

## 非磁性金属薄板用交流誘導式リニア磁気浮上装置の浮上始動特性

## Starting characteristics in an ac linear induction type magnetic levitation system for a non-magnetic thin plate

松島 功児<sup>\*1</sup>, 苗 真<sup>\*1</sup>, 大路 貴久<sup>\*1</sup> (正員), 飴井 賢治<sup>\*1</sup>, 作井 正昭<sup>\*1</sup>

Koji MATSUSHIMA, Zhen MIAO, Takahisa OHJI(Mem.), Kenji AMEI, Masaaki SAKUI

This paper deals with the compatibility of power saving operation at stable levitation and smooth operation at starting levitation to an ac induction type magnetic levitation (Maglev) system. Electrical equipment with highly inductive reactance such as an ac induction type maglev system is low efficiency; therefore a phase advance capacitor should be inserted to achieve power-saving operation. However, as the power factor approaches to 1, the system does not allow gradual levitation of the thin plate at the start point because steep starting current flows through the circuit owing to a ferroresonance phenomenon. Accordingly, we added a switching function by inserting two different capacitors into the circuit and tried the improvement of starting levitation. We described the system configuration and the experimental results of serial levitating operation in this paper.

**Keywords:** Magnetic levitation, ac induction type, aluminum plate, phase advance capacitor, ferroresonance.

## 1 はじめに

モータ等の電磁力利用機器はコイルや鉄心で構成されるため、電源側から見たインピーダンスは誘導性となる。この誘導性に対し同期モータでは界磁を調整することで力率を改善し、誘導モータではコンデンサを接続することで位相遅れを補償する。或いはインバータを使用し回転子速度や電流をフィードバックすれば高効率運転が可能である。磁気浮上技術の一つである交流誘導式磁気浮上[1-4]においても複数のコイルと鉄心で構成されており誘導性リアクタンスを有する回路となる。さらに、鉄心が直線状に配置されることや浮上対象物が非磁性金属となることから、モータ類に比べ漏れ磁束が多く概して効率が悪い。従って交流誘導式による磁気浮上装置に対しても力率改善は非常に重要であり、簡便な方法として進相コンデンサの使用が挙げられる。これにより電源容量の負担が軽減され省電力運転が可能となる。

一方、進相コンデンサによる力率改善は、電気共振点付近で動作させることを意味する。直列共振回路を構成することにより一定電圧でも電流を多量に供給できることから、起磁力を必要とする電磁力利用機器には有効である。しかしながら、交流誘導式磁気浮上装置の場合、鉄心を含む磁気回路の影響によりインダク

連絡先： 大路 貴久，〒930-8555 富山市五福 3190，富山大学大学院理工学研究部（工学），  
ohji@eng.u-toyama.ac.jp

<sup>\*1</sup> 富山大学

タンスが変化することから、共振点付近での電流変化が急峻となり、ひいては浮上体の浮上始動時の挙動にも影響を与える。

筆者らは、交流誘導式磁気浮上の原理に基づき、さらに浮上力が増大するよう工夫した交流アンペール式磁気浮上を提案した[5]。交流誘導式は、浮上体下部に配置した交流電磁石からの主磁束により浮上体内部に渦電流を生成し、この渦電流による磁束と主磁束により反発浮上させる方式である。一方、交流アンペール式は、浮上体内部に発生した渦電流の経路および位相に合わせて、別途準備した交流電磁石からの磁束を鎖交させることでフレミング則に従う電磁力（アンペール力）を発生させる方式である[5, 6]。交流アンペール式を用いたリニア磁気浮上装置にて、これまでに浮上力・案内力・アンペール力を同時に生成し安定浮上を確認した[7]。この装置は非磁性金属薄板の製品を非接触で搬送することを目的としており、表面キズ等の品質低下が生じないためにも、浮上体の浮上始動および停止時の挙動には特段の配慮が必要である。

本稿では、交流誘導式リニア磁気浮上装置に対し進相コンデンサを接続した際の電气的特性について調査する。さらに、浮上始動特性の改善と省電力運転の両方を実現するために、二値コンデンサ切替による浮上始動実験を行ったので報告する。

## 2 交流誘導式リニア磁気浮上装置と回路構成

Fig.1 は交流アンペール式リニア磁気浮上装置の概

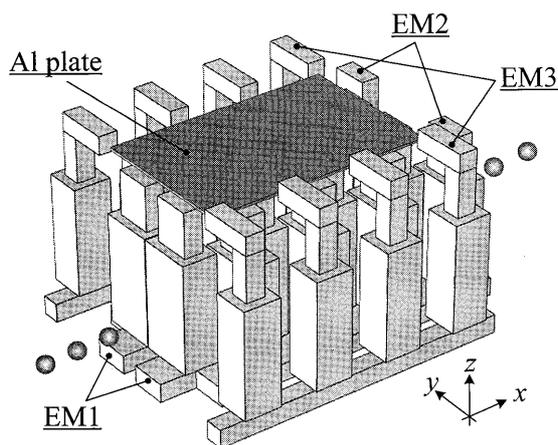


Fig. 1 An oblique drawing of an ac Ampere type maglev system (one unit).

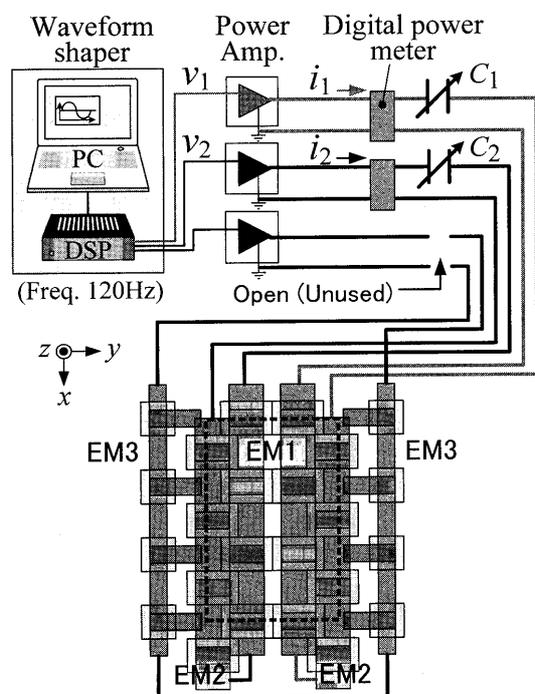


Fig. 2 Experimental setup. Use of EM1 and 2 enables the same operation as an ac induction type maglev. Eight coils and one capacitor were connected in series in each circuit.

略図である。アルミニウム製の方形薄板 (Al 薄板) を浮上対象物とし、電磁石 EM1, EM2 を薄板下部に配置することで誘導反発による浮上力と案内力を発生させる。さらに薄板の両側部に電磁石 EM3 の磁極を配置することで、薄板内部の渦電流と EM3 からの磁束との外積によるアンペール力を生成することができる。ただし、本稿では EM3 を使用しないことで交流誘導

式リニア磁気浮上装置として動作させる。また、最大 5 ユニットの連結できるが、ここでは 1 ユニット分を実験対象とする。

Fig. 2 に実験装置と周辺回路図を示す。EM1 と EM2 をそれぞれ図のように左右に分けて励磁する。即ち 1 回線あたり 8 個のコイルを励磁することとし、左右の回線ではほぼ同等の特性を持つものとする。また未使用の EM3 は固定子鉄心を配置した状態で回路のみを開放とする。電源系は、まず入力電圧信号を PC 上で作成し、DSP(mtt, s-BOX)を介して電力増幅器(NF, 4510, 2 kVA max.)に inputs する。これによりプログラマブルな任意波形発生電源を構築した。なお本実験では、左右の回線で同一の正弦波(120Hz)を印加する。測定系は、電力増幅器からの出力をデジタルパワーメータ(横河, WT210)に接続し、装置への入力電圧および入力電流の実効値を測定する。また、Al 薄板の浮上高はレーザー変位センサ(omron, ZX-LD40)を 4 台使用し薄板の四隅の変位を測定する。パワーメータの後段に力率改善のための進相コンデンサ  $C_1$ ,  $C_2$  を各回線に直列に接続する。進相コンデンサはフィルムコンデンサの直並列回路で構成したコンデンサバンクにより可変して使用できる。

### 3 電圧・電流測定

Fig. 3 は EM1, EM2 の極性パターンである。これは

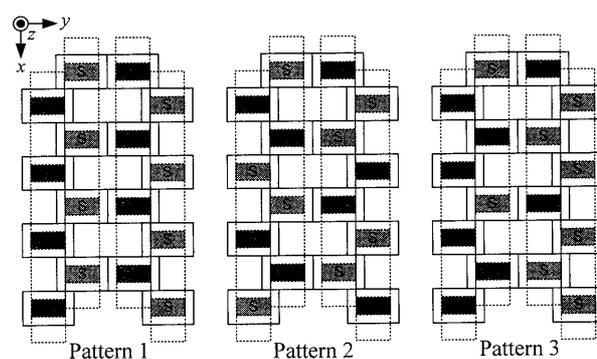


Fig. 3 Three polarity patterns of EM1 and EM2.

Table 1 Measured circuit parameters.

	Pattern 1		Pattern 2		Pattern 3	
	EM1	EM2	EM1	EM2	EM1	EM2
$L$ [mH]	732.4	694.2	782.0	761.4	564.4	554.9
$R$ [ $\Omega$ ]	39.3	34.1	13.3	14.5	17.3	16.4
$X_L$ [ $\Omega$ ]	552.2	523.4	589.6	574.1	425.5	418.4
$X_L/R$	14.1	15.3	44.3	39.6	24.6	25.5
$C_r$ [ $\mu$ F]	2.402	2.534	2.249	2.310	3.117	3.170

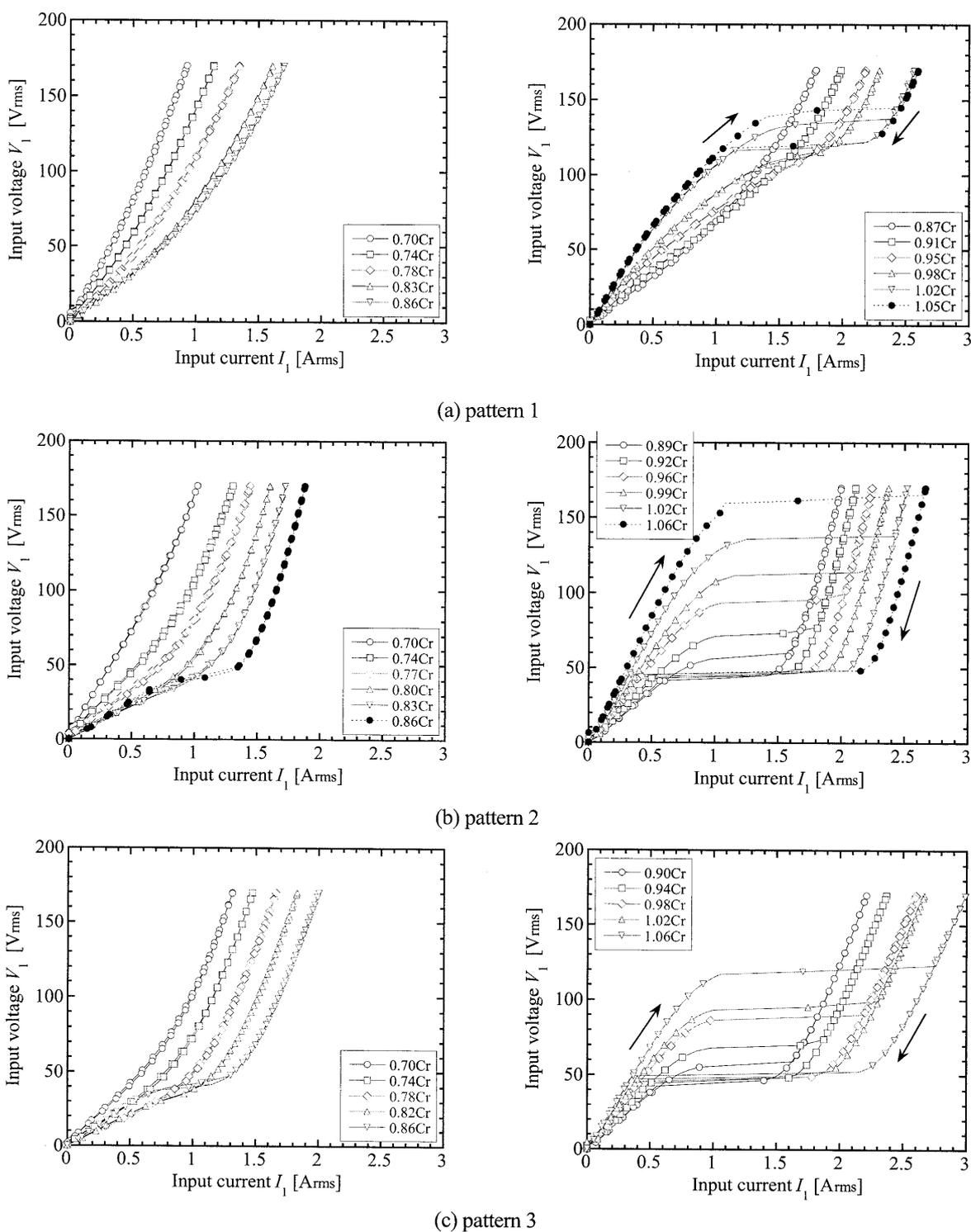


Fig. 4 V-I characteristics in each pattern.

Fig. 2 の点線で示す部分で Al 薄板が安定浮上するパターンである[7]。EM1, EM2 は  $x$  方向にのびた 4 本のレールで構成されており、パターン 1 では 1 本のレールでの磁極が全て同極、パターン 2 では隣り合う磁極が異極である。パターン 3 では外側の 2 本は全て同極、内側の 2 本は隣り合う磁極が異極である。左右 2 本ず

つのレールで見ると、全パターンで  $x$  軸に対して対称であり、 $y$  方向の安定性が良いという特徴がある[7]。

これらのパターンに対し、進相コンデンサ挿入前のインピーダンスを LCR メータ(NF, ZN2454, 120Hz)で測定した。Table 1 に測定値と換算値(網掛部分)を示す。いずれのパターンも誘導性が強く、誘導性リアク

タンス  $X_L$  と抵抗  $R$  の比率 ( $X_L/R$ ) はパターン 2 で最も大きく、次いでパターン 3, パターン 1 となる。これは固定子鉄心が  $y$  方向への積層鋼板であるため,  $x$  方向に磁路を形成しやすいパターン 2 が最も大きくなる。

EM1, EM2 にて力率が 1 となる進相コンデンサの値を算出し共振容量  $C_r$  とする。この  $C_r$  を基準として, 進相コンデンサを Fig. 2 のように直列接続し  $0.70C_r$  から  $1.06C_r$  まで変化させたときの入力電圧-入力電流 (V-I) 特性を測定した。なお,  $C_r$  は各パターンによって異なり Table 1 に示す値である。

Fig. 4 に各パターンにて進相コンデンサを可変した際の V-I 特性を示す。なお, 入力電圧は 170 Vrms を最大値とする。いずれの場合でも  $C_r$  より小さい値から徐々に進相コンデンサを増大させると, グラフの傾き (インピーダンスの大きさ) から力率が改善されるのが確認できる。進相コンデンサを  $C_r$  に近づけると非線形性が強まり, さらに  $C_r$  付近以降では電流が不連続となる状態がいずれのパターンでも見受けられた。この状態では, 電圧を増加しある値に達したとき電流が急激に増加し, その後電圧を減少しても電流値を維持し, 電流増加時とは異なる低い電圧値にて電流が急激に減少している。本装置は直列鉄共振回路とみなすことができ, 電圧や電流に応じてインダクタンスが変化し共振状態に移行する鉄共振現象が生じている [8], 鉄共振状態では低電圧かつ高電流の状態が得られることから入力電力 (VA) を抑制しながら起磁力を与えることができる。Fig. 4 の 3 パターンを比較すると,  $1.06C_r$  までの間でパターン 2 が最も不連続でのループが大きく, 状態が極端に変化している。次いでパターン 3, パターン 1 の順となっており,  $X_L/R$  の順に一致する。また, 共振容量付近 ( $1.00C_r$  付近) に設定したときの V-I 特性において, その傾きが最小となる時入力電力が最小となることから, パターン 2 やパターン 3 が省電力運転に適していることがわかる。

一方, 共振容量付近に設定した場合では, 電流が急激に増加することによって, 浮上体である Al 薄板がスムーズに浮上状態へ移行できず, 跳ね上がりが生じる。始動時のスムーズな安定浮上状態への移行と高力率状態での省電力運転を両立するために, 浮上始動時は不連続が生じない進相コンデンサ値を使用し, 安定浮上時に高力率状態となる進相コンデンサ値に切り替える二値コンデンサ切替運転を試みる。

以降では, 3 種類の極性パターンのうち, 極端な例として V-I 特性のループが最も大きいパターン 2 につ

いて述べる。

## 4 二値コンデンサ切替による浮上始動

### 4.1 回路構成

Fig. 5 に二値コンデンサによる浮上始動実験のための回路構成を示す。Fig. 2 のコンデンサの位置に, 進相コンデンサの並列回路を組み込み, 一方には電磁リレー (耐圧 AC 2kV) を接続する。リレーは DSP から ON, OFF 信号によって切り替える。進相コンデンサの値として,  $0.83C_r$ ,  $0.16C_r$  を用意し ON 状態で  $0.99C_r$  となるようにする。ここで  $0.83C_r$  の値は, 装置の残留磁化による影響と見られる誤差が 3 % 程度確認されたため, 不連続な状態が出ないように余裕を取っている。パターン 2 における  $0.83C_r$ ,  $0.99C_r$  での V-I 特性を改めて Fig. 6 に示す。いずれの進相コンデンサ値でも浮上状態が得られる電圧値 (120 Vrms) を選定し, 太線で示す切替動作を行えば滑らかな浮上始動からの安定浮上が可能となる。Fig. 7 は 120 Vrms を最大入力電圧としたときの実効値パターンである。開始から 15 秒間は  $0.83C_r$  で始動し, 15 秒後に  $0.99C_r$  に切り替える。さらに 25 秒後に  $0.83C_r$  に切り替えて 45 秒後に停止させる。

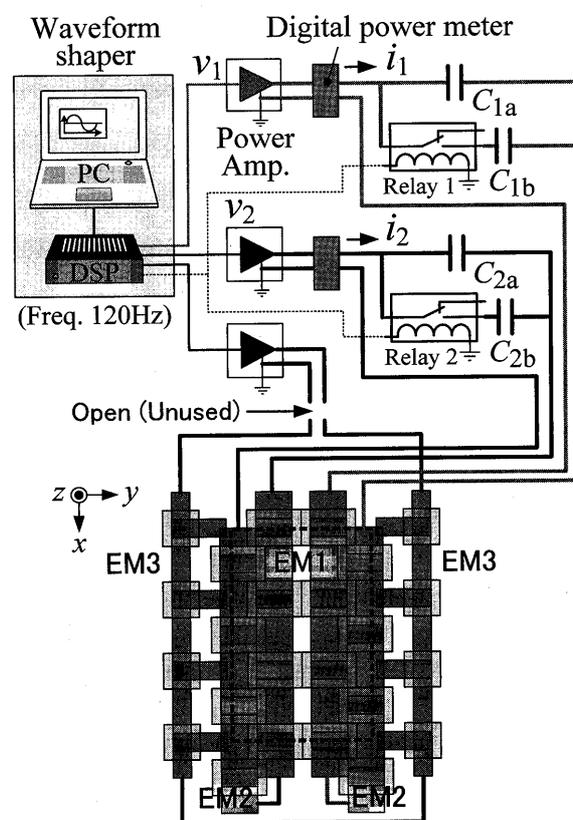


Fig. 5 Circuit structure in starting levitation test.

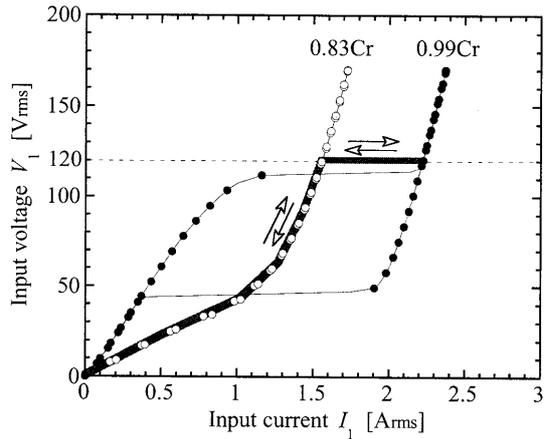


Fig. 6 Selected V-I characteristics in pattern 2. The bold line and arrows indicate the ideal switching operation.

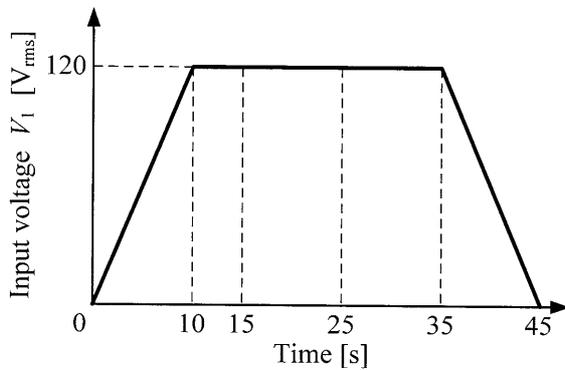


Fig. 7 R.m.s. value of applied ac voltage.

#### 4.2 実験結果

二値コンデンサの切替による浮上始動特性として、入力電流と浮上高の関係を示す。Fig. 8 は、進相コンデンサが  $0.99C_r$  で一定の場合、Fig. 9 は切替運転を行った場合である。Fig. 8 より、開始から 9 秒後に電流が 1 Arms から 2.2 Arms に急激に増加し、それに伴い Al 薄板が浮上を開始する。Al 薄板は急激に跳ね上がり約 6 mm のオーバーシュートが発生した。同様に、停止時には、開始約 42 秒後に電流が 2.0 Arms から急激に減少し、Al 薄板は固定子鉄心に落下する。一方、切替運転を行った場合 (Fig. 9)、開始から 5 秒後に電流が約 1.4 Arms となり、Al 薄板は滑らかに浮上を開始するのが確認できる。開始 15 秒後に、 $0.83C_r$  から  $0.99C_r$  に切り替わる際に電流が上昇し、Al 薄板は約 3 mm のオーバーシュートとともに浮上高が増大する。Fig. 6 より、 $0.99C_r$  では約 50 Vrms まで低下させても約 2 Arms での運転が可能である。さらに、開始 25 秒後にも同様のアンダーシュートが生じるが、電圧の減少とともに Al 薄板は滑らかに固定子鉄心に着地している。

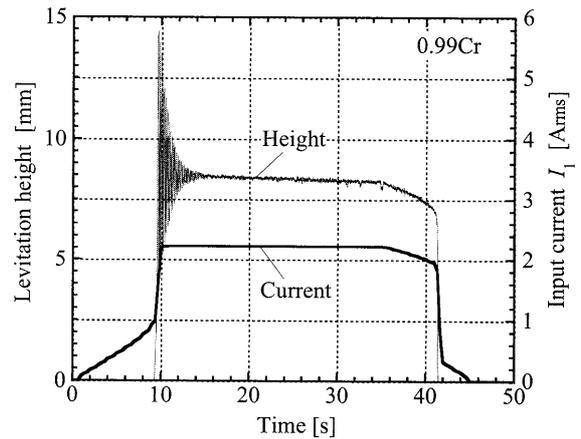


Fig. 8 Levitation height and input current without the switching function.

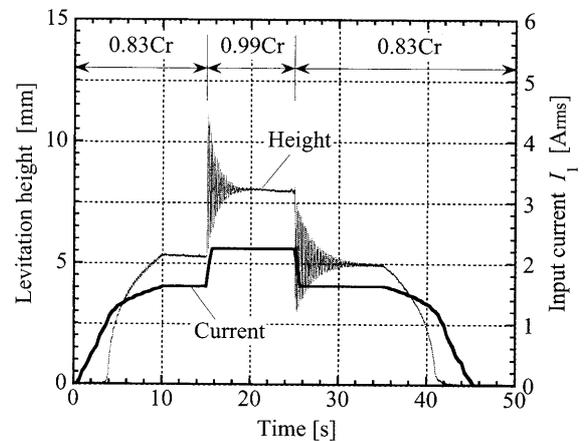


Fig. 9 Levitation height and input current with the switching function.

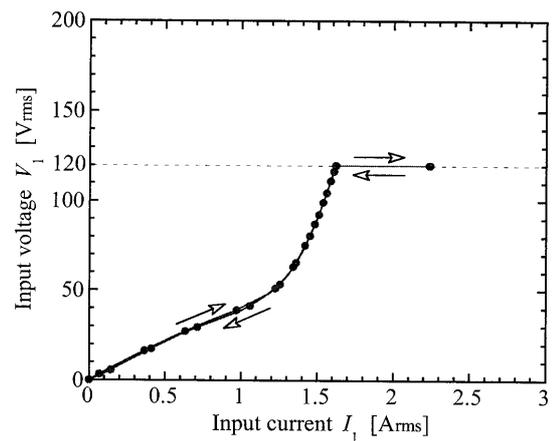


Fig. 10 V-I characteristics at starting levitation test.

Fig. 10 は浮上始動実験時の V-I 特性であり、所望のインピーダンス変化により運転されていることが確認できる。本稿では二値コンデンサを扱ったが、進相コンデンサを滑らかに可変すれば高力率状態までオーバ

一シュートを抑制しながら安定浮上させることが可能であると考えられる。

## 5 まとめ

本稿では、交流誘導式リニア磁気浮上装置の特徴である強い誘導性に対し、省電力運転のための一手段である進相コンデンサでの力率改善を試みた。3種類の極性パターンに対し、力率1前後でのV-I特性について調査し、誘導性リアクタンスと抵抗の比から、誘導性が強いほど鉄共振状態を示す不連続なループが増大することが確認された。一方、力率を1付近に設定することによって生じる急峻な電流変化によってAl薄板の浮上始動特性が影響を受ける。これに対し、リレーを用いた二値コンデンサ切替による浮上始動特性の改善を試み、Al薄板の滑らかな始動・停止と安定浮上時でのコンデンサ切替による高効率運転が両立できることを示した。

## 謝辞

本研究は科研費(21686070)の助成を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

## 付録

Al薄板および固定子の諸元を以下に示す。

### Appendix 1 Dimensions of linear stator and Al plate.

Plate	
Material	aluminium (A1050)
Electric conductivity	$3.54 \times 10^7$ S/m
Dimensions	180 mm × 120 mm × 2 mm <sup>t</sup>
Linear stator (per unit)	
Yoke	
Material	silicon steel
No. of pole	4
Pole area	15 mm × 30 mm (EM1, EM2)
	15 mm × 15 mm (EM3)
Pole pitch	60 mm
Total length	240 mm
	height
	160 mm (EM3)
Coil	
Diameter of copper wire	1 mm <sup>d</sup>
No. of turns	417
Coil height	90 mm

(2011年4月8日受付, 2011年8月27日再受付)

## 参考文献

- [1] N. Kawada, S. Morii, J. Yamada, An attempt at development of a magnetic levitation transport system in vacuum using the mechanism of induced repulsive force, *Vacuum*, Vol. 44, No. 5-7, pp. 757-759, 1993.
- [2] J. L. He, Z. Wang, D.M. Rote, and S. Winkelman, Investigation of the stability of ac repulsive-force levitation systems for low-speed maglev, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No. 5, pp. 3315-3317, 1992.
- [3] 田上, 鳥居, 交流電磁石型誘導反発方式による薄非磁性導体の浮上力及び温度上昇についての検討, 電気学会研究会資料, LD-05-82, pp. 13-18, 2005.
- [4] 近多, 鈴木, 幹, 越本, 誘導反発を用いた物体の安定浮上と移動制御, 平成23年電気学会全国大会講演概要集, 5-224, p. 327, 2011.
- [5] 大路, 佐藤, 飴井, 作井, 非磁性金属薄板の内部渦電流に対する交流アンペール力発生法と誘導反発式磁気浮上への効果, 電気学会論文誌D, Vol. 128, No. 3, pp. 238-243, 2008.
- [6] 大路, 佐藤, 飴井, 作井, アンペール力を付加した交流誘導浮上方式の諸特性評価, 日本AEM学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 132-137, 2008.
- [7] 大路, 苗, 高見, 飴井, 作井, 交流アンペール式リニア誘導浮上搬送装置の磁極配置とAl薄板の浮上特性, 日本AEM学会誌, Vol. 19, No. 3, pp. 120-126, 2011.
- [8] 松尾, 遠藤, 斎藤, 鉄共振に関する考察, 日本AEM学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 337-341, 2009.