

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7468677号
(P7468677)

(45)発行日 令和6年4月16日(2024.4.16)

(24)登録日 令和6年4月8日(2024.4.8)

(51)国際特許分類	F I
C 2 2 C 38/00 (2006.01)	C 2 2 C 38/00 3 0 3 U
H 0 1 F 1/147(2006.01)	H 0 1 F 1/147 1 7 5
C 2 2 C 38/60 (2006.01)	C 2 2 C 38/60
C 2 1 D 8/12 (2006.01)	C 2 1 D 8/12 D

請求項の数 3 (全16頁)

(21)出願番号	特願2022-552998(P2022-552998)	(73)特許権者	000001258 J F E スチール株式会社 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号
(86)(22)出願日	令和4年5月24日(2022.5.24)	(74)代理人	100147485 弁理士 杉村 憲司
(86)国際出願番号	PCT/JP2022/021301	(74)代理人	230118913 弁理士 杉村 光嗣
(87)国際公開番号	WO2022/255172	(74)代理人	100165696 弁理士 川原 敬祐
(87)国際公開日	令和4年12月8日(2022.12.8)	(72)発明者	市原 義悠 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社内
審査請求日	令和4年9月2日(2022.9.2)	(72)発明者	大村 健 東京都千代田区内幸町二丁目 2 番 3 号 J F E スチール株式会社内
(31)優先権主張番号	特願2021-91834(P2021-91834)		
(32)優先日	令和3年5月31日(2021.5.31)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 方向性電磁鋼板

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

圧延方向を横切る方向に線状に熱歪み領域を有し、かかる熱歪み領域内に還流磁区を備える方向性電磁鋼板であって、

前記方向性電磁鋼板を1.5T以上に励磁したときの磁束密度B 磁歪波形 (バタフライカーブ)において、磁束密度Bが1.0~1.5Tの範囲の鋼板伸長量()が 0.010×10^{-6} 以上 0.240×10^{-6} 以下であり、

かつ前記還流磁区の圧延方向長さ(還流磁区幅)が20 μm以上240 μm以下であることを特徴とする方向性電磁鋼板。

【請求項 2】

前記鋼板伸長量()が 0.010×10^{-6} 以上 0.200×10^{-6} 以下であり、かつ前記還流磁区幅が50 μm以上240 μm以下である、請求項 1 に記載の方向性電磁鋼板。

【請求項 3】

前記還流磁区の形成間隔が3mm以上10mm以下である、請求項 1 または 2 に記載の方向性電磁鋼板。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、変圧器などの鉄心材料として好適な方向性電磁鋼板に関する。

【背景技術】

【 0 0 0 2 】

方向性電磁鋼板は、例えば、変圧器の鉄心用材料として用いられている。かかる変圧器においてはエネルギー損失及び騒音を抑える必要があるところ、このようなエネルギー損失には方向性電磁鋼板の鉄損が、またこのような騒音には方向性電磁鋼板の磁歪特性がそれぞれ影響している。

とりわけ近年では、省エネ及び/又は環境規制の観点から、変圧器におけるエネルギー損失、及び、変圧器の動作時における騒音の低減が強く求められている。そのため、鉄損及び磁歪特性の良好な方向性電磁鋼板を開発することが、極めて重要となっている。

【 0 0 0 3 】

ここで、方向性電磁鋼板の鉄損は、主としてヒステリシス損と渦電流損とから構成される。ヒステリシス損を改善する手法としては、GOSS方位と呼ばれる(110)[001]方位を持つ結晶粒を鋼板の圧延方向に高度に配向させることや、鋼板中の不純物を低減することなどが開発されている。また、渦電流損を改善する手法としては、Siの添加により鋼板の電気抵抗を増大させることや、鋼板の圧延方向に被膜張力を付与することなどが開発されている。

10

しかしながら、方向性電磁鋼板の更なる低鉄損化を追求する際には、これらの手法では製造上の限界がある。

【 0 0 0 4 】

そこで、方向性電磁鋼板の更なる低鉄損化を追求する手法として、磁区細分化技術が開発されている。磁区細分化技術とは、仕上げ焼鈍後、または絶縁被膜焼き付け後等の鋼板に対し、溝の形成や局所的な歪みの導入といった物理的な手法で磁束の不均一性を導入することにより、圧延方向に沿って形成される180°磁区(主磁区)の幅を細分化して、方向性電磁鋼板の鉄損、特に渦電流損を低減させる手法である。

20

【 0 0 0 5 】

例えば、特許文献1には、幅300 μ m以下かつ深さ100 μ m以下の線状溝を鋼板表面に導入することで、0.80W/kg以上であった鉄損を、0.70W/kg以下まで改善する技術が提案されている。

【 0 0 0 6 】

また、特許文献2には、二次再結晶後の鋼板表面の板幅方向にプラズマ炎を照射し、局所的に熱歪みを導入することで、800A/mの磁化力で励磁した際の磁束密度(B_8)が1.935Tの鋼板において、最大磁束密度1.7Tかつ周波数50Hzで励磁した際の鉄損($W_{17/50}$)を0.680W/kgまで改善する方法が提案されている。

30

【 0 0 0 7 】

なお、特許文献1に記載されるような線状溝を形成する手法は、鉄心成形後に歪み取り焼鈍を行っても磁区細分化効果が消失しないため、耐熱型磁区細分化と称される。一方、特許文献2に記載されるような熱歪みを導入する手法では、歪み取り焼鈍によって、熱歪み導入の効果が得られなくなるため、非耐熱型磁区細分化と称される。

【 0 0 0 8 】

ここで、非耐熱型磁区細分化では、鋼板に局所的な歪みを導入することにより、渦電流損を大きく低下させることができる。その反面、非耐熱型磁区細分化は、かかる歪みの導入に起因してヒステリシス損の劣化や、磁歪の劣化を招くことが知られている。

40

したがって、従来よりも鉄損及び磁歪特性に優れた方向性電磁鋼板の開発のため、ひいては、従来よりもエネルギー損失及び騒音特性に優れた変圧器の開発のためには、還流磁区導入パターン最適化が求められている。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 9 】

【文献】特公平6 - 2 2 1 7 9号公報

【文献】特開平7 - 1 9 2 8 9 1号公報

【文献】特開2 0 1 6 - 1 6 6 4 1 9号公報

50

【文献】国際公開第2020/158732号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

還流磁区の分布は、非耐熱磁区細分化の能力に大きく影響するため、変圧器特性に優れ低鉄損と低磁歪を両立する方向性電磁鋼板の実現には、還流磁区の導入パターンを最適化することが有利である。そのためには、還流磁区について正確に把握する必要がある。これまで、還流磁区の3次元的な分布の測定手段が数多く提案されているが、いずれも、以下のような問題があった。

【0011】

例えば、特許文献3には、圧延方向に沿ってせん断した鋼板の断面を、Kerr効果顕微鏡を用いて観察する手法が開示されている。しかし、かかる測定方法では、観察用試料の作製に必須な鏡面研磨によって観察面に歪みが入ってしまうこと、また断面を露出させることによって、観察点の磁区構造が実際とは異なるものになるといった問題がある。さらにいえば、観察によって得られるのは鋼板に導入された還流磁区のごく一部に過ぎず、3次元分布の推定には不十分であった。

【0012】

また、特許文献4には、1.7Tまで励磁したときの時間磁歪波形に着目し、歪み取り焼鈍前後の磁歪波形の差分波形から、還流磁区の導入量を推定する手法が開示されている。しかし、1.7Tまでの励磁では、還流磁区の消滅による磁歪振動のみならず、圧延方向からの結晶方位のズレに起因する主磁区の磁化回転による磁歪振動の成分も含有されてしまい、正確に還流磁区の導入量を推定することは困難であった。

【0013】

上述したとおり、鉄損及び騒音量特性に優れた方向性電磁鋼板の開発に向け、還流磁区の分布を適正化する手段が希求されているが、上記の特許文献3や4開示の手法に基づいて還流磁区を特定するやり方では、近年のより高い要求性能に応えることは困難であった。

【0014】

本発明は、上記事情を鑑みてなされたものであり、還流磁区の分布を適正化するための手段を検討し、以下に述べるとおりにパタフライカーブを適正に用いる手段を見出し、かかる手段を用いることによって得られた、変圧器特性に優れ、且つ低鉄損と低磁歪とが両立した方向性電磁鋼板を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0015】

本発明者らは、上記問題を解決すべく鋭意検討を重ねた。

非耐熱型磁区細分化は、鋼板に歪みを導入して、局所的な応力場を形成することで、磁区を制御する技術である。そこで、本発明者らは、従来よりも低鉄損かつ低騒音を実現する方向性電磁鋼板を開発するために、鋼板に導入される応力分布と還流磁区の磁化方向に着目して、磁気特性への影響を調査した。

【0016】

かかる非耐熱型磁区細分化では、方向性電磁鋼板にエネルギービームを圧延直交方向（板幅方向）に照射して、局所的に熱歪みを導入するが、その際、エネルギービームの照射点には圧延方向の圧縮応力が残留する。

方向性電磁鋼板は、磁化容易軸となるGOSS方位(110)[001]を持つ結晶粒が圧延方向に集積しているため、圧延方向に圧縮応力が働くと、磁気弾性効果によって板幅方向に磁化方向を持つ磁区（還流磁区）が形成される。なお、磁気弾性効果とは、方向性電磁鋼板に引張応力を加えると、その応力方向がエネルギー的に安定になり、圧縮応力を加えると、その応力と直交する方向がエネルギー的に安定になる、という現象である。

【0017】

この還流磁区によって、渦電流損の改善効果が促される。一方で、磁化に伴う磁壁の移動が、歪みによってピンニングされるため、ヒステリシス損は大きくなることになる。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 8 】

また、圧延方向と直交する方向（板幅方向）に磁化（磁気モーメント）を持つ還流磁区を圧延方向へ磁化した場合において、圧縮応力による直交方向への異方性よりも、磁化による圧延方向への異方性が勝ったときは、磁化（磁気モーメント）が圧延方向へ向き直るので、前記還流磁区の消滅が生じる。方向性電磁鋼板は、磁化の方向に伸びるように変形するため、圧延方向に伸長し板幅方向に収縮する。鋼板を還流磁区が消滅するまで磁化したのち、圧延方向への磁化を弱める、すなわち、当初に磁化した方向とは180°逆の方向に磁化をすると、磁化による圧延方向への異方性が低下し、再び圧縮応力による直交方向への異方性が優位となるため、再び還流磁区が生成される。すると、方向性電磁鋼板は、板幅方向へ伸長し圧延方向に収縮する。

10

すなわち、変圧器の実使用上の交流磁化下では、上述程度の磁化の方向が周波数に応じて逆転するため、上述したように鋼板が伸長収縮を繰り返すことになる。これを磁歪振動と呼び、その振幅は $\mu\text{m}/\text{m}$ で表されるような小さな振動であるものの、方向性電磁鋼板を変圧器の鉄心とした際には、この磁歪振動が伝播することで、騒音となって外界に放出される。このような作用があるため、還流磁区の存在によって騒音が大きくなるのである。

【 0 0 1 9 】

そこで、発明者らは、鋼板の磁歪振動と磁区の関係に着目し、さらに詳細に調査を行ったところ、鋼板の磁歪振動には、前述した還流磁区の生成消滅挙動のみならず、結晶方位の圧延方向からのズレに起因して生じる磁化回転の成分も含まれることが判明した。

上記調査のうち、磁区観察を行って得られた最大励磁磁束密度 B が0~1.7Tのバタフライカーブにおける磁区の影響を図1に示す。図1に見られるように、励磁磁束密度が1.0T以上になると還流磁区の消滅が始まり、磁束密度が1.5Tを超えると還流磁区の消失による鋼板の伸長に、磁化回転による鋼板の収縮が重なっているため、バタフライカーブの傾きが減少し始めていることが分かる。すなわち、最大励磁磁束密度 B が1.5T以上の磁束密度

20

磁歪波形（バタフライカーブ）において、磁束密度 B が1.0Tから1.5Tの範囲の鋼板伸長量（以下、単に と示す）が還流磁区の総量によく対応することを知見した。

【 0 0 2 0 】

すなわち、この の値と、鋼板表面から観察される還流磁区の圧延方向長さ（還流磁区幅）と、鋼板に導入した還流磁区の間隔（還流磁区の本数）とから、還流磁区の分布をきわめて正確に推定することができる。そして、かかる推定を基に、還流磁区幅と、還流磁区の本数をそれぞれ適正な範囲に制御することで、従来よりも低い鉄損と低い騒音特性とを両立する方向性電磁鋼板を製造することが可能となることが分かった。

30

【 0 0 2 1 】

そこで、 と還流磁区幅の適正な範囲、および還流磁区を形成する間隔（本発明では、「還流磁区の形成間隔」ともいう）の適正な範囲をそれぞれ調査するため、さらなる検討を行った。

【 0 0 2 2 】

以下、本発明を完成させるに至った実験結果について説明する。

（実験1）

まず、図2に示すような、最大強度に対して一定以下のエネルギー強度を有する領域のビームをカットすることにより急峻なエネルギー分布に整えたプロファイルを有するレーザー照射を行って磁区細分化処理を行った。

40

なお、レーザーの照射条件は、既知の方法で製造された板厚0.23mmの方向性電磁鋼板の鋼帯に対して、ガウシアン形状のプロファイルを持つレーザーを、出力を様々に変えて照射した。このとき、レーザーはビーム径（=半値全幅）が20 μm 、100 μm 、又は200 μm のものを使用し、レーザーを収束させるレンズの直前（収束レンズからの距離：20mm）に、孔径が8mm、10mm、又は12mmのアパーチャを通して、上記図2に記載のプロファイルとし、その照射間隔を5mmとした。また、最大強度値の30%以下のエネルギーとなるビームをカットしたビームを照射した。

なお、本発明におけるガウシアン形状のプロファイルを持つレーザーとは、直線状のス

50

リットを持つプロファイラに対して、ある方向にレーザーを走査して得られる強度分布(プロファイル)が、ガウシアン分布となるようなレーザーを指す。

かくして得られた方向性電磁鋼板の鋼帯から一部を切り出し、レーザードブラー式の磁歪振動計を用いて1.5T、50Hzの正弦波交流磁化したときの磁歪振動波形を測定し、パタフライカーブを得た。

さらに市販のマグネットビューワーを用いて、鋼板表面の磁区パターンを転写し、圧延方向を横切るように形成された還流磁区の幅を測定した。

【0023】

さらに上記の磁区細分化処理した方向性電磁鋼板の試料を用いて、3相積み変圧器(鉄心重量500kg)を製作し、周波数50Hzにて、鉄心脚部分の磁束密度が1.7Tとなるときの鉄損特性を測定した。この1.7T、50Hzでの鉄損特性は、ワットメータを用いて無負荷損を測定した。同時に、このモデルトランスを、防音室内で、最大磁束密度 B_m :1.7T、周波数:50Hzの条件で励磁し、騒音計を用いて騒音レベル(dBA)を測定した。

10

【0024】

前記実験の結果として、図3に λ 及び還流磁区幅と鉄損 $W_{17/50}$ の関係を、図4に λ 及び還流磁区幅と変圧器騒音レベルの関係をそれぞれ示す。

図3に見られるように、 λ が 0.010×10^{-6} 以上 0.240×10^{-6} 以下の範囲にあり、かつ、還流磁区幅が $20 \mu\text{m}$ 以上 $240 \mu\text{m}$ 以下の範囲であれば、高い鉄損改善効果が確認できる。また、 λ が 0.010×10^{-6} 以上 0.200×10^{-6} 以下の範囲にあり、かつ、還流磁区幅が $50 \mu\text{m}$ 以上 $240 \mu\text{m}$ 以下の範囲にあるとき、特に高い鉄損改善効果が確認できる。

20

【0025】

また、図4に見られるように、変圧器の騒音は $10 \mu\text{m}$ 以上 $260 \mu\text{m}$ 以下の範囲の還流磁区幅に対しほとんど変化が認められない、一方、 λ が 0.240×10^{-6} を超過すると変圧器の騒音は急激に劣化する傾向が確認できる。

以上の実験結果から、上記 λ が 0.010×10^{-6} 以上 0.240×10^{-6} 以下であり、かつ上記還流磁区幅が $20 \mu\text{m}$ 以上 $240 \mu\text{m}$ 以下であるときに、高い低鉄損及び低騒音効果が得られるとの知見を得た。特に、 λ が 0.010×10^{-6} 以上 0.200×10^{-6} 以下の範囲にあり、かつ、還流磁区幅が $50 \mu\text{m}$ 以上 $240 \mu\text{m}$ 以下の範囲にあるとき、より優れた鉄損改善効果を発現することを見出した。

【0026】

30

(実験2)

続いて還流磁区の形成間隔の適正な範囲について調査を行った。

既知の方法で製造された板厚0.23mmの方向性電磁鋼板の鋼帯に対して、ガウシアン形状のプロファイラを持つレーザーを、 λ が 0.100×10^{-6} となるように出力を調整して板幅方向に線状に照射して、試料を作製した。その際、レーザーは、ビーム径(=半値全幅)が $100 \mu\text{m}$ のものを使用し、収束レンズに入射する直前位置(鋼板からの距離:20mm)に配置した孔径が10mmのアーチャーを通し最大強度値の30%以下のエネルギーとなるビームをカットして、図2に記載されたプロファイルとした。圧延方向の照射間隔を1~12mmに変化させて該プロファイラを有するレーザービームを板幅方向に線状に照射し試料を作製した。

40

かくして得られた方向性電磁鋼板の鋼帯から一部を切り出し、レーザードブラー式の磁歪振動計を用いて1.5T、50Hzの正弦波交流磁化したときの磁歪振動波形を測定して、パタフライカーブを得た。

さらに市販のマグネットビューワーを用いて、鋼板表面の磁区パターンを転写し、圧延方向を横切るように形成された還流磁区の幅を測定したところ、還流磁区幅は $120 \mu\text{m}$ であった。

【0027】

さらに上記の磁区細分化処理した方向性電磁鋼板の試料を用いて、3相積み変圧器(鉄心質量:500kg)を製作し、周波数:50Hzにて、鉄心脚部分の磁束密度が1.7Tとなるときの鉄損特性を測定した。この、1.7T、50Hzでの鉄損特性はワットメータを用いて無負荷

50

損を測定した。同時に、このモデルトランスを、防音室内で、最大磁束密度 $B_m=1.7T$ 、周波数：50Hzの条件で励磁し、騒音計を用いて騒音レベル（dBA）を測定した。

【0028】

図5に還流磁区の形成間隔と鉄損 $W_{17/50}$ の関係を、図6に還流磁区の形成間隔と変圧器騒音レベルの関係をそれぞれ示す。

図5より、還流磁区の形成間隔が3mm以上10mm以下の範囲において、より好適な鉄損改善が確認できる。

また、図6より、還流磁区の形成間隔が狭まるほど騒音が劣化する傾向が確認できた。特に3mm未満になると、騒音がより大きくなる。

以上のとおり、還流磁区の形成間隔が3mm以上10mm以下の場合に、より高い低鉄損化と低騒音化の効果を併せて発現することを知見した。

10

【0029】

本発明はかかる知見に基づきさらに検討を重ねて完成されたものであり、本発明の要旨構成は次のとおりである。

1．圧延方向を横切る方向に線状に熱歪み領域を有し、かかる熱歪み領域内に還流磁区を備える方向性電磁鋼板であって、前記方向性電磁鋼板を1.5T以上に励磁したときの磁束密度 B 磁歪波形（パタフライカーブ）において、磁束密度 B が1.0～1.5Tの範囲の鋼板伸長量（ ）が 0.010×10^{-6} 以上 0.240×10^{-6} 以下であり、かつ前記還流磁区の圧延方向長さ（還流磁区幅）が $20 \mu m$ 以上 $240 \mu m$ 以下であることを特徴とする方向性電磁鋼板。

【0030】

2．前記鋼板伸長量（ ）が 0.010×10^{-6} 以上 0.200×10^{-6} 以下であり、かつ前記還流磁区幅が $50 \mu m$ 以上 $240 \mu m$ 以下である、前記1に記載の方向性電磁鋼板。

20

【0031】

3．前記還流磁区の形成間隔が3mm以上10mm以下である、前記1または2に記載の方向性電磁鋼板。

【発明の効果】

【0032】

本発明によれば、変圧器のエネルギー損失と騒音を効果的に低減させる方向性電磁鋼板を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

30

【0033】

【図1】最大励磁磁束密度 B が0～1.7Tの範囲のパタフライカーブにおける磁区の影響を示した図である。

【図2】アパーチャを適用した好適なビームプロファイルの一例を表した模式図である。

【図3】 及び還流磁区幅と鉄損 $W_{17/50}$ の関係を示した図である。

【図4】 及び還流磁区幅と変圧器騒音レベルの関係を示した図である。

【図5】還流磁区の形成間隔と鉄損 $W_{17/50}$ の関係を示した図である。

【図6】還流磁区の形成間隔と変圧器騒音レベルの関係を示した図である。

【図7】スリットを適用した好適なビームプロファイルの一例を表した模式図である。

【発明を実施するための形態】

40

【0034】

以下、本発明の好適な実施形態について詳細に説明する。

ただし、本発明は、本実施形態に開示の構成のみに限定されることなく本発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々の変更が可能である。

[方向性電磁鋼板を1.5T以上に励磁したときの磁束密度 B 磁歪波形（パタフライカーブ）において、磁束密度 B が1.0～1.5Tの範囲の鋼板伸長量（ ）が 0.010×10^{-6} 以上 0.240×10^{-6} 以下であり、かつ前記還流磁区の圧延方向長さ（還流磁区幅）が $20 \mu m$ 以上 $240 \mu m$ 以下]

上記 が 0.010×10^{-6} 未満の場合には、導入された歪みが過少であるため、磁区細分化効果が発現しない。一方、上記 が 0.240×10^{-6} を超えると、導入された歪みが過剰

50

となって、ヒステリシス損を劣化させる。

【0035】

また、還流磁区幅が240 μm を超えた場合は、還流磁区の板厚方向への深さが不十分となるために磁区細分化効果が低下する。一方、還流磁区幅が20 μm 未満の場合は、還流磁区が圧延方向に対して薄すぎるため、磁化が不連続とならず、磁区細分化効果が低下する。

さらに、 α は0.240 $\times 10^{-6}$ を超えると急激に騒音が大きくなる。これは α が還流磁区の総量に対応し、還流磁区の生成消滅が生じるためと考えられる。

よって、本発明では、前記 α を0.010 $\times 10^{-6}$ 以上0.240 $\times 10^{-6}$ 以下の範囲とし、かつ還流磁区幅を20 μm 以上240 μm 以下とする。この範囲内であれば、優れた低鉄損効果及び低騒音効果を得ることができる。 α が0.010 $\times 10^{-6}$ 以上0.200 $\times 10^{-6}$ 以下であり、かつ還流磁区幅が50 μm 以上240 μm 以下である時には特に優れた鉄損特性を発現できるため、好ましい。より好ましくは、 α が0.100 $\times 10^{-6}$ 以上0.200 $\times 10^{-6}$ 以下であり、かつ還流磁区幅が50 μm 以上240 μm 以下である。

10

【0036】

[還流磁区の形成間隔が3mm以上10mm以下]

還流磁区の形成間隔が3mm未満の場合、還流磁区の総量が増加して、ヒステリシス損が劣化する恐れがある。一方、形成間隔が10mm超の場合、導入する還流磁区の総量の減少によって、磁区細分化能力が低下しやすくなる。

また、還流磁区の形成間隔が3mm未満になると、騒音が大きくなりやすいのは、還流磁区の総量が増加するためと考えられる。

20

よって、還流磁区の形成間隔を3mm以上10mm以下とすると、より高い低鉄損化と低騒音化の効果を併せて得ることができる。

なお、還流磁区の形成間隔とは、非耐熱型磁区細分化処理の際に照射されるエネルギービームの圧延方向の照射間隔を意味する。

【0037】

・方向性電磁鋼板

本発明の方向性電磁鋼板の素材となるスラブの成分組成は、二次再結晶が生じる成分組成であればよい。また、インヒビターを利用する場合、例えばAlN系インヒビターを利用する場合であればAlおよびNを、またMnS・MnSe系インヒビターを利用する場合であれば、MnとSe及び/またはSを適量含有させればよい。もちろん両インヒビターを併用してもよい。

30

上記インヒビターを利用する場合における、Al、N、S及びSeの好適含有量はそれぞれ、

- Al : 0.010 ~ 0.065質量%
- N : 0.0050 ~ 0.0120質量%
- S : 0.005 ~ 0.030質量%および
- Se : 0.005 ~ 0.030質量%

である。

【0038】

さらに、本発明は、Al、N、S、Seの含有量を制限した、インヒビターを使用しない方向性電磁鋼板にも適用することができる。この場合には、Al、N、S、Seの含有量はそれぞれ、

40

- Al : 0.010質量%未満、
- N : 0.0050質量%未満、
- S : 0.0050質量%未満および
- Se : 0.0050質量%未満

に抑制することが好ましい。

【0039】

つぎに、本発明の方向性電磁鋼板に用いる鋼素材(スラブ)の基本成分および任意添加成分についてさらに具体的に述べる。

50

C : 0.08質量%以下

Cは、熱延板組織の改善のために添加をするが、Cの含有量が0.08質量%を超えると、磁気時効の起こらない50質量ppm以下まで製造工程中に脱炭することが難しくなるため、C含有量は0.08質量%以下とすることが望ましい。また、Cを含まない鋼素材でも二次再結晶は生じることから、C含有量の下限については特に設ける必要はない。したがって、Cは0質量%であってもよい。

【0040】

Si : 2.0 ~ 8.0質量%

Siは、鋼の電気抵抗を増大させ、鉄損を改善するのに有効な元素である。そのためには含有量を2.0質量%以上とすることが好ましい。一方、含有量が8.0質量%を超えると、加工性および通板性が劣化することに加え、磁束密度も低下する。そのため、Si含有量は8.0質量%以下とすることが望ましい。より好ましくは、下限が2.5質量%であって、上限が7.0質量%である。

10

【0041】

Mn : 0.005 ~ 1.0質量%

Mnは、熱間加工性を向上させるうえで必要な元素である。そのためには含有量を0.005質量%以上とすることが好ましい。一方、含有量が1.0質量%を超えると磁束密度が劣化するため、Mn含有量は1.0質量%以下とすることが好ましい。より好ましくは、下限が0.01質量%であって、上限が0.9質量%である。

【0042】

上記の基本成分以外に、磁気特性改善に有効であることが知られている、本発明では、以下の任意添加成分を適宜含有させることができる。

20

すなわち、

Ni : 0.03 ~ 1.50質量%、

Sn : 0.01 ~ 1.50質量%、

Sb : 0.005 ~ 1.50質量%、

Cu : 0.03 ~ 3.0質量%、

P : 0.03 ~ 0.50質量%、

Mo : 0.005 ~ 0.10質量%および

Cr : 0.03 ~ 1.50質量%のうちから選ばれる1種以上

30

である。

【0043】

上記任意添加成分のうちNiは、熱延板組織を改善して磁気特性を向上させるために有効な元素である。Ni含有量が0.03質量%未満では磁気特性への貢献は小さい。一方、1.50質量%を超えると二次再結晶が不安定となり磁気特性が劣化する。そのためNiの含有量は0.03 ~ 1.50質量%の範囲とすることが好ましい。

【0044】

また、他の任意添加成分のSn、Sb、Cu、P、MoおよびCrも、Niと同様に磁気特性を向上させる元素である。いずれも、含有量が上記の下限未満ではその効果は十分ではなく、また上記の上限を超えると二次再結晶粒の成長が抑制されるために磁気特性が劣化する。そのためそれぞれ上記の含有量の範囲とすることが好ましい。

40

なお、上記成分以外の残部はFe及び不可避免的不純物である。

【0045】

ここで、上記スラブ成分中、Cは一次再結晶焼鈍において脱炭され、Al、N、SおよびSeは二次再結晶焼鈍において純化されるため、二次再結晶焼鈍後の鋼板（方向性電磁鋼板の最終製品板）では、これらの成分は不可避免的不純物程度の含有量に低減される。

【0046】

本発明の方向性電磁鋼板は、一例として、以下の手順（磁区細分化工程を除く）で製造することができる。

すなわち、前記の成分系からなる方向性電磁鋼板の鋼素材（スラブ）に、熱間圧延を施

50

した後、必要に応じて熱延板焼鈍を行う。次いで1回または中間焼鈍をはさむ2回以上の冷間圧延を施して、最終板厚の鋼帯に仕上げる。その後、前記鋼帯に、脱炭焼鈍を施し、MgOを主成分とする焼鈍分離剤を塗布した後、コイル状に巻き取って、二次再結晶及びフォスフェイト被膜の形成を目的とした仕上げ焼鈍を施す。かかる仕上げ焼鈍後の鋼帯に対し、平坦化焼鈍を施し、さらに絶縁被膜焼き付け、例えばリン酸マグネシウム系の張力被膜を形成して製品板（方向性電磁鋼板（磁区細分化工程を除く））とする。

【0047】

上述のようにして得られた製品板に非耐熱磁区細分化を施して、本発明の方向性電磁鋼板が得られる（磁区細分化工程）。

次に、本発明における磁区細分化工程に用いる非耐熱型磁区細分化について説明する。

10

・エネルギービームの照射方法

本発明では、熱歪み導入のために鋼板に照射するエネルギービームとして、ガウシアン形状のビームプロファイルを持つビームを用いることで、還流磁区の総量を制御し、精度よく規定範囲内に収めることができる。特に、鋼板に入射する前に圧延方向に開口部を持つスリットを通して、一定以下のエネルギーとなるビームをカットしたビームを照射することで、顕著に規定範囲内に収めることができる。

なお、鋼板に入射する前とは、エネルギービーム光路の内、ビーム発生源から鋼板に入射する間の任意の座標である。

また、一定以下のエネルギーとなるビームをカットとは、事前に取得したビームプロファイルの最大強度に対し一定以下、例えば最大ピーク強度の40%以下、のエネルギー強度を有する領域のビームが鋼板に入射しないようにすることを意味する。カットするビームのエネルギー強度は、最大ピーク強度の50%が上限である。

20

エネルギービームとしては、非耐熱型磁区細分化処理に一般的に使用可能なものであれば特に限定されず、例えば、電子ビーム、レーザービーム、プラズマ炎などを使用できる。

【0048】

・より良い特性を得るためのビーム照射方法

さらに高い低鉄損・低磁歪効果を得るための手法として、ビーム経路上に円形の絞り(アパーチャ)を設置する方法が挙げられる。エネルギービーム光路の内、ビーム発生源からビーム偏向系の間のアパーチャを設置し、前記同様一定以下の強度となるビームをカットしたビームを鋼板に照射する。この様な方法で照射することで、ビーム照射方向にもビームプロファイル形状の制御が可能となり、その結果スリットに比べ鋼板に導入する歪み量をさらに低減することができる。この結果、スリットに比べ同程度の熱歪みを導入することができ、さらに高い低鉄損効果が発現する。

30

【0049】

・エネルギービームの照射方向

本発明では、線状歪みを電子ビーム、レーザー、プラズマ炎といったエネルギービームの照射によって行う。1台以上のビーム照射装置を用いて、ビームを圧延方向に交差するように照射しながら線状歪みの導入を行う。このとき、ビームの走査方向は圧延方向から60°~120°の範囲とすることが好ましく、90°すなわち板幅方向に沿うように走査するとより好ましい。これは、板幅方向からのズレが大きくなると、鋼板に導入される歪みの量が増加し、磁歪の劣化を招くためである。なお、「線状」とは、実線、点線、破線、いずれであってもよい。

40

・エネルギービームの照射間隔

エネルギービームの照射間隔（隣接する熱歪み領域の間隔）は、エネルギービーム照射箇所に戻流磁区が形成されることから、3mm以上10mm以下の範囲が好ましい。

【0050】

以下、本発明を実施するにあたって、エネルギービームを照射する条件をさらに詳細に説明する。

・ビーム出力：30W以上10kW以下

鋼板に戻流磁区を導入するには、一定以上の入熱エネルギーが必要であり、30W未満で

50

は歪み導入量が不十分であり、還流磁区が形成されない。一方、10kWを超過するような過剰な入熱を行うと、熱の拡散によって非常に広範囲に還流磁区が形成されてしまい、鉄損・騒音ともに劣化してしまう。以上より、ビームの出力としては30W以上10kW以下が好適な範囲である。より好ましくは、下限が50W程度、上限が8kW程度である。

なお、電子源として電子ビームを用いた場合、加速電圧60kV以上300kV以下、ビーム電流：0.5～40mAが好適である。

【0051】

・レーザー出力：20W以上500W以下

レーザー出力は、導入歪み量の観点からビーム出力より小さい方が好ましい。これは、レーザー出力を大きくすると歪みの導入量が過剰となり、渦電流損の改善以上にヒステリシス損が劣化、さらに騒音の劣化を招くためである。そのため、レーザー出力は、500W以下とするのが好ましい。一方で、レーザー出力が小さすぎると、歪みを形成するためのエネルギーが不足する。そのため、レーザー出力は、20W以上とすることが好ましい。

10

【0052】

・スポット径：300μm以下

スポット径は、小さいほど局所的に歪みを導入することができるため好ましい。そこで本発明では、電子ビームやレーザーなどのエネルギービームのスポット径を300μm以下とすることが好ましい。280μm以下とすることがより好ましく、さらに好ましくは260μm以下である。本発明で、スポット径とは、幅30μmのスリットを用いてスリット法で取得したビームプロファイルの半値全幅を指す。

20

【0053】

・ビーム照射領域内真空度

電子ビームは、気体分子によって散乱を受け、ビーム径やハロー径の増大、エネルギーの減少等が発生する。そのため、ビーム照射領域の真空度は高い方が良く、圧力にして3Pa以下とすることが好ましい。下限については特に制限を設けないが、過度に低下させると、真空ポンプなどの真空システムにかかるコストが増大する。そのため、実用上は、10⁻⁵Pa以上の圧力とすることが好ましい。

なお、レーザーは大気中で加工可能なため、この限りではない。

【0054】

・還流磁区幅

鋼板表面に形成される還流磁区の幅は、市販のドメインビューワー、例えばシグマハイケミカル社製MV-95を使用し、鋼板表面の磁区パターンを取得して計測を行うことができる。

30

【実施例】

【0055】

次に実施例に基づいて本発明を説明する。以下の実施例は、本発明の好適な一例を示すものであり、本実施例によって何ら限定を受けるものではない。本発明の趣旨に適合する範囲で変更を加えて実施することが可能であり、そのような態様でも本発明の技術範囲に含まれることは言うまでもない。

ここで、本実施例においては、表1に示す成分を有し残部がFe及び不可避免的不純物からなる方向性電磁鋼板素材(スラブ)を用いた。

40

【0056】

【表1】

表1

成分組成(質量%)								
C	Si	Mn	Ni	Al	N	Se	S	O
0.08	3.4	0.1	0.01	0.026	0.007	0.011	0.003	0.0025

【0057】

50

表 1 に記載の組成を持つスラブから、既知の方法で製造された板厚0.23mmの方向性電磁鋼板の鋼帯を供試材とし、この鋼帯の圧延方向を横切る方向に、ガウシアン形状のプロファイルを持つレーザーを、出力を様々に変えて照射し試料を作製した。このとき、レーザーはビーム径(=半値全幅)が100 μ mのものを使用した。鋼板に入射する直前に、スリット幅が110 μ mのスリットを通して、図7に記載のように一部がカットされたプロファイルを持つレーザーを用意した。また、レーザーの収束レンズの直前に、その地点でのレーザーのスポットの全長よりも20%小さい孔径を有するアパーチャを設置し図2のようなプロファイルとしたレーザーも用意した。鋼板にいずれか一方のレーザーのみを線状に照射して、磁区細分化処理を行った。さらに、それらのレーザーの照射間隔(還流磁区形成間隔)は1mm,3mm,8mm,10mm,又は12mmとした。

10

【0058】

かくして得られた方向性電磁鋼板の鋼帯から一部を切り出し、レーザードップラー式の磁歪振動計を用いて1.5T,50Hzの正弦波交流磁化したときの磁歪振動波形を測定し、パタフライカーブを得た。

さらに市販のマグネットビューワーを用いて、鋼板表面の磁区パターンを転写し、圧延方向を横切るように形成された還流磁区の幅を測定した。

【0059】

加えて上記の磁区細分化処理した方向性電磁鋼板の試料を用いて、3相積み変圧器(鉄心重量500kg)を製作し、周波数50Hzにて、鉄心脚部分の磁束密度が1.7Tとなるとき鉄損特性を測定した。この、1.7T,50Hzでの鉄損特性はワットメータを用いて無負荷損を測定した。同時に、このモデルトランスを、防音室内で、最大磁束密度 $B_m=1.7T$ 、周波数50Hzの条件で励磁し、騒音計を用いて騒音レベル(dBA)を測定した。

20

【0060】

以上の実施例の結果を表2に示す。

同表より、本発明範囲である 0.010×10^{-6} 以上 0.240×10^{-6} 以下であり、かつ、還流磁区幅が20 μ m以上240 μ m以下である方向性電磁鋼板では、比較例に比べ、高い低鉄損($W_{17/50} < 0.73W/kg$)及び低騒音効果が得られることが分かる。また、アパーチャによってビームカットを行った実験例No.51~90のうちの発明例においては、 0.010×10^{-6} 以上 0.200×10^{-6} 以下であり、かつ、還流磁区幅が50 μ m以上240 μ m以下である場合に、スリットを用いた場合に比べてさらに高い低鉄損効果($W_{17/50} < 0.71W/kg$)および低騒音効果を得られることが分かる。加えて、いずれの場合においても還流磁区の形成間隔が3mm以上10mm以下である場合において、より高い低鉄損性や、低騒音性を発現できることが分かる。

30

【0061】

40

50

【表 2】

表2

No.	ビーム径 [μm]	スリット幅 [μm]	出力 [W]	還流磁区 形成間隔 [mm]	$\Delta\lambda$ [$\times 10^{-6}$]	還流磁区幅 [μm]	鉄損 $W_{17/50}$ [W/kg]	騒音 [dBA]	備考
1	100	110	100	1	0.150	10	0.73	42.3	比較例
2	100	110	150	1	0.180	20	0.70	42.3	発明例
3	100	110	200	1	0.200	40	0.69	42.3	発明例
4	100	110	250	1	0.220	80	0.69	42.7	発明例
5	100	110	300	1	0.240	100	0.70	43.0	発明例
6	100	110	400	1	0.260	140	0.73	44.0	比較例
7	100	110	500	1	0.300	180	0.73	45.2	比較例
8	100	110	600	1	0.320	220	0.75	45.8	比較例
9	100	110	800	1	0.360	240	0.75	47.2	比較例
10	100	110	1000	1	0.400	260	0.82	46.9	比較例
11	100	110	100	3	0.050	10	0.73	42.0	比較例
12	100	110	150	3	0.060	20	0.69	42.0	発明例
13	100	110	200	3	0.070	40	0.69	42.0	発明例
14	100	110	250	3	0.090	80	0.68	42.0	発明例
15	100	110	300	3	0.100	100	0.68	42.0	発明例
16	100	110	400	3	0.150	140	0.68	42.0	発明例
17	100	110	500	3	0.200	180	0.68	42.0	発明例
18	100	110	600	3	0.240	220	0.69	42.7	発明例
19	100	110	800	3	0.270	240	0.73	44.3	比較例
20	100	110	1000	3	0.300	260	0.78	44.9	比較例
21	100	110	100	8	0.005	10	0.79	41.7	比較例
22	100	110	150	8	0.010	20	0.70	41.7	発明例
23	100	110	200	8	0.040	40	0.69	41.7	発明例
24	100	110	250	8	0.060	80	0.68	41.7	発明例
25	100	110	300	8	0.080	100	0.68	41.7	発明例
26	100	110	400	8	0.100	140	0.68	41.7	発明例
27	100	110	500	8	0.140	180	0.68	41.7	発明例
28	100	110	600	8	0.180	220	0.68	41.7	発明例
29	100	110	800	8	0.220	240	0.69	42.0	発明例
30	100	110	1000	8	0.240	260	0.74	42.3	比較例
31	100	110	100	10	0.002	10	0.79	41.3	比較例
32	100	110	150	10	0.006	20	0.76	41.3	比較例
33	100	110	200	10	0.010	40	0.69	41.3	発明例
34	100	110	250	10	0.040	80	0.69	41.3	発明例
35	100	110	300	10	0.060	100	0.68	41.3	発明例
36	100	110	400	10	0.080	140	0.68	41.3	発明例
37	100	110	500	10	0.120	180	0.68	41.3	発明例
38	100	110	600	10	0.160	220	0.68	41.3	発明例
39	100	110	800	10	0.180	240	0.69	41.3	発明例
40	100	110	1000	10	0.220	260	0.74	41.7	比較例
41	100	110	100	12	0.001	10	0.81	41.3	比較例
42	100	110	150	12	0.004	20	0.77	41.3	比較例
43	100	110	200	12	0.008	40	0.75	41.3	比較例
44	100	110	250	12	0.010	80	0.70	41.3	発明例
45	100	110	300	12	0.020	100	0.70	41.3	発明例
46	100	110	400	12	0.040	140	0.70	41.3	発明例
47	100	110	500	12	0.060	180	0.70	41.3	発明例
48	100	110	600	12	0.100	220	0.70	41.3	発明例
49	100	110	800	12	0.120	240	0.70	41.3	発明例
50	100	110	1000	12	0.160	260	0.75	41.3	比較例

10

20

30

40

50

表2(続き)

No.	ビーム径 [μm]	アパーチャ 孔径 [mm]	出力 [W]	還流磁区 形成間隔 [mm]	$\Delta\lambda$ [$\times 10^{-6}$]	還流磁区幅 [μm]	鉄損 $W_{17/50}$ [W/kg]	騒音 [dBA]	備考
51	100	8	200	1	0.160	40	0.69	40.3	発明例
52	100	8	250	1	0.176	80	0.68	40.7	発明例
53	100	8	300	1	0.192	100	0.68	41.0	発明例
54	100	8	400	1	0.208	140	0.69	42.0	発明例
55	100	8	500	1	0.240	180	0.69	43.2	発明例
56	100	8	600	1	0.256	220	0.70	43.8	比較例
57	100	8	800	1	0.288	240	0.70	45.2	比較例
58	100	8	1000	1	0.320	260	0.77	44.9	比較例
59	100	8	200	3	0.056	40	0.69	40.0	発明例
60	100	8	250	3	0.072	80	0.67	40.0	発明例
61	100	8	300	3	0.080	100	0.67	40.0	発明例
62	100	8	400	3	0.120	140	0.67	40.0	発明例
63	100	8	500	3	0.160	180	0.67	40.0	発明例
64	100	8	600	3	0.192	220	0.67	40.7	発明例
65	100	8	800	3	0.216	240	0.69	42.3	発明例
66	100	8	1000	3	0.240	260	0.73	42.9	比較例
67	100	8	200	8	0.032	40	0.69	39.7	発明例
68	100	8	250	8	0.048	80	0.67	39.7	発明例
69	100	8	300	8	0.064	100	0.67	39.7	発明例
70	100	8	400	8	0.080	140	0.67	39.7	発明例
71	100	8	500	8	0.112	180	0.67	39.7	発明例
72	100	8	600	8	0.144	220	0.67	39.7	発明例
73	100	8	800	8	0.176	240	0.68	40.0	発明例
74	100	8	1000	8	0.192	260	0.71	40.3	比較例
75	100	8	200	10	0.008	40	0.71	39.3	比較例
76	100	8	250	10	0.032	80	0.68	39.3	発明例
77	100	8	300	10	0.048	100	0.67	39.3	発明例
78	100	8	400	10	0.064	140	0.67	39.3	発明例
79	100	8	500	10	0.096	180	0.67	39.3	発明例
80	100	8	600	10	0.128	220	0.67	39.3	発明例
81	100	8	800	10	0.144	240	0.68	39.3	発明例
82	100	8	1000	10	0.176	260	0.71	39.7	比較例
83	100	8	200	12	0.006	40	0.73	39.3	比較例
84	100	8	250	12	0.008	80	0.70	39.3	比較例
85	100	8	300	12	0.016	100	0.69	39.3	発明例
86	100	8	400	12	0.032	140	0.69	39.3	発明例
87	100	8	500	12	0.048	180	0.69	39.3	発明例
88	100	8	600	12	0.080	220	0.69	39.3	発明例
89	100	8	800	12	0.096	240	0.69	39.3	発明例
90	100	8	1000	12	0.128	260	0.71	39.3	比較例

10

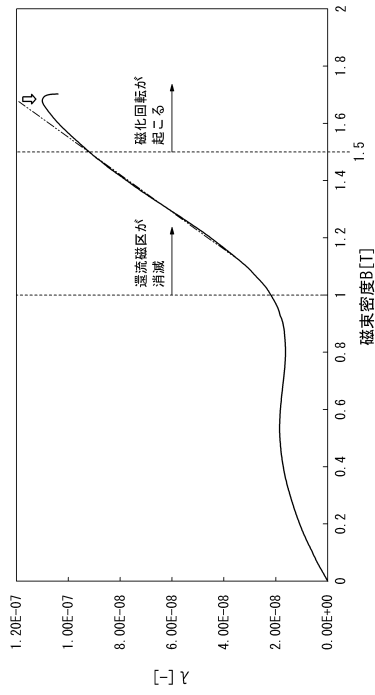
20

30

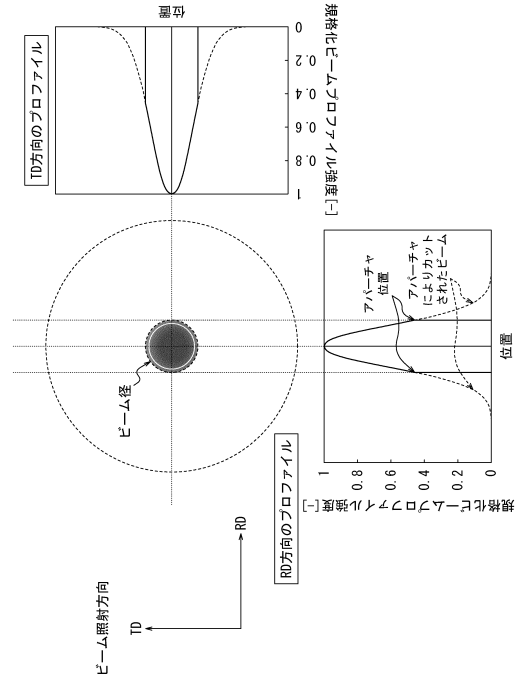
40

50

【図面】
【図 1】



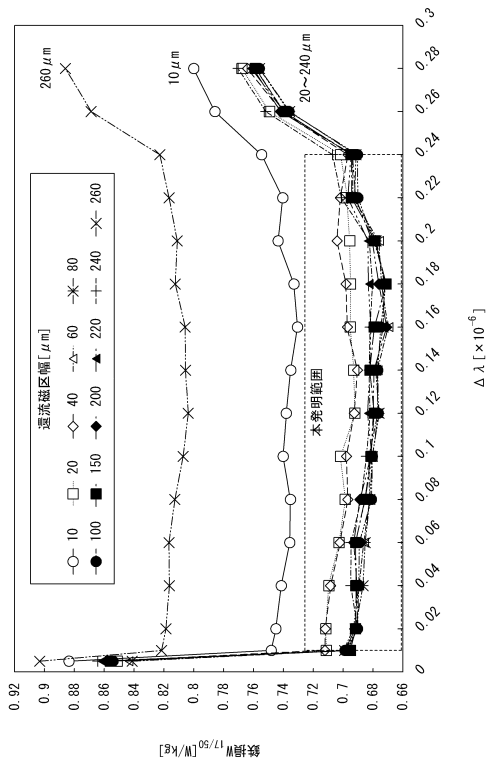
【図 2】



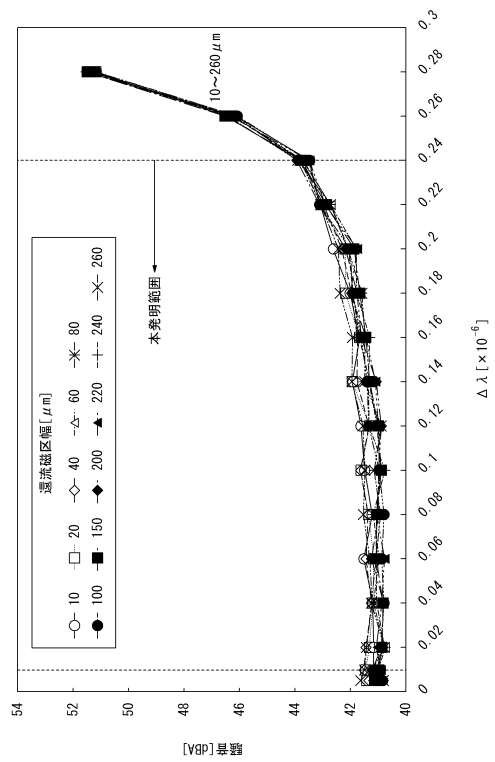
10

20

【図 3】



【図 4】

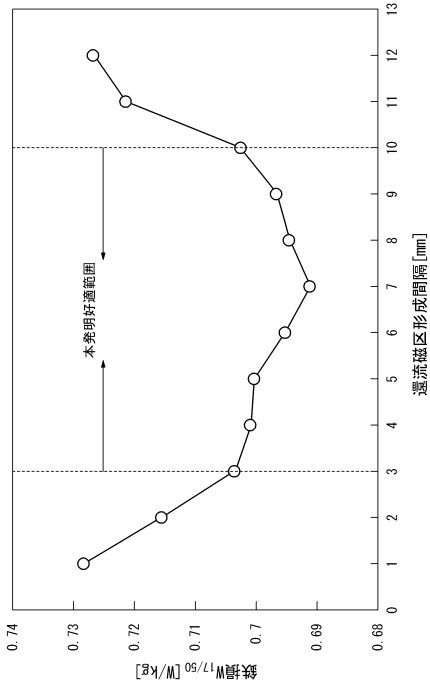


30

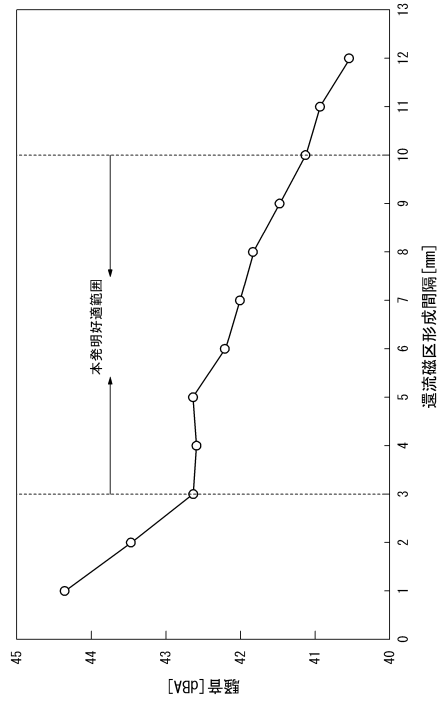
40

50

【 図 5 】



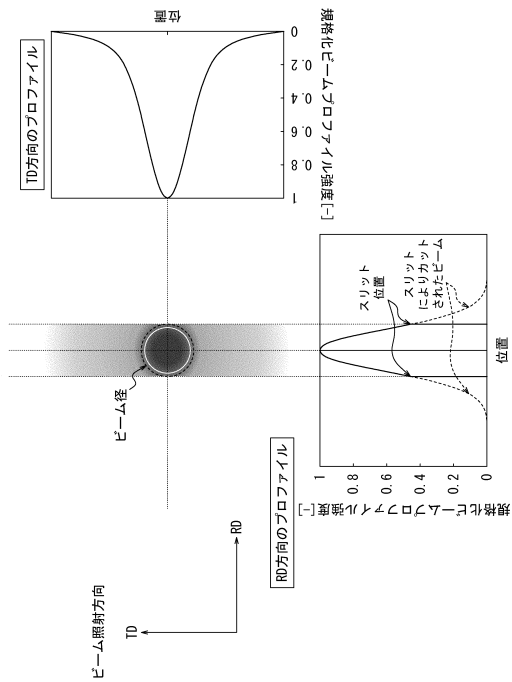
【 図 6 】



10

20

【 図 7 】



30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 千田 邦浩

東京都千代田区内幸町二丁目2番3号 J F E スチール株式会社内

審査官 鈴木 葉子

(56)参考文献 特開2002-069594(JP,A)

特開平11-279645(JP,A)

特開2001-181805(JP,A)

特表2019-536893(JP,A)

米国特許第06070317(US,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

C22C 38/00 - 38/60

C21D 8/12, 9/46

H01F 1/12 - 1/38, 1/44