

(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
2021年3月4日(04.03.2021)



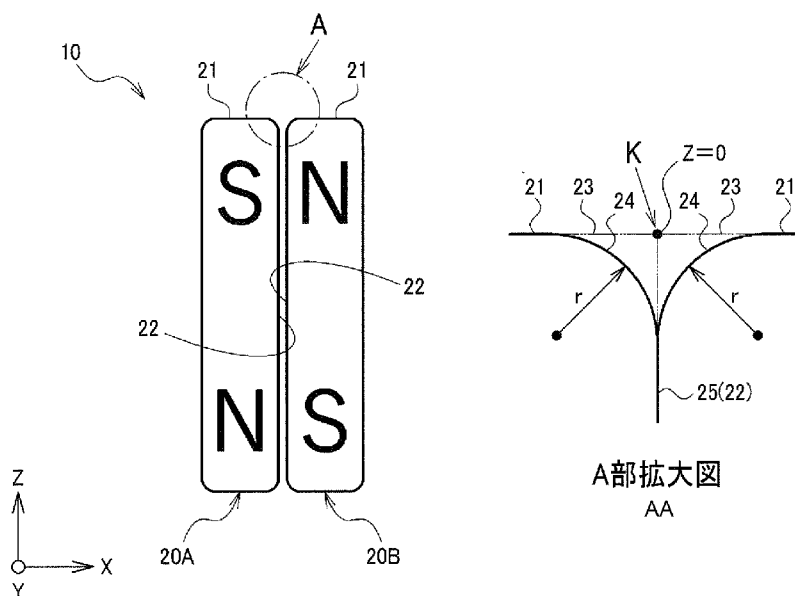
(10) 国際公開番号

WO 2021/039836 A1

- (51) 国際特許分類：
H02N 15/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号： PCT/JP2020/032159
- (22) 国際出願日： 2020年8月26日(26.08.2020)
- (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 2019-158501 2019年8月30日(30.08.2019) JP
- (72) 発明者；および
- (71) 出願人：池添 泰弘(IKEZOE Yasuhiro) [JP/JP]；
〒3458501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台
- 4 - 1 日本工業大学 基幹工学部 応用化学科内 Saitama (JP).
- (72) 発明者：菅谷 将之(SUGAYA Masayuki)；
〒3458501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台
4 - 1 日本工業大学 基幹工学部 応用化学科内 Saitama (JP).
- (74) 代理人：井上 一，外(INOUE Hajime et al.)；
〒1010063 東京都千代田区神田淡路町 2 - 8
プロステック淡路町 3階 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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,

(54) Title: MAGNETIC LEVITATION DEVICE AND MEASURING DEVICE USING SAME

(54) 発明の名称： 磁気浮上装置及びそれを用いた測定装置



AA Magnified view of A

(57) Abstract: This magnetic levitation device (10) comprises a pair of first permanent magnets (20A, 20B). Each of the first permanent magnets has a lateral surface (22), a top surface (21), and an edge line (24) formed so as to chamfer a corner (23) connecting between the lateral surface (22) and the top surface (21) in a vertical cross-sectional view. The first permanent magnets are respectively magnetized in the vertical directions Z but in reverse to each other, are arranged side by side so as to have the respective lateral surfaces (22, 22) face each other or be in contact with each other, and thereby,



WO 2021/039836 A1

HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, 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))

cause an object T that is diamagnetic with respect to a medium in an atmosphere to levitate into a space K located above the respective edge lines (24) of the first permanent magnets in a vertical cross-sectional view.

(57) 要約: 磁気浮上装置 (10) は、一对の第1永久磁石 (20A, 20B) を有する。一对の第1永久磁石の各々は、側面 (22) と、頂面 (21) と、垂直断面で側面 (22) と頂面 (21) とを結ぶ角部 (23) を面取りする稜線 (24) と、を有する。一对の第1永久磁石は、鉛直方向Zで互いに逆向きに着磁され、かつ、側面 (22, 22) 同士を対面または接触させて並設されて、垂直断面で一对の第1永久磁石の各々の稜線 (24) よりも上方に位置する空間Kに、雰囲気中の媒体に対して反磁性である対象物Tを磁気浮上させる。

明 細 書

発明の名称：磁気浮上装置及びそれを用いた測定装置

技術分野

[0001] 本発明は、磁気浮上装置及びそれを用いた加速度センサー、表面張力センサー等の測定装置に関する。

背景技術

[0002] 19世紀前半に、アーンショーが、電場や磁場を利用して物体を静的に浮上させるには、反発力しか使えないことを証明した。ただし、電場を使って反発力を生み出すことは困難である。なぜなら、同じ符号の電荷同士が反発することは良く知られているものの、実際は、物体内に特定の符号（正または負）の電荷をずっと溜めておくことはほぼ不可能で、最終的には物体の持つ電荷はゼロとなり、電場中に置かれた物体には、その誘電率にしたがって正負の電荷に偏りが生じて、結果的に引力が作用することになるからである。

[0003] 物体に働く磁氣的な力（磁気力）には、磁石に引きつけられる力（引力）と、磁石から遠ざかろうとする力（反発力）の2種類が存在する。鉄やニッケルのような強磁性体、あるいは、遷移金属の塩や酸素ガスなどの常磁性体に対して、磁石は引力を及ぼす。一方、水、プラスチック、陶器、木材、ガラス、その他多くの有機物質などに対して、磁石は反発力を及ぼす。これらは反磁性体と呼ばれる。すなわち、自然界で反発力を生み出すための唯一の系は、磁石（コイルや永久磁石）と反磁性体の組み合わせからなる系のみである。理論的には、反磁性体と磁石との間の反発力を利用すれば、地球上で物体の磁気浮上を実現できるはずである。

[0004] しかし、反磁性体と磁石の反発力は非常に弱く、反磁性体の磁気浮上を実現するには超強力磁石が必要である。1991年に、E. Beaugnon等が、フランスの強磁場施設で B （磁束密度）＝27T（テスラ）もの強磁場を発生させて、世界で初めて反磁性体の磁気浮上に成功した（非特許文献1）。ちな

みに、学校の黒板などに使う磁石は強い磁石でも0.1 T程度の磁束密度しか発生しない。磁気エネルギーは磁束密度の強度の2乗に比例するので、27 Tの磁石のエネルギーと0.1 Tの磁石のエネルギーはおよそ73000 ($= 27 / (0.1)^2$) 倍である。一般的には、『反磁性体』と呼ばれる物質が存在することすら知られていないが、これは『物体が磁石から反発するような様子を見る機会がないから』ということもできる。その理由が、上記のように、普通の磁石が発生する磁場が持つエネルギーと磁気浮上を実現できるほどの磁石が発生する磁場が持つエネルギーが何万倍も違っていて、反磁性体が磁石から反発力を受けている様子を目視で観測できるような状況は自然には存在しないからである。なお、1991年当時、この磁石は、世界最強クラスの超伝導磁石で、2019年現在でも、27 Tもの磁場を得るには、ごく限られた強磁場施設を使わなければならない。水は、反磁性体の中でも比較的強い反磁性を持っているので浮上させやすい物質の一つであるが、上のような条件下でのみ磁気浮上が実現される。

[0005] Beaugnon等の報告の後も、いくつかの強磁場施設で磁気浮上実験がなされたが、いずれにしても、一般の企業・大学の研究者が日常的に使えるような磁石を用いた実験ではない。また、浮上させることが出来る物質も反磁性体と限られていたため、応用的な観点での研究はあまり進まなかった。しかし、1998年に本発明者等が提案した磁気アルキメデスの原理（特許文献1及び非特許文献2）は、周囲媒体を巧みに利用することで、磁気浮上が容易になることを示した。たとえば、水の磁気浮上が普通の超伝導磁石で実現できるようになり、世界で初めて目の前で水が浮く様子を直接観察できるようになった。また、常磁性の溶液を媒体として利用することで、永久磁石程度の弱い磁場でも簡単に磁気浮上をさせることが可能となり、磁気分離や生体材料への応用など様々な研究が世界中で行われるようになった。また、アンショアの定理によると、磁石に引かれる物質の磁気浮上は不可能だと結論付けられていたが、浮上させたい対象物質よりも媒体の方がより強く磁石に引かれるような物質であれば、対象物質は、その系の中では相対的に反磁性

体となるので、磁気浮上が可能であることも示した。すなわち、あらゆる物質の磁気浮上を可能にしたのが、磁気アルキメデスの原理である。その後の磁気浮上や磁気力に関係する研究の多くは、磁気アルキメデスの原理を何らかの形で活用しているものが多い。

[0006] 2004年、Lyuksyutov等は、磁極が向き合う形で対向配置された微細な2つの永久磁石と電極とを使って、直径が20～30 μm ほどの水を浮上させた実験を報告している（非特許文献3）。ただし、どれくらいの磁気力が発生していたのか、その詳細は書かれていない上に、本当に浮いているのかもよく分からない。また、この構造から明らかだが、電極がなければ、磁石間の隙間に沿った方向に復元力は存在しない。電極形成のためには少なくともリソグラフィーなどの微細加工技術が必要である。また、磁極が対向し強く反発する状態で2つの永久磁石を固定する必要があるため、強磁性体基板に磁石を吸着させて固定しなければならない。

[0007] 2008年、Pigot等は、リソグラフィー技術を用いて、50 μm 程度の微細なNd-Fe-B磁石のパターンを作り、そこで、ビスマスの小片を磁気浮上させる実験を報告している（非特許文献4）。2つの磁石の磁極の向きは共に鉛直方向上向きで、平行である。上述された非特許文献3と磁極の位置関係は違うが、磁石同士が反発する配置となっていることは同じである。この磁石は、薄膜として基板に付着している。この研究では、磁場分布の解析も行われている。しかし、非特許文献3と同様、微細構造を作製する必要があるため、普通の磁石で同様の実験を実現することは不可能である。この論文本文中にこの技術の応用として、傾斜計や加速度計のことが言及されているものの、実際に作られているわけではない。

[0008] 2005年には、Gunawan等が、接して配置された2つの円柱磁石の隙間で、カーボンのロッドを浮上させることが出来ることを報告した（非特許文献5）。このシステムは、物体の磁化率の測定に使えることを示している。非特許文献3-4に比べるとかなり簡単な構造だが、浮上させやすいカーボンの磁気浮上を実証しているだけで、他の物質の磁気浮上は実現されていない

。また、磁石の磁極は水平方向に平行で、引力を及ぼす配置をとっている。

[0009] 2015年、Iida等は、磁気浮上のための磁気力を強くするために、Halbach配置と呼ばれる計9個の磁石の配置方法を利用して、磁石とヨークとの間の空洞部分でカーボンの磁気浮上を実現した（非特許文献6）。計9個の反発する磁石は、二次元的配置を実現するために、金属塊とヨークとで強固に固定されなければならない。

[0010] 2012年には、渡会等が磁気クロマトグラフィーに関する論文を発表している。ここでは、粒子の移動速度を磁気力で制御する方法について議論されており、実験で使用した磁石配置において発生した磁気力が、水の磁気浮上を実現させるに十分な磁気力を持つことを見出している（非特許文献7）。ただし、この報告では、実験データから「水の磁気浮上を実現させる程度の大きさになっている」ということを間接的に評価しているもので、シミュレーションや実測の結果ではなく、実際に浮かせた実験を示したものでもない。ここでの磁石の配置は、N極とS極が向き合う形になっているのでお互い引力を及ぼす配置になっていて、さらに磁極間に鉄の薄片を挟むことで磁気力を増強させている。また、鉄の薄片の間には隙間があり、その間隔は400 μm となっていて、これまでの論文と同様に、磁石と磁石の間の小さな隙間が磁気力増強に重要であることが想像できる。なお、この実験配置では、Z軸（鉛直上向き方向）の磁気力が水に作用する重力と釣り合うような状況が得られるかもしれないが、この配置のままでは、水平方向に物体が動いて下に落ちると予想される。

先行技術文献

特許文献

[0011] 特許文献1：特開2002-126495号公報

非特許文献

[0012] 非特許文献1：Beaugnon, E. & Tournier, R. Nature 349 (1991) 470

非特許文献2：Ikezoe Y., et al., Nature, 393 (1998) 749-750

非特許文献3：Lyuksyutov, I. F. et al., Appl. Phys. Lett. 65(10) (2004)

) 1817-1819

非特許文献4 : Pigot C., et al., IEEE TRANS. MAG., 44(11) (2008) 4521-4524

非特許文献5 : Gunawan O., et al., Appl. Phys. Lett. 106 (2015) 062407

非特許文献6 : Iida K., et al., Bull. JSME., 2(3) (2015) 14-00559

非特許文献7 : Watarai H. and Namba M., J. Chromatogr., 961(1) (2002) 3-8

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0013] 本発明の目的は、簡単な構造でありながら対象物を磁気浮上させることができる磁気浮上装置を提供することである。

本発明の他の目的は、簡単な構造でありながら対象物を磁気浮上させ、かつ、水平面内でも力学的平衡を実現することができる磁気浮上装置及びそれを用いた測定装置を提供することである。

課題を解決するための手段

[0014] (1) 本発明の一態様は、

一对の第1永久磁石を有し、

前記一对の第1永久磁石の各々は、側面と、頂面と、垂直断面で前記側面と前記頂面とを結ぶ角部を面取りする稜線と、を有し、

前記一对の第1永久磁石は、鉛直方向で互いに逆向きに着磁され、かつ、前記側面同士を対面または接触させて並設されて、前記垂直断面で前記一对の第1永久磁石の各々の前記稜線よりも上方の空間に、雰囲気中の媒体に対して相対的に反磁性である対象物を磁気浮上させる磁気浮上装置に関する。

[0015] 本発明の一態様によれば、鉛直方向で互いに逆向きに着磁され、かつ、側面同士を対面または接触させて並設された一对の第1永久磁石は、反平行に引力を及ぼし合い、垂直断面で一对の第1永久磁石の各々の稜線よりも上方に位置する空間に対象物を磁気浮上させる。ここで、雰囲気中の媒体に対して相対的に反磁性である対象物に対して、磁石は反発力を及ぼすので、磁石

の磁気力により対象物を浮上させることが原理的に可能である。その磁気浮上に必要な磁気力は、磁束密度 B (T) と磁束密度 B の鉛直方向の勾配である $\partial B / \partial Z$ (T/m) との積である $B \times (\partial B / \partial Z)$ を含む。本発明の一態様で比較的小型の永久磁石を用いた場合、磁束密度 B は小さくなるが、磁束密度 B の鉛直方向の勾配 ($\partial B / \partial Z$) を大きく確保することで、強い磁気力が得られる。

[0016] (2) 本発明の一態様 (1) では、前記一对の第 1 永久磁石の各々の前記稜線は、前記側面と前記頂面とを結ぶ前記角部を所定の半径に従って面取りすることができる。ただし、面取りは、複数の異なる曲率半径を用いても良く、あるいは直線を用いても良い。

[0017] (3) 本発明の一態様 (2) では、磁束密度 B (T) と、前記磁束密度 B の前記鉛直方向の勾配である $\partial B / \partial Z$ (T/m) との積である $B \times (\partial B / \partial Z)$ が、前記半径に依存して変化し、前記対象物の種別に応じて前記半径を設定することができる。例えば、密度の大きい、あるいは反磁性の弱い対象物ほど、半径を小さくして磁気力を高めることができる。

[0018] (4) 本発明の一態様 (1) ~ (3) では、
前記鉛直方向を Z 方向とし、水平面内で直交する方向を X 方向及び Y 方向とし、前記一对の第 1 永久磁石は、 $X-Z$ 断面に前記稜線を有し、
前記一对の第 1 永久磁石の各々は、 $Y-Z$ 断面で、前記頂面を下向き凸の円弧状に形成することができる。こうすると、頂面に形成された円弧状部分により形成される磁場によって、水平面内でも対象物が釣り合っ安定する力学的平衡を実現することができる。

[0019] (5) 本発明の一態様 (1) ~ (3) では、
前記鉛直方向を Z 方向とし、水平面内で直交する方向を X 方向及び Y 方向とし、前記一对の第 1 永久磁石は、 $X-Z$ 断面に前記稜線を有し、
前記空間を挟んで前記 X 方向で対向して配置された一对の第 2 永久磁石をさらに有し、
前記一对の第 2 永久磁石の各々は、着磁方向を前記 X 方向で同じ向きとす

ることができる。こうすると、一对の第2永久磁石により形成される磁場が加わることによって、水平面内でも対象物が釣り合って安定する力学的平衡を実現することができる。

[0020] (6) 本発明の一態様(4)または(5)では、前記対象物は、最大サイズが0.01mm~1mmとすることができる。装置の小型化を維持する場合、一对の第1永久磁石の稜線に挟まれる空間は比較的狭く、最大サイズ例えば直径が0.01mm~1mmであれば、装置の小型化は維持される。しかも、このようなサイズの粒子を浮上させることで、物理的に束縛されていない平衡状態の粒子に浮上力以外の外力を非接触方式例えば音波等で付与させることもできる。それにより、粒子またはその周囲の媒体の各種測定を実施することが可能となる。

[0021] (7) 本発明の他の態様は、
上述の(6)に記載の磁気浮上装置と、
前記磁気浮上装置により浮上された前記対象物を振動させる外力を付与する外力付与部と、
前記対象物の振動を検出して、前記対象物の振動と相関のある前記対象物の属性を測定する測定部と、
を有する測定装置に関する。

[0022] 本発明の他の態様(7)によれば、物理的に束縛されていない状態の対象物に浮上力以外の外力を付与すると、対象物に変形する。この時、対象物は三次元で力学的平衡状態にある中で、復元力により形状が振動する。そして、対象物の振動と相関のある対象物の属性、例えば対象物である液滴の表面張力、対象物Tである溶液の濃度変化に伴う表面張力、または対象物である液体の粘性等を、測定部により測定することができる。

[0023] (8) 本発明の他の態様は、
上述の(6)に記載の磁気浮上装置と、
前記対象物を浮上させている前記磁気浮上装置を移動可能に支持する支持部と、

外力により移動する前記磁気浮上装置に追従する前記対象物の動きを検出して、前記外力を測定する測定部と、
を有する測定装置に関する。

[0024] 本発明の他の態様（８）によれば、支持部に加速度や地震等の外力が付与されると、支持部により移動可能に支持された磁気浮上装置が移動する。磁気浮上装置により浮上されて物理的に束縛されていない平衡状態の対象物は、磁気浮上装置の移動に追従して変位する。この対象物の動きを検出することで、位置情報から加速度が求められ、あるいは加速度から地震の大きさを測定することもできる。

[0025] （９）本発明の他の態様は、
上述の（６）に記載の磁気浮上装置と、
前記対象物を浮上させている前記磁気浮上装置を移動させる外力を付与する外力付与部と、

前記外力により移動する前記磁気浮上装置に追従する前記対象物の振動を検出して、前記対象物の振動と相関のある、前記対象物の周囲の雰囲気中の前記媒体の属性を測定する測定部と、
を有する測定装置に関する。

[0026] 本発明の他の態様（９）によれば、外力付与部により外力が付与されて磁気浮上装置が移動すると、磁気浮上装置により浮上されて物理的に束縛されていない平衡状態の対象物は、磁気浮上装置の移動に追従して移動する。この時、対象物は三次元で力学的平衡状態にある中で、復元力により振動する。この振動の減衰は、対象物の周囲の雰囲気中の媒体の属性例えば粘性に依存する。よって、振動の減衰に基づいて対象物の周囲の雰囲気中の媒体の属性のうち、対象物の振動と相関のある属性を測定することができる。

図面の簡単な説明

[0027] [図1]本発明の第１実施形態に係る磁気浮上装置の正面図である。

[図2]磁気アルキメデスの原理を説明するための図である。

[図3]図１に示す磁気浮上装置のX-Z平面での磁場強度分布を示す図である

。

[図4]図3に示すX-Z平面での磁場強度分布のうちのZ軸方向の磁場強度分布を示す図である。

[図5]図4から算出される $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値を示す図である。

[図6]本発明の第2実施形態に係る磁気浮上装置の正面図である。

[図7]図7(A)は図6に示す磁気浮上装置のX-Z平面での磁場強度分布を示す図であり、図7(B)は水を浮上させる時の液滴の浮上位置($Z = 0.05 \text{ mm}$)におけるY軸に沿った磁場強度分布を示す図である。

[図8]水の磁気浮上実験を行った結果を示す図である。

[図9]稜線を規定するフィレット半径と磁気力との関係を示す図である。

[図10]図10(A)~図10(C)は、本発明の第3実施形態に係る磁気浮上装置の斜視図、正面図、側面図である。

[図11]図11(A)は図10に示す磁気浮上装置のX-Z平面での磁場強度分布を示す図であり、図11(B)は水を浮上させる時の液滴の浮上位置($Z = 0.05 \text{ mm}$)におけるY軸に沿った磁場強度分布を示す図である。

[図12]図11(A)に示すX-Z平面での磁場強度分布のうちのZ軸方向の磁場強度分布を示す図である。

[図13]図12から算出される $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値を示す図である。

[図14]本発明の第4実施形態に係る測定装置を示す図である。

[図15]溶液中の界面活性剤濃度と溶液の表面張力との相関を示す特性図である。

[図16]外力が付与された対象物の振動特性を示す図である。

[図17]本発明の第5実施形態に係る測定装置を示す図である。

[図18]図17に示す支持部の平面図である。

[図19]本発明の第6実施形態に係る測定装置を示す図である。

発明を実施するための形態

[0028] 以下の開示において、提示された主題の異なる特徴を実施するための多くの異なる実施形態や実施例を提供する。もちろんこれらは単なる例であり、

限定的であることを意図するものではない。さらに、本開示では、様々な例において参照番号および／または文字を反復している場合がある。このように反復するのは、簡潔明瞭にするためであり、それ自体が様々な実施形態および／または説明されている構成との間に関係があることを必要とするものではない。さらに、第1の要素が第2の要素に「接続されている」または「連結されている」と記述するとき、そのような記述は、第1の要素と第2の要素とが互いに直接的に接続または連結されている実施形態を含むとともに、第1の要素と第2の要素とが、その間に介在する1以上の他の要素を有して互いに間接的に接続または連結されている実施形態も含む。また、第1の要素が第2の要素に対して「移動する」と記述するとき、そのような記述は、第1の要素及び第2の要素の少なくとも一方が他方に対して移動する相対的な移動の実施形態を含む。

[0029] (1) 第1実施形態

(1-1) 磁気浮上装置

図1は、本発明の第1実施形態に係る磁気浮上装置を示す。図1において、磁気浮上装置10は、一对の第1永久磁石20A、20Bを有する。一对の第1永久磁石20A、20Bの各々は、例えば市販されている直方体形状であり、頂面21と、側面22と、を有する。図1のA部拡大図に示すように、一对の第1永久磁石20A、20Bの各々は、垂直断面（図1のX-Z断面）で、側面22と頂面21とを結ぶ鎖線で示す角部23を面取りする稜線24と、を有する。稜線24は、図1のA部拡大図に示すように、フィレット半径rで規定することができるが、複数の曲率半径や直線を用いて規定しても良い。

[0030] 図1において、鉛直方向をZ方向とし、水平面内で直交する方向をX方向及びY方向とする。図1は、磁気浮上装置10をX-Z平面と平行な正面から見た正面図である。図1に示すように、一对の第1永久磁石20A、20Bは、鉛直方向Zで互いに逆向きに着磁されている。図1では、第1永久磁石20Aは、上部がS極であり下部がN極であるのに対して、第1永久磁石

20Bは、上部がN極であり下部がS極である。このため、一对の第1永久磁石20A、20Bは反平行で引力を及ぼし合っている。

[0031] 一对の第1永久磁石20A、20Bは、側面22、22同士を対面または接触させて並設される。図1では側面22、22同士を対面させる例を示す一方で、図1のA部拡大図では、側面22、22同士が接触される場合を示し、この接触面を一对の第1永久磁石20A、20Bの境界面25とも称する。なお、図1において、Z=0は鉛直方向で頂面21と同一高さである位置を示す。磁気浮上装置10は、図1のA部拡大図で示すように垂直断面（図1のX-Z断面）において、一对の第1永久磁石20A、20Bの各々の稜線24よりも上方に位置する空間K、特に空間K内のうち境界面25の上方延長線上に、雰囲気中の媒体に対して相対的に反磁性である対象物T（図1では図示せず）を磁気浮上させる。

[0032] (1-2) 浮上に必要な磁気力及び磁気アルキメデスの原理

対象物Tに作用する重力はZ軸に平行で、その向きは鉛直下向き（負の符号を持つことになる）であり、単位体積当たりの力 $-\rho g$ （ N/m^3 ）と表すことができる。ここで、 ρ は物体の密度（ kg/m^3 ）で、 g は重力加速度（ m/s^2 ）である。また、物体に作用する磁気力のZ軸成分は、式（1）の右辺で表される。ここで、 χ は対象物Tの体積磁化率（無次元）、 μ_0 は真空の透磁率（ H/m ）、 B （T）は磁束密度の「大きさ」である（ベクトルではないので、向きは持たない）。磁束密度 B は場所の関数となっていて、 ∇ （ナブラ）が微分を表す演算子としたとき、 $(\chi/\mu_0)(B \nabla B)_z$ は式（1）の右辺と同じことである。式（1）の右辺中の $(\partial B/\partial Z)$ は、磁束密度 B の鉛直方向Zでの勾配を示す。よって、磁気浮上のための条件は次の式（1）のようになる。

[数1]

$$\rho g = \frac{\chi}{\mu_0} B \left(\frac{\partial B}{\partial z} \right) \quad \dots (1)$$

[0033] ここで、対象物 T は、雰囲気中の媒体に対して反磁性である。反磁性体は、体積磁化率 χ が負の物質のことであるが、磁場が反磁性体に対して作用する力が小さいのは、体積磁化率 χ の大きさが非常に小さい ($\sim 10^{-6}$) からである。普通の強磁性体で体積磁化率 χ を定義すると、1 より大きいのが普通であるから、反磁性体の体積磁化率 χ がいかに小さいかがわかる。また、式 (1) から、磁気力の大きさが、磁束密度の大きさ B と、その勾配 ($\partial B / \partial Z$) の積に比例することが分かる。したがって、ある磁石が発生する磁気力は、磁石の周辺の $B \times (\partial B / \partial Z)$ の最大値 (絶対値) を見れば、その磁石で磁気浮上が可能かどうか判断できる。代表的な反磁性体を浮上させるための $B \times (\partial B / \partial Z)$ の大きさをまとめたものが表 1 である。

[表1]

物質名	カーボン	ビスマス	水	アルミナ
磁気浮上に必要な $B(\partial B / \partial z)$ (T^2/m)	328	728	1350	2701

[0034] 一般に、($\partial B / \partial Z$) の大きさは、発生する磁束密度 B の最大値 (超電導磁石のようなコイルであればコイルの中心磁束密度、永久磁石であれば磁極表面の磁束密度) が大きいほど大きいので、強い磁場を発生する磁石の方が発生する磁気力も大きい。ただし、磁気力を表す式が 2 つの量である B と ($\partial B / \partial Z$) との積を含むことから、原理的には、磁束密度が小さい (B が小さい) ところでも、磁束密度の勾配 ($\partial B / \partial Z$) を非常に大きくすることができれば、結果的に強い磁気力を得られる。本実施形態では、磁束密度の勾配 ($\partial B / \partial Z$) を大きくしている。

[0035] 上述の議論は、磁気浮上装置 10 が配置される雰囲気中の媒体の効果を無視しているが、磁気アルキメデスの原理では、媒体の効果を考慮することにより、磁気浮上の条件式は式 (2) のように変化する。

[数2]

$$\Delta \rho g = \frac{\Delta \chi}{\mu_0} B \left(\frac{\partial B}{\partial z} \right) \quad \dots (2)$$

[0036] ここで、図2に示すように、 $\Delta\rho$ は浮上させる対象物Tの密度 ρ_1 から周囲媒体の密度 ρ_2 を引いた値であり、 $\Delta\chi$ は浮上させる対象物Tの磁化率 χ_1 から周囲媒体の磁化率 χ_2 を引いた値である。

[0037] 単純な磁気浮上の式(1)と比べれば、式(2)では ρ が $\Delta\rho$ になり、 χ が $\Delta\chi$ に変わっているが、この効果は非常に大きい。磁気アルキメデスの原理を使うことによって、磁気浮上の条件が緩和されるからである。その理由について説明する。

[0038] 式(2)を変形した式(3)を示す。

[数3]

$$B \left(\frac{\partial B}{\partial z} \right) = \frac{\Delta\rho\mu_0 g}{\Delta\chi} \quad \dots (3)$$

式(3)は、磁気浮上に必要な $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値が磁化率や密度を用いてどのように表されるかを示したものである。必要な $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値が大きければ大きいほど巨大な磁石が必要になってくるので、必要な $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値が小さい方が磁気浮上は簡単な構造になる。式(3)の右辺の $\Delta\rho$ や $\Delta\chi$ は、製作者の都合で制御できるパラメーターであり、 $\Delta\rho$ は小さい方がよく、 $\Delta\chi$ は大きい方がよいことになる。一方、単純な磁気浮上の式(2)には製作者の都合で変更できる物性値は存在しないため、巨大な $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値を持つ磁石を探す、ということ以外に解決策がない。

[0039] 浮上させる対象物Tが固体であれば、対象物Tの密度のほとんどが $10^3 \sim 10^4 \text{ kg/m}^3$ の範囲内にあり、液体であれば、対象物Tはどれも 10^3 kg/m^3 程度である。特に、有機物の固体を対象物Tとして浮上させる場合、媒体として液体を使い、かつ、媒体の成分をうまく調整することによって、 $\Delta\rho$ を限りなくゼロに近づけることができる。例えば、密度 ρ が 10^3 kg/m^3 程度であるプラスチック材料を空気中で磁気浮上させるために必要な $B \times (\partial B / \partial Z)$ は、 $1500 \text{ T}^2/\text{m}$ ほどであるが、 $\Delta\rho$ を 1 kg/m^3 程度(

密度の1000分の1)にしてしまえば、磁気浮上に必要な $B \times (\partial B / \partial Z)$ も1000分の1となり、 $1.5 \text{ T}^2 / \text{m}$ となる。つまり、永久磁石でも磁気浮上が可能となる。

[0040] 常磁性の媒体を使用すれば、 $\Delta \chi$ を大きくできる。例えば、空気が媒体であるときに比べ、酸素ガスを媒体とした時の方が、 $\Delta \chi$ は大きい。したがって、酸素ガスを媒体にすると、市販の磁石でも水の磁気浮上が可能になる。また、MnやGdなどの、常磁性イオンを含む溶液を媒体に使用すれば、 $\Delta \chi$ を大きくできると同時に、 $\Delta \rho$ を小さくでき、二重のメリットを享受できる。したがって、磁気アルキメデスの原理を用いた磁気浮上は、常磁性溶液を使うものが好適である。また、常磁性の媒体を使うことで、浮上させたい対象物Tが常磁性であったとしても、媒体よりも相対的に反磁性であれば磁気浮上ができることになり、あらゆる物質を対象物Tとして磁気浮上させることが可能である。

[0041] (1-3) 磁場強度分布

図3に、図1の構造を有する磁気浮上装置10で発生するX-Z平面での、図1のA部の磁場強度分布を示す。磁場強度分布が測定された磁気浮上装置10では、一对の第1永久磁石20A, 20Bの稜線24は、0.6mmのフィレット半径で面取りされているものを用いた。一对の第1永久磁石20A, 20Bは、反平行に引力を及ぼしあっている。Z=0の辺りでは、磁力線が右の磁石20Bから左の磁石20Aに向かって通っていて、稜線24, 24間を含む空間Kで非常に磁場が強い領域が形成される。Z軸上の磁場分布は、図4に示す通りであり、Z=0の辺りで磁場の勾配が非常に急峻になっていて、1mmの変化で磁場強度は約1T減少していることから、磁場の勾配($\partial B / \partial Z$)が $1000 \text{ T} / \text{m}$ のオーダーになっていることが分かる。

[0042] 磁気力の指標となる $B \times (\partial B / \partial Z)$ の分布は図5に示すとおりである。図5において、Z=0付近で $B \times (\partial B / \partial Z)$ の絶対値は約 $1500 \text{ T}^2 / \text{m}$ である。表1からこの値は、水の磁気浮上を可能にする大きさであるこ

とが分かる。なお、雰囲気媒体の効果を検討した磁気アルキメデスの原理を使うと、 $1500\text{T}^2/\text{m}$ の磁気力は1000分の1となって $1.5\text{T}^2/\text{m}$ となり、永久磁石でも磁気浮上が可能となることが分かる。

[0043] (2) 第2実施形態

(2-1) 磁気浮上装置

図6は、本発明の第2実施形態に係る磁気浮上装置を示す。図6において、磁気浮上装置30は、一对の第1永久磁石20A, 20Bに加えて、一对の第2永久磁石40A, 40Bを有する。図6においても、鉛直方向をZ方向とし、水平面内で直交する方向をX方向及びY方向とし、一对の第1永久磁石20A, 20Bは、図1と同様にX-Z断面に稜線24, 24を有する。

[0044] 図6では、空間Kを挟んでX方向で対向して配置された一对の第2永久磁石40A, 40Bをさらに有する。一对の第2永久磁石40A, 40Bの各々は、着磁方向をX方向で同じ向きとしている。つまり、第2永久磁石40Aは左端がS極で右端がN極であり、第2永久磁石40Bも同様に左端がS極で右端がN極である。

[0045] 第1実施形態では、Z方向でのつり合いは実現されるが、完全に非接触で磁気浮上を実現させるには、X-Y面内でも力学的平衡である必要がある。そのために、一对の第1永久磁石20A, 20Bに、一对の第2永久磁石40A, 40Bを追加している。

[0046] (2-2) 磁場強度分布

図7(A)は、X-Z平面の断面図での、図6のA部の磁場強度分布を示す。図7(A)でも、図3と同様に、稜線24, 24間を含む空間Kで非常に磁場が強い領域が形成されるので、対象物Tが磁気浮上する。また、一对の第2永久磁石40A, 40Bの作る磁力線は、一对の第1永久磁石20A, 20Bが作る磁力線とは逆向きであり、磁力線同士が打ち消しあって、非常に磁場が強い領域のすぐ上の領域に磁場が弱い部分が形成される。図7(B)は、X-Z平面の断面図での磁場強度分布を示す。ここで、 $Y=0$ の位

置は、一对の第2磁石40A、40BのY方向の幅の中心位置である。Y=0の位置付近に磁場が弱い部分が形成される。反磁性体は、磁場が強いところから弱いところへ向かって力を受ける（磁石から反発力を受ける）性質があるので、対象物Tは磁場が弱いところに落ち着き、X-Y面内でも力学的平衡となる。それにより、完全な磁気浮上が実現される。

[0047] 図6に示す磁気浮上装置30で、水の磁気浮上実験を行った結果を図8に示す。実験では、水に超音波を印加して霧を発生させ、その霧が集まって大きくなっていく様子を撮影したものが図8である。図8から分かるように、直径0.5mmほどの水滴を容易に浮かすことができる。

[0048] (2-3) 稜線を規定する半径の影響

$B \times (\partial B / \partial Z)$ の分布は、一对の第1永久磁石20A、20Bの稜線24を規定する図1に示すフィレット半径rに依存する。図9に示すように、フィレット半径が0.6mm以下だと、 $B \times (\partial B / \partial Z)$ の絶対値が $1500 \text{ T}^2 / \text{m}$ よりも大きくなり、水の磁気浮上が可能である。しかし、フィレット半径が0.8mmでは、 $B \times (\partial B / \partial Z)$ の絶対値が $1100 \text{ T}^2 / \text{m}$ であるので、水の磁気浮上は不可能である。したがって、フィレット半径が小さいほど強い磁気力を得られるが、フィレット半径が小さいと対象物Tが浮く領域が狭くなるので、目的に合わせて磁石を選択すればよい。

[0049] (3) 第3実施形態

(3-1) 磁気浮上装置

図10(A)~図10(C)は、本発明の第3実施形態に係る磁気浮上装置を示す。図10(A)~図10(C)において、磁気浮上装置50は、一对の第1永久磁石60A、60Bを有する。よって、磁気浮上装置50は、第2実施形態で必要としていた一对の第2永久磁石40A、40Bを有していない。一对の第1永久磁石60A、60Bは、第1実施形態の一对の第1永久磁石20A、20Bと共通の構造を有する。第1実施形態の側面22、頂面21、稜線24及び境界面25と共通する構造として、一对の第1永久磁石60A、60Bの各々は側面61、頂面62、稜線64及び境界面65

を有する（図11（A）も参照）。

[0050] 一对の第1永久磁石60A, 60Bの各々は、図10（C）に示すように、Y-Z断面で、頂面62が下向き凸の円弧状に形成されている。底面66も頂面62と相似形で円弧状に形成しても良い。このような形状の一对の第1永久磁石60A, 60Bもまた、市販されているものを利用できる。一例として磁石60A, 60Bのサイズは、外径が8.7mm、内径が3.0mm、厚みが9.0mmで、円弧の中心角は90°である。ここでは、立体の稜線部のフィレット半径を0.6mmに設定してある

[0051] （3-2）磁場強度分布

図11（A）は磁気浮上装置50のX-Z平面の断面図での磁場強度分布を示し、図12は図11（A）のZ方向での磁場強度分布を示す。第1、第2実施形態と同様に、一对の第1永久磁石60A, 60Bが作る磁場は、X-Z断面で稜線64, 64の上方に位置する空間で磁場強度が非常に強くなっており、その周辺では急激減衰していることがわかる。図11（B）は、X-Z平面の断面図での磁場強度分布を示す。ここで、Y=0の位置は、一对の第1磁石60A, 60BのY方向の幅の中心位置である。図11（B）でも、図7（B）と同様に、Y=0の位置付近に磁場が弱い部分が形成される。対象物Tは磁場が弱いところに落ち着くので、X-Y面内でも力学的平衡となる。それにより、完全な磁気浮上が実現される。

[0052] 図11（A）に示すX-Z平面での磁場強度分布のうち、Z軸方向の磁場強度分布を図12に示し、図12から算出される $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値を図13に示す。図13において、Z=0は境界面25の上端を示し、Z=0の付近で、表1に示す水の磁気浮上に必要な $B \times (\partial B / \partial Z)$ の値（絶対値）を優に超えており、対象物Tとしての水の磁気浮上を実現されることが分かる。また、図13から、対象物Tとしてのビスマスまたはカーボンの磁気浮上も実現されることも分かる。

[0053] （4）第4実施形態

（4-1）測定装置

図14は、本発明の第4実施形態として、第2実施形態または第3実施形態に示す磁気浮上装置30(50)を用いた測定装置を示す。測定装置100は、対象物Tを浮上させる磁気浮上装置30(50)と、磁気浮上装置30(50)により浮上された対象物Tを振動させる外力を付与する外力付与部110と、対象物Tの振動を検出して、対象物Tの振動と相関のある対象物Tの属性を測定する測定部120と、を有する。以下では、測定される対象物Tの属性として、対象物Tである液滴の表面張力、対象物Tである溶液の濃度変化に伴う表面張力、または対象物Tである液体の粘性について説明する。

[0054] 測定部120は、例えば、光源121、ハーフミラー122、検出器123、データロガー装置124、高速フーリエ変換部(FFT)125及び演算部126を有することができる。また、特に対象物Tの形状例えば液滴の半径が未知である場合には、対象物Tを撮影する、好ましくはレンズ付きまたは顕微鏡付きカメラ130を設けることもできる。

[0055] (4-2) 表面張力の測定

対象物Tである液滴が磁気浮上装置30(50)により宙に浮いているときに、外力付与部110が対象物Tに例えば音波を付与すれば、対象物Tは真球と楕円球との間で変形しながら振動する。この時、対象物Tの重心は三次元で力学的平衡状態にある中で、対象物Tは表面張力を復元力として振動する。そのときの振動数 f は、次の式(4)のように表される。

[数4]

$$f = \sqrt{\frac{L(L-1)(L+2)\sigma}{4\pi^2\rho R^3}} \quad \dots (4)$$

式(4)中、 σ は対象物Tである液滴の表面張力、 R は液滴の半径、 ρ は液滴の密度、 L はモード(自然数)を表している。半径0.2mmの球状の水滴が浮いているときに、式(4)に、 $L=2$ 、 $R=0.2\text{mm}$ 、 $\sigma=72.8\text{mN/m}$ 、 $\rho=998\text{kg/m}^3$ (20°C)を代入すれば、振動数 f は、

$f = 1.36 \text{ kHz}$ となる。逆に言えば、液滴の振動数 f を調べれば、対象物 T である液滴の表面張力 σ を算出することができる。

[0056] 液滴の半径 R は、カメラ 130 により撮影された液滴の直径からを求めることができる。光源 121 からハーフミラー 122 を通して LED 光などを液滴に照射し、その反射光をフォトダイオードなどの検出器 123 で検出する。振動成分を有するデータをデジタル処理して記憶するデータロガー装置 124 に取り込み、取り込んだデータを FFT 解析部 125 で高速フーリエ変換することによってピーク周波数 f を求める。演算部 126 は、求められた周波数 f 、モード L 、液滴の密度 ρ 及び半径 R を上述の式 (4) に代入して、表面張力 σ を演算することができる。

[0057] (4-3) 溶液の濃度変化に伴う表面張力の測定

本実施形態では、対象物 T は、純粋な液体だけではなく、例えば界面活性剤を含む水溶液等であっても良い。磁気浮上装置 30 (50) は、非常に小さな水滴を浮かすことができる。浮上された水溶液中の溶媒の成分が蒸発するにつれて、溶液の濃度が上昇する。本実施形態では、それを利用して、一滴の水滴から、界面活性剤の濃度変化に伴う表面張力測定を行うことができる。本実施形態により測定されるサンプルの量は、わずか $1 \mu\text{L}$ にも満たない量で測定可能である。

[0058] 例えば、上述の水滴が、溶媒の水の蒸発によって半径 R が 5 分の 1 になって (それによって界面活性剤の濃度が 125 倍になる)、表面張力の大きさが半分になったとする (一般的にその程度の変化である)。このとき、 $L=2$ のモードの周波数は 10.7 kHz になるはずである。液滴の直径等の最大サイズは、 $0.01 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$ 程度を想定しているが、拡大機能の付いたカメラ 130 や顕微鏡に付属したカメラ 130 を使えば、簡単に液滴のサイズを検出できる。

[0059] 一般に、界面活性剤の表面張力は、濃度が増えるに従って下がる傾向がある。これは、単調な変化ではないので、単純ではなく、図 15 のようになる。界面活性剤の濃度を徐々に上げていったときに、表面張力が下がり始めて

、ある一定の値に落ち着くまでの濃度変化はおよそ2桁である。したがって、液体の半径が1桁変わる間、すなわち濃度が3桁変わる間に表面張力を測定すれば、表面張力の濃度変化は十分に追跡できることになる。

[0060] 従って、表面張力の濃度依存性を測定するには、すべての濃度の溶液を調整して、それぞれについて表面張力を測定しなければならず、非常に面倒である。また、表面張力は、ほんの少し不純物があると、濃度依存性が変化するので、正確なデータを得るためには、再結晶などの精製プロセスを経て得られた純度の高いサンプルを用いて測定することが望ましいが、その際、当然、サンプルの量は減るので、大量の試料を準備して実験しなければならない。その点、本実施形態は、わずか一滴の水滴から界面活性剤の濃度変化に伴う表面張力測定を行うことができるという利点を有する。

[0061] (4-4) 液体の粘性の測定

対象物Tである液滴が磁気浮上装置30(50)により宙に浮いているときに、外力付与部110が対象物Tに外力、好ましくは物理的に非接触な方式での外力例えば音波を付与すれば、対象物Tは図16の通りに振動する。図16中の振動の減衰は、対象物Tである液体の粘性によるもので、時刻 $t=0$ のときの振幅を A とし、減衰時間を τ とすると、減衰する振幅 y は次の式(5)で表される。式(5)中の ω は、 $\omega=2\pi f$ である。

[数5]

$$y = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t) \quad \dots (5)$$

式(5)の時刻 t と振幅 y との関係は、図14に示す測定装置100で求められる。ここで、時刻 t と対応付けて、振動する対象物Tからの反射光が検出器123にて受光される。よつて、FFT解析部125では、時刻 t 毎の振幅 y を求めることができる。

[0062] 一方、式(5)の復元力をバネ定数 k とし、対象物Tである液滴の質量を m 、粘性を η とし、半径を r とすると、次の微分方程式(6)が成立する。

[数6]

$$m(\partial^2 y / \partial t^2) = -ky - 6\pi\eta r(\partial y / \partial t) \quad \dots (6)$$

式(6)から、下記の式(7)が成立する。

[数7]

$$\tau = m / (6\pi\eta r) \quad \dots (7)$$

図14の演算部126は、この式(7)に、既知の質量 m 、カメラ130での測定により求められる半径 r 、上記の通りの演算で求められた τ をそれぞれ代入することで、粘性 η を求めることができる。なお、式(7)から、粘性 η が大きいほど減衰時間 τ が短くなることが分かる。

[0063] (5) 第5実施形態

(5-1) 測定装置

図17は、本発明の第5実施形態として、第2実施形態または第3実施形態に示す磁気浮上装置30(50)を用いた測定装置を示す。測定装置200は、磁気浮上装置30(50)と、対象物Tを浮上させている磁気浮上装置30(50)を移動可能に支持する支持部210と、外力により移動する磁気浮上装置30(50)に追従する対象物Tの動きを検出して、外力を測定する測定部220と、を有する。

[0064] 支持部210は、基台211と、昇降盤212とを含む。基台211は、鉛直方向Zで伸縮する弾性体例えばバネ213を介して昇降盤212を支持する。昇降盤212は、図18に示すように平面視で枠部に形成され、枠部の内側に弾性体例えばバネ214、215を介して磁気浮上装置30(50)を支持する。バネ214はX方向に伸縮し、バネ215はY方向に伸縮する。よって、基台211に外力が作用すると、磁気浮上装置30(50)は三次元X、Y、Z座標で変位する。磁気浮上装置30(50)により浮上した対象物Tは、磁気浮上装置30(50)の変位に追従して変位する。

[0065] 図17に示す測定部220は、図14と同様に、光源221、ハーフミラ

— 222、検出器 223 等を含むことができ、検出器 223 より後段は図示を省略している。検出器 223 より後段には、例えば、対象物 T の移動軌跡を記録するデータロガー装置と、対象物 T の移動軌跡から加速度や地震の大きさを演算する演算部とを設けることができる。図 17 に示す測定部 220 は、X 軸測定部を示しているが、同様にして、Y 軸測定部及び Z 軸測定部を設け、直交三軸検出器を有することができる。測定部 220 は、所定時間毎に変位する対象物 T の重心の X, Y, Z 座標位置を特定する。つまり、基台 211 に加速度や地震等の外力が作用した時の対象物 T の位置を追跡する。測定部 220 は、例えば所定時間毎に変位する対象物の移動軌跡から加速度を演算することができる。あるいは、測定部 220 は、三軸 X, Y, Z 方向の加速度から、既知の手法により地震波形を作成したり、震度を算出することができる。測定部 220 は、三軸加速度検出器に代えて、所定時間毎に変位する対象物 T の重心の X, Y, Z 座標位置を記録する例えばビデオカメラ 230 を設けることができる。

[0066] (5-2) 加速度または震度の測定

磁気浮上装置 30 (50) は、対象物 T を浮上させ、かつ、水平面内でも力学的平衡を実現するので、磁気浮上装置 30 (50) に対して浮上する対象物 T の相対位置は一義的に定まる。このことは磁気浮上装置 30 (50) が移動しても変わらない。よって、図 17 に示す基台 211 が地震等の外力によって変位した時、磁気浮上装置 30 (50) により浮上した対象物 T も磁気浮上装置 30 (50) の変位に追従して変位する。従って、対象物 T の移動を追跡して、その移動軌跡が記録されれば、基台 211 に作用する外力の加速度の大きさ、三軸加速度から地震の大きさを測定することができる。

[0067] なお、ゆっくりとした動きのセンシングと速い動きのセンシングとでは、測定装置として応答の異なるものを使う場合がある。一つの解決策は磁場分布を変えることであり、これは単に磁石のサイズや配置を変えればよい。他の解決策として、浮上させる対象物 T の質量やサイズを変えることによっても、測定装置の応答を変化させることができる。

[0068] (6) 第6実施形態

(6-1) 測定装置

図19は、本発明の第6実施形態として、第2実施形態または第3実施形態に示す磁気浮上装置30(50)を用いた測定装置を示す。測定装置300は、対象物Tを浮上させる磁気浮上装置30(50)と、磁気浮上装置30(50)に外力を付与して磁気浮上装置30(50)を移動させる外力付与部310と、磁気浮上装置30(50)の移動に伴う対象物Tの振動を検出して、対象物Tの振動と相関のある、対象物Tの周囲の雰囲気中の媒体の属性を測定する測定部320と、を有する。外力付与部310は、打撃等の接触外力により磁気浮上装置30(50)を振動させるもので良い。

[0069] 図19に示す測定部320は、図14と同様に、光源321、ハーフミラー322、検出器323等を含むことができ、検出器323より後段は図示を省略している。検出器323の後段には、図14と同様に、データローガー装置、FFT解析部及び演算部を設けることができる。また、特に対象物Tの形状例えば液滴の半径が未知である場合には、対象物Tを撮影する、好ましくはレンズ付きまたは顕微鏡付きカメラ330を設けることもできる。

[0070] (6-2) 雰囲気媒体の粘性の測定

本実施形態では、第4実施形態のように対象物Tが外力によって変位する方式、または第5実施形態と同様に磁気浮上装置30(50)が外力付与部310からの外力によって変位する方式のどちらでもよい。例えば、対象物Tを浮上させた状態で、磁気浮上装置30(50)が動いた場合、その動きに追随して、浮上した対象物Tが動く。この時、対象物Tは三次元で力学的平衡状態にある中で、復元力により振動する。

[0071] この対象物Tの振動の減衰は、対象物Tの周囲の雰囲気中の媒体の属性例えば粘性に依存する。よって、振動の減衰に基づいて対象物の周囲の雰囲気中の媒体の属性のうち、対象物の振動と相関のある属性を測定することができる。媒体の振動に関しても、上述した式(5)(6)(7)が適用できる。ここで、対象物Tが変形するが重心位置は変わらないような振動では、対

象物 T 内部の粘性が振動に影響を及ぼすので、対象物 T の粘性を知ることができた。一方、対象物 T の形を変えずに、対象物 T の重心位置を変えるような振動では、対象物 T の周囲の媒体が振動に影響を及ぼすので、周囲媒体の粘性を知ることができる。

[0072] 本測定装置を用いれば、非常に少量のガスで測定装置全体を満たすだけで、そのガスの粘性を測定することができる。なお、周囲媒体は、液体であっても良い。

符号の説明

[0073] 10…磁気浮上装置、20A, 20B…一对の第1永久磁石、21…側面、22…頂面、23…角部、24…稜線、25…境界面、30…磁気浮上装置、40A, 40B…一对の第2永久磁石、50…磁気浮上装置、60A, 60B…一对の第1永久磁石、100…測定装置、110…外力付与部、120…測定部、200…測定装置、210…支持部、220…測定部、300…測定装置、310…外力付与部、320…測定部、K…空間、T…対象物

請求の範囲

- [請求項1] 一対の第1永久磁石を有し、
前記一対の第1永久磁石の各々は、側面と、頂面と、垂直断面で前記側面と前記頂面とを結ぶ角部を面取りする稜線と、を有し、
前記一対の第1永久磁石は、鉛直方向で互いに逆向きに着磁され、かつ、前記側面同士を対面または接触させて並設されて、前記垂直断面で前記一対の第1永久磁石の各々の前記稜線よりも上方に位置する空間に、雰囲気中の媒体に対して反磁性である対象物を磁気浮上させる磁気浮上装置。
- [請求項2] 請求項1において、
前記一対の第1永久磁石の各々の前記稜線は、前記側面と前記頂面とを結ぶ前記角部を所定の半径に従って面取りする磁気浮上装置。
- [請求項3] 請求項2において、
磁束密度 B (T) と、前記磁束密度 B の前記鉛直方向の勾配である $\partial B / \partial Z$ (T/m) との積である $B \times (\partial B / \partial Z)$ が、前記半径に依存して変化し、前記対象物の種別に応じて前記半径が設定されている磁気浮上装置。
- [請求項4] 請求項1乃至3のいずれか一項において、
前記鉛直方向を Z 方向とし、水平面内で直交する方向を X 方向及び Y 方向とし、前記一対の第1永久磁石は、 $X-Z$ 断面に前記稜線を有し、
前記一対の第1永久磁石の各々は、 $Y-Z$ 断面で、前記頂面が下向き凸の円弧状に形成されている磁気浮上装置。
- [請求項5] 請求項1乃至3のいずれか一項において、
前記鉛直方向を Z 方向とし、水平面内で直交する方向を X 方向及び Y 方向とし、前記一対の第1永久磁石は、 $X-Z$ 断面に前記稜線を有し、
前記空間を挟んで前記 X 方向で対向して配置された一対の第2永久

磁石をさらに有し、

前記一对の第2永久磁石の各々は、着磁方向が前記X方向で同じ向きである磁気浮上装置。

[請求項6]

請求項4または5において、

前記対象物は、最大サイズが0.01mm～1mmである磁気浮上装置。

[請求項7]

請求項6に記載の磁気浮上装置と、

前記磁気浮上装置により浮上された前記対象物を振動させる外力を付与する外力付与部と、

前記対象物の振動を検出して、前記対象物の振動と相関のある前記対象物の属性を測定する測定部と、
を有する測定装置。

[請求項8]

請求項6に記載の磁気浮上装置と、

前記対象物を浮上させている前記磁気浮上装置を移動可能に支持する支持部と、

外力により移動する前記磁気浮上装置に追従する前記対象物の動きを検出して、前記外力を測定する測定部と、
を有する測定装置。

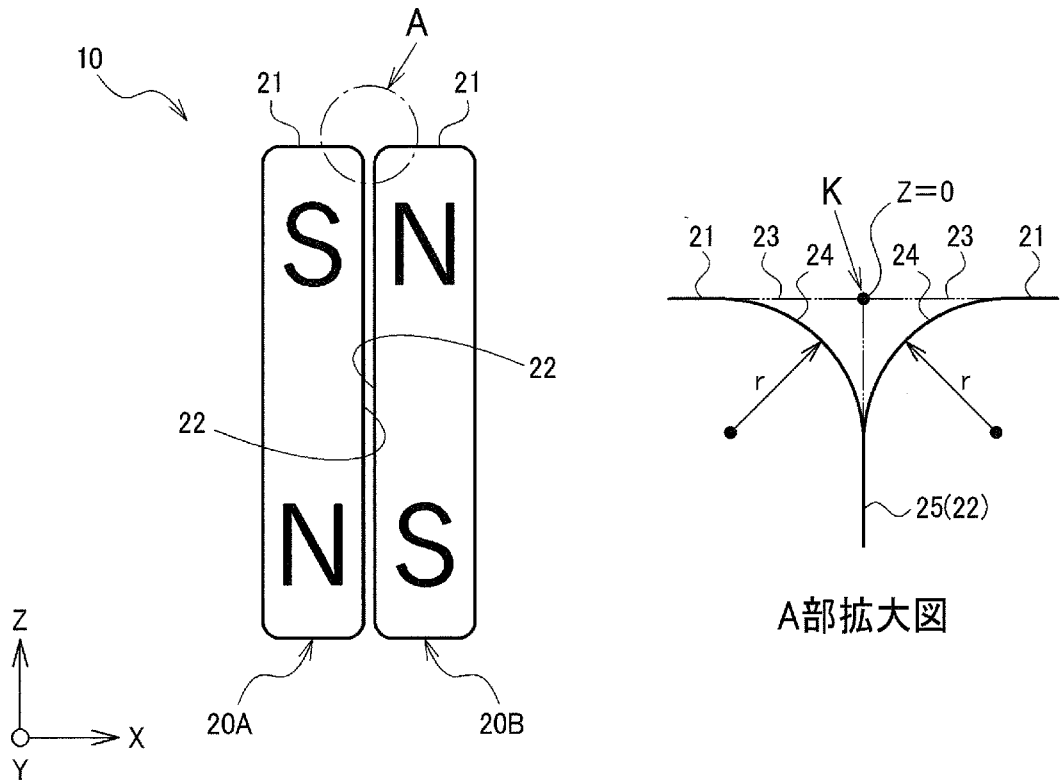
[請求項9]

請求項6に記載の磁気浮上装置と、

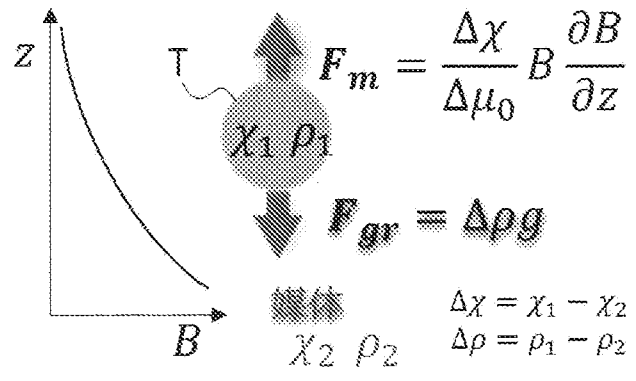
前記対象物を浮上させている前記磁気浮上装置を移動させる外力を付与する外力付与部と、

前記外力により移動する前記磁気浮上装置に追従する前記対象物の振動を検出して、前記対象物の振動と相関のある、前記対象物の周囲の雰囲気中の前記媒体の属性を測定する測定部と、
を有する測定装置。

[図1]



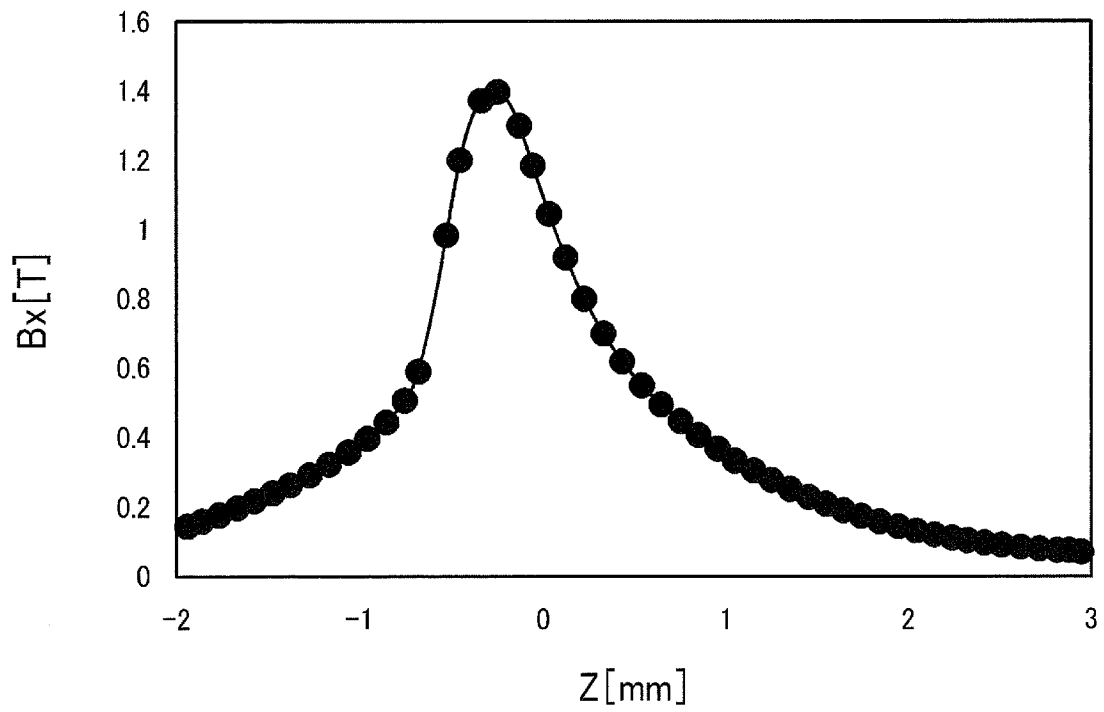
[図2]



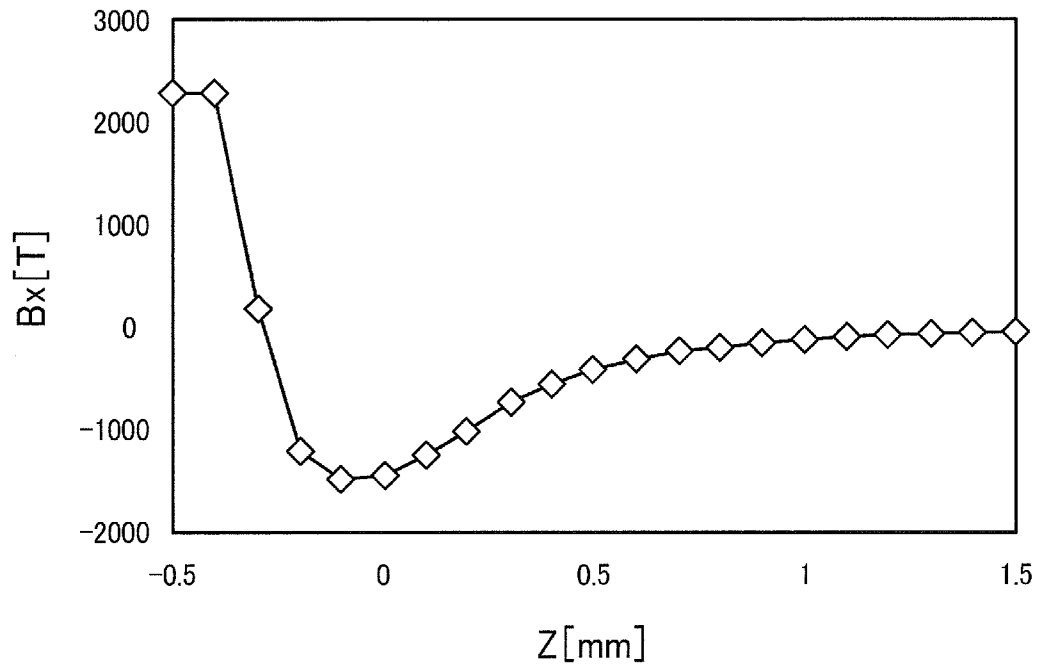
[図3]



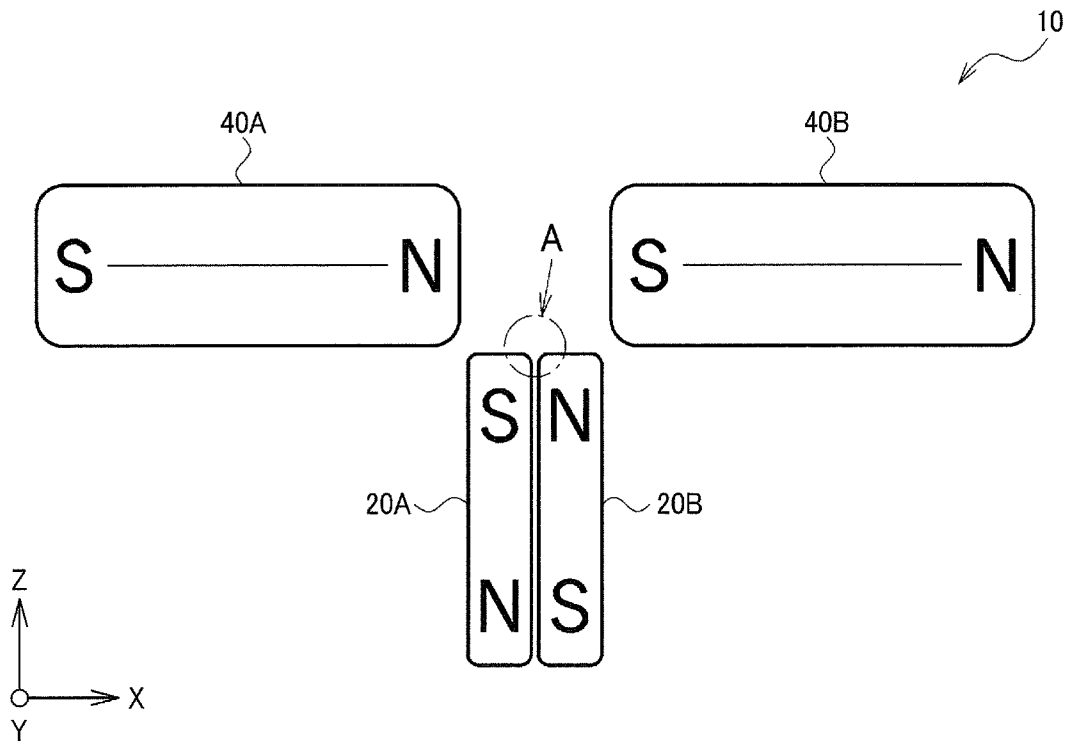
[図4]



[図5]

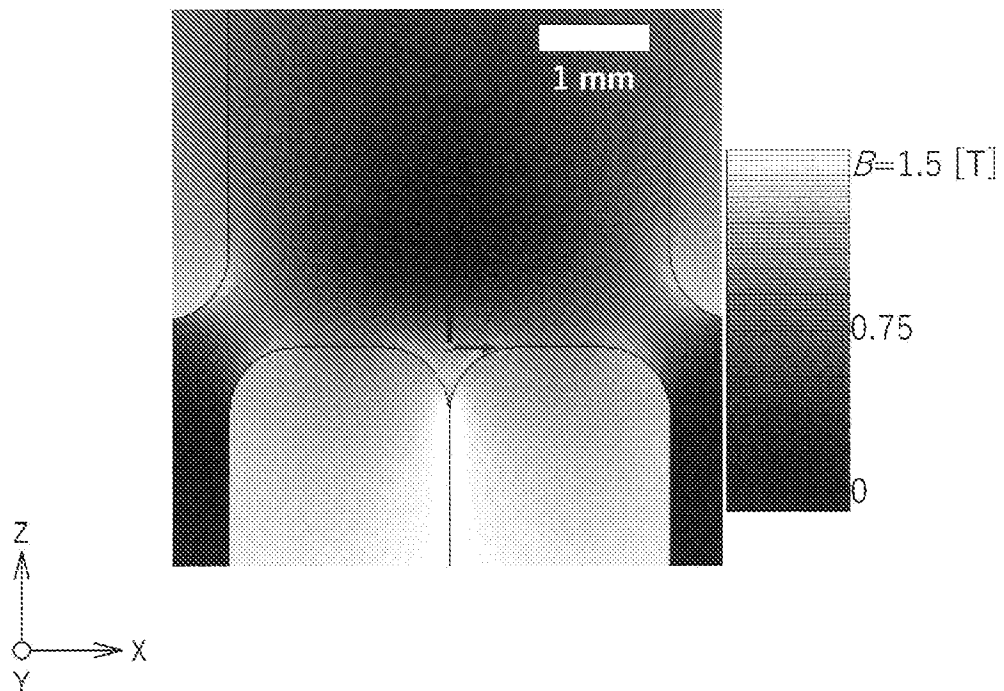


[図6]

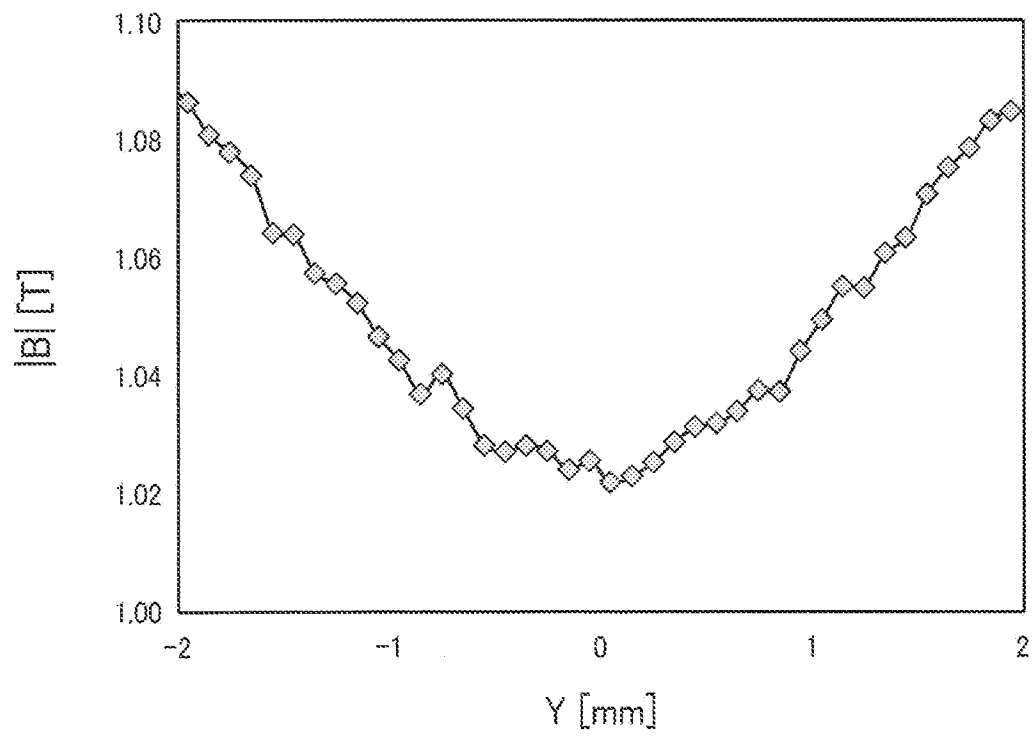


[図7]

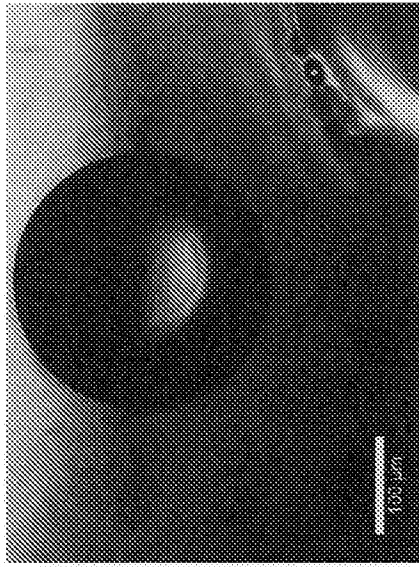
(A)



(B)



[8]



40 min



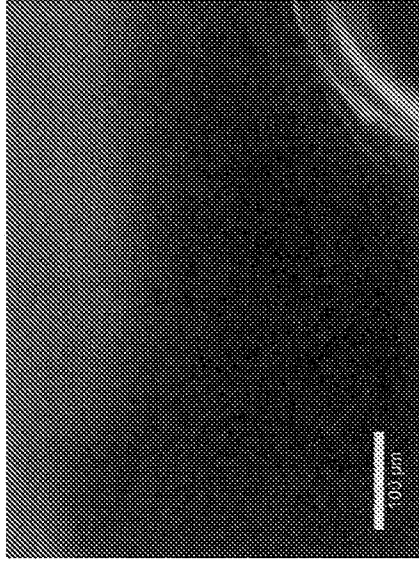
120 min



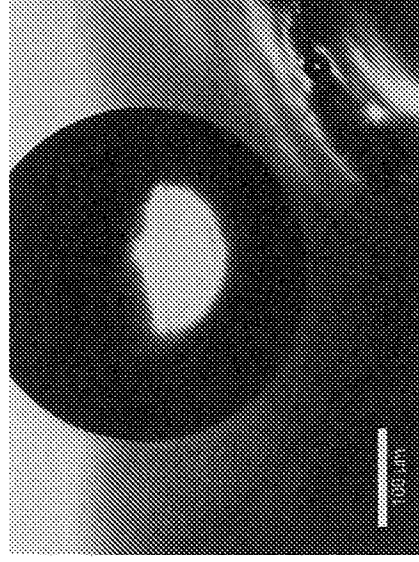
20 min



100 min

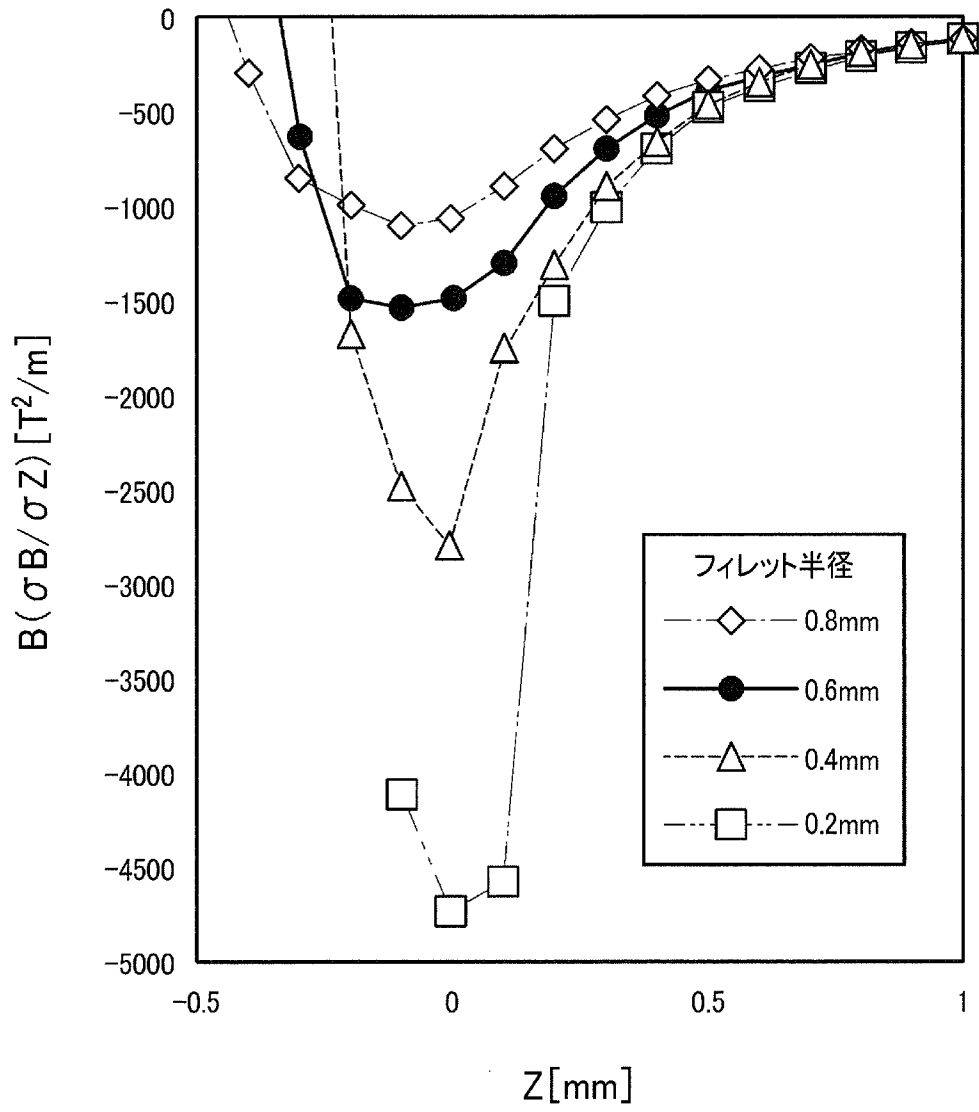


0 min



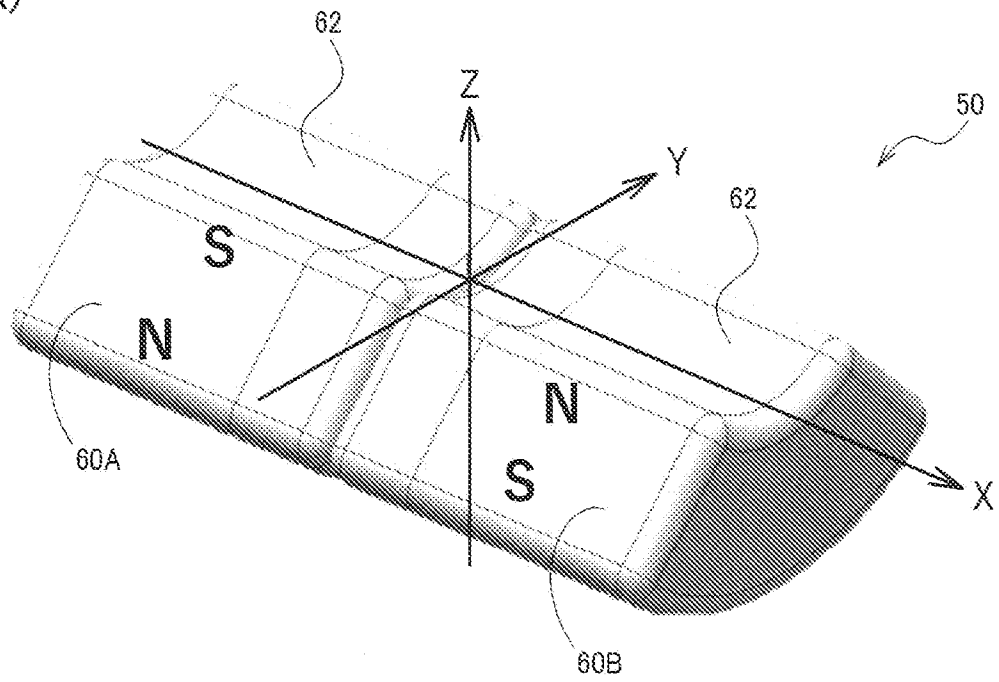
80 min

[図9]

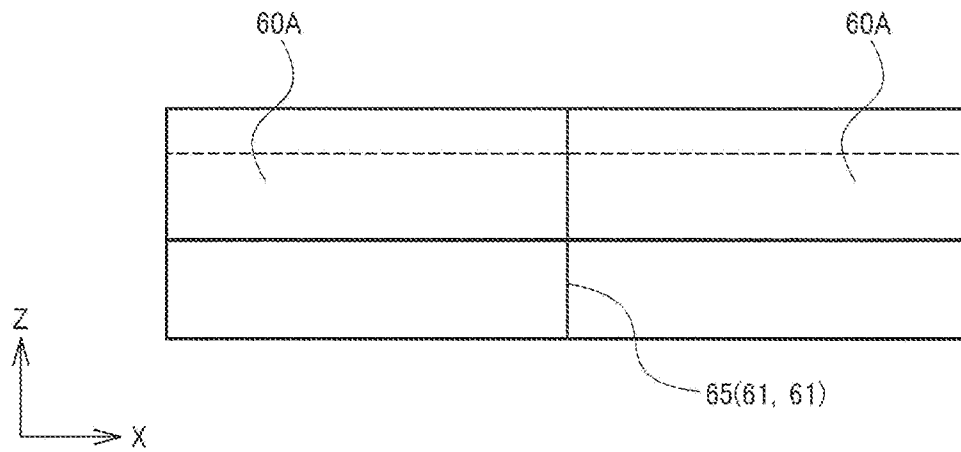


[図10]

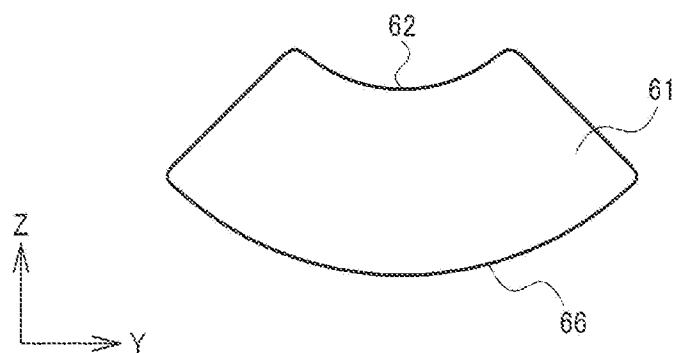
(A)



(B)

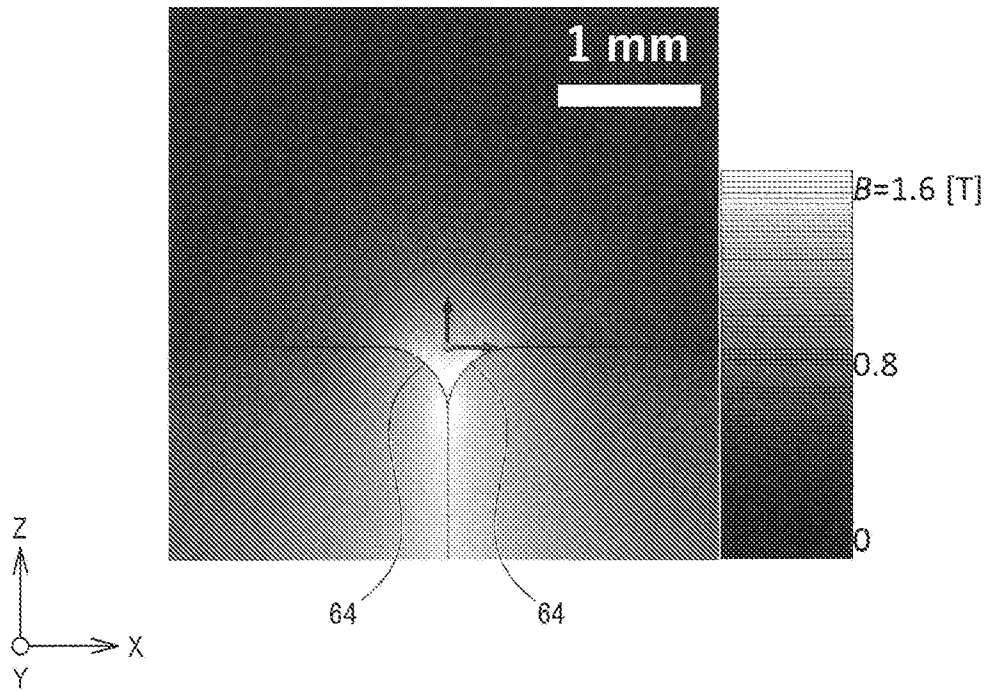


(C)

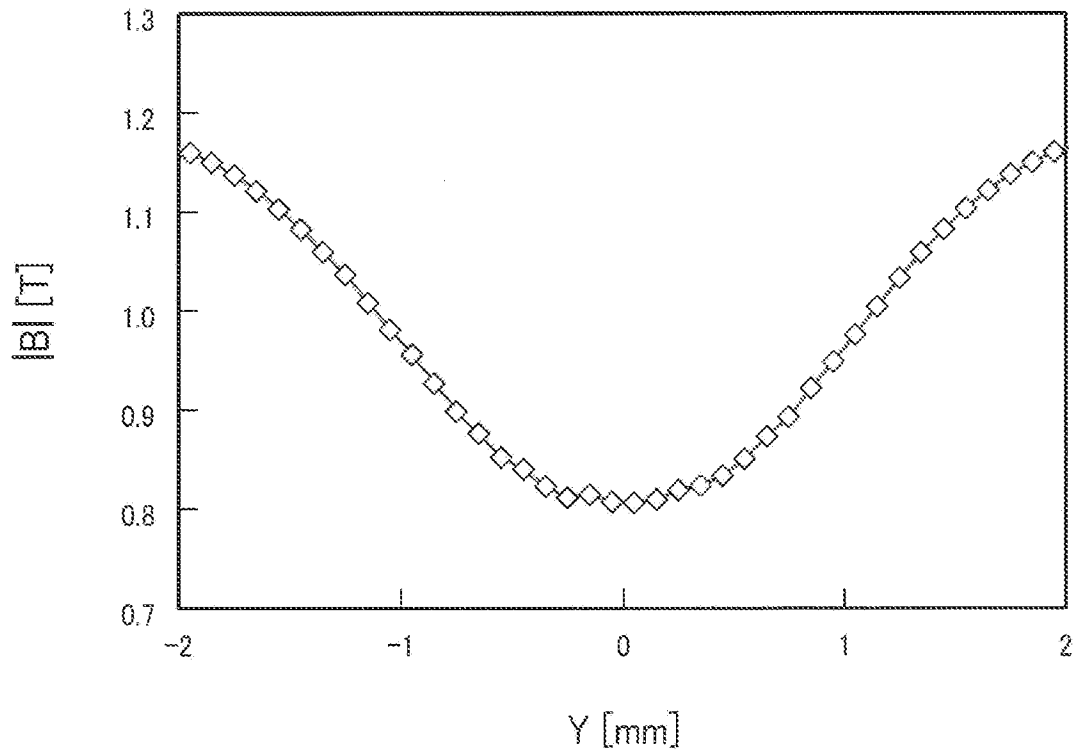


[図11]

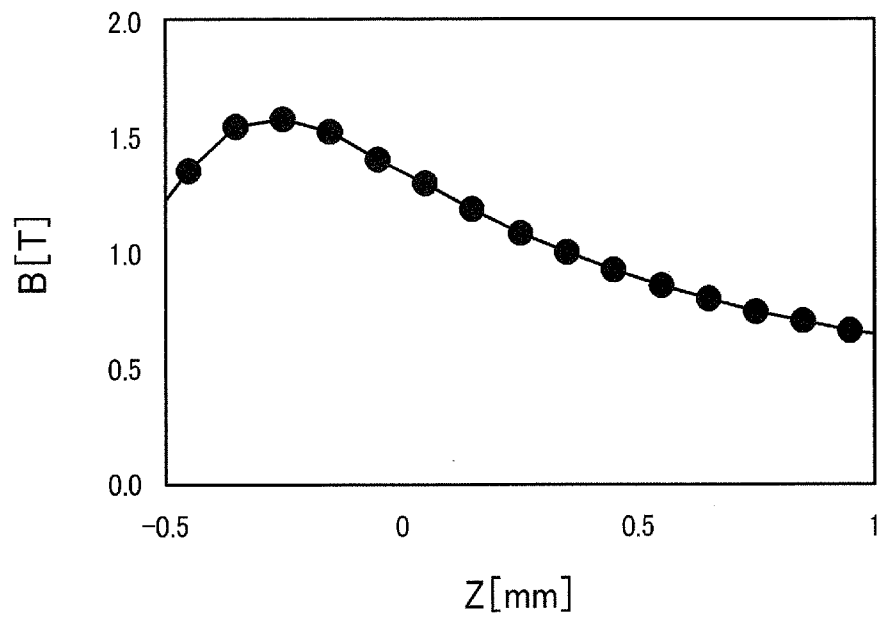
(A)



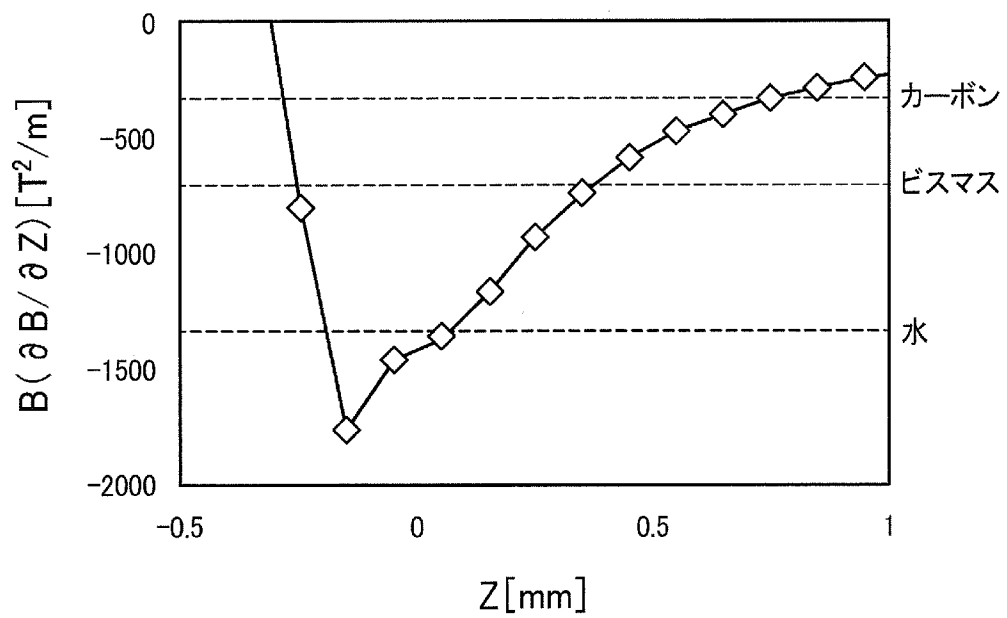
(B)



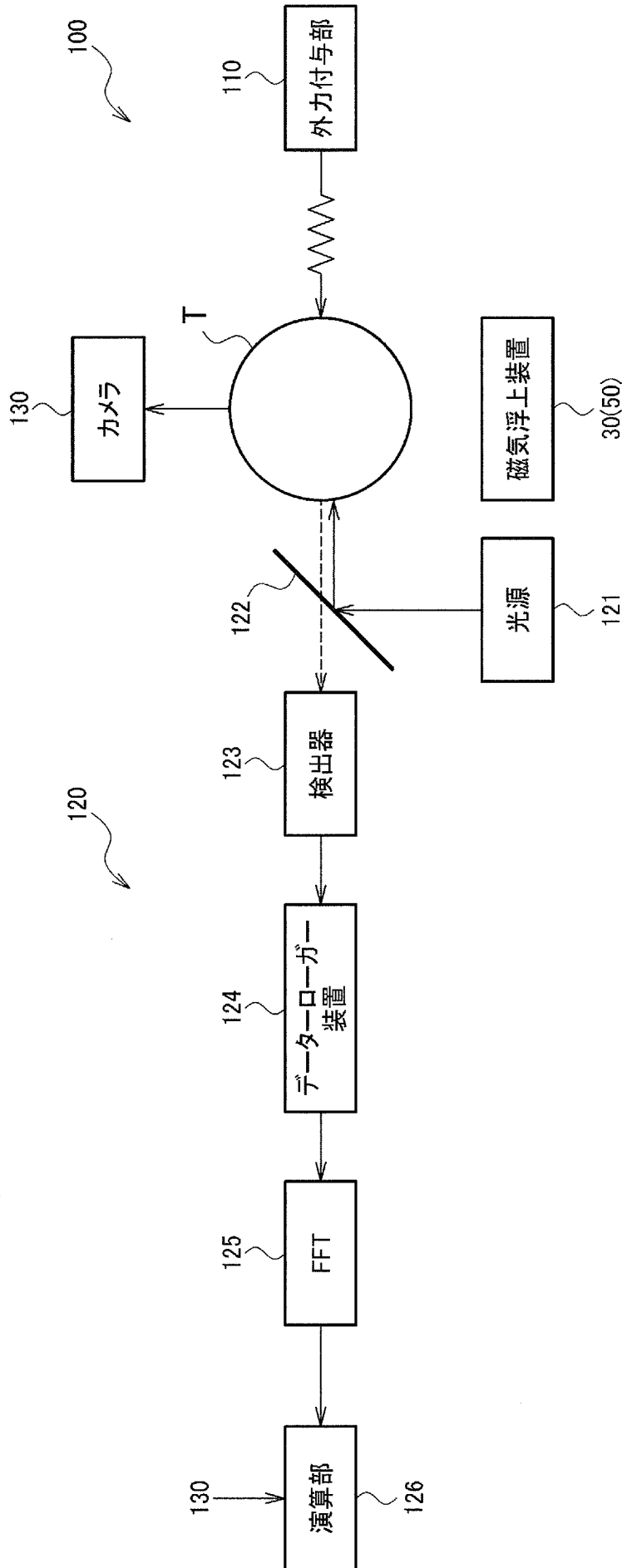
[図12]



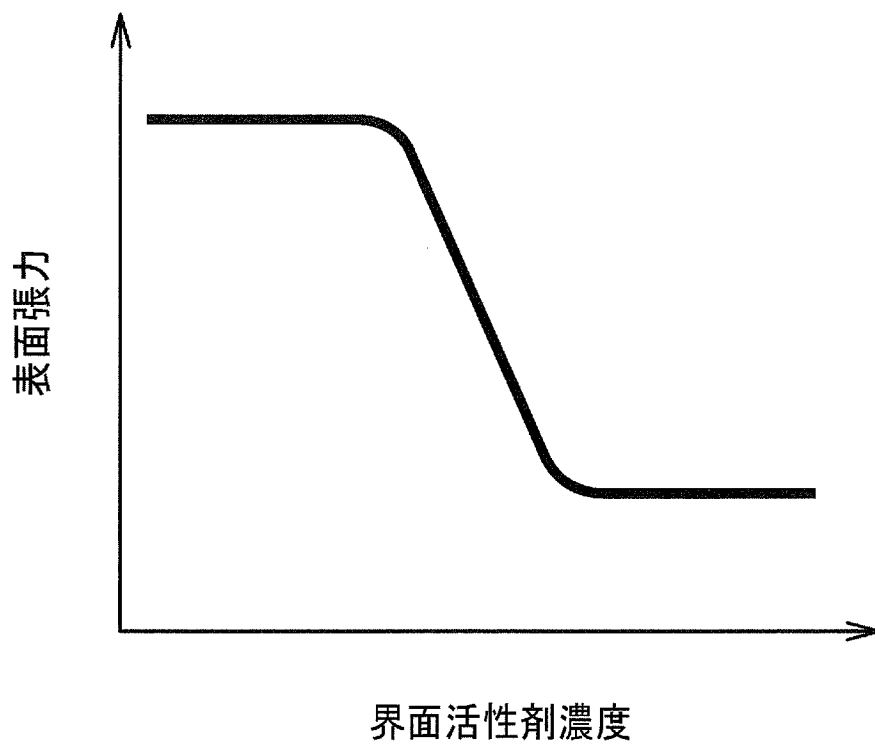
[図13]



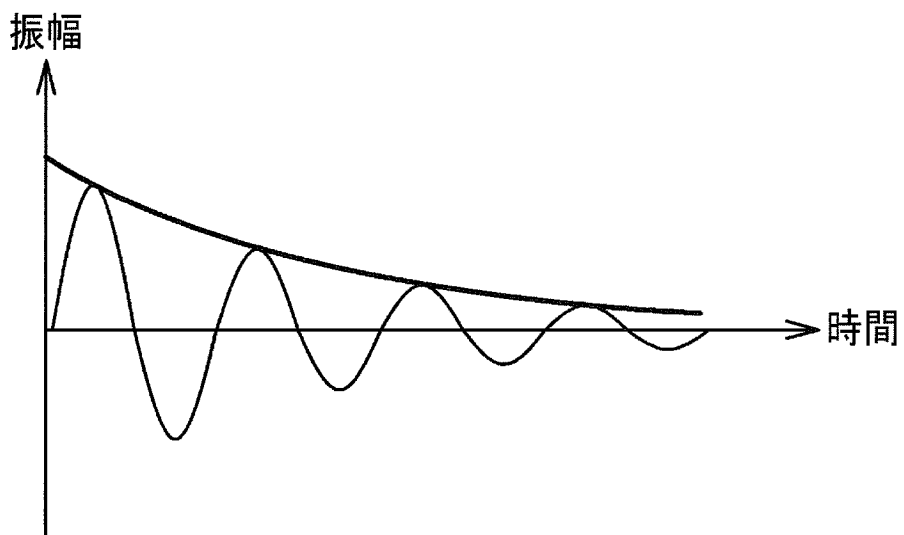
[図14]



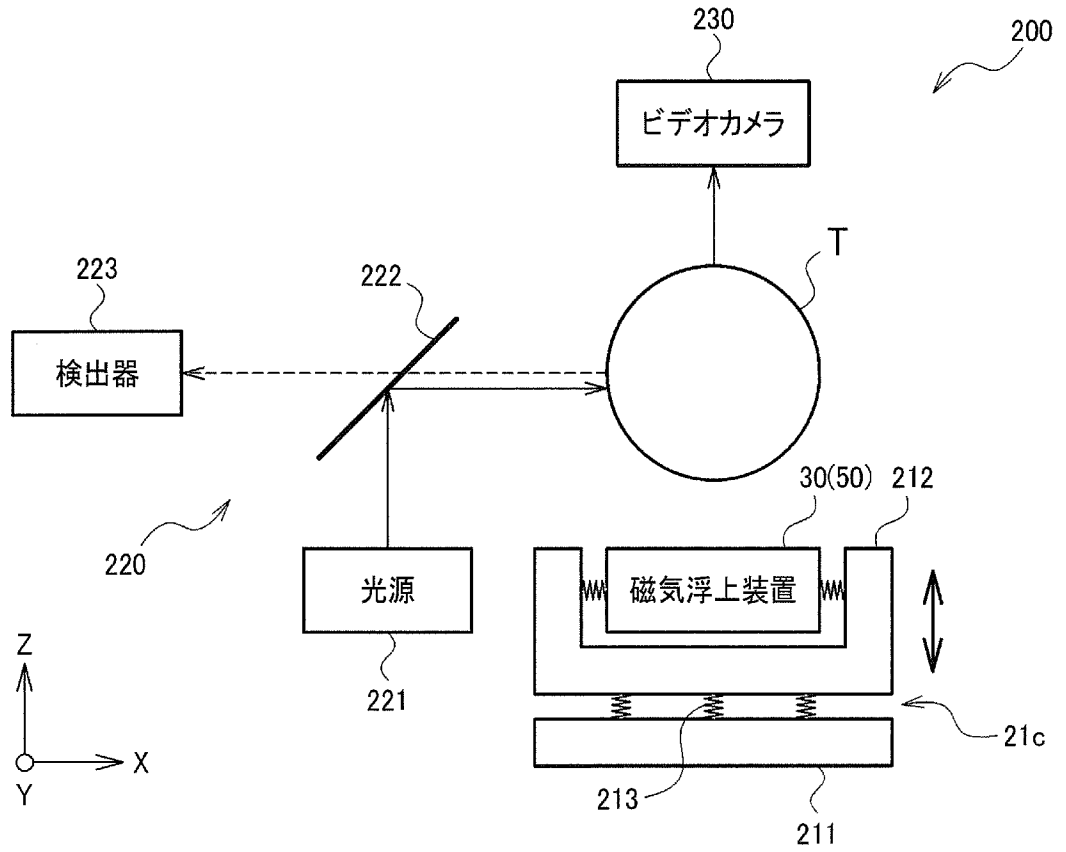
[圖15]



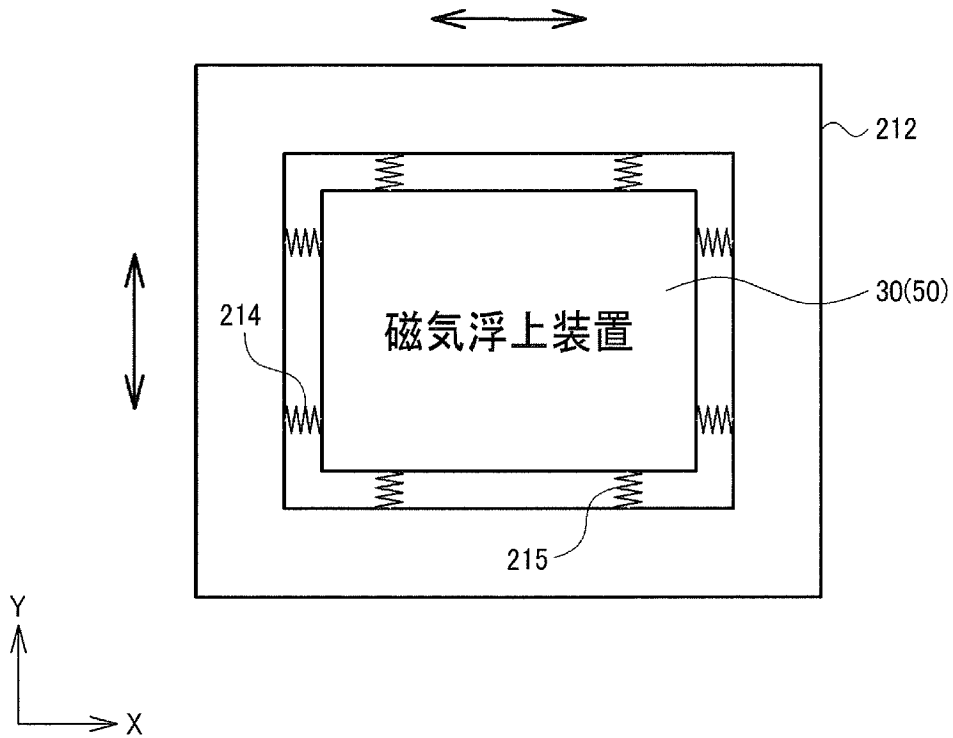
[圖16]



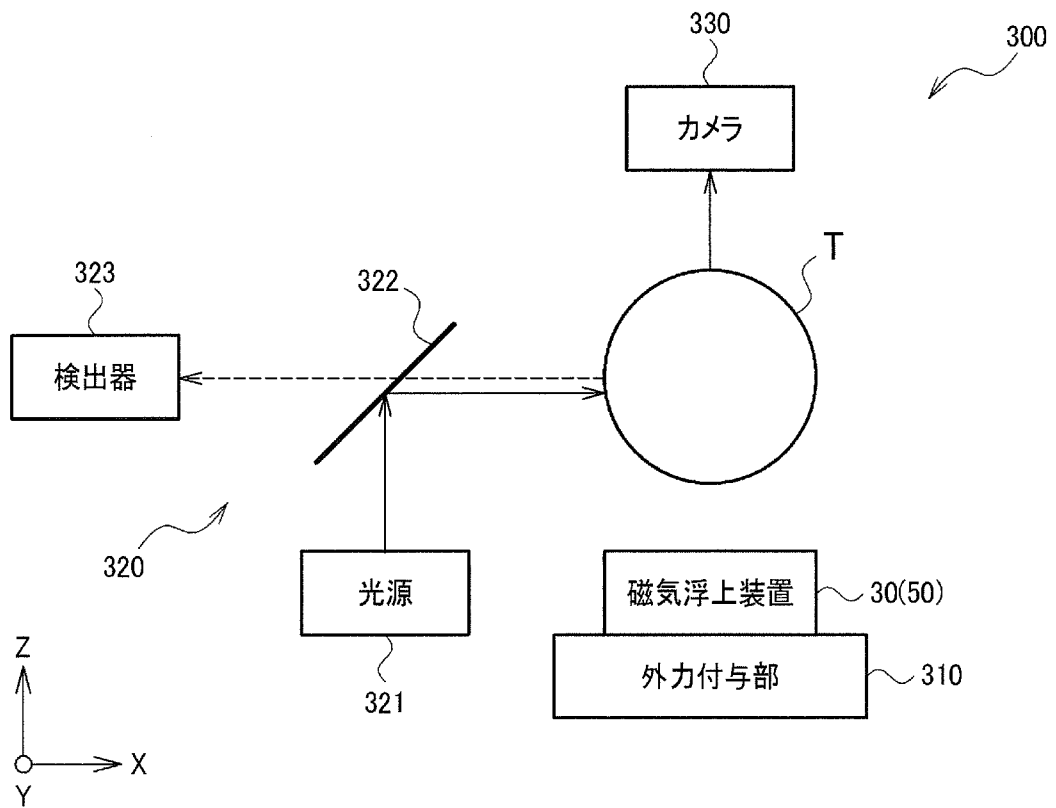
[図17]



[図18]



[図19]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/032159

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H02N 15/00 (2006.01) i
FI: H02N15/00

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)
H02N15/00

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	1971-2020
Registered utility model specifications of Japan	1996-2020
Published registered utility model applications of Japan	1994-2020

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.
Y A	JP 2012-65555 A (TOKYO UNIVERSITY OF AGRICULTURE AND TECHNOLOGY) 05 April 2012 (2012-04-05) paragraphs [0016]-[0077], fig. 1-3	1-3 4-9
Y A	JP 2017-51138 A (SHINSHU UNIVERSITY) 16 March 2017 (2017-03-16) paragraphs [0008]-[0041], fig. 1-3	1-3 4-9
Y	KR 10-2013-0125118 A (ESE CO., LTD.) 18 November 2013 (2013-11-18) abstract, paragraphs [0001]-[0031], fig. 1-11	1-3
Y	JP 2006-304470 A (YASKAWA ELECTRIC CORPORATION) 02 November 2006 (2006-11-02) paragraphs [0018]-[0024], fig. 1-3	1-3
A	JP 2002-234go1 A (JAPAN SOCIETY FOR THE PROMOTION OF SCIENCE) 23 August 2002 (2002-08-23) paragraphs [0001]-[0008], fig. 3, 5	1-9

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"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
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"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
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"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
"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)	"&" document member of the same patent family
"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	

Date of the actual completion of the international search 23 October 2020 (23.10.2020)	Date of mailing of the international search report 10 November 2020 (10.11.2020)
---	---

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.
--	---

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/032159

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	SHO, Noriko, et al., "ON-CHIP FORMATION AND FUSION OF SPHEROIDS BY LABEL-FREE MAGNETIC CELL MANIPULATION", 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, October 2013, pp. 754-756, fig. 1-4	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2020/032159

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 2012-65555 A	05 Apr. 2012	(Family: none)	
JP 2017-51138 A	16 Mar. 2017	(Family: none)	
KR 10-2013-0125118 A	18 Nov. 2013	(Family: none)	
JP 2006-304470 A	02 Nov. 2006	(Family: none)	
JP 2002-234901 A	23 Aug. 2002	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H02N 15/00(2006.01)i FI: H02N15/00		
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）） H02N15/00 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 1971-2020年 日本国実用新案登録公報 1996-2020年 日本国登録実用新案公報 1994-2020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）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2012-65555 A（国立大学法人東京農工大学）05.04.2012（2012-04-05） 段落0016-0077, 図1-3	1-3 4-9
Y A	JP 2017-51138 A（国立大学法人信州大学）16.03.2017（2017-03-16） 段落0008-0041, 図1-3	1-3 4-9
Y	KR 10-2013-0125118 A（BSE CO., LTD.）18.11.2013（2013-11-18） 要約, 段落0001-0031, 図1-11	1-3
Y	JP 2006-304470 A（株式会社安川電機）02.11.2006（2006-11-02） 段落0018-0024, 図1-3	1-3
A	JP 2002-234901 A（日本学術振興会）23.08.2002（2002-08-23） 段落0001-0008, 図3,5	1-9
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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 “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 23.10.2020	国際調査報告の発送日 10.11.2020	
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） 小林 紀和 3V 4240 電話番号 03-3581-1101 内線 3357	

国際調査報告
特許ファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/032159

引用文献	公表日	特許ファミリー文献	公表日
JP 2012-65555 A	05.04.2012	(ファミリーなし)	
JP 2017-51138 A	16.03.2017	(ファミリーなし)	
KR 10-2013-0125118 A	18.11.2013	(ファミリーなし)	
JP 2006-304470 A	02.11.2006	(ファミリーなし)	
JP 2002-234901 A	23.08.2002	(ファミリーなし)	