(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6560391号
(P6560391)
(45)発行日　令和1年8月14日(2019.8.14)　(24)登録日　令和1年7月26日(2019.7.26)

(51)Int.Cl.　F I
B64D 27/24 (2006.01)　B64D 27/24
B64C 13/50 (2006.01)　B64C 13/50
H02K 7/14 (2006.01)　H02K 7/14　A

請求項の数 15　外国語出願　(全 24 頁)

(21)出願番号　特願2018-63948(P2018-63948)
(22)出願日　平成30年3月29日(2018.3.29)
(65)公開番号　特開2018-188135(P2018-188135A)
(43)公開日　平成30年11月29日(2018.11.29)
審査請求日　平成30年7月20日(2018.7.20)
(31)優先権主張番号　15/475,401
(32)優先日　平成29年3月31日(2017.3.31)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(73)特許権者　390041542
ゼネラル・エレクトリック・カンパニイ
アメリカ合衆国、ニューヨーク州　１２３４５、スケネクタデイ、リバーロード、１番
(74)代理人　100188558
弁理士　飯田　雅人
(74)代理人　100154922
弁理士　崔　允辰
(74)代理人　100207158
弁理士　田中　研二
(74)代理人　100137545
弁理士　荒川　聡志
(74)代理人　100105588
弁理士　小倉　博

最終頁に続く

(54)【発明の名称】航空機のための電気推進システム

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
中心軸線を規定する航空機推進システム（５０）であって、
前記中心軸線の周りで回転可能な複数のファンブレード（１２８）を有し、ファン圧力比ＦＰＲを規定するファン（１０４）と、
前記ファン（１０４）を駆動するために前記ファン（１０４）に機械的に結合され、磁極数n_{poles}を含み、最大出力Ｐを規定する電気モータ（１３６）と、を含み、
前記ファン（１０４）の前記ファン圧力比ＦＰＲと、前記電気モータ（１３６）の前記磁極数n_{poles}と、前記電気モータ（１３６）の前記最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、
【数１】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～５２，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～９．８の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である、航空機推進システム（５０）。
【請求項２】
前記磁極数n_{poles}は４～１８０であり、前記最大出力Ｐは６５０馬力～６，０００馬力であり、前記ファン圧力比ＦＰＲは１～２である、請求項１に記載の航空機推進シ

ステム（５０）。
【請求項３】
前記電気モータ（１３６）は、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約３，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で動作する、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項４】
前記電気モータ（１３６）は、ギアボックスを使用せずに前記ファン（１０４）に直接接続される、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項５】
前記ファン（１０４）および前記電気モータ（１３６）は、境界層取り込みファンとして共に構成される、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項６】
前記ファン（１０４）および前記電気モータ（１３６）は、前記航空機の後端部に取り付けられるように構成された後部ファンとして共に構成される、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項７】
前記ファン（１０４）はハブ半径を規定し、前記複数のファンブレード（１２８）はファン半径を規定し、前記ファン半径に対する前記ハブ半径の比は、約０．２～約０．４である、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項８】
前記ファン半径に対する前記ハブ半径の前記比は、約０．２５～約０．３である、請求項７に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項９】
燃焼エンジンと、
電力を生成するために前記燃焼エンジンに機械的に結合された発電機と、
前記発電機を前記電気モータ（１３６）に電気的に接続し、電力電子機器を含む電力バスと、をさらに含む、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項１０】
前記電力電子機器は、１つまたは複数の炭化ケイ素部品を利用する、請求項９に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項１１】
前記電力電子機器は、約５キロヘルツ（ｋＨｚ）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数で動作するように構成される、請求項９に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項１２】
前記ファン（１０４）は最大ファン先端速度を規定し、前記最大ファン先端速度は約２００フィート／秒～約１，３５０フィート／秒である、請求項１に記載の航空機推進システム（５０）。
【請求項１３】
航空機のための推進システムを動作させるための方法であって、前記推進システムは、複数のファンブレード（１２８）を有するファン（１０４）と、前記ファン（１０４）に機械的に結合された電気モータ（１３６）と、を含み、前記方法は、
前記電気モータ（１３６）を用いて前記ファン（１０４）を駆動するステップを含み、前記ファン（１０４）のファン圧力比ＦＰＲと、前記電気モータ（１３６）の磁極数n_{poles}と、前記電気モータ（１３６）の最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、
【数２】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～５２，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～

９．８の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である、方法。
【請求項１４】
前記電気モータ（１３６）を使用して前記ファン（１０４）を駆動するステップは、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約３，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で前記電気モータ（１３６）を動作させるステップを含む、請求項１３に記載の方法。
【請求項１５】
前記電気モータ（１３６）を用いて前記ファン（１０４）を駆動するステップは、前記電気モータ（１３６）のロータの回転速度に等しい回転速度で前記ファン（１０４）を回転させるステップを含む、請求項１３に記載の方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本主題は、一般的には航空機推進システムに関し、より詳細には、電動ファンアセンブリを含む航空機推進システムに関する。
【背景技術】
【０００２】
ハイブリッド電気推進システムは、商用旅客機などの航空機に特定の効率的な利益を提供することができる。特定のハイブリッド電気推進システムは、電気推進機に電気を供給する電力源を含む。電気推進機は、一般に電気モータと推進機とを含み、電気モータが推進機を駆動する。しかしながら、電気推進機を利用する際の１つの問題は、電気モータの最大効率および／または電力密度を保証することである。したがって、所望の電力密度を有するように設計され、さらにそれが設置された航空機と効率的に動作するように設計された電気モータを含むハイブリッド電気推進システムが有用であろう。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００３】
【特許文献１】米国特許出願公開第２０１５／０３８０９９９号明細書
【発明の概要】
【０００４】
本発明の態様および利点は、以下の説明に部分的に記載されており、または説明から明らかとなり、または本発明の実践を通して学ぶことができる。
【０００５】
本開示の１つの例示的な実施形態では、中心軸線を規定する航空機推進システムが提供される。推進システムは、中心軸線の周りで回転可能な複数のファンブレードを有し、ファン圧力比ＦＰＲを規定するファンを含む。推進システムはまた、ファンを駆動するためにファンに機械的に結合され、磁極数n_{poles}を含み、最大出力Ｐを規定する電気モータを含む。ファンのファン圧力比ＦＰＲと、電気モータの磁極数n_{poles}と、電気モータの最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、
【０００６】
【数１】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～５２，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～９．８の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である。
【０００７】
特定の例示的な実施形態では、磁極数n_{poles}は４～１８０であり、最大出力Ｐは６５０馬力～６，０００馬力であり、ファン圧力比ＦＰＲは１～２である。
【０００８】

特定の例示的な実施形態では、電気モータは、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約３，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で動作する。

【０００９】

特定の例示的な実施形態では、電気モータは、ギアボックスを使用せずにファンに直接接続される。

【００１０】

特定の例示的な実施形態では、ファンおよび電気モータは、境界層取り込みファンとして共に構成される。

【００１１】

特定の例示的な実施形態では、ファンおよび電気モータは、航空機の後端部に取り付けられるように構成された後部ファンとして共に構成される。

【００１２】

特定の例示的な実施形態では、ファンはハブ半径を規定し、複数のファンブレードはファン半径を規定し、ファン半径に対するハブ半径の比は、約０．２～約０．４である。例えば、特定の例示的な実施形態では、ファン半径に対するハブ半径の比は、約０．２５～約０．３である。

【００１３】

特定の例示的な実施形態では、推進システムは、燃焼エンジンと、電力を生成するために燃焼エンジンに機械的に結合された発電機と、発電機を電気モータに電気的に接続し、電力電子機器を含む電力バスと、をさらに含む。例えば、特定の例示的な実施形態では、電力電子機器は、１つまたは複数の炭化ケイ素部品を利用する。それに加えて、またはその代わりに、特定の例示的な実施形態では、電力電子機器は、約５キロヘルツ（ｋＨｚ）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数で動作するように構成される。

【００１４】

特定の例示的な実施形態では、ファンは最大ファン先端速度を規定し、最大ファン先端速度は約２００フィート／秒～約１，３５０フィート／秒である。

【００１５】

本開示の別の例示的な実施形態では、航空機推進システムの電動ファンアセンブリが提供される。電動ファンアセンブリは、ファン圧力比ＦＰＲ、ハブ半径、およびファン半径を規定するファンを含む。ファン半径に対するハブ半径の比は、約０．２～約０．４である。電動ファンアセンブリは、ファンを駆動するためにファンに直接機械的に結合された電気モータであって、磁極数n_{poles}を含み、最大出力Ｐを規定し、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約２，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で動作する電気モータをさらに含む。ファンのファン圧力比ＦＰＲと、電気モータの磁極数n_{poles}と、電気モータの最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、

【００１６】

【数２】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～３７，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～７．０の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である。

【００１７】

特定の例示的な実施形態では、ファンは最大ファン先端速度をさらに規定し、最大ファン先端速度は約２００フィート／秒～約１，３５０フィート／秒である。

【００１８】

特定の例示的な実施形態では、ファン半径に対するハブ半径の比は、約０．２５～約０．３である。

【００１９】

本開示の例示的な態様では、航空機のための推進システムを動作させるための方法が提供される。推進システムは、複数のファンブレードを有するファンと、ファンに機械的に結合された電気モータと、を含む。本方法は、電気モータを使用してファンを駆動するステップを含み、ファンのファン圧力比ＦＰＲと、電気モータの磁極数n_{poles}と、電気モータの最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、

【００２０】

【数３】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～５２，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～９．８の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である。

【００２１】

特定の例示的な態様では、電気モータを使用してファンを駆動するステップは、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約３，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で電気モータを動作させるステップを含む。

【００２２】

特定の例示的な態様では、電気モータを用いてファンを駆動するステップは、電気モータのロータの回転速度に等しい回転速度でファンを回転させるステップを含む。

【００２３】

特定の例示的な態様では、推進システムは、燃焼エンジンと、燃焼エンジンに機械的に結合された発電機と、そのような例示的な態様により、発電機を電気モータに電気的に接続する電力バスと、をさらに含み、本方法は、発電機により電力を生成するステップと、生成された電力を電力バスを介して電気モータに供給するステップと、をさらに含む。例えば、特定の例示的な態様では、生成された電力を電力バスを介して電気モータに供給するステップは、約５キロヘルツ（ｋＨｚ）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数で動作する電力電子機器に電力を通すステップを含む。

【００２４】

本発明のこれらおよび他の特徴、態様および利点は、以下の説明および添付の特許請求の範囲を参照することによってよりよく理解されるであろう。付の図面は、本明細書に組み込まれて、本明細書の一部を構成し、本発明の実施形態を例示し、説明と共に本発明の原理を説明するのに役立つ。

【００２５】

本発明の完全かつ可能な開示は、その最良の形態を含み、当業者に向けられて、本明細書に記載されており、それは以下の添付の図面を参照する。

【図面の簡単な説明】

【００２６】

【図１】本開示の様々な例示的な実施形態による航空機の上面図である。

【図２】図１の例示的な航空機の左舷側面図である

【図３】本開示の例示的な実施形態による航空機用の推進システムの概略図である。

【図４】本開示の例示的な実施形態による電動ファンアセンブリの概略断面図である。

【図５】本開示の例示的な実施形態による図４の例示的な電動ファンアセンブリのための電気モータの拡大断面図である。

【図６】図４の電動ファンアセンブリ用の例示的な電気モータの中心軸線に沿った別の拡大断面図である。

【図７】本開示の例示的な実施形態による電動ファンアセンブリの特定のパラメータ間の関係を示すグラフである。

【図８】複数の実施例を示すチャートである。

【図９】本開示の例示的な態様による推進システムを動作させるための方法を示す流れ図

である。

【発明を実施するための形態】

【００２７】

本発明の実施形態を示すために、ここで詳細に参照を行うが、それの１つまたは複数の実施例を添付の図面に示す。詳細な説明では、図面中の特徴を参照するために数字および文字による符号を用いる。図面および説明の中で同じまたは類似の符号は、本発明の同じまたは類似の部品を参照するために使用されている。

【００２８】

本明細書において、「第１の」、「第２の」、および「第３の」という用語は、１つの構成要素と別の構成要素とを区別するために交換可能に用いることができ、個々の構成要素の位置または重要性を示すことを意図しない。

【００２９】

「前方」および「後方」という用語は、エンジンまたは車両内の相対位置を指し、エンジン車両の通常の動作姿勢を指す。例えば、エンジンに関しては、前方はエンジン入口に近い位置を指し、後方はエンジンノズルまたは排気部に近い位置を指す。

【００３０】

「上流」および「下流」という用語は、流体経路における流体の流れに対する相対的な方向を指す。例えば、「上流」は流体が流れてくる方向を指し、「下流」は流体が流れていく方向を指す。

【００３１】

単数形「１つの（ａ、ａｎ）」、および「この（ｔｈｅ）」は、文脈が特に明確に指示しない限り、複数の言及を含む。

【００３２】

近似する文言は、本明細書および特許請求の範囲の全体にわたってここで用いられるように、それが関連する基本的機能の変更をもたらすことなく許容範囲で変化することができる定量的表現を修飾するために適用される。したがって、「およそ（ａｂｏｕｔ）」、「約（ａｐｐｒｏｘｉｍａｔｅｌｙ）」、および「実質的に（ｓｕｂｓｔａｎｔｉａｌｌｙ）」などの用語で修飾された値は、明記された厳密な値に限定されるものではない。少なくともいくつかの場合には、近似する文言は、値を測定するための機器の精度、あるいは、構成要素および／またはシステムを構築もしくは製造するための方法または機械の精度に対応することができる。例えば、近似する文言は、１０％のマージン内にあることを指すことができる。

【００３３】

ここで、ならびに明細書および特許請求の範囲の全体を通じて、範囲の限定は組み合わせられ、および置き換えられ、文脈および文言が特に指示しない限り、このような範囲は識別され、それに包含されるすべての部分範囲を含む。例えば、本明細書に開示するすべての範囲は端点を含み、端点は互いに独立して組み合わせ可能である。

【００３４】

ここで図面を参照すると、図面全体を通して同一符号は同一要素を示しており、図１は、本発明の様々な実施形態を組み込むことができる例示的な航空機１０の上面図である。図２は、図１に示す航空機１０の左舷側面図を提供する。図１および図２にまとめて示すように、航空機１０は、それを通って延びる長手方向中心線１４と、垂直方向Ｖと、横方向Ｌと、前端部１６と、後端部１８と、を規定する。さらに、航空機１０は、航空機１０の前端部１６と後端部１８との間に延びる平均線１５を規定する。本明細書で使用する「平均線」とは、航空機１０の付属物（後述する翼２０およびスタビライザなど）を考慮せずに、航空機１０の長さに沿って延びる中点線を指す。

【００３５】

さらに、航空機１０は、航空機１０の前端部１６から航空機１０の後端部１８に向かって長手方向に延在する胴体１２と、一対の翼２０と、を含む。本明細書で使用される「胴体」という用語は、一般に、航空機１０の尾翼などの航空機１０の本体のすべてを含む。

そのような翼２０の第１のものは、胴体１２の左舷側２２から長手方向中心線１４に対して横方向外方に延在し、そのような翼２０の第２のものは、胴体１２の右舷側２４から長手方向中心線１４に対して横方向外方に延在する。図示する例示的な実施形態の翼２０の各々は、１つもしくは複数の前縁フラップ２６および１つもしくは複数の後縁フラップ２８を含む。航空機１０は、ヨー制御用のラダーフラップ３２を有する垂直スタビライザ３０と、ピッチ制御用のエレベータフラップ３６をそれぞれ有する一対の水平スタビライザ３４と、をさらに含む。胴体１２は、外面または外板３８をさらに含む。しかし、本開示の他の例示的な実施形態では、航空機１０は、垂直方向Ｖまたは水平／横方向Ｌに沿って直接延在してもよく、延在しなくてもよい、スタビライザの他の任意の適切な構成を追加的または代替的に含んでもよいことを理解されたい。

【００３６】

図１および図２の例示的な航空機１０は、本明細書では「システム５０」と呼ばれる推進システム５０を含む。例示的なシステム５０は、１つまたは複数の航空機エンジンと、１つまたは複数の電気推進エンジンと、を含む。例えば、図示した実施形態は、それぞれが航空機１０に、例えば一対の翼２０のうちの一方などに取り付けられるように構成された複数の航空機エンジンと、電気推進エンジンと、を含む。より具体的には、図示した実施形態では、航空機エンジンは、ガスタービンエンジンとして、またはむしろ翼下構成で翼２０の下に取り付けられ懸架されたターボファンジェットエンジン５２、５４として構成される。さらに、電気推進エンジンは、航空機１０の後端部に取り付けられるように構成された電動ファンアセンブリ５６として構成され、したがって、図示する電気推進エンジンは、「後部エンジン」と呼ぶことができる。さらに、図示した電動ファンアセンブリ５６は、航空機１０の胴体１２の上の境界層を形成する空気を取り込み消費するように構成されている。したがって、図１および図２に示す例示的な電動ファンアセンブリ５６は、境界層取り込み（ＢＬＩ）ファンとも呼ばれ得る。電動ファンアセンブリ５６は、翼２０および／またはジェットエンジン５２、５４の後方の位置で航空機１０に取り付けられる。具体的には、図示した実施形態では、電動ファンアセンブリ５６は、後端部１８で胴体１２に固定されて接続され、そのようにして電動ファンアセンブリ５６が後端部１８の尾部に組み込まれるか、または後端部と混合され、平均線１５がそれを通って延びるようになる。

【００３７】

しかしながら、本開示の他の例示的な実施形態では、電動ファンアセンブリ５６は、他の任意の適切な方法で構成されてもよく、必ずしも後方ファンまたはＢＬＩファンとして構成されなくてもよい。例えば、他の例示的な実施形態では、電動ファンアセンブリ５６は、翼下構成で１つまたは複数の翼２０に取り付けられてもよい。

【００３８】

図１および図２の実施形態をさらに参照すると、特定の実施形態では、推進システム５０は、ジェットエンジン５２、５４と共に動作可能な１つまたは複数の発電機をさらに含む。より具体的には、図示する実施形態では、推進システム５０は、第１のジェットエンジン５２と共に動作可能な第１の発電機５８と、第２のジェットエンジン５４と共に動作可能な第２の発電機６０と、をさらに含む。例えば、ジェットエンジン５２、５４の一方または両方は、回転シャフト（ＬＰシャフトまたはＨＰシャフトなど）からそれぞれの発電機５８、６０へ機械的動力を提供するように構成することができる。特定の実施形態では、それぞれのジェットエンジン５２、５４の外部に概略的に示されているが、発電機５８、６０は、それぞれのジェットエンジン５２、５４内に配置されてもよい。さらに、発電機５８、６０は、機械的動力を電力に変換するように構成されていることが理解されよう。図示する実施形態では、推進システム５０は、各ジェットエンジン５２、５４のための発電機５８、６０と、発電機５８、６０を電動ファンアセンブリ５６と電気的に接続する電力バス６２と、を含む。電力バス６２のさらなる詳細は、図６を参照して以下で説明する。したがって、そのような実施形態では、推進システム５０は、ガス電気推進システム５０と呼ぶことができる。

【００３９】
しかしながら、図１および図２に示す航空機１０および推進システム５０は単なる例として提示しており、本開示の他の例示的な実施形態では、任意の他の適切な方法で構成された推進システム５０を有する任意の他の適切な航空機１０を提示することができることを理解されたい。例えば、他の実施形態では、電動ファンアセンブリ５６を航空機１０の胴体に組み込み、したがって「ポッド付きエンジン」またはポッド設置エンジンとして構成することができる。さらに、さらに他の実施形態では、電動ファンアセンブリ５６を航空機１０の翼に組み込むことができ、したがって、「混合翼エンジン」として構成することができる。さらに、他の実施形態では、電動ファンアセンブリ５６は、境界層取り込みファンでなくてもよく、代わりに、フリーストリーム取り込みファンとして航空機１０上の任意の適切な位置に取り付けてもよい。

【００４０】
さらに、特定の実施形態では、推進システム５０の第１および第２のジェットエンジン５２、５４は、高バイパスターボファンエンジンなどのターボファンエンジンとして構成されてもよい。しかし、他の実施形態では、推進システム５０は、ターボプロップエンジン、ターボジェットエンジンなどの他の任意の適切なジェットエンジンを有してもよい。さらに、推進システム５０は２つのジェットエンジンを含むが、他の実施形態では、推進システム５０は他の任意の適切な数のジェットエンジンを有してもよく、それらのうちの１つまたは複数が発電機を駆動する。さらに、他の実施形態では、推進システム５０は、ジェットエンジンを含まなくてもよく、代わりに電力を生成するための任意の他の適切なエンジン回転発電機を有してもよい。

【００４１】
ここで図３を参照すると、例示的な航空機推進システム５０の概略図が提示されており、それは図１および図２の例示的な航空機推進システム５０と同様であってもよい。例えば、例示的な推進システム５０は、第１のエンジン５２、第２のエンジン５４、電動ファンアセンブリ５６および電力バス６２を含む。より具体的には、第１のエンジン５２は、第１の発電機５８を駆動するために第１の発電機５８に結合され、第２のエンジン５４は、第２の発電機６０を駆動するために第２の発電機６０に結合される。図１および図２を参照して上述した例示的な推進システム５０と同様に、特定の例示的な実施形態では、第１および第２のエンジン５２、５４は、例えば、ターボファンジェットエンジン、ターボプロップエンジン、ターボジェットエンジン、またはそれぞれの発電機を回転させることができる他の任意の適切なエンジンとして構成することができる。

【００４２】
電動ファンアセンブリ５６は、電力バス６２を介して第１および第２の発電機５８、６０に電気的に接続される。さらに、電動ファンアセンブリ５６は、一般に、電気モータ６４およびファン６６を含み、ファン６６は電気モータ６４に結合され、それによって駆動される。電動ファンアセンブリ５６の電気モータ６４は、電力バス６２を介して第１および第２の発電機５８、６０に電気的に接続される。

【００４３】
しかしながら、特に、他の例示的な実施形態では、推進システム５０は、他の任意の適切な構成を有してもよい。例えば、他の例示的な実施形態では、推進システム５０は、任意の他の適切な数のエンジンおよびそれぞれの発電機を含むことができ、さらに、推進システム５０の電動ファンアセンブリ５６は、任意の他の適切な数の電気モータおよびそれぞれのファンを有してもよい（例えば、１つのモータと１つの発電機と１つの電動ファン、１つのモータと１つの発電機と２つの電動ファン、２つのモータと２つの発電機と１つの電動ファンなど）。さらに、複数のエンジンおよび／または発電機が含まれる場合には、あるいは複数の電気モータおよび推進機が含まれる場合には、電力バス６２は、様々な構成要素を直列に、並列に、または並列と直列の組み合わせで電気的に接続することができる。

【００４４】

図３をさらに参照すると、特定の例示的な実施形態では、第１および第２の発電機５８、６０は、交流（「ＡＣ」）電力を生成するように構成することができる。さらに、電動ファンアセンブリ５６の電気モータ６４は、ＡＣ電力で動作するように構成することができる。しかしながら、電力バス６２は、直流（「ＤＣ」）形式で電力を伝送するように設計されてもよい。したがって、電力バス６２は、伝送される電力を変換または調整するための電力電子機器を含む。具体的には、電力バス６２は、第１の発電機５８からＡＣ電力を受け取り、そのＡＣ電力をＤＣ電力に変換する第１のＡＣ／ＤＣコンバータ電力電子機器６８と、第２の発電機６０からＡＣ電力を受け取り、そのＡＣ電力をＤＣ電力に変換する第２のＡＣ／ＤＣコンバータ電力電子機器７０と、第１および第２の発電機５８、６０から電力バス６２を介して伝送されたＤＣ電力（第１および第２のＡＣ／ＤＣコンバータ電力電子機器６８、７０を介して変換されたもの）を受け取り、そのＤＣ電力をＡＣ電力に変換するＤＣ／ＡＣコンバータ電力電子機器７２と、を含む。電力バス６２は、電気モータ６４を作動させるために、そのようなＡＣ電力を電気モータ６４にさらに供給する。

【００４５】

特定の例示的な実施形態では、電力バス６２の電力電子機器は、比較的高いスイッチング周波数f_{switch}で動作するように構成することができる。本明細書で使用される「スイッチング周波数」という用語は、電力電子機器に関連して、ＤＣ電力をＡＣ電力に変換する場合、またはその逆の場合に、電力電子機器のインバータまたはコンバータがスイッチングされるときの速度を指す。例えば、特定の例示的な実施形態では、電力電子機器は、約５キロヘルツ（「ｋＨｚ」）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数f_{switch}で動作するように構成することができる。さらに、これらのスイッチング周波数を可能にするために、電力電子機器は、１つまたは複数の炭化ケイ素（ＳｉＣ）部品を利用することができる。例えば、１つまたは複数のインバータ、コンバータなどは、炭化ケイ素で形成することができる。

【００４６】

しかしながら、他の例示的な実施形態では、推進システム５０は、他の任意の適切な構成を含むことができることを理解されたい。例えば、電気モータ６４はＤＣ電力で動作してもよく、この場合、推進システムはＤＣ／ＡＣコンバータ電力電子機器７２を含まなくてもよい。それに加えて、またはその代わりに、他の例示的な実施形態では、発電機５８、６０の一方または両方は、ＤＣ電力を生成するように構成されてもよく、その場合、推進システムは、第１および第２のＡＣ／ＤＣコンバータ電力電子機器６８、７０の一方または両方を含まなくてもよい。他の構成も同様に考えられる。

【００４７】

ここで図４を参照すると、本開示の様々な実施形態による電動ファンアセンブリ１００の概略的な断面側面図が提示されている。図示した電動ファンアセンブリ１００は、航空機１０の後端部１８で航空機１０に取り付けられるように構成され、境界層空気を取り込むようにさらに構成される。したがって、図示する実施形態では、電動ファンアセンブリ１００は、境界層取り込み（ＢＬＩ）後部ファンとして構成されている。電動ファンアセンブリ１００は、図１～図３を参照して上述した１つまたは複数の電動ファンアセンブリ５６と実質的に同じ態様で構成することができ、同様に、図４に示す航空機１０は、図１および図２を参照して上述した例示的な航空機１０と実質的に同じ態様で構成することができる。

【００４８】

図４に示すように、電動ファンアセンブリ１００は、参照のためにそれを通って延びる長手方向中心軸線１０２（または中心軸線）に沿って延びる軸方向Ａ、ならびに半径方向Ｒおよび円周方向Ｃ（軸方向Ａの周りに延びる方向、図示せず）を規定する。さらに、航空機１０は、それを通って延びる平均線１５を規定する（図４を参照）。

【００４９】

一般に、電動ファンアセンブリ１００は、中心軸線１０２の周りで回転可能なファン１０４と、構造支持システム１０８と、を含む。構造支持システム１０８は、電動ファンア

センブリ１００を航空機１０に取り付けるように構成され、図示する実施形態では、一般に、内側フレーム支持体１１０、複数の前方支持部材１１２、外側ナセル１１４、複数の後方支持部材１１６、およびテールコーン１１８を含む。図示するように、内側フレーム支持体１１０は、胴体１２の隔壁１２０に取り付けられている。複数の前方支持部材１１２は、内側フレーム支持体１１０に取り付けられ、概して、ナセル１１４に対して半径方向Ｒに沿って外側に延在する。ナセル１１４は、電動ファンアセンブリ１００の内側ケーシング１２４と共に空気流路１２２を画定し、ファン１０４を少なくとも部分的に取り囲む。さらに、図示する実施形態では、ナセル１１４は、航空機１０の平均線１５の周りで３６０度延在する。複数の後方支持部材１１６はまた、図示した実施形態では、ナセル１１４からテールコーン１１８まで概ね半径方向Ｒに沿って延在し、それらを構造的に接続している。

【００５０】

特定の実施形態では、前方支持部材１１２および後方支持部材１１６は、それぞれ、電動ファンアセンブリ１００の円周方向Ｃに沿って概ね離間していてもよい。さらに、特定の実施形態では、前方支持部材１１２は一般に入口ガイドベーンとして構成され、後方支持部材１１６は一般に出口ガイドベーンとして構成されてもよい。このように構成された場合には、前方および後方支持部材１１２、１１６は、電動ファンアセンブリ１００の空気流路１２２を通る空気流を誘導および／または調整することができる。特に、前方支持部材１１２または後方支持部材１１６の一方または両方は、可変ガイドベーンとしてさらに構成することができる。例えば、支持部材は、支持部材を横切る空気の流れを導くために、支持部材の後端部に配置されたフラップ（図示せず）を含むことができる。

【００５１】

しかしながら、他の例示的な実施形態では、構造支持システム１０８は、代わりに、他の任意の適切な構成を含むことができ、例えば、上で図示して説明した構成要素の各々を含まなくてもよいことを理解されたい。例えば、他の例示的な実施形態では、電動ファンアセンブリ１００は、前方および後方支持部材１１２、１１６またはナセル１１４を含まなくてもよい。あるいは、構造支持システム１０８は、上で図示または説明していない任意の他の適切な構成要素を含んでもよい。

【００５２】

電動ファンアセンブリ１００は、ナセル１１４とテールコーン１１８との間にノズル１２６をさらに画定する。ノズル１２６は、そこを流れる空気から推力の量を生成するように構成することができ、テールコーン１１８は、電動ファンアセンブリ１００上の抗力の量を最小にするように成形することができる。しかしながら、他の実施形態では、テールコーン１１８は他の任意の形状を有してもよく、例えばテールコーン１１８が後端部でナセル１１４によって囲まれるように、ナセル１１４の後端部の前で終わってもよい。

【００５３】

図４をさらに参照すると、ファン１０４は、複数のファンブレード１２８およびファンシャフト１３０を含み、複数のファンブレード１２８の各々は、半径方向Ｒに沿ってそれぞれのファンブレード１２８の外端部において先端部１３２を画定する。さらに、ファン１０４は、中心軸線１０２からファンブレード１２８の先端部１３２までの半径方向Ｒに沿ってファンブレード１２８の各々の半径に等しい半径１３４を規定する。複数のファンブレード１２８は、ファンシャフト１３０に取り付けられ、概ね電動ファンアセンブリ１００の円周方向Ｃに沿って離間されている。さらに、図示するように、複数のファンブレード１２８は、図４の実施形態では、ナセル１１４によって少なくとも部分的に囲まれている。

【００５４】

いくつかの例示的な実施形態では、複数のファンブレード１２８は、ファンシャフト１３０に固定的に取り付けられてもよく、あるいは複数のファンブレード１２８は、ファンシャフト１３０に回転可能に取り付けられてもよい。例えば、複数のファンブレード１２８は、複数のファンブレード１２８の各々のピッチが、例えばピッチ変更機構（図示せず

）によって一斉に変更することができるように、ファンシャフト１３０に取り付けられてもよい。複数のファンブレード１２８のピッチを変更することにより、電動ファンアセンブリ１００の効率を高めることができ、かつ／または電動ファンアセンブリ１００が所望の推力プロファイルを達成することを可能にすることができる。このような例示的な実施形態では、電動ファンアセンブリ１００は、可変ピッチファンと呼ぶことができる。

【００５５】

さらに、電動ファンアセンブリ１００のファン１０４は、動作中に、より詳細には定格速度での動作中に、ファン圧力比ＦＰＲを規定することが理解されよう。ここで、「ファン圧力比」という用語は、ファンの入口圧力に対するファンの吐出圧力の比を指す。さらに、「定格速度」という用語は、通常の動作中のファンの最大動作速度を指す。例えば、電動ファンアセンブリ１００は、離陸動作中などの最大推力動作中に定格速度で動作することができる。

【００５６】

ファンシャフト１３０は、電動ファンアセンブリ１００が定格速度で動作している間にファン圧力比ＦＰＲを規定することに加えて、ファンシャフト１３０の最大回転速度（すなわち、最大回転ファンシャフト速度Ｎ）を規定し、ファン１０４の複数のファンブレード１２８は、ファンブレード先端部１３２で最大速度（すなわち、ファン先端速度Ｕ）を規定する。理解されるように、ファン先端速度Ｕは、一般に、ファンシャフト１３０の最大ファンシャフト速度Ｎにファン１０４の半径１３４を乗じることによって決定することができる。さらに、最大ファン先端速度Ｕは、複数のファンブレード１２８および／またはファン１０４の他の構成要素を形成する材料の関数であってもよいことが理解されよう。例えば、特定の例示的な実施形態では、最大ファン先端速度Ｕは、約２００フィート／秒～約１，３５０フィート／秒、例えば約５００フィート／秒～約１，０００フィート／秒などであってもよい。

【００５７】

さらに、図示する実施形態では、ファン１０４は、電気機械によって電動ファンアセンブリ１００の中心軸線１０２の周りで回転可能である。より詳細には、ファン１０４は、電気モータ１３６によって中心軸線１０２の周りで回転可能であり、電気モータ１３６は、定格速度で電動ファンアセンブリ１００の動作中に最大電力量（すなわち、電気モータ１３６の最大出力量Ｐ）を提供することができる。図示する実施形態では、電気モータ１３６は、ファンシャフト１３０を介してファン１０４に直接接続されている。したがって、図示する実施形態では、電気モータ１３６は、ギアボックスまたは他の減速機構を使用することなく、ファン１０４に直接接続される。したがって、ファンシャフト１３０の回転ファンシャフト速度Ｎは、ファン１０４および電気モータ１３６のロータ１４２の回転速度と同一であることが理解されよう（詳細は後述する）。

【００５８】

特に、図４をさらに参照すると、電動ファンアセンブリ１００のファン１０４は、ハブ半径１３８をさらに規定する。より具体的には、電動ファンアセンブリ１００の内側ケーシング１２４がハブ半径１３８を規定する。ハブ半径１３８は、ファン１０４の複数のファンブレード１２８の前縁において、中心軸線１０２から内側ケーシング１２４の外面までの半径方向Ｒに沿った距離を指す。特に、図示した実施形態では、電動ファンアセンブリ１００は、ファン半径（すなわち、ファンブレード半径１３４）に対するハブ半径１３８の比を規定し、それは約０．２～約０．４、より具体的には約０．２５～約０．３である。このような構成によって、例えば、内側ケーシング１２４内に所望の態様で電気モータ１３６を取り付けることが可能になる。

【００５９】

さらに、ここで図５および図６も参照すると、電気モータ１３６の断面図が示されている。より詳細には、図５は、電気モータ１３６の概略的な側面断面図を示し、図６は、中心軸線１０２に沿った電気モータ１３６の概略的な断面図を示す。図示するように、電気モータ１３６は、一般に、同期式インランナー電気モータとして構成されている。より詳

細には、図示する例示的な電気モータ１３６は、ステータ１４０と、ステータ１４０内に配置されたロータ１４２と、ステータ１４０およびロータ１４２を囲む外側ケーシング１４４と、を含む。しかしながら、他の実施形態では、電気モータ１３６は、代わりに、アウトランナー（またはアウトランニング）電気モータとして構成されてもよく、ステータ１４０およびロータ１４２の位置が逆転しており、ロータ１４２が、代わりに、ステータ１４０の外側に半径方向に配置されている。

【００６０】

さらに、ロータ１４２は、回転軸または出力シャフト１４６に取り付けられており、図示する実施形態では、それはファンシャフト１３０として構成されるか、またはファンシャフト１３０に結合されている。電気モータ１３６は、ロータ１４２の回転を容易にする外側ケーシング１４４内に複数の軸受１４８をさらに含む。しかしながら、他の例示的な実施形態では、電気モータ１３６は、代わりに他の任意の適切な構成を有してもよいことを理解されたい。

【００６１】

特に図６を参照すると、ステータ１４０は複数の電磁コイル１５０を含み、ロータ１４２は、交番磁極１５４を有する複数のセグメント化された磁石１５２を含み（図６に正符号「＋」および負符号「－」を使用して示す）、交番する各一対の磁極１５４は共に磁極対として構成されている。磁石１５２は永久磁石であってもよく、電気モータ１３６は同期永久磁石電気モータである。したがって、電気モータ１３６は、磁極１５４の数に等しい磁極数すなわち磁極の数n_{poles}を規定することが理解されよう。図示する実施形態では、電気モータ１３６は、３６に等しい磁極数n_{poles}を規定する。しかし、他の例示的な実施形態では、電気モータ１３６は、代わりに、４～約２００の磁極数n_{poles}を規定することができる。例えば、他の例示的な実施形態では、電気モータ１３６は、１２～１８０の数の磁極数n_{poles}を規定することができる。

【００６２】

さらに、電動ファンアセンブリ１００の動作中に、より具体的には電気モータ１３６の動作中に、電気モータ１３６は、「基本周波数」と呼ばれることもある磁極通過周波数f_{pass}を規定する。特定の例示的な実施形態では、電気モータ１３６の磁極通過周波数f_{pass}は、約１，５００ヘルツ（「Ｈｚ」）～約３，５００Ｈｚであってもよい。例えば、特定の例示的な実施形態では、電気モータ１３６の磁極通過周波数f_{pass}は、約１，５００Ｈｚ～約３，５００Ｈｚ、例えば約１，５００Ｈｚ～約２，５００Ｈｚ、例えば約１，８００Ｈｚ～約２，２００Ｈｚ、例えば約２，０００Ｈｚであってもよい。

【００６３】

電気モータ１３６の磁極通過周波数f_{pass}の上限は、電気モータ１３６のロータ１４２およびステータ１４０を含む、電気モータ１３６を形成する材料の要因とすることができる。例えば、特定の例示的な実施形態では、電気モータ１３６は、鉄コバルト材料などの鉄系材料で形成することができる。このような実施形態では、電気モータ１３６の磁極通過周波数f_{pass}は、約１，５００Ｈｚ～約２，５００Ｈｚ、例えば約２，０００Ｈｚであってもよい。それに加えて、またはその代わりに、他の実施形態では、電気モータ１３６は、電気鋼材料で形成することができる。このような実施形態では、電気モータ１３６の磁極通過周波数f_{pass}は、約２，０００Ｈｚ～約２，７００Ｈｚ、例えば約２，２５０Ｈｚであってもよい。それに加えて、またはその代わりに、さらに他の実施形態では、電気モータ１３６は、樹脂材料または例えばエアギャップで形成された空芯機械として構成されてもよい。このような実施形態では、電気モータ１３６の磁極通過周波数f_{pass}は、約２，５００Ｈｚ～約３，５００Ｈｚ、例えば約３，０００Ｈｚであってもよい。

【００６４】

上で特定された磁極通過周波数f_{pass}内で電気モータ１３６を動作させることにより、電気モータ１３６が所望の電力密度で動作することを保証することができる。例えば、所与の電気モータ１３６の上で特定された磁極通過周波数f_{pass}を超えて動作する

と、電力密度のリターンが減少し、温度および渦電流が増加する結果として効率が低下する可能性がある。しかしながら、注目すべきことに、電気モータ１３６について他の材料も可能であり、同様に他の磁極通過周波数f_{pass}も上述の材料に対して可能である。

【００６５】

ここで図７を参照すると、電動ファンアセンブリ１００の様々なパラメータの間の関係を示すグラフ２００が示されている。特定の実施形態では、グラフ２００に示されるパラメータは、図４～図６を参照して上述した電動ファンアセンブリ１００のパラメータであってもよい。例えば、電動ファンアセンブリ１００は、ファンシャフト１３０を介して電気モータ１３６によって駆動されるファン１０４を含むことができる。ファン１０４は、ファン圧力比ＦＰＲおよびファン半径１３４を規定することができる。さらに、ファン１０４は、ファン先端速度Ｕを規定する複数のファンブレード１２８を含むことができる。さらに、ファンシャフト１３０は、回転速度Ｎを規定することができ、ファンアセンブリ１００またはファン１０４は、ハブ半径１３８をさらに規定することができる。

【００６６】

特に図７のグラフ２００を参照すると、グラフ２００は、電動ファンアセンブリ１００のファン１０４のファン圧力比ＦＰＲと、電動ファンアセンブリ１００の電気モータパラメータとの間の関係を線２０２（詳細は後述する）で示している。より具体的には、電気モータパラメータは、電気モータ１３６の磁極数n_{poles}を電気モータ１３６の最大出力Ｐ（馬力）の平方根で割ったものに等しい。本開示の発明者は、推進システム５０に電動ファンアセンブリ１００を含めることによって、図７のグラフ２００に示すように、電動ファン１０４のファン圧力比ＦＰＲは、電気モータパラメータ（すなわち、電気モータ１３６の磁極数n_{poles}を電気モータ１３６の最大出力Ｐの平方根で割ったもの）に関係しており、所望の全体効率および電力密度を有する電動ファンアセンブリが得られることを発見した。

【００６７】

具体的には、上記の発見は、複数の方程式を導出して、その方法に沿って特定の特性を有する電動ファンアセンブリについての知識のある仮定を作成することから始まった。例えば、本開示の発明者は、以下の式１を用いて、電気モータ１３６の最大出力Ｐを定義した。式１において、Ｐは電気モータ１３６の最大出力であり、

【００６８】

【数４】

$\dot{m}$

はファン１０４を通る空気流の質量流量であり、c_pはファン１０４を通る空気流の比熱であり、ΔＴはファン１０４を横切る空気流の温度変化である。

【００６９】

【数５】

$$P = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \quad \text{式（１）}$$

この式１から、本開示の発明者は、所定のファン圧力比ＦＰＲについて、ファン１０４の温度変化ΔＴが（一定の周囲条件での動作を仮定して）一定であることを認識した。したがって、これから、本発明者は、電気モータ１３６の最大出力Ｐが、所与のファン圧力比ＦＰＲに対してファン１０４を通る空気流の質量流量

【００７０】

【数６】

$\dot{m}$

に直接関係することを決定した。さらに、ファン１０４を通る空気流の質量流量

【００７１】

【数７】

$$\dot{m}$$

は、ファン１０４の断面積Ａに直接関係しており、この断面積Ａは、ファン１０４のファン半径１３４の二乗ｒ^{2}に直接関係している（ファン半径ｒは、図４を参照して上述した半径方向Ｒに沿ったファン１０４の半径１３４と同じ寸法である）。さらに、上述したように、上記のパラメータの関係は、所与のファン圧力比ＦＰＲに基づいており、これは、これらのパラメータの各々がファン圧力比ＦＰＲの関数であることを意味している。これらの関係は式２で理解される。特に、本明細書で使用される記号「∝」は、直接関係すること（すなわち、単一の順序関係）を意味する。

【００７２】

【数８】

$$P \propto \dot{m} \propto A \propto r^2 = f(FPR) \quad \text{式（２）}$$

整理すると、式２は以下の式３に単純化される。

【００７３】

【数９】

$$\sqrt{P} \propto r = f(FPR) \quad \text{式（３）}$$

さらに、本開示の発明者は、ファンシャフト速度Ｎがファン先端速度Ｕをファン１０４の半径ｒで割った値に直接関係していることをさらに認識した。一定のファン先端速度Ｕを仮定し、式３で認識される関係に基づいて、出力Ｐの平方根にファン１０４の半径ｒを代入すると、式４で認識される関係が得られる。より具体的には、式４において、本発明者らは、本開示の実施形態では、ファン先端速度Ｕが本質的に、ファン１０４の特定の構成要素を形成する材料の材料特性によって制限される所望の設計に対する最大ファン先端速度Ｕであると仮定した（例えば、図４を参照して上の説明を参照）。

【００７４】

【数１０】

$$N \propto \frac{U}{r} \propto \frac{U}{\sqrt{P}} \propto \frac{1}{\sqrt{P}} \quad \text{式（４）}$$

加えて、本発明者は、電気モータ１３６の磁極数ｎ$_{poles}$が、シャフト速度Ｎに対する磁極通過周波数ｆ$_{pass}$の関数であることを認識した。シャフト速度Ｎを、１／出力Ｐの平方根（式４を参照）に代入すると、式５において次の関係が決定される。

【００７５】

【数１１】

$$n_{pole} \propto \frac{f}{N} \propto f \times \sqrt{P} \quad \text{式（５）}$$

さらに、本発明者は所望の磁極通過周波数ｆ$_{pass}$を仮定した。具体的には、例えば図４を参照して上述した例示的な推進システム５０について、本発明者は、電気モータ１３６が約１，５００Ｈｚ～約３，５００Ｈｚ、例えば約１，５００Ｈｚ～約２，５００Ｈｚ、例えば約２，０００Ｈｚの磁極通過周波数ｆ$_{pass}$を有すると仮定した。より詳細には、図３を参照して説明したように、推進システムと共に利用される電力電子機器（例えば、電力電子機器６８、７０、７２）は、最大スイッチング周波数ｆ$_{switch}$を有することができる。本開示の発明者は、設計された電動ファンアセンブリ１００の最大スイッチング周波数ｆ$_{switch}$を仮定し、それは仮定した磁極通過周波数ｆ$_{pass}$に

影響を与える（図４を参照して上の説明を参照）。それにもかかわらず、一定の磁極通過周波数f_{pass}を仮定することにより、式５で定義された関係は、以下の式６で定義される関係に単純化することができる。

【００７６】

【数１２】

$$n_{pole} \propto \sqrt{P} = f(FPR) \quad 式（６）$$

当業者であれば、式６を以下の式７のように書くことができ、電気モータ１３６の磁極数n_{poles}／電気モータ１３６の出力Ｐの平方根が、効率／電力密度の高い電動ファンアセンブリのファン圧力比ＦＰＲの関数であることを示していることを理解するであろう。

【００７７】

【数１３】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = f(FPR) \quad 式（７）$$

上記のパラメータが式７に示すように関連していることを明らかにした後に、本開示の発明者は、実際に存在する式７に概説された関係を確認するために、そしてさらにファン圧力比ＦＰＲを磁極数n_{poles}を出力Ｐの平方根で割った値に関係付ける式／関数を定義するために、広範な実験を行った。

【００７８】

例えば、例えば、本開示の発明者は、可能性のある電動ファンアセンブリの多数の例を検討したが、各々の例は、電動ファンアセンブリに望ましいであろう設定された固有のファン圧力比ＦＰＲ（例えば１～２）および電気モータ出力Ｐ（例えば６５０ｈｐ～４５００ｈｐ）を有する。上述した定数／仮定および種々のモデルを使用して、本開示の発明者は各例について、（ａ）電動ファンアセンブリ１００の電気モータ１３６の結果として得られた回転速度（例えば、回転シャフト速度Ｎ）、（ｂ）電動ファン１０４の結果として得られたハブ半径１３８、および（ｃ）電気モータ１３６の結果として得られた磁極数n_{poles}を決定することができた。さらに、これらの値が決定されたので、本開示の発明者は、各例について、磁極数n_{poles}／電気モータ１３６の出力Ｐの平方根に等しい電気モータパラメータを決定することができた。

【００７９】

例えば、図８を簡単に参照すると、上述した例のうちの６つを示す表が示されている。これらの各例では、本発明者は、ファン圧力比ＦＰＲおよび電気モータ出力Ｐ（列１および列２）を設定した。これらの値、上述した仮定、および１つまたは複数のモデルを使用して、本開示の発明者は、各例について、（ａ）電動ファンアセンブリ１００の電気モータ１３６の結果として得られた回転速度（例えば、回転シャフト速度Ｎ）（列３）、（ｂ）電動ファン１０４の結果として得られたハブ半径１３８（列４）、および（ｃ）電気モータ１３６の結果として得られた磁極数n_{poles}（列５）を決定することができた。さらに、列５の各例について決定された値は、列２の各例の値と共に、発明者が列６の各例の電気モータパラメータを決定することを可能にし、電気モータパラメータは磁極数n_{poles}／電気モータ１３６の出力Ｐの平方根に等しい。

【００８０】

さらに、ファン圧力比ＦＰＲを電気モータパラメータに関係付ける関数／式を決定するために、各例の電気モータパラメータ値（例えば、図８に示す例の列６の値）を用いて、各例のファン圧力比ＦＰＲ値（例えば、図８に示す例の列１の値）をプロットした。これらのプロットされた値を使用して、最良適合線を決定した。この最良適合線は、図７のグラフ２００の線２０２として示されている。線２０２の式は、以下の非線形二次微分方程式（式８）であると決定された。

【００８１】
【数１４】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR} \quad 式（８）$$

上の式において、磁極通過周波数ｆ$_{pass}$が２，０００Ｈｚであると仮定すると、定数Ｃ$_1$は約２９，４５０であり、定数Ｃ$_2$は約５．５２８である。しかし、上述したように、電動ファンアセンブリ１００は、約１，５００Ｈｚ～約３，５００Ｈｚの磁極通過周波数ｆ$_{pass}$を有する電気モータ１３６を含むことができる。したがって、特定の例示的な実施形態では、定数Ｃ$_1$は２２，０００～５２，０００の値をとり、定数Ｃ$_2$は４．０～９．８の値をとることができる。磁極通過周波数ｆ$_{pass}$が約１，５００Ｈｚに等しい場合に下限線２０４が提供され（定数Ｃ$_1$は２２，０００に等しく設定され、定数Ｃ$_2$は４．０に等しい）、さらに上限磁極通過周波数ｆ$_{pass}$が約３，５００Ｈｚに等しい場合に上限線２０６が提供される（定数Ｃ$_1$は５２，０００に等しく、定数Ｃ$_2$は９．８に等しい）。さらに、式８について、ｅはオイラー数（約２．７１８）である。

【００８２】
特に、式１～式７の議論を参照すると、式８で決定された公式は、電動ファンアセンブリ１００についての特定の仮定に依存することが理解されよう。例えば、式８で決定される公式は、上述したように、電動ファンアセンブリ１００のハブ半径１３８、電動ファンアセンブリ１００のファン１０４のファン先端速度Ｕ、電動ファンアセンブリ１００のシャフト速度Ｎ、電動ファンアセンブリ１００の電気モータ１３６の磁極通過周波数ｆ$_{pass}$に依存することができる。

【００８３】
本開示の１つまたは複数の実施形態による電動ファンアセンブリを含む推進システムは、特定の設計パラメータを有する電動ファンアセンブリに対して、最大の効率および電力密度（例えば、電動ファンアセンブリを流れる空気の単位体積当たりの推力の量）を有する電動ファンアセンブリを提供することができる。

【００８４】
ここで図９を参照すると、航空機のための推進システムを動作させるための方法３００のフローチャートが提供される。推進システムは、上述した例示的な推進システムの１つまたは複数と実質的に同じ態様で構成することができる。例えば、推進システムは、複数のファンブレードを有するファンと、ファンに機械的に結合された電気モータと、を含むことができる。

【００８５】
例示的な方法３００は、一般に、電気モータを使用してファンを駆動するステップ（３０２）を含み、ファンのファン圧力比ＦＰＲと、電気モータの磁極数ｎ$_{poles}$と、電気モータの最大出力Ｐとの間の関係は、以下の式によって定義される。

【００８６】
【数１５】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

特定の例示的な態様では、Ｃ$_1$は２２，０００～３７，０００の値を有する定数であり、Ｃ$_2$は４．０～７．０値を有する定数であり、ｅはオイラー数である。

【００８７】
より具体的には、図示する実施形態では、ステップ（３０２）で電気モータを使用してファンを駆動するステップは、約１，５００Ｈｚ～約２，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で電気モータを動作させるステップ（３０４）を含む。例えば、特定の例示的な態様で

は、ステップ（３０２）で電気モータを使用してファンを駆動するステップは、約２，０００Ｈｚの最大磁極通過周波数で電気モータを動作させるステップを含むことができる。

【００８８】

さらに、図示する例示的な態様では、電動ファンは、例えば１つまたは複数の駆動シャフトまたはカップリングを介して電気モータに直接機械的に結合することができる。したがって、このような例示的な態様では、ステップ（３０２）で電気モータを使用してファンを駆動するステップは、電気モータのロータの回転速度に等しい回転速度でファンを回転させるステップ（３０６）を含むことができる。

【００８９】

さらに、特定の例示的な態様では、例示的な推進システムは、燃焼エンジンと、燃焼エンジンに機械的に結合された発電機と、発電機を電気モータに電気的に接続する電力バスと、をさらに含むことができる。このような例示的な態様では、方法３００は、発電機により電力を生成するステップ（３０８）と、電力バスを介して電気モータに生成された電力を供給するステップ（３１０）と、をさらに含むことができる。例えば、特定の例示的な態様では、ステップ（３０８）で発電機に電力を生成するステップは、燃焼エンジンにより発電機を駆動するステップを含むことができ、燃焼エンジンは、例えば、ターボファンエンジン、ターボプロップエンジン、ターボジェットエンジン、ターボシャフトエンジンなどである。

【００９０】

さらに、図示した例示的な方法３００では、ステップ（３１０）で電力バスを介して電気モータに生成された電力を供給するステップは、約５キロヘルツ（ｋＨｚ）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数で動作する電力電子機器に電力を通すステップ（３１２）をさらに含む。

【００９１】

本明細書は、本発明を最良の態様を含めて開示するとともに、あらゆる装置またはシステムの製作および使用ならびにあらゆる関連の方法の実行を含む本発明の実施を当業者にとって可能にするために、いくつかの実施例を用いている。本発明の特許可能な範囲は、特許請求の範囲によって定義され、当業者が想到する他の実施例を含むことができる。このような他の実施例は、それらが特許請求の範囲の文言と異ならない構造要素を含む場合、または特許請求の範囲の文言と実質的な差異を有さない等価の構造要素を含む場合、特許請求の範囲内であることを意図している。

［実施態様１］

中心軸線を規定する航空機推進システム（５０）であって、

前記中心軸線の周りで回転可能な複数のファンブレード（１２８）を有し、ファン圧力比ＦＰＲを規定するファン（１０４）と、

前記ファン（１０４）を駆動するために前記ファン（１０４）に機械的に結合され、磁極数n_{poles}を含み、最大出力Ｐを規定する電気モータ（１３６）と、を含み、

前記ファン（１０４）の前記ファン圧力比ＦＰＲと、前記電気モータ（１３６）の前記磁極数n_{poles}と、前記電気モータ（１３６）の前記最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、

【００９２】

【数１６】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～５２，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～９．８の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である、航空機推進システム（５０）。

［実施態様２］

前記磁極数n_{poles}は４～１８０であり、前記最大出力Ｐは６５０馬力～６，００

０馬力であり、前記ファン圧力比ＦＰＲは１～２である、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様３］

前記電気モータ（１３６）は、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約３，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で動作する、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様４］

前記電気モータ（１３６）は、ギアボックスを使用せずに前記ファン（１０４）に直接接続される、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様５］

前記ファン（１０４）および前記電気モータ（１３６）は、境界層取り込みファンとして共に構成される、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様６］

前記ファン（１０４）および前記電気モータ（１３６）は、前記航空機の後端部に取り付けられるように構成された後部ファンとして共に構成される、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様７］

前記ファン（１０４）はハブ半径を規定し、前記複数のファンブレード（１２８）はファン半径を規定し、前記ファン半径に対する前記ハブ半径の比は、約０．２～約０．４である、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様８］

前記ファン半径に対する前記ハブ半径の前記比は、約０．２５～約０．３である、実施態様７に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様９］

燃焼エンジンと、

電力を生成するために前記燃焼エンジンに機械的に結合された発電機と、

前記発電機を前記電気モータ（１３６）に電気的に接続し、電力電子機器を含む電力バスと、をさらに含む、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様１０］

前記電力電子機器は、１つまたは複数の炭化ケイ素部品を利用する、実施態様９に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様１１］

前記電力電子機器は、約５キロヘルツ（ｋＨｚ）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数で動作するように構成される、実施態様９に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様１２］

前記ファン（１０４）は最大ファン先端速度を規定し、前記最大ファン先端速度は約２００フィート／秒～約１，３５０フィート／秒である、実施態様１に記載の航空機推進システム（５０）。

［実施態様１３］

航空機推進システム（５０）の電動ファンアセンブリであって、

ファン圧力比ＦＰＲ、ハブ半径、およびファン半径を規定するファン（１０４）であって、前記ファン半径に対する前記ハブ半径の比が約０．２～約０．４であるファン（１０４）と、

前記ファン（１０４）を駆動するために前記ファン（１０４）に直接機械的に結合された電気モータ（１３６）であって、磁極数n_{poles}を含み、最大出力Ｐを規定し、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約２，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で動作する電気モータ（１３６）と、を含み、

前記ファン（１０４）の前記ファン圧力比ＦＰＲと、前記電気モータ（１３６）の前記磁極数n_{poles}と、前記電気モータ（１３６）の前記最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、

【００９３】

【数１７】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～３７，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～７．０の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である、電動ファンアセンブリ。

［実施態様１４］

前記ファン（１０４）は最大ファン先端速度をさらに規定し、前記最大ファン先端速度は約２００フィート／秒～約１，３５０フィート／秒である、実施態様１３に記載の電動ファンアセンブリ。

［実施態様１５］

前記ファン半径に対する前記ハブ半径の前記比は、約０．２５～約０．３である、実施態様１３に記載の電動ファンアセンブリ。

［実施態様１６］

航空機のための推進システムを動作させるための方法であって、前記推進システムは、複数のファンブレード（１２８）を有するファン（１０４）と、前記ファン（１０４）に機械的に結合された電気モータ（１３６）と、を含み、前記方法は、

前記電気モータ（１３６）を用いて前記ファン（１０４）を駆動するステップを含み、前記ファン（１０４）のファン圧力比ＦＰＲと、前記電気モータ（１３６）の磁極数n_{poles}と、前記電気モータ（１３６）の最大出力Ｐと、の間の関係は、以下の式によって定義され、

【００９４】

【数１８】

$$\frac{n_{pole}}{\sqrt{P}} = C_1 \cdot e^{-9.062 \cdot FPR} + C_2 \cdot e^{-1.2604 \cdot FPR}$$

ここで、C_1は２２，０００～５２，０００の値を有する定数であり、C_2は４．０～９．８の値を有する定数であり、ｅはオイラー数である、方法。

［実施態様１７］

前記電気モータ（１３６）を使用して前記ファン（１０４）を駆動するステップは、約１，５００ヘルツ（Ｈｚ）～約３，５００Ｈｚの最大磁極通過周波数で前記電気モータ（１３６）を動作させるステップを含む、実施態様１６に記載の方法。

［実施態様１８］

前記電気モータ（１３６）を用いて前記ファン（１０４）を駆動するステップは、前記電気モータ（１３６）のロータの回転速度に等しい回転速度で前記ファン（１０４）を回転させるステップを含む、実施態様１６に記載の方法。

［実施態様１９］

前記推進システムは、燃焼エンジンと、前記燃焼エンジンに機械的に結合された発電機と、前記発電機を前記電気モータ（１３６）に電気的に接続する電力バスと、をさらに含み、前記方法は、

前記発電機により電力を生成するステップと、

生成された前記電力を前記電力バスを介して前記電気モータ（１３６）に供給するステップと、をさらに含む、実施態様１６に記載の方法。

［実施態様２０］

生成された前記電力を前記電力バスを介して前記電気モータ（１３６）に供給するステップは、約５キロヘルツ（ｋＨｚ）～約３０ｋＨｚのスイッチング周波数で動作する電力電子機器に前記電力を通すステップを含む、実施態様１９に記載の方法。

【符号の説明】

【００９５】
１０　航空機
１２　胴体
１４　長手方向中心線
１５　平均線
１６　前端部
１８　後端部
２０　翼
２２　左舷側
２４　右舷側
２６　前縁フラップ
２８　後縁フラップ
３０　垂直スタビライザ
３２　ラダーフラップ
３４　水平スタビライザ
３６　エレベータフラップ
３８　外板
５０　推進システム
５２　ジェットエンジン
５４　ジェットエンジン
５６　電動ファンアセンブリ
５８　発電機
６０　発電機
６２　電力バス
６４　電気モータ
６６　ファン
６８　第１のＡＣ／ＤＣコンバータ電力電子機器
７０　第２のＡＣ／ＤＣコンバータ電力電子機器
７２　ＤＣ／ＡＣコンバータ電力電子機器
１００　電動ファンアセンブリ
１０２　中心線軸
１０４　ファン
１０８　構造支持システム
１１０　内側フレーム支持体
１１２　後方支持部材
１１４　外側ナセル
１１６　後方支持部材
１１８　テールコーン
１２０　隔壁
１２２　空気流路
１２４　内側ケーシング
１２６　ノズル
１２８　ファンブレード
１３０　ファンシャフト
１３２　ファンブレード先端部
１３４　先端部半径
１３６　電気モータ
１３８　ハブ半径
１４０　ステータ
１４２　ロータ

１４４　ケーシング
１４６　出力シャフト
１４８　軸受
１５０　電磁コイル
１５２　ロータマグネット
１５４　磁極
２００　グラフ
２０２　線
２５０　表
Ａ－Ｅ　列Ａ－Ｅ

【図１】

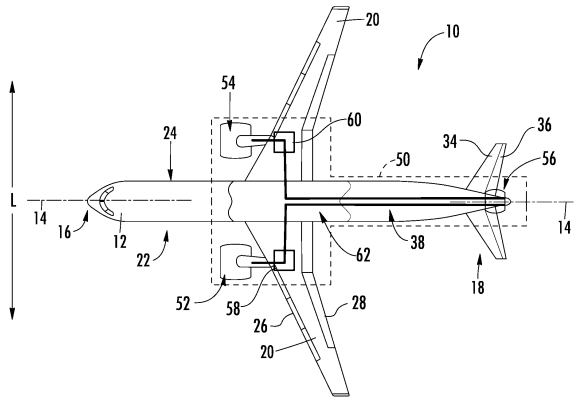


FIG. 1

【図２】

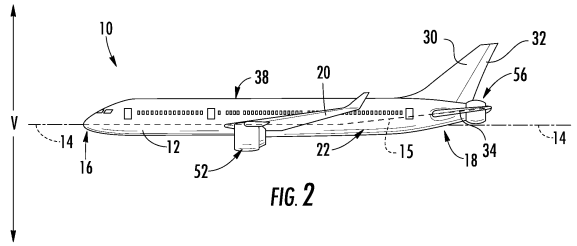


FIG. 2

【図３】

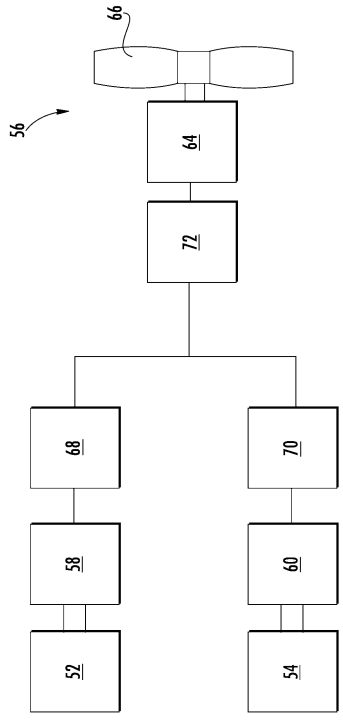


FIG. 3

【図４】

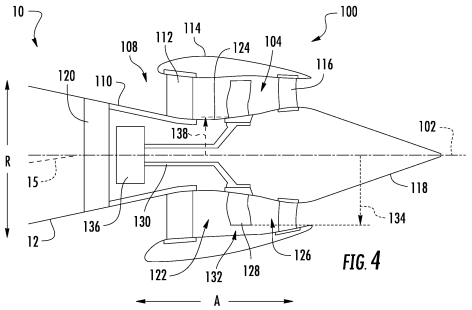


FIG. 4

【図５】

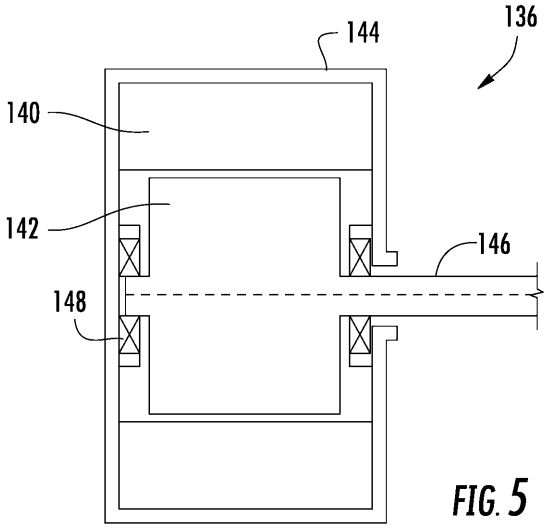


FIG. 5

【図６】

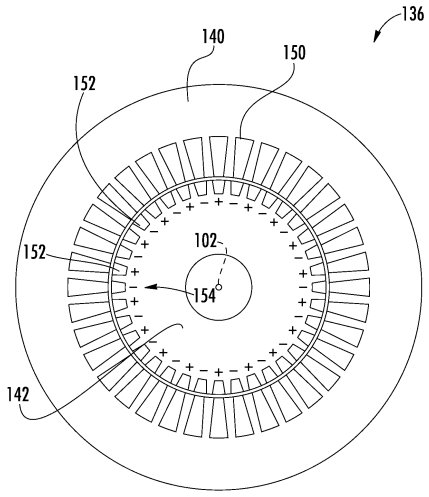


FIG. 6

【図７】

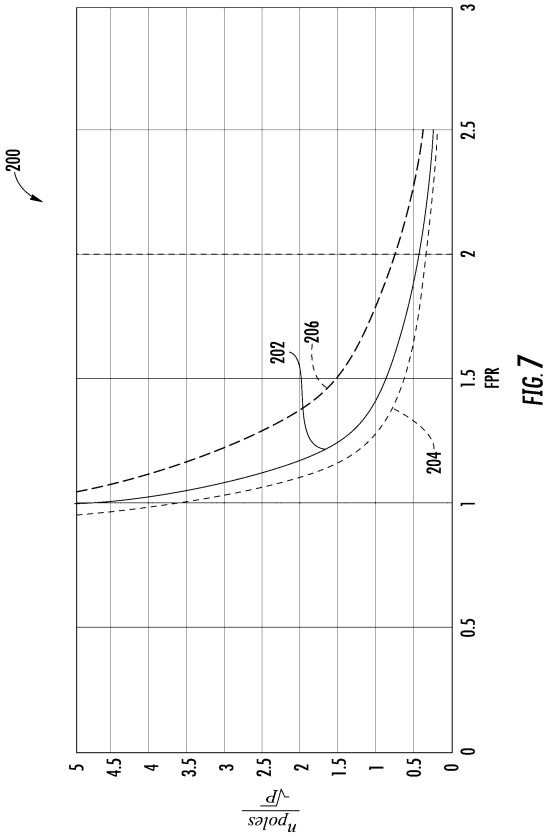


FIG. 7

【図８】

	FPR	P (HP)	RPM	r_{hub} (in)	n_{poles}	$\frac{n_{poles}}{\sqrt{P}}$
1	1.3	671	7,059	4.48	34	1.313
2	1.1	1,341	2,370	10.66	102	2.785
3	1.2	2,011	3,036	9.37	80	1.784
4	1.4	2,682	4,425	7.87	54	1.047
5	1.2	3,352	2,352	12.10	102	1.763
6	1.5	4,023	4,353	8.74	56	0.883

FIG. 8

【図９】

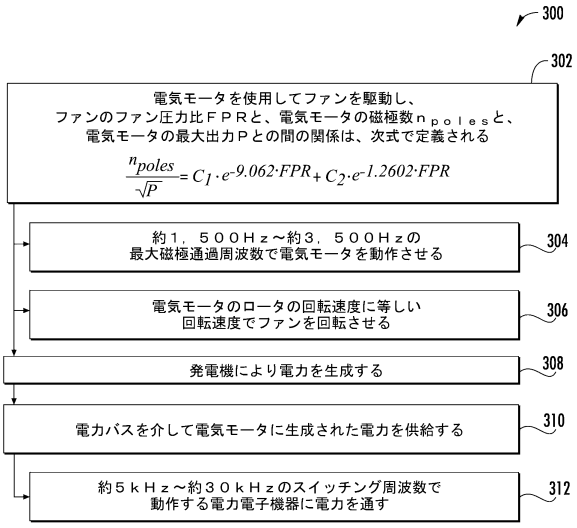


FIG. 9

フロントページの続き

(74)代理人 100113974
弁理士 田中 拓人
(72)発明者 ブランドン・ウェイン・ミラー
アメリカ合衆国、オハイオ州・４５２１５、シンシナティ、ヌーマンウェイ、１
(72)発明者 ランディ・エム・ボンドレル
アメリカ合衆国、オハイオ州・４５２１５、シンシナティ、ヌーマンウェイ、１
(72)発明者 パトリック・マイケル・マリナン
アメリカ合衆国、オハイオ州・４５２１５、シンシナティ、ヌーマンウェイ、１
(72)発明者 ポール・ロバート・ゲミン
アメリカ合衆国、オハイオ州・４５２１５、シンシナティ、ヌーマンウェイ、１
(72)発明者 ニコラス・テイラー・ムーア
アメリカ合衆国、オハイオ州・４５２１２、シンシナティ、ヌーマンウェイ、１

審査官 諸星 圭祐

(56)参考文献 特開２０１７－０６１３００（ＪＰ，Ａ）
特開２０１７－００１６６２（ＪＰ，Ａ）
特開２０１５－２２７６６０（ＪＰ，Ａ）
特開２００３－２５４０８３（ＪＰ，Ａ）
国際公開第２０１５／０５０５５５（WO，Ａ１）
特表２０１６－５３９６０９（ＪＰ，Ａ）
特開２０１６－０１１６６２（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２０１６／０２９８５７４（ＵＳ，Ａ１）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｂ６４Ｄ ２７／０２－２７／２４
Ｂ６４Ｃ １３／５０
Ｈ０２Ｋ ７／１４