

非接触搬送を目的とした静電気浮上装置の提案

高知工科大学知能機械システム工学科
政木 慶次

目次

1. 緒言

1.1 要旨

1.2 研究背景

2. 研究内容の説明

2.1 静電気浮上の目的

2.2 浮上原理

3. 静電気力に対する検討

3.1 静電気力とその特徴

3.2 搬送技術としての実用性

4. 浮上機構

4.1 実験装置

4.2 運動方程式とモデル化

4.2.1 集中システムとしてのモデル化

4.2.2 分散システムとしてのモデル化

4.3 電極の位置を固定した浮上実験

4.4 数値シミュレーション

5. 実験結果と考察

5.1 実験結果

5.2 考察

6. 結言

謝辭

参考文献

1 . 緒言

1. 1 要旨

現在、あらゆる分野において使用されている機械的な支持機構は一般的に支持する対象物に接触し、その物の動きや位置などを制御している。このように従来の支持機構であれば当然、摩擦が生じるためクリーン度を要求する分野では機械的な接触のない支持機構が要求される。

本研究ではその中でも半導体工場での導入が考えられるシリコンウエハの動き、位置を能動的に非接触で制御するために、静電気を用いた静電気浮上装置を提案する。

1 . 2 研究背景

従来、シリコンウエハの多点間移動および搬送方法は塵埃の発生を防ぐためロボットハンドによって行われてきた。しかし近年、半導体工場においては技術の進歩により回路パターンの微細化、高集積化が進み塵埃の発生をさらに抑える搬送方法の確立が望まれている。

通常のロボットハンドによる搬送の場合、直接ウエハに触れるため接触部には微粒子が付着しやすく、回路欠損の原因となりパターンの微細化、高集積化実現の妨げとなっている。

非接触ハンドリングの技術を用いれば塵埃の低減は可能である。非接触のハンドリングには磁力、空気圧そして静電気を吸引力として用いる場合が多いが、それぞれの特徴を示すと、磁力を用いた場合、吸引力は大きいですが浮上体は必ず磁性体でなければならない。次に空気圧を用いた場合、これも吸引力は大きく出すことができるがエアールを使うため埃を巻き上げてしまう。静電気力を用いた場合、吸引力は他の方法と比べかなり小さいが浮上体が絶縁体でなければよ

く、材質上の制限は少ない。よって、シリコンウエハのような面積の広く重量の小さい物の非接触搬送、超クリーン度が要求される場面では先に述べた搬送方法の改善としては静電気力による非接触搬送が一番望ましいと考えた。

2. 研究内容の説明

2.1 静電気浮上の目的

本実験では製作した静電気浮上装置を用いて半径 625(mm)、厚さ 0.5(mm) の円形ウエハと吸引力を発生させる電極との空隙を初期値 0.5m とし、これを 0.2m の位置で安定浮上を実現させることを目的とする。また実際の半導体工場の製造過程への導入を視野に入れ浮上させた状態で鉛直方向にハンドリングする、そしてシステムをできるだけ簡素化できるよう試みた。

2.2 浮上原理

磁石では N 極と S 極が引き合うように電子においてもプラスの電子とマイナスの電子の引き合うクーロン力を用い電極と浮上対象の表面にそれぞれが逆になるように電子を誘起させその空隙に働くクーロン力を吸引力とした。

3. 静電気力に対する検討

3.1 静電気力とその特徴

2枚の電極を Fig2.1 に示すように組み合わせた平行版コンデンサにおいて、上下の極板間に電圧 V をかけたとき、2枚の極板の間には + の電荷と - の電化が引き合うクーロン力より次式で示される静電吸引力 f が働くことが分かっている。

$$f = \frac{\epsilon S V^2}{2d^2} \quad (2.1)$$

ここで、 ϵ は大気中の誘電率、 S は電極の面積、 d は電極間の空隙である。

次に Fig2.2 に示すように2つの電極を上へ平行に配置し、その下に導体板を置いた場合は、2つの電極間の距離が空隙に比べ十分広く電極間の干渉がなければ Fig2.3 に示すように平行板コンデンサが2つ組み合わさったものとみなすことができる。2つの電極の面積をそれぞれ、 S_a, S_b ($S_a + S_b \approx S$) とし、両電極間に電圧 V をかけると上下の板の間には次式の吸引力がはたらく。

$$f = \frac{\epsilon V^2}{2S^2 d^2} (S_a^3 + S_b^3) \quad (2.2)$$

ここで $S_a = S_b = \frac{S}{2}$ とすれば Fig.2.2 の上下の板間に働く吸引力は、次式となる。

$$f = \frac{\epsilon S V^2}{8d^2} \quad (2.3)$$

以上のことは、シリコンウエハの板を使っても同様に成り立つことがわかっており、この吸引力を利用し、非接触浮上を行う。

しかし、大気中での静電気力の使用には絶縁破壊の問題から吸引力には限界

があることが考えられ単位面積当りの重量が小さい軽量のものしか浮上させることはできない。

以下ではその静電気力の限界を知り、静電気浮上によって浮上可能な物体の制限に関する見地を得る。

大気中の絶縁破壊は $3.5 \times 10^6 \left(\frac{V}{m} \right)$ であるので、Fig.2.2 に任意の電圧 V をかけたとき、絶縁破壊距離 d_{\max} は

$$d_{\max} = \frac{V}{2 \times 3.5 \times 10^6} \quad (2.4)$$

電圧が高くなれば電極と浮上体の間に働く吸引力は大きくなるため、最大の吸引力 f_{\max} は(2.3)式に(2.4)を代入すると

$$\begin{aligned} f_{\max} &= \frac{\epsilon S V^2}{8 d_{\max}} \\ &= 5.5264 \times S \text{ (kgW) } \end{aligned} \quad (2.5)$$

(2.5)式より吸引力は電圧に関わらず一定であることが分かった、これより本実験における静電気浮上において浮上可能な浮上体の単位面積あたりの質量は $0.55 \left(\frac{g}{cm^2} \right)$ 以下であればよいことがわかる。

3.2 搬送技術としての実用性

先に述べたとおり静電気力の浮上機構は絶縁体以外で表面積が広く単位面積当りの重量が小さければ浮上の可能性はある。よって今回のような半導体工場での非磁性体であるシリコンウエハの超クリーン度が要求される搬送において非常に有効な手段であるのでハンドリングの安定化とその精度向上が実現できれば十分に従来のロボットハンドによる搬送に取って代わる技術になりえる。

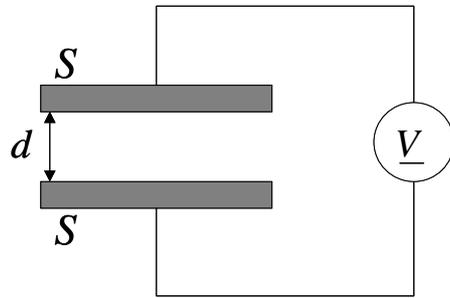


Fig2.1 : 平行板コンデンサ

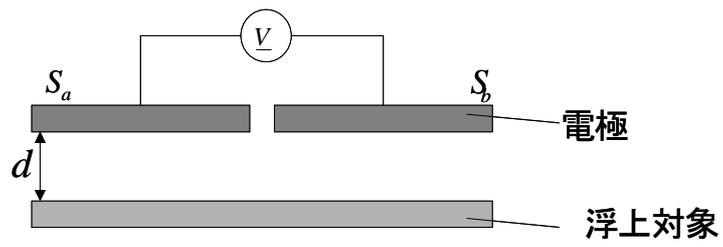


Fig2.2 : 並列に電極を配置したコンデンサ

4. 浮上機構

4.1 実験装置

実験装置は、Fig4.1 に示すと通り吸引力を発生させる電極、その電極の位置決め装置であるボイスコイルモータ（VCM）、浮上対象であるシリコンウエハおよび電極と浮上対象の位置を検出できるセンサからなる。電極の位置検出はユニバーサルジョイントを介して動くようになっており VCM の位置が電極の位置として検出できるようになっている。そして電極の下部に浮上対象となるシリコンウエハを置きその下にレーザ式の変位センサを配置して浮上対象の位置を把握できるようになっている。よって電極の位置と浮上対象の位置の差を得ることで電極と対向するシリコンウエハの空隙の距離を得る。

今回、アクチュエータとして VCM を用いたのは吸引力の限界を考え、あらかじめ浮上対象に対する電極の位置を制御して絶縁破壊の問題を解決するのが狙いである。

次に電極の形状は Fig4.2 に示す通りプラスとマイナスが交互に隣り合うようにしておりこのプラスとマイナスの電極を一組としてそれを 3 組並列に配置している。そして電極の総面積はシリコンウエハの面積とほぼ同じになっている。その質量などの各量は表 4.1 の通り

表 4.1 電極とシリコンウエハの物理量

	質量 (g) m	面積 (cm^2) S	直径 (mm) $2r * 2$	厚さ (mm)
電極	221.3	67	1500	* 1
シリコンウエハ	17.74	67	1250	0.5

* 1 : 電極の厚さは本研究において必要がないので測定せず

* 2 : r はシリコンウエハの半径を示す、本研究では電極の半径は必要ない

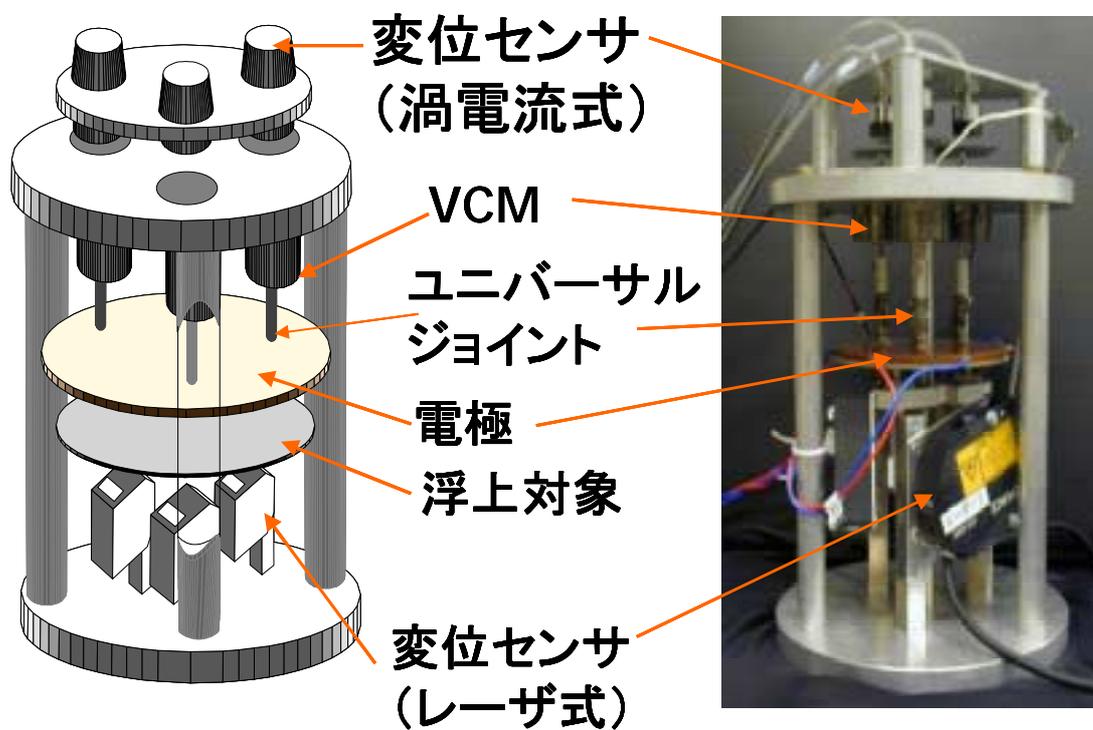
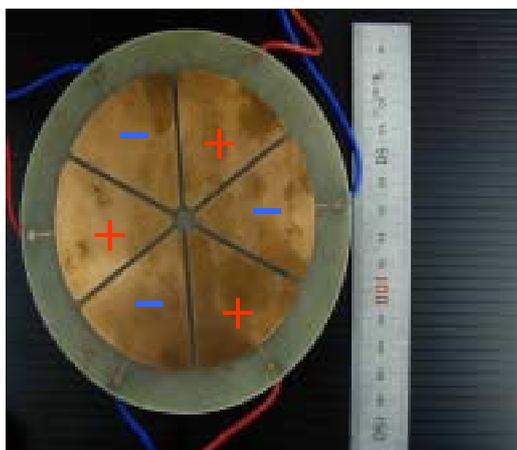


Fig4.1 : 実験装置



電極



浮上対象
(シリコンウエハ)

Fig4.2 : 電極と浮上対象の形状

4.2 運動方程式とモデル化

以下では前節において紹介した装置から運動方程式を導出しモデル化を行う。また本節では装置を集中システムとして扱う場合と、分散システムとして扱う場合の2種のモデル化を行う、そして集中システムと分散システムからシステムの簡素化を進めた。

なお、システムの考察の中では次のことを仮定しておく。

1. 装置は中心軸とアクチュエータ軸を含む面に対して対称
2. 3つの電極、VCMの特性は等しい
3. VCMのベアリング摩擦は考えない
4. 電極、浮上対象の空隙などにある空気の粘性やダンピング力は無視できる

まず集中システムとして考える場合、浮上体をひとつのものとし、その位置、姿勢を3自由度から考え制御を行う。すなわち集中システムはセンサからの検出結果から浮上体の傾き、位置を算出し3つの電極とVCMが連動し、それに適した制御量を与えることができる。

一方、分散システムの場合は装置を均一に3分割して制御を行う。この場合上下の変位センサとVCM、電極のプラス、マイナスを一組とし浮上対象の面積、質量を1/3をワンセットとして考える。このときシステムは鉛直方向だけを考えるため1自由度のシステムとして表すことが可能である。

4.2.1 集中システムとしてのモデル化

記号の説明

z_0 : 浮上体位置

θ_x, θ_y : 浮上体の x 軸、y 軸回りの回転

s_1, s_2, s_3 : 浮上体位置 (レーザセンサ出力)

z_1, z_2, z_3 : 電極位置 (渦センサ出力)

f_{m1}, f_{m2}, f_{m3} : VCM の発生力

f_1, f_2, f_3 : 電極と浮上対象の空隙に発生する静電吸引力

d_1, d_2, d_3 : 電極と浮上対象の空隙の距離

V_1, V_2, V_3 : 電極の印加電圧

i_1, i_2, i_3 : ボイスコイル電流

k_m : 電極と浮上対象の空隙の距離に比例する静電吸引力の比例定数

k_i : VCM の発生力における電流の比例定数

ウエハにおける重心回りでの運動、x 軸回りのトルク、y 軸回りのトルク

$$m_0 \ddot{z}_0 = f_1 + f_2 + f_3 \quad (4.1)$$

$$I_x \ddot{\theta}_x = \frac{\sqrt{3}}{2} r f_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} r f_2 \quad (4.2)$$

$$I_y \ddot{\theta}_y = r f_3 - \frac{1}{2} r (f_1 + f_2) \quad (4.3)$$

となる。

VCM の発生力と電流の関係は、

$$f_{mn} = k_i i_n \quad (4.4)$$

ただし、下付添え字の n は Fig 4.3 の位置を表し $n=1,2,3$ である (以下同様)

電極と浮上対象の空隙の距離は渦センサ出力とレーザセンサ出力により表すことができる

$$d_n = s_n - z_n \quad (4.5)$$

次に各電極から発生する吸引力を次式に示す

$$f_n = k_m d_n + k_i i_n \quad (4.6)$$

集中システムは以上の(4.1)、(4.2)、(4.3)、(4.4)、(4.5)、(4.6)式で表すことができる、釣り合いの位置で線形化を行うと

$$f_n = -k_m d_n \quad (4.7)$$

となる。

ウエハの重心位置回りの運動を考えると

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2}r & \frac{1}{2}r \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2}r & \frac{1}{2}r \\ 1 & 0 & -r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_0 \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

となる。

集中システムの場合、線形化されたシステムの状態ベクトルは、システムのすべての情報を含む

$$x = (z_0 \quad \theta_x \quad \theta_y \quad \dot{z}_0 \quad \dot{\theta}_x \quad \dot{\theta}_y \quad z_a \quad \theta_{ax} \quad \theta_{ay} \quad \dot{z}_a \quad \dot{\theta}_{ax} \quad \dot{\theta}_{ay})' \quad (4.9)$$

となる。またシステムの入力は3つの電極にかける電圧とVCMの駆動電流であるから

$$u = (V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad i_1 \quad i_2 \quad i_3)' \quad (4.10)$$

となる。ただし()'は転置行列を示す。

集中システムの状態方程式は次式のように得られる

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.11)$$

ここで、

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3k_m}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3k_m}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3r^2k_m}{2I_x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{3r^2k_m}{2I_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r^2k_m}{2I_y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2r^2k_m}{I_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{3k_m}{m_A} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3k_m}{m_A} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3r^2k_m}{2I_{Ax}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3r^2k_m}{2I_{Ax}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3r^2k_m}{2I_{Ay}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r^2k_m}{2I_{Ay}} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_v}{m} & \frac{k_v}{m} & \frac{k_v}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_v}{m} & -\frac{k_v}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{I_x}{2I_y} & -\frac{I_x}{2I_y} & \frac{rk_v}{I_y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_v}{m_A} & -\frac{k_v}{m_A} & -\frac{k_v}{m_A} & \frac{K}{m_A} & \frac{K}{m_A} & \frac{K}{m_A} & \frac{K}{m_A} \\ \frac{k_v}{m_A} & \frac{k_v}{m_A} & 0 & \frac{\sqrt{3}rK}{2I_{Ax}} & -\frac{\sqrt{3}rK}{2I_{Ax}} & 0 & 0 \\ \frac{I_{Ax}}{2I_{Ay}} & \frac{I_{Ax}}{2I_{Ay}} & -\frac{rk_v}{I_{Ay}} & -\frac{rK}{2I_{Ay}} & -\frac{rK}{2I_{Ay}} & \frac{rK}{I_{Ay}} & \frac{rK}{I_{Ay}} \end{pmatrix}$$

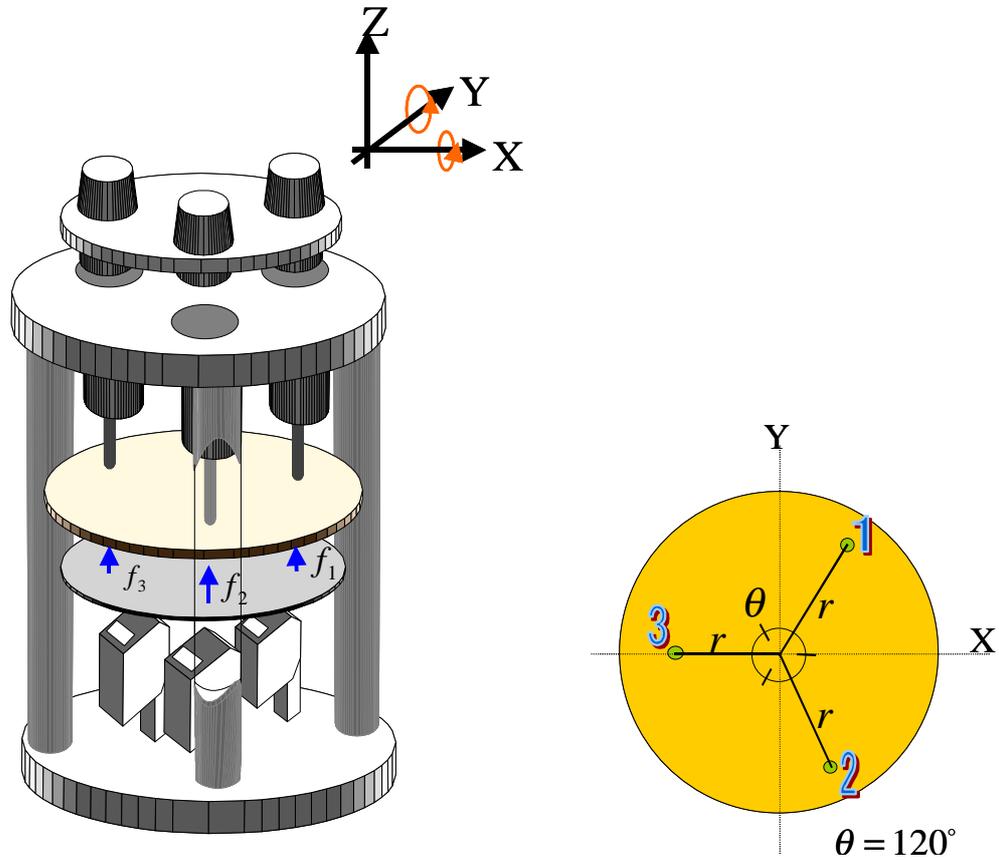


Fig4.3 : 集中システム

4.2.2 分散システムとしてのモデル化

Fig4.4 に示す分散システムは浮上対象の姿勢は考えなくてよいのでシステムとしての出力は上下の2つのセンサである。このシステムでは装置を均等に3分割するため各電極が支持する浮上対象の重量も浮上対象の3分の1を支持すると考え、その自由度は鉛直方向だけの1自由度とする。

サブシステムの状態ベクトル x は

$$x = (s_i \quad z_i \quad \dot{s}_i \quad \dot{z}_i) \quad (4.9)$$

入力 u は

$$u = (i_n \quad V_n) \quad (4.10)$$

分散システムの状態方程式は、次のように表される。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_m}{3m} & -\frac{k_m}{3m} & 0 & 0 \\ -\frac{k_m}{m_e} & \frac{k_m}{m_e} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_i}{m_e} \end{bmatrix}$$

システムの出力は上下 2 つのセンサであるから、出力ベクトル y は

$$y = [s_i \quad z_i] \quad (4.12)$$

出力方程式は

$$y = Cx$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

よって (4.11)、(4.13) 式で表されるシステム(A B C)は可制御、可観測である

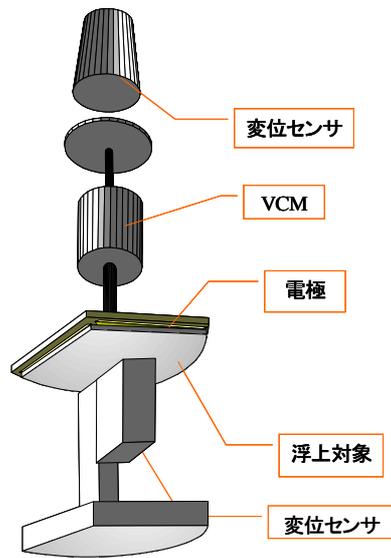


Fig4.4:分散システム

4.3VCM を固定しての浮上実験

装置の動きを見るために予備実験を行った。VCM の位置は PC から自由に動かせるようにしておき、電極に印加する電圧はあらかじめ理論値より求めた一定の値で実験を行った。

まず電極と浮上対象のスタートギャップを 0.5 (mm) とし、目標ギャップを 0.2 (mm) の位置とした、このとき理論値より必要印加電圧は約 964 (V) であるので電極にこの電圧をかけた。また、この実験で用いる PD 制御のゲインは最適レギュレータ理論より求めた。

VCM 固定時の運動方程式は浮上対象にかかる重力と吸引力が平衡状態になればよい、よって

$$mg = \frac{\epsilon S V^2}{8d^2} \quad (4.14)$$

となる。

平衡点付近での線形化を行うと

$$f = f(d, V)$$
$$f = 580.16d + 1.2 \times 10^{-4} V \quad (4.15)$$

となる。

4.4 数値シミュレーション

前節の VCM を固定した浮上実験を最適レギュレータ理論より PD 制御の各ゲインを求め、数値シミュレーションを行った。その結果が Fig4.5 である。

数値シミュレーションの結果、約 0.025 秒で収束することが分かった、しかし最適レギュレータ理論における設計パラメータ Q、R に対する重みを変化させシミュレーションを行ったがほとんどシミュレーションの結果は変化しなかった。

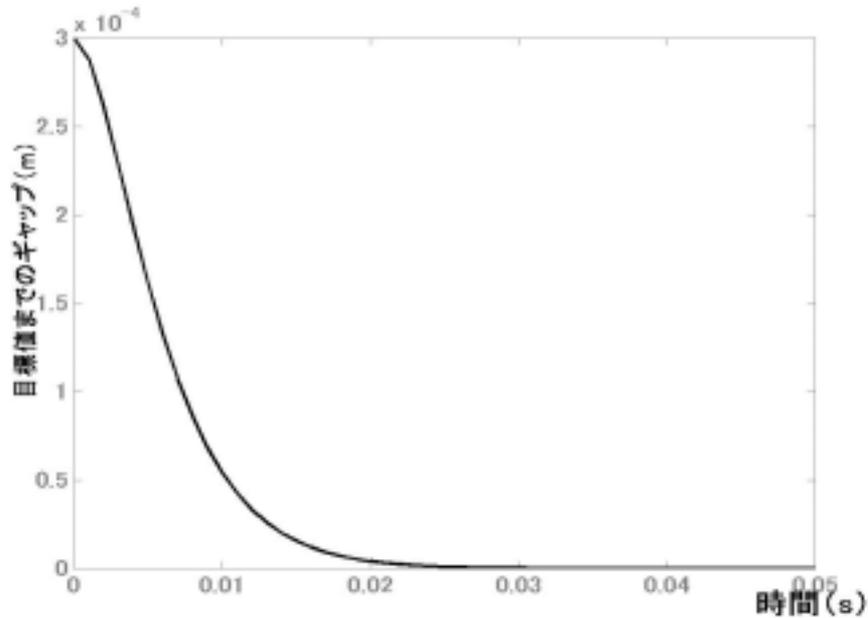


Fig4.5:シミュレーション結果

5 実験結果と考察

5.1 実験結果

VCM 固定の実験において電極から吸引力は発生しており浮上が確認できた (Fig5.1)、本研究は実現が可能であることがわかったが 3 自由度の静電気浮上装置を用いて浮上実験を行った結果として浮上が起こることはなかった。

また、集中システムと分散システムとの比較もうまくいっておらず、システムが本当に分散システムとして簡素化できるかまだ不確かさが残った。

5.2 考察

考察として以下に本研究における問題点を述べる。まず装置自体の問題としては電極の変位を測定する渦電流式変位センサが相互干渉を起こしており、電極の正確な位置が検出できていないことが考えられる、この解決策としては互いの渦電流の干渉を遮断するためセンサとセンサの間に鉄板を設けることで幾分かは干渉を無くすことはできたが完全な相互干渉の解決には至っていない。絶縁破壊を防ぐために絶縁フィルムを電極に取り付けたがフィルム自体の厚さが 0.1(mm)あり、このことを考えると電極から 0.2(mm)の位置で制御するには結果的にフィルムと浮上対象の空隙が 0.1(mm)しかなく精度の高い位置制御が必要と思われる。また、最初に実験に用いた電極と浮上対象の面積の差がありすぎたため吸引力がうまく働いていないことも考えられる、よって新しい電極を作成し再度実験を行った。新しい電極はほぼ面積が同じで吸引力には問題がないが実験中に浮上対象の位置が少し動き電極の位置とずれるとそれだけでまた浮上に必要な吸引力が働かなくなる。これからの課題として浮上対象が電極の真下にくるような位置制御を行う。

次に理論的な問題としては理論値では 0.2(mm)の位置で浮上させるのに約 960V ほど必要であることを算出したが、実際の実験結果では 1200 (V) を必要とした。よって運動方程式や線形化がうまくいっていないことが考えられる、より詳しい原因としては電極と浮上対象の空隙にある空気のダンピング力やその粘性を無視したモデル化を進めたためモデル化が不十分であると考えられる。今後は空気の粘性など含めたモデル化をすることを考えている

6. 結言

本研究では、アクチュエーターとして VCM を用いた非接触搬送による静電気浮上装置の開発を目的とし、吸引力として用いた静電気の特徴や装置のモデル化、制御におけるゲインの測定方法などについて論じた。

製作した 3 自由度の装置について述べ、制御方法、シミュレーションなどを示した。また、静電浮上のように面積に対して電極と浮上対象の空隙が小さいとその空隙内にある空気の影響を無視できないことが分かった。

実験に高電圧を発生させるアンプを使うため、安全面から慎重な実験を行わなければならない、装置製作の段階から時間がかかり過ぎ実験自体はあまり行うことはできなかった。

しかし、理論的な解析からは浮上の可能性はあり、上述した課題や改善点を考察し本装置における浮上の安定化を図りたい。

謝辞

本研究遂行するにあたり、終始懇切丁寧なご指導を賜りました、指導教官の岡宏一先生に、深く感謝いたします。

最後に助言や励ましの御言葉をいただいた多くの大学関係者、企業の方々に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1]岡宏一 著 永久磁石の運動制御による磁気浮上機構
- [2]東京大学院工学系研究科 研究代表者 樋口俊郎 静電気をを用いた超
クリーン非接触搬送システム
- [3]電気学会主催 第11回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム
後援論文集
- [4]電気学会主催 第12回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム
後援論文集
- [5]杉江俊治 藤田政之共著 フィードバック制御入門
- [6]土谷武士 江上正共著 現代制御工学
- [7]大槻義彦 著 改訂新版 基礎教養 物理学
- [8]西本敏彦 著 微分積分学講義
- [9]大西清 著 JISによる機械製作図の読み方・書き方(改訂2版)