

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4410541号
(P4410541)

(45) 発行日 平成22年2月3日 (2010.2.3)

(24) 登録日 平成21年11月20日 (2009.11.20)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 R 33/18 (2006.01)

G O 1 R 33/18

請求項の数 16 (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2003-402921 (P2003-402921)	(73) 特許権者	000006655
(22) 出願日	平成15年12月2日 (2003.12.2)		新日本製鐵株式会社
(65) 公開番号	特開2005-164365 (P2005-164365A)		東京都千代田区丸の内二丁目6番1号
(43) 公開日	平成17年6月23日 (2005.6.23)	(74) 代理人	100090273
審査請求日	平成17年9月14日 (2005.9.14)		弁理士 國分 孝悦
		(72) 発明者	根本 泰
			富津市新富20-1 新日本製鐵株式会社
			技術開発本部内
		(72) 発明者	榎園 正人
			大分県大分市大字旦野原700 大分大学
			工学部内
		審査官	堀 圭史

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気歪み解析装置、磁気歪み解析方法、コンピュータプログラム、及びコンピュータ読み取り可能な記録媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析装置であって、
 上記励磁された鉄心の磁化特性を演算する磁束密度演算手段と、
 上記磁束密度演算手段により演算された磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、上記励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析手段とを有することを特徴とする磁気歪み解析装置。

【請求項2】

上記磁化特性は、楕円磁束における楕円の長軸と、軸比と、長軸の傾き角を含み、
 上記磁気歪み特性は、上記鉄心または上記鉄心を構成する薄板鋼板の歪み率を含むことを特徴とする請求項1に記載の磁気歪み解析装置。

【請求項3】

上記磁気歪み解析手段は、上記記録媒体から読み出した歪み率の位置分布を求めて表示装置に表示することを特徴とする請求項2に記載の磁気歪み解析装置。

【請求項4】

上記磁気歪み解析手段は、上記記録媒体から読み出した歪み率の位置に関する平均値を求めて表示装置に表示することを特徴とする請求項2または3に記載の磁気歪み解析装置。

【請求項5】

上記磁化特性と上記磁気歪み特性は、上記鉄心または上記薄板鋼板の板面内方向にお

10

20

る特性であることを特徴とする請求項 1 ～ 4 の何れか 1 項に記載の磁気歪み解析装置。

【請求項 6】

上記鉄心を構成する薄板鋼板の歪み率の測定結果から、歪みテンソルを計算し、計算した歪みテンソルの固有値に基づく磁気歪み特性を求め、求めた磁気歪み特性と、その磁気歪み特性を与える磁化特性と対応付けて上記記録媒体に記録する磁歪特性演算手段を有し、

上記磁気歪み解析手段は、上記磁歪特性演算手段により記録された磁気歪み特性を読み出すことを特徴とする請求項 1 ～ 5 の何れか 1 項に記載の磁気歪み解析装置。

【請求項 7】

上記磁歪特性演算手段は、複数の歪みゲージが表面に取り付けられた薄板鋼板に楕円磁束を与えたときに生じる上記複数の歪みゲージの変化により、上記薄板鋼板の板面方向に生じる歪み率を測定した結果を入力し、入力した歪み率から、前記歪みテンソルを計算し、

上記複数の歪みゲージは、互いに異なる方向を向くようにして上記薄板鋼板の表面に取り付けられていることを特徴とする請求項 6 に記載の磁気歪み解析装置。

【請求項 8】

励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析方法であって、

上記励磁された鉄心の磁化特性を演算する磁束密度演算ステップと、

上記磁束密度演算ステップにより演算された磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、上記励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析ステップとを有することを特徴とする磁気歪み解析方法。

【請求項 9】

上記磁化特性は、楕円磁束における楕円の長軸と、軸比と、長軸の傾き角を含み、

上記磁気歪み特性は、上記鉄心を構成する薄板鋼板の歪み率を含むことを特徴とする請求項 8 に記載の磁気歪み解析方法。

【請求項 10】

上記磁気歪み解析ステップは、上記記録媒体から読み出した歪み率の位置分布を求めて表示方法に表示することを特徴とする請求項 9 に記載の磁気歪み解析方法。

【請求項 11】

上記磁気歪み解析ステップは、上記記録媒体から読み出した歪み率の位置に関する平均値を求めて表示方法に表示することを特徴とする請求項 9 または 10 に記載の磁気歪み解析方法。

【請求項 12】

上記磁化特性と上記磁気歪み特性は、上記鉄心または上記薄板鋼板の板面内方向における特性であることを特徴とする請求項 8 ～ 11 の何れか 1 項に記載の磁気歪み解析方法。

【請求項 13】

上記鉄心を構成する薄板鋼板の歪み率の測定結果から、歪みテンソルを計算し、計算した歪みテンソルの固有値に基づく磁気歪み特性を求め、求めた磁気歪み特性と、その磁気歪み特性を与える磁化特性と対応付けて上記記録媒体に記録する磁歪特性演算ステップを有し、

上記磁気歪み解析ステップは、上記磁歪特性演算ステップにより記録された磁気歪み特性を読み出すことを特徴とする請求項 8 ～ 12 の何れか 1 項に記載の磁気歪み解析方法。

【請求項 14】

上記磁歪特性演算ステップは、複数の歪みゲージが表面に取り付けられた薄板鋼板に楕円磁束を与えたときに生じる上記複数の歪みゲージの変化により、上記薄板鋼板の板面方向に生じる歪み率を測定した結果を入力し、入力した歪み率から、前記歪みテンソルを計算し、

上記複数の歪みゲージは、互いに異なる方向を向くようにして上記薄板鋼板の表面に取り付けられていることを特徴とする請求項 13 に記載の磁気歪み解析方法。

【請求項 15】

励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析することをコンピュータに実行させるためのコンピュータプログラムであって、

上記励磁された鉄心の磁化特性を演算する磁束密度演算ステップと、

上記磁束密度演算ステップにより演算された磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、上記励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析ステップとをコンピュータに実行させることを特徴とするコンピュータプログラム。

【請求項 16】

上記請求項 15 に記載のコンピュータプログラムを記録したことを特徴とするコンピュータ読み取り可能な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気歪み解析装置、磁気歪み解析方法、コンピュータプログラム、及びコンピュータ読み取り可能な記録媒体に関し、特に、薄板鋼板を複数枚積層して構成される鉄心に生じる磁気歪みを解析するために用いて好適なものである。

【背景技術】

【0002】

積層された複数枚の薄板鋼板（鉄心）の周りにコイルを巻き回して形成される変圧器などの機器では、交流励磁したときに上記鉄心に生じる磁気歪みによって、騒音が発生するという問題点があった。

【0003】

そこで、従来は、変圧器を試作し、試作した変圧器を交流励磁することによって、上記変圧器に発生する騒音を評価するようにしていた。以下、交流励磁を励磁と記す。

【0004】

【非特許文献 1】 祖田直也、榎園正人、「E & S モデルによる二次元磁気特性のヒステリシスモデリング」、日本応用磁気学会誌、社団法人日本応用磁気学会、2000 年、第 24 巻、p. 827-830

【非特許文献 2】 榎園正人、鈴木毅浩、ヨハン・ジーベルト (Johannes Sievert)、「回転磁界下の二次元磁気特性 (Measurement of Dynamic Magnetostriction under Rotating Magnetic Field)」, IEEE Transactions on Magnetics、米国電気、電子技術者協会 (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc) , 1990 年、第 26 巻、第 5 号、p. 2067-2069

【非特許文献 3】 榎園正人、戸高孝、金尾真一、「けい素鋼板の 2 次元磁気歪み特性 I . 交番磁束下の任意方向の磁気歪み」、日本応用磁気学会誌、社団法人日本応用磁気学会、1995 年、第 19 巻、p. 293-296

【非特許文献 4】 榎園正人、戸高孝、金尾真一、「けい素鋼板の 2 次元磁気歪み特性 II . 回転磁束下の任意方向の磁気歪み」、日本応用磁気学会誌、社団法人日本応用磁気学会、1995 年、第 19 巻、p. 293-296

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、上述した従来の技術では、変圧器を試作してみないと、変圧器に発生する騒音を評価することができなかった。したがって、騒音の小さい変圧器をユーザに提供するためには、変圧器の試作を何度も繰り返さなければならず、多大な労力と費用を費やしてしまうという問題点があった。

【0006】

本発明は、上述の問題点にかんがみてなされたものであり、鉄心に生じる磁気歪みを計算により求めることができるようにして、上記鉄心を用いた機器に発生する騒音を上記機器の設計の段階で評価できるようにすることを目的とする。

10

20

30

40

50

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の磁気歪み解析装置は、励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析装置であって、上記励磁された鉄心の磁化特性を演算する磁束密度演算手段と、上記磁束密度演算手段により演算された磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、上記励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析手段とを有することを特徴とする。

【0008】

また、本発明の磁気歪み解析装置は、上記磁歪特性演算手段は、複数の歪みゲージが表面に取り付けられた薄板鋼板に楕円磁束を与えたときに生じる上記複数の歪みゲージの変化により、上記薄板鋼板の板面方向に生じる歪み率を測定した結果を入力し、入力した歪み率から、前記歪みテンソルを計算し、上記複数の歪みゲージは、互いに異なる方向を向くようにして上記薄板鋼板の表面に取り付けられていることを特徴とする。

【0009】

本発明の磁気歪み解析方法は、励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析方法であって、上記励磁された鉄心の磁化特性を演算する磁束密度演算ステップと、上記磁束密度演算ステップにより演算された磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、上記励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析ステップとを有することを特徴とする。

【0010】

また、本発明の磁気歪み解析方法は、上記磁歪特性演算ステップは、複数の歪みゲージが表面に取り付けられた薄板鋼板に楕円磁束を与えたときに生じる上記複数の歪みゲージの変化により、上記薄板鋼板の板面方向に生じる歪み率を測定した結果を入力し、入力した歪み率から、前記歪みテンソルを計算し、上記複数の歪みゲージは、互いに異なる方向を向くようにして上記薄板鋼板の表面に取り付けられていることを特徴とする。

【0011】

本発明のコンピュータプログラムは、励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析することをコンピュータに実行させるためのコンピュータプログラムであって、上記励磁された鉄心の磁化特性を演算する磁束密度演算ステップと、上記磁束密度演算ステップにより演算された磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、上記励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析する磁気歪み解析ステップとをコンピュータに実行させることを特徴とする。

【0012】

本発明のコンピュータ読み取り可能な記録媒体は、上記記載のコンピュータプログラムを記録したことを特徴とする。

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、演算した磁化特性に対応付けられて記録媒体に記録されている磁気歪み特性を読み出して、励磁された鉄心に生じる磁気歪みを解析するようにしたので、騒音を評価するための指標である磁気歪み特性を、磁気特性解析により解析された磁気特性に基づいて求めることができる。これにより、上記鉄心を用いた機器に発生する騒音を上記機器の設計の段階で正確に評価することができる。

【0014】

また、本発明の他の特徴によれば、互いに異なる方向を向くように薄板鋼板の表面に取り付けられた複数の歪みゲージの変化により、上記薄板鋼板の板面内方向に生じる歪み率を測定するようにしたので、上記薄板鋼板が、その板面方向においてどのように歪んだとしても、その歪み率を正確に測定して、該歪み率の測定結果から、前記磁気歪み特性を求めるために用いる歪みテンソルを計算することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

次に、図面を参照しながら、本発明の実施の形態について説明する。

図1は、本実施の形態における磁気歪み解析装置の構成の一例を示したブロック図である。

図1において、磁気歪み解析装置1は、操作部2と、表示部3と、処理部4とを有している。

操作部2は、キーボードやマウスなどにより構成される装置であり、ユーザ（解析者）により実行された内容を処理部4に伝えるようにするための装置である。

【0016】

表示部3は、ディスプレイなどにより構成される装置であり、処理部4により実行された処理結果などを表示するための装置である。ユーザ（解析者）は、この表示部3に表示された内容を見ながら、操作部2を操作して所望の内容を入力する。

10

【0017】

処理部4は、CPU、ROM、及びRAMなどにより構成されるコンピュータである。この処理部4は、上記ROMに記録されているプログラムを実行するなどして磁気歪み解析装置1における処理動作を行う。

【0018】

具体的に処理部4は、磁歪特性データベース4aと、磁歪特性演算部4bと、磁束密度分布演算部4cと、磁歪特性検索部4dと、騒音評価部4eとを有している。

【0019】

磁歪特性データベース4aは、薄板鋼板の最大歪み率 λ_{MAX} と、その最大歪み率 λ_{MAX} を与える楕円磁束とを対応付けて格納するデータベースである。

20

ここで、楕円磁束とは、励磁されたときの磁束密度ベクトルが時間的变化して描く軌跡が楕円である磁束である。

なお、本実施の形態では、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き inc とから、上記楕円磁束を特定するようにする（図2を参照）。

また、最大歪み率 λ_{MAX} は、解析対象としている鉄心を構成する薄板鋼板に対して測定された歪み率に基づいて、磁歪特性演算部4bにより演算されるものである。

【0020】

（歪み率の測定方法）

ここで、薄板鋼板の歪み率の測定方法について説明する。

30

本実施の形態では、図3（a）に示すように、互いに平行でない3本の歪みゲージ32～34を試料（薄板鋼板）31の表面に貼り付けるようにしている。

具体的に説明すると、図3（b）に示すように、歪みゲージ32と歪みゲージ33とのなす角度と、歪みゲージ33と歪みゲージ34とのなす角度が、 $60 [^\circ]$ となるように、試料31の中央から放射状に歪みゲージ32～34を貼り付けるようにしている。

【0021】

このようにして歪みゲージ32～34が貼り付けられた試料（薄板鋼板）31を、図4に示すような2次元磁気測定装置40に取り付けて、歪みゲージ32～34が貼り付けられている方向（歪み測定方向）の歪み率 λ_{30} 、 λ_{90} 、 λ_{150} を同時に測定する。

【0022】

40

図4において、2次元磁気測定装置40は、励磁用継鉄41a～41dと、励磁コイル42a～42dと、Bコイル43と、Hコイル44とを有している。

励磁用継鉄41aと励磁用継鉄41cは、x軸方向において、試料（薄板鋼板）31を介して対向するように配設されている。また、励磁用継鉄41bと励磁用継鉄41dは、y軸方向において、試料31を介して対向するように配設されている。

【0023】

また、試料（薄板鋼板）31内に磁束を集中させるために、励磁用継鉄41a～41dの先端は、先細りの形状を有している。さらに、試料（薄板鋼板）31内の磁束を均一にするために、試料（薄板鋼板）31と、励磁用継鉄41a～41dとの間には、 $0.1 [mm]$ 程度の隙間を設けている。

50

【0024】

励磁コイル42a～42dは、それぞれ励磁用継鉄41a～41dに巻回されている。

Bコイル43は、試料（薄板鋼板）31の中心点を介してx軸方向において対向するように設けられた2つの穴を通して巻回された B_x コイル43aと、試料（鉄心）31の中心を介してy軸方向において対向するように設けられた2つの穴を通して巻回された B_y コイル43bとを有している。

Hコイル44は、試料31の上方または下方において、y軸方向に巻回された H_y コイル44aと、 H_y コイル44a上でx軸方向に巻回された H_x コイル44bとを有している。

【0025】

10

以上のようにして構成された2次元磁気測定装置40を用いて、試料（薄板鋼板）31の歪み率を測定する。すなわち、試料（薄板鋼板）31の内部の磁束が、所定の楕円磁束になるように、励磁コイル42a～42dに励磁電流を流す。そして、上記励磁電流を流したときに、試料（薄板鋼板）31に生じる各歪み測定方向の歪み率 λ_{30} 、 λ_{90} 、 λ_{150} を測定する。

【0026】

次に、磁歪特性演算部4bにより演算される内容について説明する。

（歪みテンソルの計算方法）

磁歪特性演算部4bは、ユーザによる操作部2の操作に基づいて、以上のようにして測定された歪み率 λ_{30} 、 λ_{90} 、 λ_{150} を入力する。

20

そして、入力した歪み率 λ_{30} 、 λ_{90} 、 λ_{150} から、次の（1式）のように表される歪みテンソルEの各成分 e_{11} 、 e_{12} 、 e_{22} を計算する。

【0027】

【数1】

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{12} & e_{22} \end{bmatrix} \quad \dots (1 \text{ 式})$$

【0028】

具体的に説明すると、歪みテンソルEの各成分 e_{11} 、 e_{12} 、 e_{22} は、各歪み測定方向の単位ベクトル β_θ が次の（2式）のように表されることから、以下の（3式）のように表される。すなわち、以下の（3式）に基づいて、歪みテンソルEの各成分 e_{11} 、 e_{12} 、 e_{22} を計算する。なお、本明細書及び図面では、ベクトルを太字で表すことにする。

30

【0029】

【数2】

$$\beta_{30} = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \frac{1}{2} \right]^T, \beta_{90} = [0 \quad 1]^T, \beta_{150} = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \frac{1}{2} \right]^T \quad \dots (2 \text{ 式})$$

$$\begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{30} \\ \lambda_{90} \\ \lambda_{150} \end{bmatrix} \quad \dots (3 \text{ 式})$$

40

【0030】

（歪み率の計算方法）

そして、上記のような歪みテンソルEを用いた歪みテンソルモデルにより、歪み率 λ を計算する。

図5に示すように、上記歪みテンソルモデルは、薄板鋼板内部における基準点と任意の

50

点との位置関係を表すベクトル r_0 が、薄板鋼板の歪みによってベクトル r になった場合に、これらベクトル r とベクトル r_0 との差を次の (4 式) のようにして表すモデルである。

$$r - r_0 := E r_0 \cdots (4 \text{ 式})$$

上記 (4 式) において、 E は、上記 (1 式) により表される歪みテンソルである。

【0031】

そして、上記 (4 式) は、ベクトル r_0 からベクトル r への変換と考えると、次の (5 式) のように書き換えることができる。

$$r = (I + E) r_0 \cdots (5 \text{ 式})$$

【0032】

したがって、上記歪みテンソルモデルは、線形変換できるモデルであり、且つ図 5 に示すように、円盤を楕円に変形させるモデルであることが分かる。

ここで、ベクトル r_0 の長さを r_0 、ベクトル r の長さを r 、単位行列を I とする。また、ベクトル r_0 の方向を表す単位ベクトルを β とする。これらのことを数式化すると、次の (6 式) ~ (8 式) のようになる。

【0033】

【数 3】

$$r_0 := |r_0| \cdots (6 \text{ 式})$$

$$r := |r| \cdots (7 \text{ 式})$$

$$\beta := \frac{1}{r_0} r_0 \cdots (8 \text{ 式})$$

【0034】

一般に、鉄心として用いられる薄板鋼板の歪み率は、 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 程度であることから、歪みテンソル E の各成分 e_{11} 、 e_{12} 、 e_{22} と、固有値の大きさは 1 より十分に小さいとみなすことができる。したがって、ベクトル r_0 の長さ r_0 と、ベクトル r の長さ r との関係は、次の (9 式) のように表すことができる。

【0035】

【数 4】

$$\begin{aligned} r &= r_0 |(I + E) \beta| \\ &= r_0 \sqrt{\beta^T (I + 2E + E^2) \beta} \\ &\approx r_0 (1 + \beta^T E \beta) \cdots (9 \text{ 式}) \end{aligned}$$

【0036】

上記 (9 式) を変形すると、歪み率 λ は、次の (10 式) のように表すことができる。

【0037】

【数 5】

$$\lambda = \frac{r - r_0}{r_0} = \beta^T E \beta \cdots (10 \text{ 式})$$

【0038】

本実施の形態では、上記 (10 式) により、歪みゲージ 32 ~ 34 が貼り付けられている方向の歪み率 λ を計算し、計算した歪み率の最大値と最小値を求める。

【0039】

ここで、これら歪み率の最大値と最小値は、歪みテンソル E の固有値 e_{ig1} 、 e_{ig}

10

20

30

40

50

2 (e i g 1 > e i g 2) で表される。また、歪み率 λ が最大になる方向と、最少になる方向は、歪みテンソル E の固有ベクトルで表される。以下にこれらのことを示す。

【0040】

歪みテンソル E の固有値 e i g 1、e i g 2 のそれぞれに対応する長さが 1 の固有ベクトルを v_1 、 v_2 とする。このとき、固有ベクトル v_1 、 v_2 を次の (11 式) のようにおくと、固有値・固有ベクトルの定義から以下の (12 式) が成り立つ。

【0041】

【数 6】

$$V = [v_1 \ v_2] \quad \dots (11\text{式})$$

10

$$EV = V \begin{bmatrix} \text{eig1} & 0 \\ 0 & \text{eig2} \end{bmatrix} \quad \dots (12\text{式})$$

【0042】

上述したように、固有ベクトル v_1 、 v_2 は、長さが 1 であり、互いに直交する方向を有していることから、次の (13 式) と (14 式) が成り立つ。

【0043】

【数 7】

$$V^T V = V V^T = I \quad \dots (13\text{式})$$

20

$$E = V \begin{bmatrix} \text{eig1} & 0 \\ 0 & \text{eig2} \end{bmatrix} V^T \quad \dots (14\text{式})$$

【0044】

上記 (14 式) を上記 (10 式) に代入すると、歪み率 λ は、次の (15 式) のように表すことができる。そして、この (15 式) を用いることにより、以下のように (16 式) が成り立つことを示すことができる。

【数 8】

$$\lambda = (V^T \beta)^T \begin{bmatrix} \text{eig1} & 0 \\ 0 & \text{eig2} \end{bmatrix} (V^T \beta) \quad \dots (15\text{式})$$

30

$$\text{eig2} \cdot |V^T \beta|^2 \leq \lambda \leq \text{eig1} \cdot |V^T \beta|^2 \quad \dots (16\text{式})$$

【0045】

ここで、次の (17 式) が成り立つことから、上記 (16 式) は、以下の (18 式) のように表すことができる。

【数 9】

$$|V^T \beta|^2 = \beta^T V V^T \beta = \beta^T \beta = 1 \quad \dots (17\text{式})$$

40

$$\text{eig2} \leq \lambda \leq \text{eig1} \quad \dots (18\text{式})$$

【0046】

したがって、歪み率 λ の最大値と最小値は、それぞれ歪みテンソル E の固有値 e i g 1、e i g 2 になることが分かる。

さらに、歪み率 λ が最大になる方向と最小になる方向が、歪みテンソル E の固有ベクトルになることは、例えば、次の (19 式) と上記 (15 式) とを用いて、以下の (20 式) が成り立つことから分かる。

50

【 0 0 4 7 】

【数 1 0】

$$V^T \beta = \begin{bmatrix} \nu_1^T \\ \nu_2^T \end{bmatrix} \nu_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots (19\text{式})$$

$$\lambda = \text{eig1} \quad \dots (20\text{式})$$

【 0 0 4 8 】

なお、上記（19式）において、ベクトル r_0 の方向を表す単位ベクトル β を、歪みテンソル E の固有値 eig1 の固有ベクトル ν_1 としている（ $\beta = \nu_1$ ）。

また、上記（16式）が成り立つことは、以下のように証明される。

まず、上記（15式）から次の（21式）が成り立つ。

【 0 0 4 9 】

【数 1 1】

$$\begin{aligned} & \lambda - \text{eig1} \cdot |V^T \beta|^2 \\ &= (V^T \beta)^T \begin{bmatrix} \text{eig1} & 0 \\ 0 & \text{eig2} \end{bmatrix} (V^T \beta) - (V^T \beta)^T \begin{bmatrix} \text{eig1} & 0 \\ 0 & \text{eig1} \end{bmatrix} (V^T \beta) \\ &= (V^T \beta)^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \text{eig2} - \text{eig1} \end{bmatrix} (V^T \beta) \quad \dots (21\text{式}) \end{aligned}$$

20

【 0 0 5 0 】

そして、例えば、次の（22式）のように成分表示されたとすると、以下の（23式）が成り立つ。

【 0 0 5 1 】

【数 1 2】

$$[\beta_x \ \beta_y]^T = V^T \beta \quad \dots (22\text{式})$$

30

$$\lambda - \text{eig1} \cdot |V^T \beta|^2 = (\text{eig2} - \text{eig1}) \beta_y^2 \leq 0 \quad \dots (23\text{式})$$

【 0 0 5 2 】

上記（23式）により、上記（16式）の第2式が示される。また、上記（16式）の第1式についても同様にして示される。（証明終わり）

図6に、歪み率 λ の最大値の1周期分の波形61と、最小値の1周期分の波形62の一例を示す。

【 0 0 5 3 】

（最大歪み率の計算方法）

そして、以上のようにして計算された固有値 eig1 の絶対値の中から、値が最も大きいものを選ぶとともに、固有値 eig2 の絶対値の中から、値が最も大きいものを選ぶ。そして、値が最も大きい固有値 eig1 の絶対値と、値が最も大きい固有値 eig2 の絶対値とのうち、値が大きい方のものをさらに選び、選んだ固有値の絶対値を最大歪み率 λ_{MAX} とする。このことを式で表すと、次の（24式）のようになる。

40

【 0 0 5 4 】

【数 1 3】

$$\lambda_{\text{MAX}} = \max(\max_t(|\text{eig1}(\omega t)|), \max_t(|\text{eig2}(\omega t)|)) \quad \dots (24\text{式})$$

【 0 0 5 5 】

50

この(24式)に従って選んだ最大歪み率 λ_{MAX} と、その最大歪み率 λ_{MAX} を与える楕円磁束とを対応付けて磁歪特性データベース4aに格納する。

そして、以上のような歪みテンソルEと最大歪み率 λ_{MAX} の計算を、楕円磁束(楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き inc)を異ならせて行う。

【0056】

(計算例)

次に、無方向性鋼板(NO材)と方向性鋼板(GO材)を試料31として歪み率 λ を計算した結果を示す。

なお、ここでは、試料31の内部の磁束について、楕円の長軸 B_{MAX} が1[T]、軸比 α が0.6、長軸 B_{MAX} の傾き inc が0[°]の楕円磁束になるように、2次元磁気測定装置40の励磁コイル42a~42dに励磁電流をしている。

【0057】

図7に、無方向性鋼板についての計算結果を示す。

図7の結果から、無方向性鋼板については、次のような磁歪特性が得られることが分かった。

(1) 図7(b)に示すように、歪みテンソルEの固有値 $eig1$ に対応する固有ベクトルの方向を示す特性73は、磁束密度Bを示す特性74と略一致している。このことは、磁束密度Bと略同じ方向に試料31が膨張することを示している。

(2) 図7(a)に示すように、歪みテンソルEの固有値 $eig1$ 、 $eig2$ を示す特性71、72は、時間に対して概ね一定であるが、一時的に差が小さくなる時がある($\omega t = 135$ [°]、 315 [°]付近)。そして、この時における歪みテンソルEの固有値 $eig1$ に対応する固有ベクトルの方向を示す特性73と、磁束密度ベクトルの方向を示す特性74とを比べると、この時に固有ベクトルが磁束密度ベクトルを追い越していることが分かる(図7(b))。

【0058】

図8に、方向性鋼板についての計算結果を示す。

図8の結果から、方向性鋼板については、次のような磁歪特性が得られることが分かった。

(1) 図8(b)に示すように、歪みテンソルEの固有値 $eig1$ に対応する固有ベクトルの方向を示す特性83は、磁束密度Bを示す特性84に依存せず、横断方向を示す略一定の特性となる。このことは、磁束密度Bの方向に関係なく、試料31が横断方向に歪む(縮む)ことを示している。

(2) 図8(a)に示すように、歪みテンソルEの固有値 $eig1$ 、 $eig2$ を示す特性81、82は、磁束密度Bが圧延方向を向くときは差が小さいが($\omega t = 90$ [°]、 270 [°]付近)、横断方向を向くと大きくなる($\omega t = 0$ [°]、 180 [°]、 360 [°]付近)。また、その大きさは、無方向性鋼板(NO)に比べて、最大で10倍近くになる。

【0059】

図1に説明を戻し、磁束密度分布演算部4cは、ユーザによる操作部2の操作に基づいて指定された鉄心について磁気特性解析を行い、上記指定された鉄心の全ての領域について磁束密度Bを計算する。そして、計算した磁束密度Bに基づいて、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き inc とを計算する。なお、上記磁気特性解析は、例えば、次の(25式)により定義されるE&S(Enokizono and Soda)モデリング(二次元ベクトル法)を用いて行うようにすればよい(例えば、非特許文献1~4を参照)。

【0060】

【数 1 4】

$$\begin{cases} H_x = \nu_{xr} B_x - \nu_{xi} \frac{\partial B_x}{\partial t} \\ H_y = \nu_{yr} B_y - \nu_{yi} \frac{\partial B_y}{\partial t} \end{cases} \dots (25\text{式})$$

【0 0 6 1】

上記（25式）において、 H_x 、 H_y は、磁界強度である。 B_x 、 B_y は、磁束密度である。 ν_{xr} 、 ν_{yr} は、磁気抵抗率である。 ν_{xi} 、 ν_{yi} は、磁気ヒステリシス係数である。

10

【0 0 6 2】

磁歪特性検索部 4 d は、磁束密度分布演算部 4 c により計算された楕円磁束に対応付けられている最大歪み率 λ_{MAX} を磁歪特性データベース 4 a から読み出す。この読み出し動作は、ユーザによる操作部 2 の操作に基づいて指定された鉄心の全ての領域について行う。

【0 0 6 3】

騒音評価部 4 e は、磁歪特性検索部 4 d により読み出された最大歪み率 λ_{MAX} が、ユーザによる操作部 2 の操作に基づいて指定された鉄心において、どのように分布しているのかを表示部 3 に表示する。

また、騒音評価部 4 e は、磁歪特性検索部 4 d により読み出された最大歪み率 λ_{MAX} の平均値を計算し、計算した結果を表示部 3 に表示する。

20

すなわち、鉄心に生じる騒音は、鉄心の歪み率に比例して大きくなるので、本実施の形態では、鉄心に生じる騒音を評価する指標として最大歪み率 λ_{MAX} を採用するようにしている。

る。

【0 0 6 4】

次に、図 9 のフローチャートを参照しながら、楕円磁束と、最大歪み率 λ_{MAX} とを対応付けて磁歪特性データベース 4 a に格納する際の磁歪特性演算部 4 b の動作について説明する。

【0 0 6 5】

まず、最初のステップ S 1 において、楕円磁束を初期値に設定する。

30

本実施の形態では、0 [T] から 2 [T] まで楕円の長軸 B_{MAX} を変化させるようにしている。また、0 から 1 まで軸比 α を変化させるようにしている。また、0 [°] から 180 [°] まで長軸 B_{MAX} の傾き $i n c$ を変化させるようにしている。

例えば、長軸 B_{MAX} が 0. 1 [T]、軸比 α が 0. 1、長軸 B_{MAX} の傾き $i n c$ が 0 [°] である楕円磁束を初期値として設定する。

【0 0 6 6】

次に、ステップ S 2 において、上記楕円磁束の位相 ωt を初期値に設定する。

本実施の形態では、0 [rad] から 2π [rad] まで位相 ωt を変化させるようにしている。

40

したがって、例えば、0 [rad] を位相 ωt の初期値として設定する。

【0 0 6 7】

次に、ステップ S 3 において、設定された位相 ωt における歪みテンソル $E(\omega t)$ を計算する。上述したように、歪みテンソル $E(\omega t)$ は、試料 3 1 に楕円磁束を与えて測定した歪み率 λ_{30} 、 λ_{90} 、 λ_{150} を、上記（3式）に代入して計算する。

【0 0 6 8】

次に、ステップ S 4 において、上記ステップ S 3 において計算された歪みテンソル E の固有値 $e i g 1$ 、 $e i g 2$ を計算する。すなわち、設定された位相 ωt における歪み率 $\lambda(\omega t)$ の最大値と最小値とを計算する。

【0 0 6 9】

50

次に、ステップ S 5 において、1 周期分の計算が終了したか否かを判定する。この判定の結果、終了していない場合には、ステップ S 6 に進み、次の位相 ωt を設定して、上記ステップ S 3 に戻り、1 周期分の計算が終了するまで、上記ステップ S 3 ～ S 6 の処理を繰り返す。

【0070】

一方、1 周期分の計算が終了した場合には、ステップ S 7 に進み、設定された楕円磁束の 1 周期における最大歪み率 λ_{MAX} を計算する。なお、この計算は、上記 (24 式) により行う。

【0071】

次に、ステップ S 8 において、上記ステップ S 1 (または後述するステップ S 10) において設定された楕円磁束と、上記ステップ S 7 において計算された最大歪み率 λ_{MAX} とを対応付けて、磁歪特性データベース 4 a に格納する。

10

【0072】

次に、ステップ S 9 において、所定数の楕円磁束に対する計算が終了したか否かを判定し、終了した場合には、処理を終了する。一方、計算が終了していない場合には、ステップ S 10 に進み、次の楕円磁束を設定して、上記ステップ S 2 に戻り、所定数の楕円磁束に対する計算が終了するまで、上記ステップ S 2 ～ S 10 の処理を繰り返す。

なお、図 9 に示したフローチャートにおける動作は、解析対象となる薄板鋼板の種類ごとに行うようにするという事はない。

【0073】

20

次に、図 10 のフローチャートを参照しながら、鉄心に生じる磁気歪みを解析する際の磁気歪み解析装置 1 の動作について説明する。

まず、最初のステップ S 21 において、磁束密度演算部 4 c は、磁気抵抗率 ν_{xr} 、 ν_{yr} と、磁気ヒステリシス係数 ν_{xi} 、 ν_{yi} を初期値に設定する。

次に、ステップ S 22 において、磁束密度演算部 4 c は、位相 ωt を初期値に設定する。

本実施の形態では、 $0[^\circ]$ から $360[^\circ]$ まで位相 ωt を変化させるようにしている。したがって、ここでは、 $0[^\circ]$ を初期値として設定する。

【0074】

次に、ステップ S 23 において、磁束密度演算部 4 c は、解析対象となる鉄心に対して有限要素法 (FEM) を適用し、上記 (25 式) を用いるなどして、ベクトルポテンシャル $A(\omega t)$ を計算する。

30

【0075】

次に、ステップ S 24 において、磁束密度演算部 4 c は、上記ステップ S 23 により計算したベクトルポテンシャル $A(\omega t)$ を用いて、解析対象となる鉄心に生じる磁束密度 B を計算する。

【0076】

次に、ステップ S 25 において、磁束密度演算部 4 c は、1 周期分の計算が終了したか否かを判定する。この判定の結果、終了していない場合には、ステップ S 26 に進み、次の位相 ωt を設定して、上記ステップ S 23 に戻り、1 周期分の計算が終了するまで、上記ステップ S 23 ～ S 26 の処理を繰り返す。

40

【0077】

一方、1 周期分の計算が終了した場合には、ステップ S 27 に進み、磁束密度演算部 4 c は、ステップ S 23 ～ S 26 によって計算した 1 周期分の磁束密度 B に基づいて、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き inc とを計算する。

【0078】

次に、ステップ S 28 において、上記ステップ S 27 による計算の結果、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き inc とが収束したか否かを判定する。この判定の結果、収束しない場合には、ステップ S 29 に進み、磁気抵抗率 ν_{xr} 、 ν_{yr} と、磁気ヒステリシス係数 ν_{xi} 、 ν_{yi} を変更して、上記ステップ 22 に戻り、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比

50

α と、長軸 B_{MAX} の傾き $i n c$ とが収束するまで、ステップ S 2 2 ～ S 2 9 の処理を繰り返す。

【0079】

一方、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き $i n c$ とが収束した場合には、ステップ S 3 0 に進み、ステップ S 2 7 で計算した楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き $i n c$ に対応付けられて磁歪特性データベース 4 a に格納されている最大歪み率 λ_{MAX} を読み出す。なお、このステップ S 3 0 では、上記有限要素法により分割された全ての領域（解析対象の鉄心における全ての領域）における最大歪み率 λ_{MAX} を読み出す。

【0080】

次に、ステップ S 3 1 において、騒音評価部 4 e は、ステップ S 3 0 で読み出された最大歪み率 λ_{MAX} に基づいて、解析対象の鉄心における最大歪み率 λ_{MAX} の分布を計算し、計算した結果を表示部 3 に表示する。

【0081】

次に、ステップ S 3 2 において、騒音評価部 4 e は、ステップ S 3 0 で読み出された最大歪み率 λ_{MAX} の平均値を計算し、計算した結果を表示部 3 に表示する。

【0082】

以上のように本実施の形態では、歪みゲージ 3 2 ～ 3 4 が貼り付けられた試料（薄板鋼板）3 1 に生じる歪み率を、2次元磁気測定装置 4 0 を用いて測定するようにしたので、試料（薄板鋼板）3 1 が励磁によって楕円状に歪んだ場合でも、楕円の長軸 B_{MAX} と、軸比 α と、長軸 B_{MAX} の傾き $i n c$ とを求めることができる。したがって、試料（薄板鋼板）3 1 が、その板面方向においてどのように歪んだとしても、その歪みを正確に測定することができる。

【0083】

また、磁歪特性データベース 4 a を用いて、E & S モデリングにより得られる磁気特性と、騒音を評価するための指標である最大歪み率 λ_{MAX} とを関連付けるようにしたので、変圧器などの鉄心を用いた機器に発生する騒音を上記機器の設計の段階で正確に評価することができる。

【0084】

なお、本実施の形態では、鉄心に生じる騒音を評価する指標として、最大歪み率 λ_{MAX} を用いるようにしたが、歪み率の大きさを表すものであれば、磁気歪みを評価する指標は、最大歪み率 λ_{MAX} に限定されない。例えば、図 1 1 (a) に示すような膨張率変動幅 λ_p や、図 1 1 (b) に示すような歪み率変動幅 λ_{2p} を、磁気歪みを評価する指標としてもよい。

【0085】

ここで、膨張率変動幅 λ_p とは、歪みテンソル E の固有値 $e i g 1$ を表す波形 1 1 0 1 の振幅である。また、歪み率変動幅 λ_{2p} とは、歪みテンソル E の固有値 $e i g 1$ を表す波形 1 1 0 2 の最大値と、歪みテンソル E の固有値 $e i g 1$ を表す波形 1 1 0 3 の最小値とから定まる幅である。これらを式で表すと、それぞれ次の (26 式)、(27 式) のようになる。

$$\lambda_p = \max_t(eig1(\omega t)) - \min_t(eig1(\omega t)) \quad \dots (26式)$$

$$\lambda_{2p} = \max_t(eig1(\omega t)) - \min_t(eig2(\omega t)) \quad \dots (27式)$$

【0087】

また、本実施の形態のように、上記 E & S モデリング（二次元ベクトル法）により磁気

10

20

30

40

50

特性の解析を行うようにすれば、より高精度に磁気特性を解析することができ好ましいが、磁気特性の解析方法は、上記 E & S モデリング（二次元ベクトル法）に限定されない。

【0088】

また、2次元磁気測定装置40を用いて、試料（薄板鋼板）31に生じる磁界強度Hを測定し、測定した磁界強度Hと、その磁界強度Hを与える楕円磁束とを対応付けてデータベースに格納し、図10のステップS27において計算した結果に対応付けられて格納されている磁界強度Hを上記データベースから読み出して、解析対象となる鉄心に生じる磁界強度Hの分布を表示部3に表示するようにしてもよい。さらに、解析対象となる鉄心の鉄損Wの分布についても、磁界強度Hなどと同様に求めて、表示部3に表示するようにしてもよい。

10

【0089】

（本発明の他の実施の形態）

上述した各実施の形態における磁気歪み解析装置による制御動作は、図12に示すようなコンピュータシステムを用いることにより実現することができる。

図12は、磁気歪み解析装置1に配設されたコンピュータシステムの構成の一例を示したブロック図である。

図12において、コンピュータシステム120は、CPU121と、ROM122と、RAM123と、キーボード（KB）124のキーボードコントローラ（KBC）125と、表示部としてのCRTディスプレイ（CRT）126のCRTコントローラ（CRT C）127と、ハードディスク（HD）128及びフレキシブルディスク（FD）129のディスクコントローラ（DKC）130と、ネットワーク131との接続のためのネットワークインターフェースコントローラ（NIC）132とが、システムバス133を介して互いに通信可能に接続された構成としている。

20

【0090】

CPU121は、ROM122或いはHD128に記憶されたソフトウェア、或いはFD129より供給されるソフトウェアを実行することで、システムバス123に接続された各構成部を総括的に制御する。

すなわち、CPU121は、所定の処理シーケンスに従った処理プログラムを、ROM122、或いはHD128、或いはFD129から読み出して実行することで、後述する動作を実現するための制御を行う。

30

【0091】

RAM123は、CPU121の主メモリ或いはワークエリア等として機能する。

KBC125は、KB124や図示していないポインティングデバイス等からの指示入力を制御する。

【0092】

CRT C127は、CRT126の表示を制御する。

DKC130は、ブートプログラム、種々のアプリケーション、編集ファイル、ユーザファイル、ネットワーク管理プログラム、及び本実施の形態における所定の処理プログラム等を記憶するHD128及びFD129とのアクセスを制御する。

NIC132は、ネットワーク131上の装置或いはシステムと双方向にデータをやりとりする。

40

【0093】

また、上述した実施の形態の機能を実現するべく各種のデバイスを動作させるように、上記各種デバイスと接続された装置あるいはシステム内のコンピュータに対し、上記実施の形態の機能を実現するためのソフトウェアのプログラムコードを供給し、そのシステムあるいは装置のコンピュータ（CPUあるいはMPU）に格納されたプログラムに従って上記各種デバイスを動作させることによって実施したものも、本発明の範疇に含まれる。

【0094】

また、この場合、上記ソフトウェアのプログラムコード自体が上述した実施の形態の機能を実現することになり、そのプログラムコード自体、およびそのプログラムコードをコ

50

ンピュータに供給するための手段、例えば、かかるプログラムコードを格納した記録媒体は本発明を構成する。かかるプログラムコードを記憶する記録媒体としては、例えばフレキシブルディスク、ハードディスク、光ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、磁気テープ、不揮発性のメモ리카ード、ROM等を用いることができる。

【0095】

また、コンピュータが供給されたプログラムコードを実行することにより、上述した実施の形態の機能が実現されるだけでなく、そのプログラムコードがコンピュータにおいて稼働しているOS（オペレーティングシステム）あるいは他のアプリケーションソフト等と共同して上述の実施の形態の機能が実現される場合にもかかるプログラムコードは本発明の実施の形態に含まれる。

10

【0096】

さらに、供給されたプログラムコードがコンピュータの機能拡張ボードやコンピュータに接続された機能拡張ユニットに備わるメモリに格納された後、そのプログラムコードの指示に基づいてその機能拡張ボードや機能拡張ユニットに備わるCPU等が実際の処理の一部または全部を行い、その処理によって上述した実施の形態の機能が実現される場合にも本発明に含まれる。

【図面の簡単な説明】

【0097】

【図1】本発明の実施の形態を示し、磁気歪み解析装置の構成の一例を示したブロック図である。

20

【図2】本発明の実施の形態を示し、楕円磁束の概念の一例を示した図である。

【図3】本発明の実施の形態を示し、歪みゲージが貼り付けられた試料の一例を示した図である。

【図4】本発明の実施の形態を示し、2次元磁気測定装置の構成の一例を示した図である。

【図5】本発明の実施の形態を示し、鉄心内部における基準点と任意の点との位置関係を表すベクトルを示した図である。

【図6】本発明の実施の形態を示し、最大歪み率の概念を説明する図である。

【図7】本発明の実施の形態を示し、無方向性鋼板における歪みテンソルの固有値の波形と、歪みテンソルの固有ベクトルの波形の一例を示した図である。

30

【図8】本発明の実施の形態を示し、方向性鋼板における歪みテンソルの固有値の波形と、歪みテンソルの固有ベクトルの波形の一例を示した図である。

【図9】本発明の実施の形態を示し、楕円磁束と、最大歪み率とを対応付けて磁歪特性データベースに格納する際の磁歪特性演算部の動作の一例を説明するフローチャートである。

【図10】本発明の実施の形態を示し、鉄心に生じる磁気歪みを解析する際の磁気歪み解析装置の動作の一例を説明するフローチャートである。

【図11】本発明の実施の形態を示し、膨張率変動幅と歪み率変動幅の概念を説明する図である。

【図12】本発明の他の実施の形態を示し、磁気歪み解析装置に配設されたコンピュータシステムの構成の一例を示したブロック図である。

40

【符号の説明】

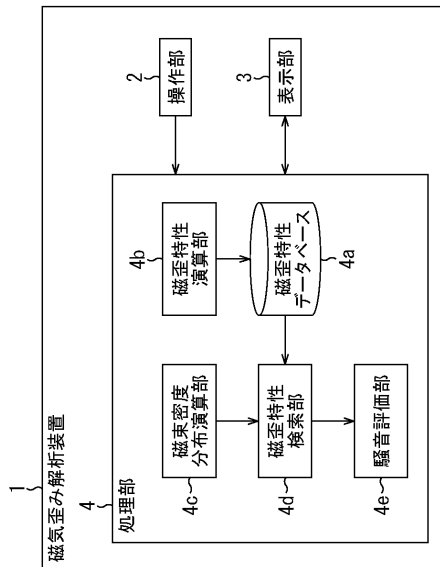
【0098】

- 1 磁気歪み解析装置
- 2 操作部
- 3 表示部
- 4 処理部
- 4 a 磁歪特性データベース
- 4 b 磁歪特性演算部
- 4 c 磁束密度分布演算部

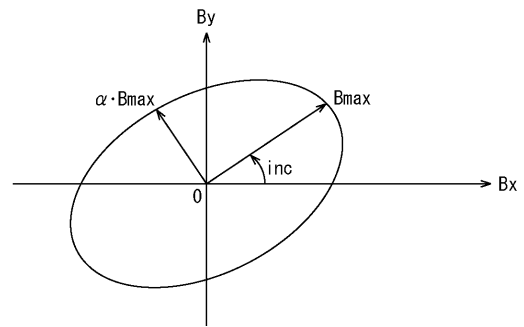
50

- 4 d 磁歪特性検索部
- 4 e 騒音評価部
- 3 1 試料（薄板鋼板）
- 3 2～3 4 歪みゲージ
- 4 0 2次元磁気測定装置

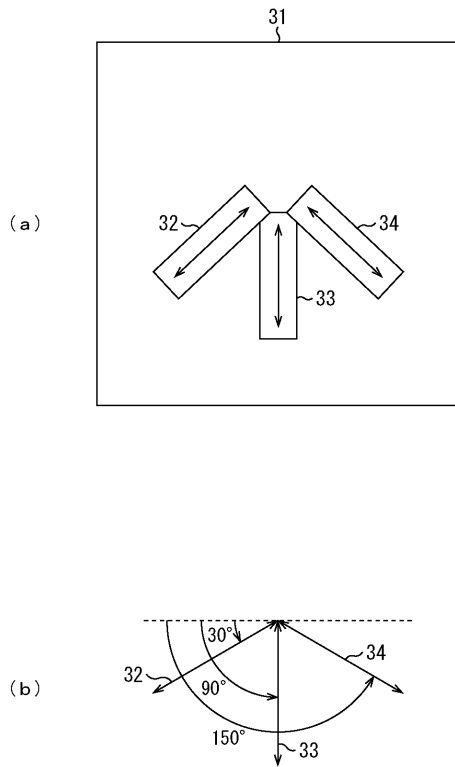
【図 1】



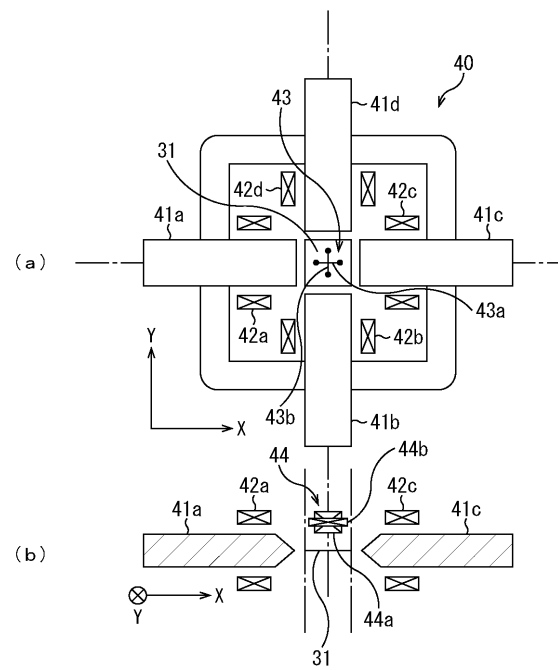
【図 2】



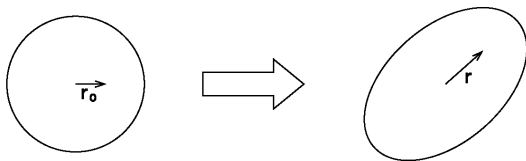
【図 3】



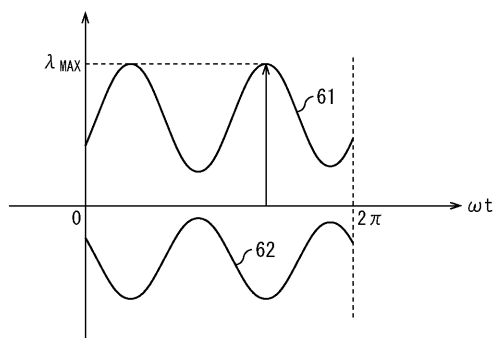
【図 4】



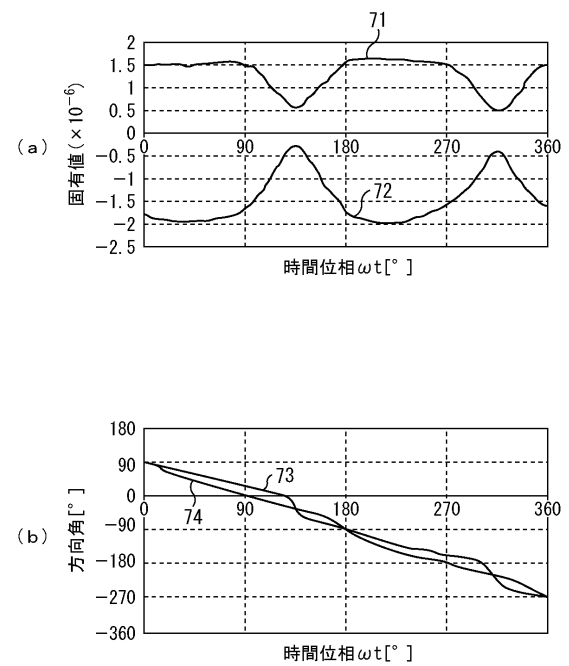
【図 5】



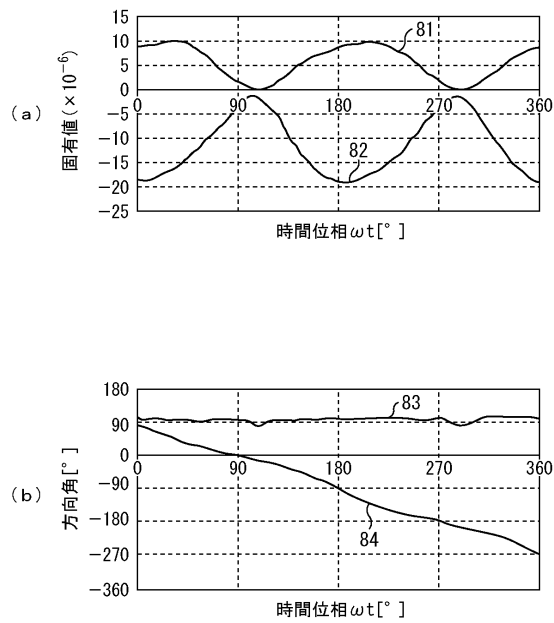
【図 6】



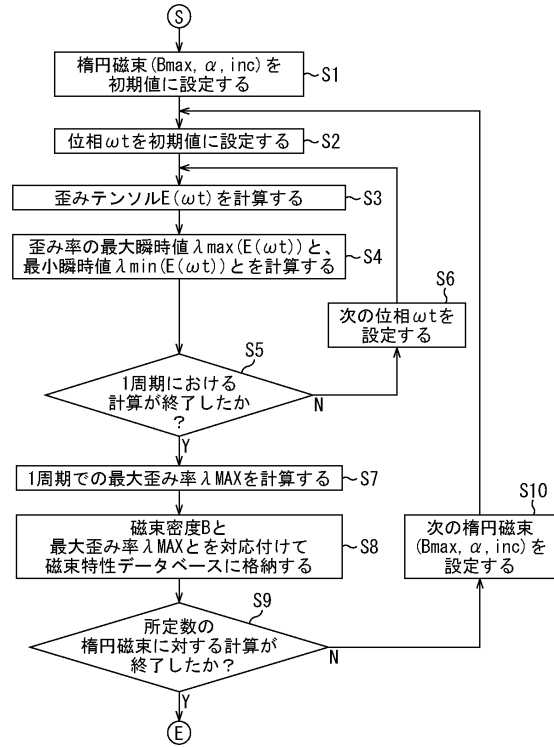
【図 7】



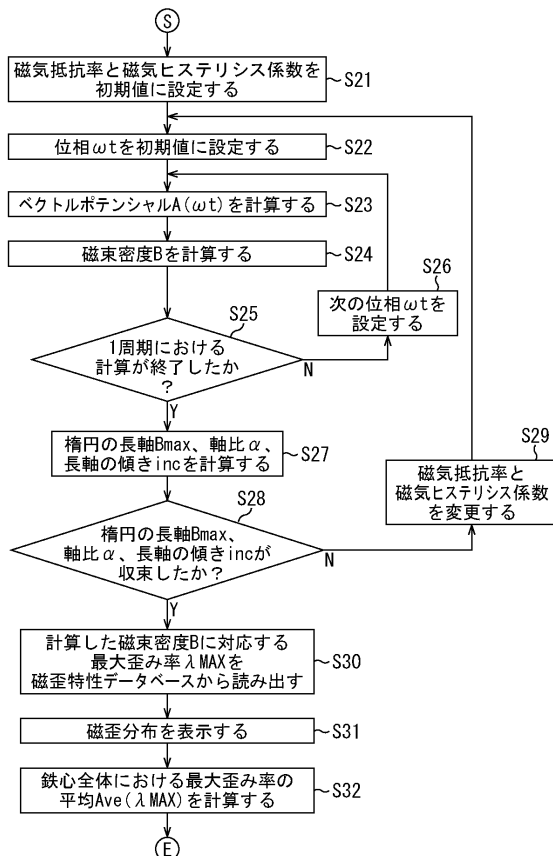
【図 8】



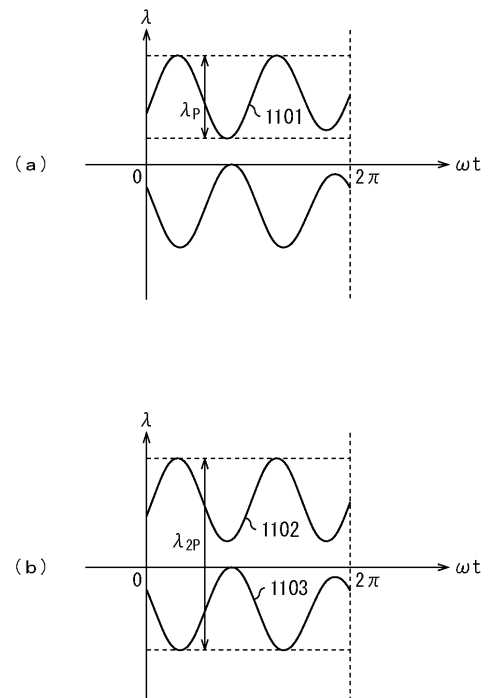
【図 9】



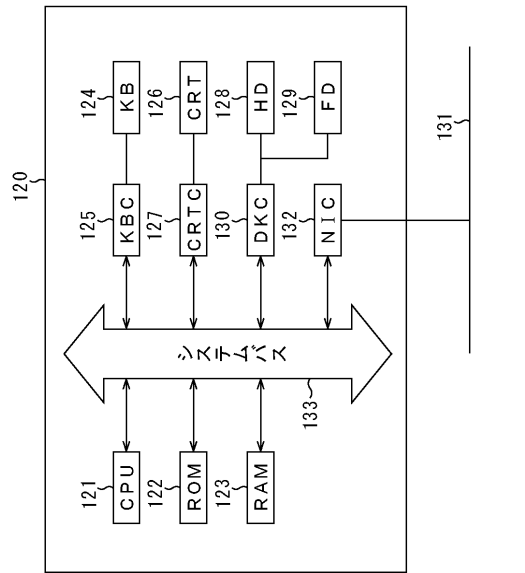
【図 10】



【図 11】



【図 12】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平5-281321 (JP, A)
特開平7-333309 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01R 33/02-18

G01N 27/72-90

G06F 17/00-18, 19/00