

## 論文内容の要旨

磁気浮上を用いた駆動機構のうち、直線駆動系はリニアモータとして、早くから多くの方式が実用化されている。一方、回転駆動系は研究が行われているものの、実用化された例が非常に少ない。磁気浮上を用いた回転駆動系として、ベアリングレスモータがあるが、多くの研究では永久磁石と電磁石またはコイルを組み合わせた構成となっている。強い磁力を得るため、一般的に希土類の永久磁石が使われるが、キュリー温度が低いため使用可能温度が低いという問題がある。また、永久磁石に外部から磁界を与えると、減磁するという問題もある。永久磁石を用いず電磁石のみによる構成とすることで、これらの問題が生じないベアリングレスモータを実現することが可能となると考える。

本研究では、固定子、回転子ともに電磁石で構成されるベアリングレスモータを提案する。回転子にエネルギーを供給する方法、固定子・回転子の構造や形状、浮上と回転制御についての提案を行うとともに、シミュレーションおよび実験により提案内容を検証し、ベアリングレスモータを具現化するにあたり、提案内容に問題がないことを示す。

まず、FBS (Function Breakdown Structure) 手法を用いて機能分解を行い、ベアリングレスモータの構成部品と、個々の構成部品にもたせる機能、課題とを明らかにする。最終目的は「回転子の浮上と回転」であり、機能として「浮上」「回転」の2つが必要となる。構成部品に着目すると、回転系モータであることから、回転子および固定子が必然的に構成要素となる。これらからさらに具現化するためのキーワードを抽出する。回転子を電磁石として機能させる必要があることから、「回転子への電力伝送」が1つ目のキーワードとなる。一般的に、永久磁石と電磁石とが同じ体積の場合、電磁石は永久磁石に比べ、小さな磁力しか発生することができないため、「小さな磁力を構造や形状により補う」ことが2つ目のキーワードとなる。そして、3つ目のキーワードは、回転子の安定な浮上とスムーズな回転を行うための「浮上と回転に必要な複数の電源」となる。

次に、整流コイルと呼んでいる、回転子コイルに電力を伝送するための励磁電流を固定子コイルに印可し、回転子コイルに受電と磁石の機能を持たせた方式について説明する。この方式では、回転子に必要なコイルは1種類のみであり、構造および構成を簡単にできる利点がある。しかし、1つのコイルに2つの機能を持たせるために次の問題が生じる。ダイオードを用いて回転子の磁極を固定する必要があるが、固定子からの磁束の向きに沿うように回転子の磁極を固定したときに比べ、固定子からの磁束の向きに逆らう向きに回転子の磁極を固定すると、回転子・固定子間で発生する力が小さくなる。従って、1つの棒磁石（ここでは回転子）の着磁方向両端での磁力が異なることになる。これは、一般的な磁気解析ソフトを用いても、正しく計算できない事象であり、計画段階での実験結果から値を得られていない時点で、どのように推定値を得るのかも問題となる。

1つ目のキーワードである「回転子への電力伝送」に関して、前記した方法を用いての電力伝送と、電力伝送専用コイルを用いての電力伝送との比較を行う。整流コイルの電力伝送の原理はトランス方式であり、回転子で受け取ることができる電力の算出手順、効率について説明する。固定子・回転子に空隙があることから、結合係数が一般的な電力トランスの約1から0.6程度に低下するため、回転子コイルで受け取ることができる電力は、固定子コイルから送った電力の0.6程度となる。さらに、半波整流を行うため回転子で受け取った電力の半分しか、回転子を電磁石にするために使うことができない。従って、固定子コイルに印可した電力の30%のみが回転子を電磁石とするために使われることになる。また、固定子鉄心および回転子鉄心が磁気飽和しないように、励磁電流・浮上電流・回転電流を調整しなければならない問題もあり、回転子に強い磁力を発生させることが難しい。次に、電力伝送専用コイルについて説明する。コイルの巻き方により、占有体積や伝送効率に違いがある。ヘリカル巻きは軸方向に長くなることから、回転子厚みよりもコイルの長さが必要となる。軸方向に短いコイルの巻き方として、スパイラル巻きとスパイダー巻きがある。同一面積にコイルを巻くとすると、スパイダー巻きはスパイラル巻きよりも、コイルを多く巻くことが出来る。従って、コイル間隙が数mmと小さなとき、スパイダー巻きはスパイラル巻きよりも、効率が良く多くの電力を伝送することが出来る。また、コンデンサを使用した共振を用いた電磁誘導（磁界共鳴）を使用することで、伝送効率が80%~90%程度となる。スパイダー巻きと磁界共鳴を組み合わせると、コイル間隙が数mmと小さなとき、伝送効率がコイル間隙の違いにより、ほとんど変化しないという利点がある。これらより、電力伝送専用コイルを用いる方式が、トランス方式よりも部品点数が増加するものの、より多くの電力を安定して供給できることになり、回転子を強い電磁石として機能させるために、

優れていることになる。

次に、2つめのキーワードである「小さな磁力を構造や形状により補う」に関して、モータの構造と形状の検討を行う。固定子、回転子の歯にタオレをつけることにより、Z軸方向（浮上方向）の力を発生させることを、既にFBSにより発案している。歯のタオレ角度を決定する前にまず、全体構造の検討を行う。すでに、電力伝送専用コイル、固定子および回転子を、モータの主たる構成品とすることを決めている。これらの配置による質量の違いを考えると、中心から、電力伝送専用コイル、回転子、固定子とすることで、空間的な無駄がなく、浮上させる構成品の質量を小さくできる。また、構造を工夫することにより、制御しなければならない軸を少なくすることができる。そこで、X軸・Y軸の2軸位置制御を行うことができるような構造およびコイル配置とする。また、磁束の流れがスムーズであることが、小さな磁力を有効に利用するために必要である。これらを勘案し、1層だけでは小さなZ軸方向の磁力を、2層構造とすることで総磁力を2倍に増やすこととした。電磁石で発生する力は、鉄心が同一寸法であれば、コイルの巻き数が多いほど大きくなるが、それに伴い体積も大きくなってしまふ、鉄心が磁気飽和した場合にはコイル電流を増やしても力の増加率が小さくなる、という問題が発生する。そこで、なるべく小さな電磁石で大きな磁力を得るため、電磁石の数を増やすことにより、合計での力を大きくすることを考える。これらより、まず仮のモータ寸法を決め、固定子・回転子の歯の数による力の違いを検討した。制御を行いやすくなる歯の数となるようにするとすれば、固定子・回転子の歯の数の比率は、2:3や3:4とすることが考えられる。仮の寸法から回転子の質量を計算し、回転子の歯1つ当たりが発生しなければならない力を求め、この条件を満たすため、固定子24歯、回転子32歯と仮に決定し、さらに歯間で生じるもれ磁束を考慮し、歯の幅を仮に決定した。決定した仮の条件により、コイルの巻き数と電流値を決め、シミュレーションにより、歯のタオレ角度と発生する力の関係を求めた。タオレ角度が約7度以上であれば、浮上に必要な力を発生できる結果となったが、一方で、Z軸変位が大きくなると復元力が不足し発散してしまう、ということも分かった。次に、回転子が回転している状態では、歯端部の形状により固定子・回転子間に働く力が変化することが知られており、力の変動が小さくなるような歯端部の形状を求める。加工を考慮し歯端部にテーパをつけることにより対応することとし、シミュレーションによりテーパ寸法を変更し、磁石間の力の変動を求めた。テーパを深さ0.5mm、長さ1mmとすることで、力の変動を小さくできる。次に、固定子コイルの巻き方について3種類での比較を行う。集中巻きしたコイルを並べると、端部から遠いコイルにより発生する磁力が小さくなる。上層、下層の2層構造とすると、上側層のコイルにより発生する磁力が小さくなる。2つのコイルを平行に巻くと、どちらのコイルからも同じ磁力を発生することができる。従って、固定子に巻くコイルは、平行巻きとし、極力巻き長さが短くなるようにする。ここまでで説明した事柄を組み合わせることにより、2つ目のキーワードを具現化することとした。

3つ目のキーワードである「浮上と回転に必要な複数の電源」をさらに分解する。まず、回転子に電力を供給するための交流電源が必要である。回転子が初期浮上位置まで浮上すれば、受動的にZ軸方向浮上位置が制御されるため、初期浮上位置までの制御を行えばよい。一方、XY平面で回転子の位置制御を行わない場合、回転子中心位置に変位があると、力の不均衡により回転子が固定子に吸着される。位置制御は回転子のXY変位を、X軸・Y軸のセンサにより検出し、位置修正を行う方法とする。回転子が静止位置から初期浮上位置までの浮上中にも位置制御を行う必要があることから、固定子には回転子の浮上と位置を制御できる機能を持たせればよい。3組の対向したコイル群を120度ごとに配置し、センサからの2軸信号を3軸信号に変換し、この信号を用いて各コイル群の電流を制御し、回転子に磁力ベクトルの向きと大きさを変化することで、回転子の浮上と位置の制御を行う。次に、回転制御について考える。回転子の1層が、モノポーラとなるように磁極を固定すれば、ある固定子が強い磁力を発生するように電流を与えることで、その固定子の歯にもっとも近い位置にある回転子の歯との間で吸引力が発生する。Z軸対称位置の固定子コイルにも同じ電流を与えると、半径方向逆方向の力が発生し、これらの固定子による半径方向の力は相殺され、回転方向のみの力が回転子に加わることになる。これらより、3相電流を用いて、固定子に与える電流を順次移動させることにより、回転子を回転させることとする。

共振を用いた電磁誘導による電力伝送と歯のタオレを特徴とする、永久磁石を使用しない新しい方式によるベアリングレスモータを提案した。提案したモータを具現化するための、手順・手法を示し、シミュレーションおよび実験により、提案内容に問題がないことを示した。簡便な方法により、歯のタオレ角度の最適値を求める手順も提案したが、実機（試作モータ）が1種類のみであり、固定子・回転子間の間隙や回転子直径など、今回の試作モータと条件が変わった場合について、実機を用いての検証が行えておらず、今後の課題である。