(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 10 月 2 日(02.10.2014)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2014/157661 A1

(51) 国際特許分類:
G01Q 60/50 (2010.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2014/059276

(22) 国際出願日: 2014 年 3 月 28 日(28.03.2014)

(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 2013-069762 2013 年 3 月 28 日(28.03.2013) JP

(71) 出願人: 国立大学法人秋田大学(AKITA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒0108502 秋田県秋田市手形学園町１番１号 Akita (JP). 国立大学法人大阪大学(OSAKA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 Osaka (JP).

(72) 発明者: 齊藤 準(SAITO, Hitoshi); 〒0108502 秋田県秋田市手形学園町１番１号 国立大学法人秋田大学内 Akita (JP). 吉村 哲(YOSHIMURA, Satoru); 〒0108502 秋田県秋田市手形学園町１番１号 国立大学法人秋田大学内 Akita (JP). 木下 幸則(KINOSHITA, Yukinori); 〒0108502 秋田県秋田市手形学園町１番１号 国立大学法人秋田大学内 Akita (JP). 野村 光(NOMURA, Hikaru); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 中谷 亮一(NAKATANI, Ryoichi); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘１番１号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP).

(74) 代理人: 山本 典輝(YAMAMOTO, Noriaki); 〒1040031 東京都中央区京橋一丁目１６番１０号 オークビル京橋３階 東京セントラル特許事務所内 Tokyo (JP).

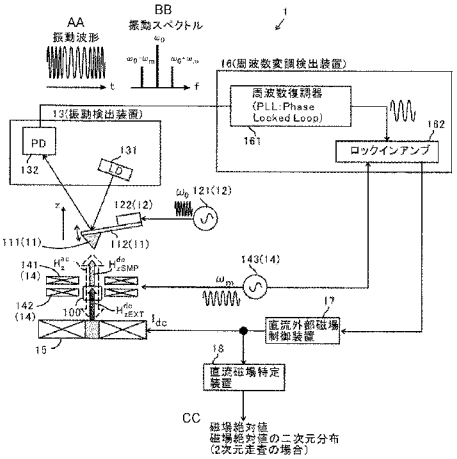
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, 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).

[続葉有]

(54) **Title**: MAGNETIC FIELD VALUE MEASUREMENT DEVICE AND MAGNETIC FIELD VALUE MEASUREMENT METHOD

(54) 発明の名称 : 磁場値測定装置および磁場値測定方法



13 Vibration detection unit
16 Frequency modulation detection unit
161 Frequency demodulator (PLL: Phase Locked Loop)
162 Lock-in amplifier
17 Direct-current external magnetic field control unit
18 Direct-current magnetic field specification unit
AA Vibration waveform
BB Vibration spectrum
CC Magnetic field absolute value
Two-dimensional distribution of magnetic field absolute value
(in case of two-dimensional scanning)

(57) **Abstract**: A magnetic field measurement device is provided with: a vibratory probe unit (11) provided with a probe (111) produced from one or more types of materials each having the property of the intensity of magnetization being proportional to the magnitude of an external magnetic field; a mechanical vibration source (12) for the probe (111); a vibration detection unit (13) for detecting the vibration frequency and amplitude of the probe (111); an alternating-current magnetic field generation unit (14) for applying an alternating-current magnetic field with a frequency different from the mechanical vibration frequency of the probe (111) to the probe (111); a direct-current external magnetic field generation unit (15) for applying a direct-current external magnetic field to the probe (111); a frequency modulation detection unit (16) for detecting frequency modulation occurring in the mechanical vibration of the probe (111); a direct-current external magnetic field control unit (17) for adjusting the magnitude of the direct-current external magnetic field in a mechanical vibration direction which the direct-current external magnetic field generation unit applies to the probe (111); and a direct-current magnetic field specification unit (18) for specifying the value of a direct-current magnetic field generated by an observation sample (100) on the basis of the output value of the direct-current external magnetic field generation unit when the magnitude of the frequency modulation has become a minimum.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2014/157661 A1

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ一種以上の材料からなる探針１１１を備えた振動式の探針装置１１、探針１１１用の機械振動源１２、探針１１１の振動周波数および振幅を検出する振動検出装置１３、探針１１１の機械振動周波数と異なる周波数の交流磁場を探針１１１に与える交流磁場発生装置１４、直流外部磁場を探針１１１に与える直流外部磁場発生装置１５、探針１１１の機械振動に生じる周波数変調を検出する周波数変調検出装置１６、直流外部磁場発生装置が探針１１１に与える機械振動方向の直流外部磁場の大きさを調整する直流外部磁場制御装置１７、及び、周波数変調の大きさが極小となったときの直流外部磁場発生装置の出力値に基づいて、観察試料１００が発生する直流磁場の値を特定する直流磁場特定装置１８を備える磁場測定装置。

明　細　書

発明の名称 ： 磁場値測定装置および磁場値測定方法

技術分野

[0001] 本発明は、観察試料が発生する直流磁場を測定する磁場測定装置および磁場測定方法に関する。

特に、本発明は、前記直流磁場を高い精度で測定することができる磁場測定装置および磁場測定方法に関する。

背景技術

[0002] 従来、観察試料が発生する磁場を観察する装置として、磁気力顕微鏡（Ｍａｇｎｅｔｉｃ　Ｆｏｒｃｅ　Ｍｉｃｒｏｓｃｏｐｅ：ＭＦＭ）が知られている。

ＭＦＭでは、交流磁場（ＡＣ磁場）を観察するものと、直流磁場（ＤＣ磁場）を観察するものがある。

本発明は、ＤＣ磁場を観察するＭＦＭにかかる技術なので、以下、ＤＣ磁場を観察する従来のＭＦＭについて説明する。

[0003] 図６（Ａ）は、ＤＣ磁場を観察する従来のＭＦＭの説明図である（特許文献１参照）。図６（Ａ）に示したＭＦＭでは、カンチレバー８１の探針８１１はハード磁性材料からなる。ハード磁性材料は、ひとたび磁化されると磁化反転が生じにくい材料である。図６（Ａ）ではハード磁性材料として、コバルトとクロムとの合金、鉄と白金との合金等が使用される。

[0004] 図６（Ａ）のＭＦＭでは、カンチレバー８１は圧電素子８１２により、共振周波数ないし共振周波数に近い周波数（例えば、３００ｋＨｚ程度）で励振される。図６（Ａ）では励振用の電源をＡＣで示す。探針８１１と観察試料８２との間には磁気的な相互作用が生じる。

この磁気的な相互作用により、カンチレバー８１のバネ定数が、見かけ上変化する。この見かけ上のバネ定数の変化により、カンチレバー８１の共振周波数が変化する。この結果、探針８１１の振動の状態（振幅や位相）も変

化する。

図６（Ａ）のＭＦＭでは、探針８１１の振動の、振幅および位相の変化（カンチレバー８１のバネ定数の変化）を光学検出する。これにより、観察試料８２の表面の磁場勾配の分布を画像として取得することができる。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開２００３－６５９３５号公報

特許文献2：国際公開２００９／０１０１９９２号パンフレット

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0006] 図６（Ａ）のＭＦＭでは、観察試料８２の磁場を直接測定するものではなく、カンチレバー８１のバネ定数の変化の値（振幅および位相の変化の値）に基づき、観察試料８２の磁場勾配を検出している。

また、図６（Ａ）のＭＦＭでは、観察試料８２の表面近傍では、遠距離力である磁気力と比較して、表面近傍のファンデルワールス力等の近距離力が強いので、磁場勾配の検出が困難である。したがって、磁場勾配は磁気力が近距離力より大きくなる、探針・観察試料間距離で計測されており、空間分解能の向上が、磁気力が主となる前記探針・観察試料間距離に制限されている。

[0007] 本願出願人は、この不都合を解消するべく、図６（Ｂ）に示す技術を提案している（特許文献２）。この技術では、カンチレバー９１は圧電素子９１２により、共振周波数ないし共振周波数に近い周波数で励振される。図６（Ｂ）では励振用の電源をＡＣで示す。カンチレバー９１の先端部の探針９１１をソフト磁性体により構成し、探針９１１にコイル９３を用いて交流外部磁場H_{AC}を与える。そして、探針９１１の磁化を周期的に変化させ、観察試料９２からの直流磁場により探針９１１の強制振動に導入される周波数変調の程度を計測する。この計測結果から観察試料９２の表面の直流磁場勾配∂

H_{SUR}／∂Ｚを測定することができる。

特許文献２の技術を用いると、圧電素子９１２による探針９１１の強制振動を交流外部磁場H_{AC}で周波数変調することで、観察試料９２の表面の直流磁場勾配∂H_{SUR}／∂Ｚを高い精度で検出することができる。

[0008] しかし、特許文献２の技術では、観察試料９２の表面の磁場勾配の検出には向いているが、磁場自体を検出することができない。

また、特許文献２の技術では、表面磁場H_{SUR}が、観察試料９２の保磁力が低い場合には、交流外部磁場H_{AC}により乱される。このために、さらに高い精度での磁場測定の要求に応えることができない場合がある。

本発明の目的は、観察試料から発生する直流磁場を乱さずに、当該の直流磁場自体を高い精度で測定することである。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明の典型的な作用を以下に説明する。

（ａ）励振させた常磁性体材料等（磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ材料）からなる探針に、当該探針の振動方向の変化率がゼロでない（大きな）交流外部磁場を与える。

（ｂ）探針先端位置に、前記探針の機械振動方向の変化率がゼロでない、前記探針の機械振動周波数と異なる周波数の交流磁場を与える。

（ｃ）探針先端に加わる観察試料からの直流磁場を、直流外部磁場により打ち消すように変化させることで、探針振動の周波数変調が弱まる。

（ｄ）周波数変調が生じないとき、または周波数変調の大きさが極小となったときに直流外部磁場を測定する。これが、観察試料から発生する直流磁場である。

[0010] 本発明の磁場測定装置は、以下の形態を包含する。

（１）

観察試料から発生する直流磁場を検出する磁場測定装置であって、

磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ一種以上の材料からなる探針を備えた振動式の探針装置と、

探針を機械励振させる機械振動源と、

探針の機械振動周波数および機械振動振幅を検出する振動検出装置と、

探針の機械振動方向の変化率がゼロでない、探針の機械振動周波数と異なる周波数の交流磁場を探針に与える交流磁場発生装置と、

機械振動方向の直流外部磁場を探針に与える直流外部磁場発生装置と、

振動検出装置が検出した機械振動周波数から探針の機械振動に生じる周波数変調を検出する周波数変調検出装置と、

直流外部磁場発生装置が探針に与える機械振動方向の直流外部磁場の大きさを調整する直流外部磁場調整装置と、

周波数変調の大きさが極小となったときの直流外部磁場発生装置の出力値、または周波数変調の大きさが極小となるであろうときの直流外部磁場発生装置の予想出力値に基づいて、観察試料が発生する上記振動方向の直流磁場の値を特定する直流磁場特定装置と、

を備えたことを特徴とする磁場測定装置。

[0011] （２）

直流外部磁場調整装置は、直流外部磁場が直流磁場の全部を打ち消すように直流外部磁場を調整することを特徴とする（１）に記載の磁場測定装置。

[0012] （３）

直流外部磁場調整装置は、直流外部磁場が直流磁場の一部を打ち消すように直流外部磁場を調整することを特徴とする（１）に記載の磁場測定装置。

[0013] （４）

交流磁場発生装置が、電磁コイルを有することを特徴とする（１）乃至（３）のいずれかに記載の磁場測定装置。

[0014] （５）

交流磁場発生装置が２つ以上の電磁コイルを有し、

当該２つ以上の電磁コイルが、探針の先端で互いに打ち消し合う向きの複数の磁場を発生することにより、交流磁場発生装置は磁場振幅がゼロになる位置を有する磁場を発生し、且つ、

交流磁場発生装置が発生する磁場の、上記磁場振幅がゼロになる位置における磁場勾配が、上記２つ以上の電磁コイルのそれぞれが単独で発生する磁場の当該位置における磁場勾配のいずれよりも大きいことを特徴とする（１）乃至（４）のいずれかに記載の磁場測定装置。

[0015] （６）

外部磁場発生装置が、探針に磁場を印加する電磁コイルを有し、

直流外部磁場調整装置が電流調整装置を有することを特徴とする（１）乃至（５）のいずれかに記載の磁場測定装置。

[0016] （７）

探針により、観察試料の表面を一次元、二次元または三次元で走査する機構を備えたことを特徴とする（１）乃至（６）のいずれかに記載の磁場測定装置。

[0017] （８）

磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ一種以上の磁性材料からなる探針を備えた振動式の探針装置を用いて観察試料から発生する直流磁場を測定する方法において、

探針を機械励振させる工程と、

探針の機械振動方向の変化率がゼロでない、探針の機械振動周波数と異なる周波数の交流磁場を与えるとともに、観察試料から発生する直流磁場を打ち消す向きの機械振動方向の直流外部磁場を探針に与える工程と、

探針の機械振動に生じる周波数変調を検出する工程と、

周波数変調の検出結果に基づき、探針に与えられる振動方向の直流外部磁場の大きさを調整する工程と、

周波数変調が生じないとき若しくは周波数変調の大きさが極小となったときの直流外部磁場の値、または周波数変調の大きさが極小となるであろうときの直流外部磁場の予想値に基づいて、観察試料が発生する振動方向の直流磁場の値を特定する工程と、

を有することを特徴とする磁場測定方法。

[0018] （９）

直流外部磁場が直流磁場の全部を打ち消すように直流外部磁場を調整する工程を有することを特徴とする（８）に記載の磁場測定方法。

[0019] （１０）

直流外部磁場が直流磁場の一部を打ち消すように直流外部磁場を調整する工程と、

少なくとも２つの直流外部磁場の値、および少なくとも２つの直流外部磁場の値に対応する周波数変調の大きさに基づいて、観察試料が発生する上記振動方向の直流磁場の値を特定する工程と

を有することを特徴とする（８）に記載の磁場測定方法。

[0020] （１１）

観察試料がセットされていないときに、（ａ）周波数変調がゼロとなるように交流磁場を校正する、又は（ｂ）周波数変調をゼロに近付けるように交流磁場を校正する工程を有することを特徴とする（８）乃至（１０）のいずれかに記載の磁場測定方法。

[0021] （１２）

探針により、観察試料の表面を一次元、二次元または三次元で走査する工程を有することを特徴とする（８）乃至（１１）のいずれかに記載の磁場測定方法。

発明の効果

[0022] 本発明では、磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する一種以上の材料からなる探針を備えた探針装置を励振し、探針位置に直流磁場が与えられたときに探針の機械振動に周波数変調を生じさせるような（探針位置に直流磁場が与えられていないときは探針の機械振動に周波数変調を生じさせないような）交流外部磁場を探針に与える。

観察試料から生じる直流磁場に基づいて探針装置の機械振動に生じる周波数変調が、直流外部磁場によりゼロとなるとき、または該周波数変調の大きさが極小となるときの直流外部磁場が、観察試料から生じる直流磁場として

実測ないし算出される。

本発明によれば、観察試料から生じる直流磁場を乱すことなく、観察試料から生じる直流磁場自体を高い精度で測定することが可能である。

図面の簡単な説明

[0023] [図1]本発明の磁場測定装置の一実施形態を示すブロック図である。

[図2]図１の磁場測定装置の作用を示すフローチャートである。

[図3]直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$と周波数変調との関係を示す図であり、（Ａ）は直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$が直流磁場$H_{zSMP}{}^{dc}$に一致すると周波数復調波の強度I_{FM}がゼロになる様子を示す図、（Ｂ）は周波数復調波の強度I_{FM}がゼロになるときの直流磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$の大きさの外挿による算出を説明する図である。

[図4]本発明の磁場測定装置の他の実施形態を示すブロック図である。

[図5]探針の振動を周波数変調したときの、スペクトル強度（測波帯スペクトル）の直流外部磁場に対する依存性を示す図である。

[図6]従来技術の説明図であり、（Ａ）は従来の磁気力顕微鏡の説明図、（Ｂ）は本発明者らの提案にかかる磁気力顕微鏡の説明図である。

発明を実施するための形態

[0024] 探針装置は、フックの法則に従ってバネ振動する装置であり、典型的な具体例としてはカンチレバーを挙げることができる。

探針装置の検出部である探針は、磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ一種以上の材料からなる。ここで、外部磁場の大きさに比例するとは、たとえば、ヒステリシスを示さずに、磁化の強さが外部磁場の大きさに比例することを意味する。すなわち、探針には、磁化の強さが外部磁場に比例する常磁性材料または反磁性材料が用いられる。また、ヒステリシスを示さない強磁性材料を用いることも可能である。

探針装置には、機械振動源が設けられており、探針を共振周波数又は共振周波数近傍の周波数で振動させることができる。機械振動源の典型的な具体例としては、ピエゾ素子を挙げることができる。

[0025] 振動検出装置は、探針装置の振動を光学検出して、少なくともその周波数変化を計測することができる。本発明において、探針振動の周波数変調の大きさは、例えば、探針振動スペクトル中の周波数変調の側帯波強度を測定することや、周波数復調器の周波数復調信号の強度を測定すること等により計測することが可能である。

振動検出装置は、例えば探針装置に設けられたミラーと、該ミラーに向けてレーザビームを出射するレーザと、ミラーの反射光を受光するフォトダイオードとから構成できる。

[0026] 後述するように、交流磁場発生装置は、例えば、交流で駆動される２つの電磁コイルによって構成することができる。交流磁場発生装置は、３つ以上の電磁コイルを有していてもよい。

交流磁場発生装置の各電磁コイルから発生する交流磁場の、探針が振動する方向（以下において単に「振動方向」ということがある。）成分の、探針位置における和はゼロとなることが好ましい。

また、探針位置において、交流磁場発生装置から発生する交流磁場の振動方向についての変化率はゼロではなく、できるだけ大きい値を持つことが好ましい。

[0027] 直流外部磁場発生装置は、例えば、直流電流で駆動される鉄心入り電磁コイルによって構成することができる。直流外部磁場発生装置は、２つ以上の電磁コイルを有していてもよい。また、直流外部磁場発生装置は、アクチュエータにより移動される永久磁石により構成することも可能である。

[0028] 直流外部磁場調整装置は、人間のオペレータが操作する装置であってもよく、また、（自動化された）制御装置であってもよい。この制御装置は、例えば、ＰＩＤ制御（Proportional Integral Derivative Controller）やＰＩ制御（Proportional Integral Controller）により、直流外部磁場発生装置が発生する直流外部磁場を、探針の機械振動に周波数変調が生じないように、または探針の機械振動の周波数変調の大きさが極小となるように制御するように構成される。

[0029] 本発明の磁場測定装置は、走査機構によって探針で観察試料の表面を一次元、二次元または三次元で走査しつつ、直流磁場特定装置によって直流磁場を特定するように構成することができる。

[0030] 後述するように直流外部磁場発生装置が鉄心入りの電磁コイルを有してなる場合には、直流磁場特定装置は、探針の機械振動に周波数変調が生じないとき、または探針の機械振動の周波数変調が極小になるときに直流外部磁場発生装置の電磁コイルに流れる直流電流値により、観察試料が探針位置に生成する磁場を特定することができる。

[0031] また、直流外部磁場発生装置が鉄心入りの電磁コイルを有してなる場合には、鉄心が残留磁化（ヒステリシス）を持つために、正確な直流外部磁場を電磁コイルに流れる直流電流値によって特定することができない場合があり得る。このような場合には、磁場検出器（例えば、コイル，ホール素子等を用いた磁気センサ）を用いて、直流外部磁場を高精度で特定することもできる。たとえば、測定に先立って、探針位置に磁場検出器を配置し、この検出器により直流外部磁場を測定することができる。

[0032] また、後述するように直流外部磁場発生装置が永久磁石と、この永久磁石を移動するためのアクチュエータとを有してなる場合には、直流磁場特定装置は、探針の機械振動に周波数変調が生じないとき、または探針の機械振動の周波数変調が極小になるときのアクチュエータの移動量（位置）により、観察試料が探針先端位置に生成する直流磁場を特定することができる。

[0033] 上述したように、直流外部磁場発生装置は、電磁コイルによって構成することができるほか、アクチュエータによって駆動される永久磁石により構成することも可能である。

直流外部磁場発生装置が、鉄心入り電磁コイルから構成される場合には、鉄心の残留磁化によって発生する直流磁場の影響により、探針振動に周波数変調が生じることがある。この影響を回避するためには、上記鉄心の残留磁化をゼロにすることが好ましい。

電磁コイルの鉄心の残留磁化をゼロにした場合には、直流外部磁場調整装

置は、後述するように探針振動の周波数変調が生じないように、または探針振動の周波数変調の大きさが極小となるように、電磁コイルを流れる電流を調整すればよい。

[0034] 観察試料から生じる直流磁場は、直流外部磁場特定装置が特定した直流磁場に残留磁場を加えた値、または直流外部磁場特定装置が特定した直流磁場から残留磁場を差し引いた値となる。

本発明の磁場測定装置は、走査機構によって探針で観察試料の表面を一次元、二次元または三次元で走査しつつ、直流磁場特定装置によって直流磁場を特定するように構成され得る。そしてその測定結果を、画像表示装置や印刷装置等の出力装置に出力するように構成され得る。

[0035] 以下、図１を参照しつつ本発明の構成および作用を説明する。

図１は本発明の磁場測定装置１を示すブロック図である。

[0036] 図１において磁場測定装置１は、探針装置１１、機械振動源１２、振動検出装置１３、交流磁場発生装置１４、直流外部磁場発生装置１５、周波数変調検出装置１６、直流外部磁場制御装置（本発明における、「直流外部磁場調整装置」）１７および直流磁場特定装置１８を備えている。

[0037] 探針装置１１は、図１の磁場測定装置１においてはカンチレバーである。カンチレバーは、アーム１１２と、アーム１１２の先端に設けた探針１１１からなり、アーム１１２の先端の探針１１１が設けられていない側にはレーザ光反射用のミラーが設けられている。探針１１１は、観察試料１００から発生する直流磁場H_{zSMP}^{dc}を検出するための、常磁性体材料を被覆したチップである。

機械振動源１２は、探針装置１１を励振させる（探針１１１を励振させる）装置であり、図１の磁場測定装置１においては機械振動源１２は、交流電源１２１とピエゾ素子１２２とから構成されている。

振動検出装置１３は、探針１１１の振動波形を検出する。図１の磁場測定装置１においては、振動検出装置１３は、レーザ１３１（図１では「ＬＤ」で示す）と、フォトダイオード１３２（図１では「ＰＤ」で示す）を備えて

いる。

交流磁場発生装置１４は、探針先端において交流磁場の大きさがゼロ（$H_z^{ac}=0$）であり且つ探針振動方向（ｚ軸方向）の交流磁場変化率（$\partial H_z^{ac}/\partial z$）が大きい交流磁場を発生する。そして、交流磁場発生装置１４は、探針を励振させた周波数ω_0と異なる周波数ω_mの交流磁場H_z^{ac}を探針１１１に与える。本実施形態では、交流磁場発生装置１４は、探針の先端で互いに打ち消しあう磁場を生成する２つの交流コイル（空心コイル）１４１、１４２と、交流電源１４３とを有してなる。

[0038] 磁場測定装置１において、探針装置１１の励振周波数ω_0としては、探針装置１１のカンチレバーの共振周波数とＱカーブ（カンチレバーのＱ値を周波数に対してプロットしたカーブ）とに基づいて、共振周波数またはＱカーブがゼロでない勾配を有する周波数を適宜選択することができる。励振周波数が共振周波数に近いほど周波数変調の側帯波（$\omega_0\pm\omega_m$）のスペクトル強度を高めることができるので、磁場測定の際には共振周波数近傍の周波数を励振周波数に採用することが好ましい。なお後述するように試料表面を走査する場合には、探針振動の振幅を一定にして探針－試料間距離を一定に保つ制御が容易になる点から、周波数変化によるＱ値の変化が大である、Ｑカーブの勾配が急峻な周波数を励振周波数に採用してもよい。探針装置１１の機械振動の周波数としては通常、共振周波数ω_rまたは共振周波数近傍の周波数であって、例えば$\omega_r-\omega_r/3Q$以上$\omega_r+\omega_r/3Q$以下、好ましくは$\omega_r-\omega_r/4Q$以上$\omega_r+\omega_r/4Q$以下（ただしＱは探針装置１１のＱ値である。）の周波数が選択される。交流磁場発生装置１４が発生させる交流磁場の振動数ω_mとしては、周波数$\omega_0\pm\omega_m$においてＱカーブがゼロでない勾配を有する周波数ω_mを適宜選択することができ、例えば$\omega_r/3Q$以下、好ましくは$\omega_r/4Q$以下（ただしＱは探針装置１１のＱ値である。）の周波数が選択される。一例として、共振周波数ω_r＝３００ｋＨｚ、Ｑ＝５００の場合には、例えばω_0＝３００．０１ｋＨｚ、ω_m＝１００Ｈｚ等とすることができる。

このとき、探針振動の周波数変調による側帯波スペクトルの周波数は、ω_0

$\pm\omega_m$となる。

[0039] 直流外部磁場発生装置１５は、探針１１１に、振動方向（ｚ軸方向）の直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}を与える。本実施形態では、直流外部磁場発生装置１５は、鉄心入りの直流コイル（直流電磁石）からなる。

周波数変調検出装置１６は、振動検出装置１３が検出した振動波形から探針１１１の振動に生じる周波数変調を検出する。周波数変調検出装置１６は、周波数復調器（ＰＬＬ：Ｐｈａｓｅ　Ｌｏｃｋｅｄ　Ｌｏｏｐ）１６１とロックインアンプ１６２とからなる。

直流外部磁場制御装置１７は、周波数変調検出装置１６による探針振動の周波数変調の検出結果に基づき、直流外部磁場発生装置１５が発生する振動方向（ｚ軸方向）の直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}を、探針振動の周波数変調がゼロまたは極小になるように制御する。制御信号は、直流電流として直流外部磁場発生装置１５に与えられる。

[0040] 図３（Ａ）は、直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}と周波数復調波の強度（または周波数変調の側帯波スペクトルの強度）との関係を示している。横軸が直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}、縦軸が周波数復調波の強度I_{FM}を示している。図３（Ａ）に示すように、直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}が観察試料からの直流磁場H_{zSMP}^{dc}に一致すると周波数復調波の強度I_{FM}はゼロまたは極小になる。

直流磁場特定装置１８は、周波数変調検出装置１６の検出結果（周波数変調の程度）および直流外部磁場制御装置１７の出力値に基づいて、観察試料１００が発生する振動方向（ｚ軸方向）の直流磁場H_{zSMP}^{dc}を特定する。

[0041] 本発明の磁場測定方法は、図１の磁場測定装置１により実施することができる。図２は本発明の磁場測定方法を示すフローチャートである。以下、図１の磁場測定装置１の作用を、図２のフローチャートを参照しながら説明する。

直流磁場を発生する観察試料１００がセット位置にセットされる（Ｓ１１０）。

探針１１１を共振周波数ω_0の近傍で強制振動させる（Ｓ１１２）。

[0042] 探針先端で、交流磁場の大きさがゼロでかつ振動方向についての磁場勾配が大きい、非共振周波数ω_mの交流磁場H_z^{ac}を探針１１１に与える（Ｓ１１４）。

探針１１１を観察試料１００上の初期座標（x_0，y_0）にセットし（Ｓ１１６）し、交流磁場による周波数変調を測定する（Ｓ１１８）。

探針１１１の機械振動に周波数変調が生じているかが検出され（Ｓ１２０）、周波数変調が生じているとき（Ｓ１２０の「ＹＥＳ」）には振動方向の直流磁場を、周波数変調が極小になるように制御し（Ｓ１２２）、処理をＳ１１８に戻し交流磁場による探針振動の周波数変調を再度測定する。

[0043] Ｓ１２０において、周波数変調が生じていないとき（Ｓ１２０の「ＮＯ」）、または周波数変調の大きさが極小になるときには、変調の検出結果および直流磁場（直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}）の値に基づいて、観察試料１００が発生する振動方向の直流磁場（直流磁場H_{zSMP}^{dc}）が直流磁場特定装置１８により特定される（Ｓ１２４）。

特定された直流磁場H_{zSMP}^{dc}の値は、直流磁場特定装置１８内の記憶装置に記憶される（Ｓ１２６）。

全ての座標について、Ｓ１１８～Ｓ１２６の処理が行われたかが判断され、未処理の座標があると判断されたとき（Ｓ１２８の「ＮＯ」）は、次の座標を指定し（Ｓ１３０）、Ｓ１１８～Ｓ１２６の処理を再度行う。Ｓ１２８において未処理の座標がないと判断されたとき（Ｓ１２８の「ＹＥＳ」）は処理を終了する。

[0044] 以下、本実施形態をさらに詳しく説明する。

機械振動源１２による励振力をＦ、探針装置１１のアーム１１２のｚ方向（観察試料面に垂直方向）のバネ定数をｋ、探針１１１の振動方向（ｚ軸方向）のゼロ点（無負荷位置）からの変位をｚとすると、Ｆ＝ｋ×ｚが成立する。

探針１１１に与えられるｚ軸方向の交流磁場をH_z^{ac}、直流磁場をH_z^{dc}とする。探針１１１の直流磁場H_z^{dc}による探針先端の磁極をq_{tip}^{dc}とし、探

針１１１の交流磁場H_z^{ac}による探針先端の磁極をq_{tip}^{ac}とする。

[0045] 探針１１１が磁場から受ける力をF_mとすると、磁場（（交流磁場H_z^{ac}）＋（直流磁場H_z^{dc}））によるバネ定数の変化分Δk_mは以下のように表される。

[0046] [数1]

$$\Delta k_m = \Delta\left(\frac{\partial F_m}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\left(q_{tip}^{dc} + q_{tip}^{ac}\cos(\omega_m t)\right)\left(H_z^{dc} + H_z^{ac}\cos(\omega_m t)\right)\right)$$
$$= \left(q_{tip}^{dc}\frac{\partial H_z^{dc}}{\partial z} + \frac{q_{tip}^{ac}}{2}\frac{\partial H_z^{ac}}{\partial z}\right) + \left(q_{tip}^{ac}\frac{\partial H_z^{dc}}{\partial z} + q_{tip}^{dc}\frac{\partial H_z^{ac}}{\partial z}\right)\cos(\omega_m t) + \frac{q_{tip}^{ac}}{2}\frac{\partial H_z^{ac}}{\partial z}\cos(2\omega_m t)$$

・・・（１）

[0047] （１）式において、$q_{tip}^{dc} \propto H_z^{dc}$である。したがって、$H_z^{dc}$を高感度で検出するには、$q_{tip}^{dc}(\partial H_z^{ac}/\partial z)$の項を大きくすることが必要になる。ここで振動方向（ｚ軸方向）についての交流磁場変化率である、$(\partial H_z^{ac}/\partial z)$を大きくするには、２個の空心コイルを発生する磁場の方向が反対向きになるように組み合わせたものが有効である。この空心コイルでは、交流磁場H_z^{ac}の極性が反転する、H_z^{ac}の大きさがゼロ、かつ$(\partial H_z^{ac}/\partial z)$が最大となる場所が２個の空心コイルの間に存在し、この場所に探針先端を置くことにより、最大の検出感度が得られる。図１では、簡略化のために２個の空心コイルの紙面上方にカンチレバーの探針を記載しているが、実際には、この２個の空心コイルの間に探針先端を置くように配置がなされている。さらにこの場所では振動している探針先端が受けるH_z^{ac}の大きさがゼロに近くなるので、$q_{tip}^{ac} \fallingdotseq 0$となる。

したがって、（１）式は次の（２）式のように表される。

[0048] [数2]

$$\Delta k_m = q_{tip}^{dc}\frac{\partial H_z}{\partial z} + q_{tip}^{dc}\frac{\partial H_z^{ac}}{\partial z}\cos(\omega_m t)$$

・・・（２）

[0049] （２）式から、直流成分q_{tip}^{dc}がゼロのときは、$\Delta k_m = 0$となり探針１

１１のバネ定数はｋであり、変調は生じない。よって、磁場測定装置１は、観察試料１００がセットされていないときに（q_{tip}^{dc}＝０すなわちH_z^{dc}＝０のときに）、周波数変調がゼロとなるように（q_{tip}^{ac}＝０すなわちH_z^{ac}＝０となるように）交流磁場発生装置１４を校正することができる。

[0050] このように校正した場合に、観察試料１００がセットされたときは、q_{tip}^{dc}＝ａ×H_{zSMP}^{dc}となる。ここで、ａは探針１１１を構成する材料（常磁性体等）により定まる定数である。したがって、$\Delta k_m \neq 0$となり、周波数変調検出装置１６は、振動検出装置１３が検出した振動波形から探針１１１の振動に生じる周波数変調を検出する。

直流外部磁場制御装置１７が直流磁場H_{zSMP}^{dc}を直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}により打ち消したとき（直流磁場H_{zSMP}^{dc}の大きさが直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}と同じで方向が逆方向のとき）は、直流磁場特定装置１８は、直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}の値を直流磁場H_{zSMP}^{dc}の値として特定する。

すなわち、この場合には、q_{tip}^{dc}＝０すなわちH_z^{dc}＝０となるので（Δk_m＝０となるので）、探針１１１の振動に周波数変調が生じなくなり、周波数変調検出装置１６は、探針１１１の振動の周波数変調を検出しない。

[0051] なお、振動方向（ｚ軸方向）での交流磁場を１個の空心コイルで発生させることも可能であるが、その場合には、H_z^{ac}の大きさがゼロにならないので、$q_{tip}^{ac} \neq 0$である。したがって、ｃｏｓ（$\omega_m t$）で変化する１次の変調成分は、次のように表される。

[0052] [数3]

$$\Delta k_m(\omega_m t) = \left(q_{tip}^{ac} \frac{\partial H_z^{dc}}{\partial z} + q_{tip}^{dc} \frac{\partial H_z^{ac}}{\partial z} \right) \cos(\omega_m t)$$

・・・（３）

[0053] この場合には、観察試料１００からの直流磁場H_{zSMP}^{dc}を直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}により打ち消すことで、q_{tip}^{dc}＝０を実現し第２項を消去できても

、第１項のq_{tip}^{ac}（$\partial H_z^{dc}/\partial z$）が残るので、$\Delta k_m$の大きさは極小を示すもののゼロにはならない。また、（$\partial H_z^{ac}/\partial z$）の大きさも２個の空心コイルを組み合わせた場合と比較して大幅に小さくなるので、周波数変調の大きさが極小になる直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}を求めるのに際して、測定ノイズの影響を受けやすくなり、計測精度が低下する。

したがって、交流磁場の発生には、２個の空心コイルを組み合わせて、探針先端の位置においてH_z^{ac}の大きさをゼロ、かつ（$\partial H_z^{ac}/\partial z$）を最大とすることが望ましい。

[0054] 例えば、直流磁場H_{zSMP}^{dc}の計測において、直流磁場H_{zSMP}^{dc}が、直流外部磁場制御装置１７による最大の直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}の出力値よりも大きいために、探針１１１の直流磁場をゼロにできない場合がある。この場合には、直流磁場H_{zSMP}^{dc}は、直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}の値から計算することができる。

すなわち、上記のように交流磁場発生装置１４を校正した場合に、直流外部磁場制御装置１７が、直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}によっては、直流磁場H_{zSMP}^{dc}の一部しか打ち消せないときがある。この場合には、直流磁場特定装置１８は、直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}の値または直流外部磁場発生装置１５を流れる直流電流I^{dc}の値と、周波数変調された信号の大きさに基づき、直流磁場H_{zSMP}^{dc}を特定することができる。

[0055] 図３（Ｂ）は、このときの直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}と周波数復調波の強度（または周波数変調の側帯波スペクトルの強度）との関係を示している。横軸が直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}、縦軸が周波数復調波の強度I_{FM}を示す。図３（Ｂ）に示すように、２つの直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}についての周波数変調の値がわかれば、周波数復調波の強度がゼロになるときの直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}すなわち直流磁場H_{zSMP}^{dc}を推定（図３（Ｂ）では直線近似）することができる。

[0056] 具体的には、以下のようにして直流磁場H_{zSMP}^{dc}を特定することができる。

観察試料１００がセットされていないときには周波数変調がゼロとなるように、装置が初期化されているものとする。

観察試料１００がセットされた場合において、直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$を与えていないときの周波数変調（探針振動の周波数変調による側帯波スペクトル成分$\omega_s=\omega_0\pm\omega_m$）の大きさが$A_{EXT=0}$であるとする。

そして周波数変調（側帯波スペクトル成分$\omega_s=\omega_0\pm\omega_m$）の大きさが$A_{EXT1}$（≠０）であるときに、直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$＝ＥＸＴ１を与えていたとする。

[0057] 周波数変調の大きさが、$A_{EXT=0}-A_{EXT1}$だけ変化したときに、直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$は、ゼロからＥＸＴ１まで変化している。

したがって、周波数変調の大きさが、$A_{EXT=0}-0$だけ変化したとすると、直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$は、ゼロからＥＸＴ１×$A_{EXT=0}$／（$A_{EXT=0}-A_{EXT1}$）まで変化することになり、直流磁場$H_{zSMP}{}^{dc}$が特定される。

[0058] 以下に、本発明の他の実施形態を説明する。

図１の実施形態では、交流磁場発生装置１４は、２つの交流コイル１４１、１４２と、交流電流電源１４３とから構成した。

これに対し、図４の磁場測定装置は、スペクトル強度に対してゼロ位法を用いることにより磁場測定を行うもので、交流磁場発生装置は、１つの交流コイルと、交流電源とから構成することができる。

[0059] 図４において、磁場測定装置３は、探針装置３１、機械振動源３２、振動検出装置３３、交流磁場発生装置３４、直流外部磁場発生装置３５および周波数変調検出装置３６を備えている。

図４の探針装置３１、機械振動源３２、振動検出装置３３、および直流外部磁場発生装置３５は、図１で説明した探針装置１１、機械振動源１２、振動検出装置１３、および直流外部磁場発生装置１５と同じである。

[0060] 探針装置３１は、カンチレバーであり、アーム３１２と、アーム３１２の先端に設けた探針３１１から構成される。探針装置３１（すなわち、探針３１１およびアーム３１２）は、図１に示した探針装置１１（すなわち、探針

１１１およびアーム１１２）と同じである。探針３１１には、Ｓｉ探針に$Ni_{92.5}Cr_{7.5}$常磁性合金を膜厚１００ｎｍ程度成膜して作製した常磁性探針を用いた。その磁化率は５×１０$^{-8}$Ｈ／ｍ（比透磁率は１．０４）程度である。

ここでは、空間的制約により、探針３１１は、観察試料３００の表面から約７ｍｍの距離に配置されている。

[0061] 機械振動源３２は交流電源３２１とピエゾ素子３２２とから構成されている。機械振動源３２（すなわち、交流電源３２１とピエゾ素子３２２）は、図１に示した機械振動源１２（すなわち、交流電源１２１とピエゾ素子１２２）と同じである。

[0062] 振動検出装置３３は、探針３１１の振動を検出する。振動検出装置３３は、レーザ３３１（図３では「ＬＤ」で示す）と、フォトダイオード３３２（図３では「ＰＤ」で示す）とから構成されている。振動検出装置３３（すなわち、レーザ３３１とフォトダイオード３３２）は、図１に示した振動検出装置１３（すなわち、レーザ１３１とフォトダイオード１３２）と同じである。

[0063] 交流磁場発生装置３４は、交流磁場変化率（$\partial H_z^{ac}/\partial z$）が大きい交流磁場を発生する。

そして、交流磁場発生装置３４は、励振させた周波数ω_0と異なる周波数ω_mの交流磁場H_z^{ac}を探針３１１に与える。

本実施形態では、交流磁場発生装置３４は、１つの交流コイル（空心コイル）３４１と、交流電流電源３４３とからなる。

[0064] 直流外部磁場発生装置３５は、探針３１１に、振動方向（ｚ軸方向）の直流外部磁場H_{zEXT}^{dc}を与える。本実施形態では、直流外部磁場発生装置３５は、図１の直流外部磁場発生装置１５と同じである。

周波数変調検出装置３６は、図１の周波数変調検出装置１６に対応する。図４では、周波数変調検出装置３６は、リアルタイムスペクトルアナライザであり、振動検出装置３３が検出した振動波形から探針３１１の振動に生じ

る周波数変調を検出する。

周波数変調検出装置３６は、周波数復調器（図１の符号１６１参照）の機能およびロックインアンプ（図１の符号１６２参照）の機能を備えている。

[0065] 図４では図示しない直流外部磁場制御装置（図１の符号１７参照）は、周波数変調検出装置３６による周波数変調の検出結果に基づき、周波数変調がゼロあるいは、小さくなるように、直流外部磁場発生装置３５が発生する振動方向（ｚ軸方向）の直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$を制御する。

制御信号は、直流電流として直流外部磁場発生装置３５に与えられる。

[0066] 本実施形態では、交流電流電源３４３から交流コイル３４１に交流電流を流し、探針位置に周波数１３０Ｈｚ、交流磁場勾配が５０［Ｏｅ／ｃｍ］の交流磁場を発生させた。

そして、探針３１１の振動を周波数変調したときの、スペクトル強度（測波帯スペクトル）の直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$に対する依存性を、周波数変調検出装置３６により調べた。

図５は、探針３１１の振動を周波数変調したときの、スペクトル強度（測波帯スペクトル）の直流外部磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$に対する依存性を示す図である。

[0067] 図５に示すように、本実施形態では、$H_{zEXT}{}^{dc}=0$のときの探針３１１の励振周波数ω_0は３０１ｋＨｚ程度であり、交流磁場の周波数$\omega_m=130$Ｈｚである。

このとき、探針振動の周波数変調による側帯波スペクトルの周波数は、$\omega_0 \pm \omega_m$となる。

図５では、観察試料３００から生じる直流磁場$H_{zSMP}{}^{dc}$の向きとは逆向きに$H_{zEXT}{}^{dc}$を増加させたときの、探針振動の周波数変調スペクトル強度I_{FM}が示されている。

[0068] $H_{zEXT}{}^{dc}$の増加に伴いI_{FM}は単調に低下し、極小となった後に増加に転じる様子が示されている。ここで、ノイズレベルは約－９０ｄＢＶである。

極小値では観察試料３００からの直流磁場$H_{zSMP}{}^{dc}$が外部直流磁場$H_{zEXT}{}^{dc}$によって打ち消されており、そのときの$H_{zEXT}{}^{dc}$が探針位置での観察試料

３００からの直流磁場H_{zSMP}^{dc}に対応している。

[0069] 図５では、H_{zEXT}^{dc}が約４０［Ｏｅ］のときにI_{FM}が極小となっており、したがって、直流磁場H_{zSMP}^{dc}は約４０［Ｏｅ］であることがわかる。

以上のように、本発明においては、単一の電磁コイルを有する交流磁場発生装置を用い、スペクトル強度ゼロ位計測法によって観察試料の直流磁場値の計測を行うことも可能である。

符号の説明

[0070] １、３　磁場測定装置

１１、３１　探針装置

１２、３２　機械振動源

１３、３３　振動検出装置

１４、３４　交流磁場発生装置

１５、３５　直流外部磁場発生装置

１６、３６　周波数変調検出装置

１７　直流外部磁場制御装置

１８　直流磁場特定装置

１１１、３１１　探針

１１２、３１２　アーム

１００、３００　観察試料

１３１　レーザ

１３２　フォトダイオード

１４１、１４２　交流コイル

１４３　交流電源

１６１　周波数復調器

１６２　ロックインアンプ

請求の範囲

[請求項1] 観察試料から発生する直流磁場を検出する磁場測定装置であって、

磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ一種以上の材料からなる探針を備えた振動式の探針装置と、

前記探針を機械励振させる機械振動源と、

前記探針の機械振動周波数および機械振動振幅を検出する振動検出装置と、

前記探針の機械振動方向の変化率がゼロでない、前記探針の機械振動周波数と異なる周波数の交流磁場を前記探針に与える交流磁場発生装置と、

前記機械振動方向の直流外部磁場を前記探針に与える直流外部磁場発生装置と、

前記振動検出装置が検出した前記機械振動周波数から前記探針の機械振動に生じる周波数変調を検出する周波数変調検出装置と、

前記直流外部磁場発生装置が前記探針に与える前記機械振動方向の直流外部磁場の大きさを調整する直流外部磁場調整装置と、

前記周波数変調の大きさが極小となったときの前記直流外部磁場発生装置の出力値、または前記周波数変調の大きさが極小となるであろうときの前記直流外部磁場発生装置の予想出力値に基づいて、前記観察試料が発生する前記振動方向の前記直流磁場の値を特定する直流磁場特定装置と、

を備えたことを特徴とする磁場測定装置。

[請求項2] 前記直流外部磁場調整装置は、前記直流外部磁場が前記直流磁場の全部を打ち消すように前記直流外部磁場を調整することを特徴とする請求項１に記載の磁場測定装置。

[請求項3] 前記直流外部磁場調整装置は、前記直流外部磁場が前記直流磁場の一部を打ち消すように前記直流外部磁場を調整することを特徴とする請求項１に記載の磁場測定装置。

[請求項4] 前記交流磁場発生装置が、電磁コイルを有することを特徴とする請求項１～３のいずれかに記載の磁場測定装置。

[請求項5] 前記交流磁場発生装置が２つ以上の電磁コイルを有し、

該２つ以上の電磁コイルが、前記探針の先端で互いに打ち消し合う向きの複数の磁場を発生することにより、前記交流磁場発生装置は磁場振幅がゼロになる位置を有する磁場を発生し、且つ、

前記交流磁場発生装置が発生する磁場の、前記磁場振幅がゼロになる位置における磁場勾配が、該位置において前記２つ以上の電磁コイルのそれぞれが単独で発生する磁場の磁場勾配のいずれよりも大きいことを特徴とする、

請求項１～４のいずれかに記載の磁場測定装置。

[請求項6] 直流外部磁場発生装置が、前記探針に磁場を印加する電磁コイルを有し、

前記直流外部磁場調整装置が電流調整装置を有することを特徴とする請求項１～５のいずれかに記載の磁場測定装置。

[請求項7] 前記探針により、前記観察試料の表面を一次元、二次元または三次元で走査する機構を備えたことを特徴とする請求項１～６のいずれかに記載の磁場測定装置。

[請求項8] 磁化の強さが外部磁場の大きさに比例する性質を持つ一種以上の磁性材料からなる探針を備えた振動式の探針装置を用いて観察試料から発生する直流磁場を測定する方法において、

前記探針を機械励振させる工程と、

前記探針の機械振動方向の変化率がゼロでない、前記探針の機械振動周波数と異なる周波数の交流磁場を与えるとともに、前記観察試料から発生する前記直流磁場を打ち消す向きの前記機械振動方向の直流外部磁場を前記探針に与える工程と、

前記探針の機械振動に生じる周波数変調を検出する工程と、

前記周波数変調の検出結果に基づき、前記探針に与えられる前記振

動方向の直流外部磁場の大きさを調整する工程と、

前記周波数変調が生じないとき若しくは前記周波数変調の大きさが極小となったときの前記直流外部磁場の値、または前記周波数変調の大きさが極小となるであろうときの前記直流外部磁場の予想値に基づいて、前記観察試料が発生する前記振動方向の前記直流磁場の値を特定する工程と、

を有することを特徴とする磁場測定方法。

[請求項9] 前記直流外部磁場が前記直流磁場の全部を打ち消すように前記直流外部磁場を調整する工程を有することを特徴とする請求項８に記載の磁場測定方法。

[請求項10] 前記直流外部磁場が前記直流磁場の一部を打ち消すように前記直流外部磁場を調整する工程と、

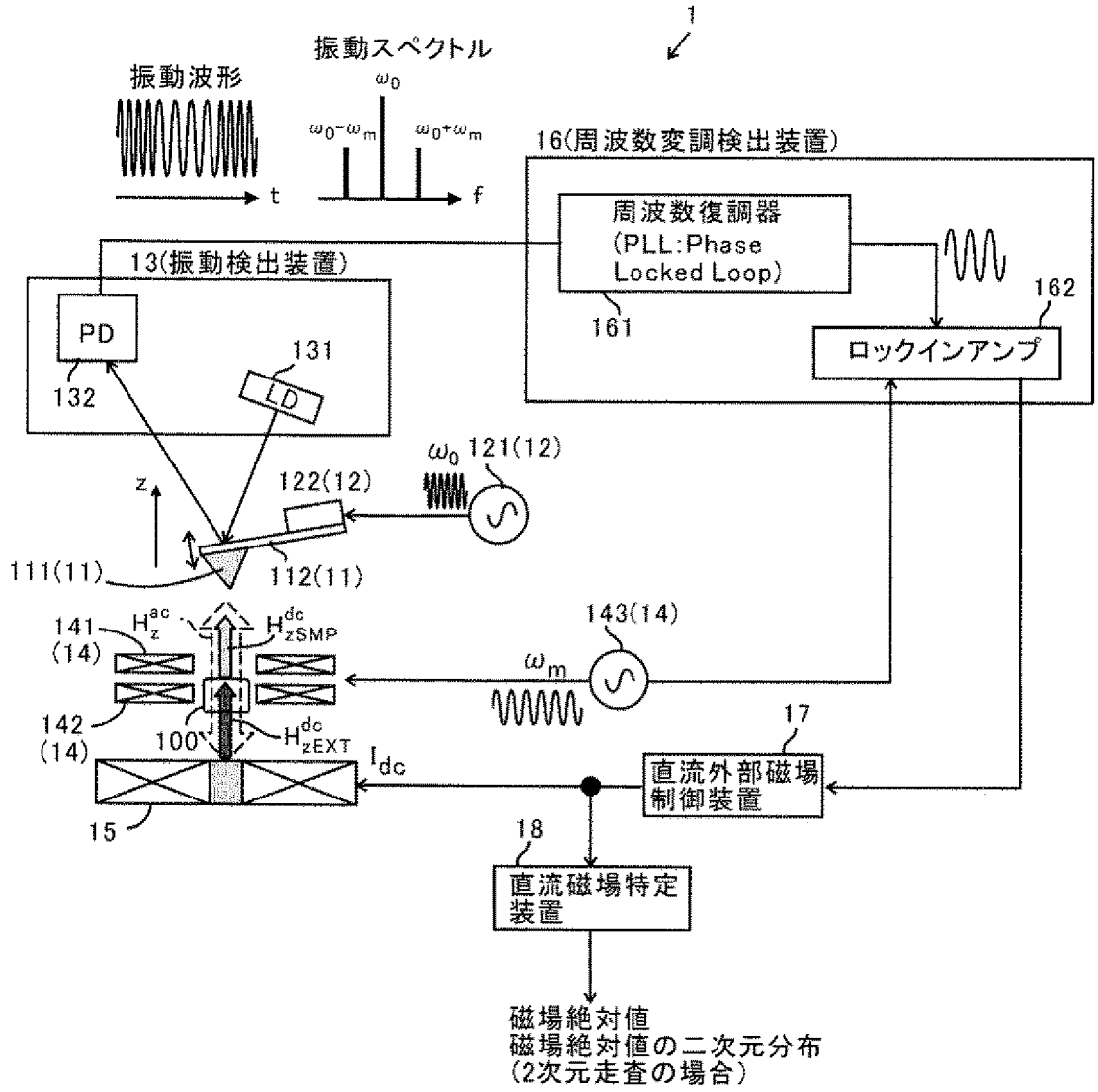
少なくとも２つの前記直流外部磁場の値、および該少なくとも２つの前記直流外部磁場の値に対応する周波数変調の大きさに基づいて、前記観察試料が発生する前記振動方向の前記直流磁場の値を特定する工程と

を有することを特徴とする請求項８に記載の磁場測定方法。

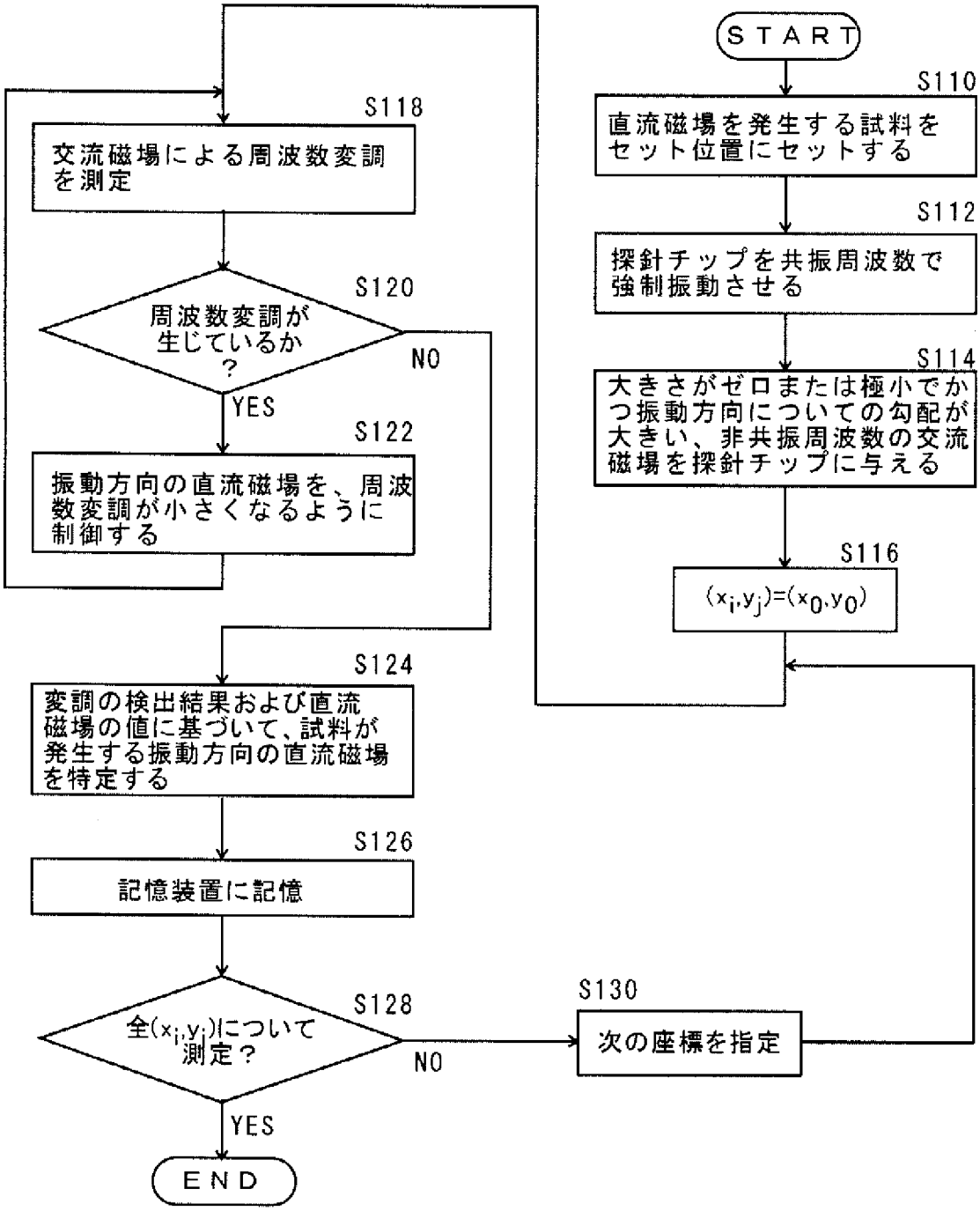
[請求項11] 前記観察試料がセットされていないときに、（ａ）前記周波数変調がゼロとなるように前記交流磁場を校正する、又は（ｂ）前記周波数変調をゼロに近付けるように前記交流磁場を校正する工程を有することを特徴とする請求項８～１０のいずれかに記載の磁場測定方法。

[請求項12] 前記探針により、前記観察試料の表面を一次元、二次元または三次元で走査する工程を有することを特徴とする請求項８～１１のいずれかに記載の磁場測定方法。

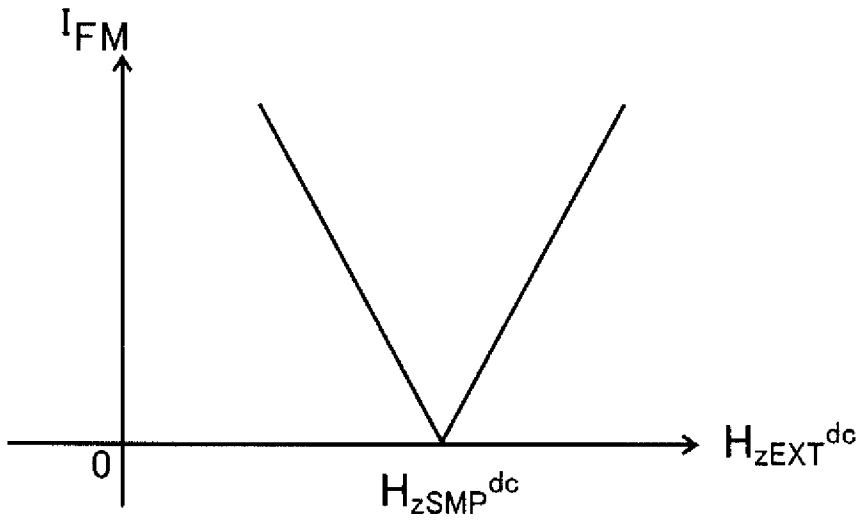
[図1]


1
振動スペクトル
振動波形
ω_0
$\omega_0-\omega_m$
$\omega_0+\omega_m$
t
f
16(周波数変調検出装置)
周波数復調器
(PLL:Phase
Locked Loop)
161
162
ロックインアンプ
13(振動検出装置)
PD
132
131
LD
ω_0 121(12)
z
122(12)
111(11)
112(11)
143(14)
141
(14)
H_z^{ac}
H_{zSMP}^{dc}
ω_m
142
(14)
100
H_{zEXT}^{dc}
I_{dc}
17
直流外部磁場
制御装置
15
18
直流磁場特定
装置
磁場絶対値
磁場絶対値の二次元分布
(2次元走査の場合)

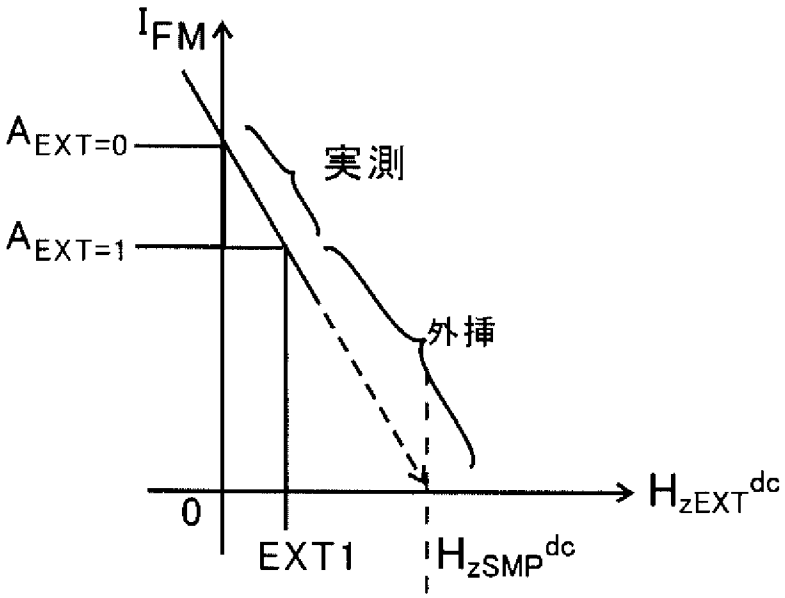
[図2]


START
S110
直流磁場を発生する試料をセット位置にセットする
S112
探針チップを共振周波数で強制振動させる
S114
大きさがゼロまたは極小でかつ振動方向についての勾配が大きい、非共振周波数の交流磁場を探針チップに与える
S116
$(x_i,y_j)=(x_0,y_0)$
S118
交流磁場による周波数変調を測定
S120
周波数変調が生じているか？
NO
YES
S122
振動方向の直流磁場を、周波数変調が小さくなるように制御する
S124
変調の検出結果および直流磁場の値に基づいて、試料が発生する振動方向の直流磁場を特定する
S126
記憶装置に記憶
S128
全(x_i,y_j)について測定？
NO
YES
S130
次の座標を指定
END

[図3]

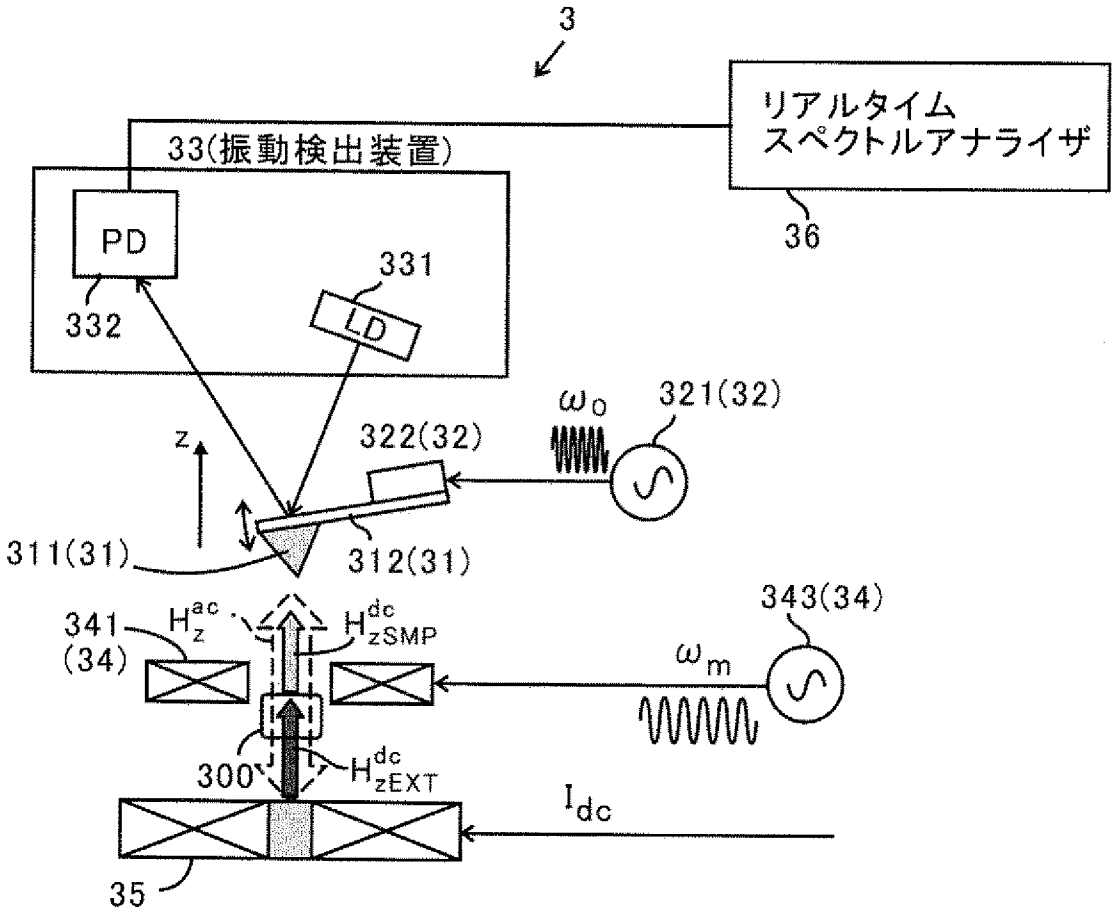

I_{FM}
0
H_{zSMP}^{dc}
H_{zEXT}^{dc}

(A)

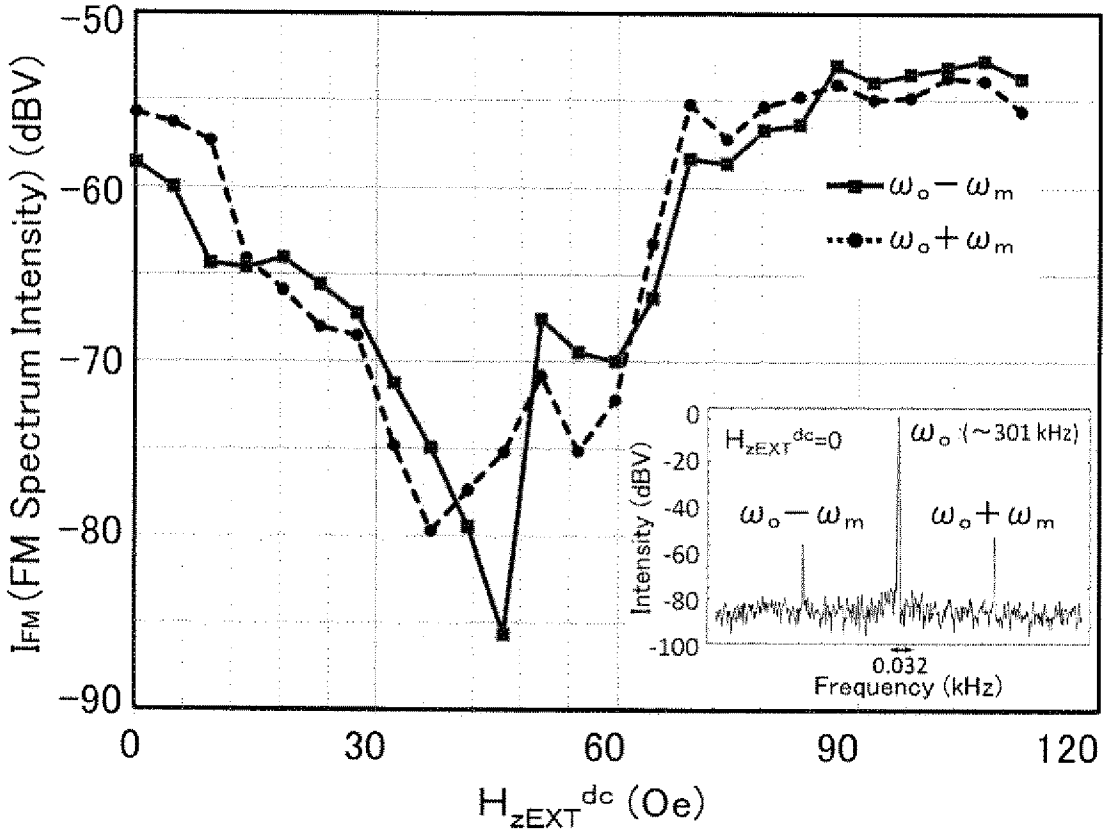

I_{FM}
$A_{EXT=0}$
$A_{EXT=1}$
実測
外挿
0
EXT1
H_{zSMP}^{dc}
H_{zEXT}^{dc}

(B)

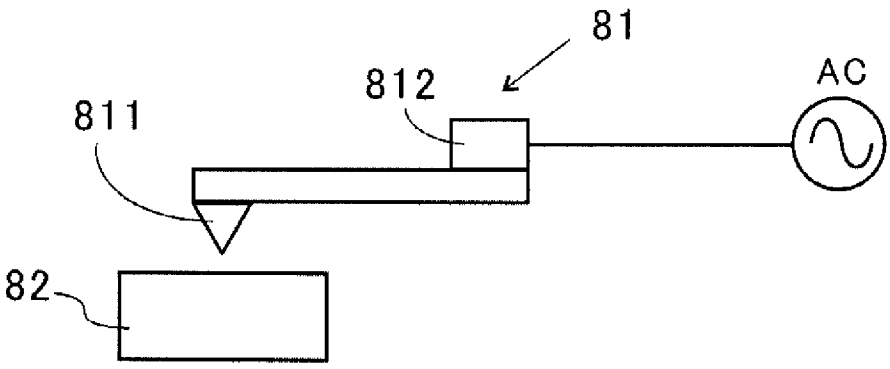
[図4]


3
リアルタイム
スペクトルアナライザ
36
33(振動検出装置)
PD
332
331
LD
ω_0
321(32)
322(32)
z
311(31)
312(31)
343(34)
341
(34)
H_z^{ac}
H_{zSMP}^{dc}
ω_m
300
H_{zEXT}^{dc}
I_{dc}
35

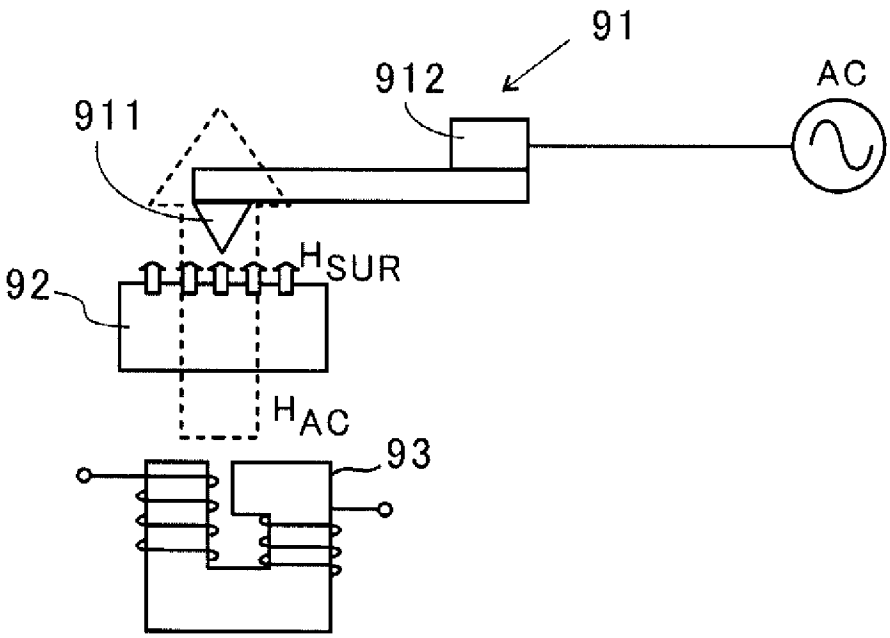
[図5]


I_{FM} (FM Spectrum Intensity) (dBV)
−50
−60
−70
−80
−90
0
30
60
90
120
H_{zEXT}^{dc} (Oe)
$\omega_o-\omega_m$
$\omega_o+\omega_m$
$H_{zEXT}^{dc}=0$
ω_o (~301 kHz)
Intensity (dBV)
0
-20
-40
-60
-80
-100
0.032
Frequency (kHz)

[図6]



(A)



(B)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2014/059276

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01Q60/50(2010.01)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)
G01Q10/00-90/00, G01R33/00-33/26, G11B5/00-5/024, G01N27/72-27/90

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 1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2012/029973 A1 (Akita University), 08 March 2012 (08.03.2012), paragraphs [0021] to [0079]; fig. 1, 2 & US 2013/0174302 A1 & EP 2613160 A1 & WO 2012/029973 A	1-12
A	JP 2013-2970 A (Hitachi, Ltd.), 07 January 2013 (07.01.2013), paragraphs [0016] to [0036]; fig. 1, 2 & US 2012/0319679 A1	1-12
A	JP 2000-275313 A (Fujitsu Ltd.), 06 October 2000 (06.10.2000), paragraph [0038] & US 6407545 B1	1-12

☒ 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	Date of mailing of the international search report
20 June, 2014 (20.06.14)	01 July, 2014 (01.07.14)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2014/059276

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P,X	Yukinori KINOSHITA, Genta EGAWA, Satoru YOSHIMURA, Hikaru NOMURA, Ryoichi NAKATANI, Satoshi SAITO, "Koban Jikiryoku Kenbikyo o Mochiita Jiba no Zettaichi Keisokuho no Teian", Dai 37 Kai The Magnetics Society of Japan Gakujutsu Koenkai Gaiyoshu, The Magnetics Society of Japan, 03 September 2013 (03.09. 2013), page 110, entire text, all drawings	1-2,4-9,12

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１４／０５９２７６

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01Q60/50(2010.01)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.　G01Q10/00-90/00, G01R33/00-33/26, G11B5/00-5/024, G01N27/72-27/90

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	１９７１－２０１４年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１４年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１４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/JMEDPlus/JST7580(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
A	WO 2012/029973 A1 (国立大学法人秋田大学) 2012.03.08, [0021]－[0079], [図１], [図２] & US 2013/0174302 A1 & EP 2613160 A1 & WO 2012/029973 A	1-12
A	JP 2013-2970 A (株式会社日立製作所) 2013.01.07, 【００１６】－【００３６】, 【図１】, 【図２】 & US 2012/0319679 A1	1-12

☑　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	国際調査報告の発送日
２０．０６．２０１４	０１．０７．２０１４

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
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）　２Ｊ　５２６１
東松　修太郎
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５２

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
A	JP 2000-275313 A（富士通株式会社）2000.10.06, 【００３８】 & US 6407545 B1	1-12
P, X	木下幸則，江川元太，吉村哲，野村光，中谷亮一，齊藤準， 交番磁気力顕微鏡を用いた磁場の絶対値計測法の提案， 第３７回日本磁気学会学術講演会概要集，日本磁気学会， 2013.09.03，p. 110，全文，全図	1-2，4-9，12