

(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2019-219246
(P2019-219246A)

(43) 公開日 令和1年12月26日(2019.12.26)

(51) Int.Cl.	F 1	テーマコード (参考)
GO 1 N 27/72 (2006.01)	GO 1 N 27/72	2 G 0 5 3
GO 6 F 17/50 (2006.01)	GO 6 F 17/50	6 1 2 H 5 B 0 4 6

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2018-116185 (P2018-116185)	(71) 出願人	000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(22) 出願日	平成30年6月19日 (2018.6.19)	(74) 代理人	110002147 特許業務法人酒井国際特許事務所
		(72) 発明者	安宅 正 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
		Fターム(参考)	2G053 AB01 BA03 BB11 CB24 5B046 JA10

(54) 【発明の名称】 磁界シミュレーションプログラム、情報処理装置および磁界シミュレーション方法

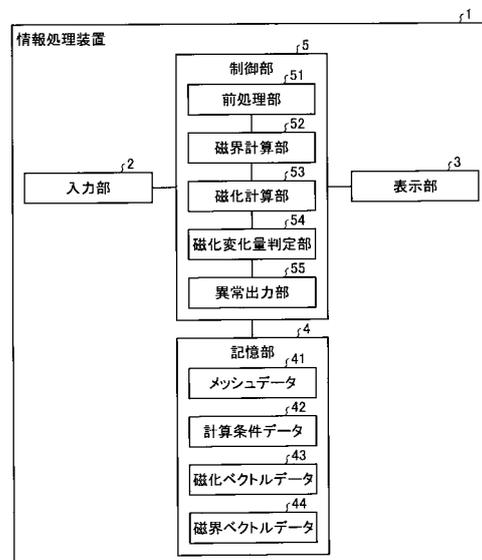
(57) 【要約】

【課題】 マイクロマグネティックシミュレーションの計算時間を短縮する場合に、不正確なシミュレーション結果を検出する。

【解決手段】 情報処理装置1は、磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとに、各要素の静磁界ベクトルデータを、磁化ベクトルデータを用いて近似する。情報処理装置1は、要素ごとに、特定の時刻の静磁界ベクトルデータを用いて次の時刻の磁化ベクトルデータを算出する。情報処理装置1は、要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との磁化ベクトルデータの変化量を算出する。情報処理装置1は、要素ごとに算出された、それぞれの磁化ベクトルデータの変化量に基づいて、シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する。

【選択図】 図1

実施例1に係る情報処理装置の構成を示す機能ブロック図



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとに、各要素の静磁界ベクトルデータを、磁化ベクトルデータを用いて近似し、

要素ごとに、特定の時刻の前記静磁界ベクトルデータを用いて次の時刻の磁化ベクトルデータを算出し、

要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との前記磁化ベクトルデータの変化量を算出し、

要素ごとに算出された、それぞれの前記磁化ベクトルデータの変化量に基づいて、前記シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する

処理をコンピュータに実行させることを特徴とする磁界シミュレーションプログラム。

【請求項 2】

該出力する処理は、要素ごとに算出された、それぞれの前記磁化ベクトルデータの変化量の最大値が所定量を超える場合に、前記シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の磁界シミュレーションプログラム。

【請求項 3】

該出力する処理は、要素ごとに算出された、それぞれの前記磁化ベクトルデータの変化量の平均値が所定量を超える場合に、前記シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する

ことを特徴とする請求項 1 に記載の磁界シミュレーションプログラム。

【請求項 4】

磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとに、各要素の静磁界ベクトルデータを、磁化ベクトルデータを用いて近似する磁界ベクトル計算部と、

要素ごとに、特定の時刻の前記静磁界ベクトルデータを用いて次の時刻の磁化ベクトルデータを算出する磁化計算部と、

要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との前記磁化ベクトルデータの変化量を算出し変化量計算部と、

要素ごとに算出された、それぞれの前記磁化ベクトルデータの変化量に基づいて、前記シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する出力部と、

を有することを特徴とする情報処理装置。

【請求項 5】

磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとに、各要素の静磁界ベクトルデータを、磁化ベクトルデータを用いて近似し、

要素ごとに、特定の時刻の前記静磁界ベクトルデータを用いて次の時刻の磁化ベクトルデータを算出し、

要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との前記磁化ベクトルデータの変化量を算出し、

要素ごとに算出された、それぞれの前記磁化ベクトルデータの変化量に基づいて、前記シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する

処理をコンピュータが実行することを特徴とする磁界シミュレーション方法。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、磁界シミュレーションプログラム、情報処理装置および磁界シミュレーション方法に関する。

【背景技術】**【0002】**

磁性体の磁化挙動を解析する技術として、磁性体を小さな磁石の集合としてモデル化し

10

20

30

40

50

、磁区状態を数値シミュレーションするマイクロマグネティックシミュレーションが知られている。マイクロマグネティックシミュレーションは、HDD (Hard Disk Drive) の磁気ヘッドやMRAM (Magnetoresistive Random Access Memory) 等のマイクロな磁性デバイス、および永久磁石や電磁鋼板といった磁性材料の磁区状態を解析するために用いられる。

【0003】

図11は、マイクロ磁化による磁性体のモデル化を説明するための図である。ここで、マイクロ磁化とは、個々の小さな磁石のことである。図11に示すように、マイクロマグネティックシミュレーションでは、磁性体を微小な要素(メッシュ)に分割し、要素ごとにマイクロ磁化 \vec{m}_i を配置し、各マイクロ磁化 \vec{m}_i の振る舞いを磁化ベクトル \vec{M} として計算する。

10

【0004】

マイクロマグネティックシミュレーションでは、各マイクロ磁化の運動を支配する方程式(支配方程式)は、式(1)であり、LLG (Landau-Lifshitz-Gilbert) 方程式と呼ばれる。

【数1】

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = -\frac{\gamma}{1+\alpha^2} (\vec{m} \times \vec{H}_{\text{eff}}) - \frac{\alpha\gamma}{1+\alpha^2} (\vec{m} \times \vec{m} \times \vec{H}_{\text{eff}}) \quad \dots (1)$$

【0005】

ここで、「 \vec{m} 」が上に付された m 、 γ 、および「 \vec{H}_{eff} 」が上に付された有効磁界ベクトル \vec{H}_{eff} は、それぞれ磁化ベクトル、ジャイロ磁気定数、ダンピング定数および有効磁界ベクトルである。「 \vec{m} 」はベクトルであることを示す。以降、ベクトルを示す「 \vec{m} 」は式中でのみ使用し、他の個所では省略する。「 \times 」は外積を示す。

20

【0006】

有効磁界ベクトル \vec{H}_{eff} は、式(2)のように、異方向エネルギー E_{ani} 、交換結合エネルギー E_{exc} 、ゼーマンエネルギー E_{app} および静磁エネルギー E_{d} の合成である。ここで、 M_s は、飽和磁化である。

【数2】

$$\vec{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{M_s} \frac{\delta}{\delta \vec{m}} [E_{\text{ani}} + E_{\text{exc}} + E_{\text{app}} + E_{\text{d}}] \quad \dots (2)$$

30

【0007】

異方向エネルギー E_{ani} 、交換結合エネルギー E_{exc} 、ゼーマンエネルギー E_{app} および静磁エネルギー E_{d} は、それぞれ式(3)、式(4)、式(5)および式(6)で計算される。

【数3】

$$E_{\text{ani}} = \int dV K_u \left(1 - (\vec{k} \cdot \vec{m})^2 \right) \quad \dots (3)$$

40

【数4】

$$E_{\text{exc}} = \int dV A (\nabla \vec{m})^2 \quad \dots (4)$$

【数5】

$$E_{\text{app}} = -\int dV M_s \vec{H}_{\text{app}} \cdot \vec{m} \quad \dots (5)$$

【数 6】

$$E_d = -\frac{1}{2} \int dV M_s \vec{H}_d \cdot \vec{m} \quad \dots (6)$$

【0008】

ここで、「 \vec{m} 」が上に付された k 、 K_u 、 A 、 M_s および「 \vec{H}_{app} 」が上に付された H_{app} は、それぞれ磁気異方性ベクトル、磁気異方性定数、交換結合定数、飽和磁化および外部磁界ベクトルである。

【0009】

「 ϕ 」が上に付された H_d は、静磁界ベクトルであり、式(7)および式(8)で計算される。なお、「 ϕ 」は、静磁ポテンシャルである。

10

【数 7】

$$\vec{H}_d = -\nabla\phi \quad \dots (7)$$

【数 8】

$$\nabla^2\phi = -\nabla \cdot \vec{m} \quad \dots (8)$$

【0010】

マイクロマグネティックシミュレーションである磁界シミュレーションを情報処理装置が実施するフローチャートの参考例を、図12を参照して説明する。図12は、磁界シミュレーションのフローチャートの参考例を示す図である。図12に示すように、情報処理装置は、まず、磁界シミュレーションに必要な計算データを生成する(ステップS91)。例えば、情報処理装置は、対象の磁性体からメッシュを生成する。情報処理装置は、メッシュごとの、静磁ポテンシャルの領域 P を生成する。情報処理装置は、メッシュごとの、磁化ベクトルを配置する領域 M を生成する。

20

【0011】

そして、情報処理装置は、磁界シミュレーションに必要な各種パラメータを設定する(ステップS92)。例えば、情報処理装置は、メッシュごとの、静磁ポテンシャルの初期値を設定する。情報処理装置は、メッシュごとの、磁化ベクトルの初期値を設定する。情報処理装置は、最大の時間ステップ k_{max} を設定する。

30

【0012】

そして、情報処理装置は、時間ステップごとに所定の時間 k_{max} まで、ステップS93とステップS97で挟まれた処理を全てのメッシュの磁化ベクトル $m(i)$ に対して繰り返し実行する。すなわち、情報処理装置は、メッシュ i ごとに、式(8)を用いて、静磁ポテンシャル ϕ を更新する(ステップS94)。

【0013】

情報処理装置は、メッシュ i ごとに、磁界ベクトルを更新する(ステップS95)。例えば、情報処理装置は、式(7)および式(8)を用いて、静磁ポテンシャル ϕ の勾配計算により静磁界ベクトル H_d を更新する。また、情報処理装置は、外部磁界ベクトル H_{app} 、磁気異方性ベクトル k および交換結合磁界ベクトル $(M_s)^2$ を更新する。

40

【0014】

そして、情報処理装置は、メッシュ i ごとに、磁化ベクトル $m(i)$ を更新する(ステップS96)。例えば、情報処理装置は、式(2)~式(6)を用いて、式(1)により、磁化ベクトル $m(i)$ を更新する(ステップS96)。

【0015】

そして、所定の時間分の繰り返しが完了すると、情報処理装置は、磁化ベクトルのシミュレーション結果を出力する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0016】

50

【特許文献1】特開平10-124479号公報
 【特許文献2】特開平10-325858号公報
 【特許文献3】特開2008-275403号公報
 【発明の概要】
 【発明が解決しようとする課題】

【0017】

ところで、マイクロマグネティックシミュレーションでは、膨大な計算時間を要し、その大部分を静磁界ベクトル H_d の計算(式(7))に用いられる静磁ポテンシャルの計算(式(8))が占めている。そこで、静磁界ベクトル H_d の計算は、静磁ポテンシャルの計算を実施しないで、式(9)により実施することもできる。なお、 N 、 μ_0 は、反磁界係数、真空の透磁率を表す。

10

【数9】

$$\vec{H}_d = N \frac{M_s}{\mu_0} \quad \dots (9)$$

【0018】

静磁界ベクトル H_d が式(9)により実施されると、シミュレーションの計算が不正確になる場合があるという問題がある。すなわち、静磁界ベクトル H_d が式(9)により実施されることで、静磁ポテンシャルの計算時間を省略し、シミュレーションの計算時間を短縮することができる。しかしながら、静磁界ベクトル H_d の計算は、近似のため、場合によっては、シミュレーションの計算が破綻し、不正確なシミュレーション結果となることがある。

20

【0019】

本発明は、1つの側面では、マイクロマグネティックシミュレーションの計算時間を短縮する場合に、不正確なシミュレーション結果を検出することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0020】

本願の開示する磁界シミュレーションプログラムは、1つの態様において、磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとの各要素の静磁界ベクトルデータを、磁化ベクトルデータを用いて近似し、要素ごとに、特定の時刻の前記静磁界ベクトルデータを用いて次の時刻の磁化ベクトルデータを算出し、要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との前記磁化ベクトルデータの変化量を算出し、要素ごとに算出された、前記磁化ベクトルデータの変化量に基づいて、前記シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する、処理をコンピュータに実行させる。

30

【発明の効果】

【0021】

1実施態様によれば、マイクロマグネティックシミュレーションの計算時間を短縮する場合に、不正確なシミュレーション結果を検出することができる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

40

【図1】図1は、実施例1に係る情報処理装置の構成を示す機能ブロック図である。

【図2】図2は、データの一例を示す図である。

【図3A】図3Aは、磁化変化量の特徴の一例を示す図(1)である。

【図3B】図3Bは、磁化変化量の特徴の一例を示す図(2)である。

【図4】図4は、実施例1に係る磁界シミュレーションのフローチャートの一例を示す図である。

【図5】図5は、実施例1に係る磁化変化量算出処理のフローチャートの一例を示す図である。

【図6】図6は、実施例1を適用する磁性体モデルの一例を示す図である。

【図7】図7は、実施例1に係る結果データの一例を示す図である。

50

【図 8】図 8 は、実施例 2 に係る磁界シミュレーションのフローチャートの一例を示す図である。

【図 9】図 9 は、実施例 2 に係る磁化変化量算出処理のフローチャートの一例を示す図である。

【図 10】図 10 は、磁界シミュレーションプログラムを実行するコンピュータの一例を示す図である。

【図 11】図 11 は、マイクロ磁化による磁性体のモデル化を説明するための図である。

【図 12】図 12 は、磁界シミュレーションのフローチャートの参考例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下に、本願の開示する磁界シミュレーションプログラム、情報処理装置および磁界シミュレーション方法の実施例を図面に基づいて詳細に説明する。なお、情報処理装置は、マイクロマグネティックシミュレーションを行う装置であり、磁化ベクトルを一定の時間ステップ毎に所定の時間分計算して表示する。また、本発明は、実施例により限定されるものではなく、磁界シミュレーションに広く適用可能である。

【実施例 1】

【0024】

[情報処理装置の構成]

図 1 は、実施例に係る情報処理装置の構成を示す機能ブロック図である。図 1 に示すように、情報処理装置 1 は、入力部 2 と、表示部 3 と、記憶部 4 と、制御部 5 とを有する。

【0025】

入力部 2 は、解析を行うユーザが各種の情報や指示を情報処理装置 1 に入力するための入力装置である。例えば、入力部 2 は、キーボード、マウス、タッチパネルに対応する。表示部 3 は、各種の情報を表示する表示装置である。例えば、表示部 3 は、ディスプレイ、タッチパネルに対応する。

【0026】

記憶部 4 は、例えば、RAM、フラッシュメモリ (Flash Memory) 等の半導体メモリ素子、または、ハードディスク、光ディスク等の記憶装置である。記憶部 4 は、メッシュデータ 4 1 と、計算条件データ 4 2 と、磁化ベクトルデータ 4 3 と、磁界ベクトルデータ 4 4 とを記憶する。

【0027】

メッシュデータ 4 1 は、シミュレーション対象となる磁性体の領域を有限要素法や有限差分法により有限個に分割された複数の要素からなるデータである。要素とは、シミュレーション対象となる領域を分割した最小単位の領域であり、複数の節点によって構成される。

【0028】

計算条件データ 4 2 は、磁界シミュレーションの計算条件に関するデータである。計算条件データ 4 2 には、例えば、有限要素法や有限差分法で扱うメッシュの個々の要素の数や、時間ステップの値が含まれる。

【0029】

磁化ベクトルデータ 4 3 は、磁界シミュレーションすなわちマイクロマグネティックシミュレーションの結果を示す磁化ベクトルのデータである。磁化ベクトルデータ 4 3 には、時間ステップ毎の各要素の磁化ベクトルの計算値が所定の時間分含まれる。

【0030】

磁界ベクトルデータ 4 4 は、磁界シミュレーションすなわちマイクロマグネティックシミュレーションの結果を計算する際に用いられる静磁界ベクトルのデータである。磁界ベクトルデータ 4 4 には、時間ステップ毎の各要素の静磁界ベクトルなどの磁界ベクトルの計算値が所定の時間分含まれる。

【0031】

制御部 5 は、CPU (Central Processing Unit) 等の電子回路に対応する。そして

10

20

30

40

50

、制御部 5 は、各種の処理手順を規定したプログラムや制御データを格納するための内部メモリを有し、これらによって種々の処理を実行する。例えば、制御部 5 は、磁界シミュレーション処理を実行する。磁界シミュレーション処理は、記憶部 4 からメッシュデータ 4 1 および計算条件データ 4 2 を読み込んで計算を開始する。そして、磁界シミュレーション処理は、時間ごとに各メッシュの磁化ベクトルを算出するときに、算出結果のチェックを行い、計算が破綻する前に、処理を中止し、中止をユーザに通知する。

【 0 0 3 2 】

制御部 5 は、前処理部 5 1 と、磁界計算部 5 2 と、磁化計算部 5 3 と、磁化変化量判定部 5 4 と、異常出力部 5 5 とを有する。なお、磁界計算部 5 2 は、磁界ベクトル計算部の一例である。磁化計算部 5 3 は、磁化計算部の一例である。磁化変化量判定部 5 4 は、変化量計算部の一例である。異常出力部 5 5 は、出力部の一例である。

10

【 0 0 3 3 】

前処理部 5 1 は、磁界シミュレーション処理の前に、前処理を行う。例えば、前処理部 5 1 は、メッシュデータ 4 1 を生成する。また、前処理部 5 1 は、メッシュデータ 4 1 の各要素に配置する磁化ベクトルを生成し、初期値を設定する。また、前処理部 5 1 は、磁界シミュレーション処理に必要な各種パラメータを設定する。

【 0 0 3 4 】

磁界計算部 5 2 は、各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとの各要素の磁界ベクトルを計算する。

【 0 0 3 5 】

例えば、磁界計算部 5 2 は、式 (9) を用いて、静磁界ベクトル H_d を計算する。すなわち、磁界計算部 5 2 は、静磁ポテンシャルの計算を実施しないで、静磁界ベクトルを近似する。なお、式 (9) の中の N 、 μ_0 は、反磁界係数、真空の透磁率である。式 (9) の中の M_s は、飽和磁化である。これにより、磁界計算部 5 2 は、式 (8) の静磁ポテンシャルの計算時間を省略し、静磁界ベクトル H_d を近似することで、結果的に磁界シミュレーションの計算時間を短縮することが可能となる。

20

【 0 0 3 6 】

加えて、磁界計算部 5 2 は、外部磁界ベクトル H_{app} を計算する。磁界計算部 5 2 は、外部磁界ベクトル H_{app} を計算する。磁界計算部 5 2 は、磁気異方性ベクトル k を計算する。磁界計算部 5 2 は、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を計算する。

30

【 0 0 3 7 】

また、磁界計算部 5 2 は、各種磁界ベクトルの計算結果を磁界ベクトルデータ 4 4 として記憶部 4 に格納する。

【 0 0 3 8 】

磁化計算部 5 3 は、要素ごとに、特定の時刻の磁界ベクトルを用いて次の時刻の磁化ベクトルを計算する。例えば、磁化計算部 5 3 は、磁界計算部 5 2 によって計算された各種ベクトルを式 (3) ~ 式 (6) に代入して、各種エネルギーを計算する。そして、磁化計算部 5 3 は、式 (2) により有効磁界ベクトル H_{eff} を算出する。そして、磁化計算部 5 3 は、有効磁界ベクトル H_{eff} を式 (1) に代入して、次の時刻の磁化ベクトルを計算する。

40

【 0 0 3 9 】

また、磁化計算部 5 3 は、計算結果を磁化ベクトルデータ 4 3 として記憶部 4 に格納する。

【 0 0 4 0 】

磁化変化量判定部 5 4 は、磁化ベクトルの変化量を判定する。例えば、磁化変化量判定部 5 4 は、要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との磁化ベクトルの変化量を算出する。なお、磁化ベクトルの変化量は、以降、「磁化の変化量」や「磁化変化量」と同義である。磁化変化量判定部 5 4 は、要素ごとの各磁化の変化量の最大値を取得する。磁化変化量判定部 5 4 は、取得した変化量の最大値が変化量の閾値より大きいかが否かを判定する。

【 0 0 4 1 】

50

なお、変化量の閾値は、磁化シミュレーションの計算実行時に、作業者によって定義される。特定の時刻と次の時刻との時間刻みが大きいと、時間積分の回数が減るため、計算時間は短縮されるが、1時間ステップ当たりの磁化変化量は大きくなる。磁化シミュレーションでは、磁化の歳差運動（式（1）の右辺第1項）を取り扱う必要があり、磁化の変化量が大きい場合には解析の精度が著しく下がってしまう。そこで、作業者は、計算時間と計算精度のバランスを考え、磁化変化量の閾値および時間刻みを定義する必要がある。

【0042】

ここで、特定の時刻と次の時刻との磁化ベクトルの変化量の算出方法について、説明する。特定の時刻 k の要素 i の磁化ベクトルを m_i^k とする。次の時刻 $k+1$ の要素 i の磁化ベクトルを m_i^{k+1} とする。かかる場合に、磁化変化量判定部54は、磁化ベクトルの変化量 dm_i^k を、式（10）により算出する。

10

【数10】

$$dm_i^k = \sqrt{(m_{i,x}^{k+1} - m_{i,x}^k)^2 + (m_{i,y}^{k+1} - m_{i,y}^k)^2 + (m_{i,z}^{k+1} - m_{i,z}^k)^2} \quad \dots (10)$$

【0043】

そして、磁化変化量判定部54は、算出された要素ごとの各磁化の変化量 dm_i^k の最大値 dm を取得する。磁化変化量判定部54は、取得した変化量の dm が変化量の閾値 dm_max より大きいかなかを判定する。

【0044】

20

異常出力部55は、異常を出力する。例えば、異常出力部55は、磁化変化量判定部54によって変化量の最大値が変化量の閾値より大きい場合には、磁界シミュレーションを中止し、中止の旨を通知する。これにより、異常出力部55は、磁界シミュレーションの計算時間を短縮する場合に、不正確な磁界シミュレーション結果を検出することができる。この結果、ユーザは、不正確な磁界シミュレーション結果を受け取ることを回避できる。

【0045】

[データの一例]

ここで、データの一例を、図2を参照して説明する。図2は、データの一例を示す図である。

30

【0046】

図2左図は、メッシュデータ41の一例である。図2左図に示すように、メッシュデータ41には、磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の位置が設定されている。なお、メッシュデータ41は、前処理部51によって生成される。

【0047】

図2中図は、磁化ベクトルデータ43の一例である。図2中図に示すように、磁化ベクトルデータ43には、時間ステップ毎の各要素の磁化ベクトルが設定されている。なお、磁化ベクトルデータ43は、磁化計算部53によって更新される。

【0048】

図2右図は、磁界ベクトルデータ44の一例である。図2中図に示すように、磁界ベクトルデータ44には、時間ステップ毎の各要素の磁界ベクトルが設定されている。なお、磁界ベクトルデータ44は、磁界計算部52によって更新される。

40

【0049】

[磁化変化量の特徴の一例]

次に、磁化変化量の特徴の一例を、図3Aおよび図3Bを参照して説明する。図3Aおよび図3Bは、磁化変化量の特徴の一例を示す図である。なお、図3Aおよび図3Bで示される磁化ベクトルは、磁化シミュレーションでは、規格化して取り扱われるため、大きさを1とする。

【0050】

図3Aに示すように、要素 i について、時刻 k から時刻 $k+1$ に磁化ベクトルが更新さ

50

れている。かかる場合には、磁化ベクトルが反転し、磁化変化量が「2」を示す。すなわち、磁化変化量が極端に大きくなってしまった場合である。かかる場合には、この要素 i から磁化の振動が伝搬してしまうため、磁界シミュレーション処理は、不正確な結果となる。そこで、磁化シミュレーションの計算を中止する必要がある。つまり、異常出力部 55 は、磁化変化量判定部 54 によって各磁性要素の変化量の最大値が閾値より大きければ、磁化ベクトルデータの計算を中止し、中止の旨を通知する。

【0051】

図 3 B に示すように、要素 i について、時刻 k から時刻 $k + 1$ に磁化ベクトルが更新されている。かかる場合には、磁化ベクトルが 90 度回転し、磁化変化量が「1」を示す。すなわち、磁化変化量が極端に大きくない場合である。かかる場合には、この要素 i から磁化の振動が伝搬しないため、磁界シミュレーション処理は、正確な結果となる。

10

【0052】

[磁界シミュレーションのフローチャート]

図 4 は、実施例 1 に係る磁界シミュレーションのフローチャートの一例を示す図である。

【0053】

図 4 に示すように、前処理部 51 は、計算データを生成する (ステップ S11)。例えば、前処理部 51 は、磁界シミュレーションで用いられるメッシュデータ 41 を生成する。前処理部 51 は、磁界シミュレーションで用いられる磁化ベクトルデータ 43 を生成する。

20

【0054】

そして、前処理部 51 は、各種パラメータを設定する (ステップ S12)。例えば、前処理部 51 は、磁化ベクトルデータ 43 の初期値を設定する。前処理部 51 は、最大のステップ数である k_{max} を設定する。前処理部 51 は、変化量の閾値である d_{m_max} を設定する。

【0055】

そして、情報処理装置 1 は、時間ステップ k 毎に最大のステップ数 k_{max} まで、ステップ S13 と S17 で挟まれた処理を繰り返し実行する。すなわち、磁界計算部 52 は、要素ごとに、静磁界ベクトルを含む磁界ベクトルを更新する (ステップ S14)。そして、磁化計算部 53 は、要素ごとに、磁化ベクトルを更新する (ステップ S15)。そして、磁化変化量判定部 54 は、要素ごとに、時間ステップ k と前回の時間ステップ $k - 1$ との磁化ベクトルの変化量 (磁化変化量) を算出する。そして、磁化変化量判定部 54 は、要素ごとの磁化変化量から、この時間ステップ k に対する磁化変化量 d_m を算出する。かかる磁化変化量算出処理のフローチャートは、後述する。

30

【0056】

そして、磁化変化量判定部 54 は、磁化変化量 d_m が変化量の閾値 d_{m_max} より大きいかが判定する (ステップ S16)。磁化変化量 d_m が変化量の閾値 d_{m_max} 以下であると判定した場合 (ステップ S16; No)、情報処理装置 1 は、時間ステップ k を 1 加算すべく、ステップ S13 に移行する。情報処理装置 1 は、時間ステップ k が最大のステップ数 k_{max} に達すると、磁界シミュレーションを終了する。

40

【0057】

一方、磁化変化量 d_m が変化量の閾値 d_{m_max} より大きいと判定した場合 (ステップ S16; Yes)、異常出力部 55 は、磁界シミュレーションを中止し、中止の旨を通知する (ステップ S18)。

【0058】

[磁化変化量算出処理のフローチャート]

図 5 は、実施例 1 に係る磁化変化量算出処理のフローチャートの一例を示す図である。なお、図 5 のフローチャートは、時刻 k における要素 i に対するループを行い、時刻 k における磁化変化量 d_m を算出する。

【0059】

50

図5に示すように、磁化変化量算出処理は、磁化変化量 $d m$ を初期化する(ステップS21)。磁化変化量算出処理は、ステップS22とステップS30で挟まれる処理を要素 i に対する処理として、 i を変えながら全ての要素に対して行う。

【0060】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、静磁界ベクトル H_d を更新する(ステップS23)。例えば、磁界計算部52は、式(9)より、静磁界ベクトル H_d を更新する。そして、磁化計算部53は、式(6)により、静磁界ベクトル H_d を用いて静磁エネルギー E_d を算出する。そして、磁化計算部53は、静磁エネルギー E_d を用いて、式(2)の第4項を算出する。

【0061】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、外部磁界ベクトル H_{app} を更新する(ステップS24)。例えば、磁界計算部52は、外部磁界ベクトル H_{app} を更新する。そして、磁化計算部53は、式(5)により、外部磁界ベクトル H_{app} を用いて外部磁界エネルギー E_{app} を算出する。そして、磁化計算部53は、外部磁界エネルギー H_{app} を用いて、式(2)の第3項を算出する。

【0062】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、異方性磁界ベクトル k を更新する(ステップS25)。例えば、磁界計算部52は、磁気異方性ベクトル k を更新する。そして、磁化計算部53は、式(3)により、磁気異方性ベクトル k を用いて異方性エネルギー E_{ani} を算出する。そして、磁化計算部53は、異方性エネルギー E_{ani} を用いて、式(2)の第1項を算出する。

【0063】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を更新する(ステップS26)。なお、 m は、磁化ベクトルである。例えば、磁界計算部52は、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を更新する。そして、磁化計算部53は、式(4)により、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を用いて交換結合エネルギー E_{exc} を算出する。そして、磁化計算部53は、交換結合エネルギー E_{exc} を用いて、式(2)の第2項を算出する。

【0064】

各要素 i に対して、磁化計算部53は、磁化ベクトル m_i を更新する(ステップS27)。例えば、磁化計算部53は、式(2)により有効磁界ベクトル H_{eff} を算出する。そして、磁化計算部53は、計算した有効磁界ベクトル H_{eff} を用いて式(1)を算出し、磁化ベクトル m_i を更新する。

【0065】

各要素 i に対して、磁化変化量判定部54は、磁化変化量 $d m_i$ を計算する(ステップS28)。例えば、磁化変化量判定部54は、時間ステップ k と前回の時間ステップ $k-1$ との磁化ベクトル m_i の変化量(磁化変化量) $d m_i$ を算出する。

【0066】

そして、磁化変化量判定部54は、磁化変化量 $d m$ を更新する(ステップS29)。例えば、磁化変化量判定部54は、各要素 i に対する磁化変化量 $d m_i$ のうち、最大の磁化変化量 $d m_i$ を磁化変化量 $d m$ として更新する。すなわち、磁化変化量判定部54は、時刻 k における磁化変化量 $d m$ を更新する。

【0067】

そして、磁化変化量判定部54は、全ての要素 i に対して磁化変化量 $d m_i$ を計算し、磁化変化量 $d m$ を計算すると処理を終了する。

【0068】

[磁性体モデルの一例]

図6は、実施例1を適用する磁性体モデルの一例を示す図である。図6左図には、磁性体モデルとして単層磁性薄膜モデルが表わされている。単層磁性薄膜モデルは、磁性体である薄膜が単層である場合のモデルである。図6右図には、磁性体モデルとして多層磁性

10

20

30

40

50

薄膜モデルが表わされている。多層磁性薄膜モデルは、磁性体である薄膜が多層である場合のモデルである。

【0069】

[結果データの一例]

このような磁性体モデルを用いて、実施例1に係る磁界シミュレーションを実行した結果について説明する。図7は、実施例1に係る結果データの一例を示す図である。

【0070】

実施例1に係る磁界シミュレーションでは、磁化変化量の閾値 dm_max が0.1に設定された。かかる場合には、情報処理装置1は、閾値 dm_max を用いた磁化変化量の判定に失敗することなく、磁界シミュレーションの計算を正常に実行する。

10

【0071】

図7では、実施例1に係る磁界シミュレーションを実行した場合と、従来の磁界シミュレーションを実行した場合との、総計算時間が示されている。従来の磁界シミュレーションとは、図12で示した磁界シミュレーションのことをいう。すなわち、従来手法では、静磁界ベクトル H_0 の計算に、静磁ポテンシャル の計算を実施した場合の磁界シミュレーション手法である。なお、図7では、実施例1に係る磁界シミュレーションを新手法といい、従来の磁界シミュレーションを従来手法というものとする。

【0072】

図12によると、磁性体モデルが単層磁性薄膜である場合には、新手法の総計算時間は、152秒であり、従来手法の総計算時間は、8042秒である。したがって、新手法は、従来手法より、総計算時間を約1/50に短縮できた。また、磁性体モデルが複層磁性薄膜である場合には、新手法の総計算時間は、165秒であり、従来手法の総計算時間は、4633秒である。したがって、新手法は、従来手法より、総計算時間を約1/30に短縮できた。

20

【0073】

[実施例1の効果]

このようにして、実施例1では、情報処理装置1は、磁性体をメッシュ分割して得られる各要素の磁化ベクトルの状態をシミュレーションする際に、時刻ごとの各要素の静磁界ベクトルデータを、磁化ベクトルデータを用いて近似する。情報処理装置1は、要素ごとに、特定の時刻の静磁界ベクトルデータを用いて次の時刻の磁化ベクトルデータを算出する。情報処理装置1は、要素ごとに、特定の時刻と次の時刻との磁化ベクトルデータの変化量を算出する。情報処理装置1は、要素ごとに算出された、それぞれの磁化ベクトルデータの変化量に基づいて、シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する。かかる構成によれば、情報処理装置1は、磁界シミュレーションの計算時間を短縮する場合に、不正確なシミュレーション結果を検出することができる。

30

【0074】

また、情報処理装置1は、要素ごとに算出された、それぞれの磁化ベクトルデータの変化量の最大値が所定量を超える場合に、シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する。かかる構成によれば、ユーザは、不正確な磁界シミュレーション結果を受け取ることを回避できる。

40

【実施例2】

【0075】

ところで、実施例1では、磁化変化量判定部54は、要素ごとの各磁化の変化量の最大値が変化量の閾値より大きい場合に、磁界シミュレーションを中止し、中止の旨を通知すると説明した。しかしながら、磁化変化量判定部54は、これに限定されず、要素ごとの各磁化の変化量の平均値が変化量の閾値より大きい場合に、磁界シミュレーションを中止し、中止の旨を通知しても良い。特に、式(1)の計算に陽解法を用いる場合には、時間刻み間隔が所定の条件を満たさないと、数値が不安定となる。そして、磁界シミュレーションの計算が発散し、磁化変化量の平均値が大きくなる場合がある。かかる場合には、実施例2の磁化変化量の平均値による判定が有効である。

50

【 0 0 7 6 】

そこで、実施例 2 に係る磁化変化量判定部 5 4 は、要素ごとの各磁化の変化量の平均値が変化量の閾値より大きい場合に、磁界シミュレーションを中止し、中止の旨を通知する場合を説明する。

【 0 0 7 7 】

[実施例 2 に係る情報処理装置の構成]

実施例 2 に係る情報処理装置 1 は、実施例 1 の図 1 に示す情報処理装置 1 と同一であるので、その重複する構成および動作の説明については省略する。

【 0 0 7 8 】

[磁界シミュレーションのフローチャート]

図 8 は、実施例 2 に係る磁界シミュレーションのフローチャートの一例を示す図である。

10

【 0 0 7 9 】

図 8 に示すように、前処理部 5 1 は、計算データを生成する (ステップ S 4 1)。例えば、前処理部 5 1 は、磁界シミュレーションで用いられるメッシュデータ 4 1 を生成する。前処理部 5 1 は、磁界シミュレーションで用いられる磁化ベクトルデータ 4 3 を生成する。

【 0 0 8 0 】

そして、前処理部 5 1 は、各種パラメータを設定する (ステップ S 4 2)。例えば、前処理部 5 1 は、磁化ベクトルデータ 4 3 の初期値を設定する。前処理部 5 1 は、最大のステップ数である k_{max} を設定する。前処理部 5 1 は、変化量の閾値である dm_{max} を設定する。

20

【 0 0 8 1 】

そして、情報処理装置 1 は、時間ステップ k 毎に最大のステップ数 k_{max} まで、ステップ S 4 3 と S 4 7 で挟まれた処理を繰り返し実行する。すなわち、磁界計算部 5 2 は、要素ごとに、静磁界ベクトルを含む磁界ベクトルを更新する (ステップ S 4 4)。そして、磁化計算部 5 3 は、要素ごとに、磁化ベクトルを更新する (ステップ S 4 5)。そして、磁化変化量判定部 5 4 は、要素ごとに、時間ステップ k と前回の時間ステップ $k - 1$ との磁化ベクトルの変化量 (磁化変化量) を算出する。そして、磁化変化量判定部 5 4 は、要素ごとの磁化変化量から、この時間ステップ k に対する磁化変化量の合計 dm_{total} を算出する。かかる磁化変化量算出処理のフローチャートは、後述する。

30

【 0 0 8 2 】

そして、磁化変化量判定部 5 4 は、磁化変化量の平均値 (dm_{total} / i_{max}) が変化量の閾値 dm_{max} より大きいかが否かを判定する (ステップ S 4 6)。なお、 dm_{total} は、各要素に対する磁化変化量の合計であり、 i_{max} は、要素の最大数である。磁化変化量の平均値が変化量の閾値 dm_{max} より大きいかが否かを判定する (ステップ S 4 6)。磁化変化量の平均値が変化量の閾値 dm_{max} 以下であると判定した場合 (ステップ S 4 6 ; No)、情報処理装置 1 は、時間ステップ k を 1 加算すべく、ステップ S 4 3 に移行する。情報処理装置 1 は、時間ステップ k が最大のステップ数 k_{max} に達すると、磁界シミュレーションを終了する。

40

【 0 0 8 3 】

一方、磁化変化量の平均値が変化量の閾値 dm_{max} より大きいと判定した場合 (ステップ S 4 6 ; Yes)、異常出力部 5 5 は、磁界シミュレーションを中止し、中止の旨を通知する (ステップ S 4 8)。

【 0 0 8 4 】

[磁化変化量算出処理のフローチャート]

図 9 は、実施例 2 に係る磁化変化量算出処理のフローチャートの一例を示す図である。なお、図 9 のフローチャートは、時刻 k における要素 i に対するループを行い、時刻 k における磁化変化量の合計 dm_{total} を算出する。

【 0 0 8 5 】

50

図9に示すように、磁化変化量算出処理は、磁化変化量の合計 dm_total を初期化する(ステップS51)。磁化変化量算出処理は、ステップS52とステップS60で挟まれる処理を要素 i に対する処理として、 i を変えながら全ての要素に対して行う。

【0086】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、静磁界ベクトル H_d を更新する(ステップS53)。例えば、磁界計算部52は、式(9)より、静磁界ベクトル H_d を更新する。そして、磁化計算部53は、式(6)により、静磁界ベクトル H_d を用いて静磁エネルギー E_d を算出する。そして、磁化計算部53は、静磁エネルギー E_d を用いて、式(2)の第4項を算出する。

【0087】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、外部磁界ベクトル H_{app} を更新する(ステップS54)。例えば、磁界計算部52は、外部磁界ベクトル H_{app} を更新する。そして、磁化計算部53は、式(5)により、外部磁界ベクトル H_{app} を用いて外部磁界エネルギー E_{app} を算出する。そして、磁化計算部53は、外部磁界エネルギー H_{app} を用いて、式(2)の第3項を算出する。

【0088】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、異方性磁界ベクトル k を更新する(ステップS55)。例えば、磁界計算部52は、磁気異方性ベクトル k を更新する。そして、磁化計算部53は、式(3)により、磁気異方性ベクトル k を用いて異方性エネルギー E_{ani} を算出する。そして、磁化計算部53は、異方性エネルギー E_{ani} を用いて、式(2)の第1項を算出する。

【0089】

各要素 i に対して、磁界計算部52は、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を更新する(ステップS56)。なお、 m は、磁化ベクトルである。例えば、磁界計算部52は、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を更新する。そして、磁化計算部53は、式(4)により、交換結合磁界ベクトル $(m)^2$ を用いて交換結合エネルギー E_{exc} を算出する。そして、磁化計算部53は、交換結合エネルギー E_{exc} を用いて、式(2)の第2項を算出する。

【0090】

各要素 i に対して、磁化計算部53は、磁化ベクトル m_i を更新する(ステップS57)。例えば、磁化計算部53は、式(2)により有効磁界ベクトル H_{eff} を算出する。そして、磁化計算部53は、計算した有効磁界ベクトル H_{eff} を用いて式(1)を算出し、磁化ベクトル m_i を更新する。

【0091】

各要素 i に対して、磁化変化量判定部54は、磁化変化量 dm_i を計算する(ステップS58)。例えば、磁化変化量判定部54は、時間ステップ k と前回の時間ステップ $k-1$ との磁化ベクトル m_i の変化量(磁化変化量) dm_i を算出する。

【0092】

そして、磁化変化量判定部54は、磁化変化量の合計 dm_total を更新する(ステップS59)。例えば、磁化変化量判定部54は、各要素 i に対する磁化変化量 dm_i を dm_total に加算する。すなわち、磁化変化量判定部54は、時刻 k における磁化変化量の合計 dm_total を更新する。

【0093】

そして、磁化変化量判定部54は、全ての要素 i に対する磁化変化量の合計 dm_total を計算すると処理を終了する。

【0094】

[実施例2の効果]

このようにして、実施例2では、情報処理装置1は、要素ごとに算出された、それぞれの磁化ベクトルデータの変化量の平均値が所定量を超える場合に、シミュレーションを中止し、中止の旨を出力する。かかる構成によれば、ユーザは、不正確な磁界シミュレーシ

10

20

30

40

50

ョン結果を受け取ることを回避できる。

【0095】

なお、情報処理装置1は、既知のパーソナルコンピュータ、ワークステーション等の情報処理装置に、上記した制御部5および記憶部4等の各機能を搭載することによって実現することができる。

【0096】

また、上記実施例1, 2では、図示した装置の各構成要素は、必ずしも物理的に図示の如く構成されていることを要しない。すなわち、装置の分散・統合の具体的態様は図示のものに限られず、その全部または一部を、各種の負荷や使用状況等に応じて、任意の単位で機能的または物理的に分散・統合して構成することができる。例えば、磁界計算部52と、磁化計算部53とを統合しても良い。前処理部51を、メッシュデータや磁化ベクトルデータ等の計算データを生成する第1の前処理部と、磁化ベクトルの初期値や最大ステップ数等の各種パラメータを設定する第2の前処理部とに分散しても良い。記憶部4を情報処理装置1の外部装置としてネットワーク経由で接続するようにしても良い。

10

【0097】

また、上記実施例で説明した各種の処理は、予め用意されたプログラムをパーソナルコンピュータやワークステーション等のコンピュータで実行することによって実現することができる。そこで、以下では、図1に示した情報処理装置1と同様の機能を実現する磁界シミュレータプログラムを実行するコンピュータの一例を説明する。図10は、磁界シミュレータプログラムを実行するコンピュータの一例を示す図である。

20

【0098】

図10に示すように、コンピュータ200は、各種演算処理を実行するCPU203と、ユーザからのデータの受け付ける入力装置215と、表示装置209を制御する表示制御部207とを有する。また、コンピュータ200は、記憶媒体からプログラム等を読み取るドライブ装置213と、ネットワークを介して他のコンピュータとの間でデータの授受を行う通信制御部217とを有する。また、コンピュータ200は、各種情報を一時記憶するメモリ201と、HDD(Hard Disk Drive)205を有する。そして、メモリ201、CPU203、HDD205、表示制御部207、ドライブ装置213、入力装置215、通信制御部217は、バス219で接続されている。

30

【0099】

ドライブ装置213は、例えばリムーバブルディスク211用の装置である。HDD205は、磁界シミュレータプログラム205aおよび磁界シミュレータ関連情報205bを記憶する。

【0100】

CPU203は、磁界シミュレータプログラム205aを読み出して、メモリ201に展開し、プロセスとして実行する。磁界シミュレータ関連情報205bは、メッシュデータ41、計算条件データ42、磁化ベクトルデータ43および磁界ベクトルデータ44に対応する。そして、例えばリムーバブルディスク211が、磁界シミュレータプログラム205a等の各情報を記憶する。

40

【0101】

なお、磁界シミュレータプログラム205aについては、必ずしも最初からHDD205に記憶させておかなくても良い。例えば、コンピュータ200に挿入されるフレキシブルディスク(FD)、CD-ROM(Compact Disk Read Only Memory)、DVD(Digital Versatile Disk)、光磁気ディスク、IC(Integrated Circuit)カード等の「可搬用の物理媒体」に当該プログラムを記憶させておく。そして、コンピュータ200がこれらから磁化解析プログラム205aを読み出して実行するようにしても良い。

【符号の説明】

【0102】

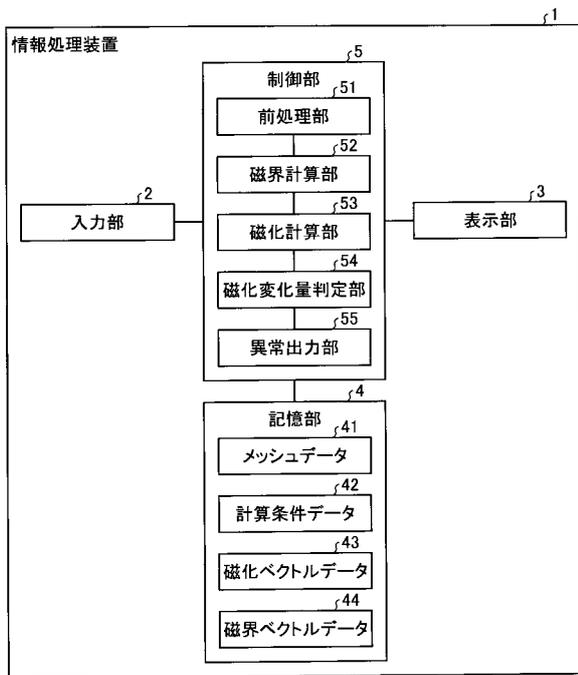
- 1 情報処理装置
- 2 入力部

50

- 3 表示部
- 4 記憶部
- 4 1 メッシュデータ
- 4 2 計算条件データ
- 4 3 磁化ベクトルデータ
- 4 4 磁界ベクトルデータ
- 5 制御部
- 5 1 前処理部
- 5 2 磁界計算部
- 5 3 磁化計算部
- 5 4 磁化変化量判定部
- 5 5 異常出力部

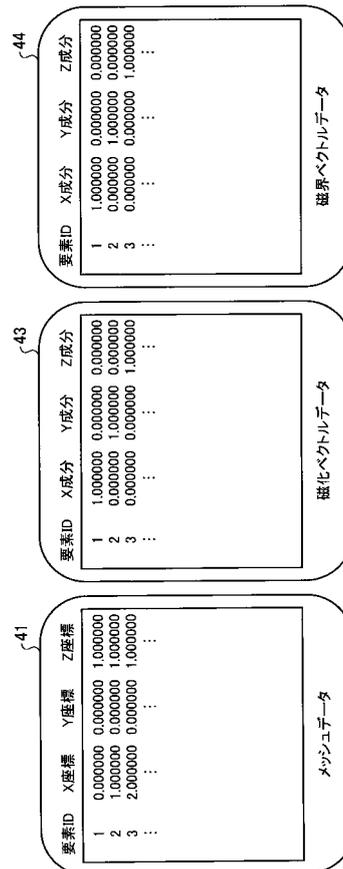
【 図 1 】

実施例1に係る情報処理装置の構成を示す機能ブロック図



【 図 2 】

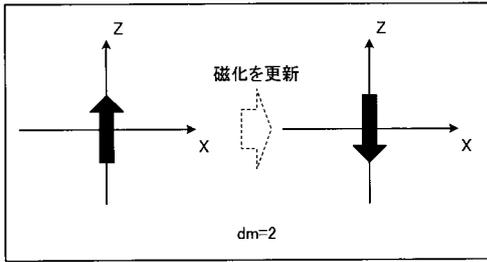
データの一例を示す図



【 図 3 A 】

磁化変化量の特徴の一例を示す図(1)

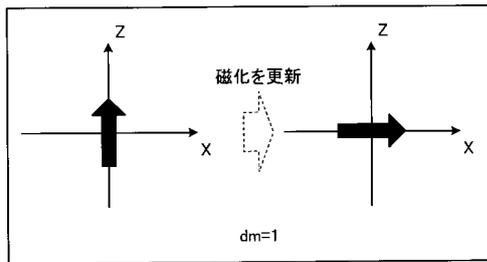
更新前から磁化ベクトルが反転した場合



【 図 3 B 】

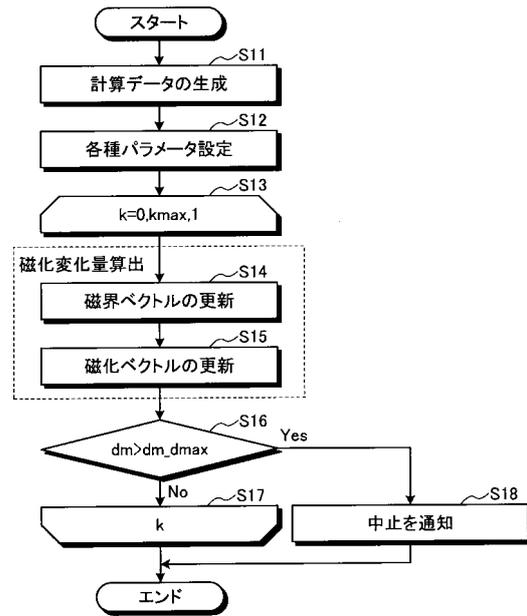
磁化変化量の特徴の一例を示す図(2)

更新前から磁化ベクトルが90度回転した場合



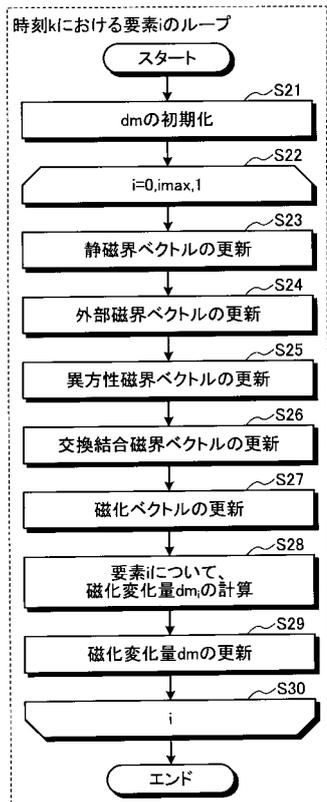
【 図 4 】

実施例1に係る磁界シミュレーションのフローチャートの一例を示す図



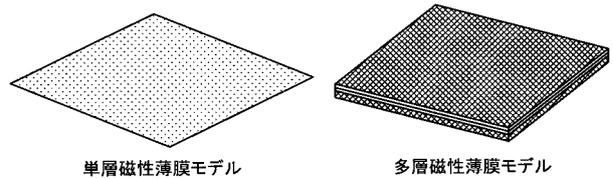
【 図 5 】

実施例1に係る磁化変化量算出処理のフローチャートの一例を示す図



【 図 6 】

実施例1を適用する磁性体モデルの一例を示す図



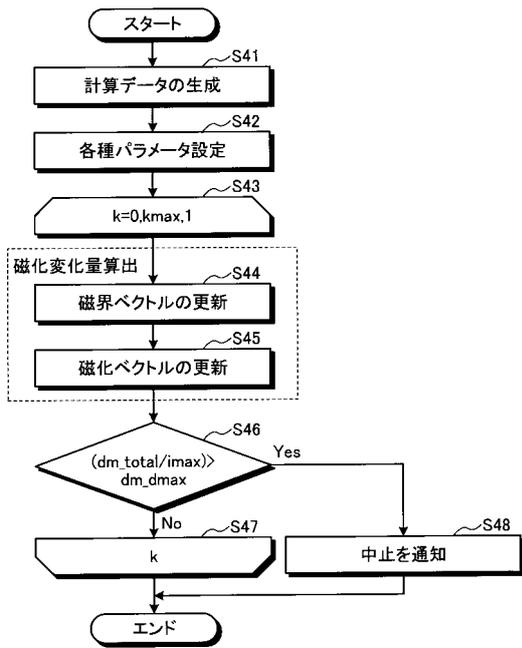
【 図 7 】

実施例1に係る結果データの一例を示す図

	従来手法	新手法
単層磁性薄膜解析	8042 [sec]	152 [sec]
多層磁性薄膜解析	4633 [sec]	165 [sec]

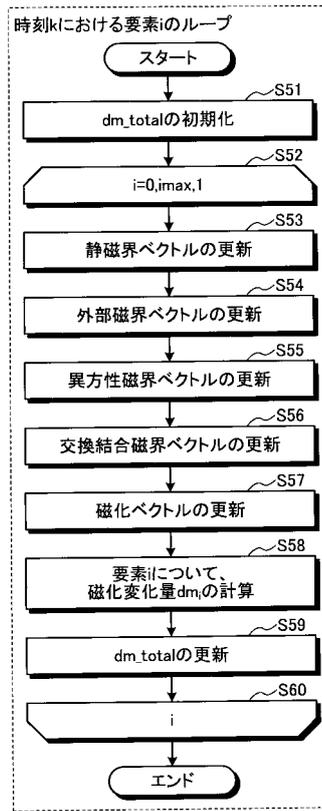
【 図 8 】

実施例2に係る磁界シミュレーションのフローチャートの一例を示す図



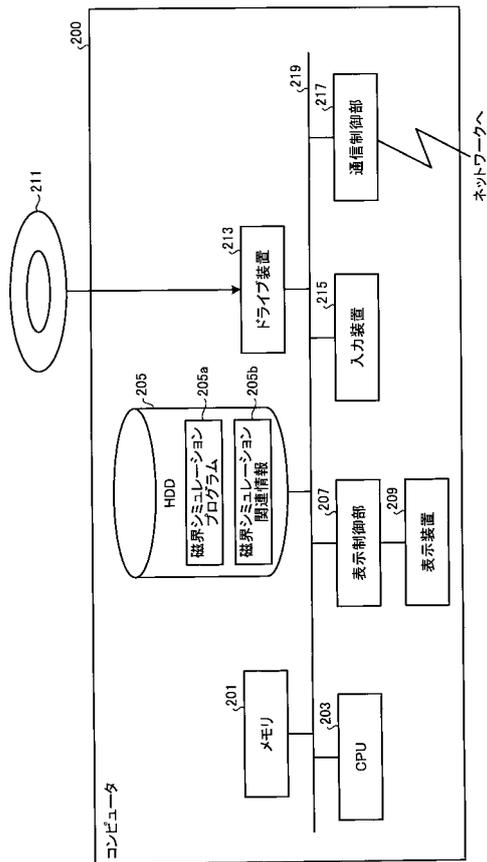
【 図 9 】

実施例2に係る磁化変化量算出処理のフローチャートの一例を示す図



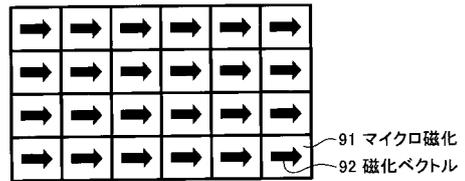
【 図 1 0 】

磁界シミュレーションプログラムを実行するコンピュータの一例を示す図



【 図 1 1 】

マイクロ磁化による磁性体のモデル化を説明するための図



【 図 1 2 】

磁界シミュレーションのフローチャートの参考例を示す図

