

インパクト駆動を用いた超伝導浮上位置決め機構の基礎的研究

Fundamental Study of Positioning Mechanism
for Superconducting Levitation System Using Impact Drive小松 茂久^{*1}(学生員), 岡 宏一^{*2}(正員), 田口 寛貴^{*1}, 坂本 真人^{*1}

Shigehisa KOMATSU(Stu. Mem.), Koichi OKA(Mem.), Hiroki TAGUCHI, Masato SAKAMOTO

In this paper, a new type of positioning mechanism for superconducting levitation system is proposed. The principle of this mechanism is to use an impact driving energy against a pinning force for positioning. When a permanent magnet is levitating over a superconductor, the pinning force works between a superconductor and the levitated permanent magnet tightly. If the system has an impact driving energy against the pinning force and the impact force is larger than the pinning force, the permanent magnet will move to next pinning points. If an impact force for the superconductor works to the system, the movement of the superconductor and the magnet are different. The movement of the superconductor is larger than the movement of the magnet. This movement means that the pinning effect has been broken and the permanent magnet has been slipped. After sticking both objects by the pinning force, the superconductor returns to the original position slowly and the levitated magnet's position is slightly changed. The repetition of the impact force and its return to the original position makes the levitated magnet be positioned.

Keywords: superconductor, magnetic levitation, pinning force, positioning, impact drive.

1 緒言

現在, 物体を移動させる場合には, 多くの場合, ベルトコンベアや搬送車などを用いた接触機構を使用している。この場合, 物体と搬送システムが接触している為, 摩擦, 振動, 騒音などのために, メンテナンスに手間や費用がかかること, 高速化ができ難いなどの問題を抱えている。

一方, 非接触機構の代表的なものに磁気浮上が考えられるが, 磁気浮上機構は, 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, 磁気浮上機構は, 一般的に, 摩擦・摩擦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。

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ィ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, 超伝導磁気浮上機構,

特に第2種超伝導体を用いてピン止め浮上した機構を用いる場合は, ピン止め浮上自体が位置保持能力を有しており, 能動的なフィードバック制御の必要性がない。

本研究では, この第2種超伝導体を持つ自己位置保持機能という優位性を利用した精密位置決めシステムを提案する。これは, 能動的な制御無しでも安定に浮上するという超伝導浮上の特徴を生かした, 装置が簡便で小型化できる搬送装置を目指したものである。その基礎研究段階として, 第2種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の構築する。位置決め手法として, 第2種超伝導体にピエゾアクチュエータによるインパクト駆動を与えた場合の浮上磁石の位置制御について実験を行い, 提案とおりの結果が得られたので報告する。

2 提案位置決め機構

2.1 ピン止め力及びピン止め浮上

第2種超伝導体には Fig. 1 のようなピン止め点と呼ばれるものが存在する。ピン止め点は, 欠陥, 結晶粒界, 不純物などが存在する場所であり, その場所は常伝導状態になっているか, 超伝導状態であってもより小さな凝集エネルギーしか持たない[1]。量子化された磁束が常伝導部分にある場合と, 超伝導部分に磁束がある場合を比較すれば, 磁束が常伝導部分にある場合のほうがエネルギー

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

e-mail: shigekoma@yahoo.co.jp

*1 高知工科大学大学院 *2 高知工科大学

ギーが小である。したがって、磁束が常伝導部分から超伝導部分へ移動しようとする時、引き戻す力が働くこととなる。これがピン止め効果と呼ばれるものであり、この力をピン止め力と呼び、Fig. 1 のような状態をピン止め浮上と呼んでいる。さらに、エネルギー的に安定なことから、この状態で永久磁石は安定に浮上し、それゆえピン止め状態は自己位置保持機能を有しており、利用価値は高いと考える。

2.2 位置決め原理

もし、系にピン止め力を超える大きなエネルギーを与えることができれば、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による駆動を行うことによって大きなエネルギーを発生させて、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提案する[2]。

Fig. 2 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Fig. 2(b) のように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運動により力を受け、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、すべりが起こる。次に、再びピン止め力により捕捉された (STICK) 後、Fig. 2(c) のように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、Fig. 2(d) のように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。

以上、理想的状態の位置決めについて論じてきたが、永久磁石の浮上高さ、浮上磁石の傾き、高温超伝導体の種類などは位置決めに影響を及ぼすと考えられる。しかし今回の実験では、提案する磁気浮上装置の実現可能性を見極めるために、高温超伝導体にはピン止め点(欠陥)を意識的に数多く分散させる[3]ことをしていない YBCO 超伝導体を用い、床に平行な平面内のみの測定を行った。

3 インパクト実験

3.1 実験装置

3.1.1 実験装置概要

本実験では、インパクト力発生源として圧電素子を使用した。これは圧電素子が持つ以下の特長による。

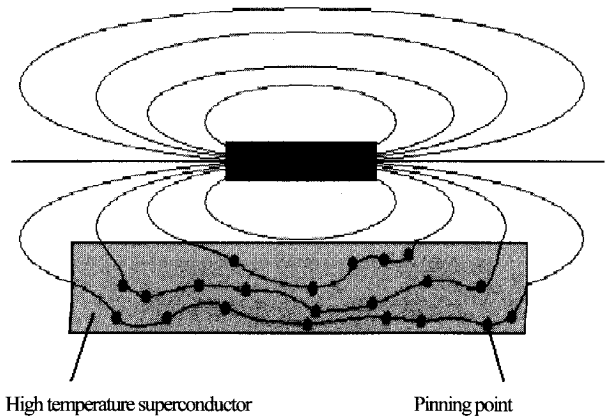


Fig. 1 Pinning points and superconductive positioning.

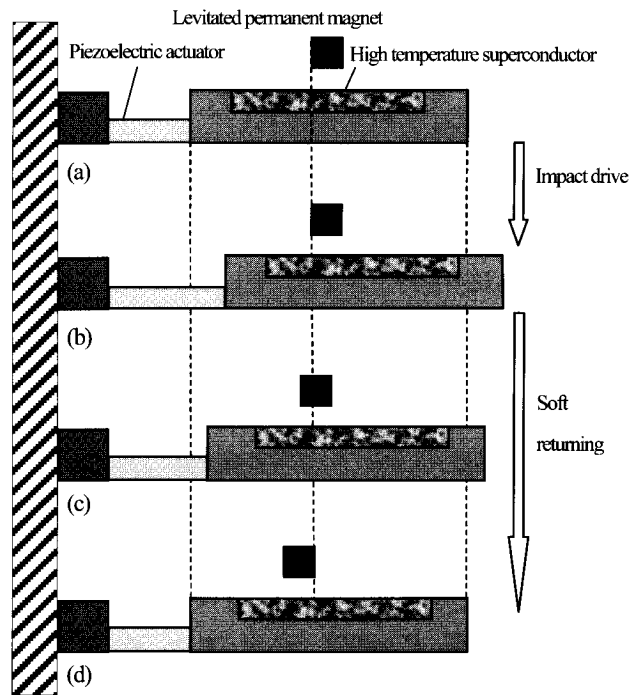


Fig. 2 Proposed principle.

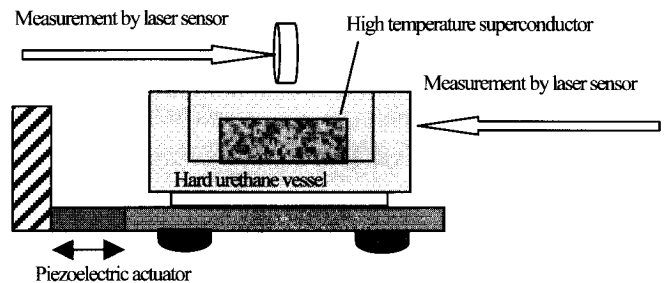


Fig. 3 Impact driving experimental system.

- ① 安価で、入手しやすい。
- ② 比較的小型・軽量・扱い簡単。
- ③ 0.1 μm 単位の高精度位置決めが可能。
- ④ 伸長・収縮時共に 100 μs 以下の高速応答を行う。
- ⑤ 付加電圧の幅が 0~150V と広いレンジで動作させることができる[4]。

さらに、本実験装置には変位拡大機能が付与されている。Fig. 3 に本実験で用いた装置の概型図を示し、Fig. 4 に実際の装置を裏側から見たものを示す。Fig. 4 の写真の真ん中の円柱をしたものが圧電素子であり、上部が変位拡大機構となっている。変位拡大機能は、てこの原理を応用したものが直線で指し示す近傍にそれぞれ配置されている。支持の方法として、銅製の半球を3個取り付けて、3点支持で運動することを可能とし、摩擦の変動を少なくするようにした。ここで、圧電素子、変位拡大機能及び3点支持半球付ステージをピエゾアクチュエータと呼ぶこととする。

Fig. 3 に示すように、変位拡大機構付きピエゾアクチュエータの上に熱伝導率の小さな硬質ウレタンの容器を載せ、その中で高温超伝導体を液体窒素で冷却し、その上に永久磁石を浮上させる。そして、ピエゾアクチュエータの出力端を固定端とし、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。

3.1.2 信号生成及び伝達並びに応答測定方法

Fig. 5 に本実験装置全体のシステム図を示す。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。生成された波形信号は、d-SPACE (DSP) を介しアンプ (NF 製 HSA4012) へ入力される。アンプで増幅された信号はピエゾアクチュエータに入力される。実際に動いた距離は、高温超伝導体の動き及び浮上永久磁石の動きを2台のレーザーセンサでそれぞれ測定した。測定した電気信号は d-SPACE (DSP) を経由してコンピュータに取り込まれ処理される。本来、このピエゾアクチュエータは最大 150V まで使用できるが、用いたアンプの容量の関係上、本実験では最大電圧を 130V とした。

3.1.3 実験に用いた永久磁石

今回の実験では、磁石の種類の違いによる応答の相違を観察することを目的とし、Table 1 に示すフェライト ($d=10, l=10$: これより d は直径、 l は長さを表し、単位は mm とする。) とネオジウム ($d=8, l=8$) の2種類を用いた。

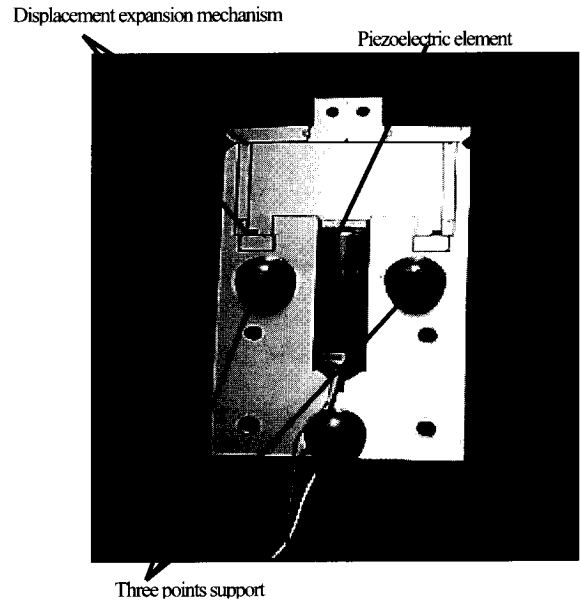


Fig. 4 Piezoelectric actuator with displacement expansion mechanism.

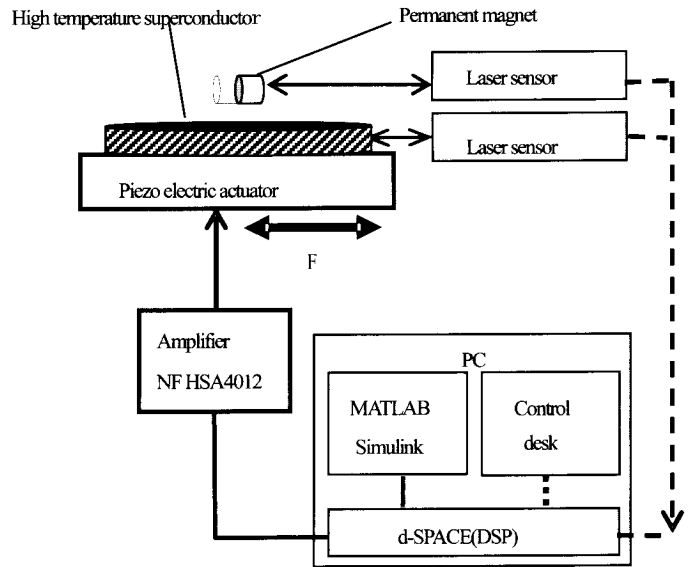


Fig. 5 Signal flow and measurement system.

Table 1 Magnetic flux density of 2 kinds of magnet.

distance(mm)	ferrite $d=10, l=10$	neodymium $d=8, l=8$
0	124	477
5	30	100
10	10	25
15	5	10
20	3	5

(unit : mT)

Table 1はそれぞれの磁石と磁束密度の関係を距離をパラメータに計測したデータである。

3.2 ピエゾアクチュエータの性能

3.2.1 変位拡大機能

ピエゾアクチュエータに静的に電圧を印加していった場合の伸びのデータを Fig. 6 に示す。印加電圧の最大値：130V まで、印加電圧と伸びはほぼ線形の関係であることを示している。このピエゾアクチュエータに用いた圧電素子は、単独で、100V において約 20 μm の変位を生じる。この実験では、静的に 100V を印加した場合は、275 μm の変位が生じており、インパクト時には、平均 267 μm である。この結果から静的、インパクト時にほぼ同等の変位を示しており、印加電圧 100V における変位拡大機能は、長さ方向の変位で約 13.8 倍である。

3.2.2 加速度

インパクト発生時における加速度を電荷型加速度計並びにオシログラフ (100MHz) を用いて、各電圧で 5 回計測した。計測した波形 (100V) を Fig. 7 に示す。印加電圧が 10V~70V の区間では、最大加速度の値は印加電圧に比例して大きくなっていくが、70V で最大値をとり、100V まではほぼ一定の値であり、100V を越してからは、小さくなっていく傾向がある。一方、時間 0.1(ms) の平均加速度の値は、印加電圧の上昇に伴い大きくなっている。Fig. 8 に各電圧における最大加速度を、Fig. 9 に各電圧における加速度の平均値を示す。

3.3 実験結果及び考察

まず、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 内で信号生成しピエゾアクチュエータにノコギリ歯状の電圧をかけ、インパクト駆動させた。印加電圧は、10V~130V の間で 10V 刻みで変化させ、インパクトの周期は 5 秒とした。計測時間は全て 100 秒とし、フェライト ($d=10, l=10$) は、30V 以下では 3~5 回、40V 以上では各電圧 10 回、ネオジム ($d=8, l=8$) では、40V 以下各電圧 3 回、50V 以上 80V 以下では各電圧 5 回、90V 以上では 10 回計測した。

印加電圧が 10V, 20V のときには、浮上中の 2 種類の永久磁石の動きははっきりとは確認できなかった。30V において、ネオジム ($d=8, l=8$) には 5 秒間隔で周期的な動きが見られたが、フェライト ($d=10, l=10$) ではその動きは確認できなかった。30V 印加時の浮上磁石の動きを Fig. 10 に示す。上段がネオジム ($d=8, l=8$)、下段がフェライト ($d=10, l=10$) の動きである。ネオジム ($d=8, l=8$) の動

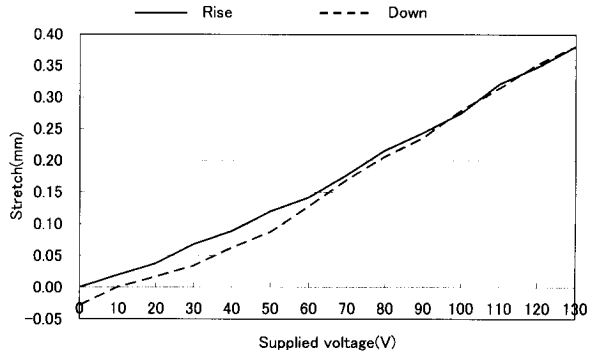


Fig. 6 Relation between supplied voltage and stretch.

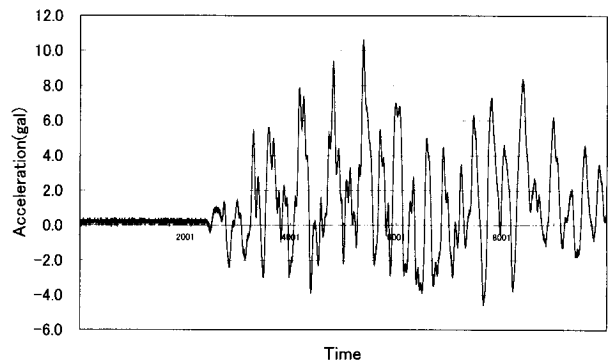


Fig. 7 Example of acceleration wave(100V).

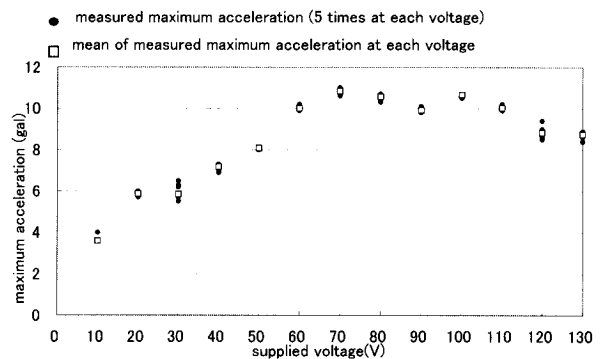


Fig. 8 Relation between supplied voltage and measured maximum acceleration.

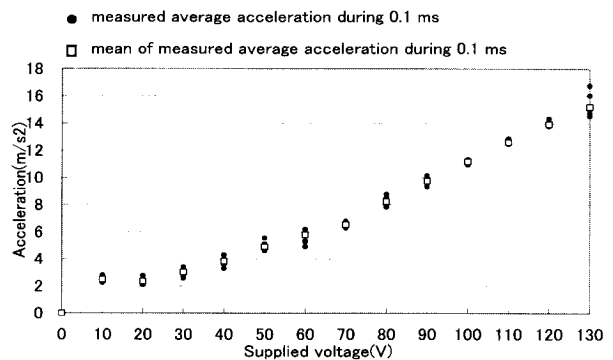


Fig. 9 Relation between supplied voltage and measured average acceleration.

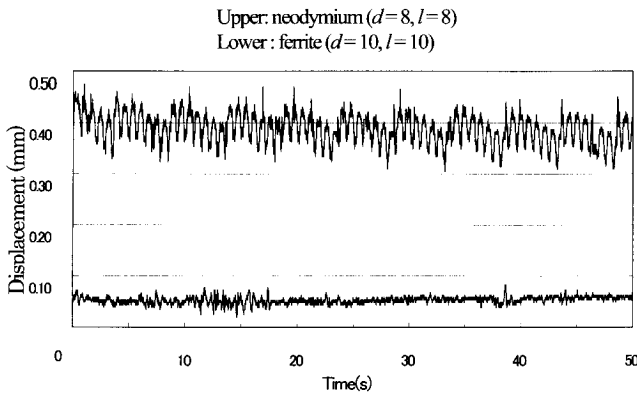


Fig. 10 Difference of response at 30V.

きのほうが、ピエゾアクチュエータの動きを忠実に反映している。これは、ネオジウム($d=8, l=8$)のほうが、ピン止め力が大きいことを示している。

フェライト($d=10, l=10$)においては、40V印加時に、ピン止め力が外れて動いていることが10回試行の中で5回確認され、50V印加時に10回試行のうち7回、60V以上印加時には全ての試行というように、印加電圧上昇とともにその回数が増加する傾向で永久磁石の動きが確認された。その変位量においても120Vから130Vの変化時を除いては印加電圧の増大とともに1インパクトあたりの変位量は大きくなっている。

一方、ネオジウム($d=8, l=8$)においては、50Vから80Vの間ではそれぞれ1, 2回ピン止め力が外れた挙動を示したが、その変位量も平均2ミクロン程度であった。90V 4回、100V 6回、110V 8回、120V 9回、130Vで5回の試行で変位が確認された。1インパクトあたりの変位は110V, 120Vの両電圧で一番大きい平均4ミクロンであった。

フェライト($d=10, l=10$)において、印加電圧110Vにおける電圧信号、超伝導体の動き、浮上磁石の動きをFig. 11に示す。電圧上昇・降下の繰り返しに対して、高温超伝導体は往復動を繰り返していることを示している。この時、フェライト($d=10, l=10$)は時間の経過とともに左へ移動しており、提案とおりの動きを示していることがわかる。Fig. 12にはフェライト($d=10, l=10$)、Fig. 13にはネオジウム($d=8, l=8$)の各印加電圧における変位をそれぞれ示している。各印加電圧10回の試行であり、黒丸は全ての計測データを表し、中抜き四角はその平均を表している。フェライト($d=10, l=10$)のほうがピン止め力が外れる電圧も低く、その移動距離も大きいことがわかる。

4 ピン止めエネルギー測定実験

4.1 実験装置概要

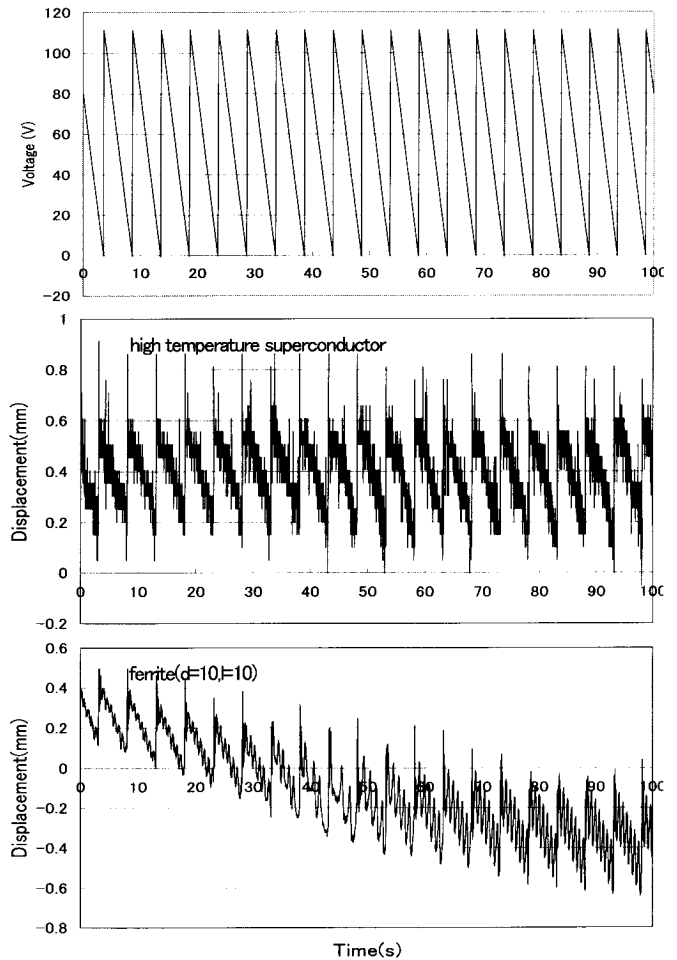


Fig. 11 Supplied voltage, displacement of superconductor and ferrite($d=10, l=10$).

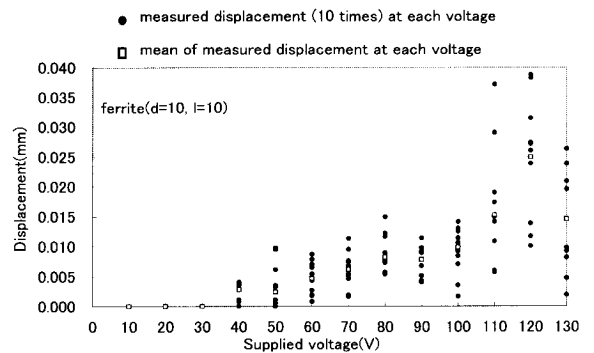


Fig. 12 Displacement by 1 impact (ferrite($d=10, l=10$)).

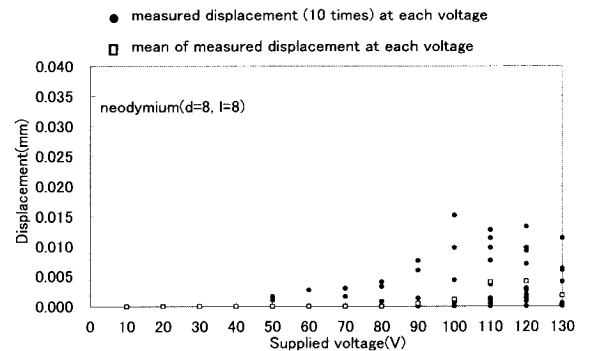


Fig. 13 Displacement by 1 impact (neodymium($d=8, l=8$)).

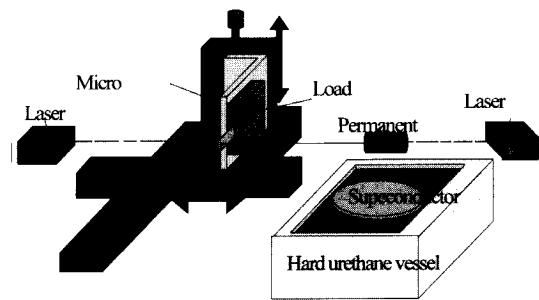


Fig.14 Pinning energy measurement system.

提案した位置決め原理のメカニズムを数値的に解明し、インパクト力と浮上磁石の変位の関係を予測可能とするために実験を行う。Fig. 14 に実験装置の外観を示す。実験システムは、高精度な動きをするステージと微小な荷重を測定することが出来るロードセルから構成されており、ロードセルはステージに固定されている。

4.2 ピン止めエネルギー測定実験要領及び理論式

冷却された高温超伝導体の直上に永久磁石を浮上させ、ステージに直結したロードセルで糸を用いて変位を与え、浮上磁石が元の位置に戻る限界の変位を測定する。このとき、変位した地点を x 、その地点における力を $f(x)$ 、変位の限界を a とすると、ピン止めエネルギー E は

$$E = \int_0^a f(x) dx \quad (1)$$

で求めることができる。

4.3 ピン止めエネルギー測定実験結果及び考察

インパクト実験で用いたフェライト ($d=10, l=10$) において、ピン止めエネルギーを測定し考察するものとする。

実験を行ったところ、フェライト ($d=10, l=10$) の変位限界は 1.25mm であった。Fig. 15 に実験時の磁石に対する力、挙動を示す。上のグラフから 20 秒間に 1.25mm の変位から元の位置に戻っていることがわかる。以上から、(1) 式にしたがって A 点までのエネルギーを計算すると、 $1.2218 \times 10^{-5} (J)$ となる。Fig. 9 における 0.1 (ms) の平均加速度と Fig. 6 におけるピエゾアクチュエータの伸びを掛け合わせると、Fig. 16 に示すエネルギーがインパクトにより各電圧で発生していたこととなる。ここで Fig. 16 を見ると、フェライト ($d=10, l=10$) のピン止めエネルギー $1.2218 \times 10^{-5} (J)$ は、40V-50V 間で発生されていたこととなる。これは、Fig. 12 に示すフェライト ($d=10, l=10$) のインパクト実験結果、40V で 10 回試行中 5 回、50V で 7 回移動したという実験結果と一致している。

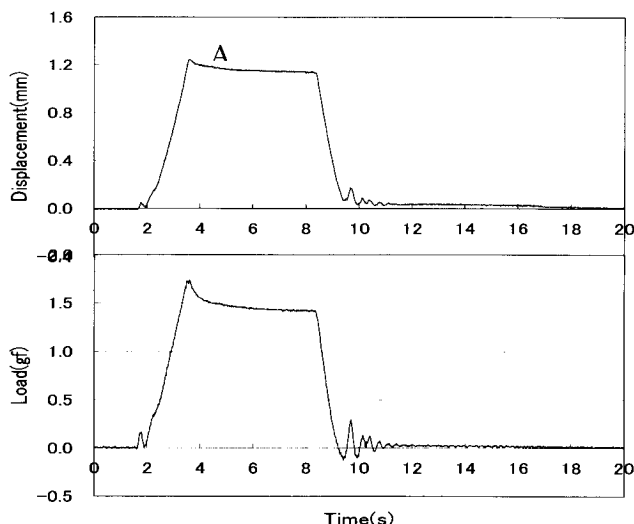


Fig. 15 Pinning energy measurement (ferrite ($d=10, l=10$)).

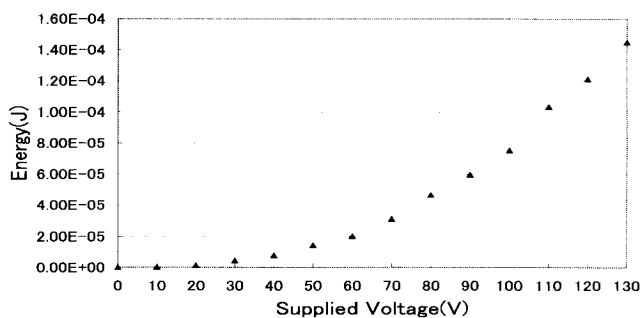


Fig. 16 Relation between supplied voltage and energy.

5 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を行った。実験結果から、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、インパクト力により、ピン止め力を外すことが可能であることを実証した。さらに、ピン止めエネルギーを想定し、それを測定する実験を行い、変位限界を測定してエネルギーを算出したところ、実験結果と一致する結果となっている。以上 2 点を提案し、実験結果は良好であった。

(2006 年 10 月 16 日受付, 2007 年 1 月 29 日再受付)

参考文献

[1] 御子柴宣夫, 鈴木克生, 超伝導物理入門, 培風館.
 [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, pp. 19-22, 2003.
 [3] 高温超伝導の材料科学, 村上雅人, 内田老鶴圃.
 [4] 箕山武志, インパクト駆動を用いた高温超伝導浮上磁石の位置決め制御, 高知工科大学, 修士論文, 2003.