

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2008年2月14日 (14.02.2008)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2008/018167 A1

(51) 国際特許分類:

H02P 6/08 (2006.01) F04D 29/058 (2006.01)
 F01D 15/08 (2006.01) F16C 32/00 (2006.01)
 F01D 25/16 (2006.01) F16C 32/04 (2006.01)
 F04D 25/04 (2006.01) H02K 7/08 (2006.01)
 F04D 29/00 (2006.01) H02K 7/09 (2006.01)
 F04D 29/056 (2006.01) H02K 7/14 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2007/000809

(22) 国際出願日: 2007年7月30日 (30.07.2007)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

特願2006-215376 2006年8月8日 (08.08.2006) JP
 特願2006-219293 2006年8月11日 (11.08.2006) JP

(71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): NTN株式会社 (NTN CORPORATION) [JP/JP]; 〒5500003 大阪府大阪市西区京町堀1丁目3番17号 Osaka (JP).

(72) 発明者; および

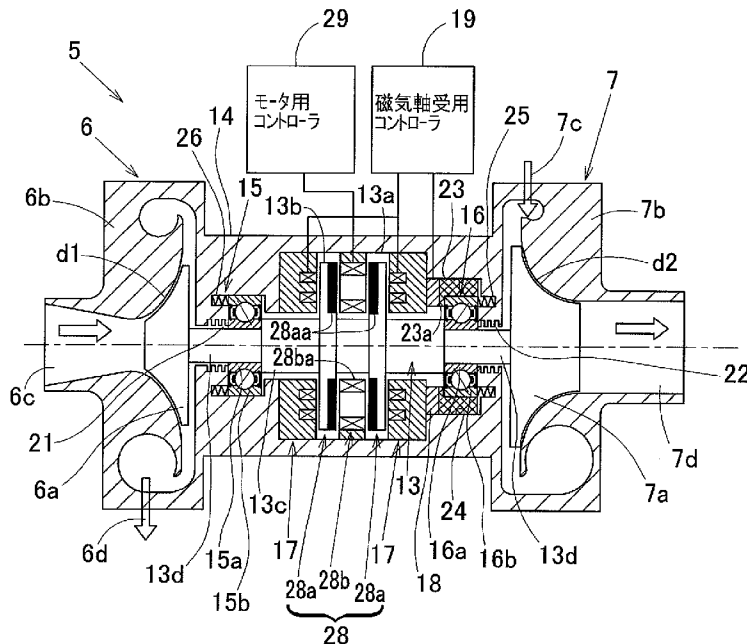
(75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 岡田浩一 (OKADA, Koichi) [JP/JP]; 〒4380037 静岡県磐田市東貝塚1578番地 NTN株式会社内 Shizuoka (JP).
 山田裕之 (YAMADA, Hiroyuki) [JP/JP]; 〒4380037 静岡県磐田市東貝塚1578番地 NTN株式会社内 Shizuoka (JP).

(74) 代理人: 杉本修司, 外(SUGIMOTO, Shuji et al.); 〒5500002 大阪府大阪市西区江戸堀1丁目10番2号 肥後橋ニッタイビル Osaka (JP).

[続葉有]

(54) Title: MOTOR-INTEGRATED TYPE MAGNETIC BEARING DEVICE

(54) 発明の名称: モーター一体型の磁気軸受装置



29 MOTOR CONTROLLER

19 MAGNETIC BEARING CONTROLLER

(57) Abstract: Provided is a motor-integrated type magnetic bearing device using roller bearings (15, 16) and a magnetic bearing together, the roller bearings (15, 16) of which bear a radial load, and the magnetic bearing of which bears an axial load and/or a bearing pre-load. The magnetic bearing device comprises a position sensor (43) for detecting an angular phase between a motor rotor (28a) and a motor stator (28b), and motor drive current phase adjusting means for applying a voltage to a motor coil (28ba). The motor drive current phase adjusting means decides, while the motor rotor (28a) is rotating at the rotating speed, the timing for starting the voltage application, by a predetermined operation based on at least the position sensor (43) among the position sensor (43), a speed sensor (45) for detecting the rotating speed of the motor rotor (28a) and a current sensor (44) for detecting the electric current to flow to the motor coil (28b).

(57) 要約: このモーター一体型の磁気軸受装置は、転がり軸受15、16と磁気軸受を併用し、転がり軸受15、16がラ

ジアル負荷を支持し、磁気軸受がアキシアル負荷と軸受予圧のどちらかー

[続葉有]

WO 2008/018167 A1



(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD,

SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

方または両方を支持する。モータロータ 28a とモータステータ 28b 間の角度位相を検出する位置センサ 43 と、モータコイル 28ba へ電圧を印加するモータ駆動電流位相調整手段とを有している。前記モータ駆動電流位相調整手段は、モータロータ 28a が前記回転数で回転する状態で、位置センサ 43 と、モータロータ 28a の回転速度を検出する速度センサ 45 と、モータコイル 28b に流れる電流を検出する電流センサ 44 のうち少なくとも位置センサ 43 に基づく所定の処理により、前記電圧印加の開始のタイミングを決定する。

明 細 書

モーター一体型の磁気軸受装置

技術分野

- [0001] この発明は、空気サイクル冷凍冷却用タービンユニット等に用いられる磁気軸受装置に関し、特に、転がり軸受と磁気軸受を併用し、磁気軸受がアキシャル負荷と軸受予圧のどちらか一方または両方を支持するようにしたモーター一体型の磁気軸受装置に関する。

背景技術

- [0002] 空気サイクル冷凍冷却システムは、冷媒として空気を用いるため、フロンやアンモニアガス等を用いる場合に比べてエネルギー効率が不足するが、環境保護の面では好ましい。また、冷凍倉庫等のように、冷媒空気を直接に吹き込むことができる施設では、庫内ファンやデフロストの省略等によってトータルコストを引下げられる可能性があり、特許第2623202号公報には、このような用途で空気サイクル冷凍冷却システムが提案されている。
- [0003] また、 -30°C ～ -60°C のディープ・コールド領域では、空気冷却の理論効率は、フロンやアンモニアガスと同等以上になることが知られている。ただし、上記空気冷却の理論効率を得ることは、最適に設計された周辺装置があって、始めて成り立つとも述べられている。周辺装置は、圧縮機や膨張タービン等である。

特許第2623202号公報では、圧縮機、膨張タービンとしては、コンプレッサ翼車および膨張タービン翼車を共通の主軸に取付けたタービンユニットが用いられている。

- [0004] なお、特開平7-91760号公報では、プロセスガスを処理するタービン・コンプレッサとして、主軸の一端にタービン翼車、他端にコンプレッサ翼車を取付け、前記主軸を電磁石の電流で制御するジャーナルおよびスラスト軸受で支承した磁気軸受式タービン・コンプレッサが提案されている。

また、特開平8-261237号公報では、ガスタービンエンジンにおける

提案ではあるが、主軸支持用の転がり軸受に作用するスラスト荷重が軸受寿命の短縮を招くことを回避するため、転がり軸受に作用するスラスト荷重をスラスト磁気軸受により低減することが提案されている。

[0005] 上記のように、空気サイクル冷凍冷却システムとして、ディープ・コール領域で高効率となる空気冷却の理論効率を得るためには、最適に設計された圧縮機や膨張タービンが必要となる。

圧縮機、膨張タービンとしては、上記のようにコンプレッサ翼車および膨張タービン翼車を共通の主軸に取付けたタービンユニットが用いられている。このタービンユニットは、膨張タービンの生じる動力によりコンプレッサ翼車を駆動することで空気サイクル冷凍機の効率を向上させている。

[0006] しかし、実用的な効率を得るためには、各翼車とハウジングとの隙間を微小に保つ必要がある。この隙間の変動は、安定した高速回転の妨げとなり効率の低下を招く。

また、コンプレッサ翼車やタービン翼車に作用する空気により、主軸にスラスト力が作用し、主軸を支持する軸受にスラスト荷重が荷される。空気サイクル冷凍冷却システムにおけるタービンユニットの主軸の回転速度は、1分間に8万～10万回転であり、一般的な用途の軸受に比べて非常に高速となる。そのため、上記のようなスラスト荷重は、主軸を支持する軸受の長期耐久性の低下、寿命低下を招き、空気サイクル冷凍冷却用タービンユニットの信頼性を低下させる。このような軸受の長期耐久性の課題を解消しなくては、空気サイクル冷凍冷却用タービンユニットの実用化が難しい。しかし、上記特許文献1に開示の技術は、この高速回転下におけるスラスト荷重の負荷に対する軸受の長期耐久性の低下については解決されるに至っていない。

[0007] 特開平7-91760号公報の磁気軸受式タービン・コンプレッサのように、主軸を磁気軸受からなるジャーナル軸受およびスラスト軸受で支承したものでは、ジャーナル軸受にアキシアル方向の規制機能がない。そのため、スラスト軸受の制御の不安定要因等があると、上記翼車とディフューザ間の微小隙間を保って安定した高速回転を行うことが難しい。磁気軸受の場合は

、電源停止時における接触の問題もある。

[0008] そこで、本発明者等は、上記課題を解決するものとして、図 1 1 に示すようなモーター一体型の磁気軸受装置を開発した。このモーター一体型の磁気軸受装置は、主軸 5 3 の両端にコンプレッサ 4 6 のコンプレッサ翼車 4 6 a および膨張タービン 4 7 のタービン翼車 4 7 a を取付けた空気サイクル冷凍冷却用タービンユニットにおいて、主軸 5 3 のラジアル負荷を転がり軸受 5 5, 5 6 で、アキシアル負荷を電磁石 5 7 でそれぞれ支持すると共に、主軸 5 3 に同軸に設けたモータ 6 8 による駆動力とタービン翼車 4 7 a の駆動力とでコンプレッサ翼車 4 6 a を回転駆動するようにしたものである。アキシアル負荷を支持する電磁石 5 7 は、主軸 5 3 に垂直かつ同軸に設けられたスラスト板 5 3 a に非接触で対向するように配置され、アキシアル方向の力を検出するセンサ 5 8 の出力に応じて磁気軸受用コントローラ 5 9 で制御される。モータ 6 8 はアキシアルギャップ型のものであって、主軸 5 3 に垂直かつ同軸に設けた別のスラスト板 5 3 b にモータロータ 6 8 a を形成すると共に、このモータロータ 6 8 a と軸方向に対向するようにモータステータ 6 8 b を配置して構成される。このモータ 6 8 は、電磁石 5 7 とは独立にモータ用コントローラ 6 9 で制御される。この場合、モータ用コントローラ 6 9 は、図 1 2 にタイミングチャートで示すように、モータロータ 6 8 a の永久磁石 6 8 a a がモータステータ 6 8 b におけるモータコイル 6 8 b a に差しかかるタイミングで、モータコイル 6 8 b a へ電圧を印加することにより、モータ効率を上げるように制御する。

[0009] 上記構成のモーター一体型の磁気軸受装置によると、主軸 5 3 にかかるスラスト力を電磁石 5 7 で支持するため、非接触でトルクの増大を抑えながら、転がり軸受 5 5, 5 6 に作用するスラスト力を軽減することができる。その結果、各翼車 4 6 a, 4 7 a とハウジング 4 6 b, 4 7 b との微小隙間を一定に保つことができ、スラスト荷重の負荷に対する転がり軸受 5 5, 5 6 の長期耐久性を向上させることができる。

[0010] しかし、上記構成のモーター一体型の磁気軸受装置において、図 1 2 のよう

に、モータロータ 68a の永久磁石 68aa の磁極切替り位置がモータステータ 68b におけるモータコイル 68ba の中心に差しかかるタイミングで、モータコイル 68ba への電圧印加を開始するのでは、モータコイルのインダクタンスにより印加電圧に対し電流の立ち上がりに遅れが生じ、最大トルク発生点である永久磁石の磁極切替り位置がモータコイル中心となる位置でモータコイルの電流値が最大とならず、必ずしも最適なモータ効率が得られないという問題がある。

発明の開示

[0011] この発明の目的は、スラスト荷重の負荷に対する転がり軸受の長期耐久性を向上させることができ、コンパクト化が図れ、かつモータ効率を向上させるモーター一体型の磁気軸受装置を提供することである。

[0012] この発明のモーター一体型の磁気軸受装置は、転がり軸受と磁気軸受を併用し、転がり軸受がラジアル負荷を支持し、磁気軸受がアキシアル負荷と軸受予圧のどちらか一方または両方を支持し、前記磁気軸受を構成する電磁石は主軸に設けられた強磁性体からなるフランジ状のスラスト板に非接触で対向するように、スピンドルハウジングに取付けられており、アキシアルギャップモータのモータロータが、前記スラスト板とこのスラスト板に周方向に等ピッチで設けられた複数個の永久磁石とで構成され、前記モータロータと対向してモータコイルを有するモータステータが前記スピンドルハウジングに設置されたモーター一体型の磁気軸受装置であって、前記モータロータと前記モータステータ間の角度位相を検出する位置センサと、モータロータの設定された、または検出された回転数に応じ、モータコイルへの電圧印加のタイミングを決定して、前記モータロータの磁石がモータコイルを通過する毎にモータコイルへ電圧を印加するモータ駆動電流位相調整手段とを有し、前記モータ駆動電流位相調整手段は、モータロータが前記回転数で回転する状態で、前記位置センサと、モータロータの回転速度を検出する速度センサと、前記モータコイルに流れる電流を検出する電流センサのうち少なくとも位置センサに基づく所定の処理により、前記電圧印加の開始のタイミングを

決定するものとしている。

[0013] この構成によると、転がり軸受と磁気軸受を併用し、転がり軸受がラジアル負荷を支持し、磁気軸受がアキシャル負荷と軸受予圧のどちらか一方または両方を支持するものであるため、アキシャル方向の精度の良い支持が行え、また転がり軸受の長期耐久性が確保でき、磁気軸受のみの支持の場合における電源停止時の損傷も回避される。また、磁気軸受の電磁石に対向させるスラスト板にモータロータの永久磁石を設けたため、軸受とモータとの部品兼用によってコンパクト化される。

[0014] また、回転数に応じ、モータコイルへの電圧印加のタイミングを決定して、所定の処理により、前記モータロータの磁石がモータコイルを通過する毎にモータコイルへ電圧を印加する開始タイミングを決定するようにしているので、モータの効率を向上させることができる。

[0015] この発明において、好ましくは、前記モータ駆動電流位相調整手段は、モータロータが前記設定回転数で回転する状態で、モータロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過するときにモータコイルの電流値が最大となるように前記電流印加の開始のタイミングを決定するものとしている。前記設定回転数は、例えば定格回転数とされる。

この構成によると、モータロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過するときに、モータコイルの電流値が最大となるように、モータ駆動電流位相調整手段がモータコイルへの電圧印加の開始タイミングを決定するようにしているので、モータの効率を向上させることができる。

[0016] この発明において、モータ駆動電流位相調整手段は、複数の設定回転数に切り換え可能とされ、切り換えられた各設定回転数毎に、モータロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過するときにモータコイルの電流値が最大となるように前記電流印加の開始のタイミングを決定可能なものとしても良い。この構成の場合、例えば複数の定格回転数において、モータ効率を向上させることができる。

[0017] この発明において、前記センサは、前記モータロータの前記永久磁石の通過を検出するものであり、前記モータ駆動電流位相調整手段は、前記センサが前記永久磁石の通過を検出してからセンサ信号を出力するまで時間を設定した出力早出し時間設定手段を有し、上記センサ信号に応答して電流印加を開始させるものとしても良い。この構成の場合、電子回路やその回路素子等で構成される出力早出し時間設定手段で時間を設定するため、センサ信号を出力するまで時間の変更が容易であり、複数の設定回転数に応じて、それぞれセンサ信号を出力するまで時間を設定し、モータ効率を向上させることが容易に行える。

[0018] この発明において、前記センサは、前記モータロータの前記永久磁石の通過を検出するものであり、前記モータ駆動電流位相調整手段は、前記センサの出力するセンサ信号に応答して電流印加を開始させるものとし、前記センサの取付位置を、回転により、モータロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過する位置に達するよりも手前で前記永久磁石を検出する位置としても良い。この構成の場合、センサの取付位置の調整だけで、モータ効率の向上に対応でき、構成が簡単である。

[0019] この発明のモーター一体型の磁気軸受装置は、コンプレッサ側翼車およびタービン側翼車が、前記主軸に取付けられ、モータ動力とタービン側翼車で発生した動力のどちらか一方または両方により、コンプレッサ側翼車を駆動させる、圧縮膨張タービンシステムに適用されたものであっても良い。

[0020] この発明において、前記モータ駆動電流位相調整手段は、前記電圧印加のタイミングを、前記位置センサの出力と前記速度センサの出力と前記電流センサの出力とによって所定の処理により決定するものとしている。なお、モータロータの回転速度を検出する手段として、前記速度センサの代りに、前記位置センサの出力から計算して回転速度を求める手段を設けてもよい。

この構成によれば、モータロータの磁石がモータコイルを通過する毎にモータコイルへ電圧を印加するモータ駆動電流位相調整手段の動作において、モータロータとモータステータ間の角度位相を検出する位置センサの出力、

モータコイルに流れる電流を検出する電流センサの出力、およびモータロータの回転速度を検出する速度センサの出力を用いて、所定の処理により前記電圧印加のタイミングを決定するものとしている。この種のモーター体型の磁気軸受装置を使用するシステム（例えば空気サイクル冷凍システム）は常に一定の回転速度で運転されるが、運転する回転速度が速くなるほどモータの消費電力も大きくなる。これに対し、本構成によれば、最小のモータ電流で目標回転速度が得られる電圧印加タイミングとすることができるので、モータの消費電力を最小に抑えることができる。

[0021] この発明において、前記モータ駆動電流位相調整手段は、設定したモータロータ回転数以下では、モータコイルへの電圧印加のタイミングを、電流センサの出力を用いずに、位置センサの出力によって決定するものとしても良い。

回転速度が低い場合には、モータコイルの電流の遅れの影響が小さいので、電流センサの出力を用いずに、位置センサの出力だけを用いて電圧印加のタイミングを決定するほうが好ましい。

[0022] この発明において、前記所定の処理は、
電圧印加のタイミングを進める単位時間（ ΔT ）を設定する手順、
電流センサから検出された現在のモータ電流の電流値を記憶する手順、
現在の電圧印加のタイミング時刻（ T ）に対して単位時間（ ΔT ）だけ加算する手順、

速度センサの出力するモータロータの回転速度が目標回転速度であるか否かを判定し、目標回転速度でないときは、目標回転速度となるまで回転速度に応じてモータコイルの電流を増減する手順、

前記判定の過程で目標回転速度になったときに、前記の記憶した電流値に対してモータ電流が減った場合は、前記の現在の電流値を記憶する手順に戻ってその減った電流値を記憶する手順、

前記判定の過程で前記目標回転速度になったときに、前記の記憶した電流値に対してモータ電流が増えた場合は、前記単位時間（ ΔT ）を正逆反対の

値（ $-\Delta T$ ）に変更した後、前記の現在の電流値を記憶する手順に戻ってその増えた電流値を記憶する手順、

前記判定の過程で前記目標回転速度になったときに、前記の記憶した電流値に対してモータ電流の変化がない場合は、現在の電圧印加のタイミング時刻（ T ）を一つ前の状態である単位時間（ ΔT ）の加算前の状態（ $T = T - \Delta T$ ）に戻す手順、

の各手順を含むものであっても良い。

[0023] この発明において、前記主軸は、タービン翼車およびコンプレッサ翼車が取付けられるものであっても良い。

図面の簡単な説明

[0024] この発明は、添付の図面を参考にした以下の好適な実施形態の説明からより明瞭に理解されるであろう。しかしながら、実施形態および図面は単なる図示および説明のためのものであり、この発明の範囲を定めるために利用されるべきものではない。この発明の範囲は添付のクレーム（請求の範囲）によって定まる。添付図面において、複数の図面における同一の部品番号は、同一部分を示す。

[図1] この発明の第1実施形態にかかるモーター一体型の磁気軸受装置が組み込まれたタービンユニットの断面図である。

[図2] モーター一体型の磁気軸受装置に用いられる磁気軸受用コントローラの一例を示すブロック図である。

[図3] モーター一体型の磁気軸受装置に用いられるモータ用コントローラの一例を示すブロック図である。

[図4] モーター一体型の磁気軸受装置における位相検出センサの取付位置の説明図である。

[図5] モータ用コントローラにおける位相調整回路の一例の機能による位相検出センサの検出信号とモータコイルの電流との関係を示すタイミングチャートである。

[図6] モータ用コントローラにおける位相調整回路の他の例の機能による位相

検出センサの検出信号とモータコイルの電流との関係を示すタイミングチャートである。

[図7] この発明の第2実施形態にかかるモーター一体型の磁気軸受装置が組み込まれたタービンユニットの断面図である。

[図8] 図1のタービンユニットを適用した空気サイクル冷凍冷却システムの系統図である。

[図9] この発明の第3実施形態にかかるモーター一体型の磁気軸受装置に用いられるモータ用コントローラの一例を示すブロック図である。

[図10] 同モータ用コントローラにおける位相調整回路によるモータコイルへの電圧印加のタイミング決定処理の一例を示すフロー図である。

[図11] 従来例の断面図である。

[図12] 同従来例でのモータ用コントローラの制御による位相検出センサの検出信号とモータコイルの電流との関係を示すタイミングチャートである。

発明を実施するための最良の形態

[0025] この発明の第1実施形態を図1ないし図6と共に説明する。図1は、この実施形態のモーター一体型の磁気軸受装置を組み込んだタービンユニット5の断面図を示す。このタービンユニット5は圧縮膨張タービンシステムを構成するものであり、コンプレッサ6および膨張タービン7を有し、コンプレッサ6のコンプレッサ翼車6aおよび膨張タービン7のタービン翼車7aが主軸13の両端にそれぞれ嵌合している。主軸13の材料には、磁気特性の良好な低炭素鋼が使用される。

[0026] 図1において、コンプレッサ6は、コンプレッサ翼車6aと微小の隙間d1を介して対向するコンプレッサハウジング6bを有し、中心部の吸込口6cから軸方向に吸入した空気を、コンプレッサ翼車6aで圧縮し、外周部の出口（図示せず）から矢印6dで示すように排出する。

膨張タービン7は、タービン翼車7aと微小の隙間d2を介して対向するタービンハウジング7bを有し、外周部から矢印7cで示すように吸い込んだ空気を、タービン翼車7aで断熱膨張させ、中心部の排出口7dから軸方

向に排出する。

[0027] このタービンユニット5におけるモーター一体型の磁気軸受装置は、主軸13をラジアル方向に対し複数の軸受15, 16で支持し、主軸13にかかるアキシアル負荷と軸受予圧のどちらか一方または両方を磁気軸受である電磁石17により支持すると共に、主軸13を回転駆動するアキシアルギャップ型のモータ28を設けたものである。このタービンユニット5は、主軸13に作用するスラスト力を検出するセンサ18と、このセンサ18の出力に応じて前記電磁石17による支持力を制御する磁気軸受用コントローラ19と、電磁石17とは独立に前記モータ28を制御するモータ用コントローラ29とを有している。

電磁石17は、主軸13の軸方向中間部において軸方向に並ぶように主軸13に垂直かつ同軸に設けられた強磁性体からなるフランジ状の2つのスラスト板13a, 13bの各片面に非接触で対向するように、一対のものがスピンドルハウジング14に設置されている。具体的には、磁気軸受ユニットを構成する一方の電磁石17は、膨張タービン7寄りに位置するスラスト板13aの膨張タービン7側に向く片面を電磁石ターゲットとして、この片面に非接触で対向するようにスピンドルハウジング14に設置される。また、磁気軸受ユニットを構成する他方の電磁石17は、コンプレッサ6寄りに位置するスラスト板13bのコンプレッサ6側に向く片面を電磁石ターゲットとして、この片面に非接触で対向するようにスピンドルハウジング14に設置される。

[0028] モータ28は、前記電磁石17と並んで主軸13に設けられたモータロータ28aと、このモータロータ28aに対し軸方向に対向するモータステータ28bとでなるモータユニットである。具体的には、モータユニットの一部品を構成するモータロータ28aは、主軸13における前記各スラスト板13a, 13bの電磁石17が対向する側とは反対側の各片面に、円周方向に等ピッチで並ぶ永久磁石28aaを配置することで左右一対のものが構成される。このように軸方向に対向配置される永久磁石28aaの間では、そ

の磁極が互いに異極となるように設定される。主軸 13 には磁気特性の良好な低炭素鋼を使用しているため、主軸 13 と一体構造となるように設けられる前記各スラスト板 13 a, 13 b を、永久磁石 28 a a のバックヨークおよび電磁石ターゲットに兼用できる。

モータユニットの他の部品であるモータステータ 28 b は、前記左右一対のモータロータ 28 a に挟まれる軸方向中央の位置において、これら両モータロータ 28 a の各面に非接触で対向するようにコアの無い状態で配置したモータコイル 28 b a を、スピンドルハウジング 14 に設置して構成される。このモータ 28 は、前記モータロータ 28 a とモータステータ 28 b 間に作用するローレンツ力により、主軸 13 を回転させる。このように、このアキシアルギャップ型のモータ 28 はコアレスモータとされていることから、モータロータ 28 a とモータステータ 28 b 間の磁気カップリングによる負の剛性はゼロとなっている。

[0029] 主軸 13 を支持する軸受 15, 16 は転がり軸受であって、アキシアル方向位置の規制機能を有するものであり、例えば深溝玉軸受やアンギュラ玉軸受が用いられる。深溝玉軸受の場合、両方向のスラスト支持機能を有し、内外輪のアキシアル方向位置を中立位置に戻す作用を持つ。これら 2 個の軸受 15, 16 は、それぞれスピンドルハウジング 14 におけるコンプレッサ翼車 6 a およびタービン翼車 7 a の近傍に配置されている。

[0030] 主軸 13 は、中間部の大径部 13 c と、両端部の小径部 13 d とを有する段付き軸とされている。両側の軸受 15, 16 は、その内輪 15 a, 16 a が小径部 13 d に圧入状態に嵌合し、片方の幅面が大径部 13 c と小径部 13 d 間の段差面に係合する。

スピンドルハウジング 14 における両側の軸受 15, 16 よりも各翼車 6 a, 7 a 側の部分は、内径面が主軸 13 に近接する径に形成され、この内径面に非接触シール 21, 22 が形成されている。この実施形態では、非接触シール 21, 22 は、スピンドルハウジング 14 の内径面に複数の円周溝を軸方向に並べて形成したラビリンスシールとしているが、その他の非接触シー

ル手段でも良い。

[0031] 前記センサ 18 は、タービン翼車 7 a 側の軸受 16 の近傍における静止側、つまりスピンドルハウジング 14 側に設けられている。このセンサ 18 を近傍に設けた軸受 16 は、その外輪 16 b が軸受ハウジング 23 内に固定状態に嵌合している。軸受ハウジング 23 は、リング状に形成されて一端に軸受 16 の外輪 16 b の幅面に係合する内鏑 23 a を有しており、スピンドルハウジング 14 に設けられた内径面 24 にアキシアル方向に移動自在に嵌合している。内鏑 23 a は、アキシアル方向の中央側端に設けられている。

[0032] センサ 18 は主軸 13 の回りの円周方向複数箇所（例えば 2 箇所）に分配配置され、軸受ハウジング 23 の内鏑 23 a 側の幅面と、スピンドルハウジング 14 に固定された部材である片方の電磁石 17 との間に介在させてある。また、センサ 18 は、センサ予圧ばね 25 により予圧が印加されている。センサ予圧ばね 25 は、スピンドルハウジング 14 に設けられた収容凹部内に収容されて軸受 16 の外輪 16 b をアキシアル方向に付勢するものとされ、外輪 16 b および軸受ハウジング 23 を介してセンサ 18 を予圧する。センサ予圧ばね 25 は、例えば主軸 13 の回りの円周方向複数箇所に設けられたコイルばね等からなる。

[0033] センサ予圧ばね 25 による予圧は、押し付け力によってスラスト力を検出するセンサ 18 が、主軸 13 のアキシアル方向のいずれの向きの移動に対しても検出できるようにするためであり、タービンユニット 5 の通常の運転状態で主軸 13 に作用する平均的なスラスト力以上の大きさとされる。

[0034] センサ 18 の非配置側の軸受 15 は、スピンドルハウジング 14 に対してアキシアル方向に移動自在に設置され、かつ軸受予圧ばね 26 によって弾性支持されている。この例では軸受 15 の外輪 15 b が、スピンドルハウジング 14 の内径面にアキシアル方向移動自在に嵌合していて、軸受予圧ばね 26 は、外輪 15 b とスピンドルハウジング 14 との間に介在している。軸受予圧ばね 26 は、内輪 15 a の幅面が係合した主軸 13 の段面に対向して外輪 15 b を付勢するものとされ、軸受 15 に予圧を与えている。軸受予圧ば

ね 26 は、主軸 13 回りの円周方向複数箇所に設けられたコイルばね等からなり、それぞれスピンドルハウジング 14 に設けられた収容凹部内に収容されている。軸受予圧ばね 26 は、センサ予圧ばね 25 よりもばね定数が小さいものとされる。

[0035] 上記タービンユニット 5 におけるモーター一体型の磁気軸受装置の力学モデルは簡単なバネ系で構成することができる。すなわち、このバネ系は、軸受 15、16 とこれら軸受の支持系（センサ予圧ばね 25、軸受予圧ばね 26、軸受ハウジング 23 など）とで形成される合成バネと、モータ部（電磁石 17 とモータ 28）で形成される合成バネとが並列となった構成である。このバネ系において、軸受 15、16 とこれら軸受の支持系とで形成される合成バネは、変位した方向と逆の方向に変位量に比例して作用する剛性となるのに対し、電磁石 17 とモータ 28 とで形成される合成バネは、変位した方向に変位量に比例して作用する負の剛性となる。

このため、上記した両合成バネの剛性の大小関係を、

軸受等による合成バネの剛性値 < 電磁石・モータによる合成バネの負の剛性値… (1) とした場合、機械システムの位相は 180° 遅れとなり不安定な系となることから、電磁石 17 を制御する磁気軸受用コントローラ 19 において、予め位相補償回路を付加する必要性が生じ、コントローラ 19 の構成が複雑なものになる。

[0036] そこで、この実施形態のモーター一体型の磁気軸受装置では、上記した両合成バネの剛性の大小関係を、

軸受等による合成バネの剛性値 > 電磁石・モータによる合成バネの負の剛性値… (2) としている。とくに、このモーター一体型の磁気軸受装置では、上記したようにアキシアルギャップ型のモータ 28 をコアレスモータとしているので、モータ 28 に作用する負の剛性値をゼロとすることができ、上記 (2) 式の大小関係を保つことができる。

その結果、制御帯域において、機械システムの位相が 180° 遅れとなることを防止できるので、磁気軸受用コントローラ 19 の制御対象を安定なも

のとき、コントローラ 19 の回路構成を図 2 のように比例もしくは比例積分を用いた簡単なものに構成できる。

[0037] ブロック図で示す図 2 の磁気軸受用コントローラ 19 では、各センサ 18 の検出出力 P_1 , P_2 をセンサ出力演算回路 30 で加減算し、その演算結果を比較器 31 で基準値設定手段 32 の基準値と比較して偏差を演算し、さらに演算した偏差を P I 補償回路（もしくは P 補償回路）33 によりタービンユニット 5 に応じて適宜設定される比例積分（もしくは比例）処理を行うことで、電磁石 17 の制御信号を演算するようにしている。 P I 補償回路（もしくは P 補償回路）33 の出力は、ダイオード 34, 35 を介して各方向の電磁石 17_1 , 17_2 を駆動するパワー回路 36, 37 に入力される。電磁石 17_1 , 17_2 は、図 1 に示したスラスト板 13 a, 13 b に対向する一対の電磁石 17 であり、吸引力しか作用しないため、予めダイオード 34, 35 で電流の向きを決め、2 個の電磁石 17_1 , 17_2 を選択的に駆動するようにしている。

[0038] 同じくブロック図で示す図 3 のモータ用コントローラ 29 では、位相調整回路 38 で演算されたモータロータ 28 a の回転角を基に位相調整回路 38 でモータ駆動電流の位相調整が行われ、その調整結果に応じたタイミングでモータ駆動電流をモータ駆動回路 39 からモータステータ 28 b に供給する。位相調整を行うことにより回転数に変動が生じるため、回転同期指令信号を基に、モータロータ 28 a の回転角をフィードバック信号として、モータ駆動電流の大きさを調整し、定回転制御が行われる。

[0039] 前記位相調整回路 38 によるモータ駆動電流の位相調整の一つとして、具体的には、以下のような制御が行われる。位相調整回路 38 は、モータロータ 28 a とモータステータ 28 b 間の角度位相を検出する図 4 の位相検出センサ 40 の出力によって、モータステータ 28 b のモータコイル 28 b a への電圧印加のタイミングを、モータ 28 の定格回転数に応じて決定する。このように決定されたタイミングで、モータ駆動回路 39 は、モータロータ 28 a の永久磁石 28 a a がモータステータ 28 b のモータコイル 28 b a を

通過する毎に、モータコイル 28 b a へ電圧を印加する。

[0040] 図 4 では、前記位相検出センサ 40 が、回転方向におけるモータコイル 28 b a の中心相当位置に取付けられているので、図 5 (A) のようにモータロータ 28 a の永久磁石 28 a a がモータコイル 28 b a を通過するとき、位相検出センサ 40 の検出信号は、図 5 (B) のように通過時間に一致したパルス幅の信号となる。

ところが、この検出信号に基づき、モータコイル 28 b a への電圧印加タイミングを決定すると、モータコイル 28 b a の電流は図 5 (C) に示す波形となって、モータロータ 28 a の永久磁石 28 a a の磁極切替り位置がモータステータ 28 b の発生する磁束の中心（モータコイル 28 b a の中心）を通過するときにモータコイル 28 b a の電流値が最大とならない。

そこで、ここでは前記位相調整回路 38 が、前記位相検出センサ 40 の出力を所定角度だけ進み位相に変換する出力早出し時間設定手段 41 を有するものとされ、この出力早出し時間設定手段 41 の出力に応答してモータコイル 28 b a への電圧印加の開始を行うことにより、モータロータ 28 a の永久磁石 28 a a の磁極切替り位置がモータステータ 28 b の発生する磁束の中心（モータコイル 28 b a の中心）を通過するときにモータコイル 28 b a の電流値が最大となるようにされる。換言すると、出力早出し時間設定手段 41 は、位相検出センサ 40 が永久磁石 28 a a の通過を検出してから次の永久磁石 28 a a の通過を検出するまでの経過時間よりも短い所定の遅れ時間後に、位相検出センサ 40 の前回の検出信号を出力する。図 5 (D) には、前記出力早出し時間設定手段 41 によって進み位相に変換された出力信号の波形を示し、図 5 (E) にはその出力タイミングでモータコイル 28 b a への電圧印加が開始されたときのモータコイル 28 b a の電流の波形図を示す。前記出力早出し時間設定手段 41 により変換される出力信号の進み角度（出力早出し時間）は、測定または計算によって求められ、前記出力早出し時間設定手段 41 に予め設定される。なお、その設定値は、モータ 28 の各定格回転数に応じたものがそれぞれ用意される。

- [0041] 前記出力早出し時間設定手段41により進み位相に変換した信号でモータコイル28baへの電圧印加の開始タイミングを決定する位相調整回路38の動作は、モータ28の回転数が変動していないことが前提となるが、この種のモーター一体型の磁気軸受装置を用いるタービンユニット5は一定回転で運転するので何ら問題はない。
- [0042] モータコイル28baへの電圧印加の開始タイミングを早めて、モータロータ28aの永久磁石28aaの中心がモータステータ28bの発生する磁束の中心（モータコイル28baの中心）を通過するときにモータコイル28baの電流値が最大となるようにする他の手段として、図4に破線で示すように、位相検出センサ40の取付位置を、回転により、モータロータ28aの永久磁石28aaの中心がモータステータ28bの発生する磁束の中心（モータコイル28baの中心）を通過する位置に達するよりも手前としても良い。この場合には、図3における位相調整回路38での出力早出し時間設定手段41は省略される。
- [0043] この場合、図6（A）のようにモータロータ28aの永久磁石28aaがモータコイル28baを通過するとき、位相検出センサ40の検出信号は、図6（B）のように永久磁石28aaがモータコイル28baに差しかかる手前から立ち上がる進み位相となり、位相調整回路38はこの検出信号に基づき、モータコイル28baへの電圧印加の開始タイミングを決定する。これにより、モータコイル28baの電流は図6（C）に示す波形となって、モータロータ28aの永久磁石28aaの中心がモータステータ28bの発生する磁束の中心（モータコイル28baの中心）を通過するときにモータコイル28baの電流値が最大となる。
- [0044] この構成のタービンユニット5は、例えば空気サイクル冷凍冷却システムに適用されて、冷却媒体となる空気を後段の熱交換器（ここでは図示せず）により効率良く熱交換できるように、コンプレッサ6で圧縮して温度上昇させ、さらに後段の前記熱交換器で冷却された空気を、膨張タービン7により、目標温度、例えば−30℃〜−60℃程度の極低温まで断熱膨張により冷

却して排出するように使用される。

このような使用例において、このタービンユニット5は、コンプレッサ翼車6 aおよびタービン翼車7 aが、前記スラスト板13 aとモータロータ28 aと共通の主軸13に嵌合し、モータ28の動力とタービン翼車7 aで発生した動力のどちらか一方または両方によりコンプレッサ翼車6 aを駆動するものとしている。このため、各翼車6 a, 7 aの適切な隙間d1, d2を保って主軸13の安定した高速回転が得られ、かつ軸受15, 16の長期耐久性の向上、寿命の向上が得られる。

[0045] すなわち、タービンユニット5の圧縮、膨張の効率を確保するためには、各翼車6 a, 7 aとハウジング6 b, 7 bとの隙間d1, d2を微小に保つ必要がある。例えば、このタービンユニット5を空気サイクル冷凍冷却システムに適用する場合には、この効率確保が重要となる。これに対して、主軸13を転がり形式の軸受15, 16により支持するため、転がり軸受の持つアキシャル方向位置の規制機能により、主軸13のアキシャル方向位置がある程度規制され、各翼車6 a, 7 aとハウジング6 b, 7 bとの微小隙間d1, d2を一定に保つことができる。

[0046] しかし、タービンユニット5の主軸13には、各翼車6 a, 7 aに作用する空気の圧力でスラスト力がかかる。また、空気冷却システムで使用するタービンユニット5では、1分間に例えば8万～10万回転程度の非常に高速の回転となる。そのため、主軸13を回転支持する転がり軸受15, 16に上記スラスト力が作用すると、軸受15, 16の長期耐久性が低下する。

この実施形態は、上記スラスト力を電磁石17で支持するため、非接触でトルクの増大を抑えながら、主軸13の支持用の転がり軸受15, 16に作用するスラスト力を軽減することができる。この場合に、主軸13に作用するスラスト力を検出するセンサ18と、このセンサ18の出力に応じて前記電磁石17による支持力を制御する磁気軸受用コントローラ19とを設けたため、転がり軸受15, 16を、その軸受仕様に応じてスラスト力に対し最適な状態で使用することができる。

特に、軸方向に並べて主軸 13 に設けられた 2 つのスラスト板 13 a, 13 b の軸方向外側に 2 つの電磁石 17 を配置して磁気軸受ユニットを構成すると共に、前記両スラスト板 13 a, 13 b で挟まれる位置にアキシアルギャップ型のモータ 28 を配置してモータユニットを構成することにより、磁気軸受ユニットとモータユニットをコンパクトな一体構造としているため、主軸 53 の軸長を短くでき、それだけ主軸 13 の固有振動数が高くなって、主軸 13 を高速回転させることができる。

[0047] また、このモーター一体型の磁気軸受装置では、モータ用コントローラ 29 において、モータロータ 28 a の永久磁石 28 a a の中心がモータステータ 28 b の発生する磁束の中心（モータコイル 28 b a の中心）を通過するときに、モータコイル 28 b a の電流値が最大となるように、位相調整回路 38 がモータコイル 28 b a への電圧印加の開始タイミングを決定するようにしているので、モータ 28 の効率を向上させることができる。

[0048] 図 7 はタービンユニット 5 の第 2 実施形態を示す。このタービンユニット 5 は、図 1 に示す実施形態において、主軸 13 に垂直かつ同軸に設けられた強磁性体からなるフランジ状のスラスト板を 1 つだけとして、このスラスト板 13 a を電磁石ターゲットとして、その両面に非接触で対向するように、左右一対の電磁石 17, 17 がスピンドルハウジング 14 に設置されている。

[0049] モータ 28 は、主軸 13 に設けられたモータロータ 28 a と、このモータロータ 28 a に対し軸方向に対向するモータステータ 28 b とでなる。モータロータ 28 a は、前記スラスト板 13 a の両面における前記電磁石 17 の対向位置よりも外径側に、円周方向に等ピッチで並ぶ永久磁石 28 a a を配置することで左右一対のものが構成される。このように軸方向に対向配置される永久磁石 28 a a の間では、その磁極が互いに異極となるように設定される。スラスト板 13 a は永久磁石 28 a a のバックヨークを兼ねる。

モータステータ 28 b は、前記スラスト板 13 a の両面のモータロータ 28 a に非接触で対向するように、スピンドルハウジング 14 に設置される強

磁性体（例えば低炭素鋼およびケイ素鋼板）からなる一対のステータヨーク 28 b b に、それぞれモータコイル b a を巻回することで左右一対のものが構成される。このようにして前記スラスト板 13 a を挟んで構成される左右 2 個のモータ 28 は、前記モータロータ 28 a とモータステータ 28 b 間に作用する磁気力により、主軸 13 を回転させる。この場合、スラスト板 13 a におけるモータロータ 28 b の位置を、電磁石 17 の対向位置よりも外径側としているので、少ないモータ駆動電流でより大きいトルクを得ることができる。その他の構成は図 1 の実施形態の場合と同様であり、ここではその説明を省略する。

[0050] 図 8 は、図 1 に示すタービンユニット 5 を用いた空気サイクル冷凍冷却システムの全体の構成を示す。この空気サイクル冷凍冷却システムは、冷凍倉庫等の被冷却空間 10 の空気を直接に冷媒として冷却するシステムであり、被冷却空間 10 にそれぞれ開口した空気の入入口 1 a から排出口 1 b に至る空気循環経路 1 を有している。この空気循環経路 1 に、予圧縮手段 2、第 1 の熱交換器 3、空気サイクル冷凍冷却用タービンユニット 5 のコンプレッサ 6、第 2 の熱交換器 3、中間熱交換器 9、および前記タービンユニット 5 の膨張タービン 7 が順に設けられている。中間熱交換器 9 は、同じ空気循環経路 1 内で入入口 1 a の付近の流入空気と、後段の圧縮で昇温し、冷却された空気との間で熱交換を行うものであり、入入口 1 a の付近の空気は熱交換器 9 a 内を通る。

[0051] 予圧縮手段 2 はブロア等からなり、モータ 2 a により駆動される。第 1 の熱交換器 3 および第 2 の熱交換器 8 は、冷却媒体を循環させる熱交換器 3 a, 8 a をそれぞれ有し、熱交換器 3 a, 8 a 内の水等の冷却媒体と空気循環経路 1 の空気との間で熱交換を行う。各熱交換器 3 a, 8 a は、冷却塔 11 に配管接続されており、熱交換で昇温した冷却媒体が冷却塔 11 で冷却される。なお、前記予圧縮手段 2 を含まない構成の空気サイクル冷凍冷却システムでもよい。

[0052] この空気サイクル冷凍冷却システムは、被冷却空間 10 を 0℃～-60℃

程度に保つシステムであり、被冷却空間 10 から空気循環経路 1 の取入口 1a に 0°C ~ -60°C 程度で 1 気圧の空気が流入する。なお、以下に示す温度および気圧の数値は、一応の目安となる一例である。取入口 1a に流入した空気は、中間熱交換器 9 により、空気循環経路 1 中の後段の空気の冷却に使用され、 30°C まで昇温する。この昇温した空気は 1 気圧のままであるが、予圧縮手段 2 により 1.4 気圧に圧縮させられ、その圧縮により、 70°C まで昇温する。第 1 の熱交換器 3 は、昇温した 70°C の空気を冷却すれば良いため、常温程度の冷水であっても効率良く冷却することができ、 40°C に冷却する。

[0053] 熱交換により冷却された 40°C 、1.4 気圧の空気が、タービンユニット 5 のコンプレッサ 6 により、1.8 気圧まで圧縮され、この圧縮により 70°C 程度に昇温した状態で、第 2 の熱交換器 8 により 40°C に冷却される。この 40°C の空気は、中間熱交換器 9 で -30°C の空気により -20°C まで冷却される。気圧はコンプレッサ 6 から排出された 1.8 気圧が維持される。

中間熱交換器 9 で -20°C まで冷却された空気は、タービンユニット 5 の膨張タービン 7 により断熱膨張され、 -55°C まで冷却されて排出口 1b から被冷却空間 10 に排出される。この空気サイクル冷凍冷却システムは、このような冷凍サイクルを行う。

[0054] この空気サイクル冷凍冷却システムでは、タービンユニット 5 において、各翼車 6a, 7a の適切な隙間 d1, d2 を保って主軸 13 の安定した高速回転が得られ、かつ軸受 15, 16 の長期耐久性の向上、寿命の向上が得られることで、軸受 15, 16 の長期耐久性が向上することから、タービンユニット 5 の全体として、しいては空気サイクル冷凍冷却システムの全体としての信頼性が向上する。このように、空気サイクル冷凍冷却システムのネックとなっているタービンユニット 5 の主軸軸受 15, 16 の安定した高速回転、長期耐久性、信頼性が向上するため、空気サイクル冷凍冷却システムの実用化が可能となる。

[0055] 図 9 はタービンユニット 5 の第 3 実施形態のモーター一体型磁気軸受装置に

用いられるモータ用コントローラ 29 を示す。位相調整回路 38 によるモータ駆動電流の位相調整は、具体的には以下のように行われる。位相調整回路 38 は、モータロータ 28 a とモータステータ 28 b 間の角度位相を検出する位置センサ 43、モータコイル 28 b a に流れる電流を検出する電流センサ 44、およびモータロータ 28 a の回転速度を検出する速度センサ 45 の各出力によって、モータコイル 28 b a への電圧印加のタイミングを所定の処理により決定する。このように決定されたタイミングで、モータ駆動回路 39 は、モータロータ 28 a の永久磁石 28 a a がモータステータ 28 b のモータコイル 28 b a を通過する毎に、モータコイル 28 b a へ電圧を印加する。なお、速度センサ 45 を設ける代わりに位置センサ 43 の角度位相の出力の変化からモータロータ 28 a の回転速度を計算する手段（図示せず）を設け、その出力される回転速度を位相調整回路 38 で用いるようにしてもよい。

[0056] 前記位相調整回路 38 がモータコイル 28 b a への電圧印加タイミングを決定する位相調整処理の具体例を、図 10 のフロー図を参照して以下に説明する。

調整開始により、先ず電圧印加のタイミング時刻 T を調整する単位時間 ΔT を設定する（ステップ S 1）。次に、電流センサ 44 で検出された現在のモータ電流の電流値 I を図示しない記憶部に保管する値 I_0 として記憶し（ステップ S 2）、現在の電圧印加のタイミング時刻 T に対して単位時間 ΔT だけ加算する（ステップ S 3）。単位時間 ΔT をプラスの値とすると、前記処理により電圧印加のタイミング時刻 T がわずかだけ遅れ位相側に変更されることになる。

[0057] 次に、速度センサ 45 の出力するモータロータ 28 a の回転速度が目標回転速度であるか否かを判定し（ステップ S 4）、目標回転速度でないときは、ステップ S 5～S 7 により目標回転速度となるまで回転速度に応じてモータコイル 28 b a の電流を増減する。すなわち、ステップ S 5 でモータロータ 28 a の回転速度が目標回転速度より小さいと判定すると、電流を増加し

て回転速度を上げ（ステップS 6）、ステップS 5でモータロータ 28 a の回転速度が目標回転速度より大きいと判定すると、電流を減少させて回転速度を下げる（ステップS 7）。

[0058] ステップS 4において、速度センサ 45の出力するモータロータ 28 a の回転速度が目標回転速度になったと判定すると、次に記憶部に記憶させた電流値 I_0 に対して現在のモータ電流 I が減ったか否かを判定する（ステップS 8）。このステップ8で、現在のモータ電流 I が記憶部に記憶させた電流値 I_0 に対して減ったと判定した場合、現在の電流値 I を記憶部に記憶させるステップS 2に戻って、ステップS 3～S 8のタイミング調整処理を繰り返すことにより、モータ電流がさらに減るかを確認する。

[0059] 一方、ステップS 8で、現在のモータ電流 I が記憶部に記憶させた電流値 I_0 に対して減っていないと判定した場合、現在のモータ電流 I が記憶部に記憶させた電流値 I_0 に対して増えたか否かを判定する（ステップS 9）。このステップS 9で、現在のモータ電流 I が記憶部に記憶させた電流値 I_0 に対して増えていないと判定した場合、電圧印加のタイミング微調整を行って電流値の変化がないことから、最良の電圧印加タイミングが得られる可能性が有るものと判断して、この後、ステップ2～S 9によるタイミング調整の処理を繰り返す。

[0060] ステップS 9において、現在のモータ電流 I が記憶部に記憶させた電流値 I_0 に対して増えたと判定した場合、その増加が前回の増加に続く単調な増加であるか否かを判定する（ステップS 10）。ステップS 10により単調な増加と判定した場合、電圧印加のタイミング調整の方向が逆であると判断して、タイミング調整の前記単位時間 ΔT を正逆反対の値 $-\Delta T$ に変更した後（ステップS 11）、ステップS 2～S 10の処理を繰り返して電圧印加のタイミングを逆方向に調整する。

[0061] 一方、ステップS 10において、モータ電流 I が前回の減少から今回の増加に転じたものと判定した場合、電圧印加のタイミングが最良点を通過したものと判断して、現在の電圧印加のタイミング時刻 T を一つ前の状態である

単位時間 ΔT の加算前の状態($T - \Delta T$)に戻す(ステップS 12)。このようにタイミング調整することにより、少ないモータ電流で所定の目標回転速度が得られる電圧印加のタイミングを求めることができる。

[0062] なお、上記処理によるモータコイル28baへの電圧印加のタイミング調整では、位置センサ43、電流センサ44、速度センサ45の出力を用いたが、回転速度が低い場合には、モータコイル28baの電流の遅れの影響が小さいので、電流センサ44の出力を用いずに、位置センサ43の出力だけを用いて電圧印加のタイミングを決定するほうが好ましい。

[0063] この構成のタービンユニット5は、例えば空気サイクル冷凍冷却システムに適用されて、冷却媒体となる空気を後段の熱交換器(ここでは図示せず)により効率良く熱交換できるように、コンプレッサ6で圧縮して温度上昇させ、さらに後段の前記熱交換器で冷却された空気を、膨張タービン7により、目標温度、例えば $-30^{\circ}\text{C} \sim -60^{\circ}\text{C}$ 程度の極低温まで断熱膨張により冷却して排出するように使用される。

このような使用例において、このタービンユニット5は、コンプレッサ翼車6aおよびタービン翼車7aが、前記スラスト板13aとモータロータ28aと共通の主軸13に嵌合し、モータ28の動力とタービン翼車7aで発生した動力のどちらか一方または両方によりコンプレッサ翼車6aを駆動するものとしている。このため、各翼車6a、7aの適切な隙間d1、d2を保って主軸13の安定した高速回転が得られ、かつ軸受15、16の長期耐久性の向上、寿命の向上が得られる。

[0064] すなわち、タービンユニット5の圧縮、膨張の効率を確保するためには、各翼車6a、7aとハウジング6b、7bとの隙間d1、d2を微小に保つ必要がある。例えば、このタービンユニット5を空気サイクル冷凍冷却システムに適用する場合には、この効率確保が重要となる。これに対して、主軸13を転がり形式の軸受15、16により支持するため、転がり軸受の持つアキシャル方向位置の規制機能により、主軸13のアキシャル方向位置がある程度規制され、各翼車6a、7aとハウジング6b、7bとの微小隙間d

1, d 2 を一定に保つことができる。

[0065] しかし、タービンユニット5の主軸13には、各翼車6a, 7aに作用する空気の圧力でスラスト力がかかる。また、空気冷却システムで使用するタービンユニット5では、1分間に例えば8万～10万回転程度の非常に高速の回転となる。そのため、主軸13を回転支持する転がり軸受15, 16に上記スラスト力が作用すると、軸受15, 16の長期耐久性が低下する。

この実施形態は、上記スラスト力を電磁石17で支持するため、非接触でトルクの増大を抑えながら、主軸13の支持用の転がり軸受15, 16に作用するスラスト力を軽減することができる。この場合に、主軸13に作用するスラスト力を検出するセンサ18と、このセンサ18の出力に応じて前記電磁石17による支持力を制御する磁気軸受用コントローラ19とを設けたため、転がり軸受15, 16を、その軸受仕様に応じてスラスト力に対し最適な状態で使用することができる。

特に、軸方向に並べて主軸13に設けられた2つのスラスト板13a, 13bの軸方向外側に2つの電磁石17を配置して磁気軸受ユニットを構成すると共に、前記両スラスト板13a, 13bで挟まれる位置にアキシアルギャップ型のモータ28を配置してモータユニットを構成することにより、磁気軸受ユニットとモータユニットをコンパクトな一体構造としているため、主軸53の軸長を短くでき、それだけ主軸13の固有振動数が高くなって、主軸13を高速回転させることができる。

[0066] また、このモーター一体型の磁気軸受装置では、モータ用コントローラ38の位相調整回路38により、モータロータ28aの永久磁石28aaがモータステータ28bのモータコイル28baを通過する毎にモータコイル28baへ電圧を印加する動作において、モータロータ28aとモータステータ28b間の角度位相を検出する位置センサ43の出力、モータステータ28bのモータコイル28baに流れる電流を検出する電流センサ44の出力、およびモータロータ28aの回転速度を検出する速度センサ45の出力を用いて、図10にフロー図で示す所定の処理により前記電圧印加のタイミング

を決定するものとしているので、最小のモータ電流で目標回転速度が得られる電圧印加タイミングとすることができ、これによりモータ 28 の消費電力を低減できる。

[0067] 以上のとおり、図面を参照しながら好適な実施形態を説明したが、当業者であれば、本件明細書をみて、自明な範囲内で種々の変更および修正を容易に想定するであろう。たとえば、速度センサの代わりに、回転速度検出手段を設けること等である。

したがって、そのような変更および修正は、添付クレームから定まるこの発明の範囲内のものと解釈される。

請求の範囲

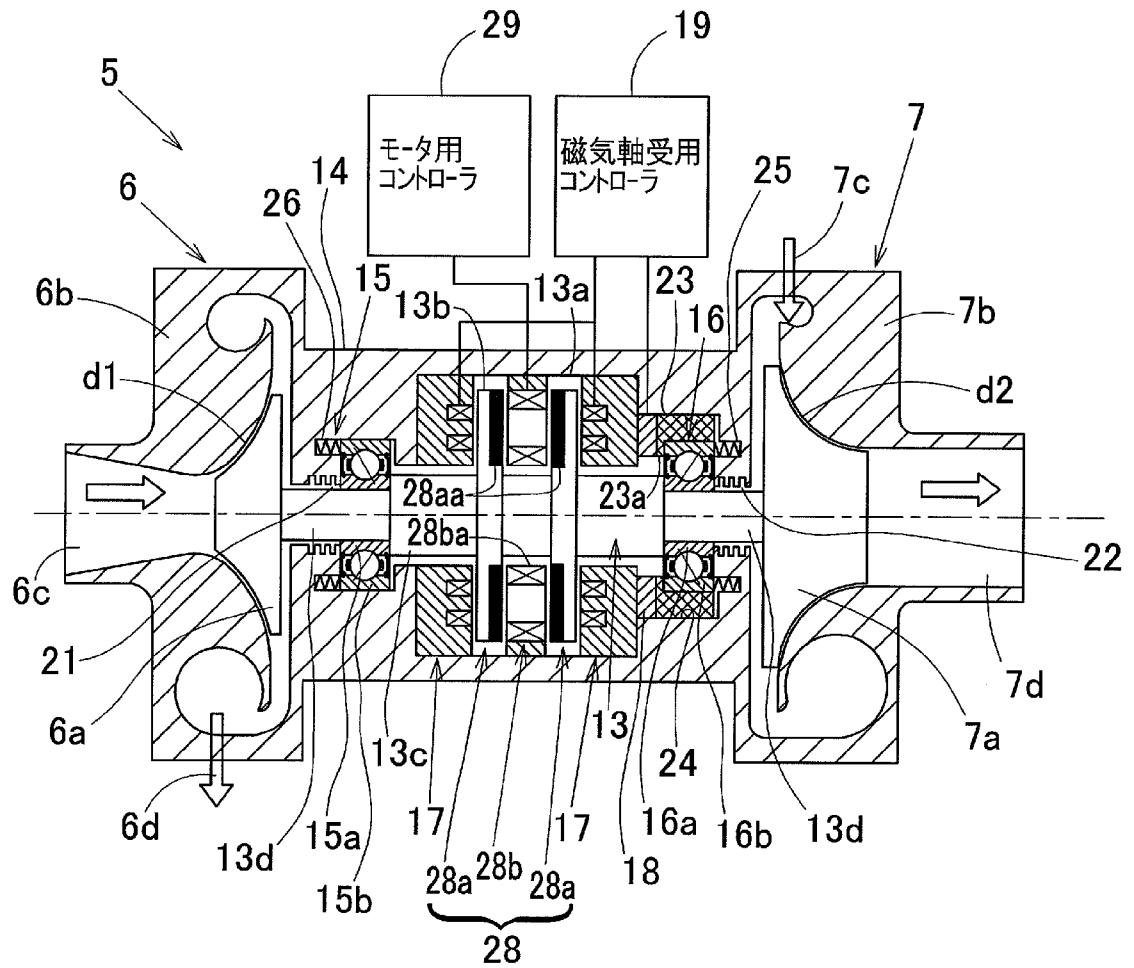
- [1] 転がり軸受と磁気軸受を併用し、転がり軸受がラジアル負荷を支持し、磁気軸受がアキシアル負荷と軸受予圧のどちらか一方または両方を支持し、
- 前記磁気軸受を構成する電磁石は主軸に設けられた強磁性体からなるフランジ状のスラスト板に非接触で対向するように、スピンドルハウジングに取り付けられており、
- アキシアルギャップモータのモーターロータが、前記スラスト板とこのスラスト板に周方向に等ピッチで設けられた複数個の永久磁石とで構成され、前記モーターロータと対向してモータコイルを有するモータステータが前記スピンドルハウジングに設置されたモーター一体型の磁気軸受装置であって、
- 前記モーターロータと前記モータステータ間の角度位相を検出する位置センサと、モーターロータの設定された、または検出された回転数に応じ、モータコイルへの電圧印加のタイミングを決定して、前記モーターロータの磁石がモータコイルを通過する毎にモータコイルへ電圧を印加するモータ駆動電流位相調整手段とを有し、
- 前記モータ駆動電流位相調整手段は、モーターロータが前記回転数で回転する状態で、前記位置センサと、モーターロータの回転速度を検出する速度センサと、前記モータコイルに流れる電流を検出する電流センサのうち少なくとも位置センサに基づく所定の処理により、前記電圧印加の開始のタイミングを決定するものとしたモーター一体型の磁気軸受装置。
- [2] 請求項 1 において、前記モータ駆動電流位相調整手段は、モーターロータが前記回転数で回転する状態で、モーターロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過するときにモータコイルの電流値が最大となるように前記電圧印加の開始のタイミングを決定するものとしたモーター一体型の磁気軸受装置。
- [3] 請求項 2 において、モータ駆動電流位相調整手段は、複数の設定回転数に切り換え可能とされ、切り換えられた各設定回転数毎に、モーターロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過する

ときにモータコイルの電流値が最大となるように前記電流印加の開始のタイミングを決定可能なものとしたモーター一体型の磁気軸受装置。

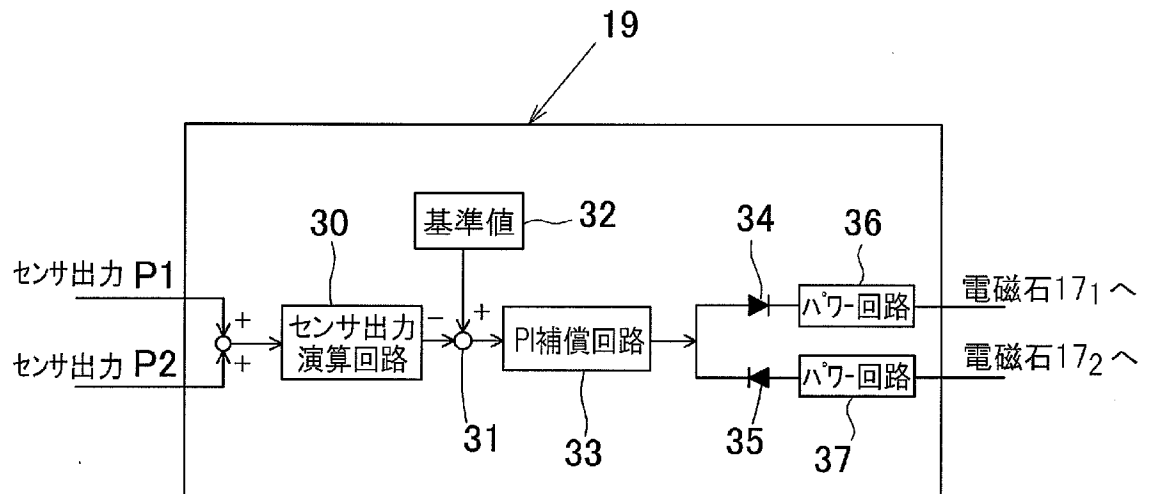
- [4] 請求項 2 において、前記センサは、前記モータロータの前記永久磁石の通過を検出するものであり、前記モータ駆動電流位相調整手段は、前記センサが前記永久磁石の通過を検出してからセンサ信号を出力するまでの時間を設定した出力早出し時間設定手段を有し、上記センサ信号に応答して電流印加を開始させるものとしたモーター一体型の磁気軸受装置。
- [5] 請求項 2 において、前記センサは、前記モータロータの前記永久磁石の通過を検出するものであり、前記モータ駆動電流位相調整手段は、前記センサの出力するセンサ信号に応答して電流印加を開始させるものとし、前記センサの取付位置を、回転により、モータロータの永久磁石の磁極切替り位置がモータステータの発生する磁束の中心を通過する位置に達するよりも手前で前記永久磁石を検出する位置としたモーター一体型の磁気軸受装置。
- [6] 請求項 2 において、コンプレッサ側翼車およびタービン側翼車が、前記主軸に取付けられ、モータ動力とタービン側翼車で発生した動力のどちらか一方または両方により、コンプレッサ側翼車を駆動させる、圧縮膨張タービンシステムに適用されたものであるモーター一体型の磁気軸受装置。
- [7] 請求項 1 において、前記モータ駆動電流位相調整手段は、前記電圧印加のタイミングを、前記位置センサの出力と前記速度センサの出力と前記電流センサの出力とによって所定の処理により決定するものとしたモーター一体型の磁気軸受装置。
- [8] 請求項 7 において、モータロータの回転速度を検出する手段として、前記速度センサの代わりに、前記位置センサの出力から計算して回転速度を求める手段を設けたことを特徴とするモーター一体型の磁気軸受装置。
- [9] 請求項 7 において、前記モータ駆動電流位相調整手段は、設定したモータロータ回転数以下では、モータコイルへの電圧印加のタイミングを、電流センサの出力を用いずに、位置センサの出力によって決定するものとしたモーター一体型の磁気軸受装置。

- [10] 請求項 7 において、前記所定の処理は、
電圧印加のタイミングを進める単位時間 (ΔT) を設定する手順、
電流センサから検出された現在のモータ電流の電流値を記憶する手順、
現在の電圧印加のタイミング時刻 (T) に対して単位時間 (ΔT) だけ加算する手順、
速度センサの出力するモータロータの回転速度が目標回転速度であるか否かを判定し、目標回転速度でないときは、目標回転速度となるまで回転速度に応じてモータコイルの電流を増減する手順、
前記判定の過程で目標回転速度になったときに、前記の記憶した電流値に対してモータ電流が減った場合は、前記の現在の電流値を記憶する手順に戻ってその減った電流値を記憶する手順、
前記判定の過程で前記目標回転速度になったときに、前記の記憶した電流値に対してモータ電流が増えた場合は、前記単位時間 (ΔT) を正逆反対の値 ($-\Delta T$) に変更した後、前記の現在の電流値を記憶する手順に戻ってその増えた電流値を記憶する手順、
前記判定の過程で前記目標回転速度になったときに、前記の記憶した電流値に対してモータ電流の変化がない場合は、現在の電圧印加のタイミング時刻 (T) を一つ前の状態である単位時間 (ΔT) の加算前の状態 ($T = T - \Delta T$) に戻す手順、
を含むモーター一体型の磁気軸受装置。
- [11] 請求項 7 において、前記主軸は、タービン翼車およびコンプレッサ翼車が取付けられるものであるモーター一体型の磁気軸受装置。

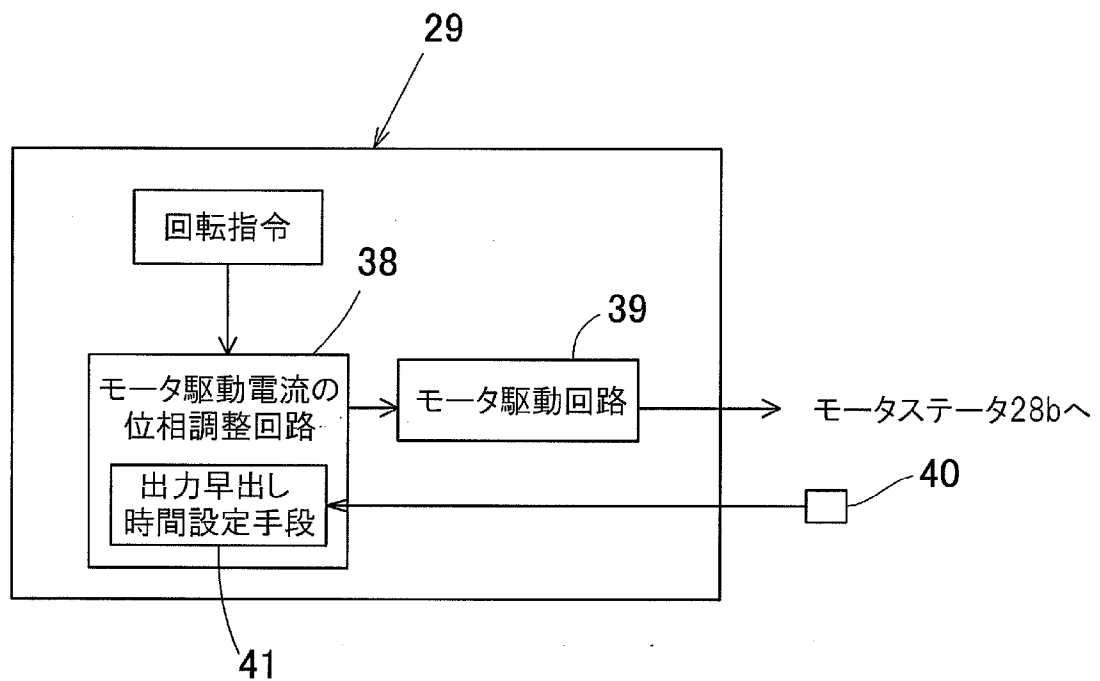
[図1]



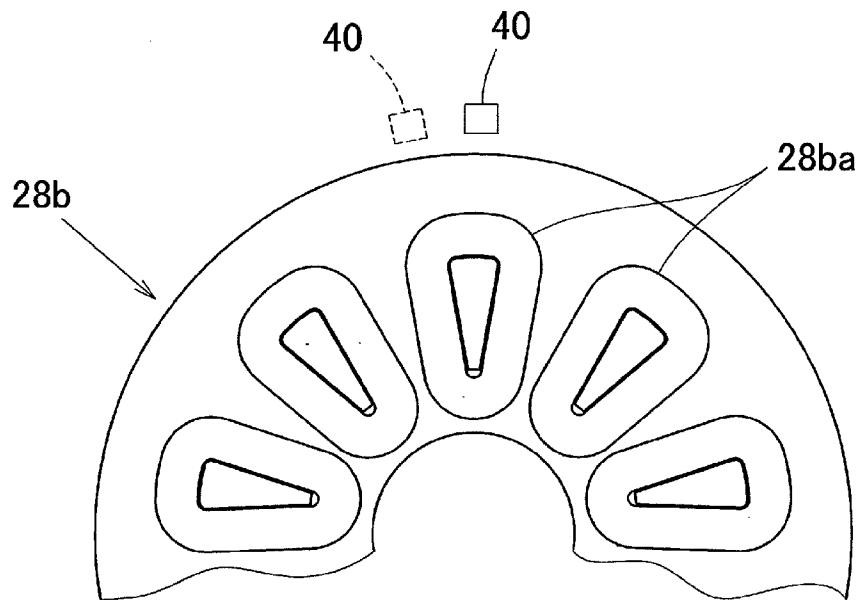
[図2]



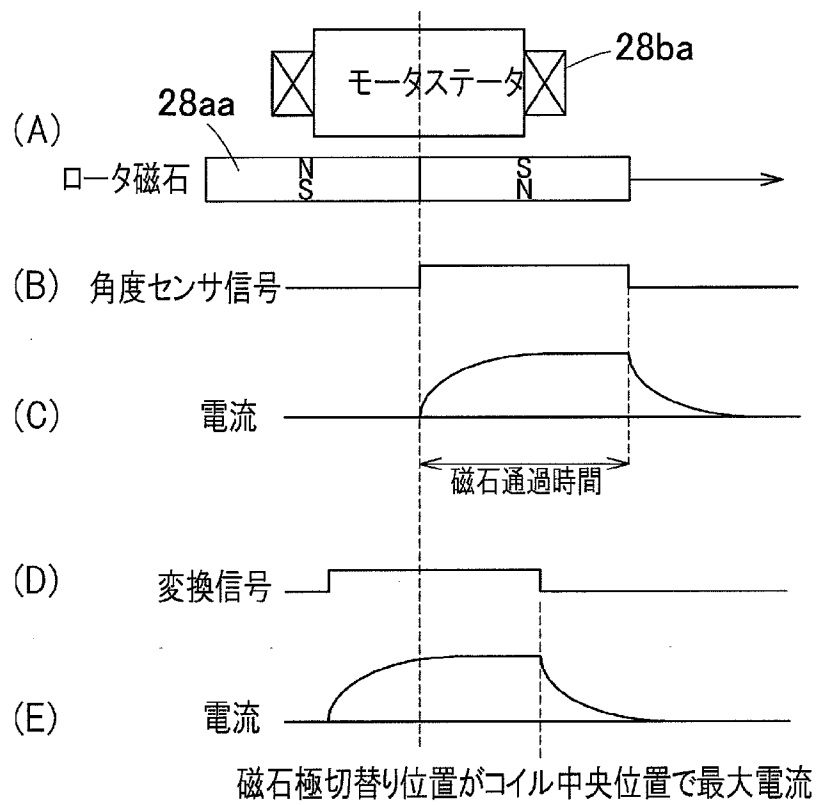
[図3]



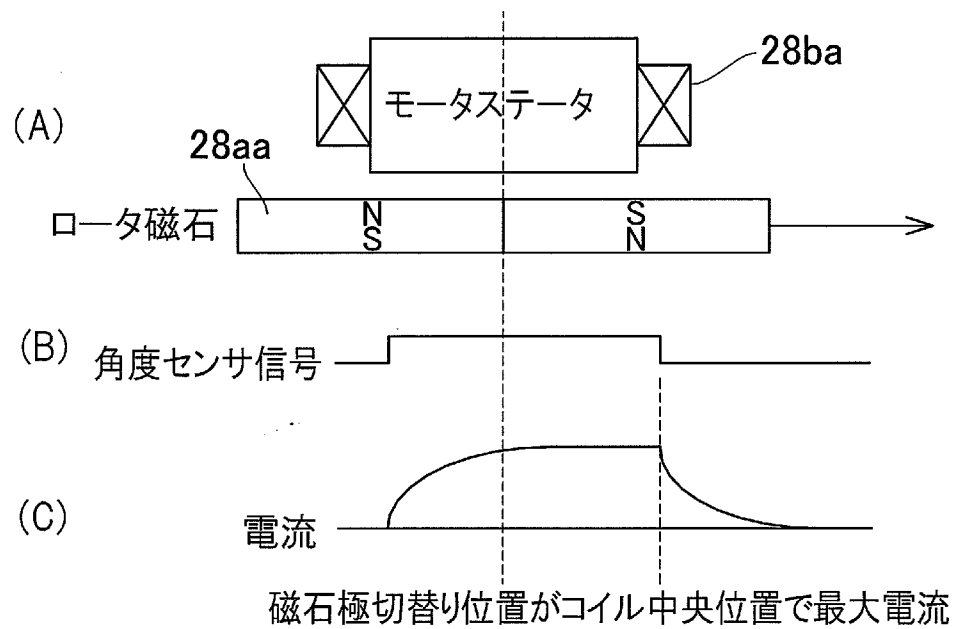
[図4]



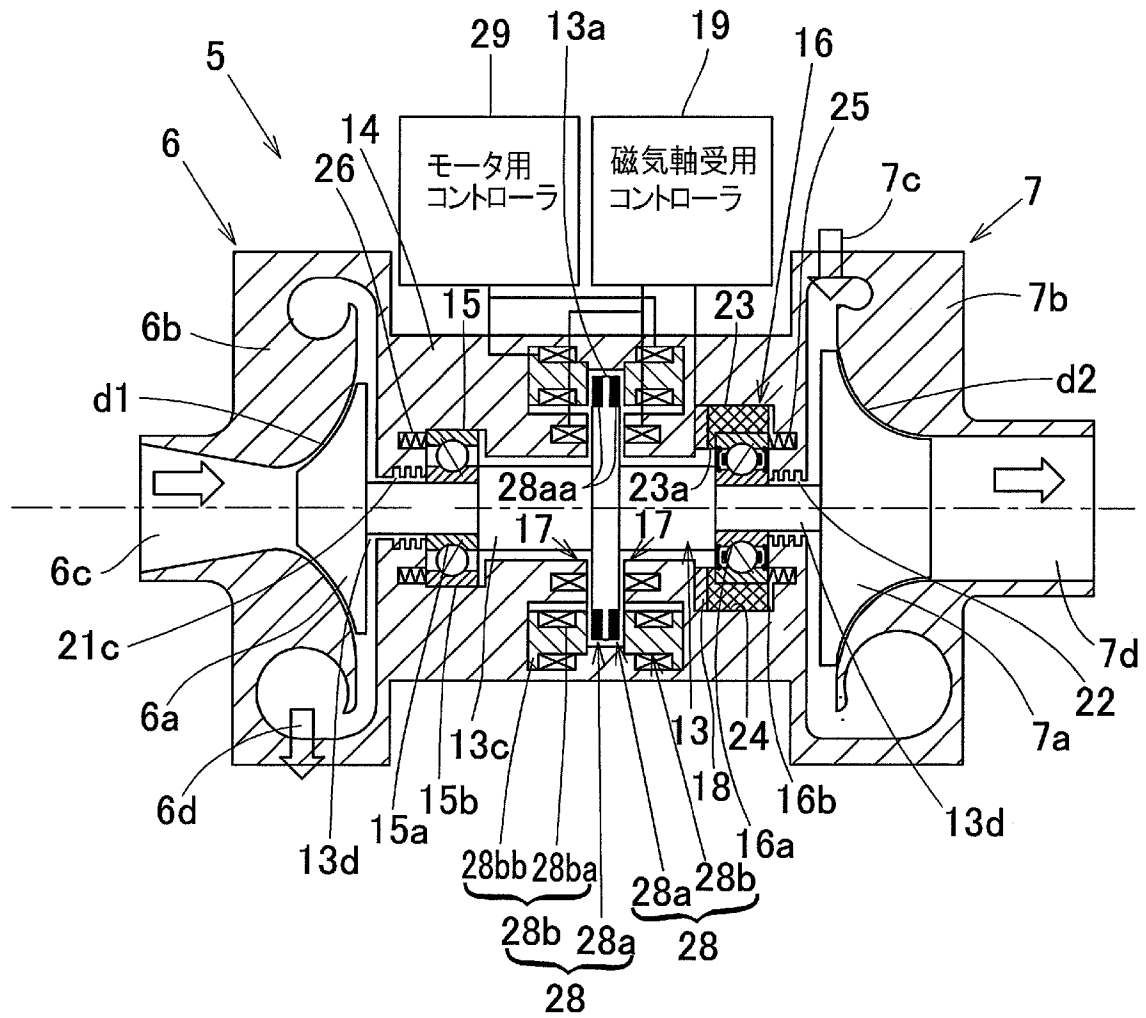
[図5]



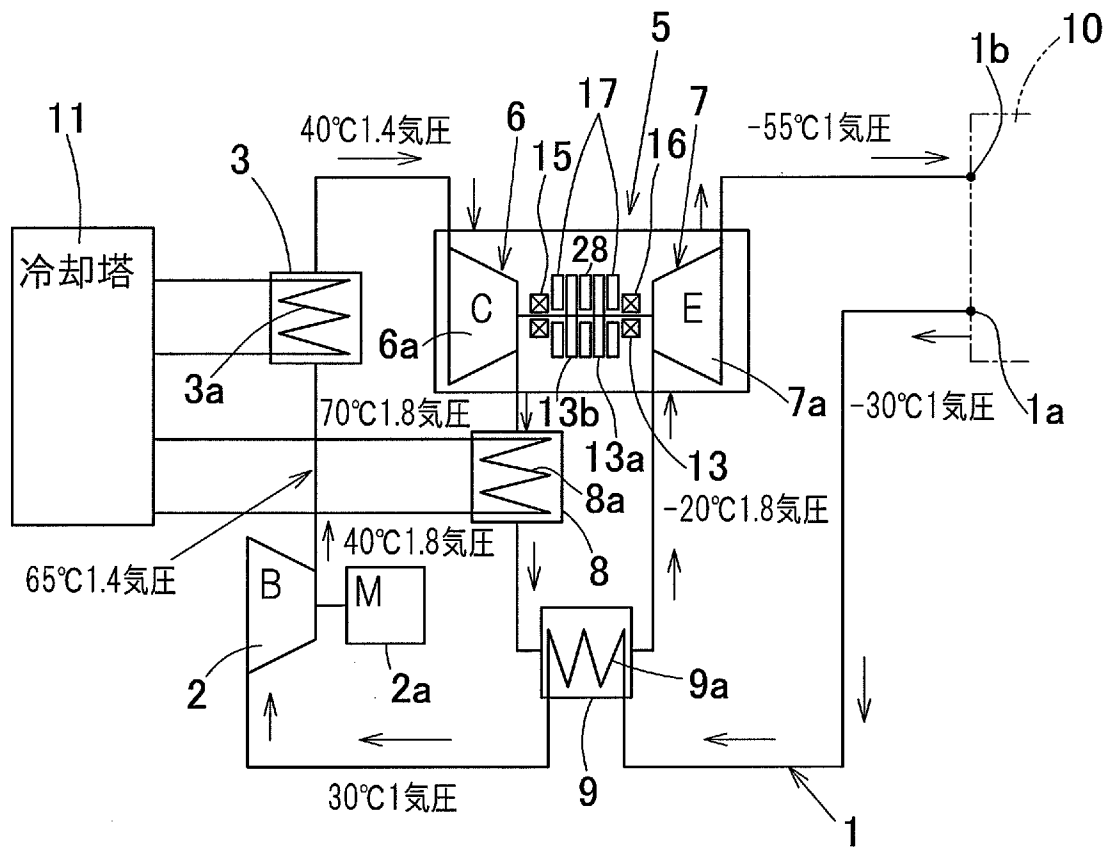
[図6]



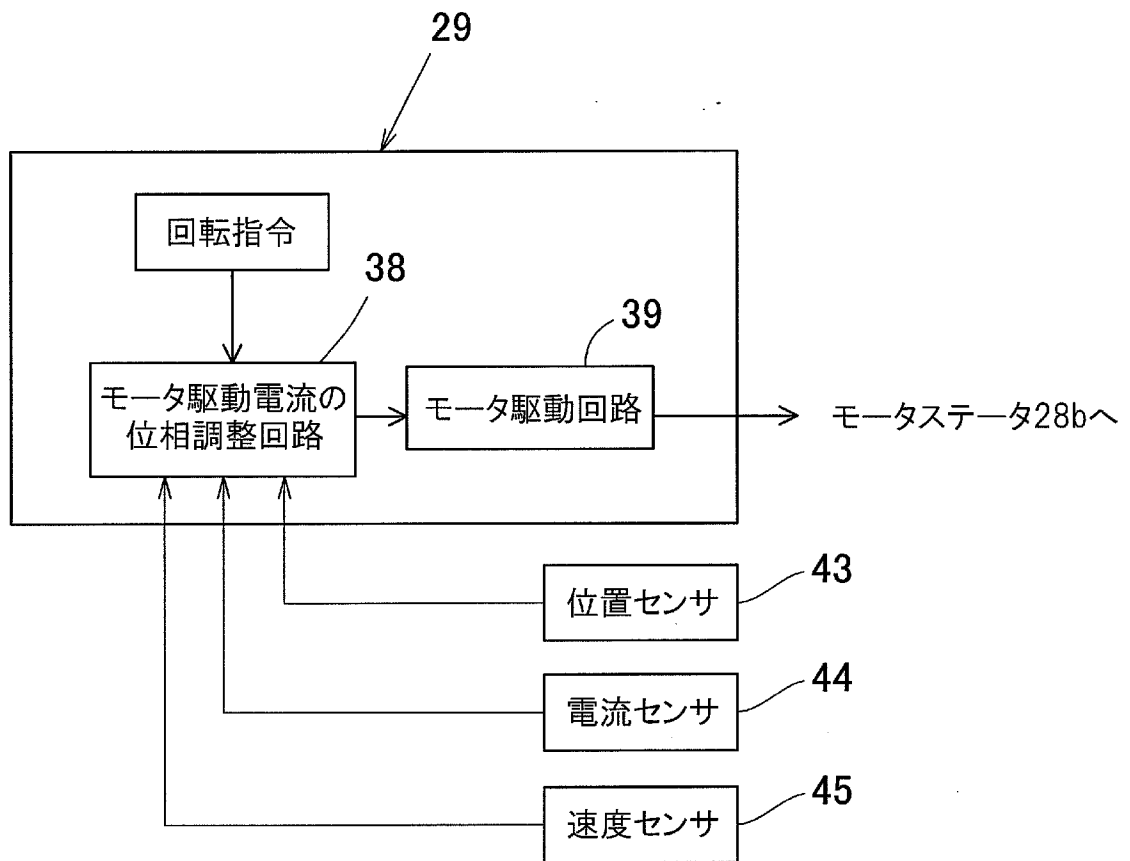
[図7]



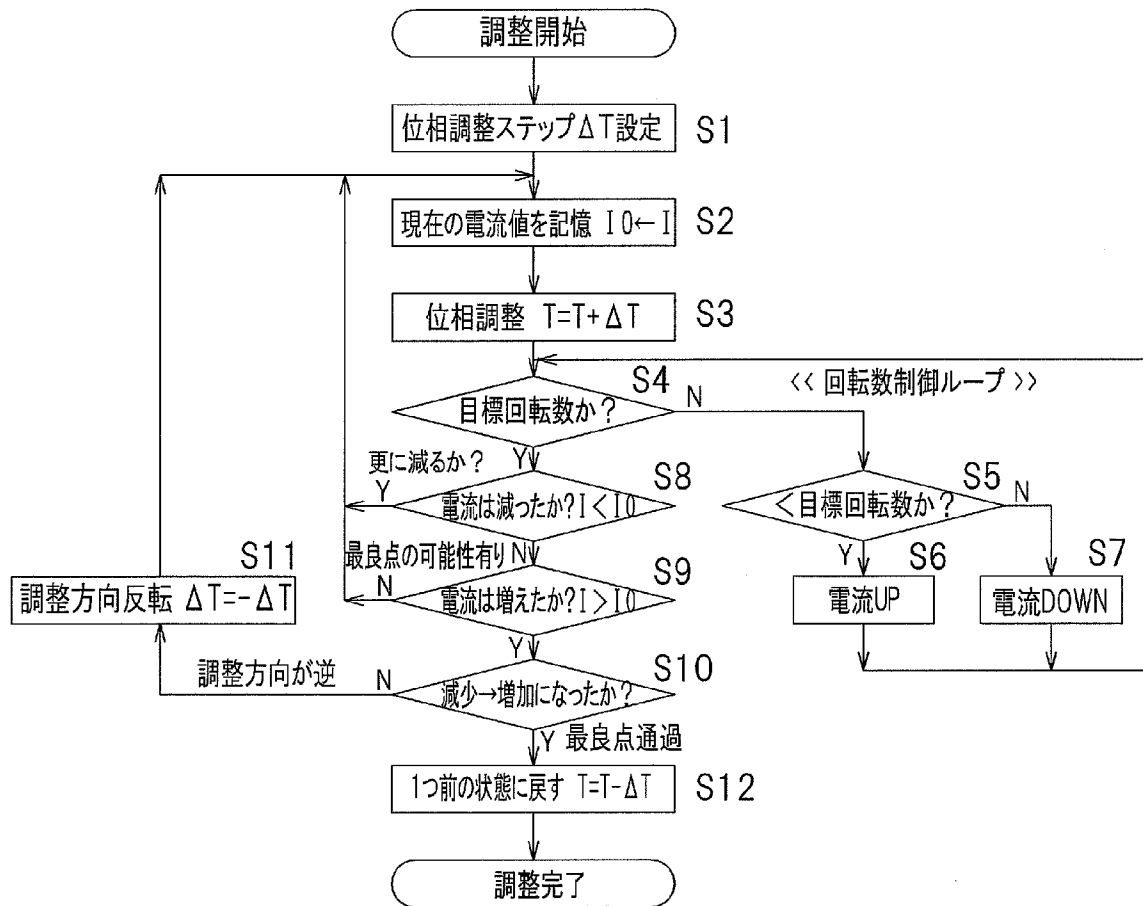
[図8]



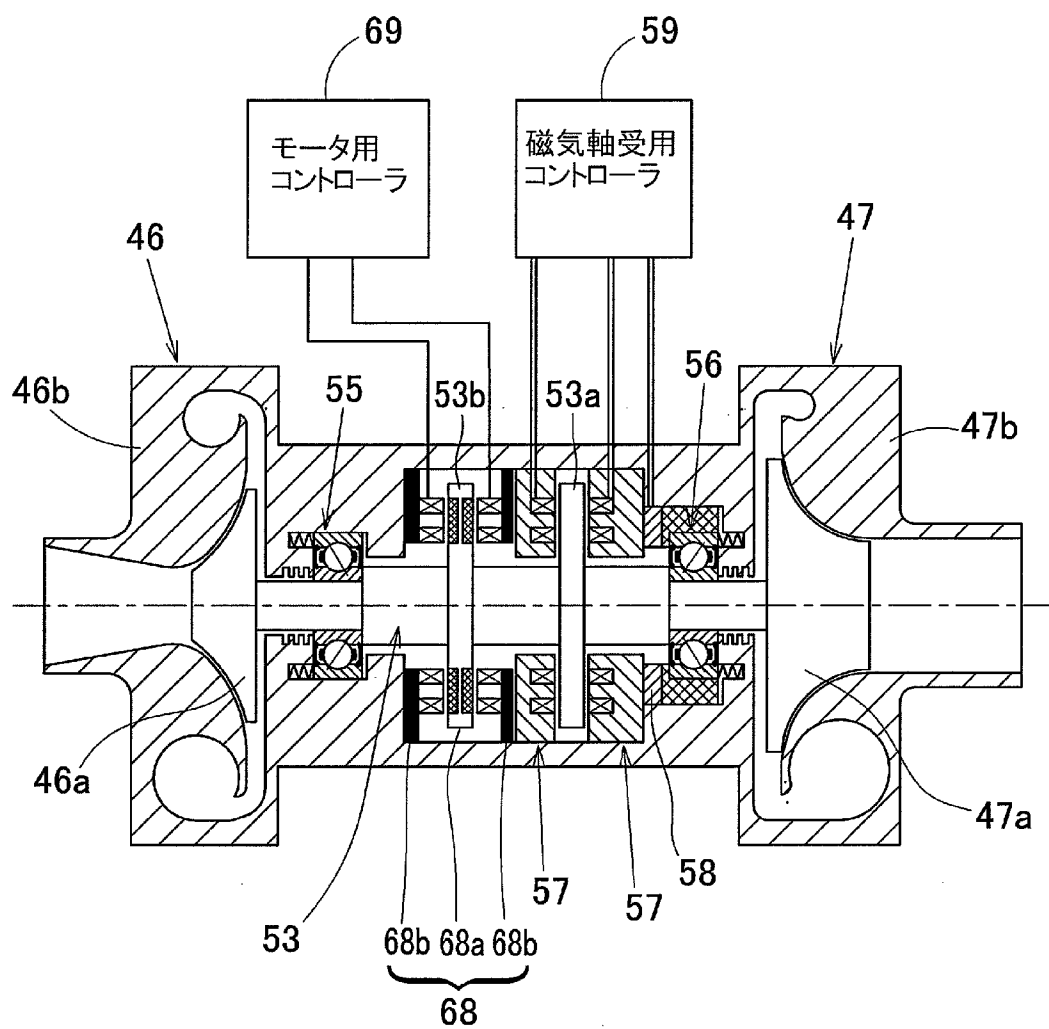
[図9]



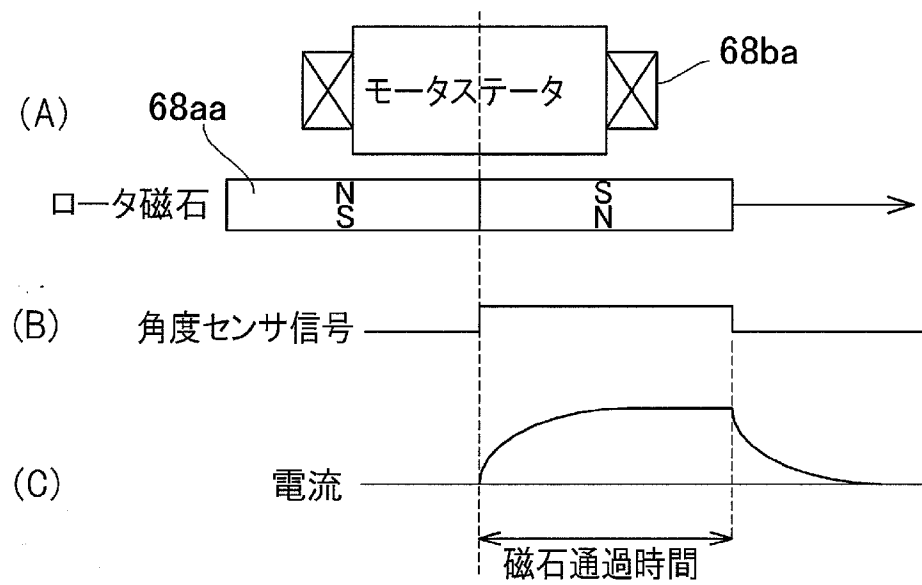
[図10]



[図11]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2007/000809

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P6/08(2006.01)i, F01D15/08(2006.01)i, F01D25/16(2006.01)i,
F04D25/04(2006.01)i, F04D29/00(2006.01)i, F04D29/056(2006.01)i,
F04D29/058(2006.01)i, F16C32/00(2006.01)i, F16C32/04(2006.01)i,
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P6/08, F01D15/08, F01D25/16, F04D25/04, F04D29/00, F04D29/056,
F04D29/058, F16C32/00, F16C32/04, H02K7/08, H02K7/09, H02K7/14

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2007
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2007	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2007

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 3-289391 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 19 December, 1991 (19.12.91), Page 3, lower left column, line 5 to page 4, upper right column, line 13; Figs. 1, 2 (Family: none)	1-11
Y	JP 11-218130 A (Tadashi FUKAO), 10 August, 1999 (10.08.99), Par. Nos. [0015] to [0017], [0042]; Figs. 1, 4 (Family: none)	1-11
Y	JP 7-91760 A (Hitachi, Ltd.), 04 April, 1995 (04.04.95), Par. No. [0001]; Fig. 1 (Family: none)	6, 11

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
11 October, 2007 (11.10.07)

Date of mailing of the international search report
23 October, 2007 (23.10.07)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2007/000809

Continuation of A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
(International Patent Classification (IPC))

H02K7/08(2006.01)i, H02K7/09(2006.01)i, H02K7/14(2006.01)i

(According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC)

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））			
Int.Cl. H02P6/08(2006.01)i, F01D15/08(2006.01)i, F01D25/16(2006.01)i, F04D25/04(2006.01)i, F04D29/00(2006.01)i, F04D29/056(2006.01)i, F04D29/058(2006.01)i, F16C32/00(2006.01)i, F16C32/04(2006.01)i, H02K7/08(2006.01)i, H02K7/09(2006.01)i, H02K7/14(2006.01)i			
B. 調査を行った分野			
調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））			
Int.Cl. H02P6/08, F01D15/08, F01D25/16, F04D25/04, F04D29/00, F04D29/056, F04D29/058, F16C32/00, F16C32/04, H02K7/08, H02K7/09, H02K7/14			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの			
日本国実用新案公報 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 日本国公開実用新案公報 1 9 7 1 - 2 0 0 7 年 日本国実用新案登録公報 1 9 9 6 - 2 0 0 7 年 日本国登録実用新案公報 1 9 9 4 - 2 0 0 7 年			
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号	
Y	JP 3-289391 A（松下電器産業株式会社）1991.12.19, 第3ページ左下欄第5行－第4ページ右上欄第13行, 第1図及び第2図（ファミリーなし）	1-11	
Y	JP 11-218130 A（深尾 正）1999.08.10, 段落【0015】－【0017】、【0042】、図1及び図4（ファミリーなし）	1-11	
Y	JP 7-91760 A（株式会社日立製作所）1995.04.04, 【0001】及び図1（ファミリーなし）	6, 11	
☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー		の日の後に公表された文献	
「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの		「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの	
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの		「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの	
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）		「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの	
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献		「&」同一パテントファミリー文献	
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願			
国際調査を完了した日 1 1 . 1 0 . 2 0 0 7		国際調査報告の発送日 2 3 . 1 0 . 2 0 0 7	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / J P） 郵便番号1 0 0 - 8 9 1 5 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官（権限のある職員） 天坂 康種	3 V 3 5 1 9
		電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1	内線 3 3 5 8