

明 細 書

発明の名称：無方向性電磁鋼板

技術分野

[0001] 本発明は、無方向性電磁鋼板、特に板厚方向にS i 濃度勾配を有する無方向性電磁鋼板に関する。

背景技術

[0002] 例えば、ドローン用モータやサーバ用ファンモータは、小型化・軽量化・高効率化の観点より400Hz～1kHzといった高周波域での駆動が行われるようになってきている。このようなモータのコア材として使用される無方向性電磁鋼板には高周波鉄損が低く、かつ磁束密度の高い特性が要望されている。

[0003] 高周波鉄損を低減するためには固有抵抗の増大が効果的であるため、従来は高S i 鋼の開発が行われている。しかし、S i は非磁性元素であるため、磁束密度、ならびに飽和磁化が低下するという問題があった。

[0004] 高周波鉄損の低減と高磁束密度を両立する手法として、板厚方向のS i 濃度勾配を制御する、いわゆるS i 傾斜磁性材料が開発されている。例えば、特許文献1には、板厚方向にS i の濃度勾配を有し、鋼板表面のS i 濃度が鋼板の板厚中心部のS i 濃度よりも高く、S i 濃度5～8%の部分が、鋼板の両表面から板厚深さ方向に板厚の10%以上であって、かつ板厚中心部のS i 濃度が3.4%以上である電磁鋼板が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特開平11-293422号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかし、板厚方向にS i 濃度勾配を付与したのみの材料をドローンや掃除機モータ等（例えば、周波数：400Hz～1kHz、磁束密度：0.8～2.0

T) の鉄心材料として使用すると、ヒステリシス損が大きく、かつ磁束密度が低くなるため、鉄損および銅損が十分に低下しない。そこで、本発明は、S i 傾斜磁性材料における低鉄損化および高磁束密度化を課題とするものである。

課題を解決するための手段

[0007] 発明者らは、上記の課題の解決に向け低鉄損と高磁束密度を両立すべく、S i 傾斜材の磁気特性におよぼす成分の影響に着目して検討を重ねた。その結果、S i 傾斜材の表層部と内層部のS i 濃度差を適切にし、さらにC o と、S n およびS b から選ばれる1種または2種とを添加することにより、高周波低鉄損かつ高磁束密度を両立可能であることを見出した。

[0008] 本発明の要旨は、以下の通りである。

1. 内層部と、前記内層部の両側に位置する表層部との積層構造を有する複層型電磁鋼板であって、

前記表層部は、質量%で、S i : 4.0~7.0%およびC : 0.0010~0.0100%、C o : 0.0010%~0.0100%を含み、さらにS n : 0.010~0.100%およびS b : 0.010~0.100%のいずれか1種または2種を含み、残部がF e および不可避不純物である成分組成を有し、

前記内層部は、質量%で、S i : 3.5~6.5%およびC : 0.0010%~0.0100%、C o : 0.0010%~0.0100%を含み、さらにS n : 0.010~0.100%およびS b : 0.010~0.100%のいずれか1種または2種を含み、残部がF e および不可避不純物である成分組成を有し、

前記表層部におけるS i 含有量 : $[S i]_1$ と前記内層部におけるS i 含有量 : $[S i]_0$ との差 ($[S i]_1 - [S i]_0$) として定義される $\Delta S i$ が0.1~0.5質量%であり、

前記電磁鋼板の板厚 : t に対する前記表層部の合計厚さ : t_1 の比率 (t_1/t) が0.04~0.78であり、

磁界の強さ：5000 A/mにおける磁束密度 B_{50} に対する飽和磁化 B_s の比（ B_{50}/B_s ）が0.825以上であり、かつ周波数：800 Hz、最大磁束密度：1.0 Tにおける鉄損： $W_{10/800}$ と前記板厚 t とが下記（1）式を満たす無方向性電磁鋼板。

$$W_{10/800} \leq 13 + 80 \times t \quad \cdots (1)$$

- [0009] 2. 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、P：0.100%以下を含む前記1に記載の無方向性電磁鋼板。
- [0010] 3. 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で0.0100%以下含む前記1または2に記載の無方向性電磁鋼板。
- [0011] 4. 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、Cu、CrおよびNiから選ばれる1種または2種以上を合計で1.00%以下含む前記1から3のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。
- [0012] 5. 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、Ca、MgおよびREMから選ばれる1種または2種以上を合計で0.0200%以下含む前記1から4のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。
- [0013] 6. 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、Znを0.0500%以下含む前記1から5のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。
- [0014] 7. 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、MoおよびWから選ばれる1種または2種を合計で0.0500%以下含む前記1から6のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。
- [0015] 8. 前記複層型電磁鋼板の表面から板厚の1/4の深さの面における方位分布関数の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面において、{100}面集積度の最高強度値が6.

0以上である前記1から7のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

[0016] 9. 前記板厚が0.03～0.20mmである前記1から8のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

発明の効果

[0017] 本発明によれば、低鉄損かつ高磁束密度のSi傾斜磁性材料を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1]表層部と内層部におけるSi含有量の差 ($[Si]_1 - [Si]_0$) として定義される ΔSi (質量%)と、1.0T、800Hzにおける全鉄損： $W_{1.0/800}$ (W/kg)との相関を示すグラフである。

[図2] ΔSi と、磁束密度比 (B_{50}/B_s)との相関を示すグラフである。

[図3]複層比と全鉄損 ($W_{1.0/800}$)との相関を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0019] 発明者らは、上記の課題を解決するために種々の実験を行って本発明を導くに到った。これらの実験の一例について、以下に説明する。無方向性電磁鋼板を、内層部とこれを両側から挟む表層部との間にSi含有量差のある、複層型電磁鋼板とする場合に、表層部と内層部とのSi含有量の差 ΔSi (以下、単に ΔSi とも示す)が磁気特性に与える影響について検討した。すなわち、 ΔSi が異なる複層型電磁鋼板を以下の手順で作製し、その磁気特性を評価した。なお、以下に示す「%」表示は、特に断らない限り「質量%」を示している。

[0020] まず、電磁鋼板の板厚 (全厚) に対する表層部各々の厚さの比率が0.3 (合計で0.6) となるように、内層部用の鋼素材の両面に表層部用の鋼素材を貼り合わせてから、熱間圧延に供した。前記表層部用の鋼素材と内層部用の鋼素材には、いずれも所望の成分組成となるように溶製した、インゴットを用いた。内層部のSi含有量 $[Si]_0$ は4.0%とした。表層部のSi含有量 $[Si]_1$ は4.0%～7.0%の範囲で変化させるようにSi含有量の異なる表層部用の鋼素材を複数用意した。なお、表層部と内層部のいずれ

についても、C含有量を0.0025%、Co含有量を0.0030%、Sn含有量を0.030%とした。表層部および内層部のいずれの成分組成も、残部はFeおよび不可避免的不純物とした。また、表層部の成分組成は、内層部の両側の表層部において同じとした。

[0021] 前記熱間圧延後、 $1000^{\circ}\text{C} \times 30\text{ s}$ の熱延板焼鈍を行い、次いで、冷間圧延により板厚を0.10mmとした。その後、 $1080^{\circ}\text{C} \times 30\text{ s}$ の仕上焼鈍を行って、電磁鋼板を得た。

[0022] 得られた電磁鋼板のそれぞれから、幅30mmおよび長さ180mmの試験片を採取し、エプスタイン試験を行って磁気特性を評価した。前記エプスタイン試験では、試験片の長さ方向が圧延方向（L方向）となるように採取したL方向試験片と、試験片の長さ方向が圧延直角方向（C方向）となるように採取したC方向試験片とを等量用いて測定し、L方向とC方向における磁気特性の平均値で評価した。

[0023] 図1に、表層部と内層部におけるSi含有量の差（ $[\text{Si}]_1 - [\text{Si}]_0$ ）として定義される ΔSi （質量%）と、1.0Tおよび800Hzにおける全鉄損： $W_{10/800}$ （W/kg）との相関を示す。また、図2に、 ΔSi と、磁束密度比（ B_{50}/B_s ）との相関を示す。ここで、前記「磁束密度比」とは、磁界の強さ： 5000 A/m における磁束密度： B_{50} に対する、飽和磁化： B_s の比（ B_{50}/B_s ）を指すものとする。

[0024] 図1に示した結果から分かるように、 ΔSi が0.1質量%以上、0.5質量%以下であれば、鉄損を低く抑えることができる。具体的には、板厚 $t = 0.10\text{ mm}$ の場合、次式（1）

$$W_{10/800} \leq 13 + 80 \times t \quad \cdots (1)$$

に、板厚 $t = 0.10\text{ mm}$ を代入した値である、 21.0 W/kg 以下に鉄損 $W_{10/800}$ を抑えることができる。

[0025] また、図2に示した結果から分かるように、 ΔSi が0.5質量%を超えると、磁束密度比が急激に低下する。これは、次のような理由によると考えられる。すなわち、表層部のSi量が内層部に比べて高い場合、表層部の透

磁率が内層部より高くなる。その結果、磁束が表層部に集中し、渦電流損が低下する。しかし、 ΔS_i が過度に大きいと、それとともなって表層部と内層部との格子定数の差および磁歪の差が大きくなる。その結果、鋼板を磁化した際にかかる応力が増大するため、ヒステリシス損が増加し、中磁場域における磁束密度は低下する。

[0026] 以上の理由により、本発明では表層部における S_i 含有量と前記内層部における S_i 含有量の差($[S_i]_1 - [S_i]_0$)として定義される、 ΔS_i を0.1~0.5質量%とする。好ましくは、 ΔS_i が0.2~0.4質量%である。

[0027] 次に、複層型電磁鋼板の板厚： t に対する、表層部の合計厚さ： t_1 の比率(t_1/t)（以下、「複層比」という場合がある）が磁気特性に与える影響について検討した。すなわち、複層比が異なる電磁鋼板を以下の手順で作製し、その磁気特性を評価した。ここで、「表層部の合計厚さ」とは、内層部の両側に設けられている表層部の厚さの和を指す。

[0028] まず、表層部用の鋼素材と内層部用の鋼素材を、複層比が0.02~0.80となるように貼り合わせ、熱間圧延した。前記表層用の鋼素材と内層部用の鋼素材は、いずれも所望の成分組成となるように溶製した、インゴットを用いた。表層部の S_i 含有量 $[S_i]_1$ は6.3%、内層部の S_i 含有量 $[S_i]_0$ は6.0%とした。また、表層部および内層部のいずれにおいても、C:0.0030%、Co含有量:0.0015%、Sn含有量:0.050%とし、残部はFeおよび不可避免的不純物とした。また、表層部の成分組成は、内層部の両側で同じとした。

[0029] 前記熱間圧延後、980℃×30sの熱延板焼鈍を行い、次いで、冷間圧延により板厚を0.08mmとした。その後、1100℃×30sの仕上焼鈍を行って、電磁鋼板を得た。

[0030] 図3に、複層比と全鉄損($W_{10/800}$)との相関を示す。この結果より、複層比が0.04~0.78の場合に鉄損が大きく低下していることがわかる。具体的には板厚 $t = 0.08\text{ mm}$ の場合、次式(1)

$$W_{10/800} \leq 13 + 80 \times t \cdots (1)$$

に、板厚 $t = 0.08 \text{ mm}$ を代入した値である、 19.4 W/kg 以下に鉄損 $W_{10/800}$ を抑えることができる。この鉄損の低下は、以下の理由によると考えられる。まず、複層比が 0.04 未満である場合、高抵抗である表層部の割合が低いため、表層部に集中する渦電流を効果的に低減することができない。一方、複層比が 0.78 超である場合には表層部と内層部の透磁率差が小さくなるため、内層部にまで磁束が浸透し、内層部からも渦電流損が発生する。したがって、複層比を $0.04 \sim 0.78$ とすることによって鉄損を低減できる。以上の理由から、本発明では複層比 (t_1/t) を $0.04 \sim 0.78$ とする。好ましくは、 t_1/t が $0.10 \sim 0.70$ であり、より好ましくは $0.30 \sim 0.60$ である。

[0031] なお、内層部を挟む一方の表層部の厚さ t_{1-1} と他方の表層部の厚さ t_{1-2} とは、同じであることが好ましいが、必ずしも同じである必要はない。すなわち、 t_{1-1} と t_{1-2} とは 20% 程度（厚い方を 100% としたとき、薄い方が $80 \sim 100\%$ ）の厚み差を有していてもよい。

[0032] [板厚]

なお、上記複層型電磁鋼板の板厚： t は特に限定されず、任意の値とすることができる。しかし、複層型電磁鋼板が薄すぎると、該複層型電磁鋼板の製造における冷間圧延や焼鈍の実施が困難となり、コストアップを招く場合がある。そのため、製造コスト削減の観点からは、 t を 0.03 mm 以上とすることが好ましい。一方、 t を 0.20 mm 以下とすれば、渦電流損をさらに低減し、その結果、全鉄損を一層低下させることができる。そのため、 t は 0.20 mm 以下とすることが好ましい。

[0033] [磁束密度比]

$$B_{50}/B_s : 0.825 \text{ 以上}$$

磁界の強さ： 5000 A/m における磁束密度 B_{50} に対する、飽和磁化 B_s の比 (B_{50}/B_s) を 0.825 以上とする。 B_{50}/B_s を高く (0.825 以上) することにより、小型モータで使用される設計磁束密度領域にお

ける磁化曲線の立ち上がりを良好にすることができる。これより、所定のトルクを得るために必要なモータ電流が少なくなるため、銅損を低減し、モータ効率を改善することができる。

[0034] [鉄損]

本発明においては、周波数：800Hz、最大磁束密度：1.0Tにおける鉄損（全鉄損）： $W_{10/800}$ （W/kg）と、前記板厚： t （mm）とが、下記（1）式を満たす必要がある。

$$W_{10/800} \leq 13 + 80 \times t \quad \dots (1)$$

[0035] 上記（1）式の関係を満たさない場合、モータ効率の低下を招くだけでなく、ステータコアの発熱が100℃を超えてしまい冷却システムが必要となるためである。なお、鉄損は板厚に依存するため、上記（1）式では板厚の影響を考慮して鉄損の上限値を規定した。

[0036] なお、上記（1）式を満足させるには、集合組織制御によりヒステリシス損を低減するとともに、Si濃度勾配および複層比を所定の範囲に制御することで渦電流損を低減する。

[0037] [集合組織]

{100}面集積度の最高強度値が6.0以上

Coを適量添加し、偏析元素であるSn、Sbの少なくとも一つを適量添加することにより、無方向性電磁鋼板における{100}面を増加させることができ、この面内に磁化しやすくなる。また、Pも偏析元素であり、適量添加により、{100}面を増加させる効果が高まる。その結果、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損も低下する。よって、{100}面集積度を6.0以上とすることが好ましい。ここで、{100}面集積度は、無方向性電磁鋼板の表面から板厚の1/4の深さの面における方位分布関数（ODF）の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面における強度と定義する。

[0038] 本発明の成分の規定理由について、以下に説明する。

[成分組成]

まず、前記表層部と内層部の成分組成について説明する。なお、以下の説

明において、各元素の含有量を表す「％」は、特に断らない限り「質量％」を表すものとする。

[0039] [表層部の成分組成]

まず、前記表層部の成分組成について説明する。本発明においては、複層型電磁鋼板の一方の面に設けられた第1の表層部と他方の面に設けられた第2の表層部の両者が、以下に述べる成分組成を有する。一般的には、第1の表層部の成分組成と第2の表層部の成分組成は同一とすればよいが、両者が異なってもよい。また、ここで表層部における元素の含有量とは、各々の表層部における当該元素の平均含有量を指すものとする。

[0040] すなわち、表層部の成分組成は、 $\text{Si} : 4.0 \sim 7.0\%$ および $\text{C} : 0.0010 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{Co} : 0.0010\% \sim 0.0100\%$ を含み、さらに $\text{Sn} : 0.010 \sim 0.100\%$ および $\text{Sb} : 0.010 \sim 0.100\%$ のいずれか1種または2種を含み、残部が Fe および不可避不純物である。

[0041] $\text{Si} : 4.0 \sim 7.0\%$

Si は、鋼板の電気抵抗を高め、渦電流損を低減する作用を有する元素である。表層部の Si 含有量($[\text{Si}]_1$)が 4.0% 未満であると、効果的に渦電流損を低減することができない。そのため、表層部の Si 含有量は 4.0% 以上、好ましくは 4.5% 以上とする。一方、表層部の Si 含有量が 7.0% を超えると、飽和磁化の低下により磁束密度が低下する。そのため、表層部の Si 含有量は 7.0% 以下、好ましくは 6.8% 未満、より好ましくは 6.5% 以下とする。なお、上述したように、表層部における Si 含有量が $4.0 \sim 7.0\%$ であるとは、第1の表層部における平均 Si 含有量が $4.0 \sim 7.0\%$ であり、かつ第2の表層部における平均 Si 含有量が $4.0 \sim 7.0\%$ であることを意味する。第1の表層部における平均 Si 含有量と第2の表層部における平均 Si 含有量とは同じであっても、異なってもよい。以下に示す、他の元素についても同様の定義が適用される。

[0042] $\text{C} : 0.0010 \sim 0.0100\%$

Cは、結晶粒界に偏析して粒界強度を高め材料の加工性を改善する元素である。Cを0.0010%以上添加することにより、材料の伸びが改善する。このため、下限を0.0010%とする。好ましくは、0.0015%以上である。一方、添加量が0.0100%を超えると、磁気時効により鉄損が増加するため、上限を0.0100%とする。好ましくは、0.0060%以下である。

[0043] Co : 0.0010~0.0100%

Coを添加することにより、最終焼鈍後の集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Coを添加する場合に、前記効果を得るためには、Co含有量を0.0010%以上とする。好ましくは、0.0015%以上である。一方、Co含有量が0.0100%を超えると、効果が飽和することに加えて、コストの上昇を招く。そのため、Co含有量は0.0100%以下とする。好ましくは、0.0050%以下である。

[0044] Sn、Sbの1種または2種 : 0.010~0.100%

Sn : 0.010~0.100%

Snを添加することにより、最終焼鈍後の集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Snを添加する場合に、前記効果を得るためには、Sn含有量を0.010%以上とする。好ましくは、0.020%以上である。一方、Sn含有量が0.100%を超えると効果が飽和することに加えて、製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Sn含有量は0.100%以下とする。好ましくは、0.080%以下である。

[0045] Sb : 0.010~0.100%

Snと同様に、Sbを添加することにより、最終焼鈍後の集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Sbを添加する場合に、前記効果を得るためにSb含有量を0.010%以上とする。好ましくは、0.020%以上である。一方、Sb含有

量が0.100%を超えると、効果が飽和することに加えて製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Sb含有量は0.100%以下とする。好ましくは、0.080%以下である。

[0046] さらに、必要に応じて、Pを0.100%以下の範囲にて含有することが好ましい。

P : 0.100%以下

Pは、Sn、Sb、Coと同様に、添加することにより集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Pを添加する場合に、前記効果を得るためには、P含有量を0.010%以上とすることが好ましい。より好ましくは、0.030%以上である。一方、P含有量が0.100%を超えると、効果が飽和することに加えて、製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、P含有量は0.100%以下とすることが好ましい。より好ましくは、0.070%以下である。

[0047] 同様に、必要に応じて、以下の元素のいずれか1種以上を含有することができる。

GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で：0.0100%以下

GeおよびGaは、集合組織を改善する効果がある。GeおよびGaのいずれか一方または両方を添加する場合に、前記効果を得るためには、GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で0.0005%以上とすることが好ましい。より好ましくは、0.0020%以上である。一方、GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で0.0100%を超えて添加しても、上記効果が飽和し、合金コストが上昇するだけである。よって、GeおよびGaのいずれか一方または両方を添加する場合は、0.0100%以下とする。より好ましくは、0.0050%以下である。

[0048] Cu、CrおよびNiから選ばれる1種または2種以上を合計で：1.00%以下

Cu、CrおよびNiは、比抵抗を増大し、鉄損低減に有利である。Cu

， C r および N i のいずれか少なくとも 1 種を添加する場合に、前記効果を得るためには、 C u、 C r および N i から選ばれる 1 種または 2 種以上を合計で、 0. 0 3 % 以上とすることが好ましい。一方、過度の添加は磁束密度の低下を招くために、 C u、 C r および N i のいずれか少なくとも 1 種を添加する場合は、 1. 0 0 % 以下とする。

[0049] C a、 M g および R E M から選ばれる 1 種または 2 種以上を合計で： 0. 0 2 0 0 % 以下

C a、 M g および R E M は、安定な硫化物を形成し、粒成長性を改善する効果がある。上記効果を得るためには、 C a、 M g および R E M から選ばれる 1 種または 2 種以上を合計で 0. 0 0 1 0 % 以上添加することが好ましい。一方、 C a、 M g および R E M から選ばれる 1 種または 2 種以上を合計で 0. 0 2 0 0 % を超えて添加しても、上記効果は飽和してしまう。よって、 C a、 M g および R E M のいずれか少なくとも 1 種を添加する場合は、合計で 0. 0 2 0 0 % 以下とする。

[0050] Z n： 0. 0 5 0 0 % 以下

Z n は、仕上焼鈍時の窒化を抑制する効果がある。この効果を得るために Z n を添加する場合は、 0. 0 0 1 0 % 以上含有させることが好ましい。より好ましくは、 0. 0 0 2 0 % 以上である。一方、 Z n を 0. 0 5 0 0 % 超で添加すると、硫化物を形成して鉄損を増加させるため、 Z n を添加する場合は 0. 0 5 0 0 % 以下とする。より好ましくは、 0. 0 1 0 0 % 以下である。

[0051] M o および W から選ばれる 1 種または 2 種を合計で： 0. 0 5 0 0 % 以下

M o および W は、いずれも無方向性電磁鋼板の表面欠陥（ヘゲ）を抑制するのに有効な元素である。本発明に従う無方向性電磁鋼板は、高合金鋼で表面が酸化され易いため、表面割れに起因するヘゲの発生率が高いが、高温強度を高める元素である M o および W の一方または両方を微量添加することによって、上記割れを抑制することができる。この効果は、 M o および W の 1 種または 2 種以上の合計で 0. 0 0 1 0 % を下回ると十分に得ることが難し

くなるため、M_oおよびWの一方または両方を添加する場合は、0.0010%以上とすることが好ましい。一方、M_oおよびWの一方または両方を0.0500%超で添加しても、上記効果が飽和し、合金コストが上昇するだけである。よって、M_oおよびWの一方または両方を添加する場合は、0.0500%以下とする。

[0052] 本発明の一実施形態では、前記表層部が、上記元素を含み、残部がFeおよび不可避不純物からなる成分組成を有する。

なお、前記不可避的不純物として電磁鋼板に含まれうる元素の例としては、Alが挙げられる。Al含有量を0.10%以下に抑制すれば、磁束密度をさらに向上させることができる。そのため、Al含有量は0.10%以下に抑制することが好ましい。

[0053] [内層部の成分組成]

次に、内層部の成分組成について説明する。ここで、内層部における元素の含有量とは、内層部における当該元素の平均含有量を指すものとする。

すなわち、内層部の成分組成は、Si:3.5~6.5%およびC:0.0010%~0.0100%、Co:0.0010%~0.0100%を含み、さらにSn:0.010~0.100%およびSb:0.010~0.100%のいずれか1種または2種を含み、残部がFeおよび不可避不純物である。

[0054] Si:3.5~6.5%

内層部のSi含有量([Si]_o)が3.5%未満であると、高周波鉄損が増加する。そのため、内層部のSi含有量は3.5%以上とする。好ましくは、4.0%以上である。一方、内層部のSi含有量が6.5%を超えると、モータコアの打ち抜き時にコアが割れるといった問題が生じる。そのため、内層部のSi含有量は6.5%以下とする。内層部のSi含有量は、6.0%以下とすることが好ましい。

[0055] C:0.0010~0.0100%

Cは、結晶粒界に偏析して粒界強度を高め材料の加工性を改善する元素で

ある。Cを0.0010%以上添加することにより、材料の伸びが改善する。このため、下限を0.0010%とする。好ましくは、0.0015%以上である。一方、添加量が0.0100%を超えると、磁気時効により鉄損が増加するため上限を0.0100%とする。好ましくは、0.0060%以下である。

[0056] Co: 0.0010~0.0100%

Coを添加することにより、最終焼鈍後の集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Coを添加する場合、前記効果を得るためには、Co含有量を0.0010%以上とする。好ましくは、0.0015%以上である。一方、Co含有量が0.0100%を超えると効果が飽和することに加えて、コストの上昇を招く。そのため、Co含有量は0.0100%以下とする。好ましくは、0.0050%以下である。

[0057] Sn、Sbの1種または2種: 0.010~0.100%

Sn: 0.010~0.100%

Snを添加することにより、最終焼鈍後の集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Snを添加する場合、前記効果を得るためには、Sn含有量を0.010%以上とする。好ましくは、0.020%以下である。一方、Sn含有量が0.100%を超えると効果が飽和することに加えて、製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、Sn含有量は0.100%以下とする。好ましくは、0.080%以下である。

[0058] Sb: 0.010~0.100%

Snと同様に、Sbを添加することにより、最終焼鈍後の集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Sbを添加する場合、前記効果を得るためには、Sb含有量を0.010%以上とする。好ましくは、0.020%以上である。一方、Sb含有量が0.100%を超えると効果が飽和することに加えて、製造性の低下

およびコストの上昇を招く。そのため、S b含有量は0.100%以下とする。好ましくは、0.080%以下である。

[0059] さらに、必要に応じて、Pを0.100%以下の範囲にて含有することができる。

P : 0.100%以下

Pは、S n、S b、C oと同様に、添加することにより集合組織が大きく改善し、磁束密度が向上するとともにヒステリシス損を低下させることができる。Pを添加する場合に、前記効果を得るためには、P含有量を0.010%以上とすることが好ましい。より好ましくは、0.030%以上である。一方、P含有量が0.100%を超えると、効果が飽和することに加えて、製造性の低下およびコストの上昇を招く。そのため、P含有量は0.100%以下とすることが好ましい。より好ましくは、0.070%以下である。

[0060] 同様に、必要に応じて、以下の元素のいずれか1種以上を含有することができる。

GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で：0.0100%以下

GeおよびGaは、集合組織を改善する効果がある。GeおよびGaのいずれか一方または両方を添加する場合に、前記効果を得るためには、GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で0.0005%以上とすることが好ましい。より好ましくは、0.0020%以上である。一方、GeおよびGaから選ばれる1種または2種を合計で0.0100%を超えて添加しても、上記効果が飽和し、合金コストが上昇するだけである。よって、GeおよびGaのいずれか一方または両方を添加する場合は、0.0100%以下とする。より好ましくは、0.0050%以下である。

[0061] Cu、CrおよびNiから選ばれる1種または2種以上を合計で：1.00%以下

Cu、CrおよびNiは、比抵抗を増大し、鉄損低減に有利である。Cu、CrおよびNiのいずれか少なくとも1種を添加する場合に、前記効果を

得るためには、Cu、CrおよびNiから選ばれる1種または2種以上を合計で、0.03%以上とすることが好ましい。一方、過度の添加は磁束密度の低下を招くために、Cu、CrおよびNiのいずれか少なくとも1種を添加する場合は、1.00%以下とする。

[0062] Ca、MgおよびREMから選ばれる1種または2種以上を合計で：0.0200%以下

Ca、MgおよびREMは、安定な硫化物を形成し、粒成長性を改善する効果がある。上記効果を得るためには、Ca、MgおよびREMから選ばれる1種または2種以上を合計で0.0010%以上添加することが好ましい。一方、Ca、MgおよびREMから選ばれる1種または2種以上を合計で0.0200%超にて添加しても、上記効果は飽和してしまう。よって、Ca、MgおよびREMのいずれか少なくとも1種を添加する場合は、合計で0.0200%以下とする。

[0063] Zn：0.0500%以下

Znは、仕上焼鈍時の窒化を抑制する効果がある。この効果を得るためにZnを添加する場合は、0.0010%以上含有させることが好ましい。より好ましくは、0.0020%以上である。一方、Znを0.0500%超で添加すると、硫化物を形成して鉄損を増加させるため、Znを添加する場合は0.0500%以下とする。より好ましくは、0.0100%以下である。

[0064] MoおよびWから選ばれる1種または2種を合計で：0.0500%以下

MoおよびWは、いずれも無方向性電磁鋼板の表面欠陥（ヘゲ）を抑制するのに有効な元素である。本発明に従う無方向性電磁鋼板は、高合金鋼で表面が酸化され易いため、表面割れに起因するヘゲの発生率が高いが、高温強度を高める元素であるMoおよびWの一方または両方を微量添加することによって、上記割れを抑制することができる。この効果は、MoおよびWの1種または2種以上の合計で0.0010%を下回ると十分に得ることが難しくなるため、MoおよびWの一方または両方を添加する場合は、0.001

0%以上とすることが好ましい。一方、MoおよびWの一方または両方を0.0500%超で添加しても、上記効果が飽和し、合金コストが上昇するだけである。よって、MoおよびWの一方または両方を添加する場合は、0.0500%以下とする。

[0065] [製造方法]

本発明の電磁鋼板の製造方法は、特に限定されることなく、任意の方法で製造することができる。製造方法の一例としては、Si含有量の異なる鋼素材をクラッドする方法が挙げられる。前記鋼素材の成分組成は、例えば、成分の異なる材料を転炉で吹練し、溶鋼を脱ガス処理することによって調整することができる。

[0066] クラッドする方法は特に限定されないが、例えば、上述した成分組成を有する表層部用の鋼スラブ（鋼素材）と内層部用の鋼スラブ（鋼素材）を用意し、最終的な複層比が所望の値となるような厚さで内層部用の鋼スラブの両面に表層部用の鋼スラブを貼り合わせ、圧延すればよい。前記圧延は、例えば、熱間圧延、温間圧延および冷間圧延からなる群より選択される1または2以上とすることができる。一般的には、熱間圧延と、その後の温間圧延の組み合わせ、または熱間圧延と、その後の冷間圧延の組み合わせとすることが好ましい。前記熱間圧延の後には、熱延板焼鈍を行うことが好ましい。また、前記温間圧延および冷間圧延は、中間焼鈍を挟んで2回以上行うこともできる。熱間圧延における仕上温度並びに巻取り温度は特に限定されず、常法に従って決定すればよい。前記圧延の後、仕上焼鈍を行う。

[0067] また、他の製造方法としては、浸珪処理を用いることもできる。浸珪処理を用いる場合は、Si含有量が厚さ方向に一定である鋼板に対して浸珪処理を施すことにより、鋼板両面の表層部のSi含有量を高めることができる。浸珪処理の方法は特に限定されず、任意の方法で行うことができる。例えば、化学気相蒸着法（CVD法）により鋼板表面にSiを堆積させ、その後、熱処理を行ってSiを鋼板の内部へ拡散させる方法を用いることができる。表層部と内層部のSi含有量は、CVD法によるSiの堆積量や、熱処理条

件を調整することによって制御できる。

実施例

[0068] 本発明の効果を確認するために、以下に述べる手順で複層型電磁鋼板を製造し、その磁気特性を評価した。

まず、表1～3に示すNo. 3～No. 27、No. 32、No. 33、No. 36～No. 76では、表1に示す成分組成を有する表層部用と表2に示す成分組成を有する内層部用の2種類の鋼スラブを用意した。次に、前記内層部用の鋼スラブの両面に前記表層部用の鋼スラブを積層し、積層された鋼スラブの外周を溶接した。したがって、表層部の成分組成は内層部を挟んだ両側において同じである。前記鋼スラブの成分組成は、転炉で吹練した後に脱ガス処理を行うことによって調整した。なお、前記成分組成は、最終的に得られる複層型電磁鋼板においても保持されている。

[0069] 次いで、積層された前記鋼スラブを1120℃で1h加熱した後、熱間圧延を板厚2.0mmまで行って熱延鋼板とした。前記熱間圧延における熱延仕上げ温度は800℃とした。前記熱延鋼板を巻取り温度：610℃で巻取り、次いで、940℃×30sの熱延板焼鈍を施した。その後、酸洗および冷間圧延を行い、表3に示す仕上焼鈍温度で焼鈍を行って電磁鋼板を得た。最終的に得られた電磁鋼板の板厚： t と、前記 t に対する前記表層部の厚さ： t_1 の比率（複層比）は表3に示すとおりとした。

[0070] なお、比較のために、クラッドしていない（非クラッド）通常の電磁鋼板を用いて同様の試験を行った（No. 1、2）。これらの比較例の電磁鋼板では、板厚方向で成分が異なる層構造にはなっていない。すなわち、表層部が存在しない。

[0071] また、No. 28、29、30、31、34、35の複層型電磁鋼板は浸珪法により製造した。具体的には、Si含有量：3.7%、板厚0.1mmの冷延鋼板に対して、1200℃で浸珪・拡散処理を行った。鋼板の全板厚におけるSi含有量の平均値を算出し、前記平均値よりもSi濃度が高い部分を表層部、低い部分を内層部とした。表層部のSi含有量は、前記表層部

におけるS i 量の平均値である。

[0072] [表1]

[表1]

No.	表層部														
	[Si] ₁ (%)	C(%)	Co(%)	Sn(%)	Sb(%)	P(%)	Ga(%)	Ge(%)	Cu(%)	Cr(%)	Ni(%)	Zn(%)	Mo(%)	W(%)	Ca(%)
1	3.0(非クラッド)	0.0025	0.0026	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	5.0(非クラッド)	0.0021	0.0019	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	6.4	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	5.5	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	4.9	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	6.0	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	6.0	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	5.9	0.0056	0.0059	-	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	5.0	0.0056	0.0059	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	5.0	0.0056	0.0056	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	5.6	0.0092	0.0094	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	5.7	0.0092	0.0094	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	6.3	0.0028	0.0024	0.080	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	6.3	0.0028	0.0024	0.080	-	0.080	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	6.3	0.0035	0.0015	0.040	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	6.0	0.0150	0.0015	0.040	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	6.6	0.0007	0.0015	0.040	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	4.8	0.0032	0.0130	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	4.5	0.0031	0.0014	0.050	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	5.0	0.0031	0.0014	0.050	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	5.6	0.0039	0.0028	0.030	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	6.5	0.0025	0.0025	0.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	6.5	0.0035	0.0019	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	6.0	0.0038	0.0031	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	5.6	0.0011	0.0043	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	6.4	0.0044	0.0055	0.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	6.4	0.0035	0.0005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	3.5	0.0039	0.0028	0.030	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	6.0	0.0038	0.0011	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	5.6	0.0039	0.0028	-	0.010	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	5.6	0.0039	0.0028	0.010	0.010	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	6.5	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	6.5	0.0035	0.0019	0.030	-	-	0.0008	-	-	-	-	-	-	-	-
43	6.5	0.0035	0.0019	0.030	-	-	0.0045	-	-	-	-	-	-	-	-
44	6.5	0.0035	0.0019	0.030	-	-	-	0.0007	-	-	-	-	-	-	-
45	6.5	0.0035	0.0019	0.030	-	-	-	0.0048	-	-	-	-	-	-	-
46	6.5	0.0035	0.0019	0.030	-	-	0.0012	0.0008	-	-	-	-	-	-	-
47	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-
48	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-	-	-
49	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-
50	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-
51	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-	-
52	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	0.90	-	-	-	-	-
53	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-
54	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-
55	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	0.80	-	-	-	-
56	6.3	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.30	0.10	0.10	-	-	-	-
57	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0015	-	-	-
58	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0045	-	-	-
59	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0210	-	-	-
60	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	0.0029	-	-
61	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	0.0300	-	-
62	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0068	0.0050	-	-
63	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0011	-
64	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0140	-
65	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0360	-
66	6.0	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0024
67	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0040
68	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0180
69	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0008
70	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0025
71	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0086
72	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0007
73	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0034
74	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0091
75	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0019
76	5.6	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0026

[0073]

[表2]

[表2]																		
No.	内層部																	
	[Si] ₀ (%)	C(%)	Co(%)	Sn(%)	Sb(%)	P(%)	Ga(%)	Ge(%)	Cu(%)	Cr(%)	Ni(%)	Zn(%)	Mo(%)	W(%)	Ca(%)	Mg(%)	REM(%)	
1	3.0(非クラッド)	0.0025	0.0016	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	5.0(非クラッド)	0.0021	0.0019	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	6.0	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
4	5.2	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	4.4	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	5.0	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	3.5	0.0035	0.0015	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
8	5.5	0.0056	0.0059	-	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9	4.5	0.0056	0.0059	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	4.5	0.0056	0.0006	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
11	5.3	0.0092	0.0094	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	6.4	0.0092	0.0094	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	6.0	0.0028	0.0024	0.080	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
14	6.0	0.0028	0.0024	0.080	-	0.080	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
15	6.0	0.0035	0.0015	0.040	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	5.7	0.0150	0.0015	0.040	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	6.4	0.0007	0.0015	0.040	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
18	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
19	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
20	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
21	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	4.3	0.0032	0.0130	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	4.0	0.0031	0.0014	0.050	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
25	4.8	0.0031	0.0014	0.050	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
26	5.2	0.0039	0.0028	0.030	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
27	6.4	0.0025	0.0025	0.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
28	6.1	0.0035	0.0019	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
29	5.7	0.0038	0.0031	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
30	5.3	0.0041	0.0043	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
31	6.2	0.0044	0.0055	0.060	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
32	6.0	0.0035	0.0005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
33	3.0	0.0039	0.0028	0.030	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
34	5.7	0.0038	0.0011	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
35	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
36	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
37	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
38	5.2	0.0039	0.0028	-	0.010	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
39	5.2	0.0039	0.0028	0.010	0.010	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
40	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
41	6.2	0.0032	0.0024	0.030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
42	6.1	0.0035	0.0019	0.030	-	-	0.0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
43	6.1	0.0035	0.0019	0.030	-	-	0.0045	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
44	6.1	0.0035	0.0019	0.030	-	-	-	0.0007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
45	6.1	0.0035	0.0019	0.030	-	-	-	0.0048	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
46	6.1	0.0035	0.0019	0.030	-	-	0.0012	0.0008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
47	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	
48	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-	-	-	-	-	
49	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	
50	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	
51	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	0.30	-	-	-	-	-	-	-	
52	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	0.90	-	-	-	-	-	-	-	
53	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	
54	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	
55	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	-	-	0.80	-	-	-	-	-	-	
56	6.0	0.0028	0.0015	-	-	-	-	-	0.30	0.10	0.10	-	-	-	-	-	-	
57	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0015	-	-	-	-	-	
58	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0045	-	-	-	-	-	
59	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0210	-	-	-	-	-	
60	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	0.0029	-	-	-	-	
61	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	0.0300	-	-	-	-	
62	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	0.0068	0.0050	-	-	-	-	
63	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0011	-	-	-	
64	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0140	-	-	-	
65	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0360	-	-	-	
66	5.7	0.0038	0.0012	-	0.040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0024	-	-	
67	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0940	-	-	
68	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0180	-	-	
69	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0008	-	
70	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0025	
71	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0086	
72	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0007	
73	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0034	
74	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0091	
75	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0019	-	0.0008	
76	5.2	0.0039	0.0028	0.010	-	0.010	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0026	0.0014	-	

[0074]

[表3]

[表3]

No.	全板厚t (mm)	ΔSi (%)	複層比 (表層合計厚 t_1 /全板厚t)	仕上焼鈍温 度 (°C)	備考
1	0.10	0.0	—	1000	比較例
2	0.20	0.0	—	1000	比較例
3	0.10	0.4	0.35	1050	発明例
4	0.10	0.3	0.35	1050	発明例
5	0.10	0.5	0.35	1050	発明例
6	0.10	1.0	0.35	1050	比較例
7	0.10	2.5	0.35	1050	比較例
8	0.08	0.4	0.50	1100	発明例
9	0.08	0.5	0.50	1100	比較例
10	0.08	0.5	0.50	1100	比較例
11	0.07	0.3	0.50	1000	発明例
12	0.05	0.3	0.40	1000	発明例
13	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
14	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
15	0.10	0.3	0.35	1050	発明例
16	0.10	0.3	0.35	1050	比較例
17	0.10	0.2	0.35	1050	比較例
18	0.15	0.3	0.03	1000	比較例
19	0.15	0.3	0.15	1000	発明例
20	0.15	0.3	0.40	1000	発明例
21	0.15	0.3	0.65	1000	発明例
22	0.15	0.3	0.80	1000	比較例
23	0.15	0.5	0.65	1000	比較例
24	0.06	0.5	0.40	1050	発明例
25	0.20	0.2	0.40	1050	発明例
26	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
27	0.10	0.1	0.40	1100	発明例
28	0.10	0.4	0.30	1200	発明例
29	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
30	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
31	0.10	0.2	0.30	1200	発明例
32	0.10	0.4	0.35	1050	比較例
33	0.10	0.4	0.40	1050	比較例
34	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
35	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
36	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
37	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
38	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
39	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
40	0.15	0.3	0.05	1000	発明例
41	0.15	0.3	0.75	1000	発明例
42	0.10	0.4	0.30	1200	発明例
43	0.10	0.4	0.30	1200	発明例
44	0.10	0.4	0.30	1200	発明例
45	0.10	0.4	0.30	1200	発明例
46	0.10	0.4	0.30	1200	発明例
47	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
48	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
49	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
50	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
51	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
52	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
53	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
54	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
55	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
56	0.10	0.3	0.30	1050	発明例
57	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
58	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
59	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
60	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
61	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
62	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
63	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
64	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
65	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
66	0.10	0.3	0.30	1200	発明例
67	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
68	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
69	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
70	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
71	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
72	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
73	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
74	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
75	0.10	0.4	0.40	1050	発明例
76	0.10	0.4	0.40	1050	発明例

[0075] (磁気特性)

次いで、得られた電磁鋼板のそれぞれについて、磁気特性を測定した。前記磁気測定は、JIS C 2550-1に準じて、25cm Epstein 枠を用いて行った。前記磁気特性としては、1.0T、800Hzにおける鉄損： $W_{10/800}$ (W/kg)、磁界の強さ：5000A/mにおける磁束密度： B_{50} 、および飽和磁化 B_s を測定した。これらの測定結果を、表4に示す。

[0076]

[表4]

[表4]

No.	13+80×t	$W_{10/1000}$ (W/kg)	B_{50} (T)	飽和磁化 B_s (T)	B_{50}/B_s	[100]面の 最高強度	備考
1	21	23.0	1.67	2.01	0.832	9.3	比較例
2	29	32.0	1.56	1.88	0.830	8.6	比較例
3	21	18.2	1.53	1.81	0.847	9.2	発明例
4	21	18.9	1.59	1.86	0.855	8.8	発明例
5	21	19.2	1.63	1.91	0.855	8.9	発明例
6	21	22.6	1.55	1.86	0.834	7.3	比較例
7	21	24.4	1.61	1.92	0.839	8.2	比較例
8	19	17.2	1.55	1.84	0.845	9.1	発明例
9	19	20.5	1.49	1.90	0.786	2.6	比較例
10	19	20.9	1.50	1.90	0.791	3.1	比較例
11	19	17.4	1.55	1.85	0.837	6.9	本発明
12	17	15.9	1.49	1.78	0.836	8.5	本発明
13	21	17.9	1.53	1.81	0.845	9.8	発明例
14	21	17.5	1.54	1.81	0.851	10.5	発明例
15	21	17.3	1.54	1.81	0.851	10.1	発明例
16	21	23.7	1.52	1.83	0.831	9.8	比較例
17	21	—	—	—	—	—	比較例(製品板に割れ発生)
18	25	28.2	1.52	1.80	0.844	9.4	比較例
19	25	23.1	1.52	1.80	0.844	9.5	発明例
20	25	22.5	1.52	1.80	0.847	9.5	発明例
21	25	22.4	1.51	1.79	0.843	9.5	発明例
22	25	26.9	1.51	1.79	0.844	9.4	比較例
23	25	27.2	1.59	1.90	0.835	9.2	比較例
24	18	16.9	1.64	1.93	0.849	8.4	発明例
25	29	26.4	1.61	1.89	0.853	9.6	発明例
26	21	19.3	1.57	1.86	0.845	9.9	発明例
27	21	16.4	1.52	1.79	0.850	9.7	発明例
28	21	16.4	1.53	1.80	0.849	9.1	発明例
29	21	17.1	1.55	1.83	0.847	9.1	発明例
30	21	17.2	1.56	1.86	0.841	9.1	発明例
31	21	16.8	1.53	1.80	0.850	9.1	発明例
32	21	23.1	1.45	1.81	0.802	2.1	比較例
33	21	26.7	1.65	1.99	0.829	6.8	比較例
34	21	17.5	1.54	1.83	0.842	7.3	発明例
35	21	17.6	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
36	21	18.9	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
37	21	20.1	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
38	21	20.1	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
39	21	19.8	1.55	1.86	0.835	7.9	発明例
40	25	24.7	1.52	1.80	0.844	9.4	発明例
41	25	24.5	1.59	1.90	0.835	9.2	発明例
42	21	16.2	1.54	1.80	0.855	9.2	発明例
43	21	16.1	1.54	1.80	0.855	9.3	発明例
44	21	16.0	1.54	1.80	0.855	9.4	発明例
45	21	16.2	1.54	1.80	0.855	9.3	発明例
46	21	16.1	1.55	1.80	0.860	9.5	発明例
47	21	18.6	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
48	21	18.4	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
49	21	18.3	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
50	21	18.3	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
51	21	18.2	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
52	21	18.2	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
53	21	18.3	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
54	21	18.1	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
55	21	18.2	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
56	21	18.2	1.50	1.81	0.829	5.2	発明例
57	21	17.4	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
58	21	17.3	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
59	21	17.2	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
60	21	17.3	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
61	21	17.2	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
62	21	17.3	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
63	21	17.1	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
64	21	17.4	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
65	21	17.2	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
66	21	17.3	1.54	1.83	0.842	7.4	発明例
67	21	19.6	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
68	21	19.3	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
69	21	19.4	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
70	21	19.3	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
71	21	19.2	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
72	21	19.4	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
73	21	19.2	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
74	21	19.3	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
75	21	19.4	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例
76	21	19.2	1.54	1.86	0.829	7.4	発明例

[0077] 表4に示した結果から分かるように、本発明の条件を満たす発明例の電磁鋼板は、高周波鉄損が低く、かつ磁束密度が高いという、優れた特性を有している。

産業上の利用可能性

[0078] 本発明の電磁鋼板は、高周波で駆動されるハイブリッド電気自動車、電気自動車、掃除機、高速発電機、エアコンコンプレッサー、工作機械等のモータコアさらには変圧器、リアクトル等のコア材料として、極めて好適に用いることができる。

請求の範囲

- [請求項1] 内層部と、前記内層部の両側に位置する表層部との積層構造を有する複層型電磁鋼板であって、
- 前記表層部は、質量%で、 $\text{Si} : 4.0 \sim 7.0\%$ および $\text{C} : 0.0010 \sim 0.0100\%$ 、 $\text{Co} : 0.0010\% \sim 0.0100\%$ を含み、さらに $\text{Sn} : 0.010 \sim 0.100\%$ および $\text{Sb} : 0.010 \sim 0.100\%$ のいずれか1種およびまたは2種を含み、残部が Fe および不可避不純物である成分組成を有し、
- 前記内層部は、質量%で、 $\text{Si} : 3.5 \sim 6.5\%$ および $\text{C} : 0.0010\% \sim 0.0100\%$ 、 $\text{Co} : 0.0010\% \sim 0.0100\%$ を含み、さらに $\text{Sn} : 0.010 \sim 0.100\%$ および $\text{Sb} : 0.010 \sim 0.100\%$ のいずれか1種または2種を含み、残部が Fe および不可避不純物である成分組成を有し、
- 前記表層部における Si 含有量： $[\text{Si}]_1$ と前記内層部における Si 含有量： $[\text{Si}]_0$ との差 ($[\text{Si}]_1 - [\text{Si}]_0$) として定義される ΔSi が $0.1 \sim 0.5$ 質量%であり、
- 前記電磁鋼板の板厚： t に対する前記表層部の合計厚さ： t_1 の比率 (t_1/t) が $0.04 \sim 0.78$ であり、
- 磁界の強さ： 5000 A/m における磁束密度 B_{50} に対する飽和磁化 B_s の比 (B_{50}/B_s) が 0.825 以上であり、かつ周波数： 800 Hz 、最大磁束密度： 1.0 T における鉄損： $W_{10/800}$ と前記板厚 t とが下記 (1) 式を満たす無方向性電磁鋼板。
- $$W_{10/800} \leq 13 + 80 \times t \quad \dots (1)$$
- [請求項2] 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、 $\text{P} : 0.100\%$ 以下を含む請求項1に記載の無方向性電磁鋼板。
- [請求項3] 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、 Ge および Ga から選ばれる1種または

2種を合計で0.0100%以下含む請求項1または2に記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項4] 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、Cu、CrおよびNiから選ばれる1種または2種以上を合計で1.00%以下含む請求項1から3のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項5] 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、Ca、MgおよびREMから選ばれる1種または2種以上を合計で0.0200%以下含む請求項1から4のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項6] 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、Znを0.0500%以下含む請求項1から5のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項7] 前記表層部の成分組成と前記内層部の成分組成のいずれか一方、または両方がさらに質量%で、MoおよびWから選ばれる1種または2種を合計で0.0500%以下含む請求項1から6のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項8] 前記複層型電磁鋼板の表面から板厚の $1/4$ の深さの面における方位分布関数の $\Phi_2 = 45^\circ$ 断面において、 $\{100\}$ 面集積度の最高強度値が6.0以上である請求項1から7のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。

[請求項9] 前記板厚が0.03～0.20mmである請求項1から8のいずれかに記載の無方向性電磁鋼板。