Y 系超電導体を用いた真空用 X-Y 2 自由度 マイクロアクチュエータ

准 員 前 田 吉 彦 (東京電機大)

正 員 合 原 一 幸 (東京電機大)

正 員 藤 田 博 之 (東 京 大)

X-Y Two-Degree-of-Freedom Typed Micro Actuator Using Yttrium High Temperature Superconductors for Vacuum Condition

Yoshihiko Maeda, Associate, Kazuyuki Aihara, Member (Tokyo Denki University), Hiroyuki Fujita, Member (University of Tokyo)

In this paper, the design, the fabrication and the operation of two dimensional micro actuators using Yttrium High Temperature Super-Conductors (HTSC) in vacuum condition are reported. This microactuator consists of two parts; (a) a slider made by a permanent magnet, (b) a stator with patterned electrodes on bulk HTSC. The slider is levitated by repulsive force between the magnet and HTSC, when HTSC is cooled by liquid nitrogen. We can control the position of the slider by switching current in electrodes using Lorentz forces between the current and the magnet. The maximum speed of the sliders is 37 mm/s at the driving current of 400 mA. Two dimensional position control of the slider is achieved in this study with strokes of a few millimeters for each direction.

キーワード：高温超電導，Y 系超電導体，磁気浮上，超電導アクチュエータ，マイクロアクチュエータ，ピン止め力

1. ま え が き

近年，集積回路の製作に用いる半導体プロセス技術を援用して，数百 μm の大きさの機構を製作する研究が行われている^{(1)~(3)}。

このような大きさになると，従来の機械のように一つ一つの部品を組立てて作り上げるという作業は非常に困難になる。そこで，半導体プロセス技術を用いて，複雑なシステムの一括製作を行うことが有効になる。更に，このプロセスを用いて製作される回路やセンサを集積化することも期待される。このような超小型システムの研究は“マイクロメカトロニクス”と呼ばれる⁽⁴⁾。このサイズの機構では，マクロな世界における負荷として支配的であった，慣性力などの体積に依存する負荷に代わり，面の接触による摩擦力のような

表面積に依存する力が相対的に大きな負荷となる。そこで，ミクロの世界における駆動と運動制御では可動部分と固定部分との表面の間に働く摩擦の問題⁽⁵⁾⁽⁶⁾が重要になる。すなわち，アクチュエータ自体が小さいためその駆動力は非常に小さく，摩擦負荷により動かなくなったり，極めて断続的な動きをしたりする恐れがある。そこで，接触による摩擦の小さい構造^{(3)(7)~(9)}あるいは，逆に摩擦を利用して駆動する方法⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が提案されている。前者の一方法として，著者らはこれまで高温超電導体（以下，HTSC）と永久磁石（以下，PM）を用いた浮上型のリニアアクチュエータを報告してきた^{(9)(12)~(14)}。

更に，HTSC を利用した非接触型のアクチュエータの利点としては以下のことが挙げられよう。従来のボールベアリングを用いたアクチュエータ（ボールベ

アリングの接触による粉塵と潤滑油が汚染の原因となる)に比べて非常にクリーンなものができる。そこで、真空装置やクリーンルームなどのクリーンな環境での応用が期待されている⁽¹⁵⁾。しかし、HTSCを利用することの制約として、液体窒素による冷却が不可欠である点がある。しかし、この制約も、例えば真空装置〔真空引きをするときに液体窒素(77 K)を利用する〕への応用を考えれば、解消することが可能である。

そこで、真空装置への応用を考えて、HTSCを用いた真空内で駆動可能なニアマイクロアクチュエータを開発した⁽¹⁶⁾。更に改良を加えて、2方向に動くマイクロアクチュエータを製作し、その動作を確認した。

本論文では、真空内で2方向(平面)駆動を実現したマイクロアクチュエータの構造、動作原理、実験装置(真空用のHTSC冷却装置など)、そしてその駆動特性について報告する。

2. アクチュエータの構造と動作原理

図1に2方向に駆動するアクチュエータの構造を示す。スライドには、垂直方向に磁化したPMを用いた。ステータは、Y系のHTSCとその上に2組の絶縁膜(ポリイミド)上に形成された銅の電極からなる。図1に示すように、ステータの2組の電極はお互い直交するように重ね合せてある。そして、ポリイミドによってそれぞれの電極は絶縁されている。

さて、液体窒素でHTSCを臨界温度以下に冷却すると、PMとHTSC間に働く磁気反発力でPMは浮上する。この磁気反発力は、主としてピン止め力に起因する⁽¹⁶⁾。ピン止め力は、HTSCの内部に侵入した磁束の周りに巻付くように流れる超電導電流(侵入磁束と同方向の磁界を作る向きに流れる)によって、侵入した磁束の位置を束縛する力である。更に、ピン止め力は浮上したPMにピン止め力以下の外力を水平方向から加えても、力の加わる前の位置にPMを戻す働きをする。この力は、アクチュエータの位置制御に有効なものになる。

次に、駆動原理を説明する。HTSC上にPMを浮かせた状態で、X方向に駆動するための電流を図1のような向きに流すと、PMの磁界と駆動電流間に働くローレンツ力でPMは電流に引きつけられて移動する。

この駆動原理を図2を使ってもう少し詳しく説明する。まず、PMは厚さが薄く、そして厚み方向に均一に磁化されていれば、図2のようにPMを電流ルー

図1 2方向駆動アクチュエータの構造
Fig. 1. Structure of two-directional micro-actuator.

図2 1方向駆動の原理
Fig. 2. Principle of one directional actuation.

ブに置換えてもよいだろう。図2の矢印の向きに磁石を動かす場合、駆動力に関与するPMの電流は紙面に垂直な成分である。2本の電極を選び、PMの電流ループと同じ向きの往復電流を流すと、PMには吸引力が働いて横方向に移動する。このとき、PMには下方の吸引力が働くが、この力よりもHTSCとPM間の磁気反発力のほうが強ければPMは浮上した状態で横方向に移動することができる。そして、電流を通電する電極を進行方向に沿って切換えると、スライドは1方向に駆動する。

更に、X方向用駆動電流とY方向用駆動電流を同時に流して、XYの駆動を組合せると、ループ状やステップ状に動かすことが可能となる。つまり、両方向用の駆動電流は直交しているので、一方の駆動力は他方の駆動力と干渉することはない。

3. 実験装置について

〈3・1〉 実験に用いたアクチュエータ まず、スライドを1方向に動かして基本駆動特性を調べ、次に2方向に動かす。ここでは、1方向用と2方向用の2種類のスライドを用いた。図3に1方向駆動用スライドと電極を示す。図4に2方向駆動用スライドと電極を示す。表1にスライドに使用したPMの寸法と磁

図 3 1方向駆動内スライダと駆動電極
Fig. 3. A slider and driving electrodes of one directional actuator.

(a) スライダとステータ

(b) スライダ

図 4 2方向駆動用スライダと駆動電極
Fig. 4. A slider and driving electrodes of two directional actuator.

表 1 スライダに使用した PM の寸法と磁気特性
Table 1. Size and magnetic characteristics of PM for the slider.

用途	寸法 (mm ³)	表面磁束密度 B_s (G)	残留磁束密度 B_r (kG)	保磁力 H_{cb} (kOe)
1方向	1×4×0.3	550	—	—
2方向	1×1×1	—	6.1~6.7	4.6~5.5

図 5 2方向駆動の原理
Fig. 5. Principle of two directional actuation.

表 2 ステータ用の HTSC の寸法と超電導特性
Table 2. Size and superconducting characteristics of HTSC for stator.

試料	寸法	臨界温度 T_c (K)	臨界電流密度 J_c (A/m ²)	下部臨界磁界 H_{c1} (A/m)
Y 系	直径: 25 mm 厚さ: 2 mm	90	2.1×10^6	1.0×10^8

注) 試料は固相反応法で作成した。

気特性を示す。ここで、図 5 に示すような PM の配置と駆動電流を組合せることで、X と Y の両方向に同等の駆動力がスライダに働くようにできる。更に、この PM の配置ではスライダに働く下方向の吸引力は、スライダの中心線上に作用する。したがって、駆動時にスライダは傾くことなく垂直方向に安定した駆動が可能である。

表 2 にステータに使用した Y 系 HTSC の寸法と超電導特性を示す。ここで、Y 系を選択したのは、著者らが以前に行った実験の結果⁽¹⁷⁾ から、Y 系の焼結体は Bi 系焼結体に比べて、PM の水平方向の移動を妨げる制動力⁽¹⁹⁾ (ピン止め力に起因する) の値が反発力に比べて小さいことを考慮したためである。

図 3 と図 4 に示した X 方向用と Y 方向用のパターン電極は垂直に交差するように、エポキシ系接着剤を用いて接着されている。両方向の 25 本の電極に駆動電流を流す。駆動電極の (線幅, ピッチ, 厚さ) は (60 μm , 180 μm , 20 μm) である。このパターン電極は、ポリイミド (厚さ: 20 μm) 上に銅 (厚さ: 20 μm) が圧延されたフィルムをフォトリソグラフィとウェットエッチング (市販のプリント基板用エッチング液を使用) して製作した。

〈3・2〉 真空用冷却装置 今回は、真空内でアク

チュエータを駆動させるので、HTSCを間接的に冷却する必要がある。そこで、図6のような冷却装置を作製した。冷却装置は、ステンレス鋼のパイプ（外径：約6.25 mm）と厚さ0.5 mmの銅板とはんだ付けで作った冷却箱（30×50×5 mm³）からなる。ステンレス鋼のパイプと冷却箱は、銀のろう付けで液体窒素が外部に漏れないように取付けてある。片方のステンレス鋼パイプで液体窒素を冷却箱に送り込み、冷却

図 6 真空用冷却装置

Fig. 6. Cooling unit under vacuum condition.

図 7 本冷却装置の場合と直接冷却の場合の PM の反発力の比較

Fig. 7. Comparison of repulsive force between using cooling unit and direct cooling.

図 8 実験装置の全体図

Fig. 8. Experimental setup.

箱中で液体窒素を巡回させて、もう一方のパイプから液体窒素を排出する。HTSC の冷却は冷却箱の上面の銅板を介して行う。更に、HTSC と銅板間に放熱グリースを塗って、熱伝達を良好に保った。

実験装置の構造上、HTSC の温度を直接測定できなかったため、今回の冷却装置と直接液体窒素で冷却した場合との HTSC の冷却され具合を、HTSC と PM 間の反発力の測定で評価してみた。測定した反発力は磁界中冷却による測定値である。PM の浮上高さの測定には、レーザ変位計 (KEYENCE LC-2320) を使用した。HTSC を直接液体窒素で冷却した場合と今回の冷却装置で冷却した場合の PM の反発力の比較を図7に示す。この結果から、HTSC の冷却に関してはほとんど問題がないことを確認した。また、HTSC 上を PM が浮上している状態において、この冷却装置の液体窒素の消費量は 4 l/h であった。

〈3〉 実験装置 図8に実験装置の全体図を示す。ガラスのデシケータ（直径：150 mm，深さ：90 mm）に厚さ 10 mm のアクリル板で蓋をして真空容器とした。真空容器の真空引きにはロータリーポンプを用いた。図8に示すように真空容器の蓋と液体窒素を流すステンレス鋼パイプと配線の接合部分はゴムとエポキシ系接着剤によるハーメチックシールがされている。真空装置の真空度をピラニー真空計で測定したところ、真空度は 1.1 Torr であった。

駆動力に影響する PM と電極間の間隔は、スペーサの高さを変えることで調整可能である。また、通電電極の切換えは手動のロータリースイッチで行った。更に、それに付随したスイッチで駆動電流のパターン（電流を1本の電極に流す，2本にループ状（間隔0.5 mm，または1 mm）に流す）を変えることができる。

4. 実験結果および検討

図9に真空中で HTSC を冷却したときのスライダの浮上の様子を示す。このスライダは HTSC より 1.3 mm 浮上した。この状態で、駆動電極に電流を流

図 9 1方向スライダの浮上の様子

Fig. 9. Levitation of one directional slider.

してスライダを駆動する。ここでは、まず1方向に駆動した場合の特性について述べ、次に X 、 Y の2方向に駆動した場合の特性を述べるものとする。

〈4・1〉 1方向駆動時の動作特性

(1) 駆動電流パターンの影響 まず、駆動電流の流し方を変えてスライダの動特性を比較した。図10に示すように電流を駆動電極1本だけに流す場合、磁石の幅の半分の間隔 (0.5 mm) にループ状に流す場合、そして磁石の幅と同じ間隔 (1 mm) にループ状に流す場合についてスライダの駆動特性を比較した。その結果、駆動電流の値が小さく、スライダが垂直方向に安定して動くのは、磁石の幅と同じ間隔 (1 mm) にループ状に電流を流した場合であった。そして、スイッチの切換えに追従してスライダが動くための最小駆動電流は 150 mA であった。また、 X 、 Y 両方向に同じように動くことを確認した。以下、磁石の幅と同じ間隔でループ状に電流を流した場合の1方向駆動特性を示す。

(2) スライダの浮上特性 駆動電流に対するスライダの高さ方向の変動を調べた。測定にはレーザ変位計を用いた。図11に駆動電流に対する駆動電極か

図10 駆動電流の流し方
Fig. 10. Pattern of driving current.

図11 駆動電流に対する1方向用スライダの浮上高さ

Fig. 11. Driving current vs. levitation height of one directional slider.

らのスライダの浮上高さを示す。駆動電流を大きくしていくと、下方方向に引きつける力が強くなってスライダの浮上高さが減少する。最小駆動電流 (150 mA) のときのスライダと駆動電極の間隔は 0.21 mm である。

(3) スライダの動特性 次に、駆動電極に順次方形波状の電流が流れるよう電流を切換えてスライダの変位の動特性を測定した。測定には、高速ビデオ (Kodak Ektapro EM, 最高 12,000 こま/秒) を用いた。図12に駆動電流 400 mA のときの動特性を示す。(a)図のグラフは時間に対するスライダの変位を示したものである。スライダが 3 mm 移動するのに要した時間は、0.3 s である。また、スライダの進行方向 (ここでは x 方向) に対して垂直な方向にも 50 μm 程度の変位が観測された。そして、(b)図のグラフは時間に対するスライダの速度特性を示したものである。この速度は、(a)図の結果における測定点と測定点間の変位をその間の経過時間で割った値とした。これより、スライダの瞬間最大速度は 37 mm/s と求められた。

(4) ステップ応答 更に、スライダのステップ応答を測定した。図13に駆動電流 400 mA のときのスライダのステップ応答 (1 ピッチ: 180 μm) を示す。これより、4 ms 程度でステップ応答は終了しているのがわかる。ただし、画像を用いた測定の都合

(a) 変位特性

(b) 速度特性

図12 1方向駆動アクチュエータの動作特性 (駆動電流: 400 mA)

Fig. 12. Operation of one directional actuator (current: 400 mA).

図 13 1方向駆動アクチュエータのステップ応答
(駆動電流: 400 mA)

Fig.13. Step response of one directional actuator (current: 400 mA).

上、電流波形の立上りに対してスライダが始動する時点の遅れは測れなかった。今後、検討する必要がある。ここでは、スライダが電極ピッチ以下の変位や電極ピッチ以上の変位で止まる、すなわち負と正の定常偏差（応答値と目標値の差）が生じる。

〈4・2〉 X, Y 2方向駆動時の動作特性 先の結果から、駆動電流が最小でかつ、スライダが垂直方向に安定動作を行うのは、磁石の幅と同じ間隔（1 mm）にループ状に電流を流した場合であることを確認した。そこで、両駆動電極に磁石の幅と同じ間隔（1 mm）にループ状に電流を流し、2方向用スライダを動かした。実験の結果、両方向に駆動電流を流して、スライダが任意の大きさのループ状や階段状に動くことを確認した。このときの最小駆動電流は、X 方向駆動電流: 650 mA, Y 方向駆動電流: 500 mA である。

(1) スライダの浮上特性 2方向駆動用スライダの HTSC からの浮上高さは 0.86 mm であった。図 14 に駆動電流に対するスライダの駆動電極からの浮上高さを示す。この結果から、駆動電流の増加に対して駆動電極からのスライダの浮上高さは、直線的に減少していることがわかる。

(2) スライダの動特性 図 15 に両方向の駆動電極に電流を流したときの、1方向駆動特性を示す。(a)図のグラフは時間に対するスライダの変位を示したものである。スライダが 2.5 mm 移動するのに要した時間は、0.33 s である。また、スライダの進行方向（ここでは Y 方向）に対して垂直な方向にも、3% ほどの変位が観測された。そして、(b)図の速度特性からスライダの瞬間最大速度は 33 mm/s と求められた。

〈4・3〉 実験結果の検討

(1) 1方向に駆動した場合 1方向動作で駆動

図 14 駆動電流に対する 2 方向駆動用
スライダの浮上高さ

Fig.14. Driving current vs. levitation height of two directional slider.

(a) 変位特性

(b) 速度特性

X 駆動電流: 700 mA, Y 駆動電流: 650 mA

図 15 2 方向駆動アクチュエータの動作特性
Fig.15. Operation of two directional actuator.

電流の配置パターンを変えて実験を行った。磁石の幅と同じ間隔（1 mm）に駆動電流をループ状に流した場合に、駆動電流が最小でスライダが垂直方向に安定して駆動した。以前に報告した 1 方向型アクチュエータ⁽¹⁶⁾に比べて、最小駆動電流値が非常に小さくなっている（600 mA → 150 mA）。これは、電流を電極 1 本に流した場合よりもループ状に流したほうが、スライダに働く力での水平方向成分（つまり駆動力）の割合が大きくなるためだと思われる。また、垂直方向に安

定して駆動する理由としては、PMの両端には同等の力が垂直方向に働いて、PMが傾かず駆動できると考えられる。

図12(a)のスライダの動特性で、進行方向に対して垂直な方向にも変位が観測された。これは、ピン止め力に起因していると思われる。これについて詳しく説明する。磁束はHTSC内部のピン止めセンタのところに侵入し、磁束はピン止め力によって侵入した場所に束縛される。ここで、PMを動かしたときに磁束にピン止め力以上の力がかかると、磁束はピン止めセンタから脱出して次のピン止めセンタに移動する。このときのPMの静止安定点が移動する前の静止安定点より進行方向に対して垂直方向にずれると、PMにも進行方向と垂直な方向にピン止め力でずれが生じると思われる。

図13のステップ応答の測定結果において、目標値(180 μm)に収束しない現象がみられる。これは、駆動力に対してピン止め力が摩擦のように働いて目標値に合致する前に停止してしまうのではないかと推測される。

(2) X, Y 2方向に駆動した場合 X, Y 2方向駆動可能なスライダを製作し、2方向に動作することを確認した。ここで、最小駆動電流の値がX方向とY方向では異なっている。これは、実際のスライダのPMの配置が理想的な図4(b)のようではなく、スライダの中心線から多少ずれている。このため、駆動力に関与する磁界の強さがXとY方向では異なり、両方向の最小駆動電流に差が生じると考えられる。

また、1方向の特性に比べて、最小駆動電流値が大きくなっている。これには、二つの原因が考えられる。一つは2方向駆動用に用いたPMが、磁性体の粒子を有機バインダで固めたボンド磁石であるので、スライダに用いたPM全体の磁気エネルギーが、磁性体のバルクから切出した1方向用スライダのPMよりも小さく⁽²⁰⁾、結果として最小駆動電流が大きくなると考えられる。もう一つの原因に、ピン止め力の影響が考えられる。今回のPMの磁石の配置からスライダの下側で磁束線の分布は閉じた形になり、HTSCに侵入する磁束線の割合が1方向用スライダのPMの場合よりも高くなる。これにより、スライダに働くピン止め力が大きくなり、その影響も受けて最小駆動電流の値が大きくなるものと思われる。

5. おわりに

Y系超電導体を用いた真空内でX, Y駆動するマ

イクロアクチュエータを開発し、スライダが2方向に駆動することを確認した。スライダを1方向に動かすための最小駆動電流は150 mAである。駆動電流：400 mA時の瞬間最大速度は、37 mm/sである。また、スライダをX, Y 2方向に動かすための最小駆動電流は、X方向用駆動電流：650 mA, Y方向駆動電流：500 mAである。

今回は、真空内でのアクチュエータの動作を確認したに過ぎない。従って、冷却効率の改善、スライダの位置を検出して駆動電流の切換えをコンピュータ制御をするなどの様々な課題が残されている。

本研究を行う際に、多くの方々の御支援、御協力をいただいた。特に、ソウル大学 金容權助教授には、アクチュエータの設計段階で御助言をいただいた。日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所 古畑智武氏と東京大学修士課程 小林 大氏には、アクチュエータと実験装置の製作において、御協力と御助言をいただいた。また、株式会社キーエンスには、スライダの浮上特性を測定するためのレーザ変位計を貸していただいた。これらの方々に深く感謝いたします。

(平成4年3月27日受付)

文 献

- (1) K. J. Gabriel, W. S. N. Trimmer & M. Mehregany: Technical Digest of The 4th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'87), Tokyo, p. 853 (1987)
- (2) M. Mehregany, S. F. Bart, L. S. Tavrow, J. H. Lang, S. D. Senturia & M. F. Schlecht: *Sensors & Actuators*, A21-23, p. 173 (1990)
- (3) W. C. Tang, T. H. Nguyen & R. T. Howe: Technical Digest, IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Salt Lake City, p. 53 (1989)
- (4) 藤田博之: 電学論 D, 108, 205 (昭63)
- (5) K. J. Gabriel, F. Behi, R. Mahadevan & M. Mehregany: *Sensors & Actuators*, A21-A23, 184 (1990)
- (6) 野口清彦・藤田博之・鈴木雅史・吉村昇: 電学論 D, 111, 592 (平3-7)
- (7) T. Hirano, T. Furuhashi, K. J. Gabriel & H. Fujita: *J. Microelectromechanical Systems*, 1, No. 1, 52 (1992)
- (8) K. S. J. Pister, R. S. Fearing & R. T. Howe: Technical Digest of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Napa Valley, California p. 67 (1990)
- (9) 金容權・桂井誠・藤田博之: 低温工学, 26, No. 1, 37 (平3)
- (10) M. Sakata, Y. Hatazawa, A. Omodaka, T. Kudo & H. Fujita: *Sensors & Actuators*, A21-A23, 168 (1990)
- (11) T. Furuhashi, T. Hirano & H. Fujita: Technical Digest of 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, p. 1056 (1991)
- (12) Y.-K. Kim, M. Katurai & H. Fujita: *Sensors & Actuators*, 20, 33 (1989)
- (13) Y.-K. Kim, M. Katurai & H. Fujita: Proceedings of Micro Mechanical Systems, Napa Valley, California, p. 61 (1990)
- (14) Y.-K. Kim, M. Katurai & H. Fujita: *Sensors & Actuators*, A, 29, 143 (1991)

-
- (15) 荻原宏康・森下明平・笠原紀子・明石征邦：平3秋季低温・超電導学会講演集, p. 45
(16) 前田吉彦・合原一幸・藤田博之：平3秋季低温・超電導学会講演集, p. 49
(17) 前田吉彦・合原一幸・藤田博之：電学論 D, 111, 590 (平3-7)
(18) 電気学会大学講座 超電導工学 (改訂版), (昭63) オーム社
(19) F. C. Moon, K-C. Weng & P-Z. Chang: *J. Appl. Phys.*, 66, No. 11, 5643 (1989)
(20) 猪俣浩一郎：新素材 100 希土類磁石 (平2) 冬樹社

前 田 吉 彦 (准員)

昭和40年12月11日生。平成2年3月東京電機大学工学部電気工学科卒業。現在、同大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程在学中。セラミック系超電導体の応用に関する研究に従事。低温工学协会会员。

合 原 一 幸 (正員)

昭和29年6月23日生。57年3月東京大学大学院電子工学博士課程修了。現在、東京電機大学工学部電子工学科助教授。工学博士。主として、カオスニューラルネットワークおよびニューラルコンピューティング産業応用研究に従事。電子情報通信学会、生物物理学会、電気設備学会、日本ME学会、INNS、SMB学会会員。

藤 田 博 之 (正員)

昭和27年12月13日生。55年3月東京大学大学院博士課程修了。工学博士。同年、4月より東京大学生産技術研究所講師、56年5月同助教授となり、現在に至る。主として、マイクロメカトロニクス、マイクロアクチュエータ、極低温・超電導技術の研究に従事。IEEE, SICE, 低温工学协会会员。