

# 高真空対応完全非磁性静電浮上モータ

## High Vacuum Compatible and Fully Nonmagnetic Electrostatic Levitation Motor

新野俊樹\*・塚本英隆\*\*

Toshiki NIINO and Hidetaka TSUKAMOTO

### 1. はじめに

半導体技術の進展やナノテクノロジーの発展に伴い、原子サイズオーダーの微細な加工や観察が行われるようになり、電子顕微鏡やEB露光装置など電子線の微細な制御を利用した機器の重要性が高まっている。電子線を利用した微細構造の観察や加工では、塵埃などはもちろんのこと気体分子も擾乱となり得るため、清浄かつ超低圧環境(超高真空)が必要となる場合がある。このような環境下での微細な位置決め、搬送などのメカトロオペレーションが大気中と同じように実現できれば、微細加工の応用がさらに広がっていくと考えられるが、超高真空に対応したモータやセンサなどの要素技術は十分に開発されておらず、真空中のメカトロニクスは大気中のそれほど容易ではない。真空中のメカトロを難しくしている要因はいくつかあり、金属間とくに同種金属材料間での摩擦係数と摩擦速度の上昇もその一つである。真空中でロータを高速回転しなければならないターボ分子ポンプでは、この問題を解決するために磁気浮上が巧みに利用されているが、電子線応用機器の試料ステージなどの場合、磁場の微小な変化や磁性体の存在すらもナノメータオーダーの電子線の制御には深刻な問題となるため、磁気浮上の応用は好ましくない。このような問題の対策として、空気軸受を排気機構を組み合わせる方法が考案されている<sup>1)</sup>。一方、筆者らは真空容器内に比較的自由に配置できる方法として、磁気力の代わりに静電気力を利用した浮上機構の開発を行っている。漏れ電場も電子ビームの制御を乱すが、電場は磁場に比べて容易にかつ完全にシールドできる点、電子線周辺での接地電位の金属の使用はあまり制限されていない点で有利である。

高真空中では電極間ギャップの絶縁破壊強度が大気中に比べ約30倍に増大する。静電気力は電場の2乗に比例す

るため、高真空中の静電気力の大きさは、大気中のその約900倍に増大し、理論的には $28 \text{ kN/m}^2$ までの吸引力を発生できる。この力は厚さ約1mmのアルミニウムに働く重力に相当し、技術的に十分な電圧印加が可能であれば、磁気力ほどではないが、かなりのメカトロ操作を自由にできることになる。これまでに筆者らは、 $10^{-4} \text{ Pa}$ の真空環境下で直径100mm、厚さ25mm、質量547gのアルミ円板の浮上に成功し、十分な浮上力を発生できることを確認した<sup>2)</sup>。また、搬送装置等への応用を目指し、水平面内の1軸に非拘束な自由度を有する浮上を実現する電極構造(以降静電浮上レール)を考案した<sup>3)</sup>。本報では、静電浮上レールの浮上体に抵抗体を固定して誘導電荷形静電モータ<sup>4)</sup>の移動子として利用し、静電気力での直接駆動に成功したので、駆動特性・浮上制御との関連について報告する。

### 2. 浮上機構

#### 2.1 浮上の原理

浮上装置の基本原理を図1を用いて説明する。浮上は静電吸引力を利用し、浮上体に働く重力と拮抗させることによって実現する。導体もしくは半導体の浮上体の上部に電極を2枚配置し、2電極間に電位差を与えると、高電位側

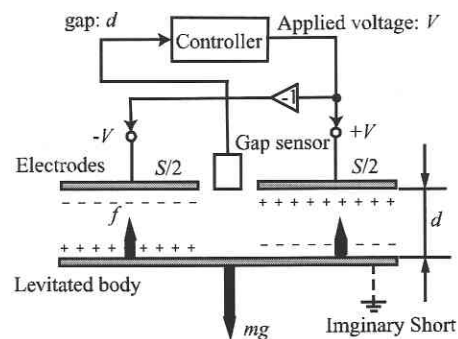


図1 浮上原理

\*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

\*\*特許庁

の電極には正の電荷，低電位側の電極には負の電荷がそれぞれ誘導される．さらに浮上体の電極と対抗する部位にはそれぞれの電極に誘導されている電荷に対して反対の符号の電荷が誘導され，電極に誘導された電荷と浮上体に誘導された電荷の間の吸引力により浮上体には浮上力が与えられる．ここでギャップセンサを配置すれば電極間電位差を制御することにより，ギャップを制御することが可能である．また，2枚の電極の電圧を独立に制御することにより，浮上力と同時に浮上体の電位を制御することができ，浮上体の電位を0に保つこともできる．

2.2 静電レール

図2に実際の浮上装置の電極と，浮上体の概形を示す．電極は，矩形の5枚の板であり，図中「Unconstrained Direction」と示される方向（以降非拘束方向）に関して軸対象となっている．浮上体は上面（電極と対向する面）に凹凸構造を有しており，凹凸の高さは浮上時の凸部と電極間の距離に対して十分大きくなるよう設定してある．浮上体は導体であるため等電位であり，各電極面も等電位であるため，凸部と電極間に働く電場と，凹部と電極間に働く電場では，前者の方が十分に大きい．さらに，静電力は電場の2乗に比例することから，浮上体への浮上力は凸部のみに働くと考えて良い．そこで以降では，浮上体凸部を浮上体電極，また，固定してある電極を，後述する静電モータのための電極と区別するために，浮上用固定電極と呼ぶことにする．

図2中浮上用固定電極の1番と5番は結線されており，浮上用固定電極には合計4つの電圧を印加することができる．静電浮上レールでは，この4つの電圧を制御することにより，浮上体の垂直方向位置，ピッチ，ロールを能動的に制御する．以下では，その方法について定性的に説明する．

各電極に適当な電圧が印加され，浮上体が安定に浮上し，

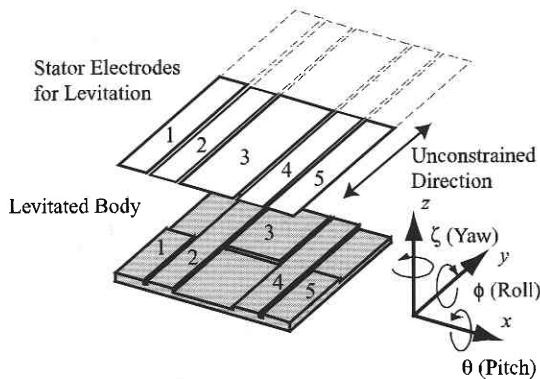


図2 静電レールの基本構造

なおかつ浮上体電位が0に制御されている状態から浮上体におおきく非拘束方向の紙面奥向きを前方とする)のモーメント(+θのモーメント)を与えるには，3番の浮上用固定電極に印加している電圧の絶対値を増加し，1番と5番に印加している電圧の絶対値を減少する．また，ロール(φ方向)のモーメントを与えるには，2番と4番の電極に印加されている電圧の絶対値を増減する．さらに，上方に引き上げるには，全ての電極に印加される電圧の絶対値を増加する．

非拘束方向に直交する水平面内の並進とヨー角は，対向する浮上体固定電極と浮上体電極の幅をそれぞれ等しくすることで，端部効果によって受動的に制御する．さらに非拘束方向に関しては，浮上用固定電極が浮上体寸法に対して非拘束方向に十分長いとすれば，端部効果は働かず，浮上用固定電極と，浮上体電極の相対位置関係は，浮上体の非拘束方向の位置に関わらず一定になり，任意の位置で浮上が可能となる．以上を表にまとめると表Iのようになる．

次に浮上体電位を0に保つための電極面積の配分について考える．1～5番の各浮上体電極の面積を $S_{LLi}$ ，各浮上用固定電極の電位を $V_{LTi}$ ，また浮上体電位を $V_{LL}$ とすると，浮上体が絶縁され浮上体の総電荷量が0とすれば，

$$\epsilon_0 \sum_{i=1}^5 (V_{LL} - V_{LTi}) \frac{S_{LLi}}{d_i} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

である．ここで， $\epsilon_0$ は真空誘電率， $d_i$ は各浮上体電極と子浮上用固定電極間の距離である．浮上体は水平に安定して浮上しているものとして，全ての $d_i$ は等しいとする．

$$V_{LL} = \frac{\sum V_{LTi} S_{LLi}}{\sum S_{LLi}} \dots\dots\dots (2)$$

であり，さらに浮上体電位を0としているので，

$$\sum V_{LTi} S_{LLi} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

表I 制御方向と用いる電極

Control Direction	Voltage Operation to electrode	
	Increase	Decrease
x	passive control	
y	unconstrained	
+z	all	none
+θ	3	1, 5
+φ	2	4
+ζ	passive control	

研 究 速 報

増幅器への負荷を均等にするためには、安定浮上時に各浮上用固定電極に印加する電圧の絶対値は等しいことが望ましいので、

$$V_{Lb} \sum \text{sgn}(V_{LTI}) S_{LLi} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

であり、さらに、端部効果を期待して、各電極には交互に正負の電圧を印加することにする。すなわち浮上用固定電極 1, 3, 5 に正の電圧, 2, 4 に負の電圧を印加することになると、

$$S_1 + S_3 + S_5 = S_2 + S_4 \dots\dots\dots (5)$$

となり、正の電圧を印加する電極と対向する浮上体電極の面積の和と、負の電圧を印加する電極と対向する浮上体電極の和とが等しければ良いことになる。

静電レールの制御システムを図 3 に示す。z, θ, φ を能動的に制御するために、ギャップセンサを 3 つ配置し、それぞれの自由度における目標値との偏差に座標変換し、PID 制御を施した後、再び座標変換を行い各浮上用固定電極に印加する制御電圧を決定する。最後にあらかじめ求めておいた目標位置での浮上に必要な電圧（以降り合い電圧）にこの制御電圧を加算して電極に印加する。PID 制御器の 3 出力から、5 電圧制御電圧への変換行列を決定するには、電極 1 と 5 が当電圧であることと、式 (3) の拘束条件を利用する。

2.2 浮上実験

浮上体はアルミ合金製で質量 117 g、表面の凹凸は 2 mm

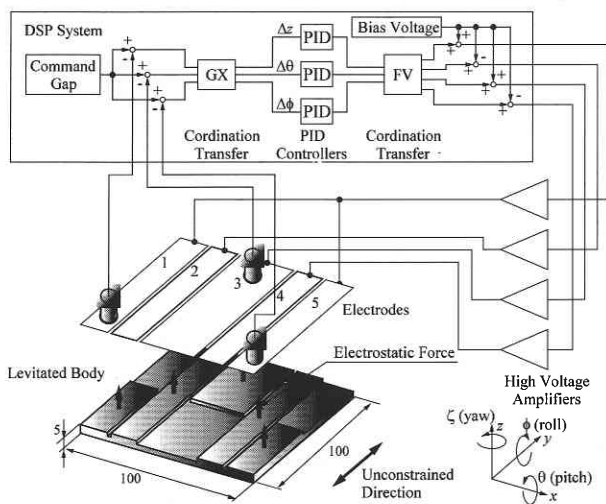


図 3 静電レール制御システム

である。浮上用固定電極 1, 3, 5 には渦電流式ギャップセンサを配置するための穴をあけた。表 II に示す制御則を用いて浮上制御した結果を図 4 に示す。

3. 浮 上 駆 動

3.1 駆動機構

浮上した浮上体の駆動には、誘導電荷形静電モータを利用した<sup>4)</sup>。このモータは微小な導電性を有する移動子と、3 相以上の相数の櫛歯状電極構造を有する固定子とから構成される (図 5 a)。運転のプロセスは充電と駆動の 2 段階に分割される。充電プロセスでは、固定子電極に値の異なる一定電圧をある一定時間印加することで、移動子の微小な導電性を利用して移動子表面に電極電荷の鏡像電荷に相当する電荷パターンを転写する (図 5 b)。次に駆動プロセスでは、先ほどの電極電圧印加パターンを一方向に順次シフトするか (図 5 c)、もしくは交流電圧とすることにより (図 5 d)、固定子・移動子間に進行電場を発生し、この進行電場とほぼ同期した速度で移動子を駆動する。この原理のモータでは移動子として、ソーダガラスが利用可能であることが報告されており<sup>5)</sup>、今回、ガラス板を浮上体に接着し、さらにその下方に、駆動用固定電極を配置することで、上方から吸引されて浮上している浮上体を非接触で駆動することを試みた。

3.2 浮上駆動実験

前述の静電レール浮上体の下側全面に厚さ 1.1 mm のガラス板を接着し、誘導電荷形モータの移動子とした。ガラス板を接着することにより、浮上体の質量は 134 g となっ

表 II 制御パラメータ

Balance Voltage $V_{Lb}$		1250V
Z gain	Proportional	15000N/m
	Derivative	40Ns/m
Theta gain	Proportional	45Nm/rad
	Derivative	0.05Nms/rad
Phi gain	Proportional	45Nm/rad
	Derivative	0.05Nms/rad

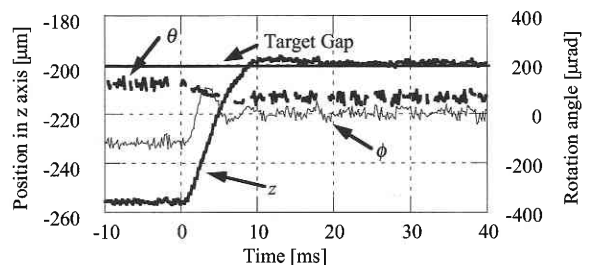


図 4 静電レールにより浮上中の浮上体の位置と姿勢

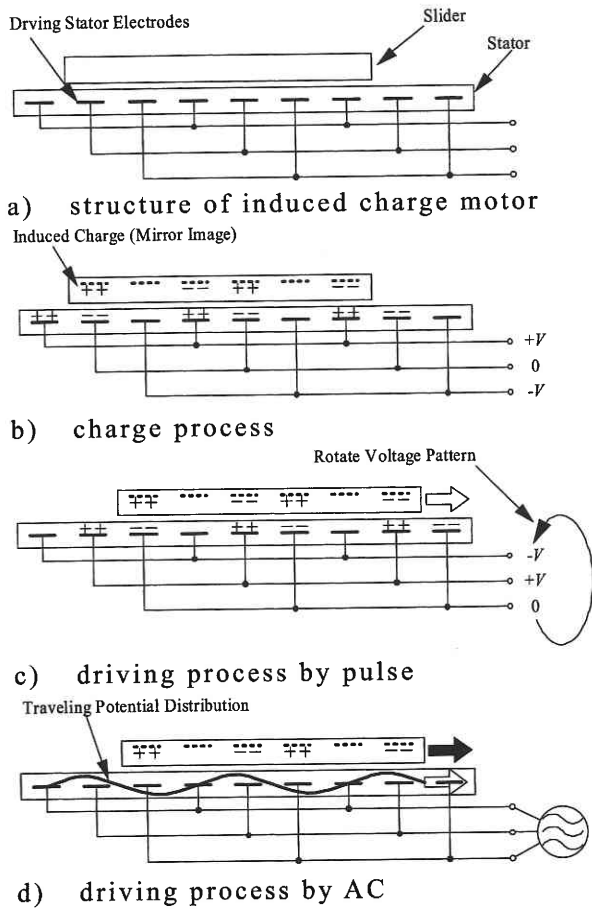


図5 誘導電荷形静電モータの構成と原理

た。駆動用固定電極は3相結線で配置ピッチは200  $\mu\text{m}$  である。

静電レールを用いて浮上体を浮上させた後、駆動用固定電極に電圧を印加し、浮上体の駆動をおこなった。浮上体は浮上用固定電極からの初期ギャップ264  $\mu\text{m}$  から、目標ギャップ200  $\mu\text{m}$  まで浮上する。浮上制御はPID制御とし、制御パラメータは表Ⅲの通りである。

浮上完了後、駆動用固定電極には振幅1 kVの3相交流を位相を固定した状態、すなわち直流状態で10秒間印加して電荷の充電を行い、次に周波数0.5 Hzとして10秒間印加して浮上体を駆動した。このときの駆動速度は0.3 mm/sである。その後再び印加電圧の位相を10秒間停止し(周波数0 Hz)、さらにその後位相の進行方向を逆転して(周波数-0.5 Hz)、浮上体を逆向きに駆動した。浮上開始から、駆動停止までの浮上体の位置、姿勢および駆動用電極への印加電圧の様子を図6に示す。

また、図7に示されるように、6.7 Hz、10 Hz、20 Hzと

1周期ずつ段階的に周波数を増加させていった場合、脱調を生じずに加減速を行うことが可能であった。20 Hzを印加した場合の同期速度は12 mm/sである。

#### 4. 考 察

浮上状態から駆動用固定電極に電圧を印加すると、浮上体が直ちに下方に引き下げられているのが確認できる。これは、ガラスに分極電荷が生じ、浮上体と静電モータ間に静電吸引力が働くためである。その後浮上積分制御の効果で、再び目標ギャップに復帰した。さらに、その後もガラス表面への充電が進行するに従い下方への吸引力は増大していると考えられるが、浮上積分制御によりギャップは一定に保たれている。このことより、静電浮上レールでは、誘導電荷形静電モータによる擾乱を考慮せずに独立に制御した場合でも、完全浮上状態を維持したまま安定な浮上を実現できることが示された。

浮上体を移動させ停止した際(22~32秒)は、駆動用

表Ⅲ 制御パラメータ

Balance Voltage		1460V
Z gain	Proportional	19500N/m
	Derivative	200Ns/m
	Integral	40000N/s·m
Theta, Phi gain	Proportional	50Nm/rad
	Derivative	0.1Nms/rad
	Integral	140Nm/s·rad

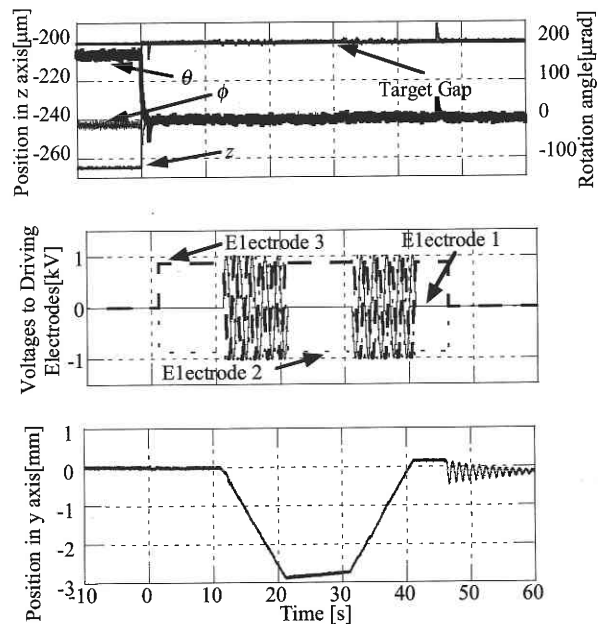


図6 浮上駆動時の浮上体の位置・姿勢及び駆動用電極に印加した電圧

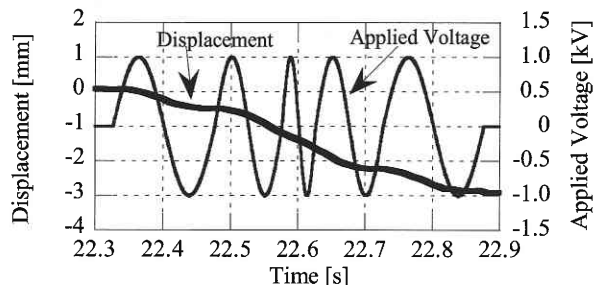


図7 周波数を徐々に高くして加速したときの浮上体の位置と加電圧（時刻は浮上開始時を0とした）

固定電極に印加している電圧は一定なので、浮上体も停止するはずであるが、徐々に元の位置に戻っている。これは、浮上用固定電極の長さが浮上体の長さと同じことにより、浮上用固定電極の範囲から外れた浮上体に端部効果が働いたためであり、浮上用固定電極を十分長くとることにより、停止状態を維持できると考えられる。

最高速度に関しては、完全浮上しており、粘性抵抗もないことからストロークを十分長くとることにより、駆動用の増幅器の限界周波数までの加速が可能であることが予想されるが、今回、静電レールの長さが不十分であったため、十分な評価ができなかった。

## 5. ま と め

静電レールに静電モータを組み合わせることで、完全非接触状態を保ちながら、浮上体を駆動することに成功した。駆動電圧の制御と浮上制御とを独立にかけた場合でも安定した浮上が得られたことから、搬送装置など比較的軽負荷の作業では静電浮上レールは様々な駆動機構に対応できることが確認できた。今後は、静電レールの長さを延長することによる最高速度、加速度などの検証、駆動方向の位置をフィードバックした位置決め制御などの検証を行っていく予定である。

(2003年9月18日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 吉本成香・吉田雄一・壇原伸補・三上善秋・岩崎健一, 精密工学会誌, 68, 4, 597-601 (2002)
- 2) 江戸・新野・樋口, 2000年度精密工学会春季大会学術講演論文集, 512, 2000,
- 3) T. Nino, H. Tsukamoto, Proc. The Sixth International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 1071-1076, (2002)
- 4) 柄川・新野・樋口, 日本ロボット学会誌, 15, 3, pp. 373-380, 1997.
- 5) R. Moser, T. Higuchi, Journal of Electrostatics, 55, 1, 97-108