

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6615530号  
(P6615530)

(45) 発行日 令和1年12月4日 (2019. 12. 4)

(24) 登録日 令和1年11月15日 (2019. 11. 15)

(51) Int. Cl.

F I

**A 6 1 B 5/055 (2006.01)**

A 6 1 B 5/055 3 4 0

A 6 1 B 5/055 3 6 0

A 6 1 B 5/055 3 7 6

請求項の数 11 (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2015-158581 (P2015-158581)  
 (22) 出願日 平成27年8月10日 (2015. 8. 10)  
 (65) 公開番号 特開2017-35306 (P2017-35306A)  
 (43) 公開日 平成29年2月16日 (2017. 2. 16)  
 審査請求日 平成30年7月20日 (2018. 7. 20)

(73) 特許権者 594164542  
 キヤノンメディカルシステムズ株式会社  
 栃木県大田原市下石上1385番地  
 (74) 代理人 110001771  
 特許業務法人虎ノ門知的財産事務所  
 (72) 発明者 高井 雄紀  
 栃木県大田原市下石上1385番地 東芝  
 メディカルシステムズ株式会社内  
 (72) 発明者 古舘 直幸  
 栃木県大田原市下石上1385番地 東芝  
 メディカルシステムズ株式会社内  
 (72) 発明者 長島 正晃  
 栃木県大田原市下石上1385番地 東芝  
 メディカルシステムズ株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気共鳴イメージング装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

温度を取得する取得部と、

磁気共鳴イメージングが行われる撮像シーケンスの情報に基づいて、前記撮像シーケンスが実行された場合の、傾斜磁場コイルの消費エネルギーの推定値を算出する第1算出部と、

前記取得部が取得した前記温度と、前記消費エネルギーの推定値とに基づいて、前記撮像シーケンスの実行とともに変化する、傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する第2算出部と

を備え、

前記第2算出部は、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイルの導線パターン間の相互作用の大きさに基づいて、前記傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する、磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 2】

前記第2算出部は、前記取得部が取得した前記温度と、前記消費エネルギーの推定値とに基づいて、前記傾斜磁場コイルが、第1の温度から第2の温度になるまでの時間を算出する、請求項1に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 3】

前記第1の温度は、前記撮像シーケンスを開始可能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像開始可能温度であり、前記第2の温度は、前記撮像シーケンスを継続可

能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像限界温度であり、

前記第2算出部は、前記傾斜磁場コイルが前記撮像開始可能温度から前記撮像限界温度になるまでの時間を算出することにより、所定の画質のもとで撮像が可能になる時間の最小値を算出する、請求項2に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項4】

前記第1算出部は、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイルの消費エネルギーを推定する、請求項1に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項5】

前記第2算出部は、前記温度と、前記消費エネルギーの推定値とに基づいて、前記撮像シーケンスを実行し続けた場合に収束する温度である収束温度の推定値を算出し、前記収束温度の推定値に基づいて、前記傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する、請求項1に記載の磁気共鳴イメージング装置。

10

【請求項6】

前記第2算出部は、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイルの消費エネルギーの推定値と、前記各軸の傾斜磁場コイルの配置に基づいて定められた所定の係数との線形和に基づいて温度上昇の推定値を算出し、前記温度上昇の推定値に基づいて、前記収束温度の推定値を算出する、請求項5に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項7】

前記撮像シーケンスの実行可否を前記撮像シーケンスの実行前に判定する判定部と、前記判定部が前記撮像シーケンスを実行可と判定した場合に、前記撮像シーケンスを実行するシーケンス制御部とを更に備え、

20

前記判定部は、前記収束温度が、所定の温度より低い場合は、前記撮像シーケンスを実行可と判定する、

請求項5又は6に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項8】

前記第2算出部は、更に、前記撮像シーケンスの実行が終了した時点での温度の推定値を算出する、請求項1～7のいずれか一つに記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項9】

前記撮像シーケンスの実行可否を前記撮像シーケンスの実行前に判定する判定部と、前記判定部が前記撮像シーケンスを実行可と判定した場合に、前記撮像シーケンスを実行するシーケンス制御部とを更に備え、

30

前記判定部は、前記撮像シーケンスの実行が終了した時点での温度の推定値が、所定の温度より低い場合は、前記撮像シーケンスを実行可と判定する、

請求項8に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項10】

前記第2算出部は、各時刻における前記傾斜磁場コイルの前記消費エネルギーの推定値から熱伝導方程式を算出し、前記熱伝導方程式を所定の境界条件のもとで解くことで、前記傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する、請求項1～9のいずれか一つに記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項11】

40

前記第1算出部は、電源に接続され自己インダクタンスを有する第1の回路と、前記第1の回路との間で相互インダクタンスを有する閉回路を少なくとも一つ有する第2の回路とを有する、前記傾斜磁場コイルを含む回路に対する等価回路を用いて、前記撮像シーケンスの情報に基づいて前記閉回路に流れる電流値を算出し、前記電流値に基づいて、前記傾斜磁場コイルの消費エネルギーの推定値の時間変化を算出する、請求項1～10のいずれか一つに記載の磁気共鳴イメージング装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、磁気共鳴イメージング装置に関する。

50

## 【背景技術】

## 【0002】

磁気共鳴イメージングにおいて、傾斜磁場コイルの温度が所定の限界温度を上回ると傾斜磁場コイルの故障につながる可能性がある。この点を解決するため、例えば温度計を傾斜磁場コイルに設置して、計測した温度が限界温度を上回った場合、撮像シーケンスを停止するという方法が考えられる。また、撮像シーケンスを実行した場合に傾斜磁場コイルの温度が所定の限界温度を上回る恐れのないような撮像シーケンスを実行するという方法も考えられる。

## 【0003】

しかし、前者の方法の場合、温度が限界を上回った場合不意に撮像シーケンスが停止してしまうので、無駄が大きい。また、後者の方法の場合、磁気共鳴イメージング装置の有する潜在能力を最大限に引き出していない。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0004】

【特許文献1】特開2010-4910号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

本発明が解決しようとする課題は、撮像シーケンスに応じて傾斜磁場コイルの温度を推定することのできる磁気共鳴イメージング装置を提供することである。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0006】

実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置は、取得部と、第1算出部と、第2算出部とを備える。取得部は、温度を取得する。第1算出部は、磁気共鳴イメージングが行われる撮像シーケンスの情報に基づいて、前記撮像シーケンスが実行された場合の、傾斜磁場コイルの消費エネルギーの推定値を算出する。第2算出部は、前記取得部が取得した前記温度と、前記消費エネルギーの推定値とに基づいて、前記撮像シーケンスの実行とともに変化する、傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する。第2算出部は、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイルの導線パターン間の相互作用の大きさに基づいて、前記傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0007】

【図1】図1は、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の構成を示すブロック図である。

【図2】図2は、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の行う処理の手順を示したフローチャートである。

【図3】図3は、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の行う処理について説明した図である。

【図4】図4は、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の行う処理について説明した図である。

【図5】図5は、第2の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の行う処理の手順を示したフローチャートである。

【図6】図6は、第2の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の行う処理について説明した図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0008】

以下、添付図面を用いて、実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置について詳細に説明する。

## 【0009】

(第1の実施形態)

まず初めに、図1を用いて、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の全体構成について説明する。図1は、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の構成を示すブロック図である。

【0010】

図1に示すように、磁気共鳴イメージング装置100は、静磁場磁石101と、シムコイル130と、傾斜磁場コイル102と、傾斜磁場電源103と、寝台104と、寝台制御回路105と、送信コイル106と、送信回路107と、受信コイル108と、受信回路109と、シーケンス制御回路110と、温度センサ50と、計算機システム120とを備える。なお、磁気共鳴イメージング装置100に被検体P(例えば、人体)は含まれない。

10

【0011】

静磁場磁石101は、中空の円筒形状に形成された磁石であり、内部の空間に一様な静磁場を発生する。静磁場磁石101は、例えば、永久磁石、超伝導磁石等である。

【0012】

シムコイル130は、静磁場磁石101の内側において中空の円筒形状に形成されたコイルであり、図示されないシムコイル電源に接続され、シムコイル電源から供給される電源により、静磁場磁石101が発生した静磁場を均一化する。

【0013】

傾斜磁場コイル102は、中空の円筒形状に形成されたコイルであり、静磁場磁石101及びシムコイル130の内側に配置される。傾斜磁場コイル102は、互いに直交するX、Y、Zの各軸に対応する3つのコイルが組み合わされて形成されており、これら3つのコイルは、傾斜磁場電源103から個別に電流を受けて、X、Y、Zの各軸に沿って磁場強度が変化する傾斜磁場を発生させる。なお、Z軸方向は、静磁場と同方向とする。また、Y軸方向は、鉛直方向とし、X軸方向は、Z軸及びY軸に垂直な方向とする。

20

【0014】

なお、傾斜磁場コイル102によって発生するX、Y、Z各軸の傾斜磁場は、例えば、スライス選択用傾斜磁場Gs、位相エンコード用傾斜磁場Ge、及びリードアウト用傾斜磁場Grを形成する。スライス選択用傾斜磁場Gsは、任意に撮像断面を決めるために利用される。位相エンコード用傾斜磁場Geは、空間的位置に応じてMR信号の位相を変化させるために利用される。リードアウト用傾斜磁場Grは、空間的位置に応じてMR信号の周波数を変化させるために利用される。また、図示されない冷却装置が傾斜磁場コイル102の近傍に設置されてもよい。冷却装置の冷却材としては、例えば水が用いられる。

30

【0015】

傾斜磁場電源103は、傾斜磁場コイル102に電流を供給する。この処理については後述する。

【0016】

寝台104は、被検体Pが載置される天板104aを備え、寝台制御回路105による制御のもと、天板104aを、被検体Pが載置された状態で傾斜磁場コイル102の空洞(撮像口)内へ挿入する。通常、寝台104は、長手方向が静磁場磁石101の中心軸と平行になるように設置される。寝台制御回路105は、計算機システム120による制御のもと、寝台104を駆動して天板104aを長手方向及び上下方向へ移動する。

40

【0017】

送信コイル106は、傾斜磁場コイル102の内側に配置され、送信回路107からRF(Radio Frequency)パルスの供給を受けて、高周波磁場を発生する。送信回路107は、対象とする原子核の種類及び磁場の強度で決まるラーモア周波数に対応するRFパルスを送信コイル106に供給する。

【0018】

受信コイル108は、傾斜磁場コイル102の内側に配置され、高周波磁場の影響によって被検体Pから発せられるMR信号を受信する。受信コイル108は、MR信号を受信

50

すると、受信したMR信号を受信回路109へ出力する。例えば、受信コイル108は、1以上、典型的には複数のコイルエレメントを有するコイルアレイである。

【0019】

受信回路109は、受信コイル108から出力されるMR信号に基づいてMRデータを生成する。具体的には、受信回路109は、受信コイル108から出力されるMR信号に対して、前置増幅、中間周波変換、位相検波、低周波増幅、フィルタリング等の各種信号処理を施した後、各種信号処理が施されたデータに対してアナログ/デジタル変換する。これにより、受信回路109は、デジタル化された複素数データであるMRデータを生成する。受信回路109が生成したMRデータは、生データとも呼ばれる。

【0020】

また、受信回路109は、生成したMRデータをシーケンス制御回路110へ送信する。なお、受信回路109は、静磁場磁石101や傾斜磁場コイル102等を備える架台装置側に備えられていてもよい。ここで、第1の実施形態において、受信コイル108の各コイルエレメントから出力されるMR信号は、適宜分配合成されることで、チャンネル等と呼ばれる単位で受信回路109に出力される。このため、MRデータは、受信回路109以降の後段の処理においてチャンネル毎に取り扱われる。コイルエレメントの総数とチャンネルの総数との関係は、同一の場合もあれば、コイルエレメントの総数に対してチャンネルの総数が少ない場合、あるいは反対に、コイルエレメントの総数に対してチャンネルの総数が多い場合もある。なお、分配合成のタイミングは、上述したタイミングに限られるものではない。MR信号若しくはMRデータは、後述する処理回路150が画像生成機能122による処理を行う前までに、チャンネル単位に分配合成されればよい。

【0021】

シーケンス制御回路110は、計算機システム120から送信される撮像シーケンスの情報に基づいて、傾斜磁場電源103、送信回路107及び受信回路109を駆動することによって、被検体Pの撮像を行う。撮像シーケンスとは、磁気共鳴イメージング装置100による検査に含まれる複数のプロトコルそれぞれに対応するパルスシーケンスを指す。撮像シーケンスの情報には、傾斜磁場電源103が傾斜磁場コイル102に供給する電源の強さや電源を供給するタイミング、送信回路107が送信コイル106に送信するRFパルスの強さやRFパルスを印加するタイミング、受信回路109がMR信号を検出するタイミング等が定義される。

【0022】

なお、シーケンス制御回路110は、傾斜磁場電源103、送信回路107及び受信回路109、シムコイル電源等を駆動して被検体Pを撮像した結果、受信回路109からMRデータを受信すると、受信したMRデータを計算機システム120へ転送する。

【0023】

温度センサ50は、例えば温度を取得する温度計である。温度センサ50は、温度センサ50が設置された場所の温度を取得すると、シーケンス制御回路110に温度情報を送信する。シーケンス制御回路110は、温度情報を温度センサ50から受信すると、計算機システム120の処理回路150に温度情報を送信する。処理回路150は、取得機能12により、シーケンス制御回路110を通じて、温度を取得する。温度センサ50としては、赤外線放射温度計等の非接触式の温度計であってもよく、また、サーミスタ温度計や熱電対温度計等の接触式の温度計であってもよい。

【0024】

計算機システム120は、磁気共鳴イメージング装置100の全体制御や、データ収集、画像生成等を行う。計算機システム120は、処理回路150、記憶回路123、入力装置124、ディスプレイ125を備える。また、処理回路150は、第1算出機能10a、第2算出機能10b、判定機能11、取得機能12、インタフェース機能121、画像生成機能122、制御機能126を有する。第1算出機能10a、第2算出機能10b及び判定機能11の具体的処理については後述する。

【0025】

10

20

30

40

50

第1の実施形態では、第1算出機能10a、第2算出機能10b、判定機能11、取得機能12、インタフェース機能121、画像生成機能122、制御機能126にて行われる各処理機能は、コンピュータによって実行可能なプログラムの形態で記憶回路123へ記憶されている。処理回路150はプログラムを記憶回路123から読み出し、実行することで各プログラムに対応する機能を実現するプロセッサである。換言すると、各プログラムを読みだした状態の処理回路150は、図1の処理回路150内に示された各機能を有することになる。なお、図1においては単一の処理回路150にて、第1算出機能10a、第2算出機能10b、判定機能11、取得機能12、インタフェース機能121、画像生成機能122、制御機能126にて行われる処理機能が実現されるものとして説明したが、複数の独立したプロセッサを組み合わせることで処理回路150を構成し、各プロセッサがプログラムを実行することにより機能を実現するものとしても構わない。

10

#### 【0026】

換言すると、上述のそれぞれの機能がプログラムとして構成され、1つの処理回路が各プログラムを実行する場合であってもよいし、特定の機能が専用の独立したプログラム実行回路に実装される場合であってもよい。なお、シーケンス制御回路110、処理回路150の有する第1算出機能10a、第2算出機能10b、判定機能11、取得機能12は、それぞれシーケンス制御部、第1算出部、第2算出部、判定部、取得部の一例である。

#### 【0027】

上記説明において用いた「プロセッサ」という文言は、例えば、CPU(Central Processing Unit)、GPU(Graphical Processing Unit)或いは、特定用途向け集積回路(Application Specific Integrated Circuit:ASIC)、プログラマブル論理デバイス(例えば、単純プログラマブル論理デバイス(Simple Programmable Logic Device:SPLD)、複合プログラマブル論理デバイス(Complex Programmable Logic Device)、及びフィールドプログラマブルゲートアレイ(Field Programmable Gate Array:FPGA))等の回路を意味する。プロセッサは記憶回路123に保存されたプログラムを読み出し実行することで機能を実現する。

20

#### 【0028】

なお、記憶回路123にプログラムを保存する代わりに、プロセッサの回路内にプログラムを直接組み込むよう構成しても構わない。この場合、プロセッサは回路内に組み込まれたプログラムを読み出し実行することで機能を実現する。なお、寝台制御回路105、送信回路107、受信回路109等も同様に、上記のプロセッサ等の電子回路により構成される。

30

#### 【0029】

処理回路150は、インタフェース機能121により、撮像シーケンスの情報をシーケンス制御回路110へ送信し、シーケンス制御回路110からMRデータを受信する。また、処理回路150は、インタフェース機能121を通じて、MRデータを受信すると、受信したMRデータを記憶回路123に格納する。

#### 【0030】

処理回路150は、画像生成機能122により、インタフェース機能121を通じて受信したMRデータや、記憶回路123に保管されたデータを用いて、画像の生成を行う。なお、処理回路150は、画像生成機能122によって得られた画像は、必要に応じてディスプレイ125や記憶回路123に送信する。

40

#### 【0031】

処理回路150は、制御機能126により、磁気共鳴イメージング装置100の全体制御を行う。例えば、処理回路150は、制御機能126により、入力装置124を介して操作者から入力される撮像条件に基づいて撮像シーケンスの情報を生成し、生成した撮像シーケンスの情報をシーケンス制御回路110に送信することによって撮像を制御する。

#### 【0032】

50

記憶回路 1 2 3 は、処理回路 1 5 0 がインタフェース機能 1 2 1 を通じて受信した M R データや、画像生成機能 1 2 2 により生成された画像データ等を記憶する。例えば、記憶回路 1 2 3 は、R A M (Random Access Memory)、フラッシュメモリ等の半導体メモリ素子、ハードディスク、光ディスク等である。

【 0 0 3 3 】

入力装置 1 2 4 は、操作者からの各種指示や情報入力を受け付ける。入力装置 1 2 4 は、例えば、マウスやトラックボール等のポインティングデバイス、あるいはキーボード等の入力デバイスである。

【 0 0 3 4 】

ディスプレイ 1 2 5 は、処理回路 1 5 0 における制御機能 1 2 6 による制御のもと、画像データ等の各種の情報を表示する。ディスプレイ 1 2 5 は、例えば、液晶表示器等の表示デバイスである。

10

【 0 0 3 5 】

次に、実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 に係る背景について簡単に説明する。

【 0 0 3 6 】

磁気共鳴イメージングにおいて、傾斜磁場コイルの急激な温度上昇は傾斜磁場コイルの故障につながるおそれがある。そのため、例えば温度計を傾斜磁場コイルに設置して温度が一定以上になると撮像を停止するという方法が考えられる。

【 0 0 3 7 】

20

しかし、温度が一定以上になると撮像が停止してしまうので、無駄が大きい。一方で、撮像が停止しないように安全マージンを確保して撮像を行うと、磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 の性能を最大限に引き出すことができない。従って、撮像シーケンスに対して、傾斜磁場コイルの温度上昇値の予測値を予め算出し、算出した結果に基づいて撮像シーケンスの調整を行うのが望ましい。

【 0 0 3 8 】

ここで、傾斜磁場電源の消費電力から温度上昇値を推定する方法も考えられる。しかし、消費された傾斜磁場電源の消費電力のうち、一部が、熱エネルギーに転換され、温度上昇に寄与するに過ぎない。このような事情から、傾斜磁場電源の消費電力から温度上昇値を正確に推定するのは難しい。

30

【 0 0 3 9 】

そこで、処理回路 1 5 0 は、第 1 算出機能 1 0 a により、所定の回路モデルを用いて傾斜磁場電源のエネルギー損失を算出する。続いて、処理回路 1 5 0 は、第 2 算出機能 1 0 b により、傾斜磁場コイル 1 0 2 の温度の推定値を算出する。処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、傾斜磁場コイル 1 0 2 の温度の推定値を基に、撮像シーケンスの実行可否を判定する。

【 0 0 4 0 】

すなわち、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 は、処理回路 1 5 0 を有する。処理回路 1 5 0 は、取得機能 1 2 により、温度を取得する。処理回路 1 5 0 は、第 1 算出機能 1 0 a により、磁気共鳴イメージングが行われる撮像シーケンスの情報に基づいて、撮像シーケンスが実行された場合の、傾斜磁場コイルの消費エネルギーの推定値の時間変化を算出する。処理回路 1 5 0 は、第 2 算出機能 1 0 b により、取得した温度と、算出した消費エネルギーの推定値とに基づいて、各時刻における傾斜磁場コイルの温度の推定値を算出する。

40

【 0 0 4 1 】

かかる点について、適宜図 3 及び図 4 を参照しながら、図 2 を用いて説明する。図 2 は、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 の行う処理の手順を示したフローチャートである。また、図 3 及び図 4 は、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 の行う処理について説明した図である。

【 0 0 4 2 】

50

まず初めに、処理回路 150 は、第 1 算出機能 10a により、磁気共鳴イメージングが行われる撮像シーケンスの情報に基づいて、撮像シーケンスが実行された場合の、傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値の時間変化を算出する（ステップ S101）。

【0043】

具体的には、図 3 に示されているように、処理回路 150 は、第 1 算出機能 10a により、傾斜磁場電源 103 に接続され自己インダクタンスを有する第 1 の回路 30 と、第 1 の回路 30 との間で相互インダクタンスを有する閉回路 31 及び閉回路 32 を有する第 2 の回路とを、傾斜磁場コイル 102 を含む回路に対する等価回路とする。まず、上記の点について簡単に説明する。

【0044】

等価回路とは、複雑な電気的特性を示す素子を、その特性を表す最小限の要素の組み合わせ回路として単純化したものである。処理回路 150 は、傾斜磁場コイル 102 の複雑な電気的特性を、等価回路として表現する。

【0045】

ここで、傾斜磁場コイル 102 の複雑な電気的特性の例としては、例えば表皮効果が挙げられる。ここで、表皮効果とは、交流電流が導体中を流れるとき、導体表面において電流密度が高く、導体表面から離れるにしたがって電流密度が低下する効果のことをいう。高周波電流が導体を流れるときに、導体内の相互インダクタンスに起因する起電力により、導体表面から離れた場所では、電流が遮蔽され、電流密度が低下する。この結果、交流電流においては電流密度が表皮深さ程度の浅い領域に集中するため、電気抵抗が増加する。典型的には、表皮効果としては、周波数の平方根に比例して、交流の電気抵抗が増加する。また、傾斜磁場コイル 102 の複雑な電気的特性の例としては、例えば渦電流による熱損失が挙げられる。ここで、渦電流とは、急激な磁場の変化により導体内に生じる誘導電流のことである。導体内に生じた渦電流は、導体中でジュール熱に変換され、傾斜磁場コイル 102 を発熱させる。

【0046】

図 3 に示されている回路は、傾斜磁場電源 103 により電圧が印加された傾斜磁場コイル 102 の電気的特性を示す等価回路の一例である。ここで、傾斜磁場コイル 102 を含む等価回路は、例えば、第 1 の回路 30 と、閉回路 31 及び閉回路 32 からなる第 2 の回路とからなる。第 1 の回路 30 は、傾斜磁場電源 103 に接続され、抵抗値 R を有する抵抗 38 と、自己インダクタンス  $L_1$  を有するコイル 33 とからなる。閉回路 31 は、抵抗値  $R_2$  を有する抵抗 36 と、自己インダクタンス  $L_2$  を有するコイル 34 とからなる。閉回路 32 は、抵抗値  $R_3$  を有する抵抗 37 と、自己インダクタンス  $L_3$  を有するコイル 35 とからなる。また、コイル 33 とコイル 34 の間には、相互インダクタンス  $M_{12}$  が、コイル 33 とコイル 35 の間には、相互インダクタンス  $M_{13}$  とが存在する。

【0047】

ここで、時刻を  $t$  とし、第 1 の回路 30 に流れる電流を  $i_1(t)$ 、閉回路 31 に流れる電流を  $i_2(t)$ 、閉回路 32 に流れる電流を  $i_3(t)$  とし、閉回路 31 及び閉回路 32 について回路の方程式を立てると、次の式 (1) が成り立つ。

【数 1】

$$\left. \begin{aligned} L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 i_2(t) &= M_{12} \frac{di_1(t)}{dt} \\ L_3 \frac{di_3(t)}{dt} + R_3 i_3(t) &= M_{13} \frac{di_1(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

【0048】

ここで、第 1 の回路 30 に対して閉回路 31 及び閉回路 32 が相互インダクタンスを通じて及ぼす効果は、第 1 の回路 30 に流れる電流  $i_1(t)$  に対して高次摂動の効果であるから一般に小さく、例えば省略可能である。

10

20

30

40

50



## 【 0 0 4 9 】

また、ここで、電流  $i_1(t)$  は、傾斜磁場のパルスシーケンスの波形に対応する量である。すなわち、パルスシーケンスの波形変化とは、電流  $i_1(t)$  の時間変化である。

## 【 0 0 5 0 】

続いて、処理回路 150 は、第 1 算出機能 10a により、撮像シーケンスの情報に基づいて閉回路 31 及び閉回路 32 に流れる電流値 ( $i_2(t)$  及び  $i_3(t)$ ) を算出する。

## 【 0 0 5 1 】

具体的には、式 (1) は、 $t$  に関して 1 階線形微分方程式であるから、任意の電流  $i_1(t)$  の関数系に対して解くことができ、電流  $i_2(t)$  及び電流  $i_3(t)$  を、電流  $i_1(t)$  の関数として、表現することができる。

10

## 【 0 0 5 2 】

一例として、電流  $i_1(t)$  が、時刻  $t = 0$  で値  $i_0$  をとり、一定の速度で電流値が増大していく場合、電流  $i_1(t)$  は、次の式 (2) のように表される。

## 【 数 2 】

$$i_1(t) = At + i_0 \quad \dots(2)$$

## 【 0 0 5 3 】

この場合、微分方程式を解くと、電流  $i_2(t)$  及び電流  $i_3(t)$  は、次の式 (3) のように表される。

## 【 数 3 】

20

$$\left. \begin{aligned} i_2(t) &= \frac{AM_{12}}{R_2} \left[ 1 - e^{-\frac{R_2}{L_2}t} \right] + i_2(0)e^{-\frac{R_2}{L_2}t} \\ i_3(t) &= \frac{AM_{13}}{R_3} \left[ 1 - e^{-\frac{R_3}{L_3}t} \right] + i_3(0)e^{-\frac{R_3}{L_3}t} \end{aligned} \right\} \dots(3)$$

## 【 0 0 5 4 】

従って、処理回路 150 は、式 (3) を用いることにより、閉回路 31 及び閉回路 32 に流れる電流値を算出できる。

30

## 【 0 0 5 5 】

続いて、処理回路 150 は、第 1 算出機能 10a により、算出された電流値に基づいて、傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値の時間変化を算出する。

## 【 0 0 5 6 】

具体的には、処理回路 150 は、各時刻において等価回路上で消費されるジュール熱の大きさを、傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値として算出する。ここで、第 1 の回路 30 における抵抗 38、閉回路 31 における抵抗 36、閉回路 32 における抵抗 37 において、エネルギーが消費される。ここで、抵抗 38 の大きさは一般に小さくなるように設計されることが多い。従って、処理回路 150 は、例えば、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値  $E(t)$  を、閉回路 31 における消費エネルギー  $E_2(t)$  及び閉回路 32 における消費エネルギー  $E_3(t)$  を主に考慮して、式 (4) のように算出する。

40

## 【 数 4 】

$$\begin{aligned} E(t) &= E_2(t) + E_3(t) \\ &= R_2 i_2(t)^2 + R_3 i_3(t)^2 \quad \dots(4) \end{aligned}$$

## 【 0 0 5 7 】

このように、処理回路 150 は、第 1 算出機能 10a により、傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値の時間変化を算出することができる。

50

## 【 0 0 5 8 】

なお、等価回路の回路構成としては、上記構成は一例を示したに過ぎず、実施形態は上述の例に限られない。例えば、閉回路の個数は2個には限られず、例えば1個でも良いし3個でもよい。また、処理回路150は、等価回路として、誘電損失等の効果を取り入れるためコンデンサを含む回路を用いても良い。また、処理回路150は、閉回路についての方程式のみを用いる例を説明したが、第1の回路についての方程式を用いても良い。

## 【 0 0 5 9 】

続いて、処理回路150は、取得機能12により、温度（初期温度）を取得する。具体的には、処理回路150は、所定の位置に設定された温度センサ50から、シーケンス制御回路110を通じて、当該所定の位置の温度（初期温度）を取得する。当該所定の位置としては、磁気共鳴イメージング装置100内部の位置であっても良いし、磁気共鳴イメージング装置100外部の位置であってもよい。続いて、処理回路150は、第2算出機能10bにより、取得した初期温度と、ステップS101で第1算出機能10aにより算出した消費エネルギーの推定値とに基づいて、収束温度の推定値を算出する（ステップS102）。ここで、収束温度とは、撮像シーケンスを実行し続けた場合に、十分な時間が経過した後（無限時間経過後）当該所定の位置において収束すると期待される温度である。収束温度においては、傾斜磁場コイル102と、外気や冷却装置等との間で、熱的な定常状態に達している。すなわち、収束温度においては、傾斜磁場コイル102の発熱を通じて単位時間あたりに流入するエネルギーと、外部に熱が排出されることを通じて単位時間あたりに流出するエネルギーとが等しくなっている。

## 【 0 0 6 0 】

処理回路150は、第2算出機能10bにより、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の導線パターン間の相互作用の大きさに基づいて、収束温度を算出する。

## 【 0 0 6 1 】

かかる状況は、例えば、式（5）に示されている。

## 【 数 5 】

$$\begin{bmatrix} \text{Temp}_{\text{sat\_a}} \\ \text{Temp}_{\text{sat\_b}} \\ \text{Temp}_{\text{sat\_c}} \end{bmatrix} = \alpha \times \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Temp}_{\text{def\_a}} \\ \text{Temp}_{\text{def\_b}} \\ \text{Temp}_{\text{def\_c}} \end{bmatrix} \quad \cdots(5)$$

## 【 0 0 6 2 】

処理回路150は、第2算出機能10bにより、温度推定位置a、b、cにおける収束温度 $\text{Temp}_{\text{sat\_a}}$ 、 $\text{Temp}_{\text{sat\_b}}$ 、 $\text{Temp}_{\text{sat\_c}}$ を、それぞれ式（5）の右辺を評価することにより算出する。

## 【 0 0 6 3 】

ここで、温度推定位置a、b、cは、温度の推定の対象となる位置であり、式（5）の例では、異なる3個の位置が選ばれている。また、 $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ は、それぞれ、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の消費エネルギーの推定値である。また、行列 $\beta = \{\beta_{ij}\}$ （ $i = 1 \sim 3$ 、 $j = 1 \sim 3$ ）は、各軸の傾斜磁場コイル102の配置に基づいて定められた所定の係数を成分とする行列である。このとき、行列 $\beta$ は、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の導線パターン間の相互作用の大きさを表す量である。また、係数 $\alpha$ は、傾斜磁場コイル102の消費エネルギーに対する、温度推定位置における温度上昇の寄与の大きさを表す係数である。すなわち、係数 $\alpha$ が大きいほど、各温度推定位置は、傾斜磁場コイル102の影響を受けやすく、逆に係数 $\alpha$ が小さいほど、各温度推定位置は、傾斜磁場コイル102の影響を受けにくい。係数 $\alpha$ は、傾斜磁場の出力波形や、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の出力電流比に応じて変化する。また、 $\text{Temp}_{\text{def}}$ は、処理回路150が取得機能12により取得した初期温度である。初期温度は傾斜磁場コイル102の無負荷の状態での温度であり、冷却装置の能力に依存する。

## 【 0 0 6 4 】

式(5)の意味を簡単に説明する。式(5)の左辺は、各温度推定位置における収束温度の推定値であり、式(5)の右辺は、各温度推定位置における温度上昇の推定値に、初期温度を加算したものである。また、各温度推定位置における温度上昇の推定値は、傾斜磁場コイル102の消費エネルギーに対する、温度推定位置における温度上昇の寄与の大きさを表す係数、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の導線パターン間の相互作用の大きさを表す行列、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の消費エネルギーの推定値 $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ を乗じたものである。

【0065】

換言すると、処理回路150は、第2算出機能10bにより、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の消費エネルギーの推定値と、各軸の傾斜磁場コイル102の配置に基づいて定められた所定の係数との線形和に基づいて温度上昇の推定値を算出し、温度上昇の推定値に基づいて、収束温度の推定値を算出する。

10

【0066】

なお、行列を用いることにより、処理回路150は、例えばX軸及びY軸の傾斜磁場コイル102の両方に同時に電流を流した場合の収束温度を算出することができる。従って、行列は、熱伝導方程式のように、コイルの各軸の導線パターン間の相互作用を厳密に求めるものではないものの、例えば実験的に得られたデータに基づいて求めた係数群という意味で、コイルの各軸の導線パターンの相互作用を考慮したものと考えることができる。

【0067】

20

なお、行列の具体的な表式の例としては、例えば、処理回路150は、各温度推定位置と、各軸の傾斜磁場コイル102の位置との距離の二乗に反比例する係数を、行列の係数としてもよい。これは、例えば所定の位置で所定の湧き出しQを持つ熱源に係る熱が、所定の面を単位時間あたりに通過する熱量は、熱源からの距離の二乗に反比例することによる。また、別の例として、行列の具体的な表式の例としては、温度センサ50の位置を各温度推定位置とし、処理回路150は、温度センサ50から得られた温度情報をもとに、行列の具体的な表式を定めても良い。

【0068】

なお、温度推定位置として、処理回路150が、第2算出機能10bにより、3点の位置について温度を推定する場合について説明したが、実施形態はこれに限られない。例えば、処理回路150は、第2算出機能10bにより、温度推定位置の数として、2点、4点、5点、10点の位置について温度を推定してもよい。

30

【0069】

続いて、処理回路150は、算出した収束温度の推定値に基づいて、第2算出機能10bにより、熱上昇曲線を算出する(ステップS103)。処理回路150は、例えば、第2算出機能10bにより、熱上昇曲線を、式(6)に示される数式を用いて算出する。

【数6】

$$\text{Temp} = (\text{Temp}_{\text{sat}} - \text{Temp}_{\text{st}}) (1 - e^{-\alpha * \text{Time}}) + \text{Temp}_{\text{st}} \quad \cdots (6)$$

【0070】

40

式(6)において、 $\text{Temp}_{\text{st}}$ は、撮像シーケンスの開始時点での温度である撮像開始温度である。また、 $\text{Time}$ は、時刻を表す。また、 $\alpha$ は、温度が、収束温度に向かって指数関数的に近づいていく時定数の逆数を表す。すなわち、 $\alpha$ は、収束温度に向かって温度が指数関数的に近づいていく速度を表す。また、 $\text{Temp}_{\text{sat}}$ は、収束温度を表す。また、 $\text{Temp}$ は、時刻 $\text{Time}$ における温度を表す。

【0071】

式(6)は、例えば熱伝導方程式より導かれる。式(6)は、傾斜磁場コイル102の温度が、収束温度に向かって指数関数的に近づいていくような時間変化を示している。図4は、式(6)の振る舞いをグラフ化したものである。グラフの縦軸は温度を、横軸は時刻を表す。グラフ40は、各時刻における傾斜磁場コイル102の温度の推定

50

値を示す。傾斜磁場コイル102の温度は、 $t = 0$ において撮像開始温度 $Temp_{st}$ となる。傾斜磁場コイル102の温度は、 $t =$ において収束温度 $Temp_{sat}$ となる。傾斜磁場コイル102の温度は、 $0 < t <$ において、収束温度 $Temp_{sat}$ に向かって指数関数的に近づいていく。

#### 【0072】

すなわち、処理回路150は、第2算出部10bにより、収束温度 $Temp_{sat}$ の推定値に基づいて、各時刻における傾斜磁場コイル102の温度の推定値を算出する。換言すると、処理回路150は、第2算出部10bにより、ステップS102及びステップS103の処理により、X軸、Y軸及びZ軸の各軸の傾斜磁場コイル102の導線パターン間の相互作用の大きさに基づいて、各時刻における傾斜磁場コイル102の温度の推定値を算出する。

10

#### 【0073】

続いて、処理回路150は、撮像シーケンスの実行が終了した時点での温度の推定値を算出する(ステップS104)。処理回路150は、例えば式(6)に、所定の時刻を代入することにより、撮像シーケンスの実行が終了した時点での温度の推定値を算出する。

#### 【0074】

続いて、処理回路150は、判定機能11により、撮像シーケンスの実行可否を当該撮像シーケンスの実行前に判定する。一例として、処理回路150は、判定機能11により、収束温度 $Temp_{sat}$ が、所定の温度(撮像限界温度 $Temp_{lim}$ )より低い場合は、撮像シーケンスを実行可と判定する。また別の例として、処理回路150は、判定機能11により、撮像シーケンスの実行が終了した時点での温度の推定値が、所定の温度(撮像限界温度 $Temp_{lim}$ )より低い場合は、撮像シーケンスを実行可と判定する。

20

#### 【0075】

続いて、処理回路150は、判定機能11による判定結果に基づいて、撮像を制御する(ステップS105)。具体的には、処理回路150が判定機能11により、撮像シーケンスを実行可と判定した場合には、処理回路150は、撮像シーケンスを実行する旨の制御信号をシーケンス制御回路110に送信する。処理回路150が判定機能11により、撮像シーケンスを実行可と判定した場合には、制御信号を受信したシーケンス制御回路110は、撮像シーケンスを実行する。また、撮像シーケンスを実行可と判定した場合には、処理回路150は、撮像条件の変更をユーザから制約なく受け付け、受け付けた撮像条件に対応する制御信号をシーケンス制御回路110に送信する。

30

#### 【0076】

一方、処理回路150は、判定機能11により、撮像シーケンスを実行不可と判定した場合は、ディスプレイ125に、当該判定結果を表示し、入力装置124を通じてユーザに対して撮像条件の再設定を要求する。例えば、処理回路150は、再設定後の撮像条件により算出した、撮像シーケンスの実行が終了した時点での温度の推定値が、撮像限界温度 $Temp_{lim}$ を超えないような撮像条件の再設定を要求する。続いて、処理回路150は、入力装置124を通じてユーザから撮像条件の再設定を受け付けると、受け付けられた撮像条件に従って、ステップS101からステップS105の処理を再度行う。処理回路150は、判定機能11により、撮像シーケンスを実行可と判断するまで、ステップS101からステップS105の処理を繰り返す。また、別の例として、処理回路150は、判定機能11により、撮像シーケンスを実行不可と判定した場合、ディスプレイ125に、当該判定結果を表示する。また、処理回路150は、温度センサ50を通じて、温度を取得する。処理回路150は、温度センサ50から取得した温度が撮像が可能な温度より大きい間、撮像を行わない。ユーザは、温度センサ50から取得した温度が撮像が可能な温度になるまで待機する。この場合、シーケンス制御回路110は、ユーザを待機させる時間である待機時間が経過した後、撮像シーケンスを実行する。処理回路150は、ディスプレイ125を通じて、待機時間の長さをユーザに提示してもよい。

40

#### 【0077】

シーケンス制御回路110が撮像シーケンスを実行すると、処理回路150は、実行し

50

た撮像シーケンスに基づいて、画像生成機能 122 により医用画像を生成する。

【0078】

第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 によれば、撮像シーケンスの実行前に温度上昇値が推定できる。従って、撮像シーケンスの実行前に、温度が撮像限界温度を超えるか否かを判断する。磁気共鳴イメージング装置 100 は、撮像シーケンス実行により温度が撮像限界温度を超えないと判断した場合、撮像シーケンスをそのまま実行する。一方、磁気共鳴イメージング装置 100 は、撮像シーケンス実行により温度が撮像限界温度を超えると判断した場合、撮像シーケンスに係るパラメータを変更する。これにより、ユーザは磁気共鳴イメージングを温度上昇による撮像停止により中断されることなくスムーズに行うことができる。また、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 によれば、多用な構造を持つシーケンスすべてに対して傾斜磁場電源 103 の出力を制御することができる。また、ユーザは、大きな傾斜磁場強度が必要なシーケンスに対しても、温度上昇値を把握できることで、撮像シーケンスの持つ最大限の性能、撮像時間を引き出すことができるようになる。

10

【0079】

(第 2 の実施形態)

第 1 の実施形態では、処理回路 150 が、第 2 算出機能 10b により、収束温度  $T_{emp\_s\_at}$  の推定値を算出し、算出した推定値に基づいて、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出する例について説明した。第 2 の実施形態でも、第 1 の実施形態と同様に、処理回路 150 が、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出するが、それを用いて異なる場面に応用する。なお、第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 と、特に示した構成を除き、同様の構成を備えることができる。第 1 の実施形態及び第 2 の実施形態とで同様の構成を有する部分については、詳細な説明は省略する。

20

【0080】

第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 と同様の構成を備える。更に、処理回路 150 は、初期温度と、消費エネルギーの推定値の時間変化とに基づいて、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度が、撮像開始可能温度から、撮像限界温度になるまでの時間を算出する。

【0081】

かかる点について、適宜図 6 を参照しながら、図 5 を用いて説明する。図 5 は、第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の行う処理の手順を示したフローチャートである。また、図 6 は、第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の行う処理について説明した図である。

30

【0082】

処理回路 150 は、第 1 の実施形態と同様に、第 1 算出機能 10a により、各傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーを算出する (ステップ S101)。また、処理回路 150 は、第 2 算出機能 10b により、収束温度 (ステップ S102) 及び熱上昇曲線 (ステップ S103) を算出する。これらのステップについては第 1 の実施形態と同様であるから詳細な説明は省略する。

40

【0083】

処理回路 150 は、第 2 算出機能 10b により、撮像シーケンスを開始可能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像開始可能温度を、第 1 の温度  $T_{emp\_max\_s\_t}$  として、例えばユーザから入力装置 124 を通じて取得する (ステップ S106)。また、処理回路 150 は、第 2 算出機能 10b により、撮像シーケンスを継続可能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像限界温度を、第 2 の温度  $T_{emp\_lim}$  として、例えばユーザから入力装置 124 を通じて取得する (ステップ S107)。続いて、処理回路 150 は、取得機能 12 により取得した初期温度と、第 1 算出機能 10a により算出した消費エネルギーの推定値の時間変化とに基づいて、第 2 算出機能 10b により、各時刻における傾斜磁場コイル 102 が、第 1 の温度 (撮像開始可能温度) から第 2 の

50

温度（撮像限界温度）になるまでの時間を算出する。（ステップS108）。

【0084】

具体的には、処理回路150は、第2算出機能10bにより、第1の温度から第2の温度になるまでの時間を、式（7～9）に基づいて算出する。

【数7】

$$\text{min Time Limit} = \text{Time}_{\text{lim}} - \text{Time}_{\text{max\_st}} \quad \cdots(7)$$

【数8】

$$\text{Time}_{\text{lim}} = -\ln(1 - \text{Temp}_{\text{lim}}/\text{Temp}_{\text{sat}})/\alpha \quad \cdots(8)$$

10

【数9】

$$\text{Time}_{\text{max\_st}} = -\ln(1 - \text{Temp}_{\text{max\_st}}/\text{Temp}_{\text{sat}})/\alpha \quad \cdots(9)$$

【0085】

ここで、式（7）の左辺minTimeLimitは、傾斜磁場コイル102が、第1の温度（撮像開始可能温度）から第2の温度（撮像限界温度）になるまでの時間を表す。この量は、式（7）の右辺の2つの量 $\text{Time}_{\text{lim}}$ 及び $\text{Time}_{\text{max\_st}}$ の差で表すことができる。ここで、 $\text{Time}_{\text{lim}}$ 及び $\text{Time}_{\text{max\_st}}$ の表式は、それぞれ式（8）及び式（9）で表される。ここで、 $\text{Temp}_{\text{sat}}$ は、収束温度である。また、 $\text{Temp}_{\text{max\_st}}$ は、撮像シーケンスを開始可能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像開始可能温度（第1の温度）である。また、 $\text{Temp}_{\text{lim}}$ は、撮像シーケンスを継続可能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像限界温度（第2の温度）である。

20

【0086】

かかる状況は、図6に示されている。図6は、式（7）～（9）について説明するための図である。図6において、傾斜磁場コイル102の温度変化曲線41が、横軸を時刻、縦軸を温度として示されている。傾斜磁場コイル102の温度は、時刻tが進むにつれて、前述の式（6）に従って、収束温度 $\text{Temp}_{\text{sat}}$ に向かって、指数関数的に近づいていく。傾斜磁場コイル102の温度は、直線42で表される時刻においては、撮像開始可能温度（第1の温度）である。また、傾斜磁場コイル102の温度は、直線43で表される時刻においては、撮像限界温度（第2の温度）である。従って、第1の温度から第2の温度までの時間minTimeLimitは、図6において、直線43で表される時刻と、直線42で表される時刻の差となる。（なお、 $\text{Temp}_{\text{sat}} < \text{Temp}_{\text{lim}}$ の場合は、系の温度が永遠に $\text{Temp}_{\text{lim}}$ に到達しない。従って、処理回路150は、minTimeLimitの値を、「無限」と設定する。あるいは、処理回路150は、minTimeLimitの値を、所定の長さの時間（例：15分）に設定する。）

30

【0087】

ここで、直線43で表される時刻 $\text{Time}_{\text{lim}}$ は、式（6）の左辺に、 $\text{Temp} = \text{Temp}_{\text{lim}}$ を代入してTimeについて解けば求めることができる。また、直線42で表される時刻 $\text{Time}_{\text{max\_st}}$ は、式（6）の左辺に、 $\text{Temp} = \text{Temp}_{\text{max\_st}}$ を代入してTimeについて解けば求めることができる。処理回路150は、第2算出機能10bにより、直線43で表される時刻と、直線42で表される時刻との差を取ることにより、式（7～9）として、第1の温度から第2の温度になるまでの時間を算出することができる。

40

【0088】

ここで、第1の温度の意味は以下の通りである。今、能動シミングを行う場合を考える。シミングは、初期温度 $\text{Temp}_{\text{def}}$ 前後で行われるが、種々の条件によって、高い温度で行われる場合もあれば、低い温度で行われることもある。撮像シーケンスを実行する場合、撮像を開始する温度が、初期温度付近である場合には問題がないが、撮像を開始する温度が初期温度よりもかなり高い場合には、シミング時の温度から大きく離れることで

50

磁場の不均一性があらわれることにより、画質の劣化が生じる。従って、画質の劣化を防ぐため、シーケンス制御回路 110 は、撮像を開始する温度が撮像開始可能温度（第 1 の温度）より高い場合には、撮像を開始しない。従って、撮像シーケンスを実行する場合において撮像が開始された場合、温度は撮像開始可能時間（第 1 の温度）より低いことが保証される。

【0089】

また、第 2 の温度の意味は以下の通りである。撮像シーケンスを継続可能な最大の温度として定められた所定の温度である撮像限界温度（第 2 の温度）を超えた場合、例えば傾斜磁場コイル 102 等に故障が生じる可能性があるため、それらの温度では、シーケンス制御回路 110 はもはや撮像シーケンスを継続可能ではない。従って、この場合は、シーケンス制御回路 110 は、撮像シーケンスを中止する。

10

【0090】

以上のことより、第 1 の温度から第 2 の温度までの時間  $\text{minTimeLimit}$  は、撮像シーケンス開始が第 1 の温度より低い温度で行われ、撮像シーケンスの中止が第 2 の温度で行われることから、撮像可能な時間として最低限保証されている時間になる。従って、ルーチン検査や同一条件で多数の患者を撮像したい場合、撮像時間が  $\text{minTimeLimit}$  を超えない時間とすることで、シミング終了時の温度などの詳細条件や撮像前の装置の温度状態によらず、安定して撮像を行うことができる。

【0091】

換言すると、処理回路 150 は、第 2 算出機能 10b により、傾斜磁場コイル 102 が、撮像開始可能温度  $\text{Temp}_{\text{max\_st}}$  から撮像限界温度  $\text{Temp}_{\text{lim}}$  になるまでの時間を算出することにより、所定の画質のもとで撮像が可能になる時間の最小値を算出する。これにより、第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、安定して撮像を行うことができる。

20

【0092】

（第 3 の実施形態）

第 1 の実施形態及び第 2 の実施形態では、処理回路 150 が、第 2 算出機能 10b により、定常状態となる収束温度  $\text{Temp}_{\text{sat}}$  を算出し、算出した収束温度を基に、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出する場合について説明した。実施形態は、これに限られない。例えば、処理回路 150 は、基礎方程式、例えば熱伝導方程式を直接解くことにより、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を直接算出してもよい。かかる場合、処理回路 150 は、図示しない第 2 算出機能 10b により、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値から熱伝導方程式を算出し、熱伝導方程式を所定の境界条件のもとで解くことで、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出してもよい。ここで、熱伝導方程式とは、式 (10) として知られる放物型偏微分方程式であり、不均一な温度の時間変化を理論的に考察する際の出発点となる方程式である。式 (10) において、温度  $\theta(x, t)$  は、三次元位置  $x$  及び時刻  $t$  の関数であって、温度を表す量である。また、式 (10) において、熱の湧き出し  $q(x, t)$  は、三次元位置  $x$  及び時刻  $t$  の関数であって、当該位置及び時刻に発生する熱源の熱量を表す量である。  $q(x, t)$  は、本実施形態では、処理回路 150 が、第 1 算出機能 10a により算出した、傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値の時間変化に対応する。また、左辺の係数  $a$  は、熱拡散率と呼ばれる所定の係数である。

30

40

【数 10】

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - a \nabla^2 \right) \theta(x, t) = q(x, t) \quad \cdots (10)$$

【0093】

ここで、熱伝導方程式に対して所定の境界条件を設定することで、冷却装置の効果を、熱伝導方程式のモデルに組み込むことができる。例えば、冷却材の冷却速度が一定で、境界上における熱流束が一定であると考えられる場合には、処理回路 150 は、熱

50

伝導方程式の境界条件として、ノイマン型境界条件を設定することができる。また、冷却材の熱容量が十分大きく、境界上での温度が一定であると考えられる場合においては、処理回路 150 は、熱伝導方程式の境界条件として、ディレクレ型境界条件を設定することができる。また、処理回路 150 は、必要に応じて、熱伝導方程式の境界条件として、混合境界条件を設定することができる。

【0094】

また、冷却装置の効果を、多層からなるモデルで表現してもよい。例えば、処理回路 150 は、冷却材（水）からなる第 1 層と、それ以外の第 2 層からなるモデルを構築し、それらを所定の境界条件のもとで解いても良い。

【0095】

このように境界条件が定まると、式 (10) の熱伝導方程式の解は、例えば、式 (10) の左辺の作用素の逆作用素であるグリーン関数を用いて求めることができる。特に、境界において円柱対称性などの高い対称性がある場合のグリーン関数は、問題が簡単化され、処理回路 150 は、ベッセル関数等を用いて所定の表式を書くことができる。したがって、ボアの形が円柱と仮定すると、処理回路 150 は、式 (10) の熱伝導方程式の解を所定の方法で厳密に得ることができる。ボアの形が楕円である場合でも同様である。

【0096】

また、境界の形状が円柱対称性を有しない場合等、対称性が低い場合においては、処理回路 150 は、式 (10) の微分方程式を差分法や有限要素法等、数値シミュレーションを用いて解いてもよい。また、処理回路 150 は、式 (10) に対してフーリエ変換を行うことにより、熱伝導方程式を解いても良い。

【0097】

このようにして、処理回路 150 は、解析的手法または数値的手法により、熱伝導方程式の解として、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出すると、第 2 算出機能 10b により、算出した推定値を基に、式 (5) 又は式 (6) のパラメータを算出してもよい。例えば、処理回路 150 は、第 2 算出機能 10b により、熱伝導方程式の解を基にして、式 (5) の係数、式 (5) の行列  $= \{ \quad \quad \quad \}$ 、式 (6) の Temp<sub>sat</sub>、式 (6) の定数等を算出してもよい。処理回路 150 は、更に、第 2 算出機能 10b により、このように算出されたパラメータを用いて、熱伝導方程式の解を算出した撮像シーケンス以外の撮像シーケンスを含む撮像シーケンスに対して、図 2 のステップ S102 からステップ S105 を実行して、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出する。

【0098】

このように、処理回路 150 は、例えば、まず、第 2 算出機能 10b により、基礎方程式である熱伝導方程式を、所定のテスト用撮像シーケンスのデータセットで解く。次に、処理回路 150 は、解かれた熱伝導方程式の解を基に、第 2 算出機能 10b が、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出するのに使用するための所定のパラメータを算出する。処理回路 150 は、最後に、第 2 算出機能 10b により、算出されたパラメータを基に、テスト用撮像シーケンス以外の撮像シーケンスを含む撮像シーケンスに対して、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出する。このように、処理回路 150 は、精密手法を用いて算出したパラメータを用いて計算負荷の小さい手法で各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値を算出する。従って、処理回路 150 は、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の温度の推定値の算出にかかる時間の短縮と計算精度との両立を可能にすることができる。

【0099】

上述した実施形態の中で示した処理手順に示された指示は、ソフトウェアであるプログラムに基づいて実行されることが可能である。汎用の計算機システムが、このプログラムを予め記憶しておき、このプログラムを読み込むことにより、上述した実施形態の磁気共鳴イメージング装置 100 による効果と同様な効果を得ることも可能である。上述した実施形態で記述された指示は、コンピュータに実行させることのできるプログラムとして、

10

20

30

40

50



磁気ディスク（フレキシブルディスク、ハードディスク等）、光ディスク（CD-ROM、CD-R、CD-RW、DVD-ROM、DVD±R、DVD±RW等）、半導体メモリ、又はこれに類する記録媒体に記録される。コンピュータ又は組み込みシステムが読み取り可能な記憶媒体であれば、その記憶形式は何れの形態であってもよい。コンピュータは、この記録媒体からプログラムを読み込み、このプログラムに基づいてプログラムに記述されている指示をプロセッサで実行させれば、上述した実施形態の磁気共鳴イメージング装置100と同様な動作を実現することができる。もちろん、コンピュータがプログラムを取得する場合又は読み込む場合はネットワークを通じて取得又は読み込んでよい。

【0100】

また、記憶媒体からコンピュータや組み込みシステムにインストールされたプログラムの指示に基づきコンピュータ上で稼働しているOS（オペレーティングシステム）や、データベース管理ソフト、ネットワーク等のMW（ミドルウェア）等が、上述した実施形態を実現するための各処理の一部を実行してもよい。

10

【0101】

更に、記憶媒体は、コンピュータあるいは組み込みシステムと独立した媒体に限らず、LAN（Local Area Network）やインターネット等により伝達されたプログラムをダウンロードして記憶又は一時記憶した記憶媒体も含まれる。

【0102】

また、記憶媒体は1つに限られず、複数の媒体から、上述した実施形態における処理が実行される場合も、実施形態における記憶媒体に含まれ、媒体の構成は何れの構成であってもよい。

20

【0103】

なお、実施形態におけるコンピュータ又は組み込みシステムは、記憶媒体に記憶されたプログラムに基づき、上述した実施形態における各処理を実行するためのものであって、パソコン、マイコン等の1つからなる装置、複数の装置がネットワーク接続されたシステム等の何れの構成であってもよい。

【0104】

また、実施形態におけるコンピュータとは、パソコンに限らず、情報処理機器に含まれる演算処理装置、マイコン等も含み、プログラムによって実施形態における機能を実現することが可能な機器、装置を総称している。

30

【0105】

以上述べた少なくとも一つの実施形態の磁気共鳴イメージング装置によれば、撮像シーケンスに応じて傾斜磁場コイルの温度を推定することができる。

【0106】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

40

【符号の説明】

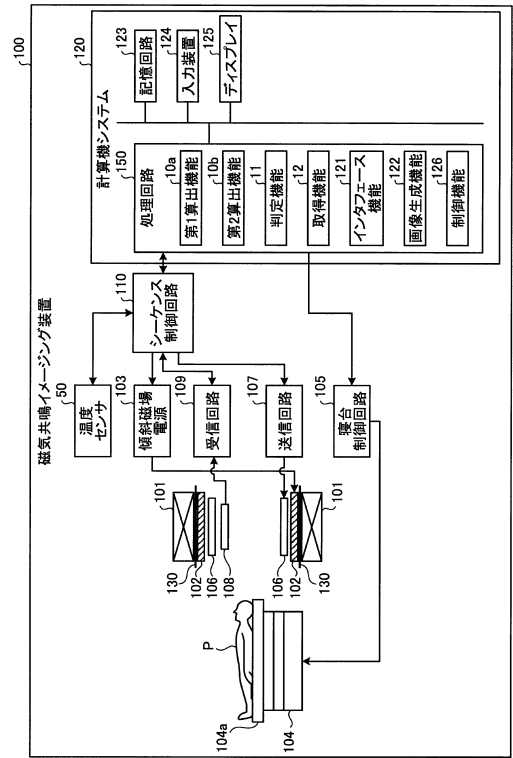
【0107】

12 取得機能

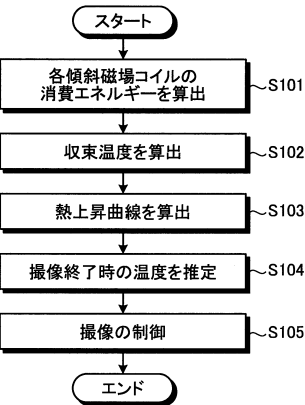
10a 第1算出機能

10b 第2算出機能

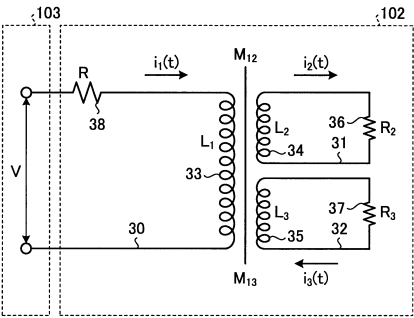
【図 1】



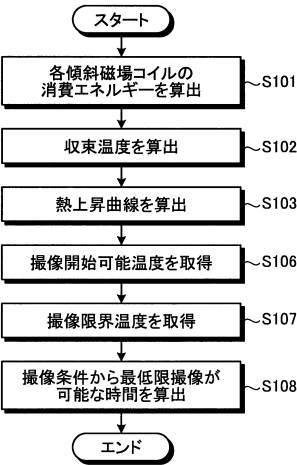
【図 2】



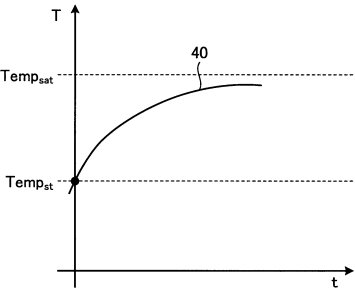
【図 3】



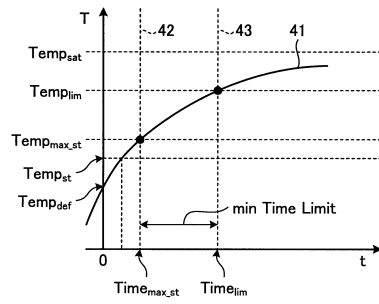
【図 5】



【図 4】



【図 6】



---

フロントページの続き

(72)発明者 待井 豊

栃木県大田原市下石上 1 3 8 5 番地 東芝メディカルシステムズ株式会社内

審査官 安田 明央

(56)参考文献 特開 2 0 0 3 - 3 1 9 9 1 9 ( J P , A )

特開 2 0 1 5 - 0 8 5 1 3 7 ( J P , A )

特開 2 0 1 3 - 0 0 0 1 7 3 ( J P , A )

米国特許出願公開第 2 0 1 3 / 0 0 0 9 6 4 1 ( U S , A 1 )

米国特許出願公開第 2 0 0 4 / 0 0 1 7 1 9 5 ( U S , A 1 )

米国特許出願公開第 2 0 1 5 / 0 1 2 3 6 6 1 ( U S , A 1 )

特開 2 0 1 4 - 0 0 0 3 4 6 ( J P , A )

特開 2 0 1 0 - 0 0 4 9 1 0 ( J P , A )

特開平 1 0 - 2 2 5 4 4 6 ( J P , A )

特開平 1 0 - 0 7 1 1 3 1 ( J P , A )

米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 0 0 9 1 5 1 ( U S , A 1 )

(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 / 5 8