(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
2012 年 2 月 9 日(09.02.2012)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2012/018018 A1

(51) 国際特許分類:
A61B 5/055 (2006.01) *G01R 33/36* (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2011/067686

(22) 国際出願日: 2011 年 8 月 2 日(02.08.2011)

(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 2010-173467 2010 年 8 月 2 日(02.08.2010) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 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; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 圓福　敬二 **(ENPUKU Keiji)** [JP/JP]; 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目１０番１号　国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP). 神鳥　明彦 **(KANDORI Akihiko)** [JP/JP]; 〒1858601 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目２８０番地　株式会社日立製作所　中央研究所内 Tokyo (JP). 緒方　邦臣 **(OGATA Kuniomi)** [JP/JP]; 〒1858601 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目２８０番地　株式会社日立製作所　中央研究所内 Tokyo (JP). 川畑　龍三 **(KAWABATA Ryuzo)** [JP/JP]; 〒1858601 東京都国分寺市東恋ヶ窪一丁目２８０番地　株式会社日立製作所　中央研究所内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: ポレール特許業務法人 **(POLAIRE I.P.C.)**; 〒1040032 東京都中央区八丁堀二丁目７番１号 Tokyo (JP).

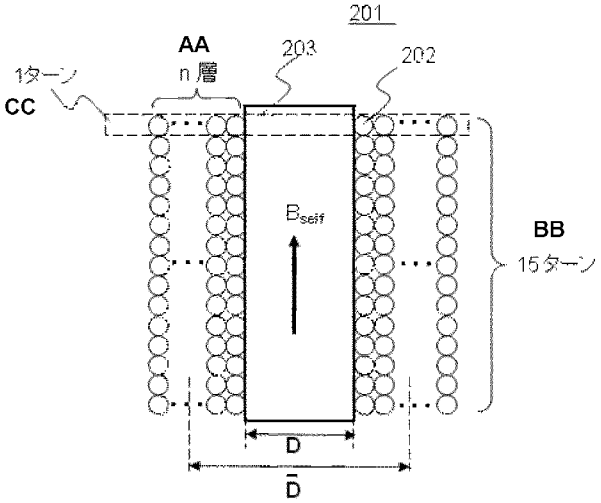
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) **Title**: HIGH SENSITIVITY MAGNETISM DETECTOR DEVICE

(54) 発明の名称 : 高感度磁気検出装置

図2



AA n LAYERS
BB 15 TURNS
CC 1 TURN

(57) **Abstract**: Provided are a detector coil shape and a high sensitivity magnetism detector device that minimize increases in alternating-current resistance resulting from multilayered turns of a detector coil. A detector coil shape is treated as having fewer than twice as many layers as a number of layers n on a detector coil, as calculated by a formula (10), and litz wire with as small a gauge as possible is used in the detector coil. A high sensitivity magnetism detector device is achieved by carrying out either voltage amplification of the voltage obtained by the detector coil or current amplification.

(57) 要約:　検出コイルの多層巻きによって発生する交流抵抗成分の増加を最小限にする検出コイル形状および高感度磁気検出装置を提供する。検出コイルに式（１０）で計算される層数ｎの２倍より小さい層数とする検出コイル形状とし、この検出コイルに素線径がなるべく小さいリッツ線を使用する。この検出コイルで得られる電圧を電圧増幅または電流増幅を行い高感度磁気検出装置を実現する。

WO 2012/018018 A1

(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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

明　細　書

発明の名称 ： 高感度磁気検出装置

技術分野

[0001] 本発明は、主に低磁場下（例えば、数ｍＴ以下）での数ｋＨｚから数１００ｋＨｚ程度の核磁気共鳴信号（以下、ＮＭＲと称する）を検出して画像化する超低磁場磁気共鳴イメージング装置（磁気共鳴イメージングを、以下にＭＲＩと称する）、または超低磁場ＮＭＲ計測装置の検出コイル技術に関するものである。また、ＭＲＩ装置やＮＭＲ装置以外においても高感度磁気検出が必要な非破壊検査装置（食品、金属異物検査など）などの検出コイルにも適応可能な技術に関する。

背景技術

[0002] 従来、電磁誘導加熱を目的として、高周波の大電流を流すコイルにリッツ線が使用されていた（例えば、特許文献１、特許文献２を参照）。これは、高周波電流による表皮効果が原因で生じる抵抗値上昇による発熱を避け、抵抗値を落とすことによって大電流を流すことを可能とするために行われてきた手法である。

一方、高周波（１ｋＨｚ以上）の磁気信号を検出する手法として、例えば、ＭＲＩやＮＭＲ信号検出では、銅線の単線（素線）の検出コイルに共振回路を有する検出コイル手法が利用されている。またＮＭＲ信号検出として常磁性と反磁性の相反する磁気特性を持つ２つ以上の線材を撚り合わせる検出コイル構成が提案されている（例えば、特許文献３を参照）。

[0003] しかし素線径での磁気雑音の効果などは全く知られていない。一方、通常の１Ｔ程度のＭＲＩ装置では生体雑音が大きくなるため、検出コイルの高感度化について検討は行われていなかった。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2007-227035号公報

特許文献2：特開2008-60432号公報

特許文献3：特開2007-132725号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：J. Magn. Reson. 194, pp.115-120

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 近年、低磁場ＭＲＩ装置の開発が急速に進んできている。これは低磁場下（数ｍＴ以下）での磁気共鳴信号をＳＱＵＩＤ(Superconducting Quantum Interference Device)などの超高感度の磁気センサで検出技術が開発されてきている（非特許文献１を参照）。この低磁場ＭＲＩ装置では共鳴周波数が数ｋＨｚから数ＭＨｚ程度の周波数で検出を行うため、生体雑音より磁気センサーノイズの方が大きく、磁気センサーノイズを小さくすることが課題であった。

[0007] 高周波（ここで、数ｋＨｚから数ＭＨｚの帯域を指し、高磁場ＭＲＩの周波数数ＭＨｚ以上の超高周波でない帯域とする。）でさらに高感度に磁気検出を行う場合、検出コイルの多層巻きによって、誘起された交流電流自らも自己磁場を発生させてしまい、自己磁場によって抵抗成分が増加するという現象を我々は発見した。この現象は次のようなメカニズムである。

（１）多層巻きの検出コイルには、自己磁場によって検出コイル内に渦電流損失が現れる。

（２）渦電流損失によって抵抗（以下に、交流抵抗と呼ぶ）が増加する。

（３）交流抵抗成分の上昇によって検出コイルの磁気雑音が増加し、検出感度を低下させる。なお、この交流抵抗成分は周波数の２乗によって増加する成分のため、周波数が高いほど交流抵抗成分は増加する。

[0008] そこで、本発明の目的は、以上のような低磁場で数ｋＨｚ乃至数ＭＨｚ程度の共鳴周波数の検出を行う検出コイルにおいて、交流抵抗の高周波による増加分を少なくする検出コイル構造を提案し、高感度な高周波磁気検出手法を提供することである。

課題を解決するための手段

[0009] 交流抵抗を減少させるため、検出コイルの層数ｎや測定周波数ｆは以下のように決定する。

（１）測定周波数ｆが決まっている場合（例えば、ＭＲＩやＮＭＲの磁場強度が決まっている場合）は、後述する式（１０）で決定される層数ｎより小さい値にする。または式（１０）で決定される層数ｎの２倍程度までとする。

（２）層数ｎが検出コイル全体の大きさの決定される場合は、後述する式（１１）を用いて測定周波数ｆを式（１１）で決定される周波数ｆより低い値と使用する。または式（１１）で決定される周波数ｆの２倍程度までとする。

（３）さらに、（１）と（２）の手法と合わせて、検出コイルに素線径のなるべく小さいリッツ線（撚り線）を使用する。その理由は、交流抵抗成分はリッツ線（撚り線）の素線の直径（または半径）の２乗に比例して増加するためである。

[0010] 以上の（１）乃至（３）の手法により高感度な磁気検出が可能となる。

発明の効果

[0011] 本発明によれば、数ｍＴ以下の低磁場で数ｋＨｚ乃至数ＭＨｚ程度の共鳴周波数の検出を行う検出コイルにおいて、高周波に起因する交流抵抗の増加分を低減させ、高感度な磁気の検出を可能とする。

図面の簡単な説明

[0012] [図1A]本実施の形態の基本構成（電圧検出型）を示す図。

[図1B]本実施の形態の基本構成（電流検出型）を示す図。

[図2]図１Ａ、Ｂに示した検出コイルの断面図を示す図。

[図3]線材に用いる導体内部の渦電流損失を説明する図。

[図4]検出コイルの層数と単位長さ当たりの交流抵抗成分（r_{ac}）と直流抵抗成分（r_{dc}）との比率との関係を示す図。

[図5]温度３００Ｋにおける層数をパラメータとした磁気雑音Ｂｎの周波数特

性を示す図。

[図6]温度７７Ｋにおける層数をパラメータとした磁気雑音Ｂｎの周波数特性を示す図。

[図7]交流抵抗成分の周波数依存性を示す図。

[図8]本発明の検出コイルを適用した核磁気共鳴イメージング（ＭＲＩ）装置の装置構成を示す図。

発明を実施するための形態

[0013] 図１Ａ及び１Ｂを用いて、微弱磁場を検出する検出コイルおよび回路構成を示す。検出コイルおよび回路構成として電圧検出型（図１Ａ（ａ））と電流検出型（図１Ｂ（ａ））とがある。図１Ａ（ａ）の電圧検出型および図１Ｂ（ａ）の電流検出型のどちらにおいても共通の構成は、検出コイル形状である。この検出コイル１０２は検出コイルボビン１０１（非磁性材料・非金属材料の樹脂材などで構成）に銅線などの導体からなる線材が巻きつけられて構成されている。この検出コイルは図中では１層巻きになっているが、実際には１層または多層巻きによって検出コイル１０２は構成されている。また検出コイル１０２はリッツ線（撚り線）の多芯線によって構成することにより、リッツ線（撚り線）の素線の直径（または半径）の２乗に比例して増加する交流抵抗成分を減少させることができる（式（３）参照）。図１Ａ（ｂ）は、図１Ａ（ａ）で示す検出コイルに用いられている線材としてリッツ線を用いた場合の線材の断面の一例を示す。本例では、リッツ線断面１０３は７本の素線１１０で構成されている。

[0014] 図１Ａ（ａ）の電圧検出型回路の構成では、検出コイル１０２の両端に共振用コンデンサ１０９を並列接続し、検出コイル１０２のインダクタンスと共振用コンデンサ１０９とで測定周波数の共振を生じさせる構成となっている。この共振用コンデンサの両端を低雑音増幅器１０４に接続することで測定周波数について高感度に磁気計測が実現される。図１Ａ（ａ）のような回路構成により、検出コイル１０２に鎖交した磁束の変化量（１次の時間微分した磁束量）によって生ずる電圧が増幅され、磁束の変化量に伴う出力電圧

１０５が低雑音増幅器１０４の端子に得られる。

[0015] また、図１Ｂ（ａ）の電流検出型回路の構成では、検出コイル１０２の両端に、磁束伝達部（コイル）１０８を直列接続とし、この磁束伝達部（コイル）１０８と検出コイル１０２は直列接続の閉ループとする。この閉ループ内には鎖交した磁束の変化量（１次の時間微分した磁束量）に伴って検出コイル１０２の両端に発生する電圧による電流が流れる。この閉ループ内の電流が、磁束伝達部（コイル）１０８に流れ、磁束１０７を作り、磁束一電圧変換部１０６によって磁束が電圧に変換される。そしてこの変換された電圧が低雑音増幅器１０４によって増幅され、出力電圧１０５を得る構成としている。

[0016] ここで、図１Ｂ（ａ）で示す検出コイル１０２に用いられているリッツ線の断面は、図１Ｂ（ｂ）に示すように、図１Ａ（ａ）の場合と同様な構成となっている。また、磁束一電圧変換部１０６はＳＱＵＩＤ（超電導量子干渉素子）やＧＭＲ素子（巨大磁気抵抗素子）やＴＭＲ素子（トンネル磁気抵抗効果素子）などの高感度磁気センサを使用し、高感度に磁束を電圧に変換する。ＳＱＵＩＤを用いる場合は、磁束一電圧変換部１０６と磁束伝達部（コイル）１０８は超電導状態の極低温温度（例えば、液体ヘリウム温度４．２Ｋ、液体窒素温度７７Ｋ）内に配置され、検出コイル１０２は極低温部でも常温でも配置することができる。

[0017] 図１Ａ（ａ）および図１Ｂ（ａ）の出力電圧１０５の電圧は、検出コイルに鎖交した磁束を時間微分した電圧であるため、この出力電圧１０５を、積分回路を通すことによって検出コイルに鎖交した磁束そのもの（１次の時間微分した磁束量ではなく、磁束量そのもの）に変換することも可能である。

[0018] また、本例では、検出コイルにリッツ線を用いたが、単素線からなる導線でも構わない。ただし、リッツ線を用いた方が、本発明の効果をより発揮することができる。

[0019] 図２に、図１に示す検出コイル１０２の断面構造を検出コイル２０１として示している。ここでは、検出コイルボビン２０３の外周部に導線を巻いて

検出コイルを構成する。検出コイルボビン外周部に接して巻かれているコイルを第１層とし、順次外側へ第２層、第３層・・・と積層し、ｎ層まで巻いて１ターンとした場合を示す。ボビン上端から下端へ各層が積層され、１５ターンのコイルを形成している。１層を１５ターンの検出コイルをｎ層巻きにしている場合を示しており、ボビン直径Ｄを４０ｍｍ（０．０４ｍ）としている。コイルの全巻き数は、ｎ層と１５ターンを掛け合わせて、Ｎ＝１５ｎとなる。検出コイル２０１のコイル部（例えば２０２）に電流が流れることによって、自己磁場B_{self}が発生する。自己磁場B_{self}によって検出コイル２０１の各コイル部には渦電流がコイル部導体内部に発生する。

[0020] 次にこの渦電流によって発生する損失について説明する。ここで渦電流によって発生する交流損失に伴う単位長さ当たりの抵抗成分をr_{ac}とし、通常導体の抵抗率のみで決まる抵抗成分をr_{dc}とする。

[0021] 図３に検出コイルに用いる線材の一例を示す。本図において、抵抗率ρ[Ω]、幅ｄ[ｍ]（これはリッツ線では素線の直径に対応）の導体板に周波数ｆ[Ｈｚ]、振幅B_0[Ｔ]の交流磁界Ｂ[Ｔ]を印加した時の単位体積当たりの渦電流損W[W/m^3]は次式で与えられる（図３参照）。なお、各物理量の後に記載する[ ]内は、単位を示し、以下同様とする。

[0022] [数1]

$$W = \frac{\pi d^2 B_0^2 f^2}{6\rho} \quad \cdots\cdots \quad (1)$$

[0023] ここで、ｄは素線の直径を示す。

[0024] リッツ線（銅線）の断面積をＡ[m^2]、長さをｌ[ｍ]とし、渦電流による単位長さ当たり交流抵抗をr_{ac}と置いた時のコイル全体の損失を考えると、以下の関係式が成り立つ。

[0025] [数2]

$$WAl = (I_0^2/2) r_{ac} l \quad \cdots\cdots \quad (2)$$

[0026] ここで、Ｉo[Ａ]は、線材を流れる交流電流の振幅を示す。

[0027] 従って、渦電流による交流抵抗（単位長さ当たり）r_{ac}[Ω]は、

[0028] [数3]

$$r_{ac}=\frac{\pi A d^2 f^2}{3\rho}\frac{B_0^2}{I_0^2} \quad \cdots\cdots \quad (3)$$

[0029] である。

[0030] ここで、磁界Bo[T]は電流によって発生するコイルの自己磁界であるから、コイルの高さをh[m]、全巻き数をN=１５ｎとすれば、アンペアの法則より

[0031] [数4]

$$B_0=g\mu_0 N I_0/h \quad \cdots\cdots \quad (4)$$

[0032] となる。ここでｇは形状ファクター、μ_0は真空の透磁率[H／m]とする。

[0033] 従って、

[0034] [数5]

$$r_{ac}=\frac{\pi A}{3\rho}\left(\frac{g\mu_0 Ndf}{h}\right)^2=\frac{\pi A}{3\rho}\left(\frac{g\mu_0 15ndf}{h}\right)^2=K\frac{n^2 f^2}{\rho} \cdots (5)$$

[0035] [数6]

$$K=\frac{\pi A}{3}\left(\frac{g\mu_0 15d}{h}\right)^2 \cdots\cdots (6)$$

[0036] となる。ここでｄ[m]は素線の直径である。したがって、ｄが小さいほどＫの値は小さくなるため、r_{ac}の値も小さくなる。つまりリッツ線（撚り線）を用いると、r_{ac}を小さくできるという効果があるため、高周波での検出コイルにはリッツ線を用いるとより効果的である。

[0037] ここで、本実施例で云う交流抵抗成分とは式（５）および（６）で定義されるコイルの層数ｎと周波数ｆと抵抗率ρなどで決定される値のことをいう。なお、式（５）、（６）では、コイルの全巻き数Ｎは、１５ターンとして計算しているが、ターン数をＴとして一般化しても良い。その場合は、式中の１５をＴに置き換えればよい。

[0038] 一方、直流抵抗（単位長さ当たり）r_{dc}[Ω]の表式は、

[0039] [数7]

$$r_{dc}=\frac{\rho}{A} \qquad \cdots\cdots (7)$$

[0040] となる。

ここで磁気雑音Ｂｎ[Ｔ／Ｈｚ$^{1/2}$]は以下のように計算できる。

[0041] [数8]

$$B_n=\sqrt{S_B}=\frac{\sqrt{4k_BTR}}{(\pi D^2/4)(15n)(2\pi f)} \cdots\cdots (8)$$

[0042] ここで抵抗値Ｒ[Ω]は、コイルの全長l_{total}[ｍ]がl_{total}＝１５ｎ・π・Ave(Ｄ)になることを考慮すると以下のように表される。なお、Ave(Ｄ)[ｍ]は、１ターン当りのコイル長さの平均値を示し、Ave(Ｄ)＝Ｄ＋（ｎ－１）ｄとなる。

[0043] [数9]

$$R=(r_{dc}+r_{ac})15n\pi\cdot Ave(D) \quad (\text{但し、} Ave(D)=D+(n-1)d) \cdots (9)$$

[0044] 図４に式（５）と式（７）で表現されるr_{ac}とr_{dc}について、実測した結果を示している。横軸が図１に示した検出コイルの層数ｎであり、縦軸がr_{ac}とr_{dc}の比率を示している。測定周波数が３０ｋＨｚでは、層数ｎ＝２でも急激にr_{ac}の値が大きくなっているのが分かる。一方、周波数が低い６ｋＨｚでは層数ｎ＝８でもr_{ac}とr_{dc}がほぼ同じ値であることが分かる。

[0045] このようにr_{ac}とr_{dc}が等しくなる条件に近い層数を計算することで抵抗値の小さい最適な層数を選択可能である。r_{ac}とr_{dc}が等しくなる層数ｎは以下のように表わされる。

[0046] [数10]

$$n=\frac{\rho}{f}\sqrt{\frac{1}{AK}} \qquad \cdots\cdots (10)$$

[0047] また（１０）式を変形してｎが固定の場合、r_{ac}とr_{dc}が等しくなる最適

な周波数ｆは以下となる。

[0048] [数11]

$$f = \frac{\rho}{n}\sqrt{\frac{1}{AK}} \quad \cdots\cdots (11)$$

[0049] したがって、式（１０）と式（１１）に表わされるように、最適な検出コイル形状は以下のように纏めることができる。

（１）測定周波数が決まっている場合（例えば、ＭＲＩやＮＭＲの磁場強度が決まっている場合）は、式（１０）で決定される層数ｎより小さい値にする。r_{ac}とr_{dc}の比率が１より大きくなっていくと、式（１０）で決定される層数ｎは大きな値となっていく。層数ｎの制限として、r_{ac}とr_{dc}の比率が２の場合までなら磁気雑音Ｂｎが１．５倍程度しか増加しないため、許容することができる。そのため、式（１０）で決定される層数ｎの２倍程度までを許容する。

（２）層数ｎが検出コイル全体の大きさで決定される場合は、式（１１）を用いて測定周波数を式（１１）で決定される周波数ｆより低い値と使用する。または式（１１）で決定される周波数fの２倍程度までとする。

[0050] 次に、図５および図６を用いて、検出コイルの測定温度を変化させた場合を考える。７７Ｋと３００Ｋの温度の違いによって、抵抗率は３００Ｋに対して７７Ｋに冷却されると約１／６の抵抗率まで減少する。この抵抗率の減少によってr_{dc}成分は式（７）に示す関係式によって減少し、r_{ac}成分は抵抗率の減少によって式（５）に示す関係式によって増加する。以上の温度の変化によるr_{dc}成分の減少とr_{ac}成分の増加によって生じる磁気雑音Ｂｎの変化（式（８）で計算される値）を、図５（３００Ｋ（室温）の場合）と図６（７７Ｋ（液体窒素中）の場合）に示す。ここで図５と図６は、直径０．１ｍｍの素線６０本で作成されたリッツ線を用いている。図５（３００Ｋの場合）では、式（１１）で計算される周波数が10^5Ｈｚ近傍のため、ほとんどr_{ac}の増加分がなく、r_{dc}成分が一定値のみによって磁気雑音が決まるため、式（８）に示すように層数が多いほど抵抗値が下がっていく。

[0051] 一方、図６（７７Ｋの場合）では、抵抗率ρが温度３００Ｋの場合より小さくなるため、（１０）式または（１１）式で計算される層数ｎも周波数ｆも小さな値となる。そのため、１０ｋＨｚ以上の帯域で、層数ｎが小さいほど感度が良くなる。これは式（５）で示されるr_{ac}成分が周波数の２乗と層数の２乗で上昇していくため、式（８）および（９）で計算される磁気雑音Ｂｎも高周波（ここでは１０ｋＨｚ以上）で層数が多いほど磁気雑音Ｂｎは上昇していくことを示している。

[0052] このように高感度な磁気検出装置を作成する場合、周波数が高いとコイル層数を多く出来ないという低周波での考え（コイル層数を多くれば感度が上昇する）と全く反対の全く新しい思想である。この層数を多くすると感度が落ちていく（磁気雑音が増加していく）ということは、冷却して使用する検出コイルでは抵抗率が減少するため比較的低周波でも生じるため、高感度な磁気検出の実現には必須の技術内容である。

以上のように式（１１）で計算される周波数ｆより高い高周波領域での高感度磁気検出には、式（１０）で計算される層数ｎより小さい層数とする必要がある。

[0053] 図７は、交流抵抗成分r_{ac}の周波数ｆ依存性を示す。この図は、図４で求めた抵抗値から直流抵抗成分を差し引いて交流抵抗成分を求めた図で、縦軸は$r_{ac}\rho / n^2$を取り、横軸に周波数ｆを取ったものである。図で示すように、r_{ac}の増加は２乗に比例している。ところで、表皮効果による抵抗の増加は、周波数ｆの１／２乗となることが知られている。このことから、本例で示すr_{ac}の増加は表皮効果が起因するものではないと言える。

[0054] ここで、表皮効果についても検討を行う。表皮効果とは高周波電流が流れる時、電流密度の導体表面で高く、導体表面から遠ざかると低くなる現象のことである。周波数が高くなると電流が導体表面に集中するため、抵抗値が上がることが知られている。表皮深さ（skin depth）d_sは次のように表わすことができる。

[0055]

[数12]

$$d_s = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad \cdots\cdots (12)$$

[0056] ここでμは、導体の透磁率である。

銅線で試算した時の表皮深さd_sは、以下のようになる。なお、１）乃至３）は、それぞれ６０Ｈｚ、１０ＫＨｚ、１００ｋＨｚの周波数で、周囲温度が３００Ｋと７７Ｋの場合を示す。

１）６０Ｈｚ：８．６ｍｍ（３００Ｋ）、３．８ｍｍ（７７Ｋ）

２）１０ｋＨｚ：０．７ｍｍ（３００Ｋ）、０．３ｍｍ（７７Ｋ）

３）１００ｋＨｚ：０．２ｍｍ（３００Ｋ）、０．１ｍｍ（７７Ｋ）

図５と図６で使用したコイルの素線は半径が０．１ｍｍであり、上記の表皮深さの長さより短い。

[0057] このことから、表皮深さｄｓは、周波数ｆ＝１００ｋＨｚで素線の線径と同程度となることが分かる。したがって、ｆ＝数ｋＨｚ当りでは、線径が表皮深さｄｓに比べて小さいので、表皮効果は無視できる。つまり１００ｋＨｚまでの周波数では表皮効果による抵抗の増加分はないと考えられる。したがって、本発明の渦電流による交流抵抗成分の増加は全く新しい考え方である。

[0058] 図８は、図１、図２に示した検出コイルを、ＭＲＩ装置に適用した一例を示す。本実施例は、核磁気共鳴（ＮＭＲ）信号を検出する、検出コイル４１４（図１の１０２と図２の２０１に対応）を用いた実施例を示す。静磁場発生マグネット４０１と傾斜磁場発生コイル４０７と高周波磁場発生コイル４０３の中に入った検査対象４０４に検出コイル４１４を近づけＮＭＲ信号を検出する。静磁場の歪みを補正するシムコイル４０５に接続されたシム電源４０６や傾斜磁場電源４０８はシーケンス４１５によって制御され、各断面ＭＲ画像の信号を検出していく。シーケンス４１５は記憶媒体４１１に記憶されているシーケンスに基づいて制御が行われる。低雑音増幅器４１３（図１(a)の場合は、磁束ー電圧変換器４１２は不要）のＭＲ信号の出力は計算機

４１０によって記録され、各断面のＭＲ画像はディスプレイ４０９上に表示される。

[0059] 本発明の検出コイルを用いることにより、交流抵抗の高周波による増加分を少なくすることができ、高感度なＭＲＩ装置を実現できる。

符号の説明

[0060] 101…検出コイルボビン、102…検出コイル、103…検出コイルのコイル部断面、104…低雑音増幅器、105…出力電圧、106…磁束ー電圧変換器、107…磁束、108…磁束伝達部（コイル）、109…共振用コンデンサ、110…素線、201…検出コイル、202…検出コイルのコイル部、203…検出コイルボビン、301…導体部、302…導体部の断面、401…静磁場発生マグネット、402…高周波磁場発生器、403…高周波磁場発生用コイル、404…検査対象、405…シムコイル、406…シム電源、407…傾斜磁場発生コイル、408…傾斜磁場電源、409…ディスプレイ、410…計算機、411…記録媒体、412…磁束ー電圧変換器、413…低雑音増幅器、414…検出コイル、415…シーケンサ。

請求の範囲

[請求項1] 微弱な磁気を検出する高感度磁気検出装置において、

線材をボビンに複数層に巻き回してなる検出コイルと、

前記微弱な磁気の変化に応じて、前記検出コイルから発生する電気的情報を検出する検出部と、を有し、

前記線材に印加される周波数が固定されている時、前記検出コイル部を構成する線材の巻き数が、下記式（１）で算出される巻き数ｎの２倍より少ない巻き数であることを特徴とする高感度磁気検出装置。

$$n = \rho / f \cdot \sqrt{(1/AK)} \quad \cdots (1)$$

（ここで、ｎ＝層数、ρ＝抵抗率[Ω]、ｆ＝周波数[Hz]、Ａ＝線材の断面積[m^2]、$K = \pi A / 6 (g \mu_0 T d / h)^2$、ｇ＝形状ファクタ、$\mu_0$＝真空の透磁率[H/m]、ｄ＝線材
幅（又素線の直径）[m]、ｈ＝検出コイル高さ[m]、Ｔ＝１層当たりのターン数である。）

[請求項2] 請求項１に記載の高感度磁気検出装置において、

前記検出コイル部を構成する線材の巻き数が、前記式（１）で算出される層数ｎより少ない巻き数であることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項3] 請求項１に記載の高感度磁気検出装置において、

前記検出部は、コンデンサと低雑音増幅器から構成された電圧検出手段であることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項4] 請求項１に記載の高感度磁気検出装置において、

前記検出部は、コイルと該コイルから誘導される磁気を感知する磁気検出手段から構成された電流検出手段であることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項5] 請求項４に記載の高感度磁気検出装置において、

前記磁気検出手段は、ＳＱＵＩＤ（超電導量子干渉素子）またはＴＭＲ素子（トンネル磁気抵抗効果素子）またはＧＭＲ素子（巨大磁気

抵抗素子）で構成されていることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項6] 請求項１に記載の高感度磁気検出装置において、

前記線材に、リッツ線を用いることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項7] 請求項１に記載の高感度磁気検出装置において、

前記検出コイル部を構成するコイル中の渦電流損失に伴う交流抵抗成分が、前記検出コイル部が有する直流抵抗成分より小さいことを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項8] 微弱な磁気を検出する高感度磁気検出装置において、

線材をボビンに複数層に巻き回してなる検出コイルと、

前記微弱な磁気の変化に応じて、前記検出コイルから発生する電気的情報を検出する検出部と、を有し、

前記検出コイルにおけるコイルの巻き数が一定の時、前記線材に印加される周波数が、下記式（１）で算出される周波数ｆの２倍より小さいことを特徴とする高感度磁気検出装置。

$$f = \rho / n \cdot \sqrt{(1/AK)} \quad \cdots (1)$$

（ここで、ｎ＝層数、ρ＝抵抗率[Ω]、ｆ＝周波数[Hz]、Ａ＝線材の断面積[m^2]、$K = \pi A / 6 (g \mu_0 T d / h)^2$、ｇ＝形状ファクタ、$\mu_0$＝真空の透磁率[H/m]、ｄ＝線材幅（又素線の直径）[m]、ｈ＝検出コイル高さ[m]、Ｔ＝1層当たりのターン数である。）

[請求項9] 請求項８に記載の高感度磁気検出装置において、

前記検出コイル部に印加される周波数が、前記式（１）で算出される周波数ｆより小さいことを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項10] 微弱な磁気を検出する高感度磁気検出装置において、

線材をボビンに複数層に巻き回してなる検出コイルと、

前記微弱な磁気の変化に応じて、前記検出コイルから発生する電気的情報を検出する検出部と、を有し、

前記線材を流れる電流に対する抵抗成分が、渦電流損失を起因とす

る所定の周波数における交流抵抗成分r_{ac}と、線材の抵抗率によって決定される直流抵抗成分r_{dc}とからなるとき、

前記検出コイル部を構成する線材の巻き数が、前記所定の周波数における前記交流抵抗成分と前記直流抵抗成分との比、r_{ac}/r_{dc}の値に基づいて決定されることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項11] 請求項１０に記載の高感度磁気検出装置において、

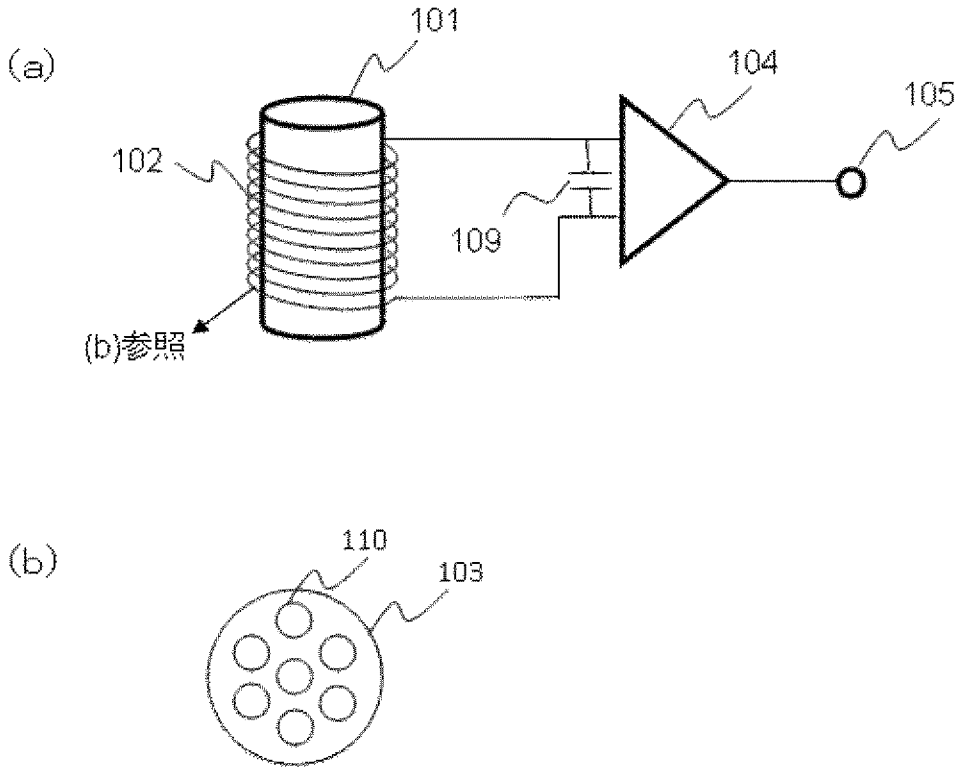
前記r_{ac}/r_{dc}比が１より大きい時の前記線材の巻き数が、前記r_{ac}/r_{dc}比が１より小さい時の前記線材の巻き数より多くなるように設定されていることを特徴とする高感度磁気検出装置。

[請求項12] 請求項１０に記載の高感度磁気検出装置において、

基準とする周波数に対して前記所定の周波数が大きい時の前記線材の巻き数が、前記所定の周波数が小さい時の前記線材の巻き数より少なくなるように設定されていることを特徴とする高感度磁気検出装置。

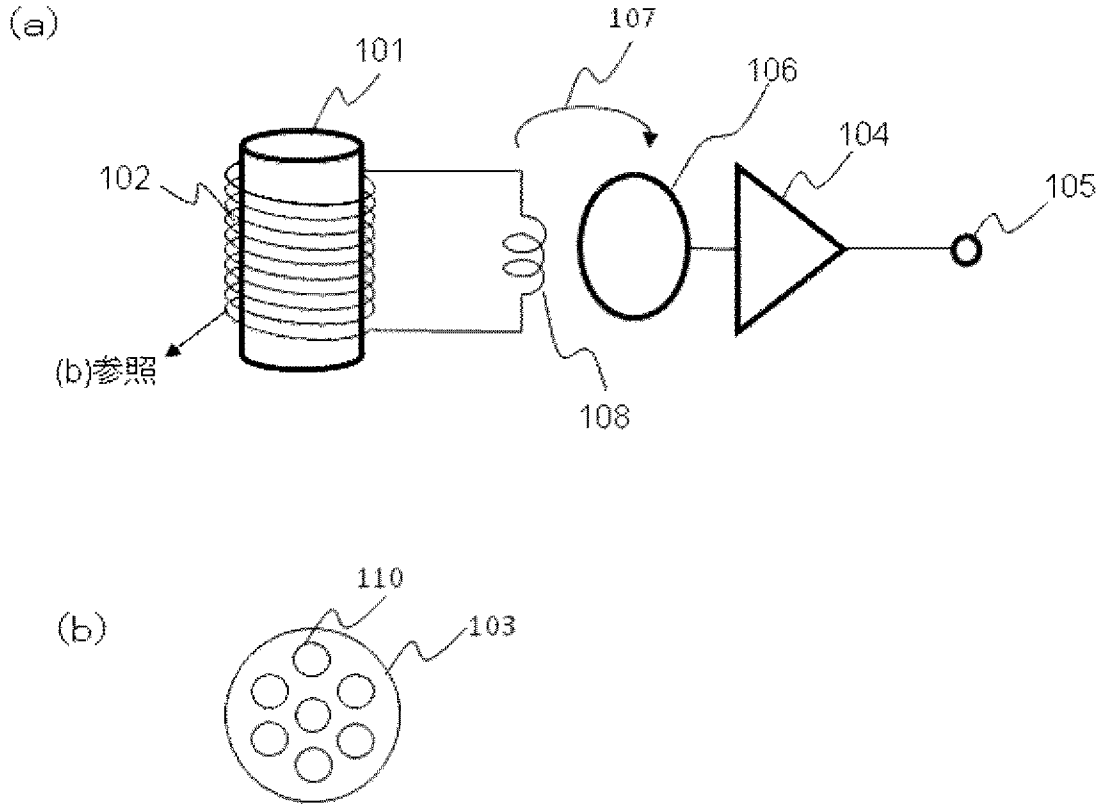
[図1A]

図1A



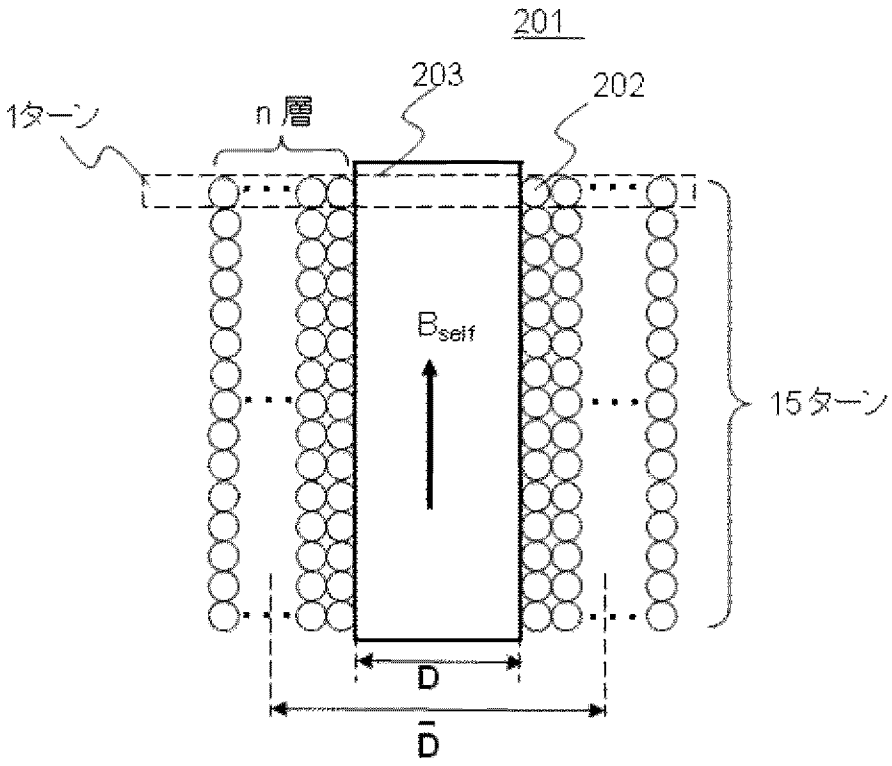
[図1B]

図1B


(a)
101
107
106
104
105
102
(b)参照
108
(b)
110
103

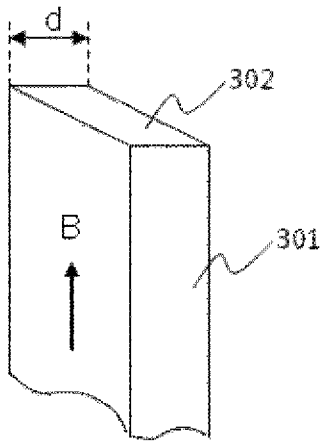
[図2]

図2


201
203
202
1ターン
n層
B_{self}
15ターン
D
$\bar{D}$

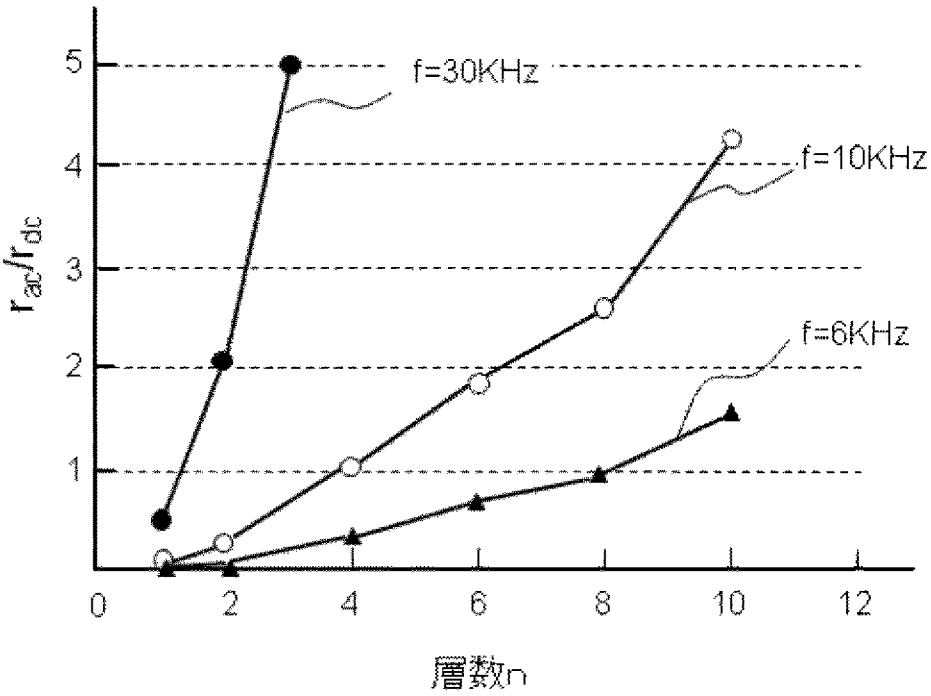
[図3]

図3



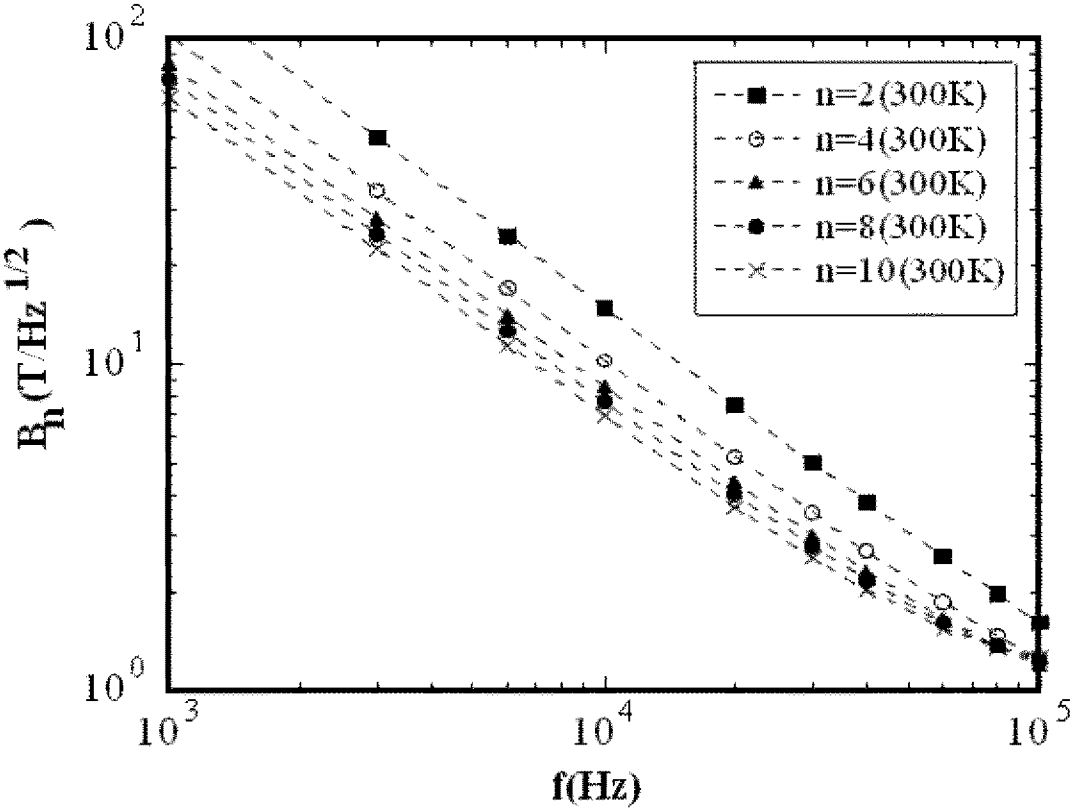
[図4]

図4



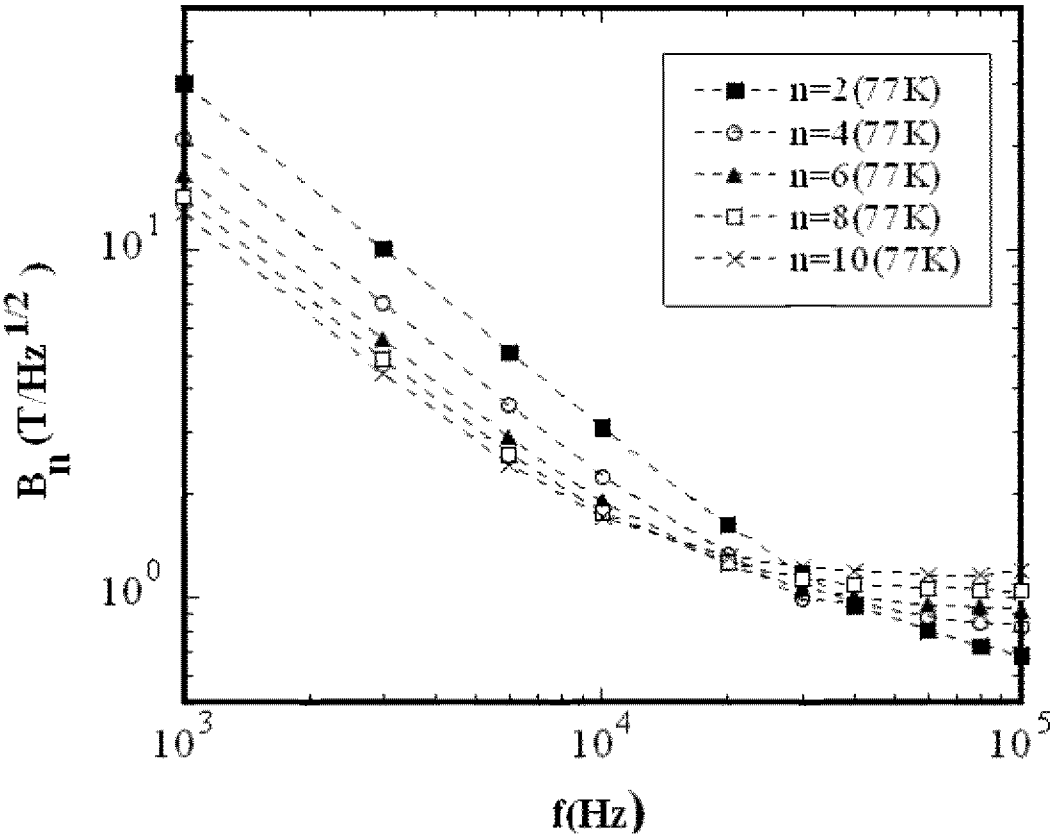
[図5]

図5


10^2
10^1
10^0
B_n(T/Hz$^{1/2}$)
10^3
10^4
10^5
f(Hz)
n=2(300K)
n=4(300K)
n=6(300K)
n=8(300K)
n=10(300K)

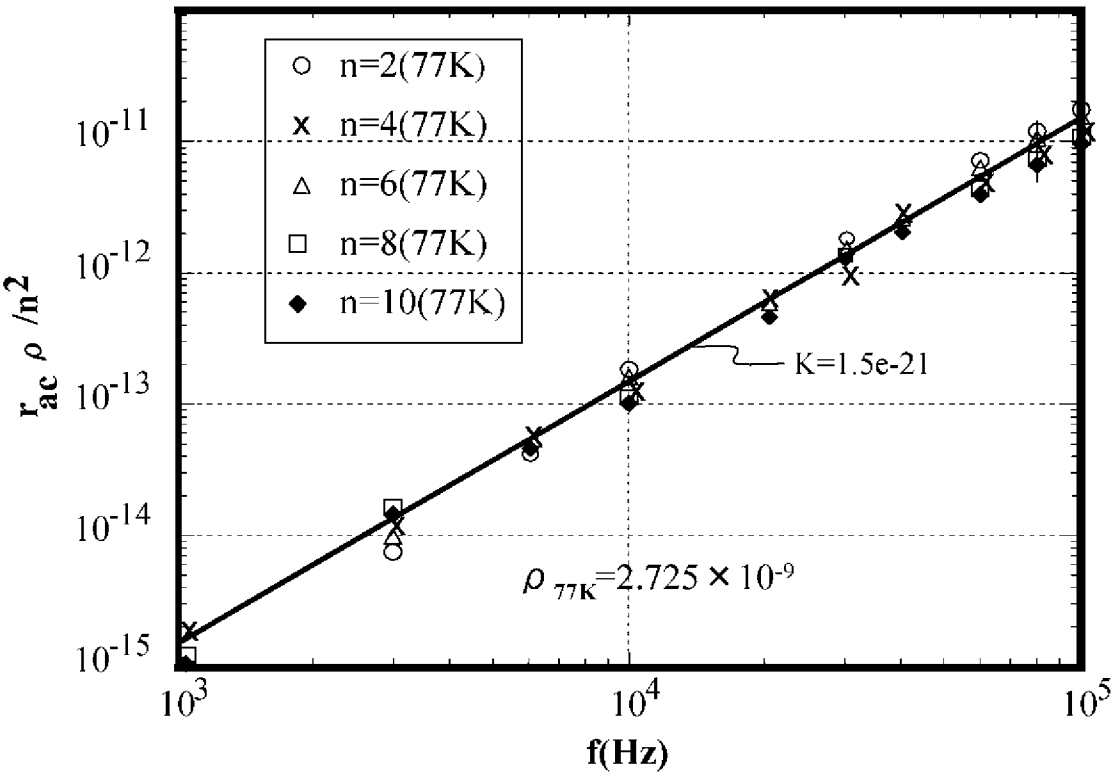
[図6]

図6


n=2(77K)
n=4(77K)
n=6(77K)
n=8(77K)
n=10(77K)
10^1
10^0
B_n(T/Hz$^{1/2}$)
10^3
10^4
10^5
f(Hz)

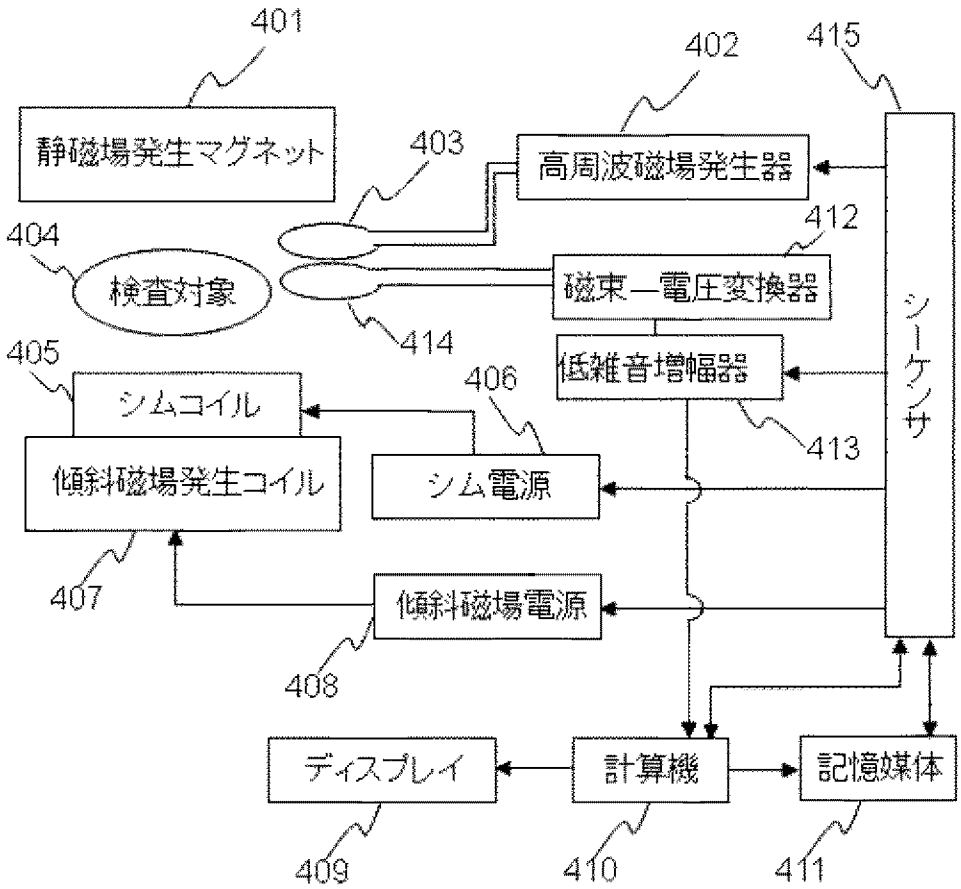
[図7]

図7


n=2(77K)
n=4(77K)
n=6(77K)
n=8(77K)
n=10(77K)
K=1.5e-21
ρ_{77K}=2.725 × 10^{-9}
r_{ac} ρ /m^2
10^{-11}
10^{-12}
10^{-13}
10^{-14}
10^{-15}
10^3
10^4
10^5
f(Hz)

[図8]

図8


401
静磁場発生マグネット
402
高周波磁場発生器
415
403
404
検査対象
412
磁束—電圧変換器
414
405
シムコイル
406
低雑音増幅器
シーケンサ
413
傾斜磁場発生コイル
シム電源
407
傾斜磁場電源
408
ディスプレイ
計算機
記憶媒体
409
410
411

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2011/067686

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
A61B5/055(2006.01)i, *G01R33/36*(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01N24/00-G01N24/14, G01V1/00-G01V99/00, H01F6/00-H01F6/06, A61B5/055, G01N27/72-G01N27/90, G01R33/20-G01R33/64, H01L39/22

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Yusuke TSUJI et al., "Performance of SQUID Coupled to HTS Pickup Coil", Cho Dendo System Kagaku Kenkyu Center Hokoku, 08 April 2010 (08.04.2010), vol.7, pages 43 to 47	1-12
A	JP 2007-64930 A (Independent Administrative Institution National Institute for Materials Science), 15 March 2007 (15.03.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-12

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
06 October, 2011 (06.10.11)	18 October, 2011 (18.10.11)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１１／０６７６８６

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　A61B5/055(2006.01)i, G01R33/36(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01N24/00-G01N24/14, G01V 1/00-G01V99/00, H01F 6/00-H01F 6/06
A61B5/055 , G01N27/72-G01N27/90,
G01R33/20-G01R33/64, H01L39/22 ,

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	１９７１－２０１１年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１１年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１１年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus(JDreamII)

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	辻裕介，外，高温超伝導検出コイルと結合したＳＱＵＩＤの特性評価，超伝導システム科学研究センター報告，2010.04.08，第７巻，Ｐ．４３－４７	1-12
A	JP 2007-64930 A (独立行政法人物質・材料研究機構) 2007.03.15，全文，全図（ファミリーなし）	1-12

☐　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 ０６．１０．２０１１	国際調査報告の発送日 １８．１０．２０１１
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｗ　４００５ 比嘉　翔一 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２９２