される投影データ $p\theta(x_r)$ は、

[0006] [数2]

$$p\theta(x_r) = \int_{-\infty}^{\infty} \mu(x_r, y_r) dy_r \quad \text{数2}$$

[0007] となる。この式は、 $\mu(x_r, y_r)$ のラドン変換、あるいは θ 方向へのプロジェクション（投影）と呼ばれている。したがって、 θ を0から 2π まで回転して得られた投影データ群をラドン逆変換（再構成計算）することによって、 $\mu(x_r, y_r)$ の分布像、すなわち被写体の μ をコントラストとする断面像を求めることができる（非特許文献1）。

[0008] 吸収率 μ は線吸収係数とも呼ばれ、エネルギーと物質によって決まるが、同じ物質でもその状態（凝集など）によって異なる。このため、 μ を物質の密度 ρ で割った値 μ/ρ は物質の状態に関係せず一定になり、質量吸収係数と呼ばれる。物質が複数の元素から構成されている混合物や化合物の質量物質係数は、各成分の質量吸収係数と重量比を用いて表される。混合物の場合は、

[0009] [数3]

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\left(\frac{\mu_1}{\rho_1}\right)x_1 + \left(\frac{\mu_2}{\rho_2}\right)x_2 + \dots}{100} \quad \text{数3}$$

[0010] となる。ここで、 $x_1, x_2, \dots$ はそれぞれの元素の重量百分率である。化学式 A_xB_y となる化合物の場合は、

[0011] [数4]

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\left(\frac{\mu_A}{\rho_A}\right)ax + \left(\frac{\mu_B}{\rho_B}\right)by + \dots}{ax + by + \dots} \quad \text{数4}$$

[0012] となる。ここで、 $a, b, \dots$ はそれぞれの元素A、Bの原子量である（非特許文献2）。

[0013] 線吸収係数は、質量吸収係数と密度の積で与えられるため、質量吸収係数が異なる混合物や化合物でも、密度状態によっては線吸収係数 μ が同じになってしまう、識別できなくなるという場合がある。この問題を解決する方法として、複数のエネルギーのX線を利用した撮像法がある。一般には異なる2つのエネルギーで実施されるため、デュアルエネルギースキャンと呼ばれて

いる。この方法では、質量吸収係数がエネルギーに依存して変化するのに対して、密度はエネルギーに対して不変なことを利用して、線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察を可能にしている。

[0014] 元素AとBから構成された被写体をエネルギーが異なる2種類のX線（エネルギーE1とE2）で測定したとき、元素AとBの密度をそれぞれ ρ_A と ρ_B とすると、エネルギーE1に対する線吸収係数 μ_1 、エネルギーE2に対する線吸収係数 μ_2 はそれぞれ、

[0015] [数5]

$$\begin{cases} \mu_1 = \mu_A(E1)\rho_A + \mu_B(E1)\rho_B \\ \mu_2 = \mu_A(E2)\rho_A + \mu_B(E2)\rho_B \end{cases} \quad \text{数5}$$

[0016] で与えられる。ここで、 $\mu_A(E1)$ 、 $\mu_A(E2)$ 、 $\mu_B(E1)$ 、 $\mu_B(E2)$ 、は元素AとBのエネルギーE1とE2における質量吸収係数で、既知な量である。このため、上式は ρ_A と ρ_B に関する連立方程式となり、未知数2に対して、式が2個与えられるために、一意に解くこと、すなわち一意に元素AとBの密度を算出することができる。また、3元素以上では2種類のエネルギーのX線で得られた像だけでは各元素の密度を一意に求めることはできない。しかし、質量吸収係数はエネルギーによって変化するため、仮にエネルギーE1で同じ線吸収係数になり、区別することができなくても、エネルギーE2では必ず異なる線吸収係数となるために、両者を識別することが可能になる。

[0017] また、各元素には吸収端と呼ばれるX線の吸収が急激に変化する固有のエネルギーがある。このエネルギーの前後で像を取得し、その差分を計算することによって対象となる元素だけ抽出した像（元素マッピング）を得ることも可能になる。以上のように、複数のエネルギーのX線を利用することによって、従来は区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。

[0018] 上記のデュアルエネルギー स्क्यानを行う方法として、これまでにX線源として利用している管球に加える電圧を変化させる方法などが考案されている（非特許文献3）。

先行技術文献

非特許文献

- [0019] 非特許文献1：科学計測のための画像データ処理、河田聡、CQ出版（1994年）、p. 221～2
- 非特許文献2：X線回折・散乱技術、菊田惺志、東京大学出版会（1992年）、p. 66～68
- 非特許文献3：“Objective characterization of GE discovery CT750 HD scanner: gemstone spectral imaging mode.”, Zhang D, Li X, Liu B., Med Phys. 2011 Mar; 38(3): 1178-88.

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0020] しかし上記の従来法では、電圧を高速に切り替える特殊な電源が必要になることや、極わずかではあるが時間差が生じること、或いは線源がシンクロトロン放射光などの場合は原理的に適用することができないなどの問題がある。

課題を解決するための手段

- [0021] 本発明ではX線源から出射した多色X線を複数の結晶板に入射し、測定に必要なエネルギーのX線を、以下に示すX線回折により選択的に取り出す。そして、取り出した各エネルギーのX線を同時に試料に照射して各画像を得る。これにより、従来は区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。
- [0022] X線回折は、シリコン等の単結晶にX線を入射した際に、ある条件（ブラッグ条件）が満されると単結晶の結晶格子でX線が回折（反射）される現象のことである。その幾何学的な配置から、ブラッグのケースとラウエのケースの2種類に分類される。ブラッグのケースは、図2（a）に示すように回折X線が入射X線と同じ結晶面（表面）で形成される配置で、単純な反射となる。結晶板がX線に対して薄い場合には、裏面から透過したX線が同時に形成される

。一方、ラウエのケースは図2（b）に示すように、入射とは異なる結晶面（裏面）で回折X線と透過X線が同時に形成される配置で、ビームの分割となる。

[0023] 上記いずれのケースでもブラッグ条件は不変で以下に示す式で与えられる。

[0024] [数6]

$$\lambda = 2d \sin \theta_B \quad \text{数6}$$

[0025] ここで、 λ はX線の波長、 θ_B はブラッグ角、 d は回折を生じる結晶格子の面間隔である。入射X線が様々なエネルギーを含んだ多色或いは白色X線の場合、上記条件を満たさないエネルギーのX線は、結晶を単に透過することになる。したがって、この現象を利用することによって、任意のある特定のエネルギーを持ったX線のみを取り出すことが可能になる。さらに、取り出す角度（ θ_B 、ブラッグ角）は、適当な面間隔 d を持った格子面を利用することによって、任意に調整することができる。

[0026] このように1個の結晶で、ある特定のエネルギーのX線を取り出すことができるので、図3に示すように複数個の結晶（図では第1結晶と第2結晶で、（a）はブラッグのケース、（b）はラウエのケース）を入射X線の光路に直列に並べることによって、複数のエネルギーのX線を同時に取り出すことが可能になる。さらに、取り出す角度は、適当な回折格子面を利用することによって調整できるので、取り出した各エネルギーのX線を図3に示すように一点で交差させることができる。そして、この交差点に被写体を設置すれば、同時に複数のエネルギーのX線を照射することができる。なお、被写体を透過した各X線は、各個別のX線カメラ、或いは大視野のX線カメラで一緒に検出すればよい。また、CTの測定は従来と同様に、被写体を入射X線に対して相対的に回転させて各角度で投影像を検出することによって、実現することができる。

発明の効果

[0027] 本発明に依れば、X線回折を利用することによって、X線源から出射した多

色X線のうち、測定に必要なエネルギーのX線のみを取り出し、同時に試料に照射して各画像を得ることができる。これにより、従来は区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化が可能になる。

図面の簡単な説明

[0028] [図1] X線CTの原理を示す図である。

[図2] ブラッグおよびラウエケースのX線回折を示す図である。

[図3] 複数のX線回折を組み合わせ、異なるエネルギーで被写体を同時に照射する構成を示す図である。

[図4] 本発明の実施例1におけるX線撮像装置の構成を示す図である。

[図5] 本発明の実施例2におけるX線撮像装置の構成を示す図である。

[図6] 本発明の実施例3における結晶による非対称反射を示す図である。

[図7] 本発明の実施例4におけるX線撮像装置の構成を示す図である。

[図8] 本発明の実施例1におけるX線撮像装置の構成を示す図である。

[図9] 本発明の実施例1におけるX線撮像装置の構成を示す図である。

発明を実施するための形態

[0029] 以下、図面を用いて本発明の実施例について説明する。以下に示す図において、同じ機能を有する部分には同じ符号を付し、重複する説明を省略する。

実施例 1

[0030] 図4は本発明で使用するX線撮像装置の一例の構成図である。同図に示すように本X線撮像装置は、X線源1、第1結晶板2、第1結晶板位置決め機構3、第2結晶板4、第2結晶板位置決め機構5、被写体ホルダー6、被写体回転位置決め機構7、第1X線カメラ8、第2X線カメラ9、制御部10、処理部11、及び表示装置12から構成される。

[0031] X線源1から放射された多色のX線13は、第1結晶位置決め機構3により位置決めされた第1結晶板2に入射し、ブラッグ条件を満足する特定のエネルギーE1のX線のみ反射され、X線14を形成する。第1結晶板2を透過し

た残りのエネルギーを有したX線15は、第2結晶位置決め機構5で位置決めされた第2結晶板4に入射する。第2結晶板4では、X線15のうちブラッグ条件を満足する特定のエネルギーE2のX線のみ反射され、X線16を形成する。X線14と16は反射された角度が異なっており、位置17で交差する。被写体ホルダー6で保持された被写体18は、被写体回転位置決め機構7により、位置17に位置決めされる。被写体18を透過したX線14及び16は、第1X線カメラ8及び第2X線カメラ9でそれぞれ検出される。処理部11では検出された像を用いて、演算により、空間分布像、即ち、被写体の各エネルギーにおける像や、物質の分別が可能な像を求め、表示器12により表示する。

[0032] 本装置において被写体の断面像は、制御部10の制御の下、以下の手順により測定する。

1. 第1結晶板2で所望のエネルギーのX線が反射されるように、第1結晶位置決め機構3により第1結晶板の回転を調整する。
2. 第2結晶板4で所望のエネルギーのX線が反射されるように、第2結晶位置決め機構5により第2結晶板の回転を調整する。
3. 被写体回転位置決め機構7により、被写体18をX線16および14から待避させた状態で、背景となる投影像を撮影する。
4. 被写体回転位置決め機構7により、被写体18をX線14および16の交点17に設置し、被写体18を透過した像を第1カメラ8及び第2カメラ9で同時に撮像する。
5. 被写体回転位置決め機構7により、被写体18をX線14および16に対して回転させる。
6. 2. から3. の手順を回転角度が180度、あるいは360度になるまで繰り返す。また、この間に、適当な間隔で被写体18を光路から待避させ、背景となる投影像の撮影を複数回行う。

[0033] なお、図8に示すように、X線源1、第1結晶板2及び同位置決め機構3、第2結晶板4及び同位置決め機構5、第1X線カメラ8及び第2X線カメラ9

を同期に回転させる大きな回転機構 101 の上に配置し、被写体 18 を回転させる代わりに、上記各装置を同時に回転させても良い。また、回転機構 101 の回転中心と、X線 14 及び 16 の交点 17 に一致するように位置決め機構 3 及び位置決め機構 5 を X線 13 に対して平行に移動できる平行移動調整機構 102 により調整し、さらにこれに対応して第 1 X線カメラ 8 及び第 2 X線カメラ 9 の位置を調整するカメラ位置決め機構 103 を設けることにより、X線 14 或いは 16 のエネルギー E1 或いは E2 を変化させた場合、簡単に各装置の位置を調整することができる。

[0034] X線源 1 として、一般的な管球或いはロータリー型のものを用いても良いし、シンクロトロン放射光を用いても良い。前者の場合は、管に印加する電圧を調整することによって、X線 14 と 16 の強度が X線 14 と 16 の強度がほぼ等しくなるようにすることができる。一方、後者の場合、非常に強い X線を利用することができ、測定時間を大幅に短縮することができる。

[0035] 結晶板によって回折される X線のエネルギーは数 6 で与えられるので、入射角度には高い安定性が要求される。このため、各結晶位置決め機構の回転機構には、タンジェンシャルバーなどを採用した位置決め精度の高い回転ステージを用いる。また、入射 X線の強度が強い場合、結晶板を水冷することによって、反射率や X線 14 および 16 のエネルギーを安定化することができる。

[0036] 第 1 及び第 2 結晶板の X線回折には、ブラッグのケースを用いても良いし、ラウエのケースを用いても良い。ブラッグのケースの場合、回折は結晶板の表面で生じるために、回折（反射）される X線には結晶板の吸収による強度の損失がないという特徴がある。一方、透過する X線の結晶板内の光路は長くなるために、他のエネルギーの X線の強度損失は大きくなる。また、一般にブラッグ角は数 10 度と浅いために、結晶板の長さが長くなり、大きな位置決め機構が必要になる。ラウエケースの場合は、回折される X線も結晶の裏面から出射するために、透過に伴い強度の損失が発生するが、結晶板を小さくすることができるというメリットがある。

[0037] X線のエネルギーが低いほど、結晶板を透過する時に生じる吸収が大きくな

るために、第1結晶板で取り出すエネルギーは、第2結晶板で取り出すエネルギーより低くすると、X線14と16の強度差を小さくすることができる。このように、第1の結晶板の厚さを、第2結晶板の厚さよりも薄くすると、X線14と16の強度差を小さくできる。また、ラウエケースの場合、X線14のエネルギーに対する第1結晶板（厚さ t_1 ）の吸収率 $\mu_{E1}t_1$ と、X線16のエネルギーに対する第1結晶板と第2結晶板を合わせた吸収率 $\mu_{E2}t_1 + \mu_{E2}t_2$ が等しくなるように、第2結晶板の厚さを調整することによって、X線14と16の強度を等しくすることができる。例えば、X線14のエネルギーを35 keV、X線16のエネルギーを52 keV、第1結晶板をシリコンとしてその厚さを1 mmとした場合、第1結晶板によるエネルギー35 keVのX線の吸収率は15%、52 keVのX線の吸収率は5%となる。このため、X線14と16の強度をほぼ等しくするためには、第2結晶板によるエネルギー52 keVのX線の吸収率は10%程度にする必要があり、シリコンの場合の厚さは2 mmとなる。なお、両強度の比が等しい場合、同じ露光時間で同じS/Nの画像を取得できるので、よりアーチファクト（擬似的に発生する模様）の少ない像を再構成することができる。

[0038] 第1 X線カメラ8及び第2 X線カメラ9として、シンチレータ+リレーレンズ系+可視光カメラから構成されたものを用いても良いし、X線用のサチコン管やハーピコン管を用いても良い。前者の場合は、X線14及び16のエネルギーに対応してシンチレータをGOSやCsIなどに交換して発光効率の最適化を図ることができる。また、リレーレンズ系としてレンズを複数枚組み合わせたものでも良いし、ファイバーカップリングものを用いて良い。前者の場合、任意の倍率に設定することができる。一方、後者の場合、倍率は固定となるが、シンチレータの発光を高い立体角で取り込むことが可能で、より少ないX線強度でも測定することができる。

[0039] X線14と16の角度差が小さく、両光路が大きく離れていないときは、図9に示すように第1及び第2 X線カメラの代わりに、大視野のX線カメラ104を用いることもできる。この場合、X線14と16がカメラに垂直に入射し

なくなるために、像が若干ぼけることになるが、制御がより簡略化することができ、さらに位置決めも容易になる。

[0040] X線14と16のエネルギーとして、任意の値を採用することができるが、例えばX線カメラのシンチレータの構成元素であるヨウ素とガドリニウムの吸収端より僅かに大きな値に設定すれば、シンチレータの変換効率を大幅に向上することができる。また、ある特定元素のK, L, Mなどの吸収端前後、例えばCuのK吸収端8.8 keVの前後となる8.5 keVと9keVに設定することによって、得られた像の差分からCuの分布像を得ることができる。

[0041] 処理部11では、第1及び第2X線カメラで得られた画像から、それぞれ個別に再構成処理して得られた断面像について、加重加算して物質の弁別が可能な像を求める。また、被写体の動きが無視できる場合には、各投影像について上記加重加算した後に断面像の再構成計算を行っても良い。この場合、エネルギー毎の断面像のアーチファクトをさらに加重加算することによってよりアーチファクトの影響を低減することができる。

[0042] 以上、本実施例によれば、X線回折を利用することによって、X線源から出射した多色X線のうち、測定に必要なエネルギーのX線のみを取り出し、同時に試料に照射して各画像を得ることができる。これにより、従来は区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。

実施例 2

[0043] 実施例1では、2個の結晶板しか用いていなかったために、エネルギーの異なる2本のX線でしか測定を行うことができなかった。本実施例では、3個以上の結晶板を用いることで、エネルギーが3種類以上のX線で同時に被写体を観察可能な撮像装置の実施例を示す。なお、図5は本発明によるX線撮像装置の構成で、実施例1の構成にさらに結晶板19、同位置決め機構20、及びX線カメラ21を追加した構成となっている。

[0044] 本実施例における各装置要素の役割は実施例1と同じで、X線源から出射されたX線を直列に配置された結晶板群に順次入射し、各結晶板で所望するエネ

ルギーのX線を取り出す。取り出す角度は回折格子面を適当に選ぶことによって調整することが可能で、本実施例では各エネルギーのX線が空間上のある点で交差するように調整する。被写体はこの交点に設置し、被写体を透過した各X線は、個別に或いは大視野のX線カメラで検出する。

[0045] 上述したように線吸収係数は、質量吸収係数と密度の積となるために、構成元素の種類数と同じ数のエネルギーの異なるX線で測定を行うことができれば、各元素の密度を一意に決定することができる。例えば、被写体がヨウ素、炭素、カルシウムで構成されている場合、異なる3つのエネルギーのX線で撮像すれば各元素の密度を定量的に決定することができる。また、構成元素の種類数がX線のエネルギーの種類より多い場合でも、種類が多いほど区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。

[0046] 以上、本実施例によれば、3個以上の結晶板のX線回折を利用することによって、X線源から出射した多色X線のうち、測定に必要な3種類以上のエネルギーのX線のみを取り出し、同時に試料に照射して各画像を得ることができる。これにより、従来は区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。

実施例 3

[0047] 実施例1及び2では、結晶板でX線を単に反射していたために、観察視野は入射するX線のサイズで限定されていた。このため、大視野の観察のためにはサイズの大きな入射X線が必要で、且つ、結晶板も大型にする必要があった。ここでは、非対称結晶板の非対称反射を利用することによって、サイズの小さな入射X線で大視野の観察が可能な実施例を示す。

[0048] X線の非対称反射とは、結晶の表面に対して非平行な回折格子面によるX線回折のことで、表面と回折面のなす角度が α のとき、非対称因子 b は

[0049] [数7]

$$b = \frac{\sin(\theta_B + \alpha)}{\sin(\theta_B - \alpha)} \quad \text{数7}$$

[0050] で与えられる。ここで、 θ_B はブラッグ角である。図6のような非対称反射では、回折されたX線の幅は入射X線の幅の $1/b$ 倍に拡大される。したがって、取り出すX線のエネルギーに対応して α を調整した結晶板により、入射X線ビームを横方向に拡大し、大視野の観察を行うことができる。例えば、入射X線のビーム幅を5mm、結晶板として厚さ1mmのシリコンを使用し、エネルギー17.8 keVのX線を(220)のブラッグケースの回折により反射する場合、ブラッグ角は 10.5° となるので、 α を 8.5° にすることによって拡大率は10倍となり、幅50mmの反射ビームを形成することができる。なお、この現象はブラッグケースでもラウエケースでも生じる現象であり、実施例1に示した両者のメリットとデメリットはそのままとなる。

[0051] 以上、本実施例によれば、非対称結晶によるX線回折を利用することによって、X線源から出射した多色X線のうち、測定に必要なエネルギーのX線のみを拡大して取り出し、同時に試料に照射して各画像を得ることができる。これにより、大視野で従来は区別が難しかった線吸収係数が等しいが密度が異なる物質の観察や、特定元素の可視化を可能にすることができる。

実施例 4

[0052] 実施例1から3では、空間分解能が画像検出器の空間分解能によってほぼ決まり、画像検出器の画素サイズ（一般に数～数10ミクロン）より向上することはできなかった。本実施例では、集光した各エネルギーのX線を被写体上で走査して画像を取得することで、空間分解能がサブミクロン以下の撮像装置の実施例を示す。図7は本発明によるX線撮像装置の構成で、実施例1の構成に各エネルギーのX線をそれぞれ集光素子と、被写体を高速に走査する被写体走査機構が加わり、画像検出器が各エネルギーのX線の強度を検出する強度検出器に替わった構成になっている。

[0053] 本実施例において、X線源1から出射された多色X線のうち、第1及び結晶板で所望の各エネルギーのX線（14及び16）のみを反射により取り出し、第1集光素子22によってX線14を、第2集光素子23によってX線16をそれぞれビームの直径がサブミクロンに集光し、被写体18に照射する。

そして、被写体 18 を透過した X 線は個別に第 1 強度検出器 24 および第 2 検出器 25 で検出する。また、制御部 10 では、被写体を各 X 線に対して走査する被写体走査機構 26 及び被写体位置決め機構 7 を制御して、各集光 X 線に対して走査及び回転させ、各角度における投影像を取得する。そして、処理部 11 において、取得した投影像から、それぞれ個別に再構成処理により断面像を再生し、再生された各像の加重加算により物質の弁別が可能な像を求める。求めた像は表示部 12 で表示する。

[0054] 本実施例において、測定は以下の手順で行う。

1. 第 1 結晶板 2 で所望のエネルギーの X 線が反射されるように、第 1 結晶位置決め機構 3 により第 1 結晶板 2 の回転を調整する。
2. 第 1 集光素子 22 を調整し、反射された X 線 14 をサブミクロン以下に集光する。この調整は、第 1 集光素子の X 線ビームに対する相対的な位置や角度などを第 1 集光素子位置調整機構 27 により適宜変化させ、被写体 18 の位置における X 線ビーム 14 が最小となるようにする。なお、集光状態（ビーム形状）の確認は、鉛やタンタルの刃などで構成されたナイフエッジを被写体位置で走査し、得られた透過 X 線ビームの強度変化などを用いて行えばよい。
3. 第 2 結晶板 5 で所望のエネルギーの X 線が反射されるように、第 2 結晶位置決め機構 6 により第 2 結晶板の回転を調整する。
4. 第 2 集光素子 23 を同様の方法により第 2 集光素子位置調整機構 28 を用いて調整し、反射された X 線 16 をサブミクロン以下に集光する。
5. 被写体走査機構 26 を用いて、被写体 18 を集光 X 線 14 および 16 に対して走査し、各位置における各エネルギーの X 線強度を第 1 強度検出器 24 及び第 2 強度検出器 25 でそれぞれ測定する。これにより、各エネルギーにおける被写体 18 の投影像が得られる。
6. 被写体回転位置決め機構 7 により、被写体 18 を X 線に対して回転させる。
7. 5. から 6. の手順を回転角度が 180 度、あるいは 360 度になるま

で繰り返す。

[0055] 上記のより得られた投影像から断面像の再構成計算は実施例 1 と同様の手順により処理部 11 で行い、その結果を表示部 12 で表示する。

[0056] 被写体走査機構 26 として、モーター駆動によるステージを用いてもよいが、モーター駆動の場合、移動の立ち上がりと立ち下がり時間を要し、高速な動作を行うことが難しい。このため、被写体が小さく走査範囲が狭い場合は圧電素子を採用したステージを用いてもよい。圧電素子はモーターよりも高速な駆動が可能のために測定時間を短縮することができる。一方、搭載できる重量が限られているために、上部に回転ステージを搭載することができない。このため、被写体位置決め機構の上部に設置することが必須である。また、回転角度毎に走査の方向や範囲が異なることになるので、制御部 10 で角度毎に逐次計算し、その結果に基づいて駆動させる。

[0057] X線を集光する第 1 集光素子 22 及び第 2 集光素子 23 として、回折を利用したフレネルゾーンプレート (FZP) や、X線の全反射を利用したミラーなどを用いることができる。FZP は、X線の光路に設置するだけで集光した X線ビームが簡単に得られるので、調整を非常に簡便にすることができる。しかし、X線の利用効率が低いために長い測定時間が必要で、また、使用する X線のエネルギーによって集光位置が変化するために、エネルギーを変更する都度、再調整を行う必要がある。一方、全反射ミラーは、一般には複数枚の球面或いは楕円面ミラーで構成されているため、複雑な角度及び位置調整が必要であるが、集光位置が X線のエネルギーに依存せず、また、X線の利用効率が高いために測定時間を短縮できるという特徴がある。したがって、X線エネルギーの変更頻度やエネルギースキンの有無、及び測定時間との兼ね合いから、適した集光素子を選択すればよい。

[0058] 以上、本実施例によれば、計算により集光 X線ビームの広がりの影響を低減した断面像を求めることができる。このため、高い空間分解能で被写体内部を非破壊で観察することができる。

[0059] なお、本実施例では、2つの結晶板を用いた例を示したが、3つ以上の結

晶板を用いても良いし、図9のように大視野X線カメラを用いても、図8のように被写体を回転させる代わりに各装置を回転させるようにしても良いことは言うまでもない。

符号の説明

- [0060] 1 X線源
- 2 第1結晶板
- 3 第1結晶板位置決め機構
- 4 第2結晶板
- 5 第2結晶板位置決め機構
- 6 被写体ホルダー
- 7 被写体回転位置決め機構
- 8 第1 X線カメラ
- 9 第2 X線カメラ
- 10 制御部
- 11 処理部
- 12 表示装置
- 13 多色のX線 14 X線
- 15 X線
- 16 X線
- 17 位置
- 18 被写体
- 19 結晶板
- 20 位置決め機構
- 21 X線カメラ
- 22 第1集光素子
- 23 第2集光素子
- 24 第1強度検出器
- 25 第2強度検出器

2 6 被写体走査機構

1 0 1 回転機構

1 0 2 平行移動調整機構

1 0 3 カメラ位置決め機構

1 0 4 X線カメラ

請求の範囲

- [請求項1] 多色X線を放射するX線源と、
前記多色X線のうち、第1のエネルギーのX線を回折する第1の結晶板と、前記多色X線のうち、前記第1のエネルギーとは異なる第2のエネルギーのX線を回折する第2の結晶板と、
前記第1のエネルギーのX線と前記第2のエネルギーのX線を、被写体が透過するように設置された前記被写体の設置台と、
前記被写体を透過した前記第1のエネルギーのX線と前記第2のエネルギーのX線とを検出する検出器と、
前記検出器で検出された透過像から、空間分布像を生成する画像処理部とを有することを特徴とするX線撮像装置。
- [請求項2] 前記第1の結晶板は、前記第2の結晶板よりも前記X線源側に設けられ、
前記第1の結晶板の厚さは、前記前記第2の結晶板よりも厚さが薄いことを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。
- [請求項3] 前記第1の結晶板は、前記第2の結晶板よりも前記X線源側に設けられ、
前記第1のエネルギーは、前記第2のエネルギーよりも小さいことを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。
- [請求項4] 前記第1の結晶板及び前記第2の結晶板は、前記被写体に含まれる元素のK、LまたはM吸収端前後のエネルギーのX線を回折することを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。
- [請求項5] 更に、前記第1、第2のエネルギーとは異なる第3のエネルギーのX線を回折する第3の結晶板を有することを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。
- [請求項6] 前記第1の結晶板及び前記第2の結晶板は、非対称結晶板であることを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。
- [請求項7] 前記第1の結晶板と前記設置台との間に設けられた、前記第1のエ

エネルギーを有するX線ビームを集光する第1の集光素子と、

前記第2の結晶板と前記設置台との間に設けられた、前記第2のエネルギーを有するX線ビームを集光する第2の集光素子とを有することを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。

[請求項8] 前記検出器は、前記第1のエネルギーのX線に対応する第1のX線カメラと、第2のエネルギーのX線に対応する第2のX線カメラを有することを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。

[請求項9] 前記検出器は、前記第1のエネルギーのX線及び第2のエネルギーのX線を検出する1のカメラを有することを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。

[請求項10] 前記第1の結晶板及び前記第2の結晶板は、フラッグの回折現象を利用するものであることを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。

[請求項11] 前記第1の結晶板及び前記第2の結晶板は、ラウエの回折現象を利用するものであることを特徴とする請求項1記載のX線撮像装置。

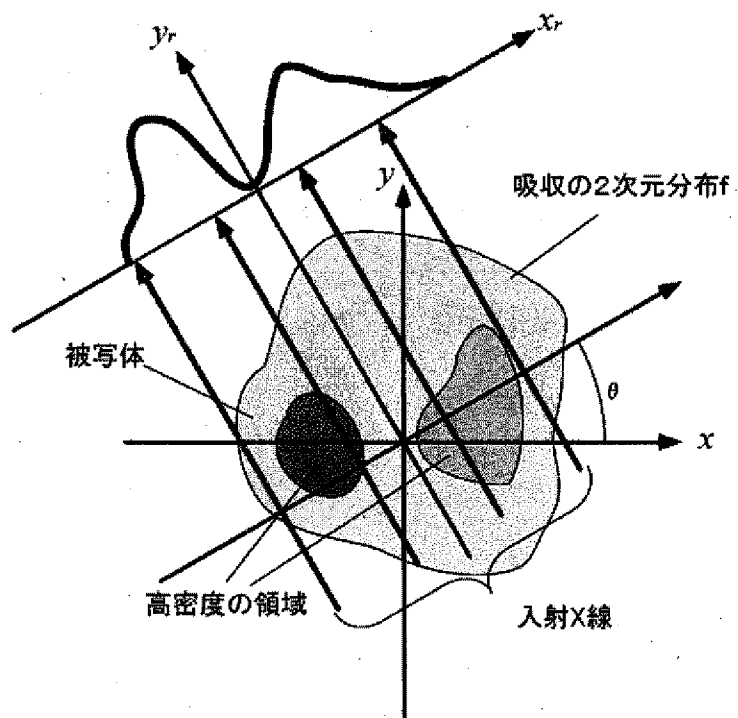
[請求項12] X線源から放射された多色X線のうち第1の結晶板で反射された第1のエネルギーのX線と、第2の結晶板で反射された前記第1のエネルギーとは異なる第2のエネルギーのX線を、両者が交差する位置に設置された被写体に同時に照射するステップと、

前記被写体を透過した前記第1のエネルギーのX線と前記第2のエネルギーのX線を検出器で検出するステップと、

前記検出器で検出された透過像から、空間分布像を生成するステップとを有することを特徴とするX線撮像方法。

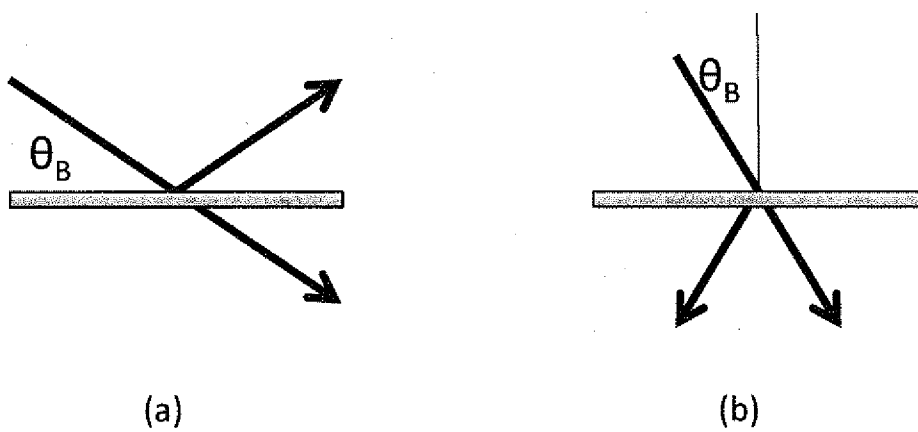
[図1]

図1



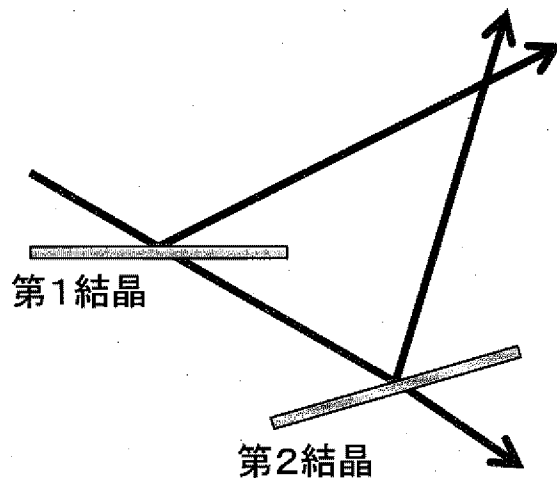
[図2]

図2

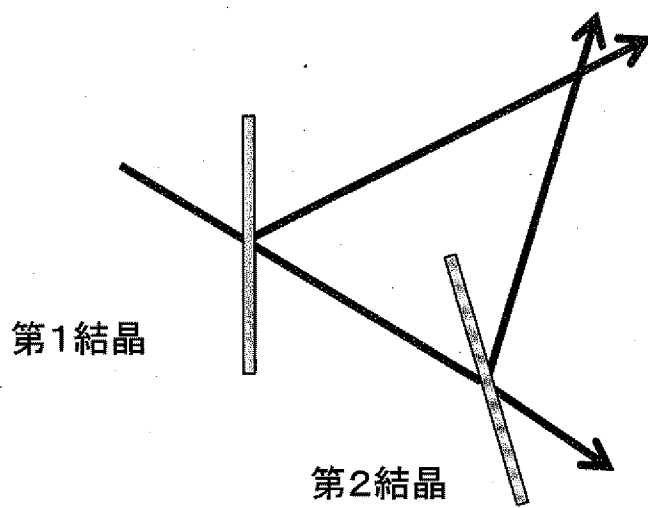


[図3]

図3



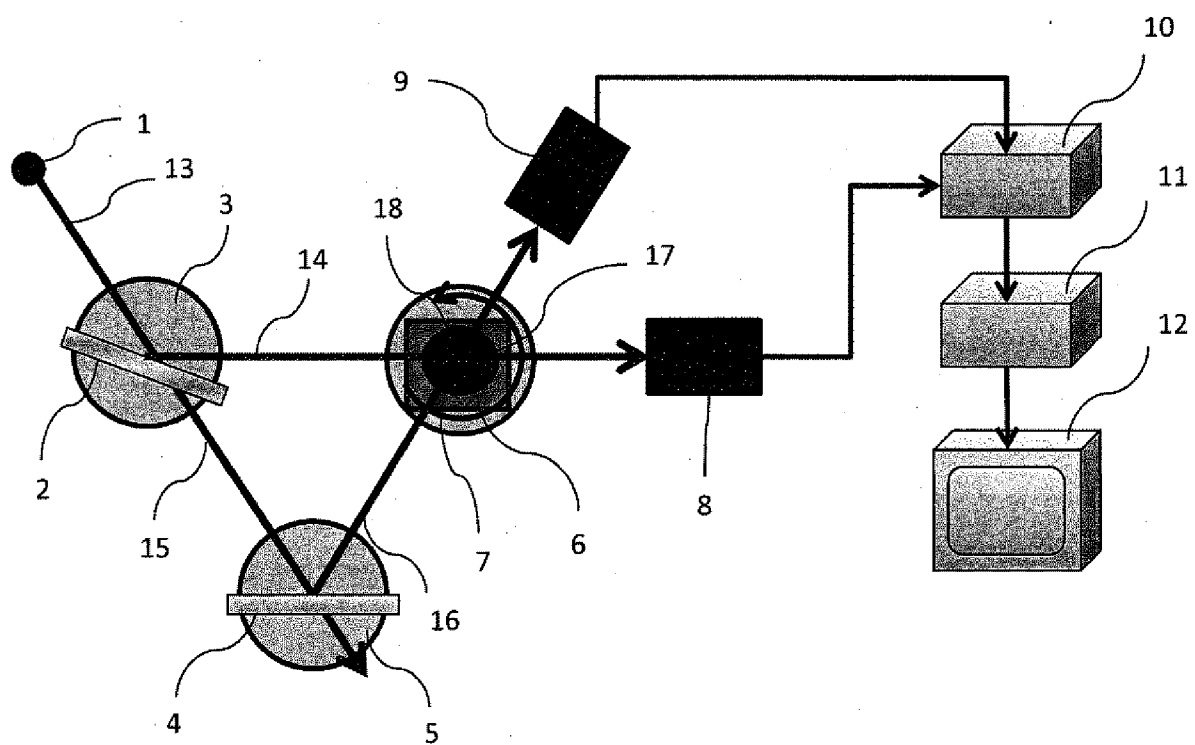
(a)



(b)

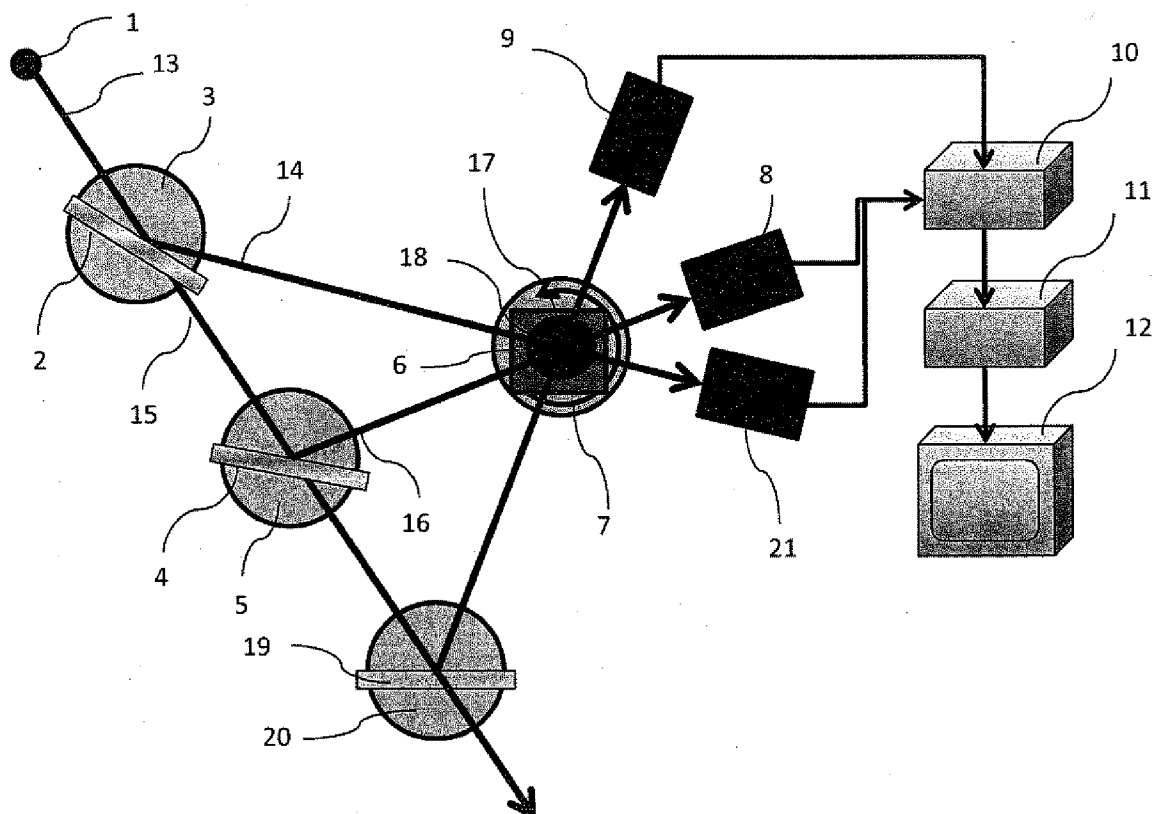
[図4]

图4



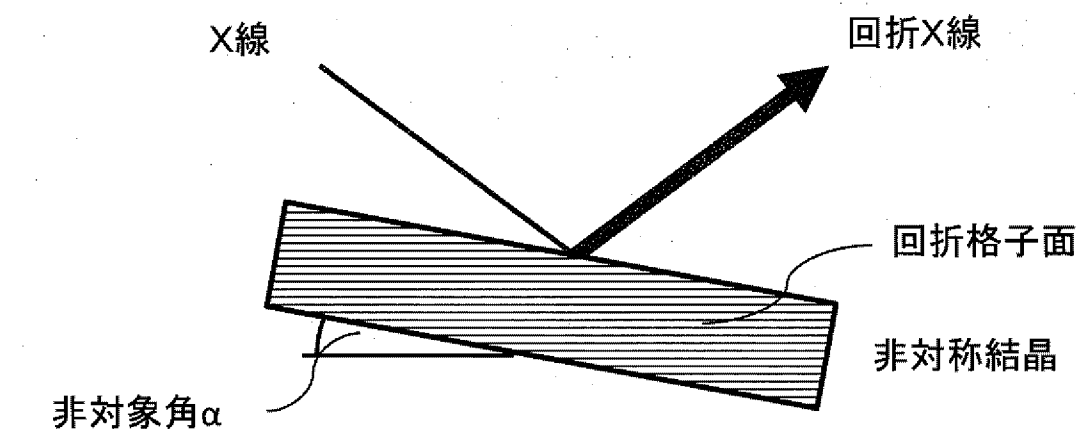
[図5]

图 5



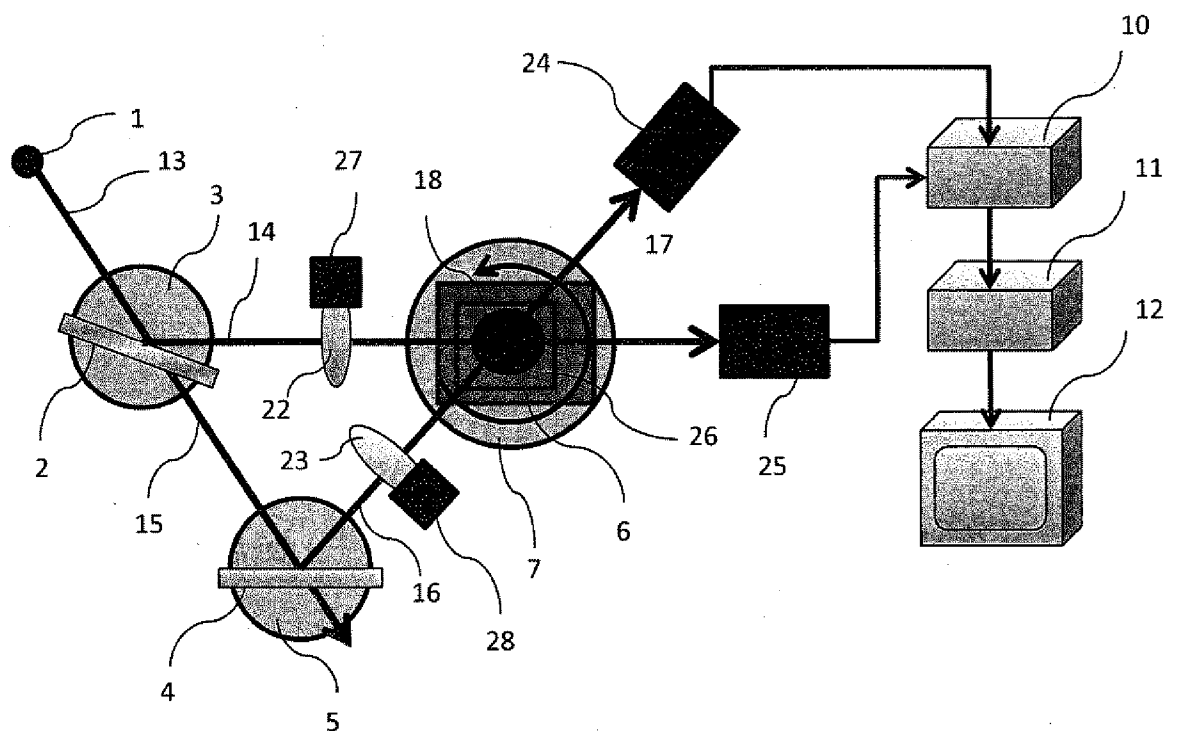
[図6]

図6



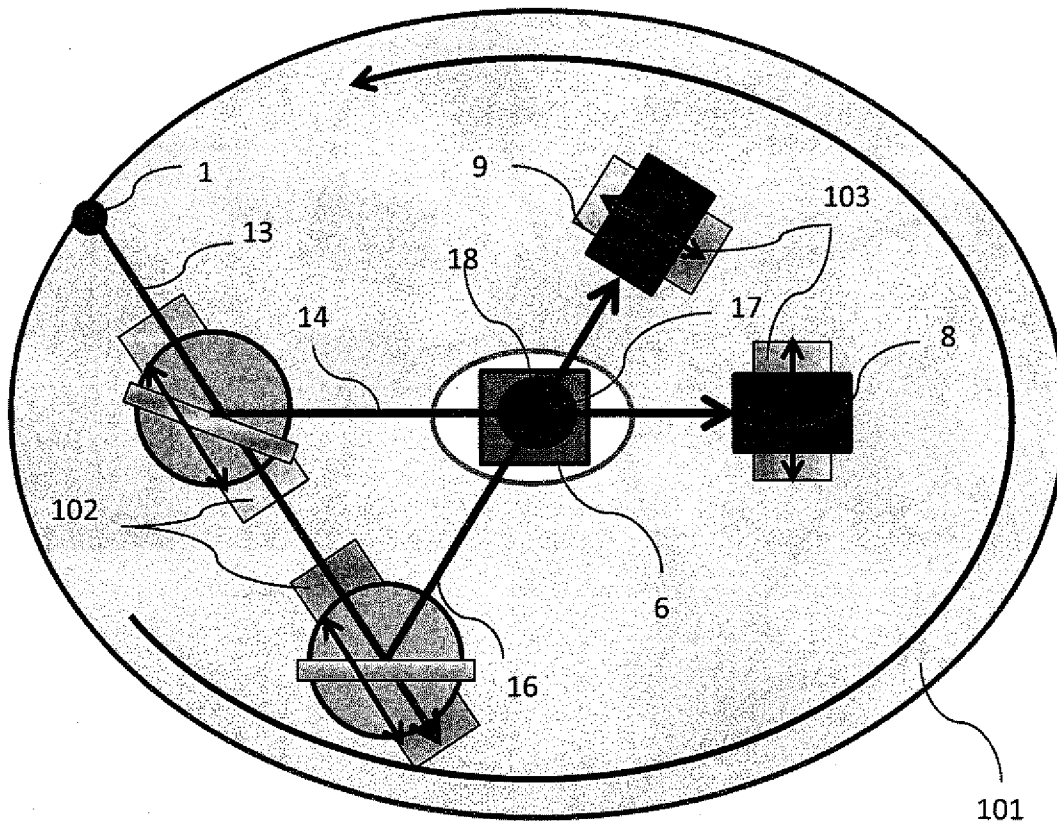
[図7]

図7



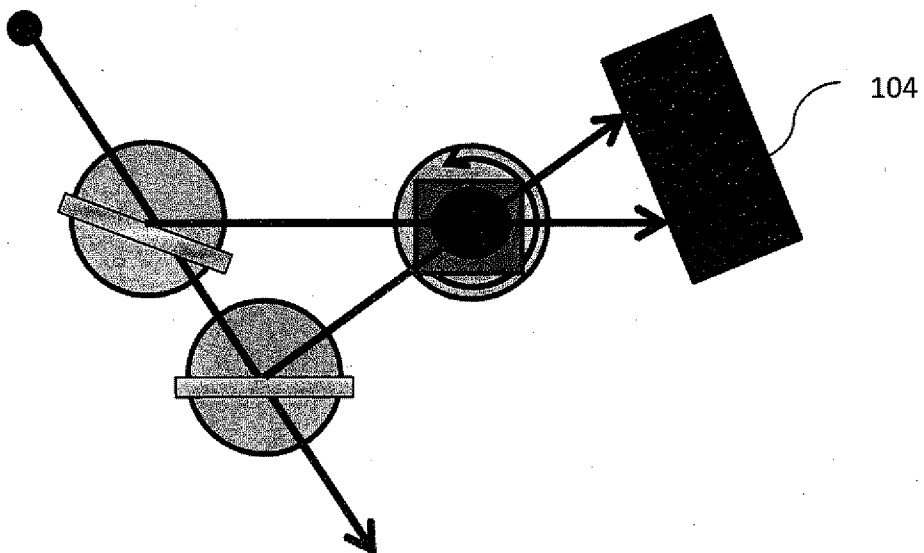
[図8]

図8



[図9]

図9



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/073570

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N23/04 (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)

G01N23/00-23/227, A61B6/00-6/14

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 1996-2012

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2012 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2012

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

WPI

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 5-340893 A (Nippon Steel Corp.), 24 December 1993 (24.12.1993),	1, 4, 6, 8, 10, 12
Y	paragraphs [0013], [0018], [0021]; fig. 1 (Family: none)	2, 3, 7, 9, 11
X	JP 2005-181083 A (Hitachi Zosen Corp.), 07 July 2005 (07.07.2005),	1, 5, 8, 12
Y	paragraphs [0002] to [0004], [0007], [0010], [0045], [0046]; fig. 1 to 5 (Family: none)	2, 3, 7, 9, 11
Y	JP 5-340894 A (Nippon Steel Corp.), 24 December 1993 (24.12.1993),	2, 3, 9
	paragraphs [0016] to [0019], [0025]; fig. 1 (Family: none)	



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

28 November, 2012 (28.11.12)

Date of mailing of the international search report

11 December, 2012 (11.12.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/073570

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2010-266368 A (Japan Science and Technology Agency), 25 November 2010 (25.11.2010), fig. 6, 7 (Family: none)	7
Y	JP 61-167848 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 29 July 1986 (29.07.1986), claim 1; page 3, upper left column, lines 17 to 20; drawings (Family: none)	11
A	JP 2008-86760 A (Wonkwang University Center for Industry - Academy Cooperation), 17 April 2008 (17.04.2008), entire text & US 2008/0089472 A1 & EP 1908405 A2 & KR 10-2008-0030745 A & CN 101156781 A	1-12
A	JP 2007-195888 A (Nihon University), 09 August 2007 (09.08.2007), entire text (Family: none)	1-12
A	JP 6-308295 A (Nippon Steel Corp.), 04 November 1994 (04.11.1994), entire text (Family: none)	1-12
A	JP 5-346500 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.), 27 December 1993 (27.12.1993), entire text (Family: none)	1-12
A	JP 2-224744 A (Shimadzu Corp.), 06 September 1990 (06.09.1990), entire text (Family: none)	1-12
A	JP 2-205760 A (Hitachi, Ltd.), 15 August 1990 (15.08.1990), entire text (Family: none)	1-12
A	JP 61-167846 A (The Furukawa Electric Co., Ltd.), 29 July 1986 (29.07.1986), entire text (Family: none)	1-12

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. G01N23/04(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 (I P C))

Int.Cl. G01N23/00-23/227, A61B6/00-6/14

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 2 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 2 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 2 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)

WPI

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	JP 5-340893 A (新日本製鐵株式会社) 1993. 12. 24, 【0013】, 【0018】, 【0021】, 図 1 (ファミリーなし)	1, 4, 6, 8, 10, 12
Y		2, 3, 7, 9, 11
X	JP 2005-181083 A (日立造船株式会社) 2005. 07. 07, 【0002】-【0004】, 【0007】, 【0010】, 【0045】, 【0046】, 図 1-5 (ファミリーなし)	1, 5, 8, 12
Y		2, 3, 7, 9, 11
Y	JP 5-340894 A (新日本製鐵株式会社) 1993. 12. 24, 【0016】-【0019】, 【0025】, 図 1 (ファミリーなし)	2, 3, 9

☒ 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

2 8 . 1 1 . 2 0 1 2

国際調査報告の発送日

1 1 . 1 2 . 2 0 1 2

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

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)

越柴 洋哉

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 2

2 W

4 4 6 2

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2010-266368 A (独立行政法人科学技術振興機構) 2010. 11. 25, 図 6, 図 7 (ファミリーなし)	7
Y	JP 61-167848 A (古河電気工業株式会社) 1986. 07. 29, 特許請求の 範囲(1), 第 3 頁左上欄第 17-20 行, 図面 (ファミリーなし)	11
A	JP 2008-86760 A (ウォンクワン ユニバーシティ センター フ ォー インダストリー アカデミー コーポレーション) 2008. 04. 17, 全文 & US 2008/0089472 A1 & EP 1908405 A2 & KR 10-2008-0030745 A & CN 101156781 A	1-12
A	JP 2007-195888 A (学校法人日本大学) 2007. 08. 09, 全文 (ファミ リーなし)	1-12
A	JP 6-308295 A (新日本製鐵株式会社) 1994. 11. 04, 全文 (ファミ リーなし)	1-12
A	JP 5-346500 A (住友電気工業株式会社) 1993. 12. 27, 全文 (ファミ リーなし)	1-12
A	JP 2-224744 A (株式会社島津製作所) 1990. 09. 06, 全文 (ファミ リーなし)	1-12
A	JP 2-205760 A (株式会社日立製作所) 1990. 08. 15, 全文 (ファミ リーなし)	1-12
A	JP 61-167846 A (古河電気工業株式会社) 1986. 07. 29, 全文 (ファミ リーなし)	1-12