

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7320218号

(P7320218)

(45)発行日 令和5年8月3日(2023.8.3)

(24)登録日 令和5年7月26日(2023.7.26)

(51)国際特許分類

A 6 1 B 5/055(2006.01)

F I

A 6 1 B 5/055 3 4 0

請求項の数 17 (全28頁)

(21)出願番号	特願2019-229073(P2019-229073)	(73)特許権者	504132272 国立大学法人京都大学 京都府京都市左京区吉田本町36番地1
(22)出願日	令和1年12月19日(2019.12.19)	(73)特許権者	515270839 株式会社Kyoto Future Medical Instruments 京都府京都市左京区下鴨森本町15番地
(65)公開番号	特開2021-94308(P2021-94308A)	(74)代理人	110000796 弁理士法人三枝国際特許事務所
(43)公開日	令和3年6月24日(2021.6.24)	(72)発明者	上野 智弘 京都府京都市左京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内
審査請求日	令和4年11月21日(2022.11.21)	(72)発明者	エクトル サンチェス ロベス 京都府京都市左京区吉田本町36番地1 株式会社Kyoto Future Me 最終頁に続く

(54)【発明の名称】 傾斜磁場コイルの設計方法および傾斜磁場コイル

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

対向して配置される複数のコイル間に性能値評価点を設定し、前記性能値評価点およびターゲットフィールド法に基づいて、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように流れ関数を決定するステップと、

決定した前記流れ関数の等高線に基づいて、連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップと、
を含む、傾斜磁場コイルの設計方法。

【請求項2】

前記連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップは、
前記連続した電流経路の領域を画定する連続した第1の貫通溝を、前記コイル面内の前記等高線間に配置する、請求項1に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

【請求項3】

前記連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップは、さらに、
前記連続した第1の貫通溝に交差する第2の貫通溝を、前記コイル面に配置し、
前記連続した第1の貫通溝または前記第2の貫通溝に向けてコイル端から延伸する第3の貫通溝を、前記コイル面に配置する、請求項2に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

【請求項4】

前記連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップは、
前記連続した電流経路として機能する線状の導体を、前記コイル面内の前記等高線に沿

10

20

って配置する、請求項 1 に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

【請求項 5】

前記性能値評価点を、対向して配置される湾曲した板状の前記複数のコイル間に設定する、請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

【請求項 6】

前記性能値評価点を、湾曲した板状の前記複数のコイルによって規定される円筒状の空洞の長軸に沿った、前記空洞の中央から端部側へオフセットした位置に設定する、請求項 5 に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

【請求項 7】

対向して配置される複数のコイルを備え、

それぞれの前記コイルは、ターゲットフィールド法に基づいて、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定された流れ関数の等高線に基づいて配置が決定されている連続した電流経路を、前記コイル面に備えている、傾斜磁場コイル。

【請求項 8】

それぞれの前記コイルは、前記連続した電流経路の領域を画定する連続した第 1 の貫通溝を、前記コイル面内の前記等高線間に備える、請求項 7 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 9】

それぞれの前記コイルは、

前記連続した第 1 の貫通溝に交差する第 2 の貫通溝と、

前記連続した第 1 の貫通溝または前記第 2 の貫通溝に向けてコイル端から延伸する第 3 の貫通溝と、

をさらに備える、請求項 8 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 10】

それぞれの前記コイルは、前記連続した電流経路として機能する線状の導体を、前記コイル面内の前記等高線に沿って備える、請求項 7 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 11】

対向して配置される湾曲した板状の前記複数のコイルを備える、請求項 7 から 10 のいずれか一項に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 12】

磁場強度が線形に変化する線形領域を、湾曲した板状の前記複数のコイルによって構成される円筒状の空洞の長軸に沿った、前記空洞の中央から端部側へオフセットした位置に備える、請求項 11 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 13】

対向して配置される湾曲した板状の前記複数のコイルは、前記長軸に垂直な横断面に傾斜磁場を生成する横断面傾斜コイルを構成し、

前記連続した電流経路は、

前記コイル面の中央に配置される、前記長軸に対称な、前記連続した電流経路が存在しない略矩形形状の領域と、

前記長軸に沿って前記略矩形形状の領域と共に前記コイル面に配置される、前記長軸に対称な、前記連続した電流経路が存在しない略台形状の領域と、

を画定しており、

前記略矩形形状の領域は、前記略台形状の領域が有する短辺および長辺のうち、前記長辺側に位置している、請求項 12 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 14】

前記略矩形形状の領域は、

前記長軸の方向の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 10 % から 15 % の範囲であり、

前記長軸に垂直な方向の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 16 % から 22 % の範囲であり、

10

20

30

40

50

前記略台形状の領域は、

前記長軸の方向の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 10 % から 15 % の範囲であり、

前記長軸に垂直な方向の前記短辺の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 18 % から 24 % の範囲であり、

前記長軸に垂直な方向の前記長辺の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 31 % から 37 % の範囲である、請求項 13 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 15】

横断面における傾斜磁場効率は、135 から 145 [$\mu\text{T} / \text{m} / \text{A}$] の範囲であり、

直流電流に対するインダクタンスは、213 から 233 [μH] の範囲であり、

直流電流に対する抵抗値は、80 から 90 [m] の範囲である、請求項 14 に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 16】

前記長軸に沿った方向に傾斜磁場を生成する一対の連続した電流経路を有する一対の軸方向傾斜コイルをさらに備え、

前記一対の軸方向傾斜コイルは、前記長軸に沿って、前記線形領域の中心を挟んで対称に配置され、電流の向きは互いに逆向きであり、

前記一対の連続した電流経路は、前記線形領域の中心を挟んだ一方側および他方側のうち少なくともいずれかにおいて、前記長軸に沿った電流密度分布が二峰性を有するように配置されている、請求項 12 から 15 のいずれか一項に記載の傾斜磁場コイル。

【請求項 17】

前記電流密度分布において、前記線形領域の中心から遠い側に位置する峰の電流密度の強度は、前記線形領域の中心に近い側に位置する峰の電流密度の強度の 10 倍から 15 倍である、請求項 16 に記載の傾斜磁場コイル。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はコイルの設計方法に関し、より詳細には、典型的に磁気共鳴画像法において用いられる傾斜磁場コイルおよびその設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance, NMR) を利用して生体内の情報を画像化する磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging, MRI) が、医療分野等において知られている。

【0003】

磁気共鳴画像法に基づく MRI 装置は、空間的に線形に変化する傾斜磁場を生成する傾斜磁場コイルを備えている。生体内には水 (H_2O) として水素原子が多量に含まれており、水素の原子核である陽子から放出される核磁気共鳴信号の共鳴周波数は、この傾斜磁場によって空間的に線形に変化する。これにより、信号検出用の RF 受信コイルによって受信される信号に対して位置情報が付加され、撮像対象である生体の関心領域 (region of interest, ROI) に位置情報が付加される。一般的に、傾斜磁場コイルは、1 つの軸方向 (Z 軸方向) 傾斜コイルと、各々がこの軸に直交する 2 つの横断面 (X 方向および Y 方向) 傾斜コイルとを備えており、関心領域には三次元の位置情報が付加される。

【0004】

図 15 は、下記非特許文献 1 に記載されている頭部撮像用の MRI 装置の例示的な構成を示す部分断面図である。図中、局部撮像用の傾斜磁場コイルを符号 109 で示し、量子化軸を規定する静磁場 B_0 を印加するためのメインマグネットを符号 200 で示し、信号検出用の RF 受信コイルを符号 300 で示す。磁気共鳴画像法において、撮像が例えば人体の頭部または四肢等の比較的小さい関心領域に対して行われる場合には、図 15 に例示するように、全身撮像用の傾斜磁場コイルに代えて局部撮像用の傾斜磁場コイルを用いる

10

20

30

40

50

ことが知られている。また、例えば下記特許文献 1 および 2 には、MRI 装置にて用いられる局部撮像用の傾斜磁場コイルが開示されている。

【0005】

傾斜磁場コイルの設計には、有限要素法やターゲットフィールド法等の手法が用いられている。例えば下記非特許文献 2 には、ターゲットフィールド法に基づいて傾斜磁場コイルを設計する方法が開示されている。

【0006】

なお、傾斜磁場は勾配磁場 (gradient field) とも呼ばれており、傾斜磁場コイルは勾配磁場コイル (gradient field coil) とも呼ばれている。

【先行技術文献】

10

【特許文献】

【0007】

【文献】特開平 8 - 56934 号公報

特表 2009 - 538202 号公報

【非特許文献】

【0008】

【文献】Foo TKF, Laskaris E, Vermilyea M, et al. "Lightweight, compact, and high-performance 3T MR system for imaging the brain and extremities", Magnetic Resonance in Medicine, 2018;00:1-14. <https://doi.org/10.1002/mrm.27175> ROSTISLAV A. LEMDIASOV, REINHOLD LUDWIG, "A Stream Function Method for Gradient Coil Design", Concepts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering), Vol. 26B(1) 67-80 (2005). <https://doi.org/10.1002/cmrb.20040>

20

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

傾斜磁場コイルの性能を表す指標には、効率度 (efficiency) やインダクタンス、抵抗値があり、傾斜磁場コイルが発生する傾斜磁場の性能を表す指標には、磁場の均一性 (uniformity) や線形性 (linearity)、ロールオーバー値がある。例えば磁場の均一性が向上すると、MRI 装置による撮像画像の解像度も向上する。しかしながら、コイルの寸法とコイルの性能とはトレードオフの関係にあり、傾斜磁場の均一性や線形性を向上させようとすると、コイルの寸法が大型化する。大型化されたコイルは、局部撮像用の傾斜磁場コイルには適さない。

30

【0010】

例えばコイルの巻き数を増やして効率度を向上させると、傾斜磁場の強度が向上し、撮像画像の解像度が向上する。また、コイルの巻き数を増やすと磁場の均一性も向上する。しかしながら、コイルの巻き数を増やすと、インダクタンスや抵抗値が増加することによりコイルの発熱量が増え、MRI 装置により撮像画像を取得する際のコイルの動作速度であるスルーレート (slew rate) が低下する。また、コイルの巻き数を増やすと、コイルの発熱量が増加することにより MRI 装置の使用時間が制限されるとともに、MRI 装置の動作速度が低下し、撮像時間のインターバルも増加する。この結果、巻き数を増やしてコイルを大型化した MRI 装置を用いて、例えば脳機能の解明を目的とした、例えば生体のような時間変化する対象を時系列的に連続して撮像する場合には、撮像画像の解像度が低下する。撮像画像の解像度を向上させるために、コイルの寸法を同程度に維持しながら、コイルの性能を向上させることが求められている。

40

【0011】

本発明は、コイルの寸法を同程度に維持しながら、コイルの性能を向上させる傾斜磁場コイルの設計方法および傾斜磁場コイルを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0012】

50

本発明者は、鋭意検討を進めていたところ、ターゲットフィールド法に基づいて、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように流れ関数を決定することにより、上記した課題が解決されることを見出した。

【 0 0 1 3 】

すなわち、上記目的を達成するための本発明は、例えば以下に示す態様を含む。

(項 1)

対向して配置される複数のコイル間に性能値評価点を設定し、前記性能値評価点およびターゲットフィールド法に基づいて、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように流れ関数を決定するステップと、

決定した前記流れ関数の等高線に基づいて、連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップと、

を含む、傾斜磁場コイルの設計方法。

(項 2)

前記連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップは、

前記連続した電流経路の領域を画定する連続した第 1 の貫通溝を、前記コイル面内の前記等高線間に配置する、項 1 に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

(項 3)

前記連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップは、さらに、

前記連続した第 1 の貫通溝に交差する第 2 の貫通溝を、前記コイル面に配置し、

前記連続した第 1 の貫通溝または前記第 2 の貫通溝に向けてコイル端から延伸する第 3 の貫通溝を、前記コイル面に配置する、項 2 に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

(項 4)

前記連続した電流経路を前記コイル面に配置するステップは、

前記連続した電流経路として機能する線状の導体を、前記コイル面内の前記等高線に沿って配置する、項 1 に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

(項 5)

前記性能値評価点を、対向して配置される湾曲した板状の前記複数のコイル間に設定する、項 1 から 4 のいずれか一項に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

(項 6)

前記性能値評価点を、湾曲した板状の前記複数のコイルによって規定される円筒状の空洞の長軸に沿った、前記空洞の中央から端部側へオフセットした位置に設定する、項 5 に記載の傾斜磁場コイルの設計方法。

(項 7)

対向して配置される複数のコイルを備え、

それぞれの前記コイルは、ターゲットフィールド法に基づいて、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定された流れ関数の等高線に基づいて配置が決定されている連続した電流経路を、前記コイル面に備えている、傾斜磁場コイル。

(項 8)

それぞれの前記コイルは、前記連続した電流経路の領域を画定する連続した第 1 の貫通溝を、前記コイル面内の前記等高線間に備える、項 7 に記載の傾斜磁場コイル。

(項 9)

それぞれの前記コイルは、

前記連続した第 1 の貫通溝に交差する第 2 の貫通溝と、

前記連続した第 1 の貫通溝または前記第 2 の貫通溝に向けてコイル端から延伸する第 3 の貫通溝と、

をさらに備える、項 8 に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 0)

それぞれの前記コイルは、前記連続した電流経路として機能する線状の導体を、前記コイル面内の前記等高線に沿って備える、項 7 に記載の傾斜磁場コイル。

10

20

30

40

50

(項 1 1)

対向して配置される湾曲した板状の前記複数のコイルを備える、項 7 から 1 0 のいずれか一項に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 2)

磁場強度が線形に変化する線形領域を、湾曲した板状の前記複数のコイルによって構成される円筒状の空洞の長軸に沿った、前記空洞の中央から端部側へオフセットした位置に備える、項 1 1 に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 3)

対向して配置される湾曲した板状の前記複数のコイルは、前記長軸に垂直な横断面に傾斜磁場を生成する横断面傾斜コイルを構成し、

前記連続した電流経路は、

前記コイル面の中央に配置される、前記長軸に対称な、前記連続した電流経路が存在しない略矩形形状の領域と、

前記長軸に沿って前記略矩形形状の領域と共に前記コイル面に配置される、前記長軸に対称な、前記連続した電流経路が存在しない略台形状の領域と、
を画定しており、

前記略矩形形状の領域は、前記略台形状の領域が有する短辺および長辺のうち、前記長辺側に位置している、項 1 2 に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 4)

前記略矩形形状の領域は、

前記長軸の方向の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 1 0 % から 1 5 % の範囲であり、

前記長軸に垂直な方向の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 1 6 % から 2 2 % の範囲であり、

前記略台形状の領域は、

前記長軸の方向の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 1 0 % から 1 5 % の範囲であり、

前記長軸に垂直な方向の前記短辺の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 1 8 % から 2 4 % の範囲であり、

前記長軸に垂直な方向の前記長辺の寸法が、前記連続した電流経路によって囲まれる前記輪郭の寸法の 3 1 % から 3 7 % の範囲である、項 1 3 に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 5)

横断面における傾斜磁場効率 η は、1 3 5 から 1 4 5 $[\mu\text{T} / \text{m} / \text{A}]$ の範囲であり、

直流電流に対するインダクタンス L は、2 1 3 から 2 3 3 $[\mu\text{H}]$ の範囲であり、

直流電流に対する抵抗値 R は、8 0 から 9 0 $[\text{m}\Omega]$ の範囲である、項 1 4 に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 6)

前記長軸に沿った方向に傾斜磁場を生成する一対の連続した電流経路を有する一対の軸方向傾斜コイルをさらに備え、

前記一対の軸方向傾斜コイルは、前記長軸に沿って、前記線形領域の中心を挟んで対称に配置され、電流の向きは互いに逆向きであり、

前記一対の連続した電流経路は、前記線形領域の中心を挟んだ一方側および他方側のうち少なくともいずれかにおいて、前記長軸に沿った電流密度分布が二峰性を有するように配置されている、項 1 2 から 1 5 のいずれか一項に記載の傾斜磁場コイル。

(項 1 7)

前記電流密度分布において、前記線形領域の中心から遠い側に位置する峰の電流密度の強度は、前記線形領域の中心に近い側に位置する峰の電流密度の強度の 1 0 倍から 1 5 倍である、項 1 6 に記載の傾斜磁場コイル。

【発明の効果】

【0 0 1 4】

10

20

30

40

50

本発明によると、コイルの寸法を同程度に維持しながら、コイルの性能を向上させる傾斜磁場コイルの設計方法および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】

【 0 0 1 5 】

【図 1】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルの斜視図である。

【図 2】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 1 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【図 3】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 1 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【図 4】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 2 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

10

【図 5】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 2 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【図 6】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 3 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【図 7】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 3 の傾斜コイルの電流密度分布を説明するための模式的な図である。

【図 8】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルの Z - Y 平面の断面図である。

【図 9】図 8 に示す断面図の部分的な拡大図である。

【図 10】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルを Z 軸方向から見た側面図である。

20

【図 11】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルの設計方法における流れ関数の決定手順を説明するためのフローチャートである。

【図 12】流れ関数を決定する際に設定する仮想的なコイル面の領域を説明するための模式的な図である。

【図 13】本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 1 の傾斜コイルおよび第 2 の傾斜コイルの巻き線パターンを説明するための模式的な図である。

【図 14】図 13 に示す等高線パターンと貫通溝のパターンとを重ね合わせて表示した模式的な図である。

【図 15】頭部撮像用の MRI 装置の例示的な構成を示す部分断面図である。

【発明を実施するための形態】

30

【 0 0 1 6 】

以下、本発明の実施形態を、添付の図面を参照して詳細に説明する。なお、以下の説明および図面において、同じ符号は同じまたは類似の構成要素を示すこととし、よって、同じまたは類似の構成要素に関する重複した説明を省略する。

[発明の概略]

【 0 0 1 7 】

本発明では、ターゲットフィールド法に基づいて傾斜磁場コイルを設計する。ターゲットフィールド法では、コイルが生成しようとする磁場分布をターゲットとして与え、ターゲットとして与えた所望する磁場分布から逆算して、コイル面内での電流密度の分布を求める。本発明では、ターゲットフィールド法において、コイル面の領域の分割に境界要素法を適用する。これにより、コイルが生成する磁場分布が与えられる。コイルの巻き線パターンは、求めた電流密度の分布から決定する。ターゲットフィールド法では、電流密度の分布は流れ関数を用いて表現される。

40

【 0 0 1 8 】

位置ベクトルを r とすると、電流密度の分布はベクトル場である電流密度場 $J(r)$ を用いて表すことができる。電流密度場 $J(r)$ は電荷の保存則

【数 1】

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0$$

50

を満たす。よって、電流密度場 $J(r)$ は、スカラー値を持つ流れ関数 (stream function)

【数 2】

$$\varphi(\vec{r})$$

を用いて、

【数 3】

$$\vec{J}(\vec{r}) = \nabla \times (\varphi(\vec{r}) \cdot \vec{n}(\vec{r}))$$

10

と表すことができる。ベクトル n は電流密度が存在する表面に垂直な単位ベクトルである。電流密度を代表するコイルの巻き線パターンは、流れ関数の一定ステップ毎の等高線に基づいて決定する。コイルの巻き線パターンは、コイル面に配置する連続した一続きの電流経路として決定する。一続きの電流経路は、所定の幅を有する切り込みまたは切り欠きを、板状の導電性部材に形成することにより設けることができる。あるいは、一続きの電流経路は、線状の導体を用いて設けることができる。

【0019】

一実施形態では、対向して配置される複数のコイル間に性能値評価点を設定し、性能値評価点およびターゲットフィールド法に基づいて流れ関数を決定する。流れ関数は、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定する。コイルの巻き線パターンとなる連続した電流経路は、決定した流れ関数の等高線に基づいて、コイル面に配置する。

20

【0020】

一実施形態では、傾斜磁場コイルは、対向して配置される複数のコイルを備えている。それぞれのコイルは、連続した電流経路をコイル面に備えている。連続した電流経路は、ターゲットフィールド法に基づいて決定された流れ関数の等高線に基づいて配置が決定されている。流れ関数は、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定されている。

【0021】

30

一実施形態では、連続した電流経路の領域は、連続した第 1 の貫通溝により画定される。連続した第 1 の貫通溝は、コイル面内における流れ関数の等高線間に配置される。コイル面において第 1 の貫通溝間に挟まれる領域が、連続した電流経路に対応する。一実施形態では、傾斜磁場コイルが備えるそれぞれのコイルは、連続した電流経路の領域を画定する連続した第 1 の貫通溝を、コイル面内における流れ関数の等高線間に備える。

【0022】

一実施形態ではさらに、第 2 の貫通溝および第 3 の貫通溝がコイル面に配置される。第 2 の貫通溝は、連続した第 1 の貫通溝に交差する。第 3 の貫通溝は、連続した第 1 の貫通溝または第 2 の貫通溝に向けてコイル端から延伸する。一実施形態では、傾斜磁場コイルが備えるそれぞれのコイルは、連続した第 1 の貫通溝に交差する第 2 の貫通溝と、連続した第 1 の貫通溝または第 2 の貫通溝に向けてコイル端から延伸する第 3 の貫通溝と、をさらに備える。

40

【0023】

別の実施形態では、連続した電流経路は、線状の導体を、コイル面内における流れ関数の等高線に沿って配置することにより画定される。一実施形態では、傾斜磁場コイルが備えるそれぞれのコイルは、連続した電流経路として機能する線状の導体を、コイル面内における流れ関数の等高線に沿って備える。

【0024】

一実施形態では、性能値評価点を、対向して配置される湾曲した板状の複数のコイル間に設定する。一実施形態では、傾斜磁場コイルは、対向して配置される湾曲した板状の複

50

数のコイルを備える。

【 0 0 2 5 】

一実施形態では、性能値評価点を、対向して配置される湾曲した板状の複数のコイルによって規定される円筒状の空洞の長軸に沿った、空洞の中央から端部側へオフセットした位置に設定する。一実施形態では、傾斜磁場コイルは、磁場強度が線形に変化する線形領域を、対向して配置される湾曲した板状の複数のコイルによって構成される円筒状の空洞の長軸に沿った、空洞の中央から端部側へオフセットした位置に備えている。

【 0 0 2 6 】

一実施形態では、傾斜磁場コイルにおいて、対向して配置される湾曲した板状の複数のコイルは、横断面傾斜コイルを構成する。横断面傾斜コイルは、対向して配置される湾曲した板状の複数のコイルによって構成される円筒状の空洞の長軸に垂直な横断面に、傾斜磁場を生成する。コイル面において、連続した電流経路は、連続した電流経路が存在しない略矩形形状の領域と、連続した電流経路が存在しない略台形状の領域と、を画定している。略矩形形状の領域は、コイル面の中央に配置され、略台形状の領域は、空洞の長軸に沿って略矩形形状の領域と共にコイル面に配置される。略矩形形状の領域は、略台形状の領域が有する短辺および長辺のうち、長辺側に位置している。略矩形形状の領域は空洞の長軸に対称であり、略台形状の領域も空洞の長軸に対称である。

【 0 0 2 7 】

一実施形態では、略矩形形状の領域は、空洞の長軸の方向の寸法が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 1 0 % から 1 5 % の範囲であり、長軸に垂直な方向の寸法が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 1 6 % から 2 2 % の範囲である。一実施形態では、略台形状の領域は、空洞の長軸の方向の寸法が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 1 0 % から 1 5 % の範囲であり、長軸に垂直な方向の短辺の寸法が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 1 8 % から 2 4 % の範囲であり、長軸に垂直な方向の長辺の寸法が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法の 3 1 % から 3 7 % の範囲である。

【 0 0 2 8 】

一実施形態では、傾斜磁場コイルの横断面における傾斜磁場効率 η は、1 3 5 から 1 4 5 $[\mu T / m / A]$ の範囲であり、直流電流に対するインダクタンス L は、2 1 3 から 2 3 3 $[\mu H]$ の範囲であり、直流電流に対する抵抗値 R は、8 0 から 9 0 $[m\Omega]$ の範囲である。一実施形態では、磁場の中心からのロールオーバー値 r_{ov} は、1 3 5 から 1 5 5 $[mm]$ の範囲である。

【 0 0 2 9 】

一実施形態では、傾斜磁場コイルは、一对の連続した電流経路を有する一对の軸方向傾斜コイルをさらに備える。一对の軸方向傾斜コイルは、対向して配置される湾曲した板状の複数のコイルによって構成される円筒状の空洞の長軸に沿った方向に、傾斜磁場を生成する。一对の軸方向傾斜コイルは、空洞の長軸に沿って、線形領域の中心を挟んで対称に配置され、電流の向きは互いに逆向きである。一对の連続した電流経路は、線形領域の中心を挟んだ一方側および他方側のうち少なくともいずれかにおいて、空洞の長軸に沿った電流密度分布が二峰性を有するように配置されている。

【 0 0 3 0 】

一実施形態では、二峰性を有する電流密度分布において、線形領域の中心から遠い側に位置する峰の電流密度の強度は、線形領域の中心に近い側に位置する峰の電流密度の強度の 1 0 倍から 1 5 倍である。

【 0 0 3 1 】

一実施形態では、傾斜磁場コイルは、例えば生体内の情報を画像化する MRI 装置に組み込まれて使用される。生体とは、例えば人体や動物等の生物およびこれらから採取された組織等を意味し、撮像対象である生体は実際に生存している必要はない。MRI 装置による撮像対象としては、典型的には水素原子を含む物質であればよく、または、核磁気共鳴を利用して核磁気モーメントを検出することが可能な核種を含む物質であればよい。

10

20

30

40

50

[傾斜磁場コイルの構成]

【 0 0 3 2 】

図 1 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルの斜視図である。

【 0 0 3 3 】

一実施形態に係る傾斜磁場コイル 1 0 0 は、横断面の X 方向に傾斜磁場を生成する第 1 の傾斜コイルと、横断面の Y 方向に傾斜磁場を生成する第 2 の傾斜コイルと、軸方向の Z 方向に傾斜磁場を生成する第 3 の傾斜コイルと、を備えている。第 1 の傾斜コイルおよび第 2 の傾斜コイルの各々は、横断面傾斜コイルとして機能し、第 3 の傾斜コイルは、軸方向傾斜コイルとして機能する。本実施形態では、第 1 の傾斜コイルないし第 3 の傾斜コイルは、支持体 9 (9 a , 9 b , 9 c) 内に配置されている。

10

【 0 0 3 4 】

傾斜磁場コイル 1 0 0 は、円筒形状の第 1 の支持体 9 a と、第 1 の支持体 9 a の外側に配置される円筒形状の第 2 の支持体 9 b と、第 2 の支持体 9 b の外側に配置される円筒形状の第 3 の支持体 9 c とを備えている。第 1 の支持体 9 a ないし第 3 の支持体 9 c は、略同心円状に配置されており、第 1 の傾斜コイルないし第 3 の傾斜コイルの各々は、これら 3 つの支持体 9 内のいずれかに配置される。支持体 9 の材質は、透磁率が低い材質であることが好ましく、非磁性であることがより好ましい。

【 0 0 3 5 】

以下、図 2 ないし図 6 を参照して、第 1 の傾斜コイルないし第 3 の傾斜コイルの各々の配置について説明する。なお、図 2 ないし図 6 は、支持体 9 (9 a , 9 b , 9 c) 内における第 1 の傾斜コイルないし第 3 の傾斜コイルの各々の配置を説明するための模式的な図であり、支持体 9 の寸法を正確に表現する図ではない。

20

【 0 0 3 6 】

図 2 および図 3 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 1 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【 0 0 3 7 】

第 1 の傾斜コイルは、横断面の X 方向に傾斜磁場を生成する横断面傾斜コイルとして機能する。第 1 の傾斜コイルは、磁場強度が線形に変化する線形領域 9 9 の空間に傾斜磁場を生成する第 1 のメインコイル 1 と、第 1 のメインコイル 1 による漏洩磁場を打ち消すための遮蔽磁場を生成する第 1 のシールドコイル 2 と、を備えている。本実施形態では、第 1 のメインコイル 1 は第 1 の支持体 9 a 内に配置されており、第 1 のシールドコイル 2 は第 3 の支持体 9 c 内に配置されている。本実施形態では、第 1 のメインコイル 1 および第 1 のシールドコイル 2 は、湾曲した板状の形状であり、第 1 のシールドコイル 2 は第 1 のメインコイル 1 の周方向外側に配置されている。

30

【 0 0 3 8 】

第 1 のメインコイル 1 は、対向して配置される複数の板状メインコイル 1 a , 1 b を備えている。第 1 のシールドコイル 2 は、対向して配置される複数の板状シールドコイル 2 a , 2 b を備えている。複数の板状メインコイル 1 a , 1 b および複数の板状シールドコイル 2 a , 2 b の各々は、連続した電流経路をコイル面に備えている。本実施形態では、複数の板状メインコイル 1 a , 1 b の各々が備える連続した電流経路は、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定された流れ関数の等高線に基づいて、配置が決定されている。流れ関数の決定方法については後述する。

40

【 0 0 3 9 】

第 1 のシールドコイル 2 は、第 1 のメインコイル 1 による漏洩磁場を打ち消すための遮蔽磁場を生成するので、流れ関数を決定する際には、第 1 のメインコイル 1 および第 1 のシールドコイル 2 は、同一の構成として一体化して計算することができる。複数の板状メインコイル 1 a , 1 b において連続した電流経路の配置を決定する流れ関数は、複数の板状シールドコイル 2 a , 2 b を考慮して決定することができる。

【 0 0 4 0 】

50

板状メインコイル 1 a の端子 1 9 a は、板状シールドコイル 2 a の端子 2 9 a に接続されている。板状メインコイル 1 a の端子 1 9 b は、電源端子に接続されている。板状シールドコイル 2 a の端子 2 9 b は、板状シールドコイル 2 b の端子 2 9 d に接続されている。板状メインコイル 1 b の端子 1 9 c は、板状シールドコイル 2 b の端子 2 9 c に接続されている。板状メインコイル 1 b の端子 1 9 d は、電源端子に接続されている。板状シールドコイル 2 b の端子 2 9 d は、板状シールドコイル 2 a の端子 2 9 b に接続されている。

【 0 0 4 1 】

板状メインコイル 1 a において、連続した電流経路は、端子 1 9 a を起点として渦状に配置されている。電流は、連続した電流経路上を端子 1 9 b から端子 1 9 a に渦状に流れる。板状シールドコイル 2 a においては、電流は端子 2 9 a から端子 2 9 b に渦状に流れる。

10

【 0 0 4 2 】

板状メインコイル 1 b についても、板状メインコイル 1 a と同様である。板状メインコイル 1 b において、連続した電流経路は、端子 1 9 c を起点として渦状に配置されている。電流は、連続した電流経路上を端子 1 9 c から端子 1 9 d に渦状に流れる。板状シールドコイル 2 b においては、電流は端子 2 9 d から端子 2 9 c に渦状に流れる。

【 0 0 4 3 】

本実施形態では、線形領域 9 9 は、図 2 並びに後に参照する図 8 および図 9 に示すように、複数の板状メインコイル 1 a , 1 b によって規定される円筒状の空洞の長軸 (Z 軸) に沿った、空洞の中央から端部側へオフセットした位置に配置されている。本実施形態では、複数の板状メインコイル 1 a , 1 b は非対称コイルである。

20

【 0 0 4 4 】

図 4 および図 5 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 2 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【 0 0 4 5 】

第 2 の傾斜コイルは、横断面の Y 方向に傾斜磁場を生成する横断面傾斜コイルとして機能する。第 1 の傾斜コイルと同様に、第 2 の傾斜コイルは、線形領域 9 9 の空間に傾斜磁場を生成する第 2 のメインコイル 3 と、第 2 のメインコイル 3 による漏洩磁場を打ち消すための遮蔽磁場を生成する第 2 のシールドコイル 4 と、を備えている。本実施形態では、第 2 のメインコイル 3 は第 1 の支持体 9 a 内に配置されており、第 2 のシールドコイル 4 は第 3 の支持体 9 c 内に配置されている。本実施形態では、第 2 のメインコイル 3 および第 2 のシールドコイル 4 は、湾曲した板状の形状であり、第 2 のシールドコイル 4 は第 2 のメインコイル 3 の周方向外側に配置されている。

30

【 0 0 4 6 】

第 2 のメインコイル 3 は、対向して配置される複数の板状メインコイル 3 a , 3 b を備えている。第 2 のシールドコイル 4 は、対向して配置される複数の板状シールドコイル 4 a , 4 b を備えている。複数の板状メインコイル 3 a , 3 b および複数の板状シールドコイル 4 a , 4 b の各々は、連続した電流経路をコイル面に備えている。第 1 のメインコイル 1 が備える複数の板状メインコイル 1 a , 1 b と同様に、本実施形態では、複数の板状メインコイル 3 a , 3 b の各々が備える連続した電流経路は、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定された流れ関数の等高線に基づいて、配置が決定されている。流れ関数の決定方法についても、第 1 のメインコイル 1 および第 1 のシールドコイル 2 の場合と同様である。複数の板状メインコイル 3 a , 3 b において連続した電流経路の配置を決定する流れ関数は、複数の板状シールドコイル 4 a , 4 b を考慮して決定することができる。

40

【 0 0 4 7 】

板状メインコイル 3 a の端子 3 9 a は、板状シールドコイル 4 a の端子 4 9 a に接続されている。板状メインコイル 3 a の端子 3 9 b は、電源端子に接続されている。板状シールドコイル 4 a の端子 4 9 b は、板状シールドコイル 4 b の端子 4 9 d に接続されている。板状メインコイル 3 b の端子 3 9 c は、板状シールドコイル 4 b の端子 4 9 c に接続さ

50

れている。板状メインコイル 3 b の端子 3 9 d は、電源端子に接続されている。板状シールドコイル 4 b の端子 4 9 d は、板状シールドコイル 4 a の端子 4 9 b に接続されている。

【 0 0 4 8 】

板状メインコイル 3 a において、連続した電流経路は、端子 3 9 a を起点として渦状に配置されている。電流は、連続した電流経路上を端子 3 9 b から端子 3 9 a に渦状に流れる。板状シールドコイル 4 a においては、電流は端子 4 9 a から端子 4 9 b に渦状に流れる。

【 0 0 4 9 】

板状メインコイル 3 b についても、板状メインコイル 3 a と同様である。板状メインコイル 3 b において、連続した電流経路は、端子 3 9 c を起点として渦状に配置されている。電流は、連続した電流経路上を端子 3 9 c から端子 3 9 d に渦状に流れる。板状シールドコイル 4 b においては、電流は端子 4 9 d から端子 4 9 c に渦状に流れる。

【 0 0 5 0 】

本実施形態では、線形領域 9 9 は、図 4 並びに後に参照する図 8 および図 9 に示すように、複数の板状メインコイル 3 a , 3 b によって規定される円筒状の空洞の長軸 (Z 軸) に沿った、空洞の中央から端部側へオフセットした位置に配置されている。本実施形態では、複数の板状メインコイル 3 a , 3 b は非対称コイルである。

【 0 0 5 1 】

図 6 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 3 の傾斜コイルを説明するための模式的な図である。

【 0 0 5 2 】

第 3 の傾斜コイルは、軸方向の Z 方向に傾斜磁場を生成する軸方向傾斜コイルとして機能する。第 3 の傾斜コイルは、線形領域 9 9 の空間に傾斜磁場を生成する第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b と、第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b による漏洩磁場を打ち消すための遮蔽磁場を生成する第 3 のシールドコイル 6 のペア 6 a , 6 b と、を備えている。本実施形態では、第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b は第 2 の支持体 9 b 内に配置されており、第 3 のシールドコイル 6 のペア 6 a , 6 b は第 3 の支持体 9 c 内に配置されている。本実施形態では、図 6 に示すように、第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b および第 3 のシールドコイル 6 のペア 6 a , 6 b は各々、線形領域 9 9 を略中心とするように配置されている。

【 0 0 5 3 】

本実施形態では、第 1 のメインコイル 1 の場合と同様に、第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b が備える一対の連続した電流経路は、ペアにおけるコイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定された流れ関数の等高線に基づいて配置が決定されている。流れ関数を決定する際には、第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b および第 3 のシールドコイル 6 のペア 6 a , 6 b は、同一の構成として一体化して計算することができる。第 3 のメインコイルのペア 5 a , 5 b において連続した電流経路の配置を決定する流れ関数は、第 3 のシールドコイル 6 のペア 6 a , 6 b を考慮して決定することができる。

【 0 0 5 4 】

第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b は、軸方向の Z 方向に傾斜磁場を生成する一対の連続した電流経路を構成する。コイル 5 a およびコイル 5 b は、線形領域 9 9 の略中心を挟んで Z 軸方向に略対称に配置される。線形領域 9 9 の略中心を挟んで一方側に配置されるコイル 5 a を流れる電流の向きは、他方側に配置されるコイル 5 b を流れる電流の向きと逆向きである。

【 0 0 5 5 】

図 7 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 3 の傾斜コイルの電流密度分布を説明するための模式的な図である。図中、グラフの横軸は Z 軸方向の位置を表し、グラフの縦軸は電流密度の強度を表す。A - A 線は、線形領域 9 9 の横断面 (X 方向および Y 方向) に沿った中心線であり、図 8 および図 9 中に示す A - A 線に対応している。

【 0 0 5 6 】

本実施形態において、Z方向に傾斜磁場を生成する一対の連続した電流経路は、線形領域の中心を挟んだ一方側および他方側のうち少なくともいずれかにおいて、軸方向のZ方向に沿った電流密度分布が二峰性を有するように配置されている。好ましくは、二峰性を有する電流密度分布において、線形領域の中心から遠い側に位置する峰の電流密度の強度は、線形領域の中心に近い側に位置する峰の電流密度の強度の10倍から15倍である。

【 0 0 5 7 】

図7の模式的なグラフには、電流密度の4つの強度ピーク51a, 52a, 51b, 52bが示されている。線形領域99の中心を示すA-A線を挟んで、グラフの左側には2つのピーク51a, 52aが存在し、グラフの右側には2つのピーク51b, 52bが存在する。グラフ左側において、ピーク52aは、ピーク51aの10倍から15倍の強度を有することが好ましい。グラフ右側において、ピーク52bは、ピーク51bの10倍から15倍の強度を有することが好ましい。

10

【 0 0 5 8 】

図8は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルのZ-Y平面の断面図である。図9は、図8に示す断面図の部分的な拡大図であり、3つの支持体内に配置される第1の傾斜コイルないし第3の傾斜コイルの層構造を説明するための模式的な図である。

【 0 0 5 9 】

なお、図8ないし図10に示す傾斜磁場コイル100の軸方向両端のうち、線形領域99から近いZ軸方向の端部を近位端と呼び、線形領域99から遠いZ軸方向の端部を遠位端と呼ぶ。図示する態様では、Z軸正方向側の端部が傾斜磁場コイル100の近位端であり、Z軸負方向側の端部が傾斜磁場コイル100の遠位端である。A-A線は、線形領域99のY軸方向に沿った中心線である。B-B線は、第1のメインコイル1および第2のメインコイル3を構成する板状メインコイル1a, 1b, 3a, 3bのY軸方向に沿った中心線である。

20

【 0 0 6 0 】

本実施形態では、第1のメインコイル1を構成する複数の板状メインコイル1a, 1bは、第1の支持体9a内に配置されており、第1のシールドコイル2を構成する複数の板状シールドコイル2a, 2bは、第3の支持体9c内に配置されている。第1のメインコイル1および第1のシールドコイル2と同様に、第2のメインコイル3を構成する複数の板状メインコイル3a, 3bは、第1の支持体9a内に配置されており、第2のシールドコイル4を構成する複数の板状シールドコイル4a, 4bは、第3の支持体9c内に配置されている。第3のメインコイル5のペアは第2の支持体9b内に配置されており、第3のシールドコイル6のペアは第3の支持体9c内に配置されている。

30

【 0 0 6 1 】

本実施形態では、A-A線で示す線形領域99の中心は、B-B線で示す第1のメインコイル1および第2のメインコイル3のZ軸方向の中心からZ軸方向の近位端側にオフセットして配置されている。同様に、A-A線で示す線形領域99の中心は、B-B線で示す第1のシールドコイル2および第2のシールドコイル4のZ軸方向の中心からZ軸方向の近位端側にオフセットして配置されている。第3のメインコイル5および第3のシールドコイル6のZ軸方向の中心は、線形領域99を略中心とするように配置されている。

40

【 0 0 6 2 】

線形領域99は、傾斜磁場コイル100が発生する磁場の強度が線形に変化する領域である。傾斜磁場コイル100がMRI装置に組み込まれて撮像に使用される場合、線形領域99は、撮像対象である生体の関心領域に対応する。傾斜磁場コイル100がMRI装置に組み込まれて例えば人体の頭部が撮像される場合、頭部は傾斜磁場コイル100の近位端から傾斜磁場コイル100の空洞内に挿入され、線形領域99に配置される。

【 0 0 6 3 】

図1の斜視図にも示すように、本実施形態では、人体の両肩の形状に適合するような切り欠きは、傾斜磁場コイル100に設けられていない。特許文献1に例示されているこの

50

ような切り欠きを傾斜磁場コイルに設けると、傾斜磁場コイルのZ軸方向の寸法が増大するところ、本実施形態に係る傾斜磁場コイル100は、このような切り欠きを設けることなく、Z軸方向の寸法はコンパクトに設計されている。本実施形態に係る傾斜磁場コイル100は、コンパクトに設計されることにより、例えば生体の頭部といった局部を撮像するための制限された空間への配置に適している。

【0064】

図10は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルをZ軸方向から見た側面図である。(A)はZ軸方向の矢視正面(近位端側)から見た側面図であり、(B)はZ軸方向の矢視背面(遠位端側)から見た側面図である。

【0065】

傾斜磁場コイル100は、静磁場の不均一度を補正するヨークを収容するための複数の貫通孔7と、冷却水等の冷媒を流すための複数の冷却管8とを備えることができる。本実施形態では、24個の貫通孔7が、第3の支持体9cに周状に略等間隔で配置されており、3つの冷却管8(8a, 8b, 8c)が支持体9に配置されている。第1の冷却管8aは第1の支持体9a内に配置されており、第2の冷却管8bは第2の支持体9b内に配置されており、第3の冷却管8cは第3の支持体9c内に配置されている。好ましくは、これら3つの冷却管8には、冷媒が流れる方向が交互になるように冷媒が導入される。図10中に符号8eで示す構成は、冷却管8を傾斜磁場コイル100の外部と接続するための器具である。

【0066】

他の実施形態では、傾斜磁場コイル100は、磁場の不均一度や磁場の変動を補正するための補正コイルの組を第2の支持体9b内に配置することができ、補正コイルの組による漏洩磁場を打ち消すための遮蔽磁場を生成するシールドコイルを第3の支持体9c内に配置することができる。補正コイルの組は、例えば B_0 補正コイル、 Z^2 補正コイル、 ZX 補正コイル、 ZY 補正コイル、 $X^2 - Y^2$ 補正コイル、 XY 補正コイルとすることができる。 B_0 補正コイルは、MRI装置において量子化軸を規定する静磁場 B_0 の変動を補正する。 Z^2 補正コイルは、Z軸方向の距離の二乗で変化する磁場の成分を補正する。 ZX 補正コイルは、Z軸方向の距離とX軸方向の距離との積で変化する磁場の成分を補正する。 ZY 補正コイルは、Z軸方向の距離とY軸方向の距離との積で変化する磁場の成分を補正する。 $X^2 - Y^2$ 補正コイルは、X軸方向の距離の二乗とY軸方向の距離の二乗との差で変化する磁場の成分を補正する。 XY 補正コイルは、X軸方向の距離とY軸方向の距離との積で変化する磁場の成分を補正する。

【0067】

本実施形態に係る傾斜磁場コイル100の例示的な寸法を表1に示す。図8、図9および表1中、符号 R_L は、三次元空間に略扁球状の回転楕円体に生成される線形領域99の長軸方向の長さであり、符号 R_S は、線形領域99の短軸方向の長さである。符号 r_1 は第1の支持体9aの内径である。符号 r_2 は第2の支持体9bの内径である。符号 r_3 は第3の支持体9cの内径である。符号 r_4 は第3の支持体9cの外径である。符号 L_1 は、線形領域99の中心から第1の支持体9aの近位端までの寸法である。符号 L_2 は、線形領域99の中心から第2の支持体9bの近位端までの寸法である。符号 L_3 は、線形領域99の中心から第3の支持体9cの近位端までの寸法である。符号 L_4 は、線形領域99の中心から第3の支持体9cの遠位端までの寸法である。符号 L_5 は、第1のメインコイル1(板状メインコイル1a, 1b)および第2のメインコイル3(板状メインコイル3a, 3b)のZ軸方向の寸法である。符号 L_6 は、第3のメインコイル5のZ軸方向の寸法である。符号 L_7 は、第3のシールドコイル6のZ軸方向の寸法である。符号 L_{off} は、A-A線とB-B線との間のZ軸方向の離隔距離であり、第1のメインコイル1および第2のメインコイル3を構成する板状メインコイル1a, 1b, 3a, 3bの中心と、線形領域99の中心との間の、Z軸方向のオフセット距離である。

【0068】

10

20

30

40

50

【表 1】

符号	寸法 [cm]
R_L	25
R_S	21
ϕ_1	42
ϕ_2	45.5
ϕ_3	52.52
ϕ_4	59
L_1	14.5
L_2	20
L_3	28
L_4	64
L_5	73.5
L_6	38
L_7	56
L_{off}	17.5

10

20

[傾斜磁場コイルの設計]

【 0 0 6 9 】

本発明では、ターゲットフィールド法に基づいて傾斜磁場コイルを設計する。ターゲットフィールド法では、コイルが生成しようとする磁場分布をターゲットとして与え、ターゲットとして与えた所望する磁場分布から逆算して、コイル面内の電流密度の分布を求める。本発明では、ターゲットフィールド法において、コイル面の領域の分割に境界要素法を適用する。これにより、コイルが生成する磁場分布が与えられる。コイルの巻き線パターンは、求めた電流密度の分布から決定する。ターゲットフィールド法では、電流密度の分布は流れ関数を用いて表現される。

30

【 0 0 7 0 】

・ 流れ関数の決定

本発明の一実施形態では、目標とする性能値として磁場の線形性を設定し、設定した性能値の範囲内における最適な流れ関数を決定する。本実施形態では、目標とする性能値として設定する磁場の線形性は、許容可能な磁場の非線形性の最大値として設定する。流れ関数は、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように決定する。好ましくは、流れ関数は、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が最小化するように決定する。

【 0 0 7 1 】

本実施形態では、ターゲットフィールド法において、コイル面の領域の分割に境界要素法 (boundary element method) を適用する。非特許文献 2 においても説明されているように、境界要素法では、コイル面の領域を多角形 (典型的には三角形、本実施形態においても三角形) の複数のパッチ領域に分割することにより、コイル面における電流密度分布を表現する。境界要素法の適用により、コイル面の領域には、周囲が複数のパッチ領域に囲まれるノードが複数個表現される。ノードを囲む複数のパッチ領域の各々には、ノードを中心として時計回りまたは反時計回りの方向に流れる電流要素が表現される。

40

【 0 0 7 2 】

図 1 1 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルの設計方法における流れ関数の決定手順を説明するためのフローチャートである。図 1 2 は、流れ関数を決定する際に設定する仮想的なコイル面の領域を説明するための模式的な図である。典型的には、以下に説

50

明する流れ関数の決定手順は、ハードウェアの構成としてプロセッサおよびメモリを備える計算機を用いて、計算機による数値シミュレーションとして実現することができる。

【 0 0 7 3 】

以下に説明する流れ関数の決定手順では、横断面傾斜コイルとして機能する第 1 の傾斜コイルを、仮想的なコイル面の領域として説明する。以下に説明する流れ関数の決定手順は、第 1 の傾斜コイルに限らず、横断面傾斜コイルとして機能する第 2 の傾斜コイルについても同様に適用することができ、軸方向傾斜コイルとして機能する第 3 の傾斜コイルについても同様に適用することができる。第 3 の傾斜コイルを仮想的なコイル面の領域として、第 3 の傾斜コイルのコイル面における流れ関数を決定する場合は、例えば図 6 に示す第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b を、仮想的なコイル面の領域とすることができる。

10

【 0 0 7 4 】

ステップ S 1 において、コイル面の領域を設定し、設定した領域を多角形（三角形）の複数のパッチ領域に分割する。図 1 2 に示すように、本実施形態では、コイル面の領域は、対向して配置される湾曲した板状の二つのコイル面 9 1 a , 9 1 b として、三次元座標を用いて設定する。コイル面 9 1 a , 9 1 b の領域の分割には、上記した境界要素法を適用する。境界要素法の適用により、コイル面 9 1 a , 9 1 b の領域には、周囲が複数のパッチ領域に囲まれる上記した複数のノードが設定され、コイル面 9 1 a , 9 1 b における電流密度分布が表現される。これにより、対向して配置される二つのコイル間の磁場分布が与えられる。

【 0 0 7 5 】

20

ステップ S 2 において、性能値評価点をコイル間の領域に設定する。図 1 2 に示すように、本実施形態では、性能値評価点 9 7 は、対向して配置される二つのコイル面 9 1 a , 9 1 b に挟まれる空間内に、三次元座標を用いて複数箇所設定する。本実施形態において性能値評価点 9 7 を設定する空間領域を、図 1 2 中に符号 9 8 を付して示す。性能値評価点 9 7 は、空間領域 9 8 を覆う表面の領域に、例えば等間隔に複数箇所（例えば 2 2 8 0 箇所）設定する。性能値評価点 9 7 は、空間領域 9 8 の全体に複数箇所設定してもよい。本実施形態では、性能値評価点 9 7 の領域 9 8 は、コイル面 9 1 a , 9 1 b の中心から Z 軸方向にオフセットして非対称に配置する。

【 0 0 7 6 】

ステップ S 3 において、目標とする性能値を設定する。本実施形態では、目標とする性能値として、許容可能な磁場の非線形性の最大値（単位：パーセント）を設定する。本実施形態では、空間内に三次元座標を用いて設定されている複数箇所の性能値評価点 9 7 の各々について、目標とする性能値を設定する。これにより、コイル面 9 1 a , 9 1 b の中心から Z 軸方向にオフセットして配置された性能値評価点 9 7 の領域 9 8 について、目標とする性能値として磁場の線形性が設定される。

30

【 0 0 7 7 】

ステップ S 4 において、最適化変数（ , , p , q , r ）の領域を設定する。本実施形態では、最適化変数の値の範囲は、 $0 < < 1$ 、 $0 < < 1$ 、 $p = (2 ,)$ 、 $q = (1 , 2)$ 、 $r = (1 , 2)$ である。単純和を意味する値 1 は、最適化変数 q または r を用いて選択されるようになる。

40

【 0 0 7 8 】

ステップ S 5 において、設定した最適化変数（ , , p , q , r ）の領域内において流れ関数を最適化する。流れ関数

【数 4】

$$\varphi(\vec{r})$$

は、三角形の頂点における値と基底関数を用いて

【数 5】

50

$$\varphi(\vec{r}) = \sum_n^N I_n \varphi_n(\vec{r})$$

となる。 I_n は、三角形のパッチ領域の頂点における流れ関数の値である。

【数 6】

$$\varphi_n$$

10

は基底関数であり、三角形のパッチ領域の頂点周辺のみで値 1 を持つ。 N は頂点の数である。この流れ関数をコイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数

【数 7】

$$\alpha \frac{\rho}{t} \sum_i^{Ne} \|\vec{J}_i\|_p A_i \|\vec{J}_i\|_q + \beta (1 - \alpha) \sum_i^{Ne} A_i \|\vec{J}_i\|_r$$

20

において、評価関数の値が最小化するように決定する。評価関数において、第 1 項がコイルの発熱に対応する項であり、第 2 項がコイル（連続した電流経路）の全長に対応する項である。ここで、

【数 8】

$$\vec{J}_i = J_i \vec{\varphi}_i$$

である。 J_i は電荷密度である。 t はコイル面を構成する導体の厚みである。 Ne は、境界要素法における三角形のパッチ領域の総数である。 A_i は、境界要素法における i 番目の三角形のパッチ領域の面積であり、ベクトル \vec{J}_i は i 番目の三角形のパッチ領域における電流密度分布ベクトルである。 J_i は i 番目の三角形のパッチ領域で頂点同士を結ぶ 3 つのベクトルで構成される行列である。ベクトル

30

【数 9】

$$\vec{\varphi}_i$$

は、 i 番目の三角形のパッチ領域の頂点における流れ関数の値 I_n の 3 つから構成される（すなわち、3 つの I_n から構成される）流れ関数ベクトルである。

【0 0 7 9】

40

ステップ S 6 において、性能値を算出する。性能値は、ステップ S 2 において設定した性能値評価点における値を算出する。

【0 0 8 0】

本実施形態では、性能値として、ステップ S 3 において設定した磁場の非線形性を算出する。まず、流れ関数に対する基底関数と、電流密度の存在する表面に垂直な単位ベクトルとの積に対し、ベクトル演算子である回転を作用させて得られるベクトルから計算されるスカラー量を、性能値評価点において決定する。次に、決定されたスカラー量と、ステップ S 5 において決定した流れ関数でスカラー量を計算した三角形のパッチ領域の頂点での値との積を、三角形のパッチ領域の頂点全てにおいて決定する。最後に、三角形のパッチ領域の頂点全てにおいて決定した積の総和を決定し、性能値評価点での磁場強度を決定

50

する。決定した磁場強度から、決定した流れ関数の性能値として、性能値評価点における磁場の非線形性を算出する。

【 0 0 8 1 】

ステップ S 7 において、ステップ S 5 およびステップ S 6 の工程を最適化変数の全領域について行ったか否かを判定する。判定の結果、行っていない場合（ステップ S 7 において N o ）には、ステップ S 8 において最適化変数（ α , β , p , q , r ）を更新し、更新した最適化変数を用いてステップ S 5 の工程を再び行う。最適化変数 α を更新する際の値の刻み幅は、例えば 0.1 から 0.01 の範囲の値とすることができる。例えば更新の最初の段階では、粗い（coarse）刻み幅の 0.1 にて最適化変数 α を更新する。更新が繰り返し行われ、最適化変数が最良な値に近づこうとする更新の終盤の段階では、細かい（fine）刻み幅の 0.01 にて最適化変数 α を更新する。

10

【 0 0 8 2 】

ステップ S 7 における判定の結果、行っている場合（ステップ S 7 において Y e s ）には、ステップ S 9 において、最良の性能値を有する流れ関数を決定する。流れ関数は、最適化に用いた最適化変数 α , β , p , q , r の値の組み合わせ毎に決定されており、流れ関数は、ステップ S 5 の工程を複数回行う事により複数個決定されている。本実施形態では、これら複数個の流れ関数のうち、ステップ S 6 において算出した性能値が最も優れている流れ関数を、最良の性能値を有する流れ関数として決定する。

【 0 0 8 3 】

ステップ S 10 において、決定された流れ関数が目標とする性能値を達成しているか否かを判定する。判定の結果、達成していない場合（ステップ S 10 において N o ）には、ステップ S 11 において、設定した性能値を緩和し、緩和した性能値を用いてステップ S 4 の工程を再び行う。

20

【 0 0 8 4 】

ステップ S 10 における判定の結果、達成している場合（ステップ S 10 において Y e s ）には、一連の工程を終了する。

【 0 0 8 5 】

・巻き線パターンの決定

本発明では、電流密度を代表するコイルの巻き線パターンは、流れ関数の一定ステップ毎の等高線に基づいて決定する。コイルの巻き線パターンは、コイル面に配置する連続した一続きの電流経路として決定する。一続きの電流経路は、所定の幅を有する切り込みまたは切り欠きを、板状の導電性部材に形成することにより設けることができる。あるいは、一続きの電流経路は、線状の導体を用いて設けることができる。

30

【 0 0 8 6 】

図 13 は、本発明の一実施形態に係る傾斜磁場コイルが備える第 1 の傾斜コイルおよび第 2 の傾斜コイルの巻き線パターンを説明するための模式的な図である。

【 0 0 8 7 】

（ A ）に示す等高線パターン 101（101a）は、図 2 および図 3 に示す板状メインコイル 1a について決定された、流れ関数の一定ステップ毎の等高線パターンである。

【 0 0 8 8 】

40

本実施形態では、板状メインコイル 1a は非対称コイルであり、板状メインコイル 1a の等高線パターン 101a は、Z 軸方向に張り出した領域 89 を有している。領域 89 は、傾斜磁場コイル 100 における線形領域 99 に対応している。等高線パターン 101a の領域 89 において、等高線の張り出しの間隔は、線形領域 99 に近づくと広くなり、線形領域 99 から遠ざかると狭くなる。

【 0 0 8 9 】

（ B ）に示す板状メインコイル 1a の貫通溝のパターンは、（ A ）に示す等高線パターン 101a に基づいてコイル面に配置された貫通溝のパターンである。（ C ）は（ B ）に示す貫通溝のパターンの部分的な拡大図である。

【 0 0 9 0 】

50

本実施形態では、コイル面に配置される貫通溝のパターンは、第１の貫通溝８１と、第２の貫通溝８２と、第３の貫通溝８３と、を備えている。これら第１の貫通溝８１ないし第３の貫通溝８３は、所定の幅を有する切り込みまたは切り欠きを、板状の導電性部材に形成することにより設けられる。例示的には、導電性部材には、厚さが約２～３ｍｍの銅板を用いることができる。

【００９１】

第１の貫通溝８１は連続した貫通溝であり、コイルの巻き線パターンに対応する連続した電流経路の領域を画定する。第１の貫通溝８１は、コイル面内における流れ関数の等高線間に配置される。コイル面において第１の貫通溝８１に挟まれる領域が、連続した電流経路に対応する。

10

【００９２】

図１４は、図１３に示す等高線パターンと貫通溝のパターンとを重ね合わせて表示した模式的な図である。図１４に示すように、第１の貫通溝８１は、第１の貫通溝８１間に等高線パターン１０１を挟むように配置されている。

【００９３】

第２の貫通溝８２は、連続した第１の貫通溝８１に交差するように配置される。第３の貫通溝８３は、連続した第１の貫通溝８１または第２の貫通溝８２に向けて、コイル端から延伸するように配置される。これら第２の貫通溝８２および第３の貫通溝８３をコイル面に複数箇所設けることにより、連続した電流経路の幅が調整される。これにより、コイル面は複数の小領域に区画され、コイル面内における渦電流の発生が抑制される。渦電流の発生が抑制されると、磁場の均一性および傾斜磁場の効率度が向上する。

20

【００９４】

図１３および図１４に例示する板状メインコイル１ａと同様に、他の板状メインコイル１ｂ，３ａ，３ｂについても、決定された流れ関数の等高線パターンに基づいて、貫通溝のパターンがコイル面に配置される。

【００９５】

本実施形態では、板状メインコイル１ａ，１ｂ，３ａ，３ｂのコイル面において、連続した電流経路は、連続した電流経路が存在しない略矩形形状の領域８５と、連続した電流経路が存在しない略台形状の領域８６と、を画定している。略矩形形状の領域８５は、コイル面の中央に配置され、略台形状の領域８６は、Ｚ軸に沿って略矩形形状の領域８５と共にコイル面に配置される。略矩形形状の領域８５は、略台形状の領域８６が有する短辺８６ａおよび長辺８６ｂのうち、長辺８６ｂ側に位置している。略矩形形状の領域８５はＺ軸に線対称であり、略台形状の領域８６もＺ軸に線対称である。

30

【００９６】

図１３および図１４に例示する板状メインコイル１ａにおいて、連続した電流経路によって囲まれる電流経路全体の輪郭の、Ｚ軸方向の寸法を L_5 とし、Ｚ軸方向に垂直な方向の寸法を L_8 とする。好ましくは、略矩形形状の領域８５は、Ｚ軸方向の寸法 L_9 が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法 L_5 の１０％から１５％の範囲であり、Ｚ軸に垂直な方向の寸法 L_{10} が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法 L_8 の１６％から２２％の範囲である。好ましくは、略台形状の領域８６は、Ｚ軸方向の寸法 L_{11} が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法 L_5 の１０％から１５％の範囲であり、Ｚ軸に垂直な方向の短辺８６ａの寸法 L_{12} が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法 L_8 の１８％から２４％の範囲であり、Ｚ軸に垂直な方向の長辺８６ｂの寸法 L_{13} が、連続した電流経路によって囲まれる輪郭の寸法 L_8 の３１％から３７％の範囲である。

40

【００９７】

第１のメインコイル１の板状メインコイル１ａと同様に、第３のメインコイル５のペア５ａ，５ｂについても、決定された流れ関数の等高線パターンに基づいて、貫通溝のパターンまたは後述する線状の導体を配置することができる。

[効果]

【００９８】

50

以上、本発明の傾斜磁場コイルの設計方法によると、ターゲットフィールド法に基づいて、コイル面内の電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように流れ関数を決定する。ターゲットフィールド法に基づいて、従来では、より少ない電流値で設定性能を達成できるように、コイル面内の電流密度分布の大きさの二乗和の項を評価関数に加え、この評価関数の値が最小化するように流れ関数を決定していたところ、本発明では、電流密度分布の大きさの単純和の項を含む多項式の評価関数の値が減少するように、流れ関数を決定する。これにより、コイルの寸法を同程度に維持しながら、コイルの性能を向上させることができ、MRI装置による撮像画像の解像度を向上させることができる。

【0099】

10

また、コイルの寸法とコイルの性能とはトレードオフの関係にあることから、本発明の傾斜磁場コイルの設計方法によると、コイルが発生する磁場の均一性や線形性、ロールオーバー値を同程度に維持しながら、コイルの寸法をより小型化することができる。

【0100】

上記したトレードオフの関係から、一般的には、傾斜磁場コイルが小型化されると、コイルが発生する傾斜磁場の撮像領域における均一性が低下し、MRI装置による撮像画像にアーティファクトが生じて撮像画像の解像度が低下する。これに対し、本発明の傾斜磁場コイルの設計方法によると、コイルが発生する磁場の均一性やロールオーバー値を撮像領域において同程度に維持しながら、コイルの寸法をより小型化することができ、撮像画像に生じるアーティファクトの発生を抑えることができる。

20

【0101】

傾斜磁場コイルが小型化されると、コイルのインダクタンスが低下し、傾斜磁場のより高いスルースピードを達成することができる。これにより、コイルに流す電流を短時間で増加または減少して、印加しようとする傾斜磁場を、少ない電流で素早く、より短時間で切り替えることが可能となり、より高いデューティサイクルでの撮像が可能となる。例えば脳の神経機能の接続関係を探求する手法である拡散テンソルマッピングでは、傾斜磁場をより高いデューティサイクルで印加することにより、信号の減少を抑えることが可能となり、拡散テンソルマッピングにおける撮像画像の解像度を向上させることが可能となる。

[その他の形態]

【0102】

30

以上、本発明を特定の実施形態によって説明したが、本発明は上記した実施形態に限定されるものではない。

【0103】

ターゲットフィールド法において、コイル面の領域を分割する際に適用する方法は、上記した境界要素法に適用されない。コイル面の領域の分割には、ターゲットフィールド法において知られている、領域を分割する種々の方法を適用することができる。

【0104】

傾斜磁場コイルの設計を行う一連の手順において、目標とする性能値は磁場の非線形性に限定されない。例えば、ステップS3の手順において、残留渦電流の割合（単位：パーセント）を、目標とする性能値として設定してもよいし、ステップS3の手順において、磁場の非線形性と残留渦電流の割合との両方を、目標とする性能値として設定してもよい。目標とする性能値として残留渦電流の割合を設定する場合、性能値評価点97は、対向して配置される二つのコイル面91a, 91bの外側にも設定する。この場合、性能値評価点97を設定する空間領域98は、対向して配置される二つのコイル面91a, 91bを包含する。

40

【0105】

また、目標とする性能値として、性能値評価点における磁場の非線形性を算出する際の方法は、上記説明した方法に限定されない。磁場の非線形性は、例えばビオ・サバル（Biot-Savart）の法則を用いて算出することもできる。まず、ステップS5において決定した流れ関数の一定ステップ毎の等高線に基づいて、電流密度を代表するコイルの巻き線

50

パターンを決定する。次に、決定した巻き線パターンにビオ・サバールの法則を適用して磁場計算を行う。最後に、ビオ・サバールの法則に基づいて計算した磁場強度から、決定した流れ関数に基づくコイルの巻き線パターンの性能値として、性能値評価点における磁場の非線形性を算出する。

【 0 1 0 6 】

線形領域 9 9 の形状は扁球状の回転楕円体に限定されない。線形領域 9 9 の形状は、長球状の回転楕円体であってもよいし、球状であってもよい。

【 0 1 0 7 】

傾斜磁場コイル 1 0 0 において、複数の貫通孔 7 が配置される位置は、第 3 の支持体 9 c に限定されない。複数の貫通孔 7 が配置される位置は、第 1 の支持体 9 a ないし第 3 の支持体 9 c の少なくともいずれかであればよい。

10

【 0 1 0 8 】

傾斜磁場コイル 1 0 0 において、補正コイルの組が配置される位置は第 2 の支持体 9 b に限定されない。補正コイルの組は、第 1 の支持体 9 a から第 3 の支持体 9 c のいずれかに配置されればよい。例えば、補正コイルの組の全ての組が、第 2 の支持体 9 b および第 3 の支持体 9 c のいずれかに配置されてもよい。第 2 の支持体 9 b 内へ配置される補正コイルの組と、第 3 の支持体 9 c 内へ配置される補正コイルの組との組み合わせは、 B_0 補正コイルが B_0 補正コイルのシールドコイルの内側に配置される限りにおいては、どのような組み合わせであってもよい。

【 0 1 0 9 】

20

コイルの巻き線パターンに対応する連続した電流経路を画定する方法は、所定の幅を有する切り込みまたは切り欠きを、板状の導電性部材に形成する方法に限定されない。コイルの巻き線パターンは、流れ関数の一定ステップ毎の等高線に基づいて決定すればよく、コイルの巻き線パターンは、連続した電流経路として機能する線状の導体を、流れ関数の等高線に沿って配置することにより画定してもよい。例示的には、線状の導体には、銅線等の種々の導電性金属線を用いることができる。コイルは、流れ関数の等高線に沿って配置された線状の導体に、例えばエポキシ樹脂を含浸することにより形成することができる。

【 0 1 1 0 】

軸方向の Z 方向に傾斜磁場を生成する第 3 の傾斜コイルには、Z 軸方向の傾斜磁場コイルとして知られている代表的なコイル型である、マックスウェル・コイル・ペアを用いることができる。例えば、第 3 のメインコイル 5 のペア 5 a , 5 b および第 3 のシールドコイル 6 のペア 6 a , 6 b の各々に、マックスウェル・コイル・ペアを用いることができる。

30

【実施例】

【 0 1 1 1 】

上記した実施形態における設計方法に基づいて、計算機を用いた数値計算により傾斜磁場コイルを設計した。コイルの設計は、磁場の非線形性および残留渦電流の割合の両方を、目標とする性能値として行った。設計した傾斜磁場コイルにおける各種コイルの配置および寸法は、図 1 ないし図 1 0、および表 1 に示す通りであった。数値計算により設計した巻き線パターンに基づいて傾斜磁場コイルを製造し、製造した傾斜磁場コイルについて性能評価を行った。性能評価の結果を表 2 に示す。表中、D S V は diameter spherical volume の略語であり、関心領域のサイズに対応している。

40

【 0 1 1 2 】

比較例として、米国 General Electric Company 製の 3 T M R I システムについて公開されている性能評価の結果を表 2 に示す。実施例に係る傾斜磁場コイルの内径および外径の寸法は、比較例に係る傾斜磁場コイルと同程度の寸法である。以下、表 2 を用いて、実施例と比較例との間でコイルの性能について検討した。

【 0 1 1 3 】

【表 2】

	比較例			実施例		
	X	Y	Z	X	Y	Z
軸						
内径/外径 [mm]		420/590			420/590	
傾斜磁場効率度 [$\mu\text{T/m/A}$]	129	129	133	140	140	138
インダクタンス [μH] @DC	234	204	204	222	224	165
抵抗値 [$\text{m}\Omega$] @DC	124	114	87	85	85	83
DSV 220*220*200: 磁場非線形性				-6.64%/+3.0%	-6.33%/+3.29%	-8%/+4%
DSV 220*220*200: 磁場不均一性				+16.5%/-21.5%	+21.3%/-22.12%	+14%/-28%
DSV 250*250*210: 磁場非線形性	17%	17%	17%	-7.39%/+3.16%	-6.71%/+6.29%	-8.43%/+4.84%
DSV 250*250*210: 磁場不均一性				+20%/-24%	+33.8%/-46.7%	+19%/-28.68%
残留渦電流 [%]	0.2	0.2	0.2	+0.09	+0.08	-0.2
磁場の中心からの ロールオーバー値 [mm]				143	143	150

【0114】

磁場の非線形性について検討した。実施例では、磁場の非線形性を表す数値は比較例よりも低下しており、同程度の寸法であっても磁場の線形性は向上していた。残留渦電流について検討した。実施例では、残留渦電流による磁場の発生を示す割合は、比較例よりも低下していた。横断面であるX方向およびY方向については、残留渦電流の発生は約半分となっていた。

【0115】

これらのことから、実施例に係る傾斜磁場コイルは、比較例に係る傾斜磁場コイルと比較して、磁場の線形性が向上し残留渦電流による磁場の発生割合が低下していることが確

10

20

30

40

50

認された。

【 0 1 1 6 】

傾斜磁場効率、インダクタンス、および抵抗値について検討した。実施例では、横断面であるX方向およびY方向における傾斜磁場効率は、 $140 [\mu T / m / A]$ であり、比較例の性能値である $129 [\mu T / m / A]$ から向上していた。また、実施例では、横断面におけるコイルのインダクタンスは $224 [\mu H]$ であり、比較例の性能値である $234 [\mu H]$ から向上していた。また、実施例では、横断面におけるコイルの抵抗値は $85 [m]$ であり、比較例の性能値である $124 [m]$ から向上していた。

【 0 1 1 7 】

これらのことから、実施例に係る傾斜磁場コイルについて、比較例に係る傾斜磁場コイルと同程度の寸法を維持しながら、性能が向上していることが確認された。なお、コイルの性能を比較するにあたり、インダクタンスの値および抵抗値の値は、横断面であるX方向およびY方向の性能値のうち、動作のボトルネックとなる側の性能値を用いて行った。

10

【 符号の説明 】

【 0 1 1 8 】

- 1 (1 a , 1 b) 第1のメインコイル (板状メインコイル)
- 2 (2 a , 2 b) 第1のシールドコイル (板状シールドコイル)
- 3 (3 a , 3 b) 第2のメインコイル (板状メインコイル)
- 4 (4 a , 4 b) 第2のシールドコイル (板状シールドコイル)
- 5 (5 a , 5 b) 第3のメインコイル
- 6 (6 a , 6 b) 第3のシールドコイル
- 7 貫通孔
- 8 (8 a , 8 b , 8 c) 冷却管
- 9 (9 a , 9 b , 9 c) 支持体
- 8 1 第1の貫通溝
- 8 2 第2の貫通溝
- 8 3 第3の貫通溝
- 8 5 略矩形状の領域
- 8 6 略台形状の領域
- 9 1 (9 1 a , 9 1 b) 仮想的なコイル面
- 9 7 性能値評価点
- 9 8 性能値評価点を設定する空間領域
- 9 9 線形領域
- 1 0 0 傾斜磁場コイル
- 1 0 1 等高線パターン

20

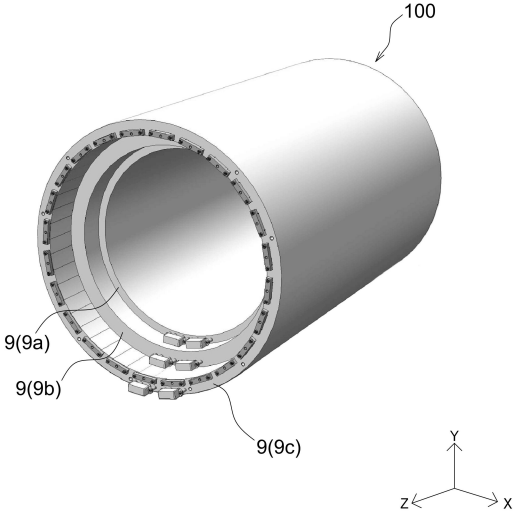
30

40

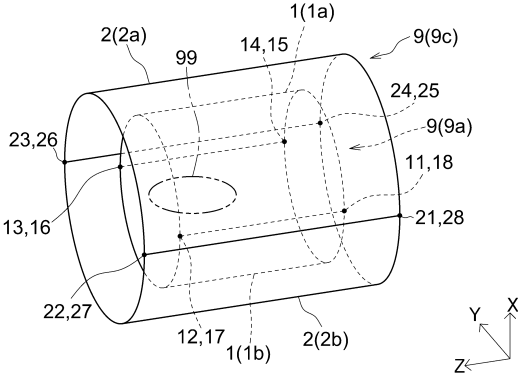
50

【図面】

【図 1】

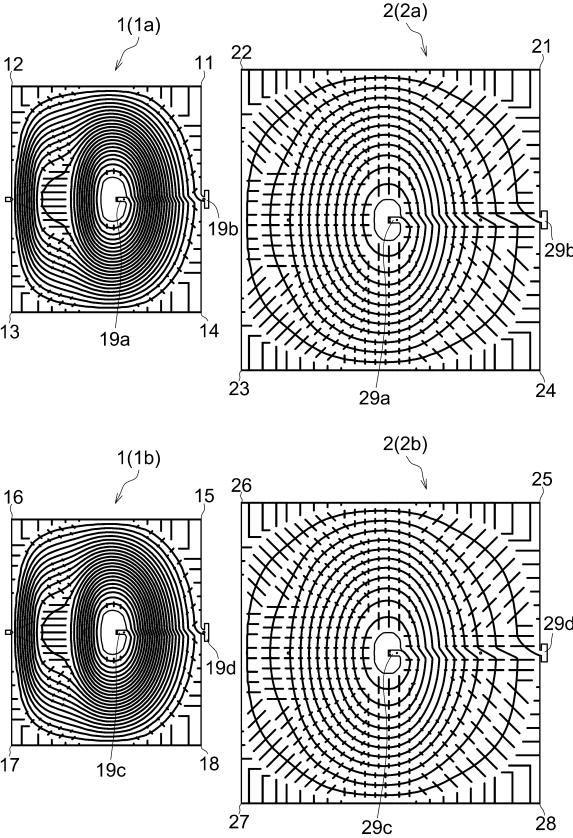


【図 2】

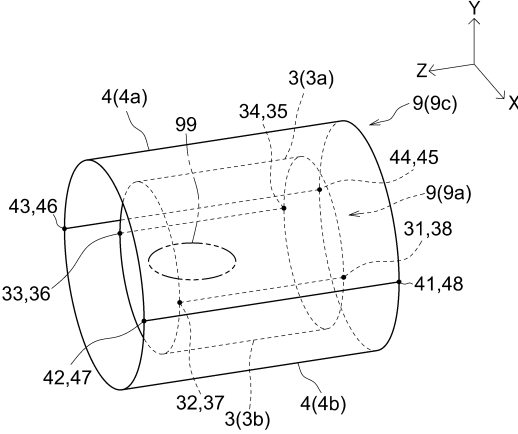


10

【図 3】



【図 4】



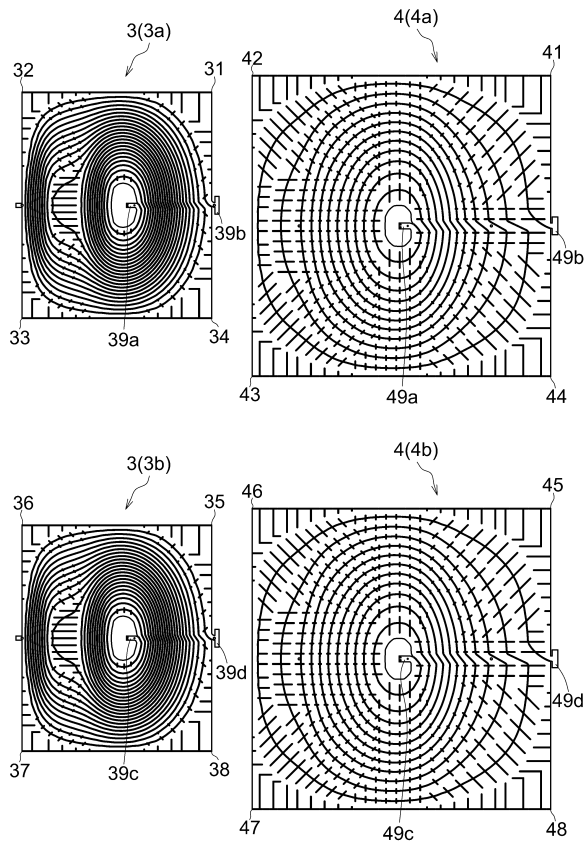
20

30

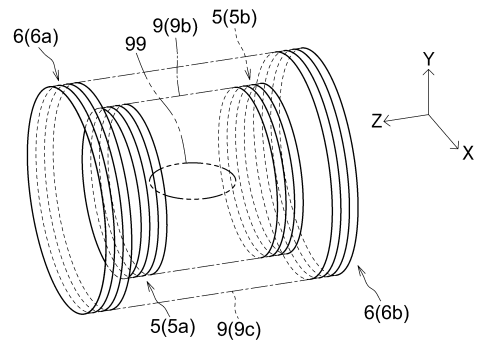
40

50

【 図 5 】



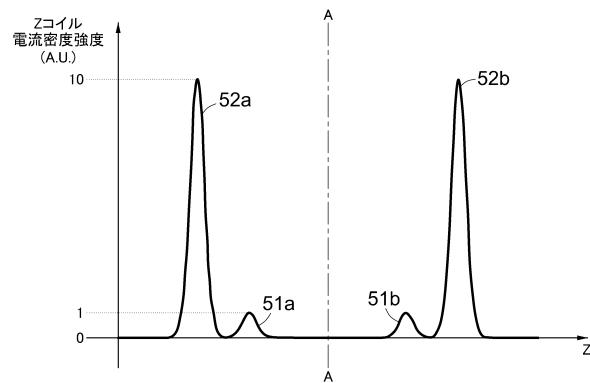
【 図 6 】



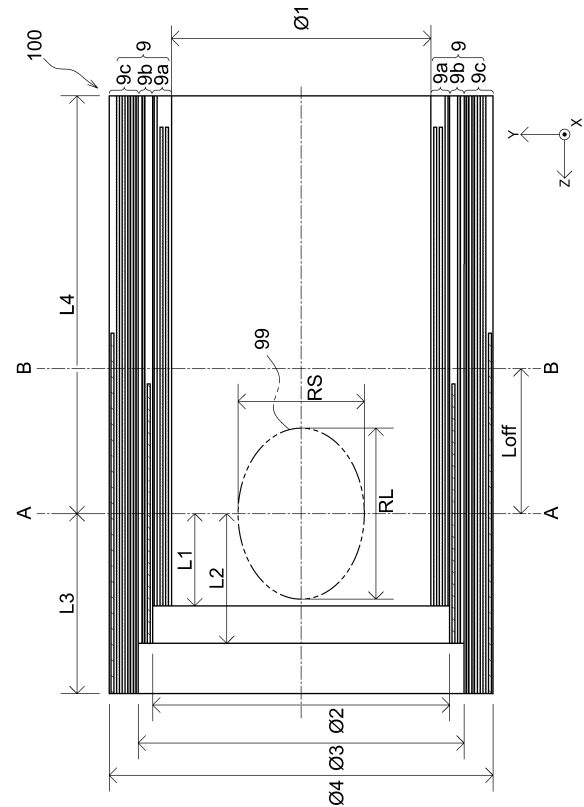
10

20

【圖 7】



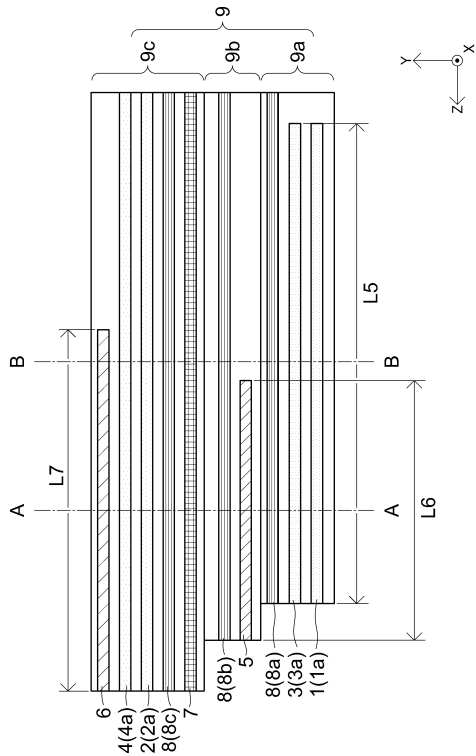
【 図 8 】



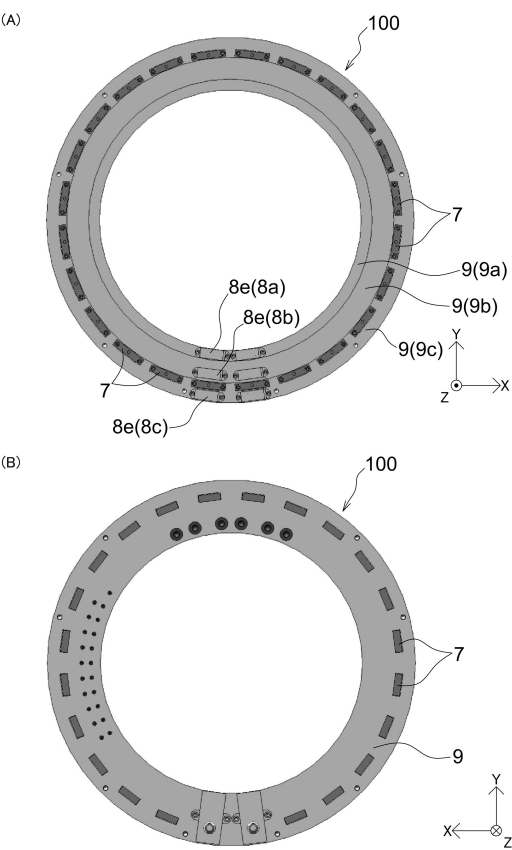
30

40

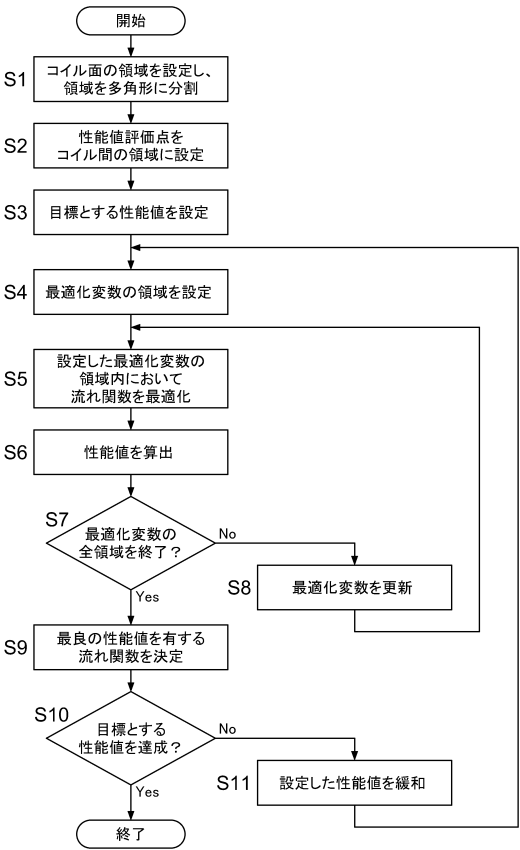
【図 9】



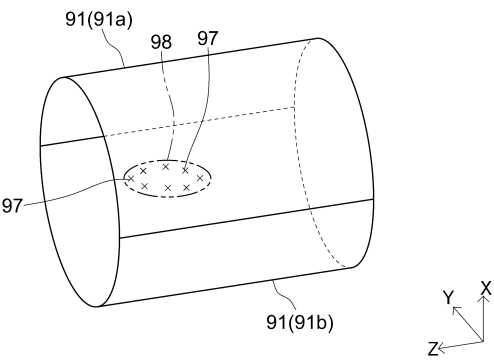
【図 10】



【図 11】



【図 12】



10

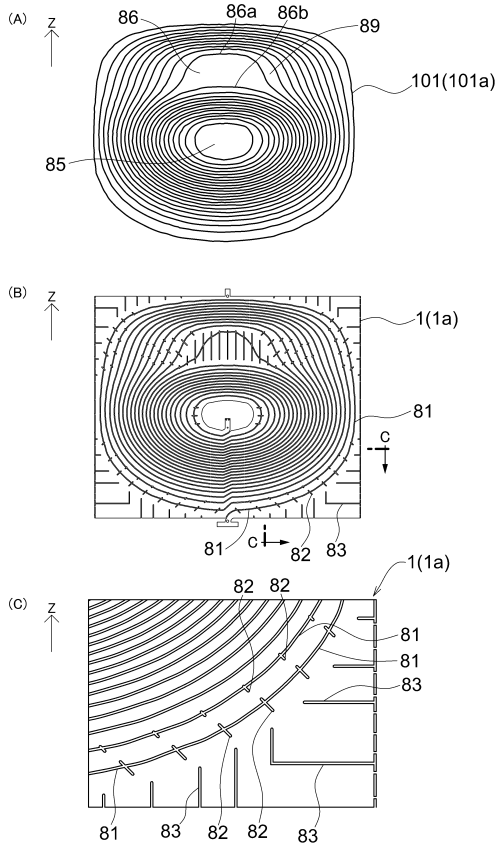
20

30

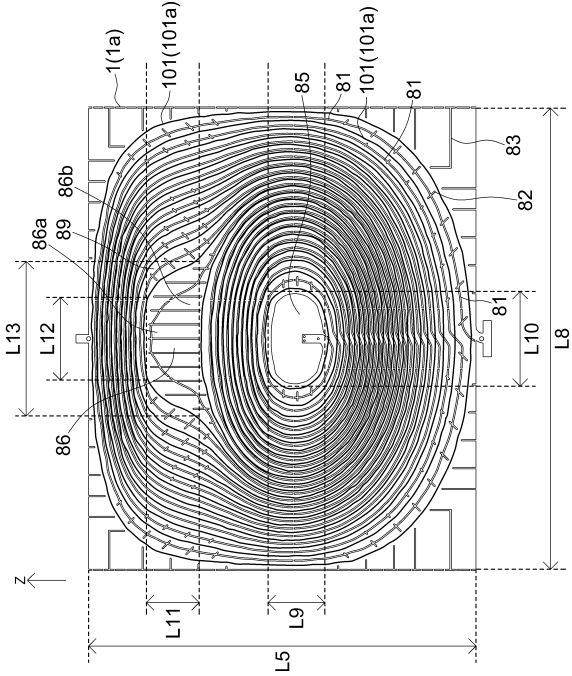
40

50

【図 1 3】



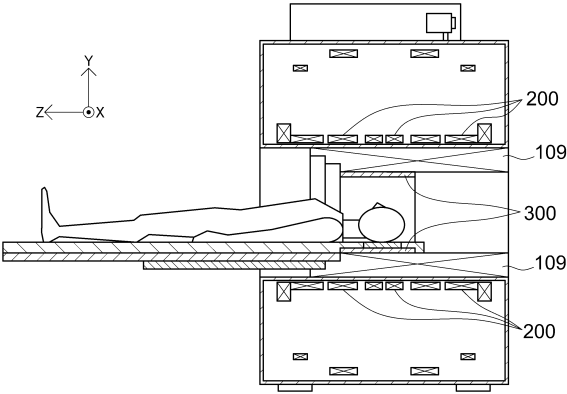
【図 1 4】



10

20

【図 1 5】



30

40

50

フロントページの続き

d i c a l I n s t r u m e n t s 内

審査官 蔵田 真彦

(56)参考文献

特開 2 0 1 2 - 2 2 2 (J P , A)

特表 2 0 1 8 - 5 1 9 8 6 3 (J P , A)

TOMASI, D , Stream Function Optimization for Gradient Coil Design , Magnetic Resonance i
n Medicine , 2001年03月10日 , vol.45, no.3 , pp.505-512Xin, X et al. , Inverse design of an organ-oriented RF coil for open, vertical-field, MR-guided,
focused ultrasound , Magnetic Resonance Imaging , 2012年07月15日 , vol.30, no.10 , pp.
1519-1526ROSTISLAV A. L, REINHOLD L , A Stream Function Method for Gradient Coil Design , Conc
epts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering) , 2005年07月15日, Vol. 26B(1) , pp.67-80 , <https://doi.org/10.1002/cmr.b.20040>

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

A 6 1 B 5 / 0 5 5

G 0 1 R 3 3 / 2 0 - 3 3 / 6 4