

(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11月18日(18.11.2021)



(10) 国際公開番号

WO 2021/229993 A1

(51) 国際特許分類:

G01R 33/24 (2006.01) **G01N 21/64** (2006.01)
G01N 24/00 (2006.01)

立大学法人京都大学(KYOTO UNIVERSITY)
[JP/JP]; 〒6068501 京都府京都市左京区吉田
本町3 6 番地1 Kyoto (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2021/015543

(22) 国際出願日: 2021年4月15日(15.04.2021)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

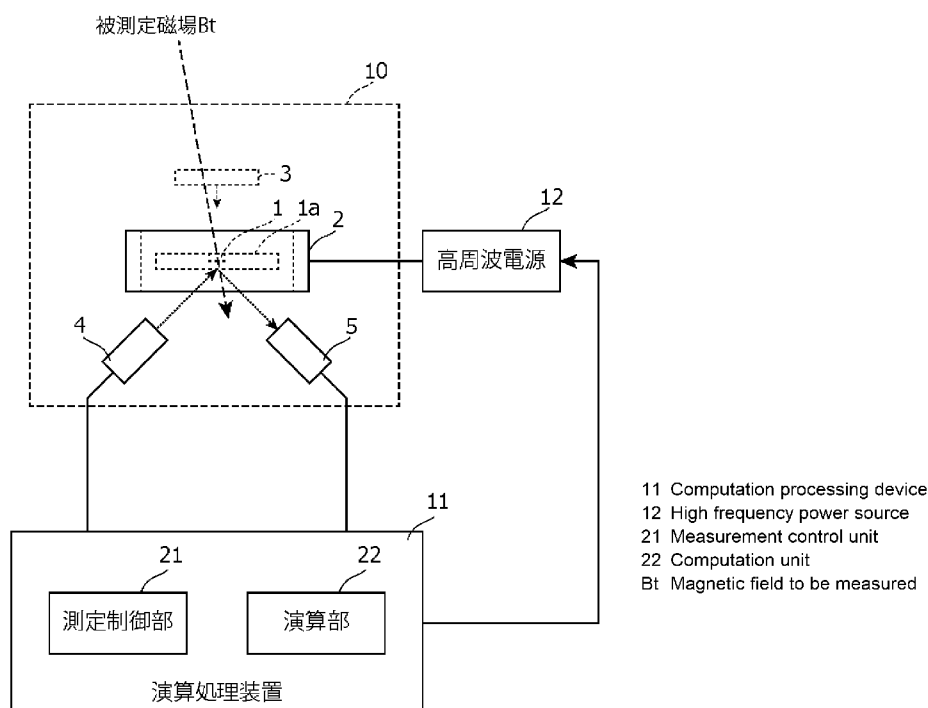
特願 2020-083739 2020年5月12日(12.05.2020) JP

(71) 出願人: スミダコーポレーション株式会社
(SUMIDA CORPORATION) [JP/JP]; 〒1040042
東京都中央区入船三丁目7 番2 号 K D
X 銀座イーストビル7 階 Tokyo (JP). 国

(72) 発明者: 芳井 義治 (YOSHII Yoshiharu);
〒9811226 宮城県名取市植松字宮島3 1 -
1 スミダ電機株式会社内 Miyagi (JP). 大塚
努(OOTSUKA Tsutomu); 〒9811226 宮城県名
取市植松字宮島3 1 - 1 スミダ電機株式
会社内 Miyagi (JP). 橋本 将輝(HASHIMOTO
Masateru); 〒9811226 宮城県名取市植松字宮島
3 1 - 1 スミダ電機株式会社内 Miyagi (JP).
水落 憲和(MIZUOCHI Norikazu); 〒6068501 京
都府京都市左京区吉田本町3 6 番地1 国立大
学法人京都大学内 Kyoto (JP). 林 寛(HAYASHI
Kan); 〒6068501 京都府京都市左京区吉田本

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

(54) 発明の名称: 磁場測定装置および磁場測定方法



(57) Abstract: A magnetic resonance member 1 comprises a diamond crystal including a plurality of nitrogen vacancy centers. A high frequency magnetic field generator 2 applies a microwave magnetic field to the magnetic resonance member 1. The plurality of nitrogen vacancy centers include nitrogen vacancy centers arranged respectively in the directions of a prescribed plurality of target axes among four axes showing the four bonding directions of carbon atoms in a diamond crystal. The magnetic resonance member 1 is disposed relative to a magnetic field to be measured Bt and oriented where

町 3 6 番地 1 国立大学法人京都大学内 Kyoto
(JP). 竹村 祐輝(TAKEMURA Yuki); 〒6068501
京都府京都市左京区吉田本町 3 6 番地 1 国
立大学法人京都大学内 Kyoto (JP).

(74) 代理人: 青木 修(AOKI Osamu); 〒1020072 東
京 都 千 代 田 区 飯 田 橋 3 - 3 - 1 1 新
生ビル5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,
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))

sensitivity to the magnetic field to be measured Bt using the nitrogen vacancy centers that are arranged respectively in the directions of the prescribed plurality of target axes is approximately maximized.

(57) 要約: 磁気共鳴部材 1 は、複数のダイヤモンド窒素-空孔中心を含むダイヤモンド結晶を有し、高周波磁場発生器 2 は、磁気共鳴部材 1 にマイクロ波の磁場を印加する。上述の複数のダイヤモンド窒素-空孔中心は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の 4 つの結合方向を示す 4 軸のうちの所定の複数の対象軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素-空孔中心を含み、上述の磁気共鳴部材 1 は、被測定磁場 B t に対して、上述の所定の複数の対象軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素-空孔中心による被測定磁場 B t の感度を略最大とする向きに配置されている。

明 細 書

発明の名称： 磁場測定装置および磁場測定方法

技術分野

[0001] 本発明は、磁場測定装置および磁場測定方法に関するものである。

背景技術

[0002] ある磁気計測装置は、電子スピン共鳴を利用した光検出磁気共鳴（ODMR：Optically Detected Magnetic Resonance）で磁気計測を行っている（例えば特許文献1参照）。

[0003] ODMRでは、サブレベルの準位と光学遷移準位とをもつ磁気共鳴部材に高周波磁場（マイクロ波）と光をそれぞれサブレベル間の励起と光遷移間の励起のために照射することで、サブレベル間の磁気共鳴による占有数の変化などが光信号により高感度で検出される。通常、基底状態の電子が緑光で励起された後、基底状態に戻る際に赤光を発する。一方、例えば、ダイヤモンド構造中の窒素と格子欠陥（以下、ダイヤモンド窒素－空孔中心（NVセンタ：Nitrogen Vacancy Center）という）中の電子は、2.87GHz程度の高周波磁場の照射により、光励起により初期化された後では、基底状態中の3つのサブレベルの中で一番低いレベル（スピン磁気量子数 $m_s = 0$ ）から、基底状態中のそれより高いエネルギー軌道のレベル（ $m_s = \pm 1$ ）に遷移する。その状態の電子が緑光で励起されると、無輻射で基底状態中の3つのサブレベルの中で一番低いレベル（ $m_s = 0$ ）に戻るため発光量が減少し、この光検出より、高周波磁場により磁気共鳴が起こったかどうかを知ることができる。ODMRでは、このような、NVセンタを有するダイヤモンドといった光検出磁気共鳴部材が使用される。

[0004] そして、NVセンタを使用した直流磁場の測定方法として、ラムゼイパルスシーケンス（Ramsey Pulse Sequence）を使用した測定方法がある。ラムゼイパルスシーケンスでは、（a）励起光をNVセンタに照射し、（b）マイクロ波の第1の $\pi/2$ パルスをNVセンタに印加し、（c）第1の $\pi/2$ パ

ルスから所定の時間間隔 t でマイクロ波の第2の $\pi/2$ パルスをNVセンタに印加し、(d) 測定光をNVセンタに照射してNVセンタの発光量を測定し、(e) 測定した発光量に基づいて磁束密度を見積もれる。

[0005] また、NVセンタを使用した交流磁場の測定方法として、スピネコーパルスシーケンス (Spin Echo Pulse Sequence) を使用した測定方法がある。スピネコーパルスシーケンスでは、(a) 励起光をNVセンタに照射し、(b) マイクロ波の第1の $\pi/2$ パルスを被測定磁場の位相0度でNVセンタに印加し、(c) マイクロ波の π パルスを被測定磁場の位相180度でNVセンタに印加し、(d) マイクロ波の第2の $\pi/2$ パルスを被測定磁場の位相360度でNVセンタに印加し、(e) 測定光をNVセンタに照射してNVセンタの発光量を測定し、(f) 測定した発光量に基づいて磁束密度を見積もれる。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2012-110489号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] ダイヤモンド窒素-空孔中心 (NVセンタ) は、窒素と空孔との配列方向 (以下、N-V方向ともいう) に対して平行な磁場成分に対して感度を有するため、N-V方向に対する被測定磁場 B_t の方向によっては、被測定磁場 B_t が良好な感度で検出されない可能性がある。

[0008] 本発明は、上記の問題に鑑みてなされたものであり、被測定磁場 B_t を良好な感度で検出する磁場測定装置および磁場測定方法を得ることを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明に係る磁場測定装置は、複数のダイヤモンド窒素-空孔中心を含むダイヤモンド結晶を有する磁気共鳴部材と、磁気共鳴部材にマイクロ波の磁

場を印加する高周波磁場発生器と、高周波磁場発生器にマイクロ波の電流を導通させる高周波電源と、磁気共鳴部材から、被測定磁場に対応する物理的事象を検出する検出装置と、高周波電源を制御し、検出装置により検出された物理的事象の検出値を特定する測定制御部と、その検出値に基づいて被測定磁場を演算する演算部とを備える。そして、上述の複数のダイヤモンド窒素－空孔中心は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸のうちの所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心を含み、上述の磁気共鳴部材は、被測定磁場に対して、上述の所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心による被測定磁場の感度を略最大とする向きに配置されている。

[0010] 本発明に係る磁場測定方法は、複数のダイヤモンド窒素－空孔中心を含むダイヤモンド結晶を有する磁気共鳴部材にマイクロ波の磁場を印加するステップと、磁気共鳴部材から被測定磁場に対応する物理的事象を検出し物理的事象の検出値を特定するステップと、検出値に基づいて被測定磁場を演算するステップとを備える。そして、上述の複数のダイヤモンド窒素－空孔中心は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸のうちの所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心を含み、上述の磁気共鳴部材は、被測定磁場に対して、上述の所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心による被測定磁場の感度を略最大とする向きに配置されている。

発明の効果

[0011] 本発明によれば、被測定磁場 B_t を良好な感度で検出する磁場測定装置および磁場測定方法を得ることができる。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]図1は、本発明の実施の形態に係る磁場測定装置の構成を示す図である。

[図2]図2は、図1における磁気共鳴部材1のNVセンタの複数の向きについて説明する図である。

[図3]図3は、NVセンタの複数の向きに対応するNVセンタのゼーマン分裂後の蛍光強度の周波数特性について説明する図である。

[図4]図4は、実施の形態1における被測定磁場 B_t の印加方向を説明する斜視図である。

[図5]図5は、実施の形態2における被測定磁場 B_t の印加方向を説明する斜視図である。

[図6]図6は、実施の形態3における被測定磁場 B_t の印加方向を説明する斜視図である。

発明を実施するための形態

[0013] 以下、図に基づいて本発明の実施の形態を説明する。

[0014] 実施の形態1.

[0015] 図1は、本発明の実施の形態に係る磁場測定装置の構成を示す図である。

図1に示す磁場測定装置は、磁気センサ部10と、演算処理装置11と、高周波電源12とを備える。

[0016] 磁気センサ部10は、所定の位置（例えば、検査対象物体の表面上または表面上方）において、被測定磁場 B_t （例えばその強度など）を検出する。なお、被測定磁場は、直流磁場でもよいし、単一周波数の交流磁場でもよいし、複数の周波数成分を有する所定期期の交流磁場でもよい。

[0017] この実施の形態では、磁気センサ部10は、磁気共鳴部材1および高周波磁場発生器2を備える。また、必要に応じて、磁気センサ部10は、静磁場発生部3を備える。

[0018] 磁気共鳴部材1は、複数のダイヤモンド窒素－空孔中心（NVセンタ）を含むダイヤモンド結晶を有する。つまり、磁気共鳴部材1は、アンサンブルな磁気共鳴部材であり、この実施の形態では、光検出磁気共鳴部材として使用される。ここでは、磁気共鳴部材1は、ダイヤモンド結晶の板材であって、支持部材1aに固定されている。

[0019] 高周波磁場発生器2は、後述のマイクロ波を磁気共鳴部材1に印加する。ここでは、高周波電源12は、そのマイクロ波の電流を生成して高周波磁場

発生器 2 に導通させる。高周波磁場発生器 2 は例えばコイルや、LC 共振装置や、スリットアンテナや、棒状アンテナなどの一種であるか、それらの複数の装置を組み合わせたものである。

[0020] なお、静磁場発生部 3 は、磁気共鳴部材 1 内の NV センタのエネルギー準位をゼーマン分裂させる静磁場（直流磁場）を印加する。静磁場発生部 3 としては、永久磁石、コイル（つまり、電磁石）などが使用される。静磁場発生部 3 としてはコイルが使用される場合、直流電源が設けられ、そのコイルに電氣的に接続され、そのコイルに直流電流を供給し、これにより、静磁場が発生する。NV センタでは、基底状態が $m_s = 0, +1, -1$ の三重項状態であり、 $m_s = +1$ の準位および $m_s = -1$ の準位が上述の静磁場によってゼーマン分裂する。磁気共鳴部材 1 における NV センタは、ゼーマン分裂可能なエネルギー準位を有し、また、ゼーマン分裂時のエネルギー準位のシフト幅が互いに異なる複数の向き（つまり、上述の N-V 方向）を取り得る。

[0021] また、この実施の形態では、磁気センサ部 10 は、磁気共鳴部材 1 から、被測定磁場に対応する物理的事象（ここでは蛍光）を検出する検出装置として、照射装置 4 および受光装置 5 を備える。照射装置 4 は、光検出磁気共鳴部材としての磁気共鳴部材 1 に光（所定波長の励起光と所定波長の測定光）を照射する。受光装置 5 は、測定光の照射時において磁気共鳴部材 1 から発せられる蛍光を検出する。なお、この物理的事象は、ここでは光学的に検出されるが、電気特性の変化（磁気共鳴部材 1 の抵抗値の変化など）であってもよく、電氣的に検出されてもよい。

[0022] 図 2 は、図 1 における磁気共鳴部材 1 の NV センタの複数の向きについて説明する図である。図 2 に示すように、ダイヤモンド結晶において、欠陥（空孔）（V）および不純物としての窒素（N）によって NV センタが形成される。ダイヤモンド結晶内の欠陥（空孔，V）に対して、隣接する窒素（N）の取り得る位置（つまり、N-V 方向）は 4 種類ある。

[0023] 磁気共鳴部材 1 は、この 4 つの N-V 方向のうちの複数（2 つ、3 つ、4

つのうちのいずれか)のN-V方向のNVセンタを含んでおり、ダイヤモンド結晶格子上での窒素および空孔の位置関係に基づき、各NVセンタは、4つのN-V方向のいずれかを有し、被測定磁場 B_t における、N-V方向に対して平行な成分に対して感度を有するため、そのN-V方向と被測定磁場 B_t とのなす角度に応じた強度で、被測定磁場 B_t に反応する。

[0024] このように、磁気共鳴部材1内の複数のNVセンタは、ダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸のうちの所定の複数の軸(以下、対象軸という)の方向にそれぞれ配列しているNVセンタを含む。そして、磁気共鳴部材1は、被測定磁場 B_t に対して、上述の対象軸の方向にそれぞれ配列しているNVセンタによる被測定磁場 B_t の感度を略最大とする向きに配置されている。

[0025] 図3は、NVセンタの複数の向きに対応するNVセンタのゼーマン分裂後の蛍光強度の周波数特性(マイクロ波周波数に対する蛍光強度の特性)について説明する図である。なお、磁気共鳴部材1に静磁場 B_0 が印加されている場合には、4つのN-V方向のNVセンタにおけるゼーマン分裂後のサブ準位が互いに異なり、図3に示すように、マイクロ波の周波数に対する蛍光強度の特性において、それぞれの向き i に対応して、互いに異なるディップ周波数対(f_{i+} , f_{i-})が現れる。このように、上述の4つのN-V方向 i に対応して、4つのディップ周波数対(f_{i+} , f_{i-})がそれぞれ個別的に現れる。

[0026] また、上述のマイクロ波は、被測定磁場 B_t に対して上述の対象軸に対応する所定のディップ周波数(つまり、ODMRにおいて蛍光強度が落ち込むマイクロ波周波数)を含む周波数成分を有する。静磁場 B_0 が磁気共鳴部材1に印加されている場合には、この所定のディップ周波数は、図3に示すようなゼーマン分裂後のものであり、静磁場 B_0 が磁気共鳴部材1に印加されていない場合には、この所定のディップ周波数は、ゼーマン分裂していない状態のものである。

[0027] 図4は、実施の形態1における被測定磁場 B_t の印加方向を説明する斜視

図である。

- [0028] 実施の形態1では、上述の対象軸を図4における上述の4軸A1～A4のうちの2軸A1, A2とし、対象軸A1, A2のうちの一方の軸に対する被測定磁場 B_t の角度を変数とすると、感度（ここでは、被測定磁場 B_t における2軸A1, A2にそれぞれ平行な成分の和）を最大にする変数の値は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ （約109度）としたとき、 $((180 - \theta) / 2)$ 度となる。
- [0029] したがって、実施の形態1では、図4に示すように、磁気共鳴部材1は、被測定磁場 B_t が、磁気共鳴部材1内のダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸A1～A4のうちの2軸A1, A2に対して、それぞれ略 $((180 - \theta) / 2)$ 度をなし、その4軸のうちの残りの2軸A3, A4に対して、それぞれ略90度をなすように配置されている。
- [0030] つまり、図4に示すように、軸A1, A2の張る平面をP1とし、軸A3, A4の張る平面をP2とし、平面P1, P2の両方に垂直な平面をP3としたとき、被測定磁場 B_t の方向が平面P1, P3に対して略平行であり、かつ平面P2に対して略垂直となるように、磁気共鳴部材1は配置される。
- [0031] したがって、実施の形態1では、上述のマイクロ波は、上述の2軸A1, A2に対応する所定のディップ周波数を含む周波数成分を有する。
- [0032] 実施の形態1では、被測定磁場 B_t のうちの対象軸A1, A2方向の成分の大きさは、それぞれ、 $B_t \times \cos((180 - \theta) / 2)$ となり、軸A3, A4方向の成分の大きさは、0となる。したがって、実施の形態1での磁気共鳴部材1の感度は、基準感度に比べ、 $2 \times \cos((180 - \theta) / 2)$ 倍（つまり、約1.63倍）となる。ここで、基準感度は、ダイヤモンド結晶の1軸のみに対して平行に被測定磁場 B_t を磁気共鳴部材1に印加し、その1軸の方向がN-V方向となっているNVセンタによる感度である。
- [0033] 図1に戻り、演算処理装置11は、例えばコンピュータを備え、プログラムをコンピュータで実行して、各種処理部として動作する。この実施の形態では、演算処理装置11は、検出された光学的あるいは電氣的な信号データ

を図示せぬ記憶装置（メモリーなど）に保存し、測定制御部 2 1 および演算部 2 2 として制御および演算動作を行う。

[0034] 測定制御部 2 1 は、高周波電源 1 2 を制御し、上述の検出装置（ここでは、照射装置 4 および受光装置 5）により検出された物理的事象（ここでは蛍光の強度）の検出値を特定する。

[0035] この実施の形態では、測定制御部 2 1 は、ODMR に基づき、所定の測定シーケンスに従って高周波電源 1 2 および照射装置 4 を制御し、受光装置 5 により検出された蛍光の検出光量を特定する。例えば、照射装置 4 は、レーザーダイオードなどを光源として備え、受光装置 5 は、フォトダイオードなどを受光素子として備え、測定制御部 2 1 は、受光素子の出力信号に対して増幅などを行って得られる受光装置 5 の出力信号に基づいて、上述の検出光量を特定する。

[0036] 演算部 2 2 は、測定制御部 2 1 によって得られ、記憶装置に保存されていた検出値に基づいて被測定磁場を演算する

[0037] 例えば、測定制御部 2 1 は、所定測定シーケンスで高周波電源 1 2 および照射装置 4 を制御して、上述の物理的事象の検出値を特定する。この実施の形態では、この測定シーケンスは、被測定磁場の周波数などに従って設定される。例えば、被測定磁場が直流磁場、比較的低速で単調増加する磁場、または比較的低速で単調減衰する磁場である場合には、この測定シーケンスには、ラムゼイパルスシーケンスが適用され、被測定磁場が比較的高周波数の交流磁場である場合には、この測定シーケンスには、スピンエコーパルスシーケンス（ハーンエコーシーケンスなど）が適用される。ただし、測定シーケンスは、これに限定されるものではない。例えば、被測定磁場が比較的低周波数の交流磁場である場合、被測定磁場の 1 周期において、複数回、ラムゼイパルスシーケンス（つまり、直流磁場の測定シーケンス）で、磁場測定を行い、それらの磁場測定の結果に基づいて、被測定磁場（強度、波形など）を特定するようにしてもよい。

[0038] 次に、実施の形態 1 に係る磁場測定装置の動作について説明する。

- [0039] まず、磁気センサ部 10 が、被測定磁場 B_t の方向に応じて上述のように磁気共鳴部材 1 が配置されるように配置される。
- [0040] 次に、測定制御部 21 は、所定の測定シーケンスを実行し、磁気共鳴部材 1 の物理的事象の検出値（ここでは蛍光強度）を磁気センサ部 10 から取得し、演算部 22 は、その検出値に基づいて、測定位置の磁場（強度など）を特定する。その際、複数の対象軸による物理的事象（ここでは蛍光）の強度が合成されることで検出値が大きくなり、感度が高くなる。
- [0041] その測定シーケンスにおいて、測定制御部 21 は、所定のタイミングで、高周波電源 12 で、上述のように対象軸に対応するディップ周波数の周波数成分を含むマイクロ波の電流を高周波磁場発生器 2 に導通させ、高周波磁場発生器 2 にそのようなマイクロ波を磁気共鳴部材 1 に印加させる。
- [0042] 以上のように、上記実施の形態 1 によれば、磁気共鳴部材 1 は、複数のダイヤモンド窒素－空孔中心を含むダイヤモンド結晶を有し、高周波磁場発生器 2 は、磁気共鳴部材 1 にマイクロ波の磁場を印加する。上述の複数のダイヤモンド窒素－空孔中心は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の 4 つの結合方向を示す 4 軸のうちの所定の複数の対象軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心を含み、上述の磁気共鳴部材 1 は、被測定磁場 B_t に対して、上述の所定の複数の対象軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心による被測定磁場 B_t の感度を略最大とする向きに配置されている。
- [0043] 具体的には、実施の形態 1 では、対象軸は、磁気共鳴部材 1 内のダイヤモンド結晶における炭素原子の 4 つの結合方向を示す 4 軸のうちの 2 軸であり、磁気共鳴部材 1 は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ としたときに、被測定磁場 B_t が対象軸の 2 軸に対してそれぞれ略 $((180 - \theta) / 2)$ 度をなし、その 4 軸のうちの残りの 2 軸に対して、それぞれ略 90 度をなすように配置されている。
- [0044] これにより、対象軸（実施の形態 1 では 2 軸）に対して最適な角度で被測定磁場 B_t が印加されるため、被測定磁場 B_t が良好な感度で検出される。

[0045] 実施の形態2.

[0046] 図5は、実施の形態2における被測定磁場 B_t の印加方向を説明する斜視図である。

[0047] 実施の形態2では、図5に示すように、上述の対象軸が、上述の4軸 $A_1 \sim A_4$ のうちの3軸 A_1, A_2, A_3 とされ、ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ （約 109° ）としたときに、磁気共鳴部材1内のダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸のうちの2軸 A_1, A_2 の間の中心を通る直線 L に対する被測定磁場 B_t の角度を α とし、この α を変数とすると、感度（ここでは、被測定磁場 B_t における3軸 $A_1 \sim A_3$ にそれぞれ平行な成分の和）を最大にする変数の値は、 $\arctan(\tan(\theta/2)/3)$ となる。

[0048] したがって、実施の形態2では、磁気共鳴部材1は、被測定磁場 B_t が、
（a）上述の2軸 A_1, A_2 に対して同一の角度をなし、かつ、（b）上述の α が略 $\arctan(\tan(\theta/2)/3)$ となるように配置されている。

[0049] つまり、図5に示すように、軸 A_1, A_2 の張る平面を P_1 とし、軸 A_3, A_4 の張る平面を P_2 としたとき、被測定磁場 B_t の方向が、平面 P_2 に対して略平行であり、かつ、平面 P_1 に対して略角度 α で交差するように、磁気共鳴部材1は配置される。

[0050] したがって、実施の形態2では、上述のマイクロ波は、上述の3軸 A_1, A_2, A_3 に対応する所定のディップ周波数を含む周波数成分を有する。

[0051] 実施の形態2では、被測定磁場 B_t のうちの対象軸 A_1, A_2 方向の成分の大きさは、それぞれ、 $B_t \times \cos(\alpha) \times \cos(\theta/2)$ となり、対象軸 A_3 方向の成分の大きさは、 $B_t \times \cos(\theta/2 - \alpha)$ となる。したがって、実施の形態2での磁気共鳴部材1の感度は、基準感度に比べ、 $(2 \times \cos(\alpha) \times \cos(\theta/2) + \cos(\theta - \alpha))$ 倍（つまり、上述の角度 α が約 $25.0^\circ (= \arctan(0.467))$ であるので、約1.92倍）となる。ここで、基準感度は、上述したものと同様である。

- [0052] なお、実施の形態2に係る磁場測定装置のその他の構成および動作については実施の形態1と同様であるので、その説明を省略する。
- [0053] 以上のように、上記実施の形態2によれば、対象軸が3軸とされ、その対象軸に対して最適な角度で被測定磁場 B_t が印加されるため、被測定磁場 B_t が良好な感度で検出される。
- [0054] 実施の形態3.
- [0055] 図6は、実施の形態3における被測定磁場 B_t の印加方向を説明する斜視図である。
- [0056] 実施の形態3では、上述の対象軸を図6における上述の4軸 $A_1 \sim A_4$ のすべてとし、対象軸 $A_1 \sim A_4$ のうちの1つの軸に対する被測定磁場 B_t の角度を変数とすると、感度（ここでは、被測定磁場 B_t における4軸 $A_1 \sim A_4$ にそれぞれ平行な成分の和）を最大にする変数の値は、ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ （約 109° ）としたとき、 $(\theta/2)$ 度となる。
- [0057] したがって、実施の形態3では、図6に示すように、磁気共鳴部材1は、被測定磁場 B_t が、磁気共鳴部材1内のダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸に対して、それぞれ略 $(\theta/2)$ 度をなすように配置されている。
- [0058] つまり、図6に示すように、軸 A_1 、 A_2 の張る平面を P_1 とし、軸 A_3 、 A_4 の張る平面を P_2 とし、平面 P_1 、 P_2 の両方に垂直な平面を P_3 としたとき、被測定磁場 B_t の方向が、平面 P_1 、 P_2 に対して略平行であり、かつ、平面 P_3 に対して略垂直となるように、磁気共鳴部材1は配置される。
- [0059] したがって、実施の形態3では、上述のマイクロ波は、上述の4軸 $A_1 \sim A_4$ に対応する所定のディップ周波数を含む周波数成分を有する。
- [0060] 実施の形態3では、被測定磁場 B_t のうちの軸 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 の方向の成分の大きさは、それぞれ、 $B_t \times \cos(\theta/2)$ となる。したがって、実施の形態3での磁気共鳴部材1の感度は、基準感度に比べ、 $(4 \times$

$\cos(\theta/2)$ 倍（つまり、約 2.32 倍）となる。ここで、基準感度は、上述したものと同様である。

[0061] なお、実施の形態 3 に係る磁場測定装置のその他の構成および動作については実施の形態 1 と同様であるので、その説明を省略する。

[0062] 以上のように、上記実施の形態 3 によれば、対象軸が 4 軸とされ、その対象軸に対して最適な角度で被測定磁場 B_t が印加されるため、被測定磁場 B_t が良好な感度で検出される。

[0063] なお、上述の実施の形態に対する様々な変更および修正については、当業者には明らかである。そのような変更および修正は、その主題の趣旨および範囲から離れることなく、かつ、意図された利点を弱めることなく行われてもよい。つまり、そのような変更および修正が請求の範囲に含まれることを意図している。

産業上の利用可能性

[0064] 本発明は、例えば、磁場測定装置および磁場測定方法に適用可能である。

請求の範囲

- [請求項1] 複数のダイヤモンド窒素－空孔中心を含むダイヤモンド結晶を有する磁気共鳴部材と、
前記磁気共鳴部材にマイクロ波の磁場を印加する高周波磁場発生器と、
前記高周波磁場発生器に前記マイクロ波の電流を導通させる高周波電源と、
前記磁気共鳴部材から、被測定磁場に対応する物理的事象を検出する検出装置と、
前記高周波電源を制御し、前記検出装置により検出された前記物理的事象の検出値を特定する測定制御部と、
前記検出値に基づいて前記被測定磁場を演算する演算部とを備え、
前記複数のダイヤモンド窒素－空孔中心は、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸のうちの所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心を含み、
前記磁気共鳴部材は、前記被測定磁場に対して、前記所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心による前記被測定磁場の感度を略最大とする向きに配置されていること、
を特徴とする磁場測定装置。
- [請求項2] 前記マイクロ波は、前記被測定磁場に対して前記所定の複数の軸に対応する所定のディップ周波数を含む周波数成分を有することを特徴とする請求項1記載の磁場測定装置。
- [請求項3] 前記磁気共鳴部材は、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ としたときに、前記被測定磁場が、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の4つの結合方向を示す4軸のうちの2軸に対して、それぞれ略 $((180 - \theta) / 2)$ 度をなすように配置されており、
前記所定の複数の軸は、前記被測定磁場に対して略 $((180 - \theta$

) / 2) 度をなす前記 2 軸であること、

を特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の磁場測定装置。

[請求項 4]

前記磁気共鳴部材は、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ とし、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の 4 つの結合方向を示す 4 軸のうちの 2 軸の間の中心を通る直線に対する前記被測定磁場の角度を α としたとき、前記被測定磁場が、(a) 前記 2 軸に対して同一の角度をなし、かつ、(b) 前記 α が略 $\arctan(\tan(\theta/2)/3)$ となるように配置されており、

前記所定の複数の軸は、前記 4 軸のうちの前記 2 軸を含む 3 軸であること、

を特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の磁場測定装置。

[請求項 5]

前記磁気共鳴部材は、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の結合角を θ としたときに、前記被測定磁場が、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の 4 つの結合方向を示す 4 軸に対して、それぞれ略 $(\theta/2)$ 度をなすように配置されており、

前記所定の複数の軸は、前記 4 軸であること、

を特徴とする請求項 1 または請求項 2 記載の磁場測定装置。

[請求項 6]

複数のダイヤモンド窒素－空孔中心を含むダイヤモンド結晶を有する磁気共鳴部材にマイクロ波の磁場を印加するステップと、

前記磁気共鳴部材から被測定磁場に対応する物理的事象を検出し前記物理的事象の検出値を特定するステップと、

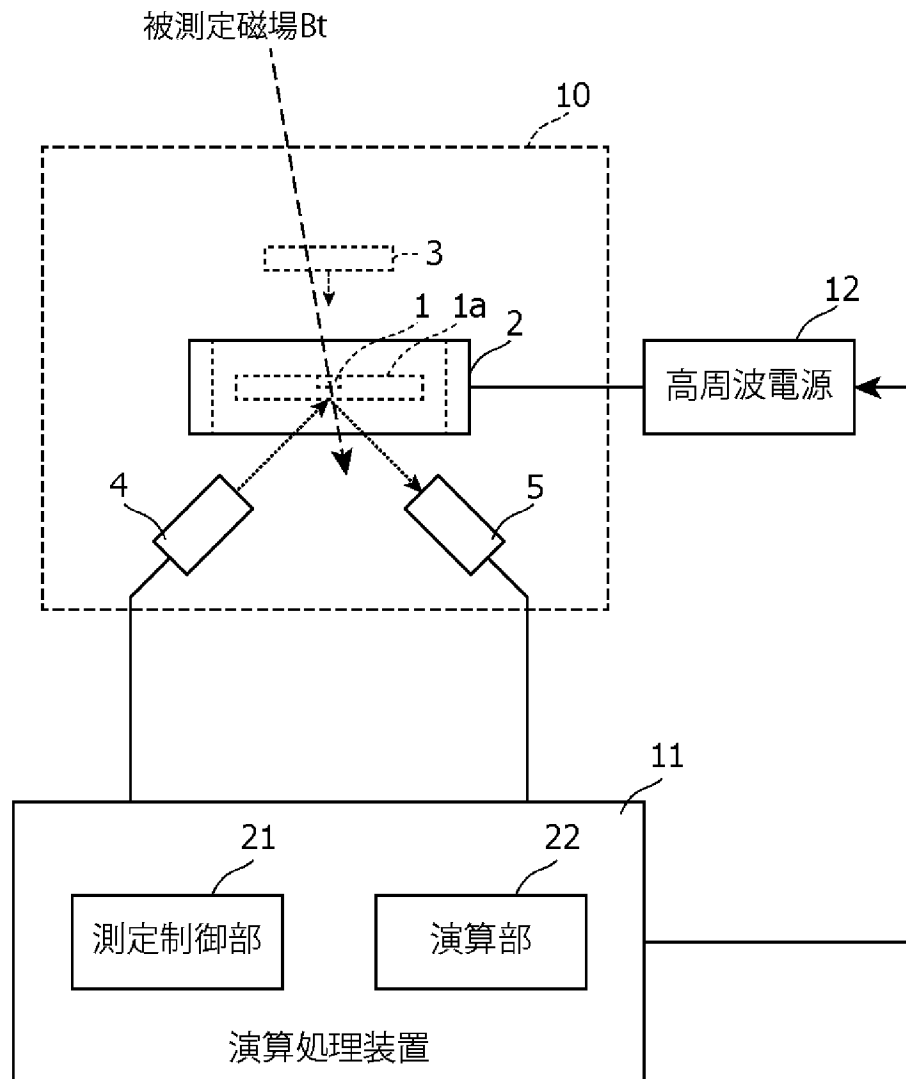
前記検出値に基づいて前記被測定磁場を演算するステップとを備え、

前記複数のダイヤモンド窒素－空孔中心は、前記ダイヤモンド結晶における炭素原子の 4 つの結合方向を示す 4 軸のうちの所定の複数の軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心を含み、

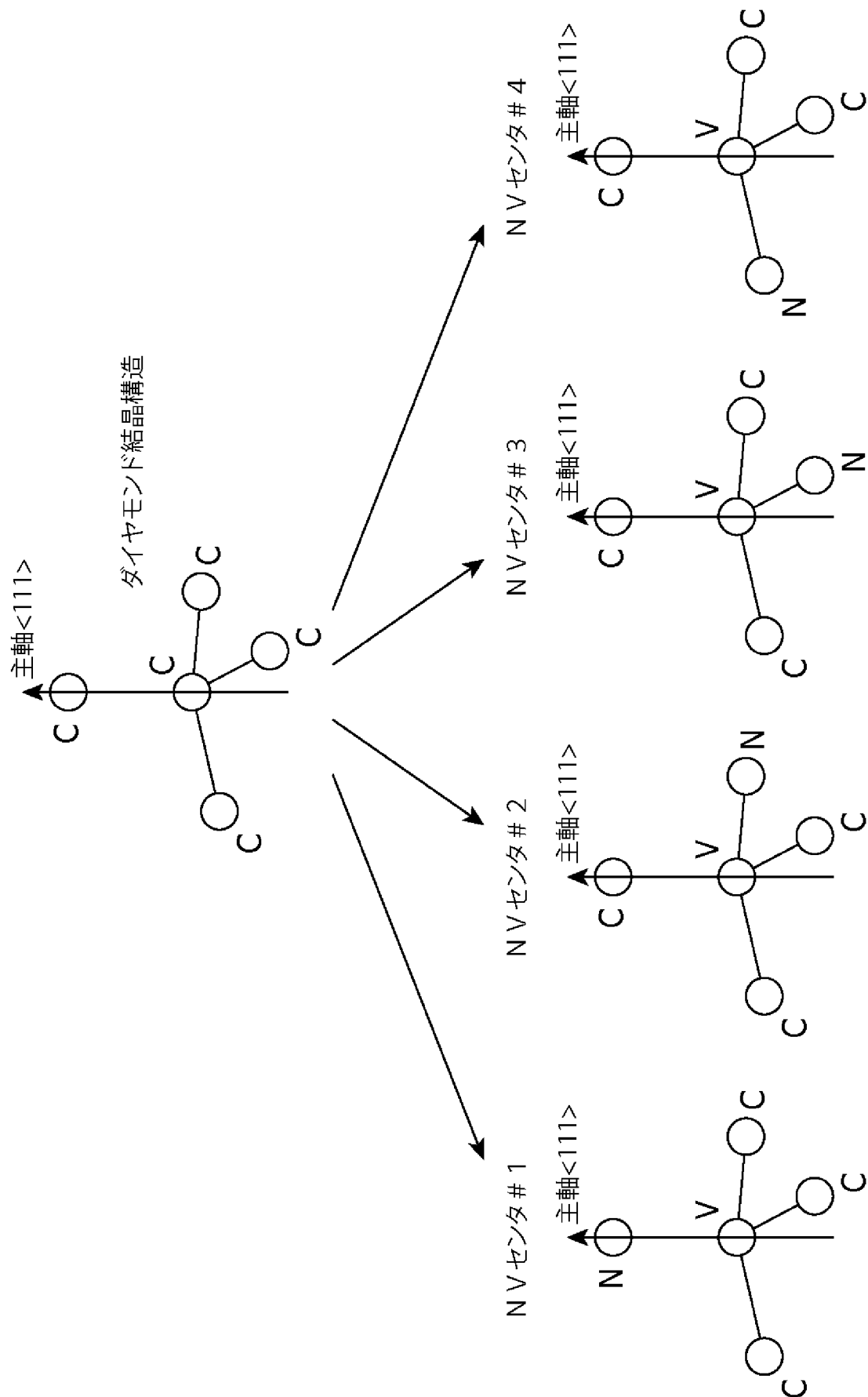
前記磁気共鳴部材は、前記被測定磁場に対して、前記所定の複数の

軸の方向にそれぞれ配列しているダイヤモンド窒素－空孔中心による前記被測定磁場の感度を略最大とする向きに配置されていること、
を特徴とする磁場測定方法。

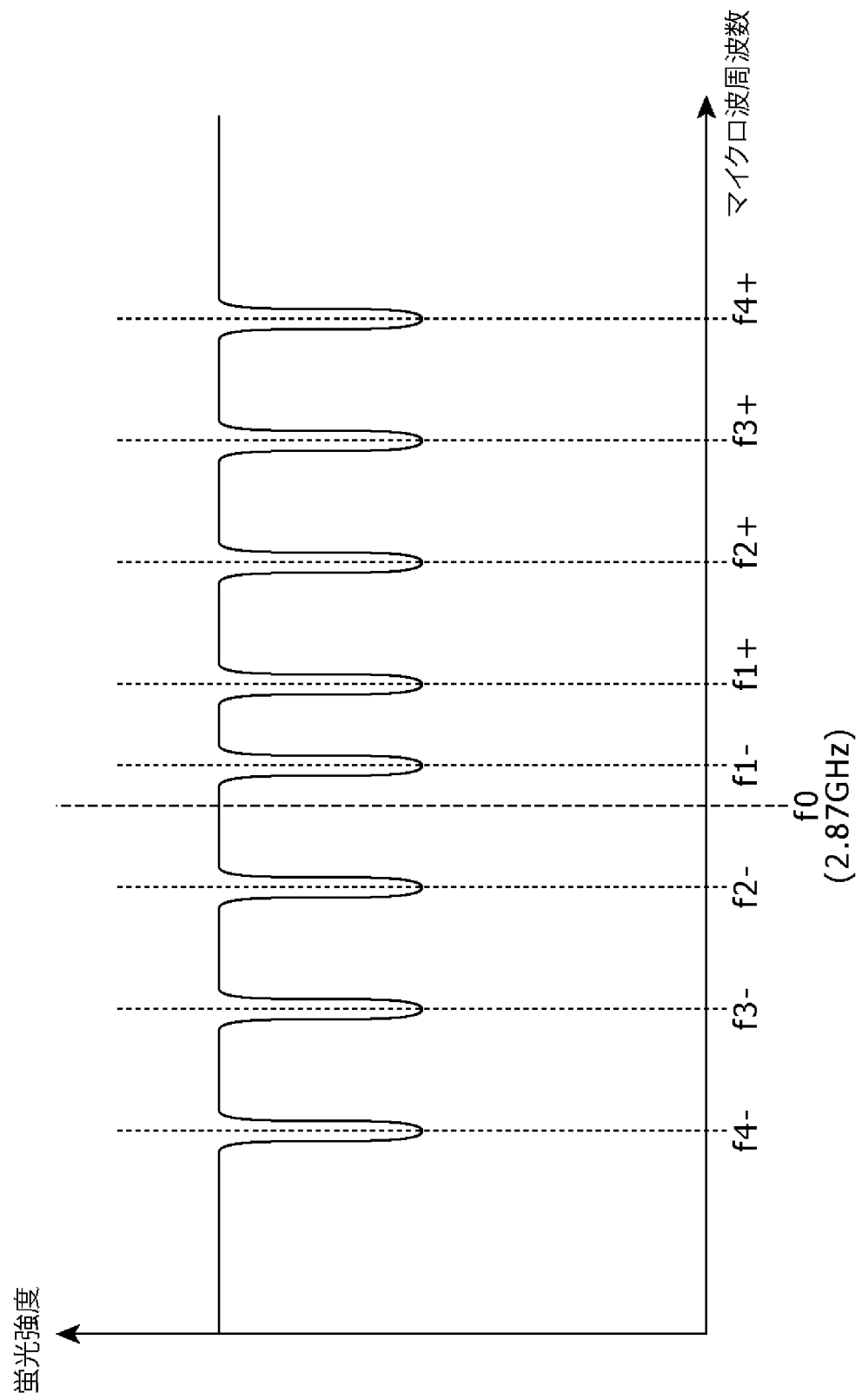
[図1]



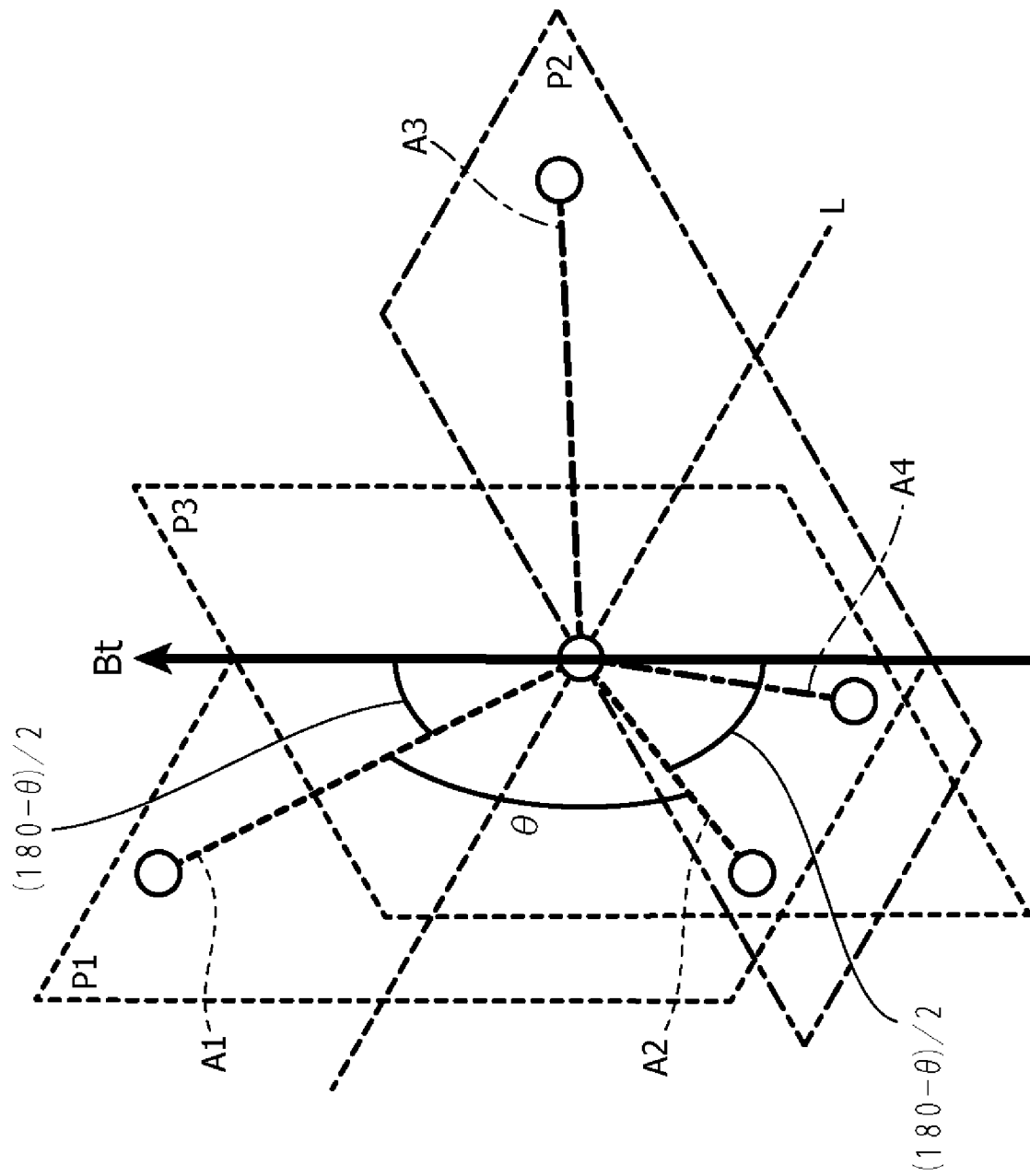
[図2]



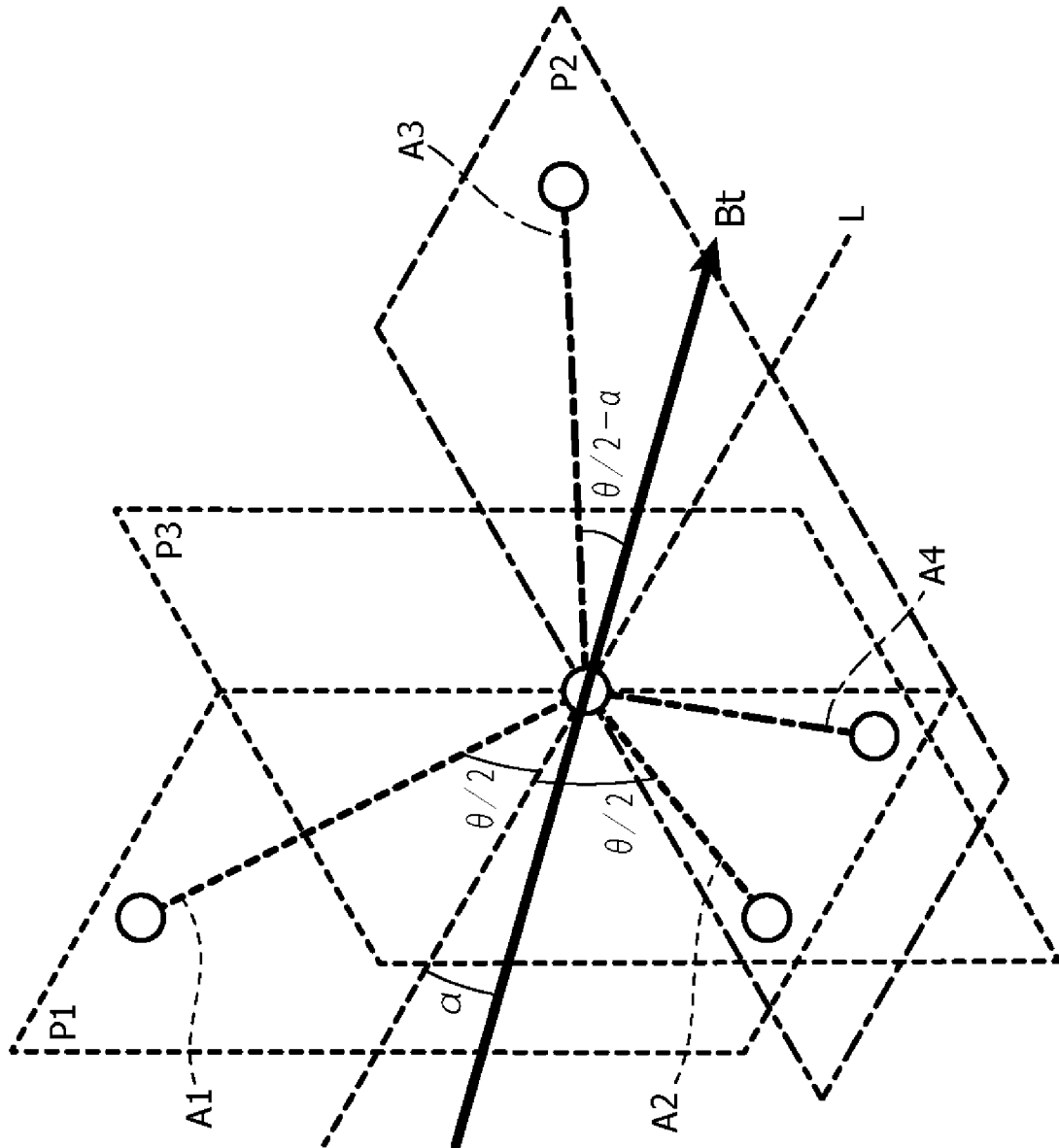
[図3]



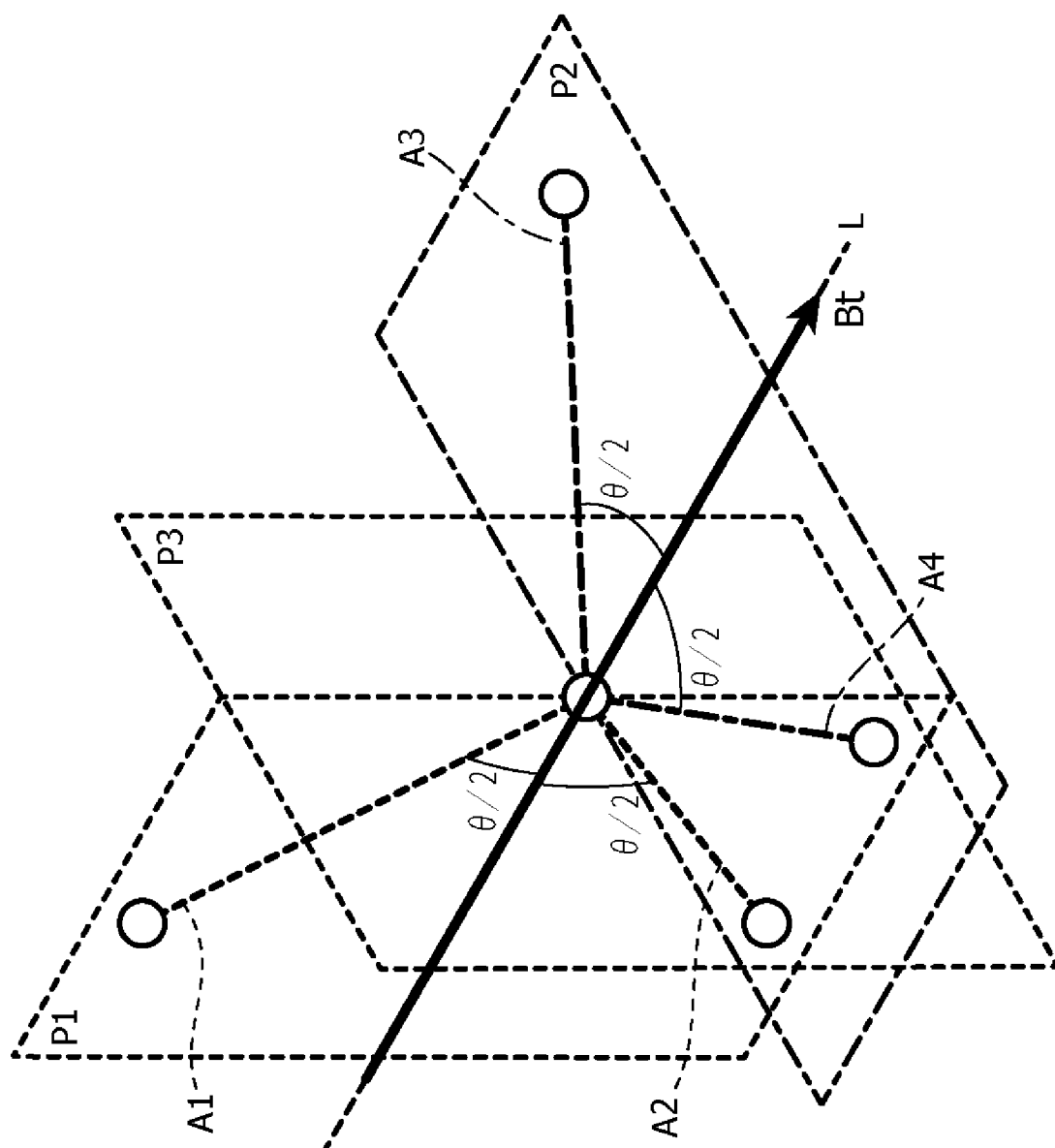
[図4]



[図5]



[図6]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/015543

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G01R 33/24**(2006.01)i; **G01N 24/00**(2006.01)i; **G01N 21/64**(2006.01)i

FI: G01R33/24; G01N24/00 E; G01N21/64 Z

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)

G01R33/20; G01N24/00; G01N21/64

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2019/0178959 A1 (PRESIDENT AND FELLOWS OF HARVARD COLLEGE) 13 June 2019 (2019-06-13) paragraphs [0007]-[0015], [0032]-[0051], fig. 1-4	1-2, 6
A		3-5
X	US 2018/0136291 A1 (PHAM, Linh M.) 17 May 2018 (2018-05-17) paragraphs [0068], [0069], [0132], [0133]	1-2, 6
A		3-5
A	US 2020/0049776 A1 (WOOD, Alexander) 13 February 2020 (2020-02-13) entire text, all drawings	1-6
P, A	WO 2021/054141 A1 (UNIVERSITY KYOTO) 25 March 2021 (2021-03-25) entire text, all drawings	1-6

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

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 June 2021

Date of mailing of the international search report

06 July 2021

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/015543

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2019/0178959	A1	13 June 2019	WO	2017/213928	A1	
US	2018/0136291	A1	17 May 2018	WO	2018/089455	A1	
US	2020/0049776	A1	13 February 2020	AU	2018214017	A1	
WO	2021/054141	A1	25 March 2021	(Family: none)			

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01R 33/24(2006.01)i; G01N 24/00(2006.01)i; G01N 21/64(2006.01)i FI: G01R33/24; G01N24/00 E; G01N21/64 Z										
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）） G01R33/20; G01N24/00; G01N21/64										
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの <table border="0"> <tr> <td>日本国実用新案公報</td> <td>1922 - 1996年</td> </tr> <tr> <td>日本国公開実用新案公報</td> <td>1971 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国実用新案登録公報</td> <td>1996 - 2021年</td> </tr> <tr> <td>日本国登録実用新案公報</td> <td>1994 - 2021年</td> </tr> </table>			日本国実用新案公報	1922 - 1996年	日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年	日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年	日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年
日本国実用新案公報	1922 - 1996年									
日本国公開実用新案公報	1971 - 2021年									
日本国実用新案登録公報	1996 - 2021年									
日本国登録実用新案公報	1994 - 2021年									
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	US 2019/0178959 A1 (PRESIDENT AND FELLOWS OF HARVARD COLLEGE) 13.06.2019 (2019 - 06 - 13) 段落0007-0015, 0032-0051, 第1-4図	1-2, 6								
A		3-5								
X	US 2018/0136291 A1 (PHAM Linh M.) 17.05.2018 (2018 - 05 - 17) 段落0068, 0069, 0132, 0133	1-2, 6								
A		3-5								
A	US 2020/0049776 A1 (WOOD Alexander) 13.02.2020 (2020 - 02 - 13) 全文、全図	1-6								
P, A	WO 2021/054141 A1 (国立大学法人京都大学) 25.03.2021 (2021 - 03 - 25) 全文、全図	1-6								
☐ 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 14.06.2021		国際調査報告の発送日 06.07.2021								
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 島田 保 2S 4004 電話番号 03-3581-1101 内線 3216								

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/015543

引用文献			公表日	パテントファミリー文献			公表日
US	2019/0178959	A1	13.06.2019	WO	2017/213928	A1	
US	2018/0136291	A1	17.05.2018	WO	2018/089455	A1	
US	2020/0049776	A1	13.02.2020	AU	2018214017	A1	
WO	2021/054141	A1	25.03.2021	(ファミリーなし)			