

超電導体をインパクト駆動することによる 浮上磁石の精密位置制御

高知工科大学知能機械システム工学科

山村 光礼

目次

1 . 緒言

1 . 1 要旨

1 . 2 研究背景

1 . 3 現在の超電導体の研究

1.3.1 マイスナ - 浮上 (第一種超電導体)

1.3.2 マイスナ - 浮上の応用

1.3.3 ピン止め浮上 (第二種超電導体)

1.3.4 ピン止め浮上の応用 ピン止め浮上の具体的な応用例

2 . 研究内容の説明

2 . 1 精密位置制御の目的

2 . 2 研究内容

2 . 3 現在の超電導体の研究

3 . 浮上機構

1 . 実験装置

2 . 測定方法

4 . 実験結果と考察

1 . 1 実験結果

1 . 2 考察

5 . 結言

謝辞

参考文献

1 . 諸言

1 . 1 要旨

今まで、交通や運輸、産業などをはじめとする多くの分野で電気技術や機械技術が重要な役割を果たしてきた。その過程において幾多もの斬新な発明、発見が繰り返されてきた。このような私たちの技術の進歩における最近の傾向として、接点のある運動から接点のない運動への移行が数多くなされている。本研究では、ピン止め浮上を用いた超電導体を用いた浮上磁石の精密位置決めシステムを提案するために、超電導体をインパクト駆動することにより浮上磁石の浮上位置制御を行う。

1 . 2 研究背景

従来形の素子や装置に磁気浮上技術を取り入れることによる、私たちの得る利点は数多くある。以下に本研究に関連のある二点を示す。

非接触化

- ・非接触化することにより、摩擦・磨耗の問題が減少
- ・システムの寿命が半永久的になる
- ・メンテナンスが容易になる
- ・騒音・振動が大幅に低減される
- ・高速化が可能になる

特殊環境での使用

- ・潤滑の問題が大幅に解消される
- ・壁面を隔てた作業が可能

また、これらの利点による付加価値も大きい。油潤滑が不要になることにより、油圧ポンプ・油圧システムのパイプ類、油を浄化する装置が不要になり、なおかつ汚染問題も解消する。また、設置場所に対する制約の軽減・人件費の低減等他にも数多くの付加価値がある。

本研究では、第二種超伝導体を用いたピン止め浮上システムの精密測定により、最終目標とする精密位置決めシステムへの応用を考えたい。

1.3 浮上原理とその応用

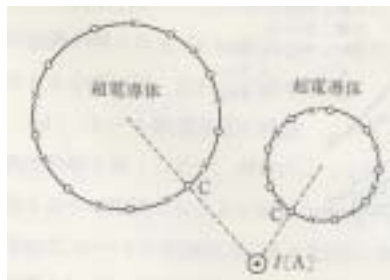
本研究で使用する超電導体を用いた浮上システムには二種類ある。一つは第一種超電導体を用いたマイスナー - 浮上であり、もう一つは第二種超電導体を用いたピン止め浮上である。前にも述べたとおり、本研究ではピン止め浮上を採用している。以下に、この二つの浮上効果の説明を示す。

1.3.1 マイスナー浮上⁽¹⁾

マイスナー浮上とは、第一種超電導体の完全反磁性であるマイスナー - 効果 (Meissner effect) を浮上力に応用したシステムである。磁界中の反磁性体の微小積 (dV) が受ける力は

$$dF = -\frac{1}{2} \mu_0 (1 - \mu_r) \nabla H^2 dV \quad (1.1-1)$$

のように非透磁率 (μ_r) と、磁界 (H) の二乗の空間変化率によって決まる。普通の反磁性体 (磁化率: -10^{-7}) のかわりに第一種超電導体を利用すると、より大きな反発力が得られる。超電導体周囲の磁束分布および電磁力は、マイスナー - 浮上の場合、離散化表面電流法⁽²⁾によって計算できる。二次元体系の場合において Fig. 2 を用いて説明する。まず、超電導体の表面を分割する。分割した区間に存在する表面遮へい電流を一つの線電流 (以下、表面電流とよぶ) で代表し、さらにその区間で輪郭点を一つ取る。輪郭点での磁束密度は、おのこの表面電流と外部電流の作る磁束密度の重ね合わせで求められる。境界条件は、おのこの輪郭点で磁束密度の表面に



(: 表面電流、x : 輪郭点、C : 基準点)

Fig. 2 表面電流法における超電導体表面の分割零 (9等分)⁽²⁾

における垂直成分が零になることと各超電導体の表面電流の和が零に

なることである．これらの境界条件を満たすようにたてた離散化表面電流に関する連立方程式を解き、表面電流分布を定める．磁界分布は、外部磁界に、求まった表面電流とビオ・サバルの法則より求めた磁界を加えることによりえられ、また電磁力は、外部磁界と表面電流の間に働くローレンツ力 (Lorentz force) として評価できる．

1.3.2 マイスナー浮上の応用⁽³⁾

マイスナー効果による浮上の最大の長所は、複雑な制御システム・大きなエネルギーを必要とする従来の電磁、静電浮上に比べてシステムが非常に単純であるということである．一方、短所としては、低温環境を必要とする点と浮上力が小さい点である．したがって、マイスナー浮上は小形機器、特に Fig. 3 示すようなマイクロアクチュエータへの応用が有望視されている．

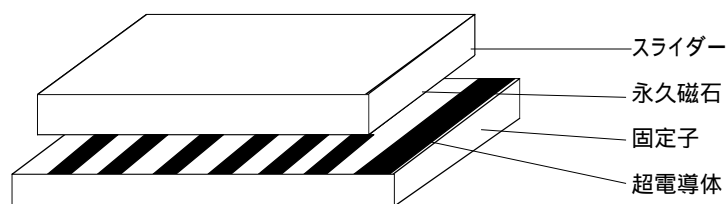


Fig. 3 マイスナー浮上アクチュエータ

1.3.3 ピン止め浮上⁽⁴⁾

ピン止め浮上とは、第二種超電導体はその上部、下部臨界磁界の間を印加したときに得られる浮上力を利用する磁気浮上システムである．高温超電導体のピン止め効果については、いまだ理論的に解明されていない点も多いが、おおむね以下のように説明できる．

定性的には、超電導体はある温度 (臨界温度 T_c) 以下では、超伝導状態に相転移する．このとき Fig. 4 に示すように超電導体に格子欠陥などの非超電導部 (ピン止め点) があると、超電導体を貫く磁束はピン止め点周囲の超電導部を貫く経路よりも、ピン止め点を貫く

経路のほうがエネルギー的に安定になる．磁束がピン止め点を貫いている超電導体では，磁束をピン止め点からはずすためにはエネルギーを加えて，ピン止め点周囲の超伝導状態をこわさなければならない．このように，磁束が超電導体中のピン止め点に固定されて，自由に動けなくなる現象を磁束のピン止め現象という．ピン止め点に固定される磁束が多ければ，ピン止めをはずすために大きなエネルギーが必要となる．

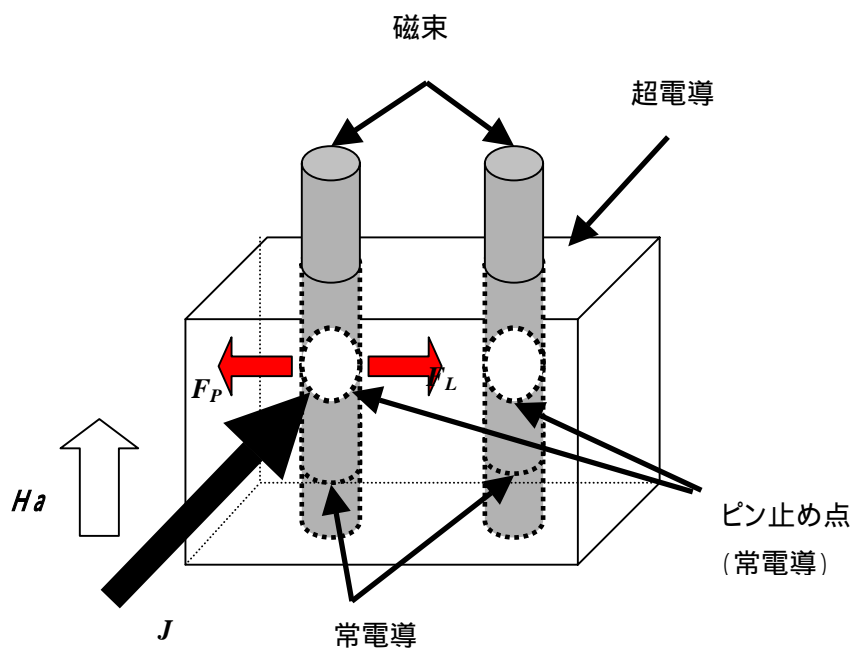


Fig. 4 ピン止め原理

常温の高温超電導体を磁界中で冷却（磁界中冷却）して超電導状態に相転移させると，初期に高温超電導体を貫いていた磁界が超電導体内にピン止めされ，常電導状態のときに超電導体を貫いていた初期磁界のパターンとほぼ同じ磁束パターンが超電導体内に保持（トラップ）される．

次に，外部磁界が変化し超電導遮へい電流（ J ）が流れる場合を考える．このとき，トラップされた磁束はローレンツ力（ $F_L = J \times B$ ）を受け，動こうとする．ローレンツ力が局所的に，または瞬間的に，ピン止め力を超える場合には，その場所，またはその瞬間のみ磁束が移動し，新しい定常磁束分布に落ち着く．このため，平衡状態の磁束分

布は，ローレンツ力がピン止め力と常につり合い状態にある条件で決定できる．

$$F_p = F_L \equiv J \times B \quad (1.2.1-1)$$

いま，簡単のため J と B が直交するとすると，磁束が存在する超・常伝導状態の混合領域では，超電導遮へい電流密度は次式で定まる臨界電流密度 J_c に等しくなることがわかる．

$$J_c \equiv \frac{|F_p|}{|B|} \quad (1.2.1-2)$$

このようにピン止め効果を臨界電流密度 J_c のみを用いて数式で記述する手法を臨界状態モデル⁽³⁾ (critical state model) とよぶ． J_c は磁場依存性があり，いままでさまざまな関数近似が提案されているが，代表的なものは次の二つである．

$$J_c = \text{const.} \quad (\text{Bean Model})^{(3)}$$

$$J_c = \frac{B_o}{|B| + B_o} \quad (\text{Kim Model})$$

このように第二種超電導体においては，外部磁界が変化するとき初期磁束分布を保持するように臨界超電導電流が流れ，ローレンツ力はつねに復元力として働く．このことは，大きな浮上力という利点に加え，ピン止め浮上が位置安定性という重要な特性をもっていることを意味する．

1.3.4 ピン止め浮上を用いた応用例⁽⁵⁾

ピン止め浮上の応用例超電導応用は，これまで，電気抵抗が零，外部磁界を完全に打ち消す完全反磁性，という超電導の特徴を活かしたものが主体であった．電気抵抗が零であれば，いったん励磁された電

流は衰退することなくいつまでも流れつづける。浮上式鉄道や医療用MRIなど産業用に超電導体を使用するためには、より大きな電流を流せる材料が必要であり、研究開発も大電流化を指向するものが多かった。一時ブームを巻き起こした酸化物超電導体についても、線材化して高電流密度化を指向した研究開発が盛んに行われている。

一方、酸化物超電導体のような第二種超電導体を特徴づけるものとして、先に述べた超電導体に侵入した磁束が格子欠陥や不純物などの非超電導部（ピン止め部）に把捉される、磁束ピン止め現象が知られている、これを利用すると、無制御で浮上車両を磁気支持（浮上・案内）するシステムを構成することができる。

Fig. 5は、QMG（Quench&Melt Growth）法により作成した、イットリウム系酸化物超電導体のピン止め現象を利用して磁氣的に浮上案内させた搬送車をリニアモータで駆動する磁気浮上搬送システムの実証モデルである。

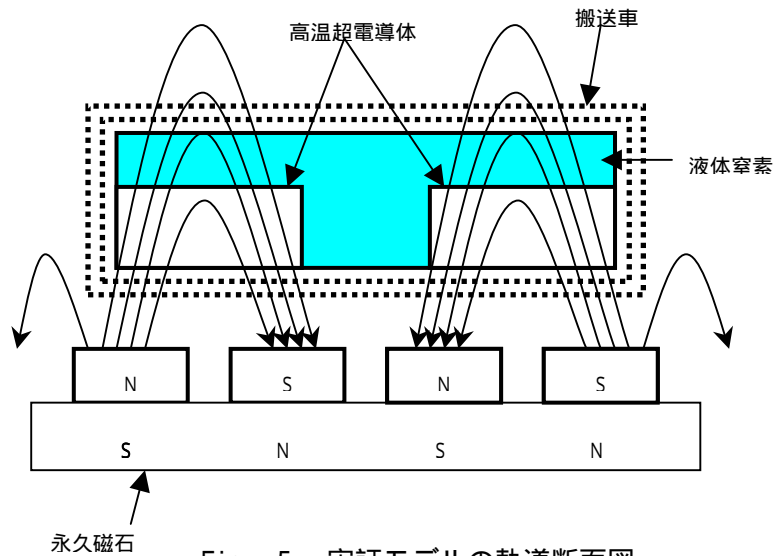


Fig. 5 実証モデルの軌道断面図

応用の立場から解釈したピン止め浮上⁽⁶⁾

超電導体のピン止め現象は、応用という立場から解釈すると、次のように説明することができる。酸化物超電導体を外部磁界の中で冷却して超電導化すると、超電導体には外部磁界がパターンとして保持（ピン止め）される。この状態で超電導体に外力を加えて磁界のパターンが異なる空間に移動させようとする、超電導体には保持したパ

ターンと同じ空間に戻ろうとする復元力（ピン止め力）が発生する．
 このようなピン止め力を最大限に生かして搬送車を浮上案内させるため，このシステムでは Fig. 5 のように気道に 4 列の永久磁石を配置し，搬送車が案内方向（左右方向）に変位した場合に超電導体周辺の磁界変化が大きくなるようにしている．同時に，進行方向には磁界のパターンが一様になるように構成して，搬送車が進行方向にだけは自由にうごけるようにしている．搬送車には，四隅に超電導体を 1 個ずつ計 4 個収納し，約 400cc の液体窒素を充填することができる．テフロンで製作した搬送車の質量は，超電導体（1 個約 100 g）・液体窒素を含め約 1.5 kg である．軌道側永久磁石の表面上約 5 mm の高さに浮上させた搬送車は，3kg の荷物を積載してもなお約 1 mm の浮上ギャップを確保することができる．浮上高さ約 4 mm での浮上ばね定数は約 7 N/mm であり，軽量物の搬送システムとしては十分な値が得られている．

Fig. 6 に示すように，浮上案内した搬送車を非接触で駆動するため，軌道両端には永久磁石列のリニア誘導モータの一次コイルが配置されている．一次コイルの三相交流で励磁して、進行方向に移動する移動磁界を発生させると，超電導体の表面には移動磁界に対応して電流が誘導され，移動磁界との相互作用で超電導体に推力あるいは制動力が作用する．

搬送車は超電導体のピン止め効果により浮上案内されているため，軌道自体が傾斜していても軌道側の永久磁石配置が変わらなければ，車両と軌道の相対位置は変わらない．したがって，壁面へ真横に取り付けをしたり，天井へ下向きに取り付けた軌道に対しても搬送車は無制御で安定に非接触支持案内される．

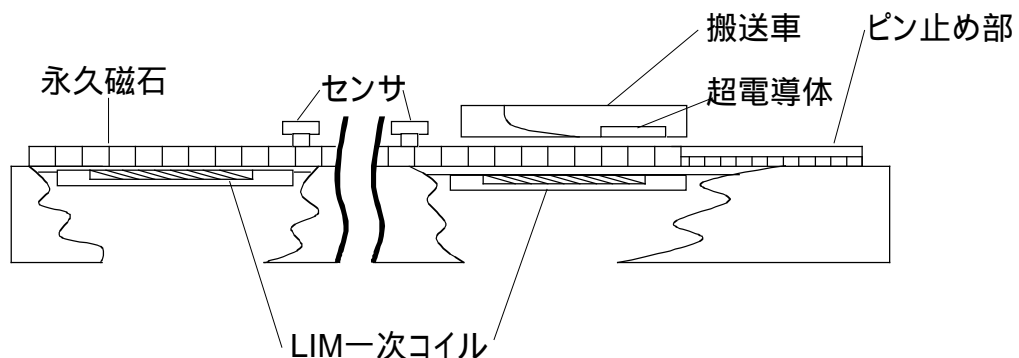


Fig. 6 実証モデルの概略構成

2 . 研究内容の説明

2 - 1 本研究の目的

本研究の目的は、ピン止め浮上を用いた非接触技術の工学的応用である。具体的な応用例として、精密機械製造用（マイクロマシンなど）の加工環境に Fig. 1 に示すようなピン止め浮上システムの導入を提案する。

Fig. 1（左図）において、中央のボックスが加工環境であり、加工を行う場合はこれを真空状態にし、塵埃の発生を最低限に抑える。そして加工環境ボックス内部の永久磁石が設置されたボックスを外部から吊り下げおよび浮上を行い、超電導体を駆動させることで迅速かつ精巧な加工が実現すると思われる。

また、Fig.1（右）のようなシステムにおいて、永久磁石レールをインパクト駆動することによって、ピン止め点を意図的にずらし浮上させた超電導体（搬送システム）を移動させることができると思われる。

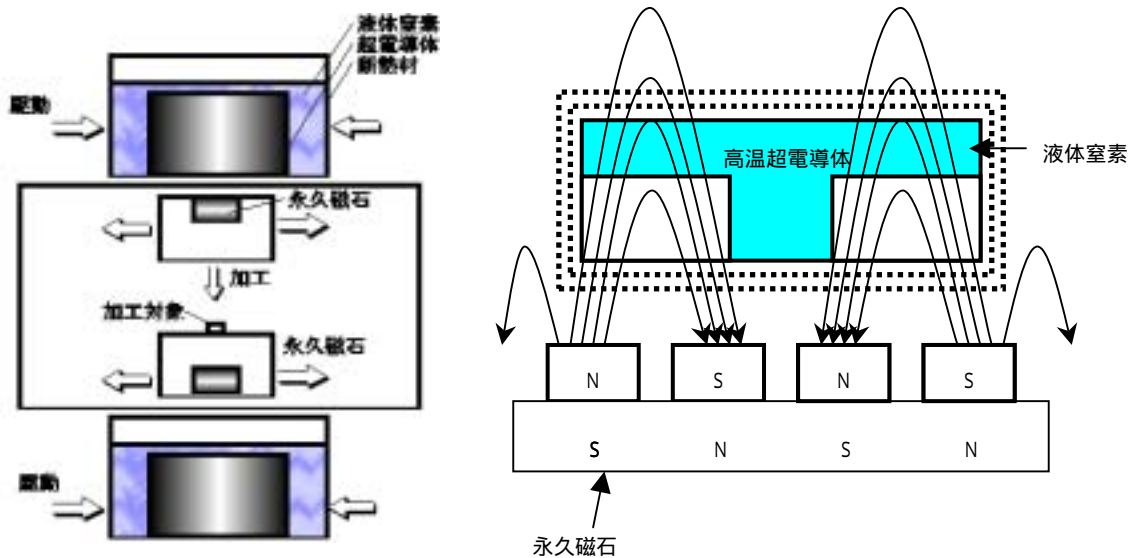


Fig. 1 ピン止め浮上の応用

2.2 研究内容

本研究は最終目標である精密位置決めシステムの実現可能性を示すための第一段階の実験である。以下にその内容を示す。

本実験では、 piezo素子をアクチュエータとして使用し、超電導体のインパクト駆動を行った。(ただし、時間の関係上、本報告時点では、一方向のみのインパクト駆動を行った。)このとき、浮上磁石はピン止め力(後に詳しく記載)によって超電導体と同じような変位をみせると思われる。本実験としては、このときの超電導体と浮上磁石のそれぞれの変位をレーザーセンサおよび渦電流式センサを用いて正確に測定することで、互いの変位関係を正確に知ることを目標にしている。

これにより、互いの変位関係が等しいというデータが得ることができれば、最終目標である精密位置決めシステムの提案がかなり現実的なものとなる。逆に、変位差が生じた場合はこの問題を解決するために新たな装置を製作し、問題解決へ実験を進めなおさなければならない。

4 . 浮上機構

4 . 1 実験装置

まず，本研究では超電導体をインパクト駆動させるために Fig . 7 に示すような変位拡大機構つきアクチュエータを使用する .

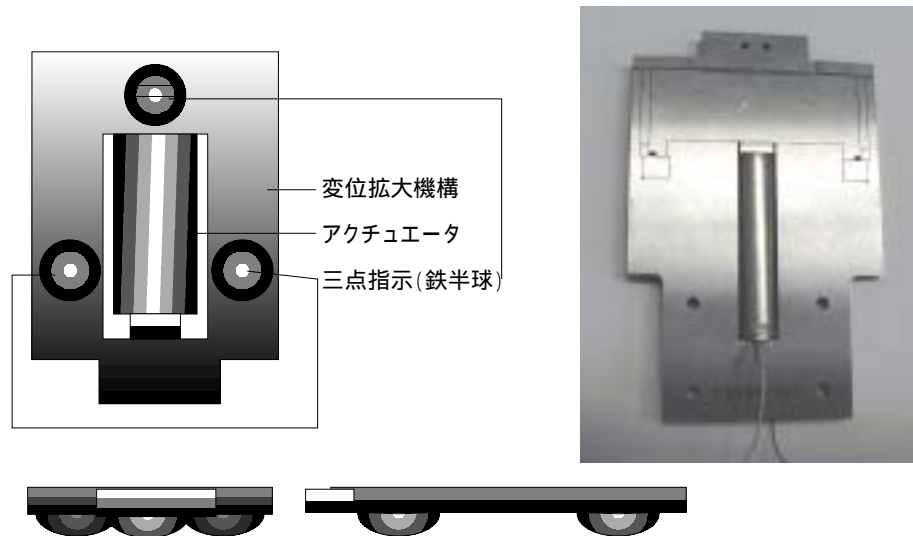


Fig . 7 変位拡大機構つきアクチュエータ (写真は実物)

Fig . 7 のように鉄半球を三点支持として使用し，台との摩擦を最小限にしている . このアクチュエータは最大 150V まで使用可能であるが，変位拡大機構が非常に壊れやすいため，本実験では最大 100V で使用する . また，本実験ではアクチュエータ自体を移動装置の土台として使用するために，容器とアクチュエータが接さないよう Fig . 8 のように上にアクリル板を接着しその上に超電導体の容器 (発砲スチロール) を乗せる . このとき，土台の運動が容器にダイレクトに伝わるよう，アクリル板と容器の間に滑り止めシートを挟む .

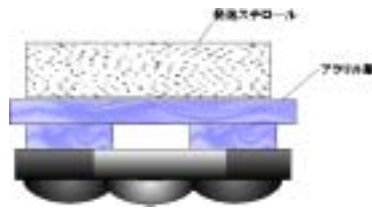


Fig. 8 移動装置全体図（正面図）

つぎに、Fig. 9に実験装置の全体図を示す。Fig. 9のようにアクチュエータによるインパクトを台にあらかじめ固定した壁に与えることで生じる反発力を利用して超電導体を逆方向にインパクト駆動させる。

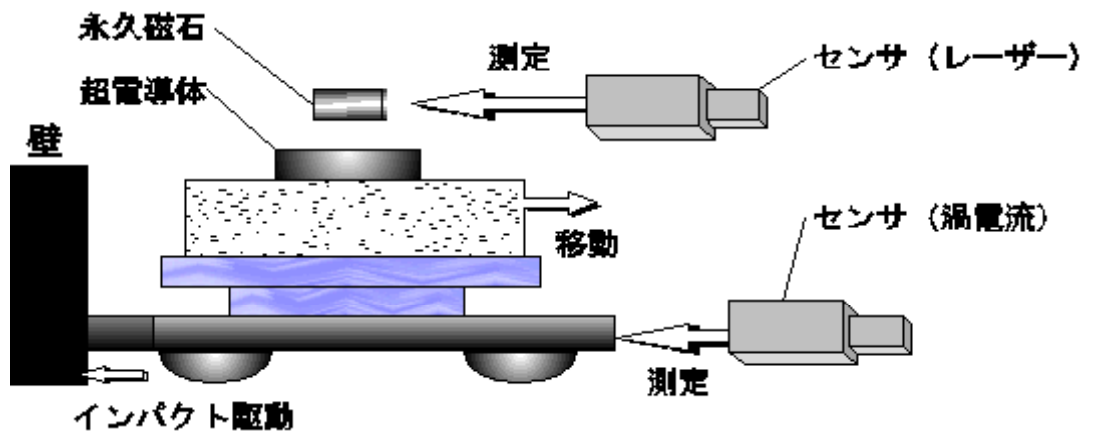


Fig. 9 実験装置の全体図

4.2 実験方法

この実験は、最終目標とする浮上磁石の精密位置制御までの予備実験である。まずは、あらかじめ台に垂直に固定した金属板に変位拡大機構の片端を固定し、次にアクチュエータに電圧をかけ超電導体を入れた容器をインパクト駆動させる。このとき、変位拡大機構のもう一方の側面をセンサ（渦電流式）で、浮上磁石をセンサ（レーザー式）でそれぞれの微小変位を測定する。実験を行う際の注意点として、浮

上磁石は実験環境による変位出力への影響が非常に大きいため、あらかじめ超電導体を臨界温度以下まで十分冷やし、なおかつ風を遮断する必要がある。また、浮上物が対象であるため実験毎の誤差がどうしても生じるため、一度の実験で各電圧のデータをまとめてとるのが最善と思われる。

5．実験結果および考察

5．1 実験結果

各センサの出力における実験装置全体の動きを Fig. 10 に、超電導体、永久磁石の各電圧での変位を Fig. 11 にそれぞれ示す。

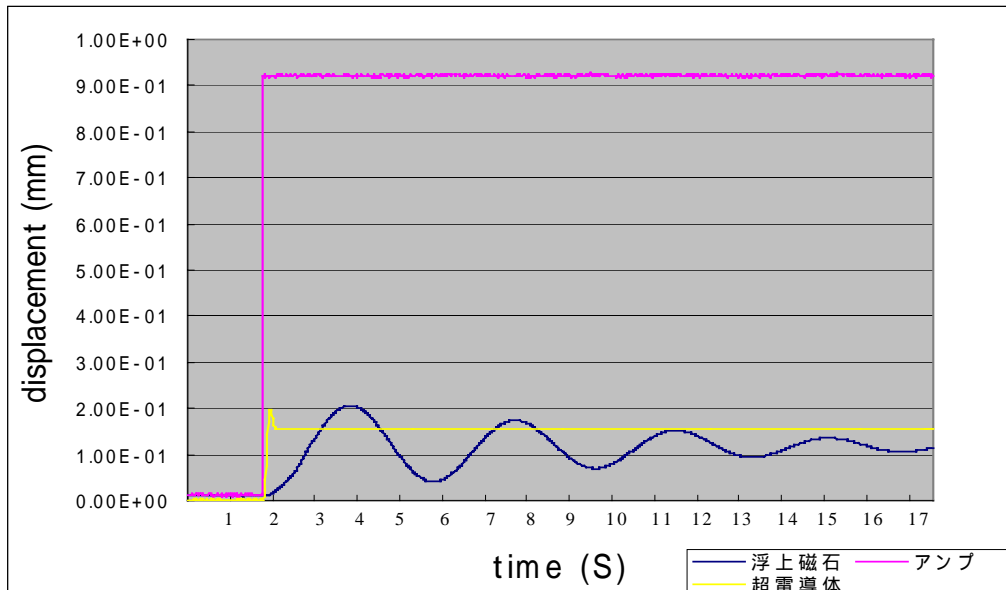


Fig. 10 レーザーセンサ出力 (アンブ出力は変位〔縦軸〕と無関係)

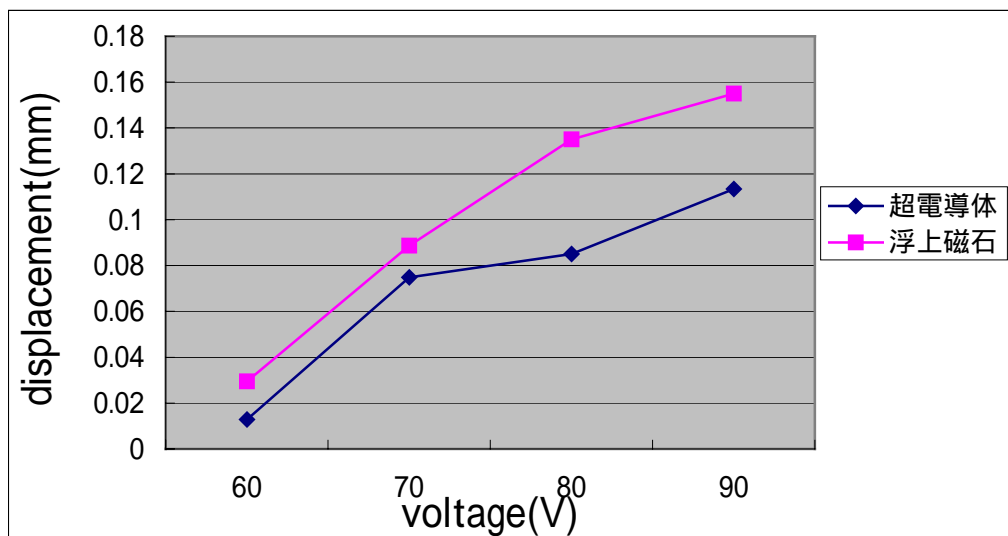


Fig.11 超電導体, 浮上磁石の各変位

5.2 考察

本実験は、最終目標である浮上磁石の精密位置決めシステムの提案への予備実験として行ったものである。実験結果を見てのとおり、浮上磁石と超電導体の各変位は等しいものではないことがわかった。これにより、本実験装置では、精密位置決めを行うには不十分ということである。また、実験より得られたデータの精度もまだまだ不十分であるため、繰り返しによるデータ取りが必要不可欠であると思われる。

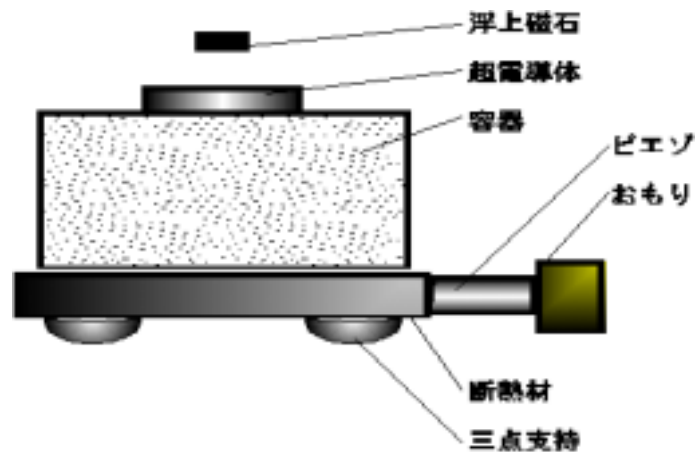


Fig. 12 新たな実験装置

6. 結言

本実験を行ったことで、上記のような結果が得られた。今後の課題としては、上で述べた問題に加え、Fig. 12 に示すような超電導体の自走装置を制作し、電圧の変化による高度な超電導体の運動における浮上磁石の浮上位置を観測することである。

また、本実験より得られたデータから浮上位置を精密に制御するには、超電導体の複雑な位置制御が必要になると思われ、最大の利点(複雑な制御系を必要としない)が得られないという結果が予測される。この問題をいかに解決するかも重要な課題の一つである。

超伝導体の自走方法としては、

- ・前進 電圧を徐々に上げ、急に下げる
- ・後退 電圧をかけた状態から徐々に電圧を下げ、急に電圧を上げる

の二通りある。この作業の繰り返しにより、浮上磁石が運動する際の振動が軽減されるかもしれない。

謝辞

本研究を行うにあたり，指導して下さったすべての人に深く感謝いたします．

参考資料

- (1)(4)(5)(6) 電気学会 磁気浮上応用技術調査専門委員会 編
「磁気浮上と磁気軸受」コロナ社
- (2) 金 「複数個の完全反磁性体を含む二次元系に
対する数値磁界計算法」電学論 D, 110, p85
- (3) 藤田 「マイクロアクチュエータとマイクロメカ
ニカルパーツ」 電学論 D, 108, P 214