

(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
2020年7月30日(30.07.2020)



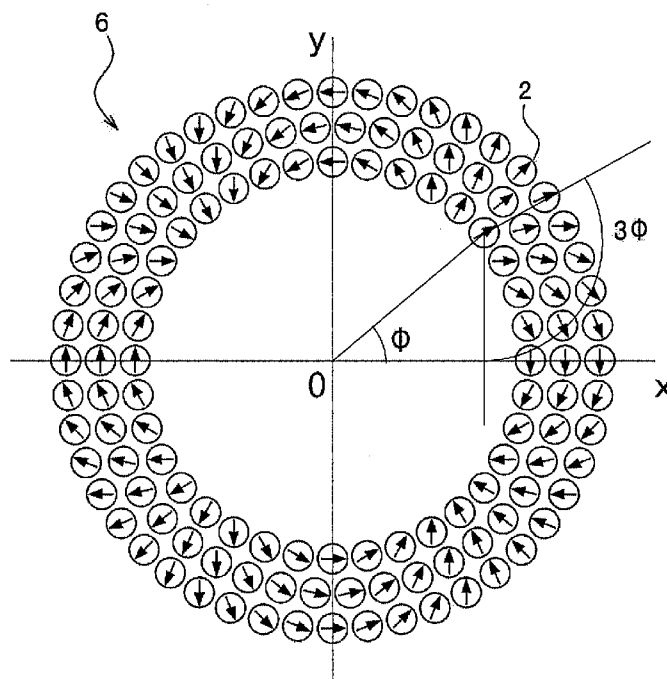
(10) 国際公開番号

WO 2020/153389 A1

- (51) 国際特許分類:
H05H 7/04 (2006.01) *H01F 7/02* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2020/002054
- (22) 国際出願日: 2020年1月22日(22.01.2020)
- (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 2019-009694 2019年1月23日(23.01.2019) JP
- (71) 出願人: 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: 和久田 毅 (WAKUDA Tsuyoshi);
〒1008280 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP). 千葉 知雄(CHIBA Tomoo); 〒1008280 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP). 堀越 篤(HORIKOSHI Atsushi); 〒1008280 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内 Tokyo (JP). 森 義治(MORI Yoshiharu); 〒5900494 大阪府泉南郡熊取町朝代西二丁目 京都大学複合原子力科学研究所内 Osaka (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人磯野国際特許商標事務所(ISONO INTERNATIONAL PATENT OFFICE, P.C.); 〒1050001 東京都港区虎ノ

(54) Title: PERMANENT MAGNET DEVICE AND MAGNETIC FIELD GENERATING DEVICE

(54) 発明の名称: 永久磁石装置、及び磁場発生装置



(57) Abstract: A permanent magnet device (6) is characterized in that a plurality of permanent magnet pieces (2) having the same shape are arranged so as to surround a columnar magnetic field evaluation space (1). The magnetization direction of the permanent magnet pieces (2) has a circumferential component of an annular array of the permanent magnet pieces (2). The magnetization direction of the permanent magnet pieces (2) is a direction obtained by correcting the angle of (n+2) times an angle ϕ formed by a reference line (x-axis) connecting one permanent magnet piece (2) as a reference



WO 2020/153389 A1

門一丁目1番18号 ヒューリック
虎ノ門ビル 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, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

and the central axis O of the column, and a line segment connecting another permanent magnet piece and the column central axis, wherein a correction angle is set to an angle for correcting a magnetic field distribution due to variations in magnetization of the plurality of permanent magnet pieces.

(57) 要約: 同一形状の複数の永久磁石片(2)が円柱状の磁場評価空間(1)を取り囲むように配置されたことを特徴とする永久磁石装置(6)であって、永久磁石片(2)の磁化方向は、永久磁石片(2)の環状配列の周方向成分を有している。永久磁石片(2)の磁化方向は、基準となる一の永久磁石片(2)と円柱中心軸Oとを結ぶ基準線(x軸)と他の永久磁石片、及び円柱中心軸を結ぶ線分との成す角 ϕ の $(n+2)$ 倍の角度を修正した方向であり、修正角は、複数の永久磁石片の磁化のばらつきによる磁場分布を修正する角度に設定されている。

明 細 書

発明の名称：永久磁石装置、及び磁場発生装置

技術分野

[0001] 本発明は、永久磁石装置、及び磁場発生装置に関し、例えば、ビーム輸送を対象とした高精度の磁場を発生させる永久磁石装置、及び磁場発生装置に関する。

背景技術

[0002] 高エネルギー物理実験用の加速器、X線光源、医療用粒子線治療装置などでビーム(加速された荷電粒子)が利用されている。発生源で叩き出された荷電粒子は、線形加速器、円形加速器などで所定エネルギーまで加速される。その加速されたビームが実験や治療で利用されている。ビームの利用には、エネルギーが散逸しないようにビームを収斂させて輸送することが必要であり、そのためにさまざまな磁場(分布)が使用されている。

[0003] このようなビームを利用する装置には、さまざまな磁石が使われており、例えば、ビームを曲げるプリズムの役割をする偏向磁石(二極磁石)、ビームを収束する役割を行う四極磁石、ビームの色収差を補正する六極磁石などが使用されている。これらの磁石を正しく機能させるためには、所定の磁場空間分布を高精度に形成することが必須であり、またその形成された磁場分布が時間的に安定であることが必要である。磁場分布の精度や磁場強度の制御性の観点から、これらの磁石は電磁石が採用されている(特許文献1参照)。

[0004] 磁場強度が強いほど、ビームに対する作用力は大きいため、装置全体としてのサイズを小さく抑えることができる。電磁石としては特に強い磁場強度や強い空間磁場勾配が必要となる用途では、超電導磁石が利用されるが、それ以外では鉄心を有する常電導の電磁石(銅コイル)が使われている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開2017-167012号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、超電導磁石は、直流電気抵抗がゼロのため損失は発生しないものの、超電導状態に維持しておくための運用コストがかかり、クエンチリスクもある。一方、常電導の電磁石では、超電導磁石のような運転上のデメリットはないが、逆に通電によるロス(ジュール損)が大きな課題となる。ビーム輸送用の磁石として、近年省エネの観点から永久磁石の利用が検討されている。

[0007] 本発明は、前記の課題を解決するための発明であって、永久磁石片のみで所定の磁場分布を形成することができる永久磁石装置及び磁場発生装置を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 前記目的を達成するために、本発明の永久磁石装置は、同一形状の複数の永久磁石片(2)が円柱状の磁場評価空間(1)を取り囲む様に配置されたことを特徴とする永久磁石装置(6)であって、前記永久磁石片の磁化方向は、前記永久磁石片の環状配列の周方向成分を有していることを特徴とする。なお、括弧内の符号や文字は、実施形態において付した符号等であって、本発明を限定するものではない。

発明の効果

[0009] 本発明によれば、磁化方向は永久磁石片の環状配列の周方向成分を有しているので、永久磁石片のみで所定の磁場分布を形成することができる。また、基準となる位置の永久磁石片と円柱状の空間の中心軸(O)とを結ぶ基準線(x軸)と他の永久磁石片、及び円柱中心軸を結ぶ線分との成す角(ϕ)の($n+2$)倍の角度に対して、永久磁石片の磁極の方向を修正することにより、永久磁石片の着磁のバラツキの磁場分布への影響を低減することができる。また、複数の永久磁石装置を積層し、互い違いに回転方向を変えるこ

とにより、スキュー成分を打ち消すことができ、回転角に応じて、ノーマル成分の磁場強度を可変することができる。

図面の簡単な説明

[0010] [図1]本発明の永久磁石装置の基本構成を示す模式図である。

[図2]永久磁石装置で使用される永久磁石片の磁化の方向を示す模式図である。

[図3]永久磁石装置が発生する磁場を評価する評価点と磁場発生源との位置関係を説明する説明図である。

[図4]ノーマル4極磁場の磁力線の形状を示す図である。

[図5]スキュー4極磁場の磁力線の形状を示す図である。

[図6]ノーマル6極磁場の磁力線の形状を示す図である。

[図7]スキュー6極磁場の磁力線の形状を示す図である。

[図8]4極磁場を形成する場合の永久磁石片の磁化配置を示す模式図である。

[図9]6極磁場を形成する場合の永久磁石片の磁化配置を示す模式図である。

[図10]永久磁石1列構成における永久磁石片の磁化バラツキを考慮した回転角度を計算した表である。

[図11A]永久磁石1列構成での不正磁場抑制を説明する説明図(1)である。

[図11B]永久磁石1列構成での不正磁場抑制を説明する説明図(2)である。

[図11C]永久磁石1列構成での不正磁場抑制を説明する説明図(3)である。

[図12]永久磁石2列構成の1列目における永久磁石片のバラツキを考慮した回転角度を計算した表である。

[図13]永久磁石2列構成の2列目における永久磁石片のバラツキを考慮した回転角度を計算した表である。

[図14A]永久磁石2列配置での不正磁場抑制ができることを示した説明図(1)である。

[図14B]永久磁石2列配置での不正磁場抑制ができることを示した説明図(2)である。

[図14C]永久磁石2列配置での不正磁場抑制ができることを示した説明図(3)

）である。

[図15]本発明の第1実施形態の永久磁石装置を示す斜視図である。

[図16]本発明の第1実施形態の永久磁石装置の磁場分布を補正するための補正方法を説明するためのフローチャートである。

[図17]本発明の第2実施形態である磁場発生装置の断面を示す図である。

[図18]本発明の第2実施形態である磁場発生装置で使用される他の永久磁石装置の磁化方向と装置回転方向（正方向）を示す模式図である。

[図19]本発明の第2実施形態である磁場発生装置で使用される他の永久磁石装置の磁化方向と装置回転方向（逆方向）を示す模式図である。

[図20]本発明の第3実施形態である磁場発生装置の磁石回転機構を説明する斜視図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、図面を参照して、本発明の実施の形態（以下、「本実施形態」と称する）につき詳細に説明する。なお、各図は、本発明を十分に理解できる程度に、概略的に示してあるに過ぎない。また、各図において、共通する構成要素や同様な構成要素については、同一の符号を付し、それらの重複する説明を省略する。

[0012] （基本構成）

図1は、本発明の永久磁石装置の基本構成を示す模式図である。

永久磁石装置としての磁気モジュール6は、同一形状の複数の永久磁石片2が円柱状の磁場評価空間1を取り囲むように配設されたものである。つまり、磁石モジュール6は、同一形状の複数の永久磁石片2が円環状に等間隔に配列されたものである。円柱状の磁場評価空間1の中心軸（円柱中心軸O）は、複数の永久磁石片2が配列された円環の中心軸に一致する。それぞれの永久磁石片2は、後記する所定の磁場分布を形成するように配設されている。なお、円柱状の磁場評価空間1の外周面は、円環状に配列された複数の永久磁石片2の内周面から離間している。

[0013] 永久磁石片2は、回転体（例えば、円柱）であり、その回転軸3が円柱中

心軸Oに平行になるように配設されている。永久磁石片2は、希土類元素を含む原料粉末を加圧成形し焼結、研削により形状を整えた後に着磁が行われたものである。永久磁石片2は、円柱であることがもっとも自然な実装形態であるが、永久磁石を固定するために穴がけられた固定用プレートに圧入、固定に有利なように若干テーパをつけた円錐台形状であっても構わない。

[0014] 磁石モジュール6は、複数層（例えば、2層）に、同心円状に配列されており、永久磁石片2の最密状態が好ましい。つまり、外層の永久磁石片2は、内層の隣接する永久磁石片2、2の中間近傍に配設されている。なお、図1は、2列構成であるが、3列（図8、9）や8列（図15）のように、より多層にしても構わない。

[0015] 図2は、永久磁石装置で使用される永久磁石片の磁化の方向を示す模式図である。

永久磁石片2の着磁方向は、永久磁石片2の回転軸3に対して垂直な面内に有する（横磁化）。そのため、永久磁石片2を回転軸3を中心に回転させることにより、磁場評価空間1（図1）に発生する磁場強度を連続的に変化させることが可能となる。

[0016] 永久磁石片2は、磁場評価空間1の円柱中心軸Oを中心として同心円状に配設される。磁場形成のしやすさから、その同心円状に配置される永久磁石片2の間隔は等間隔であることが好ましい。同心円内に配設される永久磁石片2の個数により、円柱中心軸Oに対して周方向の磁場の変化ピッチが影響を受けるため、永久磁石片2の設置個数は、一つの同心円あたり32個以上とすることが好ましい。

[0017] 永久磁石片2は、なるべく残留磁束密度の高い永久磁石を使いことが好ましく、例えば、ネオジム磁石などが好ましい。一方、高温領域では、減磁により残留磁束密度が低下するおそれがあるから、このような領域ではサマリウムコバルト磁石を使うことが必要になる。両者を組み合わせることにより、長期減磁がなく磁場強度の高い磁石モジュール6（図1）を提供することができる。

[0018] ビーム輸送に用いられる 2 極、4 極、6 極磁場は、磁場評価空間の中心軸に対し同心円状に配置される永久磁石片 2 の磁化の向きを適切に配置することにより形成可能である。永久磁石片 2 の磁化の大きさが一定であれば、数学的に理想的な磁石配置(磁化の配置向き)が決定される。しかし、永久磁石片 2 には、着磁のばらつきがあるために、その理想的配置では不正磁場が発生することになる。そこで、予め、永久磁石の磁化の大きさを計測しておき、磁化方向(永久磁石の向き)の最適化計算を行う。これにより、永久磁石片 6 の磁化の方向を調整しながら、高精度の磁場分布を形成可能な磁石モジュール 6 を製作することができる。

[0019] また、高精度に磁場が形成された磁石モジュール 6 を積層して磁石を構成することにより任意の長さの高精度な磁石を構成することが可能である。また、磁石モジュール 6 を積層して、回転可能に構成することによって、磁場の強度を変化させることも可能である。

例えば、積層する磁石モジュール 6 から不要な磁場成分が発生しないように高精度に磁場を形成しておき、隣接する磁石モジュール 6 の回転方向を互いに逆向きとしその回転量を等しくすることにより、不要磁場成分がビーム輸送に影響を与えることを抑制しながら所望の磁場強度を変化させることが可能である。

[0020] (多極磁場発生のための磁化配置法)

本発明の磁場発生装置は、ビーム輸送のために必要な磁場を形成し、その磁場は磁場分布の形状によって、2 極磁場、4 極磁場、6 極磁場などと呼ばれる。

[0021] 図 3 は、永久磁石装置が発生する磁場を評価する評価点と磁場発生源との位置関係を説明する説明図である。円柱中心軸 O を基準に x 座標及び y 座標を定義したときに、磁場評価空間 1 の位置(磁場評価位置)は、円柱中心軸 O から距離 $r = \sqrt{(x^2 + y^2)}$ 、x 座標の軸(基準線)からの角度 θ で規定される。また、任意の永久磁石片 2 は、x 座標の軸(基準線)から位相角 ϕ 、円柱中心軸 O からの距離 f の位置に配設されているものとする。また、永

久磁石片 2 の磁気モーメント M は、 x 軸方向成分 M_x 、 y 軸方向成分 M_y で表現されるものとする。

[0022] 磁場評価位置 (r, θ) での n 次の多極展開磁場のノーマル成分は、数 1 で表現され、スキュー成分は、数 2 で表現される。

[数1]

$$B_{r, nl}(r, \theta, n) = (n + 1) \frac{M_1}{2\pi f^{(n+2)}} \sin[(n + 1)\theta] r^n$$

$$\dots \dots \dots (2)$$

但し、 $M_1 = M_x \sin[(n + 2)\phi] - M_y \cos[(n + 2)\phi]$

[数2]

$$B_{r, sw}(r, \theta, n) = (n + 1) \frac{M_2}{2\pi f^{(n+2)}} \cos[(n + 1)\theta] r^n$$

$$\dots \dots \dots (1)$$

但し、 $M_2 = M_x \cos[(n + 2)\phi] + M_y \sin[(n + 2)\phi]$

[0023] 次数 n (正の整数) は、中心からの磁場評価位置までの距離 r に対する磁場分布の変化の仕方を記述するもので、次数 $n = 0$ の場合が距離によらない一定磁場で 2 極磁場を意味し、次数 $n = 1$ の場合が距離に対し線形に磁場強度が変わる 4 極磁場を意味し、次数 $n = 2$ の場合が距離に対し自乗で磁場強度が変わる 6 極磁場を意味している。次数 n の磁場は、 $2(n + 1)$ 極磁場と呼ばれるが、それはその形状の磁場分布を生成するために、 $2(n + 1)$ 極の磁石が必要であることに由来している。

[0024] ビームの輸送には、通常、ノーマル成分の磁場 (2 極、4 極など) が利用される。ノーマル成分は、磁場評価位置 θ に対し磁場強度が $\sin(n + 1)\theta$ で変化する磁場であり (数 1 参照)、スキュー成分は、磁場評価位置 θ に対し磁場強度が $\cos(n + 1)\theta$ で変化する磁場である (数 2 参照)。なお、後記するように、スキュー成分は、磁石モジュール 6 を積層し、互いに逆方向に

回転することにより、打ち消される成分である。

[0025] 具体的に、図4は、ノーマル4極磁場の磁力線の形状を示す図であり、図5は、スキュー4極磁場の磁力線の形状を示す図である。また、図6は、ノーマル6極磁場の磁力線の形状を示す図であり、図7は、スキュー6極磁場の磁力線の形状を示す図である。

[0026] 図4－6から分かるように、ノーマル成分磁場とスキュー成分磁場とは、 $90 / (n + 1)$ 度だけ回転した形となっている。

[0027] 無限長磁気モーメントが原点回りに、等距離、等間隔で配置される場合、 $2(n + 1)$ 極磁場のノーマル成分のみを生成するためには、磁気モーメントが $M = (M \sin((n + 2)\phi), -M \cos((n + 2)\phi))$ となるように配設させられればよい。

[0028] 言い換えれば、永久磁石片2によって、 $2(n + 1)$ 極磁場を生成するためには、永久磁石片2の位相角 ϕ に応じて、永久磁石片2を $-y$ 軸から $(n + 2)\phi$ だけ、回転して配設すればよい。

[0029] 図8は、4極磁場を形成する場合の永久磁石片の磁化配置を示す模式図であり、図9は、6極磁場を形成する場合の永久磁石片の磁化配置を示す模式図である。

図8の4極磁場($n = 1$)では、永久磁石片2の位相角 ϕ のとき、永久磁石片2の磁化の方向は $-y$ 軸から 3ϕ である。図9の6極磁場($n = 2$)では、永久磁石片2の位相角 ϕ のとき、永久磁石片2の磁化の方向は $-y$ 軸から 4ϕ である。つまり、各々の永久磁石片2は、複数の永久磁石片2の断面視環状の配列(環状配列)の周方向成分(接線方向成分)を有するように配設されている。

[0030] (不正磁場の発生)

磁石モジュール6は、永久磁石片2の磁化が理想的に配置されている場合には、不正磁場(不要な多極成分磁場)は発生しない。しかしながら、永久磁石片2には、一般に着磁のばらつき(残留磁束密度のばらつき)が7%から10%程度存在している。このため、磁石モジュール6は、 $2(n + 1)$ 極磁

場を発生させるために単に、永久磁石片 2 を $(n + 2)$ ϕ 回転させて配置するだけでは、 $2(n + 1)$ 極磁場以外の不正磁場が発生してしまう。

[0031] また、たとえ同一ロットの永久磁石片 2 で残留磁束密度が仮に完全に等しく不正磁場が発生しない場合であっても、その発生すべき $2(n + 1)$ 極磁場の強度は、磁石モジュール間でばらつきが生じてしまう。

[0032] (不正磁場の補償)

永久磁石装置としての磁石モジュール 6 は、多数の回転体である永久磁石片 2 から構成されており、その永久磁石片 2 は回転方向の配置自由度を有している。(1) 式、(2) 式から分かるように、磁化の大きさ(絶対値)は同じであっても、回転させて角度方向の磁化の成分(円筒形状の接線方向成分)を変化させることにより、展開磁場の強度は変化する。少なくとも永久磁石片 2 の個数分だけ磁場調整の自由度を有しているので、その個数の多極磁場成分に対して磁場補償ができることになる。

実施例 1

[0033] 本実施例の磁石モジュール 6 a は、磁石 1 列構成とし、直径 18 mm の円柱状の永久磁石片 2 を円柱中心軸 O からの距離 $f = 133$ mm ところに等間隔に 39 個配置したものである。つまり、磁石モジュール 6 a (図示せず) は、図 1 の磁石モジュール 6 において、1 列構成とし、39 個の永久磁石片 2 を円形に配設したものである。

[0034] 図 1 O は、永久磁石 1 列構成における永久磁石片の磁化バラツキを考慮した回転角度を計算した表である。この表は、縦方向に「磁石 No」1 ~ 39 を付し、横方向に、「磁石位相 ϕ [度]」、「位置 x [mm]」、「位置 y [mm]」、「磁化 [T]」、「磁化方向 3ϕ [度]」、「回転 $\delta\theta$ [度]」を演算したものである。

[0035] ここで、永久磁石片 2 は、サマリウムコバルト磁石を用い、カタログ値からその磁化(残留磁化)の強度を 1.0 [T] から 1.1 [T] の間でランダムに設定している。「回転 $\delta\theta$ [度]」は、4 極磁石の磁化配置で評価し、4 極ノーマル成分磁場以外の多極磁場が 100 [ppm] 以下になるよう

に、永久磁石片2の設置角度の微調整を試みて算出した、磁化方向 3ϕ からの修正角である。また、多極展開磁場は、円柱中心軸Oからの距離 $r = 100\text{ mm}$ における値で評価している。

[0036] 図11A, 図11B, 図11Cは、永久磁石片1列構成での不正磁場抑制を説明する説明図である。横軸は、各次数のノーマル成分又はスキュー成分である。縦軸は、回転角修正前後での不正磁場強度比(ppm)である。

100 ppm以下になるような永久磁石を探索したが、解が見つからないために、19次～24次において100 ppmを超える成分が残っている。しかしながら、永久磁石片2の個数は39個、つまり、調整自由度は39であるので、19次～20次の成分までは原理的には調整が効いている。

実施例 2

[0037] 本実施例の磁石モジュール6bは、磁石2列構成とし、直径18 mmの円柱状の永久磁石片2を円柱中心軸Oからの距離 $f = 133\text{ mm}$ のところに等間隔に39個配置し、距離 $f = 154\text{ mm}$ のところに等間隔に46個配置したものである。つまり、磁石モジュール6b(図示せず)は、図1の磁石モジュール6と同様の2列構成において、第一列に39個の永久磁石片2を円形に配設し、第2列に46個の永久磁石片2を同心円状に配設したものである。

[0038] 図12は、永久磁石2列構成の1列目における永久磁石片のバラツキを考慮した回転角度を計算した表であり、図13は、永久磁石2列構成の2列目における永久磁石片のバラツキを考慮した回転角度を計算した表である。ここで、永久磁石2は、サマリウムコバルト磁石を用い、カタログ値からその磁化(残留磁化)の強度を1.0 [T] から1.1 [T] の間でランダムに設定している。回転 $\delta\theta$ [度] は、4極磁石の磁化配置で評価し、4極ノーマル成分磁場以外の多極磁場が100 [ppm] 以下になるように、永久磁石片2の設置角度の微調整を試みて算出した。また、多極展開磁場は、円柱中心軸Oからの距離 $r = 100\text{ mm}$ における値で評価している。

[0039] 多極磁場成分100 ppm以下を目指すように、回転角度の最適化を試み

た。永久磁石片 2 の個数は 85 個であり、調整の自由度が 85 と多く、1 列構成に比べて、調整自由度が大きい。このため、1 次～19 次において、多極磁場が 100 [ppm] 以下とする解を見つけることができた。

[0040] 図 14A, 図 14B, 図 14C は、永久磁石 2 列配置での不正磁場抑制ができることを示した説明図である。

20 次～34 次の高次の不正磁場をゼロにするためには、多数の永久磁石片 2 を回転させる必要がある。しかしながら、高次の不整磁場に対する永久磁石の感度は小さい。そのため、高次の不整磁場を小さくするよりも、低次の磁場を小さくする方が容易である。多極成分の残差が最小化されるような永久磁石配置を探す最適化（100 ppm 以下となる範囲で高次の多極磁場を発生させて、多極磁場の合計値トータルを小さくする磁石配置）により、低い次数（1 次～19 次）の不整磁場がゼロになっている。

[0041] （磁石の実装）

図 15 は、本発明の第 1 実施形態の永久磁石装置を示す斜視図である。

磁石モジュール 6 は、複数の永久磁石片 2 と、保持プレート 4 と、バックヨーク 5 とから構成されている。複数の永久磁石片 2 は、前記したように、複数列に亘って同心円状に配設されている。保持プレート 4 は、円柱形状の永久磁石片 2 が圧入や嵌入により嵌合する穴や貫通孔 4a が複数形成されている。保持プレート 4 は、アルミやステンレスなどの非磁性金属である。永久磁石片 2 が円柱形状であり、貫通孔 4a が円形であるので、永久磁石片 2 は、穴や貫通孔 4a に所定の回転角で嵌合する。なお、永久磁石片 2 は、貫通孔 4a に嵌入されなくても、所定角度で挿通後、接着しても構わない。

[0042] バックヨーク 5 は、保持プレート 4 の外周に配設される鉄製の磁気シールドである。バックヨーク 5 は、漏洩磁場を低減したり、磁場評価空間 1 の磁場を増強したりする。なお、保持プレート 4 は、複数の溝を形成しておき、その溝に永久磁石片 2 を接着で固定しても構わない。また、永久磁石片 2 は、圧入・固定のしやすさを考え、僅かにテーパが形成された円錐台のような形状も有効である。

[0043] ところで、実施例 1, 2 では、直径 18 mm の永久磁石片 2 で演算したが、永久磁石片 2 は、一般に、直径 5 mm ~ 30 mm、長さ 10 mm ~ 50 mm である。永久磁石片 2 の直径は、磁場評価空間 1 の大きさや磁石モジュール 6 の大きさに応じて、適切に選択すれば構わない。特に、周方向の永久磁石片 2 の個数は、周期的磁場分布と対応するので、角度分割数が 32 を超えるように、永久磁石片 2 の直径を選択すべきである。

[0044] また、永久磁石片 2 の材料は、特に、指定されるものではないが、サマリウムコバルト磁石やネオジム磁石などの残留磁束密度 (B_r) が高い磁石が好ましい。また、ビームロスなどにより、磁石の温度が上昇することが想定される場合には、保持力の大きなサマリウムコバルト磁石を使うのが好適である。また、減磁の影響が無視できる場合には、残留磁束密度 (B_r) の大きなネオジム磁石を使うのが好ましい。

[0045] (永久磁石片 2 の配設手順)

永久磁石片 2 は、保持プレート 4 にロボットにより配設される。永久磁石片 2 の磁化は、設置前や設置時に計測され、磁化強度の情報を元に配置最適化プログラム(図示せず)により、 $2(n+1)$ 極磁場を形成するときの設置位置 (f, ϕ) と回転角度 $[(n+2)\phi]$ が決定される。所望の任意の磁場分布が生成されるようにプログラムを構成することが可能であるから、同一の手段、手法、磁石を用いて任意の磁場を生成することが可能である。

[0046] 4 極磁場 ($n=1$) を発生させるためには、基本的な永久磁石片 2 の回転配置は 3ϕ 配置をベースとするものになり、6 極磁場 ($n=2$) の場合には、 4ϕ 配置をベースとするものになる。任意磁場が構成可能であるから、2 極磁場と 4 極磁場との双方を発生させる機能結合型の磁石も構成することが可能である。

[0047] 図 16 は、本発明の第 1 実施形態の永久磁石装置の磁場分布を補正するための補正方法を説明するためのフローチャートである。このルーチンは、永久磁石装置としての磁石モジュール 6 を製作するときに、作業員又は製造装置が実行する。

まず、全ての永久磁石片2の磁化が計測され、そのデータが計算機に保存される（S1）。次に、計算機によって、目標磁場分布を発生させる最適配置が計算され、最内層からn列まで永久磁石片2が配置される（S2）。S2の後、磁場分布が計測され、目標値からのずれが評価される（S3）。S3の後、S3の評価に基づいて、所定の磁場分布になったか否か判定する（S4）。所定の磁場分布になっていないと判定されたら（S4でNo）、目標磁場分布からのずれを補償する永久磁石片2の配置（例えば、回転角）が計算される（S5）。S5の後、m列分の永久磁石片2が追加で配設される（S6）。例えば、 $m=1$ のとき、 $(n+1)$ 列目（図15参照）に永久磁石片2が追加される。S6の後、処理をS3に戻し、磁場分布が再計算され、目標値からのずれが評価される（S3）。S3の後、所定の磁場分布になっていたら（S4でYes）、処理を終了する。

[0048] 以上説明したように、本実施形態の磁石モジュール6は、複数の永久磁石片2によって、構成されている。また、磁石モジュール6は、永久磁石片2の着磁にバラツキがあっても、永久磁石片2を適切に回転させることにより、所定の磁場分布を発生させることができる。つまり、本実施形態の磁石モジュール6は、以下の問題点が解消される。

[0049] 永久磁石片2は、製造上及び着磁の制約から、大型の永久磁石を製造することは困難であり、大空間を有する磁石装置を実現するためには、多数の小型の永久磁石を組み合わせて構成する必要がある。一つのブロックとして形成可能な永久磁石の大きさは数十mm立方程度であり、所定の磁場を発生させる磁石体とするために、特殊な形状に整形された磁石にそれぞれの磁石に対して適切な方向に着磁する必要がある。

[0050] また、ビームに対して所定の作用をするように、磁場空間分布が形成される必要がある。所望の磁場分布に対し、 $1/1000$ から $1/10000$ 程度の磁場ひずみしか許容されない。しかしながら、永久磁石の着磁(残留磁束密度)は、7から10パーセント程度のばらつきがあり、このばらつきは、磁場歪みの許容値に対して、桁違いに大きい。このため、永久磁石を用いて所

定の磁場分布を形成するためには磁場補正手段が必要となる。しかしながら、磁石モジュール6は、永久磁石片2を回転調整することにより、所定の磁場分布を発生させることができる。

[0051] 一般に、ビーム調整のために発生磁場強度を調整する必要がある。電磁石の発生磁場強度は、通電電流の変化によって、容易に変化させることができるが、永久磁石の発生磁場強度は、固定されているので、調整困難である。しかしながら、磁石モジュール6は、円柱中心軸Oを中心に回転させることにより、適切な磁場強度を発生させることができる。

[0052] (第2実施形態：磁場発生装置)

このように構成された磁石モジュール6の厚さは、永久磁石片2の長さで制限されてしまう。このため、軸長の長い磁場発生装置を構成する場合には、必要長さの分だけ磁石モジュール6を積層する。

[0053] 図17は、本発明の第2実施形態である磁場発生装置の断面を示す図である。

磁場発生装置20は、積層された複数の磁石モジュール6(6a, 6b)と、磁石回転機構16と、ビームダクト13と、磁石端部磁気シールド15と、ケース14とを備えて構成される。

[0054] 磁石モジュール6(6a, 6b)は、精密な磁場分布が得られるように構成されている。このため、積層された複数の磁石モジュール6は、軸長の長い高精度に制御された磁場空間を発生させる。磁石回転機構16は、磁石モジュール6(6a)を1枚毎に正方向に回転させ、隣接する他の磁石モジュール6(6b)を逆方向に同一角度回転させるリンク機構である。つまり、複数の磁石モジュール6, 6, ...は、正方向に回転する磁石モジュール6aと、逆方向に同一角度回転する磁石モジュール6bとが交互に積層されて構成されている。

[0055] ビームダクト13は、複数の磁石モジュール6, 6, ...の円柱状の空洞(磁場評価空間1)に配設され、ビームを通過させるダクトである。

磁石端部磁気シールド15は、隣接する装置やビームに影響を与えないよう

にするための鉄製シールドである。なお、前記したように、磁石モジュール 6 は、外周部にバックヨーク 5 が設けられている。

[0056] (磁場強度可変)

磁石モジュール 6 (6 a, 6 b) は、例えば、四極磁石として所望の磁場(この場合にはノーマル四極磁場のみ)を形成するように構成されている。磁石回転機構 1 6 は、正立した状態から磁石モジュール 6 a を右回りに回転させ、磁石モジュール 6 b を左回りに回転させる。

磁石回転機構 1 6 が磁石モジュール 6 (6 a, 6 b) を θ だけ回転させると、それぞれの磁石モジュール 6 a, 6 b が発生するノーマル 4 極磁場強度も $\cos \theta$ 倍にさせられる。したがって、磁石モジュール 6 が積層された磁石全体としての発生磁場強度も、同様に $\cos \theta$ 倍となり、磁場強度が変化させられる。しかしながら、単純に磁石モジュール 6 を回転させるだけでは、回転に伴ってビーム輸送に不要なスキュー成分の 4 極磁場が元のノーマル 4 極磁場の $\sin \theta$ 倍の大きさに発生してしまう。

[0057] そこで、隣接する磁石モジュール 6 a, 6 b を互い違いに逆方向に同一角度、回転させることにする。回転角度は θ 、 $-\theta$ 、 θ 、 $-\theta$ のようになるが、 $\cos(-\theta) = \cos \theta$ に対して、 $\sin(-\theta) = -\sin \theta$ であるから、積層された磁石モジュール 6 a, 6 b ではノーマル成分は同様に $\cos \theta$ 倍で強度が変化するのに対して、スキュー成分は打ち消し合うこととなる。

[0058] また、磁石モジュール 6 の開口に比べて磁石モジュール 6 の厚さが $1/10$ 程度となるように磁石を構成すれば、スキュー成分を十分にキャンセルできる。厚さがそうでなくとも一般にビーム輸送には積分磁場が重要なので問題にならないが、短いピッチでスキュー成分磁場を積分量としてキャンセルすることが好ましい。

[0059] 磁石の強度を変更してもビーム輸送に有害な誤差磁場が発生しないのは、磁場発生装置 2 0 が高精度に磁場が形成された磁石モジュール 6 (それ単体が不要な磁場を発生していない)の組合せだからである。したがって、磁場発生装置 2 0 は、磁石モジュール 6 の各々が高精度に磁場が形成された後に、組

み立てられる必要がある。

[0060] (第2実施形態の変形例)

フラックスのループがオープンになっている単体の磁石モジュール6の場合には、外周に設けたバックヨーク5は有効である。しかしながら、第2実施形態の磁場発生装置20は、ハルバッハ配置なので外側に鉄製のバックヨーク5をつけても発生磁場はそれほど増強されない。なお、磁石が積層された磁場発生装置20でも、バックヨーク5は、外部に磁場を漏らさないシールドとしての役割をする。

[0061] 図18は、本発明の第2実施形態である磁場発生装置で使用する他の永久磁石装置の磁化方向と装置回転方向（正方向）を示す模式図であり、図19は、本発明の第2実施形態である磁場発生装置で使用する他の永久磁石装置の磁化方向と装置回転方向（逆方向）を示す模式図である。

[0062] 永久磁石装置としての磁石モジュール11, 12は、複数（例えば、48枚）の略台形状の永久磁石片17, 17, ...が隣接接合して構成される。台形は、平行な対辺（底辺）と非平行な対辺（脚）とを備えたものである。つまり、磁石モジュール11, 12は、永久磁石片17の脚部17aが隣接する永久磁石片17の脚部17aに接合されて構成されている。

[0063] 磁石モジュール11, 12は、前記実施形態と同様に、位相角 ϕ に対して、磁化の方向が 3ϕ となるように、構成されている。また、磁石モジュール11（図19）は、回転角 γ だけ右回転させたものであり、磁石モジュール12（図18）は、回転角 γ だけ左回転させたものである。

[0064] (第3実施形態)

前記第2実施形態では、複数の磁石モジュール6（6a, 6b）が積層された磁場発生装置20について説明し、磁石モジュール6（6a, 6b）の回転により、磁場強度を可変すると共に、スキュー成分がキャンセルされることについて説明した。以下、複数の磁石モジュール6, 6, ...を回転させる磁石回転機構16（図17）について説明する。

[0065] 図20は、本発明の第3実施形態である磁場発生装置の磁石回転機構を説

明する斜視図である。

磁場発生装置 20 は、積層された複数の磁石モジュール 6, 6, . . . と、4 本のガイドローラ 21 と、複数のリンク 22 と、複数の回転微調整軸 23 と、磁石回転レバー 24 と、固定ねじ 25, 26 とを備えて構成される。なお、複数のリンク 22 と複数の回転微調整軸 23 と磁石回転レバー 24 とは磁石回転機構 16 (図 17) を構成する。

[0066] 4 本のガイドローラ 21 は、位置ズレを防止しつつ、積層された磁石モジュール 6 を回転可能に保持する。複数のリンク 22 (22 a, 22 b) は、磁石モジュール 6 の一枚ごとに設けられている。リンク 22 は、一端が磁石モジュール 6 の周面に取り付けられおり、他端にナット 27 が回転可能に取り付けられている。リンク 22 a は、磁石モジュール 6 a に取り付けられており、リンク 22 b は、磁石モジュール 6 a に隣接する磁石モジュール 6 b に取り付けられている。

[0067] 回転微調整軸 23 は、リンク 22 a のナット 27 とリンク 22 b のナット 27 とを個別に回転させるように構成されている。このため、ナット 27 がスライドし、磁石モジュール 6 a, 6 b が個別に回転させられる。したがって、回転微調整軸 23 は、全ての磁石モジュール 6 a, 6 b の基準線 (x 軸) を一致させることができる。つまり、回転微調整軸 23 は、磁石モジュール 6 a, 6 b の初期角度 (初期基準線) の微調整を可能とする。また、回転微調整軸 23 を用いて、積層方向 (磁場発生装置 20 の軸方向) に回転角度分布を付けることが可能である。これにより、磁場発生装置 20 は、ビーム輸送特性上、磁場強度分布を軸方向に持たせることができる。

[0068] 磁石回転レバー 24 は、全ての回転微調整軸 23 を上下に移動させるものである。これにより、リンク 22 a, 22 b が上下に移動するので、磁石モジュール 6 a, 6 b が初期基準位置から互いに逆方向に回転させられる。これにより、磁石回転レバー 24 は、ノーマル成分を所望の強度にすることができる。固定ねじ 25, 26 は、磁場調整後、磁石モジュール 6 a, 6 b の位置を固定するものである。

[0069] (変形例)

本発明は前記した実施形態に限定されるものではなく、例えば、以下のような種々の変形が可能である。

(1) 前記実施形態の磁石モジュール6は、永久磁石片2を回転体である円柱形状にしたが、回転体(円柱、円錐台、回転楕円体等)でなくとも、三角柱、四角柱、六角柱、八角柱等のn角柱であっても構わない。つまり、永久磁石片2は、回転軸3に対して回転対称であれば構わない。

[0070] (2) 本発明の磁場発生装置は、磁場変更可能な任意の磁場分布を生成することが可能であり、特に、ビーム輸送用途の高精度の磁場分布を必要とする磁石用途に最適である。

符号の説明

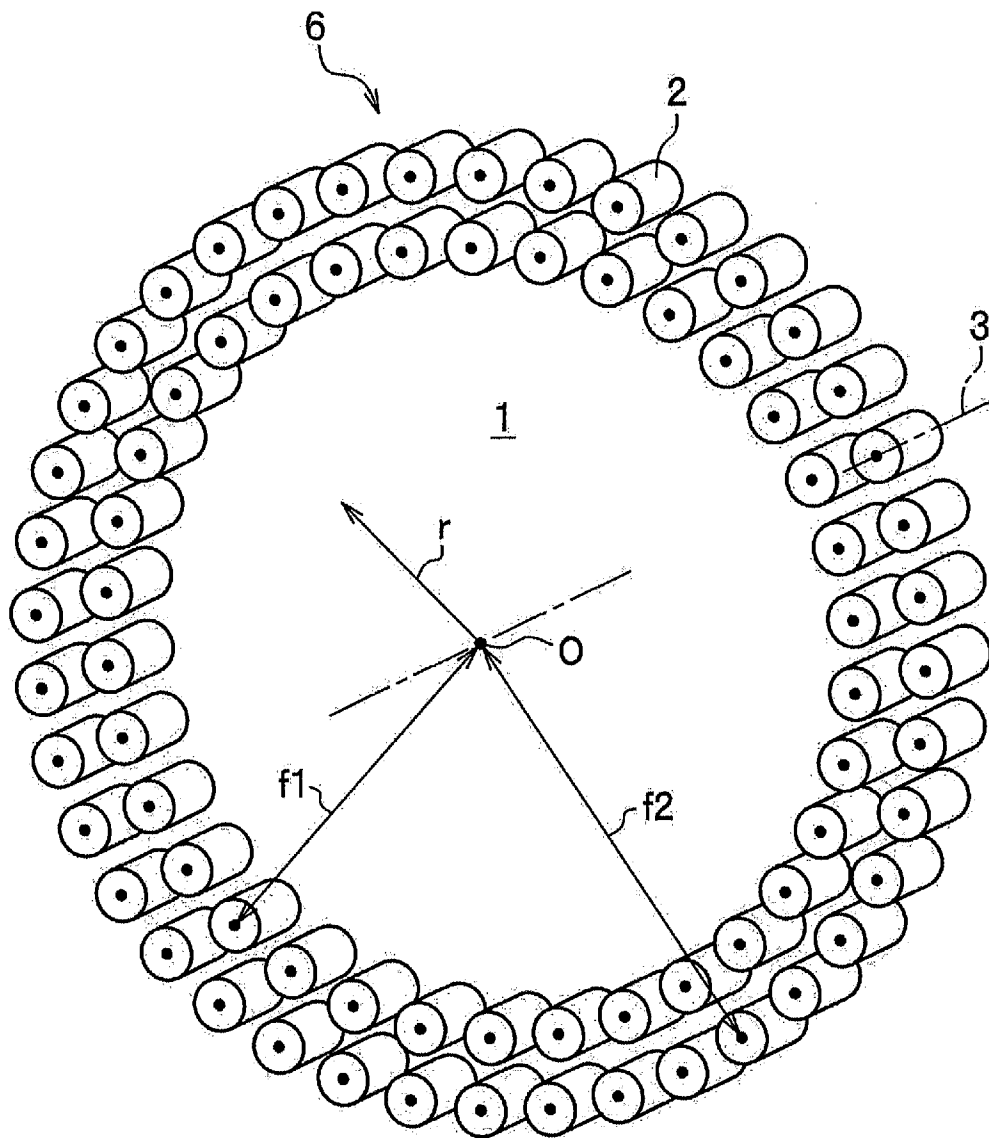
- [0071] 1 磁場評価空間
2 永久磁石片
3 回転軸
4 保持プレート
5 バックヨーク(環状磁性体)
6, 6 a, 6 b 磁石モジュール(永久磁石装置)
11, 12 磁石モジュール(永久磁石装置)
16 磁石回転機構
17 永久磁石片
20 磁場発生装置

請求の範囲

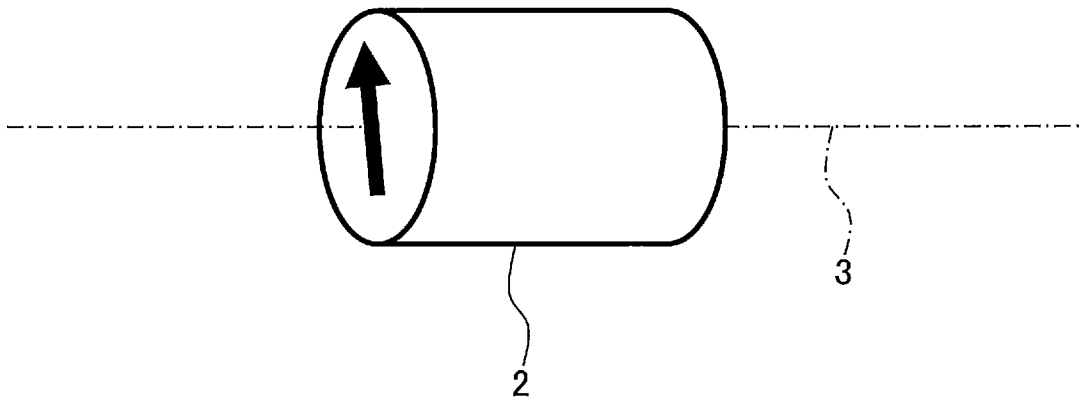
- [請求項1] 同一形状の複数の永久磁石片が円柱状の磁場評価空間を取り囲む様に配置されたことを特徴とする永久磁石装置であって、
前記永久磁石片の磁化方向は、前記永久磁石片の環状配列の周方向成分を有している
ことを特徴とする永久磁石装置。
- [請求項2] 複数の前記永久磁石片は、同心円状に多層構造に配列されている
ことを特徴とする請求項1に記載の永久磁石装置。
- [請求項3] 複数の前記永久磁石片は、断面視で回転対称の柱状体であり、
前記回転対称の回転軸の各々は、前記円柱状の磁場評価空間の円柱中心軸に平行である
ことを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の永久磁石装置。
- [請求項4] 前記永久磁石片の磁化方向は、 n を0以上の整数としたとき、基準となる一の前記永久磁石片と前記円柱中心軸とを結ぶ基準線と他の永久磁石片、及び前記円柱中心軸を結ぶ線分との成す角の $(n+2)$ 倍の角度を修正した方向であり、
前記修正した方向の修正角は、前記複数の永久磁石片の磁化のばらつきによる磁場分布を修正する角度に設定されている
ことを特徴とする請求項3に記載の永久磁石装置。
- [請求項5] 前記永久磁石片は、回転体であり、
複数の前記回転体を保持する保持プレートをさらに備え、
複数の前記回転体は、前記修正角を満たした状態で嵌入又は接着されている
ことを特徴とする請求項4に記載の永久磁石装置。
- [請求項6] 前記永久磁石片は、回転体又は円錐台形状であり、
複数の前記永久磁石片を保持する保持プレートをさらに備え、
複数の前記永久磁石片は、前記保持プレートに嵌入されている
ことを特徴とする請求項4に記載の永久磁石装置。

- [請求項7] 前記保持プレートの外周に形成された環状磁性体をさらに有することを特徴とする請求項5又は請求項6に記載の永久磁石装置。
- [請求項8] 複数の前記永久磁石片は、断面視台形形状であり、前記永久磁石片の一方の脚部と隣接する永久磁石片の他方の脚部とが接続されて、円筒形状に配列されている
ことを特徴とする請求項1に記載の永久磁石装置。
- [請求項9] 複数の前記永久磁石片は、前記円柱中心軸に対して垂直な面内で磁化されている
ことを特徴とする請求項3乃至請求項7の何れか一項に記載の永久磁石装置。
- [請求項10] 請求項4乃至請求項9の何れか一項に記載の永久磁石装置が複数積層されている
ことを特徴とする磁場発生装置。
- [請求項11] 前記永久磁石装置の各々を回転させる磁石回転機構をさらに備えることを特徴とする請求項10に記載の磁場発生装置。
- [請求項12] 隣接する前記永久磁石装置は、所定の初期基準位置から互いに逆向きとなるように回転させられる磁石装置ペアを構成することを特徴とする請求項11に記載の磁場発生装置。
- [請求項13] 隣接する前記永久磁石装置は、複数の磁石装置ペアを構成し、
前記磁石装置ペアの各々は、同じ角度で回転させられる永久磁石装置と、該同じ角度で逆方向に回転させられる永久磁石装置とから構成される
ことを特徴とする請求項12に記載の磁場発生装置。
- [請求項14] 磁場発生装置の軸方向に発生磁場強度分布を持つように、前記複数の磁石装置ペアは、積層方向に回転角度分布をつけられている
ことを特徴とする請求項13に記載の磁場発生装置。

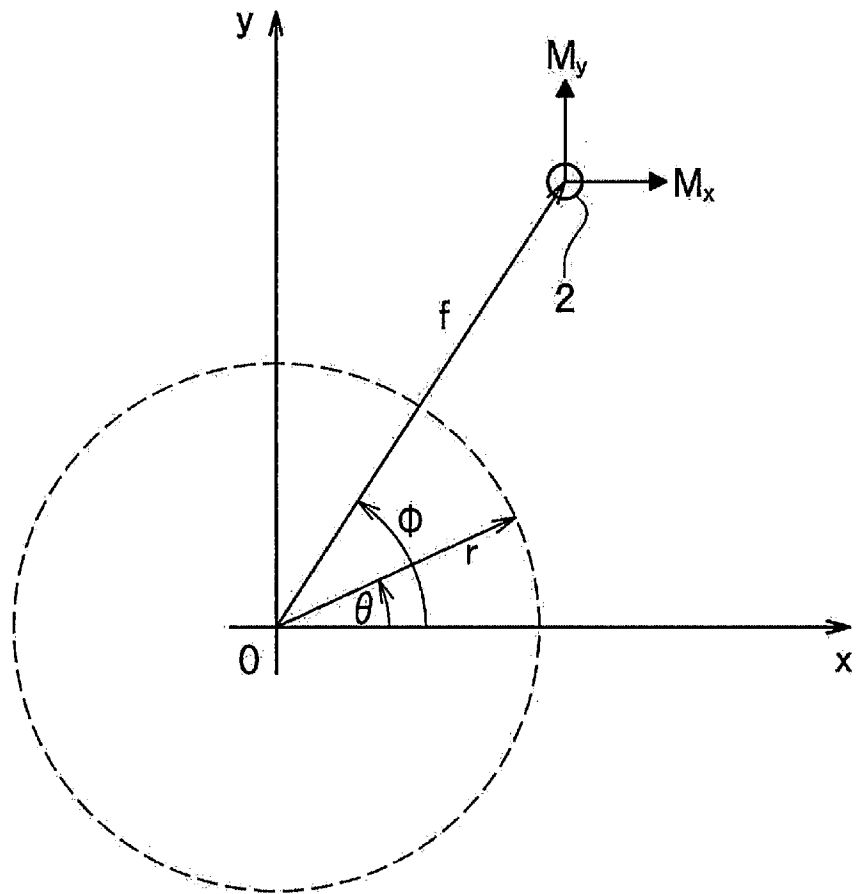
[図1]



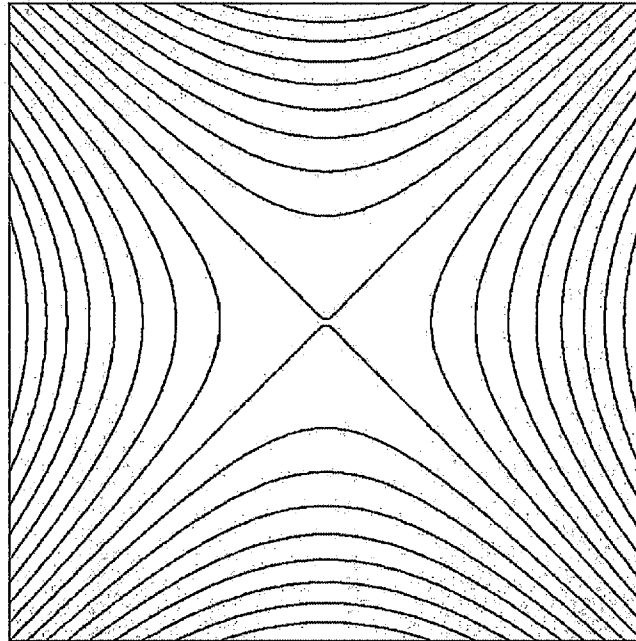
[図2]



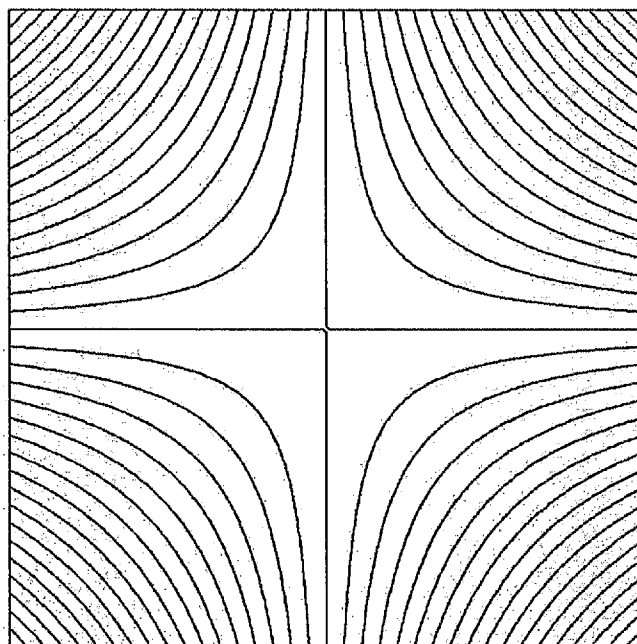
[図3]



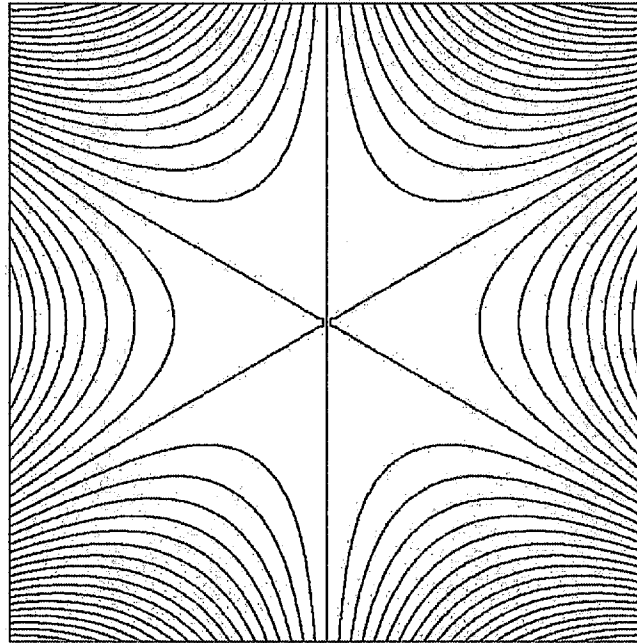
[図4]



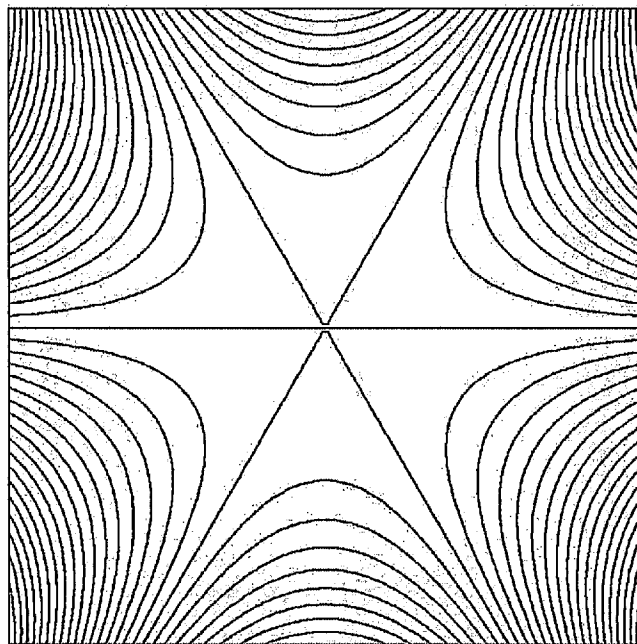
[図5]



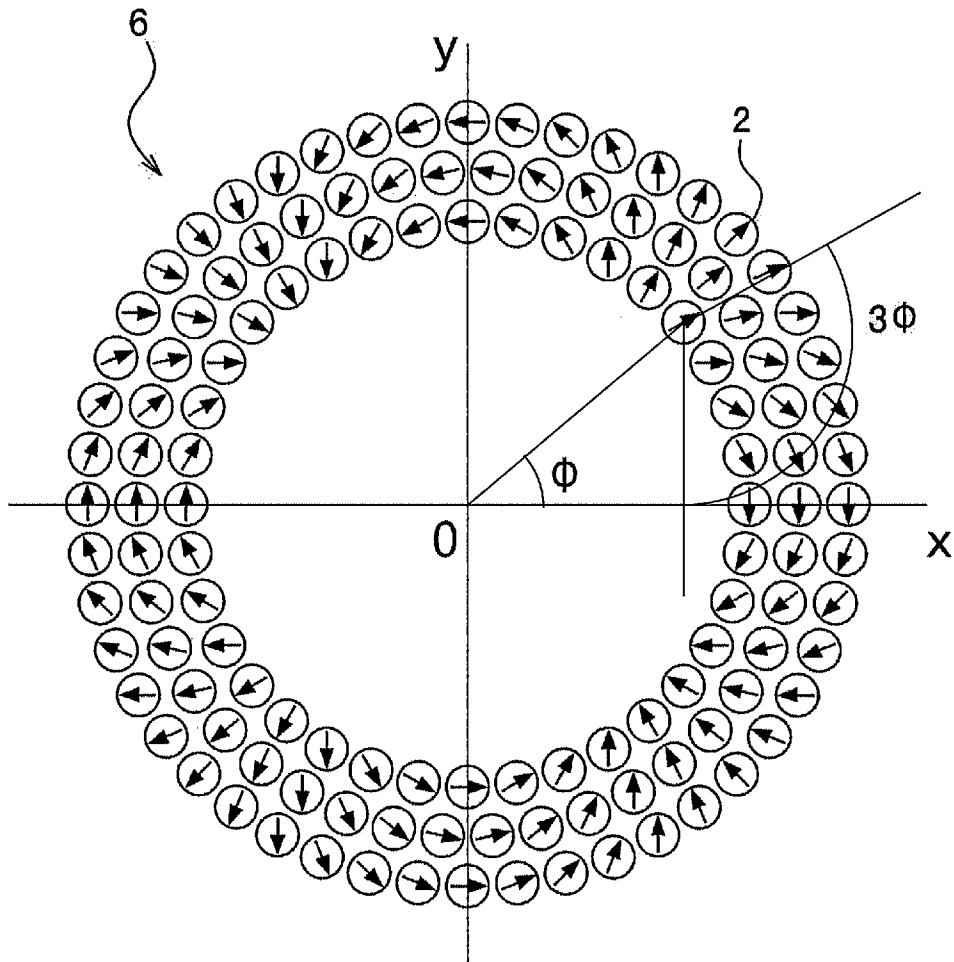
[図6]



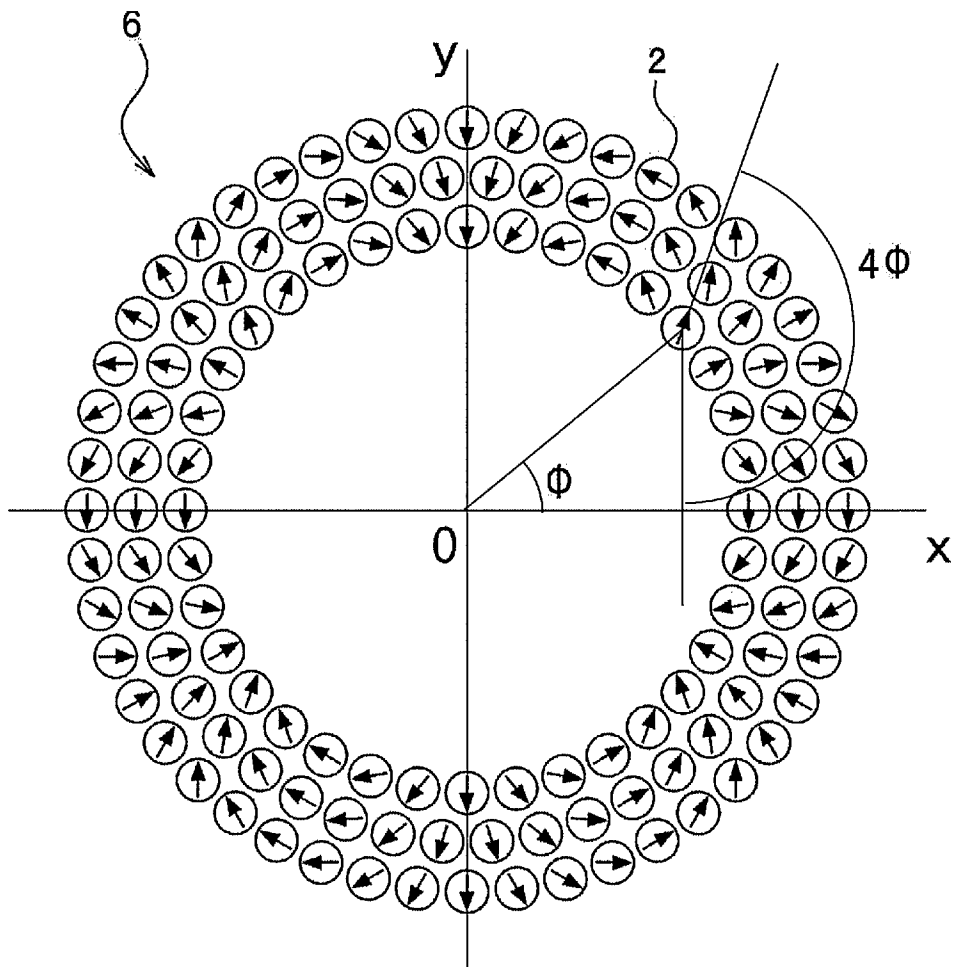
[図7]



[図8]



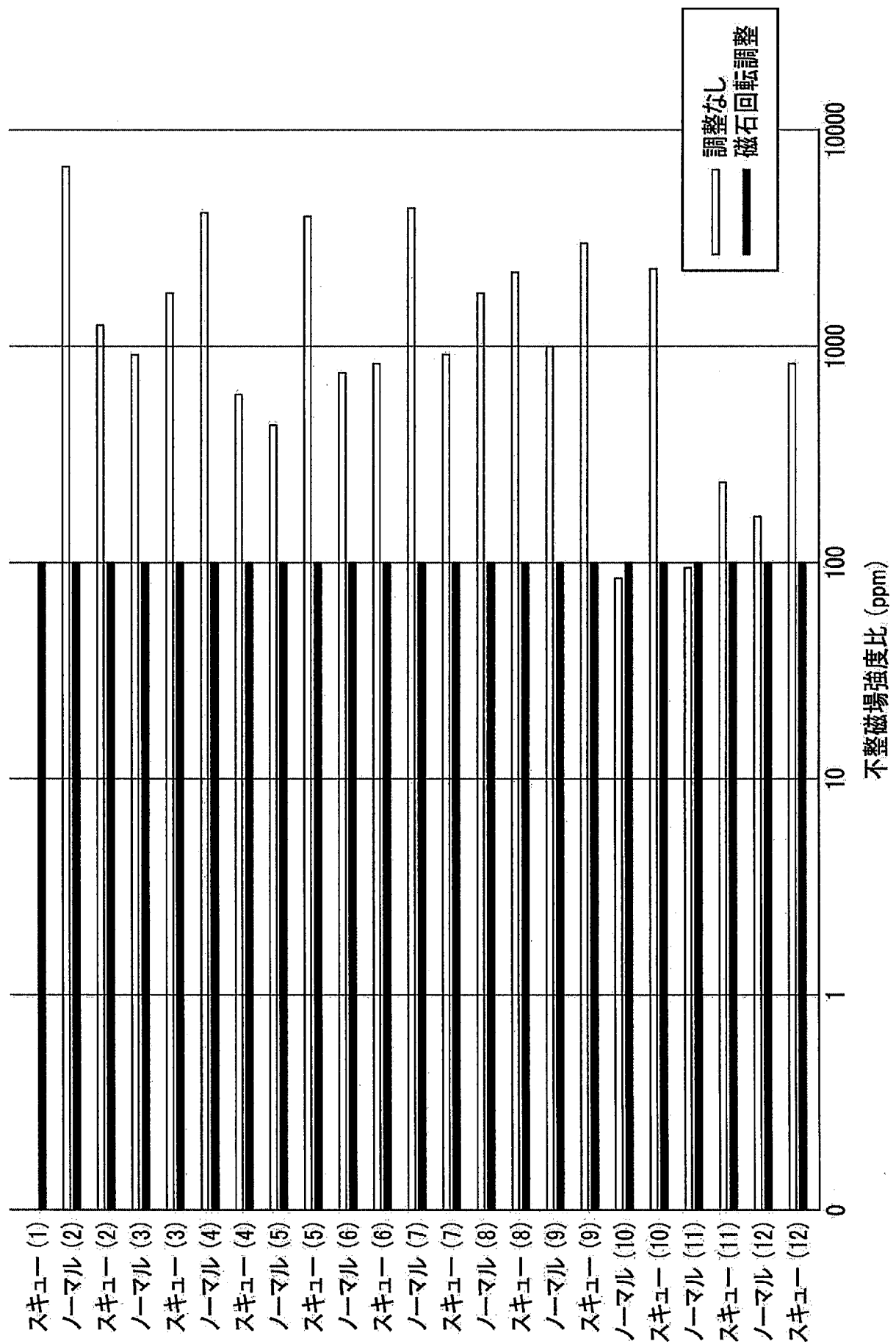
[図9]



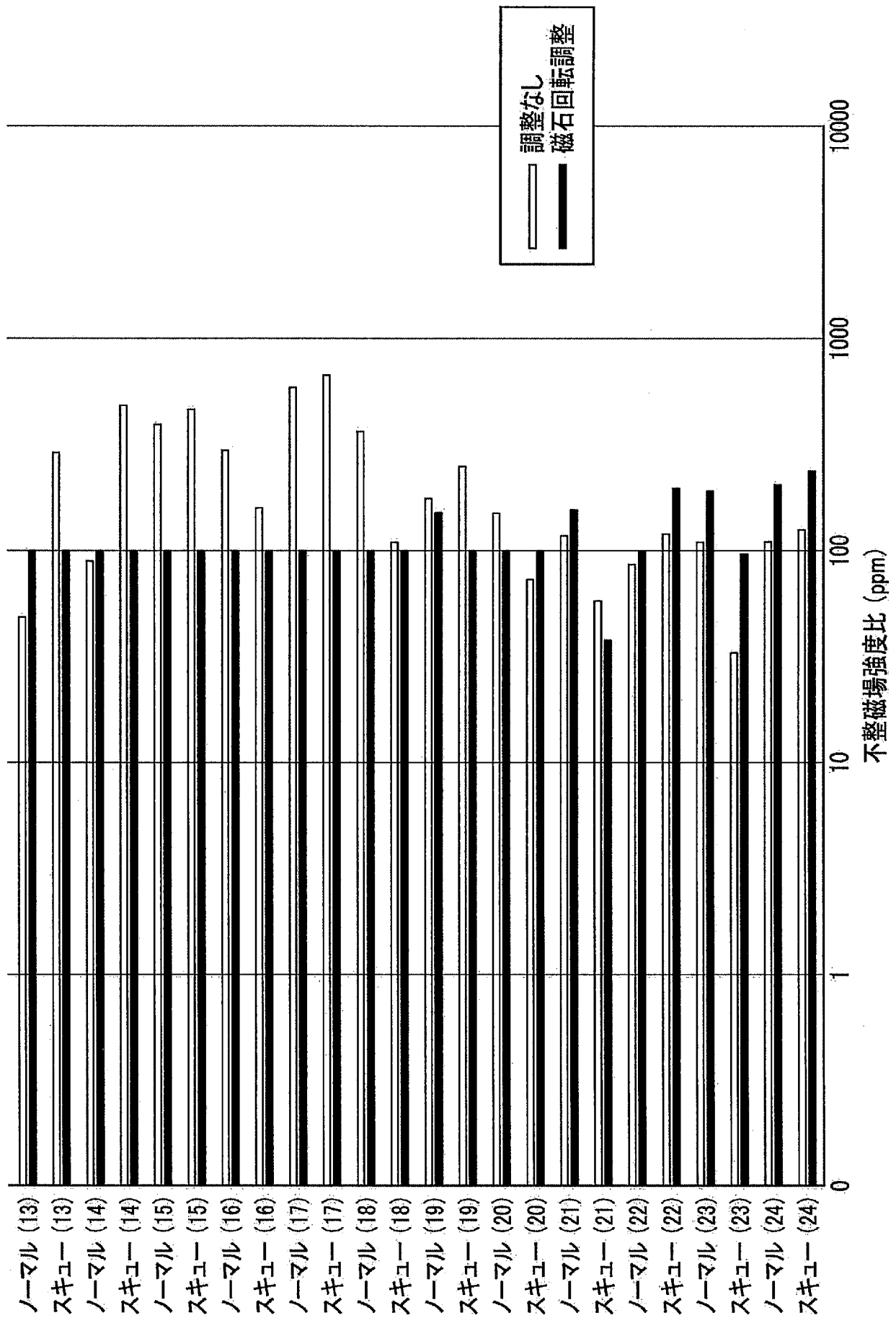
[図10]

磁石No.	磁石位相 ϕ [度]	位置x[mm]	位置y[mm]	磁化M[T]	磁化方向 3ϕ [度]	回転 $\delta\phi$ [度]
1	4.6	132.6	10.7	1.077	13.8	1.18
2	13.8	129.1	31.8	1.050	41.5	-1.16
3	23.1	122.4	52.1	1.045	69.2	1.40
4	32.3	112.4	71.1	1.072	96.9	0.76
5	41.5	99.6	88.2	1.085	124.6	0.90
6	50.8	84.1	103.0	1.091	152.3	-1.02
7	60.0	66.5	115.2	1.063	180.0	-1.73
8	69.2	47.2	124.4	1.048	207.7	0.06
9	78.5	26.6	130.3	1.086	235.4	-0.16
10	87.7	5.4	132.9	1.074	263.1	-2.55
11	96.9	-16.0	132.0	1.033	290.8	-1.50
12	106.2	-37.0	127.7	1.055	318.5	-1.97
13	115.4	-57.0	120.2	1.001	346.2	-0.57
14	124.6	-75.6	109.5	1.056	373.8	-0.04
15	133.8	-92.1	95.9	1.015	401.5	-0.10
16	143.1	-106.3	79.9	1.063	429.2	0.51
17	152.3	-117.8	61.8	1.008	456.9	0.41
18	161.5	-126.2	42.1	1.095	484.6	1.88
19	170.8	-131.3	21.3	1.073	512.3	-2.05
20	180.0	-133.0	0.0	1.028	540.0	-1.69
21	189.2	-131.3	-21.3	1.024	567.7	-0.36
22	198.5	-126.2	-42.1	1.010	595.4	1.72
23	207.7	-117.8	-61.8	1.089	623.1	2.12
24	216.9	-106.3	-79.9	1.079	650.8	-2.59
25	226.2	-92.1	-95.9	1.010	678.5	-0.60
26	235.4	-75.6	-109.5	1.034	706.2	0.14
27	244.6	-57.0	-120.2	1.010	733.8	1.35
28	253.8	-37.0	-127.7	1.069	761.5	2.44
29	263.1	-16.0	-132.0	1.072	789.2	0.34
30	272.3	5.4	-132.9	1.066	816.9	-0.35
31	281.5	26.6	-130.3	1.038	844.6	-1.38
32	290.8	47.2	-124.4	1.012	872.3	2.25
33	300.0	66.5	-115.2	1.091	900.0	0.94
34	309.2	84.1	-103.0	1.014	927.7	0.59
35	318.5	99.6	-88.2	1.100	955.4	3.09
36	327.7	112.4	-71.1	1.079	983.1	-1.45
37	336.9	122.4	-52.1	1.061	1010.8	1.44
38	346.2	129.1	-31.8	1.095	1038.5	-1.84
39	355.4	132.6	-10.7	1.016	1066.2	-0.38

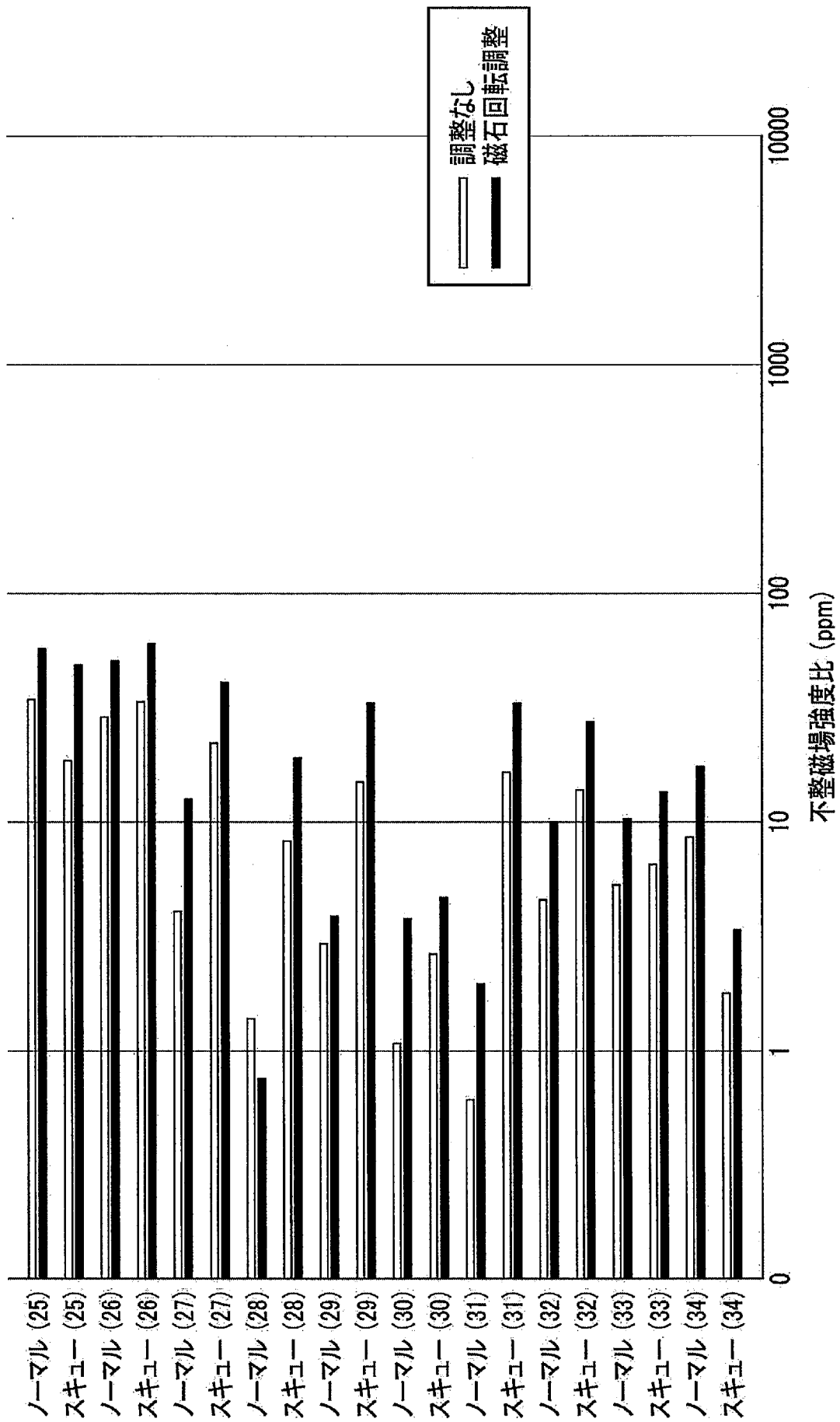
[図11A]



[図11B]



[図11C]



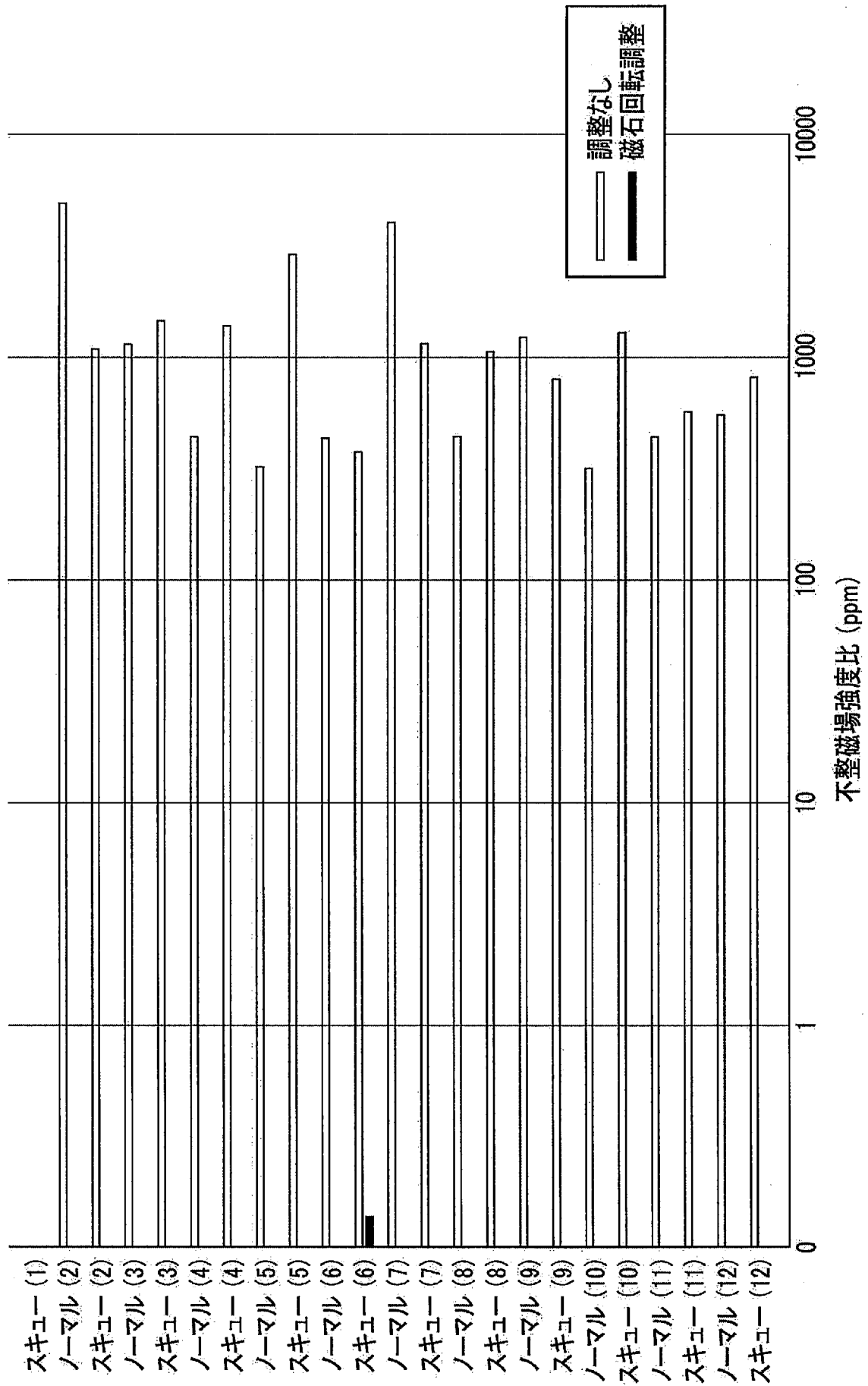
[図12]

磁石No	磁石位相 ϕ [度]	位置x[mm]	位置y[mm]	磁化M[T]	磁化方向 3ϕ [度]	回転 $\delta\phi$ [度]
1	4.6	132.6	10.7	1.077	13.8	0.45
2	13.8	129.1	31.8	1.050	41.5	-1.77
3	23.1	122.4	52.1	1.045	69.2	0.40
4	32.3	112.4	71.1	1.072	96.9	0.94
5	41.5	99.6	88.2	1.085	124.6	-0.90
6	50.8	84.1	103.0	1.091	152.3	-0.87
7	60.0	66.5	115.2	1.063	180.0	-1.10
8	69.2	47.2	124.4	1.048	207.7	0.09
9	78.5	26.6	130.3	1.086	235.4	0.69
10	87.7	5.4	132.9	1.074	263.1	-1.19
11	96.9	-16.0	132.0	1.033	290.8	-1.38
12	106.2	-37.0	127.7	1.055	318.5	-0.46
13	115.4	-57.0	120.2	1.001	346.2	-0.62
14	124.6	-75.6	109.5	1.056	373.8	-0.33
15	133.8	-92.1	95.9	1.015	401.5	1.22
16	143.1	-106.3	79.9	1.063	429.2	-0.55
17	152.3	-117.8	61.8	1.008	456.9	0.63
18	161.5	-126.2	42.1	1.095	484.6	0.10
19	170.8	-131.3	21.3	1.073	512.3	-0.52
20	180.0	-133.0	0.0	1.028	540.0	-0.66
21	189.2	-131.3	-21.3	1.024	567.7	-0.44
22	198.5	-126.2	-42.1	1.010	595.4	1.38
23	207.7	-117.8	-61.8	1.089	623.1	2.65
24	216.9	-106.3	-79.9	1.079	650.8	-0.88
25	226.2	-92.1	-95.9	1.010	678.5	-0.07
26	235.4	-75.6	-109.5	1.034	706.2	-0.30
27	244.6	-57.0	-120.2	1.010	733.8	-0.54
28	253.8	-37.0	-127.7	1.069	761.5	1.82
29	263.1	-16.0	-132.0	1.072	789.2	0.03
30	272.3	5.4	-132.9	1.066	816.9	0.80
31	281.5	26.6	-130.3	1.038	844.6	-1.51
32	290.8	47.2	-124.4	1.012	872.3	1.67
33	300.0	66.5	-115.2	1.091	900.0	-0.39
34	309.2	84.1	-103.0	1.014	927.7	1.72
35	318.5	99.6	-88.2	1.100	955.4	4.26
36	327.7	112.4	-71.1	1.079	983.1	-0.95
37	336.9	122.4	-52.1	1.061	1010.8	1.21
38	346.2	129.1	-31.8	1.095	1038.5	-1.01
39	355.4	132.6	-10.7	1.016	1066.2	-0.03

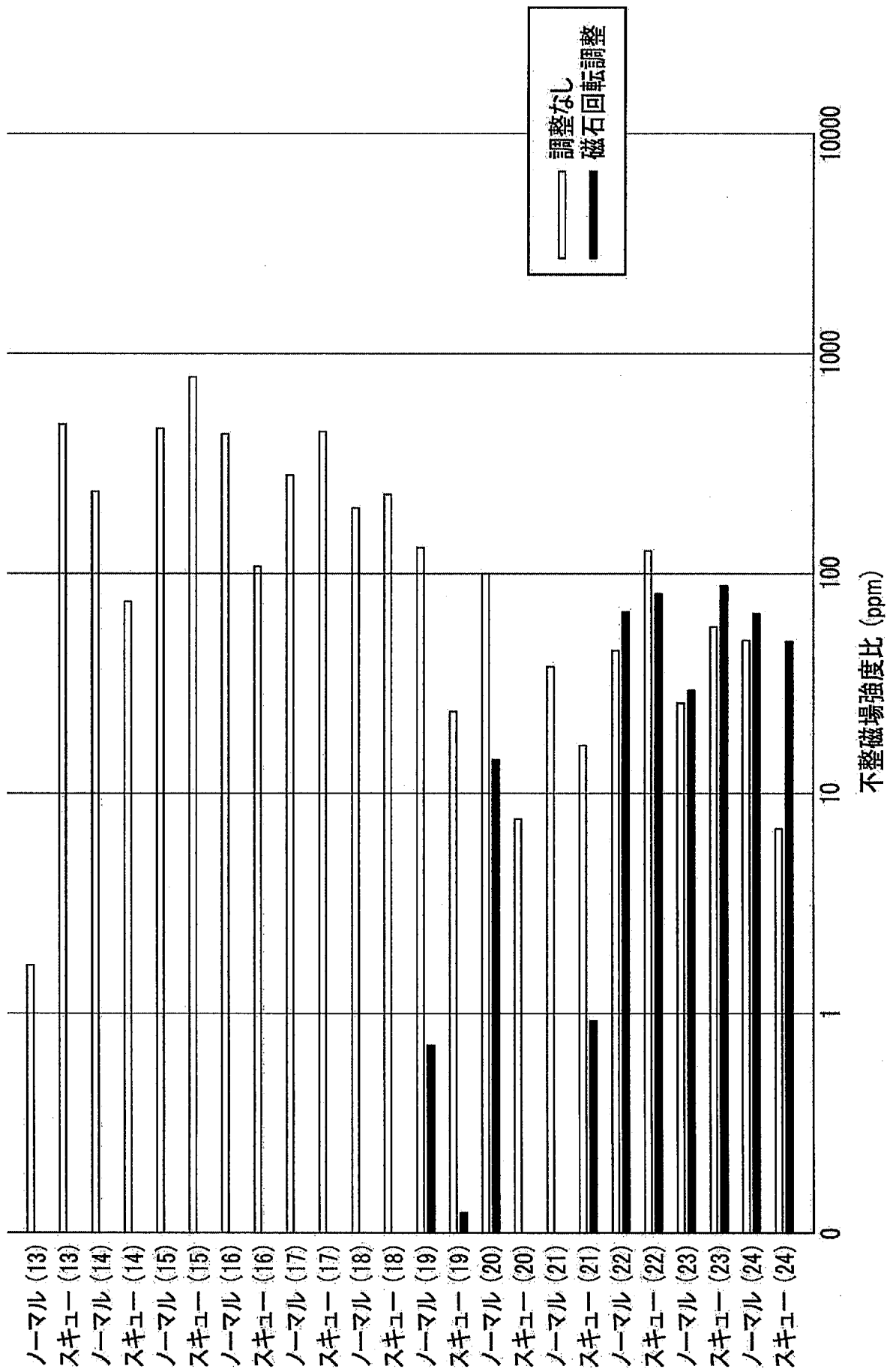
[図13]

磁石No	磁石位相 ϕ [度]	位置x[mm]	位置y[mm]	磁化M[T]	磁化方向 3ϕ [度]	回転 $\delta\phi$ [度]
1	3.9	153.6	10.5	1.098	11.7	2.62
2	11.7	150.8	31.3	1.083	35.2	-1.53
3	19.6	145.1	51.6	1.038	58.7	-0.24
4	27.4	136.7	70.9	1.040	82.2	1.17
5	35.2	125.8	88.8	1.083	105.7	0.86
6	43.0	112.5	105.1	1.064	129.1	-0.04
7	50.9	97.2	119.5	1.048	152.6	-0.54
8	58.7	80.0	131.6	1.052	176.1	-1.40
9	66.5	61.4	141.3	1.025	199.6	-0.16
10	74.3	41.5	148.3	1.056	223.0	1.26
11	82.2	21.0	152.6	1.089	246.5	0.07
12	90.0	0.0	154.0	1.091	270.0	-3.58
13	97.8	-21.0	152.6	1.021	293.5	-1.01
14	105.7	-41.5	148.3	1.064	317.0	-0.47
15	113.5	-61.4	141.3	1.066	340.4	-2.87
16	121.3	-80.0	131.6	1.018	363.9	0.07
17	129.1	-97.2	119.5	1.010	387.4	-0.17
18	137.0	-112.5	105.1	1.089	410.9	1.87
19	144.8	-125.8	88.8	1.051	434.3	-1.03
20	152.6	-136.7	70.9	1.068	457.8	0.13
21	160.4	-145.1	51.6	1.049	481.3	0.55
22	168.3	-150.8	31.3	1.029	504.8	-1.42
23	176.1	-153.6	10.5	1.054	528.3	-0.85
24	183.9	-153.6	-10.5	1.043	551.7	-1.16
25	191.7	-150.8	-31.3	1.020	575.2	0.01
26	199.6	-145.1	-51.6	1.040	598.7	1.60
27	207.4	-136.7	-70.9	1.050	622.2	1.71
28	215.2	-125.8	-88.8	1.096	645.7	-1.13
29	223.0	-112.5	-105.1	1.032	669.1	-1.64
30	230.9	-97.2	-119.5	1.085	692.6	1.10
31	238.7	-80.0	-131.6	1.062	716.1	-1.09
32	246.5	-61.4	-141.3	1.036	739.6	0.48
33	254.3	-41.5	-148.3	1.023	763.0	1.72
34	262.2	-21.0	-152.6	1.071	786.5	0.02
35	270.0	0.0	-154.0	1.029	810.0	0.05
36	277.8	21.0	-152.6	1.083	833.5	-0.67
37	285.7	41.5	-148.3	1.017	857.0	-0.43
38	293.5	61.4	-141.3	1.070	880.4	1.65
39	301.3	80.0	-131.6	1.019	903.9	-0.70
40	309.1	97.2	-119.5	1.010	927.4	1.50
41	317.0	112.5	-105.1	1.084	950.9	2.03
42	324.8	125.8	-88.8	1.081	974.3	-1.26
43	332.6	136.7	-70.9	1.051	997.8	0.60
44	340.4	145.1	-51.6	1.081	1021.3	1.29
45	348.3	150.8	-31.3	1.084	1044.8	-2.74
46	356.1	153.6	-10.5	1.010	1068.3	0.21

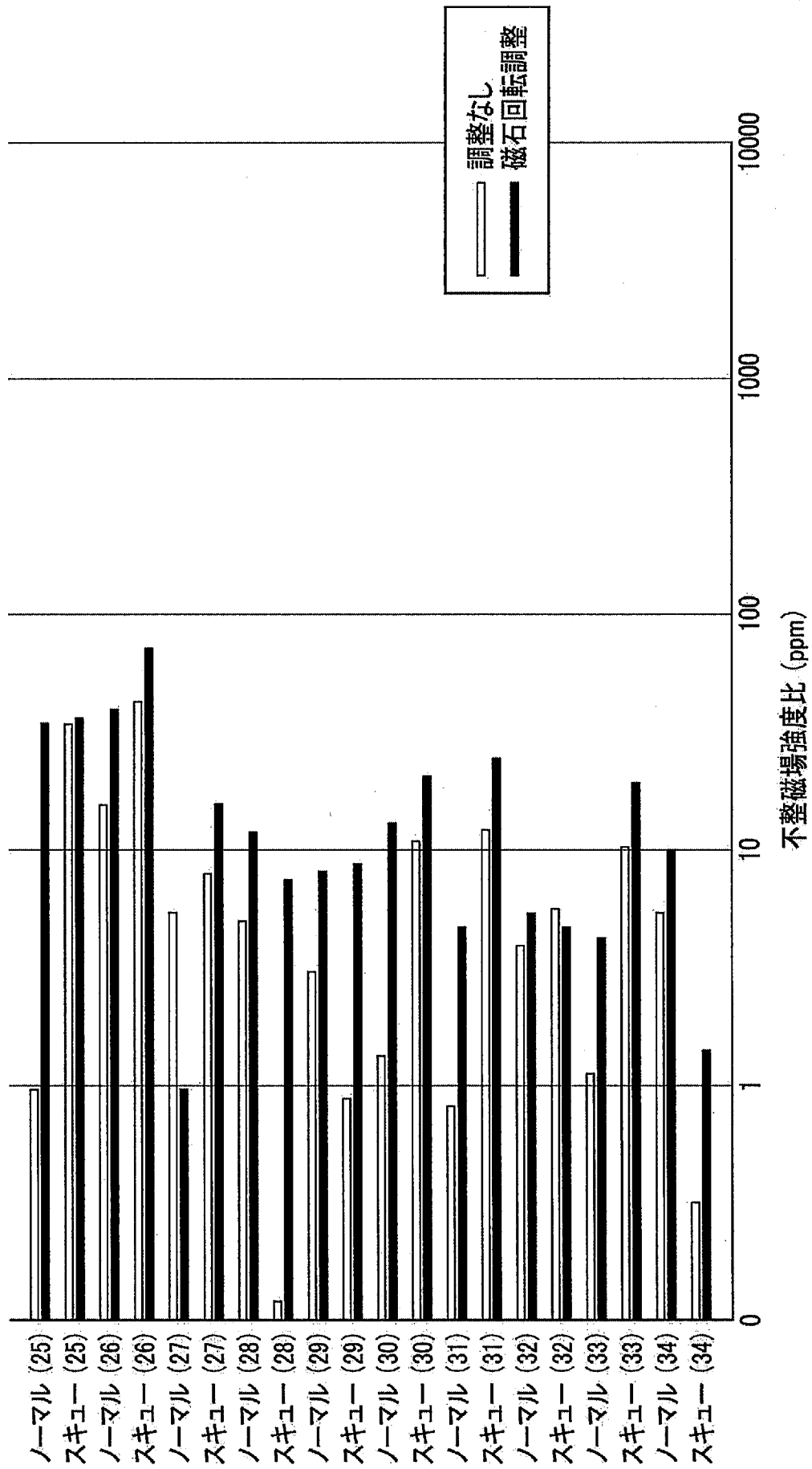
[図14A]



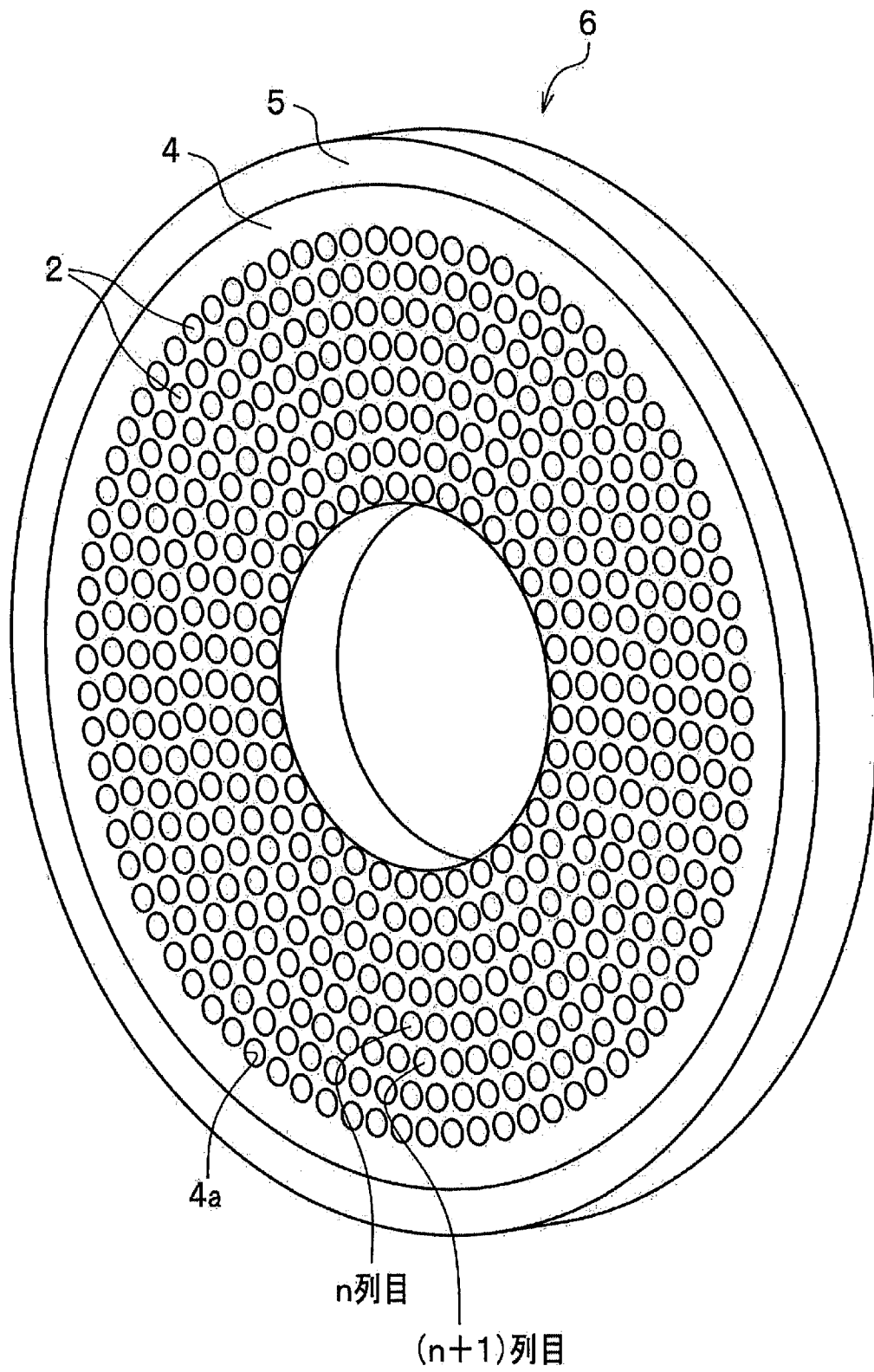
[図14B]



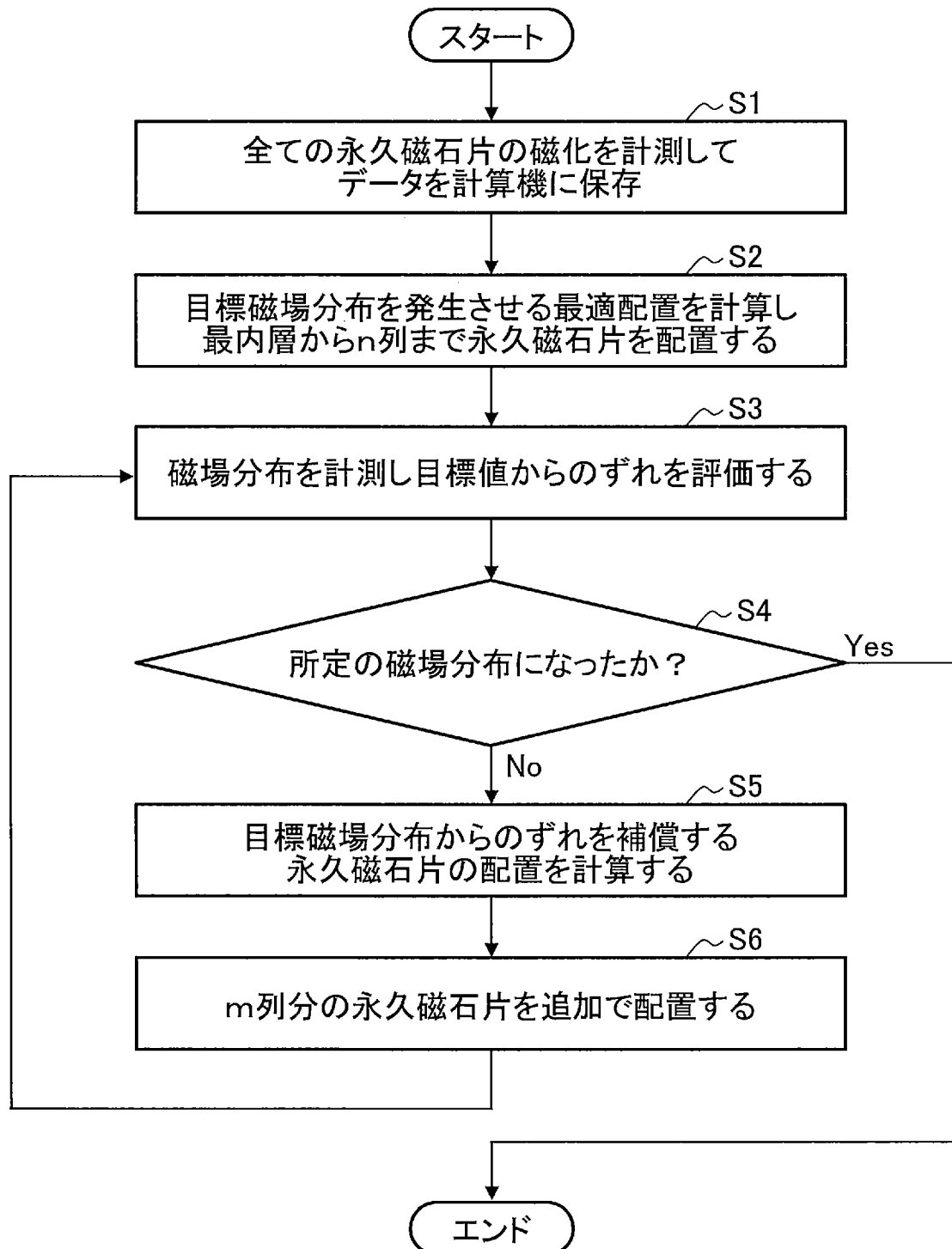
[図14C]



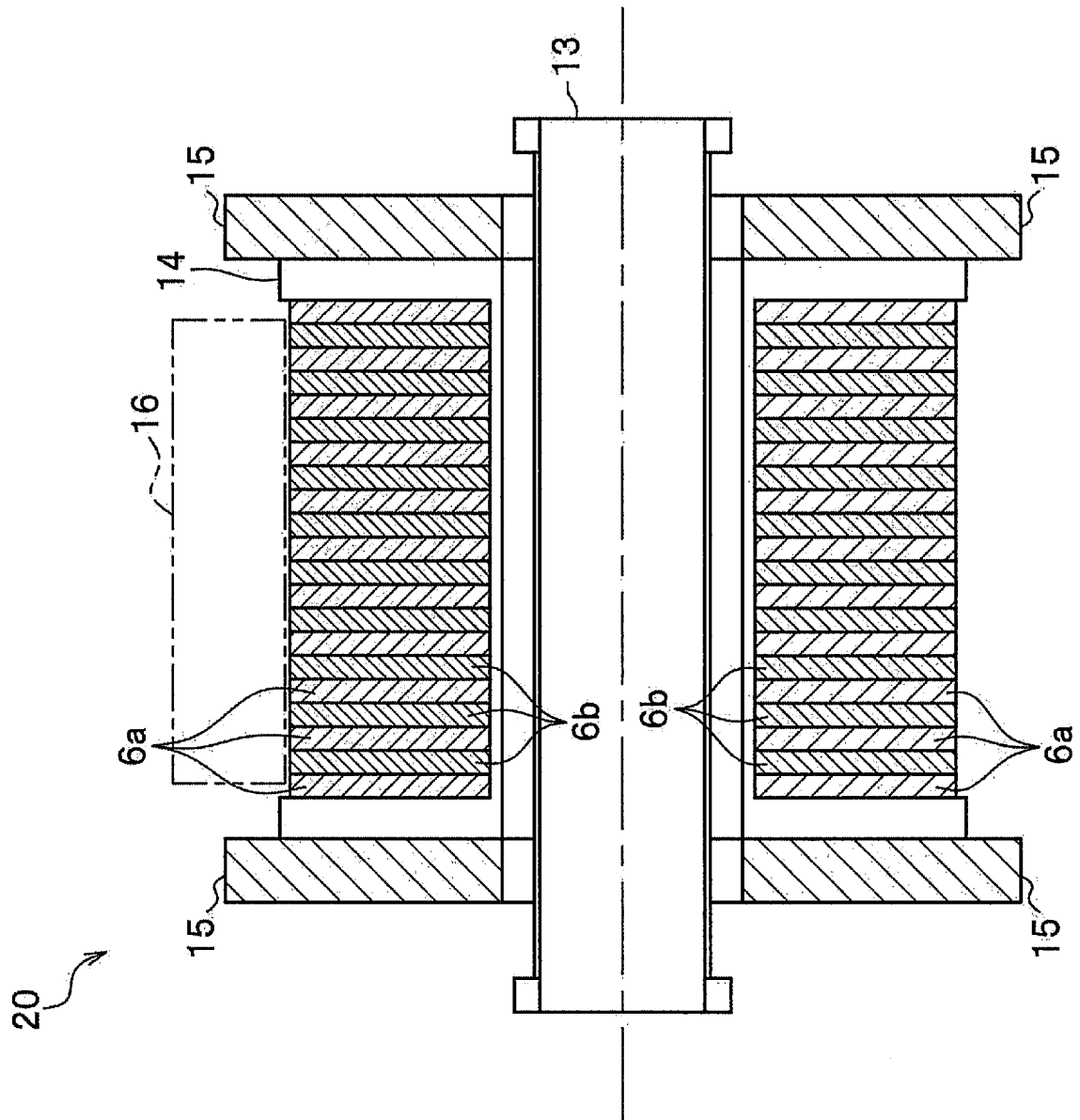
[図15]



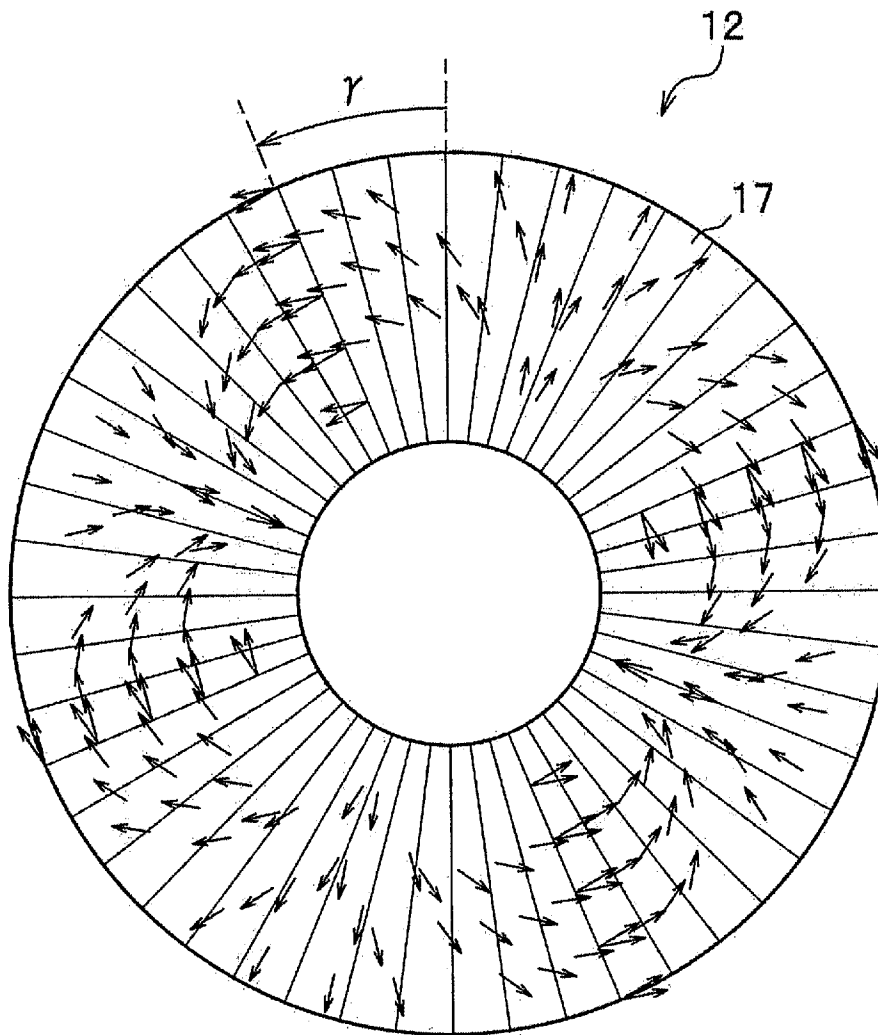
[図16]



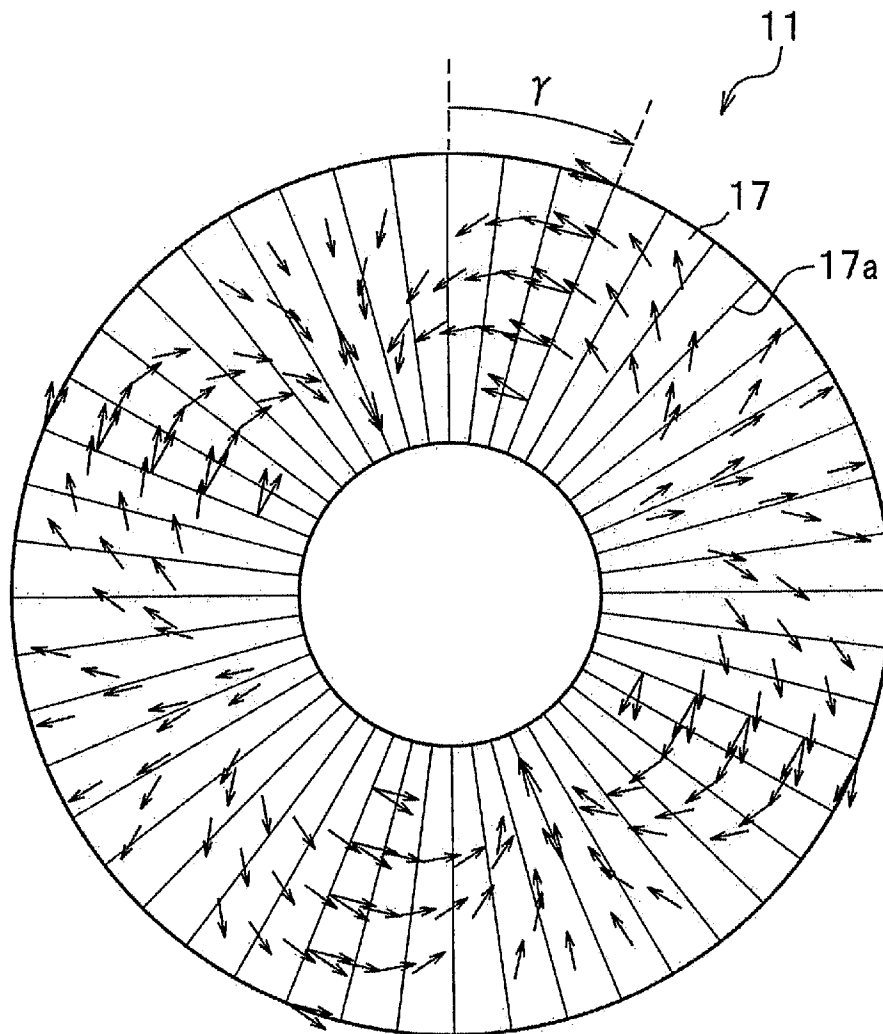
[図17]



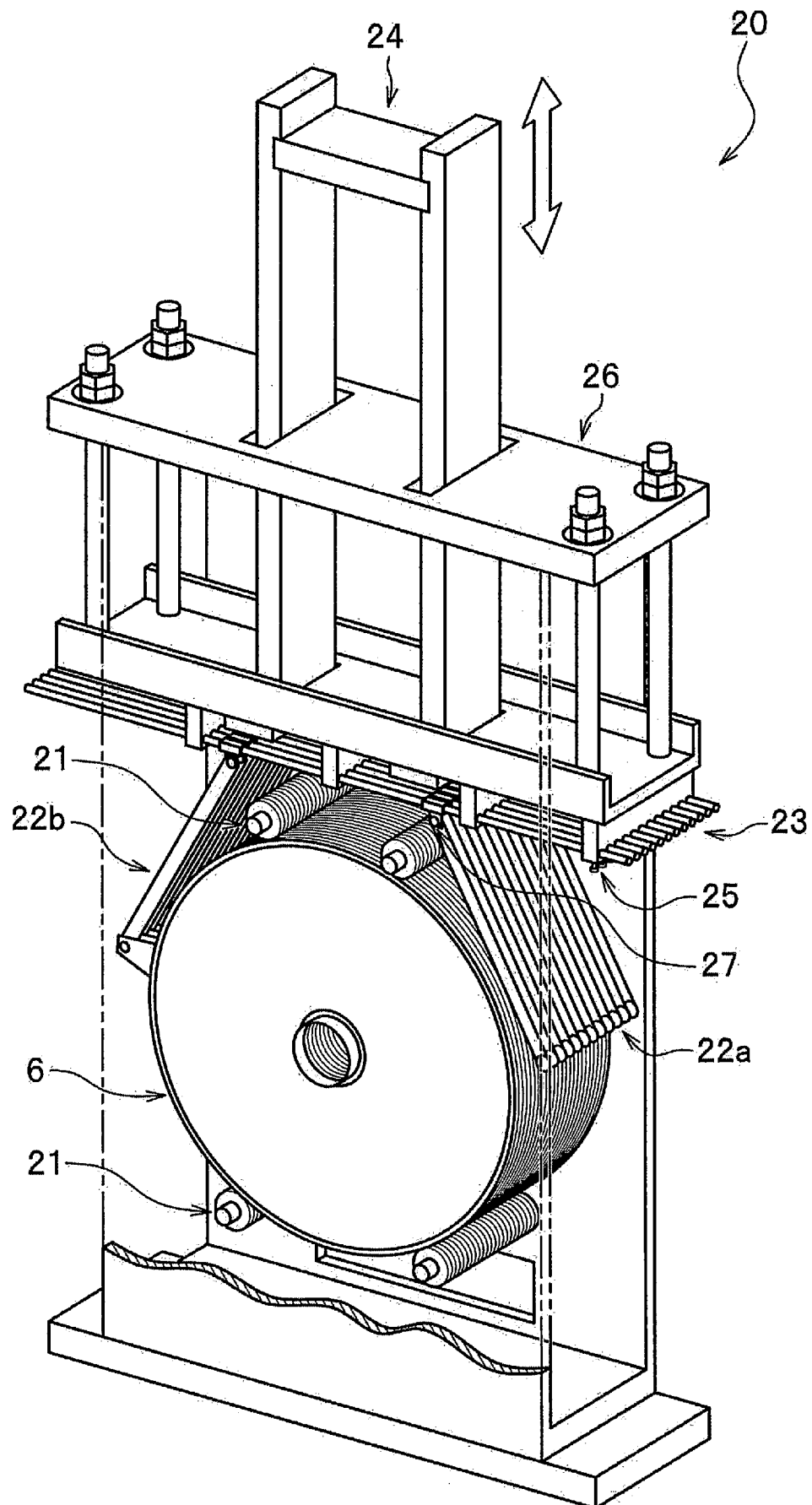
[図18]



[図19]



[図20]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2020/002054

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H05H 7/04 (2006.01) i; H01F 7/02 (2006.01) i
FI: H01F7/02 T; H05H7/04

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)

H05H7/04; H01F7/02

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.
X A	JP 6-224027 A (SHIN-ETSU CHEMICAL CO., LTD.) 12.08.1994 (1994-08-12) paragraphs [0010]-[0032], fig. 1(a)	1-3, 9 4-8, 10-14
X A	JP 2014-54633 A (SEPMAG SYSTEMS, S.L) 27.03.2014 (2014-03-27) paragraphs [0021]-[0071], fig. 3-4, 7-9	1-3, 9 4-8, 10-14
X A	JP 2003-142300 A (HITACHI METALS, LTD.) 16.05.2003 (2003-05-16) paragraphs [0006]-[0024], fig. 1	1-2, 8-11 3-7, 12-14

☐ 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
30 March 2020 (30.03.2020)

Date of mailing of the international search report
14 April 2020 (14.04.2020)

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
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2020/002054

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
JP 6-224027 A	12 Aug. 1994	(Family: none)	
JP 2014-54633 A	27 Mar. 2014	WO 2006/136237 A1 page 7, line 7 to page 20, line 30, fig. 3-4, 7-9 EP 1904237 B1 CN 101208153 A	
JP 2003-142300 A	16 May 2003	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H05H 7/04(2006.01)i; H01F 7/02(2006.01)i FI: H01F7/02 T; H05H7/04		
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）） H05H7/04; H01F7/02		
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
X A	JP 6-224027 A（信越化学工業株式会社）12.08.1994（1994-08-12） [0010] - [0032]，図1（a）	1-3，9 4-8，10-14
X A	JP 2014-54633 A（セブマグ、システムズ、ソシエタッド、リミターダ）27.03.2014 （2014-03-27） [0021] - [0071]，図3-4，7-9	1-3，9 4-8，10-14
X A	JP 2003-142300 A（日立金属株式会社）16.05.2003（2003-05-16） [0006] - [0024]，図1	1-2，8-11 3-7，12-14
☐ 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、一般的な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 30.03.2020		国際調査報告の発送日 14.04.2020
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） 井上 健一 5D 9373 電話番号 03-3581-1101 内線 3551

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2020/002054

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	6-224027	A	12.08.1994	(ファミリーなし)	
JP	2014-54633	A	27.03.2014	WO 2006/136237 A1 第7頁第7行-第20頁第 30行, 図3-4, 7-9 EP 1904237 B1 CN 101208153 A	
JP	2003-142300	A	16.05.2003	(ファミリーなし)	