

明 細 書

発明の名称：

無方向性電磁鋼板、ロータコア、ステータコア、及び、モータ

技術分野

[0001] 本開示は、無方向性電磁鋼板、無方向性電磁鋼板を素材として製造されるロータコア、ステータコア、及び、ロータコア及びステータコアを備えるモータに関する。

背景技術

[0002] 無方向性電磁鋼板は、モータ内のモータコアの素材として広く利用されている。モータコアは、回転子であるロータコアと、固定子であるステータコアとを備える。ロータコアとステータコアとは、異なる特性が求められる。

[0003] 具体的には、ロータコアには、モータ効率を高めるための低い鉄損だけでなく、次の理由により、高い強度も求められる。電気自動車やハイブリッド自動車用途のモータでは、モータ回転数を高速化することにより、モータ出力を高める設計がされている。モータ出力の増加は、モータの動作中において、回転子であるロータコアに掛かる遠心力を高める。そのため、ロータコアには良好な鉄損とともに、高い強度が求められる。

[0004] 一方、ステータコアには、ロータコアほどの高い強度は求められず、モータ効率を高めるために特に、優れた鉄損が求められる。

[0005] 以上のとおり、ロータコアとステータコアとでは、求められる強度レベル及び鉄損レベルが異なる。一方で、ロータコアとステータコアとは、同じ無方向性電磁鋼板を素材として製造される。具体的には、同じ無方向性電磁鋼板から、ロータコアとステータコアとが打抜き加工される。

[0006] そこで、同じ無方向性電磁鋼板から高強度のロータコアと、鉄損に優れたステータコアとを得るための技術が、特開2008-050686号公報（特許文献1）に提案されている。

[0007] 特許文献1では、質量%で、C：0.0050%以下、Si：2.0%以

上4.0%以下、Mn：0.05%以上2.0%以下、Al：3.0%以下、Ti：0.0030%以下、S：0.0030%以下、N：0.0030%以下、V：0.0050%以下、Nb：0.0050%以下、Zr：0.0050%以下、As：0.0050%以下を含有し、残部Fe及び不可避免の不純物からなる高合金の化学組成を有し、板厚が0.15～0.35mmの薄手の無方向性電磁鋼板を製造する。そして、ロータとステータとを同じ無方向性電磁鋼板から打ち抜く。打ち抜いたステータのみ熱処理し、打ち抜いたロータは熱処理しない。

[0008] 特許文献1では、無方向性電磁鋼板を高合金化することで、優れた鉄損と、ロータコアに必要な高い強度とが得られる。そして、高合金及び薄手の無方向性電磁鋼板を打ち抜いて製造されたステータコアに対して熱処理を実施することにより、ステータコアの鉄損をさらに低減する。以上の技術により、同じ無方向性電磁鋼板から、ロータコアの高強度化とステータの低鉄損化との両立を試みている。

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：特開2008-050686号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] モータには、上述のとおり、ロータコアの高強度化及びステータコアの低鉄損化が求められている。モータにはさらに、トルクの増加も求められている。磁束密度はトルクを生み出す原動力である。そのため、素材である無方向性電磁鋼板では、優れた磁束密度も求められる。

[0011] 上述の特許文献1では、薄手の無方向性電磁鋼板を高合金化する。この場合確かに、強度を確保しつつ、鉄損も低減し得る。しかしながら、高合金及び薄手の無方向性電磁鋼板の場合、十分な磁束密度が得られない場合がある。

[0012] 本発明の目的は、高い強度及び優れた磁束密度が得られ、さらに、優れた鉄損が得られる無方向性電磁鋼板、ロータコア、ステータコア、及びモータを提供することである。

課題を解決するための手段

[0013] 本開示による無方向性電磁鋼板は、化学組成が、質量％で、Si : 2.0 ~ 4.0 %、Mn : 0.1 ~ 1.5 %、P : 0.15 %以下、S : 0.0030 %以下、Al : 0.1 ~ 2.0 %、C : 0.0050 %以下、N : 0.0050 %以下、O : 0.0500 %以下、Cr : 0 ~ 0.50 %、Ti : 0 ~ 0.0030 %、Mo : 0 ~ 0.100 %、Ni : 0 ~ 0.50 %、Cu : 0 ~ 0.50 %、Sn : 0 ~ 0.100 %、Sb : 0 ~ 0.100 %、Ca : 0 ~ 0.0050 %、Mg : 0 ~ 0.0030 %、希土類元素 : 0 ~ 0.0100 %、B : 0 ~ 0.0030 %、Zn : 0 ~ 0.0030 %、Ge : 0 ~ 0.0030 %、As : 0 ~ 0.0100 %、Co : 0 ~ 0.0500 %、V : 0 ~ 0.0030 %、Se : 0 ~ 0.0030 %、Zr : 0 ~ 0.0030 %、Nb : 0 ~ 0.0030 %、Pb : 0 ~ 0.0030 %、及び、Ga : 0 ~ 0.0030 %、を含有し、残部はFe及び不純物からなり、板厚 t が0.30 mm以下である。式(1)で定義される $F1$ が10.0以上であり、式(2)で定義される $F2$ が8.5以下である。さらに、式(3)で定義される $F3$ が、周波数1000 Hz及び磁束密度0.5 Tにおける鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、式(4)で定義される $F4$ が、無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したときの周波数400 Hz及び磁束密度1.0 Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量％

での含有量が代入され、 t には、mm単位での板厚が代入される。

- [0014] 本開示によるロータコアは、積層された複数のロータコア素材を備える。ロータコア素材は板状である。ロータコア素材は、化学組成が、質量%で、 $Si: 2.0 \sim 4.0\%$ 、 $Mn: 0.1 \sim 1.5\%$ 、 $P: 0.15\%$ 以下、 $S: 0.0030\%$ 以下、 $Al: 0.1 \sim 2.0\%$ 、 $C: 0.0050\%$ 以下、 $N: 0.0050\%$ 以下、 $O: 0.0500\%$ 以下、 $Cr: 0 \sim 0.50\%$ 、 $Ti: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Mo: 0 \sim 0.100\%$ 、 $Ni: 0 \sim 0.50\%$ 、 $Cu: 0 \sim 0.50\%$ 、 $Sn: 0 \sim 0.100\%$ 、 $Sb: 0 \sim 0.100\%$ 、 $Ca: 0 \sim 0.0050\%$ 、 $Mg: 0 \sim 0.0030\%$ 、希土類元素: $0 \sim 0.0100\%$ 、 $B: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Zn: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Ge: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $As: 0 \sim 0.0100\%$ 、 $Co: 0 \sim 0.0500\%$ 、 $V: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Se: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Zr: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Nb: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Pb: 0 \sim 0.0030\%$ 、及び、 $Ga: 0 \sim 0.0030\%$ 、を含有し、残部はFe及び不純物からなり、板厚 t が 0.30 mm 以下である。式(1)で定義される $F1$ が 10.0 以上であり、式(2)で定義される $F2$ が 8.5 以下である。さらに、式(3)で定義される $F3$ が、周波数 1000 Hz 及び磁束密度 0.5 T における鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、式(4)で定義される $F4$ が、ロータコア素材を 800°C で1時間熱処理したときの周波数 400 Hz 及び磁束密度 1.0 T における鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、 t には、mm単位での板厚が代入される。

- [0015] 本開示によるステータコアは、互いに積層された複数のステータコア素材

を備える。ステータコア素材は円環板状であり、ステータコア素材は、ステータコア素材の周方向に隙間を設けて配列され、ステータコア素材の径方向に延びる複数のティース部を含む。ステータコア素材は、化学組成が、質量%で、 $Si: 2.0 \sim 4.0\%$ 、 $Mn: 0.1 \sim 1.5\%$ 、 $P: 0.15\%$ 以下、 $S: 0.0030\%$ 以下、 $Al: 0.1 \sim 2.0\%$ 、 $C: 0.0050\%$ 以下、 $N: 0.0050\%$ 以下、 $O: 0.0500\%$ 以下、 $Cr: 0 \sim 0.50\%$ 、 $Ti: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Mo: 0 \sim 0.100\%$ 、 $Ni: 0 \sim 0.50\%$ 、 $Cu: 0 \sim 0.50\%$ 、 $Sn: 0 \sim 0.100\%$ 、 $Sb: 0 \sim 0.100\%$ 、 $Ca: 0 \sim 0.0050\%$ 、 $Mg: 0 \sim 0.0030\%$ 、希土類元素: $0 \sim 0.0100\%$ 、 $B: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Zn: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Ge: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $As: 0 \sim 0.0100\%$ 、 $Co: 0 \sim 0.0500\%$ 、 $V: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Se: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Zr: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Nb: 0 \sim 0.0030\%$ 、 $Pb: 0 \sim 0.0030\%$ 、及び、 $Ga: 0 \sim 0.0030\%$ 、を含有し、残部はFe及び不純物からなり、板厚 t が 0.30mm 以下である。式(1)で定義される $F1$ が 10.0 以上であり、式(2)で定義される $F2$ が 8.5 以下である。さらに、式(4)で定義される $F4$ が、周波数 400Hz 及び磁束密度 1.0T における鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)、式(2)及び式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、 t には、 mm 単位での板厚が代入される。

[0016] 本開示によるモータは、上述のロータコアと、上述のステータコアとを備える。

発明の効果

[0017] 本開示の無方向性電磁鋼板では、高い強度及び優れた磁束密度が得られ、

さらに、優れた鉄損が得られる。本開示のロータコアでは、高い強度および優れた磁束密度が得られる。本開示のステータコアでは、優れた磁束密度及び優れた鉄損が得られる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1A]図1 Aは、本実施形態のロータコアの一例を示す平面図である。

[図1B]図1 Bは、図1 Aと異なる、本実施形態のロータコアの一例を示す平面図である。

[図1C]図1 Cは、図1 A及び図1 Bと異なる、本実施形態のロータコアの一例を示す平面図である。

[図2A]図2 Aは、図1 A中のカシメ部の線分 I I A - I I A での断面図である。

[図2B]図2 Bは、図1 A中のカシメ部の線分 I I B - I I B での断面図である。

[図3]図3は、本実施形態のステータコアの平面図である。

発明を実施するための形態

[0019] 本発明者らは、高い強度及び優れた磁束密度が得られ、さらに、優れた鉄損が得られる無方向性電磁鋼板について検討を行った。上述のとおり、優れた磁束密度を得るためには、合金元素の含有量を高めることは避けた方が好ましい。そこで、本発明者らは初めに、化学組成の観点から、高い強度及び優れた磁束密度と、熱処理後の優れた鉄損が得られる無方向性電磁鋼板を検討した。その結果、化学組成が、質量%で、Si : 2.0~4.0%、Mn : 0.1~1.5%、P : 0.15%以下、S : 0.0030%以下、Al : 0.1~2.0%、C : 0.0050%以下、N : 0.0050%以下、O : 0.0500%以下、Cr : 0~0.50%、Ti : 0~0.0030%、Mo : 0~0.100%、Ni : 0~0.50%、Cu : 0~0.50%、Sn : 0~0.100%、Sb : 0~0.100%、Ca : 0~0.0050%、Mg : 0~0.0030%、希土類元素 : 0~0.0100%、B : 0~0.0030%、Zn : 0~0.0030%、Ge : 0~0.00

30%、As : 0~0.0100%、Co : 0~0.0500%、V : 0~0.0030%、Se : 0~0.0030%、Zr : 0~0.0030%、Nb : 0~0.0030%、Pb : 0~0.0030%、及び、Ga : 0~0.0030%、を含有し、残部はFe及び不純物からなる無方向性電磁鋼板であれば、高い強度及び優れた磁束密度と、熱処理後の優れた鉄損が得られる可能性があると考えた。

[0020] 本発明者らはさらに、上述の化学組成を満たす無方向性電磁鋼板において、高い強度、優れた磁束密度、及び、優れた鉄損が得られるための手段を検討した。

[0021] 上述の化学組成において、Si、Al及びMnは鋼板の固有抵抗を高め、鉄損を低減する。一方、Si、Al及びMnは、磁束密度を低下する。そこで、上述の化学組成を満たす鋼板においてさらに、Si含有量、Al含有量及びMn含有量と、鉄損及び磁束密度との関係を調査した。その結果、上述の化学組成を満たす無方向性電磁鋼板において、式(1)で定義されるF1が10.0以上であり、式(2)で定義されるF2が8.5以下であれば、優れた鉄損と優れた磁束密度とを両立できる可能性があることを、本発明者らは見出した。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

ここで、式(1)及び式(2)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入される。

[0022] 本発明者らはさらに、上述の化学組成を満たし、かつ、F1が10.0以上、F2が8.5以下となる無方向性電磁鋼板において、優れた鉄損及び優れた磁束密度だけでなく、強度も高めることができる手段を検討した。上述の化学組成では、合金元素による高強度化はそれほど望めない。そこで、高合金化とは異なる高強度化の手段として、鋼板に導入されているひずみ量及び鋼板中のひずみ分布に注目した。鋼板に導入されているひずみ量及びひずみ分布が適切であれば、合金元素に頼らなくても、鋼板の強度を高めること

ができる。一方で、鋼板に導入されているひずみは鉄損を劣化する。しかしながら、熱処理によりひずみを除去し、かつ、そのひずみを駆動力として鋼板中の粒界面積を低減できれば、鉄損をさらに低減できる。

[0023] 鋼板中のひずみ量及びひずみ分布を定量的に示すのは極めて困難である。

そこで、本発明者らは、ひずみ量及びひずみ分布と相関する指標を検討した。その結果、式(3)で定義されるF3が、周波数1000Hz及び磁束密度0.5Tにおける鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、式(4)で定義されるF4が、無方向性電磁鋼板を歪取り焼鈍したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上であれば、高い強度及び優れた磁束密度が得られ、さらに、熱処理後に優れた鉄損が得られることを見出した。

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(3)及び式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、tには、mm単位での板厚が代入される。

[0024] 以上の知見に基づいて完成した本実施形態の無方向性電磁鋼板、ロータコア、ステータコア及びモータは、次の構成を有する。

[0025] 第1の形態の無方向性電磁鋼板では、化学組成が、質量%で、Si: 2.0~4.0%、Mn: 0.1~1.5%、P: 0.15%以下、S: 0.0030%以下、Al: 0.1~2.0%、C: 0.0050%以下、N: 0.0050%以下、O: 0.0500%以下、Cr: 0~0.50%、Ti: 0~0.0030%、Mo: 0~0.100%、Ni: 0~0.50%、Cu: 0~0.50%、Sn: 0~0.100%、Sb: 0~0.100%、Ca: 0~0.0050%、Mg: 0~0.0030%、希土類元素: 0~0.0100%、B: 0~0.0030%、Zn: 0~0.0030%、Ge: 0~0.0030%、As: 0~0.0100%、Co: 0~0.0500%、V: 0~0.0030%、Se: 0~0.0030%、Zr: 0~0.0030%、Nb: 0~0.0030%、Pb: 0~0.0030%

、Ga : 0 ~ 0.0030%、及び、残部はFe及び不純物からなり、板厚tが0.30mm以下である。式(1)で定義されるF1が10.0以上であり、式(2)で定義されるF2が8.5以下である。さらに、式(3)で定義されるF3が、周波数1000Hz及び磁束密度0.5Tにおける鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、式(4)で定義されるF4が、無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、tには、mm単位での板厚が代入される。

[0026] 第2の形態の無方向性電磁鋼板は、第1の形態の無方向性電磁鋼板であって、化学組成は、Cr : 0.01 ~ 0.50%、Ti : 0.0001 ~ 0.0030%、Mo : 0.001 ~ 0.100%、Ni : 0.01 ~ 0.50%、Cu : 0.01 ~ 0.50%、Sn : 0.001 ~ 0.100%、Sb : 0.001 ~ 0.100%、Ca : 0.0001 ~ 0.0050%、Mg : 0.0001 ~ 0.0030%、希土類元素 : 0.0001 ~ 0.0100%、B : 0.0001 ~ 0.0030%、Zn : 0.0001 ~ 0.0030%、Ge : 0.0001 ~ 0.0030%、As : 0.0001 ~ 0.0100%、Co : 0.0001 ~ 0.0500%、V : 0.0001 ~ 0.0030%、Se : 0.0001 ~ 0.0030%、Zr : 0.0001 ~ 0.0030%、Nb : 0.0001 ~ 0.0030%、Pb : 0.0001 ~ 0.0030%、及び、Ga : 0.0001 ~ 0.0030%、からなる群から選択される1種以上を含有する。

[0027] 第3の形態の無方向性電磁鋼板は、第1又は第2の形態の無方向性電磁鋼

板であって、降伏応力が450MPa以上であり、破断伸びが20%以上である。

- [0028] 第4の形態の無方向性電磁鋼板は、第1～第3のいずれか1つの形態の無方向性電磁鋼板であって、圧延方向を基準0°としたときの22.5°ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_{50} を、 $B_{50}(0^\circ)$ 、 $B_{50}(22.5^\circ)$ 、 $B_{50}(45^\circ)$ 、 $B_{50}(67.5^\circ)$ 及び $B_{50}(90^\circ)$ としたとき、式(5)で定義される平均磁束密度 B_{50ave} が1.65T以上である。

$$B_{50ave} = (B_{50}(0^\circ) + 2 \times B_{50}(22.5^\circ) + 2 \times B_{50}(45^\circ) + 2 \times B_{50}(67.5^\circ) + B_{50}(90^\circ)) / 8 \quad (5)$$

- [0029] 第5の形態の無方向性電磁鋼板は、第1～第4のいずれか1つの形態の無方向性電磁鋼板であって、無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したとき、鉄損 $W_{10/400}$ はF4以下である。さらに、圧延方向を基準0°としたときの22.5°ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_1 を、 $B_1(0^\circ)$ 、 $B_1(22.5^\circ)$ 、 $B_1(45^\circ)$ 、 $B_1(67.5^\circ)$ 及び $B_1(90^\circ)$ としたとき、式(6)で定義される平均磁束密度 B_{1ave} が0.70T以上である。さらに、磁束密度 B_{500} の最大値の方向を基準0°としたときの22.5°ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_{500} を、 $B_{500}(0^\circ)$ 、 $B_{500}(22.5^\circ)$ 、 $B_{500}(45^\circ)$ 、 $B_{500}(67.5^\circ)$ 及び $B_{500}(90^\circ)$ としたとき、式(7)で定義される平均磁束密度 B_{500ave} が1.98T以上である。

$$B_{1ave} = (B_1(0^\circ) + 2 \times B_1(22.5^\circ) + 2 \times B_1(45^\circ) + 2 \times B_1(67.5^\circ) + B_1(90^\circ)) / 8 \quad (6)$$

$$B_{500ave} = (B_{500}(0^\circ) + 2 \times B_{500}(22.5^\circ) + 2 \times B_{500}(45^\circ) + 2 \times B_{500}(67.5^\circ) + B_{500}(90^\circ)) / 8 \quad (7)$$

- [0030] 第6の形態の無方向性電磁鋼板は、第1～第5のいずれか1つの形態の無方向性電磁鋼板であって、20℃での熱伝導率が20W/mK以上であり、150℃での熱伝導率が23W/mK以上である。

- [0031] 第1の形態のロータコアは、積層された複数のロータコア素材を備える。

ロータコア素材は板状である。ロータコア素材は、化学組成が、質量％で、
 $\text{Si} : 2.0 \sim 4.0\%$ 、 $\text{Mn} : 0.1 \sim 1.5\%$ 、 $\text{P} : 0.15\%$ 以下、
 $\text{S} : 0.0030\%$ 以下、 $\text{Al} : 0.1 \sim 2.0\%$ 、 $\text{C} : 0.0050\%$ 以下、 $\text{N} : 0.0050\%$ 以下、 $\text{O} : 0.0500\%$ 以下、 $\text{Cr} : 0 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Ti} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Mo} : 0 \sim 0.100\%$ 、 $\text{Ni} : 0 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Cu} : 0 \sim 0.50\%$ 、 $\text{Sn} : 0 \sim 0.100\%$ 、 $\text{Sb} : 0 \sim 0.100\%$ 、 $\text{Ca} : 0 \sim 0.0050\%$ 、 $\text{Mg} : 0 \sim 0.0030\%$ 、希土類元素： $0 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{B} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Zn} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Ge} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{As} : 0 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{Co} : 0 \sim 0.0500\%$ 、 $\text{V} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Se} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Zr} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Nb} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Pb} : 0 \sim 0.0030\%$ 、 $\text{Ga} : 0 \sim 0.0030\%$ 、及び、残部はFe及び不純物からなり、板厚 t が 0.30 mm 以下である。式(1)で定義される $F1$ が 10.0 以上であり、式(2)で定義される $F2$ が 8.5 以下である。さらに、式(3)で定義される $F3$ が、周波数 1000 Hz 及び磁束密度 0.5 T における鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、式(4)で定義される $F4$ が、ロータコア素材を 800°C で1時間熱処理したときの周波数 400 Hz 及び磁束密度 1.0 T における鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F1 = 4\text{Si} + 3\text{Al} + 2\text{Mn} \quad (1)$$

$$F2 = 2\text{Si} + 3\text{Al} + \text{Mn} \quad (2)$$

$$F3 = 45 - 12\text{Si} - 5\text{Al} - 2\text{Mn} + 1000 \times t / (5 + 6\text{Si} + 5\text{Al} + 3\text{Mn}) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6\text{Si} + 5\text{Al} + 3\text{Mn}) \quad (4)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量％での含有量が代入され、 t には、 mm 単位での前記板厚が代入される。

[0032] 第2の形態のロータコアは、第1の形態のロータコアであって、ロータコア素材はさらに、カシメ部と、平坦な領域である平坦部と、を含む。カシメ部は、平坦部に対して傾斜して形成されている傾斜部を含む。傾斜部の板厚

は、平坦部の板厚の85%以下である。

[0033] 第3の形態のロータコアは、第2の形態のロータコアであって、ロータコア素材の中心軸を含む断面において、平坦部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{14} は180HV以上であり、傾斜部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{121} は $H_{14} + 40$ HV以上である。

[0034] 第1の形態のステータコアは、互いに積層された複数のステータコア素材を備える。ステータコア素材は、円環板状である。ステータコア素材は、ステータコア素材の周方向に隙間を設けて配列され、ステータコア素材の径方向に延びる複数のティース部を含む。ステータコア素材は、化学組成が、質量%で、Si:2.0~4.0%、Mn:0.1~1.5%、P:0.15%以下、S:0.0030%以下、Al:0.1~2.0%、C:0.0050%以下、N:0.0050%以下、O:0.0500%以下、Cr:0~0.50%、Ti:0~0.0030%、Mo:0~0.100%、Ni:0~0.50%、Cu:0~0.50%、Sn:0~0.100%、Sb:0~0.100%、Ca:0~0.0050%、Mg:0~0.0030%、希土類元素:0~0.0100%、B:0~0.0030%、Zn:0~0.0030%、Ge:0~0.0030%、As:0~0.0100%、Co:0~0.0500%、V:0~0.0030%、Se:0~0.0030%、Zr:0~0.0030%、Nb:0~0.0030%、Pb:0~0.0030%、及び、Ga:0~0.0030%を含有し、残部はFe及び不純物からなり、板厚 t が0.30mm以下である。式(1)で定義される $F1$ が10.0以上であり、式(2)で定義される $F2$ が8.5以下である。さらに、式(4)で定義される $F4$ が、周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)、式(2)及び式(4)中の各元素記号には、対応する

元素の質量%での含有量が代入され、t には、mm 単位での板厚が代入される。

[0035] 第2の形態のステータコアは、第1の形態のステータコアであって、ステータコア素材はさらに、カシメ部と、平坦な領域である平坦部と、を含む。カシメ部は、平坦部に対して傾斜して形成されている傾斜部を含む。傾斜部の板厚は、平坦部の板厚の85%以下である。

[0036] 第3の形態のステータコアは、第2の形態のステータコアであって、ステータコア素材の中心軸を含む断面において、平坦部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{24} は、175HV以上であり、傾斜部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{221} は前記ビッカース硬さ $H_{24} \pm 10HV$ 以下である。

[0037] 第1の形態のモータは、第1～第3のいずれか1つの形態のロータコアと、第1～第3のいずれか1つの形態のステータコアとを備える。

[0038] 以下、本実施形態の無方向性電磁鋼板、ロータコア、ステータコア、及び、モータについて説明する。なお、元素の含有量に関する「%」は、特に断りがない限り、質量%を意味する。

[0039] [本実施形態の無方向性電磁鋼板の特徴]

本実施形態の無方向性電磁鋼板は、次の特徴1～特徴5を満たす。

(特徴1)

化学組成が、質量%で、Si: 2.0～4.0%、Mn: 0.1～1.5%、P: 0.15%以下、S: 0.0030%以下、Al: 0.1～2.0%、C: 0.0050%以下、N: 0.0050%以下、O: 0.0500%以下、Cr: 0～0.50%、Ti: 0～0.0030%、Mo: 0～0.100%、Ni: 0～0.50%、Cu: 0～0.50%、Sn: 0～0.100%、Sb: 0～0.100%、Ca: 0～0.0050%、Mg: 0～0.0030%、希土類元素: 0～0.0100%、及び、B: 0～0.0030%、Zn: 0～0.0030%、Ge: 0～0.0030%、As: 0～0.0100%、Co: 0～0.0500%、V: 0～0.0030%、Se: 0～0.0030%、Zr: 0～0.0030%、Nb: 0～

0.0030%、Pb : 0~0.0030%、及び、Ga : 0~0.0030%、を含有し、残部はFe及び不純物からなる。

(特徴2)

板厚tが0.30mm以下である。

(特徴3)

式(1)で定義されるF1が10.0以上である。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

ここで、式(1)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入される。

(特徴4)

式(2)で定義されるF2が8.5以下である。

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

ここで、式(2)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入される。

(特徴5)

式(3)で定義されるF3が、周波数1000Hz及び磁束密度0.5Tにおける鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、

式(4)で定義されるF4が、無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上である。

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(3)及び式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、tには、mm単位での前記板厚が代入される。

以下、特徴1～特徴5について説明する。

[0040] [(特徴1) 化学組成について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成は、次の元素を含有する。なお

、無方向性電磁鋼板の化学組成における「%」は、特に断りがない限り、質量%を意味する。

[0041] Si : 2.0 ~ 4.0 %

シリコン (Si) は、鋼板の固有抵抗を高め、渦電流損を低減する。その結果、鋼板の鉄損が低減する。Si はさらに、鋼板に固溶して鋼板の強度を高める。Si 含有量が 2.0 % 未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。

一方、Si 含有量が 4.0 % を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の打抜き加工性が低下する。

したがって、Si 含有量は 2.0 ~ 4.0 % である。

Si 含有量の好ましい下限は 2.1 % であり、さらに好ましくは 2.2 % であり、さらに好ましくは 2.3 % であり、さらに好ましくは 2.5 % であり、さらに好ましくは 2.8 % である。

Si 含有量の好ましい上限は 3.7 % であり、さらに好ましくは 3.6 % であり、さらに好ましくは 3.5 % であり、さらに好ましくは 3.2 % である。

[0042] Mn : 0.1 ~ 1.5 %

マンガン (Mn) は、鋼板の固有抵抗を高め、渦電流損を低減する。その結果、鋼板の鉄損が低減する。Mn 含有量が 0.1 % 未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。

一方、Mn 含有量が 1.5 % を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼板の磁束密度が低下する。

したがって、Mn 含有量は 0.1 ~ 1.5 % である。

Mn 含有量の好ましい下限は 0.2 % であり、さらに好ましくは 0.3 % であり、さらに好ましくは 0.4 % である。

Mn 含有量の好ましい上限は 1.0 % であり、さらに好ましくは 0.8 % であり、さらに好ましくは 0.7 % であり、さらに好ましくは 0.6 % である。

[0043] P : 0.15%以下

りん (P) は、不可避に含有される。つまり、P 含有量は 0% 超である。

P は、固溶強化により鋼板の強度を高める。P 含有量が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、P 含有量が 0.15% を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼板が脆化して加工性が低下し、冷間圧延時に鋼板に割れが発生する場合がある。したがって、P 含有量は 0.15% 以下である。

P 含有量の好ましい下限は 0.01% であり、さらに好ましくは 0.03% である。

P 含有量の好ましい上限は 0.12% であり、さらに好ましくは 0.10% であり、さらに好ましくは 0.08% である。

[0044] S : 0.0030%以下

硫黄 (S) は不可避に含有される不純物である。つまり、S 含有量は 0% 超である。S 含有量が 0.0030% を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、S が Mn S 等の硫化物を過剰に生成する。これらの硫化物は、鋼板の鉄損及び磁束密度を劣化させる。したがって、S 含有量は 0.0030% 以下である。

S 含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、S 含有量を過度に低減すれば、製造コストが高くなる。したがって、工業生産性の観点から、S 含有量の好ましい下限は 0.0001% 超であり、さらに好ましくは 0.0003% であり、さらに好ましくは 0.0004% であり、さらに好ましくは 0.0005% である。

S 含有量の好ましい上限は 0.0020% であり、さらに好ましくは 0.0018% であり、さらに好ましくは 0.0017% であり、さらに好ましくは 0.0015% であり、さらに好ましくは 0.0010% であり、さらに好ましくは 0.0008% である。

[0045] Al : 0.1~2.0%

アルミニウム（A l）は鋼板の固有抵抗を高め、渦電流損を低減する。その結果、鋼板の鉄損が低減する。A l含有量が0.1%未満であれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が十分に得られない。

一方、A l含有量が2.0%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼の磁束密度が低下する。

したがって、A l含有量は0.1～2.0%である。

A l含有量の好ましい下限は0.2%であり、さらに好ましくは0.3%であり、さらに好ましくは0.4%である。

A l含有量の好ましい上限は1.8%であり、さらに好ましくは1.6%であり、さらに好ましくは1.4%である。

本明細書において、無方向性電磁鋼板の化学組成中のA l含有量は、酸可溶A l（s o l . A l）の含有量を意味する。

[0046] C : 0.0050%以下

炭素（C）は鋼板中の転位に固着して鋼板の強度を高める。Cが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、C含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、炭化物が過剰に生成して、鋼板の鉄損及び磁束密度を劣化させる。

したがって、C含有量は0.0050%以下である。

C含有量の好ましい下限は0%超であり、さらに好ましくは0.0001%であり、0.0001%超であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0008%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

C含有量の好ましい上限は0.0040%であり、さらに好ましくは0.0036%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%である。

[0047] N : 0.0050%以下

窒素（N）は不可避に含有される不純物である。つまり、N含有量は0%超である。N含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、Nは、鋼板中で窒化物を過剰に形成して、鋼板の鉄損及び磁束密度を劣化させる。

したがって、N含有量は0.0050%以下である。

Nはなるべく低い方が好ましい。しかしながら、N含有量を過度に低減すれば、製造コストが高くなる。したがって、工業生産性の観点から、N含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0013%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

N含有量の好ましい上限は0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%である。

[0048] O: 0.0500%以下

酸素（O）は不可避の不純物である。つまり、O含有量は0%超である。O含有量が0.0500%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、Oは、鋼板中で酸化物を過剰に形成して、鋼板の鉄損及び磁束密度を劣化させる。

したがって、O含有量は0.0500%以下である。

Oはなるべく低い方が好ましい。しかしながら、O含有量を過度に低減すれば、製造コストが高くなる。したがって、工業生産性の観点から、O含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

O含有量の好ましい上限は0.0200%であり、さらに好ましくは0.0100%であり、さらに好ましくは0.0050%であり、さらに好ましくは0.0030%である。

[0049] 本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成の残部は、Fe及び不純物からなる。ここで、不純物とは、無方向性電磁鋼板を工業的に製造する際に、原

料としての鉱石、スクラップ、又は、製造環境などから混入されるものであって、意図せずに含有されるものである。これらの不純物の含有量は、本実施形態の無方向性電磁鋼板に悪影響を与えない範囲で許容される。

[0050] [任意元素 (Optional Elements)]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Cr: 0~0.50%、Ti: 0~0.0030%、Mo: 0~0.100%、Ni: 0~0.50%、Cu: 0~0.50%、Sn: 0~0.100%、Sb: 0~0.100%、Ca: 0~0.0050%、Mg: 0~0.0030%、希土類元素: 0~0.0100%、B: 0~0.0030%、Zn: 0~0.0030%、Ge: 0~0.0030%、As: 0~0.0100%、Co: 0~0.0500%、V: 0~0.0030%、Se: 0~0.0030%、Zr: 0~0.0030%、Nb: 0~0.0030%、Pb: 0~0.0030%、及び、Ga: 0~0.0030%、からなる群から選択される1種以上を含有してもよい。以下、これらの任意元素について説明する。

[0051] [第1群: Cr]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Crを含有してもよい。

[0052] Cr: 0~0.50%、

クロム (Cr) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Cr含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Cr含有量が0%超である場合、CrはSiと同様に、鋼板の固有抵抗を高め、渦電流損を低減する。その結果、鋼板の鉄損が低減する。Crが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Cr含有量が0.50%を超えれば、鋼板の磁束密度が低下する。

したがって、Cr含有量は0~0.50%である。

C r 含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.03%である。

C r 含有量の好ましい上限は0.40%であり、さらに好ましくは0.35%であり、さらに好ましくは0.30%であり、さらに好ましくは0.10%である。

[0053] [第2群：T i、M o、N i及びC u]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、F eの一部に代えて、T i、M o、N i及びC uからなる群から選択される1種以上を含有してもよい。これらの元素は任意元素であり、いずれも、鋼板の強度を高める。以下、各元素について説明する。

[0054] T i：0～0.0030%

チタン（T i）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、T i含有量は0%であってもよい。

T iが含有される場合、つまり、T i含有量が0%超である場合、T iは炭窒化物を形成して、析出強化により無方向性電磁鋼板の強度を高める。T iが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、T i含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、炭窒化物が過剰に生成して、磁気特性が劣化する。

したがって、T i含有量は0～0.0030%である。

T i含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

T i含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0017%である。

[0055] M o：0～0.100%

モリブデン（M o）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、M o含有量は0%であってもよい。

M oが含有される場合、つまり、M o含有量が0%超である場合、M oは

炭窒化物を形成して、析出強化により無方向性電磁鋼板の強度を高める。Mnが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Mn含有量が0.100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、炭化物が過剰に生成して、磁気特性が劣化する。

したがって、Mn含有量は0～0.100%である。

Mn含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%であり、さらに好ましくは0.015%である。

Mn含有量の好ましい上限は0.090%であり、さらに好ましくは0.080%であり、さらに好ましくは0.075%であり、さらに好ましくは0.070%である。

[0056] Ni : 0～0.50%

ニッケル (Ni) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ni含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ni含有量が0%超である場合、Niは、固溶強化により鋼板の強度を高める。Niが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Ni含有量が0.50%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Ni含有量は0～0.50%である。

Ni含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.03%である。

Ni含有量の好ましい上限は0.35%であり、さらに好ましくは0.20%であり、さらに好ましくは0.10%である。

[0057] Cu : 0～0.50%

銅 (Cu) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Cu含有量は0%であってもよい。含有される場合、Cuは、無方向性電磁鋼板の強

度を高める。Cuが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。しかしながら、Cu含有量が0.50%を超えれば、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Cu含有量は0～0.50%である。

Cu含有量の好ましい下限は0.01%であり、さらに好ましくは0.02%であり、さらに好ましくは0.03%である。

Cu含有量の好ましい上限は0.30%であり、さらに好ましくは0.20%であり、さらに好ましくは0.15%であり、さらに好ましくは0.10%である。

[0058] [第3群：Sn、Sb、Ca、Mg及び希土類元素（REM）]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Sn、Sb、Ca、Mg及び希土類元素（REM）からなる群から選択される1種以上を含有してもよい。これらの元素は任意元素であり、いずれも、鋼板の磁気特性を高める。以下、各元素について説明する。

[0059] Sn：0～0.100%

すず（Sn）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Sn含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Sn含有量が0%超である場合、Snは、鋼板の表面に偏析して仕上げ焼鈍中の酸化及び窒化を抑制する。これにより、無方向性電磁鋼板の鉄損が低下する。Snはさらに、鋼板の集合組織を改善して磁束密度を高める。Snが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Sn含有量が0.100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Sn含有量は0～0.100%である。

Sn含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%である。

Sn含有量の好ましい上限は0.080%であり、さらに好ましくは0.

0.70%であり、さらに好ましくは0.060%である。

[0060] Sb : 0~0.100%

アンチモン (Sb) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Sb含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Sb含有量が0%超である場合、Sbは、鋼板の表面に偏析して仕上げ焼鈍中の酸化及び窒化を抑制する。これにより、無方向性電磁鋼板の鉄損が低下する。Sbはさらに、鋼板の集合組織を改善して磁束密度を高める。Sbが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Sb含有量が0.100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、鋼板が脆化して加工性が低下する。

したがって、Sb含有量は0~0.100%である。

Sb含有量の好ましい下限は0.001%であり、さらに好ましくは0.003%であり、さらに好ましくは0.005%であり、さらに好ましくは0.010%である。

Sb含有量の好ましい上限は0.080%であり、さらに好ましくは0.070%であり、さらに好ましくは0.060%であり、さらに好ましくは0.040%であり、さらに好ましくは0.030%であり、さらに好ましくは0.020%である。

[0061] Ca : 0~0.0050%

カルシウム (Ca) は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Ca含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ca含有量が0%超である場合、Caは、溶鋼の casting 時にSと結合して粗大硫化物及び／又は粗大酸硫化物である粗大析出物を生成する。粗大硫化物は、 casting 工程以降の製造工程で鋼板に生成する粒径が100nm程度の微細なMnS、TiN、AlN等のインヒビターを吸着する。これにより、仕上げ焼鈍時において、インヒビターによる結晶粒の成長阻害を抑制する。そのため、仕上げ焼鈍時において、結晶粒の成長を促

進する。その結果、無方向性電磁鋼板の磁気特性が高まる。C a が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、C a 含有量が0.0050%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、粗大析出物が過剰に生成する。この場合、仕上げ焼鈍工程での再結晶及び結晶粒の成長が阻害される。

したがって、C a 含有量は0~0.0050%である。

C a 含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

C a 含有量の好ましい上限は0.0040%であり、さらに好ましくは0.0035%であり、さらに好ましくは0.0030%であり、さらに好ましくは0.0025%である。

[0062] Mg : 0~0.0030%

マグネシウム(Mg)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Mg 含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Mg 含有量が0%超である場合、Mg は、C a と同様に粗大析出物を生成し、仕上げ焼鈍時において、インヒビターによる結晶粒の成長阻害を抑制する。そのため、仕上げ焼鈍時において、結晶粒の成長が促進する。その結果、無方向性電磁鋼板の磁気特性が高まる。Mg が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Mg 含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、粗大析出物が過剰に生成する。この場合、仕上げ焼鈍工程での再結晶及び結晶粒の成長がかえって阻害される。

したがって、Mg 含有量は0~0.0030%である。

Mg 含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

Mg 含有量の好ましい上限は0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

[0063] 希土類元素(REM) : 0~0.0100%

希土類元素（R E M）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、R E M含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、R E M含有量が0%超である場合、R E Mは、C aと同様に粗大析出物を生成し、仕上げ焼鈍時において、インヒビターによる結晶粒の成長阻害を抑制する。そのため、仕上げ焼鈍時において、結晶粒の成長が促進する。その結果、無方向性電磁鋼板の磁気特性が高まる。R E Mが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、R E M含有量が0.0100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、粗大析出物が過剰に生成する。この場合、仕上げ焼鈍工程での再結晶及び結晶粒の成長がかえって阻害される。

したがって、R E M含有量は0～0.0100%である。

R E M含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

R E M含有量の好ましい上限は0.0050%であり、さらに好ましくは0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%であり、さらに好ましくは0.0030%である。

[0064] なお、本明細書におけるR E Mとは、原子番号21番のスカンジウム（S c）、原子番号39番のイットリウム（Y）、及び、ランタノイドである原子番号57番のランタン（L a）～原子番号71番のルテチウム（L u）からなる群から選択される1元素以上を意味する。また、本明細書におけるR E M含有量とは、これらの元素の合計含有量を意味する。

[0065] [第4群：B]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、F eの一部に代えて、Bを含有してもよい。

[0066] B：0～0.0030%

ボロン（B）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、B含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、B含有量が0%超である場合、Bは窒化物を生

成して、仕上げ焼鈍時において、再結晶を阻害する。

したがって、B含有量は0～0.0030%である。

B含有量の過剰な低減は製造コストを高める。したがって、工業生産性の観点から、B含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0002%であり、さらに好ましくは0.0003%である。

B含有量の好ましい上限は0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%であり、さらに好ましくは0.0010%であり、さらに好ましくは0.0007%である。

[0067] [第5群：Zn、Ge、As、及び、Co]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、Feの一部に代えて、Zn、Ge、As、及び、Coからなる群から選択される1種以上を含有してもよい。これらの元素は任意元素であり、いずれも、無方向性電磁鋼板の鉄損を低減する。以下、各元素について説明する。

[0068] Zn：0～0.0030%

亜鉛（Zn）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Zn含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Zn含有量が0%超である場合、Znは酸化物及び硫化物の生成を抑制し、無方向性電磁鋼板の鉄損を低減する。Znが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Zn含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が飽和する。

したがって、Zn含有量は0～0.0030%である。

Zn含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Zn含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0069] Ge：0～0.0030%

ゲルマニウム（Ge）は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり

、Ge含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ge含有量が0%超である場合、Geは無方向性電磁鋼板の鉄損を低減する。Geはさらに、磁束密度を高める。Geが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、Ge含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が飽和する。

したがって、Ge含有量は0~0.0030%である。

Ge含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Ge含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0070] As : 0~0.0100%

砒素(As)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、As含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、As含有量が0%超である場合、Asは無方向性電磁鋼板の鉄損を低減する。Asはさらに、磁束密度を高める。Asが少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、As含有量が0.0100%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が飽和する。

したがって、As含有量は0~0.0100%である。

As含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0005%であり、さらに好ましくは0.0010%である。

As含有量の好ましい上限は0.0080%であり、さらに好ましくは0.0060%であり、0.0045%であり、さらに好ましくは0.0040%である。

[0071] Co : 0~0.0500%

コバルト(Co)は任意元素であり、含有されなくてもよい。つまり、Co含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、C o 含有量が0 %超である場合、C o は無方向性電磁鋼板の鉄損を低減する。C o はさらに、磁束密度を高める。C o が少しでも含有されれば、上記効果がある程度得られる。

しかしながら、C o 含有量が0.0500 %を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、上記効果が飽和する。

したがって、C o 含有量は0 ~ 0.0500 %である。

C o 含有量の好ましい下限は0.0001 %であり、さらに好ましくは0.0010 %である。

C o 含有量の好ましい上限は0.0400 %であり、さらに好ましくは0.0300 %であり、さらに好ましくは0.0200 %であり、さらに好ましくは0.0100 %であり、さらに好ましくは0.0065 %である。

[0072] [第6群：V、Se、Zr、Nb、Pb、及び、Ga]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成はさらに、Feの一部に代えて、V、Se、Zr、Nb、Pb、及び、Gaからなる群から選択される1種以上を含有してもよい。これらの元素は不純物であり、鉄損を劣化する。以下、各元素について説明する。

[0073] V : 0 ~ 0.0030 %

バナジウム (V) は不純物であり、含有されなくてもよい。つまり、V 含有量は0 %であってもよい。

含有される場合、つまり、V 含有量が0 %超である場合、V は微細な析出物を形成して無方向性電磁鋼板の鉄損を劣化する。V 含有量が0.0030 %を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の鉄損が顕著に劣化する。

したがって、V 含有量は0 ~ 0.0030 %である。

V 含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、V 含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、通常の工業生産を考慮した場合、V 含有量の好ましい下限は0.0001 %であり、さらに好ましくは0.0003 %であり、さらに好ましくは0.0005 %である。

V含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0074] Se : 0~0.0030%

セレン (Se) は不純物であり、含有されなくてもよい。つまり、Se含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Se含有量が0%超である場合、Seは微細な析出物を形成して無方向性電磁鋼板の鉄損を劣化する。Se含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の鉄損が顕著に劣化する。

したがって、Se含有量は0~0.0030%である。

Se含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、Se含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、通常の工業生産を考慮した場合、Se含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Se含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0075] Zr : 0~0.0030%

ジルコニウム (Zr) は不純物であり、含有されなくてもよい。つまり、Zr含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Zr含有量が0%超である場合、Zrは微細な析出物を形成して無方向性電磁鋼板の鉄損を劣化する。Zr含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の鉄損が顕著に劣化する。

したがって、Zr含有量は0~0.0030%である。

Zr含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、Zr含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、通常の工業生産を考慮した場合、Zr含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Zr含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0076] Nb: 0~0.0030%

ニオブ(Nb)は不純物であり、含有されなくてもよい。つまり、Nb含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Nb含有量が0%超である場合、Nbは微細な析出物を形成して無方向性電磁鋼板の鉄損を劣化する。Nb含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の鉄損が顕著に劣化する。

したがって、Nb含有量は0~0.0030%である。

Nb含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、Nb含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、通常の工業生産を考慮した場合、Nb含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Nb含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0077] Pb: 0~0.0030%

鉛(Pb)は不純物であり、含有されなくてもよい。つまり、Pb含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Pb含有量が0%超である場合、Pbは微細なPb粒子を形成して無方向性電磁鋼板の鉄損を劣化する。Pb含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の鉄損が顕著に劣化する。

したがって、Pb含有量は0~0.0030%である。

Pb含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、Pb含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、通常の工業生産を考慮した場合、Pb含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Pb含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0078] Ga: 0~0.0030%

ガリウム (Ga) は不純物であり、含有されなくてもよい。つまり、Ga含有量は0%であってもよい。

含有される場合、つまり、Ga含有量が0%超である場合、Gaは微細な析出物を形成して無方向性電磁鋼板の鉄損を劣化する。Ga含有量が0.0030%を超えれば、他の元素含有量が本実施形態の範囲内であっても、無方向性電磁鋼板の鉄損が顕著に劣化する。

したがって、Ga含有量は0~0.0030%である。

Ga含有量はなるべく低い方が好ましい。しかしながら、Ga含有量の過度の低減は、製造コストを高める。したがって、通常の工業生産を考慮した場合、Ga含有量の好ましい下限は0.0001%であり、さらに好ましくは0.0003%であり、さらに好ましくは0.0005%である。

Ga含有量の好ましい上限は0.0025%であり、さらに好ましくは0.0020%であり、さらに好ましくは0.0015%である。

[0079] [無方向性電磁鋼板の化学組成の測定方法]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の化学組成は、JIS G0321:2017に準拠した周知の成分分析法で測定できる。具体的には、ドリルを用いて、鋼板から切粉を採取する。採取された切粉を酸に溶解させて溶液を得る。溶液に対して、ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry) を実施して、化学組成の元素分析を実施する。C含有量、S含有量、及び、O含有量については、周知の高周波燃焼法 (燃焼-赤外線吸収法) により求める。N含有量については、周知の不活性ガス溶融-熱伝導度法を用いて求める。

[0080] [(特徴2) 板厚tについて]

本実施形態の無方向性電磁鋼板では、板厚tが0.30mm以下である。

板厚 t が 0.30 mm 以下であるため、渦電流損が低減される。

板厚 t の好ましい下限は 0.14 mm であり、さらに好ましくは 0.15 mm であり、さらに好ましくは 0.19 mm であり、さらに好ましくは 0.20 mm であり、さらに好ましくは 0.21 mm であり、さらに好ましくは 0.24 mm である。

板厚 t の好ましい上限は 0.29 mm であり、さらに好ましくは 0.27 mm であり、さらに好ましくは 0.25 mm である。

[0081] [無方向性電磁鋼板の板厚 t の測定方法]

無方向性電磁鋼板の板厚 t は、次の方法で求める。無方向性電磁鋼板の 10箇所の測定位置で板厚を測定する。測定位置はいずれも圧延方向から 45°傾いた方向を向いた 1つの線分上に配置され、隣り合う測定点の間の距離は 1.0 mm とする。測定された 10個の板厚の算術平均値を、当該無方向性電磁鋼板の板厚 t (mm) とする。板厚は得られた算術平均値の小数第三位を四捨五入して得られた小数第二位までの値とする。測定にはマイクロメーターを用いる。

[0082] [(特徴3) F_1 について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、式(1)で定義される F_1 が 10.0 以上である。

$$F_1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

ここで、式(1)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入される。

[0083] F_1 は特徴1を満たす無方向性電磁鋼板の固有抵抗に関する指標である。

F_1 が 10.0 未満であれば、無方向性電磁鋼板が他の特徴を満たしても、十分に高い固有抵抗が得られない。その結果、無方向性電磁鋼板において、十分に低い鉄損が得られない。

F_1 が 10.0 以上であれば、他の特徴を満たすことを前提として、無方向性電磁鋼板において、十分に高い固有抵抗が得られる。その結果、無方向性電磁鋼板において、優れた鉄損が得られる。

[0084] F 1 の好ましい下限は 10.3 であり、さらに好ましくは 10.5 であり、さらに好ましくは 11.5 であり、さらに好ましくは 12.0 であり、さらに好ましくは 12.5 である。

F 1 の上限は特に限定されない。しかしながら、F 1 が高すぎれば、無方向性電磁鋼板の熱伝導率が低下する。したがって、F 1 の好ましい上限は 17.0 であり、さらに好ましくは 16.0 であり、さらに好ましくは 15.5 であり、さらに好ましくは 15.0 であり、さらに好ましくは 14.5 であり、さらに好ましくは 14.0 である。

[0085] [(特徴 4) F 2 について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、式 (2) で定義される F 2 が 8.5 以下である。

$$F 2 = 2 S i + 3 A l + M n \quad (2)$$

ここで、式 (2) 中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入される。

[0086] F 2 は特徴 1 を満たす無方向性電磁鋼板の飽和磁束密度に関する指標である。F 2 が 8.5 を超えれば、無方向性電磁鋼板が他の特徴を満たしていても、十分に高い磁束密度が得られない。また、F 2 が 8.5 を超えればさらに、熱伝導率が低下する場合がある。F 2 が 8.5 以下であれば、他の特徴を満たすことを前提として、無方向性電磁鋼板において、十分に高い磁束密度が得られる。

[0087] F 2 の好ましい下限は 5.0 であり、さらに好ましくは 5.5 であり、さらに好ましくは 5.8 であり、さらに好ましくは 6.0 である。

F 2 の好ましい上限は 8.3 であり、さらに好ましくは 8.2 であり、さらに好ましくは 8.0 であり、さらに好ましくは 7.8 であり、さらに好ましくは 7.6 であり、さらに好ましくは 7.5 である。

[0088] [(特徴 5) F 3 及び F 4 について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、式 (3) で定義される F 3 が、周波数 1000 Hz 及び磁束密度 0.5 T における鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であ

り、式（４）で定義される F_4 が、無方向性電磁鋼板を 800°C で 1 時間熱処理したときの周波数 400 Hz 及び磁束密度 1.0 T における鉄損 $W_{10/40}$ 以上である。

$$F_3 = 45 - 12\text{ Si} - 5\text{ Al} - 2\text{ Mn} + 1000 \times t / (5 + 6\text{ Si} + 5\text{ Al} + 3\text{ Mn}) \quad (3)$$

$$F_4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6\text{ Si} + 5\text{ Al} + 3\text{ Mn}) \quad (4)$$

ここで、式（３）及び式（４）中の各元素記号には、対応する元素の質量％での含有量が代入され、 t には、 mm 単位での板厚が代入される。

以下、 F_3 及び F_4 について説明する。

[0089] F_3 及び F_4 は、無方向性電磁鋼板の金属組織中のひずみ量及びひずみ分布に関する指標である。上述のとおり、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、高い強度及び高い磁束密度と、歪取り焼鈍後の優れた鉄損とを得るために、鋼板中の合金元素の含有量をあえて低く抑え、鋼板に特定のひずみ量及びひずみ分布を導入する。その結果、ロータコアとして用いられる無方向性電磁鋼板では、歪取り焼鈍を実施せずにロータコアの素材として用いることにより、製造されたロータコアでは高い強度及び優れた磁束密度が得られる。さらに、ステータコアとして用いられる無方向性電磁鋼板では、歪取り焼鈍を実施してステータコアの素材として用いることにより、製造されたステータコアは、優れた鉄損及び優れた磁束密度が得られる。

[0090] 鋼板中のひずみ量及びひずみ分布を定量的に示すのは極めて困難である。そこで、本実施形態では、 F_3 及び F_4 を、鋼板中のひずみ量及びひずみ分布の指標とする。

[0091] [F_3 について]

F_3 が周波数 1000 Hz 及び磁束密度 0.5 T における鉄損 $W_{5/1000}$ を超えれば、鋼板中に導入されるひずみ量が過度に少ない、又は、鋼板中のひずみ分布が不適切である。そのため、無方向性電磁鋼板において、十分に高い強度が得られない。

F_3 が鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であれば、鋼板中に十分な量のひずみが導入され

ており、かつ、導入されたひずみの分布も適切である。そのため、無方向性電磁鋼板では、特徴1～特徴4を満たし、かつ、F4が800℃で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 以上であることを前提として、高い磁束密度が得られる。

[0092] F3の好ましい下限は、鉄損 $W_{5/1000}$ の0.40倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{5/1000}$ の0.50倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{5/1000}$ の0.60倍である。

F3の好ましい上限は鉄損 $W_{5/1000}$ の0.90倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{5/1000}$ の0.87倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{5/1000}$ の0.85倍である。

[0093] [F4について]

F4が、無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 未満であれば、歪取り焼鈍前に鋼板中に導入したひずみ量を十分に低減できていない。又は、鋼板中のひずみの分布が不適切である。この場合、ステータ用途として十分に低い鉄損が得られない。さらに、ひずみは磁化を阻害するため、特に100A/mの磁場における磁束密度 B_1 が低下する。

[0094] F4が800℃で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 以上であれば、鋼板中から十分な量のひずみを低減できており、かつ、導入されたひずみの分布も適切である。そのため、無方向性電磁鋼板では、特徴1～特徴4を満たし、F3が鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であることを前提として、歪取り焼鈍後の無方向性電磁鋼板において、優れた鉄損と優れた磁束密度とが得られる。

[0095] F4の好ましい下限は、鉄損 $W_{10/400}$ の1.01倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{10/400}$ の1.02倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{10/400}$ の1.05倍である。

F4の好ましい上限は鉄損 $W_{10/400}$ の1.50倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{10/400}$ の1.40倍であり、さらに好ましくは、鉄損 $W_{10/400}$ の1.30倍である。

[0096] [無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ は、次に示すエプスタイン試験法により求める。

J I S C 2 5 5 0 - 1 : 2 0 1 1 及び 2 5 5 0 - 3 : 2 0 1 9 に準拠して、無方向性電磁鋼板から、複数のエプスタイン試験片を切り出す。エプスタイン試験片のサイズは、幅 3 0 m m、長さ 2 8 0 m m とする。エプスタイン試験片として、長手方向が無方向性電磁鋼板の圧延方向となる複数の L 方向試験片、長手方向が無方向性電磁鋼板の圧延方向と垂直な方向となる複数の C 方向試験片を切り出す。L 方向試験片の枚数及び C 方向試験片の枚数は同数とし、各試験片の合計枚数は 1 6 枚（L 方向試験片 8 枚、C 方向試験片 8 枚）とする。

[0097] L 方向試験片及び C 方向試験片をエプスタイン枠に配置する。エプスタイン枠の 4 辺が X 方向又は Y 方向に平行であるとしたとき、X 方向に平行な一対の辺の各々に、L 方向試験片を 4 枚ずつ配置する。Y 方向に平行な一対の辺の各々に、C 方向試験片を 4 枚ずつ配置する。L 方向試験片の端部及び C 方向試験片の端部は、1 枚ずつ交互に重なり合うように積層される。これにより、L 方向試験片及び C 方向試験片が正形状に組まれる。正形状に組まれたエプスタイン試験片に対して、J I S C 2 5 5 0 - 1 : 2 0 1 1 及び 2 5 5 0 - 3 : 2 0 1 9 に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、1 0 0 0 H z、0. 5 T における鉄損 $W_{5/1000}$ ($W/k g$) を測定する。

[0098] [無方向性電磁鋼板の歪取り焼鈍後の鉄損 $W_{10/400}$ の測定方法]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の歪取り焼鈍後の鉄損 $W_{10/400}$ は、次の方法で求める。[無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法]に記載の方法に準拠して、無方向性電磁鋼板から複数のエプスタイン試験片（8 枚の L 方向試験片、8 枚の C 方向試験片）を切り出す。切り出したエプスタイン試験片（L 方向試験片、C 方向試験片）に対して熱処理（歪取り焼鈍）を実施する。熱処理では、熱処理温度を 8 0 0 °C とし、熱処理温度での保持時間を 1 時間とする。なお、温度と時間は焼鈍炉の温度（炉温）ではなく、エプスタ

イン試験片自体の温度を基準とする。エプスタイン試験片を積層した状態で歪取り焼鈍を実施する。エプスタイン試験片の温度測定は、熱電対により行う。

[0099] 温度測定では、試験用エプスタイン試験片と、試験用エプスタイン試験片と同一枚数の温度測定用エプスタイン試験片とを同一の熱処理炉に装入して同時に熱処理する。具体的には、複数の試験用エプスタイン試験片を積層した試験用エプスタイン試験片セットと、複数の温度測定用エプスタイン試験片を積層した温度測定用エプスタイン試験片セットとを準備する。温度測定用エプスタイン試験片セットの積層方向中央に配置されたエプスタイン試験片（鋼板）の絶縁コーティングをサンドペーパー（＃２４０）で除去する。絶縁コーティングが除去された箇所に、熱電対を溶接する。熱電対を溶接した温度測定用エプスタイン試験片セットを、試験用エプスタイン試験片セットと同時に熱処理する。このとき、温度測定用エプスタイン試験片セットの熱電対で得られた温度を、試験用エプスタイン試験片セットの温度とみなす。

[0100] なお、熱処理時において、試験用エプスタイン試験片セット内の複数のエプスタイン試験片を互い固定する必要はなく、温度測定用エプスタイン試験片セット内の複数のエプスタイン試験片を互いに固定する必要はない。温度測定用エプスタイン試験片セットにおいて、熱電対を挿入することにより複数の温度測定用エプスタイン試験片の積層が不安定になる場合、直径が０．３ｍｍ程度のステンレス製の針金等で温度測定用エプスタイン試験片セットの長手方向の各端部を結束して固定してもよい。

[0101] ８００℃に加熱した後の試験用エプスタイン試験片（Ｌ方向試験片及びＣ方向試験片）をエプスタイン枠に配置する。〔無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法〕に記載の方法と同様に、エプスタイン枠のＸ方向に平行な一対の辺の各々に、Ｌ方向試験片を４枚ずつ配置する。Ｙ方向に平行な一対の辺の各々に、Ｃ方向試験片を４枚ずつ配置する。Ｌ方向試験片の端部及びＣ方向試験片の端部は、１枚ずつ交互に重なり合うように積層される。これに

より、L方向試験片及びC方向試験片が正形状に組まれる。正形状に組まれたエプスタイン試験片に対して、JIS C 2550-1:2011及び2550-3:2019に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して400 Hz、1.0 Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ を測定する。

[0102] [本実施形態の無方向性電磁鋼板の効果]

本実施形態の無方向性電磁鋼板は特徴1～特徴5を満たす。そのため、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、高い強度及び優れた磁束密度が得られる。本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、歪取り焼鈍後において、優れた鉄損が得られる。

[0103] [強度について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、高い強度が得られる。具体的には、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、降伏応力が450 MPa以上である。

降伏応力の好ましい下限は460 MPaであり、さらに好ましくは470 MPaであり、さらに好ましくは480 MPaである。

降伏応力の上限は特に限定されない。しかしながら、本実施形態の無方向性電磁鋼板において、降伏応力の上限は例えば530 MPaである。

[0104] [降伏応力の測定方法]

本実施形態の無方向性電磁鋼板の降伏応力は次の方法で測定する。

無方向性電磁鋼板から、JIS Z 2241:2011に規定されたJIS 5号引張試験片を採取する。採取した引張試験片を用いて、JIS Z 2241:2011に準拠して、常温、大気圧で引張試験を実施して、降伏応力(MPa)を得る。なお、降伏応力は、引張試験により得られた応力-ひずみ曲線に上降伏点が現れる場合、上降伏点(MPa)とする。また、得られた応力-ひずみ曲線に上降伏点が現れない場合、0.2%耐力(MPa)とする。

[0105] [磁束密度について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板では、優れた磁束密度が得られる。具体的

には、圧延方向を基準 0° としたときの 22.5° ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_{50} を、 $B_{50}(0^\circ)$ 、 $B_{50}(22.5^\circ)$ 、 $B_{50}(45^\circ)$ 、 $B_{50}(67.5^\circ)$ 及び $B_{50}(90^\circ)$ としたとき、式(5)で定義される平均磁束密度 B_{50ave} が 1.65 T 以上である。

$$B_{50ave} = (B_{50}(0^\circ) + 2 \times B_{50}(22.5^\circ) + 2 \times B_{50}(45^\circ) + 2 \times B_{50}(67.5^\circ) + B_{50}(90^\circ)) / 8 \quad (5)$$

[0106] [平均磁束密度 B_{50ave} の測定方法]

平均磁束密度 B_{50ave} は、次の方法で求める。

無方向性電磁鋼板において、圧延方向(L方向)、圧延方向から 22.5° 方向、 45° 方向、 67.5° 方向、及び、圧延方向に直交する方向(90° 方向、つまり、C方向)のエプスタイン試験片を準備し、それぞれ用いて、各方向での磁束密度 B_{50} を測定する。試験方法は基本的にはJIS C 2550-1(2011)に準拠する。L方向、 22.5° 方向、 45° 方向、 67.5° 方向、C方向に延びるエプスタイン試験片を各方向で1セット分ずつ切り出す。切り出した同じ方向のエプスタイン試験片各セットに対して、JIS C 2550-1(2011)及び2550-3(2011)に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、各方向での 5000 A/m における磁束密度 B_{50} を測定する。得られた各方向の磁束密度 B_{50} を式(5)に代入して、平均磁束密度 B_{50ave} (T)を得る。

[0107] 好ましくは、本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、無方向性電磁鋼板を 800°C で1時間熱処理したとき、圧延方向を基準 0° としたときの 22.5° ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_1 を、 $B_1(0^\circ)$ 、 $B_1(22.5^\circ)$ 、 $B_1(45^\circ)$ 、 $B_1(67.5^\circ)$ 及び $B_1(90^\circ)$ としたとき、式(6)で定義される平均磁束密度 B_{1ave} が 0.70 T 以上であり、磁束密度 B_{500} の最大値の方向を基準 0° としたときの 22.5° ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_{500} を、 $B_{500}(0^\circ)$ 、 $B_{500}(22.5^\circ)$ 、 $B_{500}(45^\circ)$ 、 $B_{500}(67.5^\circ)$ 及び $B_{500}(90^\circ)$ としたとき、式(7)で定義される平均磁束密度 B_{500ave} が 1.98 T 以上である。

$$B_{1ave} = (B_1(0^\circ) + 2 \times B_1(22.5^\circ) + 2 \times B_1(45^\circ) + 2 \times B_1(67.5^\circ) + B_1(90^\circ)) / 8 \quad (6)$$

$$B_{500ave} = (B_{500}(0^\circ) + 2 \times B_{500}(22.5^\circ) + 2 \times B_{500}(45^\circ) + 2 \times B_{500}(67.5^\circ) + B_{500}(90^\circ)) / 8 \quad (7)$$

[0108] 無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したときの平均磁束密度 B_{1ave} が0.70T以上であり、平均磁束密度 B_{500ave} が1.98T以上であれば、電気自動車において、モータに掛かる磁場が最も低い高速走行時、モータに掛かる磁場が高速走行時よりも高く、登坂時よりも低い街乗り時、モータに掛かる磁場が最も高い登坂時のいずれにおいても、十分な磁束密度が得られる。

[0109] [平均磁束密度 B_{1ave} の測定方法]

平均磁束密度 B_{1ave} は、次の方法で求める。

無方向性電磁鋼板において、圧延方向（L方向）、圧延方向から22.5°方向、45°方向、67.5°方向、及び、圧延方向に直交する方向（90°方向、つまり、C方向）のエプスタイン試験片を準備する。無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理（歪取り焼鈍）する。熱処理後のエプスタイン試験片を用いて、各方向での磁束密度 B_1 を測定する。試験方法は基本的にはJIS C 2550-1（2011）に準拠する。L方向、22.5°方向、45°方向、67.5°方向、C方向に延びるエプスタイン試験片を同じ方向のエプスタイン試験片各セットに対して、JIS C 2550-1（2011）及び2550-3（2011）に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、各方向での100A/mにおける磁束密度 B_1 を測定する。得られた各方向の磁束密度 B_1 を式（6）に代入して、平均磁束密度 B_{1ave} （T）を得る。

[0110] [平均磁束密度 B_{500ave} の測定方法]

平均磁束密度 B_{500ave} は、次の方法で求める。

無方向性電磁鋼板において、圧延方向（L方向）、圧延方向から22.5°方向、45°方向、67.5°方向、及び、圧延方向に直交する方向（90°方向、つまり、C方向）のエプスタイン試験片を準備する。無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理（歪取り焼鈍）する。熱処理後のエプスタイン試験片を用いて、各方向での磁束密度 B_1 を測定する。試験方法は基本的にはJIS C 2550-1（2011）に準拠する。L方向、22.5°方向、45°方向、67.5°方向、C方向に延びるエプスタイン試験片を同じ方向のエプスタイン試験片各セットに対して、JIS C 2550-1（2011）及び2550-3（2011）に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、各方向での100A/mにおける磁束密度 B_1 を測定する。得られた各方向の磁束密度 B_1 を式（7）に代入して、平均磁束密度 B_{500ave} （T）を得る。

0° 方向、つまり、C 方向) のエプスタイン試験片を準備する。無方向性電磁鋼板を 800℃で 1 時間熱処理 (歪取り焼鈍) する。熱処理後のエプスタイン試験片を用いて、各方向での磁束密度 B_{500} を測定する。試験方法は基本的には J I S C 2550-1 (2011) に準拠する。L 方向、22.5° 方向、45° 方向、67.5° 方向、C 方向に延びるエプスタイン試験片を同じ方向のエプスタイン試験片各セットに対して、J I S C 2550-1 (2011) 及び 2550-3 (2011) に準拠した電磁鋼帯試験方法を実施して、各方向での 5000 A/m における磁束密度 B_{500} を測定する。得られた各方向の磁束密度 B_{500} を式 (7) に代入して、平均磁束密度 B_{500ave} (T) を得る。

[0111] [鉄損について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板では、歪取り焼鈍後に優れた鉄損が得られる。具体的には、無方向性電磁鋼板を 800℃で 1 時間熱処理した後の鉄損 $W_{10/400}$ は $F4W/kg$ 未満である。

[0112] [その他の特性について]

[熱伝導率について]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、熱伝導率が高い。具体的には、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、20℃での熱伝導率が $20W/mK$ 以上であり、150℃での熱伝導率が $23W/mK$ 以上である。

[0113] この場合、本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として製造されたロータコア及びステータコアでは、熱伝導率が高い。そのため、モータコアの稼働時において、モータコアが過度に熱を持つのを抑制できる。そのため、モータコアの磁石の減磁が抑制される。

[0114] [熱伝導率の測定方法]

無方向性電磁鋼板の熱伝導率は、次の方法で測定できる。

無方向性電磁鋼板の熱伝導率は、熱拡散係数と、密度と、比熱の積で求めることができる。そこで、無方向性電磁鋼板の熱拡散係数、密度、及び、比熱を次の方法で求める。

レーザーフラッシュアナライザーを用いて、無方向性電磁鋼板の熱拡散係数を求める。具体的には、無方向性電磁鋼板の板幅中央部から、 $6\text{ mm } \phi \times$ 板厚の試験片を採取する。レーザーフラッシュアナライザーを用いて、試験片の一方の表面をレーザーパルスで照射する。このとき、他方の表面の温度変化を、インフラレッド検出器で検出する。温度の時系列の変化を取得する。熱拡散方程式を用いて、熱拡散係数 ($\text{m}^2/\text{秒}$) を求める。

[0115] さらに、アルキメデス法に基づいて、無方向性電磁鋼板の密度を求める。具体的には、無方向性電磁鋼板の板幅中央部から、 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times$ 板厚の試験片を採取する。乾燥時の試験片の質量を求める。次に、試験片を水槽に浸漬する。浸漬した状態（つまり、水の浮力を受けた状態）の試験片の質量を求める。これらの結果と、水の比重とを用いて、試験片（無方向性電磁鋼板）の比重を求める。

[0116] さらに、示差走査熱量計を用いて、無方向性電磁鋼板の比熱を求める。具体的には、無方向性電磁鋼板の板幅中央部から、 $6\text{ mm } \phi \times$ 板厚の試験片を採取する。試験片を指差走査熱量計のサンプルパンに載置する。既知の比熱を持つ物質を参照サンプルとして使用する。試験片の温度と参照サンプルの温度とを一定の速度で変化させて、両者の温度変化の差に基づいて、試験片（無方向性電磁鋼板）の比熱を求める。

得られた無方向性電磁鋼板の熱拡散係数、比重、及び、比熱に基づいて、無方向性電磁鋼板の 20°C での熱伝導率 ($\text{W}/\text{m K}$)、及び、 150°C での熱伝導率 ($\text{W}/\text{m K}$) を求める。

[0117] [破断伸びについて]

本実施形態の無方向性電磁鋼板ではさらに、破断伸びに優れる。具体的には、本実施形態の無方向性電磁鋼板では、破断伸びが 20% 以上である。本実施形態の無方向性電磁鋼板では、破断伸びに優れる。そのため、無方向性電磁鋼板を加工して成形した複数のモータコア素材（後述のロータコア素材又はステータコア素材）を積層してモータコアを製造する場合、重ね合うモータコア素材を、接着剤を用いて固定せずに、カシメにより固定することが

可能となる。

[0118] 本実施形態の無方向性電磁鋼板では、上述のとおり、優れた破断伸びが得られる。そのため、本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材としてモータコア素材を製造する場合、板厚が0.30mm以下であっても、カシメを形成することができる。モータコア素材を積層して形成されたモータコアにおいて、優れた鉄損が得られる。

[0119] 破断伸びは、上述の「降伏応力の測定方法」に記載の方法に基づいて引張試験を実施して、得られた応力-ひずみ曲線に基づいて求めることができる。

[0120] 「無方向性電磁鋼板の製造方法」

本実施形態の無方向性電磁鋼板の製造方法の一例を説明する。本実施形態の無方向性電磁鋼板の製造方法の一例は、次の工程を含む。

(工程1) 熱間圧延工程

(工程2) 熱延板焼鈍工程

(工程3) 冷間圧延工程

(工程4) 仕上げ焼鈍工程

なお、工程2の熱延板焼鈍工程は任意の工程であり、実施してもよいし、実施しなくてもよい。以下、各工程について説明する。

[0121] 「(工程1) 熱間圧延工程」

熱間圧延工程では、スラブを熱間圧延して熱延鋼板を製造する。スラブは、製造された無方向性電磁鋼板の化学組成が特徴1を満たすような化学組成を有する。スラブは周知の方法で製造される。例えば、上述の化学組成の溶鋼を用いて、連続鋳造法によりスラブを製造する。

[0122] 準備されたスラブに対して、熱間圧延を実施する。好ましくは、熱間圧延工程の条件は、次工程の熱延板焼鈍工程の実施の有無に応じて適宜調整する。例えば、熱延板焼鈍工程を実施しない場合（つまり、自己焼鈍とする場合）、熱間圧延工程での好ましいスラブ加熱温度は1200℃～1250℃であり、好ましい仕上げ圧延温度は1050℃以上であり、好ましい巻取温度

は750℃以下である。例えば、熱延板焼鈍を実施する場合、熱間圧延工程での好ましいスラブ加熱温度は1100～1150℃であり、好ましい仕上げ圧延温度は850℃以下であり、好ましい巻取温度は700℃以下である。

[0123] 〔（工程2）熱延板焼鈍工程〕

熱延板焼鈍工程は任意の工程である。つまり、熱延板焼鈍工程は実施しなくてもよい。

熱延板焼鈍工程を実施する場合であって、熱延板焼鈍として箱焼鈍を実施する場合、好ましい熱処理温度は800℃以上であり、熱処理温度での好ましい均熱時間は10時間以上とする。熱延板焼鈍として連続焼鈍を実施する場合、好ましい熱処理温度は950℃以上であり、熱処理温度での好ましい均熱時間は30秒以上である。なお、必要に応じて、熱延板焼鈍工程での焼鈍を実施する前の鋼板、及び／又は、焼鈍を実施した後の鋼板に対して、周知の酸洗処理を実施してもよい。

[0124] 〔（工程3）冷間圧延工程〕

冷間圧延工程では、熱間圧延工程で製造された熱延鋼板、又は、熱延板焼鈍工程後の熱延鋼板に対して、冷間圧延を実施して冷延鋼板を製造する。冷間圧延は1回実施してもよいし、複数回実施してもよい。冷間圧延を複数回実施する場合、冷間圧延後、次の冷間圧延を実施する前に、周知の中間焼鈍を実施してもよい。

[0125] 〔（工程4）仕上げ焼鈍工程〕

冷間圧延工程を実施して製造された冷延鋼板に対して、仕上げ焼鈍を実施して、無方向性電磁鋼板を製造する。仕上げ焼鈍では、最終の板厚に仕上げられた冷延鋼板を焼鈍して再結晶させ、結晶粒を成長させる。仕上げ焼鈍工程は、昇温工程と、最高到達温度T1（℃）で鋼板を均熱する均熱工程と、均熱工程後の鋼板を冷却する冷却工程とを含む。仕上げ焼鈍工程では、次の条件1～条件3を満たす。

（条件1）

900℃以下の最高到達温度T1で焼鈍する。

(条件2)

最高到達温度T1(℃)又は800℃のうちの低い方の温度を、ひずみ影響最高温度T2(℃)と称する。また、冷却工程において、ひずみ影響最高温度T2から500℃までの温度域を、ひずみ付与温度域と称する。冷却工程中のひずみ付与温度域において、鋼板に付与する張力TE(kgf/mm²)は次の式(A)を満たす。

$$1. 0 \leq TE \leq 1.2 - T2 / 1000 \quad (A)$$

ここで、式(A)中のTEには、ひずみ付与温度域で鋼板に付与される張力(kgf/mm²)が代入される。ひずみ付与温度域で張力が変化する場合は、式(A)のTEにはひずみ付与温度域での張力の最大値が代入される。

なお、冷却工程中において鋼板に張力を付与してひずみが導入される場合、800℃以上の温度域では、ひずみが回復により消滅しやすい。そこで、ひずみ影響最高到達温度T2を、最高到達温度T1及び800℃のうちの低い方の温度(℃)とする。

(条件3)

最高到達温度T1、張力TE、ひずみ影響最高温度T2、及び、ひずみ影響最高温度T2から冷却工程で500℃に至るまでの平均冷却速度CR(℃/秒)が式(B)を満たす。

$$\text{LOG} \{ (T2 - 500) / CR - 5 \} \times TE \geq 0.02 \quad (B)$$

ここで、式(B)中のT2には、ひずみ影響最高温度T2(℃)が代入される。CRには、平均冷却速度CR(℃/秒)が代入される。TEには、ひずみ付与温度域で鋼板に付与される張力(kgf/mm²)が代入される。ひずみ付与温度域で張力が変化する場合は、式(B)のTEにはひずみ付与温度域での張力の最大値が代入される。

以下、各条件について説明する。

[0126] [(条件1) 最高到達温度T1について]

最高到達温度T1を900℃以下とする。

最高到達温度 T_1 が 900°C を超えれば、製造された無方向性電磁鋼板において、ひずみ量及びひずみ分布が適切にならない。その結果、 F_3 が $W_{5/1000}$ を超える、又は、 F_4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 未満となる。

最高到達温度 T_1 が 900°C 以下であれば、製造された無方向性電磁鋼板において、ひずみ量及びひずみ分布が適切になる。その結果、 F_3 が $W_{5/1000}$ 以下となり、かつ、 F_4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 以上となる。

なお、最高到達温度 T_1 の下限は例えば、 700°C である。

[0127] 〔（条件2）式（A）について〕

冷却工程中のひずみ付与温度域において、鋼板に付与する張力 T_E を次の式（A）を満たすように調整する。

$$1.0 \leq T_E \leq 1.2 - T_2 / 1000 \quad (\text{A})$$

[0128] ひずみ付与温度域において鋼板に付与する張力 T_E は、製造された無方向性電磁鋼板のひずみ量及びひずみ分布に影響する。

[0129] F_A を次のとおり定義する。

$$F_A = 1.2 - T_2 / 1000$$

張力 T_E (kgf/mm^2) が F_A 未満であれば、ひずみ付与温度域で鋼板に付与されるひずみ量及びひずみ分布が不適切となる。そのため、 F_3 が $W_{5/1000}$ を超える、又は、 F_4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 未満となる。

張力 T_E (kgf/mm^2) が F_A 以上であれば、ひずみ付与温度域で鋼板に付与されるひずみ量及びひずみ分布が適切な範囲となる。そのため、 F_3 が $W_{5/1000}$ 以下となり、かつ、 F_4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 以上となる。

[0130] 一方、張力 T_E が $1.0 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ を超えれば、ひずみ付与温度域でひずみが過剰に導入された結果、転位の対消滅がかえって多く発生する。この場合、ひずみ量が不足し、適切ひずみ分布が形成されない。そのため、 F_3

が $W_{5/1000}$ を超える、又は、F 4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 未満となる。

[0131] [(条件3)式(B)について]

無方向性電磁鋼板に適切な量のひずみを導入し、適切なひずみ分布を形成するには、ひずみ付与温度域において、適切な張力 T_E を適切な時間付与する必要がある。ここで、 RS を次のとおり定義する。

$$RS = \text{LOG} \{ (T_2 - 500) / CR - 5 \} \times T_E \geq 0.02 \quad (B)$$

ここで、式(B)中の T_2 にはひずみ影響最高温度 $T_2 (^{\circ}\text{C})$ が代入される。 CR には平均冷却速度 $CR (^{\circ}\text{C}/\text{秒})$ が代入される。 T_E には、ひずみ付与温度域で鋼板に付与する張力(kgf/mm^2)が代入される。

[0132] RS が 0.02 未満である場合、ひずみ付与温度域において、条件2を満たす張力が付与される時間が短すぎる。この場合、無方向性電磁鋼板に蓄積されるひずみ量が不足し、適切なひずみ分布が形成されない。そのため、F 3 が $W_{5/1000}$ を超える、又は、F 4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 未満となる。

RS が 0.02 以上であれば、他の条件を満たすことを前提として、無方向性電磁鋼板に蓄積されるひずみ量が適切であり、適切なひずみ分布が形成される。その結果、F 3 が $W_{5/1000}$ 以下となり、F 4 が 800°C で1時間熱処理したときの鉄損 $W_{10/400}$ 以上となる。

[0133] [その他の工程]

上述の製造方法において、仕上げ焼鈍工程後にコーティング工程を実施してもよい。コーティング工程では、仕上げ焼鈍後の無方向性電磁鋼板の表面に、絶縁コーティングを施す。絶縁コーティングの種類は特に限定されない。絶縁コーティングは有機成分であってもよいし、無機成分であってもよいし、有機成分と無機成分との混合であっても良い。

[0134] 以上の製造方法により、本実施形態の無方向性電磁鋼板が製造できる。なお、本実施形態の無方向性電磁鋼板は、特徴1～特徴5を満たせば、製造方法は特に限定されない。

[0135] [ロータコアについて]

本実施形態のロータコアは、本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として製造される。

図1Aは、ロータコア1の一例を示す平面図である。図1Aを参照して、ロータコア1は、複数のロータコア素材10を備える。ロータコア素材10は、板状である。ロータコア1は、複数のロータコア素材10が積層されて構成されている。

[0136] ロータコアの形状は、板状であれば特に限定されない。図1Aは一例として、永久磁石同期モータのロータコアを示す。図1Aでは、ロータコア素材10は円板状であり、周方向に配列された複数の貫通孔11を含む。貫通孔11には、図示しない永久磁石が配置される。ロータコア素材10はさらに、中心部に貫通孔13を含む。貫通孔13には、図示しないモータシャフトが挿入される。

[0137] なお、図1Aでは、モータが永久磁石同期モータの場合のロータコアを示すが、ロータコアは板状であれば、他の形状であってもよい。例えば、モータがリラクタンスモータである場合、ロータコアは、図1Bに示すように、複数の突極15を有する板状であってもよいし、図1Cに示すように、フラックスバリアとなる複数の貫通孔16を有する円板状であってもよい。また、モータが誘電モータである場合、ロータコアは銅又はアルミダイカスト等による誘導電流経路が設置された複数の貫通孔を有してもよい。

[0138] ロータコア素材10は、本実施形態の無方向性電磁鋼板を打抜き加工して製造される。そのため、ロータコア素材10は、特徴1～特徴5を満たす。そのため、ロータコア1は高い強度を有する。ロータコア1はさらに、優れた磁束密度を有する。ロータコア素材10はさらに、破断伸びに優れる。具体的には、ロータコア素材10の破断伸びは20%以上である。

[0139] [ロータコア素材の磁気特性の測定方法]

ロータコア素材の磁束密度及び鉄損は、JIS C 2556:2015に規定されている単板磁気特性試験 (Single Sheet Test

e r : S S T) に基づいて測定することができる。

- [0140] 具体的には、ロータコアからロータコア素材を分離する。ロータコア素材同士が接着剤により固定されている場合、ロータコア素材を300～450℃の温度域に温めて接着剤を軟化した後、ロータコア素材をロータコアから分離してもよい。
- [0141] 分離したロータコア素材から、S S T試験片を採取する。なお、S S T試験片の採取には、加工ひずみを避けるために、ワイヤーカットを使用する。S S T試験片は例えば、55mm×55mm×板厚とする。
- [0142] なお、ロータコア素材から55mm×55mm×板厚のS S T試験片を採取できない場合、L方向（圧延方向）16mm×幅8mm×板厚のL方向S S T試験片を2枚採取し、C方向（圧延方向に垂直な方向）16mm×幅8mm×板厚のC方向S S T試験片を2枚採取する。L方向の鉄損測定では、2枚のL方向S S T試験片を16mm×16mmの正形状に並べて試験を実施する。C方向の鉄損測定では、2枚のC方向S S T試験片を16mm×16mmの正形状に並べて試験を実施する。
- [0143] S S T試験片を用いて、上述の単板磁気特性試験（S S T試験）により、L方向の鉄損 $W_{5/1000(L)}$ （W/kg）及びC方向の鉄損 $W_{5/1000(C)}$ （W/kg）を求める。L方向の鉄損 $W_{5/1000(L)}$ （W/kg）及びC方向の鉄損 $W_{5/1000(C)}$ （W/kg）の算術平均値を、鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ （W/kg）とする。得られた鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ を、J I S C 2550-1:2011及びJ I S C 2550-3:2019に規定されるエプスタイン試験器での測定値へ換算し、エプスタイン相当値とする。
- [0144] エプスタイン相当値は、次の方法で求めることができる。予め、同一の無方向性電磁鋼板から、エプスタイン試験片と、S S T試験片とを採取する。エプスタイン試験片に対して、上述の「無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法」に記載の方法により、鉄損 $W_{5/1000(EP)}$ （W/kg）を求める。S S T試験片に対して、上述のS S T試験を実施して、鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ （W/kg）を求める。得られたエプスタイン試験片での鉄損 $W_{5/1000(EP)}$

($W/k g$) 及び S S T 試験片での鉄損 $W_{5/1000 (L+C)}$ ($W/k g$) に基づいて、換算係数 K を次式で求める。

$K = (\text{エプスタイン試験片での鉄損 } W_{5/1000 (EP)}) / (S S T \text{ 試験片での鉄損 } W_{5/1000 (L+C)})$

[0145] S S T 試験により得られたロータコアの測定値 (鉄損 $W_{5/1000 (L+C)}$) に、上述の K を乗じて、エプスタイン相当値の鉄損 $W_{5/1000 (W/k g)}$ を求める。当該エプスタイン相当値を、ロータコアの鉄損 $W_{5/1000 (W/k g)}$ とする。

[0146] なお、ロータコア素材からエプスタイン試験片を採取できない場合、ロータコア素材の密度、S S T 試験での磁束密度 B_{50} 及び鉄損 $W_{5/1000 (L+C)}$ と実質的に同じ密度、磁束密度 B_{50} 及び鉄損 $W_{5/1000 (L+C)}$ を有する無方向性電磁鋼板を準備する。具体的には、準備した無方向性電磁鋼板では、密度がロータコア素材の密度 $\pm 1\%$ の範囲内であり、S S T 試験片により得られた鉄損 $W_{5/1000 (L+C)}$ が、ロータコア素材の S S T 試験片により得られた鉄損 $W_{5/1000 (L+C)} \pm 5\%$ の範囲内であり、S S T 試験片により得られた磁束密度 B_{50} が、ロータコア素材の S S T 試験片により得られた磁束密度 $B_{50} \pm 2\%$ の範囲内とする。準備した無方向性電磁鋼板を用いて、[無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法] に準拠した方法により、エプスタイン試験片を用いて鉄損 $W_{5/1000 (EP)}$ を求める。得られた鉄損 $W_{5/1000 (EP)}$ ($W/k g$) を、エプスタイン相当値とする。

[0147] 好ましくは、ロータコア素材 10 はさらに、図 1 A ~ 図 1 C にも示すように、カシメ部 12 と、平坦部 14 とを含んでもよい。カシメ部 12 は、ロータコア素材 10 に形成された窪みである。複数のロータコア素材 10 を積層するとき、上下に重なり合うロータコア素材 10 のカシメ部 12 同士が嵌合して互いに固定される。平坦部 14 は、カシメ部 12 とは異なり、平坦な領域である。平坦部 14 は、ロータコア素材 10 の基材となる部分であり、平坦部 14 の板厚は、素材である無方向性電磁鋼板の板厚に相当する。

[0148] カシメ部 12 によりロータコア 1 を形成する場合、ロータコア素材 10 同

士を接着剤で固定する必要がある。接着剤でロータコア素材10同士を固定する場合、接着剤の凝固時の体積収縮により、ロータコア素材10には圧縮応力が付与されてしまう。この圧縮応力により、ロータコア1の鉄損が劣化する。一方、カシメ部12を用いてロータコア素材10同士を固定する場合、接着剤のような圧縮応力は付与されない。

[0149] 図2Aは、図1A中のカシメ部12の線分I-I (X方向)での断面図である。図2Bは、図1A中のカシメ部12の線分J-J (Y方向)での断面図である。図2A及び図2Bを参照して、カシメ部12は、一对の傾斜部121を含む。傾斜部121は、ロータコア素材10の平坦部14に対して傾斜して形成されている。カシメ部12は、一对の傾斜部121の間に、底部122を含んでもよい。また、カシメ部12が底部122を含まず、一对の傾斜部121の下端同士が繋がった、いわゆるVカシメであってもよい。カシメ部12は、傾斜部121を含むことにより、嵌合による固定力が高まる。

[0150] なお、カシメ部12の断面形状は図2Bの形状やVカシメに限定されない。例えば、U字型であってもよいし、W字型であってもよい。カシメ部12はN字型であってもよい。カシメ部12が傾斜部121を含んでいれば、カシメ部12の断面形状は特に限定されない。

[0151] カシメ部12の傾斜部121は、ロータコア素材10のうち板厚が最も薄い部分に相当する。傾斜部121の板厚 PT_{121} は、ロータコア素材10の平坦部14の板厚 PT_{14} の85%以下である。なお、平坦部14の板厚 PT_{14} は、素材である無方向性電磁鋼板の板厚 t に相当する。

[0152] 上述のとおり、本実施形態ではカシメ部12の傾斜部121の板厚 PT_{121} が平坦部14の板厚 PT_{14} よりも薄い。そのため、傾斜部121の平坦部14に対する傾斜角を急峻化できる。その結果、ロータコア素材10を平面視したときの傾斜部12のサイズを小さく抑えることができる。さらに、傾斜部121の平坦部14に対する傾斜角を急峻化することにより、嵌合したときの固定力が高まる。

[0153] 傾斜部 1 2 1 を含むカシメ部 1 2 を形成する場合、傾斜部 1 2 1 の板厚は薄くなる。したがって、ロータコア素材 1 0 が傾斜部 1 2 1 を形成できる程度の延性を有する必要がある。上述のとおり、ロータコア素材 1 0 は、特徴 1 ～特徴 5 を満たすため、破断伸びに優れる。そのため、板厚 PT_{121} が平坦部 1 4 の板厚 PT_{14} の 85% 以下となる傾斜部 1 2 1 を含むカシメ部 1 2 を形成できる。

[0154] 好ましくは、傾斜部 1 2 1 の板厚 PT_{121} は、平坦部 1 4 の板厚 PT_{14} の 83% 以下であり、さらに好ましくは 80% 以下である。好ましくは、板厚 PT_{121} は板厚 PT_{14} の 50% 以上であり、さらに好ましくは 60% 以上であり、さらに好ましくは 70% 以上である。

[0155] 好ましくは、ロータコア素材 1 0 の平坦部 1 4 の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{14} は 180HV 以上である。ロータコア素材 1 0 のカシメ部 1 2 の傾斜部 1 2 1 の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{121} は $H_{14} + 40HV$ 以上である。

上述のとおり、ロータコア素材 1 0 は、特徴 1 ～特徴 5 を満たす。そのため、優れた強度を有する。その結果、カシメ部 1 2 のビッカース硬さ及び平坦部 1 4 のビッカース硬さも高くなる。

[0156] [平坦部 1 4 の板厚 PT_{14} 及び傾斜部 1 2 1 の板厚 PT_{121} の測定方法]

平坦部 1 4 の板厚 PT_{14} 及び傾斜部 1 2 1 の板厚 PT_{121} は次の方法で求める。1 つのロータコア素材 1 0 において、図 2 B の断面を含む試験片を採取する。平坦部 1 4 の任意の 5 箇所 で平坦部の板厚を測定し、得られた 5 つの値の算術平均値を、平坦部 1 4 の板厚 PT_{14} (mm) とする。板厚 PT_{14} (mm) は、得られた算術平均値の小数第四位を四捨五入して得られた小数第三位までの値とする。さらに、傾斜部 1 2 1 の任意の 5 箇所 で板厚を測定し、得られた 5 つの算術平均値を、傾斜部 1 2 1 の板厚 PT_{121} (mm) とする。板厚 PT_{121} (mm) は、得られた算術平均値の小数第四位を四捨五入して得られた小数第三位までの値とする。測定はマイクロメーターを用いてもよいし、レーザー三角測量方式での板厚測定器等の非接触測定装置を用いても

よい。

[0157] [平坦部 1 4 のビッカース硬さ H_{14} 及び傾斜部 1 2 1 のビッカース硬さ H_{121} の測定方法]

平坦部 1 4 のビッカース硬さ H_{14} 及び傾斜部 1 2 1 のビッカース硬さ H_{121} は次の方法で求める。ロータコア素材 1 0 において、図 2 B の断面を含む試験片を採取する。試験片の当該断面のうち、傾斜部 1 2 1 の任意の板厚中央位置の 5 箇所、JIS Z 2244-1:2020 に準備したビッカース硬さ試験を実施する。試験力は 1 N とする。なお、ビッカース硬さ試験機が試験力を kgf 単位のみ制御可能な場合、試験力は 0.1 kgf とする。得られたビッカース硬さの算術平均値を、傾斜部 1 2 1 のビッカース硬さ H_{121} (HV) とする。ビッカース硬さ H_{121} (HV) は、得られた算術平均値の小数第一位を四捨五入して得られた整数値とする。

[0158] 同様に、試験片の当該断面のうち、平坦部 1 4 の任意の板厚中央位置の 5 箇所、JIS Z 2244-1:2020 に準備したビッカース硬さ試験を実施する。試験力は 1 N とする。なお、ビッカース硬さ試験機が試験力を kgf 単位のみ制御可能な場合、試験力は 0.1 kgf とする。得られたビッカース硬さの算術平均値を、平坦部 1 4 のビッカース硬さ H_{14} のビッカース硬さ (HV) とする。ビッカース硬さ H_{14} (HV) は、得られた算術平均値の小数第一位を四捨五入して得られた整数値とする。

[0159] [ステータコアについて]

本実施形態のステータコアは、本実施形態の無方向性電磁鋼板を素材として製造される。

図 3 は、ステータコア 2 の平面図である。図 3 を参照して、ステータコア 2 は、複数のステータコア素材 2 0 を備える。ステータコア素材 2 0 は、円環の板状である。ステータコア 2 は、複数のステータコア素材 2 0 が積層されて構成されている。

ステータコア素材 2 0 は、複数のティース部 2 1 を含む。複数のティース部 2 1 は、各々がステータコア素材 2 0 の周方向に隙間を設けて配列されて

いる。そして、ティース部21は、ステータコア素材20の径方向に延びている。

[0160] ステータコア素材20は、本実施形態の無方向性電磁鋼板を打抜き加工した後、歪取り焼鈍を実施して製造される。そのため、ステータコア素材20は、特徴1～特徴4を満たし、さらに、式(4)で定義される F_4 が鉄損 $W_{10/400}$ 以上となる。そのため、ステータコア2は、優れた磁束密度と、優れた鉄損を有する。ステータコア素材20はさらに、歪取り焼鈍前の打ち抜き加工後の状態では、ロータコア素材10と同様に、破断伸びに優れる。具体的には、ステータコア素材20の破断伸びは20%以上である。

[0161] [ステータコア素材の磁気特性の測定方法]

ステータコア素材の磁束密度及び鉄損は、JIS C 2556:2015に規定されている単板磁気特性試験(Single Sheet Tester: SST)に基づいて測定することができる。

具体的には、ステータコアからステータコア素材を分離する。ステータコア素材同士が接着剤により固定されている場合、ステータコア素材を300～450℃の温度域に温めて接着剤を軟化した後、ステータ素材をステータコアから分離してもよい。

分離したステータコア素材から、SST試験片を採取する。なお、SST試験片の採取には、加工ひずみを避けるために、ワイヤーカットを使用する。SST試験片は例えば、55mm×55mm×板厚とする。

[0162] なお、ステータコア素材から55mm×55mm×板厚のSST試験片を採取できない場合、L方向(圧延方向)16mm×幅8mm×板厚のL方向SST試験片を2枚採取し、C方向(圧延方向に垂直な方向)16mm×幅8mm×板厚のC方向SST試験片を2枚採取する。L方向の鉄損測定では、2枚のL方向SST試験片を16mm×16mmの正形状に並べて試験を実施する。C方向の鉄損測定では、2枚のC方向SST試験片を16mm×16mmの正形状に並べて試験を実施する。

[0163] SST試験片を用いて、上述の単板磁気特性試験(SST試験)により、

L方向の鉄損 $W_{5/1000(L)}$ (W/kg) 及びC方向の鉄損 $W_{5/1000(C)}$ (W/kg) を求める。L方向の鉄損 $W_{5/1000(L)}$ (W/kg) 及びC方向の鉄損 $W_{5/1000(C)}$ (W/kg) の算術平均値を、鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ (W/kg) とする。得られた鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ を、JIS C 2550-1:2011及びJIS C 2550-3:2019に規定されるエプスタイン試験器での測定値へ換算し、エプスタイン相当値とする。

- [0164] エプスタイン相当値は、次の方法で求めることができる。予め、同一の無方向性電磁鋼板から、エプスタイン試験片と、SST試験片とを採取する。エプスタイン試験片に対して、上述の「無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法」に記載の方法により、鉄損 $W_{5/1000(EP)}$ (W/kg) を求める。SST試験片に対して、上述のSST試験を実施して、鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ (W/kg) を求める。得られたエプスタイン試験片での鉄損 $W_{5/1000(EP)}$ (W/kg) 及びSST試験片での鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ (W/kg) に基づいて、換算係数Kを次式で求める。

$$K = (\text{エプスタイン試験片での鉄損 } W_{5/1000(EP)}) / (\text{SST試験片での鉄損 } W_{5/1000(L+C)})$$

- [0165] SST試験により得られたステータの測定値（鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ ）に、上述のKを乗じて、エプスタイン相当値の鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を求める。当該エプスタイン相当値を、ステータコアの鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) とする。

- [0166] なお、ステータコア素材からエプスタイン試験片を採取できない場合、ステータコア素材の密度、SST試験での磁束密度B50及び鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ と実質的に同じ密度、磁束密度B50及び鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ を有する無方向性電磁鋼板を準備する。具体的には、準備した無方向性電磁鋼板では、密度がロータコア素材の密度±1%の範囲内であり、SST試験片により得られた鉄損 $W_{5/1000(L+C)}$ が、ロータコア素材のSST試験片により得られた鉄損 $W_{5/1000(L+C)} \pm 5\%$ の範囲内であり、SST試験片により得られた磁束密度B50が、ロータコア素材のSST試験片により得られた磁束密

度 $B50 \pm 2\%$ の範囲内とする。準備した無方向性電磁鋼板を用いて、[無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法] に準拠した方法により、エプスタイン試験片を用いて鉄損 $W_{5/1000(EP)}$ を求める。得られた鉄損 $W_{5/1000(EP)}$ (W/kg) を、エプスタイン相当値とする。

[0167] 好ましくは、ステータコア素材 20 はさらに、図 3 に示すように、平坦部 24 と、カシメ部 22 とを含んでもよい。カシメ部 22 は、ステータコア素材 20 に形成された窪みである。複数のステータコア素材 20 を積層するとき、上下に重なり合うステータコア素材 20 のカシメ部 22 同士が嵌合して互いに固定される。つまり、カシメ部 22 はカシメ部 12 と同じ役割を担う。平坦部 24 は、カシメ部 22 とは異なり、平坦な領域である。平坦部 24 は、ステータコア素材 20 の基材となる部分であり、平坦部 24 の板厚は、素材である無方向性電磁鋼板の板厚に相当する。

[0168] カシメ部 22 によりステータコア 2 を形成する場合、ステータコア素材 20 同士を接着剤で固定する必要がない。そのため、カシメ部 22 を用いてステータコア素材 20 同士を固定する場合、接着剤のような圧縮応力は付与されない。ステータコア 2 の場合はさらに、カシメ部 22 により複数のステータコア素材 20 を固定した後、歪取り焼鈍を実施する。そのため、カシメ部 22 の形成時にカシメ部 22 に導入されたひずみも除去される。その結果、ステータコア 2 では、接着剤を使用した場合のような圧縮応力が付与されないだけでなく、カシメ部 22 を形成するときのひずみの影響も十分に抑制される。そのため、ステータコア 2 は優れた鉄損を有する。

[0169] カシメ部 22 の構成は、カシメ部 12 と同じである。図 2 A 及び図 2 B を参照して、カシメ部 22 は、一对の傾斜部 221 を含む。傾斜部 221 は、ステータコア素材 20 のカシメ部 22 以外の部分に対して傾斜して形成されている。カシメ部 22 は、一对の傾斜部 221 の間に、底部 222 を含んでもよい。また、カシメ部 22 が底部 222 を含まず、一对の傾斜部 221 の下端が繋がった、いわゆる V カシメであってもよい。カシメ部 22 は、傾斜部 221 を含むことにより、嵌合による固定力が高まる。

- [0170] なお、カシメ部22は、カシメ部12と同様に、例えば、U字型であってもよいし、W字型であってもよい。カシメ部22は、N字型であってもよい。カシメ部22が傾斜部221を含んでいれば、カシメ部22の断面形状は特に限定されない。
- [0171] カシメ部22の傾斜部221は、ステータコア素材20のうち板厚が最も薄い部分に相当する。傾斜部221の板厚 PT_{221} は、ステータコア素材20のカシメ部22以外の部分である平坦部24の板厚 PT_{24} の85%以下である。なお、平坦部24の板厚 PT_{24} は、素材である無方向性電磁鋼板の板厚 t に相当する。
- [0172] 上述のとおり、本実施形態ではカシメ部22の傾斜部221の板厚 PT_{221} が平坦部24の板厚 PT_{24} よりも薄い。そのため、傾斜部221の平坦部24に対する傾斜角を急峻化できる。その結果、ステータコア素材20を平面視したときの傾斜部22のサイズを小さく抑えることができる。さらに、傾斜部221の平坦部24に対する傾斜角を急峻化することにより、嵌合したときの固定力が高まる。
- [0173] 傾斜部221を含むカシメ部22を形成する場合、傾斜部221の板厚は薄くなる。したがって、ステータコア素材20が傾斜部221を形成できる程度の延性を有する必要がある。上述のとおり、ステータコア素材20は、特徴1～特徴4を満たし、さらに、式(4)で定義される F_4 が鉄損 $W_{10/40}$ 以上となる。そのため、破断伸びに優れる。そのため、板厚 PT_{221} が平坦部24の板厚 PT_{24} の85%以下となる傾斜部221を含むカシメ部22を形成できる。
- [0174] 好ましくは、傾斜部221の板厚 PT_{221} は、平坦部24の板厚 PT_{24} の83%以下であり、さらに好ましくは80%以下である。好ましくは、板厚 PT_{221} は板厚 PT_{24} の50%以上であり、さらに好ましくは60%以上であり、さらに好ましくは70%以上である。
- [0175] 好ましくは、ステータコア素材20の平坦部24の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{24} は、175HV以上であり、ステータコア素材20のカシメ

部22の傾斜部221の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{221} は、平坦部24のビッカース硬さ $H_{24} \pm 10 \text{ HV}$ 以下である。ステータコア素材20は歪取り焼鈍を施されているため、ひずみが除去されており、その結果、硬さが低くなっている。

[0176] [平坦部24の板厚 PT_{24} 及び傾斜部221の板厚 PT_{221} の測定方法]

平坦部24の板厚 PT_{24} 及び傾斜部221の板厚 PT_{221} は次の方法で求める。1つのロータコア素材10において、図2Bの断面を含む試験片を採取する。平坦部24の任意の5箇所では平坦部の板厚を測定し、得られた5つの値の算術平均値を、平坦部24の板厚 PT_{24} (mm) とする。板厚 PT_{24} (mm) は、得られた算術平均値の小数第一位を四捨五入して得られた整数値とする。さらに、傾斜部221の任意の5箇所では板厚を測定し、得られた5つの算術平均値を、傾斜部221の板厚 PT_{221} (mm) とする。板厚 PT_{221} (mm) は、得られた算術平均値の小数第一位を四捨五入して得られた整数値とする。測定はマイクロメーターを用いてもよいし、レーザー三角測量方式での板厚測定器等の非接触測定装置を用いてもよい。

[0177] [平坦部24のビッカース硬さ H_{24} 及び傾斜部221のビッカース硬さ H_{221} の測定方法]

平坦部24のビッカース硬さ H_{24} 及び傾斜部221のビッカース硬さ H_{221} は次の方法で求める。ステータコア素材20において、図2Bの断面を含む試験片を採取する。試験片の当該断面のうち、傾斜部221の任意の板厚中央位置の5箇所では、JIS Z 2244-1:2020に準備したビッカース硬さ試験を実施する。試験力は1Nとする。なお、ビッカース硬さ試験機が試験力をkgf単位のみ制御可能な場合、試験力は0.1kgfとする。得られたビッカース硬さの算術平均値を、傾斜部221のビッカース硬さ H_{221} (HV) とする。ビッカース硬さ H_{221} (HV) は、得られた算術平均値の小数第一位を四捨五入して得られた整数値とする。

[0178] 同様に、試験片の当該断面のうち、平坦部24の任意の板厚中央位置の5箇所では、JIS Z 2244-1:2020に準備したビッカース硬さ試

験を実施する。試験力は1 Nとする。得られたビッカース硬さの算術平均値を、平坦部24のビッカース硬さ H_{24} (HV)とする。ビッカース硬さ H_{24} (HV)は、得られた算術平均値の小数第一位を四捨五入して得られた整数値とする。

[0179] [ロータコア1及びステータコア2の製造方法]

ロータコア1及びステータコア2は次の方法で製造する。

本実施形態の無方向性電磁鋼板から、ロータコア素材10及びステータコア素材20を打抜き加工で製造する。打抜き加工を実施する前に、ロータコア素材10となる領域内に、プレス加工によりカシメ部12を形成する。同様に、ステータコア素材20となる領域内に、プレス加工によりカシメ部22を形成する。

[0180] カシメ部12を形成した後、ロータコア素材10を連続的に打ち抜く。このとき、打ち抜いたロータコア素材10上に、新たに打ち抜いたロータコア素材10を積層して、カシメ部12同士を嵌合させる。つまり、打抜き加工を実施しながら、ロータコア素材10の積層及び嵌合作業も実施する。以上の工程により、ロータコア1を製造する。

[0181] 同様に、カシメ部22を形成した後、ステータコア素材20を連続的に打ち抜く。このとき、打ち抜いたステータコア素材20上に、新たに打ち抜いたステータコア素材20を積層して、カシメ部22同士を嵌合させる。つまり、打抜き加工を実施しながら、ステータコア素材20の積層及び嵌合作業も実施する。

積層された複数のステータコア素材20に対して、歪取り焼鈍を実施する。歪取り焼鈍は例えば、800～850℃で1～10時間実施する。以上の工程により、ステータコア2を製造する。

[0182] [モータについて]

本実施形態のモータは、上述のロータコアと、上述のステータコアとを備える。本実施形態のモータは、本実施形態のロータコア及びステータコアを備えるため、ロータコアにおいて高い強度が得られる。本実施形態のモータ

ではさらに、優れた磁束密度及び鉄損が得られる。

実施例 1

[0183] 表 1（表 1 A、表 1 B、及び表 1 C）に示す化学組成を有する無方向性電
磁鋼板を、次の方法で製造した。

[0184] [表1A]

TABLE1A								
試験 番号	化学組成（単位は質量%、残部はFe及び不純物）							
	Si	Mn	P	S	Al	C	N	O
1	2.6	0.5	0.01	0.0010	0.3	0.0021	0.0018	0.0012
2	2.9	0.2	0.02	0.0007	0.5	0.0027	0.0021	0.0028
3	3.1	0.3	0.01	0.0015	0.6	0.0027	0.0021	0.0011
4	2.1	0.7	0.04	0.0010	1.1	0.0019	0.0029	0.0017
5	2.5	0.4	0.01	0.0004	0.6	0.0026	0.0023	0.0013
6	3.1	1.3	0.01	0.0021	0.2	0.0024	0.0023	0.0015
7	3.7	0.4	0.02	0.0017	0.1	0.0012	0.0026	0.0014
8	2.2	0.3	0.05	0.0010	0.3	0.0016	0.0016	0.0010
9	2.9	0.5	0.03	0.0016	0.5	0.0023	0.0017	0.0029
10	3.0	0.3	0.06	0.0018	0.3	0.0014	0.0019	0.0023
11	2.1	0.2	0.02	0.0008	1.3	0.0020	0.0028	0.0014
12	3.4	0.3	0.01	0.0019	0.3	0.0025	0.0029	0.0013
13	3.1	0.8	0.02	0.0010	0.4	0.0025	0.0025	0.0010
14	2.9	0.6	0.06	0.0019	0.6	0.0026	0.0024	0.0013
15	2.8	0.3	0.01	0.0017	0.7	0.0018	0.0022	0.0024
16	2.7	0.5	0.03	0.0010	0.5	0.0022	0.0021	0.0023
17	3.0	0.7	0.02	0.0008	0.3	0.0026	0.0019	0.0027
18	3.0	0.4	0.02	0.0011	0.3	0.0021	0.0019	0.0018
19	3.1	0.2	0.01	0.0014	0.4	0.0026	0.0023	0.0021
20	2.7	0.4	0.01	0.0011	0.7	0.0021	0.0024	0.0023
21	2.6	0.7	0.04	0.0013	0.6	0.0029	0.0024	0.0021
22	2.8	0.5	0.02	0.0008	0.5	0.0022	0.0027	0.0021
23	3.0	0.8	0.01	0.0007	0.3	0.0024	0.0026	0.0025
24	3.1	0.3	0.01	0.0014	0.4	0.0026	0.0011	0.0024
25	2.8	0.4	0.03	0.0008	0.3	0.0024	0.0011	0.0024
26	2.9	1.0	0.03	0.0021	0.4	0.0017	0.0013	0.0021
27	3.4	0.2	0.03	0.0014	0.4	0.0028	0.0018	0.0027
28	2.9	0.7	0.04	0.0016	0.5	0.0034	0.0024	0.0014
29	3.6	0.1	0.03	0.0017	0.2	0.0027	0.0015	0.0010
30	2.1	0.2	0.04	0.0005	0.3	0.0030	0.0034	0.0020
31	2.3	0.2	0.05	0.0016	0.1	0.0035	0.0026	0.0015
32	2.2	1.4	0.03	0.0018	1.1	0.0022	0.0029	0.0023
33	3.2	0.6	0.02	0.0018	1.3	0.0031	0.0024	0.0010
34	2.4	0.4	0.02	0.0023	0.3	0.0021	0.0019	0.0014
35	2.3	0.3	0.02	0.0009	0.4	0.0032	0.0031	0.0010
36	2.4	0.4	0.06	0.0007	0.7	0.0035	0.0033	0.0012
37	2.2	0.5	0.05	0.0007	0.3	0.0015	0.0021	0.0017
38	2.5	0.6	0.03	0.0008	0.4	0.0022	0.0026	0.0018
39	2.9	0.3	0.05	0.0006	0.5	0.0024	0.0023	0.0016
40	2.7	0.5	0.06	0.0013	0.5	0.0026	0.0021	0.0013
41	3.0	0.4	0.03	0.0009	0.1	0.0031	0.0032	0.0016

[0185] [表1B]

TABLE1B

試験 番号	化学組成（単位は質量％、残部はFe及び不純物）									
	Cr	Ti	Mo	Ni	Cu	Sn	Sb	Ca	Mg	REM
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	0.013	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	0.06	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	0.021	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	0.015	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	0.0023	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0010	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0025
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	0.01	0.0007	0.018	0.31	0.15	0.015	0.001	0.0005	-	0.0016
26	0.06	0.0016	0.026	0.04	0.01	0.053	0.003	0.0013	0.0008	0.0011
27	0.40	0.0021	0.073	0.02	0.03	0.076	-	0.0011	0.0015	-
28	0.31	0.0018	0.006	0.01	0.02	0.025	-	0.0031	-	0.0042
29	0.08	0.0011	0.007	0.08	0.06	0.026	0.011	0.0013	0.0009	0.0036
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	0.03	0.0013	0.013	0.03	0.02	0.022	-	0.0005	0.0007	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	0.04	0.0021	0.005	0.01	0.05	0.002	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	0.07	0.0009	0.013	0.03	0.02	0.022	-	-	0.0009	-
36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	0.05	0.0013	0.013	0.04	0.02	0.026	-	0.0012	-	-
38	0.01	0.0008	0.011	0.03	0.02	0.023	-	-	-	-
39	0.02	0.0011	0.013	0.03	0.03	0.022	-	-	-	-
40	0.01	0.0013	0.005	0.01	0.02	0.021	-	-	-	-
41	0.05	0.0016	0.017	0.03	0.02	0.002	-	-	-	-

[0186]

[表1C]

TABLE1C

試験 番号	化学組成（単位は質量％、残部はFe及び不純物）										
	B	Zn	Ge	As	Co	V	Se	Zr	Nb	Pb	Ga
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	0.0010	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	0.0052	-	-	-	-	-	-
17	-	0.0011	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0015
19	-	-	0.0013	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	0.0036	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	0.0014	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	0.0017	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0012	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0015	-
25	0.0002	0.0014	-	0.0035	0.0063	0.0011	-	-	0.0006	-	-
26	-	-	0.0014	0.0028	-	-	0.0011	0.0008	0.0014	0.0013	0.0012
27	-	0.0007	-	-	-	0.0015	-	-	-	0.0009	-
28	0.0005	0.0013	0.0013	0.0038	0.0056	-	-	0.0009	-	-	-
29	-	-	-	0.0042	-	0.0013	-	-	-	-	0.0011
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	0.0005	0.0008	0.0021	0.0026	-	0.0011	-	0.0011	0.0010	0.0009	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	0.0014	-	-	0.0013	0.0011	0.0019	-	-	-
36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	-	0.0014	-	0.0026	-	-	-	-	0.0013	-	0.0013
38	-	-	-	0.0022	-	-	-	0.0008	-	-	-
39	-	-	-	0.0043	-	-	-	0.0011	-	-	-
40	-	-	-	0.0020	-	-	-	0.0014	-	-	-
41	-	-	-	0.0044	-	-	-	0.0016	-	-	-

[0187] スラブ（鋼片）に対して熱間圧延を実施して、板厚2.0mmの熱延鋼板を製造した。スラブ加熱温度は1100℃～1150℃であった。仕上げ圧延温度は800℃以上850℃以下であった。巻取り温度は700℃以下であった。熱延鋼板に対して、1000℃で1分均熱する熱延板焼鈍を実施した。熱延板焼鈍後の鋼板に対して、冷間圧延を実施して、種々の板厚の冷延鋼板を製造した。

[0188] 製造された冷延鋼板に対して、仕上げ焼鈍を実施した。仕上げ焼鈍での最

高到達温度 T_1 ($^{\circ}\text{C}$)、張力 TE (kgf/mm^2)、平均冷却速度 CR ($^{\circ}\text{C}/\text{秒}$)、 RS を表2に示す。なお、表2の「 $1, 0 \leq TE \leq FA$ 」欄において「 T 」は、式(A)を満たすことを意味する。「 F 」は式(A)を満たさなかったことを意味する。

以上の製造工程により、各試験番号の無方向性電磁鋼板を製造した。各試験番号の板厚 (mm) を表2中の「板厚 t (mm)」欄に示す。また、各試験番号の $F_1 \sim F_4$ を表2の「 F_1 」欄、「 F_2 」欄、「 F_3 」欄及び「 F_4 」欄にそれぞれ示す。表2において、「 $F_3 \leq W_{5/1000}$ 」欄中の「 T 」は、 F_3 が鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であったことを意味する。「 F 」は、 F_3 が鉄損 $W_{5/1000}$ を超えたことを意味する。「 $W_{10/400} \leq F_4$ 」欄中の「 T 」は、 F_4 が、 800°C で1時間熱処理したときの $W_{10/400}$ 以上であることを意味する。「 F 」は、 F_4 が 800°C で1時間熱処理したときの $W_{10/400}$ 未満であることを意味する。

[0189]

[表2]

TABLE2

試験 番号	T1 (°C)	TE (kgf/mm ²)	1.0≧TE≧FA	冷却速度CR (°C/秒)	RS	板厚t (mm)	F1	F2	F3	F3 ≦W _{5/1000}	F4	W _{10/400} ≦F4
1	780	0.6	T	40	0.18	0.25	12.3	6.6	21.9	T	12.5	T
2	800	0.6	T	35	0.33	0.25	13.5	7.5	17.1	T	11.8	T
3	850	0.4	T	45	0.09	0.25	14.8	8.3	13.3	T	11.3	T
4	780	0.5	T	45	0.04	0.25	13.1	8.2	22.8	T	11.9	T
5	790	0.6	T	40	0.21	0.27	12.6	7.2	22.4	T	12.9	T
6	860	0.5	T	25	0.42	0.30	15.6	8.1	14.7	T	12.4	T
7	880	0.4	T	30	0.28	0.27	15.9	8.1	8.6	T	11.5	T
8	730	0.7	T	28	0.35	0.20	10.3	5.6	26.2	T	11.8	T
9	810	0.5	T	45	0.11	0.25	14.1	7.8	16.2	T	11.6	T
10	800	0.5	T	40	0.20	0.25	13.5	7.2	16.7	T	11.9	T
11	770	0.6	T	40	0.15	0.27	12.7	8.3	23.8	T	12.7	T
12	830	0.5	T	38	0.23	0.20	15.1	8.0	9.3	T	9.8	T
13	800	0.5	T	42	0.17	0.15	15.2	8.2	9.6	T	8.3	T
14	810	0.5	T	46	0.09	0.15	14.6	8.2	11.5	T	8.4	T
15	800	0.6	T	40	0.24	0.25	13.9	8.0	16.8	T	11.6	T
16	790	0.5	T	40	0.18	0.25	13.3	7.4	19.0	T	11.9	T
17	810	0.7	T	30	0.49	0.20	14.3	7.6	13.6	T	10.0	T
18	800	0.5	T	25	0.42	0.27	13.7	7.3	17.2	T	12.4	T
19	820	0.6	T	37	0.30	0.25	14.0	7.6	14.9	T	11.6	T
20	800	0.6	T	40	0.24	0.27	13.7	7.9	18.7	T	12.3	T
21	800	0.5	T	45	0.11	0.25	13.6	7.7	19.1	T	11.8	T
22	790	0.6	T	40	0.21	0.20	13.7	7.6	15.7	T	10.2	T
23	800	0.6	T	40	0.24	0.25	14.5	7.7	15.2	T	11.4	T
24	800	0.6	T	38	0.28	0.27	14.2	7.7	15.4	T	12.2	T
25	790	0.5	T	45	0.08	0.25	12.9	6.9	19.3	T	12.2	T
26	850	0.5	T	47	0.07	0.25	14.8	8.0	15.3	T	11.3	T
27	830	0.5	T	48	0.05	0.30	15.2	8.2	12.5	T	12.6	T
28	800	0.5	T	40	0.20	0.30	14.5	8.0	17.4	T	12.9	T
29	820	0.5	T	35	0.28	0.25	15.2	7.9	9.6	T	11.2	T
30	720	0.5	T	35	0.05	0.25	9.7	5.3	30.6	T	14.2	F
31	720	0.5	T	30	0.18	0.25	9.9	5.1	29.1	T	14.1	F
32	780	0.5	T	40	0.15	0.25	14.9	9.1	19.3	T	11.2	T
33	760	0.6	T	37	0.18	0.25	17.9	10.9	6.6	T	10.2	T
34	910	0.5	T	45	0.11	0.25	11.3	6.1	25.2	F	13.0	T
35	950	0.5	T	45	0.11	0.25	11.0	6.1	26.3	F	13.2	T
36	810	0.2	F	45	0.04	0.25	12.5	7.3	22.3	F	12.3	F
37	750	0.1	F	30	0.05	0.25	10.7	5.8	27.9	F	13.4	F
38	730	1.1	T	45	-1.05	0.25	12.4	6.8	22.3	F	12.4	F
39	830	1.1	T	27	0.86	0.25	13.7	7.6	16.8	F	11.8	F
40	800	0.5	T	55	-0.17	0.25	13.3	7.4	19.0	F	11.9	F
41	820	0.6	T	55	-0.21	0.25	13.1	6.7	17.8	F	12.1	F

[0190] [評価試験]

各試験番号の無方向性電磁鋼板に対して、次の評価試験を実施した。

(試験1) 化学組成測定試験

(試験2) 板厚測定試験

(試験3) 鉄損測定試験

(試験4) 降伏応力及び破断伸び測定試験

(試験5) 磁束密度測定試験

(試験6) 熱伝導率測定試験

以下、試験1～試験6について説明する。

[0191] [(試験1) 化学組成測定試験]

上述の〔無方向性電磁鋼板の化学組成の測定方法〕に記載の方法に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の化学組成を測定した。その結果、各試験番号の無方向性電磁鋼板の化学組成は表 1 に示すとおりであった。

[0192] 〔（試験 2）板厚測定試験〕

上述の〔無方向性電磁鋼板の板厚 t の測定方法〕に記載の方法に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の板厚を測定した。測定結果を表 2 中の「板厚 t (mm)」欄に示す。

[0193] 〔（試験 3）鉄損測定試験〕

上述の〔無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ の測定方法〕に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg) を求めた。得られた鉄損 $W_{5/1000}$ を表 3 中の「鉄損 $W_{5/1000}$ (W/kg)」欄に示す。

さらに、上述の〔無方向性電磁鋼板の歪取り焼鈍後の鉄損 $W_{10/400}$ の測定方法〕に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板において、800℃で1時間熱処理したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ を求めた。得られた鉄損 $W_{10/400}$ を表 3 中の「歪取り焼鈍後鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)」欄に示す。

[0194]

[表3]

TABLE3

試験 番号	鉄損 W _{5/1000} (W/kg)	歪取り焼鈍後 鉄損 W _{10/400} (W/kg)	降伏 応力 (MPa)	破断 伸び (%)	B _{50ave} (T)	B _{1ave} (T)	B _{500ave} (T)	20℃ 熱伝導率 (W/mk)	150℃ 熱伝導率 (W/mk)	備考
1	27.5	11.9	452	27	1.66	0.97	2.02	24	27	本発明例
2	25.9	11.0	472	26	1.66	0.98	2.00	23	26	本発明例
3	19.4	10.6	470	26	1.65	0.93	1.98	22	24	本発明例
4	24.9	11.8	456	29	1.65	0.97	1.98	23	26	本発明例
5	27.9	12.3	451	26	1.66	0.98	2.01	24	27	本発明例
6	22.4	11.1	460	28	1.65	0.91	1.98	21	24	本発明例
7	18.8	10.4	489	26	1.65	0.85	1.98	21	24	本発明例
8	31.5	11.4	457	22	1.67	0.88	2.05	26	29	本発明例
9	23.1	11.0	475	27	1.66	0.98	1.99	22	25	本発明例
10	23.8	11.5	483	24	1.66	0.98	2.01	23	26	本発明例
11	28.4	12.3	461	28	1.65	0.96	1.98	24	26	本発明例
12	20.2	8.9	492	29	1.66	0.96	1.99	21	24	本発明例
13	19.5	7.8	496	27	1.65	0.98	1.98	21	24	本発明例
14	19.4	7.8	488	26	1.65	0.98	1.98	22	25	本発明例
15	25.6	10.7	474	27	1.66	0.98	1.99	22	25	本発明例
16	24.4	11.7	469	28	1.66	0.98	2.00	23	26	本発明例
17	25.2	8.4	475	26	1.66	0.98	2.00	22	25	本発明例
18	24.4	12.0	476	26	1.66	0.98	2.00	23	25	本発明例
19	24.8	10.4	474	24	1.66	0.97	2.00	22	25	本発明例
20	26.4	11.4	467	29	1.66	0.96	1.99	23	25	本発明例
21	23.8	11.4	464	26	1.66	0.98	1.99	23	25	本発明例
22	24.3	9.4	476	28	1.66	0.96	2.00	23	25	本発明例
23	25.2	10.5	480	27	1.66	0.98	1.99	22	25	本発明例
24	26.1	11.3	486	26	1.66	0.98	1.99	22	25	本発明例
25	24.7	11.9	466	28	1.66	0.98	2.01	23	26	本発明例
26	21.4	10.1	457	27	1.66	0.93	1.99	22	24	本発明例
27	23.4	11.7	500	26	1.65	0.96	1.98	21	24	本発明例
28	24.9	12.5	486	27	1.66	0.98	1.99	22	25	本発明例
29	22.1	10.5	511	28	1.66	0.97	1.99	21	24	本発明例
30	31.2	15.0	452	27	1.67	0.97	2.05	27	30	比較例
31	31.0	14.9	462	22	1.67	0.85	2.06	27	30	比較例
32	23.8	11.1	474	27	1.64	0.97	1.96	22	24	比較例
33	25.2	9.8	573	28	1.64	0.95	1.91	19	22	比較例
34	22.8	11.0	370	19	1.67	0.69	2.03	25	28	比較例
35	22.5	10.6	350	16	1.67	0.53	2.03	25	28	比較例
36	18.2	13.3	445	27	1.66	0.64	2.00	24	27	比較例
37	20.4	15.8	445	28	1.67	0.65	2.04	26	29	比較例
38	21.8	14.6	445	28	1.66	0.68	2.02	24	27	比較例
39	16.7	12.4	449	28	1.66	0.67	2.00	23	25	比較例
40	18.5	13.7	447	28	1.66	0.68	2.00	23	26	比較例
41	17.5	14.2	439	28	1.66	0.69	2.02	23	26	比較例

[0195] [(試験4) 降伏応力及び破断伸び測定試験]

上述の「降伏応力の測定方法」に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の降伏応力 (MPa) を求めた。得られた降伏応力を表3中の「降伏応力 (MPa)」欄に示す。さらに、「降伏応力の測定方法」により得られた応力-ひずみ曲線から、各試験番号の無方向性電磁鋼板の破断伸び (%) を求めた。得られた破断伸びを表3中の「破断伸び (%)」欄に示す。

[0196] [(試験5) 磁束密度測定試験]

上述の〔平均磁束密度 B_{50ave} の測定方法〕に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の平均磁束密度 B_{50ave} (T) を得た。得られた平均磁束密度 B_{50ave} (T) を表 3 中の「 B_{50ave} (T)」欄に示す。

さらに、上述の〔平均磁束密度 B_{1ave} の測定方法〕に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の平均磁束密度 B_{1ave} (T) を得た。得られた平均磁束密度 B_{1ave} (T) を表 3 中の「 B_{1ave} (T)」欄に示す。

さらに、上述の〔平均磁束密度 B_{500ave} の測定方法〕に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の平均磁束密度 B_{500ave} (T) を得た。得られた平均磁束密度 B_{500ave} (T) を表 3 中の「 B_{500ave} (T)」欄に示す。

[0197] 〔試験 6〕熱伝導率測定試験〕

上述の〔熱伝導率の測定方法〕に基づいて、各試験番号の無方向性電磁鋼板の 20℃の熱伝導率 (W/mK) 及び 150℃の熱伝導率 (W/mK) を求めた。得られた 20℃及び 150℃の熱伝導率を表 3 中の「20℃熱伝導率 (W/mK)」欄、及び、「150℃熱伝導率 (W/mK)」欄に示す。

[0198] 〔評価結果〕

表 1～表 3 を参照して、試験番号 1～29 は、特徴 1～特徴 5 を満たした。そのため、降伏強度は 450 MPa 以上であり、高い強度が得られた。さらに、平均磁束密度 B_{50ave} が 1.65 T 以上であり、優れた磁束密度が得られた。さらに、歪取り焼鈍後の鉄損 $W_{10/400}$ が、F4 W/kg 未満であり、歪取り焼鈍後において優れた鉄損が得られた。

[0199] なお、これらの試験番号 1～29 ではさらに、歪取り焼鈍後の平均磁束密度 B_{1ave} が 0.70 T 以上であり、平均磁束密度 B_{500ave} が 1.98 T 以上であった。さらに、20℃での熱伝導率が 20 W/mK 以上であり、150℃での熱伝導率が 23 W/mK 以上であり、優れた熱伝導率が得られた。

[0200] 一方、試験番号 30 及び 31 では、F1 が式 (1) を満たさなかった。そのため、歪取り焼鈍後において、十分な鉄損が得られなかった。

[0201] 試験番号 32 及び 33 では、F2 が式 (2) を満たさなかった。そのため、十分な磁束密度が得られなかった。また、試験番号 33 では、20℃及び

150℃の熱伝導率が低かった。F1が高かったためと考えられる。

[0202] 試験番号34及び35では、仕上げ焼鈍工程での最高到達温度T1が900℃を超えた。そのため、F3が $W_{5/1000}$ を超えた。その結果、十分な降伏強度及び十分な破断伸びが得られなかった。

[0203] 試験番号36及び37では、仕上げ焼鈍工程中の張力TEがFA未満であった。そのため、F3が式(3)を満たさず、F4が式(4)を満たさなかった。その結果、十分な降伏強度が得られなかった。さらに、歪取り焼鈍後の平均磁束密度 B_{1ave} が0.70T未満であり、十分な磁束密度が得られなかった。

[0204] 試験番号38及び39では、仕上げ焼鈍工程中の張力TEが1.0kgf/mm²を超えた。そのため、F3が式(3)を満たさず、F4が式(4)を満たさなかった。その結果、十分な降伏強度が得られなかった。さらに、歪取り焼鈍後の平均磁束密度 B_{1ave} が0.70T未満であり、十分な磁束密度が得られなかった。

[0205] 試験番号40及び41では、RSが式(B)を満たさなかった。そのため、F3が式(3)を満たさず、F4が式(4)を満たさなかった。その結果、十分な降伏強度が得られなかった。さらに、歪取り焼鈍後の平均磁束密度 B_{1ave} が0.70T未満であり、十分な磁束密度が得られなかった。

実施例 2

[0206] 表1の各試験番号の無方向性電磁鋼板を用いて、図1Aに示す形状のロータコア素材及び図3に示す形状のステータコア素材を製造した。具体的には、各試験番号の無方向性電磁鋼板に対して、打ち抜き加工を実施して、ロータコア素材を製造した。また、各試験番号の無方向性電磁鋼板に対して、打ち抜き加工を実施して、ステータコア素材の中間材を製造した。中間材に対して、800℃で1時間の歪取り焼鈍を実施し、ステータコア素材を製造した。

[0207] 各試験番号のロータコア素材及びステータコア素材に対して、次の評価試験を実施した。

(試験 7) 磁気特性評価試験

(試験 8) カシメ部の傾斜部の板厚及び平坦部の板厚測定試験

(試験 9) カシメ部の傾斜部の硬さ及び平坦部の硬さ測定試験

以下、試験 7 ～試験 9 について説明する。

[0208] [(試験 7) 磁気特性評価試験]

上述の [ロータコア素材の磁気特性の測定方法] に記載の方法に基づいて、各試験番号のロータコア素材の鉄損 $W_{5/1000}$ ($W/k g$) を求めた。なお、試験片のサイズは $16\text{ mm} \times \text{幅 } 8\text{ mm} \times \text{板厚}$ とした。得られた鉄損 $W_{5/1000}$ ($W/k g$) を表 4 A に示す。

さらに、[ステータコア素材の磁気特性の測定方法] に記載の方法に基づいて、各試験番号のステータコア素材の鉄損 $W_{10/400}$ ($W/k g$) を求めた。なお、試験片のサイズは $16\text{ mm} \times \text{幅 } 8\text{ mm} \times \text{板厚}$ とした。得られた鉄損 $W_{10/400}$ ($W/k g$) を表 4 B に示す。

[0209]

[表4A]

TABLE4A

試験 番号	ロータコア						
	鉄損 W _{5/1000} (W/kg)	平坦部 板厚PT ₁₄ (mm)	傾斜部 板厚PT ₁₂₁ (mm)	H ₁₄ (HV)	H ₁₄ +40	H ₁₂₁ (HV)	H ₁₂₁ ≥ H ₁₄ +40
1	27.5	0.250	0.210	195	235	256	T
2	25.9	0.250	0.200	205	245	281	T
3	19.4	0.250	0.190	212	252	303	T
4	24.9	0.250	0.210	194	234	255	T
5	27.9	0.270	0.220	193	233	264	T
6	22.4	0.300	0.250	212	252	275	T
7	18.8	0.270	0.220	225	265	295	T
8	31.5	0.250	0.210	186	226	247	T
9	23.1	0.250	0.200	208	248	284	T
10	23.8	0.250	0.210	210	250	271	T
11	28.4	0.270	0.210	193	233	277	T
12	20.2	0.200	0.160	218	258	294	T
13	19.5	0.150	0.120	215	255	291	T
14	19.4	0.150	0.120	213	253	289	T
15	25.6	0.250	0.200	205	245	281	T
16	24.4	0.250	0.210	203	243	263	T
17	25.2	0.200	0.160	209	249	285	T
18	24.4	0.270	0.210	208	248	292	T
19	24.8	0.250	0.210	210	250	270	T
20	26.4	0.270	0.230	203	243	259	T
21	23.8	0.250	0.200	202	242	278	T
22	24.3	0.200	0.150	205	245	300	T
23	25.2	0.250	0.200	209	249	285	T
24	26.1	0.270	0.220	211	251	281	T
25	24.7	0.250	0.210	202	242	263	T
26	21.4	0.250	0.200	209	249	285	T
27	23.4	0.300	0.240	221	261	297	T
28	24.9	0.300	0.250	211	251	274	T
29	22.1	0.250	0.210	224	264	285	T
30	31.2	0.250	0.210	182	222	243	T
31	31.0	0.250	0.200	187	227	263	T
32	23.8	0.250	0.210	201	241	262	T
33	25.2	0.250	0.200	232	272	308	T
34	22.8	0.250	0.200	184	224	260	T
35	22.5	0.250	0.210	181	221	242	T
36	18.2	0.250	0.200	197	237	273	T
37	20.4	0.250	0.210	187	227	247	T
38	21.8	0.250	0.210	198	238	259	T
39	16.7	0.250	0.210	208	248	269	T
40	18.5	0.250	0.210	205	245	266	T
41	17.5	0.250	0.210	204	244	265	T

[0210]

[表4B]

TABLE4B

試験 番号	ステータコア						備考
	鉄損 $W_{10/400}$ (W/kg)	平坦部 板厚 PT_{24} (mm)	傾斜部 板厚 PT_{221} (mm)	H_{24} (HV)	H_{221} (HV)	$H_{221} \leq H_{24} \pm 10$	
1	11.9	0.250	0.210	188	187	T	本発明例
2	11.0	0.250	0.200	199	201	T	本発明例
3	10.6	0.250	0.190	208	207	T	本発明例
4	11.8	0.250	0.210	187	187	T	本発明例
5	12.3	0.270	0.220	187	188	T	本発明例
6	11.1	0.300	0.250	208	208	T	本発明例
7	10.4	0.270	0.220	222	221	T	本発明例
8	11.4	0.250	0.210	177	179	T	本発明例
9	11.0	0.250	0.200	203	205	T	本発明例
10	11.5	0.250	0.210	205	206	T	本発明例
11	12.3	0.270	0.210	185	184	T	本発明例
12	8.9	0.200	0.160	213	213	T	本発明例
13	7.8	0.150	0.120	209	209	T	本発明例
14	7.8	0.150	0.120	207	206	T	本発明例
15	10.7	0.250	0.200	199	200	T	本発明例
16	11.7	0.250	0.210	196	198	T	本発明例
17	8.4	0.200	0.160	203	205	T	本発明例
18	12.0	0.270	0.210	202	200	T	本発明例
19	10.4	0.250	0.210	204	203	T	本発明例
20	11.4	0.270	0.230	197	197	T	本発明例
21	11.4	0.250	0.200	196	196	T	本発明例
22	9.4	0.200	0.150	199	199	T	本発明例
23	10.5	0.250	0.200	203	202	T	本発明例
24	11.3	0.270	0.220	205	206	T	本発明例
25	11.9	0.250	0.210	196	197	T	本発明例
26	10.1	0.250	0.200	204	203	T	本発明例
27	11.7	0.300	0.240	216	216	T	本発明例
28	12.5	0.300	0.250	205	204	T	本発明例
29	10.5	0.250	0.210	219	219	T	本発明例
30	15.0	0.250	0.210	172	171	T	比較例
31	14.9	0.250	0.200	177	177	T	比較例
32	11.1	0.250	0.210	194	195	T	比較例
33	9.8	0.250	0.200	224	223	T	比較例
34	11.0	0.250	0.200	182	180	T	比較例
35	10.6	0.250	0.210	179	181	T	比較例
36	13.3	0.250	0.200	191	191	T	比較例
37	15.8	0.250	0.210	178	180	T	比較例
38	14.6	0.250	0.210	189	190	T	比較例
39	13.5	0.250	0.210	203	202	T	比較例
40	13.7	0.250	0.210	199	200	T	比較例
41	14.2	0.250	0.210	199	198	T	比較例

[0211] [(試験8) カシメ部の傾斜部の板厚及び平坦部の板厚測定試験]

上述の〔平坦部14の板厚 PT_{14} 及び傾斜部121の板厚 PT_{121} の測定方法〕に記載の方法に基づいて、ロータコア素材の平坦部14の板厚 PT_{14} 及

び傾斜部 1 2 1 の板厚 $P T_{121}$ を求めた。さらに、[平坦部 2 4 の板厚 $P T_{24}$ 及び傾斜部 2 2 1 の板厚 $P T_{221}$ の測定方法] に記載の方法に基づいて、ステータコア素材の平坦部 2 4 の板厚 $P T_{24}$ 及び傾斜部 2 2 1 の板厚 $P T_{221}$ を求めた。得られた板厚 $P T_{14}$ (mm)、板厚 $P T_{121}$ (mm)、板厚 $P T_{24}$ (mm) 及び板厚 $P T_{221}$ (mm) を表 4 (表 4 A 及び表 4 B) に示す。

[0212] [(試験 9) カシメ部の傾斜部の硬さ及び平坦部の硬さ測定試験]

上述の[平坦部 1 4 のビッカース硬さ H_{14} 及び傾斜部 1 2 1 のビッカース硬さ H_{121} の測定方法] に記載の方法に基づいて、ロータコア素材の平坦部 1 4 のビッカース硬さ H_{14} 及び傾斜部 1 2 1 のビッカース硬さ H_{121} を求めた。さらに、[平坦部 2 4 のビッカース硬さ H_{24} 及び傾斜部 2 2 1 のビッカース硬さ H_{221} の測定方法] に記載の方法に基づいて、ステータコア素材の平坦部 2 4 のビッカース硬さ H_{24} 及び傾斜部 2 2 1 のビッカース硬さ H_{221} を求めた。得られたビッカース硬さ H_{14} (HV)、ビッカース硬さ H_{121} (HV)、ビッカース硬さ H_{24} (HV)、ビッカース硬さ H_{221} (HV) を表 4 に示す。

[0213] [評価結果]

表 4 (表 4 A 及び表 4 B) を参照して、本発明例である試験番号 1 ~ 2 9 のロータコア素材では、傾斜部の板厚が平坦部の板厚の 8 5 % 以下であり、平坦部のビッカース硬さ H_{14} が 1 8 0 HV 以上であり、傾斜部のビッカース硬さ H_{121} が $H_{14} + 4 0$ HV 以上であった。また、本発明例である試験番号 1 ~ 2 9 のステータコア素材では、傾斜部の板厚が平坦部の板厚の 8 5 % 以下であり、平坦部のビッカース硬さ H_{24} が 1 7 5 HV 以上であり、傾斜部のビッカース硬さ H_{221} が前記ビッカース硬さ $H_{24} \pm 1 0$ HV 以下であった。

[0214] 以上、本開示の実施の形態を説明した。しかしながら、上述した実施の形態は本開示を実施するための例示に過ぎない。したがって、本開示は上述した実施の形態に限定されることなく、その趣旨を逸脱しない範囲内で上述した実施の形態を適宜変更して実施することができる。

請求の範囲

[請求項1] 無方向性電磁鋼板であって、
化学組成が、質量%で、
S i : 2. 0 ~ 4. 0 %、
M n : 0. 1 ~ 1. 5 %、
P : 0. 1 5 %以下、
S : 0. 0 0 3 0 %以下、
A l : 0. 1 ~ 2. 0 %、
C : 0. 0 0 5 0 %以下、
N : 0. 0 0 5 0 %以下、
O : 0. 0 5 0 0 %以下、
C r : 0 ~ 0. 5 0 %、
T i : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、
M o : 0 ~ 0. 1 0 0 %、
N i : 0 ~ 0. 5 0 %、
C u : 0 ~ 0. 5 0 %、
S n : 0 ~ 0. 1 0 0 %、
S b : 0 ~ 0. 1 0 0 %、
C a : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、
M g : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、
希土類元素 : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
B : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、
Z n : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、
G e : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、
A s : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、
C o : 0 ~ 0. 0 5 0 0 %、
V : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、
S e : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

Zr : 0 ~ 0.0030%、
Nb : 0 ~ 0.0030%、
Pb : 0 ~ 0.0030%、及び、
Ga : 0 ~ 0.0030%、を含有し、
残部はFe及び不純物からなり、
板厚tが0.30mm以下であり、
式(1)で定義されるF1が10.0以上であり、
式(2)で定義されるF2が8.5以下であり、
式(3)で定義されるF3が、周波数1000Hz及び磁束密度0.5Tにおける鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、
式(4)で定義されるF4が、前記無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上である、
無方向性電磁鋼板。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、tには、mm単位での前記板厚が代入される。

[請求項2]

請求項1に記載の無方向性電磁鋼板であって、
前記化学組成は、

Cr : 0.01 ~ 0.50%、

Ti : 0.0001 ~ 0.0030%、

Mo : 0.001 ~ 0.100%、

Ni : 0.01 ~ 0.50%、

Cu : 0.01 ~ 0.50%、
Sn : 0.001 ~ 0.100%、
Sb : 0.001 ~ 0.100%、
Ca : 0.0001 ~ 0.0050%、
Mg : 0.0001 ~ 0.0030%、
希土類元素 : 0.0001 ~ 0.0100%、
B : 0.0001 ~ 0.0030%、
Zn : 0.0001 ~ 0.0030%、
Ge : 0.0001 ~ 0.0030%、
As : 0.0001 ~ 0.0100%、
Co : 0.0001 ~ 0.0500%、
V : 0.0001 ~ 0.0030%、
Se : 0.0001 ~ 0.0030%、
Zr : 0.0001 ~ 0.0030%、
Nb : 0.0001 ~ 0.0030%、
Pb : 0.0001 ~ 0.0030%、及び、
Ga : 0.0001 ~ 0.0030%、
からなる群から選択される1種以上を含有する、
無方向性電磁鋼板。

[請求項3]

請求項1に記載の無方向性電磁鋼板であって、
降伏応力が450MPa以上であり、
破断伸びが20%以上である、
無方向性電磁鋼板。

[請求項4]

請求項1に記載の無方向性電磁鋼板であって、
圧延方向を基準 0° としたときの 22.5° ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_{50} を、 $B_{50}(0^{\circ})$ 、 $B_{50}(22.5^{\circ})$ 、 $B_{50}(45^{\circ})$ 、 $B_{50}(67.5^{\circ})$ 及び $B_{50}(90^{\circ})$ としたとき、式(5)で定義される平均磁束密度 B_{50ave} が1.65T以上である、

無方向性電磁鋼板。

$$B_{50\text{ave}} = (B_{50}(0^\circ) + 2 \times B_{50}(22.5^\circ) + 2 \times B_{50}(45^\circ) + 2 \times B_{50}(67.5^\circ) + B_{50}(90^\circ)) / 8 \quad (5)$$

[請求項5]

請求項1に記載の無方向性電磁鋼板であって、

前記無方向性電磁鋼板を800℃で1時間熱処理したとき、

鉄損 $W_{10/400}$ はF4以下であり、

圧延方向を基準 0° としたときの 22.5° ピッチでの各角度の方向の磁束密度 B_1 を、 $B_1(0^\circ)$ 、 $B_1(22.5^\circ)$ 、 $B_1(45^\circ)$ 、 $B_1(67.5^\circ)$ 及び $B_1(90^\circ)$ としたとき、式(6)で定義される平均磁束密度 $B_{1\text{ave}}$ が0.70T以上であり、

磁束密度 B_{500} の最大値の方向を基準 0° としたときの 22.5° ピッチでの各角度の方向の前記磁束密度 B_{500} を、 $B_{500}(0^\circ)$ 、 $B_{500}(22.5^\circ)$ 、 $B_{500}(45^\circ)$ 、 $B_{500}(67.5^\circ)$ 及び $B_{500}(90^\circ)$ としたとき、式(7)で定義される平均磁束密度 $B_{500\text{ave}}$ が1.98T以上である、

無方向性電磁鋼板。

$$B_{1\text{ave}} = (B_1(0^\circ) + 2 \times B_1(22.5^\circ) + 2 \times B_1(45^\circ) + 2 \times B_1(67.5^\circ) + B_1(90^\circ)) / 8 \quad (6)$$

$$B_{500\text{ave}} = (B_{500}(0^\circ) + 2 \times B_{500}(22.5^\circ) + 2 \times B_{500}(45^\circ) + 2 \times B_{500}(67.5^\circ) + B_{500}(90^\circ)) / 8 \quad (7)$$

[請求項6]

請求項1に記載の無方向性電磁鋼板であって、

20℃での熱伝導率が20W/mK以上であり、

150℃での前記熱伝導率が23W/mK以上である、

無方向性電磁鋼板。

[請求項7]

積層された複数のロータコア素材を備え、

前記ロータコア素材は板状であり、

前記ロータコア素材は、
化学組成が、質量%で、
Si : 2.0 ~ 4.0%、
Mn : 0.1 ~ 1.5%、
P : 0.15%以下、
S : 0.0030%以下、
Al : 0.1 ~ 2.0%、
C : 0.0050%以下、
N : 0.0050%以下、
O : 0.0500%以下、
Cr : 0 ~ 0.50%、
Ti : 0 ~ 0.0030%、
Mo : 0 ~ 0.100%、
Ni : 0 ~ 0.50%、
Cu : 0 ~ 0.50%、
Sn : 0 ~ 0.100%、
Sb : 0 ~ 0.100%、
Ca : 0 ~ 0.0050%、
Mg : 0 ~ 0.0030%、
希土類元素 : 0 ~ 0.0100%、
B : 0 ~ 0.0030%、
Zn : 0 ~ 0.0030%、
Ge : 0 ~ 0.0030%、
As : 0 ~ 0.0100%、
Co : 0 ~ 0.0500%、
V : 0 ~ 0.0030%、
Se : 0 ~ 0.0030%、
Zr : 0 ~ 0.0030%、

Nb : 0 ~ 0.0030%、
Pb : 0 ~ 0.0030%、及び、
Ga : 0 ~ 0.0030%、を含有し、
残部はFe及び不純物からなり、
板厚tが0.30mm以下であり、
式(1)で定義されるF1が10.0以上であり、
式(2)で定義されるF2が8.5以下であり、
式(3)で定義されるF3が、周波数1000Hz及び磁束密度0.5Tにおける鉄損 $W_{5/1000}$ 以下であり、
式(4)で定義されるF4が、前記ロータコア素材を800℃で1時間熱処理したときの周波数400Hz及び磁束密度1.0Tにおける鉄損 $W_{10/400}$ 以上である、

ロータコア。

$$F1 = 4Si + 3Al + 2Mn \quad (1)$$

$$F2 = 2Si + 3Al + Mn \quad (2)$$

$$F3 = 45 - 12Si - 5Al - 2Mn + 1000 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (3)$$

$$F4 = 4 + 800 \times t / (5 + 6Si + 5Al + 3Mn) \quad (4)$$

ここで、式(1)～式(4)中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、tには、mm単位での前記板厚が代入される。

[請求項8]

請求項7に記載のロータコアであって、
前記ロータコア素材はさらに、
カシメ部と、
平坦な領域である平坦部と、を含み、
前記カシメ部は、
前記平坦部に対して傾斜して形成されている傾斜部を含み、
前記傾斜部の板厚は、前記平坦部の板厚の85%以下である、

ロータコア。

[請求項9]

請求項8に記載のロータコアであって、

前記ロータコア素材の中心軸を含む断面において、

前記平坦部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{14} は180HV以上であり、

前記傾斜部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{121} は $H_{14} + 40$ HV以上である、

ロータコア。

[請求項10]

互いに積層された複数のステータコア素材を備え、

前記ステータコア素材は円環板状であり、

前記ステータコア素材は、前記ステータコア素材の周方向に隙間を設けて配列され、前記ステータコア素材の径方向に延びる複数のティース部を含み、

前記ステータコア素材は、

化学組成が、質量%で、

Si : 2.0 ~ 4.0 %、

Mn : 0.1 ~ 1.5 %、

P : 0.15 %以下、

S : 0.0030 %以下、

Al : 0.1 ~ 2.0 %、

C : 0.0050 %以下、

N : 0.0050 %以下、

O : 0.0500 %以下、

Cr : 0 ~ 0.50 %、

Ti : 0 ~ 0.0030 %、

Mo : 0 ~ 0.100 %、

Ni : 0 ~ 0.50 %、

Cu : 0 ~ 0.50 %、

S n : 0 ~ 0. 1 0 0 %、

S b : 0 ~ 0. 1 0 0 %、

C a : 0 ~ 0. 0 0 5 0 %、

M g : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

希土類元素 : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、

B : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

Z n : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

G e : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

A s : 0 ~ 0. 0 1 0 0 %、

C o : 0 ~ 0. 0 5 0 0 %、

V : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

S e : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

Z r : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

N b : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、

P b : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、及び、

G a : 0 ~ 0. 0 0 3 0 %、を含有し、

残部は F e 及び不純物からなり、

板厚 t が 0. 3 0 mm 以下であり、

式 (1) で定義される $F 1$ が 1 0. 0 以上であり、

式 (2) で定義される $F 2$ が 8. 5 以下であり、

式 (4) で定義される $F 4$ が、周波数 4 0 0 H z 及び磁束密度 1 .

0 T における鉄損 $W_{10/400}$ 以上である、

ステータコア。

$$F 1 = 4 S i + 3 A l + 2 M n \quad (1)$$

$$F 2 = 2 S i + 3 A l + M n \quad (2)$$

$$F 4 = 4 + 8 0 0 \times t / (5 + 6 S i + 5 A l + 3 M n) \quad (4)$$

ここで、式 (1)、式 (2) 及び式 (4) 中の各元素記号には、対応する元素の質量%での含有量が代入され、 t には、mm 単位での前

記板厚が代入される。

- [請求項11] 請求項 10 に記載のステータコアであって、
前記ステータコア素材はさらに、
カシメ部と、
平坦な領域である平坦部と、を含み、
前記カシメ部は、
前記平坦部に対して傾斜して形成されている傾斜部を含み、
前記傾斜部の板厚は、前記平坦部の板厚の 85 % 以下である、
ステータコア。
- [請求項12] 請求項 11 に記載のステータコアであって、
前記ステータコア素材の中心軸を含む断面において、
前記平坦部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{24} は、175 HV 以上であり、
前記傾斜部の板厚中央位置でのビッカース硬さ H_{221} は前記ビッカース硬さ $H_{24} \pm 10$ HV 以下である、
ステータコア。
- [請求項13] 請求項 7 ～請求項 9 のいずれか 1 項に記載のロータコアと、
請求項 10 ～請求項 12 のいずれか 1 項に記載のステータコアとを
備える、
モータ。