

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4421079号

(P4421079)

(45) 発行日 平成22年2月24日(2010.2.24)

(24) 登録日 平成21年12月11日(2009.12.11)

(51) Int. Cl. F I
A 6 1 B 5/055 (2006.01) A 6 1 B 5/05 3 4 0
G 0 1 R 33/385 (2006.01) G 0 1 N 24/06 5 1 0 Y

請求項の数 4 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2000-151956 (P2000-151956)	(73) 特許権者	000003078
(22) 出願日	平成12年5月23日(2000.5.23)		株式会社東芝
(65) 公開番号	特開2001-327478 (P2001-327478A)		東京都港区芝浦一丁目1番1号
(43) 公開日	平成13年11月27日(2001.11.27)	(74) 代理人	100078765
審査請求日	平成19年5月7日(2007.5.7)		弁理士 波多野 久
前置審査		(74) 代理人	100078802
			弁理士 関口 俊三
		(72) 発明者	油井 正生
			栃木県大田原市下石上1385番の1 株
			式会社東芝 那須工場内
		(72) 発明者	坂倉 良知
			栃木県大田原市下石上1385番の1 株
			式会社東芝 那須工場内
		審査官	田中 洋介
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 MR I 用傾斜磁場コイル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

磁気共鳴イメージング(MRI)装置に搭載する傾斜磁場コイルにおいて、
 楕円柱を成す第1のボビンにコイル線材を巻装して成る第1のコイルと、この第1のコイルの外側において前記第1のボビンと同軸状に配置された第2のボビンに別のコイル線材を巻装して成る第2のコイルとを備え、

前記第1のコイルは、前記第1のコイルが生成する当該第1のコイルの外側所望位置での磁場がほぼ零となるように前記コイル線材の前記第1のボビンにおける巻き位置を決め、前記第1のボビンにおける当該決められた前記巻き位置に前記コイル線材を巻装したコイルである一方、

前記第2のコイルは、前記第1のコイルが生成する当該第1のコイルの外側所望位置での磁場がほぼ零となるように、前記第1のコイル及び前記第2のコイルの周方向の各電流密度関数を偶関数および奇関数の各級数によりそれぞれ定め、定められた前記電流密度関数に基づいて前記別のコイル線材の前記第2のボビンにおける巻き位置を決め、前記第2のボビンにおける当該決められた前記巻き位置に前記別のコイル線材を巻装したコイルであることを特徴とするMRI用傾斜磁場コイル。

【請求項 2】

請求項 1 記載の傾斜磁場コイルにおいて、

前記第1のコイルのコイル線材の巻き位置を与えたときに、この第1のコイルが生成する当該第1のコイルの外側所望位置での磁場がほぼ零となるように、前記第2のコイルの

10

20

コイル線材の巻き位置を決めたことを特徴とするMRI用傾斜磁場コイル。

【請求項3】

請求項2記載の傾斜磁場コイルにおいて、

前記第2のコイルの第2のボビンは楕円柱状を成し、この第2のボビンが形成する楕円柱面と前記第1のボビンが形成する楕円柱面は略同一の焦点を有することを特徴とするMRI用傾斜磁場コイル。

【請求項4】

請求項2記載の傾斜磁場コイルにおいて、

前記第2のコイルの第2のボビンは円柱状を成すことを特徴とするMRI用傾斜磁場コイル。

10

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、磁気共鳴イメージング装置に搭載されて、その開口部の診断用空間に傾斜磁場を発生させる傾斜磁場コイルに係り、とくに、アクティブシールド型の楕円柱状傾斜磁場コイルに関する。

【0002】

【従来の技術】

医療用のMRI装置は、被検体内における原子核スピンの磁気共鳴現象を利用して断層像を撮像したり、NMRスペクトル計測を行なうシステムである。

20

【0003】

このMRI装置は、被検体を挿入・配置する、例えば略円筒状の診断用開口部（ウォームボア）を有するガントリを備える。ガントリは、診断用開口部を形成し且つ静磁場を発生させる静磁場磁石、静磁場に重畳させる傾斜磁場パルスを発生させる傾斜磁場コイル、及び被検体との間でRFパルス信号（MR信号を含む）の送受を行なうRFコイルを備える。

【0004】

傾斜磁場コイルには傾斜磁場アンプが接続されており、シーケンサから傾斜磁場アンプに与えられる指令に応じて、当該アンプが駆動し、傾斜磁場コイルから傾斜磁場パルスが発生される。この傾斜磁場パルスのスイッチング時間として、現在、1ms以下の値が要求されている。とくに、近年注目されている超高速撮像法の場合、0.3ms以下のスイッチング時間が要求されている。このため、より強力な傾斜磁場アンプと共に、エネルギー的に高効率の傾斜磁場コイルの開発が望まれている。

30

【0005】

従来、静磁場の方向が水平方向であるMRI装置の場合、傾斜磁場コイルの形状として円柱状のものが採用されてきた。この円柱状の傾斜磁場コイルにおいてそのエネルギー効率を上げるには、その第1の対策としては、コイル半径を小さくすればよい。これは、コイルのスイッチング時間を決めるパラメータであるインダクタンスは、コイル半径の5乗に比例するという性質に基づいている。しかし、この方法の場合、エネルギー効率を高めるほどコイル半径を小さくしなければならず、成人の全身検査を行い得る半径の確保が困難になっていた。

40

【0006】

この問題を解決する対策の1つに、例えば米国特許第4,820,988号公報に見られる如く、コイル形状を円柱状から楕円柱状に変えた傾斜磁場コイルが提案されている。コイル半径を鉛直方向（通常、Y軸方向に相当）につぶして、コイル軸方向に直交する断面を楕円形に成形することで、高効率を保持し且つ成人の全身検査も可能にするものである。具体的なコイル形状としては、半円柱をY軸方向に偏心させて対向させたコイル形状や、円柱形状のコイルを円周方向の一方向から押し扁平にした楕円柱状のコイル形状が示されている。

【0007】

50

また、特開平5 - 269100号公報には、楕円柱状のコイル形状を有する楕円傾斜磁場コイルと、その詳細な磁場設計法とが提案されている。

【0008】

ところで、傾斜磁場コイルの重要な管理項目の1つとして、そのパルス駆動時に発生する渦電流を極力、小さい値に抑えることがある。渦電流は、時間変動する磁場が静磁場磁石の熱シールド板を貫くことにより過渡的に発生し、撮影領域に渦磁場を重畳させてしまう。これにより、MR画像に輝度ムラなどを発生させ、深刻な画質低下をもたらす。これを防止するには、傾斜磁場コイルの外側にシールドコイルを配置して、メインコイルとなる傾斜磁場コイルから外部に洩れる磁場を抑制又はシールドする能動(自己)遮蔽型傾斜磁場コイル(ASGC: Actively Shielded Gradient Coil)が用いられている(例えば米国特許第4,733,189号公報、同第4,737,716号公報を参照)。ASGCは、MRI装置のX、Y、及びZチャンネルそれぞれの磁場発生を担うコイルアセンブリを備え、各コイルアセンブリがメインコイルとシールドコイルとを有している。これにより、チャンネル毎に傾斜磁場を外界には殆ど洩らさないシールド構造になっている。

10

【0009】

このようなASGCに対して、コイル形状が円柱状である場合の設計法が、Mansfield等による「J. Phys. E: Sci. Inst. 19, 540-545(1986)」、Turnerによる「J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 19, L147-L151」等により具体的に提案されている。

20

【0010】

【発明が解決しようとする課題】

このため、楕円柱状の傾斜磁場コイルもアクティブシールドタイプのコイルであることが要求され、発生させる傾斜磁場精度の高い設計法が求められているが、現状では、そのような具体的な設計法が提案されていない。このため、シールドコイルの電流分布を計算したり、所望の磁場性能(最大傾斜磁場強度や磁場線形性など)を計算するというように、アクティブシールドタイプの楕円柱状傾斜磁場コイルを具体的に設計することができず、実用化の段階には至っていない。

【0011】

本発明は、以上のような従来技術の有する問題に鑑みてなされたもので、アクティブシールドタイプの楕円柱状傾斜磁場コイルの設計法を具体的に提示し、かかるコイルを実用化できるようにすることを、その目的とする。

30

【0012】

【課題を解決するための手段】

上述した種々の目的を達成するため、本発明によれば、磁気共鳴イメージング(MRI)装置に搭載する傾斜磁場コイルにおいて、楕円柱を成す第1のボビンにコイル線材を巻装して成る第1のコイルと、この第1のコイルの外側において前記第1のボビンと同軸状に配置された第2のボビンに別のコイル線材を巻装して成る第2のコイルとを備え、前記第1のコイルは、前記第1のコイルが生成する当該第1のコイルの外側所望位置での磁場がほぼ零となるように前記コイル線材の前記第1のボビンにおける巻き位置を決め、前記第1のボビンにおける当該決められた前記巻き位置に前記コイル線材を巻装したコイルである一方、前記第2のコイルは、前記第1のコイルが生成する当該第1のコイルの外側所望位置での磁場がほぼ零となるように、前記第1のコイル及び前記第2のコイルの周方向の各電流密度関数を偶関数および奇関数の各級数によりそれぞれ定め、定められた前記電流密度関数に基づいて前記別のコイル線材の前記第2のボビンにおける巻き位置を決め、前記第2のボビンにおける当該決められた前記巻き位置に前記別のコイル線材を巻装したコイルであることを特徴とする。

40

【0013】

好適には、前記第1のコイルのコイル線材の巻き位置を与えたときに、この第1のコイルが生成する当該第1のコイルの外側所望位置での磁場がほぼ零となるように、前記第2の

50

コイルのコイル線材の巻き位置を決めることである。

【 0 0 1 4 】

更に好適には、前記第 2 のコイルの第 2 のボビンが楕円柱状を成し、この第 2 のボビンが形成する楕円柱面と前記第 1 のボビンが形成する楕円柱面は略同一の焦点を有することである。これに代えて、前記第 2 のコイルの第 2 のボビンは円柱状を成すように形成してもよい。

【 0 0 1 5 】

【発明の実施の形態】

以下、この発明の実施形態を図面に基づき説明する。

【 0 0 1 6 】

(第 1 の実施形態)

第 1 の実施形態に係る MRI (磁気共鳴イメージング) 装置を図 1 ~ 6、8 に基づき説明する。

【 0 0 1 7 】

この磁気共鳴イメージング装置は、傾斜磁場コイルとして、軸方向に直交するコイル断面が略楕円状を成す能動 (自己) 遮蔽型傾斜磁場コイル (ASGC: Actively Shielded Gradient Coil) (以下、この傾斜磁場コイルを「楕円柱状 ASGC」と呼ぶ: この楕円柱は実際には中空状に形成されるが、楕円柱と呼ぶことにする) を備えた装置である。

【 0 0 1 8 】

図 1 には、この MRI 装置におけるガントリ 1 の軸方向に沿った概略断面を示す。このガントリ 1 はその全体が円筒状に形成されており、内側のウォームボアが診断用空間 OP として機能し、診断時にはボア内に被検体 P が挿入可能になっている。なお、ガントリ 1 の軸方向を Z 軸とした XYZ 直交座標系が設定される。

【 0 0 1 9 】

ガントリ 1 は、略円筒状に形成され且つ上記ボアを実質的に形成する静磁場用磁石 1 1、この磁石 1 1 のボア内に配置された楕円柱状 ASGC (略円筒状の傾斜磁場コイル) 1 2、この楕円柱状 ASGC 1 2 の例えば外周面に取り付けられたシムコイル 1 3、及び楕円柱状 ASGC 1 2 のボア内に配置された RF コイル 1 4 を備える。被検体 P はその周りに RF コイル 1 4 を配置させた状態で、図示しない寝台天板上に載せられ、ボア (診断用空間) 内に置かれる。

【 0 0 2 0 】

静磁場用磁石 1 1 は超伝導磁石で形成されている。つまり、外側の真空容器の中に、複数の熱輻射シールド容器および単独の液体ヘリウム容器が収められ、液体ヘリウム容器の内部に超伝導コイルが巻装・設置されている。外側の真空容器の外周面は金属カバー 1 1 A で覆われている。

【 0 0 2 1 】

楕円柱状 ASGC 1 2 は、X、Y、Z チャンネル別々にコイルアセンブリを有し、しかも、そのコイルアセンブリは各チャンネル毎に磁場を外界に洩らし難いシールド構造になっている。このシールド状態で、X 軸、Y 軸、及び Z 軸の各方向毎にパルス状の傾斜磁場を発生させる。

【 0 0 2 2 】

具体的には、楕円柱状 ASGC 1 2 は、X、Y、Z チャンネルの X コイル 1 2 X、Y コイル 1 2 Y、Z コイル 1 2 Z がコイル層毎に絶縁状態で積層され、全体として軸方向断面が略楕円の円筒状を成している。X コイル 1 2 X、Y コイル 1 2 Y 及び Z コイル 1 2 Z の各々は、各 X、Y、Z 軸方向の傾斜磁場を発生する複数の巻線部を有するメインコイルと、このメインコイルの巻線部が発生した傾斜磁場 (パルス) が外界に洩れるを抑制又は減少させる、いわゆるシールド用の複数の巻線部を有するシールドコイルとを備える。なお、各コイル 1 2 X、1 2 Y、1 2 Z は各チャンネル毎に独立した傾斜磁場電源に接続されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 3 】

図 2 に、X コイル、Y コイル、及び Z コイルを代表して、Z コイル 1 2 Z の模式的な概略構成を示す。ここで、Z コイル 1 2 Z の中心軸を Z 軸とし、この Z 軸に垂直な直交 2 軸をそれぞれ X 軸及び Y 軸とする座標系を設定する。

【 0 0 2 4 】

Z コイル 1 2 Z は、同図に示す如く、第 1 のコイルとしてのメインコイル 2 1 と第 2 のコイルとしてのシールドコイル 2 2 が 2 重且つ同軸の楕円柱状を成している。メインコイル 2 1 は、軸方向 (Z 軸方向) 断面が楕円を成すボビン B 1 (第 1 のボビン) に、例えば平板状導体から成るコイル線材 C 1 を巻装することで形成され、一方、シールドコイル 2 2 は、軸方向断面が楕円を成し且つボビン B 1 よりも大径のボビン B 2 (第 2 のボビン) にコイル線材 C 2 を巻装することで形成されている。メインコイル側とシールドコイル側のコイル線材 C 1 , C 2 には、互いに反対向きのパルス電流が流される。

10

【 0 0 2 5 】

図 3 及び図 4 には、この Z コイルのコイルパターン (コイル巻線部) を例示する。図 3 は、Z 軸方向に関して対称なパターンを有する対称型楕円柱状 A S G C の Z コイルのコイルパターン (2 分の 1 展開図) を示し、図 4 は、Z 軸方向に関して非対称なパターンを有する非対称型楕円柱状 A S G C の Z コイルのコイルパターン (2 分の 1 展開図) を示す。各図において、(a) がメインコイルのコイルパターンを、(b) がシールドコイルのコイルパターンをそれぞれ示す。

【 0 0 2 6 】

X コイル 1 2 X は、図示しないが、例えば平板状導体から成るメインコイル及びシールドコイルを含み、そのコイル夫々が、ボビンに巻装された 4 個のサドル型コイルパターン (巻線部) を持っている。つまり、メインコイル及びシールドコイルの夫々は、Z 軸方向に並置され且つ直列接続される 2 個のサドル型コイルパターンを、X 軸方向において 2 組対向配置させている。メインコイル及びシールドコイルの合計 8 個の巻線部は共に電氣的に直列に接続され、例えば共通の傾斜磁場電源に接続される。このとき、メインコイルとシールドコイルとでは流れる電流が互いに逆向きとなるように通電経路が作られる。これにより、シールド機能を持ちながら、X 軸方向に線形の傾斜磁場を発生可能になっている。

20

【 0 0 2 7 】

図 5 及び図 6 には、この X コイルのコイルパターンを例示する。図 5 は、対称型楕円柱状 A S G C の X コイルのコイルパターン (2 分の 1 展開図) を示し、一方、図 6 は、非対称型楕円柱状 A S G C の X コイルのコイルパターン (2 分の 1 展開図) を示す。各図において、(a) がメインコイルのコイルパターンを、(b) がシールドコイルのコイルパターンをそれぞれ示す。コイル線材の巻き位置は所定磁束分布条件の元に解析的に求められている。

30

【 0 0 2 8 】

Y コイル 1 2 Y は、X コイル 1 2 X と同様のコイルパターンを採り、且つ、X コイル 1 2 X を Z 軸に関して 9 0 度回転させた状態で同様に配置される。

【 0 0 2 9 】

上述した Z コイル、X コイル、及び Y コイルのコイルパターンは、従来の円状 A S G C のそれと類似してはいるが、後述するように、コイル線材を楕円面に沿って配置することで初めて磁気共鳴イメージングに必要な磁場性能を発揮するように、その線材巻き位置や線材間隔が設計されている。

40

【 0 0 3 0 】

図 8 に示す如く、特開平 5 - 2 6 9 1 0 0 号に示す、従来周知の楕円柱状傾斜磁場コイル (非シールドタイプ) の場合、その 1 つのコイルループには逆向きのループが必ず存在している。図 8 は Y コイルを示しているが、X コイルでも、Z コイルでもそのような逆向きループは存在している。これに対して、本発明に係る楕円柱状 A S G C の各コイルの場合、かかる逆向きループは必ずしも必要ではなく、この点で従来のコイルとはパターン面からも異なっている。

50

【 0 0 3 1 】

以下に、上述した楕円柱状 A S G C の設計手法を定量的に説明する。具体的には、楕円柱状 A S G C におけるコイル線材の巻き位置を決める方法を詳述する。

【 0 0 3 2 】

メインコイルのコイル線材を配置する楕円柱面は、楕円柱座標系を用いて、一般的に以下のように記述できる。

【 0 0 3 3 】

【数 1】

$$x = c \cosh \xi_c \cos \eta, \quad y = c \sinh \xi_c \sin \eta \quad \cdots \cdots (1)$$

10

ここで、 $(\pm c, 0)$ は楕円の焦点の座標に対応する。また、シールドコイルのコイル線材を配置する楕円柱面も、同様に、一般的に以下のように記述できる。

【 0 0 3 4 】

【数 2】

$$x = c \cosh \xi_s \cos \eta, \quad y = c \sinh \xi_s \sin \eta \quad \cdots \cdots (2)$$

20

なお、メインコイルとシールドコイルの焦点は同位置である。

【 0 0 3 5 】

次いで、メインコイルのコイル線材の巻き位置を与えたときに、シールドコイルのコイル線材の巻き位置を決定する手法を説明する。

【 0 0 3 6 】

メインコイルのコイル線材を表す 方向電流密度関数 j (η, z) を以下のように置く。

【 0 0 3 7 】

【数 3】

$$j_\eta(\eta, z) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} \left[\sum_{n=0}^{\infty} j_\eta^{(n)}(k) c e_n(\eta) + \sum_{n=1}^{\infty} j_\eta^{(n)}(k) s e_n(\eta) \right] \quad \cdots \cdots (3)$$

30

仮に、シールドコイルの 方向電流密度関数を、

【数 4】

$$J_\eta(\eta, z) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} \left[\sum_{n=0}^{\infty} J_\eta^{(n)}(k) c e_n(\eta) + \sum_{n=1}^{\infty} J_\eta^{(n)}(k) s e_n(\eta) \right] \quad \cdots \cdots (4)$$

40

と置いたとき、A S G C であることから、

50

【数5】

$$J_n^{c,n}(k) = - \frac{\phi_n^c(k, \xi_c, \xi_s)}{\Phi_n^c(k, \xi_s)} j_n^{c,n}(k)$$

$$J_n^{s,n}(k) = - \frac{\phi_n^s(k, \xi_c, \xi_s)}{\Phi_n^s(k, \xi_s)} j_n^{s,n}(k)$$

…… (5)

10

という比例関係が成立して、シールドコイルの電流密度関数が計算される。電流密度関数が計算されると、従来周知の方法により、その関数から流線関数が計算され、この関数に基づきシールドコイルのコイル線材の例えばディスクリートな巻き位置が決められる。この関係式は、Xコイル、Yコイル、及びZコイルの全てに適用できる。

【0038】

なお、上述の式(5)の関係式における諸量は、マチュウ関数を用いて、以下のように置かれている。

【0039】

20

【数6】

$$\begin{aligned} & \phi_n^c(k, \xi_c, \xi_s) \\ = & \sum_{\substack{m=1 \\ (n+m:\text{even})}} [S e_m(\xi_c, -q) G e k_m(\xi_s, -q) (M_m^s)^{-2} \nu_n^m \nu_m^{\sum_j} \\ & + \frac{c^2 k^2}{\pi^2} \{ C e_{m-1}(\xi_c, -q) F e k_{m-1}(\xi_s, -q) (M_{m-1}^c)^{-2} \sinh \xi_c \sinh \xi_s \alpha_n^{c, m-1} \alpha_{\sum_j}^{c, m-1} \\ & + S e_m(\xi_c, -q) G e k_m(\xi_s, -q) (M_m^c)^{-2} \cosh \xi_c \cosh \xi_s \beta_n^{s, m} \beta_{\sum_j}^{s, m} \}] \end{aligned}$$

30

$$\begin{aligned} & \Phi_n^c(k, \xi_s) \\ = & \sum_{\substack{m=1 \\ (n+m:\text{even})}} [S e_m(\xi_s, -q) G e k_m(\xi_s, -q) (M_m^s)^{-2} \nu_n^m \nu_m^{\sum_j} \\ & + \frac{c^2 k^2}{\pi^2} \{ C e_{m-1}(\xi_s, -q) F e k_{m-1}(\xi_s, -q) (M_{m-1}^c)^{-2} \sinh^2 \xi_s \alpha_n^{c, m-1} \alpha_{\sum_j}^{c, m-1} \\ & + S e_m(\xi_s, -q) G e k_m(\xi_s, -q) (M_m^c)^{-2} \cosh^2 \xi_s \beta_n^{s, m} \beta_{\sum_j}^{s, m} \}] \end{aligned}$$

40

【数7】

$$\begin{aligned}
& \phi_n^s(k, \xi_c, \xi_s) \\
= & \sum_{\substack{m=1 \\ (n+m:\text{even})}} [C e_m(\xi_c, -q) F e k_m(\xi_s, -q)(M_m^c)^{-2} \nu_n^m \nu_{\sum_j}^m \\
& + \frac{c^2 k^2}{\pi^2} \{S e_{m+1}(\xi_c, -q) G e k_{m+1}(\xi_s, -q)(M_{m+1}^c)^{-2} \sinh \xi_c \sinh \xi_s \alpha_n^{s, m+1} \alpha_{\sum_j}^{s, m+1} \\
& + C e_m(\xi_c, -q) F e k_m(\xi_s, -q)(M_m^c)^{-2} \cosh \xi_c \cosh \xi_s \beta_m^{c, n} \beta_m^{c, \sum_j} \}] \quad 10
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \Phi_n^s(k, \xi_s) \\
= & \sum_{\substack{m=1 \\ (n+m:\text{even})}} [C e_m(\xi_s, -q) F e k_m(\xi_s, -q)(M_m^s)^{-2} \nu_n^m \nu_{\sum_j}^m \\
& + \frac{c^2 k^2}{\pi^2} \{S e_{m+1}(\xi_s, -q) G e k_{m+1}(\xi_s, -q)(M_{m+1}^s)^{-2} \sinh^2 \xi_s \alpha_n^{s, m+1} \alpha_{\sum_j}^{s, m+1} \\
& + C e_m(\xi_s, -q) F e k_m(\xi_s, -q)(M_m^s)^{-2} \cosh^2 \xi_s \beta_m^{c, n} \beta_m^{c, \sum_j} \}] \quad 20
\end{aligned}$$

【数 8】

$$\begin{aligned}
\nu_m^j &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta s e'_m(\eta, -q) c e_j(\eta, -q), \quad \nu_m^{\sum_j} = \sum_{\substack{j=0 \\ (j+m:\text{even})}}^{\infty} \nu_m^j \\
\alpha_{\sum_j}^{c, m} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta \cos \eta c e_m(\eta, -q) c e_j(\eta, -q), \quad \alpha_{\sum_j}^{c, m} = \sum_{\substack{j=0 \\ (j+m:\text{even})}}^{\infty} \alpha_{\sum_j}^{c, m} \quad 30
\end{aligned}$$

$$\beta_{\sum_j}^{s, m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta \sin \eta s e_m(\eta, -q) c e_j(\eta, -q), \quad \beta_{\sum_j}^{s, m} = \sum_{\substack{j=0 \\ (j+m:\text{even})}}^{\infty} \beta_{\sum_j}^{s, m}$$

$$\begin{aligned}
\nu_j^m &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta s e'_j(\eta, -q) c e_m(\eta, -q), \quad \nu_{\sum_j}^m = \sum_{\substack{j=1 \\ (j+m:\text{even})}}^{\infty} \nu_j^m \\
\alpha_{\sum_j}^{s, m} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta \cos \eta s e_m(\eta, -q) s e_j(\eta, -q), \quad \alpha_{\sum_j}^{s, m} = \sum_{\substack{j=1 \\ (j+m:\text{even})}}^{\infty} \alpha_{\sum_j}^{s, m} \quad 40
\end{aligned}$$

$$\beta_{\sum_j}^{c, m} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} d\eta \sin \eta c e_m(\eta, -q) s e_j(\eta, -q), \quad \beta_m^{c, \sum_j} = \sum_{\substack{j=1 \\ (j+m:\text{even})}}^{\infty} \beta_m^{c, j}$$

【数 9】

$$\begin{aligned}
M_{2n}^{\xi} &= (-1)^n c e_{2n}(0, -q) c e_{2n}\left(\frac{\pi}{2}, -q\right) [A_0^{(2n)}]^{-1} \\
M_{2n+1}^{\xi} &= (-1)^{n+1} c e_{2n+1}(0, -q) \frac{\partial c e_{2n+1}}{\partial \eta}\left(\frac{\pi}{2}, -q\right) [\sqrt{q} B_1^{(2n+1)}]^{-1} \\
M_{2n+1}^{\xi} &= (-1)^n \frac{\partial s e_{2n+1}}{\partial \eta}(0, -q) s e_{2n+1}\left(\frac{\pi}{2}, -q\right) [\sqrt{q} A_1^{(2n+1)}]^{-1} \\
M_{2n+2}^{\xi} &= (-1)^{n+1} \frac{\partial s e_{2n+2}}{\partial \eta}(0, -q) \frac{\partial s e_{2n+2}}{\partial \eta}\left(\frac{\pi}{2}, -q\right) [\sqrt{q} B_2^{(2n+2)}]^{-1} \\
q &= \frac{c^2 k^2}{4} \dots\dots (6)
\end{aligned}$$

【 0 0 4 0 】

コイル内側空間における磁場の z 成分は、次式で表される。

20

【 0 0 4 1 】

【数 1 0 】

$$\begin{aligned}
& B_z(\xi, \eta, z) \\
&= \frac{\mu_0}{\sinh^2 \xi + \sin^2 \eta} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} \{ \\
&\quad \sum_{m=0}^{\infty} (F e k_m(\xi_c) u_m^c(k) \sinh \xi_c + F e k_m(\xi_s) U_m^c(k) \sinh \xi_s) D_m^c \\
&\quad + \sum_{m=0}^{\infty} (F e k_m(\xi_c) u_m^s(k) \cosh \xi_c + F e k_m(\xi_s) U_m^s(k) \cosh \xi_s) E_m^c \\
&\quad + \sum_{m=1}^{\infty} (G e k_m(\xi_c) v_m^c(k) \sinh \xi_c + G e k_m(\xi_s) V_m^c(k) \sinh \xi_s) D_m^s \\
&\quad + \sum_{m=1}^{\infty} (G e k_m(\xi_c) v_m^s(k) \cosh \xi_c + G e k_m(\xi_s) V_m^s(k) \cosh \xi_s) E_m^s \} \\
&\dots\dots (7) \quad 40
\end{aligned}$$

ここで、

【数 1 1 】

$$D_m^c = (M_m^c)^{-2} [\sinh \xi \cos \eta c e_m(\eta, -q) C e'_m(\xi, -q) \\ - \cosh \xi \sin \eta c e'_m(\eta, -q) C e_m(\xi, -q)]$$

$$E_m^c = (M_m^c)^{-2} [\cosh \xi \sin \eta c e_m(\eta, -q) C e'_m(\xi, -q) \\ + \sinh \xi \cos \eta c e'_m(\eta, -q) C e_m(\xi, -q)]$$

$$D_m^s = (M_m^s)^{-2} [\sinh \xi \cos \eta s e_m(\eta, -q) S e'_m(\xi, -q) \\ - \cosh \xi \sin \eta s e'_m(\eta, -q) S e_m(\xi, -q)]$$

$$E_m^s = (M_m^s)^{-2} [\cosh \xi \sin \eta s e_m(\eta, -q) S e'_m(\xi, -q) \\ + \sinh \xi \cos \eta s e'_m(\eta, -q) S e_m(\xi, -q)]$$

10

$$u_m^c(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n^{c,m} j_{\eta}^{c,n}(k), \quad u_m^s(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n^{c,m} j_{\eta}^{s,n}(k)$$

20

$$v_m^c(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n^{s,m} j_{\eta}^{c,n}(k), \quad v_m^s(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n^{s,m} j_{\eta}^{s,n}(k)$$

$$U_m^c(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n^{c,m} J_{\eta}^{c,n}(k), \quad U_m^s(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n^{c,m} J_{\eta}^{s,n}(k)$$

$$V_m^c(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n^{s,m} J_{\eta}^{c,n}(k), \quad V_m^s(k) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n^{s,m} J_{\eta}^{s,n}(k)$$

30

..... (8)

【 0 0 4 2 】

また、メインコイル単独、シールドコイル単独、及び A S G C のインダクタンス L_c , L_s , 及び $L_{A S G C}$ はそれぞれ、次の式で表される。

【 0 0 4 3 】

【 数 1 2 】

$$\begin{aligned}
L_c = & \frac{2\pi\mu_0 c^2}{I^2} \int_{-\infty}^{\infty} dk \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} [C e_m(\xi_c) F e k_m(\xi_c) (M_m^c)^{-2}] \right. \\
& \times [\sinh^2 \xi_c |u_m^c|^2 + \cosh^2 \xi_c |u_m^s|^2 + |w_m^c|^2] \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} [S e_m(\xi_c) G e k_m(\xi_c) (M_m^s)^{-2}] \\
& \left. \times [\sinh^2 \xi_c |v_m^c|^2 + \cosh^2 \xi_c |v_m^s|^2 + |w_m^s|^2] \right\}
\end{aligned} \tag{10}$$

ここで、

【数 1 3】

$$\begin{aligned}
L_s = & \frac{2\pi\mu_0 c^2}{I^2} \int_{-\infty}^{\infty} dk \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} [C e_m(\xi_s) F e k_m(\xi_s) (M_m^c)^{-2}] \right. \\
& \times [\sinh^2 \xi_s |U_m^c|^2 + \cosh^2 \xi_s |U_m^s|^2 + |W_m^c|^2] \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} [S e_m(\xi_s) G e k_m(\xi_s) (M_m^s)^{-2}] \\
& \left. \times [\sinh^2 \xi_s |V_m^c|^2 + \cosh^2 \xi_s |V_m^s|^2 + |W_m^s|^2] \right\}
\end{aligned} \tag{20}$$

$$L_{ASGC} = L_c - L_s \tag{30}$$

..... (9)

【数 1 4】

$$w_m^c(k) = -\frac{1}{i c k} \sum_n \nu_n^m j_{\frac{s}{\eta}}^n \quad (m:\text{even} \rightarrow n:\text{odd}, m:\text{odd} \rightarrow n:\text{even})$$

$$w_m^s(k) = \frac{1}{i c k} \sum_n \nu_n^m j_{\frac{c}{\eta}}^n \quad (m:\text{even} \rightarrow n:\text{odd}, m:\text{odd} \rightarrow n:\text{even})$$

$$W_m^c(k) = -\frac{1}{i c k} \sum_n \nu_n^m J_{\frac{s}{\eta}}^n \quad (m:\text{even} \rightarrow n:\text{odd}, m:\text{odd} \rightarrow n:\text{even}) \quad 10$$

$$W_m^s(k) = \frac{1}{i c k} \sum_n \nu_n^m J_{\frac{c}{\eta}}^n \quad (m:\text{even} \rightarrow n:\text{odd}, m:\text{odd} \rightarrow n:\text{even})$$

..... (10)

である。

【0044】

より実用的な楕円柱状ASGCを設計するには、所望の傾斜磁場強度や撮像領域をカバー
20
できる程度の磁場線形性を確保すること、及び、インダクタンスをできる限り小さく
することが望ましい。以上の定量解析に拠るコイル線材の巻き位置決定によって、楕円柱状
ASGCを実際に設計して、楕円柱状ASGCが本来的に有している特徴（高いエネルギー効
率及び成人の全身検査も可能）を発揮させることができる。

【0045】

（第2の実施形態）

さらに、図7を参照して、本発明に係る第2の実施形態を説明する。

【0046】

図7は、この第2の実施形態に係る楕円柱状ASGCのZコイル12Zを示すもので
30
、前述した図2のコイル構造に対応している。このZコイル12Zは、軸方向に直交す
るコイル断面が略楕円形状のメインコイル21と、このコイルの外側に配設され且つ軸
方向の直交するコイル断面が略円形状のシールドコイル22とを備える。このように、
メインコイル21は楕円柱形状を保持するものの、シールドコイル22は円柱形状と
することで、第1の実施形態のコイルと同じ傾斜磁場強度及び磁場線形性を確保する場合
、巻き数を減らすことができるので、インダクタンスを低下させることができる。

【0047】

第2の実施形態においてコイルを設計するには、メインコイルに電流密度関数を与え、こ
れに対応するシールドコイルの電流密度関数を有限要素法などの周知の計算手法を用いて
求める。これにより得られたシールドコイルの電流密度関数を解析式の重ね合わせで表現
40
する。この表現式の重み係数はメインコイルの長軸、短軸、軸長及びシールドコイルの
コイル半径などに依存した値に設定する。この重み係数が既知になると、円筒状コイルでの
インダクタンスや磁場を表す式を利用して、ASGCとしてのインダクタンスや磁場を計
算する。これにより、所望の傾斜磁場強度や磁場線形性を有する、メインコイルのみが楕
円柱状を成す楕円柱状ASGCを提供することができる。

【0048】

なお、本発明は上述した実施形態で説明した構成に限定されるものではなく、特許請求の
範囲に記載の要旨の範囲内において更に種々の形態を採ることができる。

【0049】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明に係るMRI用傾斜磁場コイルによれば、エネルギー的に高 50

い効率を保持でき、全身を撮像することができ、且つ渦電流の発生を確実に抑制してアーチファクトを低減させた実用段階の傾斜磁場コイルを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の実施形態に係るMRI装置のガントリの概略構成図。

【図 2】第 1 の実施形態に係る楕円柱状ASGCのZコイルのコイル配置状況を概念的に示す図。

【図 3】対称タイプのZコイルのコイルパターンを示す展開図。

【図 4】非対称タイプのZコイルのコイルパターンを示す展開図。

【図 5】対称タイプのXコイルのコイルパターンを示す展開図。

【図 6】非対称タイプのXコイルのコイルパターンを示す展開図。

【図 7】第 2 の実施形態に係る楕円柱状ASGCのZコイルのコイル配置状況を概念的に示す図。

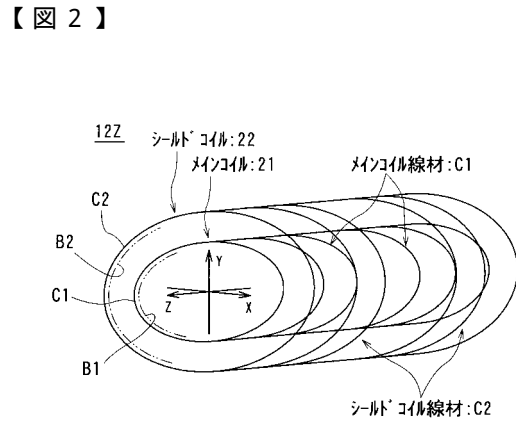
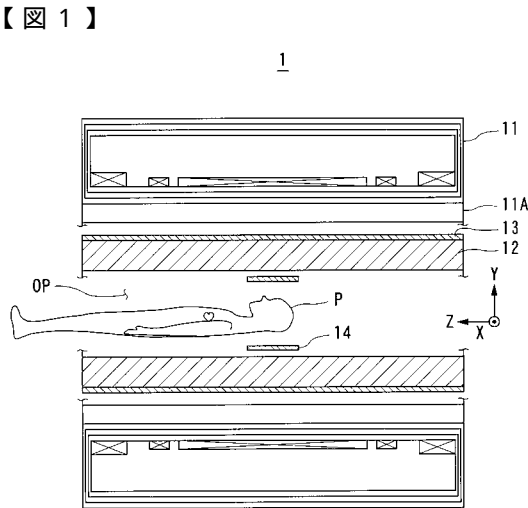
【図 8】従来例として示す楕円柱状傾斜磁場コイル（非シールドタイプ）のYコイルのコイルパターンを説明する図。

【符号の説明】

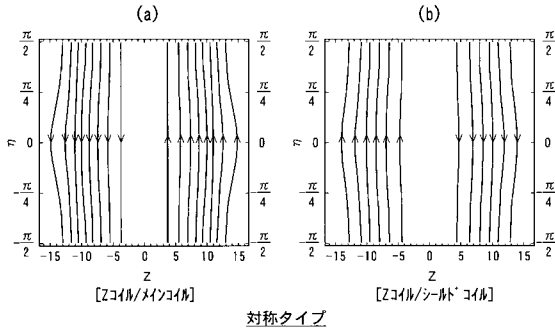
- 1 MRI装置のガントリ
- 1 2 楕円柱状ASGC
- 1 2 X ~ 1 2 Z Xコイル ~ Zコイル
- 2 1 メインコイル
- 2 2 シールドコイル
- 2 1 メインコイル
- 2 2 シールドコイル
- B 1 ポビン（第 1 のポビン）
- B 2 ポビン（第 2 のポビン）
- C 1 , C 2 コイル線材

10

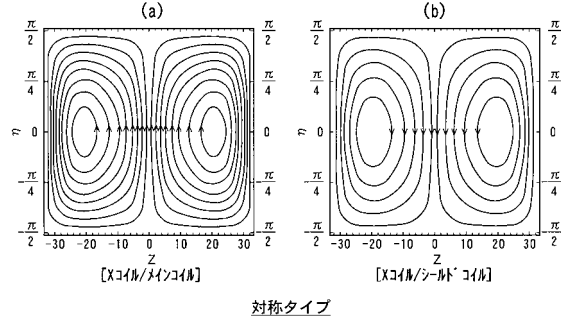
20



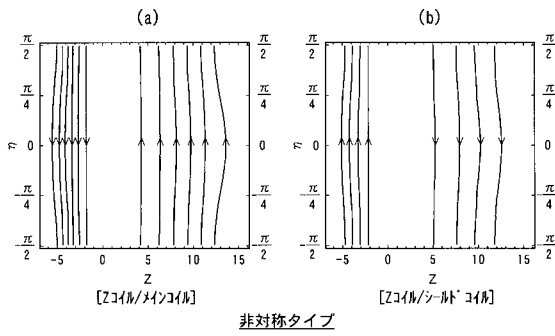
【 図 3 】



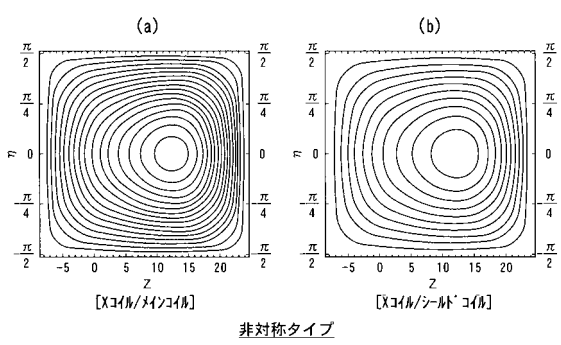
【 図 5 】



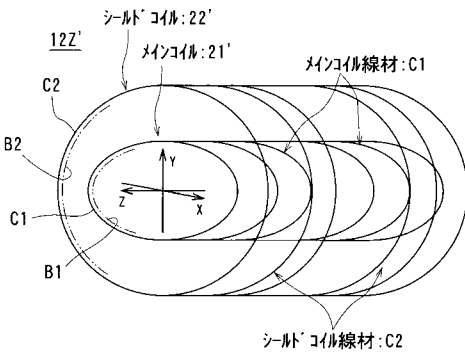
【 図 4 】



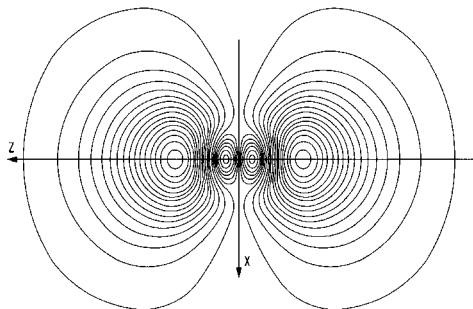
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平05-049608(JP,A)
特開平08-229024(JP,A)
特開平10-179552(JP,A)
特許第2712519(JP,B2)
特開昭62-143012(JP,A)
特開2001-112737(JP,A)
特開平04-367650(JP,A)
特開平05-269100(JP,A)
特許第2584005(JP,B2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

A61B 5/055
G01R 33/20-33/64
G01N 24/00-24/14
JSTPlus(JDreamII)
JMEDPlus(JDreamII)