

学術論文

エネルギー伝送機能を備えた永久磁石併用交流形磁気浮上

PM-Biased AC Magnetic Suspension with Energy Transfer Function

水野 毅^{*1} (正員), 木下 大輔^{*2}, 高崎 正也^{*1} (正員), 石野 裕二^{*1}

Takeshi MIZUNO (Mem.), Daisuke KISHITA, Masaya TAKASAKI (Mem.), Yuji ISHINO

A novel AC magnetic suspension with a permanent magnet is proposed which has the performance of noncontact energy transfer to the suspended object (floator). It uses permanent magnets for suspending the weight of the floator. An electromagnet combined with the permanent magnet operates for both stabilization and energy transfer to the floator. The principles of the proposed magnetic suspension system are clarified. It is shown that the average suspension force can be adjusted with an impedance control circuit in which the amplitude of the positive secondary current and that of the negative secondary current are separately controlled. An experimental apparatus is fabricated which has three pairs of primary and secondary electromagnets with permanent magnets for three-axis active control in the vertical direction; the three secondary electromagnets are fixed to the floator that is a rectangular steel plate. The efficacy of the fabricated impedance control circuit is confirmed by the single-axis control experiments. By operating the three secondary electromagnets, the floator was successfully suspended without any mechanical contact.

Keywords: Magnetic suspension, AC magnetic suspension, magnetic bearing, permanent magnet, energy transfer.

1 緒言

磁気力によって物体を非接触で支持する磁気浮上には、磁力の発生源と浮上の対象となる物体(浮上体)の種類・組み合わせによって、いろいろな方式がある[1]。常電導電磁石と強磁性体との間の吸引力を利用する方式の磁気浮上では、ほとんどの場合、直流電磁石が用いられている。この場合、浮上体に電力を非接触で供給するためには、トランスなどを用いる必要がある。これに対し、交流電磁石を用いると、浮上力を発生すると同時に浮上体に電力を供給することが可能となる。

このような交流吸引形磁気浮上に関しては、浮上体に搭載した2次電磁石のコイル電流の大きさを調整することによって、浮上体に電池を搭載することなく、浮上を実現できることがすでに実証されており[2-4]、この原理を利用した磁気浮上搬送システムも開発されている[5,6]。その浮上原理は、2次側コイルの端子を短絡・開放制御することによって、浮上体の反発状態と吸引状態を切換えて、安定な磁気浮上を実現するというものである[4]。

本論文では、永久磁石を併用した交流吸引形磁気浮

上を提案する。提案する磁気浮上では、浮上体の重量を支持するのに必要なバイアス磁束を、永久磁石を用いて与える。これに対し、交流電磁石は、安定な浮上およびエネルギー電送を達成することに用いる。そして浮上力の平均的な大きさを連続的に増減するために、電流の向きによって独立にインピーダンスの大きさを設定できる新しい方式の可変インピーダンス回路を提案する。

本論文では、まず、提案する交流型磁気浮上の基本構成と動作原理について述べる。つぎに、提案する方式の磁気浮上によって、実際に浮上体の完全非接触支持が可能であることを実証するために試作した磁気浮上実験装置の概要を述べる。つぎに、試作した装置を1自由度磁気浮上装置として用いて実施した基礎実験の結果を示す。さらに、これを3自由度磁気浮上装置として用いて、浮上対象物の完全非接触支持を実現した結果について述べる。

2 永久磁石併用交流形磁気浮上の原理

2.1 インピーダンス制御形交流磁気浮上

従来から提案されている単相電磁石を用いた交流磁気浮上機構の基本構成を Fig.1 に示す。固定された1次側コイルと浮上体に取り付けられた2次側コイルからなる。1次側コイルには定電圧交流電源もしくは定電流電源が接続されている。2次側コイルには可変イ

連絡先: 水野 毅, 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255, 国立大学法人埼玉大学工学部機械工学科,
e-mail: mizar@mech.saitama-u.ac.jp

^{*1} 国立大学法人埼玉大学 ^{*2} カシオ計算機株式会社

ンピーダンス回路が接続される。

可変インピーダンス回路で実現する等価インピーダンスが無限大の場合、2次側コイルは開放されていることになるので、1次側コイルに流れる電流によって、通常の交流電磁石と同じ大きさの吸引力が発生する。逆に、インピーダンスを小さくすると、2次側コイルには、誘導起電力によって電流が流れ、1次側電磁石によって生成される磁束の変化を打ち消すような磁束が生じるので、吸引力は小さくなる。したがって、2次側コイルに接続するインピーダンスの大きさを空隙の大きさによって変えれば、浮上制御が達成できる。これがこれまでに提案されている交流吸引形磁気浮上の原理である[2,4]。

2.2 永久磁石併用交流形磁気浮上

本報で提案する永久磁石を併用した交流吸引形磁気浮上の基本構成図を Fig.2 に示す。これは、ステータ側電磁石（1次側電磁石）、浮上体及びこれに取付けられた電磁石（2次側電磁石）とからなる。そして、1次側電磁石のコイルには交流電源が接続されている。また、2次側電磁石のコイルには、可変インピーダンス回路が接続されている。さらに、2次側電磁石の表面には、永久磁石が取付けられている。

この磁気浮上系では、浮上体の重量を支える吸引力は、永久磁石によって与える。永久磁石だけでは、安定な浮上は得られないので、1次側コイルに交流を流し、誘導起電力によって流れようとする2次側電流の大きさを可変インピーダンス回路によって制御することによって、吸引力の調整を行い、安定な浮上を実現

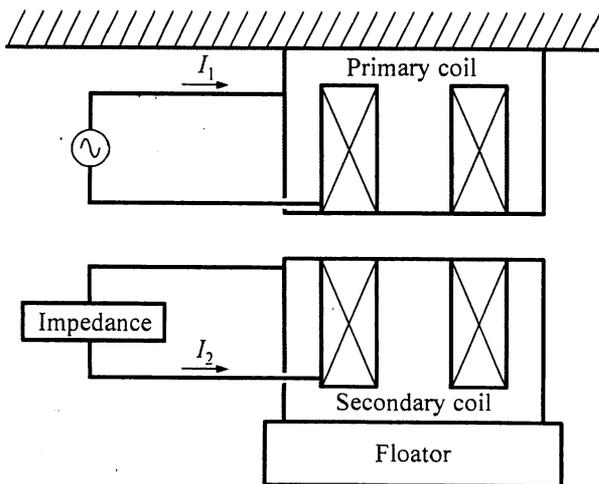


Fig.1 Conventional AC magnetic suspension with impedance control mechanism.

する。ただし、ここで用いる可変インピーダンス回路は、電流の流れる方向によっては、電流を全く流さなくするような特性を持っている必要がある。以下では、このような特性が必要となる理由を説明する。

Fig.3 は、2次側コイルと直列に接続するインピーダンス回路において、電流の向きに依らず、単純にインピーダンスを大きくした場合と小さくした場合の2次側コイル電流及び吸引力の変化の様子を概念的に示したものである。例えば、インピーダンスを小さくすると、2次電流の大きさ（振幅）は大きくなる。この電

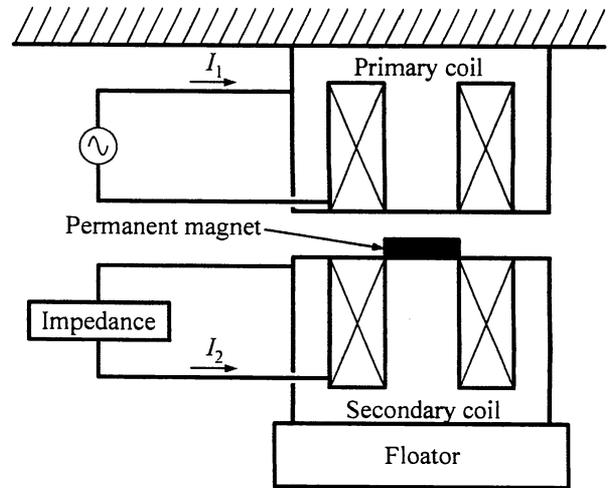


Fig.2 PM-biased AC magnetic suspension with impedance control mechanism.

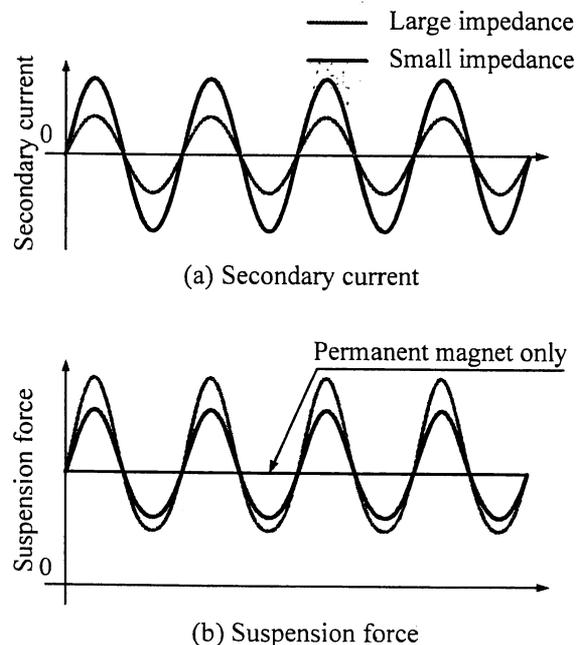


Fig.3 Impedance dependence of the secondary current and suspension force.

流は、1次電流を流すことによって生じる磁束の変化を打ち消すように流れるので、もし永久磁石によるバイアス磁束がないのであれば、浮上力は小さくなる。逆に、インピーダンスを大きくすると、浮上力は大きくなる。2.1 で述べた従来のインピーダンス制御形交流磁気浮上では、この原理に基づいて吸引力を制御している。しかしながら、永久磁石によるバイアス磁束がある場合には、Fig.3(b)に示すように浮上力が変化するので、インピーダンスの大きさを変化させても、吸引力の平均値の変化はそれほど大きくない。具体的には、磁束の交流成分を $\phi_a \sin \omega t$ とすると、 ϕ_a を変化させても $(\phi_a \sin \omega t)^2$ に比例する項から生じるバイアス力

だけが変化し、 $\phi_a \sin \omega t$ に比例する項は、平均すると零になってしまうので、吸引力の制御には寄与しない。

一方、Fig.4に示すように、2次側コイルと直列にダイオードを挿入すると、2次側コイルを流れる電流は、ダイオードの順方向だけとなる。1次側電流が浮上力を減らす方向に流れているときに2次電流が流れるようになっていいると、浮上力の減少が抑制される。逆に、1次側電流が浮上力を増やす方向に流れているときには2次側電流は流れないので、平均的な浮上力は増加することになる (Fig.4(a))。ダイオードの向きを反転すると、この関係は逆になるので、平均的な浮上力は増加することになる (Fig.4(b))。さらに、永久磁石の極性を反転すると、ダイオードの向きと浮上力の増減の関係も反対になる。

以上のことから、電流の向きによって独立にインピーダンスの大きさを設定できる可変インピーダンス回路を用いれば、平均的な吸引力を連続的に増減させられるので、安定な磁気浮上を達成することが可能になると考えられる。

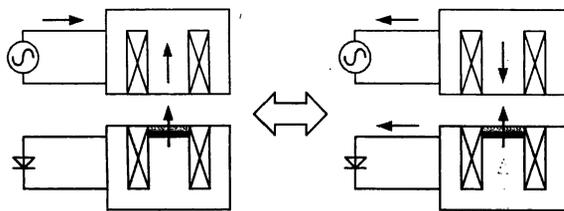
2.3 可変インピーダンス回路

本研究で開発した可変インピーダンス回路の構成を Fig.5 に示す。この回路は、前述したような電流の向きによって独立にインピーダンスの大きさを設定できる機能を持っている。

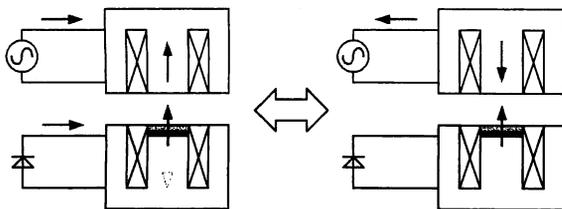
この回路では、ダイオードを利用して、2次側コイルを流れる電流の方向によって、その流れる経路を変えている。具体的には、図で2次側電流がコイルを上から下に流れるとき、電流は左側のA回路を通る。逆に、コイルを下から上に流れるとき、右側のB回路を通る。以下では、前者を正方向に流れる電流、後者を負方向に流れる電流と呼び、それぞれを I_a 、 I_b で表すことにする。

電流 I_a 、 I_b の大きさは、それぞれの回路のオペアンプへの入力電圧 V_a^{ref} 、 V_b^{ref} によって独立に調整することができる。したがって、平均的な浮上力の大きさは、これらの入力電圧によって制御できる。例えば、永久磁石の極性が、 I_a が大きくなると浮上力が増加している場合には、つぎのような関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} V_a^{ref} > 0, V_b^{ref} = 0 &\Rightarrow \text{浮上力増加} \\ V_a^{ref} = 0, V_b^{ref} > 0 &\Rightarrow \text{浮上力減少} \end{aligned} \right\} (1)$$



(a) Increase of suspension force



(b) Decrease of suspension force

- ← : Magnetic field produced by permanent magnet
- ← : Magnetic field produced by primary current
- ← : Magnetic field produced by secondary current

Fig.4 Operation of diode.

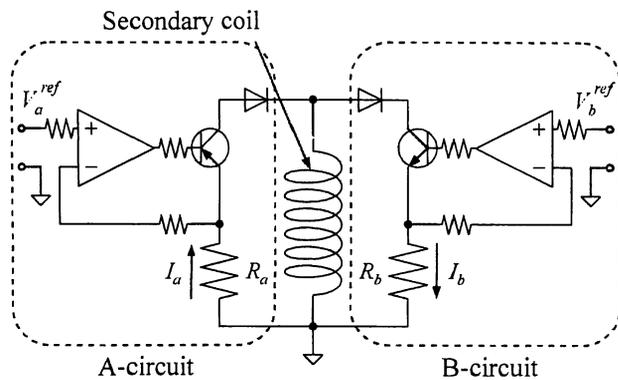


Fig.5 Impedance control circuit.

したがって、浮上体の運動に応じて V_a^{ref} , V_b^{ref} の値を変えてやれば、浮上体に復元力や減衰力を作用させることができるので、安定な磁気浮上が達成できると考えられる。

3 実験装置

試作した実験装置の写真及び概略図を Fig.6 及び

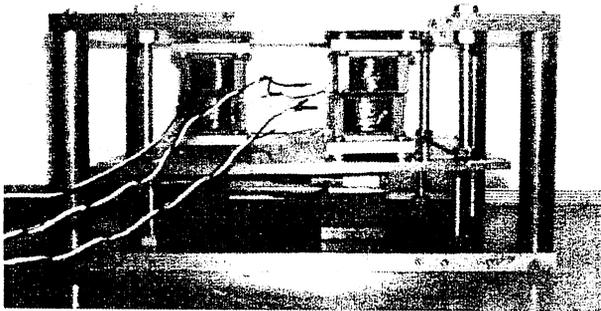
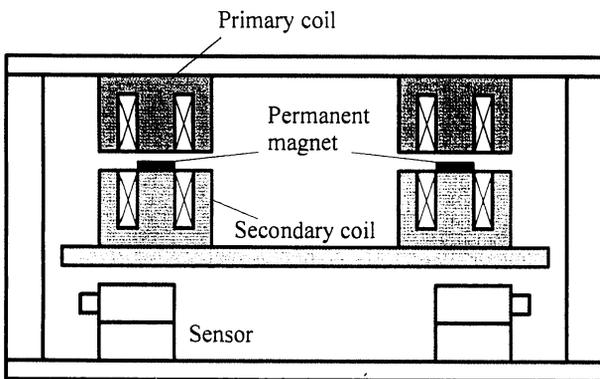
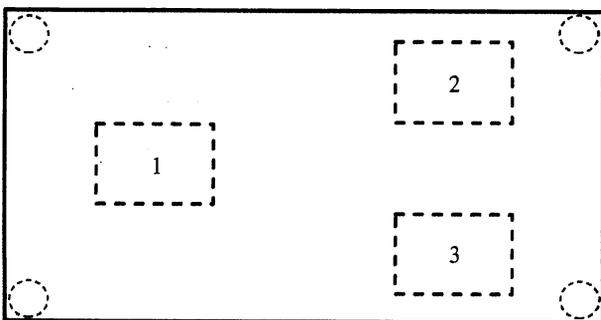


Fig.6 Photograph of experimental apparatus



(a) Side view



(b) Top view

Fig.7 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.7 に示す。この装置は、永久磁石を併用した交流電磁石を 3 組備えている。その配置を Fig.7(b) に示す。2 次側電磁石と永久磁石は、矩形の鋼板からなる浮上体に取り付けられている。

以下の実験では、この装置をつぎの二通りの方法で用いている。

(1) 1 自由度実験装置：この場合には、浮上体の片側を軸で固定し、その運動を軸周りの 1 自由度の回転運動だけに拘束する。

(2) 3 自由度実験装置：この場合には、3 組の交流電磁石を利用して、浮上体の垂直方向の 3 自由度の運動、すなわち 1 自由度の並進運動と 2 自由度の回転運動を能動的に制御する。一方、他の自由度の運動は磁石の端効果を利用してパッシブに拘束し、完全非接触支持を実現する。

交流電磁石は、1 次側・2 次側ともに珪素鋼板を積層したものを鉄心とし、直径 0.5mm のホルマル導線を 330 回巻いたものをコイルとして用いた。コイル抵抗の大きさは、3.0Ω である。永久磁石としては、円柱状の薄型ネオジム磁石 (φ3mm×0.6mm) を 20 個鉄心の表面に取り付けて用いた。

1 次側電磁石の励磁には精密電力増幅器を用い、この増幅器への入力信号を発振器で与えることによって、交流電源の振幅・周波数を自在に変えられるようにした。なお、以下に示す実験では、交流電源 (1 次側コイルへの印加電圧) の振幅・周波数はそれぞれ 30V, 150Hz とした。

浮上体の垂直方向の変位は、ベース上に取付けた 3 個の渦電流形変位センサで検出している。これらのセンサは、交流電磁石と同じ位置に配置している。

制御系の実装には、DSP を核とするデジタル制御装置を用いている。渦電流形センサの出力は、A/D 変換器を通してコントローラに入力される。コントローラでは、その信号に基づいて、安定化に必要な制御入力を計算し、それに対応する V_a^{ref} , V_b^{ref} の値 (式(1)参照) を D/A コンバータを介して可変インピーダンス回路に出力する。

4 実験結果

4.1 エネルギー伝達効率の測定

最初に、製作した永久磁石併用交流電磁石間のエネルギー伝達効率を測定した結果を示す。この実験では、2 次側電磁石を固定し、1 次側電磁石とのギャップを

一定に保った状態で測定を行った。また、2次側コイルの両端を47Ωの固定抵抗を介して接続し、この抵抗で消費される電力の1次側電磁石に供給される入力電力に対する比で伝達効率を評価した。

測定結果を Fig.8 に示す。図の横軸は、1次側電磁石と2次側電磁石との間のギャップを表している。ただし、永久磁石の厚さもこのギャップに含まれている。図から、ギャップを小さくしていくと伝達効率が良くなることが確認できる。

4.2 吸引力特性の測定

つぎに、試作した可変インピーダンス回路を用いて永久磁石を併用した交流電磁石を励磁したときの吸引力特性を測定した結果を Fig.9 に示す。この実験では、2次側電磁石を力センサに取付けて、吸引力の測定を行っている。図から、 I_a が増加すると吸引力は増加し、 I_b が増加すると吸引力は減少することがわかる。また、吸引力が減少する割合は、増加する割合の約8倍となっている。

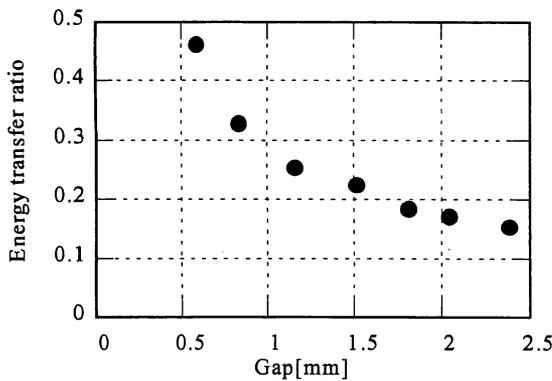


Fig.8 Energy transfer ratio as a function of gap.

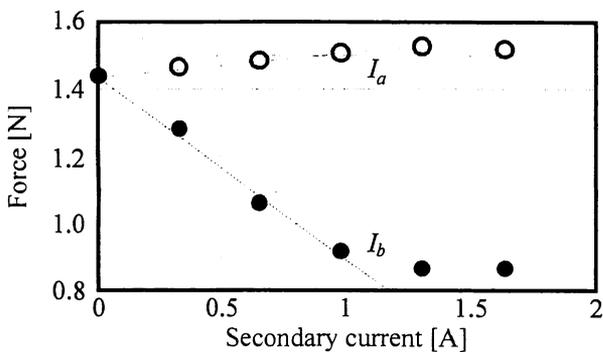


Fig.9 Suspension force as a function of secondary current.

4.3 1自由度制御実験

この実験は、Fig.10 に示すように浮上体の運動を1自由度の回転運動に拘束した状態で、交流電磁石1だけを動作させて行った。制御則としてはPD制御を用いた。制御系全体の信号の流れを Fig.11 に模式的に示す。デジタルコントローラからは、可変インピーダンス回路へ指令電圧 V_a^{ref} , V_b^{ref} が出力されるが、式(1)の関係を満たすように、出力される値に上限あるいは下限を設けている。

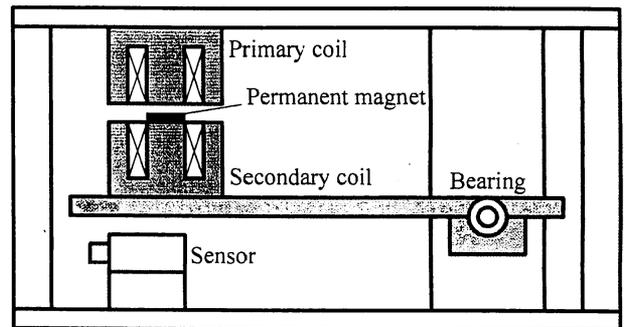


Fig.10 Single-axis operation.

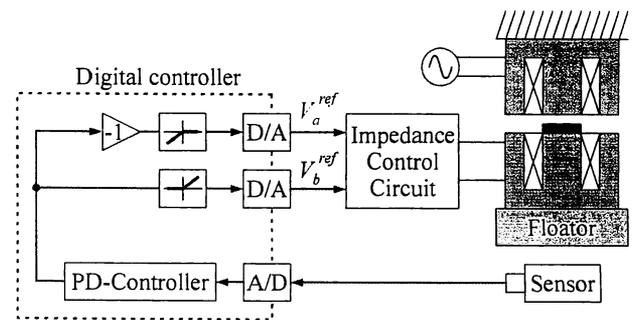


Fig.11 Schematic diagram of control system.

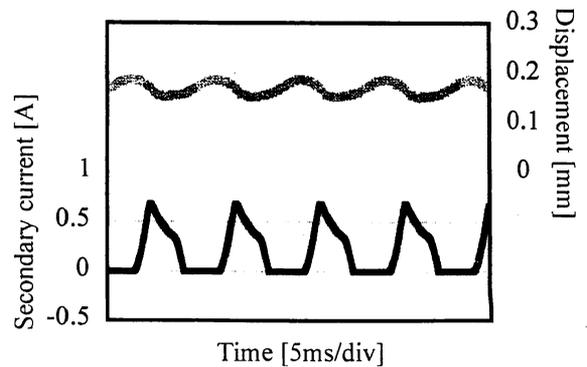


Fig.12 Floator displacement and secondary current when the single-axis system is stabilized.

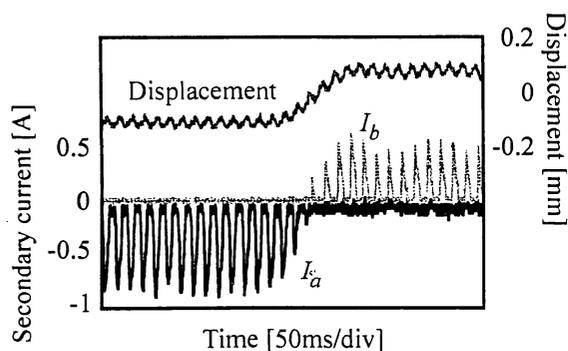


Fig.13 Step response of the single-axis suspension system.

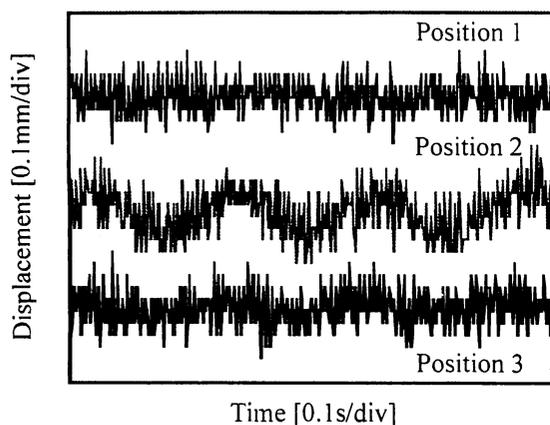


Fig.14 Vertical displacements of the floator when noncontact suspension is achieved.

浮上体の回転運動が安定化されているときの浮上体の変位と2次側電流を Fig.12 に示す。実験の条件では、浮上体の平行位置が基準となる位置 ($z=0$) より上側にあるので、P制御の作用によって、 I_b だけが流れるように制御されている。

つぎに、制御信号にステップ状の外乱信号を重畳させたときの応答を Fig.13 に示す。浮上体が基準位置より下に変位しているときには、浮上力が増大するように I_a だけが流れ、逆に基準位置より上に変位しているときには、浮上力が減少するように I_b だけが流れていることが確認できる。

これらの結果から、開発した可変インピーダンス回路によって安定な磁気浮上を達成するような動作が実現されていることが確認できる。

4.4 完全非接触浮上の実現

最後に、浮上体の運動を拘束している軸を取りはずし、3個の交流型電磁石を動作させて浮上体の完全非接触を試みた。制御則としては、1自由度制御の場合

と同様に PD 制御を用いた。制御系は、基本的には、Fig.11 に示したものを3組用いた構成とした。ただし、デジタルコントローラとしては、一つの装置を共通に用いた。

浮上体の完全非接触浮上させたときの各変位センサの出力を Fig.14 に示す。この結果から、浮上体は、約 0.1mm 程度の範囲の位置変動を伴いながら浮上していることがわかる。

5 あとがき

本論文では、永久磁石を併用した交流吸引形磁気浮上を提案し、電流の向きによって独立にインピーダンスの大きさを設定できる新しい方式の可変インピーダンス回路の基本構成を明らかにした。つぎに、試作した3自由度磁気浮上実験装置の概要を述べた。実験では、最初に、実験装置を1自由度磁気浮上装置として用いて、提案する方式の交流形磁気浮上機構によって、浮上体に作用する吸引力が連続的に制御でき、安定な磁気浮上を達成するような動作が実現されていることを確認した。つぎに、実験装置を本来の3自由度磁気浮上装置として用いて、浮上対象物の完全非接触支持を実現することに成功した。

今後は、浮上時におけるエネルギー伝送性能などを評価するために、浮上体に充電回路を設置し、非接触浮上させた状態で2次電池を充電する実験を行う予定である。また、超清浄空間における搬送システムなど、より実用性の高いシステムを開発し、性能を評価していくことを計画している。

(2005年2月15日受付, 2005年9月14日再受付)

参考文献

- [1] 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会(編), “磁気浮上と磁気軸受”, コロナ社, pp.8-13, 1993.
- [2] Tsukamoto, O., Yasuda, K. and Chen, J. Z., “A New Magnetic Levitation System with AC Magnets”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.24, No.2, pp.1497-1500, 1988.
- [3] 陳, 塚本, “三相交流電磁石を用いた吸引形磁気浮上方式の特性解析”, 電気学会論文誌 D, 112 巻, 10 号, pp.997-1005, 1992.
- [4] 平田, 引原, 平根, “LIM を用いた交流吸引形磁気浮上システムの浮上特性”, 電気学会論文誌 D, 110 巻, 10 号, pp.1091-1099, 1990.
- [5] 引原, 小西, 平根, “LIM による磁気浮上システムの実用化搬送車に関する研究”, 電気学会論文誌 D, 112 巻, 12 号, pp.1194-1199, 1992.
- [6] 引原, 上條, 平根, “交流吸引形浮上搬送用 LIM の走行実験”, 電気学会論文誌 D, 115 巻, 3 号, pp.182-286, 1995.