永久磁石回転型磁気車輪の磁極と特性との関係

正員 藤井 信男 (九州大)
 正員 小川 幸吉 (大分大)
 学生員 千田 誠 (九州大)

Relation between Magnetic Poles and Characteristics of Revolving Permanent Magnet Type Magnet Wheel

Nobuo FUJII, Member (Kyushu University), Kokichi OGAWA, Member (Oita University),
 Makoto CHIDA, Student Member (Kyushu University)

The authors had proposed the revolving permanent magnet type magnetic wheel called the “magnet wheel”, which have both functions of induction repulsive type magnetic levitation and thrust. In this paper, the relation between magnetic poles and lift force or thrust characteristics is examined to grasp the performance. Five types of magnet wheels are discussed in the experimental study and four more types are used in the theoretical study with the three-dimensional numerical analysis. The following parameters are considered, they are magnetomotive force (mmf) of permanent magnet, thickness of magnet in magnetizing direction and the total volume of magnets, fundamental factor and distortion factor of the space mmf distribution of poles, pole pitch, diameter of magnet wheel, mechanical clearance, thickness and resistivity of conducting plate, etc. The result cleared the following. 1. The lift force per magnet volume is nearly proportional to the fundamental factor of space mmf distribution of pole. The low degree space harmonic mmf is effective to increase lift force. 2. The driving power per lift force is almost independent of configuration of the primary member including pole arrangement and position against the secondary conducting plate respectively, and only depends on the resistance of conducting plate. 3. In both the “partial overlap type” and “tilt type” magnet wheels, many number of poles with the sufficiently large pole pitch is useful. In the tilt type the use with a small tilt angle is desirable.

キーワード：リニアドライブ、磁気浮上、磁気車輪、永久磁石、誘導反発型磁気浮上、境界要素法、有限要素法

1. まえがき

現在実用化されている磁気浮上方式は電力消費が少ない吸引型が主であるが、最近ではエネルギー損失がほとんどない方式として超電導バルク材でピン止め効果を利用する方法や、超電導コイルを用いた Mixed- μ 方式などの基礎研究も行われている。一方、自己安定性を有するために無制御で安心して利用できる誘導反発型磁気浮上方式も有用であり、高速で大型の JR 磁気浮上列車⁽¹⁾や低速の浮上搬送装置⁽²⁾などに、それぞれの用途に応じて工夫がなされ、実用化研究が行われている。しかしながら、誘導反発型磁気浮上は一般に誘導された電流は抵抗損として消費されるために、電力損失が問題になることが多い。また、利用のし易さから長ギャップでの動作が好ましいが、通常の常電導交流巻線では、強磁界を得るのは困難であり、またコイル内で多大な抵抗損をもたらす、さらに力率が非常に悪い装置になって、大きな電源容量を必要とする。この一解決策として、超電導磁石や強力な永久磁石を機械的に動かして利用する方法が考えられる。先に、外側回転界磁形の同期電動機を導体板上で回転させて誘導反発磁気浮上と走行を同時に行う磁気浮上自動車⁽³⁾が考案されており、将来的な超電導磁

石の代わりに永久磁石を用いて模型の走行に成功している。しかしながら、磁石磁界の利用率が非常に低く、また外部への漏れ磁界の問題も有している。

筆者らは、永久磁石を導体板上で機械的に回転させて磁気浮上・リニアドライブを行う、永久磁石回転型磁気車輪を考案している⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これは、誘導反発磁気浮上時に必然的に生じる電力損失の原因となる制動トルクを推力に変換し、リニアドライブに利用しようとするものである。磁石磁界の利用率も比較的高く、また横方向案内力も利用するために、模型ながら、磁気車輪を積載した車両が無制御で磁気浮上・案内・走行できることが実証されている⁽⁶⁾。先の論文では、本稿でタイプ A と呼ぶ磁極配置をもつ磁気車輪のみの特性について報告した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

本論文では高性能化のための指針を得るために、9 種の磁気車輪を用いて、磁極と性能に関連する浮上力や推力特性との関係について調べる。実験的には 5 種類の磁気車輪について、解析モデルとしてはさらに 4 種類の磁極配置について調べる。まず、単に誘導反発浮上装置としての平行時、そして偏い式、傾斜式と呼ぶそれぞれの磁気車輪に対し有効な磁極について検討する。なお、解析には三次元の数値解析法⁽⁷⁾を使用した。

2. 磁気車輪の種類と磁極

本磁気車輪は、誘導反発型磁気浮上と同時に推力を得ることを特長とし、筆者らは先に図1(a)と(b)にそれぞれ示すような「偏い式」と「傾斜式」と呼ぶ二つの方式を提案している。いずれも導体板上方で永久磁石を機械的に回転させる方式であり、以下特に混乱がない限り、永久磁石回転体を単に磁気車輪と呼ぶ。

図1 永久磁石回転型磁気車輪の基本構成

Fig. 1. Fundamental configuration of the magnet wheels.

磁気車輪の性能に関連する磁極のパラメータとして、1. 永久磁石起磁力の大きさ、または磁化の強さ、2. 磁石の磁化方向の厚さ h_M と磁石体積、3. 磁石起磁力の大きさ F_m と円周方向の空間分布における基本波成分 F_1 との比、すなわち基本波率 F_1 / F_m 、4. 起磁力分布における高調波成分の大きさ、5. 円周方向の磁極間隔であるポールピッチ τ 、また磁極が円形配置されることから、磁路の形成に影響を与える磁気車輪の直径も一つのパラメータと考えられる。さらに、磁界の反作用に関連するパラメータとして、メカニカルクリアランス g_2 や導体板の厚さ d や抵抗率 ρ_r が考えられる。

これらのパラメータの影響について調べるために、本論文では図2に示す磁極構成について検討する。実験で使ったものをタイプA, B, C, D, Eで表わす。タイプA, B, Cは(f)図で示される台形の単位磁石を組み合わせた磁極が、半径60mmの円周上に配置されている。磁石は保持力926kA/m、最大エネルギー積345kAT/mのネオジウム系希土類永久磁石を使用し、単位磁石の寸法は長辺58mm、短辺30mm、幅38mm、磁化方向の厚さ $h_M=40$ mmである。タイプAは1極当たり磁石を3個使用した2極構成であり、1磁極の長さはポールピッチの2/3倍、角度で120°である。タイプBは、Aの磁極中心の磁石1個を取り除いたもので、2極であるが、円周方向の磁石の起磁力分布は基本波成分に対して高調波成分が多い構成になっている。タイプCはBの4個の磁石を用いて、等間隔で4極配置したものである。(d)図のタイプDと(e)図のタイプEで用いた磁石はA~Cと同種であるが、磁化方向の厚さ h_M は半分の20mmである。タイプDは長辺30mm、短辺15mm、幅40mmの磁石を半径60mm上に45°間隔でN, N, S, S...と配

置しており、空間高調波成分が多い4極構成である。タイプEは長辺30mm、短辺15mm、幅30mmの磁石を半径30mm上にN, N, S, Sと配置して2極構成としている。

一方、解析で使用するモデルは極数 p と磁石数を用いた記号で表す。(a)図のタイプAは2極で6個の磁石を用いているので2p6Mと表されるが、別の組み合わせとして(i)図のような配置も考えられるので、それぞれ2p6M-1と2p6M-2の記号で区別して表す。2極を4個の磁石で構成する場合も、(h)図と(b)図の2種が考えられ、それぞれ2p4M-1, 2p4M-2で表す。なお、解析で用いるモデルは全て半径60mm上に(f)図に示す寸法の単位磁石を組み合わせて配置するが、磁化方向の厚さ h_M はいくつか変化させて検討を行った。

また、実験機の磁気車輪の磁石表面には3mm厚の非磁性ステンレススチール板のカバーがあり、解析においてもこれを考慮している。以下、メカニカルクリアランス g_2 とは、磁気車輪カバー表面と二次導体板表面間の距離を呼んでいる。

図2 磁気車輪の磁極配置

Fig. 2. Arrangement of pole of the magnet wheels.

なお、先に永久磁石を利用する磁気軸受において、磁極配置について検討された例はあるが、それは磁性体との吸引力を利用するものであり、本論文の内容との関連はみられない⁽⁸⁾。

3. 磁気車輪の磁極と特性との関係

以下に示す計算値は三次元数値解析法を用いて得た。ここで、Maxwell の方程式で表される三次元場の定式化にはベクトルポテンシャルとスカラーポテンシャルを未知数とする境界要素法を用い、渦電流の連続性は有限要素法と同様の定式化を行って考慮した。永久磁石は等価な磁化電流で表した。積分方程式の離散化の過程においては、二次導体では三角柱一次要素を用いたが、表皮効果を考慮するために導体厚み方向は二次補間関数で置き換えている。

〈3・1〉平行時の特性 まず、磁気車輪と導体板が平行な場合、すなわち、図1(b)の傾斜式で傾斜角度 ϕ が零の場合の特性について述べる。この場合に得られる力は、誘導反発型の浮上力のみである。図3は、磁気車輪の各タイプA～Eを永久磁石総体積当たりの浮上力 F_L/V と比較したものである。実際の実測値は試験装置⁽⁴⁾を用いて回転速度に対して連続的にコンピュータに取り込んでいるが、ここでは見易くするために適当に間引いて、各タイプでそれぞれ異なる記号で表している。横軸は磁石中央における回転速度(m/s)で表したもので、11.3m/sはタイプA～Dの1,800rpmに、タイプEでは3,600rpmに相当する。

図3(a)は10mm厚の銅板でメカニカルクリアランス g_2 が20mmの場合を示す。同一磁石数を用いた2極のタイプBと4極のタイプCの値はほとんど等しいが、7m/s前後で優劣が逆転している。これは、極数が多いCの方が速度に対する浮上力の飽和が早いこと、また表皮効果の影響によるものと考えられる。他のタイプについては回転速度に対する優劣順位の変化はほとんど見られない。実測値と計算値を比較すると、タイプEを除いては両者の非常に一致が見られる。タイプEの計算は他のA～Dと同じ大きさの要素分割で行っているが、Eの場合は磁気車輪面積が約1/4であるために、要素分割の粗さによる計算誤差と考えられる。

図3(b)は10mm厚のアルミ合金（抵抗率は銅の2.94倍、以下ではアルミまたはAlと略す）でメカニカルクリアランス20mmの場合の回転速度に対する浮上力特性を示す。この速度範囲では力の飽和はほとんど見られず、浮上力は回転速度にほぼ比例して増加している。回転速度が十分高くなると銅板時の浮上力とほとんど同じ値になることが、計算値によって確認されている。すなわち、アルミの場合は抵抗率比2.94倍の回転速度で銅板時の浮上力とほぼ同じ値になる。

実測値におけるタイプBとCはほとんど重なっている。浮上力の飽和現象が現れないこのような条件の場合には、各タイプの浮上力の大小の順位は回転速度によって変化しない。実測値と計算値は銅板の場合よりも更によく一致し

ており、タイプEの計算を除いて、実測値や計算値の精度の良さが確認できる。したがって、実測値または計算値のみによる分析においても十分信頼できると考えられる。

(a) 銅板の場合

(b) アルミ板の場合

図3 回転速度に対する磁石体積当たりの浮上力特性
Fig. 3. Lift force per PMs volume versus revolution speed.

図4では、各タイプの浮上力の大きさの関係を調べるために、基本波率 F_1/F_m と磁石体積対浮上力比 F_L/V との関係を示す。図において回転速度は11.3m/s時の値を示す。タイプA,B,C,D,Eの基本波率は、それぞれ0.780, 0.472, 0.579, 0.469, 0.424である。磁石体積対浮上力比は、二次側がアルミ板、銅板にかかわらず、基本波率にほぼ比例することが見られる。Aの値を通る比例直線を点線で表し、これを基準とすると、起磁力の空間高調波成分が多いタイプBやDはやや大きめの値になっている。一方、タイプEは磁石幅に対して直径が小さく、回転軸中心をわたる磁路が形成され易くなり、実質的なポールピッチが短くなって漏れ磁束が多くなるためにやや小さな F_L/V 値になると考えられる。

これら各磁気車輪の基本波率に関する比較は、比較の条件が完全には一致していないために、この図だけによる詳細な考察にはやや無理があり、むしろこの結果は、後に述べる偏い式や傾斜式磁気車輪での考察の基準値として利用する。

図5は、条件を同一にした解析によって、起磁力分布の

基本波率と体積対浮上力比の関係を調べたものである。すなわち、図2で示した2p6M-1, 2p6M-2, 2p4M-1, 2p4M-2, 2p2Mを比較したもので、全て同一直径の磁気車輪で、2極、ポールピッチ188.5mm一定である。磁化方向の厚さ h_M については20mmと40mmの2種について示した。ただし、図5中における記号では、全て2極であるために、2pを省略している。なお、他の条件として、平行時、二次導体は5mm厚の銅板、メカニカルクリアランスは20mm、回転速度は1,800rpm一定である。

図4 実験で用いた磁気車輪の磁石体積当たりの浮上力特性

Fig. 4. Lift force per PMs volume characteristics of test wheels.

図5 磁極起磁力の基本波率と磁石体積当たりの浮上力との関係

Fig. 5. Relation between fundamental factor of mmf distribution of poles and lift force per PMs volume.

図6 磁極起磁力分布の高調波分析

Fig. 6. Space harmonic analysis of mmf distribution of poles.

図5より、体積対浮上力比は大体において基本波率に比例している。4M-2の黒丸、すなわちタイプBの値が実測値と比べてあまり大きくないのは、解析における要素分割が粗いために、高調波成分が正確に把握されていないためと考えられる。6M-2, 4M-1, 4M-2の場合は磁石厚さ h_M による変化が大きい。これらの場合、 h_M が小さいと、他の磁石と鎖交せずに単位磁石のみでループを構成する磁束が、浮上力を増加させると考えられる。一方、6M-2と4M-1の基本波率の値はわずかしき違わないが、 F_L/V に大きな差が見られる。この理由を究明するために、図6に示すように磁石起磁力の空間高調波成分の内容について調べた。6M-2と4M-1のひずみ率はそれぞれ、0.870と0.573で4M-1の方が小さいが、図6に見られるように、4M-1は6M-2と比べて第2次高調波が非常に大きい。すなわち、低次の高調波ほど浮上力を発生しやすいと考えられる。

図7は最適な永久磁石の磁化方向の厚さについて調べたものである。最適値は種々の条件で変化すると考えられるが、ここでは同一直径120mm上に、それぞれ2極、4極、6極の磁極が配置される場合、すなわち、ポールピッチ τ が異なる3種の場合について調べた。他の条件は、メカニカルクリアランスが20mm、二次導体が5mm厚の銅板、回転速度11.3m/s、1,800rpm時である。

磁気車輪の場合には二次側は非磁性の導体板だけであり、磁路の大部分は磁気抵抗が大きいために、磁石厚さの増加に対して浮上力は飽和しにくい、体積当たりの浮上力で見ると、極値が見られる。図から、ポールピッチが短いほど F_L/V が最大になる磁石厚さが小さくなるが見られる。すなわち、磁気抵抗が大きい磁路が短くなるほど、最適な磁石厚さは薄くなる。しかしながら、ポールピッチが短くなるほど F_L/V の最大値も小さくなっている。これは、同一メカニカルクリアランスの条件でポールピッチが短くなると、二次導体に鎖交しない漏れ磁束が増加することによるものと考えられる。

図7 磁石の磁化方向厚さと体積当たりの浮上力との関係
Fig. 7. PM thickness in magnetizing direction versus lift force per PMs volume.

〈3・2〉偏い式磁気車輪の特性 偏い式磁気車輪は、図1(a)で見られるように、導体板の縁付近の上方で磁気車輪を回転させて推力を得る方式であり、磁気車輪と導体板

領域の重なり割合が重要なパラメータになる。いま、図 1(a)において灰色で示した磁気車輪の磁極が回転する領域の面積を S_1 、この領域と導体板が重なっている斜線部の面積を S_2 として、重なり割合を $k_y = S_2 / S_1$ として定義する。したがって、車輪と導体板が完全に重なっているときは $k_y = 1$ となる。なお、本節の図では、10mm 厚のアルミ板で、メカニカルクリアランス $g_2 = 15\text{mm}$ 、回転速度 11.3m/s の場合を示している。

図 8(a)は偏い式磁気車輪の重なり割合に対する磁石体積対浮上力比特性を示す。偏い式の場合の導体板は細長い導体板を使用することが得策と考えられるので、試験機では 450mm 幅の導体板を用いている。したがって、重なり割合 $k_y = 1$ でも、車輪側の渦電流の通路が十分に確保されないために、図 3 の平行時の浮上力と等しくはならない。計算値は実測値と比較的によく一致しており、重なり割合が 0.5 以下の極端に小さい値にならない限り、 k_y の値によって各タイプの体積対浮上力比の優劣の順序は変化しないことが確認できる。

(a) 磁石体積当たりの浮上力

(b) 磁石体積当たりの推力

図 8 偏い式磁気車輪における重なり割合—浮上力、推力特性

Fig. 8. Lift force, thrust per PMs volume versus overlap factor in the “partial overlap type” magnet wheel.

図 8(b)は磁石体積対推力比 F_x / V 特性について各タイプを比較したものである。実測値においては重なり割合の変化による各タイプの F_x / V の大きさの順序の変化は見られない。実測値と計算値の間には大きさに差が見られるが、各タイプでの重なり割合に対する F_x / V の変化の様子はよく一致している。

図 9 重なり割合—浮上力当たりの駆動電力特性

Fig. 9. Driving power per lift force versus overlap factor.

図 9 は重なり割合に対する浮上力対駆動電力比 P / F_L について示す。ここで、駆動電力 P とは二次導体板中に渦電流を流す際に生じる回転制動トルク T_D と回転角速度 ω_m の積 $P = T_D \omega_m$ に等しく、回転させるために生じる機械損は含んでいない。すなわち、この駆動電力は一次側から二次側へ伝達される電力であり、機械的に回転させる本磁気車輪特有のものではなく、誘導反発型磁気浮上装置や誘導電動機の二次入力に等しい。

重なり割合が小さいときは駆動電力が小さく、特に寸法が小さなタイプ E ではかなり小さな電力を測定しているために、実測値における測定精度を考慮すると、単位浮上力当たりの駆動電力は各タイプでほとんど差異は見られず、また重なり割合に対しても変化しないことがわかる。すなわち、磁石起磁力の基本波成分、高調波成分、ポールピッチ、磁石厚さにはほとんど無関係であることを示している。また回転速度にもほとんど依存しないことが確認されている⁽⁹⁾。

図 10 は駆動電力に対する推力特性を示す。誘導反発型磁気浮上では上で述べたように二次入力としての電力 P が必ず必要であり、この電力は全て二次導体中の銅損として消費されるが、本磁気車輪ではこの電力から動力として利用できる推力を取り出そうとするものである。すなわち、駆動電力当たりの推力 F_x / P (N/W) は推力への変換率 F_x / F_T としても定義でき、両者の関係は次式で与えられる。

$$\frac{F_x}{F_T} = \frac{\pi}{30} N r \frac{F_x}{P} \quad (1)$$

ここで、 F_T (N) は制動トルクに対応する制動力、 N (rpm) は磁気車輪の毎分の回転数、 r (m) は磁極中央部の円の半径を表す。

各タイプで推力変換率はあまり差異は見られないが、実線で表す 2 極のタイプ A と一点鎖線で表す 4 極のタイプ C では若干特性が異なり、極数が少ない 2 極の場合は、重なり割合を小さくして用いるのはやや不利であることを示している。

体積当たりの推力がほぼ最大となる重なり割合 $k_y = 0.65$ 付近では全てのタイプで推力変換率は約 0.5 となっている。すなわち、偏い式磁気車輪をこの重なり割合で使用すると、通常であれば銅損で消費される、所要浮上力を得るための電力の約半分を推力発生に利用できる。

図10 重なり割合-推力変換率特性

Fig. 10. Transformation rate for thrust vs. overlap factor.

図11 偏い式磁気車輪における各磁極タイプの浮上力, 推力の比較

Fig. 11. Comparison of lift force and thrust respectively for five magnet wheels in the "partial overlap type".

(a) 磁石体積当たりの浮上力

(b) 磁石体積当たりの推力

図12 傾斜式磁気車輪における傾斜角度-浮上力, 推力特性

Fig. 12. Lift force, thrust per PMs volume versus tilt angle in the "tilt type" magnet wheel.

図8(a),(b)から本条件においては, k_y を0.65前後で使用するのが有効と考えられるので, 図11で示す各タイプの体積当たりの浮上力および推力の比較は, $k_y=0.662$ の場合で行う。浮上力特性について図4の平行時と比べると, 2極のタイプAやEよりも, 4極のタイプCとDが有利であることを示している。また, 推力特性も4極の方が有利であるが, 浮上力の場合よりも優位度合いは小さい。これらから, 偏い式では磁気車輪と導体板が部分的に重なるために, 2極では渦電流による磁極の構成が不利になると考えられる。

〈3・3〉傾斜式磁気車輪の特性 本節では傾斜式磁気車輪について述べる。なお, 図は10mm厚のアルミ板で, 最小メカニカルクリアランス $g_{2,min}=10\text{mm}$, 回転速度11.3m/sの場合を示す。図12は傾斜角度に対する浮上力と推力特性を示す。図12(a)の体積対浮上力比特性において, ポールピッチが短い4極のタイプCとDは, 傾斜角の増加に対する浮上力の減少がやや大きいことが見られる。なお, タイプEのポールピッチはCとDと同じであるが, 直径が半分なので, 傾斜角度に対するギャップ長の差が小さく, タイプAやBと同様な減少割合になっている。

図12(b)の傾斜角度に対する体積対推力比特性では4極のC, Dと2極のA, Bの差がより明確に現れている。ポールピッチが小さい4極では, 傾斜角度が大きくなるとギャップ中での漏れ磁束が増加し易くなり, 推力や浮上力が小さくなると考えられる。したがって, 傾斜式磁気車輪では比較的多極数にして, 大きな浮上力と推力が共に得られる小さな傾斜角度で用いるのが得策と考えられる。

図13 傾斜角度-浮上力当たりの駆動電力特性

Fig. 13. Driving power per lift force versus tilt angle.

図13は傾斜角度と浮上力対駆動電力比との関係を示す。浮上力の大きさは各タイプで異なるが, ある浮上力に要する駆動電力は種々異なる磁極配置にほとんど無関係であり, また, 傾斜角にもほとんど依存しないことを示している。さらに, 回転速度にもほとんど無関係である⁽⁹⁾。

図14は二次導体板の抵抗と浮上力対駆動電力比との関係を示す。ただし, ここでは, 固有の体積抵抗率 ρ_v に導体板の厚み d を掛けた表面抵抗率 $\rho_s = \rho_v d$ を用いて表している。浮上力対駆動電力比は二次導体の表面抵抗率にほぼ比例している。

図 14 導体板の表面抵抗率－浮上力当たりの駆動電力特性

Fig. 14. Driving power per lift force versus surface resistivity of conducting plate.

図 15 傾斜角度－推力変換率特性

Fig. 15. Transformation rate for thrust vs. tilt angle.

すなわち、図 9 と図 13 および図 14 から、浮上力対駆動電力比は、一次側の構造やメカニカルクリアランスを含む二次側との位置関係にはほとんど依存せず、また、二次導体の抵抗だけにほぼ依存することがわかる。

図 15 は傾斜式磁気車輪の傾斜角度と推力変換率との関係を示す。推力の変換率は傾斜角度の増加に伴って大きくなるが、4 極の C,D の方が、2 極の A,B よりも大きいことを示している。

図 16 傾斜式磁気車輪における各磁極タイプの浮上力、推力の比較

Fig. 16. Comparison of lift force and thrust respectively for five magnet wheels in the "tilt type".

図 16 は傾斜式における体積対浮上力比と推力比について、各タイプを比較したものである。ただし、傾斜角度は 10 度一定での条件である。浮上力だけをみると、4 極での優位性は見られず、空間高調波成分が多いタイプ B が大きい。駆動電力と比例する浮上力に対する推力値の見地からみると、やはり 4 極が有利であることを表している。

4. むすび

以上の結果から、次のことが明らかになった。

- 各磁極タイプにおける磁石体積当たりの浮上力や推力の大小の順位は、回転速度によって変化しない。また、偏い式における重なり割合、傾斜式における傾斜角度に対しても変化しない。
- 単位浮上力当たりの駆動電力は、磁極起磁力分布の基本波成分、高調波成分、ポールピッチ、磁石厚さにはほとんど無関係である。また、偏い式における重なり割合、また傾斜式における傾斜角度に対しても変化しない。すなわち、浮上力に要する電力は、一次側の構造やメカニカルクリアランスを含む二次側との位置関係にはほとんど関係せず、ほぼ二次導体の抵抗だけに依存する。
- 磁気車輪の基本である平行時の特性では、磁石体積当たりの浮上力の値は、磁極磁界の空間分布の基本波率にほぼ比例する。ただし、低次の高調波成分は浮上力の増大に効果がある。

また、ポールピッチが短いほど磁石体積対浮上力 F_L/V の値を最大にする磁石厚さが薄くなる。同時に最大 F_L/V 値も小さくなる。

- 偏い式磁気車輪については、磁石体積当たりの浮上力、推力共に、2 極よりも 4 極構成時が大きく、十分なポールピッチを確保して多極数で用いるのが有利である。実験で用いたタイプ A～E の中では、2 極であるがポールピッチが長く、基本波率が最も大きなタイプ A を重なり割合 $k_y=0.65$ 付近で用いるのが最良である。
- 傾斜式磁気車輪についても、十分なポールピッチを確保しながら多極数にして小さな傾斜角度で用いるのが有利である。タイプ A～C の中では、C の磁極を長くして基本波率を高くすれば、4 極の C を傾斜角度 10 度程度で用いるのが最良である。

なお、これらの結果のいくつかは、永久磁石を機械的に回転させて利用する他の同様な電磁装置に対しても役立つものと考えられる。

終わりに、本試験機の製作に当たりご尽力頂いた元・安川電機(株)、現・佐賀大学教授の松本敏雄氏に深く感謝の意を表す。また、実験等にご協力頂いた平成 8 年本学大学院修士課程修了の大見謝恒也君に謝意を表す。なお、本研究の一部は平成 7 年度文部省科学研究費・一般研究(C)の助成により行われた。

(平成 8 年 9 月 24 日受付、平成 8 年 11 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 藤原・藤本：「浮上と案内を兼用する誘導反発磁気浮上の特性」電学論D, 112, 459 (平4-5)
- (2) J. L. He, Z. Wang, D. M. Rote, S. Winkelman:
"Investigation of The Stability of AC Repulsive-
Force Levitation Systems for Low-Speed Maglev",
IEEE Trans. on Magnetics, 28, 3315(Sep. 1992)
- (3) 川合・有賀：「磁気浮上式自動車, EQUOS-LIM-CAR」
発明, 89, 70 (1992-10)
- (4) 藤井・小川・松本：「永久磁石回転形磁気車輪」電学
論D, 115, 319(平7-3)
- (5) 藤井・小川・直塚：「磁気車輪の静特性解析」電学論
D, 115, 327(平7-3)
- (6) 長嶋・上條・飯倉・長谷川・重枝・中島：「磁気車輪
で推進・浮上・案内する磁気浮上車模型」平成7年電気
学会全大No. 1060
- (7) K. Ogawa, Y. Horiuchi, N. Fujii: "Calculation of
Electromagnetic Forces for Magnet Wheels", Proc. of
IEEE Con. on Electromagnetic Field Computation,
PB1-21, 141 (Mar. 1996)
- (8) 松村：「磁気軸受における磁極配置とうず電流損失に
ついて」電気学会リニアドライブ研資, LD-90-72, 25
(平2-11)
- (9) N. Fujii, K. Ogawa, K. Naotsuka, K. Ohmija, T.
Matsumoto: "Driving Power of Magnet Wheels", Int.
Sympo. on Linear Drives for Industry Applications,
21 (May 1995)

藤 井 信 男

(正員) 昭和50年3月九州大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月九州大学工学部助手, 63年4月助教授。平成8年4月改組により同大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻に配置換え。NSERC (カナダ政府の自然科学・工学分野の研究評議会) から1990年度 Fellowship を受ける。リニアドライブ, 磁気車輪の研究に従事。工学博士。

小 川 幸 吉

(正員) 昭和27年4月3日生。昭和55年九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年大分大学工学部エネルギー工学科講師。57年同助教授。平成4年から平成5年まで文部省在外研究員 (ウィスコンシン大学)。リニアモータおよび磁気浮上の磁界解析の研究に従事。工学博士。

千 田 誠

(学生員) 平成7年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学院システム情報科学研究科電気電子システム工学専攻入学, 現在に至る。磁気車輪の研究に従事。