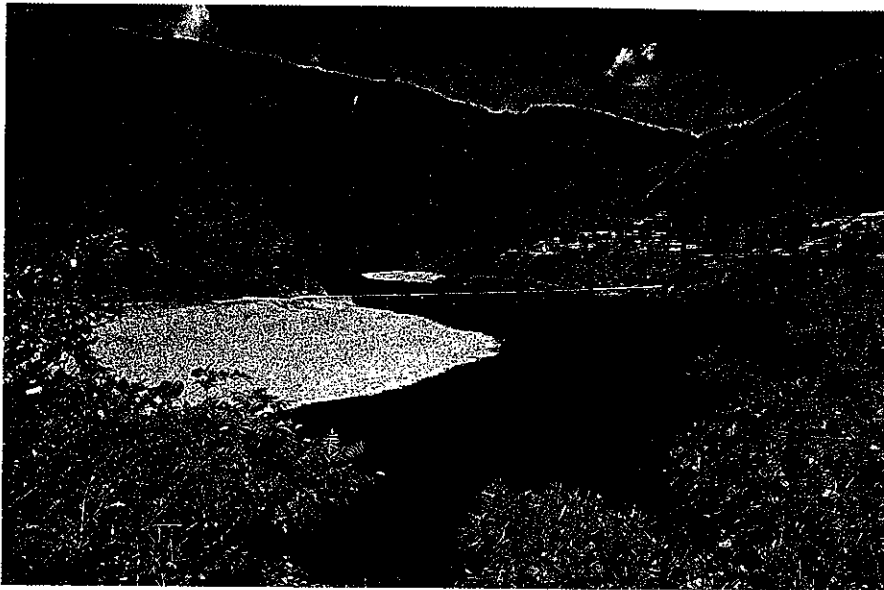


講演論文集

第17回

「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム



The 17th Symposium on Electromagnetics and Dynamics



2005年
6月22日水～6月24日金

高知市文化プラザかるぽーと

主催：日本AEM学会 共催：電気学会 日本機械学会



インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構の可能性

Possibility of positioning mechanism for superconduct magnetic levitation system using impact drive

小松 茂久 (高知工科大)

岡 宏一 (高知工科大)

正員

田口 寛貴 (高知工科大)

坂本 真人 (高知工科大)

Shigehisa Komatsu

Kochi University of Technology

Koichi Oka

Kochi University of Technology

Member

Hiroki Taguchi

Kochi University of Technology

Masato Sakamoto

Kochi University of Technology

In this paper, a new type of positioning mechanism for superconduct magnetic levitation system is proposed. The proposed mechanism is using an impact driving technology for positioning. When a magnet is levitating over a superconductor, an impulse force for the superconductor drives with the system. The movement, however, are different. The super conductor movement is larger than the magnet movement. When the superconductor returns to the original position slowly, the levitated magnet position is changed slightly. The iteration of the impact force and soft returning makes the levitated magnet to be positioned.

To begin with, propose a typical positioning mechanism. Next, explain the principle of the positioning mechanism. Then, explain the experimental method and system. Finally, some basic experimental examinations are introduced and the possibility of the proposed positioning mechanism is examined.

Keyword: rectified superconductor, magnetic levitation, positioning, impact drive

1 緒言

現在, 物体を移動させる場合の大半は, ベルトコンベアや搬送車などによる接触機構を使用しており, 物体が接触している為, 摩擦を発生しながら運動している。非接触機構 (磁気浮上) は, 装置が大型化すること, 高価なものになること, 支持力が比較的小さいことなど不利な条件が多いことから, ほとんど実用化されていないのが現状である。しかし, 非接触機構 (磁気浮上) は, 摩擦・摩耗の問題の減少により, システムが半永久的になること, メンテナンスが容易にできること, 振動・騒音の問題が低減されること, 高速化が可能になることなどの大きなメリットがある。また, 油圧ポンプ・油圧系統のパイプ類, 油を浄化する装置が不要になり, 汚染問題も減少するといったような付加価値も大きい。

実用化が考えられる磁気浮上機構には, 常伝導状態を用いる場合と超伝導状態を用いる両方式が考えられるが, 常伝導の磁気浮上では安定化のためのフ

連絡先: 小松 茂久, 〒782-8502, 高知県香美郡土佐山田町宮の口 185, 高知工科大学知能機械システム工学科,

e-mail: shigekoma@yahoo.co.jp

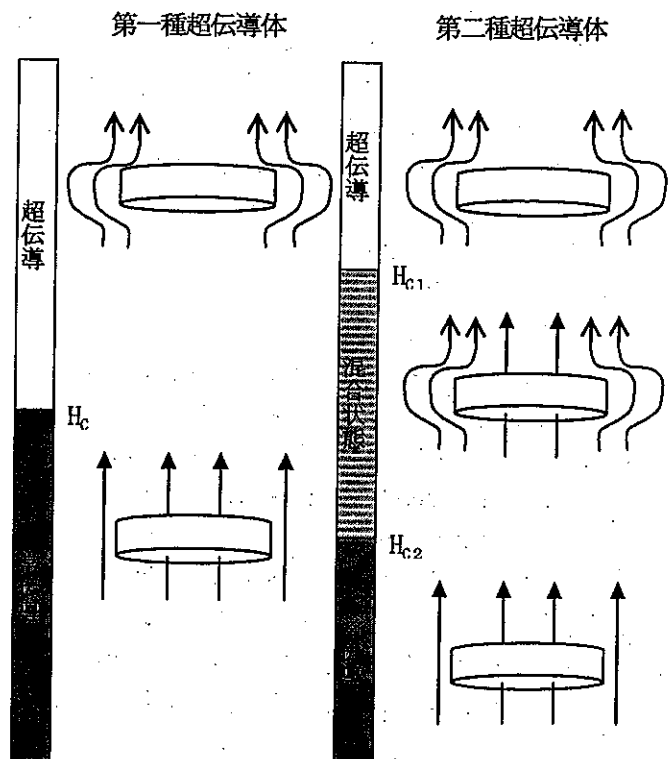


Fig.1 Difference of response between No1 superconductor and No2 superconductor

ードバック機構が必要であり、センサなどが必要で装置が高価かつ複雑なものとなる欠点がある。一方、超電導磁気浮上機構は能動的な制御なしでも安定な浮上を得ることが可能であり、メリットが大きいと考えられる。

本研究では、超伝導体を用いてピン止め浮上させた永久磁石の精密位置決めシステムを提案する。その手法として、超伝導体のインパクト駆動による浮上磁石の位置制御について考察した。

2 位置決め機構

2.1 第一種超伝導体と第二種超伝導体

超伝導体には大きく分けて第一種超伝導体と第二種超伝導体の二つに分けることができる。この二つの大きな違いは超伝導体を作るときの材料にある。アルミニウム、スズ、インジウム、タングステンといった、いわゆる単体で超伝導体を作ると第一種超伝導体になり、ニオブ・チタン合金やニオブ・スズ合金、セラミックスといったもので作ると第二種超伝導体となる。違いは材料だけでなく、大きな性質の違いを持っている。概略は、Fig.1 に示してあるが、第一種超伝導体では、臨界温度以下の状態で、臨界磁場を超えない範囲の磁場を加えると完全なマイスナー状態を示す。しかし、第二種超伝導体においては、臨界温度以下の状態で、磁場を徐々に加えていくとその加える磁場の程度により、その応答は超伝導状態の特徴である完全なマイスナー状態、超伝導状態と常伝導状態の混合状態である不完全なマイスナー状態、常伝導状態のそれぞれを示す。超伝導状態と常伝導状態の混合状態では、マイスナー効果を示す部分と量子化された磁束が貫く部分が混在する状態となる。

今回は、第二種超伝導体のもつ、量子化された磁束が貫く不完全なマイスナー状態（ピン止め浮上）を対象とし、本実験には、イットリウム系酸化セラミックス（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ）を使用した。このイットリウム系酸化セラミックスは $-181(^{\circ}\text{C})$ で超電導状態となり、現在発見されている高温超電導体の中でも革新的なものである。このイットリウム系酸化セラミックスを液体窒素（沸点： -195.802°C ）を用いて冷却して超電導状態を実現し、その直上に永久磁石を浮上させる。

2.2 ピン止め浮上

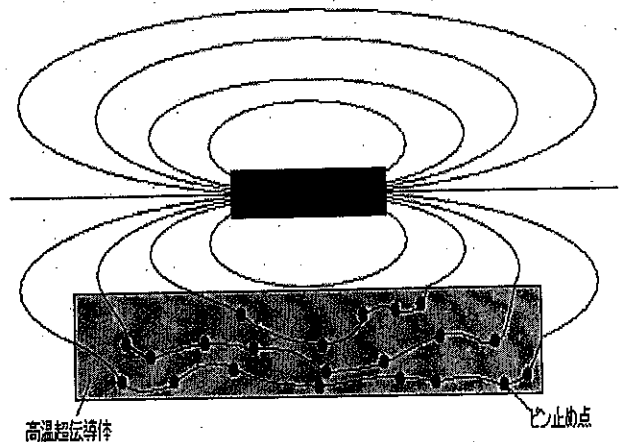


Fig.2 Nonconduct positioning

第二種超伝導体には Fig. 2 の様に結晶の境界や歪み、不純物などの数々の要因によって作られたピン止め点と呼ばれるものが存在する。このピン止め点は非超伝導部分となるので、磁束が通りやすい点となる。ピン止め点で磁束を捕捉することができると考えられているこの現象は、ピン止め効果と呼ばれている。超伝導体を冷却し超伝導状態を実現すると、磁束はピン止め点に保持され、その磁束を捕捉することによって浮上の復元力を得るシステムがピン止め浮上である。

ピン止め浮上が行われている場合、その復元力は磁場が変化したときに、トラップされた磁束と遮蔽電流によって発生するローレンツ力によって得られていると考えられる。このローレンツ力は超伝導体内ではピン止め力と釣り合っている。磁場が大きく変化しローレンツ力がピン止め力の限界を超えるとときには、磁束は次のピン止め点に移ると考えられている。

このことは系にピン止め力を超える大きな力を発生させることができれば、ピン止めされている磁束のピン止め点をずらし、能動的な位置決めをする可能性があると考えられる。

本研究では、インパクトメカニズム⁽¹⁾による駆動を行うことによって大きな力を発生させて、磁束を保持しているピン止め点をずらすという超伝導位置決め機構について考察する⁽²⁾。

2.3 位置決め原理

Fig. 3 のように高温超伝導体の上で永久磁石が非接触で安定に浮上しているものとする。高温超伝導体に対して右方向にインパクト力を加えると、高温

超伝導体は瞬間的に右方向に移動する。このとき高温超伝導体が保持している磁束のピン止め点がずれることが期待できる。同時に永久磁石は、超伝導体の運動による磁束の変化により力を受け、超伝導体の運動を追従すると考えられるが、ずれた磁束の影響でわずかながら超伝導体より移動量は少ないと考えられる。この後ゆっくりした運動により高温超伝導体を元の位置に戻す

と、永久磁石は相対的にわずかに左に移動したことになる。この動作を繰り返すことによって位置決めが可能であると考えられる。

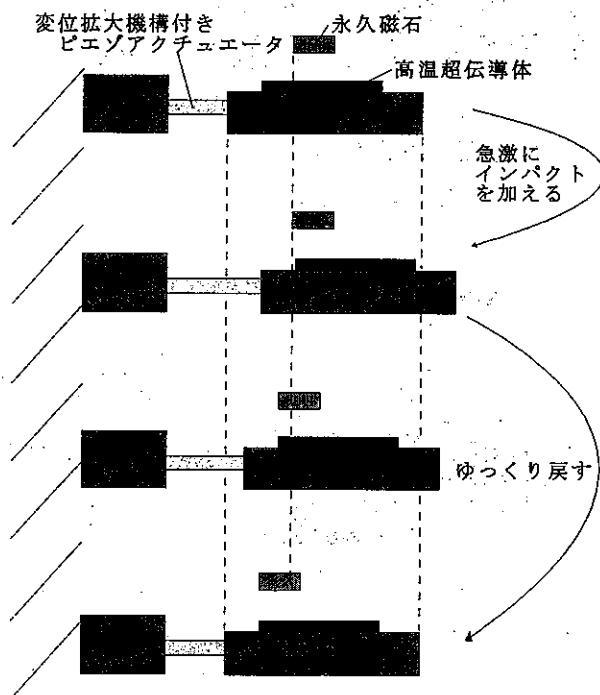


Fig. 3 Positioning mechanism for superconduct magnetic levitation system using impact drive

3 実験装置

3.1 実験装置概要

実験装置の外観をFig. 4, Fig. 5に示す。図より分かるように、装置はFig. 6の変位拡大機構付きピエゾアクチュエータに超伝導体を載せ、ピエゾアクチュエータの出力端を壁に接着したものである。ピエゾアクチュエータにステップ電圧を加えると、ピエゾアクチュエータは急速に伸び、超伝導体がインパクト駆動される。

3.2 インパクト駆動部の構成

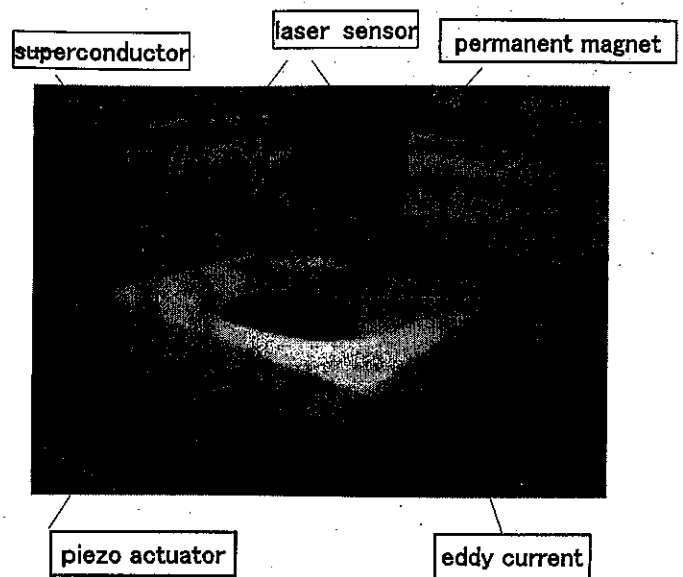


Fig. 4 External view of experimental apparatus

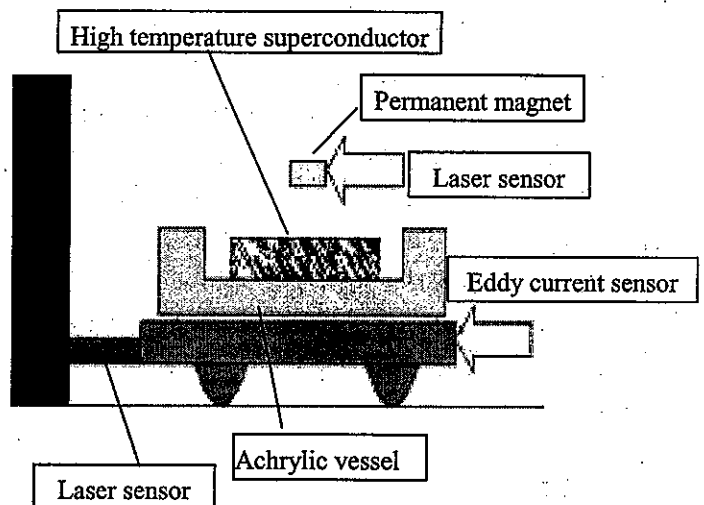


Fig. 5 Experimental apparatus

本実験では、インパクト力を発生させる機構として、変位拡大機構付きピエゾ・アクチュエータを使用した。ピエゾ・アクチュエータは、 $0.1\mu\text{m}$ 単位の高精度位置決めが可能で、伸長・収縮時共に $100\mu\text{s}$ 以下の高速応答を行うなどの特性を有している。また、圧電セラミックスを用いている為、電磁ノイズが発生しない。また、付加電圧の幅が $0\sim 150\text{V}$ と広いレンジで動作させることができる。その他に、使用温度の範囲が広く汎用性が高い。本来、この変位拡大機構付きピエゾ・アクチュエータは最大 150V まで使用できるが、掛ける電圧がインパクトである

ため、変位拡大機構が壊れやすくなる。そこで、本実験では90Vを最大電圧とした。図より分かるように、装置はFig. 6の変位拡大機構つき piezoアクチュエータに超伝導体を載せ、piezoアクチュエータの出力端を壁に接着したものである。piezoアクチュエータにステップ電圧を加えると、piezoアクチュエータは急速に伸び、超伝導体がインパクト駆動される。Fig. 6の写真の真ん中の円柱をしたものがpiezo素子であり、上部が変位拡大機構となっている。このアクチュエータは、銅製の半球を3つ取り付けてある。半球を取り付けた側を床におくことで、変位拡大機構つきpiezoアクチュエータが3点支持で運動することが可能になり、摩擦の変動を少なくできると考えられる²⁾。

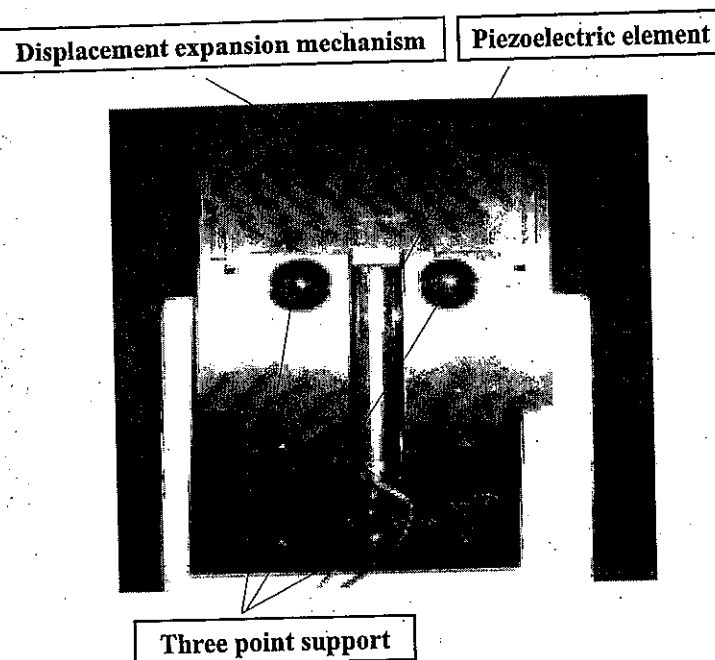


Fig. 6 Piezo actuator

3.3 信号生成及び伝達並びに応答測定方法

本実験においては、全ての信号の生成及び測定を1台のPCから行った。

まず、MatlabのSimulinkを使い波形信号を生成し、d-SPACE(DSP)を介しアンプへ入力する。アンプで増幅された信号はpiezo・アクチュエータに入力される。

実際に動いた距離は、超伝導体の動きを渦電流センサで、永久磁石の動きをとレーザーセンサで測定し、電気信号がd-SPACE(DSP)に送られる。Fig. 7に本実験装置全体のシステム図を示す。

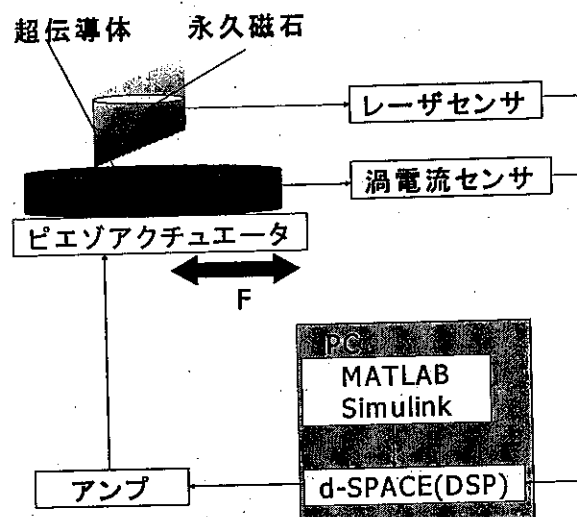


Fig. 7 Signal flow and measurement system

4 実験結果

4.1 実験方法

まず、高温超伝導体を冷却し、超伝導状態を実現し、永久磁石をピン止め浮上させた。次に、PC内で信号生成し、piezoアクチュエータにステップ状の電圧をかけ、インパクト駆動させた。

また、かける電圧は1.0V～9.0Vの間で変化させた。9.0Vを印加したときの入力波形をFig. 8に示す。このときの永久磁石と超伝導体の運動をそれぞれ、レーザーセンサと渦電流センサによって測定した。

4.2 結果・考察

印加電圧が、1.0Vまたは2.0Vのときには、高温超伝導体の動きにほとんど変化が見られなかった。当然ではあるが、浮上中の永久磁石にも動きは見られなかった。これは変位拡大機構つきpiezoアクチ

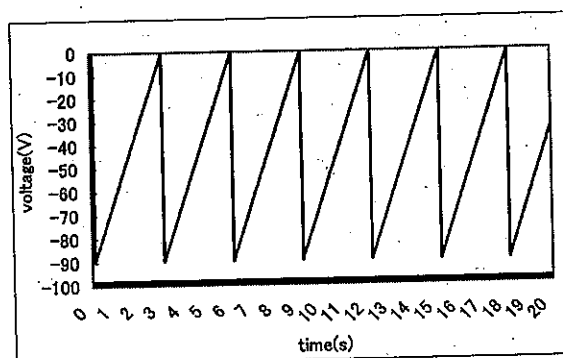


Fig. 8 Shape of waves (90V/20s)

ユエータの変位拡大機構部分の伸びが、かける電圧に比例して伸びているため、微電圧では伸びが極小すぎてインパクトとしての力が不十分であるためと考えられる。3.0Vから超伝導体の動きが確認でき、永久磁石の動きも追従していることが確認できた。高い電圧をかければ、永久磁石の運動も大きくなることも確認できた。

ピエゾアクチュエータに4.0Vの電圧をかけ、インパクト駆動させた時の結果をFig. 9に、9.0Vの電圧をかけ、インパクト駆動させた時の結果をFig. 10に示す。4.0Vの電圧を加えたFig. 9では、永久磁石は高温超伝導体の動きにあわせて追従しているが、X軸方向の浮上位置は変化していないのがわかる。それに対して9.0Vを加えた結果のFig. 10では、永久磁石が高温超伝導体の動きにあわせて追従しているとともに、除々に永久磁石が一方向に変化していることがわかる。Fig. 11のグラフはアクチュエータに9.0Vを加える実験の時間を長くした時の結果である。図からわかるように、強いインパクト力(高電圧)をかけることを繰り返すことにより、永久磁石は一定方向へ移動することが確認でき、前章で述べた原理を実証することができた。

5 応用

応用として、この位置決め原理を用いて高温超伝導磁気浮上を鉛直方向に応用することを提案する。これまで、鉛直方向でピン止め浮上している浮上体は、時間がたつにつれて浮上体の位置が下がっていくことが知られている。そこでインパクト力を用いることによって浮上体の高さの位置制御が期待できる。装置の一例を、Fig. 12で示す。高温超伝導体の周りに永久磁石が非接触で安定に浮上しているものとする。このとき、鉛直方向にインパクト力を加えると、高温超伝導体は瞬間的に鉛直方向に移動する。このとき高温超伝導体が保持している磁束のピン止め点がずれることが期待できる。一方永久磁石は、超伝導体の運動による磁束の変化により力を受け、超伝導体の運動を追従すると考えられるが、ずれた磁束の影響でわずかながら超伝導体より移動量は少ないと考えられる。この後ゆっくりした運動により高温超伝導体を元の位置に戻すと、永久磁石は相対的にわずかに下に移動したことになる。

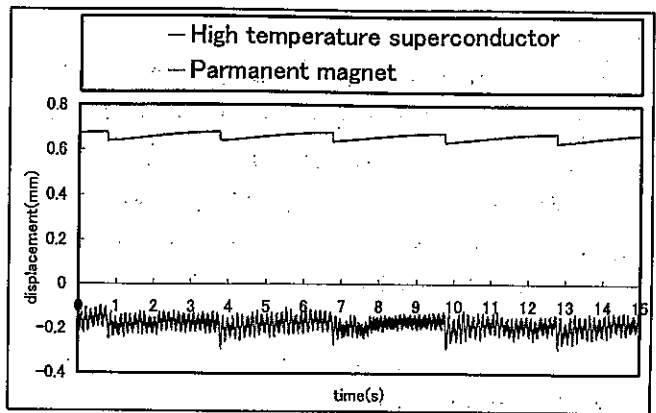


Fig.9 Experimental result(40v 15s)

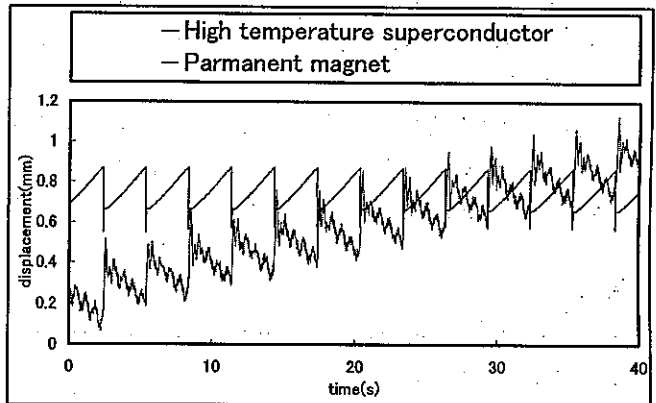


Fig.10 Experimental result(90v 40s)

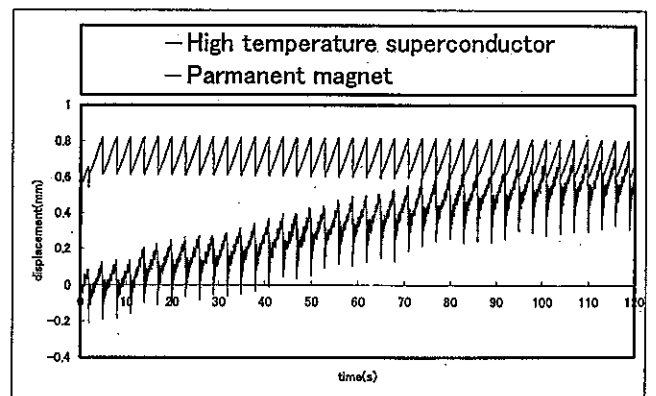


Fig.11 Experimental result (90v 120s)

6 結言

今回は高温超伝導体を用いたピン止め浮上において、インパクト力により永久磁石の磁束が保持されているピン止め点をずらすという原理を提案した。この原理に基づいて、実験装置を開発し実験を行った。実験により、強いインパクト力を繰り返しかけることにより永久磁石が一定方向に移動することが確認でき、位置決め機構の可能性を実証した。

しかし、ここで問題点も明らかとなった。現時点で考えられる問題点は、

- ① 永久磁石の残存振動
- ② 超伝導体と永久磁石の個体差や温度条件による浮上力の差違
- ③ 超伝導体ごとのピン止め点の違い

などであるが、今後の課題が多いことも分かった。位置決め機構の実現には、まずこのような課題を解決する必要があると考える。

今後はまず超伝導体にかかる波形（系に加える加速度＝力）を変更しながら実験を重ね、精密位置決め制御の実現を追及していく予定である。

参考文献

- [1] <http://www.Intellect.pe.u-tokyo.Ac.jp/japanese/>
- [2] 岡宏一, 小松茂久, インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構における提案, 電気学会資料 P19~P22

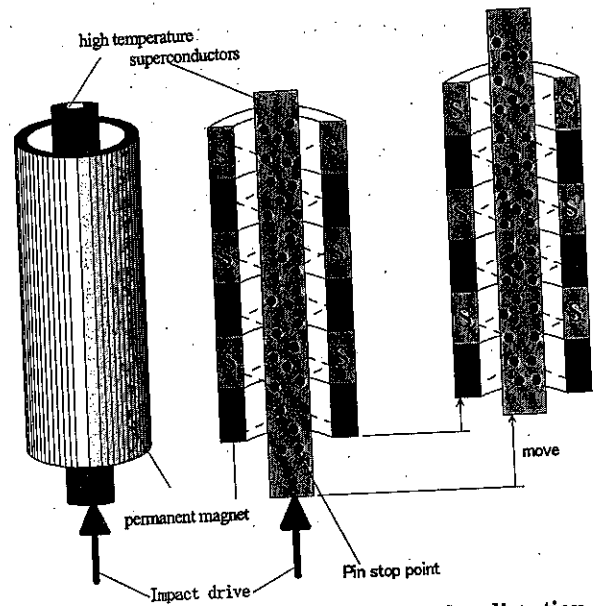


Fig.12 Application in perpendicular direction