

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-36420

(P2016-36420A)

(43) 公開日 平成28年3月22日(2016.3.22)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
A 6 1 B 5/055 (2006.01)	A 6 1 B 5/05 3 3 2	2 G 0 8 5
G 0 1 R 33/3875 (2006.01)	A 6 1 B 5/05 3 7 0	4 C 0 9 6
G 0 1 R 33/3815 (2006.01)	G 0 1 N 24/06 5 2 0 J	
G 0 1 R 33/387 (2006.01)	G 0 1 N 24/06 5 1 0 C	
H 0 5 H 7/04 (2006.01)	G 0 1 N 24/06 5 2 0 Y	

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 25 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2014-160051 (P2014-160051)
 (22) 出願日 平成26年8月6日(2014.8.6)

(71) 出願人 000005108
 株式会社日立製作所
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
 (71) 出願人 504151365
 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
 茨城県つくば市大穂1番地1
 (74) 代理人 110001807
 特許業務法人磯野国際特許商標事務所
 (72) 発明者 阿部 充志
 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号 株式会社日立製作所内
 (72) 発明者 佐々木 憲一
 茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内
 最終頁に続く

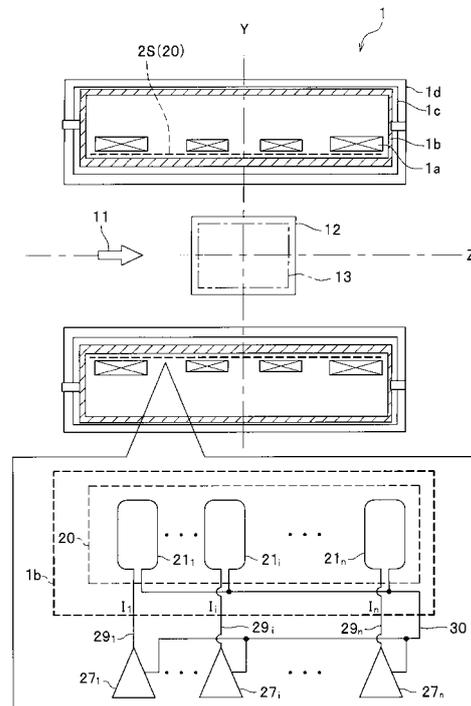
(54) 【発明の名称】 磁場調整装置、磁石装置および磁場調整方法

(57) 【要約】

【課題】高精度な磁場調整が可能で、取り扱いやすい磁場調整装置、この磁場調整装置を備える磁石装置、および、磁場調整方法を提供する。

【解決手段】複数のシムコイル21が配置されるシムコイルアレイ20と、シムコイル21の電流から磁場への応答行列の特異値分解で得た固有モードに基づいて、シムコイル21の電流指令値を決定する演算部23と、決定された前記電流指令値に基づいて、シムコイル21の電流を制御する電源27と、を備え
 電源27からシムコイル21への給電線の一方が、他のシムコイル21の給電線の一方と共通する共通給電線30として構成されることを特徴とする。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

複数のシムコイルが配置されるシムコイルアレイと、
前記シムコイルの電流から磁場への応答行列の特異値分解で得た固有モードに基づいて、
前記シムコイルの電流指令値を決定する演算部と、
決定された前記電流指令値に基づいて、前記シムコイルの電流を制御する電源と、を備え、

前記電源から前記シムコイルへの給電線の一方が、他のシムコイルの給電線の一方と共通する共通給電線として構成される
ことを特徴とする磁場調整装置。

10

【請求項 2】

前記シムコイルアレイは、
磁石装置の磁場利用空間を取り囲むこととともに、前記磁石装置の中心軸を周回方向に取り囲むように配置され、
周回方向に 2 個以上、かつ、軸方向にも 2 個以上の前記シムコイルが配置され、
各シムコイルが囲む面積の和が、前記シムコイルアレイのコイル面の面積に対して、80%以上となるように密に配置される
ことを特徴とする請求項 1 に記載の磁場調整装置。

【請求項 3】

前記磁石装置は、超伝導磁石装置である
ことを特徴とする請求項 2 に記載の磁場調整装置。

20

【請求項 4】

前記シムコイルは、超伝導線材からなり、前記超伝導磁石装置の超伝導コイルを収容する冷媒容器に収容され、
前記シムコイルごとに永久電流スイッチを備える
ことを特徴とする請求項 3 に記載の磁場調整装置。

【請求項 5】

磁場調整に利用しない高次の固有モードを前記シムコイルの電流分布に加え、
前記共通給電線を通して電流を低減するように調整する共通給電線電流低減処理部を備える
ことを特徴とする請求項 1 に記載の磁場調整装置。

30

【請求項 6】

前記演算部は、
多点の磁場計測データから、特異値分解の固有モードとの内積で、各固有モードの強度である固有モード強度を演算する固有モード強度演算部と、
前記固有モード強度演算部で演算された各固有モードの固有モード強度と、目標磁場分布に対応する各固有モードの固有モード基準強度との差分である残差を演算する残差演算部と、

各固有モードの残差に、各固有モードの電流分配と特異値に基づいて決定した係数を積算して、各固有モードにおける各シムコイルに通電する電流の補正値を演算し、該各固有モードにおける各シムコイルに通電する電流の補正値を各シムコイルについて加算して、各シムコイルに通電する電流の補正指令値を演算する電流補正指令値演算部と、

前記電流補正指令値演算部で演算された前記補正指令値と、基準電流値とを加算して、前記シムコイルの電流指令値を決定する加算部と、を有することで、残差磁場を負帰還制御する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の磁場調整装置。

40

【請求項 7】

各シムコイルの電流を決める演算において、各固有モードの残差を固有モード毎に示して、補正する固有モードを選択するモード選択部を備える
ことを特徴とする請求項 1 に記載の磁場調整装置。

50

【請求項 8】

請求項 1 に記載の磁場調整装置を備えることを特徴とする磁石装置。

【請求項 9】

磁場計測分布と、電流から磁場への応答行列の特異値分解で得た各固有モードとの内積により前記各固有モードの固有モード強度を算出するステップと、

目標磁場分布と前記各固有モードとの内積により得られた前記各固有モードの固有モード基準強度と、前記固有モード強度との差分である残差を算出するステップと、

前記残差と前記固有モードの電流分配に基づいて、各シムコイルの補正電流量を算出するステップと、

前記補正電流量に基づいて、各シムコイルの電流を補正するステップと、を実行することを特徴とする磁場調整方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁場を調整する磁場調整装置、この磁場調整装置を備える磁石装置、および、磁場調整方法に関する。

【背景技術】

【0002】

研究用加速器等が備える研究用磁石装置では、磁場が一定値またはある目標の磁場分布となるように、高精度な磁場分布調整が要求される。例えば、1 ppm以下の精度で空間的に磁場分布が一定で、かつ、時間的にも一定に保たれている必要がある実験装置もある。

【0003】

超伝導コイルを永久電流モードで通電している場合、その内部の磁束は保存され、磁場強度は一定に保たれる。この性質を利用して、磁石装置には超伝導コイルが用いられ、磁場を1年以上の長時間ほぼ一定に維持している磁石もある。そして、これらの磁石装置では、主たる磁場を生成するコイル（超伝導コイル）に加えて、磁場微調整用コイル（シムコイル）をさらに備え、磁石軸方向の磁場についてその分布を微調整する機能を持たせている。

【0004】

第1従来例として、特許文献1（特開平8-316031号公報）が開示されている。図12は、第1従来例のシムコイル121の配置例の展開図である。なお、図12において、横軸は周回方向角度（ θ ）を示し、縦軸は軸方向位置（ Z ）を示す。

【0005】

第1従来例では、図12に示すように、1つの円筒面に多数（図12では、周回方向に8個、軸方向に6個の計48個）のシムコイル121が間隔を置いて配置されている。このようにシムコイル121を配置し、各シムコイル121の電流配分を制御することにより、磁場の微調整を行うことができるようになっている。なお、各シムコイル121の電流配分は、球面関数の強度とラグランジュの未定乗数法を用いて算出する。

【0006】

また、第2従来例として、特許文献2（特開2013-98439号公報）が開示されている。図13は、第2従来例のシムコイル221の配置例の展開図である。なお、図13において、横軸は周回方向角度（ラジアン）を示し、縦軸は軸方向位置を示す。

【0007】

第2従来例では、図13に示すように、複数（図13では、No.1からNo.6で示す6種類）の電流面200Sに導体を配置することによりシムコイル221が製作され、これらが互いに重ねられて配置されることにより、目標とする磁場に調整している。なお、各シムコイル221の配置は、応答行列の特異値分解に基づいて決定している。

【先行技術文献】

10

20

30

40

50

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開平8-316031号公報

【特許文献2】特開2013-98439号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、第1従来例（特許文献1）の構成では、各シムコイル121が作る磁場には、多くの種類の球面関数を含むので、関数の高次と低次の干渉が残る。このため、磁場を調整する毎に、意図しなかった磁場成分も変化して、磁場調整制御が煩雑となる。また、シムコイル121の発熱低減と誤差磁場との間にトレードオフがあるため、発熱を低減させると、磁場精度の調整を犠牲にするという課題がある。

10

【0010】

また、第2従来例（特許文献2）では、磁場精度をより向上させることができるが、各電流面200Sのシムコイル221がそれぞれ円筒面を構成し、各シムコイル221（各円筒面）を重ねて構成されているため、径方向の厚さが厚くなる。このため、装置の構造が複雑となり、また、装置の小型化に限界がある。

【0011】

またMRI装置では、軸方向の磁場を球面調和関数で展開した磁場を発生するコイルを備えている。この場合、コイル間の磁場や誘導電流は一般には非干渉にできない。このことは、一つの補正を行った時に、他の磁場分布を発生する電流や磁場に影響があることを意味し、磁場の正確な補正を難しくする。

20

【0012】

そこで、本発明は、高精度な磁場調整が可能で、取り扱いやすい磁場調整装置、この磁場調整装置を備える磁石装置、および、磁場調整方法を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

このような課題を解決するために、本発明に係る磁場調整装置は、複数のシムコイルが配置されるシムコイルアレイと、前記シムコイルの電流から磁場への応答行列の特異値分解で得た固有モードに基づいて、前記シムコイルの電流指令値を決定する演算部と、決定された前記電流指令値に基づいて、前記シムコイルの電流を制御する電源と、を備え、前記電源から前記シムコイルへの給電線の一方が、他のシムコイルの給電線の一方と共通する共通給電線として構成されることを特徴とする。

30

【0014】

また、本発明に係る磁石装置は、前記磁場調整装置を備えることを特徴とする。

【0015】

また、本発明に係る磁場調整方法は、磁場計測分布と、電流から磁場への応答行列の特異値分解で得た各固有モードとの内積により前記各固有モードの固有モード強度を算出するステップと、目標磁場分布と前記各固有モードとの内積により得られた前記各固有モードの固有モード基準強度と、前記固有モード強度との差分である残差を算出するステップと、前記残差と前記固有モードの電流分配に基づいて、各シムコイルの補正電流量を算出するステップと、前記補正電流量に基づいて、各シムコイルの電流を補正するステップと、を実行することを特徴とする。

40

【発明の効果】

【0016】

本発明によれば、高精度な磁場調整が可能で、取り扱いやすい磁場調整装置、この磁場調整装置を備える磁石装置、および、磁場調整方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】本実施形態に係る磁石装置の模式断面図とシムコイル結線法を示した図である。

50

【図 2】本実施形態に係る磁場調整装置が備えるシムコイルアレイの展開図である。

【図 3】本実施形態に係る磁場調整装置の構成模式図である。

【図 4】本実施形態に係る磁場調整装置を用いた磁場調整方法のフローチャートである。

【図 5】固有モード強度演算部の演算回路の模式図である。

【図 6】残差演算部、電流補正指令値演算部、加算増幅器の演算回路および各シムコイルへの結線を示した模式図である。

【図 7】実施例に係るシムコイルアレイの配置を説明する図であり、(a)は展開図、(b)は鳥瞰図である。

【図 8】実施例に係る固有モードの磁場分布を説明するグラフである。

【図 9】誤差磁場を調整するシミュレーション例を説明するグラフである。

【図 10】(a)は第 1 変形例に係るシムコイルアレイの展開図であり、(b)(c)は第 1 変形例に係るシムコイルアレイの固有モードの磁場分布の例である。

【図 11】第 2 変形例に係る磁石装置の構成模式断面図である。

【図 12】第 1 従来例のシムコイルの配置例の展開図である。

【図 13】第 2 従来例のシムコイルの配置例の展開図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

まず、本実施形態に係る磁場調整装置の概要について説明する。

【0019】

第 1 従来例(特許文献 1)のように、シムコイルの層を少数(特許文献 1 の例では 1 層)とすることは、磁場調整装置の構造を簡素化し、磁場調整装置を小型化し、磁場調整装置が搭載される磁石装置を小型化する点で重要である。しかし、特許文献 1 の方法では、磁場の干渉により磁場制御計算が煩雑になるという課題がある。

【0020】

これに対し、第 2 従来例(特許文献 2)のように、特異値分解を使う方法は、磁場成分がわかりやすく、それぞれの磁場成分が電流と磁場に対応した固有モードで非干渉なため、第 1 従来例より簡単に磁場制御を行うことができる。但し、第 2 従来例(特許文献 2)では、固有モードに対応するシムコイルを積層して構成されている。このため、磁場調整精度を向上させるために固有モードの数を増やすと、シムコイルの積層数も増え、磁場調整装置の構造が複雑になる。

【0021】

そこで、本実施形態に係る磁場調整装置は、多数のシムコイルから構成されるアレイ型シムコイルを用い、各シムコイルの電流は特異値分解を応用する方法を用いて制御する。これにより、高精度で、扱いやすい磁場調整装置を構成することができる。

【0022】

このような方法は、本発明者らの非特許文献(M. Abe, K. Takeuchi, 「Low loop voltage startup and equilibrium control using multivariable poloidal field coils in the Hitachi tokamak HT-2」, Fusion Technology, 29(1996), p. 277 - 293)の計算手法を参考にできる。この非特許文献はトカマクに関するものであり、ポロイダル磁場コイルの電流分配を、目的磁場に対して補正する電流分布に最適化する。この計算過程で、コイル電流から目標領域(非特許文献ではプラズマ表面)の応答行列を特異値分解し、電流分配と磁場成分を対とした固有モードを得て、その固有モードの組み合わせで磁場調整を行っている。なお、この非特許文献は、円環プラズマの平衡磁場制御を行うために周回方向の一樣な磁場のみを考えている。これに対し、本実施形態では、周回方向に非一樣な磁場の場合も考慮する。

【0023】

また、外乱磁場は 1 種類に限られず、種々の成分を持った磁場が入り込む可能性がある。このため、磁場調整用のシムコイルは、単数のコイル(または、直列もしくはは並列に結

10

20

30

40

50

線された 1 組のコイル)ではなく、いくつかのシムコイルの集合(アレイ型シムコイル)である必要がある。また、外乱磁場は軸方向だけでなく周回方向にも分布する可能性がある。

【0024】

そして、それぞれのシムコイルは、相互に独立して制御可能に構成されることが好ましい。つまり、あるシムコイルに電流が流れると他のシムコイルに電流が誘導されるという構成では、精度よく磁場を調整することは困難であることを意味する。

【0025】

さらに、いくつかのシムコイルを組み合わせることで適切な電流配分で磁場を調整することで、できるだけ広い範囲の外乱磁場成分を補正できることが好ましい。

10

【0026】

即ち、複数のシムコイルを相互には独立に、さらに組み合わせることで磁場を補正することにより外乱磁場の成分を高い割合で除去できるシムコイル群(アレイ型シムコイル)が必要となる。

【0027】

磁石装置 1、磁場調整装置 2

以下、本発明を実施するための形態(以下「実施形態」という)について、適宜図面を参照しながら詳細に説明する。なお、各図において、共通する部分には同一の符号を付し重複した説明を省略する。

【0028】

本実施形態に係る磁場調整装置 2、および、この磁場調整装置 2 を備える磁石装置 1 について図 1 から図 6 を用いて説明する。図 1 は、本実施形態に係る磁石装置 1 の模式断面図であり、本実施形態のシムコイル結線(図 1 の下側に示す吹き出し内)と共に示す。なお、図 1 の上側に示す模式断面図は、水平軸であり後述する超伝導コイル 1 a の中心軸である Z 軸、および、鉛直軸である Y 軸で形成される平面で切断した磁石装置 1 の断面図である。

20

【0029】

本実施形態に係る磁石装置 1 は、互いに中心軸(Z 軸)が一致する環形状の複数(図 1 の例では 4 個)の超伝導コイル 1 a と、冷媒容器 1 b と、輻射シールド 1 c と、真空容器 1 d と、を備えている。

30

【0030】

超伝導コイル 1 a は、冷媒容器 1 b に収容されている。また、冷媒容器 1 b には、超伝導コイル 1 a を冷却するための冷媒が充填されている。冷媒容器 1 b は、真空容器 1 d に収容される。真空容器 1 d 内は、高真空状態となっており、冷媒容器 1 b と真空容器 1 d の間を真空断熱するようになっている。さらに、冷媒容器 1 b と真空容器 1 d の間には、輻射シールド 1 c が設けられており、輻射による熱伝達を抑制するようになっている。

【0031】

超伝導コイル 1 a は、超伝導線材で構成されるコイルであり、冷媒容器 1 b に充填された冷媒により超伝導臨界温度以下まで冷却される。超伝導コイル 1 a は、永久電流モードで通電されることにより、図 1 において Z 軸方向の矢印で示す磁場方向 1 1 の向きに磁場(主たる磁場)を発生させる超伝導磁石として機能する。これにより、超伝導コイル 1 a は、円筒状の磁石装置 1 の中心に設けられた磁場利用領域 1 2 に静磁場を発生させる。なお、図 1 の例では、磁石装置 1 は、MRI 装置において静磁場を発生する磁石装置であり、円筒状の磁場利用領域 1 2 が設定されているものとして説明する。

40

【0032】

さらに、磁石装置 1 は、磁場調整装置 2 (後述する図 3 参照)を備えている。磁場調整装置 2 は、磁場利用領域 1 2 の静磁場の精度(均一度)を向上させるように磁場調整をする装置である。具体的には、磁場調整装置 2 は、設定された磁場評価面 1 3 について、静磁場の精度(均一度)を向上させるように磁場調整をする。なお、図 1 では、磁場利用領域 1 2 の境界面を磁場評価面 1 3 とした場合を例に示している。

50

【0033】

磁場調整装置2（後述する図3参照）は、複数のシムコイル21（後述する図2参照）からなるシムコイルアレイ20を備えている。シムコイルアレイ20（シムコイル21）は、冷媒容器1bの内部で、超伝導コイル1aの径方向の内側に設けられる円筒面2S（図1参照）に配置されている。また、円筒面2Sの中心軸は、Z軸（即ち、超伝導コイル1aの中心軸）と一致する。なお、シムコイル21は、冷媒が充填された冷媒容器1bの内部に配置されるため、超伝導線材で構成し、通電による発熱を抑制する構成とすることが好ましい。このシムコイル21の給電線（ $29_1 \sim 29_n, 30$ ）から、極低温部（冷媒容器1bの内部）に進入する熱は無視できない。そのため、本実施形態では給電線の片側は共通の給電線30とする。これにより、極低温部（冷媒容器1bの内部）に進入する給電線数を減少できるので、入熱量も減少でき、安定した超伝導磁石の運転を行うことができ、また、冷凍機の負荷を下げることもできる。なお、この構成については、図6で再度詳しく述べる。

10

【0034】

次に、本実施形態に係る磁場調整装置2が備えるシムコイルアレイ20およびシムコイル21について図2を用いて更に説明する。図2は、本実施形態に係る磁場調整装置2が備えるシムコイルアレイ20の展開図である。なお、図2において、横軸は周回方向角度（ラジアン）を示し、縦軸はZ軸（図1参照）の軸方向位置を示す。また、シムコイル21は、超伝導線材を巻回して構成されるが、図2では、シムコイル21のコイル部（巻回部）のみを図示し、シムコイル21のコイル部と接続する配線（引出線）等は省略して図示している。

20

【0035】

シムコイルアレイ20は、図2に示すように、周回方向および軸方向に複数のシムコイル21が配列されて構成され、図1に示す円筒面2Sに配置される。換言すれば、円筒面2Sは周回方向および軸方向について多数に分割され、その分割された領域にそれぞれシムコイル21が配置されて、シムコイルアレイ20が構成されている。なお、図2では、シムコイルアレイ20は、周回方向に6個、軸方向に5個の計30個のシムコイル21が配列される例を示している。

【0036】

ここで、第1従来例では、図12に示すように、シムコイル121と、隣接するシムコイル121との間には広い隙間がある。これに対し、本実施形態のシムコイルアレイ20は、図2に示すように、シムコイル21を密に配置している。

30

【0037】

ここで、磁気モーメントは各コイルの面積に比例して大きくなるので、シムコイル21を隙間なく配置することが好ましい。但し、実際にはシムコイル21の支持構造やコイル導体断面の大きさ等で制限されるため、占有率を100%とすることはできない。ここでは、各シムコイル21（コイル中心線）が囲む面積の和と、コイル配置面の面積（円筒面2Sの面積）との比が、80%以上となることを、密配置としている。

【0038】

このように、シムコイル21を密配置とすることにより、磁気モーメントを大きくすることができ、第1従来例（図12参照）と比較して、低い電流で磁場補正をすることができる。また、密配置とすることにより、分散配置されたシムコイル21による磁場リップルも問題とはならない。

40

【0039】

次に、本実施形態に係る磁場調整装置2について図3を用いて更に説明する。図3は、本実施形態に係る磁場調整装置2の構成模式図である。

【0040】

磁場調整装置2は、周回方向および軸方向に複数のシムコイル21が配置されて構成されるシムコイルアレイ20と、磁場評価面13（図1参照）の磁場を計測する磁場計測部22と、磁場計測部22で計測した磁場計測値に基づいて各シムコイル21に流す電流を

50

算出して各シムコイル 2 1 に電流を流す電流生成部 2 3 と、を備えている。また、電流生成部 2 3 は、固有モード強度演算部 2 4 と、残差演算部 2 5 と、電流補正指令値演算部 2 6 と、加算増幅器（電源）2 7 と、記憶部 2 8 と、を備えている。

【0041】

固有モード強度演算部 2 4 は、磁場計測部 2 2 で計測した磁場計測値に基づいて固有モード強度を算出する。なお、固有モード強度演算部 2 4 の演算処理は、図 4 および図 5 を用いて後述する。

【0042】

残差演算部 2 5 は、固有モード強度演算部 2 4 で算出した固有モード強度と、記憶部 2 8 に保存されている固有モード基準強度との差（残差）を算出する。電流補正指令値演算部 2 6 は、残差演算部 2 5 で算出した残差に基づいて電流補正指令値を算出する。加算増幅器（電源）2 7 は、記憶部 2 8 に保存されている基準電流値に、電流補正指令値演算部 2 6 が算出した電流補正指令値を加算して電流指令値を算出するとともに、算出した電流指令値に基づいてシムコイル 2 1 に電流を流す。なお、加算増幅器（電源）2 7 は、各シムコイル 2 1 に流す電流を独立して制御することができるように構成されている。なお、残差演算部 2 5、電流補正指令値演算部 2 6 および加算増幅器（電源）2 7 の処理は、図 4 および図 6 を用いて後述する。

10

【0043】

記憶部 2 8 は、固有モード基準強度、基準電流値、後述する目標磁場値、固有分布データ等の磁場調整に必要なデータが記憶されている。

20

【0044】

< 磁場調整装置を用いた磁場調整方法 >

次に、本実施形態に係る磁場調整装置 2 を用いた磁場調整方法について、図 4 を用いて説明する。図 4 は、本実施形態に係る磁場調整装置 2 を用いた磁場調整方法のフローチャートである。

【0045】

ステップ S 1 からステップ S 4 は、汎用のコンピュータ等を用いて、後述する電流分配演算・磁場調整処理（ステップ S 5 からステップ S 11）に用いる固有分布データをあらかじめ作成する処理である（固有分布データ作成処理）。

【0046】

ステップ S 1 において、コンピュータは、シムコイルアレイ 2 0 を構成するシムコイル 2 1 の配置（図 2 参照）と、磁場評価面 1 3（図 1 参照）上に設定される複数の磁場計測点の位置の入力を受け付ける。作業者は、シムコイルアレイ 2 0 を構成するシムコイル 2 1 の配置（図 2 参照）と、磁場評価面 1 3（図 1 参照）上に設定される複数の磁場計測点の位置をコンピュータに入力する（形状入力）。

30

【0047】

ステップ S 2 において、コンピュータの演算装置は、入力された形状（シムコイル 2 1 の配置、磁場計測点の位置）に基づいて、磁場の応答行列 A を生成する。

【0048】

ここで、シムコイルアレイ 2 0 を構成するシムコイル 2 1 の数を n とし、それぞれのシムコイル 2 1 のシムコイル電流（ $I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$ ）を成分にもつ n 次元ベクトルを電流ベクトル I とする。また、磁場計測点の数を h とし、それぞれの磁場計測点の磁場（ $B_1, \dots, B_k, \dots, B_h$ ）を成分にもつ h 次元ベクトルを磁場ベクトル B とする。磁場の応答行列式は、

40

$$B = A I \quad \dots \dots (1)$$

の方程式で表わすことができる。なお、磁場の応答行列 A は、 h 行 n 列の行列となる。

【0049】

具体的には、あるシムコイル 2 1 に単位電流を流した際の各磁場計測点の応答磁場について、ビオ・サバル（Biot-Savart）の式を用いて算出し、これを全てのシムコイル 2 1 について同様に行うことにより、磁場の応答行列 A を生成する。

50

【 0 0 5 0 】

ステップ S 3 において、コンピュータの演算装置は、ステップ S 2 で生成した磁場の応答行列 A を特異値分解する。

【 0 0 5 1 】

磁場の応答行列 A を特異値分解すると、磁場分布の固有分布は、

$$u_1, u_2, u_3, \dots \dots (2)$$

であり、電流ポテンシャルの固有分布は、

$$v_1, v_2, v_3, \dots \dots (3)$$

であり、 u_j と v_j の間には、

$$j \cdot u_j = A \cdot v_j \dots \dots (4)$$

が成立する。ここで、 j は、 j 番目モードの特異値である。

【 0 0 5 2 】

即ち、 j 番目モードの単位電流 v_j は、 j 番目モードの磁場 u_j (h 次元ベクトル) を j (スカラー) の強さで発生する電流分配を表わす n 次元ベクトル ($v_{1j}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{nj}$) であり、 i 番目のシムコイル 2 1 に対応する分布強度は v_{ij} である。

【 0 0 5 3 】

ステップ S 4 において、コンピュータの演算装置は、ステップ S 3 において特異値分解により得られた固有モード (2 つの固有分布 u_j, v_j と、1 つの特異値 j で、1 つの固有モードを示す。) 群のデータを、固有分布データとして、出力する。なお、固有モードは特異値が大きい方から順に番号が付されているものとする。また、固有モードの数は、シムコイル 2 1 の数 n または磁場計測点の数 h のいずれか小さい方の値以下である。このため、磁場計測点の数 h は、少なくともシムコイル 2 1 の数 n 以上とすることが好ましい。

【 0 0 5 4 】

次に、ステップ S 5 からステップ S 1 1 では、あらかじめ作成された固有分布データおよび磁場計測部 2 2 により計測された磁場計測値から、各シムコイル 2 1 に流す電流を演算し、各シムコイル 2 1 に電流を流して磁場を調整する処理である (電流分配演算・磁場調整処理)。なお、磁場調整時において、各シムコイル 2 1 には、シムコイル電流として基準電流値 ($I_{01}, \dots, I_{0i}, \dots, I_{0n}$) の電流が流されている。なお、 n 個の各シムコイル 2 1 の基準電流値 ($I_{01}, \dots, I_{0i}, \dots, I_{0n}$) を成分にもつ n 次元ベクトルである基準電流値ベクトル I_0 は、前回の電流値や、主たる磁場を生成する磁石装置 1 (超伝導コイル 1 a) の製作誤差から推定する。

【 0 0 5 5 】

ステップ S 5 において、磁場調整装置 2 の電流生成部 2 3 は、ステップ S 4 であらかじめ作成された固有分布データを読み込んで記憶部 2 8 に記憶する。なお、記憶部 2 8 には、 h 個の各磁場計測点の目標磁場値 ($B_{01}, \dots, B_{0k}, \dots, B_{0h}$) を成分にもつ h 次元ベクトルである目標磁場値分布 B_0 があらかじめ記憶されているものとする。

【 0 0 5 6 】

ステップ S 6 において、磁場調整装置 2 の磁場計測部 2 2 により、各磁場計測点の磁場計測値 ($B_1, \dots, B_k, \dots, B_h$) を計測する。 h 個の各磁場計測点の磁場計測値 ($B_1, \dots, B_k, \dots, B_h$) を成分にもつ h 次元ベクトルを磁場計測値分布 B と称する。

【 0 0 5 7 】

ステップ S 7 において、磁場調整装置 2 の固有モード強度演算部 2 4 は、磁場計測値分布 B ($B_1, \dots, B_k, \dots, B_h$) から、各モードの磁場の固有モード強度を算出する。即ち、磁場制御に用いる固有モードの数を m とし、1 番目モードの磁場の固有モード強度 P_1 から m 番目モードの固有モード強度 P_m を求める。なお、磁場制御に用いる固有モードの数 m は、一般的には、シムコイル 2 1 の数 n と同じか、または、 n よりも小さい数であるが、ここでは、 n よりも小さい数とする。詳細は後述する。

【 0 0 5 8 】

ここで、 j 番目モードの磁場の固有モードの強度 P_j は、

10

20

30

40

50

$$P_j = B \cdot u_j \quad \dots \dots (5)$$

の内積で算出する。なお、 u_j は、 j 番目モードの磁場分布の固有分布 u_j (h 次元) であり、固有分布データとして記憶部 28 に記憶されている。

【0059】

また、目標磁場値分布 B_0 から、各固有モードの固有モード基準強度を算出する。 j 番目モードの磁場の固有モードの基準強度 P_{0j} は、

$$P_{0j} = B_0 \cdot u_j \quad \dots \dots (6)$$

の内積で算出する。なお、固有モード基準強度 P_{0j} は、あらかじめ計算して記憶部 28 に記憶しておき、それを読み込む構成としてもよい。

【0060】

ステップ S8 において、残差演算部 25 は、各モードについて、固有モード強度と固有モード基準強度との差分である残差 P を算出する。即ち、1 番目モードから m 番目モードについて、固有モード強度と固有モード基準強度との差分である残差を算出する。

【0061】

ここで、 j 番目モードの残差 P_j は、 j 番目モードの固有モード強度 P_j および j 番目モードの固有モード基準強度 P_{0j} を用いて、

$$P_j = P_{0j} - P_j \quad \dots \dots (7)$$

から算出する。

【0062】

ステップ S9 において、電流補正指令値演算部 26 は、残差 P を打ち消すための電流補正指令値 I_i を算出する。ここで、目標磁場値分布 B_0 は磁場調整装置 2 により補正する磁場の補正量に比べて強い磁場であり、通常、 $P_j \ll B_0$ となる。このため、以下の式を用いて磁場調整に必要な個々のシムコイル 21 に加算する電流補正指令値ベクトル I (n 個の各シムコイル 21 の電流補正指令値 ($I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$) を成分にもつ n 次元ベクトル) を算出する。

【0063】

即ち、 j 番目モードの残差 P_j を打ち消すために i 番目 ($i = 1 \sim n$) のシムコイル 21 に加算する電流補正指令値 I_{ij} は、

$$I_{ij} = -v_{ij} P_j / \mu_j \quad \dots \dots (8)$$

となる。ここで、 v_{ij} は、 j 番目モードの単位電流 v_j である n 次元ベクトル ($v_{1j}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{nj}$) のうち i 番目のシムコイル 21 に対応する分布強度であり、固有分布データとして記憶部 28 に記憶されている。また、 μ_j は、 j 番目モードの特異値であり、固有分布データとして記憶部 28 に記憶されている。なお、式 (8) において、右辺の符号が「-」となっていることは、この磁場調整が磁場分布の負帰還制御 (負のフィードバック制御) となっていることを意味している。

【0064】

よって、1 番目モードから m 番目モードまでの残差 ($P_1 \sim P_m$) を打ち消すために i 番目のシムコイル 21 に加算する電流補正指令値 I_i は、

$$I_i = I_{i1} + I_{i2} + \dots \dots + I_{im} \quad \dots \dots (9)$$

となる。これを 1 番目のシムコイル 21 から n 番目のシムコイル 21 について同様に行うことにより、電流補正指令値ベクトル I ($I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$) を算出する。

【0065】

ステップ S10 において、加算増幅器 27 は、基準電流値ベクトル I_0 に電流補正指令値演算部 26 で算出した電流補正指令値ベクトル I を加算して電流指令値ベクトル I を算出する。なお、電流指令値ベクトル I は、 n 次元のベクトルである。

【0066】

即ち、 i 番目 ($i = 1 \sim n$) のシムコイル 21 について、基準電流値 I_{0i} に電流補正指令値演算部 26 で算出した電流補正指令値 I_i を加算して、 i 番目 ($i = 1 \sim n$) のシムコイル 21 に流す電流である電流指令値 I_i を算出する。

10

20

30

40

50

$$I_i = I_{0i} + I_i \quad \dots \dots (10)$$

【0067】

なお、電流指令値ベクトル I は、各固有モードの成分の加算とみることができる。

$$I = I e_1 + I e_2 + \dots \dots + I e_j + \dots \dots + I e_m \quad \dots \dots (11)$$

ここで、 $I e_j$ は、 j 番目モードによる電流値であり、基準電流値ベクトル I_0 の j 番目モード成分と、 j 番目モードの残差 P_j を打ち消すためにシムコイル 21 に加算する電流補正指令値 $I e_j$ ($I_{1j}, I_{2j}, \dots, I_{ij}, \dots, I_{nj}$) の加算である。

【0068】

ステップ S 11 において、加算増幅器 27 は、電流指令値ベクトル I に基づいてシムコイル 21 に通電する。即ち、 i 番目 ($i = 1 \sim n$) のシムコイル 21 にステップ S 10 で算出した電流指令値 I_i に基づいて通電する。

10

【0069】

以上のように、本実施形態に係る磁場調整装置 2 は、磁場の固有モードごとに残差を低減するように調整磁場を発生させることができる。なお、固有モード間是非干渉であることから、ある固有モードの残差を低減するようにシムコイル 21 の電流を制御しても、他の固有モードの残差が増加するといったことがないため、磁場調整が容易になる。

【0070】

< 固有モード強度演算部 24 >

次に、図 4 のステップ S 7 において、磁場の固有モード強度 $P_1 \sim P_m$ を算出する固有モード強度演算部 24 の演算回路について、図 5 を用いてさらに説明する。図 5 は、固有モード強度演算部 24 の演算回路の模式図である。

20

【0071】

図 5 において、符号 $24_1 \sim 24_m$ に示す演算回路は、前述の式 (5) の内積演算を行う回路であり、固有モード全て ($1 \sim m$) についてそれぞれ演算を行う。固有モード強度演算部 24 は、 h 個の磁場計測点の磁場計測値 ($B_1, \dots, B_k, \dots, B_h$) が入力され、 m 個の固有モード強度 ($P_1, \dots, P_j, \dots, P_m$) を出力する。

【0072】

なお、前述のように、磁場制御に用いる固有モードの数 m は、シムコイル 21 の数 n よりも少ない数とする。また、前述のように、固有モードは特異値が大きい方から順に番号が付されている。特異値の小さい固有モード ($m+1$ 番目以降の固有モード) では、式 (4) に示すように、単位電流当たりの磁場の発生が小さい。このため、高次 (特異値が小さい) の固有モードについて残差を減少させるように制御すると (ステップ S 8 ~ S 10 参照)、大きな電流が必要となる。なお、ステップ S 4 で前述したように、固有モードの最大数は、シムコイル 21 の数 n または磁場計測点の数 h のいずれか小さい方の値で決まり、磁場計測点の数 h をシムコイル 21 の数 n 以上とすることから、シムコイル 21 の数 n で決まる。このため、磁場制御に用いる固有モードの数 m を (シムコイル 21 の数 n よりも) 少ない数として、少ない電流で磁場調整できるようにしている。なお、磁場制御に用いる固有モードの数 m を小さくしすぎると要求される磁場精度が達成できない場合もあるので、 m は要求される磁場精度に応じて適宜設定する。

30

【0073】

演算回路 $24_1 \sim 24_m$ は、同様の構成であるため、演算回路 24_j を例に説明する。演算回路 24_j は、入力信号を増幅 (利得倍) する h 個の増幅回路と、加算回路から構成され、式 (5A) に示す演算を行い、 j 番目モードの固有モード強度 P_j を出力する。なお、 j 番目モードの磁場分布 u_j ($u_{j1}, \dots, u_{jk}, \dots, u_{jh}$) は、固有分布データとして記憶部 28 に記憶されている。

$$P_j = B_1 u_{j1} + \dots + B_k u_{jk} + \dots + B_h u_{jh} \quad \dots \dots (5A)$$

【0074】

また、図 5 の固有モード強度演算部 24 の演算回路は、入力を目標磁場値分布 B_0 とすることにより、固有モード基準強度 P_{0j} を出力する前述の式 (6) の内積演算を実現できる。

40

50

【0075】

< 残差演算部 25、電流補正指令値演算部 26、加算増幅器 27 >

次に、残差演算部 25、電流補正指令値演算部 26、加算増幅器 27 の演算回路について、図 6 を用いてさらに説明する。図 6 は、残差演算部 25、電流補正指令値演算部 26、加算増幅器 27 の演算回路および各シムコイル 21 への結線を示した模式図である。

【0076】

残差演算部 25 は、残差演算回路 25₁ ~ 25_m を備えており、固有モード強度演算部 24 (図 5 参照) から出力された m 個の固有モード強度 ($P_1, \dots, P_j, \dots, P_m$) および m 個の固有モード基準強度 ($P_{01}, \dots, P_{0j}, \dots, P_{0m}$) が入力され、式 (7) の残差演算を実行し、m 個の残差 ($P_1, \dots, P_j, \dots, P_m$) を出力する (図 4 のステップ S8 参照)。

10

【0077】

電流補正指令値演算部 26 は、m 個の残差 ($P_1, \dots, P_j, \dots, P_m$) が入力され、式 (8) および式 (9) の演算を実行し、n 個の電流補正指令値 ($I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$) を出力する (図 4 のステップ S9 参照)。

【0078】

加算増幅器 27 は、n 個の基準電流値 ($I_{01}, \dots, I_{0i}, \dots, I_{0n}$) と n 個の電流補正指令値 ($I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$) が入力され、式 (10) の演算を実行し、n 個の電流指令値 ($I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$) を算出する (図 4 のステップ S10 参照)。そして、加算増幅器 27 は、各シムコイル 21₁ ~ 21_n に流れる電流が電流指令値 ($I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$) となるように制御する。

20

【0079】

ここで、加算増幅器 27 は、独立した加算増幅器 27₁ ~ 27_n で構成され、各加算増幅器 27₁ ~ 27_n が、各シムコイル 21₁ ~ 21_n の一端と、第 1 給電線 29₁ ~ 29_n を介して、1 対 1 に対応して接続されており、各シムコイル 21₁ ~ 21_n の電流を独立して制御することができるようになっている。

【0080】

また、各シムコイル 21₁ ~ 21_n の他端は、共通給電線である第 2 給電線 30 で加算増幅器 27₁ ~ 27_n と接続されている。ここで、極低温部である冷媒容器 1b (および、真空容器 1d) の内部のシムコイル 21 と外部の加算増幅器 27 とを接続する給電線 29, 30 は、極低温部への熱の進入口となる。第 1 従来例では、1 つのシムコイルに対し、2 つの電流導入端子を使っている。即ち、シムコイルの数を n とすると、2n 個の配線が真空断熱部を貫通する熱進入口となる。これに対し、本実施形態では、図 5 に示すように、シムコイル 21 への給電線のうちの一方を共通給電線 (第 2 給電線 30) とする。これにより、(n + 1) 個の配線が真空断熱部を貫通する熱進入口となり、配線数を減らして極低温部への熱進入を抑制することができる。なお、第 2 給電線 30 はアース線としてもよい。

30

【0081】

また、電流制御時において、各シムコイル 21₁ ~ 21_n に流れる電流を変化させる際、シムコイル 21 同士の磁気的な干渉が生じるため、精度よく電流を制御する。一方、各シムコイル 21₁ ~ 21_n に流れる電流が一定値 (電流指令値) に到達すると、干渉は生じず、電流制御は不要となる。このため、各シムコイル 21₁ ~ 21_n の端子間に超伝導スイッチ (PCS) (図示せず) を設けておき、永久電流モードで運転するようにしてもよい。即ち、加算増幅器 27 でシムコイル 21 に流れる電流を電流指令値になるように制御した後に、超伝導スイッチ (図示せず) を接続する。このように構成することにより、超伝導コイル 1a (図 1 参照) だけでなく、磁場調整用のシムコイル 21 も永久電流モードで運転することができる。

40

【0082】

また、図 6 に示すように、電流補正指令値演算部 26 は、モード選択部 26a を備えていてもよい。モード選択部 26a は、あらかじめ設定された許容誤差に基づいて、j 番

50

目モードの残差 P_j が、

$$P_j < \dots \dots (12)$$

の場合、係数 $G_j = 0$ とする。式 (12) が成立しない場合は、係数 $G_j = 1$ とする。

【0083】

そして、電流補正指令値演算部 26 は、前述の式 (9) を、係数 G_j を含んだ以下の式 (9A) に置き換えて演算する。

【0084】

【数1】

$$\Delta I_i = \sum_j -G_j v_{ij} \Delta P_j / \lambda_j \dots \dots (9A)$$

10

【0085】

即ち、j 番目モードの残差 P_j が許容誤差 未満の場合、加算から排除する、換言すれば、j 番目モードについて磁場調整を行わないようにすることができる。残差 P_j が十分に小さい (許容誤差 未満) 場合、式 (8) に示すように、 I_{ij} についても小さくなる。このため、加算増幅器 (電源) 27 の電流制御可能な分解能によっては、同様に磁場調整を行うと、むしろ磁場の均一度が乱れるおそれがある。これに対し、j 番目モードの残差 P_j が許容誤差 未満の場合、j 番目モードについて磁場調整を行わないようにすることにより、このような磁場の均一度の乱れを防止することができる。なお、 G_j は、0 または 1 を用いるものとして説明したが、これに限られるものではなく、他の値を用いてもよい。

20

【0086】

また、図 6 に示すように、電流補正指令値演算部 26 は、共通給電線電流低減処理部 26b を備えていてもよい。

【0087】

ここで、1 ~ n 番目のシムコイル 21₁ ~ 21_n に電流を流す第 1 給電線 29₁ ~ 29_n には、それぞれ、電流 I_1 ~ I_n が流れるのに対し、共通給電線である第 2 給電線 30 に流れる電流 I_{com} は、

$$I_{com} = I_1 + \dots + I_i + \dots + I_n \dots \dots (13)$$

となる。このため、第 2 給電線 30 は、第 1 給電線 29₁ ~ 29_n よりも大電流が流れるため、電流容量を大きくする、即ち、第 2 給電線 30 の線材の断面積を大きくする。このため、第 2 給電線 30 からの熱侵入が大きくなるおそれがある。

30

【0088】

これに関し、共通給電線電流低減処理部 26b は、第 2 給電線 30 に流れる電流 I_{com} を小さくするように制御する。前述したように、磁場制御に用いる固有モードは 1 番目から m 番目までであり、シムコイル 21 の数 n よりも小さくなっている ($m < n$)。このため、($n - m$) の自由度が残っている。また、前述のように、高次の固有モードほど特異値が小さく、単位電流当たりの磁場の発生が小さい。したがって、高次の固有モードでシムコイル 21 に流す電流を変化させても、磁場に与える影響は小さい。一方で、第 2 給電線 30 に流れる電流 I_{com} を小さくすることができる。これにより、第 2 給電線 30 の線材の断面積を極端に大きくする必要がなく、第 1 給電線 29₁ ~ 29_n と比較してせいぜい 3 倍程度以下の容量、より積極的な制御を行えば 1 / 10 程度の容量まで低減させることができる。これにより、第 2 給電線 30 の線材の断面積を小さくして、第 2 給電線 30 からの熱侵入を抑制することができる。

40

【0089】

ここで、高次モードによる電流分配ベクトル I_H を、

$$I_H = F_{m+1} v_{m+1} + \dots + F_n v_n \dots (14)$$

とする。なお、 v_{m+1} (~ v_n) は、 $m + 1$ (~ n) 番目モードの単位電流 (n 次元ベクトル) であり、固有分布データとして記憶部 28 に記憶されている。 F_{m+1} ~ F_n は、係数である。

50

【0090】

加算増幅器27は、電流指令値ベクトル I でシムコイル21に流す電流を制御しているが、高次モードによる電流分配ベクトル I_H を加算しても磁場の影響は小さい。このため、共通給電線電流低減処理部26bは、第2給電線30に流れる電流が小さくなるように $F_{m+1} \sim F_n$ を決定する。

【0091】

例えば、最も磁場の影響が小さい、即ち、最も特異値が小さい n 番目モードを用いるものとして、

$$F_{m+1} = \dots = F_{n-1} = 0$$

$$F_n = -I_{com} / (v_{1n} + \dots + v_{in} + \dots + v_{nn}) \quad \dots \dots (15)$$

10

とすればよい。なお、 v_{in} は、 n 番目モードの単位電流 v_n (n 次元ベクトル)の i 番目のシムコイル21に対応する電流分布強度である。

【0092】

また、高次モードが算出しにくい場合もある。これは、特異値が小さくなるほど、計算誤差が相対的に大きくなるためである。この場合、高次モードによる電流分配ベクトル I_H について、仮想的なモードの電流分配を考える。まず、

$$E = (1, 1, \dots, 1) \quad \dots \dots (16)$$

の n 次元ベクトルを考え、 v_H として、

$$v_H = E - (E v_1 + \dots + E v_L) / |E - (E v_1 + \dots + E v_L)| \quad \dots \dots (17)$$

20

を計算する。ここで、 L は E の成分として L 番目モードの固有モードまで差し引くことで、 v_H には L 番目以下の固有モードは含まれなくなる。また、 L は、 $m+1$ から n 未満の整数である。このようにして求めた v_H の電流分配で、

$$I_H = F_H v_H \quad \dots \dots (14A)$$

$$F_H = -I_{com} / (v_{1H} + \dots + v_{iH} + \dots + v_{nH}) \quad \dots \dots (15A)$$

で計算した高次モードによる電流分配ベクトル I_H を各シムコイル電流に加える。このような方法で、第2給電線(共通給電線)30を通過する電流を小さく保つことができる。

【0093】

なお、高次モードによる電流分配ベクトル I_H は、電流補正指令値演算部26から加算増幅器(電源)27に出力して、加算増幅器(電源)27で基準電流値ベクトル I_0 に電流補正指令値ベクトル I を加算する際に高次モードによる電流分配ベクトル I_H を加算してもよい。また、電流補正指令値演算部26で電流補正指令値ベクトル I に高次モードによる電流分配ベクトル I_H を加算したものを電流補正指令値ベクトル I として、加算増幅器(電源)27に出力するようにしてもよい。

30

【0094】

実施例

次に図7から図9を参照して、本実施形態に係る磁場調整装置2を用いた磁場調整の実施例を示す。

【0095】

図7(a)は、実施例に係るシムコイルアレイ20の配置を説明する展開図である。なお、横軸は周回方向をラジアンで $-\pi/2 \sim 3\pi/2$ で示し、縦軸は軸方向位置をメートル(m)単位で示している。個々のシムコイル21は円筒に沿った矩形であり、周回方向には同じ角度の大きさで配置されている。また、シムコイル21同士の間隔は、可能な限り密に配置し、磁場を強く発生できるようにしている。なお、シムコイル21は、必ずしも周回方向に同一の角度で分解して配置する必要は無い。また、図7(a)において、一部のシムコイルには形状を判りやすくするためにマークを付けている。また各シムコイル21には1から30までの番号を付している。

40

【0096】

図7(b)は、実施例に係るシムコイルアレイ20の配置を説明する鳥瞰図である。中心部の小さな円筒面は磁場計測を行う磁場評価面13である。ちなみに、本手法では磁場

50

計測点は任意の位置に取ることが可能である。また、磁場評価面 13 は、図 1 の場合とは異なり、円筒面としている。30 個のシムコイル 21 が円筒状に配置されている。この各シムコイル 21 は、それぞれ電流端子を持っているが、ここでは省略して図示している。また、各シムコイル 21 は、線材が 1 ターンではなく通常複数のターン数が巻かれている。これにより、電流を小さくして、電流導入端子を小さくする。また、発熱量の低減でも有利であり、特に超伝導線材を用いる場合には有利となる。

【0097】

シムコイル 21 の相互の間隔は密にするが、実際には若干の隙間が存在する。これは、絶縁やシムコイル 21 の固定部品のためである。実際の機器では磁場を制御する位置の半径とコイル配置の円筒面の半径の比は、程度として倍半分程度の比率 (1/2 程度) である。そのため、若干の隙間がシムコイル 21 の相互間に存在できる。その隙間の程度は、1/2 のさらに 1/5 程度 (= 1/10 程度) であれば実際上隙間による磁場変動は問題とならない。つまり、隙間が、大きさで 1/10 程度以下、面積では 80% 程度以上がシムコイル 21 で覆われていることがシムコイル 21 の大きさの条件と考えられる。

10

【0098】

図 8 は、実施例に係る固有モードの磁場分布を説明するグラフである。図 7 の例に示すシムコイルアレイ 20 (シムコイル 21) で、磁場評価面 13 に生成可能な固有モードの磁場分布 u_j を図 8 に示す。各図において、横軸は周回方向で、縦軸は軸方向位置である。また、ドットの有無は磁場の符号の正負を示している。また、各図の MODE は、固有モード番号を示し、その下の数値はその固有モードの特異値を示している。また、コイル数 ($n = 30$) と同じ数の固有モードが可能であるが、図 8 には 20 個の固有モード ($m = 20$) とその磁場分布で示している。

20

【0099】

なお、図 8 では、軸方向の磁場成分を各固有モードについて分布を示している。しかし、明示していないが、各シムコイル 21 が半径方向の磁場を生成する方向に向いていることを考えると、半径方向成分の磁場も同様に調整できることは自明である。

【0100】

図 7 に示すように、実施例に係るシムコイルアレイ 20 は、シムコイル 21 を円筒面に 1 層配置したものであるが、第 2 従来例と同様に、図 8 に示すように、相互に干渉のない固有モードが多数生成できることが理解できる。なお、固有モードの数は、シムコイル 21 の数 n または磁場計測点の数 h のいずれか小さい方の値以下である。このため、周回方向および軸方向共に、複数のシムコイル 21 を配置することにより、固有モードを多数生成することができるようになっている。

30

【0101】

図 9 は、誤差磁場を調整するシミュレーション例を説明するグラフである。

図 9 (a) は、主たる磁場を生成する超伝導コイル 1a (図 1 参照) が 1 個傾いた時の誤差磁場を 0.5 ガウス (5.000×10^{-5} [T]) 毎の等高線で示す。磁場評価面 13 は、図 7 (b) の円筒面上であり、上下方向に ± 10 cm、半径で 33.3 cm とする。図 9 (a) に示すように、誤差磁場は、-1.08 ガウス (-1.079×10^{-4} [T]) から -4.45 ガウス (-4.462×10^{-4} [T]) で分布して存在している。

40

【0102】

この磁場分布から固有モード強度を計算し、特異値の降順で番号付けして、その強度を \times 印でプロットした図が図 9 (c) である。縦軸は残差の固有モード強度、横軸は固有モード番号である。

【0103】

図 9 (c) に示すように、図 9 (c) のグラフは右下がりの傾向があり、固有モード番号が大きくなるほど、固有モード強度の大きな成分はなくなっていく。これは、図 5 および図 6 において、1 ~ m 番目までの固有モードについて磁場制御を行い、高次 ($m + 1$ ~ n 番目) の磁場制御を行わなくても好適に磁場調整を行うことができることを示している。

50

【0104】

また、図9(c)において丸印が付いた固有モード成分について補正すると、大きな成分はなくなる。その補正する成分の強度から考えて、数100分の1の残差磁場となると期待できる。このように、図9(c)から大きな寄与の固有モードを選択して磁場補正に考慮する。これは、図6のモード選択部26aの処理に相当する。仮に、全ての固有モード(1~m番目)を補正しようとする、各シムコイル21の電流が過大と成りやすいので、磁場調整に寄与の大きい固有モードを選択する意味は大きく、図9(c)のグラフはその選択に利用する。

【0105】

図9(b)に、丸印が付いた固有モード成分について補正した場合の残差磁場分布を示す。ここでは、残差磁場を0.01ガウス(1.000×10^{-6} [T])毎の等高線で示す。図9(b)に示すように、残差磁場は、0.016ガウス($+1.631 \times 10^{-6}$ [T])から-0.017ガウス(-1.735×10^{-6} [T])で分布して存在している。即ち、残差磁場は、 $\pm 2 \mu\text{T}$ 以下の大きさで、よく補正できていることが判る。

10

【0106】

変形例

なお、本実施形態に係る磁石装置1および磁場調整装置2は、上記実施形態の構成に限定されるものではなく、発明の趣旨を逸脱しない範囲内で種々の変更が可能である。

【0107】

図10(a)は第1変形例に係るシムコイルアレイ20の展開図であり、(b)(c)は第1変形例に係るシムコイルアレイ20の固有モードの磁場分布の例である。

20

図2では、軸方向に配置されるシムコイル21の幅を等しい幅にするものとしているが、これに限られるものではない。図10(a)に示すように、軸方向位置の中心側、即ち、磁場評価面13(磁場利用領域12)に近い側のシムコイル21Bを狭幅にし、遠い側のシムコイル21Aを広幅にしてもよい。このように等しい幅でなくても、図10(b)(c)に一例を示すように、干渉しない固有モードの磁場分布を得ることができ、同様の処理で磁場調整をすることができる。

【0108】

図11は、第2変形例に係る磁石装置の構成模式断面図である。

図1では、シムコイルアレイ20を円筒面2Sに配置するものとして説明したが、これに限られるものではない。

30

例えば、円筒面2Saにシムコイルアレイ20を配置してもよい。シムコイルアレイ20を超伝導コイル1aの外側に配置することにより、シムコイルアレイ20を超伝導コイル1aの内側に配置する(図1参照)場合と比較して、超伝導コイル1aを磁場利用領域12(磁場評価面13)に近づけることができるので、超伝導コイル1aに流れる電流を小さくすることができる。一方で、シムコイル21が磁場利用領域12(磁場評価面13)から離れるため、シムコイル21に流れる電流は大きくなる。その点では、円筒面2Sに配置することが好ましい。

【0109】

また、シムコイル電流面2Sbに配置してもよい。この場合、シムコイルアレイ20は、常伝導のシムコイルアレイとなる。この位置は、磁場利用領域12に近いので、より早い応答が可能であり、また、より大きな磁場を補正できる。

40

【0110】

このように、シムコイルアレイ20の配置は、配置に必要な厚さ、超伝導コイル1aの配置領域の余裕、および、目標の補正に必要なシムコイル21の磁場性能を考慮して、適宜選択することができる。

【0111】

また、本実施形態に係る磁石装置1および磁場調整装置2は、加速器など、磁場を利用する装置に用いることができる。また、本実施形態に係る磁石装置1は、磁場利用領域12に円筒状の領域に静磁場を発生させる磁石装置であり、本実施形態に係る磁場調整装置

50

2 は、磁場利用領域 1 2 の静磁場精度が向上するように磁場調整する装置であるものとして説明したが、磁石装置 1 が磁場利用領域 1 2 に発生させる磁場は静磁場に限られるものではない。磁場利用領域 1 2 にある目標の磁場分布を発生させる磁石装置 1 および磁場調整装置 2 であってもよい。また、磁石装置 1 の超伝導コイル 1 a の中心軸（Z 軸）は、水平であるものとして説明したが、これに限られるものではなく、例えば、垂直であってもよい。

【 0 1 1 2 】

また、本実施形態に係る磁石装置 1 は、図 1 に示すように、トンネル状としているが、磁石一般的に形状でもよい。

【 0 1 1 3 】

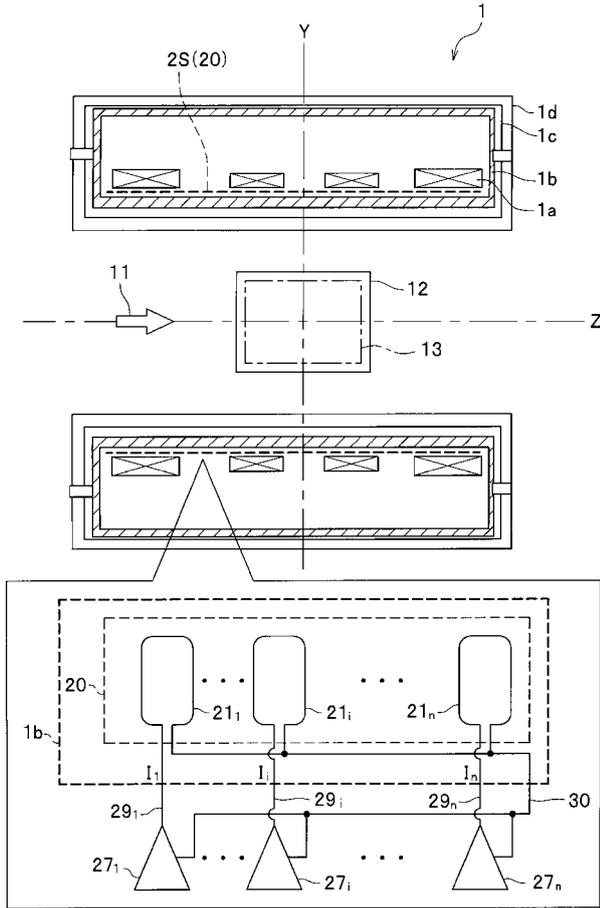
また、図 1 において、磁場利用領域 1 2 は円筒状であるものとして説明したが、これに限られるものではない。例えば、球形状であってもよく、その他の形状であってもよい。また、磁場評価面 1 3 は、磁場利用領域 1 2 の形状にあわせて、適宜選択すればよい。

【 符号の説明 】

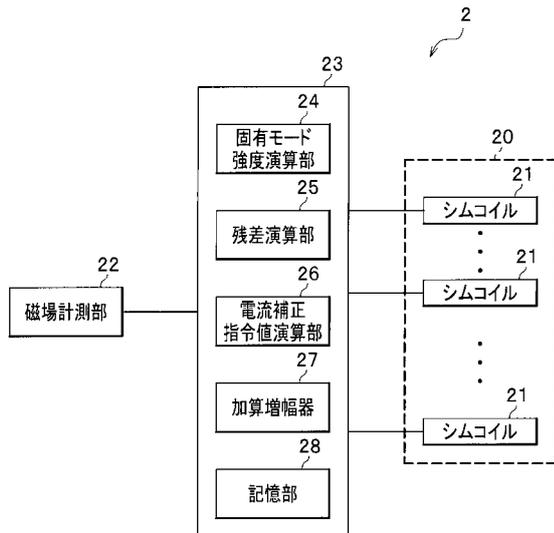
【 0 1 1 4 】

1	磁石装置	
1 1	磁場方向	
1 2	磁場利用領域	
1 3	磁場評価面	
2	磁場調整装置	20
2 0	シムコイルアレイ	
2 1	シムコイル	
2 2	磁場計測部	
2 3	電流生成部	
2 4	固有モード強度演算部	
2 5	残差演算部	
2 6	電流補正指令値演算部	
2 6 a	モード選択部	
2 6 b	共通給電線電流低減処理部	
2 7	加算増幅器（加算部、電源）	30
2 8	記憶部	
2 9	第 1 給電線	
3 0	第 2 給電線（共通給電線）	

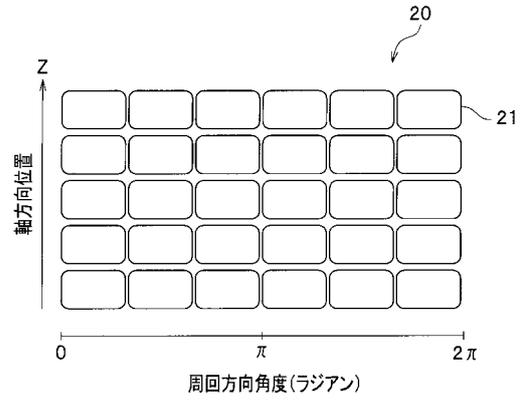
【図1】



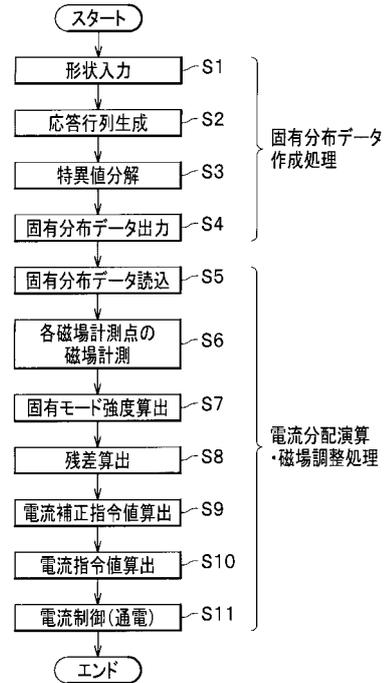
【図3】



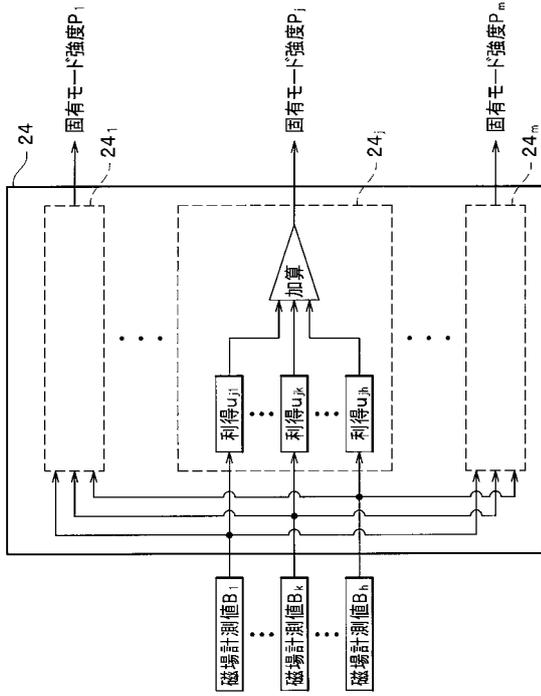
【図2】



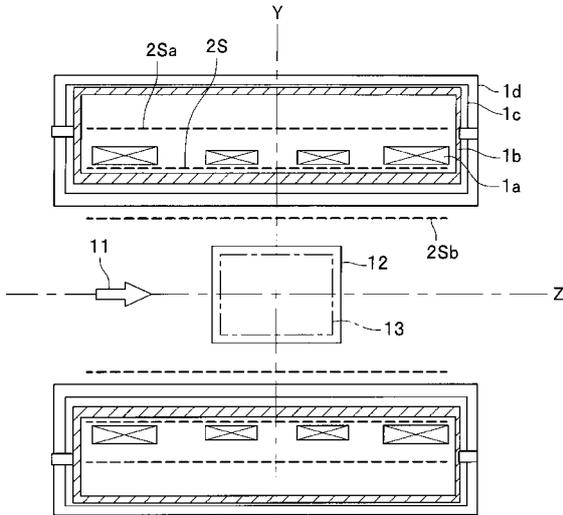
【図4】



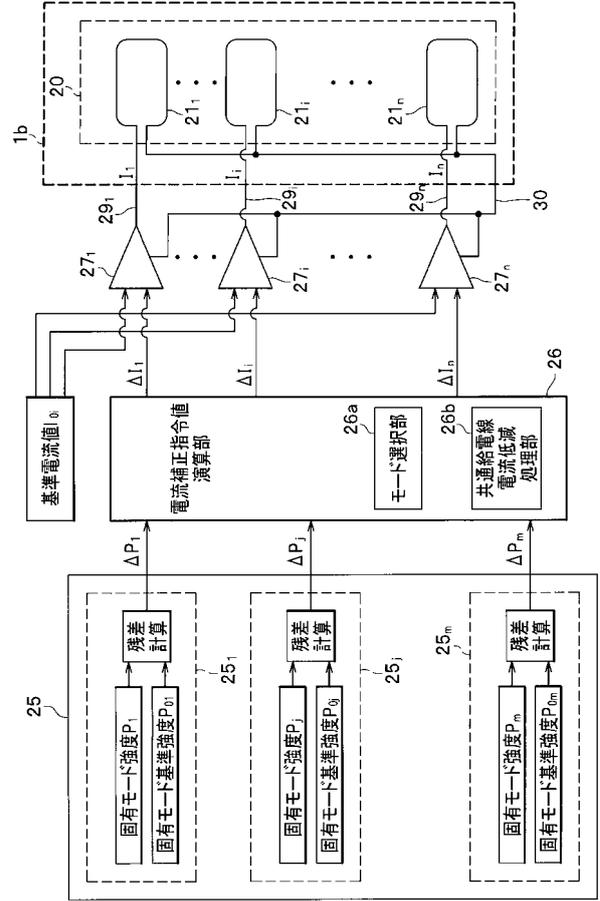
【 図 5 】



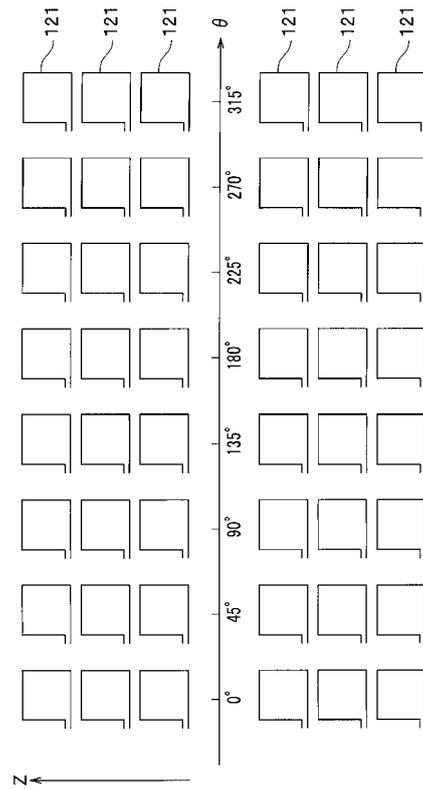
【 図 1 1 】



【 図 6 】

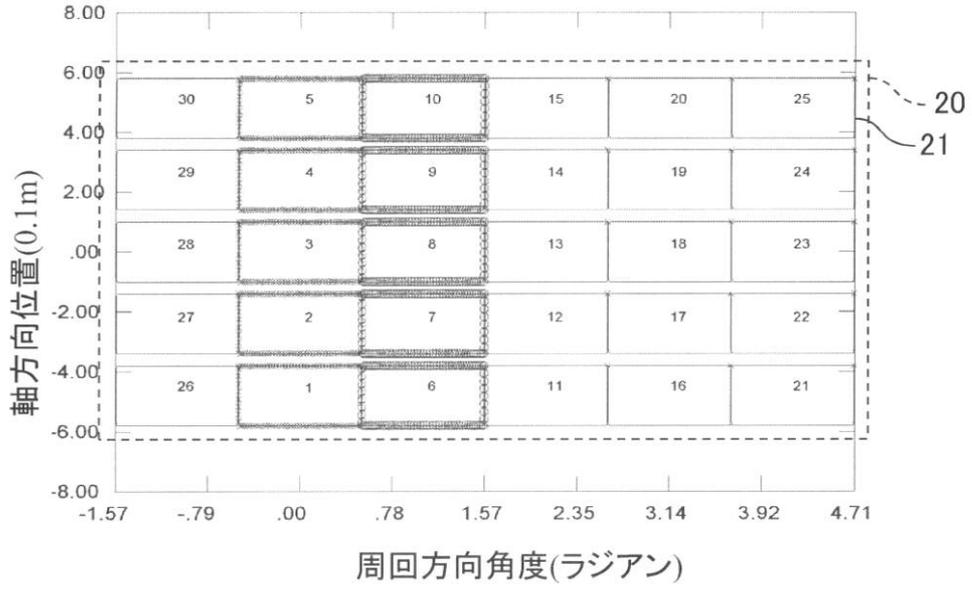


【 図 1 2 】

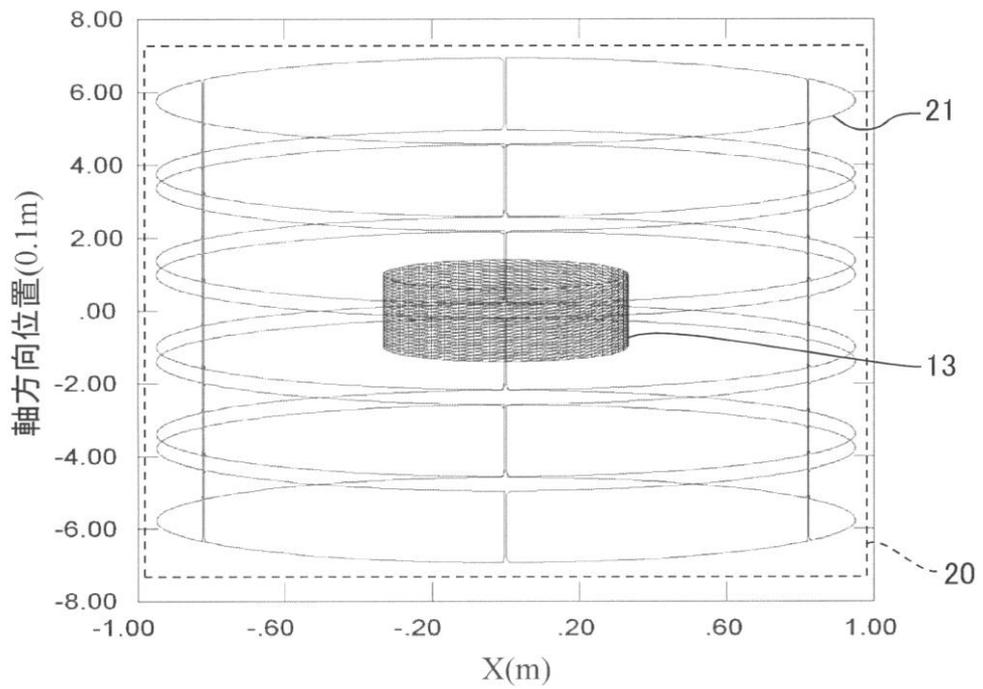


【図7】

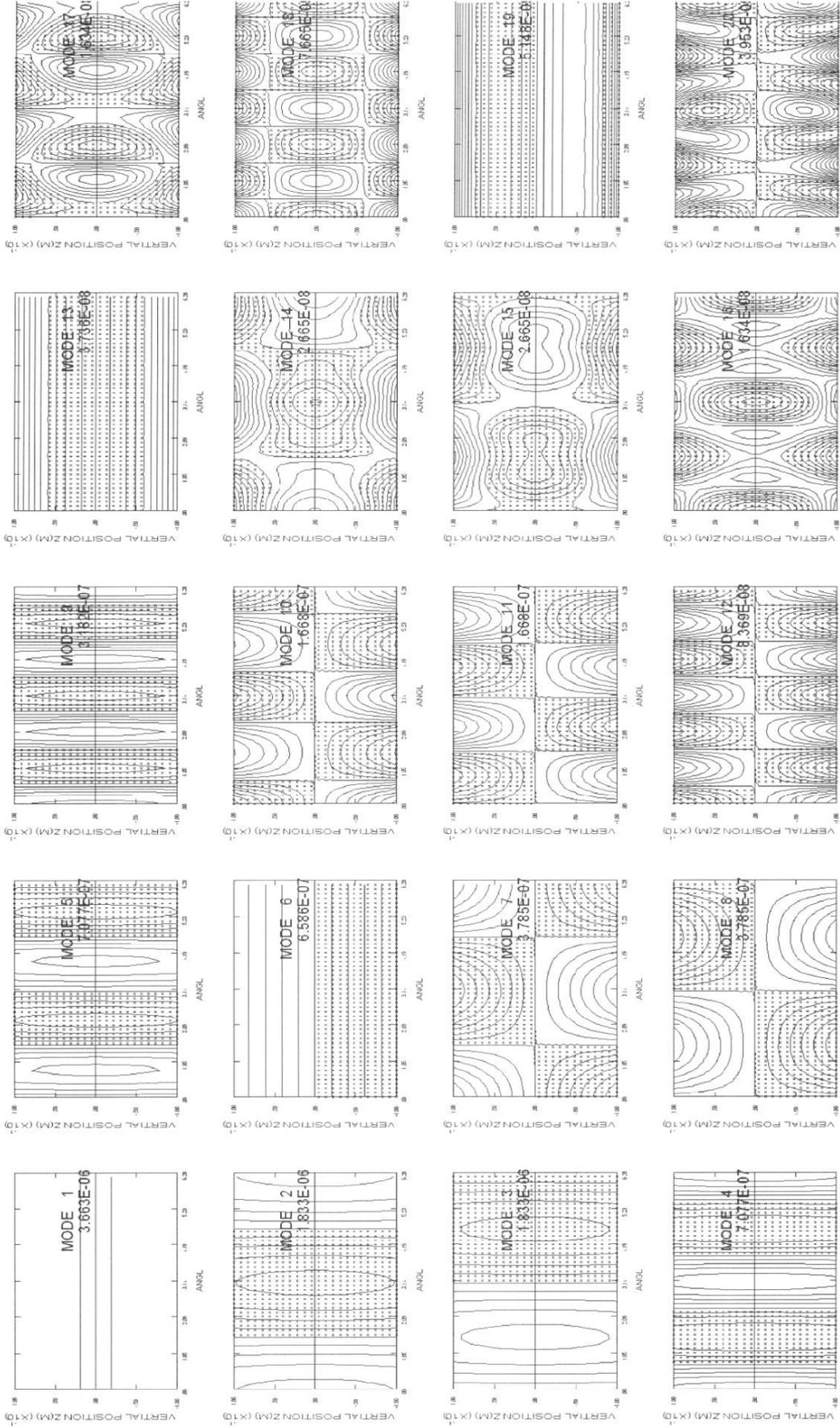
(a)



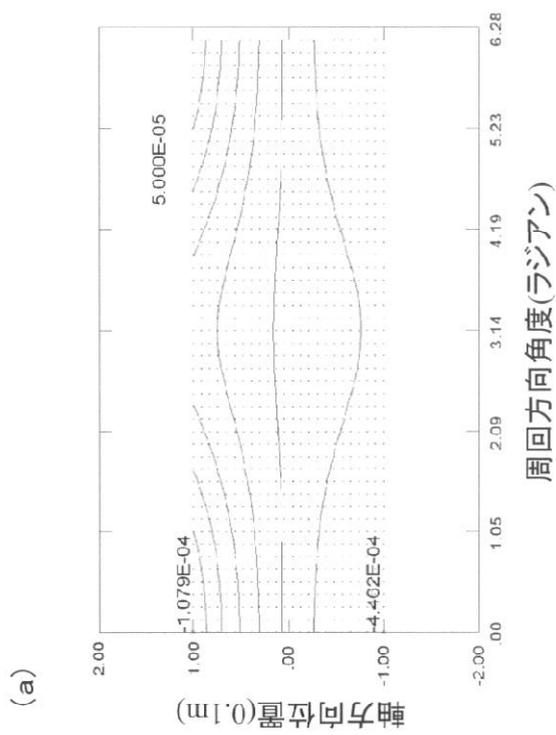
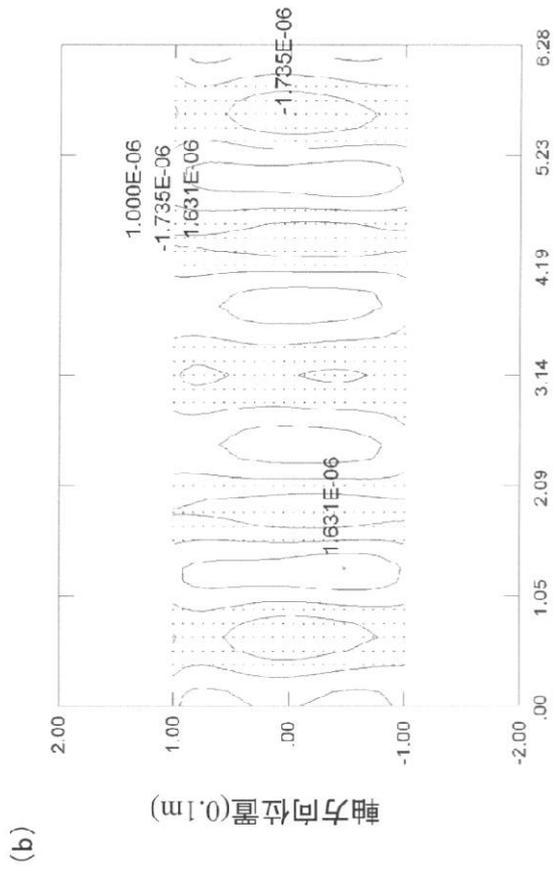
(b)



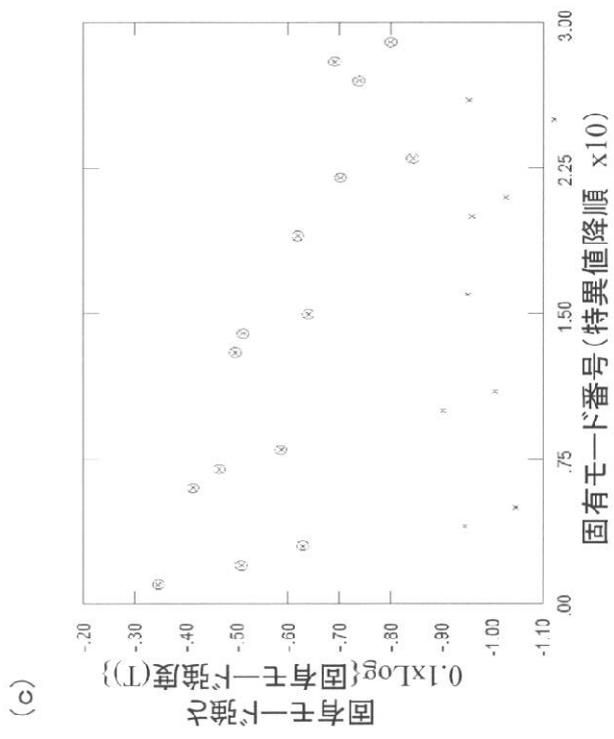
【 図 8 】



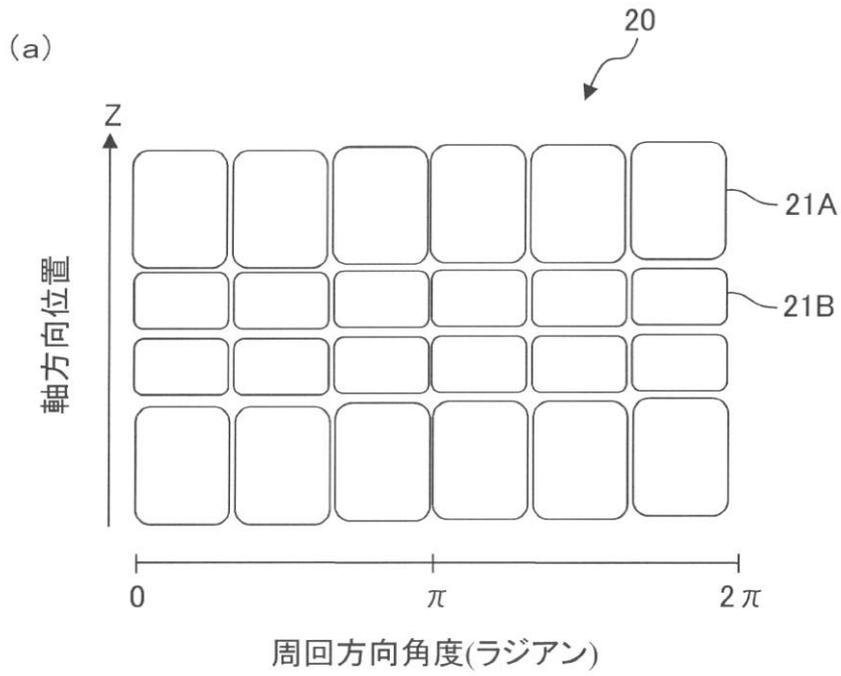
【図9】



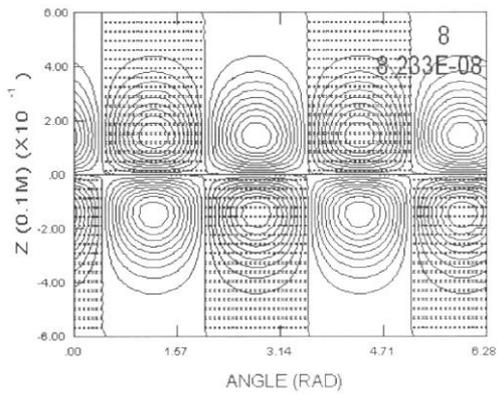
周回方向角度(ラジアン)



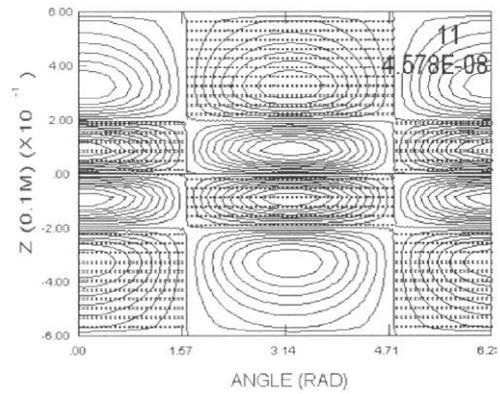
【図10】



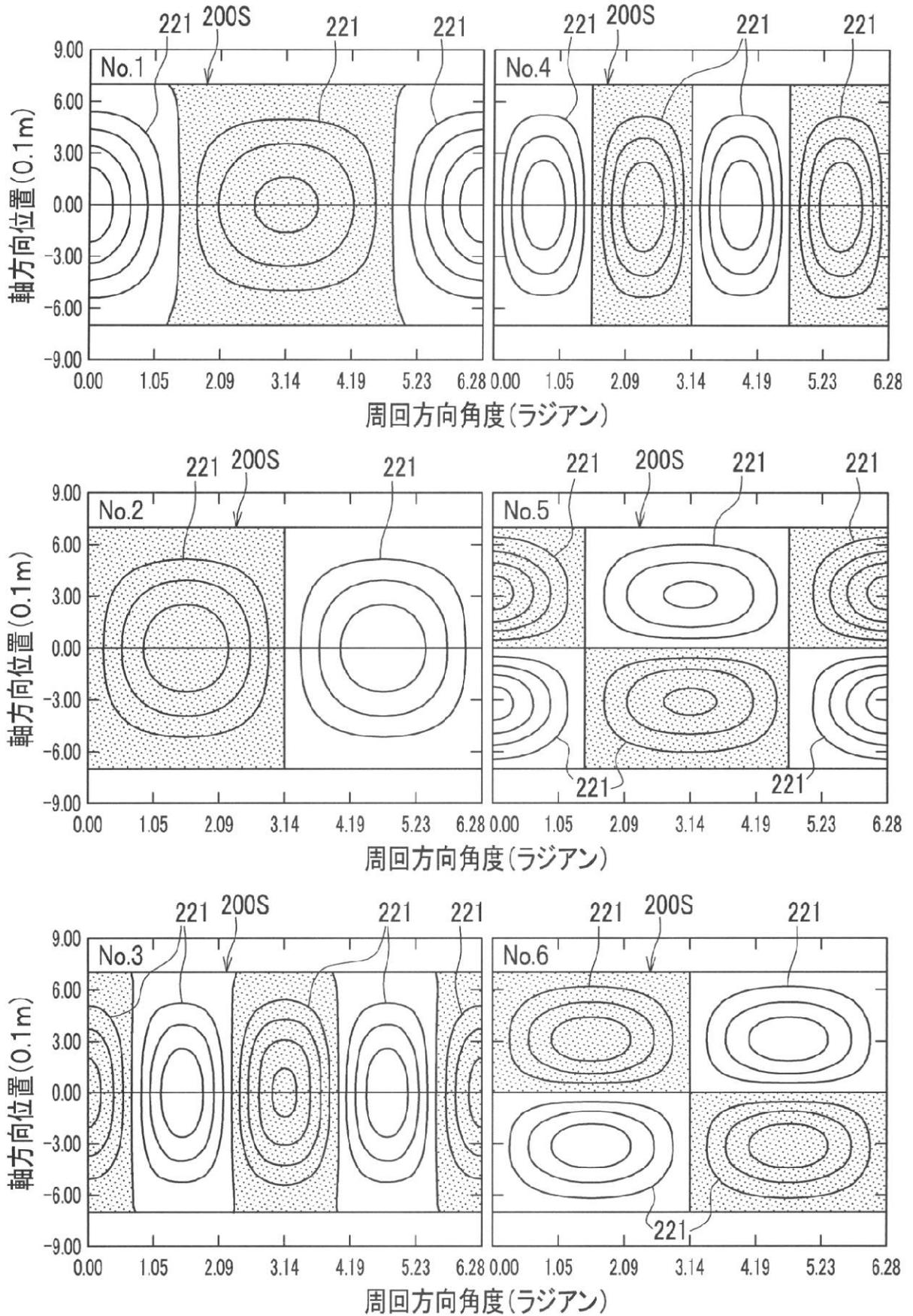
(b)



(c)



【図13】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.	F I			テーマコード(参考)		
<i>H 0 1 F 6/00 (2006.01)</i>	H 0 5 H	7/04	Z A A			
<i>H 0 1 F 7/20 (2006.01)</i>	H 0 1 F	7/22	Z			
	H 0 1 F	7/20	C			

Fターム(参考) 2G085 BA19 BB02 BC04 BC18 BE02 CA02 CA16 CA26
4C096 AB32 AB37 AB42 CA02 CA15 CA17 CA22 CA35 CA53