

## レーザ光を基準に用いた磁気吸引浮上機構

Active control of magnetic bearings using laser beams to detect air gaps.

川 勝 英 樹\*・川 合 稔\*

Hideki KAWAKATSU and Minoru KAWAI

## 1. ま え が き

能動制御型の磁気浮上機構においては、若干の例外を除いて<sup>1)</sup>、浮上ギャップを検出するためのギャップセンサを用いる必要がある。よく用いられるセンサとして、(1)渦電流式、(2)静電容量式、(3)光反射式、などがあり、これらを複数個用いて浮上体の位置と姿勢の検出を行う。浮上体がある直線にそって案内されるリニア型浮上機構の場合、これらのセンサは固定子側に並べられたり、浮上体に固定される。しかし、この方法はいくつかの問題点を有しており、(1)センサを固定側に設置する場合、センサが多数必要となる、(2)センサを固定側に設置する場合、個々のセンサのゼロ点を校正して浮上の基準とする面を定義しなければならない、(3)浮上体にセンサを固定する場合、浮上体からセンサ信号を固定側に配線や光通信などで伝えなければならない<sup>2)</sup>、(4)超高真空や超クリーンな環境で用いるにはセンサや配線が多いことは望ましくない。などである。本研究は、光の直進性を用いて定義される線や面に沿ってリニア磁気浮上機構の浮上制御を行おうとするものである。この方法により、従来のセンサによる方法の持っていた多くの問題が解決される。現在、大気中で $2\mu\text{m}$  (p-p) 程度の浮上精度と、 $1\text{N}/\mu\text{m}$ の浮上剛性を確認している。本報告では、レーザを基準とした磁気吸引浮上の基本構想、1自由度実験装置と実験結果、リニア浮上機構の設計、光学系によって生じ得る浮上の誤差や対策などについて述べる。

## 2. 基本構想

磁気吸引浮上機構の構成要素は、一般的に、図1に示すように、(1)浮上体、(2)電磁石、(3)ギャップセンサ、(4)制御回路からなる。ただし、図1は1自由度浮上機構に簡略化した例である。従来の磁気吸引浮上機構においては、ギャップセンサとして一般的に、(1)静電

\*東京大学生産技術研究所 第2部

容量型、(2)インダクタンス型、(3)渦電流型、(4)反射光量型、などが用いられている。リニア浮上機構においてこれらのセンサを用いる場合、図2のようにセンサを浮上体に固定するか、もしくは図3のように固定子側に多数のセンサを配置する必要がある。この両者の問題は、前者の場合、浮上体への配線が必要な点、また後者の場合、多数のセンサを用いる点や、センサごとのゼロ点の校正を行わなければならない点である。

本研究は、リニア浮上機構に関する上記のような問題点をすべて解決しようとするものである。図4(a)、図4(b)にレーザ光線を浮上の基準に用いた浮上方法の説明図を示す。ただし、図4は説明のため1自由度に簡略化されている。図4(a)は受光素子を浮上体に固定した場合、図4(b)は光の反射装置を浮上体に固定し、受光素子を固定側に配置した場合である。ここで、受光素子

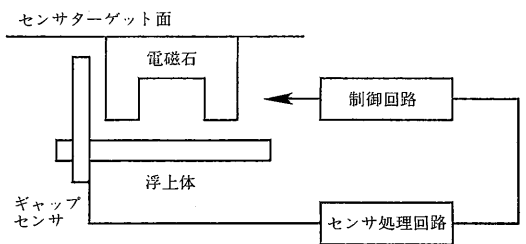


図1 磁気浮上機構の構成要素の概略図  
図は1自由度に簡略化されている

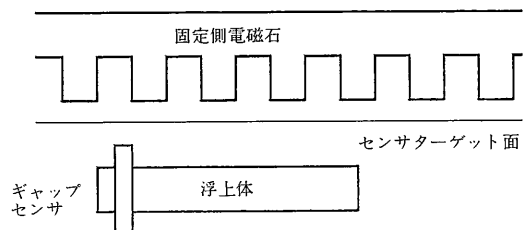


図2 ギャップセンサを浮上体に固定したリニア磁気浮上機構の概略図。図は1自由度に簡略化されている

## 研究速報

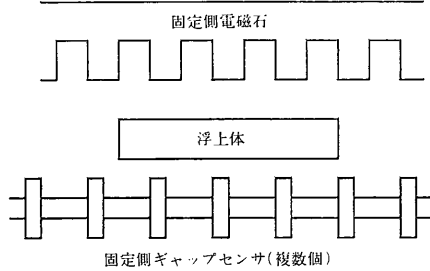


図3 ギャップセンサを固定側に固定したりニア磁気浮上機構の概略図。図は1自由度に簡略化されている

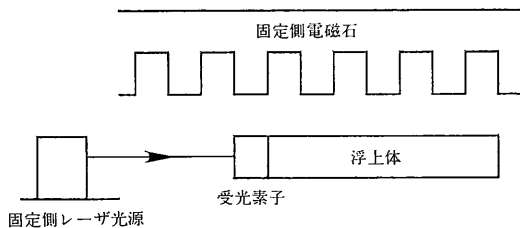


図4(a) レーザ光源を固定側に、受光素子を浮上体側に有する磁気浮上機構の概略図。図は1自由度に簡略化されている

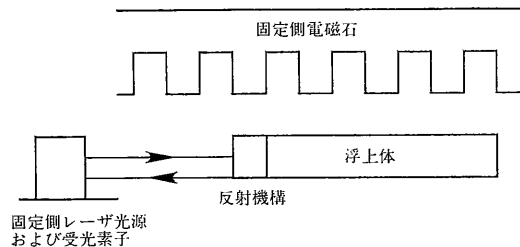


図4(b) レーザ光源と受光素子を固定側に、反射機構を浮上体側に有する磁気浮上機構の概略図。図は1自由度に簡略化されている

は、一般にPSD (position sensitive detector), や分割型フォトダイオードと言う名称で市販されているもので、安価なものである。PSDや分割型フォトダイオードは、その受光面のどこに光が当たっているかをサブマイクロメートルで検出することのできる素子である。そのため、図4(a)のように浮上体に受光体を固定し、浮上機構の案内方向にレーザー光を走らせることによって、光の直線性で定義される線もしくは面に沿って浮上位置を制御することが可能となる。図4(b)は、浮上体に反射装置、たとえば、プリズム、キャッツアイ、コーナーキューブなどを固定し、浮上体の浮上方向への変位を反射光の反射方向の変化として検出して浮上制御を行うものである。図4(b)の装置の利点は、浮上体への配線を必要としない点である。レーザー光を用いた浮上方法の利点を列挙する。

(1) リニア浮上機構において、案内方向の移動距離が長くなっても、必要なセンサの数が変わらない。

(2) 浮上すべき面が光で定義されるため、光の良い直線性を反映した浮上精度が期待できる。そのため、電磁石の磁極面の加工精度に影響されない浮上制御が可能となる。また、従来のギャップセンサを用いた浮上ギャップの検出方法のように、ギャップセンサのターゲットを設ける必要がなく、ターゲットの加工の直線性や、磁極面との平行度などを考慮する必要がない。

(3) 浮上すべき面が光で定義される。そのため、従来の方法のように固定子側に多数のギャップセンサを固定し、そのうえで個々のセンサのゼロ点を校正する必要がない。

(4) 現在、レーザーを用いた原子間力顕微鏡で、 $10^{-11}$  Torrの超高真空で作動するものがある。本浮上方法は、浮上の位置検出に光を用いているという点で、超高真空への応用の可能性が高い。

(5) 小型のレーザーダイオードと反射用のプリズムやコーナーキューブを用いているため、装置全体の小型化が可能である。

(6) 液中であっても、光の伝搬が可能で、光の直進性がある程度得られれば、本方法を応用することが可能である。

(7) 浮上ギャップの検出に光を用いているため、電磁石からノイズが浮上ギャップの信号に飛び込むことがない。

### 3. 実験

#### 3.1 実験装置

ローラ式のリニアガイドで浮上体の運動を一自由度に拘束した装置を用いて浮上の実験を行った。装置の概略図を図5に示す。寸法 $40 \times 40 \times 30$ mmの鉄のブロックがローラ式のリニアガイドの上にボルトで固定しており、そのブロックの両側に一對の電磁石が固定されている。ブロックの上にPSDやプリズムなどの光学素子が固定される。実験には二形式の構成の光学系を用いた。一つの形式はレーザー光源を固定側に、受光素子としてPSDを浮上体側に固定したもの、もう一つの形式はレーザー光源とPSDを固定側に、反射体用の直角プリズムを浮上体側に固定したものである。後者は図5に記した形式で、浮上体へのセンサ用配線を必要としないという利点を有す。PSDの出力は電流・電圧変換用のオペアンプとアナログわり算器に入力された。その結果、受光部の中央付近では受光点の変位にほぼ比例した出力が得られた。得られた変位信号を用いて比例微分制御が行われた。

#### 3.2 実験結果と考察

浮上ギャップのほぼ中央に浮上体が位置するときにPSDの位置信号がゼロとなるようにレーザーの光軸を調

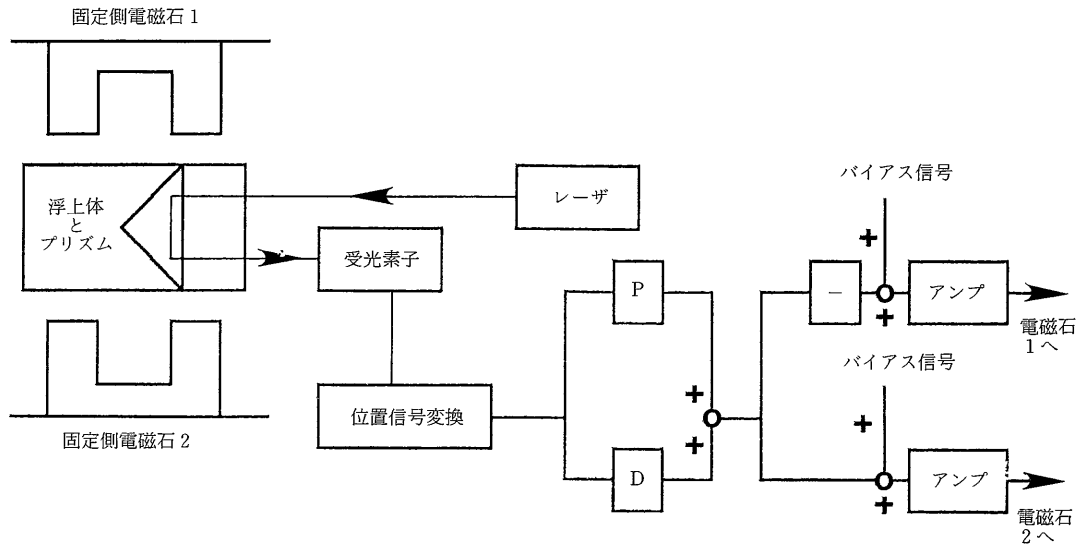


図5 レーザを基準に用いた磁気吸引浮上の1自由度実験装置の構成図。図はレーザと受光素子を固定側に、反射機構（この実験では直角プリズム）を浮上体側に固定した場合である。固定側にレーザを、浮上体側に受光素子を固定した場合も実験を行っており、両形式の光学系で同等の浮上性能を確認している

表1 1自由度吸引浮上実験装置の仕様および性能。二形式の光学系にたいして同様の性能が確認された。

浮上体質量	浮上ギャップ	浮上精度	浮上剛性
約0.4kg	0.3mm	2 $\mu\text{m}$ (p-p)	1 N/ $\mu\text{m}$

整した。その結果、二形式の光学系の両方でほぼ同等な浮上性能を確認した。浮上性能を表1にまとめる。

なお、空気のゆらぎが大きい場合、10 $\mu\text{m}$ オーダの浮上点のふらつきを観察した。

### 3.2.1 浮上精度

浮上精度を左右する要因として、(1)空気の揺らぎによる光軸の揺らぎ、(2)位置検出用受光素子の分解能が挙げられる。そのため、浮上精度の改善方法として、(1)常温チャンバや真空チャンバなどに装置をいれて空気の揺らぎの影響を低減する、(2)レーザダイオードを50 kHz程度の周波数で点滅させ、その点滅にロックインを行う、などの方法を挙げられる。本磁気浮上装置の主たる応用環境は、(1)半導体回路製造用スーパークリーンチャンバ、(2)バイオ実験用スーパークリーンチャンバ、(3)真空チャンバである。これらの環境は、空気の揺らぎの少ない環境といえ、光の直進性と言う点で好ましい。ただし、本制御方法は比較的高い堅牢性を有している。定量的把握はまだ得られていないが、タバコの煙を光路に充填させたり、タバコの熱気を光路に近づけても浮上

を続けることが可能であることを確認している。

### 3.2.2 浮上剛性

浮上剛性の向上には、受光素子の周波数帯域を高くする必要がある。今までの実験では比較的応答の遅いPSDを用いている。今後、より応答の早い分割型フォトダイオードを用いて浮上剛性の向上を行う。ただし、現在のPSDを用いても、積分制御を行うことにより見かけの剛性を高めることは可能である。

## 4. リニア浮上機構の光学系の設計

### 4.1 光学系の構成

実験を通じてレーザを基準とした浮上制御が可能であることを確認した。今後、実験で得られた指針にもとづきリニア浮上機構の設計試作を行う。本章では、光学系の構成の一例を示し、どのようにリニア浮上機構の浮上体の位置や姿勢を検出するかを論じる。光学系設計の際注意した点を列挙すると、(1)一本のレーザ光からなるべく多くの浮上体の姿勢や位置の情報を得ること、(2)浮上体のローリングやピッチングなどの姿勢変化によって反射体の姿勢が変化しても、浮上体のギャップ方向の浮上位置の情報が正確に検出されること、である。図6に光学系を上部から見た図を示す。レーザ光はビームスプリッタによって4本の平行光に分割される。4本のレーザ光はそれぞれ浮上体の四隅に固定されたコーナキューブで入射光と平行な方向に反射されて固定側に設置した2方向検出のPSDや四分型フォトダイオード

研究速報

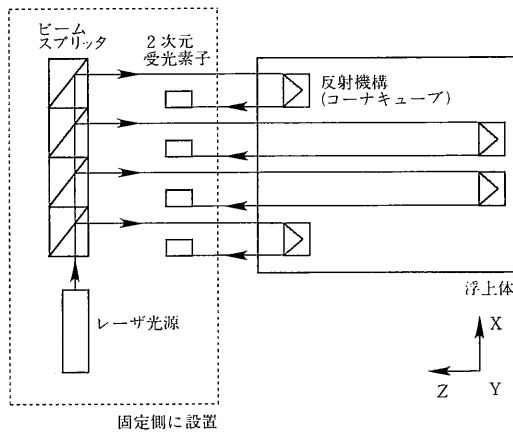


図6 ビームスプリッタを用いて複数の反射機構にレーザー光を導き、浮上体の位置や姿勢を検出する方法。図は浮上体と光学系を上部からみた図である。図の光学系を用いることにより、以下の運動の自由度が検出される。(1) Y方向並進、(2) X方向並進、(3) Z軸回りの回転(ロール)、(4) X軸回りの回転(ピッチ)、(5) Y軸回りの回転(ヨー)。以上の位置と姿勢の情報を用いることにより、浮上体の磁気吸引浮上制御が可能となる。なお、反射機構としてコーナキューブを用いると、浮上体の傾きに影響されことなく各反射機構のXおよびY方向の変位を検出することが可能となる

にあたる。ビームスプリッタを用いた理由を列挙すると、(1)レーザー光源が1個にできる、(2)多数のレーザー光源からでる光を平行にするよりも、単一光源の光を加工精度の高いビームスプリッタで分割した方がよい、などが挙げられる。また、反射体としてコーナキューブを用いた理由を列挙すると、(1)コーナキューブの姿勢によらず反射光が入射光と平行である。そのため、浮上体のローリングやピッチングに干渉されることなく反射体の並進変位を検出できる、(2)コーナキューブが光軸に対して直角な方向に変位すると、反射光も変位に応じた分だけ平行にずれる。そのため、2次元PSDや四分分割型フォトダイオードを用いて反射光を受光すれば、一本のレーザー光から二方向への浮上体の変位が独立に検出できる、などである。図6の光学系の構成で浮上体の案内方向の位置を除くすべての位置と姿勢の情報が得られるので、リニア浮上機構の制御に用いることができる。

#### 4.2 光学系の問題点

本研究は光の直進性を用いて線や面を定義し、それを基準として浮上制御を行おうとするものである。原理的にはサブ $\mu\text{m}$ オーダの浮上精度がながい案内範囲にわたって期待できるが、実際においては、光学素子や受光素子の性能によって浮上精度が影響を受ける。本節では

浮上の誤差要因についてのべる。

##### 4.2.1 反射機構について

図6に示した光学系では反射機構にコーナキューブを用いている。コーナキューブは入射光と出射光を平行にするものである。しかし、実際においては、反射面の加工精度によって数秒程度の平行度の不一致が生じる。この平行度の誤差が浮上位置の精度に与える影響は浮上体を受光素子から離れるほど大きくなる。

##### 4.3 受光素子の問題点

本報告の実験ではPSDを一検出用の受光素子として用いている。PSDはその問題点として、(1)応答があまり早くない、(1kHz以下)、(2)空気のゆらぎの影響を受けやすい、(3)受光部にあたる光の直径が大きい場合、空気のゆらぎの影響をより大きく受ける、などを有す。分割型フォトダイオードは応答の早さと空気のゆらぎに対する堅牢性の点でPSDよりも優れていることが期待される。今後フォトダイオードを用いて同様の実験を行い、浮上精度や浮上剛性の測定を行う。

#### 5. 今後の課題

今後の課題を以下に列挙する。

- (1) 第4章で示したリニア浮上機構の試作と実験。
- (2) フォトダイオードを受光素子に用いた実験。
- (3) ヘテロダイン干渉式測長法と本研究の浮上方法を組み合わせる研究。
- (4) 浮上式XYステージの設計と試作。
- (5) 光学素子の加工精度に影響されない光学系の設計と実験。

#### 6. あとがき

本報告では、レーザーを基準とした磁気吸引浮上機構の光学系と制御方法についてのべた。1自由度の浮上実験の結果、 $2\mu\text{m}$ (p-p)程度の浮上精度と $1\text{N}/\mu\text{m}$ の浮上剛性を確認した。ただし、受光素子としてPSDを用いると、空気のゆらぎの影響で $10\mu\text{m}$ オーダの浮上位置の変動を生じることも観察された。

実験の結果、浮上体に配線をほどこすことなく、比較的長い案内距離にわたってリニア浮上機構の浮上制御が可能となることの指針を得た。(1991年9月30日受理)

#### 参考文献

- 1) D. Visher and H. Bleuler, in Proceedings of the Second international symposium on magnetic bearings (Seiken Symposium), Tokyo, Japan, 301, (1990)
- 2) 松田隆一, 電気誌, 109巻9号, 699, (1989)