

バイアスされた交流電圧による真空中静電浮上

Electrostatic Levitation by AC Voltage with DC Bias in High Vacuum Condition

新 野 俊 樹*・江 戸 宏 一**・樋 口 俊 郎**

Toshiki NIINO, Koichi ETO and Toshiro HIGUCHI

1. は じ め に

半導体製造装置や科学分析機器などの装置において、高真空、超高真空の必要性が高まっており、それらの環境下での物体のハンドリングが求められている。一方、真空中のメカトロニクスでは、大気中に比べて非常に大きい摩擦力が¹⁾ 深刻な障害となる。この問題の解決に浮上制御技術の利用は有効であり、実際、真空中で数万 rpm の回転数を必要とするターボ分子ポンプでは、磁気軸受が広く利用されている。しかしながら、電子顕微鏡など、荷電粒子ビームの精密な制御が必要な装置では、ビーム直近での磁場の漏洩はもちろん、磁性体の使用すら制限される。そこで筆者らは、磁場に比べて遮蔽が容易で、また、磁性体も必要としない電場による力を利用した浮上を提案している。周知の通り、大気中の静電力は磁気力に比べて非常に弱い。これは空気の絶縁破壊により発生可能な電場が弱いためである。一方、真空中では絶縁破壊電場が大気中の約 27 倍の 80 MV/m 以上になり、破壊電場におけるマクスウエル応力(主成分)は 28 kN/m² (285 gf/cm²) になる。このことは、厚さ 1 m 以上のアルミ板の浮上が可能であることを示しており、浮上装置への利用が期待できる。

これまでに筆者らは厚さ 20 mm のアルミ円板の浮上に成功し²⁾、静電力利用の可能性を確認したが、実用化を考慮すると、浮上に必要な高電圧を発生、制御する増幅器が大がかりであることが問題になる。しかし、浮上に必要な電圧のうち、高速な制御を必要とする部分は、最大電圧の 50% 以下であるため、増幅器に比べて安価な直流定電圧源の出力を増幅器出力に重畳することで、増幅器が出力しなければならない電圧の最大値を 50% 程度まで低減できるが²⁾、増幅器の出力電圧のオーダの低減には至っていない。

一般に高電圧は、高周波数の交流を変圧器で昇圧して発生することが多く、比較的簡単に 10 kV 程度の電圧を発生、制御できる。しかし一方、容量性負荷である浮上用電極に大電圧振幅、高周波数の交流電圧を印加すると、大きな電流が電極に流入し、変圧器を利用していた場合、変圧器 1 次側に流入する補償電流が大きくなり、結局出力の大きな増幅器を必要とすることになってしまう。それをさけるためには、交流の振幅を下げる必要がある。そこで本報では、交流電圧と一定直流電圧の重畳電圧による浮上を提案し、理論的解析と基礎実験を行い、その結果について報告する。

2. 静電浮上装置

静電浮上の基本原理を図 1 に示す。平板状の電極 2 枚の直下に導電性の浮上体を配置し、電極間に電位差を与えると、浮上体の各電極と対向する部位に電荷が誘導され、電極に誘導された電荷との間に吸引力が発生し、浮上体には重力に拮抗する浮上力が加わる。そこで、印加電圧を制御して、この力を調整し、浮上体を目標の位置で浮上する。

実際の浮上システムは浮上体、その直上の電極ユニット、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)。図 3 に浮上装置の概形と電極の形状を示す。浮上体には直径 100 mm、厚さ 5 mm、質量 106 g のアルミ円板を用いた。電極ユニットは、1 枚の中心電極と、3 枚の周辺電極によって構成される。前述した浮上原理では、1 軸の浮上力の制御には 2 枚の電極が必要だが、2 枚のうち 1 枚を中心電極として共用することで、本浮上装置では 3 軸の浮上力を制御し、浮上体の鉛直方向の位置 z 、ロール角 θ 、ピッチ角 ϕ を能動的に制御する。浮上体の運動に関する自由度の残り 3 自由度のうち、水平面内の並進は、電極の外形と浮上体の外形を同一にすることで、端部効果を利用して受動的に制御し、水平面内の回転は、浮上体が円形であることから無視する。ギャップセンサには渦電流センサ (KEYENCE EX-502/008) を用い、センサの出力は制御装置に入力される。制御装置に

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

**東京大学大学院工学系研究科

は DSP (Texas Instruments TMS320C30) をプロセッサとするシステムを用い、制御周期 0.2 ms のデジタル制御を施す。図 4 に直流浮上を行う際の制御ブロック図を示す。ギャップセンサの出力は、指令ギャップと比較され誤差が並進方向位置、ロール角、ピッチ角に変換される。変換された誤差に対して PD 制御を施した結果に上述の変換の逆変換を施し、さらに、計算される浮上位置での釣合電圧に加算することで周辺 3 電極の指令電圧とする。中心電圧については周辺 3 電極の電位の平均値の符号を反転したものとする。このように電圧を印加することにより、浮上体の電位は 0 V に制御される³⁾。高電圧出力装置については後述する。

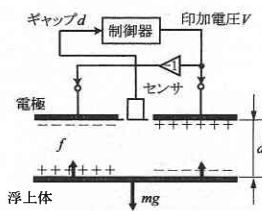


図 1 静電浮上の基本原理

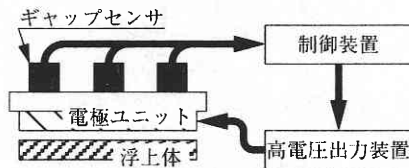


図 2 浮上装置の概略

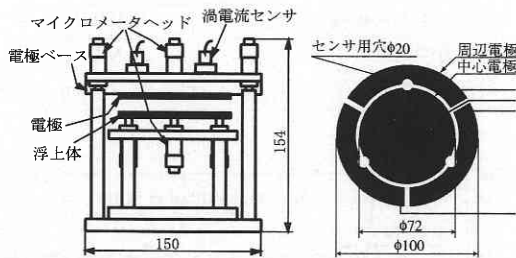


図 3 静電浮上装置外形と電極形状

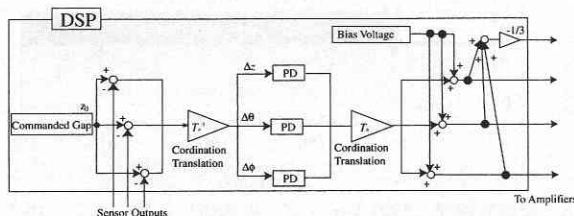


図 4 制御ダイアグラム

3. 交流直流浮上の解析

前節で述べた制御に従って、電極に電圧を印加することで浮上体を浮上できるが、質量の大きい浮上体の浮上には直流高電圧の制御が必要である。これまでの実験結果によれば、20 mm のアルミ板を浮上するには 4 kV 程度が必要であり、このような直流高電圧が制御できる増幅器は大きくてある。そこで本報では、直流定電圧に、振幅が制御可能な交流を重畳することにより、浮上が可能であるか検討する。以後、このような浮上方法を交流直流浮上と呼ぶ。本節では、交流直流浮上による静電力と通常の直流浮上による静電力とを比較解析する。

直流の浮上において、あるギャップにおける各電極が発生する吸引力 f_{DCi} は、

$$f_{DCi} = \alpha_i V_{DCi}^2 \dots \dots \dots (1)$$

である。但し、 α_i 、 V_{DCi} は、それぞれ、電極の形状・面積・ギャップによって定まる定数、電極印加電圧である。浮上では、 V_{DCi} を適当に制御することにより、重力と電極の発生力をつりあわせる。一方、交流直流浮上では直流高電圧に交流電圧が重畳された電圧 V_{ACDCi} すなわち、

$$V_{ACDCi} = V_{DC0i} + V_{ACi} \sin \omega_c t \dots \dots \dots (2)$$

が印加される。ここで、 V_{DC0i} 、 V_{ACi} 、 ω_c はそれぞれ、直流電圧、重畳される交流電圧の振幅、交流の角周波数である。 V_{ACDCi} を式 (1) の V_{DCi} に代入すれば、交流直流浮上における各電極の吸引力 f_{ACDCi} がもとまる。

$$f_{ACDCi} = \alpha_i \left(V_{DC0i}^2 + 2V_{DC0i}V_{ACi} \sin \omega_c t + V_{ACi}^2 \sin^2 \omega_c t \right) \dots \dots (3)$$

ここで、 ω_c が十分大きいと仮定して、平均化を行うと、平均の力 $\overline{f_{ACDCi}}$ は、

$$\begin{aligned} \overline{f_{ACDCi}} &= \frac{\omega_c}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_{ACDCi} dt \\ &= \alpha_i \left(V_{DC0i}^2 + \frac{1}{2} V_{ACi}^2 \right) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

となり、 V_{ACi} を制御すれば、 $\overline{f_{ACDCi}}$ が制御可能であることがわかる。

次に、制御について検討する。前述したように実際の制御では、鉛直方向の位置 z 、ロール角 θ 、ピッチ角 ϕ に関して PD 制御を施しているが、ここでは単純化して鉛直方向位置の比例制御についてのみ議論する。まず、直流による浮上に関しては、ギャップの変化を考慮した浮上力は、

$$f_{DC} = \beta \left(\frac{V_{DC}}{z + z_0} \right)^2 \dots \dots \dots (5)$$

ただし、 β 、 z_0 、 z はそれぞれ、電極の形状・面積によって

研究速報

定まる定数, 目標ギャップ, ギャップの目標ギャップからの誤差である. また, 比例制御による印加電圧は,

$$V_{DC} = V_b + k_{pDC} z \dots\dots\dots (6)$$

ただし, V_b, k_{pDC} はそれぞれ, 目標ギャップでの釣合電圧, 比例ゲインである. (6) を (5) に代入して, z/z_0 の1次までの近似を求めると,

$$f_{DC} \approx \beta \left(\frac{V_b^2}{z_0^2} + 2 \frac{V_b}{z_0} \left(k_{pDC} - \frac{V_b}{z_0} \right) \frac{z}{z_0} \right) \dots\dots\dots (7)$$

となる. 一方, 交流直流浮上の場合, ギャップの変化を考慮した平均の浮上力は,

$$\overline{f_{ACDC}} = \beta \frac{\left(V_{DC0}^2 + \frac{1}{2} V_{AC}^2 \right)}{(z + z_0)^2} \dots\dots\dots (8)$$

また, 交流振幅 V_{AC} は,

$$V_{AC} = V_{AC0} + k_{pAC} z \dots\dots\dots (9)$$

ただし, V_{AC0}, k_{pAC} は, それぞれ, 交流振幅の一定分, 比例ゲインである. これを (8) に代入し, z/z_0 の1次までの近似を求めると,

$$\overline{f_{ACDC}} \approx \beta \left(\frac{V_{DC0}^2}{z_0^2} + \frac{1}{2} \frac{V_{AC0}^2}{z_0^2} + \left(\frac{V_{AC0} k_{pAC}}{z_0} - 2 \frac{V_{DC0}}{z_0^2} - \frac{V_{AC0}^2}{z_0^2} \right) \frac{z}{z_0} \right) \dots\dots\dots (10)$$

である. ここで (7) と (10) を比較して, 直流浮上及び交流直流浮上において, 浮上ギャップと浮上力の関係が等価になるようにすると, z/z_0 の0次の項に関して,

$$\beta \frac{V_b^2}{z_0^2} = \beta \left(\frac{V_{DC0}^2}{z_0^2} + \frac{1}{2} \frac{V_{AC0}^2}{z_0^2} \right) \dots\dots\dots (11)$$

1次の項に関して

$$2\beta \frac{V_b}{z_0} \left(k_{pDC} - \frac{V_b}{z_0} \right) = \beta \left(\frac{V_{AC0} k_{pAC}}{z_0} - 2 \frac{V_{DC0}}{z_0^2} - \frac{V_{AC0}^2}{z_0^2} \right) \dots\dots\dots (12)$$

であるから, 交流直流のパラメータに対する, 直流浮上による等価な釣合電圧と比例ゲインの関係は

$$V_b^2 = V_{DC0}^2 + \frac{1}{2} V_{AC0}^2 \dots\dots\dots (13)$$

$$k_{pDC} = \frac{V_{AC0} k_{pAC}}{2V_b} \dots\dots\dots (14)$$

となる.

4. 実 験

図5のようなシステム構成で, 浮上実験を行った. DSPシステムで, 交流振幅を制御し, アナログ乗算器によって, 2.0 kHzの交流を変調しさらに高電圧アナログ増幅器 (Trek 609 C) で増幅する. アナログ増幅器の出力に高電圧直流電源 (EMCO E 80) を直列に接続して⁴⁾, 直流電圧と交流電圧を重畳し, 電極に印加する. 表Iに各制御パラメータを示す. 図6に浮上を行った際の, 各電極と浮上体間のギャップ, 電極印加電圧を示す.

制御開始同時に 101 Hzの振動が約半周期観測され, そ

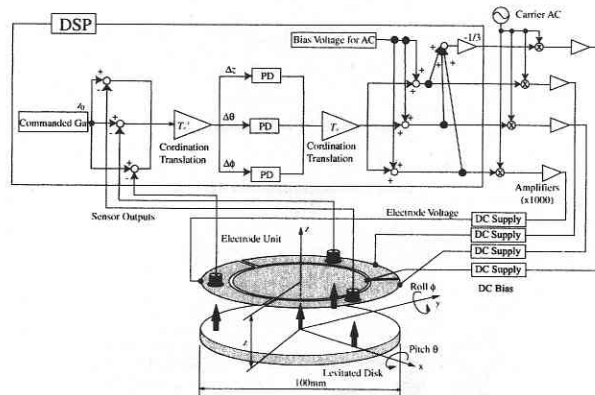


図5 交流直流浮上のシステム構成

表I 交流直流浮上のパラメータ

指令ギャップ	x_0	205 μm
直流バイアス	V_{DC0}	600 V
交流バイアス振幅	V_{AC0}	1100 V
鉛直方向比例ゲイン	k_{pACDC}	25 MV/m
鉛直方向微分ゲイン	k_{dACDC}	45 kVs/m

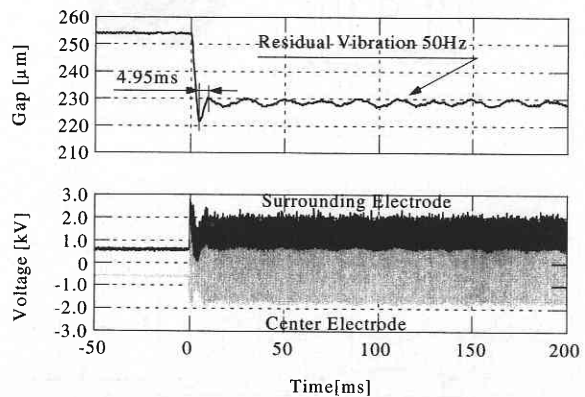


図6 交流直流浮上時のギャップ (平均値) と周辺および中心電極の電位

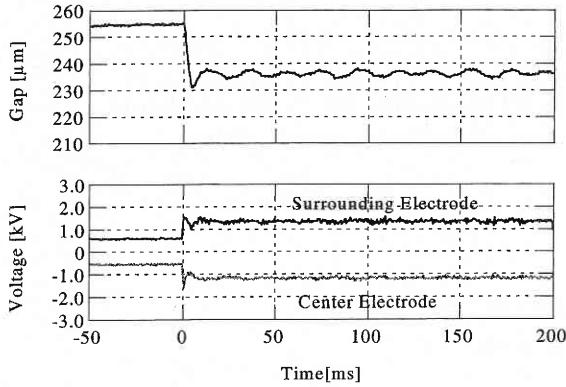


図 7 等価パラメータによる直流浮上時のギャップ (平均値) と周辺および中心電極の電位

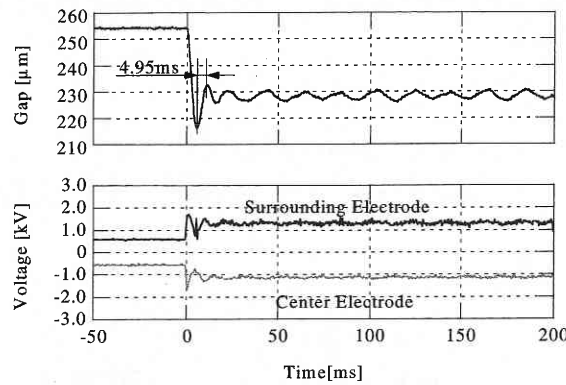


図 8 浮上位置が同じになるように調整されたパラメータによる直流浮上時のギャップ (平均値) と周辺および中心電極の電位

の後 50 Hz の振動が残留している。この振動は真空排気を行っているロータリーポンプからのものと考えられる。

次に、(13)、(14) に従って、等価なパラメータを設定し、直流電圧 (直流定電圧源出力にアナログアンプ出力を重畳⁴⁾) による浮上を行った結果を図 7 に示す。このパラメータの浮上では、安定時の浮上ギャップが異なるため釣合電圧 V_b を調整し、さらに、(14) に従って比例ゲインを調整して再び浮上を試みたところ、図 8 のような結果が得られた。表 II に、各パラメータと安定浮上位置を整理する。

5. 考 察

交流直流浮上と直流浮上の実験結果を比較すると、等価釣合電圧に 130 V (12%) の差が生じたが、これは直流高電圧源の出力電圧が 100 V 程度変動しているためであると

表 II 各パラメータと安定時浮上ギャップ

浮上方法	交流直流	直流	直流
直流定電圧 V_{bDC}, V_b [V]	600	1070	1200
交流定振幅 V_{AC0} [V]	1250		
比例ゲイン k_{pAC}, k_{pDC} [MV/m]	40	23.4	* 20.8
等価釣合電圧 v_b [V]	1070	1070	1200
等価比例ゲイン k_{pDC} [MV/m]	23.4	23.4	* 20.8
安定浮上ギャップ [μm]	228	236	228
初期振動数 [Hz]	101	測定不能	101

* 式(14)を用いて V_b から算出

考えられる。また、今回、交流電圧を出力した増幅器の帯域の制限から、交流の周波数が 2.0 kHz と低くなってしまったことも、この誤差に影響を与えていると考えられ、今後、高速な定電圧増幅器と変圧器を組み合わせた浮上を試みる必要がある。さらに初期の振動数に関しては、交流直流駆動と直流駆動とで理論通りの一致を見た。

6. ま と め

真空中静電浮上の高電圧出力源から、高電圧出力アナログ増幅器を排除し、静電浮上装置の実用性を高めるために、比較的容易に発生が可能な交流電圧と一定高電圧による、交流直流浮上を提案した。直流による浮上との比較において、交流直流浮上の制御を解析し、等価釣合電圧と等価比例ゲインをもとめた。実験結果では、等価釣合電圧に関して、12% の誤差を生じた。また初期振動については、解析結果との非常によい一致をみた。

(2000年7月7日受理)

参 考 文 献

- 1) 西村, 「真空中における潤滑技術」, 真空, Vol. 42, No. 9, 1999, pp. 791-796.
- 2) 江戸, 樋口, 新野, 「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, pp. 575-578.
- 3) Jin, Kanemoto, Higuchi, Electrostatic levitator for hard disk media, IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference. Thirtieth IAS Annual Meeting IEEE. Part vol.2, 1995, pp. 1310-17.
- 4) 新野, 江戸, 樋口, 「直流高電圧に交流電圧を重畳した真空中静電浮上」, 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p. 514.