

明 細 書

発明の名称：ロータコア、ロータ、および回転電機

技術分野

[0001] 本発明は、ロータコア、ロータ、および回転電機に関する。本願は、2021年11月15日に日本に出願された特願2021-185697号に基づき優先権を主張し、それらの内容を全てここに援用する。

背景技術

[0002] IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) など、永久磁石埋込型の回転電機では、ロータコア内に永久磁石が埋め込まれると共に、永久磁石の近傍にフラックスバリアが形成される。フラックスバリアは、回転電機内の磁束の流れを制御するために形成される。フラックスバリアにより、回転電機の特性を向上させることができる。特許文献1には、永久磁石が設置される磁石穴にフラックスバリアが設置されることが記載されている。当該フラックスバリアは、永久磁石よりも外周側と内周側とのそれぞれに設置される。また、特許文献1には、外周側のフラックスバリアをロータコアの外周側において開放させることが記載されている。また、特許文献1には、内周側のフラックスバリアの曲率が、内周側のフラックスバリアの間の磁石間ブリッジ部の応力が軽減されるように定められることが記載されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2019-57984号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、特許文献1に記載の技術では、ロータコアの外周面を介した磁束の短絡を抑制する観点からでしか、外周側のフラックスバリアの構成を定めていない。このため、ロータのトルクを十分に向上させることができ

ない。

[0005] 本発明は、以上のような問題点に鑑みてなされたものであり、ロータのトルクを増加させることを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 本発明のロータコアは、軟磁性材料を用いて形成され、1極当たり少なくとも一つの磁石穴を有する軟磁性体部を備えたロータコアであって、前記磁石穴は、当該磁石穴に設置される永久磁石に対し、当該永久磁石の磁化方向と回転の中心となる回転軸線に平行な方向とに垂直な左右方向の両側に、前方側フラックスバリアとなる空間および後方側フラックスバリアとなる空間を有し、前記前方側フラックスバリアとなる空間および前記後方側フラックスバリアとなる空間のうち、少なくとも一つのフラックスバリアとなる空間は、前記ロータコアの外周面において開放されている開放端部を有し、前記回転軸線に対して垂直な断面において、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の開放端部前方側コーナ部の位置は、当該開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置よりも、前記ロータコアの回転方向の後方側にあり、前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部は、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記ロータコアの回転方向における前方側のコーナ部であり、前記断面において、前記開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置は、当該磁石穴に設置される前記永久磁石のうち、当該開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石の端部の一つである永久磁石基準端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置であり、前記断面において、前記開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石の前記永久磁石基準端部は、当該永久磁石の端部のうち、当該永久磁石を含む一つの極の領域の前記周方向における中心の位置と、前記回転軸線と、を通る直線からの前記周方向における距離が最も遠い位置にある端部であり、前記開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石を含む一つの極の領域の前記周方向における中心の位置と、前記回転軸線と、を通る直

線からの前記周方向における距離は、前記ロータコアの回転方向における前方側および後方側のうち、当該開放端部が存在する側において定められる距離である。

本発明のロータは、前記ロータコアと、前記ロータコアに設置される複数の永久磁石と、を備える。

本発明の回転電機は、前記ロータと、前記ステータと、を備える。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]図1は、IPMSMの基本形状の一例を示す図である。

[図2]図2は、図1に示すIPMSMのロータ断面を示す図である。

[図3]図3は、IPMSMの最適形状の一例を示す図である。

[図4A]図4Aは、最適形状のIPMSMにおける磁束密度ベクトルの第1の解析結果を示す図である。

[図4B]図4Bは、第1の解析結果の磁束の流れの概略の一例を説明する図である。

[図5A]図5Aは、最適形状のIPMSMにおける磁束密度ベクトルの第2の解析結果を示す図である。

[図5B]図5Bは、第2の解析結果の磁束の流れの概略の一例を説明する図である。

[図6A]図6Aは、永久磁石の残留磁束密度が0.4Tである場合の基本形状のIPMSMにおける磁束密度ベクトルの一例を示す図である。

[図6B]図6Bは、永久磁石の残留磁束密度が0.4Tである場合の基本形状のIPMSMにおける磁束の流れの概略の一例を説明する図である。

[図7A]図7Aは、永久磁石の残留磁束密度が1.0Tである場合の基本形状のIPMSMにおける磁束密度ベクトルの一例を示す図である。

[図7B]図7Bは、永久磁石の残留磁束密度が1.0Tである場合の基本形状のIPMSMにおける磁束の流れの概略の一例を説明する図である。

[図8]図8は、実施形態のIPMSMの構成の一例を示す図である。

[図9]図9は、実施形態のロータ断面の一例を示す図である。

[図10]図10は、実施形態のロータコアの構成の一例を示す図である。

[図11A]図11Aは、図10に示すロータコアの一部分を拡大して示す図である。

[図11B]図11Bは、ロータコアの構成の第1変形例を示す図である。

[図11C]図11Cは、ロータコアの構成の第2変形例を示す図である。

[図12A]図12Aは、解析実行対象のロータの構成の第1の例を示す図である。

[図12B]図12Bは、解析実行対象のロータの構成の第2の例を示す図である。

[図12C]図12Cは、解析実行対象のロータの構成の第3の例を示す図である。

[図12D]図12Dは、解析実行対象のロータの構成の第4の例を示す図である。

[図12E]図12Eは、解析実行対象のロータの構成の第5の例を示す図である。

[図12F]図12Fは、解析実行対象のロータの構成の第6の例を示す図である。

[図12G]図12Gは、解析実行対象のロータの構成の第7の例を示す図である。

[図12H]図12Hは、解析実行対象のロータの構成の第8の例を示す図である。

[図12I]図12Iは、解析実行対象のロータの構成の第9の例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、図面を参照しながら、本発明の一実施形態を説明する。

なお、長さ、位置、大きさ、間隔等、比較対象が同じであることは、比較対象が厳密に同じであることの他、発明の主旨を逸脱しない範囲で比較対象が異なることも含む。例えば、比較対象が同じであることには、比較対象が

設計時に定められる公差の範囲内で異なることも含む。また、各図において、 $x-y-z$ 座標は、各図における向きの関係を示すものである。 $x-y-z$ 座標において、白丸（○）の中に黒丸（●）が付されている記号は、紙面の奥側から手前側に向かう方向が正の方向である矢印線を示す記号である。また、各図において、表記の都合上、同一の構成要素が複数ある場合、当該複数の構成要素のうちの一部の構成要素の符号の図示を省略する。また、以下では、当該複数の構成要素の説明を、必要に応じて、当該複数の構成要素のうち符号を付した構成要素を用いて行う。

[0009]（経緯）

本発明者らは、特開2021-114099号公報において、IPMSMのロータコアを始めとする各種のコアの形状を設計する手法を提案した。そこで、本発明者らは、当該手法を用いて、ロータコアの形状としてトルクの向上に寄与する形状を探索した。後述する本発明の実施形態は、その結果に基づいてなされたものである。以下に、その結果について説明し、後述する本発明の実施形態に至った経緯を説明する。

[0010] 特開2021-114099号公報の明細書に記載の手法においては、設計対象要素の基本形状の設定が必要である。本欄では、図1に示すIPMSM100が備えるロータ110におけるフラックスバリア113a～113b、114a～114bの形状を設計対象要素の基本形状とする場合を例示する。そこで、まず、図1に示すIPMSM100について説明する。

[0011] 図1では、IPMSM100の極数が8極である場合を例示する。図1において、「1極」と示している両矢印線の範囲がIPMSM100の1極を構成する部分である。なお、IPMSM100の極数が n 極である場合、IPMSM100は、概ね、IPMSM100の回転軸線0を回転対称軸とする n 回対称の回転対称性の関係を有する。 n は2以上の整数であり、図1に示す例では n は8である（ $n=8$ ）。図1は、IPMSM100の回転軸線0に垂直に切った断面を4等分した4つの領域の一つを示しており、IPMSM100の領域のうちロータ110の2極を構成する領域を示す。これら

4つの領域は、概ね、IPMSM100の回転軸線0を回転対称軸とする4(=8極÷2)回対称の関係を有する。したがって、図1において、IPMSM100中心線を回転軸線0として図1に示す領域を90°ずつ回転させることにより、IPMSM100の回転軸線0に垂直に切った場合のIPMSM100の断面の全体の構成が得られる。

[0012] 図1に示すように、IPMSM100は、ロータ110と、ステータ120と、を備える。

ステータ120は、ステータコア121と、不図示のステータコイルと、を備え、回転磁界を発生させるためのものである。なお、図1では、ステータ120が備えるステータコイルの図示を省略する。しかしながら、不図示のステータコイルは、ステータコア121の各スロット122に配置される(前述したように、表記の都合上、図1では一つのスロットのみに符号を付している)。

[0013] ロータ110は、IPMSM100の回転軸線0を回転軸線として回転する。本欄では、図1において「回転方向」の傍らに付している矢印線(紙面に向かって反時計回りの方向)にロータ110が回転する場合を例示する。なお、ロータ110の回転軸線0と、IPMSM100の回転軸線0と、は一致する。

ロータ110は、ロータコア111と、1極当たり複数の永久磁石(図1に示す例では2個の永久磁石112a~112b)と、を備える。ロータコア111は、軟磁性材料を用いて構成される。

[0014] ここでは、1極当たり複数の永久磁石112がロータコア111に設置される場合を例示する。したがって、ロータコア111には、ロータコア111の回転軸線0に平行な方向に沿って、1極当たり複数の磁石穴が形成される(以下の説明では、回転軸線0に平行な方向を、必要に応じてz軸方向と称する)。当該磁石穴は、z軸方向に貫通する貫通穴である。複数の永久磁石112a~112bは、それぞれ、ロータコア111に形成された前記磁石穴に挿入されることによって、ロータコア111内に設置(埋設)される

。前述したように図1では、IPMSM100の領域のうちロータ110の2極を構成する領域を示す。図1では、1極当たり2個の永久磁石112a～112bが埋設される。したがって、ロータコア111には合計で16個の永久磁石が埋設される。なお、前述したように、図1では、表記の都合上、ロータ110の1極を構成する部分にのみに符号を付し、ロータ110のその他の7極を構成する部分における符号を省略する。

[0015] ロータコア111に形成された前記磁石穴において、永久磁石112a～112bが存在しない空間は、フラックスバリア113a～113b、114a～114bとなる。フラックスバリア113a～113b、114a～114bは、磁束が通らない領域、または、当該フラックスバリア113a～113b、114a～114bの周囲の領域よりも磁束が通りづらい領域である。ここでは、フラックスバリア113a～113b、114a～114bには有体物が存在しない場合を例示する（すなわち、フラックスバリア113a～113b、114a～114bが空隙部（空気の領域）である場合を例示する）。しかしながら、フラックスバリア113a～113b、114a～114bに非磁性体が設置されていても、後述する図4A～図7Bに示す結果と同様の結果が得られる。

[0016] 以下の説明では、IPMSM100（ロータ110）の回転軸線Oに対して垂直に切った場合のロータ110の断面を、必要に応じてロータ断面と称する。図2は、図1に示すIPMSM100の1極分のロータ断面を示す図である。なお、図2では、各符号が指す位置が不明確になることを避けるために、断面を示すハッチングを省略する。

[0017] 図2において、永久磁石112a～112bの磁極面201a～201b、201c～201dから磁束が流出入する。また、図2において、磁極面201a～201b、201c～201dに直交する方向が永久磁石112a～112bの磁化方向Dmである。以下の説明では、ロータ断面において、永久磁石112a～112bの中心における永久磁石112の磁化方向Dmに対して左右両側の方向を、必要に応じて左右方向Dsと称する。左右方

向Dsは、永久磁石112の磁化方向Dmと、IPMSM100の回転軸線0に平行な方向と、に垂直な方向である。フラックスバリア113a～113b、114a～114bは、永久磁石112a～112bの左右方向Dsの両側に形成されている。

[0018] 以下の説明では、フラックスバリア113a～113b、114a～114bのうち、永久磁石112a～112bよりも左右方向Dsの外周側に位置するフラックスバリアを、必要に応じて、外周側フラックスバリア113a～113bと称する。また、フラックスバリア113a～113b、114a～114bのうち、永久磁石112a～112bよりも左右方向Dsの内周側に位置するフラックスバリアを、必要に応じて、磁石間フラックスバリア114a～114bと称する。

[0019] ブリッジ部116a～116bは、ロータコア111の軟磁性材料の領域を周方向において連結する（狭い）領域である。周方向とは、ロータ110（ロータコア111）の外周面115を巡る方向（ロータ110（ロータコア111）の回転方向に対して平行な方向および反平行な方向）である。ブリッジ部117aは、ロータコア111の軟磁性材料の領域を、IPMSM100の半径方向において連結する（狭い）領域である。以下の説明では、ブリッジ部116a～116b、117aのうち、永久磁石112a～112bよりも左右方向Dsの外周側（IPMSM100の半径方向の外周側）に位置するブリッジ部116a～116bを、必要に応じて、外周側ブリッジ部と称する。また、ブリッジ部116a～116b、117aのうち、永久磁石112a～112bよりも左右方向Dsの内周側（IPMSM100の半径方向の内周側）に位置するブリッジ部117aを、必要に応じて、磁石間ブリッジ部117aと称する。図2に示す例では、外周側ブリッジ部116a～116bは、外周側フラックスバリア113a～113bと、ロータコア111の外周面115と、の間に位置する軟磁性材料の領域である。また、磁石間ブリッジ部117aは、磁石間フラックスバリア114a～114bの間に位置する軟磁性材料の領域である。

[0020] ブリッジ部116a～116b、117aは、永久磁石112a～112bから流出した磁束が当該永久磁石112に戻ることを抑制するためのものである。ブリッジ部116a～116b、117aにおいては、磁束の進行方向に垂直な断面の面積が他の領域よりも小さい。したがって、ブリッジ部116a～116b、117aの磁気抵抗は、ロータコア111を構成する軟磁性材料の他の領域の磁気抵抗よりも大きい。よって、ブリッジ部116a～116b、117aを設けることにより、永久磁石112a、112bから流出した磁束が当該永久磁石112に戻ることを抑制することができる。ブリッジ部116a～116b、117aは、ロータコア111の機械的強度を担保するために存在する。ブリッジ部116a～116b、117aを通る磁束は、永久磁石112a～112bに還流するために、ロータ110のトルクに殆ど寄与しないというのがこれまでの当業者における技術常識である。以下の説明では、永久磁石の一方の磁極面から流出し、ブリッジ部を通して当該永久磁束の他方の磁極面に戻る（還流）する磁束を、必要に応じて、還流磁束と称する。

[0021] 本発明者らは、特開2021-114099号公報の明細書に記載の手法によりロータコア111の形状を設計した。その際、図1および図2に示すフラックスバリア113a～113b、114a～114bを設計対象要素（基本形状から形状を変更する要素）とした。また、永久磁石112を設計対象要素以外の所定のコアの要素（形状を変更しない要素）とした。また、永久磁石112の残留磁束密度を0.4Tとした。なお、永久磁石112の残留磁束密度は、例えば永久磁石112の仕様により予め定められている。また、不図示のステータコイルに流れる励磁電流を、ピーク値が20Aであり周波数が50Hzである三相交流電流とした。また、進角を30°とした。また、ロータ110の回転に伴いロータ110が受ける遠心力によりロータコア111に生じる応力を無視して、ロータ110の平均トルクの値を最大にすることを最適化問題のアルゴリズムにおける最適化条件とした。すなわち、図3に示す形状は、ロータコア111に生じる応力が過大になること

が許容される場合の最適形状である。したがって、図3に示す形状は、最適化条件が満足されれば、ロータコア111の形状が実現可能な形状であるか否かは考慮されていない形状である。以下の説明では、このようにして設計される形状のIPMSMと区別するために、図1に示すIPMSM100を、必要に応じて、基本形状のIPMSM100と称する。図3は、基本形状のIPMSM100から特開2021-114099号公報の明細書に記載の手法でロータ110の平均トルクの値が最大になるように最適化されたIPMSM100の構成の一例を示す図である。以下の説明では、図3に示すIPMSM100を、必要に応じて、最適形状のIPMSM100と称する。以下に、図3に示すIPMSM100を最適形状のIPMSM100から本発明者らが得た知見について説明する。

[0022] ((第1の知見))

前述したように、図3に示す最適形状は、ロータコア111に生じる応力が過大になることを許容する場合の形状である。外周側ブリッジ部116a～116bは軟磁性材料で構成される。したがって、外周側ブリッジ部116a～116bよりも空気の方が透磁率は小さいため、外周側ブリッジ部116a～116bよりも空気の方が磁気抵抗は大きい。よって、図3に示す最適形状のIPMSM100では、図1および図2に示した外周側フラックスバリア113a～113b（の一部）は、ロータコア111の外周面115に到達して外部に開放（連通）するように、外周側フラックスバリア113c～113dが形成される。換言すれば、ロータコア111（軟磁性体部）の外周面115には、外周側フラックスバリア113c～113dによって開放端部が形成される。当該開放端部の長手方向は、z軸方向に平行な方向であり、当該開放端部の短手方向は、周方向であり、当該開放端部は、外部に連通する。なお、開放端部は、開放されている端部であり、実在する面ではなく仮想面である。図2に示す基本形状のIPMSM100では、外周側ブリッジ部116a～116bが存在する。したがって、外周側フラックスバリア113a～113bは外周面115に到達しておらず、閉じている

。この点で、図2と図3とは異なる。一方、図3に示す最適形状のIPMSM100において、外周側フラックスバリア113c～113dはロータコア111の外周面115に到達して開放している。このことから、図1および図2に示す外周側ブリッジ部116a～116bを通過する磁束の多くは還流磁束であると言える。

[0023] 図3に示す外周側フラックスバリア113c～113dにより還流磁束が低減される。このことに加え本発明者らは、図3に示すように、外周側フラックスバリア113c～113dの開放端部310c～310dが、ロータコア111の回転方向の後方側（回転方向の逆側）にずれていることに着目した。そして、本発明者らは、外周側フラックスバリア113d～113dが、これまでの技術常識として知られている還流磁束の低減以外の役割を果たしているのではないかと考えた。

[0024] そこで、本発明者らは、図3に示す最適形状のIPMSM100における電磁界解析の結果（磁束密度ベクトル）のうち、外周側フラックスバリア113c～113d付近の結果を確認した。なお、図3において、 r 、 θ は、それぞれ、極座標（円座標）における動径、偏角を表す。図3において、ロータコア111の回転軸線0に対して垂直に切った場合のロータコア111の断面での回転軸線0の位置を極座標の原点0とする。また、原点0から外側に向かう方向が動径方向（IPMSM100の半径方向）の正の方向であり、紙面に向かって反時計回りの方向（回転方向）が偏角の正の方向であるものとする。なお、外側とは、ロータコア811の外周面818が存在する側である。

[0025] 図4A～図4Bは、最適形状のIPMSM100における電磁界解析の結果を説明する図である。図4Aは、最適形状のIPMSM100における磁束密度ベクトルの一例を示す図である。図4Bは、最適形状のIPMSM100における磁束のうち、ロータコア111の外周面115付近の磁束の流れの概略の一例を説明する図である。図4Aでは、磁束密度ベクトルを、その大きさに応じた濃度を有する矢印線で表現する。しかしながら、図4

Aでは、表記の都合上、磁束密度ベクトルの特徴を明確に表せない。そこで、説明の便宜のため、図4 Bに、最適形状のIPMSM100における磁束のうち、説明に必要な磁束の流れの概略を示す。図4 Bにおいて、永久磁石112a～112b内に示す「N」および「S」は、ロータ110の磁極（N極およびS極）を示す。したがって、永久磁石112a、112bの磁極面201a、201cはN極の磁極面であり、磁極面201b、201dはS極の磁極面である。

[0026] また、図4 Bにおいて、ステータコア121のティース123a～123d内に示す矢印線は、ロータ110およびステータ120の位置関係が図4 Aおよび図4 Bに示す位置関係であるときの時刻に、ステータコア121のティース123a～123dに発生している磁束を示す。具体的に、ステータコア121のティース123a～123b内に示す矢印線は、ステータコア121のティース123a～123bにおいて、IPMSM100の回転軸線0からIPMSM100の半径方向に沿って外側に向かう方向の磁束が発生していることを示す。一方、ステータコア121のティース123c～123d内に示す矢印線は、ステータコア121のティース123c～123dにおいて、IPMSM100の半径方向に沿ってIPMSM100の回転軸線0に向かう方向の磁束が発生していることを示す。また、矢印線の本数は、ステータコア121のティース123c～123dにおける磁束量（磁束密度）の相対的な大小関係を表す。なお、矢印線の本数が多いほど磁束量（磁束密度）の比は必ずしも矢印線の本数の比と一致するものではない。また、ロータ110のトルクの瞬時値は、ロータ110が1回転している間に変化する。ロータ110およびステータ120の位置関係が図4 Aおよび図4 Bに示す位置関係であるときの時刻は、ロータ110のトルクの瞬時値が最大となる時刻である。

[0027] また、図4 Bにおいて、ロータ110（ロータコア111）からステータ120（ステータコア121）に向かって延びている矢印線は、ロータ11

0 (ロータコア 1 1 1) からステータ 1 2 0 (ステータコア 1 2 1) に向かって流れる磁束の向きを示す。また、ステータ 1 2 0 (ステータコア 1 2 1) からロータ 1 1 0 (ロータコア 1 1 1) に向かって延びている矢印線は、ステータ 1 2 0 (ステータコア 1 2 1) からロータ 1 1 0 (ロータコア 1 1 1) に向かって流れる磁束の向きを示す。図 4 B では、表記の都合上、これらの矢印線により表される磁束 $\phi 1$ 、 $\phi 2$ 、 $\phi 3$ を、いずれも 1 本の矢印線で表す。しかしながら、磁束 $\phi 1$ 、 $\phi 2$ 、 $\phi 3$ の磁束量は、必ずしも同じではない。

[0028] 図 4 A～図 4 B に示す結果は、ロータコア 1 1 1 が、紙面に向かって反時計回りの方向に回転する場合の結果である。したがって、同一の極における 2 個の永久磁石 1 1 2 a～1 1 2 b のうち、回転方向における前方側 (回転方向側) に位置する永久磁石は永久磁石 1 1 2 a であり、後方側に位置する永久磁石は永久磁石 1 1 2 b になる (図 4 B において「前方側」および「後方側」の傍らに付している矢印線を参照)。以下の説明では、回転方向における前方側に位置する永久磁石 1 1 2 a を、必要に応じて、前方側の永久磁石 1 1 2 a と称する。また、回転後方における後方側に位置する永久磁石 1 1 2 b を、必要に応じて、後方側の永久磁石 1 1 2 b と称する。

[0029] 外周側フラックスバリア 1 1 3 c により、前方側の永久磁石 1 1 2 a の一方の磁極面 (例えば N 極) から、図 2 に示す外周側ブリッジ部 1 1 6 a を経由して、他方の磁極面 (例えば S 極) に還流する還流磁束が低減される。同様に、外周側フラックスバリア 1 1 3 b により、後方側の永久磁石 1 1 2 b の一方の磁極面 (例えば N 極) から、図 2 に示す外周側ブリッジ部 1 1 6 b を経由して、他方の磁極面 (例えば S 極) に還流する還流磁束が低減される。

[0030] ところで、ロータ 1 1 0 のトルクは、ロータ 1 1 0 (ロータコア 1 1 1) およびステータ 1 2 0 (ステータコア 1 2 1) 間のギャップ (空隙) G における磁束密度ベクトルの動径方向 (IPMSM 1 0 0 の半径方向) 成分 B_r および周方向成分 B_θ の内積に比例する。以下の説明では、動径方向 (IPMSM

M100の半径方向)成分を、必要に応じて、半径方向成分と称する。したがって、図3に示すように極座標系を定める場合、ロータ110からステータ120に向かう方向の磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r および周方向成分 B_θ が共に正であり、且つ、当該磁束密度ベクトルの方向がIPMSM100の半径方向に対して大きく傾く方向である場合に、ロータ110のトルクは大きくなる。

[0031] 図4Bにおいて、ロータコア111の外周面115の領域のうち外周側フラックスバリア113cよりもIPMSM100の回転方向の後方側の領域からステータコア121のティース123aに向かう磁束 ϕ_1 は、IPMSM100の半径方向に対して大きく傾いている。これは、外周側フラックスバリア113cの開放端部310cが、ロータコア111の回転方向の後方側(回転方向の逆側)にずれているためであると考えられる。

[0032] 以上のことから、本発明者らは、外周側フラックスバリア113の開放端部310をロータコア111の回転方向の後方側(回転方向の逆側)にずらすことにより、ロータ110のトルクを大きくすることができるという第1の知見を得た。以下の説明では、ロータコア111の外周面115の領域のうち外周側フラックスバリア113cよりもIPMSM100の回転方向の後方側の領域からステータコア121のティース123aに向かう磁束 ϕ_1 を、必要に応じて、外周側フラックスバリア113cの後方側の磁束 ϕ_1 と称する。

[0033] なお、図4Bにおいて、外周側フラックスバリア113cの後方側の磁束 ϕ_1 と逆向きの磁束もロータ110のトルクの増大に寄与する。磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r および周方向成分 B_θ が共に負になるからである。

[0034] ((第2の知見))

また、本発明者らは、図3に示す最適形状のIPMSM100において、外周側フラックスバリア113c~113dとは別の位置に窪み部118a、119aが形成されていることに着目した。そこで、本発明者らは、図3に示す最適形状のIPMSM100における電磁界解析の結果(磁束密度ベ

クトル)のうち、窪み部118a、119a付近の結果を確認した。

[0035] 図3に示すように極座標系を定める場合、ステータ120からロータ110に向かう磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r および周方向成分 B_θ が共に負であり、且つ、当該磁束密度ベクトルの方向がIPMSM100の半径方向に対して大きく傾く方向である場合に、ロータ110のトルクは大きくなる。

[0036] また、前述したように、図4Aに示す電磁界解析の結果は、不図示のステータコイルに流れる励磁電流が三相交流電流である場合の結果である。したがって、IPMSM100には回転磁界が発生する。ロータコア110(ロータコア111)の回転周期と、ステータコア121(ティース123)に生じる回転磁界の回転周期とは同じである。したがって、ロータコア111と回転磁界との位置関係は、ロータコア111が回転しても変わらない。なお、本願で用いる励磁電流は、三相交流電流には限定されない。

[0037] よって、図4Bにおいて、窪み部118aは、ロータコア111が回転しても、高磁束密度のティース123a、123c(矢印線の本数が2本のティース123a、123c)と対向する。ステータコア121のティース123cからロータコア111の外周面115の領域のうち窪み部118aよりもIPMSM100の回転方向の後方側の領域に向かう磁束 ϕ_2 は、IPMSM100の半径方向に対して傾いており、且つ、当該磁束 ϕ_2 による磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r および周方向成分 B_θ は共に負である。

[0038] したがって、ステータコア121のティース123cからロータコア111の外周面115の領域のうち窪み部118aよりもIPMSM100の回転方向の後方側の領域に向かう磁束 ϕ_2 は、ロータ110のトルクの増大に寄与する。以下の説明では、ステータコア121のティース123cからロータコア111の外周面115の領域のうち窪み部118aよりもIPMSM100の回転方向の後方側の領域に向かう磁束 ϕ_2 を、必要に応じて、窪み部118aの後方側の磁束 ϕ_2 と称する。

[0039] 一方、ステータコア121のティース123cからロータコア111の外

周面 115 の領域のうち窪み部 118 a よりも IPMSM 100 の回転方向の前方側の領域に向かう磁束 $\phi 3$ は、IPMSM 100 の半径方向に対して傾いており、且つ、当該磁束 $\phi 3$ による磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r 、周方向成分 B_θ はそれぞれ、負、正である。したがって、ステータコア 121 のティース 123 c からロータコア 111 の外周面 115 の領域のうち窪み部 118 a よりも IPMSM 100 の回転方向の前方側の領域に向かう磁束 $\phi 3$ は、ロータ 110 のトルクの増大に寄与しない。以下の説明では、ステータコア 121 のティース 123 c からロータコア 111 の外周面 115 の領域のうち窪み部 118 a よりも IPMSM 100 の回転方向の前方側の領域に向かう磁束 $\phi 3$ を、必要に応じて、窪み部 118 a の前方側の磁束 $\phi 3$ と称する。

[0040] よって、窪み部 118 a の後方側の磁束 $\phi 2$ が窪み部 118 a の前方側の磁束 $\phi 3$ よりも大きくなるように窪み部 118 a の大きさおよび位置を定めれば、ロータ 110 のトルクを大きくことができる。

[0041] 一方、図 4 B において、窪み部 119 a は、ロータコア 111 が回転しても、低磁束密度のティース 123 a、123 b（矢印線の数 2 本のティース 123 a、123 b）と対向する。したがって、窪み部 119 a は窪み部 118 a よりもロータ 110 のトルクの増大に寄与しない。また、窪み部の数が多くなると、ロータ 110（ロータコア 111）の機械的強度が低下する虞がある。

[0042] 以上のことから、本発明者らは、ロータコア 111 の外周面 115 の領域のうち、最低の磁束密度よりも高い磁束密度のティース 123 a、123 b と対向する位置に窪み部 118 a を設けることにより、ロータ 110 のトルクを大きくすることができるという第 2 の知見を得た。

[0043] なお、ステータコア 121 のティース 123 a～123 d のうち、どのティースが最低の磁束密度のティースであるのかは、例えば、図 4 A に例示するような電磁界解析の結果から特定される。

[0044] また、図 4 B において、窪み部 118 a の後方側の磁束 $\phi 2$ と同様に、窪

み部 118a の後方側の磁束 $\phi 2$ と逆向きの磁束もロータ 110 のトルクの増大に寄与する。磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r および周方向成分 B_θ が共に正になるからである。また、窪み部 118a の前方側の磁束 $\phi 3$ と同様に、窪み部 118a の前方側の磁束 $\phi 3$ と逆向きの磁束もロータ 110 のトルクの増大に寄与しない。磁束密度ベクトルの半径方向成分 B_r 、周方向成分 B_θ が、それぞれ、負、正になるからである。

[0045] ((第3の知見))

図1および図2において、磁石間ブリッジ部 117 は軟磁性材料で構成される。したがって、磁石間ブリッジ部 117 よりも空気の方が透磁率は小さい。したがって、磁石間ブリッジ部 117 よりも空気の方が磁気抵抗は大きい。よって、図1および図2に示した磁石間ブリッジ部 117a を含む全ての磁極間ブリッジ部がフラックスバリア（空隙部）であれば、磁石間ブリッジ部を構成する磁性体材料の領域が空隙部に置き換わることになる。この置き換わりにより、当該領域の透磁率は小さくなる。したがって、当該領域の磁気抵抗は増大する。よって、前述した技術常識によれば、還流磁束が低減されると考えられる。このことから、本発明者らは、図1および図2に示す外周側ブリッジ部 116a ~ 116b のみならず磁石間ブリッジ部 117a もフラックスバリア（空隙部）になると予想した。しかしながら、図3に示す最適形状の IPMSM100 では、この予想とは異なる結果となった。しかしながら、図3に示す最適形状の IPMSM100 では、磁石間フラックスバリア 114c ~ 114d のように、図1および図2に示した磁石間フラックスバリア 114a ~ 114b は繋がらない。すなわち、図3に示す最適形状の IPMSM100 では、磁石間ブリッジ部 117b のように、図1および図2に示した磁石間ブリッジ部 117a の一部が残っている。このように図3に示す最適形状の IPMSM100 は、前述した予想とは異なる形状となった。

[0046] また、図1および図2において、磁石間ブリッジ部 117a よりも外周側ブリッジ部 116a ~ 116b の方がステータ 120 に近い位置にある。し

たがって、外周側ブリッジ部 116 a ~ 116 b を通過する磁束の方が、磁石間ブリッジ部 117 a を通過する磁束よりも、ステータ 120 側に向かい易くなる。よって、周側ブリッジ部 116 a ~ 116 b を通過する磁束の方が、磁石間ブリッジ部 117 a を通過する磁束よりも、還流磁束になりづらいと考えられる。このことから、外周側フラックスバリア 113 a ~ 113 b がロータコア 111 の外周面 115 に到達することよりも、磁石間フラックスバリア 114 a ~ 114 b 同士が繋がった方が、ステータ 120 側に向かう磁束を増やすことができると考えられる。しかしながら、前述したように、図 3 に示す最適形状の IPMSM 100 は、これとは逆の結果を示す形状となった。

[0047] そこで、本発明者らは、図 3 に示す最適形状の IPMSM 100 における電磁界解析の結果（磁束密度ベクトル）のうち、永久磁石 112 a ~ 112 b 付近の結果を確認した。

図 5 A ~ 図 5 B は、最適形状の IPMSM 100 における電磁界解析の第 2 の結果を説明する図である。図 5 A は、最適形状の IPMSM 100 における磁束密度ベクトルの一例を示す図であり、図 4 A と同じである。図 5 B は、最適形状の IPMSM 100 における磁束のうち、永久磁石 112 a ~ 112 b 付近の磁束の流れの概略の一例を説明する図である。

[0048] 図 5 B における表記の方法は、図 4 B における表記の方法と同じである。図 5 B において、永久磁石 112 a ~ 112 b から流出する磁束の向きを示す。永久磁石 112 a ~ 112 b から延びている矢印線は、ステータコア 121 のティース 123 c ~ 123 d 内に示す矢印線と同様の意味を持つ。すなわち、永久磁石 112 a ~ 112 b から延びている矢印線の本数は、永久磁石 112 a ~ 112 b から流出する磁束量（磁束密度）の相対的な大小関係を表すものとする。なお、永久磁石 112 a ~ 112 b から延びている矢印線の長さは、磁束の大きさとは無関係である。

[0049] 図 5 B において、前方側の永久磁石 112 a から流出する磁束の多くは、永久磁石 112 a ~ 112 b の間の磁石間ブリッジ部 117 b（図 2 に示し

た磁石間ブリッジ部 117a のうちフラックスバリアに置き換わっていない領域) に向かわずに、ステータ 120 側に向かう (磁束 $\phi 11$ を参照)。一方、後方側の永久磁石 112b から流出する磁束には、ステータ 120 側に向かう磁束 (磁束 $\phi 12$ を参照) の他に、永久磁石 112a ~ 112b の間の磁石間ブリッジ部を通過する磁束がある (磁束 $\phi 13$ 、 $\phi 14$ を参照)。しかしながら、後方側の永久磁石 112b から流出して永久磁石 112a ~ 112b の間のブリッジ部を通過する磁束は、後方側の永久磁石 112b に戻らずに、前方側の永久磁石 112a (磁束 $\phi 13$ を参照) や、前方側の永久磁石 112a よりも IPMSM100 の内周側の領域を通過してステータ 120 に向かう (磁束 $\phi 14$ を参照)。

[0050] このように、永久磁石 112a ~ 112b の間に磁石間フラックスバリア 114c ~ 114d を設けた場合、永久磁石 112a ~ 112b の間の磁石間ブリッジ部を通過する磁束の中に、還流磁束にならずにロータ 110 のトルクに寄与する磁束 $\phi 13$ 、 $\phi 14$ が存在する。したがって、磁石間ブリッジ部 117a を設けることにより、ロータ 110 のトルクに寄与する磁束を発生させることができる (図 5B に示す磁束 $\phi 13$ を参照)。また、外周側ブリッジ部 116a ~ 116b を外周面 115 に到達させて開放させることにより、還流磁束を減らしてステータ 120 側に向かう磁束を増やすことができる (図 5B に示す磁束 $\phi 11$ を参照)。すなわち、本発明者らは、磁石間ブリッジ部 117a を積極的に設けることと、外周側フラックスバリア 113a ~ 113b をロータコア 111 の外周面 115 まで拡大させて開放させることと、により、ロータコア 111 を分割せずに IPMSM100 のトルクを大きくすることができるという第 3 の知見を得た。

[0051] なお、ここでは、z 軸方向 (回転軸線の延びる方向) に垂直な方向におけるロータ 110 の断面 (x-y 断面) が、z 軸方向のいずれの位置においても同じである場合を例示する。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、ロータコア 111 に対して所謂スキューを施しても良い。具体的にスキューは、複数の軟磁性体ブロックを、z 軸を軸として所定角度

だけ同一方向に回転させた状態でz軸方向に積み重ねることで実現される。このようにする場合、各軟磁性体ブロックに永久磁石が設置される。したがって、例えば、各軟磁性体ブロックの磁石穴の数と、軟磁性体ブロックの数と、の積の数だけ永久磁石が必要になる。このようなスキューを施すことにより、回転電機の振動を抑制することができる。

[0052] ここで、軟磁性ブロックは、例えば、同じ大きさおよび形状を有する複数の軟磁性体板をそれらの輪郭（内縁および外縁）が合うように積み重ねることにより製造される。各軟磁性体ブロックに用いる軟磁性体板の形状および大きさは同じであっても異なっても良い。ただし、複数の軟磁性体ブロックを積み重ねた際に、各軟磁性体ブロックの外縁は一致するようにする。また、所定角度は、各軟磁性体ブロックで同じであっても異なっても良い。また、板状の軟磁性材料を用いずに軟磁性体ブロックを構成しても良い。

[0053] ((第4の知見))

さらに、本発明者らは、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が低いと、永久磁石112a～112bで発生する磁束量が小さくなる（磁束密度が低くなる）ため、磁束が還流しづらくなると考えた。そこで、図1に示した基本形状のIPMSM100に対して永久磁石112a～112bの残留磁束密度を0.4T、1.0Tとした場合のそれぞれにおける電磁界解析を実行した。図6A～図6Bは、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が0.4Tである場合の基本形状のIPMSM100における電磁界解析の結果の一例を示す図である。図7A～図7Bは、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が1.0Tである場合の基本形状のIPMSM100における電磁界解析の結果の一例を示す図である。なお、図4A～図7Bにおいて、永久磁石112a～112bの残留磁束密度およびロータコア111の形状以外の条件は同じである。

[0054] 図6A、図7Aはそれぞれ、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が0.4T、1.0Tである場合の基本形状のIPMSM100における磁

束密度ベクトルの一例を示す図である。図6B、図7Bはそれぞれ、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が0.4T、1.0Tである場合の基本形状のIPMSM100における磁束の流れの概略の一例を説明する図である。図6Bおよび図7Bは、図4Bおよび図5Bと同様に、説明の便宜のため、基本形状のIPMSM100における磁束のうち、説明に必要な磁束の流れの概略を示すものである。なお、図6Bおよび図7Bにおける矢印線の意味は、図5Bにおける矢印線の意味と同じである。

[0055] 図6Bにおいて、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が0.4Tであると、永久磁石112a～112bから流出した磁束の多くは、外周側ブリッジ部116a～116bを通過する還流磁束である（磁束 $\phi 25$ 、 $\phi 26$ を参照）。このことは、図3に示した最適形状のIPMSM100において、図1および図2に示した外周側フラックスバリア113a～113b（の一部）がロータコア111の外周面115に到達して開放するという結果が得られることに対応する。また、図6Bにおいて、磁石間ブリッジ部117aを通過する磁束の多くは、図5Bに示した磁束 $\phi 13$ ～ $\phi 14$ と同様に、還流磁束にならない磁束である（図5Bに示す磁束 $\phi 13$ ～ $\phi 14$ と図6Bに示す磁束 $\phi 23$ ～ $\phi 24$ を参照）。

[0056] 一方、図7Bにおいて、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が1.0Tであると、永久磁石112a、112bから流出し、磁石間ブリッジ部117aを通過する磁束の多くが還流磁束になる（磁束 $\phi 33$ 、 $\phi 34$ を参照）。図7Aに示す結果では、磁石間ブリッジ部117aを通過する磁束は還流磁束が支配的であった。このことから、永久磁石112a～112bの残留磁束密度が高いと、図5Bおよび図6Bに示した還流磁束にならない磁束 $\phi 13$ ～ $\phi 14$ 、 $\phi 23$ ～ $\phi 24$ が少なくなることが分かる。なお、図7Bにおいても、図6Bと同様に、永久磁石112a～112bから流出し、外周側ブリッジ部116a～116bを通過する還流磁束が存在する（磁束 $\phi 35$ 、 $\phi 36$ を参照）。また、図7Bにおいても、図6Bと同様に、永久磁石112a～112bからステータ120側に向かう磁束が存在する（

磁束 $\phi 31$ 、 $\phi 32$ を参照)。

[0057] 以上のように、本発明者らは、残留磁束密度が低い永久磁石112a～112bを用いると、還流磁束にならずにロータ110のトルクに寄与する磁束が磁石間ブリッジ部117aを通過する磁束に多く含まれるという第4の知見を得た。このことから、永久磁石112a～112bの残留磁束密度以外の条件が同じであれば、残留磁束密度が低い永久磁石112a～112bを用いる場合の方が、残留磁束密度が高い永久磁石112a～112bを用いる場合よりも、磁石間ブリッジ部117aを設けることによるロータ110のトルクの改善効果が大きくなると考えられる。したがって、残留磁束密度が低い永久磁石112a～112bをロータコア111に設置することにより、ロータ110のトルクの改善効果を大きくすることができる。よって、例えば、レアアースを含有する永久磁石を用いなくてもロータ110のトルクを向上させることが可能になる。例えば、レアアースを含有しない永久磁石としてフェライト磁石などを用いてもロータ110のトルクを向上させることが可能になる。

以下に説明する本発明の実施形態は、以上の経緯でなされたものである。

[0058] なお、前述したように本欄では、図1において「回転方向」の傍らに付している矢印線の方法(紙面に向かって反時計回りの方向)にロータ110が回転する場合を例示した。しかしながら、本欄における説明は、ロータ110が回転する方向によって変わるものではない。なお、図1に示す当該矢印線の方法とは反対方向にロータ110が回転する場合、本欄の説明において、前方側、後方側の永久磁石112は、それぞれ永久磁石112b、112aになる。また、ステータコア121のティース123a～123dにおける磁束の向きおよび磁束量(磁束密度)の大小関係が図4A～図7Bに示すものと入れ替わる。すなわち、図4B、図5B、図6B、および図7Bにおいて、ステータコア121のティース123a～123d内に示す外側を向く矢印線、内側を向く矢印線は、それぞれ内側、外側を向く。また、図4B、図5B、図6B、および図7Bにおいて、2本、1本の矢印線は、それぞ

れ 1 本、2 本の矢印線になる。

[0059] (実施形態)

以下、本発明の一実施形態を説明する。本実施形態では、回転電機がインナーロータ型の IPMSM である場合を例示する。図 8 は、IPMSM800 の構成の一例を示す図である。図 8 は、IPMSM800 (ロータ 810) の回転軸線 0) に対して垂直に切った場合の IPMSM800 の断面図である。図 1 と同様に、図 8 において、「1 極」と示している両矢印線の範囲が IPMSM800 の 1 極を構成する部分である。本実施形態では、IPMSM800 が 8 極である場合を例示する。しかしながら、IPMSM800 の極数は 8 極に限定されない。前述したように IPMSM800 の極数が n 極である場合、IPMSM800 は、概ね、IPMSM800 の回転軸線 0 を回転対称軸とする n 回対称の回転対称性の関係を有する。 n は 2 以上の整数であり、図 8 に示す例では n は 8 である ($n = 8$)。

[0060] 図 8 において、IPMSM800 は、ロータ 810 と、ステータ 120 と、を備える。ステータ 120 は、図 1 に示したステータ 120 と同じである。したがって、ここでは、図 1 に付した符号と同じ符号を付してステータ 120 についての詳細な説明を省略する。IPMSM800 は、例えば、以下のようにして定められるステータ 120 (不図示のステータコイルおよびステータコア 121) を備える。ステータコア 121 は、例えば、幅が一定のヨーク部と、24 個のティース部と、により構成される。ヨーク部の幅及びティース部の長さは、IPMSM800 の半径方向の長さである。ヨーク部の形状は、例えば、円環状である。24 個のティース部は例えば、ヨーク部の内周面に等間隔に設置される。ヨーク部の幅は、例えば、ステータ 120 の内径と外径の差の半分である。ティース部の長さは、例えば、ステータ 120 の内径と外径の差の 0.4 倍である。ティース部の先端 (回転軸線 0 側の端) には、突起部が形成される。突起部は、周方向の両側へ突出するように形成される。その突起部の周方向の長さとは幅は、例えば、ティース部の長さの 0.3 倍である。ただし、ステータ 120 の構成が、IPMSM のステ

ータとして一般的に採用される構成であれば、前述した知見は、ステータ 120 の構成によって変わらない。

[0061] 本実施形態では、ステータ 120 が備える不図示のステータコイルに流れる励磁電流が三相交流電流である場合を例示する。したがって、ステータコア 121（ティース 123）には、三相交流電流の周波数に応じた周期の回転磁界が発生する。なお、前述したように、図 8 でも図 1 と同様、ロータ 810 の 1 極を構成する部分にのみに符号を付しロータ 810 のその他の 7 極を構成する部分における符号を省略する。

[0062] ロータ 810 は、IPMSM 800 の回転軸線 0 を回転軸線として回転する。ロータ 810 は、図 8 の紙面に向かって反時計回りの方向および時計回りの方向のうちのいずれか一方のみの方向に回転する。本実施形態では、ロータ 810 が、図 8 の紙面に向かって反時計回りの方向に回転する場合を例示する（図 8 において「回転方向」の傍らに付している矢印線を参照）。図 9 は、ロータ 810 の構成（ロータ断面）の一例を示す図である。以下の説明では、ロータ 810 の回転方向を、必要に応じて、回転方向と略称する。なお、前述したように、図 9 でも図 8 と同様、ロータ 810 の 1 極を構成する部分にのみに符号を付しロータ 810 のその他の 7 極を構成する部分における符号を省略する。

[0063] 図 8 および図 9 において、本実施形態では、ロータ 810 が、ロータコア 811 と、1 極当たり複数の永久磁石 812a～812b と、を備える場合を例示する。具体的に本実施形態では、ロータ 810 が、ロータコア 811 と、1 極当たり 2 個の永久磁石 812a～812b を備える場合を例示する。ロータコア 811 は、軟磁性材料を用いて構成される。ロータコア 811 は、例えば、ロータ 810 の回転軸線 0 に沿って積層された複数枚の電磁鋼板を用いて作製される。ただし、ロータコア 811 は、必ずしも、積層された複数の電磁鋼板を用いて作製される必要はない。ロータコア 811 は、例えば、圧粉磁心、アモルファスコア、およびナノ結晶コアであっても良い。なお、ロータコア 811 が、圧粉磁心、アモルファスコア、ナノ結晶コアで

ある場合、ロータコア811を構成する軟磁性材料は、それぞれ、絶縁被覆された軟磁性粒子、アモルファス合金、ナノ結晶合金を用いて作製される。

[0064] 図10は、ロータコア811の構成の一例を示す図である。図10でも、図8および図9と同様に、ロータコア811の回転軸線0に対して垂直に切った場合のロータコア811の断面図である。以下の説明では、ロータコア811の回転軸線0に対して垂直に切った場合のロータコア811の断面を、必要に応じて、ロータコア断面と称する。なお、ロータコア811の回転軸線0と、IPMSM800の回転軸線0およびロータ810の回転軸線0と、は一致する。また、前述したように、図10でも図8および図9と同様、ロータコア811の1極を構成する部分にのみに符号を付しロータコア811のその他の7極を構成する部分における符号を省略する。

[0065] 図10に示すように本実施形態では、ロータコア811に、1極当たり複数の磁石穴817a～817bが作製されている場合を例示する。具体的に本実施形態では、ロータコア811に、1極当たり2個の磁石穴817a～817bが作製される場合を例示する。また、本実施形態では、複数の磁石穴817a～817bが、z軸方向に貫通する貫通穴である場合を例示する。図8～図10において、複数の永久磁石812a、812bは、それぞれ、ロータコア811に形成された磁石穴817a、817bに挿入されることで、ロータコア811内に設置（埋設）される。このように本実施形態では、ロータコア811は、永久磁石812a～812bが設置される磁石穴として1極当たり複数の磁石穴817a～817bを備える。したがって、図10に示す例では、磁石穴817aが、同一の極に設置される複数の磁石穴のうち、回転方向における前方側の磁石穴である。また、図10に示す例では、磁石穴817bが、ロータ810（ロータコア811）の回転方向における後方側の磁石穴である。以下の説明では、ロータ810（ロータコア811）の回転方向における前方側の磁石穴817aを、必要に応じて、前方側磁石穴817aと称する。また、以下の説明では、ロータ810（ロータコア811）の回転方向における後方側の磁石穴817bを、必要に応じ

て、後方側磁石穴 817b と称する。

[0066] また、ロータコア 811 には、永久磁石 812a～812b が設置されない穴 816 が作製されている。穴 816 は、z 軸方向に貫通する貫通穴であり、不図示のシャフト等が設置される。なお、穴 816、磁石穴 817a～817b 以外の穴がロータコア 811 に作製されても良い。これらの穴は、永久磁石 812a～812b が設置されていていてもされていなくても良い。

[0067] 図 9 において、本実施形態では、永久磁石 812a～812b の磁極面 901a～901d から磁束が流出入する場合を例示する。磁極面 901a～901d に直交する方向が、永久磁石 812a～812b の磁化方向 D_m である。図 9 に示すように、永久磁石 812a～812b の磁化方向 D_m は、永久磁石 812a～812b を横切るように示す両矢印線の方法である。図 8～図 10 において、永久磁石 812a～812b が設置される磁石穴 817a～817b は、磁石穴 817a～817b に設置される永久磁石 812a～812b の磁極面 901a～901d が、ロータコア 811 の外周面 818 に対して傾くように作製される。図 8～図 10 に示すように本実施形態では、磁石穴 817a～817b に設置される永久磁石 812a～812b の周方向の間隔が、ロータコア 811 の外周面 818 に近いほど広くなるように、磁石穴 817a～817b が作製される場合を例示する。このように本実施形態では、永久磁石 812a～812b がいわゆる V 字状に配置される場合を例示する。

[0068] (経緯) の欄の((第 4 の知見))の欄で説明したように、永久磁石 812a～812b による還流磁束を低減する観点から、永久磁石 812a～812b の残留磁束密度は、IPMSM800 における永久磁石としての機能を発揮することができる範囲で低い方が好ましい。なお、IPMSM800 における永久磁石としての機能を発揮するとは、永久磁石で発生する磁束の少なくとも一部がステータ 120 に到達することにより、ロータのトルクに寄与する磁束になることを指す。永久磁石 812a～812b の常温における残留磁束密度が 0.4 T を上回ると、永久磁石 812a～812b で発生する

磁束量が多くなることにより磁石間ブリッジ部821aを通過する磁束に含まれる還流磁束が多くなる。このため、還流磁束にならない磁束（図5Bに示す磁束 $\phi 13$ 、 $\phi 14$ を参照）によるロータ810のトルクの増大効果が低減する。さらに、永久磁石812a～812bの常温における残留磁束密度が0.8Tを上回ると、このようなロータ810のトルクの増大効果の低減が顕著になる。また、永久磁石812a～812bの常温における残留磁束密度が0.4Tを上回ると、レアアースを含有する永久磁石812a～812bを用いる必要がある場合が生じる。また、永久磁石812a～812bの常温における残留磁束密度が0.8Tを上回ると、多量のレアアースを含有する永久磁石812a～812bを用いる必要がある場合が生じる。

[0069] 以上の観点から、永久磁石812a～812bの常温における残留磁束密度は、0.8T以下が好ましく、0.4T以下がより好ましい。また、永久磁石812a～812bに含まれるレアアースは少ない方が好ましく、永久磁石812a～812bにレアアースが含有されていないのがより好ましい。ただし、IPMSMにおける永久磁石としての機能を発揮することができれば、永久磁石812a～812bの常温における残留磁束密度は、前述した範囲でなくても良い。

[0070] 図9において、フラックスバリア813a～813b、814a～814bは、図10に示す永久磁石812a～812bが設置される磁石穴817a～817bのうち、永久磁石812a～812bが存在しない空間である。フラックスバリア813a～813b、814a～814bには有体物が存在していない。すなわち、フラックスバリア813a～813b、814a～814bは、空隙部（空気の領域）となっている。フラックスバリア813a～813b、814a～814bは、磁束が通らない領域、または、当該フラックスバリア813a～813b、814a～814bの周囲の領域よりも磁束が通りづらい領域である。以上のように本実施形態では、フラックスバリア813a～813b、814a～814bに有体物が存在しない場合を例示する。しかしながら、必ずしもこのようにする必要はない。例

えば、図10に示す永久磁石812a～812bが設置される磁石穴817a～817bのうち、永久磁石812a～812bが存在しない空間に非磁性体を設置することにより、フラックスバリア813a～813b、814a～814bを構成しても良い。

[0071] 図9において、永久磁石812a～812bよりも左右方向Dsにおける外周側に位置するフラックスバリア813a～813bは、外周側フラックスバリアである。外周側フラックスバリア813a～813bは、ロータ断面において、ロータ810（ロータコア811）の外周面818に到達して開放している。一方、永久磁石812a～812bよりも左右方向Dsにおける内周側に位置するフラックスバリア814a～814bは、磁石間フラックスバリアである。磁石間フラックスバリア814a～814bは、z軸方向の端部以外では開放していない。なお、外周側とは、ロータコア811の外周面818側を指し、内周側とは、ロータコア811の内周面819側を指す。

[0072] 前述したように永久磁石812aは、永久磁石812bよりも前方側にある前方側永久磁石812aであり、永久磁石812bは、後方側永久磁石812bである。前方側永久磁石812aよりも外周側に位置する外周側フラックスバリア813aは、当該前方側永久磁石812aよりも回転方向における前方側に位置する。一方、後方側永久磁石812bよりも外周側に位置する外周側フラックスバリア813bは、当該後方側永久磁石812bよりも回転方向における後方側に位置する。

[0073] また、図10に示すようにロータコア811の外周面818には、窪み部815aが作製されている。窪み部815aは、ロータコア811の外周面818と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコア121のティース123のうち磁束密度が最低となるティース123b、123dとは異なるティース123a、123bと間隔を有して対向する位置に作製される。（経緯）の欄で説明したように、ロータコア811の回転周期とステータコア121（ティース123）に生じる回転磁界の回転周期とは同じである

。したがって、ロータコア811が回転しても、窪み部815aと対向する位置にあるティース123の磁束密度は同じである。本実施形態では、1極当たり1個の窪み部815aが作製される場合を例示する。しかしながら、1極当たりの窪み部815の数は2個以上であっても良い。窪み部815aと間隔を有して対向する位置に設置されるステータコア121のティース123a、123cの磁束密度は、高い方が好ましく、最高の磁束密度であるのがより好ましい。ロータ810のトルクを大きくすることができるからである。

[0074] 図11Aは、図10に示すロータコア811の一部分を拡大して示す図（ロータコア断面を示す図）である。図11Bおよび図11Cは、図11Aに対する変形例である。図10および図11A～図11Cを参照しながら、本実施形態のロータコア811の構成の一例を詳細に説明する。なお、図11A～図11Cでは、各符号が指す位置が不明確になることを避けるために、断面を示すハッチングの図示を省略する。

図10において、ロータコア811が占める領域のうち、軟磁性材料の領域（穴816、磁石穴817a～817b以外の領域）が軟磁性体部820である。図10および図11Aに示すように、ロータコア断面において、永久磁石812a～812bが設置される磁石穴817a～817bは、第1端部1111a～1111bと、第2端部1112a～1112bと、第3端部1113a～1113bと、第4端部1114a～1114bと、を有する。以下に、第1端部1111a～1111bと、第2端部1112a～1112bと、第3端部1113a～1113bと、第4端部1114a～1114bの一例を説明する。

[0075] まず、第1端部1111a～1111bについて説明する。第1端部1111a～1111bは、磁石穴817a～817bが有する外周側フラックスバリア813a～813bとなる空間の最も外周側に位置する端部である。第1端部1111a～1111bは、ロータコア断面において、ロータコア811の外周面818の位置で開放している開放端部である。このことか

ら、以下の説明において、第1端部1111を開放端部1011と称することもある。以下の説明では、ロータコア断面において、屈曲または湾曲している部分を、必要に応じて、コーナ部と称する。ただし、ロータコア811の外周面818のうち開放端部とは異なる領域（回転軸線0からの距離がロータ810の半径の長さである円弧の領域）はコーナ部ではないものとする。

[0076] ロータコア断面において、磁石穴817a～817bの屈曲している部分がコーナ部である場合、当該コーナ部の位置は当該屈曲している位置であるものとする。ロータコア断面において、磁石穴817a～817bの湾曲している部分がコーナ部である場合、当該コーナ部の位置は当該湾曲している部分（曲率を有している部分）の代表点の位置であるものとする。これらの詳細は後述する図11A～図11Cを参照しながら説明する。図11Aに示す例では、第1端部1111a～1111bは、ロータコア断面において、一つの磁石穴817a～817bの12個のコーナ部のうち、ロータコア811の外周面818（最も外周側）の位置にある2個のコーナ部1131a～1131b、1131c～1131dの一方から他方までの、周方向に沿う領域である。なお、周方向とは、ロータ810（ロータコア811）の外周面818を巡る方向（ロータ810（ロータコア811）の回転方向に対して平行な方向および反平行な方向）である。

[0077] 第1端部1111a～1111bの周方向の長さL1が短すぎると、第1端部1111a～1111bにおける磁気抵抗が小さくなりすぎる。その結果、周方向において磁石穴817a～817bを乗り越える磁束が多くなることにより、還流磁束が多くなる虞がある。一方、第1端部1111a～1111bの周方向の長さL1が長すぎると、外側部822a～822hが小さくなることにより、ロータ810のトルクに寄与する磁束が少なくなる虞がある。第1端部1111a～1111bの周方向の長さL1は、このような観点から適宜定められる。第1端部1111a～1111bの周方向の長さL1は、例えば、永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さL2

の0.1倍以上、1.0倍以下の範囲内から定めれば良い。なお、本実施形態では、永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さが一定である場合を例示する。しかしながら、永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さは一定でなくても良い。永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さが一定でない場合には、永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さL2の代表値（例えば平均値）を永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さとして、第1端部1111a～1111bの周方向の長さL1を定めれば良い。

[0078] また、ロータコア断面における磁石穴817a～817bのその他の領域の長さも、第1端部1111a～1111bの周方向の長さL1と同様に、還流磁束の抑制と、磁路および強度の確保と、の観点から定められる。例えば、ロータコア断面における磁石穴817a～817bの相互に対向する2つの端部間の長さの最小値は、例えば、永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さの0.1倍以上、1.0倍以下の範囲内から定めれば良い。

[0079] （経緯）の欄の((第1の知見))の欄で説明したように、外周側フラックスバリア813a～813bの開放端部である第1端部1111a～1111bをロータコア811の回転方向の後方側（回転方向の逆側）にずらすことにより、ロータ810のトルクを増大させる。このようにするために本実施形態では、図11Aに示すように、ロータコア断面において、開放端部である第1端部1111a、1111bの開放端部前方側コーナ部1131a、1131cの位置が、当該開放端部である第1端部1111a、1111bを有する磁石穴817a、817bに対する基準位置831a、831bよりも、ロータコア811の回転方向の後方側になるようにする。第1端部1111a、1111bの開放端部前方側コーナ部1131a、1131cは、ロータコア断面において、第1端部1111a、1111bのコーナ部のうち、ロータコア811の回転方向における前方側のコーナ部である。

[0080] ここで、開放端部である第1端部1111a、1111bを有する磁石穴817a、817bに対する基準位置831a、831bは、図11Aに示

すように、ロータコア断面において、当該磁石穴817a、817bに設置される永久磁石812a、812bの端部の一つである永久磁石基準端部841a、841bと回転軸線0とを通る直線1172、1174と、ロータコア811の外周面818と、の交点の位置にある。開放端部である第1端部1111a、1111bを有する磁石穴817a、817bの永久磁石基準端部841a、841bは、当該磁石穴817a、817bに設置される永久磁石812a、812bの端部のうち、個々の開放端部（第1端部1111aまたは1111b）に最も近い位置にある一つの永久磁石812aまたは812bが有する端部である。開放端部である第1端部1111a、1111bを有する磁石穴817a、817bの永久磁石基準端部841a、841bは、当該開放端部に最も近い位置にある一つの永久磁石812aまたは812bの端部のうち、ロータコア断面において、当該永久磁石812aまたは812bを含む（ロータの）一つの極（磁極）の領域（図3において破線で囲まれる領域）の周方向における中心の位置と回転軸線0（原点0）とを通る直線1177からの周方向における距離が最も遠い位置にある端部である。ここで、直線1177からの周方向における距離は、ロータコア811の回転方向における前方側および後方側のうち当該開放端部が存在する側において定められる距離である。図11Aに示すように、開放端部である第1端部1111aを有する磁石穴817aの永久磁石基準端部841aは、永久磁石812aの端部のうち、直線1177よりも第1端部1111a側である前方側において、直線1177からの周方向における距離が最も遠い位置にある端部である。また、開放端部である第1端部1111bを有する磁石穴817bの永久磁石基準端部841bは、永久磁石812bの端部のうち、直線1177よりも第1端部1111b側である後方側において、直線1177からの周方向における距離が最も遠い位置にある端部である。

[0081] なお、図11Aでは、表記の都合上、複数の回転軸線0を示すが、実際の回転軸線0は、図8～図10に示すように1個である（図11Aに示す回転

軸線Oは一つの位置で重なる)。このことは、後述する図11Bおよび図11Cでも同じである。本実施形態では、磁石穴817a、817bは、直線1177に対し、ロータコア811の回転方向における前方側、後方側に、それぞれある。したがって、永久磁石基準端部841a、841bは、直線1177に対し、ロータコア811の回転方向における前方側、後方側の一方のみに、それぞれ存在する。これに対し、例えば、磁石穴817a～817bが、直線1177を跨ぐように配置されており、且つ、当該磁石穴817a～817bに設置される永久磁石812a～812bの左右方向Dsの両側に形成される外周側フラックスバリア113a～113b、114a～114bの双方がロータコア811の外周面818において開放端部を有すると仮定する。この場合、永久磁石基準端部841a、841bは、ロータコア断面において、直線1177に対し、ロータコア811の回転方向における前方側および後方側のそれぞれに存在する。

[0082] 図11A～図11Cに示す例では、ロータの一つの極の領域の周方向における中心の位置は、例えば、永久磁石基準端部841aと841bとを結ぶ仮想直線の midpoint の位置として定められる。この中心の位置と、回転軸線O（原点O）とを通る直線を直線1177とする。

[0083] 以下の説明では、開放端部前方側コーナ部1131a、1131cを、必要に応じて、それぞれ、前方側開放端部前方側コーナ部、後方側開放端部前方側コーナ部と称する。また、以下の説明では、前方側磁石穴817aの開放端部1111a、後方側磁石穴817bの開放端部1111bを、必要に応じて、それぞれ、前方側開放端部1111a、後方側開放端部1111bと称する。

[0084] 前方側開放端部前方側コーナ部1131aは、前方側磁石穴817aが有する外周側フラックスバリアとなる空間1123aの開放端部である前方側開放端部1111aの、ロータコア811の周方向における2つのコーナ部1131a～1131bのうち、ロータコア811の回転方向の前方側のコーナ部1131aである。

[0085] 後方側開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 c は、後方側磁石穴 8 1 7 b が有する外周側フラックスバリアとなる空間 1 1 2 3 b の開放端部である後方側開放端部 1 1 1 b の、ロータコア 8 1 1 の周方向における 2 つのコーナ部 1 1 3 1 c ~ 1 1 3 1 d のうち、ロータコア 8 1 1 の回転方向の前方側のコーナ部 1 1 3 1 c である。

[0086] また、ロータコア断面において、永久磁石基準端部 8 4 1 a ~ 8 4 1 b は、前方側永久磁石端部 8 4 1 a と、後方側永久磁石端部 8 4 1 b とを有する。前方側永久磁石端部 8 4 1 a は、前方側磁石穴 8 1 7 a に設置される永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の端部のうち、最も回転方向の前方側の位置の端部である。後方側永久磁石端部 8 4 1 b は、後方側磁石穴 8 1 7 b に設置される永久磁石 8 1 2 b の端部のうち、最も回転方向の後方側の位置の端部である。

[0087] また、ロータコア断面において、基準位置 8 3 1 a ~ 8 3 1 b は、前方側基準位置 8 3 1 a を有する。基準位置 8 3 1 a ~ 8 3 1 b は、前方側永久磁石端部 8 4 1 a と回転軸線 0 とを通る直線 1 1 7 2 と、ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 と、の交点の位置である。

[0088] また、ロータコア断面において、基準位置 8 3 1 a ~ 8 3 1 b は、後方側基準位置 8 3 1 b を有する。後方側基準位置 8 3 1 b は、後方側永久磁石端部 8 4 1 b と回転軸線 0 とを通る直線 1 1 7 4 と、ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 と、の交点の位置である。

[0089] ここで、ロータ 8 1 0 のトルクを確実に向上させる観点から、以下のようにして開放端部前方側コーナ部（前方側開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 a および後方側開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 c）の位置を定めるのが好ましい。

ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコア 1 2 1 のスロット数（個）を $N_{s\text{lot}}$ とする。また、基準位置 8 3 1 a ~ 8 3 1 b からの回転軸線 0 周りの角度である基準位置移動角度 θ_a (rad) を $2\pi / N_{s\text{lot}}$ とする。図 8 に示す例では、ステータコア 1 2

1のスロット数(個)を N_{slot} は24個であるので、基準位置移動角度 θ_a は、 $2\pi/24(\text{rad}) = 15(^{\circ})$ である。

[0090] ロータコア断面において、直線1171、1172のなす角度 θ_f は、 $\theta_a/24$ 以上 $15\theta_a/24$ 以下とするのが好ましく、 $\theta_a/3 \pm \theta_a/24$ の範囲内とするのがより好ましい。直線1171は、ロータコア断面において、前方側開放端部前方側コーナ部1131aと、回転軸線0と、を通る直線である。方側開放端部前方側コーナ部1131aは、ロータコア断面において、開放端部前方側コーナ部1131a、1131cのうち、同一の極における周方向の中心よりも回転方向の前方側に位置するコーナ部である。直線1172は、ロータコア断面において、当該前方側開放端部前方側コーナ部1131aをコーナ部の一つとする開放端部1111aを有する磁石穴817aに対する基準位置831aと、回転軸線0と、を通る直線である。以下の説明では、この角度 θ_f を、必要に応じて、前方側の外周側フラックスバリア移動角度 θ_f と称する。

[0091] また、ロータコア断面において、直線1173、1174のなす角度 θ_b は、 $\theta_a/24$ 以上 $\theta_a/8$ 以下とするのが好ましく、 $\theta_a/12 \pm \theta_a/24$ の範囲内とするのがより好ましい。直線1173は、ロータコア断面において、後方側開放端部前方側コーナ部1131cと、回転軸線0と、を通る直線である。後方側開放端部前方側コーナ部1131cは、開放端部前方側コーナ部1131a、1131cのうち、同一の極における周方向の中心よりも回転方向の後方側に位置するコーナ部である。直線1174は、ロータコア断面において、当該後方側開放端部前方側コーナ部1131cをコーナ部の一つとする開放端部1111bを有する磁石穴817bに対する基準位置831bと、回転軸線0と、を通る直線である。以下の説明では、この角度 θ_b を、必要に応じて、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b と称する。

[0092] また、(経緯)の欄の((第2の知見))の欄で説明したように、ロータコア811の外周面818の領域のうち、最低の磁束密度よりも高い磁束密度の

ティース123a、123bと対向する位置に窪み部815aを設けることにより、ロータ810のトルクを増大させる。ロータ810のトルクを増大する効果をより高めるために、窪み部815aの全ての領域が、当該磁束密度のティース123a、123bと対向するのが好ましい。しかしながら、窪み部815aの一部の領域が、当該磁束密度のティース123a、123bと対向しても良い。また、ロータ810のトルクを確実に向上させる観点から、窪み部815aを以下のように定めるのが好ましい。

[0093] 図11Aに示すように、ロータコア断面において、後方側基準位置831bからの回転軸線0周りの角度である基準位置移動角度 θa (rad)を $2\pi/N_{s10t}$ とする。後方側基準位置831bは、ロータコア断面において、後方側永久磁石端部841bと回転軸線0とを通る直線1174と、ロータコア811の外周面818と、の交点の位置である。後方側永久磁石端部841bは、同一の極に設置される永久磁石812a~812bの端部のうち、周方向の最も後方側に位置する端部である。前述したように図8に示す例では、ステータコア121のスロット数(個)を N_{s10t} は24個である。したがって、基準位置移動角度 θa は、 $2\pi/24$ (rad) = 15 (°) である。

[0094] まず、ロータコア断面において、直線1175、1173のなす角度を、 θa とするのが好ましい。直線1175は、ロータコア断面において、窪み部後方側コーナ部1161aと、回転軸線0と、を通る直線である。窪み部後方側コーナ部1161aは、ロータコア断面において、窪み部815aの開放端部1151aにおける2つのコーナ部1161a~1161bのうち、回転方向の後方側に位置するコーナ部である。直線1173は、ロータコア断面において、後方側開放端部前方側コーナ部1131cと、回転軸線0と、を通る直線である。後方側開放端部前方側コーナ部1131cは、当該窪み部815aが設置される極と同一の極において当該窪み部815aよりも回転方向の後方側に位置する。

[0095] また、ロータコア断面において、直線1176、1175のなす角度 θc

は、 $\theta a/8$ 以上、 $25\theta a/24\theta a$ 以下とするのが好ましく、 $3\theta a/4 \pm \theta a/12$ の範囲内とするのがより好ましい。直線1176は、ロータコア断面において、窪み部前方側コーナ部1161bと、回転軸線0と、を通る直線である。窪み部前方側コーナ部1161bは、ロータコア断面において、窪み部815aの開放端部1151aにおける2つのコーナ部1161a～1161bのうち、回転方向の前方側のコーナ部である。直線1175は、ロータコア断面において、窪み部後方側コーナ部1161aと回転軸線0とを通る直線である。以下の説明では、この角度 θc を、必要に応じて、窪み部開口角度 θc と称する。

[0096] また、窪み部815aの深さの最大値Cdは、ロータコア811の直径の0.01倍以上0.1以下の範囲内とするのが好ましく、ロータコア811の直径の0.04倍以上0.07倍以下の範囲内とするのが好ましい。以下の説明では、窪み部815aの深さの最大値Cdを、必要に応じて、窪み部深さ最大値Cdと称する。

[0097] また、窪み部815aの形状は限定されない。図11Aでは、窪み部815aの平面形状（ロータコア断面の形状）が、窪み部815aの重心の位置と、ロータコア811の回転軸線0と、を通る直線を対称軸とする線対称の関係性を有する四角形である場合を例示する。しかしながら、窪み部815aの平面形状は、対称性を有していない形状であっても良い。また、窪み部815aの平面形状は、三角形であっても、五角形以上の多角形であっても良い。また、窪み部815aのコーナ部は曲率を有していても良い。

[0098] 次に、第2端部1112a～1112bについて説明する。第2端部1112a～1112bは、磁石穴817a～817bの左右方向Dsにおける内周側に位置する端部である。第2端部1112a～1112bは、磁石間フラックスバリア814a～814bの端部と一致し、且つ、閉鎖されている。つまり、磁石穴817a～817bは、永久磁石812a～812bが設置された状態において、永久磁石812a～812bと第2端部1112a～1112bとの間に、回転軸線0に沿って延びるフラックスバリアとな

る空間が形成されるような形状を有する。

[0099] 図11Aに示す例では、第2端部1112a～1112bは、ロータコア断面において、永久磁石812a～812bが設置される磁石穴817a～817bの2個のコーナ部1132a～1132b、1132c～1132dの一方から他方までの、磁石穴817a～817bの輪郭に沿う領域である。第2端部1112a～1112bを構成するコーナ部1132a～1132b、1132c～1132dは、磁石穴817a～817bが磁石間ブリッジ部821を間に挟んで相互に対向するようにIPMSM800の設計者によって定められる。図11Aに示す例では、第2端部1112a～1112bには、ロータコア断面において磁石間ブリッジ部821を挟んで対向する2個の磁石穴817a～817bの各々の第2端部1112a～1112b同士を最短の距離で結ぶ直線の両端の位置が含まれる。

[0100] 、図11Aに示す例では、ロータ810（ロータコア811）が回転しているときに最も応力が集中する軟磁性材料の領域が、第2端部1112a～1112bの間に含まれる。図11Aに示す例では、前述した第2端部1112a～1112b同士を最短の距離で結ぶ直線は、コーナ部1132a、1132cを結ぶ直線1141aである。図11Aに示す例において、磁石間ブリッジ部821aは、例えば、2個のコーナ部1132a、1132cを結ぶ直線1141aと、2個のコーナ部1132b、1132dを結ぶ直線1141bと、により囲まれる軟磁性材料の領域として定められている。

[0101] なお、図11Aでは、2個の磁石穴817a～817bの間の領域の全てが軟磁性材料の領域である場合を例示する。したがって、2個の磁石穴817a～817bの各々の第2端部1112a～1112b同士を最短の距離で結ぶ直線1141aは、各々の第2端部1112a～1112b同士を、軟磁性材料の領域と重なる長さが最短になるように引いた直線と同じである。一方、2個の磁石穴817a～817bの間の領域にフラックスバリアが形成されている場合には、必ずしも、このようにはならない。2個の磁石穴817a～817bの各々の第2端部1112a～1112b同士を最短の

距離で結ぶ直線がフラックスバリアと重なる場合があるからである。前述したようにロータ810（ロータコア811）が回転しているときに最も応力が集中する軟磁性材料の領域が、第2端部1112a～1112bの間に含まれる。また、各々の第2端部1112a～1112b同士を、軟磁性材料の領域と重なる長さが最短となるように引いた直線の両端の位置が第2端部に含まれる。このようにすれば、各々の第2端部1112a～1112bの間の領域にフラックスバリアがあるか否かに関わらず、ロータ810（ロータコア811）が回転しているときに最も応力が集中する軟磁性材料の領域が、第2端部1112a～1112bの間に含まれるようにすることができる。

[0102] 図11Bは、ロータコア811の構成（ロータコア断面）の第1変形例を示す図である。

図11Bに示す例において、例えば、2個のコーナ部1132e、1132hを結ぶ直線1141cと、2個のコーナ部1132g、1132jを結ぶ直線1141dと、により囲まれる軟磁性材料の領域が、磁石間ブリッジ部821iの領域として定められているものとする。この場合、第2端部1112c、1112dは、永久磁石812a、812bが設置される磁石穴817c、817dの2個のコーナ部1132eおよび1132g、1132hおよび1132jの一方から他方までの、磁石穴817c～817dの輪郭に沿う領域になる。

[0103] また、図11Bにおいて、以上のようにせずに、例えば、2個のコーナ部1132e、1132hを結ぶ直線1141cと、2個のコーナ部1132f、1132iを結ぶ直線1141eと、により囲まれる軟磁性材料の領域が、磁石間ブリッジ部とする領域として定められていても良い。この場合、第2端部1112c、1112dは、永久磁石812a～812bが設置される磁石穴817c、817dの2個のコーナ部1132eおよび1132f、1132hおよび1132iの一方から他方までの、磁石穴817の輪郭に沿う領域になる。また、第2端部1112は、永久磁石812a、81

2 bが設置される磁石穴8 1 7 c、8 1 7 dの2個のコーナ部1 1 3 2 fおよび1 1 3 2 g、1 1 3 2 iおよび1 1 3 2 jの一方から他方までの、磁石穴8 1 7 c、8 1 7 dの輪郭に沿う領域であっても良い。

[0104] なお、図1 1 Bに示す例では、軟磁性体部8 2 0を構成する軟磁性材料と重なる長さが最短の距離になるように引いた直線の両端の位置は、コーナ部1 1 3 2 f、1 1 3 2 iの位置である。したがって、第2端部1 1 1 2 c～1 1 1 2 dには、コーナ部1 1 3 2 f、1 1 3 2 iの位置が含まれる。

[0105] 図1 1 Aおよび図1 1 Bに示す例では、ロータコア断面において、第2端部1 1 1 2を定める2個のコーナ部1 1 3 2が曲率を有していない場合を例示した。図1 1 Cは、ロータコア8 1 1の構成（ロータコア断面）の第2変形例を示す図である。図1 1 Cでは、図1 1 Aに対し、第2端部1 1 1 2 a～1 1 1 2 bのコーナ部1 1 3 2 a～1 1 3 2 dを、曲率を有するコーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nに変更した場合を例示する。

[0106] コーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nが曲率を有している場合、コーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nの位置は、当該曲率を有している領域の代表点の位置であるものとする。コーナ部の代表点は、例えば、磁石間ブリッジ部の大きさが最も大きくなるように選択される。このようにする場合、図1 1 Cに示す例では、コーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nを示す黒丸（●）の位置が、コーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nの代表点の位置である。このようにして定められるコーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nの代表点の位置を、コーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 nの位置として取り扱う。なお、コーナ部の代表点は、必ずしも、磁石間ブリッジ部の大きさが最も大きくなるように選択される必要はない。例えば、コーナ部を形成する領域の中心位置をコーナ部の代表点として選択しても良い。図1 1 Cに示す例では、第2端部1 1 1 2 e、1 1 1 2 fは、永久磁石8 1 2 a、8 1 2 bが設置される磁石穴8 1 7 e、8 1 7 fの2個のコーナ部1 1 3 2 k～1 1 3 2 l、1 1 3 2 m～1 1 3 2 nの一方から他方までの、磁石穴8 1 7 e、8 1 7 fの輪郭に沿う領域になる。あるいは、磁石間ブリッジ部の大きさが最も小さくなるようにコーナ部の代表点を

選択しても良い。

[0107] なお、図 1 1 C に示す例では、軟磁性体部 8 2 0 を構成する軟磁性材料と重なる長さが最短の距離になるように引いた直線の両端の位置は、直線 1 1 4 1 h の両端の位置である。したがって、第 2 端部 1 1 1 2 e ~ 1 1 1 2 f には、直線 1 1 4 1 h の両端の位置が含まれる。

[0108] また、第 1 端部 1 1 1 1 のコーナ部が曲率を有する場合には、当該曲率を有している領域の代表点を、第 1 端部 1 1 1 1 のコーナ部の位置とすれば良い。第 1 端部 1 1 1 1 のコーナ部の代表点は、例えば、第 1 端部 1 1 1 1 の大きさが最も広くなるように、ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 の位置に設定される。ただし、必ずしもこのようにする必要はない。例えば、当該曲率を有する領域の中心位置を、第 1 端部 1 1 1 1 のコーナ部の代表点としても良い。

[0109] 図 1 1 A の説明に戻り、第 3 端部 1 1 1 3 a ~ 1 1 1 3 b について説明する。第 3 端部 1 1 1 3 a ~ 1 1 1 3 b は、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m において外周側に位置する端部である。永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m において外周側は、ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 に近い側である。図 1 1 A に示す例では、第 3 端部 1 1 1 3 a 、 1 1 1 3 b は、第 1 端部 1 1 1 1 a 、 1 1 1 1 b を定める 2 個のコーナ部 1 1 3 1 a ~ 1 1 3 1 b 、 1 1 3 1 c ~ 1 1 3 1 d のうち、内側に位置するコーナ部 1 1 3 1 b 、 1 1 3 1 c から、第 2 端部 1 1 1 2 a 、 1 1 1 2 b を定める 2 個のコーナ部 1 1 3 2 a ~ 1 1 3 2 b 、 1 1 3 2 c ~ 1 1 3 2 d のうち、永久磁石 8 1 2 a 、 8 1 2 b の磁化方向 D m において外周側に位置するコーナ部 1 1 3 2 a 、 1 1 3 2 c までの、磁石穴 8 1 7 a 、 8 1 7 b の輪郭に沿う領域である。内側は、ロータの一つの極の領域の周方向における中心の位置に近い側である。図 1 1 B に示す例では、第 3 端部 1 1 1 3 c 、 1 1 1 3 d は、例えば、第 1 の端部 1 1 1 1 を定めるコーナ部 1 1 3 1 b 、 1 1 3 1 c から、第 2 端部 1 1 1 2 を定めるコーナ部 1 1 3 2 e 、 1 1 3 2 h までの、磁石穴 8 1 7 c 、 8 1 7 d の輪郭に沿う領域である。図 1 1 C に示す例では、第 3

端部 1 1 1 3 e、1 1 1 3 f は、第 1 の端部 1 1 1 1 を定めるコーナ部 1 1 3 1 b、1 1 3 1 c から、第 2 端部 1 1 1 2 を定めるコーナ部 1 1 3 2 k、1 1 3 2 m までの、磁石穴 8 1 7 e、8 1 7 f の輪郭に沿う領域である。

[0110] 図 1 1 A の説明に戻り、第 4 端部 1 1 1 4 a ~ 1 1 1 4 b について説明する。第 4 端部 1 1 1 4 a ~ 1 1 1 4 b は、永久磁石 8 1 2 a、8 1 2 b の磁化方向 D m において内周側に位置する端部である。図 1 1 A に示す例では、第 4 端部 1 1 1 4 a、1 1 1 4 b は、第 1 端部 1 1 1 1 a、1 1 1 1 b を定める 2 個のコーナ部 1 1 3 1 a ~ 1 1 3 1 b、1 1 3 1 c ~ 1 1 3 1 d のうち、外側に位置するコーナ部 1 1 3 1 a、1 1 3 1 d から、第 2 端部 1 1 1 2 a、1 1 1 2 b を定める 2 個のコーナ部 1 1 3 2 a ~ 1 1 3 2 b、1 1 3 2 c ~ 1 1 3 2 d のうち、永久磁石 8 1 2 a、8 1 2 b の磁化方向 D m において内周側に位置するコーナ部 1 1 3 2 b、1 1 3 2 d までの、磁石穴 8 1 7 a、8 1 7 b の輪郭に沿う領域である。外側は、ロータの一つの極の領域の周方向における端に近い側である。図 1 1 B に示す例では、第 4 端部 1 1 1 4 c、1 1 1 4 d は、例えば、第 1 の端部 1 0 1 1 を定めるコーナ部 1 1 3 1 a、1 1 3 1 d から、第 2 端部 1 1 1 2 c、1 1 1 2 d を定めるコーナ部 1 1 3 2 g、1 1 3 2 j までの、磁石穴 8 1 7 c、8 1 7 d の輪郭に沿う領域である。図 1 1 C に示す例では、第 4 端部 1 1 1 4 e、1 1 1 4 f は、第 1 の端部 1 1 1 1 を定めるコーナ部 1 1 3 1 a、1 1 3 1 d から、第 2 端部 1 1 1 2 を定めるコーナ部 1 1 3 2 l、1 1 3 2 n までの、磁石穴 8 1 7 e、8 1 7 f の輪郭に沿う領域である。

[0111] 図 1 1 A ~ 図 1 1 C において、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b が設置される 2 個の磁石穴 8 1 7 a ~ 8 1 7 b、8 1 7 d ~ 8 1 7 e、8 1 7 f ~ 8 1 7 g は、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b が設置される空間 1 1 2 1 a ~ 1 1 2 1 b を有する。また、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b が設置される 2 個の磁石穴 8 1 7 a ~ 8 1 7 b、8 1 7 d ~ 8 1 7 e、8 1 7 f ~ 8 1 7 g は、永久磁石が設置される空間 1 1 2 1 a ~ 1 1 2 1 b と、第 2 端部 1 1 1 2 a ~ 1 1 1 2 b、1 1 1 2 c ~ 1 1 1 2 d、1 1 1 2 e ~ 1 1 1 2 f との間に、磁石

間フラックスバリアとなる空間1122a～1122b、1122c～1122d、1122e～1122fを有する。また、永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817a～817b、817d～817e、817f～817gは、永久磁石が設置される空間1121a～1121bと、第1端部1111a～1111bとの間に、図8に示した外周側フラックスバリア813a～813bとなる空間1123a～1123b、1123c～1123d、1123e～1123fを有する。

[0112] 以下の説明では、永久磁石812a～812bが設置される空間1121a～1121b、磁石間フラックスバリアとなる空間1122a～1122b、1122c～1122d、1122e～1122f、外周側フラックスバリアとなる空間1123a～1123b、1123c～1123d、1123e～1123fを、必要に応じて、それぞれ、磁石設置空間1121a～1122b、磁石間フラックスバリア空間1122a～1122b、1122c～1122d、1122e～1122f、外周側フラックスバリア空間1123a～1123b、1123c～1123d、1123e～1123fと称する。磁石設置空間1121a～1122b、磁石間フラックスバリア空間1122a～1122b、1122c～1122d、1122e～1122f、外周側フラックスバリア空間1123a～1123b、1123c～1123d、1123e～1123fについて説明する。

[0113] 前方側磁石穴817aにおいては、外周側フラックスバリア空間1123aが、前方側フラックスバリアとなる空間の一例である。後方側磁石穴817bにおいては、外周側フラックスバリア空間1123bが、後方側フラックスバリアとなる空間の一例である。また、前方側磁石穴817aにおいては、磁石間フラックスバリア空間1122aが、後方側フラックスバリアとなる空間の一例である。後方側磁石穴817bにおいては、磁石間フラックスバリア空間1122bが、前方側フラックスバリアとなる空間の一例である。すなわち、前方側磁石穴817aおよび後方側磁石穴817bにおいて、前方側フラックスバリアとなる空間（外周側フラックスバリア空間112

3 a、磁石間フラックスバリア空間 1 1 2 2 b) は、後方側フラックスバリアとなる空間 (磁石間フラックスバリア空間 1 1 2 2 a、外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 b) よりも、回転方向の前方側に位置する。

[0114] より具体的には、前方側磁石穴 8 1 7 a が有する外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 a は、前方側磁石穴 8 1 7 a が有する磁石間フラックスバリア空間 1 1 2 2 a よりも回転方向の前方側にあり、且つ、前方側磁石穴 8 1 7 a が有する磁石間フラックスバリア空間 1 1 2 2 a よりもロータコア 8 1 1 の外周側にある。また、後方側磁石穴 8 1 7 b が有する外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 b は、後方側磁石穴 8 1 7 b が有する磁石間フラックスバリア空間 1 1 2 2 b よりも回転方向の後方側にあり、且つ、後方側磁石穴 8 1 7 b が有する磁石間フラックスバリア空間 1 1 2 2 b よりもロータコア 8 1 1 の外周側にある。また、前方側磁石穴 8 1 7 a が有する外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 a と、後方側磁石穴 8 1 7 b が有する外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 b は、開放端部である第 1 端部 1 1 1 1 a ~ 1 1 1 1 b を有する。このように外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 a、1 1 2 3 b の双方が開放端部 (第 1 端部 1 1 1 1 a ~ 1 1 1 1 b) を有するのが好ましい。しかしながら、外周側フラックスバリア空間 1 1 2 3 a、1 1 2 3 b の一方のみが開放端部 (第 1 端部 1 1 1 1) を有していても良い。

[0115] 図 1 1 A ~ 図 1 1 C に示すロータコア断面において、磁石設置空間 1 1 2 1 a ~ 1 1 2 1 b の、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m に沿った方向である幅方向の長さ L 2 は、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m の長さに対応する長さと同等ではほぼ一定である。磁石設置空間 1 1 2 1 a ~ 1 1 2 1 b の幅方向の長さ L 2 は、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m の長さと同じであっても、磁石穴 8 1 7 a ~ 8 1 7 b に永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b を設置し易くするために永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m の長さよりも (僅かに) 長くても良い。なお、本実施形態では、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m の長さが一定である場合を例示する。しかしながら、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の磁化方向 D m の長さは必

ずしも一定でなくても良い。永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さが一定でない場合には、磁石設置空間1121a～1121bの幅方向の長さを、永久磁石812a～812bの磁化方向Dmの長さに対応する長さと同等にしても良い。この場合、磁石設置空間1121a～1121bの幅方向の長さは一定ではない。

[0116] 磁石設置空間1121a～1121bの少なくとも一部の領域は、永久磁石812a～812bが設置されると、永久磁石812a～812bによって占められることにより、空間ではなくなる。磁石間フラックスバリア空間1122a～1122bは、図8に示す磁石間フラックスバリア814a～814bに一致し、且つ、永久磁石812a～812bが設置されても空間のままである。外周側フラックスバリア空間1123a～1123bは、図9に示す外周側フラックスバリア813a～813bに一致し、且つ、永久磁石812a～812bが設置されても空間のままである。なお、磁石間フラックスバリア空間1122a～1122fおよび外周側フラックスバリア空間1123a～1123fに非磁性体が設置される場合、磁石間フラックスバリア空間1122a～1122fおよび外周側フラックスバリア空間1123a～1123fの少なくとも一部の領域は、非磁性体によって占められる。

[0117] 次に、図10および図11A～図11Cを参照しながら、軟磁性体部820の構成の一例について説明する。なお、ここでは、図11Bにおいて、コーナ部1132e、1132gが第2端部1112cの2個のコーナ部であり、コーナ部1132h、1132jが第2端部1112dの2個のコーナ部である場合を例示する。

[0118] 図10において、軟磁性体部820は、磁石間ブリッジ部821a～821hと、外側部822a～822hと、内側部823aと、を有する。

[0119] 磁石間ブリッジ部821a～821hは、ブリッジ外縁部のうち、軟磁性材料が存在する領域である。図10および図11Aに示す例では、ブリッジ外縁部は、同一の極において永久磁石812a～812bが設置される2個

の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b の外周側のコーナ部 1132a、1132c 同士を結ぶ直線（図10において第2端部 1112a～1112b の外周側の端を結ぶ二点鎖線を参照）と、当該2個の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b の内周側のコーナ部 1132b、1132d 同士を結ぶ直線（図10において第2端部 1112a～1112b の内周側の端を結ぶ二点鎖線を参照）と、当該2個の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b と、により囲まれる領域である。図10において、本実施形態では、ブリッジ外縁部 831a には、軟磁性材料のみが存在する場合を例示する。軟磁性材料のみが存在するとは、フラックスバリアなど、軟磁性材料以外の領域が含まれないことを指す。したがって、本実施形態では、磁石間ブリッジ部 821a は、ブリッジ外縁部 831a と一致する。なお、図10および図11Aでは、ブリッジ外縁部 831a が、同一の極において永久磁石 812a～812b が設置される2個の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b の間の領域に対応する。また、同一の極において永久磁石 812a～812b が設置される2個の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b の間の領域にフラックスバリアなど、軟磁性材料以外の領域が含まれていても良い。この場合、磁石間ブリッジ部 821a は、ブリッジ外縁部 831a から軟磁性材料以外の領域を除いた領域になる。また、磁石間ブリッジ部 821a～821h の数は、ロータ 810 の極数（本実施形態では8）に等しい。

[0120] 具体的に図11Aに示す例では、ブリッジ外縁部 831a は、磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b の外周側のコーナ部 1132a、1132c 同士を結ぶ直線 1141a と、当該2個の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b の内周側のコーナ部 1132d、1132d 同士を結ぶ直線 1141b と、当該2個の磁石穴 817a～817b の第2端部 1112a～1112b と、により囲まれる領域である。磁石間ブリッジ部 821a は、このブリッジ外縁部 831a と一致する

。図10および図11Aにおいて、符号821aおよび831aを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0121] また、図11Bおよび図11Cに示す例では、以下のようにブリッジ外縁部が定められる。

図11Bに示す例では、ブリッジ外縁部831bは、磁石穴817a～817bの第2端部1112c～1112dの外周側のコーナ部1132e、1132h同士を結ぶ直線1141cと、当該2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112c～1112dの内周側のコーナ部1132g、1132j同士を結ぶ直線1141dと、当該2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112c～1112dと、により囲まれる領域である。磁石間ブリッジ部821iは、このブリッジ外縁部831bと一致する。図11Bにおいて、符号821iおよび831bを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0122] 図11Cに示す例では、ブリッジ外縁部831cは、磁石穴817a～817bの第2端部1112e～1112fの外周側のコーナ部1132k、1132m同士を結ぶ直線1141fと、当該2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112e～1112fの内周側のコーナ部1132l、1132n同士を結ぶ直線1141gと、当該2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112e～1112fと、により囲まれる領域である。磁石間ブリッジ部821jは、このブリッジ外縁部831cと一致する。図11Cにおいて、符号821jおよび831cを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0123] 外側部822aは、外側外縁部のうち、軟磁性材料が存在する領域である。外側外縁部は、磁石間ブリッジ部821aの外周側において磁石間ブリッジ部821に連結された領域である。図10および図11Aに示す例では、外側外縁部は、永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817a～817bの第3端部1113a～1113bと、ロータコア811の外周面818と、により囲まれる領域である。図9において、本実施形態で

は、外側外縁部832aには、軟磁性材料のみが存在する（フラックスバリアなど、軟磁性材料以外の領域が含まれない）場合を例示する。したがって、外側部822aは、外側外縁部832aと一致する。ただし、外側外縁部832aにフラックスバリアなど、軟磁性材料以外の領域が含まれていても良い。この場合、外側部822aは、外側外縁部832aから軟磁性材料以外の領域を除いた領域になる。また、外側部822a～822hの数は、ロータ810の極数（本実施形態では8）に等しい。

[0124] 具体的に図11Aに示す例では、外側外縁部832aは、磁石穴817a～817bの第2端部1112a～1112bの外周側のコーナ部1132a、1132c同士を結ぶ直線1141aと、当該2個の磁石穴817a～817bの第3端部1113a～1113bと、ロータコア811の外周面818と、により囲まれる領域である。外側部822aは、この外側外縁部832aと一致する。図10および図11Aにおいて、符号822aおよび832aを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0125] また、図11Bおよび図11Cに示す例では、以下のように外側外縁部が定められる。

図11Bに示す例では、外側外縁部832bは、磁石穴817a～817bの第2端部1112c～1112dの外周側のコーナ部1132e、1132h同士を結ぶ直線1141cと、当該2個の磁石穴817c～817dの第3端部1113c～1113dと、ロータコア811の外周面818と、により囲まれる領域である。外側部822iは、この外側外縁部832bと一致する。図11Bにおいて、符号822iおよび832bを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0126] 図11Cに示す例では、外側外縁部832cは、磁石穴817a～817bの第2端部1112e～1112fの外周側のコーナ部1132k、1132m同士を結ぶ直線1141fと、当該2個の磁石穴817e～817fの第3端部1113e～1113fと、ロータコア811の外周面818と、により囲まれる領域である。外側部822jは、この外側外縁部832c

と一致する。図11Cにおいて、符号822jおよび832cを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0127] 内側部823aは、内側外縁部のうち、軟磁性材料が存在する領域である。内側外縁部は、磁石間ブリッジ部821aの内周側において磁石間ブリッジ部821aに連結された軟磁性材料の領域である。図10および図11Aに示す例では、内側外縁部は、永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817a～817bの第4端部1114a～1114bと、ロータコア811の外周面818と、ロータコア811の内周面819と、により囲まれる領域である。図9において、本実施形態では、内側外縁部833aには、軟磁性材料のみが存在する場合を例示する。軟磁性材料のみが存在するとは、フラックスバリアなど、軟磁性材料以外の領域が含まれないことを指す。したがって、内側部823aは、内側外縁部833aと一致する。ただし、内側外縁部833aにフラックスバリアなど、軟磁性材料以外の領域が含まれていても良い。この場合、内側部823aは、内側外縁部833aから軟磁性材料以外の領域を除いた領域になる。また、図9に示す例では、内側部823aの数は1である。なお、内側部823aは、必ずしもロータコア811の外周面818に囲まれている必要はない。例えば、相互に隣接する極の外周側フラックスバリア813a（外周側フラックスバリア空間1123a）の間に軟磁性材料が存在しないようにロータコア811を構成する場合、内側部823aは、ロータコア811の外周面818に囲まれない。

[0128] 具体的に図11Aに示す例では、内側外縁部833aは、永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112a～1112bの内周側のコーナ部1132b、1132d同士を結ぶ直線1141bと、当該2個の磁石穴817a～817bの第4端部1114a～1114bと、ロータコア811の外周面818と、ロータコア811の内周面819と、により囲まれる領域である。内側部823aは、この内側外縁部833aと一致する。図10および図11Aにおいて、符号82

3 aおよび8 3 3 aを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0129] また、図1 1 Bおよび図1 1 Cに示す例では、以下のように内側外縁部が定められる。

図1 1 Bに示す例では、内側外縁部8 3 3 bは、永久磁石8 1 2 a～8 1 2 bが設置される2個の磁石穴8 1 7 c～8 1 7 dの第2端部1 1 1 2 c～1 1 1 2 dの内周側のコーナ部1 1 3 2 e、1 1 3 2 h同士を結ぶ直線1 1 4 1 cと、当該2個の磁石穴8 1 7 c～8 1 7 dの第4端部1 1 1 4 c～1 1 1 4 dと、ロータコア8 1 1の外周面8 1 8と、ロータコア8 1 1の内周面8 1 9と、により囲まれる領域である。内側部8 2 3 bは、この内側外縁部8 3 3 bと一致する。図1 1 Bにおいて、符号8 2 3 bおよび8 3 3 bを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0130] 図1 1 Cに示す例では、内側外縁部8 3 3 cは、永久磁石8 1 2 a～8 1 2 bが設置される2個の磁石穴8 1 7 e～8 1 7 fの第2端部1 1 1 2 e～1 1 1 2 fの内周側のコーナ部1 1 3 2 l、1 1 3 2 n同士を結ぶ直線1 1 4 1 gと、当該2個の磁石穴8 1 7 e～8 1 7 fの第4端部1 1 1 4 e～1 1 1 4 fと、ロータコア8 1 1の外周面8 1 8と、ロータコア8 1 1の内周面8 1 9と、により囲まれる領域である。内側部8 2 3 cは、この内側外縁部8 3 3 cと一致する。図1 1 Cにおいて、符号8 2 3 cおよび8 3 3 cを並べて示しているのは、このことを意味する。

[0131] 次に、磁石間ブリッジ部8 2 1 aの幅wについて説明する。磁石間ブリッジ部8 2 1 aの幅wは、ロータコア断面において、ブリッジ幅規定線1 1 4 2 a～1 1 4 2 cの軟磁性材料と重なる部分の長さで表される。図1 1 A～図1 1 Cに示すように、ブリッジ幅規定線1 1 4 2 a～1 1 4 2 cは、永久磁石8 1 2 a～8 1 2 bが設置される2個の磁石穴8 1 7 a～8 1 7 b、8 1 7 c～8 1 7 d、8 1 7 e～8 1 7 fの第2端部1 1 1 2 a～1 1 1 2 b、1 1 1 2 c～1 1 1 2 d、1 1 1 2 e～1 1 1 2 f同士を、軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線である。

[0132] 具体的に図1 1 Aに示す例では、永久磁石8 1 2 a～8 1 2 bが設置され

る2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112a～1112b同士を軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線は、直線1142aであり、前述した直線1141aと一致する。図11Aにおいて、符号1141aおよび1142aを並べて示しているのは、このことを意味する。この場合、磁石間ブリッジ部821aの幅wは、ロータコア断面において、ブリッジ幅規定線1142aの軟磁性材料と重なる部分の長さである。図11Aに示す例では、ブリッジ幅規定線1142aの全てが軟磁性体材料と重なる。したがって、磁石間ブリッジ部821aの幅wは、ブリッジ幅規定線1142aの長さと同じ。磁石間ブリッジ部に穴が形成されているために、ブリッジ幅規定線の一部が軟磁性材料と重なる場合、磁石間ブリッジ部の幅wは、ブリッジ幅規定線の軟磁性材料と重なる部分の長さである。なお、ブリッジ幅規定線の軟磁性材料と重なる部分の長さは、ブリッジ幅規定線の長さから、ブリッジ幅規定線の軟磁性材料と重なっていない部分の長さを減算した長さである。

[0133] 図11Bに示す例では、永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817c～817dの第2端部1112c～1112d同士を軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線は、直線1142bであり、前述した直線1141eと一致する。図11Bにおいて、符号1141eおよび1142bを並べて示しているのは、このことを意味する。したがって、ブリッジ幅規定線は、直線1142bである。この場合、磁石間ブリッジ部821iの幅wは、ロータコア断面において、ブリッジ幅規定線1142bの軟磁性材料と重なる部分の長さである。図11Bに示す例でも、ブリッジ幅規定線1142bの全てが軟磁性体材料と重なる。したがって、磁石間ブリッジ部821iの幅wは、ブリッジ幅規定線1142bの長さと同じ。

[0134] 図11Cに示す例では、永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817e～817fの第2端部1112e～1112f同士を軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線は、直線1142cであり、

前述した直線 1 1 4 1 f と一致する。図 1 1 C において、符号 1 1 4 1 f および 1 1 4 2 c を並べて示しているのは、このことを意味する。したがって、ブリッジ幅規定線は、直線 1 1 4 2 c である。この場合、磁石間ブリッジ部 8 2 1 j の幅 w は、ロータコア断面において、ブリッジ幅規定線 1 1 4 2 c の軟磁性材料と重なる部分の長さである。図 1 1 C に示す例でも、ブリッジ幅規定線 1 1 4 2 c の全てが軟磁性体材料と重なる。したがって、磁石間ブリッジ部 8 2 1 j の幅 w は、ブリッジ幅規定線 1 1 4 2 c の長さと等しい。

[0135] 以上のようにして定められる磁石間ブリッジ部 8 2 1 の幅 w は、ロータコア 8 1 1 の直径の 0. 0 2 倍以下であるのが好ましい。磁石間ブリッジ部 8 2 1 の幅 w がロータコア 8 1 1 の直径の 0. 0 2 倍を上回ると、磁石間ブリッジ部 8 2 1 を通過する磁束が多くなることにより磁石間ブリッジ部 8 2 1 を通過する磁束に含まれる還流磁束が多くなる。したがって、還流磁束にならない磁束（図 5 B に示す磁束 $\phi 13$ 、 $\phi 14$ を参照）によるロータ 8 1 0 のトルクの増大の効果が低減する。

[0136] また、磁石間ブリッジ部 8 2 1 の幅 w は、以下の（１）式で定まる長さ w_{min} を上回るのが好ましい。

$$w_{min} = \rho \times S \times r_g \times \omega \div Y_s \quad \cdots (1)$$

ここで、 ρ は、軟磁性体部 8 2 0 を構成する軟磁性材料の密度（ kg/m^3 ）である。 ρ は、例えば、IPMSM 8 0 0 の仕様により予め定められている。 Y_s は、軟磁性体部 8 2 0 を構成する軟磁性材料の常温における降伏応力（ Pa ）である。

[0137] 降伏応力（ Y_s ）は、例えば、軟磁性材料の仕様により予め定められている。なお、降伏応力（ Y_s ）は、測定値であっても良い。降伏応力（ Y_s ）として測定値を採用する場合、例えば、以下のようにしても良い。まず、軟磁性材料の板厚方向における中心部から、引張試験片として J I S 5 号試験片を採取する。そして、引張試験片に対して J I S Z 2 2 4 1 : 2 0 1 1 の記載に基づいて引張試験を行うことにより降伏応力（ Y_s ）を測定する。

この際、引張試験片の圧延方向を引張方向とする。詳細には、引張試験により、JIS Z 2241:2011に記載の上降伏点および降伏点が測定される場合、降伏応力(Y_s)は、上降伏点としても良い。一方、引張試験により、降伏現象が明確に表れない材料の場合、降伏応力(Y_s)は、JIS Z 2241:2011に記載のオフセット法により測定される0.2%耐力としても良い。

[0138] Sは、後述する外力影響部824(図11A~図11Cに示す824a~824cを参照)のロータコア断面における面積(m^2)である。 r_g は、ロータ810(ロータコア811)の回転の中心(回転軸線O)から外力影響部824のロータコア断面における重心Gの位置までの半径方向における距離(m)である(図11A~図11Cの外力影響部824のロータコア断面における重心Gと回転軸線Oとを結ぶ直線1178を参照)。重心Gの位置は、重心の定義の基づき、外力影響部824の各部分に働く重力の合力が作用する点として定められる。なお、図11A~図11Cでは、説明および表記の都合上、外力影響部824a~824cの重心Gの凡その位置を示す。 ω は、最高回転数で回転するときのロータ810の角速度(rad/sec)である。ロータ810の最高回転数は、IPMSM800において許容されるロータ810の回転数の上限値であり、IPMSM800の仕様により予め定められる。

磁石間ブリッジ部821の幅 w は、大きすぎるとトルクが低下するため、(1)式で定まる長さ w_{min} の3.0倍以下とすることが好ましい。

[0139] ここで、外力影響部824は、同一の極において永久磁石812a~812bが設置される2個の磁石穴817a~817bの第3端部1113と、ロータコア811(軟磁性体部820)の外周面818と、ブリッジ幅規定線1142と、により囲まれる軟磁性材料の領域である。

図11Aに示す例では、外力影響部824aは、永久磁石812a~812bが設置される2個の磁石穴817a~817bの第3端部1113a~1113bと、ロータコア811の外周面818と、ブリッジ幅規定線11

4 2 a と、により囲まれる軟磁性材料の領域である。

[0140] 図 1 1 B に示す例では、外力影響部 8 2 4 b は、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b が設置される 2 個の磁石穴 8 1 7 c ~ 8 1 7 d の第 3 端部 1 1 1 3 c ~ 1 1 1 3 d と、ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 と、ブリッジ幅規定線 1 1 4 2 b と、により囲まれる軟磁性材料の領域である。

[0141] 図 1 1 C に示す例では、外力影響部 8 2 4 c は、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b が設置される 2 個の磁石穴 8 1 7 e ~ 8 1 7 f の第 3 端部 1 1 1 3 e ~ 1 1 1 3 f と、ロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 と、ブリッジ幅規定線 1 1 4 2 c と、により囲まれる軟磁性材料の領域である。

なお、一つのロータ 8 1 0 に含まれる外力影響部 8 2 4 の数は、ロータ 8 1 0 の極数（本実施形態では 8）に等しい。（1）式における S は、これら 8 個の外力影響部 8 2 4 のロータコア断面における面積の合計値ではなく、1 個の外力影響部 8 2 4 のロータコア断面における面積である。

[0142] ロータコア 8 1 1 において、ロータ 8 1 0（ロータコア 8 1 1）が回転しているときに最も応力が集中する領域は、ブリッジ幅規定線 1 1 4 2 a ~ 1 1 4 2 c と重なる位置にある軟磁性材料の領域である。以下の説明では、この領域を、必要に応じて、応力集中領域と称する。磁石間ブリッジ部 8 2 1 の幅 w が（1）式の w_{min} と等しい場合、ロータ 8 1 0（ロータコア 8 1 1）が最高回転数で回転しているときに応力集中領域に生じる応力は、軟磁性材料の降伏応力と（理論的には）等しくなる。したがって、ロータ 8 1 0（ロータコア 8 1 1）が最高回転数で回転しているときに応力集中領域が破断することを抑制するために、磁石間ブリッジ部 8 2 1 の幅 w が（1）式の w_{min} を上回るようにするのが好ましい。

[0143]（計算例）

次に、計算例を説明する。本計算例では、図 8 に示したように 1 極当たり 2 つの永久磁石が V 字状に配置された IPMSM を、励磁条件を含む電磁界解析条件に従って動作（回転）させた場合のロータコアの各微小領域（メッシュ）における磁束密度ベクトル、渦電流ベクトル、およびトルクを、有限

要素法による電磁界解析を行うことにより計算した。なお、トルクは、マックスウェル応力であるものとした。また、当該IPMSMを、ヤング率やポアソン比などの物性値を含む応力解析条件に従って動作（回転）させた場合のロータコアの各微小領域（メッシュ）における応力ベクトルを、有限要素法による応力解析を行うことにより計算した。有限要素法による電磁界解析や応力解析の手法は、一般的な手法であるので、ここではその詳細な説明を省略する。なお、各計算例において、ロータコアのフラックスバリアおよび窪み部以外の条件は、電磁界解析条件を含め同じ条件である。本計算例では、電磁界解析の条件として、永久磁石の残留磁束密度を0.4 Tとした。また、ステータコイルに流れる励磁電流を、ピーク値が20 Aであり周波数が50 Hzである三相交流電流とした。また、進角を30°とした。また、ロータコアの直径はいずれも27 mmである。また、ステータコアのスロット数は24個である。

[0144] まず、（経緯）の欄の((第1の知見))の欄で説明したように、ロータコア断面において、開放端部前方側コーナ部1131a、1131cの位置が基準位置831a、831bよりも、ロータコア111の回転方向の後方側になるようにすることによる効果を検証した結果を表1に示す。

[0145]

[表1]

【表 1】

番号	θf	θb	窪み部	トルク増減	備考
1	基準位置	基準位置	無	$\pm 0\%$	—
2	0.625°	基準位置	無	$+3.6\%$	発明例
3	1.25°	基準位置	無	$+5.6\%$	発明例
4	1.875°	基準位置	無	$+8.3\%$	発明例
5	2.5°	基準位置	無	$+9.4\%$	発明例
6	3.125°	基準位置	無	$+10.4\%$	発明例
7	3.75°	基準位置	無	$+12.7\%$	発明例
8	4.325°	基準位置	無	$+13.6\%$	発明例
9	5.0°	基準位置	無	$+13.7\%$	発明例
10	5.625°	基準位置	無	$+13.2\%$	発明例
11	6.25°	基準位置	無	$+12.8\%$	発明例
12	6.875°	基準位置	無	$+11.4\%$	発明例
13	7.5°	基準位置	無	$+9.8\%$	発明例
14	8.125°	基準位置	無	$+8.3\%$	発明例
15	8.75°	基準位置	無	$+6.2\%$	発明例
16	9.375°	基準位置	無	$+2.0\%$	発明例
17	10°	基準位置	無	-3.4%	比較例
18	基準位置	0.625°	無	$+1.3\%$	発明例
19	基準位置	1.25°	無	$+5.6\%$	発明例
20	基準位置	1.875°	無	$+1.5\%$	発明例
21	基準位置	2.5°	無	$+0.3\%$	比較例
22	基準位置	3.125°	無	-0.6%	比較例
23	5.0°	1.25°	無	$+15.4\%$	発明例
24	5.0°	1.25°	有	$+16.5\%$	発明例

[0146] 表 1 において、 θf の欄には、図 1 1 A に示した前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf ($^\circ$) が示されている。また、表 1 において、 θb の欄には、図 1 1 A に示した後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θb ($^\circ$) が示されている。また、表 1 において、基準位置は、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf および後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θb が 0° であることを示す。また、表 1 において、窪み部の欄には、窪み部の有無が示されている。

[0147] 本実施形態で定義したように、前方側の外周側フラックスバリアの移動角

度 θ_f および後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b は、2つの直線（例えば直線 1 1 7 1、1 1 7 2）のなす角度であるので、0以上の値をとる。なお、例えば、偏角 θ の正の方向が、ロータの回転方向と同じ方向となるように極座標系を定めて、当該極座標系で前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f および後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b を表現するとする。この場合、これらの移動角度 θ_f 、 θ_b がそれぞれ負の値であることで、基準位置に対して負の方向側（回転方向の後方側）に位置することが表される。以上のことは、窪み部開口角度 θ_c についても同じである。

[0148] トルク増減の欄には、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f および後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b がそれぞれ 0° である場合のロータのトルクに対する増減量を百分率で表した値が示されている。したがって、トルク増減の欄の値が大きいほどロータのトルクが、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f および後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b がそれぞれ 0° である場合のロータのトルクよりも大きいことを示す。

[0149] 図 1 2 A、図 1 2 B は、それぞれ、表 1 の番号 9、1 9 における解析実行対象のロータの構成（ロータ断面）を示す図である。図 1 2 C、図 1 2 D は、それぞれ、表 1 の番号 2 3、2 4 における解析実行対象のロータの構成（ロータ断面）を示す図である。図 1 2 A～図 1 2 D でも図 1 と同様に、IPMSMの回転軸線 0 に垂直に切った断面を 4 等分した 4 つの領域の一つの領域（IPMSMの領域のうちロータの 2 極を構成する領域）を示す。なお、この一つの領域についてのみ電磁界解析を実行すれば、IPMSMの回転対称性を利用することにより、ロータ断面全体の電磁界解析の結果が得られる。また、前述したように、図 1 2 A～図 1 2 D でも、図 1 などと同様に、ロータの 1 極を構成する部分にのみに符号を付し、ロータのその他の極を構成する部分における符号を省略する。

[0150] 図 1 2 A～図 1 2 D では、本実施形態で説明したように、外周側フラック

スバリア1201a~1201eは、ロータコア断面においてロータコアの外周面1211a~1211dに到達して開放している。また、磁石間フラックスバリア1202a~1202bは繋がっておらず、磁石間フラックスバリア1202a~1202bの間には軟磁性材料（磁石間ブリッジ部）が存在する。

[0151] 前述したように本計算例では、ステータコアのスロット数 $N_{s, \sigma, t}$ は24個である。したがって、基準位置移動角度 θ_a は、 $\pi/12 \text{ rad} = 15^\circ$ である（ $\theta_a (\text{rad}) = 2\pi/N_{s, \sigma, t}$ ）。本実施形態で説明したように、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f は、 $\theta_a/24$ 以上 $15\theta_a/24$ 以下とするのが好ましく、 $\theta_a/3 \pm \theta_a/24$ の範囲内とするのがより好ましい。本計算例では、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f は、 0.625° 以上 9.375° 以下とするのが好ましく、 $5 \pm 0.625^\circ$ の範囲内とするのがより好ましい。

[0152] 表1において、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f が、 0.625° 以上 9.375° 以下である番号2~16においては、トルク増減は正の値を示すので、ロータのトルクを向上させることができることが分かる。また、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f が、 $5 \pm 0.625^\circ$ の範囲内である番号8~10においては、ロータのトルクをより向上させることができることが分かる。特に、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f が、 $5 \pm 0.625^\circ$ の範囲内の中心値の 5° である番号9においてトルク増減の値は極大値を示す。一方、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f が 9.375° を上回る番号17においては、トルク増減は負の値を示し、ロータのトルクを向上させることができないことが分かる。

[0153] また、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b は、 $\theta_a/24$ 以上 $\theta_a/8$ 以下とするのが好ましく、 $\theta_a/12 \pm \theta_a/24$ の範囲内とするのが好ましい。本計算例では、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b は、 0.625° 以上 1.875° 以下とするのが好ましく、 1.2

$5 \pm 0.625^\circ$ の範囲内とするのが好ましい。

[0154] 表 1 において、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b が、 0.625° 以上 1.875° 以下である番号 18～21 においては、トルク増減は正の値を示し、ロータのトルクを向上させることができることが分かる。また、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b が、 $1.25 \pm 0.625^\circ$ の範囲内である番号 18～20 においては、ロータのトルクをより向上させることができることが分かる。特に、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b が、 $1.25 \pm 0.625^\circ$ の範囲内の中心値の 1.25° である番号 19 においてトルク増減の値は極大値を示す。一方、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b が 1.875° を上回る番号 21、22 においては、トルク増減は 0 付近または負の値を示し、ロータのトルクを向上させることができないことが分かる。

[0155] 以上の表 1 の番号 2～22 の結果から、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f および後方側のフラックスバリアの移動角度 θ_b のいずれか一方のみを本実施形態で説明した範囲としても、ロータのトルクを向上させることができることが分かる。

[0156] ただし、表 1 において、番号 9 に示すように前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_f を定めると共に番号 19 に示すように後方側のフラックスバリアの移動角度 θ_b との双方を本実施形態で定めた範囲内とした番号 23 においては、トルク増減の値は番号 2～16、18～20 よりも大きくなり、ロータのトルクをより向上させることができることが分かる。

[0157] また、本実施形態で説明したように、窪み部開口角度 θ_c は、 $\theta_a/8$ 以上、 $2.5\theta_a/24$ 以下とするのが好ましく、 $3\theta_a/4 \pm \theta_a/12$ の範囲内とするのがより好ましい。本計算例では、基準位置移動角度 θ_a は、 $2\pi/24$ (rad) = 15° である。したがって、窪み部開口角度 θ_c は、 1.975° 以上 15.625° 以下とするのが好ましく、 $11.25^\circ \pm 1.25^\circ$ の範囲内とするのが好ましい。また、窪み部深さ最大値 C_d は、ロータコアの直径の 0.01 倍以上 0.1 以下の範囲内とするのが

好ましい。前述したように本計算例では、ロータコアの直径はいずれも 27 mm である。表 1 に示す番号 24 は、後述する表 2 の番号 27 と同じである。図 12D に示す窪み部 1242a の窪み部開口角度 θ_c は 3.125° である。また、図 12D に示す窪み部 1242a の窪み部深さ最大値 C_d はロータコアの直径の 0.05 倍である。

[0158] 表 1 において、番号 24 は、以上の窪み部 1242a を設置した他は、番号 23 と同じ条件の結果である。番号 23～24 を比較すると、本実施形態で説明した範囲の窪み部開口角度 θ_c および窪み部深さ最大値 C_d を有する窪み部 1242a を設置することにより、ロータのトルクをより向上させることができることが分かる。

[0159] 次に、(経緯)の欄の((第2の知見))の欄で説明したように、ロータコア 811 の外周面 818 の領域のうち、最低の磁束密度よりも高い磁束密度のティース 123a、123b と対向する位置に窪み部 815a を設けることによる効果を検証した結果を表 2 に示す。

[0160]

[表2]

【表 2】

番号	θf	θb	θc	Cd [mm]	トルク 増減	備考
23	5.0°	1.25°	0	0	+15.4%	発明例
25	5.0°	1.25°	1.25°	ロータ径*0.05	+15.4%	発明例
26	5.0°	1.25°	1.875°	ロータ径*0.05	+15.8%	発明例
27 (=24)	5.0°	1.25°	3.125°	ロータ径*0.05	+16.5%	発明例
28	5.0°	1.25°	5.0°	ロータ径*0.05	+17.8%	発明例
29	5.0°	1.25°	10.0°	ロータ径*0.05	+22.4%	発明例
30	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.05	+22.7%	発明例
31	5.0°	1.25°	15.0	ロータ径*0.05	+18.0%	発明例
32	5.0°	1.25°	15.625	ロータ径*0.05	+16.6%	発明例
33	5.0°	1.25°	16.25	ロータ径*0.05	+15.0%	発明例
34	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.01	+18.6%	発明例
35	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.04	+22.0%	発明例
36	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.06	+22.9%	発明例
37	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.07	+22.7%	発明例
38	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.1	+17.6%	発明例
39	5.0°	1.25°	11.25	ロータ径*0.11	+15.4%	発明例

[0161] 表2において、 θc の欄、Cdの欄には、それぞれ、図11Aに示した、窪み部開口角度 θc 、窪み部深さ最大値Cdが示されている。表2において、ロータ径*数値は、当該数値にロータコアの直径を乗算した値である。表2におけるその他の表記は、表1と同じである。なお、表2では、表1に示した番号23を再掲している。

[0162] 図12Eは、表2の番号36における解析実行対象のロータの構成（ロータ断面）を示す図である。また、前述したように図12Dは、表2の番号27（表1の番号24）における解析実行対象のロータの構成（ロータ断面）を示す図である。表2の番号36は、表2の番号27（表1の番号24）に

対し、窪み部 1 2 4 2 a ~ 1 2 4 2 b の窪み部開口角度 θ_c が異なる。

[0163] 前述したように本計算例では、窪み部開口角度 θ_c は、 1.975° 以上 15.625° 以下とするのが好ましく、 $11.25^\circ \pm 1.25^\circ$ の範囲内とするのがより好ましい。また、窪み部深さ最大値 C_d は、ロータコアの直径の 0.01 倍以上 0.1 以下の範囲内とするのが好ましい。

[0164] 表 2 において、番号 2 3 と番号 2 5 とを比較すると、番号 2 5 のように、窪み部開口角度 θ_c が 1.975° を下回ると、窪み部を設けてもロータのトルクの向上に寄与しないことが分かる。同様に、番号 2 3 と番号 3 3 とを比較すると、番号 3 3 のように、窪み部開口角度 θ_c が 15.625° を上回ると、窪み部を設けてもロータのトルクの向上に寄与しないことが分かる。また、番号 2 3 と番号 3 9 とを比較すると、番号 3 9 のように、窪み部深さ最大値 C_d がロータコアの直径の 0.1 倍を上回ると、窪み部を設けてもロータのトルクの向上に寄与しないことが分かる。

[0165] 一方、窪み部開口角度 θ_c が 1.975° 以上 15.625° 以下であり、且つ、窪み部深さ最大値 C_d がロータコアの直径の 0.01 倍以上 0.1 以下である番号 2 6 ~ 3 2、3 4 ~ 3 8 では、番号 2 3 に比べてトルク増減の値が大きくなる。したがって、番号 2 6 ~ 3 2、3 4 ~ 3 8 では、番号 2 3 に比べてロータのトルクを向上させることができることが分かる。

[0166] また、窪み部開口角度 θ_c が、 $11.25^\circ \pm 1.25^\circ$ の範囲内である番号 2 9 ~ 3 0 においては、ロータのトルクをより向上させることができることが分かる。特に、窪み部開口角度 θ_c が、 $11.25^\circ \pm 1.25^\circ$ の範囲内の中心値の 11.25° である番号 3 0 においてトルクの増減の値は極大値を示す。また、窪み部深さ最大値 C_d が、ロータコアの直径の 0.04 倍以上 0.07 倍以下の範囲内である番号 3 5 ~ 3 7 においては、ロータのトルクをより向上させることができることが分かる。特に、窪み部深さ最大値 C_d が、ロータコアの直径の 0.04 倍以上 0.07 倍以下の範囲内の中心付近の値を示す番号 3 6 においてトルク増減の値は極大値を示す。

[0167] また、表 2 において、例えば、番号 2 3 と番号 3 6 とを比較すると、前方

側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf および後方側のフラックスバリアの移動角度 θb を本実施形態で説明した範囲としなくても、窪み部開口角度 θc および窪み部深さ最大値 $C d$ を本実施形態で説明した範囲とすることにより、ロータのトルクを向上させることができることが分かる。

[0168] 以上のことから、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf と、後方側のフラックスバリアの移動角度 θb と、窪み部開口角度 θc および窪み部深さ最大値 $C d$ と、のうち、いずれか一つを本実施形態で説明した範囲としていれば、その他については本実施形態で説明した範囲としなくても良いことが分かる。

[0169] 次に、（経緯）の欄の（第3の知見）の欄で説明したように、磁石間ブリッジ部 8 2 1 を積極的に設けることと、外周側フラックスバリア 8 1 3 をロータコア 8 1 1 の外周面 8 1 8 まで拡大させて開放させることと、を行うことによる効果を検証した結果を表 3 に示す。

[0170] [表3]

【表 3】

番号	トルク [Nm]	
40	0. 62	図12F
41	0. 37	図12G
42	0. 55	図12H
43	0. 48	図12I

[0171] 図 1 2 F ～ 図 1 2 I は、表 3 の番号 4 0 ～ 4 3 における解析実行対象のロータの構成（ロータ断面）を示す図である。なお、ここでは、（第3の知見）の欄における効果のみを検証するために、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf および後方側のフラックスバリアの移動角度 θb を本実施形態で説明した範囲としていない。

[0172] 図 1 2 F では、外周側フラックスバリア 1 2 0 1 f ～ 1 2 0 1 g は、ロー

タコア断面においてロータコアの外周面 1211f に到達して開放している。また、磁石間フラックスバリア 1202a～1202b は繋がっておらず、磁石間フラックスバリア 1202a～1202b の間には軟磁性材料（磁石間ブリッジ部 1232a）が存在する。図 12F に示す例では、磁石間ブリッジ部の幅 w は 0.3 mm である。また、図 12F に示す例では、(1) 式の w_{min} は 0.075 mm である。

[0173] 図 12G に示す磁石間フラックスバリア 1202a～1202b の形状および大きさは、図 12F に示すロータの磁石間フラックスバリア 1202a～1202b の形状および大きさと同じである。したがって、図 12G に示すロータの磁石間ブリッジ部 1232a の形状および大きさは、図 12F に示すロータの磁石間ブリッジ部 1232a の形状および大きさと同じである。また、図 12G に示す外周側フラックスバリア 1201h～1201i の形状および大きさは、磁石間フラックスバリア 1202a～1202b の形状および大きさと同じである。図 12G では、外周側ブリッジ部の幅および磁石間ブリッジ部の幅が概ね均等になるように外周側フラックスバリア 1201h～1201i および磁石間フラックスバリア 1202a～1202b が配置されている。また、図 12G に示す外周側フラックスバリア 1201h～1201i は、ロータコア断面においてロータコアの外周面 1211g に到達せずに開放していない。

[0174] 本計算例では、外周側ブリッジ部の幅は、ロータコア断面において、当該磁石間ブリッジ部を通る磁束が流れる方向に垂直な方向の長さで表されるものとする。磁石間ブリッジ部の幅は、当該磁石間ブリッジ部における当該長さ（磁束が流れる方向に垂直な方向の長さ）のうち、最短の長さであるものとする。

[0175] 図 12H では、永久磁石 1221a～1221b（磁石間フラックスバリア 1202d～1202e）の間には軟磁性材料（磁石間ブリッジ部 1232b）が存在する。図 12H に示す外周側フラックスバリア 1202d～1202e の形状および大きさは、磁石間フラックスバリア 1232b の形状

および大きさと同じである。また、図12Hでは、外周側ブリッジ部1231c～1231dの幅および磁石間ブリッジ部1232bの幅が概ね均等になるように外周側フラックスバリア1201j～1201kおよび磁石間フラックスバリア1202d～1202eが配置されている。また、図12Hに示す外周側ブリッジ部1231c～1231dの幅、磁石間ブリッジ部1232bの幅は、それぞれ、図12Gに示す外周側ブリッジ部1231a～1231bの幅、磁石間ブリッジ部1132aの幅よりも短い。

[0176] 図11A～図11Cを参照しながら前述した通り、磁石間ブリッジ部の幅は、ロータコア断面において、ブリッジ幅規定線の軟磁性材料と重なる部分の長さで表される。ブリッジ幅規定線は、永久磁石が設置される2個の磁石穴の第2端部同士を、軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線である。図11Bおよび図11Cを参照しながら前述した通り、軟磁性部を構成する軟磁性材料と重なる長さが最短の距離になるように引いた直線の両端の位置が第2端部に含まれる。したがって、図12Hに示す例では、磁石間フラックスバリア1202d～1202eの間の領域を最短距離で結ぶ直線の長さが、磁極間ブリッジ部の幅になる。

[0177] また、図12Hに示す外周側フラックスバリア1201j～1201kは、ロータコア断面においてロータコアの外周面1211hに到達せずに開放していない。また、図12Hに示す磁石間フラックスバリア1202d～1202eは繋がっていない。したがって、磁石間フラックスバリア1202(1202d～1202e)の間には軟磁性材料(磁石間ブリッジ部)が存在する。

[0178] 図12Iに示す外周側フラックスバリア1201h～1201iの形状および大きさは、図12Gに示すロータの外周側フラックスバリア1201h～1201iの形状および大きさと同じである。したがって、図12Iに示す外周側ブリッジ部1231a～1231bの形状および大きさは、図12Gに示すロータの外周側ブリッジ部1231a～1231bの形状および大きさと同じである。また、図12Iでは、永久磁石1221a～1221b

よりも左右方向D sにおける内周側のフラックスバリア（磁石間フラックスバリア1202f）の数は一つである。

[0179] 表3において、図12Gに示すように外周側ブリッジ部1131a～1131bおよび磁石間ブリッジ部1132aの幅を、図12Fに示す磁極間ブリッジ部1132aの幅と同じにして図12Hに示す磁極間ブリッジ部1232bよりも広くすると、図12Hに示すように外周側ブリッジ部1231c～1231dの幅および磁石間ブリッジ部1232bの幅を狭くした場合よりもロータのトルクが低くなることが分かる。また、図12Iに示すように外周側ブリッジ部1231a～1213bを設け、且つ、磁石間ブリッジ部をなくすと、ロータのトルクは、図12Gに示すように外周側ブリッジ部1231a～1231bおよび磁石間ブリッジ部1232aを設け、且つ、磁石間ブリッジ部1232aの幅を図12Fに示す磁極間ブリッジ部1232aの幅と同じにして図12Hに示す磁極間ブリッジ部1232bよりも広くした場合に比べれば高くなる。しかしながら、図12Iに示すように磁石間ブリッジ部をなくすと、ロータのトルクは、図12Hに示すように外周側ブリッジ部1231c～1231dおよび磁石間ブリッジ部1232bを設け、且つ、外周側ブリッジ部1231c～1231dの幅および磁石間ブリッジ部1232bの幅を図12Gに示す外周側ブリッジ部1231a～1231bの幅および磁石間ブリッジ部1232aの幅よりも狭くした場合よりも低くなることが分かる。そして、図12Fに示すように外周側ブリッジ部を設けずに磁石間ブリッジ部1232aを設けると、ロータのトルクは、図12Gに示すように、外周側ブリッジ部1231a～1231bおよび磁石間ブリッジ部1232aを設けた場合、並びに、図12Hに示すように、外周側ブリッジ部1231c～1231dおよび磁石間ブリッジ部1232bの幅を図12Gに示す外周側ブリッジ部1231a～1231bの幅および磁石間ブリッジ部1232aの幅よりも狭くした場合よりも高くなることが分かる。すなわち、図12Fに示すように、磁石間ブリッジ部1232aを設け、外周側フラックスバリア1201f～1201gをロータコアの外周

面まで拡大させて開放させる場合に、ロータのトルクが最も高いことが分かる。

[0180] 表4に、図12Fに示すロータおよび図12Hに示すロータの応力の計算結果を示す。表4に示す値は、以下のようにして算出される値である。まず、回転数の欄に示す回転数で回転しているときにロータコアにかかる応力の計算値のうち、最大の応力の値を、当該回転数で回転しているときにロータコアにかかる応力の最大値とする。そして、当該回転数で回転しているときにロータコアにかかる応力の最大値を、図12Hに示すロータが20000rpmで回転しているときに当該ロータのロータコアにかかる応力の最大値を100として正規化（無次元化）する。このようにして正規化された値を表4の各欄に示す。

[0181] [表4]

【表4】

回転数[rpm]	図12F	図12H
1000	0.17	0.25
3000	1.55	2.25
5000	4.32	6.25
10000	17.2	25.0
15000	38.8	56.3
20000	69.0	100

[0182] 表3に示すように、図12Gに示すロータのトルクと、図12Iに示すロータのトルクは、図12Fおよび図12Hに示すロータのトルクに比べて小さい。したがって、図12Fおよび図12Hに示すロータは、図12Iに示すロータと比べても電磁氣的に優位である。そこで、表4を用いて、力学的な観点から、図12Fに示すロータと、図12Hに示すロータとを比較する。図12Fに示す磁石間ブリッジ部1232aの幅と、図12Hに示す外周

側ブリッジ部 1 2 3 1 c ~ 1 2 3 1 d および磁石間ブリッジ部 1 2 3 2 b の幅の和と、は概ね同じである。しかしながら、表 4 に示すように、図 1 2 F に示すロータの方が、図 1 2 H に示すロータよりも、ロータコアにかかる応力の最大値が低くなる。したがって、図 1 2 F に示すロータの方が、図 1 2 H に示すロータよりも、遠心力に対する耐力を向上させることができることが分かる。

以上のように、図 1 2 F に示すロータ（ロータコア）は、図 1 2 G ~ 図 1 2 I に示すロータ（ロータコア）に比べて、力学的および電磁氣的に優位な形状であると言える。

[0183] （まとめ）

以上のように本実施形態では、ロータコア断面において、開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 a、1 1 3 1 c の位置が、基準位置 8 3 1 a ~ 8 3 1 b よりも、ロータコア 8 1 1 の回転方向の後方側にある。ここで、開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 a、1 1 3 1 c は、ロータコア断面において、同一の極に設置される少なくとも一つの開放端部 1 1 1 1 a ~ 1 1 1 1 b の、ロータコア 8 1 1 の周方向における 2 つのコーナ部 1 1 3 1 a ~ 1 1 3 1 b、1 1 3 1 c ~ 1 1 3 1 d のうち、ロータコア 8 1 1 の回転方向における前方側のコーナ部である。また、基準位置 8 3 1 a、8 3 1 b は、それぞれ、当該開放端部 1 1 1 1 a、1 1 1 1 b を有する磁石穴 8 1 7 a、8 1 7 b に対する基準位置である。したがって、ロータ 8 1 0 のトルクを増加させることができる。

[0184] また、本実施形態では、前方側開放端部 1 1 1 1 a の前方側開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 a の位置が、当該前方側開放端部 1 1 1 1 a を有する磁石穴 8 1 7 a に対する基準位置 8 3 1 a よりも、ロータコア 8 1 1 の回転方向の後方側にある。また、後方側開放端部 1 1 1 1 b の後方側開放端部前方側コーナ部 1 1 3 1 b の位置が、当該後方側開放端部 1 1 1 1 b を有する磁石穴 8 1 7 b に対する基準位置 8 3 1 b よりも、ロータコア 8 1 1 の回転方向の後方側にある。したがって、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b がいわゆる V

字状に配置されるロータ810のトルクを増加させることができる。

[0185] また、本実施形態では、前方側の外周側フラックスバリア移動角度 θ_f を $\theta_a/24$ 以上 $15\theta_a/24$ 以下とする（ θ_a は基準位置移動角度である）。したがって、ロータ810のトルクを確実に増加させることができる。

[0186] また、本実施形態では、後方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θ_b を $\theta_a/24$ 以上 $\theta_a/8$ 以下とする。したがって、ロータ810のトルクを確実に増加させることができる。

[0187] また、本実施形態では、開放端部1111a～1111bの、ロータコア811の周方向の長さ L_1 を、永久磁石812a～812bの磁化方向 D_m の長さ L_2 の0.1倍以上、1.0倍以下とする。したがって、還流磁束を確実に抑制することができる。

[0188] また、本実施形態では、ロータコア811の外周面818と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコア121のティース123a、123bと間隔を有して対向する位置に窪み部815aを設ける。ティース123a、123bは、ティース123a～123dのうち磁束密度が最低となるティース123b、123dとは異なるティースである。したがって、ロータ810のトルクをより増加させることができる。

[0189] また、本実施形態では、ロータコア断面において、窪み部開口角度 θ_c を $\theta_a/8$ 以上、 $25\theta_a/24$ 以下とする（ θ_a は基準位置移動角度である）。したがって、ロータ810のトルクを確実に増加させることができる。

[0190] また、本実施形態では、窪み部深さ最大値 C_d をロータコア811の直径の0.01倍以上0.1以下の範囲内とする。したがって、ロータ810のトルクを確実に増加させることができる。

[0191] また、本実施形態では、ロータコア811は、1極当たり複数の磁極穴を有する。また、当該1極当たり複数の磁石穴は、左右方向 D_s で外周側に位置する第1端部1111a～1111bと、左右方向 D_s で第1端部1111a～1111bよりも内周側に位置する第2端部1112a～1112b

とをそれぞれ有する2個の磁石穴817a～817bを含む。軟磁性体部820は、2個の磁石穴817a～817bの各々の第2端部1112a～1112bの間に磁石間ブリッジ部821aを有する。2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112a～1112bは、磁石間フラックスバリア空間1122a～1122bの端部と一致し、且つ、閉鎖されている。一方、2個の磁石穴817a～817bの第1端部1111a～1111bは、開放されている。したがって、IPMSM800のトルクをより増加させることができる。

[0192] また、本実施形態では、磁石間ブリッジ部821aの幅wを、ロータコア811の直径の0.02倍以下にする。したがって、磁石間ブリッジ部821aの幅wをより低減することができる。よって、磁石間ブリッジ部821aを通過する磁束に含まれる還流磁束をより低減することができる。これにより、ロータ810のトルクに寄与する磁束（還流磁束にならない磁束）を多くすることができる。

[0193] また、本実施形態では、磁石間ブリッジ部821aの幅wを、(1)式の w_{min} を上回らせる。したがって、ロータ810（ロータコア811）の回転により発生する応力によって磁石間ブリッジ部821aを起点とする破断が生じることを抑制することができる。

[0194] また、本実施形態では、同一の極において永久磁石812a～812bが設置される2個の磁石穴817a～817bの第2端部1112a～1112bの間の領域を軟磁性材料の領域とすることにより、フラックスバリアとなる空間が存在しないようにする。したがって、第2端部1112a～1112bの間の領域の大きさが同じであれば、第2端部1112a～1112bの間の領域にフラックスバリアとなる領域がある場合に比べ、第2端部1112a～1112bの間の領域に含まれるブリッジ部（磁石間ブリッジ部821a）を広くすることができる。よって、第2端部1112a～1112bの間の領域の大きさを必要最小限の大きさにすることができる。これにより、例えば、ロータ810（ロータコア811）の1極当たりの領域の大

きさを狭くすることができる。

[0195] また、本実施形態では、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の常温における残留磁束密度を 0. 8 T 以下にする。したがって、磁石間ブリッジ部 8 2 1 a を通過する磁束に含まれる還流磁束をより低減することができる。よって、ロータ 8 1 0 のトルクに寄与する磁束（還流磁束にならない磁束）を多くすることができる。また、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b の常温における残留磁束密度を 0. 4 T 以下にすれば、磁石間ブリッジ部 8 2 1 a を通過する磁束に含まれる還流磁束をより一層低減することができる。よって、ロータ 8 1 0 のトルクに寄与する磁束（還流磁束にならない磁束）をより多くすることができる。

[0196] また、本実施形態では、永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b としてレアアースを含有しない永久磁石を用いる。したがって、入手が困難な材料を用いなくても、ロータ 8 1 0 のトルクを増加させることができる。

[0197] （変形例）

本実施形態では、1 極当たり 2 個の永久磁石 8 1 2 a ~ 8 1 2 b を設ける場合を例示した。しかしながら、1 極当たりの永久磁石の数は、1 個であっても 3 個以上であっても良い。

[0198] ただし、永久磁石の数が 3 個以上である場合、以下のようにするのが好ましい。すなわち、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf および後方側のフラックスバリアの移動角度 θb を定める必要がある外周側フラックスバリアを有する磁石穴に設置される永久磁石の磁化方向 $D m$ における端部のうち、ロータコアの外周面側の端部（図 1 1 A に示す例では第 3 端部 1 1 1 3）と、ロータコアの外周面と、の間の領域に、永久磁石が設置されていないのが好ましい。このようにすれば、前方側の外周側フラックスバリアの移動角度 θf および後方側のフラックスバリアの移動角度 θb を本実施形態で説明した範囲にしてロータのトルクを確実に向上させることができるからである。

[0199] また、1 極当たり 1 個の永久磁石が設置される場合、当該永久磁石が設置

される磁石穴において、当該永久磁石の左右方向D sの両側のフラックスバリアとなる空間が前方側フラックスバリアおよび後方側フラックスバリアとなる。この場合、前方側フラックスバリアおよび後方側フラックスバリアの双方または一方が開放端部を有する。

[0200] また、本実施形態では、永久磁石埋込型の回転電機としてIPMSMを例示した。しかしながら、永久磁石埋込型の回転電機はIPMSMに限定されない。例えば、永久磁石埋込型の回転電機はIPMSG (Interior Permanent Magnet Synchronous Generator) であっても良い。

[0201] なお、以上説明した本発明の実施形態は、何れも本発明を実施するにあたっての具体化の例を示したものに過ぎず、これらによって本発明の技術的範囲が限定的に解釈されてはならないものである。すなわち、本発明はその技術思想、またはその主要な特徴から逸脱することなく、様々な形で実施することができる。

[0202] なお、以上の実施形態の開示は、例えば以下になる。

[開示1]

軟磁性材料を用いて形成され、1極当たり少なくとも一つの磁石穴を有する軟磁性体部を備えたロータコアであって、

前記磁石穴は、当該磁石穴に設置される永久磁石に対し、当該永久磁石の磁化方向と回転の中心となる回転軸線に平行な方向とに垂直な左右方向の両側に、前方側フラックスバリアとなる空間および後方側フラックスバリアとなる空間を有し、

前記前方側フラックスバリアとなる空間および前記後方側フラックスバリアとなる空間のうち、少なくとも一つのフラックスバリアとなる空間は、前記ロータコアの外周面において開放されている開放端部を有し、

前記回転軸線に対して垂直な断面において、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の開放端部前方側コーナ部の位置は、当該開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置よりも、前記ロータコアの回転方向の後方側にあり、

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部は、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記ロータコアの回転方向における前方側のコーナ部であり、

前記断面において、前記開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置は、当該磁石穴に設置される前記永久磁石のうち、当該開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石の端部の一つである永久磁石基準端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置であり、

前記断面において、前記開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石の前記永久磁石基準端部は、当該永久磁石の端部のうち、当該永久磁石を含む一つの極の領域の前記周方向における中心の位置と、前記回転軸線と、を通る直線からの前記周方向における距離が最も遠い位置にある端部であり、前記開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石を含む一つの極の領域の前記周方向における中心の位置と、前記回転軸線と、を通る直線からの前記周方向における距離は、前記ロータコアの回転方向における前方側および後方側のうち、当該開放端部が存在する側において定められる距離である、ロータコア。

[開示2]

前記断面において、ロータの同一の極に設置される全ての前記開放端部の前記開放端部前方側コーナ部の位置は、当該開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置よりも、前記ロータコアの回転方向の後方側にある、開示1に記載のロータコア。

[開示3]

前記ロータコアは、1極当たり複数の磁極穴を有し、

前記複数の磁石穴は、前記回転方向の前方側に位置する前方側磁石穴と、前記回転方向の後方側に位置する後方側磁石穴と、を有し、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間は、前記前方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間よりも前記

回転方向の前方側且つ前記ロータコアの外周側にある外周側フラックスバリアであり、

前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間は、前記後方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の後方側且つ前記ロータコアの外周側にある外周側フラックスバリアであり、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間と、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間と、のうち、少なくとも一方のフラックスバリアとなる空間は、前記開放端部を有し、

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部は、前方側開放端部前方側コーナ部と、後方側開放端部前方側コーナ部と、のうちの少なくとも一方を有し、

前記断面において、前記前方側開放端部前方側コーナ部は、前方側開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部であり、

前記断面において、前記前方側開放端部は、前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間の前記開放端部であり、

前記断面において、前記後方側開放端部は、後方側開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部であり、

前記断面において、前記後方側開放端部前方側コーナ部は、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間の前記開放端部であり、

、

前記断面において、前記永久磁石基準端部は、前方側永久磁石端部と、後方側永久磁石端部と、のうちの少なくとも一方を有し、

前記断面において、前記前方側永久磁石端部は、前記前方側磁石穴に設置される前記永久磁石の端部のうち、最も前記回転方向の前方側の位置の端部であり、

前記断面において、前記後方側永久磁石端部は、前記後方側磁石穴に設置される前記永久磁石の端部のうち、最も前記回転方向の後方側の位置の端部であり、

前記断面において、前記基準位置は、前方側基準位置と、後方側基準位置と、のうちの少なくとも一方を有し、

前記断面において、前記前方側基準位置は、前記前方側永久磁石端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置であり、

前記断面において、前記後方側基準位置は、前記後方側永久磁石端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面との交点の位置である、開示 1 または 2 に記載のロータコア。

[開示 4]

前記開放端部前方側コーナ部は、前記前方側開放端部前方側コーナ部と、前記後方側開放端部前方側コーナ部と、を有し、

前記永久磁石基準端部は、前記前方側永久磁石端部と、前記後方側永久磁石端部と、を有し、

前記基準位置は、前記前方側基準位置と、前記後方側基準位置と、を有し、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間と、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間と、のそれぞれが、前記開放端部を有する、開示 3 に記載のロータコア。

[開示 5]

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部のうち、同一の極における前記周方向の中心よりも前記回転方向の前方側に位置する前記開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該開放端部前方側コーナ部をコーナ部の一つとする前記開放端部を有する前記磁石穴に対する前記基準位置と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta_a / 24$ 以上 $15 \theta_a / 24$ 以下であり、

θ_a は、前記基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角度（rad）であり、

θ_a は、 $2\pi / N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアの-slot数（個）である、開示1～4のいずれか一つに記載のロータコア。

[開示6]

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部のうち、同一の極における前記周方向の中心よりも前記回転方向の後方側に位置する前記開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該開放端部前方側コーナ部をコーナ部の一つとする前記開放端部を有する前記磁石穴に対する前記基準位置と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta_a / 24$ 以上 $\theta_a / 8$ 以下であり、

θ_a は、前記基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角度（rad）であり、

θ_a は、 $2\pi / N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアの-slot数（個）である、開示1～5のいずれか一つに記載のロータコア。

[開示7]

前記開放端部の前記周方向の長さは、当該開放端部を有する前記磁石穴に設置される前記永久磁石の磁化方向の長さの0.1倍以上、1.0倍以下である、開示1～6のいずれか一つに記載のロータコア。

[開示8]

前記軟磁性体部は、前記フラックスバリアとなる空間とは異なる窪み部として、前記ロータコアの外周面において開放されている開放端部を有する窪み部をさらに有し、

前記窪み部は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設

置されるステータコアのティースのうち磁束密度が最低となるティースとは異なるティースと間隔を有して対向する位置にある、開示 1～7 のいずれか一つに記載のロータコア。

[開示 9]

前記断面において、前記窪み部の開放端部における 2 つのコーナ部のうち、前記回転方向の後方側のコーナ部である窪み部後方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該窪み部が設置される極と同一の極において当該窪み部よりも前記回転方向の後方側に位置する前記開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 θa であり、

前記窪み部の開放端部における 2 つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部である窪み部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、前記窪み部後方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta a/8$ 以上、 $25\theta a/24$ 以下であり、

θa は、前記断面において、後方側永久磁石端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置である後方側基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角度 (rad) であり、

前記後方側永久磁石端部は、同一の極に設置される前記永久磁石の端部のうち、前記周方向の最も後方側に位置する端部であり、

θa は、 $2\pi/N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのスロット数 (個) である、開示 8 に記載のロータコア。

[開示 10]

前記窪み部の深さの最大値は、前記ロータコアの直径の 0.01 倍以上 0.1 倍以下の範囲内である、開示 8 または 9 に記載のロータコア。

[開示 11]

前記ロータコアは、1 極当たり複数の磁極穴を有し、

前記複数の磁石穴は、前記回転方向の前方側に位置する前方側磁石穴と、前記回転方向の後方側に位置する後方側磁石穴と、を有し、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間は、前記前方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の前方側にあり、

前記後方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間は、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の後方側にあり、

前記軟磁性体部は、前記前方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間と、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間との間の領域に配置された磁石間ブリッジ部を有し、

前記前方側磁石穴は、当該前方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の前方側に前記開放端部となる第1端部を有し、

前記前方側磁石穴は、当該前方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の後方側に第2端部を有し、

前記後方側磁石穴は、当該後方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の後方側に前記開放端部となる第1端部を有し、

前記後方側磁石穴は、当該後方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の前方側に第2端部を有し、

前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の各々の前記第2端部は、フラックスバリアとなる空間の端部と一致し、且つ、閉鎖されている、開示1～10のいずれか一つに記載のロータコア。

[開示12]

前記断面において、ブリッジ幅規定線の、前記軟磁性材料と重なる部分の長さは、前記ロータコアの直径の0.02倍以下であり、

前記ブリッジ幅規定線は、前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の前記第2端部同士を、前記軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線である、開示11に記載のロータコア。

[開示13]

前記断面において、前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の各々は、

当該前方側磁石穴および当該後方側磁石穴に設置される前記永久磁石の磁化方向で外周側に位置する第3端部と、前記第3端部よりも当該永久磁石の磁化方向で内周側に位置する第4端部と、をさらに有し、

前記断面において、ブリッジ幅規定線の、前記軟磁性材料と重なる部分の長さは、 w_{min} を上回り、

前記ブリッジ幅規定線は、前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の前記第2端部同士を、前記軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線であり、

w_{min} は、 $\rho \times S \times r_g \times \omega \div Y_s$ で算出され、

ρ は、前記軟磁性材料の密度 (kg/m^3) であり、

Y_s は、前記軟磁性材料の常温における降伏応力 (Pa) であり、

S は、外力影響部の面積 (m^2) であり、

前記外力影響部は、前記断面において、前記ブリッジ幅規定線の一方の端に位置する前記前方側磁石穴の前記第3端部と、前記ブリッジ幅規定線の他方の端に位置する前記後方側磁石穴の前記第3端部と、前記軟磁性体部の外周面と、前記ブリッジ幅規定線と、により囲まれる前記軟磁性材料の領域であり、

r_g は、前記断面における前記外力影響部の重心の位置と前記回転の中心との半径方向における距離 (m) であり、

ω は、最高回転数で回転するときのロータの角速度 (rad/sec) である、開示11または12に記載のロータコア。

[開示14]

軟磁性材料を用いて形成され、1極当たり少なくとも一つの磁石穴を有する軟磁性体部を備えたロータコアであって、

前記軟磁性体部は、外周面に窪み部を有し、

前記磁石穴は、当該磁石穴に設置される永久磁石の磁化方向と回転の中心となる回転軸線に平行な方向とに垂直な左右方向に第1端部および第2端部を有し、

前記第1端部および前記第2端部のうち、少なくとも一方の端部は開放されている開放端部であり、

前記窪み部は、前記開放端部とは異なる位置にあり、

前記窪み部は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのティースのうち磁束密度が最低となるティースとは異なるティースと間隔を有して対向する位置にある、ロータコア。

[開示15]

前記断面において、前記窪み部の開放端部における2つのコーナ部のうち、前記ロータコアの回転方向の後方側のコーナ部である窪み部後方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該窪み部が設置される極と同一の極において当該窪み部よりも前記回転方向の後方側に位置する開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 θa であり、

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部は、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記ロータコアの回転方向における前方側のコーナ部であり、

前記窪み部の開放端部における2つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部である窪み部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、前記窪み部後方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta a/8$ 以上、 $25\theta a/24$ 以下であり、

θa は、前記断面において、後方側永久磁石端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置である後方側基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角度（rad）であり、

前記後方側永久磁石端部は、同一の極に設置される前記永久磁石の端部のうち、前記周方向の最も後方側に位置する端部であり、

θa は、 $2\pi/N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのスロット数（個）である、開示14に記載のロータコア

。

[開示 16]

前記窪み部の深さの最大値は、前記ロータコアの直径の 0.01 倍以上 0.1 倍以下の範囲内である、開示 14 または 15 に記載のロータコア。

[開示 17]

開示 1 ~ 16 のいずれか一つに記載のロータコアと、
前記ロータコアに設置される複数の永久磁石と、
を備える、ロータ。

[開示 18]

前記永久磁石の常温における残留磁束密度は、0.8 T 以下である、開示 17 に記載のロータ。

[開示 19]

前記永久磁石は、レアアースを含有しない、開示 17 または 18 に記載のロータ。

[開示 20]

開示 17 ~ 19 のいずれか一つに記載のロータと、
ステータと、
を備える、回転電機。

産業上の利用可能性

[0203] 本発明は、例えば、回転電機に利用することができる。

請求の範囲

[請求項1]

軟磁性材料を用いて形成され、1極当たり少なくとも一つの磁石穴を有する軟磁性体部を備えたロータコアであって、

前記磁石穴は、当該磁石穴に設置される永久磁石に対し、当該永久磁石の磁化方向と回転の中心となる回転軸線に平行な方向とに垂直な左右方向の両側に、前方側フラックスバリアとなる空間および後方側フラックスバリアとなる空間を有し、

前記前方側フラックスバリアとなる空間および前記後方側フラックスバリアとなる空間のうち、少なくとも一つのフラックスバリアとなる空間は、前記ロータコアの外周面において開放されている開放端部を有し、

前記回転軸線に対して垂直な断面において、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の開放端部前方側コーナ部の位置は、当該開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置よりも、前記ロータコアの回転方向の後方側にあり、

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部は、ロータの同一の極に設置される少なくとも一つの前記開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記ロータコアの回転方向における前方側のコーナ部であり、

前記断面において、前記開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置は、当該磁石穴に設置される前記永久磁石のうち、当該開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石の端部の一つである永久磁石基準端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置であり、

前記断面において、前記開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石の前記永久磁石基準端部は、当該永久磁石の端部のうち、当該永久磁石を含む一つの極の領域の前記周方向における中心の位置と、前記回転軸線と、を通る直線からの前記周方向における距離が最も遠い位

置にある端部であり、

前記開放端部に最も近い位置にある前記永久磁石を含む一つの極の領域の前記周方向における中心の位置と、前記回転軸線と、を通る直線からの前記周方向における距離は、前記ロータコアの回転方向における前方側および後方側のうち、当該開放端部が存在する側において定められる距離である、ロータコア。

[請求項2] 前記断面において、ロータの同一の極に設置される全ての前記開放端部の前記開放端部前方側コーナ部の位置は、当該開放端部を有する前記磁石穴に対する基準位置よりも、前記ロータコアの回転方向の後方側にある、請求項1に記載のロータコア。

[請求項3] 前記ロータコアは、1極当たり複数の磁極穴を有し、
前記複数の磁石穴は、前記回転方向の前方側に位置する前方側磁石穴と、前記回転方向の後方側に位置する後方側磁石穴と、を有し、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間は、前記前方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の前方側且つ前記ロータコアの外周側にある外周側フラックスバリアであり、

前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間は、前記後方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の後方側且つ前記ロータコアの外周側にある外周側フラックスバリアであり、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間と、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間と、のうち、少なくとも一方のフラックスバリアとなる空間は、前記開放端部を有し、

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部は、前方側開放端部前方側コーナ部と、後方側開放端部前方側コーナ部と、のうちの少なくとも一方を有し、

前記断面において、前記前方側開放端部前方側コーナ部は、前方側開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部であり、

前記断面において、前記前方側開放端部は、前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間の前記開放端部であり、

前記断面において、前記後方側開放端部は、後方側開放端部の、前記ロータコアの周方向における2つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部であり、

前記断面において、前記後方側開放端部前方側コーナ部は、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間の前記開放端部であり、

前記断面において、前記永久磁石基準端部は、前方側永久磁石端部と、後方側永久磁石端部と、のうちの少なくとも一方を有し、

前記断面において、前記前方側永久磁石端部は、前記前方側磁石穴に設置される前記永久磁石の端部のうち、最も前記回転方向の前方側の位置の端部であり、

前記断面において、前記後方側永久磁石端部は、前記後方側磁石穴に設置される前記永久磁石の端部のうち、最も前記回転方向の後方側の位置の端部であり、

前記断面において、前記基準位置は、前方側基準位置と、後方側基準位置と、のうちの少なくとも一方を有し、

前記断面において、前記前方側基準位置は、前記前方側永久磁石端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置であり、

前記断面において、前記後方側基準位置は、前記後方側永久磁石端部と前記回転軸線とを通る直線と、前記ロータコアの外周面との交点の位置である、請求項1または2に記載のロータコア。

[請求項4]

前記開放端部前方側コーナ部は、前記前方側開放端部前方側コーナ

部と、前記後方側開放端部前方側コーナ部と、を有し、

前記永久磁石基準端部は、前記前方側永久磁石端部と、前記後方側永久磁石端部と、を有し、

前記基準位置は、前記前方側基準位置と、前記後方側基準位置と、を有し、

前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間と、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間と、のそれぞれが、前記開放端部を有する、請求項3に記載のロータコア。

[請求項5]

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部のうち、同一の極における前記周方向の中心よりも前記回転方向の前方側に位置する前記開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該開放端部前方側コーナ部をコーナ部の一つとする前記開放端部を有する前記磁石穴に対する前記基準位置と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta_a / 24$ 以上 $15 \theta_a / 24$ 以下であり、

θ_a は、前記基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角度 (rad) であり、

θ_a は、 $2\pi / N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアの-slot数 (個) である、請求項1～4のいずれか1項に記載のロータコア。

[請求項6]

前記断面において、前記開放端部前方側コーナ部のうち、同一の極における前記周方向の中心よりも前記回転方向の後方側に位置する前記開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該開放端部前方側コーナ部をコーナ部の一つとする前記開放端部を有する前記磁石穴に対する前記基準位置と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta_a / 24$ 以上 $\theta_a / 8$ 以下であり、

θ_a は、前記基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角

度 (rad) であり、

θ_a は、 $2\pi / N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのスロット数 (個) である、請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載のロータコア。

[請求項7] 前記開放端部の前記周方向の長さは、当該開放端部を有する前記磁石穴に設置される前記永久磁石の磁化方向の長さの 0.1 倍以上、1.0 倍以下である、請求項 1 ～ 6 のいずれか 1 項に記載のロータコア。

[請求項8] 前記軟磁性体部は、前記フラックスバリアとなる空間とは異なる窪み部として、前記ロータコアの外周面において開放されている開放端部を有する窪み部をさらに有し、

前記窪み部は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのティースのうち磁束密度が最低となるティースとは異なるティースと間隔を有して対向する位置にある、請求項 1 ～ 7 のいずれか 1 項に記載のロータコア。

[請求項9] 前記断面において、前記窪み部の開放端部における 2 つのコーナ部のうち、前記回転方向の後方側のコーナ部である窪み部後方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、当該窪み部が設置される極と同一の極において当該窪み部よりも前記回転方向の後方側に位置する前記開放端部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 θ_a であり、

前記窪み部の開放端部における 2 つのコーナ部のうち、前記回転方向の前方側のコーナ部である窪み部前方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、前記窪み部後方側コーナ部と前記回転軸線とを通る直線と、のなす角度は、 $\theta_a / 8$ 以上、 $25\theta_a / 24\theta_a$ 以下であり、

θ_a は、前記断面において、後方側永久磁石端部と前記回転軸線と

を通る直線と、前記ロータコアの外周面と、の交点の位置である後方側基準位置からの前記回転軸線周りの角度である移動角度（rad）であり、

前記後方側永久磁石端部は、同一の極に設置される前記永久磁石の端部のうち、前記周方向の最も後方側に位置する端部であり、

θ_a は、 $2\pi / N_{slot}$ で算出され、

N_{slot} は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのスロット数（個）である、請求項8に記載のロータコア。

[請求項10] 前記窪み部の深さの最大値は、前記ロータコアの直径の0.01倍以上0.1倍以下の範囲内である、請求項8または9に記載のロータコア。

[請求項11] 前記ロータコアは、1極当たり複数の磁極穴を有し、
前記複数の磁石穴は、前記回転方向の前方側に位置する前方側磁石穴と、前記回転方向の後方側に位置する後方側磁石穴と、を有し、
前記前方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間は、前記前方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の前方側にあり、

前記後方側磁石穴が有する前記前方側フラックスバリアとなる空間は、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間よりも前記回転方向の後方側にあり、

前記軟磁性体部は、前記前方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間と、前記後方側磁石穴が有する前記後方側フラックスバリアとなる空間との間の領域に配置された磁石間ブリッジ部を有し、

前記前方側磁石穴は、当該前方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の前方側に前記開放端部となる第1端部を有し、

前記前方側磁石穴は、当該前方側磁石穴に設置される前記永久磁石

に対し前記回転方向の後方側に第2端部を有し、

前記後方側磁石穴は、当該後方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の後方側に前記開放端部となる第1端部を有し、

前記後方側磁石穴は、当該後方側磁石穴に設置される前記永久磁石に対し前記回転方向の前方側に第2端部を有し、

前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の各々の前記第2端部は、フラックスバリアとなる空間の端部と一致し、且つ、閉鎖されている、請求項1～10のいずれか1項に記載のロータコア。

[請求項12] 前記断面において、ブリッジ幅規定線の、前記軟磁性材料と重なる部分の長さは、前記ロータコアの直径の0.02倍以下であり、

前記ブリッジ幅規定線は、前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の前記第2端部同士を、前記軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線である、請求項11に記載のロータコア。

[請求項13] 前記断面において、前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の各々は、当該前方側磁石穴および当該後方側磁石穴に設置される前記永久磁石の磁化方向で外周側に位置する第3端部と、前記第3端部よりも当該永久磁石の磁化方向で内周側に位置する第4端部と、をさらに有し、

前記断面において、ブリッジ幅規定線の、前記軟磁性材料と重なる部分の長さは、 w_{min} を上回り、

前記ブリッジ幅規定線は、前記前方側磁石穴および前記後方側磁石穴の前記第2端部同士を、前記軟磁性材料と重なる長さが最短になるように結ぶ直線であり、

w_{min} は、 $\rho \times S \times r_g \times \omega \div Y_s$ で算出され、

ρ は、前記軟磁性材料の密度 (kg/m^3) であり、

Y_s は、前記軟磁性材料の常温における降伏応力 (Pa) であり、

S は、外力影響部の面積 (m^2) であり、

前記外力影響部は、前記断面において、前記ブリッジ幅規定線の一

方の端に位置する前記前方側磁石穴の前記第3端部と、前記ブリッジ幅規定線の方の端に位置する前記後方側磁石穴の前記第3端部と、前記軟磁性体部の外周面と、前記ブリッジ幅規定線と、により囲まれる前記軟磁性材料の領域であり、

r_g は、前記断面における前記外力影響部の重心の位置と前記回転の中心との半径方向における距離(m)であり、

ω は、最高回転数で回転するときのロータの角速度(rad/sec)である、請求項11または12に記載のロータコア。

[請求項14] 軟磁性材料を用いて形成され、1極当たり少なくとも一つの磁石穴を有する軟磁性体部を備えたロータコアであって、

前記軟磁性体部は、外周面に窪み部を有し、

前記磁石穴は、当該磁石穴に設置される永久磁石の磁化方向と回転の中心となる回転軸線に平行な方向とに垂直な左右方向に第1端部および第2端部を有し、

前記第1端部および前記第2端部のうち、少なくとも一方の端部は開放されている開放端部であり、

前記窪み部は、前記開放端部とは異なる位置にあり、

前記窪み部は、前記ロータコアの外周面と間隔を有して対向する位置に設置されるステータコアのティースのうち磁束密度が最低となるティースとは異なるティースと間隔を有して対向する位置にある、ロータコア。

[請求項15] 請求項1～14のいずれか1項に記載のロータコアと、

前記ロータコアに設置される複数の永久磁石と、
を備える、ロータ。

[請求項16] 前記永久磁石の常温における残留磁束密度は、0.8T以下である、請求項15に記載のロータ。

[請求項17] 前記永久磁石は、レアアースを含有しない、請求項15または16に記載のロータ。

〔請求項18〕 請求項15～17のいずれか1項に記載のロータと、
ステータと、
を備える、回転電機。