

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7007700号  
(P7007700)

(45)発行日 令和4年1月25日(2022.1.25)

(24)登録日 令和4年1月12日(2022.1.12)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 1 R 33/02 (2006.01) G 0 1 R 33/02 A

請求項の数 7 (全22頁)

|          |                                  |          |  |
|----------|----------------------------------|----------|--|
| (21)出願番号 | 特願2017-68879(P2017-68879)        | (73)特許権者 | 504139662<br>国立大学法人東海国立大学機構<br>愛知県名古屋市千種区不老町1番 |
| (22)出願日  | 平成29年3月30日(2017.3.30)            | (74)代理人  | 100085361<br>弁理士 池田 治幸                         |
| (65)公開番号 | 特開2018-169361(P2018-169361<br>A) | (74)代理人  | 100147669<br>弁理士 池田 光治郎                        |
| (43)公開日  | 平成30年11月1日(2018.11.1)            | (72)発明者  | 中山 晋介<br>愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立<br>大学法人名古屋大学内      |
| 審査請求日    | 令和2年3月26日(2020.3.26)             | 審査官      | 小川 浩史  |

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 磁気計測装置

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

センサヘッド部と、該センサヘッド部に通電するための間欠的な直流電流を生成する通電部と、前記センサヘッド部に生ずる磁界を計測するための検出コイルと、該検出コイルの起電力を前記通電部による前記センサヘッド部への通電に同期して検出する検出部と、を含む磁気計測装置であって、

前記センサヘッド部は、磁気異方性を有する磁性体を有し、

前記通電部は前記磁気異方性を有する磁性体もしくは該磁気異方性を有する磁性体に沿って設けられた導線に矩形波からなる前記間欠的な直流電流を通電するものであり、

前記検出コイルは、前記磁気異方性を有する磁性体が生ずる磁界の変動に起因して起電力を生ずるものであり、

前記磁気計測装置は、前記間欠的な直流電流が小電流側から大電流側に变化したこと、および、大電流側から小電流側に变化したことの少なくとも一方に基づく前記検出コイルの起電力の変化に基づいて磁気を検出を行う演算部を有し、

前記磁気計測装置は、前記通電部が通電する間欠的な直流電流における前記大電流側となる時間の長さが大きくなるほど前記検出コイルの起電力の大きさが大きくなるとともに、前記大電流側となる時間の長さが所定値を超えると、前記検出コイルの起電力の大きさが飽和する特性を有し、

前記通電部が通電する間欠的な直流電流における前記大電流側となる時間の長さは、前記所定値以上とされること、

を特徴とする磁気計測装置。

【請求項 2】

前記磁性体の真空に対する比透磁率が 10000 倍程度であるとともに、前記磁性体の内部磁化が順方向と反方向の配向をとるエネルギー差が電子のスピンに起因することにより、前記磁性体の電子スピンの集合が同時に変化する構造を有し、

前記検出コイルの起電力が、検出する前記磁気の強度のボルツマン分布関数として近似され、該ボルツマン分布関数の中心部における直線状部分を測定対象領域とすることで、前記検出コイルが生ずる起電力は、外部磁界の変化に対して線形に変化すること、を特徴とする請求項 1 に記載の磁気計測装置。

【請求項 3】

前記演算部は、前記間欠的な直流電流が小電流側から大電流側に変化したこと、および、該変化に続いて大電流側から小電流側に変化したことに基づく前記検出コイルの起電力の変化に基づいて磁気の検出を行うこと、

を特徴とする請求項 1 または 2 のいずれか 1 に記載の磁気計測装置。

【請求項 4】

前記通電部の発生する間欠的な直流電流は、その大電流側となる時間の長さを変更可能であること、

を特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 に記載の磁気計測装置。

【請求項 5】

前記磁気異方性を有する磁性体は、アモルファス材料であること、

を特徴とする請求項 2 に記載の磁気計測装置。

【請求項 6】

測定対象に対して振動磁界を与える振動磁界発生部をさらに備え、

前記検出部は、該振動磁界発生部によって発生させられる振動磁界の振動と同期して該検出コイルの起電力を検出すること、

を特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 に記載の磁気計測装置。

【請求項 7】

前記間欠的な直流電流の繰り返し周期が、1 μ 秒以上であること、

を特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 に記載の磁気計測装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気計測装置に関するものであり、特に磁気異方性を有する材料における磁気モーメントの変化に基づいて磁気を検出する磁気計測装置に関する。

【背景技術】

【0002】

例えばピコテスラやナノテスラのような次元での高感度の磁気の計測を行うための磁気計測装置に関する研究が広く行われており、例えば、超伝導量子干渉素子 (superconducting quantum interference device; SQUID) や磁気インピーダンスセンサ (MI センサ) を用いた磁気計測装置が提案されている。

【0003】

このうち、SQUID を用いた磁気計測装置は、超電導ジョセフソン効果及び超電導コイルを用いるものであり、超電導を実現するための超低温を維持するための大規模な装置や、環境磁界を緻密に遮蔽するための設備が必要となるという課題がある。

【0004】

一方、MI センサを用いた磁気センサは、MI (Magneto impedance) 素子に高周波数の交流電流を通電した時に起こる、導体表層部の電流伝導路 (表皮効果) が、外部磁界に高度に影響を受けるという MI 効果を利用しているので、交流電流の周波数に依存して変化する現象を利用するセンサである。また、上述の SQUID を用いた磁気計測装置のような大規模な装置や設備を要しない利点がある。

10

20

30

40

50

## 【0005】

ところで、本発明の発明者は、前記MI素子として用いられるアモルファスワイヤのような磁気異方性を有する磁性体に、あるいは、かかる磁性体に近接した導線に一過性直流電流（ステップパルス状の電流）を印可した場合に、その磁性体が磁界を発生すること、および、その発生する磁界は、その磁性体の置かれた周囲の磁界の強度に応じて異なることを見いだした。このように磁性体が発生する磁界は、前記ステップ状の電流のパルスが1つの場合、すなわち、電流が一定時間印可され、その後供給されなくなる場合でも生ずるものである。MI素子に交流電流を通電することによってインピーダンスの変化を生じるMI効果とは本質的に異なるものである。

## 【先行技術文献】

10

## 【特許文献】

## 【0006】

【文献】特開2003-004830号公報

国際公開第2005/019851号

特開2010-256109号公報

国際公開第2009/130814号

特開2012-185103号公報

## 【非特許文献】

## 【0007】

【文献】Uchiyama, T., Nakayama, S., Mohri, K., Bushida, K., "Biomagnetic field detection using very high sensitive MI sensor for medical application" *Physica Status Solidi A - Applications and Materials Science*, 2009, 206, 639-643.

20

Nakayama, S., Atsuta, S., Shinmi, T., Uchiyama, T., "Pulse-driven magnetoimpedance sensor detection of biomagnetic fields in musculatures with spontaneous electric activity" *Biosensors and Bioelectronics*, 2011, 27, 34-39.

30

Nakayama, S., Sawamura, K., Mohri, K., Uchiyama, T., "Pulse-driven magnetoimpedance sensor detection of cardiac magnetic activity", *PLoS ONE*, 2011, 6(10), e25834.

Melo LGC, Menard D, Yelon A, Ding L, Saez S, Dolabdjian C, "Optimization of the magnetic noise and sensitivity of giant magnetoimpedance sensors" *J Appl Phys*, 2008, 103: 033903.

40

磁気センサ理工学（増補） 毛利佳年雄 コロナ社 pp1-181 (2016)

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0008】

本発明はかかる知見に基づいてなされたものであり、その目的とするところは、磁気異方性を有する磁性材料を用い、より簡易な構成を可能にする一方で精度のよい計測を可能にする磁気計測装置を提供することにある。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0009】

本願の発明者らは、磁気異方性を有する磁性材料は、周囲から磁界が加わっていない状態

50

と測定対象となる外部磁界が加わった状態とでは、その内部磁化の配向が変化すること、また、その磁化材料の近傍に配された導線に一定量以上の電流が流された場合には、その誘導磁界に沿って（導線電流軸近傍の）磁性材料の内部磁化は整列させられることを見いだした（current induced para-axial magnetization alignment: IPA効果）。さらに、磁気異方性を有する磁性材料（具体的にはアモルファスメタルワイヤ）に、直流電流を間欠的に印可した時にも、類似の検出コイル起電力を得ることの観察から、近傍に配置された導線と同一の作用を発揮する導線状構造が磁性材料内部に存在し、近傍の磁性材料の内部磁化を整列させることを示唆すると考えられる。そこでこの効果は、疑似的なIPA効果に相当する（図4など）。本発明はかかる知見に基づいて成されたものである。

#### 【0010】

すなわち、前記目的を達成するための本発明の要旨とするところは、（a）センサヘッド部と、該センサヘッド部に通電するための間欠的直流電流（ステップ状のパルス）を生成する通電部と、前記センサヘッド部に生ずる磁界を計測するための検出コイルと、該検出コイルの起電力を前記通電部による前記センサヘッド部への通電に同期して検出する検出部と、を含む磁気計測装置であって、（b）前記センサヘッド部は、磁気異方性を有する磁性体を有し、（c）前記通電部は前記磁気異方性を有する磁性体もしくは該磁気異方性を有する磁性体に沿って設けられた導線に矩形波からなる前記間欠的な直流電流を通電するものであり、（d）前記検出コイルは、前記磁気異方性を有する磁性体が生ずる磁界の変動に起因して起電力を生ずるものであり、（e）前記磁気計測装置は、前記間欠的直流電流が小電流側から大電流側に変化したこと、および、大電流側から小電流側に変化したこと、の少なくとも一方に基づく前記検出コイルの起電力の変化に基づいて磁気を検出を行う演算部を有し、（f）前記磁気計測装置は、前記通電部が通電する間欠的な直流電流における前記大電流側となる時間の長さが大きくなるほど、前記検出コイルの起電力の大きさが大きくなるとともに、前記大電流側となる時間の長さが所定値を超えると、前記検出コイルの起電力の大きさが飽和する特性を有し、（g）前記通電部が通電する間欠的な直流電流における前記大電流側となる時間の長さは、前記所定値以上とされること、を特徴とする。

#### 【発明の効果】

#### 【0011】

本発明の磁気計測装置によれば、磁気異方性を有する磁性体を有するセンサヘッド部と、該センサヘッド部に通電するための間欠的直流電流、すなわち、ステップ状のパルス信号を生成する通電部と、前記センサヘッド部の生ずる磁界を計測するための検出コイルと、該検出コイルの起電力を前記通電装置による前記センサヘッド部への通電に同期して検出する検出部と、を含む磁気計測装置において、通電部より、前記磁気異方性を有する磁性体もしくは該磁気異方性を有する磁性体に沿って設けられた導線に矩形波からなる前記間欠的直流電流が通電させられ、前記検出コイルにおいて、前記磁気異方性を有する磁性体が生ずる磁界の変動に起因して起電力が生じさせられ、前記演算部により、前記間欠的直流電流が小電流側から大電流側に変化したこと、および、大電流側から小電流側に変化したこと、の少なくとも一方に基づく前記検出コイルの起電力の変化に基づいて磁気を検出が行われる。また、前記磁気計測装置は、前記通電部が通電する間欠的な直流電流における前記大電流側となる時間の長さが大きくなるほど、前記検出コイルの起電力の大きさが大きくなるとともに、前記大電流側となる時間の長さが所定値を超えると、前記検出コイルの起電力の大きさが飽和する特性を有し、前記通電部が通電する間欠的な直流電流における前記大電流側となる時間の長さは、前記所定値以上とされるので、精度よく磁気計測が行われるとともに、センサの小型化が実現される。

#### 【0012】

好適には、前記磁性体の真空に対する比透磁率が10000倍程度であるとともに、前記磁性体の内部磁化が順方向と反方向の配向をとるエネルギー差が電子のスピンに起因することにより、前記磁性体の電子スピンの集合が同時に変化する構造を有し、前記検出コイルの起電力が、検出する前記磁気の強度のボルツマン分布関数として近似され、該ボルツ

10

20

30

40

50

マン分布関数の中心部における直線状部分を測定対象領域とすることで、前記検出コイルが生ずる起電力は、外部磁界の変化に対して線形に変化するものである。このようにすれば、外部磁界の変化を検出コイルの起電力として正確に検出しうる。また好適には、前記演算部は、前記間欠的な直流電流が小電流側から大電流側に変化したこと、および、該変化に続いて大電流側から小電流側に変化したことに基づく前記検出コイルの起電力の変化に基づいて磁気の検出を行うものである。このようにすれば、間欠的な直流電流が小電流側から大電流側に変化したこと、および、該変化に続いて大電流側から小電流側に変化したことを一対のものとして捉え、それらに基づく前記検出コイルの起電力の変化の振幅や面積を差分もしくは合計するなどした演算が可能となる。

【0013】

好適には、一対の前記センサヘッド部と、該一対のセンサヘッド部に対応して一対の前記検出コイルを有し、前記演算部は、該一対の検出コイルの出力を差分もしくは増幅することにより磁気の検出を行うものである。このようにすれば、一対のセンサヘッドを差動、あるいは、併用などした磁気計測が可能となる。

【0014】

また好適には、過去の演算結果を記憶する記憶部を有し、前記演算部は、現在の演算結果と該記憶部に記憶された過去の演算結果とを差分もしくは増幅することにより磁気の検出を行うものである。このようにすれば、センサヘッドが1つしかない場合においても時間的に異なる環境について得られるセンサ出力を差動、あるいは合計するなどした演算が可能となる。また現実には、バイアスコイルを使用して外部磁界を0にキャンセルした場合でも、検出コイルの起電力は一定に、すなわち、時間軸に対して直線状になることはないので、検出コイルの起電力を大きく増幅してAD変換することができず、ビット落ちが生ずる。そこで、事前に記録しておいた信号を差分すれば、大きくコイル起電力全体を増幅することができるので、ビット落ちによる信号低下を減少できる。

【0015】

また好適には、前記検出コイルは、前記センサヘッド部および検出対象を該検出コイルの内部に取り囲むように設けられる。このようにすれば、検出対象およびセンサヘッド部を検出コイル内に設けることで装置の小型化を実現しうる。

【0016】

また好適には、前記通電部の発生する間欠的な直流電流は、その大電流側となる時間の長さを変更可能であることを特徴とする。このようにすれば、間欠的な直流電流における大電流側となる時間の長さを変更することで、センサヘッド部から生ずる磁界の大きさを所望の値に適宜変更させることができる。さらに好適には、前記間欠的な直流電流の繰り返し周期が、1  $\mu$  秒以上である。このようにすれば、間欠的な直流電流として、周期性のあるパルスを用いる場合において磁気計測を行うことができる。

【0019】

また好適には、前記磁気計測装置は、測定対象に対して振動磁界を与える振動磁界発生部をさらに備え、前記検出部は、該振動磁界発生部によって発生させられる振動磁界の振動と同期して該検出コイルの起電力を検出することを特徴とする。このようにすれば、比較的低磁場における共鳴現象などを検出することができる。

【0020】

さらに好適には、磁気計測装置は、前記センサヘッド部の近傍へ設置され、前記センサヘッド部へ通電される電流と同方向または直交する磁界を発生する磁界発生部を備え、該磁界発生部により前記センサヘッド部12に通電される電流と同期した磁界を発生することで、磁気計測特性を調節することを特徴とする。このようにすれば、センサヘッド部が複数のセンサヘッドを有する場合に、少なくとも1つのセンサヘッドに前記磁界発生部からの磁界を加えることで、たとえば該磁界発生部からの磁界が間欠的な変調（調整）信号となり、個々のセンサヘッドのそれぞれについて感度の調整を行うことができる。例えば、2つのセンサヘッドを有するグラジオセンサを構築する場合に、一方のセンサヘッドの感度を修正することで、効果的な差動増幅効果が得られる。また、広範囲波長の電磁波の印

10

20

30

40

50

可により磁気異方性を有する素材は、その内部磁化の状態変化に応じて感度や検出特性を調整できる。

【0021】

さらに好適には、磁気計測装置は、前記センサヘッド部を取り付けるセンサヘッド取付部を有し、該センサヘッド取付部は前記センサヘッド部と前記磁界発生部との相対的な位置、すなわち、距離、角度を変化させることができることを特徴とする。このようにすれば、センサヘッドの感度補正を行うことができるとともに、距離、角度などを異ならせた場合の変化を効果的に計測することができる。

【0022】

さらに好適には、磁気計測装置は、前記センサヘッド部にバイアス磁界を付加するバイアス磁界発生部を有することを特徴とする。このようにすれば、センサヘッド部に印可される環境磁界や測定対象からの磁界とバイアス磁界発生部により発生させられるバイアス磁界とを相殺、または合計することにより、磁気計測装置の感度を調整することができる。このようにすれば、このバイアス磁界発生部と過去の演算結果とを差分もしくは増幅する差動増幅装置を共に使用することにより、微小な外部磁界変動によって発生する検出コイル起電力を2つのピーク領域の時間にわたり大きく増幅することができるので、検出コイル起電力を入力されるAD変換器の変換効率を高めビット落ちを最小にできる。

10

【0023】

さらに好適には、前記センサヘッド部における磁気異方性を有する磁性体は、iron garnet、ダイヤモンド、SiCの少なくとも1を有する固体、もしくは微小固体の集合体であること、を特徴とする。このようにすれば、アモルファス素材などの磁気異方性を有する物質に代わり、直接に、これら微小粒子の中の磁界変動を検出コイルで検出することができるほか、近傍にフォトマルチプライヤなどを設置することで、補足的信号を検出することができる。また、広範囲の波長の電磁波発生器を付加して、センサヘッドを変調することができる。

20

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】本発明の磁気計測装置におけるセンサ部の概要を説明する(a)図および(b)写真である。

【図2】本実施例の磁気計測装置の構成を説明する図である。

30

【図3】本実施例の磁気計測装置における制御回路の構成を説明する図である。

【図4】デジタルディレイパルス発生器から発生させられるパルス信号と出力アンプに入力されるアナログ信号の例を示す図である。

【図5】本実施例の磁気計測装置におけるコンピュータの演算方法を説明する図である。

【図6】本実施例の磁気計測装置の動作原理を説明するための実験例を説明する図である。

【図7】本実施例の磁気計測装置の検証を行うための実験例を説明する図である。

【図8】本発明の別の実施例における制御回路の構成を説明する図であって、図3に対応する図である。

【図9】本発明のさらに別の実施例におけるセンサ部の構成を説明する図であって、図1に対応するものである。

40

【図10】本発明の更に別の実施例における磁気計測装置の構成を説明する図であって、図9に対応するものである。

【図11】本発明のさらに別の実施例における磁気計測装置の構成を説明する図であって、図2、図3などに対応する図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

以下、本発明の一実施例について、図面を参照しつつ詳細に説明する。なお、図は適宜簡略化されており、また、図面における寸法などは、実際の寸法や比率などとは必ずしも一致するものではない。

【実施例1】

50

## 【 0 0 2 6 】

図 1 は、本発明の磁気計測装置 1 0 におけるセンサ部 1 2 の構成の概要を説明する図である。このうち、図 1 ( a ) はセンサ部 1 2 の構成の概要を説明する図であり、図 1 ( b ) は外観を説明する図 ( 写真 ) である。図 1 ( a ) に示すように、本発明の磁気計測装置 1 0 はセンサ部 1 2 と後述する回路部 1 4 とを含んで構成される。本実施例におけるセンサ部 1 2 には、2 つのセンサヘッド 1 2 a、1 2 b を有するように構成されており、後述するようにそれら 2 つのセンサヘッド 1 2 a、1 2 b を差動させて用いることなどができるようになっている。

## 【 0 0 2 7 】

センサ部 1 2 は、図 1 に示すように、1 本のアモルファスワイヤ 2 2 と、2 つのセンサヘッド 1 2 a、1 2 b に対応して検出コイル 2 6、2 8 が設けられている。アモルファスワイヤ 2 2 は本発明の磁気異方性を有する磁性体に相当する。長手状のアモルファスワイヤ 2 2 の両端には電極が設けられていて、一方の電極は接地される一方、他方の電極には電線 2 4 が接続され、後述する回路部 1 4 から駆動電圧  $P E X$  が供給される。この駆動電圧  $P E X$  もしくは後述する  $D P 1$  が、本発明の間欠の直流電流を印可するためのパルス信号に相当する。また、検出コイル 2 6、2 8 はそれぞれ一端が設置され、他端に接続された電線 3 0、3 2 がそれぞれ後述する回路部 1 4 に接続されることにより、それら検出コイル 2 6、2 8 の両端電圧である  $E T C 1$ 、 $E T C 2$  をそれぞれ検出しようになっている。また、アモルファスワイヤ 2 2 は、検出コイル 2 6、2 8 に沿った部分、すなわちセンサヘッド 1 2 a、1 2 b に対応する部分 2 2 a、2 2 b と、それ以外の部分であるバランス部 2 2 c に分けられる。このバランス部 1 2 c は前記駆動電圧  $P E X$  が印可される必要がないため、電気的な損失を低減するために、バランス部の両端を電気抵抗の小さいケーブルによって短絡するバイパスケーブル 3 4 が設けられている。

## 【 0 0 2 8 】

図 1 ( b ) は、本実施例のセンサ部 1 2 の外観を説明する写真である。同図に示すように、本実施例のセンサ部 1 2 は、一枚の基板 3 6 上に実装されている。すなわち、基板 3 6 にアモルファスワイヤ 2 2、検出コイル 2 6、2 8 が設けられるとともに、アモルファスワイヤ 2 2 の両端と電氣的に接続されたケーブルを取り出すためのコネクタ 3 8 が、また、検出コイル 2 6、2 8 の両端のそれぞれと電氣的に接続されたケーブルを取り出すためのコネクタ 4 0、4 2 がそれぞれ設けられている。

## 【 0 0 2 9 】

図 2 は、本実施例の磁気計測装置 1 0 の全体の構成を説明する図であって、特に回路部 1 4 の構成を説明する図である。図 2 に示すように回路部 1 4 は制御回路 4 2、デジタルディレイパルス発生器 4 4、コンピュータ 4 6、アナログフィルタ 4 8、データロガー 5 0 などを備えて構成される。

## 【 0 0 3 0 】

このうち、制御回路 4 2 は、前記センサ部 1 2 を制御、すなわち、駆動したり出力を取り出したりするためのものである。この制御回路は、所望の作動をおこなうよう設計された電子回路として構成されてもよいし、設計者が所望の論理機能をプログラムすることができる  $F P G A$  (  $F i e l d P r o g r a m m a b l e G a t e A r r a y$  ) などによって構成されてもよい。この制御回路 4 2 は、本発明の通電部や検出部に対応する。

## 【 0 0 3 1 】

また、デジタルディレイパルス発生器 4 4 は、操作者によって設定された形状のパルス波形を出力可能な装置である。すなわち、デジタルディレイパルス発生器 4 4 は、パルスの間隔 ( 周期 )、幅、タイミング、大きさなどを所望の値として出力することができる。本実施例においては、デジタルディレイパルス発生器 4 4 は少なくとも図 2 に示す  $D P 1$  および  $D P 2$  の 2 系統の出力が可能とされている。デジタルディレイパルス発生器 4 4 も本発明の通電部に対応する。

## 【 0 0 3 2 】

図 3 は、この制御回路 4 2 の構成の一例を説明する回路図である。図 3 に示すように、制

10

20

30

40

50

制御回路 42 は、入力アンプ 52、出力アンプ 54、56、サンプルホールド回路 58、60、ハイパスフィルタ 62、64、ローパスフィルタ 66、68、差動アンプ 70 を含んで構成されている。

【0033】

入力アンプ 52 は、前記デジタルディレイパルス発生器 44 から入力されるパルス信号 DP1 を所定の増幅率にて増幅して出力ポート EX から出力する。出力ポート EX からの出力 PEX は、電線 24 を介してセンサ部 12 のアモルファスワイヤ 22 に印可される。すなわち、デジタルディレイパルス発生器 44 の出力するパルス信号 DP1 は、アモルファスワイヤ 22 に印可する電圧パターンを決定するパルス信号である。

【0034】

出力アンプ 54、56 は、検出コイル 26、28 のそれぞれについて設けられており、検出コイル 26、28 の出力電圧である ETC1、ETC2 [V] を入力ポート S1、S2 からそれぞれ取り込み、所定の増幅率により増幅する。この増幅率は後述する高速 AD コンバータの分解能などの仕様に依りて決定される。

【0035】

サンプルホールド回路 58、60 は、出力アンプ 54、56 からの出力であるアナログ波形に対し、前記デジタルディレイパルス発生器 44 から供給されるパルス信号 DP2 に依りてホールド処理を行う。具体的には、パルス信号 DP2 が低電圧となった場合に、それをトリガとしてアナログ波形における値を再び高電圧となるまで保持する。

【0036】

図 4 は、デジタルディレイパルス発生器 44 から発生させられるパルス信号 DP1 および DP2 と出力アンプ 54、56 に入力される入力ポート S1、S2 のアナログ信号の例を示す図であり、図 4 (a) は理論値、図 4 (b) は実際の実験値をそれぞれ表している。図 4 (a) に示すように、アモルファスワイヤ 22 に印可される電圧を決定するパルス信号 DP1 は、本実施例においてはたとえば  $1 [\mu\text{sec}]$  程度の一定周期 p (すなわち  $1 [\text{MHz}]$  程度の周波数)、一定幅 w のパルスである。また、サンプルホールド回路を制御するパルス信号 DP2 は、前記パルス信号 DP1 の立ち上がりから時間 d だけ遅れて一瞬だけ落ち込むようになっている。そしてパルス信号 DP2 が落ち込んだ後に立ち上がるのをトリガとしてサンプルホールド処理が行われるものとされている。この時間 d はたとえば、検出コイル 26、28 の出力電圧 ETC1、ETC2 がピークとなった際にサンプリングが可能となるように、事前にシミュレーションあるいは実験的に決定される。

【0037】

また、図 4 (b) に示すように、本実施例においては、パルス信号 DP1、DP2 とともに、その振幅 (パルスの大きさ) は 5V とされている。

【0038】

サンプルホールド回路 58、60 から出力された信号は、ハイパスフィルタ 62、64、および、ローパスフィルタ 66、68 を通過することにより、所定の周波数成分が除去される。なお、図 3 に示すように、ハイパスフィルタ 62 およびローパスフィルタ 66 はサンプルホールド回路 58 から出力された信号、すなわち、検出コイル 26 の出力 ETC1 に対応して設けられたものであり、ハイパスフィルタ 64 およびローパスフィルタ 68 はサンプルホールド回路 60 から出力された信号、すなわち、検出コイル 28 の出力 ETC2 に対応して設けられたものである。

【0039】

差動アンプ 70 は、ハイパスフィルタ 62、64、および、ローパスフィルタ 66、68 を通過したサンプルホールド回路 58、60 の出力値の差分を出力する。これにより、2つの検出コイル 26、28 の出力電圧 ETC1、ETC2 の差分を得ることができる。

【0040】

なお、この図 3 に示す制御回路 42 の例は、センサ部 12 における 2つのセンサヘッド 12a、12b の出力を差動させる場合の制御回路の一例を説明するものである。したがって、2つのセンサヘッド 12a、12b を差動させない場合、たとえば、それぞれのセン

10

20

30

40

50

サヘッド 12 a、12 b の出力を単独で用いるような場合には、制御回路 42 における差動アンプ 70 を要しない一方、出力端子が各センサヘッド 12 a、12 b 毎にそれぞれ必要となる。

#### 【0041】

また、図 3 に示す制御回路 42 においては、入出力される信号はアナログ信号とされているが、本実施例のように図 2 に示すように入力信号 DP 1、DP 2 がデジタルディレイパルス発生器 44 によって発生させられるデジタル信号である場合には、制御回路 42 において高速 DA コンバータを備えてアナログ信号に変換することができる。また、出力信号 EOUT についても同様であり、最終的にコンピュータ 46 において演算処理されるのに先立って、適切な段階で高速 AD コンバータによってデジタル信号化されればよい。本実施例においては、これら高速 DA / AD コンバータの図示は省略している。

10

#### 【0042】

図 2 に戻って、コンピュータ 46 は、たとえば CPU、メモリ、ROM、RAMなどを備えたいわゆるマイコンであり、あらかじめ記憶されたプログラムの内容にしたがって、前記デジタルディレイパルス発生器 44 の差動を制御したり、あるいは、後述するデータロガー 50 から得られるデータを所定の演算処理したりする。このコンピュータ 46 が本発明の演算部に対応する。

#### 【0043】

アナログフィルタ 48 は、たとえばバンドパスフィルタを含んで構成され、制御回路 42 から出力された信号から所望の周波数成分のみを取り出す。

20

#### 【0044】

データロガー 50 は、アナログフィルタ 48 から出力されたデータを所定のサンプリングレートに応じて記憶する。また、記憶されたデータを前記コンピュータ 46 に出力する。データロガー 50 は本発明の記憶部に対応する。

#### 【0045】

本実施例において、コンピュータ 46 は、データロガー 50 から得られたデータについて、ノイズの低減を目的とした演算を行う。この演算を図 5 を用いて説明する。図 5 (a) に示すように、アモルファスワイヤ 22 にパルス状の電圧  $P_{EX}$  が印可されると、そのアモルファスワイヤ 22 のセンサヘッドに対応する部分 22 a、22 b に近接させられた検出コイル 26、28 には電圧の変動が生ずる。前記パルス信号 DP 1 において 1 回のパルスの発生に伴うセンサヘッド 12 a、12 b のそれぞれの出力信号  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  の変化を 1 つの単位とする。図 5 (b) には、複数回のパルスが前記パルス信号 DP 1 として供給された場合の検出コイルの該複数回の变化を伴う出力電圧  $E_{coil}$  の例が記載されている。この検出コイルの出力電圧  $E_{coil}$  は、前記検出コイル 26、28 の出力信号  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  に対応するものである。

30

#### 【0046】

コンピュータ 46 は、かかる出力電圧  $E_{coil}$  について、N 回のパルスによって生じた出力電圧を積算する。この積算は、たとえばパルス信号 DP 1 の立ち上がり時を基準として、所定のサンプリングレートごとに出力電圧  $E_{coil}$  を積算するものである。積算区間は、検出コイル 26、28 の出力波形に応じて、たとえば 300 乃至 1000 [ $\mu\text{sec}$ ] の範囲から適宜定められる。この出力電圧  $E_{coil}$  の積算値  $E_{coil}$  が得られる。かかる積算値においては、ノイズの積算は平均化されて、信号の積算に対して相対的に小さくなることから、信号に対するノイズの影響を低減しうるものであることから、より精度のよい磁気検出を可能とすることができる。

40

#### 【0047】

本実施例の磁気計測装置 10 の構成は上述の通りであり、アモルファスワイヤ 22 への入力電圧  $P_{EX}$  としては、高電位と低電位をペアとして、少なくとも 1 回、あるいは反復的に与えるものである。このことは、以下のことを意図している。言い換えれば、アモルファスワイヤ 22 には間欠的な直流電流が流れることとなる。センサヘッド部 12 の (磁気異方性を有する) 素材であるアモルファスワイヤ 22 の内部の磁化素子は、環境磁界によ

50

って長手方向にボルツマンの法則に従って分布している。この内部磁化を高電位に伴う電流で一定方向に配向させる。この一定方向とは、本実施例のようにアモルファスワイヤ 22 が線状、言い換えれば円柱形状である場合には、その周方向のベクトル成分を有するものである。さらに低電位、あるいはそれに伴う小電流や無電流へ戻すことで再び環境磁界の支配となる。この 2 つの過程では同じ割合の内部磁化の移動が反対方向に起こることとなる。則ち、環境磁界に依存した軸方向の内部磁化を高電位印可時に排出し、低電位側印可時には吸収する。この内部磁化排出と吸収反応の時定数（反応・緩和速度）が異なるため、間欠的に印可する直流電流の幅  $w$  (duration) と間隔 (interval) を好適に選ぶことで最大感度が得られる。このように、アモルファスワイヤ 22 に間欠的な直流電流を印可することによって発生させる磁界は、一般的にコイルに交流電流を印可して得られるような磁界とはその原理も実際の現象、すなわち、実際に発生する磁界の時間変化なども異なる。本実施例の磁気計測装置 10 は上述の原理に基づくものである。また、後述する構成により、回路ノイズを低減させる効果も有する。

10

【0048】

なお、本明細書においては、パルス信号  $DP1$  が入力アンプ 52 により増幅されてアモルファスワイヤ 22 への入力電圧  $P_{EX}$  として印可される。そのため、パルス信号  $DP1$  における電圧の高低とアモルファスワイヤ 22 への入力電圧  $P_{EX}$  の高低とは対応した概念である。さらに、アモルファスワイヤ 22 への入力電圧  $P_{EX}$  の高低は、アモルファスワイヤ 22 へ通電される電流の大小とも一致した概念である。

【0049】

続いて、本発明の磁気計測装置の動作原理についての検討を行うために、発明者が行った実験について説明する。図 6 はかかる実験を説明する図であって、図 6 (a) はその実験における装置の構成を示す図である。図 6 (a) に示すように、センサ部 12 における 1 つのセンサヘッド 12a に対して、その長手方向、すなわち、アモルファスワイヤ 22 の延びる方向（図 6 (a) における紙面内の上下方向）に対して直交する方向となるように所定の間隔を介して導線 74 が配設される。そして、ある環境磁界  $B_e$  の存在下において、導線 74 には何も通電しない状態で、センサヘッド 12a の検出コイル 26（図 1 など参照）のコイル起電力  $E_{TC1}$  をオシロスコープで観察した。このとき、アモルファスワイヤ 12 に通電されるパルス状の電圧  $P_{EX}$  におけるパルスの幅  $w$ （図 4 (a) 参照）の大きさを複数の異なる値に設定して、検出コイル 26（図 1 など参照）のコイル起電力  $E_{TC1}$  をそれぞれ測定した。このようにして得られた、パルスの幅  $w$  の値に対して、発生した検出コイル 26 のコイル起電力（誘導起電力） $E_{TC1}$  の振幅の関係を図 6 (b) に示す。図 6 (b) からわかるように、パルスの幅  $w$  の値が大きくなるにつれて、検出コイル 26 の起電力  $E_{TC1}$  の振幅の大きさが増加する一方、パルスの幅  $w$  の値が 200 ~ 300 [nsec] 程度において検出コイル 26 の起電力  $E_{TC1}$  の振幅の大きさは最大に達した。

20

30

【0050】

続いて、前記導線 74 に正弦波状の交流電流  $I_T$  を通電して同様の実験を行った。このとき、サンプルホールド回路 58（図 3 参照）によりサンプルホールド処理されて連続的に出力されるセンサ出力  $E_{OUT}$  の振幅の大きさと、アモルファスワイヤ 12 に通電されるパルス状の電圧  $P_{EX}$  におけるパルスの幅  $w$  の大きさとの関係は、前述の導線 74 に電流を流さない場合の検出コイル 26 の起電力  $E_{TC1}$  の振幅の大きさとパルスの幅  $w$  の大きさとの関係と一致した関係となった。すなわち、パルスの幅  $w$  の値が大きくなるにつれて、センサ出力  $E_{OUT}$  の振幅の大きさが増加する一方、パルスの幅  $w$  の値が 200 ~ 300 [nsec] 程度においてセンサ出力  $E_{OUT}$  の振幅の大きさは最大に達した。

40

【0051】

これらの結果を考察すると、検出コイル 26 の起電力  $E_{TC1}$  の出力の回路には容量成分もあり、出力波系は遅れ平滑化されると考えられるが、パルス幅  $w$  が大きくなるにつれて検出コイル 26 の起電力  $E_{TC1}$  の振幅の大きさも増大していることから、本発明の磁気計測装置の感度上昇には、励起パルスの直流成分が関与していると考えられることができる。

50



## 【 0 0 5 7 】

上述の実施例と同様に、デジタルディレイパルス発生器 4 4 により発生させたパルス信号 DP 1 を制御回路 4 2 の入力アンプ 5 2 により所定の増幅率で増幅させた電圧 P E X をアモルファスワイヤ 2 2 に印可した。図 7 ( b ) は、このときの入力電圧 P E X と検出コイル 2 6 、 2 8 の出力電圧 E T C 1 、 E T C 2 の時間変化を共通する横向きの時間軸を用いて示すものであって、ヘルムホルツコイル 7 8 に - 1 0 0 [  $\mu$  T ] から 1 0 0 [  $\mu$  T ] までの 5 つの異なる強度の磁界 M H H を発生させた場合を示している。なお、本実験においては検出コイル 2 6 、 2 8 の出力は理論上同じものとなるので、図 7 ( b ) 、 図 7 ( c ) においては、一方の検出コイルのものを示しており、以下の説明においては、出力電圧 E T C と記す。図 7 ( b ) における ( i ) 乃至 ( v ) は、図 7 ( c ) における ( i ) 乃至 ( v ) で示された三角形の印が付されたプロットの磁界 M H H の強度に対応する出力電圧 E T C である。

10

## 【 0 0 5 8 】

入力電圧 P E X として、幅 ( 時間 ) w のステップ状のパルスを印可した際の出力電圧 E T C の変化は、図 7 ( b ) に示すように、外部磁界 M H H の値に応じて異なるものとなっている。具体的にはたとえば、磁界 M H H が 1 0 0 [  $\mu$  T ] 付近の場合、入力電圧 P E X が低電圧状態から高電圧状態に切り替わると、その後出力電圧 E T C は極大となり、入力電圧 P E X が高電圧状態から低電圧状態に切り替わると、その後出力電圧 E T C は極小となる ( 図 7 ( b ) の ( i ) ) 。また、磁界 M H H が - 1 0 0 [  $\mu$  T ] 付近の場合、出力電圧 E T C は 1 0 0 [  $\mu$  T ] の場合と比べて正負がほぼ逆の出力となり、入力電圧 P E X が低電圧状態から高電圧状態に切り替わると、その後出力電圧 E T C は極小となり、入力電圧 P E X が高電圧状態から低電圧状態に切り替わると、その後出力電圧 E T C は極大となる ( 図 7 ( b ) の ( v ) ) 。

20

## 【 0 0 5 9 】

ここで、図 7 ( b ) の ( i ) の例について検討すると、出力電圧 E T C の変化における極大は、入力電圧 P E X におけるパルスの高電圧状態における直流成分により、アモルファスワイヤ 2 2 の内部磁化に軸方向に蓄えられていた環境磁界の影響が放出されることに起因するものであると考えられる。また、出力電圧 E T C の変化における極小は、入力電圧 P E X が低電圧状態、すなわち、アモルファスワイヤ 2 2 に流される電流が小さい状態へ戻すことによる、アモルファスワイヤ 2 2 の内部磁化が環境磁界の吸収過程に起因するものであると考えられる。つまり、出力電圧 E T C の極大および極小の出現は、いずれも入力電圧 P E X におけるパルスの変化に伴うものであるが、それぞれ入力電圧 P E X が低電圧状態から高電圧状態への変化、および、その逆である高電圧状態から低電圧状態への変化に伴うものである、そして、出力電圧 E T C の極大および極小に変化する際の遷移の時定数は、それぞれ異なる。すなわち、入力電圧 P E X が低電圧状態から高電圧状態となり出力電圧 E T C が極大となる過程では、出力電圧 E T C のの時定数は数 1 0 [ n s e c ] (several tens of nsec) であるため、2 0 0 [ n s e c ] 程度で定常状態に達する。一方、入力電圧 P E X が高電圧状態から低電圧状態となり出力電圧 E T C が極小となる過程では、出力電圧 E T C が極大となる過程より遅い。そのため、入力電圧 P E X におけるパルスの間隔、すなわち、高電圧状態から低電圧状態に変化した後、再び高電圧状態となるまでの間隔は、2 ~ 3 [  $\mu$  s e c ] 程度の間隔 (interval/period) をもって与えないと、入力電圧 P E X が再び高電圧状態となった際に出力電圧 E T C の十分大きな反応を得られなくなる。なお、上記入力電圧 P E X におけるパルスの高電圧状態と低電圧状態は、それぞれ相対的に高低を有する 2 つの電圧状態であればよいが、好適には低電圧状態は 0 [ V ] とされる。そのようにした場合、前記低電圧状態の場合にアモルファスワイヤ 2 2 に流される電流も 0 [ A ] である。

30

40

## 【 0 0 6 0 】

前記出力電圧 E T C における極大および極小の 2 つのピークは、上述のように環境磁界 M H H を反映するものであり、それぞれ反対方向を向いているので、これら 2 つのピーク値を差分することで、極大値のみ、あるいは極小値のみというように 1 つのピークを用いる

50

よりも大きな振幅を得ることができる。また、入力電圧  $P_{EX}$  におけるパルスの繰り返し周期  $p$  (図4(a)参照)を、ハムノイズ周波数などより十分に短くとることにより、低周波数の回路ノイズに対するフィルター効果を得ることができる。

#### 【0061】

励起直流電流の幅  $w$  は通常数百 [ n s e c ] レベルである。従って、検出コイルの出力電圧  $E_{TC}$  におけるその反対方向のピーク位置または領域は、通常数百 [ n s e c ] レベルの時間的なずれしか持たない。一方、回路ノイズ、例えば、電源の交流に依存する  $50 - 60$  [ H z ] の電氣的振動は、前述の反対方向ピークの数百 [ n s e c ] レベルの時間差に対してきわめて長いので、出力電圧  $E_{TC}$  における2つのピークに対して同じ方向の電気ノイズを与える。2つのピークの振幅・面積は、外部磁界に依存して反対符号方向へ変化を与えるので、2つのピークの振幅・面積を差分することで外部磁界を計測することができる。このとき、ピーク演算のためのサンプリング時間・積算時間を同じにすれば、通常の電源などの低周波数の電気ノイズは、差分により打ち消されることとなる。この差分演算は、外部磁界計測の精度を向上させるとともに、ノイズフィルター効果も同時に発揮する。

10

#### 【0062】

図7(c)にみられるように、検出コイル26, 28に発生する誘導起電力  $E_{TC}$  の振幅は、外部磁界  $M_{HH}$  に依存して変化している。アモルファスワイヤ22の内部磁化の移動により誘導起電力  $E_{TC}$  が発生するので、このグラフ曲線の中央部分は、外部磁界  $M_{HH}$  強度のボルツマン分布関数として近似できる。  $+ - 50 \mu T$  程度で飽和するボルツマン曲線の中心部スロープから内部磁化が順方向と反方向の配向を取るエネルギー差  $E$  が電子のスピンの起因するとき、通常エネルギー差は磁束密度  $B$  に比例しており、磁束密度  $B$  は、比透磁率  $\mu_s$ 、真空の透磁率  $\mu_0$  と磁界強度  $H$  の積で表される。そこで、使用するアモルファス素材の比透磁率は真空の  $10,000$  倍程度であると推定される。この見かけ上の比透磁率は、磁場(磁界強度)を強化する構造が感磁部材内部にあるか、または電子スピンの集合が同時に変化する構造となっているか、またはその両者の組み合わせと考えられる。従って、非特許文献4に記載されるような単一スピンの独立に磁界の影響を受けることを仮定する場合のノイズレベルは、  $1 \text{ cm}$  の素材あたり  $10$  [ f T ] 程度と推定されるが、多くのスピンの同時に配向を変化する構造となっている場合、例えば  $10000$  個が同時に配向を変える構造の場合には、ノイズレベルは  $100$  [ p T ] となる。従って、多くの感磁部材を同時に制御する前記  $IPA$  の方式は、感磁部材の量(数、体積)を増加することにより、ノイズレベルを低減することができる。

20

30

#### 【0063】

本実施例の磁気計測装置10によれば、磁気異方性を有するアモルファスワイヤ22を有するセンサヘッド部12と、センサヘッド部12に通電するためのステップ状のパルス信号を生成するデジタルディレイパルス発生器44および制御回路42と、センサヘッド部12の生ずる磁界を計測するための検出コイル26, 28と、検出コイル26, 28の起電力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  を制御回路42によるセンサヘッド部12への通電に同期して検出する制御回路42と、を含み、制御回路42より、アモルファスワイヤ22もしくはアモルファスワイヤ22に沿って設けられた導線124にパルス信号  $DP1$ 、 $P_{EX}$  が通電させられ、検出コイル26, 28において、アモルファスワイヤ22が生ずる磁界の変動に起因して起電力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  が生じさせられ、コンピュータ46により、パルス信号  $DP1$  が低電位側から高電位側に変化したこと、および、高電位側から低電位側に変化したことの少なくとも一方に基づく検出コイル26, 28の起電力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  の変化に基づいて磁気の検出が行われるので、精度よく磁気計測が行われるとともに、センサヘッド部12の小型化が実現される。

40

#### 【0064】

また、上述の実施例によれば、コンピュータ46は、ステップ状のパルス信号  $DP1$ 、 $P_{EX}$  が低電位側から高電位側に変化したこと、および、該変化に続いて高電位側から低電位側に変化したことに基づく検出コイル26, 28の起電力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  の変化に

50

基づいて磁気の検出を行うので、パルス信号  $DP1$ 、 $PEx$  が低電位側から高電位側に変化したこと、および、該変化に続いて高電位側から低電位側に変化したことを一対のものとして捉え、それらに基づく検出コイル 26、28 の起電力  $DP1$ 、 $PEx$  の変化の振幅や面積を差分もしくは合計するなどした演算が可能となる。

【0065】

また、上述の実施例によれば、一対の前記センサヘッド 12a、12b と、一対のセンサヘッド 12a、12b 部に対応して一対の前記検出コイル 26、28 を有し、制御回路 42 の差動アンプ 70 は、それら一対の検出コイル 26、28 の出力  $ETC1$ 、 $ETC2$  を差分もしくは増幅することにより磁気の検出を行うものであるため、一対のセンサヘッドを差動、あるいは、併用などした磁気計測が可能となる。

10

【0066】

また、上述の実施例によれば、デジタルディレイパルス発生器 44 の発生するステップ状のパルス信号  $DP1$  は、その高電位側となる時間  $w$  を変更可能であるため、センサヘッド部 12 から生ずる磁界の大きさを所望の値に適宜変更させることができる。

【0067】

また、上述の実施例によれば、磁気異方性を有する磁性体としては、アモルファスワイヤ 22 が用いられているので、そのアモルファスワイヤ 22 もしくはアモルファスワイヤ 22 に沿って配設された導線 124 に電流を流すことで、所望の効果を得ることができる。

【0068】

また前述の実施例によれば、磁気異方性を有する磁性体として、固体、液体、気体もしくは蒸気のいずれかの態様のものを用いることができるので、形状に自由度を持たせてセンサヘッド部 12 を構成することができる。

20

【0069】

続いて、本発明の別の実施例について説明する。以下の説明において、実施例相互に共通する部分については、同一の符号を付して説明を省略する。

【実施例 2】

【0070】

図 8 は、本発明の別の実施例における、制御回路 142 の構成を説明する図であって、前述の実施例における図 3 に対応する図である。本実施例においては、図 8 に示す制御回路 142 は、前述の実施例における制御回路 42 に代えて用いられる。

30

【0071】

本実施例の制御回路 142 は、前述の実施例の制御回路 42 と比べて、以下の点においてその構成が異なっている。すなわち、前述の実施例の制御回路 42 における差動アンプ 70 は、2 つのセンサヘッド 12a、12b からの出力  $ETC1$  および  $ETC2$  の差分を所定の増幅率（図 3 の例では 200 倍）に増幅していた。一方、本実施例の制御回路 142 は、一方のセンサヘッド 12a の出力  $ETC1$  と、そのセンサヘッド 12a の過去の出力  $ETC1'$  との差分を増幅する。この過去の出力  $ETC1'$  はたとえば、データロガー 50 に記憶されていたものであって、たとえばアモルファスワイヤ 22 に印可される電圧  $PEx$  の元となるパルス信号  $DP1$  の時間変化とともに記憶されている。そして、実際にアモルファスワイヤ 22 に電圧  $PEx$  が印可される際に、その電圧  $PEx$  の変化、具体的にはたとえばその入力電圧  $PEx$  における低電圧状態から高電圧状態への立ち上がりなどを、データロガー 50 に記憶された過去のパルス信号  $DP1$  の時間変化と同期させ、その過去のパルス信号  $DP1$  の時間変化に伴って記憶された出力電圧  $ETC1$  を順次出力し、差動アンプ 70 に供給する。

40

【0072】

かかる態様は、具体的には次のような場合に有効である。すなわち、環境磁界が時間の経過に関わらず一定である場合において、測定対象がある場合とない場合とで時間差を置いて本実施例の磁気計測装置 10 により計測し、両者におけるセンサヘッド 12a の検出コイル 26 の出力  $ETC1$ 、 $ETC1'$  との差分を得ることができる。これにより、検出コイル 26 の出力電圧から環境磁界の影響を除去もしくは低減することができ、限られた同一

50

のハードウェアで分解能を向上させることができる。本実施例の磁気計測装置 10 によれば、1つのセンサの時間的に異なる時点の出力を差動アンプ 70 により差動させることができるので、1つのセンサヘッド 12 a しか要せず、構成を簡素にすることができる。

【0073】

上述の実施例によれば、磁気計測装置 10 は、過去の演算結果を記憶するデータロガー 50 を有し、制御回路 42 およびコンピュータ 46 は、現在の演算結果とデータロガー 50 に記憶された過去の演算結果とを差分もしくは増幅することにより磁気の検出を行うことができるので、センサヘッド 12 a が 1 つしかない場合においても、時間的に異なる環境について得られるセンサ出力  $E_{TC1}$  を差動、あるいは合計するなどした演算が可能となる。

10

【実施例 3】

【0074】

図 9 は、本発明の磁気計測装置 10 のさらに別の実施例を説明する図であって、センサ部 112 の構成を説明する図である。この図 9 は、前述の実施例の図 1 に対応する図である。

【0075】

図 9 (a) は、本実施例のセンサ部 112 の構成の概要を説明する図であって、図 9 (b) はその回路構成をより簡易に示した図である。本実施例のセンサ部 112 と前述の実施例のセンサ部 12 とは以下の点で異なる。すなわち、(i) アモルファスワイヤ 22 が検出コイル 26 の内部に配設されている点、および、(ii) アモルファスワイヤ 22 に沿って導線 124 が併設されており、該導線 124 はアモルファスワイヤ 22 とは電氣的に接続されていない点異なる。

20

【0076】

制御回路 42 の出力  $E_X$  から出力される方形波状の電圧  $P_{EX}$  は、導線 124 に印可される。ここで、図 9 に示すように導線 124 は長手状のアモルファスワイヤ 22 の長手方向に沿って配設されているので、導線 124 に電圧  $P_{EX}$  が印可されて電流が流れる場合には、前述の実施例と同様に、その電流の直流成分によって、アモルファスワイヤ 22 の内部磁化が変化することとなる。また、導線 124 を流れる電流の値は、アモルファスワイヤ 22 の内部磁化を一致した方向に揃えることができるような程度の大きさとされる。

【0077】

検出コイル 26 は、本実施例においては円筒長手状のソレノイドコイルであり、円筒内部の空洞部分にアモルファスワイヤ 22 および導線 124 が配設されている。これにより、アモルファスワイヤ 22 の内部磁化の変化を検出コイル 26 の起電力変化として捉えることができる。

30

【0078】

なお、前述の実施例におけるセンサ部 12 との相違点である、(i) アモルファスワイヤ 22 が検出コイル 26 の内部に配設されている点、および、(ii) アモルファスワイヤ 22 に沿って導線 124 が併設されており、該導線 124 はアモルファスワイヤ 22 とは電氣的に接続されていない点のうち、いずれか一方のみがセンサ部 12 と異なるように構成することもできる。

【0079】

また、図 9 においては、説明の簡単のため、センサ部 12 として、長手状のアモルファスワイヤ 22 に対して 1 つのセンサヘッド 12 a のみを説明したが、図 1 のセンサ部 12 と同様に、長手状のアモルファスワイヤ 22 に対して一対 (2 つ) のセンサヘッド 12 a、12 b が設けられることができる。

40

【0080】

前述の実施例においては、検出コイル 26 は、センサヘッド部 12 および検出対象 90 を検出コイル 26 の内部に取り囲むように設けられるので、装置の小型化を実現し、設計の自由度を向上しうる。

【実施例 4】

【0081】

50

図 10 は、本発明の磁気計測装置のさらに別の実施例の構成を説明する図であって、前述の実施例の図 2、図 3 などに対応する図である。本実施例の磁気計測装置 110 においては、図 2、図 3 で示された前述の実施例の磁気計測装置 10 が、さらに後述する発振器 82 およびコイル 84 を有している。

#### 【0082】

図 10 における発振器 82 はコイル 84 に接続されており、コイル 84 は、そのコイル 84 から発生する磁界を磁気計測装置 10 の測定対象 90 に与えることができるように配設されている。発振器 82 からコイル 84 電流が供給され、コイル 84 から所定の周波数で振動する磁界が発生できるものとされている。ここで本実施例においては、コイル 84 から発生する振動磁界が計測対象 90 を共鳴させることができる周波数となるようにされている。発振器 82 およびコイル 84 が本発明の振動磁界発生部に対応する。

10

#### 【0083】

なお、本実施例や前述の実施例において一对のセンサヘッド 12a、12b の出力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  が差動させられる場合においては、それら一对のセンサヘッド 12a、12b のいずれか一方、図 10 の例においてはセンサヘッド 12a に測定対象 90 が近接するようにセンサ部 12 が配設されることができる。このようにすれば、一方のセンサヘッド 12a には環境磁界および測定対象 90 からの磁界が印可される一方、他方のセンサヘッド 12b には環境磁界のみが印可されるため、両者の検出コイル 26、28 の出力電圧出力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  が差動させられることにより環境磁界の影響を除去あるいは低減することができ、出力電圧の変動レンジが小さくなることから、同一のハードウェアを用いる場合においてより分解能を向上させることができる。

20

#### 【0084】

また、本実施例においては、デジタルディレイパルス発生器 44 は、前述の実施例と同様に、アモルファスワイヤ 22 に供給する駆動電圧  $P_{EX}$  の元となるパルス信号  $DP1$ 、サンプルホールド回路 58、60 を駆動させるための基準になるパルス信号  $DP2$  を発生するための 2 つのチャンネル 1Ch、2Ch に加え、発振器 82 の作動を制御するためのトリガー信号を発生するためのチャンネル 3Ch を有しており、全体として少なくとも 3 チャンネルの出力ポートを有している。発振器 82 はデジタルディレイパルス発生器 44 (図 2 参照) に接続されており、デジタルパルス発生器 44 からの制御信号に基づいて発振器 82 がコイル 84 に電流を供給するようにされている。そして、デジタルパルス発生器 44 は、アモルファスワイヤ 22 に励起電圧  $P_{EX}$  を印可し、サンプルホールド回路 58、60 を制御するのに関連して、発振器 82 の作動を制御するためのトリガー信号を発生する。このようにすれば、センサ部 12 による磁気計測に併せて振動磁界を発生させることができる。

30

#### 【0085】

図 11 は、本実施例の磁気計測装置 110 におけるデジタルディレイパルス発生器 44 の各チャンネルごとの出力パターンと、発振器 82 からの出力、コイル 84 から測定対象 90 に印可される振動磁界の時間変化を説明するためのタイムチャートである。

#### 【0086】

前述のとおり、デジタルディレイパルス発生器 44 の 1Ch からは、アモルファスワイヤ 22 を励起させるための電圧  $P_{EX}$  のもとになるパルス信号  $DP1$  が発生させられる。そして、3Ch からは、発振器 82 を起動するためのトリガー信号が発生させられる。ここで図 11 に示すように、デジタルディレイパルス発生器 44 は、パルス信号  $DP1$  が低電圧状態から高電圧状態に立ち上がる時点から時間  $t_{13}$  だけ前に、トリガー信号を発生させるものとされている。そして、かかるトリガー信号を受信した発振器 82 は、所定時間  $t_{OSC}$  の間、コイル 84 に対して電流を供給する。コイル 84 からは、その電流が流れている  $t_{OSC}$  の間、振動磁界が発生させられるとともに、その振動磁界は、電流が停止した後時間  $t_{dmp}$  の間だけかかって減衰していく。一方、デジタルディレイパルス発生器 44 は、コイル 84 からの振動時間が減衰している途中において、サンプルホールド回路 58、60 がサンプルホールド処理を行うためのトリガー信号となるパルス信号  $DP2$

40

50

を 2 C h から出力する。

【 0 0 8 7 】

本実施例の磁気計測装置 1 1 0 によれば、測定対象 9 0 に対して振動磁界を与える発振器 8 2 およびコイル 8 4 をさらに備え、制御回路 4 2 およびデジタルディレイパルス発生器 4 2 は、発振器 8 2 およびコイル 8 4 によって発生させられる振動磁界の振動と同期して検出コイル 2 6 の起電力  $E_{TC1}$  を検出するので、共鳴現象などを検出できる。すなわち、環境磁界またはヘルムホルツコイル 7 8 などで補助的に付加する低強度の静磁場環境において、計測対象物 9 0 内部の原子核・電子が有する共鳴周波数に相当する振動磁界が周囲の別の第二のコイル（たとえばコイル 8 4）から印可されたとき、振動磁界印可後も、対象物内部の原子核・電子が発する振動磁界を（静磁界強度・スピンの種類やその）緩和時間に応じて検出する。このとき、本実施例の磁気計測装置による計測（励起直流電流印可）インターバルを対象物の共鳴周波数と同期させることで、効果的な測定を行うことができる。

10

【 0 0 8 8 】

その他、一々例示はしないが、本発明はその趣旨を逸脱しない範囲内において種々の変更が加えられて実施されるものである。

【 0 0 8 9 】

例えば、前述の実施例では 2 つのセンサ 1 2 a、1 2 b を有するセンサヘッド 1 2 の例を示したが、これに限られず、1 つのセンサ 1 2 a を用いることによって磁気測定を行うことも可能である。かかる場合において、実施例 2 のような構成をとらないのであれば、2 つのセンサの出力を作動させることを前提として設けられた回路部 1 4 の構成部分、すなわち差動アンプ 7 0 などは設けられる必要はない。

20

【 0 0 9 0 】

また、前述の実施例においては、磁気異方性を有する磁性体として長手状のアモルファスワイヤ 2 2 が用いられたが、かかる態様に限られない。たとえば、磁気異方性を有する磁性体としては、iron garnet、ダイヤモンド、SiC の少なくとも 1 を有する物質が用いられてもよい。また、形状も長手棒状に限られず、円筒状や平面状のものであってもよい。平面状の磁性体をたとえば円筒状に巻き回したような所望の形状とされてもよい。さらに、磁気異方性を有する磁性体は、1 つの固体に限られず、微小固体の集合体であってもよいし、固体に限られず、たとえば所望形状の容器に収納された磁気異方性を有する粒子を含有するイオン液体などのように、磁気異方性を有する液体や気体、蒸気とすることも可能である。さらに、アモルファス材料と上記イオン液体との複合物として設けることも可能である。

30

【 0 0 9 1 】

また、前述の実施例においては、回路部 1 4 において、サンプルホールド回路 5 8、6 0 は、それぞれ検出コイル 2 6、2 8 の起電力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  の振幅のピーク（ピーク値）を検出するものとされたが、この際、検出コイル 2 6、2 8 の起電力  $E_{TC1}$ 、 $E_{TC2}$  は、図示しないバンドパスフィルタにより AC カップリングされた後、サンプルホールド回路 5 8、6 0 に入力されるようにしてもよい。

【 0 0 9 2 】

また、前述の実施例においては、アモルファスワイヤ 2 2 のうち、センサヘッド 1 2 a、1 2 b に該当しない部分は電氣的に短絡するためのバイパスケーブル（導線）3 4 が設けられたが、必ずしも必須ではなく、パルス信号に基づいて作成された電流  $P_{EX}$  アモルファスワイヤ 2 2 全体を流れるようにしてもよい。」

40

【 0 0 9 3 】

また、前述の実施例においては、アモルファスワイヤ 2 2 に印可される励起電圧の基になるパルス信号 DP 1 は一定周期 p のものとされたが、これに限定されず、間欠的なパルス信号とされてもよい。すなわち、パルス幅 w は一定であるが、その発生間隔は一定でなくてもよい。これは、本発明によれば、前述の通り、パルス信号 DP 1 の立ち上がりおよび落ち込みとその後の直流電流成分に起因して検出コイル 2 6、2 8 による起電力の変化の

50

検出を行うものであって、パルス信号 D P 1 が所定周期であることを要しないためである。

【 0 0 9 4 】

また、前述の実施例においては、デジタルディレイパルス発生器 4 4 の発生するステップ状のパルス信号 D P 1 は、その高電位側となる時間  $w$  を変更することによって、センサヘッド部 1 2 から生ずる磁界の大きさを所望の値に適宜変更させるものとしたが、このような態様に限られない。この時間  $w$  の変更に代えて、あるいは加えて、アモルファスワイヤ 2 2 に印可するパルス電位  $P E X$  の振幅を変化することや、または、センサヘッド部 1 2 から生ずる磁界の大きさを変更することもできる。このパルス電位  $P E X$  の振幅の変化は、入力アンプ 5 2 の増幅率を変更したり、あるいはパルス電位  $P E X$  の元となるパルス信号 D P 1 の電圧を変更することによって実行される。これは、パルス電位  $P E X$  の振幅のある値によって生ずる磁界強度における遷移速度に依存して磁化の状態遷移が起こることによることで、定常状態に達するまでの時間  $w$  を十分な定常状態に達する前の値とすることで、検出コイルの誘導起電力を調整することができるためである。

10

【符号の説明】

【 0 0 9 5 】

- 1 0 : 磁気計測装置
- 1 2 : センサヘッド部
- 2 6、2 8 : 検出コイル
- 4 2 : 制御回路 ( 通電部・検出部 )
- 2 2 : アモルファスワイヤ ( 磁性体 )
- 5 0 : データロガー ( 記憶部 )
- 8 2 : 発振器 ( 振動磁界発生部 )
- 8 4 : コイル ( 振動磁界発生部 )
- D P 1 : ステップ状のパルス信号
- E T C 1、E T C 2 : 検出コイルの起電力

20

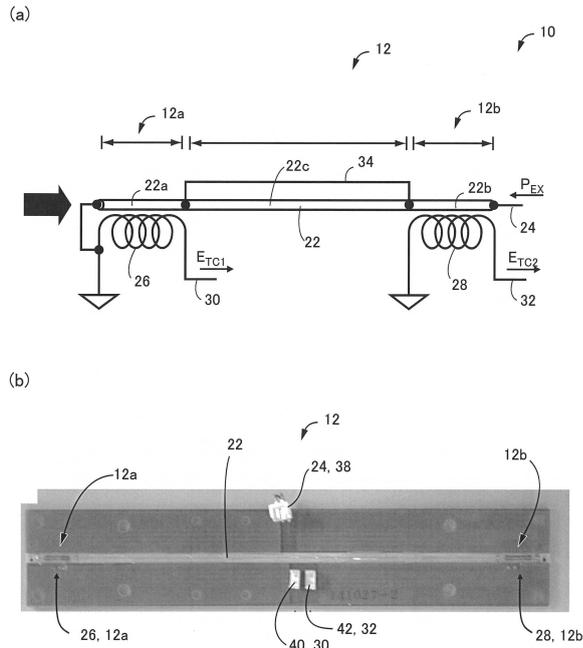
30

40

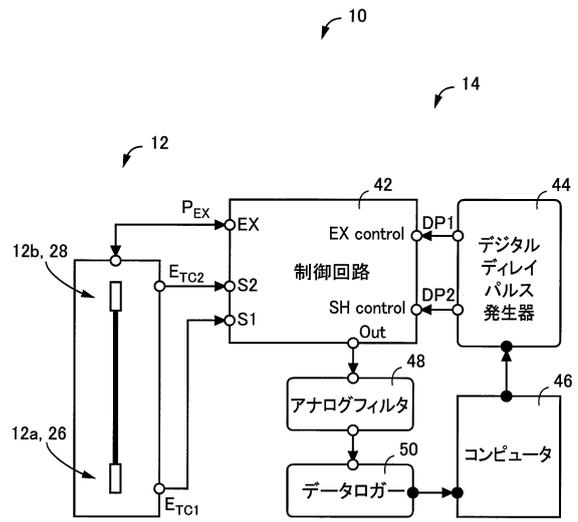
50

【 図面 】

【 図 1 】



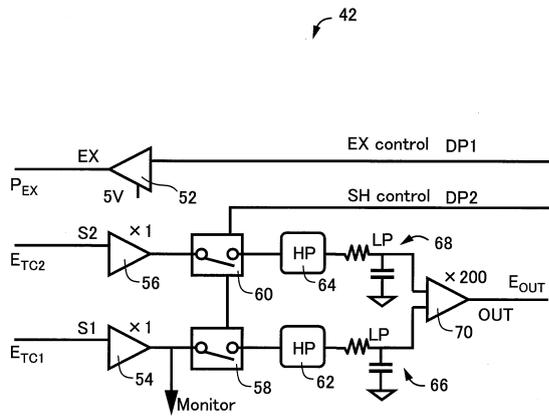
【 図 2 】



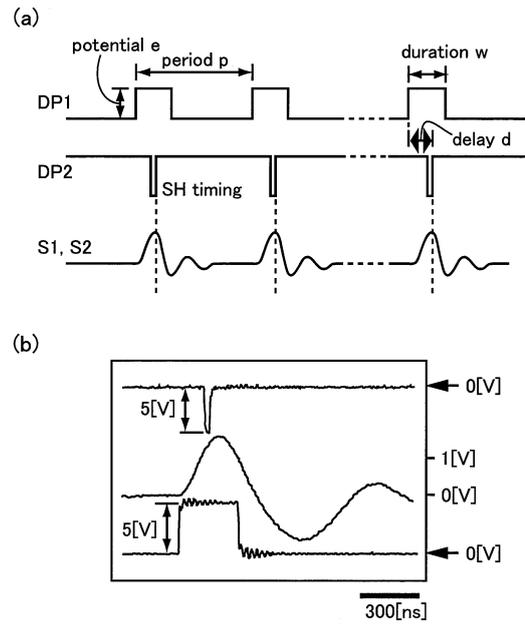
10

20

【 図 3 】



【 図 4 】

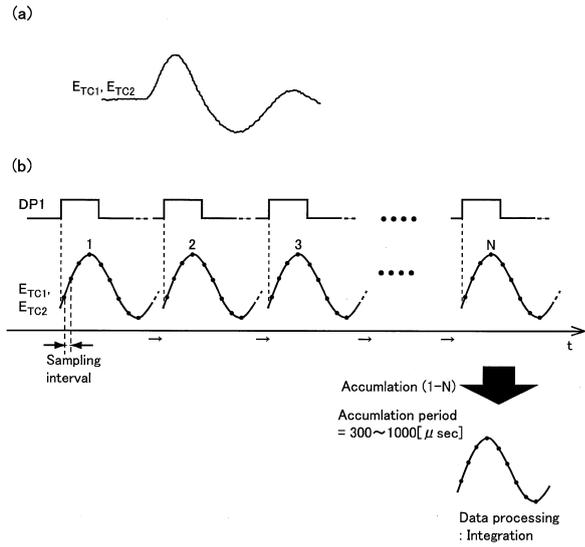


30

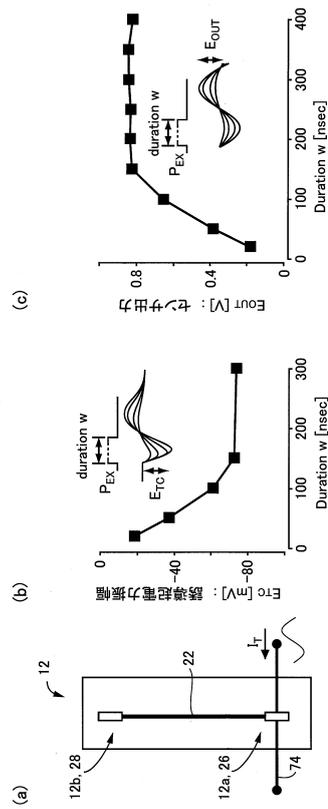
40

50

【 図 5 】



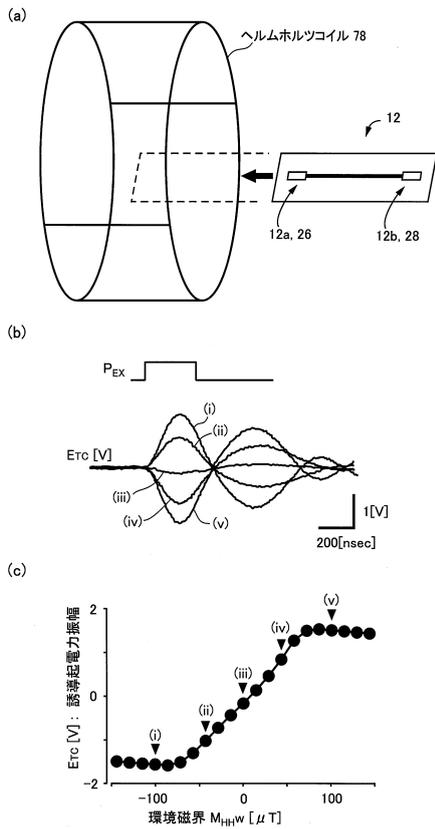
【 図 6 】



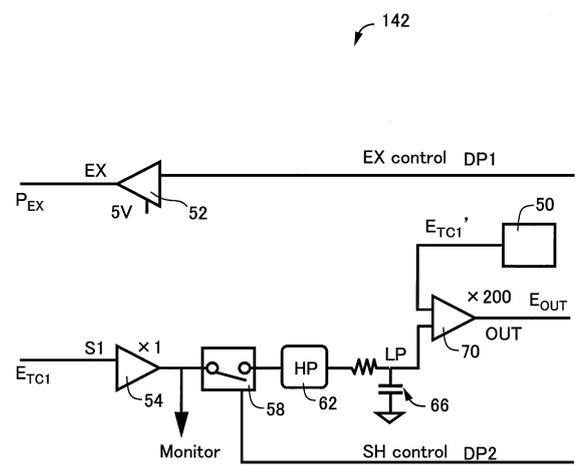
10

20

【 図 7 】



【 図 8 】

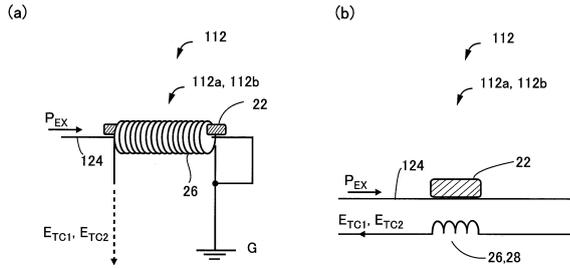


30

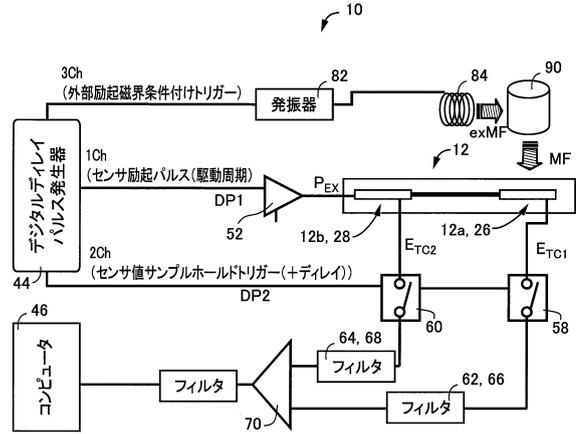
40

50

【図 9】

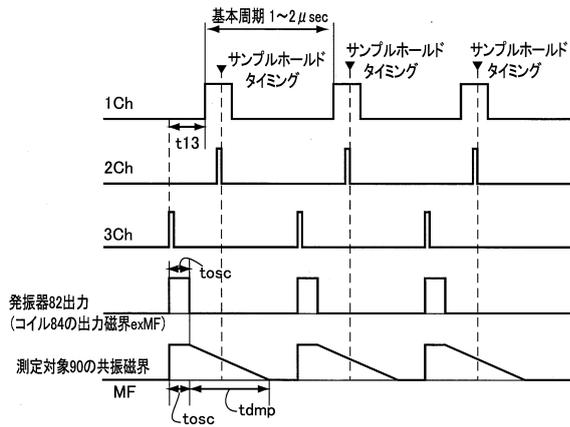


【図 10】



10

【図 11】



20

30

40

50

## フロントページの続き

- (56)参考文献 国際公開第 2 0 1 4 / 1 3 6 9 7 5 ( W O , A 1 )  
特開 2 0 1 2 - 1 9 8 0 3 8 ( J P , A )  
特公平 3 - 3 5 6 2 4 ( J P , B 2 )  
特開 2 0 1 2 - 1 8 5 1 0 3 ( J P , A )  
Shinsuke Nakayama, Tusyoshi Uchiyama , “ Real-time Measurement of Biomagnetic Vector Fields in Functional Syncytium Using Amorphous Metal ” , SCIENTIFIC REPORTS , 5:8837 , 2015年03月06日 , pp.1-9 , DOI: 10.1038/srep08837  
Tsuyoshi Uchiyama, Kaneo Mohri, Shinsuke Nakayama , “ Measurement of Spontaneous Oscillatory Magnetic Field of Guinea-Pig Smooth Muscle Preparation Using Pico-Tesla Resolution on Amorphous Wire Magneto-Impedance Sensor ” , IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS , 2011年10月 , Vol. 47, No. 10 , pp. 3070-3073 , DOI: 10.1109/TMAG.2011.2148165
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)  
G 0 1 R 3 3 / 0 0 - 3 3 / 2 6