

クリーンルーム用アクチュエータ

Clean Room Actuators

樋 口 俊 郎*

Toshiro HIGUCHI

半導体製造やバイオテクノロジー関係の分野においてクリーンルームは不可欠のものになっており、そのクリーン度への要求が高まってきている。これにともない、塵の発生しないクリーンな自動化機器の開発が強く求められている。本文では、クリーンルーム用アクチュエータの現状を著者らの研究をまじえて解説する。

1. ま え が き

半導体製造における製品の歩留まりを低下させる原因として塵埃の存在があり、LSIのパターンの微細化に伴って、塵の発生とウェハへの塵の付着をいかに防止するかが重要な課題となっている。また、バイオ関連の工業の分野においても、細菌やかびの発生の媒体となる塵埃ができるだけ少ない環境が求められている。このようにクリーンな環境下で行うことが不可欠な工程が種々の産業で急速に増加してきている。

作業の内容によって要求されるクリーン度はさまざまであるが、塵埃の極めて少ないクリーンな環境を実現し、これを維持するには、外部から塵をクリーンルームに入れないようにすることは当然である。さらに、クリーンルーム内においては、発生した塵を吸収し排出除去したり、作業に伴う塵の発生を防止することが必要である。ロボットは後者の有力な手段として期待されている。

塵の発生源の最大のものは人間であるとされており、したがって、クリーンルーム内での各作業工程から人間の直接作業を無くし自動化を進めなくてはならないからである。しかし、ロボットや自動機械によって人の直接作業を排除しても、つぎには機械からの塵埃の発生が問題となる。そこで、クリーンルームでの使用を目的とした塵を発生しないロボットが要求されている。ここでは、クリーンルーム用のウェハ搬送機器やロボット等の各種自動機を目的として開発されているアクチュエータと移動位置決め機構の動向を解説するとともに、著者らが進めている研究の紹介を行う。

2. シールによる塵の拡散の防止

クリーンルームでの自動化機器を作る場合に、現在の技術段階で、最も簡便かつ経済的な方法は、基本的には

*東京大学生産技術研究所 第2部

従来の機構と同様のものを用いて機械を構成するが、機器内の駆動部、減速機、モータ、案内、軸受部の各要素を、できるだけ塵の発生の少ないものをもちいるとともに、内部から発生する塵を、機器の外部にできるだけ出さないようにすることである。現在、クリーンルーム用ロボットとして開発されているもののほとんどのものがこの考えによっている。図1にその1例を示す¹⁾。駆動機構や電気配線等の塵の発生源となるものをロボットの内部に入れるとともに、ロボットの関節部の外界（この場合はクリーンな環境）に接するところをシールし、ロボットの内部と外部とのつながりをできる限り小さくしている。褶動部をシールするには、回転部のほうが容易であり、直線運動部のシールは難しい。したがって、この形式のクリーンルーム用ロボットは多関節形のものが多い。また、ロボット内部の気圧を、クリーンルームよりも低くし、仮に塵が発生しても、汚れた空気がロボットから外にでないように工夫しており、図1の例では、ロ

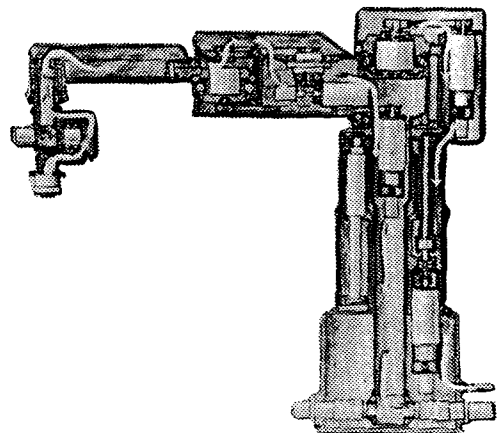


図1 クリーンルーム用ロボットの例¹⁾
(図中の矢印は空気の流れを示す)

ボットの内部ではクラス2000~3000であるが、外部では0.3 μ クラス10以下を実現している。

3. 機械的接触の排除

半導体製造において各工程内でウェハは位置決めされまた工程間を搬送されなければならないが、これらを自動化した場合には、今度は、これらの自動機械からの塵の発生が問題となる。図2の位置決めテーブルを例にとると、案内面やボールねじから塵が発生しており、潤滑油の飛沫も問題である。したがって機械からの塵の発生を防止するには、その主因である相対運動する個所での機械的接触を無くすことが抜本的対策であるといえる。

ここでは、直線運動の非接触位置決め機構についての基本的な考え方と幾つかの実例を紹介する。

位置決め機構は移動体の駆動機構と案内支持機構とで構成される。したがって、塵を発生しない理想的な位置決め機構は、この案内支持と駆動との両方を機械的接触の無いもので行うものでなければならない。

まず、機械的接触を伴わない直線運動に関する駆動機能を実現するにはリニアモータを用いることが必須の条件となる。つまり、回転モータを用いた場合には、直線運動への変換の際に必然的に機械接触を伴う機構(たとえば、ボールねじ)を用いなければならないからである。

次に、非接触の案内支持機構として実用可能なものとしては、空気等の流体軸受によるものと磁気軸受によるものが考えられる。リニアモータとこれらの非接触支持機構とを組み合わせることによって塵の発生が無い理想的な直線運動・位置決め機構が実現できるといえる。

リニアモータには、その動作原理により、リニア直流モータ、リニア誘導モータ、リニア同期モータ、リニアステップモータ等の種類があり、おのおのについてもさまざまな型式のものが開発されている²⁾。クリーンルーム用としては、ブラシレスのものでなくてはならない。現在までに開発されたクリーンルーム用の移動・位置決め機構のうち、リニアモータを利用したものを挙げてみる。

<リニア誘導モータ>+ <空気圧浮上>

リニア誘導モータは、数m~数百mの比較的に長い距離

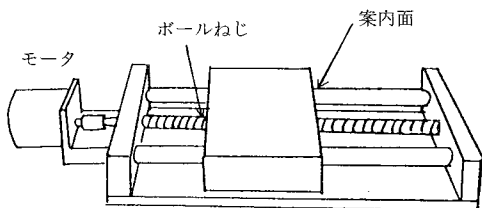


図2 位置決めテーブルからの塵の発生源

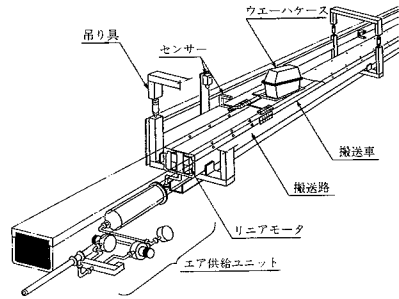


図3 空気圧浮上搬送システム³⁾

の10m/秒程度での搬送に適している。図3に、日立機電工業で開発されすでに実用化されている、半導体工場でのウェハケースの工程間搬送装置を示す³⁾。ウェハケースを載せるパレット(ビークル)はリニア誘導モータの2次側導体となるとともに、ランウエイ上面から供給される空気で浮上しており、パレット自体にはエネルギーを供給する必要が無い。空気圧浮上の問題点はクリーンルーム内の空気の流れを乱す恐れがあることと、クリーンルームのクリーン度に応じた清浄な空気を供給しなければならない点である。この例では、空気の消費をできるだけ少ない浮上機構を開発するとともに、ウェハケースを載せるパレットが通るところのみに空気を供給するように工夫している。

<リニア誘導モータ>+<磁気吸引浮上>: クリーンルーム用での長距離搬送を目的とし、移動体を電磁石の吸引力を制御することによって非接触浮上させる磁気吸引浮上とリニア誘導モータとを組み合わせたものである。磁気吸引浮上のための電磁石を、地上に(固定側)に設置する方法と、移動体のほうに固定する方法とが考えられる。

長い距離の搬送には、移動体側に吸引浮上用の電磁石を固定する方法が適しているといえる。この場合、移動体への給電が問題となり(クリーンルームではブラシ等による接触給電は望ましくない)、磁気吸引浮上用の電源として移動体にバッテリーを積載する方法がとられる。

その例として、ウェハケース搬送用に東芝で開発されたものを図4に示す。移動体は図5に示すように永久磁石と電磁石を組み合わせた磁気回路のギャップに生じる吸引力によってガイドレールに吊り下げられる構造になっている。移動体を安定に浮上させるためには、ギャップセンサの検出信号に基づき電磁石の電流を調節する閉ループ制御が行わなければならないが、この例ではさらに、永久磁石の起磁力による吸引力と移動体の重力とが釣り合う位置をギャップの指令値になるようにすることにより、電磁石での電力の消費を極力小さくする工夫がなされている。

<リニア直流モータ>+<空気軸受>: クリーンルーム用と

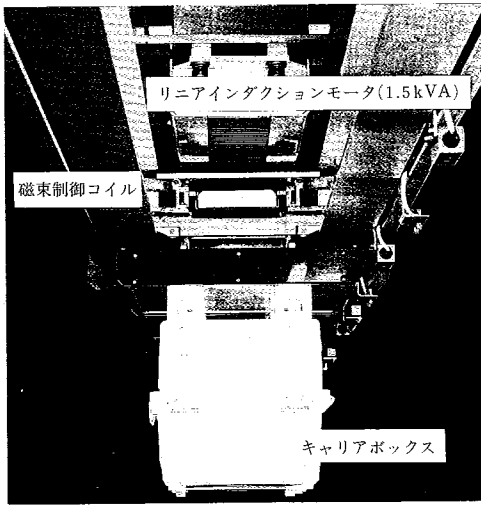


図4 磁気吸引浮上搬送システム⁴⁾

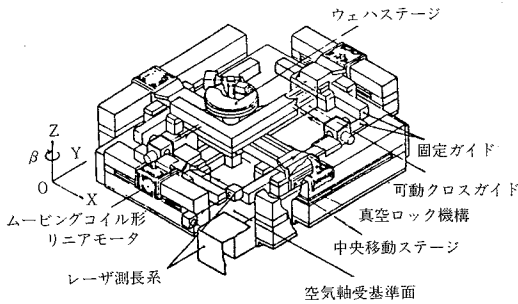


図6 ムービングコイル形直流リニアモータを用いた精密位置決め装置⁵⁾

してはブラシを用いない形式のリニア直流モータを用いる必要がある。クリーンルーム内の超精密位置決めテーブルとしてNTTと立石電機が開発したものを図6に示す⁵⁾。

この例が示すように、リニアモータ（特にリニア直流モータ）と非接触案内支持機構との組み合わせは塵の発生防止の効果からだけでなく、位置決めの高精度化を追求した場合の直線位置決め機構の主要な手段ともなっている。これは、案内内部や駆動部での機械的接触に伴う摩擦や伝達部のがたの影響を受けないサーボ機構を構成できるからである。

〈リニア直流モータ〉+ 〈磁気軸受〉

短ストロークの精密位置決めを目的として、駆動にボイスコイル形直流モータを用いたものが東洋ベアリングで開発されている⁶⁾。また、永久磁石を可動子に組み入れたリニア直流モータ形式のものが金沢大学の松村らで研究されている⁷⁾。図7に示すように可動子は磁気軸受によって非接触支持されており、軸方向の位置を中央部に

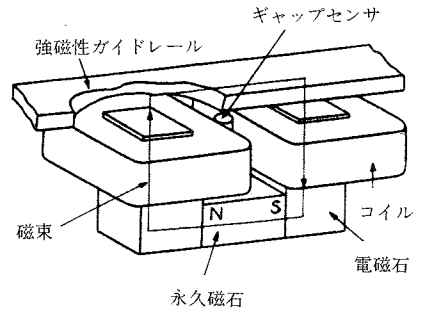


図5 吸引力発生用磁気回路⁴⁾

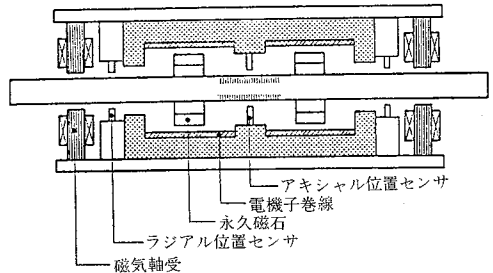


図7 リニア直流モータと磁気軸受の組み合わせ⁷⁾

置かれたリニアエンコーダによって検出し、固定子側のコイルの電流を制御することによって、軸方向の位置決めがなされる。

5. 位置決め機能を有する非接触アクチュエータ

5.1 リニアステップモータを利用した非接触位置決め機構

リニアステップモータでは位置決め保持力や推進力として利用している方向と直交する方向に推進力の最大値の10倍程度の大きな吸引力が働いている。通常のリニアステップモータでは、この吸引力に対してボールベアリングによって機械的にギャップを一定に保つようになっている。そこで、この吸引力が制御できれば、リニアステップモータを磁気吸引浮上のための電磁石の働きを兼ねさせることが期待できる。この着想に基づいて完全非接触のリニアアクチュエータの開発を著者らは進めている⁸⁾⁹⁾。ここでは、このアクチュエータの原理と試作機の紹介を行う。

さきに述べたように、一般のリニアステップモータでは、ギャップを減じる方向に吸引力が発生する。したがってこの吸引力を制御するには、各相の電流の大きさを変化させれば良いことは容易に思いつくが、リニアステップモータの本来の機能である位置決め機能を完全に保ちつつ磁気吸引浮上が可能で吸引力の制御を行うことは

非常に困難であると考えられる。そこで、著者らはリニアステップモータの磁気回路を工夫することによって、吸引力と推進力とを互いにほとんど独立に制御することのできる構造のモータを開発した。

試作した装置の説明を兼ねて、動作原理を説明する。図8に磁極の構造を示す。リニアステップモータとして見た場合、その動作はPM(永久磁石)形リニアステップモータと同様のものになっている。ただし、一般のPM形リニアステップモータでは、その名が示すように永久磁石を用いて主磁束の起磁力としているが、ここではメインコイルによってこの起磁力を得ている。図8に示すように、磁極子 T_1 と T_2 、 T_3 と T_4 は歯ピッチ(実験装置では6mm)の $1/2$ だけ互いに位相をずらしてあり、 T_3 は T_1 に対して $1/4$ ピッチだけ位相をずらしてある。メインコイルにある一定の電流 I_m を流しておけば、A相コイルとB相コイルを通常の2相PM形リニアステップモータのものと同様に扱え、同様の位置決め制御を行える。

さて、このときの吸引力に着目すると、1つの磁極子についてみれば、その固定歯との間の磁気抵抗は、リニアステップモータの進行方向(X方向)の位置によって大きく変化するために、1つの磁極子に関する吸引力は大きく変化する。しかし、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 の全磁極子の吸引力の総和についてみた場合、メインコイルの起磁力に対する磁気抵抗の変化はわずかであり、計算による推定値とともに図9に示す吸引力の測定結果から明らかなように、Xの位置によってほとんど影響を受けない。したがって、ステップモータに不可欠な歯の存在にもかかわらず、メインコイルの電流を ΔI_m だけ変化させることによって、吸引力の制御を、X方向の位置の影響を受けずに出来る。

一方、X方向の位置決め制御は、A相B相の電流のバランスを変化させて行えるが、このとき ΔI_m が I_m に対して小さいときは ΔI_m は位置決めほとんど影響を与えない。

このように一体構造でありながら吸引力の制御はメインコイルのみで、位置決め制御はA相、B相コイルで互

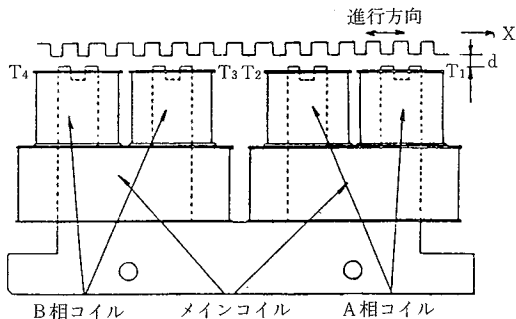


図8 MS形リニアステップモータの磁極構造

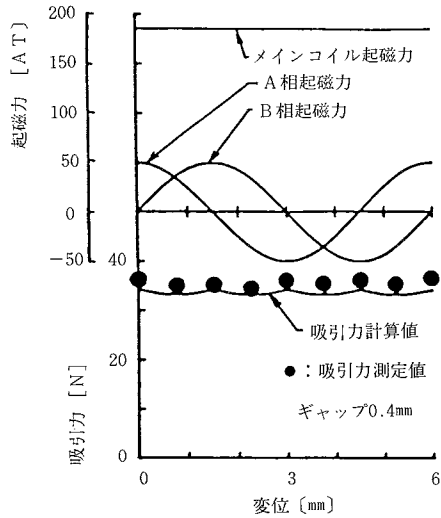


図9 進行方向についての吸引力の変動

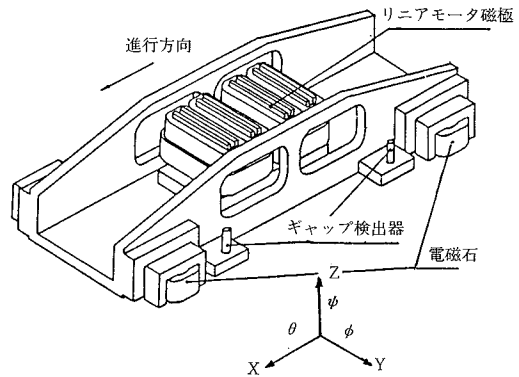


図10 MS形リニアステップモータ基礎実験装置の移動体

いに独立して、干渉することなく行うことができる。

移動体が磁気吸引によって完全に非接触支持され、かつ、位置決め制御がリニアステップモータの機能で行えることを実証するために、図10に示す基礎実験装置を試作した。移動体中央に図8のリニアステップモータ本体(これをMS(Magnetic Suspension)形ステップモータ要素と呼ぶ)を取り付け、移動体を吸引浮上する。4端に付けた電磁石は姿勢制御に用いるものである。渦電流式の非接触変位計を3個用い、移動体の上下方向の変位、ローリング、ピッチングを検出し、この信号に基づいて、PD制御によって吸引力を制御している。

ステップモータの駆動は、A相、B相コイルに正弦波形と余弦波形の電流を流すマイクロステップ駆動で行った。浮上に成功することができ、18mm/secの移

動速度としたとき、移動体の重心の上下動を±4 μm内に保つことができています (ギャップ設定値は0.4mm)。

図11が示すように今回の試作では2枚の平板間 (ただし上側の板の下面には6mmピッチの歯が付けられている) に移動体を非接触支持したが、実際の応用では種々の形態の非接触位置決め機構を構成することが可能である。

5.2 回転形非接触アクチュエータ

リニア形で開発した吸引力制御機能とステップモータの機能を一体で有する要素の形状を変化させ、組み合わせることにより、同様の原理による回転形の完全非接触ア

クチュエータを構成することができる。図12に回転テーブルの試作機の写真を示し、図13に構造の説明図を示す¹⁰⁾。外径380mm質量11.5kgで放射状に溝を付けた円盤状のロータが、天板に120度おきに取り付けたステップモータの機能を有する3個の固定子のメインコイルの電流を制御することによって非接触浮上する。そして、回転速度の制御と位置決めは、A相コイルとB相コイルを一般の2相ステップモータでのコイルと全く同じように

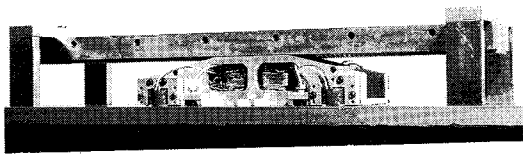


図11 MS形リニアステップモータの浮上実験装置

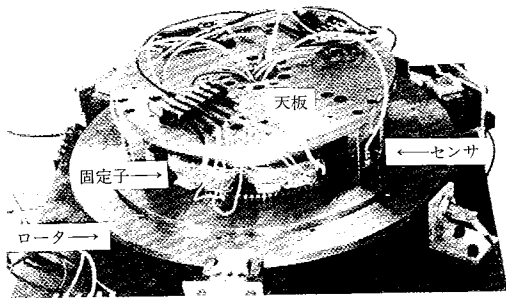


図12 MS形ステップモータによる回転テーブル

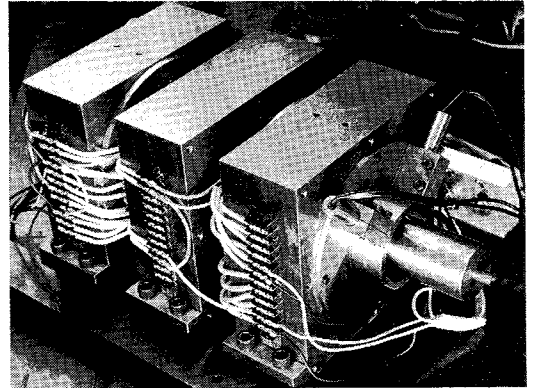
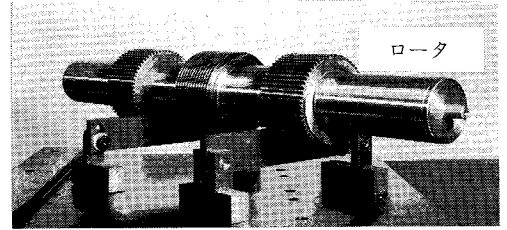


図14 MS形ステップモータによる軸回転形アクチュエータ

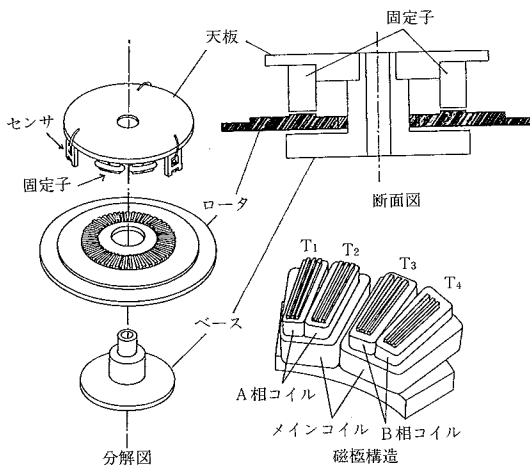


図13 非接触回転テーブルの構造

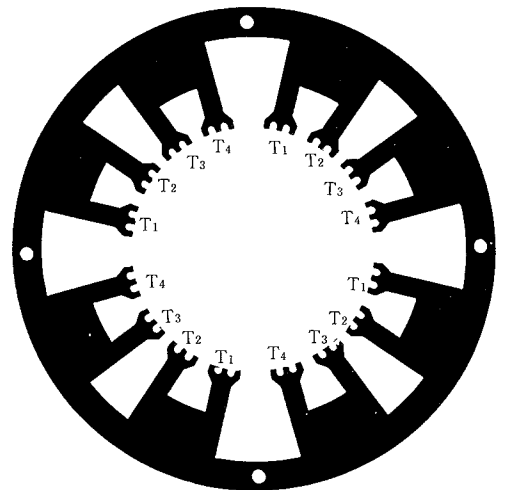


図15 ラジアルユニットのステータの磁極構造

扱うことによって開ループ制御で行える。

図14に軸回転形非接触アクチュエータのロータと試作機の写真を示す¹¹⁾。図15に示すように、4個のMS形ステップモータ要素からなるラジアルユニットを2組用いることにより、通常の磁気軸受と同様の原理により、軸方向を除くロータ軸の非接触支持が±1μmの精度で行えている。

6. あとがき

半導体の高精度高密度化にともない、塵を発生しないクリーンなロボットや移動、位置決め機構とこれを実現するためのアクチュエータとその制御技術の開発研究が、ますます重要になると思われる。とくに、磁気吸引浮上によるものは、媒体を必要としないから、真空環境や液体中での使用が可能であり、クリーンルーム用だけではなく特殊環境での利用が拡大するものと期待できる。

(1987年4月1日受理)

参考文献

- 1) 丸山茂生：クリーンルーム内の移載ロボット，ファクトリーオートメーション 4, 2, 50~53 (1986)
- 2) 樋口俊郎：リニアモータ開発の現状と動向，機械設計 29, 12, 26~39 (1985)
- 3) 福渡一郎：クリーンルーム用搬送装置，機械設計29, 12, 73~77 (1985)
- 4) 東芝磁気浮上搬送システム，カタログKPS1604 (1986)
- 5) 宇根，竹内，辻：X線露光装置用空気浮上式XYステータの開発，昭和60年精機学会秋季大会講論集，569~570 (1985)
- 6) 大島三郎：搬送用磁気浮上装置，精密工学会自動組立専門委員会研究例会講演前刷集 86-9, 11~16 (1986)
- 7) 松村，前田，藤田，福園：磁気浮上による完全非接触リニア直流モータ，電気学会論文誌 B, 106, 12, 1067~1074 (1986)
- 8) T. Higuchi, H. Kawatatsu, A. Horikoshi: Contactless Guiding and Positioning Using a Magnetically Suspend Electro-magnet Type Linear Stepping Motor, Proceedings of Japan-USA Symposium on Flexible Automation, 335~342 (1986)
- 9) 樋口，水野，川勝，堀越：磁気吸引浮上機能を有するリニアステップモータ，電気学会論文誌 D, 107, 1, 50~56 (1987)
- 10) 樋口，岡，小森：ステップモータを利用した非接触位置決め機構(第5報，第7報：磁気吸引浮上テーブル) 精密工学会講演論文集，昭和61秋489~490 (1986) 昭和62春893~894 (1987)
- 11) 樋口，岡，川勝：ステップモータを利用した非接触位置決め機構(第4報，第6報：磁気吸引浮上モータ) 精密工学会講演論文集，昭和61秋487~488 (1986) 昭和62春497~498 (1987)