

学術論文
------

## 誘導反発磁気浮上装置としての磁気車輪の特性について

Characteristics of The Magnet Wheel As A Magnetic Levitation  
Device of Induction Type

藤井 信男	(九州大学)	小川 幸吉	(大分大学)
松本 敏雄	(安川電機)		

Nobuo FUJII, Member of JSAEM, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Fukuoka, 812-81  
Kokichi OGAWA, Member of JSAEM, Oita University  
Toshio MATSUMOTO, Yaskawa Electric Co., Ltd.

A new type of magnetic wheel called the "magnet wheel" has been proposed. The magnet wheel has both magnetic levitation and linear drive functions combined into one. In the magnet wheel, the permanent magnets are rotated over the conducting plate so that an induction type of repulsive lift force is obtained. To produce thrust from the drag torque which is simultaneously induced with the lift force, the "tilt type" and "partial overlap type" magnet wheels have been proposed. Poor power factor and large power consumption are the common problems in an induction type of magnetic levitation. The magnet wheel is free of the power factor problem. The paper shows that the ratio of the lift force to the driving power of the magnet wheel is the same as that of the ordinary induction type of magnetic levitation. Also, the magnet wheel requires no extra power to produce the thrust needed for linear drive. This fact means the improvement of efficiency in running condition. Furthermore, the use of high density permanent magnets makes the magnet wheel more compact and light weight compared with ordinary magnetic wheels.

Key Words : Magnet Wheel, Magnetic Wheel, Magnetic Levitation, Linear Drive,  
Permanent Magnet

## 1 まえがき

吸引力を利用する磁気浮上は小さな起磁力で大きな力を得ることができるために広く利用されている。特に電磁石と永久磁石との併用によって、ほとんど電力を消費しない方式 [1] も可能である。しかしながら、安定な吸引型磁気浮上には比較的複雑な構造と繊細な制御が不可欠である。一方、永久磁石と電磁石または電磁石同士による反発型浮上方式では三次元的な反発力のために、安定浮上には極度に繊細な浮上制御が必要になる。また、この方式は起磁力の割に発生力も小さく、交流巻線を使用する場合は極端に低力率の装置になって実用性に乏しい。したがって、反発力を利用する磁気浮上方式としては、二次側の起磁力が一次側から供給されて自動的に自己安定性が得られる誘導型が好ましいと考えられる。誘導型にするためには、時間的に変化する磁界を二次側に鎖交させる必要があるが、一次側の交流巻線で交番磁界や回転磁界を発生させる方式では低力率のために非常に大きな容量となり

好ましくない。したがって、高密度で強大な起磁力を有する超伝導マグネットや希土類永久磁石を力学的に動かす方法で磁界の時間的な変化を作り出す方式が考えられ、前者は実用化レベルにはほぼ達しているわが国の誘導反発磁気浮上列車・リニアモーターカーで利用されている [2][3]。

筆者らが考案した磁気車輪 (magnet wheel) [4][5] とは、永久磁石を回転させて誘導反発型の磁気浮上力と推力を同時に発生させるものである。これは、先に magnetic wheel と呼ばれた通常のリニアモーターの推力と垂直力を利用したもの [6][7] やリニアモーターと電磁石を組み合わせた [8] 磁気車輪と同様の機能を持つ。本磁気車輪の動作原理は、磁石を力学的に回転させて得られる回転磁界を導体板に鎖交させて浮上力を得ながら、同時に発生する制動トルクから推力を取り出すものである。すなわち、簡単な方式で反発浮上力と推力さらに案内力が同時に得られること、また、推力での走行によって浮上に要する電力の一部を運動エネルギー

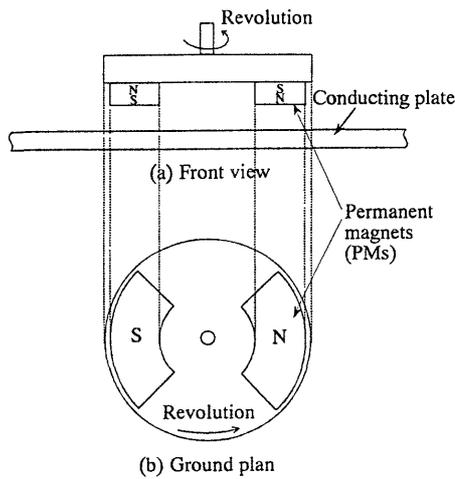


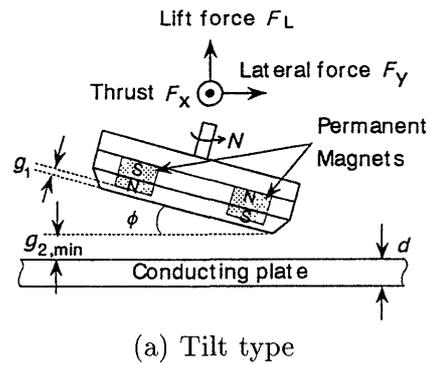
Fig.1 Fundamental structure of magnet wheel.

ギーに変換し、誘導反発型磁気浮上における電力面での短所を緩和できることを特長とする。

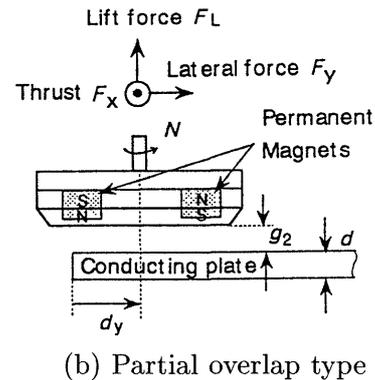
本稿では回転だけで走行しない状態での磁気車輪の動作を試験装置を用いて実験的に確認し、誘導反発磁気浮上装置としての特性について述べる。また、理論的な検討には三次元解析が不可欠であり、筆者らの数値解析法の妥当性を確認する。

2 磁気車輪の基本構造

磁気車輪は一次側である永久磁石の回転体とそれに対向する二次導体板で構成されるが、以降は、特に混乱がない限り、永久磁石の回転体だけでも単に磁気車輪と呼ぶ。Fig. 1 に示されるような磁気車輪が導体板と平行な時は、反発浮上力と共に制動トルクが生じる方式として従来から知られている。一般に有害無用な制動トルクから推力を取り出すために、Fig. 2 (a),(b) に示すようなそれぞれ傾斜式 (Tilt type)、偏い式 (Partial overlap type) と呼ぶ 2 種の方式を提案する。傾斜式は磁気車輪を導体板に対して傾斜させる形式、偏い式は磁気車輪を導体板の縁付近で使用する形式であり、両者ともに円周方向のトルク分布に差をつけて推力を得ようとするものである。なお、Fig. 2 に示す力成分の方向は単に直交座標系で定義されたものであり、浮上力 (Lift force) と推力 (Thrust) は図中の回転方向に対して磁気車輪自身が受ける力の方向と一致しているが、横方向力 (Lateral force) は実際に作用する力とは逆である。一方、Fig. 1 と 2 では 2 極構成で描いているが極数は限定されない。また、磁気車輪回転用にはモータを使用する場合、電機子巻線を付加した自己駆動形 [4] が考えられる。



(a) Tilt type



(b) Partial overlap type

Fig.2 Fundamental configuration of the magnet wheels.

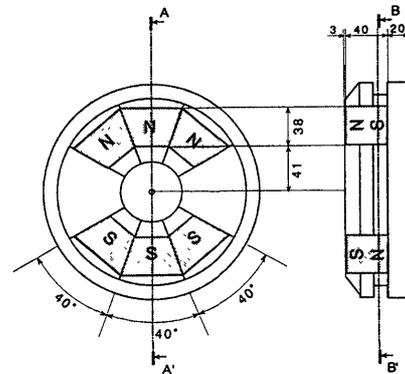


Fig.3 Arrangement of permanent magnets of the test facility.

3 試験機の定数

数値例として試験機 [4] の定数を用いる。本稿で述べる磁気車輪の永久磁石の構成は Fig. 3 に示すような 2 極であり、けい素鋼板の円形ヨークに取り付けられている。永久磁石は 1 極当たり空間角度 120 度に相当する長さを持ち、幅 38mm、磁化方向の高さは 40mm で、半径 60mm 上に配置されている。また磁石の保持力は 11,640Oe、最大エネルギー積は 43.3MGOe である。導体板としては 10mm 厚の銅板および銅の 2.94 倍の

抵抗率をもつアルミニウム合金板(以下,これを単にアルミ板と称す)を用いる。

4 磁気車輪と導体板が平行な時の特性

磁気車輪の今後の発展のためには解析式が不可欠であるが,ここでは積分方程式に基づく三次元の磁界計算法[6]による数値解析を行う。Fig. 4に試験機に対する本三次元解析値(3-D analysis)と直交座標を用いた二次元解析(2-D analysis)による解析値[4]との差異を示す。ここでは10mm厚の銅板でメカニカルクリアランス  $g_2 = 15\text{mm}$  の場合を示す。両者間には大きな差がみられ,磁気車輪では磁極が半径方向に短いことと円形配置されているために,三次元解析等でこれらを考慮する必要があることを示している。

Fig. 5 (a),(b)はそれぞれ  $g_2 = 20\text{mm}$  で10mm厚の銅板(Cu)と  $g_2 = 15\text{mm}$  でアルミ板(Al)を用いたときの磁気車輪回転速度に対する浮上力と制動トルク特性例を示す。本三次元解析値は実測値とよく一致することが確認できる。実験した回転速度範囲において,抵抗が小さな銅板の場合には大きな浮上力が得られ,また飽和の傾向がみられる。一方,アルミ板の場合には浮上力は回転速度とほぼ比例して増加している。また,アルミ板ではトルクの極大値は明確に現れていない。

Fig. 6はFig. 5の場合の単位駆動力あたりの浮上力について示す。すなわち,駆動電力対浮上力比はそれぞれの導体板において回転速度にほとんど無関係に一定であり,導体板の抵抗の大きさでさまること示している。

Fig. 7は導体板の表面導電率に対する駆動電力対浮

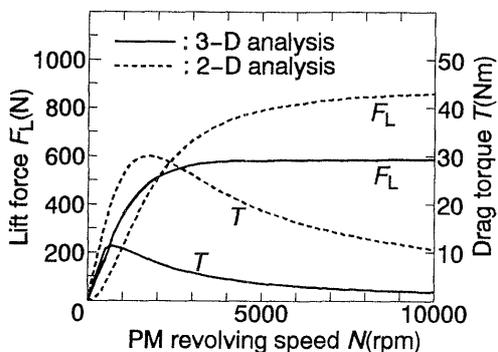
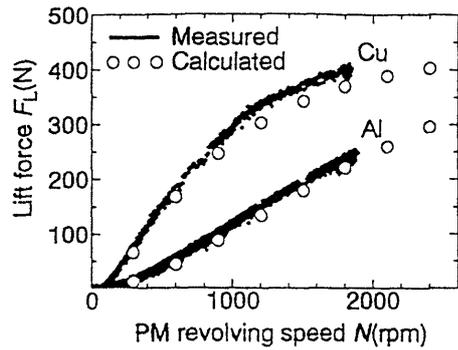
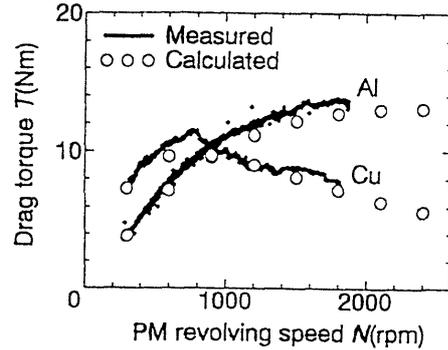


Fig.4 Comparison between three-dimensional analysis and two-dimensional analysis.



(a) Lift force characteristics



(b) Drag torque characteristics

Fig.5 Lift force and drag torque curves.

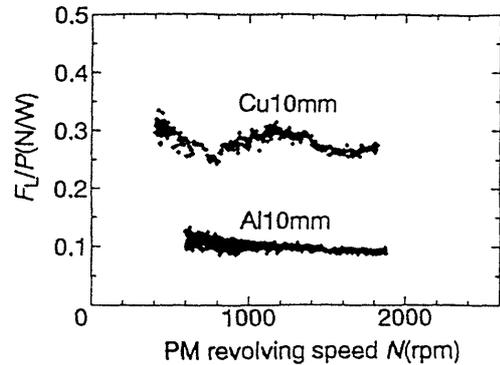


Fig.6 Lift force per driving power in the same condition as Fig. 4.

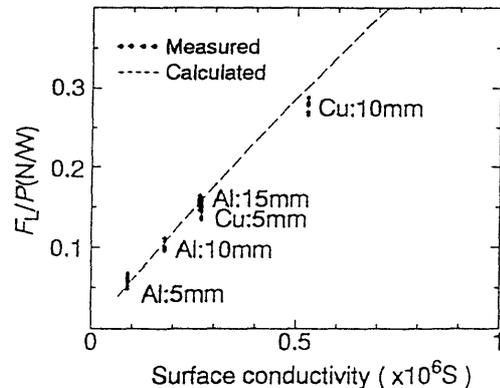
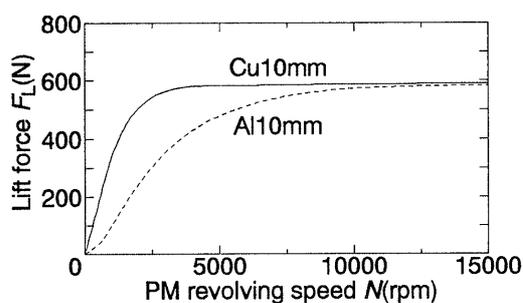


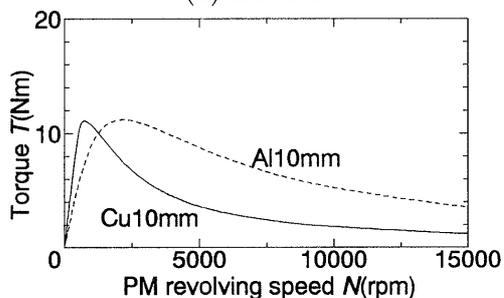
Fig.7 Lift force per driving power as function of surface conductivity.

上力比の特性を示したものである。表面導電率は導体固有の体積導電率に厚みを掛けた値であるので、5mm厚の銅板とその0.34倍の体積導電率をもつ15mm厚のアルミ板の表面導電率の値はほぼ等しく、これらの駆動電力対浮上力比はほぼ等しい。また、同じ厚みであれば、銅の駆動電力対浮上力比はアルミの約 $1/0.34=2.94$ 倍であることを示している。すなわち、本設計仕様の場合、駆動電力対浮上力比は導体板のみで決定され、表面導電率にほぼ比例することが実験と計算の両面から確認される。

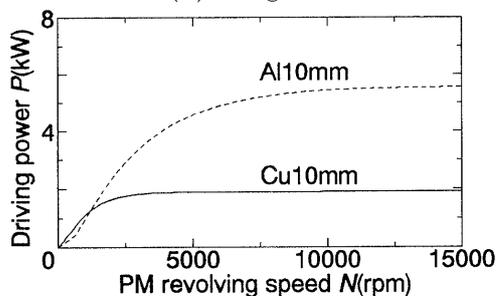
実験を行った回転速度は2,000rpm程度までであるために、より広範囲における銅板とアルミ板時の特性を計算値と比較してFig. 8に示す。Fig. 8 (a)に示されるように、導体板の表皮効果が無視できる場合、浮上力は回転速度が大きくなるにつれて増加するが、その飽和値は導体抵抗にかかわらず等しくなり、飽和値に



(a) Lift force



(b) Drag force



(c) Driving power

Fig.8 Characteristics at the horizontal rotation.

達する回転速度は抵抗の値に比例する。また、Fig. 8 (b)に示されるように制動トルクの最大値も導体の抵抗にかかわらず同じであり、最大値となる回転速度は抵抗の値に比例する。この現象は誘導電動機において回転子抵抗が変化する場合のトルクの比例推移曲線と同様である。このように導体の抵抗にかかわらず、浮上力、制動トルクの最大値は同じ値が得られるが、導体中で消費される抵抗損に等しい磁気車輪の駆動電力は、Fig. 8 (c)に示されるように浮上力と導体の抵抗に比例する。すなわち、導体板が決まっていれば、回転速度に無関係に浮上力に比例する駆動電力が必要であり、また異なる導体板で同じ浮上力を得るためには、抵抗に比例する電力が必要であることを示している。ただし、ここで示す導体抵抗に対する駆動電力対浮上力比の値は本試験機定数に関するものであり、実際は設計定数によって変化するものと考えられる。

なお、磁気車輪の駆動電力  $P$ (W)と制動トルク  $T$ (Nm)との関係は回転速度  $N$ (rpm)を用いて次式で与えられる。ただし、機械損や風損は無視されるものとする。

$$P = \frac{\pi}{30} NT \quad (1)$$

## 5 磁気車輪の特性

Fig. 9は傾斜式磁気車輪の回転速度に対する浮上力  $F_L$ 、推力  $F_x$ 、横方向力  $F_y$  特性を示す。条件はアルミ板10mmで、傾斜角  $\phi=10$ 度、最小メカニカルリアランス  $g_{2,min}=10$ mmの時であり、傾斜角や各力の方向の定義等はFig. 2 (a)に示す通りである。Fig. 9から実際に浮上力と共に推力が得られているのが確認される。傾斜しているために平均等価ギャップが長

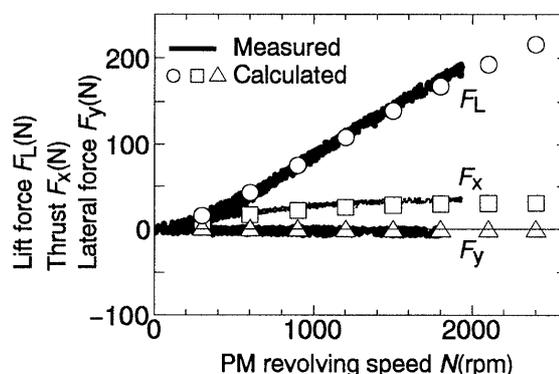


Fig.9 Forces versus revolving speed in the tilt type magnet wheel.

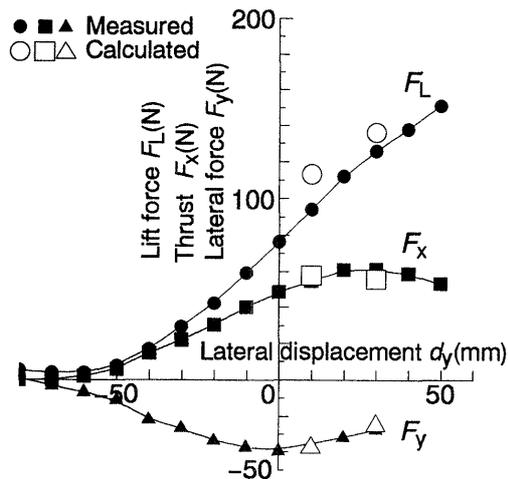


Fig.10 Forces versus revolving speed in the partial overlap type magnet wheel.

くなり、浮上力特性は Fig. 5 (b) の平行回転時と比べて値は小さくなっているが、傾斜角度がわずかであるので特性曲線の傾向は平行回転時と同様である。また、推力特性も平行回転時のトルク曲線とは同様な傾向を示す。一方、横方向力はほとんど発生していない。傾斜式磁気車輪の場合には平板上を磁気浮上させて前後左右自在に動かす利用に適しているので、横方向力が発生しないのは好都合であると考えられる。また、本三次元解析は三次元力を精度よく算定できることを示している。

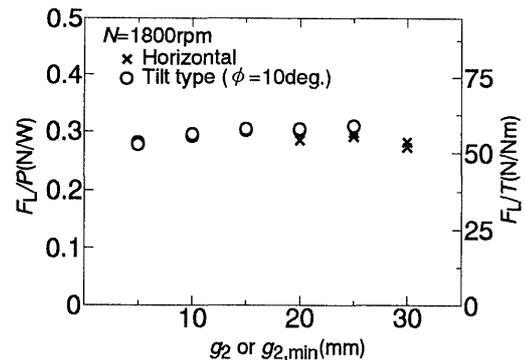
Fig.10 は偏い式磁気車輪の横方向変位量  $d_y$  に対する浮上力、推力、横方向力特性を示す。なお、偏い式における各力の方向および  $d_y$  の定義は Fig. 2 (b) に示す通りである。すなわち、正の  $d_y$  の値が大きくなるに従い 4 章で述べた平行時の特性に近づく。ここでは 10mm 厚のアルミ導体板で、メカニカルクリアランス  $g_2=15\text{mm}$ 、回転速度 1,800rpm のときを示す。

重なり  $d_y$  が少なくなるに従って浮上力  $F_L$  は直線的に減少している。推力  $F_x$  の最大値は変位量  $d_y = 20\sim 30\text{mm}$  でみられるが、この値は磁気車輪の直径や極数で異なる。また、偏い式では傾斜式と比べて浮上力に対する推力が大きく発生しているが、この比率は傾斜角や変位量のみならず、磁気車輪のポールピッチや極数等で異なる。一方、横方向力  $F_y$  は明らかに傾斜式と比べて大きく発生し、磁気車輪が導体板から離れようとする方向に作用することを示している。これは、偏い式磁気車輪が細長い導体板を使用することから、ストライプ状の導体軌道に沿わせる案内力として有効に利用できると思われる。

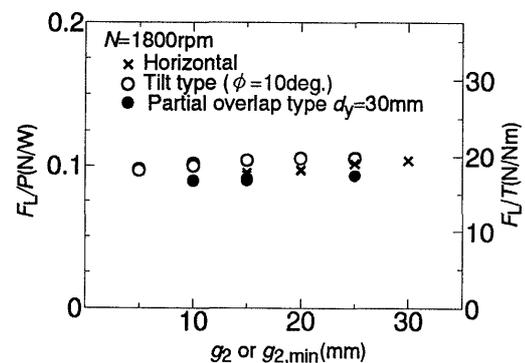
## 6 磁気浮上装置としての磁気車輪の特徴

Fig.11 は、磁気車輪のメカニカルクリアランスに対する駆動電力対浮上力比を実測値で示す。(a) 図は 10mm 厚の銅板の場合、(b) 図は 10mm 厚のアルミ板の場合である。図には双方共に回転速度が 1,800rpm のときの値で示しているが、傾斜式や偏い式の磁気車輪の場合においても、駆動電力対浮上力の値は回転速度に対してほぼ一定である。

Fig. 1 に示されるように磁気車輪を導体板と平行に配置して単に誘導反発磁気浮上装置として利用する場合を×印で、傾斜角 10 度の傾斜式磁気車輪の場合を○印で、変位量 30mm の偏い式磁気車輪の場合を●で表す。Fig.11 で見られるように、平行時、傾斜式、偏い式のいずれの方式においても駆動電力対浮上力比は導体板の抵抗だけで決まる一定の値になり、これらの値は Fig. 7 の値に一致している。すなわち、推力を同時発生させる磁気車輪の場合と単に浮上力だけを利用



(a) Copper plate with thickness of 10mm



(b) Aluminum plate with thickness of 10mm

Fig.11 Comparison of lift forces per driving power among the horizontal, tilt type and partial overlap type magnet wheel.

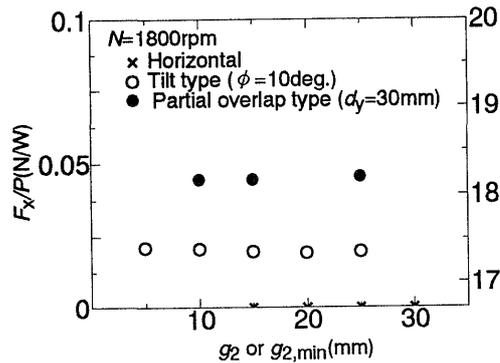
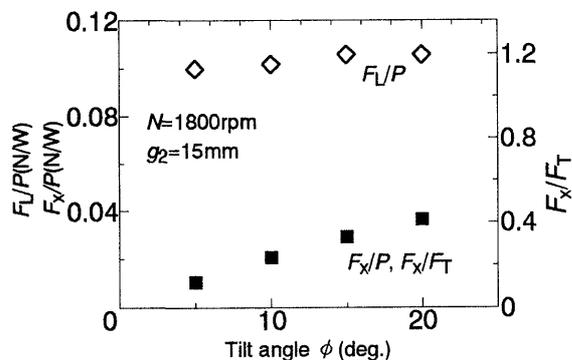
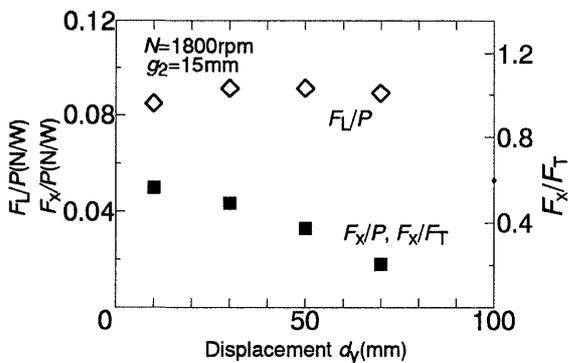


Fig.12 Comparison of thrust per driving power among the horizontal, tilt type and partial overlap type magnet wheel.



(a) Tilt type



(b) Partial overlap type

Fig.13 Variation of thrust per driving power for each magnet wheel.

する場合とでは，駆動電力対浮上力比  $F_L/P$  は等しいことが確認される．また，この  $F_L/P$  の値はメカニカルクリアランスの値には無関係であることを示している．

Fig.12 は Fig.11(b) に対応する駆動電力対推力比  $F_x/P$  を示す．推力を取り出せない平行時は当然零であるが，傾斜式や偏い式では浮上に要する電力を用い

て，浮上力の 25～50% 程度の推力が得られることを表している．また，この  $F_x/P$  の値はメカニカルクリアランスには無関係であることを示している．これらの駆動電力対推力比の傾斜式および偏い式における変化をそれぞれ Fig.12(a) と (b) に示す．駆動電力対浮上力比  $F_L/P$  は傾斜角や変位量に対して変化しないが，駆動電力対推力比  $F_x/P$  は傾斜角が大きくなるほど，また，偏い式では変位量が小さくなるほど大きくなることを示している．いま，磁気車輪の制動力を  $F_T$  (N) で表わすと，制動力から推力への変換率  $F_x/F_T$  は  $F_x/P$  を用いて次式で与えられる．ここで  $r$  (m) は磁気車輪の半径を表わす．

$$\frac{F_x}{F_T} = \frac{\pi}{30} N r \frac{F_x}{P} \quad (2)$$

すなわち，制動力から推力への変換率は傾斜式では傾斜角が 25 度，偏い式では変位量 30mm 程度で 50% 程度になるが，傾斜角が大きくまた変位量を小さくし過ぎると得られる浮上力の値が小さくなり，装置の大きさや重量当たりの浮上力の面で不利になる．

## 7 むすび

誘導反発型磁気浮上装置として磁気車輪を見る場合，力学的に回転させる短所を有するものの，高密度の希土類永久磁石を有効に利用して小型軽量化が実現できる方式と考えられる．誘導反発方式は一般に浮上力当たりの電力が大きくなるが，従来浮上力のためだけに要した電力で本磁気車輪は推力をも取り出せることを実証した．この推力は走行時には運動エネルギーとして利用されるために，結果として浮上装置としての効率を向上させることができる．また，電力は導体板の力率とは無関係であり，駆動するための有効電力だけを供給すればよい特長も有する．なお，本検討は試験機の定数だけで行ったために駆動電力対浮上力比は導体抵抗だけに依存していたが，この値は磁気車輪の設計次第で変化すると考えられる．

(1995 年 9 月 14 日受付)

## 参考文献

- [1] 森下，小豆沢：「常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御」電学論 D，108，6，pp.447-454（昭 63-5）
- [2] 藤原：「浮上コイル側壁配置磁気浮上方式の特性」，電学論 D，108，5，pp.439-446（昭 63-5）

- [3] 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, 5, pp.459-466 (平 4-5)
- [4] 藤井, 小川, 松本: 「永久磁石回転形磁気車輪」 電学論 D, 115, 3, pp.319-326 (平 7-3)  
N. Fujii, K. Ogawa, T. Matsumoto: "Revolving Magnet Wheels with Permanent Magnets", Electrical Engineering in Japan, Vol.116, pp.106-118 (Jan. 1996)
- [5] 藤井, 小川, 直塚: 「磁気車輪の静特性解析」 電学論 D, 115, 3, pp.327-335 (平 7-3)
- [6] J.A.Ross: "ROMAG Transportation System", Proc. IEEE, Vol.61, pp.617-620 (1973)
- [7] 田中, 多田隈: 「片側式リニア誘導電動機を用いた磁気浮上推進兼用システムの考察」 電学論 B, 100, pp.353-360 (昭 55-6)
- [8] S.Suzuki, M.Kawashima, Y.Hosoda, T.Tanida: "HSST-03 System", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.20, pp.1675-1677 (1984)
- [9] 小川, 藤井: 「磁気車輪の磁界解析」 平成 6 年電気学会産業応用部門全大, No.216, pp.922-925