

並進方向に非拘束な自由度を持つ真空対応静電浮上装置の試作

Electrostatic levitation system in vacuum condition which is not constrained in horizontal translation

新野俊樹*・塚本英隆*

Toshiki NIINO and Hidetaka TSUKAMOTO

1. はじめに

ナノテクノロジー研究, 半導体製造, 材料開発などの分野では, 各種高分解能顕微鏡, 高分解能加工装置, 表面解析装置など様々な装置が利用されるが, これらの装置では, サブミクロンからナノメートルオーダーの微細構造を観察・制御する必要性から, 塵埃や気体分子によるコンタミネーションの少ない高真空環境を必要とする場合がある. また, 近い将来, これらの装置を生産ラインなどへ導入することを想定した場合, このような環境下での高速・高精度位置決め, 搬送などの高度なメカトロニック操作が必要となることが予想される^{1,2)}.

しかし, 真空中では固体間の摩擦係数が大きく, 摩擦も速い, また, 複雑なメカを配置すると, 表面積が増大し, アウトガスが増え, 真空容器内の圧力を下げることが難しくなる, などの問題がある.

以上の問題のうち, 主に摩擦の問題に対する解決策として, 筆者らは真空環境下での静電浮上を利用したシステムを提案している. 摩擦の問題は大気中でも深刻であり, 精密位置決めを行う際や高速な相対速度を持つ物体間の潤滑には, 空気などの流体静圧を用いた浮上を利用されるが, 空気圧浮上が困難な真空中では, 磁気浮上を利用され, ターボ分子ポンプ用の軸受けとして大成功している. しかしながら, 電子顕微鏡, 電子線露光装置など, 電子ビームを利用する装置では, ビーム制御の不要磁場による擾乱をさける必要性から, ビーム周辺での磁気浮上機構の使用は好ましくない. 一方, 静電浮上は磁性体を全く使用せずに浮上力を発生することができ, 場のシールドも磁場に比べれば容易である. また, 発熱が少ない点も空気による冷却が全く期待できない真空中では有利である.

静電力は磁気力に比べて非常に弱いのではないかという懸念があるが, 1 Pa 以下の真空中では絶縁破壊強度が増大

し³⁾, 理論的には大気中での磁場の1/10程度の吸引力が期待できる. これまでに筆者らは, 厚さ25 mm, 質量547 gのアルミ円板の浮上体を 10^{-4} Paの真空環境下で浮上することに成功, 静電力が十分な浮上力を発生できることを確認した. また, 静電浮上には高電圧の高速な制御が必要であり, それには高価な高速増幅器が必要となるため, 実用性を考えると問題がある. そこで, 高速増幅器の出力に, 比較的安価な定電圧電源の出力を重畳することで, 高速増幅器が出力しなくてはならない電圧範囲を低減し, 静電浮上装置の経済性の向上も可能であることを示した⁴⁾.

本報では, 静電浮上を搬送装置や位置決めテーブルなどに応用する場合を想定して, 水平方向の並進に拘束の無い自由度を有する浮上を実現するための電極構造(静電浮上レール)を提案し, 試作, 浮上試験を行う. また, 定電圧電源を用いた高速増幅器負荷の低減方法をこの静電レールに適用し, その実験結果の報告を行い, 真空中静電浮上の実用可能性を高める.

2. 静電浮上レール

静電浮上は, 浮上体の直上に電極を配置し, 電極に電圧を印加することによっておこなう(図1). このような配置により, 固定子電極と浮上体による平板コンデンサを構成し, 平板コンデンサの2電極間の吸引力を浮上力として利用する. ギャップセンサを用いて, フィードバック制御系を構成し, 印加電圧を制御することによって静電吸引力を調整し浮上体を目的の位置で浮上させる. 各浮上用電極がアクチュエータに相当するが, 浮上体が絶縁されている場合, 浮上体の電位を決定するために, 制御する自由度数に1を加えた枚数の固定子電極の電圧制御が必要となる.

浮上システムは浮上体, 固定子電極ユニット, ギャップセンサ, 制御装置, 高電圧発生装置から構成される(図2)静電浮上レールにおける各固定子電極は非拘束方向を長軸とする矩形であり, このため, 電極が十分長ければ, 浮上

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

体の位置が変化しても浮上体と電極の相対関係は変化しない。このことにより、並進方向に非拘束な自由度を可能にする。浮上体はその上面に凹凸構造を有する。固定子電極は浮上体の凹部、凸部の両方の直上にあるが、凸部と固定子電極との間隔は凹部でのそれと比べ十分に小さいので(実験装置において浮上ギャップ 200 μm, 凹凸差 2 mm), 静電吸引力は凸部のみに働くこととする。以降では、浮上体凸部を浮上体電極と呼ぶことにする。固定子および浮上体にはそれぞれ5枚の電極を構成し、1から5までの番号を付番する。固定子電極1と5は接続されており、常に等しい電圧が印加される。以下、各自由度の制御方法について説明するが、ここでは、説明を簡単にするために、浮上体電位を0と仮定する。まず、浮上体のピッチ角θの制御には、電極1(電極5)と電極3を利用する。電極3の印加電圧の絶対値を電極1(電極5)に対して大きくすることによりθを大きくする方向のモーメントを発生する。次に、ロール角φの制御には、電極2および電極4を使用する。ピッチ角と同様に電極2の印加電圧の絶対値を、電極4に対して大きくすることで、φを増大するモーメントが発生する。最後に、鉛直方向の位置zは、すべての固定子電極における印加電圧の絶対値を大きくすることで、zを大きくする力を発生する。以降では直感的な理解を容易にするために、電極1および5を電極θ-, 電極3を電極θ+, 電極2, 4をそれぞれ、電極φ+, 電極φ-と呼ぶことにする。残りの自由度、鉛直軸周りの回転とおよび、xy方向の並進については、固定子電極と浮上体電極の幅を等しくすることで、端部効果を用いて受動的に制御する。表1に各自由度の制御方法と使用電極を整理する。

制御は目標ギャップ周辺で線形化した自由度対応PD制御とした。ギャップセンサ出力の指令ギャップからの誤差を、座標変換により、zθφ座標系へ変換し、PD制御を施した後、電極電圧へ座標変換し、さらに、あらかじめ計算された指令ギャップでのつりあい電圧に重畳し、電極へと印加する。

PD制御器からの出力は、3出力であるのに対して電極

表1 制御方法

制御方法	方向	電極
能動	z +	1,2,3,4,5
受動	x,y,ζ	
能動	θ +	3
	θ -	1,5
	φ +	2
	φ -	4

電圧は4電圧なので冗長であるが、絶縁された浮上体電位を0とするための拘束条件を加えて、制御器からの3出力を4電極電圧の座標系へ投影する。具体的には、

$$v_{\theta+}S_{\theta+} + v_{\theta-}S_{\theta-} + v_{\phi+}S_{\phi+} + v_{\phi-}S_{\phi-} = 0 \dots\dots(1)$$

が拘束条件となる。ただし、 $v_{\theta+}$, $v_{\theta-}$, $v_{\phi+}$, $v_{\phi-}$ は、各固定子電極への印加電圧、 $S_{\theta+}$, $S_{\theta-}$, $S_{\phi+}$, $S_{\phi-}$ は各固定子電極の面積である。また、静電気力の大小は印加電圧の符号の正負に影響されないので、電圧の符号は任意に選ぶことが出来るが、xおよびyを受動制御するための端部効果を大きくするためには、電極電位は交互に並んでいた方が好ましい。本報の実験においては、 $v_{\theta+}$, $v_{\theta-}$ を正、 $v_{\phi+}$, $v_{\phi-}$ を負とした。(図3)さらに、PD制御器の出力を電圧値に変換する際、浮上体の電位は0以外にも任意に設定可能であるが、モデルの単純化と、増幅器最大電圧の最小化のためには、0とすることが好ましい。

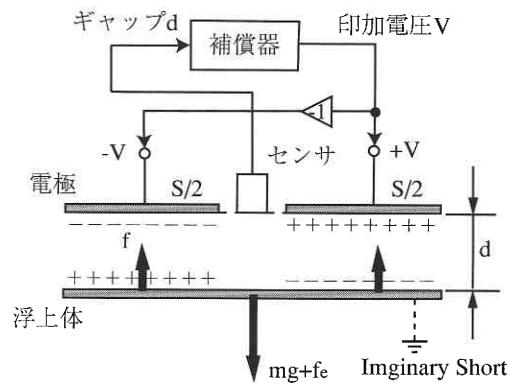


図1 静電浮上模式図

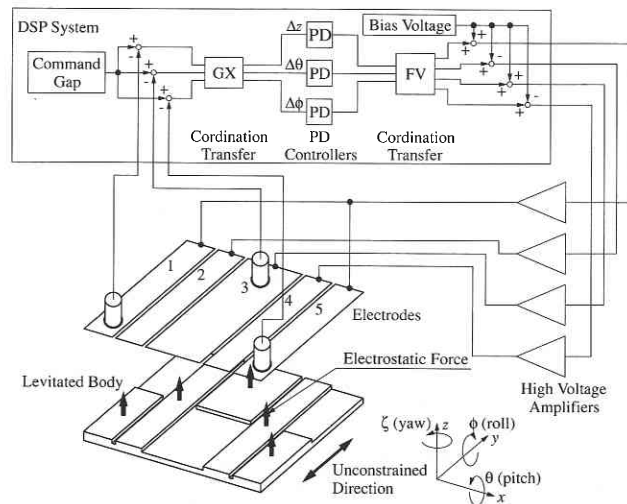


図2 浮上システム

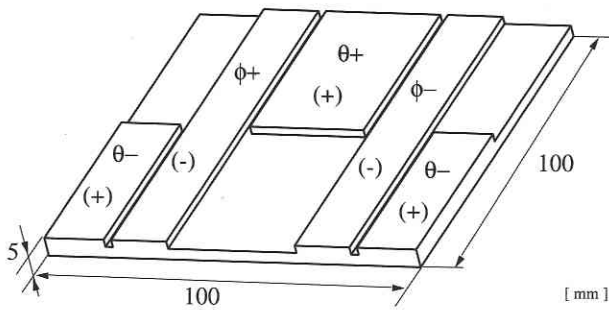


図3 浮上体電位

表2 制御パラメータ

つりあい電圧		1250V
鉛直方向ゲイン	比例	15000N/m
	微分	40Ns/m
ピッチ方向ゲイン	比例	45Nm/rad
	微分	0.05Nms/rad
ロール方向ゲイン	比例	45Nm/rad
	微分	0.05Nms/rad

3. 実 験 装 置

ギャップセンサには渦電流センサ (EX-500, KEYENCE) を用い、高電圧発生装置には高速増幅器 (Model 609 E, Trek) を用いた。制御装置には DSP (ADSP-324) をプロセッサとするシステムを用いた。浮上体の質量は 117 g である。浮上体電極 $\theta+$ と、浮上体電極 $\theta-$ の面積は等しくなるようにし、浮上体電極 $\phi+$ と $\phi-$ は同形状である。(前項 図3) また、浮上体電極 $\theta+$ および $\theta-$ の面積の和と、浮上体電極 $\phi+$ および $\phi-$ の面積の和を等しくなるように電極を設計した。(ただし固定子電極の、ギャップセンサ用の穴の面積は電極面積に含めない。)

4. 高速増幅器による浮上実験

静電浮上レールをもちい浮上実験を行った。目標ギャップは $200 \mu\text{m}$ とし、つりあい電圧は 1250 V とした。その他の各制御パラメータを表2に示す。また、実験結果として、図4に浮上を行った際の、浮上体の重心と固定子電極間の距離、傾き、各電極の出力電圧を示す。目標ギャップである $200 \mu\text{m}$ で浮上し、高速増幅器の出力は $\pm 2.1 \text{ kV}$ であった。

5. 高速増幅器と定電圧電源を用いた浮上

前項の実験結果から、浮上には $\pm 2.1 \text{ kV}$ の印加電圧が必要であることがわかった。出力電圧の絶対値での最大値

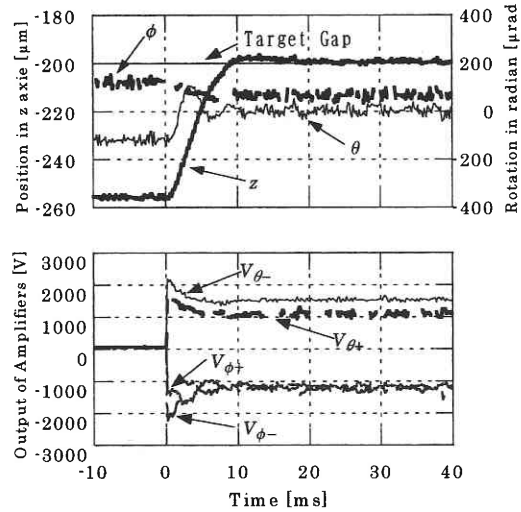


図4 浮上体の姿勢、印加電圧

は 2 kV 以上であるが、電圧が変化している範囲は、絶対値で 1000 V から 2100 V である。そこで、変化のない 1000 V 以下の電圧は比較的安価な定電圧電源から出力し、高速増幅器の出力に重畳させることにより、高速増幅器から出力しなければならない電圧を低減することを試みた。使用した定電圧電源は最大 8 kV の直流値電圧を発生することが可能である (E 80, EMCO 社製)。出力電圧は入力電圧に比例するが、その応答速度は 1 s 以上と非常に遅く、制御出力には利用できない。回路構成を図5に示す。高速増幅器の出力に直列に定電圧電源を接続し、重畳を実現している。また、定電圧電源の内部インピーダンスによる、高速増幅器の電圧変化に対する電極電圧の応答速度の低下を防ぐために、定電圧電源の出力端子間に $0.22 \mu\text{F}$ のコンデンサを接続した⁴⁾。

つりあい電圧のうち定電圧電源から 950 V、高速増幅器から 300 V をあたえた。PD 制御の各ゲインについては前項の実験と同じ値をもちいた。実験結果として図6に浮上を行った際の、浮上体重心と固定子電極間の距離、傾き、高速増幅器、定電圧電源の出力電圧を示す。

用いた定電圧電源は、入力値に応じた出力電圧を出力す

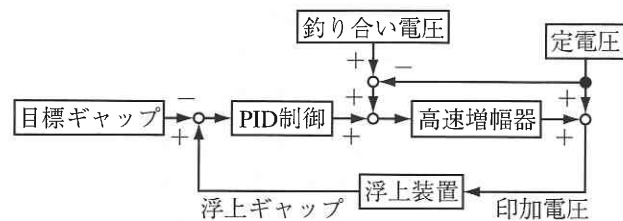


図5 回路構成

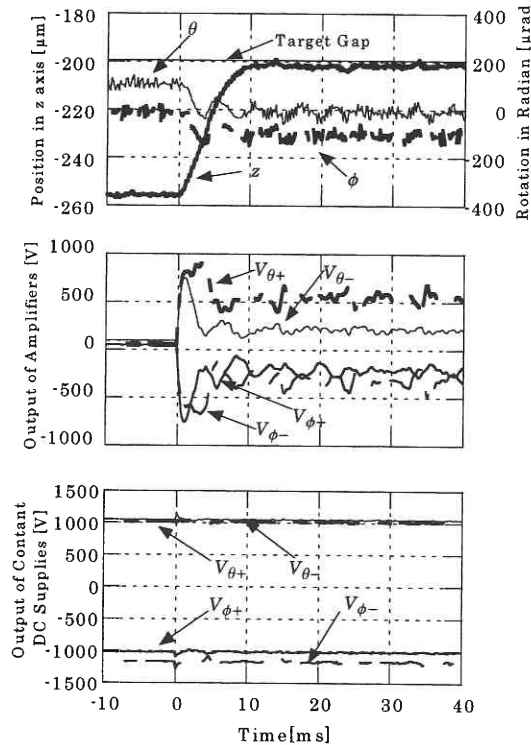


図6 浮上体の姿勢, 印加電圧
(上; 高速増幅器 下; 定電圧電源)

るが, 入力値と出力電圧の関係は線形ではないため, 指示どおりの電圧を出力することは難しく, 各定電圧電源の出力電圧に差が生まれている. 高速増幅器の出力電圧に定電圧電源の出力電圧を重畳させることによって, 高速増幅器の出力電圧は ± 900 Vに低減された.

6. 考 察

静電浮上レールを用い高電圧発生装置に高速増幅器を使用した浮上実験では, ± 2 kV以上の電圧が必要であったが, 安定浮上時に必要な電圧は1250 V (20–30 msにおける面積あたりの印加電圧 (絶対値) の平均) であった. 浮上体をコンデンサと考え, 必要な浮上力をえるための印加電圧を計算すると1310 Vであり, 実験値と一致しない. また, 浮上時に定常偏差が残っているため各電圧により印加電圧が異なった. これらは, 電極・センサが水平でない

ため電極, 浮上体間の測定距離が正確なものではなく誤差を含んでいる, 印加電圧と浮上力との関係が間違っている, 浮上体がアンバランスであるため重力によるモーメントが働いている, といった可能性がある. このため, 電圧に対する浮上力を調べることを目的とした, 定量的な評価を行う必要がある.

また, 高速増幅器と定電圧電源を組み合わせた浮上では高速増幅器より300 Vのつりあい電圧を出力した. これは, 実際のつりあい電圧と理論値が異なる, 定電圧電源の出力が一定でない, ため, つりあい電圧を補正する目的で出力した. 定量的な評価によりつりあい電圧が求まり, 定電圧電源の出力を一定にすることができれば, この電圧はなくすることができる.

さらに, 出力電圧は浮上開始直後にピークを迎えるため, 浮上体を浮上目標位置に即座に浮上させるのではなく, 目標値を徐々に変化させ, 時間をかけて最終目標位置まで浮上させていく浮上方法 (ランプ指令) を使用することにより, 高速増幅器からの出力電圧はより軽減できると思われる.

7. ま と め

水平方向の並進に拘束の無い自由度を有する浮上を実現する電極構造 (静電浮上レール) を提案し, 浮上試験を行った. また, 定電圧電源を用いた高速増幅器負荷の低減方法を適用し増幅器出力電圧を ± 1 kV以下に低減した. 今後の課題として, 電圧と浮上力の関係についての定量的な評価, ランプ指令を用いた高速増幅器負荷の低減があげられる.

(2002年3月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 前田, 「半導体と真空装置」, 表面技術, Vol. 48, No. 11, 1997, pp. 3–9.
- 2) 小林, 「超高真空/極高真空の技術の展望」, 圧力技術, Vol. 38, No. 2, 2000, pp. 2–7.
- 3) D. Vischer, H. Bleuler "A New Approach to Sensor less and Voltage Controlled AMBs Based on Network Theory Concepts" 2nd International Symposium on Magnetic Bearing, 301, 1990.
- 4) 江戸, 新野, 樋口, 「高電圧直流電源出力に高速増幅器出力を重畳した真空中静電浮上」, 第12回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, p. 575.